

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

内田 裕貴

# 目次

## 第1章 序論

- 1.1 研究背景 . . . . . 1
- 1.2 研究の目的 . . . . . 3
- 1.3 静止気象衛星「ひまわり8号」 . . . . . 3
- 1.4 熱環境把握における問題点 . . . . . 5
- 1.5 本研究の概要および本論文の構成 . . . . . 6

## 第2章 静止気象衛星による地表面温度観測

- 2.1 概説 . . . . . 8
- 2.2 衛星による地表面温度観測 . . . . . 8
- 2.3 「ひまわり8号」による地表面温度 . . . . . 9
- 2.4 「ひまわり8号」の観測値の検証 . . . . . 9
- 2.5 土地被覆と温度の日変化の関係 . . . . . 14
- 2.6 本章で得られた成果と考察 . . . . . 18

## 第3章 静止気象衛星による観測データの大気補正

- 3.1 概説 . . . . . 19
- 3.2 「ひまわり8号」AHIとTERRA/ASTERについて . . . . . 19
- 3.3 「ひまわり8号」AHI . . . . . 20
- 3.4 TERRA/ASTER . . . . . 20
- 3.5 AHIとASTERの観測値の比較 . . . . . 23
  - 3.5.1 ASTER分解能90mの場合 . . . . . 24
  - 3.5.2 ASTER分解能10×10画素へ平均化した場合 . . . . . 25
  - 3.5.3 ASTER分解能20×20画素へ平均化した場合 . . . . . 26
- 3.6 スプリットウィンドウ法による補正 . . . . . 31
- 3.7 本章で得られた結果と考察 . . . . . 33

## 第4章 静止気象衛星による地表面温度の分布パターンと日変化

4.1	概説	34
4.2	地域傾向面分析による都市の熱環境について	34
4.3	対象日時および使用データ	35
4.4	対象日の地表面温度の日変化結果	37
4.4.1	2015年4月26日における傾向面分析結果	40
4.4.2	2015年5月2日における傾向面分析結果	43
4.4.3	2016年4月15日～16日における傾向面分析結果	46
4.4.4	2016年5月4日～5日における傾向面分析結果	49
4.4.5	2017年4月13日～14日における傾向面分析結果	52
4.5	本章で得られた結果と考察	57

## 第5章 静止気象衛星による観測データにみられる短時間の雲の影響の除去

5.1	概説	58
5.2	使用したデータならびに研究対象地域	58
5.3	晴天日における地表面温度の日変化	59
5.4	雲の影響を受けたシミュレーション	61
5.5	雲の影響を受けた地表面温度の日変化	65
5.5.1	2015年5月10日の解析結果	65
5.5.2	2016年4月15日の解析結果	69
5.6	本章で得られた成果と考察	72

## 第6章 静止気象衛星による地表面温度の時空間分布パターンおよびヒートアイランド現象の評価

6.1	概説	73
6.2	使用データと地表面温度	73
6.3	主要都市の地表面温度	73
6.3.1	東京	74
6.3.2	他の主要都市	75
6.4	気温と地表面温度の比較	83
6.5	都市域における地表面温度の時空間分布	86
6.6	本章で得られた成果と考察	89

第7章 結論と展望 . . . . . 91

謝辞 . . . . . 95

# 第 1 章

## 序論

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

近年、環境問題という言葉を目にする機会が多くなっている。我々の生活の一部となっている自動車においても排ガス規制をはじめ環境負荷低減処置がとられている。環境問題の取り組みは、昔から謳われており、1992年にブラジル・リオデジャネイロで開催された「国連環境開発会議」（「地球サミット」UNCED）では、世界172ヶ国の政府代表者、国際機関、NGO(Non Governmental Organaization)などが参加した国連サミットが行われた。この地球サミットでは、地球温暖化、酸性雨などの地球環境問題を人類共通の課題と位置付け、「持続可能な開発」という理念の下に環境との両立を目的として開催された<sup>1)</sup>。その後日本では、1997年に京都で開催された地球温暖化防止京都会議(COP3)が行われ、「京都議定書」が策定されている<sup>2)</sup>。地球温暖化による影響は世界的に異常気象を引き起こしており、平均気温の上昇や、海面上昇や生態系への影響が数多く報告されている。環境省が提示している「STOP THE 温暖化 2017」には、世界各地で起きている異常気象の要因からその対策取組が記されている<sup>3)</sup>。まず、急激な気候変動の影響により平均気温の上昇が挙げられ、IPCC第5次評価報告書によると132年間に0.85℃の気温が上昇していると報告されている<sup>3)</sup>。特に2014年以降は、さらに上昇を続けており2016年度は観測史上最も暑い年と報告されている<sup>3)</sup>。さらに、1901年～2010年の110年間に世界の海面水位が平均1.7mm/年上昇しており、1993年～2010年では約3.2mm/年と急激に上昇していると報告されている<sup>3)</sup>。温暖化による影響は年々深刻化している。

日本においても、気候変動の影響を受けており1890年～2010年まで平均気温は、長期的にみると100年あたり約1.19℃の割合で上昇している。IPCC第5次評価報告書で示された結果と比較しても高い上昇率となっている<sup>3)</sup>。特に、都心部においては「ヒートアイランド」と呼ばれる現象が生じており、1990年代後半から徐々に日本においても認識されるようになってきている<sup>4)</sup>。図1-1にヒートアイランド現象の概念図を示す<sup>5)</sup>。ヒートアイランドが起こる要因として、都市部におけるオフィスビルの増加に伴う植生域の減少、建物や道路の地表面にコンクリートやアスファルトなどを用いたハードサーフェス化などがあげられる。我々の生活から排出される人工排熱の増加や大気汚染物質などによる熱の吸収等が問題とされている<sup>6)</sup>。それらの要因により日中、太陽放射により暖められた

建造物の壁面などは、太陽高度が下がり始める夕方以降に熱を放出し夜間の気温を上昇させ<sup>6)</sup>、熱帯夜を生み出している。人口が密集する都心部を含めた地域では、多様な産業活動や社会活動、自動車の普及に伴い多くの熱が排出され昼間の排熱量は局所的に  $100\text{W}/\text{m}^2$  (中緯度での真夏の太陽南中時における全天日射量の約 10%) を超えるとされている<sup>5)</sup>。特に夏季においては、日中の気温が高いためエアコンを多用し、それにより人工排熱が増加し夜間においても多用するため都市部では気温が高い状態が続いていると考えられる。気象庁が掲載している関東地方を対象とした 2013 年の観測データでは、東京都心部の朝方 5 時で  $28^\circ\text{C}$  前後、15 時においては広範囲で  $30^\circ\text{C}$  を超える気温を観測している (図 1-2)<sup>7)</sup>。

今日ではヒートアイランド現象を抑制する対策として多くの取り組みがなされているが、国土交通省では、「緑化の推進」、「低炭素まちづくりの推進・ヒートアイランド現象緩和に向けた都市づくり」、「住宅・建築物の省エネ性能の向上」、「打ち水の実施による国民へのヒートアイランド問題の意識向上」などの取り組みが行われている<sup>8)</sup>。

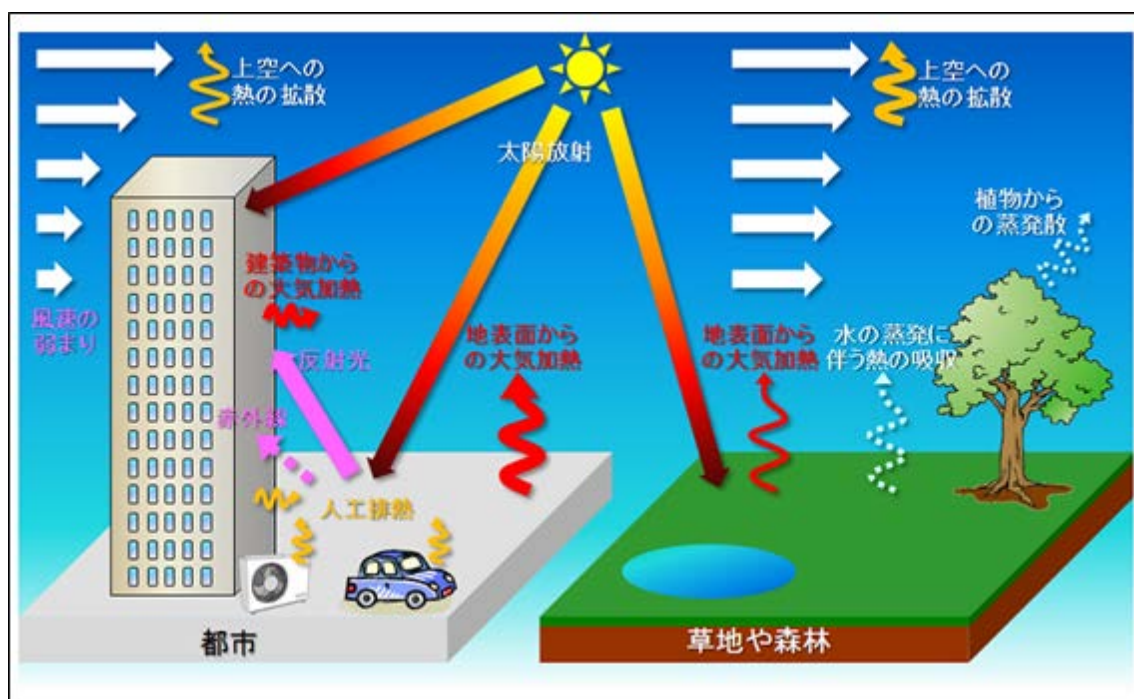


図 1-1 ヒートアイランド現象の概念図

(出典：国土交通省気象庁：[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr\\_faq/02/qa.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/02/qa.html))

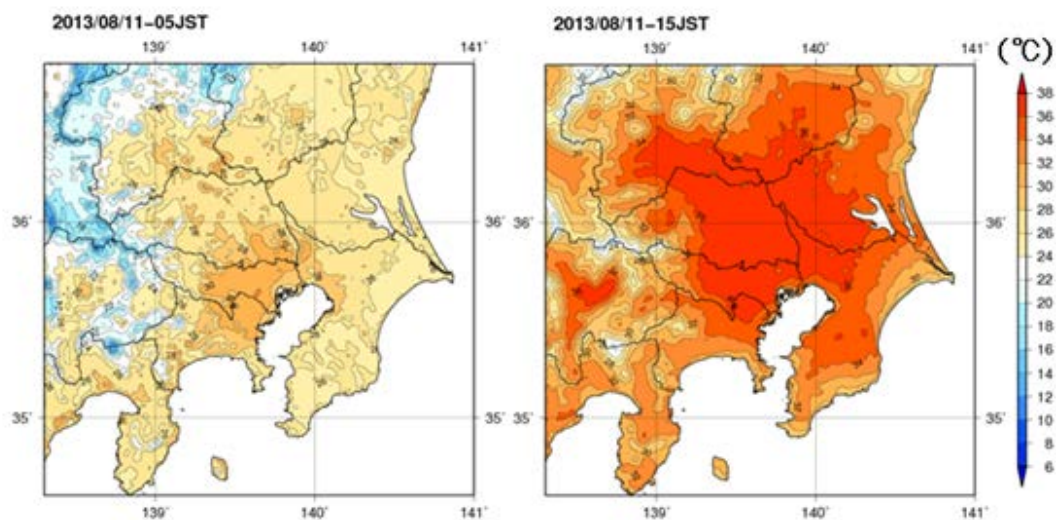


図 1-2 2013 年 8 月 11 日 05 時(左図), 15 時(右図)における  
関東地方の気温の分布

(出典：国土交通省気象庁：[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr\\_faq/01/qa.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/01/qa.html))

## 1.2 研究の目的

地球観測衛星から得られる地表面温度情報は、ヒートアイランド現象の強さ、すなわち規模や郊外との温度差などの実態を把握するのに有効であると考えられる。一方、2014 年に打ち上げられた新世代静止気象衛星「ひまわり 8 号」は、従来の「ひまわり」衛星と比べ多くの点で性能の向上が図られている。特に注目すべきは、全球を 10 分間隔で、日本付近を 2.5 分間隔で観測できるようになった点で、地上分解能の向上もありヒートアイランド現象に関する分析・解析に有用な日温度変化の調査が可能となった。

本研究では、第一に「ひまわり 8 号」から得られる地表面温度の連続観測データより、日本の主要都市の熱環境がどのように観測されているかに焦点を絞り、衛星観測データの持つ意味と解析した熱環境情報の信頼性を明らかにすることを、そして第二にヒートアイランド現象の監視や種々対策効果の評価に対して衛星画像から得られた特徴を分析することで、ヒートアイランド現象の監視および評価の面での貢献を確認することを目的とした。

## 1.3 静止気象衛星「ひまわり 8 号」

2014 年 10 月 7 日に打ち上げられた新世代静止気象衛星「ひまわり 8 号」(図 1-3)は、「ひまわり 6、7 号」の後継衛星<sup>9)</sup>である。衛星本体の設計寿命は 15 年





図 1-3 「ひまわり 8 号」のイラスト

(出典：気象衛星センター：<https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/general/himawari.html>)

以上とされており<sup>9)</sup>、衛星本体の機能確認試験、地上側を含むシステム全体の連続運用試験等の所要の準備を進め、2015年7月7日11時00分より正式運用が開始された。搭載されているセンサ AHI (Advanced Himawari Imager:以下 AHI)は、最先端の観測性能を有する放射計であり、他の新世代気象衛星に先駆けて運用を開始することから、国際的にも注目されている<sup>8)</sup>。

「ひまわり 8 号」を始めとする静止軌道衛星は、赤道上空約 36,000 km の軌道上にあり地球の自転と同じ周期で飛行している(図 1-4)。赤道上に位置するメリットとして、地球表面の約 1/3 を観測範囲に捉えることができるため、観測範囲の広域さと地球上の同じ領域を常に観測することが可能である<sup>10)</sup>。これらのことから静止気象衛星は、低気圧や前線に伴う数千 km のスケールを持つ大規模の雲域から熱雷など数時間で不規則的に変化する局所的な気象情報を常時観測可能となっている<sup>10)</sup>。一方、Landsat や Terra/Aqua などの極軌道衛星は両極付近を通り、赤道をほぼ直交する軌道を飛行しているため、低高度を短い

周期で飛行し、地上の任意点を1日2回程度観測している<sup>10)</sup>。静止気象衛星と比較すると観測頻度は落ち観測範囲が狭くなるものの、高解像度の画像が得られる<sup>10)</sup>。

「ひまわり8号」が他の衛星と比較して特筆すべき点として、観測頻度の向上が挙げられる。「ひまわり6、7号」は全球観測に30分を要したが、「ひまわり8号」は10分に短縮されている。さらに日本周辺域は2.5分で観測可能となっている。気象分野のみならず、多くの分野での活用が期待され、都市の熱環境調査においては連続観測されたデータからその変化の特徴を明らかに出来ると考えられる。

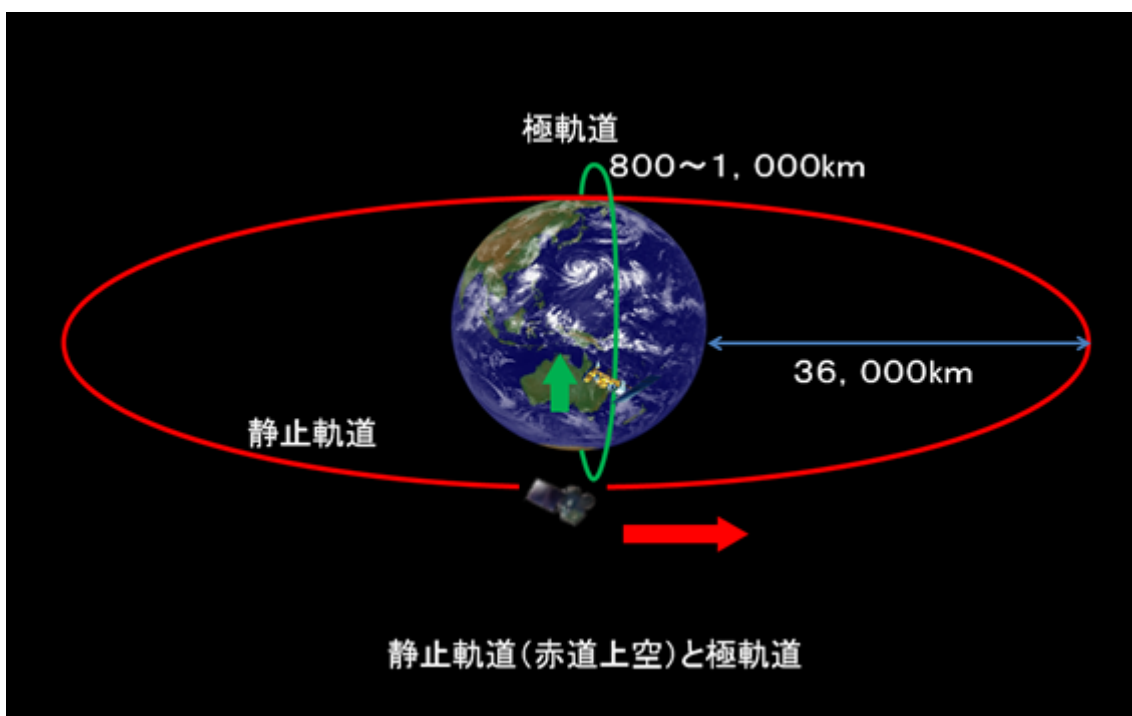


図1-4 静止軌道（赤道上空）と極軌道の概念図

(出典：気象衛星センター：<https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/general/geopolar.html>)

#### 1.4 熱環境把握における問題点

ヒートアイランド現象の研究は諸外国で既に行われており、特に都市化による気温の上昇が指摘されている<sup>6)</sup>。都市部の気温が上昇する熱環境に関する研究は、現地の気温観測や郊外における代表点の観測データの比較など局所的な解析が数多く、面的な解析があまりなされていない。また、従来の気温観測では測

定機器の設置環境が強く影響する上、広域を一様に観測することが難しかった。効果的な調査手法が十分に確立しているとは言えない。

そこで一度に広域を観測し視覚的に情報を得ることが可能なリモートセンシング技術が有効だとされている。リモートセンシング技術は、衛星等により観測対象物からの電磁波の反射・放射からその情報を得る技術である。様々な分野において有効活用されており、ヒートアイランド現象を始め環境問題に対する情報把握に関連する研究も数多くなされている。従来のヒートアイランド現象に関する研究では、人工衛星 Terra/Aqua 搭載の MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer : 以下 MODIS) や Terra 搭載の ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer : 以下 ASTER) など、極軌道から高い分解能で観測できるセンサが用いられてきた。しかしながらこれらの衛星からは、極軌道衛星であるため昼夜 2 回しか観測データは得られない。このため連続したデータが必要な、1 日 (24 時間) の詳細な地表面温度の変動を捉えることは出来なかった。

## 1.5 本研究の概要および本論文の構成

本研究では、2015 年 7 月 7 日に正式運用が開始された「ひまわり 8 号」により連続観測されたデータを用いて、都市の熱環境の変動を把握した。従来の「ひまわり」衛星と比べ空間分解能及び観測頻度が向上したため、観測された連続データを解析することで 1 日の地表面温度の分布と変動を視覚的に捉えられることから、ヒートアイランド現象に関する知見が得られ、環境問題対策等の検討に寄与出来ると考えられる。

首都圏を例として、まず「ひまわり 8 号」の可視・近赤外域の観測データから土地被覆分類を行い、代表的な土地被覆毎に地表面温度の日変化の分布及び変動の調査を行った。次に、「ひまわり 8 号」から算出した地表面温度の測定精度の検証を行い、複数のバンドデータを使った大気補正法として知られるスプリットウィンドウ法の適用について検討を行った。また、時間的分解能が向上したことから、小さな雲の発生や動きも熱画像にはノイズとして捉えられてしまうため、雲域の影響を補完する手法の提案も試みた。最終的には時空間地域傾向面分析により、都市の熱環境の変動の可視化を行い、都市間の熱環境の模式化に成功した。そしてヒートアイランド現象の強さを示す指標として応用するため、日本の 5 都市を対象として比較・検討を行いその有効性を示すことができた。

本論文は、7章からなる。第一章は序論であり、環境問題のひとつであるヒートアイランド現象の要因とその原因、それに対する既往研究や対策を説明し、新世代気象衛星「ひまわり8号」を使用した本研究の目的と概要を述べている。

第二章では、新世代気象衛星「ひまわり8号」の観測データから地表面温度算出方法とその精度について述べている。地表面温度の解析に使用する熱赤外バンドの有効性、さらに土地被覆とその地表面温度の関係性を明らかにした後、24時間の地表面温度算出結果から求めた日変化を都市の熱環境の特徴を表す指標としてとらえることを示した。

第三章は、「ひまわり8号」における複数の熱赤外バンドデータ間関係性を示している。大気補正に用いられるスプリットウィンドウ法の適用について検証を行い、使用に適したバンドの組み合わせについて明らかにした。

第四章では、地表面温度の解析結果に地域傾向面分析を加えることで、熱環境を視覚的に把握することの有効性について述べている。各都市の熱環境の特徴、都市間の特性の違いの把握を試みた。

第五章では、従来の衛星データで課題となっている雲の影響の低減について述べている。雲の影響を受けた時間帯の前後の観測データを用いることにより補完が可能で、雲の影響の少ない日変化を捉える効果を示した。また、実際に雲の影響を受けた画像の補完処理を行い、その影響を視覚的にも補完することも示した。

第六章では、地域傾向面分析に時間軸を加えて実施することで、空間的特徴に時間経過による変動を加味した解析について述べている。日本の5都市を対象とした分析結果を示し、各都市の熱環境の特徴を数値化・可視化することで活用可能であることを示した。

第七章は、結論であり、本論文で得られた主要な成果をまとめて記述した。

## 第1章<参考文献>

- 1) 外務省：「国連環境開発会議」（「地球サミット」（UNCED））（1992年），  
<<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/unced1992.html>>，2018.2.9 閲覧
- 2) 赤堀 聡之，地球環境問題-京都会議(COP3)から COP6 へむけての議論-，森林科学，Vol.28，pp.16-22，2000.
- 3) 環境省：「STOP THE 温暖化 2017」，  
<<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/knowledge/Stop2017.pdf>>，2018.2.9 閲覧
- 4) 山口 隆子：ヒートアイランド対策，日生气誌，Vol.50，pp.71-75，2013
- 5) 気象庁，ヒートアイランド現象，  
<[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr\\_faq/02/qa.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/02/qa.html)>，2018.2.9 閲覧
- 6) 北林興二，都市ヒートアイランド現象と可視化，可視化情報，Vol.22，No.86，pp.1-6，2002.
- 7) 気象庁，ヒートアイランド現象，  
<[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr\\_faq/01/qa.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/01/qa.html)>，2018.2.9 閲覧
- 8) 国土交通省，国土交通省ヒートアイランド・ポータル  
<[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_mn\\_000016.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_mn_000016.html)>，2018.2.22 閲覧
- 9) 気象衛星センター，ひまわり8号・9号の運用計画，  
<<http://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/info/plan.html>>，2018.2.19 閲覧
- 10) 気象衛星センター，静止軌道衛星と極軌道衛星  
<<http://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/general/geopolar.html>>，2018.2.19 閲覧
- 11) 内田裕貴，朝香智仁，青山定敬，野中崇志，岩下圭之，杉村俊郎，ひまわり8号データにみる春季日照時間の変化による地表面温度日変化の変動，環境情報科学センター，Vol.31，pp.125-130，2017.

## 第2章

### 静止気象衛星による地表面温度観測

## 第 2 章 静止気象衛星による地球表面温度観測

### 2.1 概説

第 2 章では具体的に「ひまわり 8 号」が観測したデータを用いて首都圏の熱環境について解析を行う。第 1 章において本論文の目的を述べたが、ヒートアイランド現象などの都市部における熱環境を把握する上でリモートセンシング技術が有効であると考えられている。従来の地球表面温度の観測に広く利用されている衛星 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration: 以下 NOAA) や MODIS ではなく、より地上分解能の高い Landsat との比較を行った。空間分解能が劣るデメリットと時間分解能が優れるメリットを明らかにし、「ひまわり 8 号」から得られる観測画像から、土地被覆情報と温度の日変化特性の関係について調査を行った。また、従来の衛星観測ではある特定の時間にしか観測できなかった地球表面温度情報が、連続観測により日変化として捉えられる点に着目し、土地被覆状況と地球表面温度の日変化特性の関係という視点から、首都圏の熱環境監視について考察を行った。

### 2.2 衛星による地球表面温度観測

現在、地球表面の温度観測を行っている衛星には極軌道衛星と静止衛星が存在している。極軌道衛星には、地上分解能 1km ほどの NOAA、MODIS や地上分解能 100m ほどの Landsat などがある。静止衛星には、静止気象衛星「ひまわり 6・7 号」があり、地上分解能は 4km となっている。いずれも 11~12  $\mu\text{m}$  の観測波長域で観測を行っており、NOAA や MODIS は 1 日に 2 回の観測機会、「ひまわり 6・7 号」には連続した観測機会がある。観測値はそれぞれ大気上端における放射輝度に変換するための変換式が提供されており、輝度温度への変換が可能である。しかしながら、大気の影響を含んでいるため実際の地球表面温度とは異なる。現在でも大気の影響を除去するための種々工夫、補正処理が提案されている。都市部における熱環境を把握する上で、従来では NOAA や MODIS のような極軌道衛星の場合 1 日の観測機会が 2 回なため熱環境の変化をより詳細に捉えることができなかった。しかしながら都市部に限らず地球表面温度をより詳細に把握するためには、観測頻度の高い衛星観測を行う必要がある。

2014 年 10 月 7 日に、新世代気象衛星「ひまわり 8 号」が打ち上げられ、2015 年 7 月 7 日に定常運用を開始した。従来の静止衛星「ひまわり 6・7 号」と比較すると観測波長帯数は 5 バンドから 16 バンドに増加し、地上分解能も可視域で 1km から 0.5km~1km、赤外が 4km から 2km に向上している。また、観測時間は全球観測の場合 30 分から 10 分に機能が向上し、特に日本特定域の領

域だと2分半毎に観測が可能となっている。これにより短時間間隔連続観測が実現している。空間分解能と時間分解能の向上により、都市部における熱環境の詳細な変化を捉えることが可能となり、高度な利用が期待されている。

### 2.3 「ひまわり8号」による地球表面温度

新世代静止気象衛星として打ち上げられた「ひまわり8号」は、地上分解能が2kmに向上し、観測間隔も日本特定付近等限られた領域に限定すれば2分半毎に観測できる。すなわち1日の観測回数が576回となり、温度の日変化の変動を追跡できる。また、可視・近赤外波長帯域の地上分解能は、0.5~1kmであり、土地被覆情報の抽出がある程度のレベル(精度)で可能な性能を有している。そこでまず、「ひまわり8号」が観測したデータから土地被覆情報を把握し、地球表面の土地被覆ごとの日温度変化について調査した。

### 2.4 「ひまわり8号」の観測値の検証

「ひまわり8号」に搭載されたセンサAHIは、表2-1に示すように16の観測波長帯(バンド)を有し、そのうち6バンド(バンド11~16)が8~13 $\mu\text{m}$ に設定されている。表2-2は地球表面温度の温度情報を知るために提供されている放射輝度への変換式(2-1)の係数である。gainとoffsetは、傾きと切片を意味している。

$$\text{放射輝度}(I)=[\text{gain}] \times \text{観測値}[\text{DN}]+[\text{offset}] \cdots (2-1)$$

表 2-1 AHI の観測波長帯

バンド	中心波長 ( $\mu\text{m}$ )	バンド幅 ( $\mu\text{m}$ )	バンド	中心波長 ( $\mu\text{m}$ )	バンド幅 ( $\mu\text{m}$ )
1	0.4703	0.0407	10	7.3471	0.1871
2	0.5105	0.0308	11	8.5905	0.3727
3	0.6399	0.0817	12	9.6347	0.3779
4	0.8563	0.0345	13	10.4029	0.4189
5	1.608	0.0409	14	11.2432	0.6678
6	2.257	0.0441	15	12.3828	0.9656
7	3.8848	0.2006	16	13.2844	0.5638
8	6.2383	0.8219	TM6	11.45	2.1
9	6.9395	0.4019			



表 2-2 放射輝度への変換係数

band	gain	offset
11	-4.000709E-03	16.20287
12	-3.926041E-03	15.900467
13	-3.752548E-03	15.197821
14	-3.502701E-03	14.185946
15	-3.117366E-03	12.625359
16	-5.763542E-03	11.527139
TM6	3.700000E-02	3.1628

(1)Landsat-7/バンド 6 との比較

図 2-1 に Landsat-7 により 2015 年 1 月 18 日 10 時 15 分頃、関東～伊豆諸島領域が観測された画像を示す。「ひまわり 8 号」による観測画像と共に緯度・経度座標系への投影変換を行った。変換後の画像データは「ひまわり 8 号」赤外バンドの地上分解能 2km を基準とした。ただし赤道上空からの観測のため、実際の空間分解能は 4km 程度と考えられる。また、Landsat-7/ETM+(多重スペクトル走査計, Enhanced Thematic Mapper Plus)は、スキャン・ライン・コレクションの不具合により観測画像の両端にデータのギャップが生じている。投影変換前にこのギャップを修正するため 40×40 画素の移動平均処理を施し、地上分解能は 1,200m 相当としてから投影変換を行った。

図 2-2 は、投影変換後の「ひまわり 8 号」バンド 14 と Landsat-7/バンド 6 である。対象領域には、陸域、海域に加え、若干の雲域が含まれている。両者が観測した地球表面温度の比較を行うため、「ひまわり 8 号」バンド 14 と Landsat-7/バンド 6 間で相関関係を調べた。

得られた相関係数を表-3 に示す。相関関係(R)が負の値を示す要因として、静止気象衛星は温度の低い雲域を明るく表示するため気象衛星の観測値が大小を反転して記録されているためであると考えられる。本研究で使用している「ひまわり 8 号」データは、評価用に提供されたもので、位置情報やキャリブレーション等の処理アルゴリズムは更新が続けられている。今回の結果から、Landsat-7 との観測条件の違いも考慮すれば、良好な相関が認められたと考えられる。

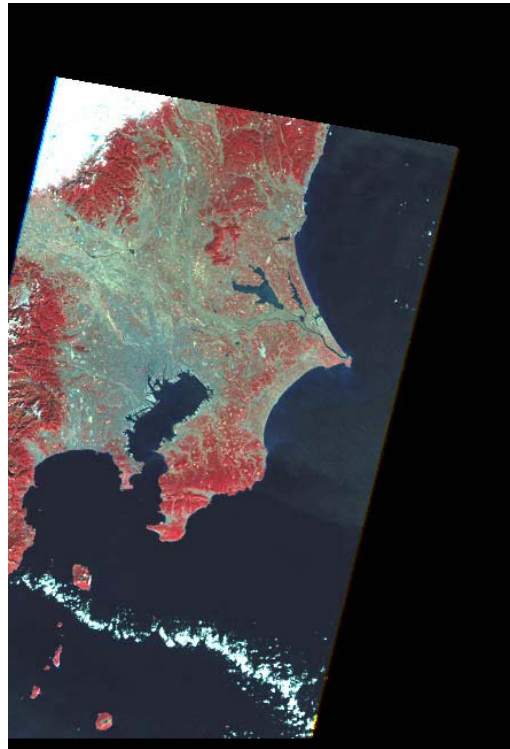
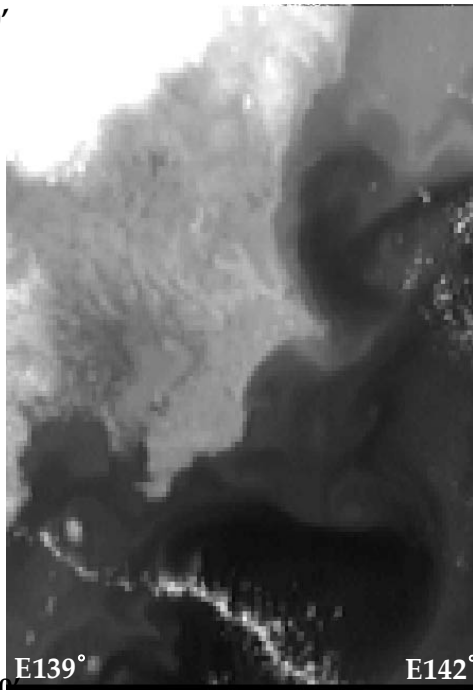


図 2-1 Landsat-7(2015 年 1 月 18 日 10 時 15 分頃観測)

N37° 20'



N34° 00'

E139°

E142°

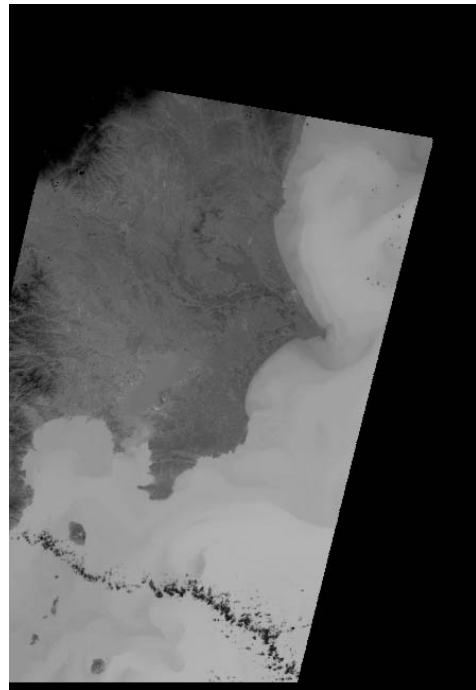


図 2-2 各衛星の熱赤外画像 (左 : ひまわり 8 号画像, 右 : Landsat-7 画像)

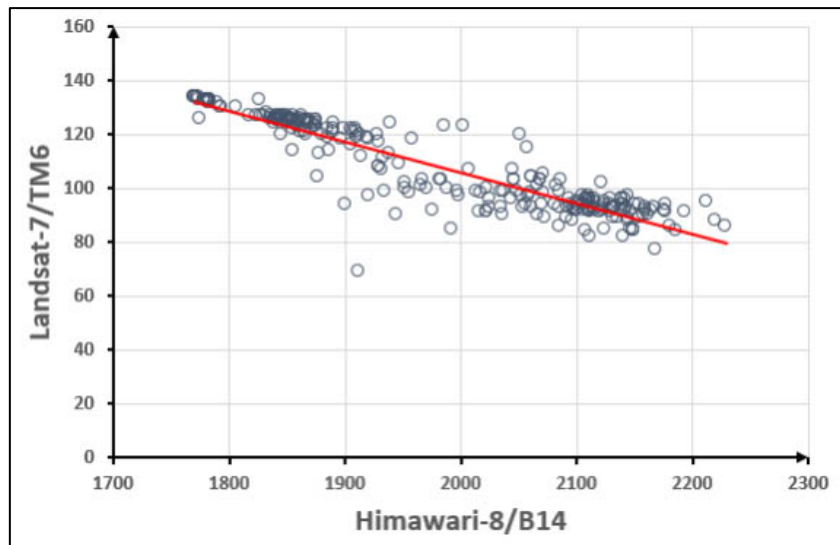


図 2-3 観測値の相関関係

表 2-3 相関係数および回帰係数

	R	a	b
B11	-0.8926	0.7380	1.2892
B12	-0.8899	0.3319	1.5836
B13	-0.9069	0.7731	1.8540
B14	-0.8978	0.6988	2.2312
B15	-0.8896	0.4772	3.1766
B16	-0.8626	0.1920	3.4919

図 2-3 は「ひまわり 8 号」バンド 14 と Landsat-7/バンド 6 の観測値の分布図で、放射輝度に変換後両者の回帰分析を行った。その結果、表 2-3 に示す 1 次回帰係数 (a, b) が得られた。Landsat-7/バンド 6 の観測波長帯域は「ひまわり 8 号」のバンド 14 および 15 の波長帯に相当する。ゲイン値 (a) が 0.6988, 0.4772 とおよそ 1/2 になっている。これは、「ひまわり 8 号」の観測する放射輝度が Landsat-7 の観測値のおよそ半分であることを示している。その主な原因として、衛星の観測位置が異なることによる影響が大きいと考えられる。Landsat-7 は、高度約 700km の極軌道に位置しており、ほぼ直下を観測していることから大気の影響は大気層の厚さ、すなわち大気を透過する距離で説明できると考えられる。一方の「ひまわり 8 号」は赤道上空約 36,000km の静止軌道にあり、観測時の大気を透過する距離は大きく、その影響からこのような数値になったものと推察できる。

対象領域における「ひまわり 8 号」の観測角は約  $40^\circ$  である。Landsat-7 に影響する大気を透過する距離を 1.0 とし、「ひまわり 8 号」に影響する大気を透過する距離を入射角の  $\cos$  に反比例すると仮定すれば、以下の式が立てられる。

$$1/\cos 40^\circ = 1.32 \quad \text{となる。}$$

また、斜め方向への放射量の減衰を入射角の  $\cos$  に比例すると仮定すれば、

$$\cos 40^\circ = 0.76$$

であり、これら 2 つの要因による減衰の影響は、

$$(1/1.32) \times 0.76 = 0.57$$

となり、ゲイン値が小さい理由の一つと考えられる。

## (2) 地球表面温度の日変化

「ひまわり 8 号」は日本付近の特定領域を 2 分半毎に観測することが可能である。0 時から 24 時までの地球表面温度の変化を評価するため、各時間毎の地球表面温度分布画像を比較した。図 2-4 は、8 時から 18 時までの 2 時間毎の「ひまわり 8 号」観測画像である。太陽が昇るにつれ地表面温度が上昇し南中以降は下降する様子が、また海面温度がほとんど変化しない様子が、それぞれ明瞭に現れている。

