

業務用厨房における厨房換気システムの性能評価
Performance Evaluation of Kitchen Ventilation System in Commercial Kitchen

○草野 峻悟（竹中工務店） 粕谷 敦（竹中工務店） 増田 恭大（竹中工務店）
Shungo KUSANO*1 Atushi KASUYA*1 Yasuhiro MASUDA*1

In the commercial kitchen targeted in this study, a ceiling air supply type replacement air-conditioning system has been introduced in order to achieve both comfort and energy saving of the kitchen. In addition, ventilation rate control according to the gas flow rate and current value of kitchen equipment is adopted. In this study, the comfort of the kitchen and the effects of the installed equipment were examined based on the measurement of the thermal environment, interviews with cookers, and the results of system operation.

1. はじめに

厨房内における温熱・空気環境は調理者の健康や生産性に与える影響が大きく、調理空間の快適性を保つ換気・空調システムが必要不可欠である。また業務用厨房では換気・空調用に消費されるエネルギーが非常に大きく、業務用のエネルギー消費量を削減することは建物全体のエネルギー消費量の削減に寄与する。

本研究で対象とした業務用厨房では、厨房の快適性と省エネルギー性を両立させるために天井給気型置換空調方式を導入している。また、厨房機器のガス流量・電流値に応じた換気量制御を採用している。本研究では、温熱環境の測定、システムの運用実績により、厨房の快適性や導入した設備の効果に関して報告する。

2. 計画概要

2.1 厨房計画概要

検討対象とした業務用厨房の概要を Tab.1 に、平面図・内観写真を Fig.1、2 に示す。食堂に併設された本厨房は、ガス・電気併用式厨房であり、主厨房・洗浄室から構成される。本厨房にはガスを熱源とする 3 種類の加熱機器と電気を熱源とする 5 種類の加熱機器と 1 台の洗浄機が設置されている。空調の設定温度は 22℃としている。

2.2 空調換気システムの概要

厨房の換気・空調システム概念図をFig.4に示す。洗浄室の換気計画は、外気処理空調機による給気及び食堂から流入する空気が排気フードを通じて排気される計画としている。主厨房については、導入外気を空調処理空気と未処理外気に分けて給気を行い、厨房プランニングと整合性を図っている。空調機処理空気に関しては天井面に不燃性の布製吹出口(Fig.3)を 4 箇所設置し、天井給気による置換空調を計画している。空調機からの新鮮空気を天井面から主厨房内の各エリアに給気し、排気フード B～F と天井排気口

を通じて排気される計画としている。未処理外気に関しては、蒸気系厨房機器の側面壁から低風速での吹出し、蒸気系フード A でショートパスさせている。

換気量は厨房機器のガス流量、電流値により、制御を行い、換気動力と外気処理空調機の処理熱量の削減を図っている。換気量制御の考え方として、排気系統は、主厨房、

Table.1 Kitchen overview

Form	Company cafeteria(Number of meals=800)			
Floor space	Main kitchen70.08㎡、Washing room18.18㎡			
Business hours	8:00-10:00(Breakfast)、11:00-15:00(Lunch)、17:00-20:00 (Dinner)			
Area	Main equipment name	Heat source	Number	Consumption (kW/Number)
Main kitchen	Gas rotary kettle	Gas	1	30.2
	Steam convection oven	Electrical	1	20.2
	Rice cooker	Gas	1	27.9
	Hot cooker	Electrical	1	4.5
	Electromagnetic cooker	Electrical	7	5
	Gas fryer	Gas	2	10
	Electric griddle	Electrical	1	9
	Electric boiled noodle machine	Electrical	2	4.6
Washing room	Dish washer	Gas	1	52.3

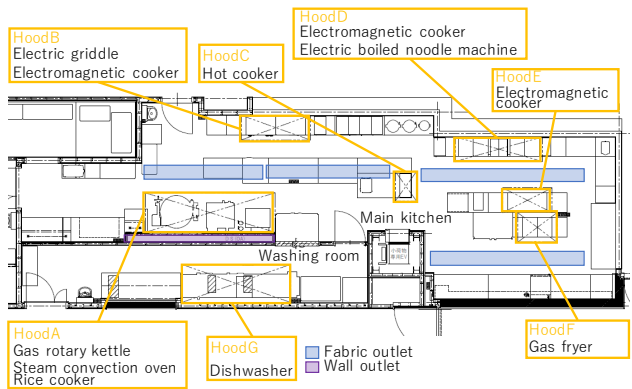


Fig.1 Kitchen top view

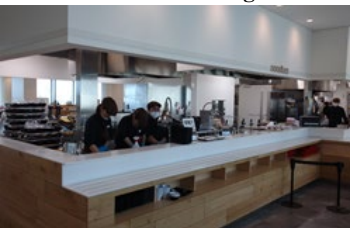


Fig.2 Kitchen picture



Fig.3 Fabric outlet

洗浄室に対して 2 台の排気ファンとしている。給気系統は、前述の通り外気処理空調機、また未処理外気を給気ファンにより供給している。フード A～G の排気風量制御は、各厨房機器のガス流量、電流値により必要風量の算出を行い、フード毎に VAV の比例制御を行っている。またフードの VAV は排気風量の下限値を 50%としている。排気ファンは主厨房、洗浄室に設置している各 VAV の要求風量を合計し必要風量の演算を行い、排気ファンの回転数制御としている。上記に対する給気風量制御は、未処理外気に関してはフード A の厨房機器のガス流量・電流値から給気 VAV の比例制御を行い、外気処理空調機に関しては、室内温度が設定値となるよう VAV の比例制御としている。給気ファンは、各 VAV の風量合算により、給気ファンの回転数制御としている。

3. 温熱環境実測

3.1 実測概要

実測対象は主厨房と洗浄室とした。測定機器は温湿度計を使用し、1 分間毎の主厨房・洗浄室内の温湿度を計測した。また、その他のデータは、中央監視で収集したデータを使用した。温湿度測定位置を Fig.5 に、計測高さを Tab.2 に示す。実測期間は、2020 年 1 月 22 日から 1 月 24 日の 3 日間としている。

3.2 実測結果

(1) 室内空気温度

作業空間における温度実測結果について、作業空間 (FL+1200) の経時変化を Fig.6 に示す。測定点①は、他の測定点と比較して、2・3℃低くなっているが下調理場であり、近傍に厨房機器などの発熱体が多かったためと考えられる。測定点⑪は、ガスフライヤーが稼働している 12:00 から 13:00 で 25℃を超える時間帯があった。厨房内の温度状態は外気温度に関わらず、23℃前後となっている。換気量の変化、厨房の機器負荷率の変化に関わらず、平均的に温熱環境が維持されていることが確認された。

(2) 鉛直温度分布

主厨房測定点⑤の鉛直温度分布の結果を Fig.7 に示す。この図より、天井面に近づくにつれて、温度が上がっており、置換空調を取り入れた効果が確認された。特異点を除いて最大約 5℃の差が見られた。特に FL+300 は温度が大きく下がっているが、これは、未処理外気の側面壁からの吹き出しの影響で FL+300 mm 温度が 2～3℃低くなっていたと考えられる。

4. 換気量制御による省エネ性の評価

4.1 厨房機器の利用実態

主厨房・洗浄室における機器単体負荷率、主厨房全体

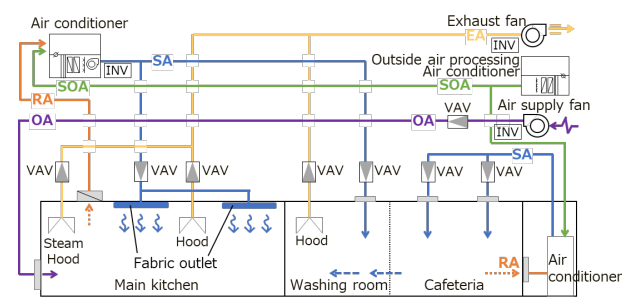


Fig.4 Ventilation control system diagram

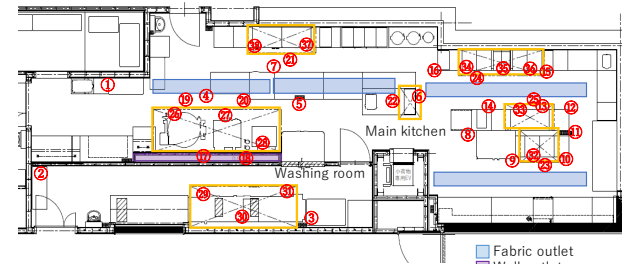


Fig.5 Thermo-hygrometer installation position

Table.2 Measurement height

Measurement point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
FL+300	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
FL+850	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
FL+1200	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
FL+1600	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Hood temperature																			
Outlet(FL+2500)																			
Outlet(FL+1000)																			
Measurement point	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
FL+300																			
FL+850																			
FL+1200																			
FL+1600																			
Hood temperature																			
Outlet(FL+2500)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Outlet(FL+1000)																			

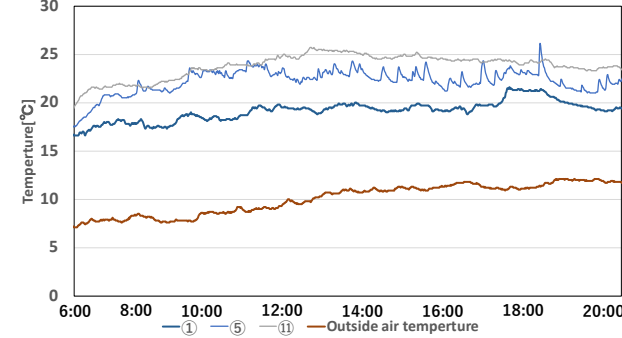


Fig.6 Temperature change in the main kitchen

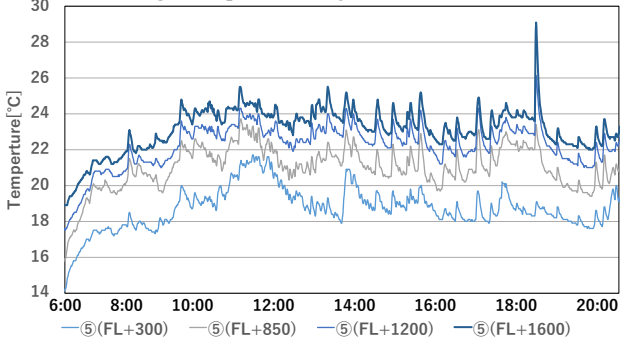


Fig.7 Thermo-hygrometer installation position (Measurement point ⑤)

負荷率の経時変化（10 分間平均）を Fig.8 から 10 に示す。機器の利用実態に関しては、ガスフライヤー・スチームコンベクションオーブン・電磁調理器は継続的に利用されている。ゆで麺機は、6:00 から 14:30 に稼働しており、昼食提供後停止されている。食器洗浄機は朝食、昼食提供開始時である 8:00、11:00 頃より上昇し始め、9:00、12:00 でピークを迎えている。また主厨房全体の機器負荷率に関しては、ピーク値が約 36%と低い負荷率での運用となっている。

4.2 省エネルギー性の検証

フード A～F の厨房機器の電流値からの要求排気風量と機器負荷率の 1 日の経時変化を Fig. 11 から 16 に示す。フード C の厨房機器に関しては実測期間中稼働が見られなかったため、除いている。Fig. 11 のフード A において、排気 VAV の定格風量 5, 120 m³/h に対して、最小風量 2, 560 m³/h を下限として経時変化している。フード A の厨房機器負荷率は、下調理時である 8:00 から 11:00 において、一時的に約 80%まで上がっている。一日の平均で見ると約 17%と低い負荷率での運用となっている。Fig. 12 のフード B において、排気 VAV の定格風量 1, 700 m³/h に対して、最小風量 850 m³/h を下限として経時変化している。フード B の厨房機器負荷率は、昼食の提供時間であるおよそ 11:00 から 15:00 のみの稼働となっており、機器全体のピーク値で見ると約 22%と低い負荷率での運用となっている。Fig. 13 のフード D において、排気 VAV の定格風量 1, 830 m³/h に対して、最小風量 915 m³/h を下限として経時変化している。フード D の厨房機器負荷率は、厨房が稼働し始める 6:00 頃から昼食の提供が終わる 14:30 ごろまで 30%から 40%付近で推移している。Fig. 14 のフード E において、排気 VAV の定格風量 1, 220 m³/h に対して、最小風量 600 m³/h を下限として経時変化している。フード E の厨房機器負荷率は、厨房が稼働し始める 6:00 頃と 12:00 頃に約 60%まで上がっている。一日の平均で見ると約 10%と低い負荷率での運用となっている。Fig. 15 のフード F において、排気 VAV の定格風量 1, 170 m³/h に対して、最小風量 580 m³/h を下限として経時変化している。フード E の厨房機器負荷率は、厨房が稼働し始める 6:00 頃から提供終了時間の 20:00 頃まで継続的な運用となっている。一日の平均で見ると約 13%と低い負荷率での運用となっている。Fig. 16 のフード G において、排気 VAV の定格風量 3, 690 m³/h に対して、最小風量 2, 260 m³/h を下限として経時変化している。フード G の厨房機器負荷率は、厨房が稼働し始める 6:00 から 20:30 頃までの運用となっている。一日の平均で見ると約 9%と低い負荷率での運用となっている。

全フードにおいて、厨房機器の負荷率が低いため、厨

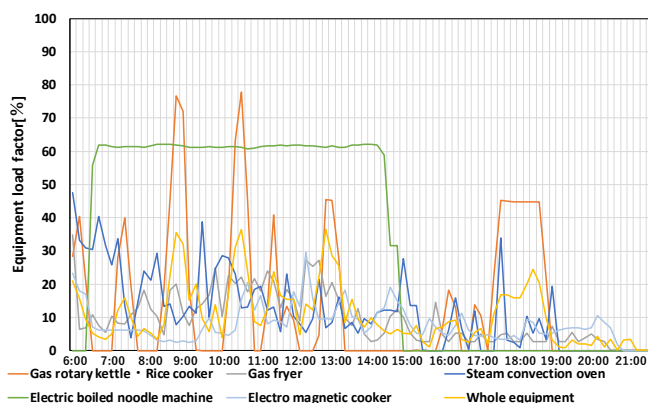


Fig.8 Equipment load factor(Main kitchen)

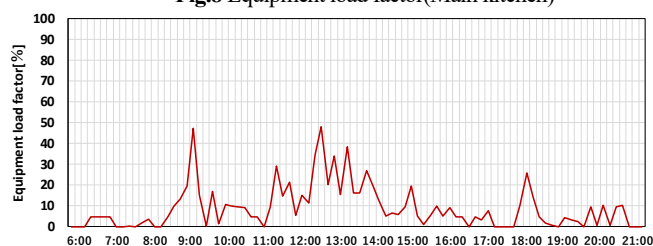


Fig.9 Equipment load factor(Dish washer)

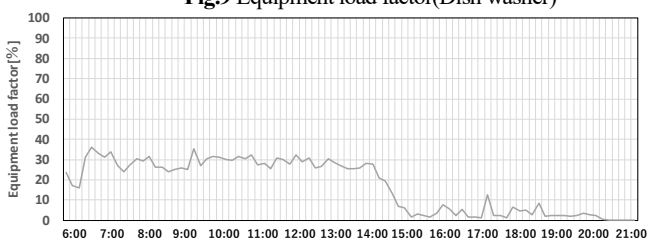


Fig.10 Equipment load factor(Whole equipment)

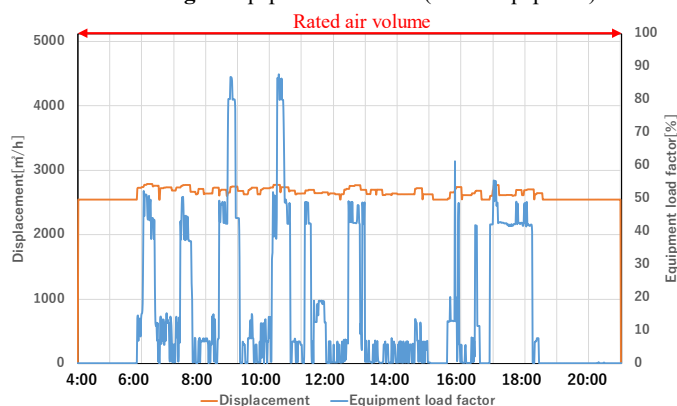


Fig.11 Changes in displacement and equipment

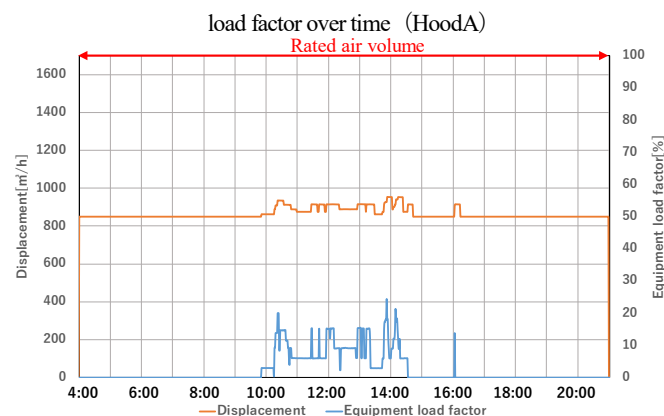


Fig.12 Changes in displacement and equipment

load factor over time (HoodB)

房稼働時間中において VAV の風量下限値での運転が多く占めている。なお本計画では、定格風量の運用に対して、全体の排気動力削減量は約 38% となっている。

厨房の換気量制御において、フードの VAV は排気風量の下限値を 50% と設定しているが、今回の実測から厨房機器が低い負荷率で運用されていることが確認できた。VAV の下限値を下げると、臭気や水蒸気の影響もあるため、下限値の決定方法は今後の課題である。

6. まとめ

本報では、業務用厨房の換気・空調計画の概要及び換気風量制御に関する運用実績について報告を行い、厨房内の温熱環境と省エネルギー性について確認し、以下の知見を得た。

- (1) 天井面からの布製吹き出し口による置換空調により、適正な温熱環境が形成されていることを確認した。
- (2) 本厨房の換気システムは従来の換気方式に比べ、省エネルギー性が排気動力では約 38% 向上した。
- (3) 省エネルギー性を図りながら、換気効率を向上し、適正な温熱環境が形成されていることを確認した。

今後の検討課題としては、厨房機器負荷率と換気量制御の検討、厨房機器低負荷時・低風量時における排気捕集率についての検討を行っていく。

参考文献

- 1) 豊村、甲谷、山中、桃井、相良：食堂を併設した業務用厨房の換気・空調設計手法に関する研究（その 2）フード排気量設計手法の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）環境工学Ⅱ pp. 793-794、2011. 8
- 2) 北村、甲谷、山中、桃井、相良：食堂を併設した業務用厨房の換気・空調設計手法に関する研究（その 4）実厨房においてエアコン吹出气流がフード周辺気流に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）環境工学Ⅱ pp. 683-684、2012. 9
- 3) 相原、奥田、西川：フード内温度を用いた換気量制御のためのシステム構築、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）環境工学Ⅱ pp. 801-802、2011. 8
- 4) 須田 他 社員食堂に併設された業務用厨房の換気・空調に関する実測評価厨房利用実態と換気量制御、日本建築学会大会学術講演会集、2015. 9
- 5) 山下 他 天井給気型置換換気・空調方式を導入した業務用ガス厨房に関する（第 2 報）厨房内の温熱環境と気流の可視化実験、空気調和・衛生工学会大会論文集 2016. 9

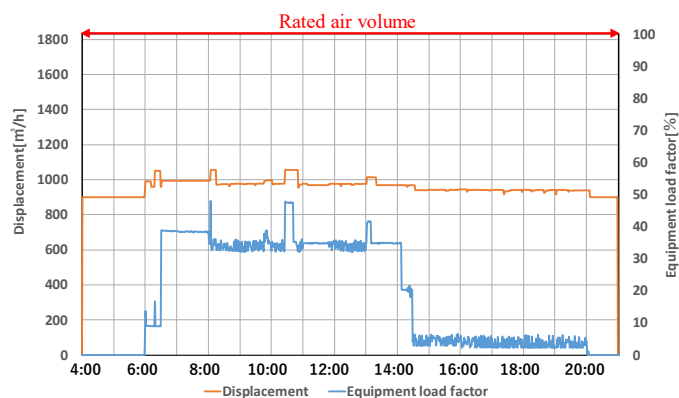


Fig.13 Changes in displacement and equipment

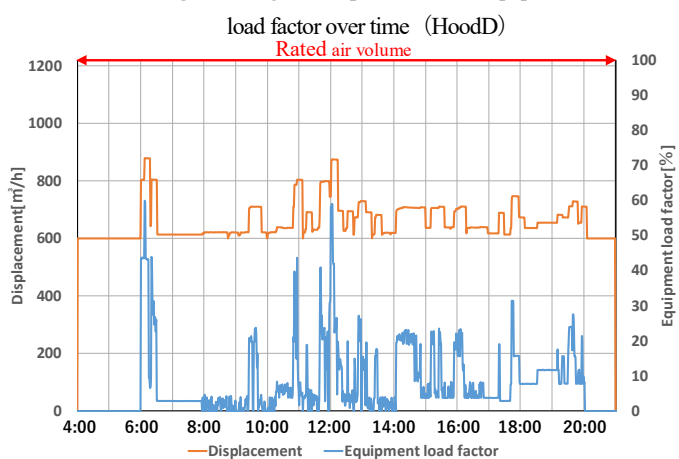


Fig.14 Changes in displacement and equipment

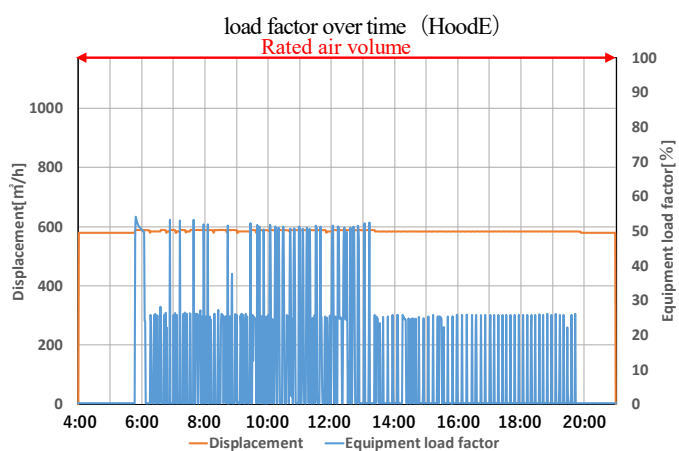


Fig.15 Changes in displacement and equipment

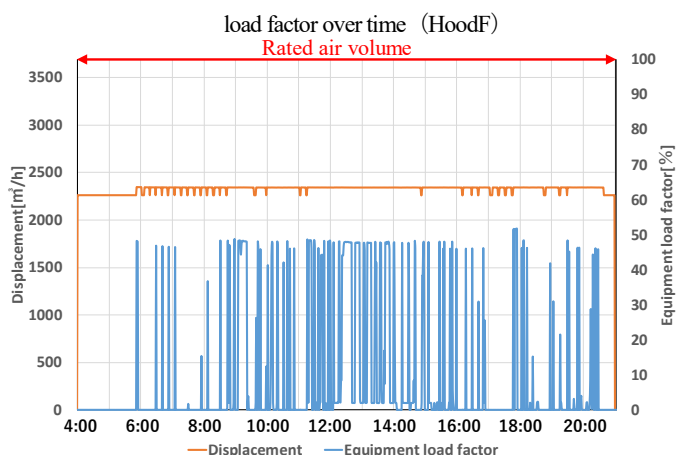


Fig.16 Changes in displacement and equipment

load factor over time (HoodG)

アニオン交換処理水を用いた建築設備配管の腐食抑制方法 Corrosion Prevention of Building Equipment by Anion Exchanged Water

正会員 ○榎本 恭佑 (新菱冷熱)

正会員 松川 安樹 (新菱冷熱)

正会員 山田 育弘 (新菱冷熱)

Kyosuke KASHIMOTO^{*1}Yasuki MATSUKAWA^{*1}Ikuhiro YAMADA^{*1}^{*1} SHINRYO CORPORATION

Local corrosion still often occurs in Carbon steel pipes and Copper tubes. We have been thinking that it is the cause of "making the starting point of the corrosion" for occurring the Local corrosion by our studies. So We are considering using an Anion Exchange Water, which the corrosive anions such as chloride ions and sulfate ions were replaced to bicarbonate ions for preventing the Local corrosion. In this report we show the summary of a background, the way for Corrosion Prevention in this study, and some examined data.

1. はじめに

建築設備配管の長寿命化を図るために、腐食対策は重要な課題である。近年、異種金属接触腐食や潰食など原因や対策が明確な腐食事象は減少傾向にある。しかし、亜鉛めっき鋼管や熱交換器銅チューブに発生する局部腐食(写真-1)については、原因と対策が明らかにされていないため、現在でも腐食トラブルが度々発生している。

(図-1)

本研究では、配管施工後の水張り・フラッシングの段階で薬品を使用せずに、亜鉛めっき鋼管や銅チューブに発生する局部腐食を抑制する施工方法を検討している。本報では、アニオン交換樹脂を用いて、水中の塩化物イオンや硫酸イオンなどの腐食性アニオンを炭酸水素イオンに置換。これにより、炭素鋼鋼管、亜鉛めっき鋼管、銅管の局部腐食を抑制する方法を検討した結果を述べる。

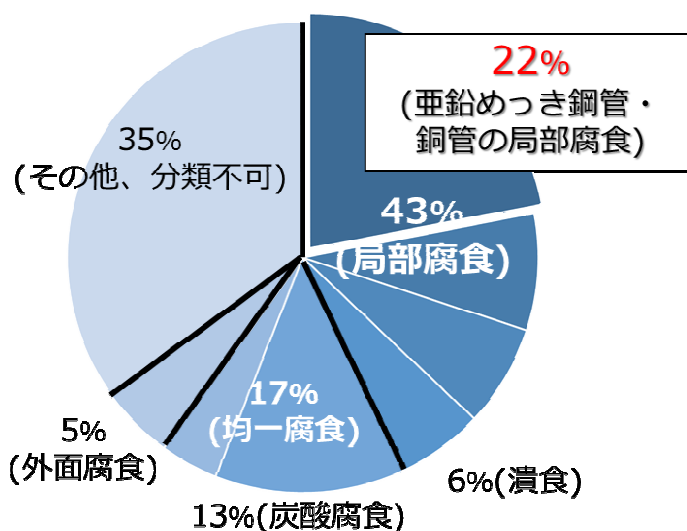


図-1 社内腐食事例の解析結果(腐食形態別分類)



a) 亜鉛めっき鋼管

(冷却水系統、250A SGP 白、9年で漏水)



b) 冷凍機銅チューブ

(冷却水系統、1年以内に漏水)

写真-1 亜鉛めっき鋼管や熱交換器銅チューブに発生する局部腐食事例

2. 腐食抑制方法の概要

2.1 腐食対策の方針

建築設備配管系で、最近 20 年間に発生した腐食事例の解析結果より、局部腐食の発生には配管施工後に行う水張り・フラッシングの状況が影響していることが推察される。例えば、水張り後に長期間運転しない場合やフラッシングが不足している場合は、水中微粒子が配管内面に沈着して、その部分が「局部腐食の起点」となることが考えられる。著者らは、局部腐食の発生を抑制するには、水張り・フラッシングの段階で、この「起点」をつくらないことが重要と考えた。水張り時の腐食抑制方法については、亜硝酸塩系防食剤を添加する方法が一般的である。本研究では、地球環境の保全と長寿命化による社会の持続的発展に貢献するため、薬品を使用しない防食方法を検討した。

2.2 アニオン交換処理

薬品を使用しない腐食対策として、アニオン交換樹脂を用いて腐食性アニオン（ Cl^- や SO_4^{2-} ）を防食性アニオン（ HCO_3^- ）に置換する技術に着目した。アニオン交換処理水により、局部腐食の発生を抑制するイメージを表-1 に示す。

なお、アニオン交換処理水の腐食抑制効果については、1996 年に小野らが³⁾、2005～2007 年には高崎らが報告している^{2)~4)}。しかし、実際の現場に導入された事例は少ない。本研究では、本水処理技術を現場に導入するために必要な情報、例えば、①建築設備に使用されている各種金属材料に対する防食効果とそのメカニズム、②適用できる補給水の水質、③処理水量や現場での再生方法について、調査・検討を行った。

表-1 アニオン交換処理水が局部腐食の発生を抑制するイメージ

補給水の種類	水道水	アニオン交換処理水
水張り直後	<div><div><div><div>Cl^- SO_4^{2-} Mg^{2+}</div><div>Ca^{2+} HCO_3^- Na^+</div></div><div>金属配管断面</div></div><p>水道水には、腐食を促進するCl^-やSO_4^{2-}などの腐食性アニオンが含まれている</p></div>	<div><div><div><div>HCO_3^- HCO_3^- Mg^{2+}</div><div>Ca^{2+} HCO_3^- Na^+</div></div><div>金属配管断面</div></div><p>腐食性アニオン（Cl^-、SO_4^{2-}）を防食性アニオン（HCO_3^-）に置換</p></div>
数日後 （滞留状態で保持）	<div><p>Cl^-やSO_4^{2-}などの影響で配管内面が腐食することにより発生</p><div><div>腐食生成物</div><div>局部腐食の起点</div></div><p>水中微粒子や腐食性アニオンの影響で「局部腐食の起点」ができる</p></div>	<div><div>腐食性アニオンが無いため腐食が抑制</div><div>「局部腐食の起点」ができない</div></div>
数年後	<div><div><div></div><div>局部腐食が進行して一部で貫通</div></div></div>	<div><div>水張り時に供給された酸素分だけ全面腐食</div><div>局部腐食の発生を抑制</div></div>

3. 実験結果および考察

3.1 アニオン交換処理による水道水の水質変化

つくば市水と東京都水道水について、アニオン交換処理を行った。アニオン交換処理には、純水装置などでよく使用されている樹脂（三菱ケミカル製、強塩基性イオン交換樹脂、ダイヤイオン SA20A、10L）を用いた。なお、純水製造で使用する際には、NaOH で樹脂を再生するが、本研究では腐食対策のために NaHCO₃ で樹脂を再生した。処理に用いた樹脂の外観を写真-2、処理前後の水質を表-2、確認事項を以下に記す。

- (1) 200L/h の処理水量で、腐食性アニオン（Cl⁻や SO₄²⁻）の濃度は 1mg/L 未満に減少した。
- (2) アニオン交換処理により、全硬度やシリカの濃度は変化せずに防食性アニオン（HCO₃⁻）の濃度が上昇した。
- (3) アニオン交換処理直後の水溶液の pH は、7 以下に低下した。ばっき処理により pH が上昇したことから、pH の低下は、遊離炭酸の増加による影響であることが推察された。

なお、アニオン交換処理直後に遊離炭酸が増加する機構については、調査中であるが、NaHCO₃ でアニオン交換樹脂を再生していることが影響しているものと考えている。

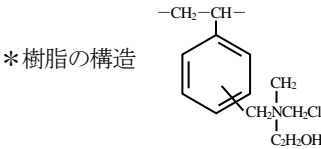


写真-2 実験に使用したアニオン交換樹脂の外観（三菱ケミカル製、強塩基性イオン交換樹脂、ダイヤイオン SA20A、10L）

表-2 アニオン交換処理前後の水道水の水質

（アニオン交換樹脂：三菱ケミカル製 ダイヤイオン SA20A 10L，再生剤：NaHCO₃，処理水量：200L/h）

項目	単位	つくば市水		東京都水（利根川・荒川水系）	
		処理前	処理後	処理前	処理後
アニオン交換処理	—				
pH（ばっき前）	—	7.4	6.6	7.3	6.8
pH（ばっき後）	—	8.0	8.6	8.0	8.2
電気伝導率	mS/m	32.7	27.4	17.8	16.0
酸消費量 pH4.8	mg/L (CaCO ₃)	49	128	45	91
全硬度	mg/L (CaCO ₃)	74	73	56	55
カルシウム硬度	mg/L (CaCO ₃)	42	45	44	45
シリカ(SiO ₂)	mg/L	2	2	15	14
塩化物イオン	mg/L	40	1 未満	10	1 未満
硫酸イオン	mg/L	39.5	1.0 未満	24.3	1.0 未満
硝酸イオン	mg/L	1.4	1.3 未満	5.7	1.3 未満
鉄	mg/L	0.05 未満	0.05 未満	0.05 未満	0.05 未満
銅	mg/L	0.05 未満	0.05 未満	0.05 未満	0.05 未満
亜鉛	mg/L	0.02 未満	0.02 未満	0.02 未満	0.02 未満

3.2 アニオン交換処理水による腐食抑制効果

3.2.1 実験方法

(1) 試験片

実配管 (50A SGP 黒・SGP 白) より、縦 50mm×横 25mm×厚さ 3mm の試験片を切り出し、管内面に相当する部分を試験溶液に暴露した。再現性を確認するために、1 条件につき 3 枚浸漬した。

(2) 試験溶液

東京都水 (以降、未処理水) と東京都水をアニオン交換処理した水 (以降、処理水) の 2 種類の溶液を 1L ビーカーに注ぎ、試験に用いた。

(3) その他試験条件

試験期間は 336 時間 (14 日間)、試験溶液の温度は室温 (25℃)、大気開放で実験を行った。スターラーで緩やかに攪拌した場合 (以降、攪拌あり) と、無攪拌 (以降、攪拌なし) の場合の 2 条件で実験を行った。

(4) 腐食速度の算出

実験前後の試験片の重量変化より腐食速度 (d) を算出した。計算方法を式 (1) に示す。

$$d = \frac{w_1 - w_2}{S \times \rho} \times \frac{365}{t} \times 10 \quad (1)$$

d: 腐食速度 (mm/y) ρ: 密度 (g/cm³)
w₁: 試験前の試験片重量 (g) S: 試験溶液との接液面積 (cm²)
w₂: 試験後 (除錆後) の試験片重量 (g)
t: 試験日数 (日)

SGP 黒の腐食生成物の除去には 7% 塩酸 + 0.5% 腐食抑制剤 (朝日化学工業製)、SGP 白の腐食生成物の除去には 30% 酸化クロム (VI) 溶液を用いた。

3.2.2 実験結果

重量減少より算出した各試験片の腐食速度を図-2、確認事項を以下に記す。

1) SGP 黒

攪拌の有無に関わらず、未処理水中の腐食速度に対して処理水中では、最大で約 1/60 以下に抑制された。塩化物イオン (Cl⁻) や硫酸イオン (SO₄²⁻) などの腐食性イオンを含まない処理水中では、SGP 黒表面の保護皮膜が保持されてアノード反応が抑制されていることが推察された。

2) SGP 白

攪拌なしの条件では、未処理水中の腐食速度に対して処理水中の腐食速度は最大で約 1/2 以下に抑制された。SGP 白の表面に生成した亜鉛を主成分とする保護被膜の耐食性は高く、塩化物イオン (Cl⁻) や硫酸イオン (SO₄²⁻) などの腐食性イオンの影響を受けにくいことが推察された。

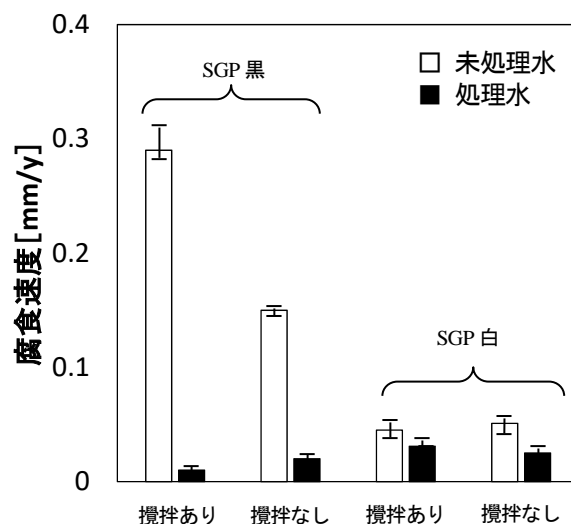


図-2 未処理水および処理水中における SGP 黒と SGP 白の腐食速度 (25℃、大気開放、試験期間: 336 時間)

4. まとめ

- (1) 水道水をアニオン交換処理することにより、腐食性アニオンの濃度 (Cl⁻: 10~40mg/L、SO₄²⁻: 24~40mg/L) は、1mg/L 未満に減少した。
- (2) 東京都水をアニオン交換処理した処理水中の腐食速度は、SGP 黒で最大約 1/60、SGP 白で約 1/2、未処理の水道水中よりも抑制できることを確認した。

参考文献

- 1) 小野ら: 「密閉冷却水系の炭素鋼、銅に対するアニオン交換処理の防食効果」、第 43 回腐食防食討論会、B-306 (1996)
- 2) 高崎ら: 「アニオン交換処理による氷蓄熱システムの腐食抑制 (その 1) 腐食性アニオンおよび水温の影響」、材料と環境 2005、A-101 (2005)
- 3) 高崎ら: 「アニオン交換処理による氷蓄熱システムの腐食抑制 (その 2) 抑制効果におよぼす前処理の影響」、第 53 回材料と環境討論会、B-202 (2006)
- 4) 高崎ら: 「アニオン交換処理による氷蓄熱システムの腐食抑制 (その 3) 静置条件における水質の影響」、第 54 回材料と環境討論会、D-113 (2007)

この報文は、平成 29 年度 空気調和・衛生工学会大会の学術講演論文集(J-8、 pp.125~128)を加筆、修正したものである。

大規模オフィスビルにおける冷水送水温度可変制御の効果検証 Evaluation Study on The Variable Control of Cold Water Temperature in The Large-scale Office Building

○小 林 佑 輔 (竹中工務店)

粕 谷 敦 (竹中工務店)

Yusuke KOBAYASHI*¹ Atsushi KASUYA*¹

This study is reported the reduction effects of energy consumption for heat-source systems that automatically raises the supplying temperature by the variable control of the cold water temperature in the large-scale office building.

