

博士論文

丘陵都市における都市気候ゾーン毎の
高温域形成要因分析およびその対策に関する研究
—都市高温化緩和策の適所導入支援ツール作成に向けて—

A study on the factors of high temperature areas
and its measures for each urban climate zone in hilly city
-For Making Supporting Tool Introducing Effective Urban Warming Mitigation-

横山 真
Makoto Yokoyama

広島大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Hiroshima University

2019年5月
May 2019

目次

第1章 はじめに

| | | |
|-----|-------------|---|
| 1-1 | 研究背景 | 1 |
| 1-2 | 適所導入支援ツールとは | 2 |
| 1-3 | 関連する既往研究 | 3 |
| 1-4 | 研究目的 | 6 |

第2章 研究概要

| | | |
|-----|-----------|----|
| 2-1 | 丘陵都市とは | 8 |
| 2-2 | 対象地概要 | 8 |
| 2-3 | 数値計算モデル概要 | 9 |
| 2-4 | 本研究の構成 | 11 |

第3章 丘陵都市における気温分布傾向の把握

| | | |
|-------|----------------------|----|
| 3-1 | 本章の概要 | 14 |
| 3-2 | 典型的夏季晴天日の抽出と風況パターン分類 | 15 |
| 3-2-1 | 典型的夏季晴天日の抽出 | |
| 3-2-2 | 卓越風向の分析 | |
| 3-2-3 | 風況パターン分類 | |
| 3-3 | 気温実測調査および数値計算概要 | 19 |
| 3-3-1 | 気温実測調査概要 | |
| 3-3-2 | 数値計算概要 | |
| 3-4 | 横浜市全域の気温分布傾向把握 | 23 |
| 3-5 | 各数値計算結果と実測調査結果との比較 | 26 |
| 3-6 | 本章のまとめ | 28 |

第4章 多変量解析を用いた丘陵都市の都市気候ゾーニング

| | | |
|-------|--------------|----|
| 4-1 | 本章の概要 | 31 |
| 4-2 | 数値計算概要 | 32 |
| 4-3 | 数値計算結果 | 34 |
| 4-3-1 | 気象台観測データとの比較 | |

| | |
|------------------------|----|
| 4-3-2 気温分布・風分布傾向の把握 | |
| 4-4 多変量解析による都市域の分類 | 39 |
| 4-4-1 主成分分析 | |
| 4-4-2 クラスタ分析 | |
| 4-5 ゾーニングの妥当性確認 | 44 |
| 4-5-1 ゾーン毎の特徴 | |
| 4-5-2 実測データによるゾーニングの検証 | |
| 4-6 本章のまとめ | 47 |

第5章 地形特性が異なるゾーン毎の高温化対策方針の検討

| | |
|-------------------|----|
| 5-1 本章の概要 | 50 |
| 5-2 対象地と分析データ概要 | 51 |
| 5-2-1 対象地の概要 | |
| 5-2-2 実測調査概要 | |
| 5-2-3 数値計算概要 | |
| 5-3 対象谷戸の気温分布傾向 | 56 |
| 5-4 現状都市気候の分析 | 58 |
| 5-4-1 実測結果との比較 | |
| 5-4-2 日中の熱環境・風環境 | |
| 5-4-3 夜間の熱環境・風環境 | |
| 5-5 潜在自然気候の分析 | 64 |
| 5-5-1 日中の熱環境・風環境 | |
| 5-5-2 夜間の熱環境・風環境 | |
| 5-6 地形分類毎の対策方針の提案 | 67 |
| 5-7 本章のまとめ | 67 |

第6章 海風特性が異なるゾーン毎の高温化対策方針の検討

| | |
|--------------------|----|
| 6-1 本章の概要 | 70 |
| 6-2 対象エリアおよび数値計算概要 | 71 |
| 6-2-1 対象エリア | |
| 6-2-2 数値計算概要 | |
| 6-3 各数値計算結果 | 75 |
| 6-3-1 メソ数値計算の水平分布図 | |
| 6-3-2 地区数値計算の水平分布図 | |
| 6-3-3 上空風速の比較 | |

| | |
|----------------------------|----|
| 6-4 気温と風の関連分析..... | 78 |
| 6-4-1 評価単位地区の設定 | |
| 6-4-2 気温と風の関連 | |
| 6-5 地区内パラメータとの関連分析..... | 81 |
| 6-5-1 地区内パラメータの算出 | |
| 6-5-2 気温・風速と地区内パラメータの関連 | |
| 6-5-3 気温・風速と地区内パラメータの重回帰分析 | |
| 6-5-4 対策方針の提案 | |
| 6-6 本章のまとめ..... | 88 |
| 第7章 結論と展望 | |
| 7-1 結論..... | 89 |
| 7-2 展望..... | 90 |

謝辞

第1章 はじめに

- 1-1. 研究背景
- 1-2. 適所導入支援ツールとは
- 1-3. 関連する既往研究
- 1-4. 研究目的

第1章 はじめに

1-1. 研究背景

近年、都市域では地球温暖化および都市ヒートアイランド現象による「都市高温化」が生じている。この都市高温化は特に夏季において人々の快適性を損ない、健康被害（熱中症や睡眠障害等）、極端気象（集中豪雨等）や冷房エネルギー消費の増大といった様々な問題を引き起こしていると言われており、その緩和が求められている¹⁻¹⁾。

都市高温化緩和のためには、「市街地の風通し向上」や「緑化」等の手法が多数存在し、既往研究ではこれらの効果が実測調査や数値計算を通して検証されている^{例えば1-2)1-3)}。そのため今後はこれら都市高温化緩和策を積極的に導入した「都市高温化緩和に配慮した都市づくり」を行っていく必要があると考えられる。

しかし、これらの都市高温化緩和策の効果は対象とする場所の「気候特性」によって大きく異なると考えられる。例えば、沿岸部の市街地では海から冷涼な風が吹くため、「風の道」を設けるなど市街地内の風通し向上を図ることにより、熱環境の大きな改善が期待できる。一方で内陸部の市街地では、沿岸部のように冷涼な風が吹かないため、風通し向上による熱環境の改善はあまり期待できないと考えられる。このような「風資源の乏しい気候特性」のエリアでは、市街地内の「緑被率の向上」や「緑陰の創出」といった沿岸部の市街地とは異なった手法による熱環境の改善が必要と考えられる。

このように都市高温化緩和に配慮した都市づくりを効果的に進めるためには、対象とする場所の「気候特性」を捉えた適材適所の都市高温化緩和策を選択していくことが重要である。しかし現状、実際に都市づくりを行う人々にとって、対象とする場所毎に適した都市高温化緩和策を知る術はほとんどなく、この点に都市高温化緩和策を積極的に導入した都市高温化緩和に配慮した都市づくりが進まない一因があると考えられる。

以上の背景より、今後、都市高温化緩和に配慮した都市づくりを効果的に進めていくためには、対象とする場所毎の「気候特性」の違いを考慮し、「どのようなエリア」に「どのような都市高温化緩和策」を用いれば良いか（効果的か）ということ、都市づくりを行う人々に分かりやすく伝えるツール（以下、適所導入支援ツール）を作成し、都市づくりの中で活用していく必要があると考えられる。

1-2. 適所導入支援ツールとは

本研究において、適所導入支援ツールは「どのようなエリア」を示した対象地の「①都市気候ゾーニングマップ」、および「どのような都市高温化緩和策」をゾーン毎に示した「②対策メニューリスト」を組み合わせることによって実現するものと想定している（図 1-1 参照）。

具体的には「①都市気候ゾーニングマップ」は、対象地全域を都市気候特性の観点から分類（ゾーニング）し、これをマップとして示したものである。このようなマップを作成するためには、まず対象地全域の都市気候を面的に把握・分析し、その結果をもとに対象地を都市気候特性の観点から定量的に分類する必要がある。このような作業には対象地全域の都市気候分析を必要とするため、対象とする県や市全域の広範囲に対して行った実測調査結果や数値計算結果を活用する必要がある。

一方「②対策メニューリスト」は「①都市気候ゾーニングマップ」で示される各ゾーンにおいて、それぞれの気候特性を踏まえた効果的な建物・都市形態の改善策（都市高温化緩和策）をリストとして示したものである。このようなリストを作成するためには「①都市気候ゾーニングマップ」で示された各ゾーンの市街地において、高温化と建物・都市形態との定量的な関連分析を行い、ゾーン毎に効果的な建物・都市形態の改善策をそれぞれ示す必要がある。このような作業には高温化と建物・都市形態との関連分析を必要とするため、建物・都市形態の影響を考慮した空間解像度の高い実測調査結果や数値計算結果を活用する必要がある。

またこのような適所導入支援ツールを実現するためには、前提条件として、前節で述べたように気候特性の違いによって効果的な都市高温化緩和策が異なること、つまり都市気候ゾーン毎に高温域の形成要因が異なり、その結果考えるべき都市高温化への対策方針が異なることを定量的な分析に基づいて明らかにする必要があると考えられる。

なお本研究では「適所導入支援ツール」の使い方として、各地で「都市マスタープラン」や「地区計画」等を作成する際に、その対象地が位置するゾーンの気候特性を踏まえた「対象地全体の都市高温化に対する方針」や「対象地内で行う具体的な建物・都市形態改善策」を設定する際の根拠として用いられることを想定している。具体的には、都市づくりを行う人々が計画を作成する対象地の気候特性を「①都市気候ゾーニングマップ」から読み取り、さらにそのゾーンで効果的と考えられる建物・都市形態の改善策を「②対策メニューリスト」から選択するという形を想定している。

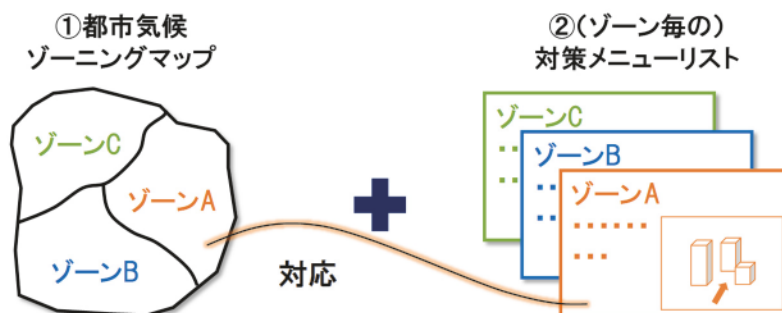


図 1-1 適所導入支援ツールのイメージ

1-3. 関連する既往研究

以上のように、本研究で想定している「適所導入支援ツール」を作成するためには、まず都市気候や高温化に関して、異なる種類（範囲や空間解像度）のデータを分析し、「①都市気候ゾーニングマップ」、および「②対策メニューリスト」をそれぞれ作成し、これらを組み合わせる必要がある。そこで本節では、適所導入支援ツールを構成する「①都市気候ゾーニングマップ」および「②対策メニューリスト」に関連する既往研究の整理を行う。

① 都市気候ゾーニングマップ作成に関連する既往研究

まず「①都市気候ゾーニングマップ」作成に関連して、県や市全域のような広範囲を対象とし、気候特性の観点から対象地のゾーニングを行っている既往研究として、例えば北尾ら¹⁻⁴⁾が挙げられる。北尾ら¹⁻⁴⁾は大阪地域を対象にメソ気象モデル WRF による数値計算結果を用いて海風前線を推定し、海風利用の観点から大阪地域のゾーニングを行っている。また大場ら¹⁻⁵⁾は仙台市を対象に Software Platform による数値計算結果を用いて「顕熱収支 MAP」を作成し、各地域の地域特性を考慮したヒートアイランド対策検討のためのゾーニングを行っている。これらの既往研究では、いずれもメソ気象モデルによる数値計算を活用して対象地の都市気候を再現し、その結果をもとにゾーニングを行っている。

一方で実測調査を活用して対象地のゾーニングを行っている既往研究も見られる。例えば鍋島ら¹⁻⁶⁾は大阪平野周辺の気温実測地点（80 地点）のデータに対して、主成分分析とクラスター分析を用いて気温の日変化特性の観点から実測地点を分類し、大阪平野の地域類型を行っている。また Matuso ら¹⁻⁷⁾は広島市を対象に 64 地点で気温実測調査を行い、鍋島ら¹⁻⁶⁾と同様の手法を用いて気温実測地点の分類を行っている。

これらのように対象地の都市気候ゾーニングを行っている既往研究は、「数値計算を活用した手法」と「実測調査を活用した手法」の2つに大きく分類でき、各地でこのような都市気候ゾーニングが行われている。しかし、どちらの手法においても県や市全域といった広範囲を対象としている一方で、空間解像度は比較的粗い。例えば、数値計算を活用する場合、メソ気象モデルによる数値計算の多くは計算機性能や計算時間の制約等により、空間水平解像度は概ね数 km～500m 程度である。また実測調査を活用する場合、広範囲の対象地に対して設置できる実測地点数には限界がある。そのためどちらの手法においても、微地形や河川等のスケールの小さい影響をゾーニングに反映することは難しいと考えられる。

またこのような都市気候ゾーニングの結果を発展させた事例として、「都市環境気候図¹⁻⁸⁾」が挙げられる。都市環境気候図とは対象地域を気候特性の観点からゾーニングし、各ゾーンの気候的特徴および各種課題への対策指針を示した地図集である。元々はドイツで大気汚染対策のために作成・活用されているツールであるが、日本では主に都市高温化緩和に配慮した都市・地域づくりを効果的に行うためのツールとして捉えられている。

例えば Matuso ら¹⁻⁹⁾は広島市を対象に都市環境気候図を作成している（図 1-3 参照）。Matuso ら¹⁻⁹⁾は広島市を平野部と山間部に分け、気温実測調査とメソ気象モデル WRF による数値計算結果を用いて、例えば平野部では昼夜にそれぞれ吹く海陸風の活用、山間部では山地からの夜

間冷気流活用の観点から現状と対策方針を示した都市環境気候図を作成している。

このように都市環境気候図は、定量的な気候分析の結果に基づいて対象地を気候特性の観点からゾーニングした上でゾーン毎の対策方針を地図上に示した効果的なツールであり、本研究で想定している適所導入支援ツールの内、「都市気候ゾーニングマップ」と概ね同様と考えられる。しかし都市環境気候図においても、前述の都市気候ゾーニングに関する既往研究と同様に、県や市全域といった広範囲を対象としているため、作成過程における気候分析の空間解像度は低い。

一方で、地形が複雑なエリアにおいては、小さな起伏等の地形が都市気候に与える影響が一定程度生じ得ると考えられる。例えば、小笠原ら¹⁻¹⁰⁾は一つの小規模谷（谷戸）内の住宅地を対象に実測調査と CFD を用いて熱環境特性の分析を行い、日中に谷戸内部の建物密集エリアの気温が上昇し、逆に夜間は斜面冷気流の影響により気温が下がること等を明らかにしている。小笠原ら¹⁻¹⁰⁾は1つの地形を対象としているが、地形が複雑なエリアの面積割合が大きい地域ではこのような地形の影響が対象地全域で面的に生じると考えられる。

通常、都市気候ゾーニングは日中の海風による気温低減効果といった「広域の影響」に基づいて行われることが多い。しかし、地形が複雑なエリアの面積割合が大きい場合には、さらに「地形による影響」がゾーニングに反映される可能性がある。つまり、地形が複雑なエリアにおける「気候特性」は「広域特性」および「地形特性」の2つによって構成されると考えられる。このような「地形による影響」をゾーニングに反映させるためには、従来よりも高解像度の気候分析を行い、その結果から「①都市気候ゾーニングマップ」を作成する必要があるものと考えられる。我が国は山地・丘陵地の割合が大きく、地形が複雑なエリアが多く存在することからも、従来よりも高解像度の気候分析を行い、「広域特性」および「地形特性」を反映した都市気候ゾーニングマップの作成を行うことは重要であると考えられる。

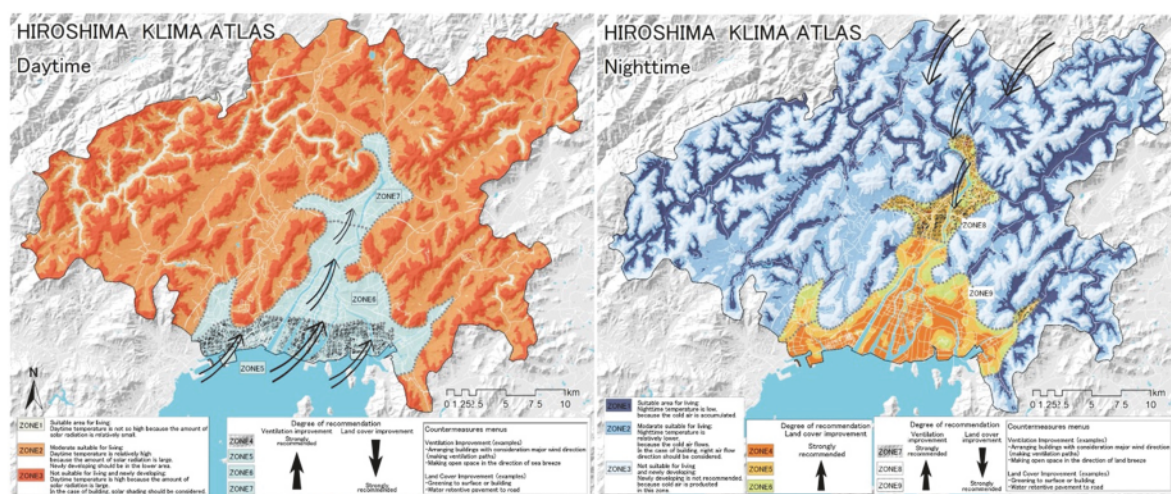


図 1-3 広島市の都市環境気候図（昼間）（左：気候分析図、右：対策指針図）

② 対策メニューリスト作成に関連する既往研究

一方で「②対策メニューリスト」作成に関連して、高温化と建物・都市形態との関連分析を行っている既往研究は数多く存在する。その中で例えば橋本ら¹⁻¹¹⁾は名古屋市を模したモデル街区を対象に、平均建物高さや建物高さのばらつきの建物形態パラメータを変更した際に、それらの変更領域とその風下領域の居住域の気温に与える影響を CFD (Computational Fluid Dynamics) により検討している。また林ら¹⁻¹²⁾は沿岸部の木造密集市街地の実街区を対象に、市街地形態と放射環境との関連を分析した上で、放射環境改善対策モデルを複数作成し、その放射環境の改善効果を CFD により検討している。

これらの既往研究では主に CFD による建物・都市形態の影響を考慮できる数値計算結果(空間解像度数 m 程度)を用いて、各対象地における現象の解明や対策効果の分析等を行っている。一方でこれらの既往研究はそれぞれ1つの街区内や地区内を対象としているため、通常はその対象地がどこに位置するかといった、広域との関連はあまり考えられていない。しかし、前述の通り、都市高温緩和策の効果はその場所の気候特性により異なると考えられるため、本来的には広域との関連を踏まえた分析が必要と考えられる。

一方で、気候特性が異なる地区間の比較を目的とした既往研究として、佐々木ら¹⁻¹³⁾が挙げられる。佐々木ら¹⁻¹³⁾は仙台市とその周辺地域において複数の評価領域を設定し、各評価領域内の熱収支特性の違いについて、数値計算結果を用いて比較している。本研究で想定している適所導入支援ツールの作成には、このような地区間の比較を各ゾーンで行う必要があると考えられる。しかし、佐々木ら¹⁻¹³⁾は分析にメソ気象モデルの数値計算結果(空間解像度 500m)を用いており、建物等の情報は平均化されている。そのため高温化と建物・都市形態との関連は分析していない。

このように既往研究において、まず広域の影響を踏まえて高温化と建物・都市形態との関連分析を行ったものは見られない。またさらに前節で適所導入支援ツール作成の前提条件として挙げられた気候特性の違いによって都市気候ゾーン毎に高温域の形成要因が異なり、考えるべき対策方針が異なることを定量的に明らかにした既往研究も見られない。

以上のことから、「適所導入支援ツール」の作成のためには、まず広域の影響を踏まえて高温化と建物・都市形態との関連を分析し、都市気候ゾーンの違いによって、高温域の形成要因がそれぞれ異なり、考えるべき対策方針が異なることを定量的に明らかにする必要があるものと考えられる。特に地形が複雑なエリアにおいて「適所導入支援ツール」を作成する際には、前述の通り、「広域の影響」に加えて「地形の影響」を反映させた高解像度の「①都市気候ゾーニングマップ」を作成し、ゾーン毎の高温域形成要因の分析とその比較を行う必要があると考えられる。

なお以降、「都市気候ゾーニングマップ」に関連して県や市全域のような広範囲を対象とした都市気候の数値計算を「メソ数値計算」、「②対策メニューリスト」に関連して建物・都市形態を考慮した数値計算を「地区数値計算」とそれぞれ呼ぶこととする。

1-4. 研究目的

以上のことを踏まえて、本研究では地形が複雑なエリアを多く含む「丘陵都市」を対象として、都市高温化緩和策の「適所導入支援ツール」を作成するために必要と考えられる以下の2点を目的とした。

① 地形の影響を考慮した高解像度の都市気候ゾーニングマップを作成すること

丘陵都市の1つである神奈川県横浜市において、市全域の広範囲を対象とした高解像度のメソ数値計算を行い、その結果および多変量解析を用いて、「広域の影響」に加えて「地形の影響」を考慮した高解像度の都市気候ゾーニングマップを作成する。

② 都市気候ゾーン毎の高温域の形成要因と対策方針の違いを明らかにし、都市高温化緩和策の適所導入の必要性を示すこと

横浜市の内、都市気候ゾーンが異なる複数の市街地において、地区数値計算を行い、気候特性（広域特性+地形特性）の違いによってゾーン毎に高温域の形成要因が異なり、考えるべき都市高温化緩和への対策方針が異なることを示す。

なお本研究では実際に「適所導入支援ツール」を作成するには至らないが、本研究で得られた知見をもとに「適所導入支援ツール」の作成が可能となると考えている

また本研究の特徴は以下の点にあると考えている。

- (1) 都市高温化緩和に配慮した都市づくりを効果的に行うためのツールとして、都市高温化緩和策の適所導入支援ツールを提案し、このツールを定量的に実現するためのフレームを構築した点
- (2) 地形が複雑なエリアの都市気候形成に寄与すると考えられる「地形の影響」を考慮した都市気候ゾーニングマップを、従来よりも高解像度のメソ数値計算を用いた気候分析の結果から作成した点
- (3) 広範囲の都市気候を再現したメソ数値計算結果を反映した地区数値計算を用いて、気候特性（地形特性および広域特性）の違いによって都市気候ゾーン毎に高温域の形成要因が異なり、考えるべき対策方針が異なることを定量的に示した点

参考文献

- 1-1) 日本建築学会編：ヒートアイランドと建築・都市 ー対策のビジョンと課題ー, pp.16-29, 日本建築学会叢書, 2007
- 1-2) 竹林英樹・山田俊明・森山正和：街区の空間特性が街路空間の風通し環境に及ぼす影響ー気候資源としての風の利用を目的とした街路形態と街路空間の風通しの関係の分析その2ー, 日本建築学会環境系論文集, vol.76, No.670, pp.1087-1092, 2011.
- 1-3) 成田健一・菅原広史・横山仁・三坂育正・松島大：皇居の冷氣生成機能と周辺市街地への熱的影響に関する実測研究, 日本建築学会環境系論文集, vol.76, No.666, pp.705-713, 2011.
- 1-4) 北尾菜々子・森山正和・竹林英樹・田中貴宏：大阪地域を対象とした都市環境気候地図の作成方法に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 18(38), pp.255-258, 2012
- 1-5) 大場拓・吉田知弘・持田灯・吉野博・渡辺浩文：仙台におけるヒートアイランド対策検討のための都市気候のゾーニング手法の提案, 第19回風工学シンポジウム論文集, pp.55-60, 2006
- 1-6) 鍋島美奈子・西岡真稔・中尾正喜：大阪平野における夏季気温の水平分布構造, 空気調和・衛生工学会論文集, 140, pp.1-10, 2008
- 1-7) Matsuo, K. and Tanaka, T.: Urban Environmental Climate Maps for Urban Planning Considering Urban Heat Island Mitigation in Hiroshima, *Journal of Heat Island Institute International*, 9(2), pp.61-66, 2014
- 1-8) 日本建築学会編：都市環境のクリマアトラスー気候情報を活かした都市づくり, ぎょうせい, 2000
- 1-9) Matsuo, K. and Tanaka, T.: Analysis of Spatial and Temporal Distribution Patterns of Temperatures in Urban and Rural Areas -Making Urban Environmental Climate Maps for Supporting Urban Environmental Planning and Management in Hiroshima-, *Sustainable Cities and Society*, 2019 (In Press)
- 1-10) 小笠原峻志・田中貴宏・吉田聡・佐土原聡：谷戸地形を有する住宅地の夏季の熱環境特性解析ー横浜市保土ヶ谷区仏向地区における解析とその対策の提案ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-I, pp.903-904, 2009
- 1-11) 橋本一輝・飯塚悟・玄英麗：鉛直方向の建物形態パラメータが街区群の温熱環境・風環境に及ぼす影響評価ー鉛直方向の風の道を活用する街区形態のシミュレーション検討(その2)ー, 日本建築学会環境系論文集, 80(711), pp.415-424, 2015
- 1-12) 林健太郎・田中貴宏・稲地秀介・保川美咲：沿岸部の木造密集市街地における市街地形態が屋外気温と風通しに及ぼす影響, 76(670), pp.1087-1092, 2014
- 1-13) 佐々木澄・吉田知弘・持田灯・渡辺浩文・吉野博：典型的夏季晴天日を対象とした大気部熱収支構造の定量評価に基づく都市内部の熱収支 MAP の試作ー気候数値解析に基づく都市気候の地域特性の定量化(その2)ー, 71(602), pp.85-92, 2006.4

第2章 研究概要

- 2-1. 丘陵都市とは
- 2-2. 対象地概要
- 2-3. 数値計算モデル概要
- 2-4. 本研究の構成

第2章 研究概要

2-1. 丘陵都市とは

本研究では、地形が複雑なエリアを多く含む都市の1つとして「丘陵都市」を対象とした。なお本研究において「丘陵都市」とは、市域の大部分を起伏のある丘陵地（標高が概ね 300m 以下）が占め、かつ丘陵地に市街化が進行している市域を想定している。

このように市域を地形の観点から分析している事例として、文献 2-1 が挙げられる。文献 2-1 では国土調査法による地形分類の大分類を参考に、地形をもとにした政令指定都市の類型を行い、政令指定都市を、「山地・河川タイプ」、「丘陵地・台地タイプ」、「河川・低地タイプ」の3つに分類している（表 2-1 参照）。なおここでは千葉市、川崎市、横浜市が「丘陵地・台地タイプ」に含まれている。文献 2-1 によると、これらの市では中小河川が自然環境の骨格となっており、河川浸食による開析が多く生じ、小規模谷が樹枝状に分布する複雑な地形を有している。また、これらの市は東京都の周辺に位置するため、都市化の影響が著しいと考えられる。

以上の点から本研究で想定している「丘陵都市」は概ね文献 2-1 における「丘陵地・台地タイプ」に相当すると考えられる。そこで本研究では文献 2-1 の「丘陵地・台地タイプ」を参考に、神奈川県横浜市を丘陵都市の1つとして、対象地とすることとした。

2-2. 対象地概要

対象地である横浜市は神奈川県東部に位置する政令指定都市である。参考として横浜市の基礎的統計データを以下に示す。（平成 30 年 12 月 1 日現在）

- ・面積：437.38 [km²]
- ・総人口：3,741,255 [人]
- ・人口密度：8,553 [人/km²]
- ・世帯数：1,692,526 [世帯]

横浜市は東京都心に近いため、市街化が著しく、市全域で市街化が進行している（図 2-1 左図参照）。またこれまで気温実測調査等により都市高温化の影響が報告されており、特に内陸部でその影響が顕著であるとされている²⁻²⁾。そのため「横浜市都市計画マスタープラン」²⁻³⁾の中でも地球温暖化や都市ヒートアイランド現象への対策が位置付けられており、都市高温化緩和に配慮した都市づくりが求められている。一方で東京湾に面し、また南西には相模湾が位置しているため、2つの湾からの海風による気温低減効果（以降、海風効果とする）が期待される。これについては次章以降で詳細に分析する。

また横浜市の地形的な特徴として、大きく沿岸の平地と内陸の丘陵地に分けられ、丘陵地の面積割合が比較的大きい（図 2-1 右図参照）。また内陸の丘陵地は多摩丘陵の端部に位置することから台地と平地が複雑に入り組み、「谷戸」と呼ばれる小規模谷が多数分布する複雑な地形を有している²⁻⁴⁾。そのため昼間の風が地表面付近を複雑に吹き、谷部では潜在的に広域風の影響を受けにくい等、微地形の影響が気候特性に影響を与え得ると予想される。なおこれらの地形が複雑なエリアにおいても、高度経済成長期のスプロールにより市街化が進行している。

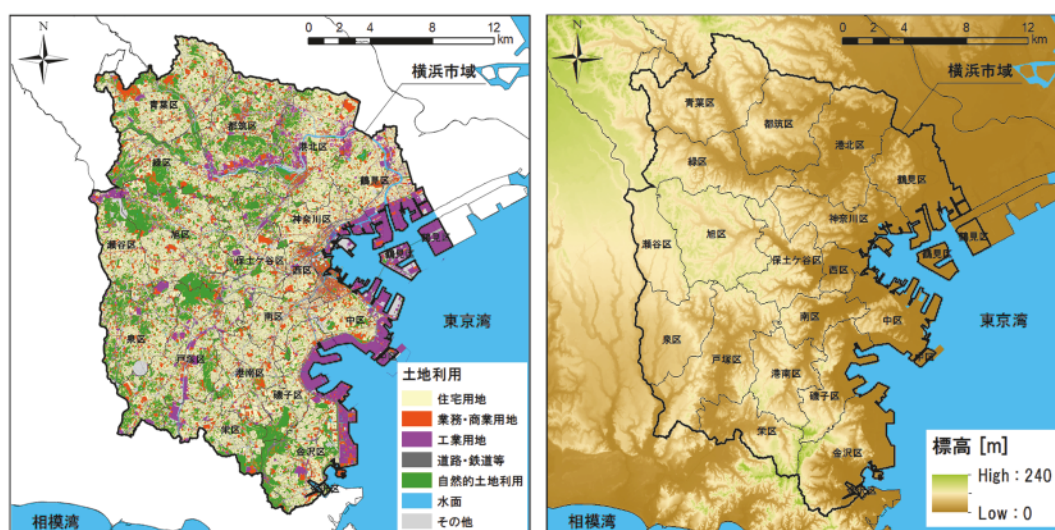


図 2-1 研究対象地（左：土地利用分布、右：標高分布）

※横浜市都市計画基礎調査および基盤地図情報数値標高モデルより作成

2-3. 数値計算モデル概要

本研究ではスーパーコンピュータの1つである地球シミュレータ（写真 2-1）に搭載されている Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment²⁻⁵⁾（以下、MSSG とする）を用いて次章以降の数値計算を行った。MSSG は国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）で開発が続けられている大気海洋結合モデルであり、地球全体から1つの街路空間まで大小様々なスケールの物理現象の数値計算の実行が可能なマルチスケールシミュレーションモデルである（図 2-2 参照）。例えば、本研究で想定している県や市全域の広範囲を対象としたメソ数値計算においては完全圧縮・非静力のメソ気象モデルとして、建物・都市形態を考慮した地区数値計算においては3次元の放射計算や樹木の蒸散効果を取り込んだ非定常の LES（Large eddy simulation）としてそれぞれ機能する²⁻⁶⁾。

本研究において MSSG による数値計算を用いるメリットとして、以下の2つが挙げられる。

① 広範囲に対して高解像度の数値計算が可能であること

MSSG は地球シミュレータ上で稼働するため、通常よりも大規模な数値計算を行うことができる。これは都市気候の数値計算においては、通常よりも広範囲の領域に対して、高解像度の数値計算が可能ということである。都市気候ゾーニングマップの作成に関しては、前述の通り、従来のメソ気象モデルを用いて県や市全域の広範囲を対象とした場合、水平空間解像度は通常、数 km～500m 程度となる。一方で MSSG では市全域を対象に、より小さい水平空間解像度のメソ数値計算が可能である。そこで本研究で対象とする丘陵都市の「地形の影響」を考慮した従来よりも高解像度の都市気候ゾーニングマップを作成可能であると考え、MSSG によるメソ数値計算を活用することとした。

② 異なるスケールを組み合わせた数値計算が可能であること

前述の通り、本研究で想定している「適所導入支援ツール」作成のためには、広域との

関連を踏まえた上で高温化と建物・都市形態との関連を分析する必要がある。通常、「広域の影響を考慮する数値計算」と「都市・建物形態の影響を考慮する数値計算」では扱う物理現象が異なることからそれぞれ異なる数値計算モデルが必要であり、これらを組み合わせることは難しい。一方、MSSG では同じ計算モデル上で様々なスケールの計算が可能のため、異なるスケールの影響を組み合わせることで通常の手法よりも比較的容易と考えられる。例えば本研究においては、横浜市の都市気候ゾーニングマップにおける各ゾーンの気候特性の違いを踏まえた上で、高温化と都市・建物形態との関連を分析することができる。このような異なるスケールの数値計算モデルを組み合わせるための既往研究はいくつか見られるが^{例えば 2-7)、2-8)}、元々別の目的で開発された数値計算モデルを組み合わせるためには、課題が多く、また手順が複雑と考えられる。一方で、地球シミュレータを用いるというハードルはあるが、同一モデル上で全ての分析を行うことができるメリットは大きいと考えられる。以上のことから本研究では「適所導入支援ツール」を今後、各地で作成することを視野に入れて、MSSG による数値計算を活用して分析を行った。

なお、数値計算の解像度については、基本的には任意に設定することができるが、本研究では横浜市全域を対象とした広範囲の数値計算は空間解像度 100m、都市・建物形態を考慮した数値計算は空間解像度 5m とした。これらは横浜市の地形の起伏を再現できる水平解像度および横浜市の平均的な住居建物（面積：約 70m²）を十分に解像（考慮）できる空間解像度として、それぞれ設定している^{注 2-1)}。なお、丘陵都市以外の地形が平坦な都市を対象として「適所導入支援ツール作成」のための分析を行う場合には、ゾーニング作成のために行う数値計算の解像度を变化させる（例えば 500m や 1km）ことが考えられる。一方で都市・建物形態を考慮した数値計算の解像度は場所を問わず概ね 5m 程度と考えられる。また基本的にはこれら 2 つの数値計算を組み合わせることにより「適所導入支援ツール」の作成が可能と考えられる。



写真 2-1 地球シミュレータ

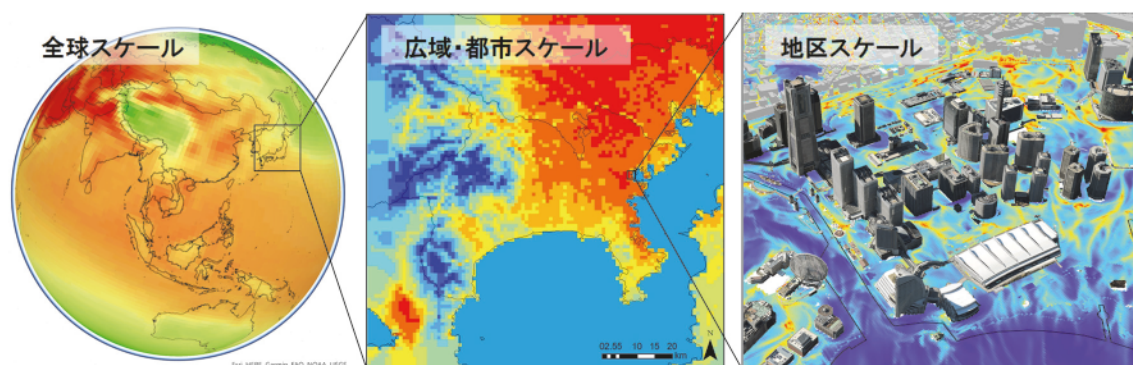


図 2-2 マルチスケールシミュレーションのイメージ

2-4. 本研究の構成

図 2-3 に本研究の流れを示す。第 1 章「はじめに」では、本研究の背景および関連する既往研究を整理し、研究目的を示す。第 2 章「研究概要」では、丘陵都市の定義、横浜市の概要、MSSG による数値計算の特徴および本研究の構成を示す。第 3 章「丘陵都市における気温分布傾向の把握」では、気温実測調査とメソ数値計算（WRF および MSSG による）の結果を用いて、横浜市全域の気温分布傾向を把握し、丘陵都市における気温分布の再現に関して、MSSG によるメソ数値計算が効果的であることを示す。第 4 章「多変量解析を用いた丘陵都市の都市気候ゾーニング」では、MSSG によるメソ数値計算結果を入力条件とした多変量解析によって、横浜市の都市域を分類し、「地形の影響」を考慮した都市気候ゾーニングマップを作成し、評価する。第 5 章「地形特性が異なるゾーン毎の高温化対策方針の検討」では、MSSG による地区数値計算を用いて、地形の影響（地形特性）が異なる市街地の熱環境・風環境を分析し、地形特性の違いにより、高温域の形成要因と考えるべき対策方針が異なることを示す。第 6 章「海風特性が異なるゾーン毎の高温化対策方針の検討」では、MSSG によるメソ数値計算を境界条件とした地区数値計算の結果を用いて、広域の影響（海風特性）が異なる市街地における熱環境・風環境をそれぞれ分析し、海風特性の違いにより、高温域の形成要因と考えるべき対策方針が異なることを示す。最後に第 7 章「結論と展望」では、本研究で得られた成果をまとめ、今後の展望を示す。

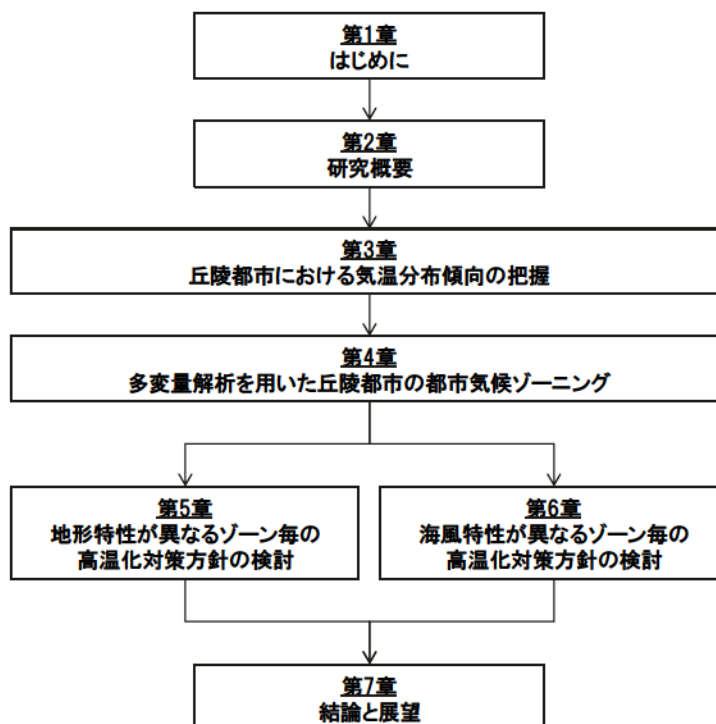


図 2-3 研究の流れ

注

注2-1) 一般的に数値計算は、解像度の向上に伴い、対象とできる範囲が小さくなる。そのため計算解像度は高ければ良いというわけではなく、対象とする現象と範囲の関係から決定する必要があると考えられる。この点を踏まえて、本研究の横浜市における分析においては、100m 解像度および 5m 解像度の数値計算がそれぞれ適していると評価した。また高解像度化に伴うデメリットとして、数値計算結果自体を「都市づくりを行う人々」に提供する場合には、高解像度化により提示される情報が過多となる恐れがある。しかし本研究で想定している「適所導入支援ツール」においては、数値計算結果から得られた個々の分析結果を「都市気候ゾーニングマップ」および「対策メニューリスト」という簡略化した形で提示することを考えているため、数値計算を高解像度化することに伴うデメリットは今回の手法においては比較的少ないと考えている。

