

1. 気象予測への活用に向けた日本全域の 人工排熱量分布推定に関する検討

野依 亮介¹・相馬 一義^{2*}・高山 拓哉³・
馬籠 純⁴・石平 博⁴・田中 賢治⁵

¹株式会社ウェザーニューズ（〒261-0023 千葉県千葉市美浜区中瀬1-3幕張テクノガーデン）

²山梨大学大学院総合研究部 工学域土木環境工学系（〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11）

³中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社（〒160-0023 東京都新宿区西新宿1丁目23-7
新宿ファーストウエスト 9F）

⁴山梨大学大学院総合研究部 生命環境学域環境科学系（〒400-8510 甲府市武田4-4-37）

⁵京都大学防災研究所（〒611-0011京都市宇治市五ヶ庄）

* E-mail: ksohma@yamanashi.ac.jp

本研究では、全国的に入手可能な統計・GISデータを用い、全国一律に空間解像度約1kmで人工顕熱排熱量・人工潜熱排熱量・温排水排熱量を推定した。推定結果から県別の年間総人工排熱量を求め統計データと比較した結果、県ごとのエネルギー消費量に対応した総人工排熱量が表現できていることを確認した。推定した人工排熱量の活用例として、人工顕熱排熱量分布を降水短期予測で用いられる数値気象モデル（雲解像気象モデル）に導入し、典型的な夏季晴天日を対象にヒートアイランド再現実験を行った。推定した人工顕熱排熱量を導入した実験（CTRL）と無視した数値実験（NOAH）について地表付近の気温をAMeDAS観測値と比較したところ、CTRLでより高い再現精度が得られた観測点が多い結果が得られた。

Key Words : Anthropogenic heat, GIS data, Statistical data, Cloud resolving meteorological model, Heat island

1. 背景と目的

近年日本では、局地的大雨による被害が問題となっており、安全・安心な社会形成を目指すうえでその対策が急務となっている。自動車・空調等から発生する人工排熱がヒートアイランド現象に伴う水平風収束と上昇気流を強化し、局地的大雨を強化する可能性が指摘されており¹⁾、詳細な人工排熱量分布を考慮しヒートアイランド現象の予測精度を向上させることが局地的大雨予測改善につながる可能性がある。

詳細な人工排熱量分布を降水短期予測で用いられる数値気象モデル（雲解像気象モデル）へ取り入れ、精度向上を図る試みがいくつかの研究でなされている（例えば Souma et al.¹⁾）。しかし、特に人工排熱量分布については首都圏や京阪神地域など限られた地域を対象に、自治体により整備状況の異なるデータベースに依存して推定さ

れており（例えば妹尾ら²⁾、照井ら³⁾等）、雲解像気象モデルへ導入する際にはそのような地域毎に推定された人工排熱量分布データを重回帰分析等に基づき他地域へ拡張して使用しているのが現状である¹⁾⁴⁾。降水短期予測に用いられる雲解像気象モデルは日本全域を対象として計算が行われており、全国均一かつ可能な限り詳細な人工排熱量データセットの整備が望まれる。

以上を踏まえて本研究では、全国的に入手可能な統計・GISデータから可能な限り詳細な人工排熱量を推定する手法を構築する。次に、推定した人工排熱量分布についてエネルギー消費統計データと比較し、その信頼性を検討する。さらに推定した人工排熱量の活用例として、降水短期予測で用いられる数値気象モデル（雲解像気象モデル）に導入し、京阪神地域における典型的な夏季晴天日を対象にヒートアイランド再現実験を行い、観測値と比較した検証を行う。加えて人工排熱量についてのみ

条件を変えた数値実験を行い、推定した人工排熱量分布導入がヒートアイランド現象の再現性に与える効果を検討する。

2. 本研究で提案する人工排熱量推定手法の概要

本研究では民生家庭部門、民生業務部門、産業部門、自動車部門の4つに分けて推定を行う。また、人工排熱量を人工顕熱排熱量（大気を直接温める熱量）、人工潜熱排熱量（大気へ排出される水蒸気が凝結する際に放出される熱量）、温排水排熱量（下水へ排出される熱量）に分けて分布を求める。また、雲解像気象モデル計算への導入を目的としているため、月別・時間帯別に空間解像度 1km での推定を行う。

- ・民生家庭部門：木内ら⁵⁾の手法を参考に、戸建住宅と集合住宅の別、用途（暖房、冷房、動力、照明、給湯、厨房）の別を考慮して原単位を設定し、平成 17 年度国勢調査に基づく地域統計メッシュデータと組み合わせて推定した。

