

ガラス張り展望用エレベーターシャフト内上下温度分布検証について（計画設計段階）

（第1報）余部クリスタルタワーの場合

The verification of vertical temperature distribution inside elevator shaft for glass-bounded observation
(planning design stage)

In case of Amarube crystal tower (The 1st report)

○森下 雅也 (ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)) 岡村 栄子 (ジェイアール西日本コンサルタンツ(株))
前佛 克佳 (ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)) 伊勢 博 (ジェイアール西日本コンサルタンツ(株))
Masaya MORISHITA*¹ Eiko OKAMURA*¹ Katsuyoshi ZENBUTSU*¹ Hiroshi ISE*¹

*¹JR West Japan Consultants Company

The elevator of the Amarube crystal tower (Notation as EV) is 47 meters high outdoors and the EV shaft is three-sided. It is expected that the thermal load due to summer solar radiation is expected to increase, and it was inferred that it is difficult to meet the temperature condition (40 °C. or less) within the EV shaft in response to only natural ventilation. In order to satisfy the temperature condition inside the EV shaft (-5 to 40 °C), we proposed "Hybrid Ventilation" which combines natural ventilation and mechanical ventilation, and considers energy conservation. It describes its effectiveness from its design method, vertical temperature / airflow distribution analysis result.

1. はじめに

余部クリスタルタワーの展望用エレベーター（以下EV）は屋外で高さ47m、EVシャフトは三方ガラス張りである。Fig.1 建物パースから夏の日射による熱負荷が大きいことが予想された。自然換気のみで

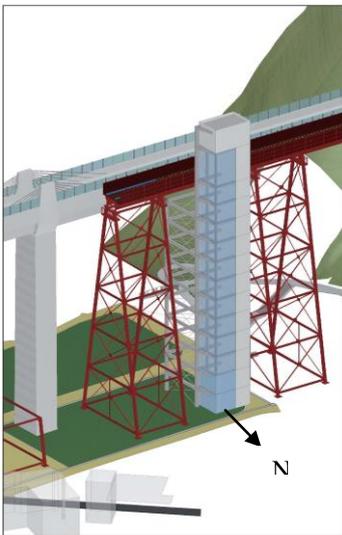


Fig.1 EV Building Perth

は、EVシャフト内の温度条件（40℃以下）を満たすことが困難であることが推測された。EVシャフト内の温度条件（-5～40℃）を満たすため自然換気と機械換気を併用し、省エネルギー性も考慮した「ハイブリット換気」の設計提案を行った。設計の妥当性を上下温度・気流分布解析を行い検証した。その結果を以下に記述する。

2. ハイブリット換気の設計

2.1 EVシャフト内温度条件

EVメーカーはEVシャフト内の温度条件を-5℃

～40℃以内と規定している。当建物EVシャフトは高さ47mの三方ガラス張りのシャフトであるため、EVメーカーの温度条件から逸脱する可能性があることが推測された。そこでEVシャフト内温度条件-5℃～40℃の検証を行った。

まず、最低温度条件（-5℃以上）について、過去の気象データから香美町の過去10年間の最低温度は-4.2℃であった。よって、EVシャフト内は外気温以下にはならないと判断できる。EVの最低温度条件は-5℃以内であり条件内となる。

次に、EVシャフト最高温度条件（40℃以内）は、夏期の日射による熱負荷からEVシャフト内の温度条件に合致しない可能性が推測された。

2.2 EVシャフト内夏期最大熱負荷

設計条件は外気温33.8℃、EVシャフト内40℃、EVシャフト床面積19.0㎡、天井高45.25m、容積860.3m³、EVシャフトのガラス仕様は合わせガラスt=10mm+10mm（日本板硝子：ラミクール）熱貫流率5.3W/㎡・K、日射遮蔽係数0.70、日射取得率0.61でEVシャフト内の夏期最大熱負荷は、54,906wとなった。

2.3 EVシャフト内熱負荷処理

(1) 熱負荷処理の選択

EVシャフト内の熱負荷処理方式について下記3方式の検討を行う。

Plan①：自然換気方式

Plan②：ハイブリット換気方式(自然+機械)

Plan③：全空調方式

Tab.1 の比較表から、EV シャフト内温度条件を満足し、イニシャルコスト・ランニングコストで優れている Plan②の「ハイブリット換気方式」を選択し、詳細検討・設計を行った。

Tab.1 Comparison of Heat Load Processing in EV Shaft

Matters	Plan① Natural ventilation	Plan② Hybrid ventilation	Plan③ Air conditioning
Temperature condition	×	○	○
Construction cost	○	△	×
Maintenance cost	○	△	×
Special mention	※1	—	×
Judgment	×	○	×

※1:The inside of the EV shaft exceeds 40 ° C

機械換気的能力は、夏期最大熱負荷から機械換気で必要な換気風量を算出した。

(2) 機械換気の機種選定

換気計算から自然換気のみでは不足する換気量 21,850 m³/h を機械換気で補う風量でよいが、自然換気の状態は常に一定ではない。換気風量は、夏期の最大熱負荷を機械換気運転だけで処理できる風量 26,900 m³/h 以上の能力とした。

次に機械換気の機種は、設置スペース条件から有圧扇を選定する。有圧扇の仕様は直径 60cm、1 台当り換気能力 10,000 m³/h を選定し、予備を含め計 4 台設置、合計風量 40,000 m³/h とした。

(3) 機械換気の制御方式（温度設定）

EV シャフト内の温度により Fig.2 の設定値で夏期ハイピーク時の熱負荷を考慮して予備機も含め 4 台の有圧扇の台数制御により運転を行う。台数制御運転により換気動力の削減と近隣への騒音対策に配慮している。

3. EVシャフト内上下温度・気流分布検証

夏期最大熱負荷計算は、EV シャフト内温度を均一として算出している。実際、EV シャフト内は、上下で温度分布が異なるため、ハイブリット換気が

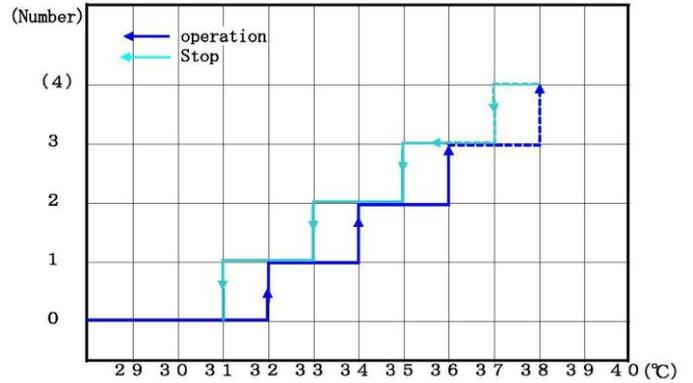
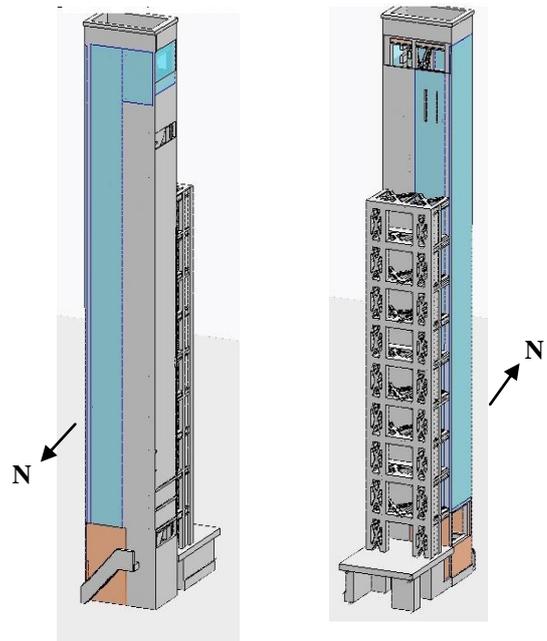


Fig.2 Setting of pressure operated fan unit control

有効に作用し設計条件が担保されたか検証を行うために次の 3 ケースについて上下温度・気流分布解析を行った。

- Case1：夏期ピーク時自然換気のみ
- Case2：夏期ピーク時ハイブリット換気



Blue part: laminated glass

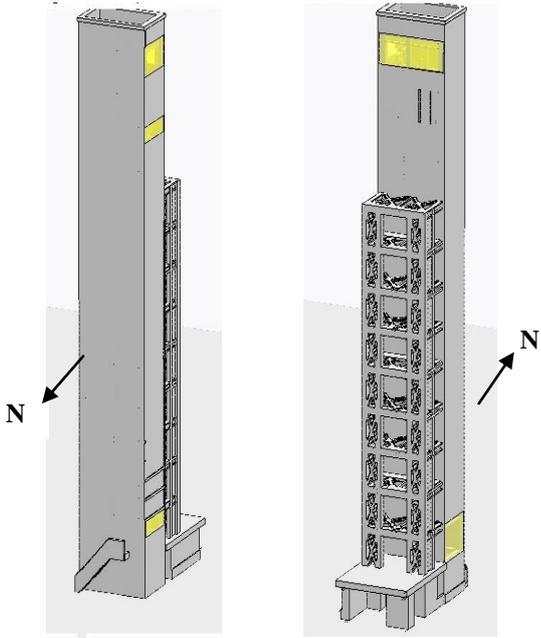
Fig.4 Heat load condition setting diagram

- Case3：中間期自然換気のみ

Case1, Case2 の結果について記述する。

3.1 上下温度・気流分布検証

検証する建物設定条件を Fig.4, Fig.5 に示す。



Yellow part: Louver (opening ratio 50%)

Fig.5 Solar Heat Load Condition Design Location

(1) Case1 夏期ピーク時の自然換気のみ

・解析条件

外気温度：33.8℃

外部風速：0m/s（無風）

EV シャフト内温度：40℃

EV 空調機排熱量：2,500W

・熱負荷計算結果

ガラス面日射負荷：54,906W

Case1 の上下温度・気流解析分布を Fig.6 解析モデル C 断面図にて Fig.7.1 から Fig.7.3 にて示す。

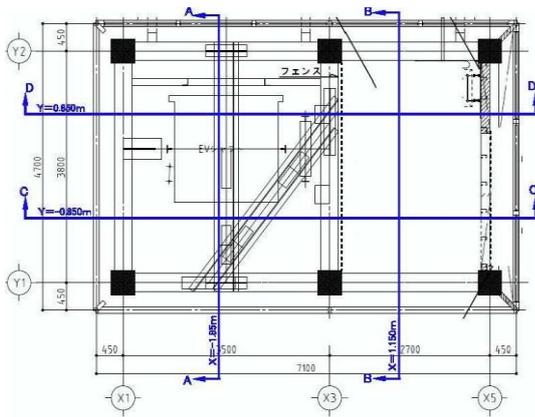


Fig.6 Cross section of analysis

解析結果は、EV シャフト内には 40℃以上分布が EV シャフト上部ガラス面および 1F 着床時の EV カゴ上部に発生した。EV カゴ上部には EV 制御盤類があり、熱負荷の影響がある。

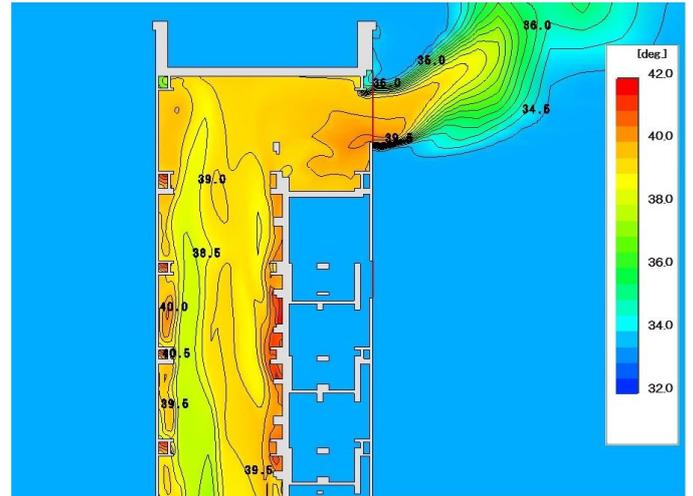


Fig.7.1 Case1: Upper part of the EV shaft



Fig.7.2 Case1: Intermediate part of the EV

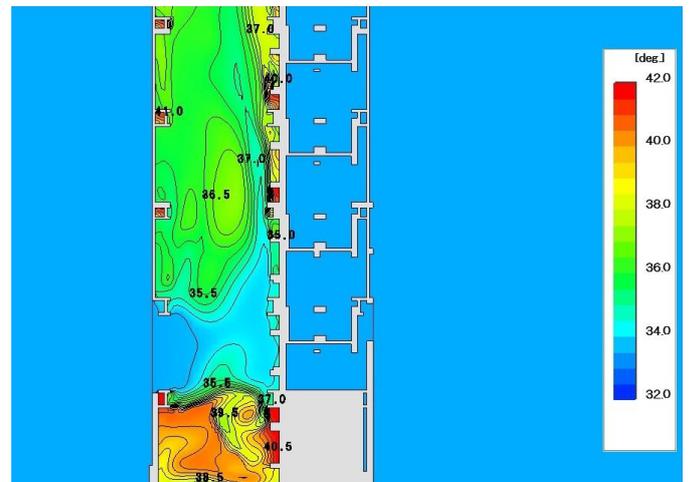


Fig.7.3 Case1: Lower part of the EV shaft

(2) Case2 夏ピーク時ハイブリット換気
機械換気設備位置図を Fig.8 に示す。

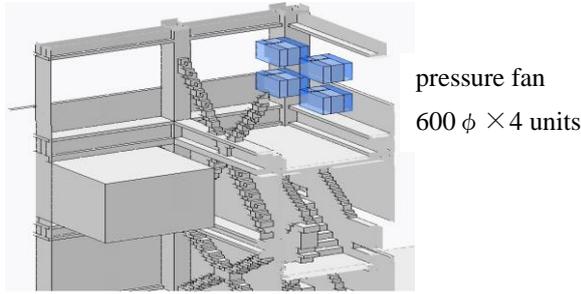


Fig.8 Location of mechanical ventilation equipment
解析条件は(1)Case 1 と同条件となる。

Case2 の上下温度・気流解析分布図を Fig.9.1 から Fig.9.3 に示す。

Fig.9.1 から Fig.9.3 より解析結果は、Case 1 自然換気より EV シャフト内の温度分布が平均 1~2°C 下がった。EV シャフト上部ガラス面および 1F 着床時の EV カゴ上部の EV 制御盤類付近にあった 40°C 以上分布が除去された。ハイブリット機械換気が EV シャフト内の温度を下げ、40°C 以上分布も解消したことから有効であることが検証された。

3.2 上下温度・気流分布解析による換気検証

解析結果を比較すると、Case1 自然換気では温度分布に 40°C 以上の分布が存在し、EV 設置条件の温度 40°C 以下を満足せず、Case2 ハイブリット換気が有効であることが検証された。

4. まとめ

今回、EV シャフト高さ 47m 三方ガラス張りという特殊条件での夏期の日射による熱負荷処理について、設計段階でハイブリット換気を提案した。また、設計条件が確保されているか上下温度・気流分布解析を行った。結果、EV シャフト内の温度条件を満たすことが確認できた。

参考文献

- 1)浮力による重力換気計算：空気調和・衛生工学会
- 2)熱負荷計算ソフト IPAC-MECH 空調熱負荷計算:
 ㈱泉創建エンジニアリング
- 3)上下温度分布・気流分布解析ソフト 3次元熱流体3解析プログラム (WindPerfect2015) :㈱環境シミュレーション



Fig. 9.1 Case 2: Upper part of the EV shaft

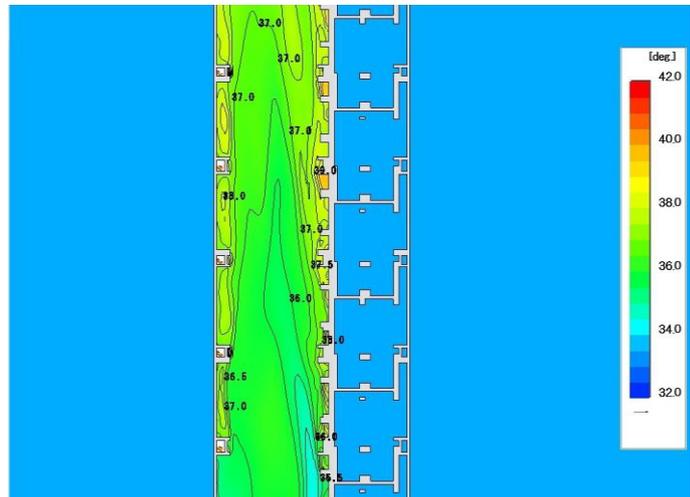


Fig. 9.2 Case 2: Intermediate part of the EV shaft

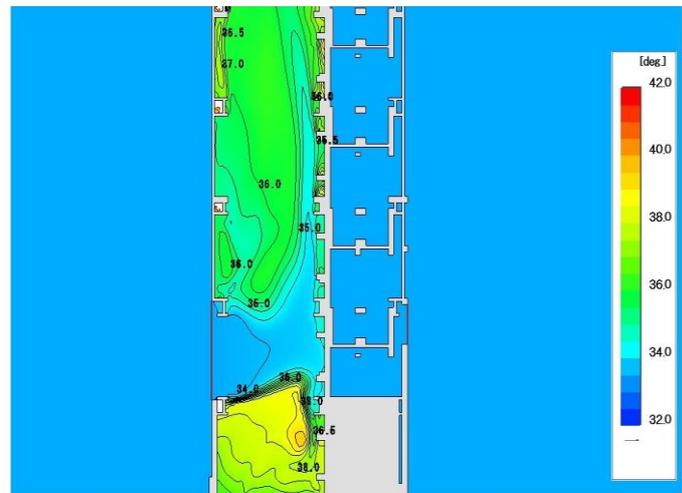


Fig. 9.3 Case 2: lower part of the EV shaft

ガラス張り展望用エレベーターシャフト内環境実測と
実測に基づくシミュレーション解析結果の整合性について
(第2報) 余部クリスタルタワーの場合

Consistency of Simulation Analysis Results Based on the Actual Measurement of the Environment and the Actual Measurement in the Elevator Shaft for the Glass-bounded Observation In case of Amarube Crystal Tower (2nd Report)

○岡村 栄子 (ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)) 伊勢 博 (ジェイアール西日本コンサルタンツ(株))
森下 雅也 (ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)) 稲田 朝夫 (須賀工業(株))

Eiko OKAMURA*¹ Hiroshi ISE*¹ Masaya MORISITA*¹ Tomoo INADA*²

*¹ JR West Japan Consultants Company *² SUGA Co. Ltd.

The elevator of the Amarube crystal tower (Notation as EV) has adopted the "Hybrid Ventilation" method which combines natural ventilation and mechanical ventilation, and considers energy conservation. Moreover, design studies utilizing simulation is performed in its design. In this design, design is being studied using simulation. In this design, we are considering equipment design using simulation. Therefore, we examined the thermal environment inside the EV shaft during the intermediate period and examined to improve the accuracy of the design method making use of the simulation based on the result.

はじめに

余部クリスタルタワーのエレベーター（以下 EV）は、自然換気と機械換気を融合させ、省エネルギー性も考慮した「ハイブリット換気」方式が採用されており、その設計においてシミュレーションを活用した設計検討が行われている。そこで、本施設の竣工前に EV シャフト内の温熱環境調査を実施し、中間期における EV シャフト内の温熱環境を把握するとともに、シミュレーション解析結果との整合性について検証を行い、その精度を向上させるための検討を実施したので、その内容を報告する。

1. 実測調査の概要

1.1 測定期間

実測調査は、本施設竣工前の中間期とし、2017 年 10 月 20 日より 2017 年 10 月 27 日の期間で実施した。

1.2 測定項目と測定方法

実測調査の項目と測定方法の概要を以下に示す。

(1) 外気温湿度

EV シャフトに隣接する階段室の給気ガラリ部に温湿度ロガーを設置し、外気温湿度を測定した。

(2) 日射量

本施設の近傍に設置された現場事務所の屋根上に全天日射計を設置し、日射量を計測した。

(3) 外気風向・風速

日射量と同じく現場事務所の屋根上に超音波式風

向風速センサを設置し、風向・風速を計測した。

(4) EV シャフト内の温度

EV シャフト内各所に温湿度ロガーを設置し、EV シャフト内の温度を計測した。

(5) ガラリ通過気流の風速

EV シャフトの自然換気用給排気ガラリに風速センサを取り付け、給排気ガラリを通過する気流速度を計測した。

1.3 測定計測器

各測定に利用した計測機器を Table.1 に示す。

Table.1 Measuring equipment

Measurement item	Measuring equipment	Model
Outside air temperature	Humidity Logger	LR5001 LR9501 sensor
Amount of solar radiation	Pyranometer	MS802
Wind	UltraSonic Anemometer	WMT52
Temperature in the EV shaft	Humidity Logger	LR5001 LR9501 sensor
Air velocity (Ventilation Louver)	Anemometer	MODEL 6531

2. 実測結果

2.1 EV シャフト内の温度

測定期間中における代表日として、天候が終日悪く（雨、くもり）日射の影響を受けていない 10 月 21 日の温度測定結果を Fig.1 に、比較的天候が良くほぼ終日晴れており日射の影響を受けていた 10 月 26 日の温

度測定結果を Fig.2 に示す。

日射の影響を受けていない日 (10月21日) については、各測定点とも外気温度に追従した温度変動を示し、上下温度差も、ほとんど生じていない。

一方、日射の影響を受けた日は、外気温度の上昇に伴い、各測定点ともに温度は上昇し、午前中は中間階における温度上昇が顕著となっている。14時以降の午後については、EV シャフト上部の EV 機械室の温度 (同室に設置されている排気ガラの下部) が、他の測定点の温度に比べ高くなる傾向を示している。

このように、EV シャフトの温度は、日射の影響がなければ外気温度にほぼ追従した温度変動を示す。一方、日射の影響を受ける場合は、日射による熱負荷により EV シャフトの温度は外気温に対して上昇傾向を示す。

2.2 ガラリ通過気流の風速

測定期間中における代表日として、ほぼ終日晴れていた 10月26日の給気ガラリ通過気流の風速 (10分間の平均風速) を Fig.3 に、同日の排気ガラリ通過気流の風速を Fig.4 に示す。なお参考に、外気風速をプロットするとともに、各ガラリ直近における温度測定値と外気温との温度差についてもプロットした。

(1) 給気ガラリ通過気流

外気風速が速い時間帯 (10時~16時) においてガラリ通過風速が速くなる傾向が見られ、外気風速の影響を受けていると推察される。また、この時間帯は、ガラリ直近における温度測定値と外気温との温度差が小さくなる傾向を示している。

明け方前の時間帯 (4時~8時) と夕方以降の時間帯 (17時~22時) を比較すると、外気風速に差異は見られないが、若干ガラリ通過風速が速くなっている。また、この時のガラリ直近における温度測定値と外気温との温度差を比較すると、明け方の約 1°C 差に対し、夕方以降は約 2°C 差となっている。このように、夕方の自然換気量は朝方に比べ増加しているものと推定される。

(2) 排気ガラリ通過気流

排気ガラリについては、外気風速とガラリ通過風速に明確な相関は見られず、また、ガラリ直近における温度測定値と外気温との温度差についても明確な相関は見られない。

給気ガラリと同様に、明け方前の時間帯 (4時~8時) と夕方以降の時間帯 (17時~22時) を比較すると、外気風速に差異は見られないが、若干ガラリ通過風速が速くなっており、夕方の自然換気量が朝方に比べ増加している。

(3) 自然換気の状態推定

前述した測定結果より自然換気の状態を推定すると以下となる。

- ①明け方前から 10 時頃までの時間帯については、自然換気量はさほど多くなく、その結果 EV シャフト内の温度が外気に比べ上昇傾向を示す。
- ②10 時以降は、外気風速が高くなった影響により、給気ガラリより流入する外気が増加し換気量が増加する。
- ③16 時以降、外気風速が弱くなると換気量が減少し、EV シャフト内温度と外気温との差は大きくなる傾向を示す。但し、一定の自然換気は確保されている。

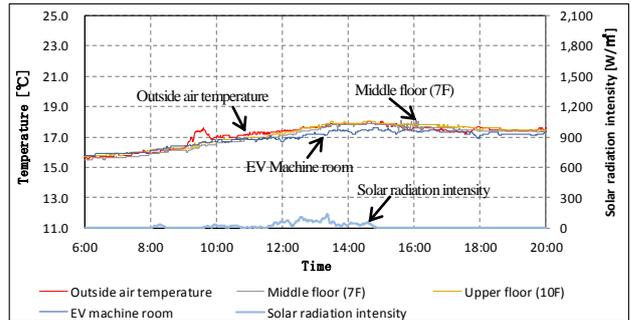


Fig.1 Result of temperature measurement of EV shaft (10/21)

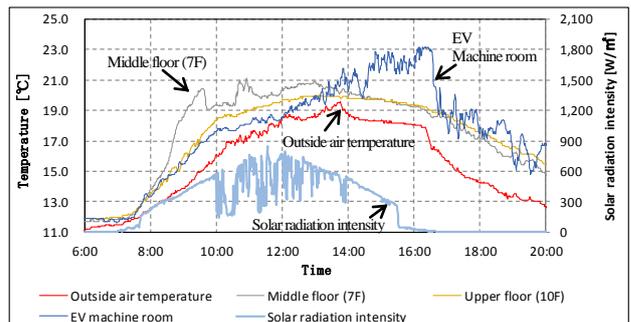


Fig.2 Result of temperature measurement of EV shaft (10/26)

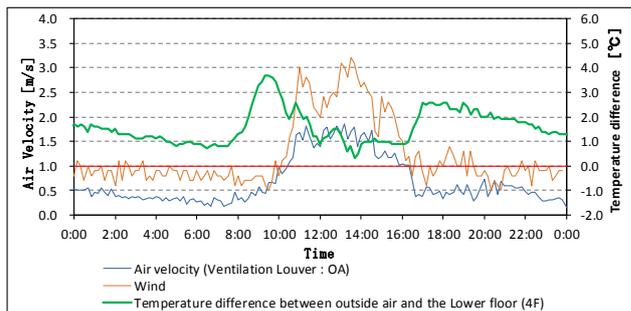


Fig.3 Result of Air velocity measurement of Ventilation Louver (OA)

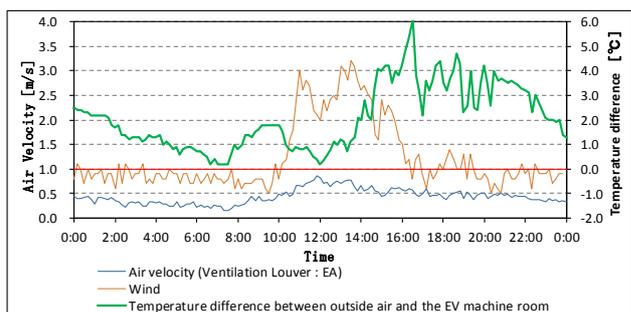


Fig.4 Result of Air velocity measurement of Ventilation Louver (EA)

3. EV シャフト内の温熱環境

EV シャフト内の温度分布に関して、特に午前中の日射量が大きかった27日について、各測定点の垂直温度分布を Fig.5 に示す。

垂直温度分布の傾向として、昼の13時頃までと15時以降の温度分布に差異が見られる。13時までの温度分布は、日射が当たる7階までの下層部は、測定高さが高くなると温度が高くなるが、上層部の温度は下層部より低い温度を示している。特に、11時における温度分布について、このような傾向が顕著にみられる。

15時以降については、測定高さが高いほど温度が高い傾向となる。

なお、全ての測定日、測定時刻において、排気ガラリ部の温度がEV 機械室下部（排気ガラリより下）での温度より低い温度となっている。このことから、排気ガラリの一部分において、外気がEV シャフトに流入していると推察される。

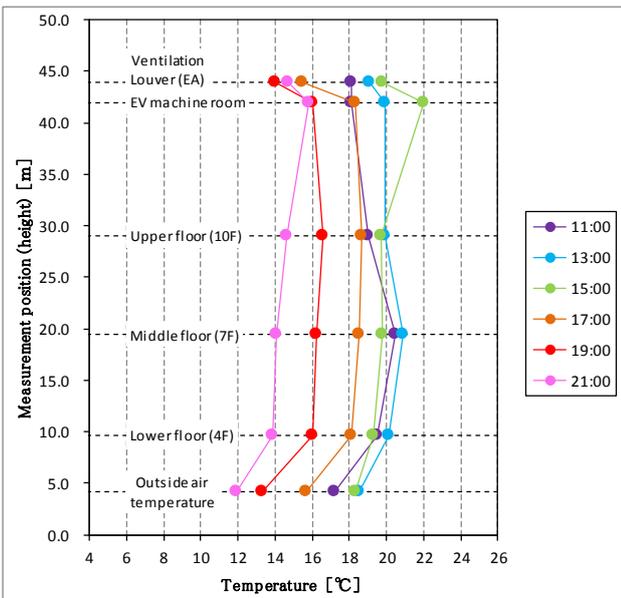


Fig.5 Vertical temperature distribution inside the EV shaft (10/26)

以上の結果より、EV シャフト内の温熱環境を推定した結果を以下に示す。

① 午前中

下層部（7 階まで）のエリアは日射を受けることにより内部壁面や鉄骨部の温度が上昇し、EV シャフト内に対する内部負荷（加熱負荷）として作用し、下層階の温度が上昇する。この温度上昇、及び外気風速が強まることから、給気ガラリから流入する外気が増加し自然換気量は増加する。

上層部（8 階以上）については、日射が当たらない為、内部壁面や鉄骨部の温度は外気とほぼ等しく、自然換気による上昇気流は壁面や鉄骨部への吸熱負荷により温度が低下する。

② 午後

自然換気による上昇気流により上層部の内部壁面や鉄骨部の温度が上昇することで、吸熱負荷が減少し、下層部と上層部の温度差は徐々に小さくなる。

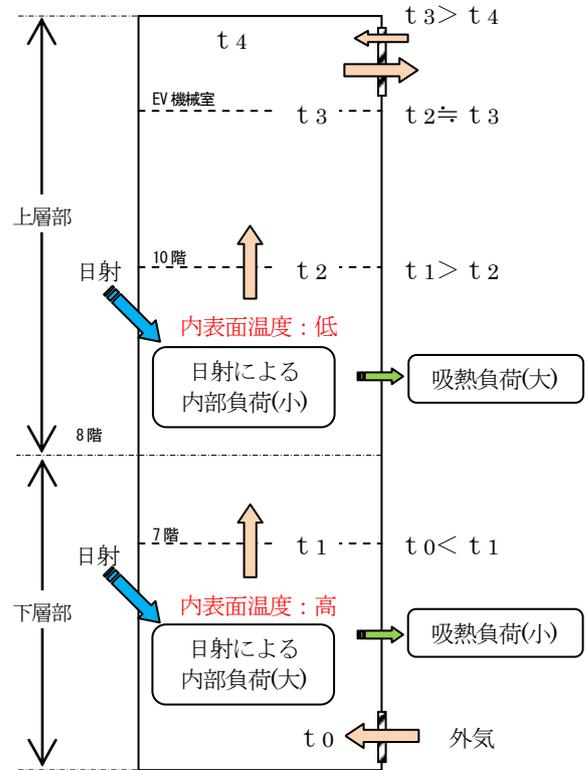


Fig.6 Thermal environment (A.M.)

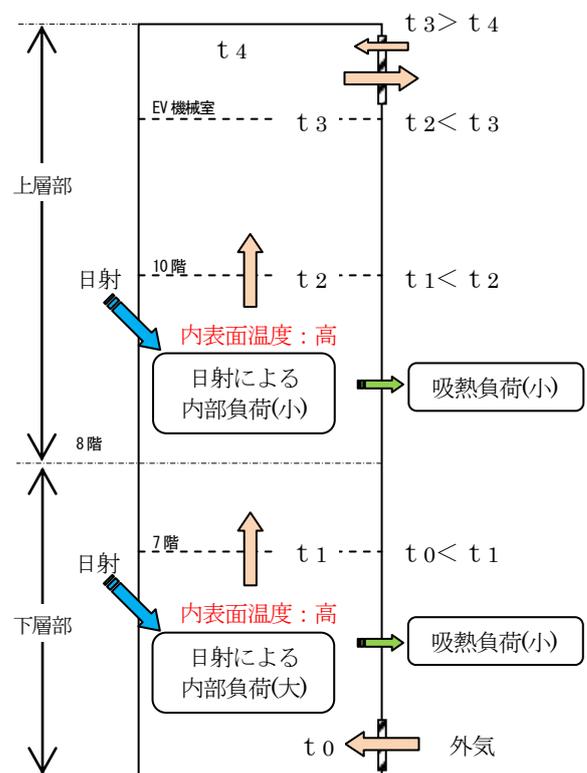


Fig.6 Thermal environment (P.M.)

4. シミュレーション結果との検証

シミュレーションを活用した設計の精度を向上させるため、中間期における実測調査結果に基づきシミュレーションを行い、実測結果とシミュレーション結果の比較検討を行った。

4.1 シミュレーション条件

(1) 気象条件

外気温度：17.5℃

外部風速：1.4m/s（一様流）、風向S

(2) 日射負荷

高層部は日射が遮られるため、低層部から中層部に設定しシミュレーションを行った。

4.2 検証結果

(1) EV シャフト内の気流

シミュレーション結果では、給気ガラリより外気が流入し、排気ガラリより流出する様子がみられる（Fig.8-1～Fig.8-3の Air flow 参照）。これは、下層部のエリアで日射を受けることにより温度が上昇し、EV シャフト内に上昇気流が発生しているためと思われる、実測結果と一致する結果を示している。

(2) EV シャフト内の温度分布

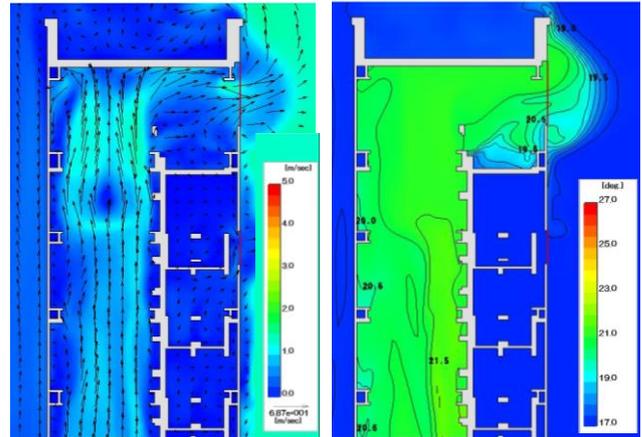
EV シャフト内の温度は17.5℃から22.5℃となる様子がみられる。温度のピークとなる領域は低層部から中層部におけるエリアとなっている（Fig.8-1～Fig.8-3の Temperature 参照）。このように、シミュレーションにおいても実測結果と同様に、下層部と上層部の境界部における温度が高くなる傾向を示している。EV シャフト内の温度を比較するとシミュレーション結果の方が実測値より高い温度を示しているが、これは内部鉄骨等への吸熱量をシミュレーション時には考慮していないことに起因すると考えられる。

5. まとめ

シミュレーションを活用した設計手法の精度を向上させるため、中間期におけるEV シャフト内の温熱環境測定を実施し、実測結果とシミュレーション解析結果を比較検証した。その結果を纏めると以下となる。

- 1) EV シャフト内において日射を受けることにより温度が上昇し、自然換気が行われている。
- 2) シミュレーション解析結果は、気流分布、及び温度分布ともに、ほぼ実測結果と一致した結果を示す。ただし、シミュレーションにより予測した温度と実測値とでは若干の差異が生じた。この差異については、内部鉄骨等への吸熱量を精度よくシミュレーション時に想定することで小さくすることが出来ると考えられる。

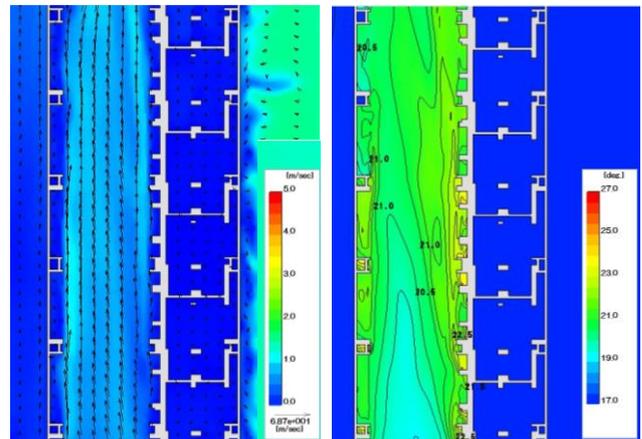
以上の結果より、設計としてシミュレーションを活用することの有効性が確認された。



(Air flow)

(Temperature)

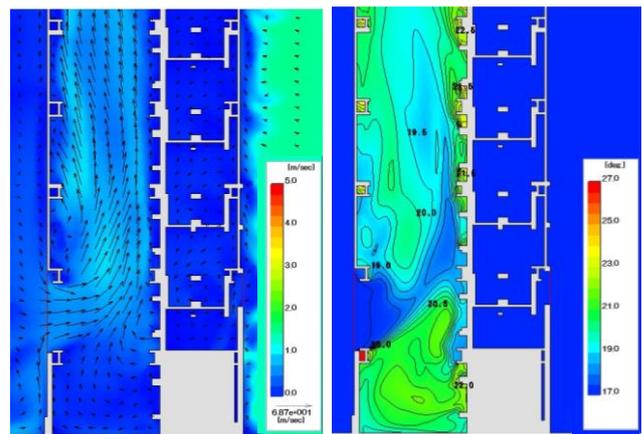
Fig.8-1 Result of simulation (Upper part of the EV shaft)



(Air flow)

(Temperature)

Fig.8-2 Result of simulation (Intermediate part of the EV shaft)



(Air flow)

(Temperature)

Fig.8-3 Result of simulation (Lower part of the EV shaft)

参考文献

- 1) 浮力による重力換気計算：空気調和・衛生工学会
- 2) 上下温度分布・気流分布解析ソフト 3次元熱流体解析プログラム (WindPerfect2015)：(株)環境シミュレーション

熱源を選択可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較（その2）

スラブ断熱改修による水式天井放射空調の冷暖房能力の改善効果の検証

Verification of the Performance of the Water-type Ceiling Radiative Air-conditioning System which can Select Heat Sources (Part2)

Improvement Effect of Radiative Air-conditioning System by Slab Insulation Refurbishment

○山本 健太（立命館大学） 近本 智行（立命館大学） 李 明香（立命館大学）
 岡本 茂（東畑建築事務所） 小林 陽一（安井建築設計事務所）

Kenta YAMAMOTO*¹ Tomoyuki CHIKAMOTO*¹ Myonghyang LEE*¹

Shigeru OKAMOTO*² Yoichi KOBAYASHI*³

*¹ Ritsumeikan University *² Tohata Architects & Engineers, Inc. *³ Yasui Architects & Engineers, Inc.

In this paper, we verify the precision accuracy for model experiment by comparing the result of the previously mentioned experiment. We create analysis model reproducing not only movement of heat and air but also radiant heat transfer. In this verification, we conduct a CFD analysis using this model. Based on the above, we create a CFD analysis model reproducing indoor space and slab. We conducted case studies of slab insulation refurbishment. Through the above analysis, we verify improvement effect of radiative ceiling air-conditioning system.

1. はじめに

既往研究¹⁾において、放射冷暖房システムは夏期及び冬期に室内設定温度を緩和しても、在来空調と比べて温熱感を維持する結果を得た。

前報²⁾では水式天井放射空調システムを有する会議室において夏期・冬期に温熱環境実測を行い、熱移動現象の詳細調査を行った。結果、本空調の供給熱量のうち、半分の冷暖房能力しか得られていないということが明らかになった。これは今回の対象室とした居室の天井スラブの断熱性能が不十分であったためであると考えられる。

本報では前報²⁾にて示した実建物を対象に室内空間およびスラブを再現した CFD モデルを作成し、同モデルを用いて断熱性についてケーススタディを実施する。

以上の解析を通じて、本空調システムの冷暖房能力の改善効果を示すことを本報での目的としている。

2. 実測時の再現性の検討

2.1 解析概要

本解析では天井放射空調が導入されている会議室を CFD 解析空間として再現し、室内の流れ場、温度場、輻射場の定常解析を行った。即ち、CFD 解析による空気の流れ場・温度場の解析に加え、固体内の熱伝導及び固体表面間の放射熱伝達を連成させた定常解析を行う。Fig.1 に解析空間を示す。解析対象は、8.0×9.0×3.6m の空間で、天井パネル、天井スラブ、外壁を含んでいる。居室の東面が外壁であり、窓が配置されている。南面、西面、北面は内壁である。天井パネルはパンチングメタルであり、放射パネルの部分には配管が敷設されており、それ以外の部分には不織布としてグラスウール（以下GWとする）が敷設されている。この天井放射パネルは圧力損失特性を持ったフィルターとしてモデル化した（Fig.1）。また、机の

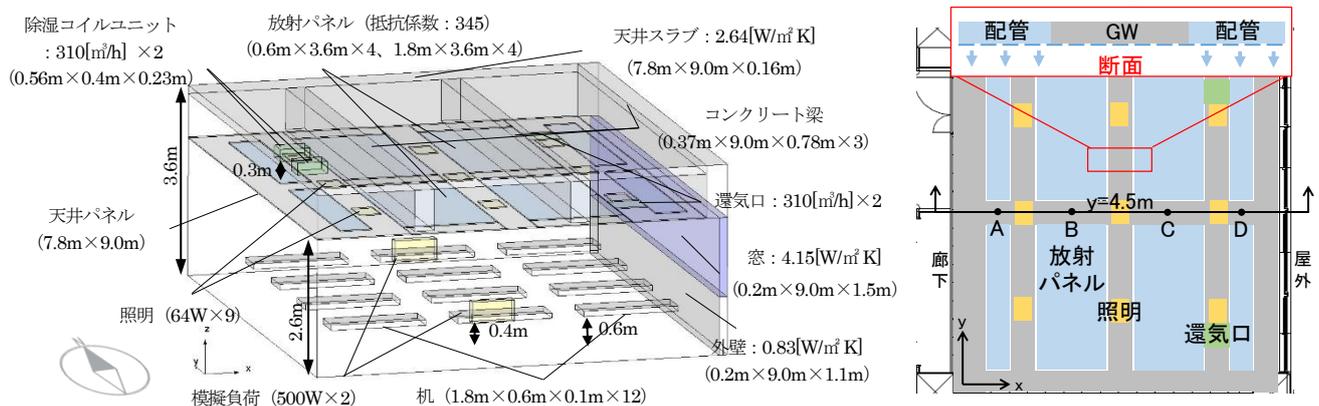


Fig.1 CFD analysis model (left: cooling, right: heating)

足は室内の気流場には影響を及ぼさないものと考え、モデル作成において再現しなかった。

Fig.1の天井パネルの4点(A~D)は、y=4.5mにおける上下温度分布の測定点の配置を示す。

2.2 解析条件

解析条件を Table.1 に示す。解析における乱流モデルとしては標準 k-ε モデルを用いて、放射対流連成解析を行った。流出入境界の流速は、給気還気口に対して除湿コイルユニットの定格風量を一律に与えた。給気温度は、実測値より冷房時においては 17.6°Cとし、暖房時は 21.5°Cとしている。乱流統計量は、乱流強度と乱流長さスケールから設定した。放射パネルについては、各ブロックの表面温度が同様であると仮定し、配管表面温度の実測値をそれぞれに与えた。放射パネルによる圧力損失特性の導出には、三浦らによる CFD を用いた予測手法を使用した^{文3)}。Fig.2 に圧力損失の多項式による近似曲線とその近似式を示す。圧力損失ΔPは次式で示される。

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} C_f v^2$$

$$= 206.95 v^2$$

慣性による抵抗係数

$$C_f = 344.9$$

ρ：空気の密度[kg/m³]

v：風速[m/s]

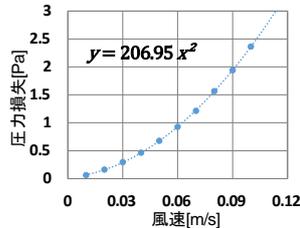


Fig.2 pressure loss

壁面境界の熱伝達率は指定の表面熱伝達係数を用いた^{文4)}。実測で得られた壁面温度を平均し、各面が同様であると仮定し境界条件として与えた。放射率は天井スラブを鋼板とみなして 0.6、そのほかの表面を 0.9^{文5)}とした。

模擬発熱量に関しては、実測を行った際に与えた発熱量を設定した。

2.3 実測値と解析結果の比較

Fig.3 に y=4.5m の測定点 (A~D) における上下温度分布の比較を示す。冷房時は屋外側の室内温度において 0.5°Cほどの誤差が生じた。暖房時では実測値と比較すると全体的にやや高めの温度となった。これは解析では放射パネルの温度を一律に与えているが、実際には上下面に温度分布が生じていることが一因であると考えられる。どちらも居住域において 0.5°C差程度であり、実測値と比較すると概ね傾向が一致している。本解析モデルは実測

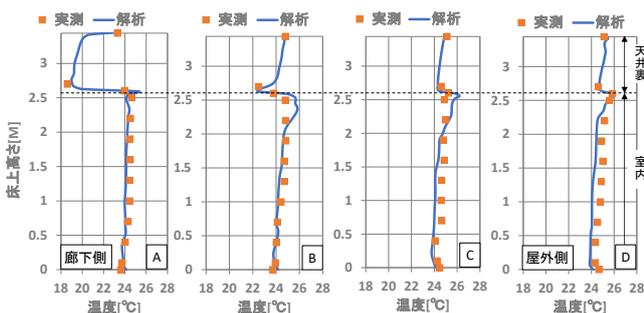


Fig.3 Comparison of vertical temperature distribution on y=4.5m (left: cooling, right: heating)

Table.1 Analysis conditions

CFDコード	STREAM V13							
乱流モデル	標準 k-ε モデル							
解析タイプ	放射対流連成							
解析領域	8.0m(x) × 9.0m(y) × 3.6m(z)							
メッシュ数	10,627,200 (50mm × 50mm × 10mm)							
流出入境界	給気口	流量: 620m ³ /h (=0.94m/s)、温度: 17.6°C/21.5°C						
	還気口	流量: 620m ³ /h (=0.24m/s)、温度: 24.7°C/22.6°C						
壁面境界	放射パネル	表面温度規程、抵抗係数: 345						
	熱貫流率 [W/m ² K]	スラブ: 2.64、天井裏側外壁: 0.64 窓面: 4.15、室内側外壁: 0.83						
	熱伝達率 ^{文4)} [W/m ² K]	冷房	天井裏側水平面: 6、垂直面: 8、室内側水平面: 9					
	暖房	天井裏側水平面: 9、垂直面: 8、室内側水平面: 6						
温度境界	熱伝導率 [W/mK]	GW: 0.036、天井パネル: 222、梁: 1.6						
	放射率 [-]	スラブ: 0.6、それ以外: 0.9						
内部発熱	平均温度 [°C]	放射パネル	外部負荷					
	冷房	22.5	上階空気	SAT	南面	西面	北面	床面
	暖房	31.1	25.3	31.8	24.9	24.0	24.5	24.2
			21.0	5.6	22.4	20.9	21.6	20.9
内部発熱		照明: 64W × 9、模擬負荷: 500W × 2						

Table.2 Analysis case

Case	断熱材厚さ [mm]				平均熱貫流率 U _a 値 [W/m ² K]
	スラブ	外壁	窓 (中空層)	パネル裏	
0 基準	0				2.49
1 t10	10	20	6	10	1.71
2 t25	25				1.30
3 t50	50				1.04
4 t25+外壁	25	50	20		
5 t50+有孔	50	20	6	0	

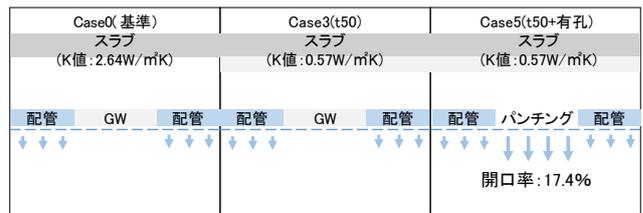


Fig.4 Ceiling condition

時の再性は高いと言える。

3. スラブ断熱性能による感度解析

3.1 解析概要

前節の解析モデルを用いて天井スラブの断熱改修を想定し、放射対流連成解析を行う。Table.2 に解析ケースを示す。基準 case0 では実際のスラブと外壁仕様を境界条件として設定した。case0~3 では天井スラブの断熱改修による効果を評価するため、断熱材厚さをパラメータとして設定した。case3~5 では断熱改修後の居室の平均熱貫流率が一定の条件となるように断熱材の厚さを設定した。case4 では天井スラブの断熱改修に加えて外壁を断熱したケースとした。case5 では天井パネルの GW を取り除いたケースとして、圧力損失特性は開口率 17.4%のものを

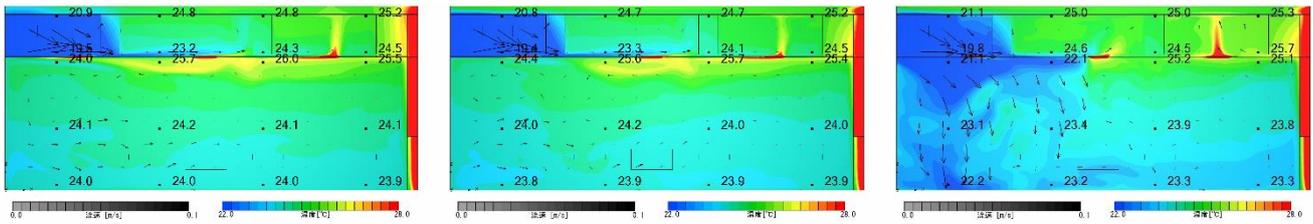


Fig.5 Temperature wind speed distribution on y=4.5m (left: case 0, center: case 3, right: case 5)

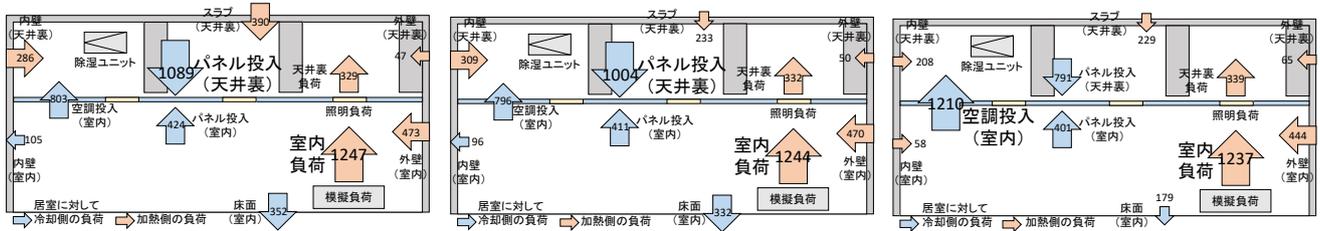


Fig.6 Breakdown of cooling load (left: case0, center: case3, right: case5)

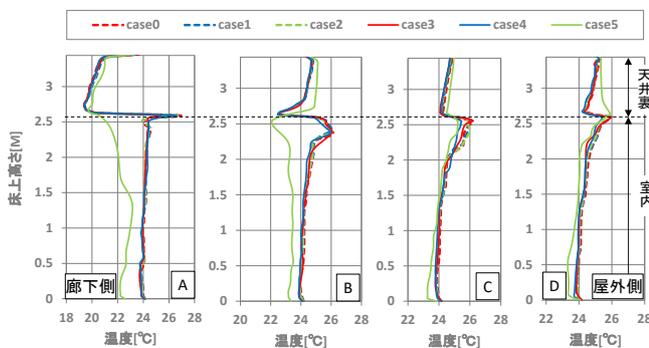


Fig.7 Comparison of vertical temperature distribution

使用した (Fig.4)。このケースでは空気が流通する有孔面積が2倍となっている。

3.2 冷房時の解析結果

Fig.5, 6に case0, 3, 5における温度風速分布と負荷内訳の冷房時解析結果を示す。Fig.7, 8に上下温度分布と熱収支を示す。Fig.8は、居室に対して冷却側の負荷とパネルの投入熱量を負、加熱側の負荷を正として示す。各ケースで正と負の熱収支は99%程度となっており、精度は概ね確保できている。

case0 と 3 の比較では、スラブを断熱強化することで空間温度分布に大きな違いが見られなかったが (Fig.5)、天井裏への投入熱量が減少した。これはスラブの熱負荷を157W 削減できたためである (Fig.6)。

case3 と 4 の比較では、外皮負荷が約 230W が削減できたため、投入熱量が 200W 減少した (Fig.8)。

case3 と 5 の比較では、Fig.5 の温度分布を見ると case5 の天井裏平均温度^{注1)}が 0.5°Cほど上昇した一方で、室内温度には 0.7°Cの低下が見られた。Fig.5 の風速分布を見ると case5 では天井パネルから 0.1m/s の速さで室内に冷気が降下していることが分かる。これは、天井パネルの有孔面積を大きくしたことによって除湿ユニットからの冷気が室内に移動しやすくなったためである。また、Fig.5

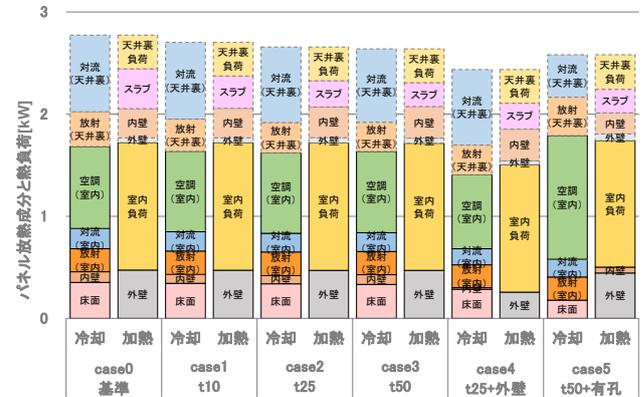


Fig.8 Heat balance of heat input and load

の case3 で内部発熱によってパネル直下に溜まっていた暖気が、case5 では見られなくなったことから、暖気が天井裏に上昇したことが分かる。これにより天井裏投入熱量が 213W 減少し、空調投入熱量^{注2)}が 414W 増加した (Fig.6)。Fig.13 の case5 は case0 と比べて冷房時の運転効率^{注3)}が 7%向上していることが分かる。

このことからスラブ断熱改修した上で、天井面の有孔面積を増やすことで、冷房能力がより改善すると考える。

3.3 暖房時の解析結果

Fig.11, 12に暖房時の上下温度分布と熱収支の解析結果を示す。ネルの投入熱量と居室に対して加熱側の負荷を正、除去側の負荷を負として示している。冷房時と同様に精度は確保できている。

case0 と 3 の比較では、スラブの断熱性を強化することによって、case3 の天井裏温度が 1°C近く上昇した一方、室内温度^{注1)}にはあまり違いが見られなかった (Fig.11)。これはスラブからの熱負荷を 711W 削減できたためである (Fig.10)。

case3 と 4 の比較では、外壁の断熱性を強化したことで、case4 の室内温度が 0.5°Cほど上昇したのに対し、天井裏は同等の温度であった (Fig.11)。これは窓面からの熱負荷

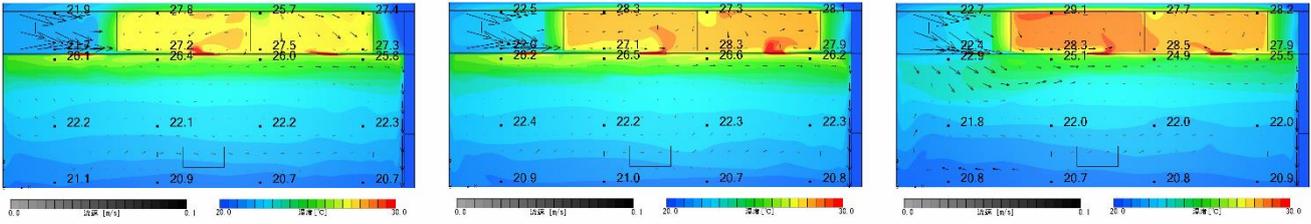


Fig.9 Temperature wind speed distribution on y=4.5m (left: case 0, center: case 3, right: case 5)

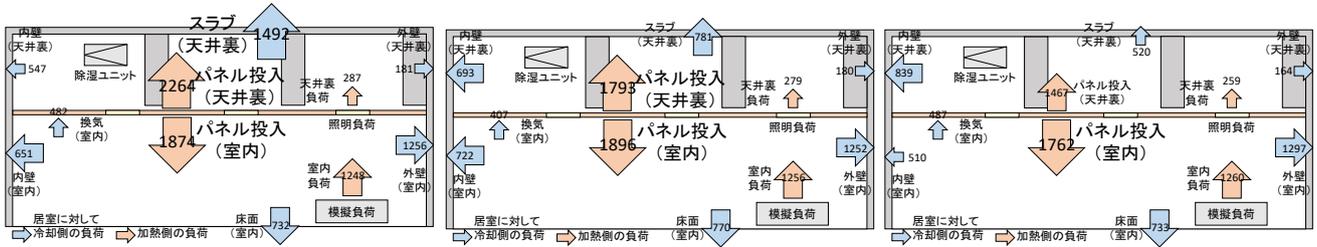


Fig.10 Breakdown of heating load (left: case0, center: case3, right: case5)

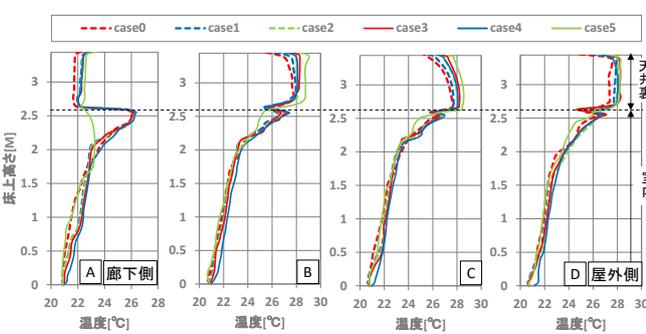


Fig.11 Comparison of vertical temperature distribution

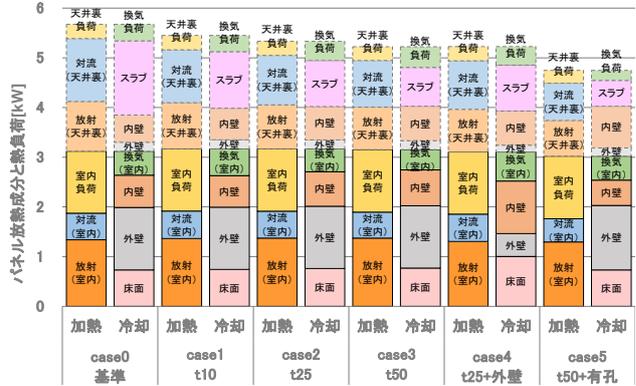


Fig.12 Heat balance of heat input and load

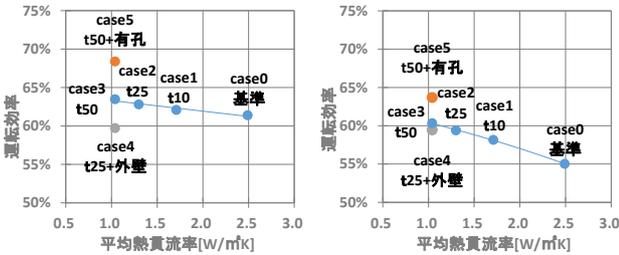


Fig.13 Comparison of operation efficiency (left: cooling, right: heating) がおおよそ 400W 減少したからである (Fig.12)。

case3 と 5 の比較では、case5 の天井裏温度が 0.6°C ほど上昇した (Fig.11)。Fig.9 の温度分布によると case3 は天井パネル直下の平均空気温度が 26.4°C と高いが、case5 では 24.6°C と低い。このことから有孔面積を増やすことで、溜まっていた暖気が天井裏に上昇することが分かる。また、case5 では天井裏の風速が低下したため、除湿ユニットによる対流成分が減少した (Fig.12)。スラブからの熱負荷が約 260W 削減されたことによって天井裏投入熱量が 326W 減少した (Fig.10)。case5 では case0 と比較すると、全投入熱量が 930W ほど削減され、Fig.13 から暖房時の運転効率が 8.7% 向上していることが分かる。

以上のことからスラブ断熱改修に加えて、天井面の有孔面積を増やすことで、冷暖房能力を改善できると考え

られる。

4. まとめ

本研究では天井放射空調を用いた居室を CFD 解析空間として再現し、スラブ断熱改修が与える影響について検証した。実測時の再現性の検討では温熱環境の予測に十分な精度が確保できたと言える。また、冷房時、暖房時ともに天井スラブの断熱強化に加え、天井パネルの有孔面積の増加によって、本空調システムの運転効率が向上することが確認された。

注釈

- 1) 平均温度は Fig.1 に示す測定ポイント (A~D) の平均としている
- 2) 空調投入熱量：給気によってパネルから室内に供給された熱量
- 3) 運転効率：全投入熱量に対する室内投入熱量の割合

参考文献

- 1) 宮城ほか：熱源を選択可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較 (その 1)、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、p1249-1250、2015 年 9 月
- 2) 山本ほか：熱源を選択可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較 (その 3)、空気調和・衛生工学会大会学術発表会論文集、2016.9
- 3) 三浦ほか：パッシブチルドビームを用いた天井内冷却式放射空調の基礎検討 (第 3 報) CFD を用いた圧力損失特性と天井パネル表裏間移流量予測手法の検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、p37-40、2015.9
- 4) 空気調和ハンドブック、改訂 5 版、丸善株式会社、2008、p57
- 5) 空気調和・衛生工学会：空気調和衛生工学便覧第 14 版 1 基礎編、p.86,2010.2

商業施設を対象としたエネルギー需要モデルの開発

Development of energy demand estimation model in commercial building

○北村 拓也 (大阪大学) 山口 容平 (大阪大学) 金 範峻 (大阪大学)
木村 舜 (大阪大学) 黄 雄明 (大阪大学) 池田 耕介 (大阪大学) 下田 吉之 (大阪大学)

Takuya KITAMURA*¹ Yohei YAMAGUCHI*¹ Bumjoon KIM*¹
Shun KIMURA*¹ Yumei KOU*¹ Kosuke IKEDA*¹ Yoshiyuki SHIMODA*¹

*¹ Osaka University

This study attempts to reveal the energy demand structure in commercial buildings. For this purpose, we revealed feature of facility specifications by logistic regression analysis. Then we developed energy demand estimation model which can consider the difference of building characteristics such as scale, HVAC system and behavior of people. Finally we estimate the total energy consumption by multiplying consumption rate and total floor area. The estimated total energy consumption of commercial buildings in Kinki region was 120PJ/year

はじめに

商業施設は業務部門のエネルギー消費の 22%を占め、商業施設における省エネルギー技術の導入・普及が国全体のエネルギー需要に及ぼす影響を定量化することは重要である。商業施設は取扱商品や商品の販売形式によって様々な業態が存在し、業態ごとに規模や設備、営業時間などの特徴が大きく異なる。これによって業態ごとのエネルギー消費特性は異なることが知られており、省エネルギー技術導入の評価においては業態や設備仕様などの多様性を考慮する必要がある。しかし、これまでに業態や設備の多様性を考慮したうえで国家スケールでの商業施設のエネルギー消費、省エネルギー技術の導入・普及効果を定量化した研究はない。そこで本研究では、そのような分析能力を持つエネルギー需要モデルを開発することを目的とする。

1. 商業施設エネルギー需要モデル

都市圏や国などの空間スケールでエネルギー需要を推計する手法として、Archetype Engineering Modeling¹⁾手法が確立されている。この手法では都市圏の建築ストックを用途や規模といったエネルギー需要に大きな影響を及ぼす因子で類型化し、各類型の代表建物モデルを作成する。代表建物モデルは類型の標準的な特徴を持つ建物であり、シミュレーションの入力条件として使用される。シミュレーションにより推計されたエネルギー需要は原単位化され、最後に原単位とストック存在量との積和を取ることにより対象とするストック全体のエネルギー需要が定量化される。このような構造により、建物の建築仕様や設備仕様、建物の使い方といった因子が都市圏のエ

ネルギー需要に及ぼす影響を評価できる。また、シミュレーションでは建物の熱負荷計算を行うため、高効率照明が暖房需要に影響を与えるように、エネルギー需要決定因子間の相互作用を考慮したエネルギー需要推計を行うことが可能である。さらに、建物の建築ストックの変化が都市圏のエネルギー需要に及ぼす影響を評価することができる。この手法を使うことで、建物の省エネルギー対策が都市圏、国家全体のエネルギー需要に及ぼす影響を評価することができる。