参考文献

- 2-1) 横浜市環境科学研究所：横浜型エコシティ研究報告書 花鳥風月のまちづくり，環境研資料，No.146，2002
- 2-2) 松島由佳・小倉智代・山下理絵・内藤純一郎・関浩二：2013年～2015年夏季の横浜市内の気温観測結果－緑地による気温上昇緩和効果について－，横浜市環境科学研究所報，41号，2017
- 2-3) 工藤嘉晃・加藤央之：相模湾からの海風侵入過程，日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要，49，pp.45-55，2014
- 2-4) 森清和・島村雅英：横浜市域における谷戸地形の特質と推移に関する一考察，ランドスケープ研究，64(5)，pp.631-634，2001.3
- 2-5) K. Takahashi, R. Onishi, Y. Baba, S. Kida, K. Matsuda, K. Goto and H. Fuchigami: Challenge toward the prediction of typhoon behavior and downpour, *Journal of Physics: Conference Series*, 454(1), 2013.
- 2-6) Matsuda, K., Onishi, R. and Takahashi, K.: Tree-crown resolving large-eddy calculation coupled with three-dimensional radiative transfer model, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 173, pp.53-66, 2018
- 2-7) 榎木康太・小野佳之・大塚清敏，気象モデルとLES解析に基づく複雑地形上の多地点強風予測，ながれ，31，pp.157-163，2012
- 2-8) 内田孝紀・丸山敬・竹見哲也・奥勇一郎・大屋裕二・李貫行，気象モデルと流体力学モデルを用いた風車設置地点における設計風速評価手法の提案，風力エネルギー，34，pp.118-124，2010

第3章 丘陵都市における気温分布傾向の把握

- 3-1. 本章の概要
- 3-2. 典型的夏季晴天日の抽出と風況パターン分類
- 3-3. 気温実測調査および数値計算概要
- 3-4. 横浜市全域の気温分布傾向把握
- 3-5. 各数値計算結果と実測調査結果との比較
- 3-6. 本章のまとめ

第3章 丘陵都市における気温分布傾向の把握

3-1. 本章の概要

本章では、横浜市全域を対象に行った気温実測調査および2つのメソ数値計算の結果を用いて、典型的夏季晴天日における横浜市全域の気温分布傾向の把握を行う。また2つのメソ数値計算の内、従来の手法として行った「WRFによる500m解像度のメソ数値計算（以降、従来型メソ数値計算とする）」と、従来よりも高解像度の手法として行った「MSSGによる100m解像度のメソ数値計算（以降、高解像度メソ数値計算とする）」から作成された気温分布の比較を通して、丘陵都市における気温分布の再現に関して、高解像度メソ数値計算が効果的であることを示す^{注3-1)}。

以下に本章の流れを示す（図3-1参照）。

- 1) アメダスデータを用いた典型的夏季晴天日の抽出
- 2) アメダスデータを用いた横浜市の風況パターン分類
- 3) 横浜市全域の気温分布傾向の把握
- 4) 2つのメソ数値計算結果の比較

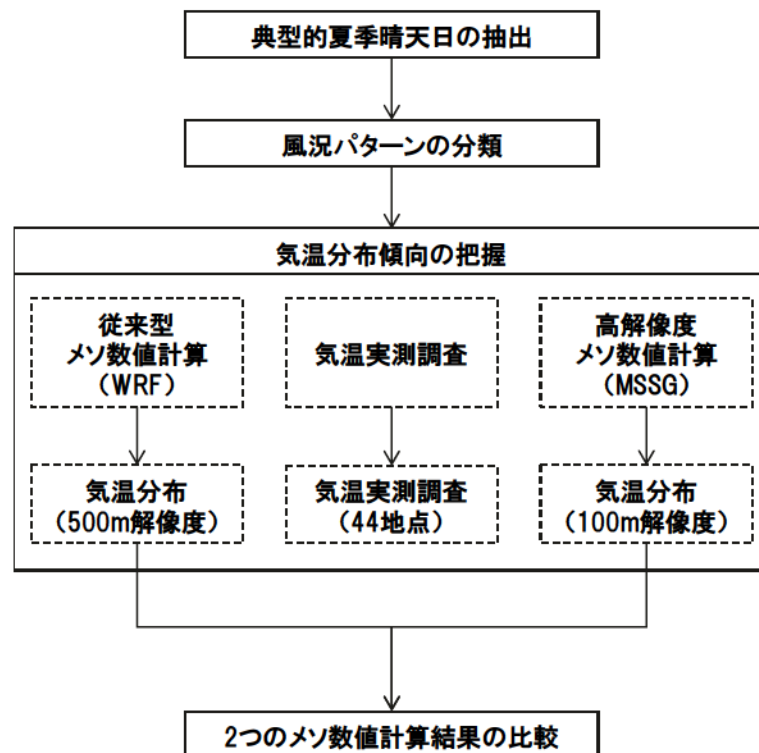


図3-1 第3章の流れ

3-2. 典型的夏季晴天日の抽出と風況パターン分類

3-2-1. 典型的夏季晴天日の抽出

横浜地方気象台の日照時間・降水量・気温データ（1時間値）を用いて、2008年～2017年の7～8月における典型的夏季晴天日の抽出を行った。なお既往研究³⁻¹⁾を参考に、気象庁の「晴れ日数」、「降水日数」、「真夏日」の定義³⁻²⁾³⁻³⁾に基づく抽出条件を以下のように設けた。

条件①：日照時間が可照時間の40%以上の日

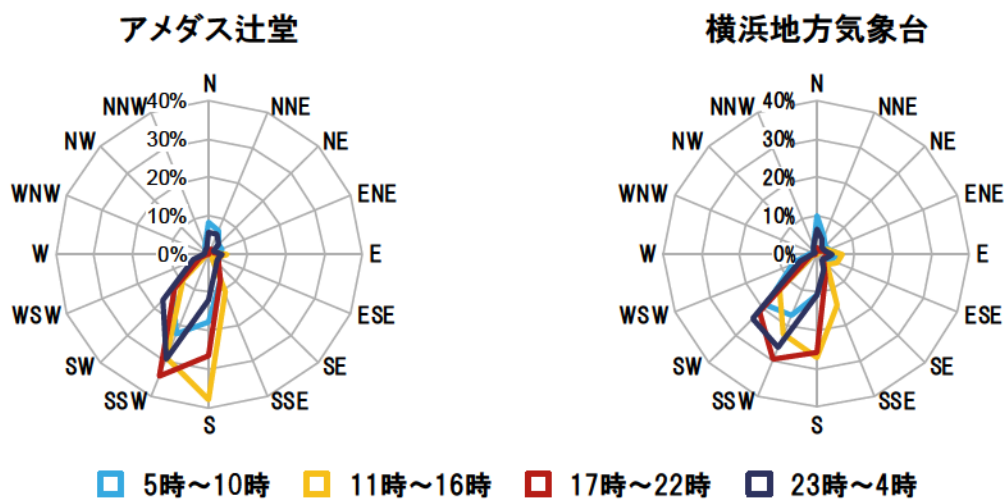
条件②：日降水量が1mm以下の日

条件③：日最高気温が30℃以上の日

図3-2に典型的夏季晴天日の抽出結果の一覧を示す。

3-2-2. 卓越風向の分析

図3-3に横浜市内に位置する横浜地方気象台および横浜市の南西に位置するアメダス辻堂における典型的夏季晴天日の風配図を示す（場所は図3-5参照）。なお図3-3は2008年～2017年の梅雨明け～8月末の風向データ（1時間値）を用いて作成した。図3-3を見ると、横浜地方気象台とアメダス辻堂の両地点で南からの風が卓越している。これは、相模湾から吹く海風が横浜市内に進入しているためと考えられる。また横浜地方気象台では日中、東よりの風も吹いており、横浜市内の東京湾沿岸においては東京湾から吹く海風も同様に存在すると考えられる。



期間：梅雨明け～8月末の晴天日(2008～2017年)

図3-3 風配図（左：アメダス辻堂 右：横浜地方気象台）

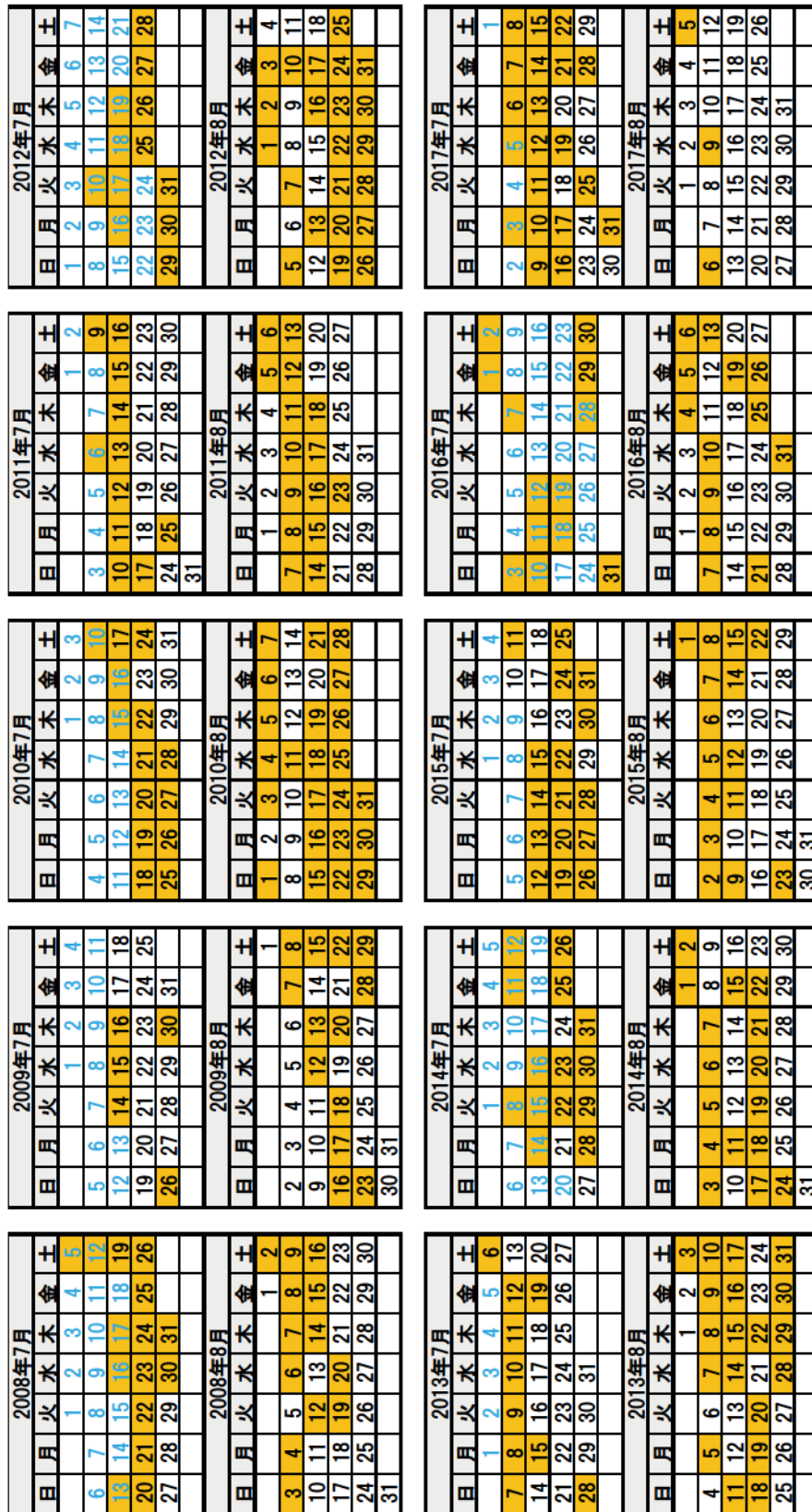


図 3-2 典型的な夏季晴天日の抽出結果

1 梅雨明け前

1 典型的夏季晴天日

1

3-2-3. 風況パターン分類

文献 3-4 によると夏季晴天日の関東地方には、主に午前中に東京湾から吹く小規模な海風と、主に午後に相模湾から吹く大規模な海風が存在する。これは横浜市においては、前節で示した相模湾からの南風および東京湾からの東風に相当すると考えられる。そこで典型的夏季晴天日を1日の風の吹き方（風況パターン）によって分類した。分類には横浜地方気象台およびアメダス辻堂の風向データ（1時間値）を用い、以下の3つのパターンに分類した。

- ・ パターン A（東風日）：1日中、東風（一部、北風）が卓越する
- ・ パターン B（南風日）：1日中、南風が卓越する
- ・ パターン C（東+南風日）：午前中に東風、午後に南風が卓越する。

なお分類条件は以下の通りとした。

条件 1：アメダス辻堂において、9時～18時に南寄りの風（南東～南西）が出現する

条件 2：横浜地方気象台において、9時～12時に東寄りの風（東北東～東南東）が出現する

条件 3：横浜地方気象台において、13時～18時に南寄りの風（南～南西）が出現する

以上の条件 1～3 を全てに該当する場合はパターン C（東+南風日）、条件 1 および条件 3 に該当する場合はパターン B（南風日）、それ以外をパターン A（東風日）とした。図 3-3 に各パターンの出現日数と出現割合を、図 3-4 にパターン分類結果の一覧を示す。結果として、パターン B およびパターン C の出現頻度が高いことが分かる。

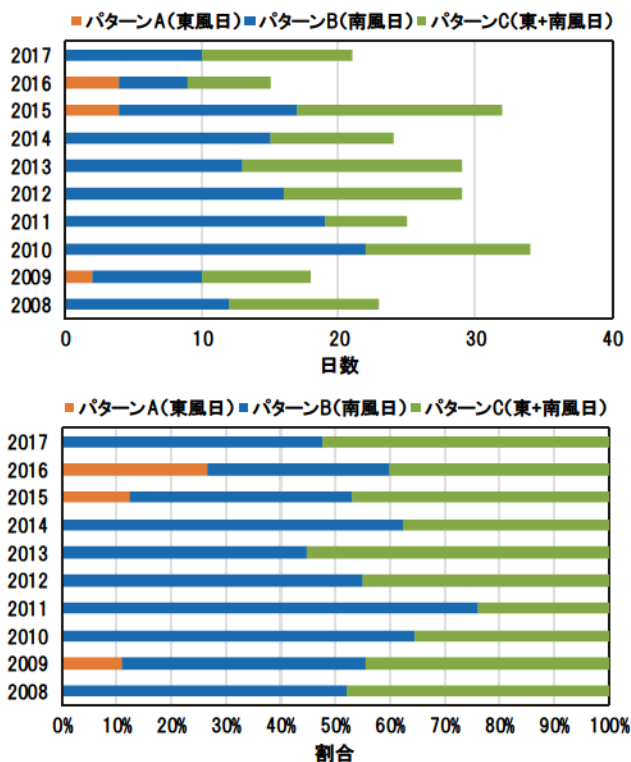


図 3-3 各風況パターン日の出現日数（上段）と出現割合（下段）

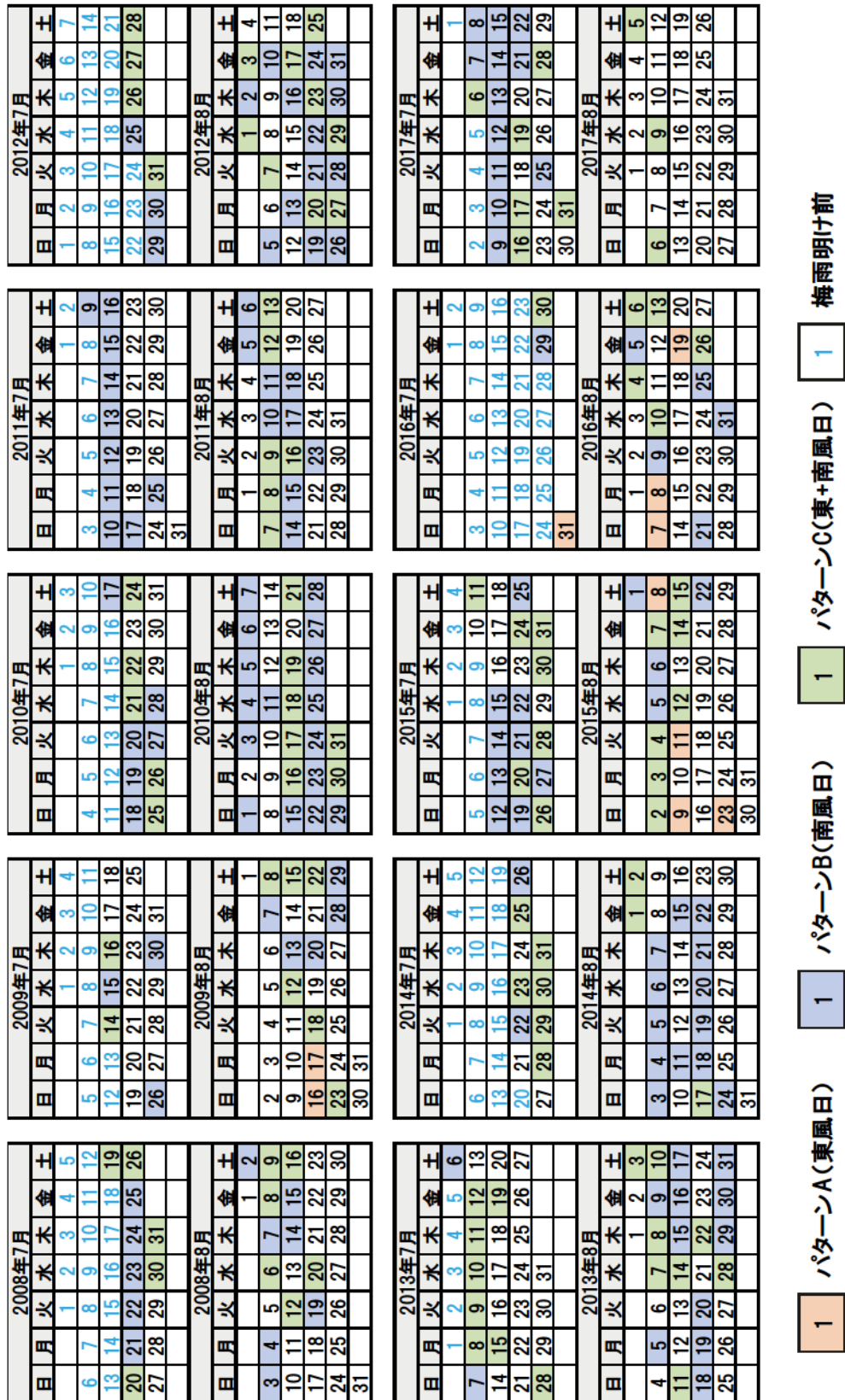


図 3-4 風況パターンの分類結果

3-3. 気温実測調査および数値計算概要

3-3-1. 気温実測調査概要

横浜市内およびその周辺地域の小学校の百葉箱を用いて気温の長期多点同時実測調査を行った（写真 3-1）。実測にはデータロガー付き温度センサーを用いた。実測期間は 2015 年 7 月 24 日～8 月 31 日までの計 39 日間とし、測定間隔は 10 分間とした。図 3-5 に実測地点の分布（59 地点）を示す。なお測定機器毎の差を小さくするため、HOBO Pro v2（Onset）の測定値を参照値として器差補正を行った。

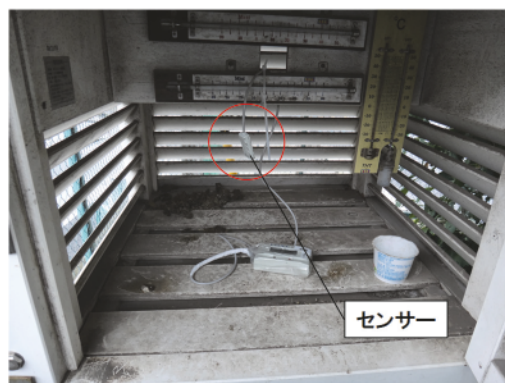


写真 3-1 データロガー付き温度センサー（左）と百葉箱内の様子（右）

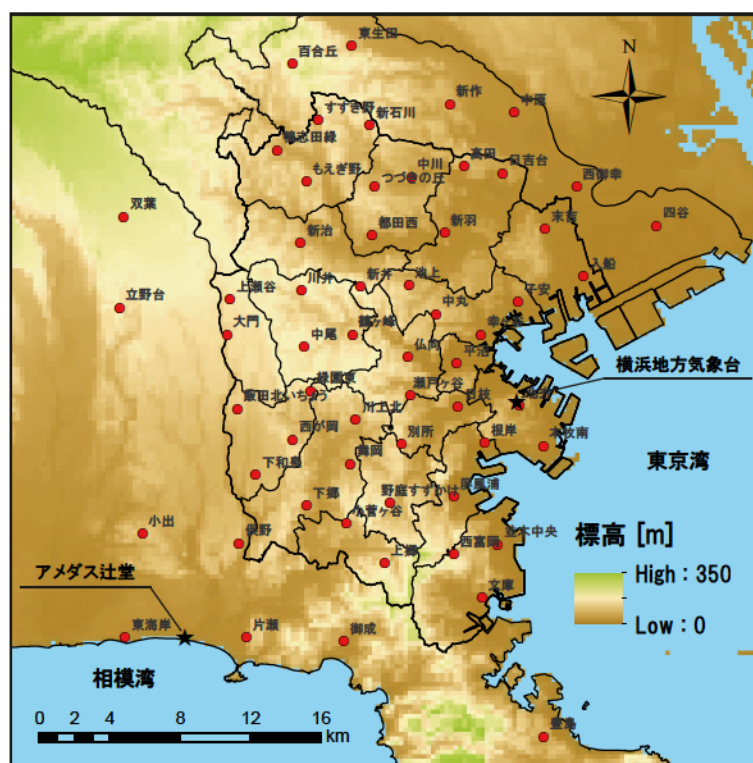


図 3-5 実測調査地点（59 地点）

3-3-2. 数値計算概要

本章では WRF による「従来型メソ数値計算」と MSSG による「高解像度メソ数値計算」を行う。以下にそれぞれの数値計算の概要を示す。

① WRF による「従来型メソ数値計算」(500m 解像度)

WRF³⁻⁵⁾は、米国大気研究センター (NCAR) 等の研究機関により開発された実用的な天気予報とそれに関連する研究のために開発されたメソスケールの気象モデルである。また「研究用の ARW」と「現業用の NMM」の 2 種類があり、今回は WRF ver3.7.1 の ARW を用いた。WRF では都市全体規模 (数 km~数百 km) のシミュレーションが可能のため、都市気候の分析において多く用いられる。一方で計算機の負荷の関係上、数値計算の空間解像度は概ね数 km~500m 程度^(例えば 3-6)3-7)3-8)であるため、細かい地形等の表現は難しい。

表 3-1 に数値計算条件を示す。計算期間は晴天日が続いた 2015 年 8 月 4 日 0 時~8 日 0 時とし、1 時間毎の結果を出力した。図 3-6 に計算領域を示す。計算領域はネスティング手法を用いて、Domain1 を解像度 4.5km の 131×131 格子、Domain2 を解像度 1.5km の 100×100 格子、Domain3 を解像度 500m の 121×121 格子とそれぞれ設定した。なお分析には Domain3 の内、横浜市内に位置するメッシュを用いた。初期値・境界値には NCEP 再解析全球客観解析データ (6 時間間隔、1° 解像度) および気象庁メソ客観解析値 (3 時間間隔、5km 解像度) を用いた。

図 3-7 に数値計算の入力に用いた Domain3 (500m 解像度) の土地利用・標高分布をそれぞれ示す。土地利用分類は USGS (United States Geological Survey) の分類 (24 分類) を用いた。また Domain3 の都市域には建物の凹凸による風速低減や人工排熱などの影響を計算結果に反映できる単層都市キャノピーモデル (Single layer urban canopy model)³⁻⁹⁾を導入し、モデル内の各パラメータ (建物高さや人工排熱量) は横浜市の都市計画基礎調査データを基に都市域で一様に設定した。

表 3-1 数値計算条件 (WRF)

| | | |
|---------|--|-------------------------|
| 計算期間 | 2015/8/4 0時~2015/8/8 0時 | |
| 水平格子 | Domain1 | 4500m 解像度 131×131格子 |
| | Domain2 | 1500m 解像度 100×100格子 |
| | Domain3 | 500m 解像度 121×121格子 |
| 鉛直格子 | 30 層(地表面~50hPa、不等間隔) | |
| 気象データ | 気象庁メソ客観解析値(3時間間隔, 5km格子) NCEP再解析全球客観解析データ(6時間間隔, 1° 格子) | |
| 土地利用データ | 国土数値情報 土地利用細分メッシュ(100m解像度) | |
| 標高データ | 国土数値情報 標高・傾斜度5次メッシュ(250m解像度) | |
| 雲微物理過程 | WRF Single-Moment (WSM) 3-class simple ice scheme | |
| 放射過程 | 長波 | RRTM Longwave scheme |
| | 短波 | Dudhia Shortwave scheme |
| 大気境界層過程 | YSU scheme | |
| 都市キャノピー | Single layer urban canopy model | |

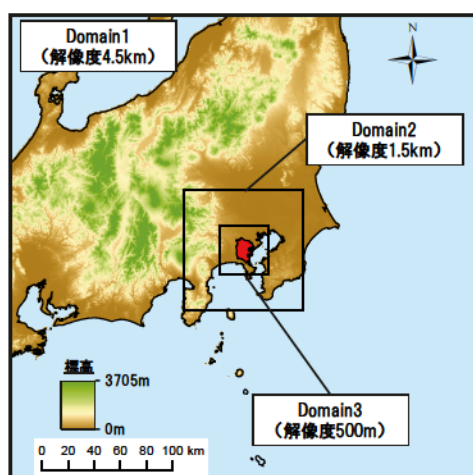


図 3-6 計算領域 (WRF)

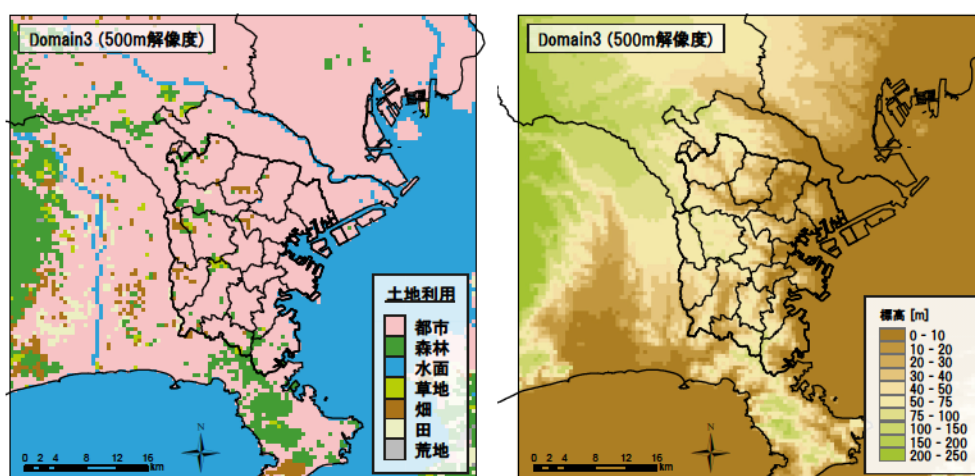


図 3-7 WRF の数値計算入力条件 (Domain3) (左：土地利用分類、右：標高)

② MSSGによる「高解像度メソ数値計算」(100m 解像度)

表 3-2 に数値計算条件を示す。計算期間は WRF によるメソ数値計算と同様に、2015 年 8 月 4 日 0 時～8 日 0 時とし、1 時間毎の結果を出力した。図 3-8 に計算領域を示す。計算領域は横浜市を中心とした 100m 解像度の 400×400 格子と設定し、分析にはその内、横浜市内に位置するメッシュを用いた。また初期値・境界値には気象庁の MSM データ (3 時間間隔、10km 解像度) を用いた。図 3-9 に数値計算の入力に用いた土地利用・標高分布をそれぞれ示す。土地利用分類は「建物」、「建物用地」、「道路」、「草地」、「森林」、「水面」の 6 分類とした。図 3-9 から、図 3-7 と比較すると都市内の地形等が詳細に表現されていることが分かる。また人工排熱については、文献 3-10 を参考に各メッシュの時刻毎の顕熱・潜熱をそれぞれ算出し、数値計算に入力した。

表 3-2 数値計算条件 (MSSG)

| | | |
|---------|-------------------------------|--|
| 計算期間 | 2015/8/4 0時~2015/8/8 0時 | |
| 水平格子 | Domain1 | 100m 解像度(400×400格子) |
| 鉛直格子 | 96 層(地表面~地上20km、不等間隔) | |
| 気象データ | 気象庁MSMデータ(3時間間隔, 10km格子) | |
| 土地利用データ | Domain1 | 神奈川県都市計画基礎調査GISデータ 国土数値情報土地利用細分メッシュ(100mメッシュ) |
| 標高データ | Domain1 | 基盤地図情報数値標高モデル(10mメッシュ) |
| 雲微物理過程 | Reisner2 scheme | |
| 放射過程 | Mstrnx scheme | |
| 大気境界層過程 | Mellor-Yamada Level2.5 scheme | |
| 都市キャノピー | なし | |

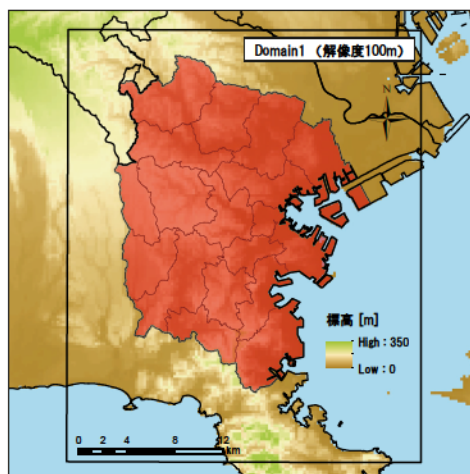


図 3-8 計算領域 (MSSG)

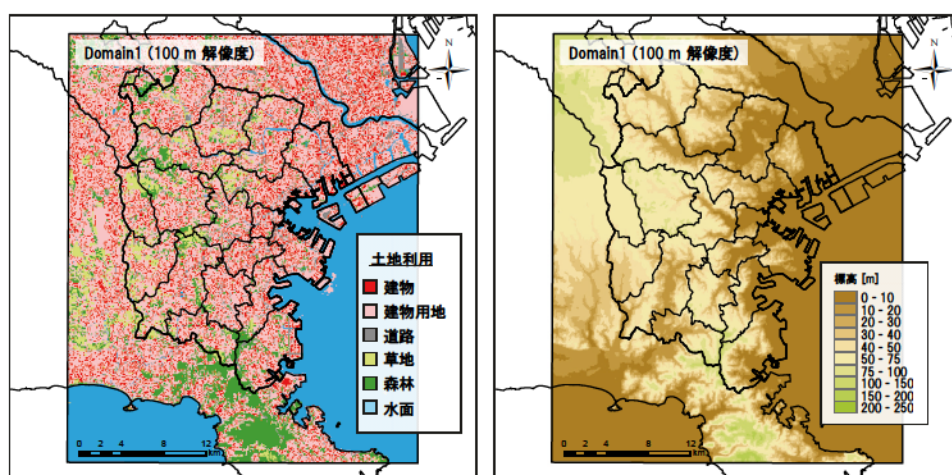


図 3-9 MSSG の数値計算入力条件 (左: 土地利用分類、右: 標高)

3-4. 横浜市全域の気温分布傾向把握

図 3-10～図 3-12 に気温実測調査結果および 2 つのメソ数値計算結果から作成した 2015 年 8 月 7 日 5 時（夜間）および 12 時（昼間）の水平気温分布図をそれぞれ示す。以下にそれぞれの結果における傾向を示す。なお数値計算結果はどちらも地上 2m の計算結果を用いた。

・ 気温実測調査

気温実測調査は 10 分間隔で行ったため、図 3-10 はそれぞれ該当時刻の前後 30 分の平均値を用いて作成した。まず 12 時の結果を見ると、気温が最も低い地点（地点 56）は相模湾沿岸に位置しており、気温が高い地点（例えば地点 32 や地点 73）は横浜市北部および川崎市に位置している。最も気温が高い地点は 37℃以上であり、実測調査を行ったエリア内で 5℃程度の気温差が生じている。また相模湾沿岸部から北部にかけて、徐々に気温が高くなっていることからこの気温差は主に相模湾からの海風の影響によるものと考えられる。前節の風況パターン分類の結果によると 2015 年 8 月 7 日はパターン C（東+南風日）であり、この時刻は相模湾からの南風が進入しつつある時間帯と考えられる。

次に 5 時の結果を見ると、横浜市北西部の内陸で気温が最も低く（地点 32）、横浜市や川崎市内の東京湾沿岸部で気温が高い（例えば地点 5）。実測調査を行ったエリア内の差は 2.5℃～3.0℃程度であり、日中と比較するとその差は小さい。これらの気温差は内陸と沿岸の土地利用の違いによる影響に加えて、内陸部においては標高が高いこと、沿岸部においては陸地と比べて夜間に温度低下しにくい海水温や東京湾沿岸の工場地帯の人工排熱の影響を受けていること等により生じていると考えられる。

・ WRF による「従来型メソ数値計算」（500m 解像度）

まず 12 時の結果を見ると、全体的な気温分布傾向は気温実測調査と概ね同様である。東京湾沿岸部と相模湾沿岸部で気温が低下しているのは 2 つの湾からの海風が進入しているためと考えられるが、気温実測調査と比較すると東京湾沿岸の気温がやや低い。また横浜市北西部の高温域の形が気温実測調査結果とやや異なり、高温域の気温も 1℃程度低い。これは東京湾からの海風効果が気温実測調査結果よりも大きく評価されているためと考えられる。

次に 5 時の結果を見ると、自然的土地利用のエリアにおいて気温が低いが、都市域の気温差は比較的小さく、全体で 1.0℃～1.5℃程度である。気温実測調査結果と比較すると、全体的に気温が高く、夜間の気温があまり低下していないことが分かる。また横浜市北部の谷筋等で気温が高くなっている様子が見られる。

・ MSSG による「高解像度メソ数値計算」（100m 解像度）

まず 12 時の結果を見ると、全体的な気温分布の傾向は気温実測調査結果、WRF によるメソ数値計算結果と概ね同様である。一方で 500m の気温分布と比較すると、ローカルなスケールのばらつきが比較的大きいことが分かる。これは高解像度の数値計算において、

日中に吹く風の効果にローカルなばらつきが生じやすいためと考えられる。また高温域の形や気温の高さは概ね気温実測調査結果と同様であった。

次に5時の結果を見ると、全体的に気温は地形（標高の高さ）に沿って変化しており、夜間の気温分布には地形による影響が大きいことが推察される。また気温は沿岸部で高く、標高の高い内陸部で低い傾向が見られる。一方で沿岸部において、局所的に気温が高いエリアが見られるが、これは工場等からの排熱による影響である。また気温が高いエリアの風下においても気温が上昇しているエリアが一部見られるが、その影響範囲は比較的小さく、排熱が全体の気温分布傾向に与える影響は小さいと考えられる。

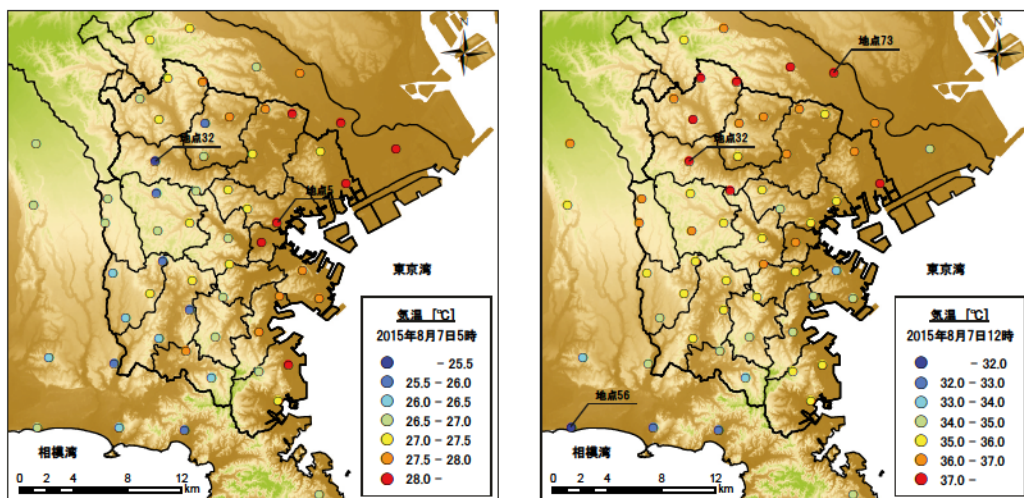


図 3-10 実測調査結果による年 8 月 7 日の気温分布（左：5 時、右：12 時）

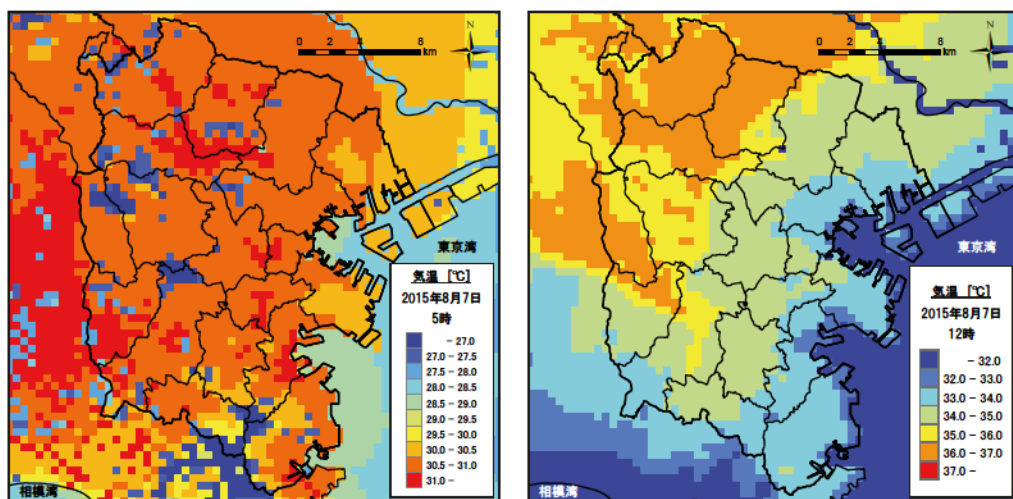


図 3-11 数値計算結果（WRF）による 8 月 7 日の気温分布（左：5 時、右：12 時）

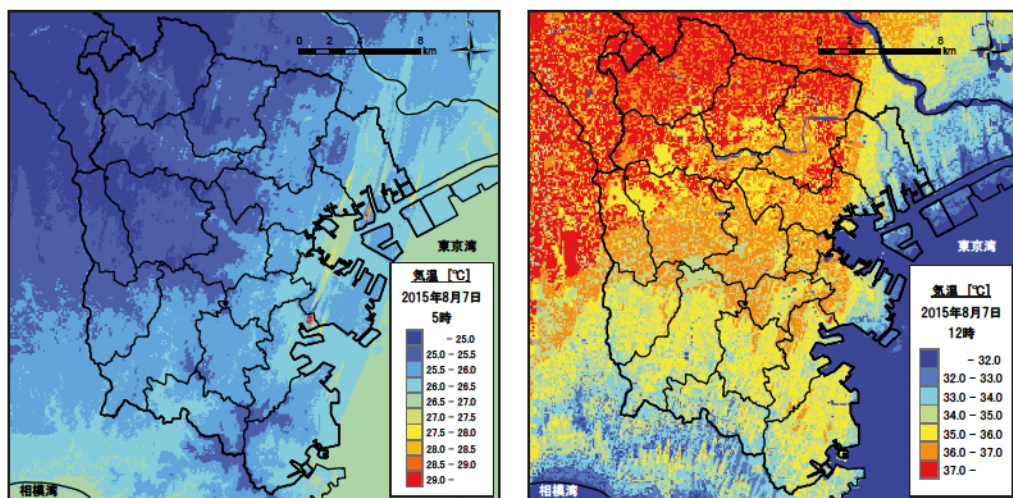


図 3-12 数値計算結果（MSSG）による 8 月 7 日の気温分布（左：5 時、右：12 時）

3-5. 各数値計算結果と実測調査結果との比較

ここでは実測調査結果による気温分布と2つのメソ数値計算結果による気温分布との比較を通して、丘陵都市における高解像度メソ数値計算の気温分布再現の特徴を分析する。

図3-13に気温実測調査結果と2つのメソ数値計算結果との相関係数の時刻別推移（2015年8月7日）を示す。なお図3-13の作成には全気温実測調査地点（59地点）の内、横浜市内に位置する44地点と、それらに対応するそれぞれ44個のメッシュの気温を用いた。またMSSGによる高解像度メソ数値計算については、44個の該当メッシュ周辺の平均気温を用いて相関係数を算出した結果を併せて示す。具体的には該当メッシュ周辺の3×3の9メッシュ（周辺3平均）、4×4の16メッシュ（周辺4平均）、5×5の25メッシュ（周辺5平均）の平均気温をそれぞれ用いている^{注3-2}。