- ・民生業務部門（第三次産業）・産業部門（第一次・第二次産業）：事業所（業種別）の従業者 1 人当たりのエネルギー消費量と 500m メッシュ内の従業者（第二次、第三次産業については平成 18 年事業所・企業統計調査、第一次産業については平成 17 年度国勢調査に基づく）を掛け合わせることで排熱量を推定した。

- ・自動車部門：平成 22 年度道路交通センサスより県別・車種（大型車・小型車）別・道路種別の交通量を求め、国土数値情報の全国道路延長データ（1km メッシュ）と組み合わせて排熱量を算出した。

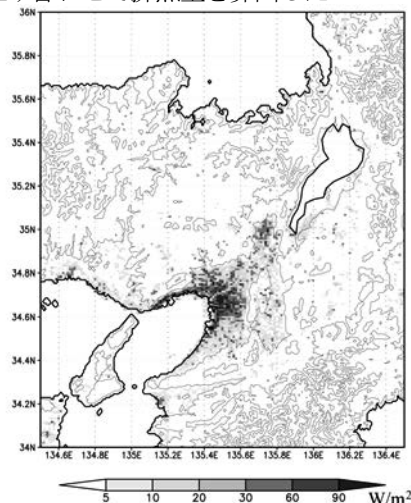


図1 京阪神地域における 8 月 12JST の人工顕熱排熱量。単位は W/m^2 。図中の太実線は海岸線及び湖岸線，細実線は標高 100m, 500m, 800m, 1000m, 1500m, 2000m を表す。

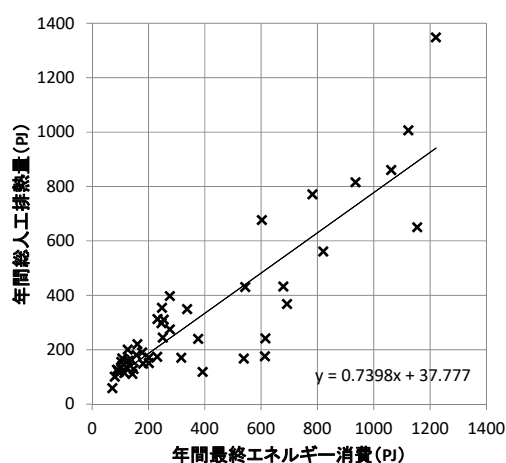


図2 県別の年間総人工排熱量（人工顕熱排熱量＋人工潜熱排熱量＋温排水排熱量）と年間最終エネルギー消費との比較。

3. 人工排熱量推定結果についての検討

2節で推定した人工排熱量のうち、8月の人工顕熱排熱量を取り上げ、ピークを示す12JSTの京阪神地域における分布を図1に示す。図1では $90W/m^2$ を超える地域が神戸・大阪・京都市の中心部で見られ、人工潜熱排熱量・温排水排熱量についても大坂市の中心部では $15W/m^2$ を超える地域が見られる（図示せず）。

推定値から算出した県別の年積算総人工排熱量（人工顕熱＋人工潜熱＋温排水排熱量）[J]について、消費したエネルギーは最終的に人工排熱として排出されると仮定して、使用した国勢調査と同じ2005年（平成17年）の統計⁶⁾に基づく年積算最終エネルギー消費量（電力・熱配分後消費・排出量）と比較した（図2）。相関係数を求めると0.88となり、県ごとの最終エネルギー消費量に対応した総人工排熱量を本研究のデータセットで表現できていることがわかる。

4. 人工排熱量推定値を導入した雲解像気象モデルによる夏季晴天日の再現計算

(1) 使用する雲解像気象モデル

本研究では、推定した人工排熱量を導入したヒートアイランドのシミュレーションを行うために、雲解像気象モデルCReSiBUC ver2.4.4（Souma et al.¹⁾; ver1.0はMoteki et al.⁷⁾）を用いる。CReSiBUCでは、大気モデルとして名古屋大学で開発された雲解像気象モデルCReSS⁸⁾を、陸面過程モデルとして京都大学で開発されたSiBUC⁹⁾を用いている。本研究では第一段階として、気温に与える影響の大きい人工顕熱排熱量のみを導入して計算を行う。

陸面過程モデルSiBUCは植生・水体・都市の各サブモデルから構成され、都市サブモデルでは空調・自動車等から排出される人工顕熱排熱量分布、アスファルトなどの人為的土地被覆、都市幾何形状（高層建物の存在等）を考慮して地表面から大気への水・熱・運動量輸送の計算を可能にしている。都市サブモデルにおいては、地表面へ入力するエネルギーを計算する際に、純放射量に人工顕熱排熱量を加えることができる。



