

千葉工業大学  
博士学位論文

微気象観測に基づく都市街区内の  
温熱環境空間分布特性の評価

河野 恭佑  
(Kyosuke Kawano)

2020年3月

## Abstract

The wet-bulb globe temperature (WBGT) has been widely used for heat disorder prediction in Japan since it is highly correlated to the number of emergency transportation due to heat disorder. It is calculated from wet-bulb temperature, globe temperature, and air temperature.

In urban area, buildings are distributed densely and intricately. It causes a considerable variation of globe temperature, in turn WBGT, among a district. However, the number of the micro-meteorological observations, which are currently operated, are not enough to resolve such a fine spatial variation.

In this study, a mobile observation was conducted to monitor WBGT and related meteorological components within residential urban districts at three locations around Tokyo. The purposes of this study are 1) evaluation of the spatial variations of urban thermal comfort based on micro-meteorological observations together with a use of an urban micro-climate model, and 2) construction of a simple equation to estimate globe temperature of the entire urban areas in district scale.

The present micro-meteorological observation within urban districts revealed the following things: 1) higher WBGT occurred in areas of higher globe temperature, 2) WBGT and globe temperature within a pedestrian space in the urban district were well apart from the values in the nearest meteorological station, and 3) thermal comfort could be different depending on the environment of humidity and radiation even though WBGT is a same level.

To estimate the globe temperature within urban districts, a simple equation is proposed as a function of global radiation components representing a meso-scale environment, and a local sky view factor (SVF) and air temperature at pedestrian level.

The equation was verified by the mobile observation, with assigning the observed values of SVF and air temperature along the district, and global radiation obtained at a point measurement. This resulted in the RMSE of the globe temperature within 1.70 °C in a part of Tokyo under the condition along sunlit area and wind speed less than 4 m s<sup>-1</sup>. Therefore, the equation could reproduce the globe temperature distribution in district scale reasonably from the morphological information of buildings and regionally representative air temperature and radiation without direct meteorological measurement along urban district.

As an application of this study, the thermal stress along runners and audiences in a marathon course, which was a candidate of the 2020 Tokyo Olympic game, was evaluated using a numerical model, SOLWEIG. WBGT for runners became maximum after 36 km

from the start. For audience, it is recommended to stay at the left sidewalk of the marathon course after 30 km to reduce thermal stress.

The main conclusion of this dissertation is that there is a significant spatial variation of WBGT within urban district, and higher WBGT was emerged with higher globe temperature. A simple estimation equation of globe temperature was proposed to reproduce the spatial variation of globe temperature, which aims to be applied for various urban districts in the world.

# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究目的 .....	4
1.3 熱ストレスに関する指標 .....	4
1.3.1 湿球黒球温度：WBGT .....	4
1.3.2 平均放射温度：MRT .....	5
1.4 数値モデル .....	7
1.5 本論の構成 .....	8
1.6 観測結果の位置づけ .....	9
<b>第2章 都市街区の微気象観測システムの構築</b> .....	14
2.1 観測領域 .....	14
2.1.1 都心部市街地：Area_1 .....	14
2.1.2 都市水域周辺低層住宅街：Area_2 .....	14
2.1.3 都心部商用地域：Area_3 .....	15
2.2 観測概要・総観気象場 .....	15
2.2.1 Area_1 .....	15
2.2.2 Area_2 .....	16
2.2.3 Area_3 .....	17
2.2.4 観測概要のまとめ .....	17
2.3 使用機器の検定 .....	17
2.3.1 熱電対（E型） .....	18
2.3.2 温湿度センサ（SHT-35, SHT-75） .....	18
2.3.3 温湿度大気圧センサ（TR-73U） .....	18
2.3.4 黒球温度計（ $\phi$ 4 mm, $\phi$ 40 mm） .....	18
2.3.5 自作通風筒 .....	19
2.4 湿球温度の算出方法 .....	19
2.4.1 乾湿計公式 .....	19
2.4.2 乾湿計公式の精度 .....	22
2.5 黒球温度の算出方法 .....	23
2.5.1 ベルノン式黒球温度への変換 .....	23
2.5.2 熱収支式に基づいた黒球温度推定方法 .....	25

2.5.3	MRT を用いた黒球温度の算出方法	25
2.6	気象観測データの取り扱い	26
2.6.1	品質管理	26
2.6.2	空間分布図の作成方法	26
2.6.3	天空率の算出	27
<b>第3章</b>	<b>屋外暑熱環境の実態把握</b>	<b>58</b>
3.1	Area_1	58
3.1.1	熱環境場の空間分布	58
3.1.2	用途地域が異なる領域間の比較	59
3.1.3	ルーチン観測網との比較	59
3.1.4	小まとめ	59
3.2	Area_2	60
3.2.1	熱環境場の空間分布	60
3.2.2	水域からの距離が異なる領域間の比較	61
3.2.3	道路方向が異なる領域間の比較	62
3.2.4	ルーチン観測網との比較	62
3.2.5	小まとめ	63
3.3	Area_3	63
3.3.1	熱環境場の空間分布	63
3.3.2	ルーチン観測網との比較	64
3.3.3	小まとめ	64
3.4	まとめ	64
<b>第4章</b>	<b>都市街区内の黒球温度推定式の提案</b>	<b>79</b>
4.1	説明変数	79
4.2	黒球温度推定式の提案	79
4.2.1	移動気象観測結果による推定	79
4.2.2	定点気象観測結果による推定	80
4.2.3	黒球温度推定式の適用範囲および利点	81
4.3	他領域への適用	81
4.3.1	検証用データ	81
4.3.2	検証結果	82
4.4	既存式との比較	82
4.5	まとめ	83

<b>第 5 章 広域における黒球温度推定式の有用性評価</b> .....	<b>89</b>
5.1 数値放射モデル：SOLWEIG .....	89
5.1.1 解析領域 .....	89
5.1.2 デジタルデータ .....	89
5.1.3 気象データ .....	90
5.1.4 MRT および黒球温度の推定方法 .....	90
5.2 定点における放射量（SOLWEIG）の妥当性評価 .....	91
5.2.1 気象状況および SOLWEIG への入力気象場 .....	91
5.2.2 長短波放射量，MRT，および黒球温度の比較検証 .....	92
5.3 街区内における天空率（UMEP）の妥当性評価 .....	92
5.4 街区内における黒球温度（SOLWEIG）の妥当性評価 .....	93
5.4.1 SOLWEIG への入力気象場 .....	93
5.4.2 黒球温度の比較検証 .....	93
5.4.3 SOLWEIG 内での MRT と各気象要素の関係 .....	94
5.4.4 SOLWEIG で計算された MRT に対する補正量の検討 .....	95
5.5 黒球温度推定式の有用性評価 .....	97
5.5.1 検証条件 .....	97
5.5.2 SOLWEIG との比較検証 .....	97
5.6 まとめ .....	97
<b>第 6 章 2020 年東京オリンピックマラソンコースの熱ストレス予測</b> .....	<b>115</b>
6.1 背景 .....	115
6.2 解析領域 .....	115
6.3 SOLWEIG への入力気象場 .....	116
6.4 コース上のデータ処理 .....	116
6.4.1 黒球温度の算出方法 .....	116
6.4.2 走者に即した熱環境場の再現方法 .....	116
6.4.3 コース設定 .....	117
6.5 走者に対する熱ストレス評価 .....	117
6.6 黒球温度最大時における WBGT の変動幅 .....	118
6.7 沿道観客に対する熱ストレス評価 .....	118
6.8 まとめ .....	119
<b>第 7 章 結論</b> .....	<b>128</b>
7.1 本論の総括 .....	128

7.2 今後の展望 .....	129
参考文献 .....	132
参照データ .....	138
謝辞 .....	139
研究業績 .....	141
付録 .....	142

## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

都市では、人工被覆や人工排熱が増加することによるヒートアイランド現象が顕在化しており、人体への熱負荷の増大が懸念されている。これに伴う代表的な疾病として、「熱中症」が挙げられる。「熱中症」は地域・屋内外問わず発症し、死亡事故にもつながる重大な社会問題であり（星・稲葉，2002，星ら，2010），生活空間の温熱環境を正確に把握し，熱ストレス指標に基づき，正しい予防情報を提供することで注意喚起することが重要である。