図3-13より、全体的な傾向としては日中に相関係数が比較的大きく、夜間に相関係数が小さい。まず日中の結果を見ると、従来型メソ数値計算（500m解像度）の相関係数が大きく、最大で0.9程度（14時、15時）である。一方高解像度メソ数値計算（100m）では、日中の相関係数が従来型メソ数値計算（500m解像度）と比較すると小さく、最大でも0.75程度（17時～19時）である。

次に周辺平均を行った3つの結果を見ると、いずれの場合も周辺平均していない結果と比較して日中の相関係数が高い。また周辺平均に用いるメッシュ数が増えると、この差はより大きくなる。ただし周辺平均の有無による差と比較すると、周辺平均に用いるメッシュ数の影響は小さい。この周辺平均による差は、前節で示した通り、日中の気温分布においてローカルなばらつきが大きいためと考えられる。そのため、高解像度メソ数値計算を用いて日中の気温分布を再現する際には、ローカルなばらつきの影響を小さくすることが必要と考えられる。

一方で周辺平均を行った結果においても、従来型メソ数値計算よりも相関係数が小さい時間帯が見られる。この原因の一つとして、計算領域の影響が考えられる。今回行った高解像度メソ数値計算では、ネスティングを行わず、概ね横浜市のみを計算領域としている。そのため、日中の気温変動に大きく影響を与える東京湾や相模湾からの海風の挙動について、十分に考慮できていない可能性がある。この点については改善する必要があると考えられる。

図3-14に44地点の気温実測調査結果とメソ数値計算結果の散布図（2015年8月7日15時、6時）を示す。15時の結果を見ると、決定係数は従来型メソ数値計算で高解像度メソ数値計算よりも大きい。一方で散布図のプロットを見ると、高解像度メソ数値計算では図中の1対1の対応を示す点線に沿って分布しており、特に周辺平均を行った結果において、この特徴は顕著であることが分かる。このことから高解像度メソ数値計算では、気温実測調査結果と比較して絶対値が比較的一致していることが分かる。

次に夜間の結果を見ると、高解像度メソ数値計算では従来型メソ数値計算と比較すると相関係数が高い。前述の図3-12からも分かるように高解像度メソ数値計算では「地形の影響」をより考慮することができたため、分布傾向の再現性が向上したと考えられる。また図3-14を見ると、高解像度メソ数値計算において、従来型メソ数値計算と比較して全体の気温差が大きく

なっていることが分かる。気温実測調査結果による全体の気温差はこれよりも大きいため、より一層の改善が必要ではあるが、この気温差の増加が相関係数の向上に影響していると考えられる。また周辺平均を行った3つの結果を見ると、夜間においては周辺平均の有無による相関係数の変化はほぼない。夜間は日中と比較して大気が安定し、風が気温に与える影響が小さいため、気温のばらつきが日中よりも小さいと考えられる。

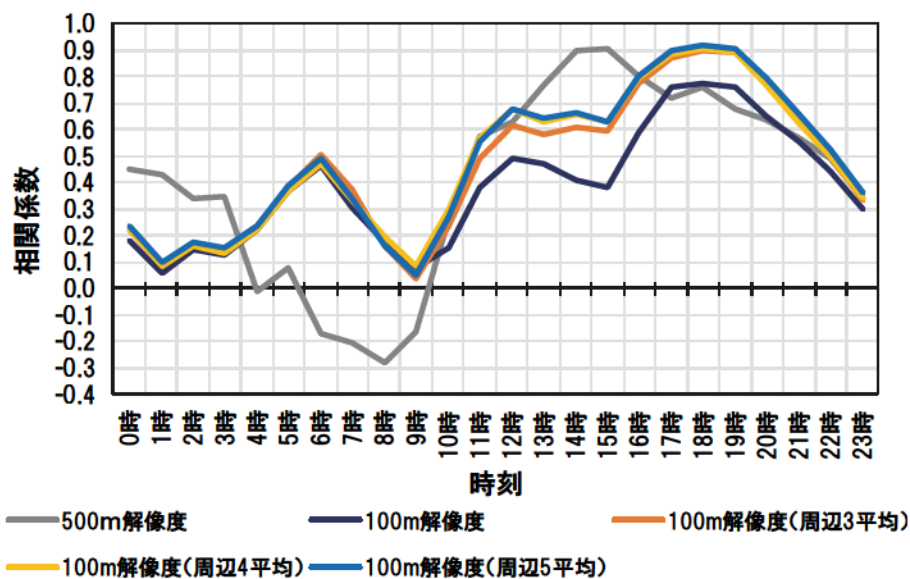


図 3-13 実測調査結果と数値計算結果の時刻別相関係数 (8月7日)

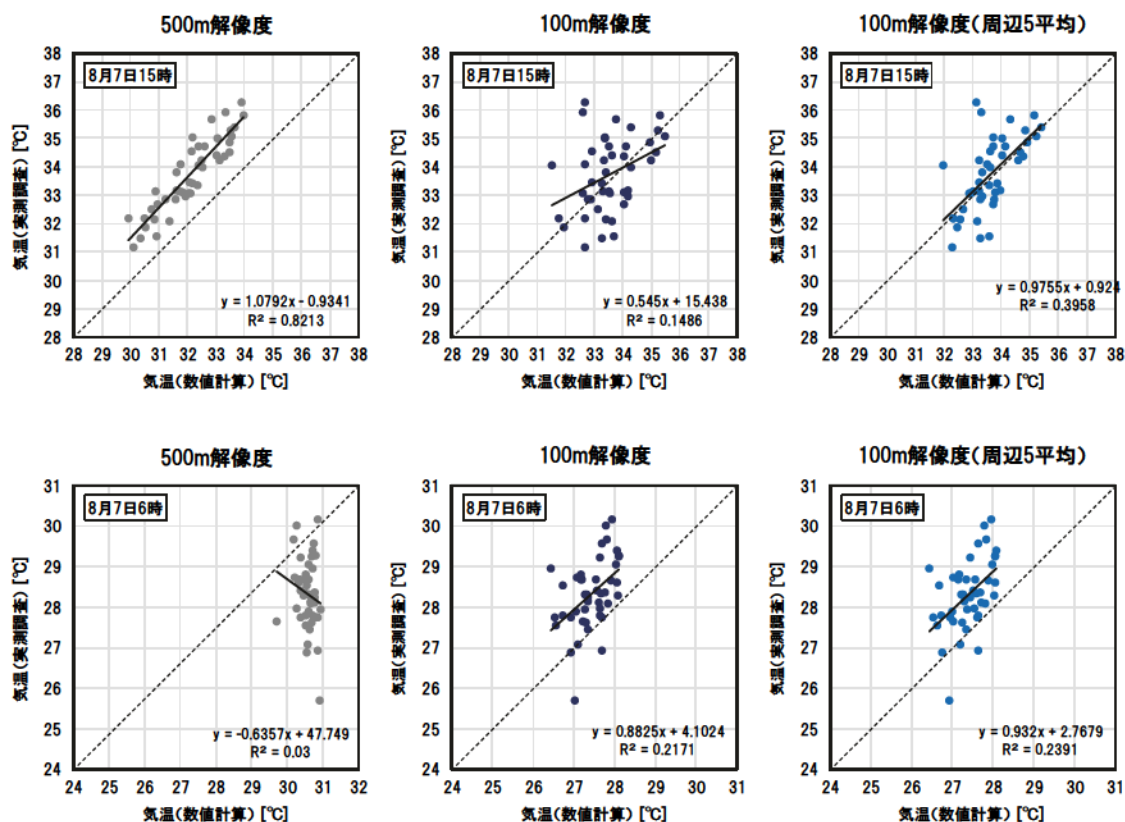


図 3-14 各値計算結果と実測調査結果の散布図
(上段：8月7日15時、下段：8月7日6時)

3-6. 本章のまとめ

本章で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 実測調査結果および2つのメソ数値計算結果から、日中は市の北部で、夜間は沿岸部で気温が相対的に高い傾向が見られた。これらはそれぞれ、日中に吹く海風および夜間の海水温等の影響と考えられる。
- 2) 高解像度メソ数値計算は、従来型メソ数値計算と比較すると、日中に実測調査との相関係数がやや小さい。これは高解像度メソ数値計算において、日中の風の効果にローカルなばらつきが生じやすいためと考えられる。
- 3) ただし、高解像度メソ数値計算においては、各メッシュの計算結果を周辺平均することで日中の相関係数が大きく向上した。このことから日中においては、ローカルなばらつきをある程度小さくする工夫が必要と考えられる。
- 4) 一方で夜間では高解像度メソ数値計算の相関係数が従来型メソ数値計算の相関係数よりも比較的高い。これは高解像度メソ数値計算において、地形の起伏に伴う夜間の気温差を従来よりも再現できているためと考えられる。

以上のように、日中のローカルなばらつきを小さくする工夫が必要ではあるが、高解像度メソ数値計算は日中の気温分布傾向再現に加えて、地形の起伏に伴う夜間の気温差を比較的再現できている等、「地形の影響」を考慮できていると考えられる。このことから本研究では地形が複雑な丘陵都市の気温分布の再現性という観点からは従来型メソ数値計算よりも高解像度メソ数値計算が効果的であると考えた。そこで次章では「広域の影響」および「地形の影響」をどちらも考慮できると考えられる高解像度メソ数値計算を用いて、横浜市の都市気候ゾーニングマップ作成を行う。

注

- 注3-1) 数値計算の解像度の影響を分析するためには、本来ならば使用モデルや解像度以外のパラメータを全て揃えた条件下で比較を行うべきと考えられる。一方で本研究ではこれまで都市気候分析によく用いられてきた WRF によるメソ数値計算と新しい MSSG によるメソ数値計算の比較を行っているため、数値計算解像度以外の設定条件も異なっている。そのため本章における比較は、数値計算解像度の比較ではなく、2つの手法の比較として位置付けた。
- 注3-2) MSSG による 100m 解像度のメソ数値計算の結果に対して、5×5 メッシュの周辺平均を行った場合、分析に用いる各サンプルの空間的な対象範囲は WRF による 500m 解像度のメソ数値計算と同じになる。しかし、高解像度の MSSG による 100m 解像度のメソ数値計算では、対象範囲内に地表面条件（主に土地利用と標高）のばらつきが生じるため、このばらつきを平均化した状態の物理現象を計算する WRF による 500m 解像度のメソ数値計算とは数値計算において対象範囲内で生じる物理現象が異なってくる（例えば、谷地形による熱拡散の低下の有無等）。そのためこれら2つは同じ空間的な範囲を対象としているが、それぞれのサンプルの値が持つ物理的な意味は異なる。

参考文献

- 3-1) 松尾薫・田中貴宏：広島平野における夏季の気温分布に関する研究-夏季多点同時気温観測による気温分布形成要因の分析-, 日本建築学会環境系論文集, 80(717), 2015
- 3-2) 気象庁：天気とその変化に関する用語,
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/yougo_hp/tenki.html,
(2018年8月1日にアクセス)
- 3-3) 気象庁：気温に関する用語,
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/yougo_hp/kion.html,
(2018年8月1日にアクセス)
- 3-4) 工藤嘉晃・加藤央之：相模湾からの海風侵入過程, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 49, pp.45-55, 2014
- 3-5) Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Wang, W., Powers, J.G.: A description of Advanced Research WRF Version3, *NCAR/TN-475+STR*, 2008
- 3-6) 竹林英樹・妹尾将司：メソ気象モデル WRF を用いた海岸に立地する都市の規模と夏期のヒートアイランド強度の関係分析, 日本建築学会環境系論文集, 81(726), 2016
- 3-7) 飯塚悟・近藤由美・玄英麗：減災・防災型都市形態モデルの導入と温熱環境に及ぼす影響 - 領域気象モデル WRF による名古屋都市圏の温熱環境シミュレーション(その5) -, 日本建築学会環境系論文集, 79(704), 2014
- 3-8) Takane, Y., Ohashi, Y., Kusaka, H., Shigeta, Y., Kikegawa, Y.: Effects of Synoptic-Scale Wind under the Typical Summer Pressure Pattern on the Mesoscale High-Temperature Events in the Osaka and Kyoto Urban Areas by the WRF Model, *Journal of Applied Meteorology and climatology*, 52, pp.1764-1778, 2013
- 3-9) Mukul Tewari, Fei Chen, Hiroyuki Kusaka, Shiguang Miao: Coupled wrf/unified Noah/urban-canopy modeling system, 2007
- 3-10) 国土交通省・環境省：都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書, 2003

第4章 多変量解析を用いた丘陵都市の都市気候ゾーニング

- 4-1. 本章の概要
- 4-2. 数値計算概要
- 4-3. 数値計算結果
- 4-4. 多変量解析による都市域の分類
- 4-5. ゾーニングの妥当性確認
- 4-6. 本章のまとめ

第4章 多変量解析を用いた丘陵都市の都市気候ゾーニング

4-1. 本章の概要

本章では、前章で再現性の検討を行った MSSG による高解像度メソ数値計算(100m 解像度)を用いて、横浜市全域の都市気候を再現する。さらにその結果を入力条件とした多変量解析(主成分分析およびクラスター分析)を行い、「広域の影響」に加えて「地形の影響」を考慮した横浜市の「都市気候ゾーニングマップ」を作成する。また作成されたゾーニングマップの妥当性等を確認するために、ゾーン毎の特徴を把握し、さらに実測調査データを用いた検証を行う。

本章の流れを以下に示す。(図 4-1 参照)

- 1) 数値計算結果と気象台観測データとの比較
- 2) 気温分布・風分布傾向の把握
- 3) 主成分分析による気温変動特性指標の抽出
- 4) クラスター分析による都市域のゾーニング
- 5) 都市気候ゾーン毎の特徴把握
- 6) 実測調査データによるゾーニングの検証

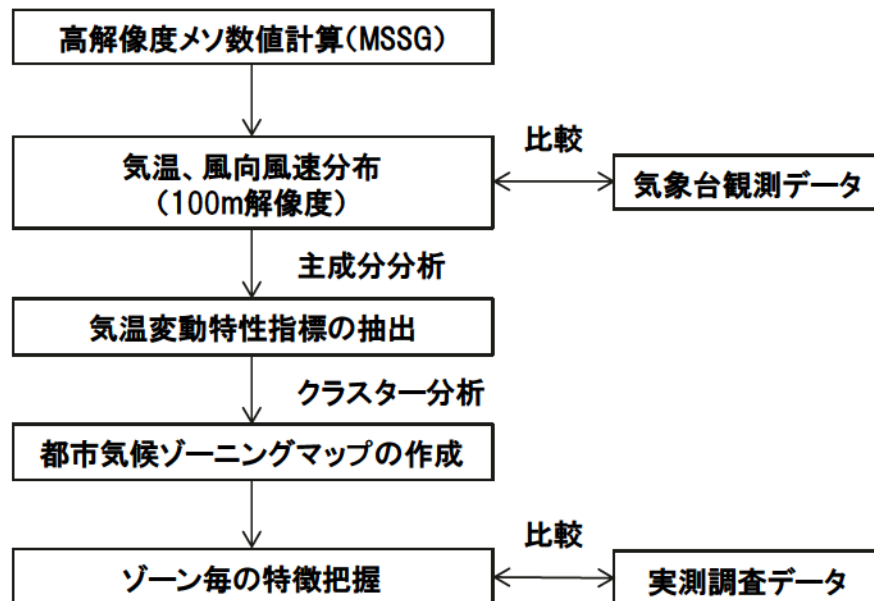


図 4-1 第4章の流れ

4-2. 数値計算概要

本研究では前章で検討を行った MSSG による高解像度メソ数値計算（100m 解像度）を用いて、横浜市全域の都市気候計算を行う。

表 4-1 に数値計算条件を示す。計算期間は晴天日が続いた 2016 年 7 月 29 日 0 時～31 日 0 時および 2016 年 8 月 4 日 0 時～7 日 0 時とし、1 時間毎の計算結果を出力した^{注 4-1}。図 4-2 に計算領域を示す。計算領域は前章の結果を踏まえて、ネスティング手法を用いて、Domain1 を解像度 2.5km の 192×192 格子、Domain2 を解像度 500m の 512×512 格子、Domain3 を解像度 100m の 512×512 格子とそれぞれ設定した。なお分析には Domain3 の内、横浜市内に位置するメッシュを用いた。鉛直格子は地表面から高度 20km までを不等間隔で 96 層に分割し、最下層は地上 25m とし、分析にはこの最下層のデータを用いた^{注 4-2}。

数値計算の初期値・境界値には気象庁の MSM データ（3 時間間隔、10km 解像度）を用いた。図 4-3 に数値計算の入力に用いた土地利用・標高分布（Domain3）を示す。土地利用データは Domain1、2 には米国 USGS の土地利用データを、Domain3 には東京都内は東京都都市計画基礎調査 GIS データ（2006 年版）を、それ以外には細密数値情報・数値地図 5000（10m メッシュ）および国土数値情報土地利用細分メッシュ（100m メッシュ）をそれぞれ用い、表 4-2 に示す分類に再分類して入力した。なお本章の数値計算の入力にはメッシュ毎の各土地利用分類の割合が入力され、数値計算に反映されている。図 4-3 左はその内、各メッシュの代表土地利用（都市的土地利用分類は統合）を示したものである（100m 解像度）^{注 4-2}。また標高データは Domain1、2 には GTOPO30 を、Domain3 には国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル（10m メッシュ）をそれぞれ用いた。また都市域には単層都市キャノピーモデルを用いたが、前章の結果より全体的な傾向には影響しないと考え、人工排熱は考慮しないこととした。

表 4-1 数値計算条件

| | | |
|---------|--|---|
| 計算期間 | ① 2016/7/29 0時～2016/7/31 0時 ② 2016/8/4 0時～2016/8/7 0時 | |
| 水平格子 | Domain1 | 2500m解像度(192×192格子) |
| | Domain2 | 500m解像度(512×512格子) |
| | Domain3 | 100m解像度(512×512格子) |
| 鉛直格子 | 96 層(地表面～地上20km、不等間隔) | |
| 気象データ | 気象庁MSMデータ(3時間間隔, 10km格子) | |
| 土地利用データ | Domain1 | USGS土地利用データ |
| | Domain2 | |
| | Domain3 | 東京都都市計画基礎調査GISデータ 細密数値情報・数値地図5000(10mメッシュ) 国土数値情報土地利用細分メッシュ(100mメッシュ) |
| 標高データ | Domain1 | GTOPO30 |
| | Domain2 | 基盤地図情報数値標高モデル(10mメッシュ) |
| | Domain3 | |
| 雲微物理過程 | Reisner2 scheme | |
| 放射過程 | Mstrnx scheme | |
| 大気境界層過程 | Mellor-Yamada Level2.5 scheme | |
| 都市キャノピー | Single layer urban canopy model | |

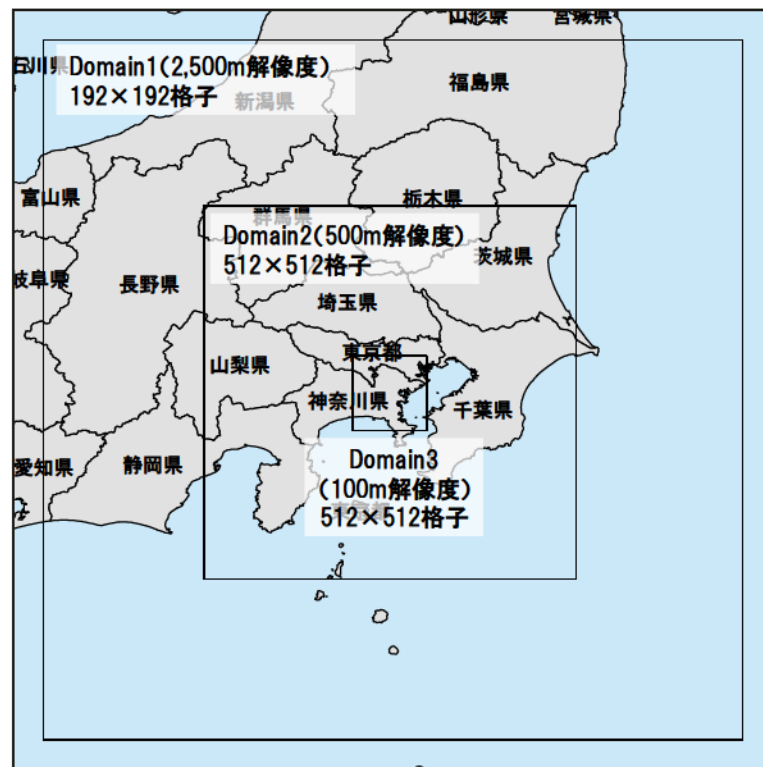


図 4-2 計算領域

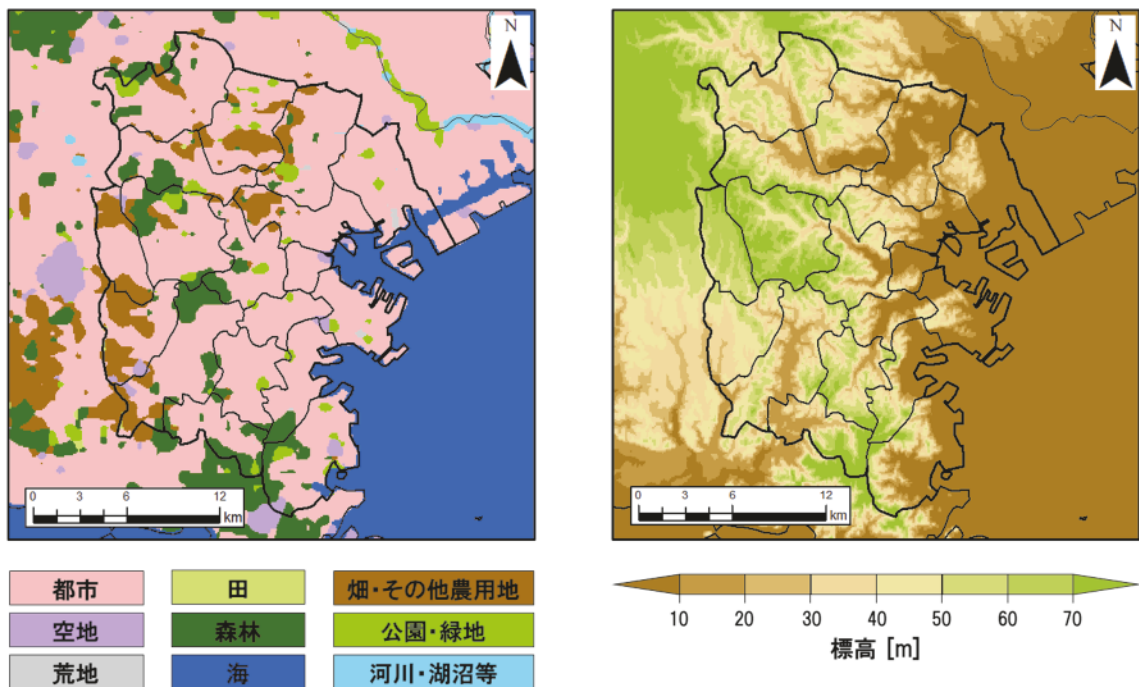


図 4-3 数値計算入力条件 (Domain3)
(左：代表土地利用、右、標高)

表 4-2 土地利用分類

| 土地利用分類 | |
|-----------------------|---|
| Domain1 (2500m解像度) | USGS(United States Geological Survey) の土地利用分類 ¹⁵⁾ (24分類) |
| Domain2 (500m解像度) | |
| Domain3 (100m解像度) | 以下の12分類 (赤字:都市系、緑字:自然系、青字:水系) 建物、住居系土地、商業系土地、工業系土地、道路、 田、畑・その他農用地、森林、荒地、空地、公園・緑地、 河川・湖沼等、海 |

4-3. 数値計算結果

4-3-1. 気象台観測データとの比較

数値計算結果の精度を確認するため、横浜地方気象台（前節の図 3-5 参照）の観測データとの比較を行った。図 4-4 に数値計算結果と観測データの気温・風速の推移および風配図をそれぞれ示す。なお比較に用いる数値計算結果は観測地点を中心に半径 100m のバッファ領域を作成し、その領域と交差するメッシュの値の平均値とした。図 4-4 より、気温は数値計算が観測データよりやや低い。これは今回用いた計算結果は地上 25m の気温であるためと考えられる。図 4-4 より、風速は 8 月 4 日、5 日の夜間で数値計算結果が大きい、日中は概ね一致している。この数値計算結果と観測データの差が大きい日は、夜間の風向が変わらず常に南風が吹き続ける日であった。このような日には後述する相模湾から東京湾へ吹く夜間の風が強められ、横浜地方気象台周辺で風速が過大になっており、これが要因の 1 つとして考えられる。また、図 4-4 より観測データの方がやや西寄りの風が見られる。以上の結果より、若干のずれはあるが、対象地の気温分布への影響が大きいと考えられる卓越風向が風配図より概ね一致していること、また海風発達時（午前中～正午過ぎ頃）の気温や風速が比較的一致していることから、横浜市内の気温分布・風分布の「全体的な傾向」は再現できていると判断し、以降の分析に用いることとした。ただし、夜間風速が過大であり、また夜間の最低気温のカーブ形状が違う等、時間帯によっては差が大きいため、以降の分析は基本的には 5 日間の時刻別平均値を用いることとした。またこれら計算精度の向上については、引き続き検討を行う予定である。

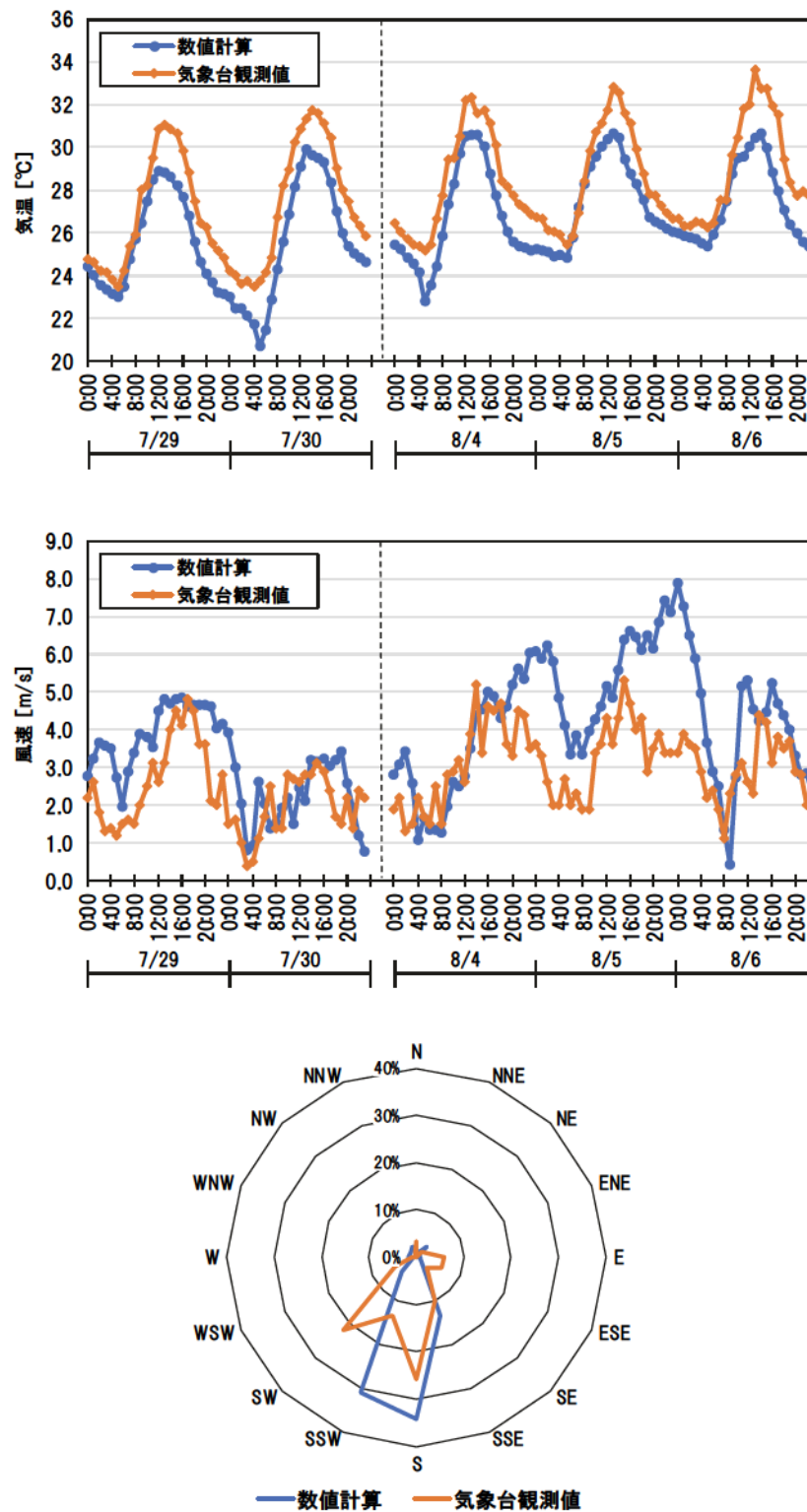


図 4-4 計算結果と観測データの比較
 (上段：気温の推移、中段：風速の推移、下段：風配図)

4-3-2. 気温分布・風分布傾向の把握

図 4-5、図 4-6 に計算結果の内、2016 年 8 月 5 日（パターン B（南風日））と 2016 年 8 月 6 日（パターン C（東+南風日））の 6 時、10 時、13 時の気温分布および風向・風速分布をそれぞれ示す。以下に、各時刻の分布傾向をそれぞれ示す。

■ 6 時

5 日、6 日のいずれの気温分布も東京湾沿岸で気温が高く、内陸で気温が低い。風向・風速分布から、この時刻では相模湾から東京湾にかけて南風が吹いており、5 日と 6 日でその影響範囲は異なるが、この南風が卓越しているエリアでは気温が相対的に高い。この南風は相模湾上を通り、陸域より温度の高い夜間の海水温の影響を大きく受けているため、卓越範囲で気温が下がりにくくなっていると考えられる。一方、内陸では風速は小さいが、北からの陸風が卓越している。この陸風が卓越している範囲では気温は地形（標高）の影響を大きく受けている。また内陸の谷部を見ると、5 日では気温が周囲より低く、6 日では周囲より高い。風速を比較すると 5 日の風速が小さく、6 日で大きい。このことから 6 日のようにある程度風が吹く場合には風通しの良い丘陵上部の気温が低下し、5 日のように風速が非常に小さいときには逆転層が発生し、谷底が冷却されるためと考えられる。

■ 10 時

この時刻では風況パターンの違いが顕著に見られる。風速分布を見ると、パターン B（南風日）の 5 日では 10 時の時点でほぼ市全域に南風が吹いている。一方でパターン C（東+南風日）の 6 日では相模湾および東京湾沿岸のみで風速が大きく、2 つの湾からの海風が徐々に進入しつつある。気温分布を見ると、5 日では相模湾沿岸から徐々に気温が上昇するが、6 日では 2 つの海風進入エリア（相模湾沿岸では海岸線から 7~8km 程度、東京湾沿岸では海岸線から 3~4km 程度）で気温が低く、それより内陸のエリアでは気温はほぼ一様となる。そのため、相対的な高温エリアはパターン C（東+南風日）の 6 日でより広がっている。また風が弱く、気温がほぼ一様な内陸のエリアを見ると、谷部においてやや気温が高い傾向が見られる。これは地形的な風通しの悪さが影響していると考えられる。

■ 13 時

風速分布を見ると、パターン B（南風日）の 5 日では、市全域に概ね一様に南風が卓越している。一方でパターン C（東+南風日）の 6 日でも市全域である程度風は吹いているが、市の南西部で風速が相対的に大きく、海風の進入途中であると考えられる。気温分布を見ると、10 時と同様にパターン B（南風日）の 5 日では概ね相模湾からの距離によって気温分布が形成されているが、パターン C の 6 日では東京湾からの距離も影響している。そのため、相対的な高温域はパターン B（南風日）では市北部の東寄りに位置するが、パターン C（東+南風日）の 6 日では市の北西部に位置している。また市内の気温差はパターン B（南風日）の 5 日よりパターン C（東+南風日）の 6 日で大きい。このように風況パターンにより分布傾向は少し異なるが、概ねは全章の結果と同様であった。また市中央部や北部の谷部の風速が小さく、気温がやや高いことから地形の起伏の影響も見られる。

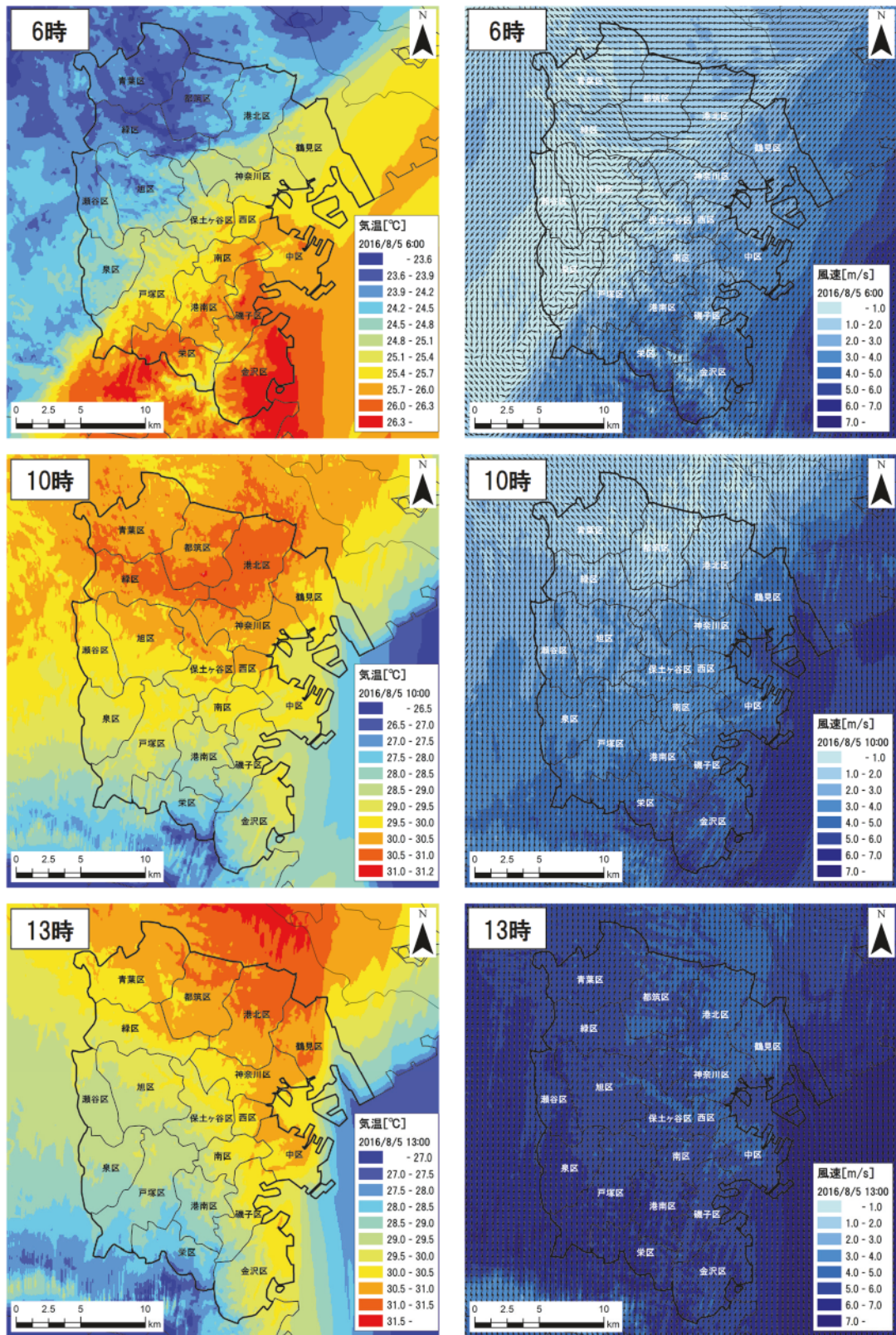


図 4-5 地上 25m の気温分布 (左列) および風向・風速分布 (右列)
(2016 年 8 月 5 日 上段 : 6 時、中段 : 10 時、下段 : 13 時)

