

ヒートアイランド研究の現状と今後の方向性に関する試論

—転換期における「環境研究」のあり方を視野に—

A study on the present state of heat island studies and its prospect

-With the several proposals for the "Environmental Research" in the turning point-

泉 岳樹*

Takeki IZUMI*

ABSTRACT ; This paper aims to clarify the prospect for heat island studies and suggest several constructive ideas for "Environmental Research" in the turning point. First, it is pointed out that solving the solid waste problem, which is well discussed these days, is not enough to establish the ecocycle society and that solving heat island problem is also very important because it is caused partly by the energy waste. Second, the achievement of the present studies on heat island is examined by reviewing the existing studies. It indicates that most studies on heat island were performed not from a viewpoint to reduce the heat island effects, but from the pure curiosity to understand the phenomena. Third, three newly ideas are proposed after reviewing the description of the reasons why heat island is regarded as a problem. Fourth, several subjects for the better heat island studies are pointed out and reevaluation of "The Limits to Growth" as an environmental research is done. Finally, an opinion is stated about the important point of view for the future environment research.

KEYWORDS ; heat island studies, environmental research, ecocycle society, urban planning

1. はじめに

近年、地球環境問題の悪化などを背景に、「持続可能な社会」、「循環型社会」など、大量生産・消費・廃棄を前提とした現代とは異なった方向の社会を目指す機運が高まっている。このような情勢を受けて、都市のあり方についても多くの議論がなされつつある。最近では、環境共生住宅・ゼロエネルギー住宅などのような個別建物アプローチだけでなく、環境共生都市・エコポリスなどと呼ばれる環境低負荷型の新たな都市像についても論じられるようになってきた¹⁾。

都市では、先進国人口の約8割が生活しており、今後発展途上国でも都市への人口集中が見込まれている。地球環境問題への対応を考えても、都市における人間生活を環境低負荷型にすることは急務であるといえる。

しかも、1997年の地球温暖化防止京都会議(COP3)で、二酸化炭素を中心とする地球温暖化ガスの排出削減目標が決められたように、近年、世界的に地下資源・化石エネルギー消費の削減が求められるようになった。このような状況下では、多くの人間の生活の場であり、資源・エネルギーの大量消費の場である都市も、「循環」を意識した新たな姿に変わることが求められる。そこで、21世紀における新たな「循環型都市」像を模索することが極めて重要な課題となるが、その際、物の生産・流通・消費・廃棄における循環性と同等レベルの重要な論点として、エネルギーの循環性があげられる。物の循環が途切れたことによる問題が廃棄物問題であるならば、エネルギー循環の機能不全に起因する問題が都市ヒートアイランド現象といえよう。

* 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻

Department of Urban Engineering, University of Tokyo

筆者は、環境問題に強い問題意識を持ちつつ、学部学生時代に「都市計画」分野を専攻した。人類の約半数が居住する都市のあり方を解析し、今後の方向を見据えてみたかったからである。

大学院修士時代から、ヒートアイランドに関する総合的研究の一翼を担うことになったことにより、「都市ヒートアイランド現象」を具体的研究テーマとし、現象の解明(観測)、問題認識(日本だけでなく、発展途上国の都市問題まで念頭に)、対策(都市計画)、これらの担い手の育成(環境教育)という大きな一連のフローに関わることとなった。現場での観測としては、①つくば市並木団地、②市原市ちはら台団地、③多摩市永山団地、④タイのバンコク周辺4カ所等に従事し、住宅地での風速の低減、乱れの増加、顕熱の発生効果や、バンコクでの気温の鉛直構造等を明らかにすることに協力した^{2),3)}。

また、共同研究者の協力を得て、メソスケール気象モデルを導入し「首都機能移転」問題を具体的な対象として、数値シミュレーション研究を行った。最終的には、当時の5つの移転先候補地を対象に、夏季晴天日の現状と移転後の気温差について解析し、その結果を、泉ら⁴⁾としてとりまとめた。研究開始当初、都市周縁へのグリーンベルト導入効果⁵⁾や、人工排熱の用途別削減効果⁶⁾をシミュレートするなど、現象再現から一歩踏み込んでヒートアイランド対策を目的としている先行研究があり、既に数値シミュレーションによる応用研究は成熟期にあるとの認識を持っていた。だが、この研究の過程で数値シミュレーション研究の可能性や意義と共に、多くの仮定や前提条件のもとで得られた結果の一般性や誤差などについての問題を実感することになった。また、研究の中間段階で日本地理学会において報告した結果だけが一人歩きし、日経新聞の記事⁷⁾となり、首都機能移転に反対している東京都から度重なる問い合わせを受けるなど、研究者としての社会的責任も痛感させられることになった。