日本では，環境省が，熱中症の救急搬送人員数（図 1-1 上段）や日最高気温（図 1-1 下段）と高い相関関係にある湿球黒球温度（wet-bulb globe temperature, WBGT）に基づき，全国約 840 か所において毎年 5 月～10 月にかけて熱中症予防情報を提供している（環境省 HP）。WBGT は，大気中の湿り気を表す湿球温度，周囲から受ける放射量を表す黒球温度，気温から算出される熱ストレス指標である。WBGT に対する各項目による影響について述べる。湿球温度は，活動空間よりも広域スケールの気象場に影響されると報告されている（大橋，2010）。気温は，重みづけが最も小さいことから，WBGT への寄与が最も小さい。しかしながら，黒球温度は，建物の配置，高さの変動，物性，用途といった街区特性が混在する都市においては，街区スケール（10<sup>0</sup>m）で顕著に変動すると考えられる。したがって，都市街区内において，WBGT に基づく温熱環境評価を行う上では，放射環境を詳細に観測する必要がある。

これについて，以降では，「観測手法」，「黒球温度の観測」，「WBGT に関する既往の研究」の3つの観点から，未解明・不十分な点を整理する。

#### (a) 観測手法

気象観測手法は流体力学的に2種類に分けられる。固定座標に基づく Euler 概念と座標系の移動による Lagrangian 概念である。Euler 概念とは，気象庁などのルーチン固定観測のような「定点気象観測」を指し，ある地点における時間変化を捉えることができる。一方，Lagrangian 概念とは，観測機器を動体に設置し，移動させて観測する「移動気象観測」を指し，短時間で空間連続的に観測することができる。

都市においては，観測機器の設置場所の確保や許可申請面で困難を伴い，温熱環境を空間的に網羅するためには，移動気象観測が適している。都市部での移動気象観測は，気温や湿度などの気象要素を最小限にした観測は行われているものの，複数の気象要素から求められる熱ストレスは，観測が複雑化するため，その研究例は極めて少ない。

#### (b) 黒球温度の観測

黒球温度の一般的な観測で用いられる機器は，ベルノン式黒球温度計（150 mm）である。しかしながら，問題点が二つある。一つは，ベルノン式黒球温度計は時間応答性が悪く，大

きくて重量があること。今一つは、気象官署では通常の観測項目になっておらず、環境省による実測地点でも全国に 11 か所しかないことである。

これらの改善策として、前者に対しては、*Nakayoshi et al.* (2015) のように黒球温度計の球径を小さくすることで時間応答性を向上させ、軽量化することである。ただし、観測機器の作製は容易ではなく、都市街区内での観測例は極めて少ないことが現状である。後者に対しては、気象官署で通常観測される気象要素を用いて黒球温度を推定することである。この推定式については、すでにいくつか提案されている。

例えば、高市ら (2003) は温室内の作業環境の WBGT を推定するために、気温 ( $T_a$ ) [°C] と全天日射量 ( $S_0$ ) [ $W m^{-2}$ ] のみを用いて、風速を考慮しない式 (1-1) から黒球温度 ( $T_g$ ) [°C] を算出した。また、登内・村山 (2008) は気温、全天日射量、風速 ( $U$ ) [ $m s^{-1}$ ] を用いて、かつ全天日射量に閾値をかけ 2 分化した式 (1-2) を提案した。2013 年までは環境省では式 (1-2) を用いて WBGT を算出していた。

$$T_g = T_a + 0.090S_0 / (1 + 0.0037S_0) \quad (1-1)$$

$$T_g = T_a - 0.3 + 0.0256S_0 - 0.18U^{\frac{1}{2}} \quad (S_0 \leq 400 W m^{-2}) \quad (1-2)$$

$$T_g = T_a + 12.1 + 0.0067S_0 - 2.40U^{\frac{1}{2}} \quad (S_0 > 400 W m^{-2})$$

環境省によると、黒球温度の推定に使用されていた式 (1-2) は雲の変動が激しい場合、推定誤差は約 5°C であることが報告されている (環境省, 2010)。これについて、*Okada et al.* (2013) は風速の系統的誤差が含まれていることを指摘し、黒球表面の熱収支から式 (1-3) を提案した。

$$T_g = T_a + (S_0 - 30.0) / (0.0252S_0 + 10.5U + 25.5) \quad (1-3)$$

しかしながら、式 (1-3) は弱風環境下 ( $1.3 m s^{-1}$  以下) のみに適用させた推定式のため、岡田ら (2013) が、国内 4 地点の気象官署における長期観測データを基にパラメータ調整を施し、全天日射量や風速の幅広い変化に対応する式 (1-4) を提案し、RMSE を 2.39°C に抑えることを可能にした。

$$T_g = \frac{(S_0 - 38.5)}{(0.0217S_0 + 4.35U + 23.5)} + T_a \quad (1-4)$$

このように気温、全天日射量、風速を用いて簡易的に黒球温度が推定されているが、いずれも气象台のような定点観測値に基づいた推定式である（以降、既存式）。したがって、街区内のように、建物が密集した空間への適用は未評価である。

### (c) WBGT に関する既往の研究

都市の温熱環境に対しては、様々な研究が行われているものの、その複雑さゆえ、未解明な点が多い。その中でも、微気象観測または数値シミュレーションによって、WBGT に基づき熱ストレスを評価・検討された研究事例について紹介する。

#### (i) 微気象観測

都市における観測は容易ではなく、観測・解析事例は極めて少ない。今回は3つの事例について紹介する。

*Ohashi et al.* (2009) は、岡山県岡山市の商業地区および住宅地区において、測器を自転車に取り付け、移動しながら各地点に数分滞在して観測を行う「移動式定点観測」を実施した。その結果、気温や黒球温度の高かった商業地区より、近隣の河川から水蒸気が流入した住宅地区の方が WBGT が高いことが示され、風系場の重要性について指摘した。

上野ら (2011) は、熊本県熊本市の市街地において、WBGT 計を携帯し、歩行して観測する「移動観測」を実施した。その結果、日射量が高く、交通量の多い幹線道路沿いで WBGT が高いことがわかった。また、アーケード（屋根）の下でも時間により WBGT が急激に高くなり、時間や場所による WBGT の局所的な空間変動を明らかにした。

檜村ら (2016) は、千代田区周辺の 2020 年東京オリンピックマラソンコース（原案）において、自転車に測器を取り付け移動する「移動観測」を実施した。その結果、コース内の WBGT は、近隣の定点の観測値を大きな差異はなく、走者に対しては、疲労も考慮すると、予想以上に熱ストレスが高いことがわかった。

いずれの研究も 1 領域における解析結果であり、複数領域を用いた統計的な街区の特性については未解明である。

#### (ii) 数値シミュレーション

都市における熱ストレスに関する数値シミュレーションは数多く行われている。本節では、WBGT を用いた解析結果について紹介する。

*Ohashi et al.* (2014) は、気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting) を用いて、東京都 23 区内を 1 km の空間解像度で WBGT を計算した。その結果、日最高 WBGT の空間分布は、グリッド間の気温差より黒球温度差に影響され、高い天空率が WBGT の上昇に寄与することを示した。

*Honjo et al.* (2018) は、数値放射モデル SOLWEIG (Solar and Longwave Environmental Irradiance Geometry) を用いて、千代田区周辺の 2020 年東京オリンピックマラソンコース

(原案)の黒球温度を2mの空間解像度で推定し、WBGTによる熱ストレス評価を行った。その結果、日向におけるWBGTの空間変動は約0.5℃と予測し、走者は、コースの位置取りが中央・左右で異なった場合でも、ほとんど熱ストレスは変化しないことを示した。

Matsuda et al. (2018)は、3次元放射伝達モデル3DRT (Three-dimensional Radiative Transfer) と乱流モデルLES (Large Eddy Simulation) を組み合わせた数値モデルを開発し、適切な樹木分布を導入し、実測値に基づいて検証を行った。再現性を確認したうえで、東京湾周辺の公園や遊歩道におけるWBGTを5mの空間解像度で計算し、樹木下のWBGTが周辺よりも低下することをよく再現できることを示した。

都市街区内の熱ストレスは歩行レベル(1m)で変化すると考えられる。したがって、これらの研究よりも高い空間解像度で計算し、それに対応する観測結果で数値モデルを検証することが必要である。