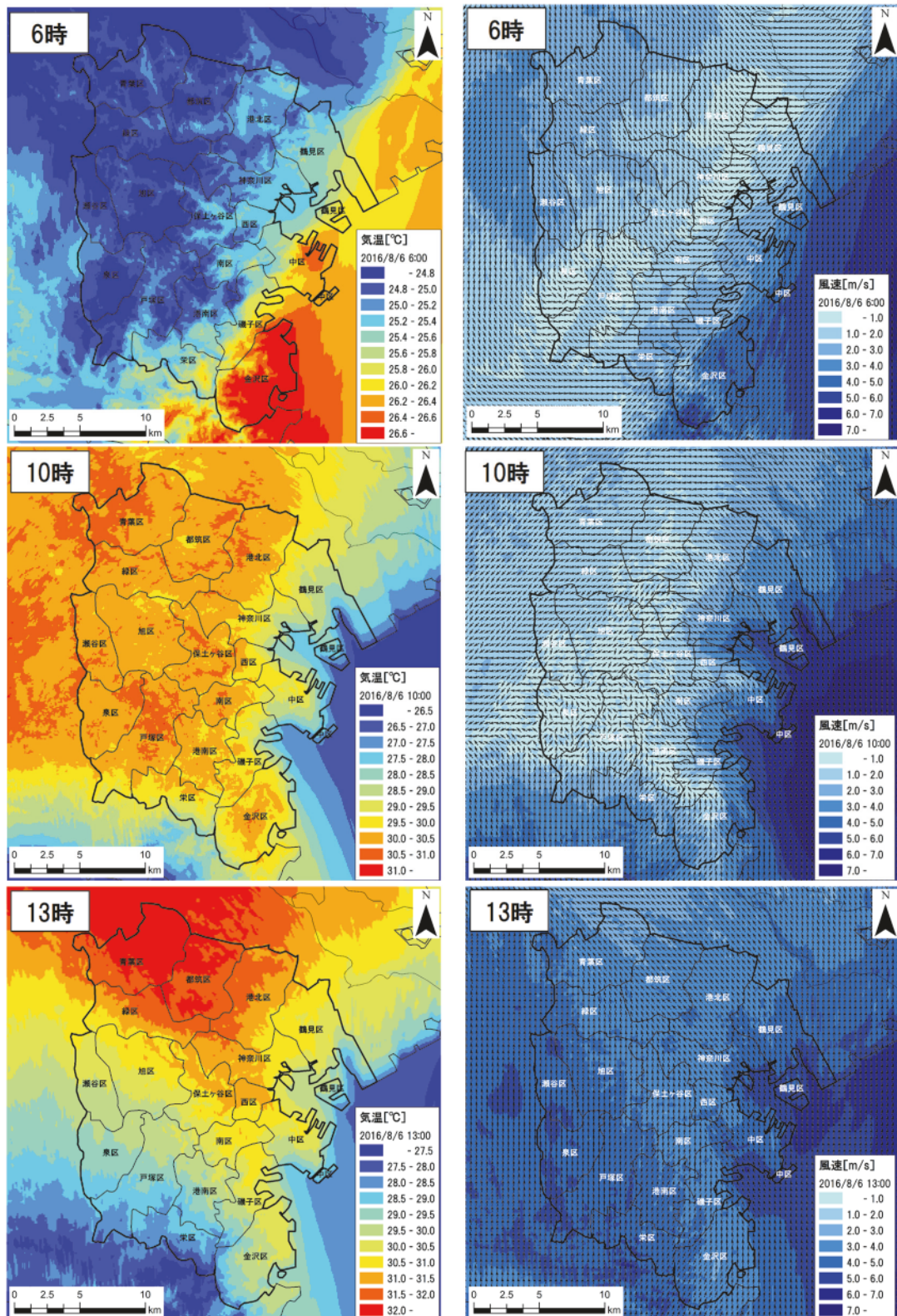


図4-6 地上25mの気温分布(左列)および風向・風速分布(右列)
(2016年8月6日 上段:6時、中段:10時、下段:13時)

4-4. 多変量解析による都市域の分類

4-4-1. 主成分分析

対象地の都市域において、都市気候の観点からゾーニングを行うため、文献 4-1 を参考に主成分分析およびその結果（主成分得点）を入力条件としたクラスター分析による都市メッシュの分類を行った。具体的にはまず主成分分析により都市域の時刻毎の気温分布の内、分布傾向が類似している時間帯を統合し、都市域の気温分布パターンを支配している主成分（気温変動特性指標）を抽出した。対象地内の都市メッシュ（39556 個）をサンプルとし、計算期間（7月 29 日～7月 30 日、8月 4 日～8月 6 日の 5 日間）の時刻別平均気温（0 時～23 時の 24 変数）を説明変数とした主成分分析（バリマックス回転）を行った。なおここでは代表土地利用が「建物」、「住居系土地」、「商業系土地」、「工業系土地」、「道路」のメッシュを「都市メッシュ」として分析対象とした。

表 4-3 に主成分分析の結果を示す。なお表 4-3 では各主成分の固有値、累積寄与率および各主成分と各説明変数間の相関係数を示している。また各主成分と各説明変数間の相関係数については、関連が大きい相関係数±0.6 以上のものを色付けしている。ここでは説明力が大きい固有値 1 以上の 3 つの主成分を抽出した。第 1～3 主成分は、それぞれ主に夜間気温および午前中の気温、12 時～21 時の正午過ぎから夜にかけての気温、7 時～9 時の明け方の気温との関連が大きい。

図 4-7 にメッシュ毎の第 1～3 主成分得点の水平分布図を示す。図 4-7 より第 1 主成分は東京湾沿岸部で大きく内陸で小さいことから、夜間海水温および東京湾からの海風効果の影響を表していると考えられる。第 2 主成分は市南部で小さく市北部で大きいことから、相模湾からの海風効果を表していると考えられる。第 3 主成分は谷部で大きく沿岸部や丘陵上部で小さい等、地形の凹凸による影響を表しており、地形に起因する日射量やローカルな風通し等と関連が大きいと考えられる。

そこで第 3 主成分と風速の関連について、図 4-8 に第 3 主成分と時刻別平均風速との相関係数の推移を示す。図 4-8 より全体的な傾向として、第 3 主成分が大きいメッシュでは風速が小さく、負の相関関係が見られる。しかし一部の時間帯では相関が小さい。まず 7 時～9 時については、横浜市南部の金沢区で局所的な風の発達が見られたため、金沢区に位置するメッシュを除いて相関係数を算出した所、図 4-8 に示すように相関関係が向上した。また 10 時～13 時でも、相関係数が小さい。この時間帯は海風が徐々に進入する時間帯であり、相模湾からの距離によって風の方が大きく異なる。そこで相模湾からの距離帯によってメッシュを分類し、距離帯毎の相関係数を算出した（図 4-9）。各距離帯で違いはあるが、いずれも相関係数が向上する。これらの結果をまとめると第 3 主成分と時刻別平均風速の間には、対象地全域の風環境の場が概ね一樣な時間帯には負の相関関係が見られ、また海風発達時等の風環境の場が大きく異なる場合には、同じ風環境の場の中では負の相関関係が見られることが明らかとなった。

以上の結果から、横浜市の気温分布を支配している気温変動特性指標として、「広域の影響」に相当する「夜間海水温および東京湾からの海風効果」および「相模湾からの海風効果」に加えて、丘陵都市の特徴である「地形の影響」に相当する「地形の凹凸」が抽出された。そこで次節ではこれら気温変動特性指標を入力条件としたクラスター分析を行い、都市メッシュの分類を行った。

表 4-3 主成分分析結果

| | | 第1主成分 | 第2主成分 | 第3主成分 | |
|-----------------|----|-------|-------|-------|-------|
| 固有値 | | 11.2 | 9.1 | 2.1 | |
| 累積寄与率 | | 45.75 | 84.84 | 93.53 | |
| 各主成分と説明変数との相関係数 | 気温 | 0時 | 0.95 | 0.17 | 0.08 |
| | | 1時 | 0.93 | 0.18 | 0.03 |
| | | 2時 | 0.94 | 0.07 | -0.04 |
| | | 3時 | 0.94 | -0.12 | 0.04 |
| | | 4時 | 0.95 | -0.20 | -0.01 |
| | | 5時 | 0.91 | -0.25 | -0.05 |
| | | 6時 | 0.77 | -0.43 | 0.24 |
| | | 7時 | 0.41 | -0.42 | 0.76 |
| | | 8時 | -0.12 | -0.23 | 0.94 |
| | | 9時 | -0.65 | -0.05 | 0.71 |
| | | 10時 | -0.84 | 0.13 | 0.49 |
| | | 11時 | -0.85 | 0.40 | 0.28 |
| | | 12時 | -0.68 | 0.69 | 0.10 |
| | | 13時 | -0.53 | 0.82 | 0.03 |
| | | 14時 | -0.43 | 0.88 | -0.03 |
| | | 15時 | -0.26 | 0.94 | -0.11 |
| | | 16時 | -0.12 | 0.97 | -0.15 |
| | | 17時 | 0.04 | 0.97 | -0.17 |
| | | 18時 | 0.15 | 0.95 | -0.16 |
| | | 19時 | 0.27 | 0.93 | -0.11 |
| | | 20時 | 0.46 | 0.86 | -0.11 |
| | | 21時 | 0.68 | 0.70 | -0.13 |
| | | 22時 | 0.81 | 0.53 | -0.15 |
| | | 23時 | 0.85 | 0.44 | -0.18 |

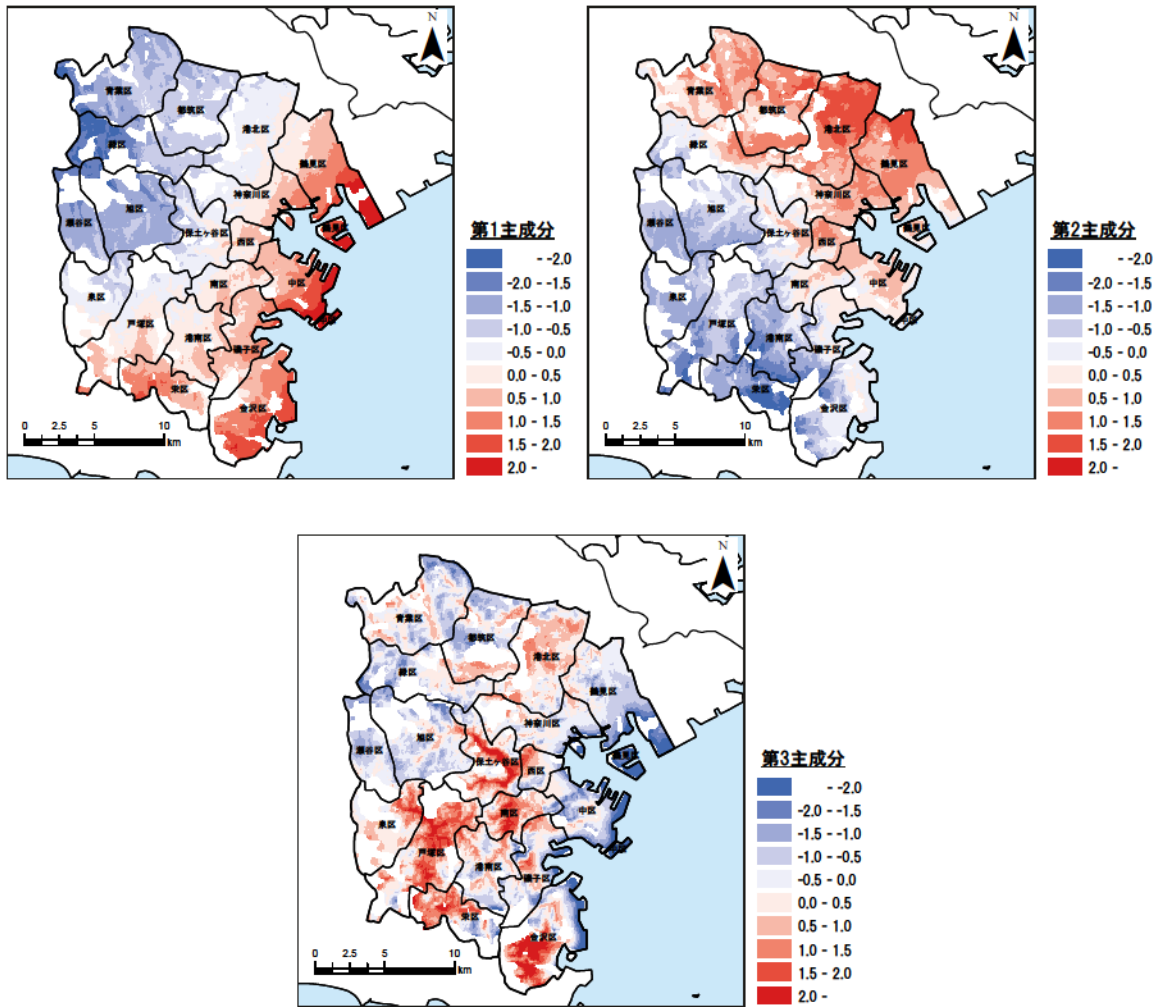


図 4-7 主成分得点の水平分布（左上：第 1 主成分、右上：第 2 主成分、下：第 3 主成分）

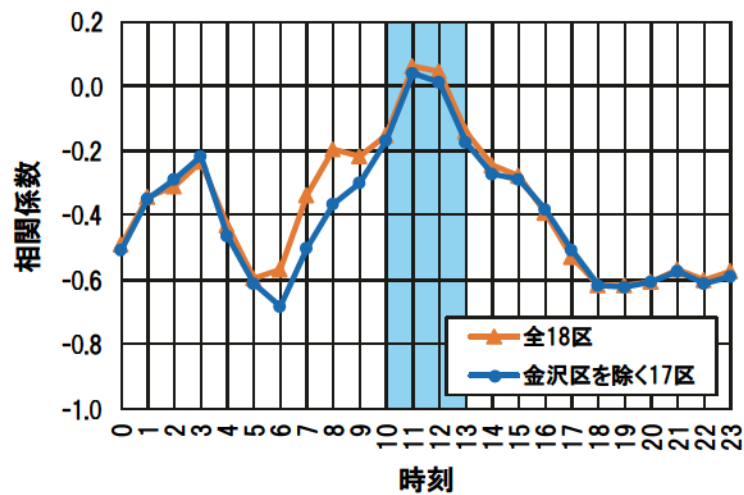


図 4-8 第 3 主成分得点と風速との相関係数の時刻別推移（全 18 区および金沢区を除く 17 区）

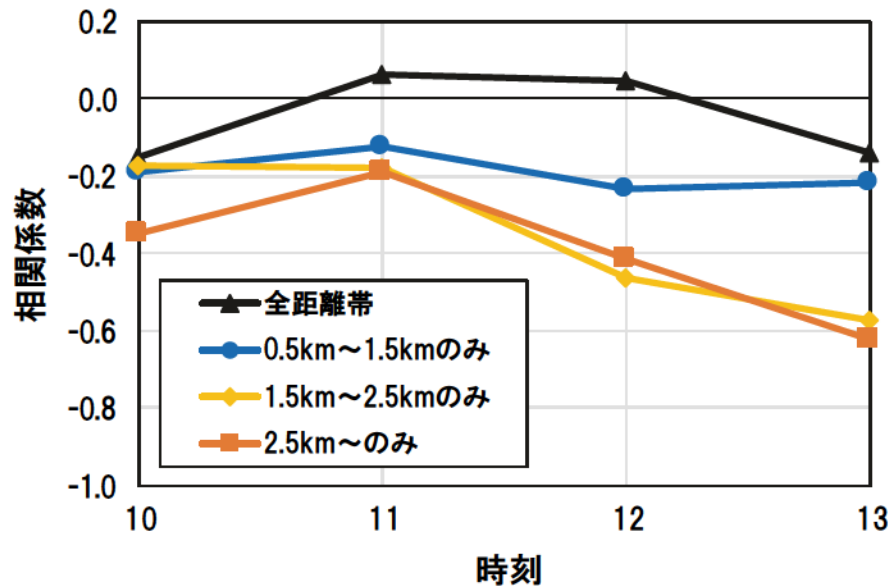


図 4-9 第 3 主成分得点と風速との相関係数の時刻別推移（相模湾からの距離帯別）

4-4-2. クラスタ分析

ここでは前節の主成分分析と同じ横浜市内の都市メッシュ（39556 個）をサンプルとし、前節で算出した 3 つの気温変動特性指標（主成分得点）を説明変数とした階層型クラスタ分析（Ward 法、ユークリッド平方距離による）を行った。なお結果として都市メッシュを 5 つのクラスターに分類した^{注 4.3)}。図 4-10 にクラスター毎の平均主成分得点を示す。さらにこの結果をマップ化し、ゾーニングマップを作成した（図 4-11）。なお図 4-11 中の「緑地」は代表土地利用が「田」、「畑・その他農用地」、「森林」、「荒地」、「空地」、「公園・緑地」のメッシュである。また図 4-12 に各ゾーンの地理的特徴（相模湾からの距離、東京湾からの距離、標高、Topographical Position Index（TPI^{注 4.4)}）を示す。

まず図 4-11 を見るとゾーンが主に 3 つの気温変動特性指標（前節で抽出）に従い、相模湾・東京湾からの距離（広域の影響）および地形の凹凸（地形の影響）によって分類されている様子が見られる^{注 4.5)}。図 4-12 と併せて見ると、Zone1、Zone2 は相模湾からの距離が小さく、相模湾に近い横浜市南部に位置していることが分かる。また Zone3 は東京湾からの距離が小さく、東京湾沿岸部に位置しており、Zone4、Zone5 は相模湾・東京湾どちらからの距離も比較的大きく、市北部の内陸側に位置していることが分かる。さらに地形の凹凸を示す TPI を比較してみると、Zone2 と Zone5 では TPI が負の値となっている。またそれぞれ両海岸からの距離が同程度の Zone1 と Zone4 と比較すると標高が低いことから Zone2 と Zone5 は谷部に、Zone1、Zone4 は丘陵の上部にそれぞれ位置していることが分かる。以上の結果を踏まえて、次章ではそれぞれの都市気候ゾーンの特徴について把握する。

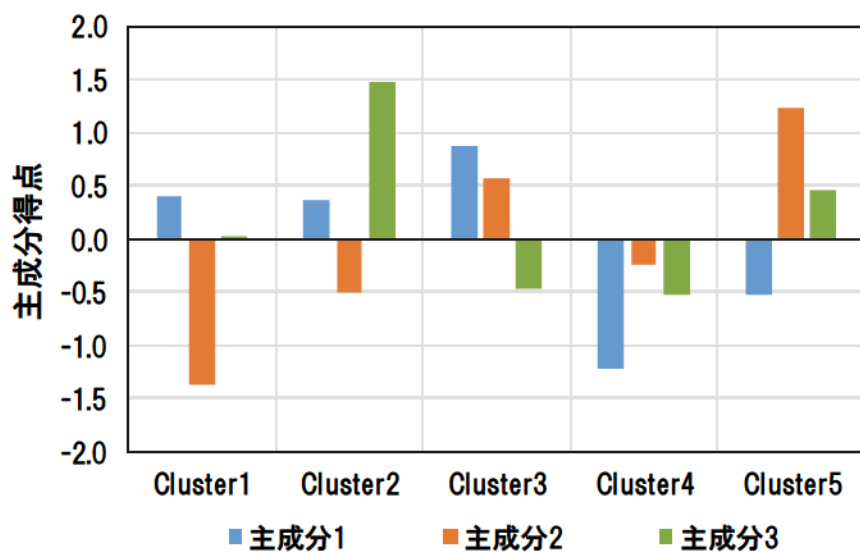


図 4-10 クラスタ毎の平均主成分得点

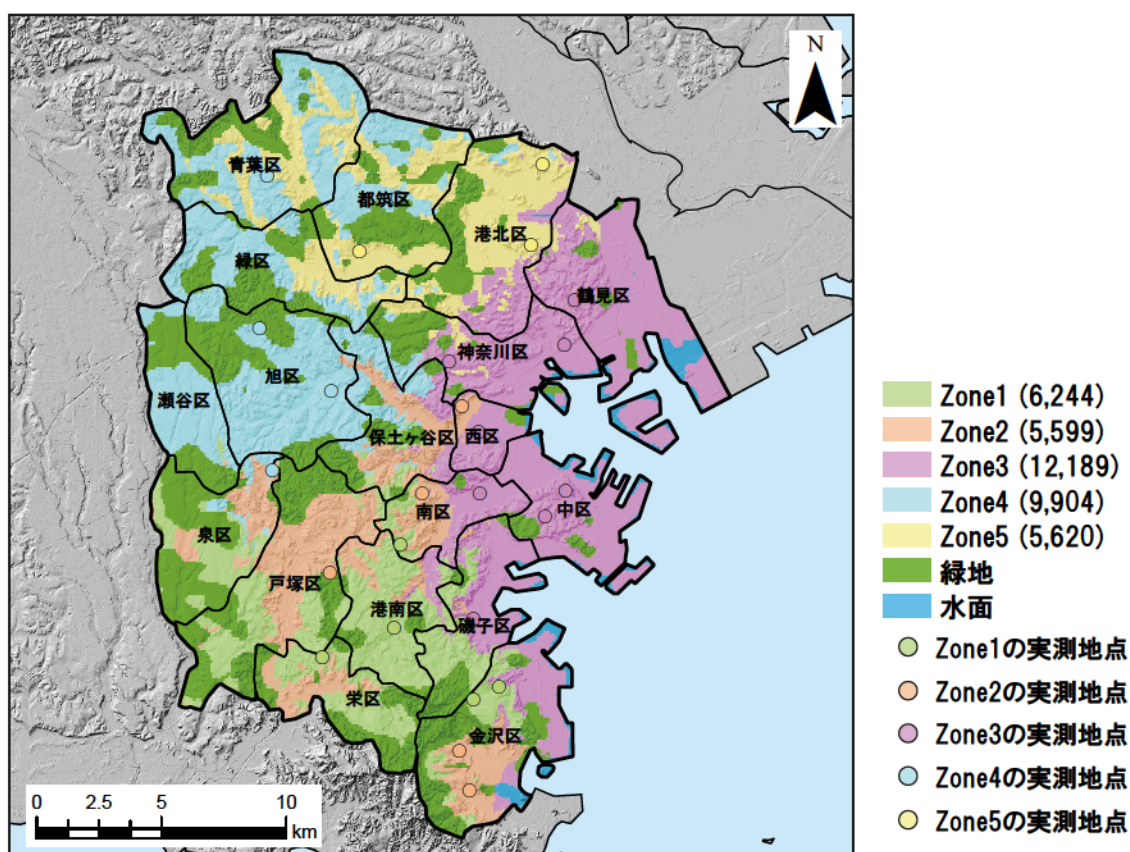


図 4-11 都市気候ゾーニングマップ（凡例の括弧内はメッシュ数）

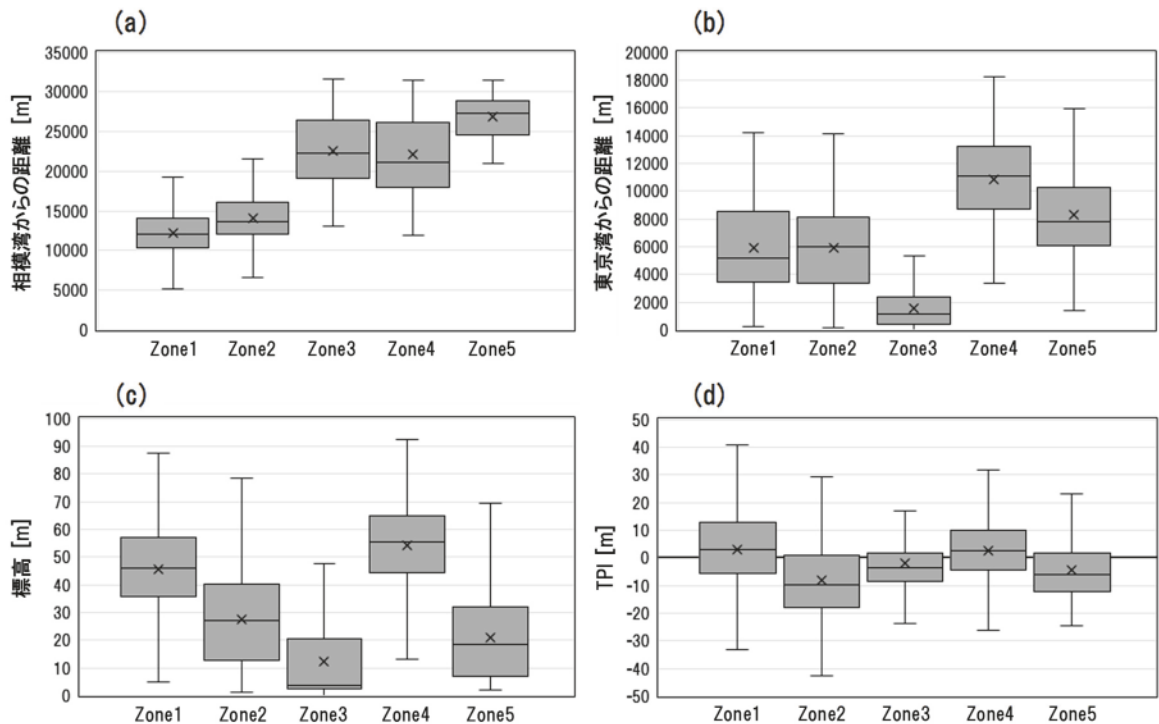


図 4-12 ゾーン毎の地理的特徴

((a) 相模湾からの距離、(b) 東京湾からの距離、(c) 標高、(d) TPI)

4-5. ゾーニングの妥当性確認

4-5-1. ゾーン毎の特徴

図 4-13 にゾーン毎の気温推移および風速推移を、図 4-14 にゾーン毎の風配図をそれぞれ示す。なお図 4-13 は計算期間におけるクラスター毎の都市メッシュの時刻別平均値を用いて作成し、図 4-14 は計算期間の 1 時間毎のデータを全て用いて作成した。以下にゾーン毎の特徴を示す。

- ・ Zone1：市南部に位置する。風速が 1 日を通して大きく、特に 11 時～14 時の風速が他ゾーンよりも大きい。そのため他ゾーンよりも気温上昇が早めに抑制される。相模湾からの海風効果を得やすいエリアであるため、南～南西方向からの風通しを良くすることが有効と考えられる。しかし他ゾーンに比べて対策の優先度は低い。
- ・ Zone2：市南部～中央部に位置する。相模湾からの距離は Zone1 と同程度だが、谷部のため Zone1 よりも風速が小さく、気温が高い。そのため立地に対して風利用の期待度はやや小さい。しかし、Zone4、5 に比べると気温は低いため、Zone1 と同様、南～南西方向からの風通しを良くすることが基本的な対策と考えられる。
- ・ Zone3：東京湾沿岸に位置する。午前中の風速が大きく、午前中の気温は最も低い。しかし、最高気温は Zone4、5 に次いで 3 番目である。そのため午前中の海風を有効活用する対策として東～南東方向からの風通しを良くすることが有効と考えられる。

- ・ Zone4：市中央部～北部の丘陵上部に位置する。気温は Zone5 に次いで 2 番目に高いが、最高気温に達する時刻は比較的早い。午前中の風速は比較的小さいが、午後に最も大きくなる。これは午後に相模湾からの海風が到達するためと考えられる。そのため午後の対策として南方向からの風通しを良くすることが有効と考えられるが、午前中の対策として風通し改善以外の対策が求められる。
- ・ Zone5：市北部の谷部に位置する。最高気温は最も高く、また風速は 1 日を通して他のゾーンよりも小さい。地形と立地から風通しが悪く熱環境が悪化しやすいエリアであるため、他のゾーンに比べて対策優先度が高い。また風通しの向上による改善効果はあまり期待できないため、緑陰の創出等の対策が必要と考えられる。

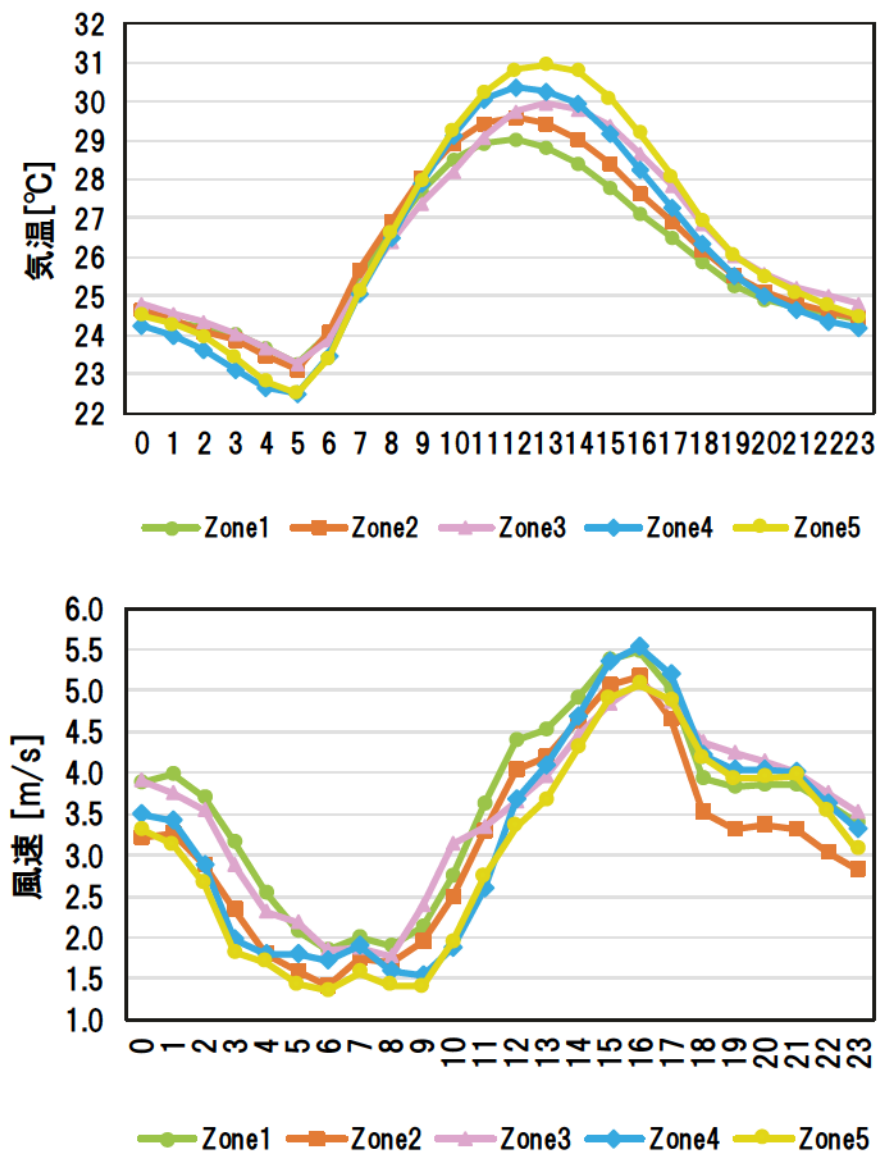


図 4-13 ゾーン毎の平均気温（上段）と平均風速（下段）の推移

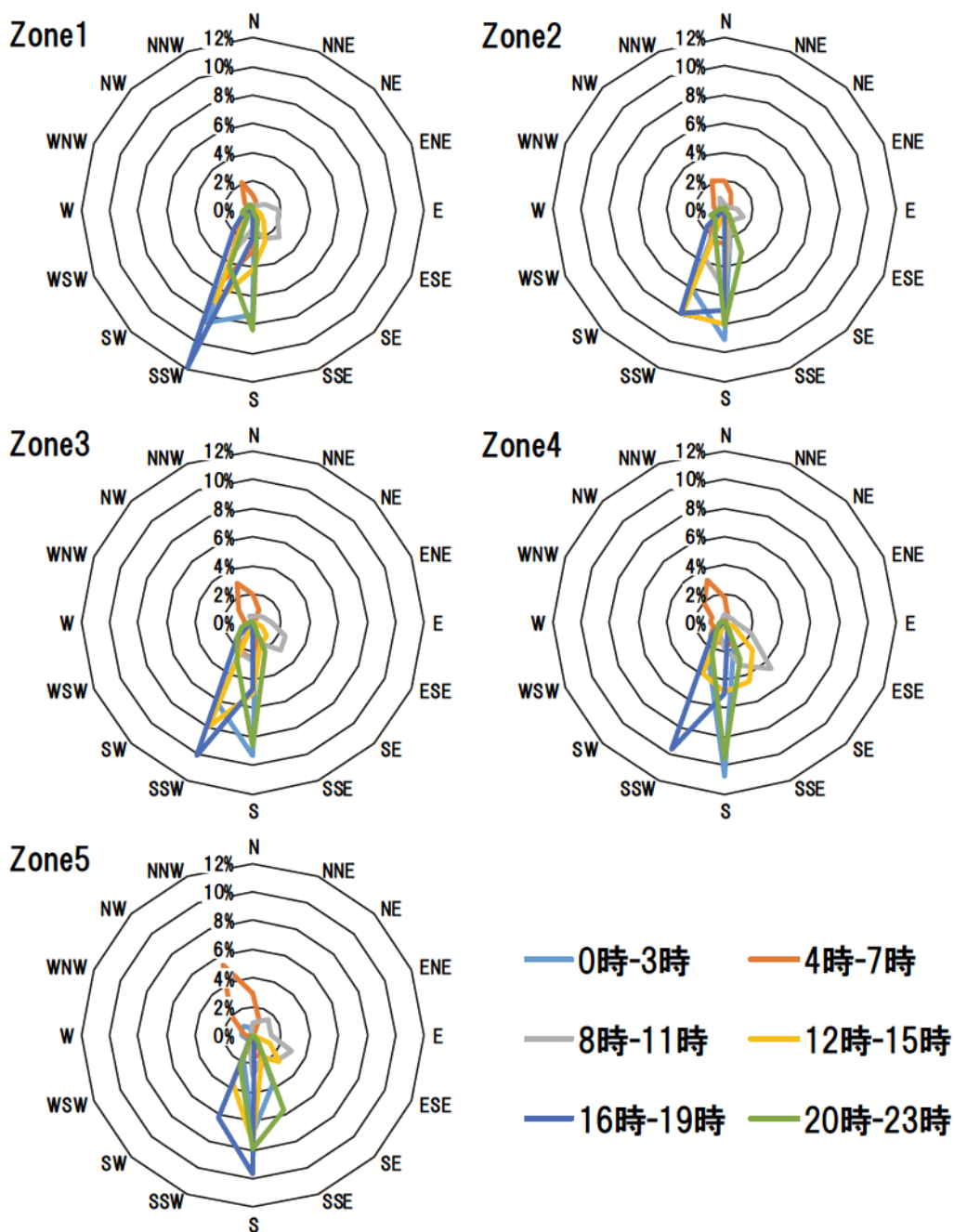


図 4-14 ゾーン毎の風配図

4-5-2. 実測データによるゾーニングの検証

最後に、計算期間と同期間に測定した実測データ^{注4-5)}を用いて、ゾーン毎の傾向の比較を行った。実測地点は図 4-11 中に示す。図 4-15 に実測調査結果を用いて作成したゾーン毎の気温推移を示す。なお図 4-15 は計算期間 5 日間の時刻別平均値から作成した。全体的な傾向は図 4-13 上段と一致しているが、Zone4 の気温が図 4-13 上段よりも低い。今回の分析では各ゾ

ーンに位置する実測地点の平均値を用いており、また Zone4 に含まれる実測地点に常に木陰に入る百葉箱が含まれていた。そのため Zone4 では気温が低めに評価されている可能性が考えられる。また各ゾーンの地点数も異なるため、今後実測地点を増やし、ゾーン間の地点数の差および百葉箱の設置状況のばらつきを排除した上でより詳細な分析が必要と考えられる。

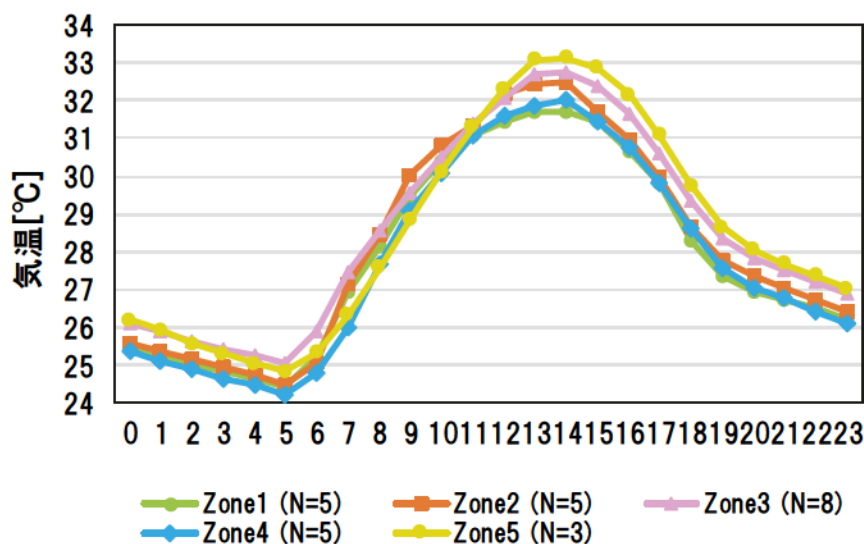


図 4-15 ゾーン毎の平均気温の推移（実測調査データから作成）

4-6. 本章のまとめ

本章で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 時刻別平均気温を説明変数とした主成分分析により、横浜市都市域の気温変動特性指標として、3つの主成分を抽出した。これらはそれぞれ、「夜間海水温および東京湾からの海風効果」、「相模湾からの海風効果」、「地形の凹凸」による影響を表していると考えられ、前者2つは「広域の影響」、後者は「地形の影響」に相当する。
 - 2) 3つの気温変動特性指標の主成分得点を説明変数としたクラスター分析により、横浜市の都市域を5つのゾーンに分類し、「都市気候ゾーニングマップ」を作成した。なおこれらのゾーンは主に相模湾・東京湾からの距離（広域の影響）に加えて、地形の凹凸（地形の影響）によって分類された。
 - 3) 作成された各ゾーンの特徴（平均気温・平均風速）を比較した結果、日中における気温・風速の変動パターンや最高気温・最大風速の違いが各ゾーン間で見られた。
 - 4) 気温の実測調査結果を用いて、ゾーン毎の気温変動の傾向を確認した結果、一部で異なる点があったが、全体的にゾーン毎の傾向は数値計算結果による結果と概ね同様であった。
- 以上のように、高解像度メソ数値計算（MSSGによる100m解像度のメソ数値計算）を活用して、「広域の影響」に加えて「地形の影響」を考慮した都市気候ゾーニングマップを作成す

ることができた。このように丘陵都市の気候特性は「広域特性（横浜市においては海風特性）」および「地形特性」から構成されるものと考えられる。このことを踏まえて次章では、横浜市内、特に地形が複雑なエリアにおいて MSSG による地区数値計算を行い、地形の影響（地形特性）が異なる市街地の熱環境・風環境を分析し、地形特性の違いにより、高温域の形成要因と考えるべき対策方針が異なることを示す。

