

環境システムとしての大気・熱環境研究の来し方行く末

A study on atmospheric and thermal environment as an environmental system: Its past and future

一ノ瀬俊明*

ICHINOSE Toshiaki*

ABSTRACT: The author discussed on the current standpoint and its past and future of atmospheric and thermal environmental researches performed in the discipline of "Environmental Systems Research (ESR)". Most of those researches orientated a mitigation of urban thermal stresses. In Japan, architecture is the leading discipline on this area, while geography and meteorology are in foreign countries. This area in ESR has achieved at the beginning and the end of 1990's. By the great improvement of computing environment through 1990's, numerical model simulation has become familiar with us, otherwise a value of performing numerical simulation itself has become less important and it needed methodological outstanding and obvious purpose. Cross-border working group around environmental sciences, establishment of middle or big scale research foundations and activities of ESR researchers in those societies have helped this discipline to grow up. Studies on air pollution in urban area has been less popular through 1990's in Japan. But their necessity has increased in Asian cities developing now, therefore studies on controlling method by urban planning process with a combination of a mitigation of thermal stress is necessary. The author concluded this is a mission of ESR.

KEYWORD; thermal environment, heat island, numerical simulation, observation, review

1 はじめに

本論では、「環境システム研究」に掲載された当該分野の論文を、国内外の研究動向と対比しながら、その位置付けならびに来し方行く末を論じる。環境システム研究における大気・熱環境研究のほとんどは、都市のサーマルストレス緩和を指向したものである。従来国内では、建築学の分野において最も盛んに取り組まれ、建物～街区スケールの観測・数値計算等において先行研究が豊富である。一方海外では気象学者・地理学者がこの分野に熱心に取り組んでいる。両者とも環境システムの一要素に対する研究というスタンスよりは素過程の解明に力点を置いている感がある。また、中核的な国際学会も存在しないが、日本の研究水準は高く、数値モデルや観測に定評がある。よって、本論では環境システム研究における大気・熱環境研究の対象空間スケールをメソスケール以下に限定する。それを超えるスケールについては、地球環境研究の分野でも評価がなされるものと考えられるためである。

2 環境システム研究における大気・熱環境研究の歴史

「環境システム研究」でこの分野が成長したのは 90 年代初頭、そしてこの Society の活動に触発された周辺分野からの参加をみた 90 年代終盤である。90 年代を通じ計算機環境は飛躍的に発展し、モ

* 国立環境研究所地球環境研究センター Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

デルによる数値シミュレーションが身近なものとなった。反面その実行自体の価値は乏しくなり、手法上の創意工夫と明確な目的意識が求められるようになった。また観測は従来人手と機材の確保が悩みの種であったが、都市熱環境関係の分野横断的研究会、中～大規模研究プロジェクトが90年代に入って立ち上がり、そこで「環境システム研究」周辺の研究者が中核的役割を果たしていることも、この分野の成長理由の一つであろう。

90年代初頭にエンジニアリングワークステーション（EWS）上のUNIX環境が普及するまでの間、主たる計算機環境は各大学・研究機関のメインフレーム計算機であった。そこではもっぱらTSSもしくはバッチ処理により計算が行われ、計算結果の図化にしても使い勝手がいいものではなく、今日の常識からすれば膨大な計算課金が必要であった。よって、分散処理の考え方にもとづくEWS-UNIX環境の普及は、計算は有料、計算時間はユーザーがシェアするものという従来の常識を覆すことになった。しかしEWS本体及びそこで動作するソフトウェアは高額なものが多く、3次元の流体計算などを気軽に行う条件は、90年代中盤のMS Windows+Pentiumプロセッサという作業環境の登場を待たねばならなかった。また98年以降は低価格の高速機種が次々に登場し、そのCPU速度はEWS-UNIX環境のそれに比べ、コストパフォーマンスの点で優れている。環境システム研究におけるこの分野の成長も、計算機環境の向上を如実に反映しているものと思われる。

3 90年代前半の動向

90年代前半までの数値計算は、空間スケールとしてはメソスケール、空間解像度は数キロ程度のものが主流であった。都市周辺の気温場・風系に対する地形や一般風の効果については、中井ら（1988）、北田・久保田（1992）、川又ら（1992）が計算している。もちろん、現実のフィールドを対象に計算を行う以前に、仮想簡略地形条件での理論計算が繰り返されたことはいうまでもない。