はじめに

中央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、大規模建物の空調システムとしてこれまで数多く採用されている。熱源機器の冷水出口温度を高めた「中温熱源」は熱製造効率を高めることができ、空調システム全体のエネルギー消費量の削減が期待できる。本研究では実建物の大規模オフィスビルに対して、冷水送水温度可変制御(VWT: Valuable Water Temperature)を採用した熱源システムの電力消費量削減効果について事前検証と実績値の結果を用いて報告する。

1. 概要

1.1 評価対象施設

評価対象は大阪市内に立地する地上22階建て、延床面積約49,612m²のテナントオフィスビルである。建物外観を写真1に示す。熱源システムに冷水送水温度可変制御を採用している。設備計画はテナントオフィスビルの機能性・効率性、省エネルギー・省CO₂、快適性・知的生産性、事業継続性(BCP)に配慮しており、複数ボイドを利用した自然換気システム、潜熱・顕熱分離の放射併用パーソナル空調システム、冷媒自然循環システム等を採用している。

1.2 熱源システム概要

熱源・空調は、熱媒温度帯を室内温度に近づけて省エネルギー化を図る計画としている。熱源・空調システムの概念図を図1に示す。本システムは、室内側の負荷処理を行う放射併用パーソナル空調、熱搬送する冷媒自然循環、熱製造を行う中温熱源で構築している。

熱源システムのフローを図2に、熱源の設置状況を写真2に示す。中温熱源として、高効率空冷モジュールチラーと熱回収型水冷チラー、低水深温度成層型水蓄熱槽で構成し、冷水供給温度を9~13℃として熱源効率を向上している。空冷モジュールチラーは、部分負荷効率が高



写真1 建物外観

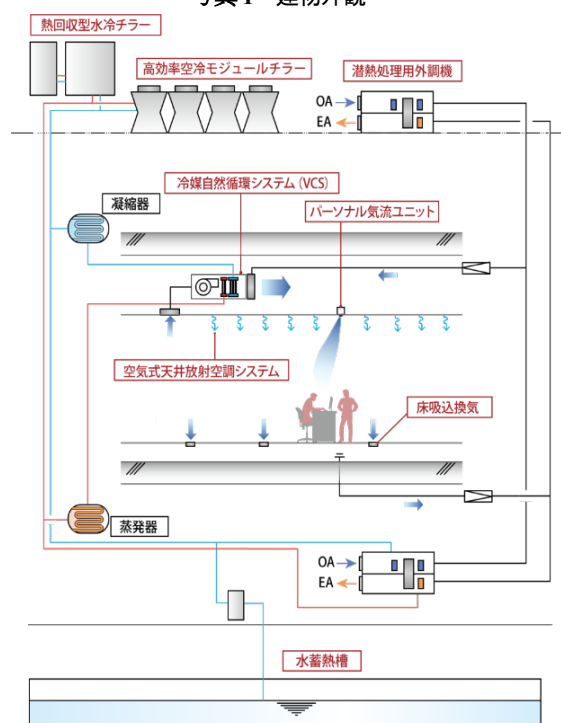


図1 熱源・空調システム概念図

いロータリーコンプレッサー搭載機種としている。熱回収型水冷チラーは、冬季に冷房と暖房が共存するオフィスビルにおいて、排熱を活用しながら冷水と温水を同時に取り出して、高効率運転を可能としている。

温度成層型水蓄熱槽については、多層連結パイプ連結方式とし、夜間に熱回収型水冷チラーにて冷水 8℃で蓄熱し、昼間 9℃で放熱することで、蓄熱時の効率も高めている。冬季においては、冷却塔により冷水を製造するフリークーリングを行っている。冷却塔フリークーリングについては、中温冷水利用により有効運転範囲・期間を広げ、省エネルギー化を図っている。

1.3 冷水送水温度可変制御の概要

熱源から取り出す冷水温度について、熱負荷状態に合わせて自動で可変温度制御を行い、熱源効率をさらに高めている（特許出願中）。図3に冷水送水温度可変制御の概念図を示す。冷水送水温度可変制御については、全体の冷水熱量の使用状況に加えて、凝縮器・空調機などの制御弁開度情報を元に、冷水の可変制御を行っている。テナントオフィスビルにおいて、熱負荷の偏在など一部のテナントで熱需要が大きい場合などを考慮して、制御弁開度情報を元に可変温度制御を行う計画としている。

2. シミュレーションによる効果予測

2.1 シミュレーションツール

熱源システムの電力消費量を事前に把握するために、LCEM ツール Ver.3.10 を使用し、熱負荷モードを利用した期間計算を行った。熱源システムの解析モデルを図4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5に示す。空調時間は 8~20 時のパターンを使用する。

表1 熱源システム機器仕様

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

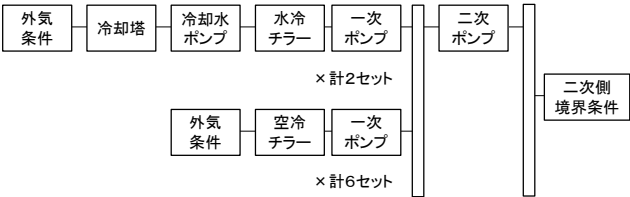


図4 熱源システムの解析モデル

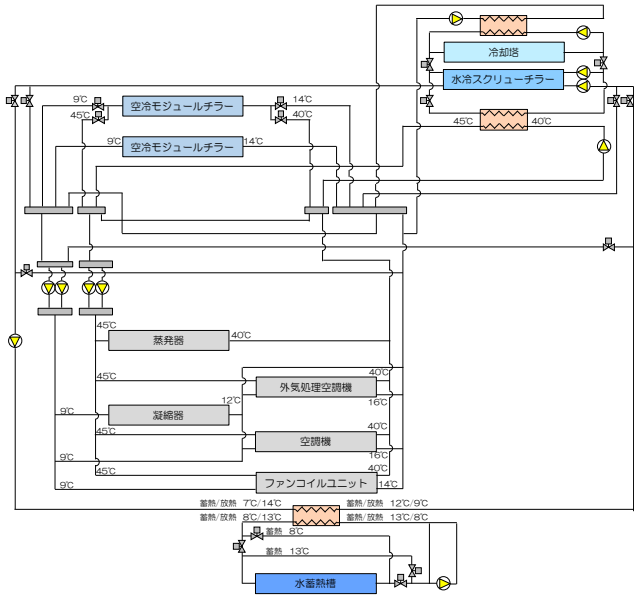


図2 熱源システムフロー図



写真2 熱源の設置状況

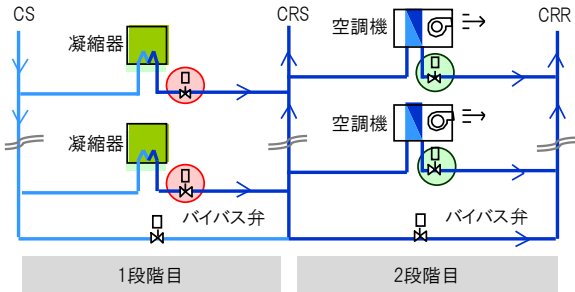


図3 制御弁開度情報を利用した冷水 VWT 制御

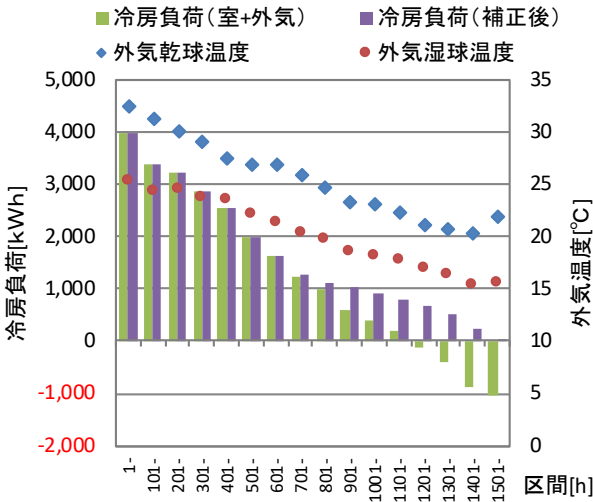


図5 二次側境界条件（熱負荷モード）

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。

2.2 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送水温度可変制御を行う場合の熱源システムの年間電力消費量を比較した。解析条件として CASE1 は出口温度を年間通じて 7°C とし、CASE2 は 9°C とした。CASE3 は負荷率に応じて出口温度を変化させており(図 6)、温度差はいずれの条件でも 5°C とした。一般に、空冷チラーは負荷率が低下すると COP が向上する。空冷チラーの特性を図 7 に示す。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。従って 空冷チラーの増段条件を 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な運用になると考えられる。そこで CASE3 の条件では熱源のうち空冷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て解析した。

2.3 解析結果

CASE1~3 の条件において、年間の熱源システムの電力消費量を算出した。計算結果を図 8 に示す。電力消費量合計について、CASE1 と比較して CASE2 は 9% 程度、CASE3 は 14% 低減できている。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、CASE3 では、冷水入口温度が高まることで空冷チラーの COP が向上し熱源システム全体の電力消費量を抑えている。なお、CASE1 及び 2 では空冷チラー運転台数は最大で 6 台中 4 台であった。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、稼動する区間が無いと考えられる。

3. 運転実績

3.1 熱源の運転実績

夏季 2018 年 8 月 6 日における時刻別の熱源電力消費量を図 9 に示す。夜間は水冷チラーで蓄熱運転を行いながら負荷需要には空冷チラーにて対応し、日中は空冷チラー主体で冷水を製造している。

2018 年 6 月~10 月の外気温度と冷水システム COP の散布図を図 10 に示す。冷水システムを評価するため、空

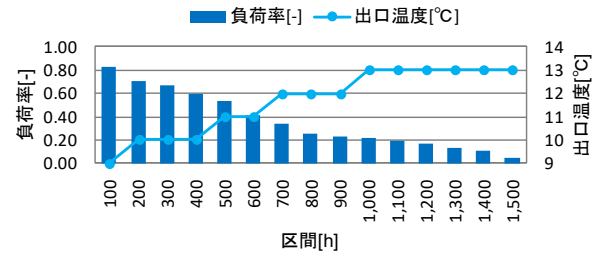


図 6 解析条件 (CASE3)

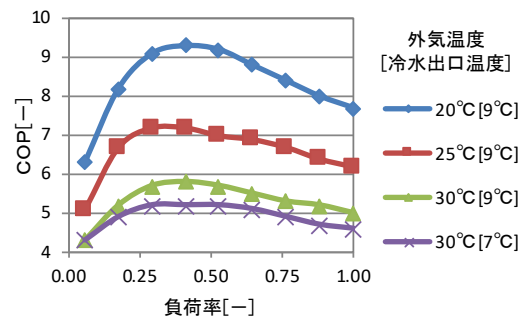


図 7 空冷チラーの特性

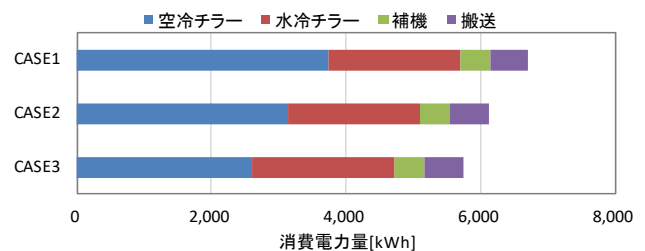


図 8 解析結果 (年間電力消費量)

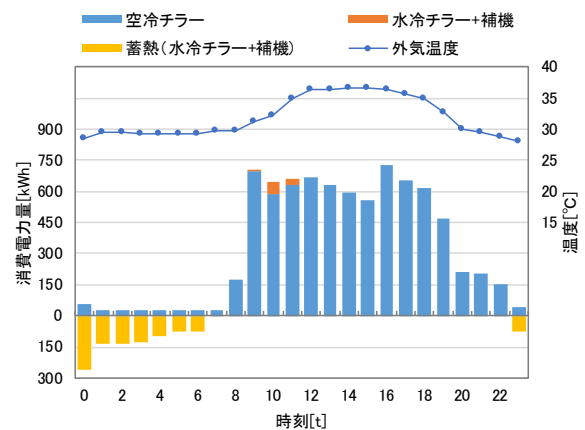


図 9 運転実績 (時刻別熱源電力消費量)

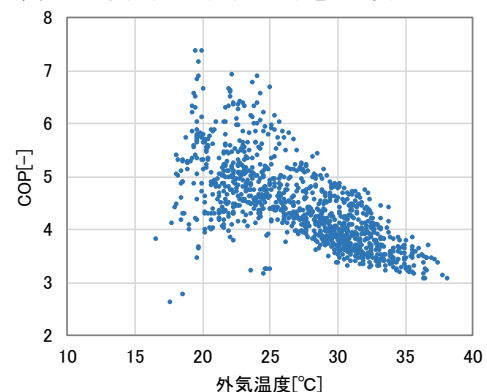


図 10 外気温度と冷水システム COP

冷チラー、水冷チラー共に冷水運転モードのみの期間としている。冷水システム COP は、冷水製造熱量を、熱源機・一次ポンプ・冷却塔・冷却水ポンプの電力消費量の合計で除して算出しており、1 時間値としている。外気温度が 20℃以下で一部の COP が低い値を示しているが、全体的には外気温度が低下すると冷水システム COP が上昇する傾向である。夏季における冷水システム COP の期間平均は 4.5、温水システムを含めた年間 COP は 4.2 であった。

3.2 冷水送水温度可変制御の運転実績

冷水送水温度可変制御範囲は 9～13℃としており、各凝縮器の制御弁開度情報にて送水温度を自動変更している。具体的には、各凝縮器の制御弁開度情報について、全て低開度設定以下の場合に冷水送水温度設定を 1℃上昇し、凝縮器 1 台でも高開度設定以上となる場合に冷水熱量不足と判定し、冷水送水温度設定を 1℃下げる制御としている。冷水送水温度設定を変更した場合には、ハンチング防止として 30 分間状態を保持する制御としている。

2018 年 12 月～3 月において、冷水可変温度制御による送水温度設定毎の積算稼働時間を図 11 に示す。凝縮器系統毎の冷水需要に対応して、送水温度設定は全体の 70% 程度が 10℃以上で稼働しており、送水温度 13℃以上の稼働時間は 25%と最も高い比率となった。冷水需要に対応した冷水可変温度制御により、熱源機器の高効率運転に寄与していると考えられる。

3.3 運転実績と解析結果の比較

図 12 に 2018 年実負荷と LCEM ツールの解析に用いた二次側境界条件の年間冷房負荷のデュレーションカーブを示す。2018 年実負荷は解析条件と比較して運転時間 0h～800h の区間では冷水負荷は小さいが、年間運転時間は 4700h 程度と 3 倍程度であり差異が見られる。そこで LCEM ツールの解析条件 CASE3 について、二次側境界条件に実負荷を用いて再解析した。表 2、図 13 に CASE3 の再解析結果と 2018 年運転実績における年間の冷水熱負荷及び電力消費量を示す。年間電力消費量について、2018 年実績は再解析結果と比較して 107%程度であり、空冷チラー及び補機に差が見られた。

2018 年実績が再解析結果と比較して年間電力消費量が多い理由として、以下の 2 点が考えられる。空冷チラーは 6 台構成であり、低負荷時には台数制御で停止するユニットがある。空冷チラーの仕様として、ユニット停止時には冷媒寝こみ防止機能などにより待機電力が発生するため、実績値の電力消費量が大きくなったと考えられる。補機については、冬季は冷却塔フリークーリングにより冷却塔が稼働していたため、実績値の電力消費量が大きくなったと考えられる。

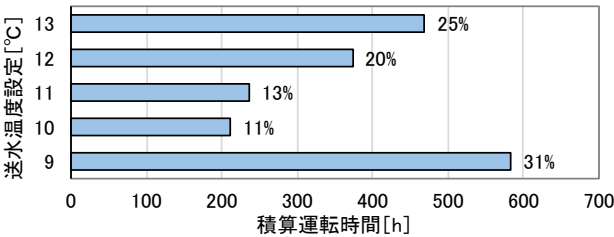


図 11 冷水送水温度設定毎の積算稼働時間（12～3 月）

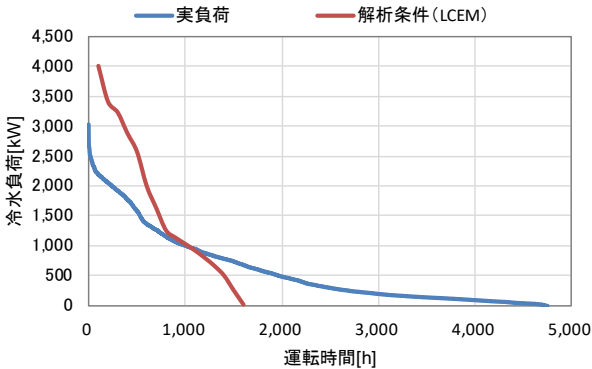


図 12 年間冷房負荷デュレーションカーブ

表 2 年間電力消費量比較

	電力消費量[MWh]				
	空冷チラー	水冷チラー	補機	搬送	合計
再解析CASE3	6,578	1,454	312	1,768	10,112
実績	7,545	736	1,148	1,410	10,839

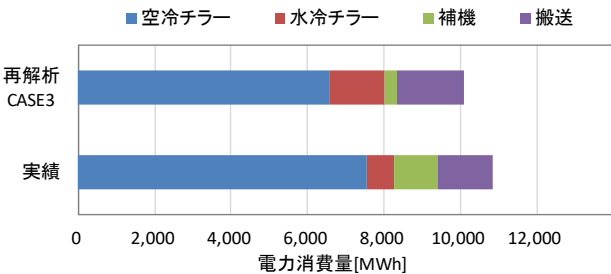


図 13 年間電力消費量比較

5. まとめ

本研究は大規模オフィスビルにおける冷水送水温度可変制御の効果検証として、熱源システムの電力消費量について事前検証と運用段階での実績値の結果を示した。冷水送水温度可変制御により熱源システムの電力消費量の削減が可能であるが約 7%の差がみられた。電力消費量の評価精度を向上するためには、効果の事前検証の二次側境界条件で用いる熱負荷及び機器仕様について算定精度を上げることが求められる。

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 ver3.10 主要オブジェクトの計算アルゴリズム」

中央監視データによる、エネルギー消費量の分析および熱源設備の性能検証

Performance Verification of a Heat Source System and Primary Energy Consumption
Analysis , Utilizing Central Monitoring Data

○伊藤 賢一 (大気社)

Kenichi ITO*1

勝屋 訓 (大気社)

Satoshi SHOYA*1

井上 正一 (大気社)

Shoichi INOUE*1

*1 Taikisha Ltd.

An energy consumption at a heat source facility must reduce by energy-saving method for CO2 emission reduction. With that purpose , It is necessary to know the situation of facilities utilizing central monitoring data. In this report, an operation situation of current facilities is verified by probability density and the trend of the heat load factor. and energy-saving method is examined .

はじめに

熱源設備では省エネルギー化を図るため、エネルギー消費の多くを占める冷凍機に対して機器の成績係数(COP)向上を目指す運用が行われてきた。

代表的な方法に、機器の組合せや発停の順序を考慮し、各機器が定格に近い負荷で、運転されるように運用する台数制御がある。

しかし、インバータターボ冷凍機等、部分負荷運転時に高効率を示す機器の普及や、定速ターボ冷凍機においても、台数制御等における発停タイミングを考慮し、定格負荷より低い負荷率で最も効率がよくなる部分負荷特性を持たせた機種も普及している。この為、より効率良く設備を運用するためには、設備の状態を詳細に収集する必要がある¹⁾。

また、ネットワーク機器の性能向上にともない、中央監視において設備の状態を詳細に監視、記録する事が容易に実現できるようになってきた。

近年は、建物に対する省エネルギー化の要求が高まっていることもあり、中央監視に記録された設備の運転データの有効に活用する事が求められている。

また、改修時の計画にあたり、データに基づく性能検証が求められる例もある²⁾。

本報では、中央監視に蓄積された運転データにより、利用目的の異なる蓄熱槽を備えた2例の冷熱源設備について、運用方法の分析や省エネルギー対策の検討を行った例を報告する。運転データの分析にはコミッションングの考え方を参考にしている³⁾。

また、負荷データの比較検討には、設備容量等によって無次元化した、負荷率および確率密度を使用した。

1. 分析対象とモデル

熱源設備の分析に使用したモデルは、コミッションングの考え方を参考にしたものである。

これは、解析対象を「系」と呼ばれる領域に分割し、対象となる量の収支に着目して整理するものである。概要をFig. 1に示す。

系は解析対象となる量(例えば冷熱量や冷水量)について、その系の境界から出入りする量のみに着目し、収支を取るように整理された領域である。系はブラックボックスと考え、系の内部で発生する事象については無視する。設備全体を熱源、負荷などの大きな領域に分割し、系間における量の授受を整理した表をシステムレベルと呼び設備全体を把握しようとするものである (Fig. 1(a)) .

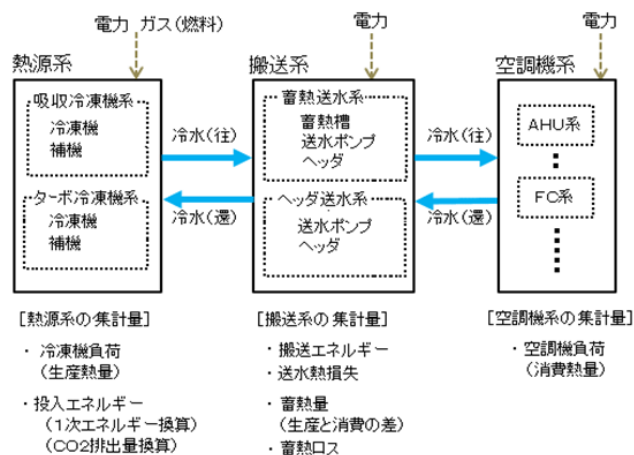
システムレベルの系は、系内部において対象とする量の収支に着目して整理した領域に分割される。この系をサブシステムレベルと呼び、熱源系であれば、吸収式冷凍機群、ターボ冷凍機群、ボイラ群など、熱源機器を機能別に整理した系に分割する事ができる (Fig. 1(b))。

さらにサブシステムレベルの系は、それを構成する機器単体に分割する事もできる (Fig. 1(c))。

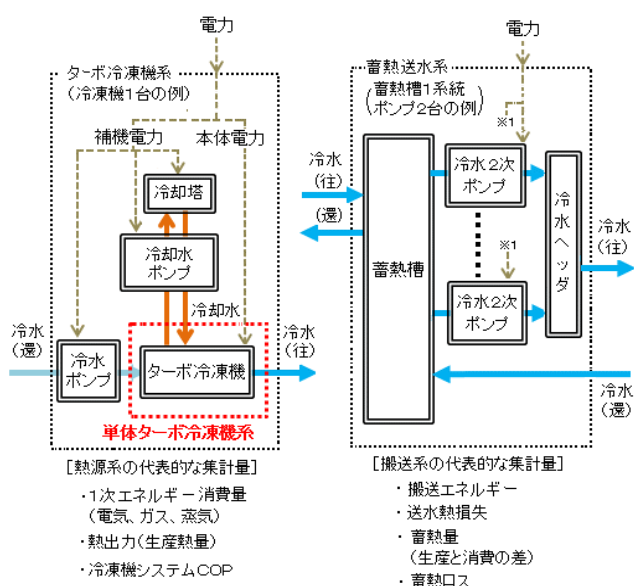
この系を機器レベルの系とよび、ターボ冷凍機1台と冷水ポンプなどを組み合わせて、冷凍機が冷水を生産する為に必要な最小限の系と考える事ができる。

機器レベルは、COPなど機器単体の省エネルギー指標が整理できるレベルであり、設備診断では重要な系となる事が多い。

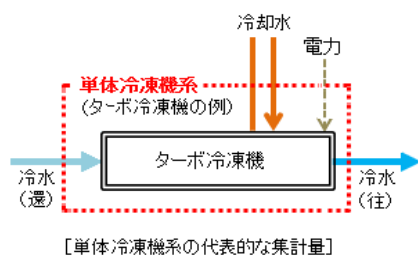
次節では蓄熱槽を備えた冷熱源設備に対して、盛夏期の運用データから、設備全体の負荷傾向を確認するためにシステムレベルの系で分析を行い、冷凍機の運転状況の



(a) System level



(b) Sub system level



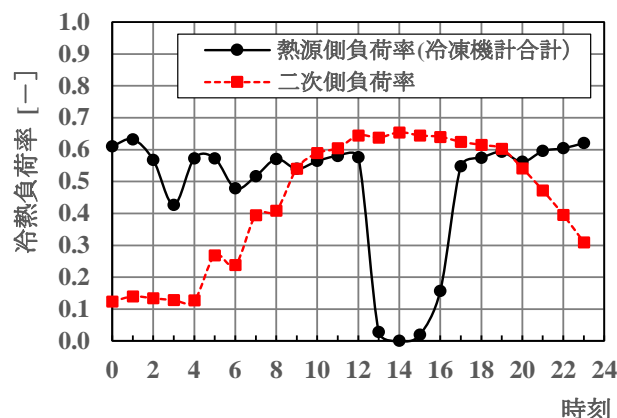
(c) Equipment level

Fig.1 Analytical model

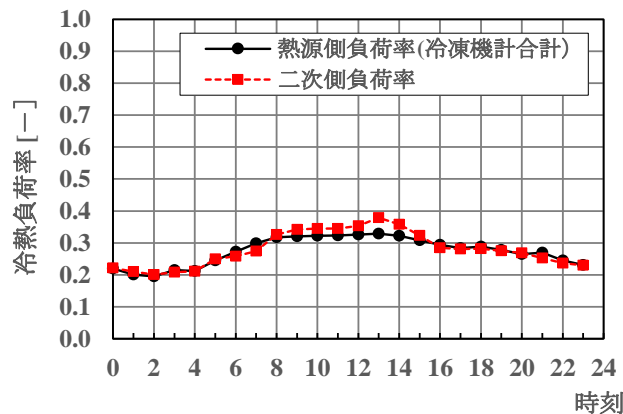
2. 設備全体の負荷傾向

1.1 負荷率の日周期

Fig. 2 に設備全体の 8 月における時刻別平均負荷傾向を示す。縦軸の冷熱負荷率は設備規模によらず負荷率のみで比較するため、熱源側の生産冷熱量および二次側の冷熱消費量 (冷熱需要) を熱源側の定格設備容量で無次元化した値である。Fig. 2(a) に蓄熱によるピークカット (デマンドシフト) を目的とした設備 (以下 Case1) の結果を示し、Fig. 2(b) にピークカット (デマンドシフト) を行わない運用としている設備 (Case2) の結果を示す。



(a) Case 1. (Peak Shift)



(b) Case 2

Fig.2. Mean load factor in August

Case. 1 で、熱源の負荷率 (図中●) は 14 時を中心に関前後 2 時間 (計 4 時間) は原則として熱源を停止し、蓄熱槽に貯めた冷熱を利用する。

但し蓄熱槽からの放熱が完了した場合や、瞬時負荷が蓄熱槽の放熱能力を上回った場合など、冷熱供給だけで二次側負荷を、まかなえない場合は、一部の冷凍機のみ追い掛け運転を許可している。

熱源運転時においては、概ね負荷率 0.6 程度で安定して推移している。該当期間における瞬時最大負荷率は

0.897 である事から蓄熱槽を設置する事で必要設備容量を低減し、電力デマント（電力基本料金）の削減に寄与する運用となっている。

また蓄熱槽によって冷熱生産と冷熱消費の時間差を吸収出来る事から、経年劣化等に対する安全率などは考慮する必要があるが、設備容量を現在の 60%程度にまで低減できる可能性があると推定できる。

Case. 2 では、熱源側と二次側の負荷率が終日均衡しており、蓄熱槽によるデマンドシフトは行われていない。

熱源の負荷率は、0.2~0.4 で推移しており負荷率としては低い値を示しているが、これは冷凍機の台数制御運転にあたり、予備機を含めたローテーションを行うために、熱源容量の余力が大きいためである。

負荷率は昼から夜にかけて緩やかに減少しているが、昼夜の差が小さく、Case. 1 でみられた明確な負荷ピークがみられない。このため、蓄熱槽によるデマンドシフトを行ったとしても、電力デマンドの低減効果は低い。

また、昼夜の消費電力量の差が小さいため、夜間電力利用による電力料金削減効果も小さい。これらの事からデマンドシフトではなく、台数制御による冷凍機の発停にともなう供給水温の安定化を目的とした計画時に想定は現状も変わっていない事が確認された。

1.2 負荷率の発生確率

熱源設備の稼働状態を検討する為、夏季の熱源負荷（冷熱生産量）と二次側負荷（冷熱消費量）について、負荷率の確率密度で比較した。運用時間を確率密度に換算して無次元することで年間運転時間の違いなどによらず、設備の稼働状態の特徴を比較する事ができる。