既往の研究からわかるとおり、都市における統計的な温熱環境の空間分布特性を観測と数値シミュレーションの双方からアプローチして解析した事例はなく、都市の熱ストレスの空間分布特性は未だ解明されていない。

## 1.2 研究目的

本研究では、以下に掲げる3点から、都市街区内の温熱環境の空間分布特性を評価することを目的とした。

- 1) 都市における街区特性の異なる3領域において微気象観測を実施し、街区スケールの気象場を統計的に評価する。
- 2) 実測値に基づき、街区内の空間変動を再現できる簡易的な黒球温度の推定式を提案する。
- 3) 実観測と数値モデルから広域における温熱環境の空間分布特性を評価する。

## 1.3 熱ストレスに関する指標

日本で広く用いられる熱ストレス指標である湿球黒球温度(WBGT)と放射パラメータである平均放射温度(Mean Radiant Temperature, MRT)について以下に説明する。

### 1.3.1 湿球黒球温度: WBGT

まず、WBGTを説明する前に、熱中症に関する歴史について触れておく。表1-1に熱中症に対する指標の年表を示す。古くから熱中症は、坑内労働や製鉄業、軍隊でよく発生していた。1800年代から、熱中症に対して、気温などを用いた熱ストレス指標が使われており、WBGTも労働環境に基づいた熱ストレス指標である。

WBGTの起源は、1923年にHoughten and Yaglou (1923)が発表した気温、湿度、気流の組み合わせによる有効温度(Effective temperature, ET)に由来する。1930年にVernon (1930)によって黒球温度が発表されてから、熱中症が多く発生する製鉄業や炭坑内では積極的に

輻射熱が計測されており、熱中症と輻射熱が関連することがわかってきた (e.g. 斎藤・三浦, 1963). このような背景から, *Yaglou and Minard* (1957) は ET と海軍訓練時の熱中症発生率の関係を示したのち, 輻射熱を考慮し, 現場で簡易的に使用できる WBGT を提案したと考えられる.

WBGT は人体を用いた実験式であり, 湿球温度 ( $T_w$ ) [°C]・黒球温度・気温から算出される. 計算式は, 屋内のように日射の影響が無視できる環境 (式(1-5)) と屋外 (式(1-6)) で異なる.

$$WBGT = 0.7T_w + 0.3T_g \quad (1-5)$$

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_a \quad (1-6)$$

主に人体と外気との熱のやりとり (熱収支) に着目した指標であり, 日射環境下においては, 風速は黒球温度の変化として陰的に加味される.

WBGT が発案されてからは, 主にスポーツの分野で使用されており, 1989 年には国際標準化機構 (ISO7243) にも推奨され, 現在でも世界中で広く一般的に使用されている (e.g. *Chow et al.* 2016 ; *Zare et al.* 2018).

日本では, 環境省によって 2006 年に WBGT の一般公開が開始された. 指針は表 1-2 で示すように日常生活指針 (日本生気象学会, 2013) と運動指針 (日本体育協会, 2013) に区別され, 環境省では, 日常生活指針に基づいて全国約 840 か所において熱中症予防情報が提供されている.

また, 公開される約 840 か所のうち, 気象庁の協力のもと全国 11 か所 (東京, 札幌, 仙台, 新潟, 名古屋, 大阪, 広島, 高知, 福岡, 鹿児島, 那覇) の露場において黒球温度の観測を行っており, 実測に基づいた WBGT が提供されている. それ以外の地点では, 気象庁が観測している気温, 相対湿度, 全天日射量, 風速を用いて, 小野ら (2014) によって提案された式から実況推定値として WBGT が提供されている.

### 1.3.2 平均放射温度 : MRT

MRT は, 新標準有効温度 (Standard new Effective Temperature, SET\*) などの体感指標を計算する際に, 放射パラメータとしてよく用いられる. 周囲からの熱放射を平均化した周辺表面の平均温度である. 放射パラメータのみではなく, 放射に着目した熱環境評価の際は, 直接的に用いられることもある (e.g. *Herrmann and Matzarakis* 2013; *Tan et al.* 2013). 本研究では, 1) 定義式と 2) 経験式の 2 種類の計算式に基づき MRT を算出した.

#### 1) 定義式

人体に入射する放射は, 取り囲む空間を東西南北および上下の 6 成分に分類できる. 定義

式は、この6成分からの長短波放射量を計算し、合算することで放射熱流束 ( $S_{str}$ ) [ $\text{W m}^{-2}$ ] を求め (式(1-7)), Stefan-Boltzmann の法則 (式(1-8)) に基づき、MRT に変換する方法である。

$$S_{str} = \zeta_k \sum_{i=1}^6 S_i F_i + \varepsilon_p \sum_{i=1}^6 L_i F_i \quad (1-7)$$

$$MRT = \sqrt[4]{(S_{str}/(\varepsilon_p \sigma))} - 273.15 \quad (1-8)$$

ここで、式(1-7)の $\zeta_k$ と $\varepsilon_p$ は短波放射量 ( $S_i$ ) [ $\text{W m}^{-2}$ ] と長波放射量 ( $L_i$ ) [ $\text{W m}^{-2}$ ] に対する人体への吸収係数であり、 $F_i$ は人体と周辺の物体表面との間の形態係数である。また、式(1-8)の $\varepsilon_p$ は人体の射出率であり、 $\sigma$ は Stefan-Boltzmann 定数 ( $=5.67 \times 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}]$ ) である。

## 2) 経験式

一方、1930年に *Vernon* (1930) によって 150 mm 銅製中空の黒球温度計が開発されてから、その4年後に *Bedford and Warner* (1934) によって黒球と周囲の放射環境との熱交換が明らかにされ、そこから MRT を計算できる経験式が提案された。以下にその計算の流れを示す。

黒球と周辺環境との間の熱放射による受(放)熱量と対流による放(受)熱量の熱平衡から決定され、式(1-9)が成立する。

$$H_R = H_C \quad (1-9)$$

ここで、 $H_R$ は熱放射による、 $H_C$ は対流による受(放)熱量 [ $\text{Btu ft}^{-2} \text{hr}^{-1}$ ] である。

熱放射による受熱量は式(1-10)のように示される。

$$H_R = \varepsilon \sigma (T_{mrt}^4 - T_g^4) \quad (1-10)$$

ここで、 $\varepsilon$ は放射率 ( $=0.95$ )、 $\sigma$ は Stefan-Boltzmann 定数 ( $=1.73 \times 10^{-9} [\text{Btu}/(\text{ft}^2 \text{ } ^\circ\text{R}^4 \text{ hr})]$ ) である。平均放射温度 ( $T_{mrt}$ ) および黒球温度 ( $T_g$ ) は華氏絶対温度 [ $^\circ\text{R}$ ] である。

対流による放熱量は、温水を満たした黒球温度計を風洞内で強制風により冷却し、式(1-11)の実験的な式を得た。

$$H_C = 0.169 \sqrt{v} (t_g - t_a) \quad (1-11)$$

ここで、 $v$ は風速 [ $\text{ft min}^{-1}$ ] であり、黒球温度 ( $t_g$ ) および気温 ( $t_a$ ) は華氏 [ $^{\circ}\text{F}$ ] である。

式(1-9)に式(1-10)および式(1-11)を代入することで MRT を算出する式(1-12)が得られる。

$$T_{mrt}^4 \times 10^{-9} = T_g^4 \times 10^{-9} + 0.1028\sqrt{v}(t_g - t_a) \quad (1-12)$$

*Bedford and Warner* (1934) によると、厳密には、弱風環境 (i.e. 高温時) における MRT は線形ではないことを指摘しているが、概ね以下の式(1-13)が成り立つことも示している。

$$t_{mrt} = t_g + 0.169\sqrt{v}(t_g - t_a) \quad (1-13)$$

これを SI 単位に変換することで、日本でも一般的に用いられる式(1-14)が得られる。

$$MRT = T_g + 2.37\sqrt{v}(T_g - T_a) \quad (1-14)$$

ここで、温度は摂氏 [ $^{\circ}\text{C}$ ] であり、風速の単位は  $\text{m s}^{-1}$  である。

ちなみに、ISO7726 (1998) では、式(1-12)の考えに類似する以下の式が採用されている。

$$MRT = \left[ (T_g + 273)^4 + \frac{1.10 \times 10^8 \times v^{0.6}}{\varepsilon \times D^{0.4}} (T_g - T_a) \right]^{0.25} - 273 \quad (1-15)$$