その後、数値シミュレーションの際の境界条件で、ヒートアイランド形成要因の1つでもある地表面アルベドについて、リモートセンシングとGIS(地理情報システム)を利用した研究をすすめ、泉ら⁸⁾としてとりまとめた。これは、上記の認識の結果として、より正確な情報の発信者になることを目指すための研究であり、研究手法を広げることにもつながった。その一方で、研究の無限の細分化・精緻化(たこつぼ型研究)という方向性を実感することにもなった。

このような状況の中で、1999度の研究論文発表会の際の「提案型論文」の主旨に関する総合討論⁹⁾や、応募規定における「提案型論文」の位置づけ¹⁰⁾に触発され、以下、ヒートアイランド現象の研究史を整理し、その現状と課題を検討した上で、あわせて、今後の「環境研究」のあり方について考察することにした。

2. ヒートアイランド現象の研究史

ヒートアイランド現象に関する研究はどのように進んできたのであろうか。研究史の整理にはいくつかの軸がありうるが、ここでは、現象解明型研究と問題解決志向型研究という分類に基づいて整理する。

2.1 現象解明型研究

これまでのヒートアイランド研究は、主に、現象の把握や発生機構の解明などを目的とした現象解明型の研究が主流であった。ここでは、研究の手法により、観測研究、統計学的研究、数値シミュレーション研究という3つに分類して、その歴史を振り返る。

(1) 観測による研究

観測による研究は、ヒートアイランド研究の中核をなしており、観測方法の進歩などに伴い多くの研究が見られる。

まず第1段階は、都市とその周辺の2地点間気温差の研究である。ヒートアイランド現象の発見は、19世紀初頭にL. Howardがロンドンにおける観測により、郊外に比べ都市部の気温が高いことを見出したことにはじまる。その後、E. Renouはパリでの観測を行い、J. V. Hannは、欧米諸都市で観測し、その気温差を都市気温(city temperature)と名付けた。これは、今日のヒートアイランド強度に相当するものである。このようにヒートアイランド現象は、かなり以前から知られた現象であったが、大気汚染や衛生問題などのように、重要な都市問題として位置づけられることはなかった。

第2段階は、都市及びその周辺における気温の水平分布の研究(自動車での気温の移動観測による研究)である。20世紀に入り、Schmidtはウィーンで自動車による気温の移動観測を行った。この研究のポイントは、短時間に都

市周辺の多くの地点の気温を計測し、時間補正を施すことにより、同時刻における気温の分布図を作成したことである。これにより、気温の水平分布が明らかとなった。自動車による移動観測は、誤差の補正法の改良などにより、比較的容易に精度の良い観測が行える。その結果、現在でも多くの都市を対象にこの手法が適用されている¹¹⁾。

第3段階は、都市及びその周辺における気温の鉛直分布の研究(係留気球を用いた観測による研究)である。Duckworth・Sandberg¹²⁾は、サンフランシスコで係留気球を用いた観測を行い、都市域と郊外での気温の鉛直分布を明らかにした。この研究がヒートアイランドの立体構造解明の先駆的業績である。ここで、上空で都市より郊外のほうが気温が高くなる、いわゆるクロスオーバー現象が発見された。また、この研究により初めてHeat Island(ヒートアイランド)という用語が用いられた。日本では、小園¹³⁾が土浦市におけるヒートアイランドの立体構造を明らかにした例などがある。

第4段階は、都市とその周辺における気温の水平分布の研究(多地点同時観測)である。近年の観測測器の急速な進歩(小型化、大記憶容量化、廉価化など)により、多地点同時観測が行われるようになった¹⁴⁾。その結果、詳細かつ時系列的な水平気温分布が明らかとなり、ヒートアイランド現象の実態がより明確に把握できるようになった。

これらの観測研究により、ヒートアイランド現象の動態把握はほぼ達成されつつあると考えられる。

(2) 統計学的研究

観測研究により、ヒートアイランド現象の概要が明らかになると、ヒートアイランド強度(都市と郊外の気温差)と、人口や天空比などといった様々な要因との関係を統計学的に解析する研究ができた。その先駆けとなったのがOke¹⁵⁾で、北米と西欧の都市を対象として、ヒートアイランド強度と都市の人口とが対数比例の関係にあることを明らかにした。日本においては、福岡¹⁶⁾が同様の研究を行い、日本におけるヒートアイランド強度と人口の回帰直線の傾きが北米や西欧と大きく違うことを明らかにした。朴¹⁷⁾は、天空比や非透水性面積比とヒートアイランド強度の関係を示し、さらに人口と天空比、非透水性面積比の相互関係を明らかにした。これらの統計学的研究は、ヒートアイランド強度を都市規模関連指標との関係で定量的に把握することを可能にしたが、両者の物理的関係のメカニズムが必ずしも明らかでない等の問題があるため、これらの研究は収束しつつある。