図 2-5 に可視(バンド 2, 3)、近赤外(バンド 4)データによりカラー合成した画像と、クラスタリング処理(K-means 法)による教師なし土地被覆分類を行った結果を示す。バンド 1, バンド 2 およびバンド 4 の地上分解能は 1km, バンド 3 は 500m であることから、投影変換後は地上分解能 1km を基準とした。両画像と地球表面温度分布画像の変化を比較すると、以下の状況が認められる。

- ・森林等の植生域は、温度の上昇が緩やかで、低下も緩やかである。
- ・海域はほとんど変化が見られないが、東京湾では若干の変動が認められる。

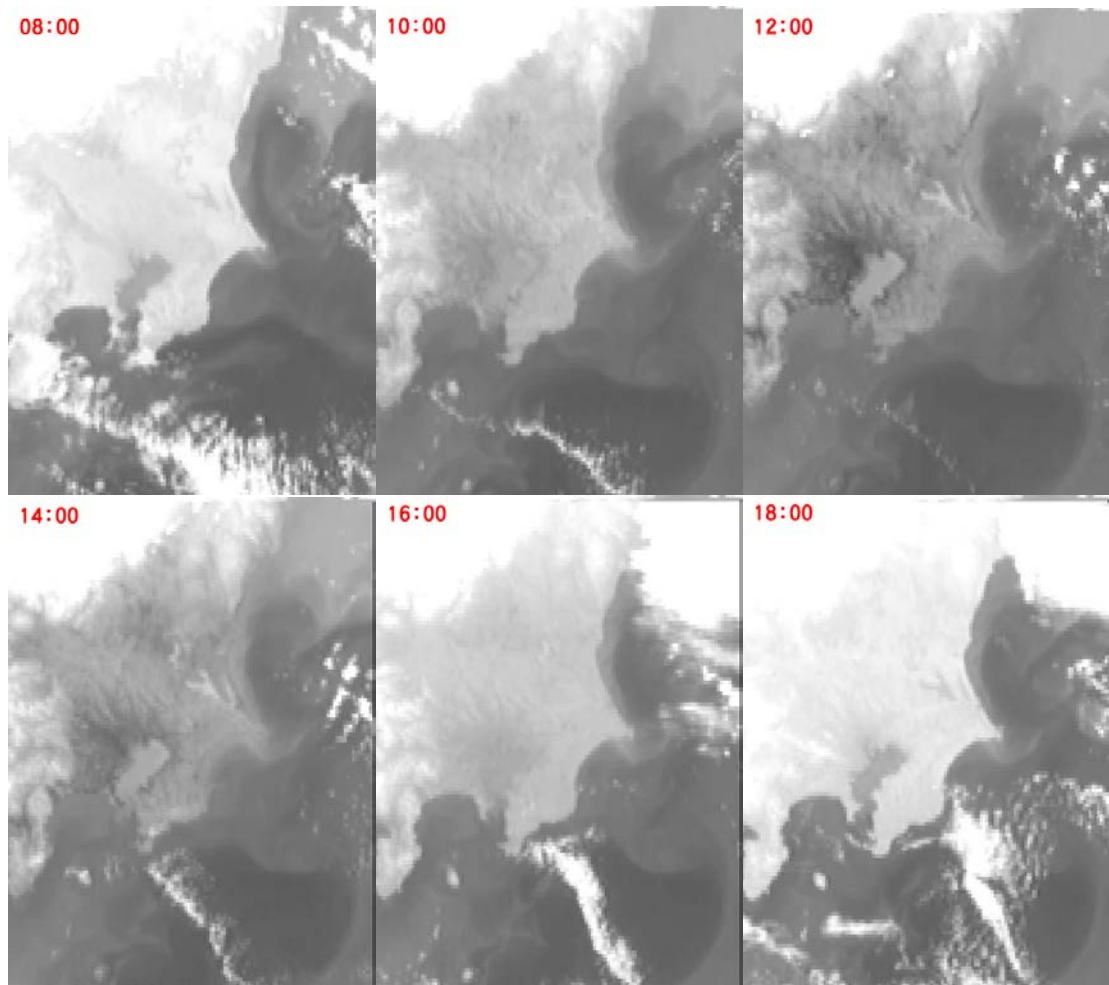


図 2-4 8 時～18 時までの 2 時間毎の地球表面温度

## 2.5 土地被覆と温度の日変化の関係

土地被覆により地球表面の温度の日変化が異なることは知られている。「ひまわり 8 号」と Landsat-7 の可視・近赤外情報から土地被覆分類を行い、「ひまわり 8 号」から得られる土地被覆情報について検証した。その後、代表的な土地被覆分類ごとの地球表面温度の日変化を比較・考察を行った。

### (1) 「ひまわり 8 号」および Landsat-7 の土地被覆分類

Landsat-7/バンド 1～4 を用いて「ひまわり 8 号」と同様にクラスタリング手法による分類処理を行った。図 2-6 は、Landsat-7 の分類結果である。クラス数は「ひまわり 8 号」、Landsat-7 共に 20 とした。地上分解能の違いからクラス数を一致させることは難しいが Landsat-7 のデータを平均化処理し同等な分解能としているため、比較対象可能な分類結果が得られた。

表 2-4 は、分類結果の比較である。両者を比較すると人工構造物、自然な地表面、海表面といった大分類項目はほぼ一致する結果を得ることができた。分

類精度は約 78%，カップ係数は 0.69 となり，両者の分類結果は良好に一致していることを示している。

## (2) 土地被覆分類ごとの地球表面温度の日変化

「ひまわり 8 号」バンド 1~4 から得られた土地被覆情報を (a) 人工的な地表面として「市街地」，「住宅地」，(b) 自然な地表面として「森林」，「農地」，「草地」，および (c) 「水域」を設定して統合した。それぞれの分類項目を代表する雲の無い地点を選定し，地球表面温度の観測値を調査したところ，図 2-7 の様な日変化が抽出された。図の横軸は観測時間で，0 時~18 は 2015 年 1 月 18 日 00 時から 18 時の，19 時~23 は 1 月 17 日 19 時から 23 時の各観測点の「ひまわり 8 号」の観測値である。海表面は太陽光の影響を受けないためグラフは横ばいである。一方，地表面は太陽光の影響によりその上昇，下降の速度，幅が異なっている。

ヒートアイランド現象の発生要因のひとつに都市化があげられる。人工構造物に覆われている割合と日平均気温の間に相関が認められるという報告もあり，図 2-7 の都市化地域と自然地域の間に認められる温度差がその事実を裏付けていると考えられる。「ひまわり 8 号」の連続観測情報からはこの都市化の影響をより詳細に関し，解析できる可能性が指摘できる。

図 2-7 より，海域の観測値 (DN) はおよそ 1,800，人工的土地被覆域は，2,400~1,750，自然的土地被覆域は，2,400~2,000 である。それぞれの値を式(1)により放射輝度 (I) に変換し，同様に提供されている輝度温度 (Tb) へ変換式(2)を利用すると，海域はおよそ 288k (15°C)，人工的土地被覆域は 269.3~289.4k (-3.8~16.2°C)，自然的土地被覆域は，269.34~282.1k (-3.8~9.0°C) となる。大気の上端における観測値ではあるが，人工的土地被覆域は，自然な状態よりも地球表面温度がおよそ 7°C 上昇すると算出された。

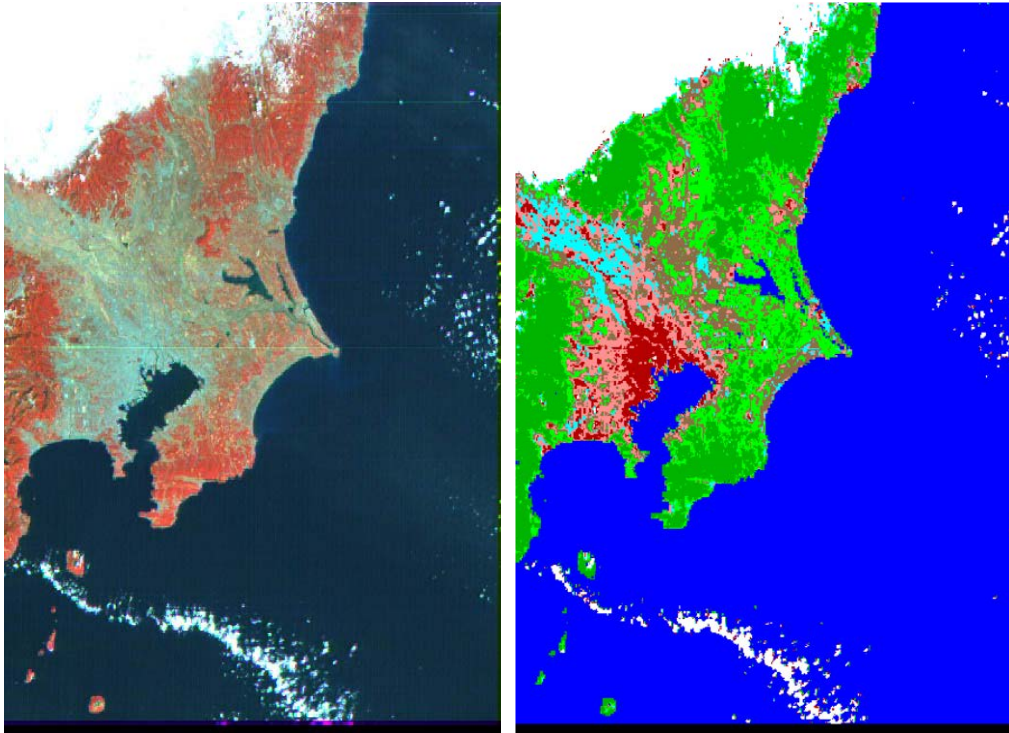


図 2-5 ひまわり 8 号の可視・近赤外合成画像およびクラスタリング分類結果

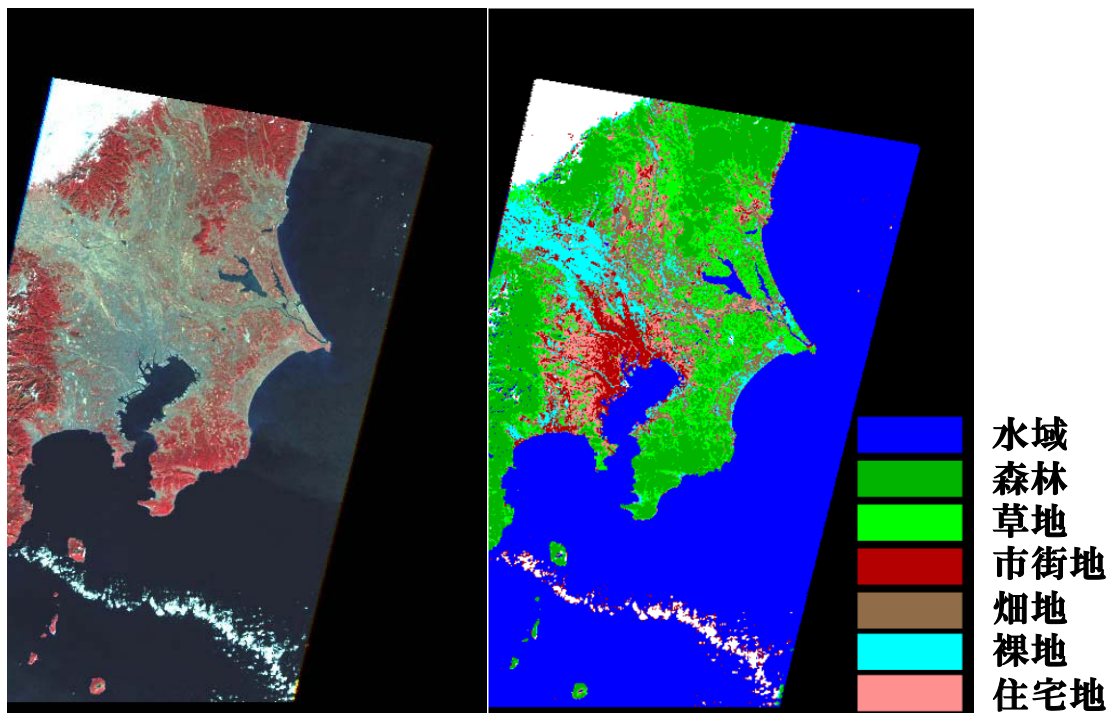


図 2-6 Landsat-7 の可視・近赤外合成画像およびクラスタリング分類結果

表 2-4 分類結果の比較

		Himawari-8							total	User's Accuracy
		sea	forest	grass	city	residence	farm	open		
Landsat-7	sea	48621	402	280	40	53	44	7	49447	98.33
	forest	82	8418	2112	2	10	110	13	10747	78.33
	grass	188	1671	7565	18	294	2177	324	12237	61.82
	city	207	10	53	3186	2074	236	168	5934	53.69
	residence	144	21	916	474	2506	1508	86	5655	44.31
	farm	99	81	2126	56	1114	5204	341	9021	57.69
	open	119	19	208	596	2005	1510	3042	7499	40.57
	total	49460	10622	13260	4372	8056	10789	3981	100540	
Producer's Accuracy		98.30	79.25	57.05	72.87	31.11	48.23	76.41		78.12

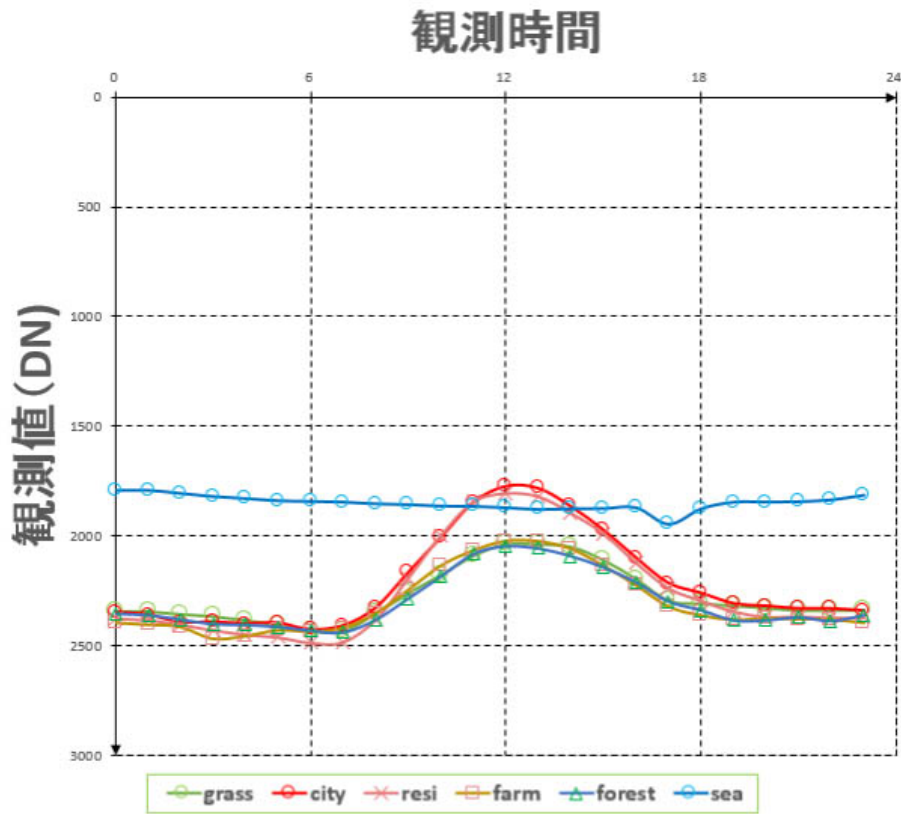


図 2-7 土地被覆項目ごとの地球表面温度の日変化



## 2.6 本章で得られた成果と考察

キャリブレーション等の処理アルゴリズム調整は継続して行われているが、本研究結果からは「ひまわり 8 号」衛星は、期待通りの性能を発揮していることが確認できた。使用した「ひまわり 8 号」データは、定常運用開始前に提供された観測データである。

「ひまわり 8 号」の定常運用が開始されれば季節を通じて日変化を把握することができ、都市の熱環境の実態を地球表面温度の日変化として表すことはできる。従来の観測データは、短時間間隔で詳細な連続観測データが得られなかったため実用的な利用に至らなかった。しかし、高分解能で新たな熱環境に関する観測データは、都市の熱環境問題に対する分析や自然災害に関連する温度変化の監視等、従来では適用できなかった事例への応用が期待できると言える。さらに、土地被覆情報と地球表面温度からヒートアイランド現象・熱環境に関する指標を示すことで、日本のみならず広くアジア諸国での都市の熱環境を比較評価することも可能だと考えられる。

次章では、「ひまわり 8 号」に搭載されているセンサ AHI のうち熱赤外域に相当する波長帯の関連性について Landsat-7 と検討する。

## 第2章<参考文献>

1) 佐々木政幸, 操野年之: 静止地球環境観測衛星ひまわり 8号及び9号について, 日本リモートセンシング学会誌, Vol, 31, pp. 255-257, 2011.

2) ひまわり標準データ利用の手引き, 気象庁

<[http://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/imawari89/space\\_segment/hsd\\_sample/HS\\_D\\_users\\_guide\\_jp\\_v12.pdf](http://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/imawari89/space_segment/hsd_sample/HS_D_users_guide_jp_v12.pdf)>, 2015, 2018.2.9 閲覧

3) 永山他: ヒートアイランド現象の解明・対策に資する土地被覆整備の試み, 日本写真測量学会 18年次学術講演会発表論文集, pp. 11-12, 2005.

4) 天野, 松下: 連続気温観測による地方都市でのヒートアイランド特性, 土木学会中部支部研究発表会, VII-32, pp. 539-540, 2008.

5) 福田, 佐俣, 井上: 横浜市 GIS を用いた地表面被覆マップ作成と気温観測値との関連性, 横浜市環境科学研究所報第 32号, pp. 15-21, 2008

6) 環境省: 平成 11 年度ヒートアイランド現象抑制のための対策手法報告書,

< <https://www.env.go.jp/air/report/h20-05/0.pdf> >, 2018.2.9 閲覧

7) 環境省: 平成 22 年度熱中症とヒートアイランド現象の関係解析調査業務報告書,

< <http://www.env.go.jp/air/report/h23-02/00-0gaiyo.pdf> >, 2018.2.9 閲覧

8) 環境省: <http://www.env.go.jp/air/report/h14-01/index.html>, 2018.2.9 閲覧

## 第3章

### 静止気象衛星による観測データの大气補正

## 第3章 静止気象衛星による観測データの大気補正

### 3.1 概説

前述の通り、2014年10月に打ち上げられた「ひまわり8号」は、従来よりも大幅な観測機能の向上が図られた次世代静止気象衛星である。地球全体を10分、日本付近においては2.5分間隔で観測を行うことが可能となっている。従来の衛星観測ではある特定の時間でしか観測できなかった地表面温度情報が

「ひまわり8号」では連続観測の実現により日変化として捉えることが可能となった。観測値から放射輝度および輝度温度への変換式は、観測データとともに提供されている<sup>2)</sup>。しかし、その観測値は大気上端におけるもので、地表面温度を求めるためには大気の影響を除去する必要がある。地表面温度を推定するため、種々補正手法が開発されている。その中でも代表的な手法として、近接した観測波長帯域の観測値から大気の影響を推定し地表面温度を求める手法(スプリットウィンドウ法)が知られている。第3章では「ひまわり8号」に搭載されているセンサ AHI の熱赤外波長帯に6バンドを有していることから、これらのバンド間の観測値を比較し、大気の影響の違いを確認し、地表面温度推定に有効なバンドについて検討した。

その結果、バンド11, 13, 14, 15は同程度の輝度温度が算出されたがバンド12, バンド16は異なる値が算出された。実測値を使った回帰分析によりスプリットウィンドウ法の有効性、精度等について考察を行った。

### 3.2 「ひまわり8号」/AHI と TERRA/ASTER について

定常運用移行後も観測画像データの処理アルゴリズムの調整は続けられ、打ち上げ当初位置合わせに若干のずれが見られたが定常運用後は安定した精度で処理が行われている<sup>2)</sup>。ひまわり8号に搭載されている AHI は、16のバンドを有しており、その中でもバンド11~16が8~14 $\mu\text{m}$ の観測波長域であり、地球表面からの熱放射を観測している。一方、1998年12月18日に打ち上げられた米国地球観測衛星 TERRA に搭載されたセンサ ASTER は、通商産業省(現在の経済産業省)による地球観測器のことで、8~12 $\mu\text{m}$ の観測波長帯を6バンド有し、地上分解能90mで観測を行っている。ASTERは、15年におよぶ運用と並行して現地調査、同時期観測等による校正実験が積み重ねられ、現在では、地球表面温度に変換した処理レベルのデータも提供されている。

本章では、「ひまわり8号」の観測値より輝度温度を算出し、ほぼ同時刻に観測された ASTER による地表面温度との比較を行った。さらに簡単な大気補正法として知られるスプリットウィンドウ法<sup>4)</sup>, <sup>5)</sup>の適用について検証を行い、

ASTER データを参照して有効なバンドと係数について検討を行った。

### 3.3 「ひまわり 8 号」/AHI

ひまわり 8 号に搭載されているセンサ AHI は、従来機である「ひまわり 6・7 号」に搭載されているセンサと比較して、以下の点において機能が向上している。

#### 1) 観測バンド数の増加：

可視、近赤外域は 1 から 4 バンドに増加，中間赤外域は，0 から 6 バンドに，熱赤外域は 2 から 6 バンドにそれぞれ増加している。

#### 2) 空間分解能の向上：

可視、近赤外域は 1 および 0.5km になり，赤外域は 2km にそれぞれ向上した。

#### 3) 観測間隔の短縮：

全球観測は 30 分から 10 分間隔，日本付近等の特定領域は 2.5 分間隔となり，観測頻度が向上した。

また，青バンドが加わり，赤バンドの分解能が 0.5km に向上しているため，従来機では見られなかった詳細なトゥルーカラー合成 (RGB=バンド 321，図 3-1 左) やフォールスカラー合成 (RGB=バンド 432，図 3-1 右) が可能となった。熱赤外バンドの分解能は 2km であるが同時観測されている可視，近赤外データにより地球表面の状態が確認可能である。バンド 11~16 が 8~14  $\mu\text{m}$  波長帯に当たるが，バンド 12 とバンド 16 は  $\text{SO}_2$ ， $\text{CO}_2$  の吸収帯を含んでいる。

2015 年 12 月 4 日 10 時 30 分に観測された「ひまわり 8 号」画像を同時に配信される位置情報を元に地図投影変換を行い，緯度経度座標に幾何補正した。北緯  $35^\circ 20'$  から  $36^\circ$ ，東経  $139^\circ 30' \sim 141^\circ$  の領域のフォールスカラー合成画像とバンド 14 (米国地球観測衛星 Landsat が観測する熱バンドと同じ観測波長帯域) 画像を図 3-1 に示す。

### 3.4 TERRA/ASTER

TERRA は 1999 年 12 月 18 日に打ち上げられた NASA の宇宙計画「地球観測システム (EOS-Earth Observation System)」で開発された最初の衛星である。国際協力のもと日本から通商産業省 (現産業省) による資源探査観測システムとしてセンサ ASTER が開発され搭載された。ASTER は高性能光学センサで以下の様に可視から熱赤外域まで幅広い観測波長帯を有し，地球を構成する地圏，水圏，雪氷圏，生物圏，大気圏やそれらの相互関係の研究に寄与することを目的

としている<sup>8)</sup>。

1) 可視・近赤外域

可視近赤外放射計(VNIR)により、可視域2バンド、近赤外域1バンドおよび後方視近赤外域1バンドを空間分解能15mで観測する。

2) 短波長赤外域

短波長赤外放射計(SWIR)により、1.6~2.4 $\mu$ 帯域を6バンド、地上分解能30mで観測する。

3) 熱赤外域

熱赤外放射計(TIR)により、8~12 $\mu$ 帯域を5バンド、地上分解能90mで観測する。

2015年12月4日10時30分に観測されたデータから地表面温度情報(処理レベル2B03)を入手し、解析を行った。このプロダクトはTIR放射計によって取得した熱赤外5バンドデータに大気補正を行い、求めた地球表面温度からの放射輝度から温度/放射率処理により地表面温度に変換したデータセットである。図3-2にフォールスカラー画像(RGB=バンド321)とAHI幾何補正処理と同じ緯経度座標(図3-3の範囲)に投影変換した熱画像を示す。

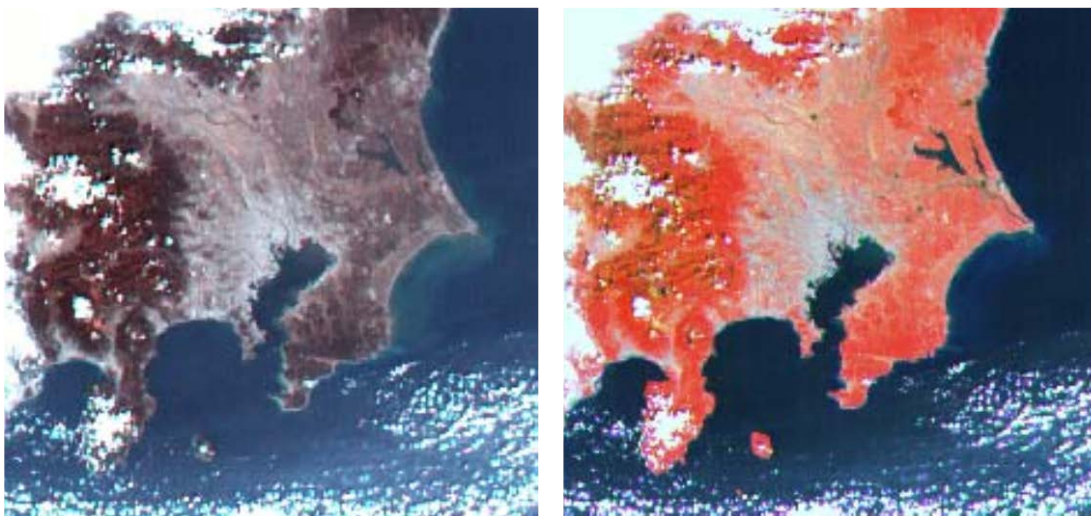


図3-1 ひまわり8号カラー合成画像(2015年5月14日10時30分観測)

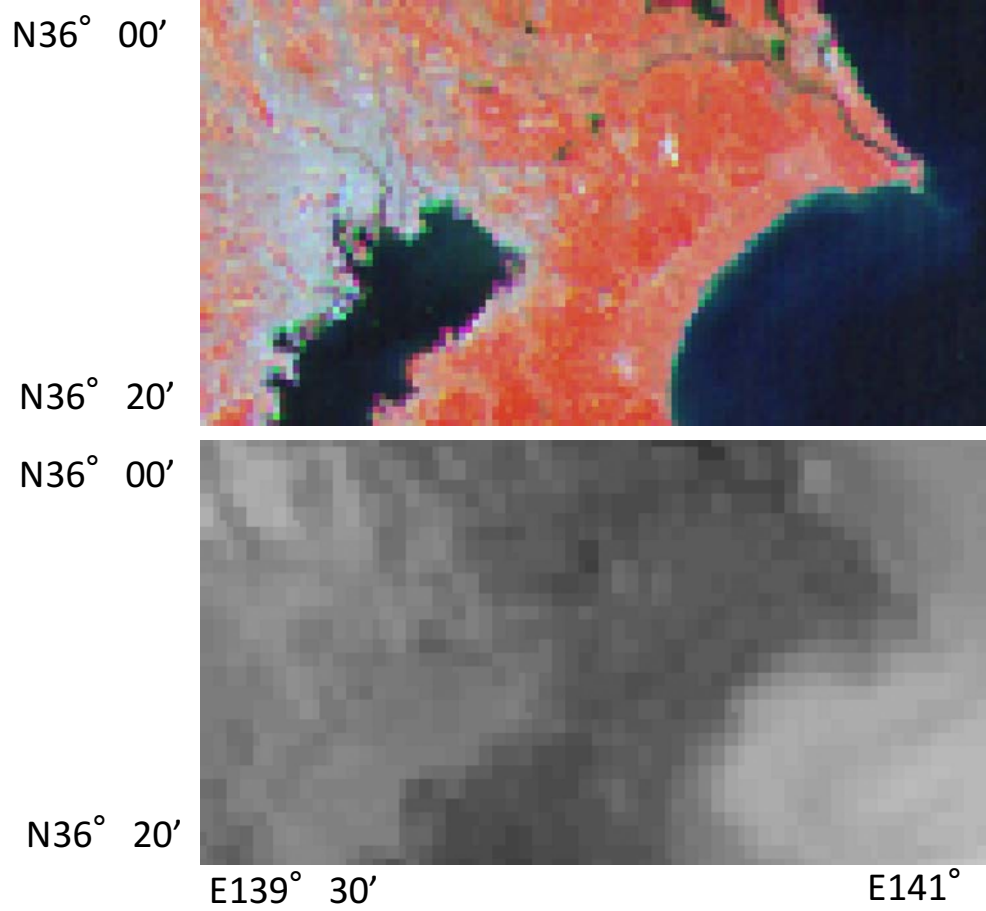


図 3-2 幾何補正後のフォールスカラー及びバンド 14 画像  
(2015 年 5 月 14 日 10 時 30 分観測)

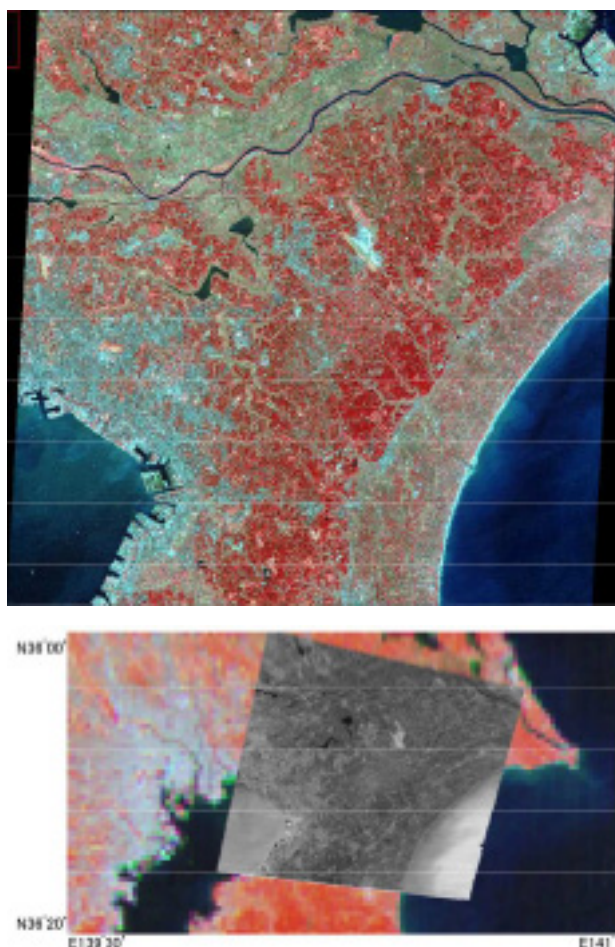


図 3-3 ASTER によるフォールスカラー画像（上）および地表面温度画像（下）

### 3.5. AHI と ASTER の観測値の比較

AHI バンド 11～16 は、地球表面の温度情報を得るために以下の変換式が提供されている<sup>7)</sup>。式(3-1)は観測値から放射輝度への、式(3-2)は放射輝度から輝度温度への変換式である。各補正係数には、表に示す値が提供されている。

$$I = \text{gain} \times \text{DN} \times \text{offset} \quad (3-1)$$

$$T_e(\lambda, I) = \frac{hc}{k\lambda} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{2hc^2}{\lambda^5 I} + 1\right)} \quad (3-2)$$

I : 放射輝度( $\text{w}/\text{m}^2 \cdot \text{str} \cdot \mu\text{m}$ )

DN : 観測値



offset, gain : 提供される係数

Te : 有効温度

$\lambda$  : 中心波長( $\mu\text{m}$ )

h, c, k : 定数

Tb : 輝度温度

$c_0, c_1, c_2$  : 提供される係数

AHI による観測輝度温度を ASTER による地表面温度と比較した<sup>10)</sup>。ASTER データは温度校正されている処理レベル L2B03 データ (0.1 度単位の情報) を使用した。衛星の位置情報を元に位置合わせを行った後、両者の相関係数を調査した。

### 3.5.1 ASTER 分解能 90m の場合

まず、ASTER の分解能 90m と比較した場合の結果を表 3-1 に示す。また、横軸を ASTER データ、縦軸を AHI データとして観測値の分布状況を比較した結果を図 3-5 に示す。

表 3-1 ASTER と AHI の観測輝度温度の関係

Band	R	a	b	mean	st. dev.
11	0.739	0.748	-6.09	17.84	1.508
12	0.737	0.557	21.47	12.18	1.701
13	0.774	0.682	2.3	4.87	1.511
14	0.777	0.619	2.01	6.51	1.567
15	0.71	0.477	-1.43	14.72	1.799
16	0.628	0.309	34.35	20.18	1.941

※ASTER データは元データ

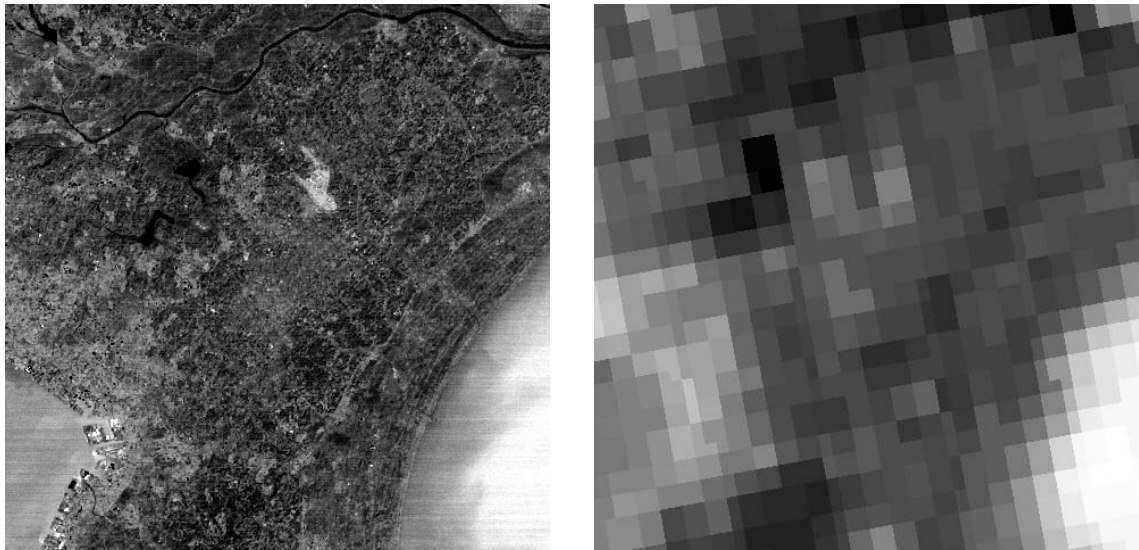


図 3-5 右：ASTER 温度画像 左：AHI バンド 14 温度画像

### 3.5.2 ASTER 分解能 10×10 画素へ平均化した場合

次に，ASTER の分解能を 10×10 画素へ平均化したものと比較した場合の結果を表 3-2 に示す．また，横軸を ASTER データ，縦軸を AHI データとして観測値の分布状況を比較した結果を図 3-6 に示す．

表 3-2 ASTER と AHI の観測輝度温度の関係(10×10)

Band	R	a	b	mean	st. dev.
11	0.863	0.725	-5.72	17.604	1.519
12	0.855	0.549	21.61	12.052	1.705
13	0.901	0.667	2.55	4.826	1.52
14	0.905	0.605	2.25	6.753	1.595
15	0.83	0.461	-1.17	14.559	1.805
16	0.744	0.291	34.63	19.777	1.945

※ASTER データは，10×10 の平均化

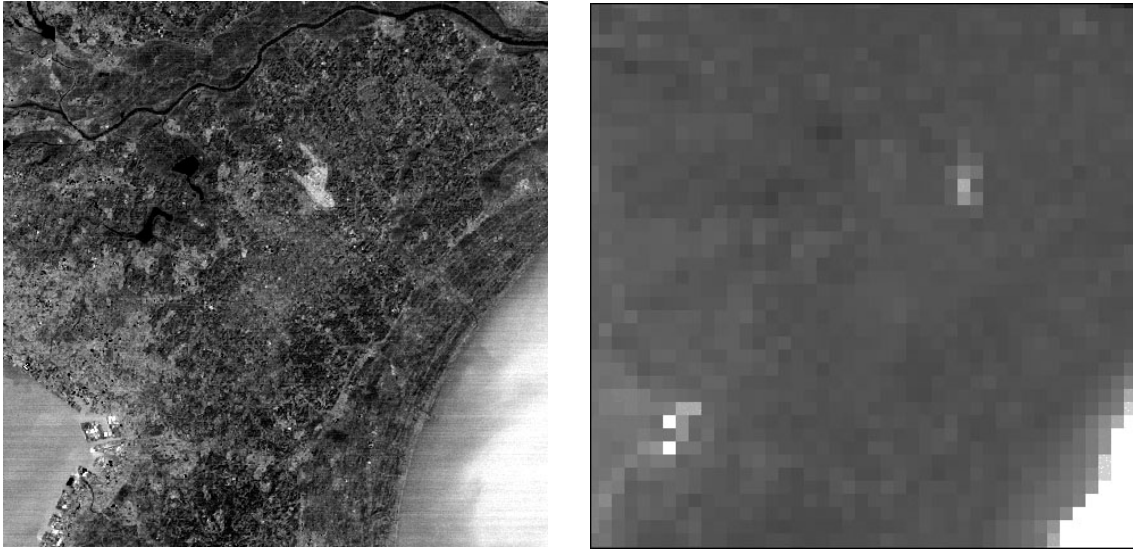


図 3-6 右：ASTER 温度画像 左：AHI バンド 14 温度画像

### 3.5.3 ASTER 分解能 20×20 画素へ平均化した場合

最後に，ASTER の分解能を 20×20 画素へ平均化したものと比較した場合の結果を表 3-3 に示す．また，横軸を ASTER データ，縦軸を AHI データとして観測値の分布状況を比較した結果を図 3-7 に示す．