ここで、標準的なベルノン式黒球温度計であれば、射出率 ( $\varepsilon$ ) と球の直径 ( $D$ ) [m] は、それぞれ 0.95 と 0.15 である。

#### 1.4 数値モデル

数値モデルは実現象を予測するための計算ツールであり、観測では困難な時空間的に密な物理量の評価を行うことが可能である。以下に、数値モデルの使用例および本研究で用いる数値モデルについて紹介する。

天気予報や台風経路の予測には、WRF がよく用いられる (e.g. *Oku et al.* 2014)。最近では、Urban Canopy Model (UCM) や Building Energy Model (BEM) などを組み込むことで、地上付近における広域的な気温や WBGT の予測にも使用される (e.g. *Q. V. Doan et al.* 2016; *Kusaka et al.* 2012; *Ohashi et al.* 2014)。

街区スケールの乱流の再現には、LES がよく用いられ、大気境界層内の乱流構造の解析などが行われている (e.g. *Kanda et al.* 2013; *Inagaki et al.* 2017)。

このように、現在でも、数値モデルは気象現象に応じて、世界中で開発・活用されている。

本研究では、「都市街区内」と「黒球温度」が計算できることを前提としている。それらの条件を満たす数値モデルとして、都市街区内の放射を再現することができる SOLWEIG (Ver. 2016a) に着目した。SOLWEIG はスウェーデンで開発された数値モデルであり (Lindberg *et al.* 2008), 長短波放射量や MRT の推定が可能である。本研究で扱った SOLWEIG の Ver. 2016a は、いくつかの国で再現性の評価が行われており (e.g. Chen *et al.* 2014; Lau *et al.* 2015), 特に開発グループの Lindberg *et al.* (2011a) は数地点の定点観測値を用いて検証を行い、MRT は 25°C から 55°C までの温度帯での再現性が高いことを示した。

都市の街区構造の再現には都市気候予測ツールである Urban multi-scale environmental predictor (UMEP) を用いた。

これらの数値モデルは無償ツールとして提供されており、今後、世界中で使用されることが期待される。しかしながら、日本での使用例は数少ない (e.g. 山崎ら, 2016; Honjo *et al.* 2018)。また、日本国内の観測値を用いて再現性を評価した例はなく、加えて街区スケールの局所的な変動が含まれる観測値に基づくモデルの再現性については未評価である。そこで本研究では、観測値に基づいてこれらの数値モデルの妥当性を評価した。

## 1.5 本論の構成

本学位論文は、7 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景や目的、熱ストレスに関する指標や数値モデルの選定について記述した。

第 2 章では、観測概要および取得したデータの取り扱いや解析方法について記述した。本研究では街区特性の異なる 3 領域において気象観測を行った。各観測では使用機器や観測手法が異なることから、評価を統一するためのデータの取り扱い方法や観測機器の精度について明示した。

第 3 章では、微気象観測結果に基づいて、街区内で大きく変動する熱ストレスの実態を評価した。湿球温度や気温より黒球温度の空間変動が大きい傾向にあり、メソ気象スケールで用いられる定点観測 (気象庁, 環境省) の値と有意な差が生じていることを示した。WBGT が高い地点では黒球温度が著しく高い傾向にあったことから、都市街区内で変動する黒球温度を適切に把握することが重要であることを指摘した。また、同一領域内において「住宅街」と「街道」、「南北道路」と「東西道路」、「北側領域」と「南側領域」のように対照的な街区特性の空間における熱ストレスを比較した結果、湿度や放射の差異から人体の感じる暑さの感覚に違いがある可能性を指摘した。

第 4 章では、微気象観測結果に基づき都市街区内の変動を再現できる黒球温度推定式を提案した。日向で風速が  $4 \text{ m s}^{-1}$  以下の弱風環境下であることを条件に、領域を代表する全天日射量と街区内で変動する天空率および気温を用いることで、 $1.70^\circ\text{C}$  の RMSE で黒球温度を推定できることを示した。

第 5 章では、観測値に基づいて数値放射モデル SOLWEIG から得られる街区内の放射環

境の妥当性を評価するとともに、同モデル結果と比較することで、提案した黒球温度推定式の広域的な熱ストレス評価における有用性を述べた。数値モデルで計算される各放射成分は定点気象観測結果に対して高い再現性を示し、黒球温度は約 3°C の RMSE で評価できることがわかった。一方、移動気象観測結果に対しては、天空率の再現性は高かったものの、黒球温度は約 6~8°C のバイアスが生じ、変動の類似性は見られなかった。これは、数値モデルに入力した気温や全天日射量が領域一定値であるためであり、移動気象観測で得られた気温や下向き短波放射量を考慮した結果、観測値の変動を概ね捉えることができた。以上の結果から、SOLWEIG への入力は領域に適切な時間・空間分解能をもつ入力条件を与えることで、街区スケールの局所的な黒球温度を再現できる可能性を指摘した。第 4 章で提案した黒球温度推定式に、3 次元都市幾何形状データに基づく実態に即した天空率を導入して広域的な都市街区領域の黒球温度の空間分布を求めた。これを SOLWEIG で計算される放射量から算出した黒球温度の空間分布と比較した結果、空間変動特性は類似していた。このことから、提案した黒球温度推定式は、数値放射モデルを用いらずに街区内の空間分布を評価できることから、工学上有用であることを指摘した。

第 6 章では、広域的な都市の熱ストレス評価に焦点を当て、2020 年東京オリンピックにおいて候補として挙げられたマラソンコースの放射量を数値モデルから計算し、走者と観客に対する熱ストレスを評価した。走者に対しては、天空率の高い約 33 km 付近の皇居周辺（千代田区）で周辺よりも熱ストレスが高い傾向にあり、約 36 km 以降では WBGT がコース最大値に達すると予測された。また観客は、熱ストレスの高まる約 30 km 以降においては、走者に対して左側の歩道の方が右側より熱中症リスクを低減できる可能性が示された。

最後に、第 7 章では、本研究の総括および今後の展望について記述した。

## 1.6 観測結果の位置づけ

各解析で使用する観測結果の位置づけを図 1-2 にフローチャート形式で示し、図の上部に Case 名の説明の略図を示す。

Case 名について、観測領域番号は、3 領域に割り当てられた番号を示し、Area\_2 であれば、「2」である。観測順番は、同じ領域における観測日の順番を意味し、3 日間の観測を実施した場合、1 回目は「1」である。同日観測順番は、同じ領域かつ同日に行った観測の順番を意味し、一日 6 回の観測の場合、a~f が割り当てられ、1 回目は「a」である。各 Case の詳細については、第 2 章で記載する。