本研究で開発するモデルでは山口ら²⁾が開発した商業施設の業態区分に加え、空調設備によりストックを類型化し、設備仕様の差異がエネルギー需要に及ぼす影響を考慮する。これを実現するため、空調設備の採用状況を表す回帰モデルを開発した。モデルの積み上げ過程においては、回帰モデルにより推計された採用率を使用して、設備区分別の延床面積を定量化した。また、エネルギー需要の推計にはアメリカ DOE が開発した EnergyPlus を用いた。代表建物モデルの建築仕様、空調設備仕様、建物の使われ方は文献、利用可能なデータに基づいて類型別に標準的な値を設定した。以下では 2 節に設備採用率の回帰分析結果、3 節に代表モデルによるエネルギー需要推計結果、4 節に日本全国の商業施設ストックのエネルギー需要推計結果を示す。

2. 商業施設における空調設備採用状況の回帰分析

2.1 回帰分析の方法

Table 1、Table 2 にそれぞれ回帰分析を行う設備システムの区分を示す。空調設備システムについては個別空調方式(PAC/MUL)、定風量方式(CAV)、変風量方式(VAV)、

ファンコイルユニット方式(FCU)、外調機を用いたファンコイルユニット方式(FCU+OHU)の 5 つの区分を設けた。また外気導入方式については直接吹き出し方式、エアハンドリングユニットを用いて導入外気を室への供給空気と混合させる方式、個別外調機方式、中央外調機方式の 4 つの区分を設けた。熱源設備システムについては初めに中央方式と個別方式の二つに分類した。個別方式は電気式とガス式の 2 区分を設けた。中央方式は冷熱源・温熱源、燃料種によって 5 つの区分を設けた。

Table. 1 Classification of facility

Heat Source System	HVAC system
HVAC system	Package Unit System or Multi Air Conditioning System(PAC/MUL)
	Constant Air Volume(CAV)
	Variable Air Volume (VAV)
	Fun Coil Unit(FCU)
	Fun Coil Unit with Outdoor Handling Unit(FCU+OHU)
Outdoor air system	Direct intake
	Mixing at AHU
	Unitary intake control
	Central intake control

Table. 2 Heat Source Systems

Case Name	Heat Source System	Energy Source
EHP	Unitary	Electric Heat pump
GHP		Gas Heat pump
TB	Central	Turbo Chiller+Gas Boiler
AB		Absorption Chiller+Gas Boiler
ABCH		Absorption Chiller and Heater
AHP		Air Source Heat Pump
COM		Electric and Gas Combination

回帰分析には多項ロジスティック回帰を用いた。多項ロジスティック回帰では、基準とする区分の採用率と対象とする設備区分の採用率の比の対数が説明変数と回帰係数の線形結合でモデル化するものであり、(1)式で対象とする設備区分の採用率が与えられる。左辺について、 p_m は選択肢 m の採用率を、 p_{base} は基準となる選択肢の採用率を表す。右辺について、 β_0 は回帰係数の定数項を、 β_{mk} は選択肢 m 、説明変数 k の回帰係数を、 X_k は説明変数 k を表す。

$$\log_e \frac{p_m}{p_{base}} = \beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_{mk} X_k \quad (1)$$

分析には一般社団法人建築設備技術者協会が発行している建築設備情報年鑑・竣工設備データ³⁾を用いた。サンプルとしては竣工年が 1987 年度から 2012 年度の商業施設 652 件を用いた。

Table. 3 に回帰分析で用いた説明変数を示す。本研究では建物の竣工年、立地地域、業態、延床面積の常用対数、熱源方式、熱源の種類を説明変数として考慮した。また、ステップワイズ法により AIC を最大とする変数の組み合

わせを選択し、有意な影響を持たない因子を回帰モデルから除外した。

Table. 3 Predictor variables of logistic regression

Explanatory variable	Definition of explanatory variable
Year 1986-1990	Year of completion
Year 1991-1995	
Year 1996-2000	
Year 2001-2005	
Year 2006-	
Area cold	Area
Area east	
Area west	
Specially shop	Business category
Food supermarket	
General Merchandise store	
Department store	
Log ₁₀ (TFA)	Common logarithm of Total Floor Area
Discetralized HVAC	Heat source system
Centralized HVAC	
Connected to DHC	

2. 2 商業施設における空調設備採用状況

Fig. 1 に売場において推計された空調方式採用率を示す。図は ELPAC のサンプルを延床面積に基づいて 10 のグループに分類し、グループごとに回帰モデルによる採用率推計値の平均値を算出したものであり、横軸は各グループのサンプル商業施設延床面積平均値の常用対数を示す。図からわかるように商業施設の空調方式は全体の 90%以上を PAC/MUL、CAV が占めており、延床面積の小さい領域においては PAC/MUL 方式の採用率が高く、延床面積の増加に伴って採用率が減少していく。また、回帰係数から総合スーパーと比較して百貨店においては VAV の採用率が高く、専門店では FCU の採用率が非常に低いと推計された。

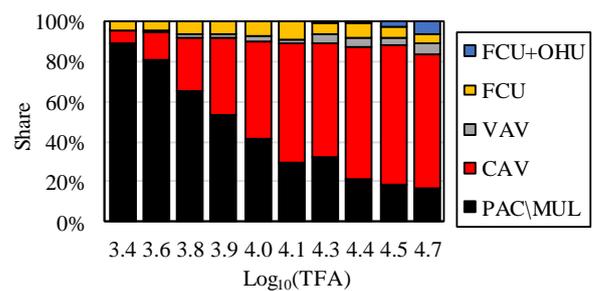


Fig. 1 Adoption rate of HVAC systems

Fig. 2 に売場において推計された外気導入方式採用率を示す。図からわかるように商業施設の外気導入方式の多くを直接吹き出し方式が占めており、延床面積の増加に伴って AHU 混合方式、個別式外調機の採用率が高くなる。また、回帰係数から関東・中部と比較して、寒冷地においては中央式外調機の採用率が低くなる傾向がみられた。近畿以西では個別式外調機の採用率が高く、エアハンドリングユニットにおいて導入外気を室への供給空気と混合させる方式 (以下 AHU 混合方式) の採用率が低い。

総合スーパーと比較して食料品スーパーにおいては個別式外調機の採用率が非常に低い。百貨店では中央式外調機の採用率が非常に低く、AHU 混合方式の採用率が高い。

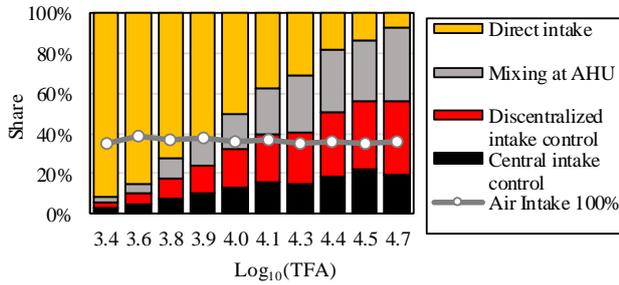


Fig. 2 Adoption rate of outdoor air system

Fig. 3 に熱源システムの個別方式、中央方式の別で採用率を示す。図から分かるように、規模が小さい建物では個別式熱源方式が支配的であり、規模の増加に伴って中央熱源方式の比率が高くなる。回帰係数から竣工年の新しい建物では個別方式の熱源採用率が高いと推計された。

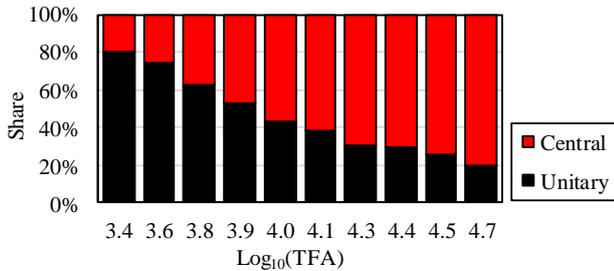


Fig. 3 Adoption rate of Heat source system

Fig. 4 に熱源の燃料種採用率を示す。図から分かるように、電気熱源の採用率は延床面積の増加に伴って減少し、蓄熱採用率は増加する。電気・ガス両用の熱源は規模による影響は観測されなかった。また、回帰係数から関東・中部と比較して、寒冷地においては蓄熱有の熱源の採用率が低く、ガス熱源の採用率が高い。

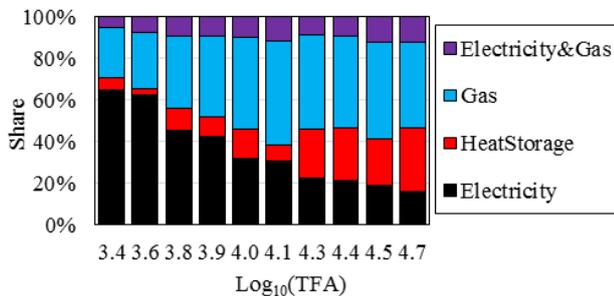


Fig. 4 Adoption rate of Heat source

3. 代表建物モデルの設計とエネルギー需要推計

Table. 4 に代表建物モデルの延床面積と階数を示す。代表建物モデルの類型は山口ら²⁾の手法により商業施設の業態と規模を基準に区分を行った。これらの値は DECC データベース⁴⁾に収録されているデータから類型別の平均値を算出した。商業施設におけるゾーニングは売場・客

席フロアの配置が考慮されるため偏心コアとし、バックヤードをフロアの北側に、売場をフロアの南側に配置した。代表建物モデルの空調システムには2節と同じ区分を用いた。また、照明・機器・人員密度・外気導入量・営業時間の設定値は白石ら⁵⁾が設定した値を用いた。

Table. 4 Architectural Specification of representative models

Category Number	Business category	Total Floor Area	Number of Floor
R1	ConvenienceStore	183 m ²	1
R2	SpecialityShop	110 m ²	1
R3	HomeCenter	7,231 m ²	1
R4	HousingClothingSuper	6,000 m ²	2
R5	ConvenienceDrug	892 m ²	1
R6	SuperDrugStore	2,462 m ²	1
R7	SmallGrocery	1,262 m ²	1
R8	MediumGrocery	2,308 m ²	1
R9	LargeGrocery	3,846 m ²	1
R10	SmallGeneral	9,538 m ²	3
R11	MediumGeneral	27,273 m ²	3
R12	LargeGeneral	92,727 m ²	4
R13	MediumDepartment	32,727 m ²	8
R14	LargeDepartment	76,364 m ²	12

Fig. 5 に類型別年間一次エネルギー消費原単位を示す。冷蔵・冷凍用途のエネルギー消費については本研究のシミュレーションでは考慮していないため、鈴木ら⁶⁾の冷凍・冷蔵モデルから得られた結果を商業類型別に積み上げた。図から分かるようにエネルギー需要原単位は最も大きいコンビニエンスストアで15,869 MJ/(m²・年)、最も小さいホームセンターで1,557 MJ/(m²・年)と類型によって大きく異なることが分かった。またエネルギー消費の用途は類型によって大きく異なることが分かった。

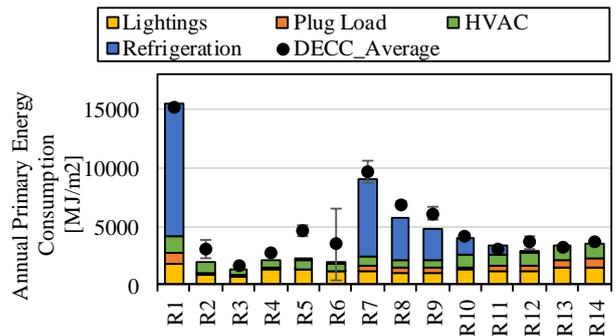


Fig. 5 Annual Primary Energy Consumption by Business category

4. 近畿圏商業施設エネルギー需要推計

4.1 近畿圏商業施設の類型別空調・熱源設備ストック
商業施設の類型別売場面積ストックを商業統計⁷⁾の業態別売場面積データから算出した。次に類型別売場面積ストックに回帰分析で明らかにした空調設備採用率を掛け合わせることで近畿圏全体の空調設備ストックを推計した。近畿圏商業施設の類型別空調設備ストックを Fig. 6 に、類型別熱源設備ストックを Fig. 7 に示す。両図から分かるように、近畿圏の商業施設では専門店の売場面積ス

トックが大きいことが分かる。次に衣料品・住関連スーパー、小型総合店舗の順に売場面積ストックが大きい。空調設備ストックでは延床面積の小さい専門店やコンビニエンスストアでは外調機を用いた個別空調方式の採用率が高く、延床面積の大きい百貨店では定風量方式の採用率が高い。熱源設備ストックでは延床面積の大きい百貨店や総合店舗ではガス熱源の採用率が高い。

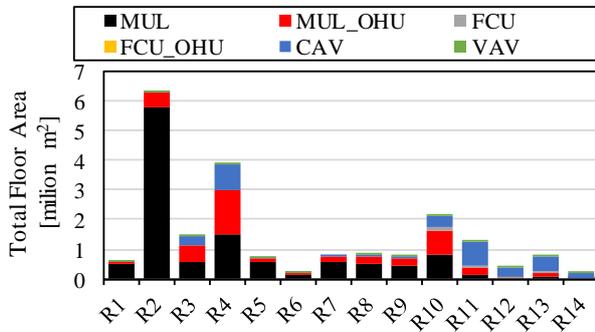


Fig. 6 Facility stock of HVAC system

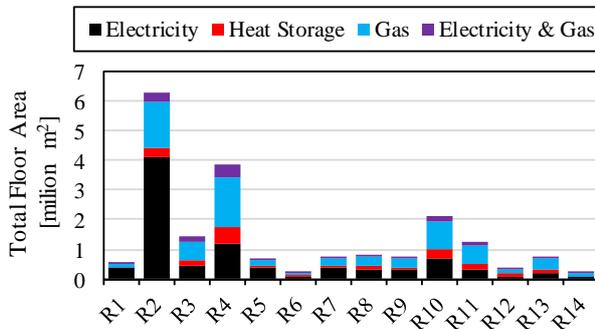


Fig. 7 Facility stock of Heat Source system

4. 2 近畿圏商業施設エネルギー需要推計

3節で推計した類型別エネルギー需要原単位と4. 2節で推計した空調・熱源設備ストックを掛け合わせることで近畿圏商業施設のエネルギー需要を推計した。Fig. 8に近畿圏用途別、業態別エネルギー消費量を示す。近畿圏における商業施設の年間一次エネルギー消費量は120PJと推計された。業態別では専門店のエネルギー消費は全体の22%と大きな割合を占める。またコンビニエンスストアのエネルギー消費は全体の12%であり、売場面積ストックが小さいことを考慮するとエネルギー消費原単位が非常に大きいことが分かる。用途別では照明用途のエネルギー消費量は39PJ/年で、全体の32%を占める。空調用途全体のエネルギー消費量は全体の33%を占める。食料品スーパーやコンビニエンスストアで大きな割合を占めていた冷蔵用途は、小売店舗全体のエネルギー消費量に占める割合は26%である。照明、空調は商業施設のエネルギー消費量全体の約55%を占めるため、商業施設のエネルギー消費量削減には照明や空調設備への省エネルギー技術の導入が有効だと考えられる。また燃料種別では電気のエネルギー消費量は全体の93%と大きな割合を占める。

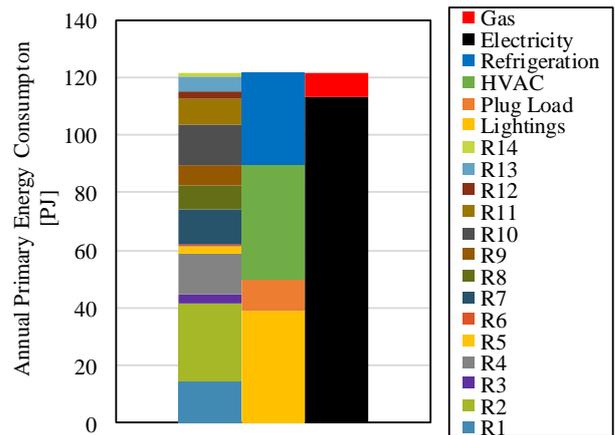


Fig. 8 Total annual primary energy consumption in Kinki area

5. まとめ

商業施設の業態や建築仕様、設備仕様、建物の使われ方を考慮したエネルギー需要モデルの開発を行い、近畿圏の年間一次エネルギー消費量の推計を行った。商業施設のエネルギー消費は業態間でその量と用途が大きく異なり、また採用している設備も異なることが明らかになった。近畿圏における商業施設の年間一次エネルギー消費量は120PJと推計され、照明や空調用途のエネルギー消費量が多いことが明らかになった。本研究で開発したエネルギー需要モデルは建物の形状や設備の変化が都市圏全体のエネルギー需要に及ぼす影響を定量化できるため、省エネ対策を導入した場合のエネルギー消費削減量を定量化することが可能である。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP16H04463 の助成を受けたものである。

参考文献

- Swan LG., Ugursal V.I. 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 13, pp. 1819-1835.
- 山口ら：商業施設エネルギー消費原単位分析に用いる業態区分の開発，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,2013
- 一般社団法人建築設備技術者協会；竣工設備データELPAC2010
- 一般社団法人日本サステナブル建築協会；非住宅建築物の環境関連データベース 2006年度～2008年度データ
- 白石ら：近畿圏の小売店舗ストックを対象とするエネルギー需要モデルの開発，第29回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集，2013
- YusukeSuzuki, Analysis and Modeling of Energy Demand of Retail Stores, Proceedings of Building Simulation 2011, pp. 1824-1831
- 経済産業省：平成26年商業統計

折板状反射体の日射反射性能に関する研究
- 折板形状による反射率の異方性発現効果 -

Research on Reflection Performance of Folded Plate

— Expression Effects of Anisotropy Reflectance by Folded Plate Shape —

永目 享大 (大阪市立大学)

西岡 真稔 (大阪市立大学)

鍋島 美奈子 (大阪市立大学)

Kodai NAGAME*¹ Masatoshi NISHIOKA*¹ Minako NABESHIMA*¹

*¹ Osaka City University

A reflection technique that can change the performance of reflecting solar radiation such as solar radiation absorptivity rate while controlling the direction of reflection is required, as a method for controlling heat island phenomenon and the cooling and heating load in summer and winter. In this paper, focusing on the folded plate, numerical simulation revealed the influence of the shape of the reflector and the material of the reflective surface on the performance of reflecting solar radiation. As a result, it is possible to change the solar radiation absorptivity rate by 27% in the south and reflect the sunlight upwards.

1. はじめに

近年、都心部でヒートアイランド現象が顕在化しており、これに対する抑制策として建物外皮を高反射化し、日射受熱量を低減する対策が普及しつつある。代表的な方法として、高反射率塗料を用いる方法があるが、高反射率塗料は拡散反射性を持つため、(1) 低層面や側壁面に適用した場合、Fig.1 のように反射日射が周辺の建物や地物に吸収され、日射の吸収位置が移転するだけの結果となってしまう。(2) また、冬季においては高反射化により、受熱量が低減することで暖房負荷が増加してしまうといった問題が挙げられる。これらの問題を踏まえて、Fig.2 のように、夏季には、半球反射率を大きくし、かつ天空方向への反射量を大きくする。その上で冬季には、半球反射率を低くすることができれば、より有用性の高い技術と言えるだろう。

上記のような反射技術として、折板状反射体に着目した。折板状反射体は2つの反射面から構成されており、その構造から太陽光を上方向へと反射することを狙っている。また、2つの反射面にそれぞれ反射性能の異なる反射材を設置することで、太陽高度の変化に対する、半球反射率の異方性を発現させることが期待される。

既往研究において、古林ら¹⁾は季節によって反射率が変化する折板状反射体を提案・試作し、BRDFを測定することでその有用性を示した。しかし、冷暖房負荷に影響を及ぼす日射吸収率を季節により、どの程度変化させることができるのか、また折板状反射体を設置した際に地表面や周辺建物への反射量がどの程度あるのか把握できていない現状にある。また、季節・時刻により細かく変化する太陽高度と、折板状反射体の複雑な形状から、

日射反射性能の実験的検討は困難が予想される。

そこで本研究では、数値シミュレーションによって評価を行うこととし、折板状反射体の形状・反射面の素材が日射吸収率や上方向反射率などの日射反射性能に及ぼす影響についてケーススタディを通じて明らかにすることを目的とする。また、折板状反射体の街路壁面設置を想定し、街路を模擬した数値計算により、周辺建物や地表面に与える影響についても検討を行う。

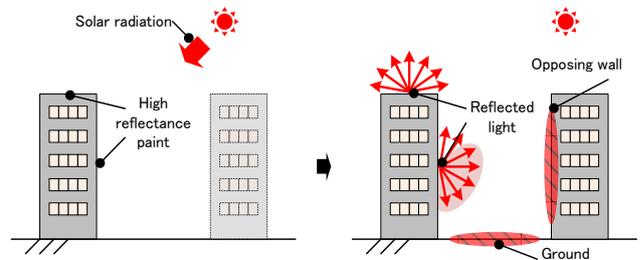


Fig.1 High reflectance paint

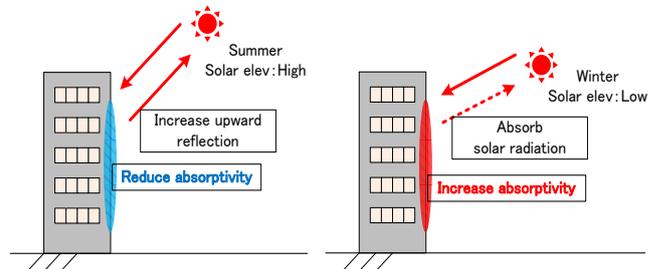


Fig.2 Useful reflection technology

2. 本研究で対象とする折板状反射体

本研究では、異なる3種類の折板状反射体について検討を行う。2枚の反射面のプロポーシオンから1:1型折板状反射体(略称1:1型)、1:2型折板状反射体(1:2型)、1:3型折板状反射体(1:3型)と呼ぶこととする。それぞれの反射体寸法の詳細をFig.3,4,5に示す。1:1型は最も標準的な再帰反射体の形状であり、反射体開口部に垂直に入射する光に対して再帰反射量が最も大きくなるように設計されている。1:2型、1:3型は天空方向への反射量を増やすことを狙った形状となっている。

3. 数値計算概要

3.1. 使用する反射モデル

反射面については式(1)で表される修正Phongモデルを用い、反射特性を再現する。鏡面反射面における拡散反射率 k_d 、鏡面反射率 k_s は分光光度計UV-3600(SHIMADZU)により測定した分光反射率をもとに算出する。BRDF(式(1)の ρ)については変角光度計GSMS-4(MCRL)により入射角が-45度に対する反射角別の反射強度を反射角-75度~75度の範囲において5度ピッチで測定する。この測定値を用いると、式(1)における未知パラメータは n のみとなり、既往研究^[2]と同様に最小自乗法によりこれを決定する。拡散反射面における拡散反射率 k_d は鏡面反射率 k_s を0とし、既往研究^[1]により測定された半球反射率をもとに決定する。本研究で反射素材として用いる白色拡散面・灰色拡散面・黒色吸収面・アルミ輝面におけるパラメータをTable.1に纏める。尚、本研究で鏡面反射面として用いるアルミ製輝面は、太陽熱発電などに用いられる極めて高反射な素材である。

$\rho = k_d \frac{1}{\pi} + k_s \frac{n+2}{2\pi} \cos^n \alpha \quad (1)$	
ρ :BRDF	k_d :Diffuse reflectivity
k_s :Specular reflectivity	n :Phong parameter

3.2. 数値計算方法

本研究では、数値計算法として、モンテカルロパストレーシング法を用いる。この方法を用いた放射伝熱解析では、日射を複数のエネルギー粒子として表し、乱数を用いて決定したエネルギー粒子の吸収や反射といった挙動の追跡を行うことで解析を行う。反射面に入射したエネルギー粒子においては式(2),(3)によって確率的に反射方向を決定する。拡散反射面では、Lambertの余弦法則をもとに鏡面反射面では、修正Phongモデルをもとに重点サンプリング法を適用する。尚、反射面に入射した光源の挙動は拡散反射率 k_d 、鏡面反射率 k_s 、0~1の一樣乱数 ξ_3 を用いて以下の式(4)より判別する。^[3]

3.3. 数値計算概要

折板状反射体における数値計算はFig.6のように5面から成る閉空間を形成し行う。Fig.6のA面は日射の入射位置となる折板状反射体における開口部であり、本稿

では、反射体の「開口面」と呼ぶ。開口面では、エネルギー粒子の射出と反射した粒子の吸収が行われ、吸収した粒子の方向ベクトルと、その粒子数により反射方向とその方向別の反射強度を算出する。

射出点はFig.7のように開口面を三角形に等しく分割し、その重心に配置する。エネルギー粒子は入射条件を与えて射出し、受照面(Fig.8)に粒子が到達すると、そこで反射モデルに従い、拡散反射、あるいは鏡面反射が起きる。そして反射位置、および反射日射の方向ベクトルを求め、次の到達面への粒子を追跡する。周期境界面(Fig.9)へと到達した粒子は、Fig.9に示すように反対側の面へ平行移動させることで、連続した空間を想定する。最終的にエネルギー粒子が開口面に到達するまで、この操作を繰り返せば、入射から反射に至るプロセスを計算することができる。

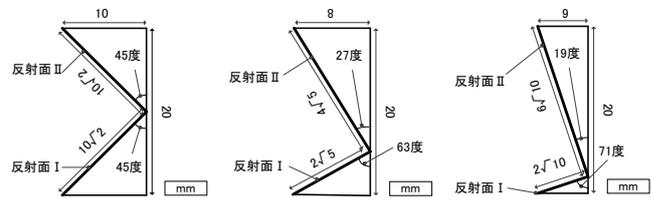


Fig.3 1:1 type Fig.4 1:2 type Fig.5 1:3 type

$(\theta, \phi) = (a \cos \sqrt{\xi_1}, 2\pi \xi_2) \quad (2)$		
$(\alpha, \phi) = (a \cos \xi_1^{1/(n+1)}, 2\pi \xi_2) \quad (3)$		
θ :polar angle	ϕ :azimuthal angle	
ξ_1, ξ_2 :uniform stochastic variables over the interval [0,1]		
α :the angle between the perfect specular reflective direction and the out going direction		
$0 < \xi_3 < k_d$:Diffuse reflectivity	(4)
$k_d < \xi_3 < k_d + k_s$:Specular reflectivity	
$k_d + k_s < \xi_3 < 1$:Absorption	

Table.1 Reflective material parameters

	k_d	k_s	n
White diffusion surface	0.85	0	—
Gray diffusion surface	0.32	0	—
Black absorbing surface	0.09	0	—
Aluminum bright surface	0.09	0.71	3137

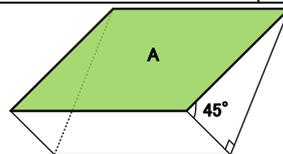


Fig.6 Opening surface

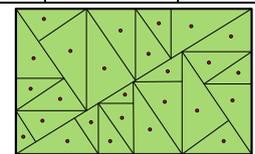


Fig.7 Injection point

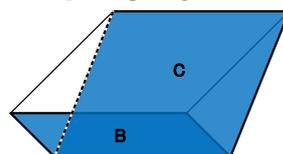


Fig.8 Receiving surface

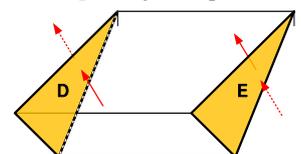


Fig.9 Periodic interface

4. 折板状反射体の日射反射性能

4.1. 計算条件とケーススタディの構成

東京の緯度・経度の位置に折板状反射体を設置する条件でケーススタディを行う。反射体開口面に与える粒子数は、524288 点としている。ケーススタディと反射面の素材構成を Table.2,3 に示す。

4.2. 検討方法

上述の検討ケースを対象に数値計算を行い、以下のステップに従い検討を行う。

(1) STEP1 日射反射性能 (時別値) の算出

入射粒子の個数を N_{in} 、開口面を通過した粒子数を N_r 、反射粒子のうち、折板状反射体の開口面の法線に対して上方向に射出された粒子数を N_{up} とすると日射吸収率は式(5)で、上向き反射率は式(6)で表される。この計算により1日の時刻別の日射反射性能を算出する。結果の一例を Fig.10 に示す。

$a_{in} = 1 - \frac{N_r}{N_{in}} \quad (5)$
$\rho_{up} = \frac{N_{up}}{N_r} \quad (6)$
a_{in} :Solar absorptivity ρ_{up} :Upward reflectivity

(2) STEP2 日射反射性能 (積算値) の算出

入射する直達日射量が時刻により異なることを考慮するために、STEP1により算出した時刻別の吸収率・反射率と入射する直達日射量により各日の日積算日射量を算出する。入射する直達日射量は Bouger の式 (大気透過率=0.7) により算出する。尚、本稿では日射の入射方向に対する反射特性の把握を趣旨としているため、指向性を持たない天空日射については分析を行わない。

(3) STEP3 日射反射性能の比較

STEP2により算出した日積算日射量をもとに1日を通した日射吸収率・上向き反射率を算出し、季節による比較を行う。W/B における結果を Fig.12 に、MIRO/B における結果を Fig.13 に示す。この結果をもとに以下で考察を行う。

4.3. 考察

1:2 型の MIRO/B では、夏季の日射吸収率を約 60% 程度に抑え、冬季は約 90% 程度まで高める効果が得られ、夏の冷房負荷を抑制し、さらに冬季の暖房負荷を低減することが期待できよう。また、夏季の上向き反射率も 90% 以上と大きい値を示し、ヒートアイランド抑制につながる結果となった。

Table.2 計算条件とケーススタディ

Orientation	South side		
Date	August 21	December 21	
Times of day	True solar time 8-16		
Reflector shape	1:1 type	1:2 type	1:3 type

Table.3 Construction of reflective surface material

Name	Reflective surface I	Reflective surface II
W/B	White diffusion surface	Black absorbing surface
MIRO/B	Aluminum bright surface	Black absorbing surface

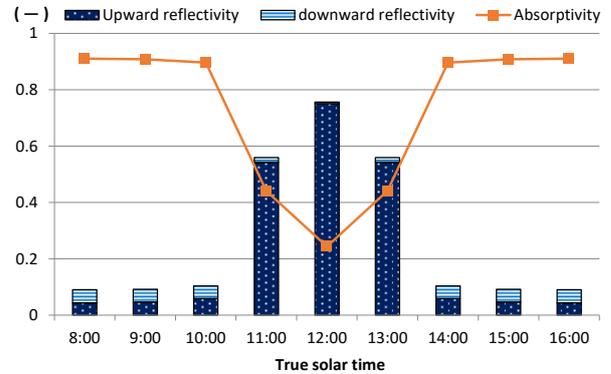


Fig.10 Solar absorptivity · reflectivity (Value by time)

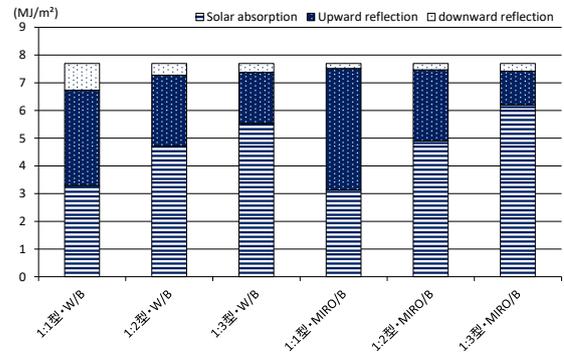


Fig.11 Daily solar radiation

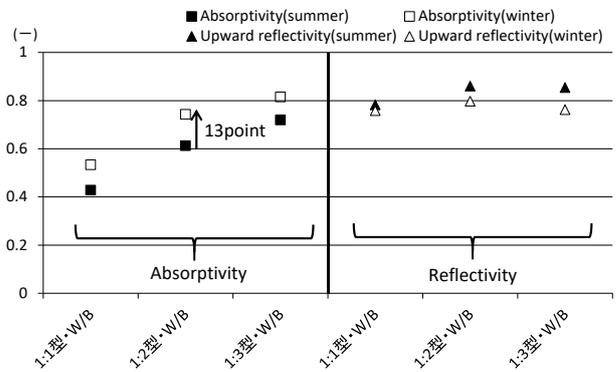


Fig.12 Comparison of reflection performance (W/B)

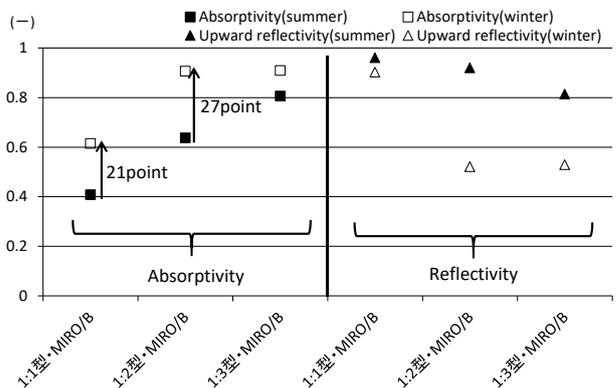


Fig.13 Comparison of reflection performance (MIRO/B)

5. 街路モデルを用いた数値計算

5.1. はじめに

これまでに、折板状反射体単体の数値計算概要と結果について示してきたが、街路を模擬した数値計算においては、その計算方法を拡張する必要がある。拡張の方法としては、まず折板状反射体を設置した壁面に粒子が入射した場合、反射体における開口面の入射点をランダムに決定し、その点から入射した粒子の反射計算を行う。その計算から得られた粒子の反射方向を保存し、壁面の入射点において保存した方向へと再び粒子を射出する。

5.2. 街路形状モデル

本研究では、Y軸正を北、X軸正を東としたD/H（建物間隔Dに対する建物高さH）が1の街路形状モデルを作成した。Fig.14の射出面よりエネルギー粒子を射出する。射出した粒子は折板状反射体を設置した壁面へと入射し、反射あるいは吸収される。対向壁面と地表面は完全吸収面としており、最終的にこの面に吸収された粒子数により、反射量を算出する。尚、Fig.15のように壁面と地表面を周期境界面で囲むことで無限に長い東西街路を想定する。

5.3. 計算条件とケーススタディの構成

計算条件として、射出面に与える粒子数は8120点とし、入射角は夏季・春秋季・冬季の南中時太陽高度を基に設定している。この前提条件のもと、エネルギー粒子の粒子数を N_{ray} 、反射体設置壁面へ入射したエネルギー粒子数を N_{in} 、反射体を設置した壁面に吸収された粒子数を N_{absorb} 、地表面に吸収された粒子数を N_{ground} 、対向壁面に吸収された粒子数を N_{wall} とし、以下の式(7),(8),(9)に示す項目を算出する。これにより、折板状反射体を壁面に設置した際に地表面や対向壁面へと与える影響を把握する。計算条件とケーススタディをTable.4に示す。

5.4. 計算結果

上述のように算出した反射性能をFig.16に示す。地表面方向への反射量はW/B、MIRO/BにおいてW/Wと比較すると全ての形状で抑制することができた。対向壁面方向への反射量もW/B、MIRO/Bでは、ほとんどのケースで抑制することができたが、MIRO/B 1:1型の50度・70度では、鏡面反射の反射角が小さくなるため、対向壁

面方向の反射量が大きくなってしまったことが分かった。

6. まとめ

折板状反射体における数値計算により、1:2型のMIRO/Bでは、夏季に日射吸収率を60%程度に抑え、冬季には約90%まで高めることができ、季節によって反射率が可変であることを明らかにした。また、街路モデルを用いた数値計算により、夏季、冬季ともに側壁面の高反射化対策としての有用性を示した。

【参考文献】

- [1] 古林薫ほか「折板状反射面を有する建物壁面の下向き日射の低減効果」空気調和・衛生工学会論文集 (247), 1-7, 2017-10
- [2] 西岡真穂ほか「建物外皮の高反射化を目的とする指向性反射体の研究—コーナーキューブ型反射体の数値シミュレーション—」日本熱物性シンポジウム講演論文集, 2012-10, pp.152-154
- [3] E. Lafortune.etal “Using the modeified Phong reflectance model for physically based rendering” Technical Report CW197, Dept. Comp. Sci, K.U. Leuven(1994)

$\rho_{ground} = \frac{N_{ground}}{N_{in}} \quad (7)$
$\rho_{wall} = \frac{N_{wall}}{N_{in}} \quad (8)$
$a_{in} = \frac{N_{absorb}}{N_{in}} \quad (9)$
ρ_{ground} : Ground reflectivity ρ_{wall} : Opposing wall reflectivity a_{in} : Receiving surface absorptivity

Table.4 Calculation condition and case study

Number of particles	8120 pieces		
Angel of incidence	30°	50°	70°
Reflector shape	1 : 1 type	1 : 2 type	1 : 3 type
Reflective surface material	W/B	W/W	MIRO/B

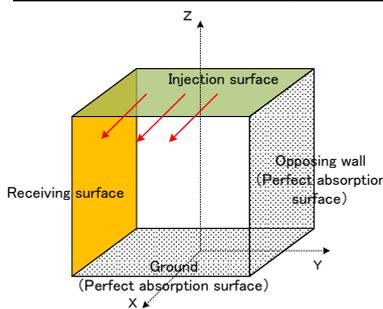


Fig.14 Street model

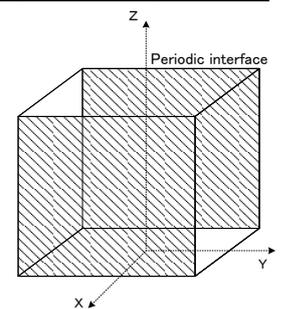


Fig.15 Periodic interface

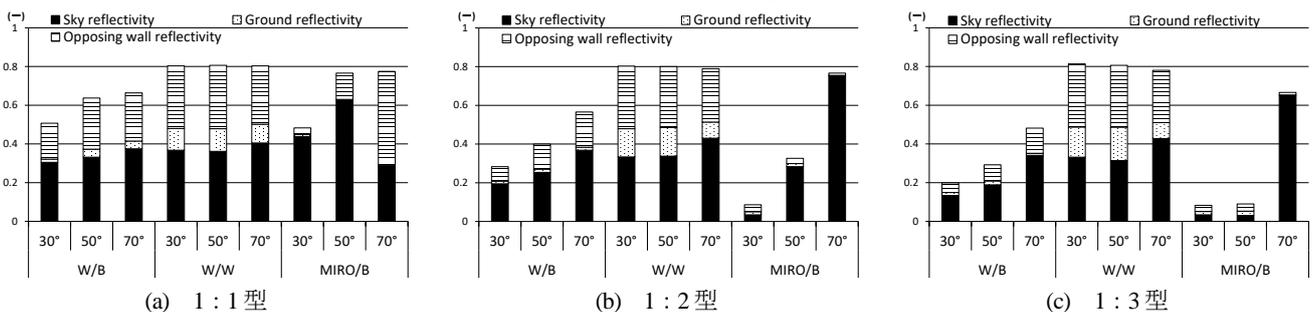


Fig.16 Reflection performance in street model

既成市街地の二棟建物間の熱源融通による省エネルギー効果に関する研究 Energy saving effect by thermal interchanging system among two buildings in built-up area

○林 耿 程 (神戸大学) 竹 林 英 樹 (神戸大学)

GengCheng Lin*¹ Hideki TAKEBAYASHI*¹

*¹Kobe University

Energy-saving effect by the thermal interchanging system among two buildings, which uses optimum heat sources in those buildings, is evaluated by the energy simulation. Objective buildings for office, commercial, hotel use are selected from Sannomiya district in the center of Kobe city. Hourly cooling and heating loads of objective buildings are calculated by using the energy simulation tool 'EnergyPlus.' The optimum heat sources are selected based on the calculation results of cooling and heating loads. The simulation results of the energy interchanging system among two buildings are evaluated in comparison with individual case.

1. はじめに

スマートシティでは、複数の建物間でエネルギー供給をコントロールすることで、機器の高効率運転により省CO₂化が図られる。著者らはシミュレーションにより推定した時刻ごとの電力と熱の負荷に基づいて複数の建物間でのエネルギー融通による省エネルギー効果を検討し、コージェネレーションシステムの導入とエネルギーの面的利用による省エネルギーの可能性を検討した¹⁾。

本研究では、既報¹⁾で推定した時刻ごとの熱負荷に基づき、建物間熱源融通システムの導入効果を検討した。具体的には、対象とする二棟の建物間に融通導管を設置し、融通導管の熱損失、搬送動力も考慮して、熱源融通システムの導入効果を分析した。

2. 代表建物の負荷特性

神戸市中央区三宮地区より用途・規模ごとに選定した代表建物を Table.1 に示す。熱負荷は熱負荷シミュレーションソフト EnergyPlus²⁾により算出した。

熱源融通の導入可能性を検討するために、各建物における年間 8760 時間の計算結果を暖房負荷降順、冷房負荷降順に並べ変えて考察した (Fig.1~3)。商業用途の建物では、Commerce C の冷暖房負荷は小さい。他の用途と比較して冷暖房負荷の大きい時間が多い。事務用途の建物では、Office A, B, D は規模に応じた値であるが、Office C は危機管理センターが 24 時間稼働しており、小さな冷暖房負荷の時間が

多い。Hotel A は冷暖房負荷の小さい時間が多い。住宅用途の House A は冷房負荷より暖房負荷が大きい。

冷暖房負荷の小さい時間が長い Hotel A は、冷暖房負荷の大きい商業用途の建物と熱源を融通することで高効率な運転の可能性がある。事務所はほぼ同様の負荷変動であるため、住宅は個別式が想定されるため、対象外とした。これらの建物との距離を考慮し、Table.2 の検討ケースを設定した。

Table.1 Representative building in each building use and scale

Use	Scale	Representative building
Office	Large	Office A
	Medium	Office B
		Office C
	Small	Office D
Commerce	Large	Commerce A
	Medium	Commerce B
	Small	Commerce C
Hotel	Medium	Hotel A
House	Medium	House A

Table.2 Combination case of energy interchanging system

Case	Combination
Case1	Commerce A + Commerce C
Case2	Commerce A + Hotel A
Case3	Commerce B + Hotel A

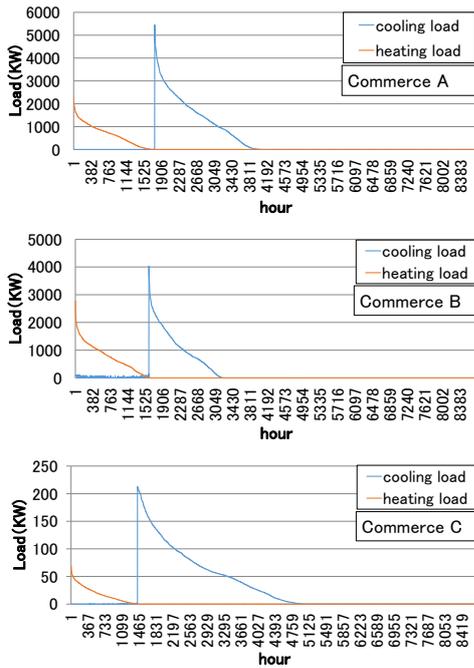


Fig.1 Air-conditioning load in commerce buildings

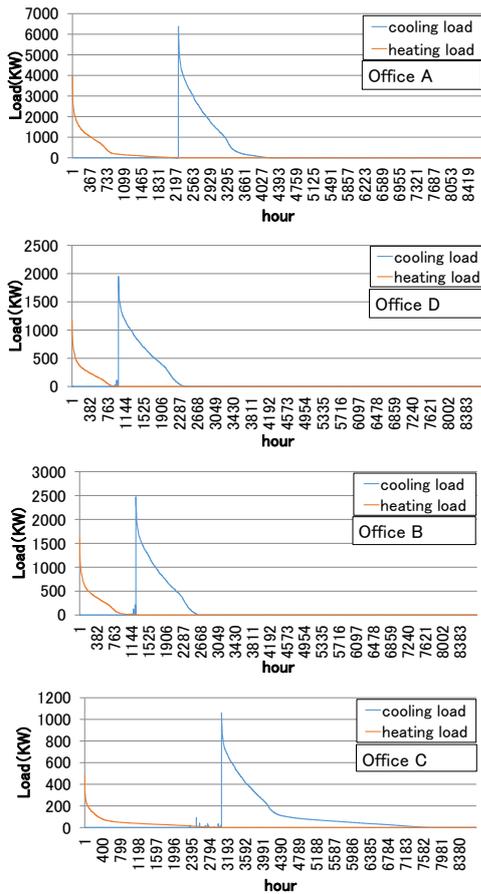


Fig.2 Air-conditioning load in office buildings

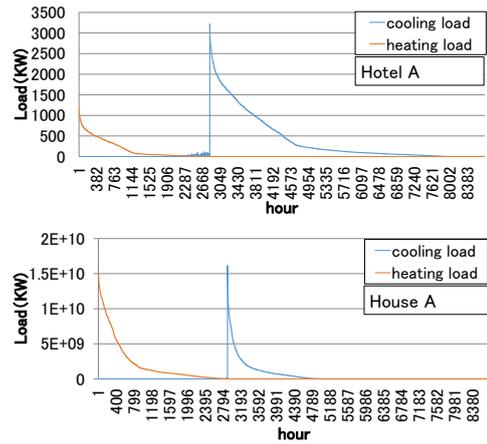


Fig.3 Air-conditioning load in hotel and house building

3. 融通導管の熱損失，搬送動力の算定方法

融通導管の熱損失は Eq.1 より算出した。融通導管の時刻熱供給量は Eq.2 より算出した。建物間の搬送動力は管路の損失水頭に基づいて算出した。管路の損失水頭は直管の損失水頭+曲管の損失水頭+出入口の損失水頭と設定した。直管の損失水頭はダルシー・ワイスバッハの Eq.3 より算出した。曲管の損失水頭と出入口の損失水頭は Eq.4 より算出した。搬送動力は Eq.5 より算出した。

$$Q_{共} = \frac{2\pi(T-\theta)}{\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{2}{d_3 \alpha}} \quad \text{Eq.1}$$

$$Q_{時} = \rho c \times \pi r^2 v \Delta t \quad \text{Eq.2}$$

$$H_{直} = k \times \frac{v^2}{2g} \times \frac{L}{d} \quad \text{Eq.3}$$

$$H_{曲} = f \times \frac{v^2}{2g} \quad \text{Eq.4}$$

$$P = \rho g Q (H_{直} + H_{曲}) / \eta \quad \text{Eq.5}$$

ここで、

$Q_{共}$: 単位長さ当たりの伝熱量[W/m],

θ : 熱媒温度[K],

T : 共同溝内温度[K],

α : 共同溝内ジャケット表面の総合熱伝達率 (9.3[W/(m²K)]),

λ : 各部材の熱伝導率[W/(m k)],

d : 管の各層の外径[m],

$Q_{時}$: 導管の時刻熱供給量[J],

ρ : 冷媒(水)の密度 (1000[kg/m³]),

c : 水の比熱 (4.2×1000[J/(kgK)]),

v : 熱媒の流速 (2[m/s]と想定),

- r : 融通導管内半径 (0.2286[m]),
- Δt : 温度差 (5[K]),
- $H_{直}, H_{曲}$: 直管と曲管の損失水頭[m],
- k : $0.02+0.0005/d$,
- f : 損失係数[-],
- g : 自由落下の加速度 (9.8[m/s²]),
- L : 直管の長さ[m],
- η : ポンプの効率 (0.7[-]と想定) である.

4. 熱源融通システムの導入効果

代表建物を融通導管で連結して熱融通ネットワークを設定し³⁾, 融通導管の熱損失や搬送動力を考慮して熱源融通システムの導入効果を検討した.

4.1 年間の導入効果

年間の導入効果(一次エネルギー削減量)を Table.3 に示す. Commerce A と Commerce C で融通した場合 (Case1) は, 熱源の容量の差が大きく, 融通の効果は少ない. Commerce A (Case2), Commerce B (Case3) と Hotel A で融通した場合は導入効果が期待できる.

Case2 と Case3 の融通効果は主に中間期の 5, 6, 9, 10 月に生じた. 年間の融通状況を Fig.4, 5 に示す. 融通による一次エネルギー消費量の低下が確認される.

Table.3 Annual energy savings by interchanging

Case	Individual (GJ)	Interchanging (GJ)
Case1	14, 481	14, 268 (-1. 4%)
Case2	22, 570	20, 848 (-7. 6%)
Case3	16, 678	15, 680 (-6%)

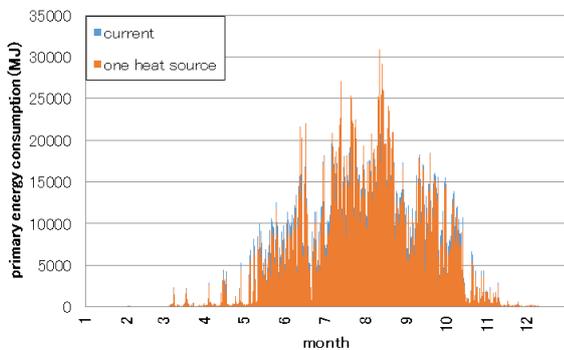


Fig.4 Primary energy consumption by interchanging in case2

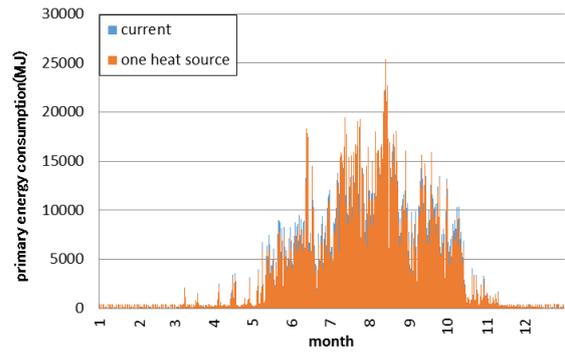


Fig.5 Primary energy consumption by interchanging in case3

4.2 Case2 と Case3 の熱源融通の実態分析

熱源融通の実態は, 以下に分類される.

- ①Commerce A, B→Hotel A
- ②Hotel A→Commerce A, B
- ③融通なし

Commerce B, Commerce A, Hotel A の熱源容量は, それぞれ 14,511[MJ], 19,637[MJ], 11,579[MJ]であり, Hotel A は Commerce A, B よりも小さい. 従って, 熱源機器の効率曲線が同じであれば, Hotel A の熱源容量を超えるまでは, 負荷率の高い熱源機器を優先して使用するため, ①Hotel A→Commerce A, B が優先され, 熱源容量を超えると, ②Commerce A, B→Hotel A となる. 更に, Commerce A, B の熱源容量を超えると, ③融通なしとなる.

Case2 と Case3 の月毎の熱源融通の実態を Table.4, 5 に示す. Case2 では, 6 月と 9 月に融通量が Hotel A の容量を超える場合が多く, ①Commerce A→Hotel A の融通により 1.7%, ②Hotel A→Commerce A の融通により 5.9%の一次エネルギー消費量が削減された. Case3 では, ①Commerce B→Hotel A の融通時間は短く, ②Hotel A→Commerce B の融通により 4.9%の一次エネルギー消費量が削減された. 年間を通して Case3 より Case2 の融通時間が長いため, 一次エネルギー消費量の削減効果が大きい.

Table.4 Monthly energy savings by interchanging in case2

	①Hotel A→Commerce A			②Commerce A→Hotel A			③no energy interchange Hour(h)	Primary energy consumption of no energy interchanging (MJ)
	Hour (h)	Amount of energy interchanging (MJ)	Reduction of primary energy consumption(MJ)	Hour (h)	Amount of energy interchanging(MJ)	Reduction of primary energy consumption(MJ)		
may	308	1,378,596	234,375	2	23,015	1,922	0	1,775,582
june	299	1,927,383	314,075	50	743,011	33,934	10	3,425,345
september	251	1,782,995	273,932	109	1,488,605	91,744	0	3,875,426
october	308	1,182,390	180,816	12	145,616	11,475	0	1,672,978
yearly	1661	8,731,101	1,323,810 (5.9%)	558	8,111,780	397,785 (1.7%)	111	22,569,625

Table.5 Monthly energy savings by interchanging in case3

	①Hotel A→Commerce B			②Commerce B→Hotel A			③no energy interchange Hour(h)	Primary energy consumption of no energy interchanging (MJ)
	Hour (h)	Amount of energy interchanging (MJ)	Reduction of primary energy consumption (MJ)	Hour (h)	Amount of energy interchanging(MJ)	Reduction of primary energy consumption (MJ)		
may	234	959,962	133,723	0	0	0	0	1,328,194
june	230	1,333,171	190,798	27	316,577	17,781	13	2,476,802
september	207	1,360,241	185,020	63	720,048	46,554	10	2,934,884
october	248	878,994	113,294	0	0	0	0	1,181,547
yearly	1289	6,099,555	809,379 (4.9%)	300	3,594,526	188,572 (1.1%)	183	16,677,675

5. 結論

神戸市中央区三宮地区における用途・規模ごとの代表建物の負荷特性に基づいて熱源融通の検討ケースを設定した。代表建物を融通導管で連結して熱融通ネットワークを設定し、融通導管の熱損失や搬送動力を考慮して、熱源融通システムの導入効果を検討した。

熱源の容量の差が大きいCommerce AとCommerce Cで融通した場合（Case1）は、融通の効果は少ないと算定された。Commerce A, BとHotel Aで融通した場合（Case2, Case3）は、一次エネルギー消費量の削減効果が7.2%, 6%と算定された。Case2とCase3の融通効果は主に中間期の5, 6, 9, 10月に生じた。熱源融通の実態を分析したところ、Case3では、Commerce B→Hotel Aの融通時間は短く、Hotel A→Commerce Bの融通が大部分を占めていた。Case2では、Commerce A→Hotel Aの融通が多く、年間を通してCase3よりCase2の融通時間が長いため、一次エネルギー消費量の削減効果が大きいと考察された。

謝辞 本研究の遂行にあたり日建設計総合研究所の范理揚氏、鈴木義康氏にご支援頂いた。謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐々木和樹, 竹林英樹: 熱源シミュレーションによる既成市街地におけるエネルギー消費量の分析に関する研究, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A83, 2017.3
- 2) EnergyPlus: <https://energyplus.net/>
- 3) 本田輝幸, 林徹夫, 龍有二, 野村幸司, 入部真武, 八木敏明: 地域冷暖房の最適計画に関する研究—その1 地域冷暖房導入による機器容量の減少と地域導管の熱損失, 日本建築学会九州支部研究報告, 第38号, 1999.3

寒冷気候に適した超高断熱・高気密住宅の熱・湿気性能に関する数値シミュレーション
(その1) PHIUS+ 2015 基準を満たすモデル住戸の性能評価

**Numerical Simulations on Energy and Moisture Control Characteristics
for the High Performance Detached Houses Designed for the Cold Climate Zone
(Part1) Performance Evaluations for the PHIUS+ 2015 Candidate Model**

芝池 英樹 (京都工芸繊維大学) 水野上 徹 (京都工芸繊維大学)
○松本 舞 (京都工芸繊維大学)

Hideki SHIBAIKE*¹ Tohru MIZUNOUE*¹ Mai MATSUMOTO*¹

*¹ Kyoto Institute of Technology

In this paper, a detached timber framed model house with three kinds of building envelop performances on thermal insulation and airtightness have been examined by using WUFI Plus 3.1, that is, the hygrothermal building simulation application, on their annual air conditioning load for heating/cooling and humidification/dehumidification as well. The specified climate data is the AmeDAS reference year of Sapporo. The result on the computational condition with PHIUS+ 2015 envelope assemblies devised the balanced ventilation system with the heat recovery circuit (HRV) shows the lowest sensible load for heating and cooling. However the dehumidification load is greater than the rest of results for the inferior performances of building envelop assemblies, such that it could assume to install the dedicated dehumidification equipment.