(3) 数値シミュレーション研究

1970年代に入ると、ヒートアイランド現象を数値シミュレーションにより再現する研究が登場した。その先駆けとなったのが、Myrup¹⁸⁾やAtwater¹⁹⁾である。これらの研究は熱収支モデルを使ったもので、蒸発効率、粗度、大気汚染、人工排熱などがヒートアイランド現象に及ぼす影響を評価している。その後は、流体モデルが利用されるようになるが、これにはKimura²⁰⁾やYoshikado²¹⁾のように、単純化したモデルにより、目的とする現象の解析に重点的にあたるものと、Hjelmfelt²²⁾やKimura and Takahashi²³⁾のように3次元モデルを用い現実の都市を対象として再現シミュレーションを行うものがある。盆地内の湖岸都市という複雑地形を対象とした藤野・浅枝²⁴⁾のように、近年の3次元モデルを用いた研究の進歩は著しい。

2.2 問題解決指向型研究

以上にみた現象解明型研究の成果により、ヒートアイランド現象の現象把握や発生機構は概ね明らかになった。近年、ヒートアイランド現象は、都市環境を悪化させる要因の一つとして認知されるようになり、「いかにすればヒートアイランドを緩和できるか」という問題解決指向型の発想が求められるようになった。次にこのような問題解決志向型の研究をみてもみる。

まず、観測による研究では、浜田・三上²⁵⁾や桐原²⁶⁾が代々木公園(東京)を対象としてクールアイランドの実態を明らかにし、大規模緑地によるヒートアイランド緩和効果に着目した。Suzuki²⁷⁾は荒川・隅田川(東京)を対象として河川のヒートアイランド緩和効果を計測した。さらに藤野²⁸⁾は浸透性舗装の気温緩和効果を明らかにしている。

また、数値シミュレーションによる研究では、福岡市にグリーンベルトを配置する効果について解析した大濱ら²⁹⁾、都市活動を平面的・立体的再配置の効果を分析したurano et al.³⁰⁾、熊本市を対象に地形の改変や緑地の増加に関

して検討した上野・井村³¹⁾、東京23区を対象に土地利用の改変や人工排熱削減等の効果を解析したIchinose et al.³²⁾などがある。泉ら³³⁾の首都機能移転シナリオ下における熱環境評価も、基本的にこの路線に位置するものである。

なお、建築学系の分野では、都市熱環境問題として、キャノピー層や建築外部空間などのミクロスケールの温熱環境を対象とした研究が積極的に行われている。これらの研究の中には、芝生の冷却を実測した香川ら³⁴⁾や街路樹の熱環境緩和効果を実測した萩島ら³⁵⁾のように、問題解決志向型の研究も多く見られる。都市熱環境研究は、ヒートアイランド研究とも密接に関連するが、日本建築学会³⁶⁾に詳しいので省略する。

2.3 ヒートアイランド研究の到達点

以上にみたヒートアイランド現象に関する研究史を、筆者の問題意識に従って整理したものが図1である。

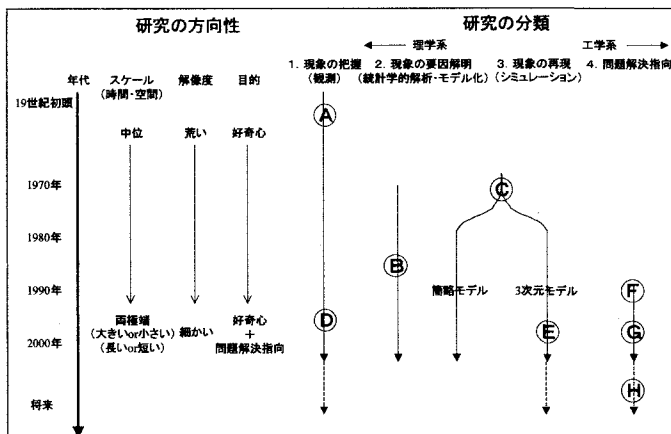


図1 ヒートアイランド研究の発展過程

図中に示した①～④は、以下のことを指している。

理学系(主に気象学・気候学)

- ①: 現象把握のための簡易な気象観測。
- ②: 現象解明を目指した観測値と他のさまざまな指標との統計学的分析。
- ③: 現象のモデル化と、簡易な数値シミュレーションによる現象解明や現象再現。
- ④: より細かい現象把握のための、詳細な観測の実施(技術的進歩が前提)。
- ⑤: 高度な現象再現のためのモデルの詳細化とシミュレーションの実施。

工学系(主に土木・建築学からのアプローチを念頭に)

- ⑥: ヒートアイランドの対策や予測を念頭に置いた応用研究の実施。
- ⑦: 応用面でのニーズに伴う、新たな対策技術の開発や予測手法の技術的改良。
- ⑧: 環境アセスメントなどを通じた、社会における具体的取り組み実施への貢献
(予測手法や対策技術の成熟と共に、現象の「問題性」が広く認知されることが前提)

