



ヒートアイランド悪循環の科学

明星大学理工学部

総合理工学科（環境・生態学系）教授

亀卦川 幸浩

1. はじめに

著者は、前職において企業人として主に環境分野のコンサルティング業務に携わっていた。30 歳の頃、都市の高温化、すなわちヒートアイランド現象について、環境・エネルギー問題としての視点から某国立大学の研究を支援する業務を経験した。ヒートアイランドを気象現象としての理学的視点のみならず、都市のエネルギーシステムとも関連付け、気候緩和と省エネの両視点から都市高温化対策を検討する業務であった。学生時代に地球物理学を専攻し、就職後はエネルギー技術に関連する調査も手掛けていた関係で、著者はその理学・工学に跨る研究に大いに関心を抱いた。気象学やシミュレーションについては素人同然であったが、幾つかの幸運にも恵まれ、上述業務の一環で国立研究機関にて都市の気象とエネルギー分野の数値モデルの開発に携わった。その後、コンサルティングから徐々に研究に軸足を移し、40 代目前で現職の私大教員に転じた。現在も都市の気候変動やその緩和策・適応策といったヒートアイランドと関連深い研究を続けている。

さて、ヒートアイランド現象とは、陸面と地表近くの境界層大気の系の放射・熱収支が都市域にて人為的に改変され生ずる局地的な気候変動であ

る。この要因は、主に土地被覆の人工化(蒸散・蒸発を伴う植生・土壌面の減少)や電力等のエネルギー消費に由来する人工排熱であることが今日ではよく知られている。著者は、このうち既述の通り後者に関係した研究を行ってきた¹⁾。夏季の都市気温上昇によって、冷房エネルギー消費が増大し、それに伴う排熱増がヒートアイランドの要因へフィードバックされる、いわゆる“排熱フィードバック”の悪循環問題(図1)に 20 年程前に興味を持ったことが発端であった。

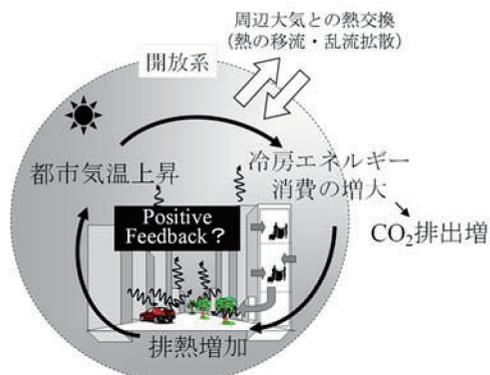


図 1 都市高温化と冷房エネルギー需要増のフィードバックプロセス³⁾

全球であれ都市規模であれ、今日見られる温暖化は、空調用途を中心に人類の過半が都市域で偏在的に需要する電力等のエネルギー需要を変

化させている。その増減は更に気候変動要因としての CO₂ 排出量や人工排熱量そのものの増減へとフィードバックされる。かくして、気候とエネルギー需要の都市域での関係は相互作用的になる。著者は、主にこの相互作用に着目した研究を行ってきた。その視点から掲題の研究の現状と展望について簡単に述べてみたい。なお、本文中で以降に紹介する先行研究の詳細については、著者の近年のレビュー論文等^{1), 2), 3)}を参照頂ければ幸いである。

2. これまでの研究

都市域でのエネルギー消費に伴って生ずる人工排熱については、1970 年代頃よりヒートアイランドの形成因子としての視点からの多くの研究が行われてきた。90 年代までの研究では、都市気象の変化がエネルギー需要と排熱の変動に動的にフィードバックされる効果を見出し、排熱を静的に扱い、その都市気温への影響を論ずるものが中心であった。このうち観測にもとづく研究では、都市域での長期の測定気温の中に、曜日による変化や平日・休日間の差異といった人間活動の周期に関連する変動を統計的に見出し、排熱による気温への影響を推定する試みがなされた。一方、数値モデルによる研究では、都市域でのエネルギー消費のインベントリデータから推計された人工排熱の空間分布と時間変化を気象数値モデルの大気底層部の熱収支において付加的に考慮する数値実験が多くなされた。結果として、大気境界層内での鉛直混合が弱まる夜間や冬季に排熱による都市地上気温への影響の感度が増大する事等が見出された。

その後 2000 年以降には、建物エネルギー消費に伴う空調系の人工排熱(顕熱・潜熱)とその都市気候へのフィードバックを動的にシミュレート可能な建物エネルギーモデル(BEM)とメソスケール気象・都市キャンピーモデルの結合モデルも複数開発されるようになった。著者らは、この種の結合モデルを世界に先駆け独自に開発し、都市の気候・熱環境とエネルギー需要の相互作用の解析や省エネ・温暖化対策の評価等の研究に用いてきた。その一環として東京・大阪を対象とした研究では、複数街区内部での多点気温観測結果と電力実需要等にもとづく街区スケール人工排熱量のモニタリング結果の両データの解析を通じ、両都市の都心オフィス街にて夏季地上気温の人工排熱への応答感度が同程度(100W/m²の排熱変化に対し約1°Cの気温変化)であることを見出した。また、この測定結果から得られる応答感度は、著者らの数値モデルによって概ね再現可能であることを検証できた。加えて一連の解析から、東京の都心オフィス街区では排熱フィードバック効果で夏季の14~16時における域内電力需要が2~2.5%押し上げられている事が推定された。以上は、実測と数値実験にもとづき、排熱フィードバック効果、いわゆる悪循環の定量化を試みた著者らの最近のユニークな研究成果の一つである。