注

- 注4-1) 晴天日のみの計算を行うため、数値計算は 2 つの期間に分けて行った。また通常であれば助走計算期間を設けるが、図 4-4 から今回の計算では精度にあまり変化はないと考えたため、助走計算期間を設けなかった。
- 注4-2) 前節の結果から地上付近では日中に気温のばらつきが大きく、これを小さくする必要があると考えたため、本章では前節で用いた地上 2m の気温ではなく、ばらつきの小さいと考えられる地上 25m の結果を用い、また土地利用についても各メッシュの代表土地利用だけでなく、各土地利用分類の割合を入力した。
- 注4-3) クラスタ分析における分類数（ここではゾーンの数）は任意に設定可能だが、本研究では文献 4-2 を参考に 5 分類とした。文献 4-2 ではゾーニングを行う際に都市計画関係者に対するヒアリングを行っており、都市計画が対応できる妥当なゾーン数として 5 ゾーンを設定している。そこで本研究においても 5 ゾーンとすることとした。
- 注4-4) Topographical Position Index (TPI) は地形の凹凸を表す指標であり、正の値は当該メッシュが周囲より高い位置にあること（凸地形）、負の値は当該メッシュが周囲より低い位置にあること（凹地形）を示している。以下に TPI の算出方法を示す。

$$\text{TPI} = (\text{DEM の当該セルの標高値}) - (\text{周辺セル (半径 2km) の平均標高値})$$

- 注4-5) 主成分分析で抽出された 3 つの気温変動特性指標は寄与度がそれぞれ異なり、第 3 主成分は比較的寄与度が小さい。しかし第 3 主成分が丘陵都市の特徴である地形の影響を反映した指標であり、また第 3 主成分と風速との関連が一定程度見られることから本研究ではこれらの 3 つの気温変動特性指標を等しく扱い、横浜市の気温変動特性指標の特徴が異なるエリアを分類することとした。
- 注4-6) 気温実測調査は前節と同様の手法により、横浜市内の小学校に設置されている百葉箱（32 地点）を用いて測定したものをを用いた。実測期間は 2016 年 7 月 25 日～9 月 5 日（10 分間隔）とし、その内の計算期間に含まれる結果を用いた。なお今回は都市メッシュ上に位置する 23 地点を用いた（用いた実測データの分布は図 4-11 参照）。

参考文献

- 4-1) 鍋島美奈子・西岡真稔・中尾正喜：大阪平野における夏季気温の水平分布構造，空気調和・衛生工学会論文集，140，pp.1-10，2008
- 4-2) Tanaka, T., Sadohara, S. and Inachi, S.: Urban Environmental Climate Maps for Planning and Design: Trials in Yokohama, *Proceedings of the 8th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia*, P-09, 2010

第5章 地形特性が異なるゾーン毎の高温化対策方針の検討

- 5-1. 本章の概要
- 5-2. 対象地と分析データ概要
- 5-3. 対象谷戸の気温分布傾向
- 5-4. 現状都市気候の分析
- 5-5. 潜在自然気候の分析
- 5-6. 地形分類毎の対策方針の提案
- 5-7. 本章のまとめ

第5章 地形特性が異なるゾーン毎の高温化対策方針の検討

5-1. 本章の概要

本章では、横浜市の内、特に地形が複雑なエリアにおいて MSSG による地区数値計算を行い、現状の熱環境・風環境の特徴や傾向を地形分類毎に把握する。また都市（人工被覆および建物）の影響がない条件下の地区数値計算（潜在自然気候ケース）を行い、丘陵地の潜在的な熱環境・風環境を把握する。これらの結果を用いて、都市高温化緩和に向けた地形分類毎の対策方針を作成し、地形特性の違いにより、高温域の形成要因と考えるべき対策方針が異なることを示す。

以下に本章の流れを示す。（図 5-1 参照）

- 1) クラスタ分析による地形分類
- 2) 実測調査結果を用いた対象谷戸の気温分布傾向の把握
- 3) 地形分類毎の現状都市気候の分析
- 4) 地形分類毎の潜在自然気候の分析
- 5) 都市高温化緩和に向けた地形分類毎の対策方針の提案

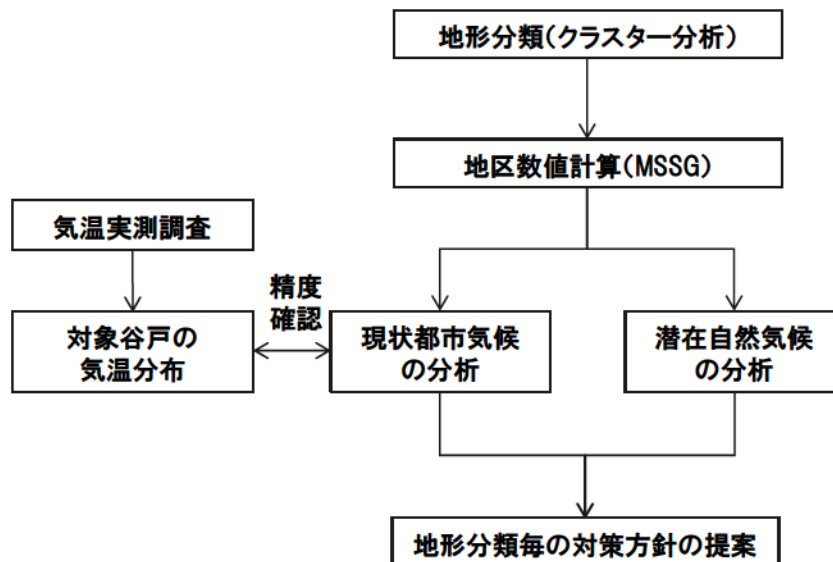


図 5-1 第 5 章の流れ

5-2. 対象地と分析データ概要

5-2-1. 対象地の概要

本章の対象地は、横浜市の中央部に位置する保土ヶ谷区仏向町およびその周辺エリアとした（図 5-2 参照）。横浜市の丘陵部には谷戸⁵⁻¹と呼ばれる小規模谷が存在し、このエリアにも谷戸が多数存在し、入り組んだ地形を有している。このエリアの土地利用は主に住宅用地であり、谷戸の内部でも市街化が進行し、住宅が密集している。一方で谷戸の斜面には現在でも樹木が多く残存しており、夜間にはこれら斜面緑地からの冷気の流出も期待される。

対象エリアは谷戸を含む複雑な地形を有しているため、まず対象エリアの地形分類を行った。具体的にはまず GIS を用いて後述の数値計算領域の全メッシュ（5m 格子）の標高、傾斜角、および地形の凹凸を示す TPI^{注5-1}をそれぞれ算出した（図 5-3 参照）。次にこれら 3つの指標を入力条件としたクラスター分析（k 平均法）を行い、数値計算領域の全メッシュ（1,192,448 個）を分類した。図 5-4 に分類結果を示す。結果として対象エリアを低地部、谷部、斜面部、台地部の 4つに分類した。

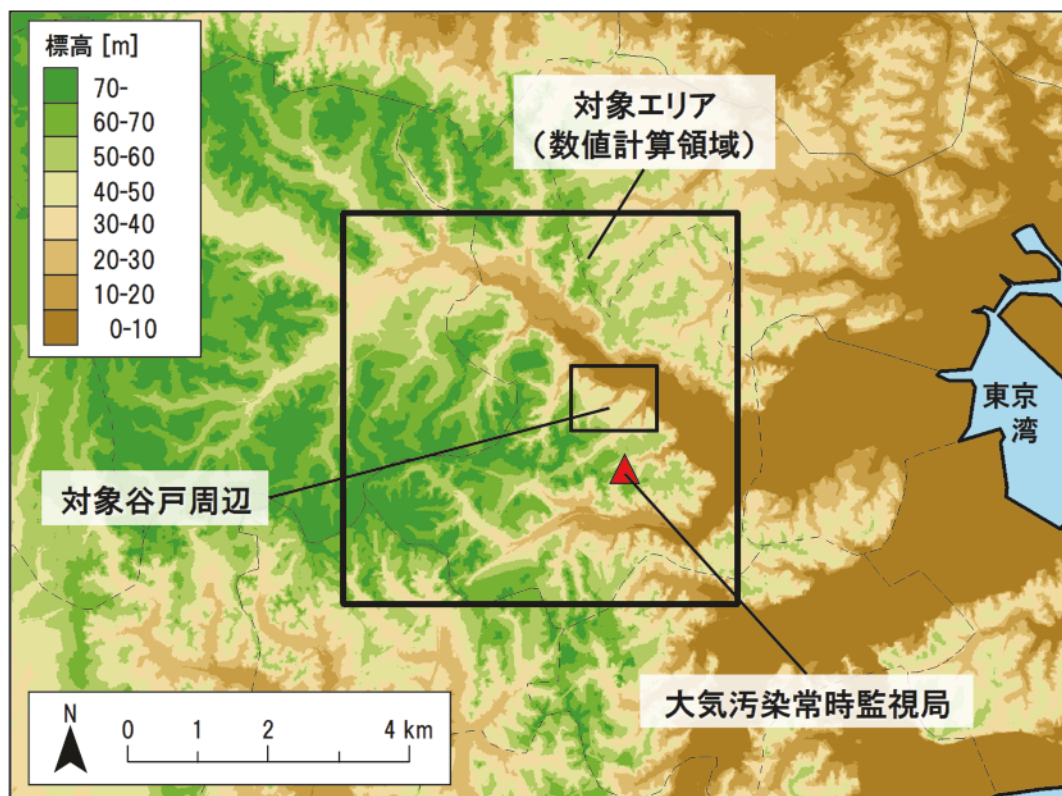


図 5-2 対象地周辺の標高および数値計算領域

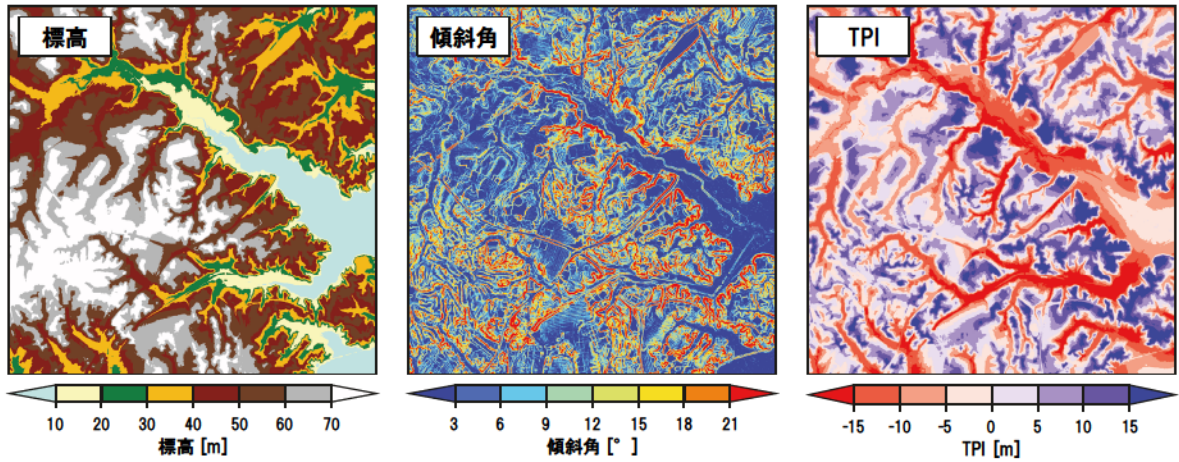


図 5-3 対象エリアの標高、傾斜角、TPI

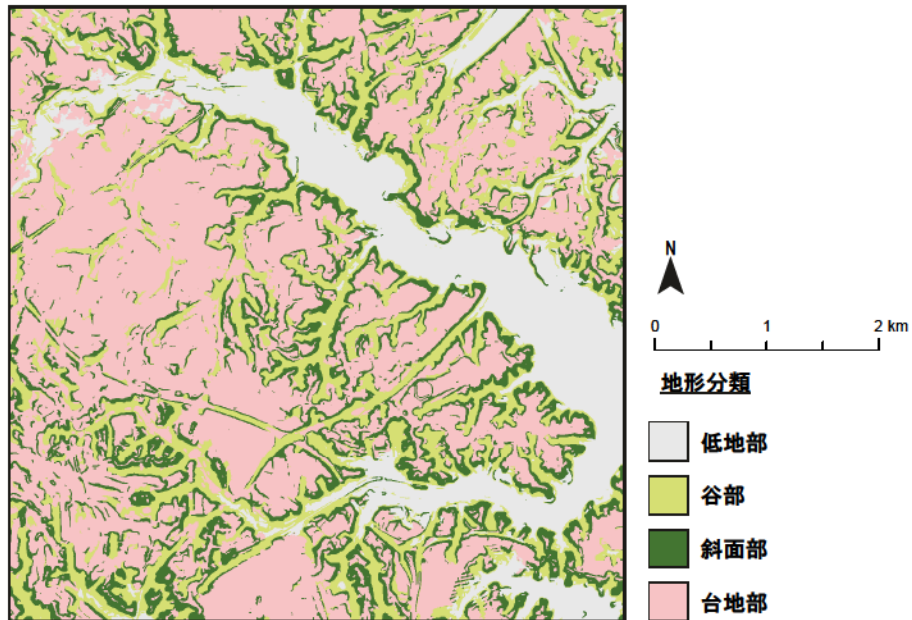


図 5-4 対象エリアの地形分類結果

5-2-2. 実測調査概要

対象エリア内の谷戸（以下、対象谷戸）において気温の定点実測調査を行った（位置は図 5-2 参照）。対象谷戸の幅は出口付近で約 50m であり、谷戸の底部と周辺の台地部の標高差は約 30m である。文献 5-2 における横浜市の谷戸の特徴と比較すると、この対象谷戸は概ね平均的な大きさであり、横浜市の典型的な谷戸の 1 つと考えられる。図 5-5 に対象谷戸周辺の建物・緑地分布を示す。

実測地点は図 5-6 に示す 30 地点とした。実測にはデータロガー付き温度センサを放射シールド（自然通風式）に入れたものを用いた^{注 5-2)}。実測期間は 2008 年 8 月 2 日～8 月 4 日とし、

実測間隔は1分とした。実測を行った3日間の天気はいずれも晴天であり、風況パターン分類によるとパターンB（南風日）であった。

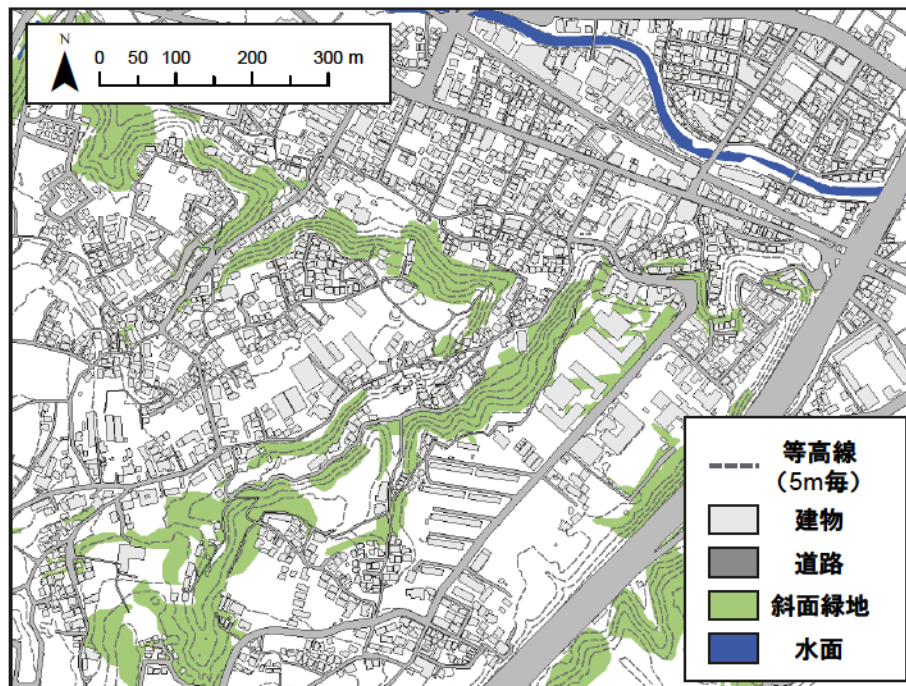


図 5-5 対象谷戸周辺の建物・緑地分布

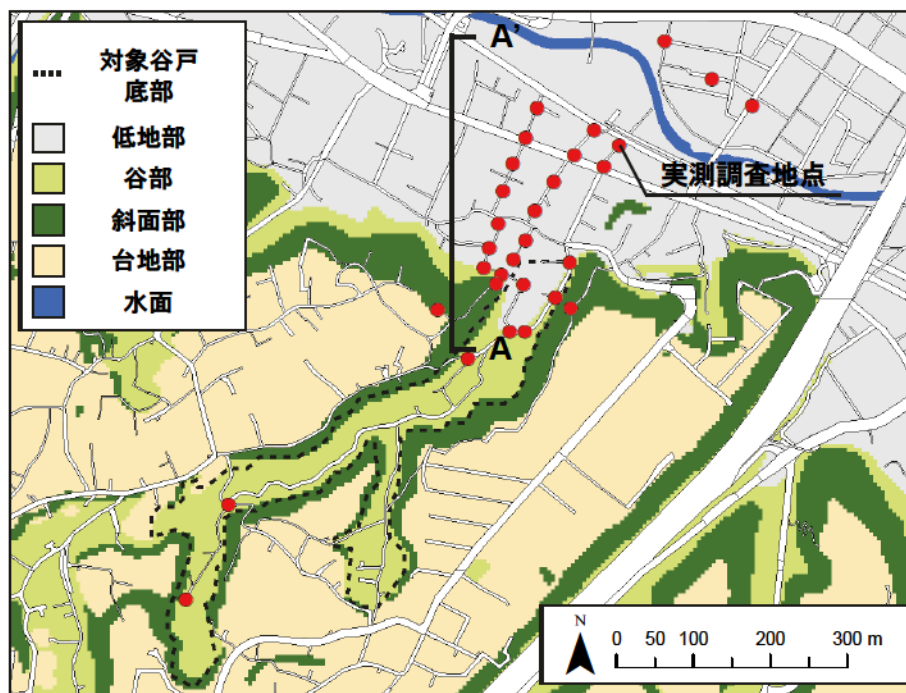


図 5-6 気温実測調査地点

5-2-3. 数値計算概要

対象谷戸を含む対象エリアに対して、MSSGによる地区数値計算を行った。数値計算条件を表5-1に示す。計算期間は実測調査期間の内、2008年8月2日の12時00分～13時30分（昼間）および8月3日の3時00分～4時30分（夜間）とした。なお分析にはそれぞれ最後の30分間の結果を用いた。計算解像度はxyz方向それぞれ5mとし、図5-7に示す約5.5km四方を計算領域とし、その内の中心4km四方を分析対象領域とした。境界条件（初期値・境界値）には気象庁のMSMデータ（10km解像度、3時間毎）を時間的・空間的に補間した値を用いた。地表面入力条件として、土地利用には横浜市都市計画基礎調査のGISデータおよび航空写真から作成した緑被データを、高さ情報（標高+建物高さ）には横浜市都市計画基礎調査のGISデータおよび基盤地図情報数値標高モデル（解像度5m）をそれぞれ用いた。なお土地利用分類は「建物」、「建物用地」、「アスファルト」、「緑地」、「樹木」、「水面」の6分類とした（図5-8参照）。また人工排熱については今回の数値計算では考慮しなかった。

また人工被覆面と建物の影響のない丘陵地の潜在的な気候環境（潜在自然気候）を把握・分析するため、現状ケースに加えて、建物をなくし都市的土地利用を全て樹木のない草地に変更することを想定した「潜在自然ケース」を対象に数値計算を行った。本研究では「潜在自然ケース」の計算結果を熱環境・風環境のベースラインと位置づけ、この結果から、昼間の風や夜間の冷気流といった自然資源の活用ポテンシャルを把握することとした。なお数値計算においては土地利用の内、「建物」、「建物敷地」、「アスファルト」を全て「緑地」に変更した。

表5-1 計算条件

| | | |
|---------|---|-----------------------------------|
| 計算期間 | 昼間 | 2008年8月2日 12:00(JST) - 13:30(JST) |
| | 夜間 | 2008年8月3日 3:00(JST) - 4:30(JST) |
| 解像度 | 5m×5m×5m | |
| 格子数 | 1088×1096×151 | |
| タイムステップ | 0.25 秒（出力は10秒毎） | |
| 気象データ | 気象庁MSMデータ(3時間間隔、10km解像度) ※計算には時間的・空間的に補間したデータを使用 | |
| 地表面データ | 標高 | 基盤地図情報数値標高モデル5mメッシュ (国土地理院) |
| | 土地利用 | 平成20年度都市計画基礎調査GISデータ |
| | 樹木 | 航空写真から作成した緑被データ |

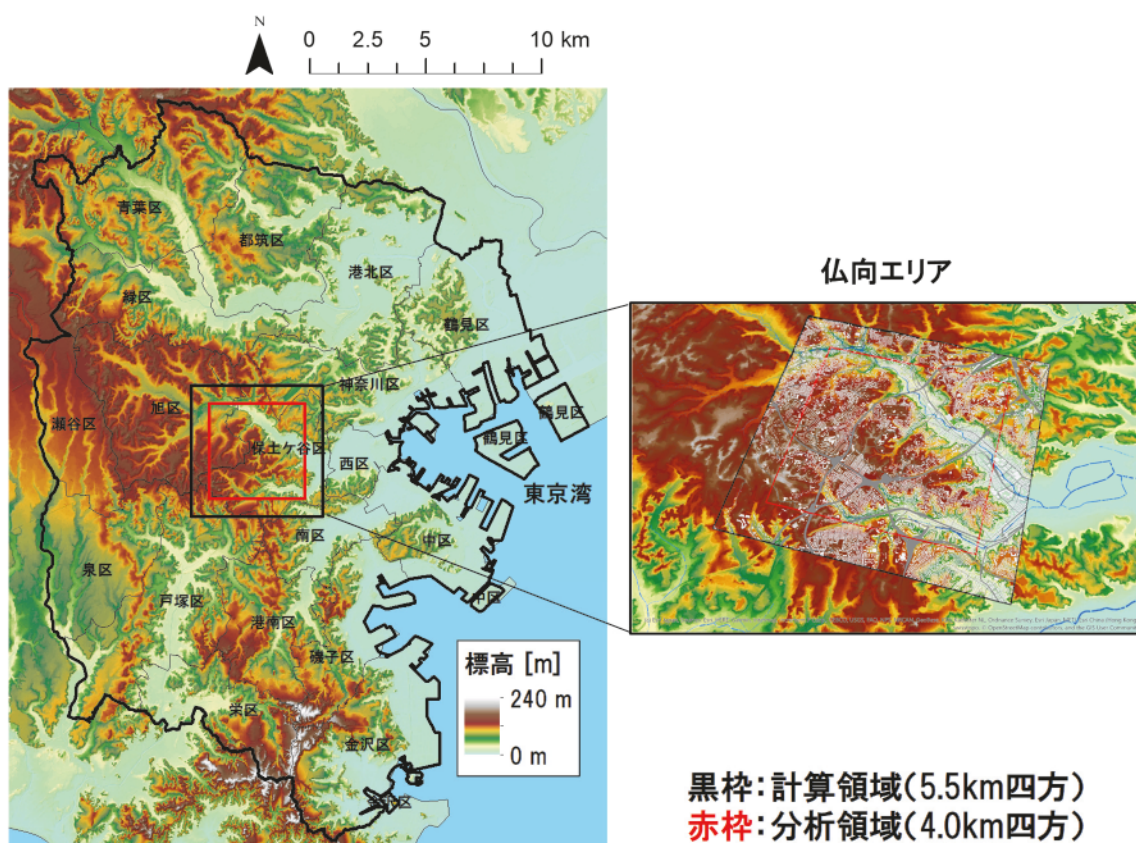


図 5-7 都市計算領域の概要（仏向エリア）

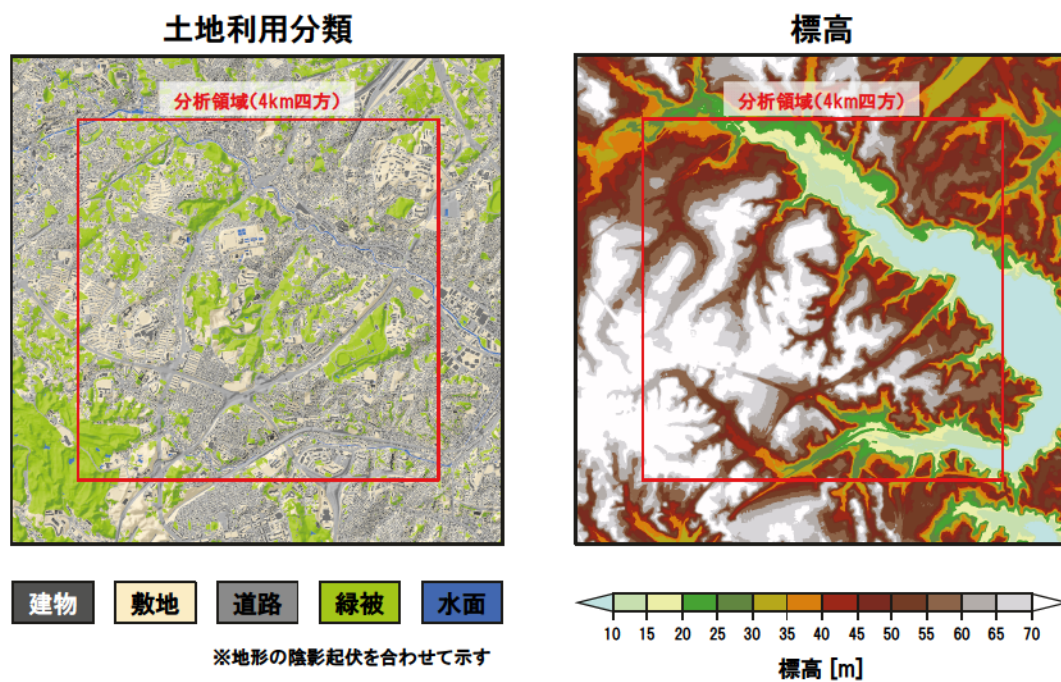


図 5-8 地表面入力条件

5-3. 対象谷戸の気温分布傾向

図 5-9 に実測調査結果の例として、8月2日13時と8月3日4時の水平気温分布をそれぞれ示す。なおそれぞれ前後30分（合計1時間）の平均値を用いた。まず13時は実測地点間の気温差が最大で3℃程度であり、谷戸の奥（地点1、2）や斜面（地点8、10、11）で気温が低い。これらの地点では周囲に森林が特に多く、実測地点周囲の日射量が少ないと考えられる。一方で建物が密集している低地部の地点（例えば、地点25等）で気温が全体的に高い。しかし、最も気温が高いのは谷戸内に位置する地点4であり、この地点の気温は低地部の地点より高い。地点4はその周囲で建物が密集していることに加えて、谷部の地形特性上、低地部に比べて弱風となりやすく、地表面付近で発生した熱が拡散されにくいことが要因として推察される。次に4時には実測地点間の気温差が最大で1.5℃程度であり、日中に比べ小さい。この時刻は谷戸の奥と斜面緑地の直下で特に気温が低く、斜面緑地からの冷気の影響を受けていると考えられる。一方で斜面緑地から遠い河川周辺エリア（地点24～30）で気温が高い。また低地部においても、斜面緑地に近い地点では比較的気温が低く、ここでも斜面緑地からの冷気流の影響がある程度生じていると推察される。

図 5-10 に斜面緑地からの距離と夜間気温との関係を示す。なおここでは冷気流の影響が顕著に見られた8月4日4時の結果を示す。また、ここでは斜面緑地からの距離の影響を把握するために、斜面緑地から低地部に向かって垂直に伸びる道路上にほぼ等間隔に設置された地点13～25のデータを用いた。図 5-10 から累乗近似線を引いた場合に、決定係数が比較的高い値を示し、斜面緑地からの距離が大きくなると気温が上昇する傾向が見られた。このことから斜面緑地から冷気が発生しており、その効果は斜面緑地の近傍で特に大きいと考えられる。また図 5 より、このエリアでは50m付近が冷気流の影響範囲で、気温を0.5～1.0℃程度低下させる能力があるものと推察される。これは例えば同様に実測調査による冷気流の効果範囲を分析している蝦名ら⁵⁻²⁾や鳴海ら⁵⁻³⁾の結果と比べる比較的小さい。これはこれらの既往研究で対象地している斜面緑地（傾斜方向に対してそれぞれ幅が375m程度、400m程度）と比較すると、本対象地の斜面緑地の傾斜方向に対する幅が小さい（60m程度）ためと考えられる。

図 5-11 左に地形分類毎の時刻別平均気温の推移を、図 5-11 右に谷部の実測地点の時刻別平均気温の推移をそれぞれ示す。なお今回の実測地点では台地部に含まれる地点はなかった。また図 5-11 は実測期間（2008年8月2日～4日）の時刻別平均値である。図 5-11 左から、日中は斜面部の気温が低く低地部、谷部で気温が高い。低地部と谷部では最高気温は同程度であるが、谷部では午前中の気温が比較的低い。これは谷部の一部の地点で後述するように日射量が小さいためと考えられる。夜間は日中と比べ気温差は小さいが、谷部で気温が低く、特に深夜から明け方にかけてその差が大きい。また図 5-11 右より、谷部内の気温変動には実測地点間のばらつきが一定程度見られる。地点4、7、9は最高気温が比較的高く、これらの地点はいずれも谷戸の出口付近に位置している。逆に最高気温が低いのは地点1、2であり、これらは谷戸の奥に位置している。この違いの要因として、谷戸の出口付近では人工被覆面が多く、建物が密集しているのに対して、奥では木が生い茂っており、地表面付近の日射量が少ないことが考

えられる。また日中の気温上昇パターンを見ると、地点5、7は比較的最高気温が高いが、午前中の気温は低い。これらの地点は谷部の東側に位置し、午前中は斜面林の影に入るため、日射量が少ないことが要因と推察される^{注5-3}。一方、夜間は日中と比べると地点間の差は小さいが、地点1、7で比較的气温が低い。これはこれら2地点が緑地の直下に位置しているためと考えられる。

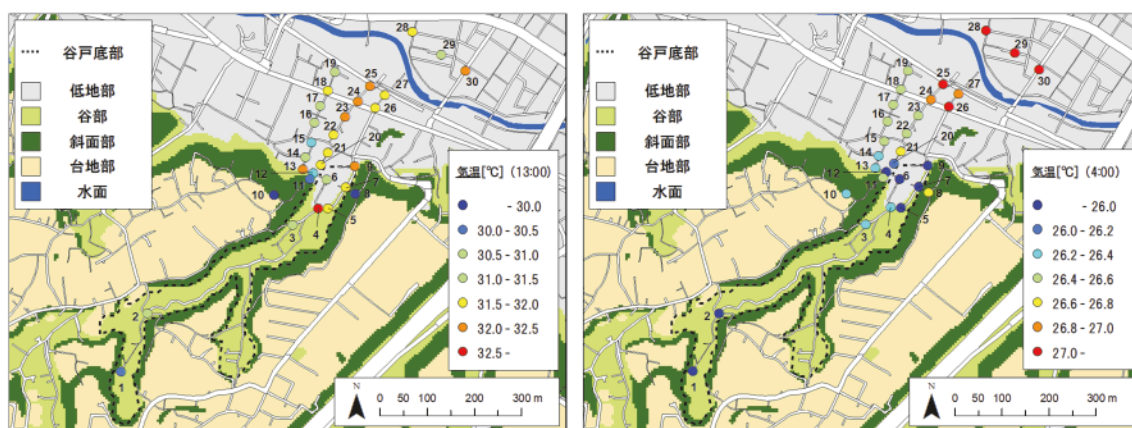


図 5-9 実測調査による気温分布（左：13時、右：4時）

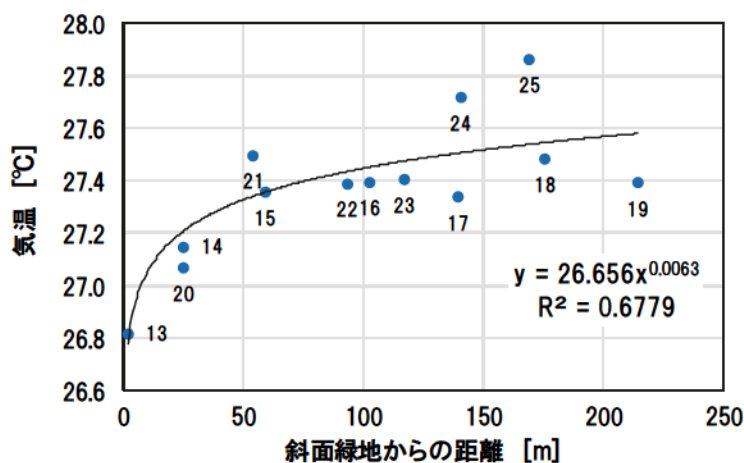


図 5-10 気温と斜面緑地からの距離の関連（2008年8月4日4時）

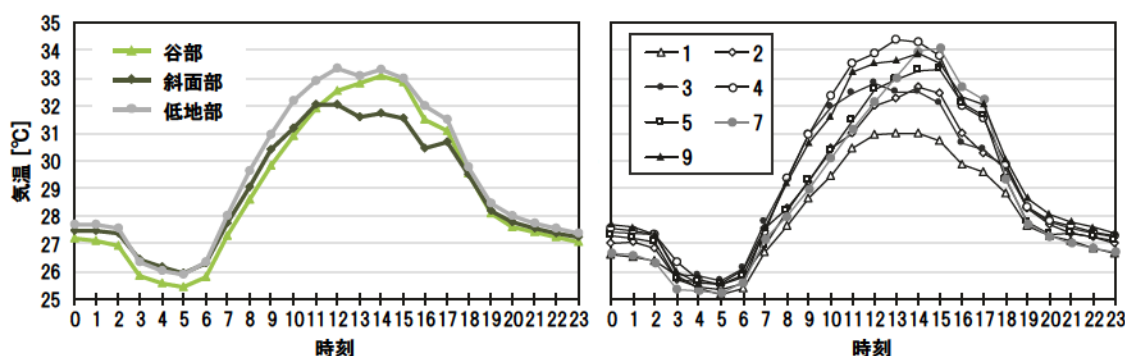


図 5-11 気温の推移（左：地形分類毎の平均値、右：谷部に位置する7地点）

5-4. 現状都市気候の分析

5-4-1. 実測結果との比較

数値計算精度確認のために、実測調査と数値計算の結果の比較を行った。図 5-12 に昼と夜の結果をそれぞれ示す。なお図 5-12 はそれぞれ 8 月 2 日 13 時 00 分～13 時 30 分および 8 月 3 日 4 時 00 分～4 時 30 分の平均値から作成した。また数値計算結果は各実測地点から 5m のバッファを発生させ、そのバッファと交差するメッシュの平均値を用いた。図 5-12 より、実測調査結果と数値計算結果の分布傾向は概ね一致しているが、昼間は計算値が実測値よりも大きい。これは初期値・境界値に用いている気象データや地表面の物性値等の影響と考えられる。この絶対値の調整は今後の課題であるが、気温の大小関係は概ね再現できているため、数値計算を行う目的である地形分類毎の平均的な傾向の比較のためには大きな問題はないと考えた。

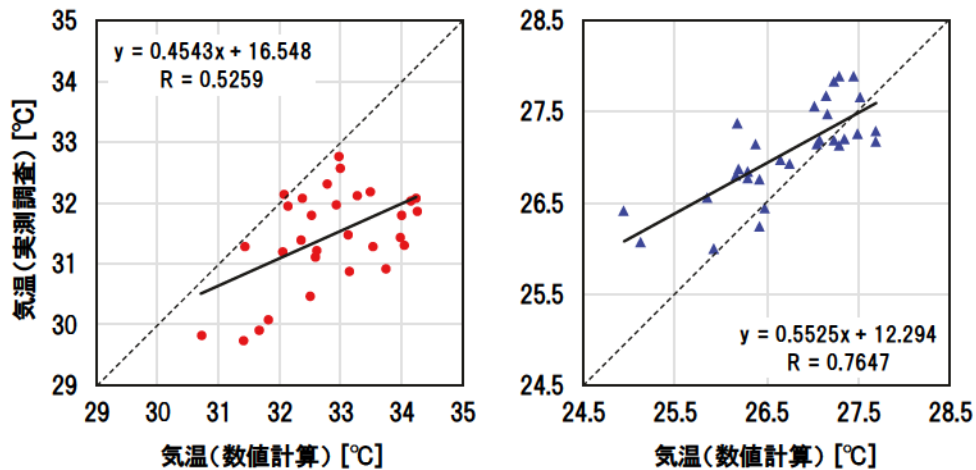


図 5-12 実測調査結果と数値計算結果の比較（左：昼間、右：夜間）

5-4-2. 日中の熱環境・風環境

図 5-13 に昼間の気温と風速の水平分布図をそれぞれ示す。なお図 5-13 は 13 時 00 分～13 時 30 分の平均値より作成した。図 5-13 左より、建物が密集しているエリアで気温が高く、特に低地部で高温域がみられる。また谷部においても高温域が見られ、特に谷戸の出口付近の気温が高い。これは前章の実測調査と同様の傾向であり、全体的な気温分布傾向は概ね再現できていると考えられる。しかし、実測調査の地点 4 のような局所的な高温域は見られない。今回の数値計算では人工排熱を考慮していないため、局所的な高温化が表現されなかったと考えられる。一方で台地部は低地や谷部に比べて比較的建物密度が小さく、気温も低い。図 5-13 右より風速は公園や河川等のオープンスペースで大きく、最大で 4m/s 程度である。一方で市街地内の風速は 0.5～1m/s 程度であり、建物が密集する市街地内の風通しは良くない。

図 5-14 に地形分類毎の日中の平均気温と平均風速を示す。なお図 5-14 は土地利用が建物用地のメッシュを用いた。現状の日中では低地部において他の地形分類に比べて気温が高く、風

速が小さい。一方で台地部では他の地形分類に比べて気温が低く、風速が大きい。しかし、地形分類毎の気温と風速には比較的大きなばらつきが見られる。そこで各地形分類間の平均気温および平均風速の差の検定をそれぞれ行った（例えば、「谷地の平均気温」と「低地の平均気温」の差の検定）。結果として、現状では全ての地形分類間の平均気温および平均風速において、有意水準 5%で統計的に有意な差が見られた。これらの結果から横浜市の丘陵市街地においては台地部の熱環境・風環境が比較的良好であると考えられる。

図 5-15 に都市的土地利用メッシュ（建物敷地・アスファルト）における地形毎の気温と風速の相関係数および台地部における気温と風速の散布図を示す。図 5-15 より、いずれの地形においても気温と風速の間には負の相関関係が見られる。また地形間で比較すると、台地部において相関係数が負の方向に大きい。このことから、台地部においては広域風の影響を受けやすく、風通しを改善することで熱環境の緩和を図ることができると推察される。

また図 5-16 に台地部と低地部におけるグロス建蔽率と風速の散布図を示す。なおここでは分析領域（4km 四方）を 100m メッシュで分割し、各メッシュのグロス建蔽率を算出している。また風速には 100m メッシュの平均値を用いた。図 5-16 より、どちらも負の相関関係が見られるが、低地部と台地部を比較すると、台地部において相関係数が負の方向の大きく、また回帰直線の傾きが大きいことが分かる。このことより、低地部と比べると台地部において建物密度を低下させることによる風速の増加が大きく、図 5-15 の結果と併せて、風通しの向上による日中の熱環境緩和につながるものと考えられる。