図3 本研究における雲解像気象モデルの計算領域。

(2) 計算設定

本研究では、琵琶湖プロジェクト集中観測が行われた2001年8月14日を対象として、雲解像気象モデルへ人工排熱量分布推定結果を導入した計算を行う。この日は日本列島が太平洋高気圧に覆われた典型的な夏季晴天日であった。建物階数割合分布についてはESRI Japanが提供するArcGIS Data Collection 詳細地図2011（株式会社ゼンリン Zmap-AREA II（2010-2 版）に基づく）に基づいて設定した。また人工的土地被覆（アスファルト・建物等）を含む土地利用については国土地理院による国土数値情報（1997年調査に基づく）より各グリッドセル内の人工的土地被覆、混合林、草地、畑地、水田、水面が占める割合を計算した。標高データにはUSGSのGTOPO30を、砂・粘土の割合、土層及び根層の厚さ、植生カバー率、緑葉率についてはEcoclimap¹⁰⁾による値を、海水温にはGHRSSSTを用いた。CReSSの主なオプション設定は、降水過程としてLin-Taoによる3種類の氷相（雲氷、雪、雹・霰）を含む微物理パラメタリゼーションを、乱流過程として乱流運動エネルギーに基づいた1.5次のクロージャースキームを用いる。初期の土壌水分量については根層において十分に湿潤な値（マトリックポテンシャルで-20m）を一様に与え、陸面温度は大気最下層の気温と同じとして与える。

本研究では、気象庁が提供するメソ客観解析データ（水平解像度10km, 3時間ごと）を1時間毎に線形内挿して用いて現実的な大気場の初期・境界条件を与えた。

図3に示す領域（240×240グリッド、鉛直方向68層）について水平解像度2km, 鉛直解像度平均200m（最下層30m）で、2001年8月13日21時から8月15日0時まで27時間の計算を行う。8月13日21時～8月14日0時にかけてはスピニングアップ期間とし、解析には使用しない。

人工顕熱排熱量分布については2節で推定したデータを陸面過程モデルSiBUCの都市サブモデルに導入した実験を行い、以降CTRL実験と呼ぶ。また、仮想的に計算対象領域全体で0W/m²とした実験を併せて行い、以降NOAH実験と呼ぶ。

(3) 気温再現結果と観測値とを比較した検討

対象日について、京阪神地域（京都府、大阪府、兵庫県）においてAMeDASによる観測10分毎の気温観測値が気象庁月報に収録されている34地点を対象として検討を行った。比較に当たってはシミュレーション、AMeDAS観測値について、2001年8月14日00:10JSTから24:00JSTを対象に大気モデル最下層の最高気温、最低気温、平均気温を算出した。

CTRL実験について34地点の値から算出した平均二乗誤差（RMSE）、及び相関係数を表1に示す。最高気温については若干RMSEが高いものの、最高気温、最低気温、平均気温とも相関係数が0.7以上と観測点毎の違いを表現できていることがわかる。

次に最高気温、最低気温、平均気温のそれぞれについて、CTRLとNOAHとで0.1度以上変化のあった観測点を抽出し、CTRLでNOAHよりも値が観測値に近い場合を「改善した」とし、CTRLで値が観測値から離れている場合を「悪化した」としてそれぞれの地点数について検討を行った。その結果、最高気温については16地点で改善、3地点（豊中、生駒山、美山）で悪化した。最低気温については3地点で改善、悪化した地点は0地点であった。平均気温については10地点で改善、1地点（生駒山）で悪化した。最高・最低・平均気温とも改善した地点数が多く、悪化した地点はごく少数であることから、本研究で推定した人工顕熱排熱量の導入が再現精度向上に寄与したと考える。

最高気温について「改善した」地点が多くなった原因として、CTRL実験ではNOAH実験と比較して海風（及び山谷風）の瀬戸内海から内陸への侵入に伴い、都市域で加熱された高温域が内陸側へ広がっていることが考えられる。「悪化した」一部の観測点については海風前線付近に位置し、CTRL実験における海風前線位置と海風前線付近における雲の再現性に影響を受けている可能性が考えられる。

大阪において最低気温が観測された時間（05JST）には陸風が卓越し、都市部での加熱の影響が瀬戸内海沿岸

にとどまっております、このことが最低気温について「改善した」点が最高気温と比較して少数にとどまった原因と考えられる。

表1 CTRL 実験における 34 地点の AMeDAS 観測値に対する最高気温、最低気温、平均気温の平均二乗誤差 (RMSE) 及び相関係数。

	最高気温	最低気温	平均気温
RMSE (°C)	2.34	1.20	1.05
相関係数	0.70	0.71	0.78

5. まとめ

本研究では、まず全国的に入手可能な統計・GISデータを用いて可能な限り詳細な人工排熱量を推定した。全国一律に空間解像度約1kmで人工顕熱排熱量・人工潜熱排熱量・温排水排熱量のデータが得られた。推定した人工排熱量分布から県別の年間総人工排熱量を求め、統計データにおける年積算最終エネルギー消費量と比較した結果、相関係数が0.88となり、県ごとのエネルギー消費量に対応した総人工排熱量を本研究のデータセットで表現できていることを確認した。

