

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 7 月 11 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21688001

研究課題名（和文） 樹冠表面温度を利用した都市気温分布図の作成と緑地の気候緩和機能の分析

研究課題名（英文） Development of air temperature distribution map using surface temperature of tree crown and analysis of cooling effect of urban green space

研究代表者

村上 暁信（MURAKAMI AKINOBU）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：10313016

研究成果の概要（和文）：

本研究では、市街地を対象に樹冠の表面温度分布から気温分布図を作成することを目的とした。まず航空機リモートセンシング観測を行い、得られた熱赤外域データから樹冠の表面温度を抽出した。次に熱収支シミュレーターにより樹冠周辺の放射環境特性を分類し、分析に使用し得る樹冠の抽出を行った。その上で、樹冠周辺の熱収支を検討し、表面温度分布図から気温分布図作成を作成する手法を構築した。さらに、得られた気温分布図からヒートアイランド発生状況とその特徴を分析した。

研究成果の概要（英文）：

Airborne remote sensing was implemented to acquire land surface information including thermal infrared data, and then surface temperatures of tree crown were extracted from the thermal infrared data. The characteristics of radiant environment of each tree crown were classified into several categories using a numerical simulation on heat environment, and the tree crown which can be used for the analysis was extracted. Through the study, a method to generate air temperature distribution map from thermal infrared image taken for urbanized area was developed. Besides, the condition of urban heat island and the feature of heat environment were discussed using the air temperature distribution map acquired in this study.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2011 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
総計	11,600,000	3,480,000	15,080,000

研究分野：ランドスケープ科学

科研費の分科・細目：農学，園芸学・造園学

キーワード：都市環境，環境計画，リモートセンシング

## 1. 研究開始当初の背景

近年、ヒートアイランド問題に代表される都市熱環境の悪化が深刻化している。平成 16 年 3 月には「ヒートアイランド対策大綱」が

策定されるなど、都市の熱環境問題は緊急に取り組むべき環境問題として認識されている。同大綱では、ヒートアイランド問題の主要因である人工排熱の低減や地表面被覆の

改善等の具体的対策と同時に、観測・監視体制の強化を提唱している。しかし、現時点では、現況を把握するための熱環境観測手法や継続的に変化を監視するためのモニタリング手法が十分に整備されていない。特に都市の気温分布については、現地観測に頼らざるを得ないため広域の気温分布図を作成するには至っていない。

## 2. 研究の目的

地表面温度から気温を求めることはできないため、リモートセンシングデータ (RS データ) から気温分布を求める試みはなされていない。しかし樹木 (樹冠) に着目すると、その表面温度は夜間に日射の影響がなくなり熱的平衡状態になると周囲の気温と強い相関を持つことが知られている。従って、広域について夜間の樹冠表面温度を把握することができれば夜間の気温分布を把握することができる。研究代表者はこの考えに基づき、過去に地方中小都市を対象として RS 観測を行い、実測を踏まえて RS データから樹冠の表面温度を抽出することにより、気温分布図を作成する手法を開発した。本研究により、RS データから広域について気温分布図を作成できることが示された。しかし、本手法を高層の建築物が林立する大都市市街地で適用することはできない。大都市の市街地では、樹冠の表面温度が周囲の地物からの長波長放射等に大きく影響されるからである。そこで、本研究では、分析対象とする樹冠周辺の空間形状と熱環境特性を 3D-CAD 対応型の熱環境シミュレーターを用いて再現し、周辺地物からの長波長放射等を勘案することにより、RS データから気温分布図を作成する手法を開発することを目的とした。本研究で用いる熱収支数値シミュレーターは、建物の凹凸も含めた三次元情報と材料等の情報を入力することにより、全表面について表面温度を算出することができ、さらに任意の点における放射の授受を計算することができる。本研究ではこのシミュレーターを用いて、樹冠表面温度への周辺地物からの影響を分析し、それを踏まえて RS データから気温分布図を作成する。さらに、同手法から作成される気温分布図を用いて、市街地における緑地の気候緩和機能を評価することとした。

## 3. 研究の方法

本研究では RS 観測を用いて、樹冠の表面温度を抽出することにより、都市の気温分布図を作成する。具体的には、以下の 4 点に取り組むこととした。

- (1) 夜間に航空機 RS 観測 (熱赤外域) を行い、樹冠の表面温度分布を抽出する。
- (2) 樹冠周辺の空間形状について 3D-CAD モデルを作成し、熱環境シミュレーターを用いて