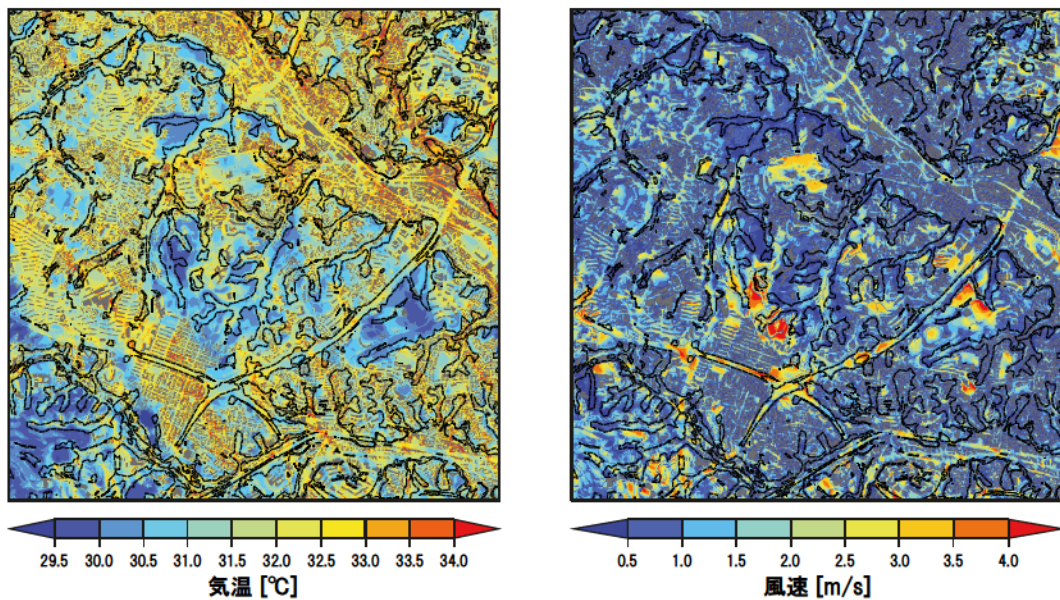


図 5-13 現状における昼間の計算結果（左：気温分布、右：風速分布）

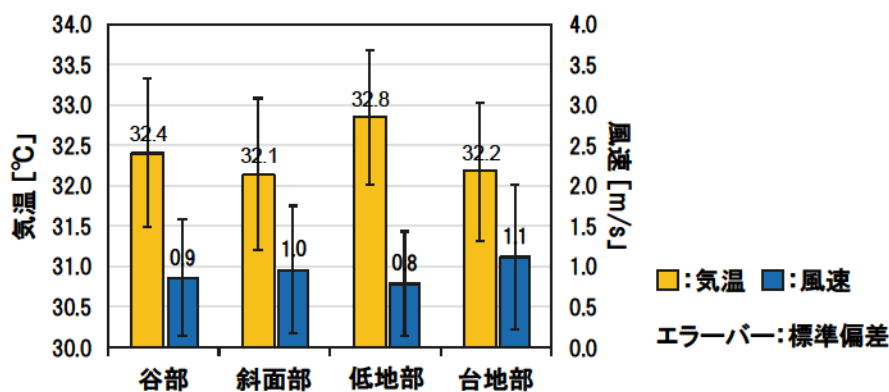


図 5-14 地形分類毎の平均気温と平均風速（現状（昼間））

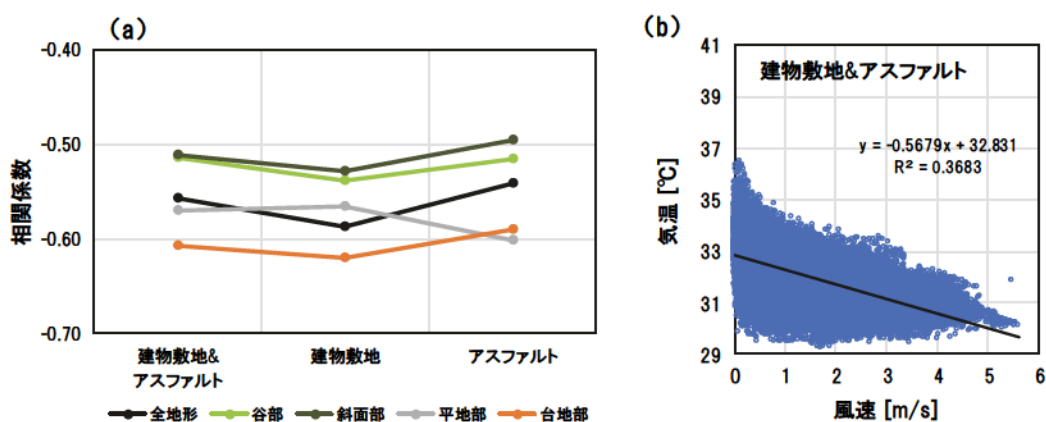


図 5-15 (a) 地形毎の気温と風速の相関係数（現状）

(b) 風速と気温との散布図（台地部、建物敷地&アスファルト）

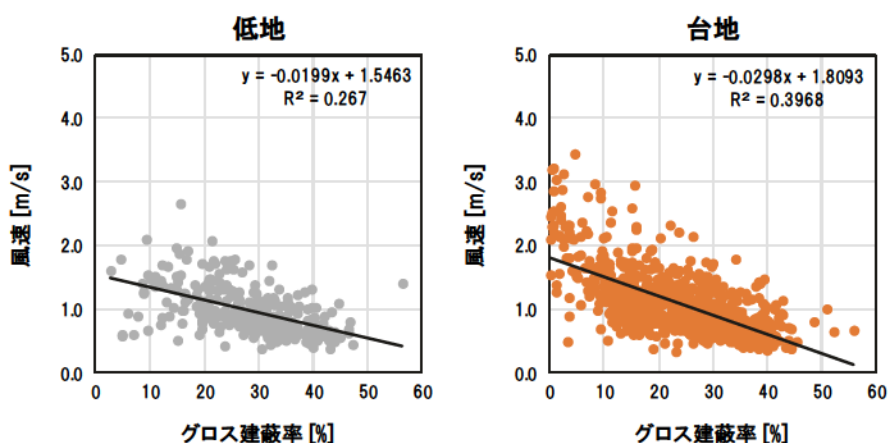


図 5-16 グロス建蔽率と風速との散布図（左：低地、右：台地）

5-4-3. 夜間の熱環境・風環境

図 5-17 に夜間の気温と風速の水平分布図をそれぞれ示す。なお図 5-17 は 4 時 00 分～4 時 30 分の平均値から作成した。図 5-17 左より実測結果と同様に北側の低地部の気温が高く、谷部の

奥の気温が比較的低い。谷部が低温となっているのは斜面緑地からの冷気が溜まっているためと考えられる。そのため夜間の谷戸内部の熱環境は現状でも比較的良好である。しかし、谷部に溜まった冷気が低地部に影響している様子はあまり見られない。これは谷戸内部の建物により冷気流出が阻害されているためと考えられる。一方で低地部の端部では周囲よりも気温がやや低下しているエリアがみられる。これは谷戸の外側の斜面緑地からの冷気流の影響が低地部に及んでいるためと考えられる。図 5-17 右より、風速は全体的に小さく、台地部や河川、道路等で昼間と同様にやや大きい。また斜面下部も風速がやや大きく、これは斜面緑地からの冷気流の影響と考えられる。図 5-18 に現状夜間の地形分類毎の平均気温・平均風速を示す。図 5-18 は土地利用分類が建物敷地のメッシュの値を用いて作成した。気温は低地部で最も高く、谷部、斜面部で平均的に低い。谷部・斜面部では斜面緑地の影響を受けているためと考えられる。一方で台地部では、平均風速が大きく、平均気温も比較的低いことから、夜間においても広域風による影響を一定程度受けていると推察される。

図 5-19 に図 5-6 中の AA' 断面における気温分布図（4 時 25 分 0 秒）を示す。図 5-19 から図の左部の斜面緑地（図中点線）で気温が低く、冷気が生成されている様子が分かる。生成された冷気は間欠的に斜面から下降し、徐々に低地部に広がる動きを繰り返していた。このような冷気流の間欠性は多くの既往研究^{例えば 5-4)5-5)}で報告されており、広域風の変化や地表面の摩擦の影響が指摘されている。本研究の計算結果では、冷気が低地部に広がる時間帯において、斜面下の風速が小さくなる傾向が見られたため、風の強弱が一定程度影響していると考えられる。

図 5-20 に谷部と低地部それぞれにおける斜面緑地からの距離と気温との関係を示す。なお図 5-20 の縦軸は 4 時 00 分～4 時 30 分の最低気温とした。図 5-20 に用いたメッシュは土地利用が「建物用地」および「アスファルト」とした。図 5-20 より谷部、低地部ともにばらつきは大きく決定係数は小さいが、斜面緑地からの距離が大きくなると、最低気温が高くなる傾向が見られる。またどちらもばらつきが大きいにも関わらず、斜面緑地から距離が遠いメッシュでは最低気温が一定となる。図 5-21 に斜面緑地からの距離を 10m 毎に分類し、各距離帯の最低気温を算出したものを示す。図 5-21 から谷地では 150m 以下、低地では 280m 以下で最低気温が低下する傾向が見られる。またそれぞれ 150m、280m より遠い距離帯の最低気温を平均すると谷地で 26.4℃、低地で 26.6℃となった。この最低気温が一定となるまでの距離を冷気流の影響範囲と考えた場合、谷部では斜面緑地から最大で 150m 程度、低地部では最大で 280m 程度であると推察される。またこの閾値（谷部：26.4℃、低地部：26.6℃）を下回るメッシュを地図化すると図 5-22 のようになる。図 5-21 より、谷部では概ね冷気の効果が見られているが、低地部においては斜面沿いのエリアのみで効果が得られていることが分かる。また谷の出口が道路等で開けている場合は比較的冷気の影響が遠くまで広がっている。図 5-17 より、夜間の熱環境が最も悪いのは低地部の中心であるため、斜面緑地からの冷気の通り道（風の道）を確保することが有効と考えられる。

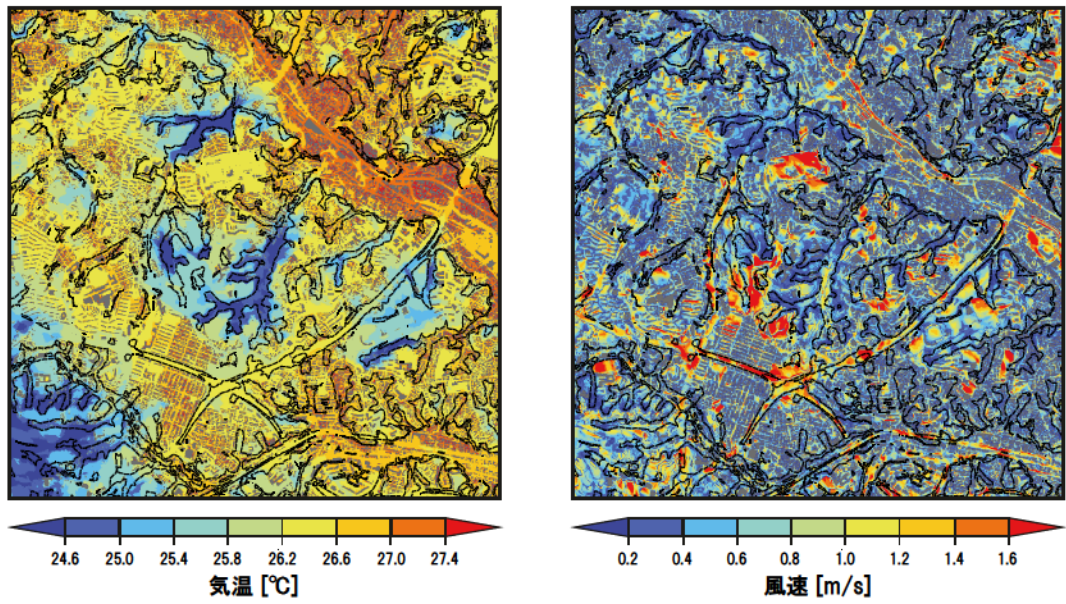


図 5-17 現状における夜間の計算結果（左：気温分布、右：風速分布）

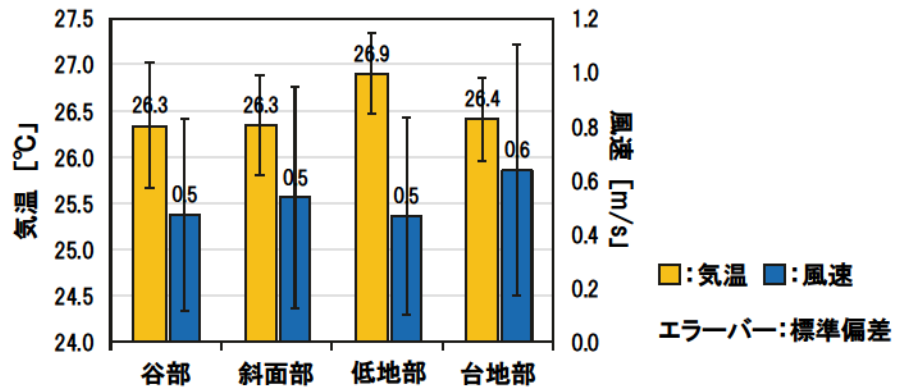


図 5-18 地形分類毎の平均気温と平均風速（現状（夜間））

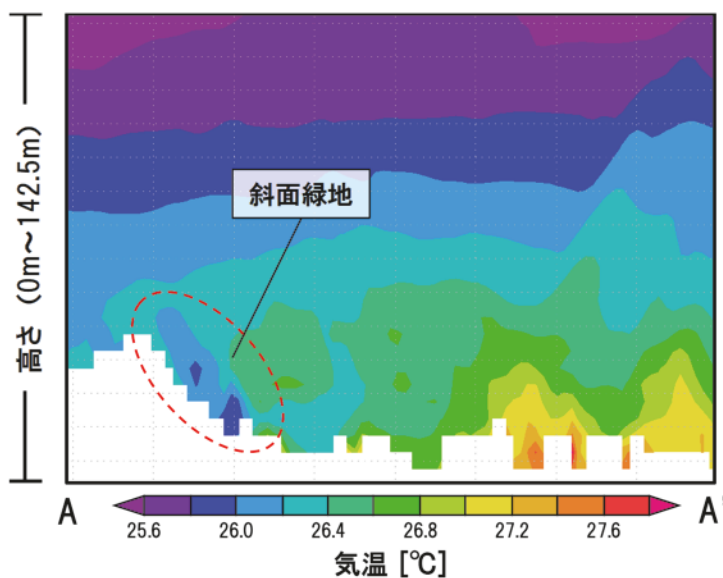


図 5-19 AA' 断面における気温の鉛直分布図 (8月3日4時5分0秒の瞬時値)

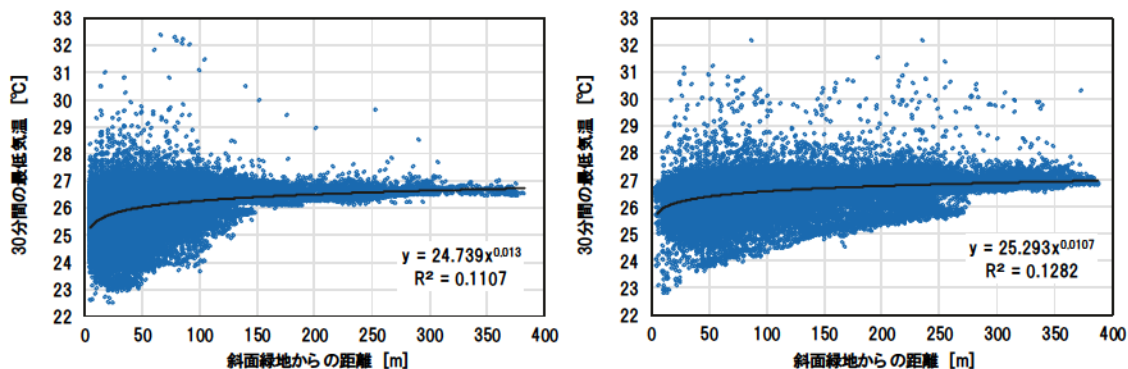


図 5-20 30分間の最低気温と斜面緑地からの距離の関連 (左：谷部、右：低地部)

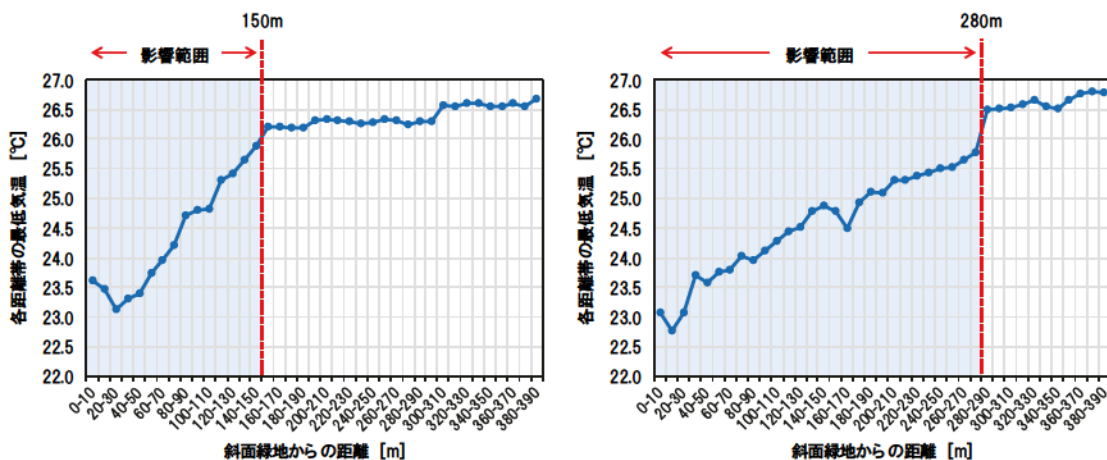


図 5-21 各距離帯 (10m 毎) の最低気温 (左：谷部、右：低地部)

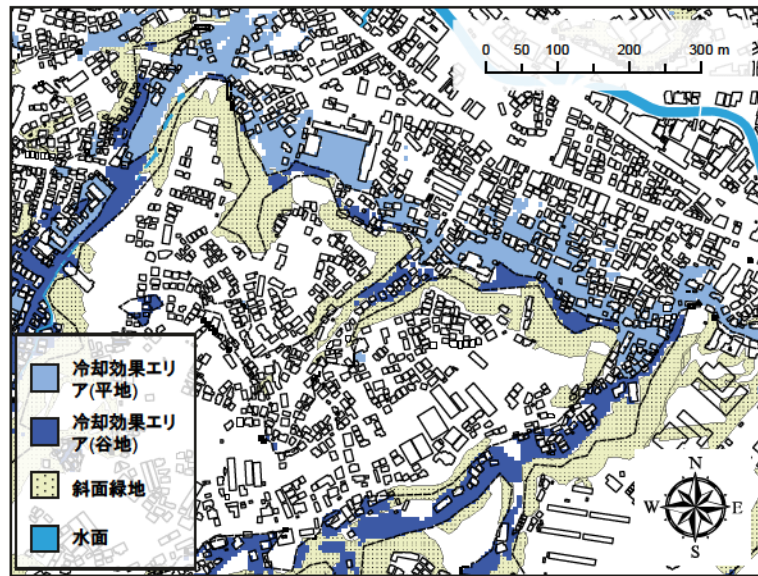


図 5-22 夜間冷気流による冷却効果マップ

5-5. 潜在自然気候の分析

5-5-1. 日中の熱環境・風環境

図 5-23 に潜在自然ケースにおける昼間の気温と風速の水平分布図をそれぞれ示す。なお 13 時 00 分～13 時 30 分の平均値から作成した。図 5-23 左より、人工被覆面がないため、地表面温度の低下や蒸発散の増加により、現状よりも全体的に気温が低い。逆に建物による影響がないため、風速は現状と比較して大きい。また現状よりも気温が高いエリアで風速が小さい傾向が顕著にみられる。

図 5-24 に前章と同様に地形分類毎の日中の平均気温と平均風速を算出した結果を示す。なお図 5-14 で用いたメッシュと同じ位置のメッシュの結果を用いた。この結果より、まず現状と同様に日中の台地部は他の地形分類と比較して熱環境・風環境ともに良好であることが分かる。また低地部では現状と異なり平均風速が台地部と同程度であるため、潜在的な風環境としては比較的良好と考えられる。このことから低地部では、現状から風通しを向上することで、ある程度の熱環境の緩和が図れると推察される。一方で谷部は潜在的に風環境が悪いため、風通しの改善を図ったとしても効果が小さい可能性が考えられる。そのため、現状の谷部において熱環境の緩和を図る際には、人工排熱の削減や人工被覆の改善等、風通し改善以外の対策が有効と考えられる。

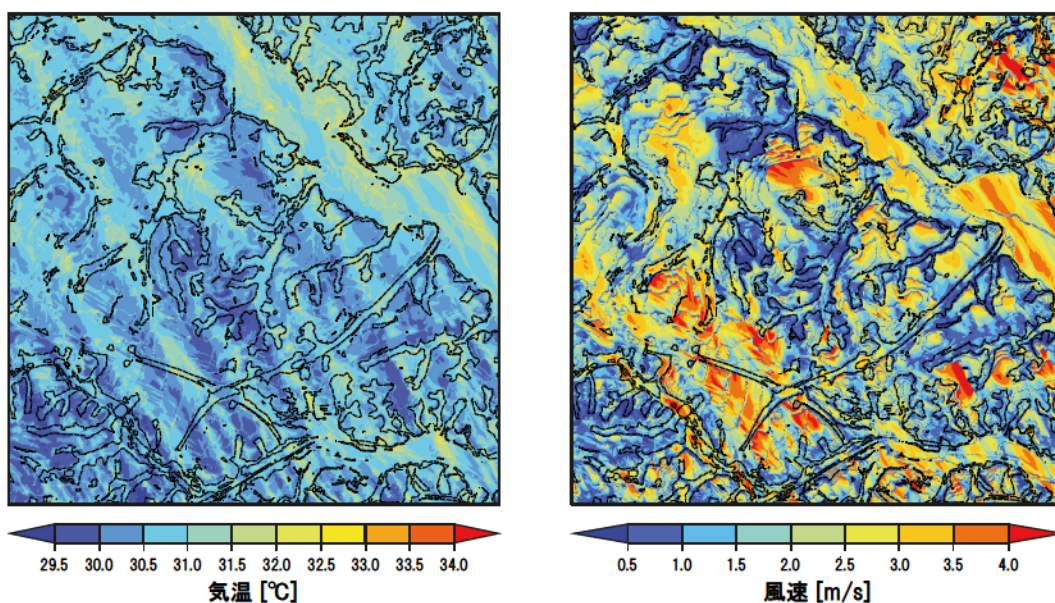


図 5-23 潜在自然ケースにおける屋間の計算結果（左：気温分布、右：風速分布）

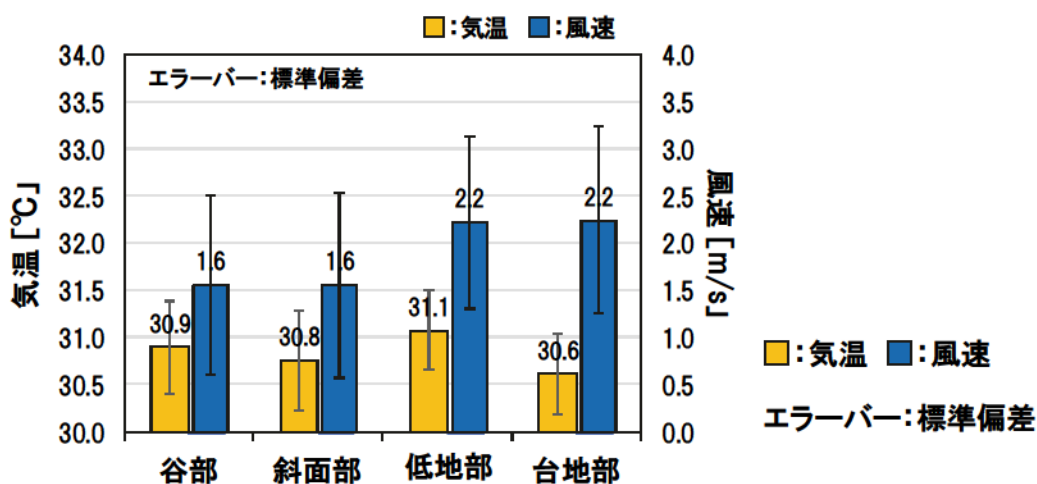


図 5-24 地形分類毎の平均気温と平均風速（潜在自然ケース（屋間））

5-5-2. 夜間の熱環境・風環境

図 5-25 に潜在自然ケースにおける夜間の気温と風速の水平分布図をそれぞれ示す。なお 4 時 00 分～4 時 30 分の平均値を用いた。図 5-25 左より、気温は台地部で全体的に高く、谷部で低い。特に大きな谷部で気温が低い。これは冷気量が集水域の大きさと関係しているためと考えられる。また谷部から低地部に出るエリアで気温の低下が見られる。低温域は谷の出口から放射状に広がっており、特に谷筋方向にその影響範囲が大きい。これは谷部に集積した冷気が低地に流出しているためと考えられる。図 5-25 右より風速を見ると全体的に小さく、相対的には台地部と谷部の出口で大きい。谷出口の風速が大きいエリアは気温が低下しているエリアと

概ね対応している。なお冷気の流出速度は最大で1.2m/s程度である。またその周りの風速が小さくなっているエリアでも、一部気温低下が見られることから、気温低減効果が徐々に蓄積していると推察される。

図5-26に潜在自然ケースの夜間の地形分類毎の平均気温および平均風速を示す。図5-26より、谷部および低地部で平均的に気温が低い。これは谷部で冷気が集積し、低地部に流出しているためと考えられる。図5-25においては、谷部で低地部に比べて大幅に気温が低下しているエリアが見られたが、一方で斜面緑地が少ない谷部において冷却効果は見られなかった。そのため、平均を行うと図5-26に示すように谷部と低地部で差が見られなくなったと考えられる。

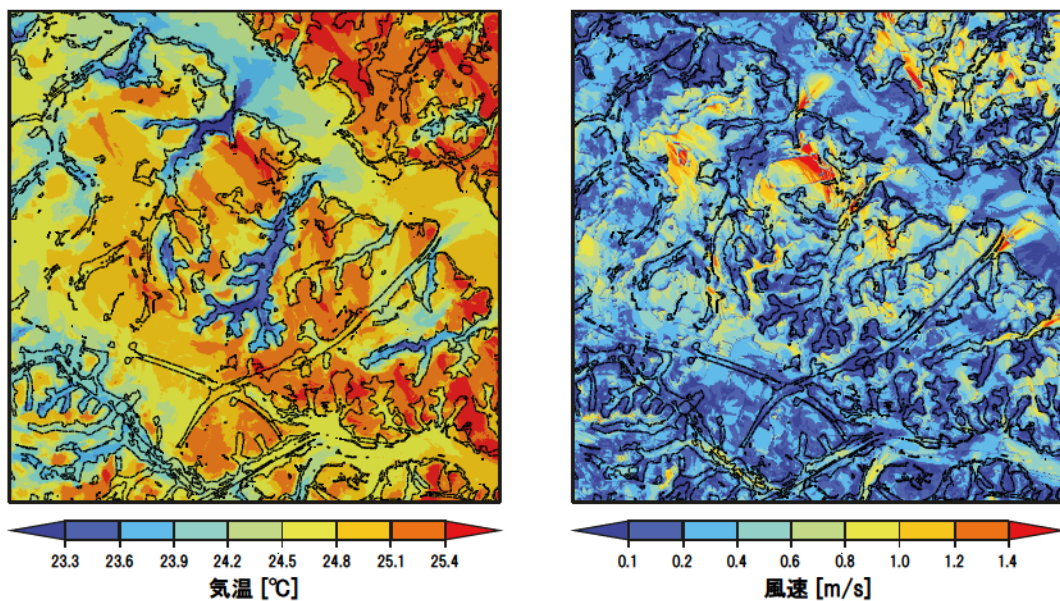


図5-25 潜在自然ケースにおける夜間の計算結果（左：気温分布、右：風速分布）

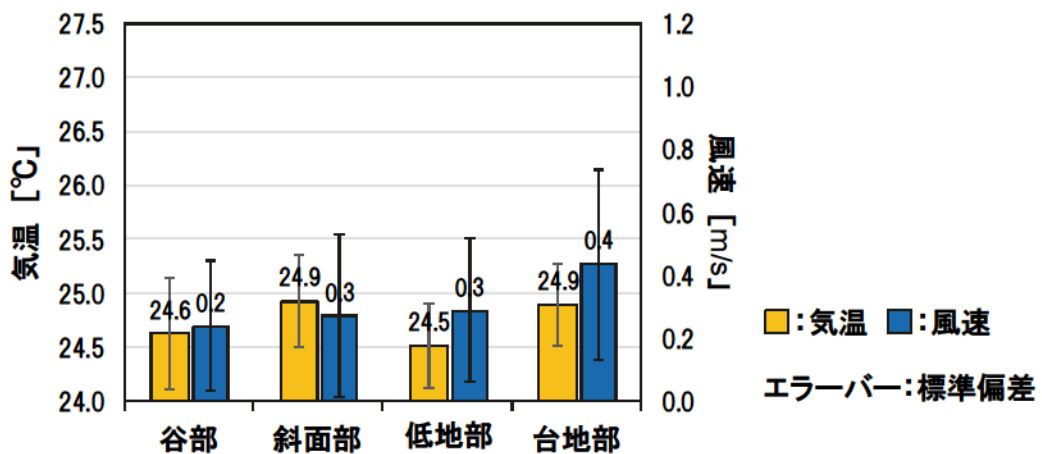


図5-26 地形分類毎の平均気温と平均風速（潜在自然ケース（夜間））

5-6. 地形分類毎の対策方針の提案

前章までの結果を踏まえて、熱環境・風環境改善の観点から見た地形分類毎の対策方針を地にそれぞれ示す。

- ・ 谷部：昼間は現状も潜在的にも比較的気温が高く、風通しが悪いため、居住環境は良くない。一方で夜間は斜面緑地からの冷気が溜まるため気温が低く、また建物がない場合には低地部への冷気の流出源にもなり得る。そのため、夜間の冷気流出を妨げないように比較的的低密度に建物を配置することが有効と考えられる。また谷部の人口減少が顕著であること⁵⁻⁶⁾や土砂災害等の防災上の課題も含めて考えると本来居住地向きではないエリアとも考えられるため、将来的には再自然化を行い、周辺市街地への冷気の供給源として整備していくことも対策方針として考えられる。
- ・ 低地部：現状、昼間の気温は高く、風通しが悪い。一方で潜在的には昼間の風環境は良好なため、風通しの向上が熱環境の緩和に有効と考えられる。夜間は現状では気温が高いが、潜在的には谷部から冷気の流出が期待されるため、この活用が望まれる。そのため昼間の広域風や夜間の冷気流を市街地内にうまく取り込むことが有効と考えられる。対策としては建物密度を減らし、広域風や谷部の谷筋の方向に合わせてオープンスペースを整備し風通しを向上させること、具体的には谷部の出口周辺を緑地化すること等が対策方針として挙げられる。
- ・ 斜面部：夜間において、谷部や低地部への冷気の流出源となっているため、斜面林の維持や再整備が有効と考えられる。また日射量の影響により、昼間の現状では北向き斜面の気温が比較的低位のため、夏季の熱環境のみを考えると、北向き斜面以外での再自然化が優先的と考えられる。
- ・ 台地部：広域風の影響を受けやすいため、昼間は現状、潜在自然ケースともに風通しが良く、気温は比較的低位。また夜間にも一定程度風が吹いているため、現状のまま、建物密度を上げずに風を阻害しない開発が有効と考えられる。

5-7. 本章のまとめ

本章で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 丘陵下部の市街地（低地部・谷部）では、日中の平均気温が高く、平均風速が小さい。一方で平均的には低地部の気温が谷部の気温よりも高いが、実測調査の結果から、小規模の内部では局所的に低地部よりも高温化する可能性が示唆された。
- 2) 丘陵上部の市街地（台地部）では、比較的日中の平均気温が低く、平均風速が大きい。また気温と風の相関係数が負の方向に大きいことから、日中に吹く広域風の影響を受けやすいと推察される。
- 3) 夜間では丘陵下部の市街地の内、谷部の平均気温が低く、低地部の平均気温が高い。これは谷部において、斜面緑地から発生する冷気流の影響を受けているのに対し、低地部では建物により冷気流の影響が阻害されているためと考えられる。

- 4) 一方で夜間の丘陵上部の市街地（台地部）では、平均風速が大きく、平均気温も比較的低いことから、夜間においても広域風による影響を一定程度受けていると推察される。
- 5) これらの結果に基づいて、都市高温化緩和に向けた対策方針を地形分類毎にそれぞれ作成した。

以上のように、MSSG による地区数値計算を用いて、地形特性（地形分類）の違いにより、気温に影響を与える要因が異なり、都市高温化緩和に向けて考えるべき対策方針が異なることを示した。次章では、広域の影響（海風特性）が異なる2つのエリアにおいてMSSGによるメソ数値計算を境界条件とした地区数値計算を行い、それぞれの市街地の熱環境・風環境を分析し、海風特性の違いにより、高温域の形成要因と考えるべき対策方針が異なることを示す。

注

注5-1) Topographical Position Index (TPI) は地形の凹凸を表す指標であり、正の値は当該メッシュが周囲より高い位置にあること（凸地形）、負の値は当該メッシュが周囲より低い位置にあること（凹地形）を示している。以下に TPI の算出方法を示す。

$$\text{TPI} = (\text{DEM の当該セルの標高値}) - (\text{周辺セルの平均標高値})$$

なお周辺セルは当該セルを中心とした円内（半径 500m）に含まれるものとした。

- 注5-2) 一般的に自然通風式による気温測定は強制通風式に比べて測定精度が良くないことが指摘されている。そこで本研究では測定精度向上のため、文献 5-7 を参考に放射シールドの上部に直射日光を避けるための遮蔽版を設置し、測定を行った。
- 注5-3) 図 5-26 に谷戸内部の観測地点（7 地点）における気温と日射量との時刻別相関係数の推移を示す。なお日射量は GIS を用いて地形・建物・斜面林を考慮して算出した。ただし樹冠の高さや大きさについては正確なデータがなかったため、Google Earth から目視で判断し、これをデータ化した。図 5-27 より、日中を通して正の相関が見られ、特に午前中と夕方の相関が大きい。このことから日中の谷戸内部の気温の形成要因の 1 つとして日射量があると推察される。

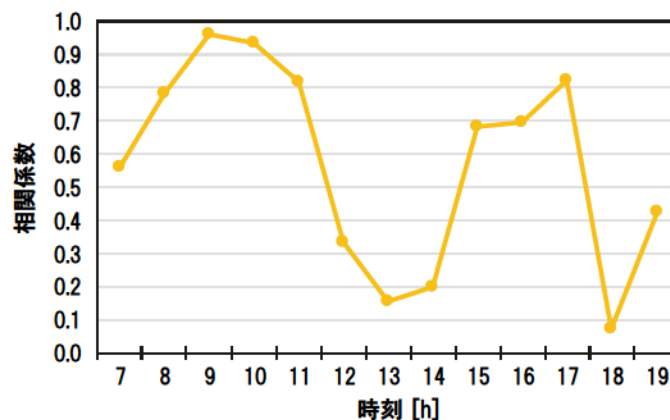


図 5-27 気温と日射量との相関係数の推移

参考文献

- 5-1) 森清和・島村雅英：横浜市域における谷戸地形の特質と推移に関する一考察，ランドスケープ研究，64(5)，pp.631-634，2001
- 5-2) 蝦名聖二・成田健一・三坂育正：スリパチ状緑地が夜間冷気の形成・流出に及ぼす効果，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学-I，pp.939-940，2016
- 5-3) 鳴海大典・水野稔・下田吉之：地域気候特性に配慮した地域・建築計画指針に関する基礎的検討ー都市周辺の丘陵地を対象とする気候解析を通してー，日本建築学会計画系論文集，67(561)，2002
- 5-4) 鳴海大典・水野稔・中村安弘・下田吉之・比嘉博：冷気流の発生構造把握のための実測調査研究ー丘陵地周辺の住宅地域に及ぼす冷気流の影響その1ー，日本建築学会計画系論文集，66(543)，2001
- 5-5) 竹林英樹・森山正和：夏季夜間における山麓冷気流の出現頻度と市街地における影響距離，日本建築学会計画系論文集，66(542)，pp.99-104，2001
- 5-6) 横須賀市都市部都市計画課：谷戸地域空き家等実態調査報告書，横須賀市，2013
- 5-7) 牛山素行編：身近な気象・気候調査の基礎，古今書院，2000

第6章 海風特性が異なるゾーン毎の高温化対策方針の検討

- 6-1. 本章の概要
- 6-2. 対象エリアおよび数値計算概要
- 6-3. 各数値計算結果
- 6-4. 気温と風の関連
- 6-5. 地区内パラメータとの関連分析
- 6-6. 本章のまとめ

第6章 海風特性が異なるゾーン毎の高温化対策方針の検討

6-1. 本章の概要

本章では、広域の影響（海風特性）が異なる2つのエリアにおいてMSSGによるメソ数値計算を境界条件とした地区数値計算を行い、それぞれの市街地の熱環境・風環境の特徴や傾向を把握する。また地区毎の平均気温、平均風速を目的変数、地区内パラメータを説明変数とした重回帰分析を用いて、それぞれの市街地における熱環境・風環境の総合評価を行う。これらの結果を用いて、熱環境・風環境に対する広域風の寄与度を比較し、海風特性の違いにより、高温域の形成要因と考えるべき対策方針が異なることを示す。

以下に本章の流れを示す。（図6-1参照）

- 1) メソ数値計算および地区数値計算結果の結果分析
- 2) 重回帰分析による熱環境・風環境の総合評価
- 3) 2つのエリアの高温化形成要因の比較
- 4) 2つのエリアにおける対策方針の提案

