

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03353

研究課題名(和文) 熱赤外域分光リモートセンシングによる都市空間の気温分布の逆推定手法の構築

研究課題名(英文) Inverse estimation of air temperature distribution in urban spaces using an infrared spectroradiometer

研究代表者

浅輪 貴史 (Asawa, Takashi)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：50361796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、最先端のリモートセンシング技術である地上型の熱赤外分光放射計を用いることで、都市・建築空間における気温分布を逆推定する手法を構築することを目的とした。研究期間内には、気温分布の逆推定手法の数学的定式化や逆問題固有の問題に対する改善法の検討を行ったうえで、実験室実験による気温逆推定結果への感度分析、屋外実験による都市空間の気温分布への逆推定手法の適用、数値シミュレーションによる逆推定の誤差要因解析に取り組んだ。その結果、条件付きではあるものの、100m程度の都市の街路空間における気温分布の逆推定に有効であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

都市のヒートアイランド現象の解明や、建築空間の熱環境対策において、都市や建築の気温分布を時空間的に計量化することは非常に重要である。これまで、建築分野では、センサを直接空間内に設置し、センサと空気との熱伝達によって計測する方法を採用していたため、空間分布の取得が困難である点と、日射や放射による誤差が混入しやすかったという課題があった。このような都市や建築空間の気温分布を遠隔からのリモートセンシングにより推定をする手法であり、上記の課題を解決するものである。

研究成果の概要(英文)：This study developed inversion estimation method for the horizontal distribution of air temperature in urban spaces using an infrared spectroradiometer. We conducted the formulation of the atmospheric radiation transfer and inversion estimation method, examination of specific problems included in the inversion estimation, sensitivity analysis for air temperature estimation in an experimental room, validation of the inversion results in outdoor spaces, and error analysis using numerical simulation. We confirmed this method can estimate air temperature distribution for the outdoor street space of around 100m, under certain conditions.

研究分野：都市・建築環境工学

キーワード：リモートセンシング 気温 逆推定 都市環境

1. 研究開始当初の背景

都市のヒートアイランド現象の解明や、建築空間の熱環境対策において、都市や建築の気温分布を時空間的に計量化することは非常に重要である。これまで、建築分野では、センサを直接空間内に設置し、センサと空気との熱伝達によって計測する方法を採用していたため、空間分布の取得が困難である点と、日射や放射による誤差が混入しやすかったという課題があった。一方でリモートセンシング分野では、人工衛星から分光放射計によって気温の鉛直分布を観測する手法が構築されている。このリモートセンシングによる気温分布の計量化手法を建築分野に応用できれば、これまでの課題も大幅に解決され、大いに有用である。一方で技術的課題として、リモートセンシング分野では気温の鉛直分布を長いパスで観測するものであり、水平分布や短いパスでの測定に関する報告は見られない。これは、人工衛星からの観測では、気体成分が高度の上昇につれ減少するという性質が利用されているためであり、気温の短距離での水平分布の実現可能性は自明ではない。近年になり、熱赤外分光放射計が市販化され、建築分野でも利用できるようになってきたことも、本研究の着想に至った経緯である。

2. 研究の目的

本研究課題では、熱赤外分光放射計を用いた都市・建築空間における気温分布の逆推定手法を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、気温分布の逆推定手法の数学的定式化、熱赤外域分光センサの利用可能性の理論的・実験的検討、逆問題における誤差の鋭敏性への対応と解の安定化手法の提示、実験室実験による気温逆推定結果への感度分析、屋外実験による都市空間の気温分布への逆推定手法の適用、数値シミュレーションによる逆推定の誤差要因解析に取り組んだ。

4. 研究成果

4.1 放射伝達の概要と観測方程式の定式化

気温分布の逆推定手法に用いる各種方程式の定式化を行った。放射は空気中を伝播する間に吸収や散乱により減衰、増幅する。以下に本研究で扱う、伝達過程を記述した放射伝達方程式の一般解が観測機に入射する観測方程式を表す<sup>1)</sup>。

$$I_v(s) = B_v(T_{surf})\tau_v(0,s) + \int_0^s B_v[T(s')] \frac{d\tau_v(s',s)}{ds'} ds' \quad (1)$$