以上の整理に基づけば、現在のヒートアイランド研究は、理学系は④と⑤の延長線上にあり、工学系は、⑥から⑧への過渡期にあるといえよう。このように、ヒートアイランド研究は発展してきたとはいえ、その対策を念頭においた問題解決志向型の応用研究はまだ始まったばかりである。

3. ヒートアイランド現象を研究することの意義・意味についての再検討

3.1 ヒートアイランド現象の問題性について

2.で言及したように、近年、ヒートアイランド現象は、都市環境を悪化させる要因の一つとして認知され、その対策や制御を目指す応用研究もみられるようになってきた。これらの研究では、ヒートアイランド循環によるダストドームの形成、夏季における快適性の低下や空調需要の増加による電力消費やピーク電力の増大、これらエネルギー消費の増加に伴う二酸化炭素排出の増大などが、ヒートアイランド現象の問題点として指摘されている。

しかしながら、最近、平野ら³⁷⁾は東京を対象に、空調と給湯のエネルギー消費の通年の収支を計算し、ヒートアイランド現象により概算値で2.3%のエネルギー消費が削減されているとの結果を得た。この結果については前提条件などに今後検討を加える必要があるが、この結果が正しいとすると、通年のエネルギー収支では、ヒートアイランド現象は「問題」ではないとの見方も可能である。人口増大と都市部への人口集中が続く発展途上国の多くの都市が低緯度帯に存在していることを考えれば、この結果は直ちにこれまで示されてきているヒートアイランド現象の問題性や緩和策の有効性を否定するものではないが、ヒートアイランド現象の問題性に関しては、今一度しっかりと研究されるべきであろう。また、このような問題性の検討に加え、ヒートアイランド研究の意義・意味についてはさらに広く環境問題・都市問題の中で位置づける必要があると考えられる。

3.2 地球環境問題の意味とヒートアイランド現象の意義

ヒートアイランドとは、人間が地表面を改変して都市を形成し、そこで生活し人工排熱を出すことによって地域気候に大きなインパクトを与え、温暖化を引き起こす現象のことである。人間活動によって、都市に人工的な気候環境が形成されることの問題性について、地球温暖化を代表とする地球環境問題とリンクさせて考えてみよう。

まず、地球環境問題の意味することをどのように捉えたらよいのだろうか。そのために、少し歴史を振り返ってみよう。イギリスを筆頭とする産業革命により、18世紀に人類は「近代」に突入し、未曾有の発展を今日まで継続してきた。このような発展を支えた資源・エネルギー的根拠は何であったか。それは、石炭や石油の全面的利用である。近代以前は太陽エネルギー及び水に由来する植物資源の循環利用を中心とし、その他水力・風力などのエネルギーに依存した社会を形成しており、それぞれの風土により発展が制約された状況下にあった。制約条件は、利用可能な自然資源及びエネルギー量であった。イギリスは、石炭を利用することによりこの制約条件を克服し、産業革命を遂行することになった。この過程は、市民革命や宗教改革とも連動していた。人類史にとって極めて大きな転換点となったのである。その後、人類は石炭や石油の利活用をベースとして自然の改変と新たな利用を推進し、現在に至ったのである。ではこのような「近代」は永続することができるのだろうか。この点については、地球温暖化をはじめとする地球環境問題をどう理解するかに関わってくる。地球温暖化ガスである二酸化炭素の増加とは、結局、石炭や石油の大量使用にその原因が求められる。「近代」とは石炭や石油に大きく依存することによって発展してきたのであるから、地球温暖化問題とは「近代」の本質的限界を提示していると考えることができる。1999年のUNEP報告³⁸⁾では、地球温暖化、森林破壊、砂漠化などの地球環境問題は既に手遅れだとの見解が打ち出されている。人類としては、何としても「近代後」の世界の構築に努めなければならないといえる。

そのように考えると、先進国の約8割が居住する都市のあり方が地球環境問題を引き起こしている最大の要因といっていよう。地域レベルで人工的な気候環境を形成していることを示す都市ヒートアイランド現象は、人間活動の巨大さを実感させる極めてよい事例と位置づけられるのではないか。この点をさらに次項で検討することにする。

3.3 環境問題としてのヒートアイランド現象の特質と問題性

日本では高度経済成長期と時を同じくして、大気汚染・水質汚濁などの典型7公害に代表されるような地域の環境問題が顕在化した。これら地域の環境問題と、1980年代後半から認識されるようになった地球環境問題との大きな違いの1つが加害・被害の関係の不明確さである。多くの公害問題では、加害者としての企業の工場、被害者としての住民が存在し、加害・被害の関係が明確であった。しかし、地球環境問題では地球温暖化の原因物質の1つである二酸化炭素に代表されるように、企業からの直接排出だけではなく、人間1人ひとりの生活に伴い多量の原因物質が排出されており、加害・被害の関係は公害問題ほど明確ではない。また、公害問題が地理的にみると、都市スケールで局所的な場合が多かったのに対し、地球環境問題では、加害・被害地域が国境を越えることも多い。さらに、問題

