

研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2007～2009
課題番号：19560550
研究課題名（和文） 熱環境とエネルギー需要の連成解析に基づくアジア低緯度都市の 省エネポテンシャル評価
研究課題名（英文） Evaluation of Energy Saving Potential in Asian Low-Latitudinal Cities Based on the Combined Analysis of Urban Thermal Environment and Energy Demand
研究代表者 亀卦川 幸浩 (KIKEGAWA YUKIHIRO) 明星大学・理工学部・准教授 研究者番号：20409519

研究成果の概要（和文）：アジア低緯度都市において懸念される都市高温化と空調エネルギー需要増との間の悪循環過程をシミュレート可能な都市気候・エネルギー連成数値モデルを開発した。事例研究として、インド国・デリーにて集中気象観測を行い、デリーの都市高温化の現況を明らかにすると共に、開発したモデルによるその再現性を検証できた。連成モデルは、都市人口増等の将来シナリオ下で、都市気候の変化とその空調エネルギー需要への波及効果も加味し、アジア低緯度都市の冷房省エネポテンシャルを定量化可能であることが示された。

研究成果の概要（英文）：To simulate the vicious interaction between urban warming and increase of air conditioning energy demand predicted in Asian low-latitudinal cities, we have developed a numerical combined model of urban climate and building energy consumption. As a case study, the model was applied to Delhi with a successful reproduction of the present state of its urban climate which was clarified through our meteorological observations. Finally, it was confirmed that the model could quantify the cooling energy saving potential in Asian low-latitudinal cities taking into account the possible urban climate change and its impact on air conditioning energy demand under future scenarios like urban population growth.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木環境システム

キーワード：アジア低緯度都市、気候変動、都市熱環境、ヒートアイランド、省エネルギー、マルチスケールモデリング、デリー

## 1. 研究開始当初の背景

温室効果の増進等により全球規模の気候変動が進行する今世紀の地球上で、人類の過半は総陸地面積の約 3%にすぎない都市域に偏住し、集中的な土地被覆の改変等を通じ、ヒートアイランド現象に代表される局地規模の気候変動をも顕在化させている。加えて、ヒートアイランドと化した都市域では、冷房の需要増加が、人工排熱を増大させ、その帰結としての気温上昇が更なる冷房エネルギー消費と CO<sub>2</sub> 排出の増大を誘発するという、悪循環問題の発現も懸念されている。

中低緯度の冷房需要域に多数の大都市を擁するアジアを中心として、更なる都市化が進行する今世紀において、都市のエネルギー需要と気候・大気熱環境の間に存在する以上の双方向の関係性を明らかにすることは、都市と地球の気候変動がもたらす社会影響やその緩和策を論ずる観点からも、重要な研究課題の一つと位置づけられている。

一方、建物の凹凸や人工排熱を伴う複雑地表面としての都市が局地気候にもたらす熱的・力学的な影響過程のモデリングは、気象学における今日的な研究課題となっている。同課題に関連し、研究代表者らは『都市気候・エネルギー連成モデル』を構築し、国内大都市域におけるエネルギー需要と地域気候の関係性やヒートアイランドの形成機構の研究へ適用してきた。この事前研究の成果より、上述の悪循環問題の発現がとりわけ懸念される熱帯・亜熱帯のアジア低緯度都市域では、ヒートアイランド現象進行に伴い我が国都市域を上回る増エネポテンシャルが予見された。当該ポテンシャルを加味した都市省エネ策の評価手法を開発・適用することは、地球規模の環境保全の視点からも重要な研究テーマと考えられた。

以上の課題認識のもと、アジア低緯度域の都市気候研究の動向を調査する過程で、インド国デリーに立地するインド工科大学の研究者より積極的な関心が示された。このことを受け、研究代表者らの『都市気候・エネルギー連成モデル』の改良とその発展的活用を通じ、デリー都市圏での熱環境改善（蒸暑環境の緩和）による都市省エネポテンシャルの定量化に向け、本研究課題を提案するに至った。

## 2. 研究の目的

アジア低緯度域に位置する巨大都市群より、東京に続き世界第2位の都市圏人口（2009年時点で 2170 万人）を擁するインド国デリーを対象に、以下の事項を明らかにすることを研究目的とした。

