

論文の内容の要旨

論文題目 熱環境と空調エネルギー需要の相互作用を考慮した
都市高温化対策の評価

氏名 亀卦川 幸浩

本研究は、大都市域への偏在化が進む民生エネルギー需要の地球環境的視点からの削減必要性に基づき、都市高温化対策を民生エネルギー利用の凡地球的効率化オプションと位置付ける観点から出発したものであった。このように民生エネルギー需要が集中する大都市域では、ヒートアイランド化により増大する冷房消費エネルギーが廃熱として更に都市を高温化させる悪循環も危惧されている。本研究では、このような熱環境と空調エネルギー需要の相互作用過程を都市スケールで表現可能な数値モデルを構築し、各種高温化対策を都市空調システム総体の省エネ方策として位置付ける新たな観点からの都市高温化対策技術の評価を目指した。本学位論文は以上を目的とした研究の成果を取りまとめたものである。ここでの対策評価研究は、その将来的な適用対象としてアジア巨大都市群を視野に入れるものであるが、評価手法の開発と検証のフェーズを含む本論文においては、検証データ等各種資料入手の容易性に配慮し、夏季東京 23 区を研究対象としている。

以上の研究目標へ向け、まず始めに、夏季屋外熱環境と冷房エネルギー需要の相互作用過程の街区スケール表現を可能とする数値モデルを構築した。同数値モデルは、メソスケール広域気象モデル (MM)、街区キャノピー気象モデル (CM)、ビルエネルギー・廃熱解析モデル (BEM)、より構成されるマルチスケールモデルであった。MM と CM は既往研究におけるモデルであり、BEM は CM が予測した街区気象に対する建築側の空調エネルギー消費・

廃熱応答を表現すべく新たに開発したモデルであった。この BEM による建築廃熱を街区大気熱収支へフィードバックすべく CM に改良を施し、CM と BEM を結合した。さらに MM 計算結果より CMBEM 結合モデル大気の初期・上端境界条件と移流冷却・加熱率を生成する単方向接続のスキームにより MM と CMBEM 間を接続した。以上のマルチスケールモデルを本論文では MM-CMBEM 単方向接続モデルと称した。同モデルは、MM による所与の広域大気条件のもと、各種高温化対策想定下の街区キャノピーにおける大気-建物系熱収支を CMBEM によりシミュレート可能な、街区スケールでの夏季高温化対策評価モデルと位置付けられた。

以上の MM-CMBEM 単方向接続モデルを、東京 23 区域において対照的街区構造を有する大手町、練馬の両街区に対し適用し、各種実測データとの比較を通じ夏季条件下にてその検証を行った。その結果、モデルは、(1)両街区気象条件（地上気温・風速）と建築物内熱環境（室温・冷房熱負荷量）の夏季時間変化を概ね再現可能である事、(2)モデルにより予測された冷房電力需要の両街区での気温感応度は、東京電力の夏季需要データより推計された 23 区都心域と郊外域、両エリアでの広域実態感応度とほぼ整合する事、が確認された。これにより、モデルは、夏季の業務・住宅街区の双方に対し適用可能である事が示された。次に、冷房廃熱源の街区内配置が、外気温と冷房エネルギー需要に与える影響が解析された。大手町では外気への全廃熱源を無くす事で、夏季地上気温は 1℃強降下し、冷房熱源機器エネルギー消費は約 6%削減される事が予測された。これに対し、練馬における廃熱削減効果は、外気温について-0.57℃、冷房エネルギー消費にして 2.57%の削減に止まった。これは、モデル上において、練馬街区キャノピー大気の支配的加熱源が人工廃熱ではなく建物表面からの顕熱輸送である事に依った。

続いて、都市全域スケールでの高温化対策評価に向け、23 区域の夏季対策配置について検討を行った。MM-CMBEM 単方向接続モデル上の街区気温予測式に基づき、大気熱収支構造の街区形状依存性に関し考察した結果、天空率が有効な対策検討指標となる事が示唆された。この事を検証すべく、23 区より対象街区を抽出し、冷房排熱削減、街区被覆面の高アルベド化と緑化の対策想定下、MM-CMBEM 単方向接続モデルにより数値実験を行った。その結果、23 区の 90%以上を占める天空率 0.8 以下の街区中、事務所街区では冷房廃熱削減、住宅街区では側壁面緑化、が有効な夏季気温緩和策であり、天

空率の小さな街区ほど大きな気温緩和効果が得られる事が予測された。また、これらの気温緩和策は、街区冷房省エネルギー性の観点からも有効な対策である事が示された。一方、天空率 >0.8 の街区中には、地表緑化が最良となる街区の存在が予測された。これらの結果は、天空率の高温化対策検討指標としての有効性を支持した。なお、街区高アルベド化策は窓面透過光を増大させ、地表面への対策導入時には必ずしも省エネに寄与しない可能性が示された。以上の検討結果に基づき、夏季 23 区の最適対策配置マップを作成した。