を複雑とするのは、多くの場合原因物質が問題を起すまでにタイムラグが存在するということである。このため、問題となる現象自体の把握を早期に行うことが困難であったり、現世代が加害者であっても直接の被害は受けず、被害を受けるのは将来世代であるというような、いわゆる「将来世代問題」が起こったりする。

このような状況を踏まえた上で、ヒートアイランド現象について考えてみよう。ヒートアイランド現象は、影響範囲の大きさの視点から見ると、都市スケールの環境問題として位置づけられ、問題の原因を考えると地球環境問題と似た性質を持つ問題と捉えることはできないだろうか。現象の影響範囲が都市スケールであることは自明であろう。問題の原因が、地球環境問題と類似していると捉えるのは、加害・被害の関係が不明確であり、現在の人間の生活スタイル自体に問題の根元があることや、地球環境問題が地球の環境容量に人間活動が迫ったために起こる問題であるならば、ヒートアイランド現象は、人間活動が都市の環境容量に迫った、あるいはそれを越えてしまったことにより起こっている問題と考えられるためである。

これらに加え、ヒートアイランド現象では、原因と結果に大きなタイムラグは生じないため「将来世代問題」に伴うような問題対策の困難さは生まれない。そのため、科学的知見を具体的な対策に結びつけ、その対策の正否をチェックするには、格好の問題といえるのではないだろうか。このような視点に立ったとき、ヒートアイランド現象は、人類が21世紀に立ち向かわなければならない地球環境問題への答えを導き出すための重要な問題の1つと捉えることができる。そして、ヒートアイランド問題に対応することは、その問題自体に対応するという意味だけではなく、これら複雑化する問題群に対応していくための1つの指針を示すことにもつながると考えられる。

3.4 ヒートアイランド現象の都市計画にとっての意味

「循環型社会」の形成が現在、注目されている。「循環型社会」とは、平成10年版の環境白書³⁹⁾によれば、「環境負荷として社会的コストとなっていたものを内部化することにより、必要かつ適正な費用が流入し組み込まれることで(適正処理・リサイクル等の)静脈産業として確立させ、そのことを挺にして、全体の循環の輪を適切につないだシステム」を実現する社会のことである。もともとは、各地で深刻化する最終処分場の不足、ゴミ焼却に伴うダイオキシン問題に代表される廃棄物問題を背景に「リサイクル社会」というような意味で生まれた言葉である。最近では、地球温暖化対策としての資源・エネルギー消費の削減にもつながるものとして広く定着しつつある。また、「循環型社会」に似た概念として「循環社会(社会の永続性を確保するため、有限な地球の中で行う人間のあらゆる活動に伴い消費されるモノやエネルギーに係わる資源を繰り返し、または様々な形で利用するとともに、廃棄するものを最小限とする意志と能力(システム)を有する社会)」というような、より広範なものを対象とした派生的概念が生まれつつある⁴⁰⁾。

このような現状を踏まえたとき、ヒートアイランド現象の問題としての新たな一面がみえてくる。今までの廃棄物問題が、主に廃棄物、ゴミ、尿尿などといった物質の廃棄問題であるならば、ヒートアイランド現象は、大気に排出されるエネルギーの廃棄問題の現れとも捉えられる。これらの物質やエネルギーが循環するスケールを考えると、都市とは閉鎖系ではなく開放系であることが分かる。循環とは、大辞林⁴¹⁾によると「閉じた回路を繰り返し通ること。ひとめぐりすること」となっている。現在の都市という単位(領域)は、循環型社会を形作る総体にはなり得ないのである。このことを、しっかり認識しないと、かつて地域の環境問題であった酸性雨が、煙突の高層化などによりヨーロッパや北米で国際環境問題へと発展してしまったのと同じような問題が多発する危険がある。その意味では、ヒートアイランド対策として近年注目を浴びている「風の道」⁴²⁾なども十分に注意を払う必要がある。循環型社会に帰するまちづくり、都市計画とは、資源、エネルギー、大気などの循環系のスケールを念頭に置き、その循環の一部を構成する要素として都市(人が集住する場所)を捉え、循環を形成する森林、農村、河川、海、大気などとの相互関係を十分考慮したものではない。都市計画の起源が産業革命後の都市への人口集中による衛生問題(物質の廃棄問題)であることを鑑みると、その対象としてヒートアイランド問題(エネルギーの廃棄問題)が加わり、計画策定にあたって考慮すべき空間スケールが拡大することは、当然の成り行きといえよう。19世紀後半のE.ハワードの田園都市論やP.ゲデスの提案は20世紀の都市計画や都市に大きな影響を与えたが、21世紀を目前に控えた今、新たな都市計画のあり方、都市論が求められている。都市ヒートアイランド問題は、その中で1つの重要な論点を提供していることは間違いないだろう。

