

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	熱赤外リモートセンシングによる分光放射輝度を用いた建築空間における気温分布の逆推定
Title(English)	
著者(和文)	鶴見隆太
Author(English)	Ryuta Tsurumi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第372号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:浅輪 貴史,山中 浩明,松岡 昌志,鍵 直樹,大風 翼
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第372号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

(2000字程度)

報告番号	乙 第 号	学位申請者	鶴見 隆太	
論文審査員	氏 名	職 名	氏 名	職 名
	主査 浅輪 貴史	准教授	大風 翼	准教授
	山中 浩明	教授		
	松岡 昌志	教授		
	鍵 直樹	教授		

本論文は「熱赤外リモートセンシングによる分光放射輝度を用いた建築空間における気温分布の逆推定」と題し、以下の7章から構成されている。

第1章「序論」では、建築熱環境の評価において、建築空間の気温分布は空調用エネルギー消費量や快適性を議論するうえで重要である一方、既往研究で用いられる移動計測や定点計測の手法は時間・空間分布の代表性に課題があることを指摘している。そのうえで、広域の大気リモートセンシング分野では人工衛星に搭載した分光放射計から大気の鉛直気温分布を逆推定する手法が確立されており、これを建築スケールでの気温分布に対して適用できれば上記の課題解決につながるが、適用可能かは自明ではないことを既往研究を概観しながら論じている。そこで、建築空間において、熱赤外リモートセンシングにより観測した分光放射輝度を用いて水平気温分布を逆推定する手法の有効性と適用条件を明らかにするという本研究の目的を述べるとともに、論文の構成を示している。

第2章「放射伝達過程の概要と観測方程式の定式化」では、空気中の放射伝達過程の原理を述べたうえで、放射伝達方程式から分光放射計に入射するエネルギーを表す観測方程式を定式化し、透過率の変化率とプランク関数の積が観測機に入射するエネルギーに対する空気からの寄与を表すことを確認している。透過率の変化率を人工衛星などの鉛直観測と水平観測と比較した場合、水平観測においては分光放射計から離れるに従い透過率の変化率が単調減少するため、遠方の気温の逆推定の難易度が高くなるが、透過率の変化率の異なる波長帯を選択することで逆推定できる可能性を示している。

第3章「気温分布の逆推定アルゴリズム」では、水平方向の気温分布の逆推定においては、一般的なパラメータ推定法である最小二乗法が使用できないため、本研究で用いる逆推定アルゴリズムである Maximum a Posteriori (MAP) 法を導入することが有効であることを示している。MAP 法は観測前に気温について分かっている確率的な情報（事前情報）を用いて解を正則化させる方法であるが、その推定値である MAP 解の解釈には真値との誤差 (Root Mean Squared Error; RMSE) だけでは不十分なことを指摘し、事前情報に対する観測からの影響を定量的に把握する指標である Averaging kernel を導入することが有効であることを論じている。さらに、プランク関数の気温での微分と放射伝達シミュレーションで算出された透過率の変化率を用いて、観測方程式を線形化した Jacobian を計算する方法を述べている。

第4章「放射伝達シミュレーションによる逆推定の感度解析」では放射伝達シミュレーションを用いた感度解析により、建築スケールの気温分布に逆推定法を適用するのに適したセンサと観測条件、および推定条件を明らかにしている。その結果、建築スケールでも MAP 法を適用することで誤差の鋭敏性が問題にならず気温分布を推定できること、対象の距離は推定精度に大きく影響を及ぼさないこと、分光放射計の波長分解能を上げると観測からの情報が増える一方で観測誤差の影響を強く受けるためチャンネル選択が重要であること、ランダム誤差が5%から10%に増える程度では精度に大きな影響はないこと、Jacobian 作成時の水蒸気のバイアスに関しては逆推定に大きな影響がある一方で二酸化炭素のバイアスの影響は小さく、逆推定にとって良好な性質を有することを明らかにしている。

第5章「熱赤外分光放射計を用いた建築スケールの気温分布の逆推定実験」では、建築スケールの気温分

布の逆推定の実現性を実験的に明らかにするために、分光放射計を用いて温度差のある2つの空間の気温分布を逆推定する実験を行っている。まず放射伝達シミュレーションを用いて Jacobian を計算し、これと観測により得られた放射輝度から気温分布を逆推定した結果を提示している。気温の逆推定に対する事前情報の影響を確認するために、事前情報の標準偏差を 3 °C または 5 °C に設定し逆推定を実施した結果、事前情報の設定によらず全てのケースで観測前より RMSE が減少し、全ケースの事前情報の平均 RMSE は 2.1 °C であったが MAP 解では 1.3 °C に減少することを明らかにしている。ただし、この分光放射計 (Full Width at Half Maximum: FWHM が約 30cm⁻¹) では空間 5 層の内、センサに近い 1 層目には Averaging kernel にピークが見られた一方 2 層目以降は見られず、2 層目以降で気温分布を再現できたのは、事前情報からの寄与が支配的であることを確認している。

第 6 章「局所的なヒートソースがある空間での逆推定実験」では、センサから離れた位置での感度を確認するため観測パスの途中にヒートソースがある状況で気温分布を逆推定する実験を行っている。局所的なヒートソースがある場合は事前情報の不確実性が高くなることが想定されるが、事前情報の標準偏差が 15 °C または 30 °C と第 5 章に比べ大きい場合でも逆推定により誤差が減り、RMSE は事前情報に比べ全ケース平均で 45% 減少することを示している。特にヒートソースの位置が事前に明らかな場合は、空間 5 層の内ヒートソースが 2 層目から 4 層目と分光放射計から離れた場所でも MAP 解はヒートソースの位置に Averaging kernel のピークがあり、気温の逆推定が可能なことを明らかにしている。

第 7 章「結論」では、各章で得られた知見を総括し、結論と今後の課題を述べている。

以上要するに本論文は、建築空間において熱赤外リモートセンシングを適用し分光放射輝度を観測することで、これまで取得が困難であった温度差を有する空間の気温分布を逆推定可能なことをシミュレーションと実験を用いて示したものであり、建築環境工学と環境計測分野における貢献が大きい。よって本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値があるものと認められる。