表 3-3 ASTER と AHI の観測輝度温度の関係(20×20)

Band	R	a	b	mean	st. dev.
11	0.89	0.71	-5.45	17.44	1.53
12	0.88	0.64	21.68	11.99	1.71
13	0.93	0.66	2.70	4.80	1.53
14	0.93	0.60	2.38	6.72	1.60
15	0.86	0.45	-1.00	14.46	1.81
16	0.78	0.28	34.86	19.46	1.95

※ASTER データは，20×20 の平均化

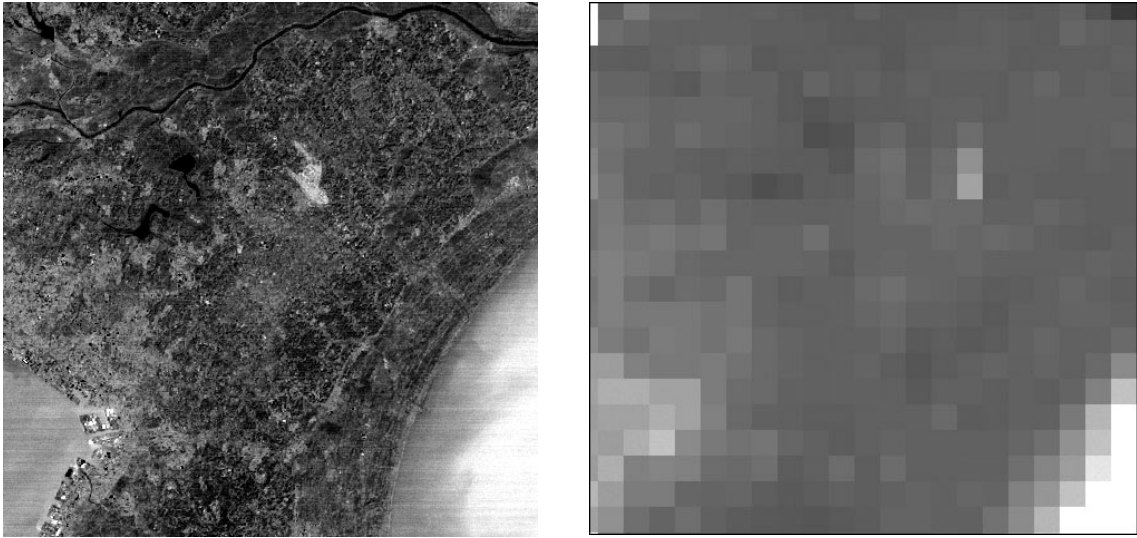


図 3-7 右：ASTER 温度画像 左：AHI バンド 14 温度画像

各バンドの観測輝度温度と ASTER 地表面温度データの相関係数は、0.628～0.777であった。これは、広域を対象としていることおよび地上分解能(AHIは2km, ASTERは90m)の差が大きいこと等が原因だと考えられる。

分解能を調整(10×10画素および20×20画素の平均化により地上分解能を約1kmおよび2kmとした)すると相関係数は、0.744～0.905, 0.778～0.931に達していることから相関が認められる。表に示しているa, b, はASTERデータからAHIデータへの回帰式の傾きおよび切片である。傾きaが0.278～0.748であり, AHIの方が低く観測されている。また, 切片bが21.47～34.86と大きいバンド12, 16は, 観測波長帯域にSO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>の吸収帯が含まれているためその影響がオフセット値として表れるものと思われる。残差の平均値(表中のmean)および標準偏差(表中のst. dev.)から, 対象の領域におけるバンドの補正地表面温度は, 5℃～20°程度低くなっていることが確認できる。

以下(図3-8～図3-13)に, ASTERと各バンドにおける観測輝度温度の分布状況を示す。

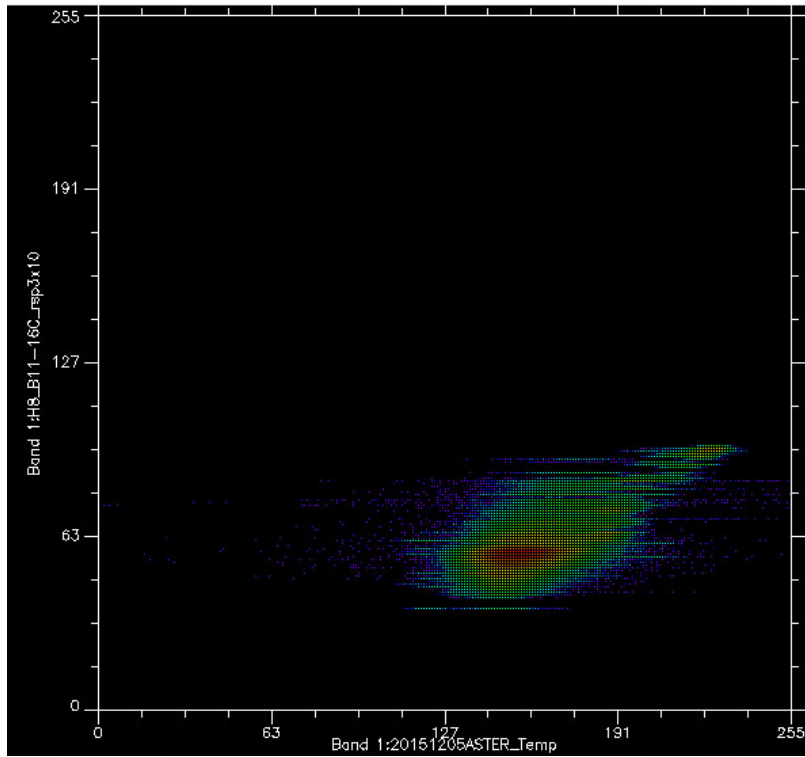


図 3-8 ASTER と AHI Band11 の観測輝度の関係

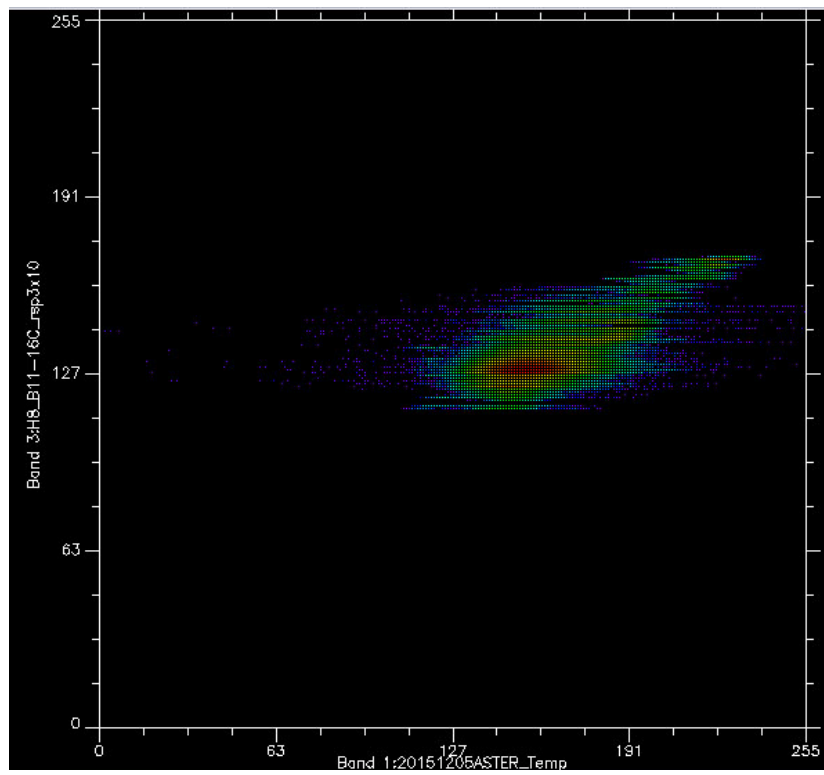


図 3-9 ASTER と AHI Band12 の観測輝度の関係

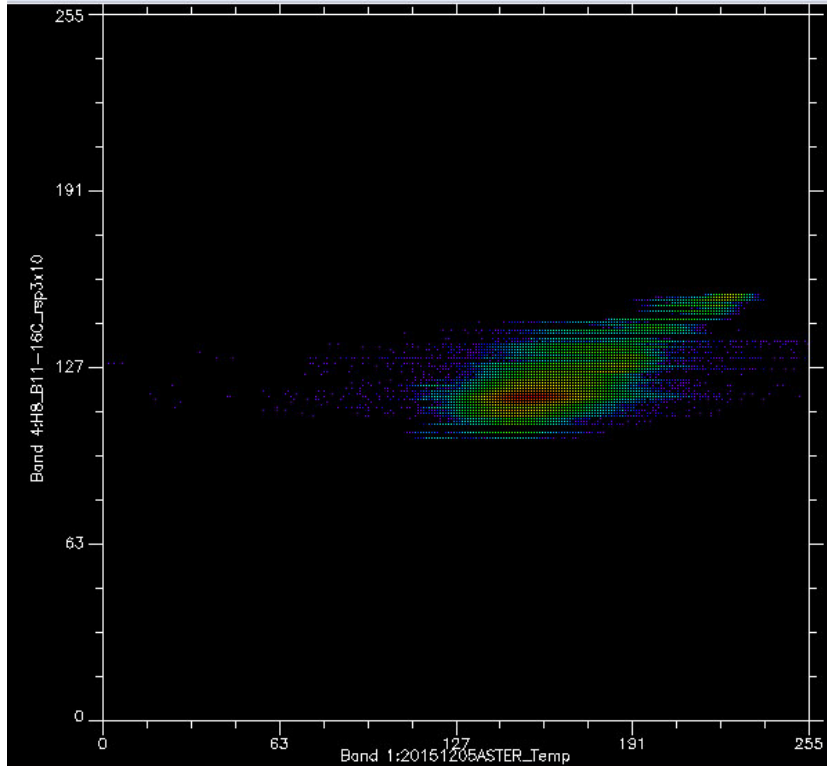


図 3-10 ASTER と AHI Band113 の観測輝度の関係

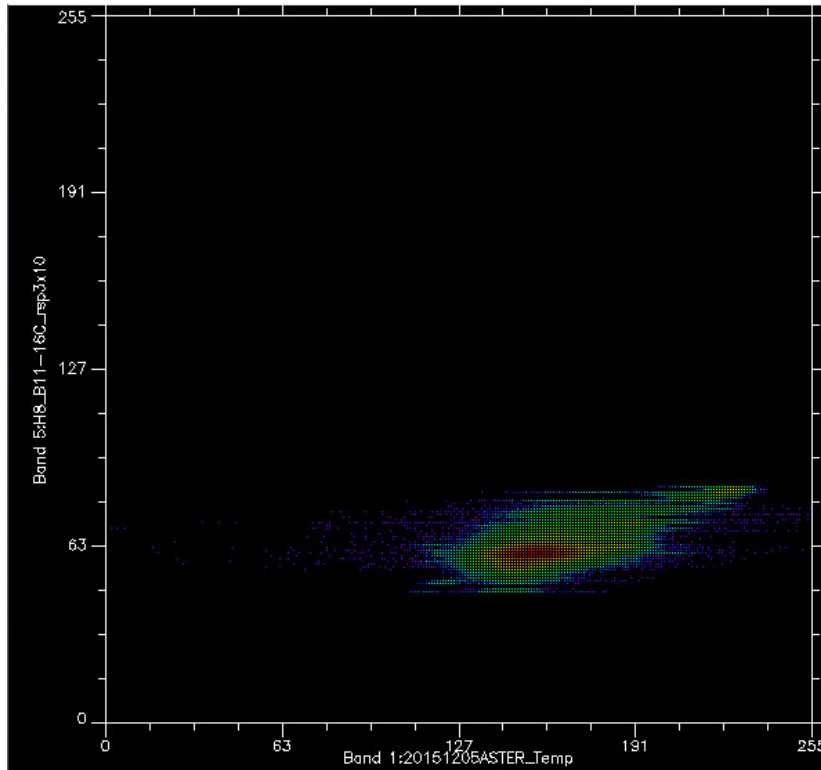


図 3-11 ASTER と AHI Band114 の観測輝度の関係

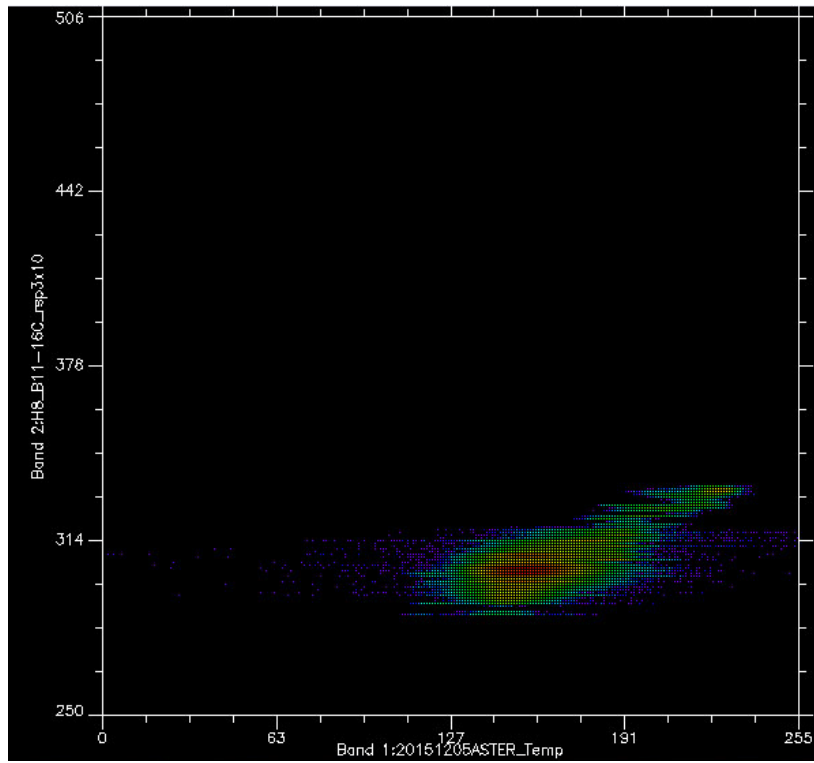


図 3-12 ASTER と AHI Band115 の観測輝度の関係

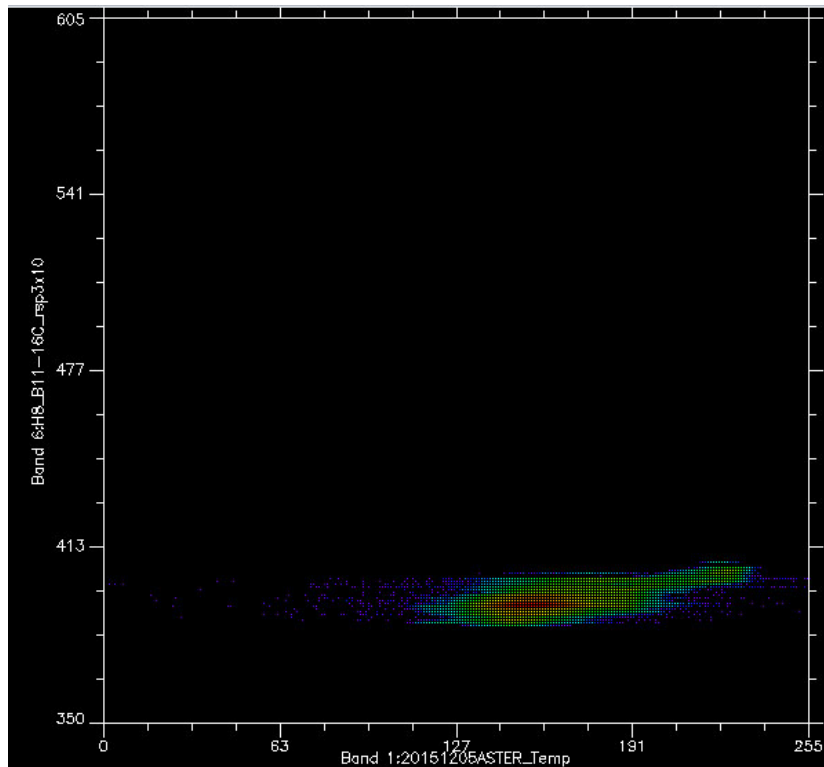


図 3-13 ASTER と AHI Band116 の観測輝度の関係

### 3.6 スプリットウィンドウ法による補正

各バンドで観測値が異なるのは大気の影響が波長帯により異なるためである。つまり、バンド間に現れる差異が大気の影響であり、これを利用した大気補正方法がスプリットウィンドウ法として知られている。以下に補正式(3-3)を示す。

$$T_s = T_{bi} + (T_{bi} - T_{bj}) \times \alpha \quad (3-3)$$

$T_s$  : 地球表面温度(ASTER)

$T_{bi}$  : AHI バンド  $i$  による観測輝度温度

$T_{bj}$  : AHI バンド  $j$  による観測輝度温度

$\alpha$  : 補正係数

ここで、 $T_s$  は ASTER データによる  $10 \times 10$  画素地表面温度の平均値、 $T_{bj}$  はバンド  $i, j$  による観測輝度温度、 $\alpha$  は補正係数である。放射率の異なる対象物が入り組んでいる陸域であるが、分解能が  $2\text{km}$  であることから海域同様に一律の放射率と見なし、本手法を利用した。領域を対象として  $T_s$  を ASTER による地表面温度データ、AHI のバンド  $i, j$  による観測輝度温度を  $T_{bi}, T_{bj}$  として最小二乗法により求めた補正係数  $\alpha$  を表 3-4 に示す。



表 3-4 スプリットウィンドウ法の補正係数

	band11	band12	band13	band14	band15	band16
band11	-	0.417247	1.395555	1.69388	7.560946	0.306322
band12	0.582753	-	0.831587	0.772292	0.588095	-1.61323
band13	-0.39555	0.168413	-	-2.19614	-0.41263	0.110815
band14	-0.69939	0.227708	3.196143	-	0.153642	0.153642
band15	-6.56095	0.411905	1.412629	1.735227	-	0.301424
band16	0.693678	2.613233	0.889185	0.846358	0.698576	-

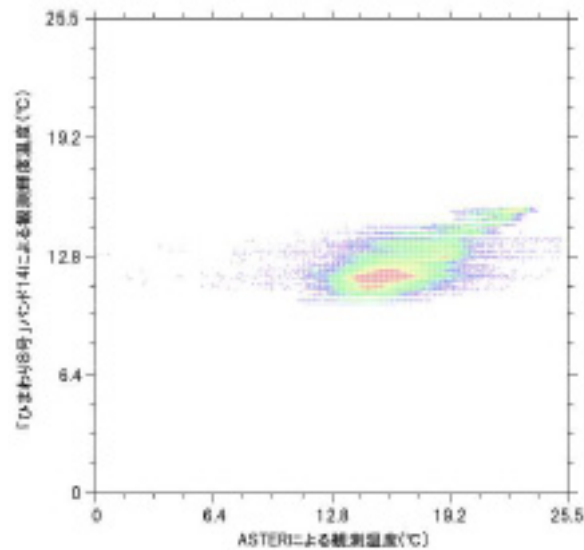


図 3-14 AHI と ASTER による観測値の比較

### 3.7 本章で得られた成果と考察

求めた補正係数  $\alpha$  を使用して、バンド 11~16 から任意の二つのバンドによる補正処理を行い ASTER データと比較した。その結果を相関係数、残差の絶対値の平均と標準偏差として表に示す。最も良好な結果は、バンド 14 と 15 の組み合わせで得られ、相関係数は、0.789、残差平均は 1.01、標準偏差は 0.8 であった。

また、大気補正処理した結果を図に示す。どの組み合わせも 0.7~0.8 の相関を示し、残差の絶対値の平均は概ね  $1^{\circ}$ 、標準偏差 0.9 であった。このことから二つのバンドを利用したスプリットウィンドウ法により単バンドでは困難であった絶対的溫度の推定が可能となり、地表面溫度の推定精度が向上することを確認できた。

本研究で使用した ASTER データの推定精度は  $1.5^{\circ}\text{C}$  程度と考えられる。地域や季節等により最良の組み合わせや係数の傾向は異なるものと思われるが、事例検証を重ね、共通して良好な結果を導く組み合わせ及び補正係数の検証が引き続き必要である。

本研究結果より、使用したデータの観測時間帯、すなわち午前 10 時~11 時頃のデータより処理した地表面溫度は信頼性が高く広域の検証にも利用可能と思われる。

### 第3章<参考文献>

- 1) 国土交通省気象庁：静止気象衛星「ひまわり 8 号」の運用開始日について (H27. 5. 27), 気象衛星センターお知らせ,  
<[http://www.jma.go.jp/jma/press/1505/27a/20150527\\_himawari8\\_operation\\_schedule\\_press.html](http://www.jma.go.jp/jma/press/1505/27a/20150527_himawari8_operation_schedule_press.html)>, 2016. 6. 3 閲覧
- 2) 国土交通省気象庁：静止気象衛星「ひまわり 8 号」による観測データの品質向上について (H28. 3. 9), 気象衛星センターお知らせ,  
<[http://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/operation8/eventlog/20160309\\_himawari-8\\_event\\_ja.pdf](http://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/operation8/eventlog/20160309_himawari-8_event_ja.pdf)>, 2016. 6. 3 閲覧
- 3) 国土交通省気象庁：リーフレット新しい静止気象衛星-ひまわり 8, 9 号-,  
<<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/himawari/index.html>>, 2016. 6. 3 閲覧
- 4) 国土交通省：ひまわり標準データ利用の手引き, 気象庁  
<[http://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/imawari89/space\\_segment/hsd\\_sample/HS\\_D\\_users\\_guide\\_jp\\_v12.pdf](http://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/imawari89/space_segment/hsd_sample/HS_D_users_guide_jp_v12.pdf)>, 2015, 2016. 6. 3 閲覧
- 5) 野中, 松永, 沢辺, 森山, 外岡: 地上ターゲットを用いた Terra ASTER と Landsat-7 ETM+ の熱赤外バンドの輝度校正, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 22, No. 1, pp. 62-77, 2002.
- 6) 資源・環境観測解析センター (ERSDAC) : 資源探査用将来型センサ (ASTER),  
<[http://www.jspacesystems.or.jp/project-aster/wp-content/uploads/sites/18/2013/03/138r2aster\\_index.pdf](http://www.jspacesystems.or.jp/project-aster/wp-content/uploads/sites/18/2013/03/138r2aster_index.pdf)>, 2016. 6. 3 閲覧
- 7) Price, C. J. : Land surface temperature measurement from the split window channels of the NOAA 7 Advanced Very High resolution Radiometer, The Journal of Geophysical Research 89, pp. 7231-7237, 1984.
- 8) 松永, 六川, 石井 : スプリットウインドウ法の TIMS データへの応用, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 13, No. 2, pp. 1-13, 1993.
- 9) 9) 資源・環境観測解析センター (ERSDAC) : ASTER リファレンスガイド,  
<<https://unit.aist.go.jp/igg/rs->

rg/ASTERSciWeb\_AIST/jp/documnts/pdf/ASTER\_RefV1. pdf>, 2016. 6. 3 閲覧

10) 内田, 奥山, 岩下, 杉村: ひまわり 8 号/AHI 及び TERRA/ASTER 熱赤外データの比較, 日本リモートセンシング学会第 60 回 (平成 28 年度春季) 学術講演会論文集, pp. 179-180, 2016.

## 第4章

# 静止気象衛星による地表面温度の分布パターンと 日変化

## 第4章 静止気象衛星による地表面温度の分布パターンと日変化

### 4.1 概説

「ひまわり8号」の高頻度観測が実現したことにより、地表面温度の日変化を捉えることが可能になった。ヒートアイランド現象の知見を詳細に把握するため、四季を通じて地表面温度を解析し、その変化を捉え検証する。

前述した通り、近年、環境問題は深刻化しており、その解決に向けた種々の取り組みがなされている。都市化および人口増加によるエネルギー消費量の増加がヒートアイランド現象を引き起こす主要因だと考えられる。ヒートアイランド現象の解明や対策については、既に多くの研究例を見ることができる。他方衛星による地表面温度情報の観測は、広域を継続的に観測する特徴から、その利用および応用について実験や解析が続けられてきた。人工衛星 Aqua と Terra に搭載されている MODIS は、可視から熱赤外に空間分解能 250-1000m の計 36 バンドを持ち、地表面温度を算出するためのアルゴリズムも検証され、温度精度も 1K となっている<sup>1)</sup>。しかしながら、序論でも述べた通り Landsat/TM や Aqua/Terra は極軌道衛星であり、観測データは、昼夜2回しか得られないため詳細な日変化を捉えることは出来なかった。

ヒートアイランド現象の発生要因として挙げられるのは、日中、太陽放射により暖められた道路や建物の壁面は、夕方から夜間にかけて熱を放出し、夜間の気温を増加させている点である<sup>2)</sup>。そこで都市の地表面温度の日変化を調査することで、熱環境の分布を把握することができる。本研究では、熱環境の分布をシミュレーションする一つの方法として、地域傾向面分析を行った。地域傾向面分析(Trend-Surface Analysis)とは、ある特定の地表面現象の空間的な分布数値を規則的に変化する全域部分と不規則的に変化する極地部分とに識別する手法である<sup>2)</sup>。ひまわり8号の時間的分解能が大きく向上したことにより、各時間の地域傾向面分析を行うことで、より詳細に視覚化することができると考え、地表面温度分布の変動を捉えることが可能となり、その特徴を捉えることが可能であると考えられる。

### 4.2 地域傾向面分析による都市の熱環境について

地表面温度の観測を行っている衛星には、第1章でも述べたとおり、極軌道衛星と静止気象衛星がある。前者には地上分解能 1km ほどの NOAA/AVHRR や TERRA/MODIS 等および地上分解能 4km の静止気象衛星「ひまわり6・7号」がある。

いずれも 11~12 $\mu$ m の観測波長帯を有し、それぞれ大気上層における放射輝度を観測している。それぞれの観測値は、輝度温度に変換するための返還式が提供されているが、その値は、大気の影響を受けているため相対的な温度分布としてとらえる必要がある<sup>3)</sup>。

ヒートアイランド現象をより視覚的に捉えるために、年間(四季)を通じて地表面温度の日変化を捉えることが重要である。そこで概説でも述べた通り、春季~冬季にかけて24時間毎の地表面温度を調査し、傾向面分析による解析を行った。本研究では、Landsat/TM等で広く利用されている11 $\mu$ m波長帯に相当しているバンド14の観測データを用いて解析を行い、解析対象地域は、東京の皇居を対象とした約100km四方の領域とする。

なお、本研究で用いた地域傾向面分析(Trend-surface Analysis)の適用範囲は広く、地形・気象・商業活動・人口など幅広く活用されている。具体的には、数値表現された地表の事象(分布数値)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・偶然差異に関連した部分に区別する手法である<sup>2)</sup>。今回、時間分解能が大きく向上したことにより、地表面温度分布の変動を把握することが可能となり、対象領域における温度分布を視覚化することにより、その特徴を捉えられることが可能であると考えられる。

#### 4.3 対象日時および使用データ

まず、2015年5月に観測されたひまわり8号AHI可視バンドによる合成画像(RGB)を図4-1に示す。解析対象データは、24時間ほぼ雲に覆われていない日を条件に以下の日時を選定した。下記に示す、選定した日時において1時間ごとの地表面温度を比較した。

- ・2015年4月26日(00時00分~23時00分)
- ・2015年5月2日(00時00分~23時00分)
- ・2016年4月15日~16日(07時00分~06時00分)
- ・2016年5月4~5日(12時00分~11時00分)
- ・2017年4月13~14日(16時00分~15時00分)

ひまわり8号が観測した熱赤外面像データを経緯度座標に幾何補正したものから、東京を中心として約100km四方の地域を解析対象とした。まず、東京都心を中心とした地表面温度の分布状況を概観すべく、地域傾向面分析を試み

た. 一例で 2015 年 5 月 2 日における 3 次多項式による近似により求められた傾向面を図 4-2 に示す. また使用した 3 次多項式は以下の通りである.

$$Z = \sum a_{i,j} x^i y^j \quad (i+j \leq 3, \quad i=0 \sim 3, \quad j=0 \sim 3)$$

$x = \text{pixel}$

$y = \text{line}$

$a = \text{係数}$

$Z = \text{温度}$

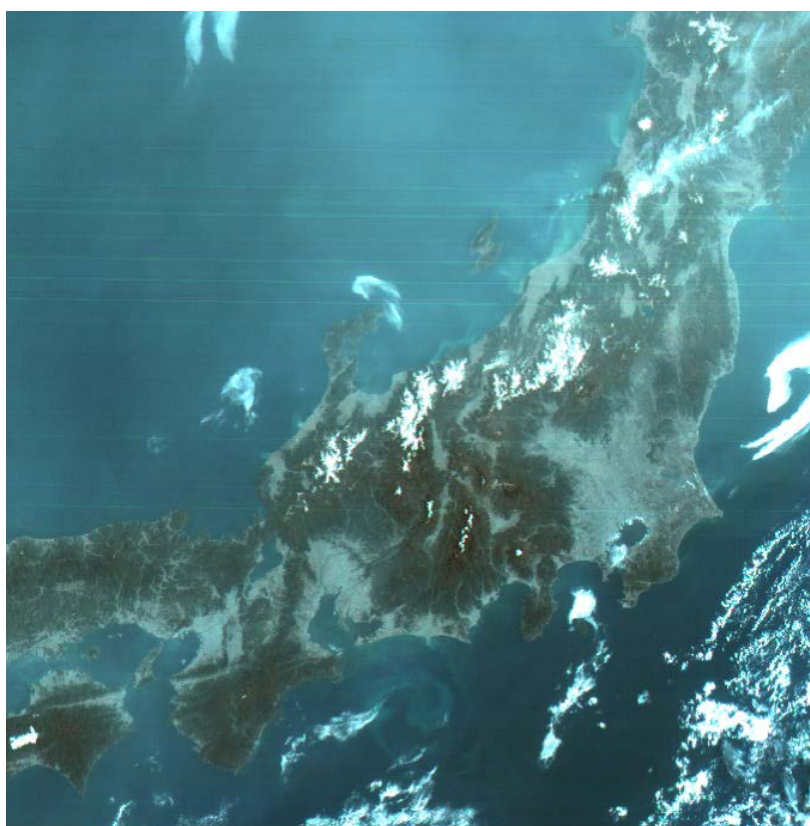


図 4-1 ひまわり 8 号が観測した日本周辺



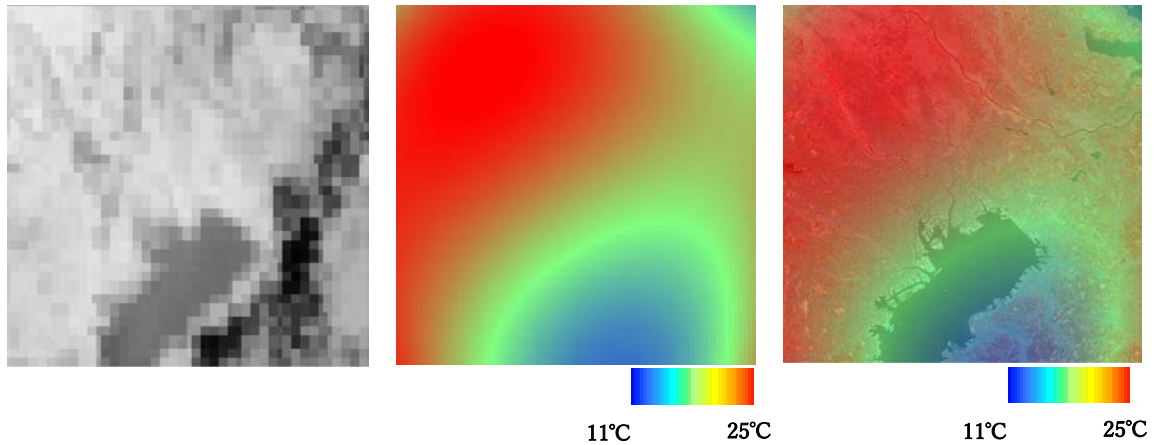


図 4-2 2015 年 5 月 2 日の傾向面分析の結果  
(左：バンド 14 画像，中：傾向面分析結果，右：Landsat 画像との合成)

#### 4.4 対象日の地表面温度の日変化結果

4.3 節で述べたように以下に選定した日時における地表面温度を算出した結果を図 4-3～7 示す。解析対象領域は、緯度経度座標に幾何補正した「ひまわり 8 号」AHI バンド 14 画像から、東京を中心とした約 100km 四方の地域とした。以下に対象毎の地表面温度と傾向面分析の結果を示す。