土地利用の改変に伴う都市の温暖化機構については、70年代には既に定性的に知られていたものであったが、北田・久保田（1992）は、地表面熱収支過程を組み込んだ3次元気象モデルを用い、実際のフィールドでの都市温暖化を観測結果と対比して示した先駆けであり、その後の類似研究のプロトタイプを示したといえる。また藤野ら（1994）は、南関東における海陸風循環、一般風とヒートアイランドの形態との関係を論じている。将来における具体的な開発の影響をこの手法で検証しようとした研究としては、河原ら（1994）、大濱ら（1995）、泉ら（1999）などがある。河原ら（1994）のシナリオは臨海部の開発、大濱ら（1995）の対象は市街地の風上に設けたグリーンベルトの冷却効果である。泉ら（1999）は国政レベルでも検討されている首都機能移転をシナリオとして、実際の移転候補地における熱環境変化の予測を行った。いずれの候補地でも移転に伴う昇温は0.5～1.0℃と小幅であるが、臨海都市の場合は海風の影響により昇温地域が広域化する。水鳥ら（1994）、一ノ瀬ら（1997）は、地表面境界条件として人工排熱時空間分布のシナリオを実際の都市で検証しているが、人工排熱の削減は実現が困難なわりに効果が小さいことも浮き彫りとなった。

上野ら（1992；1993）は、リモートセンシングと1次元熱収支モデルにより、現実のフィールドで時系列的に都市効果を検証した。また、リモートセンシングで得られるのは地表面輝度温度であるが、これを用いて地上気温分布を広域的に推定しようとしたのが金子ら（1994）である。リモートセンシングの普及につれ、最近でも同様の研究は数多く行われているが、いまだ決定的な推定方法は見出されていない。植物の蒸散作用を表現するSiBモデルを都市気候モデルに組み込んだのは大濱ら（1993）である。この手法は従来GCMの分野で行われていたものであるが、植物活動の日周性を含む細かな熱や水蒸気の挙動をモデルで表現することは、モデルの空間解像度を高める場合に重要と思われる。

一方観測については、都市人工地覆の熱収支・蓄熱特性、都市大気の加熱が、横川ら（1989）、浅枝ら（1992）によって取り組まれている。これは都市インフラとしての舗装のメンテナンスや、交通騒

音の削減という視点からの要請もあったためである。アスファルトとコンクリートの比較、夏季における熱フラックスの1日の挙動などが観測及び理論計算で明らかにされた。また、地表面付近の流れにより舗装面から大気に熱が輸送される様子を柴原ら（1993）が観測している。さらに、都市の気温低減に寄与するものとしては都市河川の微気象緩和効果も注目されている。武若ら（1992）は観測によりこれを確認している。木内ら（1995）は、景観との関連でも河川空間がもたらす市街地の快適性評価を行っている。

人工排熱量の定量化に関する研究は、当初生活科学的色彩の強い都市におけるエネルギー消費構造の研究からスタートした。この研究から伸びるもう一方の枝は、CO₂ 排出量削減に代表される地球環境研究である。この重要な研究は、平松ら（1992）、守田（1993）などによってなされ、今日様々な計算にシナリオとして用いられる都市人工排熱を、膨大な基礎資料から定量化していくことの困難さを示すものであった。その後都市域のエネルギー消費量と称する多くのデータを目にするようになったものの、出典によるばらつきが大きく、この作業手法自身はいまだ確立されていない感がある。従来、人工排熱量はエネルギー消費量に等しいとする研究が多かったが、守田（1996）は個別のエネルギー消費機器における消費から排熱の発生にいたるプロセスについても言及・考察している。

都市インフラ改良の視点から、都市排熱の削減・有効利用（特に下水排熱）を指向した研究としては三好ら（1990）などがある。このアイデアは後に一ノ瀬ら（1996）が GIS 上で解析システムとして具体化している。また榛沢ら（1989）、武田ら（1990）は土地利用分布と人工排熱分布の関係に着目し、人工排熱分布からみた理想的な土地利用パターンの提示を、簡単なモデルをもとに現実のフィールドで行っている。類似の研究としては、加藤ら（1998）が環境負荷の小さな都市形態をめぐって、自動車交通と熱環境がトレードオフの関係にあることを示したものがある。