1. はじめに

温室効果ガスの排出削減は喫緊の課題であり、これまで我が国では努力目標だった省エネルギー基準が、2020年以降の新築建物では義務化され、住宅のエネルギー性能への関心は増々高まっている。また、省エネルギー性能向上と屋内の温熱快適性を両立させる高品質な屋内環境が消費者ニーズを形成し、高断熱・高気密住宅の需要が増えている。住宅におけるエネルギー消費量の約30%は暖房負荷によるものであり、早急なエネルギー性能向上策が望まれる。過度な暖房、もしくは冷房・除湿は年間空調負荷を増大させる要因であるが、快適性を損なう室内温・湿度設定では、冷・暖房エネルギー消費量の予測結果が実態を反映せず、削減効果を過大評価する危険性がある。

本研究では、空調(冷・暖房、除・加湿)負荷抑制の観点から、寒冷地域に求められる超高断熱・高気密住宅の断熱・気密性能、熱回収型換気装置等が空調負荷抑制にもたらす効果を、建物の非定常熱・湿気同時移動を計算できる Windows アプリケーション WUFI Plus Ver3.1 を用いて数値的に検討する。即ち、札幌市に立地する総2階建て陸屋根木造戸建住宅モデルに関して、外皮の断熱レベルと空調負荷(冷・暖房、除湿・加湿)の関係、さらに換気熱回収の有無、外気冷房の有無が空調負荷削減にもたらす効果を検討する。外皮断熱・気密性能レベルは、高性能から降順で PHIUS+ 2015(Passive House Institute US)基準、札幌版次世代住宅基準の High Level、札幌版次世代住宅基準の Standard Level の3種類を設定する。

2. WUFI Plus の計算方法^{3), 4)}

Windows アプリケーション WUFI Plus は、単方位外皮での1次元非定常熱・湿気同時移動の数値予測を、複数方位の外壁、屋根および床に応用して、建物内多数室での非定常温・湿度変動と空調負荷変動、および外皮内の温・湿度変動等の定量的検討を可能にする数値予測ツールである。室内各ゾーンのCO₂濃度予測も可能である。さらに、風力・浮力・機械換気等による多数室換気計算も連成させることが可能である。本報(その1)では、単室での温・湿度と空調負荷の非定常変動を検討する。

3. モデル住宅の概要

計算対象とした住宅モデルは、「北の住まいの熱環境計画」2015年版¹⁾に示された木造戸建住宅モデルをもとに作成した。120mm角の在来軸組工法を前提に、居住者は計4名(夫婦と子供二名)、延床面積118.42m²、室容積

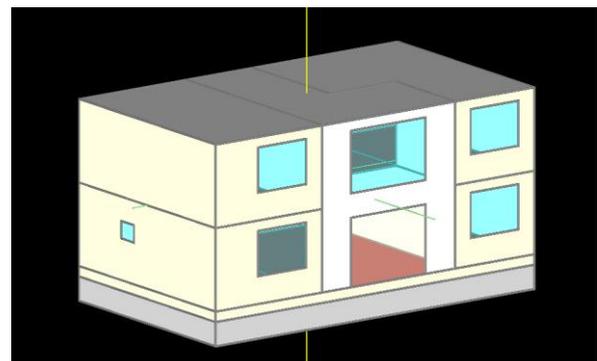


Figure.1 Overview of the model house in WUFI Plus 3.1

Table.1 Thermal performances of building envelop combinations

	Part	U-Value(W/m ² K)	U _A -Value(W/m ² K)	Continuous thermal Insulation	Cavity Insulation
Standard Level	Roof	0.136	0.280	PH* ¹ 50mm	GW* ² 120mm
	Wall	0.201		PH 10mm	GW 120mm
	Base Floor	0.277		—	XPS* ³ 100mm
	Base Wall	0.22		PH 50mm	XPS 50mm
	Window	1.33(SHGC:0.29)		—	—
High Level	Roof	0.136	0.222	PH 50mm	GW 120mm
	Wall	0.141		PH 50mm	GW 120mm
	Base Floor	0.144		XPS 200mm	—
	Base Wall	0.161		XPS 100mm	PH 50mm
	Window	1.33(SHGC:0.29)		—	—
PHIUS+ 2015	Roof	0.095	0.156	PH 110mm	GW 120mm
	Wall	0.103		PH 100mm	GW 120mm
	Base Floor	0.144		XPS 200mm	—
	Base Wall	0.105		XPS 200mm	PH 50mm
	Window	0.8(SHGC:0.59)		—	—

PH*¹:フェノバボード (熱伝導率: λ=0.019W/m-K) GW*²:グラスウール (熱伝導率: λ=0.032W/m-K)

XPS*³:押出法ポリエチレンフォーム (熱伝導率: λ=0.03W/m-K)

Table.2 Computational conditions for cases

Case#	Envelop Level	C-Value (cm ² /m ²)	Natural ACH (1/h)	HRV efficiency	Bypass Ventilation
1	Standard Level	1.0	0.196	—	×
2	Standard Level	1.0	0.196	0.87	×
3	High Level	0.5	0.098	—	×
4	High Level	0.5	0.098	0.87	×
5	High Level	0.5	0.098	0.87	○
6	PHIUS	0.5	0.098	—	×
7	PHIUS	0.5	0.098	0.87	×
8	PHIUS	0.5	0.098	0.87	○

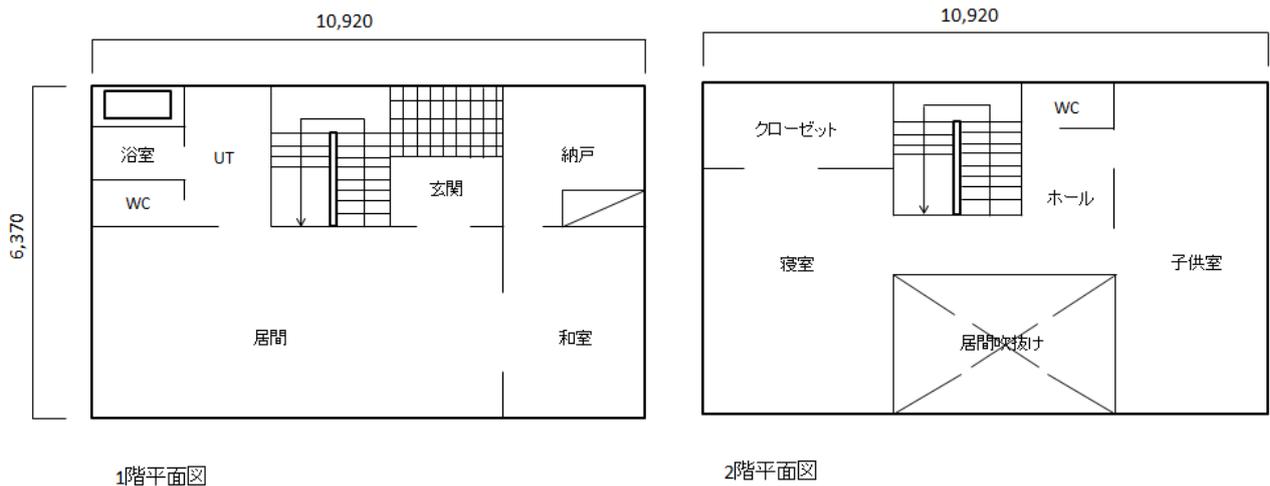


Figure.2 Floor Plans of the Model House

333.98m³である。内部発熱（対流熱、放射熱）や水蒸気発生量等に関しては、建築環境・省エネルギー機構（Institute of Building Environment and Energy Conservation, 以下 IBEC と略称）が想定した居住者の1時間ごとの生活スケジュール⁵⁾から作成し、平日と休日の2パターンで設定している。モデル住宅のゾーニングは、元は台所、居間、和室、浴室、洗面所、一階トイレ、一階ホール、二階トイレ、二階ホール、寝室、子供室、クローゼットに一階天井裏および屋根裏を加えた計14ゾーンに分かれていたが、計算の簡略化のため本報（その1）では全1ゾーンとし、次報（その2）では、一階（東・西）、二階（東・西）、階段室、床下の計4ゾーンに統合して計算している。建物外皮の断熱・気密レベルは各基準を参考に、性能の異なる3種類の外皮構成を設定する。外皮性能レベルに関してはTable.1に、検討比較を行うケースに関してはTable.2に各々示す。なお、気密性能はASTME1827-96⁶⁾の換算法に基づいてPHIUS+2015は差圧50Paでの外皮単位面積当たりの漏気量から、札幌版次世代住宅基準では9.8Pa減圧時のC値（相当すきま面積）から、各々差圧3Pa時の漏気回数を求めて入力している。

4. 外皮の断熱・気密性能の空調負荷削減効果

計算期間を1年間（助走期間略1ヶ月経過後、2017年10月1日から2018年10月1日まで）として、3.で述べた3種類の外皮構成を採用したモデル住宅に対して、外皮断熱性能や気密性能、および換気装置の熱回収機能が空調（顕熱）負荷削減に与える効果を比較する。

4.1 空調負荷（冷・暖房、除・加湿）の比較

各モデルに対する空調（顕熱）負荷の年間変動状況をFigure.3に示す。暖房負荷は外皮断熱性能に依存して大きく変化し、断熱性能が向上するほど暖房負荷は大きく減少することを確認した。寒冷気候のため冷房負荷は量的には控えめとなったが、PHIUSモデルが最大となった。

また除湿負荷は、PHIUSモデルとHigh Levelモデルで大差なく、Standard Levelよりも少ない値を示した（Table.3参照）。加湿負荷はPHIUSモデルが最大を示した。

4.2 換気装置の熱回収換気機能の効果

熱回収機能のある第一種換気システムの空調負荷削減効果を検討した。熱回収機能のない第1種換気システムでは、冷気が直接室内に給気されるため、暖房室でも冷気を感じたり、厳寒期には給気口付近で結露し結露水が滴下して室内を汚損して、放置するとカビが発生する危険性もある。一方、熱回収型換気装置は、新鮮な外気を室温に近づけて給気する、冷暖房で快適に保たれた室内温熱環境を損なうことなく、屋内空気を排気可能である。熱回収機能のある換気装置により冷・暖房に必要な空調（顕熱）負荷は削減され、外皮の断熱・気密性能が向上するほど、期待される効果は大きくなる（Figure.3参照）。

4.3 バイパス換気への切り替えによる外気冷房効果

High LevelモデルとPHIUSモデルではバイパス換気による外気冷房（ナイトページ：以下NP）を併用し冷房負荷削減効果を検討した。NPへの切り替えは顕熱制御とし、オーバーヒートで冷房負荷が発生する4月～10月を対象に外気温度が室内温度より2℃以上低い場合、通常時の2倍の換気量を増やすことで評価した。

外気冷房は冷房・除湿負荷に大きく影響し、外気冷房により冷房負荷は減少するが、除湿負荷は増加し、High Levelモデルでは除湿負荷の増加より冷房負荷の減少が大きく効果が認められるが、PHIUSモデルでは冷房負荷減少が下回りマイナス効果となっている（Table.3、Figure.3参照）。外気温が最高値を示す8月1日前後3日間のPHIUSモデルに対する室温・外気温と冷房・除湿負荷の時間変動をFigure.4に示す。冷房負荷のない時間でも大きな除湿負荷が発生しており、外気導入量の調整、エンタルピー制御による外気冷房等の検討余地が残る。

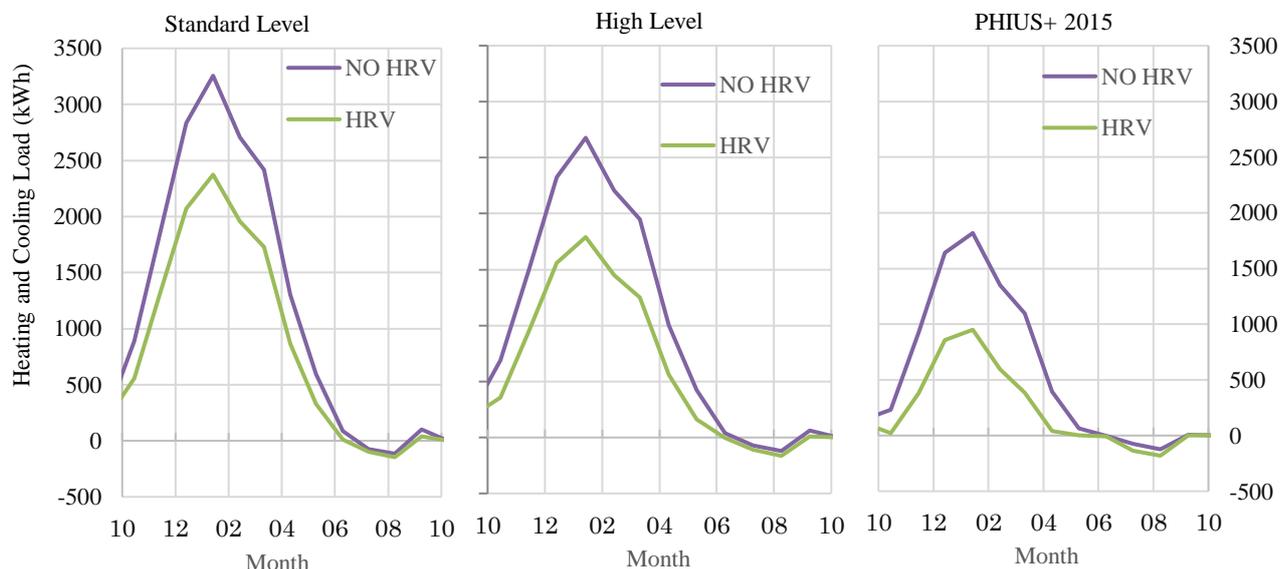


Figure.3 Monthly Profiles of Heating and Cooling (Sensible) Loads for Cases

4.4 外皮断熱・気密性能による合板含水率変動への影響

北側外壁の外装下地材（吹込みガラスウール外側に配置される構造用合板）の5年間の含水率変動を WUFI Pro6.1 で計算し、外皮の断熱・気密性能による影響を比較検討した。断熱・気密性能が高いほど下地材含水率は早く減少するが、これらの断熱・気密性能では、構造用合板の耐久性を脅かす影響は観られず、健全な減少を示した (Figure.4 参照)。

5. まとめ

本報では、建物の熱・湿気性状を数値予測できる Windows アプリケーション WUFI Plus 3.1.1.0 を用いて、断熱・気密性能の異なる3種類の木造外皮を想定した戸建て住宅モデルに関して、空調負荷（冷・暖房、除湿・加湿）や換気装置の熱回収機能の有無、温度制御によるバイパス換気を併用した外気冷房の影響を数値的に検討した。

PHIUS+ 2015 基準の住宅モデルは、最も断熱・気密性能が高く厚い連続断熱層を備えており、暖房負荷は最小となったが、冷房・除湿負荷は僅差ながら最大となった。

熱回収型換気システムの空調負荷削減効果は、どのモデルでも顕著に表れた。室内外温度差が大きい暖房期間

Table.3 Accumulated Cooling and Dehumidification Loads

Case	Bypass	Cooling (kWh)	Dehumid. (kWh)
High Level	×	274.72	272.75
High Level	○	163.24	431.25
PHIUS+	×	326.77	251.98
PHIUS+	○	146.80	475.62

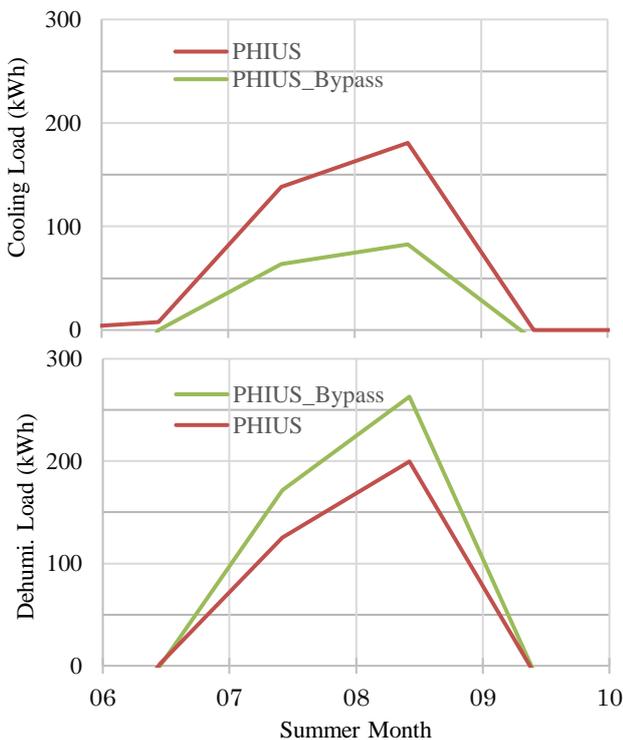


Figure.4 Bypass Effects on Monthly Profiles of Cooling and Dehumidification Loads for PHIUS Model

において特に有効で機能している。冷房期間の効果は縮小し、バイパス機能を併用して外気冷房による削減効果を加えるには、外気導入量の調整と、エンタルピー制御等による切り替え判断に検討余地が残こされている。

参考文献

- 1) 一般社団法人北海道建築技術協会, 北の住まいの熱環境計画 2015年, 2015
- 2) 札幌市ホームページ, 札幌版次世代住宅基準について, <http://www.city.sapporo.jp/toshi/jutaku/10shien/zisedai/zisedai.html>
- 3) Künzel, Harywig M, Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One- and two-dimensional calculation using simple parameters, IRB Verlag, 1995
- 4) H.M. Künzel, Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope, Solar Energy 78, 2005
- 5) 一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構, 住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説
- 6) ASTM Inteatonal, Standard Test Methods for Determining Airtightness of Building Using an Orifice Bloewr Door, 2007
- 7) 菊田弘輝, 他5名 高断熱・高気密住宅の室内環境と暖房エネルギー消費量に関する実態調査—札幌市内の北方型住宅を対象として—日本建築学会環境系論文集, 2011

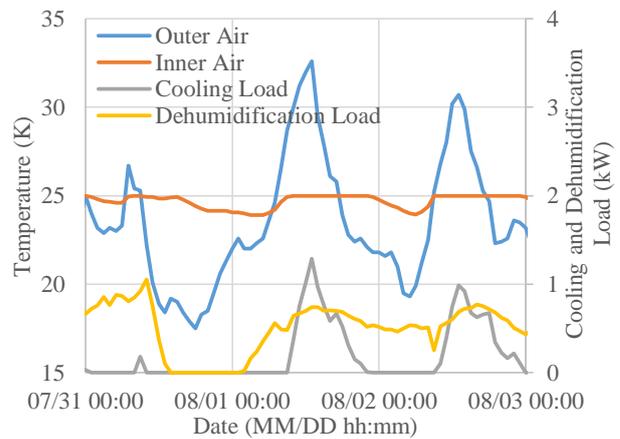


Figure.5 Temporal Profiles of Indoor Temperature, Cooling and Dehumidification Loads

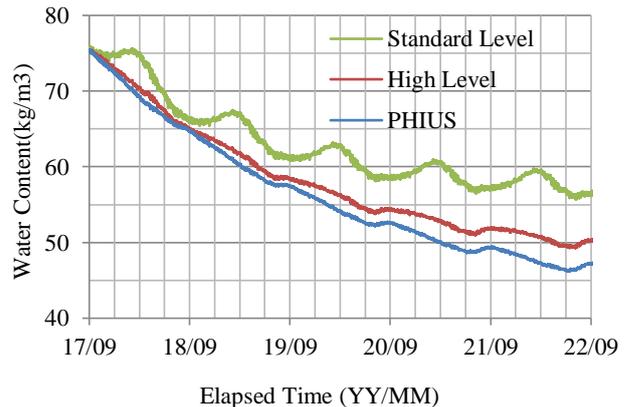


Figure.6 Long Term Variations of Water Content in Plywood

**屋外への開口部を持つ地下街での
IoT を用いた空調負荷制御に向けた気流性状に関する実態調査と分析
Field Survey and Analysis on Airflow for Air Conditioning Load Control using IoT in an
Underground Mall with Outdoor Opening**

○藤本 色葉 (神戸大学)

竹林 英樹 (神戸大学)

長 廣 剛 (神戸大学)

進藤 宏行 (日建設計総合研究所)

Iroha FUJIMOTO*¹ Hideki TAKEBAYASHI*¹ Tsuyoshi NAGAIHIRO*¹ Hiroyuki SHINDO*²

*¹ Kobe University *² NIKKEN SEKKEI Research Institute

In recent years, commercial use of underground mall is progressing. In such a space, the energy consumption required for air conditioning is large, due to a large number of visitors and large outdoor openings. In order to reduce energy consumption and CO₂ emissions in these spaces, we have to control the air conditioning equipments highly efficiently, respond to heat load from outside air flowing from large openings and visitor's behavior. In this study, the possibility of outdoor air cooling is examined by measurement data. Airflow distribution under the natural ventilation condition is considered based on the CFD results.

はじめに

近年、地下街や駅の通路などの商業利用（いわゆる駅ナカ空間）が進んでいる。こうした空間では、人の往来が多く、屋外への開放部を持つなどの特性から、冷暖房などに要するエネルギー消費量は大きい。現状では、省エネルギーに配慮した冷暖房や換気はあまり行われておらず、エネルギー消費量・CO₂ 排出量の削減ポテンシャルが大きいと考えられる¹⁾。これらの空間の大幅な省エネ・CO₂ 削減のためには、高効率な設備機器の導入とともに、開放部から流入する外気による熱負荷への対応や、利用者の行動特性を踏まえた空調・換気制御手法の開発が求められる。本研究では、既存地下街における温湿度やファンの風量等の実測データに基づき、空間の特性を分析し、外気導入による省エネルギーの可能性を検討した。

1. 対象施設の概要

神戸市三宮地区にある三宮地下街(さんちか)の公共通路(Fig.1)を対象とした。床面積は 2,903m² であり、空調面積の 21% を占める。6:00~24:00 に開放される。

公共通路には、天井面の 106 の制気口(吹出し口)、大小 2 箇所のレターンガラリ、南北 2 箇所の大きな屋外開口部が存在する。北側の開口部を開口 A、南側を開口 B と呼ぶ。この 2 開口における外気導入量の制御が

重要である。通路閉鎖時には、開口 A はリングシャッター、開口 B は管理用シャッターにより閉鎖され、開口 A では空気の流出入がある。

公共通路部の給排気ファンの設計風量を Fig.2 に示す。OA ファンは存在しない。

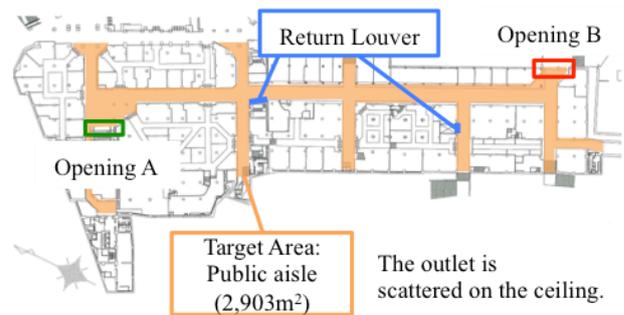


Fig.1 Outline of target area (Public passage)

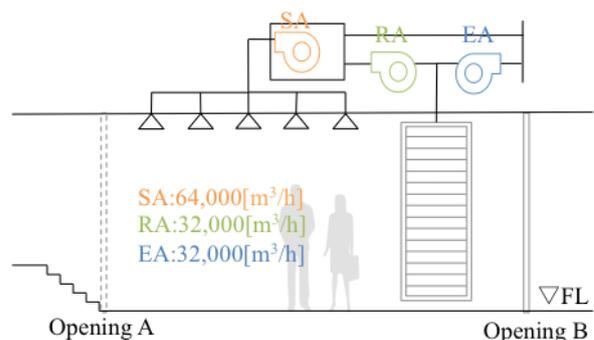


Fig.2 Supply and exhaust fans in public passage

2. 実測データによる現況把握

2.1 夜間調査による気流性状の実態把握

通路が閉鎖された夜間(24:00~6:00)において、営業時間と同じ条件で給排気ファンを運転し、制気口、レターンガラリ、リングシャッターで封鎖された開口 A において計測した風量バランスを Fig.3 に示す。

(1) 制気口風量の計測結果

計測用ダクトとクリモメーターを用いて各制気口の風量を計測した。全ての制気口で実測値が設計値を大幅に下回り、合計風量 6,587m³/h は設計値 64,000m³/h の 1 割程度であった。空調機のファンが 1 台しか運転していなかったためであると考察されたが、ダクトに大きな欠損の可能性もあり、今後精査が必要である。

(2) レターンガラリ風量の計測結果

ガラリ面に計測メッシュを設定し、クリモメーターを用いて風量を計測した。2 箇所のレターンガラリの風量は 31,441m³/h, 2,715m³/h となり、合計 34,157m³/h はファンの設計値 32,400m³/h にほぼ一致した。

(3) 開口 A の風量の計測結果

開口 A に計測メッシュを設定し、クリモメーターを用いて風量を計測した。開口上部では 12,619m³/h が通路から屋外へ流出し、開口下部では 23,899m³/h が屋外から通路へ流入していた。合計では 11,280m³/h の空気が屋外から通路へ流入していた。

2.2 気温鉛直分布の実態把握

通路中央付近におんどりを上中下 3 点に設置し、2017 年 8~10 月に気温を測定した。各月の代表週の測定結果を Fig.4 に示す。日曜日からの 1 週間で、降雨の最も少ない週を選定した。

上と中の気温はほぼ同じで下のみ低い。温度差は、空調停止時間の 20:00~翌 10:00 は約 1℃、空調運転時間の 10:00~20:00 は約 2℃であった。気温の低い下層の空気を搬送して利用者の顔付近に吹き出すことで扇風機効果が期待できる。通路が閉鎖されている夜間には、外気温は低下するが、通路内の気温はあまり低下しない。この時間帯に外気を導入することで、ナイトパーズの効果が期待できる。9、10 月にはほとんどの時間で通路内の気温が外気温を上回っており、外気導入による冷房負荷削減のポテンシャルがある。降雨日を除くと、上中下の気温はほぼ同様の変化を示した。

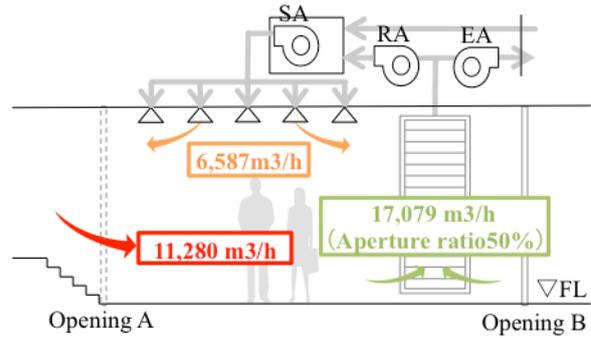


Fig.3 Measurement results of supply and exhaust air balance

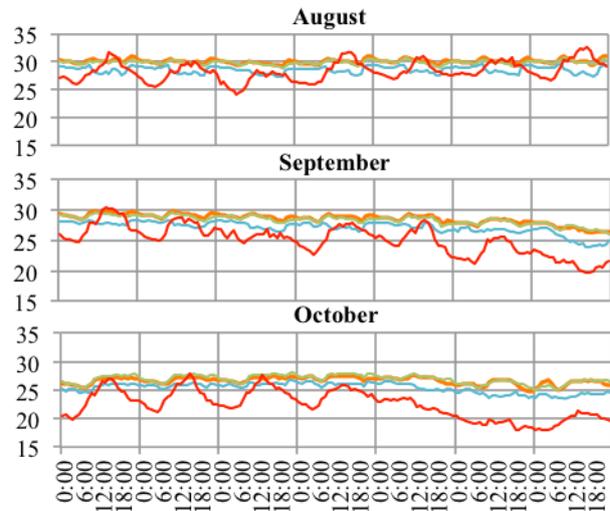


Fig.4 Measurement results of vertical air temperature profile at the center of public passage in representative period in 2017

3. 外気冷房の可能性の検討

3.1 月ごとの外気冷房効果

神戸地方気象台の外気温データを用い、月ごとの外気導入可能時間と全時間に対する割合を算出した。許容条件は厚生労働省が定める「建築物における衛生的環境の確保に関する法律」に基づき、温度は 17~28℃かつ通路内気温以下、湿度は 40~80%と定めた。外気導入可能時間は、8 月は 136 時間(19%)、9 月は 480 時間(75%)、10 月は 369 時間(58%)となった。湿度が 80%を超えた時間は、9 月に 100 時間、10 月に 259 時間あり、湿度の影響で 10 月の導入可能時間が少なくなった。

外気冷房による削減熱量と通路の熱負荷に対する割合を Table.1 に示す。削減熱量は、通路内の気温と外気温の差に EA ファンの設計風量を乗じて算出した。10 月は通路の熱負荷が小さいため 100%を超えた。

Table.1 Potential of outside air cooling in each month

August	
Number of hours available for outside air cooling [h]	136
Average temperature difference between inside and outside [°C]	0.9
Heat load reduction [MJ]	25,058
Heat load of public passage [MJ]	420,552
Ratio[%]	6.0
September	
Number of hours available for outside air cooling [h]	486
Average temperature difference between inside and outside [°C]	3.1
Heat load reduction [MJ]	76,977
Heat load of public passage [MJ]	239,059
Ratio[%]	32.2
October	
Number of hours available for outside air cooling [h]	374
Average temperature difference between inside and outside [°C]	5.8
Heat load reduction [MJ]	142,938
Heat load of public passage [MJ]	117,996
Ratio[%]	121.1

Table.2 Patterns of outside air cooling

Patterns		Cas e1	Cas e2	Cas e3	Cas e4	Cas e5	Cas e6	Cas e7
		Natural ventilation			Mechanical ventilation			
Opening	A	○	×	○	○	○	○	○
	B	×	○	○	○	○	○	○
Fan	SA	×	×	×	○	○	×	○
	RA	×	×	×	×	○	×	○
	EA	×	×	×	○	×	○	○

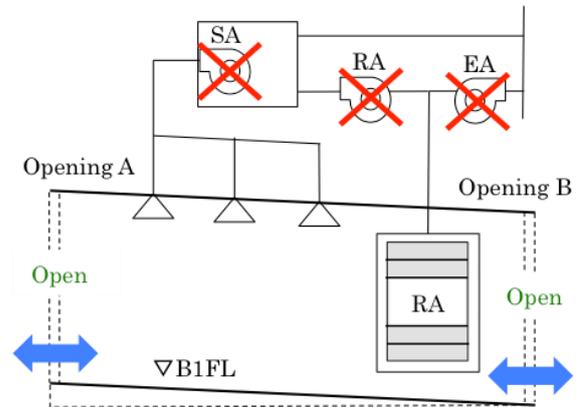


Fig.5 Conditions of fan and opening in Case3

3.2 気流性状の検討

開口部の開閉とファンの運転に基づき、外気導入のパターンを Table.2 に整理した。Case3 (Fig.5) の両側開放自然換気の場合に、開口 A から外部風が流入した際の影響を検討した。開口 A での実測値 0.27m/s、人が風を感じる 1m/s、風が強いと感じる 3m/s の流入条件を設定し、通路内の気流性状を CFD により算出した。

床面から 1.5m での風速分布を Fig.6~Fig.8 に示す。開口 A から流入した外気は、通路の圧力損失や分岐により徐々に勢いを失い、流入条件が 0.27m/s の場合は開口 A から 120m 付近で風速が 0 になり、1m/s の場合は 150m、3m/s の場合は 170m であった。いずれの場合においても、自然換気では通路全体の換気は困難である。

今後は、風速の大きい箇所への、風の流れを防ぐ装置などの設置による、外部風の影響の遮蔽を検討する。

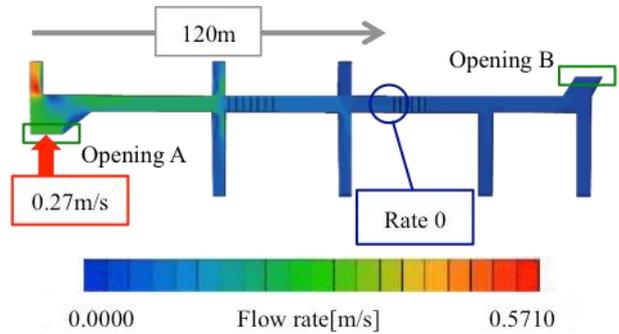


Fig.6 Wind velocity distribution when inlet airflow is 0.27 m/s

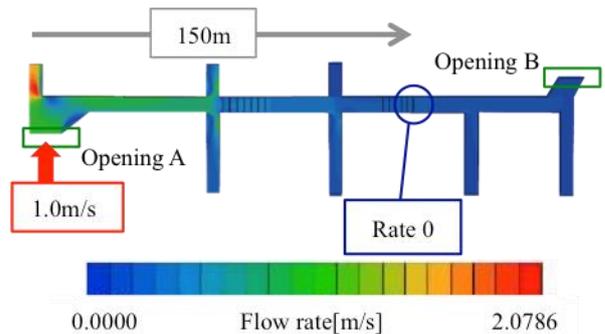


Fig.7 Wind velocity distribution when inlet airflow is 1.0 m/s

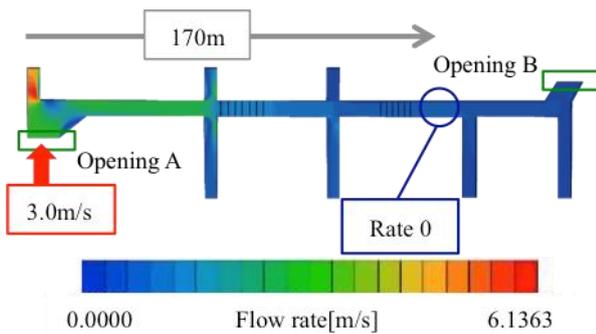


Fig.8 Wind velocity distribution when inlet airflow is 3.0 m/s

4. まとめ

神戸市三宮地区にある三宮地下街(さんちか)の公共通路を対象として、各月の外気冷房効果を検討した。9月は、湿度が低く外気を導入できる時間数が多いため、効果が大きい。10月は9月より湿度が高く外気を導入できる時間数は少ないが、外気と通路の温度差が大きく、通路内の負荷が小さいため、外気冷房効果の割合は大きい。

CFD シミュレーションより、一番大きな開口部から外部風が流入する自然換気条件で、通路の気流分布を検討した。比較的強い風が流入したとしても、通路全体を換気することは困難であると考察された。今後はファン動力を考慮した機械換気条件で検討を行う。

謝辞 本研究は、環境省 CO2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業の人流・気流センサを用いた屋外への開放部を持つ空間の空調制御手法の開発・実証の一環として実施した。測定に協力頂いた関係者の皆様に謝意を表します。

参考文献

1) 株式会社テクノ菱和, 神戸地下街株式会社, 一般社団法人神戸すまいまちづくり公社, 平成 26 年度大規模 CO2 削減ポテンシャル調査・対策提案委託業務「さんちか」に関する報告書, (2015.3)

屋外への開口部を持つ地下街の空調機器高効率運転に向けた実績データ分析に関する研究
Research on performance data analysis for high-efficiency operation of air conditioning equipment in an underground mall with outdoor openings

○木本 健優 (神戸大学) 竹林 英樹 (神戸大学)

磯崎 日出雄 (神戸大学) 長 廣 剛 (神戸大学) 進藤 宏行 (日建設計総合研究所)

Kenyu KIMOTO*¹ Hideki TAKEBAYASHI*¹

Hideo ISOZAKI*¹ Tsuyoshi NAGAIHIRO*¹ Hiroyuki SHINDO*²

*¹ Kobe University *² NIKKEN SEKKEI Research Institute

Energy consumption by air conditioning and heating in the underground shopping mall may be large due to many visitors and large openings to the outdoor. So, the potential to reduce energy and CO2 is large. We analyze the actual data and grasp the actual state of energy consumption. Furthermore, we analyze the energy saving effect by introducing highly efficient equipment, by comparing with the past data. And, we analyze the actual condition of production and load heat, after that we examine the possibility of high efficient operation of heat source.

1. はじめに

近年、地下街や駅の通路などの商業利用が進んでいる。こうした空間では、人の往来が多く、屋外への開口部を持つなどの特性から、冷暖房などに要するエネルギー消費量は大きく、エネルギー消費量・CO2 排出量の削減ポテンシャルが大きいと考えられる¹⁾。これらの空間の大幅な省エネ・CO2 削減のためには、高効率な設備機器の導入とともに、開口部から流入する外気による熱負荷への対応や、利用者の行動特性を踏まえた空調・換気制御手法の開発が求められる。その一方で、IoT、AI 等の情報技術の進展により、新たに収集されたデータを活用した複雑な制御の可能性が指摘されている。本研究では、対象地下街の協力を得て、実績データを分析し、エネルギー消費量の実態を把握した。さらに、過去の実績データとの比較により、高効率機器の導入による省エネルギー効果を分析した。また、実績データを用いて負荷熱量の実態を分析し、熱源機器の高効率運転の可能性を検討した。

2. 分析の概要

2.1 分析の対象

対象施設は三宮地下街（さんちか）である。Fig.1 に対象施設の空調範囲、空調面積を示す。用途は公共通路部、物販店舗、飲食店舗に分類される。

2.2 機器更新と分析のスケジュール

Fig.2 に対象施設の機器更新と分析のスケジュールを示す。対象施設では、2014 年度から高効率機器の

導入が順次行われている。2013 年度と 2016 年度の実績データを用いてエネルギー消費量の比較を行い、2017 年 5～8 月の実績データを用いて第 1, 2 機械室の空調範囲を対象として負荷熱量を分析した。

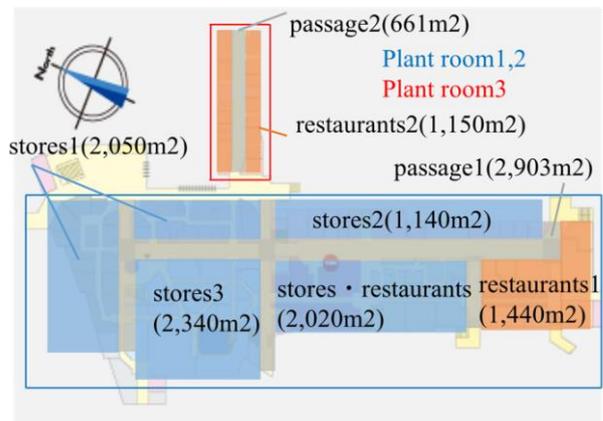


Fig.1 Air conditioned areas of objective underground passage

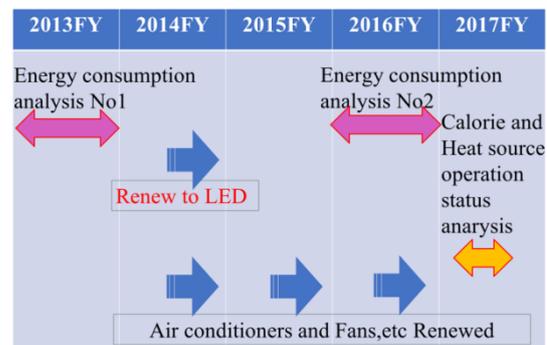


Fig.2 Renew of equipment and analysis periods

3. 実績データを用いたエネルギー消費量の分析

3.1 エネルギー消費量の算出方法

実績データの点検記録の概要を Table.1 に示す。対象施設ではガスはほとんど使われておらず、エネルギー消費の大半は電力である。受電日誌(Power receiving daily log)は日毎の電力消費量(照明, コンセント, 店舗動力, 空調衛生動力, 空調動力, 冷房消費電力量)の計測結果, テナント電力量(Monthly power consumption of tenants)は, 月ごとの電力消費量を店舗ごとに記録したものである。巡回日誌(Patrol diary)は, 1日4回(10時, 14時, 16時, 20時)の給排気ファン, 熱源, 空調機等の電流値, 機器運転時間の巡回・点検結果を記録したものである。

エネルギー消費量の算出方法は, 受電日誌により把握できる場合はその値を用い, 把握できない場合は, 巡回日誌の電流値と運転時間を用い, 力率を0.9と仮定して算出した。その他は, 総エネルギー消費量から他の項目の値を引いたものである。

3.2 高効率機器導入前後のエネルギー消費量の比較

2013年度と2016年度のエネルギー消費量の内訳を Fig.3 に示す。照明のLED化や空調機等の更新により対象施設全体のエネルギー消費量は16.5%削減された。LED化により, 公共通路等の照明, コンセントのエネルギー消費量は34%削減され, それに伴う負荷低減により, 冷凍機のエネルギー消費量も7%削減された。また, 空調機等の更新により, 空気搬送のエネルギー消費量も8%削減された。公共通路等のLED化に並行して, テナント部でもLED化が一部行われ, エネルギー消費量は20%削減された。

3.3 標準的な商業施設のエネルギー消費量との比較

対象施設と標準的な商業施設の1m²あたりの年間エネルギー消費量の内訳と構成比²⁾³⁾を Fig.4 に示す。対象施設の1m²あたりの年間エネルギー消費量は, 標準的な商業施設の約1.9倍であったが, 機器更新により約1.6倍程度まで削減された。標準的な商業施設より照明, コンセントの負荷が大きく, 飲食店舗の厨房等での火器使用や臭気対策のため空調機やファンのエネルギー消費量も大きい。対象施設は通路として利用されることもあり, 暖房設備がほとんどないことから, 熱源系のエネルギー消費量の割合は小さく, 搬送系と照明, コンセントの割合が大きい。

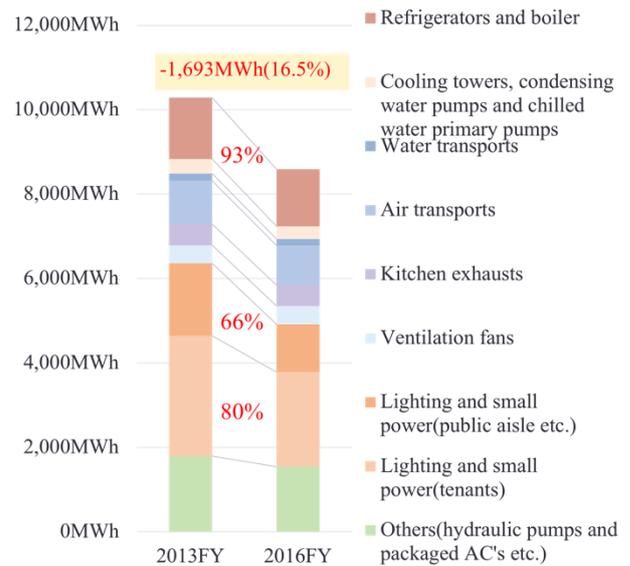


Fig.3 Comparison of annual energy consumption

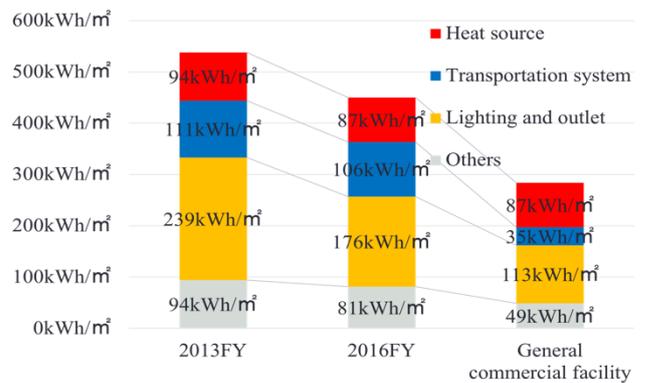


Fig.4 Comparison with typical commercial building

4. 負荷熱量の分析

2017年5~8月の積算負荷熱量を Fig.5 に示す。第1,2機械室の空調範囲が対象である。夏季の7,8月は中間期の5,6月の約2.6倍である。日積算負荷熱量と日平均外気条件との関係を Fig.6~8 に示す。青は平日, 赤は休日, 緑は祝日, 灰色は定休日を示す。負荷熱量は, 外気温, エンタルピーとの間に関係が確認された。外気温が1℃上昇すると負荷熱量は約6,000MJ増加し, エンタルピーが1kJ/kg上昇すると, 約1600MJ増加する。

Table.1 Outline of inspection record

Inspection record	Power receiving daily log
	Monthly power consumption of tenants
	Patrol diary

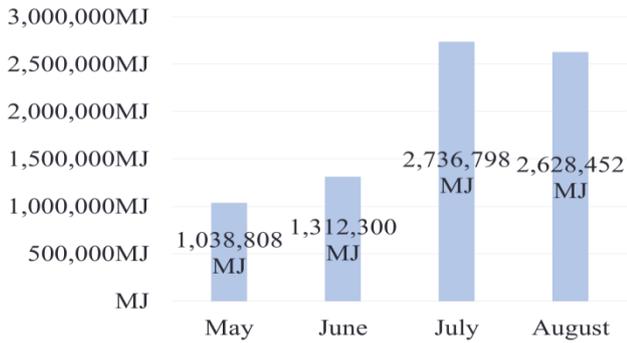


Fig.5 Monthly integrated cooling load in 2017



Fig.6 Daily relationship between outside relative humidity and cooling load

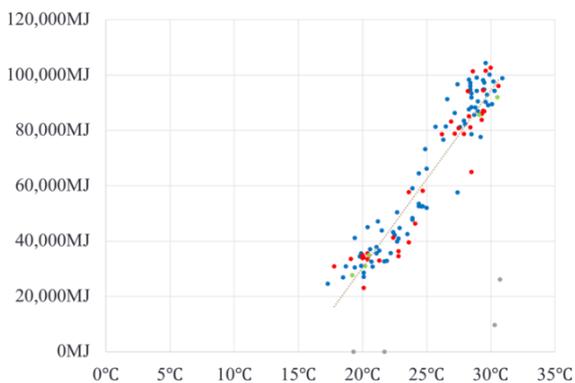


Fig.7 Daily relation between outside air temperature and cooling load

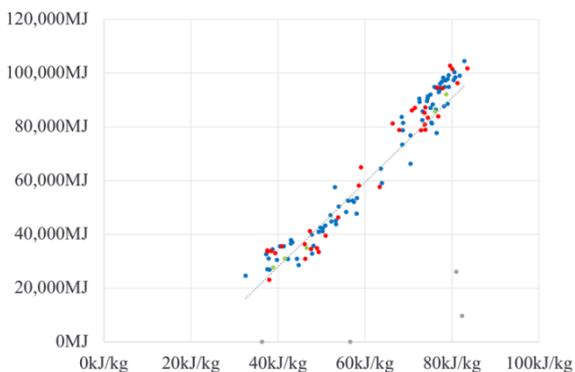


Fig.8 Daily relationship between outside enthalpy and cooling load

5. 熱源機器の高効率運転の可能性の検討

2017年5月25日(木)の1時間ごとの製造熱量と負荷熱量、負荷率を Fig.9 に示す。1時間ごとの負荷率をグラフ上部に示す。製造熱量と負荷熱量の日積算値はほぼ同じであるが、1時間ごとの値は対応しておらず、負荷を移動させて熱が製造されている。仮に、負荷熱量に対応させて熱が製造されると、負荷率の低い時間が生じる。

負荷に対応させて熱を製造した場合の負荷率の出現割合と負荷熱量を Table.2 に示す。負荷率が 80%未達の低い時間は、中間期で 60%程度、夏季では 35%程度になる。

Fig.10 に示す負荷率に応じた熱源機器の COP を想定した場合の、負荷に対応した運転と負荷に追従させなかった現状の運転のエネルギー消費量を Table.3 に示す。負荷に対応した運転の場合、負荷率が低くなる時間が中間期に多いため、負荷変動に追従させなかった現状の運転より 17~20%エネルギー消費量が大きくなると評価された。

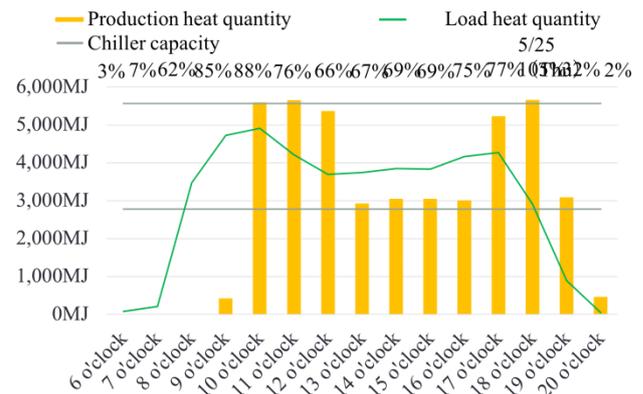


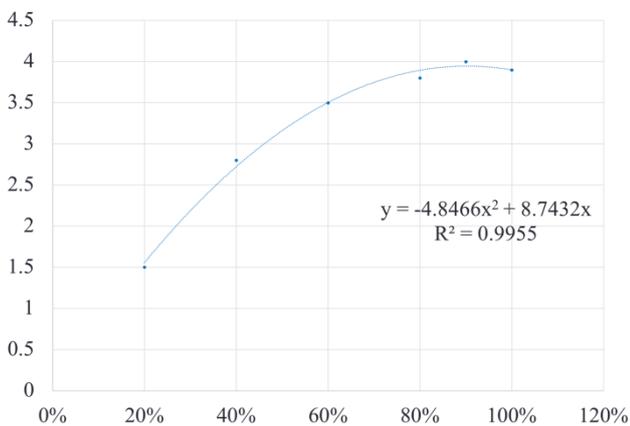
Fig.9 Production, load heat and load factor at May 25, 2017

Table.2 Load factor when the heat source operates according to load

Load factor	~80%	81~90%	91%~
May	61% (530,763MJ)	9% (138,185MJ)	31% (369,859MJ)
June	57% (564,437MJ)	13% (248,623MJ)	30% (499,239MJ)
July	33% (458,159MJ)	27% (889,123MJ)	40% (1,389,514MJ)
August	36% (492,387MJ)	40% (1,326,899MJ)	24% (809,165MJ)

Table.3 Energy consumption in current case and load responding case

	Energy consumption in operation corresponding to load (MWh)	Energy consumption in current operation (MWh)	Reduction amount (MWh)	Reduction amount (%)
May	115.2	92.3	22.9	19.8
June	137.8	114.0	23.8	17.2
July	239.1	238.6	0.5	0.2
August	225.3	228.1	-2.8	-1.2

**Fig.10** COP of heat source equipment according to load factor

6. 結論

対象地下街の協力を得て、実績データを分析し、エネルギー消費量の実態を把握した。過去の実績データとの比較により、高効率機器の導入による省エネルギー効果を分析した。LEDなどの高効率機器の導入により、エネルギー消費量は年間で16.5%削減された。公共通路等の照明、コンセントのエネルギー消費量が34%削減され、それに伴い冷凍機のエネルギー消費量が7%削減された。

実績データを用いて負荷熱量の実態を分析し、熱源機器の高効率運転の可能性を検討した。負荷熱量は夏季に大きく、曜日による変動は少ない。また、負荷熱量は外気温とエンタルピーとの関係が確認された。負荷熱量に対応させた運転と比較して、負荷変動に追随させなかった現状の運転では中間期に17~20%程度のエネルギー消費量が削減されていたと評価された。

謝辞 本研究は、環境省 CO2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業の人流・気流センサを用いた屋外への開放部を持つ空間の空調制御手法の開発・実証の一環として実施した。協力頂いた関係者の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 株式会社テクノ菱和, 神戸地下街株式会社, 一般社団法人神戸すまいまちづくり公社, 平成 26 年度大規模 CO2 削減ポテンシャル調査・対策提案委託業務「さんちか」に関する報告書, (2015. 3)
- 2) 省エネルギーセンター
(http://www.eccj.or.jp/commercial_bldg/s2.html)
- 3) 都市ガスコージェネレーションの計画・設計と運用, 公益社団法人 空気調和・衛生工学会, (2015)
- 4) 気象庁ホームページ
(<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)

時変動するエアコン吹出し気流のCFD解析手法に関する研究
 (その1) 2方向吹出しパッケージエアコンを有する室の室内気流性状
CFD Analysis on Unsteady Airflow in Room with Air-conditioner,
Part1 Airflow Pattern in Room with Two-way Packaged Air-conditioner

○ 安田智一 (大阪大学) 甲谷寿史 (大阪大学)
 山中俊夫 (大阪大学) 中井奈保子 (大阪大学)

Norikazu YASUDA*¹ Hisashi KOTANI*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Nahoko NAKAI*¹

*¹ Osaka University

Packaged air-conditioner is widely introduced into buildings in Japan in recent years. Simplified estimate method of airflow in room with air-conditioner makes energy saving planning more easily effectively. To analyze an unsteady airflow, analysis in steady-state is needed. The purpose of this study is to make a simplified CFD analysis method which can regard an unsteady airflow as a steady airflow by using average wind speed and wind direction and turbulence statistics. In this paper, the airflow pattern of the unsteady airflow in room with air-conditioner was clarified.

はじめに

室内環境には、空調吹出し口からの一次気流が大きく影響し、設計段階で吹出し口からの気流を予測することが必要になる。近年では、室内気流性状を把握するためにCFD(Computational Fluid Dynamics)が用いられている。地球環境保全を目的に建物の省エネルギーが求められる時代であるので、空調吹出し口からの吹出し気流を簡易的に予測することが可能であれば効率的に省エネルギーな設計に貢献することができる。これまでに、吹出し口のモデル化について様々な手法が提案され¹⁾²⁾³⁾、アネモ型ディフューザー⁴⁾、ライン型ディフューザー⁵⁾を対象としたCFD簡易化についての研究がなされている。本研究では、時変動気流を特徴とする、2方向パッケージエアコンを対象とする。正確な時変動気流の予測を行うにはスイングによる吹出し方向の変更を反映した詳細な非定常解析を必要とされ、その解析時間は膨大となるという問題がある。だが実際問題、室内の快適性を保つた

めにセンサーで温度制御をする際にはスイングによる秒単位による気流の変化は考慮されず、ある一定時間の平均値で判断される。また、吹出し口から離れた居住域ではそもそもスイングによる気流の影響はそれほど大きくない可能性が考えられる。そこで、吹出し方向・速度を平均的な一定値とし、スイングによる気流の拡散を何ら

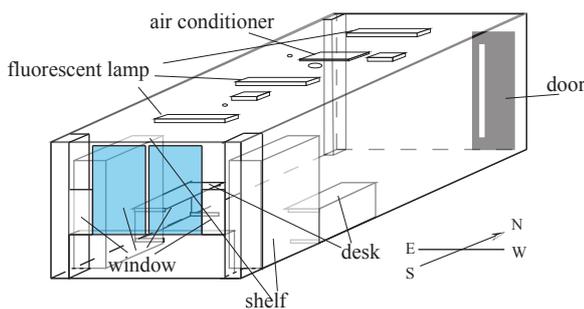


Fig.1 Room Model

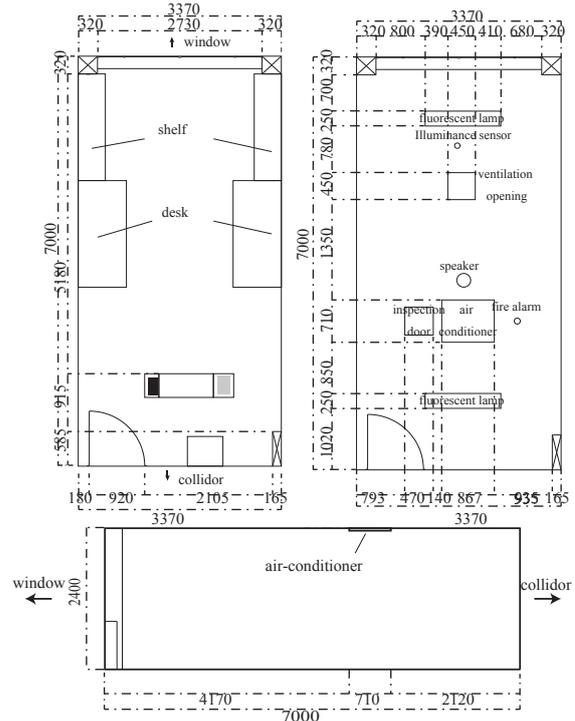


Fig.2 Room Plan,Ceiling Plan and Cross-Sectional View

かの方法で考慮することで時変動気流を定常流とみなし、居住域においては概ね正確な気流場を得られるようなCFD簡易解析手法の獲得を目指す。本報では、実験による時変動気流の性状把握について報告する。

1. 実験概要

実験は大阪大学内の建物の一室を用いて行った。Fig.1にパースを、Fig.2に平面図、天井伏図、断面図を示す。窓面には断熱処理を行い、室内は等温条件とみなす。本研究で対象とするエアコンはこの室に取り付けられている2方向吹出しパッケージエアコンであり、Fig.3のとおりである。このエアコンには運転モードが送風運転、冷房運転、暖房運転の3種類ある。また、吹出し風量は本研究では630m³/h・510m³/hする。風向モードはモード1～モード5とその間を往復するスイングモードがある。それぞれの風向モードの角度はTable1を参照されたい。

このエアコンを対象に、PIV(Particle Image Velocimetry)による吹出し口近傍での気流性状の把握、熱線流速計を用いた吹出し気流の乱流統計量の測定、超音波流速計を用いた室内の風速分布の測定の3種類の実験を行った。次節に各実験の概要を示す。

2. PIVによる吹出し口近傍の気流性状の把握

吹出し気流の吹出し口付近での性状を把握するためにPIVによる風速分布を調べた。PIV測定とは、流れ場における多点の瞬時速度を非接触で得ることができる流体計測法のことである。トレーサー粒子の移動距離から速度を得る。

本研究で用いたPIV測定機器などの測定条件をTable2、測定機器配置と測定領域をFig.4に示す。吹出し口は、長手方向に風速分布があったため、測定位置を

気流が最も安定する位置に設置し、レーザー面に垂直にCCDカメラを設置し気流の様子を撮影した。PIVの測定領域は、幅800mm×高さ600mmの範囲で吹出し口近傍に設けた。

風量は630m³/h、風速は5.4m/s(カタログ値)、風向は全モード送風運転で行った。800mm×600mmの測定領域での風向固定モードの風速コンター図をFig.5に、スイングモードを測定時間で平均した風速コンター図をFig.6に示す。モード1で天井に付着するような気流が確認されるが、コアンダ効果によって途中で風向が変化していると考えられる。また、スイングモード(時間平均)の風速コンター図を見ると、風向固定気流のものと比べて拡散し、風速は約半分になっていることがわかる。これはスイングすることで常に同じ方向に気流がないものを平均したからである。Fig.7に吹出し口から水平方向に52mm,199mm,210mm離れた位置での風速の鉛直分布を示す。このグラフからもスイング気流(時間平均)は風向固定気流と比べ風速が小さく広がりが大きいことがわかる。吹出し口から離れるにつれて(x=210mm)最大風速を取る位置に散らばりが生じることがわかる。またスイング気流は時間平均をすると風向がモード2とモード3の間にあることがわかった。

次に、スイングモードの気流は風向固定モードの気流と比べどれだけ到達距離が短くなるかを調べた。Fig.8に以下に示す4つの場合の残風速1m/sの到達距離を示す。今回、Fig.9の風速コンター図で残風速0.5m/sや0.25m/sの到達距離が正確に判別できなかったため残風速1m/sで比較している。●はFig.5の各モード(風向30°、48°、52°、60°、65°)での到達距離をプロットしたものである。▲はスイング気流の時間平均を示す風速コンター図であるFig.6での各モードの吹出し角度における到達距離をプロットしたものである。▲はスイングモードの結果を各モードの風向の結果を切り出したものであるFig.9のそれぞれの到達距離をプロットしたものである。■はFig.7の5つのスカラー平均した風速コンター図であるFig.10での各モードの吹出し角度における到達距離をプロットしたものである。●と▲を比較するとすべての風向でスイング気流は風向固定気流よりも到達距離が短いことが

わかった。風向固定のスカラー平均したもの(■)が風向の違いで到達距離に大きな差が出ている(mode1・2とmode3・4・5)。原因としてFig.5の5つのコンター図を平均したが、mode1が天井に付着する影響でFig.10に示す

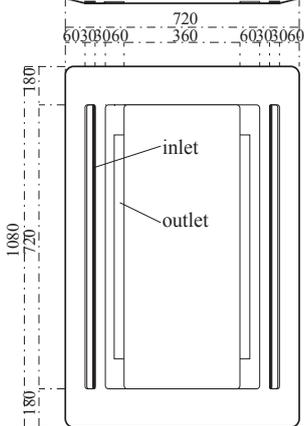


Fig.3 Air Conditioner

Table1. Air Conditioner Function

air volume	630m ³ /h・510m ³ /h
mode	fan mode・cooling mode
direction	mode1:30° mode2:48° mode3:52° mode4:60° mode5:65° swing mode:30°~65°

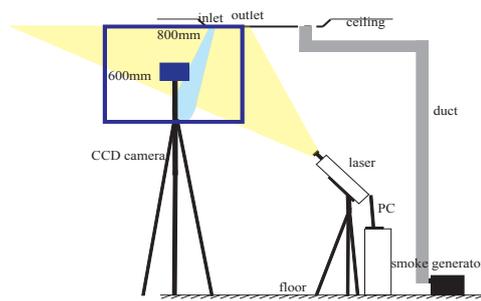


Fig.4 PIV Measurement Equipment Arrangement

Table2.Measurement Condition

program	Davis8.3	
CCD camera	ImagerProX 2M	
laser	Nd:YAG laser	
laser output	50mJ/Pulse	
camera flame size	1600pix×1200pix	
sampling period	10Hz	
sampling time	fixed direction mode	20s
	swing mode	24s
algorithm	direct cross-correlation method	

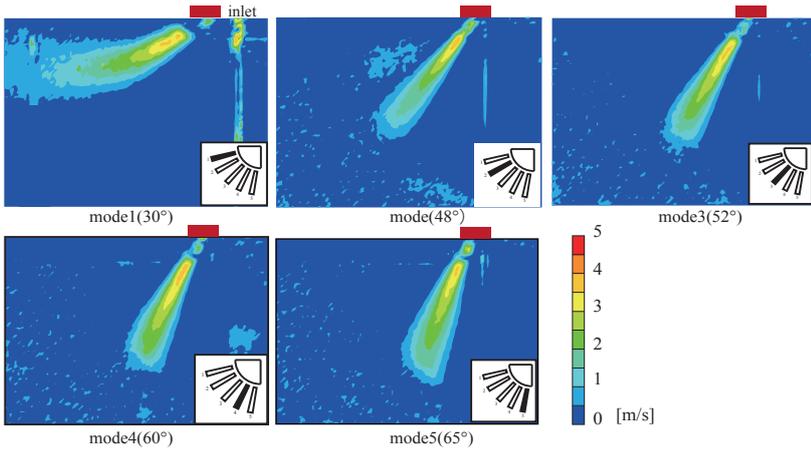


Fig.5 Distribution of Scalar Velocity at Fixed Direction

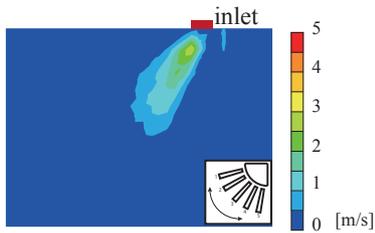


Fig.6 Distribution of Scalar Velocity at Swing Mode (Time Average)

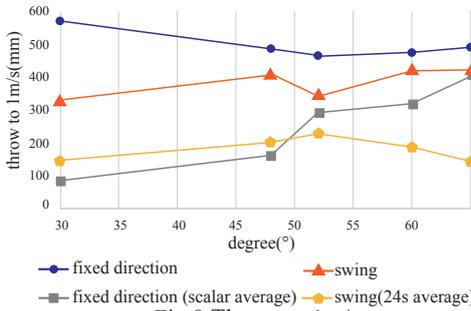


Fig.8 Throw to 1m/s

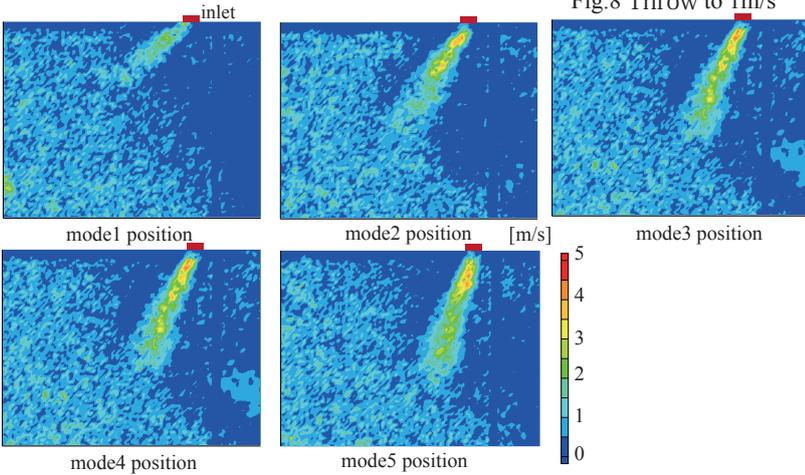


Fig.9 Distribution of Scalar Velocity at Swing Mode

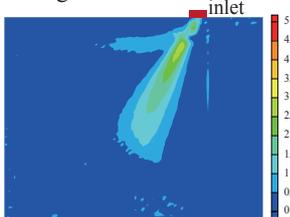


Fig.10 Distribution of Scalar Velocity at Fixed Direction(Scalar Average)

Table3 Measurement Condition Hot-wire Anemometer

measurement item	x-velocity
	y-velocity
measurement equipment	hot-wire anemometer
	climomaster(for calibration)
sampling period	100Hz
sampling time	1minute

Table4 Turbulence Statistics Results

mode	inlet position								
	1			2			3		
	k	l	ε	k	l	ε	k	l	ε
3	0.135042	0.004808	0.928836	0.030971	0.008153	0.060165	0.039363	0.007877	0.089234

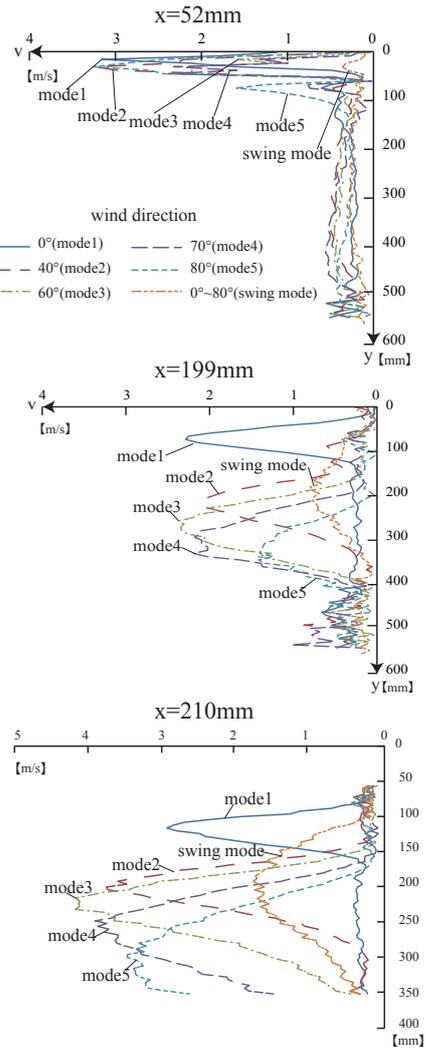


Fig.7 Velocity Distribution

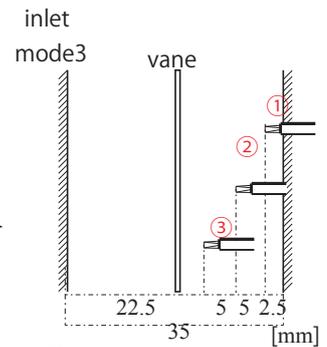


Fig.11 Measurement Point

ように水平方向の気流と斜め方向の気流の2つが重なったような性状となることが考えられる。また、風向固定気流の風向が等間隔でないことも理由にあげられる。今後残風速を小さくし比較したいと思う。

3. 熱線流速計による乱流統計量の測定

エアコン吹出し気流の乱流統計量の測定について述べ

る。クリモスター風速計を用いて簡易的な較正を行った。この作業によって、電圧と風速の近似曲線(原点を通る1次関数に近似)を求める。次に、較正を終えた熱線流速計を吹出し口直下の測定点と離れた位置の測定点に設置し水平方向風速 V_x と鉛直下向き方向風速 V_y を測定し、測定結果を用いて乱流エネルギー k と長さスケ-

ル1、乱流散逸率 ϵ を計算した。測定点は Fig. 11 のとおりで、測定条件は Table3 にまとめる。位置は、すべてのパターンで吹出し口の西側の端から 200mm の位置で測定した。すべて送風運転で行った。

まず較正によって得られた近似曲線の結果は $v=0.81V$ (ただし、 v は xy 合成風速、 V は出力電圧である) となりこの式を用い求めた吹出し口付近での乱流統計量は Table4 のようになった。この結果を用いて CFD での気流の拡散の再現を試みる。

4. 超音波風速計による室内風速変動の把握

エアコンから離れた位置での風速変動を調べるために超音波風速計を用いて風速を測定した。測定点を Fig. 12 に示す。超音波風速計のプロブはアングルに取り付けて測定を行った。送風運転での風速を測定し、測定条件を Table5 にまとめる。

測定結果を Fig. 13 に示す。各風向モードの主流の風向に大きな風速を持つことより、吹出し口から離れた位置にも気流の影響が及ぶことがわかった。主流に誘引される周辺空気の様子も見て取れる。また、床面付近で、主流方向に逆行する気流があることから、気流が循環していると考えられる。スイング気流は固定気流よりも幅広い範囲に気流が到達することもわかった。

おわりに

本報では、スイング気流の CFD での再現に必要なデータを得るためにパッケージエアコンを対象にその吹出し気流性状の把握のための様々な実験を行った。その結果、時変動気流の吹出し口付近での風速や乱流統計量、吹出し口から離れた空間での風速などのデータを得るこ

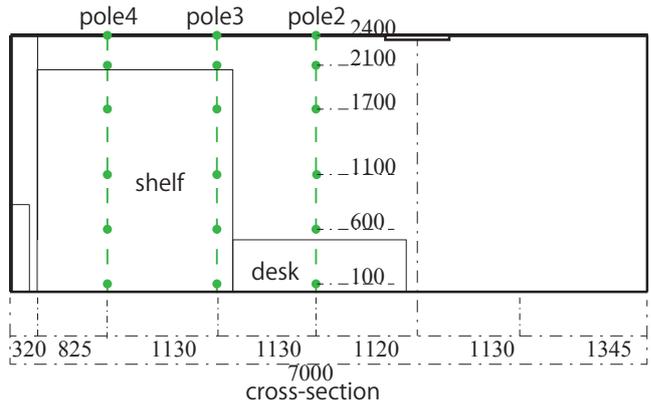


Fig.12 Ultrasonic Anemometer Measurement Point とができた。次報では、本報で得られたデータを参考に CFD 解析によるエアコンの時変動気流の再現を試みる。今後は、風向固定気流とスイング気流の到達距離などの関係性の調査やそれをもとにした CFD における流入境界条件の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) P.V.Neilsen: Description of Supply Openings in Numerical Models for Air Distribution, ASHRAE Transaction, Part1, pp.963-971,1992.2
- 2) J.Srebric, Q.Chen: Simplified Numerical Models for Complex Air Supply Diffusers, HVAC&R Research, pp.277-294, 2002.6
- 3) Chen,Q.,and Moser,A.:Simulation of a multiple-nozzle diffuser,Proc.of 12th AIVC Conference,Vol.2,pp.1-14,1991
- 4) 澤田, 甲谷, 桃井, 相良, 山中: 複雑な形状吹出し口を有する室内気流の CFD 解析に関する研究 (その 5) 吹出し気流の BOX における仮想境界面に関する検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 ,pp.2207-2210,2012.9
- 5) 丹原, 甲谷, 桃井, 山中, 相良, 中井: ライン型ディフューザを用いた室の CFD 解析手法に関する研究 (その 5) シングルラインディフューザにおける気流性状の把握と簡易解析手法の検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 ,pp.205-208,2016.9.6

Table5 Measuring Condition Ultrasonic Anemometer

wind direction	mode 1,mode3,mode5,swing
sampling time	mode 1,mode3,mode5:1 minute swing:2minutes

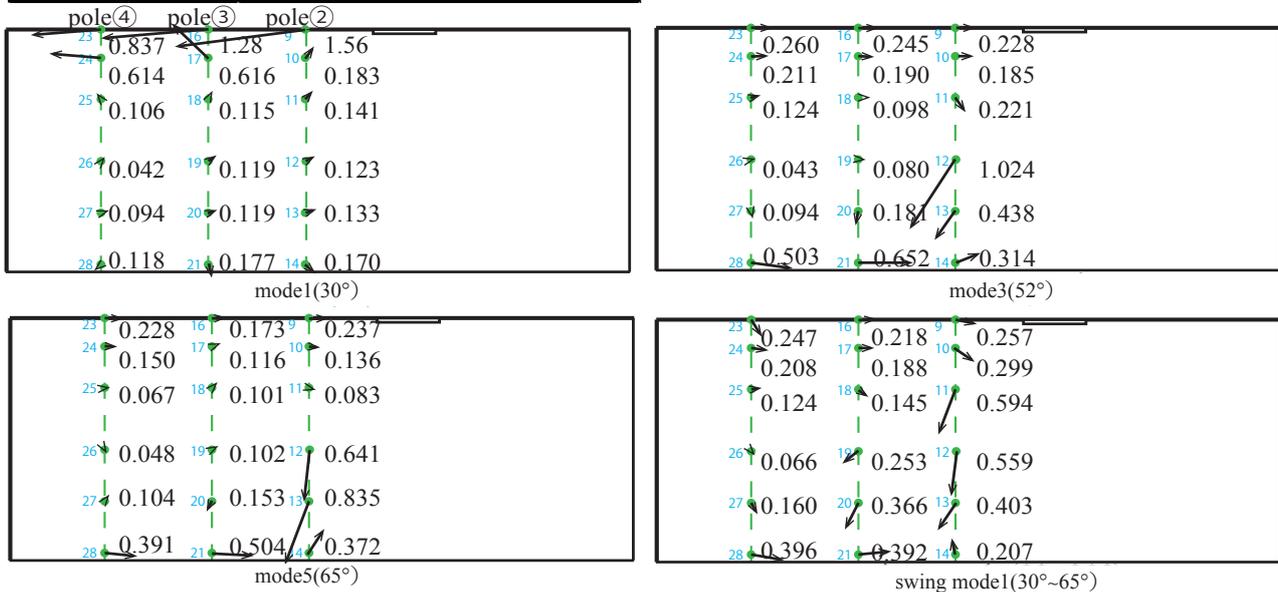


Fig.13 Ultrasonic Anemometer Results(m/s)

時変動するエアコン吹出し気流のCFD解析手法に関する研究
 (その2) 定常CFD解析による時変動吹出し気流の再現手法に関する研究
CFD Analysis on Unsteady Airflow in Room with Air-conditioner
Part2.CFD Calculation Method for Unsteady Airflow by Steady-state Analysis

○ 中井 奈保子 (大阪大学) 甲谷 寿史 (大阪大学)
 山中 俊夫 (大阪大学) 安田 智一 (大阪大学)

Nahoko NAKAI *¹ Hisashi KOTANI*¹
 Toshio YAMANAKA*¹ Norikazu YASUDA*¹

*¹ Osaka University

Many building service designers predict to airflow pattern in room for the optimization of the diffuser layout design. Today, they often use CFD analysis. However, there are some problems. One of them is too much computational time. I focus on airflow from Air-Conditioner. This makes unsteady airflow, so they calculate by Unsteady-state Analysis. In this paper, I study about calculation methods by steady-state analysis to cut down computational time.