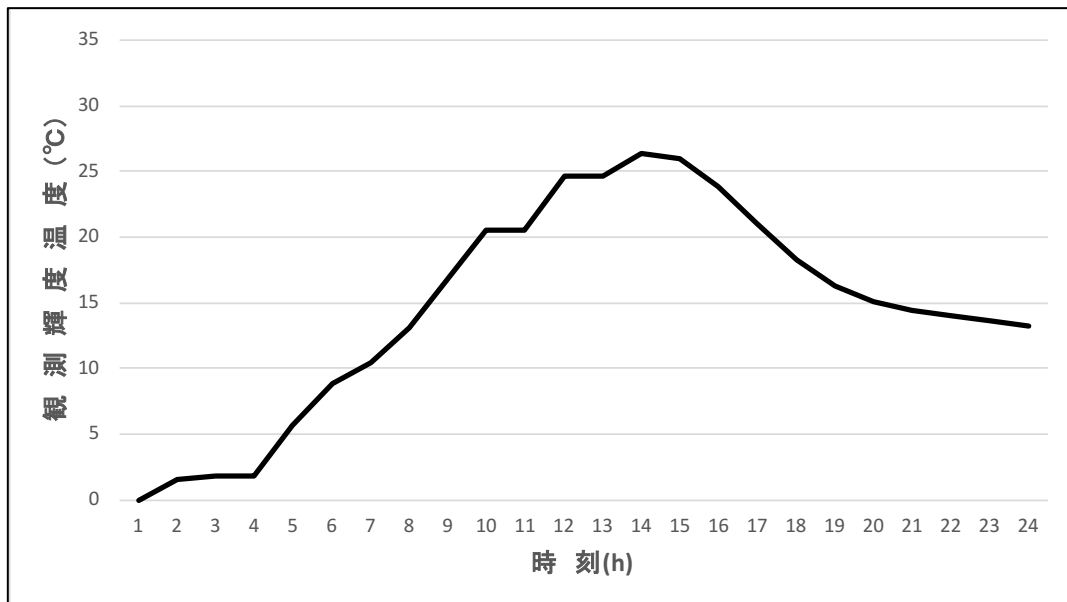


図 4-3 2015 年 4 月 26 日における地表面温度の日変化

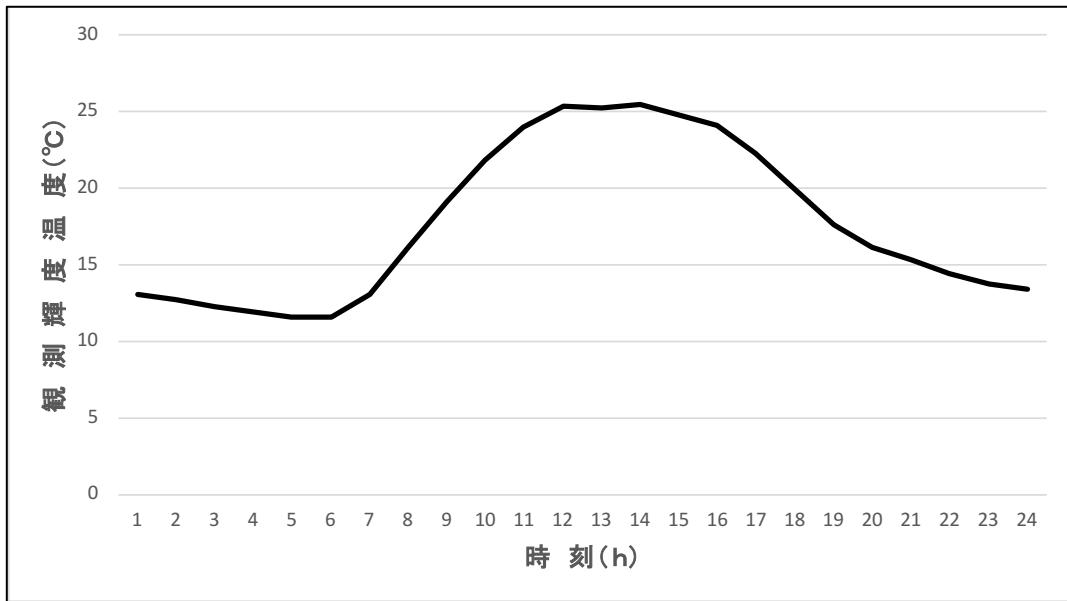


図 4-4 2015 年 5 月 2 日における地表面温度の日変化

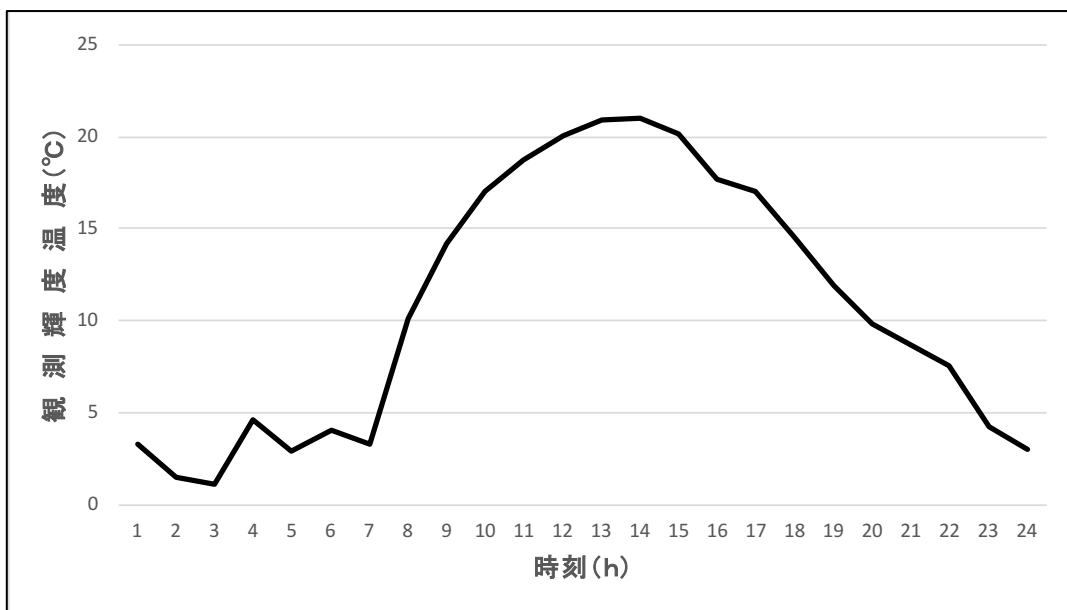


図 4-5 2016 年 4 月 15 日における地表面温度の日変化

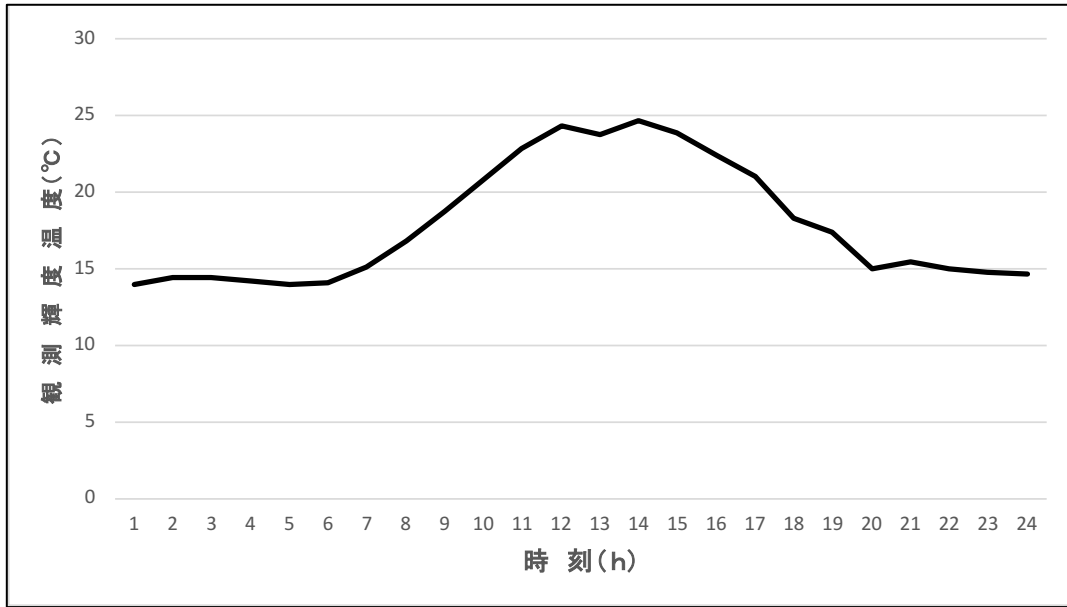


図 4-6 2016 年 5 月 4 日における地表面温度の日変化

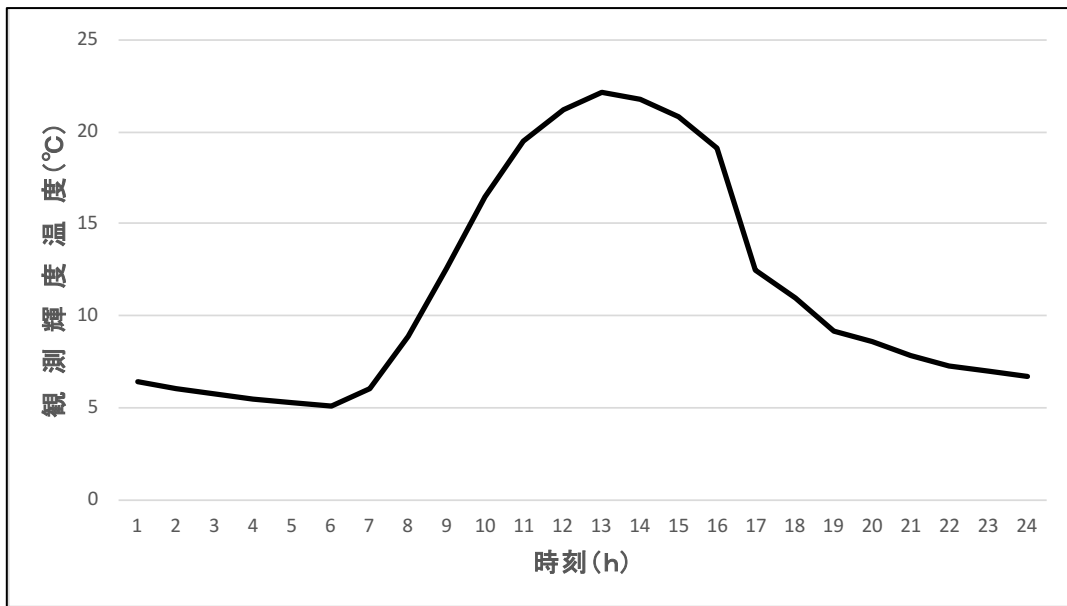


図 4-7 2017 年 4 月 13 日における地表面温度の日変化

2015 年 4 月 26 日，2016 年 4 月 15 日，2016 年 5 月 4 日における地表面温度の日変化結果を見てみると，朝方から日中にかけてばらつきが生じている．気象庁アメダスによる観測結果を参照するとその時間帯において雲の発生が認められ，雲の影響を受けて温度が低く示されているものと考えられる．

2015年5月2日における地表面温度の日変化結果は、雲の影響もなく良好な地表面温度の日変化を捉えられたと考えられる。正確な地表面温度の日変化を得るには、今後は雲の影響を考慮しなければならない課題となる。

#### 4.4.1 2015年4月26日における傾向面分析結果

東京の皇居を中心とする約100km×100kmの領域において、傾向面分析を行った結果を示す。1時間毎(24時間)解析することで、都市部における熱環境分布が視覚的に捉えることが可能であると考えられる。

図4-8～22に朝方、昼間、夜間の地域傾向面分析による結果を示す。

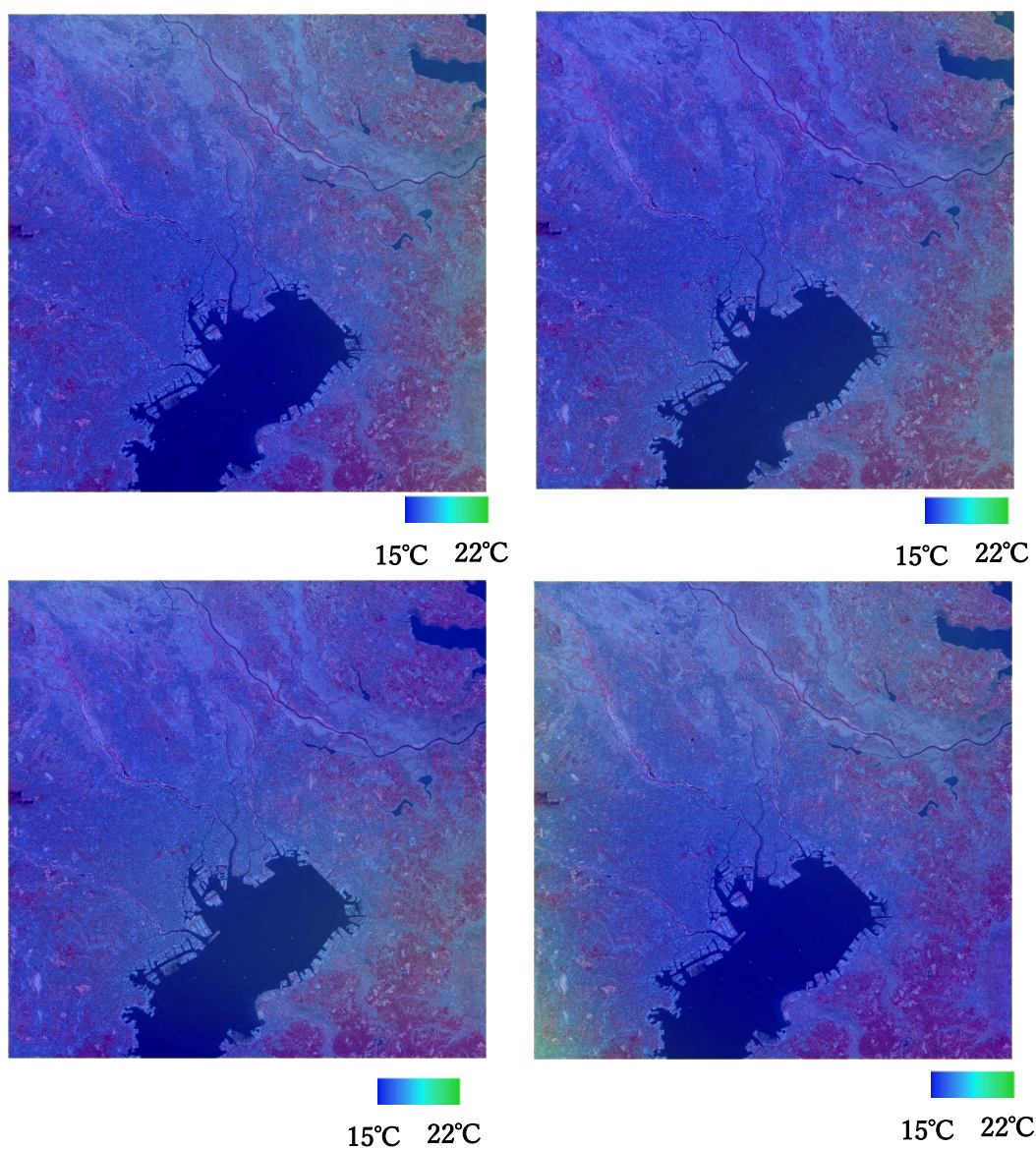


図4-8 2015年4月26日における傾向面分析の結果(1時～4時)

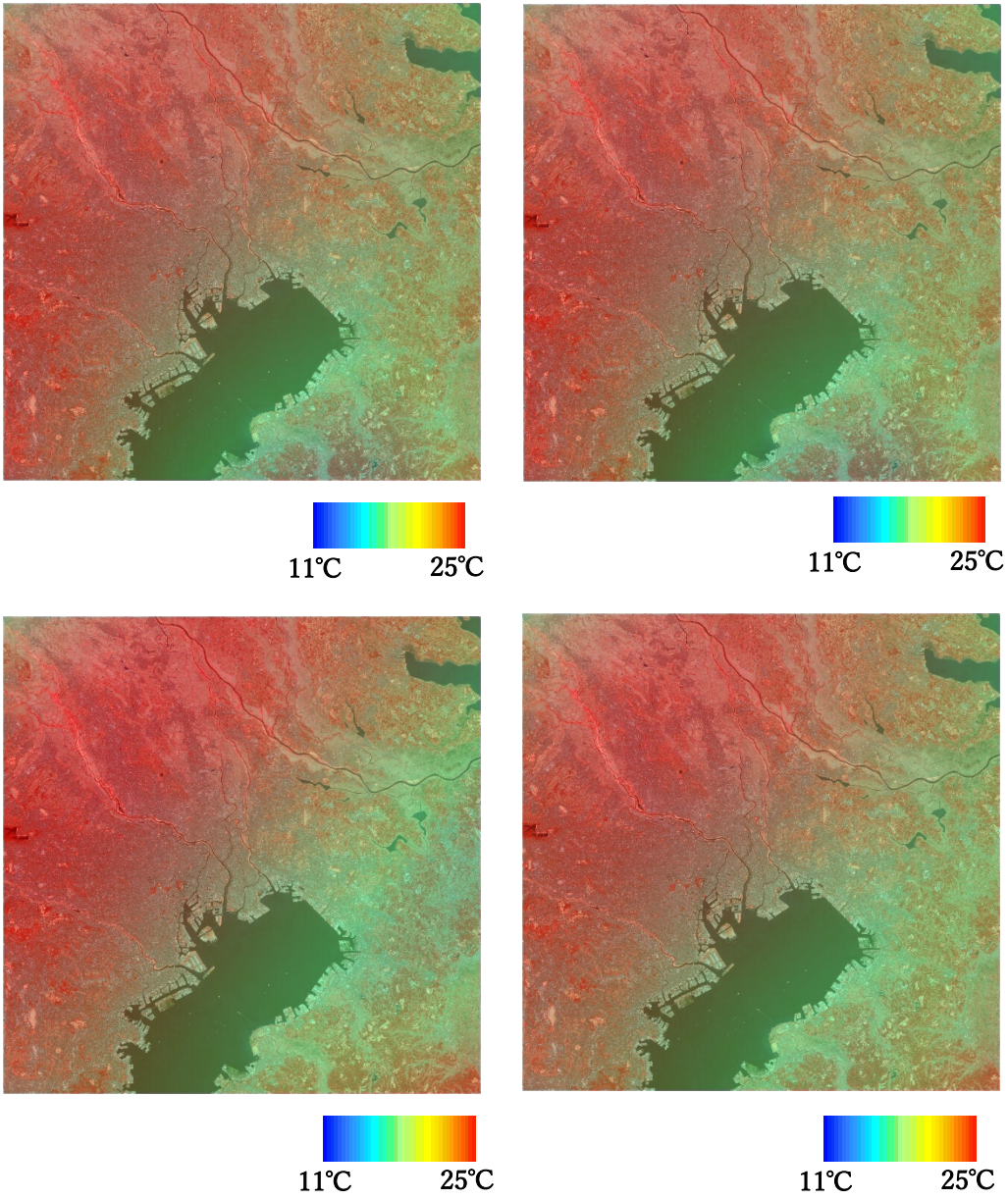
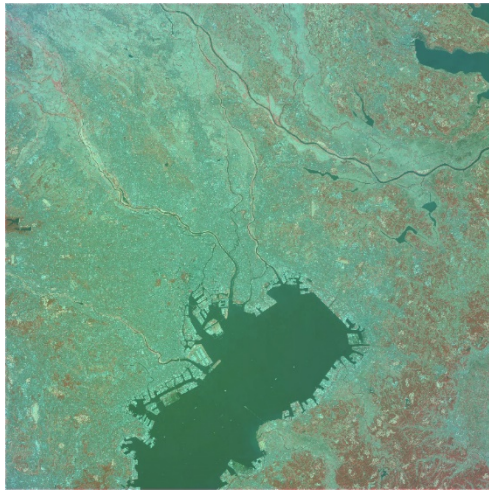
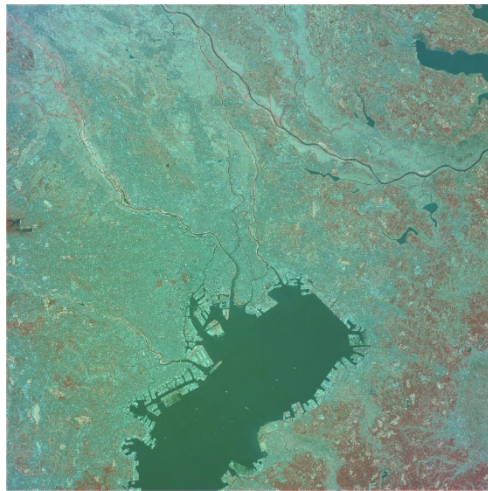


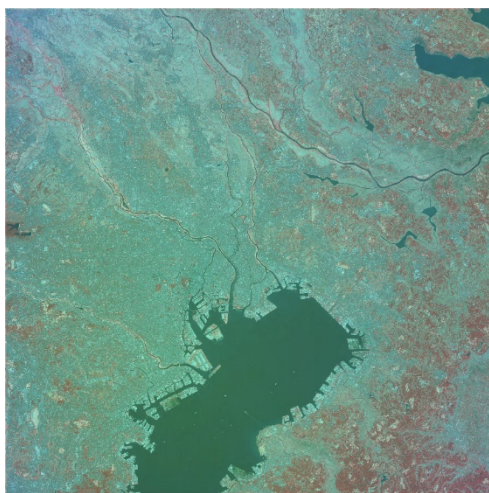
図 4-9 2015 年 4 月 26 日における傾向面分析の結果(11 時～14 時)



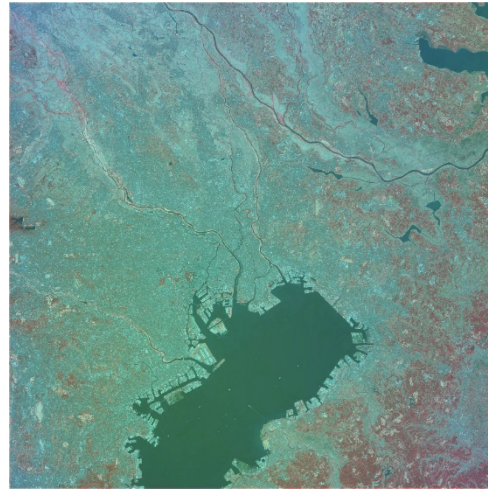
15°C 22°C



15°C 22°C



15°C 22°C



15°C 22°C

図 4-10 2015 年 4 月 26 日における傾向面分析の結果(20 時~23 時)

#### 4.4.2 2015年5月2日における傾向面分析結果

東京の皇居を中心とする約100km×100kmの領域において、傾向面分析を行った結果を示す。朝方、昼間、夜間における時間帯で土地被覆分類ごとによる熱環境分布の変化を視覚的に捉えることが可能である。

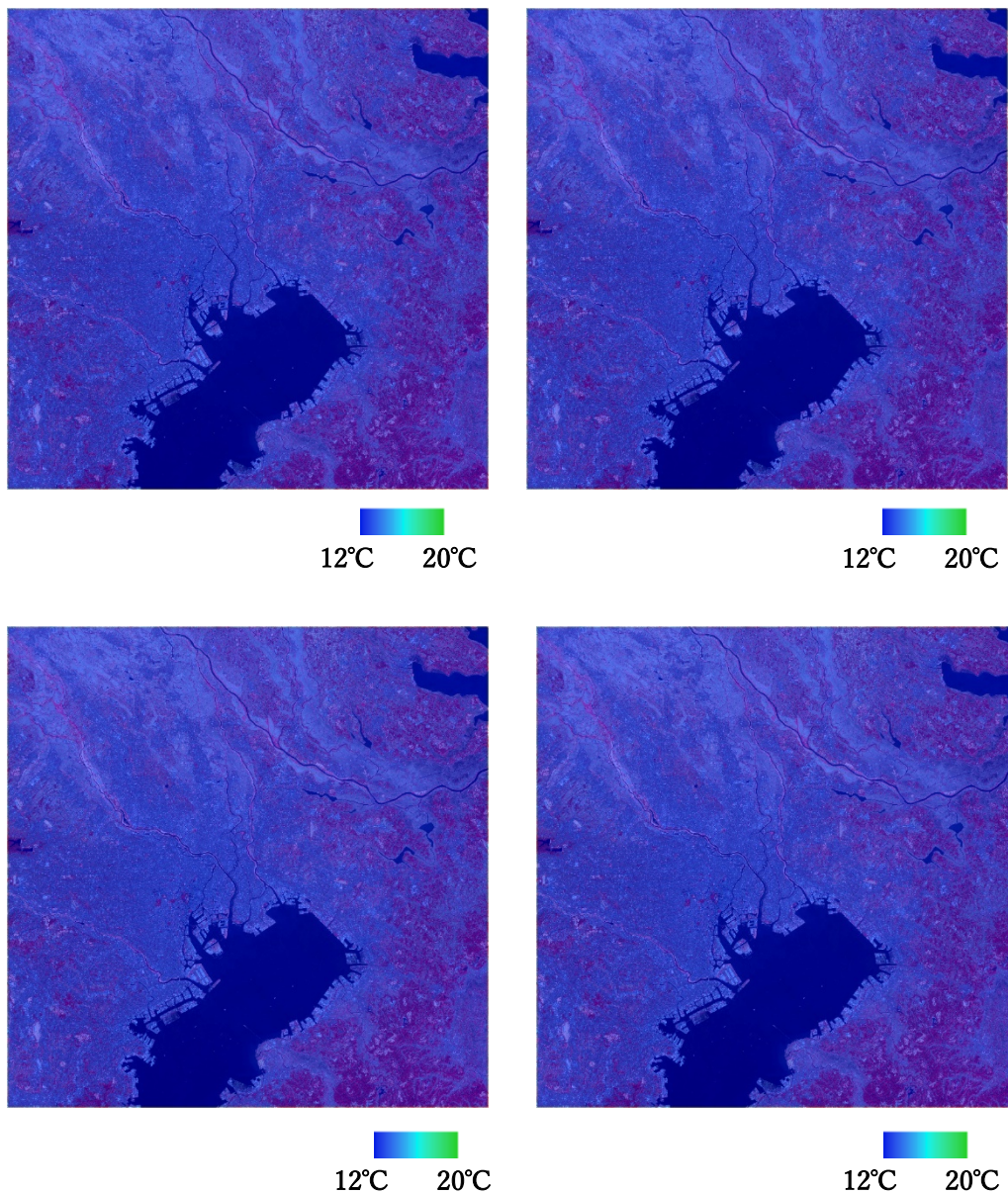


図 4-11 2015年5月2日における傾向面分析の結果(1時～4時)

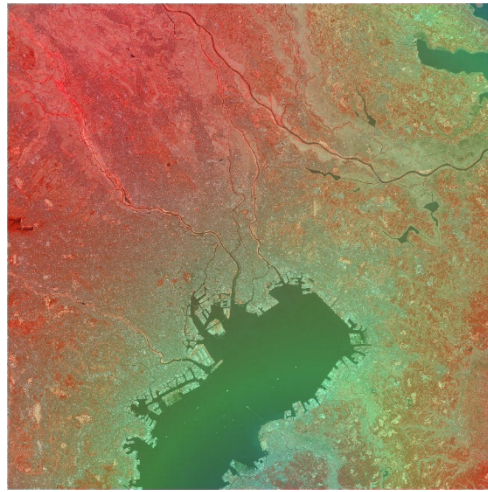
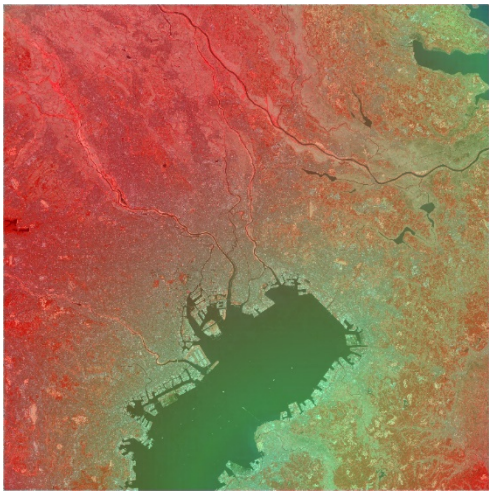
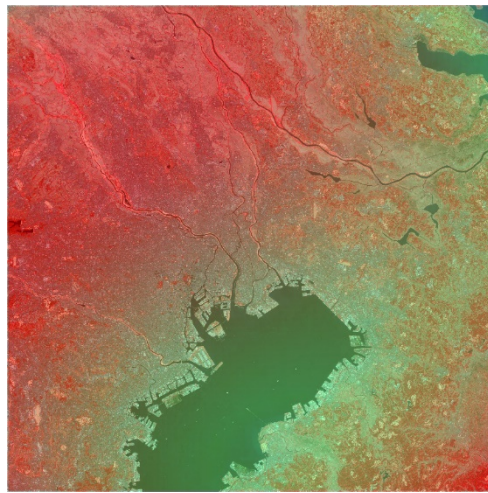
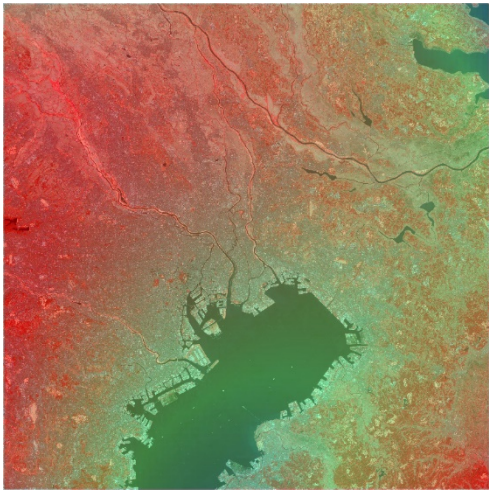
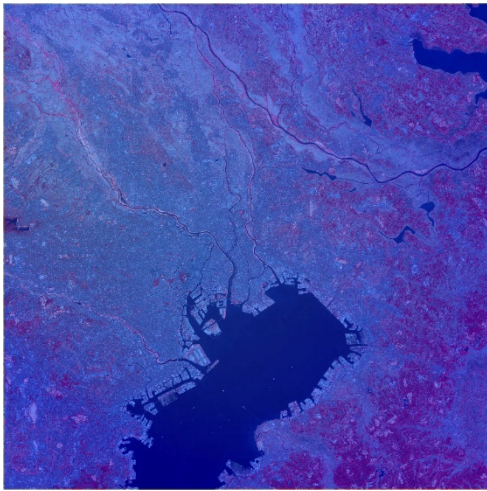
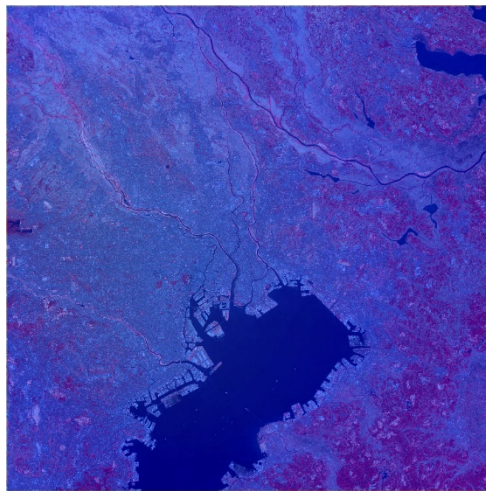


図 4-12 2015 年 5 月 2 日における傾向面分析の結果(11 時~14 時)

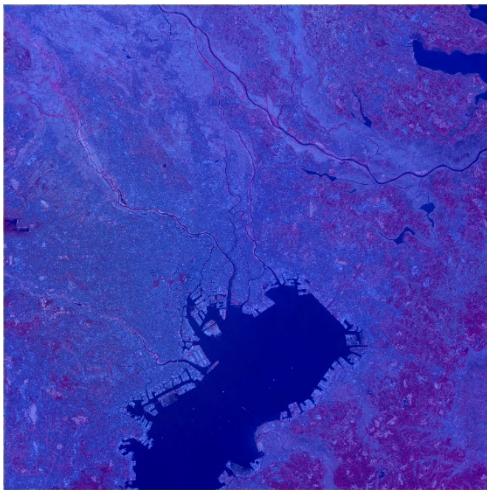




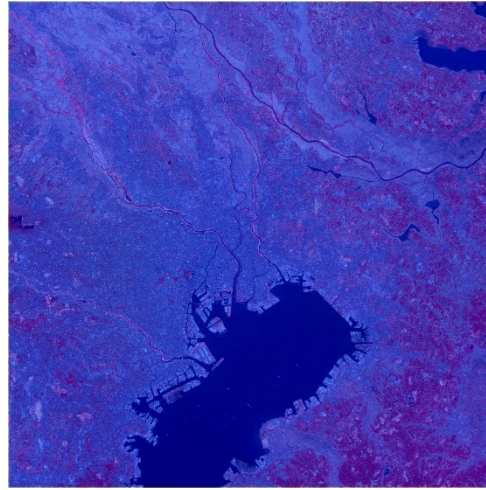
12°C 20°C



12°C 20°C



12°C 20°C



12°C 20°C

図 4-13 2015 年 5 月 2 日における傾向面分析の結果(20 時~23 時)

#### 4.4.3 2016年4月15日～16日における傾向面分析結果

東京の皇居を中心とする約100km×100kmの領域において、傾向面分析を行った結果を示す。朝方、昼間、夜間における時間帯で土地被覆分類ごとによる熱環境分布の変化を視覚的に捉えることが可能である。

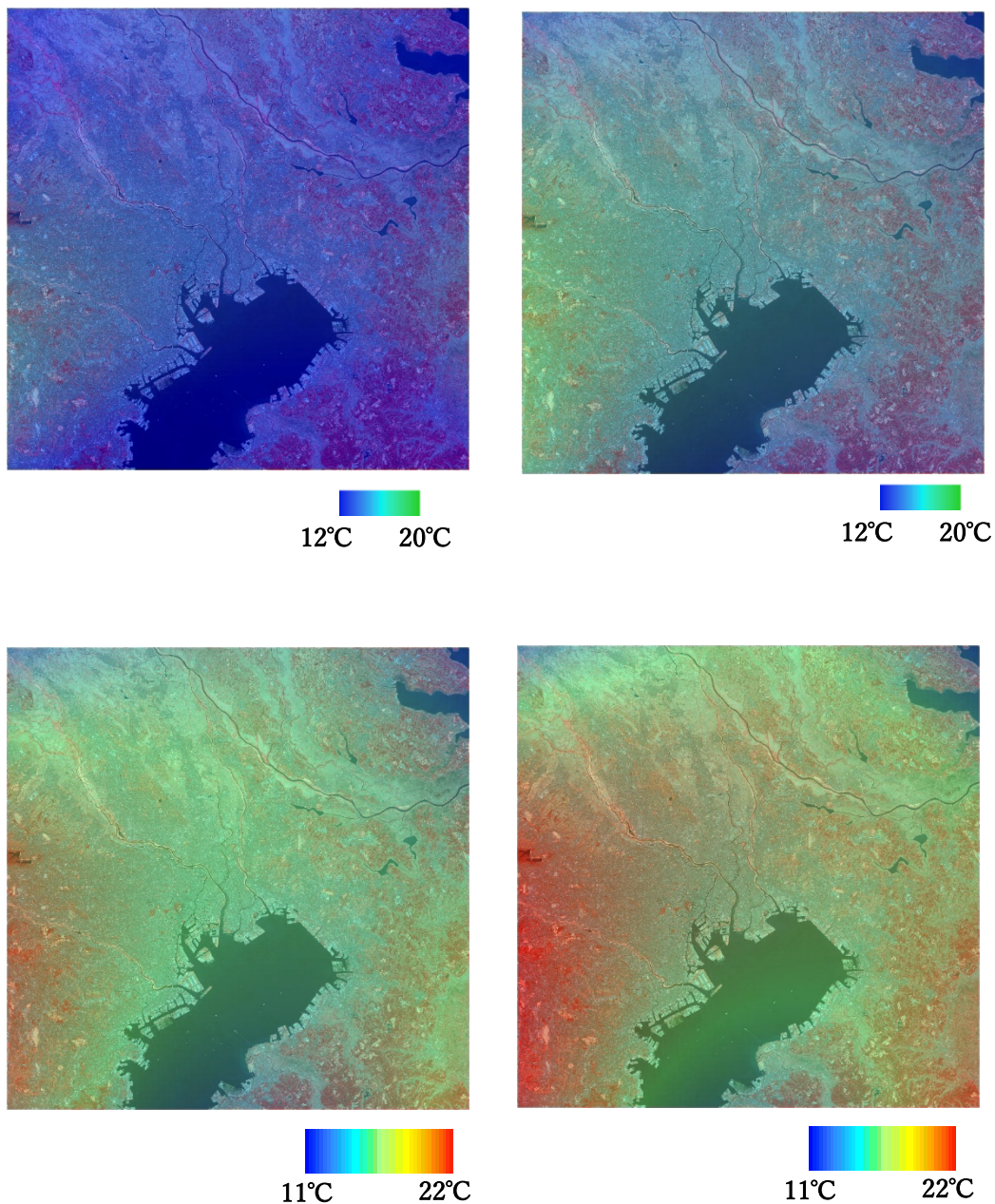


図 4-14 2016年4月15日における傾向面分析の結果(7時～10時)

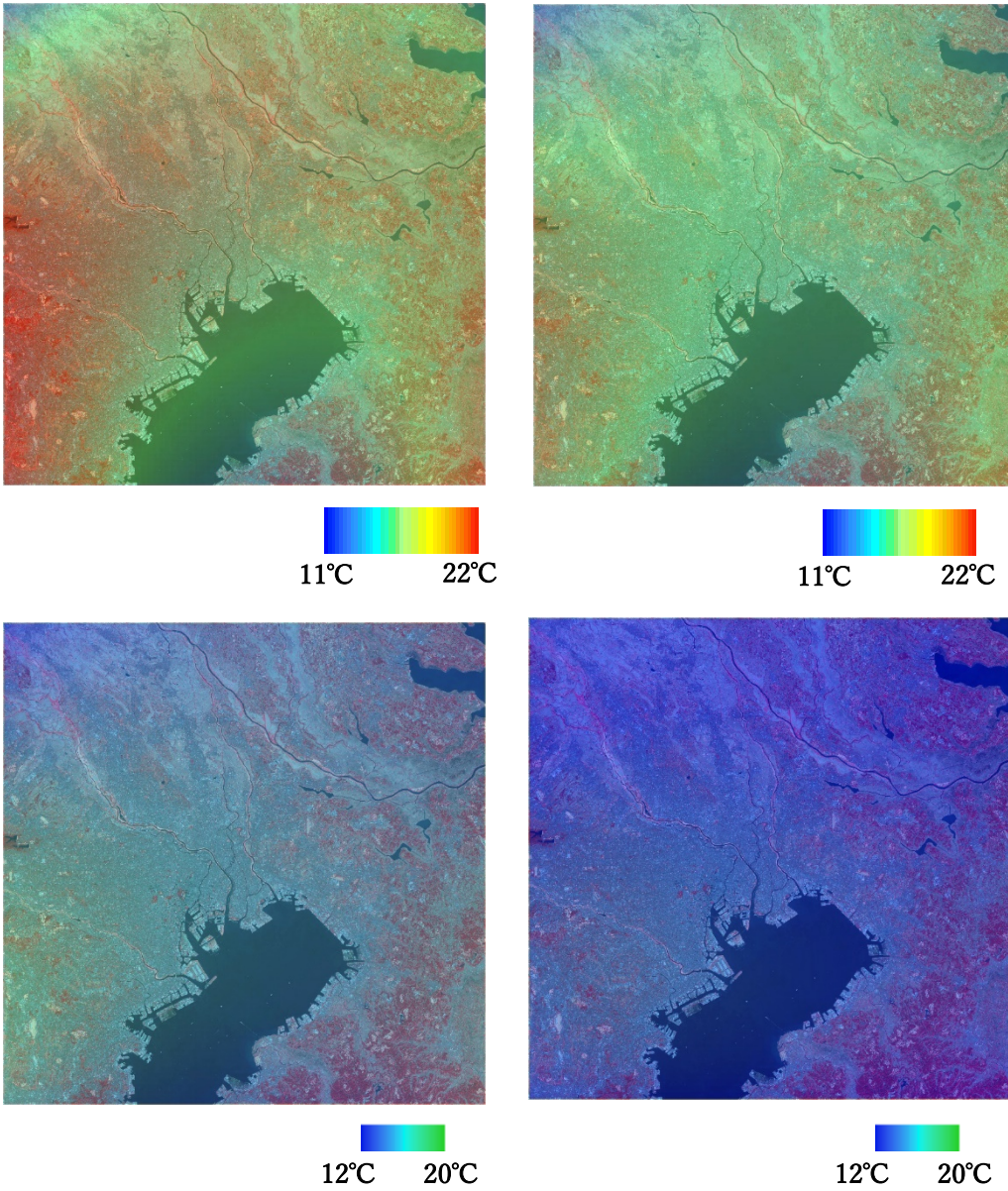
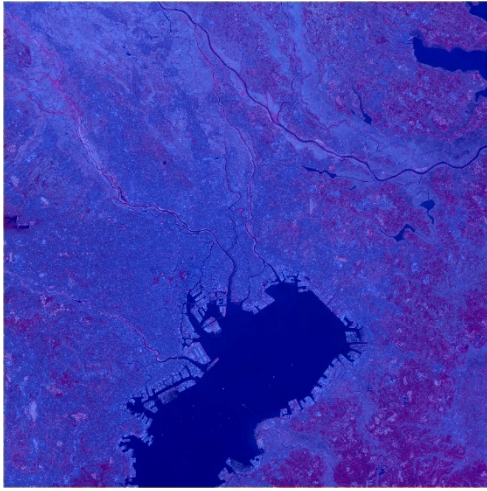
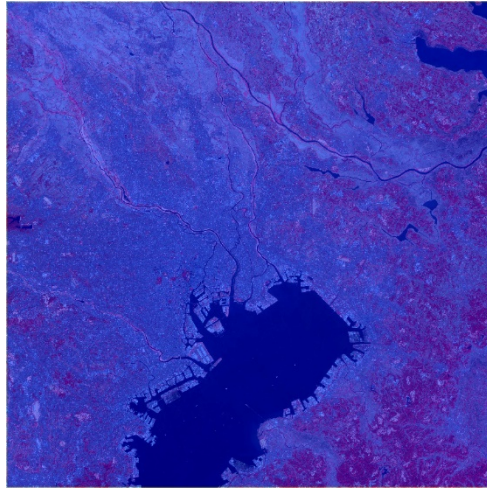