ここで $I_v$ :輝度[Wcm<sup>-2</sup>sr<sup>-1</sup>/cm<sup>-1</sup>],  $B_v$ :Planck 関数[Wcm<sup>-2</sup>sr<sup>-1</sup>/cm<sup>-1</sup>],  $\tau_v(s',s)$ : 位置 $s'$ から $s$ までの透過率,  $T$ : 温度[K],  $s$ : 位置[m],  $v$ : 波数[cm<sup>-1</sup>]. 左辺は観測機に入射するエネルギー, 右辺第1項は境界面からの寄与, 第2項は空気からの寄与を表す。図1に熱赤外分光放射計に入射するエネルギーの概念図を示す。

4.2 気温分布の逆推定アルゴリズム

本研究では、逆問題における誤差への鋭敏性に対応し、ベイズ的アプローチで解を安定させる Maximum a Posteriori (以下 MAP) 法を適用した<sup>2)</sup>。図2に MAP 法の流れ図を示す。評価方法は RMSE に加えて、逆推定値である MAP 解に対する事前分布からの影響を定量的に評価するために、本研究では Averaging kernel (以下 AK) も用いた<sup>3)</sup>

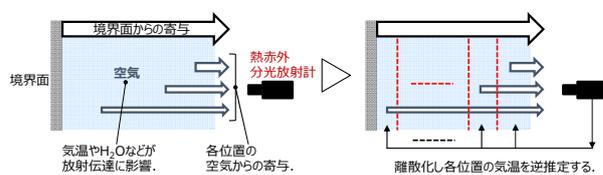


図1 熱赤外分光放射計に入射するエネルギー

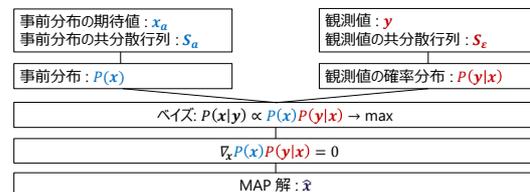


図2 Maximum a Posteriori (MAP) 法の流れ図

4.3 屋内空間における水平気温分布逆推定の感度分析実験

4.3.1 実験概要

屋内実験では 25℃程度の極端な温度差をつけた空間を対象とした。対象パスを任意に離散化し実験を行った。各層の空間を断熱材で囲い、温度を上昇させることで加熱層とした。1層目を加熱した Case を Case 1 とし、2層目以降同様に Case を設定する。屋内実験では何層目まで観測の感度を高く逆推定できるか明らかにすることを目的とする。実験に用いた装置を表1、屋内実験図を図3に示す。MAP 解が真値をどの程度逆推定できているか比較するため、各パス上を温湿度計で測定し真値として用いた。事前分布との温湿度には、空間分布一様として実際に測定した観測機近傍の値を用いた。境界面温度は黒体炉の設定温度の値を用いた。本研究では無用なノイズを避けるため、水蒸気の吸収波長帯の波長と大気の窓領域の波長を組み合わせ、計 10 チャンネルを選択した。

4.3.2 実験結果

図4に屋内実験の各CaseのMAP解とAKを示す。また屋内実験の事前分布とMAP解のRMSEを表2に示す。Case 1, 2では加熱層のMAP解が真値に近い値で逆推定できた。AKが1, 2層目に極大をとることから、2層目までは観測の寄与が高い。MAP解のRMSEは事前分布のRMSEと比較すると5℃以上向上した。Case 3でも加熱層が真値に近い値を逆推定したが、2層目のMAP解が真値より高い値となった。2層目のAKが3層目でも高く、2層目の逆推定に3層目の情報が重み付けられた。MAP解のRMSEは事前分布のRMSEと比較すると3℃以上向上した。Case 4では加熱層が事前分布と変わらない値を逆推定した。4層目のAKが0に近い値を取っていることから、今回の選択した波長では観測の寄与が小さく事前分布の影響が顕著となった。この実験では事前分布が真値に対して25℃低く、逆推定に厳しい条件を設定したが、10mを4層に離散化した場合、3層目までは逆推定可能であること、またその際の各層のMAP解に対する感度を確認した。

