

都市の気候解析とクールシティに向けた展望  
Urban Climate Analysis and Vision to Cool City

神戸大学 名誉教授  
Professor Emeritus  
森山正和  
Masakazu Moriyama

キーワード: 都市気候 (Urban Climate)、ヒートアイランド (Heat Island)、地表面熱収支 (Earth Surface Heat Budget)、潜在自然気候 (Potential Natural Climate)、エコシティ (Eco-city)

## 1. はじめに

1970年頃からはじまった建築学分野におけるヒートアイランド現象の研究について、その始まり頃の状況について、私の視点から振り返ってみたい。一方、最近では夏季の熱環境は猛暑災害ととらえられるような年も現れて来た。このような状況で都市の熱環境のあり方を考えたとき、将来的なクールシティに向けた計画を考えてみたい。

## 2. 私の視点から見た都市気候解析の研究

### 2.1 1970年代

1972年6月5～16日にストックホルムで国連人間環境会議が開催され、人間活動の地球規模の環境影響が注目を浴びた。また、1973年にはアラブ産油国による石油戦略でいわゆるオイルショックと呼ばれる混乱が生じ、物価上昇が激しさを増した。オイルショックを契機に省エネルギーの必要性が高まり1970年代後半は省エネルギーに関する研究や行政の施策が深化していった。その中で、1973年には、尾島俊雄編「都市の設備計画」<sup>1)</sup>が出版され、建築環境工学の分野に都市環境の視点が導入され、都市設備という言葉も使われるようになった。「都市の設備計画」は、その当時出版された都市環境及び都市設備分野のユニークな書物であり、尾島俊雄研究室に所属していた学生が中心となり執筆したものである。

私の修士論文のタイトルは、「鹿島臨海工業地帯の熱環境調査」であり、地表面熱収支の考え方を背景にしながらコンビナートによる熱環境への影響を定量的に計測しようとした<sup>2)</sup>。この研究の背景として、図1に示すように、人間活動がもたらす地球や都市の大気の温度変化の問題を挙げている。私は1972年に大阪市立大学家政学部（後の生活科学部）住居学科の助手となり研究教育の世界に入った。1973年には尾島俊雄研究室において東京都心部と郊外を対象に赤外線ラインスキャナーによる都市の表面温度観測が行われ、夏季晴天日の表面温度変化を5回/日の観測からその特徴をまとめた<sup>3)</sup>。リモートセンシング手法についてはこの分野を先行的に発展させていた鳥羽商船高等専門学校の落合弘明先生に教を乞うた。1974年8月には開園前の長居公園植物園でセイタカアワダチソウの草地で地中30cm、高さ2m位までの垂直温度分布の実測を行い、草地の熱収支について考察した<sup>4)</sup>。その際に大いに参考としたのが内嶋善兵衛先生が雑誌に連載した農業気象分野の地表面熱収支に関する文献<sup>8)</sup>及び農業気象ハンドブック<sup>9)</sup>である。

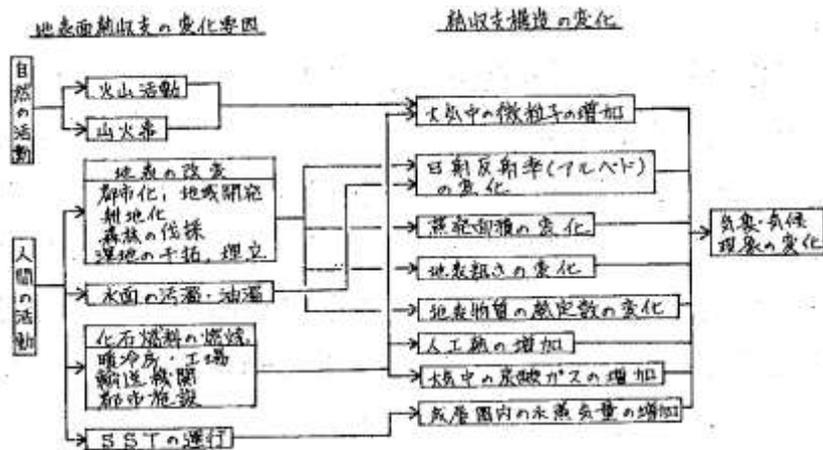


図1 地球及び都市スケールにおける熱収支の変化要因（文献3）

その後、大阪府をスタディエリアとして地域的熱収支のマップ作りを行った。観測した都市の表面温度の特性を基礎として、都市の平均的な熱収支成分の計算方法を整理した<sup>4)</sup>。研究の当初より複雑な地表を地域的な熱収支の視点から如何に表現するかは大きな課題であった。表1に示すように土地利用の種類を原単位とする「単位土地利用」の考え方<sup>6)</sup>で大阪府全体の領域に拡張した。「都市の設備計画」の本の中には、関東地域を500mメッシュで作成した単位土地利用メッシュマップが掲載されている<sup>1)</sup>。

