

## 審査の結果の要旨

氏名 蛭田 有希

熱中症被害の深刻化など、都市の熱環境問題が顕在化している。こういった都市高温化問題は、急速な都市化や地球規模での温暖化によって深刻化しており、対策が急がれる問題として人々の関心を集めている。一方で、行政の対策は緑化が中心であり、市街地の自然的要素がもつ様々な機能の中でも、気象緩和機能は著しく有益な機能だとされる。また、緑化等の空間構成の改変は、我々が、直接、市街地の熱環境に働きかけることのできる数少ない手段のひとつである。また、近年、空閑地のあり方や管理方法が問題となるなど、空閑地の適切な活用を検討するうえでも、基幹的な緑地だけでなく市街地全体に分布する自然的要素を、省力・安価、効果的にマネジメントするための、基礎的、実証的な知見の集積が期待される。しかしながら、これまで積み上げられてきた都市気候に関する膨大な知見が、実際の都市計画において活用されることは少ない。その理由として、都市計画や政策決定を担う人々が活用できるようなデータやツールが不足していることが指摘されている。

本研究では、こうした知見活用に資するツールの提供に向け、観測データや空間情報に基づく統計的なモデルに着目する。本研究で統計的モデルを重視する理由は次の3点である。

第一に、仮定に依存せず、複雑な現象の結果として観測される観測値に基づいた知見を提供できる。熱環境シミュレーションは、現象解明のために不可欠な手法だが、多くの仮定に依存し、僅かなパラメータの変更が予測結果に影響する可能性がある。特に植生の影響を考慮する場合、植生の形状の入力手法、葉の偏りの考慮、種ごとに異なる蒸散係数など未解明な点が多く、仮定される条件も不確実なものとならざるを得ない。そのため、観測値に基づいたモデルの構築を重視する。

第二に、統計的モデルでは、空間の構成と季節・時間的变化により変動する熱環境との関係を把握できる。気象条件は刻々と変化するが、気温、湿度、日射、風速などは、季節や時間帯に特徴的な組み合わせによって繰り返されており、空間構成要素と気温との関係も、それら気象的条件のサイクルによって規定される。周期的に繰り返される典型的な気象条件の組み合わせとその変化の範囲において、空間構成要素と気温との関係の変化のパターンを捉えることは、現象の全体像を把握し、空間構成要素のあり方を考える上で役立つ。

第三に、気温差等を空間情報指標の関数として評価できる。このことは、1)自治体等が整備するGISデータから、直接、熱環境を評価する地図を作成することへの貢献、そして、2)自然的要素がもつ他の機能との相乗効果や代替関係の把握への貢献、という観点から重

要である。市街地にある自然的な要素は、気候緩和に限らず、様々な機能を持ち、人に与える影響も多様である。GISを基盤として多用な機能を統一的に評価することは、様々な機能の相互の関係を把握しながら、緑地等の整備方針を決定することに資する方法の一つである。

したがって、市街地の熱環境を統計的モデルにより評価するための手法を確立することは、複雑なメカニズムの結果として生じる現象の特性を理解・説明し、実際の都市計画や施策に活かすために重要である。

しかし、一方で、熱環境評価に統計的モデルを活用するためには、次に示す課題を克服する必要がある。第一の課題は、変数では説明しきれない要因の影響を考慮することである。気温は、市街地の空間構成だけでなく、人工排熱、風向・風速といった風環境など、多くの要因によって形成される。こういった影響を無視し、空間構成要素のみで気温説明する回帰モデルを構築すれば、モデルの信頼性は下がる。第二の課題は、空間的自己相関がもたらす影響への対応である。気温には明らかに空間的自己相関がある。空間的自己相関による観測値の独立性の欠如は、推定結果の信頼性の低下につながる。第三の課題は、現象に即した柔軟なモデルの構築である。様々な空間情報指標を説明変数とした場合、気温と説明変数との関係は線形に限らない。非線形な関係があればそれを考慮する必要がある。第四の課題は、説明変数の選択に関する課題である。1)市街地構成要素である地物、2)その計測量、そして、3)その熱的効果の関係は不明である。説明変数として用いられる空間情報指標が、実際にどのような地物のどのような熱的効果を表現しているかを可能な限り特定することが求められる。

本研究は、市街地の自然的要素が気温に与える影響を定量的に評価するために、空間情報指標により気温を説明できる統計的モデルの構築手法を提案することを目的とする。具体的には、1)説明変数となる「異なる熱的効果を示す少数の空間情報指標」を把握する方法を提案すること、そして、2)空間情報によって説明される要因以外の気温形成要因の影響程度を見積もりながら、空間的自己相関等のバイアスに対応可能な、柔軟な回帰モデルの構築方法を提案することを目的としている。