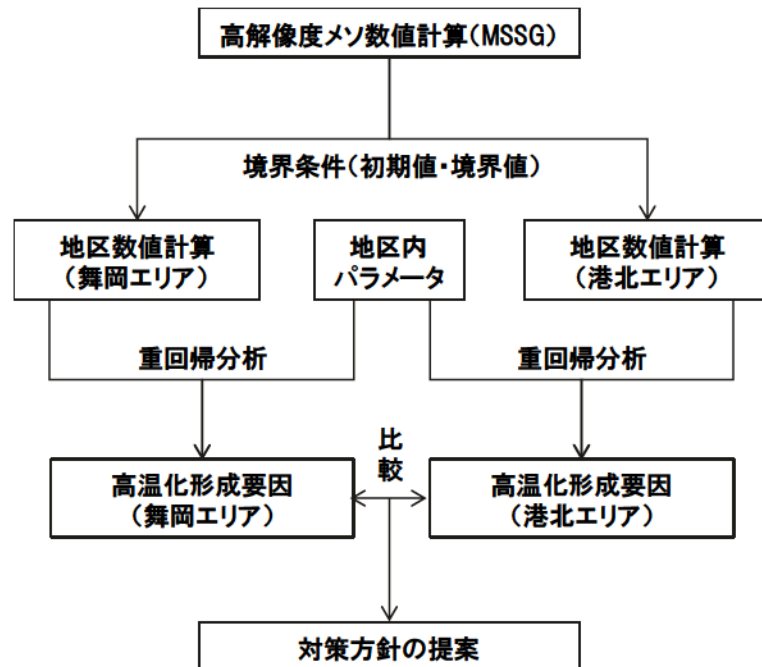


図6-1 第6章の流れ

6-2. 対象エリアおよび数値計算概要

6-2-1. 対象エリア

本章の対象地は、横浜市南部に位置する戸塚区舞岡町の周辺エリア（以下、舞岡エリア）および都筑区センター南駅の周辺エリア（以下、港北エリア）とした（図 6-2 参照）。第 4 章で作成した「都市気候ゾーニングマップ」によると、舞岡エリアは「ZONE1」と「ZONE2」を、港北エリアは「ZONE4」、「ZONE5」をそれぞれ含む。つまり舞岡エリアと港北エリアではゾーニングマップ上では気候特性が異なるエリアであり、特に「ZONE1、2」と「ZONE3、4」は広域風の影響（相模湾からの海風効果）により分類されていることから、これら 2 つのエリアでは相模湾からの海風効果の影響が異なると考えられる。

以下に 2 つ対象エリアの物理的特徴をそれぞれ示す。

- ・ 都市的土地利用の面積率（港北エリア：72.9%、舞岡エリア：80.9%）
- ・ 自然的土地利用の面積率（港北エリア：26.6%、舞岡エリア：18.0%）
- ・ グロス建蔽率（港北エリア：19.0%、舞岡エリア：23.1%）
- ・ 平均建物階数（港北エリア：2.0 階、舞岡エリア：2.0 階）
- ・ 平均建築面積（港北エリア：107.6m²、舞岡エリア：84.8m²）

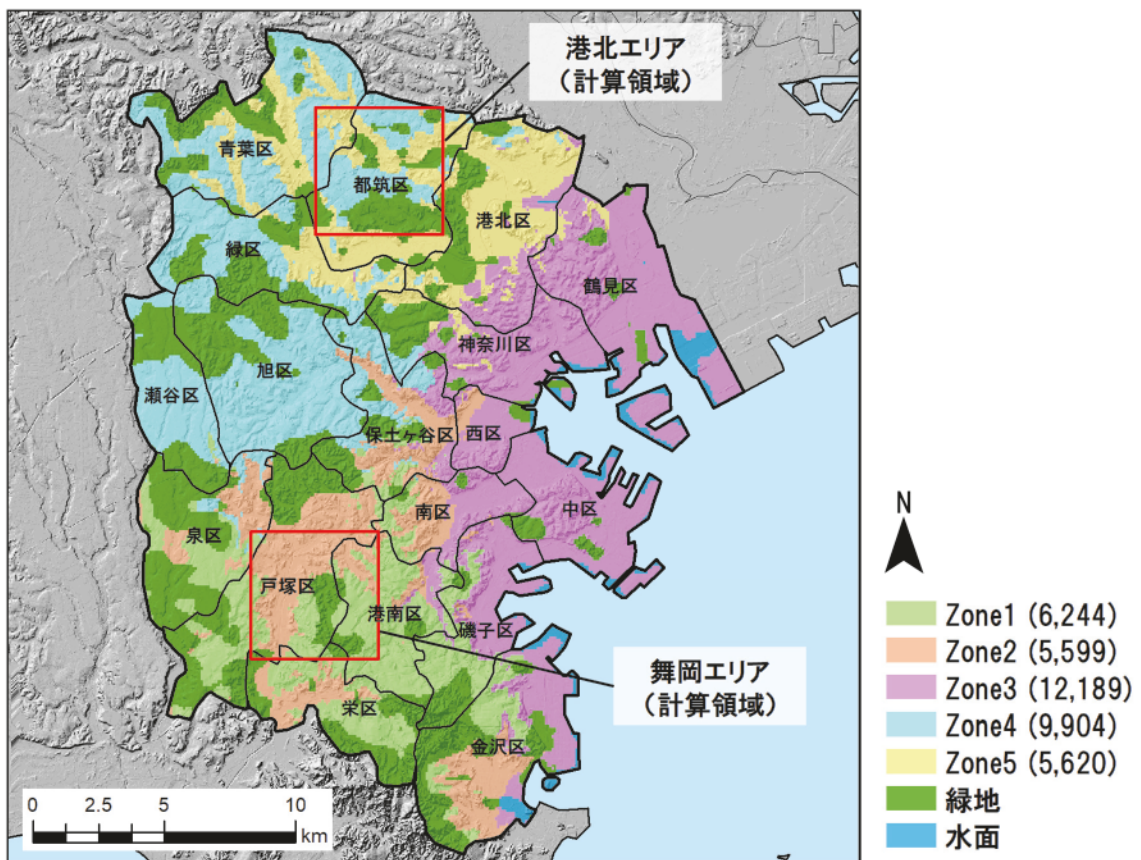


図 6-2 2 つの対象地の位置と都市気候ゾーニングマップ

6-2-2. 数値計算概要

本章では広域の都市気候の影響を反映した上で、地区の熱環境・風環境を分析するため、まずMSSGによるメソ数値計算を行い、その計算結果を境界条件（初期値・境界値）としたMSSGによる地区数値計算を行った。以下にそれぞれの数値計算条件等をそれぞれ示す。

① メソ数値計算

表6-1に数値計算条件（メソ）を示す。計算期間は2008年8月2日9時～15時（パターンB（南風日））とした。図6-3に計算領域を示す。計算領域はネスティング手法を用いて、Domain1を解像度2.5kmの192×192格子、Domain2を解像度500mの192×192格子、Domain3を解像度100mの256×256格子とそれぞれ設定した。なお次で述べる地区数値計算の境界条件（初期値・境界値）には、Domain3（100m解像度）の計算結果を用いた。地表面条件や物理スキーム等の設定方法は第4章の数値計算と同様である（表6-1参照）。

② 地区数値計算

表6-2に数値計算条件（地区）を示す。計算期間は2008年8月2日12時～13時（パターンB（南風日））とした。なお分析には最後の30分の結果を用いた。計算解像度は前章の数値計算と同様、xyz方向に5mとし、図6-4に示す4.8km四方（960×960格子）を計算領域とした。また計算領域の内、図6-4に示す4km四方をそれぞれの分析領域とした。境界条件（初期値・境界値）には前述したメソ数値計算結果（100m解像度、1時間毎）を時間的・空間的に補間した値を用いた。図6-5、図6-6に2つのエリアにおける地表面入力条件（土地利用分類および標高）を示す。なお地表面条件作成に用いたデータや分類方法等は前章の数値計算と同様である。（表6-2参照）

表6-1 数値計算条件（メソ）

| | | |
|---------|---------------------------------|---|
| 計算期間 | 2008/8/2 9時～2008/8/2 15時 | |
| 水平格子 | Domain1 | 2500m解像度(192×192格子) |
| | Domain2 | 500m解像度(192×192格子) |
| | Domain3 | 100m解像度(256×256格子) |
| 鉛直格子 | 96層(地表面～地上20km、不等間隔) | |
| 気象データ | 気象庁MSMデータ(3時間間隔, 10km格子) | |
| 土地利用データ | Domain1 | USGS土地利用データ |
| | Domain2 | |
| | Domain3 | 東京都都市計画基礎調査GISデータ 細密数値情報・数値地図5000(10mメッシュ) 国土数値情報土地利用細分メッシュ(100mメッシュ) |
| 標高データ | Domain1 | GTOPO30 |
| | Domain2 | 基盤地図情報数値標高モデル(10mメッシュ) |
| | Domain3 | |
| 雲微物理過程 | Reisner2 scheme | |
| 放射過程 | Mstrnx scheme | |
| 大気境界層過程 | Mellor-Yamada Level2.5 scheme | |
| 都市キャノピー | Single layer urban canopy model | |

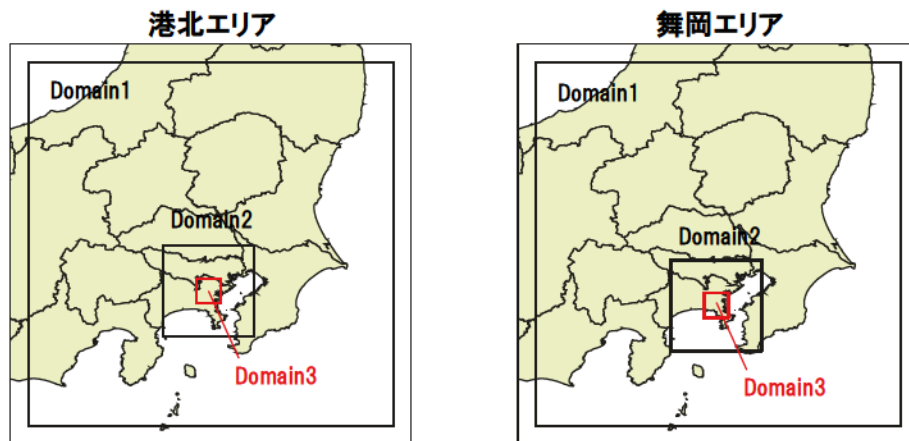
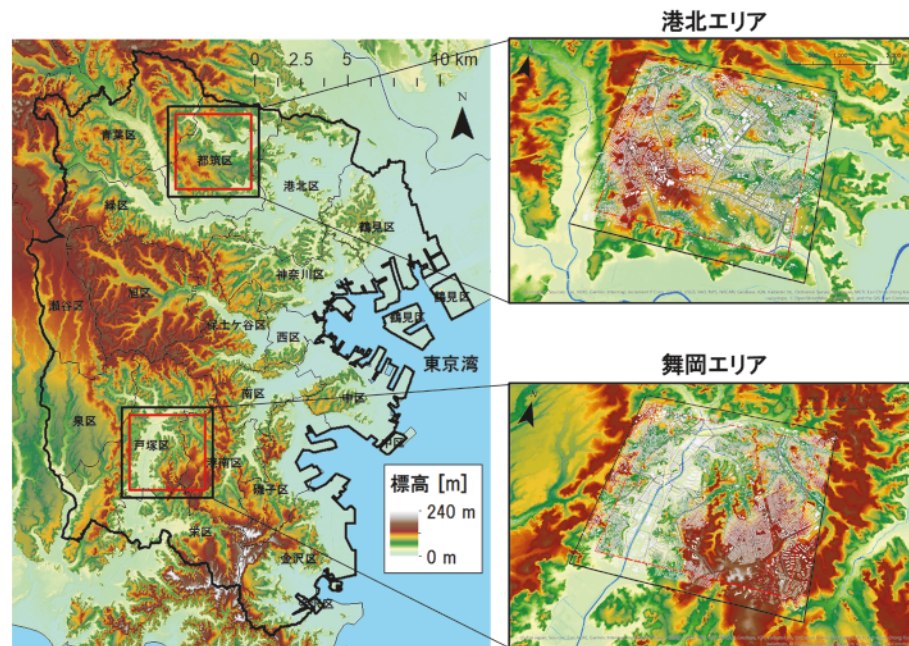


図 6-3 数値計算領域 (メソ)

表 6-2 数値計算条件 (地区)

| | | |
|---------|----------------------------|----------------------------|
| 計算期間 | 2008年8月2日 12時～13時 | |
| 解像度 | 5m×5m×5m | |
| 格子数 | 960×960×101 | |
| タイムステップ | 約0.25秒 (結果の出力は10秒毎) | |
| 気象データ | メソ気象計算の計算結果 (100m解像度、1時間毎) | |
| 地表面データ | 標高 | 基盤地図情報数値標高モデル5mメッシュ(国土地理院) |
| | 土地利用 | 横浜市都市計画基礎調査GISデータ |
| | 樹木位置 | 航空写真から作成した緑被データ |



黒枠: 計算領域(4.8km四方)、赤枠: 分析領域(4.0km四方)

図 6-4 数値計算領域 (地区)

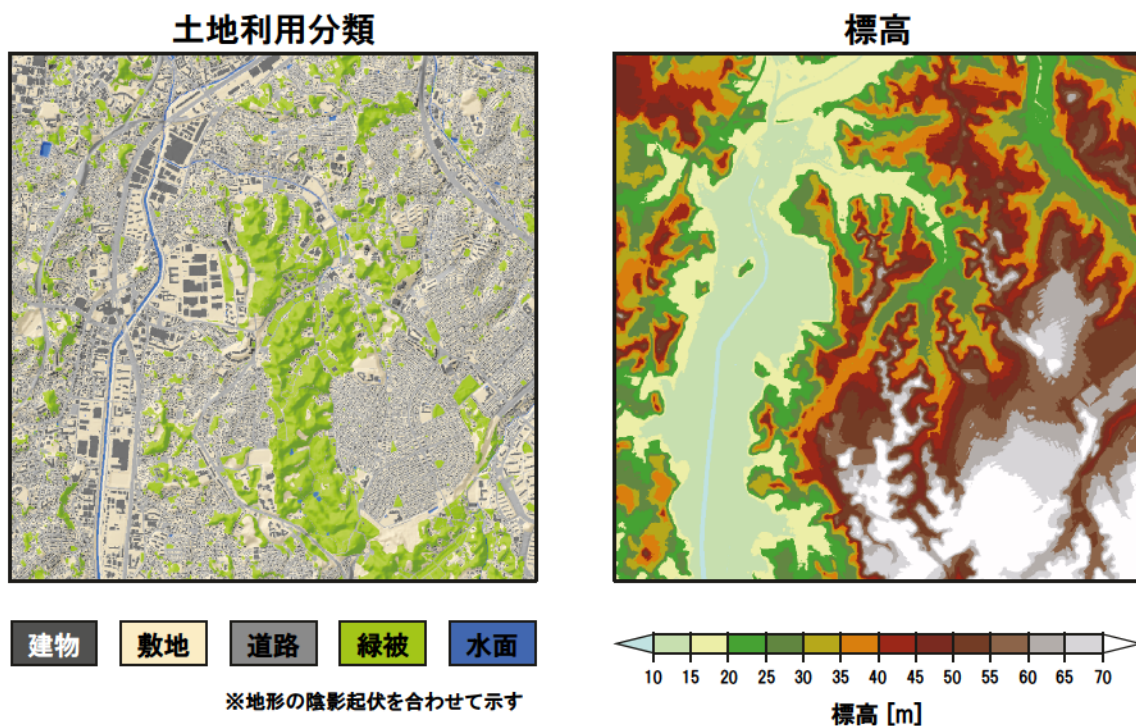


図 6-5 地表面入力条件（舞岡エリア）

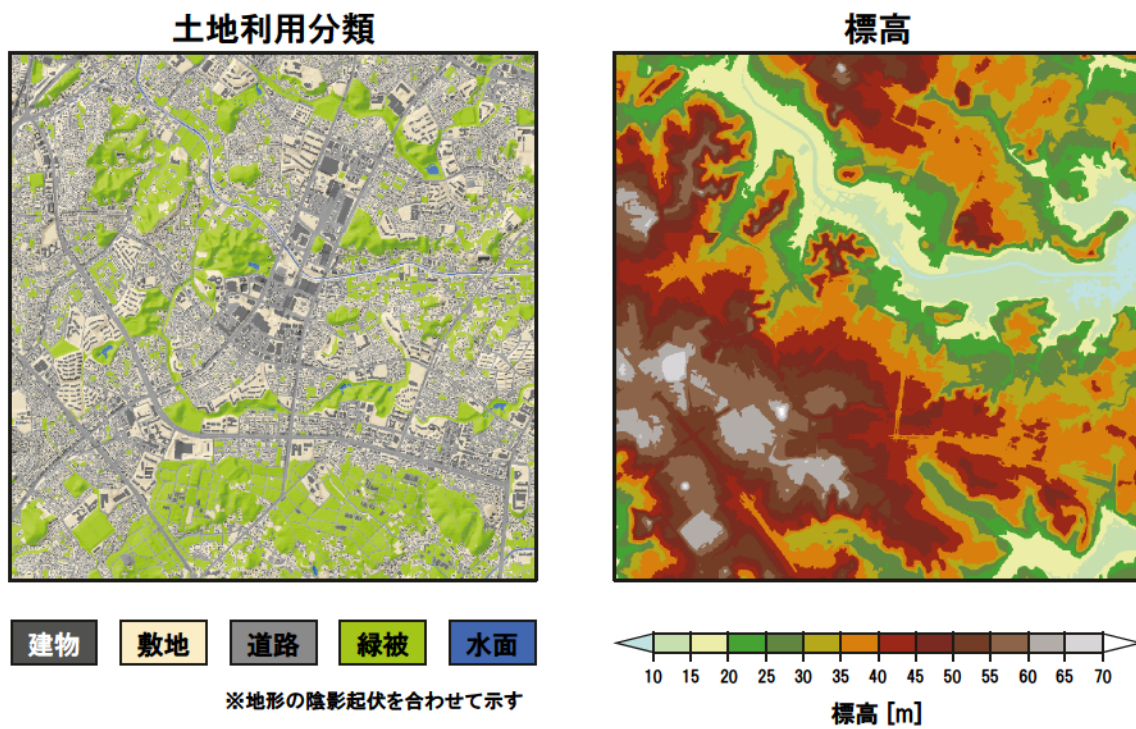


図 6-6 地表面入力条件（港北エリア）

6-3. 各数値計算結果

6-3-1. メソ数値計算の水平分布図

図 6-7、図 6-8 にメソ数値計算の結果から作成した 2008 年 8 月 2 日 12 時の気温分布（地上 2m）および風速分布（地上 2m）を示す。これらの図より、第 4 章のパターン B（南風日）の傾向と同様に、気温は相模湾から徐々に上昇し、風速は徐々に低下している。それぞれの地区スケールの計算領域内（図中黒枠）を見ると、舞岡エリアでは気温が 29.0℃～30.0℃程度、風速が 2.5m/s～3.5m/s 程度であり、港北エリアでは気温が 30.0℃～31.0℃程度、風速が 1.5m/s～2.5m/s 程度である。これらを比較すると、舞岡エリアで港北エリアと比較して気温が 1℃程度低く、風速が 1m/s 程度大きい。

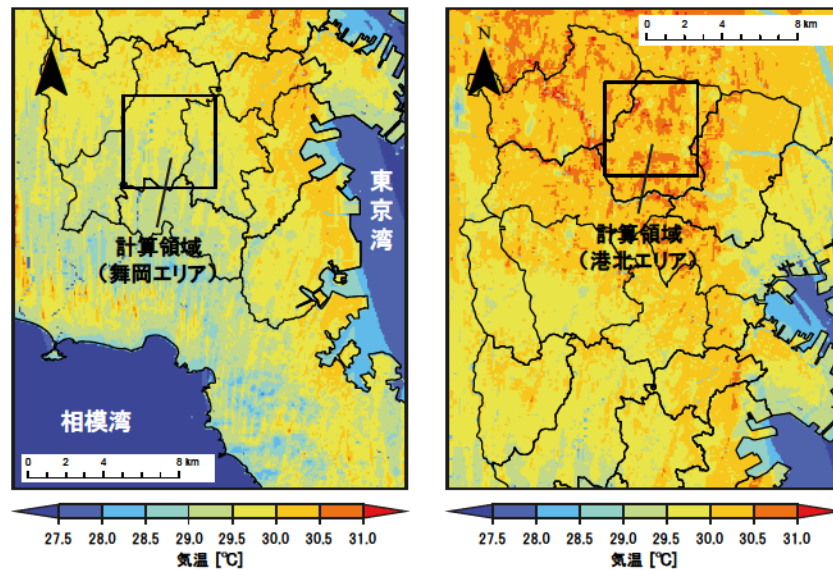


図 6-7 地上気温の水平分布図（2008 年 8 月 3 日 12 時）

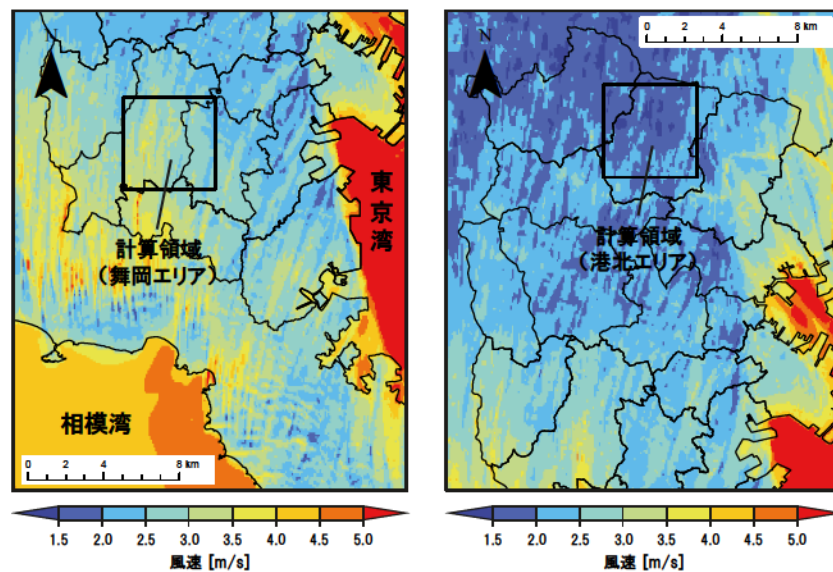


図 6-8 地上風速の水平分布図（2008 年 8 月 3 日 12 時）

6-3-2. 地区数値計算の水平分布図

図 6-9、図 6-10 に地区数値計算の結果から作成した舞岡エリアおよび港北エリアにおける気温分布（地上 2.5m）および風速分布（地上 2.5m）をそれぞれ示す。なおこれらの図はそれぞれ 12 時 30 分～13 時 00 分の平均値から作成した。以下に 2 つのエリアの分布傾向をそれぞれ示す。

■ 舞岡エリア

エリア中央の緑地帯や河川上で比較的低温となっている。また都市域に着目すると、都市内で相対的な高温域（32℃以上）はエリア全体に点在している傾向が見られる。風速分布より、河川上や高幅員道路などのオープンスペースで風速が大きく、街区内等の建物近傍では 0～0.5m/s 程度のエリアの割合が多い。

■ 港北エリア

次に港北エリアを見ると、舞岡エリアよりも全体的に気温が高い。相対的には緑地帯で低温となっているが、舞岡エリアの緑地帯と比較して 1℃程度高い。また都市域において相対的に高温な箇所は特にエリアの北側に分布している傾向が見られる。風速分布を見るとエリア南側の緑地帯で風速が大きい。このエリアを除くと舞岡エリアと同様に高幅員道路などのオープンスペースで風速が大きい。しかし、オープンスペース内の風速を比較すると、港北エリアのオープンスペースの風速が比較的小さい。

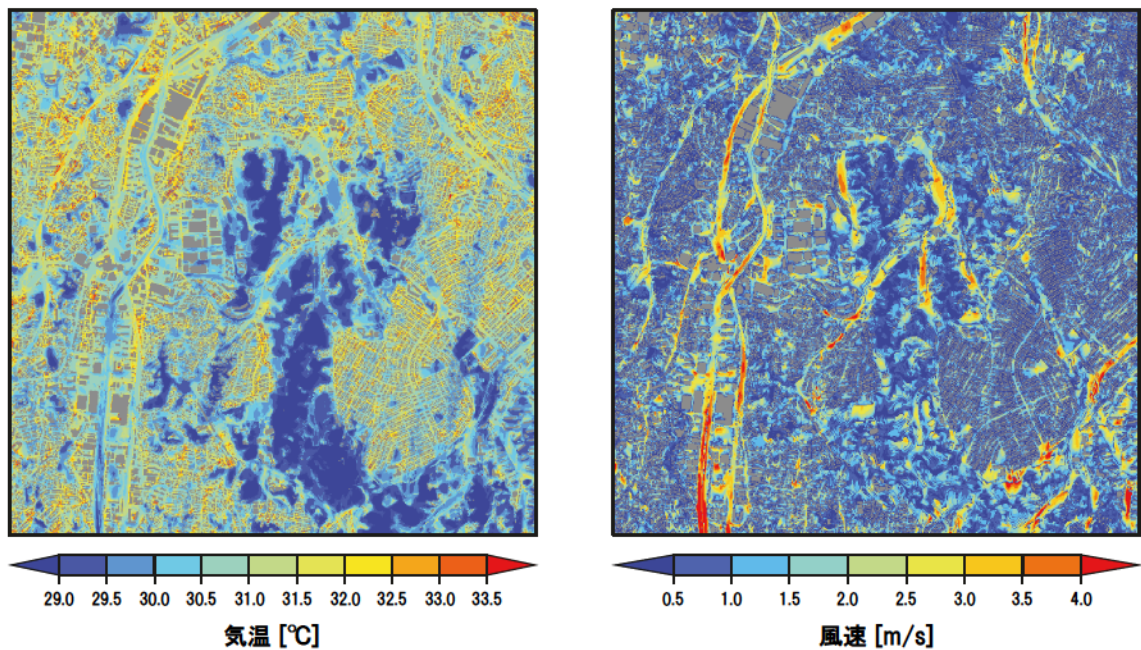


図 6-9 舞岡エリアの都市計算結果（左：気温分布、右：風速分布）
（2008 年 8 月 2 日 12 時 30 分～13 時 00 分の平均値）

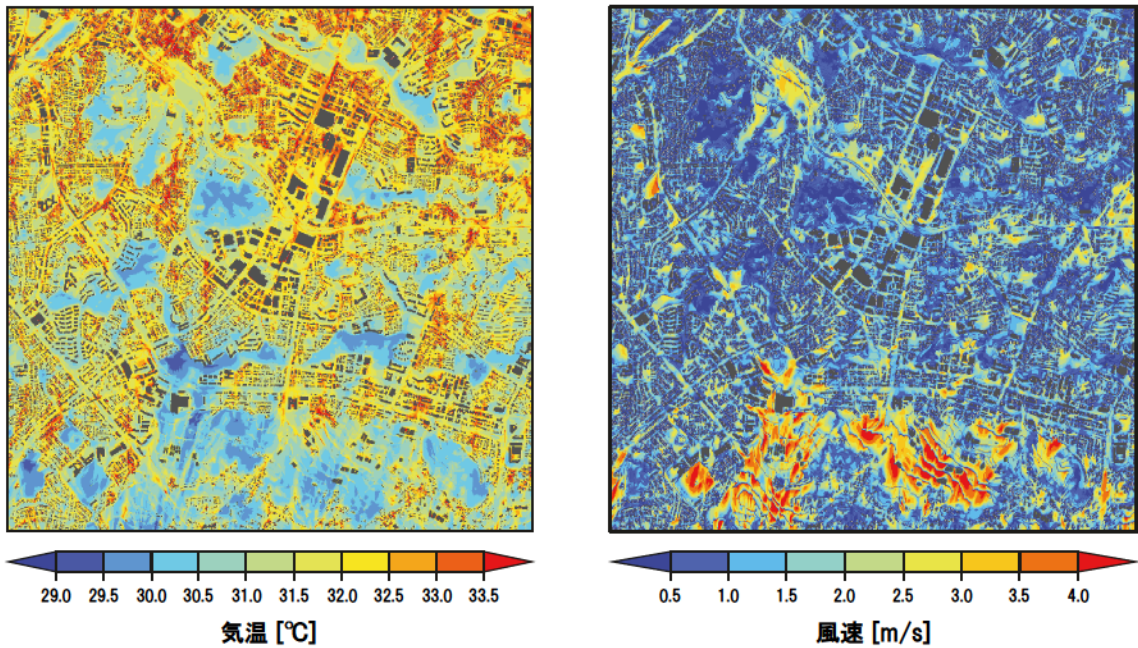


図 6-10 港北エリアの都市計算結果（左：気温分布、右：風速分布）
 (2008年8月2日12時30分～13時00分の平均値)

6-3-3. 上空風速の比較

図 6-11 に2つのエリアにおける平均風速の鉛直分布を示す。なお図 6-11 は各絶対高度のエリア平均値から作成した。この図より、舞岡エリアで港北エリアと比較して上空の風速が大きいことが分かる。またその差は30分間平均値で1.2～1.4m/s程度であり、概ねメソ数値計算の影響を反映できていると考えられる。また絶対高度を用いているため直接的な比較はできないが、高度が下がるにつれて、2つのエリアの風速差は小さくなるが、舞岡エリアの風速がやや大きい。

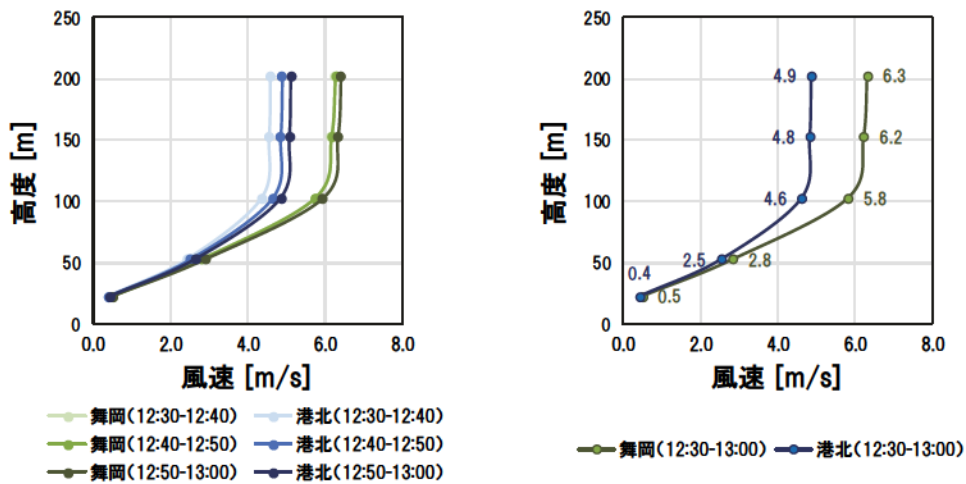


図 6-11 各エリアの上空風速

6-4. 気温と風の関連分析

6-4-1. 評価単位地区の設定

まず、本節および次節で関連分析を行う際に用いる評価単位地区を設定した。ここでは前述した分析領域（4km 四方）をメッシュ幅 200m で分割し、20 行×20 列の 400 メッシュを作成し（図 6-13、図 6-14 参照）、これらの各メッシュを評価単位地区として各値を算出し、分析に用いた。なお分割にメッシュ幅 200m を用いた理由としては、本章の成果を地区計画で活用していくことを想定しているためである。表 6-3 に現在、横浜市で作成されている地区計画（全 121 地区）の計画面積を規模別に分類した度数分布を示す⁶⁻¹⁾。表 6-3 より、横浜市で多く作成されている地区計画の規模は、概ね 200m メッシュの大きさに相当すると考えられる。そこで 200m×200m のメッシュを評価単位地区として分析に用いることとした。

図 6-12、図 6-13 に 2 つのエリアにおける評価単位地区をそれぞれ示す。それぞれ 400 地区を作成したが、本章では広域風の影響の違いを明らかにすることを目的としているため、前章の結果より広域風の影響を受けやすいと考えられる丘陵上部に位置する地区（台地都市地区）を抽出した。抽出方法は図 6-12、図 6-13 に示すように、まず都市的土地利用が地区の過半数を占める「都市地区」を抽出し、さらに前章と同様に行った地形分類の結果（図 6-14 参照）から台地部に位置する「台地都市地区」を抽出した。

図 6-15、図 6-16 に舞岡エリアおよび港北エリアにおいて作成した、評価単位地区毎の平均気温分布（地上 2.5m）と平均風速分布（地上 2.5m）を示す。なおこれらは 12 時 30 分～13 時 00 分の平均値である。次節以降の分析にはこれらの値を用いた。

表 6-3 横浜市内の地区計画面積の度数分布

| 計画面積[ha] | メッシュ幅[m] | 近似メッシュ幅[m] | 地区数 |
|------------------|----------------|------------|-----------|
| 0-2.25 | 0-150 | 100 | 16 |
| 2.25-6.25 | 150-250 | 200 | 41 |
| 6.25-12.25 | 250-350 | 300 | 23 |
| 12.25-20.25 | 350-450 | 400 | 21 |
| 20.25-30.25 | 450-550 | 500 | 7 |
| 30.25-42.25 | 550-650 | 600 | 7 |
| 42.25-56.25 | 650-750 | 700 | 1 |
| 56.25-72.25 | 750-850 | 800 | 5 |
| 72.25-90.25 | 850-950 | 900 | 2 |
| 90.25-110.25 | 950-1050 | 1000 | 1 |
| 110.25- | 1050- | 1100 | 2 |

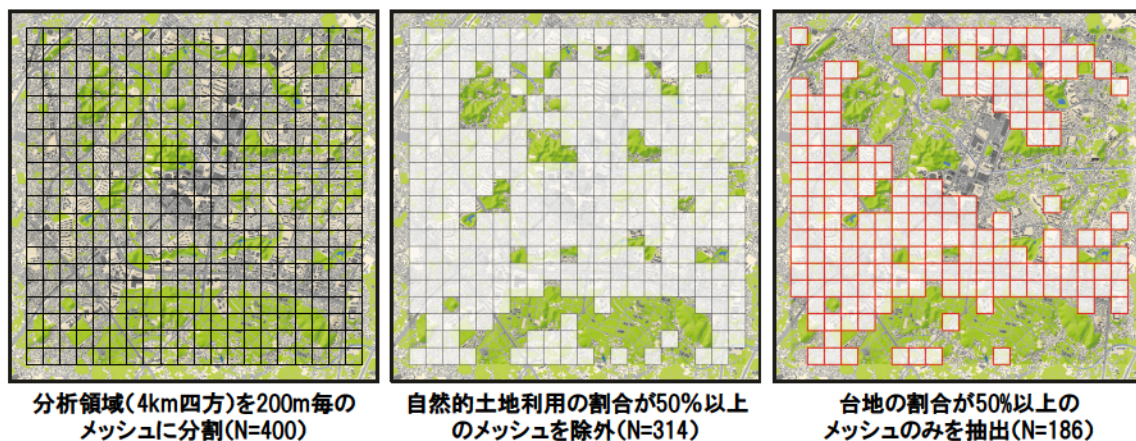


図 6-12 港北エリアの評価単位地区 (左 : 全地区、中 : 都市地区、右 : 台地都市地区)

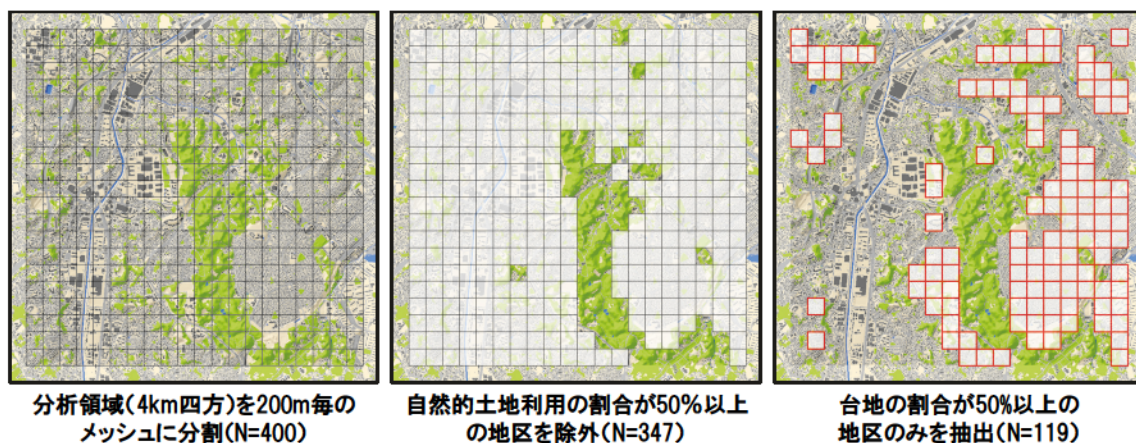


図 6-13 舞岡エリアの評価単位地区 (左 : 全地区、中 : 都市地区、右 : 台地都市地区)

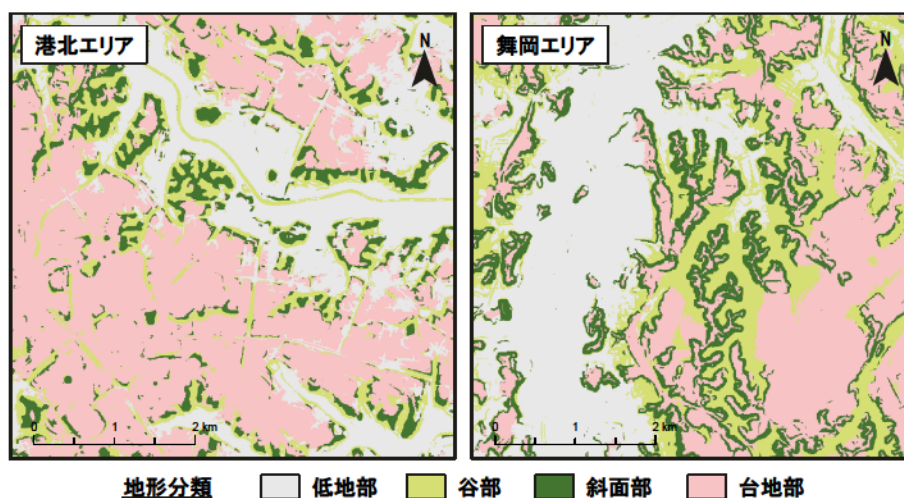


図 6-14 地形分類の結果 (左 : 港北エリア、右 : 舞岡エリア)