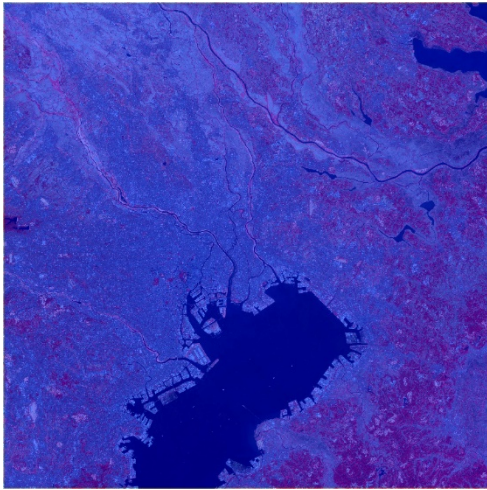
図 4-15 2015 年 4 月 26 日における傾向面分析の結果(15 時～18 時)



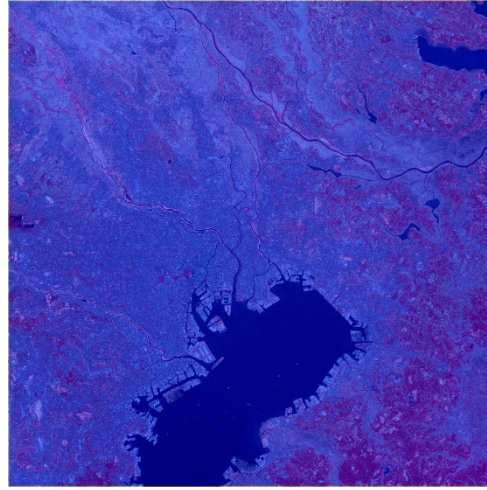
15°C 22°C



15°C 22°C



15°C 22°C



15°C 22°C

図 4-16 2015 年 4 月 26 日における傾向面分析の結果(19 時~22 時)

#### 4.4.4 2016年5月4日～5日における傾向面分析結果

東京の皇居を中心とする約100km×100kmの領域において、傾向面分析を行った結果を示す。朝方、昼間、夜間における時間帯で土地被覆分類ごとによる熱環境分布の変化を視覚的に捉えることが可能である。

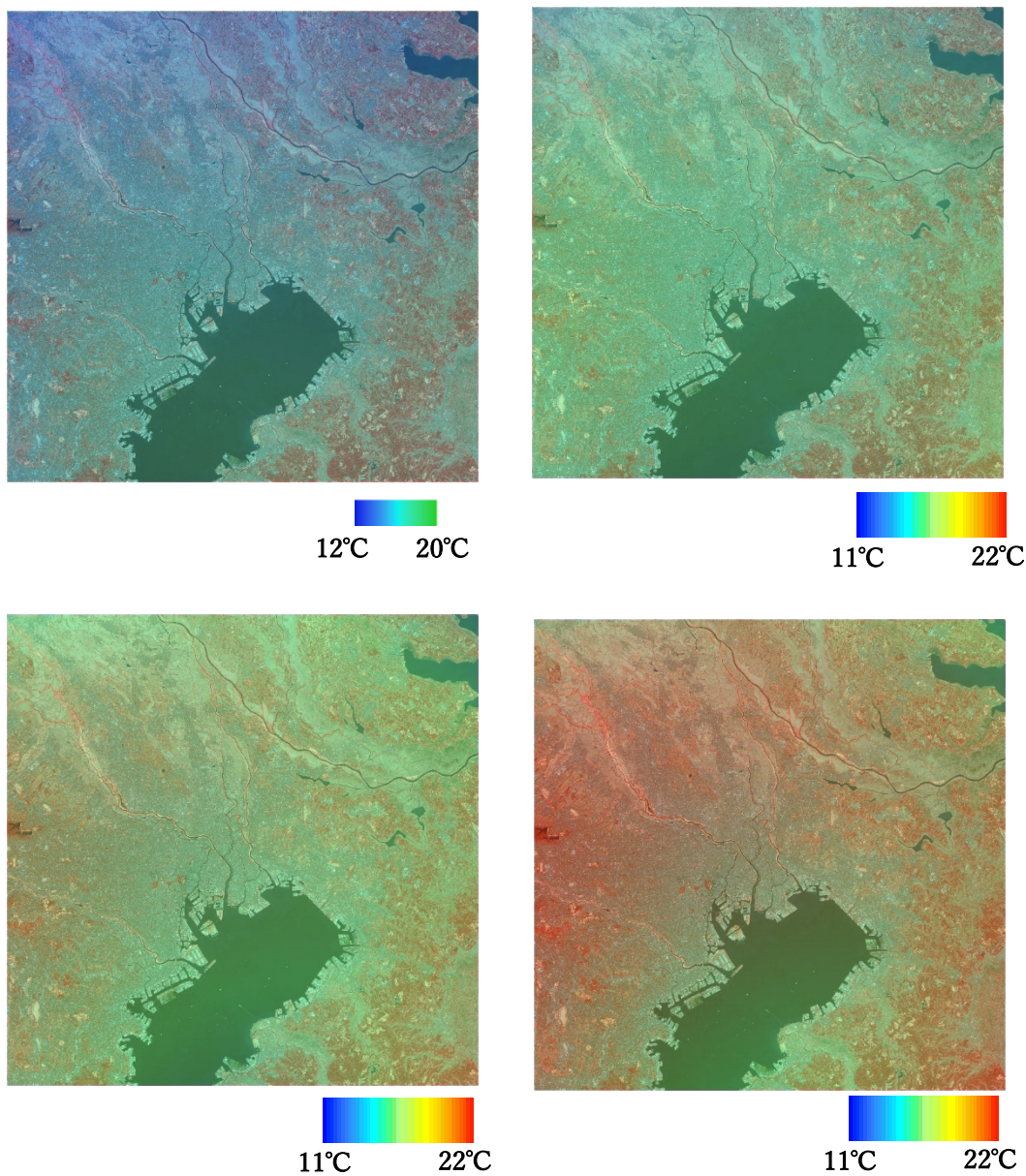


図 4-17 2016年5月4日における傾向面分析の結果(6時～9時)

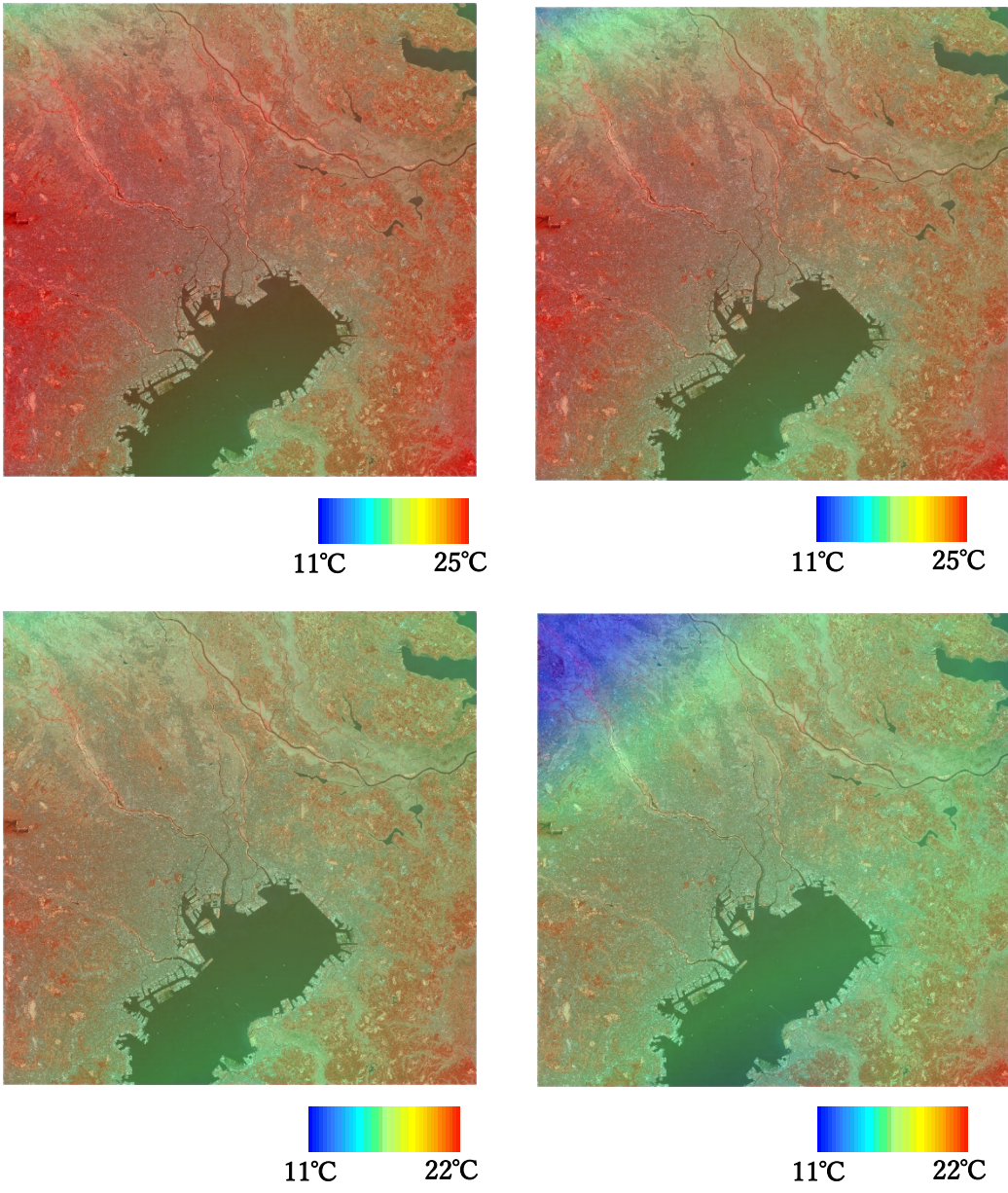
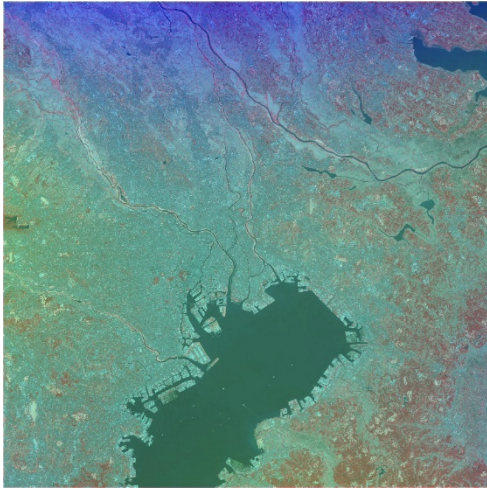
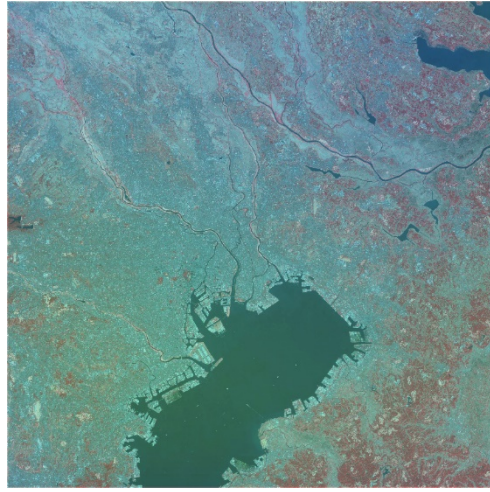


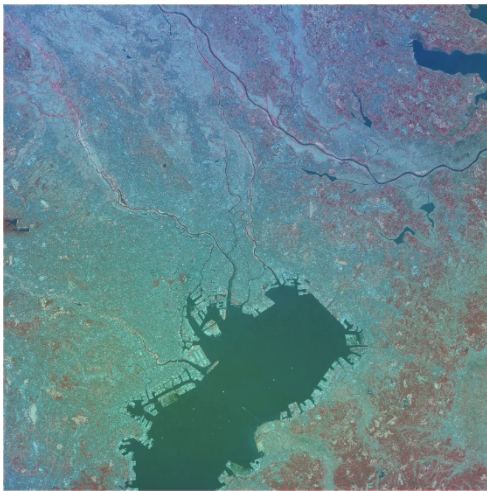
図 4-18 2016 年 5 月 4 日における傾向面分析の結果(14 時～17 時)



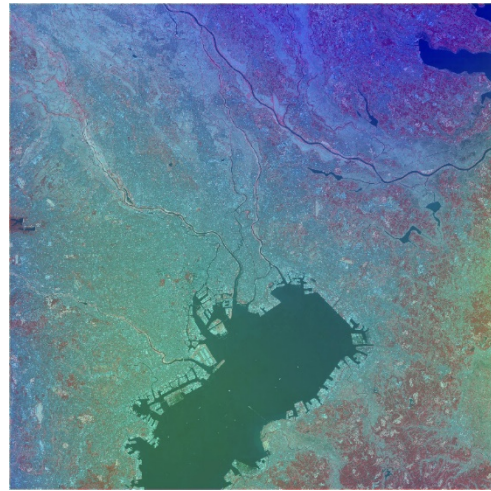
12°C 20°C



12°C 20°C



12°C 20°C



12°C 20°C

図 4-19 2016 年 5 月 4 日における傾向面分析の結果(21 時~24 時)

#### 4.4.5 2017年4月13日～14日における傾向面分析結果

東京の皇居を中心とする約100km×100kmの領域において、傾向面分析を行った結果を示す。朝方、昼間、夜間における時間帯で土地被覆分類ごとによる熱環境分布の変化を視覚的に捉えることが可能である。

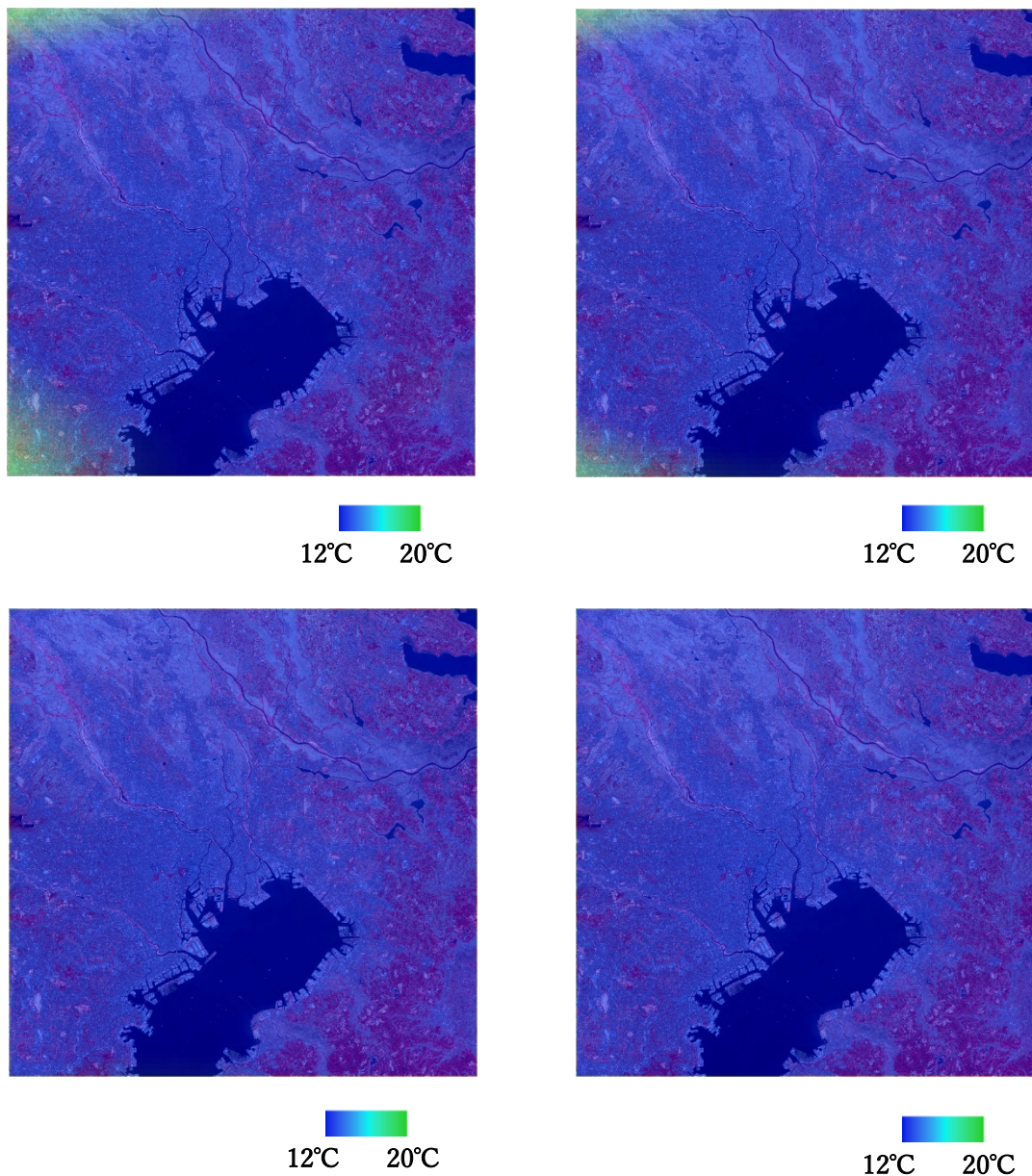


図 4-20 2017年4月13日における傾向面分析の結果(16時～19時)



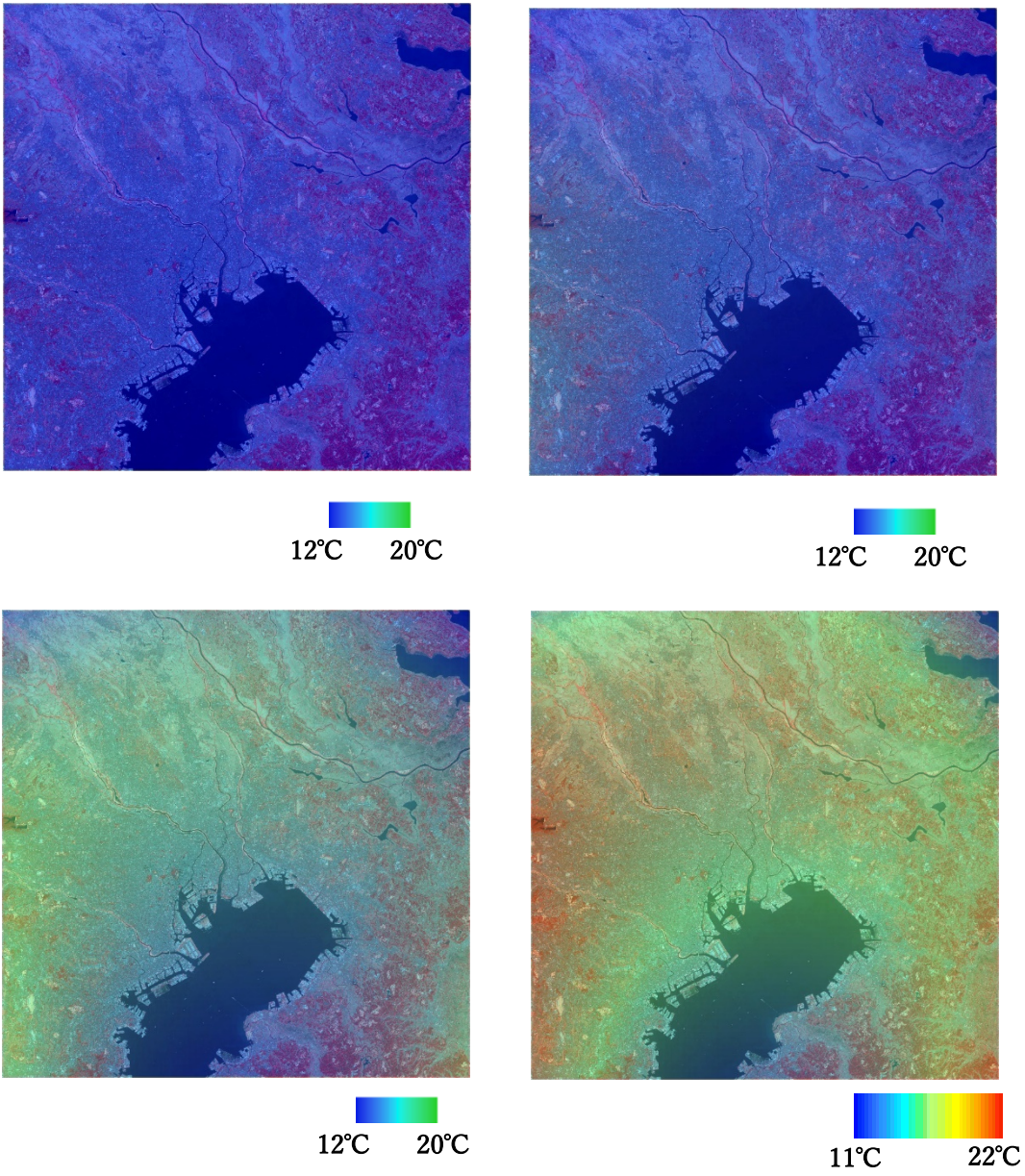


図 4-21 2017 年 4 月 14 日における傾向面分析の結果(7 時～10 時)

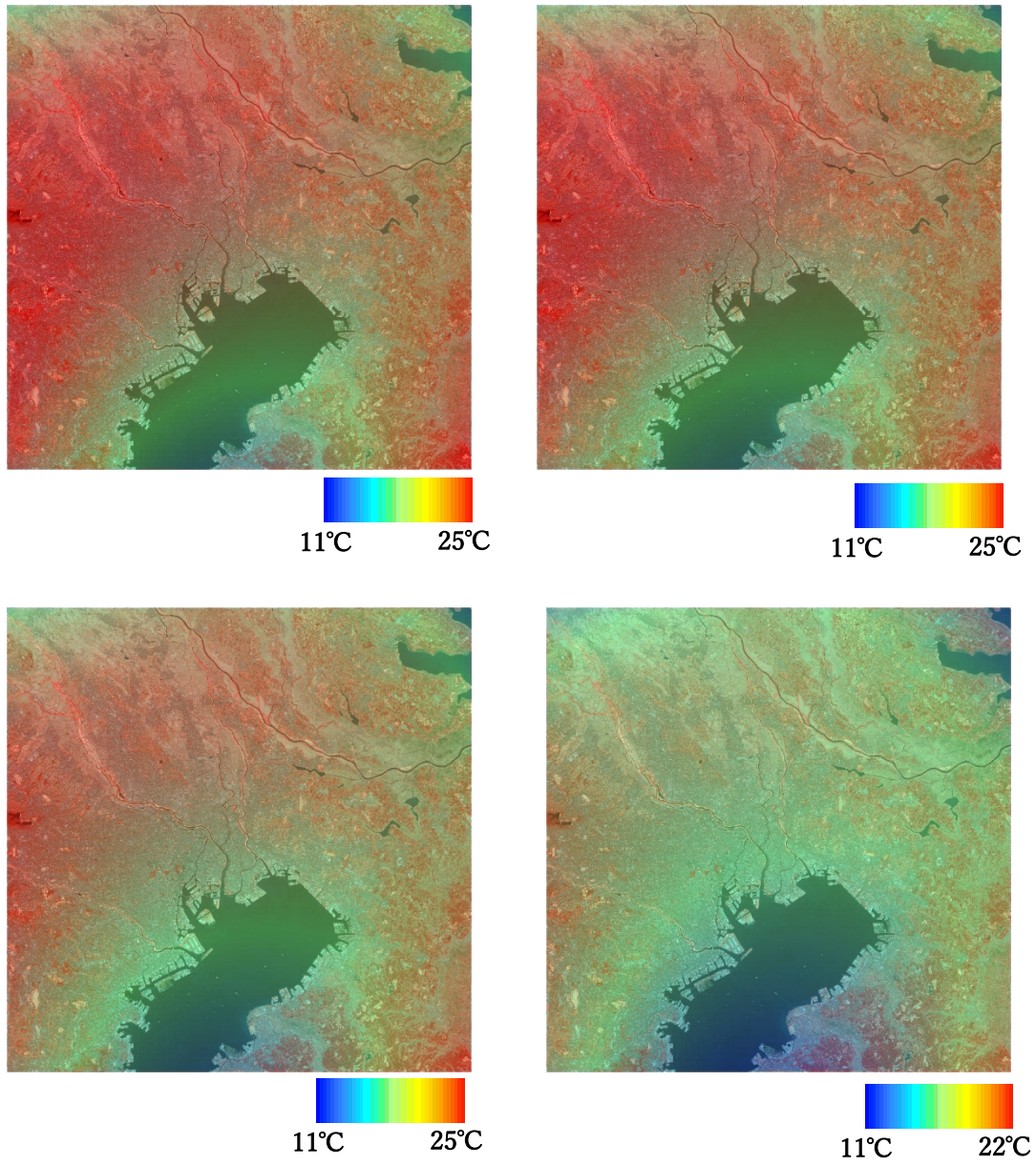


図 4-22 2017 年 4 月 14 日における傾向面分析の結果(12 時～15 時)

表-4-1 地域傾向面分析による概況温度  
 (右：2015年4月26日，左：2016年4月15日)

1時	2.49	13時	9.13
2時	3.04	14時	9.32
3時	3.18	15時	8.76
4時	2.54	16時	8.35
5時	3.76	17時	7.79
6時	3.80	18時	6.90
7時	4.06	19時	6.12
8時	4.89	20時	5.64
9時	6.22	21時	5.37
10時	7.64	22時	5.20
11時	7.88	23時	5.09
12時	8.73	24時	4.97

1時	1.86	13時	9.28
2時	1.56	14時	9.28
3時	2.00	15時	8.77
4時	2.54	16時	7.93
5時	1.91	17時	7.18
6時	2.15	18時	6.03
7時	2.11	19時	4.98
8時	4.36	20時	4.36
9時	6.00	21時	4.08
10時	7.34	22時	3.67
11時	8.23	23時	3.04
12時	8.87	24時	2.43

東京湾と千葉県側の森林地帯の地表面温度が低減していることが各日における日中の高温時に明瞭に現れている。また、各日において、Landsat 画像と傾向面分析により得られた画像を合成すると市街地域の沿岸部と内陸部で熱環境の大きな違いが顕著であり、水域や森林域が熱環境の緩和に効果的であることが視覚的にも捉えることが確認できる。

2015年～2017年の4月中旬、下旬および5月上旬の日変化として捉えると、この時期は10日ほどの観測の違いで日照時間（日の出から日没までの時間で代替え）が大きく変化するため、最低温度が高くなる傾向が認められる。

気象庁アメダスによる2015年4月26日，5月2日，2016年4月15日，5月4日，2017年4月13日午前6時の気温を確認するとそれぞれ，13.4℃，17.2℃，14.9℃，18.8℃，7.9℃であった。概況気温と比較するとアメダス観測測器は，地上1.5mの高度に設置され，周辺に建物や樹木など構造物がない場所を選定し温度を測定している。傾向面分析による概況温度との差は概ね5℃程度の差で推定できている。また，表4-1に対象日時における平均二乗誤差を示す。2015年4月26日の朝方1時～4時，2016年4月15日の朝方1時～7時は該当日における他の時間と比較して温度が低くなっており，これは雲による影響の異常値である。3次式による温度推定精度は，早朝夜間で約5℃，

日中で約 10°C 平均二乗誤差となった。温度の下降が緩やかになり、地表に加えられた熱量の増加分がこのような傾向として表れているものと考えられる。

なお、地表面温度の日変化のグラフが滑らかではない時間は、移動する小さな雲等の影響によるものと考えられ、温度が他の日と比較して低く示されている。特に 2015 年 4 月 26 日の夜間(1 時~4 時)は、同時間帯で若干の雲が発生しており、その雲による影響のもと考えられる。しかしながら、短時間、小さな雲に覆われていても、その前後の地表面温度のデータから補間や近似が可能だと考えられる。

日照時間が大きくなれば都市が受け取る熱量も増大し、結果として蓄える熱量の増加につながる。春季は昼間時間の伸びが大きく、その影響が日変化に現れた。「ひまわり 8 号」の観測データは地表面温度の変動を日変化として捉えていると言える。

都市の地表面温度分布を傾向面分析で近似し、その特徴をヒートアイランド現象として捉えるならば、衛星画像に現れる地表面温度の空間的な分布特徴を評価することで、各都市の熱環境評価や都市間のヒートアイランド現象の違いを見出すことなどが可能と考えられる。加えて、「ひまわり 8 号」から得られる日変化は、各都市の季節や時間による熱環境の変動特性についての情報も示していると考えられる。

#### 4.5 本章で得られた成果と考察

本研究では、「ひまわり 8 号」が観測した熱赤外面像データからなるべく雲の無い日を選定し、東京の皇居周辺を対象とし、地表面温度の日変化を傾向面分析から行い、気象庁アメダスの気温情報を用いて温度推定精度の比較を行った。従来のひまわり衛星に比べ時間分解能が向上しているため、その季節における日変化の変動を詳細にかつ視覚的に捉えることができ、地表面温度分布の変動を把握することができた。

特に、冬季の解析結果では、データ数は少ないものの、他の季節と比較すると朝方、夜間における温度分布の差が土地被覆ごとで明瞭に差が表れていることが判読できる。

傾向面分析による概況温度とアメダスとの比較結果も今回対象とした日時においては、同程度の誤差であった。

また、傾向面分析を行うことで、従来の衛星でも捉えることができた水域や森林域が熱環境緩和に効果的であることも視覚的に再確認することができ、3 次式による温度推定精度も、対象日時において一定の結果を得ることができた。

しかしながら、ひまわり 8 号の時間的分解能が向上したことにより、小規模の雲の異動や発生、数時間の雲による影響も地表面温度の日変化を捉える上で顕著に表れるため、雲による影響は、今後の課題になると考えられる。また、2次元空間に時間軸を加えた3次元高次多項式による時間空間傾向面分析を試みることで、雲の影響を軽減させることが可能であると考えられる。

#### 第4章<参考文献>

- 1) 北林：都市ヒートアイランド現象と可視化，可視化情報学会誌，22，131-136，2002
- 2) 石水照雄，大友篤，磯部邦昭：地域傾向面分析・適用事例および問題点，地理学評論，49(7)，455～469，1976.
- 3) 山口 隆子，ヒートアイランド対策，日生氣誌，Vol. 50，p71-75，2013
- 4) 内田裕貴，青山定敬，朝香智仁，野中崇志，杉村俊郎：静止気象衛星による首都圏の熱環境について，土木学会論文集 G(環境)特集号，71(5)，I-319～I-324，2015
- 5) 気象庁，ヒートアイランド現象，  
< [http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr\\_faq/02/qa.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/02/qa.html) >，2018. 2. 9 アクセス
- 6) 北林興二，都市ヒートアイランド現象と可視化，可視化情報，Vol. 22，No. 86，p1-6，2002
- 7) 気象庁，ヒートアイランド現象，  
< [http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr\\_faq/01/qa.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr_faq/01/qa.html) >，2018. 2. 9 アクセス
- 8) 国土交通省，国土交通省ヒートアイランド・ポータル  
<[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_mn\\_000016.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_mn_000016.html)>，2018. 2. 22 アクセス
- 9) 気象衛星センター，ひまわり 8 号・9 号の運用計画，  
< <http://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/info/plan.html> >，2018. 2. 19 アクセス
- 10) 気象衛星センター，静止軌道衛星と極軌道衛星  
< <http://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/general/geopolar.html> >，2018. 2. 19 アクセス

11)内田裕貴, 朝香智仁, 青山定敬, 野中崇志, 岩下圭之, 杉村俊郎, ひまわり  
8号データにみる春季日照時間の変化による地表面温度日変化の変動, 環境情報  
科学センター, Vol. 31, p125-130, 2017

## 第5章

# 静止気象衛星による観測データにみられる短時間の 雲の影響の除去



## 第5章

### 静止気象衛星による観測データにみられる短時間の雲の影響の除去

#### 5.1 概説

4章でも述べた通り、ひまわり8号における観測頻度の時間的分解能が向上したことにより、都市の地表面温度を日変化として捉えることが可能となった。本章では、ひまわり8号の時間的分解能が向上した点に着目し、都市の10分毎の観測データから日変化を調査した。このとき、小規模な雲の発生や移動による影響も捉えてしまうため、一部領域においては、短時間のデータ欠損が生じる。衛星画像における雲の存在は、気象学的には重要な情報源であるが、都市における地表面温度の日変化ならびに熱環境を把握する上では、異常値なため、なるべくその影響を取り除く必要がある。

Landsat 衛星の高い分解能と熱赤外バンドを用いて雲域の除去などの研究がなされているが、補正を行う際には、正確なデジタル標高モデルと衛星画像の精密幾何補正が必要とされている。本章では、雲域の影響を除去する手法として、雲の影響の無い前後の観測画像データを用いて、高次多項式による地表面温度の推定手法を新たに提案し、その有効性について検証を行ったものである。

検証の方法は、まず、なるべく雲域の影響を受けていない地表面温度の日変化を算出した後、雲が数時間程度発生したと仮定したシミュレーションを行い高次多項式による補間を行う。その後、シミュレーションを行い補正した地表面温度データを画像に施し、その結果を比較し、有効性を検討するものである。

なお、短時間の定義は、2～3時間程度を想定している。

#### 5.2 使用したデータならびに研究対象地域

ひまわり8号は、本来の静止気象衛星としての気象観測のみならず火山灰やエアロゾルの分布も高精度に把握できるとされ、幅広い分野での利用が期待されている。本章では、特に増加した観測波長帯数の中でも熱赤外域に相当する6バンドの中から Landsat/TM の熱赤外波長  $11\mu\text{m}$  に相当するバンド14を用いて地表面温度を算出した。

図5-1にひまわり8号が観測した2015年5月2日13時の東京周辺を対象とした約80km×80kmの領域の熱赤外バンド画像を示す。図5-1に示したようにひまわり8号をはじめとする気象衛星は、Landsat等の地球観測衛星とは異なり、温度の低い雲域を明るく表示し、温度の高い領域は黒く表示される。研究の対象地域は、東京周辺の約80km×80kmの領域を対象とし、地表面温度の変

動を日変化として算出した．なお，DN 値を観測輝度に変換しても，大気補正や放射率補正を行った地表面温度と異なるが，本研究では，観測輝度温度に変換した値が相対的に日変化を示すと考え，これを地表面温度と表記している．

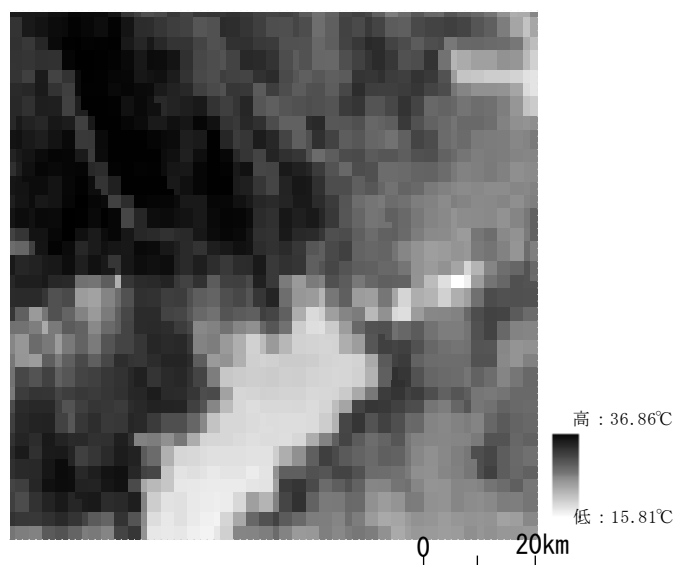


図 5-1 ひまわり 8 号が観測した東京周辺の熱赤外バンド画像  
(2015 年 5 月 2 日 13 時観測)