全文審査論文の募集がスタートした 92 年、論文数は飛躍的な増加をみることとなり、その後研究されることとなった主なテーマのほとんどが登場した。また 94 年には 3 次元気象モデルを用いた研究が飛躍的に増加した。

4 90 年代後半の動向

96 年を境に新たな流れが顕在化した。都市における熱環境を研究する目的はやはり、サーマルストレスの小さな都市形態を模索することにある。これまでは、3 次元気象モデルの空間水平解像度が数キロ程度と荒く、土地利用変化や人工排熱のシナリオを与えての事例解析であることが多かった。しかし、これでは具体的な街区の設計に踏み込むことはできない。90 年代後半になって街区スケールを対象とした研究が飛躍的に増加したが、計算機の性能向上に加え、フィールドでの観測を可能にする大型研究プロジェクトの成立、気象学・地理学等との交流の成果などもその背景にあることを忘れてはならない。一部他分野からの参入の効果もあろう。

Eusuf *et al.*（1994）は、ストリートキャニオンと上空大気との顕熱交換特性について理論計算の結果と実測データとを対比させて論じた。ここで重要となったのは街区の形状（天空率など）と風速である。この研究は街区形状と熱環境の関係を議論するための先駆けとなった。つづいて Ca *et al.*（1996）は舗装材の微気象影響評価のため、都市キャノピーモデルを開発した。赤川ら（1996）は 2~3km² 程度の仮想開発地域における街区の形状や植生の導入状況をシナリオとした熱環境計算を行った。浦野ら（1998）は構造の複雑な都市キャノピーから都市大気への顕熱供給をモデル化するため、都市キャノピー内の気温場を一様とみなしてキャノピー内の放射や風系場の計算を容易にする手法を提示した。3 次元気象モデルには水の挙動等の植物生理学的過程が導入されるようになり、藤野ら（1996）はこの手法を中近東の砂漠地域における灌漑緑化事業評価に適用した。これは、気候条件が異なる地域での多くの新たな知見に結びついた。また実際の都市地表面は都市キャノピーや植生キャノピーが入り混じる複雑な形状

をしており、その形状故の計算の難しさがあったが、岡村・北田（1997）はメソスケールモデルにこれらサブグリッドスケールの要素を導入し、植生によるクールアイランド効果を再現している。なお、ここ 2〜3 年はネスティングの技術を取り入れた計算例が気象学、建築学の分野で増えており、環境システム研究の分野でも一般化するものと予想される。盆地には特有の気候、循環場が生じることが知られているが、これを観測と数値計算の両面から定量化したのが藤野・浅枝（1998）である。昼間盆地底には局地的な循環場と混合層が発達し、上空から供給される高温乾燥大気が盆地底の高温場を持続させる。このテーマは同様の地形上に展開する都市の多いドイツでもポピュラー（一ノ瀬・タム，1999）なものであるが、この研究はそれらの中にあっても傑出したものといえる。

舗装材の性能評価についても新素材が登場した。Eusuf *et al.*（1995）は透水性舗装を、熊谷ら（1998）は様々な種類の保水性セラミック舗装を実験的に評価し、その有効性を実証した。野外観測では都市内の緑地の持つ市街地冷却効果が取り上げられた。Ca *et al.*（1995）は多摩ニュータウン、桐原・三上（1999）は明治神宮・代々木公園を対象としている。また久保田ら（1997）は建物間の空地における微気象観測を行い、建蔽率や建物の向き、開閉度、人工排熱源の有無との関係を論じている。山田ら（1998）は、水田に水が張られる前後での比較をもとに、湛水による周辺地域の冷却効果を示している。桐原ら（1998）は琵琶湖に隣接する長浜市において、湖風による市街地の冷却効果を示した。