1 はじめに

室内環境を空調設備で整えるためには、室内の気流性状を把握することが必要であり、近年ではCFD(Computational Fluid Dynamics)解析が用いられている。空調吹出し口からの気流を設計段階で予測するためには、CFD解析において計算負荷を削減し、容易に予測する必要がある。これまでに、吹出し口のモデリングについて様々な手法が提案されており¹⁾²⁾³⁾、アネモ型ディフューザ⁴⁾やライン型ディフューザ⁵⁾を対象としたCFD簡易化についての研究がなされている。本研究では、時変動気流が特徴である、2方向パッケージエアコンを対象とする。時変動気流を正確に予測するためには、エアコンのベーンのスイングによる風向変化を考慮した非定常解析が必要となり、膨大な計算負荷がかかり、問題となる。一方で、実運用においてセンサーで温度制御する際には、スイング気流の秒単位の変動は考慮されず、10分など一定時間の平均値が用いられる。また、吹出し口から離れた居住域では、時変動気流の影響がそれほど大きいかどうか明らかではない。前報では、2方向パッケージエアコンを有する室内において吹出し口近傍風速分布・乱流統計量・室内風速変動を測定した。本報では、測定結果をもとにCFD非定常解析を行った。また、定常解析において時変動気流の拡散を考慮する方法について検討を行う。

2 実験による2方向パッケージエアコンの性状把握

実験は、大阪大学構内の一般的な部屋において、平成29年12月～平成30年1月に行った。実験室の平面図・断面図・天井伏図をFig.1に、対象とした2方向パッケージエアコン詳細図をFig.2に示す。実験では、窓に断熱処理を施し、等温状態とみなすこととした。Table1に実験条件を示す。実験では、吹出し口近傍の風速分布、乱

Table1 Experimental Conditions

date	2017.12~2018.1
item	PIV
	Hot-wire anemometer
	Ultrasonic anemometer
velocity	5.4m/s
room temperature	19-21°C
supply angle	0°,40°,60°,70°,80°

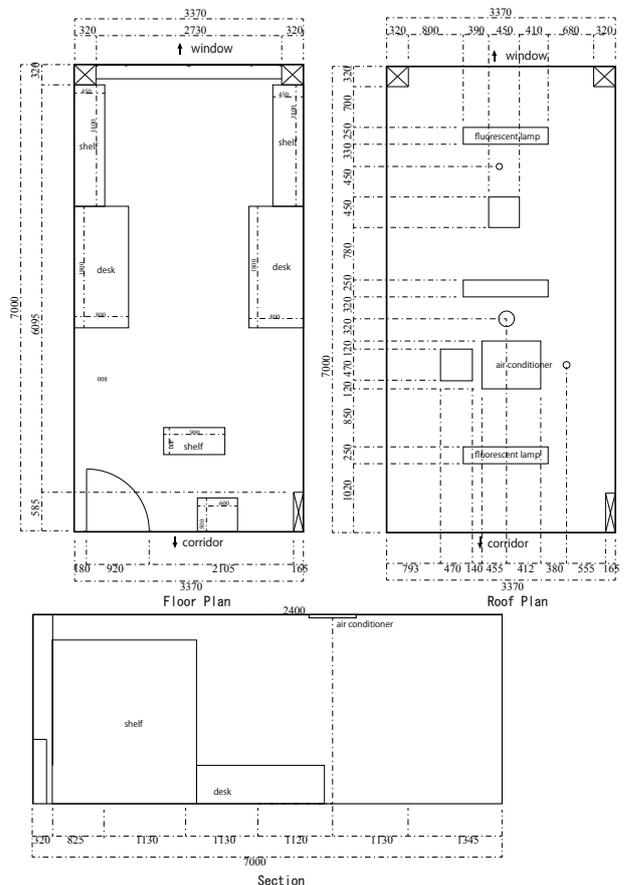


Fig.1 Experimental Room

Table2 CFD Condition in Unsteady-state Analysis

CFD Code	ANSYS FLUENT 17.2
Finite Difference Scheme	QUICK
Algorithm	SIMPLE
Turbulent Model	Standard k-ε model
Near-Wall treatment	Enhanced Wall Treatment
Turbulent Intensity	26%
Turbulent Length Scale	17mm
Inlet Velocity	5.4m/s
Time Step	0.01s
Number of Time Steps	1200

流統計量、室内気流風速変動をPIV、熱線流速計、超音波風速計を用いて測定した。詳細は前報を参照されたい。本報では、CFDで与える境界条件として実験より得られた、吹出し風速・乱流統計量を用いる。

3 CFD 非定常解析による時変動気流の再現

3.1 解析概要

実験で得られた結果をもとに、CFD 非定常解析を行い、時変動気流の再現を試みた。解析条件を Table2 に示す。乱流モデルは標準 k-ε モデルを採用し、離散化スキームは QUICK とした。実験では、スイング周期が 12 秒であるため、タイムステップ 0.01s で 1200 回計算した。実験室を模擬した解析空間を Fig. 3 に、流入境界の詳細図を Fig. 4 に示す。流入境界面では、吹出し方向を斜めに与えるのではなく、y 方向速度と x 方向速度それぞれプロファイルを用いて与え⁹⁾、合成風速を 5.4m/s 一定になるように設定した。吹出し角度はカタログ値より 0°(水平)～80° とし、各角度にベーンが留まる時間に偏りなく、一定であると考える。

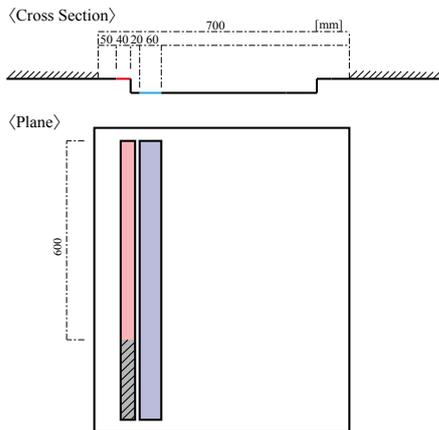


Fig.2 Detail of Air-conditioner

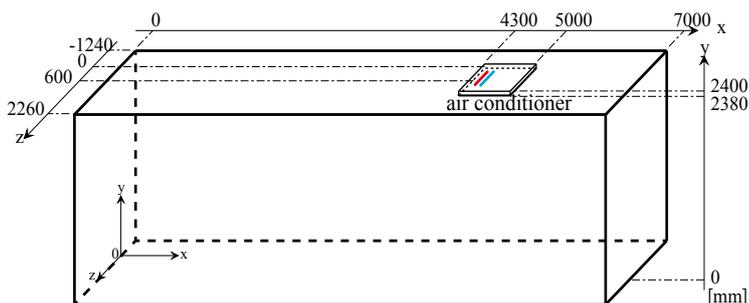


Fig.3 Detail of Analysis Domain

3.2 解析結果

12 秒間の非定常解析の結果を 1 秒ごとの風速コンター図を Fig. 5 に、12 秒間の平均風速コンター図を Fig. 6 に示す。

Fig. 5 より、吹出し開始から 3 秒後には気流が床面に到達し、風向が 0° に近づく 5 秒後・6 秒後には気流が 2 つに分離する。風向が 0° となった直後の 7 秒後・8 秒後には、気流が天井面に付着しており、9 秒後に剥離していく様子がわかる。80°→0°→80° という風向変化であるが、床面や天井面に付着する 45°・0° 付近での風速は大きいのに対

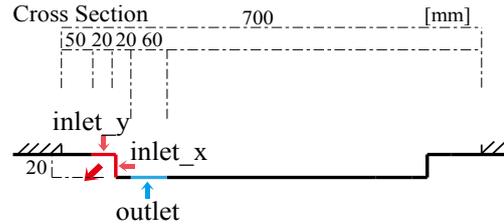


Fig.4 Detail of Inlet in Unsteady-state Analysis

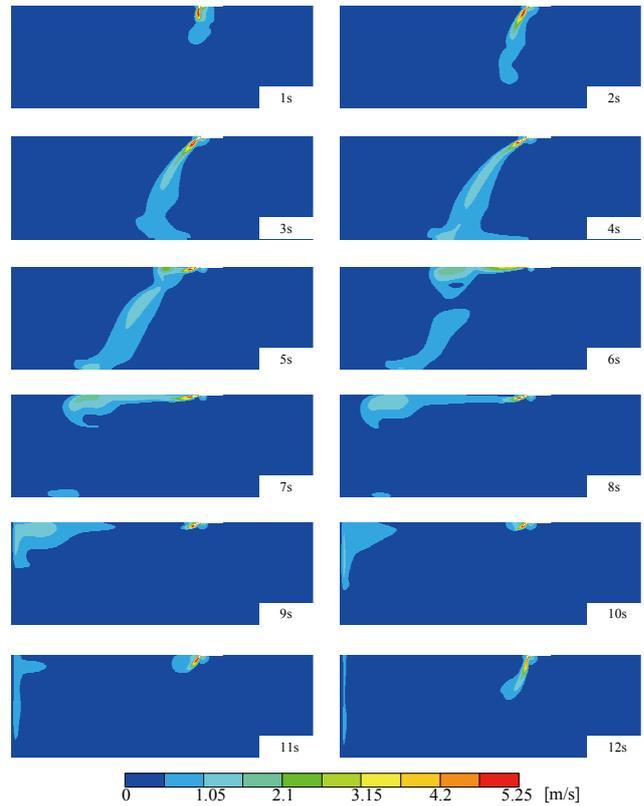


Fig.5 Scalar Velocity Distribution (per second) in Unsteady Analysis

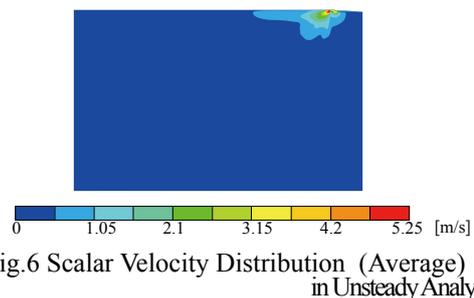


Fig.6 Scalar Velocity Distribution (Average) in Unsteady Analysis

Table3 CFD Condition in Steady-state Analysis

CFD Code	ANSYS FLUENT 17.2
Finite Difference Scheme	Second-order Upwind
Algorithm	SIMPLE
Turbulent Model	Standard k-ε model
Near-Wall treatment	Enhanced Wall Treatment
Turbulent Intensity	26%
Turbulent Length Scale	17mm
Inlet Velocity	5.4m/s
Supply Direction	40°

し、0°～80°間を移動する際の風速は小さいことがわかる。また、8秒後にも気流が水平方向であることから、スイング周期とは関係なく、付着の影響で床面や天井面に気流の留まる時間が長くなっていると考えられる。

Fig. 6より、12秒平均では、気流が天井に付着する0°の位置での到達距離が大きくなっている。しかし、同様の考え方では気流が床面に付着する、45°付近においても到達距離が大きくなるはずであるが、実際はあまり大きくない。この原因として、今回の非定常解析では、0～12秒の結果を用いたため吹き出し直後である45°では、十分な気流場が生成されていたことが挙げられる。解析時間を24秒、36秒…と長くし、吹き出し開始直後のデータは用いずに平均する必要がある。

4 CFD 定常解析による簡易化手法の検討

4.1 非定常 CFD 解析との比較

CFD 定常解析については、y方向・x方向の気流を吹き出し後に合成することで拡散に影響があり、4.3で述べる乱流統計量についての検討の妨げになる可能性を考慮し、y方向のみの流入境界面とし、風速と角度を与えた。⁷⁾ここでは、風向は実験結果とともにモード2の風向40°とした。CFD 定常解析の解析条件をTable3に、流入境界の詳細図をFig. 7に示す。

非定常解析と定常解析(ケース1)の結果を比較し、実際定常解析を行った場合にどの程度の補正が必要であるかを考察する。Fig. 8に風速コンター図を示す。

結果より、定常解析を行った場合、気流の到達距離は長く、拡散は小さいということがわかる。よって、4.2では、到達距離を小さくする方法として、開口面積を調節し、吹き出し流量は保ったまま風速を小さくする検討を行う。

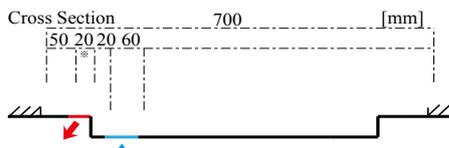


Fig.7 Detail of inlet in Steady-state Analysis

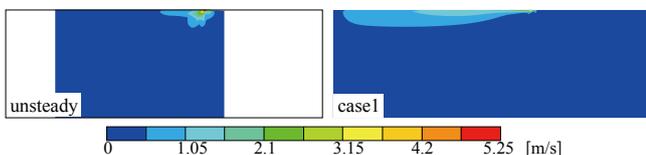


Fig.8 Scalar Velocity Distribution in Unsteady-state Analysis and Steady-state Analysis(case1)

Table 4 Analysis Cases (4.2)

	A[m ²]	b[mm]	v [m/s]
case1	0.012	20	5.4
case2	0.024	40	2.7
case3	0.048	80	1.35
case4	0.06	100	1.08
case5	0.072	120	0.9

4.2 開口面積による到達距離の検討

4.1より、定常解析を非定常解析の時間平均と一致させるためには、到達距離を短くしなければならない。吹き出し風速を小さくすれば、到達距離を短くすることができるが、吹き出し流量は非等温を検討する場合には保存する必要がある。そこで、開口面積(Fig7※)を大きくすることで風速を小さくした5つのケースを検討する。長手方向の長さは全てのケースで0.6mとしているため、吹き出し口幅の大きさを調節する。Table4に各ケースの吹き出し口幅と吹き出し風速を示す。Fig. 9に非定常解析の時間平均・ケース1～5の風速コンター図を、Fig. 10に残風速0.5m/sの到達距離を示す。ケース1・ケース2では、40°方向に吹き出ししているにも関わらず、天井面に沿った風速分布となり、ケース3・4・5では開口面積が大きくなるにつれて、吹き出し風向40°方向の風速分布となった。到達距離を比較

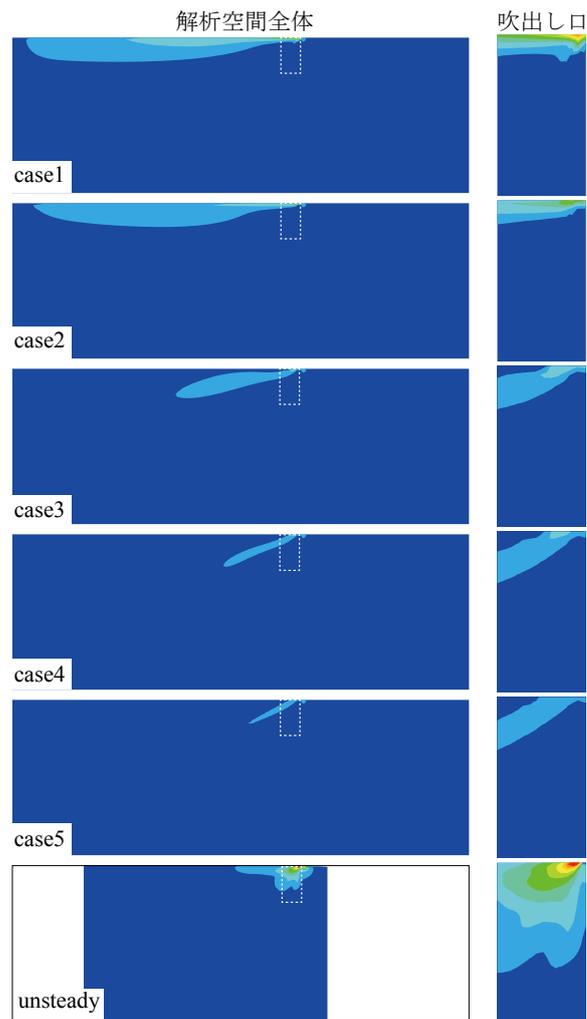


Fig.9 Scalar Velocity Distribution in Unsteady-state Analysis and Steady-state Analysis(case1・case2・case3・case4・case5)

Table 5 Analysis Cases (4.3)

	I [%]	L [mm]
case4-1	2.6	17
case4-2	26	17
case4-3	2.6	170
case4-4	26	170

すると、風向を除くとケース 5 が非定常解析に比較的近いことがわかる。しかし、到達距離は拡散幅が大きくなると短くなることを踏まえ、非定常解析の結果よりは到達距離がわずかに長いケース 4 の開口面積・風速を用いて 4.3 拡散幅の検討を行う。

4.3 乱流統計量による拡散幅の検討

時変動気流を時間平均することで失われる気流の拡散を吹出し気流の乱流統計量を調節することで補うことを試みた。乱流統計量(乱流強度 I、長さスケール L)は、実験結果より求めた乱流エネルギー k とエネルギー散逸率 ε を式 1、式 2 を用いて算出した。この 2 つの乱流統計量について 4 つのケースを検討する。ケース 4-1 では、実験で得られた基準値 I=2.6%、L=17mm とし、ケース 4-2 では、I の値を 10 倍し、ケース 4-3 では L の値を 10 倍にした。ケース 4-4 では、I と L の両方を 10 倍した。それぞれのケースを Table 5 に示す。

Fig. 11 に風速コンター図、Fig. 12 に残風速が 0.5m/s とする拡散幅・到達距離を示す。実験結果から算出した I・L の値を用いたケース 4-1、それぞれ一方を 10 倍したケース 4-2・ケース 4-3 では、風速分布に大きな違いは見られなかったが、I と L の両方の値を 10 倍したケース 4-4 では、到達距離が短くなっていることが分かる。ケース 4-4 の拡散幅には、基準ケース 4-1 と差異はなかった。

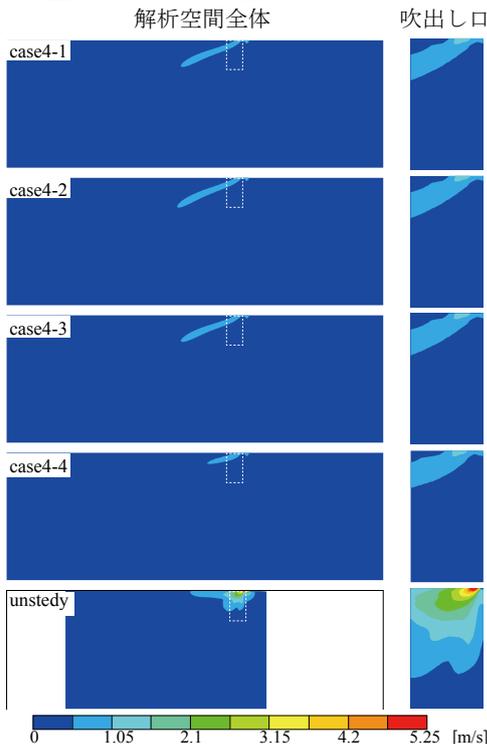


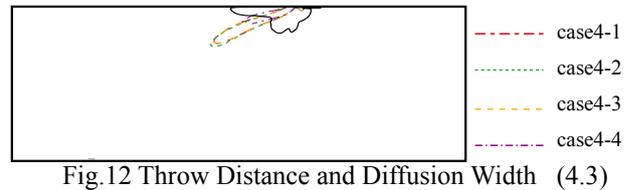
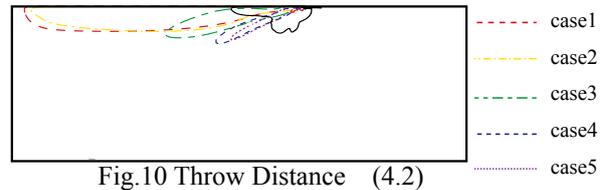
Fig.11 Scalar Velocity Distribution in Steady-state Analysis (case4-1・case4-2・case4-3・case4-4)

5 まとめ

本報では、実験結果をもとに CFD 解析を行った。非定常解析では、プロファイルを用いた境界条件を与え、時変動する気流性状を把握した。また、定常解析では、非定常解析の時間平均と同様の結果を得る方法について検討を行った。開口面積を大きくすることで、到達距離を短くできることがわかった。乱流統計量の調節では、到達距離を短くすることはできるが、拡散幅には影響がなかった。以上のことから、拡散幅を変化させる方法について今後は検討が必要であると考ええる。より拡散しやすい吹出し口の形状について検討する予定である。また、非定常解析の時間平均の風速分布は単純なものではなく、大きく分けて 2 つの噴流の重なりである。到達距離を短くすることはできたが、この風速分布を再現するためには、吹出し口において、吹出し風速に方向別の分布を付けることや、PV 法などを適用することを検討したい。

$$k = \frac{3}{2}(vI)^2 \quad 1) \quad L = \frac{0.07D}{c_\mu^{3/4}} \quad 2)$$

k : 乱流エネルギー [m^2/s^2]
 v : 流速 [m/s]
 I : 乱流強度 [%]
 L : 長さスケール [m]
 D : 代表長さ [m]
 C_μ : 0.07[-]



【参考文献】

- 1)PVNielsen: Description of Supply Openings in Numerical Models for Air Distribution, ASHRAE Transaction, Part1, pp.963-971,1992.2
- 2)J.Srebric, Q.Chen: Simplified Numerical Models for Complex Air Supply Diffusers, HVAC&R Research, pp.277-294, 2002.6
- 3)Chen,Q.,and Moser,A.:Simulation of a multiple-nozzle diffuser,Proc.of 12th AIVC Conference,Vol.2,pp.1-14,1991
- 4)澤田, 甲谷, 桃井, 相良, 山中: 複雑な形状吹出し口を有する室内気流の CFD 解析に関する研究 (その 5) 吹出し気流の BOX における仮想境界面に関する検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.2207-2210,2012.9
- 5)丹原, 甲谷, 桃井, 山中, 相良, 中井: ライン型ディフューザを用いた室の CFD 解析手法に関する研究 (その 5) シングルラインディフューザにおける気流性状の把握と簡易解析手法の検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.205-208,2016.9.6
- 6)五島, 酒井, 小野: 4 方向カセット型ディフューザの CFD パーツ化に関する検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.221-224,2017.9
- 7)田中, 今野, 佐藤, 坂本: ビル用マルチエアコン導入時の室内温熱環境に関する研究 (その 2) 実測調査と CFD 解析用吹出し噴流モデルの作成, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.923-924,2009.8

空調設備改修による大空間印刷工場の作業環境改善事例

Improving Working Environment of Large Space Printing Plant through Renovation of Air-Conditioning Facility

○小林 一樹 (須賀工業)

加川 一郎 (須賀工業)

Ikki KOBAYASHI*¹ Ichiro KAGAWA*¹

*¹ Suga Industry Co. Ltd

はじめに

某印刷工場の空調改善工事について、現状把握に基づいた改修計画の検討、並びに工事後の改善効果検証結果について紹介する。(尚、本稿では建物の特定につながる恐れのある情報を極力回避した結果、記述に具体性を欠く部分があることを諒解されたい。)

1. 改修前の冷房不足状況

本印刷工場では、空調改修工事に先立つ数年前にオフセット印刷機を更新して以来、印刷場の冷房が不足気味な作業環境となっていた。印刷機更新後も空調設備は従前の設備をほぼそのままの形で使用していたことから、印刷機更新後の現況とのミスマッチが原因と考えられた。

2. 現状課題の明確化

空調改善の依頼を受け、現状把握のため、印刷機仕様書及び既設空調設備図面の検討、現地ヒアリング及び調査を行い、具体的な問題点として以下を認識した。

- ・印刷機稼働時の室内温湿度は概ね温度 24℃ 湿度 65%前後であり、一般的な空調条件 26℃ 50%に比べ温度は低いものの湿度が高かった。
- ・更新に伴い印刷機の冷却方式が水冷から空冷となり室内への放熱量が増えた結果、既設空調機の冷房能力では不足となっていると想定された。
- ・新旧の印刷機の実オペレーター作業位置が異なる結果、既設空調の手薄なエリアで作業している場所が見られた。
- ・更新に伴い印刷機の設置台数を1台減らしているが、撤去した跡地に残った開口部を通じて、空調気流がショートサーキットしていると想定された。

これらの解消又は軽減を課題に据え、第一に現状の空調非効率要因の是正を、第二に不足能力分の増強を計画した。

3. 改修計画

3.1 既存空調設備の効率化

(1) 空調吹出し位置の適正化

1) オペレーター作業位置への対応

快適な空調のためにはオペレーターの作業位置付近に空調気流が届いていることが必要だが、印刷機更新によりオペレーター作業位置が変わっているにもかかわらず従前の空調設備をそのまま使用している結果、空調風量が十分でない位置でオペレーターが作業する一方で、負荷のない位置で無為に給気されている状況が、場所によって見受けられた。

2) 局所放熱への対応

印刷機の冷却方式が水冷式（装置内部を冷却水が循環して装置発熱の一定量を除去し、残りが周囲への放熱となる）から空冷式（冷却水回路を持たず装置発熱が全て周囲に放散される）へ変わったことにより、部位によっては放熱が増大し局所的な空調不足が起こっていた。

これらの状況を是正するため、空調ダクト改修により、現在の必要箇所へ重点を置いた風量配分とすることを計画した。

(2) ショートサーキットの解消

更新に伴い印刷機設置台数が1台減らされていたが、印刷機は縦方向の寸法が大きく、床スラブを貫通して建

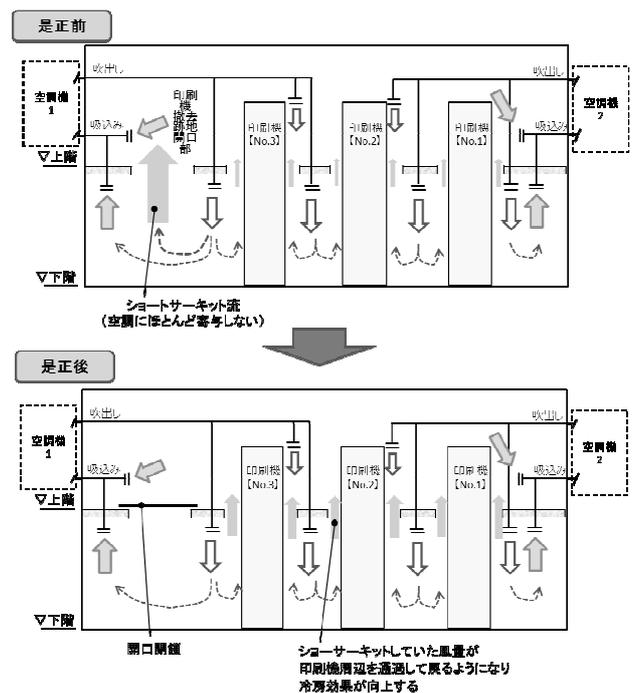


図-1. 床開口閉鎖によるショートサーキット解消

物の2フロアにまたがり設置されているため、撤去された1台の跡地の床スラブに巨大な開口が残されていた。この開口を通じて、室内へ吹出された空調気流が発熱箇所へ到達しないまま空調機へ戻ってしまうショートサーキットが疑われ、スモークマシンを用いた可視化調査を行いこれを確認した。これを是正するため床開口部にシートを張り渡しショートサーキット経路を遮断する計画とした(図-1)。

建築基準法上、床開口の閉鎖が建物床面積の増加と見なされ確認申請が必要となる可能性があったが、所轄の建築指導課と協議の結果、落下防止の手すりでも囲われた床開口をシートで閉鎖しても用途が発生しないことから床面積の増加と解釈されず、確認申請は不要であった。一方、消防法上の解釈は、下階で火災発生時に煙が滞留する天井面と見なされ、シート張り部分に自動火災報知設備の感知器を増設した。また消防法上の少量危険物エリアであったため、シート材質は樹脂製であるが不燃材料認定品とした。

(3) 空調機系統及び室内フローの見直し

印刷機更新前は印刷場の上下階が共にオペレーターの作業フロアであったことから上下階で同一の空調機系統となっていたが、印刷機更新後は、下階は主として人の作業フロア、上階は主として印刷機付帯設備の設置場所と、主用途が異なっていた。このため、下階の冷房に合わせた低い温度で吹出すと上階では冷房過剰となり、空調機の冷房能力が上階に無駄に供給される傾向があった。

この状況を是正するため上下階の空調機系統の分離を計画した。ダクト改修により既設の空調機は下階専用系

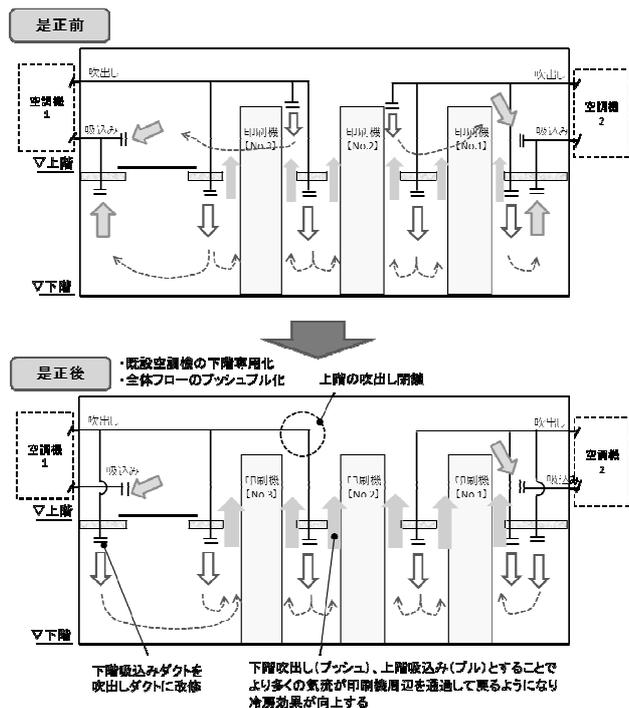


図-2. 空調機系統の分離とプッシュ・プル化

統に変更し、上階用の空調機を新設する計画とした。さらに吹出口をすべて下階に配置し、吸入口は上階にのみ配置する「プッシュ・プル」とし、床開口部を通じて印刷機周辺を強制的に通過させることで[下階で給気(プッシュ) → 印刷機周辺の熱除去 → 上階で吸込み(プル)空調機へ戻す]という大きなフローを形成することによりショートサーキットの少ない効率的な空調を意図した(図-2)。

3.2 空調能力の増強

(1) 熱負荷の設定

a 印刷機発熱と既設空調能力

更新後印刷機の発熱量メーカー仕様値 1315kW に対し既設空調機冷房能力(顕熱)は511kWであった。不足分は実に804kWであり、印刷機発熱の61%が処理できていないことになる。しかしながら、快適とは言えないものの一応は空調しながら稼働していることから、メーカー仕様ほど実際には発熱していない可能性も十分に想定された。

また印刷機仕様通りの能力補填を計画すると現状比257%まで空調機能力が増加し、空調機械室のスペース不足や既設熱源システム容量不足といった付随問題の解決を含めると大工事となり、「空調改善」としては費用対効果の面で厳しい状況となることが予想された。

これらのことから、空調設備の計画に先立ち実際の熱負荷を把握するために調査、検討を行った。

b 設計上の負荷想定

1) 印刷機稼働率

夏季ピーク期間の印刷機系統動力盤の0.5h毎の電力積算データを調べると(図-3)、印刷機の稼働率に波があり、平均負荷率は低いこと、高負荷の状態は長時間継続しないことがわかった。また月曜日～金曜日のデータが酷似しており明確なパターンが読み取れるが、印刷工程がほぼ固定しているためであり、これを標準稼働パターンと考えてよいことをヒアリングにより確認した。

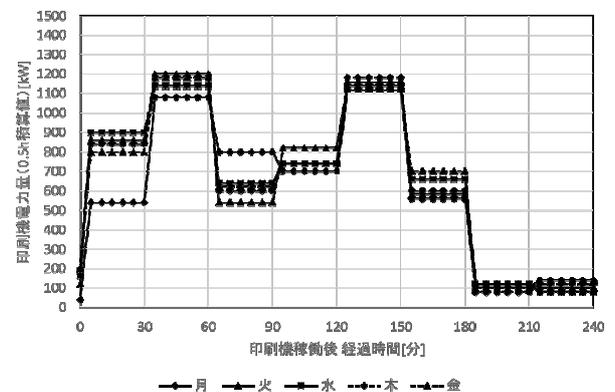


図-3. 印刷機負荷曲線(電力量データ)

2) 「湿し水」の蒸発作用

印刷機稼働率と室内温湿度の時間変動を調べると、印刷機稼働率と室内湿度との間に強い相関が見られた一方、温度との相関は低かった(図-4)。オフセット印刷機は装

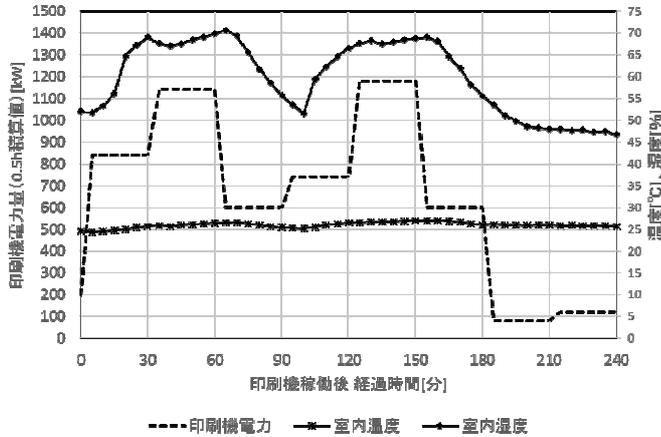


図-4. 印刷機電力量データと室内温湿度の相関

置内部で「湿し水」と呼ばれる水を連続的に散布しており、印刷機稼働率が上昇し発熱が増大すると、装置内部温度の上昇により散布水の蒸発量が増大、室内へ拡散し湿度を上昇させる一方、蒸発による冷却効果のため温度上昇は限定的になっているものと推察できた。そこで既設空調機の給気温度及び室内温湿度等を計測し空調機の実際の処理熱量を計算すると、ピーク時で顕熱560kW程度、潜熱650kW程度を処理していると推定できた。顕熱と潜熱を合計して1210kWとなり、同時刻の印刷機動力盤電力量データ1180kWと概ね整合しており、推定は概ね妥当と判断できた(図-5)。以上より、印刷機発熱の5~6割

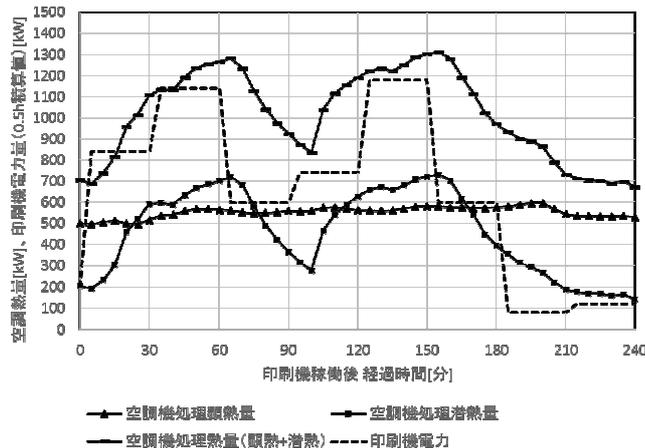


図-5. 推定空調熱量と印刷機電力量データ

は「湿し水」の蒸発に消費され、温度上昇要因(いわゆる発熱負荷)としては残り4~5割を考慮すればよいと考えた。設計上の負荷想定としては安全を見込み、印刷機発熱量1315kWの6割に当たる789kWを設計上の装置発熱負荷と設定した。

(2) 空調目標温湿度の設定

温度24℃前後 湿度65%前後と、湿度の高いことが不快要因と想定されていたものの、オフセット印刷の「湿し水」による高湿度傾向は容易には解消できないと考え、湿度が高くとも体感が快適となる温湿度の組み合わせを検討した。快適性を定量的に評価する指標としてPMV(予想平均(温冷感)申告)を利用し、最終的に温度20℃ 湿度71% PMV 0.256を設計条件とした。PMV 0.256の設定は、 $-0.5 < PMV < 0.5$ が快適域といわれる中で多少の余裕を見込んでいる。また改修前の温湿度は概ね24℃前後65%前後でPMVは0.731となるため、設定した温湿度目標で十分な環境改善が見込めると判断した(表-1)。

表-1. 改修前現状と目標温湿度のPMV比較

	PMV	PMV計算条件					
		温度 [°C]	湿度 [%]	代謝量 [met]	着衣量 [clo]	気流 [m/s]	平均放射温度 [°C]
現状 室内環境	0.731	24	65%	1.7	0.7	0.2	24
設計 目標温湿度	0.256	20	71%	1.7	0.7	0.2	24
(参考)一般的な 空調設計条件	0.280	26	50%	1.2	0.7	0.2	24

注)印刷場における作業様態を考慮して代謝量は一般的な空調条件よりも多く想定した。

(3) 空調設備機器スペックの決定

設定した負荷熱量及び目標温湿度にて空調設計を行い、空調機1台の増設(顕熱428kW)、既設空調機1台の能力アップ更新(顕熱82kWアップ)を計画した。合計で顕熱510kWの増強であるが、メーカー仕様値をそのまま採用した場合の必要増強熱量804kWから4割近く低減している。それでも既設空調機冷房能力511kWからはほぼ倍増させている。

過剰設備を回避することは工事コストの削減のみならず、引渡し後の運用において無駄な空調エネルギー消費を回避でき、ランニングコスト削減及び環境負荷低減の意味でも非常に重要と考える。本件の特殊な(もっと言えば幸運な)状況として、印刷工程がほぼ固定しているため調査で把握した現況が将来も再現されると想定できたことが決め手となり、装置発熱の独自検討による低減解釈が可能となった。

4. 改善効果検証結果

改修工事の前後で印刷場内の温湿度を多点計測(12点)し改善効果を検証した。比較のため計測位置は改修前後で同位置とした。工事前の平均25.6℃ 67.1% PMV 0.935から、工事後の平均21.4℃ 69.1% PMV 0.421に改善していた。設計条件20℃ 71% PMV 0.256に若干未達なものの快適域とされる $-0.5 < PMV < 0.5$ に入っており、現場の方々からの快適性に関する評価も概ね良好であった。また低温度高湿度の傾向は想定どおりであった(表-2)。

表-2. 改修前後の温湿度計測比較

		各計測値(数字は計測位置番号)												平均値
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
改修前	温度[℃]	27.0	26.6	25.6	25.8	25.9	26.6	25.7	24.3	25.2	23.6	25.2	25.7	25.6
	湿度[%]	62.5	65.4	70.6	63.0	68.9	69.7	64.2	63.5	69.1	76.6	64.8	67.3	67.1
改修後	温度[℃]	21.6	22.3	21.8	23.7	19.7	22.1	21.5	19.8	21.3	19.4	21.3	22.3	21.4
	湿度[%]	65.4	66.7	70.3	59.6	79.5	71.6	68.9	66.8	70.5	78.8	63.5	68.0	69.1

5. まとめ

- ・環境改善計画に当り、現状観察及びヒアリングを通して既存空調の非効率要因を把握し、改修ターゲットとした。
- ・空調不足能力の増強計画に当り、過剰計画を回避すべく、空調設計に先立つ調査・分析により実際の熱負荷を定量把握した。これを正として負荷を低減したコンパクト設計をできたのは、印刷工程がほぼ固定化しており再現性に期待できたという状況に負っている。
- ・負荷（オフセット印刷機）と不可分な「湿し水」による高湿度傾向は、解消すべきターゲットと考えるよりも負荷固有の特性として受け入れ、高湿度を前提とした温湿度目標を設定した。高湿度環境の快適性についてPMV（予想平均申告）を利用し定量的に検討した。
- ・改修前後の温湿度計測比較の結果、設定した温湿度目標には若干到達しなかった。しかし目標値自体に余裕を持たせていたこともあり、PMV 指標の快適域には入っていた。
- ・所期の目標である印刷場の環境改善については、現場の方々から概ね良好な評価を頂けた。

【参考】

本稿は「オーガナイズド・セッション」を意識し、難解な専門用語を避けるよう努めたが、「顕熱」「潜熱」という用語については若干説明が必要と考え、以下に簡単な解説を試みる。

- ・物質の相変化を伴う熱移動を顕熱、相変化を伴わない熱移動を潜熱という。

相変化とは蒸発（気化）、凝縮（液化）等いわゆる状態変化の総称であり、相変化している物質の温度は、熱の授受があるにも関わらず、変化しないという特徴がある。例を挙げると、鍋で水から湯を沸すとき、①水が温度上昇を続け 100℃に至り、②沸騰が始まり湯がどんどん蒸発していく。①を顕熱変化、②を潜熱変化という。潜熱変化の過程では、（コンロ等で）熱を与え続けているにもかかわらず湯の温度は 100℃のまま上がらない（尚、発生する水蒸気も 100℃である）。温度変化といったわかり易い形で熱移動の影響が表れないことから、潜熱と呼ぶ（“潜” 在的な、という意味と思われる）。対して、熱移動の影響が温度の変化という形で顕在化する場合を顕熱と呼ぶ。

冷房時、空調機内部で冷水により空気を冷却するが、このとき空気中の水分が結露してドレン水が発生する。この空気中の水蒸気を結露させる熱は潜熱であり、冷房熱量を消費するが、空気の温度低下には寄与しない。その代わり除湿に寄与している。

冷房の空調設計を厳密に行う場合、一定の冷房熱量を投入して得られる効果として温度低下（顕熱）と除湿（潜熱）のバランスを検討する必要があるため、本件では顕熱・潜熱の検討を行っている。

中温冷水を利用した熱源システムの評価
送水温度変化に伴うエネルギー消費量の基礎検討
Evaluation of heating system using medium-cold water
Basic study on energy consumption associated with change in water supply temperature

○小林 佑輔 (竹中工務店) 粕谷 敦 (竹中工務店)
Yusuke KOBAYASHI Atsushi KASUYA
Takenaka Corporation

This paper describes the effect of reducing the energy consumption of the heating system by changing the cold-water supply temperature.

はじめに

1970 年以前より空調システムの主流である中央熱源方式(セントラル熱源方式)は、エネルギー効率とメンテナンス性の良さから中高層オフィスビルを中心に数多く採用されている。オフィスビルなどで広く採用されている空調システムは、室温を 22~26°C に保つために、夏期は 7°C 以下の冷水、冬期は 45°C 以上の温水を作り、空調の吹出口から冷風や温風を吹き出すことによって空調を行うが、熱源機器の冷水出口温度を高めた「中温冷水」とすることで、熱源機器の更なる高効率化が可能となる。本研究では熱源機器の送水温度を変化させることで、熱源システム全体のエネルギー消費量の削減効果を把握する。

1 シミュレーションツール

本研究では、解析モデルにおける熱源システムの消費電力量を把握するために、LCEM ツール Ver3.10 を使用し、熱負荷モードを利用した期間計算を行った。建築地

は大阪とし、延床面積が約 50,000 m² の高層オフィスビルを想定し、熱源システムのみ解析モデルを構築した。熱源システムの解析モデルを図 1 に示し、熱源システム機器仕様を表 1 に示す。熱源システムは水冷チラー 2 台と空冷チラー 6 台の構成としている。熱源システムは外気条件と二次側境界条件で期間計算を行い、二次側境界条件は熱負荷モードを設定した。LCEM ツールにおける大阪の冷房標準熱負荷モードを図 2 に示す。空調時間は 8 時~20 時のパターンを使用する。1201h から 1600h の区間において冷房負荷が 0 以下となるが、室内負荷と外気負荷の合算より算定されており、室内負荷はあるが外気負荷が冷却として寄与していることを示す。今回は熱源システムを扱うため、室内負荷と外気負荷の合算値が 0 以下の区間は外気負荷を除外した補正後の冷房負荷で検証する。冷房負荷は標準熱負荷モードの負荷率に MICRO-PEAK による動的熱負荷計算にて得られた冷房時の年間ピーク熱負荷を乗じて算定した。

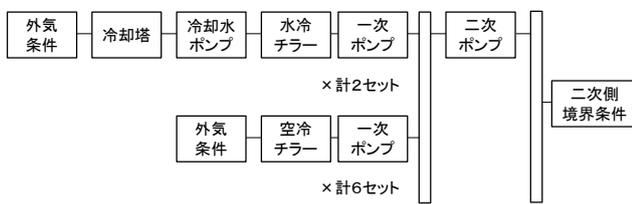


図1 解析モデル

機器名称	機器仕様	台数
水冷チラー	冷房能力160RT	2
冷却塔	冷却能力185RT	2
一次ポンプ	1610L/min × 11kW	2
空冷HPチラー	冷房能力25.8RT × 9M	6
一次ポンプ	260L/min × 3.7kW × 9M	6
二次ポンプ	3455L/min × 30kW	5

表1 熱源システム機器仕様

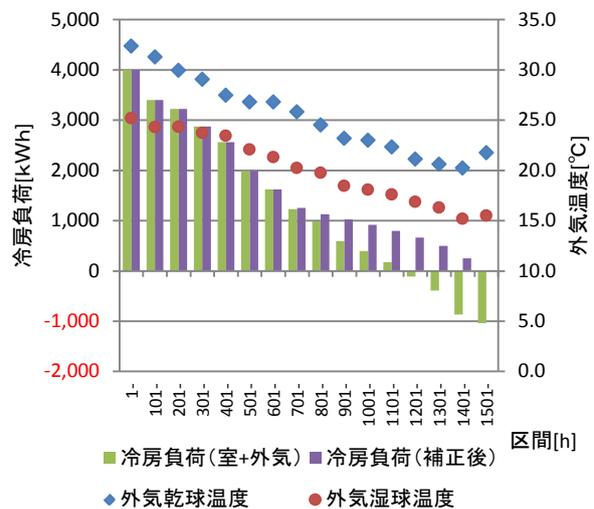


図2 冷房標準熱負荷モード (大阪)

3 送水温度を上げた場合のシステム COP 推移

(1) 解析条件

熱源機器の出口温度を高めた際に、熱源システムの年間消費電力量がどのように推移するか検証する。解析条件を表 2 に示す。送水温度は 7°C~9°C とし、出口温度を高めるほど温度差を小さくし、入口温度を低くしている。

(2) 解析結果

Case1 の条件において、年間の熱源システムの消費電力量を算定した。計算結果を図 3 に示し、各条件における消費電力量の構成比を表 3、図 4 に示す。熱源の冷水出口温度が高まるにつれて、搬送動力は増大するが、熱源システムの消費電力量は減少傾向になる。これより、熱源機器の送水温度を高めることは、熱源システムの高効率運転に寄与することが分かる。

表 2 解析条件 (CASE1)

	CASE 1-1	CASE 1-2	CASE 1-3
出口温度[°C]	7	8	9
入口温度[°C]	15	14	13
温度差[°C]	8	7	6

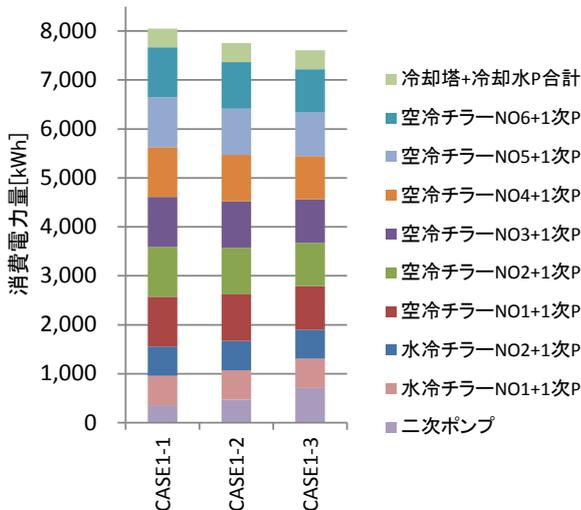
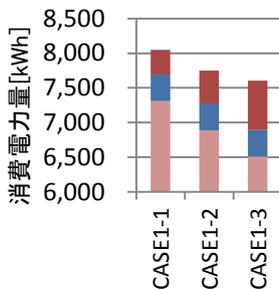


図 3 熱源システム消費電力量 (CASE1)



■ 熱源 ■ 補機 ■ 搬送

図 4 消費電力量構成 (CASE1)

表 3 消費電力量構成比 (CASE1)

	CASE 1-1	CASE 1-2	CASE 1-3
熱源	90.8%	88.9%	85.6%
補機	4.8%	5.0%	5.1%
搬送	4.4%	6.1%	9.3%

4 冷水可変送水温度制御 (VWT)

(1) 解析条件

熱源機器の出口温度を、年間を通じて一定とする場合と、熱負荷の負荷率に応じて高める冷水可変送水温度制御 (VWT: Valuable Water Temperature) を行う場合の熱源システムの年間消費電力量を比較した。解析条件を表 4 に示す。Case2-1 は出口温度を年間通じて 9°C とし、Case2-2 は負荷率に応じて出口温度を変化させている。温度差はいずれの条件も 5°C とした。

(2) 解析結果

Case2-1、Case2-2 の条件において、年間の熱源システムの一次エネルギー消費量を算出した。計算結果を図 5 に示す。空冷チラー運転台数は最大 4 台となっている。空冷チラーの計画台数は冷房ピーク負荷から設定しているため、今回条件では稼動する区間が無いと考えられる。搬送動力は冷水入口・出口温度差が同じのため、各条件で差は無いが、CASE2-2 では、冷水出口温度が高まることで熱源機器の COP が向上し熱源システム全体の消費電力量を抑えている。

5 熱源の部分負荷 COP を考慮した運転

(1) 解析条件

一般に、空冷 HP チラーは負荷率が低下すると COP が向上する部分負荷特性に優れている。高効率空冷 HP

表 4 解析条件 (CASE2)

	CASE 2-1	CASE 2-2								
	-	1-	101-	201-	301-	401-	501-	601-	701-	
区間[h]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
負荷率	-	0.83	0.71	0.67	0.60	0.53	0.41	0.34	0.26	
出口温度[°C]	9	9	10	10	10	11	11	12	12	
入口温度[°C]	14	14	15	15	15	16	16	17	17	
区間[h]		801-	901-	1001-	1101-	1201-	1301-	1401-	1501-	
負荷率		0.23	0.21	0.19	0.17	0.14	0.10	0.05	0.00	
出口温度[°C]		12	13	13	13	13	13	13	13	
入口温度[°C]		17	18	18	18	18	18	18	18	

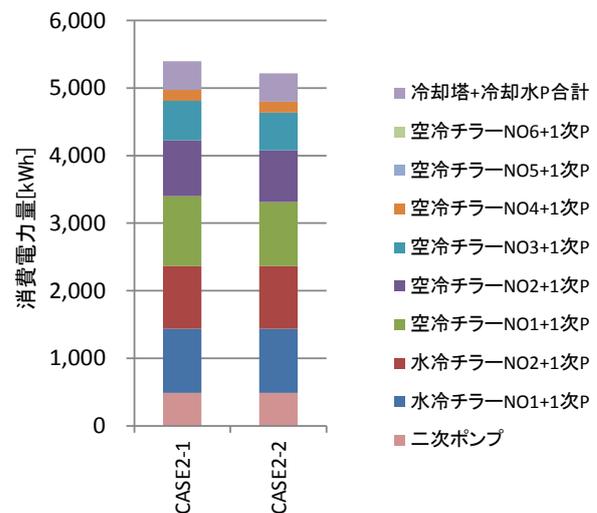


図 5 熱源システム消費電力量 (CASE2)

E-5

チラーの特性を図6に示す。熱源機器は負荷率が40%付近において、どの外気温度でもCOPが最大となる。CASE1、CASE2は熱源の増段条件を機器定格能力の負荷容量としたが、COPが最大となる負荷率40%の負荷容量とすることで更に高効率運転になると考えられる。そこで、CASE2の条件で熱源のうち空冷HPチラーの増段条件を負荷率40%の負荷熱量あるいは流量としCASE3として検証した。増段条件を表5、増段イメージを図7に示す。負荷熱量が3000kWの場合、CASE2は5台運転、CASE3は8台運転となる。

(2) 解析結果

Case3の条件において、年間の熱源システムの消費電力量を算定した。計算結果を図8に示す。CASE2と比較して更に消費電力量を低減できている。図9にCASE2-1、CASE3-1における熱源機器の運転台数を区間ごとに示す。区間701hまで空冷チラーが稼働しており、CASE3-1では運転台数は多いが、COPが高い負荷容量で増段しているため、熱源システムの消費電力量は低く抑えられている。

6 考察

冷水出口温度を高めた場合、熱源システムの年間消費電力量は抑えられるが、効果量が限定的である。熱負荷の算定に用いたLCEMツールの標準熱負荷モードでは、各区間において平均外気温度を用いている。実建物では、更に低い外気温度の期間も冷房負荷が発生し、更に熱源機器は高効率運転となるため、消費電力量は低くなると考えられる。また、今回機器構成を8台構成としたが、空冷HPチラーをモジュール構成とした場合の台数制御特性を加味できていない。今後の課題として、実建物に応じた負荷特性と空冷HPチラーの制御特性の反映と二次側機器まで含めたシステム構成の検証が挙げられる。

まとめ

本研究は、熱源機器の冷水送水温度変化に伴う熱源システム全体の消費電力量の変化を把握することを目的とした。その結果、冷水送水温度を高めることで熱源システムとして消費電力量削減が可能となる。

参考文献

- 1) 国土交通省大臣官房官庁営繕部 設備・環境課:
「LCEM ツール ver.3.10 主要オブジェクトの計算アルゴリズム」

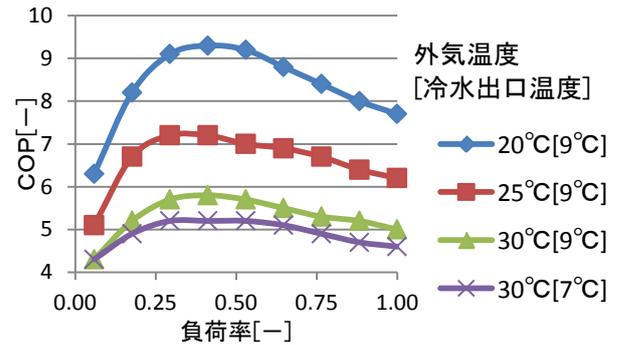


図6 空冷チラー特性

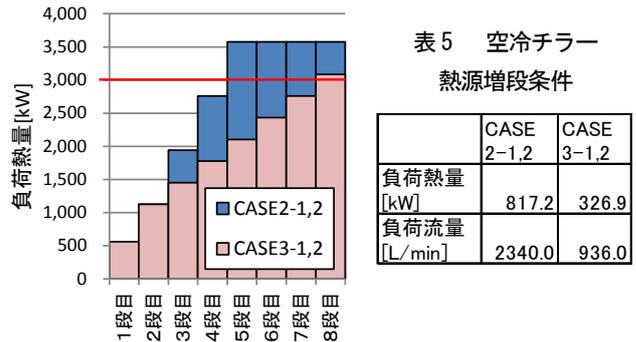


図7 空冷チラー熱源増段イメージ

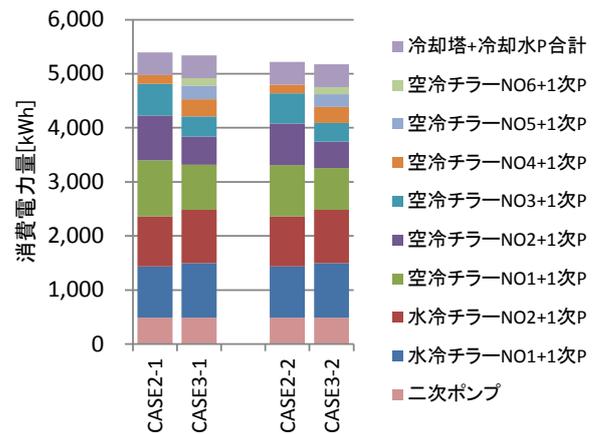


図8 熱源システム消費電力量 (CASE2, 3)

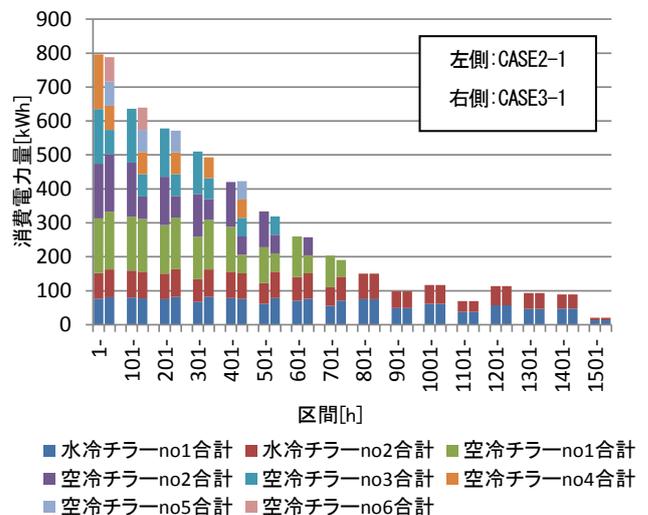


図9 熱源運転台数 (CASE2-1, 3-1)

病院向けノンドラフト型快適空調システムの性能検証

Performance Verification of Non-draft Comfortable Air-Conditioning System for Hospital

○杉浦 佑紀 (三機工業)

上田 紳悟 (三機工業)

植村 聡 (三機工業)

新村 浩一 (三機工業)

山口 倫明 (三機工業)

Yuki SUGIURA*¹ Shingo UEDA*¹ Satoshi UEMURA*¹ Koichi SHINMURA*¹ Tomoaki YAMAGUCHI*¹

*¹ Sanki Engineering Co.Ltd.

The airflow draft by air conditioning is one of causes that hospital patients on the bed feel uncomfortable. To reduce the airflow draft, the all-air radiant air-conditioning system is recently set up. This system has air conditioning effects of both convectional airflow and radiation. We developed the new air outlet of diffusion of which convectional airflow effect is controlled to reduce against the patient on the bed. This system was introduced into a hospital, so we'll report a result of temperature, velocity and wind direction.