本研究では、街区特性の異なる 3 領域において、合計 27 回の移動気象観測を実施し、解析に応じて観測結果を選定した。

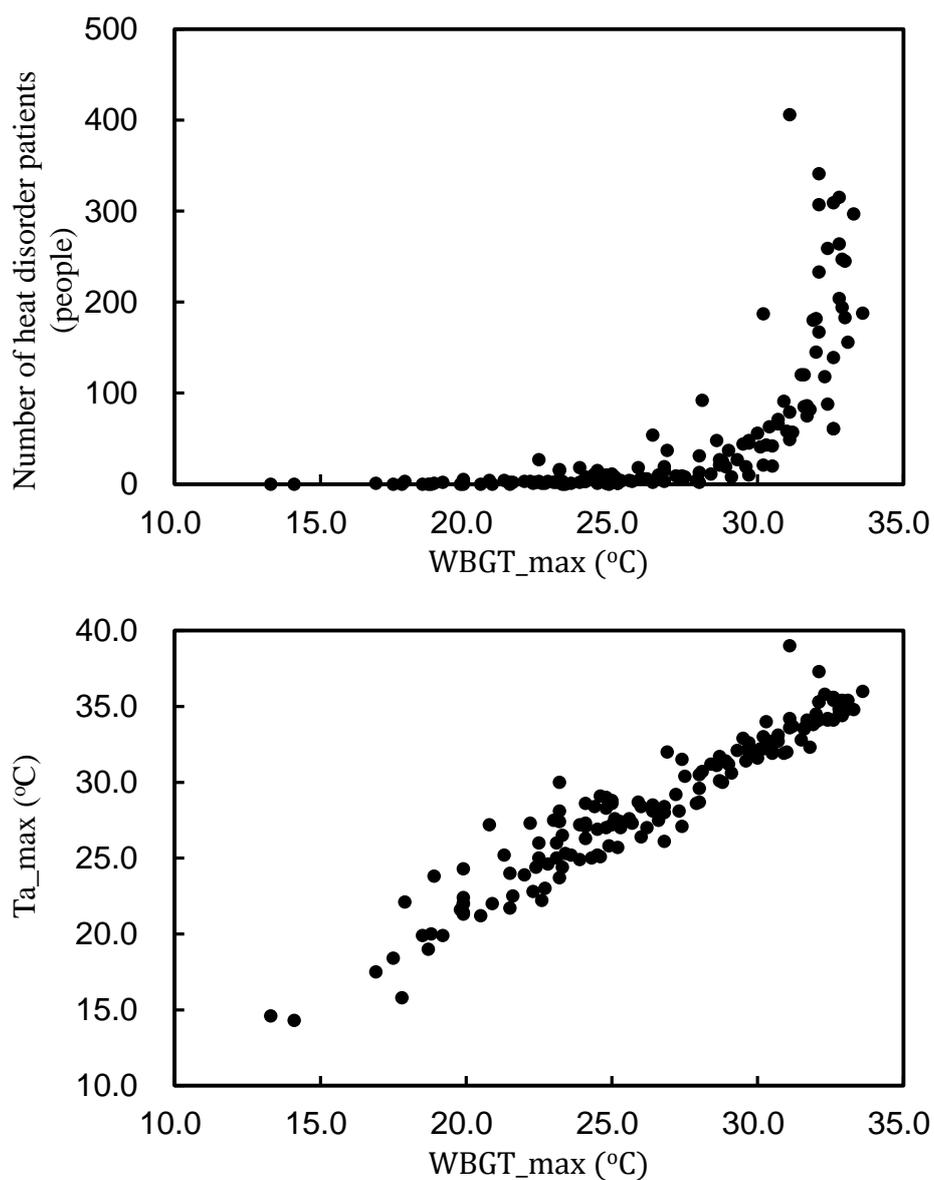


図 1-1 東京における 2018 年 5~9 月のデータに基づく日最高 WBGT (WBGT\_max) と熱中症による救急搬送人員数の関係 (上段) および日最高 WBGT と日最高気温 (Ta\_max) の関係 (下段). 救急搬送人員数は総務省消防庁 (東京), 気象データは東京管区気象台を参照した.

表 1-1 熱中症に対する指標の年表. 中井 (2011) を基に作成.

西暦	できごと	公表者・機関
1897	外気温34°Cで活動限界	森林太郎, 小池正直
1926	16歳未満の女子は気温35°C以上で就業を禁止	鉱夫労役扶助規則
1937	坑内で気温34°C以上, 比湿92%以上で熱中症の対象	松下正信
1941	坑内温度34°Cで炭鉱で熱中症発生	斎藤一
1949	坑内で湿球温度31.5°C, 80%乾球温度34.5°Cで熱中症の対象	近藤正二
1953	気温33°C, 湿度75%以上で熱中症「あかまり」の発症を確認	鈴木芳彦
1957	WBGTを提案, 26.5°C以上で訓練の制限	Yaglou, Minard
1962	ETが23.8~26.6°Cで高温の許容限界を定義	Yaglou
1965	湿球温度24.5°Cで練習を短縮	Murphy, Ashe
1975	長距離走用にWBGTを定義	ACSM
1981	テニス, 陸上などはWBGT31.2°Cで中止	McArdle et al.
1982	WBGTの国際基準化	ISO
1983	スポーツ活動時は湿球温度19.4°Cで水分塩分摂取を推奨	Fox
1983	WBGT28°C以上で長距離走が中止	Hughson et al.
1994	スポーツ活動中はWBGT28°C以上で「危険」と定義	日本体育協会
1996	長距離走では気温と湿度の関係で危険度を定義	ACSM
2006	熱中症予防情報サイトの開設	環境省
2008	日常生活指針を公表	日本生気象学会
2013	熱中症予防情報の提供地点を約850か所に拡大	環境省
2019	熱中症予防情報の提供地点は約840か所(うち実測11か所)	環境省

ACSM: The American College of Sports Medicine

表 1-2 日常生活における指針（上段）および運動指針（下段）

温度基準 (WBGT)		注意すべき生活活動の目安	注意事項
危険 (31°C以上)		全ての生活活動でおこる危険性	高齢者においては安静状態でも発生する危険性が大きい
嚴重警戒 (28~31°C)			外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する
警戒 (25~28°C)		中等度以上の生活活動でおこる危険性	運動や激しい作業をする際は定期的に十分に休息を取り入れる
注意 (25°C未満)		強い生活活動でおこる危険性	一般に危険性は少ないが激しい運動や重労働時には発生する危険性がある

気温 (参考)	暑さ指数 (WBGT)	熱中症予防運動指針	
35°C以上	31°C以上	運動は原則中止	WBGT31°C以上では、特別の場合以外は運動を中止する。特に子供の場合は注意すべき
31~35°C	28~31°C	嚴重警戒 (激しい運動は中止)	WBGT28°C以上では、熱中症の危険性が高いので、激しい運動や持久走など体温が上昇しやすい運動は避ける。運動する場合には頻りに休息をとり水分・塩分の補給を行う。体力の低い人、暑さになれていない人は運動中止。
28~31°C	25~28°C	警戒 (積極的に休息)	WBGT25°C以上では、熱中症の危険が増すので、積極的に休息をとり適宜、水分・塩分を補給する。激しい運動では、30分おきくらいに休憩をとる。
24~28°C	21~25°C	注意 (積極的に水分補給)	WBGT21°C以上では、熱中症による死亡事故が発生する可能性がある。熱中症の兆候に注意するとともに、運動の合間に積極的に水分・塩分の補給は必要である。
24°C未満	21°C未満	ほぼ安全 (適宜水分補給)	WBGT21°C未満では、通常は熱中症の危険は小さいが、適宜水分・塩分の補給は必要である。市民マラソンなどではこの条件でも熱中症が発生するので注意