負荷率が $r \sim r + \Delta r$ で運用される確率 $P(r)$ は、確率密度 $D(r)$ より下式で表される。

$$P(r) = \int_r^{r+\Delta r} D(r) dr$$

Fig. 3 に熱源設備全体の負荷率に対する確率密度を示す。Case. 1 では熱源は負荷率 0.55~0.65 の間に集中している。負荷率の分布幅が狭い事から概ね冷凍機は定格運転状態にあると推定される。本冷凍機は部分負荷特性を持たない機種であり、定格運転を主とした運用方法は適切と考えられる。

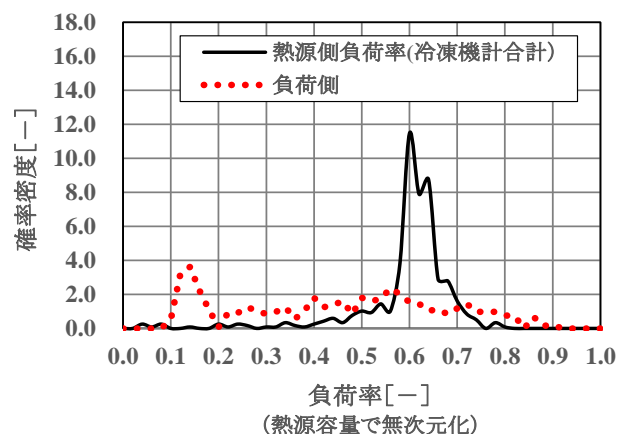
しかし、Case. 1 は予備機を持たない設備である事から現状の運転状況は負荷率が低いと考えられ、冷凍機単体の劣化が疑われる。

2次側負荷率は幅広く分布しており、蓄熱槽がデマンドシフトだけでなく、熱源と2次側負荷間における負荷率の差を埋めるバッファとしても機能している事が確認

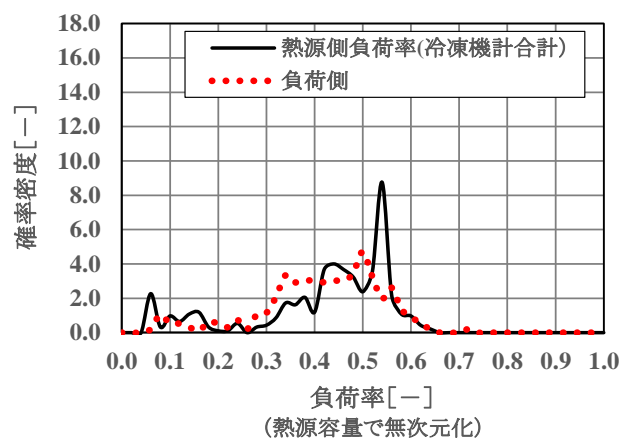
できる。

この為、蓄熱槽をヘッダに改修し搬送動力の低減を試みる手法（配管の密閉化）などの採用には設備の大型化による損失との比較検討が必要である。

Case. 2 では熱源は負荷率 0.05 から 0.2 および 0.3~0.60 範囲に広く分布している。概ね負荷側も同様である事から、負荷に応じて熱源が適切に運転されている事が確認できる。



Case 1. (Peak Shift)



(b) Case 2

Fig.3. Probability density of load factor in August

3. 冷凍機単体の運用状況

Fig. 4 に冷凍機単体の負荷率に対する確率密度を示す。負荷率は冷凍機単体の定格容量で無次元化した。

Case. 1 では冷凍機の負荷率は 0.7~0.8 の狭い間に集中しており、熱源全体の負荷率と同様の傾向を示している。この冷凍機は蓄熱槽に対する冷熱蓄熱運転が中心であり蓄熱時に機器単体としてもフル運転となる運用をしているが、負荷率の中心が 0.75 付近にあり本来の能力が出ていない。

原因として経年劣化が疑われるが、低下が大きい事が

ら、それ以外の原因もあると思われるので、現地調査も含めた検討が必要と考えられる。

Case2. では冷凍機の負荷率は、0.7～0.9の間に分布しており、台数制御を行っている事などから、計画時の想定通りの運用が出来ていると推定される。

本機種は、定格負荷時にCOPが最大となる機種であるが、負荷率0.85を中心に安定して運転されている事を考えると、次回更新時は負荷率が0.8～0.9付近で最も効率の良くなる機種を選定する事で容易に高効率化が図れるものと予想できる

4. エネルギー消費に関する検討

Case. 2において、既設冷凍機は、負荷率1.00でCOPは最大となる機種である。これを、部分負荷特性の異なる機種に更新した時の消費電力量の削減率を検討する。

現状機種（冷凍機Aとする）および負荷率0.8付近でCOPが最大となるように、部分負荷特性を調整された機種（冷凍機Bとする）の負荷率0.85および1.00におけるCOPを下表に示す。冷凍機Bは冷凍機Aの後継機種にあたり、定格COPも向上している。共に定速型ターボ冷凍機である。

負荷率0.85でみると冷凍機BはCOP約10%高くなるため、消費電力は91%となる。負荷率0.8～0.9での運転は冷凍機運転時間の約50%を占める事から、現状の全消費電力量に対して約4.5%の電力量が削減されると推定される。

ここでは、部分負荷COPを求めるために冷却水温度を24℃に固定して計算したが、さらに詳細な分析として、外気条件から算出した湿球温度により、冷却水温度を推定し、リアルタイムの負荷率と冷却水温度を考慮した部分負荷COPによって分析することが考えられる。

5. まとめ

本報では、冷熱源に蓄熱槽を備えた冷熱源設備において、熱源負荷および2次側（需要側）の熱負荷について、コミショニングで使用される考え方を参考に、中央監視で記録蓄積されたデータにより、熱源設備および2次側設備の負荷率について現状を分析し、概ね計画時の想定通りの運用となっている事を確認した。

さらに、現状の負荷率の傾向から、冷凍機更新による消費電力量の削減率について推定を行った。

今後、実測データに基づく性能検証および検証結果を反映した設備運用の最適化に対する要求は高くなっていくと推定される。そのため、必要な実測データを適切に測定、記録する為には、当初から性能検証を計画に反映する事が重要となると予想される。

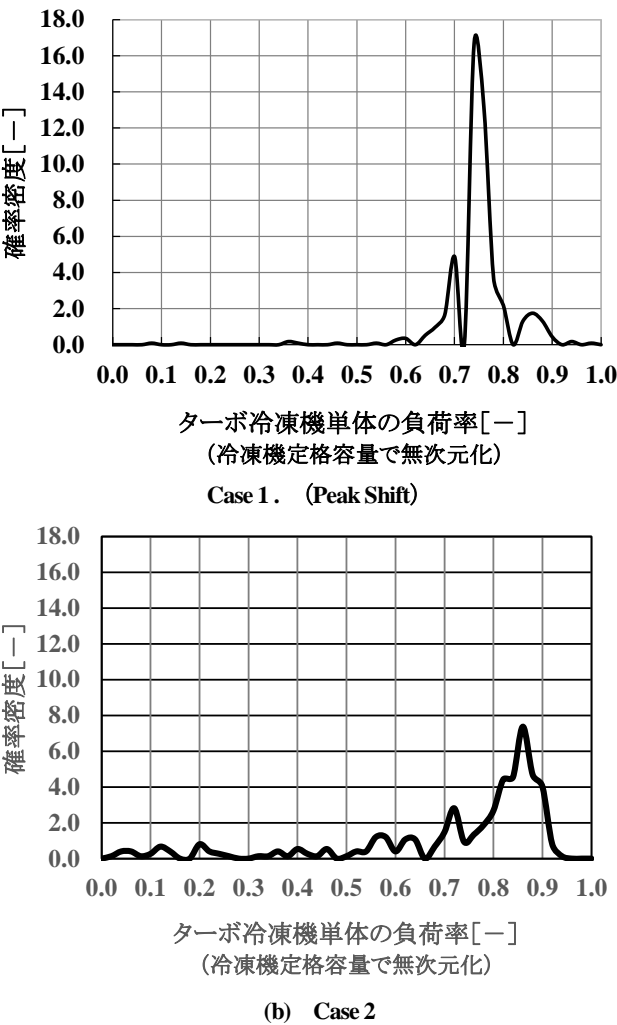


Fig.4. Probability density of a refrigerator load factor

Table1. Partial load COP for the load factor

機種	負荷率 1.00	負荷率 0.85
冷凍機A	7.3	7.2
冷凍機B	7.5	7.9

COPは冷却水温 24℃の場合

参考文献

1) サーマルマネジメント-余熱廃熱の制御と有効利用, 2-3-2, p. 162
2) 野上ら：研究施設の熱源改修における計画と運転実績, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2015
3) 建築設備コミショニング協会；建築設備性能検証マニュアル, BSAC-M01-Ver. 02, p149

建築設備技術の最新動向

The Latest Trend of the Building Facilities Techniques

○川村 圭 (大成建設株式会社) 湯浅 孝 (大成建設株式会社) 永吉 敬行 (大成建設株式会社)

Kei KAWAMURA*¹Takashi YUASA*¹Takayuki NAGAYOSHI*¹*¹ TAISEI CORPORATION

はじめに

2014年に竣工した ZEB 実証棟^(注1)は、オフィスとして利用しながら導入した省エネルギー技術や太陽光パネルによる創エネルギーの検証を行い、ビル単体での年間エネルギー収支ゼロを竣工以来5年に渡り達成した。また、2019年5月には世界初となる「WELL 認証・プラチナ (新築/既存建物全体)」を取得し、建物の環境性能と執務者の健康増進を高いレベルで両立可能であることを示した。この度、経済合理性を考慮したエネルギー性能の向上と健康経営時代に相応しいオフィスへの進化を目指し ZEB 実証棟のリニューアルを行った。本稿では ZEB 実証棟に新たに導入した ZEB、ウェルネス、AI・IoT 関連技術と当社が開発した最新技術の一例を報告する。

1. ZEB 実証棟に新たに導入した技術

1.1 T-Zone Saver Connected

当社では、個人の所在位置を高精度に特定できる技術「T-Zone Saver Connected」を開発した。人の在席状況を高精度に識別できる当社の検知技術「T-Zone Saver」に個人を特定できる技術である Bluetooth を用いたビーコンから得られる測位情報を組み合わせることにより、人の所在位置の情報だけでなく個人の特定も高精度に行う機能を拡張させた。本技術により、オフィスで働く人の様々な状況に即した「好みに応じた空間の提供」等の快適なサービス提供が可能になった。(Fig.1)

1.2 T-WorkStyle-Concierge

当社で開発した「T-WorkStyle Concierge」は、IoT クラウドを活用することで、温湿度や騒音値などの執務空間の環境 (環境情報)、人やモノの所在や滞在時間 (位置情報)、ワーカーの空間利用目的や環境の好み (パーソナル情報) を取得し、スマートフォンなどの個人端末でどこからでも簡単に情報の検索や個人にマッチした最適な空間を提案することができる。(Fig.2)

2. 当社が開発した最新技術

2.1 T-Green Multisolar

建物の外壁や窓と一体化させた太陽光モジュールで発電する外装システム「T-Green Multisolar」は、高い発電効率に加え採光、眺望、遮熱、断熱の各機能と意匠性を備えるとともに災害時には独立した非常用電源として

も機能する。太陽光モジュールを外装パネル化したソリッドタイプと、窓ガラスと一体化したストライプタイプの太陽電池を配置することで透過性を確保したシースルータイプ、これらを組み合わせることで、様々な建物外装に適用することができる。(Fig.3)

3. まとめ

今回、当社で開発した最新の ZEB、ウェルネス、AI・IoT 関連技術の一例を紹介したが、この他にも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、社会貢献等を目指していく。なお本論で紹介した「T-Green Multisolar」は株式会社カネカとの共同開発によることを付記する。

(注1) 大成建設技術センターZEB 実証棟



Fig.1 T-Zone Saver Connected



Fig.2 T-WorkStyle-Concierge

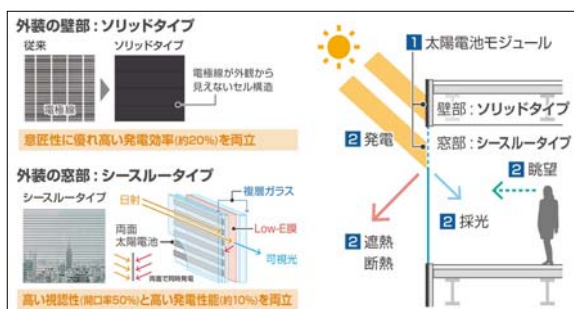


Fig.3 T-Green Multi Solar

領域海洋モデルを用いた播磨灘における物質輸送特性の評価

Evaluation of characteristics of trace substance transport in Harima-nada by using regional ocean modeling system

○フォン シンウ (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)

Chenyu FENG^{*1}

Hikari SHIMADERA^{*1}

Tomohito MATSUO^{*1}

Akira KONDO^{*1}

^{*1} Osaka University

In Harima-nada, oligotrophication has been of increasing concern. In this research, we analyzed the characteristics of trace substance transport in Harima-nada. ROMS (Regional Ocean Modeling System) successfully captured seasonal variations of surface water temperature and salinity in Harima-nada. Forward trajectory analyses were used to evaluate the characteristics of trace substance transport. Each forward trajectory started near the estuary of Kako river, which has the largest basin area among the inflowing rivers of Harima-nada. The results indicated that about 80% of trace substance released near the estuary remained within Harima-nada for 30-day period after the release.

背景・目的

1990 年代前半までは瀬戸内海の単位面積当たりの漁獲量は世界最高レベルであったが、その後瀬戸内海東部海域に位置する播磨灘においては水産物の品質と収穫量は低下しており、その原因の一つとして貧栄養化が挙げられている。また、播磨灘の貧栄養化の原因の一つとして、流入河川からの栄養塩負荷の減少が考えられる。効果的な貧栄養化対策を検討するためには、播磨灘における栄養塩の動態把握が求められる。本研究ではその第一段階として、播磨灘における微量物質の輸送特性を評価するために、領域海洋モデルによる流動場を用いた前方流跡線解析を行った。

国土交通省の瀬戸内海総合水質調査における年 4 回 (2 月、5 月、8 月、10 月) の観測結果を用いた。

Fig.2 に観測点の位置を示す。

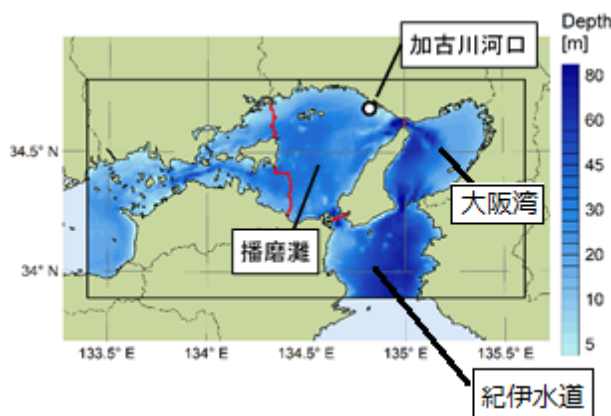


Fig.1 Calculation domain

1. 計算方法

領域海洋モデル ROMS¹⁾ v3.8 を用いて、2010 年の播磨灘における流動場を計算した。計算領域を Fig.1 に示す。水平方向は解像度 1 km、格子数 200×100 とし、鉛直方向は海面から海底を 30 層に分割した。海底地形には日本周辺を水平解像度 500 m で整備した J-EGG500 を用いた。初期・境界条件には日本周辺海域の水位、水温、塩分濃度、流速を水平解像度 1/12 度で整備した JCOPE2M²⁾ を用いた。再現性評価には、

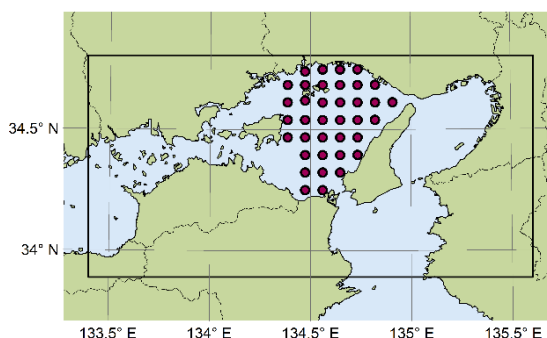


Fig.2 Observation point

モデルの再現性を確認したのち、播磨灘における微量物質の輸送特性を評価するため、ROMS による流動場を用いた前方流跡線解析を実施した。解析の始点は、播磨灘への流入河川の中で流域面積が最大である加古川の河口付近（北緯 34.68 度、東経 134.82 度）（Fig.1）とし、水平方向 5 点×5 点（東西、南北 1 km 間隔）、鉛直方向 3 点（表層：水深約 0.3 m、中層：水深約 7.5 m、底層：水深約 15 m）とした。流跡線解析は 2010 年 2 月 1 日～3 月 2 日、5 月 1 日～30 日、8 月 1 日～30 日、11 月 1 日～30 日の各日 0 時に開始し、解析期間は各開始時間から 30 日間とした。

2. 結果と考察

2.1 流動場

Fig.3 に、計算領域内における表層の流れ場の計算値を示す。播磨灘における 2 月と 8 月の流れの速度が比較的大きく、一方で 5 月と 11 月は比較の流れが小さい。また、大部分で播磨灘から紀伊水道へ流れが出ており、播磨灘へは西側から入ってきている。さらにこの特徴は 2 月と 8 月に顕著に表れる。また、2 月は播磨灘から大阪湾へ流れの速度が大きい、一方で 8 月では播磨灘内において西側から北へ流れており、この流れが後述する前方流跡線の挙動に影響を与えていると考えられる。

Fig.4 に、計算領域内における表層温度の計算値を示す。播磨灘においては水深が浅くまた熱容量が小さいため、季節変動が大きい。一方、紀伊水道は暖流である黒潮の影響を強く受けるため、年間を通して水温が高い。結果として、夏季は紀伊水道と播磨灘の温度差は小さく、他の季節は紀伊水道の方が水温が高くなった。

Fig.5 に計算領域内における塩分濃度の計算値を示す。一年を通して紀伊水道で塩分濃度は高く、播磨灘沿岸で低い。また、季節変動については、表層が加熱されて水温躍層が発達する夏季に濃度が低く、表層が冷却されて鉛直混合が活発となる冬季に濃度が高くなった。

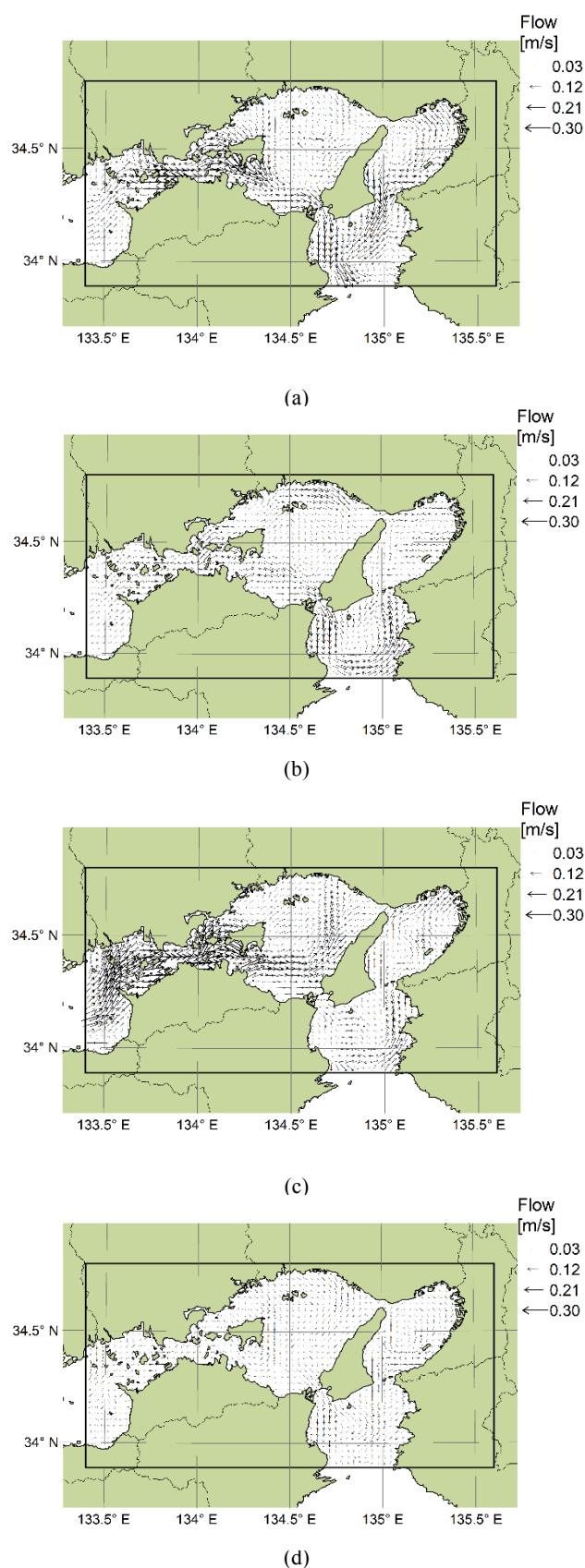
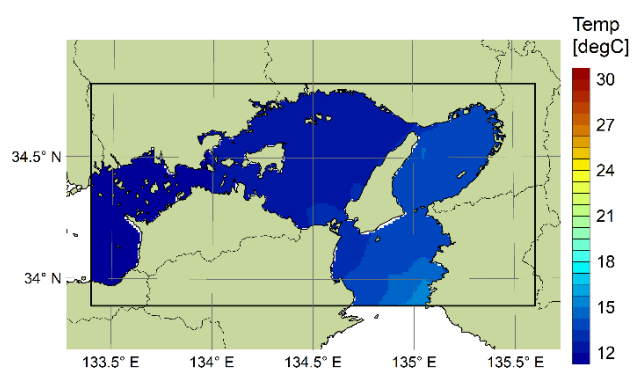
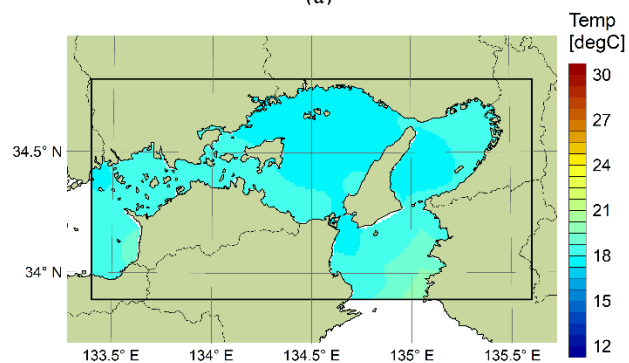


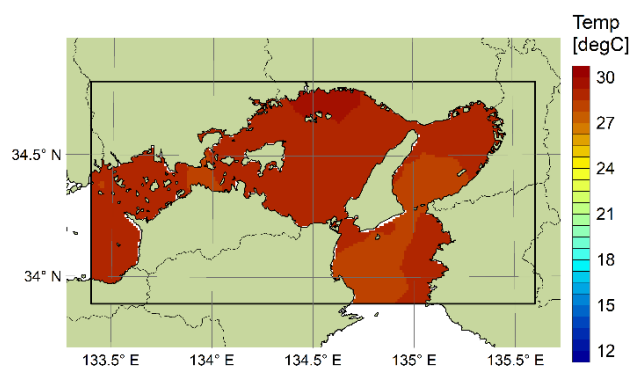
Fig.3 Flow field in (a) February, (b) May, (c) August and (d) November.



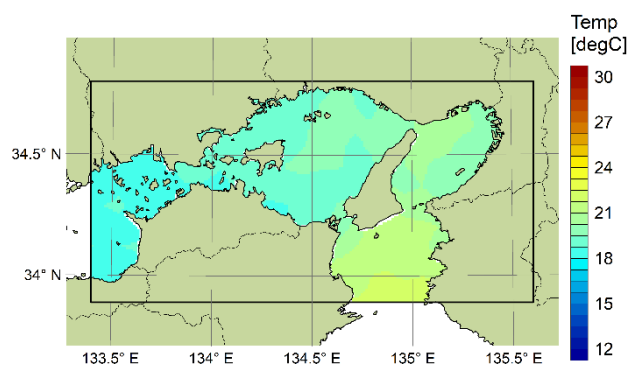
(a)



(b)

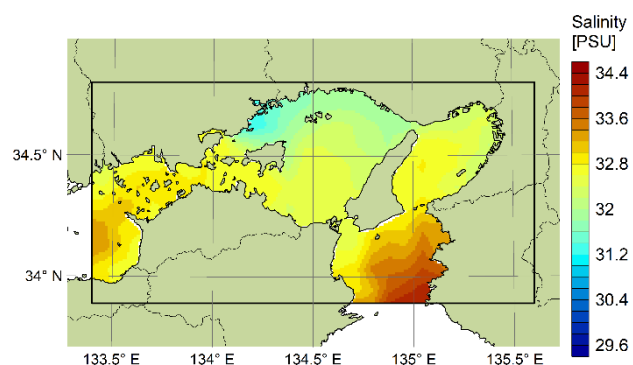


(c)

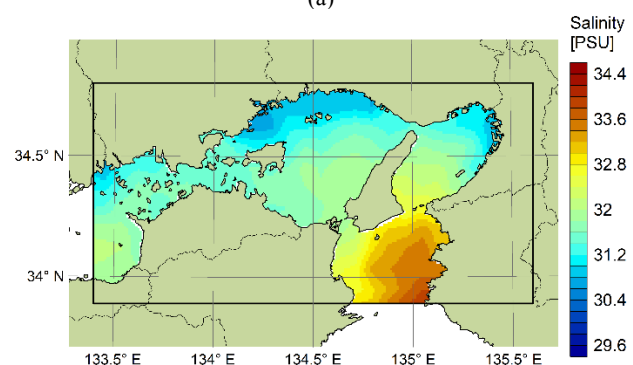


(d)

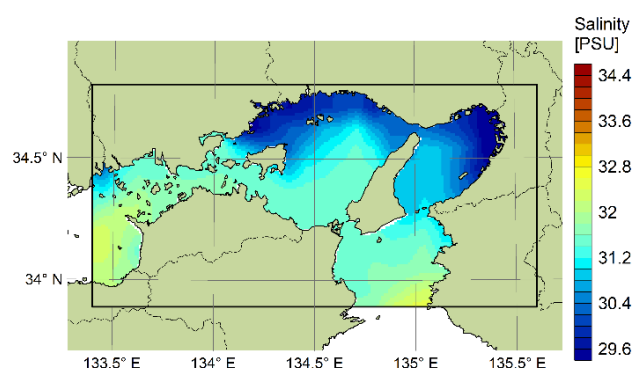
Fig.4 Surface temperature in (a) February, (b) May, (c) August and (d) November



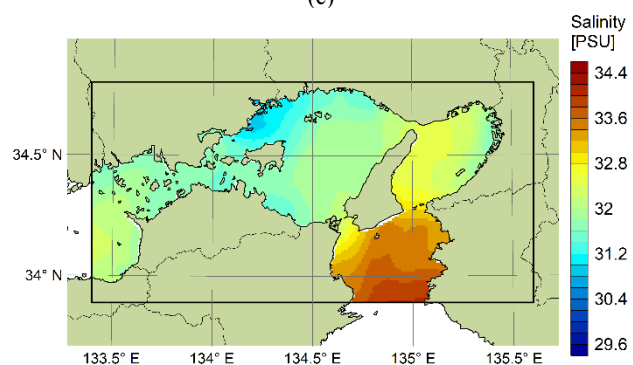
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.5 Salinity in (a) February, (b) May, (c) August and (d) November

2.2 再現性評価

再現性評価の結果として、**Fig.6** に播磨灘における表層の水温および塩分濃度の観測値と計算値の比較を示す。表層水温については、計算期間を通して季節変動を非常に良く再現できた。また、表層塩分濃度については、5 月にやや過小評価された場合もあるが、季節変動を概ね良好に再現した。

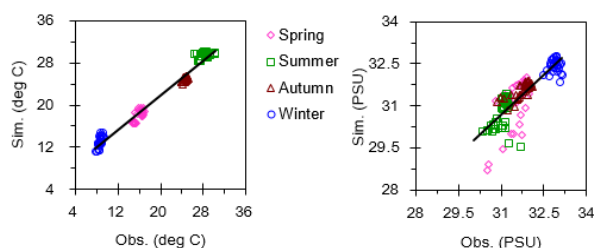


Fig.6 Comparison of measured value with simulating value about surface temperature (left) and salinity (right)

2.3 前方流跡線解析

Fig.7 に加古川河口付近からの前方流跡線の通過位置を、ROMS の各水平格子で集計した解析期間中の確率分布で示す。加古川河口付近からの前方流跡線は、各 30 日間の解析期間において、一部は明石海峡を通過して大阪湾へと流出したが、大部分は播磨灘に留まっていた。解析期間内で流跡線が播磨灘に留まる確率は、2 月、5 月、8 月、11 月でそれぞれ 80%、86%、68%、92%で、平均 81%であった。8 月は他の季節に比べて値が小さく、また 11 月で高いのは、前述した流れ場のように、8 月は西から北への流れが主流であり、また 11 月は全体的に流れの速度が大きいことが原因と考えられる。以上より、加古川河口付近から微量物質が継続的に放出された場合、放出後～30 日間において、放出された物質の 80%程度は播磨灘に滞留すると考えられる。

3. 結論

本研究の結論を、以下にまとめる。

- 領域海洋モデルが播磨灘における水温、塩分濃度を良好に再現できることを示した。
- 播磨灘における微量物質の輸送特性として、加古川河口付近からの放出物質は、放出後～30 日間において、80%程度が播磨灘に滞留することを示した。

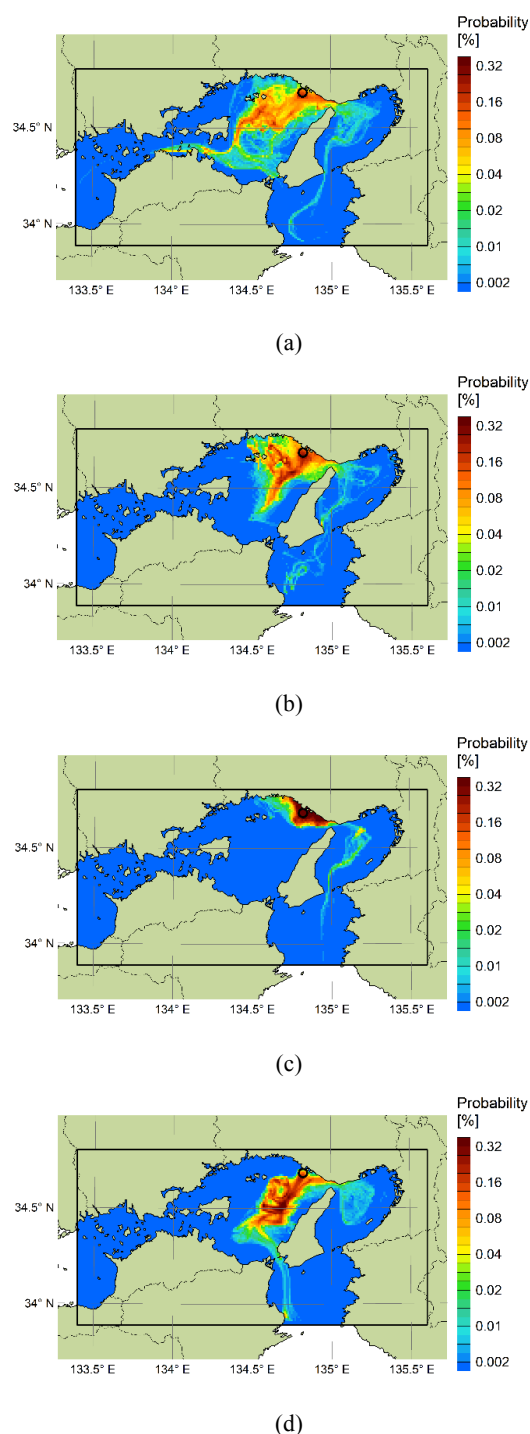


Fig.7 Probability of trajectory pathway in (a) February, (b) May, (c) August and (d) November

参考文献

- 1) Hedstrom, K, 2018, Technical Manual for a Coupled Sea-Ice/Ocean Circulation Model (Version 5). U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Alaska OCS Region. OCS Study BOEM 2016-037. 169 pp
- 2) Miyazawa, Y., A. Kuwano-Yoshida, T. Doi, H. Nishikawa, T. Narazaki, T. Fukuoka, and K. Sato, 2019: Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio Confluence region, Ocean Dynamics, 69, 267-282.

再帰反射材の配置の工夫が街区の日射反射特性に与える影響

Effect of Layout of Retro-Reflection on Solar Radiant Reflection Characteristics of City Block

○二 岡 佳 子 (奈良女子大学)

吉田 伸治 (奈良女子大学)

Kako FUTAOKA*1 Shinji YOSHIDA*1

*1 Nara Woman's University

The purpose of this research is to evaluate the effect of layout of retro-reflective (RR) materials on solar radiant reflection characteristics of city block by a model experiment. We carried out comparison of the distributions of both incident and reflected energy between combinations of installing materials to both the exterior building wall and the ground surfaces in each case by using the model experiments. From the investigation, it was found that installing the RR materials to the building and the ground surfaces improved the solar radiant reflection performance of the city block, and also strengthened the directivity of the reflection.