### 5.3. 晴天日における地表面温度の日変化

シミュレーションを行うために，まず晴天日における地表面温度の日変化を求める必要がある．図 5-2 に 2015 年 5 月 2 日の地表面温度の日変化を示す．この日は，気象庁アメダスの観測結果を見ても，朝方 3 時前後，6 時前後は快晴で，日中から夕方・夜間においても雲の発生は確認されておらず．終日雲の発生が認められないため 1 日 (24 時間) を通じて雲の影響を受けていない地表面温度の日変化を捉えていると考えられる．実際に 2015 年 5 月 2 日に観測した東京中心部のテストポイント (アメダス観測点) の地表面温度を表 5-1 に示す．また，1 時間毎の日変化を算出した結果を図に示す．各時間帯でも他の時間帯と比較しても温度に大きなばらつきはなく，日中にかけて緩やかに温度が上昇し，夕方・夜間にかけても緩やかに温度が下降していることがわかる．この結果を元に，短時間の雲域の発生を仮定し，高次多項式を用いて近似式により地表面温度に対する雲の影響の日変化補間を試みた．

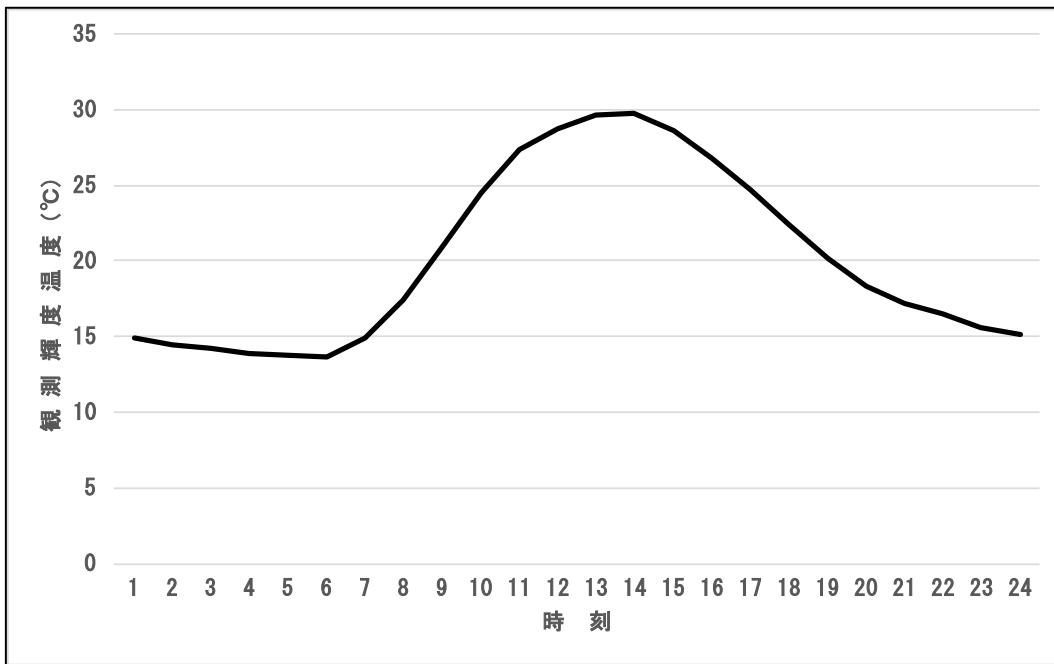


図 5-2 2015 年 5 月 2 日における地表面温度の日変化

表 5-1 2015 年 5 月 2 日の地表面温度

時刻	観測輝度温度(°C)	時刻	観測輝度温度(°C)
0時	14.89	12時	29.66
1時	14.49	13時	29.73
2時	14.19	14時	28.66
3時	13.93	15時	26.78
4時	13.81	16時	24.69
5時	13.69	17時	22.42
6時	14.9	18時	20.13
7時	17.42	19時	18.3
8時	20.83	20時	17.19
9時	24.51	21時	16.49
10時	27.37	22時	15.62
11時	28.78	23時	15.13

#### 5.4 雲の影響を受けたシミュレーション

晴天日の地表面温度の日変化として2015年5月2日の24時間のデータをもとに、雲の影響を受けたと仮定し、いくつかの雲の発生パターンを想定し、シミュレーションを行った。使用した高次多項式は、以下の式(5-1)である。

$$Z = \sum_{i=0}^n a_i t^i \cdots (5-1)$$

ここで、 $t$ は時刻、 $a_i$ は係数、 $z$ は地表面温度である。

シミュレーションは以下の3パターンを想定して行った。

- ①雲が1時間発生した場合
- ②2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

雲の発生は気象条件などにより、異なるが上記のパターンを想定してシミュレーションを行った。シミュレーションの方法は、該当する時刻が雲の影響を受けたと仮定し、その時刻を異常値として除外し、高次多項式による補間を試みた。

ひまわり8号の実測値と3次多項式～6次多項式による推定値を比較したところ、3次多項式では、 $2.93^{\circ}\text{C}$ 、4次多項式では、 $1.31^{\circ}\text{C}$ 、5次多項式では、 $1.18^{\circ}\text{C}$ 、6次多項式では、 $0.39^{\circ}\text{C}$ の残差の標準偏差を得た。これらのことから、6次多項式を用いて補間することで良好な曲線近似を得ることができると推測されたため、シミュレーションでは、6次多項式を用いて行うこととした。

### ①雲が1時間発生した場合

24時間のうち雲が1時間程度雲が発生したことを仮定し、晴天日の地表面温度の日変化において朝方(4時)、日中(13時)、夕方(19時)それぞれにおいて1時間の地表面温度データを取り除き、6時多項式による補間を試みた。その結果を図5-2に示す。

朝方4時、日中13時、夕方19時において取り除いた点を「×」で示し、実測値を実線、6次多項式による近似曲線を示している。

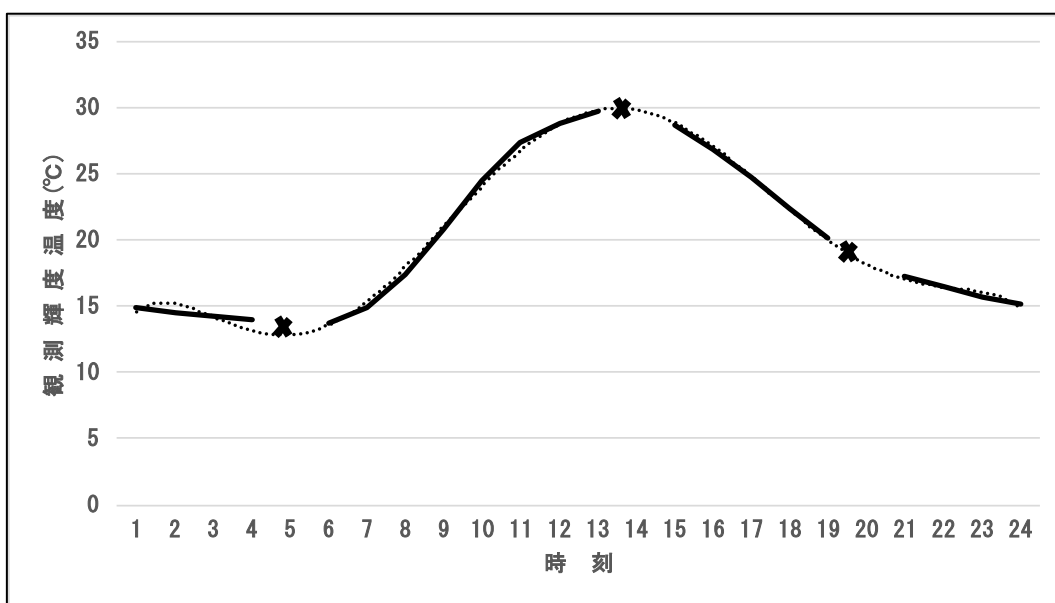


図5-3 朝方(4時)、日中(13時)、夕方(19時)を除いた地表面温度の日変化

両者を比較すると雲が発生していると仮定した時間帯において、6次多項式による曲線近似で補間できているものと考えられ、雲が1時間発生した場合においては相関係数が0.996を得られ補間できるものと考えられる。

### ②2時間～3時間雲に覆われている場合

次に、2時間～3時間程度雲に覆われている場合のシミュレーションを行った。24時間のうち雲が発生したと仮定し、朝方(3時～4時)、日中(13時～14時)、夕方(18時～20時)を取り除き、6次多項式を用いて補間を試みた。その結果を図5-4、図5-5に示す。

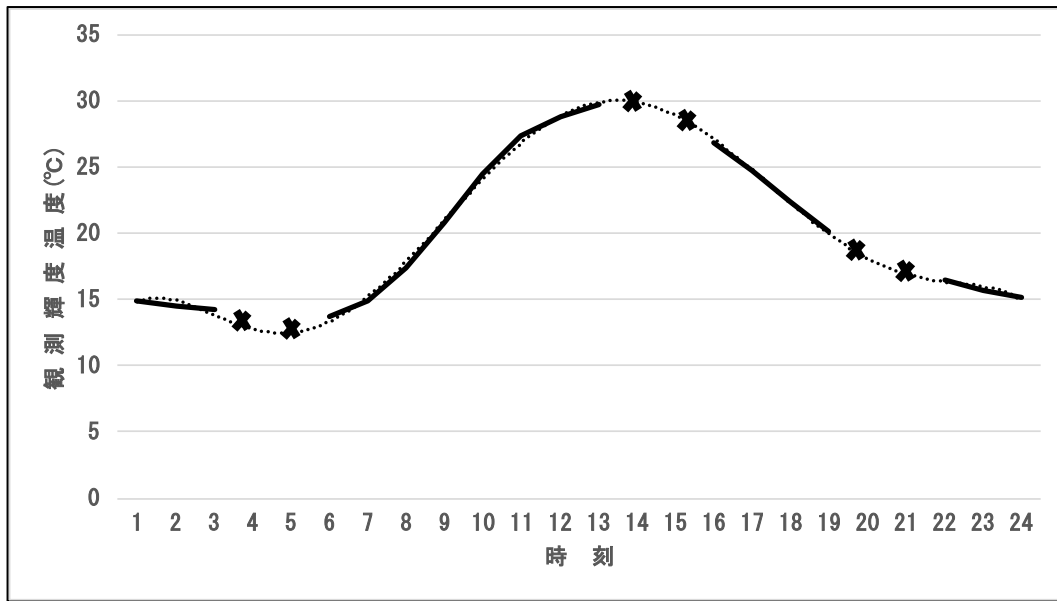


図 5-4 朝方(3時, 4時), 日中(13時, 14時), 夕方(19時, 20時)を除いた地表面温度の日変化

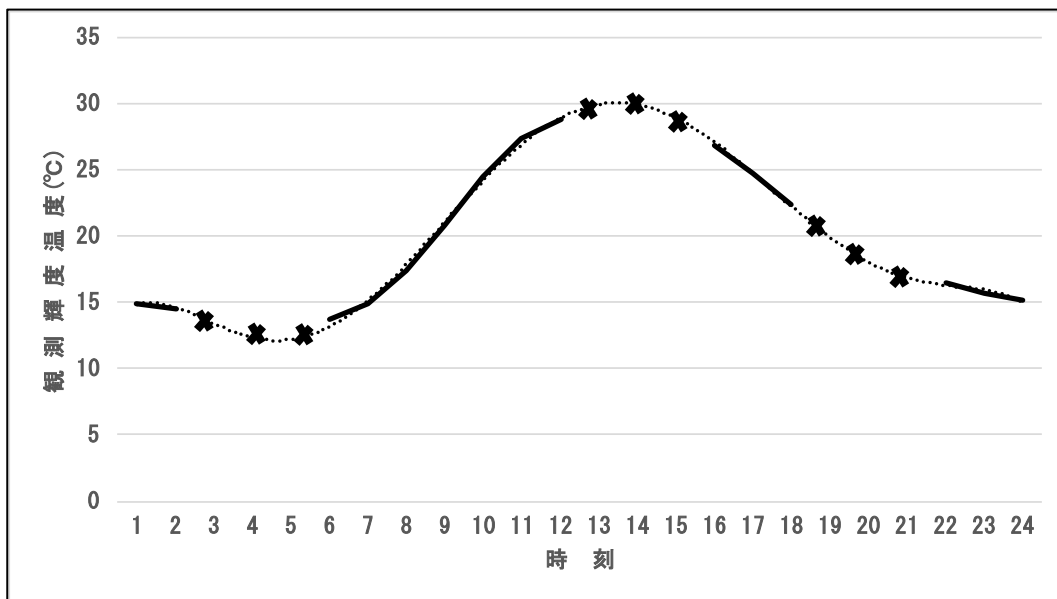


図 5-5 朝方(2時, 3時, 4時), 日中(12時, 13時, 14時), 夕方(18時, 19時, 20時)を除いた地表面温度の日変化

両者を比較すると 2 時間～3 時間程度雲に覆われている場合でも, 6 次多項式による地表面温度の日変化は, データを取り除いた区間(時刻)においても補間できると考えられる.

③長時間(4時間以上)雲に覆われている場合

最後に、長時間(4時間以上)雲に覆われている場合のシミュレーションを行い、6次多項式を用いて補間を試みその結果を図5-6、図5-7に示す。

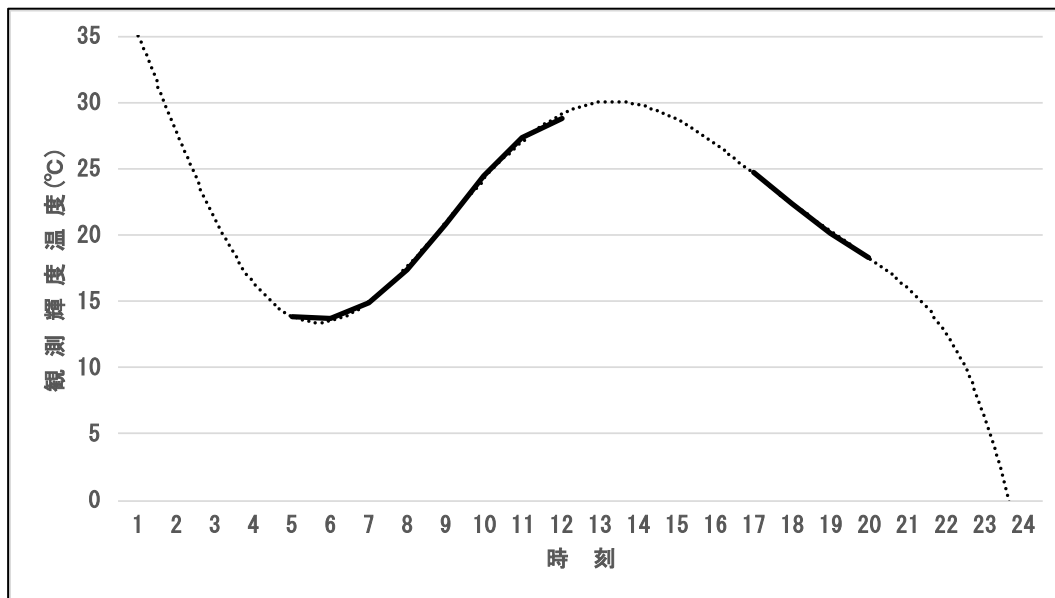


図5-6 朝方、日中、夕方における長時間(4時間以上)を除いた地表面温度の日変化

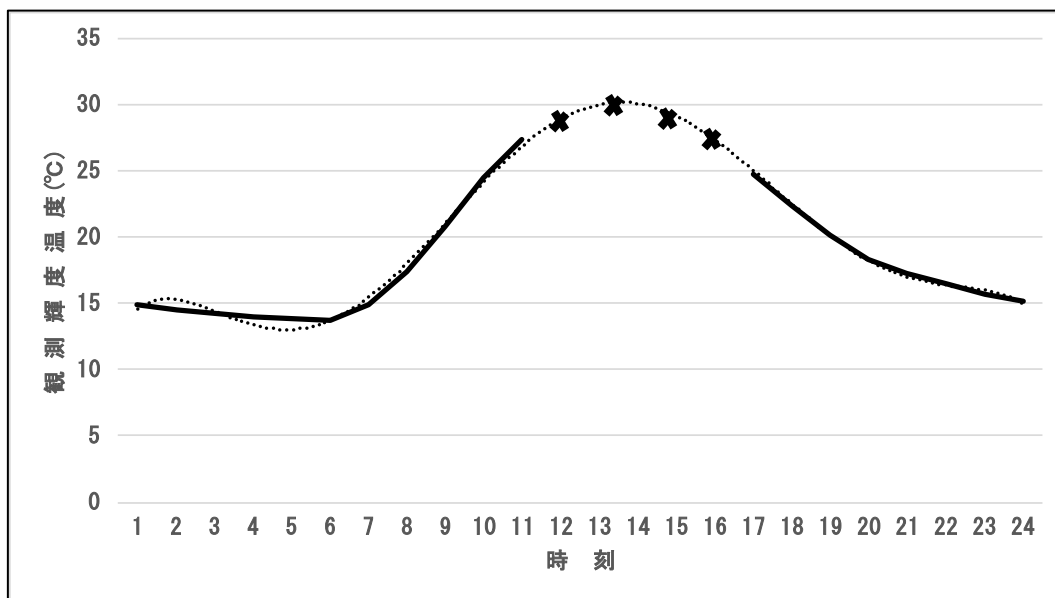


図5-7 日中における長時間(4時間以上)を除いた地表面温度の日変化

朝方、夜間における雲域の発生は、6次多項式による補間は難しいことがわかった。しかしながら、日中のみ長時間(4時間程度)の雲の影響だと想定した場合は、図に5-7示すとおり、6次多項式による補間ができると思われる。

大きく3つのパターンにおける雲の発生時間を想定したシミュレーションを行い、以下の点について推察できる。

- ・1時間～3時間程度の連続して発生していない雲であれば、その時間帯の観測データを除外し、前後の時間帯の地表面温度を利用することで6次多項式による近似曲線を求め地表面温度の日変化を補間することが可能である。

- ・長時間(4時間以上)の連続した雲による影響は、朝方、夜間の時間帯における6次多項式による補間は、近似式推定範囲の端部(朝方、夜間)にあたり、標本数(参照データ数)が少ないため難しいと考えられる。しかし、規則的に大きく変動する日中の連続した時間の発生であれば6次多項式による補間が可能であると考えられる。今回のシミュレーションで得られた知見を元に、検証を行う。

## 5.5 雲の影響を受けた地表面温度の日変化

シミュレーションの結果から、6次多項式を用いて地表面温度の日変化を補間できることが確認できた。そこで実際に24時間のうち雲が発生している日を先生し、ひまわり8号が観測したデータから地表面温度を算出し、雲の影響を受けている日について6次多項式による日変化の補間を試みた。検証日時は以下の通りである。

- ・2015年5月10日(00:00～23:00)
- ・2016年4月15日(00:00～23:00)

なお、実際の処理はひまわり8号が観測した画像データに対し、雲が発生している時間帯の観測画像を観測点ごとに6次多項式により補間するものである。観測点ごとの対象が異なるためそれぞれの補正式も異なっている。

### 5.5.1 2015年5月10日の解析結果

まず、2015年5月10日のひまわり8号が観測した地表面温度を表5-2に示し、当日の地表面温度の日変化を図5-8に示す。気象庁アメダスの観測データを参照すると、朝方3時、6時前後の時間帯で薄雲が発生しており、夕方18時、21時前後で雲が発生している。

表5-2の地表面温度の解析結果を見てみると、同時帯において他の時間帯と比較すると温度が低くなっており、地表面温度の日変化としてみてもばらつ



きが生じていると判読できる．そこで，雲が発生している時間帯の温度を異常値として取り除き，6次多項式による日変化の補間を試み，その結果を図5-9に示す．

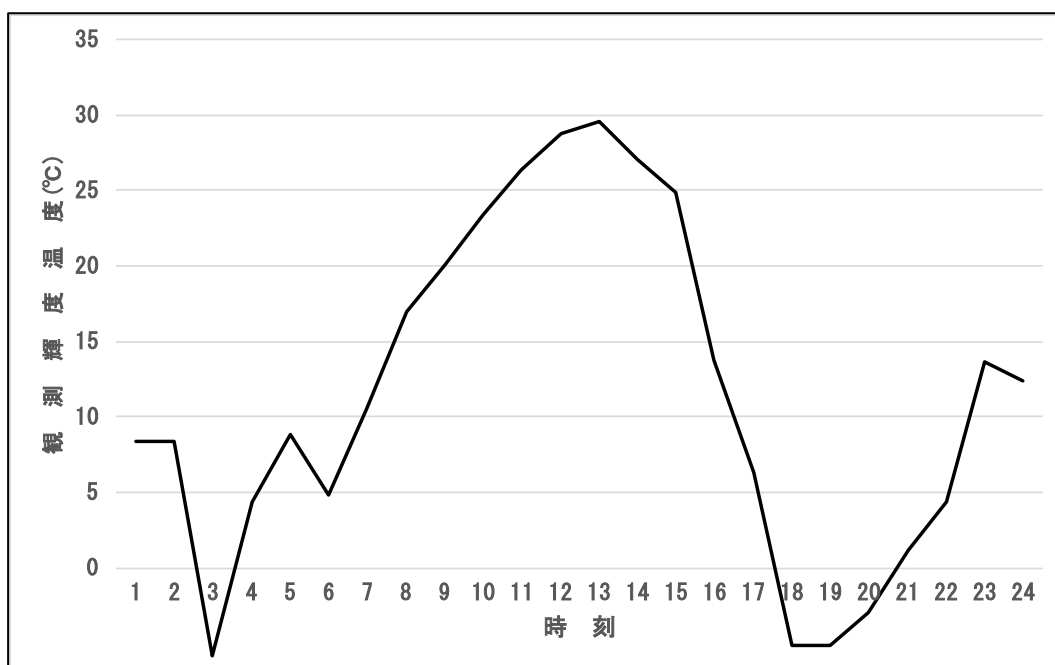


図5-8 2015年5月10日における地表面温度の日変化

表5-2 2015年5月10日の地表面温度

時刻	観測輝度温度(°C)	時刻	観測輝度温度(°C)
0時	8.42	12時	29.61
1時	8.42	13時	27.05
2時	-5.82	14時	24.84
3時	4.36	15時	13.79
4時	8.86	16時	6.37
5時	4.87	17時	-5.15
6時	10.58	18時	-5.09
7時	16.97	19時	-3.02
8時	20.06	20時	1.22
9時	23.41	21時	4.37
10時	26.35	22時	13.62
11時	28.73	23時	12.43

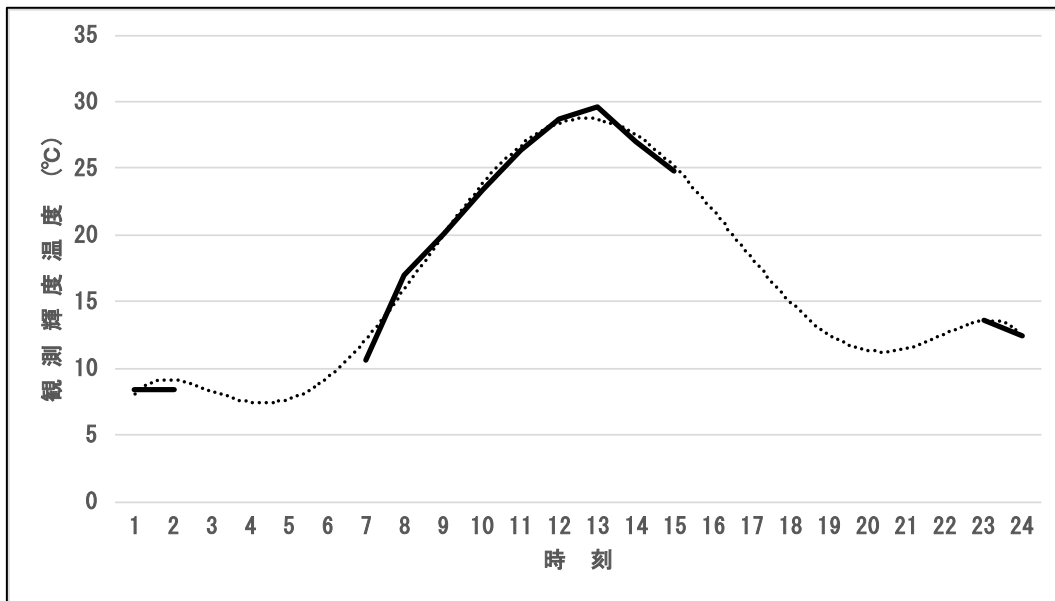


図 5-9 2015 年 5 月 10 日の 6 次多項式による地表面温度の日変化

異常値として朝方、夜間の地表面温度を取り除き 6 次多項式による近似曲線は、概ね良好な日変化の近似曲線を推定できたと思われる。次に、朝方 3 時～日中 12 時の各時間帯のひまわり 8 号熱赤外面像データを 6 次多項式により推定し、補間を行った。画像の補間は、実測値における観測画像と補間処理をした画像で比較した。

2015 年 5 月 10 日の 4 時、5 時の実測値における観測画像を図 5-10 に示し、図 5-11 に補正処理を行った画像を示す。この時間は、気象庁アメダスの観測結果にも示されているとおり、朝方 3 時～6 時において東京を中心として雲が発生し、広い範囲で観測されている。実際にひまわり 8 号が観測した熱赤外面像からも白枠で示した領域においてその状況を判読することができる。両者を比較すると東京を中心とした箇所の雲域の影響は減少しているが、それ以外では補間できていないことが判読できる。主な原因として、2015 年 5 月 10 日は、朝方だけでなく日中から夜間にかけても雲が長時間発生しているためだと考えられる。この結果から、6 次多項式を用いた雲の影響の補間は、短時間の雲の影響に対しては有効だが長時間の場合は、補完することが難しいことが推察される。

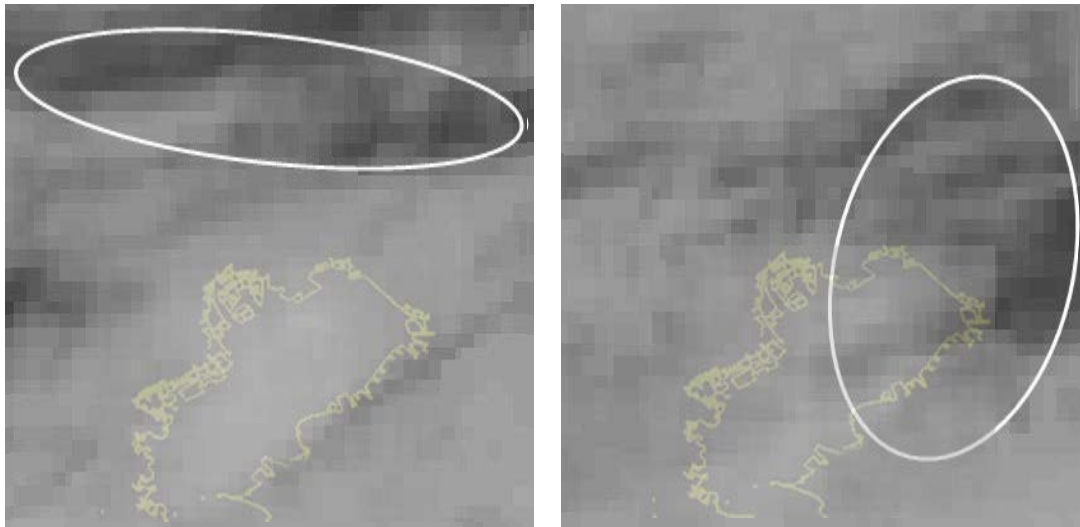


図 5-10 ひまわり 8 号が観測した東京周辺の熱赤外バンド画像  
(2015 年 5 月 10 日 左 4 時観測, 右 : 5 時観測)

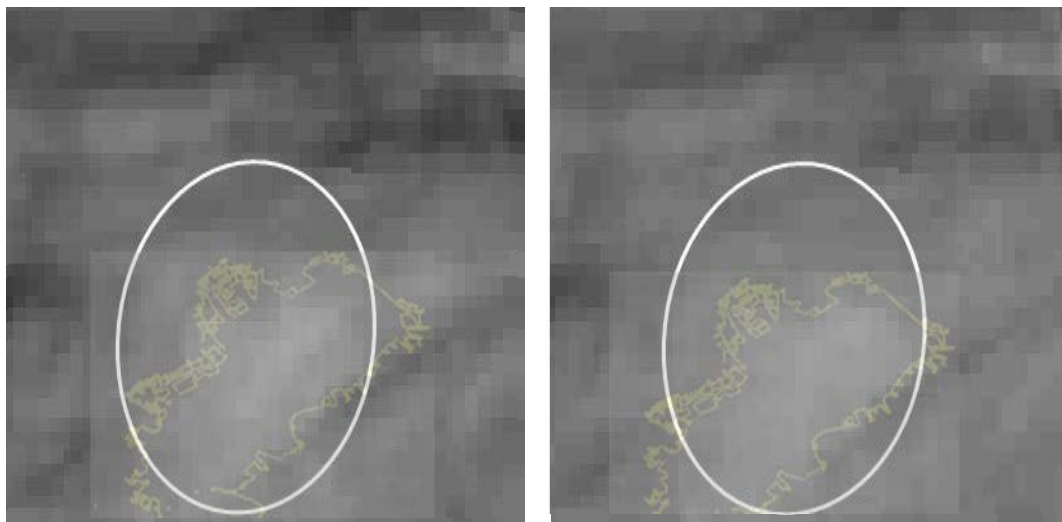


図 5-11 ひまわり 8 号が観測した東京周辺の熱赤外バンド画像(補正後)  
(2015 年 5 月 10 日 左 : 4 時観測, 右 : 5 時観測)

※昼間の画像でないため、対象領域に大きな温度差はないが、東京湾が明瞭になったことで補間効果を視覚的に確認することができる。

### 5.5.2 2016年4月15日の解析結果

最後に2016年4月15日の観測データを検証する。表5-3に地表面温度の解析結果を示し、図5-12に同日の地表面温度の日変化を示す。対象日の気象庁アメダスの観測データを参照すると朝方3時に雲が観測されていることがわかる。表5-3の地表面温度の日変化の解析結果を見てみると、他の時間帯と比較すると温度が低く、日変化として見えてもばらつきが生じていることが判読でき、雲の影響を受けているものだと考えられる。

2015年5月10日と同様に、雲が発生している時間帯の地表面温度を異常値として取り除き、6次多項式による日変化の補間を試みた。その結果を図5-13に示す。

概ね良好な地表面温度の日変化の曲線近似を得ることができたと考えられる。

次に、実測値における観測画像を図5-14に示し、補正処理後の画像を図5-15に示す。観測画像では、朝方4時に東京上空に雲の塊が判読でき、5時には、その雲の塊が東京を中心に棒状に伸びていることが判読できる。補正処理を行った画像では、朝方4時に判読できた雲の塊が消え、5時に東京を横断していた棒状の雲も目視では判読できないほど減少している。この結果から、2016年4月15日は、朝方のみ雲が発生しており限られた時間のみを対象としているため補間できたと考えられる。

以上の結果から、高次多項式を用いて推定した値を加え補正処理を行うことで雲の影響を軽減できることが視覚的に確認することができた。

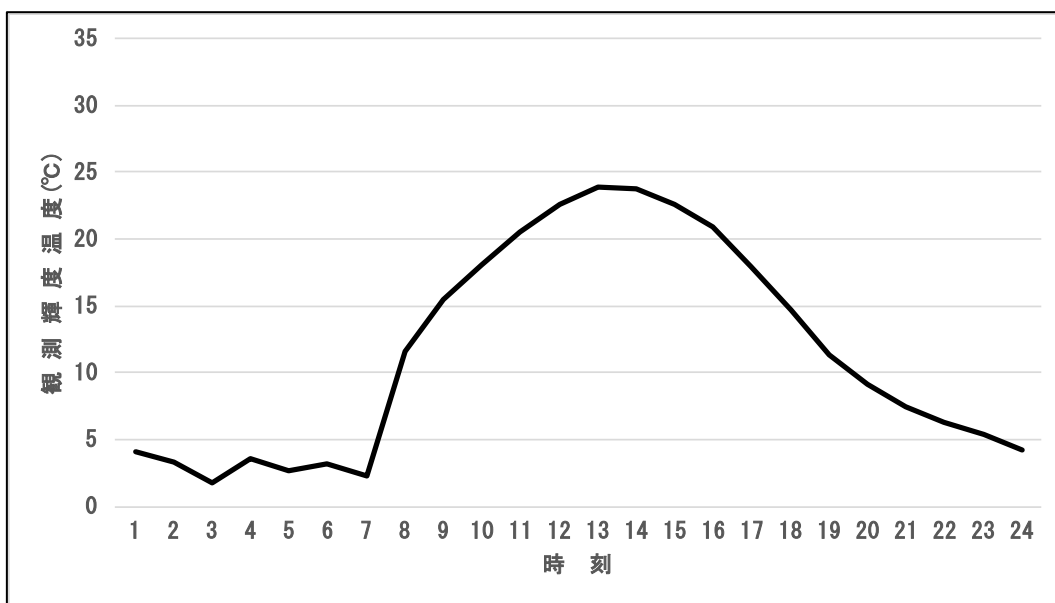


図5-12 2016年4月15日における地表面温度の日変化

表 5-3 2016 年 4 月 15 日の地表面温度

時刻	観測輝度温度(°C)	時刻	観測輝度温度(°C)
0時	4.06	12時	23.9
1時	3.24	13時	23.8
2時	1.8	14時	22.64
3時	3.58	15時	20.91
4時	2.66	16時	17.94
5時	3.21	17時	14.64
6時	2.25	18時	11.31
7時	11.57	19時	9.15
8時	15.45	20時	7.51
9時	18.12	21時	6.31
10時	20.58	22時	5.33
11時	22.59	23時	4.21

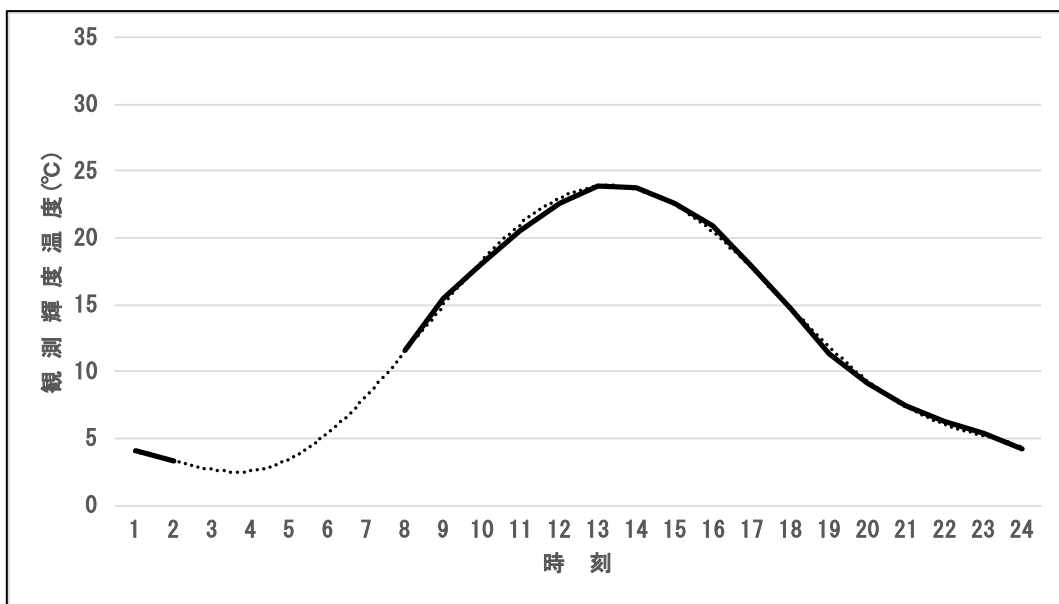


図 5-13 2016 年 4 月 15 日の 6 次多項式による地表面温度の日変化

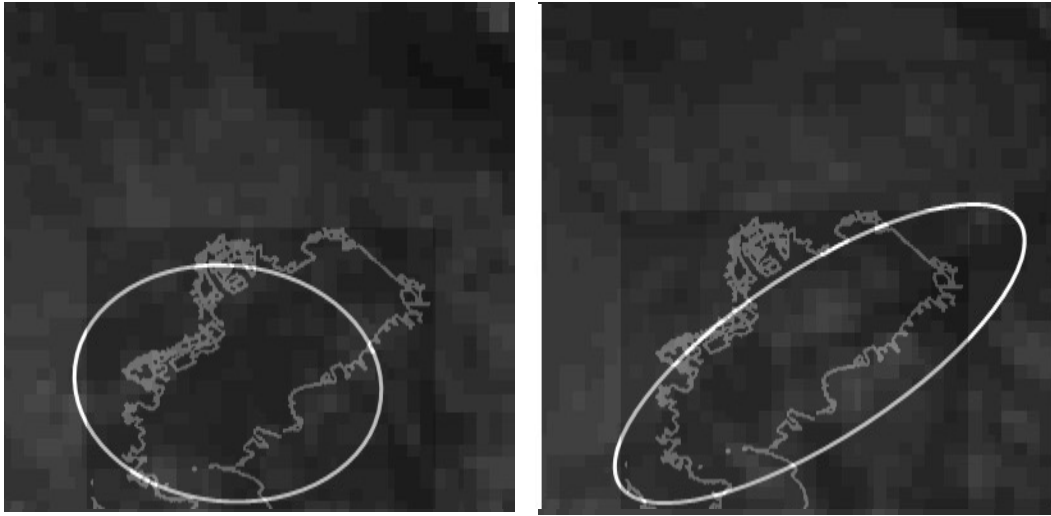


図 5-14 ひまわり 8 号が観測した東京周辺の熱赤外バンド画像  
(2016 年 4 月 15 日 左 : 4 時観測, 右 : 5 時観測)

