

氏名（本籍）	河野 恭佑（千葉県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 232 号
学位授与の日付	令和 2 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	微気象観測に基づく都市街区内の温熱環境空間分布特性の評価
論文審査委員	(主査) 教授 矢内 栄二 (副査) 教授 五明美智男 教授 松島 大 准教授 小田 僚子 東京理科大学 准教授 仲吉 信人

学位論文の要旨

微気象観測に基づく都市街区内の温熱環境空間分布特性の評価

本学位論文では、都市街区内で実施した微気象観測結果に基づき、街区内で複雑に変動する熱ストレスの実態を明らかにしたうえで、熱ストレス評価で重要な物理量である黒球温度の推定式を提案し、その有用性を評価した。さらに、数値モデルを併用することで広域における温熱環境を評価した。

「熱中症」は死亡事故にもつながる重大な社会問題であり、特に都市部ではヒートアイランド現象によって熱中症発生リスクが高まっている。日本では熱中症の救急搬送人員数と高い相関関係にある湿球黒球温度（wet-bulb globe temperature, WBGT）に基づき、環境省から全国約 840 地点に熱中症予防情報が提供されている。WBGT は湿球温度（湿り気）・黒球温度（周囲からの放射）・気温から算出される温熱指標であるが、都市街区内は建物の配置、高さ、物性、用途といった街区特性が複雑であるため、提供される代表地点の WBGT 値が必ずしも領域を代表した熱ストレスを表すわけではない。特に放射環境は街区特性に応じて変動しやすいと考えられ、街区内の放射環境を適切に評価する必要がある。しかしながら、これまでに都市街区内の微気象変動を詳細に観測した事例は少なく、統計的な温熱環境の空間分布特性は未だ解明されていない。

そこで、本研究では 3 領域の都市街区内において黒球温度を含めた気象要素を街区スケール（100 m）で観測し、気象場を統計的に評価するとともに、広域で適用可能な簡易的な黒球温度推定式を提案した。WBGT は $\phi 150$ mm 黒球温度計に基づき評価される指標であるが、本移動観測では時間応答性の高い小径の自作黒球温度計を用いることで街区内の変動を捉えるよう工夫した。また、観測値に基づいて妥当性を評価した数値モデルを併用することで、広域における温熱環境を評価した。

本学位論文は、7章から構成されている。

第1章では、本研究の背景や目的、熱ストレスに関する指標や数値モデルの選定について記述した。

第2章では、観測概要および取得したデータの取り扱いや解析方法について記述した。本研究では街区特性の異なる3領域において気象観測を行った。各観測では使用機器や観測手法が異なることから、評価を統一するためのデータの取り扱い方法や観測機器の精度について明示した。

第3章では、微気象観測結果に基づいて、街区内で大きく変動する熱ストレスの実態を評価した。湿球温度や気温より黒球温度の空間変動が大きい傾向にあり、メソ気象スケールで用いられる定点観測（気象庁、環境省）の値と有意な差が生じていることを示した。WBGTが高い地点では黒球温度が著しく高い傾向にあったことから、都市街区内で変動する黒球温度を適切に把握することが重要であることを指摘した。また、同一領域内において「住宅街」と「街道」、「南北道路」と「東西道路」、「北側領域」と「南側領域」のように対照的な街区特性の空間における熱ストレスを比較した結果、湿度や放射の差異から人体の感じる暑さの感覚に違いがある可能性を指摘した。

第4章では、微気象観測結果に基づき都市街区内の変動を再現できる黒球温度推定式を提案した。日向で風速が 4 m s^{-1} 以下の弱風環境下であることを条件に、領域を代表する全天日射量と街区内で変動する天空率および気温を用いることで、 1.70°C のRMSEで黒球温度を推定できることを示した。

第5章では、観測値に基づいて数値放射モデル SOLWEIG から得られる街区内の放射環境の妥当性を評価するとともに、同モデル結果と比較することで、提案した黒球温度推定式の広域的な熱ストレス評価における有用性を述べた。数値モデルで計算される各放射成分は定点気象観測結果に対して高い再現性を示し、黒球温度は約 3°C のRMSEで評価できることがわかった。一方、移動気象観測結果に対しては、天空率の再現性は高かったものの、黒球温度は約 $6\sim 8^{\circ}\text{C}$ のバイアスが生じ、変動の類似性は見られなかった。これは、数値モデルに入力した気温や全天日射量が領域一定値であるためであり、移動気象観測で得られた気温や下向き短波放射量を考慮した結果、観測値の変動を概ね捉えることができた。以上の結果から、SOLWEIG への入力は領域に適切な時間・空間分解能をもつ入力条件を与えることで、街区スケールの局所的な黒球温度を再現できる可能性を指摘した。第4章で提案した黒球温度推定式に、3次元都市幾何形状データに基づく実態に即した天空率を導入して広域的な都市街区領域の黒球温度の空間分布を求めた。これを SOLWEIG で計算される放射量から算出した黒球温度の空間分布と比較した結果、空間変動特性は類似していた。このことから、提案した黒球温度推定式は、数値放射モデルを用いらずに街区内の空間分布を評価できることから、工学上有用であることを指摘した。

第6章では、広域的な都市の熱ストレス評価に焦点を当て、2020年東京オリンピックにおいて候補として挙げられたマラソンコースの放射量を数値モデルから計算し、走者と観客に対する熱ストレスを評価した。走者に対しては、天空率の高い約33 km 付近の皇居周辺（千代田区）で周辺よりも熱ストレスが高い傾向にあり、約36 km 以降ではWBGTがコース最大値に達すると予測された。また観客は、熱ストレスの高まる約30 km 以降においては、走者に対して左側の歩道の方が右側より熱中症リスクを低減できる可能性が示された。