4. 今後のヒートアイランド研究及び環境研究に関する検討といくつかの提案

以上、ヒートアイランド研究の持つ意味・意義について検討を加えた。それらをふまえつつ、今後のヒートアイランド研究や環境研究に関する検討と提案を行いたい。

4.1 今後のヒートアイランド研究への提案

2.で説明したように、ヒートアイランド研究には、理学系学問分野と工学系学問分野からさまざまなアプローチがされている。

第1の提案は、多様な問題意識の摺り合わせである。理学系はどうしてもより精緻な現象解明に興味の中心があり、ヒートアイランド現象の「問題性」に対する感度は比較的低いといつてよい。そのため、ヒートアイランド現象をどうしたらよいのか、といった方向へ向けての研究がほとんど存在しない。他方、工学系の場合は、応用研究との意識はあるものの、研究者の層が薄く、未だ実用的な方法論を社会に提供する研究段階へ到達していない。また、応用研究の前提であるヒートアイランド現象の「問題性」が必ずしも明らかではないといった問題がある。理学系・工学系研究者の問題意識(何のためにヒートアイランド現象を研究するのか)をできるだけ摺り合わせる必要がある。

第2の提案は、それぞれの系内での論議は当然であるが、系間での交流をもっと活発にすることである。現在でも、いくつかのインターディシプリナリーな会合はもたれており、貴重な成果をあげている⁴³⁾が、さらに活発な交流が今後必要と考えられる。その中で、研究目的論、研究方法論、研究対象論等の論議を深める必要がある。

第3の提案は、以上のような作業を前提として、ヒートアイランド研究に関する問題意識、研究方法、研究対象、研究形態、対策の方向などを整理する多次元の研究マトリックスを、関係者が共同して作成することである。具体的には、例えば、①問題意識・目的意識については、基礎研究、応用研究といった大区分の下に、漸進的改革と急進的改革といった区分があり得る。②研究方法としては、観測、シミュレーションといった大区分の下で、観測としては、観測項目や使用計測機器などによる区分が考えられ、シミュレーションとしては、使用するモデルや前提としている仮定などで区分される。③研究対象としては、空間と時間といった大区分の下で、それぞれさまざまなスケールが区分される。④研究形態では、個人か共同かといった大区分の下で、組織規模や役割分担のあり方などによりさらに小区分が可能である。以上に例示したように、多次元のヒートアイランド研究マトリックスが編成されると、研究の分野密度等が一目瞭然となる。その結果、研究資源の最適配置なども可能となる。以上の作業を通じて、ヒートアイランド研究従事者が共同して、社会に対する「説明責任」(アカウンタビリティ)を果たしたり、他分野の研究者や新規参入研究者へ研究上の羅針盤を提供することが、さらなるヒートアイランド研究の発展とヒートアイランド対策の進展には必要不可欠であろう。

4.2 今後の環境研究の在り方について

環境研究は、究極的には、人類の種としての永続性を確保することに資する研究といえるかも知れないが、具体的なアプローチ法には大きく分けて2つある。藤平⁴⁴⁾がいう「根治療法」アプローチと「対症療法」アプローチがそれぞれあり、家田⁴⁵⁾が整理する「制約アプローチ」と「比較考量アプローチ」もまた同様な区分である。ただし、両者にあってはそれらの評価は異なっており、藤平の場合は、前者のアプローチを重視しているのに対し、家田の場合は、後者のアプローチを重視している。現状では、後者のアプローチが主流と考えてよいだろう。ただし、先に挙げたUNEP報告のように、現在行われている「対症療法」アプローチに限界があることは、明らかである。

そのような立場に立脚した場合、今後の環境研究はどのようにあるべきといえるであろうか。その点に関して重要な示唆を与えるのが1972年に出版された「成長の限界」⁴⁶⁾である。30年近く前に公表されたこの本は、当時、極めて大きな衝撃を世界に与えた。21世紀のある時期に地球は成長の限界に直面することを、システムダイナミクス(SD)を用いて、シミュレーションの結果として示したからである。

この本の特徴は、まず第1に、問題意識が鮮明なことである。第2は、課題に対して適切な方法論(SD)を採用したことである。全地球規模の環境問題を取り扱うに当たり、まだ解明されていない要素や要素間関係は多々あったはずであるが、それらの解明を待たずして、将来の見当付けを行うには、SDという方法論は極めて好適であったといえよ