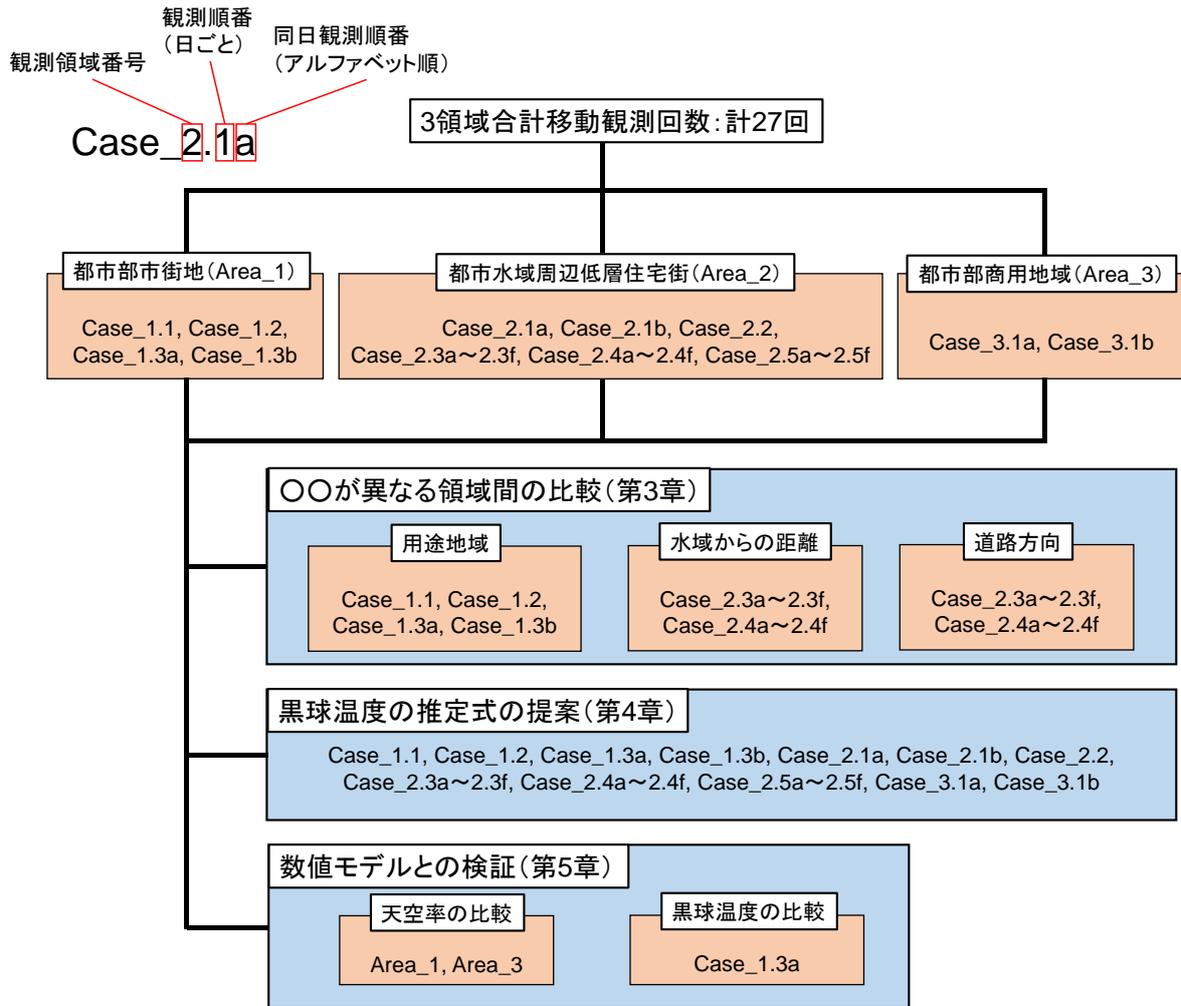


図 1-2 解析フローチャート

## 第2章 都市街区の微気象観測システムの構築

本章では、観測概要および解析データの取り扱いについて説明する。各観測では、使用した機器が異なるため、観測機器の器差・誤差検定や黒球温度を統一温度に変換したことを明示する。また、第3章で示す空間分布図の作成方法についても説明する。

### 2.1 観測領域

本研究では、熱ストレスの悪化が想定されるものの、観測例が少ない都市街区を対象とした。街区の定義は、住居に関する法律に基づき、それぞれの市町村区や不動産で設けられている。そのうち、よく扱われる5点の定義について挙げる。1) 建物が一筆単位で構成され、それらが集合した区域、2) 共通の空間特性を帯びる一団の区域、3) 道路や鉄道などで区画された地域、4) 河川や水路などで区画された地域、5) 住所表示で〇〇市 A 丁目 B 番地 C 号のうちの B に相当する区域、が街区の定義として挙げられる。本研究では、1) ~3) に相当する地域として、東京都大田区の市街地（都心部市街地）を、1) ~3)、5) に相当する地域として、千葉県習志野市の谷津干潟北側低層住宅街（都市水域近隣低層住宅街）を、2) ~4) に相当する地域として、東京都千代田区の商用地域（都心部商用地域）を選定した。以下に、それぞれの領域の詳細を示す。

#### 2.1.1 都心部市街地：Area\_1

都心部に位置する一般的な市街地として、図 2-1 に示す東京都大田区の洗足池周辺を対象とした（以降、Area\_1）。観測対象領域の面積は約 0.96 km<sup>2</sup> であり（約 0.8 km × 約 1.2 km）、南西から北東にかけて延びる全長約 3 km において移動気象観測を行った（図 2-1 実線）。用途地域に着目すると、幹線道路である「街道」と商店街や戸建て住宅が並ぶ「住宅街」に大別することができ（図 2-1 赤線および緑線）、「街道」の方が平均的に高い建物が建ち並んでいる。ルート内は全てアスファルトで舗装されており、地表面の物性は概ね一様と仮定して問題はない。領域内における標高および建物の高さの高低差はそれぞれ約 30 m・約 50 m であり（図 2-2, 図 2-3(a)）、風速や気温は、それらの影響を受けた偏差が確認されている（河本ら, 2018）。

#### 2.1.2 都市水域周辺低層住宅街：Area\_2

Area\_1 では起伏が大きく高層建造物が立ち並ぶ領域であったが、それと対症的な領域として、図 2-4 に示す千葉県習志野市の谷津干潟北側の低層住宅街を対象とした（以降、Area\_2）。図 2-4 の実線で示した全長約 2.5 km のルートにて移動気象観測を実施した。定点気象観測は、図 2-4 の赤点で示す地点で実施し、陸上は Sta.1-Sta.6, Sta.9、干潟内は Sta.7 および Sta.8 である。移動気象観測の対象領域の面積は 0.12 km<sup>2</sup>（約 0.4 km × 約 0.3 km）であり、Area\_1 同様に地表面はアスファルトで舗装されているが、干潟に近い南側では植生が多く存在する。領域内における標高の変動は小さく、最大建物高さは Area\_1 より低く約 30

m であり、平均的な建物高さのピークも小さい傾向にある (図 2-3 (b)). 建築基準法第 48 条および都市計画法第 9 条に従うと、一部マンション (20~30 m) を除き、一般的に低層住宅街に分類される地域である。ルート内には 28 か所の交差点 (および T 字路) が存在する。これらの交差点を除き、道路方向に着目すると、概ね「東西道路」と「南北道路」に大別できる (図 2-5)。道路幅員は約 55% が 5 m 以下 (変動: 4.3 m~9.5 m) であり、全体的に道路の中央線がない狭い道路である。また、谷津干潟を水蒸気の流出源と仮定し、南風時に沿岸から 200 m を境に「北側」と「南側」に分類することで (図 2-5)、干潟からどの範囲まで水蒸気が流入しているかを評価することができる。

### 2.1.3 都心部商用地域: Area\_3

Area\_1, Area\_2 とは異なり、商業・工業・住宅・高層ビル群などの建物用途が多様に存在する領域として、図 2-6 に示す東京都千代田区を中心とした東西に約 9 km、南北に約 7 km にわたって延びる 2020 年東京オリンピックマラソンコース (東京開催時) を対象とした (以降, Area\_3)。図 2-6 の赤線で示した全長約 21 km のルートにて移動気象観測を、黄色点で示した日比谷公園内で定点気象観測を実施した。解析対象とした 3 領域の中で、最大建物高さや平均的な建物高さのピークは最も高く、約 330 m および約 10 m であり、都市化が顕著な領域である (図 2-3 (c))。特徴的な地点として皇居周辺 (図 2-6 黒丸) は道路幅員が広く、高い建物や樹木が存在しないため、日射による熱環境場の悪化が懸念される領域である。

## 2.2 観測概要・総観気象場

### 2.2.1 Area\_1

Area\_1 では、2016 年 3 月 29 日 11:22~12:27 (Case\_1.1)、30 日 11:35~12:29 (Case\_1.2) では、図 2-7 (a) に示す 1 台の台車に、8 月 25 日 12:12~12:57 (Case\_1.3a) および 14:07~14:52 (Case\_1.3b) では、図 2-7 (b) (c) に示す 2 台の台車にそれぞれ表 2-1 に対応する測器を取り付け、図 2-1 (実線) に示すルートを矢印の方向に平均  $1.1 \text{ m s}^{-1}$  (標準偏差:  $0.3 \text{ m s}^{-1}$ ) で移動気象観測を行った。

Case\_1.1, Case\_1.2 に用いた黒球温度計は、一般的に使用されるベルノン式 ( $\phi 150 \text{ mm}$ ) を採用し、内部には  $0.1 \text{ mm}$  の E-Type の熱電対を挿入した。Case\_2.3a, Case\_2.3b で用いた黒球温度計は、応答性を考慮し、黒色つや消し塗料を塗布した  $\phi 40 \text{ mm}$  のピンポン玉 (ポリエスチレン) の中に  $\phi 0.05 \text{ mm}$  の素線を E-Type の熱電対に溶接した機器を挿入した (以降,  $\phi 40 \text{ mm}$  黒球温度計)。応答時間は無風条件下で約 40 秒であり、ベルノン式黒球温度計の約 100 秒 (仲吉, 2013) に対して向上した。