90 年代前半に一ノ瀬ら（1994）が試みた、都市における人間活動を定量化し都市熱環境評価に組み入れるという流れが、97 年以降再び盛んになった。これらの取り組みにより、都市気候の境界条件であった人間活動自身へも、都市気候からのフィードバックが可能になった。カラ（1998）は、夏季の都市キャンपीにおけるエアコンの電力消費と排熱量、室外気温のダイナミックなインタラクションを計算するモデルを開発した。ここではエアコンの COP の室外気温依存性も表現されている。谷川ら（1997）は局地的な熱環境や住民のライフスタイル、環境意識の差によって同じ地域でもエネルギー消費特性に差異が存在するのではないかと、この問題意識から住民アンケートを実施し、この仮説を実証した。また上野ら（1997）は、GIS ベースでの都市熱環境分布可視化システムを開発し、家庭における空調エネルギー消費が局地的な熱環境を反映することを示した。このシステムの開発自体は、ドイツの KLIMAATLAS（例えば、一ノ瀬・タム，1999）にも共通する考え方にもとづいている。ヒートアイランドの存在は冷房需要を増大させるが、暖房需要を減少させるのではないかと。この問いに平野・茅（1998）はリモートセンシングを応用して得た気温（月別・時刻別）のメッシュデータ解析により、商業地域では暖房需要の減少を見込んでも、ヒートアイランドはエネルギー消費を増大させることを示した。河原ら（1999）は、一ノ瀬ら（1994）が 89 年時点について描いた東京 23 区における人工排熱の時空間分布について、90 年代のデータを整備した上で時間外挿により 2010 年の分布を提示している。田村ら（1999）は、一ノ瀬ら（1997）が東京で試みた人工排熱削減シナリオの影響評価を、都市緑化との比較でより高精度に行い、時間帯別、地域別に削減の有効性を明示している。

このほか河原ら（1997）は、東京の晴天時における熱と水蒸気の動態について、その季節変化や海風との関係をデータ解析と数値計算の両面から論じ、水蒸気については人間活動による付加よりは植生からの蒸散、海風による移流が支配的であることを示した。また、人文地理学の分野で日本における近世以降の土地利用データが整備されたため、当時の気温場や局地循環を再現する試みも行われている（一ノ瀬，1999）。

計算機環境が激変したこともあり、3 次元気象モデルの計算については 90 年代後半のみをレビューすれば、この分野に新規参入する場合でも一通りのバックグラウンドは構築できるものと思われる。

5 都市大気汚染研究の低迷

一方都市スケールの大気汚染研究は 90 年代に入り、本家ともいえるべき大気環境学会等でも低迷して

いる。日本での需要の低下や改善の頭打ちも一因と思われる。「環境システム研究」では 99 年になって数本投稿されたものの、90 年代にはほとんど投稿されていない。しかし成長する途上国の都市での需要は高まっており、サーマルストレスの緩和とセットでの都市計画的制御手法の研究が必要となっている。この分野はドイツが豊富な経験を有しており、途上国アジアへの応用が期待される。これは気象学のみならず、様々な分野・視点からの貢献を必要とし、まさに環境システム研究のミッションの一つといえよう。例えば「風の道」に関しては、既に「環境システム研究」でも取り上げられはじめている（盛岡ら、1999；一ノ瀬・タム、1999）。

6 国内外における関連学会の動向

現在、都市における大気・熱環境研究分野の成果が発表されている場としては「環境システム研究」のほか、日本建築学会の「計画系論文報告集」、日本地理学会の「地理学評論」、日本気象学会の「天気」、「JMSJ（気象集誌）」などがある。いずれも数千部発行されており、投稿先としては遜色ない。また国際誌としては *Atmospheric Environment* や *Energy and Buildings* などがある。前者は都市の大気・熱環境について、1996 年に Essen で行われた ICUC（都市気候学に関する国際会議）で発表された論文から選りすぐった 34 編を 33 巻 24-25 号（1999）に特集として掲載している。また同誌 30 巻 3 号（1996）は 1992 年に福岡で行われた CUTEST（都市熱環境研究国際会議 in 東和大学）の発表論文から 18 編を掲載している。ここにも環境システム分野の研究者による貢献が見られる。しかし通常は、より広域スケールの大気化学の論文などが多い。