表 1 実験に用いた装置

分光放射計	SR-5000N(CI-Systems社) FWHM 約 30 cm <sup>-1</sup>
平面黒体炉	SR-800R(CI-Systems社) 放射率 0.97±0.02
赤外線	サーモギア G100 / G120
放射カメラ	(NEC Avio 赤外線テクノロジー社)
温湿度計	TR-72nw-S (T&D社) 測定間隔 10 s

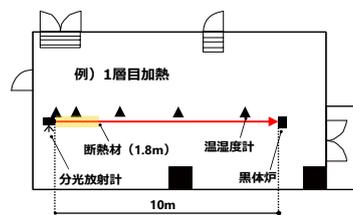


図 3 屋内実験図

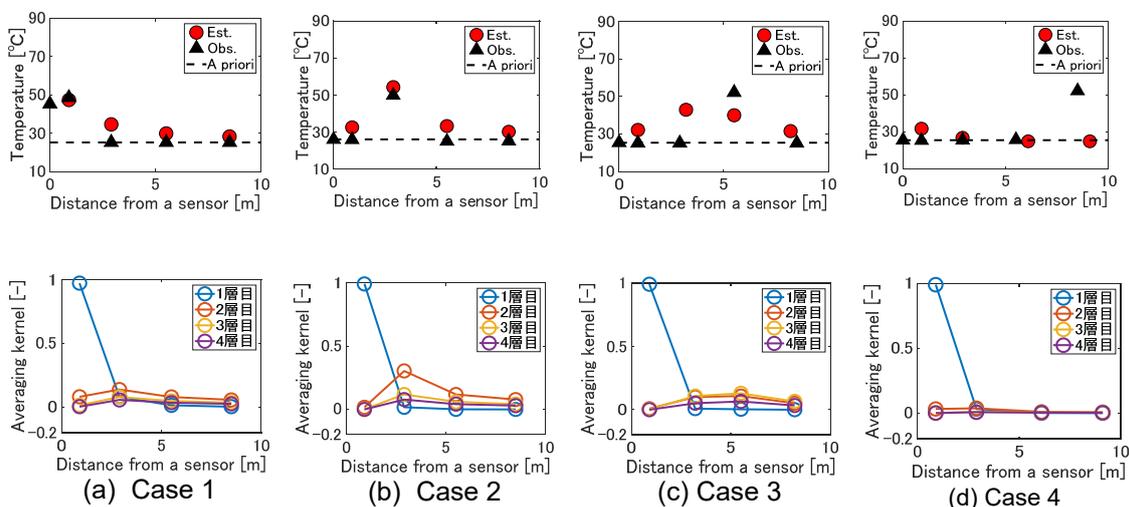


図 4 屋内実験のMAP解とAK

表 2 屋内実験の事前分布とMAP解のRMSE

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
事前分布	11.70°C	11.92°C	13.49°C	13.63°C
MAP解	5.51°C	6.28°C	10.28°C	14.37°C

#### 4.4 街路空間における水平気温分布逆推定の精度検証実験

##### 4.4.1 実験概要

屋外実験では1~2℃程度の温度差のある空間を対象とし、街路樹等もある街路空間の気温分布をどの程度の精度で逆推定可能か検証する。屋外実験は夏季と冬季の両方で実施した。屋外実験図を図5、屋外実験の条件を表3に示す。各Pathは図の通りに設定し任意に離散化した。真値の取得方法や温湿度設定方法、波長選択方法は屋内実験と同様の方法を用いた。ただし境界面温度について黒体炉を街路空間で用いることは適切ではない。そこでスプリットウィンドウ法により推定した境界面温度を用いてMAP解を求めた。推定した値と比較するための真値として、赤外線放射カメラを用いて境界面付近で撮影を行った。

