

元 慶應義塾大学環境情報学部 教授

久保 幸夫

(成果とりまとめ 東京都立大学大学院理学研究科 教授

三上 岳彦)

「都市ヒートアイランドの計測制御システム」

1. 研究実施の概要

1.1 基本構想

本研究は、都市における熱汚染の緩和を目的とし、都市熱環境、特に都市ヒートアイランド(UHI)の計測と制御に関するシステムを開発しようとするものである。

近年、人口の集中する都市部が郊外に較べて高温になるヒートアイランド現象が顕著になっている。都市の高温化は、都市生活を不快にするだけでなく、熱帯・亜熱帯の諸都市では夏季の空調利用増によってエネルギー消費量が増えるためさらに高温化が促進されるという悪循環を発生させている。

ヒートアイランドの原因としては、人工排熱の増加と地表面被覆の人工化に加えて、緑地や水面の減少による蒸発散量の減少や、沿岸地帯の埋め立てによる海風侵入効果の低下など、いくつかの要因が複合している。しかも、こうしたヒートアイランド現象は、中高緯度に位置する欧米よりも、比較的低緯度に多くの都市があるアジアにおいて深刻な問題を生じていると考えられる。しかし、アジアの諸都市におけるヒートアイランドの実態については不明な点が多く、その緩和策に関してもほとんど研究がなされていない。

ヒートアイランドを緩和することは、温暖化の防止、エネルギー利用の削減、生活環境の改善などの意味からも有意義であるが、その実現は容易でない。具体的な方策としては、生活レベルでのエネルギー消費量抑制、都市構造の改良、産業の低エネルギー消費化と分散などが考えられるが、本研究では、土地利用を中心とする都市構造の改良によるヒートアイランドの緩和を目指す。

研究のプロセスとしては、ヒートアイランドを中心とする都市熱環境の計測を行うとともに、それに大きく影響を与えている人工排熱と土地利用に関して計測・調査を行い、モデルを作成する。そして、都市計画的立場から、人工排熱源の移転再配置や気候緩和策(緑化など)について数値シミュレーションを行い、熱環境において負荷の低い構造をもつ都市へと誘導する方策を検討する。

本研究を遂行するに当たり、下記の4つのテーマを設定した。これらのテーマを遂行するに当たり、各テーマに対応する4つの班(サブグループ)に分かれて研究を進めた。

- ・テーマ1(モニタリング班): グラウンドモニタリング(高密度地上観測網)によるUHI実態解明

- ・テーマ2(リモートセンシング班): 高精度衛星画像リモートセンシングによるUHI実態解明

- ・テーマ3(モデリング班): モデル作成とUHI数値シミュレーション

- ・テーマ4(土地利用班): 都市的土地利用制御によるUHI緩和計画

テーマ1では、高精度人工衛星を用いて、土地利用・土地被覆データを取得するとともにアルベド(太陽光の反射率)を計算する。また、建物の高さ由来する地表面粗度の計測と熱映像を用いた気温分布の計測等を行い、都市ヒートアイランドの実態を解明する。このようにして得られたアルベドや地表面粗度は、数値モデルの境界条件に適用が可能である。

テーマ2では、東京首都圏に120ヶ所の温湿度観測点(小学校の百葉箱を利用)を設け、15分間隔で気温と湿度を測定し、小型データロガーに記録する。さらに、数ヶ所で風向・風速や日射量等の観測も実施し、ヒートアイランドの時間・空間構造の実態を明らかにする。また、バンコク(タイ)および上海(中国)においても、定点観測・移動観測を実施

し、東京との比較を試みる。これらの観測データは、数値シミュレーションの再現計算結果の検証にも用いることができる。

テーマ3では、テーマ1と2で得られたデータを局地気象モデルの地表面境界条件として入力し、ヒートアイランド発生ならびに緩和・制御の数値モデルを走らせる。対象地域は、東京首都圏、上海、および首都移転候補地である。

テーマ4では、上記のモデルを用いて、土地利用を制御することにより都市の熱環境を緩和・抑制する方策を検討する。大都市圏スケールでは、緑地の増加、屋上緑化、埋め立て地の抑制などが、また地域スケールでは「風の道」の確保などが、そして地区・街区スケールでは、熱環境を建物、放射、気流の3つのサブモデルを用いてシミュレーションし、建物素材や樹木の影響、建物配置の影響などを定量的に評価する。