はじめに

近年では居室内の快適性が強く求められており、行動が制限される入院患者が過ごす病室では特に重要視されている。快適性の重要な要素である室内の温熱環境は空調機器によって保たれるが、一方で空調による騒音や気流感が居室内の患者の不快感を引き起こす原因となることも多い。また、患者や医療スタッフへ快適性に関するアンケート調査を行うと温湿度、気流感、におい、騒音など多岐に渡って問題点が挙げられる。特に不快な気流（ドラフト）に対する不満は多い。水式の輻射空調であれば騒音、ドラフトの問題は解消されるが熱処理能力の低さから導入のハードルは高い。

そこで筆者らは居室内の空調、特に気流に関わる問題を解消するため、2014年にノンドラフト型快適空調システムを開発し^{1,2)}、実現場での実機導入と室内の温度測定と風速測定を行った³⁾。本報では2018年春に移転開院予定の公益財団法人日本生命済生会日本生命病院内に、ノンドラフト型快適空調システムを全面的に導入し性能検証を行ったので、形状の異なる4室の温度と風向風速の測定結果を中心に報告する。

1. ノンドラフト型快適空調システムの概要

ノンドラフト型快適空調システムの根幹をなす拡散型吹出口を図1に示す。この拡散型吹出口は側面スリットとサイドパンチングおよび独自の気流拡散構造によって構成されている。これにより、図2に示す通りベッド上の患者に直接風が直接当たらない方向に吹出し、ほとんど気流を感じさせることがない。一方で、ベッド側面に立つ医療従事者や見舞客に対しては、多少の気流感を与えて快適性を向上させる。このような患者を避ける方向での冷温風の給気と、パネル面からの輻射効果により冷

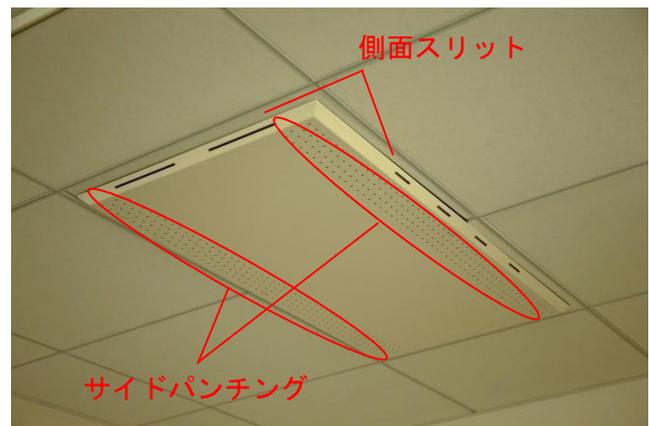


図1 拡散型吹出口

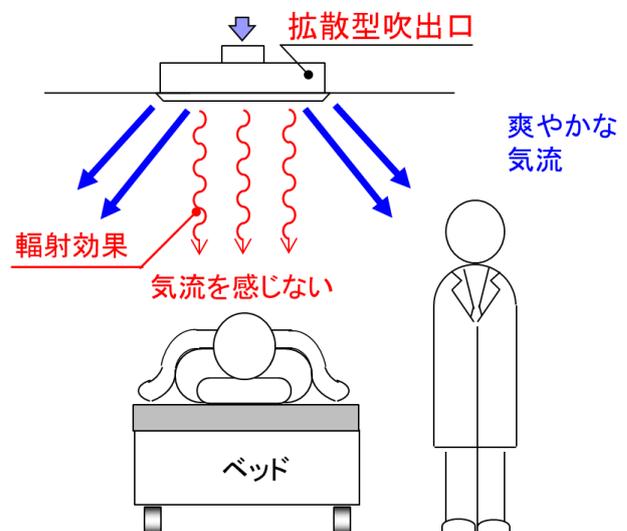


図2 ノンドラフト型快適空調システム

温感を供給することができ、ベッド上の患者にとって快適な空調を行うことが可能である。

2. 測定条件

測定は2017年9月に行った。測定時は試運転調整段階であったため、ベッド等什器類や医療機器等の発熱体は設置されていない。詳細を下記に記す。

2.1 測定対象室

測定対象室と測定点を図3に示す。測定対象室は4床室、個室A、B、Cの四室とした。拡散型吹出口は4床室には4台、個室A、B、Cには各1台設置されている。拡散型吹出口の側面スリットは、壁側短辺を除く3辺とし、壁に沿って患者頭部に流れる風量を抑制する。その他、設置されている制気口や空調機還気口、その風量、位置を同図に示した。空調機還気口については、個室Cでは天井面に吸込口を設け、その他の室では機器付属のスリット状の吸込パネルとした。なお、個室B、個室Cの排気量に関しては、ミニキッチンに排気扇が存在するが測定時は停止していたため記述していない。

また、各室に設置されているブリーズライン型吹出口は、拡散型吹出口の気流を極力乱さないために、直下ではなく反対側の壁面に向けて、斜め下方向に吹き出すよう調整した。

2.2 測定項目

(1) 風向風速分布

各室において、拡散型吹出口の直下のベッドと想定される箇所を詳細に測定した。水平面ではベッド範囲内で250mm間隔、範囲外では500mm間隔を測定点とした。ベッドは1000×2000mmと想定した。垂直面では、FL+800、1300、1800、2300mmを測定点とした。

測定には、三次元風向風速計（ソニック製 WA-590）を用い、安定した30秒間の平均値を整理した。ドラフトが無いことの判定基準値は、ISO7730⁴⁾にある風速0.25m/s以下とした。

(2) 室内代表温度・垂直温度分布

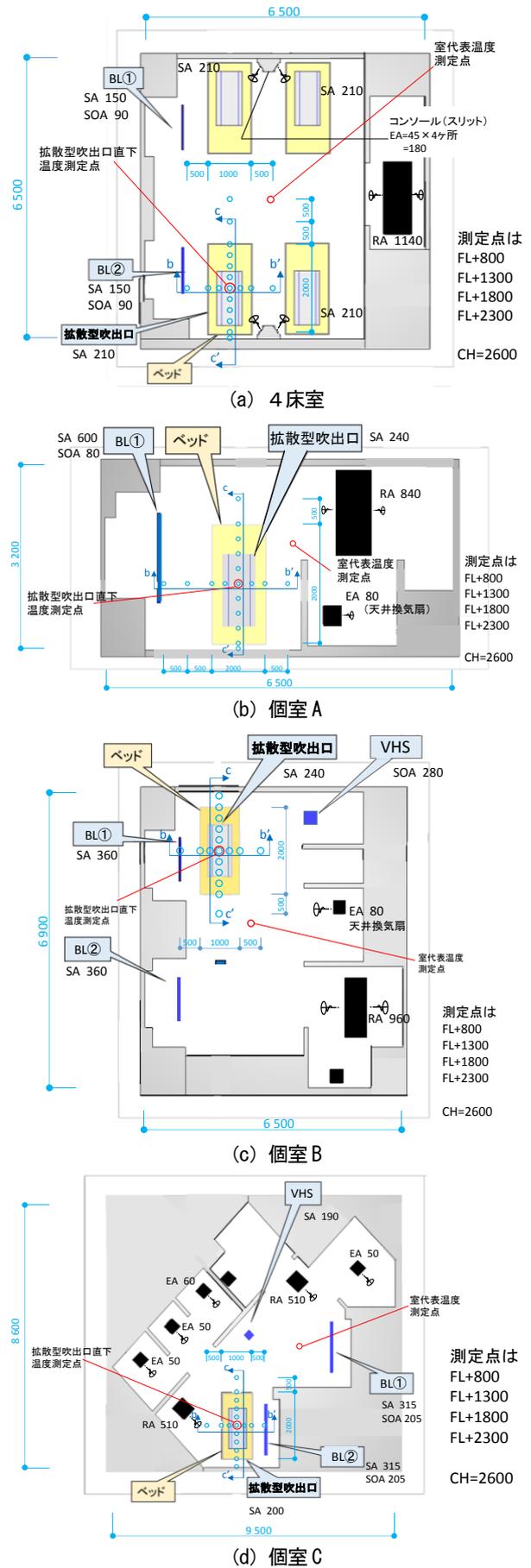
各室において垂直温度分布を測定するため、拡散型吹出口の直下でFL+800、1300、1800、2300mmを温度測定点とした。

また、室内の代表点をそれぞれ図3に示した位置に定め、FL+1500mmで温度測定を行った。さらに、吹出口内にセンサーを取り付け、吹出温度を測定した。

測定には、温湿度ロガー（T&D製おんどとり RTR-507）を用い、1分間隔で60分の平均値を整理した。

2.3 室内空調条件

測定時は夏期であり、冷房運転とした。設定は室内空調機を26℃（風量：強モード）とし、外調機を自動運転（給気温度制御）とした。なお、温度測定時には、測定



記号：SA；給気、SOA；外気、BL；ブリーズライン型吹出口
図3 測定対象室と測定点

者の立ち入りが無い状態とした。

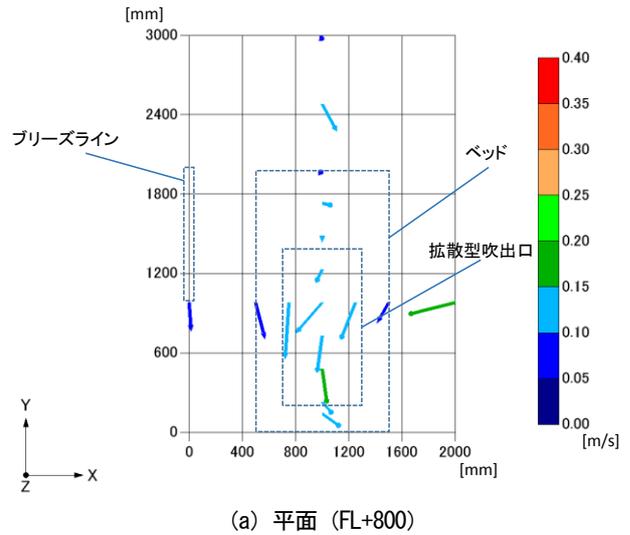
3. 測定結果

3.1 4床室

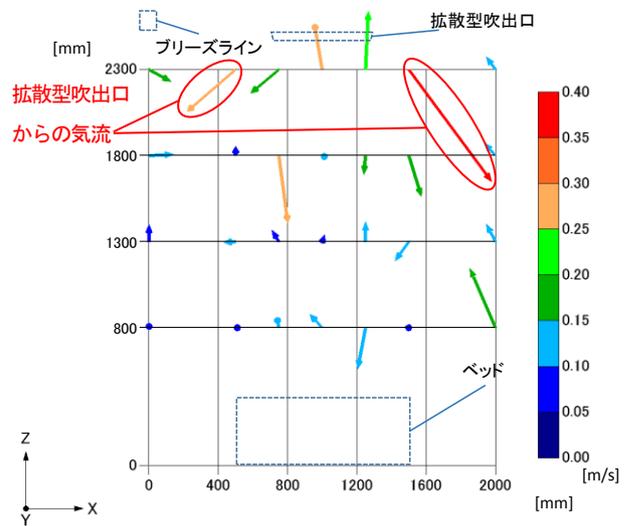
ベッド上、患者の仰臥位時を想定し、FL+800の水平面について、ベッド短手方向の風速分布を図4に示す。同図より、ベッド範囲の風速は0.09～0.15m/sであり、基準値以下であることが確認できる。また、ベッド範囲外となるX=2000で少し風速が大きいのは、側面スリットからの吹出しの影響と考えられる。

同様にベッド長手方向の風速分布を図5に示す。同図より、ベッド範囲の風速は0.07～0.15m/sであり、基準値以下であることが確認できる。以上より、ベッド上の風速は基準値以下であり、ドラフトのないことが確認できた。

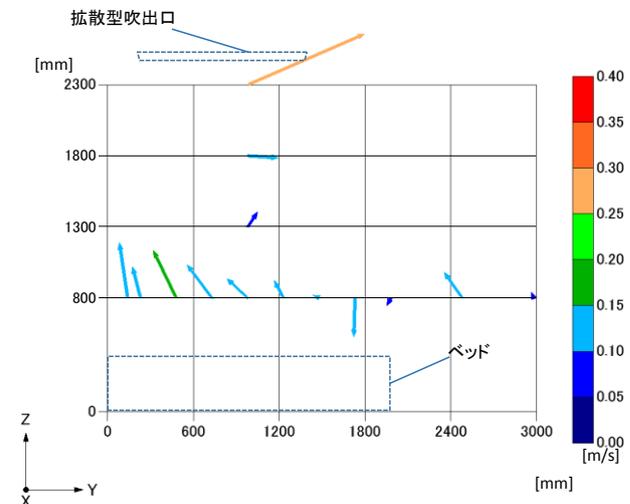
各断面の風向風速分布を図6に示す。同図(a)はベッド上となる水平断面の分布であるが、いずれも0.25m/s以下であり、壁側となる頭側に気流がやや向いている。同図(b)はベッド短手の垂直断面であるが、拡散型吹出口の側面スリットからの吹出しにより、天井付近で大きな風速が見られるが、ベッド上は平穏であることが分かる。同図(c)はベッド長手の垂直断面である



(a) 平面 (FL+800)



(b) b-b' 断面 (ベッド中心)



(c) c-c' 断面 (ベッド中心)

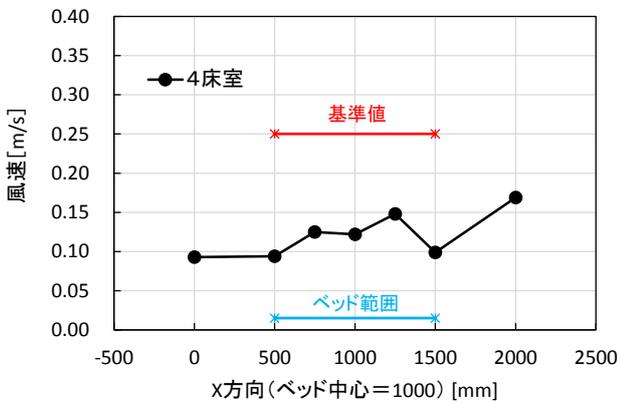


図4 ベッド上風速 (4床室、FL+800、b-b' 断面)

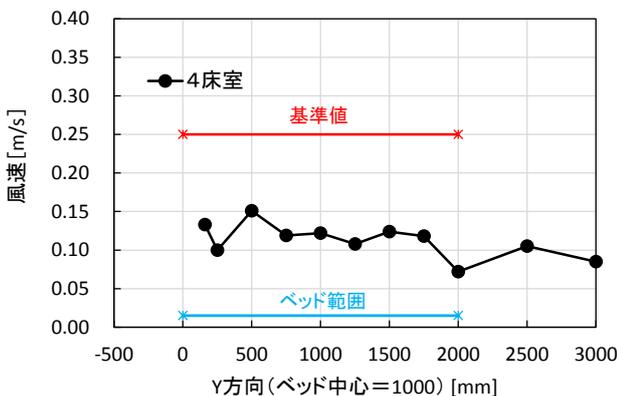


図5 ベッド上風速 (4床室、FL+800、c-c' 断面)

図6 風向風速分布 (4床室)

が、ベッド上は平穏であり、0.1m/s 程度ではあるが壁際での上昇気流が見られる。

図7に、垂直温度分布を示す。拡散型吹出口の直下の居住域 (FL+800~1800mm) は 24.9℃~25.3℃であり、ほぼ一様で快適な分布であることが確認できる。

3.2 個室A、B、C

個室におけるベッド短手方向の風速分布を図8に示す。同図より、ベッド範囲では 0.08~0.18m/s であり、基準値以下と確認できる。また、ベッド範囲外になると風速は大きくなる傾向にあり、拡散型吹出口の側面スリットの効果と考えられる。個室Cの X=2000 地点 (ベッド範囲外) での風速が大きいのは、ブリーズラインからの吹出しが内壁に沿って下降した気流の影響と考えられる。

同様にベッド長手方向の風速分布を図9に示す。同図より、ベッド範囲の風速は 0.07~0.20m/s であり、基準値以下である。こちらはベッド範囲外での風速増加傾向が顕著にはみられない。これは、この地点に到達する気流が、短辺の側面からの給気が主であり、長辺と比べ少ないためと考えられる。個室Aの X=120~250 や個室Bの X=1750 など、若干風速が大きいのは壁近傍で気流が集まり易いためと考えられるが、いずれも基準値 0.25m/s 以下である。

垂直温度分布を図10に示す。いずれも居住域 (FL+800~1800) において 25℃±0.5℃の範囲内であり、ほぼ一様であると確認できた。

4. まとめ

ノンドラフト型快適空調システムを全面的に採用した実病院において、形状の異なる4室の気流と温度環境を測定した。その結果、ベッド上患者の仰臥位時高さ FL+800 の空間における風速は、今回測定した代表4室すべてにおいて 0.25m/s 以下でドラフトを感じない風速であることが確認できた。また垂直方向の温度分布はほぼ一様であり、快適な温熱環境であることも確認できた。

参考文献

- 1) 小松ほか: 病院向けノンドラフト型快適空調システムの開発 (第1報) ベッド上における気流抑制効果、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 365-368、2015.9
- 2) 植村ほか: 病院向けノンドラフト型快適空調システムの開発 (第2報) 室内温度分布、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 369-372、2015.9
- 3) 宮崎ほか: 病院向けノンドラフト型快適空調システムの開発 (第3報) 実病院における性能検証、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 449-452、2016.9
- 4) ISO7730, Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, 1984

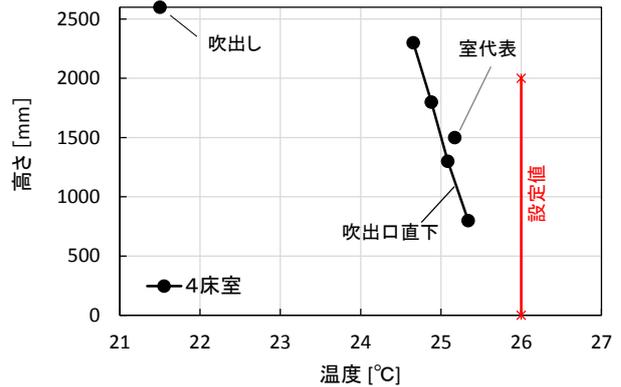


図7 垂直方向温度分布 (4床室)

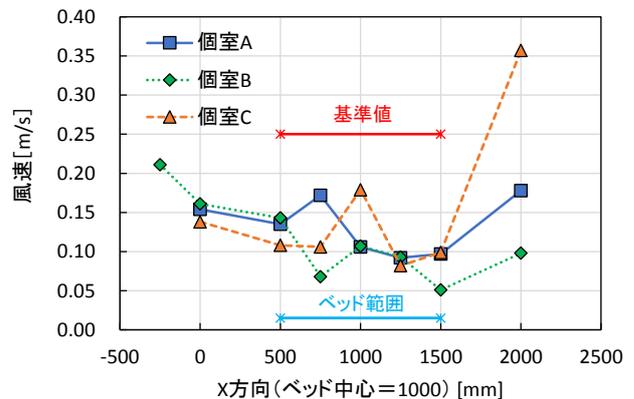


図8 ベッド上風速 (個室、FL+800、b-b' 断面)

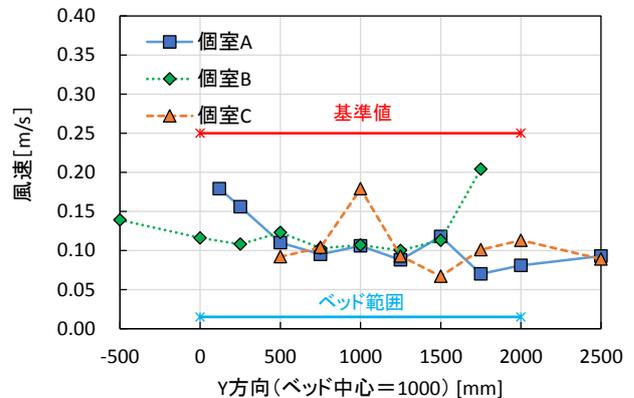


図9 ベッド上風速 (特室、FL+800、c-c' 断面)

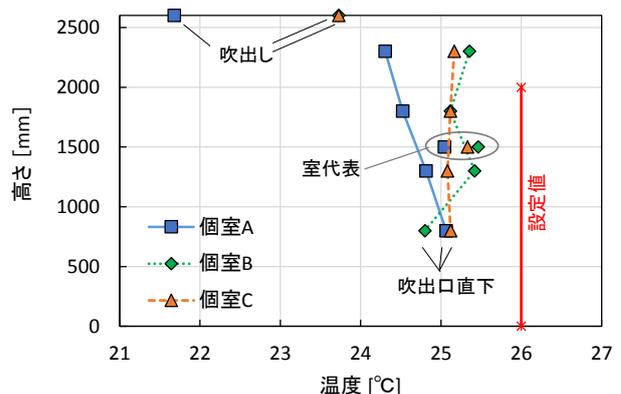


図10 垂直方向温度分布 (個室A、B、C)

建築設備技術の最新動向 The Latest Trend of the Building Facilities Technique

○永吉 敬行 (大成建設) 根本 昌徳 (大成建設)

Takayuki NAGAYOSHI*¹ Masanori NEMOTO*¹

*¹ TAISEI CORPORATION

はじめに

2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画において「建築物については、2020年までに新築公共建築物等で、2030年までに新築建築物の平均でZEBを実現することを目指す」とする政策目標が設定されている。ZEBとは、建物設計時における年間エネルギー収支（生成エネルギーと消費エネルギーの年間積算収支）が概ねゼロもしくはプラスとなる建築物を意味し、低炭素化社会の実現やエネルギーセキュリティ向上を目的とした施策として期待が高まっている。当社では建築設備のスマート化やさまざまな省エネルギー技術の新規開発、保有技術の更なる進化を促進させ、建物のエネルギー消費とCO2排出量の削減を行いZEBの実現を図っている。

1. 省エネ・ZEB 関連技術

Table. 1 に代表的な省エネ・ZEB 関連技術一覧を示す。

1.1 T-ZEB シミュレーター

当社では、ZEBの普及展開に向け、ZEB化実現のための計画・評価ツール「T-ZEB シミュレーター」を開発した。この計画・評価ツールは計画建物だけでなく、周辺建物を含めて仮想空間にモデルを構築し、立地環境から取得可能な創エネルギー量と、建物計画で採用する省エネ技術の効果をシミュレーションできるツールである。創エネと省エネの手法を様々なパターンで目標とするZEBレベルに応じた、コストスタディも検討可能であり、計画建物のZEB化や、ZEB指向建物の提案を行うことができる。(Fig. 1)

1.2 T-Zone Saver

当社で開発した「T-Zone Saver」は、次世代人検知センサーにより得られるリアルタイムの人の在席情報をもとに、照明・空調設備を最適に自動制御し、省エネを図ることができる。(Fig. 2)

1.3 T-Green BEMS

BEMS (Building and Energy Management System) とはビル・エネルギー・マネジメント・システムのことで、建物内の使用エネルギー等を把握し、省エネ等に役立つシステムである。当技術は利用者の視点に立った、分かり易さ・使いやすさに重点を置いたデザインを採用することで、エネルギー管理の業務効率をサポ

ートしている。さらに、施設内のPCから電力状況を把握することができる「エネルギー見える化画面」により、省エネ意識の啓蒙を図り、施設の執務者へ節電行動を促すことができる。(Fig. 3)

2. まとめ

今回、最新の省エネ・ZEB 関連技術の一例を紹介したが、この他にも省エネ・ZEB、BCP、ウェルネス技術等様々な建築設備技術の開発が進められている。これらの最新技術の積極的な導入を図り、さらなる省エネ、安心・安全、快適性の確保等を実現し、顧客満足、社会貢献等を目指していく。

Table.1 ZEB technology

技術名				
電気	1	T-Zone Saver	2	大成オリジナルLED照明
	3	T-Soleil (太陽光採光システム)	4	有機薄膜太陽電池外壁ユニット
	5	T-Light Cube 採光システム	6	T-Light Louver 採光システム
空調・換気	1	場所打ち杭利用地中熱空調システム	2	躯体蓄熱放射空調システム
	3	T-Personal Air Ⅲ (パーソナル空調)	4	T-Radiant Slab (排熱利用躯体放射空調)
	5	空調の冷媒蒸発温度制御	6	T-Fresh Air (インテリジェント自然換気システム)
その他	1	T-GreenBEMS	2	T-ZEB シミュレーター
	3	T-Façade Air 薄型ダブルスキン		

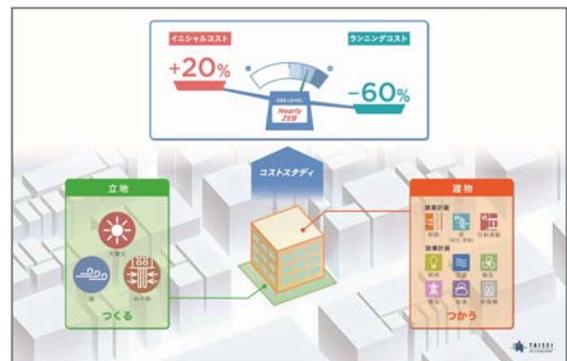


Fig.1 T-ZEB simulator



Fig.2 T-Zone Saver



Fig.3 T-Green BEMS

中規模オフィスビルにおけるZEBへの取り組み Approach to Zero Energy Building in the Middle-size Office

○西村 鉄平（昭和設計）

谷口 勝則（昭和設計）

岸本 卓也（関西電力）

山口 麻有（関西電力）

Teppei NISHIMURA*¹ Katsunori TANIGUCHI*¹ Takuya KISHIMOTO*² Mayu YAMAGUCHI*²*¹ The Kansai Electric Power Co.,Inc. *² Showa Sekkei, Inc.

はじめに

本建物は、低炭素都市『クールシティ・堺』の実現を目指す大阪府堺市のシンボルロード沿いに位置することから、地域における低炭素社会をリードする『次世代型オフィス』にふさわしい外観を目指すと共に、様々な環境配慮技術を導入した。事務所ビルの年間一次エネルギー消費量原単位（1,993MJ/m²・年）から30%削減した1,394MJ/m²・年を目標値とし、竣工後の運用実績で662MJ/m²・年と目標値に対して約53%の削減（一般事務所ビル比約67%削減）を達成し、ZEB Ready相当の性能を発揮することができた。また、『防災』の観点では、南海トラフ巨大地震に備えた堺市の津波避難対策のひとつである津波避難ビルに指定され、緊急避難場所としての役割も担うことから、災害時の復旧活動拠点として施設の機能維持に必要な設備を導入した。

1. 建物概要

建物概要を表-1に示す。本建物は延床面積が約7300m²の中小規模オフィスビルであり、「環境」、「防災」、「快適性」をキーワードに計画した。

2. 環境配慮計画

2.1 配置計画・平面計画

メインアプローチとなる大小路シンボルロードに面して本館棟を配置することで利便性のよい計画とした。建物は自然採光を効率的に享受でき、日射負荷を抑制できるように東西軸を意識した配置とした（図-1）。

執務室は約15mスパンの無柱空間を確保するとともにモジュール寸法を採用することで、建物利用者の快適性や将来の更新に対する柔軟性の向上を図った。

また、コアを西側に計画し、西日の日射負荷抑制を図ると同時に、敷地西側のマンションへのプライバシーに配慮した（図-2）。

2.2 外皮計画

建物で消費されるエネルギーの中で空調の割合は大きく、空調エネルギー消費量削減には外皮負荷の抑制が重要である。本建物では、高断熱化（断熱材50mm採用）とLow-E複層ガラスの採用に加えて、庇・縦ルーバーの出幅について、最大熱負荷計算により日射負荷削減効

表-1 建物概要及び設備概要

建設地	大阪府堺市 堺区熊野町	
建物用途	事務所	
敷地面積	3245 m ²	
建築面積	1029 m ²	
延床面積	7338 m ²	
構造	鉄骨造	
階数	地上8階	
竣工	2014年8月	
電気設備	受電方式：高圧2回線受電 主たる照明器具：高効率高周波点灯型蛍光灯、LED照明 その他：太陽光発電設備、見える化設備	
空調設備	熱源：電気式空気熱源ヒートポンプビル用マルチエアコン（EHP） 換気：直膨コイル付全熱交換器 自動制御：PLC方式、最適運転制御設備	
衛生設備	給水方式：加圧給水方式 給湯設備：ヒートポンプ給湯器	
搬送設備	エレベーター2台	



図-1 配置計画

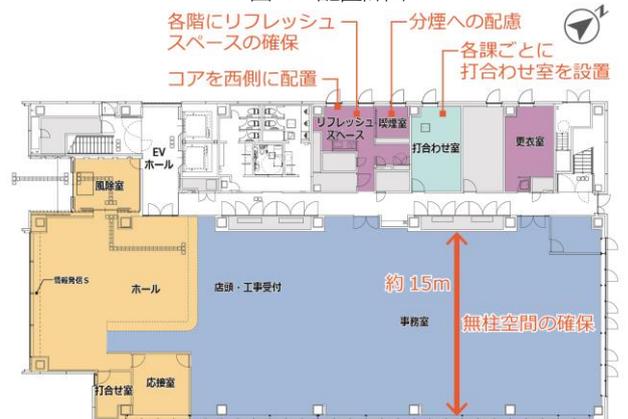


図-2 平面計画

移を示す。年間を通して約 3,000kWh/月で、日照時間が多い月の消費量が少ない傾向にある。2 階事務室の代表日（2015/9/1：晴、2015/9/3：雨）における照明電力消費量の推移を図-9 に示す。9/1 と 9/3 を比較すると、日射強度の大きい 9/1 の方が昼間の電力消費量が少ない。日光利用により、照明出力が絞られていることが分かる。特に、LED 照明採用フロアでは照度 500lx 設定で平均照明消費電力が 3.4W/m²と非常に小さい。

4. 外部指令による個別空調最適制御

本建物の空調設備には、設計・施工が容易でコスト面に優れ、運転効率が高い電気式空気熱源ヒートポンプ方式ビル用マルチ空調機（以下、EHP と称す）を全面的に採用した。EHP は一般のユーザーには使い勝手がよいが、性能検証を行うにあたっては、処理熱量や運転挙動が把握できず、徹底した省エネルギーと室内環境、空気質などの最適性を考慮する等きめ細やかな制御を行うことは難しい。そこで、メーカーの協力のもと EHP の運転データを取得し、外部から EHP に対して運転指令を行うことができる空調・照明外部指令制御システム（図-10）を開発した。当システムにより、EHP の能力・運転状態や室内環境を監視しながら、EHP 室外機出力・室内設定温度や設定照度を段階的に抑制することが出来る。EHP 高効率制御では、図-11 に示す通り、当該建物の EHP は負荷率 40%付近の領域で COP が高くなることから、この時間帯での運転を長時間化する制御とした。また、室内温湿度や CO₂ 濃度に応じて外気処理用 EHP の室外機出力や運転台数を制御することで、徹底した省エネルギーと適正な室内環境の両立を目指した。これらの省エネルギー制御を運用開始後から実証試験を行い、その効果と快適性を評価し有効性を確認した。

図-12 に個別空調最適制御の代表日における結果を示す。外気温度の近い日で制御無効日と制御有効日の空調電力消費量を比較した結果、冷房期で 39%、暖房機で 47% の削減を達成した。個別空調最適制御を年間を通じて有効にした場合の効果は推定したところ、夏季（7 月～9 月）は約 21%、夏季以外は約 20%の電力消費量削減効果があると試算された。

図-13 は冷房期における個別空調最適制御を行った時の室外機の運転状況および代表室内温湿度である。制御無効日は外気処理用 EHP が給気温度の設定値を持たないため、室内負荷処理用 EHP の設定温度 26 度以下に冷房していた。それに対して、制御有効日は EHP の出力が抑えられ、室内温度は設定値に近づく結果となった。

図-14 は外気処理機 CO₂ 濃度制御の制御結果である。室内 CO₂ 濃度に合わせて外気導入量を必要最小限に調整することで、外調機の延べ運転時間を常時 2 台運転に比べ 43%削減し、外気負荷を抑制することが出来た。個別

空調最適制御の無効日・有効日それぞれにおいて、在室者へのアンケートを実施した。温度環境・湿度環境ともに制御無効日と制御有効日で満足度の差は見られず、温度環境は 7 割以上、湿度環境は 8 割以上が不満ではないとの回答であった。このアンケート結果と図-12 より、在室者は個別空調最適制御によるわずかな室内環境の変化に気づかなかつたと考えられる。

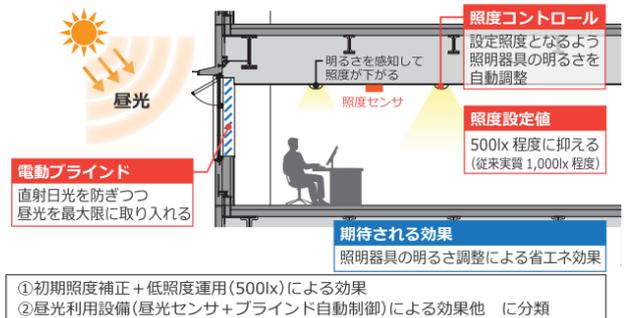


図-7 日光利用計画図

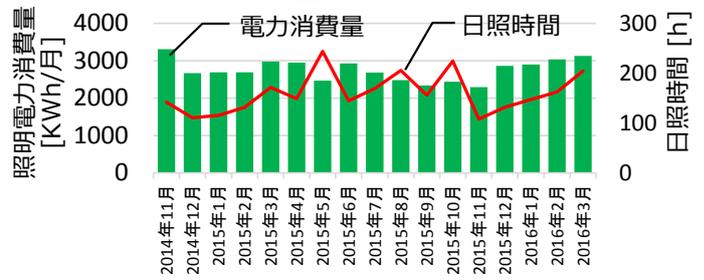


図-8 執務室の月間照明電力消費量と日照時間

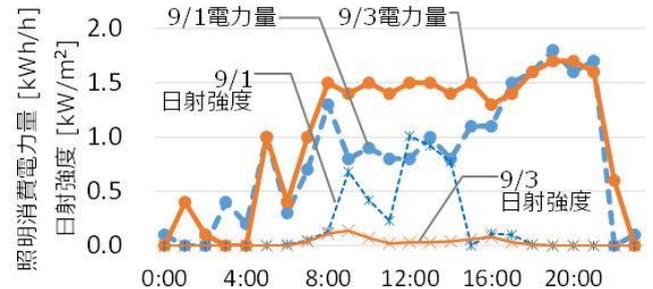


図-9 2 階事務室代表日における照明電力消費量の推移

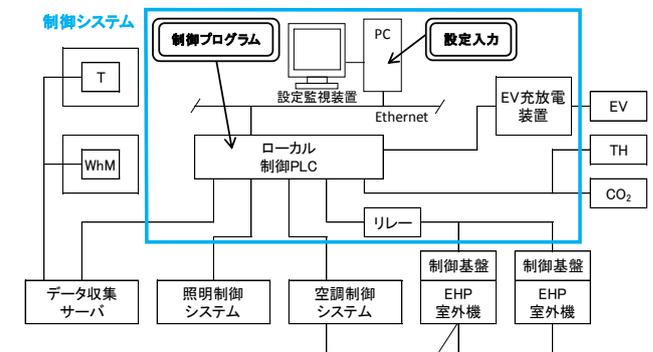


図-10 空調・照明外部指令制御システム概要図

5. 2015 年度エネルギー消費実績・エネルギー消費原単位

5.1 月間電力量および年間電力量の用途別比率

図-15 に建物全体の月間電力消費量の推移を、図-16

に2015年度の年間電力消費量の用途別比率を示す。空調負荷が大きい夏、冬に熱源電力消費量が多く、建物全体では8月にピークが発生している。特殊用途である通信機器室を除いた用途別電力消費量比率では、年間を通して電力を消費している「電灯コンセント」の比率が27%と最も多く、次に「熱源」が22%、「厨房」が13%を占めている。

5.2 一次エネルギー消費量原単位

図-17に2015年度(2015年4月~2016年3月)の年間一次エネルギー消費量原単位を、図-18に、ZEB評価指標を示す。基準建物の原単位を1,993MJ/m²・年と想定すると、実績値662MJ/m²・年^{注1)}と67%削減を達成しており、本建物は、ZEB readyクラスの性能を発揮できている。削減効果については、熱源・空調では、使用者による省エネルギー活動(空調機の運転エリアや運転時間の制限)による効果大きい。その他に、中間期における外気冷房運転や高度な空調運転制御手法の導入効果等により削減できている。また電灯では、使用者による省エネルギー活動(電灯の点灯エリアや点灯時間の制限)により削減できている。

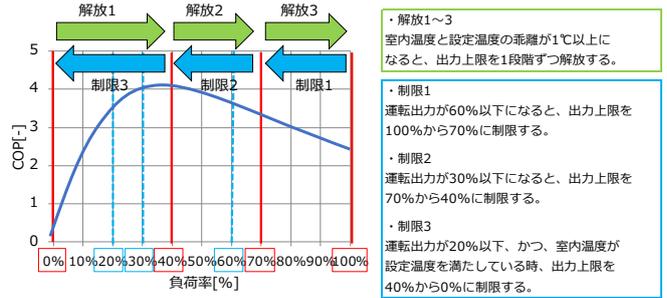


図-11 EHP 高効率制御概要図

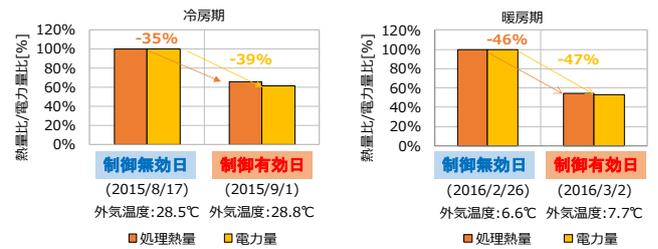


図-12 個別空調最適運転制御結果

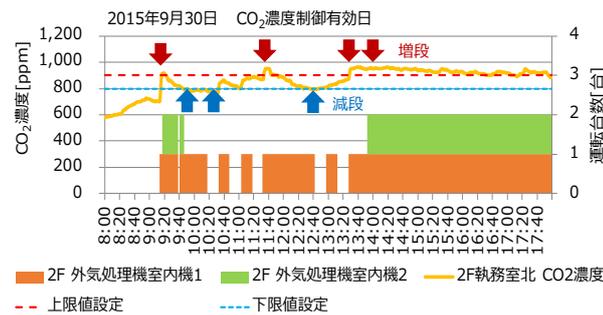


図-14 外気処理機CO₂濃度制御結果

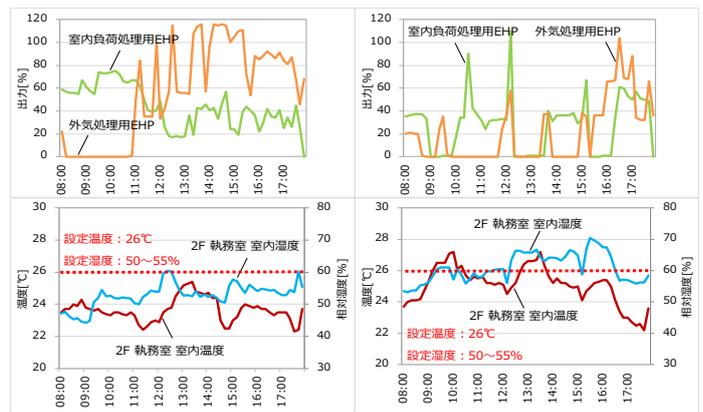


図-13 個別空調最適制御時の室内環境

6. まとめ

多種多様な環境負荷削減手法を可能な限り最小コストで導入するとともに、ビル用マルチ空調機の高度な制御手法を開発し採用した。竣工以後、性能検証WGを定期的に開催し、計測データや実証試験より室内環境やエネルギー性能を検証・評価した。

その結果、当初目標である一般事務所ビルの年間一次エネルギー消費量原単位から実績で約67%の削減を達成した。この成果は中小規模オフィスの省エネモデル事例となり、今後の省エネルギーの推進につながることを期待したい。

注1) 一次エネルギー消費量原単位は通信機器室を除いた数値。

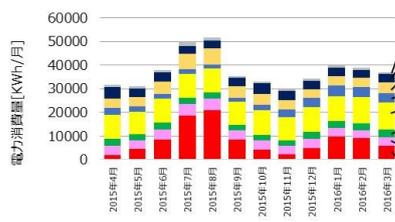


図-15 月間電力消費量の推移

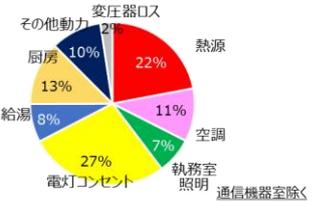


図-16 年間電力量の用途別比率

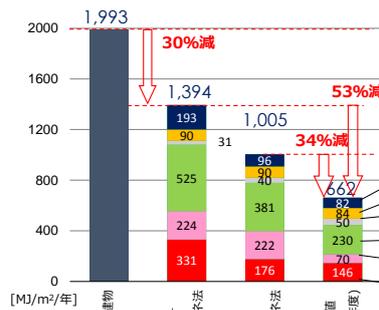


図-17 年間一次エネルギー消費量原単位

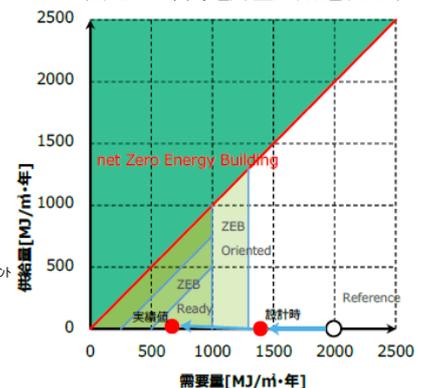


図-18 ZEB チャート

ホルムアルデヒド除去システムの開発 Development of Formaldehyde Removal System

○福谷 篤正 (新菱冷熱工業㈱) 山下 一彦 (新菱冷熱工業㈱) 中村 浩二 (新菱冷熱工業㈱)
湯 懐鵬 (新菱冷熱工業㈱) 穴井 俊博 (新菱冷熱工業㈱)

Atsumasa Fukutani*¹ Kazuhiko Yamashita*¹ Koji Nakamura*¹ Huaipeng Tang*¹ Toshihiro Anai*¹

*¹ Shinryo Corporation

医療施設の病理検査室や解剖室で問題となっているホルムアルデヒド汚染問題を解決する手段として、「ホルムアルデヒド除去装置」と「特殊な気流方式を用いた局所排気装置」の2つの要素技術から成る循環除去方式の空調換気システムを開発した。基礎研究で2つの要素技術を確立した後、循環除去方式の空調換気システムの性能を実規模試験で検証した。作業環境測定に準じて試験室内のホルムアルデヒド濃度を測定した結果、すべての測定点で管理濃度0.1ppm以下になることを確認した。

はじめに

医療福祉施設において行われる病理検査では、摘出した体組織のホルマリンによる固定や組織の洗浄、写真撮影による記録、切出しなどの作業時にホルムアルデヒドが室内に放出される。これらの作業は作業頻度が高く長時間に及ぶため、作業の過程で発生したホルムアルデヒドに作業者が曝露される危険性が高い。このような状況下において、2008年に特定化学物質障害予防規則（通称、特化則）が改正されてホルムアルデヒドの管理濃度が0.1ppmと厳しくなり、ホルムアルデヒドの発散源に局所排気装置等を設置することが義務付けられた。しかし、既存施設を改修する場合、建物構造上の問題で外気量・排気量の増強が困難な場合が多いこと、局所排気装置等の設置による作業性の悪化などが問題となり、対策工事を実施できない場合がある。

これらの問題を解決するため、「ホルムアルデヒド除去装置」と「特殊な気流方式を用いた局所排気装置」の2つの要素技術から成る循環除去方式の空調換気システムを開発した。本稿では基礎研究から得られた要素技術の特長と、実規模試験におけるホルムアルデヒド濃度の測定結果について報告する。

1. 基礎研究

1.1 ホルムアルデヒド発生量の推定

1.1.1 切出し作業台、撮影台、流し台の発生量

実在する切出室において、対策工事前のホルムアルデヒド濃度を測定し、その結果から切出し作業台、撮影台、流し台におけるホルムアルデヒドの発生量を推定した。室内のホルムアルデヒド総発生量は、室内の濃度と外気、排気系統の濃度から瞬時一様拡散を想定して算出した。同時作業中の検体数から算出した結果、

20%中性緩衝ホルマリン液を用いた場合の検体一つあたりの発生量は70~200mg/hであった。本開発では安全側を考慮し、切出し作業台、撮影台、流し台の発生量を250mg/hとした。

1.1.2 固定槽の発生量

固定槽にはホルマリン液が満たされており、検体の出し入れの際に蓋を開放する。固定槽からのホルムアルデヒド発生量を明らかにするため、NIOH (National Institute of Occupational Health) が提案した液溜りモデルを用いた。20%中性緩衝ホルマリン液を入れた固定槽1台あたりの発生量を推測した結果、約650mg/hとなった(液温25℃、液溜りに平行な風速0.2m/s、液面300mm×300mmの場合)。

1.2 ホルムアルデヒド除去装置の開発

触媒分解や活性炭吸着などの除去方式を用いる空気清浄機および除去フィルタによるホルムアルデヒドの除去技術について、性能評価法を含め継続的な研究がなされている²⁾。従来のホルムアルデヒドの除去技術の問題点として、分解方式における中間生成物の発生、活性炭などの物理吸着方式における除去性能の持続性(或いはライフタイム)が指摘されている³⁾。

1.2.1 ホルムアルデヒド除去装置の構成

従来技術の問題点を解決するため、アミノ酸を用いた除去技術の開発を行った。アルデヒド類は、アミノ酸と化学反応して無害化することが知られている⁴⁾。ただしアミノ酸をそのまま空気中のホルムアルデヒドの除去に使うと、反応効率が低く、また空気中のNO_x、オゾンなどに酸化されるため、長期的に性能を維持することは困難である。

開発した薬液は、グリシンなどのアミノ酸を水中に溶解し、pHを9以上のアルカリ性に調整してホルムアルデヒドとの反応効率を高め、更に適切な酸化防止

剤とキレート剤を加えることでアミノ酸の長期安定性が強化されている^{5) 6)}。なお、薬液はすべて食品添加物で構成され安全性が高い。

ホルムアルデヒド除去装置の構成を図-1 に示す。アミノ酸を用いた薬液を薬液槽に保持し、ポンプで薬液を滴下エレメントに供給する。十分な薬液が含浸した状態の滴下エレメントをホルムアルデヒド含有空気が通過する際、グリシンとの化学反応を利用してホルムアルデヒドを除去する。

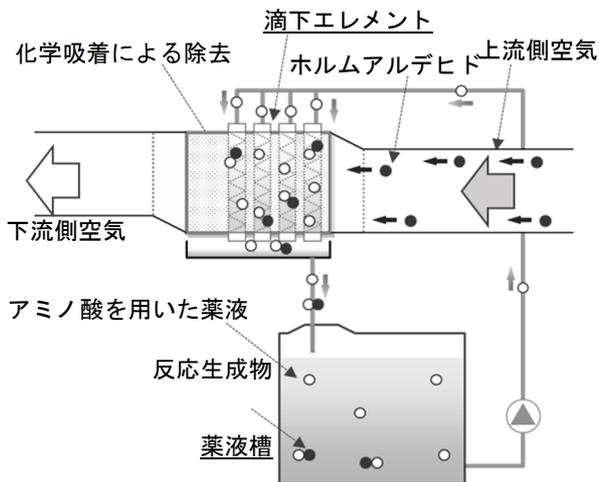


図-1 ホルムアルデヒド除去装置の構成

1.2.2 除去性能の持続性

長期間運転の除去性能を図-2 に示す。処理風量 3,240m³/h のホルムアルデヒド除去装置を用いて、上流側のホルムアルデヒド濃度が 0.08~0.12ppm、薬液有効容積が 200L の場合、合計 1,100 時間(8 時間/日、22 日/月の運転で約 6 ヶ月継続試験)の運転期間中、ワンパス除去率は、上流側濃度の変動によって多少上下するが全期間にわたって 90%以上となった。また、下流側濃度が管理濃度の 1/10 以下で推移することが分かった。

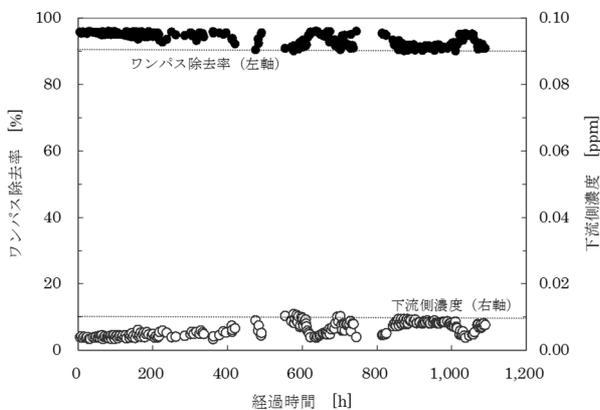


図-2 長期間運転の場合の除去性能

1.2.3 他の化学物質共存時における除去性能

病理検査の業務では、エタノールやキシレンなど、

ホルムアルデヒド以外の化学物質を扱う。ホルムアルデヒド除去装置を設置した場合、ホルムアルデヒド以外の化学物質の影響により、除去性能の低下と中間生成物の発生が考えられた。そこで、病理検査室を模擬した試験室を建設し、その空調系統に処理風量 6,000m³/h のホルムアルデヒド除去装置を設置して、ホルムアルデヒド以外の化学物質による除去性能への影響および中間生成物の有無を調査した。

ホルムアルデヒド除去装置の上流側、下流側濃度の測定結果を表-1 に示す。

表-1 ホルムアルデヒド濃度の測定結果

他の化学物質 (上流側濃度)	除去装置の 上流側、下流側ホルムアルデヒド 濃度		
	上流側濃度 [ppm]	下流側濃度 [ppm]	ワンパス 除去率 [%]
エタノール (50ppm)	0.11	0.006	94
キシレン (2.2ppm)	0.22	0.013	94
エチルベンゼン (0.28ppm)			
グルタルアルデ ヒド (0.23ppm)	0.23	0.017	93

エタノールなどの化学物質が共存している使用条件でもホルムアルデヒドの除去率は 90%以上で他の化学物質に影響されなかった。

中間生成物の有無を確認するため、カルボニル化合物と VOC のクロマトグラムを確認したが、いずれの化学物質が共存した場合でも、下流側に新たな物質は検出されなかった。この結果から開発したホルムアルデヒド除去装置が安定した性能を維持できることを確認した。

1.3 特殊な気流を用いた局所排気装置の開発

特化則では、ホルムアルデヒド発生源を密閉する設備、局所排気装置又はプッシュプル型換気装置の設置を義務付けている。ただし、従来の局所排気装置などによっては、作業性の問題が障害となり、対策が進まないことがある。そこで、U字型などの独自の気流制御を用い、ホルムアルデヒドを効率良く捕集しながら広い作業スペースと良好なコミュニケーションを実現する切出し作業台用の局所排気装置を開発した⁷⁾。

1.3.1 切出し作業台局所排気装置の構成と機能

切出し作業台用の局所排気装置は、U字型の気流を形成する 3 つの気流制御ユニットと局所排気口で構成される(図-3)。ホルムアルデヒド発生源近傍に存

E-8

在する高濃度のホルムアルデヒド含有空気は、誘引ユニット上の局所排気口（パンチング面）で吸引し、作業台に接続された小口径の排気用ダクトを通じて屋外に排出する。

人が動いた場合など、一時的に発生する気流により低濃度のホルムアルデヒドが局所排気口から周囲に拡散することが考えられた。その対策として、U字型の気流を形成する3つの気流制御ユニットを設けた。この局所排気装置は局所排気口とU字型の気流により、ホルムアルデヒドの拡散を抑制する。さらに作業域に大型のダクトや機器、大風量のファンを必要としないため、広い作業スペースが確保でき、騒音による作業員間のコミュニケーションを阻害しない。

1.3.2 ホルムアルデヒド濃度の測定結果

切出し作業台用局所排気装置のホルムアルデヒド濃度に対する低減効果を確認するため、試験室で作業台近傍のホルムアルデヒド濃度を測定した。

ホルムアルデヒドを発生させるため、4台の作業台上に10%中性緩衝ホルマリン液を入れた312mm×241mmのアルミバット（ホルムアルデヒド発生量：約250mg/h）を設置した。

作業員近傍のホルムアルデヒド濃度測定位置を図-4に、ホルムアルデヒド濃度の測定結果を表-2に示す。作業員のホルムアルデヒドの曝露状況を再現するため、マネキンを設置し、測定位置は局所排気口とマネキンの中央部を通過する断面位置で計10箇所の測定を行った。濃度は最大で0.022ppm、発生源に近い呼吸域における平均で0.013ppmとなり、管理濃度0.1ppmの1/10程度の濃度環境となった。

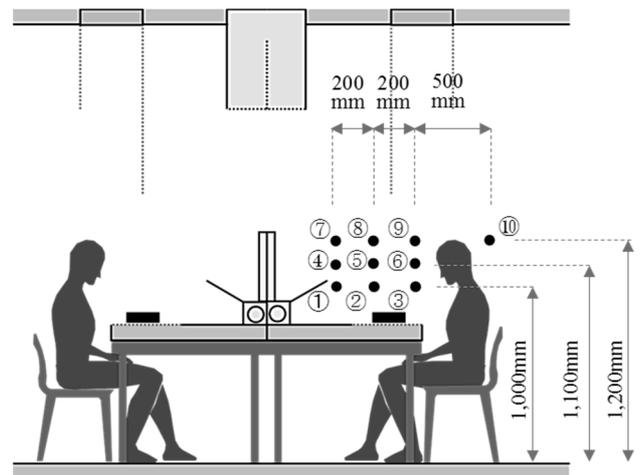


図-4 ホルムアルデヒド濃度測定位置と測定結果

表-2 ホルムアルデヒド濃度の測定結果

測定位置	濃度 [ppm]	測定位置	濃度 [ppm]
①	0.015	⑥	0.009
②	0.009	⑦	0.022
③	0.009	⑧	0.009
④	0.022	⑨	0.010
⑤	0.009	⑩	0.010

2. 実規模試験

2つの要素技術から成る循環除去方式の空調換気システムの性能を実規模試験で確認した。このシステムはホルムアルデヒド除去装置を室内循環として用いることで、換気量を大幅に増強することなく、室内のホルムアルデヒド濃度を低減する（図-5）。本章では、ホルマリン液を入れたアルミバットを発生源として、作業環境測定に準じた濃度測定を行ったので、結果を紹介する。

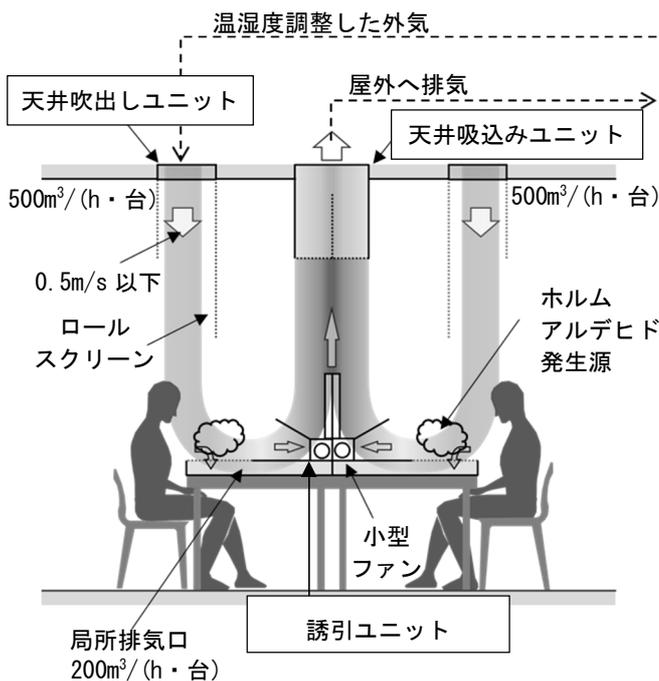


図-3 切出し作業台用局所排気装置の構成

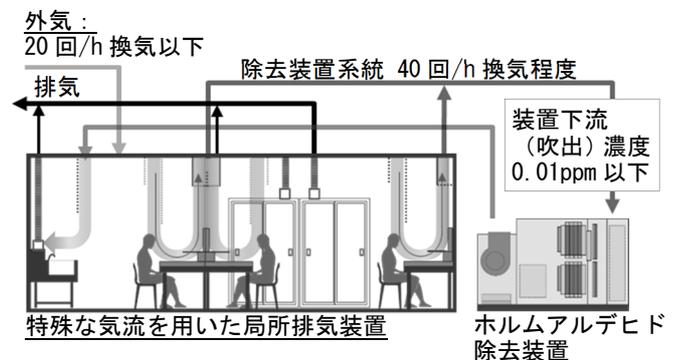


図-5 循環除去方式の空調換気システム

2.1 空調換気システム

写真-1の試験室に切出し作業台、流し台、固定槽、撮影台用の局所排気装置を設置し、外気・排気系統の

風量を 1,800m³/h (13 回/h) とした。排気系統はホルムアルデヒドの発生源近くの局所排気口、排気ダクトに接続し、高濃度空気を屋外に排出した。

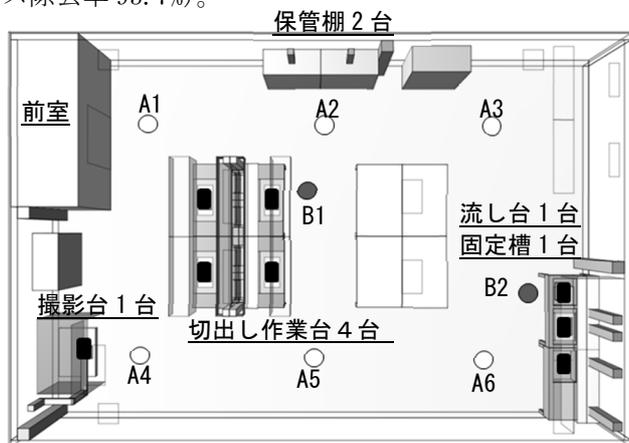
ホルムアルデヒド除去装置の処理風量は 6,000m³/h (41 回/h) であり、全体換気としての役割を担う。天井吸込み口などの 0.1ppm 以下の低濃度のホルムアルデヒドを除去装置で除去して再循環させた。



写真-1 試験室外観 (6,000mm×9,000mm×2,700mmH)
排気と温度調整した外気の風量：1,800m³/h

2.2 試験室内のホルムアルデヒド濃度

試験室内のすべての局所排気装置に 10%中性緩衝ホルマリン液を入れたアルミバットをホルムアルデヒド発生源として設置し、作業環境測定で想定される測定位置におけるホルムアルデヒド濃度を確認した。試験室内とホルムアルデヒド除去装置の濃度測定位置を図-6 に、ホルムアルデヒド濃度の測定結果を表-3 示す。室内のすべての測定点で管理濃度を大幅に下回り、管理区分は第 1 管理区分となった。なお、ホルムアルデヒド除去装置の上流側濃度は 0.095ppm、下流側濃度は 0.006ppm と外気レベルであった (ワンパス除去率 93.7%)。



■ 10%中性緩衝ホルマリン液を入れたアルミバット
測定高さ：床上 1,200mm

図-6 ホルムアルデヒド発生源の設置位置と
A, B 測定の測定ポイント

表-3 ホルムアルデヒド濃度測定結果

	測定点	濃度 [ppm]	管理区分
A 測定	A1	0.011	第 1 管理区分 第 1 評価値 E _{A1} : 0.033ppm 第 2 評価値 E _{A2} : 0.013ppm
	A2	0.010	
	A3	<0.006	
	A4	0.015	
	A5	0.010	
	A6	0.010	
B 測定	B1	0.011	第 1 管理区分 C _B : 0.011ppm
	B2	0.008	
外気系統表		0.013	
排気系統		0.643	

備考：濃度測定 of 定量下限値：0.006ppm

まとめ

基礎研究と実規模試験で蓄積した要素技術の開発により、「0.1ppm 以下の安全な作業環境の実現」、「広い作業スペースの確保」、「外気処理に関わる消費エネルギーの削減」という特長を有する循環除去方式の空調換気システムが実現できることを確認した。

参考文献

- 1) Anne Lennert, Frands Nielsen and Niels Oluf Breum: EVALUATION OF EVAPORATION AND CONCENTRATION DISTRIBUTION MODELS A TEST CHAMBER STUDY, Ann. Occup. Hyg, Vol.41, No.6, pp. 625~641, 1997
- 2) 長谷川麻子・羽田崇秀・小峯裕己・鎌田元康: 単体ガス成分に対する家庭用空気清浄機の性能試験方法に関する検討, 日本建築学会環境系論文集 (2003), No.572, pp.55~62
- 3) 一條佑介・野崎淳夫: 家庭用空気清浄機のホルムアルデヒド除去性能の劣化性に関する研究, 室内環境, Vol.13, No.1 (2010), pp.31~38
- 4) 野口美由貴・水越厚史・小林徳和・湯懐鵬・柳沢幸雄: L-システインを用いたアセトアルデヒド除去システムの開発 (1), 一湿式除去技術の研究開発一, 室内環境学会学術大会講演要旨集 (2010), pp.236~237
- 5) 新菱冷熱工業株式会社. ホルムアルデヒド除去剤及び脱臭装置. 特開 2011-110079. 2011.6.9
- 6) 新菱冷熱工業株式会社. アルデヒド除去剤、アルデヒド除去装置、およびアルデヒド除去装置の運転方法. 国際公開 WO2013/057791 A1. 2013.4.25
- 7) 新菱冷熱工業株式会社. 化学物質排出システム. 特開 2014-25624, 2014.2.6

環境負荷低減技術の活用による省エネルギー化と BCP 対応を実現したエコホスピタル
Eco hospital realizing energy saving and BCP
by utilizing environmental load reduction technology

○吉澤 茂之 (清水建設 (株)) 浅野 勝弘 (清水建設 (株))
 太田 昭彦 (清水建設 (株)) 中村 友久 (清水建設 (株))

Shigeyuki YOSHIZAWA*¹ Katsuhiro ASANO*¹ Akihiko OTA*¹ Tomohisa NAKAMURA*¹

*¹ Shimizu Co. Ltd.

This hospital is a disaster-resistant hospital equipped with structural safety and maintenance of clinical functions at the time of a major earthquake. Constructed an eco-hospital that utilizes the following energy-saving and environmental load reduction technology. Disaster-resistant medium pressure gas, Co-generation system, Introduction of cool outside air from the forest, Solar radiation shielding, and LED lighting.