熱環境を再現する。

(3) (1) で得られた知見を用いて、樹冠の表面温度から気温分布図を作成する。

(4) 作成された気温分布図を用いて、都市緑地のヒートアイランド緩和効果を分析、評価する。

尚、本研究では RS 観測による解析に先立ち、樹冠表面の熱収支の検討を行った。本研究では夜間の気温分布の把握を目的としたため、太陽からの日射や、樹木による光合成の影響を無視できる夜間の樹冠表面における熱収支の検討を行った。加えて、本研究では、高層建築物が林立する大都市市街地を対象としたため、樹冠の表面温度と風速、周辺地物からの長波長放射の影響を検討する必要がある。そのため、樹冠表面の熱収支と周辺地物からの影響を評価することを目的に、屋外で実験を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 樹冠表面の熱収支と気温の関係

樹木の樹冠表面の温度は、次式のように表わされる。

$\lambda$ : 熱伝導率 (W/mK),  $T$ : 温度 (K),  $x$ : 一次元断面方向の距離 (m),  $s_u$ : 日射反射率,  $I_{DR}$ : 直達日射量 (W/m<sup>2</sup>),  $\phi$ : 形態係数 (sky: 天空率),  $I_{SR}$ : 天空日射量 (W/m<sup>2</sup>),  $I_{RR}$ : 周辺地物からの反射日射量 (W/m<sup>2</sup>),  $L$ : 大気放

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = a_{su}(I_{DR} + \phi_{sky} I_{SR} + I_{RR}) + L + \epsilon_s \sum_{i=1}^n \epsilon_i \phi_i \sigma T_i^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 + H + LE$$

受熱日射量
大気放射量
周辺地物からの長波長放射量
樹冠表面からの長波長放射量
顕熱輸送量
蒸発潜熱量

射量 (W/m<sup>2</sup>),  $\epsilon$ : 長波長放射率,  $\sigma$ : ステファンボルツマン定数 (w/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>), 下付 s: 表面, 下付  $\alpha$ : 空気,  $H$ : 顕熱輸送量 (W/m<sup>2</sup>),  $LE$ : 蒸発潜熱量 (W/m<sup>2</sup>)

樹冠を構成している葉は非常に薄く、熱容量が小さいため葉の断面方向の温度分布はないものとみなすことができ、従って左辺は 0 になる。夜間においては、太陽からの日射がないため、受熱日射量は無視することができる。また、夜間は光合成もおこなわれないため潜熱量も無視することができる。そのため、夜間の樹冠表面温度は大気放射量、周辺地物からの長波長放射量、樹冠表面からの長波長放射量、顕熱輸送量によって決定される。ここで顕熱輸送量は風速に影響することが知られていることから、樹冠付近の気候を実

測し、樹冠表面温度と周辺気温、風速、周辺地物からの長波長放射の影響について分析を行った。

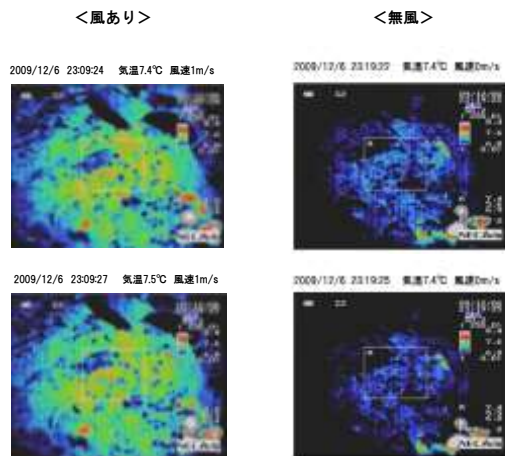


図1 樹冠表面の観測結果例

(夜間は無風時に放射冷却により樹冠表面温度が下がり、風が吹き始めると周辺気温相当に表面温度が上昇する様子がわかる)

実測調査は、2009年12月に茨城県つくば市内の樹木を対象として行った。測定対象樹木は天空率の違いが及ぼす影響を検討するために、樹冠付近の天空率が異なる樹木を複数選定した。周辺地物からの長波長放射の影響については、温度を変化させた物体を対象樹木(樹冠)に近づける実験を繰り返すことで分析を行った。測定項目は樹冠の表面温度、樹冠付近の気温、風速とし、樹冠の表面温度の測定・記録には熱放射カメラとビデオレコーダーを用いた。気温・風速の測定には、超音波風速計を用いて、放射カメラで観測する樹冠近くで測定した。測定間隔は1秒に設定した。