1.2 研究の実施と成果

東京首都圏に設置した120カ所の高密度気温観測データ（空間平均偏差）の補正值に主成分分析を適用して、上位2成分の固有ベクトル分布と成分スコアの日変化パターンを季節別に解析した結果、第1成分は寒候期（10～3月）の夜間から早朝に最大となり、空間パターンから人工排熱による典型的な都心部中心のヒートアイランドを示すのに対して、第2成分は暖候期（4～9月）の午後から夕方に最大となり、空間パターンから明らかなように海風の侵入にともなう高温域の内陸部への移動（移流効果）を示すことがわかった。観測によってこのような詳細なヒートアイランドパターンの日変化が明らかになったことは注目に値する。

次に、東京首都圏を対象に夏季と冬季の典型日を選び、局地気象モデルを用いて気温や風の場の再現と熱環境緩和効果を定量的に評価する数値シミュレーションを行った。その結果、夏季の場合、人工排熱の20%削減では早朝の都心部で-0.22の気温低下が認められたが、日中はほとんど効果がないこと、そして都市部における緑地の10%増加で日中の都心北部で-0.3以上の効果が認められた。さらに、都市部の建物屋上を緑化することで都心北部では-1以上の気温低下が認められた。一方、東京湾の約半分を埋め立てて市街地化すると海風の移流効果が減じて、都心部では日中の気温が2以上上昇する結果となった。埋め立て地をすべて緑化したとしても1以上の気温上昇が認められた。

上記のシミュレーションでは、緑化シナリオや屋上緑化シナリオにおいて地表面パラメータの設定で土地利用データを用いたが、土地被覆別のパラメータを用いる方がより現実的である。そこで、本研究では、試験的に衛星データから緑被率を算出して設定した地表面パラメータを用いて、夏季典型日の東京圏における気温と風の場を数値シミュレーションによって再現した。その結果、緑化によって都の北部で1～2程度の気温低下効果が現れているが、都心から湾岸部ではほとんど変化のないことが明らかになった。

ところで、数値シミュレーションの精度を高めるためには、本研究で行ったような高密度の気象観測データが必要となるが、人工衛星による熱画像から得られる地表面温度から気温を求めることができれば、観測データのない地域についてもシミュレーションを行うことができる。そこで、高密度気温データの得られる東京首都圏において、LANDSAT-TMデータから放射量補正前後の表面温度と気温の関係を分析した結果、夜間の衛星熱画像は都市のヒートアイランドの計測に有効に利用できることが明らかになった。

本研究では、東京首都圏だけでなく、アジアの大都市として上海（中国）とバンコク（タイ）においても、現地での気象観測と数値シミュレーションを試みた。その結果、都心部

(CU)と北部郊外(AIT)では日没後の気温降下量に平均 4 程度の差が生じることが明らかになった。なお、バンコクにおいては日中のタイ湾からの海風侵入が都心部のヒートアイランド緩和に効果がある。そのため、建物配置を海風が通りやすいように設計することが望ましいと言える。

次に、都市内土地利用の望ましい配置をエネルギー消費と言う観点から検討した。これまでの議論では、現実の都市を対象にしたが、結果の一般化と言う点で仮想都市を想定し、その内部の土地利用配置から、一心型都市、四心型都市、十六心型都市、および一心型空地混在都市の4つに、都市内の全メッシュですべての土地利用が均一に混在する「用途混在型都市」を加えた5つの土地利用配置に対して局地気象モデルによる数値シミュレーションを行った。その結果、都市内エネルギー消費の観点からは、用途混在型都市が最も望ましく、一心型空地混在都市、十六心型都市、四心型都市、一心型都市の順でエネルギー消費が増大することが明らかになった。また、都市内エネルギー消費と言う観点に立つと、都心の数だけでなく、公園緑地や運動場といった空地系土地利用の都市内配置も重要な要素であること、特に、空地を都市内全域に均等に配置する方が、都市縁辺部に配置するよりも望ましいといえる。

最後に街区スケールに関して、熱帯地域のバンコクの中心地に対して建物配置の効果を定量的に評価するシミュレーションを行った。得られる情報が限られているため、街区形状については、現地の建物の形状を写真から判定して、一辺 6m の立方体のメッシュとして入力した。場の気象条件については、チュラロンコン大学における観測結果を用いた。バンコクの乾期には風向が一定しており、この風向に対する建物配置を仮想的に 90 度回転させた場合についてもシミュレーションを行った。その結果、現状ではこの街区では南南東の季節風が建物によって遮られて不快な環境が形成されているが、仮に建物の配置が 90 度回転していれば、街路上を風が吹き抜けることができ快適性が向上することが示された。これらの効果を SET* の変化として定量的に示した。

以上、各班毎の研究成果の概要を記したが、このほかに国内と海外(バンコク)で各1回の国際研究集会を開催し、研究成果の中間報告とアジアの諸都市に共通するヒートアイランド緩和策に関する意見交換を行った。特に、バンコクにおいては、チュラロンコン大学の全面的協力を得て、1999年春に集中気象観測とワークショップを開催し、気象データの収集と研究成果の発表・情報交換を行い、アジアの低緯度都市のかかえるヒートアイランド問題について貴重な意見交換を行うことができた。

2 . 主な研究成果

(1)論文発表 (国内 20 件、海外 14 件)

Mikami, T., Kannari, A., Yamazoe, Y., Suzuki, C., Kimura, K., and Kubo, S. (2000): Investigation of urban heat islands in Tokyo Metropolis based on the ground monitoring system. *Biometeorology and urban climatology at the turn of the millennium*: WMO/TD No.1026, 491-495.