以上の研究成果を「都市化による地表面熱収支変化に関する研究」として尾島俊雄先生指導のもとでまとめ、1978年に博士論文として提出した。都市の地表面熱収支は、Budyko（内嶋善兵衛訳）による「気候と生命」<sup>10)</sup>、Geigerによる”Climate near the Ground”<sup>11)</sup>が考え方の拠り所となった。

Myrup<sup>12)</sup>の比較的単純な境界層1次元熱収支モデルは地表付近の気温計算を容易に計算できるという点で魅力的であった。1次元熱収支モデルは、後に、大気安定度を考慮した形でよく使われるようになった。以上のように、1970年代の都市の気候解析は、各種土地利用や各種地表面における地表面温度及び地表面熱収支の観測が行われており、航空機によるリモートセンシング手法を用いた都市表面温度の観測も行われた。

表1 単位土地利用の定義（文献6）

表 4.1 (a) 都市スケールの単位土地利用 (500m LUN)				表 4.1 (b) 建築スケールの単位土地利用 (10m LUN)			
	500m LUN	地表面状態の例	説明	大分類	10m LUN	10m LUNの名称	
自然地表	⑥ 水面	海, 川, 湖, 池	10m LUN (表4.1 (b)) と同様	自然地表	⑥	水面	
	① 裸地	裸地, 砂地			①	裸地	
	② 水田	水稲, 湿田, 沼田			②	水田	
	③ 草地	畑, 牧草, 芝地			③	草地	
	④ かん木	籐地, 茶畑, 桑畑			④	かん木	
複合地表	⑤ 森林	山林, 樹林, 果樹園	樹木に囲まれた居住地, 建物周辺の防風林, 屋敷森を含む。	建設地表	⑥	アスファルト舗装	
	⑦ 田園居住地	都市郊外の住宅地			⑦	瓦屋根	
	⑧ 散在居住地	住宅団地, 工場			建物が, ある程度の距離をもって並んでいる土地	⑧	トタン屋根
	⑨ 総描市街地	商業・業務地, 一般市街地			建物が密集し, 個々の建物を総合して, 総描と称し, 広い地域では空地面積が, 約20%以下の土地。都市計画分野における連担市街地に相当する。	⑨	RC屋根
	⑩ 高層市街地	事務所街	総描市街地内において, 3層以上の建物が密集している土地。				

(注) 上の表において, 10m LUN  
 ⑥ アスファルト舗装には, 一般道路・砂利道・鉄道・高架道路などが含まれているものとする。

## 2.2 1980年代

1979年にも2度目のオイルショックはあったが省エネルギーの努力が実り、大きな影響はなかったと言われている。逆に、1980年代は「初めのころは」Japan as No. 1」と言われ経済的には安定していたが、後半になると主に土地投機によるバブル経済が問題となって行った。パーソナルコンピュータは80年代半ばには不可欠な研究の道具となっていた。また、80年代はドイツを中心に発展したエコロジー建築や環境共生住宅などの環境配慮の建築が注目された。私は1980年4月に神戸大学工学部環境計画学科の松本衛教授の研究室に専任講師として異動した。

80年代に入ると都市気候に関する国際会議による研究交流がはじまった。1980年11月に、イスラエルのヘルツェリアで都市気候国際会議が開催された。京都大学教授であった堀江吾郎先生から勧められたこともあり私も参加した。この会議でハイデルベルク大学のProf. Fezerと知り合い、90年代半ば頃まで様々な交流を続けた。1986年9月、カールスルーエ大学でProf. Hoescheleが主催した都市気候国際会議が開催され、Mr Zimmermannと知り合った。ドイツ人研究者との研究交流を長い間サポートして来られたProf. Baumüllerもこの会議に参加していた。

大気安定度を考慮した1次元熱収支モデルは都市化した地表付近の気温の推定方法として簡易に用いられるように開発され、パーソナルコンピュータで計算が容易になった。図2は、上空高さ100mの温度と風速及び地中温度を与えて地表付近の気温を計算したものである<sup>13),14)</sup>。大気の安定度は日中不安定、夜間は安定又は中立状態である。夜間の気温に人工排熱が大きな影響を与え、日中の気温には緑地が大きな影響を与えることが示されている。しかし、多くの観測では緑地内の日中の気温は計算結果ほど大きく下がることはない。緑被表面温度は低いが日中の不安定大気による大気の乱れが気温を一様化する働きがあるので緑地内は期待するほどには下がらないと考えられる。このモデルの限界である。