##### 4.4.2 スプリットウィンドウ法

観測輝度を用いて境界面温度を以下の式で推定した。

$$T_s = T_{b1} + \eta (T_{b1} - T_{b2}) \quad (3)$$

$$\eta = \frac{1 - \tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \quad (4)$$

ここで  $T_s$ : 境界面温度[K],  $T_{b1}$ ,  $T_{b2}$ : 輝度温度[K]とする。ただし  $\tau_1, \tau_2$ : 透過率[-]とする。観測輝度を較正するための境界面温度の初期値には実際に測定した観測機近傍の気温を用いた。透過率を算出するための放射伝達条件は、事前分布と同様の条件を用いた。表4に赤外線放射カメラで測定した境界面温度とスプリットウィンドウ法で推定した境界面温度を示す通り、夏季

は 0.9 °C 以内と高い精度で推定した。

#### 4.4.3 実験結果

図 6(a)(b)に夏季の屋外実験の MAP 解と AK, 表 5 に夏季屋外実験の事前分布と MAP 解の RMSE を示す. Path 1, 4 では MAP 解が真値に近い値を逆推定した. AK が 1, 2 層目までは対応する層で極大となり, 観測による寄与が影響している. ただし 3 層目の AK は 0 に近い値となり, 事前分布の影響が支配的である. 一方 Path 2, 3 では 2 層目以降の MAP 解は事前分布の影響が大きくなった. 図 6(c)(d)に, 冬季屋外実験の MAP 解と AK, 表 6 に冬季屋外実験の事前分布と MAP 解の RMSE を示す. Path 1 では MAP 解が真値に近い値となった. ただし 2 層目の逆推定に 1 層目の情報も含まれた. Path 2, 3 では MAP 解が気温分布の傾向は捉えているが, 真値に対して高い値で逆推定された. また Path 1 同様, 2 層目の MAP 解に 1 層目の情報が影響している. 夏季同様, すべての Path で 3 層目以降は事前分布の影響が支配的である. 屋外実験では事前分布が真値と近い値であり, 観測による寄与は屋内実験ほど大きくならなかった. ただし MAP 解の RMSE はすべての Path で 1.0 °C 以内と高い精度で逆推定できた. 以上の屋外実験の結果より, 3 層目以降は事前分布の寄与が支配的となるが本手法が 100~150 m の街路空間で 2 層目までの水平気温分布の逆推定に有効であることが分かる.

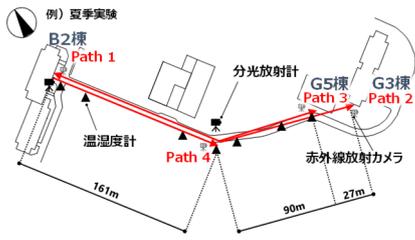


図 5 街路実験図

表 3 屋外実験の条件

Path	夏季				冬季		
	1	2	3	4	1	2	3
距離[m]	161	117	90	161	161	117	90
分割数	3層	4層	3層	3層	4層	4層	3層
事前分布	1層目: 0 m 位置の気温 ± 1 °C						
	2層目以降: 0 m 位置の気温 ± 3 °C						
	湿度: 0 m 位置の絶対湿度						