はじめに

年々深刻化するヒートアイランド現象に対して、様々な対策が提案・導入されている。その中の一つとして、街区の蓄熱量及び冷房負荷を削減するために建物外表面を高反射率化することが挙げられるが、これを低層面や壁面に適用すると照り返しに伴う周辺環境の悪化が懸念される。近年、この照り返しの緩和が期待される再帰反射材の建材利用に関する研究が行われている¹⁾。再帰反射材は、入射した光を再び元の入射方向に再帰させる特性を有している。しかし Fig. 1 に示すように、再帰反射材の反射光のうち再帰反射成分となる割合は入射角度によって大きく変化する。入射角が小さいときは主に再帰反射するが、入射角が大きくなると再帰反射成分は著しく低下し、ほとんどが鏡面反射する²⁾。つまり、太陽高度の高い夏季正午付近の時間帯においてはその効果を十分に発揮できず、建物の高反射率化と同じく、照り返しにより周辺環境が悪化する可能性がある。この課題に対して Beatrice³⁾ らは、再帰反射材の配置の工夫によって街区の日射反射性能を向上させる方法を調査しており、Fig. 2 のような配置を提案している。本研究では Beatrice らとは異なる再帰反射材・条件の模型実験、並びに数値解析を行うことにより、再帰反射材の配置の工夫が街区の日射反特性へ及ぼす影響を分析する。本報では模型実験の結果を報告する。

1. 実験方法

奈良女子大学 E 棟 4 階の暗室にて街区を模した模型を設置し、入射光・反射光を測定する。実験風景を Fig. 3 に示す。測定には二つのフォトダイオードを組み合わせた自作測定装置を用いた。測定装置からの出力はデータロ

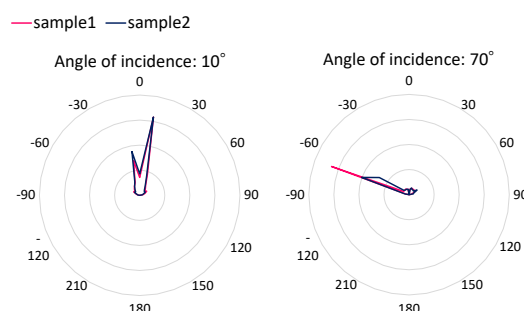


Fig.1 Angular distribution of reflected radiation from the retro-reflective materials²⁾

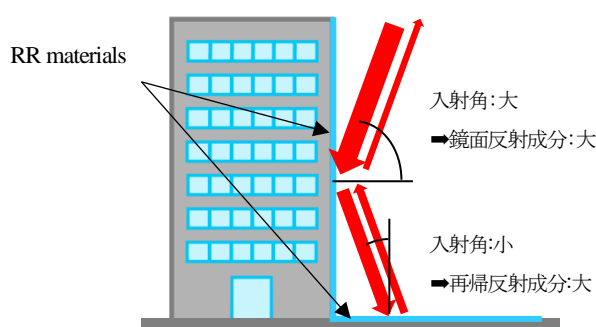


Fig.2 Conceptual diagram concerning effects of installing multi retro-reflective materials proposed by Beatrice et al.³⁾

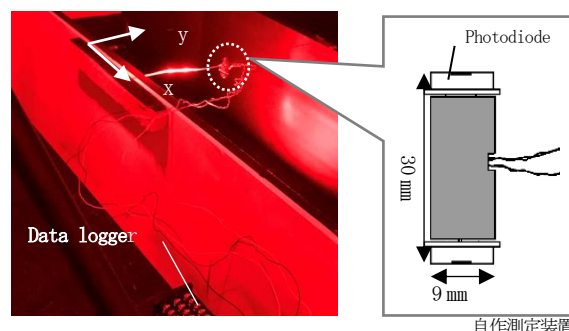


Fig.3 Photo of study site for the model experiment

ガーに 500ms の間隔で記録され、結果の評価にはこれらのデータの 20 秒平均値を用いた。

2. 測定装置の動作確認と試料の反射特性把握

2.1 実験概要

まず予備実験として、自作測定装置の動作確認を行った。反射の様子が推定される黒色塗料と光沢のない白紙の入射光・反射光を測定し、その結果により動作確認を行う。また、同条件下で再帰反射材を測定することにより本実験に使用する再帰反射材の反射特性を把握する。

2.2 実験概要

模型の平面図を Fig. 4 に、立面図を Fig. 5 に、測定範囲内の測定点詳細図を Fig. 6 に示す。黒色塗料を塗ったスチレンボードの床面の上に、30 cm 間隔で光沢のない黒紙で覆った 2 枚の壁を配置した。床面に設置した試料へ入射仰角 20° でコリメートライトを照射し、測定範囲内 49 点における入射光・反射光を測定する。

2.3 測定結果・考察

各試料の入射光・反射光の測定結果について述べる。結果に使用した各試料の値はそれぞれの入射光強度で基準化したものである。以下に基準化の手順を示す。

- 1) それぞれの試料において、直接光が入射した位置を定める。本実験では Fig. 7 の入射光の測定結果より 0.3V 以上の値を検出した点を、直接入射位置とした。
- 2) 直接入射位置の測定値の平均値 \bar{x}_B 、 \bar{x}_W 及び \bar{x}_{RR} を求める。 $\bar{x}_B=0.447$ 、 $\bar{x}_W=0.467$ 、 $\bar{x}_{RR}=0.450$ だった。

\bar{x}_B : 黒色塗料の直接入射エネルギー平均値[V]
 \bar{x}_W : 白紙の直接入射エネルギー平均値[V]
 \bar{x}_{RR} : 再帰反射材の直接入射エネルギー平均値[V]

- 3) 各測定点の入射光・反射光の値をそれぞれの平均値で除したものを基準化した値として扱う。

Fig. 8 にそれぞれの入射光・反射光強度の水平分布を示す。入射光はどの試料においても入射位置でのみ光を検出し、値もほぼ同じ結果となった。反射光について分析する。黒色塗料は多くの光を吸収したためほとんど検出されなかった。白紙については床面照射位置をピークとした同心円状の分布を示した。これらの結果から自作測定装置による光の検出に異常がないことが確認できた。一方、再帰反射材からは再帰反射位置と鏡面反射位置にほぼ同程度の強い値を検出した。この結果より、本研究に使用した再帰反射材は入射角 20° 時には鏡面反射と再帰反射成分が同程度となる反射特性を有していることが分か

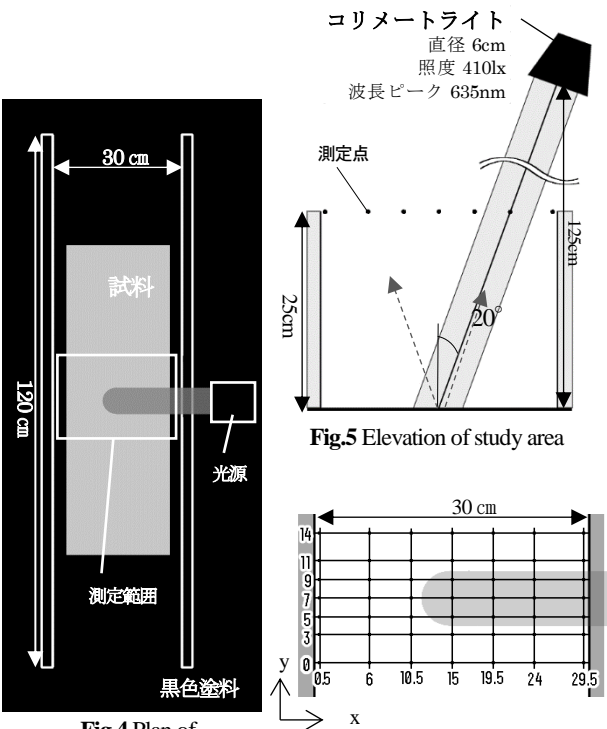


Fig.4 Plan of the study area

Fig.6 Layout of measurement points

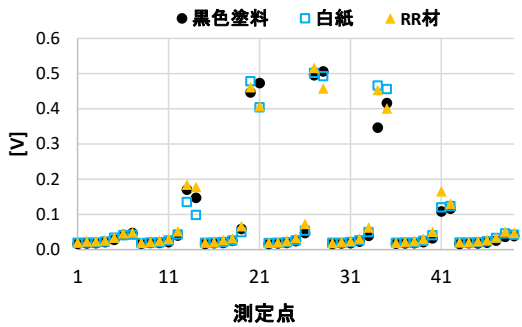


Fig.7 Distributions of output voltage of the incident lighting

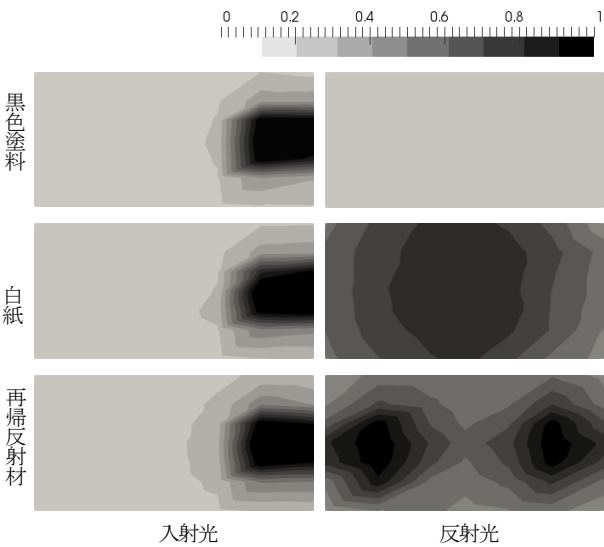


Fig.8 Horizontal distributions of both the incident and the reflected lighting 注1)

った。3種の試料を比較すると、反射強度のピーク値は再帰反射材が最も大きく、入射光と同程度の強度を検出した点もあった。一方、測定範囲内49点の測定値の合計である総合上向き反射エネルギー量[V]は白紙が最も大きい結果となった。これらの結果より、本実験に用いる試料においては、白紙は再帰反射材よりも高い反射率を有すると考えられる。

3. 再帰反射材の配置の工夫

3.1 実験概要

実験条件を Table1 に、対象模型の立面図と測定点詳細図を Fig. 9, 10 に示す。照射壁面へ入射仰角 70° でコリメートライトを照射させ、各条件の入射光・反射光を測定する。本実験では case2 を基本ケースとして定めた。これは床面を地表面、照射壁面を建物外表面と想定すると、一般的な街路空間の建物外表面に再帰反射材を設置した場合に相当する。また case1 は一般的な建築材料で被覆された外表面を想定したケースに相当する。case1, 2 の比較により入射仰角 70° の時の再帰反射材の壁面設置効果を評価する。一方 case3, 4 は、case2 において懸念される建物外表面に用いた再帰反射材からの照り返しによる影響を緩和させることを意図したケースである。case3 は、床面にも再帰反射材を併用することにより建物壁面からの鏡面反射成分を再び上方へと再帰反射させることを意図している。case4 は床面を完全拡散型の高反射材を用いて上方へと日射を反射させることを意図している。case2 ～4 の比較により再帰反射材の配置工夫が街区の日射反射特性に与える影響を分析する。

3.2 測定結果・考察

各ケースの入射光・反射光の測定結果について述べる。結果に使用した値は予備実験と同様の手順で基準化したものである。Fig. 11 の入射光の測定結果より、本実験では 0.35V 以上を直接入射位置とした。

Fig. 12 に計測された入射光・反射光強度の水平分布を示す。また、Fig. 13 に AA' 断面における反射強度の分布を、Fig. 14 に BB' 断面における反射強度の分布を示す。Table2 には各ケースの反射光の最大強度と総合上向き反射エネルギー量をまとめた。入射光はどのケースにおいても同様の結果となった。反射光について分析していく。case1, 2 の総合上向き反射エネルギー量は同程度で、分布も非常に似ていたが、case2 においては再帰部分に分布がやや集中する結果となった。特に壁面近傍(x=0.5)での推移が顕著である。予備実験の結果より示唆された、再帰反射材よりも白紙の反射率が高いことを踏まえると、壁面が白紙である case1 の方が全体的に case2 よりも強い強度を示すものと予想されたが、本実験における両者の差はわずかとなった。これらのことから、本実験に使用し

Table1 Experimental cases

	照射壁面	床面	対向壁面
case1	白紙	黒色塗料	黒紙
case2	再帰反射材	黒色塗料	黒紙
case3	再帰反射材	再帰反射材	黒紙
case4	再帰反射材	白紙	黒紙

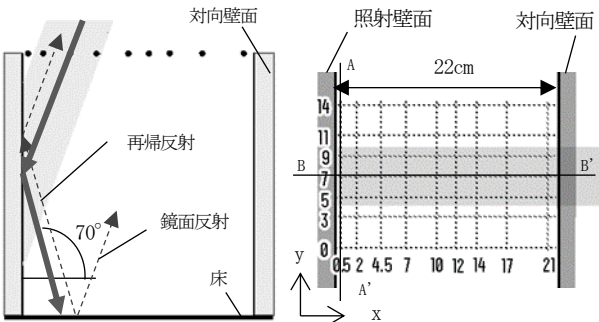


Fig.9 Elevation of study area Fig.10 Layout of measurement points

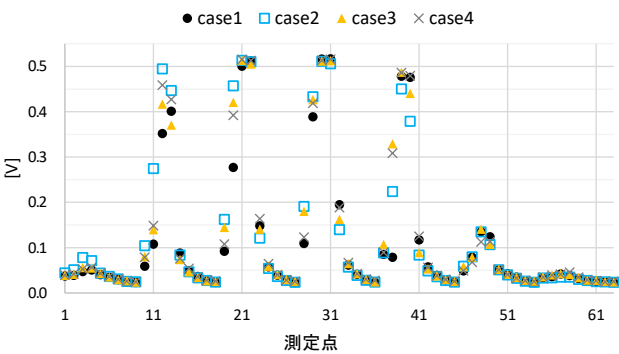


Fig.11 Distributions of output voltage of the incident lighting

Table2 Maximum value of reflection intensity
and total upward reflected energy

	case1	case2	case3	case4
max[-]	0.86	0.89	0.93	0.89
total[V]	12.46	12.26	18.78	18.90

た再帰反射材は入射仰角 70° の場合でも、少ないとはいえ再帰反射が生じていると考えられる。再帰反射材を併用した case3 では、case1, 2 よりも総合上向き反射エネルギー量が増え、かつ再帰反射位置、床面からの鏡面反射位置の二点にピークが生じた。このうち再帰反射成分に関しては照射壁面中央近傍(x=0.5, y=7)で顕著であった。再帰反射材の併用により総合上向き反射エネルギー量を増加させることができたといえる。最後に case4 では床面に用いた白紙への入射位置を中心とした同心円状の分布を示した。ピーク強度は case3 より小さく case1, 2 と同程度である。しかし総合上向き反射エネルギー量は case3 と同程度の結果となった。床面を高反射材にすることで、

街区全体の反射性能が底上げすることができると考えられる。また case3, 4 の結果から、再帰反射材を併用することで、街区の反射光の指向性が強まることがわかった。

4. まとめ

フォトダイオードを用いた模型実験により、再帰反射材の配置の工夫が街路空間における日射反射特性に与える影響を分析した。実験結果から、再帰反射材を二平面に併用することで、街区の日射反射性能の向上、及び反射光の指向性が強まることが分かった。

今後は、数値解析により様々な条件下での、再帰反射材の配置の工夫による街区の日射反射特性への影響を評価する予定である。本報での成果は、それら様々な条件下で再帰反射材の効果を評価する際の、結果の妥当性を考慮する参考データとして活用する。また、本報では光のみを扱っていたが、今後の解析では温熱環境への影響についても分析する予定である。

参 考 文 献

1) 酒井英樹, 長村一雄, 井川憲男:再帰反射材の照り返し抑制効果, 日本建築学会構造系論文集第 630 号, pp1239-1244, 2008. 8

2) Federico Rossi et al.: Retroreflective façades for urban heat island mitigation: Experimental investigation and energy evaluations, Applied Energy volume145, pp. 8-20, 2015. 5

3) Beatrice Castellani et al.: Investigation On The Optic-Energy Interaction Between Retro Reflective Façades And Pavement In Urban Canyons, PROCEEDING of 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE on COUNTERMEASURES to URBAN HEAT ISLANDS, SUB10_FP-0006, 2016

注 1) 作成ソフトの問題上、スケールバーと図の色が対応していない。

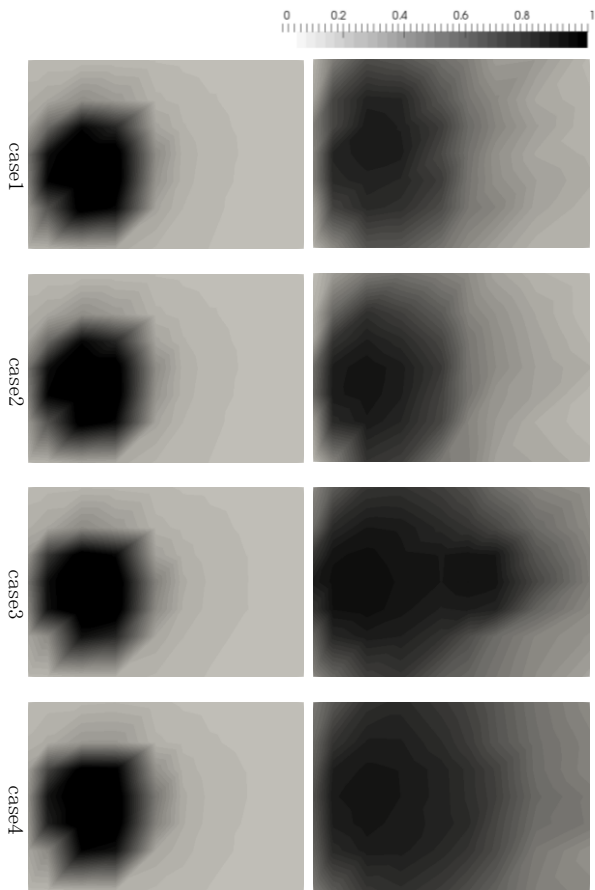


Fig.12 Horizontal distributions of both the incident and the reflected lighting

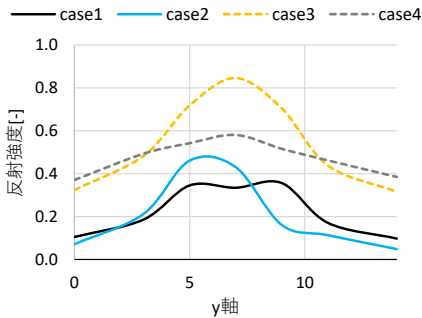


Fig.13 Distributions of intensity of the reflected lighting on the AA' section

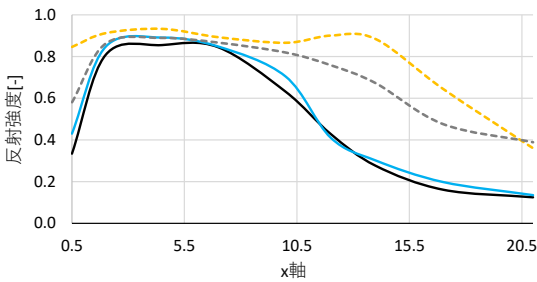


Fig.14 Distributions of intensity of the reflected lighting on the BB' section

歴史的市街地の街区内環境に関する建築高さと空地に着目した改善提案と効果検証 Suggestion and Verification of Improvement Focusing on Building Height and Open Space for the Environment in the Traditional Residential Area

○有働 堇 (立命館大学) 近本 智行 (立命館大学) 土井 脩史 (京都橘大学)

Sumire UDO*¹ Tomoyuki CHIKAMOTO*¹ Shushi DOI*²

*¹ Ritsumeikan University *² Kyoto Tachibana University

The purpose of this research is to propose the shape of buildings and open space in the urban area where different height-restricted areas are mixed, considering the architectural planning viewpoint and the landscape policy viewpoint. In the previous report, the wind environment was investigated by wind tunnel experiments, and the accuracy verification of CFD analysis were conducted. In this report, the improvement measures are proposed, and a detailed verification considering the temperature using CFD is conducted. Then, the effectiveness of the proposed model is evaluated by quantitative analysis.

はじめに

都市部で通風を確保することは、交通排熱や空調機屋外機の排熱を排出するために重要である。京都市では、昔から町家のある街区では空地の連担により風通しを確保し、夏季の快適性が維持されてきた。しかし近年の京都市では町家（低層建築物）や中高層建築物の混在により、環境が悪化している箇所が発生している。

市街地の環境とその地域の特色を関連付けた研究として、梅干野ら^{文1)}は、歴史的な街並を有する市街地を対象とし、隣接敷地の空地化による熱放射環境の悪化が、夏季の建物熱負荷の増大をもたらすことを示した。林ら^{文2)}は、沿岸部の木造密集市街地を対象とし、市街地形態と気温・風の関連分析により風通し改善対策モデルを検討している。

一方、本研究では、異なる高さ制限地区が混在する市街地を対象とし、町家の空間構成を踏まえた周囲の建物形状や空地のあり方を提案することを目的としている。また、伝統的空間構成（建築と空地の関係）の継承という建築計画的視点や高さ規制中心の景観政策の視点を取り入れつつ、街区内環境改善に対する多角的な検討を試みている。既報^{文3)} 文4)では、風洞実験により京都市都心部の風環境を調査し、その結果を用いて CFD 解析条件の決定のための精度検証について報告した。

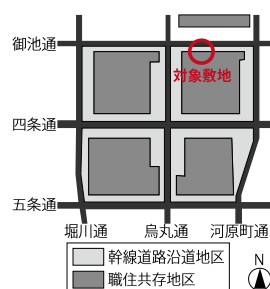


Fig.1 Location of target site



Fig.2 Status of target site

本報では、強風現象の発生および通風不足の両問題の改善を目指した具体的な環境改善モデルを提案し、CFDを用いて温度変化を考慮した詳細な検証を実施する。そして定量的な分析により、街区内環境改善に対する提案モデルの有効性を評価する。

1. 対象敷地

対象敷地は幹線道路沿道地区と職住共存地区の境界に位置（御池通沿い南側、姉小路通と柳馬場通の周辺、直径320m）する（Fig.1）。対象敷地を含む京都市都心部の建築高さ制限は、幹線道路沿道地区で31m、職住共存地区で15mである^{文5)}。対象敷地は、京都市都心部の中でも伝統的な町家と多くの既存不適格建築物が混在しているエリアに位置する（Fig.2）。

2. 熱データの収集

2.1 概要

既報^{文3)} 文4)では風環境を中心に検証を実施してきたが、CFDで詳細に環境を検証していくにあたり、熱データを加えることが重要である。そこで、実測により対象敷地の熱データを収集する。得られた結果をCFDにおける境界条件設定の資料として用いる。熱データの収集は、赤外線サーモグラフィカメラ（InfReCR500EX-S）を用いて熱画像を撮影することにより実施した。

2.2 測定日時および測定箇所

測定は2019年7月30日の8時、12時、16時、20時に実施した。マンション屋上から屋上面日なたおよび屋上面日かげ（町家瓦屋根、コンクリート屋根）、歩行により壁面日なた、壁面日かげ（各方位）、道路日なたおよび道路日かげ、町家にて庭の地表面を測定した。

2.3 実測結果

測定箇所のうち、代表的な3か所における各時刻の外

気温と熱画像を Fig.3 に示す。時刻によって屋根面、壁面、道路の地表面の温度は大きく変化するが、町家の庭の地表面は温度が低く、変化も小さい。

3. 改善街区の提案・解析

3.1 解析概要

解析対象は、風洞実験^{文3)}と同様のエリアとする。CFD の計算条件およびメッシュ分割条件は、CFD 精度検証^{文4)}と同様とする。物体初期温度および流入風温度は、実測時の外気温 34.4℃に設定する。流入風向は、北側が幹線道路となることを想定した北向き、南側が幹線道路となることを想定した南向きの2方位とする。

熱境界条件は、熱データの収集における熱画像から得た表面温度を用いた。Table.1 に熱境界条件となる表面温度^{注1)}、Fig.4 に解析モデルに設定した表面温度分布を示す。表面温度は、コンクリート屋根面が 61.9℃、町家の庭の地表面が 28.8℃となり、温度差は約 33℃である。

3.2 改善策の提案と解析ケース

Table.2 に提案する改善策、Table.3 に解析ケースを示す。評価領域における強風現象や通風不足といった問題の改善に有効であると予想した改善策を提案する。解析ケースは、現状モデル、建築高さ規制を適用したモデルに加え、改善策 A～D を組み合わせた9ケースとする（以下、流入風向北のケースを Case0N、流入風向南のケースを Case0S のように表記する）。

3.4 解析結果

Fig.5 に Case0N の解析結果を示す。東側の街路の風速は 2.0m/s 以上と大きかったが、街区内は風速 0.2m/s 以下

で気流が滞っており、気温が 40℃以上の地点があった。Fig.6 に個別的なエリア（Fig.5 (a) 点線枠）における流入風向北の解析結果を示す。Case0N と比較した時の、各ケースでの風の流れ・温度の残留または拡散の様子について考察した。Case1N では、高層建築物の間から流入する

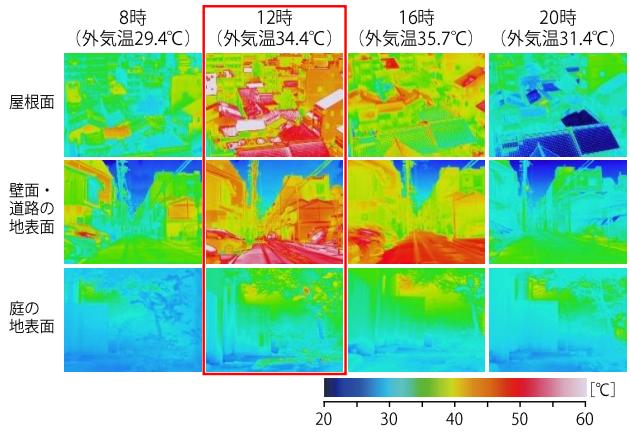


Fig.3 Measurement result

Table.1 Thermal boundary condition		
境界面		表面温度 [℃]
屋根面	コンクリート	61.9
	町家	52.8
壁面	北側	38.5
	東側	43.6
	南側	44.2
	西側	43.2
地表面	道路・駐車場	54.3
	街区	38.4
	町家の庭	28.8

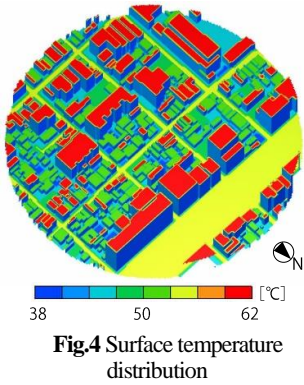


Fig.4 Surface temperature distribution

Table.2 Improvement measures for wind environment

	A_中間高さ	B_風穴	C_隣棟間隔	D_空地の連担
改善策	幹線道路沿道地区と職住共存地区の間に中間高さのゾーンを設ける。	建物に風穴となるフロアを設ける。	建物の隣棟間隔を広げて空地を設ける。	町家付近の空地を連担させる。
概要				
街区への適用				
改善効果	建物高さの差が小さくなり、強風現象の発生が抑制される。	“風の抜け道”を形成し、高層建築物による風の遮断をなくす。通りに沿って隙間なく建物を見て壁状の建物群で職住共存地区を囲むよりも、職住共存地区への風通しが良くなる。		町家本来の通風性能を活用する。

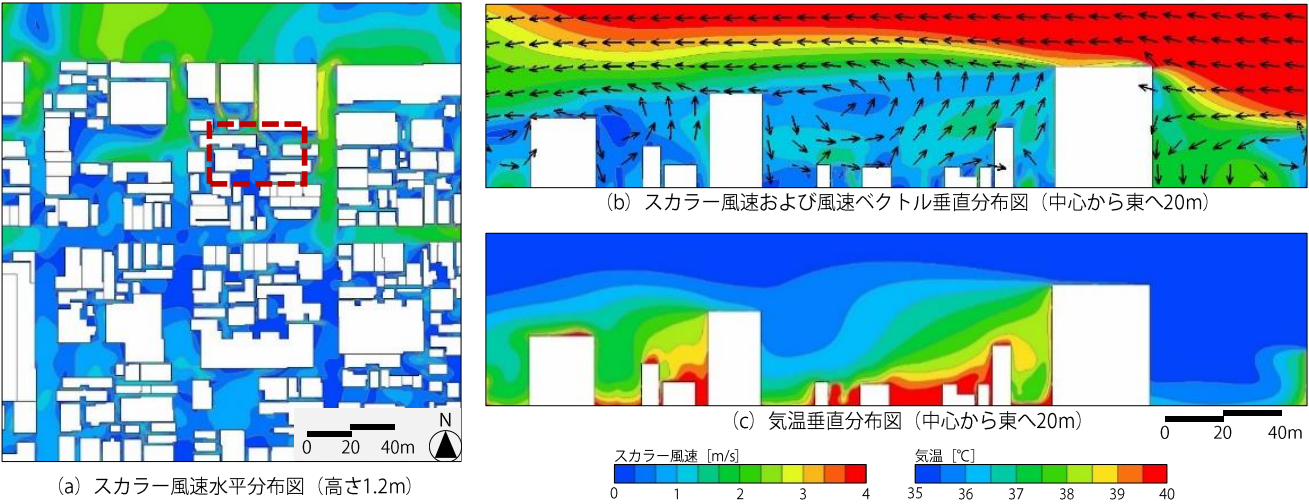


Fig.5 Analysis results on Case0N (current model)

風が減少した。それにもない38.5℃以下の気温の低い範囲がなくなり、比較的気温の高い範囲が広がっていた。Case2Nでは、風速、気温ともに大きな変化は見受けられなかった。Case3Nでは、風穴を設けた建物の後流側に位置する建物付近の風速ベクトルが逆向きとなり、気温もその建物に沿って低下した。これは、風穴を設けたことにより、町家上空の風を低い位置から街区内に引き込んで逆流となったためと考えられる。また、東側の街路からの流入が減少した。Case4Nでは、高層建築物の間（隣棟間隔を広げた箇所）からの風の流入が増加した。街区内の気温は低下し、41℃以上となる範囲が減少した。これは、高層建築物の間から引き込まれた風が、町家周辺まで到達して熱を拡散させているためだと考えられる。Case5Nでは、空地を通過する風速が大きく増加したが、気温の低下はあまり見受けられなかった。

Table.3 Calculation case	
ケース	解析モデル
Case0	現状モデル
Case1	高さ規制適用モデル
Case2	改善策A_中間高さ
Case3	改善策B_風穴
Case4	改善策C_隣棟間隔
Case5	改善策D_空地の連担
Case6	改善策A+改善策D
Case7	改善策B+改善策D
Case8	改善策C+改善策D

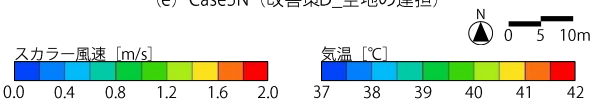
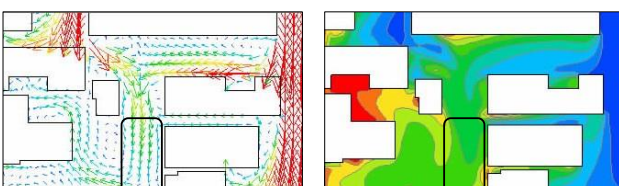
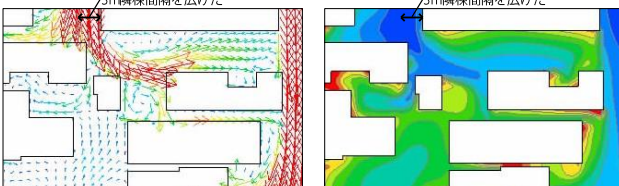
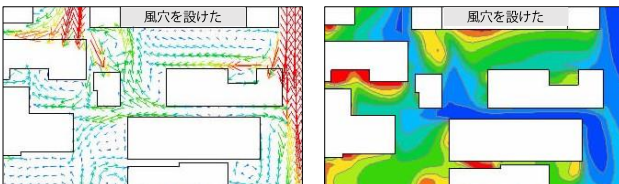
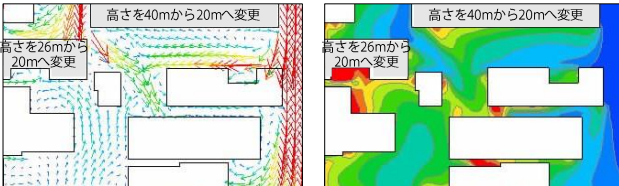
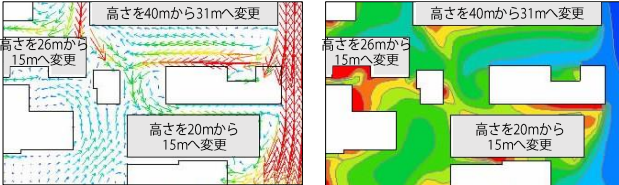


Fig.6 Analysis results (Left: Wind speed Right: Temperature)