そのほか、80年代には松本衛先生のもとで次のような様々なテーマを模索した。

- ・1981年に、科学研究費の採択を契機に「指向反射特性」の研究を開始した。この延長でリモートセンシング手法による土地被覆調査に適用を意図して植物の放射計算モデルに用いられていた配置関数の考え方を植物から都市に拡張できないか検討したが難しすぎて断念したままである<sup>15)</sup>。

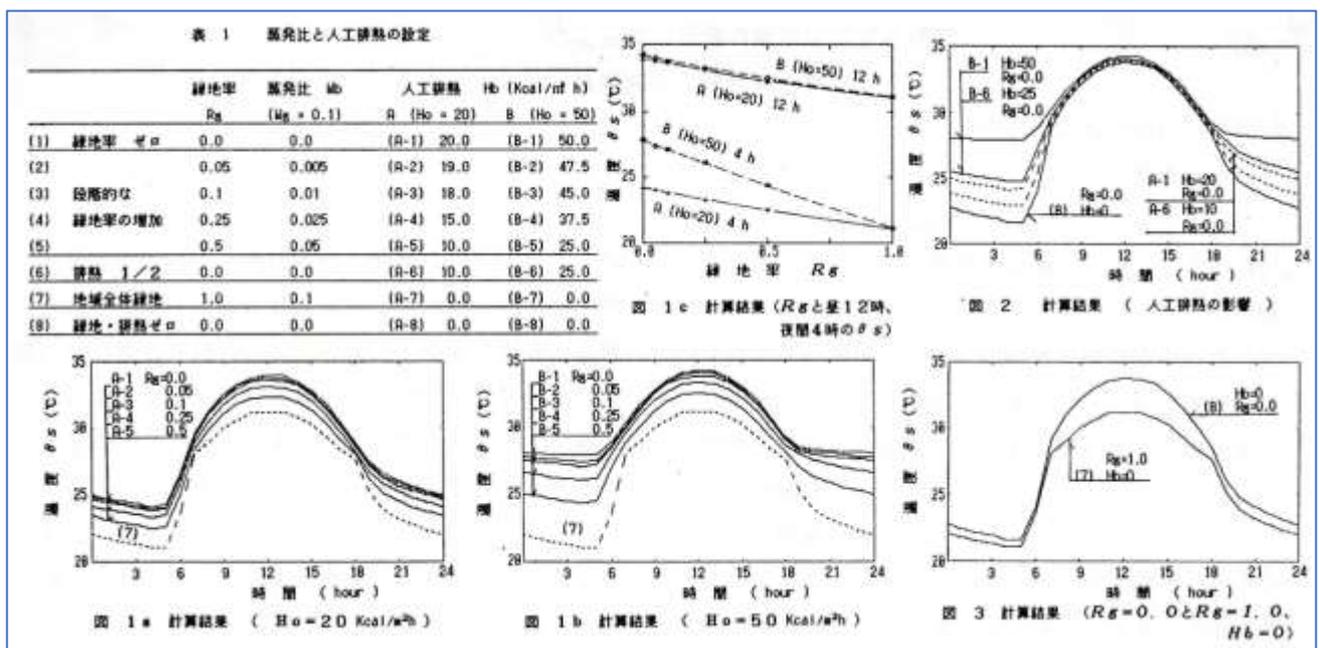


図2 1次元熱収支モデルによる地表付近気温の計算結果 (文献13))

- ・1985年、日本建築学会環境工学委員会主催の設計競技「屋上の設計」に神戸市勤務の卒業生らと参加、新神戸と三宮をつなぐ空中プロムナードを提案、Kobe Uranus Promenade で首尾よく入賞を果たした<sup>16)</sup>。
- ・1989年6月から8月にかけて、神戸大学工学部の益田奨学基金を得てエッセン大学の Prof. Kuttler のもとにおよそ1カ月間滞在し、ルール地域のクリマアトラスに出会い資料調査を行った。また、1994年9月には在外研究員として滞在していたカールスルーエ大学において、主に、日本とドイツの研究者による small meeting 「都市計画のための気候解析」を Prof. Hoeschele、Mr Zimmermann とともに開催した。これが第1回独日会議となり、この会議はその後、原則3年ごとに開催され、次回は2020年8月31日から9月3日にベルリンで第9回が開催される予定である。