実測調査の結果から、樹冠表面温度と周辺気温との関係を整理し、天空率及び周辺地物からの放射の影響から、樹冠表面温度から気温分布図を作成する際に参照し得る樹冠抽出の条件を取りまとめた。

また上空から航空機で熱画像を撮影する際、葉密度が低い樹木では樹冠下の被覆面温度の影響を受けてしまい、樹冠表面の温度を正しく測定できない。そのため、気温分布図を作成するために利用し得るサンプル樹木の選定条件を整理する必要がある。本研究では建物上部等から地上樹木を複数撮影(可視域、近赤外域)して画素内緑被率を算出した上で、同様に撮影した表面温度、地上で実測した樹冠及び樹冠下表面温度の関係から、気温分布図作成に利用し得る樹冠の選定基準を整理した。

上記検討から、樹冠表面温度から気温分布図を作成するための条件、変換方法を取りまとめた。本手法の詳細については2013年3

月時点で特許出願の準備中である。

(2) RS データを用いた気温分布図の作成

(1)で取りまとめた気温分布図作成手法を適用し、茨城県土浦市～つくば市を対象にして気温分布図を作成した。

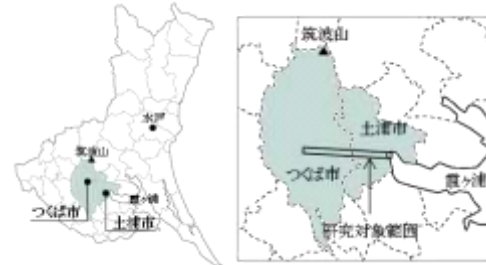


図2 研究対象域

分析対象範囲は、土浦駅付近から研究学園付近まで存在する都市的環境から里山・農地など自然環境までの環境傾度を取るよう、東西約13km、南北約0.8kmのベルト状に設定した。対象範囲内の標高差は最大約35mである。水面を除いて最も標高が低いのは、土浦市街地西部の農地で約1m、最も高い地点は里山内の樹林地やつくばの市街地で約35mである。土浦の市街地は概ね5~10m、つくばの市街地は25m~35m程度であり、市街地においてはつくばの方がやや標高の高い位置にあるものの、標高差により生じる気温差は小さいものと考えられる。

本研究では航空機MSS(Multi Spectral Scanner)観測により取得されたRSデータをもとに対象範囲内の分析を行うこととした。航空機MSS観測は可視域や近赤外域だけでなく、中間赤外域や熱赤外域まで多波長帯の情報を高分解能で取得することが可能である。

観測は2009年12月22日の昼間と夜間(日没後)の2度実施された。観測高度はともに450mであり、地上における空間分解能は約0.5mの画像を取得した。観測波長帯(バンド)は、昼間は可視域から熱赤外域までの12波長帯(band1~12)、夜間は熱赤外域の2波長帯(band11, 12)である。得られた画像については茨城県数値地図2500をもとに、複数に分割した上でAffine返還による幾何補正を行った。幾何補正にはPG-STEAMER(ver.4.2)を使用した。

夜間の航空機MSS観測と同時に、地上で熱放射カメラを用いて地表面温度を実測した。実測した表面温度の値と、同地点のピクセルの熱赤外域(Band 12)のDN値の関係を一次式で近似したところ、以下の式が得られた。

$$(\text{表面温度}) = 0.0016 \times (\text{Band12 DN値}) - 12.545$$

得られた回帰式の決定係数は0.976と高い値を示したことから、この回帰式を用いてBand12の観測データから表面温度分布図を

作成することが可能である。上式をもとに、Band12 の DN 値を表面温度に変換し、夜間の表面温度分布図を作成した。市街地や水面が高い表面温度を示した一方、農地では低い表面温度が確認された。

表面温度分布図中の樹冠部分を把握するため、Band 4 (中心波長 667nm) と Band 5 (中心波長 848nm) を用いて、NDVI を算出した。(1)で取りまとめた気温分布図作成に利用し得る樹冠の選定基準から分析に使用する樹冠を抽出した。さらに、三階建て以上の建築物が存在する地域において使用する材料情報を加えた 3D CAD モデルを作成し、観測時点の気象条件を入力した上で熱収支数値シミュレーション (ThermoRender) を使用して樹高レベルの平均放射温度分布図及び天空率分布図を作成した (樹高分布に合わせて複数の高度を設定した)。各樹冠について算出