はじめに

当病院は、構造安全性と診療機能維持を備えた災害に強い病院を目指し、隣接する施設と一体となった BCP 対応を行い、敷地エリア全体での災害対策を行っている。

また、省エネルギーと環境負荷低減技術を活用したエコホスピタルを目指し、コージェネレーションシステム (以下、CGS) 導入による有効な排熱利用や、高効率熱源の採用、新しい換気システムの導入、断熱や日射遮蔽による負荷低減への配慮、ベルの森からの冷涼な外気導入や LED 照明の採用など、様々な省エネルギー設備を積極的に導入している。

1. 建築概要

建築名称 社会医療法人生長会ベルランド総合病院
 所在地 大阪府堺市中区東山
 用途 病院 477 床
 敷地面積 33,882.35m²
 建築面積 6,152.03m²
 延床面積 42,966.72m²
 構造 RC 造 (一部 S 造) 付加制震構造
 階数 地下 2 階・地上 10 階建

2. 設備概要

2.1 空調設備

熱源設備：ガス焚冷温水機 250RT×2 台
 ガス焚冷温水機 (排温水利用型)
 500RT×1 台
 ガスエンジン発電装置 400kW×2 台
 貫流ボイラー 627kW×2 台
 空調方式：空調機、外調機、ファンコイルユニット、
 パッケージエアコン



図 1 外観写真

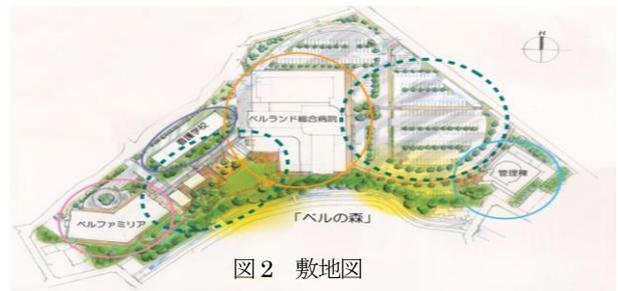


図 2 敷地図

配管設備：冷水・温水 4 管、2 管方式
 (大温度差送水：
 冷水 $\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$ 、温水 $\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$)

2.2 衛生設備

給水設備：上水・雑用水の 2 系統給水、
 圧力給水方式

給湯設備：ボイラー+貯湯槽+排熱利用予熱槽
 による中央式

衛生機器設備：節水型便器、温水洗浄便座、自動水栓

消火設備：連結送水管、スプリンクラー等

井戸設備：既存井戸利用 (雑用水として利用)

2.3 電気設備

受電方式：屋内キュービクル型

受変電設備：三相変圧器 4, 100kVA、単相変圧器
 1, 050kVA、スコット変圧器 400kVA

発電設備：地上設置ディーゼルエンジン駆動 625kVA



図3 省エネルギー導入技術

3. BCP計画

本計画は2011年の東日本大震災以降であり、その経験を踏まえて、災害に強い病院の実現を目指すとともに、当病院のみならず、隣接する特別養護老人ホームと一体となったBCP対応を行い、敷地エリア全体での災害時対応に取り組んでいる(図4)。

病院については災害拠点病院に準ずる計画とし、給水設備・排水設備・電気設備は使用限定をしながらではあるが、3日間の運用が可能な計画とし、都市ガス設備は、災害時途絶の少ない中圧Bガス配管を引込んでいる。

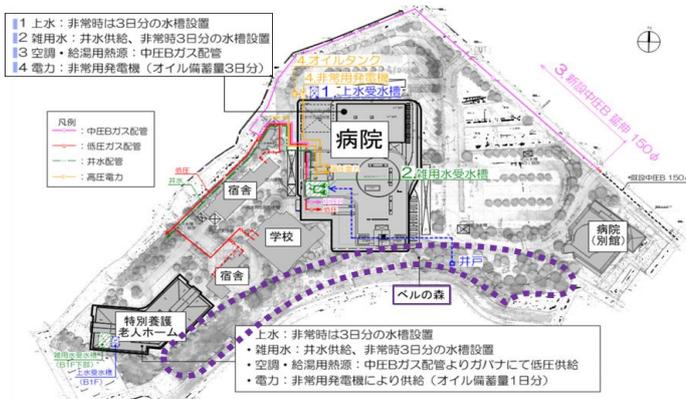


図4 敷地配置とBCP対応導入設備

4. コージェネレーションシステムの導入

4.1 コージェネレーションシステムの概要

建物の年間負荷特性や冷暖切替の必要性等を考慮し、空調熱源は中央熱源と個別熱源の併用方式を採用している(図5)。

中央熱源はBCPを考慮し、中圧ガスを熱源とする機器構成とした。CGS2台を設置する計画とし、季節毎の冷暖房負荷に応じて、温水用熱交換機、給湯予熱槽、ジェネリンクに排熱供給を行い、電力デマンドを優先しつつ、後述の「省エネ運転ナビ」により排熱利用効率が最大となる様にCGSの台数制御を行っている。

4.2 コージェネレーションシステム導入効果検証

図6に、夏期代表日におけるコージェネレーションシステムの冷水利用量・温水利用量・排熱有効利用率と受電電力量・CGS1・2号機による発電量の実績を時系列グラフにて示す。

冷水利用としてはジェネリンクにより夏期冷房負荷のベース負荷対応に用いられている。温水利用は予熱槽の予熱に用いられ、夏期においても発生するシャワー・風呂等の利用に活用されている。

夏期ピーク日の日中の時間帯では使用電力量も多いためCGSはフルで2台運転としており、その分受電電力量は抑えられピークカットに貢献していることがわかる。これにより年間の受電電力量が平準化され、契約電力の削減につながっている。

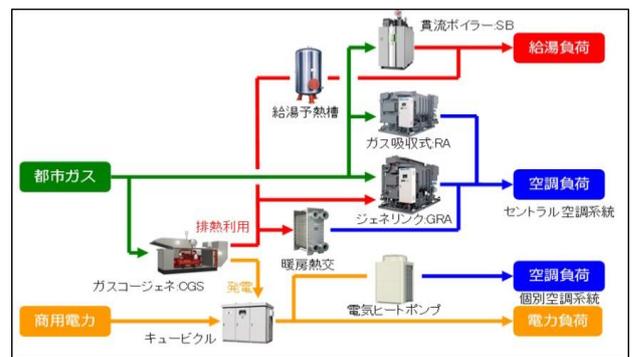


図5 熱源システムフロー図

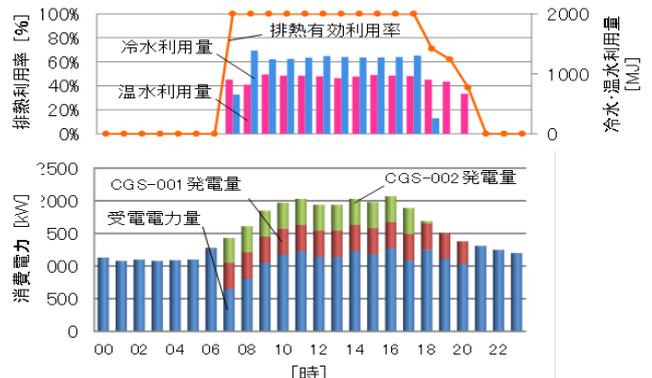


図6 夏季CGS運転実績(代表日)

また排熱有効利用率のグラフより、日中の時間帯ではCGS 2台運転でも排熱がすべて有効に利用されていることが見て取れ、電力のピークカットのみならず、排熱による空調負荷への貢献を同時に達成しており、電気・ガス双方の削減に寄与していると言える。

図7に月ごとの発電量・冷水利用量・温水利用量の積み上げと総合係数を示す。最初の中間期である春期の4～6月はCGSは1台運転のとしていたためエネルギーの絶対値は下がっているが、10月以降の秋期は、春期の運転状況を元に熱源運用の改善を行いCGSの運転時間を長く設定したためエネルギー絶対値が大きくなっている。CGSの総合効率で見てみると、平均で約62.3となっており、カタログ値の71.6に対して高水準で安定した値を維持している。

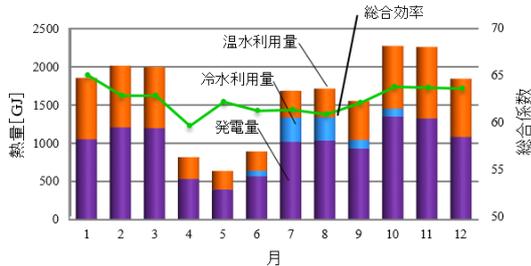


図7 GCSの年間エネルギー発生量と総合係数

5. 病院エコ換気システムと自然外気の有効利用

5.1 病棟エコ換気システム

病院では一般的に病室の必要換気量をHEAS基準の最少必要外気量に則り2回換気としている。しかしながらこの数値は、『建築物における衛生的環境の確保に関する法律』(ビル管法)による換気量と比べると約2倍の外気量となっており、それに見合う外気導入量に見合うエネルギーが必要となるため通常の建物よりも省エネルギー性能は悪くなる。そこで臭気量の少ない夜間をビル管法風量に抑える制御を行う省エネルギー換気システムを採用した(図8)。

図9に4床室冬期代表日の時間ごとの換気量に対する空調負荷を、通常換気、エコ換気別を示す。実際の病院の運用形態をもとに、エコ換気とする時間帯は23時(消灯時間以降)～5時(朝食前)とした。その間の換気量を半分に絞る(排気ファンを2台運転から1台運転に台数制御を行う)制御を行い、夜間の外気負荷を50%削減する。これを病棟全床(477床)に適用した場合の年間月別の外気負荷の削減量(通常換気とエコ換気の差)を、図10に示す。

5.2 自然外気の有効利用

本計画ではB1階の診察・診療系統において、ベルの森からの冷涼な外気を外調機に導入し、外気負荷の低減を図っている。図11にベルの森の外気温度実測と屋上の外気温度実測の結果を示す。日中で最大5.8℃、平均で約

2℃ベルの森のほうが低い外気温となった。これはベルの森が常に日陰である、傾斜地のため風が流れやすい、地面が土のため地表面放射熱が低い等に起因するものと考えられる。

図12に夏期における該当外調機の運転時間月合計と、ベルの森による外気負荷削減量を示す。夏期ピークの8月において約9,300MJの外気負荷低減となった。

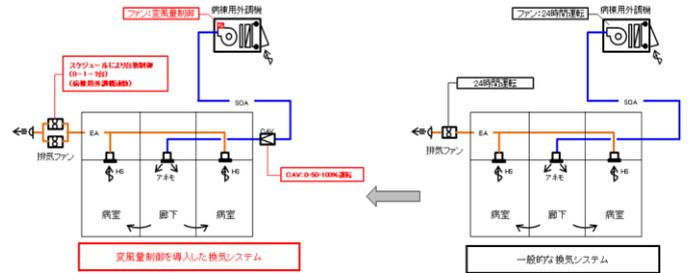


図8 病棟エコ換気システム

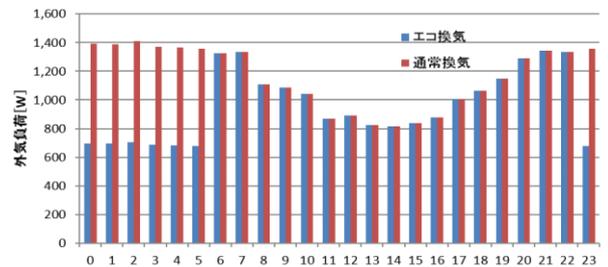


図9 冬期病室外気負荷(代表日)

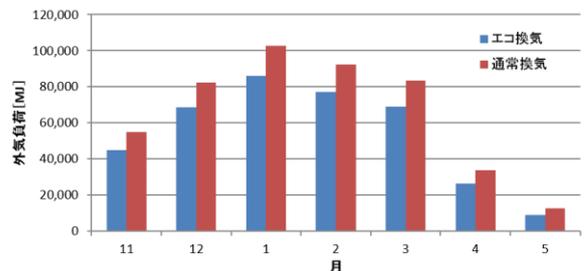


図10 月別病室外気負荷

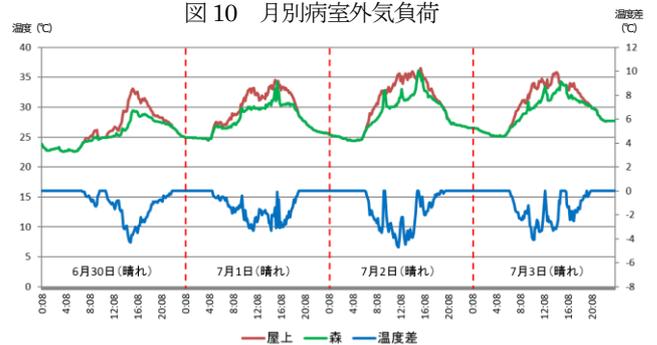


図11 ベルの森 外気温度差実測結果

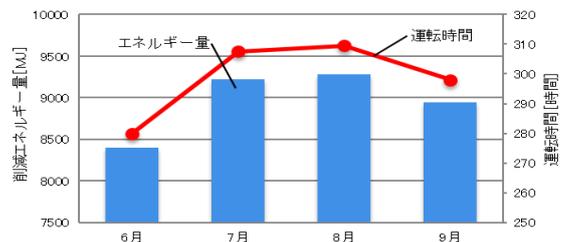


図12 ベルの森からの外気取入れによる負荷削減量

6. 省エネ運転ナビの導入

6.1 省エネ運転ナビの概要

当病院では中央監視システムのサブシステムとして熱源システムの予測制御（省エネ運転ナビ®）を導入している。図13にその予測制御概念図を示す。

このシステムは気象予報データを元に負荷予測値を算出し、予測値を元に設備機器の翌日の運転スケジュール作成や、翌日の制御方式を判定することで、最適な熱源制御を可能としており、気象実績と建物空調負荷実績を用いて、過去の熱源運転について評価することも可能である。

本計画では特に、CGSの発電と排熱利用を最適化することに注目し、予測システムの改良を行った。竣工後1年の実績データの蓄積を待った後、庫の蓄積データに基づき省エネ運転ナビ®の運用を開始した。

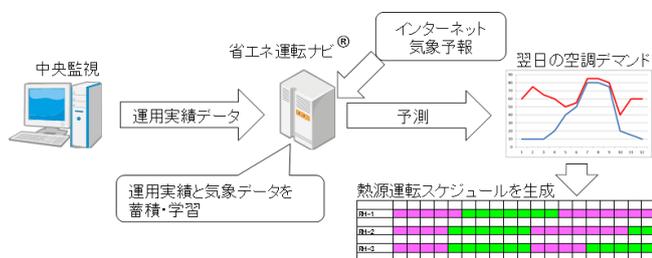


図13 熱源システム予測制御の概念図

6.2 省エネ運転ナビ結果解析

図14に夏期代表日のガス使用量・受電電力量・1次エネルギー量・CGS運転台数・排熱有効利用率・電力デマンドについての実績値と省エネ運転（省エネ運転ナビに従った運転）との比較表を示す。この表では省エネ運転に従った運転を行ったほうが一次エネルギー消費量が削減されることがわかる。排熱利用率の平均効率においても省エネ運転のほうが5%程度上昇している。

同日のCGS運転台数・排熱有効利用率・CGS推奨運転台数の実績値・省エネ運転別グラフを図14に示す。日中は2台運転ではぼナビ通りの運転となっているが、立ち上がり・立ち下がり時間付近では1台運転に絞ることでより高い排熱有効利用率となることわかる。

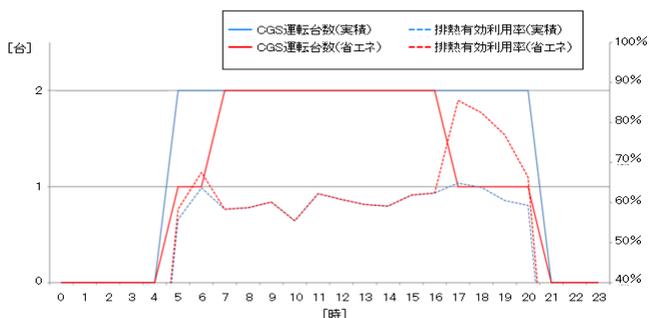


図14 運転台数と排熱有効利用率

7. エネルギー評価

7.1 計画値に対する実績値

当病院の年間一次エネルギー消費量について、計画値と実績値の比較を図15に示す。計画値では40.7%削減であったが、実績値は45.3%削減となり、当初予定以上の省エネ率を達成することができた。これは前項で述べた様々な省エネルギー手法の採用、季節毎のCGS運転モード切替、熱源の最適運転などによるものと考えられる。なお図中の導入前の数値はPAL・CEC標準値から算出している。

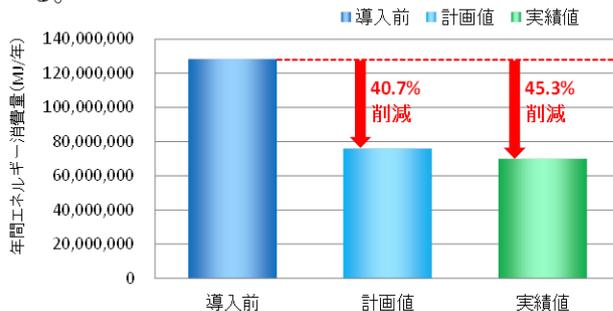


図15 年間一次エネルギー消費量推移

7.2 一般病院との比較

図16に単位面積あたりの年間一次エネルギー消費量について当病院の実績値と、省エネルギーセンターの示す病院の標準値を示す。

当病院の値は2,620MJ/m²・年となり、省エネルギーセンターが発表している一般病院の値4,050MJ/m²・年と比べて、約35%の減となっている。

この結果、紹介してきた様々な最先端省エネ技術を採用した当病院は、省エネルギー性能に優れた病院を実現していると言える。

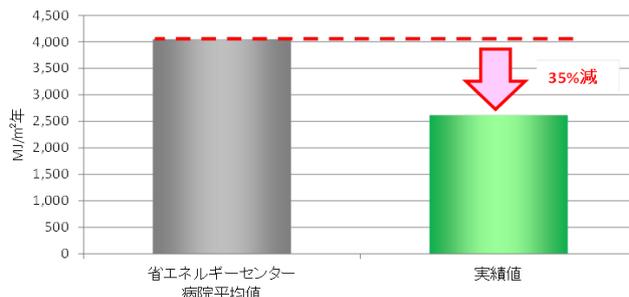


図16 単位エネルギー消費量比較

8. おわりに

当病院は、2011年の東日本大震災を経験したことで、災害時の診療機能維持を目的としたインフラ機能への配慮により、患者・家族・スタッフへの安心を提供している。さらには外皮性能への配慮を行った建築と、様々な省エネルギー技術を導入した設備との組み合わせにより、単位面積当たりの年間一次エネルギー消費量も一般病院に対して大きな削減を果たしており、エネルギー消費の少ない、災害時にも自立可能なエコホスピタルを実現した。

寝屋川市のクリマアトラスと熱環境適応策に関する研究(1)
寝屋川市のクリマアトラスの作製

Study on climate atlas and Thermal environment adaptation measures in Neyagawa city
Drawing up climate atlas in Neyagawa city.

○松本 大也 (摂南大学) 森山 正和 (摂南大学)
市田 瑞喜 (摂南大学) 山本 慶祐 (摂南大学)

Daiya MATSUMOTO*¹ Masakazu MORIYAMA*¹ Mizuki ICHIDA*¹ Keisuke YAMAMOTO*¹

*¹ Setsunan University

The climate atlas is the reference maps to make the environmental masterplan, town planning and architectural plan. The purpose of the research is to show the characteristics of the distribution of air temperature and wind flow in Neyagawa city. From morning to afternoon, mountain breeze brings the cool air to urban area. From evening to night, sea breeze blows from south-west.

1. 研究背景及び研究目的

近年、都市におけるヒートアイランド現象が深刻化し、問題となっている。ヒートアイランド現象とは、都市の気温が周辺地域よりも高くなる現象である。ヒートアイランド現象により、都心部は、郊外より気温が高くなっている。

本研究では、寝屋川市の熱環境を改善するため、3つの目的がある。まず一つ目は、寝屋川市の気温と標高、土地利用、用途地域、緑被率との関係を考察し、寝屋川市の気温の高い地域と低い地域を明確にする。二つ目は、寝屋川市の風がどう流れているか明確にする。三つ目は、以上のことから寝屋川市のクリマアトラスを作成する。クリマアトラスとは、都市環境気候図の事で、環境基本計画、まちづくり、地区計画、建築計画等の計画や、ヒートアイランド対策等の政策に活かす地図群である。今後、このような寝屋川市の建築計画で、いかすことを検討する。

2. 研究方法

ArcGIS で、以下のデータを用いて、気温や風との関係性を考察する。

- ①気温 (WRF,1km メッシュ)
- ②風向風速 (WRF,1km メッシュ)
- ③標高 (国土地理院)
- ④土地利用 (国土数値情報,100m メッシュ)
- ⑤用途地域 (国土数値情報)
- ⑥緑被率 (LANDSAT7,GLCF,30m メッシュ)

ArcGIS とは、地理情報を収集、解析、管理、解析、伝達等をする包括的なシステムである。

ここで使用する気温、風向風速データは、WRF の計算結果を使用する。WRF とは、The Weather Research & Forecasting Model の略で、実用的な天気予報とそれに関連するために開発された、気候予測数値モデルである。基礎方程式は、運動方程式、連続の式、熱力学方程式及びジオポテンシャルの式で構成され、乾燥大気の静水圧地形準拠座標 (η 座標) 系で記述される。

3. 気温

寝屋川市で、昼間の気温 (Fig.5) が低い地域は、北西部と東部である。その原因は、北西部については、淀川が流れており、その影響が大きいと考えられる。東部については、生駒山の影響で標高 (Fig.3) が比較的高くなっている、かつ森林や公園・緑地 (Fig.2) があり、緑 (Fig.1) が多い地域であるためと考えられる。また、昼間の気温 (Fig.5) が高い地域は、中央部と南部である。その原因は、標高 (Fig.3) が低く、低層の建物 (Fig.1) が密集しているからと考えられる。

夜間の気温 (Fig.6) は、標高 (Fig.3) が高く、緑 (Fig.2) の多い東部の地域が低く、その他の地域はほぼ同じで、約1°C程度の気温差しかない。

昼間と夜間の気温差 (Fig.7) は、河川付近は、気温差が2°Cしかなく、中央部では6°Cの気温差がある。このことから、河川付近では気温の変化が少ないと分かり、内陸部では、気温が上がりやすく冷めやすいことが分かる。



Fig.1 Land use

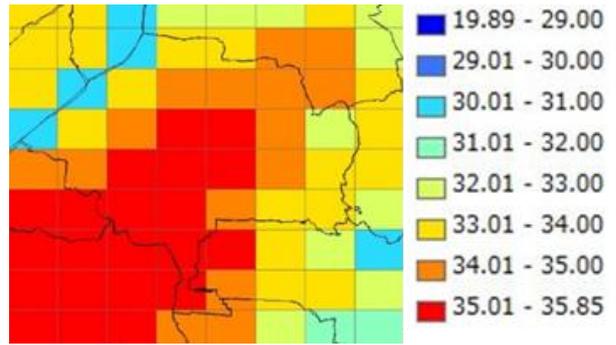


Fig.5 Temperature in the daytime (14 o'clock) (°C)

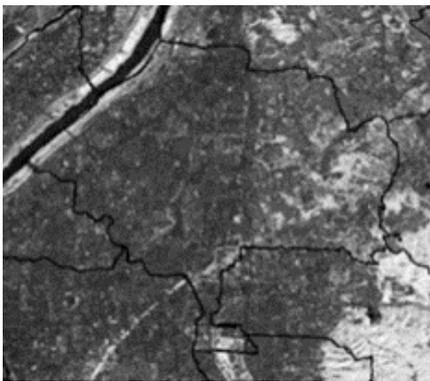


Fig.2 Green coverage

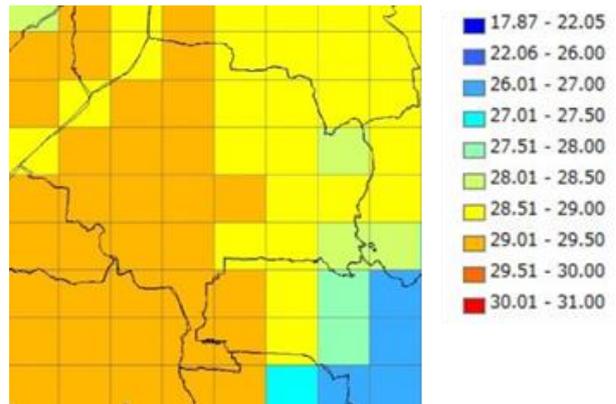


Fig.6 Temperature at night (23 o'clock) (°C)

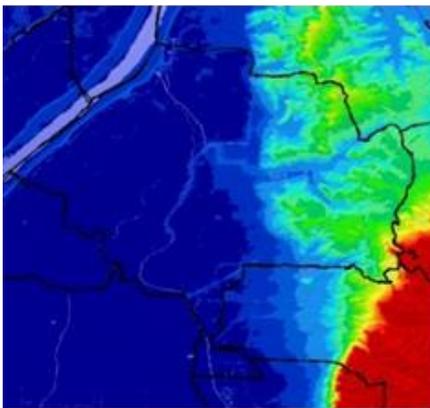


Fig.3 Elevation (m)

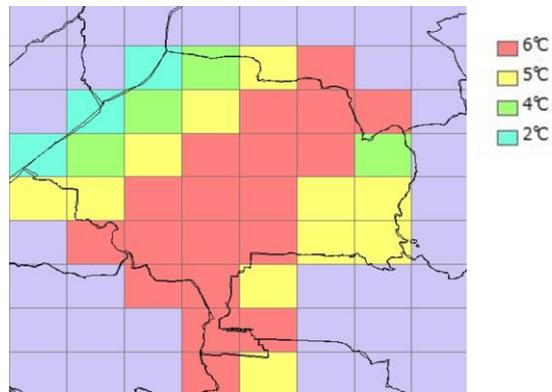


Fig.7 Temperature difference between daytime and nighttime

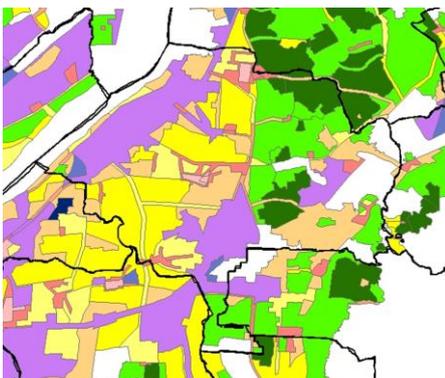


Fig.4 Land use Zoning

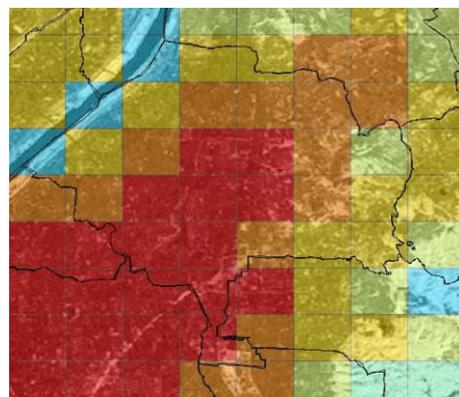


Fig.8 Figure of extensive daytime temperature and the green coverage rate of Neyagawa city

4.1 8月の風の特徴

8月の使用できるデータから枚方のアメダスで雨の日を除いた24日間を使用した。頻度分布をとり、一番多い風向を採用した。

風向においては、摂南大学と寝屋川市駅では、朝と夕方と夜には南西の風が多く、昼前から昼過ぎにかけて東の風が多くなる。寝屋川公園では、朝に南東の風が多く、昼前から昼過ぎにかけて東の風が多くなり、夕方から夜に、南西または西の風が多くなる。

風速においては、摂南大学と寝屋川市駅では、1時から9時に東の風が強くなり、そこから南西の風も強くなっていく。寝屋川公園では毎時間、南東の風が強くなり、7時から18時に、東の風も強い。12時から22時に、南西の風が強い。

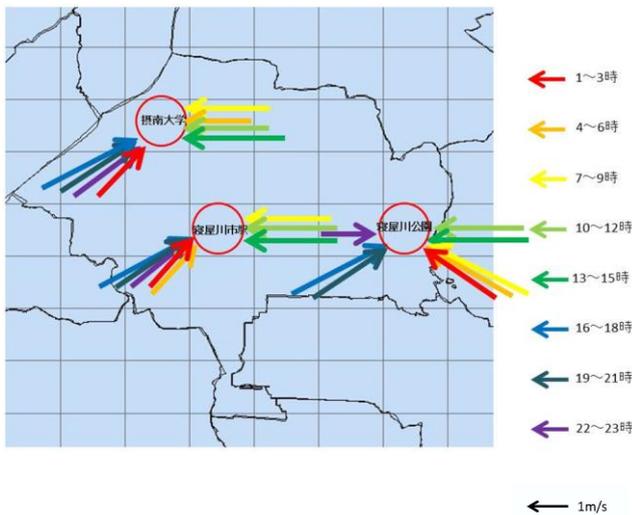


Fig.9 Wind direction and wind velocity on fine weather in August

4.2 晴天海風日の風の特徴

晴天海風日は、8月にTable.1にみたす日を選び、10日(2,5,16,21,22,25,26,27,29,30日)を選んだ。頻度分布をとり、一番多い風向を採用した。

風向においては、摂南大学ではほぼ1日中南西の風が多い。寝屋川市駅では、1時から8時まで南西の風が多く、9時に東の風が多く、10時から12時まで西の風が多くなり、15時から24時まで南西の風が多くなる。寝屋川公園は、1時から3時まで南西の風が多く、4時から8時まで南東の風が多く、9時から10時は南西の風が多く、11時から13時まで西風が多く、14時から15時まで南東の風が多くなり、16時から24時まで南西の風が強い。

風向においては、どの地域も未明と13時以降に風が弱くなっている。

Table.1 Sea breeze day in fine weather

晴天日	
天気	快晴または晴れ
日照時間	7時間以上
日射量	19(mj/m ²)以上
降水量	0.5(mm)以上

海風日	
風速	2.0(m/s)以上
風向	各地域おもに2方向の風
時間	1日あたり上記の風が12時以降から6時間以上吹く

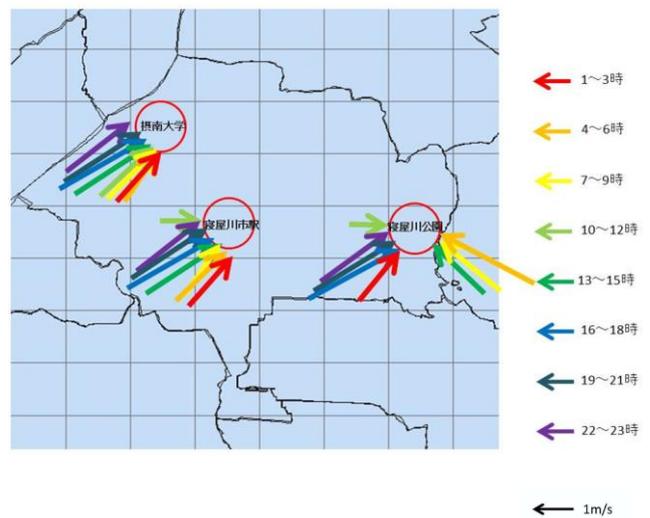


Fig.10 Wind direction and wind velocity of sea breeze day in fine weather in August

5. 結論

本研究は、寝屋川市のクリマアトラス作製を目的とし、寝屋川市の気温と風の考察をした。気温においては、昼間、中央部が、気温が上がりやすく、河川部、東側の緑地、公園がある地域が、気温が低くなる。夜間は、東側の緑地、公園がある地域が低い、あまり変わらないという結果だった。風においては、摂南大学と寝屋川市では、朝、東側の強い風が多く、昼から夜にかけて南西側の強い風が多くなる。寝屋川公園は、朝から昼にかけて、東または南東側の風が多く吹き、夕方から夜にかけて南西の強い風が吹く。晴天海風日は、摂南大学と寝屋川市駅においては、1日中南西の風が強く吹くが、寝屋川公園では、朝に南東の強い風が吹き、昼過ぎにも南東の強い風が吹き、その他の時間は、西または南西の強い風が吹く。寝屋川市の気温と風を表すと下記の図になり、朝から昼過ぎ(Fig.12,13)にかけて山風が吹き、涼しい風が市街地に流れる。そして、夕方から夜(Fig.15)には、海風が吹き暑い風が市街地に流れてくる。

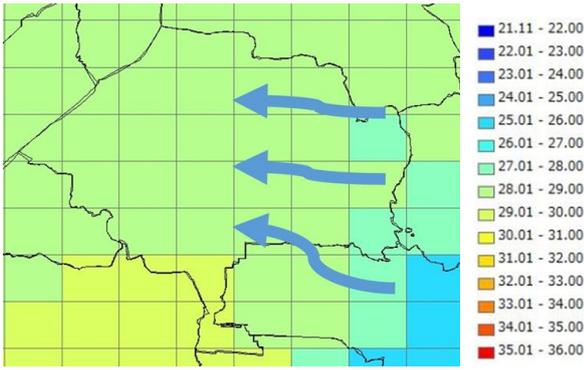


Fig.11 Neyagawa city in the morning from midnight (°C)

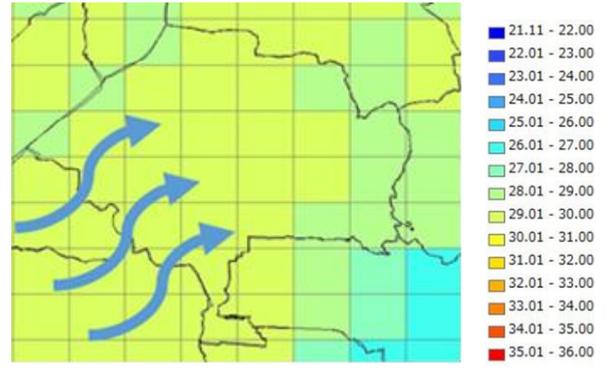


Fig.15 Neyagawa city at night (°C)

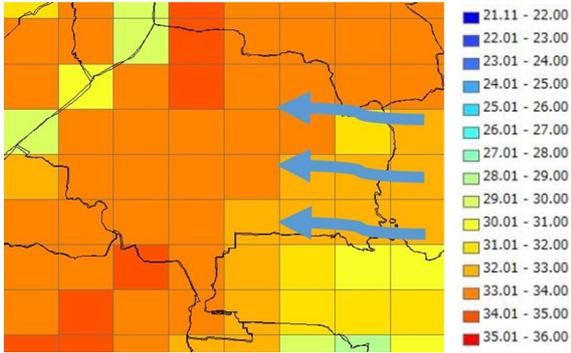


Fig.12 Neyagawa city of late morning (°C)

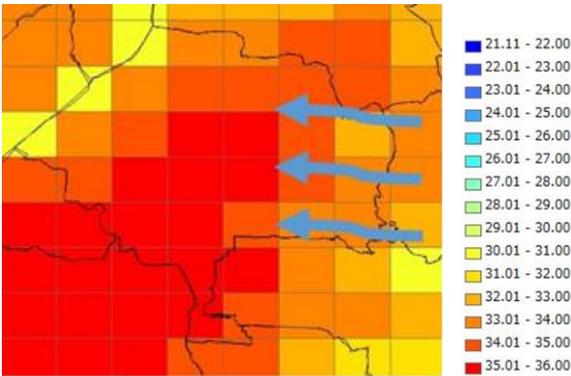


Fig.13 Neyagawa city in the early afternoon (°C)

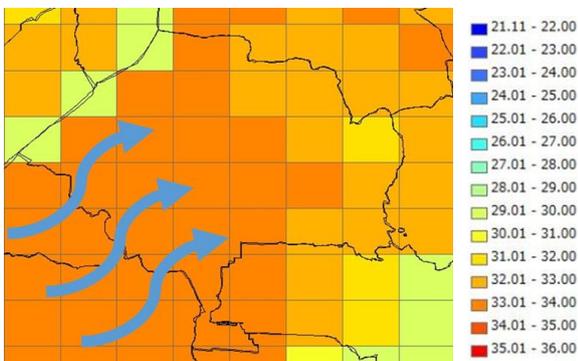


Fig.14 Neyagawa city in the evening (°C)

寝屋川市のクリマアトラスと熱環境適応策に関する研究(2)

～戸建および集合住宅街区の熱環境適応策～

Study on climate atlas and thermal environment adaptation measures in Neyagawa city (2)

Thermal environment adaptation measures for detached houses and apartment houses.

○市田 瑞喜 (摂南大学) Mizuki ICHIDA Setsunan University

In this research, Neyagawa City is surveyed and two detached houses and two apartment houses are selected. The site was analyzed locally using Google earth and Google map, create 3D models and cover diagrams with Sketch up, Auto CAD, and building coverage, green coverage and paving ratio calculate are the covered state of the block. The adaptation measures suitable for the land and application of the selected block are proposed. The present thermal environment are compared with the land cover ratio and SET*.

1. 調査背景および目的

毎年のように環境問題として挙げられるものに、都市におけるヒートアイランド現象がある。ヒートアイランド現象とは自動車や緑被率の減少、舗装面の拡大によって都市部を中心に気温が上昇し、都市周辺より高温になる現象である。外気温の上昇で冷房負荷が増加するに伴い、人工排熱が増え、都市の気温が上昇するといった悪循環をもたらしている。

本研究の目的は、寝屋川市の戸建および集合住宅街区の熱環境適応策を提案することで、将来的な寝屋川市街地の熱環境の改善を図ることである。

2. 研究方法

①本研究では、寝屋川市を調査対象とし、戸建住宅および集合住宅の街区を選定する。街区は集合住宅から2か所 A1・A2 とし、戸建住宅から2か所 B1・B2 の計4か所を対象として選定を行った。

②Google earth と Google map のストリートビューを用いて選定した街区内の建物や高木、草地、舗装面などの数や面積の解析を行い、Sketch up と Auto CAD で3Dモデルおよび被覆図を作成し、街区の被覆状態から建蔽率、緑被率、舗装率を算出する。

③選定した街区の土地、用途にあった適応策を対策メニューから提案し、現在と未来の熱環境や土地被覆、建蔽率、緑被率、舗装率の比較を行う。

④現地にて魚眼レンズを用いて撮影した写真を解析し、形態係数を算出する。8月2日の14時30分に計

測した表面温度と日射量を基にMRTを計算、気温と湿度、風速、着衣量、代謝量は夏季日中を想定し、仮定してSET*を計算する。

2-2 調査場所の選定

土地利用図を基に寝屋川市全体で比較的気温が低く、緑被の多い東側から集合住宅 A1 と戸建住宅 B1 の2か所を選定し、気温が高く緑被の低い西側から集合住宅 A2 と戸建住宅 B2 の2か所を選定した。以上の計4か所を対象街区とし、調査を行った。現地での形態係数を算出するための魚眼レンズでの調査は、図2の★印を人通りが多く、改善の必要性がある地点ということで、暑熱環境評価点とした。

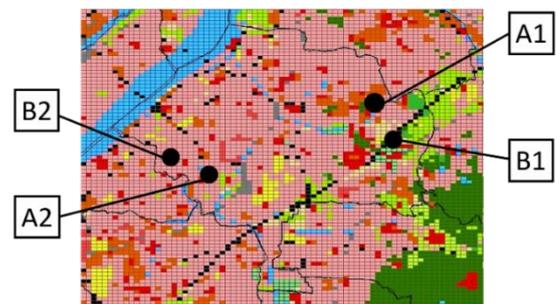


Fig. 1 Object location and land use map

2-3 対策メニュー

現在の寝屋川市の建蔽率、緑被率、舗装率の改善を図るために選定した集合住宅の街区 A1・A2 と戸建住宅の街区 B1・B2 の計4か所に有効である対策を対策メニューから検討する。4つの街区で有効な対策を活用し、改善後それぞれの被覆率、SET*を算出する。

Table 2-3 Countermeasure menu

	対策の手法
建物への対策	<減築> 地域の通風や採光の改善が図れる。 建蔽率を下げる。
	<屋上緑化> 屋上や屋根に植物を植え緑化する手法。 主な効果としては夏の日差しを防ぐ、 断熱性の向上などが挙げられる。
敷地への対策	<中庭・裏庭の緑化> 日陰を作り出す。住宅地に緑が増えることでヒート アイランド現象の緩和や輻射熱の低減につながる。
	<駐車場の緑化> ヒートアイランド現象の緩和や輻射熱の 低減につながる。緑被率の向上に最適。
	<高木による緑陰> 高木を植えることによって大幅に緑陰を増やすこ とができる。ケヤキ並木等

3. 現状と改善後の比較

3-1 集合住宅 A1

寝屋川市の中でも気温の低い東側に位置する集合住宅で西側に比べて緑被率が高い。マンションの周りにはほぼ草地になっており緑被率はほぼ半分の割合を占めている。

Table.3-1 Land coverage rate of apartment building A1

建蔽率	28%	改善後	28%
緑被率	43%		76%
舗装率	24%		12%

3-2 集合住宅 A2

寝屋川市の中でも気温が高い西側に位置し、東側に比べて緑被率が低い。マンションの周りや歩道の周りには低木や草地があるが、駐車場の面積が広いので舗装率は高めである。

Table.3-2 Coverage of Apartment A2

建蔽率	33%	改善後	33%
緑被率	15%		75%
舗装率	48%		20%

3-3 戸建住宅 B1

寝屋川市の中でも気温が低い東側である。各家の敷地内に高木や低木があり緑被率が高い。他の戸建て住宅と比べ庭がある分緑被は高い。

Table.3-3 Land coverage rate of detached house B1

建蔽率	32%	改善後	32%
緑被率	20%		30%
舗装率	48%		46%

3-4 戸建住宅 B2

寝屋川市の中でも気温の高い西側の戸建住宅。この街区は周辺にも街区内にも草地や植木がほとんどなく、緑被率がほぼ0に近い街区になっている。

Table.3-4 Coverage of detached house B2

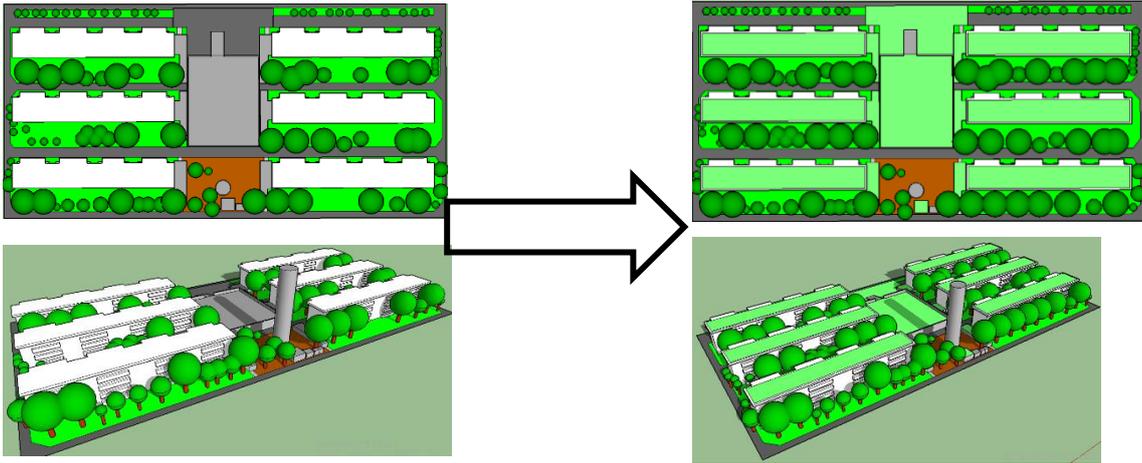
建蔽率	34%	改善後	29%
緑被率	1%		40%
舗装率	65%		31%

4. 暑熱環境評価点における SET*の算出法

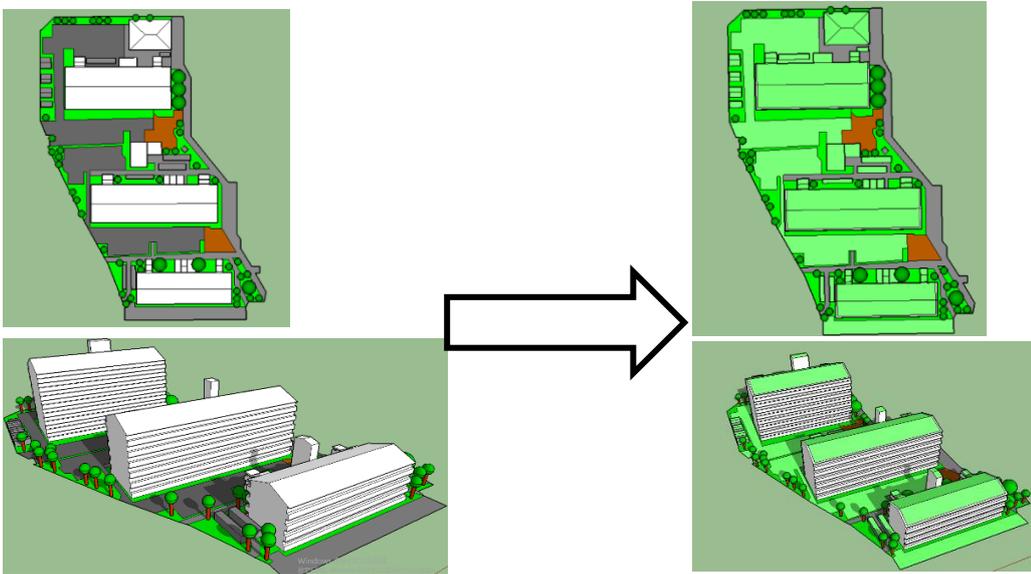
魚眼レンズを用いて撮影した写真から算出した形態係数と、2017年8月2日14時30分に計測した表面温度と日射量を基に MRT（平均放射温度）を計算し、気温、絶対湿度、風速、着衣量、代謝量は夏季日中を想定した基準条件を使用、すべて固定する。そこから SET*を計算する。形態係数を求めるための要素として、緑被、地表面舗装、建築物日陰、建築物北面、建築物東面、建築物西面、建築物南面、天空、土に分別した。

Table.4 Surface temperature of each element

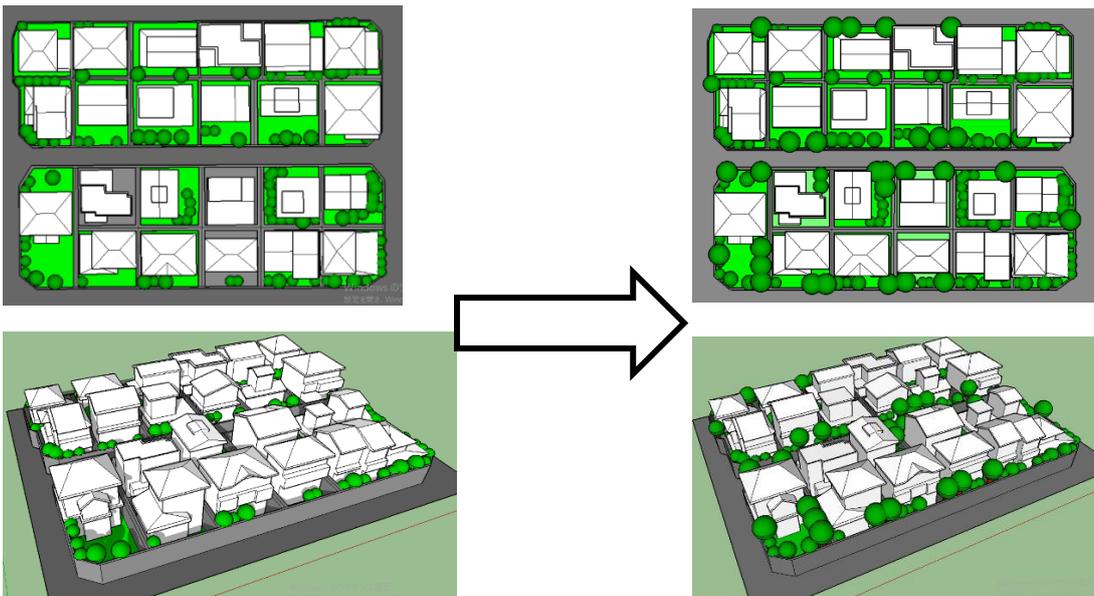
要素	緑被	地表面 舗装	建築物 北面
表面 温度	36℃	53℃	36℃
要素	建築物 南面	建築物 東面	建築物 西面
表面 温度	39℃	36℃	41℃
要素	天空	建築物 日影	日射量
表面 温度	36℃	41℃	1kW/m ²



集合住宅 A1

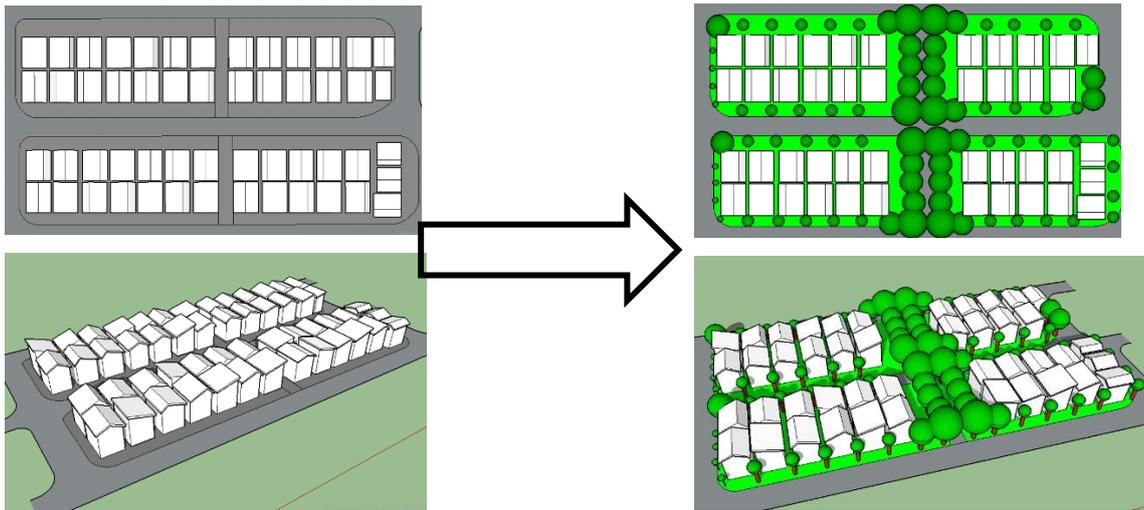


集合住宅 A2



戸建住宅 B1

Fig. 2 Current status of selection location and comparison after improvement



戸建住宅 B2

Fig. 2 Current status of selection location and comparison after improvement

5. 結果

集合住宅 A1 では駐車場の緑化、高木による緑陰の対策を行った。

集合住宅 A2 は駐車場の広い面積を生かした緑化で大幅な改善を行った。

戸建住宅 B1 は中庭の緑化と高木により対策を行った。

戸建住宅 B2 は中央の小道の両脇を減築し高木による緑陰で緑被率の改善と緑陰の拡大を図った。

暑熱環境評価点について A1 は駐車場を緑化と高木を増やすことで緑陰をつくり、SET*を 0.3℃下げることができた。

A2 は駐車場を緑化し、大幅に緑被率を上げることで SET*を 1℃下げることができた。

B1 は中庭をさらに緑化し、高木を植え、地表面への緑陰を拡大することで SET*を 0.8℃下げることができた。

B2 は縦にのびる小道の両端を減築し、高木を植えることで緑被率と緑陰を増やした。SET*は 0.7℃下げることができた。

<参考文献>

Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung für die Stadt
Karlsruhe

気象庁

www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/02/qa.html

寝屋川市のクリマアトラスと熱環境適応策に関する研究 (3)

～水路に着目した熱環境適応策～

Study on clima atlas and thermal environment adaptation measures in Neyagawa city.

~The thermal environment adaptation measures focusing on waterways~

○山本 慶祐 (摂南大学) 森山 正和 (摂南大学)

市田 瑞喜 (摂南大学) 松本 大也 (摂南大学)

Keisuke YAMAMOTO*¹ Masakazu MORIYAMA*¹ Daiya MATSUMOTO*¹ Mizuki ICHIDA*¹

*¹ Setsunan University

In this study, we selected the western part of Neyagawa city as a target area, focused on the waterway which is a big feature of western Neyagawa city as a part of the proposal of clima atlas preparation and thermal environment adaptation proposal, and changed to a space that can be used as a thermal environment adaptation measure. Since the waterway functions as a cold heat source during the day and wind is likely to occur around the waterway, improvement of the thermal environment can be expected.

1. 研究目的

現在の都市部では、地球温暖化及びヒートアイランド現象により悪化する熱環境への適応策が求められている。

本研究では寝屋川市西部を対象地域に選び、クリマアトラス作成と熱環境適応策の提案の一環として、寝屋川市西部の大きな特徴である水路に着目し、熱環境適応策として利用できる空間へと変える研究を行う。水路は日中の冷熱源として機能し、周囲には風も生じさせやすくなるため、熱環境の改善が期待できる。

2. 研究方法

寝屋川市西部には多くの水路があり、その中から図1~5に示す4箇所の区画を研究対象として選定した。区画の範囲は、水路に沿った方向に約50~100メートル、水路と直行する方向にそれぞれの水路の端から隣接した道路+街区一つ分まで、隣接した道路がない場合は水路の端から街区一つ分までとする。

それぞれの区画の特徴と選定理由は、以下の通り。①区画 T……この区画には右岸側に整備された緑地があり、高木、低木、草地などの豊富な緑と散策路、公園がある。大規模水路の一番目として選定した。②区画 I……この区画には住宅地や駐車場に隣接し、主要地方道を横断する幅の広い水路である。大規模水路の二番目として選定した。③区画 N……この区画には住宅地、田園、小学校などに隣接して流れる少し幅の狭い水路である。小規模水路の一番目として選定した。④区画 K……この区画には住宅地の道の脇を流れる非常に幅の狭い水路がある。小規模水路の二番目として選定した。

以上の四箇所の区画の現状における熱環境的な問題点を“環境省：まちなかの暑さ対策ガイドライン”¹⁾より引用した暑さ対策メニューを適用することで緩和し、現状と改善後の被覆率、暑熱環境評価点での SET*²⁾推移を求め、改善効果を定量的に示す。

被覆の要素は、舗装率、建蔽率、高木以外の緑被、高木、水面の五種類とする。高木は緑陰を生み出すという意味で他の緑との差別化を図るため、要素として単独で分けている。作り出す緑陰の関係上で、樹高が5mを超えるものを高木とする。魚眼レンズを用い撮影した写真から算出した形態係数と、真夏に計測した表面温度と日射量を基に MRT を計算、そこから気温、絶対湿度、風速、着衣量、代謝量は夏季日中を仮定して SET* を計算する。

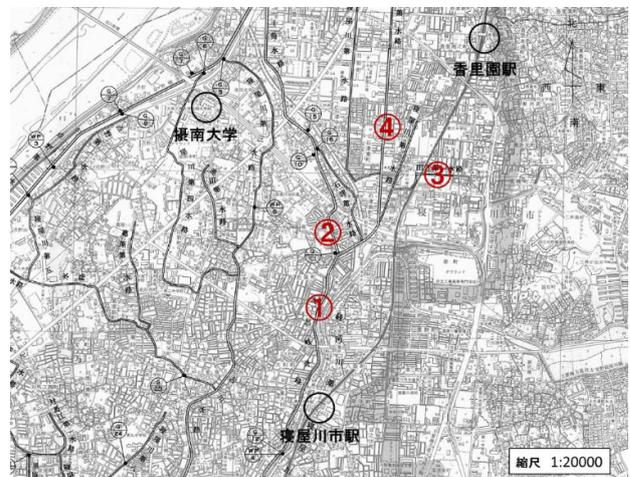


Fig. 1 Waterway map in the western part of Neyagawa city and the waterway to be studied

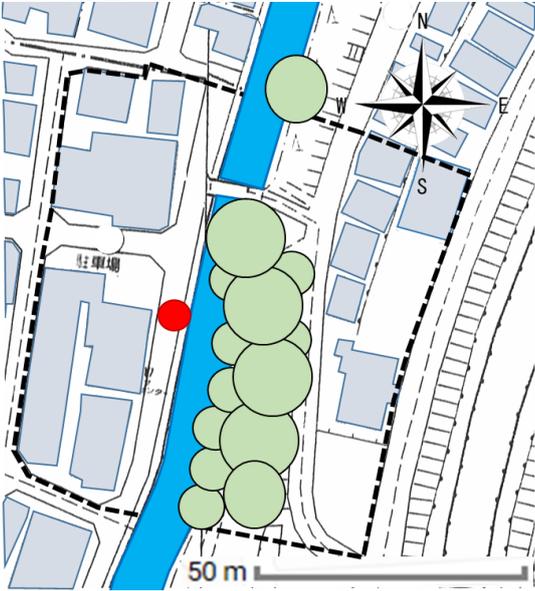


Fig. 2 Area T present

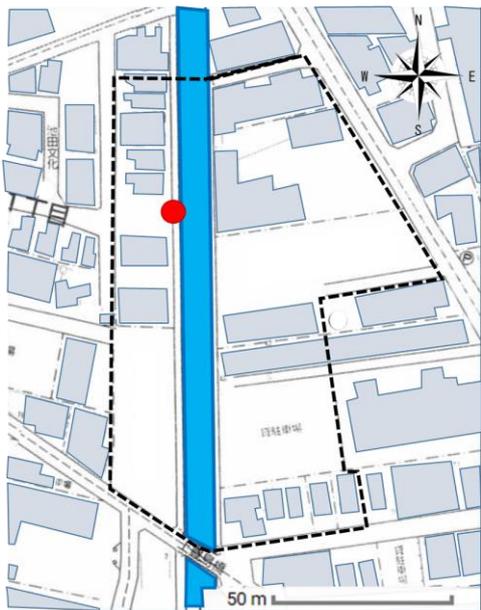


Fig. 3 Area N present

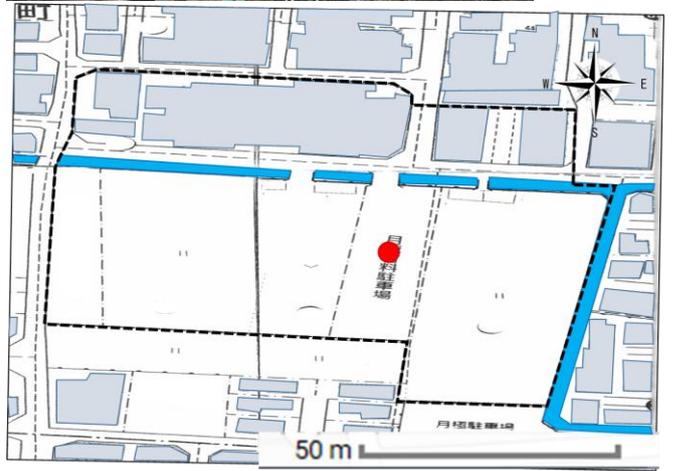


Fig. 4 Area N present

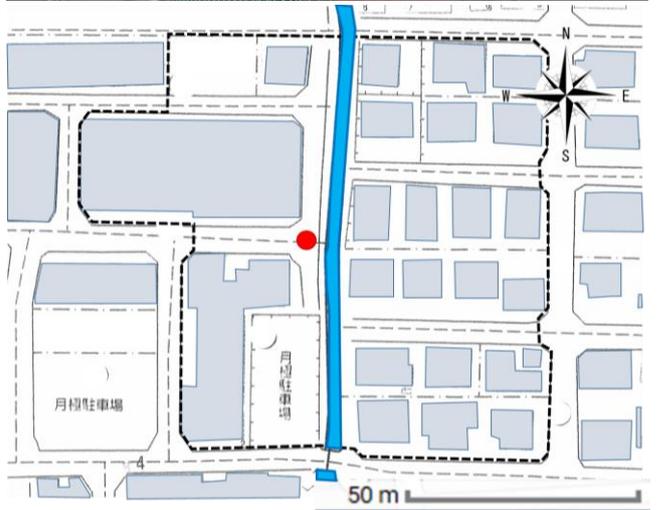


Fig. 5 Area K present

図中の点線内が区画の範囲であり、水色の範囲は建築物、青い範囲は水路、薄い緑の円は高木、赤い点は暑熱環境評価点を表している。

諸熱環境評価点は、それぞれの区画の水路横の道路の中央あたりに配置したが、区画 N のみ改善案として作ったポケットパーク内に設定している。

図 2~5 はゼンリン住宅地図帳²⁾のものを使用している。

3. 現状の調査結果と熱環境適応策の検討結果

それぞれの区画に合った改善案を考える為に、まずは現状を明らかにする。現地調査、Google earthでの調査にて求めた被覆の面積をAuto cad上で算出し、おおよその被覆率を算出した。その後、同様にして判明した特徴を基に、暑さ対策メニューを適用していく。

Table.1 Heat countermeasure menu used

暑さ対策メニュー
○樹冠・藤棚等による緑陰
○人工日除け
○地表面等の保水化
○壁面等の緑化
○壁面等の保水化
○微細ミスト噴霧

区画T現状……高木の割合が非常に高く、緑陰が豊富である。しかしそれは緑道として整備された右岸側のみの特徴で、左岸側に緑の要素はほとんど見られない。この区画の特徴は、右岸側と左岸側で全く違う環境になっているということ。

区画T改善案……左岸側を雛形とし、水路に沿って高木を配置し緑被率を高めた緑道に整備することで日射を遮蔽し、舗装率、建蔽率の高さから発生する熱放射を和らげる。同時に、樹木の葉を模して放熱性能を高め緑道にマッチしたタイプの日除けを作ることさらに熱放射を和らげ、視覚的にも緑道として完成されたものとする。さらに微細ミスト噴霧の装置を設置し、冷却効果を得る。

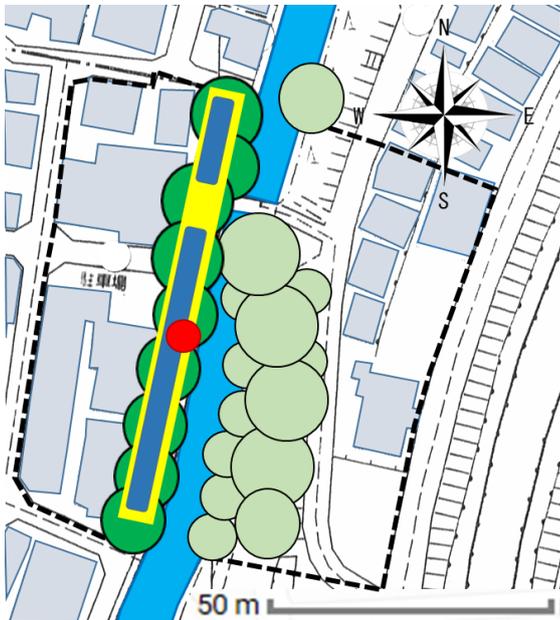
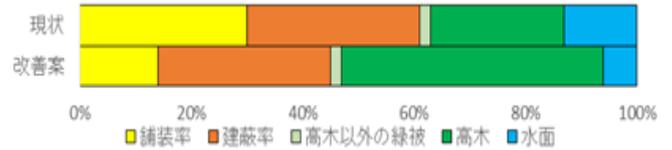


Fig. 6 Area T after improvement

緑の円が新しく植えた高木、黄色の範囲が日除け、濃い青色の範囲が微細ミスト噴霧をそれぞれ表している。

Table.2 Area T change in coating rate



暑熱環境評価点にて、改善後 MRT は 2.1℃、SET* は 0.3℃減少した。しかしこれは微細ミスト噴霧の影響を入れていないので、実際にはもう少し SET* が減少すると考えられる。

区画I現状……舗装率の割合が極めて高く、建蔽率が多少ある程度で、他の要素はほとんど見られない。この区画の特徴は、水路に接する道の幅が狭く、住宅の壁面がすぐ横まで迫ってきているということ。

区画I改善案……区画Tと同じく水路に沿って高木を配置し緑道として整備する。この区画には学校帰りの自転車通いの学生がよく通るので、自転車で問題なく通行できかつ冷却効果がある地表面の保水化を図る。さらに道のすぐそばに迫る建築物壁面からの熱放射を減らす目的で、水路に面する建築物東側壁面に壁面緑化を施す。

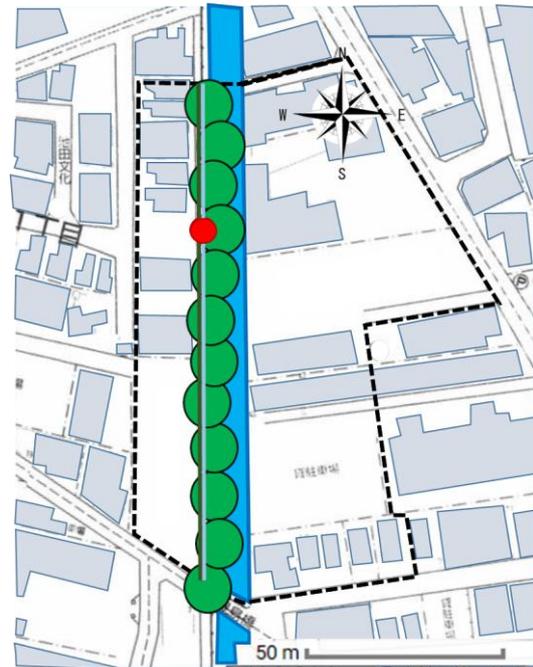
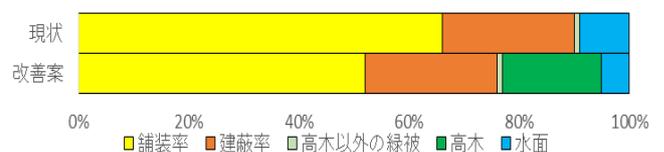


Fig. 7 Area I after improvement

緑の円が新しく植えた高木、水色の線が地表面の保水化、濃い緑の線が壁面緑化をそれぞれ表している。

Table.3 Area I change in coating rate



暑熱環境評価点にて、改善後 MRT は 2.8℃、SET* は 0.7℃減少した。改善を施した東側壁面に日の当たらない

午後の表面温度を仮定条件に使用したので、午前はまだ少しSET*が減少すると考えられる。

区画 N 現状……高木以外の緑被が高いのは、南側に水路に隣接した大きな田園がある為。実際は北側の住宅地や道路には緑がほとんど見られなかった。この区画の特徴は、南側に大きな田園が2つ接していること。また、2つの田園に挟まれる形で駐車場があるので、その場所に何かを作る提案が可能だと考えた。

区画 N 改善案……他の区画と同じく水路に沿って高木を配置し緑道として整備するほか、南側の田園に挟まれた駐車場をポケットパークとして改善する。具体的には田園に接する西側、南側、東側の三面に冷却ルーバーを取り付け、人口日除けも設置し日陰を作り、机と椅子を配置することで、地域の人々が憩えるような、熱環境的に快適なポケットパークを提供する。

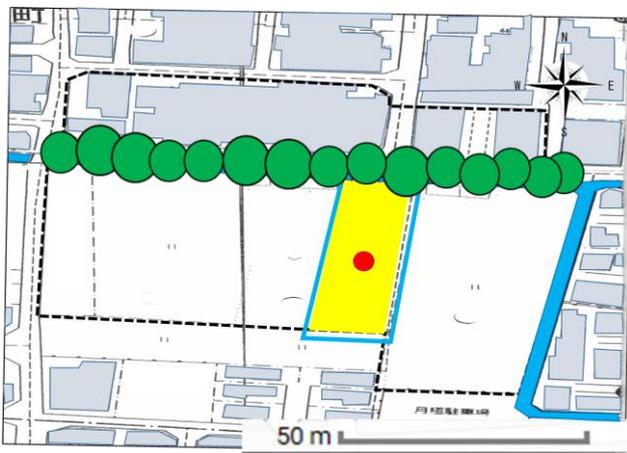
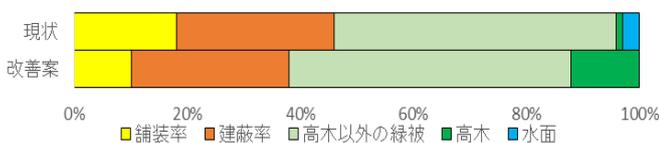


Fig. 8 Area N after improvement

緑の円が新しく植えた高木、黄色の範囲が日除け、水色の線が冷却ルーバーをそれぞれ表している。

Table.3 Area I change in coating rate



暑熱環境評価点にて、改善後 MRT は 6.4℃、SET* は 1.2℃減少した。

区画 K 現状……舗装率、建蔽率の割合が高くなったが、比較的高木以外の緑被の要素も高い結果となった。水路周辺、住宅地内ともに広い範囲で中木、低木、芝生面が多く見られた為である。この区画の特徴は、幅の狭い道を伴って水路が住宅地の側を横断しているということ。イメージとして東京都江戸川区、古川親水公園の形態に似ていると考えたので、その計画を参考にする。

区画 K 改善案……他の区画と同じく水路に沿って高

木を配置し緑道として整備するほか、水路と外部とを仕切るフェンスをなくし、水面と同じ高さに新しく道を整備することで高低差を減らし、水路との境界を取り払い体感的な親水性を高める。また、区画 T と同じく緑道にマッチした樹木の葉を模したタイプの日よけを局所的に設置し、その下に机と椅子を配置して小さな休憩所を作ることで、親水緑道内に憩いの場を提供する。

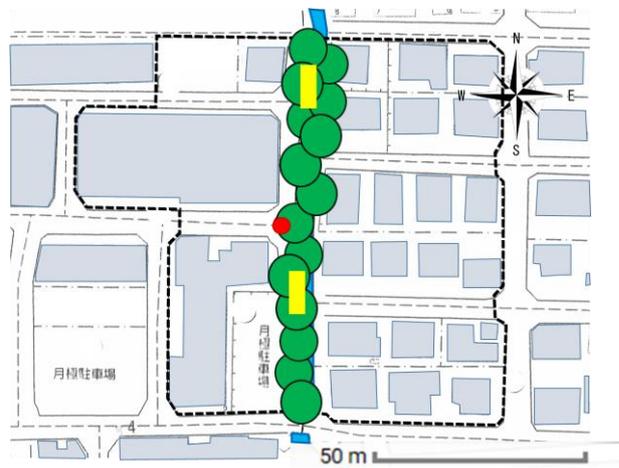
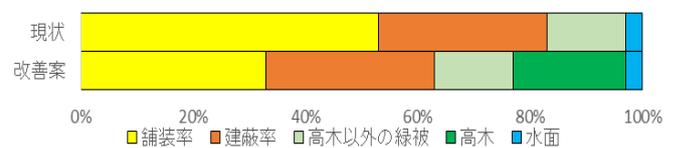


Fig. 9 Area K after improvement

緑の円が新しく植えた高木、黄色の範囲が日除けをそれぞれ表している。

Table.4 Area K change in coating rate



暑熱環境評価点にて、改善後 MRT は 2.6℃、SET* は 0.4℃減少した。

4.結論

各区画の改善後を比較した結果、SET*を効率よく下げる為には、区画 N のように日除けや緑陰などの日射を低減する方を広範囲に亘り適用することが最も有効だと考えられる。また水路には通風を確保できる利点があるが、本研究には風に関する対策メニューを取り入れていない。今後の課題として、通風の冷却効果の検討と共に、水路の規模による風量の差も示していく必要がある。

参考文献

- 1) 環境省：まちなかの暑さ対策ガイドライン http://www.env.go.jp/air/life/heat_island/guidelineH28.html
- 2) ゼンリン住宅地図帳 大阪府寝屋川市 株式会社ゼンリン 2015年2月

**クールスポットを創出する方法に関する研究
～大学構内のホットエリアとクールスポットの実態調査
Study on how to create Cool Spot**

～Measurement Result of Hot Area and Cool Spot in University Campus [1行]

○牧 一 樹 (摂南大学) 森山 正和 (摂南大学)

Kazuki Maki*¹ Masakazu Moriyama*¹

*¹ Setsunan University

For the influence of the heat island phenomenon, it is considered that measures and improvements can be made by understanding the factors in detail, considering the arrangement and size of buildings, trees, etc.

Although it may describe the same thing as the heat island phenomenon mentioned earlier, in recent years, the area affected by the thermal environment is increasing due to the global warming phenomenon. Therefore, we are considering improvement plan for thermal environment.