### 3. 「クールシティ」への展望

#### 3.1 「クールシティ」とは

地球温暖化問題はCO<sub>2</sub>をはじめとした温室効果ガスの排出削減が喫緊の課題である。2015年のパリ会議では温室効果ガスの排出抑制について、世界全体が一層の努力を協力して行うことが決められている。省エネルギーは国によって温度差はあるが日本はエネルギーを取り巻く情勢から引き続き重要な課題である。1973年のオイルショック以来石油漬け社会からの脱却を図り2011年の大震災を経て省エネルギーを前提とした社会構造の構築はゼロエネルギー建築などを通してかなり進んで来たと考えられる。都市のヒートアイランドは元々都市特有の気候現象として地理学や気象学の研究対象という色合いが濃かったが、地球温暖化が顕在するにつれ気候的に異常な暑熱環境が現実のものとして現れるに至ると、工学的な制御の必要な課題となるに至っている。温室効果ガスによる気候変動の対策に準じて言えば、ヒートアイランド現象（都市の暑熱環境）の緩和策と適応策は次のように説明されるであろう。

・暑熱環境緩和策: 日中の日射の受熱を防ぐ、すなわち、日射熱の蓄熱を防ぎ夜間の保有熱量を抑える。クールルーフや遮熱性舗装、保水性舗装などが有効であり、体感的な評価よりも広域的、あるいは地球スケールの気温低下や二酸化炭素削減効果を意図している。例えば、Prof. Akbari の都市のクールルーフ化による地球温暖化対策の研究などがある<sup>17)</sup>。

・暑熱環境適応策: 緑陰や水場・水辺などの屋外憩い空間などの設置や増設であり、主に、暑熱環境時のヒートストレスの軽減や熱中症対策を意図している。

以上のように、都市のヒートアイランド対策は地球温暖化の緩和策と適応策の両面に必要とするが、快適で健康な都市を創るというヒートアイランド対策の目的で言えば、近年の異常高温をもたらす気候変動の影響は、適応策に対する研究の重要性が一層増して来ているように思われる。

#### 3.2 ヒートアイランドの定義 - 潜在自然気候からの発想

図3に示す「潜在自然気候」はその土地状態が「潜在自然植生」<sup>18)</sup>であった場合に予測される気候である。都市化の意味を考える一つの基準を与える。都市ヒートアイランドとは現況土地状態の気温分布と潜在自然気温との差として定義できる。これはある程度、数値計算で求めることが可能になった<sup>19)</sup>。現存土地状態と潜在自然植生との間に将来の都市をイメージすることができる。

現在、未来都市のモデルとして一般的に挙げられるものには、エコシティ（エコロジカル・シティ、環境共生都市）、コンパクトシティ、スマートシティなどがある。いずれも都市の持続可能性（サステナビリティ）を意識した名称であると考えられる。ここで、「クールシティ」も同様に未来都市のイメージとして用いられ、「クール」という言葉が「涼しい」から「冷静な」「格好いい」などの意味でも使われる。ここでは、主に、都市の暑熱環境の軽減を意図してヒートアイランド対策の面から考える。



図3 現存気候と潜在自然気候との差でヒートアイランドを定義

### 3.3 コンパクト・エコシティの構想

現代都市の環境計画において必要な3つの改善を考える。

- (1) エコシティ：緑・水辺空間及び風の道を確保し、ヒートアイランドや大気汚染を緩和し、レクリエーション空間を豊かにすること → 河川を復活させ、緑地を都市の1/3確保し、風の道を形成すること
- (2) コンパクト化：環境インフラ（水・エネルギー・廃棄物）の供給処理能力を充実させ、資源の有効利用を計るとともに、環境汚染を防ぐこと → 都市をコンパクト化して設備の共有・共同利用を進める
- (3) 移動のネットワーク：公共交通を充実し、快適な緑陰の歩行・自転車ネットワークを形成すること → 地下鉄の整備促進、駅間は路面電車や新交通システムで結び、緑陰の歩行・自転車ネットワークを整備する

ここで、大阪を中心としたコンパクト・エコシティのケーススタディを行った<sup>20)</sup>。コンパクトな居住空間、コンパクトタウンが、基盤の目状に整備された地下鉄乗換駅（結節点）を中心（核）に立地するものとする。中央付近は公共施設や業務商業施設が立地し、周辺に住宅が立地するモデルを想定する。図4に示すように、都市全体は「コンパクトタウン」の集合である。コンパクトタウンはある程度の生活の完結性、自治的性格があり、種類、規模、自然緑地空間との関係性距離、自然立地の魅力継承などを研究する必要がある。