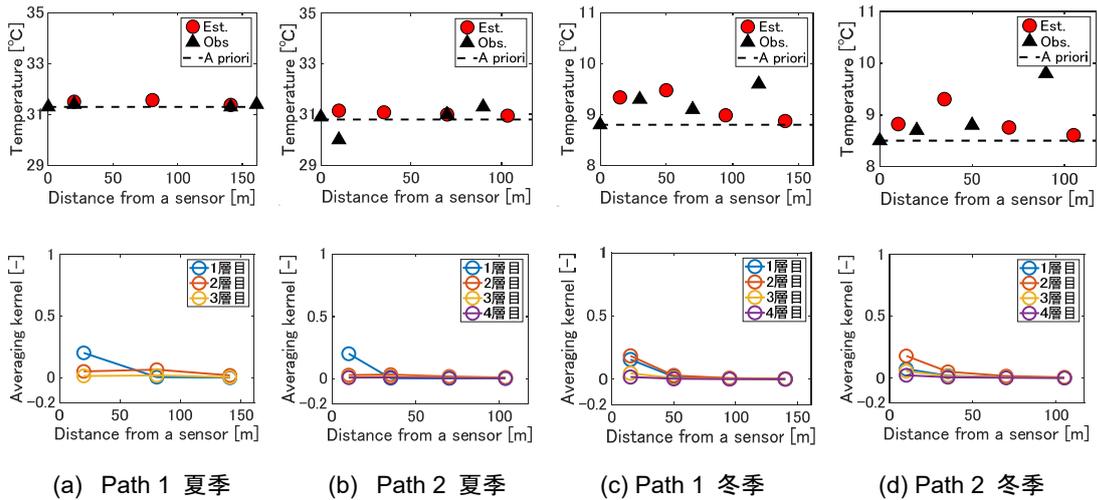


図 6 街路実験の MAP 解と AK (夏季と冬季)

表 4 赤外線放射カメラとスプリットウィンドウ法により推定した境界面温度

Path	夏季				冬季		
	1	2	3	4	1	2	3
観測値[°C]	33.2	33.9	34.2	33.5	23.9	20.4	14.0
推定値[°C]	33.0	33.4	33.3	33.2	13.1	12.1	12.1

表 5 夏季屋外実験の事前分布と真値との MAP 解の RMSE

	RMSE			
	Path 1	Path 2	Path 3	Path 4
事前分布	0.06 °C	0.55 °C	0.35 °C	0.32 °C
MAP 解	0.15 °C	0.69 °C	0.57 °C	0.50 °C

表 6 冬季屋外実験の事前分布と真値との MAP 解の RMSE

	RMSE		
	Path 1	Path 2	Path 3
事前分布	0.54 °C	0.78 °C	0.24 °C
MAP 解	0.45 °C	0.72 °C	0.52 °C

## 4.5 数値シミュレーションによる誤差要因分析

### 4.5.1 数値シミュレーションの概要

逆推定に影響する誤差は一意に決定することはできない. そこで逆推定に影響を及ぼすと考えられるパラメータを選択し, MAP 解に与える影響を数値感度解析した. 数値シミュレーションでは放射伝達計算に真の条件を設定して算出した輝度を観測輝度とした. 数値感度解析のために標準ケースを作成した. 図 7 に標準 Case の設定条件, 表 7 に標準 Case の計算条件を示す. 波長は 74 チャンネルすべてを用いた. 次に Case 毎に放射伝達計算条件を変えて MAP 解と AK の挙動を確認した. 表 8 に 標準 Case から変えた Case 毎の計算条件を示す.

#### 4.5.2 解析結果

図8に数値シミュレーションによる各ケースのMAP解とAKを示す。標準Caseでは1, 2層目はMAP解が真値に近い値となり、実験結果のように1, 2層目の観測寄与が大きい、3層目以降は2層目までと比較すると事前分布の影響が大きくなる。Case AではMAP解が過大に逆推定された。水蒸気の誤差は透過率に影響を与えるため、Jacobianの誤差が大きくなりMAP解の精度に影響を与えた。夏季実験では水蒸気の誤差が大きいためMAP解の精度に影響を与えた。Case Bでは境界面温度がMAP解に無視できない影響を与えた。冬季実験では境界面温度の推定誤差が大きいためMAP解の精度に影響を与えた。Case CではAKが1, 2層目に極大をとっている。屋外実験では1層目の誤差によるMAP解の変動を抑えるために、1層目の事前分布における気温の標準偏差を低くしたため、1層目のAKが低くなった。その他、MAP解の精度に影響を及ぼす誤差要因を系統的な数値実験により明らかにした。