された平均放射温度分布図及び天空率分布図を参照し、(1)で取りまとめた条件に照らして、さらに気温分布図に使用する樹冠の選択を行った。

抽出された樹冠を対象にして、各樹冠内で最高温度を示すピクセルを気温同等の樹冠とみなし、抽出した。抽出した樹冠の地点数は約 200 地点であった。

抽出された樹冠の表面温度はすべて気温相当であるとみなせるが、この時点においては点の情報である。本研究では観測範囲内の気温分布の面的な広がり把握することを目的としているため、得られた気温の点情報から内挿補間 (IDW 法) を行うことで面的な気温分布図を作成した。

作成された気温分布図からは、RS 観測時刻 (12 月 22 日 17:10 前後) の気温は里山付近で気温が低く、都市部で気温が高い傾向が明

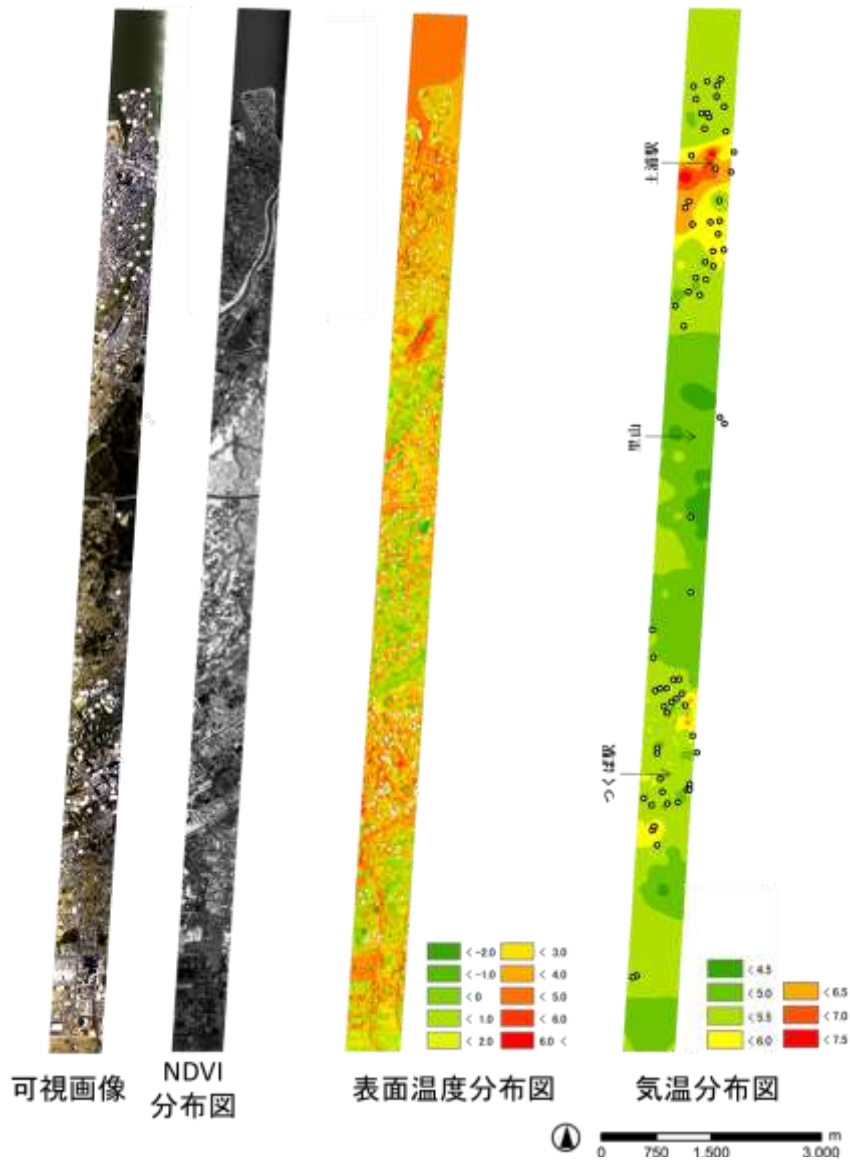


図3 本研究で使用した分布図及び作成された気温分布図

確に表れた。このことから、つくばと土浦のどちらの市街地においてもヒートアイランド現象が発生していることが確認された。気温分布図全体では、土浦駅の北西部で最高気温が、土浦とつくばの間の樹林地付近で最低気温が確認され、その差は約 3℃であった。つくばと土浦の両都市部を比較すると、全体に土浦で気温が高かった。また、高温域も土浦では土浦駅周辺を中心に明確に表れていたのに対し、つくばでは明確な高温部の中心が見られなかった。これには、土浦では駅前を中心に人工物が密集する一方で、つくばでは市街地内にも街路樹や公園、官舎周辺の植栽など多くの緑が確保されているといった、両者の都市構造の違いに起因するものと考察された。

気温分布図作成には、対象とする範囲の面的且つ密な気温の情報が必要であり、都市スケールにおいてはそのような情報を得ることが容易ではない。その点、本研究では、航空機 MSS データにより把握した夜間の樹冠の表面温度を指標にすることで、樹林地など立ち入ることが難しい地域まで含めた広域的な気温分布状況を、高密度な樹冠表面温度情報をもとに把握することが可能となった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

①王彦, 村上暁信: 下草管理が里山の夜間冷気の移流に与える影響. ランドスケープ研究, 75(5), 543-546, 2013 (査読有)

②村上暁信, 佐藤理人, 原山祐太郎: ヒートアイランド緩和効果からみた環境指標としての緑被率の有効性. 日本都市計画学会学術研究論文集, 47, 265-270, 2012 (査読有)

③村上暁信, パリホン アルマンド: 東南アジア大都市における都市化の特徴と熱環境への影響. ランドスケープ研究, 74(5), 703-706, 2011 (査読有)

④佐藤隼, 村上暁信: 公園内の熱放射環境と幼児の行動から捉える熱中症の危険性. ランドスケープ研究, 74(5), 581-584, 2011 (査読有)

⑤多田裕樹, 村上暁信: 都市およびその近郊地域におけるソメイヨシノの開花日と周辺土地被覆の関係. ランドスケープ研究, 74(5), 511-514, 2011 (査読有)

⑥佐藤理人, 村上暁信: 3D CAD による日積算受熱日射量分布を用いた熱環境緩和のための緑化手法に関する研究. ランドスケープ研究, 74(5), 699-702, 2011 (査読有)

⑦Murakami, A. and Isawa, J.: Study on the influences of thermal condition on the people's usage of open spaces in central