一方関連の国際研究集会としては、ICUC が 1989 年に京都、1993 年にダッカ、1996 年にエッセン、1999 年にシドニーで行われている。また、最近ではアメリカ気象学会主催都市環境シンポジウムが隔年で行われており、1990 年代後半以降はほぼ毎年なんらかの関連国際会議が行われるようになった。さらに、この分野でも国際的な組織を作るべし、との声が高まり、会員の枠を限定しないルースアンブレラとしての国際都市気候学会（仮称）が発足した。2000 年 6 月に電子投票が行われ、会長に Oke 博士（カナダ）、書記に Arnfield 博士（米国）が、他の 8 人の分野別世話人とともに選出された。日本からも建築学の分野から中村泰人博士が選出されている。

7 まとめ

最近環境庁から「ヒートアイランド現象抑制のための対策手法報告書」が発表された。これは日本の都市におけるヒートアイランド対策の指針という位置付けで作成されたものであり、実際に多くの自治体に配布されることとなっている。まちづくりにおける大気・熱環境の保全という視点は、わが国のプランナーにはなじみの薄いものである。しかしながら、都市における夏季のサーマルストレスは、多くの市民・自治体の関心事となっている。この分野の知見は専門性が高く、プランナーが基礎理論から学ぶのは非効率的である。必要なエッセンスを効率的に伝える目的で書かれたガイドライン、教科書は有益であり、海外では「都市建設のための気候学入門」、「都市及び地域気候・大気汚染マップ作成ガイドライン」（ともにドイツ）、「都市地表面における植栽と明色塗装に関するガイドブック」（EPA）などが出ている（Wirtschaftsministerium, Baden-Wuerttemberg, 1998；VDI, 1997；EPA, 1992）。

一方、内容が教条的に適用された場合の問題点も、公共投資と関連するだけに非常に大きい。報告書では日本における対策の難しさとして、平均風速には恵まれているが夏季の暑熱対策が長期間必要（自然面の特徴）、再開発をめぐる合意形成過程の複雑さ（社会・制度面の特徴）等を指摘しているが、このような報告書は、地方自治体における都市マスタープランや環境基本計画の策定に際し、サーマルストレスの緩和という視点を正式に位置付けるという意味でも画期的なものである。こういった内容は同じ都市の大気・熱環境を対象としているとはいえ、気象学や地理学の分野で取り組まれること

は困難であろう。まさしく環境システム研究のミッションではないだろうか。その意味でも、環境システムとしての大気・熱環境研究の使命は重い。

引用文献

EPA (1992): *Cooling Our Communities: A Guidebook On Tree Planting And Light-Colored Surfacing*.

VDI (1997): *Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten fuer Staedte und Regionen*, VDI-Richtlinien VDI3787 Blatt 1, 73p. (in German and in English)

Wirtschaftsministerium, Baden-Wuerttemberg (1998): *Staedtebauliche Klimafibel. Hinweise fuer die Bauleitplanung*, 271p. (in German)

一ノ瀬ら (1994): 細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析, 環境工学研究論文集, 31, 263-273

一ノ瀬ら (1996): 下水熱有効利用可能性解析ツールとしての GIS の開発, 土木学会論文集, No.552/VII-1, 11-21

一ノ瀬ら (1997): 細密地理情報にもとづく都市気候数値シミュレーション地表面境界条件の高精度化, 天気, 44, 785-797

「環境システム研究」から (☆は全文審査論文)

<都市熱環境の観測>

横川ら (1989): 都市内熱環境・交通騒音問題改善について (透水性舗装の環境工学的意義)

浅枝ら (1992): 舗装面が地表付近の大気の加熱に及ぼす影響

武若ら (1992): 都市河川が周辺地の微気象に及ぼす効果

柴原ら (1993): 屋外環境の改変による受熱量の変化について

Eusuf *et al.* (1995): Thermal characteristics of porous pavement and its effect on urban environment