4. 改善効果評価・分析

4.1 評価軸

外部空間の風環境、地表面の熱除去、建物内部の通風性能の3つの観点から解析結果を定量的に評価する^{注2)}。

(1) 風環境の評価

村上^{文6)}によって提案された気温を考慮した風環境評価尺度を評価指標とし、日平均風速0.7m/s以下で「弱風による非適風」、1.7m/s以上で「強風による非適風」とする。各ケースにおける風環境評価の割合を算出した結果をFig.7に示す。

(2) 熱除去の評価

対流熱伝達によって地表面から奪われる熱量を算出^{注3)}し、地表面の受熱量^{注4)}に対する除去熱量の割合で評価す

る。本報では、地表面温度 54.3°C を設定している道路地表面について、熱除去率を算出した。各ケースにおける熱除去率の平均を Fig.8 に示す。

(3) 通風性能の評価

任意に 6 つの町家を抽出し、それらの開口部における風速から換気回数を算出^{注5)}し、通風性能の評価に用いた。各ケースにおける換気回数の平均を Fig.9 に示す。有波^{文7)}の研究より、換気回数 20 回/h で十分に換気されていると判断する。

4.2 評価結果

Case1 (高さ規制適用モデル) では、「非適風」の割合は Case0 (現状モデル) と概ね同様の傾向がみられるが、熱除去率および換気回数は、流入風向北、南ともに低い。Case5 (改善策 D_空地の連担) では、空地の連担による街区内の風通しの促進かつ通風性能の向上を改善効果として期待したが、流入風向北は「弱風による非適風」の割合は約 44% と高く、換気回数は約 6 回/h と最も少なかった。Case6 (改善策 A_中間高さ+改善策 D_空地の連担) では、換気回数が流入風向南は 20 回/h に達しているが、流入風向北は約 7 回/h であり、流入風向南に比べて約 13 回/h 低い結果となった。Case7 (改善策 B_風穴+改善策 D_空地の連担) および Case8 (改善策 C_隣棟間隔+改善策 D_空地の連担) では、流入風向北、南ともに「適風」の割合が高い。また、換気回数は流入風向北では約 12~13 回/h で他ケースよりも多く、流入風向南でも 15 回/h を上回っている。Case5 では改善効果が大きく現れなかったが、それと組み合わせた Case7 および Case8 で評価の高い項目が多かったことから、空地の連担と組み合わせた相乗効果により街区環境の改善に対して高い効果が現れたと考えられる。

5. まとめ

本報では、京都市都心部における街区環境の改善を目的とした街区形状の提案を行い、CFD により温度変化を考慮した検証を実施した。

現状の街区に建築高さ規制を適用した場合 (Case1) は、環境悪化を助長してしまうことを明らかにした。また、町家付近の空地を連担させる提案 (Case5) では、街区内の風通しの促進を改善効果として期待したが、改善効果は得られないことが明らかとなった。一方、風通しを遮っている高層建築物に風穴を設ける提案 (Case3) やその隣棟間隔を広げる提案 (Case4) により、風環境を良好にする効果が得られることが明らかになった。さらに、建物形状の改善策と空地の連担を組み合わせた街区形状 (Case7、8) は、より有効であることを示した。

本研究で提案したような改善策を歴史的市街地に取り入れることにより、「強風による非適風」を抑制しつつ、町家と共存する街区とすることが可能である。

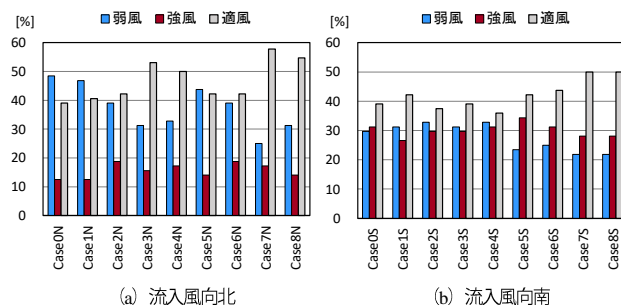


Fig.7 Ratio of "non-suitable wind" and "suitable wind"

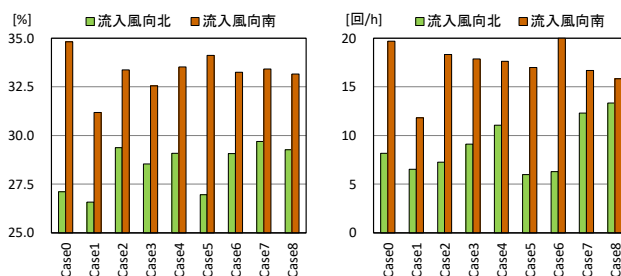


Fig.8 Average heat removal rate

Fig.9 Average ventilation rate

注釈・参考文献

注1) データの信頼性を高めるため、任意の3地点の実測値の平均化し、各境界面の表面温度とする。町家の屋根面は4方位の差が相対的に小さいと判断し、その平均値を境界条件とする。道路・駐車場の地表面は「道路日なた」、街区の地表面は「道路日かげ」、町家の庭の地表面は「町家の庭日かげ」の表面温度をそれぞれ使用する。

注2) 評価に用いた風速は、解析結果から算出した各評価地点の風速比に、実測時 (2019年7月30日) の京都市気象台にて観測された風速 (3.2m/s) を乗じて算出したものとする。

注3) 対流熱伝達による伝熱量の算出には次式を用いた。

$$q = \alpha_c (\theta_s - \theta_f) \quad \alpha_c = 5.6 + 3.9v$$

q : 伝熱量[W/m²] α_c : 対流熱伝達率[W/m²・K]

θ_s : 地表面温度[°C] θ_f : 気温[°C] v : 風速[m/s]

注4) NEDO (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構) の日射量データベース閲覧システムによると7月30日12時の1時間当たりの全天日射量の平均値は2.25MJ/m² (625W/m²) である。

注5) 換気回数の算出には次式を用いた。

$$n = (Q \times 60) / V \quad Q = (1/\sqrt{2}) (1/\alpha A)^2 v \sqrt{(C_1 - C_2)}$$

n : 換気回数[回/h] Q : 通風量[m³/s] V : 室容積[m³]

α : 流量係数 (0.5とする) A : 開口面積[m²] (2m²とする)

v : 風速[m/s] C_1, C_2 : 圧力係数[-] ($C_1=0.7, C_2=-0.4$ とする)

文1) 梅干野ほか: 歴史的な街並を有する市街地における空地化とその環境影響の評価 数値シミュレーションによる空地化が夏季熱環境と建物熱負荷量に及ぼす影響の解析、日本建築学会環境系論文集 第75号 第656号、pp. 899-905、2010年10月

文2) 林ほか: 沿岸部の木造密集市街地における市街地形態が屋外気温と風通しに及ぼす影響、日本建築学会環境系論文集 第79巻 第698号、pp. 349-356、2014年4月

文3) 有働ほか: 歴史的市街地における建築高さと空地に着目した風環境の検証 (その2) 風速風向測定と可視化による京都市都心部の風環境把握、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、E-39、2018年9月

文4) 有働ほか: 歴史的市街地における建築高さと空地に着目した風環境の検証 (その4) 建物形状とメッシュ幅の影響の検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、J-18、2019年9月

文5) 京都市都市計画局: 京都の景観、pp. 41-47、2009年2月

文6) 村上ほか: 気温の影響を考慮した風環境評価尺度に関する研究 一日平均風速と日平均気温に基づく適風、非適風環境の設定一、日本建築学会計画系論文集 第358号、pp. 9-17、1985年12月

文7) 有波ほか: 有効換気回数及び有効窓面積率による住宅の通風性能評価に関する研究、日本建築学会環境系論文集 第78巻 第685号、pp. 277-284、2013年3月

高密度街区における建物の通風設計に関する研究
(その4) 風洞実験と LES 解析によるレイノルズ数効果の検討
Ventilation Design Method of Buildings Located in High Density Block Area
(Part 4) Consideration of Reynolds Number Effect based on Wind Tunnel Test and LES
Analysis

○福山 莞爾 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学)
Lim Eunsu (東洋大学) 小林 知広 (大阪大学)

Kanji FUKUYAMA*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Eunsu LIM*² Tomohiro KOBAYASHI*¹
*¹ Osaka University *² Toyo University

The objective of this paper is the validation of Reynold number effect for some scaled models under 10m/s of approaching wind. This paper first shows the results of the wind tunnel test to obtain wind pressure coefficient and wind velocity between different scale building models. Based on a study varying modeled buildings scale(3-scales), a correlation between scale and Reynolds number is to be shown. Then, the result of CFD by LES compared with the experimental value, such as wind pressure coefficient and wind velocity by wind tunnel test, is to be shown.

はじめに

近年、オフィスビルや商業施設等において省エネルギーやBCPの観点から自然エネルギーの利用が注目されている。その中でも自然換気は、中間期の冷房負荷の削減が期待できる。しかし、中高層建築が密集した都市の市街地（以下、高密度街区）では建物間の気流の流れが複雑になり、換気量予測が困難である。換気量をより正確に予測するには、建物壁面の風圧係数及び壁面周辺の気流性状の情報である。既報¹⁾では、高密度街区の建物を対象に、風圧係数及び風速の取得を目的とした風洞実験を行ったが、模型の縮尺が1/1000と小さかったためレイノルズ数が小さく、都市の風を模擬できていないか疑問が残った。そこで、本報ではレイノルズ数が気流場に与える影響の検討を目的とし、風洞実験で模型の縮尺を変え、それらを対象に風圧及び風速を測定した。結果とLESにより同様の条件で解析を行った結果から得られた知見を報告する。

1. 街区のモデル化の概要

Fig.1に街区モデルの概要を、Fig.2に測定対象とした街区モデルを示す。竹林ら²⁾の大阪・心斎橋地区を研

究の対象とする道路幅と建物高さによる風通しに関する研究では、グロス建蔽率が48.0%であった。本研究では、大阪市中心部のオフィスビルが並ぶ街区を参考にモデル化し、測定対象街区モデルを、Fig.2のように異なる3つのスケールを設定する。また、既報での条件設定を引き継ぎ、測定街区(Fig.1 Target block)以外の周辺街区は前述した値に近いグロス建蔽率が51.8%になるものとする。ここで、グロス建蔽率は建築面積の合計を道路等の公共用地を含めた全体面積で除したものである。

2. 風洞実験による風圧係数・風速の取得

2.1 風洞実験の概要

街区内の気流性状を把握するために、風圧係数及び建物間の風速の取得を目的とした風洞実験を行った。Fig.3に風洞断面図及び模型配置図を示す。対象建物及び周辺街区を縮尺1/1000, 1/500, 1/250のそれぞれで再現し、境界層流下で測定を行った。Fig.4にアプローチフローの鉛直速度分布及び乱流強度を示す。風向鉛直方向の風速分布はEq.1に示す、べき乗則におおよそ従う。

$$\frac{U}{U_R} = \left(\frac{z}{H_R} \right)^{\frac{1}{4.2}} \tag{Eq.1}$$

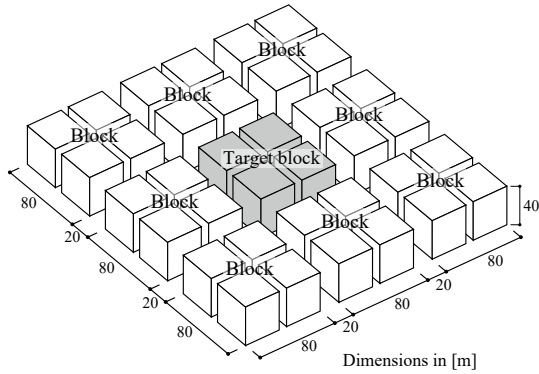


Fig.1 Block model

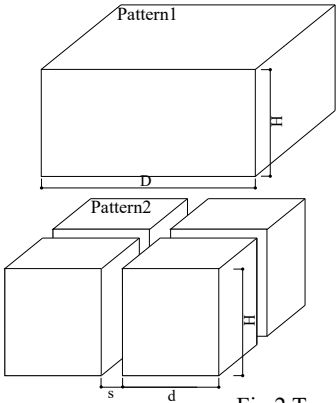


Fig.2 Target block model

Pattern1				
Scale	H	D		
1/1000	40	80		
1/500	80	160		
1/250	160	320		
Pattern2				
Scale	H	d	s	
1/1000	40	36	8	
1/500	80	72	16	
1/250	160	144	32	

Dimensions in [mm]

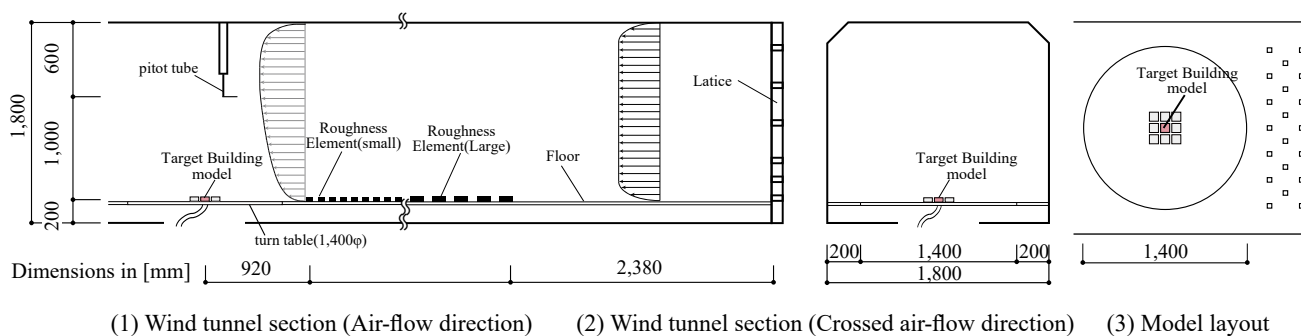
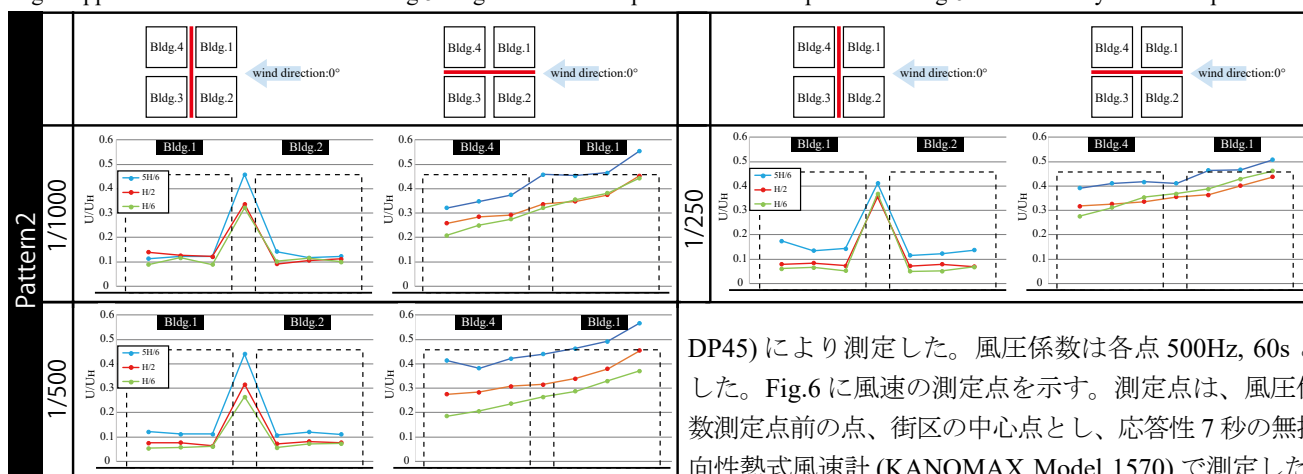
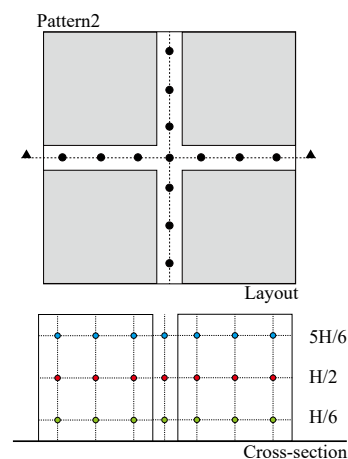
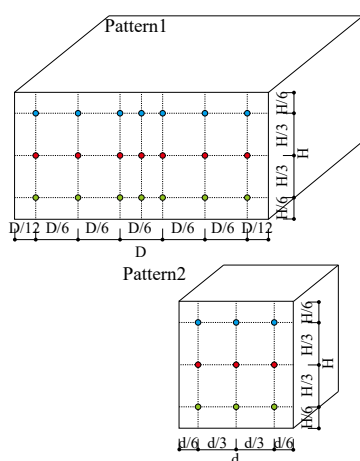
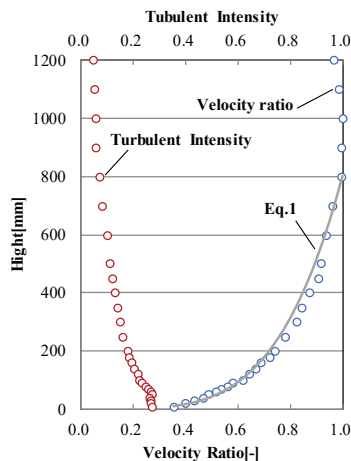


Fig.3 Geometry of wind tunnel test



風洞内に模型を設置しない状態で I 型熱線風速計を用いて 1.0kHz, 60s で測定した。風洞内風速は、床上 1,000mm 高さのピトー管位置で 10m/s に設定した。風圧係数及び規準化風速の基準風速は、実験において測定したピトー管の風速とアプローチフローの風速プロファイルにより算出したものである。また、風洞内基準静圧は、ピトー管静圧とした。Eq.2 に風圧係数の定義式を示す。

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho U_H^2} \quad (\text{Eq.2})$$

2.2 実験条件

Fig.5 に対象建物模型と風圧測定点を示す。測定点は、Pattern1 では壁面 21 点・天井面 5 点、Pattern2 では壁面 9 点・天井面 1 点とし、微差圧計 (Validyne 社、

DP45) により測定した。風圧係数は各点 500Hz, 60s とした。Fig.6 に風速の測定点を示す。測定点は、風圧係数測定点前の点、街区の中心点とし、応答性 7 秒の無指向性熱式風速計 (KANOMAX Model 1570) で測定した。風速測定は各点 200Hz, 60s とした。また、風速は規準化風速 v とし、その定義式を Eq.3 に示す。

$$v = \frac{U}{U_R} \quad (\text{Eq.3})$$

また、建物間距離 s を代表長さ、各 Case の街区中心の上下 3 点の測定点の風速の平均風速 U_{AVE} を代表風速とする Re 数は Eq.4 で定義される。

$$Re = \frac{U_{AVE} \times s}{\nu} \quad (\text{Eq.4})$$

2.3 風洞実験の結果

(1) 風速分布

Fig.7 に実験で得られた建物間の風速分布を示す。全条件において風の流れ方向の隙間では建物の摩擦で風下側ほど、減衰していくことがわかる。風速が小さな箇所において、例えば 1/1000 に比べて 1/250 では 20 ～

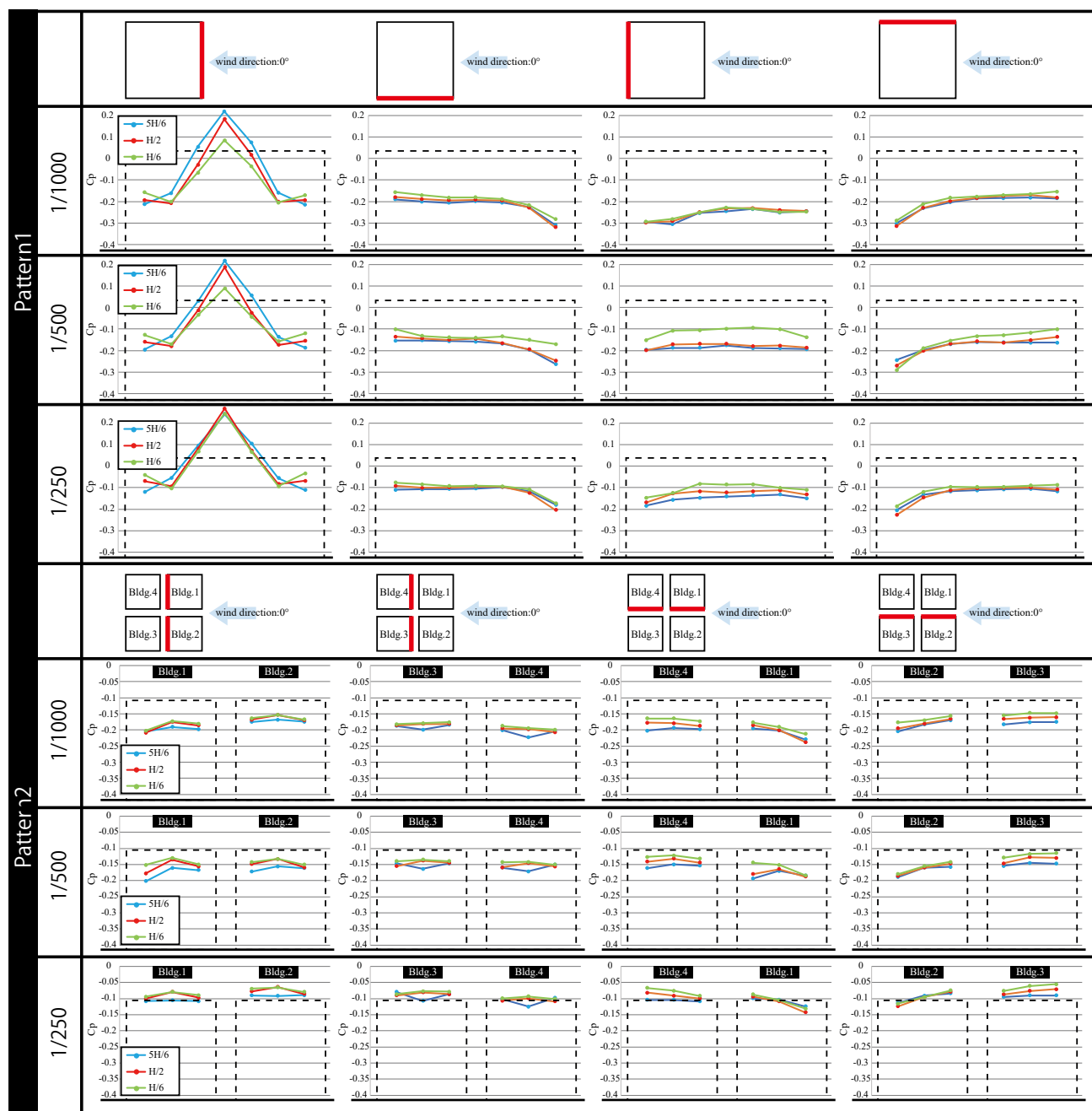


Fig.8 Distribution of wind pressure coefficient on wall surface

25%程度風速が大きくなるといった違いが見られた。

(2) 風圧係数

Fig.8 に実験で得られた風圧係数を示す。Pattern1・Pattern2 両者において、風上側で壁面に当たった風が要因となる剥離流の影響で、主流並行面の風上側の測定点において風圧係数が負圧側に大きくなっていることが分かる。また、概ね Scale 間による風圧係数の絶対値の違いがある程度見受けられ、例えば Pattern2 の主流方向の面では最大 50%程度 1/1000 と 1/250 では差が見られた。これより、気流が狭い隙間を通る際にその長さに影響を受けやすいことが示唆された。

3. CFD 解析と実験値の比較

3.1 LES の解析概要

風洞実験を真値として、LES による解析の精度検証を行うため、風洞と模型を再現したモデルを対象

とした計算を行った。風洞実験においては、3つの異なる Scale を対象にしていたが、本報では LES による解析においては Scale が 1/1000 の結果のみ考察を行う。解析は初めに標準 k-ε モデルを用いて十分に計算を収束させた後、その結果を初期条件とした LES による計算を行った。LES での計算時間間隔は 0.001s とし、計算開始後 1,000 time step(1.0s) を標準 k-ε モデルからの移行期間として計算結果を破棄し、その後の 5,000 time step(5.0s) を本計算とした。流入境界条件は Fig.4 に示す境界層流（基準高さ 1,000mm で 10m/s）を与えた。Table.1 に解析手法を示す。

3.2 解析空間の概要

Fig.9 に LES 解析における流入境界 (x/L=-5)、及び流出境界 (x/L=11)、街区モデルの配置を示す。鉛直方向の長さが 1,000mm(基準高さに等しい)で、奥行き

Table.1 Outline of CFD Analysis		
CFD Code	Fluent19.2	
Turbulence Model	Large Eddy Simulation Smagorinsky-Lilly Model($C_p=0.1$)	
Algorithm	SIMPLE	
Discretization Scheme for advection Term	Central Differencing	
Time Step Size	0.001sec. (1000Hz)	
Time Step	5000	
Boundary Condition	Inlet	Velocity: Profile(Experimental value)
	Outlet	Outflow
	Wall	Two Layer Model of Linear-Log Law
Total Number of Cells	1/1000	2,597,400
	1/500	4,374,400
	1/250	4,327,870

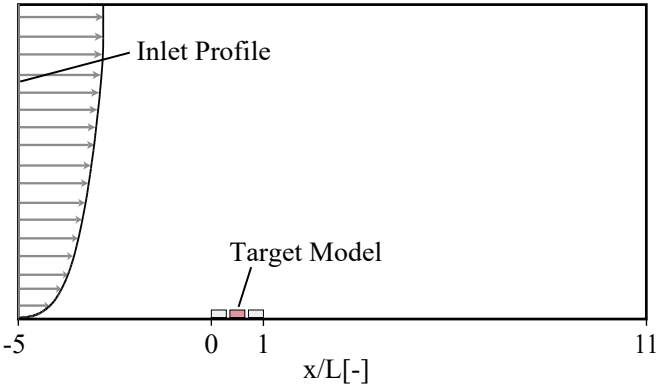


Fig.9 Schmatic cross-section for LES simulation

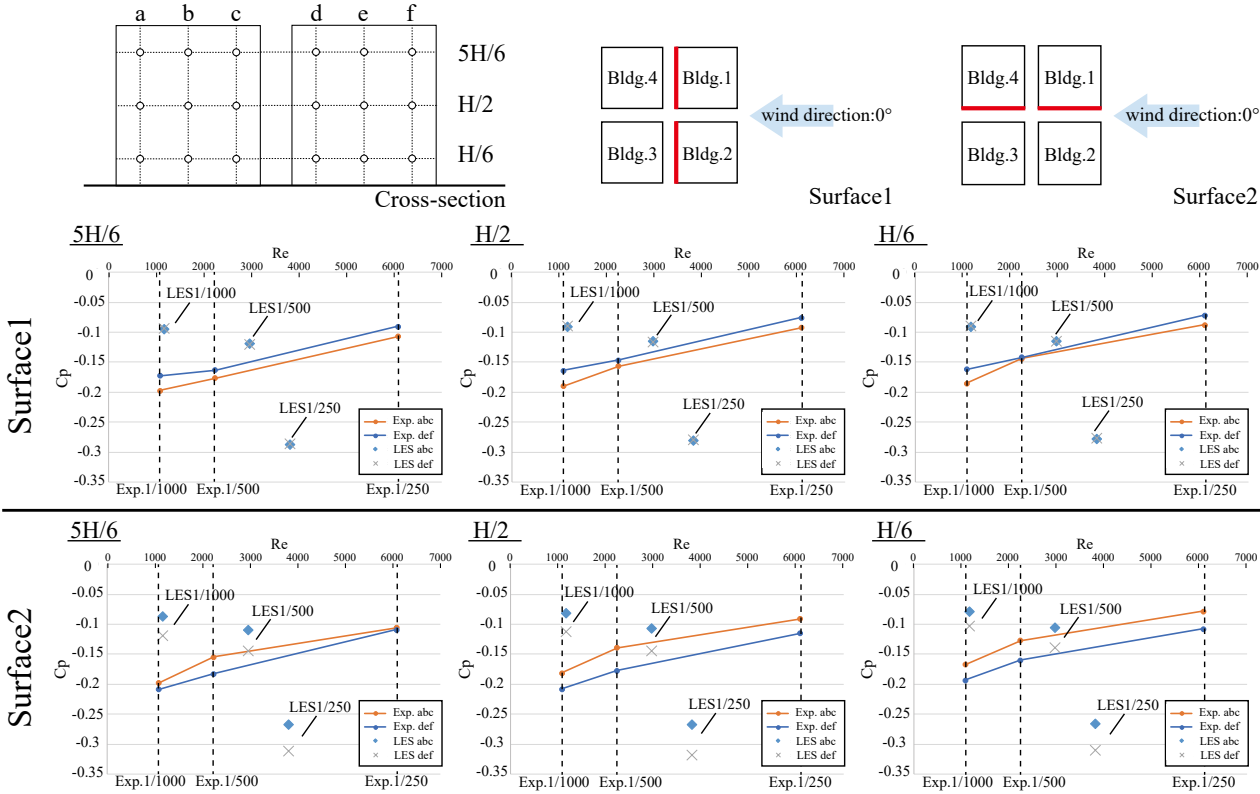


Fig.10 Relationship between C_p and Reynolds number

は1,800mm(風洞の幅)となっている。

3.3 解析結果と比較結果

Fig.10 に、Scale 間で異なる Re 数と実験値及び LES 解析結果の風圧係数の関係を示す。実験では4面測定したが、本報では代表して2面を Surface1,2 として検討し、abc,def それぞれ高さごとの平均で評価する。実験では Re 数が多いと風圧係数は0よりになるが、LES では逆の傾向が見られた。実験と LES の傾向の違いの原因は検討できなかったが、模型の Scale が変わると Re 数の効果で風圧の絶対値に変化があることが分かり、1/1000 と 1/250 では50%以上差が見られた。よって模型の Scale によってはある程度、絶対値が実際とは異なりうることを注意しておく必要があることが示唆された。しかし、2.3 節の風圧係数の分布の結果より、Scale が異なっても全体の分布傾向としてはほぼ同様であることから、差圧で計算を行う換気量算定の観点では絶対値の違いは影響が小さいと考えることもできる。

4. おわりに

本報では実在する高密度街区をモデル化し、風洞実験と LES による解析を通して模型の縮尺と Re 数の関係を評価した。結果としてレイノルズ数が風圧係数や風速の値に与える影響は無視できない程度ではあることが分かった。今後は LES 解析によって、ここに挙げた条件以外のより詳細な部分への検討を行い、街区周辺の気流場の知見を深めていく所存である。

【注釈】

C_p : 風圧係数 [-], ρ : 空気密度 [kg/m³], p : 測定点風圧 [Pa], P_R : 基準動圧 [Pa], v : 規準化風速 [-], U : 測定点風速 [m/s], U_R : 基準風速 [m/s], U_H : 軒高風速 [m/s], Re : レイノルズ数 [-], ν : 動粘性係数 ($=1.421 \times 10^{-5}$) [m²/s]

【参考文献】

- 1) 福山、山中、Lim、小林、佐嶋：高密度街区における建物の通風設計に関する研究（その1）風洞実験による壁面風圧及び建物間風速分布，第48回空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集
- 2) 竹林ら：気候資源としての風の利用を目的とした街路形態街路空間の風通しの関係の分析，日本建築学会環境系論文集，74(635):pp.77-82

CFD 解析による市街地建物表面の対流熱伝達率分布に関する研究
Study on Convective Heat Transfer Coefficient Distribuion
on Urban Building Surface by CFD Analysis

○北風 晴都 (大阪大学) 正会員 袁 継輝 (大阪大学)
山中 俊夫 (大阪大学) 正会員 小林 知広 (大阪大学)

Haruto KITAKAZE*¹ Jihui YUAN*¹
Toshio YAMANAKA*¹ Tomohiro KOBAYASHI*¹
*¹ Osaka University

In recent years, urban canopy models have been developed for the purpose of more accurately predicting phenomena specific to urban areas such as the urban heat island phenomenon. In the urban canopy model, the convective heat transfer coefficient is a parameter that determines the surface temperature outside the city, more appropriate boundary conditions are desirable in predicting the outdoor environment. However, the logarithmic law of temperature differs in the way heat is transmitted depending on how the elements near the wall are divided, resulting in different analysis results. Factors that affect the convective heat transfer coefficient include wind speed, the difference between the surface temperature and the air temperature, etc..In this study, a preliminary study on the effects of mesh division on the surface temperature and convective heat transfer coefficient is conducted by the k-ε model.