最後に、第7章では、本研究の総括および今後の展望について記述した。

審査結果の要旨

本学位論文は、首都圏の都市街区内で実施した微気象観測結果に基づき、街区内で複雑に変動する熱ストレスの実態を明らかにしたうえで、熱ストレス評価において重要な物理量である黒球温度の推定式を提案し、その有用性を評価するとともに、数値モデルを用いて街区内の広域的な温熱環境を評価したものであり、7章で構成されている。

第1章「序論」では、都市街区内の温熱環境の研究を行うに至った経緯および本研究の目的、熱ストレス評価指標、本論で用いた数値モデルの概要について述べている。都市域では地球温暖化に加えヒートアイランド現象により暑熱環境が悪化し、熱中症発生リスクが高まっている。これに対し、日本では環境省が熱中症の救急搬送者人員数と相関関係の高い湿球黒球温度（WBGT）に基づき、全国約840地点に熱中症予防情報を提供している。WBGTとは湿球温度（湿度）・黒球温度（放射）・気温から算出される温熱指標であるが、都市街区内は建物の配置、高さ、物性、用途といった街区特性が複雑であるため、提供される代表地点のWBGT値が必ずしも領域を代表した熱ストレスを表すわけではない。特に放射環境は街区特性に応じて変動しやすいと考えられ、街区内の放射環境を適切に評価する必要がある。しかしながら、これまでに都市街区内の微気象変動を詳細に観測した事例は少なく、統計的な温熱環境の空間分布特性は未だ解明されていない。そこで、学位申請者は3領域の都市街区内において気象要素を街区スケール（100m）で観測し、気象場を統計的に評価するとともに、広域で適用可能な簡易的な黒球温度推定式を提案すること、また、数値モデルを用いることで広域的な街区内温熱環境の空間分布特性を評価することを目的とした。

第2章「都市街区内の微気象観測システムの構築」では、街区特性の異なる3領域において実施した気象観測の概要について説明した。WBGTは一般的に $\phi 150\text{mm}$ 黒球温度計に基づき評価されているが、本研究では移動観測により街区内の変動を捉えるために時間応答性の高い小径の自作黒球温度計を用いており、黒球温度データの取扱い方法について詳述している。また、その他の気象測器も時間応答性を重視していることから、使用機器の詳細な検定を行っており、観測データの品質管理について述べている。

第3章「屋外暑熱環境の実態把握」では、微気象観測結果に基づいて、街区内で大きく変動する熱ストレスの実態を評価した。街区内では黒球温度の空間変動が湿球温度・気温よりも顕著であり、気象官署における定点観測値と有意な差が生じていることを明らかにした。また、WBGTが高い地点では黒球温度が著しく高い傾向を示したことから、都市街区内での熱ストレス評価においては変動が激しい黒球温度を適切に把握することの重要性を指摘した。また、同一領域内においても「住宅街／街道」、「南北道路／東西道路」のように対照的な街区特性においては、湿度や放射の差異から人体の感じる暑さの感覚に相違がある可能性を指摘した。

第4章「都市街区内の黒球温度推定式の提案」では、実測した微気象観測結果に基づき、領域を代表する全天日射量と街区内で変動する天空率および気温を変数とした黒球温度推定式を提案した。日向で風速が 4m s^{-1} 以下の弱風環境下において、実測値との比較からRMSEが 1.70°C という高い精度で黒球温度を推定できることを示した。

第5章「広域における黒球温度推定式の有用性評価」では、観測値に基づいて数値放射モデル

SOLWEIG から得られる街区内の放射環境の妥当性を評価するとともに、提案した黒球温度推定式の広域的な熱ストレス評価における有用性について述べた。数値モデルで計算される各放射成分は、移動気象観測で得られた気温や全天日射量を適用することで観測値の変動を概ね捉えられることを示し、街区スケールの局所的な黒球温度を再現できる可能性を指摘した。広域的な都市街区領域内を対象に、SOLWEIG で計算される放射量から算出した黒球温度と、第 4 章で提案した黒球温度推定式から算出された黒球温度を比較した結果、両者は類似した空間変動特性をもつことを示した。このことから、本研究で提案した黒球温度推定式は、観測が困難である街区内の黒球温度の変動を、数値放射モデルを用いることなく、比較的容易に把握できる全天日射量、天空率、気温という 3 つの変数から推定でき、工学上有用であることが示された。

第 6 章「2020 年東京オリンピックマラソンコースの熱ストレス予測」では、広域的な都市の熱ストレス評価に焦点を当て、2020 年東京オリンピックの候補として挙げられたマラソンコースの放射量を SOLWEIG から計算し、走者と観客に対する熱ストレスを評価した。妥当性の評価された数値モデルを併用することで、走者だけではなく観客も含めた詳細な熱ストレスの空間分布評価を行える可能性を指摘した。

第 7 章「結論」では、各章で得られた成果を総括し、都市街区スケールでは放射環境が複雑に変動すること、その放射環境を簡易的に評価可能な推定式を提案したことの意義について述べた。

以上要するに、本論文は都市街区内の温熱環境について観測と数値解析の双方から詳細に検討したものである。放射環境が複雑な都市街区内の温熱環境を予測・診断するうえで重要な知見を含む価値ある研究であり、都市気象学分野において工学上貢献するところが大きい。したがって、学位申請者の河野恭佑は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。