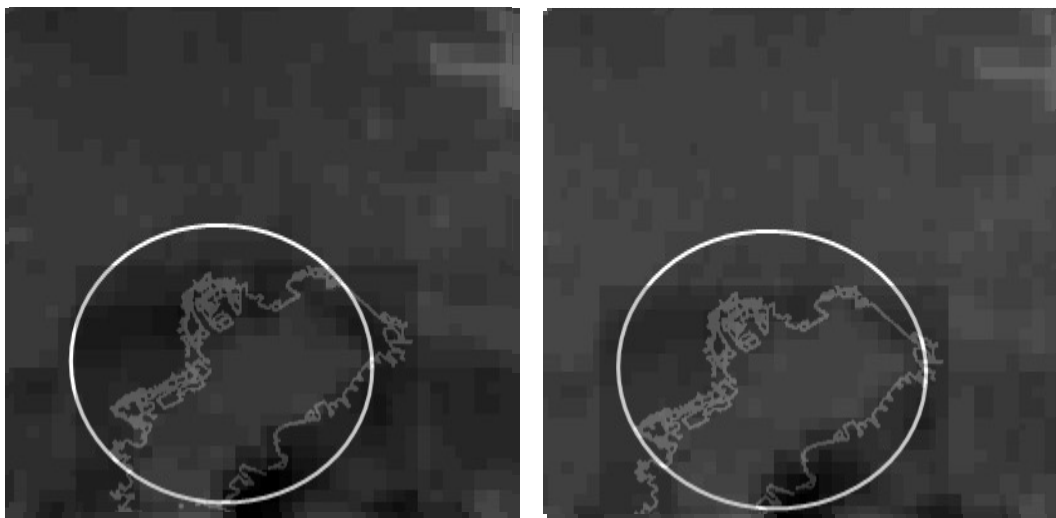


図 5-15 ひまわり 8 号が観測した東京周辺の熱赤外バンド画像(補正後)  
(2016 年 4 月 15 日 左 : 4 時観測, 右 : 5 時観測)

※昼間の画像でないため、対象領域に大きな温度差はないが、東京湾が明瞭になったことで補間効果を視覚的に確認することができる。

## 5.6 本章で得られた成果と考察

本章では、ひまわり 8 号が観測した地表面温度の日変化において 24 時間の内、雲の影響を受けている時間帯を異常値として取り除き、雲域の影響の補間を試みた。

雲の影響を補完する上で、雲が発生していない晴天日における地表面温度日変化を調査し、3つの雲の発生パターンを想定し、高次多項式による近似式による補間を検証した。

3次多項式～6次多項式での残差の標準偏差を求めたところ、6次多項式を用いて補間することで良好な曲線近似が得られることが推測された。

シミュレーションの結果、数時間程度の連続でない雲の発生であれば、その時間帯の観測データを除外することで前後の地表面温度を利用することで近似曲線を求め、地表面温度の日変化を推定・補間することが可能であることがわかった。また、長時間において雲が発生した場合は、朝方、夜間に発生したと仮定すると近似式推定範囲の端部（朝方、夜間）にあたり、標本数（参照データ数）が少ないため、補間することが難しいことがわかった。

シミュレーションの結果をもとに、実際にひまわり 8 号が観測した雲の影響を受けた地表面温度の日変化に対し、雲が発生している該当時刻を除外し、6次多項式を用いて地表面温度の日変化を推定したところ、概ね良好な曲線近似を得ることができた。

次に、実測値の観測データにおいて、6次多項式による地表面温度の日変化推定を行い雲による影響を軽減する補正処理を行った。実測値の画像データと比較した結果、日中のうち短時間の雲の発生であれば補間することが可能であるが、シミュレーションを行った結果からも朝方から夜間における長時間の発生では、補間することが難しいことが推察され、さらなる検討が必要だと考えらえる。

雲の発生は、季節やその日の天候に左右され異なるが、高次多項式による雲域の影響軽減は、簡易的にその雲の影響を取り除き、地表面温度の日変化を推定できると思われる。

## 第5章<参考文献>

- 1) 北林興二;都市ヒートアイランド現象と可視化, 可視化情報学会誌, 22, (86), p. 131-136, 2002.
- 2) 山口隆子;ヒートアイランド対策, 日本生気象学会誌, 50, (2), p. 71-75, 2013
- 3) 国土交通省;国土交通省ヒートアイランドポータル, <[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_mn\\_000016.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_mn_000016.html)>, (2017.9.25 閲覧)
- 4) 佐々木政幸, 操野年之;静止地球観測衛星ひまわり8号及び9号について, 日本リモートセンシング学会誌, 31, (2), pp. 255-257, 2011
- 5) 内田裕貴, 青山定敬, 朝香智仁, 野中崇志, 杉村俊郎, 土木学会論文集G(環境), 71, (5), p. I\_319-I\_324, 2015.
- 6) 飯倉喜和, 佐藤清忠, 横山隆三;熱バンドを用いた衛星画像における薄い巻雲の影響の除去, 日本リモートセンシング学会誌, 19, (1), pp. 59-63, 1999
- 7) 気象庁;静止気象衛星「ひまわり8号」の運用開始日について, [http://www.jma.go.jp/jma/press/1505/27a/20150527himawari8\\_operation\\_schedule\\_press.html](http://www.jma.go.jp/jma/press/1505/27a/20150527himawari8_operation_schedule_press.html), 2017.9.25 閲覧)
- 8) 気象庁;リーフレット「静止気象衛星 - ひまわり8号・9号 - », [http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/himawari/201703\\_leaflet89.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/himawari/201703_leaflet89.pdf), (2017.9.25 閲覧)
- 9) 気象庁;ひまわり8号・9号ひまわり標準データ利用の手引き, <[http://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/imawari89/space\\_segment/hsd\\_sample/HS\\_D\\_users\\_guide\\_jp\\_v12.pdf](http://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/imawari89/space_segment/hsd_sample/HS_D_users_guide_jp_v12.pdf)>, (2017.9.25 閲覧)



## 第6章

静止気象衛星による地表面温度の時空間分布  
パターンおよびヒートアイランド現象の評価

## 第6章

### 静止気象衛星による地表面温度の時空間分布パターンおよびヒートアイランド現象の評価

#### 6.1 概説

「ひまわり8号」により観測された地表面温度から日本の主要都市の熱環境について、各都市の日温度変化と分布の特徴を地域傾向面分析による巨視的視点から調査した。さらに各都市の分析結果の特徴を都市の構造と比較して、各都市に表れるヒートアイランド現象の可視化及び数値化を試みた。

#### 6.2 使用データと地表面温度

使用したデータを下記に示す。特に地表面温度の上昇が顕著に表れると予想される夏季に観測された画像で、主要都市とその周辺を対象に24時間連続して雲量ができるだけ少ない日時を選択した。

- (1) 東京 (2016年8月31日4時～9月1日3時)
- (2) 札幌 (2016年8月6日9時～8月7日8時)
- (3) 仙台 (2016年8月6日9時～8月7日8時)
- (4) 名古屋 (2016年8月31日4時～9月1日3時)
- (5) 福岡 (2016年8月10日1時～8月11日0時)

#### 6.3 主要都市の地表面温度

まず地表面温度の日変化を評価するため、1時間毎の地球表面温度の分布状況を調査比較した。図6-1～6-5は日本時間8時から20時までの1時間毎のAHIバンド14画像である。太陽が昇るにつれ地表面温度が上昇し、南中以降は下降する様子が見られ、また海面の温度はあまり変化していない様子が確認できる。

土地被覆により地表面の日温度変化が異なることは知られている<sup>1) 2) 3)</sup>。図6-1～6-5下段中央は国土数値情報の土地利用2次メッシュデータである。土地利用メッシュデータと地表面温度日変化画像を比較すると、市街地では温度上昇が著しく日没後も周辺地域に比べ表面温度が高い状況が続いているが、森林等植生域は温度の上昇が緩やかで、海水域は大きな変化は見られない。

土地利用情報を(a)人工的な土地被覆として「建物用地」、(b)自然な土地被覆

として「田」,「森林」, および(c)水域として「河川地及び湖沼」,「海水域」に統合し, それぞれの分類項目の地表面温度の観測値を平均し時系列に調査した結果, 図 6-6 の様な日変化が認められた.

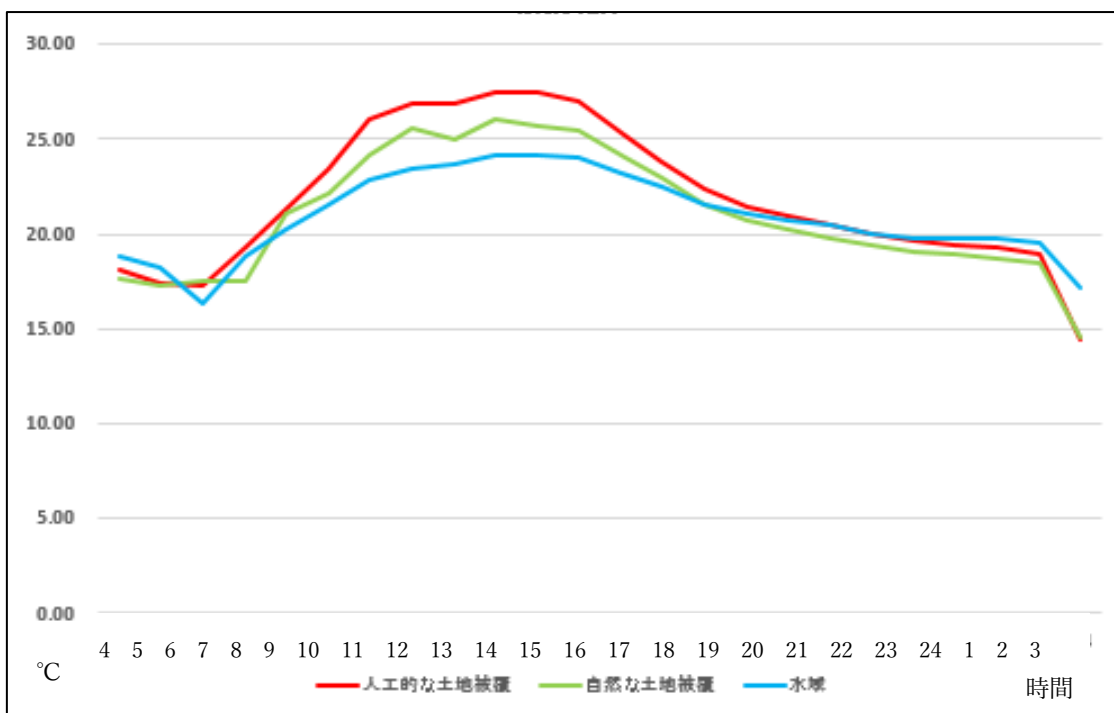


図 6-6 土地被覆毎の地表面温度の日変化 (東京)  
(2016 年 8 月 31 日 04:00~9 月 1 日 03:00)

### 6.3.1 東京

図 6-1 に示す 8 時から 20 時の AHI バンド 14 画像から求めた東京とその周辺の観測輝度温度を地表面温度分布とすれば, その日変化を監視できる. 日変化の大きい画像の中央部は市街地 (東京都心部), 日変化の少ない画像の右下部は海域 (東京湾) である.

土地利用メッシュデータと地表面温度日変化画像を比較すると, 以下の状況が認められる.

- ・市街地では温度上昇が著しく日没後も周辺地域に比べ表面温度が高い状況が続いている.
- ・森林等植生域は温度の上昇が緩やかで, 低下も緩やかである.
- ・海水域は大きな変化は見られないが, 東京湾では若干の変動が認められる.

各分類項目の日温度変化 (図 6-6) の横軸は観測時間で, 縦軸は 2016 年 8 月 31

日4時から9月1日3時までの各分類項目の観測輝度温度の平均値である。水域は太陽光の影響をそれほど受けないためその変動は少ない。一方、地表面は太陽光の影響により温度の上昇が見られ、人工構造物の有無によりその上昇、下降の速度、幅が異なっている。

ヒートアイランド現象の発生要因の一つに都市化があげられる<sup>4) 5) 6)</sup>。人工構造物に覆われている割合と日平均気温の間に相関が認められるという報告もあり<sup>1 2) 1 3)</sup>、図7の人工的な土地被覆と自然な土地被覆の間に認められる温度差がその事実を裏付けていると考えられる。「ひまわり8号」の連続観測情報からはこの都市化の影響をより詳細に監視、解析できる可能性が指摘できる。

### 6.3.2 他の主要都市

図6-7～6-10に札幌、仙台、名古屋、福岡各都市とその周辺における地表面温度分布から求めた日変化を示す。東京の場合と同様、分類項目毎の日変化には同様な傾向が認められる。ただし、温度の上昇や下降の幅や速度が都市によって異なっている。

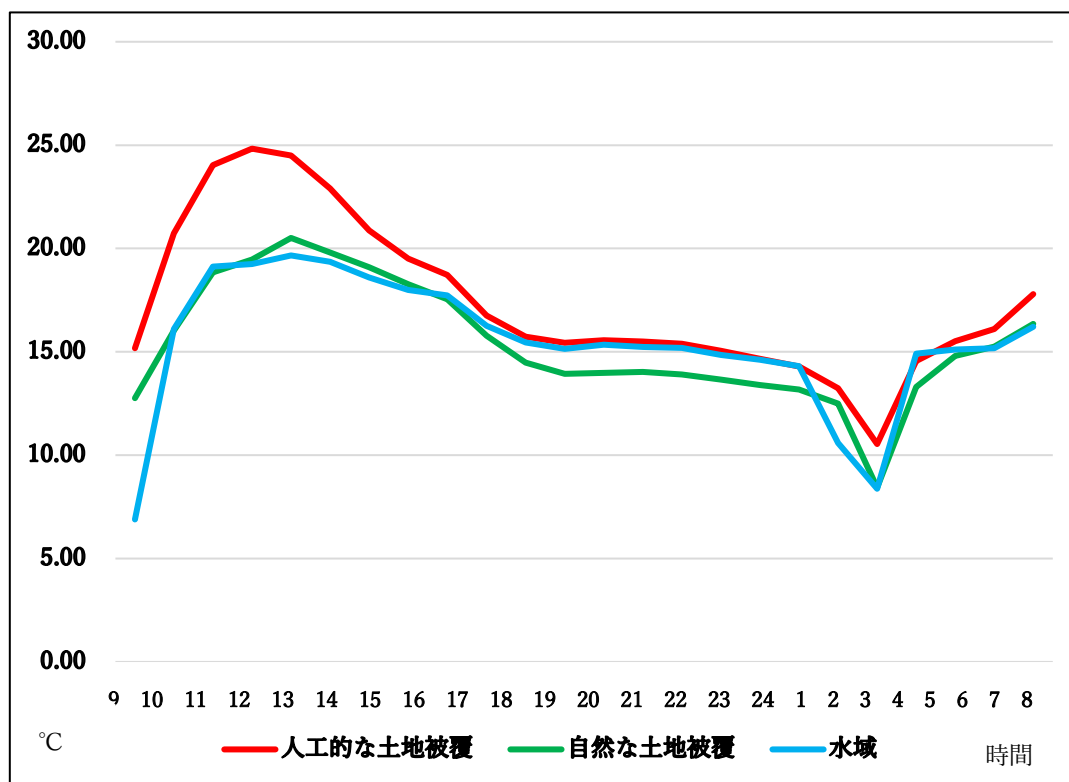


図6-7 土地被覆毎の地表面温度の日変化 (札幌)  
(2016年8月6日09:00～8月7日08:00)

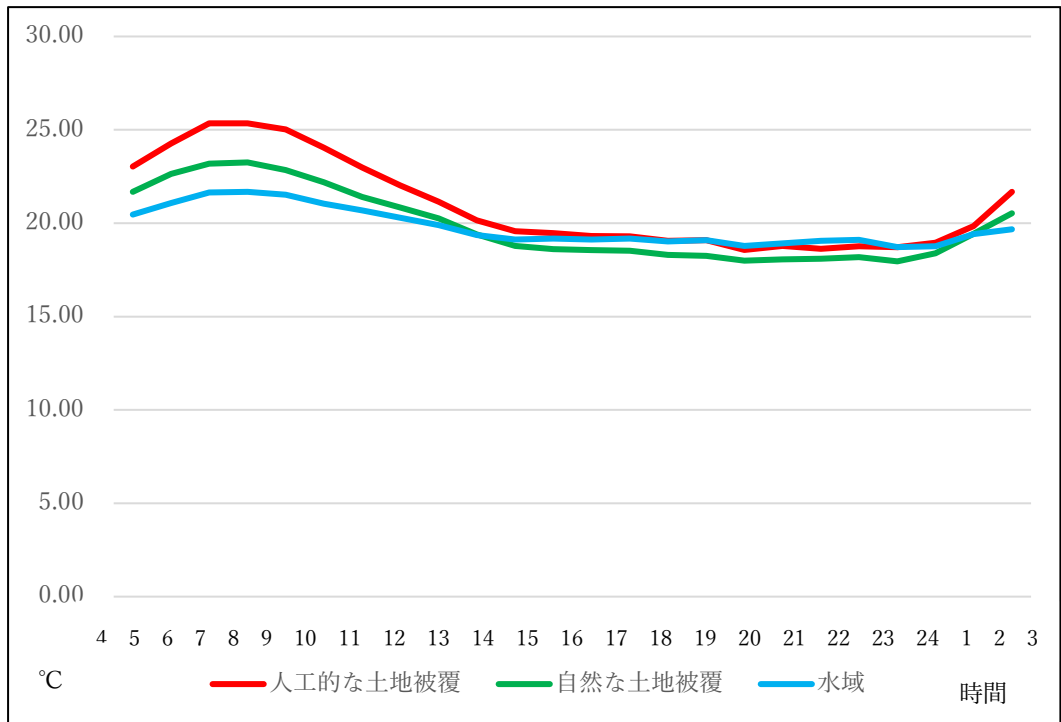


図 6-8 土地被覆毎の地表面温度の日変化 (仙台)  
(2016年8月6日09:00~8月7日08:00)

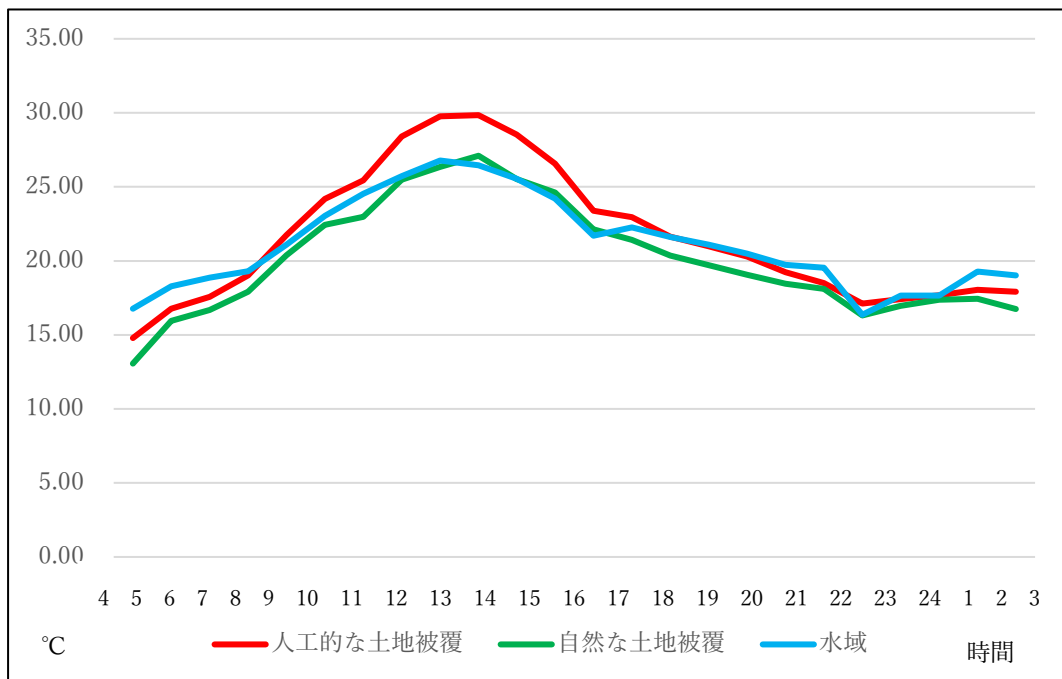


図 6-9 土地被覆毎の地表面温度の日変化 (名古屋)  
(2016年8月31日04:00~9月1日03:00)

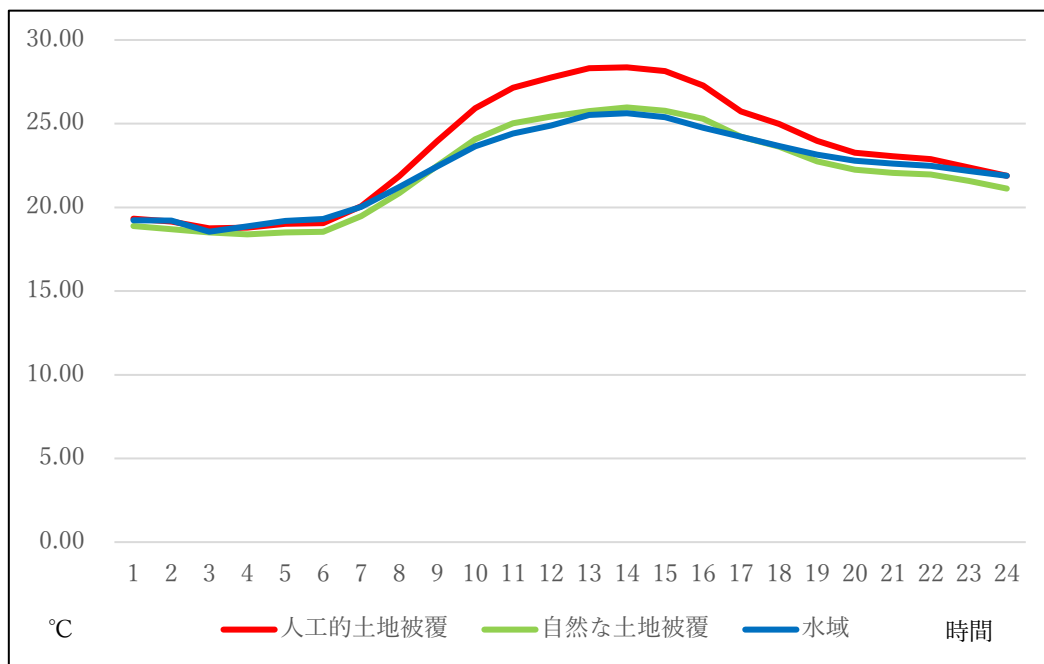


図 6-10 土地被覆毎の地表面温度の日変化 (福岡)  
 (2016年8月10日01:00~8月11日00:00)

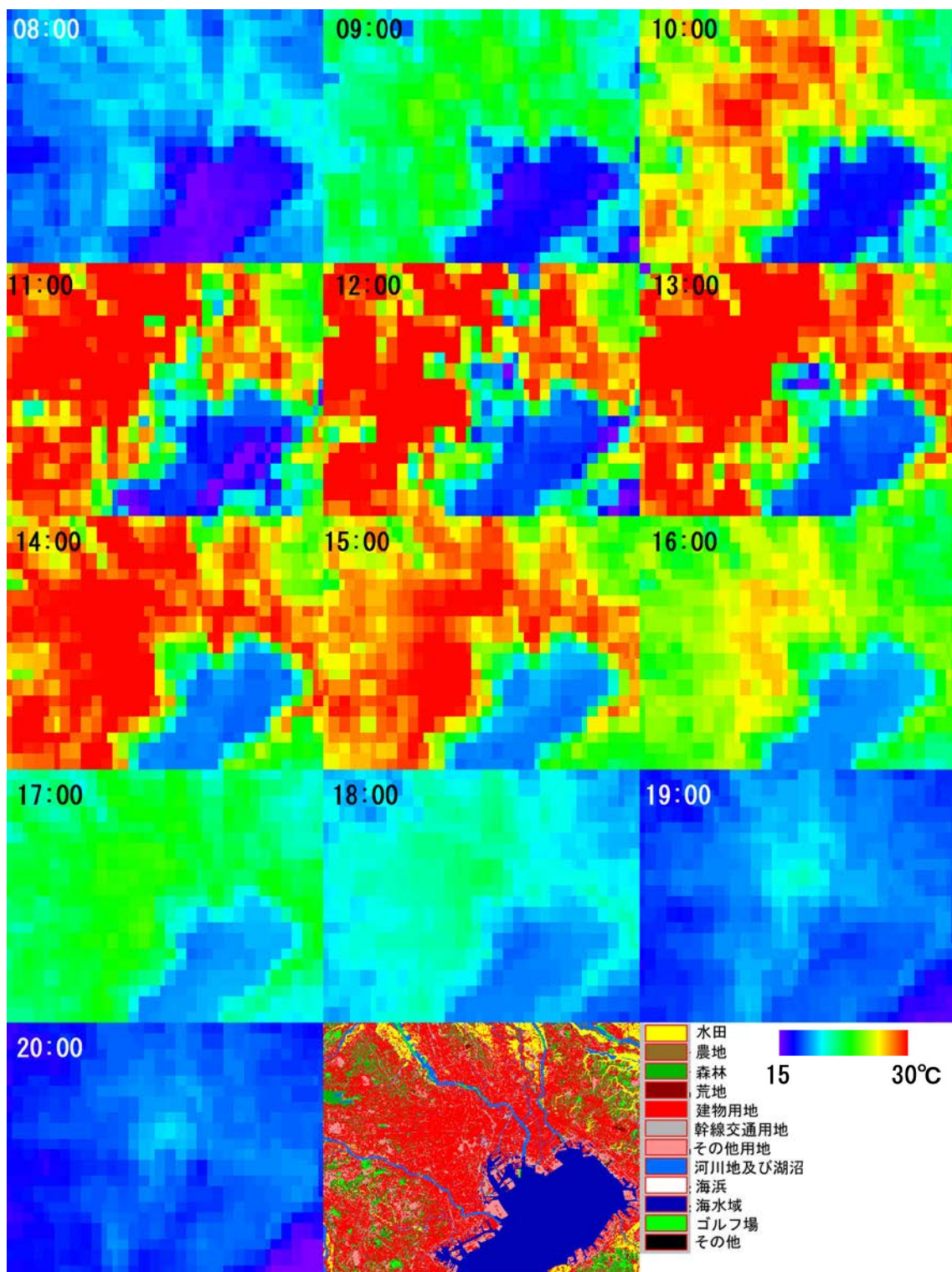


図 6-1 8時～20時(JST)までの1時間毎における  
東京とその周辺の地表面温度画像及び土地利用図

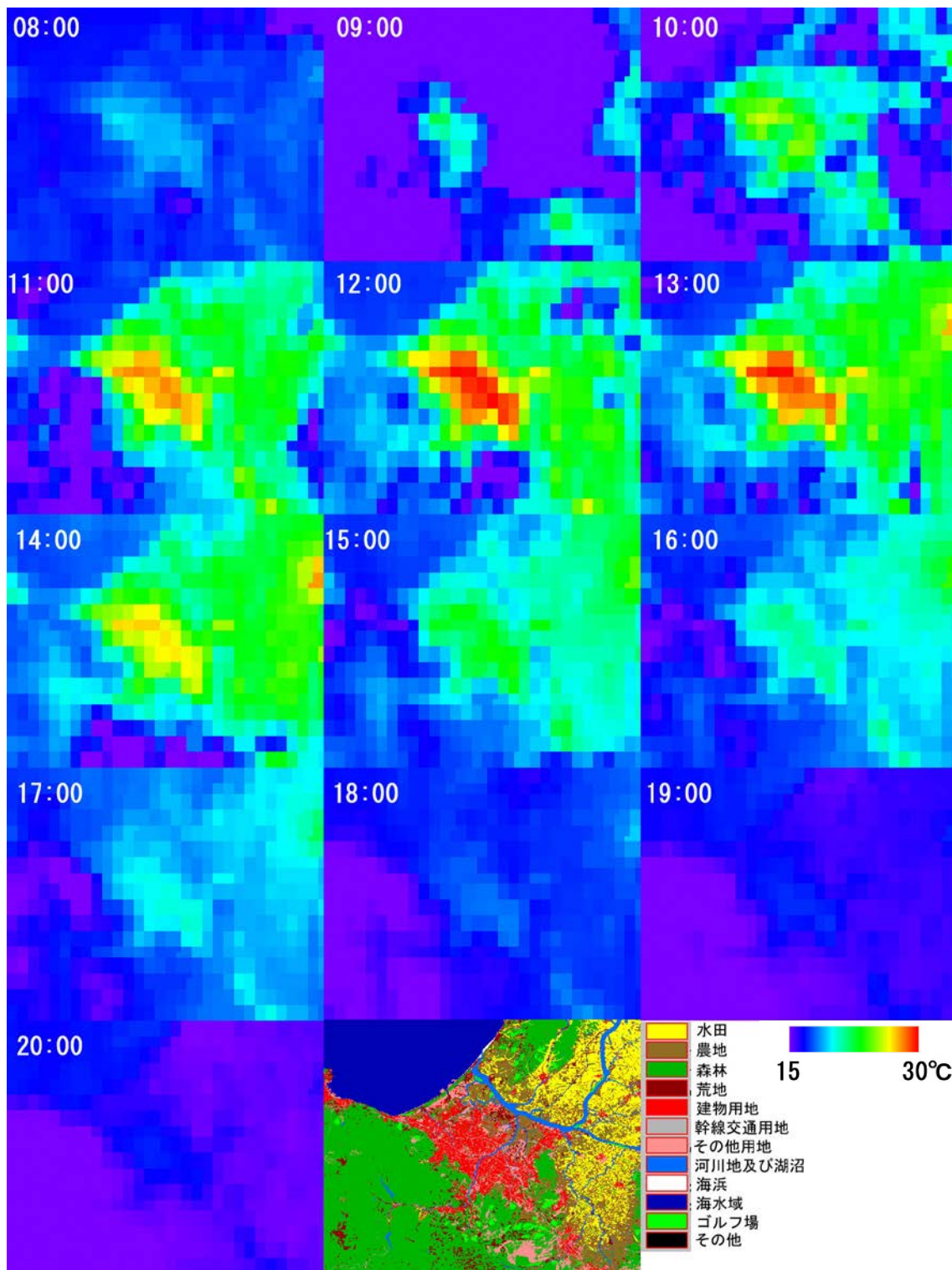


図 6-2 札幌とその周辺の地表面温度画像及び土地利用図



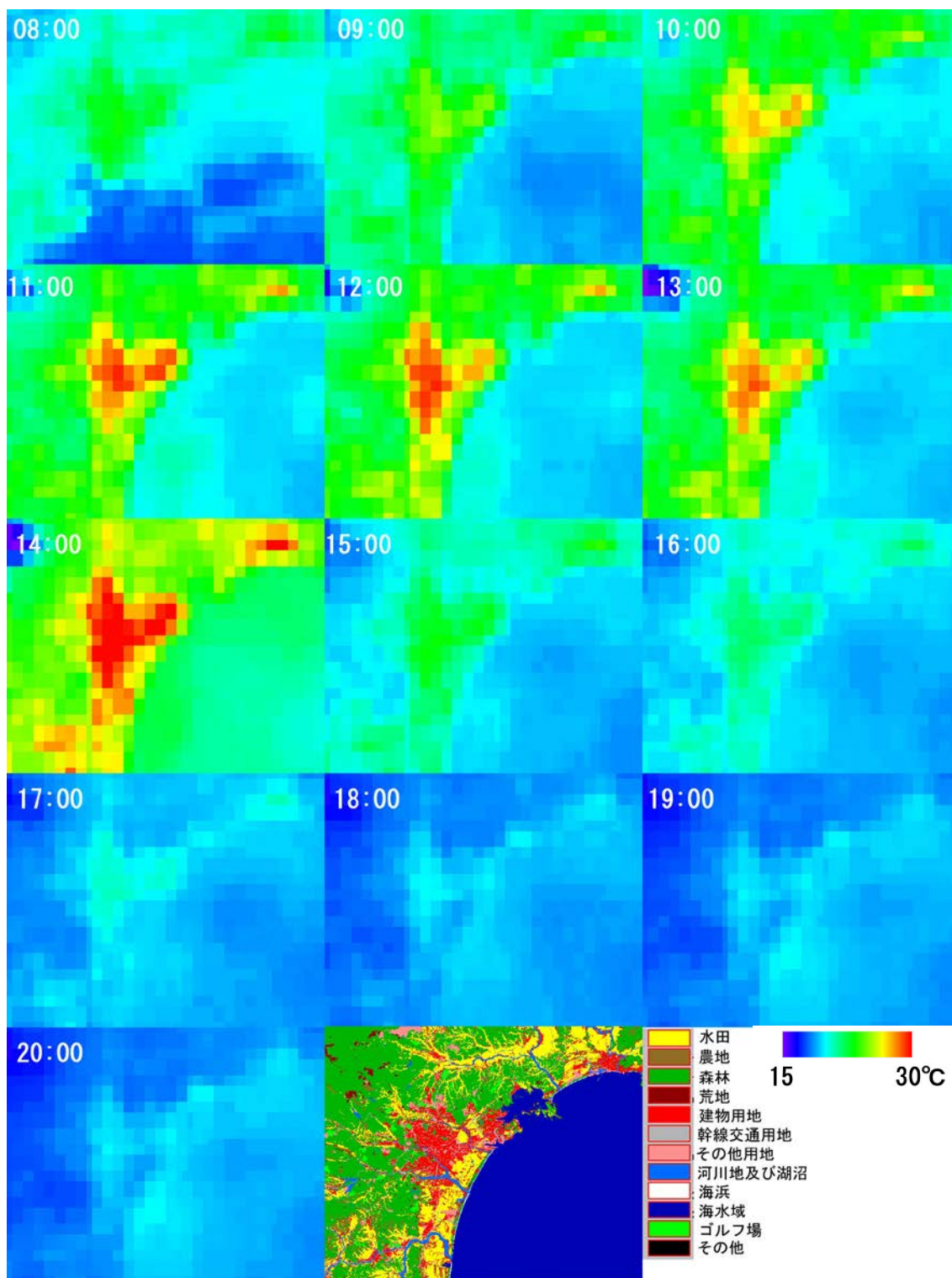


図 6-3 仙台とその周辺の地表面温度画像及び土地利用図

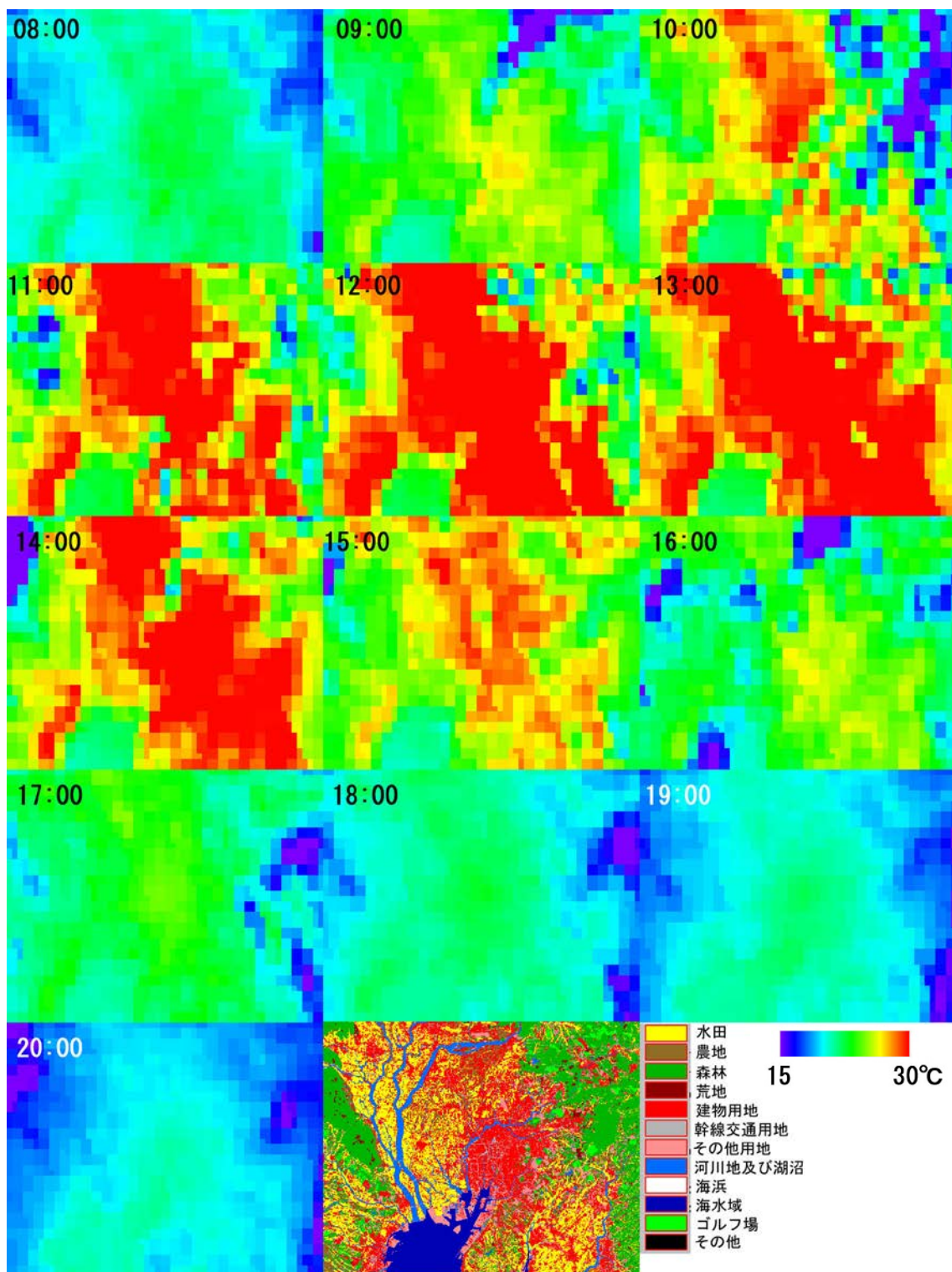


図 6-4 名古屋とその周辺の地表面温度画像及び土地利用図

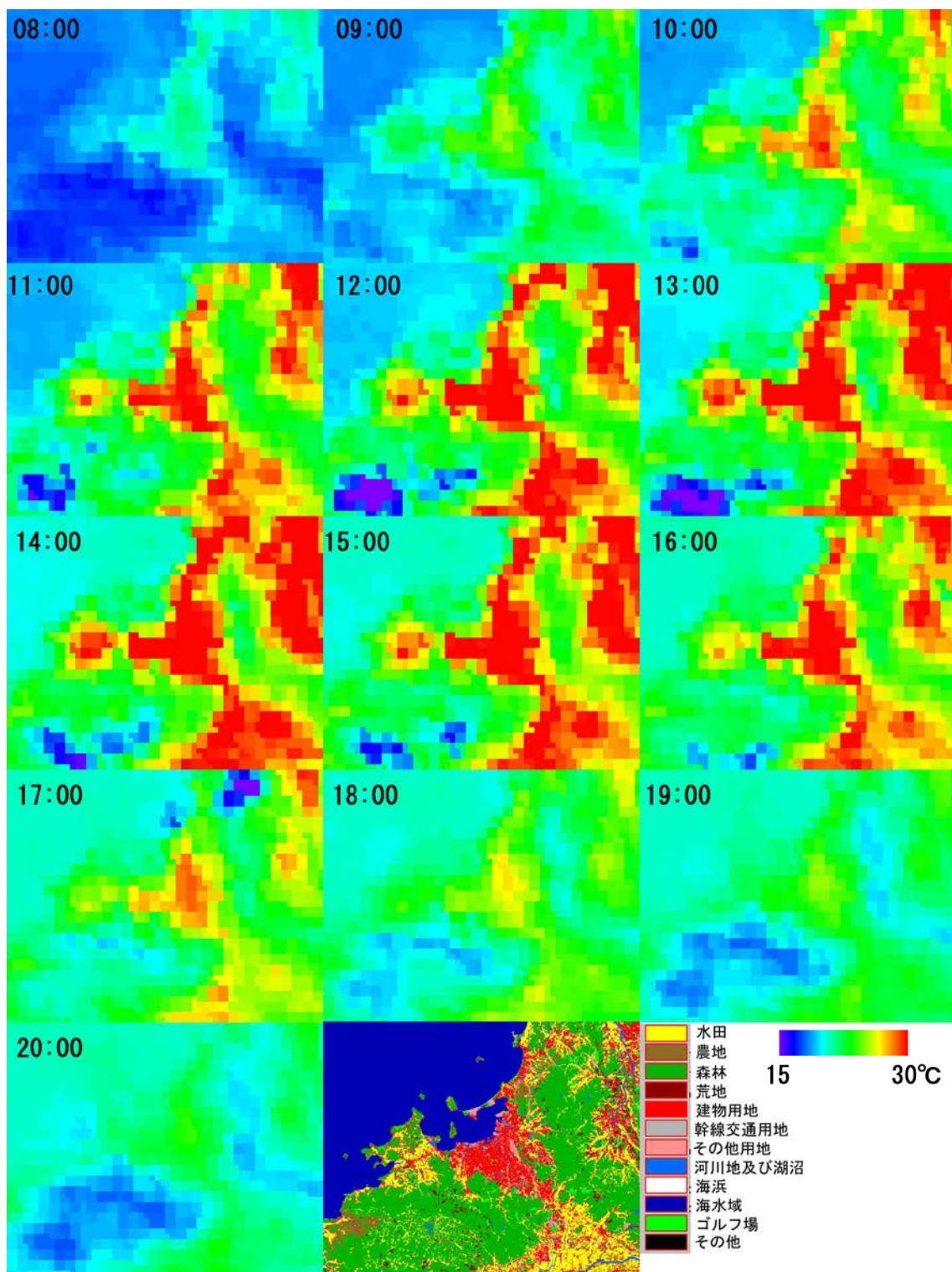


図 6-5 福岡とその周辺の地表面温度画像及び土地利用図

#### 6.4 気温と地表面温度の比較

気温と地表面温度の間には関係があることが知られている<sup>7) 8) 9)</sup>。我が国では全国の気象データを地域的に細かく監視するため、自動観測システム AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) が全国約 1,300 か所に設置されている。各都市の解析対象領域内に含まれる観測点は 3~7 点で、図 6-10、6-11 に東京と福岡のひまわり 8 号観測輝度温度と AMeDAS 気温データの日変化を示す。5 都市における解析対象領域内に含まれる AMeDAS 観測点において、両者の相関係数は表 6-1 のとおりである。雲の影響が大きい名古屋等を除くとほぼ 0.9 前後の値を示している。