はじめに

近年、都市のヒートアイランド現象などの都市域特有の現象をより高精度に予測することを目的として都市環境モデルが開発されている。都市環境モデルにおいて建物外表面における温度の境界条件については適切な手法が確立しておらず、暫定的に対流熱伝達率を一定値とした解析例もみられる。対流熱伝達率は都市外表面温度を左右するパラメーターであるため、屋外環境及び室内熱負荷の予測に際してはより適切な境界条件が望ましい。さらに対流熱伝達率に影響する因子は風速、表面温度と気温の差 ΔT などが挙げられるが、各因子の影響を定量的に検討した例はほとんどない。

本研究は都市表面の対流熱伝達率の特性の把握を目的とし、初段階として k-ε モデルにおいて、はじめにメッシュ分割による表面温度及び対流熱伝達率に与える影響について予備検討を行い、そのうえで風速、表面温度と

気温の差 ΔT が市街地建物表面の対流熱伝達率に与える影響を定量的に検討した。

1 メッシュ分割による影響の予備検討

1.1 解析概要

Fig.1 に予備検討における解析領域を示す。80m×80m×40m の直方体を建物と想定し、メッシュ幅が表面温度及び熱流束、対流熱伝達率に及ぼす影響を検討

Table 1 Analysis condition

CFD code		STREAM V14(RC2)
Turbulence model		Standard k-ε model
Algorithm		SIMPLER
Discretization scheme		QUICK
Area of CFD analysis		X(4800m)×Y(900m)×Z(400m)
Boundary condition	Xmin	Fixed temperature, Power law (Exponent recipracal(n)=4)
	Xmax	Natural outflow boundary
	Ymin	Fixed temperature, Free slip
	Ymax	Fixed temperature, Free slip
	Zmin	Fixed temperature, Free slip
	Zmax	Fixed temperature, Free slip
	Fluid-Solid	Temperature power law, No slip
Weather condition		July 31st ,12:00, in Osaka Sunny Day
Solar condition	Solar position	Altitude:79.04°, Azimuth:0.00°
	Direct solar radiation	658W/m ²
	Diffuse solar radiation	236W/m ²
Indoor preset temperature		24°C
Outdoor temperature		30.6°C
Wind direction		West

Table 2 Analysis case in preliminary study

Analysis case	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Mesh size[mm]	50	100	500	1,000	2,000
Number of mesh	2014220	2786900	1,190,640	409,248	130,977
Maximum adjacent mesh size ratio	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1

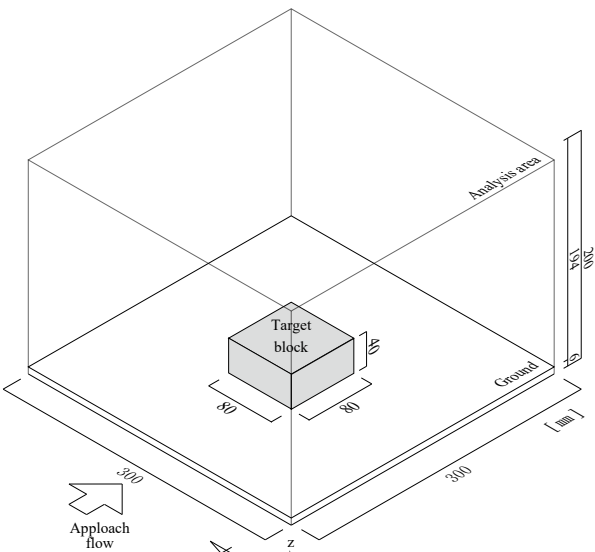


Fig.1 Analysis area in preliminary study

する。Table1 に解析条件を示す。熱境界条件については解析領域面は成り行き、空気と地面及び建物との対流熱伝達に関しては一般化対数則により与えた。気象条件は、6月21日(夏至)の大阪の晴天日を想定し、解析を行った。室内設定温度は24℃一様とし、外気温についてはNEDO データベース¹⁾を参考に同日の29年分の平均値を使用した。なお、日射に関しては直達・散乱日射の両方を考慮しており、建物外皮及び地表面に当たった日射は拡散反射もしくは吸収されるものとする。また、地面の日射反射率は、0.25 とし、建物外皮、地表面の長波長放射率は全て 0.9 としている。屋外風速については気象庁のデータ²⁾に基づき、風向は西向き、地表面から 28m

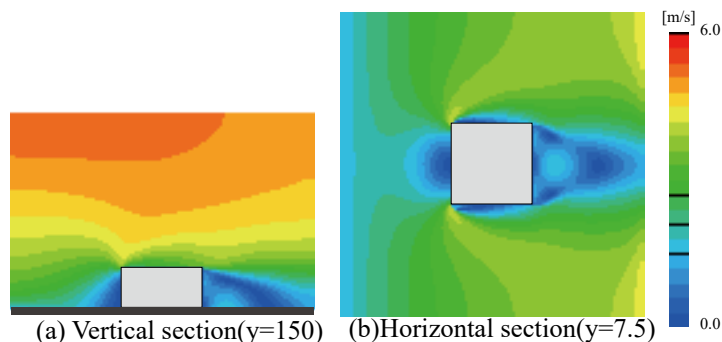


Fig. 2 Wind speed distribution(Case3)

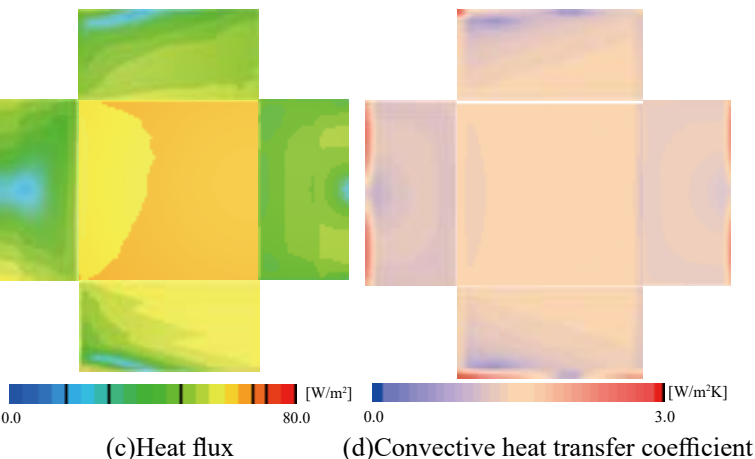
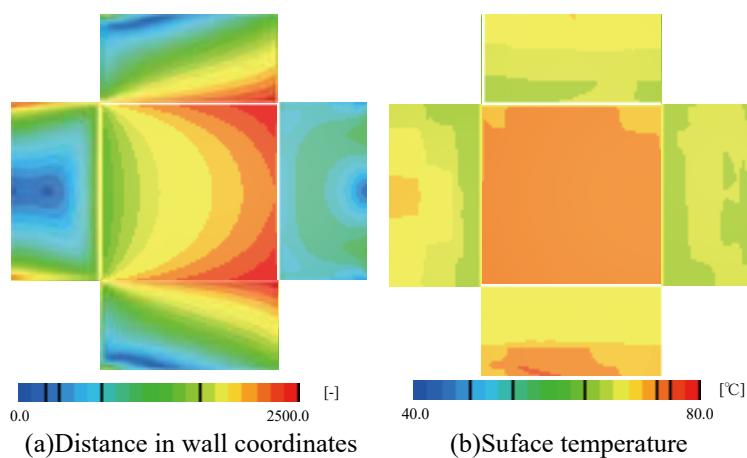


Fig.3 Distribution of distance in wall coordinates, temperature, heat flux, convective heat transfer coefficient on the building surface(Case3)

での風速を基準とし 3m/s とした。

1.2 解析ケース

Table 2 に予備検討における解析ケースを示す。建物及び地面表面の近傍メッシュ幅を変更し、メッシュ幅による影響を着目した。

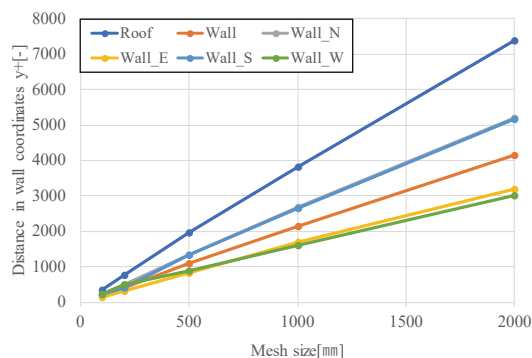


Fig. 4 Correlation between mesh size and distance in wall coordinates y+

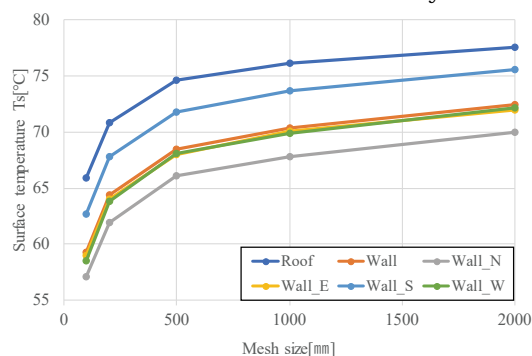


Fig. 5 Correlation between mesh size and surface temperature

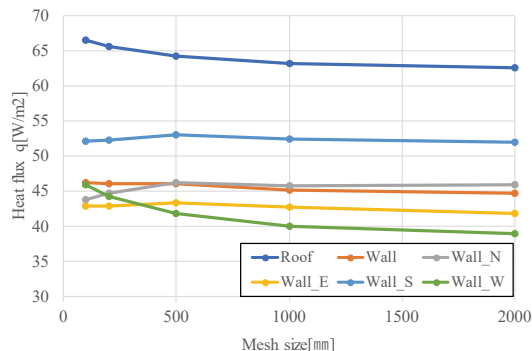


Fig. 6 Correlation between mesh size and heat flux

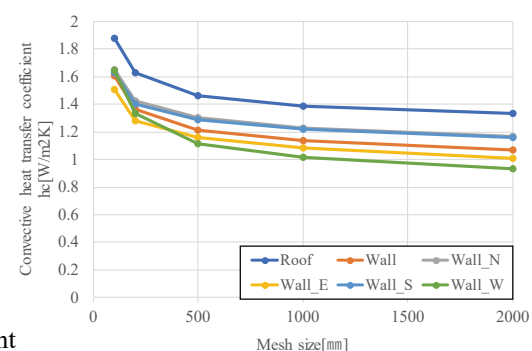


Fig. 7 Correlation between mesh size and convective heat transfer coefficient

1.3 対流熱伝達率の算出

対流熱伝達率については、流入温度（30.6℃）を代表温度とし、CFD 解析により算出された表面熱流束及び表面温度を用いて対流熱伝達率を算出した（式（1））。

$$h_c = \frac{q}{\Delta T} = \frac{q}{T_s - T_{re}} \tag{1}$$

h_c: 対流熱伝達率 [W/m²K]
q: 表面熱流束 [W/m²]
T_{re}: 代表温度 [°C](=30.6)
T_s: 表面温度 [°C]
ΔT: 表面温度と代表温度の差 [K]

1.4 検討結果

Fig. 2 と Fig. 3 にそれぞれ Case5 における建物周辺の風速分布、建物表面の無次元距離・表面温度・熱流束・対流熱伝達率分布を示す。風速分布については、風速が建物に衝突する西面中央、建物の側面近傍、建物の後方で風速が弱まっていることが分かる。表面温度に関しては屋根面で大きな値を示しており日射の影響を受けている。また建物低層部で比較的大きい値を示しているのは、地面からの日射、放射の影響を受けていると考えられる。熱流束については日射と風速による影響がみられる。熱伝達率に関しては風速の影響が見られ、屋根面・風下側で低下している。

Fig. 4 ～ 6 にそれぞれメッシュ幅と無次元距離・表面温度・熱流束・対流熱伝達率の相関を示す。ここで用いた値は、街区表面それぞれにおける平均値を用いた。メッ

シュ幅の縮小により無次元距離及び表面温度は低下、熱流束及び対流熱伝達率は増加する。熱流束及び対流熱伝達率において西側壁面が他の壁面と異なる変化をしている原因は風上側の面であるため、壁面中央において風速が著しく低下し日射の影響を大きく受けるためであると考えられ、建物が連なる街区においてはメッシュ幅の変化によって表面温度・熱流束・対流熱伝達率への影響は大きい、建物表面毎の分布の傾向は変わらないと考えられる。対流熱伝達率が低い値となっている点については現在検討中である。

2 建物表面の対流熱伝達率に関する検討

予備検討に基づき建物表面毎の対流熱伝達率分布の傾向はメッシュ幅の変化によって変わらないことから、街区モデルにより表面近傍メッシュ幅を 2000 mm として表面温度や風速が建物表面の対流熱伝達率に与える影響を評価した。

Table 3 Analysis case

Solar reflectance change case									
Solar reflectance[-]	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Wind speed[m/s]	3.0								
Wind speed change case									
Solar reflectance[-]	0.5								
Wind speed[m/s]	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0		

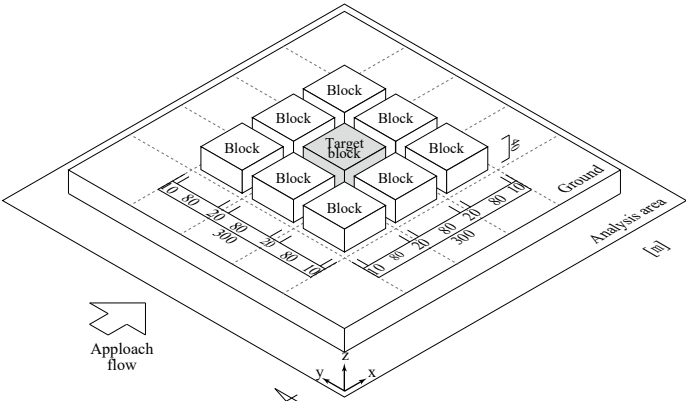


Fig. 8 Block model

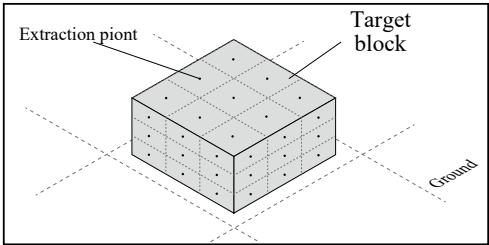


Fig.10 Extraction point

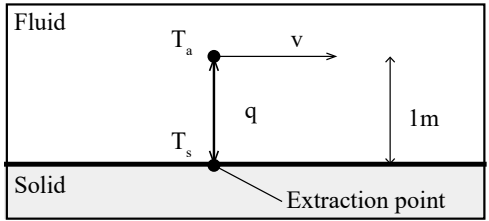


Fig.11 Diagram near the wall

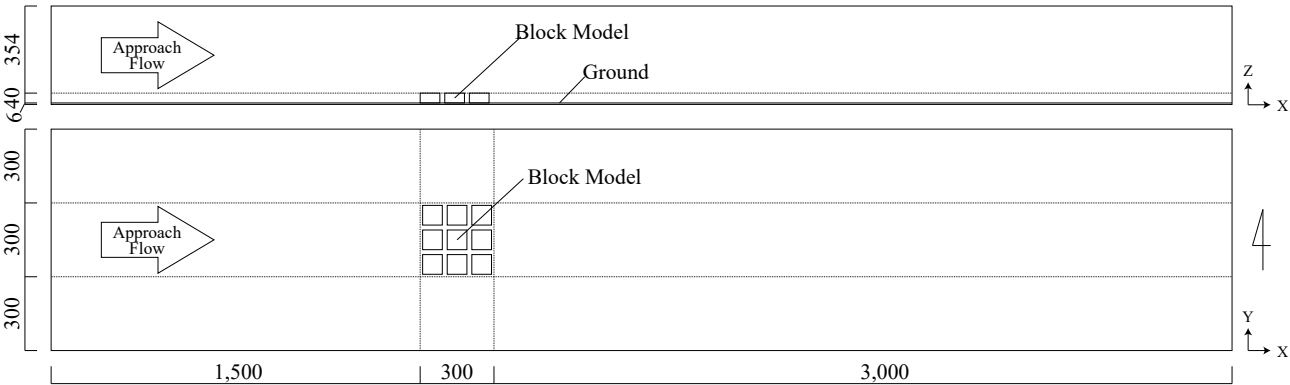


Fig. 9 Analysis area

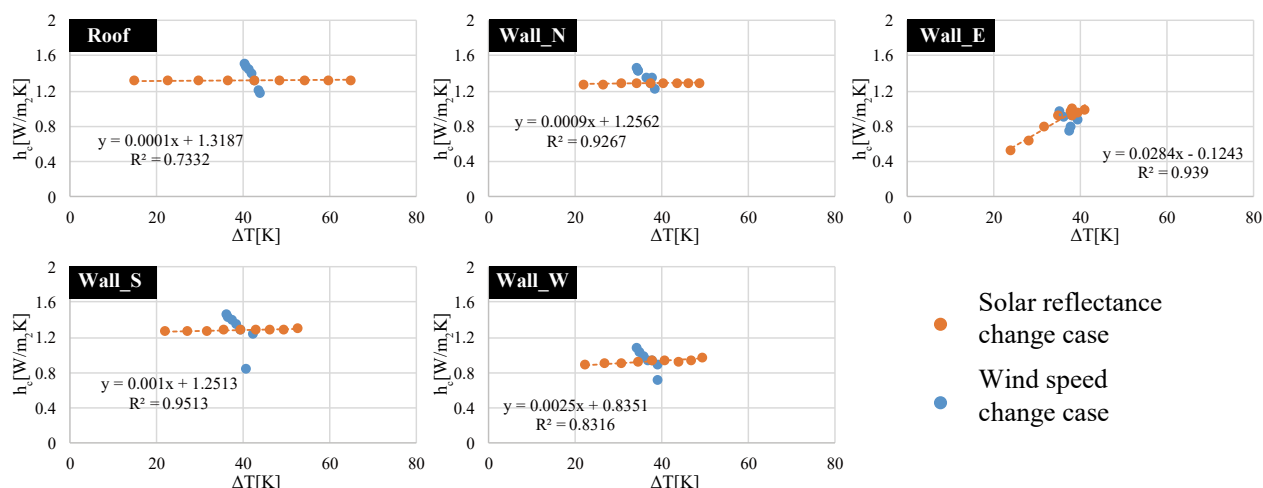


Fig.12 Correlation between convective heat transfer coefficient and temperature difference

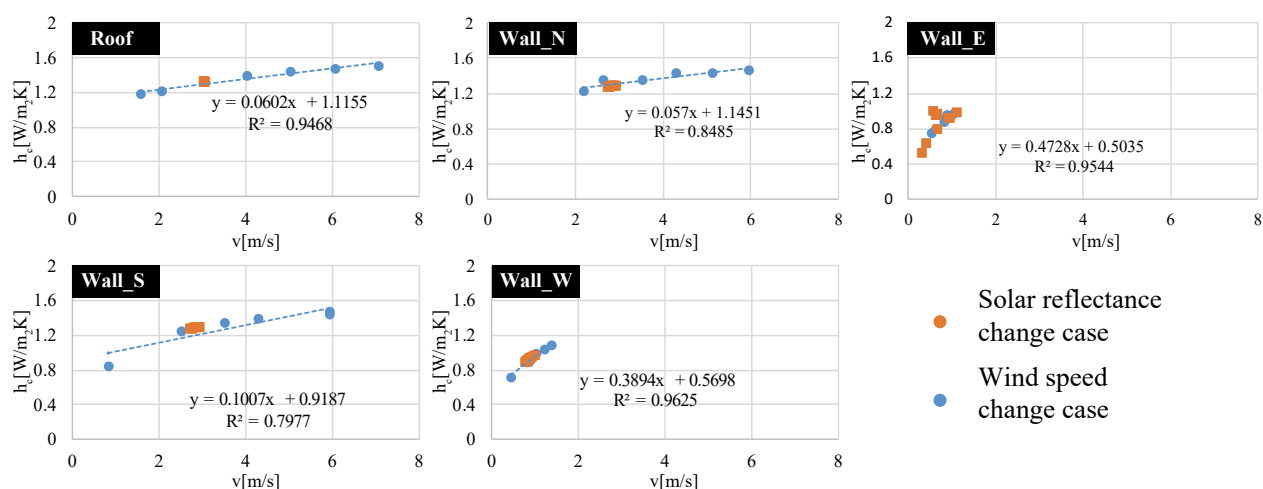


Fig.13 Correlation between convective heat transfer coefficient and wind speed of first mesh

2.1 解析概要

Fig. 8 に街区モデルを、Fig. 9 に解析領域を示す。解析対象は大阪市中心部の街区 (34.4°N, 135.31°E) を想定し、80 m × 80 m × 40 m の街区モデルが東西 (x)、南北 (y) 方向ともに 3 棟均等に配置されている。日射反射率、長波長放射率に関しては検討のモデルと同様とした。

2.2 解析ケース

解析ケースを Table 3 に示す。建物表面の温度の変化による影響を見るために屋外風速を 3 m/s とし建物表面の日射反射率を変化させた条件を 9 条件、建物表面の近傍風速の変化による影響を見るために日射反射率を 0.5 とし屋外風速を変化させた条件を 7 条件の解析を行った。

2.3 抽出点について

Fig. 10 に抽出点の位置を示す。街区モデルの中央街区の壁面を 9 分割し、分割した面積の中心点を抽出点とした。Fig. 11 に壁面近傍における概要図を示す。風速については対象建物表面から 1 m の値を用いた。

2.4 解析結果

Fig. 12 に対流熱伝達率と表面温度と代表温度の温度差 ΔT の相関を、Fig. 13 に対流熱伝達率と第一メッシュ

の風速の相関を示す。各抽出点で概ね同様の傾向を示したため、各表面の中心点のみを掲載する。

屋根面、北・南・西側壁面では、表面温度の変化において対流熱伝達率が概ね一定の値を示し風速の変化において大きく変化するめ、強制対流が支配的であることがわかる。一方で風下側となる東側壁面では、風速の変化以上に表面温度の変化により対流熱伝達率が変化しており強制対流の影響も見受けられるが、自然対流が支配的であるといえる。これは流入風速の変化に依らず風速が小さい値となるためであると考えられる。

3 まとめ

本報では、k-ε モデルにおけるメッシュ幅の影響を検討し、表面温度や風速が建物表面の対流熱伝達率に与える影響を評価した。今後は、風向・街区形状などの影響の検討や、実測との比較を行い屋外解析における対流熱伝達率分布の特性、再現精度を検討する所存である。

【参考文献】

- 1) htmlNEDO 日射量データベース
: <http://app0.infoc.nedo.go.jp/>
- 2) 気象庁 HP: <http://www.jma.go.jp/jma/index>

高床式砂栽培農業施設の光環境に関する研究

-2 段積み栽培ベッド下段における日射量分布の実測および改善策の検討 -

Study on light environment of the agricultural facility for high floored sand cultivation
-Survey and improvement measure of distribution of solar radiation
on the lower column of cultivation bed-

○三宅 悠貴 (大阪市立大学)

西岡 真稔 (大阪市立大学)

北川 康孝 (東レ建設株式会社)

鍋島 美奈子 (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*¹Yoshiyuki OOHASHI*² Yasutaka KITAGAWA *²*¹ Osaka City University *² TORAY Construction Co., Ltd.

In recent years, high floored sand cultivation which has high productivity and workability has attracted attention, however, there is not enough information about the light environment in a plastic greenhouse for high floored sand cultivation. In this study, both inside and outside solar radiation are observed and propose an estimation method of inside solar radiation based on outside one. Additionally, the effect of putting reflector toward lower shade part of stacked sand bed is examined. As a result, it is confirmed that the harvested amount of crops is increased due to the increase of solar radiation.

1 研究背景・目的

1.1 研究背景

現在、農業用ビニルハウスでの高床式砂栽培農業が注目されており、西日本を中心に展開されている。この農法は、連作障害がほとんどなく生産性が高いことや栽培ベッドは建築現場で用いられている足場材でできているため施工性が高いこと、高さが可変であり車椅子やお年寄りの方でも容易に作業ができ、作業性が高いこと等が特徴として挙げられる。さらに、今後は高床式砂栽培に IoT 技術を組み合わせたシェアリング農業が、地域雇用創出や地域活性化につながる新しい農業の形として、各地へ展開が見込まれている。しかし、高床式砂栽培農業を行う上での光環境の情報は整備されておらず、環境条件を把握し、設計資料として整理することは有用である。

1.2 研究目的

これまで田中ら¹⁾は大阪府四条畷市にあるビニルハウスにて栽培ベッドが 1 段及び 2 段積みの場合のビニルハウスの光環境について整理し、統計モデルを用いて屋外日射量からハウス内日射量を求めた。しかし、このモデルはハウスの設置箇所(緯度・経度・方角)や構造、太陽位置(季節)などを考慮しておらず、実測を行ったハウス以外に適用するのは難しい。原口ら²⁾は基本的な構造のハウスを対象としたハウス内日射量分布推

定モデルを作成したが、ビニルの汚れなどハウスの特性は考慮されていなかった。また、高床式砂ベッドは多段積みにすることで農地面積を拡大することができるメリットを持っているが、下段部分の日射量が小さくなるデメリットもあり、多段積みに適した栽培計画を立てるためには日射量分布の把握が必須となる。そこで本研究では、実測データを用いて、ハウスの特性を考慮した、屋外日射量から高床式砂栽培農業施設内の日射量を推定する。さらに 2 段積み下段部分に日射量改善策を施し、作物の収穫重量へ与える影響を検討することを目的とする。

1.3 実測概要

京都府相楽郡精華町にあるビニルハウス B 棟及び屋外にて実測を行った。各測器の設置位置も含めたビニルハウスの平面図を Fig. 1 に、断面図を Fig. 2 に示す。破線部分が 2 段積みとなっている。

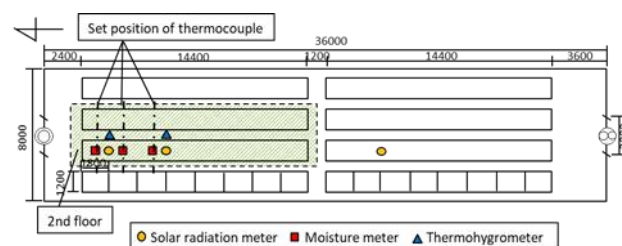


Fig. 1 The floor plan of the plastic greenhouse

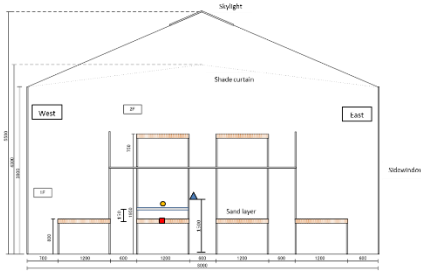


Fig. 2 The cross section of the plastic greenhouse

2 日射量推定

2.1 推定方法

原口ら²⁾の方法を参考に、ハウスのフレーム率や汚れなどの特性を実測値により補正する推定方法を提案する。ただし、ハウス内部材の反射は考慮しない。屋外日射量からハウス内日射量および2段階積み砂ベッド下段部分の日射量を推定するモデルのフローチャートをFig. 3に示す。

(1) 1段階積み砂ベッド

まずEq.(1)~Eq.(6)によって屋外全天日射量の直散分離を行う³⁾。次にビニルハウス構造のモデル化(空間座標表示)を行う。ハウス壁面はその方向によって南北面①、②と側面③、④と天井面⑤、⑥の合計6個に分割し、Eq.(7)~Eq.(10)を用いて各壁面に対する直達日射の入射角 θ を求める。さらにビニルハウス床面に到達する日射量を求めるにあたり、直達日射がハウスのどの面から入射するかによって入射角が異なり、それを透過率に反映させる必要があるため、以下の方法によって入射面の判定をする。栽培ベッド上の任意の点P(XP, YP, ZP)を通る方向余弦(l_1, l_2, l_3)の光線の方程式はEq.(11)で表され、平面の方程式を表すEq.(12)と連立して解くことで光線と平面の交点($X0, Y0, Z0$)を求める。この交点が壁面の範囲内に存在する時、直達日射はその壁面を通り点Pに到達する。Eq.(13)~Eq.(14)よりハウス内の全天日射量(推定値) $\hat{I}_{TH,in}$ を求め、実測値 $I_{TH,in}$ とのRMSEが最小になるようにハウスの特性値 c_v を決定する(Eq.(17))。

(2) 2段階積み栽培ベッドの下段部分

2段階積み栽培ベッド下段部分の日射量について検討する際は、ビニルハウス内に入射した直達日射が2階の栽培ベッドあるいは通路部に入射するか否かで、1階部分の直達日射の有無を判定する。Fig. 4に示すように2段階積み栽培ベッド下段部分の任意の点P(XP, YP, ZP)における日射量を推定する際、1階部分と2階部分の各頂点をA~Hとし、四角形ABCDを面①、四角形EFGHを面②、四角形ABFEを面③、四角形DCGHを面④、四角形AFHEを面⑤として考える。1段階積み砂ベッドの

場合と同様に考えて、光線が面⑤を通る場合には点Pは日陰になるため直達日射=0とし、面①~④を通る場合には遮蔽物がない場合のハウス内直達日射量と等しいと考える。また光線が格子状足場部分を通る場合には、Eq.(18)で表されるように入射角に対応した足場部分の透過率をかけることで直達日射量を求める。ただし骨組み部材等からの反射分は考慮しない。さらに、天空日射量については、まず栽培ベッド2階部分をFig. 5で示すように4分割して、点Pに対する各面の形態係数をEq.(19)~Eq.(22)を用いて求める。そして、式23に示すようにハウス内の天空日射量に対して天空率をかけあわせることによって天空日射量を求める。求めた直達日射量と天空日射量を足すことで2段階積み栽培ベッド下段部分の全天日射量を求める。

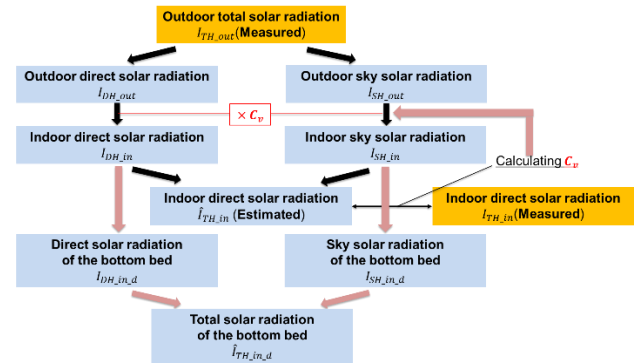


Fig. 3 Flowchart of model construction

$$K_{Tt} = \frac{I_{TH,out}}{I_0 \times \sin h} \quad \text{Eq.(1)}$$

$$K_{Dt} = -0.43 + 1.43K_{Tt} \quad (K_{Tt} \geq K_{Ttc}) \quad \text{Eq.(2)}$$

$$K_{Dt} = (2.277 - 1.258 \sin h + 0.2396 (\sin h)^2) K_{Tt}^2 \quad (K_{Tt} < K_{Ttc}) \quad \text{Eq.(3)}$$

$$K_{Ttc} = 0.5163 + 0.333 \sin h + 0.00803 (\sin h)^2 \quad \text{Eq.(4)}$$

$$I_{DN} = K_{Dt} \times I_0 \quad \text{Eq.(5)}$$

$$I_{SH,out} = I_{TH,out} - I_{DN} \times \sin h \quad \text{Eq.(6)}$$

$$l_1 = \cos \alpha = \cos h \cos A \quad \text{Eq.(7)}$$

$$l_2 = \cos \beta = -\cos h \sin A \quad \text{Eq.(8)}$$

$$l_3 = \cos \gamma = \cos(\pi/2 - h) \quad \text{Eq.(9)}$$

$$\cos \theta = l_1 w_1 + l_2 w_2 + l_3 w_3 \quad \text{Eq.(10)}$$

$$\frac{X - XP}{l_1} = \frac{Y - YP}{l_2} = \frac{Z - ZP}{l_3} = \alpha \quad \text{Eq.(11)}$$

$$w_1 X + w_2 Y + w_3 Z = a \quad \text{Eq.(12)}$$

$$I_{DH,in} = I_{DH,out} \times \tau_v \times c_v \quad \text{Eq.(13)}$$

$$\tau_v = -5 \times 10^{-8} \times \theta^4 + 5 \times 10^{-6} \times \theta^3 - 2 \times 10^{-4} + 1.4 \times 10^{-3} + 0.892) \quad \text{Eq.(14)}$$

$$I_{SH,in} = I_{SH,out} \times \bar{\tau}_v \times R_s \times c_v \quad \text{Eq.(15)}$$

$$\hat{I}_{TH_in} = I_{DH_in} + I_{SH_in} \quad \text{Eq.(16)}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (I_{TH_in} - \hat{I}_{TH_in})^2}{N}} \quad \text{Eq.(17)}$$

$$\tau_s = 0.7 \times e^{-0.037} \quad \text{Eq.(18)}$$

$$C_h = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{X}{\sqrt{X^2 + 1}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{X^2 + 1}} + \frac{Y}{\sqrt{Y^2 + 1}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{Y^2 + 1}} \right) \quad \text{Eq.(19)}$$

$$X = x/Z \quad \text{Eq.(20)}$$

$$Y = y/Z \quad \text{Eq.(21)}$$

$$I_{SH_in_d} = \{1 - (C_1 + C_2 + C_3 + C_4)\} \cdot I_{SH_in} \quad \text{Eq.(22)}$$

K_{Tt}	Clearness index
I_0	Solar constant (=1382 W/m ²)
I_{TH_out}	Outdoor total solar radiation (W/m ²)
I_{DH_out}	Outdoor direct solar radiation (W/m ²)
I_{SH_out}	Outdoor sky solar radiation (W/m ²)
I_{DN}	Normal direct solar radiation (W/m ²)
h	Solar altitude
A	Solar azimuth
l_1, l_2, l_3	Solar direction cosine
w_1, w_2, w_3	Wall normal vector
τ_v	Transmittance of vinyl
I_{DH_in}	Indoor direct solar radiation (W/m ²)
I_{SH_in}	Indoor sky solar radiation (W/m ²)
θ	Angle of incidence on vinyl surface
\hat{I}_{TH_in}	Estimated Outdoor total solar radiation
I_{TH_in}	Measured total solar radiation (W/m ²)
R_s	Sky factor
c_v	Characteristic value of the plastic greenhouse
N	The number of date
τ_s	Transmittance of grafting scaffold of the upper bed
C_h	View factor
$I_{SH_in_d}$	Sky solar radiation of the bottom bed (W/m ²)