う。なお、ここで注意しておくべきことは、デカルト以来の近代自然科学は本質的に「要素還元主義」ともいわれる方法論に立脚しているが、SDはシステム論及び因果論に立脚した「全包括主義」ともいわれる方法論によっていたことである。このことが、いち早く地球環境の危機を予測することにつながったのである。また、このような研究に対する「限界に直面することを認めたくない人々」の反発の大きさを十分に考慮に入れ、論議の中で彼らに対するさまざまな配慮がうかがわれることも評価できるところである。

このメドウズらの業績は、当時の段階とすれば、まさに驚異的といってもよいのではないだろうか。その後の環境研究は、現在に至るまで、問題意識水準、方法論的模索、研究結果の斬新さ、社会的インパクトなどにおいて、「成長の限界」を超えていないとも捉えられるだろう。

5. おわりに

以上、ヒートアイランド研究について、筆者自身の経験に基づいて、考え、感じてきたことを整理してみた。

「近代」という時代が終わろうとしている大転換期において、「研究」的営為の持つ意味は、歴史貫通的かつ普遍的なものではあらず、時代に即した特殊なものではありえないのではないのだろうか。そのようなものでなければ、この困難な時代を切り開くことはできないと思われる。そこで、研究に関する筆者なりのいくつかのフレーズを述べて、終わりとしたい。

- ・人類は今、極めて危機的状況にある。地球環境問題、環境ホルモン問題等により、人類は、人体の外部環境及び内部環境の双方からその生存を危うくされつつある。しかも、その原因は、人類の活動そのものから生じ、結果しつつあることに特徴がある。
- ・環境問題と総称される問題群を克服しない限り、人類の生存は保証されない。このような時期を生きる研究者としては、何らかの形で環境問題に関わる必要があるのではないか。
- ・国家にとって、戦争の時代には、あらゆる研究資源は戦争遂行に投入された。現代の環境問題とは、全人類、全国家にとって、そのようなものではないか。「既に手遅れではないか」との科学的議論も存在する。基礎・応用、文系・理系を問わず、全研究者の共通テーマとして環境問題を掲げ、その実体解明と解決策の提起にあたるべきではないか。
- ・研究者の使命のひとつに「予測」がある。この社会の仕組みを解明した上で、今後の予測を行うこと、このことが重要である。環境問題に関連させてこのことを行うことが全研究者に課せられた最上位命題ではないか。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻の岡部篤行教授、並びに国立環境研究所地球環境研究センターの一ノ瀬俊明主任研究員に多くのご指導を頂きました。記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、内藤正明・加藤三郎編：持続可能な社会システム、第6章、岩波書店、1998。
- 2) 浦野明・花木啓祐・岡部敦行：街区における顕熱流の観測、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.737-738、1999。
- 3) 新津潔・久保幸夫：係留気球を使用したバンコクの気温鉛直分布観測、日本地理学会発表要旨集、57、pp.266-267、2000。
- 4) 泉岳樹・岡部篤行・貞広幸雄・花木啓祐・一ノ瀬俊明：首都機能移転による熱環境変化の予測、環境システム研究、27、pp.171-178、1999。
- 5) 大濱隆司・金子慎治・上野賢仁・井村秀文：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——、環境システム研究、23、1995。
- 6) 一ノ瀬俊明・下堂蘭和宏・鶴野伊津志・花木啓祐：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、pp.785-797、1997。
- 7) 日本経済新聞(1997年12月6日)朝刊科学技術欄。
- 8) 泉岳樹・岡部篤行・貞広幸雄・平野勇二郎：建物による日影が衛星リモートセンシングから算出された都市域のアルベドへ及ぼす影響、GIS-理論と応用、8 (1)、pp.11-18、2000。