1 研究背景及び研究目的

近年、日本の都市部においてはヒートアイランド現象が進行しており過去 100 年間で気温は上昇傾向にある。

ヒートアイランド現象の主な要因には、人工排熱の増加・都市形態の高密度化・地表面被覆の人工化の 3 点が大きく考えられている。

そのため、街の中には、クールスポットが必要である。本研究の目的は、以下の 2 点である。

- ①クールスポットとホットエリアにおける温熱環境評価の比較を実態調査に基づいて行う。
- ②ホットエリアにクールスポットを作る方法を検討する

2. 測定方法

2.1 測定場所 (図 1 参照)

摂南大学寝屋川キャンパスの一角で図 1 に測定場所を示す。

- ① 8 号館前のパーゴラ (クールスポット)
- ② 10 号館前のレンガタイル (ホットエリア)
- ③ ウッドデッキ前 (ホットエリア)
- ④ ケヤキ並木 (クールスポット)

2.2 測定項目及び測定機器

- ① 気温、湿度 (アスマン乾湿度計)
- ② グローブ温度 (グローブ温度計及び PMV 計)
- ③ 風向・風速 (超音波風速計、ウェザーバケット)
- ④ 表面温度 (放射カメラ Fluke)
- ⑤ 形態係数 (魚眼写真) 地面に対して垂直に東西南北方向と水平に上方と下方の 6 方向の写真を撮る。

2.3 測定期間及び時刻

7 月 30 日の 13 時、14 時半、16 時、17 時半

7 月 31 日の 11 時、13 時、14 時半、16 時、17 時半

8 月 2 日の 11 時、13 時、14 時半、16 時

2.4 測定方法

① 2.1 に挙げた測定場所 4 か所において、2.2 に挙げた測定機器を用いて、気温、湿度、グローブ温度、風向・風速を測定する。

② 各測定場所において、放射カメラを用いて各方向 (16 方位) と地面を撮影し、表面温度の測定を行う。

3. 測定結果

① 気温: 一つの例だが、7 月 31 日の気温では、11 時、16 時、17 時半の気温で、ケヤキ並木前が最も高く、11 時、16 時、17 時半の気温で、10 号館前が最も低く、13 時の気温のみ、パーゴラが最も高いです。

このような結果になった根拠は、ほとんどの風向が、西南西だったので、ケヤキ並木前には、風が入りにくかったからだ。

クールスポットの気温は低く、ホットエリアの気温は高いと予想していたが、クールスポットは、必ずしも低いというわけではなかった。7 月 30 日、31 日、8 月 2 日の 3 日間の合計 13 回の測定で、予想通りの結果は、3 回しかみられなかった。これは、クールスポットの規模が小さく、また、ホットエリアと隣り合わせであり、空気は風があれば全体的に流れると考えられる。

② 相対湿度: 湿度データだが、7 月 30 日の相対湿度では、13 時以外、パーゴラは最も高く (16 時のみ、ウッドデッキ前、ケヤキ並木前と同じ)、16 時以外、ウッドデッキ前は最も低いです。 (13 時、14 時半は、他と並ぶ)

このような結果になった根拠は、13 時のパーゴラは、気温が低く、それ以外の時間は、気温が高く、パーゴラには屋根があり、その屋根に落ち葉等があり、すき間があり、風通しが良かったから、相対湿度が高かったです。また、16 時のウッドデッキ前の相対湿度が最も低くなか

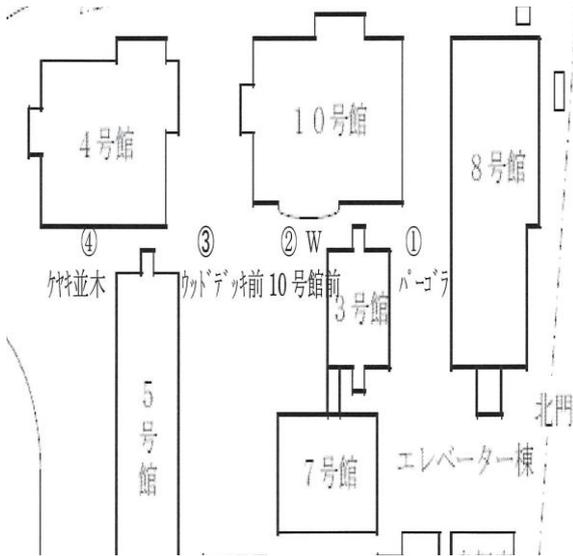


Figure 1 Location of measurements in Setsunan University campus)

ったのは、気温が最も低かったからであり、16時以外のウッドデッキ前の相対湿度が最も低かったのは、気温が比較的高く、測定結果上、風があまりなかったからです。

③風速：パーゴラとケヤキ並木が大きかった。これは、枚方のアメダスの記録によれば、南西から南東の風が多かったからと考えられる。

7月31日の風速で、16時の風速は、どの地点も、等しく、16時以外の風速は、強い頃にケヤキ並木前、10号館前、パーゴラだ。

このような結果になった根拠は、16時以外のほとんどの風向が、西南西で、なおかつ、2.0以下の風速だったからだ。16時の風速、風向は、そうではなかったからだ。

④グローブ温度：クールスポットのグローブ温度は低く、ホットエリアのグローブ温度は高いと予想した通りになった。10号館前、ウッドデッキ前は、日向の時間が長く、パーゴラ、ケヤキ並木は、ほとんど日影だったからと考えられる。

また、他の根拠ですが、10号館前とウッドデッキ前は、日向の範囲が広く、表面温度が上昇し、パーゴラとケヤキ並木前は、日影に囲まれ、表面温度が低下したからだと考えられる。

4. クールスポットとホットエリアの熱環境の比較と考察

4.1 SET*による考察

3日間の測定結果から、風速、相対湿度、気温、グローブ温度を使用して、SET*を求めた。

着衣は、0.6clo、代謝は、1.0metとした。

図5に示すようにクールスポットのSET*は低く、ホットエリアのSET*は高いと予想した通りになった。

このような結果になった根拠は、パーゴラとケヤキ並



①8号館前のパーゴラ (クールスポット)



②10号館前のレンガタイル (ホットエリア)



③ウッドデッキ前(ホットエリア)



④ケヤキ並木(クールスポット)

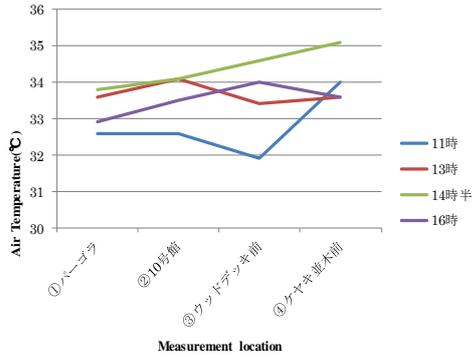


Figure 2 Air Temperature

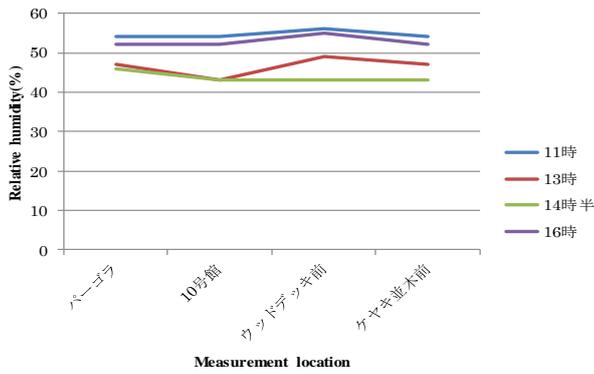


Figure 3 Relative Humidity

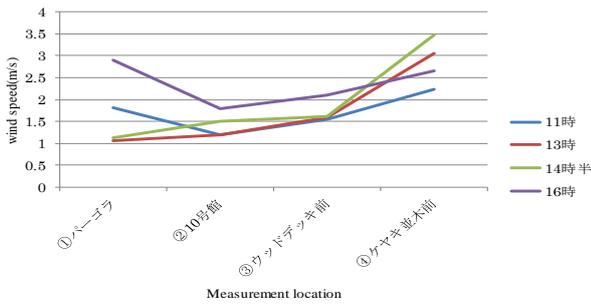


Figure 4 Wind speed

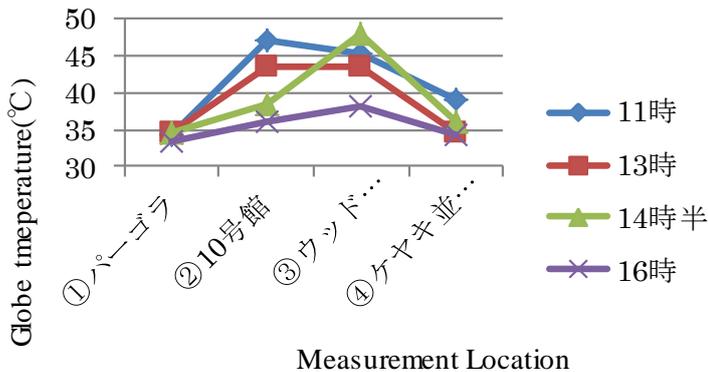


Figure 5 Globe temperature

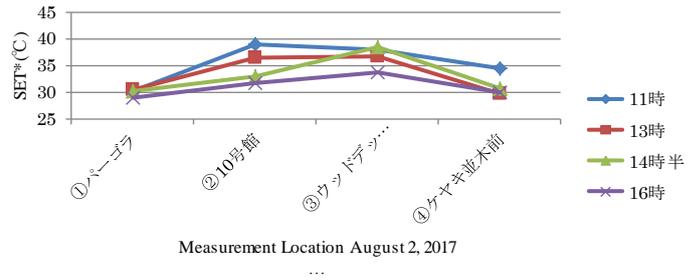


Figure 6 Comparison of SET* August 2, 2017

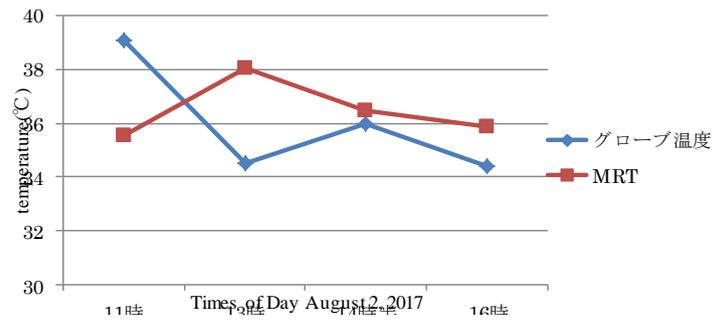


Figure 7 Comparison of MRT and globe temperature of Keyaki-namiki ④

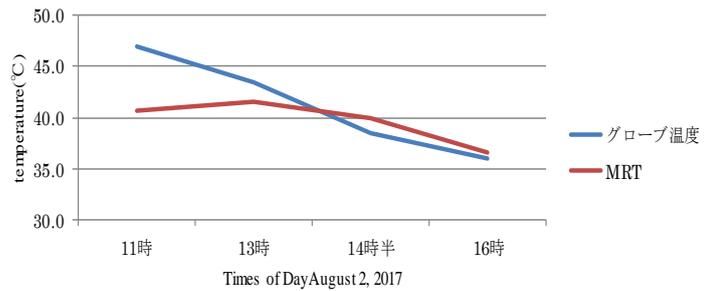


Figure 8 Comparison of MRT and globe temperature in front of ② Building No. 10 on August 2

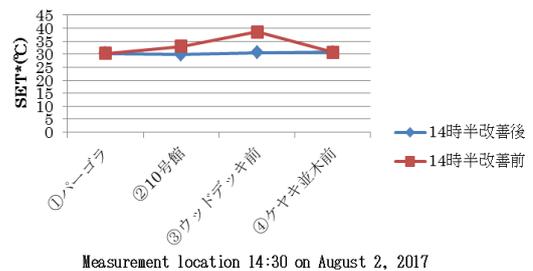


Figure 9 ② Values of SET* when thinking of queer trees in front of the 10th building and ③ wood deck

木前は、パーゴラには、屋根があり、その屋根には、葉などがついていて、風通しがすごくよく、ケヤキ並木には、大きな木があって、その木の陰に上手く風が通り、涼しくなったため、熱的快適域だった。

また、10号館前とウッドデッキ前は、木陰などがなく、時間帯によっては陰がなく、風通しが良くなかったため、比較的涼しくなく、熱的快適域ではなかった。グローブ温度の影響を大きく反映していると考えられる。

4.2 平均放射温度(MRT)による考察

4.2-1 MRT の計算

F:形態係数

T:表面温度(K)

日射ありと仮定すれば次式となる

$$MRT = \{ (\sum F \cdot T^4) + a \cdot J / \sigma \}^{0.25}$$

$$= \{ (\sum F \cdot T^4) + a \cdot J_{nd} / \sigma + a \cdot F \cdot J_{h0.1} / \sigma \}^{0.25}$$

a: 吸収率を0.5と仮定

σ : $5.67 \cdot 10^{-8}$ (W/m²K⁴)

J: 日射量(W/m²)

4.2-2 MRT の計算結果とグローブ温度の測定結果との比較

形態係数は、魚眼レンズカメラの写真から求めた。図6に示すようにMRTとグローブ温度は、あまり違いがなかった。

これらのMRTとグローブ温度のデータのグラフから、MRTの計算結果とグローブ温度の測定結果を比較して、10号館前とウッドデッキ前は、MRTの計算結果より、グローブ温度の方が高かった。ケヤキ並木前と8号館パーゴラ前は、MRTの計算結果より、グローブ温度の方が低かった。なぜ、このような結果になったのか、強調するかもしれないが、10号館前とウッドデッキ前、両方のグローブ温度は、測った地点での温度が、MRTの計算結果で求めた平均放射温度より高かった。他には、10号館前とウッドデッキ前、それぞれの方角で温度が低いからだと考えられる。また、日射量の量が多かったため、MRTの計算結果で求めた平均放射温度より高かったということも考えられる。

次に、ケヤキ並木前と8号館パーゴラ前だが、表面温度が、10号館前とウッドデッキ前より比較的良かったからだと考えられる。

4.3 暑熱環境の改善方法に関する検討

夏の測定で求めた形態係数で、木や、芝生、高さのある建物の形態係数を仮定し、暑熱環境を改善する方法を考えることによる効果は、SET*や、平均放射温度が低下し、暑さがなくなっていく、快適な環境になると考えられる。

4.4 まとめ

暑熱環境の改善方法、改善効果に関する考察に関しては、暑熱環境の改善方法、改善効果に関する考察だが、暑熱環境の改善だが、様々な改善がある。例えば、10号館前とウッドデッキ前の地面のレンガタイルを緑にするや、水を撒くや、10号館前とウッドデッキ前の地面のレンガタイルに屋根などをつけるといったところだ。夏の測定でレンガタイルに水を撒いてみると、表面温度が最大10℃低下しました。

他には、夏の測定で求めた形態係数で、木や、芝生、高さのある建物の形態係数を増やすことや、あと、摂南大学のグラウンドに座席、テントや、屋根をつけて、暑熱環境を改善するということだ。このことによる効果だが、SET*や、平均放射温度が低下し、暑さがなくなっていく、快適な環境になると考えられる。次に、ケヤキ並木前と8号館パーゴラ前だが、今現在の状況を維持して何も問題ないと考えられる。なぜなら、ケヤキ並木前と8号館パーゴラ前には、それぞれを覆う木々が多々あり、それらのおかげで、快適な環境であるからと考えている。

5. 結論

これらの測定結果から、暑熱環境の改善方法、改善効果に関する考察だが、暑熱環境の改善だが、様々な改善がある。例を一つ言うと、10号館前とウッドデッキ前の地面のレンガタイルを緑にするや、水を撒くや、10号館前とウッドデッキ前の地面のレンガタイルに屋根などをつけるといったところだ。夏の測定でレンガタイルに水を撒いてみると、表面温度が最大10℃低下した。

他には、夏の測定で求めた形態係数で、木や、芝生、高さのある建物の形態係数を増やすことや、あと、摂南大学のグラウンドに座席、テントや、屋根をつけて、暑熱環境を改善するということだ。このことによる効果だが、SET*や、平均放射温度が低下し、暑さがなくなっていく、快適な環境になると考えられる。次に、ケヤキ並木前と8号館パーゴラ前だが、今現在の状況を維持して何も問題ないと考えられる。なぜなら、ケヤキ並木前と8号館パーゴラ前には、それぞれを覆う木々が多々あり、それらのおかげで、快適な環境であるからと考えている。

1.2 デGREE-デイ

温床線の ON/OFF 制御条件である 15°C と砂層温度の 1 日平均の差をデGREE-デイとして砂ベッド 1unit(1.2m × 1.8m)あたりの 1 日積算消費電力量との相関関係を Figure 4 に示す。この図を見るとデGREE-デイと 1 日の積算消費電力量すなわち必要砂層加熱量の相関が強いことが分かる。式 1 より本来の暖房デGREE-デイは住宅などの一冬の暖房に必要な概算熱量 (暖房負荷) の算出に用いられることから、本研究でも必要な砂層加熱量の指標としてデGREE-デイを用いる。

$$H_h = \overline{KS} \times 24 \times D \quad (1)$$

H_h	: Heating load (Wh/Season)
\overline{KS}	: Heat transmission coefficient (W/K)
D	: Degree day (°C · day)

2. ハウス内空気、砂層温度の伝熱モデルを用いた推定式

2.1 ハウス内空気温度の推定

松尾らの研究では屋外空気温度による室温のステップ応答を簡単な指数関数(1 次遅れの式)で近似し、暖房された一般住宅の外気温励振に対する室温のステップ応答を式 2、式 3 のように表現した。さらに式 2、式 3 から屋外空気温度による室温の三角波応答時系列を式 4~式 7 で示し、屋外空気温度との合成積で式 9 を導いた。この時、未定係数は式 9 の r 、 b_0 、 b のみで r 、 b_0 、 b は適当な仮定値を与えて求められる室温の計算値と実測値の平均残差(式 10)が最小となるよう決定できる。

この伝熱モデルをビニルハウスに応用し、屋外空気温度からハウス内空気温度を、推定したハウス内空気温度から砂層温度を推定する。用いる伝熱モデルの模式図と等価電気回路を Figure 5~Figure 8 に示す。上記の手順で行う。ただし、本研究では加熱を行わない際の温度を推定するので暖房による応答は無視した (式 11~式 14)。式 15 を用いて屋外空気温度からハウス内空気温度を推定し、測定したハウス内空気温度との平均残差を求めた。なお助走期間は無しとした。算出に用いた期間は 2015 年 1 月 1 日~1 月 30 日である。屋外温度には日射の影響を加味するために実測した屋外空気温度と日射量から求める相当外気温度を用いた。相当外気温度を求める式を式 16 に示す。外気の総合熱伝達率においては放射熱伝達率を $5W/(m^2 \cdot K)$ 、田中ら⁴⁾の研究より対流熱伝達率を実測した屋外風速データから式 17 で算出し、その合計値を用いる。日射吸収率を 0.2~0.8 と変えてそれぞれ r_{OR} 値と平均残差の関係を求めた時、日射吸収率が 0.4 の時 r_{OR} 値 0.76 で平均残差が最小 1.91°C となった。この時のハウス内空気の屋外空気によるステップ応答と三角波応答を Figure 9、Figure 10 にハウス内空気推定温度の推移を実測温度と共に Figure 11 に示す。

2.2 砂層空気温度の推定

ハウス内空気温度を用いて砂層温度の推定を行う。式

11~式 15 において屋外空気温度の要素にハウス内空気温度を、ハウス内空気温度の要素に砂層温度を代入してハウス内空気温度による砂層温度のステップ応答 ($\varphi_{RS}(t)$)、三角波応答 ($\varphi_{RS,j}$)、推定式 ($\theta_{S,n}$) を求めた。なお砂層の r 値を r_{RS} とした。

2.1 より求めたハウス内空気温度推定値から砂層温度を推定し、測定した砂層温度との平均残差を求めた。なお助走期間は無しとした。算出に用いた期間は 2015 年 1 月 1 日~1 月 30 日である。ハウス内空気温度には日射の影響を加味するため実測したハウス内空気温度と屋外日射量から求める $\theta_{R,SAT}$ を用いた。対流熱伝達率に用いる風速は 0m/s とした。日射吸収率を 0~0.7 と変えて相当室温を算出し、それぞれに r_{RS} と平均残差の関係を求めた時、日射吸収率が 0.1 の時 r_{RS} 値 0.88 で平均残差が最小 1.34°C となった。この時の砂層のハウス内空気によるステップ応答と三角波応答を Figure 9、Figure 10 に砂層推定温度の推移を実測温度と共に Figure 12 に示す。

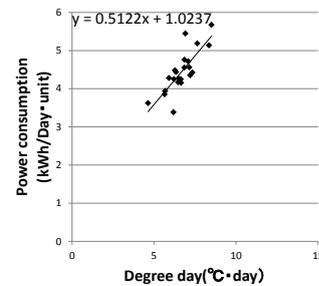


Figure 4 Degree day-Power consumption

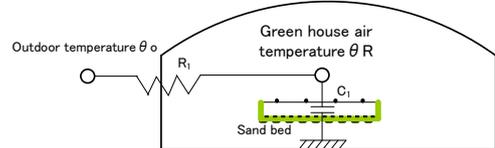


Figure 5 Simple model(Outdoor-Green house air)

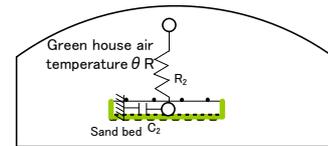


Figure 6 Simple mode(Green house air-Sand)

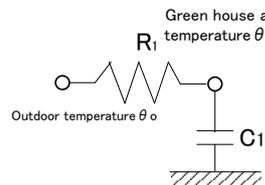


Figure 7 Equivalent electric circuit(Outdoor-Green house air)

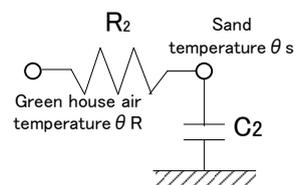


Figure 8 Equivalent electric circuit(Green house air-Sand)

$$\varphi(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$\psi(t) = b_0 - b e^{-\lambda t} \quad (3)$$

$$\varphi_0 = 1 - \frac{1}{\lambda \Delta t} (1 - r) \quad (4)$$

$$\varphi_j = \frac{1}{\lambda \Delta t} (1-r)^2 r^{j-1} \quad (5)$$

$$\psi_0 = b_0 - br \quad (6)$$

$$\psi_j = b(1-r)r^j \quad (7)$$

$$r = e^{-\lambda \Delta t} \quad (8)$$

$$\theta_{R,n} = \varphi_0(\theta_{o,n} - r^n \theta_{o,0}) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & + \varphi_1 \sum_{j=1}^n \theta_{o,n-j} r^{j-1} \\ & + (b_0 - br)H_n \\ & + br(1-r) \sum_{j=1}^n H_{n-j} r^{j-1} \\ & + r^n \theta_{R,0} \end{aligned}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\theta_n - \theta'_n)^2}{N}} \quad (10)$$

$$\varphi_{OR}(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (11)$$

$$\varphi_{OR,0} = 1 - \frac{1}{\lambda \Delta t} (1 - r_1) \quad (12)$$

$$\varphi_{OR,j} = \frac{1}{\lambda \Delta t} (1 - r_1)^2 r_1^{j-1} \quad (13)$$

$$r_{OR} = e^{-\lambda_{OR} \Delta t} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \theta_{R,n} = \varphi_{OR,0}(\theta_{o,sat,n} - r_1^n \theta_{o,sat,0}) \\ + \varphi_{OR,1} \sum_{j=1}^n \theta_{o,sat,n-j} r_1^{j-1} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\theta_{o,SAT} = \theta_o + \frac{a_R * J}{h_R} \quad (16)$$

$$h_a = 3.2 + 2.6 \times V - 0.0065 \times V^2 \quad (17)$$

$$\theta_{R,SAT} = \theta_R + \frac{a_S * J}{h_S} \quad (18)$$

3. 寒冷地の冬期における砂層温度の推定

寒冷地のハウス内空気温度及び砂層温度を伝熱モデルを用いて推定を行う。推定の対象地として新潟、仙台、帯広の環境データ(屋外空気温度、日射量、風速)を用いる。また一方で温暖地として大阪の環境データも用いて比較を行う。なお各地の屋外環境データは気象庁のデータベースを用いた。推定期間は2015年1月1日から1月30日とした。四条畷で実測された平均屋外空気温度は3.9℃、1日の平均日射量は82.8W/m²であった。大阪の平均屋外空気温度は6.3℃、1日の平均日射量は107.6W/m²であった。新潟の平均屋外空気温度は3.1℃、1日の平均日射量は58.1W/m²であった。仙台の平均屋外空気温度は2.5℃、1日の平均日射量は101.6W/m²であった。帯広の平均屋外空気温度は-8.6℃、1日の平均日射量は91.0W/m²であった。

$\varphi(t)$:Step response of indoor temperature by outdoor air temperature
$\psi(t)$:Step response of indoor temperature by heating
φ_j	:Triangle wave response time series of room temperature with outdoor air temperature
ψ_j	:Triangular wave response time series of room temperature due to heating
r,b,b ₀	:Undetermined coefficient
λ	:1/T _c
T _c	:Time constant
H	:Heating(J/h)
δ	:Mean residual
θ_n	:measurement value
θ'_n	:Calculated value
$\varphi_{OR}(t)$:Step response of green house air temperature by outdoor air temperature
$\varphi_{OR,j}$:Triangular wave response of green house air temperature by outdoor air temperature
λ_{OR}	:1/T _{c,OR}
T _{c,OR}	:Time constant of green house
$\theta_{o,SAT}$:Equivalent outside temperature (°C)
a _R	:Green house Solar radiation absorption rate (-)
h _R	:Green house Overall heat transfer coefficient (W/(m ² K))
θ_o	:Outdoor temperature (°C)
J	:Outdoor Amount of solar radiation (W)
h _a	:Convection heat transfer coefficient (W/m ² K)
V	:Wind speed(m/s)
$\theta_{R,SAT}$:Equivalent room temperature(°C)
a _S	:Sand Solar radiation absorption rate (-)
h _S	:Sand Overall heat transfer coefficient (W/(m ² K))
θ_R	:Green house air temperature (°C)

伝熱モデルを用いて各地域の砂層温度を推定する際は、2章のハウス内空気推定温度(θ_R)から式18より計算した $\theta_{R,SAT}$ (日射吸収率0.1)を用いて推定した。r_{RS}値は0.88を用いた。四条畷の平均温度は8.1℃、大阪の平均温度は9.9℃、新潟の平均温度は4.7℃、仙台の平均温度は5.4℃帯広の平均温度は-4.8℃であった。

屋外空気温度、屋外空気相当外気温度(日射吸収率0.4)、ハウス内空気温度推定値、砂層温度推定値の2015年1月1日～1月30日の最大値、平均値、最小値をFigure 13に示す。ほとんどの地域で屋外空気相当外気温度、ハウス内空気温度、砂層温度の平均が同程度になることが分かった。また大阪と寒冷地において最大値の差の方が最小値の差より大きくなることが分かった。

2014年11月22日～2015年1月23日を栽培期間とし、砂層加熱の制御温度を15℃とした時の栽培期間の各

地のデGREEデイを求めた。新潟、仙台、帯広のデGREEデイは 589.1、661.7、1,096.7°C・日となり四条畷の1.7、1.9、3.2倍となった。必要砂層加熱量はデGREEデイに比例することから、各寒冷地における必要砂層加熱量の四条畷との比はデGREEデイの比と等しい。四条畷の栽培期間の必要加熱量の実測値が 1,111MJ なので各寒冷地の必要砂層加熱量の推定値はそれぞれ Figure 14 のように 1,915MJ/unit、2,152MJ/unit、3,567MJ/unit であることが分かる。

4. まとめ

・伝熱モデルを用いた推定手法を用いて寒冷地のハウス内空気温度と砂層温度の推定を行いデGREEデイより必要な砂層加熱量の比較を行った。新潟、仙台、帯広の必要砂層加熱量の推定値は 1,915MJ/unit、2,152MJ/unit、

3,567MJ/unit で四条畷の 1.7、1.9、3.2 倍となった。

・今後の課題として他地域の実測値との整合性を確認する必要がある。

参考文献

- 1)稲葉 鍋島ら:冬期における農業用ビニルハウスの効率的な暖房方式に関する研究 (第 1 報)高床式砂ベッドの加温と保温効果の実験的検証 空気調和・衛生工学会近畿支部学術講演論文集 2015 年 3 月
- 2)空島 鍋島ら:冬期における農業用ビニルハウスの効率的な暖房方式に関する研究 (第 2 報) 高床式砂ベッドの加温と保温による葉菜類生育促進効果の実証と寒冷地への適用可能性の検討 第 45 回空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集 2016 年 3 月
- 3)松尾 斉藤現場測定にもとづく住宅熱特性の推定 日本建築学会環境工学論文集 第 3 集 1981 年 4 月
- 4)田中・奥島・佐瀬ら 対流熱伝達率におよぼす風向・風速の影響 農業施設学論文集 26 巻第 1 号 1995 年 6 月

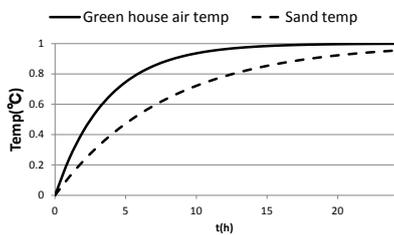


Figure 9 Step response temperature

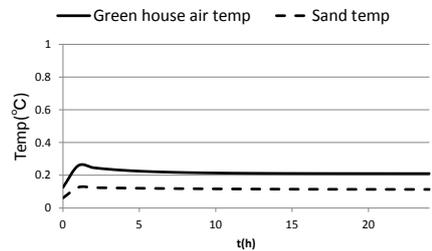


Figure 10 Triangular wave response temperature

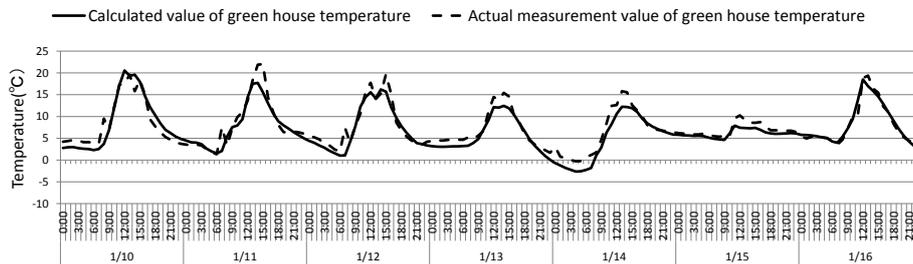


Figure 11 Comparison of calculated value and measured value of green house temperature

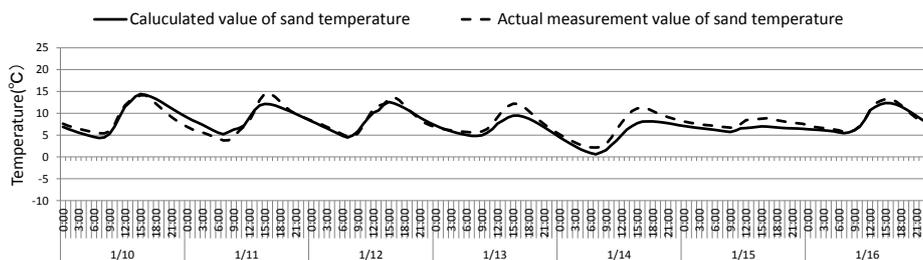


Figure 12 Comparison of calculated value and measured value of sand temperature

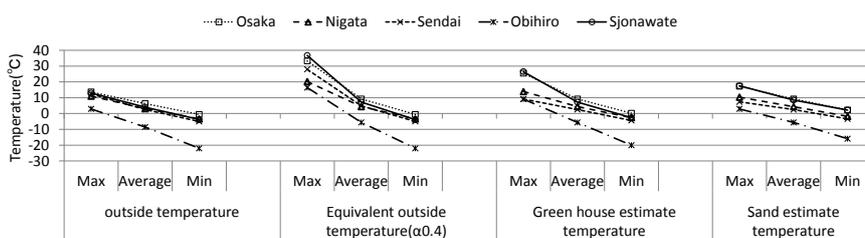


Figure 13 Temperature comparison

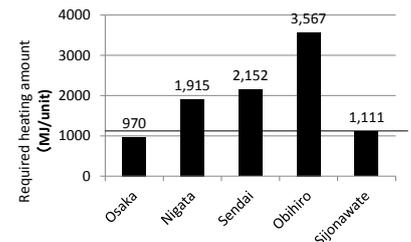


Figure 14 Comparison of required heating amount

夏期におけるビニルハウス内の環境改善に関する研究
日射遮蔽及びミスト噴霧効果の実験的検討
Study on Improvement of Condition in the Plastic Greenhouse in Summer
-An Experiment on the Effect of Solar Radiation Shading and Mist Spraying -

○三宅 悠貴 (大阪市立大学) 鍋島 美奈子 (大阪市立大学)
西岡 真稔 (大阪市立大学) 大橋 良之 (東レ建設株式会社)
Yuki MIYAKE*¹ Minako NABESHIMA*¹ Masatoshi NISHIOKA*¹
Yoshiyuki Oohashi*²
*¹ Osaka City University *² TORAY Construction Co., Ltd.

The temperature in the plastic greenhouse in summer is very high and it might raise heat stroke and the growth delinquent of the crops. The purpose of this study is examination by the environmental improvement effect by solar radiation shading and mist spraying. As the result of this study, it was found that the shading has a higher temperature rise suppressing effect than the inner shading. In addition, it showed that 1 minute-mist-spraying has almost no cooling effect, but the thermal environment can be improved by 30 minutes-mist-spraying.

はじめに

近年、地球温暖化による夏期の猛暑日の増加と共に農作業中の熱中症患者の発生数が増加しており、ビニルハウス内での熱中症による死亡事例も毎年報道されている。

ビニルハウス栽培は作物の収穫時期の調整ができ、秀品率を向上させられるメリットがある。その一方で、夏期にはハウス内の空気温度は40℃を超え、作物の生育適温を上回るため生育不良を引き起こす恐れがある¹⁾。また、WBGT値は熱中症の嚴重警戒域(26℃)を超え、熱中症発症の危険性が高く作業者にとっても危険な状態である²⁾。これらのことからハウス内熱環境を改善する必要があることが分かる。そこで本研究では日射遮蔽及びミスト噴霧による高温対策について検討を行う。

ビニルハウスの日射遮蔽には、外側遮蔽と内側遮蔽の2通りの方法がある。ここで、それぞれの遮蔽方法を行った際のハウスにおける熱の流れをFigure 1、Figure 2に示す。ハウスに同じ大きさの日射が到達したとすると、地面への吸収熱量は等しいため、どちらの遮蔽方法でも地面からの対流・放射熱量は同じと考えられる。しかし、遮蔽ネットに吸収された熱が外側遮蔽の場合は屋外に伝わるのに対して、内側遮蔽の場合はハウス内に伝わることで、内側遮蔽の方がハウス内気温は高くなると理論的には想定される。そこで本研究では各遮蔽方法の昇温抑制効果を実測により検証する。

また木村ら³⁾はミストを直接噴霧すると作物に水滴が付き、生育に悪影響を及ぼす恐れがあることから、ビニルハウス内にある日射遮蔽ネットにミストを噴霧し、ミスト噴霧前と噴霧後の温度差から冷却効果を評価した。この際、遮蔽ネット上部の空気では温度降下が確認されたが、下部の空気では温度降下はほとんど見られなかつ

た。そこで本研究では、遮蔽ネットより下の位置からハウス内空気に対し直接的にミスト噴霧を行うことでの冷却効果について検討する。

1 実験概要

京都府相楽郡精華町にある研究所内に設置されているビニルハウスにおいて実測を行った。ビニルハウスの配置図をFigure 3に示す。日射遮蔽実験はC棟、ミスト噴霧実験はB棟において行った。

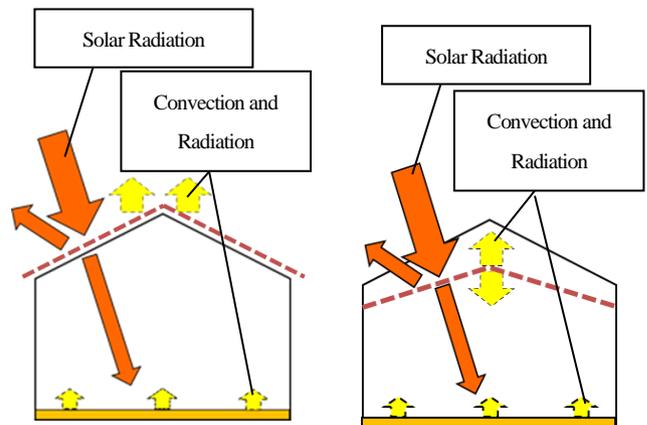


Figure 1 Outside shading

Figure 2 Inside shading

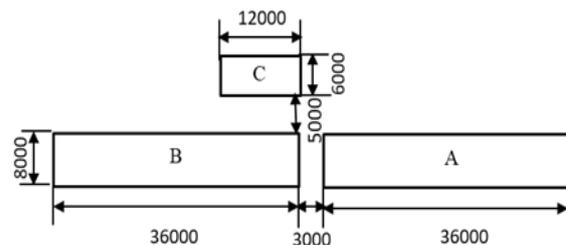


Figure 3 Plastic greenhouse layout

1.1 日射遮蔽実験

測器設置位置を Figure 4、Figure 5 に示す。ハウス内中央部の遮蔽ネット下部（地面から 1.5m、2.5m の高さ）、遮蔽ネット上部（地面から 3m の高さ）で気温を、1m の高さで日射量を測定した。気温の測定間隔は 10 分であり、日射量は 10 分間の平均値を測定した。実測期間は外側遮蔽が 10 月 27 日～11 月 12 日、内側遮蔽が 11 月 13 日～11 月 27 日、遮蔽無しが 11 月 28 日～12 月 20 日である。ただし、それぞれの遮蔽方法においてネットの日射透過率は同じものを使用した。

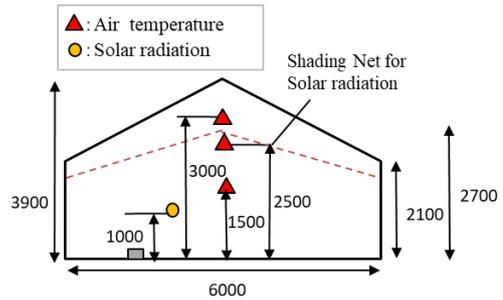


Figure 4 Survey instrument setting minor axis cross section (Experiment of solar radiation shading)

1.2 ミスト噴霧実験

測器設置位置を Figure 6、Figure 7 に示す。ハウス内の地面から 4m の高さでミスト噴霧を行い、その際のハウス内気温及び湿度を地面から 1.5m の高さ 2 箇所 (①と②) において測定した。ミストノズル間隔は 50cm であり、噴霧量は 1.3L/min であった。実測日は 11 月 1 日、2 日、3 日、10 日、13 日の計 5 日間であり、1 分噴霧 14 分停止もしくは 19 分停止を繰り返して行った。気温及び湿度の計測間隔は 10 秒とした。また、湿度の上昇を抑えるためにハウスの側窓と天窓を開放し、ファンを稼働させた状態で噴霧を行った。

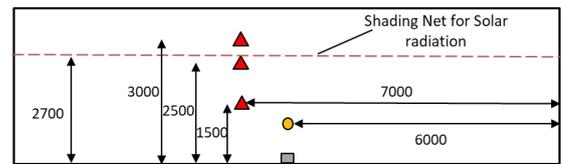


Figure 5 Survey instrument setting major axis cross section (Experiment of solar radiation shading)

2 評価方法

2.1 日射遮蔽実験

横軸に外気温、縦軸にハウス内気温をとり、それぞれの遮蔽方法について線形回帰分析を行った。ハウス内気温には日射量が大きく関係するため、分析を行うにあたり、屋外日射量を $100\text{W}/\text{m}^2$ ごとに分けることとした。ただし、日射量が急に变化した際にはハウス内気温は時間的遅れを伴って変化すると考えられるため、10 分間で屋外日射量が $100\text{W}/\text{m}^2$ 以上变化した場合の計測値は除くこととした。分析によって求められた回帰式から昇温抑制に有効な遮蔽方法を判断した。

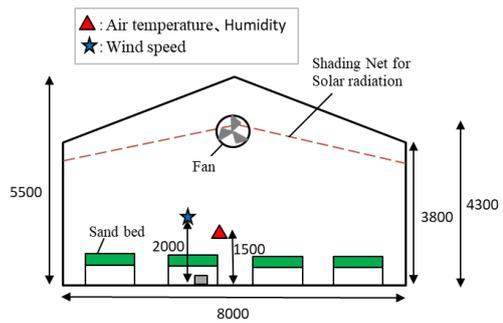


Figure 6 Survey instrument setting minor axis cross section (Experiment of mist spraying)

2.2 ミスト噴霧実験

ミスト噴霧を行う前の気温から、噴霧後最も低下した際の気温を差し引くことで温度低下量として算出した。ここで、ハウス内気温と外気温の差を 30 分間計測した結果を Figure 8 に示すが、その温度差は $3.2^{\circ}\text{C}\sim 3.8^{\circ}\text{C}$ 程度で、ほぼ一定であることが分かる。したがって、ミスト噴霧中に外気温が变化した場合は温度低下量から外気温の変化量を除くことで、ミストによる温度低下量として求めることで冷却効果として評価した。さらに WBGT 値から環境改善策としての有効性を検討した。

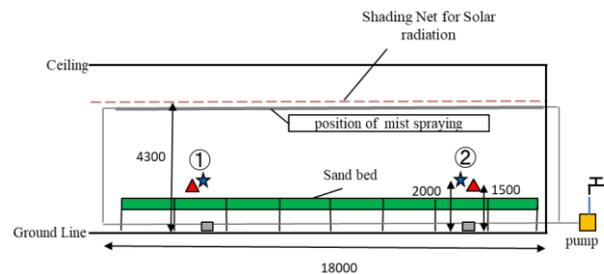


Figure 7 Survey instrument setting major axis cross section (Experiment of mist spraying)

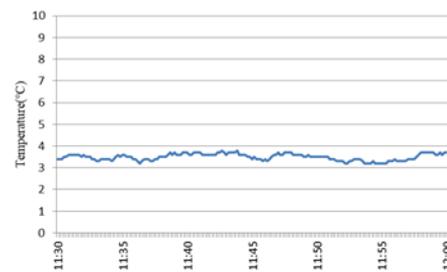


Figure 8 Difference between outdoor and indoor temperature

3 結果と考察

3.1 日射遮蔽実験

外側遮蔽及び内側遮蔽の各条件で、昼間の平均日射量が 500W/m²以上を計測した日の 14 時におけるハウス内の各高さの気温を Figure 9 に示す。各条件の実測日は異なるので、単純に室温の比較はできないが、300cm (ネット上部空間)における気温は 150cm(ネット下部空間)に比べて外側遮蔽では 2.2℃しか差がないのに対して、内側遮蔽では 8.3℃高くなっていることが分かった。また、外気温とハウス内気温の関係を散布図に示す (Figure 10、Figure 11)。屋外日射量が 400~500W/m²の場合、外側遮蔽の場合の回帰式： $y = 1.14x + 14.4$ 、内側遮蔽の場合の回帰式： $y = 1.37x + 12.8$ となった。この回帰式を用いて、外気温 $x=30℃$ を外挿すると、ハウス内温度は外側遮蔽で 48.6℃、内側遮蔽で 53.9℃と推定された。他の日射量についても同様にして分析を行った結果を Table 1 に示す。ハウス内の 150cm 高さにおける気温は外側遮蔽、内側遮蔽、遮蔽無しの順に低くなり、外側遮蔽では内側遮蔽よりも 3~5℃ほど昇温が抑制できると推定された。今回は外気温が約 25℃までの範囲でしか実測データがないため、回帰モデルの決定係数が 0.7 程度となった。そこで外気温が 30℃を超える夏期のデータを追加することで、回帰精度を高めて回帰式を求めなおす必要がある。

3.2 ミスト噴霧実験

3.2.1 ミスト噴霧 (1 分間)

ミスト噴霧を行った際の気温の推移を Figure 12 及び Figure 13 に示す。11 月 3 日の 1 回目から 3 回目の噴霧における温度低下量は温湿度センサー①で 0.1℃、0.5℃、0℃、②で 0.6℃、0.7℃、0.2℃であった。また、11 月 10 日の 1 回目から 4 回目の噴霧における温度低下量は温湿度センサー①で 0.4℃、0.2℃、0.3℃、0.6℃、②で 0.4℃、0.3℃、0.2℃、1.1℃であった。他の実験日についても最大で 1℃程度しか温度低下が見られず、WBGT 値についても変化が見られなかった。今回用いた温湿度センサー (おんどとり RTR-503) では、1 分間のミスト噴霧では冷却効果が観測できず、1 分では噴霧時間が短くハウス内の空気を冷却するための水分量が足りなかったことが原因として考えられる。

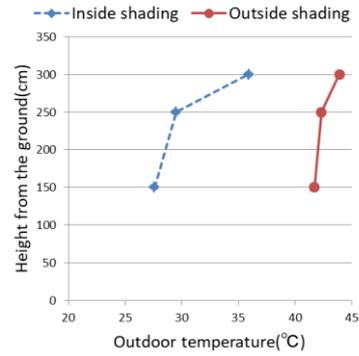


Figure 9 Vertical temperature distribution

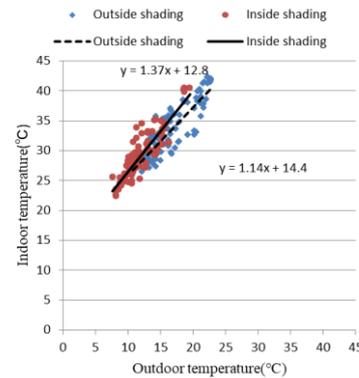


Figure 10 Relationship between outdoor and indoor temperature (Solar radiation:400~500W/m²)

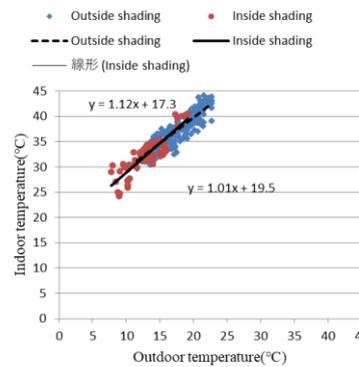


Figure 11 Relationship between outdoor and indoor temperature (Solar radiation:500~700W/m²)

Table 1 Result of solar radiation shading

	Shading method		
	Outside shading	Inside shading	Without shading
(I)1~100W/m ²	32.3℃	37.6℃	37.8℃
(II)100~200W/m ²	37.5℃	45.1℃	39.6℃
(III)200~300W/m ²	44.8℃	47.6℃	51.8℃
(IV)300~400W/m ²	46.7℃	49.8℃	57.6℃
(V)400~500W/m ²	48.6℃	53.9℃	57.4℃
(VI)500~700W/m ²	49.6℃	51.6℃	59.9℃

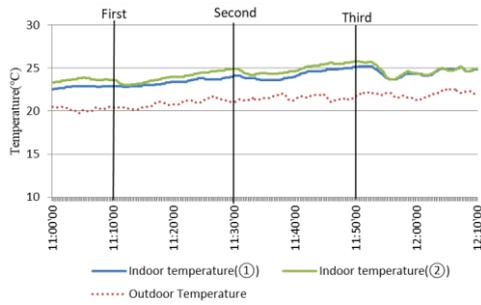


Figure 12 Change of air temperature (Nov.3)

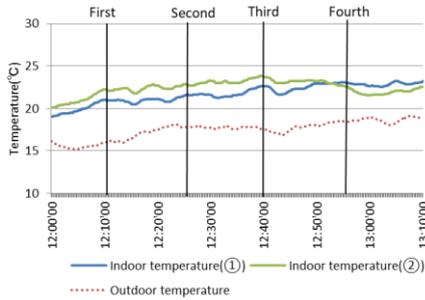


Figure 13 Change of air temperature (Nov.10)

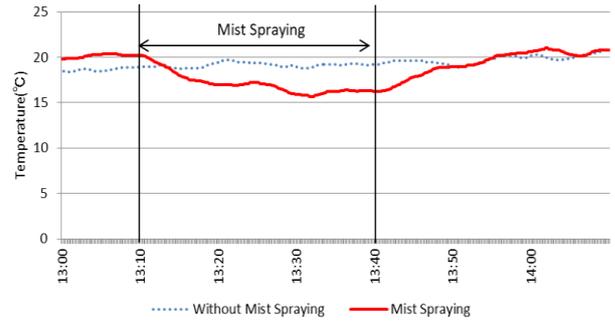


Figure 14 Change of air temperature

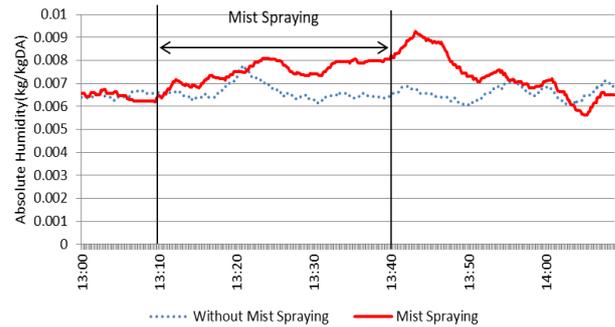


Figure 15 Change of absolute humidity

3.2.2 ミスト噴霧 (30 分間)

1 分間のミスト噴霧では噴霧量が少なかったことが、温度低下が見られなかった原因として考えられたために追加で 1 月 16 日に 30 分間のミスト噴霧実験を行った際の気温、絶対湿度、WBGT 値の推移を Figure 14~Figure 16 に示す。温度に関しては噴霧開始から 1 分後で 0.2℃、3 分後で 1℃、5 分後で 2℃、10 分後で 3℃、20 分後で 4℃、22 分後で最大 4.5℃の温度低下が見られた。また、絶対湿度は噴霧開始以降上昇し続け、15 分後で 2g/kgDA 程度上昇した。WBGT 値は噴霧開始から 6 分後で 1℃低下し、18 分後に最大で 1.8℃低下した。1 分のミスト噴霧では WBGT 値に変化が見られなかったことを踏まえると、噴霧時間を長くすることで熱環境が改善されることが分かった。ただし、30 分間の噴霧を行った際には作物や皮膚の濡れが確認された。

4 まとめ

- ・外側遮蔽の方が内側遮蔽よりも昇温抑制効果が高いことを明らかにした。
- ・1 分間のミスト噴霧では噴霧量が少ないために、冷却効果が確認されなかった。
- ・30 分間のミスト噴霧では温度は約 5℃低下し、絶対湿度は約 2g/kgDA 上昇したが、WBGT 値は 2℃程度低下した。しかし、この際作物や皮膚の濡れが発生した。
- ・日射遮蔽実験については夏期にも実測を行い、回帰精度を向上させる必要がある。
- ・ミスト噴霧実験については作物や皮膚の濡れを考慮したうえで適切な噴霧時間の模索を行う必要がある。

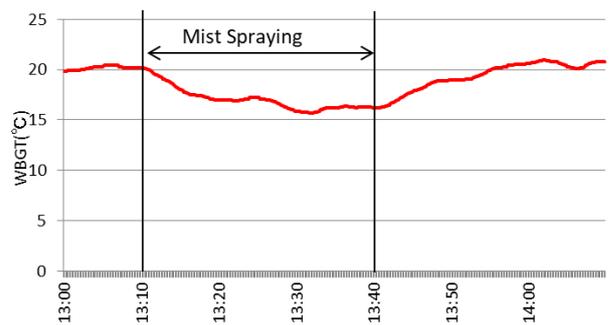


Figure 16 Change of WBGT

参考文献

- 1) 二村幹夫、山口徳之、池内都、和田朋幸、大石一史：夏期高温時の超微粒ミスト噴霧と夜間冷房がバラ切り花の収量、品質に及ぼす影響 愛知県農業総合意見状研究報告, 44 号, p53-59, 2012. 12
- 2) 登内道彦、村山貢司 (2013)：ビニルハウスにおける暑熱環境の測定 日生氣誌, 50 (3) :S37
- 3) 木村駿介ほか：夏期におけるミスト噴霧によるビニルハウス内の環境改善の実験的検討, 平成 27 年度空調和・衛生工学近畿支部学術研究発表会, A-73, 2016

京阪神地域における都市が夏期降水に与える影響の数値解析

Numerical analysis of the impact of urbanized land cover on summertime precipitation in Keihanshin area

○笠本 健士朗 (大阪大学) 嶋 寺 光 (大阪大学)

松尾 智仁 (大阪大学) 近藤 明 (大阪大学)

Kenshiro Kasamoto*¹ Hikari Shimadera*¹ Tomohito Matsuo*¹ Akira Kondo*¹*¹ Osaka University

The urban heat island may affect rainfall frequency and intensity. This study utilized the Weather Research and Forecasting model (WRF) to estimate the impact of urbanized land cover on rainfall in Keihanshin area. The impact of urban land use was estimated by comparing two simulation cases with the present land use data and no-urban land use data in which “urban area” was replaced by “grassland”. The urbanized land cover increased rainfall by enhancing the formation and development of convective clouds under unstable atmospheric conditions. While both rainfall frequency and intensity increased because of the urbanized land cover, there was a remarkable enhancement in the intensity of short-term strong rainfall.

はじめに

ヒートアイランド現象は、猛暑や熱帯夜の原因となるだけでなく、局地的降雨にも影響していると言われている¹⁾。日本の主要都市の一つである大阪では、ヒートアイランド現象によって気温が上昇し、観測データから短時間強雨が増加傾向にあることがわかっている²⁾。これまでに、限定された都市域において降雨頻度が増加していること³⁾、土地利用を変更することで都市化が局地気象に影響を与えていること⁴⁾がわかっているが、日本の主要都市において発生する都市化によるヒートアイランド現象と降雨の関係およびその降雨強度への影響については明確になっていない。また、数値モデルを用いた数値計算においては、観測データの分析のみによる評価では取り除くことが困難である広域的な気候変動をはじめとする様々なほかの要因による影響を排除し、都市化の影響だけを切り出した解析を行うことができる。したがって、本研究では、都市化の降雨に対する影響を評価するために、日本の主要都市の一つである大阪市を含む京阪神地域を対象に、数値モデルを用いた数値解析を行った。

1. 計算条件

1.1 気象モデル

本研究では気象モデルに Weather Research and Forecasting model (WRF)⁵⁾ のバージョン 3.5 を使用した。本研究で使用した WRF の設定を Table.1 に示す。

Table.1 WRF configurations

Parameter	Setting
Topography	USGS (30 sec)
Land use	GIA of Japan (100 m)
Initial and boundary	NCEP FNL, REG-SST-HR, MSM-GPV
Nesting	No feedback
Cumulus	Off
Microphysics	WSM6
Radiation	Dudhia / RRTM
PBL	YSU
Land surface	Noah LSM (without UCM)
Analysis nudging	Off

1.2 計算領域・計算期間

本研究で使用した WRF の計算領域および地域気象観測所の位置を Fig.1 に示す。計算領域は近畿地方を対象とする D01 と京阪神地域を対象とする D02 とした。計算期間は 2006～2015 年の各年の 6 月 24 日～6 月 30 日を助走期間、7 月～9 月の 3 ヶ月間を評価対象期間とした。

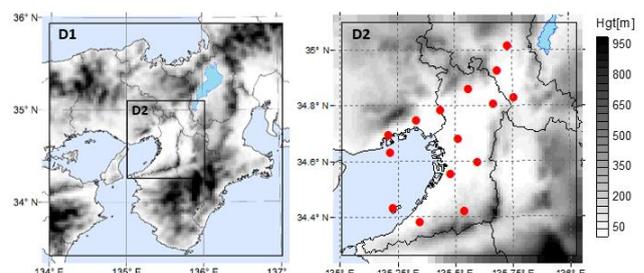


Fig.1 Modeling domain and locations of meteorological observatories

1.3 解析ケース

本研究では、ヒートアイランド現象が降雨に及ぼす影響を評価するために、現況土地利用を用いた URBAN ケースと、D02 の「都市域」を「草地」に変更した土地利用を用いた NOURB ケースで計算を行った。URBAN ケースと NOURB ケースの土地利用分布を Fig.2 に示す。

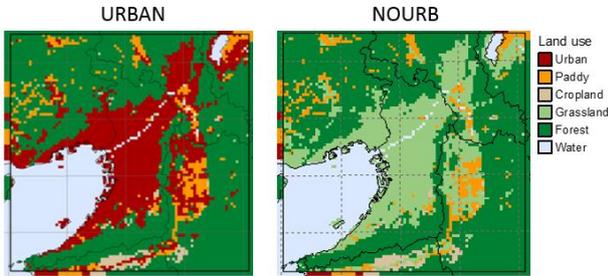


Fig.2 Land cover of URBAN case and NOURB case

2. 計算結果と考察

2.1 再現性評価

対象期間である 2006 年から 2015 年各年の気温、風速の日平均値の月平均値、および月積算降水量の平均値についての縦軸を URBAN ケースの計算値、横軸を観測値とした地点別散布図を Fig.3 に示す。気温は全体的にやや過大評価しているが、地点・期間による違いを良好に再現できていると言える。風速は、観測値が小さい地点で過大評価、大きい地点で過小評価の傾向があるが、平均では観測値と計算値が概ね一致している。降水量は、気温・風速に比べるとばらつきが大きいものの、計算値は概ね観測値の半分～倍に収まっている。以上より、全体的には気象場をよく再現できていると言える。

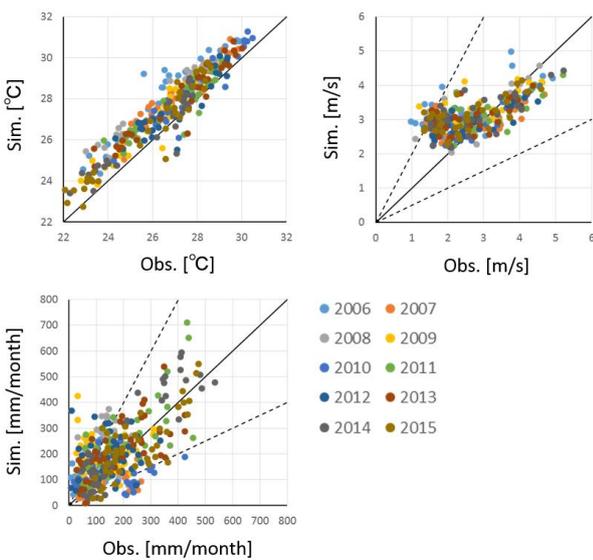


Fig.3 Scatter plots of temporal mean observed versus simulated temperature, wind speed and precipitation in each month.

2009 年と 2015 年の全地点の値を平均した気温、風速、

降水量の時系列変化を Fig.4, Fig.5 に示す。2009 年, 2015 年における気温、風速は、やや過大評価しているが、計算値が観測値の時間変動をよく捉えられていた。また、2015 年における降水量は時間変動をよく捉えられていたが、2009 年における降水量は計算値と観測値の差が大きい日が多く見られた。これらの日は、対象領域に前線が近づいた日である。本研究では、後述するように、台風および前線が対象領域に近づいた日を解析対象から除外するため、これらの差は本研究の解析に影響しないと考えられる。よって、台風・前線の影響している日を除外した場合、2009 年における降水量は時間変動をよく捉えられていたと言える。

以上の結果から、URBAN ケースのシミュレーションは気象場をよく再現しており、WRF が、降雨に対する都市化の影響評価を行うのに妥当なモデルであることが分かった。

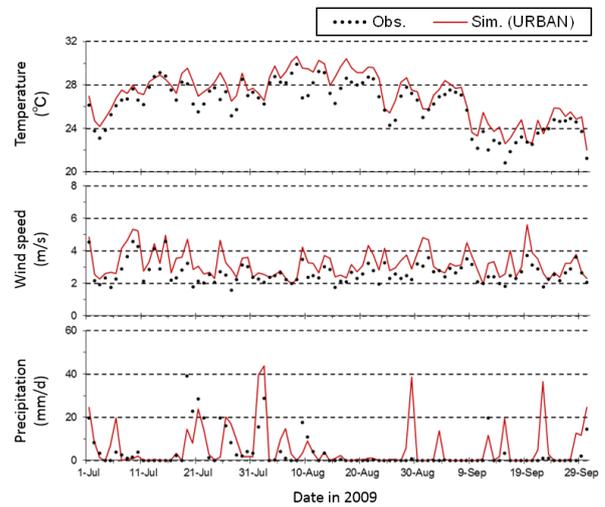


Fig.4 Daily time series of observed and simulated spatial mean daily average temperature, wind speed and precipitation in 2009.

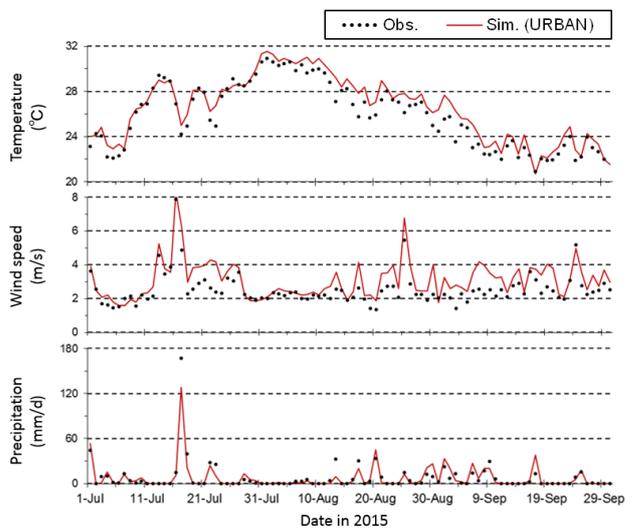


Fig.5 Daily time series of observed and simulated spatial mean daily average temperature, wind speed and precipitation in 2015.

2.2 解析対象日

本研究では、都市における局地的な降水を対象としていることから、台風・前線がD01に接近した日を解析対象から除外した。除外条件は、

- 1) 台風の中心がD01から300km以内に入った場合
- 2) 前線がD01を通過した場合

とした。その結果、対象期間全920日から333日が除外され、解析対象日は587日となった。

2.3 都市化の降水に対する影響

(1) 空間的变化について

D02について、全解析対象期間中の平均地上気温、湿度、風速および平均月降水量のURBANとNOURBの差分をFig.6に示す。平均地上気温は、都市域において上昇し、湿度は、都市域において減少した。このことから、モデルが、ヒートアイランド現象の特徴を捉えていることがわかる。土地被覆の変化に伴い、潜熱フラックスが都市域にて減少した。これにより、顕熱フラックスが上昇した。また、大気境界層高さは上昇し、降水量は増加した。

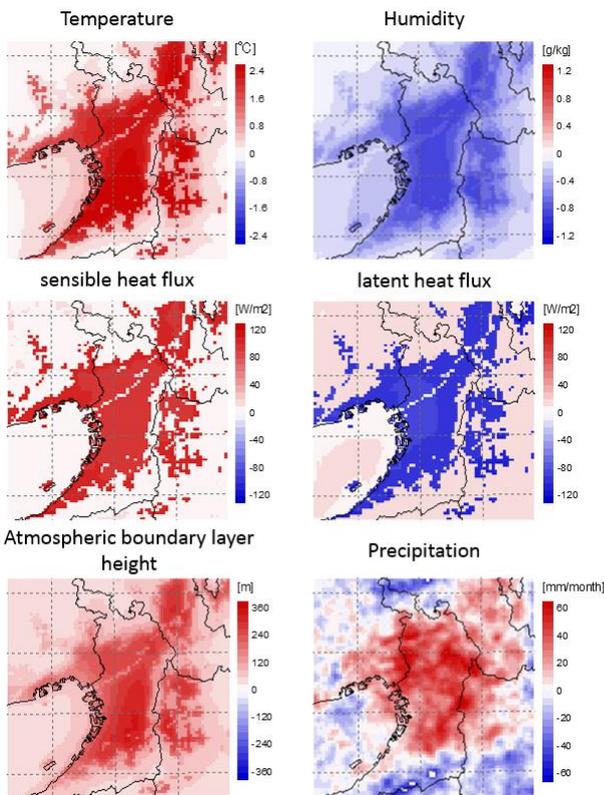


Fig.6 Spatial distributions of temperature, humidity, sensible heat flux and latent heat flux, atmospheric boundary layer height and precipitation (URBAN – NOURB)

(2) 降水量増加について

URBAN ケースで都市域となっている計算格子における降水量の平均日内変動を Fig.7 に示す。URBAN ケース

はNOURB ケースに比べて、降水量が夕方から夜間にかけて増加しており、19時における増加率が1.57倍と、日内で最も大きな差を示した。

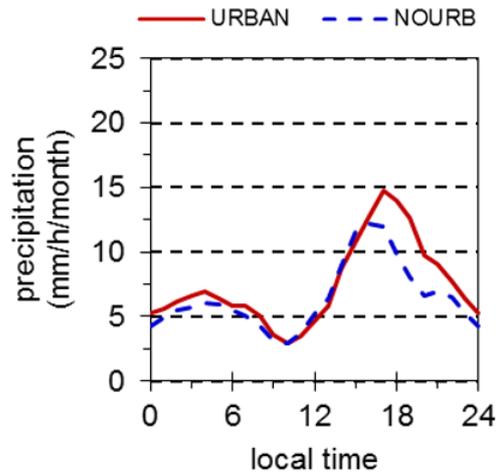


Fig.7 Diurnal variations of the simulated mean precipitation in URBAN and NOURB cases.