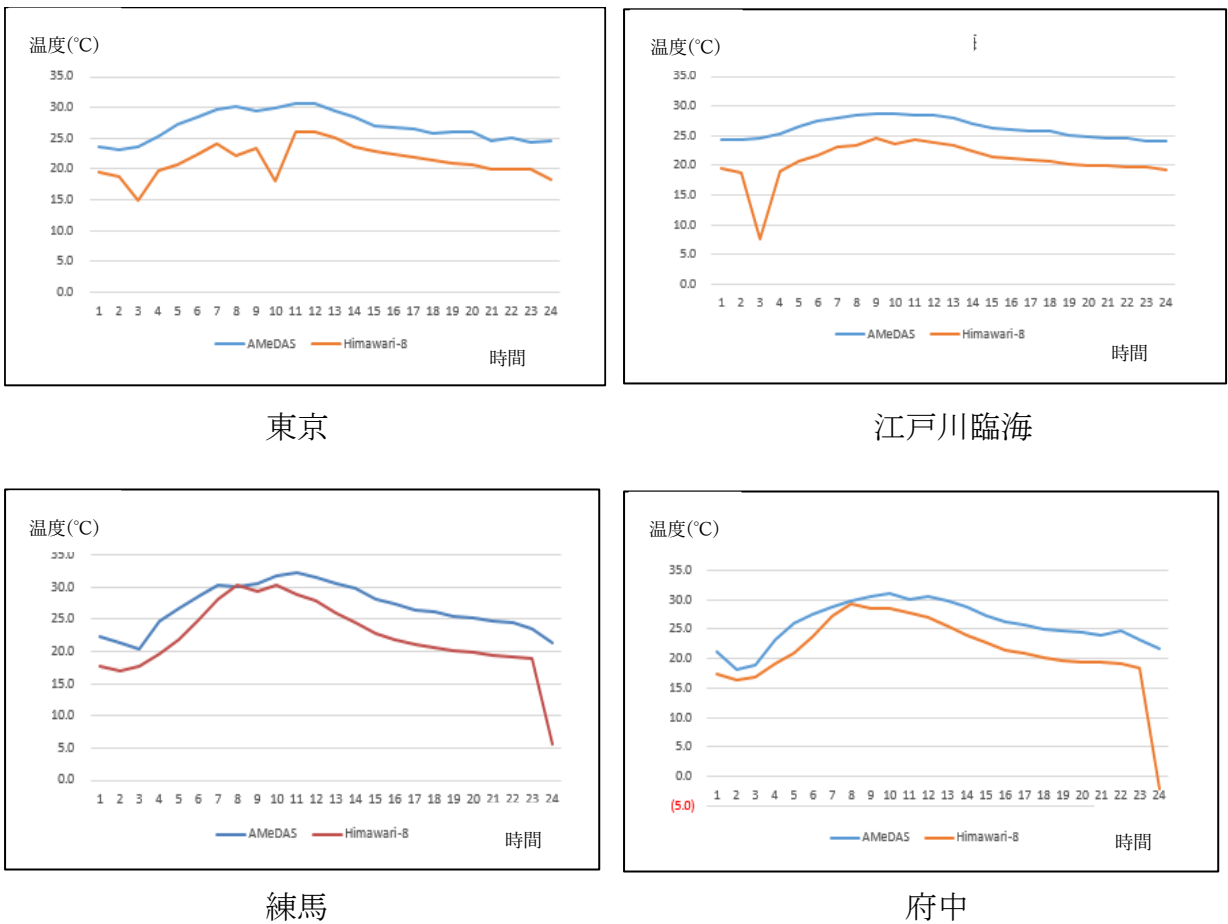
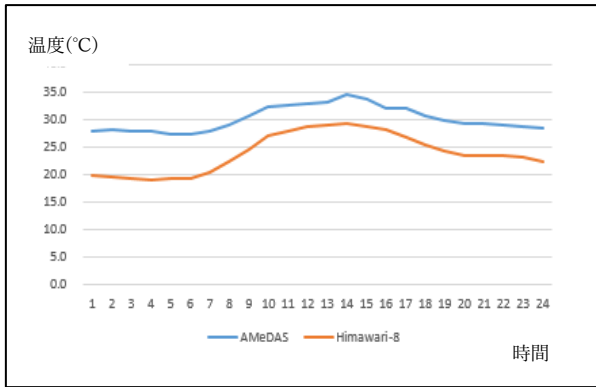
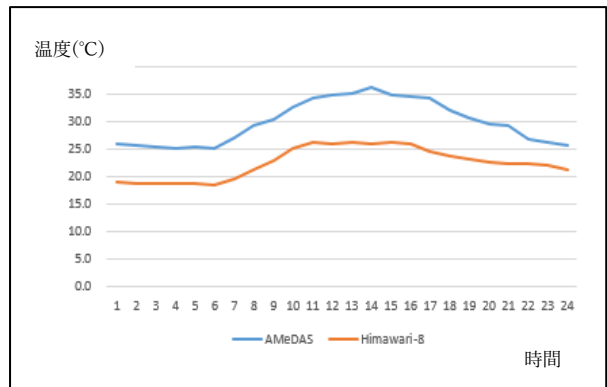


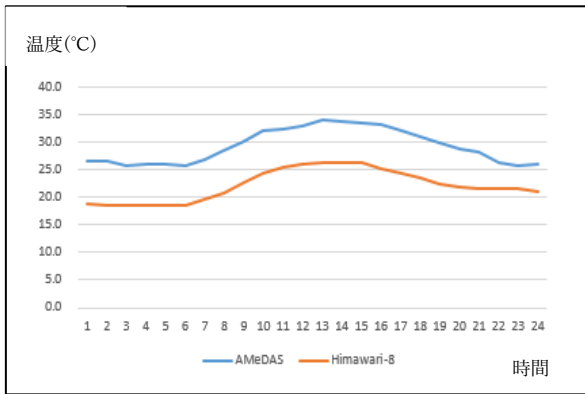
図 6-10 東京における AMeDAS 観測点の気温データとひまわり 8 号観測輝度温度の日変化



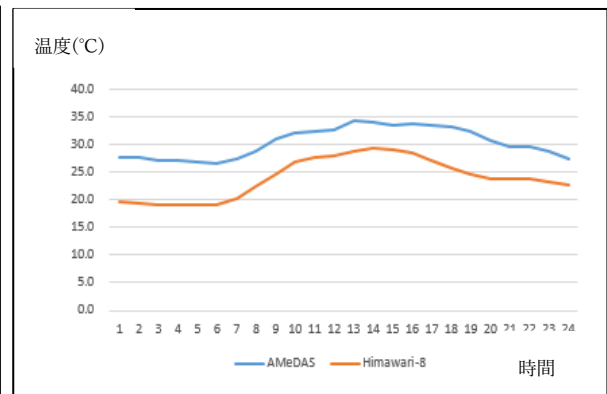
福岡



大宰府



前原



博多

図 6-11 福岡における AMeDAS 観測点の気温データとひまわり 8 号観測輝度温度の日変化

表 6-1 ひまわり 8 号観測輝度温度と AMeDAS 気温の相関係数

		AMeDAS観測点	Lat/Long		相関係数
東京	1	東京	35 139	41.5 45.0	0.7484
	2	江戸川臨海	35 139	38.3 51.8	0.6916
	3	羽田	35 139	33.2 46.8	0.7162
	4	府中	35 139	41.0 29.0	0.7669
	5	練馬	35 139	44.3 35.5	0.8924
札幌	1	札幌	43 141	3.6 19.7	0.9679
	2	山口	43 141	8.9 13.3	0.8743
	3	石狩	43 141	11.6 22.2	0.8455
	4	新篠津	43 141	13.2 38.7	0.8938
	5	江別	43 141	6.6 36.1	0.8957
	6	恵庭島松	42 141	55.6 33.9	0.9160
仙台	1	仙台	38 140	15.7 53.8	0.9101
	2	塩釜	38 141	20.3 0.8	0.8996
	3	石巻	38 141	25.6 17.9	0.9256
	4	東松島	38 141	25.6 12.8	0.9342
	5	鹿島台	38 141	27.6 5.5	0.9400
	6	大衡	38 140	28.4 53.3	0.9335
	7	名取	38 140	8.3 55.0	0.7948
名古屋	1	名古屋	35 136	10.0 57.9	0.5565
	2	豊田	35 137	7.9 10.6	0.1565
	3	大府	34 136	59.7 56.6	0.7480
福岡	1	福岡	33 130	34.9 22.5	0.9703
	2	前原	33 130	33.6 11.4	0.9422
	3	太宰府	33 130	29.8 29.4	0.9512
	4	博多	33 130	35.0 27.1	0.9600

## 6.5 都市域における地表面温度の時空間分布

人工的な土地被覆域は自然な土地被覆域よりも表面温度が上昇することが確かめられた。またひまわり 8 号による観測データは AMeDAS による気温データと同様な日変化を示していることから、相対的な温度分布情報としての利用が可能であることが確認出来た。ひまわり 8 号の熱赤外面像からは地表面温度の日変化と高温域の分布状況を監視できる。この分布の変動を地域傾向面分析<sup>10)</sup>により解析した。地域傾向面分析によれば、地表面温度情報を規則的な変動・分布としてとらえ、その特徴を視覚化することができる。都市の地表面温度分布の解析に採用し、得られた変化により都市における熱環境に関する一つの指標として、拡散パターンや変動プロセスの解明に寄与できると考えられる。

具体的な処理は、各画素の観測輝度温度の空間的分布と日変化を多項式で近似する。解析対象とした 5 都市において、24 時間分のデータを使用し以下に示す 5 次多項式により分析を行った。

$$Z = a_{i j k} x^i y^j t^k \quad (i+j+k \leq 5) \quad (3)$$

ここで  $(x, y)$  は画像座標、 $t$  は時間、 $z$  は地表面温度、 $a$  は最小自乗近似法により求めた係数である。

AHI バンド 14 画像を使用した 9 時から 19 時までの分析結果を、東京および名古屋を例として図 6-11, 6-12 に示す。図左は観測輝度温度、図右は地域傾向面分析画像である。日の出とともに温度上昇が始まり、高温域が広がる様子が可視化されている。

また、AMeDAS 観測点における傾向面分析結果から求めた日変化を図 6-13 に示す。各都市の中心に近い AMeDAS 観測点における日変化を比較すると、その特徴の違いが認められる。

図 6-14 に各都市中心付近の AMeDAS 観測点における傾向面分析結果に基づく地表面温度の日変化より 6 時から 21 時までの変化を示す。各地点における地表面温度の上昇幅や 21 時での残存増加温度の違い等に、それぞれの都市の特徴が現れている。

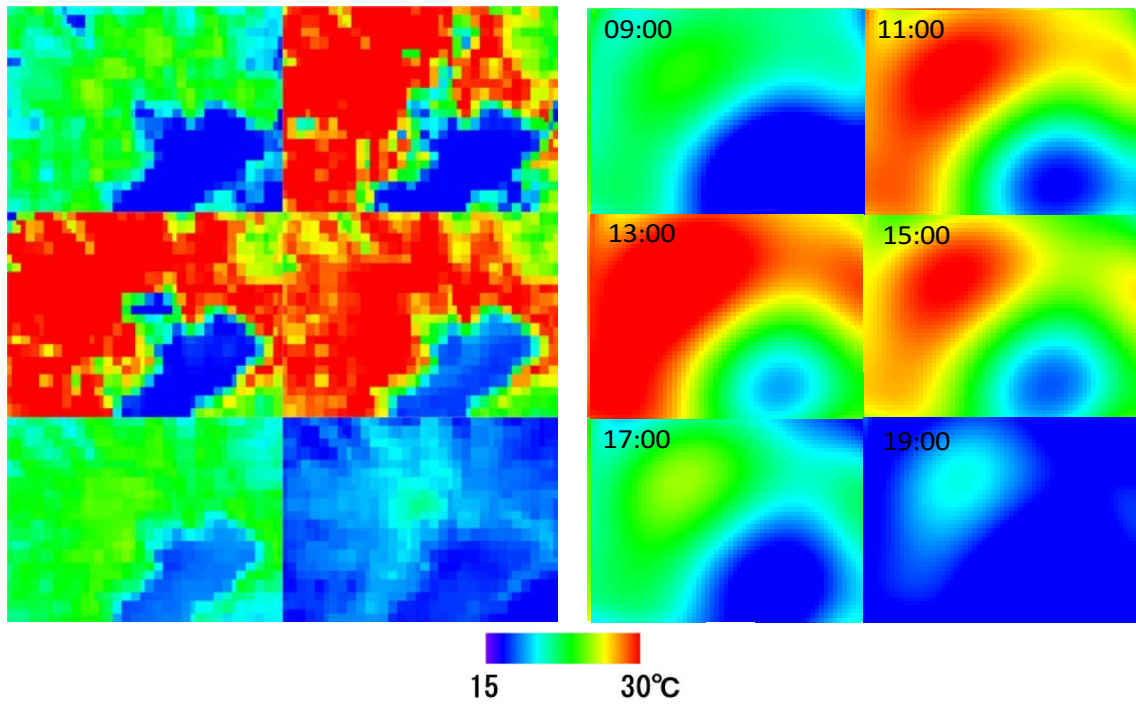


図 6-11 東京におけるひまわり 8 号観測輝度値の時空間傾向面分析結果

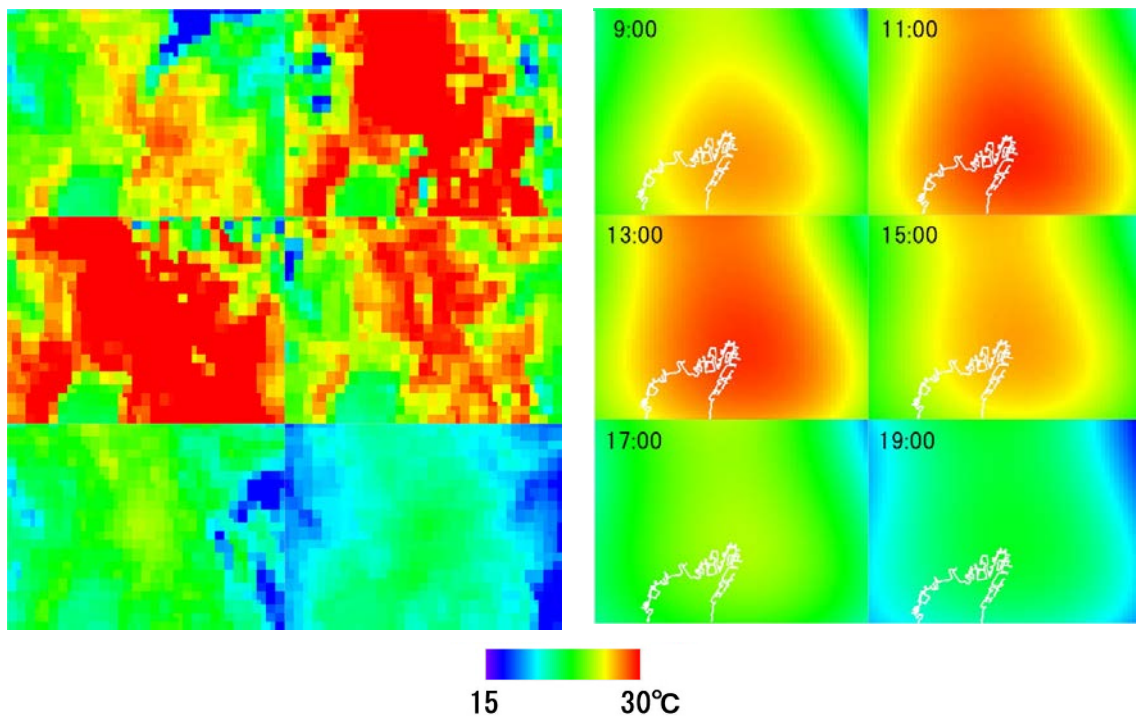
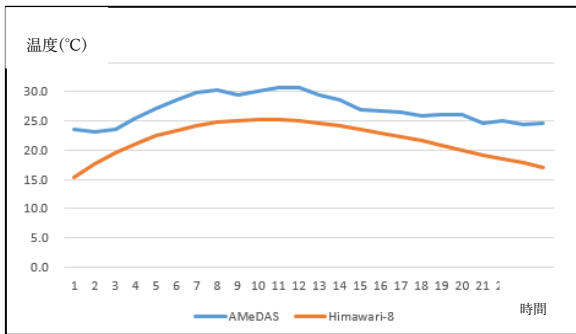
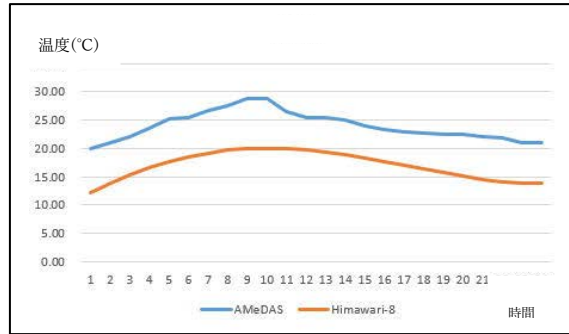


図 6-12 名古屋におけるひまわり 8 号観測輝度値の時空間傾向面分析結果

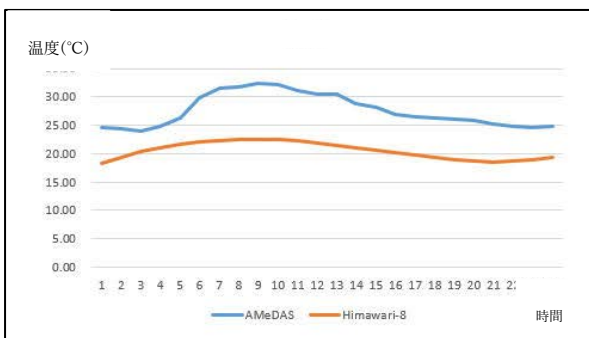




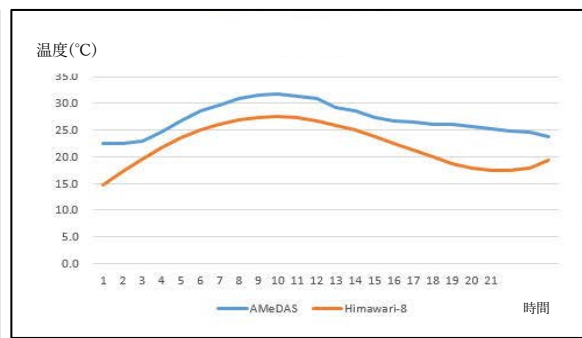
東京



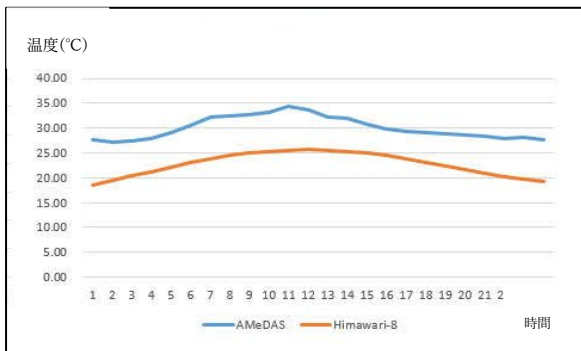
札幌



仙台



名古屋



福岡

図 6-13 傾向面分析結果から求めた日温度変化  
(東京, 札幌, 仙台, 名古屋, 福岡)

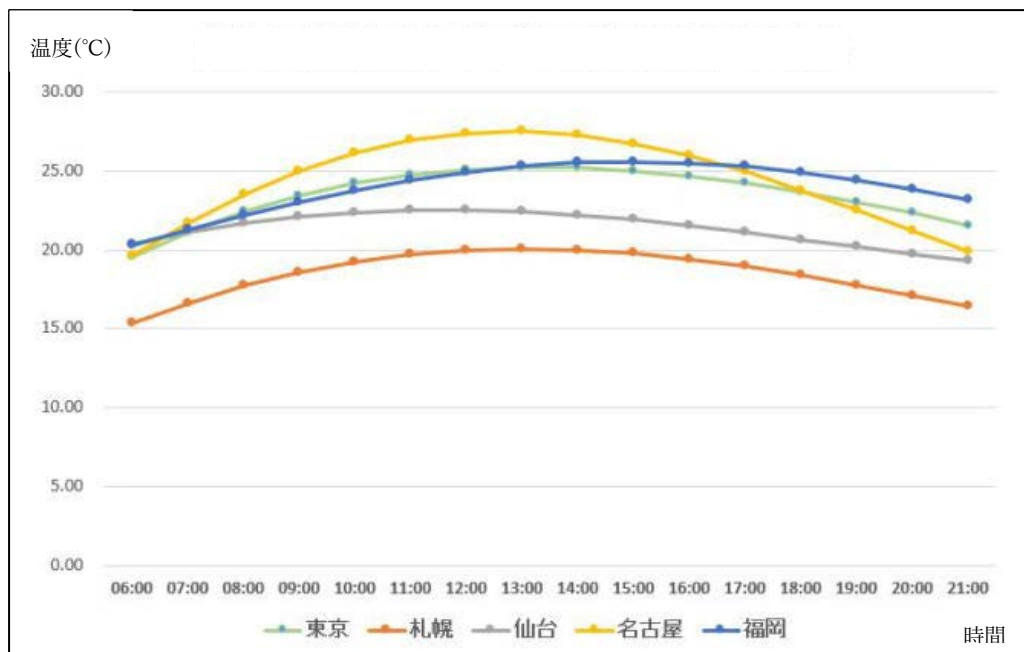


図 6-14 各都市中心付近の AMeDAS 観測点における地表面温度の変化の比較

### 6.6 本章で得られた成果と考察

都市の温度上昇は日本全国で観測されている。この 100 年間で年平均気温の上昇は表 6-2 に示すとおりである。表-2 に示した結果と分析結果 I (6 時と 13 時の気温差) と分析結果 II (6 時と 21 時の温度差) を比較すると、人口都市化率では東京および名古屋が、電力消費、気温変化では東京および福岡がそれぞれ大きな値を示し、その都市における規模が反映されている。

また、分析結果 II から東京と福岡における夜間の熱の放出がそれぞれ昼間と比較し約 2°C となり、放出できていないことが数値的にも判断することができる。温度上昇の低い仙台と札幌は、各都市の緯度が高い位置的な影響もあると考えられる。福岡と札幌は、両者の都市の規模は同等だが分析結果 I と II の差が大きく、その要因として森林や海域などの土地被覆状況の違いが影響しているものと考えられる。

本章では、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。

表 6-2 各都市における人間活動を示す要因と傾向面分析結果から算出した温度上昇及び残存増加温度

	人口(人)	電力消費量 (1000kWh)	都市化率 (%)	気温変化 (/100年)	分析結果 I 6時と13時の温度差	分析結果 II 6時と21時の温度差
東京	13,398,087	43,786,676	92.9	3.2	5.7	2.0
名古屋	2,276,130	1,584,455	89.3	2.8	4.7	1.0
福岡	1,518,440	6,628,117	64.3	3.1	2.1	-1.0
札幌	1,945,504	5,428,052	75.1	2.7	7.9	0.3
仙台	1,073,242	3,695,040	69.9	2.3	5.0	2.8

ヒートアイランド現象の主要因と考えられる人間活動に関して、人口、電力消費、都市化率、この100年間の気温変化を表4に示す<sup>18) - 22)</sup>。表6-2の要因毎に各都市の値を比較すると以下のとおりであった。

- ・人口：東京 > 名古屋 > 札幌 > 福岡 > 仙台
- ・電力：東京 > 福岡 > 札幌 > 仙台 > 名古屋
- ・都市化：東京 > 名古屋 > 札幌 > 仙台 > 福岡
- ・気温：東京 > 福岡 > 名古屋 > 札幌 > 仙台
- ・分析 I (6時と13時の温度差)：札幌 > 東京 > 仙台 > 名古屋 > 福岡
- ・分析 II (6時と21時の温度差)：仙台 > 東京 > 名古屋 > 札幌 > 福岡

ひまわり8号による6時から13時の地表面温度の上昇は、札幌および仙台の高緯度に位置する都市、および人口の多い東京が大きな値を示した。また21時と9時の地表面温度を差分し、上昇した地表面温度が十分に低下せず残存している温度として比較すると、仙台と東京が大きな値を示し、福岡と札幌が0°に近い値を示した。東京と仙台は上昇した地表面温度が日が落ちてすぐには放熱できていないものと考えられる。逆に札幌と福岡は21時の時点で十分放熱されていると考えられる。

## 第6章<参考文献>

- 1) 永山他：ヒートアイランド現象の解明・対策に資する土地被覆整備の試み，日本写真測量学会 18 年次学術講演会発表論文集，pp. 11-12，2005.
- 2) 天野，松下：連続気温観測による地方都市でのヒートアイランド特性，土木学会中部支部研究発表会，VII-32，pp. 539-540，2008.
- 3) 福田，佐俣，井上：横浜市 GIS を用いた地表面被覆マップの作成と気温観測値との関連性，横浜市環境科学研究所報第 32 号，pp. 15-21，2008.
- 4) 環境省：平成 11 年度ヒートアイランド現象抑制のための対策手法報告書，環境省ホームページ<<http://www.env.go.jp/air/report/h20-05/index.html>>，1999. 3.
- 5) 環境省：平成 22 年度熱中症とヒートアイランド現象の関係解析調査業務報告書，環境省ホームページ<<http://www.env.go.jp/air/report/h23-02/index.html>>，2011.
- 6) 環境省：平成 12 年度熱中症とヒートアイランド現象の実体解析と対策のあり方について報告書，環境省ホームページ(<<http://www.env.go.jp/air/report/h14-01/index.html>>)2003.
- 7) 佐俣満夫：都市における地表面温度の特性、横浜市環境科学研究所報大 19 号、pp. 31-35、1995.
- 8) 菅原広史、近藤純正：都市における各種地表面温度の敏感度解析、日本気象学会誌「天気」、Vol. 42, No. 12, 1995.
- 9) 伊藤大悟、森田真一、田中克哉、後藤圭二、清水桐郎、三笠昌子：熱画像データを用いた地表面温度と暑熱環境に関する分析、日本ヒートアイランド学会論文集，Vol. 9，2014.
- 10) 石水，大友，磯部：地域傾向面分析・適用事例および問題点，地理学評論，Vol. 49, No. 7, pp. 455-469, 1976.

11) 東京都総務局統計課：東京都統計年鑑，東京都の統計，  
([http://www.toukei.metro.tokyo.jp/tnenkan/tn-index.htm# h21](http://www.toukei.metro.tokyo.jp/tnenkan/tn-index.htm#h21)).

12) 名古屋市総務局企画部統計課：名古屋市統計年鑑，毎年の統計データ，  
(<http://www.city.nagoya.jp/shisei/category/67-5-9-0-0-0-0-0-0-0.html>).

13) 福岡市総務企画局企画調整部統計調査課：福岡市統計書，  
<<http://www.city.fukuoka.lg.jp/soki/tokeichosa/shisei/toukei/toukeisyo/index.html>>.

14) 仙台市民局広聴統計課：仙台市統計書，  
<<http://www.city.sendai.jp/chosatoke/shise/toke/tokesho/index.html>>.

15) 札幌市まちづくり政策局政策企画部企画課，札幌市統計書  
<<http://www.city.sendai.jp/chosatoke/shise/toke/tokesho/index.html>>.

## 第7章

### 結論と展望

## 第7章 結論と展望

新世代静止気象衛星「ひまわり8号」により連続観測された地上分解能2kmの熱赤外面像データから地表面温度を算出することは、ヒートアイランド現象の規模や実体を把握し、対策等の計画・検討に資するところが大きいと考えられる。

本研究の第一の目的は、日本の主要都市の熱環境についてその特徴を分析することであった。また、研究の第二の目的は、ヒートアイランド現象の可視化・数値化により現象を模式化することであった。これらによりリモートセンシング技術の有用性の一例を示すことができたと考えられる。

本研究の成果を要約すれば以下のとおりである。

### 7.1 静止気象衛星による地表面温度観測（第2章）

第2章では、静止気象衛星「ひまわり8号」AHIの可視・近赤外波長帯域で観測を行っているバンド1~4による土地被覆分類、および熱赤外波長帯で観測を行っているバンド11~16による観測輝度温度情報から、従来から活用されている極軌道衛星による温度情報と比較し、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185km、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2km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、両者の最も近い波長帯であるバンド14とバンド6の相関係数は0.898、一次回帰係数のゲイン値は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。これらのことから「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。

## 7.2 静止気象衛星による観測データの大気補正 (第3章)

第3章では、大気の影響を除去するためスプリットウィンドウ法による検証を行った。スプリットウィンドウ法(Split-Window Method)は、従来から多く利用されている大気補正の手法であり、熱赤外領域の $11\mu\text{m}$ 帯と $12\mu\text{m}$ 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的な手法とされている。検討には、ASTERデータを参照し精度検証を行った。ASTERデータは、長年の観測と現地調査により高精度な大気補正アルゴリズムが開発されている。「ひまわり8号」の熱赤外波長帯バンド11~16から任意の二つのBandによりASTERデータを参照して精度検証を行ったところ、最も良好な組み合わせはBand14と15であり、残差の絶対値の平均値は $1.0^\circ$ であった。これらのことから「ひまわり8号」観測データにおいてもスプリットウィンドウ法の適用することで大気の影響を除去できることを確認できた。

## 7.3 静止気象衛星による地表面温度の分布パターンと日変化 (第4章)

第4章では、「ひまわり8号」による観測データから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、既往研究では、主に日本国内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Band14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。



#### 7.4 静止気象衛星による観測データにみられる短時間の雲の影響の除去（第5章）

第4章の結果から地表面温度の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、地表面温度の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挙げられる。

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用し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、②2時間から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。

#### 7.5 「ひまわり8号」データによる主要都市の熱環境静止気象衛星による地表面温度の時空間分布パターンおよびヒートアイランド現象の評価（第6章）

第4章において、地域傾向面分析による空間的解析の有効性を示したが、第6章では、地域傾向面分析に時間的要素を加えた時空間地域傾向面分析を行った。実際に日本の主要都市5都市(東京、名古屋、福岡、札幌、仙台)を対象に時空間傾向面分析を行った。その結果、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温度を比較し、併せて、人間活動の指標(人口、消費電力、都市化率、100年間の気温変化)と比較することで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。

## 7.6 展望

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思われる。

## 謝辞

本論文をとりまとめるにあたり、常日頃からご指導頂き、主査を務めて頂きました日本大学生産工学部土木工学科 教授 博士(工学) 杉村 俊郎 先生は、終始ご厚意なる多くのご指導ならびにご教授を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

本論文の副査を務めて頂きました日本大学生産工学部環境安全工学科 教授 博士(工学) 岩下 圭之 先生、日本大学理工学部土木工学科 教授 博士(工学) 羽柴 秀樹 先生には、衛星リモートセンシング技術分野におけるご助言と論文執筆に関わるご指導を賜り、心から厚くお礼申し上げます。同じく副査を務めて頂きました日本大学生産工学部土木工学科 教授 博士(工学) 森田 弘昭先生には、環境工学分野におけるご助言をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

また、日本大学生産工学部土木工学科 准教授 博士(工学) 青山 定敬先生、日本大学生産工学部環境安全工学科 准教授 博士(工学) 野中 崇志先生、日本大学生産工学部土木工学科 専任講師 博士(工学) 朝香 智仁先生には、本研究を遂行する上で、様々なご意見とご指摘、ご指導を賜りました。心から厚くお礼申し上げます。

日本大学生産工学部土木工学科測量学研究室の大学院生ならびに卒業研究生の皆様方には、多大なるご協力を賜りました。生産工学研究科土木工学専攻修士2年 中村 光士郎 氏、鈴木 真之介 氏、福島 滉貴 氏においては、多くの困難を共にしました。ここに、心から厚く感謝申し上げます。

そして、本論文を作成する機会を与えて下さった日本大学名誉教授 工藤 勝輝 先生におかれましては、常日頃から研究者そして教員としての心構えや姿勢を暖かくそして厳しくご指導賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

最後に、本論文を作成するにあたり、私が所属している日本大学生産工学部土木工学科の教職員の皆様方、そしていつも優しく見守り、支えていただいた両親に、格別なるご配慮とご支援、そして激励を頂きました。この場を借りて感謝の意を表します。

平成 31 年 1 月

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

内田 裕貴