3. 展望

前述の通り、ヒートアイランドの形成要因としての視点から研究が始められた人工排熱については、近年、世界の都市域を対象にエネルギー需要統計等にもとづく大陸スケールの排熱データベースの構築も試みられている。その結果を活用し、ヒー

トアイランドのみならず、より広域の地域気候や全球の気候変動に対する人工排熱の影響の将来予測を試行した数値実験による研究例も見られる。その中には、中国沿岸部などの高密度のエネルギー需要域で、人工排熱が今世紀半ばに温室効果ガスの現況放射強制力(約 $2\text{W}/\text{m}^2$)の半分程度に達し平均地上気温に対し最大 1°C の昇温効果をもたらすことを予測した事例も存在する。

以上の一連の研究は、未だ排熱による気温影響を単方向で論ずる静的アプローチのものが中心である。しかし、排熱を都市から全球までのマルチスケールの気候形成因子として位置づける気候変動の予測研究においても、排熱フィードバックを伴う気候とエネルギー需要の相互作用を予測対象となる規模(都市～全球)で動的にモデル化する方向へ更に進展すると考えられる。当該研究における当面の課題は、気象・気候条件を境界条件として冷暖房用途を中心に建物群のエネルギー需要とその帰結としての地域排熱量を計算する BEM の改良である。気象数値モデルとカップリングされた BEM については、著者らの研究グループによる初の開発事例に続き、フランス・スペインや米国のグループによる開発が現在進められている。これらの BEM は、空調設備設計等に実用化されている個別建築を対象とした空調シミュレーションの工学モデルを単純化したものである。当該工学モデルに比し、建築単体での空調エネルギー需要の予測精度をある程度犠牲にしつつも、より少ない入力パラメータと計算負荷で街区～都市規模の空調需要と排熱変動やその気象条件への応答感を模擬可能な BEM の改良が進みつつある。また、都市の気象モデルのみならずその全球気候

モデルへの組み込みも試行されている。空調用途の他に、気象条件への依存性を有する照明用電力等の他のエネルギー需要のモデリングも必要ではあるものの、以上の一連の研究の進展により、都市域では気象とエネルギー需要の同時予測を行う”エネルギー・天気予報”、全球規模では将来のエネルギー需要と CO_2 排出の増減にもたらす気候変化のフィードバック効果の定量化といった応用研究への広がりも予想できる。

以上のモデル関連の研究の進捗に伴い、エネルギーの視点からのヒートアイランドとその関連分野の研究は、更に都市のエネルギーマネジメント(エネマネ)や将来的な気候変動対策の研究とも連携し発展を遂げることも期待される。

まず、都市のエネルギーマネジメントについては、BEM を採用する一部の都市気象モデルが前述の通りエネルギー需要量を予測出来る事に加え、自然エネルギーの供給可能量についても予測可能性を有することに関係する。既にエネルギー・気象学(Energy & Meteorology)の分野では、局地気象モデルによる風況や日射の予報を風力・太陽光発電の発電量予測に活用する多くの研究が進められ、同手法は都市の気象モデルにも実装可能である。特に、我が国で急速に普及が進む太陽光発電については、出力変動電源としての商用電力系統(グリッド)への大量連携に伴う供給電力の不安定化(電圧変動等)への対策として、太陽光による発電量の正確な予測に基づいた商用電源の供給量の制御が必要となる。都市キャノピーモデル等を実装し建築を陽に考慮した気象モデルは、都市域において隣棟ビル影等の影響を考慮したより現実的な太陽光発電量予測へも適用可能である

う。その実現に向けた課題は、現時点の気象モデルが最も不得意とする複雑でカオス性の強い雲量予報の影響を直接的に被る日射の予測精度の改善であるが、当面は雲データ同化等により観測情報を活用した精度改善が有効と思われる。仮に都市気象モデルが都市域での日射量分布を予報可能であれば、同モデルが BEM により予測する街区スケールの電力需要と太陽光発電量を対比させた需給解析を通じ、エネマネへの応用も可能になると考えられる。

次に、気候変動対策の研究であるが、BEM 等を含む最新の都市気象モデルは、将来の都市エネルギーシステムの構成と効率やエネルギー需要水準の変化がもたらす人工排熱変動を考慮した都市気候の将来予測にも適用可能である。全球モデルから都市気象モデルへのダウンスケーリングによる地域気候の将来予測の研究は既に着手されており、省エネによる排熱削減や都市緑化を人体への暑熱ストレスの軽減策と見なし、ヒートアイランド対策を地球温暖化への適応策としての視点から評価する気候変動対策の研究も始まっている。

なお上述の研究展望には、著者が最近取り組んでいる研究テーマが多く含まれている。本稿が著者の興味にかなり偏った内容となったことをご容赦頂きたい。

<参考文献>

- 1) 亀卦川幸浩、都市とエネルギー消費、気象研究ノート「都市の気象と気候」(第 3 章)、第 224 号(2012)、pp.57-83.
- 2) Kikegawa Y., A. Tanaka, Y. Ohashi, T. Ihara, Y. Shigeta, Observed and simulated sensitivities of summertime urban surface air temperatures to anthropogenic heat in downtown areas of two Japanese major cities Tokyo and Osaka, Theoretical and Applied Climatology, 117(1-2) (2014)、pp.175-193.
- 3) 亀卦川幸浩、都市気候・建物エネルギー連成数値モデルの開発と適用、環境科学会誌、28(1)(2015)、pp. 37-44.