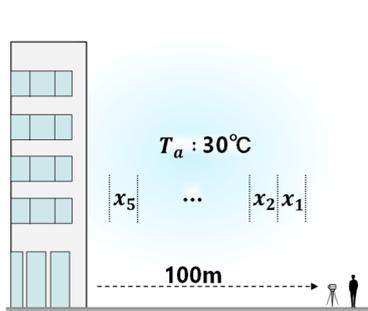


図7 標準Caseの設定条件

表7 標準Caseの計算条件

水蒸気	65% (19.75 g/m <sup>3</sup> )
境界面	35 °C
事前分布	1層目: ±1 °C 2層目以降: ±3 °C

表8 各Caseの計算条件

	変更条件
Case A	水蒸気-2.00 g/m <sup>3</sup>
Case B	境界面温度-3 °C
Case C	事前分布 ±3 °C一様

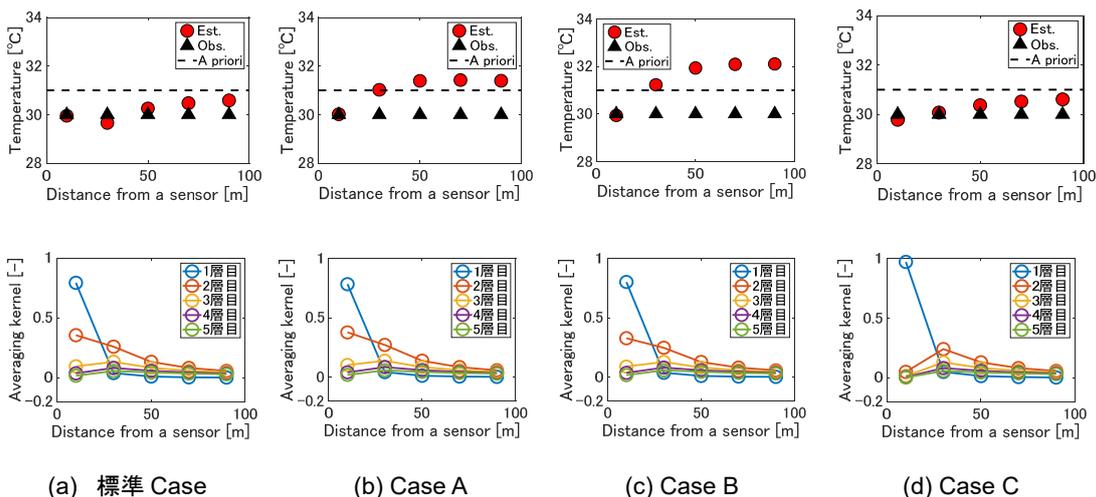


図8 数値シミュレーションによる各ケースのMAP解とAK

#### 4.6 総括

以上より、本手法が100~150mの街路空間を4層に分割した場合に2層目までの水平気温分布の逆推定に有効であることを総合的に確認した。3層目以降は事前分布の寄与度が大きくなることも明らかとなったが、これに関しては、双方向からの観測法を検討すること、本研究期間内では装置の限界で実施できなかったCO<sub>2</sub>の吸収波長帯も用いること、波長の半値全幅(FWHM)のより小さいFTIR分光放射計の適用を検討すること、放射伝達計算により精緻なLine by Line法(LBL法)を適用することなどで改善の可能性があるので、今後の重要な研究課題である。

#### 参考文献

- 1) 浅野正二, 大気放射学の基礎(2010), 朝倉書店
- 2) K. N. Liou, An Introduction to Atmospheric Radiation (2002)
- 3) Academic Press. C. D. Rodgers, Inverse Methods for Atmospheric Sounding (2000), World Scientific

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 井上順平、浅輪貴史、鶴見隆太
2. 発表標題 熱赤外分光放射計を用いた都市・建築空間における気温分布の逆推定に関する基礎的研究 その3 街路空間実験
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上順平、浅輪貴史、鶴見隆太
2. 発表標題 熱赤外分光放射計を用いた街路空間における気温分布の逆推定に関する実験的検討
3. 学会等名 日本ヒートアイランド学会第14回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上順平、浅輪貴史、鶴見隆太
2. 発表標題 熱赤外分光放射計を用いた都市・建築空間における気温分布の逆推定に関する基礎的研究 その4逆推定の妥当性確認と境界面の遠隔推定
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小林 秀樹  (Kobayashi Hideki)  (10392961)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究センター・ユニットリーダー代理   (82706)	