

論文の内容の要旨

氏名：内 田 裕 貴

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：新世代静止気象衛星による都市部における地表面温度の時空間解析に関する研究

1. 本研究の目的

地球温暖化が進む中、日本ではヒートアイランド現象の発生が顕著である。その影響は日中の気温上昇、夜間の熱帯夜の増加などに現れており、人体にも悪影響を及ぼし始めている。各都道府県では、ヒートアイランド対策ガイドラインを策定し種々の取り組みを行っている。このような状況の中、都市の熱環境を把握する手法として衛星リモートセンシング技術が活用されている。これは、同技術が有する広域性、同時観測性および周期性等の長所を活用した地表面温度の観測が都市の熱環境の実測値の面情報であり、その観測データの解析により有効な都市の熱環境情報が得られるからである。

これまで数々行われてきた衛星リモートセンシング技術を用いた都市の熱環境に関する既往研究にはいくつかの問題点がある。まず、1)ある限られた領域における熱環境の解析・評価である、2)都市全体の熱環境を評価するには至っていない、3)適用している衛星のほとんどは極軌道の地球観測衛星のため、観測頻度が限られた情報による解析結果であり、熱環境の日変化を評価できていない、4)天候により連続観測が妨げられる、などが挙げられる。このため本論文では、2015年7月より定常運用されている新世代静止気象衛星「ひまわり8号」の高頻度観測に着目し、都市全体の熱環境を評価することを目的とし、既往の課題を解決する手段として新たに「ひまわり8号」を使った熱環境を高精度で視覚化できる『衛星時空間解析手法』を提案し、その有効性について検証を行ったものである。

2. 本研究の成果概要

1) 静止気象衛星による地表面温度観測の検証

本研究で使用した静止気象衛星「ひまわり8号」は従来の気象衛星に比べ観測性能が大きく向上している。搭載されているセンサ AHI (Advanced Himawari Imager) は計 16 の観測波長帯 (Band) を有しており、その内 Band 11~16 が熱赤外波長帯 (8~12 μ m) を観測している。

第2章では、静止気象衛星「ひまわり8号」が、従来から活用されている極軌道衛星による地表面温度観測精度と同等に適用できることについて、検証を行った。使用した衛星データは、米国地球観測衛星 Landsat-7/ETM+ の熱赤外波長帯 (Band 6) である。Landsat-7 は、高度およそ 700km から観測幅 185 km、地上分解能 60m で観測を行っている。一方の「ひまわり8号」は、高度およそ 36,000km から、同様の波長帯 (Band 14) で地上分解能 2 km で観測を行っている。両者が観測した地表面温度について比較し精度検証を行った結果、相関係数 0.898 および一回帰係数のゲイン値 0.699 が得られた。衛星軌道からの観測は大気を通じた地表面の観測であり、測定した画像データは大気の影響を受けている。静止軌道からの観測は極軌道からの観測よりも大気の影響が大きいことため回帰係数のゲイン値は小さいが、観測値には良好な相関関係が認められた。「ひまわり8号」は地表面温度を従来の衛星と同様に捉えていることを確認した。

衛星が観測する地表面温度は大気による影響を除去する必要がある。米国地球観測衛星 Terra に搭載された通産省 (現在の経済産業省) のセンサ ASTER は熱赤外波長帯域を6つの Band で、観測幅 60 km、地上分解能 90m で観測を行っている。ASTER データは 1999 年に打ち上げられて以来長期に渡る地上同期観測を重ね、高精度な大気補正アルゴリズムが開発されている。その成果は、大気補正処理済みデータセット (処理レベル L2B03) として提供されている。

第3章では、「ひまわり8号」の観測データからより正確に地表面温度を把握するために、大気補正手法である『スプリットウィンドウ法 (Split-Window Method)』を適用した。この手法は、熱赤外領域の 11 μ m 帯と 12 μ m 帯における水 (気・液・固相すべて) の吸光係数の相違すなわち、この2つの Band の輝度温度の差を用いて大気の影響を除去して地表面の輝度温度を求める手法であり、解像度 1km 以上の低解像度衛星に対して有効な手法とされている。

補正精度の検証データとして、大気補正処理済み ASTER データの地表面温度を使用した。その結果、「ひまわり 8 号」の大気補正処理は、Band 14 と 15 の組み合わせが最も良い結果となった。その相関係数は 0.789、残差の平均は 1.01、残差の標準偏差は 0.814 であった。「ひまわり 8 号」の観測データは Band 14 と 15 の組み合わせによるスプリットウィンドウ法により最も精密に大気補正を行うことができ、その結果として高精度で地表面温度を把握できることを明らかにした。

2) 地表面温度の分布パターンの推定

ヒートアイランド現象の発生要因として、日中の太陽放射により暖められた道路や建物等の構造物が夕方から夜間にかけて熱を放出している点を挙げることができる。そこで都市の地表面温度の分布パターンを推定することで、ヒートアイランド現象の要因の一つが把握できると考えられる。