そのほか、以下の点に留意する必要がある。

- ・暑熱環境対策のビジョンについて、緩和策として規模の大きな防暑林、オープンスペースの形成が必要であり、適応策として、緑陰遊歩道・緑陰自転車道と水浴び可能な水場や水辺と風通しの確保などである。
- ・風の道（風通し）は、人間活動から生まれる汚染物質を除去したり、暑熱環境における蒸し暑さ（湿気環境）を軽減する意味からも重要である。



図4 大阪中心地域を対象としたコンパクト・エコシティのスタディ（図作成：田中貴宏）  
大阪グリッドモデル、緑被面積 30%ケース、既存街区を各ゾーンに 1 / 3 ずつ均等に配分

#### 4. まとめと今後の課題

クールシティのビジョンとして、緑・水辺空間及び風の道を確保し、ヒートアイランドや大気汚染を緩和し、レクリエーション空間を豊かにすること、そのために、緑地を都市の 1 / 3 は確保し、風の道を形成することが重要である。

大阪には海風があり陸風もある。この自然現象を意識して気候環境を考える。大阪地域の気候で快適性を向上させるコントロールの最も難しい熱環境は「蒸し暑さ」である。基本的には機械力で除湿に頼らなければコントロールができない。しかし、特に外部空間では「風通し」で緩和され、「自然な風環境」に適応して居住空間を考えることも重要である。大阪の中心部辺りは、風に恵まれた住みよい都市と考えることもできる。

環境容量は街の作り方で増やすこともできる。人が幸福（満足）と感ずる都市空間の枠組み、現代社会における自然と人との安全で満足な距離の取り方、空間構成・規模、居住密度、それを見出して環境容量を意識して増やす。それらは時代によって、場所によって、人によっても異なるので一律には規定できないが、その考え方は知恵として受け継ぐことができる。

<参考文献>

- 1) 尾島俊雄編：都市の設備計画、鹿島出版会、1973年
- 2) 尾島俊雄、森山正和、田口高志：サーマルシステムモデルの作成（その2）（A モデル—鹿島地域における熱環境実測調査）、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）昭和47年10月
- 3) 尾島俊雄、森山正和：地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究 第1報地表面温度の実測研究、日本建築学会論文報告集第245号、昭和51年7月
- 4) 尾島俊雄、森山正和：地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究 第2報地表面熱収支の計算法と実測、日本建築学会論文報告集第245号、昭和53年3月
- 5) 森山正和：地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究 第3報地表面熱収支の計算スタディ、日本建築学会論文報告集第245号、昭和53年10月
- 6) 森山正和：地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究 第4報地域環境アセスメントへの応用—大阪地域におけるケーススタディ、日本建築学会論文報告集第245号、昭和53年11月
- 7) Toshio Ojima, Masakazu Moriyama:Earth Surface Heat Balance Changes Caused by Urbanization, Energy and Buildings, 4(1982)99-114
- 8) 内嶋善兵衛：技術者のための農業気象学講座、農業技術、1964年2月～11月
- 9) 新編農業気象ハンドブック、養賢堂、1974年
- 10) エム・イ・ブディコ（内嶋善兵衛、岩切敏訳）：気候と生命（上）、東京大学出版会、1973年
- 11) Rudolf Geiger:The Climate near the Ground, Harvard University Press,1966
- 12) Leonard O. Myrup: A Numerical Model of the Urban Heat Island, Journal of Applied Meteorology, vol. 8, No. 6 Dec. 1969
- 13) 森山正和、松本衛：1次元熱収支モデルによる都市気温の推定に関する研究（その2）大都市熱帯夜の対策計算スタディ、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、昭和61年8月
- 14) Masakazu Moriyama, Mamoru Moriyama:Control of Urban Night Temperature in Semi-tropical Regions During Summer, Energy and Buildings, 11(1988)213-219
- 15) 松本衛、森山正和：都市の放射熱環境の定量化における“表面”の定量化について、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、昭和57年10月
- 16) 第1回環境設計競技 審査員講評・入選作品、建築雑誌、1986年3月
- 17) Hashem Akbari, Surabi Menon, Arthur Rosenfeld: Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO<sub>2</sub>, Climatic Change, DOI 10.1007/s10584-008-9515-9, 2008
- 18) 宮脇昭：日本植生誌、至文堂、1980-1996
- 19) 北尾菜々子、森山正和、田中貴宏、竹林英樹：メソ気象モデルWRFを用いた大阪地域のヒートアイランド現象に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第75巻第651, 465-471、2010年5月
- 20) 森山正和：ヒートアイランド対策の要素技術と土地利用の改善 風土に適応した生活のための都市空間デザイン、建築設備士、2008年10月