以上の MM-CMBEM 単方向接続モデルにより予測可能と考えられた各種対策導入に伴う街区規模熱環境の変化について、その広域都市気象へのフィードバック過程を表現可能とすべく、モデルの改良を行った。運動量と熱の大気接地境界層内鉛直フラックスに関する CMBEM 計算結果を、フラックス下端境界条件として MM 大気層へフィードバックする接続手法等により、MM と CMBEM 間の接続を双方向へと改めた。この MM-CMBEM 双方向接続モデルを 2000 年 9 月夏日晴天条件下の関東地方に適用し、23 区全域にて都市キャノピーの存在を陽に考慮した実況再現計算を行った。その結果、AMeDAS 気象データとの比較を通じ、モデルは関東全域の地上温位と地上風系の日変化を概ね再現可能である事が示された。次に、MM-CMBEM 双方向接続モデルの街区気象モデルとしての妥当性を検証すべく、CMBEM 街区気温予測結果と 23 区内実測街区気温との比較を行った。23 区 AMeDAS 気温との比較は、街区構造について AMeDAS 観測点近傍の局所的範囲の条件設定を採用した場合に、モデルによる地上気温の再現性が向上する事を示した。この AMeDAS 気温と比べ都市キャノピーのより強い影響下にある街区気温を東京駅周辺業務街区にて実測し、モデル計算結果と比較した。その結果、同街区気温と AMeDAS 気温の差として実測データ上に見られた街区キャノピーの地上気温に及ぼす影響は、モデル上においても定性的には再現されている事が示された。以上により、一部定性的ではあるものの、広域、街区、両スケールの気象再現性の観点より MM-CMBEM 双方向接続モデルの妥当性が明らかとされた。

最後に、この MM-CMBEM 双方向接続モデルを本研究にて提案した高温化対策配置想定下の 8 月晴天条件の 23 区に適用し、広域の気温緩和と 23 区全体での冷房省エネルギー効果について予測を行った。その結果、23 区全域への高温化対策の導入は、MM 水平格子上の約 10km 四方の平均気温でみて、

23 区域において昼間に最大 1℃弱となる地上気温緩和効果をもたらし、その発現範囲は、23 区とその周辺 10km 程度までの領域と予測された。この気温緩和に伴い、23 区内の事務所街区では日積算ベースで平均 3.1%の冷房電力消費と 0.8%の冷房用都市ガス消費の削減が見込まれ、住宅街区における冷房電力消費削減率は 17.5%に達すると予測された。この対策導入に伴う冷房エネルギー消費の削減は、8 月の 23 区民生部門総エネルギー需要に対し、1.18%の省エネ効果をもたらすものと推計された。同省エネに伴う 23 区全体での民生部門 CO₂ 排出削減率は 1.27%であり、8 月において 920ton-CO₂/day の CO₂ 削減効果が予測された。高温化対策がもたらす都市エネルギー需要総体への影響に関する以上の予測は、気象条件と建築側熱収支の相互作用物理過程を都市スケールにて考慮したという点で、最初の研究例として位置付けられるものであった。

以上、本研究において都市全域スケールの高温化対策評価数値モデルとして開発を行った MM-CMBEM 双方向接続モデルは、都市高温化対策のより現実的かつ実効的評価へ向け、以下の新規性を有するものであった。

- (1)気象条件と建築空調エネルギー需要の廃熱を介した相互作用物理過程を都市スケールで考慮可能である事。
- (2)これにより高温化対策によりもたらされる気温緩和効果に加えて、その空調エネルギー需要への波及効果が予測可能であり、高温化対策を都市省エネ方策としての観点からも同時に評価可能である事。
- (3)気象モデル上で都市キャノピーを陽に考慮している為、街区構造に応じた気温形成要因の相違に配慮した街区スケールでの対策配置検討が可能である事。

しかしながら、以上の新規性を有する MM-CMBEM 双方向接続モデルは、一方において、その適用妥当性が夏季のみにおいて確認されたモデルであった。高温化対策がもたらす都市エネルギー需要総体への影響を明らかとする為には、対策による冬季暖房熱需要への影響も加味した通年スケールでの対策評価が必要と考えられた。これにより、本研究の発展性を、より実効的な都市高温化対策評価手法の提案という観点から展望した場合、冬季適用と通年スケールでの長期積分に向けた MM-CMBEM 双方向接続モデルの改良が今後の最重要研究課題と位置付けられた。