第 4 章では、「ひまわり 8 号」によって観測された都市全体の熱環境を視覚的に評価する手法として地域傾向面分析(Trend Surface Analysis)を行い、ヒートアイランド現象の空間分布解析により、その有効性を明らかにした。地域傾向面分析は、数値表現された地表面現象(2次元空間に分布した数値情報)につき、体系的・全域的、規則的差異に関連した部分と非体系的・局地的・偶然的差異に関連した部分に識別する手法である。既往研究では、主に日本国内外における主要都市の人口密度分布に多く用いられている手法である。

緯度経度座標系に幾何補正した「ひまわり 8 号」の Band 14 画像から東京を中心とする約 100km 四方の領域について、1 時間ごとの 24 時間のデータを用いて解析を行った。その結果、各観測時間における地表面温度分布パターンを捉えることができ、その時系列情報から地表面温度分布の日変化を追跡することができた。従来の衛星では、ある観測時刻における地表面温度分布から水域や森林域が熱環境緩和に効果的であることが判明している。これに対して本提案手法を適用した「ひまわり 8 号」データから得られた地表面温度分布パターンの日変化からは、さらに温度の上昇・下降の特徴もとらえることができた。

3) 短時間の雲の影響の除去

第 4 章の結果から地表面温度分布パターンの日変化を捉えることはできたが、限られた晴天日においても小規模な雲の発生や移動が、分布パターンの空間的な解析や時系列変化に影響を及ぼすという課題がある。

第 5 章では、この課題を解決する手法として、晴天日における地表面温度の日変化を対象に、雲が発生したと仮定したときのシミュレーションデータにより、新たに高次多項式を使った雲の除去手法について提案し、その有効性について検証を行った。想定したパターンは、1)雲が 1 時間発生した場合、2)2 時間～3 時間雲に覆われている場合、3)長時間(4 時間以上)雲に覆われている場合の 3 パターンである。高次多項式によるシミュレーションデータの補正処理を行った結果、3 つのパターンは 6 次多項式が最も雲の影響を除去できることが判明した。この結果を受け、実画像に対して 6 次多項式による補正を適用した。雲の影響による低温領域が認められるデータに本提案手法を適用した結果、雲の影響を取り除くことができ、本手法が雲の影響除去手法として有効であることを確認した。

4) 時空間地表面温度分布パターンの推定とヒートアイランド現象の評価

上記において、新世代静止気象衛星「ひまわり 8 号」を使用することで、都市全体の熱環境を空間的、視覚的に捉える手法を提案し、その効果について検証した。

第 6 章では、日本の主要 5 都市(東京、名古屋、福岡、札幌、仙台)を対象に地域傾向面に時間の要素(地表面温度の日変化)を加えた時空間傾向面分析を試みた結果、各都市の温度分布パターンの日変化を捉えることができ、本論の提案手法が、都市全体の熱環境の実態を評価できる手法であることが明らかとなった。また、各都市における朝方と昼間における温度上昇、朝方と夜間における残存上昇温度を比較するヒートアイランド現象の説明指標としての応用事例を示すことができた。

3. 展望と今後の課題

静止気象衛星「ひまわり 8 号」は順調に観測を続けており、加えて「ひまわり 9 号」がすでに待機軌道に投入されている。設計寿命は 15 年であり、今後も数十年に渡り継続観測ができると考えられる。この観測データから都市域の地表面温度分布情報を継続して得ることが出来る。本論で提示したヒートアイラン

ド現象の数値化手法については、観測波長帯数が多いことからさらなる処理・解析手法が提案できる可能性は大きい。また、時空間傾向面分析による地表面温度分布パターンの変化情報から、より有効な指標の抽出も可能と思われる。

従来の衛星でも捉えることができた水域や森林域の熱環境緩和効果は、本研究成果からより詳細に捉え直すことが可能と考えられる。「ひまわり 8 号」の最大の特徴である高頻度観測は時間軸に関する応用研究に重要な情報であり、本論文の成果は将来に向けての基礎的研究の一事例と位置づけられる。

今後の課題としては以下を挙げることができる。

- ・本論文で示したヒートアイランド現象の評価手法は、都市全体のヒートアイランド対策に対する評価に応用できるものと思われる。
- ・各都道府県で取り組まれている「ヒートアイランド現象対策ガイドライン」に共通している「まちづくり計画」に取り入れることで、さらに都市部における熱環境緩和計画策定に役立てることができると考えられる。
- ・「ひまわり 8 号」の観測範囲は太平洋側の地球半球に及び、また米国や欧州が同様の機能を有する静止気象衛星を打ち上げる予定であることから、日本の都市のみならず、諸外国でも発生しているヒートアイランド現象の解析・評価にも利用できると考えられる。

以 上