URBAN ケースで都市域となっている計算格子について、解析対象日で平均した潜熱フラックス、顕熱フラックス、気温、大気境界層高さの日内変動を Fig.8 に示す。URBAN ケースでは潜熱フラックスがほとんど0で、NOURB ケースに比べて平均で104.4W/m²の減少が見られた。顕熱フラックスは、潜熱フラックスが大きく減少している日中で上昇傾向が見られ、平均で90.4W/m²上昇した。気温は、顕熱フラックスの上昇によって、日没から明け方にかけて上昇傾向にあり、平均で2.1°C上昇した。また、大気境界層高さは、日中で上昇傾向にあり、平均で194.4m上昇した。大気境界層高さの上昇は、地上気温が上昇したことにより、大気がより不安定になったことが原因であると考えられる。

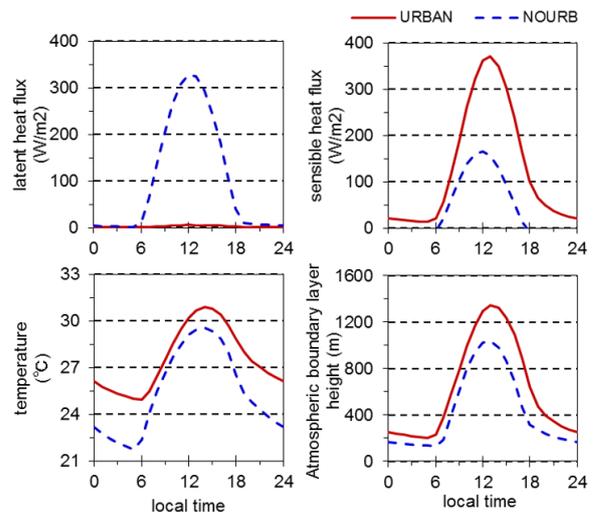


Fig.8 Diurnal variations of the simulated mean ground-level meteorological variables in URBAN and NOURB cases.

以上のことから、都市域における降水量の増加は、地上気温の上昇に伴い、大気がより不安定になったことで対流雲の形成が起りやすくなったことが原因であると考えられる。

(3) 降水強度に対する都市の影響

降水強度に対する都市の影響を評価するために、解析対象日を URBAN ケースの都市域で平均した日降水量によって分類した。分類は

- 1) 弱い降水： 1mm/d 以上 10mm/d 未満
- 2) 中程度の降水： 10mm/d 以上 25mm/d 未満
- 3) 強い降水： 25mm/d 以上

とした。

D02 について、各分類の日降水量の URBAN ケースと NOURB ケースの差分を Fig.9 に示す。また、各分類における一時間降水量の頻度と NOURB から URBAN への頻度増加比率を Table.2 に示す。全分類において、降水量が増加していることから、都市化が全強度の降水に影響を与えていることがわかる。また、強い降水において短時間強雨 (1 時間に 10mm/h 以上) の比率が大きいことから、都市化による強い降水の増加は短時間強雨の増加によるものであると言える。

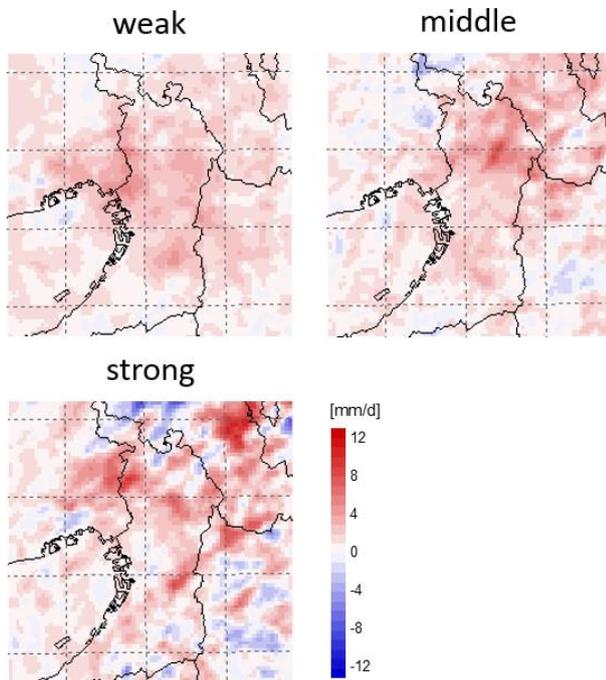


Fig.9 Spatial distributions of precipitation each classification (URBAN - NOURB)

Table.2 Frequency and increase ratio of hourly rain each classification

	intensity (mm/h)	URBAN (%)	NOURB (%)	ratio
Weak rain	(0.5, 10]	4.39	3.82	1.15
	(10, ∞]	0.30	0.24	1.28
Middle rain	(0.5, 10]	11.71	10.90	1.07
	(10, ∞]	1.47	1.21	1.22
Strong rain	(0.5, 10]	17.11	16.74	1.02
	(10, ∞]	4.86	4.34	1.12

3. 結論

本研究では、気象モデル WRF を用いて、現況の土地利用をもつ URBAN ケースとその都市域を草地に変更した土地利用をもつ NOURB ケースのシミュレーションを行い、その結果を比較することで、都市化が降水に与える影響を評価した。

本研究で得た結果を以下にまとめる。

- 1) 降水量の増加は、都市化による気温上昇に伴い、大気がより不安定になったことで、対流雲の形成が起りやすくなったことが原因である。
- 2) 都市化は、強い降水を含めた全強度の降水に影響を与えており、特に短時間強雨の頻度を増加させている。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所 ヒートアイランド現象とその影響
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0406pdf/ks0406005.pdf>
- 2) 大阪府河川整備審議会 近年の降雨を踏まえた取組みについて
http://www.pref.osaka.lg.jp/attach/4127/00195550/04_h27bukai3_siryu2-2.pdf
- 3) 高橋日出男, 中村康子, 鈴木博人: 東京都区部における強雨頻度分布と建築物高度の空間構造との関係. 120.2, 359-381, 2011.
- 4) 佐藤友徳, 寺島司, 井上忠雄, 木村富士男: 東京都都市域における夏季の降水システムの強化, 53(6), 479-484, 2006
- 5) Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Baker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers J.G: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical Note. NCAR/TN-475+STR. DOI: 10.5065/D68S4MVH. 2008

水質モデルを用いた加古川流域から播磨灘への窒素流出解析

Analysis of nitrogen discharge from the Kako River Basin to Harima Nada using water quality model

○森 正 憲 (大阪大学) 古賀 佑太朗 (兵庫県環境研究センター)
 嶋 寺 光 (大阪大学) 松 尾 智 仁 (大阪大学)
 近 藤 明 (大阪大学)

Masanori MORI*¹ Yutaro KOGA*² Hikari SHIMADERA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University *² Hyogo Prefectural Institute of Environmental Sciences

In Harima Nada, nutrient concentration has decreased due to regulation for water quality improvement, which may be attributable to recent decrease in fishery yield. In order to evaluate the attribution quantitatively, it is necessary to grasp the dynamics of nitrogen in rivers flowing into Harima-Nada. In this study, hydrological transport of total nitrogen in the Kako River Basin, which is the largest among basins around Harima Nada, was analyzed by using water quality model. While the model well captured temporal variations of river flow, it tended to overestimate nitrogen concentration probably because of an overestimate of nitrogen load originating from area sources.

はじめに

瀬戸内海では、高度成長期には富栄養化の影響で赤潮が頻発していたが、瀬戸内海環境保全特別措置法による規制等により水質汚濁流入負荷量は大きく減少し、水質の改善が進んできた。その一方で、1990年代後半以降瀬戸内海における漁獲量は減少傾向にあり、ノリの色落ちも報告されている¹⁾。

上記の問題の要因の1つに貧栄養化が考えられる。溶存無機態窒素(DIN)をはじめとする栄養塩は、海洋生物の餌となる植物プランクトンの成長に必須であるが、瀬戸内海で漁獲量の減少が確認されたのと同時期に、瀬戸内海東部の播磨灘においてはDIN濃度の低下が進んでいる¹⁾。

このような課題を解決するための栄養塩管理対策の検討には、長期の栄養塩流出量評価が必要である。また、DIN濃度変化には流入河川による窒素負荷量の変化が影響を与えていることが明らかになっている²⁾。また、複数の流入河川中で加古川が最大の流域面積を持っていることが分かっている³⁾。

以上より本研究では、長期の栄養塩流出解析のための基礎研究として水文・水質モデルを構築し、播磨灘への流入河川の中で最大の流域面積を持つ加古川流域を対象に、流量、総窒素濃度の再現や、流域内の総窒素の寄与率の算出などといった総窒素(TN)の流出解析を行った。

1. 解析方法

1. 1 水文・水質モデルの概要

水文モデルで流域界・水路網データ、土地利用データ、気象データから流域内の降雨流出過程が計算される。続いて水質モデルにて、水文モデルにより計算された陸域流出量、河川水位・流量と、窒素負荷発生源データから河川水中窒素の動態が解析される。

1. 2 計算条件

計算領域は Fig.1 に示す加古川流域である。流域全体を1852の標準地域メッシュ(3次メッシュ)に区分し、計算期間は2015年の1年間とした。

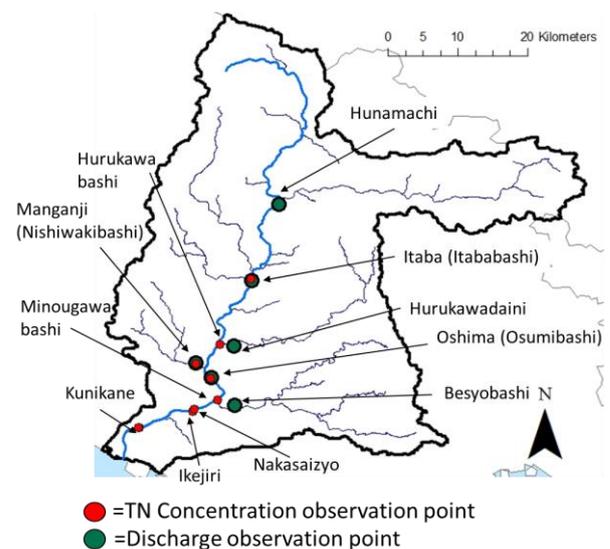


Fig.1 Kako River basin and observation point

Table.1 に各観測点における調査観測項目を、Table.2 に降雨後に実測を行った日時を示す。降雨後は河川への面源からの総窒素負荷が増加することが知られている。この中で流量の計算結果を本流の上流と下流に位置する板波と大島で、総窒素濃度の計算結果を降雨時に実測を行った板波橋と中西条について示す。中西条についてのみ、降雨後の2時間ごとに実測を行った。また、同じ地点で得られた実測値でも、観測所名が流量および平水時の総窒素濃度と、降雨後の総窒素濃度で異なるものが存在するので、Fig.1, Table.1 内の丸括弧に降雨後の総窒素濃度が得られた観測所名を示す。

Table.1 Observed items at each observation point⁴⁾⁵⁾

Area	Discharge	After rain (TN)	In ordinary water (TN)
Hunamachi	○	—	—
Itaba	○	○ (Itababashi)	○
Hurukawadaini	○	—	—
Hurukawa	—	○	—
Manganji	○	○ (Nishiwakibashi)	—
Oshima	○	○ (Osumibashi)	—
Minougawabashi	—	○	—
Besyobashi	○	—	—
Nakasaijo	—	○ (Every 2 hours)	—
Ikejiri	—	—	○
Kunikane	—	—	○

Table.2 Survey date at the time of rain⁴⁾

Year	Survey date	Survey date (Nakasaijo)
2015	8/20	—
	9/17	9/16-17
	10/28	10/27-28
	11/18	11/17-18

Table.3 に山林、水田、畑、市街地の土地利用割合を、Fig.2 に各土地利用の流域内における分布を示す。流域内には山林が多く存在することが分かる。窒素負荷発生源データとして面源からの降雨流出に伴う総窒素負荷、点源として下水処理場と事業所からの窒素負荷を考慮した。面源負荷は Table.4 に示す土地利用ごとの窒素の浸出率

を用いて、降水量の時系列変化に応じて総窒素負荷が分配されると仮定した。水処理場と事業所からはそれぞれ排水の流量および窒素濃度の日平均値、年平均値を入力し計算を行った。また、全計算格子において流出した総窒素負荷を発生源別に集計し、年間の窒素負荷の寄与率を算出した。面源負荷の影響を調べるために、全ての汚染源を考慮した計算に加え、面源負荷を考慮しない計算を行った。

Table.3 Land use ratio in the Kako River basin⁶⁾

Land Use	Forest	Rice field	Farm	City	Water
Ratio (%)	66.4	18.7	1.0	11.3	2.6

Table.4 Area source load unit for each land-use category⁷⁾

Land use	Forest	Rice field	Farm	City
TN leach rate (kg/ha/year)	5.78	5.0	2.4	4.5

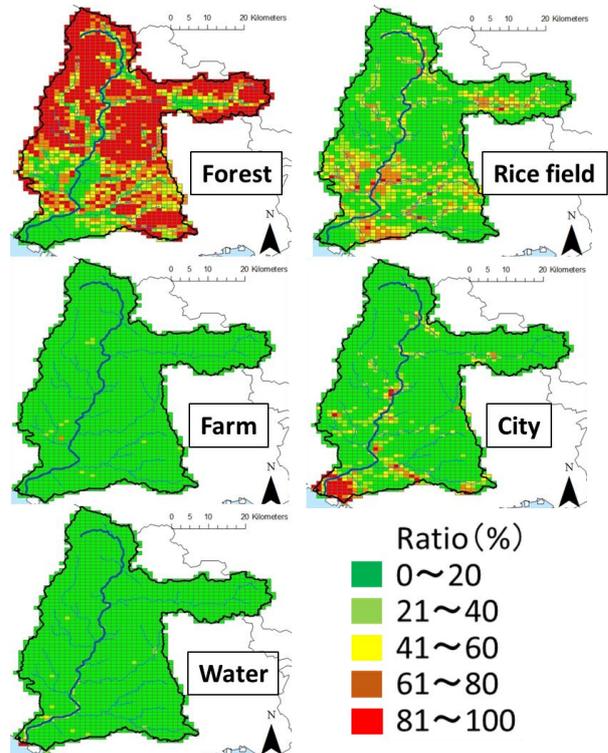


Fig.2 Distribution of land use ratio within Kako River basin

2. 計算結果

Fig.3, Fig.4 に板波と大島における流量時別値の計算値と実測値を、Fig.5 に全流量観測点における年平均流量の実測値と計算値の比較を示す。年平均流量は全体的に過大評価傾向ではあるが、板波と大島において実測値の変動傾向を計算値が捉えており、良好な結果といえる。

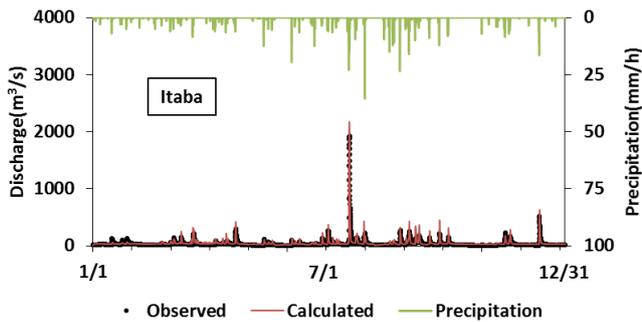


Fig.3 Calculated and observed hourly flow rate at Itaba in 2015

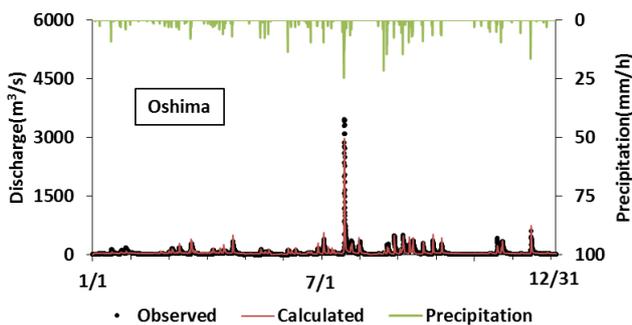


Fig.4 Calculated and observed hourly flow rate at Oshima in 2015

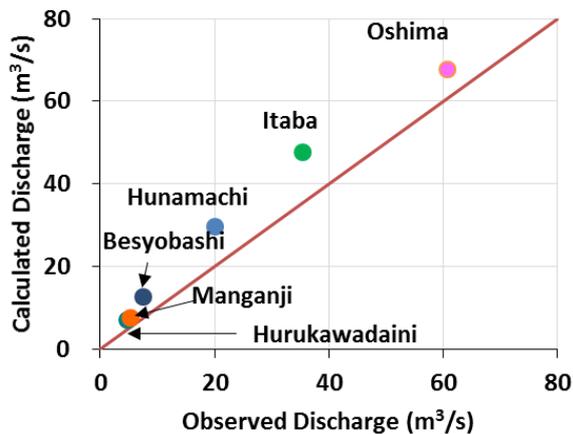


Fig.5 Scatter plot of calculated and observed annual mean flow rates

Fig.6, Fig.7に板波橋と中西条における総窒素濃度の計算値（面源負荷あり，なしの2ケース）と実測値の時系列変化を示す。面源負荷がない場合は総窒素濃度の変動が抑えられていることから，降雨後の濃度は面源負荷からの総窒素流出に依存していることが分かる。また，Fig.8に降雨後の実測が実施された10月27～29日の中西条における総窒素濃度の実測値と計算値を示す。面源負荷を考慮した場合には，実測値と比べ，降雨後の総窒素濃度が過大評価されていることが分かる。

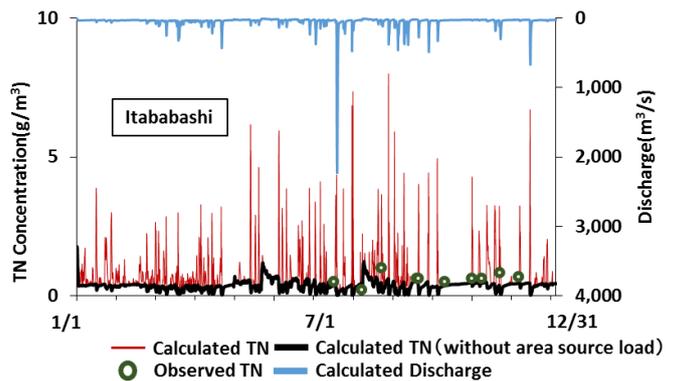


Fig.6 Calculated and observed TN concentrations at Itababashi in 2015

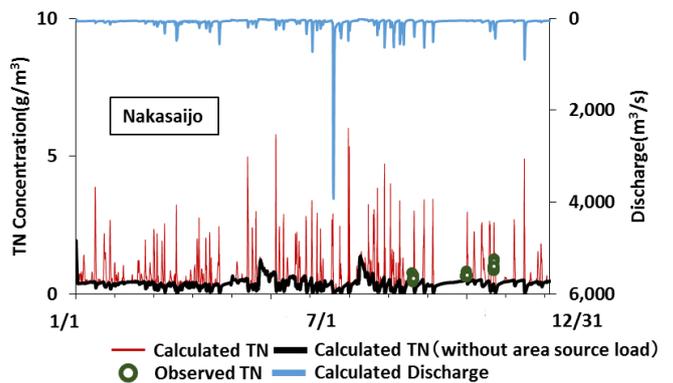


Fig.7 Calculated and observed TN concentrations at Nakasaijo in 2015

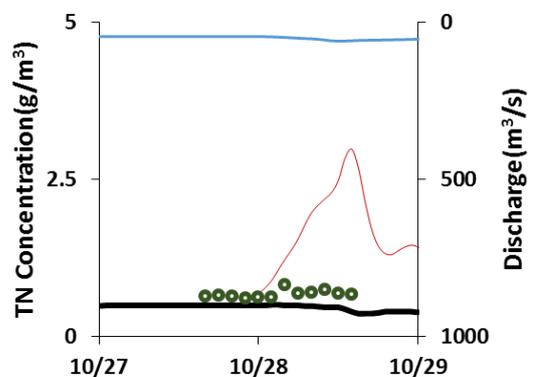


Fig.8 Calculated and observed TN concentrations on October 27-28 at Nakasaijo in 2015

Fig.8 Calculated and observed TN concentrations on October 27-28 at Nakasaijo in 2015

Fig.9に全総窒素濃度観測点における，平水時および降雨後の平均総窒素濃度の実測値と計算値（実測値が得られた時間での平均）を示す。平水時の計算値は過小評価されており，降雨後の計算値は過大評価されていることが分かる。

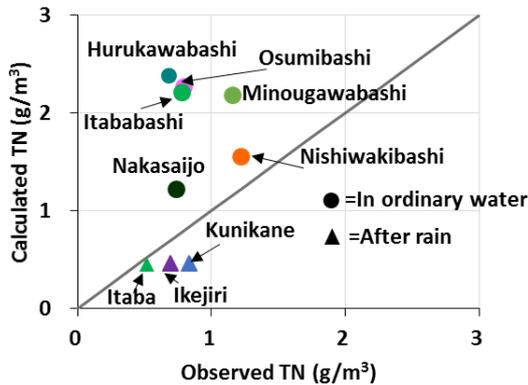


Fig.9 Scatter plot of mean calculated and observed TN concentrations

Fig.10 に流域内の総窒素負荷の発生源別の寄与率を示す。山林が最大の寄与率を示しており、2 番目に大きいのが事業所であった。山林の寄与率の大きさは流域内の山林の面積率が反映されたものと考えられる。

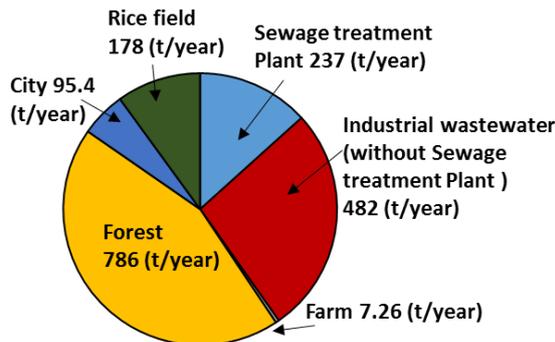


Fig.10 TN contribution rate by source

3. 考察

降雨後の総窒素濃度が過大評価されている原因に、降雨流出による面源からの総窒素負荷を過大評価していることが考えられる。本研究にて使用しているモデルにおいては、入力した原単位に従って総窒素負荷の時間配分が時間ごとに変化する降水量に応じて決定されるが、面源負荷の計算に用いる原単位は降雨そのものの負荷も含んでいる他、先行降雨継続時間や先行晴天期間などの降雨直前の初期条件に依存するものである⁸⁾。さらに雨天時のデータのみで算出した原単位で求めた負荷量と晴天時データもおりませで算出した原単位の負荷量とでは約3倍もの違いがあったことが報告されている⁹⁾。よって面源負荷の原単位は晴天時と降雨時で別々の値を用いることが必要と考えられる。また池淵周一ら¹⁰⁾によると、溶存態無機窒素、溶存態無機りん、懸濁態りんは広葉樹林流域が大きいほど流出負荷量が大きくなり、懸濁態窒素については針葉樹林流域が大きいほど流出負荷量が増加するという傾向がある。今回は山林による面源負荷は

一定としており、樹種による値の違いは考慮していないため、今後山林の樹種構成を考慮して面源汚濁負荷原単位を設定することで、より正確な総窒素濃度が算出できる可能性がある。

4. 結論

本研究の結論を以下にまとめる

- 構築した水文・水質モデルは、加古川流域における河川流量を良好に再現したが、降雨流出時の総窒素濃度を過大評価した。
- 総窒素濃度の過大評価の原因は、面源負荷の過大評価であることが示唆された。
- 山林からの総窒素寄与が最大であった。

今後の課題として、原単位の設定を降雨時と晴天時で分け、面源からの降雨流出の過大評価を改善することが挙げられる。また山林の樹種を考慮するなど、土地利用の区分を細分化し、より正確な面源から発生する総窒素負荷量を計算することも考えられる。

参考文献

- 1) 瀬戸内海の貧栄養化について - 兵庫県立農林水産技術総合センターひとこと
http://www.hyogo-nourinsuisangc.jp/15-one/one_2709.html
- 2) 播磨灘の栄養塩環境と兵庫県漁業の実態及び窒素供給取り組み事例 - 環境省
https://www.env.go.jp/council/former2013/11seto/y111-hearing03b/mat03_1.pdf
- 3) 瀬戸内海に流れる河川一覧
http://earthresources.sakura.ne.jp/er/EV_SNK_K.html
- 4) 古賀佑太郎, 宮崎一, 藤森一男, 松林雅之: 加古川流域における降雨時の窒素, りん負荷量の調査, 公益財団法人ひょうご環境創造協会兵庫県環境研究センター紀要, 第7号, pp8-14
- 5) 国土交通省 水文水質データベース
<http://www1.river.go.jp>
- 6) 国土数値情報ダウンロードサービス
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj>
- 7) 国土交通省 流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説
<http://www.mlit.go.jp/common/001065300.pdf>
- 8) 海老瀬潜: 面源負荷の流出に及ぼす水文条件の影響, 国立公害研究所研究報告, 第95号, pp57-70
- 9) 村田智史: 水田からの汚濁負荷流出原単位に関する研究
<http://kaihatsu2.sse.tottori-u.ac.jp/dev/main/study/summary/.../murata03.pdf>
- 10) 池淵周一: 流域森林等の変化をシナリオとしたシミュレーションの実施, 森林理水機能調査 (森林整備手法等基準調査) 報告書, pp264-274, 2015

OneBox 型マルチメディアモデルを用いた淀川流域のサルファ剤の環境動態解析 Analysis of environmental behavior of sulfa drugs in the Yodo River Basin using OneBox type multi-media model

○李 昇 運 (大阪大学) 嶋 寺 光 (大阪大学)
松 尾 智 仁 (大阪大学) 近 藤 明 (大阪大学)
Shengyun LI*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Akira KONDO*¹
*¹ Osaka University

This study focuses on Sulfamethoxazole (SMX) that has been used in livestock husbandry and emitted into the Yodo River Basin. Emissions of SMX were estimated using statistical data on SMX usage and livestock excrement. A OneBox type multimedia fate model was utilized with the estimated emissions in order to simulate the behavior of SMX in four environmental media (atmosphere, soil water and sediment) in the study period from 2005 to 2015. Based on the calculated result, SMX emitted to soil was efficiently transported to water, which resulted in the largest amount of SMX in water among the four environmental media.

はじめに

近年、医薬品や化粧品等のパーソナルケア製品 (Pharmaceutical and Personal Care Products、以下 PPCPs) に含まれる化学物質が、環境中から微量ながら検出されている^{1,2)}。PPCPs には様々な種類があり、処方薬及び販売薬、動物用医薬品、化粧品、日焼け止め、芳香剤、診断用医薬品などが含まれる。PPCPs は日常的に大量に使用され、環境中へと排出されていることから、慢性的曝露による生態影響が懸念されている。医薬品が人に使用された場合、そこに含まれる化学物質は体内で代謝された後、代謝物として下水に放出され、下水処理場で処理されずに残ったものが河川へと放出される。一方、動物用医薬品が家畜に使用された場合、そこに含まれる化学物質は体内で代謝された後、代謝物は糞尿として排出される。糞尿の大部分は、たい肥化処理や液肥化処理により農地に還元される。また、糞尿の一部は、炭化・焼却処理や排水浄化処理が行われ、わずかではあるが野積みや素掘りなどの不適切な処理が行われている。医薬品の使用量は人に対するものよりも家畜に対するものの方が多く、上述の環境への排出経路を考慮すると、環境汚染に対しては動物用医薬品の影響が大きいと考えられる。本研究では、動物用医薬品の中でも特に販売量が多い、スルフォンアミド系合成抗菌剤に属するサルファ剤を対象とする。

化学物質の環境リスクを評価するためには、環境中の化学物質濃度を推定する必要がある。その方法の一つとして、大気・土壌・水域・底質といった複数の環境メディア内・メディア間における化学物質の挙動を表現する

マルチメディア運命予測モデルによる数値シミュレーションが挙げられる。本研究では、琵琶湖・淀川流域を対象に、OneBox 型マルチメディアモデルを用いて、環境中に排出された畜産用サルファ剤の動態解析を行った。

1. サルファ剤の排出量推計

1.1 対象物質

畜産用抗菌剤として全国的に広く使われている、スルファメトキサゾール (Sulfamethoxazole、以下 SMX) を対象とした。SMX は合成薬であるため、天然抽出物に比べて自然界では難分解性を示す。農林水産省の統計資料³⁾によると、SMX は他のサルファ抗菌剤よりも多くの量が使用されている。SMX は人にも用いられるが、畜産用に比べて、使用量が少なく環境への影響は小さいものとみなし、本研究では人からの環境中への排出経路は対象外とした。

1.2 全国使用量

農林水産省令第 62 号動物用医薬品等取締規則の公布に基づいて、2005 年から日本全国の動物医薬品販売の統計が整備されている。本研究では、2005～2015 年の動物用医薬品等販売高年報³⁾に記載されている、全国の SMX の原末換算量 (動物別) (Table.1) を基に、環境中への排出量を推計した。

1.3 淀川流域における排出量

家畜に投与された SMX は、臓器代謝の後、最終的には排泄物として体外に排出される。本研究では、投与された SMX は最終的に全て環境中に排出されると仮定した。また、家畜 1 頭あたりの SMX 使用量および排泄物

量が全国一律であると仮定して、淀川流域に含まれる2

Table.1 National SMX usage (unit: mol/y)

Year	Pig	Broiler	Layer (Hen)
2005	239045.4	19786.8	8823.8
2006	346112.9	17119.6	8931.9
2007	257784.2	15147.3	7573.6
2008	267719.8	4556.9	12531.6
2009	274549.2	10235.4	16256.2
2010	217701.6	3126.0	2456.1
2011	209620.8	10116.4	15527.5
2012	221407.2	14341.1	15850.7
2013	237189.0	16357.9	19084.2
2014	192707.7	44873.7	11717.0
2015	189509.8	38282.4	9986.7

Table.2 Amount of livestock excrement (unit: ton/y)

Animal	Pig	Layer (Hen)	Broiler
National	22380	7450	5140
Yodo River Basin	400	607	191

府4県（大阪、京都、兵庫、滋賀、三重、奈良）と全国における家畜排泄物量⁴⁾ (Table.2) の割合に基づいて、式(1)の通り、淀川流域におけるSMXの排出量 E_{local} を算出した。

$$E_{local} = \sum_{i=0}^n E_{i,all} \times \frac{S_{i,local}}{S_{i,all}} \quad (1)$$

ここで、 i は動物の種類、 E_{all} は全国におけるSMX排出量、 S_{all} および S_{local} はそれぞれ全国および淀川流域における家畜排泄物量である。

淀川流域における2005～2015年の年別SMX排出量の推計結果を Fig.1 に示す。本研究では、SMXは全て土壌へと排出されると仮定した。

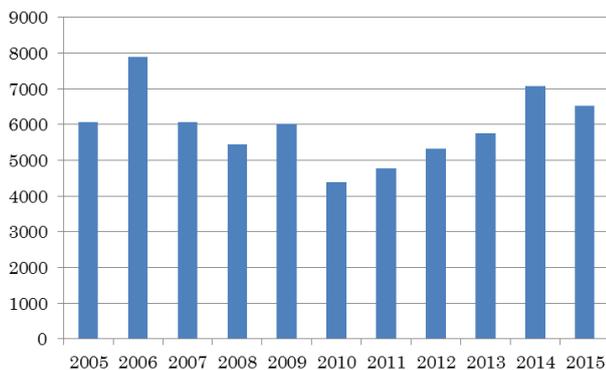


Fig.1 Estimated annual SMX emissions (unit: mol/y) in the Yodo River Basin

2. マルチメディアモデル

2.1 モデル概要

マルチメディアモデルは、化学物質の環境メディア間の移動に着目したモデルである。本研究では、環境を大気、土壌、水域、底質の4つのメディアで構成した。各メディアの関係とフラックスを Fig.2 に示す。大気・水域では移流による化学物質の流出を考慮した。大気は気相、粒子相から成り、上層大気と混合層に相当する下層大気の2層を考慮した。水域は液相、浮遊粒子相から成り、土壌からの流出や底質との平衡を考慮した。

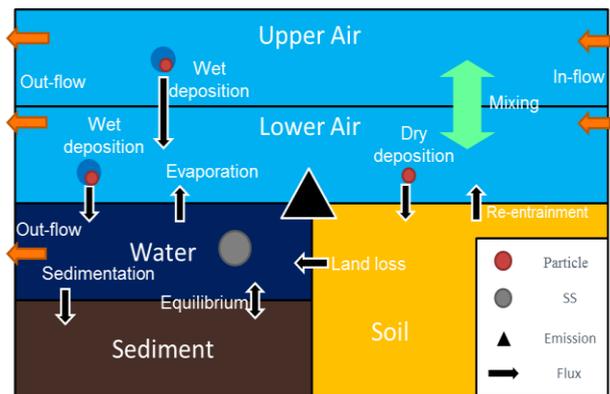


Fig.2 Schematic of multimedia model

2.2 OneBox 型モデル

対象領域である淀川流域 (Fig.3) を1つの箱と仮定し、各メディアにおける濃度は均一と仮定する OneBox 型マルチメディアモデルを用いた。計算領域は、南北方向に約 111km、東西方向に約 74km、高さ方向に 2km とした。

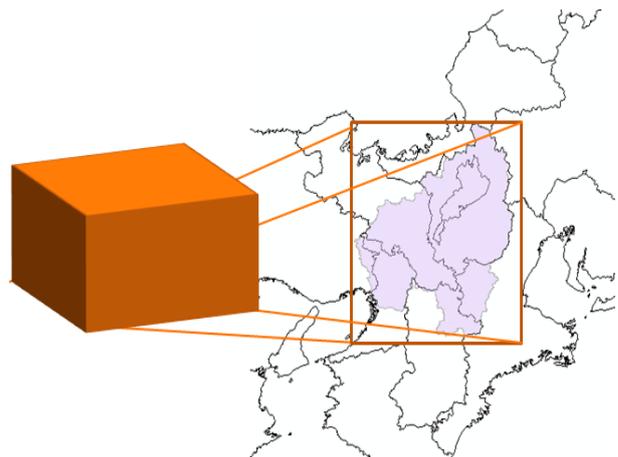


Fig.3 Yodo River Basin as simulation domain of OneBox type model

2.3 計算条件

上述の通り、家畜に投与された SMX は全て土壌に排出されると仮定した。排出量推計を行った 2005～2015年の淀川流域を対象に SMX の動態解析を行った。

また、モデル内のパラメータのうち代表的な 35 種について、SMX 濃度計算結果に対する感度係数を以下の方法

によって算出した。あるメディア i の感度係数 S_i は式(2)のように定義する。

$$S_i = \left| \frac{Y_{i,1.25} - Y_{i,0.75}}{0.5Y_i} \right| \quad (2)$$

ここで、 Y はパラメータ変更前のメディア中濃度、 $Y_{1.25}$ 、 $Y_{0.75}$ はそれぞれ対象パラメータを 1.25、0.75 倍した時のメディア中濃度である。各メディアの感度係数 S_i と重み w_i 、各メディアの存在量の比率によって、各パラメータの環境全体での SMX 濃度計算結果に対する感度係数を式(3)によって求めた。

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i S_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

3. 計算結果

3.1 濃度の経年変化

2005～2015年の各メディア、すなわち大気気相中 (gs)、大気粒子相中 (pt)、土壌中 (sl)、水域液相中 (lq)、水域浮遊粒子相中 (ss) と底質中 (sd) における存在量 (M) および濃度 (C) の計算結果を Fig.4 および Fig.5 示す。本研究では、SMX は全て土壌に排出されると仮定したが、SMX は水域に最も多く存在する結果となった。また、SMX の濃度変動は排出量変動 (Fig.1) にほぼ対応しており、流域内で長期的に蓄積されることはなかった。計

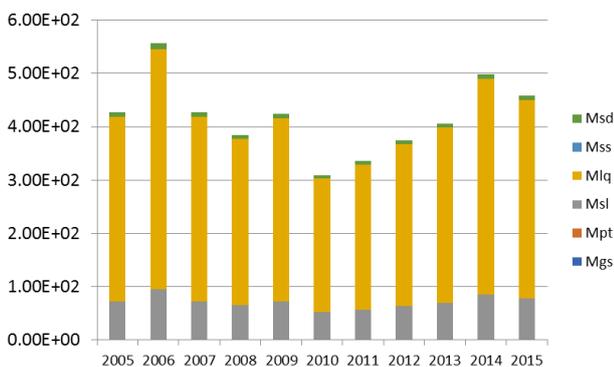


Fig.4 Amount of SMX in each media (unit: mol) from 2005 to 2015

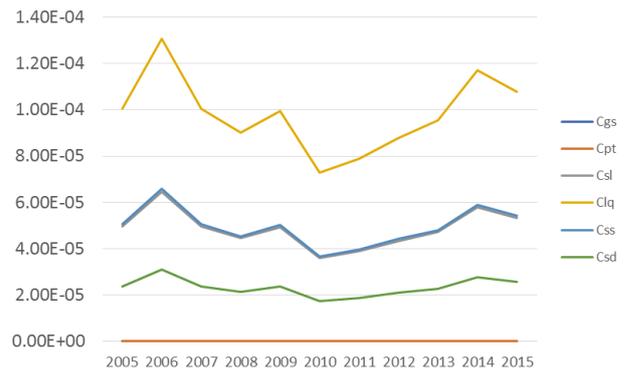


Fig.5 Annual SMX concentration in each media (unit: ng/L) from 2005 to 2015

算期間 11 年間を通して継続的に SMX が排出されており、SMX のメディア存在比は計算期間を通して大きくは変動しなかった。これらの結果は、降雨流出に伴って、速やかに SMX が土壌から水域に輸送されたことを示している。したがって、流域内で SMX が使用されなくなると、流域内での濃度は速やかに低下すると考えられる。しかし、流域外へと流出した SMX は、広域的な水質汚染を引き起こす可能性がある。

水中 SMX 濃度の年平均値は、計算期間において平均で約 90 ng/L、最大で約 130ng/L となった。現時点では、国内における SMX 濃度の実測事例がほとんどなく、計算結果の妥当性が評価できていない。

3.2 感度解析

マルチメディアモデルに使用されているパラメータ 35 種の SMX 濃度に対する感度係数を Table.4 に示す。SMX が水域に速やかに流出することを反映して、底質浮上速度、流域平均流量、水域の面積、水深、SMX の水中半減期などの水域における動態に関するパラメータの感度が高くなった。

4. 結論

PPCPs の一種で畜産用抗菌剤として広く用いられている SMX を対象に、OneBox 型マルチメディアモデルを用いて淀川流域における環境動態解析を行った。土壌へと排出された SMX の大部分は速やかに水域へと流出し、水域から流域外へと流出した。感度解析においては、SMX が水域に速やかに流出することを反映して、水域における動態に関するパラメータの SMX 濃度計算結果に対する感度が高くなった。

今後の課題として、本モデルを用いて将来予測等の更なる解析を行うためには、実測値との比較による妥当性検証が必要である。

また、本研究における排出量推計は非常に簡易的なものであり、動物代謝率、体内残留、排泄物の環境への直

接放出と下水処理の割合、堆肥としての再利用、年内の投薬時期などを一切考慮できていない。関連データの収集を行い、より精緻な排出量推計を行うことで、計算結果の信頼性を向上させる必要がある。

さらに、本研究で用いた OneBox 型マルチメディアモデルでは、各メディアの空間変動が考慮できていない。しかし現実には、畜産農家は淀川流域内に均一に分布しているわけではなく、SMX 排出量にも大きな空間変動があると考えられる。したがって、空間変動が考慮できる分布型マルチメディアモデルを用いて、流域内の SMX 濃度分布を推計する必要がある。

Table.4 Result of Sensitivity Analysis

Variable	Parameter Explain	Sensitivity Index	Main influenced media ¹
War	Width	1.69E-11	AR PT
Lar	Length	5.85E-06	AR PT
Uard	Wind speed of lower air	5.68E-06	AR PT
Rar	Cleanliness of upper air	2.94E-07	AR PT
Hadif	Thickness of ground layer	8.69E-08	AR PT
RO	Rainfall	2.50E-01	GS PT SL
RW	Raindrop radius	4.68E-10	AR PT
Vgw	Rain drop velocity	2.19E-10	AR PT
Vptdd	Settling velocity	5.44E-07	AR PT
Gpt	Particle generation	4.47E-22	AR
SC_ptd	Particle surface concentration in lower air	2.52E-08	AR PT
SC_ptu	Particle surface concentration in upper air	7.38E-09	AR PT
Swt	Area of water area	4.70E-01	LQ SS SD
Hwt	Water depth	4.50E-01	LQ SS SD
Qwt	Annual mean flow	4.82E-01	LQ SS SD
Hwdif	Ground diffusion layer	5.74E-02	SD
Hsl	Soil depth	2.35E-01	SL
Vslrs	Soil particle	8.29E-06	AR PT

	scattering rate		
Vslro	Soil particle rainfall outflow	3.27E-05	SD
Eps	Porosity	2.75E-01	SS SD
Sita	Moisture content	2.33E-01	AR PT SL
OC	Organic carbon proportion	3.77E-03	PT SL
RO	Rainfall surface outflow rate	1.02E-01	AR PT SL
Vssdp	Suspended Solid settling velocity	6.58E-02	SS SD
Hsd	Sediment depth	1.05E-01	SD
Vsdrs	Sediment floatation speed	8.17E+04	LQ SD
HE	Henry coefficient	8.15E-08	AR PT
VP	Vapor Pressure	3.06E-08	AR PT
POW	Octanol / water partition coefficient	3.06E-03	AR PT SL
DA	Atmospheric diffusion coefficient	8.17E-08	AR PT
DW	Water diffusion coefficient	5.72E-02	SD
HL_gs	Half-life in atmosphere	2.73E-06	AR PT
HL_lq	Half-life in water	3.20E-01	LQ SS SD
HL_sl	Half-life in soil	4.28E-02	AR PT SL LQ SS SD
HL_sd	Half-life in sediment	2.07E-03	SD

¹AR means Atmosphere. PT means Particle in air. SL means Soil. LQ means Water. SS means suspended solid and SD means Sediment.

参考文献

- 1) 鈴木俊也 水環境中のヒト用医薬品の存在実態及び環境中濃度の予測 東京健安研七年报
- 2) 清野敦子・益永茂樹・中西準子 水環境中における医薬品の検出 第 37 回日本水環境学会年会 2003
- 3) 動物用医薬品等販売高年報 動物医薬品検査所 - 農林水産省
<http://www.maff.go.jp/nval/iyakutou/hanbaidaka/index.html>
- 4) 家畜排せつ物の管理と利用の現状と対策について- 環境省
<https://www.env.go.jp/council/09water/y0917-03/mat03.pdf>

郊外からの風による都市気温の低減効果に関する研究

The reduction effect on the urban air temperature by the wind from the suburb

○久野 永美子 (神戸大学) 竹林 英樹 (神戸大学)

Emiko KUNO*1 Hideki TAKEBAYASHI*1

*1 Kobe University

Coastal cities are strongly affected by sea breeze and the air temperature rises as it moves away from the coast. In the same way, it is assumed that inland cities are also affected by wind from the suburb and the air temperature rises as it moves away from the suburb. In this research, for the inland city (Berlin area, Essen area, Karlsruhe area of Germany), the reduction effect on the urban air temperature by the wind from the suburb was analyzed. Further, the calculation results of the urban air temperature distribution in inland cities and coastal cities were compared.

1. はじめに

海岸都市である日本の都市の夏季日中の気温は、海風の影響を受けて海岸から離れるほど上昇することが明らかになっている¹⁾。内陸都市においても同様に、郊外からの風の影響を受けて郊外から離れるほど気温が上昇すると考えられる。日本と同様に比較的大きな都市が存在し、信頼できる観測データが揃っており、計算結果の妥当性の検討に助言を得やすいドイツの都市（ベルリン、エッセン、カールスルーエ）を対象として、郊外からの風が都市の気温分布に及ぼす影響を分析した。さらに、海岸都市の気温分布の分析結果と比較した。

2. メソ気象モデル WRF の概要と計算条件

メソスケールの気象モデル WRF (Weather Research & Forecasting) は、米国大気研究センター (NCAR) などの研究機関により開発された完全圧縮の非静力学モデルで、支配方程式は、運動方程式、連続の式、ジオポテンシャル式、温位保存式、スカラー保存式などで構成され、乾燥大気の静水圧地形準拠座標 (η 座標) 系によって記述される。地表面付近の現象は、地表面過程と大気境界層過程によって解かれ、下端境界条件が設定される。都市域には都市キャノピーモデル (UCM) を組み込むことで、建物による抵抗や相互放射の影響を考慮する。

本研究では、WRF version3.7.1-ARW を用いた。計算条件を表1に示す。計算期間は2008年7月23日から8月23日の1ヶ月間とした。計算対象領域を図1に示す。ネスティング手法を用い Domain1, 2 を設定した。考察対象領域は Domain2 (1km×1km メッシュ) である。境界条件、標高データ、土地利用データのいずれにも USGS のデータを用いた。各地域の土地利用設定を図2に示す。土地利用別の物性値を表2に示す。

3. 計算値と観測値の比較

ドイツ気象局の観測データを用いて精度検証を行った。晴天日を定義し、観測値に基づき抽出した。晴天日の定義を表3に示す。

Domain2 (1km×1km メッシュ) 内にあるドイツ気象局の観測値と計算値を比較した。表4に気温と風速の Bias, RMSE, Correlation を示す。いずれの地域においても比較的良い精度で計算結果が得られた。しかし、都市以外の観測地点の気温は観測値との差が確認された。都市には都市キャノピーモデルを組み込んでいるが、都市以外の観測地点では、夜間に気温を低く計算する傾向にある。

Table.1 Calculation condition

Calculation period		23.July.2008 - 23.August.2008
Vertical grid		28 layer (surface-100hPa)
Horizontal grid		Domain1:3km(120×120grids) Domain2:1km(103×103grids)
Meteorological data		NCEP:final analysis (6 hourly,1 degree grid,17 layer)
Geographical data	Terrain height	United States Geological Survey
	Land use	(about 100m×100m grids)
Microphysics process		Purdue Lin et al.scheme
Radiation processes	Long wave	RRTM Longwave scheme
	Short wave	Dudhia Shortwave scheme
Planetary boundary layer process		Mellor-Yamada-Janjic PBL scheme
Surface processes	Urban area	UCM(Urban Canopy Model)
	Non urban area	Noah LSM
Cumulus parameterization		None
Four-dimensional data assimilation		None

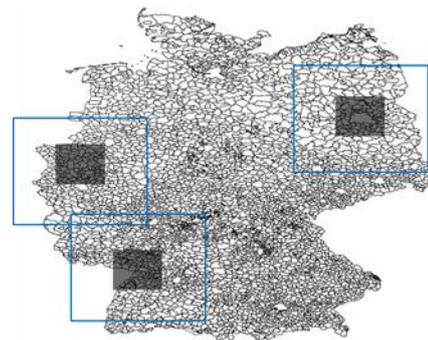


Fig.1 Calculation area (outside: domain 1, inside: domain 2)

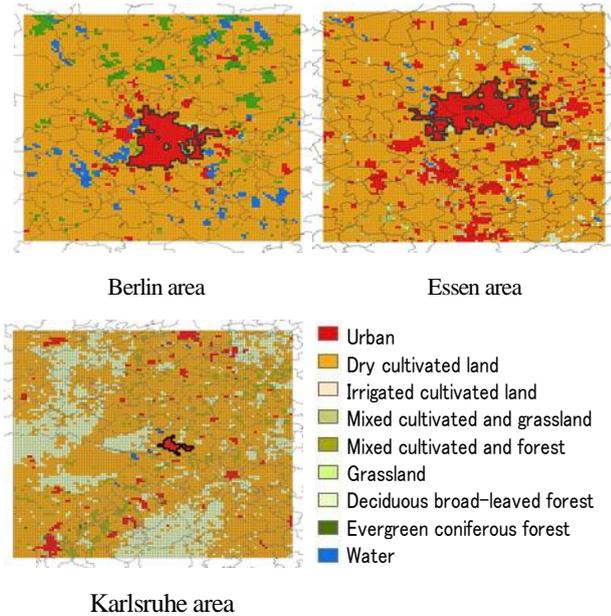


Fig.2 Land use condition

Table.2 Physical properties in each land use

USGS		Albedo	Evaporation efficiency	Emissivity	Roughness length	Thermal inertia
Land use code	Land use	[%]	[%]	[%]	[m]	[$kJ/m^2 \cdot K \cdot s^{0.5}$]
1	Urban	15	10	88	0.8	1.26
2	Dry cultivated land	17	30	98.5	0.15	1.68
3	Irrigated cultivated land	18	50	98.5	0.15	1.68
5	Mixed cultivated and grassland	18	25	99	0.14	1.68
6	Mixed cultivated and forest	16	35	98.5	0.2	1.68
7	Grassland	19	15	96	0.12	1.26
11	Deciduous broad-leaved forest	16	30	93	0.5	1.67
13	Evergreen broad-leaved forest	12	50	95	0.5	2.09
14	Evergreen coniferous forest	12	30	95	0.5	1.67
16	Water	8	100	98	0.0001	2.52

4. 気温分布の分析

都市と郊外の境界（風上側）からの距離と気温の関係を分析した。さらに、海岸都市の気温分布の分析結果と比較した。分析には2008年7月23日から8月23日の晴天日の中（9時～14時）の計算結果を用いた。

4.1 郊外からの距離と気温の関係

海岸都市の既往研究では、晴天海風日の気温は海岸からの距離の2分の1乗に比例すると考察された²⁾。内陸都市においても郊外からの距離を指標として分析した。

各地域の郊外からの距離と晴天日を平均した気温上昇の関係を図3に示す。3地域ともに郊外からの距離が大きくなると気温が上昇する傾向が確認されたが、相関係数の小さい日や気温上昇の傾きの小さい日も確認された。

相関係数の小さい日の例として、カールスルーエ地域の7月24日14時の気温・風ベクトル分布と郊外からの距離と気温の関係を典型的な晴天日の7月25日と併せて図4、図5に示す。気温上昇の傾きの小さい日の例として、エッセン地域の7月28日14時の気温・風ベクトル分布と郊外からの距離と気温の関係を典型的な晴天日の7月24日と併せて図6、図7に示す。都市域内に形成された低温域の影響であると考察された。

Table .3 Definition of fine day

Sunny day	
Weather	Mostly Sunny or Sunny
Sunshine hours	7.0 hours or more
Precipitation	0.5[mm] or more

Table .4 Bias, RMSE, Correlation of temperature and wind speed

		Temperature			Wind speed		
		Bias[°C]	RMSE[°C]	Correlation	Bias[°C]	RMSE[°C]	Correlation
B e r l i n	Alexanderplatz	0.11	0.61	0.93	-	-	-
	Buch	-0.3	0.58	0.93	-	-	-
	Dahlem	1.44	1.84	0.94	-	-	-
	Marzahn	0.47	0.73	0.93	-	-	-
	Tegel	0.59	0.78	0.94	1.29	1.35	0.84
	Tempelhof	0.73	0.84	0.94	0.97	1.08	0.82
	Neuruppin	-0.15	1.27	0.9	2.08	2.14	0.79
	Potsdam	-0.74	1.88	0.91	0.86	0.9	0.74
	Zehdenick	-0.28	0.95	0.91	-	-	-
	Heckelberg	0.02	0.94	0.91	-	-	-
E s s e n	Bochum	-0.15	0.73	0.87	-	-	-
	Borken in Westfalen	-0.53	1.84	0.90	-	-	-
	Essen-Bredeney	0.47	0.76	0.92	1.37	1.40	0.74
	Tönisvorst	-0.69	0.95	0.92	-	-	-
	Wuppertal-Buchenhofen	1.19	1.34	0.91	-	-	-
	Remscheid	-0.56	0.82	0.90	-	-	-
	Lüdinghausen-Brochtrup	-0.82	0.92	0.92	-	-	-
	Duisburg-Baerl	-1.00	1.32	0.91	-	-	-
	Waltrop-Abdinghof	-0.12	0.45	0.92	-	-	-
	Gevelsberg-Oberbröking	-0.60	0.88	0.90	-	-	-
K a r l s r u h e	Bergzabern-Ba	-1.63	1.70	0.91	-	-	-
	Heidelberg	-2.93	3.00	0.91	-	-	-
	Kaiserslautern	-0.99	1.15	0.93	-	-	-
	Karlsruhe	-1.60	1.73	0.92	-0.54	0.61	0.73
	Pforzheim-Ispringen	-0.13	0.72	0.92	0.46	0.66	0.61
	Rheinau-Memprechtshofen	-0.44	0.71	0.91	-	-	-
	Neubulach-Oberhaugstett	0.12	0.94	0.91	-	-	-

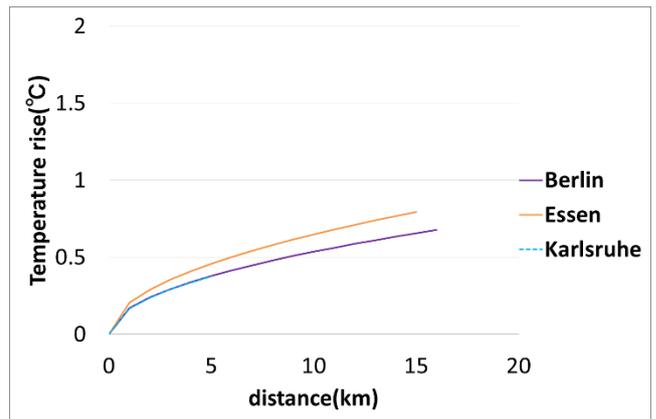


Fig.3 Relationship between distance from suburbs and air temperature rise on fine day in each region

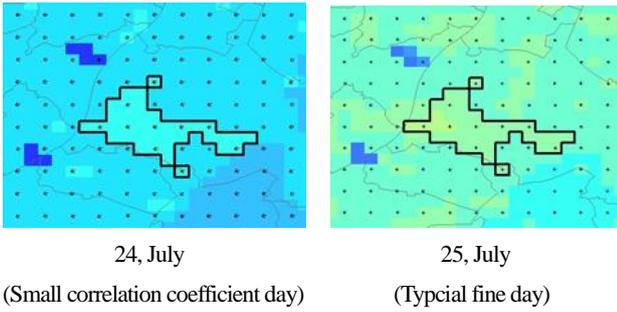


Fig.4 Air temperature distribution in Karlsruhe area at 14:00

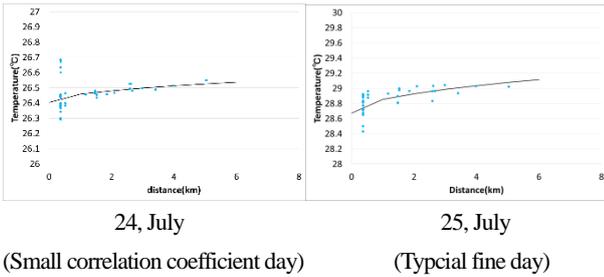


Fig.5 Relationship between distance from suburbs and temperature in Karlsruhe area at 14:00

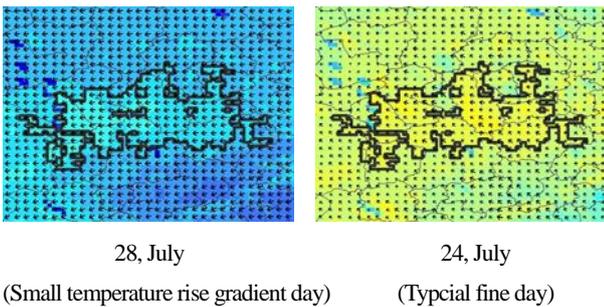


Fig.6 Air temperature distribution in Essen area at 14:00

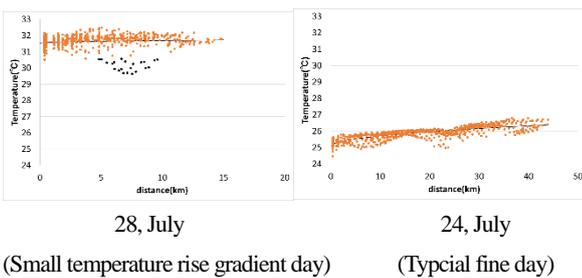


Fig.7 Relationship between distance from suburbs and temperature in Essen area at 14:00

4.2 海岸都市での分析結果との比較

図8に各地域における晴天日の郊外及び海岸からの距離と気温上昇の関係を示す。各地域における晴天日14時の郊外及び海岸からの距離が0kmと最も風下側の地点の気温を表5に示す。各地域における晴天日の気温分布を図9に示す。内陸都市においては、風上側の境界線を太線で示す。

郊外及び海岸からの距離と気温上昇の傾きの関係は、東京地域 $0.56 (^{\circ}\text{C}/\text{km}^{1/2})$ 、10kmで 1.8°C 上昇、大阪地域 $0.54 (^{\circ}\text{C}/\text{km}^{1/2})$ 、10kmで 1.7°C 上昇、エッセン地域 $0.21 (^{\circ}\text{C}/\text{km}^{1/2})$ 、10kmで 0.7°C 上昇、名古屋地域 $0.18 (^{\circ}\text{C}/\text{km}^{1/2})$ 、10kmで 0.6°C 上昇、ベルリン地域 $0.17 (^{\circ}\text{C}/\text{km}^{1/2})$ 、10kmで 0.5°C 上昇、カールスルーエ地域 $0.17 (^{\circ}\text{C}/\text{km}^{1/2})$ 、10kmで 0.5°C 上昇) となった。

内陸都市では、郊外と都市との気温差は小さく、気温上昇の傾きは海岸都市ほど大きくならない。ただし、海岸都市においても沿岸部に都市以外の土地利用が広がっている場合は、傾きは小さい。

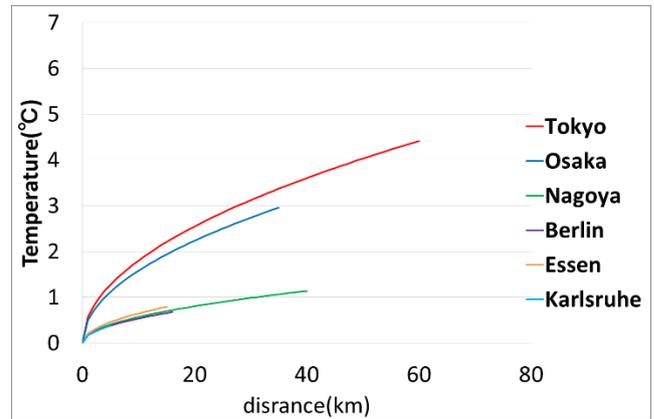


Fig.8 Relationship between distance from the suburb and coast and air temperature rise on fine day in each region

Table.5 Air temperature at windward and leeward points of the city

	Inland city				Coastal city				
	day	Temperature($^{\circ}\text{C}$)			day	Temperature($^{\circ}\text{C}$)			
		Suburb 0km point	Urban bottom point	difference		Sea 0km point	Urban bottom point	difference	
Berlin area	7/25	30.4	31.2	0.8	Tokyo area	8/3	27.6	35.8	8.3
	26	31.4	31.8	0.4		4	27.7	36.1	8.4
	27	30.7	31.4	0.8		7	27.6	35.6	8.0
	28	30.5	31.2	0.7		22	27.7	35.8	8.1
	29	30.0	30.6	0.6		23	28.0	35.9	7.9
	31	29.1	29.7	0.6		24	27.8	37.5	9.7
	8/7	30.9	31.6	0.7		25	28.0	36.8	8.9
	7/24	24.3	25.8	1.6		26	27.9	35.9	7.9
Essen area	28	30.3	31.6	1.3	Osaka area	27	27.7	35.6	7.9
	30	26.8	28.4	1.6		28	27.7	35.0	7.3
	31	30.0	31.5	1.5		29	27.9	34.4	6.5
	8/4	20.2	21.6	1.4		8/5	28.8	34.8	6.0
	6	27.2	28.5	1.3		21	28.4	34.4	6.0
	14	19.8	21.0	1.3		22	28.6	34.4	5.8
	15	20.2	21.6	1.4		25	28.2	33.5	5.4
	16	20.5	21.8	1.3		26	28.1	34.7	6.6
Karlsruhe area	7/24	25.3	26.5	1.2	Nagoya area	27	28.2	34.1	5.9
	25	27.6	29.0	1.4		29	28.7	35.4	6.7
	28	23.9	24.4	0.5		30	28.4	35.1	6.7
	29	28.6	29.6	1.0		8/4	27.9	31.6	3.7
	8/5	23.1	24.2	1.1		6	27.6	33.9	6.3
	6	28.3	29.0	0.7		7	27.1	32.4	5.3
	13	21.4	23.6	2.2		25	28.0	34.3	6.3
	14	21.3	22.3	1.0		26	27.8	32.8	5.0
16	20.8	22.1	1.3	29	27.5	32.7	5.2		
17	22.6	24.1	1.5						
18	25.1	26.5	1.4						

5. 結論

本研究では、内陸都市（ベルリン地域、エッセン地域、カールスルーエ地域）を対象として、郊外からの風が都市の気温分布に及ぼす影響を分析した。さらに、内陸都市と海岸都市の気温分布の分析結果を比較した。

内陸都市では、郊外と都市の気温差が、海岸付近と都市の気温差より小さいため、気温上昇の傾きは小さい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 16H04464 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 金川一平, 竹林英樹: 都市の規模及び沿岸部土地利用と気温上昇の関係分析, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 217-220, 2017. 3
- 2) 北尾奈々子, 森山正和, 他: 大阪地域を対象とした都市環境気候地図の作成方法に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 18 (38), 255-258, 2012. 2

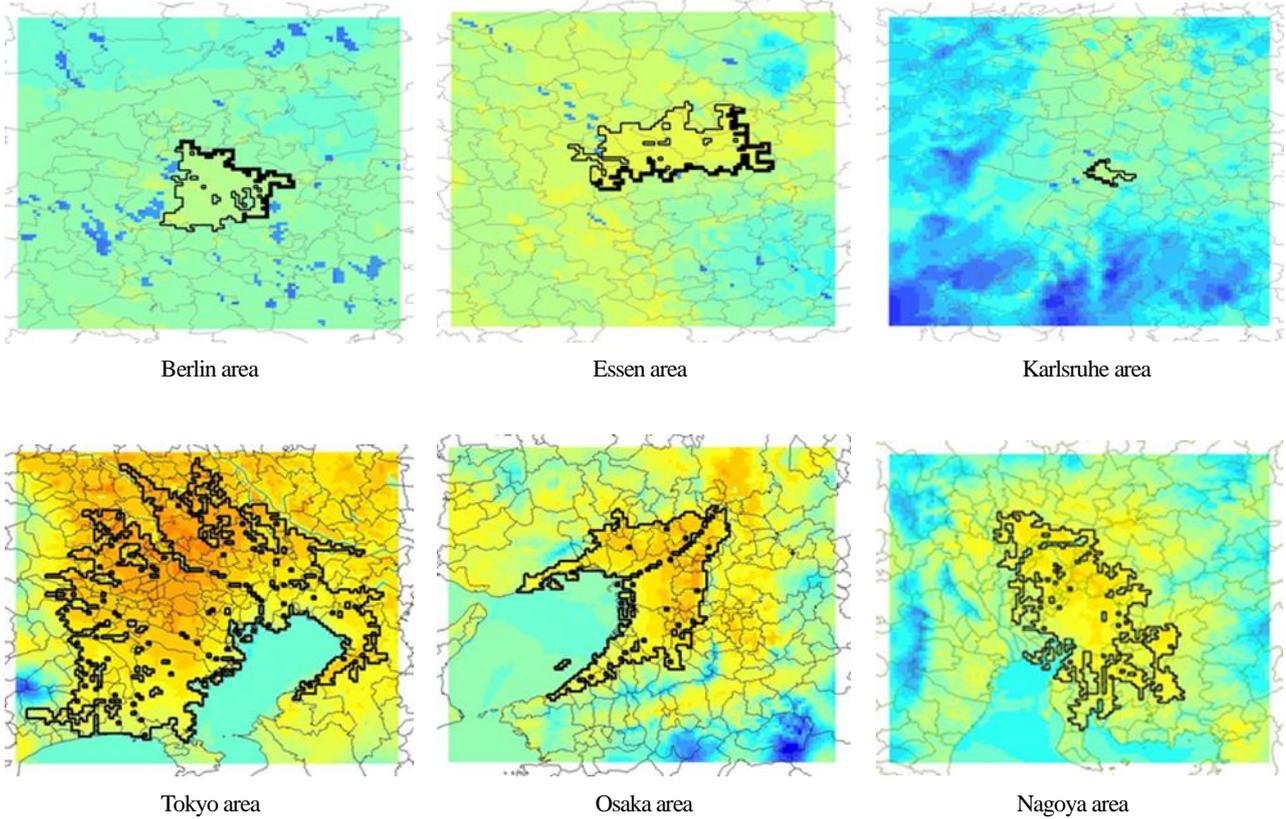


Fig.9 Air temperature distribution at 14:00 in fine day