Ca *et al.* (1995): Effects of greening on the climate of Tama new town

木内ら (1995): 複合環境下における河川空間と周辺市街地の快適性評価

久保田ら (1997): 微気候からみた街区形態の評価に関する研究☆

熊谷ら (1998): 保水性セラミック舗装の水蒸気特性に関する実験的研究

山田ら (1998): 幸手市における湛水水田の日中気温の低減効果について☆

桐原ら (1998): 夏季の長浜市における都市キャノピー層内での気温観測

桐原・三上 (1999): 夏季の都市内大規模緑地が形成するクールアイランドの鉛直構造～明治神宮・代々木公園を事例として～

<リモートセンシングの活用>

上野ら (1992): 都市の熱環境制御に関する研究～一次元熱収支モデルによる地表面温度とリモセン輝度温度との比較～☆

上野ら (1993): 都市化に伴う熱環境の変化に関する研究～リモートセンシングデータによる北部九州諸都市の解析～☆

金子ら (1994): リモートセンシング輝度温度による都市域気温分布の推定～北部九州、関西、関東3地域への適用と比較～☆

<モデルにおける地表面過程の改良>

大濱ら (1993) : 都市熱環境における植物の役割に関する研究～SiB モデルに基づく数値シミュレーション～☆

Eusuf *et al.* (1994): A parameterization scheme for the sensible heat exchange between the street canyon and the atmosphere using the relationship narrowness index and wind velocity

浦野ら (1998) : 都市気候予測のための街区から大気への顕熱流のモデル化

<3次元気象モデル>

中井ら (1988) : 都市のヒートアイランド現象に及ぼす地形と平均風の効果

北田・久保田 (1992) : 土地利用の変化が濃尾平野の気温分布に与えた影響に関する数値解析～土地被覆の改変と人工熱源増加の気温変化に対する寄与～

川又ら (1992) : 熱収支モデルによる東京圏の熱環境解析

藤野ら (1994) : 首都圏の夏季のヒートアイランドの形成と地衡風の関係について

岡村・北田 (1997) : サブグリッドスケールの土地利用が大気境界層に与える影響のモデル化～ $\kappa-\epsilon$ モデルにおける都市化域のパラメタリゼーション～

河原ら (1997) : 東京の晴天時における熱・水蒸気の動態解析

藤野・浅枝 (1998) : 複雑地形が都市熱環境に及ぼす影響について～琵琶湖周辺部における解析～

一ノ瀬 (1999) : 近世以降の土地利用変化に起因するローカルな気候変動～数値シミュレーションによるアプローチ～☆

<うちシナリオ評価に関するもの>

河原ら (1994) : 臨海部の開発が海風と都市熱環境に及ぼす影響に関する数値実験

水鳥ら (1994) : 名古屋市とその周辺地域における熱環境シミュレーション

大濱ら (1995) : 三次元クロージャーマodelによる都市熱環境構造の解析～福岡市周辺地域への適応～☆

藤野ら (1996) : 灌漑緑化による砂漠域の微気象改善効果に関する検討～その2～

Ca *et al.* (1996): Investigation on the effects of pavement material on the micro-scale thermal environment

赤川ら (1996) : 地域開発における熱環境評価

一泉ら (1999) : 首都機能移転による熱環境変化の予測☆

田村ら (1999) : 大阪市域における熱環境改善策導入効果の数値実験

<人工排熱の定量化と影響評価>

平松ら (1992) : エネルギー消費の大都市間比較☆

守田 (1993) : 都市の人工熱排出構造について～日本の8大都市を対象にして～

守田 (1996) : 都市人工熱源の熱環境負荷原単位について

谷川ら (1997) : 都市熱環境特性と家庭のエネルギー消費特性の関連に関する研究☆

上野ら (1997) : 都市熱環境解析用地図の作成とその応用～街区規模での熱環境特性とエネルギー消費の解析～☆

平野・茅 (1998) : 都市ヒートアイランド現象の民生用エネルギー消費への影響

から (1998) : 市街地の建物における空調による人工排熱負荷の数値解析☆

河原ら (1999) : 東京都23区における人工排熱の時空間分布の推定

<都市計画への応用>

榛沢ら（1989）：熱環境による土地利用評価

武田ら（1990）：生活環境指標を用いた熱環境改善に関する研究

三好ら（1990）：都市における下水廃熱の利用性に関する研究

加藤ら（1998）：自動車交通と熱環境からみた環境負荷の小さな都市形態

盛岡ら（1999）：大都市における「風のみち」維持要因についての調査研究

一ノ瀬・タム（1999）：わが国の都市における「風の道」の必要性について