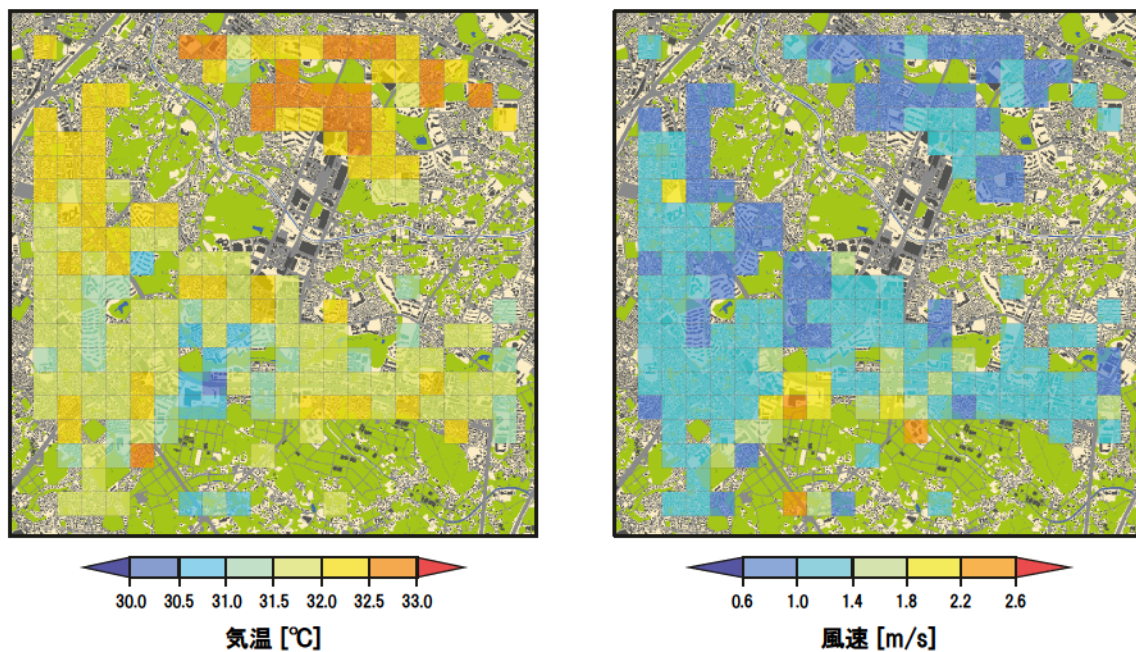


図 6-15 評価単位地区毎の平均気温分布（左）および平均風速分布（右）（港北エリア）
（2008年8月2日12時30分～13時00分の平均値）

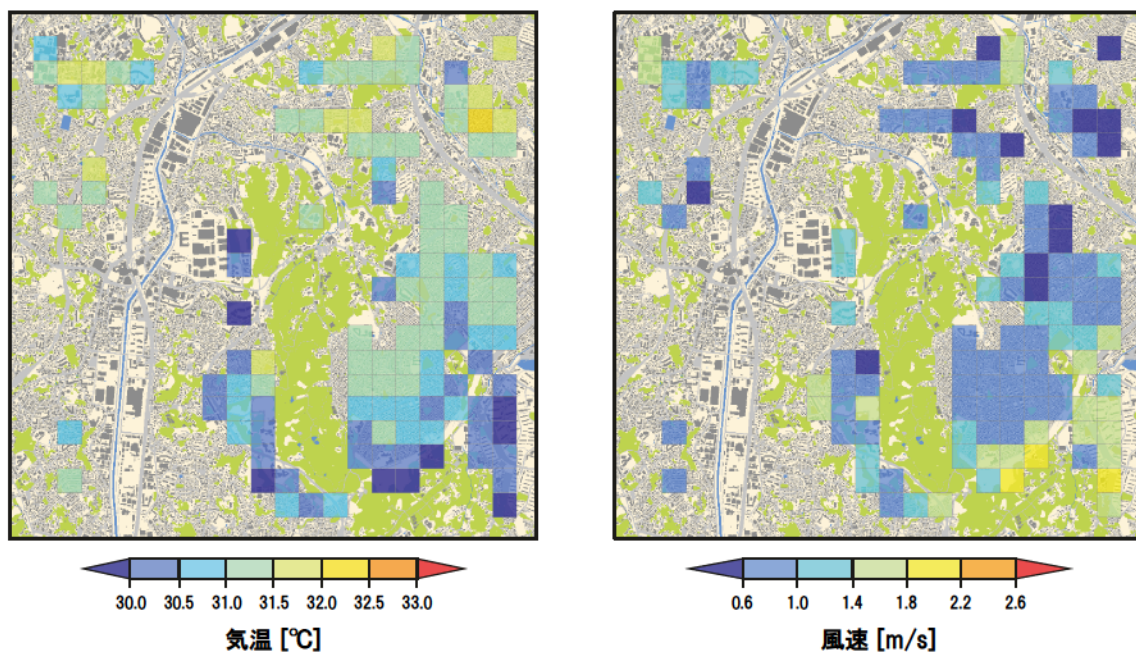


図 6-16 評価単位地区毎の平均気温分布（左）および平均風速分布（右）（舞岡エリア）
（2008年8月2日12時30分～13時00分の平均値）

6-4-2. 気温と風の関連

図 6-17 に舞岡エリアおよび港北エリアにおける地区毎の平均風速と平均気温の散布図を示す。なお図 6-17 は前節の台地都市地区をサンプルとして作成した（舞岡エリア：119 地区、港北エリア：186 地区）。図 6-17 より、どちらのエリアにおいても気温と風速の間には負の相関関係が見られる。また 2 つのエリアを比較すると、舞岡エリアにおいて決定係数および回帰式の傾きの絶対値が港北エリアよりも相対的に大きい。このことから、横浜市の南部に位置し海風効果の大きいと考えられる舞岡エリアの丘陵上部では、市北部に位置する港北エリアの丘陵上部と比較して風と気温の関連が強く、風が熱環境に与える影響が相対的に大きいと推察される。

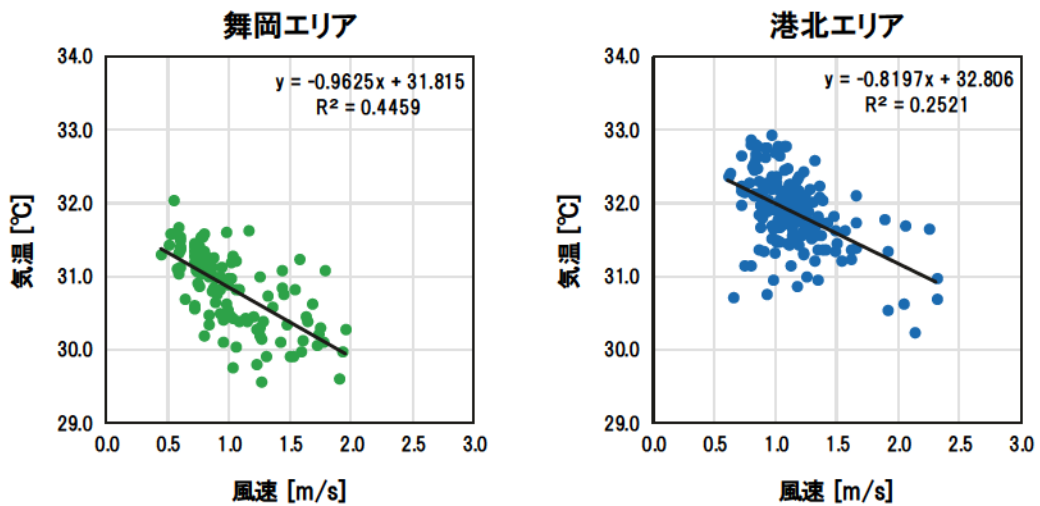


図 6-17 地区毎の平均風速と平均気温との散布図（左：舞岡エリア、右：港北エリア）

6-5. 地区内パラメータとの関連分析

6-5-1. 地区内パラメータの算出

まず、次節以降で関連分析に用いる地区内パラメータの算出を行った。ここでは表 6-4 に示す 7 個の地区内パラメータ（グロス建蔽率、階数の標準偏差、緑地率、水面率、海岸距離、平均標高、標高の標準偏差）を舞岡エリアおよび港北エリアにおいて地区毎にそれぞれ算出した。なお各パラメータはそれぞれ、横浜市都市計画基礎調査の建物データ（グロス建蔽率、階数の標準偏差）および土地利用データ（緑地率、水面率）、国土数値情報海岸線データ（海岸距離）、基盤地図情報数値標高モデル（平均標高、標高の標準偏差）から算出した。また「標高」および「海岸距離」については、まず数値計算のメッシュに合わせて 5m 毎に値を算出し、それらの地区毎の平均値や標準偏差を算出した。

表 6-4 地区内パラメータの概要

| パラメータ名 | 概要 |
|---------|----------------------------------|
| グロス建蔽率 | 地区内の都市的土地利用の面積に対する「建物」が占める面積割合 |
| 階数の標準偏差 | 地区内に位置する「建物の地上階数」の標準偏差 |
| 緑地率 | 地区面積に対する「自然的土地利用(水面を除く)」が占める面積割合 |
| 水面率 | 地区面積に対する「水面」が占める面積割合 |
| 海岸距離 | 地区内の「相模湾からの距離」の平均値 |
| 平均標高 | 地区内の「標高」の平均値 |
| 標高の標準偏差 | 地区内の「標高」の標準偏差 |

6-5-2. 気温・風速と地区内パラメータの関連

図 6-18、図 6-19 に舞岡エリアおよび港北エリアにおける地区毎の平均気温・平均風速と各地区内パラメータとの相関係数をそれぞれ示す。以下に比較的関連が見られたグロス建蔽率、階数の標準偏差、緑地率、海岸距離、平均標高についてパラメータ毎の傾向をそれぞれ示す。

- ・ グロス建蔽率

どちらのエリアにおいても、平均気温とは正の相関、平均風速とは負の相関が見られることから、グロス建蔽率が大きい（建物密度が高い）地区では気温が高く、風速が小さい。これは建物密度が大きい地区では、地区内の風通しが悪く、地区内で発生した熱が拡散されにくいと考えられる。また平均気温・平均風速ともに舞岡エリアで相関係数の絶対値が大きかった。

- ・ 階数の標準偏差

どちらのエリアにおいても、平均気温とは負の相関、平均風速とは正の相関が見られることから、階数の標準偏差が大きい（建物高さのばらつきが大きい）地区では気温が低く、風速が大きい。これは地区内の建物高さにばらつきが生じることにより、上空風を地区内に取り込みやすく、結果として地区内の熱の拡散が促進されるためと考えられる（鉛直方向の風の道効果⁶⁻²⁾）。また平均気温・平均風速ともに舞岡エリアで相関係数の絶対値が大きい。

- ・ 緑地率

どちらのエリアにおいても、平均気温とは負の相関、平均風速とは正の相関が見られることから、緑地率が高い地区では気温が低く、風速が大きい。これは自然被覆面による蒸散効果や地表面温度の低下およびオープンスペースができることに伴う風通しの向上による影響と考えられる。また2つのエリアによる相関係数の差は比較的小さいが、気温については舞岡エリアで平均気温に対する相関係数の絶対値がやや大きい。

- ・ 海岸距離

どちらのエリアにおいても、平均気温とは正の相関、平均風速とは負の相関が見られることから、相模湾からの距離が遠くなると気温が上昇し、風速が低下する。これはこの日がパターン B（南風日）であり、相模湾からの海風が卓越しているためと考えられる。また

2つのエリアによる相関係数の差は比較的小さいが、港北エリアで相関係数の絶対値がやや大きい。

平均標高

どちらのエリアにおいても、平均気温とは負の相関、平均風速とは正の相関が見られることから、標高が高い地区では気温が低く、風速が大きい。今回の分析には丘陵上部の地区のみを用いているが、標高が高い地区ほど広域風の影響を受けやすかったためと考えられる。また2つのエリアによる差は小さい。

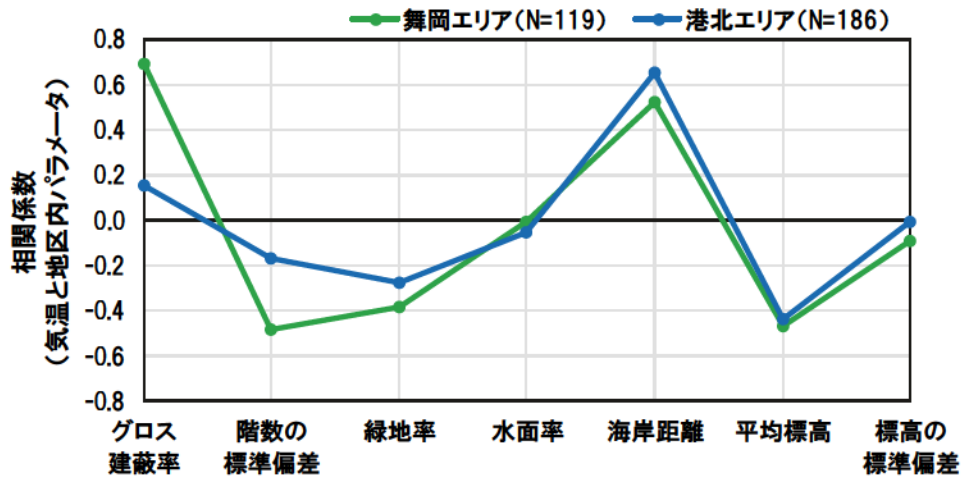


図 6-18 平均気温と地区内パラメータの相関係数

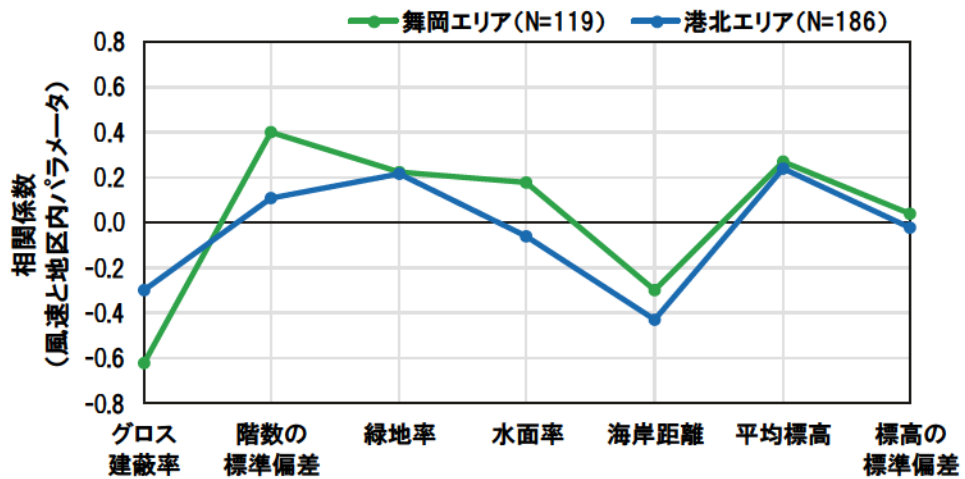


図 6-19 平均気温と地区内パラメータの相関係数

6-5-3. 気温・風速と地区内パラメータの重回帰分析

舞岡エリアおよび港北エリアにおいて、地区毎の平均気温・平均風速を目的変数、前節で分析した7個の地区内パラメータを説明変数とした重回帰分析（強制投入法）を行った。結果を表6-5、表6-6にそれぞれ示す。また図6-20、図6-21に2つのエリアにおいて作成された重回帰式の標準化偏回帰係数を比較した結果をそれぞれ示す。

まず重相関係数を見ると、港北エリアの平均風速を目的変数とした場合を除いた3つの重回帰式においてはそれぞれ0.7以上であった。図6-20、図6-21より、2つのエリアの標準化偏回帰係数を比較すると、まず平均気温を目的変数とした場合には、グロス建蔽率がどちらのエリアにおいても5%水準で有意であったが、特に舞岡エリアで標準化偏回帰係数が正の方向に大きかった。一方で緑地率を見ると、港北エリアの標準化偏回帰係数が舞岡エリアの標準化偏回帰係数よりも負の方向に大きく、また港北エリアのみで5%水準で有意であった。

また平均風速を目的変数とした場合には、同様にグロス建蔽率がどちらのエリアにおいても5%水準で有意であったが、特に舞岡エリアで標準化偏回帰係数が負の方向に大きかった。緑地率を見ると、港北エリアのみで5%水準で有意であり、標準化偏回帰係数は港北エリアで正の値、舞岡エリアで負の値であった。

以上の結果より、海風効果が大きい舞岡エリアでは平均気温・平均風速に対する「グロス建蔽率」の寄与が大きく、地区内の「建物密度の低下」が熱環境・風環境の改善に効果的な対策として考えられる。一方で海風効果が小さい港北エリアでは、舞岡エリアと比較すると平均気温・平均風速に対する「グロス建蔽率」の寄与は小さく、一方で「緑地率」の寄与が比較的大きいと考えられる。そのため、熱環境・風環境の改善を図る際には、地区内の「建物密度の低下」だけでなく、「緑地率の向上」を併せて考える必要がある。

このように、メソ数値計算を境界条件とした地区数値計算を行うことによって、海風特性が異なる2つの市街地エリアの広域の影響の違いを考慮した上で建物・都市形態の影響を分析でき、結果としてこの違いにより高温化の形成要因と考えるべき物理的な対策方針が異なることをケーススタディとして示すことができた。

表 6-5 舞岡エリアの重回帰分析結果（左：平均気温、右：平均風速）

| 目的変数:平均気温 (サンプル数=119) | | | 目的変数:平均風速 (サンプル数=119) | | |
|-----------------------|---------------------------|------|-----------------------|---------------------------|------|
| 説明変数 | 標準化偏回帰係数 | 有意確率 | 説明変数 | 標準化偏回帰係数 | 有意確率 |
| グロス建蔽率 | 0.41 | ** | グロス建蔽率 | -0.64 | ** |
| 階数の標準偏差 | -0.31 | ** | 階数の標準偏差 | 0.17 | * |
| 緑地率 | -0.06 | | 緑地率 | -0.11 | |
| 水面率 | 0.01 | | 水面率 | 0.13 | |
| 海岸距離 | 0.27 | ** | 海岸距離 | -0.18 | * |
| 平均標高 | -0.26 | ** | 平均標高 | -0.04 | |
| 標高の標準偏差 | 0.02 | | 標高の標準偏差 | -0.20 | * |
| 重相関係数 | 0.85 | | 重相関係数 | 0.71 | |
| | *有意確率:5%以下 **有意確率:1%以下 | | | *有意確率:5%以下 **有意確率:1%以下 | |

表 6-6 舞岡エリアの重回帰分析結果（左：平均気温、右：平均風速）

| 目的変数:平均気温 (サンプル数=186) | | | 目的変数:平均風速 (サンプル数=186) | | |
|-----------------------|----------|------|-----------------------|----------|------|
| 説明変数 | 標準化偏回帰係数 | 有意確率 | 説明変数 | 標準化偏回帰係数 | 有意確率 |
| グロス建蔽率 | 0.12 | * | グロス建蔽率 | -0.28 | ** |
| 階数の標準偏差 | -0.28 | * | 階数の標準偏差 | 0.23 | ** |
| 緑地率 | -0.23 | ** | 緑地率 | 0.19 | ** |
| 水面率 | -0.01 | | 水面率 | -0.11 | |
| 海岸距離 | 0.56 | ** | 海岸距離 | -0.37 | ** |
| 平均標高 | -0.17 | ** | 平均標高 | 0.06 | |
| 標高の標準偏差 | 0.08 | | 標高の標準偏差 | -0.10 | |
| 重相関係数 | 0.76 | | 重相関係数 | 0.57 | |

*有意確率:5%以下
**有意確率:1%以下

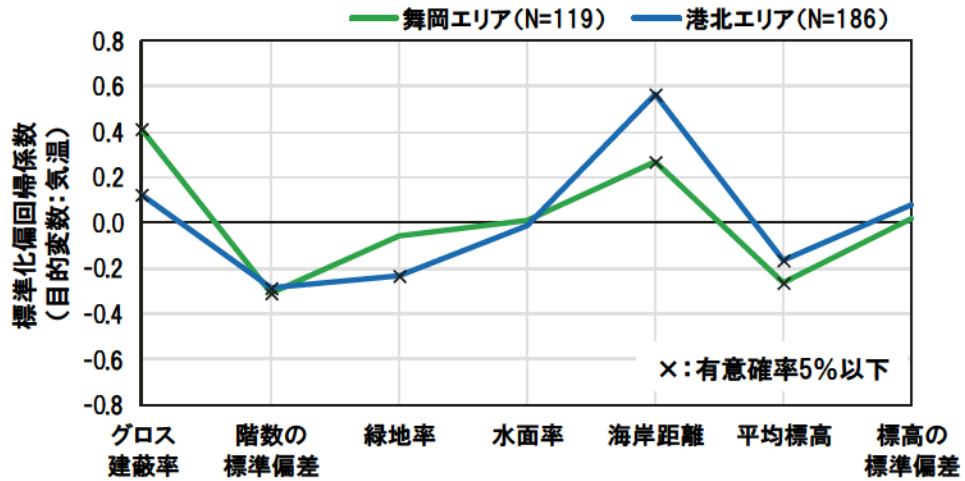


図 6-20 標準化偏回帰係数の比較（目的変数：平均気温）

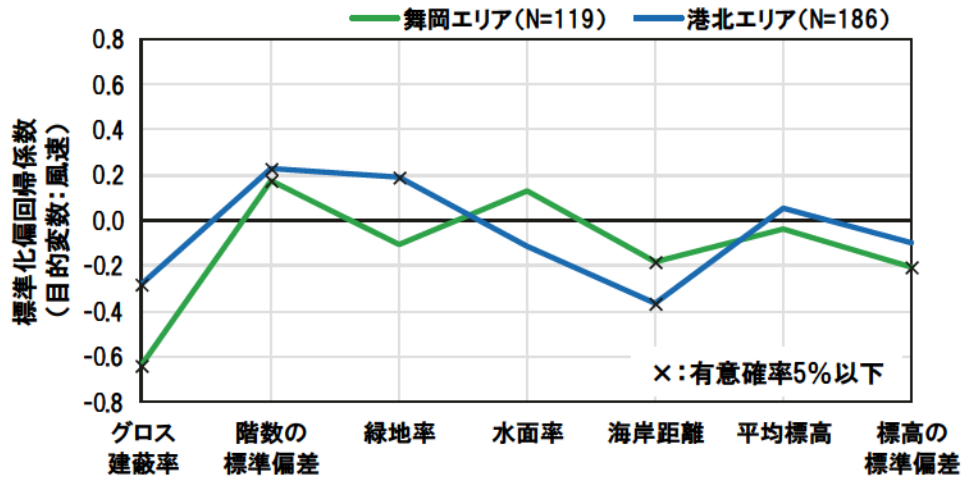


図 6-21 標準化偏回帰係数の比較（目的変数：平均風速）

6-5-4. 対策方針の提案

前節の結果より、海風特性の違いにより2つのエリアで考えるべき対策方針が異なり、海風効果の大きい舞岡エリアではグロス建蔽率の低下が、海風効果の小さい港北エリアではグロス建蔽率および緑地率の増加を考える必要があることがそれぞれ重回帰分析の結果から示された。ここでは2つのエリアに対して、分析結果から考えられる具体的な対策方針の提案を行う。

まずグロス建蔽率と緑地率と気温との関係の確認を行った。図6-22に2つのエリアにおける平均気温とグロス建蔽率との散布図を、図6-23に平均気温と緑地率との散布図をそれぞれ示す。図6-22より、グロス建蔽率については、舞岡エリアで回帰直線の傾きが大きく、港北エリアでは小さい。一方、図6-23より、緑地率については、どちらのエリアにおいても傾きはあまり変わらない。またどちらのエリアにおいても比較的ばらつきが大きいことが分かる。図6-24にグロス建蔽率のクラス(10%毎)別に平均気温と緑地率との散布図を作成した結果を示す。図6-24より、各クラスのサンプルは少ないが、クラス分けをした場合には舞岡エリアと比較して、港北エリアにおいて回帰直線の傾きが比較的大きい。これは市街地密度によって、気温と緑地率との関連が異なること等が推察される。

以上を踏まえて、それぞれのエリアにおける対策方針の提案を行う。

- ・ 舞岡エリア

横浜市の南部に位置し、海風効果が大きいため、建物密度を低下させ、オープンスペースや風の道作成により市街地内の風通しを向上させることが都市高温化緩和のための大きな対策方針として考えられる。また舞岡エリアを含む横浜市南部では今後、人口減少が予想されるため、これに伴う「風通しを確保する市街地再整備」が必要である。具体的には人口減少が進行する住宅地等では、新たな公園・広場の整備や道路の拡幅により市街地内のオープンスペースを確保すること等が考えられる。一方で今後の地域拠点となり新たなオープンスペースを確保しにくい駅周辺等では、総合設計制度等を活用した公開空地の積極的な整備や、卓越風向に沿った風の流入を妨げない建物配置等により市街地内に風の道作成すること等が考えられる。

- ・ 港北エリア

横浜市の北部に位置し、海風効果が小さいため、オープンスペースや風の道作成による市街地内の風通し向上だけでなく、市街地内の緑の維持・増加をしていくこと都市高温化緩和のための大きな対策方針として考えられる。特にこのエリアは今後も人口増加が予想されるため、「緑豊かな市街地開発」を行う必要がある。具体的には緑道の整備のように現存している農地・樹林地を保全しつつ開発を行うことや、また既存の市街地においてはエリア内に多く存在する駐車場の緑化や大型建物の屋上緑化といった人工被覆面の改善によりエリア内の緑地率を向上させること等が考えられる。

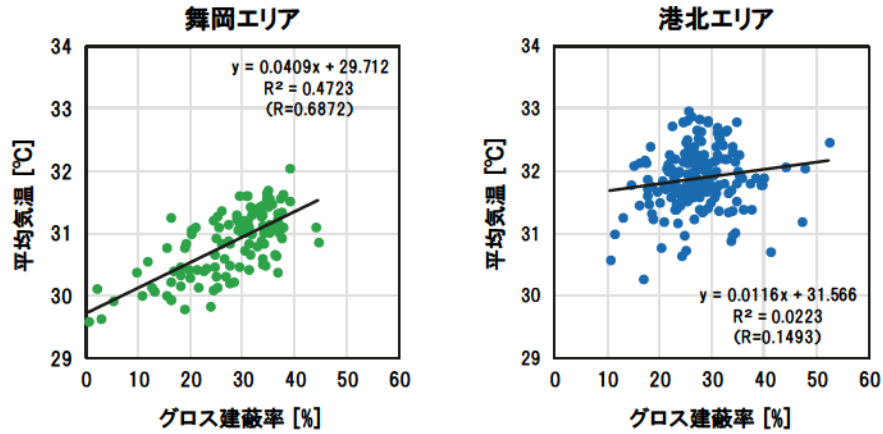


図 6-22 グロス建蔽率と平均気温との散布図（左：舞岡エリア、右：港北エリア）

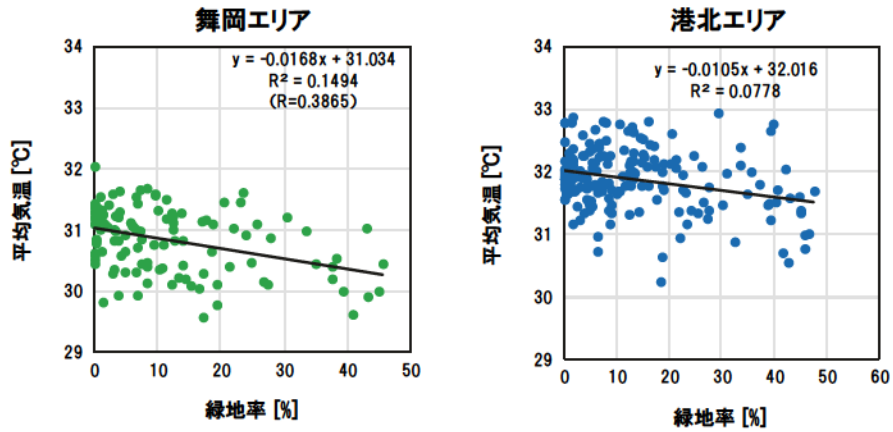


図 6-23 緑地率と平均気温との散布図（左：舞岡エリア、右：港北エリア）

| | グロス建蔽率(~5%) | グロス建蔽率(5%~15%) | グロス建蔽率(15%~25%) | グロス建蔽率(25%~35%) | グロス建蔽率(35%~45%) | グロス建蔽率(45%~) |
|-------|--|--|---|--|--|--|
| 舞岡エリア | $y = -0.0052x + 32.283$ $R^2 = 0.1325$ N=3 | $y = -0.0035x + 31.254$ $R^2 = 0.0487$ N=6 | $y = 0.0075x + 31.426$ $R^2 = 0.0334$ N=29 | $y = -0.0084x + 31.508$ $R^2 = 0.0485$ N=58 | $y = 0.0071x + 31.163$ $R^2 = 0.0465$ N=23 | |
| 港北エリア | | $y = -0.0305x + 32.381$ $R^2 = 0.7384$ N=5 | $y = -0.0075x + 31.767$ $R^2 = 0.0018$ N=60 | $y = -0.0107x + 32.134$ $R^2 = 0.0817$ N=107 | $y = -0.0281x + 31.848$ $R^2 = 0.7$ N=11 | $y = -0.0464x + 32.281$ $R^2 = 0.7659$ N=3 |

図 6-24 グロス建蔽率クラス別の平均気温と緑地率の散布図

6-6. 本章のまとめ

本章で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) MSSGによるメソ数値計算結果を境界条件とした地区数値計算を用いて、広域の影響（海風特性）の違いを考慮したそれぞれのエリアにおける熱環境・風環境を把握した。
- 2) どちらのエリアにおいても気温と風速の間には負の相関が見られたが、海風効果が大きい南部の舞岡エリアでは、北部の港北エリアと比べて気温と風の関連が強く、風が熱環境に与える影響が相対的に大きいことが示唆された。
- 3) 地区内の平均気温、平均風速を目的変数、物理的なパラメータを説明変数とした重回帰分析の結果、海風効果が大きい舞岡エリアでは気温に対する「グロス建蔽率」の標準化偏回帰係数が大きいことから、地区内の「建物密度の低下」が効果的な対策として考えられる。
- 4) 一方で海風効果が小さい港北エリアでは、舞岡エリアと比較して「グロス建蔽率」の標準化偏回帰係数が小さく、「緑地率」の標準化偏回帰係数が大きい。そのため、効果的な対策として、地区内の「建物密度の低下」に加えて、「緑地率の向上」を併せて考える必要がある。

以上のように、MSSGによるメソ数値計算結果を境界条件とした地区数値計算を用いて、海風特性の違いにより、気温に影響を与える要因が異なり、都市高温化緩和に向けて考えるべき対策方針が異なることを示した。次章では、本研究の各章で得られた成果をまとめ、本研究の今後の展望について述べる。

参考文献

- 6-1) 横浜市：地区計画地区一覧,
<http://www.city.yokohama.lg.jp/toshi/tikukeikaku/>,
(2018年12月1日にアクセス)
- 6-2) 加藤隆矢・飯塚悟：鉛直方向の風の道が導入領域およびその風下領域の温熱環境・風環境に及ぼす影響評価－鉛直方向の風の道を活用する街区形態のシミュレーション検討（その1）－, 日本建築学会環境系論文集, 78(689), pp.569-pp.577, 2013

第7章 結論と展望

7-1. 結論

7-2. 展望

第7章 結論と展望

7-1. 結論

本節では、各章の内容を以下にまとめ、これらを本研究の結論とする。

第1章

近年の暑熱環境の悪化を背景に、都市高温化緩和に配慮した都市づくりの促進が必要と考えられる。第1章では、この課題解決に資すると考えられる各対象地の気候特性に適した都市高温化緩和策を示す「適所導入支援ツール」の概要と必要性を述べた後、これに関連する既往研究を整理し、このようなツールの実現に必要な知見等を明らかにした。またその結果を踏まえて、本研究では特に丘陵都市において、このような「適所導入支援ツール」を作成する際に必要と考えられる2つの知見を得ることを目的とした。

第2章

本研究で対象とする丘陵都市の定義および対象地である神奈川県横浜市の概要について示した後、本研究で用いる数値計算モデル Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) の概要を述べ、MSSG を活用することによって得られる結果と全章で示した2つの研究目的との関係を整理した。また本研究の各章の構成を示した。

第3章

横浜市全域を対象に行った気温実測調査および2つのメソ数値計算（従来型メソ数値計算、高解像度メソ数値計算）の結果を用いて、典型的な夏季晴天日における横浜市の気温分布傾向の把握を行った。また2つのメソ数値計算から作成された気温分布の比較を通して、丘陵都市における気温分布の再現性に関して、高解像度メソ数値計算が効果的であることを示した。結果として、日中のローカルなばらつきを小さくする工夫が必要ではあるが、高解像度メソ数値計算は日中の「広域の影響」に加えて、地形の起伏に伴う夜間の気温差を比較的再現できている等、「地形の影響」を考慮できていることから、本研究では丘陵都市の気温分布の再現性という観点からは高解像度メソ数値計算が効果的であると考えた。

第4章

MSSG による高解像度メソ数値計算結果（100m 解像度）を入力条件とした多変量解析（主成分分析およびクラスター分析）により、「広域の影響」に加えて「地形の影響」を考慮した横浜市の「都市気候ゾーニングマップ」を作成した。具体的にはまず主成分分析の結果、気温変動特性指標として「夜間海水温および東京湾からの海風効果」、「相模湾からの海風効果」、「地形の凹凸」が抽出され、前者2つは「広域の影響」、後者は「地形の影響」に相当すると考えられた。さらにこれら3つの気温変動特性指標を入力条件としたクラスター分析の結果、相模湾・東京湾からの距離（広域の影響）に加えて、地形の凹凸（地形の影響）によって横浜市の都市

域が5つのゾーンに分類された。またゾーニングの妥当性を確認するため、各ゾーンの特徴を把握し、実測調査結果との比較からゾーン毎の全体的傾向が同様であることを確認した。

第5章

横浜市の内、特に地形が複雑なエリアにおいて MSSG による地区数値計算を行い、現状および潜在的な熱環境・風環境の特徴や傾向を地形分類毎に把握した。またこれらの結果を用いて、都市高温化緩和に向けた地形分類毎の対策方針を作成し、地形特性の違いにより、高温域の形成要因と考えるべき対策方針が異なることを示した。結果として、日中は丘陵の上部の市街地（台地部）と下部の市街地（低地部・谷部）で広域風の影響が異なり、丘陵上部の市街地（台地部）では、都市・建物形態の影響を考慮した場合にも広域風の影響を受けやすいことが推察された。また夜間では斜面緑地から発生する冷気流の影響が大きく、丘陵下部の市街地（低地部・谷部）ではその効果を潜在的に得られると推察された。一方で建物配置により冷気流が阻害されており、これを妨げない建物配置が望まれることを示した。

第6章

広域の影響（海風特性）が異なる2つのエリアにおいて MSSG によるメソ数値計算を境界条件とした地区数値計算を行い、それぞれの熱環境・風環境の特徴や傾向を把握した。また重回帰分析を用いて2つのエリアにおける熱環境・風環境の総合評価を行い、海風特性の違いにより高温域の形成要因と考えるべき対策方針が異なることを示した。結果として、海風効果が大きい舞岡エリアでは地区内の「建物密度の低下」が都市高温化緩和に効果的として考えられ、海風効果が小さい港北エリアでは、地区内の「建物密度の低下」に加えて、「緑地率の向上」を併せて考える必要があることが示された。また最後に2つのエリアにおける具体的な対策方針を提案した。

7-2. 展望

本研究の結論を踏まえて、今後の展望を以下に示す。

① 分析対象日および数値計算精度の改善について

本研究では、各章で1日～数日の典型的夏季晴天日を対象とした分析を行ったが、これら分析対象日を増やすこと必要と考えられる。また各章の数値計算精度については、実測調査との比較を通して全体的な傾向を再現できていることは確認したが、例えば第5章における谷戸内部の局所的な高温化等、実測結果との乖離が見られる部分も見られる。実測調査データの測定精度の関係上、これらを完全に一致させる必要はないが、計算精度の向上は課題の一つと考えられる。さらに分析対象日や計算精度については、本研究の目的である「適所導入支援ツール」を各地で作成するために、どの程度の分析対象日を確保し、どの程度の計算精度を必要とするのかをある程度体系的に明らかにする必要がある。

② 都市・建物形態改善シナリオの作成と対策効果の評価

本研究では、第6章において、気候特性ゾーンが異なる市街地エリアの熱環境・風環境形成要因の比較を通して、ゾーン毎に物理的な対策方針の考え方が異なることを示した。一方で次のステップとして、抽出された物理的な対策方針に従って、都市・建物形態の改善を行ったシナリオを作成し、これらのシナリオ下において、想定する対策効果（熱環境・風環境）が得られることを定量的に明らかにする必要があるものと考えられる。

③ 計画的な対策方針の作成について

本研究では、分析の結果から「グロス建蔽率の低下」や「緑地率の増加」といった対策を示しているが、「適所導入支援ツール」を都市づくりの現場で活用するためには、これらの「物理的な対策方針」を、都市計画を行う人々が理解できる「計画的な対策方針」に言い換えたものとする必要があると考えられる（例えば、物理的な対策方針が「緑地率の増加」の場合、計画的な対策方針は「駐車場の緑化」や「街路樹の整備」等が考えられる）。そのためには、都市気候および都市計画の専門家の協働ワークショップ等を実施し、「物理的な対策方針」から考え得る「計画的な対策方針」をある程度、客観的かつ網羅的に抽出する必要があるものと考えられる。

④ 将来版の都市気候ゾーニングについて

本研究では現状の都市気候をもとにゾーニングマップの作成およびゾーン毎の分析を行っているが、最終的には将来の気候変動の影響を考慮した将来版の都市気候ゾーニングマップを併せて作成する必要があると考えられる。例えば、本研究では「広域の影響」として海風特性が挙げられているが、このような日中の海風による影響は気候変動により変化することも推察される。また都市づくりにおいては、長期的な視点を含めて計画を考える場面（例えば都市マスタープラン等）も比較的多いことから、将来における気候特性の変化を考慮して対策方針の作成を行うことが望ましいと考えられる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、多くの方々のご指導、ご助力を頂きました。

まず田中貴宏先生に心よりお礼申し上げます。田中先生のもとで過ごした6年間には数えきれないほど多くのことを学ばせていただき、経験させていただきました。また夜遅くまで議論していただいたり、何度も相談を聞いていただき、その度に背中を押していただいたり、研究に関しては勿論、それ以外のことにしても多くのことでお時間を割いて下さりました。本当にありがとうございました。私にとって、とても充実したかけがえのない時間でした。

続いて JAMSTEC・杉山徹様に心より感謝いたします。杉山様には地球シミュレータを使った本研究を始めるきっかけを作っていただきました。また地球シミュレータおよび MSSG の使い方を一から丁寧に教えていただき、学会発表や論文投稿の際にはいつもの的確なご指摘やアドバイスをいただきました。また横浜研究所で過ごした時間はとても刺激的でした。このような機会を与えて下さり、本当にありがとうございました。また横浜での調査等に際して、横浜国立大学・佐土原聡先生、吉田聡先生、佐藤裕一様、谷光清様には申請書の手配や測定機の準備等多大なご協力とご支援をいただきました。深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、神奈川県県土整備局からは都市計画基礎調査に関わるデータに関して、国立研究開発法人海洋研究開発機構からは地球シミュレータおよび大型計算機システムを用いた大規模計算の実行に関してご支援いただきました。また経済面では日本学術振興会より科学研究費補助金(特別研究員奨励費)をご支援いただきました。心より感謝申し上げます。

また広島大学の皆様にも大変お世話になりました。論文の副査をしていただいた西名大作先生、岡川貢先生、角倉英明先生、金田一清香先生、久保田徹先生には本論文をまとめるために必要な多くのご助言をいただきました。建築事務室の前川明日香さん、上脇薫さんには事務手続きに関して大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。また建築環境学研究室および都市・建築計画学研究室では多くの先輩・同期・後輩と出会うことができました。一緒に頑張りながら、気兼ねなく話ができる仲間が近くにいることの大きさを研究室での生活を通して感じることができました。特に A グループの皆さんとは、毎週の打ち合わせや夏の過酷な調査等、特に多くの時間を共にし、先輩後輩関係なしに切磋琢磨することができたと思います。このような充実した環境で過ごせたことに感謝いたします。

最後にここまで何も不自由ないようにサポートしてくれた両親と、休みの日や夜遅くまで研究に打ち込むことを許してくれた妻と息子に心から感謝します。これまで皆様のおかげで得ることができたものをより社会に役立つものに発展させ、また次世代に伝えていけるように、これから日々研究および教育活動に取り組んでいきたいと思っております。

2019年5月31日

横山真