(1) デリー都市圏での地上気象観測を通じ、

気温分布等からみたデリーの都市気候の現況とその特徴を把握すると共に、都市気候モデル検証用の実地データを取得すること。加えて、電力消費量等のエネルギー需要に関わる資料を収集・分析し、デリーにおける人工排熱量を推計すると共に、都市気候と冷房用途を含む建物エネルギー需要の関係性のモデル解析に向けた基礎資料を得ること。

(2) 研究代表者らが事前研究にて開発した『都市気候・エネルギー連成モデル』に対し、アジア低緯度域への適用等の為の改良を行う。国内都市域を対象にその予備的検証を行った後、同モデルをデリー都市圏に適用し、(1)の実地データとの比較によりモデルの妥当性を本検証すること。

(3) (2)で改良・検証された連成モデルに対し、デリー都市圏でのエネルギー需要の伸張や都市熱環境改善策の導入等のシナリオを投入し、同シナリオ下での都市スケールの気候・熱環境変化とそれに伴う冷房消費エネルギー量の変動を定量的に予測すること。

(4) 以上の結果にもとづき、気候・熱環境と都市空調エネルギー需要の相互作用の考慮下において、デリー都市圏の省エネポテンシャルを定量化し、以って、本研究にて開発した連成解析モデルを用いるアジア低緯度都市の省エネ化方策の評価手法のプロトタイプとして提示すること。

## 3. 研究の方法

(1) 前項の研究目的(1)については、土地利用の観点より数 km の水平スケールで空間代表性を有する地上気象要素が測定可能と考えられる観測地点をデリーとその近郊より 28 地点、現地踏査を通じ選定した。その後、2008 年 5 月と 2010 年 3 月の乾季に各 4 日間に渡り地上気温・湿度を 28 地点で連続計測した。並行し 3 地点では建物屋上で日射量等も含む総合気象観測を行い、更に 2010 年 3 月の測定では移動観測により計 63 の追加地点で地上気温を測定すると共に、人工衛星 TERRA/ASTER による地表測定データを取得した。以上の現地測定データより地上気温等の時空間分布を解析した。また、電力・LPG や自動車燃料等の需要インベントリーデータを収集・解析し、デリーにおける人工排熱量の空間分布とその時間変化を推計した。

(2) 研究目的(2)については、3 次元メソスケール気象モデル（以降 MM）、1 次元都市キ

ヤノピーモデル（同 CM）、及びビルエネルギー・排熱予測モデル（同 BEM）より構成される『都市気候・エネルギー連成モデル』の MM 部分をこれまでの静水圧モデルから非静水圧モデルへ置換した。これにより気象計算の空間分解能を向上させると共に、アジアモンスーン域での重要な気候要素である降水現象の影響を解析可能な連成モデルとして再構成した。具体的には、米国で近年開発された公開モデルである WRF（Weather Research & Forecasting Model）を MM として採用し、研究代表者らが独自に開発した街区気象と空調排熱を含む建物熱収支の連成予測モデル（CM-BEM）を WRF と接地大気層で双方向に接続することで、新たな連成モデル（WRF-CM-BEM）を構築した（図 1）。同モデルを夏季東京に適用し、地上気温とその人工排熱への応答感度の再現性の観点より、予備検証を行った。続いて、現地調査や衛星画像解析等により同定したグリッド毎の街区形状や土地被覆、地物の放射・熱物性、建物での空調使用等に関わる入力パラメータと共に WRF-CM-BEM をデリーに適用し、(1)で実測した地上気温の再現性の観点よりモデルの本検証を行った。

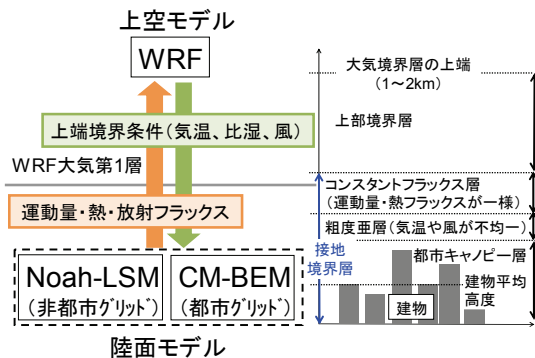


図 1 WRF-CM-BEM の概略図

- (3) 研究目的(3)については、(2)のデリーの数値実験に対し、地表面入力条件を変更した感度解析を行い、現況都市気候の各形成因子の寄与度を推定した。その内、建物密度等のいくつかの支配的因子について、デリーの将来的都市成長や気候変動緩和策の導入に伴う増減を想定した。この将来シナリオがデリーの都市気温と冷房エネルギー需要にもたらすインパクトを WRF-CMBEM を用い推計した。
- (4) 最後に(3)の解析結果にもとづき、デリーの都市気候緩和と冷房エネルギーの省エネポテンシャルを推定した。