- 9) 原沢英夫:提案型論文に関する総合討論, 土木学会環境システム委員会ニュースレター, **12-3**, 2000.
- 10) 土木学会環境システム委員会:第28回環境システム研究論文発表会応募規定, 土木学会誌, **85**, pp.124-125, 2000.
- 11) 例えば, 榊原保志:長野県小布施町におけるヒートアイランド強度と郊外の土地被覆との関係, 天気, **46**, pp.567-575, 1999.
- 12) Duckworth, F. S. and Sandberg, J. S.:The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradient, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **35**, pp.198-207, 1954.
- 13) 小園修(1987):土浦市におけるヒートアイランドの立体構造, 地理学評論, **60**, pp.757-764
- 14) 山添謙・牛山素行・三上岳彦・木村圭司:東京における夏季および秋季の気温分布の日変化, ヒートアイランドの計測制御システム中間報告書, 科学技術振興事業団基礎研究(CREST), pp.16-22, 1999.
- 15) Oke,T.R.:City size and the urban heat island, *Atmospheric Environment*, **7**, pp.769-779, 1973.
- 16) 福岡義隆:都市の規模とヒートアイランド, 地理, **28**, pp.34-42, 1983.
- 17) 朴恵淑:日本と韓国の諸都市における都市規模とヒートアイランド強度, 地理学評論, **60**, pp.238-250, 1987.
- 18) Myrup, L.O.:A numerical model of the urban heat island, *Journal of applied meteorology*, **8**, pp.908-918, 1969.
- 19) Atwater, M. A.:Thermal effects of urbanization and industrialization in the boundary layer, *Journal of applied meteorology*, **11**, pp.229-245, 1972.
- 20) Kimura, R.:Dynamics of steady convections over heat and cool islands, *Journal of the meteorological society of Japan*, **53**, pp.440-457, 1975.
- 21) Yoshikado, H:Vertical structure of the sea breeze penetrating through a large urban complex, *Journal of applied meteorology*, **29**, pp.878-891, 1990.
- 22) Hjelmfelt, M. R.:Numerical simulation of the effects of St. Louis on mesoscale boundary-layer airflow and vertical air motion : simulations of urban and non-urban effects, *Journal of applied meteorology*, **21**, pp.1239-1257, 1982.
- 23) Kimura, F. and Takahashi, S.:The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area : A numerical experiment, *Atmospheric Environment*, **25B**, pp.155-164, 1991
- 24) 藤野毅・浅枝隆:複雑地形が都市熱環境に及ぼす影響についてー琵琶湖周辺部における解析ー, 環境システム研究, **26**, pp.477-482, 1998.
- 25) 浜田崇・三上岳彦:都市内緑地のクールアイランド現象ー明治神宮・代々木公園を事例として, 地理学評論, **67**, pp.518-529, 1994.
- 26) 桐原博人・三上岳彦: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, 環境システム研究, **27**, pp.707-714, 1999.
- 27) Suzuki, C., Mikami, T., Iijima, Y., Shimoyama, K., Tanaka, H. and Iwashita, H.:The Cooling Effects of River in Urban Area, *Proceedings of international congress of biometeorology & international conference on urban climatology*, Icucpo2.07.pdf (in CD-ROM), 1999.
- 28) 藤野毅・柴原千浩・浅枝隆・村瀬範芳・和氣亜紀夫:浸透性舗装の水分・熱移動特性と冷却効果, 水工学論文集, **38**, pp.235-240, 1994.
- 29) 前掲5)
- 30) Urano, A., T. Ichinose and K.Hanaki:Thermal environment simulation for three dimensional replacement of urban activity, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **81**, pp.197-210, 1999.
- 31) 上野賢仁・井村秀文:数値モデルによる熊本市の熱環境解析, 環境システム研究, **26**, pp.705-710, 1998.
- 32) Ichinose, T. Shimodozono, K. and Hanaki, K.:Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmospheric Environment*, **33**, pp.3897-3909, 1999.
- 33) 前掲4)
- 34) 香川治美・林徹夫・谷本潤・片山忠久:芝生植栽が都市熱環境に及ぼす影響に関する研究(第1報) 土壌の含水状態を考慮した芝生植栽の蒸発発散特性の定量的特定, 日本建築学会計画系論文集, **507**, pp.7-12, 1998.
- 35) 萩島理・片山忠久・林徹夫・谷本潤:樹木の放射温度分布に関する実測 街路樹のある街路の温熱環境予測 その1, 日本建築学会計画系論文集, **516**, pp.79-86, 1999.
- 36) 日本建築学会地球環境委員会都市環境動態小委員会・都市と熱環境WG:都市熱環境の実態・予測・評価に関する研究成果集, 日本建築学会, 1999.
- 37) 平野勇二郎・茅陽一・柴崎亮介:都市ヒートアイランド現象の空調・給湯用エネルギー消費への影響評価, 土木学会論文集VII, **629**, pp.83-96, 1999.
- 38) United Nations Environment Programme:Global Environment Outlook 2000, <http://www-cger.nies.go.jp/geo2000/>, 2000.
- 39) 環境庁:環境白書 総論 平成10年版, 大蔵省印刷局, 1998.
- 40) 加藤三郎:「循環社会」創造の条件, 日刊工業新聞社, 1998.
- 41) 松村明編:大辞林(第二版), 三省堂, 1995.
- 42) 一ノ瀬俊明:ドイツのKlimaanalyse ～都市計画のための気候解析～, 天気, **46**, pp.709-715, 1999.
- 43) 例えば, 都市気候学の集大成をめざして, CUTE(Conference on Urban Thermal Environment)10-UCN(Urban Climatology Network)24 合同ワークショップ発表論文集, 1997.
- 44) 藤平和俊:「環境学」入門, 日本経済新聞社, 1999.
- 45) 家田仁:サステナブル都市:どうとらえ, どう実現するか, 土木学会誌, **84**, pp.48-51, 1999.
- 46) Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. and Behrens III, W. W.:The limits to growth(大来佐武郎監訳:成長の限界, ダイヤモンド社), Universe Books, 1972.