第2章では、既往研究の整理について述べている。まず、1)都市の熱環境問題、2)市街地の自然的要素がもたらす機能に関する文献を整理し、1)熱環境問題の対策オプションに占める自然的要素の活用の比重、2)自然的要素に期待される効用に占める気候緩和機能の比重、はともに大きいことを示した。次に、市街地の自然的要素が熱環境に与える影響に関する研究を1)実測、2)統計的分析、3)シミュレーションに分けて整理し、それぞれの手法における利点や難点を整理した。

第3章では、対象地の選定およびデータの整備について述べている。対象地は、東京都葛飾区水元地区とした。詳細スケールにおいて稠密な地点で測定された気温や詳細解像度の空間情報は不足しており、整備が必要であった。本研究では、2014年の1年間、対象地内57地点において、10分ごとに気温を観測した。空間構成要素として、樹木、植被地、自然地被、不燃建物、木造建物の5種類をデータ化し、それらを、面積や体積等5種類の計量手法で計量し、合計23種類の空間情報指標を得た。

第4章では、説明変数の特定手法について述べている。説明変数には、1)できるだけ異なる熱的効果を表現するということ、そして、2)できるかぎり少数の指標であることが求

められる。変数の特定にあたっては、「気温と最も強い相関を示す空間情報が、季節や時間帯に入れ替わる」という点に着目した分析を行った。結果、説明変数として、気温観測地点から半径約 170m の範囲で計測された樹木体積、同じく、約 10m の範囲の樹木体積、約 30m の範囲の植被地面積、約 50m の範囲の自然地被面積、約 40m の範囲の木造建物面積の 5 種類が選択された。

第 5 章では、空間情報指標で説明しきれない気温形成要因の影響程度を見積もりながら、空間情報指標により気温を説明できる回帰モデルの構築手法を提案することを目的として、Leroux et al. (2000) による CAR 事前分布を組み込んだ階層的ベイズ推定する回帰モデル（‘CAR Bayes Model’）を観測値に適用した。そして、他の 7 種類の回帰モデルとの比較により ‘CAR Bayes Model’ の質を評価し、見積もられたランダム効果  $\phi_i$  の空間分布の把握や面的な予測により、モデルの特性を理解した。結果、‘CAR Bayes Model’ は、1) 推定値の観測値へのあてはまりと、2) 推定結果の安定性の二つの観点から質が高いモデルだと判断された。また、‘CAR Bayes Model’ によって気温が高いと予測された場所は、主要な交差点と一致しており、説明変数（空間情報指標）では予測できない気温形成要因を推定しているものと考えられた。

第 6 章では、第 5 章と同様のモデルと説明変数を用いて、気温と空間構成要素との関連性の季節・時間帯による変化を把握した。まず、季節・時間帯ごとに面的な予測を行い、その変化を捉えた。そして、季節・時間帯ごとの、決定係数、ランダム効果、外れ値の影響を把握することにより ‘CAR Bayes Model’ の特性を理解した。結果、‘CAR Bayes Model’ では、気温が 1) 変数によって説明される程度、2) ランダム効果によって説明される程度、3) モデルによって説明できない程度を分けて把握可能であるということ、そして、‘CAR Bayes Model’ による推定結果は、外れ値の影響を受けにくいことが明らかとなった。このように、季節・時間帯ごとに把握された未知の要因の空間分布と、現地の状況を照らし合わせることは、1) モデルに組み込むべき変数の把握によるモデルの改善、2) モデルに組み込むことができない影響要因の特定、に貢献可能だと考えられた。

第 7 章では、本研究の内容をまとめ、得られた知見の活用可能性や今後の課題について述べた。地物の熱的効果を表現しやすい変数の特定や、CAR 事前分布にもとづいたランダム効果の推定は、冒頭に示した統計的モデルによる熱環境評価の 4 つの課題克服に貢献するものと結論づけられた。今後の課題として、1) ランダム効果によって見積もられた未知の要因の変数化、2) 隣接行列を定義する距離範囲や重みづけの方法による影響の把握、3) 異なる対象地での検証による知見の一般化、4) 他のモデルクラス、事前分布の種類、パラメータの推定方法などの組み合わせによる、多様なモデルの適用可能性の検討などが挙げられる。また、今後、こういった課題の克服により、クリマアトラスのように熱環境という観点から脆弱な場所を特定できる地図の作成や、緑等の整備量（アウトプット）とその効果（アウトカム）との関係の把握等が可能になることが期待される。

以上、市街地の自然的要素が気温に与える影響について、統計的モデルを構築し、詳細に分析した結果、各要因による説明力を明確にし、かつ、その決定要因の変化を時系列的に示すとともに、その効果を明らかにした本研究の学術的貢献は大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。