#### 4. 研究成果

(1) 研究目的(1)については、乾季デリーにおいて、2008年5月25日～28日及び2010年3月7日～10日の概ね好天静穏であった各4日間、地上気象の集中多点計測を行った。その結果、地上気温の時空間分布と土地利用や街区形状などの気温形成因子との間に、境界層気象学の基礎理論に照らし合理的な関係性が見出された。具体的には、微気候の観点からみた土地利用分類法を用い実測気温を解析した結果、大気混合が進む昼間に比し、大気が安定化する夜間において観測地点間で顕著な気温差が認められた。植生が多く開けた地点ほど低温になる、天空率が小さい市街地地点ほど日没後の気温減少速度が小さくなる、などの合理的な関係性も確認できた（図 2）。

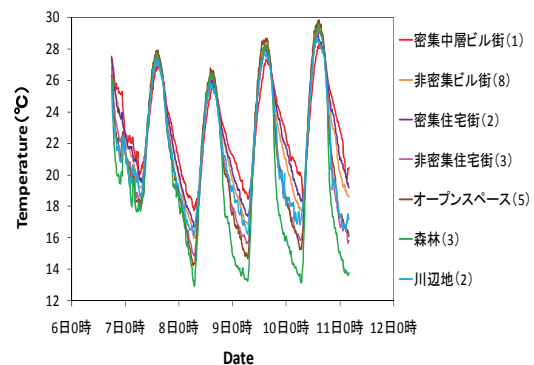


図 2 実測地上気温の時系列 (2010 年 3 月) (土地利用分類毎の平均、()内は観測地点数)

また、1970年代のデリーでの観測事例と比較した場合、都心と郊外の気温差 (= ヒートアイランド強度) にみられた未明のピークは本研究の観測では認められなかった。これは、1970年代、デリー圏で早朝に形成されていた接地逆転層が、その後の都市成長を経た現代のデリーでは、地表面粗度の増大等により形成されにくくなっていることに依ると推測された。ヒートアイランド強度の絶対値においても経年増加がみられ、2010年3月の測定で検出された本研究での最大ヒートアイランド強度 (=10°C) は、先進国大都市での最大強度の報告例に匹敵した。以上の実測を通じ、先行研究における 1970年代の観測以降、実態が不明であったデリーの都市気候の現況を把握できた (発表論文(1)、(6)、学会発表(2))。

更に、エネルギー需要のインベントリー分析により、デリーの人工排熱量を時刻別・2km 水平格子別に推計した結果、市街地格子での平均排熱量は 6.5W/m<sup>2</sup> であり、夏季東京 23 区域の排熱量の 1/5 程度に止まることが判明した。

(2) 研究目的(2)については、各種の実測より推計された東京・大阪の都心オフィス街における夏季地上気温の人工排熱への応答感度 ( $0.7\sim 0.9^{\circ}\text{C}/100\text{W}\cdot\text{m}^2$ 、発表論文(5)) について、その WRF-CM-BEM による再現性をまず検証した。東京を対象とした気象数値実験の結果、WRF-CM-BEM は、同域地上気温の空間分布のみならず、上述の応答感度も概ね再現できることが確認された(学会発表(1))。続いて、デリーを対象とした2010年3月の実測期間のシミュレーションでは、同域の地上気温分布を実測に見られる土地利用や街区構造(天空率等)との関係性も含め WRF-CM-BEM が再現可能であることが検証できた(学会発表(2))。