Case\_1.1~Case\_1.3b で用いたおんどとりは、内径  $80 \text{ mm}$  の塩ビパイプに断熱アルミシートを巻きつけ、約  $3.5 \text{ m s}^{-1}$  で強制通風させた全長約  $30 \text{ cm}$  の自作通風筒 (以降, 通風筒 A) の中に設置した。熱電対は先端に  $0.05 \text{ mm}$  の素線を溶接した機器を使用し、応答時間は無風条件下で約 2 s である。

Case\_1.1～Case\_1.3b の観測時間内の東京管区気象台（以降、気象台（東京））で観測された気象状況を図 2-8 に示す。各日の風系場は、いずれも南寄りで風速は約  $4 \text{ m s}^{-1}$  であった（図 2-8(a)）。Case\_1.1, Case\_1.2 の日中の気温は、 $16^{\circ}\text{C}$  前後と平年並みであったが、Case\_1.1 は晴天日、Case\_1.2 は曇天日であった（図 2-8(b)）。Case\_1.3a, Case\_1.3b の日中の気温は、 $30^{\circ}\text{C}$  以上になる真夏日であったものの、時間とともに雲量が増え、Case\_1.3a では概ね晴天であったが、Case\_1.3b では曇天であった（図 2-8(b)）。

## 2.2.2 Area\_2

Area\_2 では、2017 年 8 月 3 日 11:20～14:40（移動：12:16～12:42（Case\_2.1a）、13:38～14:02（Case\_2.1b））、23 日 12:20～14:50（12:35～12:59（Case\_2.2））に移動および定点気象観測を実施した。移動気象観測は、図 2-9 (a) に示す 1 台の台車に表 2-2 に対応する測器を取り付け、図 2-10 (a) に示すルートで矢印の方向に平均  $1.5 \text{ m s}^{-1}$ （標準偏差： $0.1 \text{ m s}^{-1}$ ）で行った。定点気象観測は、陸上と干潟内で行い、陸上は Sta.1～Sta.6（図 2-4 参照）において図 2-9 (b) のように設置し、干潟内は Sta.7,8（図 2-4 参照）において図 2-9 (c) のように設置した。取り付けた測器は、表 2-3 に示すとおりである。

移動気象観測における黒球温度計は、 $\phi 40 \text{ mm}$  の他に、Nakayoshi *et al.* (2015) が開発し河本ら (2018) によって改変された  $\phi 4 \text{ mm}$  のステンレス球の中に  $\phi 0.2 \text{ mm}$  の E-Type の熱電対を挿入した機器も使用し（以降、 $\phi 4 \text{ mm}$  黒球温度計）、主たるデータはこちらを使用した。 $\phi 4 \text{ mm}$  黒球温度計の応答時間は、風速  $2.0 \text{ m s}^{-1}$  下で約 8 秒であり、 $\phi 40 \text{ mm}$  黒球温度計より応答性が向上した。

翌年にも同領域において、移動および定点気象観測を実施した。観測日時は、2018 年 7 月 11 日 12:45～14:40（移動：12:45～14:39（Case\_2.3a～Case\_2.3f））、24 日 12:50～16:30（13:40～16:07（Case\_2.4a～Case\_2.4f））、26 日 12:30～14:50（12:03～14:25（Case\_2.5a～Case\_2.5f））である。移動気象観測では、気象場の時間変化を最小限に抑えるために、図 2-11 に示す台車に表 2-4 に対応する測器を取り付け、図 2-10(b) のようにルートを 4 班に分かれて、1 日あたり 6 回の観測を各回同時に行った。観測を開始した方向は、図 2-10(b) の矢印の示すとおりで、全日程の台車の平均速度は  $0.6 \text{ m s}^{-1}$ （標準偏差： $0.1 \text{ m s}^{-1}$ ）であり、1 回あたり約 15 分かけて観測した。定点気象観測は、干潟内では Case\_2.1a～Case\_2.2 と同様に設置し、陸上では Sta.9（図 2-4 参照）において、図 2-12(a) の台車に表 2-5 に示す測器を取り付け、図 2-12(b) のように設置した。

熱電対と温湿度センサは、内径  $56 \text{ mm}$  の塩ビパイプにステンレスシートを巻きつけ、日射の影響を極力低減させるため筒部を二重構造とし、 $2.0\sim 3.0 \text{ m s}^{-1}$  で強制通風させた全長  $20 \text{ cm}$  の自作通風筒（以降、通風筒 B）の中に設置した。

天空率を把握するために、本観測前である 2018 年 6 月 19 日に Case\_1.3a, Case\_1.3b と同様のカメラを用いて図 2-13 のように天空写真の観測を行った。

定点気象観測で観測された気象状況を図 2-14 に示す。ここで、Case\_2.1a～Case\_2.2 の気

温は Sta.4, その他は Sta.7, Sta.8 の値を, Case\_2.3a~Case\_2.5f ではすべて Sta.9 の値を用いた. 各日の風系場に関して, Case\_2.3a-Case\_2.4f では, 南寄りで風速は  $1 \text{ m s}^{-1}$  前後と弱風であった. その他の観測日では, 概ね東から北寄りであり, Case\_2.3a-Case\_2.4f よりも風速が強く,  $2\sim 3 \text{ m s}^{-1}$  であった (図 2-14(a)). 図 2-14(b) より, Case\_2.1a, Case\_2.1b の日中の気温は夏日程度であり, 全天日射量からも曇りがちであったことがわかる. Case\_2.2 では, 日中の日射量が  $800 \text{ W m}^{-2}$  以上に達し, 気温も猛暑日程度まで上昇し, 解析対象日の中では最も熱環境場の悪化が見込まれる日であった. Case\_2.3a~Case\_2.5f では, 全天日射量の変動から, 各日とも雲の変化が大きいことがわかるが, 概ね晴天日であり, 気温は  $30^\circ\text{C}$  以上の真夏日相当であった. Case\_2.4a~Case\_2.4f に関しては, 気温が Case\_2.2 と同等に高い日であった.

### 2.2.3 Area\_3

Area\_3 では, 2018 年 8 月 30 日 8:10~14:20 (移動: 8:00~9:37 (Case\_3.1a), 13:00~14:15 (Case\_3.1b)) に移動および定点気象観測を実施した. 移動気象観測ルートは全長約 21 km あるため, 図 2-15 のようにルートを 6 班に分かれて, 図 2-16 に示す台車に表 2-6 に対応する測器を取り付けた. 移動気象観測は, 図 2-15 の矢印の方向に平均  $1.2 \text{ m s}^{-1}$  (標準偏差:  $0.4 \text{ m s}^{-1}$ ) の速度で走行し, 1 回あたり約 1 時間かけて往復観測した. 定点気象観測は, 図 2-6 (黄色点) に示す地点において, 表 2-7 に示す測器を図 2-17 のように設置した.

移動気象観測で使用した熱電対と温湿度センサは, 塩ビパイプにアルミシートを巻いて自作した強制通風筒内で観測した. 黒球温度計は Nakayoshi *et al.* (2015) によって作製された  $\phi 12 \text{ mm}$  の銅製球の黒球温度計を採用した (以降,  $\phi 12 \text{ mm}$  黒球温度計). 応答時間は風速  $1.0 \text{ m s}^{-1}$  下で約 10 秒である. 定点気象観測では, ベルノン式黒球温度計を使用し, 温湿度センサは検定を受けた Prede 社製の強制通風筒内に設置した.

定点気象観測で観測された気象状況を図 2-18 に示す. 風系場は概ね北西寄りで風速は  $1 \text{ m s}^{-1}$  以下と弱風であった (図 2-18(a)). 図 2-18(b) より, 移動気象観測の時間帯は雲が多かったが, 気温は早朝の 8 時台から約  $28^\circ\text{C}$  と夏日を超え, 南中時には約  $34^\circ\text{C}$  の猛暑日に相当する温度まで上昇した. そのため, 熱環境場の悪化が見込まれる日であった.

### 2.2.4 観測概要のまとめ

2.2.1~2.2.3 項で説明してきた観測領域や日時, 本研究で重要となる気象要素 (気温, 相対湿度, 黒球温度) を観測する機器の項目数は多く, 複雑であるため, 表 2-8 に観測概要の要点を一覧にした.