urbanized area using a numerical simulation. Journal of Landscape Architecture in Asia, 5, 150-155, 2010 (査読有)

⑧佐藤理人, 村上暁信, 梅干野晁: 3D CAD 対応熱環境シミュレータを用いた密集市街地の緑化による熱環境の緩和に関する研究. ランドスケープ研究, 73(5), 601-606, 2010 (査読有)

⑨梶田大介, 村上暁信, 佐藤理人: 3D-CAD を用いた密集住宅地における緑の変化と建築更新の関係に関する研究. ランドスケープ研究, 73(5), 595-600, 2010 (査読有)

[学会発表] (計 4 件)

① Murakami, A.: Pattern of infants' behavior in a park and evaluation of heat stroke risk using numerical simulation model. Environmental Health 2013 -Science and Policy to Protect Future Generations, (included in Proceeding USB), 2013/3/6 Boston, USA

② Murakami, A.: Spatial distribution of the phenological phases in urban area in Japan. Urban Environmental Pollution -Creating Healthy, Liveable Cities, (included in Proceeding USB), 2012/6/19 Amsterdam, The Netherlands

③ Murakami, A.: Prediction of Air Temperature Distribution in Urbanized Area of Tokyo, Japan Using Airborne Thermal Images. 2010 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, ((included in Proceeding CD-ROM), 2010/7/27 Honolulu, USA

④ Murakami, A., Hoyano, A.: Study on the Seasonal Change of Urban Heat Island Phenomenon Using Airborne Thermal Image. 2009 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, (included in Proceeding CD-ROM), 2009/7/12~17, Cape Town, South Africa

[その他]

樹冠表面温度から気温分布図を作成するための条件、変換方法を取りまとめたが、本手法の詳細については 2013 年 3 月時点で特許出願の準備中である。

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 暁信 (MURAKAMI AKINOBU)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号: 10313016