(3) 研究目的(3)については、前述(2)のデリーを対象とした地上気温の再現シミュレーションに加えて、その地表面入力条件を操作した感度解析を行った。その結果、現在のデリーの地上気温場の支配的形成要因は、植生等の自然被覆を喪失した都市的土地利用(人工被覆)の拡大であり、次いで建築物集積がもたらす熱容量の増大や夜間放射冷却の抑制等の熱的影響が大きい一方、先進国に比しなお低水準に止まる人工排熱の影響は小さいことが判明した。以上の結果を受け、デリーの将来的都市成長に伴う高温化の進行とその緩和策の冷房エネルギー需要へのインパクトを含めた導入効果を予測すべく、数値実験を重ねた。デリーにおける1人当たりのGDPが日本の現況水準に迫り、都市圏人口が現在の1.5倍へ増加することが予想されている2025年頃を想定し、将来シナリオを作成した。建物内の非空調エネルギー需要と自動車排熱量が、現況水準から前者は5倍、後者は6倍の先進国(東京)水準へ達し、冷房機器のエネルギー効率も我が国での現況効率に到達するシナリオをCase1とした。この設定に加え、同時に進行するであろう1.5倍への人口増加に伴う建物量の増大を、デリー全域で建物高度を一律に1.5倍するシナリオ(Case2)、高度は現況値のまま建物の水平断面積を1.5倍するシナリオ(Case3)の二通りの設定で表現した。予測が困難な土地利用の変化については無視し、市街化範囲は現況のままと仮定した。都市効果のみによる気候変動を解析すべく、モデルの初期・境界条件としての広域気象条件は現況値を採用し、地球温暖化等の広域気候変動の影響は除外した。以上のシナリオを WRF-CM-BEM へ適用した結果、乾季の高温月である5月の晴天日の日平均地上気温は、デリーの市街地グリッド平均で、Case-1では $0.1^{\circ}\text{C}$ 、Case-2とCase-3では $0.6^{\circ}\text{C}$ と $0.1^{\circ}\text{C}$ 、現況値より上

昇すると予測された(図3)。一方、冷房エネルギー需要については、全ケースで50%~60%の省エネ効果がシミュレートされた。

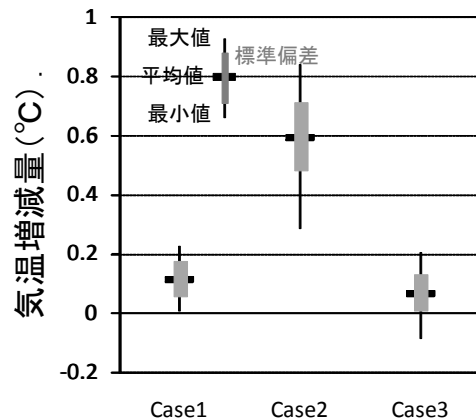


図3 各シナリオ下でシミュレートされた日平均地上気温の増減(5月晴天日条件、全市街地グリッド平均)

(4) 以上の(3)の数値実験より、現況気温への影響が小さいデリーの人工排熱は、今後のエネルギー需要増に伴い増加し、気温上昇に寄与する可能性があること、建物量の増大は排熱に比し将来的なデリーの都市温暖化により大きく作用する可能性があり、特に建築物の高層化の影響が大きいことが示唆された。特にCase-2では、天空率と気温上昇量の間には負の相関が認められたことから、一定程度以上の天空率を確保し通風効率にも配慮した街区形状を採用することが有効であるなど、デリーの今後の都市温暖化対策の方向性を示唆する知見を得ることができた。一方、冷房エネルギー需要については、今後の空調機器の高効率化に伴う省エネ効果が、気温上昇に伴う冷房熱需要増がもたらす増エネ効果を凌駕し、正味の省エネ効果をもたらす可能性が示唆された。緑化を含めた各種の都市温暖化対策が、以上の省エネポテンシャルを増進させ得る複合効果も加味することで、より実用的な都市の省エネ化方策の導出に寄与できる可能性が確認できた。この種の総合的省エネポテンシャルの定量化は今後の研究課題とした。しかし、以上の研究成果より、本研究で構築した都市気候・エネルギー連成モデル(WRF-CM-BEM)は、都市の冷房エネルギー需要について、上述の総合的省エネポテンシャルの発現に至る物理プロセスを現実的にシミュレート可能であり、世界的にも希少なプロトタイプモデルとして、アジア低緯度都市の省エネ化方策の検討に適用可能であることが確かめられた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