本條 毅・菅原広史・三上岳彦・成田健一・桑田直也 (2000): 新宿御苑のクールアイランド効果の実測. 第14回環境情報科学論文集: 273-278.

Mikami,T., Kimura,K., Yamazoe,Y. and Kannari,K. (2000): The ground monitoring system of urban heat islands in Tokyo Metropolitan area. *Proceedings of International Symposium on Climate Change and Variability, and Their Impacts*: 152-157.

Mikami, T., Kannari, A., Yamazoe,Y., Suzuki,C., Kimura,K. and Kubo,S. (1999): Investigation of urban heat island in Tokyo metropolis based on the ground monitoring system. *Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology*.

Suzuki C., Iijima Y., Simoyama K., Tanaka H., Iwashita H., and Mikami T. (1999):. Cooling effect of the river in urban area. *Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology* .

Kirihara, H. and Mikami, T.(1998): Diurnal variation of potential temperatures in a large urban green tract. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, **33**, 21-31.

桐原博人・藤野 毅・三上岳彦(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. 土木学会環境システム研究, **26**, 487-492.

桐原博人・三上岳彦(1998) 夏季の明治神宮・代々木公園およびその周辺地域の表面温度の日変化. 土木学会環境システム研究, **26**, 487-492.

三上岳彦(2001): ヒートアイランド計測・評価のための観測システムと手法. 緑の読本 Ser.57: 15-20.

一ノ瀬俊明・下堂蘭和宏・鶴野伊津志・花木啓祐 (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

浦野明・花木啓祐・一ノ瀬俊明・下堂蘭和宏 (1997): 都市活動の立体的再配置による都市熱環境の制御に関する研究, 環境システム研究, **25**, 463-467

Urano, A., T. Ichinose and K. Hanaki (1998): Sensitivity Analysis of Building Drag Effect and Anthropogenic Heat Release in Urban Environment, "*Klimaanalyse fuer die Stadtplanung*", *Report of RCUSS*, Kobe University, 286-291

Ichinose, T., K. Shimodozono and K. Hanaki (1999): Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmospheric Environment*, **33**, 3897-3909

Urano, A., T. Ichinose and K. Hanaki (1999): Thermal environment simulation for three dimensional replacement of urban activity, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **81**, 197-210

一ノ瀬俊明 (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~, 環境システム研究, **27**, 115-126

一ノ瀬俊明・ハンス ペーター タム (1999): わが国の都市における「風の道」の必要性について, 環境システム研究, **27**, 721-730

ジャリヤー プンヤワット・イチノセ トシアキ・ミカミ タケヒコ・クボ サチオ (1999): 都市上空の熱ドーム 測定および抑制の手引き, *Environmental Journal*, **3**, **14**, 22-31 (タイ語)

一ノ瀬俊明 (1999): 都市のヒートアイランド現象, 雨水技術資料, **35**, 17-25

平野勇二郎・泉岳樹・柴崎亮介・一ノ瀬俊明 (2000): 衛星リモートセンシングによる緑被率データを用いた都市気候数値シミュレーション, 風工学シンポジウム論文集, **16**, 125-130

Ichinose, T. (2001): Regional warming related with land use change during past 135 years in Japan, "*Present and Future of Modeling Global Environmental Change --Toward Integrated Modeling--*", Terra Scientific Publishing Company

久保田孝幸, 花木啓祐, 浦野明, 粉川大樹, 小宮英孝 (1997): 「微気候からみた街区形態の評価に関する研究」, 環境システム研究 (全文審査部門), Vol. 25, 191-199.

粉川大樹, 久保田孝幸, 花木啓祐, 浦野明 (1997): 「建物間の空地形態が熱環境に及ぼす効果」, 環境システム研究, Vol. 25, 459-462.

IZUMI, T. A. OKABE, Y. SADAHIRO, and T. ICHINOSE (1998): The Effect of the Relocation of Japanese Capital on a Thermal Environment, Proceedings of International Conference on Modeling Geographical and Environmental Systems with Geographical Information Systems, 7-14, Hong Kong.

村上祐二・岡部篤行・貞広幸雄・泉岳樹 (1998): 緑地配置によるヒートアイランド緩和効果, 地理情報システム学会講演論文集, 7, 41-46.