次に、推定した人工顕熱排熱量分布を降水短期予測で用いられる数値気象モデル（雲解像気象モデル）に導入し、典型的な夏季晴天日を対象にヒートアイランド再現実験を行った。人工顕熱排熱量を導入した実験（CTRL）と一律0W/m²とした数値実験（NOAH）について、地表付近気温をAMeDAS観測値と比較したところ、一日の最高気温、最低気温、平均気温ともCTRLで観測値に近づいた点が多かった。

謝辞：本研究の実施に当たっては中電CTI 長谷川晃一氏、名古屋大学 坪木和久教授、篠田太郎准教授、京都大学 鈴木章吾氏、池淵周一名誉教授、中北英一教授、市川温准教授、山口弘誠准教授、東京工業大学 神田学教授、木内豪教授、妹尾泰史氏、愛媛大学 森脇亮教授、山梨大学 砂田憲吾特任教授、末次忠司教授、舩谷敬一教授、坂本康教授、金子栄廣教授、杉山俊幸教授、新藤純子名誉教授、宮沢直季助教より多くのご助言をいただきました。

また、本研究は公益財団法人河川財団の河川整備基金、河川基金による助成、科研費 基盤研究 (B) 19H02246、基盤研究 (C) 15K06230、若手研究 (B) 24760390、基盤研究 (B) 19H01378、基盤研究 (S) 15H05765、基盤研究 (S) 22226010、基盤研究 (A) 22246066、及び前田記念工学振興財団の支援を受けました。また、科学技術人材育成費補助金、山梨大学グローバルCOEプログラム、名古屋大学HPC計算科学連携研究プロジェクト、山梨大学

学内融合研究、スマート社会基盤創造研究ユニットからのご支援をいただきました。

ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) K. Souma, K. Tanaka, T. Suetsugi, K. Sunada, K. Tsuboki, T. Shinoda, Y. Wang, A. Sakakibara, K. Hasegawa, Q. Moteki, and E. Nakakita (2013): A comparison between the effects of artificial land cover and anthropogenic heat on a localized heavy rain event in 2008 in Zoshigaya, Tokyo, Japan, *Journal of Geophysical Research*, 118, pp.11,600-11,610, doi:10.1002/jgrd.50850, 2013.
- 2) 妹尾泰史, 神田学, 木内豪, 萩島理: 潜熱割合を考慮した人工排熱時空間分布の推計と局地気象に対する影響、*水工学論文集*、第 48 巻、pp. 169-174, 2004.
- 3) 照井奈都, 鳴海大典, 下田吉之: 人工排熱の排出特性が都市熱環境の再現に及ぼす影響—京阪神地域を対象とする感度分析—, *日本ヒートアイランド学会論文集*, 4, pp.15-25, 2009.
- 4) 萱場互起, 青柳曉典, 高橋俊二: 重回帰分析による人工排熱量の推定: *測候時報*, 77.4-6, 2010.
- 5) 木内豪, 吉谷純一: 首都圏における将来の人工排熱量一時空間分布の推計, *第三十回環境システム研究論文発表会講演集* pp. 205-210, 2002.
- 6) 資源エネルギー庁: 都道府県別エネルギー消費統計, https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/, 2019 年 3 月 19 日閲覧.
- 7) Q. Moteki, Y. Ito, K. Yorozu, K. Souma, A. Sakakibara, K. Tsuboki, T. Kato, K. Tanaka, and S. Ikebuchi: Estimation for Effects of Existence of Urban on Development of Cumulonimbus Clouds Using Atmosphere-Land Coupled Model of CReSiBUC, *Annals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, No.48 C, pp.197-208, 2005.
- 8) Kazuhisa Tsuboki and Atsushi Sakakibara: Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator, *High Performance Computing*. Zima H. P. et al. (eds), Springer, Germany, pp.243-259, 2002.
- 9) Kenji Tanaka: Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model, doctoral dissertation, Kyoto Univ., 2004.
- 10) J. L. Champeaux, V. Masson and F. Chauvin: ECOCLIMAP: a global database of land surface parameters at 1 km resolution, *Meteorological Applications*, 12(1), pp. 29-32, 2005.