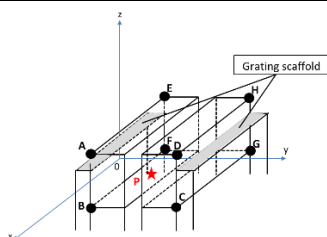


Fig. 4 Coordinate setting

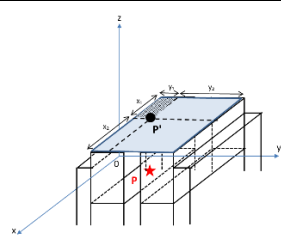


Fig. 5 Division method of the upper bed

2.2 推定結果

(1) 1 段積み栽培ベッド

1 段積み栽培ベッド部分において 11/26～12/31 の実測データをもとに、全天日射量の実測値と推定値の RMSE が最小になるようにハウスの特性値 c_v を求めた結果 $c_v = 0.92$ となり、RMSE は 6.28W/m² となった。代表日として 12/16 の推定結果を Fig. 6 に示す。これに対して、 $c_v = 1$ としてハウス内日射量を推定した結果、

RMSE は 9.75W/m² となったことより、ハウスの特性値を考慮することによって推定精度の向上が確認できた。また、田中らの統計モデルと同様に線形回帰によって屋外日射量からハウス内日射量を推定した結果、RMSE は 8.64W/m² となり、推定精度の向上が確認できた。

(2) 2 段積み栽培ベッドの下段部分

2 段積み栽培ベッド部分において 12/1～12/31 の実測データをもとに日射量を推定した。代表日として 12/16 の推定結果を Fig. 7 に示す。また、下段部分における推定モデルの RMSE は 19.2W/m² であり、田中らの統計モデルを用いた際の RMSE (=13.1W/m²) に比べて大きくなった。これは、モデル上では上段のベッドと足場以外の部材(ネットや排水用の斜面など)を表現していないこと、座標設定が実際のハウスの砂ベッド構造と完全には一致していないことにより、実測値を推定値が大きく異なる時間帯が存在する原因と考えられる。

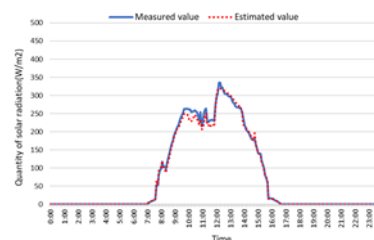


Fig. 6 Estimated result of solar radiation (Indoor)

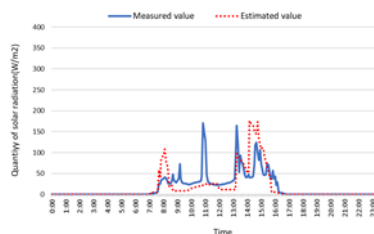


Fig. 7 Estimated result of solar radiation (bottom bed)

3 光環境改善策

3.1 改善策概要

本研究では、2 段積み栽培ベッドにおける下段の土壌上および上段の足場材下に反射材を設置することで、下段部分の作物にも反射日射が当たるよう対策をおこない、成長の促進につながるかを検証する(Fig. 8)。ただし、カビ発生を防ぐため、反射材には土壌表面から蒸発した水分を空气中に逃がせる透湿性防水布を使用する。土壌表面には透湿性防水布を、上段の足場材下および 1 階の通路部分には白色プラスチックダンボールを設置する(Fig. 9)。反射材として使用する透湿性防水布は裏面にアルミ蒸着のない IMA SUPER コート®MAX (以降、SX) とアルミ蒸着ありの IMA SUPER コート®AL (以降、SA) とする。また 2 種類の透湿性防水布、プラスチックダンボールとも反射率は約 80% である。

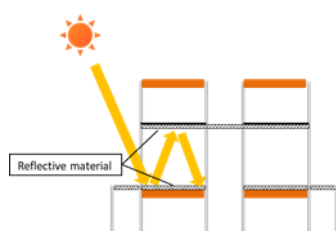


Fig. 8 Image of reflection

Fig. 9 Condition of
the experiment

3.2 実験方法

実験は 2 段積みの箇所の北側 3 ベッド×2 列において行う。Fig. 10 のように実験対象となる各ベッドを A~F とし、ベッド A,B は対策なし、ベッド C,D には透湿防水布 SX、ベッド E,F には透湿防水布 SA を設置した。本研究で栽培した作物はコマツナであり、2019 年 11 月 18 日に各ベッドの中央 3 列に 8 株ずつ、11 月 24 日に各ベッド 40 株ずつ定植を行い、2020 年 1 月 9 日に収穫し、重量を計測した。定植期間中の日射量、砂層温度、含水率について、反射材を設置したベッドと対策無しのベッドとの比較をおこなう。

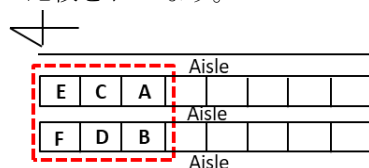


Fig. 10 Sign of the bed

3.3 実験結果

それぞれの測定項目を比較した結果を Fig. 11~Fig. 13 に示す。土壌温度および含水率に関しては各ベッドで差はほとんどなかったのに対して、日射量は改善策有りの方が無しに比べて午後の日射量が大きくなっていることが分かる。これは日射量を測定したのが西側のベッドであり、午後に直達日射が当たりその反射分が増加した、すなわち改善策の効果があらわれた結果であると考えられる。また、Fig. 13 に示すように改善策無しの積算日射量が 30.01MJ/m^2 、改善策有りの積算日射量が 36.16MJ/m^2 であり、約 1.2 倍となった。さらに 1 株あたりの平均収穫重量を Fig. 15 に示す。改善策無し of ベッド(A,B)に比べて改善策有りのベッド(C,D,E,F)の方が $4.9\text{g/株}\sim 19.5\text{g/株}$ 大きくなっており、改善策を施したことにより収穫重量が 1.17 倍~1.68 倍となった。上述の測定項目ごとの差を考慮すると、日射量の増加が収穫重量の増加につながったと考えられる。ただし、ともに改善策を施した C と E で平均収穫重量を比較すると E の方が 14.6g/株 大きくなっている。これは、天空率の平均値がベッド E は 41.2%、ベッド C が 30.3% であり、天空日射量の差が一つの原因として考えられる。

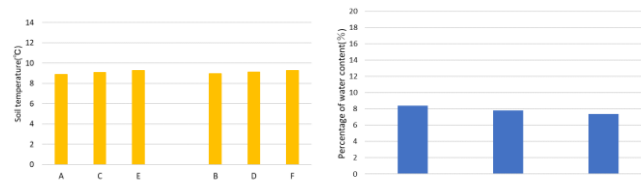


Fig. 11 Soil temperature

Fig. 12 Water content

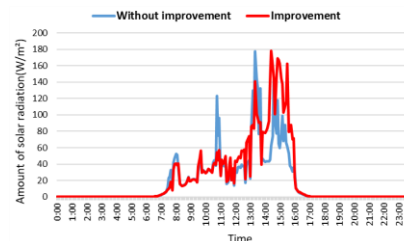


Fig. 13 Amount of solar radiation

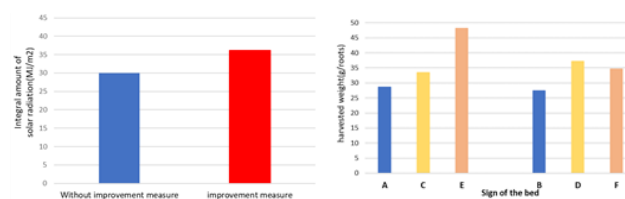
Fig. 14 Integral amount
of solar radiation

Fig. 15 Harvested weight

4 まとめ

- ・ビニルの汚れやフレーム率などハウスの特性値を考慮した物理モデルを作成し、1 段積み栽培ベッドおよび 2 段積み栽培ベッドの下段部分における日射量を推定した。その結果、1 段積み栽培ベッド部分においてはハウスの特性値を考慮することによって RMSE が約 3W/m^2 小さくなり、推定精度向上が確認できた。しかし、2 段積み栽培ベッドの下段部分においては既往研究の統計モデルより RMSE が約 6W/m^2 大きくなり、推定精度改善にはならなかった。

- ・2 段積み栽培ベッド下段部分の日射量推定モデルにおいて、足場やベッド部材などを正確に表現することによって推定精度の向上が見込める。

- ・京都府相楽郡精華町のビニルハウス B 棟において 2 段積み栽培ベッドに対して透湿性防水布を反射材として用いた光環境改善策を施し、その効果について検証した。その結果、1.2 倍の日射量増加と、1.2~1.7 倍の収穫量増加が確認できた。

【参考文献】

- 1) 田中千尋ら：ビニルハウスにおける葉菜類の生育環境に関する研究-実測調査に基づく照度及び室温の推定-，空気調和衛生工学会近畿支部論文集，2019.3
- 2) 原口智和ら：ビニルハウス内の日射量分布推定モデル，九大農学芸誌第 50 巻，1995.7
- 3) 宇田川光弘ら：水平面全天日射量観測地よりの直達日射量の推定，日本建築学会 計画系論文報告書，第 267 号，pp83-89，1978.5

透湿性防水膜蒸発パネルの冷却効果に関する屋外実験

Outdoor Experiment on Cooling Effect of Evaporating Panel of Moisture Permeable Waterproof Membranes

○古川 将平 (大阪市立大学)

市井 翔大 (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)

Shohei FURUKAWA*1 Shodai ICHII*1 Masatoshi NISHIOKA*1 Minako NABESHIMA*1

*1 Osaka City University

As global warming progresses, urban heat island phenomena are likely to degrade the summer heat environment. As an adaptation measure, this study proposes an evaporative cooling method using a moisture-permeable waterproof membrane. The concept of the evaporating mechanism is to store water inside a moisture-permeable waterproof membrane designed in a bag shape and evaporate it from the bag surface. In this article, the effects of the evaporation panel made of the moisture-permeable waterproof membrane in an outdoor environment is verified.

1. 研究背景・目的

近年、都市のヒートアイランド現象による夏季の暑熱環境の悪化が深刻な問題となっている。その改善手法の一つとして、蒸発冷却手法を壁体や壁面に適用する技術が開発されている。梅干野ら¹⁾は高揚水性セラミック材の毛管引力を用いた蒸発冷却壁体を考案し、蒸発対象面全体を常に濡らすことのできる給水システムを開発している。しかし、簡素な装置構成でかつ冷却効率のよいシステムの提案が課題として残されている。そこで本研究では、蒸発面を常に維持できることに加え、簡素な構成で冷却効率の良いものとして、透湿性防水膜を用いた蒸発冷却手法を提案する。蒸発機構の概念は、透湿性防水膜で袋状に設計したものの内部に液水を貯留し、袋表面から蒸発させるものである。透湿性防水膜を用いた蒸発冷却パネルの内部に水を貯留し、水蒸気透過によって蒸発冷却を促すことでパネルの表面温度を低減し、日射を受けても高温になることのない日よけ技術の開発を目的として研究を行う。

これまで筆者ら²⁾は、屋外環境下でも重要なパラメータとなる透湿性防水膜の透湿抵抗の測定方法について研究してきたが、実際に蒸発冷却パネルを設置したテントや建物等、屋外で実用形態に近いモデルでの蒸発冷却パネルの冷却効果については実験・検証されていない。そこで、本研究では、自作した蒸発冷却パネルとテントを用いて屋外で実験を行い、冷却効果を実証することを目的とする。

2. 実験概要

Figure 1 に示す実用形態に近い実験装置で屋外実験を行う。まず、作成する蒸発冷却パネルは、森畠³⁾を参考に、フレーム材としてプラスチック段ボール(W910×H280×D5 mm)をW70×H100×D5 mmに格子状にくり抜き、両面に透湿性防水膜(SUPER コート MAX®一村産業社製)を接着剤で貼り合わせる。その蒸発冷却パネルを用いて3つの蒸発面を構成する約1 m四方の蒸発簡易テント(Figure 4)を2張製作する。そして、一方のテントのパネル内には水を入れ(パネル(水あり))、もう一方のテントのパネルには水を入れず(パネル(水なし))、Table 1の項目を計測する。

測定箇所は Figure 5 に示すが、テント膜材とパネルの表面温度は各面の中央部にセンサーをテープで貼り付ける。黒球温度はテント内部の中心で測定する。測定はいつでも1分間隔とする。実験場所は大阪市立大学工学部C棟屋上北西部で、2つのテント間は2 mとし、日射量と風速は同条件とみなす。

テント中央部に黒球温度計を設置し、体感温度を評価する。

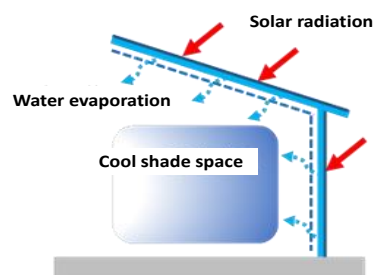


Figure 1 Practical example

3. 実験結果

3.1. 実験日

2019年9月18日、10月10日、16日、11月7日、8日の5日間実験を行った。分析する時間帯は気温が高くなる12:00～14:00とする。黒球温度計による冷却効果の分析は、Table 2より気温が高く日射量も多い10月10日を代表日とする。また分析は水平面のテント膜材とパネルに限定して分析する。

3.2. 日射がグローブ球（黒球温度計）に伝わるまでの熱移動過程

日射熱が黒球温度に到達するまでの熱移動過程をFigure 2、Figure 3に示す。まず、日射熱はテント膜材に吸収され、主として放射熱伝達により蒸発パネルへ移動すると考えられる。蒸発パネルが水を保持している場合（Figure 2）は、蒸発冷却によりパネル温度の上昇は小さいが、水を保持していない場合（Figure 3）には上昇が大きい。

次にパネルから黒球へも主として放射熱伝達により熱移動が起こり、パネル温度の上昇がなければ黒球温度も気温からあまり上昇せず、このとき蒸発パネルは日よけとして効果的であるといえる。

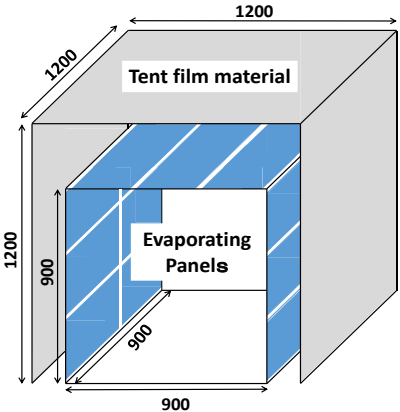


Figure 4 Tent with evaporative cooling panel

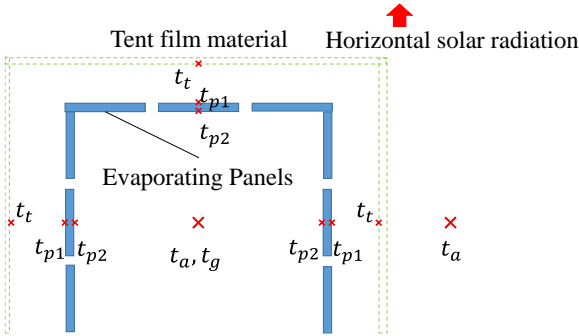


Figure 5 Measurement points

Table 1 Measurement items

1	Temperature and humidity (Inside and outside the tent)
2	Globe temperature (Inside the tent)
3	Surface temperature of panel (Center of each panel)
4	Surface temperature of tent film material (Center of tent film material)
5	Solar radiation (Horizontal plane)

Table 2 Outline of experiment day

The date	Mean temperature	Amount of solar radiation
9/18	29.2 °C	NA
10/10	29.5 °C	9.3 MJ/m ² (from 11:00 to 17:00)
10/16	21.2 °C	7.5 MJ/m ² (from 12:04 to 17:00)
11/7	21.9 °C	7.0 MJ/m ² (from 11:00 to 17:00)
11/8	18.0 °C	8.1 MJ/m ² (from 11:00 to 17:00)

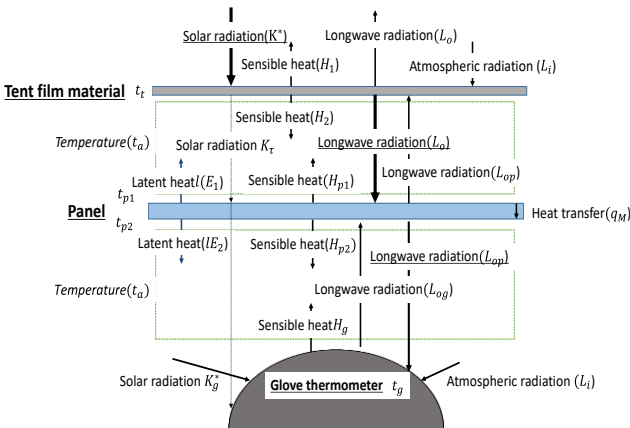


Figure 2 Diagram of heat balance (with water)

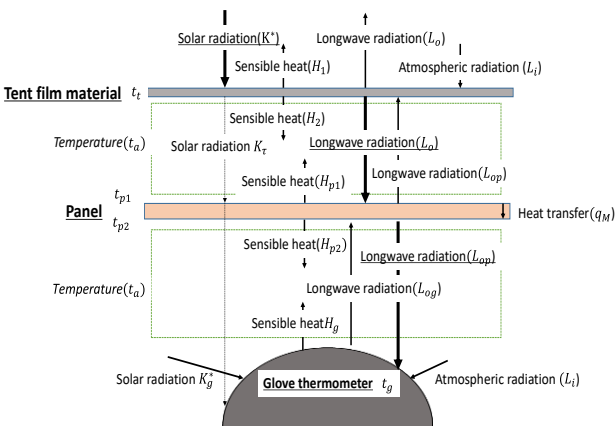


Figure 3 Diagram of heat balance (without water)

3.3. 各表面温度と気温の関係

テント膜材表面温度(t_t)、パネルの外側表面温度(t_{p1})、パネルの内側表面温度(t_{p2})、 t_g 、気温(t_a)のそれぞれ1分間隔の測定値を分析時間(12:00~14:00)で平均したものを Figure 7 に示す。なお、 t_t 、 t_{p1} 、 t_{p2} は水平面の表面温度である。パネルに水を入れることで t_{p1} 、 t_{p2} を気温以下に下げ、その影響で t_g 、 t_t も下げ、テント内の熱環境を良くしている。10月10日の分析では気温29.5℃のときに t_{p2} は31.6℃から28.2℃まで下げることが確認でき、気温以下にまで下げていた。 t_g は38.9℃から32.7℃、 t_t は34.8℃から32.2℃まで下げることができている。

さらに t_{p2} について考察する。横軸に水平面全天日射量、縦軸にパネル内側表面温度と空気温度の差($t_{p2} - t_a$)をとり、その関係について Figure 8 に示す。ただしここでは、測器として用いた日射計の熱容量により本来測定されるべき値が異なる可能性があるため、水平面全天日射量は10分間の移動平均を検討する。同様に t_{p2} と t_a も10分間の移動平均で示す。Figure 6 に水平面全天日射量の測定値を移動平均した結果を示す。ただし、ある時刻 t における水平面全天日射量[W/m²]を I_t とすると、 n 分間の移動平均は以下の式で求めることとする Figure 8 では高い相関が得られているが、水ありパネルの t_{p2} は概ね気温以下で測定されていることがわかる。

$$I_t = \frac{\sum_{k=t-n+1}^t I_k}{n}$$

3.4. テント膜材表面温度とパネル表面温度の関係

横軸にテント膜材表面温度(t_t)の1分間隔の測定値、縦軸にパネルの内側表面温度(t_{p2})の1分間隔の測定値をとり、その関係を Figure 9 に示す。 t_{p1} と t_t には高い相関性があることが分かる。また、Figure 9 から t_t が等しい時を比較すると、水ありの方が t_{p1} が低くなっている。つまり、パネルに水を入れることで t_t が同じでもパネルの温度は下げられたことが確認できる。

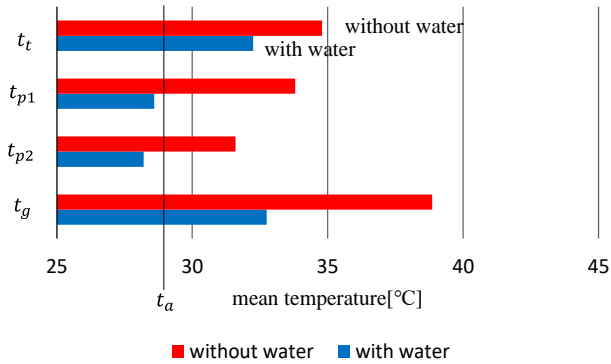


Figure 7 Relationship between surface temperature of tent film material / panel and globe temperature (October 10)

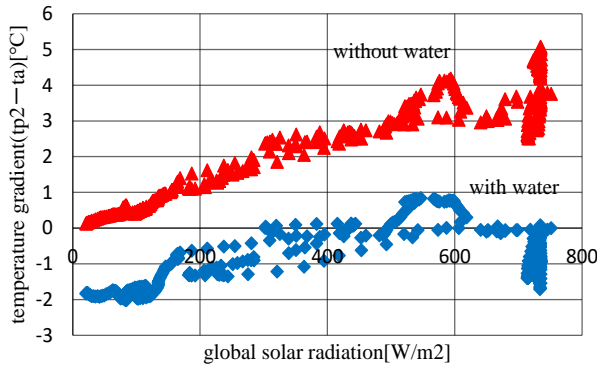


Figure 8 Relationship between global solar radiation and temperature gradient between surface temperature of panel and air temperature (October 10)

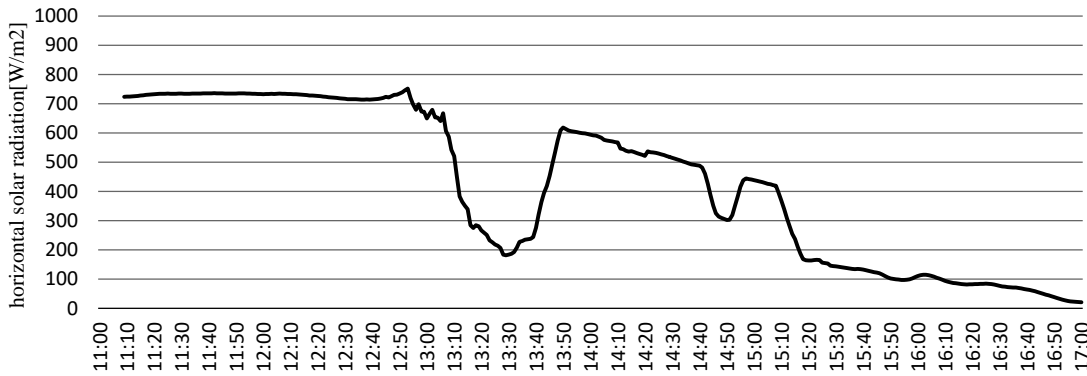


Figure 6 Time change of horizontal solar radiation (moving average for 10 minutes) (October 10)

3.5. 黒球温度の水ありと水なしの関係

テント内の 2 つの黒球温度の時間変化の結果を Figure 10 に示し、パネル（水あり）とパネル（水なし）のテント内黒球温度差を比較する。2 つの黒球温度と気温はともに 1 分間隔の測定結果である。パネル（水あり）の黒球温度は、パネル（水なし）の黒球温度よりも低くなっており、平均 6.0 °C、最大 10.3 °C の差がみられた。

また、横軸に水なしの黒球温度、縦軸に水ありの黒球温度をとった結果（1 分間隔の測定値）を Figure 11 に示す。2 つの黒球温度には概ね線形関係が見られる。しかし、12:50 を境に、2 つの群に分かれた傾向が現れており、日射の影響だと思われるが理由の詳細は不明である。12:00 ~12:50 の結果では、水ありテント内の黒球温度 40 °C において水なしテント内の黒球温度が 35 °C と、5 K 程度の温度差が現れている。

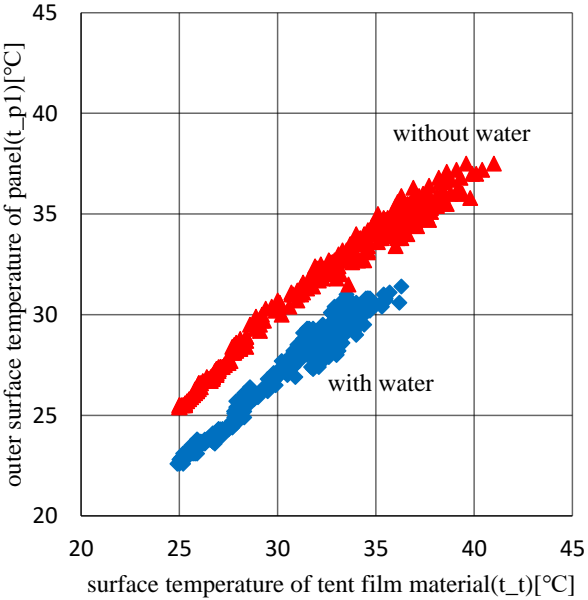


Figure 9 Relationship between surface temperature of panel and surface temperature of tent film (October 10)

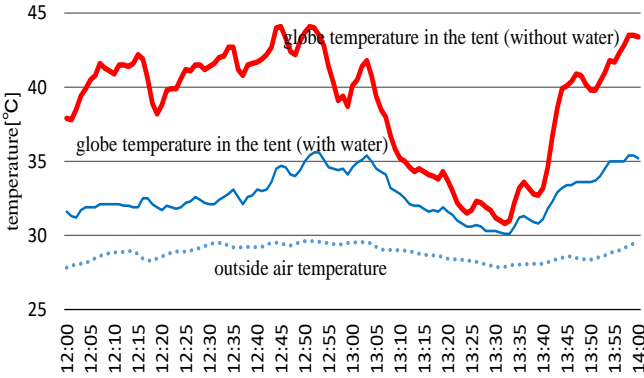


Figure 10 Time change of two globe temperatures (October 10)

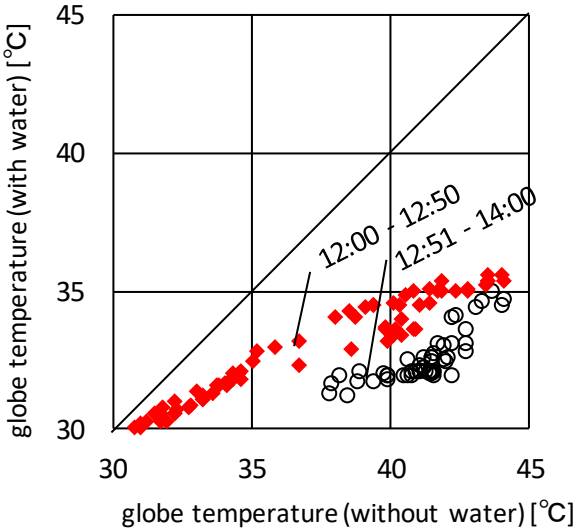


Figure 11 Relation between globe temperature (panel with water) and globe temperature (panel with water (October 10)

4. まとめ

分析日である 2019 年 10 月 10 日の実験結果分析のまとめを以下に列挙する。

- パネルの内側表面温度はパネルに水を入れることで気温 29.5 °C のときに 31.6 °C から 28.2 °C まで下げることが確認でき、気温以下にまで下げていた。
- テント膜材とパネルの外側表面温度は高い相関性があるが、テント膜材表面温度が等しい場合でも水を入れたパネルの方の表面温度が低くなることが確認できた。
- パネルに水を入れることで黒球温度を下げることで、蒸発冷却効果を実証できた。平均 6.0 °C、最大 10.3 °C の差がみられた。
- また黒球温度差には時刻別に日射の影響で 2 つの傾向が得られたと思われるが、理由の詳細は不明である。

【参考文献】

- 1) 梅干野晃ほか：高揚水性セラミック材を用いた蒸発冷却壁体システムの開発-製作したセラミック材の基本性能と試験壁体の冷却効果等の把握実験-,日本建築学会環境系論文集第 74 巻,第 641 号,775-782,2009 年 7 月
- 2) 大田侑誠ほか：透湿性防水膜の蒸発・透湿特性に関する実験的研究-(その 2)透湿抵抗測定法の検討-,2019 年度日本建築学会近畿支部研究発表会,4062
- 3) 森島輝ほか：透湿性防水膜を用いた蒸発冷却パネルに関する研究-(その 2)蒸発冷却パネル表面における熱収支-,日本建築学会大会学術講演梗概集(東北),2018 年 9 月, 40442

異常高温対策の導入計画のための 街路空間の都市環境気候図に関する研究 Study on Urban Environmental climate Map in Street Canyon for Countermeasures against Extremely High Temperature

○大 久 保 舞 (神戸大学)

竹 林 英 樹 (神戸大学)

Mai OKUBO *¹ Hideki TAKEBAYASHI *¹*¹ Kobe University

Currently, specific plans to introduce adaptation heat island measures in the urban area of Kobe city are being studied in order to cope with extremely high temperatures in summer. In this study, a method to identify the priority location in the Sannomiya urban block was analyzed to effectively introduce a heat island adaptation measure according to urban block characteristics. Information on countermeasures for extremely high temperatures has been prepared by the analysis results of the wind and radiant environment in the actual urban block using building shape model data, creating an urban environmental climate map in the street canyon, and evaluating the characteristics of the current outdoor thermal environment.