泉岳樹・岡部篤行・貞広幸雄・花木啓祐・一ノ瀬俊明 (1999): 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, 171-178.

泉岳樹・岡部篤行・貞広幸雄 (2000): 都市ヒートアイランド現象のシミュレーションモデルと循環型社会に関する若干の考察, 総合都市研究, 71, 87-107.

WATANABE, Terushisa, Atsuyuki OKABE, Takeki IZUMI, and Yukio SADAHIRO (2000): Analysis of the Effect of Land Use Patterns on Energy Consumption Using a Modified CSU Mesoscale Model, Paper presented at the 29th International Geographical Congress, Seoul, August 2000.

泉岳樹・岡部篤行・貞広幸雄・平野勇二郎 (2000): 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), 11-18.

渡辺晃久・貞広幸雄・岡部篤行・泉岳樹 (2001): エネルギー消費からみた都市内土地利用配置の評価, GIS - 理論と応用 -.

泉岳樹・佐藤尚毅・岡部篤行・貞広幸雄・花木啓祐・一ノ瀬俊明 (2001): 内陸部での都市化による気候変化の数値シミュレーション 栃木・福島地域における事例解析, 天気.

Shi,Z.C., R. Shibasaki (1998): A study of GIS database revision using high resolution satellite images. Proc. of International Conference on Modeling Geographical and Environmental Systems with GIS, Vol.2, pp.487-492.

Z.C. Shi, R. Shibasaki(1997): Automated Building Extraction from Digital Stereo Imagery. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial And Space Images, A. Gruen eds., Birkhauser Verlag, 119-128.

Yan,Wanglin, Kubo,S.(1999): An integrated utilization of GPS, RS and GIS for the analyses of urbanization in Shanghai, Proceedings of the 6th International Conference in Computers in Urban Planning and Urban Management (CUPUM), 70.

Yan,Wanglin(2001):The Statistical and Spatial Characteristics of Air Temperature between TM Thermal Image Estimation and Synchronized Ground Observation, Proceedings of the 7th International Conference in Computers in Urban Planning and Urban Management (CUPUM).

(2)口頭発表 (国際学会発表のみ)

Mikami,T., Kimura,K., Yamazoe,Y. and Kannari,K. (2000): The ground monitoring system of urban heat islands in Tokyo Metropolitan area. IGU International Symposium on Climate Change and Variability, and Their Impacts, Seoul, Korea.

Mikami, T., Kannari, A., Yamazoe,Y., Suzuki,C., Kimura,K. and Kubo,S. (1999): Investigation of urban heat island in Tokyo metropolis based on the ground monitoring system. The 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology, Sydney, Australia.

Suzuki C., Iijima Y., Simoyama K., Tanaka H., Iwashita H., and Mikami T. (1999):. Cooling effect of the river in urban area. The 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology, Sydney, Australia .

Ichinose, T. (1999): Regional warming related with land use change during around 135 years in Japan. The 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology, Sydney, Australia .

Niitsu, K. (2000): Urban heat island in Bangkok and its impact. IGU International Symposium on Climate Change and Variability, and Their Impacts, Seoul, Korea.

Mikami, T., Hamada, T. and Kirihara, H. (1998): Cool island phenomena in a large green park in Tokyo. AMS Second Symposium on Urban Environment, Alburcarqui, U.S.A.

Ichinose, T. and Urano, A. (1998): Regional warming related with land use change during recent 150 years in Japan. AMS Second Symposium on Urban Environment, Alburcarqui, U.S.A.

(3)新聞報道

環境新聞 (2001.4.25): 「屋上緑化は広まるか」

産経新聞 (2001.5.8 朝刊): 「ヒートアイランド現象、夏場の大雨、杉並区中心に多発」

朝日新聞 (2001.5.17 朝刊): 「屋上緑化、都が義務づけ」

東京新聞 (2001.5.18 朝刊): 「分かった、東京豪雨の秘密」

毎日新聞 (2001.7.3 夕刊): 「新しい気象災害」

朝日新聞 (2001.7.24 夕刊): 「都心の森にクール効果」

朝日新聞 (2001.7.26 夕刊): 「都心周辺狙うゲリラ豪雨」

読売新聞 (2001.8.19 朝刊): 「都心の集中豪雨」

夕刊フジ (2001.8.21): 「列島が変だ、ヒートアイランド現象」

朝日新聞 (2001.9.7 朝刊): 「屋上を花壇や芝生に 実験中の渋谷区役所」(コメント)

日本経済新聞 (2001.9.9 朝刊): 「都心の森の意外な効果」

The Japan Times (2001.9.24): "Temperature push new heights in Tokyo"