- (1) 石坂泰斗、亀卦川幸浩、Manju MOHAN, Bhola Ram GURJAR、乾季デリーにおけるヒートアイランド現象と土地利用・街区構造との関係性、第 38 回環境システム研究論文発表会講演集、2010、pp. 283-289、査読無
- (2) 大橋唯太、亀卦川幸浩、山口和貴、井原智彦、岡和孝、数値気象モデルを利用した屋外活動空間の暑熱評価、日本生気象雑誌、47 巻、2010、pp. 91-106、査読有
- (3) Yukitaka Ohashi, Hidemasa Kuroyanagi, Yukihiro Kikegawa, Kazutaka Oka, Yoshinori Shigeta, Yujiro Hirano, Hiroyuki Kusaka, and Fei Chen, Influence of Differences in Urban Structure and Electric Power Demand on Atmospheric Thermal Environment in Osaka Urban Area, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol. 28, 2010, pp. 87-101, 査読有
- (4) 大橋唯太、畔柳秀匡、亀卦川幸浩、岡和孝、建物用途の異なる複数街区を対象としたヒートアイランド対策の数値シミュレーション、環境システム研究論文集、37 巻、2009、pp. 73-81、査読有
- (5) 亀卦川幸浩、大橋唯太、重田祥範、井原智彦、田川稔、井上達也、東京・大阪における夏季電力消費と都市熱環境の関係性に関する研究、環境システム研究論文集、37 巻、2009、pp. 113-123、査読有
- (6) Manju Mohan, Yukihiro Kikegawa, B. R. Gurjar, Shweta Bhati, Anurag Kandya and Koichi Ogawa, Assessment of urban heat island intensities over Delhi, the 7th International Conference on Urban Climate Extended abstracts (on CD-ROM), 2009, 査読無
- (7) 小川洗一、亀卦川幸浩、Manju Mohan, B. R. Gurjar、デリーにおけるヒートアイランド現象の影響評価、第 37 回環境システム研究論文発表会講演集、2009、pp. 61-65、査読無
- (8) 畔柳秀匡、大橋唯太、亀卦川幸浩、岡和孝、重田祥範、平野勇二郎、日下博幸、Fei CHEN、街区構造と電力需要の違いが都市熱環境に及ぼす影響 ー大阪市街地を対象にした解析ー、水工学論文集、53 巻、2009、pp. 289-294、査読有
- (9) Hiroaki Kondo, Takayuki Tokairin, Yukihiro Kikegawa, Calculation of wind in a Tokyo urban area with a mesoscale model including a multi-layer urban canopy model, Journal of Wind

Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, 2008, pp. 1655-1666, 査読有

- (10) Tomohiko Ihara, Yukihiro Kikegawa, Kazutake Asahi, Yutaka Genchi and Hiroaki Kondo, Changes in Year-round Air Temperature and Annual Energy Consumption in Office Building Areas by Urban Heat Island Countermeasures and Energy-saving Measures, Applied Energy, Vol. 85, 2008, pp. 12-25, 査読有
- (11) 大橋唯太、亀卦川幸浩、都市気象・ビルエネルギー連成数値モデルを利用した熱中症予報システムの開発 ー大阪市を対象にした検証例、環境情報科学論文集、21 巻、2007、pp. 399-404、査読有

[学会発表] (計 6 件)

- (1) Yukihiro Kikegawa, Yukitaka Ohashi, Tomohiko Ihara, Hiroaki Kondo, Observed and simulated interactions between electricity consumption and urban surface air temperatures in downtown Tokyo and Osaka, Second Conference on Weather, Climate, and the New Energy Economy, 26 January 2011, Seattle, USA
- (2) 保刈和也、石坂泰斗、亀卦川幸浩、Manju Mohan, Bhola R. Gurjar、乾季デリーの地上気温に見られる土地利用と都市キャンピーの影響、日本気象学会 2010 年度秋季大会、2010 年 10 月 29 日、京都テルサ(京都)
- (3) Yukihiro Kikegawa, Anthropogenic Heat and Urban Climate Prediction, International Workshop on Urban Climate Projection for better Adaptation Plan, 2 June 2010, University of Tsukuba

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

亀卦川 幸浩 (KIKEGAWA YUKIHIRO)

明星大学・理工学部・准教授

研究者番号：20409519