1. はじめに

神戸市都市部においても、夏期の異常高温の対策として、街路空間へのヒートアイランド適応策の導入計画が検討されている。木山ら¹⁾は、建物周辺の放射熱環境の観点から、建物壁面からの距離に応じて対策優先箇所を特定する指標を提案した。山本ら²⁾は、都市の街路形態（道路方向、道路幅、建物高さ）と風環境の関係から対策優先箇所を特定する方法を提案した。実街区において具体的な対策技術の導入を検討するには、放射熱環境と風環境を統合した温熱環境指標の分布をより詳細に提示する都市環境気候図の整備が必要である。

本研究では、街区特性に応じたヒートアイランド適応策の導入を実現するために、三宮周辺街区を対象として、建物形状モデルデータを用いて風環境および放射熱環境を解析し、温熱環境の特徴を提示する街路空間の都市環境気候図の整備方法を検討した。

2. 数値計算による風環境評価

2.3km 四方の計算対象領域（外側）と 1.0km×1.3km の解析対象領域（内側）を図 1 に示す。ポートタワー気象観測局（100m）における夏季（2010 年 8 月 1 日～8 月 31 日）の最多風向の南西と、風向が南西の場合の平均風速 4.3[m/s]を、初期条件及び流入境界に設定した。解析には標準 k-ε 型乱流モデルを用いた。標高は全域一定とし、建物形状が風環境に及ぼす影響に注目し、鉄道、高架、樹木は再現せず、建物のみを再現した。地上 1.5m での風速の計算結果を図 2 に示す。道路幅の大きい道路

やオープンスペースで大きい方が、周辺建物による影響を受けて街路空間内では小さい。



Fig.1 Calculation and analysis area (red frame)

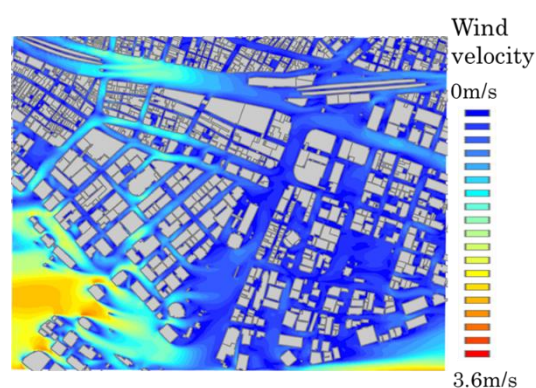


Fig.2 Calculation result of wind velocity at the height of 1.5m

3. 温熱環境指標分布の計算結果と考察

夏期代表日（2019 年 8 月 5 日）を対象に表面温度，MRT を計算し，建物や植栽による日射遮蔽及び被覆材の影響を考察した．また，風速の計算結果と統合して温熱環境指標の SET*を算出した．これらの計算結果と，建物や樹木の配置，被覆材料などとの関係を分析した．

3.1 計算対象領域の概要

計算対象領域の建物形状と土地被覆の配置を図 3，考察対象領域の分類を図 4，土地被覆の割合を図 5，樹木の分布を図 6，樹冠面積率を表 1 に示す．計算対象領域を 2m のメッシュで分割し，日射量，表面温度，MRT を計算した．被覆材料は，東遊園地の敷地内はウッドデッキ，芝生，水盤，アスファルト，コンクリート，土，平板(白)，ブロック，レンガ，鉄平石の 10 種類とし，それ以外の街路はアスファルト，ブロック，芝生の 3 種類とした．樹木は現地調査と Google Earth を用いて樹冠幅および高さを設定した．

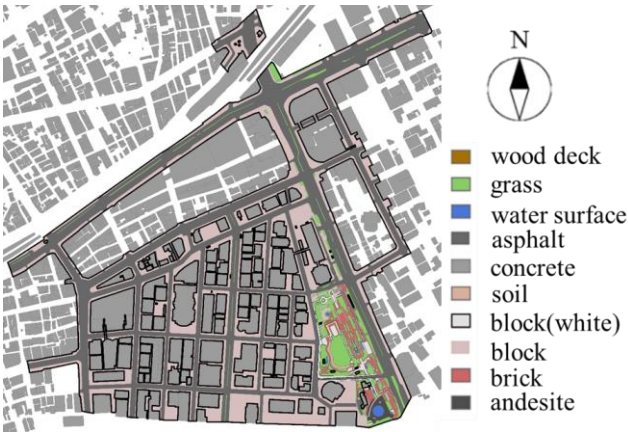


Fig.3 Building shape and land cover distribution in the objective area

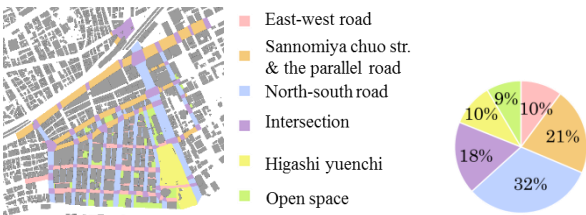


Fig.4 Classification of the study area

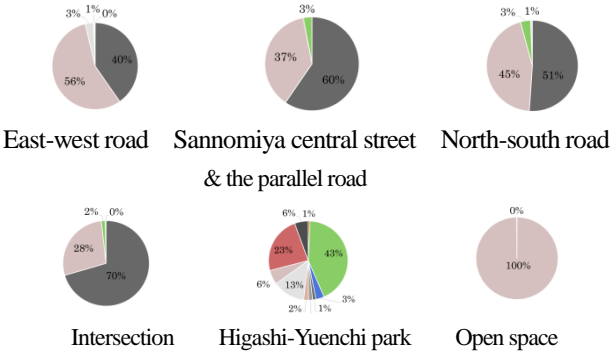


Fig.5 Area ratio of land cover materials in each study area



Fig.6 Distribution of trees

Table.1 Ratio of tree canopy area in each study area

overall	9.7%
East-west road	9.5%
Sannomiya center street & the parallel road	7.1%
North-south road	9.4%
Intersection	3.3%
Higashi-Yuenchi park	31.9%
Open space	4.7%

3.2 表面温度，MRT，SET*の分布

夏期代表日（2019 年 8 月 5 日）の表面温度，MRT，SET* を計算した．気温，湿度は神戸地方気象台の測定データを用いた．天空率，日射量は GIS のツールにより算出した．人体の日射吸収率は 0.5，樹木の透過率は 0.06，着衣量は 0.6clo，代謝量は 1.0met とした．

13時の表面温度，MRT，SET*分布を図7～図8に示す．建物や樹木により日射が遮蔽された箇所の表面温度が低い．樹冠面積率の大きい道路では，東西道路，南北道路ともに終日日射量が少なく，地表面温度の上昇が抑えられている．MRT は，日射の影響と地表面温度の影響を受けて，中央分離帯や東遊園地内の芝生部分で低い．SET* は風速より MRT の影響をより強く受けている．



Fig.7 Distribution of surface temperature (left) and MRT (right) at 13:00 on August 5, 2019



Fig.8 Distribution of SET* at 13:00 on August 5, 2019

3.3 SET*の時刻変化と温熱環境指標の考察

日陰、日向における被覆別の SET*の時刻変化を図 9 に示す。石井ら³⁾による SET*と快適性の関係に従うと、6時から7時はすべての地点で快適となるが、9時には芝生と水盤を除く日向で非常に不快となる。13時から14時には日陰の芝生でも非常に不快、日陰の水盤でも不快となる。18時には日陰の水盤でどちらでもないとなる。日中は被覆の改善より日射遮蔽が SET*の上昇抑制に有効である。

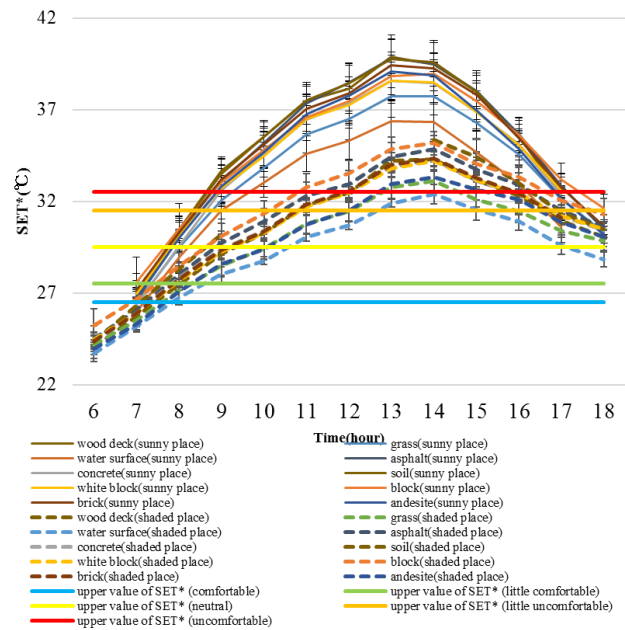


Fig.9 Diurnal variation of SET* on each land cover on August 5, 2019

3.4 表面温度、MRT、SET*の頻度分布

考察対象領域ごとの時刻別の SET*の頻度分布を図 10 に示す。日射の影響が大きく、日陰部分では SET*が低減している。

領域ごとの日陰の頻度分布を図 11 に示す。東西道路では9時から16時に日陰となる箇所の割合が30%~40%で変化しないが、他の領域では正午前後に最小となる。

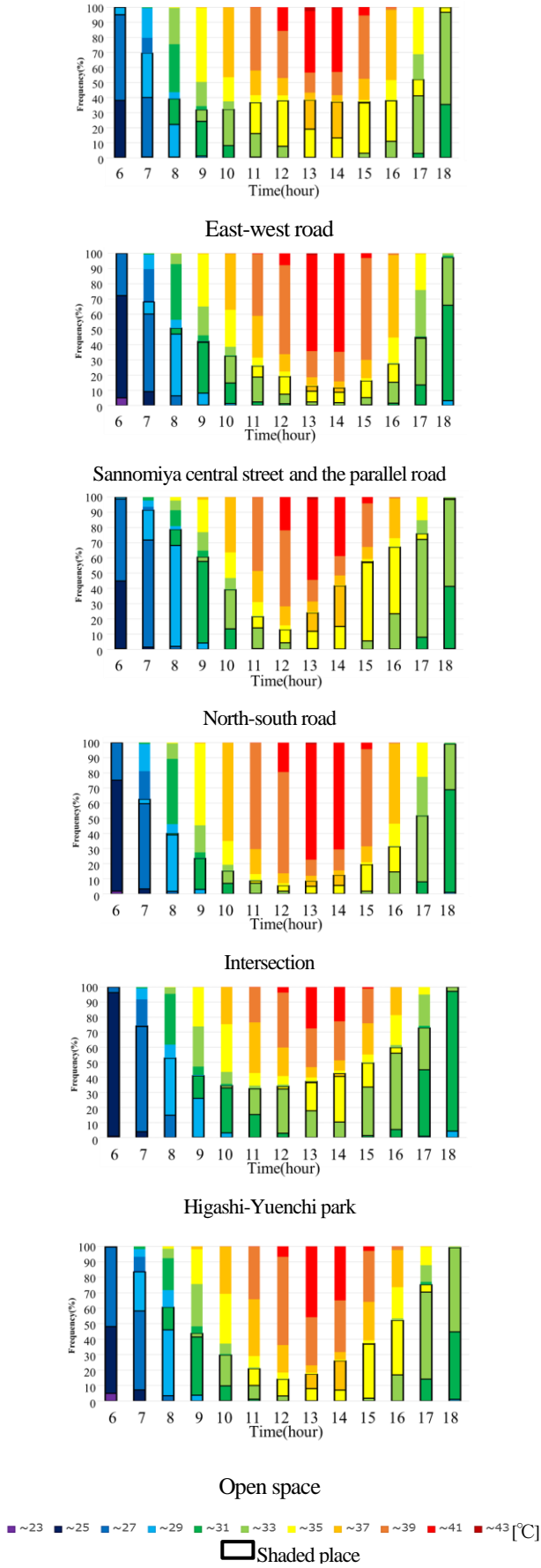


Fig.10 Diurnal variation of the frequency of SET* in each study area on August 5, 2019

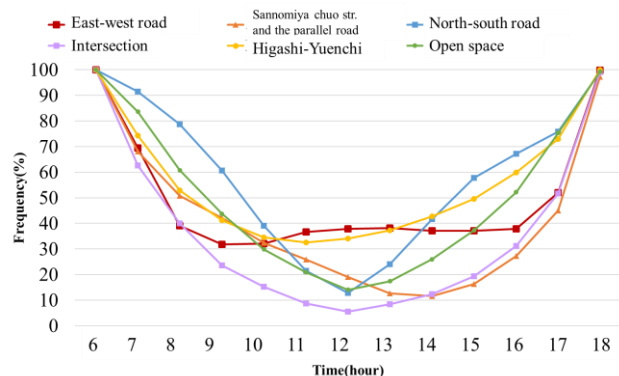


Fig.11 Diurnal variation of the shaded area ratio in each study area on August 5, 2019

3.5 道路幅と地表面温度, MRT, SET*の関係

道路幅と SET*の関係を、被覆材料ごとに日向、日陰に分けて図 12～図 14 に示す。道路幅が狭くなると、地表面温度, MRT, SET*が日向では低下し、日陰では上昇する傾向が若干確認されたが、日向、日陰の違いが支配的である。

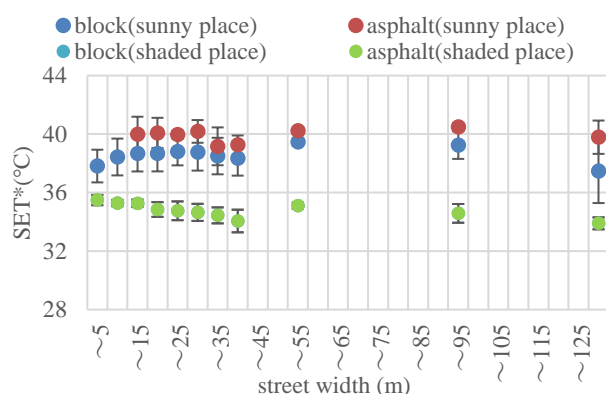


Fig.12 Relationship between street width and SET* at 13:00 on August 5, 2019 (East-west road)

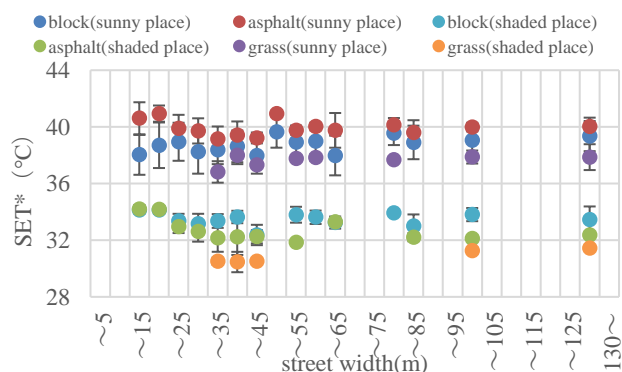


Fig.13 Relationship between street width and SET* at 13:00 on August 5, 2019 (Sannomiya center street and the parallel road)

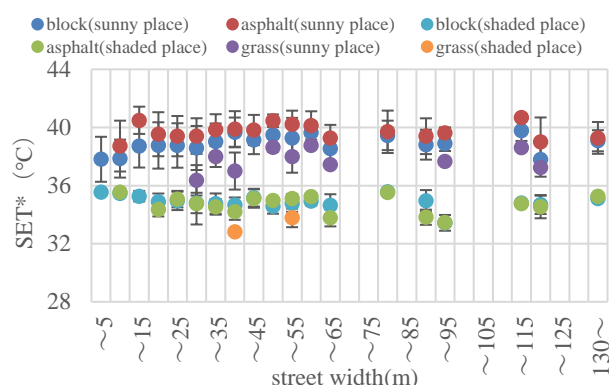


Fig.14 Relationship between street width and SET* at 13:00 on August 5, 2019 (North-south road)

3.6 神戸市との異常高温対策ワークショップ

SET*の分布図などを提示して、神戸市職員とのワークショップを実施し、様々な視点から今後のまちづくりに向けた具体的な可能性を議論した。現在複数の駅前広場のリノベーションが計画中であり、温熱環境指標の分布を踏まえた暑さ対策技術導入検討の必要性が確認された。

4. 結論

神戸市都市部における夏期代表日の SET*の分布には風速より MRT の影響が卓越し、日中は被覆の改善より日射遮蔽が SET*の上昇抑制に有効である。SET*指標に基づく快適感の評価からは、日中は全ての考察対象領域において快適と感じられる場所はなく、日陰であっても非常に不快と感じる地点の割合が大きい。日陰となる箇所の割合は、東西道路では 9 時から 16 時に 30%～40% を推移するが、他の道路では正午前後に最小となる。道路幅の狭い場合に SET*が若干緩和されたが、日射遮蔽の影響が支配的である。

夏期の日中には日射遮蔽と被覆の改善の両方が必要であり、温熱環境指標の分布を踏まえた暑さ対策技術導入の検討が必要である。

謝辞 神戸市の戸澤氏、稲松氏に協力頂いた。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 木山裕貴, 竹林英樹: ヒートアイランド対策の優先的導入の観点に基づく街区特性と街路空間の放射熱環境の関係分析, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2017
- 2) 山本直生, 竹林英樹: ヒートアイランド対策の優先的導入の観点に基づく街区特性と街路空間の風環境の関係分析, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2017
- 3) 石井昭夫ら: 屋外気候環境における快適感に関する実験, 人間・熱環境系シンポジウム報告集 11, pp.134-137, 1987

暑熱環境下における孤立樹木の熱収支の数値解析

Numerical Analysis of Heat Balance of Isolated Tree in Hot Environment

永井 賢人 (大阪府立大学) 木下 進一 (大阪府立大学) 吉田 篤正 (大阪府立大学)

Kento NAGAI*1 Shinichi KINOSHITA*1 Atsumasa YOSHIDA*1

*1 Osaka Prefecture University

Numerical analysis was performed on the daily heat balance of isolated trees under heat weather conditions. Net radiation was estimated using the Ross's radiation transfer model, latent heat was estimated using the Jarvis model, and leaf temperature was estimated from sensible heat. Latent heat was about 70% of net radiation during hours of high solar radiation. However, due to overestimation of the amount of transpiration, the amount of latent heat exceeded the net radiation during periods of low solar radiation. It was found that the heat balance of the whole tree was greatly affected by the inside of the canopy.

1. はじめに

近年、都市部でヒートアイランド現象による気温上昇が深刻な問題となっている。主な原因はアスファルトやコンクリートなどの日射反射率が低く、蓄熱しやすい人工被覆の拡大と人工排熱の増加であると考えられている。ヒートアイランド現象の軽減には対流顕熱輸送量の削減が有効であり、その一つとして緑化が挙げられる。植樹することにより、植物の蒸散により葉面とその周囲大気温度の上昇の軽減と、樹木の樹冠部の日射の軽減による樹木周囲の暑熱環境の緩和が期待できる。しかし、都市域で植樹する際、コスト面や敷地面積の限度を考えると効率的な植樹が好ましい。

本研究では3次元樹木モデルを用いて、樹林帯の樹木と異なるふく射状況である街路樹のような孤立した樹木の樹冠部の熱収支を計算することにより、樹木が周囲の熱環境に与える影響を評価することを目的とする。

2. 熱収支モデル

樹木の熱収支はRossのふく射輸送方程式より正味ふく射量を、Jarvis²⁾モデルより潜熱輸送量の計算を行い、それらの残差を顕熱輸送量とする。顕熱輸送量から対流熱伝達の式を用いて葉温の計算をする。得られた葉温から再び正味ふく射量、潜熱輸送量を計算し、葉温の変化がなくなるまで繰り返し計算を行う。

計算モデルは3次元とし、微小要素に分割し、微小要素ごとで熱収支の計算を行う。図1のように樹木の根本を原点とした計算領域を考えた。樹木CGモデルを描画するAMAPを用いて個葉の枚数、葉表面の配向、葉面積のデータを得る。得たデータを開関数化し、正味ふく射量の計算などに用いる。主に用いる関数として葉面積密度 $a(\mathbf{x})$ 、配置関数 $g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L)$ がある。葉面積密度とは微小要素内に存在する葉面積の総和を微小要素体積で割った値である。次配置関数とは微小要素内に存在する表面の法線ベクトル

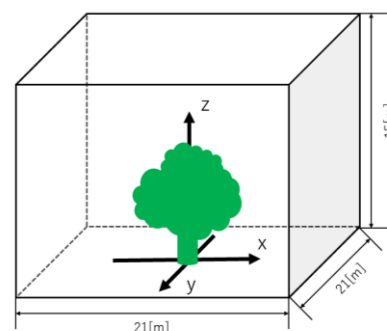


Fig.1 3D tree model.

ルが同じ微小立体角内にある葉の面積の和を微小要素内の総葉面積で割ったものである。配置関数は以下のように正規化されている。

$$\frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) d\omega_L = 1 \quad (1)$$

2.1 正味ふく射量

葉面積密度および配置関数を用いて、Rossのふく射輸送方程式に基づいて樹冠部の各微小要素の正味ふく射量を算出する。基礎方程式は日射・赤外放射に分けられ、さらに日射は直達成分と散乱成分に分けられる。方程式は樹冠部に入射したふく射の減衰のみでなく、葉表面の散乱や葉表面からの赤外放射も考慮した式であり、差分法により計算する。以下に式を示す。

・日射直達成分

$$r_j \frac{\partial i_d(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{\partial x_j} = -a(\mathbf{x}) G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) i_d(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \quad (2)$$

・日射散乱成分

$$\begin{aligned} \hat{r}_j \frac{\partial I(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{\partial x_j} = & -a(\mathbf{x}) G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) I(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \\ & + a(\mathbf{x}) \int_{\omega'=4\pi} \Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') I(\mathbf{x}, \mathbf{r}') d\omega' + a(\mathbf{x}) e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (3)$$

・赤外放射 (遠赤外)

$$r_j \frac{\partial i(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{\partial x_j} = -a(\mathbf{x})G(\mathbf{x}, \mathbf{r})i(\mathbf{x}, \mathbf{r}) + a(\mathbf{x})b(\mathbf{x}, \mathbf{r}) + \frac{1-\varepsilon}{\pi} a(\mathbf{x}) \int_{\omega'=4\pi} \Gamma_R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') i(\mathbf{x}, \mathbf{r}') d\omega' \quad (4)$$

$$e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = \int_{\omega'=4\pi} \Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') i_d(\mathbf{x}, \mathbf{r}') d\omega' \quad (5)$$

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) |\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_L| d\omega_L \quad (6)$$

$$b = \frac{\varepsilon}{\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \sigma T_l^4 \quad (7)$$

$$\Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') = \left(\frac{T}{\pi}\right) \Gamma_T(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') + \left(\frac{R}{\pi}\right) \Gamma_R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (8)$$

$$\Gamma_T(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) H[(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_L)(\mathbf{r}' \cdot \mathbf{r}_L)] d\omega \quad (9)$$

$$\Gamma_R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) H[-(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_L)(\mathbf{r}' \cdot \mathbf{r}_L)] d\omega \quad (10)$$

$$H[f] = f \text{ if } f \geq 0, H[f] = 0 \text{ if } f < 0 \quad (11)$$

ここで \mathbf{r} はふく射光線の方向ベクトル, i_d および I はそれぞれ短波放射の直達成分と散乱成分, i は赤外放射, G は葉群の減衰係数, Γ は葉群の散乱関数, T および R はそれぞれ各波長域に対する単一葉面の透過率および反射率である. 葉面での反射および透過はそれぞれ半球方向に一様であるとする. ε は葉面の赤外放射率, ω は立体角, T_l は絶対温度である. 葉のふく射特性は波長域ごとに異なっており, PAR(可視光), NIR(近赤外), FIR(遠赤外)に分けてそれぞれに反射率, 透過率, 吸収率を定めた. ふく射特性を表 1 に示す. 境界条件として直達日射, 散乱日射, 天空赤外放射, 地表面放射, 地表面反射の 5 項目を考慮する. 直達, 散乱日射は Erbs³⁾モデルより水平面直達日射量, 水平面天空日射量を求める. 天空赤外放射は Brunt⁴⁾の式を用いて気温と地上水蒸気圧より求める. また, 地表面放射, 地表面反射は波長域ごとに反射率を一定の数値で定め, 地中の熱伝導を一次定常熱伝導方程式より求め, 地表面の熱収支から地表面の放射量を計算する.

Table. 1 Leaf radiation characteristics.

Wavelength	Reflectance	Transmittance	Emissivity
PAR	0.1	0.1	0.8
NIR	0.4	0.5	0.1
FIR	0.1	0	0.9

2.2 潜熱輸送量の計算式

個葉の蒸散速度の予測モデルである Jarvis モデルを用いて潜熱輸送量の計算を行う. 各セルの葉面積 Jarvis モデルは大気中の水蒸気モル分率と気孔内の水蒸気モル分率の差と葉面のコンダクタンスとの積より蒸散速度 J_p [mol/m²s] を求める. 葉面のコンダクタンスは気孔コンダクタンス g_s [mol/m²s] と葉面境界層コンダクタンス g_b [mol/m²s] からなる. 以下に式を示す.

$$J_p = \frac{g_s g_b}{g_s + g_b} \frac{p_l - p_c}{P} \quad (12)$$

$$g_s = g_{smax} f_1(Q) f_2(D) f_3(T) \quad (13)$$

$$f_1(Q) = \left(\frac{Q}{Q + \frac{g_{smax}}{a}} \right) \quad (14)$$

$$f_2(D) = 1 - bD \quad (15)$$

$$f_3(T) = \left(\frac{T_l - T_L}{T_0 - T_L} \right) \left(\frac{T_H - T_l}{T_H - T_0} \right)^{\frac{T_H - T_0}{T_0 - T_l}} \quad (16)$$

$$g_b = 0.147 \sqrt{\frac{u}{d_m}} \quad (17)$$

p_l は気孔内の水蒸気圧であり, 気孔内の水蒸気は常に飽和状態とし, 葉温での飽和水蒸気圧を気孔内の水蒸気圧と考える. p_c は大気水蒸気圧, P は大気圧である.

気孔コンダクタンスは光量子量 Q [μmol/m²s], 飽差 D [hPa], 葉温 T_l [°C] のそれぞれの関数の積で表される. 関数は 0~1 の値になるよう正規化されている. 飽差とは気孔内の水蒸気密度と大気の水蒸気密度の差である. 葉面境界層コンダクタンスは風速と葉面幅より求める. 気孔コンダクタンスの関数で使用するパラメータ最大気孔コンダクタンス g_{smax} , 光量子量に関する気孔開度の定数 a , 飽差に関する気孔閉度に定数 b , 蒸散を行う最適温度 T_0 は実測データを用いて値を決定した. T_L は蒸散を行う最低限界温度(5°C), T_H は最高限界温度(42°C)である. また, 葉面境界層コンダクタンスは風速 u と葉面幅 d_m の関数である.

2.3 顕熱輸送量

顕熱輸送量は葉面と大気の大気対流熱伝達より計算する. 以下の式で示される.

$$H = 2a(x)\Delta x\Delta y\Delta z\alpha(T_l - T_{air}) \quad (18)$$

熱輸送は葉の両面で行われ, また熱伝達率 α [W/m²K] は

風速 $u[m/s]$ の一次関数として次式で表される。

$$\alpha = 8.3u + 18.2 \tag{19}$$

上記の式を用いて顕熱量から葉温を計算し、得た葉温から再び熱収支計算を葉温の変化がなくなるまで行う。

3. 孤立樹木の熱収支解析

3.1 解析条件

本研究ではクスノキを対象として熱収支の計算を行った。クスノキは比較的蒸散量が多い樹種であり、また樹形は球形に近くなる。計算領域は x 軸方向、 y 軸方向には-10.5m~10.5m、 z 軸は 0~15m とし、微小要素は各辺 1m の立方体とした。 x 軸正から負の方向に向かって南北、 y 軸正から負の方向に東西となっている。図 2 に樹冠部の 3 次元プロット図を示す。樹高は 11m、樹冠部の地表投影面積は 58.8[m²]、葉の枚数は 16000 枚である。また、表 2 にクスノキの気孔コンダクタンスパラメータを示す。パラメータは実測データを用いて求めた。図 4 に実測値と計算値の相関を示す。パラメータの適合度は R^2 を用いて評価した。 R^2 は 1-(実測値と計算値の差の平方和/実測値の平均値と実測値の差の平方和)で定義される。表 2 より R^2 は 0.88 であり、十分な適合度である。今回使用した気象条件を図 4,5 に示す。気象データは大阪市内の 2016~2019 年の 7 月下旬から 8 月上旬の晴天日 10 日分のデータを平均したものである。

3.2 解析結果

図 6 に樹木の一日の熱収支の解析結果を示す。日射量の多い 10~14 時では潜熱量輸送量の割合が正味ふく射量の 7 割程度であった。樹林帯の樹木の潜熱輸送量の割合は 5 割から 7 割程度と報告があり、クスノキは蒸散量が多い樹種であることから 7 割程度であるのは妥当な結果である。しかし、日射の少ない時間帯では潜熱輸送量が正味ふく射量を上回っておりこれは蒸散速度の光量子量に対する応答を過大評価していると考えられる。図 3 からコンダクタンスの実測値が低いところでは予測値が高くなっており、その影響により潜熱輸送量が多くなっていることが考えられる。日射のない夜間は樹冠部全体の顕熱輸送量が負であることから、葉が周囲大気に対して冷却効果があることがわかる。図 7 に樹冠部の葉温の平均値、最大値、最小値、気温を示す。葉温と気温の差は最大で 4.6℃であった。これは気孔コンダクタンスを求める際に使用したデータと比較すると日射量の多い時間では 4~5℃であったので妥当だといえる。現在、使用している熱伝達率は風速 1.5~3.5m で 30~45W/m²K であるが、葉面が粗面として葉面幅と風速からヌセルト数から理論的に求めた熱伝達率は 13~17 W/m²K であった。このことから顕熱輸送量は実際では解析結果より大きくなることが考えられる。また、日射の多い時間帯でも葉

温の最小値は気温を下回っている。これは図 8 に示される時刻 12 時の樹冠部中心の垂直な断面の顕熱輸送量の分布から日射の多い時間帯であったとしても樹冠内部の顕熱輸送量が負であるからである。顕熱輸送量が負であるのは樹冠表面では日射を吸収し、正味ふく射量が樹冠内部では下がっているのに対して、潜熱輸送量は樹冠全体で勾配が少なく、樹冠部表面と内部での蒸散量に差がないため顕熱輸送量が負となっている。これは日射が少ない時間帯と同様、光量子量に対する蒸散速度を過大評価しているためだと考えられる。

図 9 に図 8 の樹冠部表面と内部の熱収支の比較を示す。図 8 は熱エネルギーを微小要素に存在する総葉面積で割った値であるのに対し図 9 は単位が W であり、樹冠内部の微小要素に比べて樹冠表面の微小要素の熱収支が樹木全体に影響する割合が少ないことがわかる。

Table.2 Conductance parameter

Parameter	Value
g_{smax}	0.365 [mol/m ² s]
a	0.012
b	0.021
T_0	28.3 [C°]

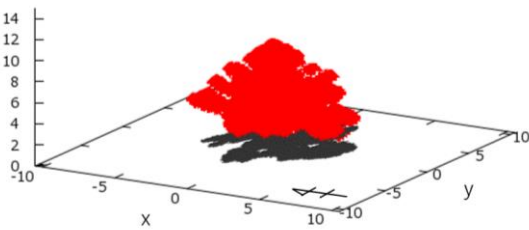


Fig.2 3D plot leaf distribution.

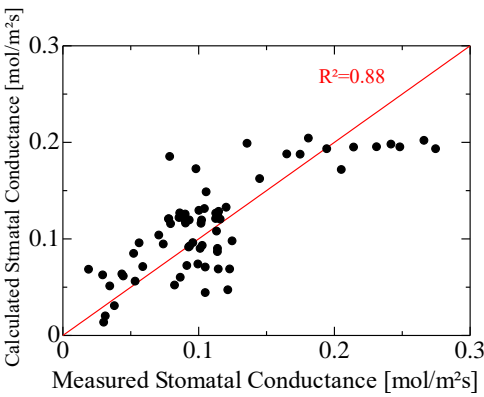


Fig.3 Comparison between measured and calculated conductance.

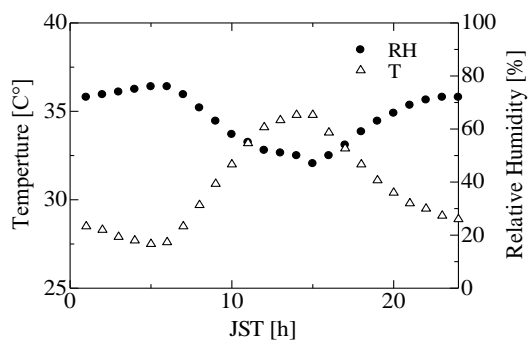


Fig.4 Weather condition (temperature and relative humidity).

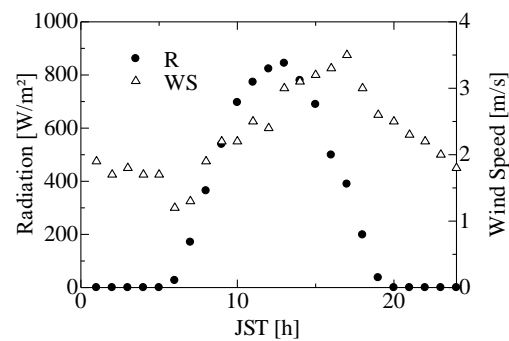


Fig.5 Weather condition (horizontal solar radiation).

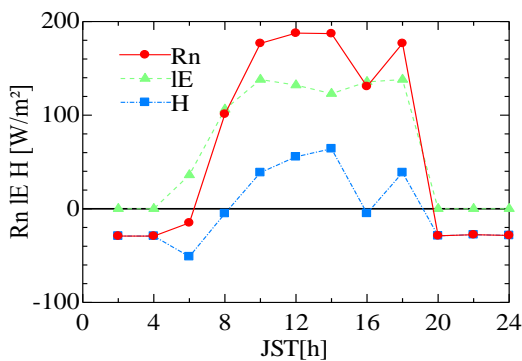


Fig.6 Tree heat balance in a day.

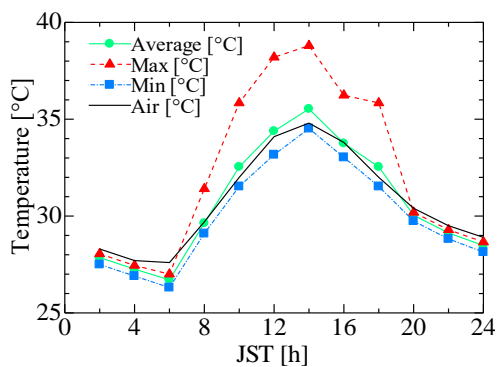


Fig.7 Leaf temperature change in a day.

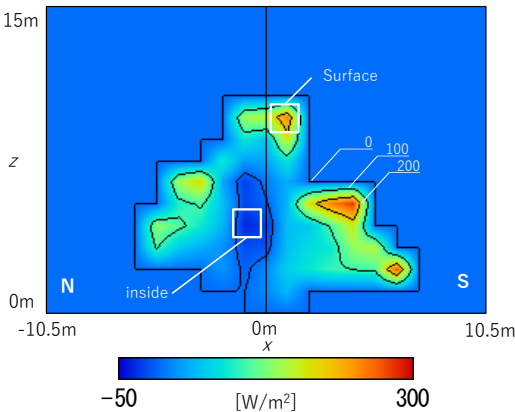


Fig.8 Sensible heat distribution at 12A.M. (y=0).

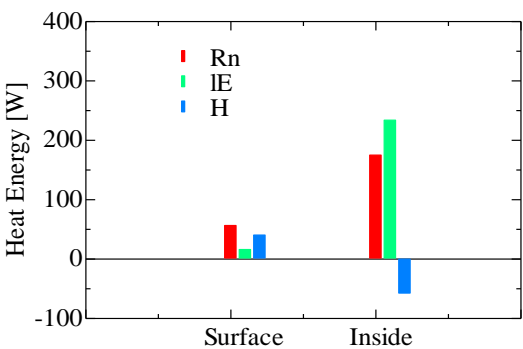


Fig.9 Comparison between surface and inside heat balance of canopy.

4. 結言

- ・日射の多い時間での樹木全体の熱収支としては潜熱輸送量は正味ふく射量の7割
- ・蒸散速度の過剰評価のため正味ふく射量が少ない時間帯では潜熱量が正味ふく射量を上回る
- ・樹冠内部の葉面積が多いため、樹木全体の熱収支は樹冠内部による影響が大きい

参考文献

- 1) Ross, J., Radiation Transfer in Plant Communities, in Monteith ed., Vegetation and Atmosphere, vol.1, 13-56
- 2) Jarvis, P.J., The interpretation of the variation in leaf water potential and stomatal conductance in canopies in the field, Phil. Trans. R. Soc. Lond., 273, 593-610, 1976
- 3) Erbs D. G., Klein S. A., Duffie J. A., Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation, 28[4], 293-302, 1982
- 4) Wilfried . B., On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies, Water Resour. Res., 11, 742-744, 1975