## 2.3 使用機器の検定

移動気象観測で用いた機器を中心に屋内または屋外にて各測器の器差検定を実施した.

データは 0.1 s または 1 s でサンプリングとし、瞬間的な変動を除去するため 10 s 平均値を用いた。器差は二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE) によって評価した。検定時は測器を並べて設置し、図中の横軸が数字の場合、その順番を表し、連番 (e.g. 1,2) は隣接することを意味する。

### 2.3.1 熱電対 (E 型)

屋内において、6~8 本の熱電対を用いて、器差検定を行った結果を図 2-19 に示す。Case\_2.1a~Case\_2.2 (図 2-19(a)) および Case\_2.3a~Case\_2.5f (図 2-19(b)) の RMSE の平均値は、約 0.1°C (最大: 約 0.2°C), 約 0.3°C (約 0.6°C) であった。また、屋外における強制通風筒挿入時 ( $T_{a\_ref}$ ) と曝露時 ( $T_{a\_out}$ ) の関係について図 2-20 に示す。決定係数は、曝露した熱電対に日射や風速によるバラつきがあるため、低く見積もられたが、RMSE は 0.4°C であった。また、30°C 以上の高温環境下では、通風筒内の気温は、曝露時より 1°C 程度温度の上昇を抑制することができる。

### 2.3.2 温湿度センサ (SHT-35, SHT-75)

屋内において、5~7 本の温湿度センサを用いて、器差検定を行った。Case\_2.3a~Case\_2.5f に使用した SHT-35 は、屋内での器差検定時に系統的な器差が発生していたため (図 2-21(a)), 各機器に対してリファレンスである SHT75 を基に補正を行った。補正後の SHT-35 および SHT-75 (ref) の相対湿度を図 2-21 (b) に示す。図 2-21 (b) のように SHT-75 を基に補正することによってバイアスを除去した。また、屋内で 5 本の SHT-35 (補正済み) と 7 本の SHT-75 を用いて器差検定を行った結果を図 2-22 に示す。SHT-75 に関しては実観測で気温も扱うため、気温の検定も行った。SHT-35 (図 2-22(a)) および SHT-75 の相対湿度と気温 (図 2-22(b)) の RMSE の平均値は、0.35% (最大: 約 0.6%), 0.23% (約 0.5%), 0.3°C (約 0.5°C) であった。

### 2.3.3 温湿度大気圧センサ (TR-73U)

屋内において、8 つの温湿度大気圧センサを用いて、器差検定を行った結果を図 2-23 に示す。大気圧の RMSE の平均値は、約 0.3 hPa (最大: 約 0.8 hPa) であった。相対湿度は、Case\_1.1~Case\_1.3b で各回 1 台のみの使用であり、気温は、解析には使用していないため、それぞれ検定は行っていない。

### 2.3.4 黒球温度計 ( $\phi 4$ mm, $\phi 40$ mm)

屋内において、7 本の  $\phi 4$  mm と 10 本の  $\phi 40$  mm の黒球温度計を用いて、器差検定を行った結果を図 2-24 に示す。 $\phi 4$  mm (図 2-24(a)) および  $\phi 40$  mm (図 2-24(b)) の黒球温度の RMSE の平均値は、約 0.2°C (約 0.5°C), 約 0.1°C (最大: 約 0.2°C) であった。また、屋外においても器差検定を行い、一定の風向で抽出した結果を図 2-25 に示す。 $\phi 4$  mm (図 2-

25(a)) と  $\phi 40$  mm (図 2-25(b)) の黒球温度の RMSE の平均値は、約  $0.4^{\circ}\text{C}$  (約  $0.6^{\circ}\text{C}$ )、約  $0.8^{\circ}\text{C}$  (最大：約  $1.6^{\circ}\text{C}$ ) であった。

### 2.3.5 自作通風筒

通風筒とは、温度や湿度センサの測定感部を風雨、日射、放射から保護するために用いられる機器であり、強制通風により排熱することで、より正確な測定値を得ることができる。気象庁アメダス観測点の気温・湿度の観測に用いられる一般的な通風筒は、形状が大きく、移動観測には不向きであるため、本研究では自作した小型の通風筒を使用している。そのため、本項では、自作通風筒の精度を一般的な通風筒の結果と比較することで検証した。

検定済みの一般的な通風筒として、Prede 社の縦型強制通風筒 (以降、 $Ta_{ref}$ ) を使用し、屋外にて自作通風筒の検定を行った (2018 年 6 月 1 日、8 月 17 日)。実観測では、通風筒内で気温に加えて相対湿度も観測したが、検定では、より気象変化に敏感な気温を用いて精度検証を行った。本観測結果とアメダス等のルーチン観測データを比較する際には、本検定結果を留意した。

#### (a) 通風筒 A (2018 年 6 月 1 日)

Case\_1.1~Case\_1.3b で用いた通風筒 ( $Ta_{made\_A}$ ) は、図 2-26(a) に示す長さ 30 cm の中型の通風筒である。 $Ta_{ref}$  と  $Ta_{made}$  との関係を図 2-27 に示す。検定時の平均気温は約  $24^{\circ}\text{C}$  であり、 $Ta_{ref}$  との RMSE と決定係数は、約  $0.3^{\circ}\text{C}$ 、0.89 であった。これより、追従性に関しては問題ないが、夏場の高温環境下では器差が大きくなることが懸念される。

#### (b) 通風筒 B (2018 年 8 月 17 日)

Case\_2.3a~Case\_2.5f で用いた通風筒 ( $Ta_{made\_B}$ ) は、図 2-26(b) に示すように通風筒 A より長さが 10 cm 短い、小型の通風筒である。検定時の平均気温は約  $30^{\circ}\text{C}$  であり、 $Ta_{ref}$  との RMSE と決定係数は、約  $0.4^{\circ}\text{C}$ 、0.87 であった (図 2-27)。

## 2.4 湿球温度の算出方法

### 2.4.1 乾湿計公式

湿球温度は式 (1-2) で示した通り、WBGT を計算する上では、重要な物理量である。しかしながら、湿球温度は直接観測することが難しく、応答時間が遅いことから移動観測では不向きである。そこで本研究では、相対湿度 ( $RH$ ) [%]・気温・大気圧 ( $p$ ) [hPa] から逆算する手法を用いて湿球温度を計算した。この手法は、市販の WBGT センサや WBGT を用いた評価ではしばしば採用されている。

湿球温度を逆算する上で、まず、エネルギー保存則に基づいた物体の熱収支について考える (式 (2-1))。

$$c \frac{m}{A} \frac{dT_b}{dt} = R - H - LE \quad (2-1)$$

ここで、 $c$ 、 $m$ 、 $A$ は、それぞれ物体の比熱 [ $\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$ ]、質量 [ $\text{kg}$ ]、表面積 [ $\text{m}^2$ ] であり、 $T_b$ は物体の温度である。 $R$ は放射交換、 $H$ は顕熱フラックス、 $LE$ は潜熱フラックスである。

本節では物体を湿球に読み替えることで計算過程を論ずる。

式(2-1)の右辺の各変数について整理する。

### 1) 放射交換 $R$

放射交換は、物体へ入射する長短波放射量と物体から射出または反射する長短波放射量の放射収支 (i.e. 正味放射量) で決定される。

$$R = (1 - \alpha)S + \varepsilon L - \varepsilon \sigma T_w^4 \quad (2-2)$$

ここで、 $\alpha$ は湿球のアルベド、 $\varepsilon$ は湿球の射出率である。 $S$ と $L$ はそれぞれ湿球表面に入射する短波・長波放射量 [ $\text{W m}^{-2}$ ] である。右辺の第1, 2項の合計値は、長短波放射量の入力成分の合算値 ( $R_{inp}$ ) [ $\text{W m}^{-2}$ ] を表し、これは、直達日射量 ( $S_{dir}$ ) [ $\text{W m}^{-2}$ ] と散乱日射量 ( $S_{dif}$ ) [ $\text{W m}^{-2}$ ] が既知もしくは推定可能であれば、以下の式で表すことができる

$$R_{inp} = 0.25S_{dir} + 0.5(S_{dif} - S_{up}) + 0.5(L_{down} - L_{up}) \quad (2-3)$$

ここで扱われる直達日射量は、太陽高度を考慮した法線面直達日射量でなければならない。

### 2) 顕熱フラックス $H$

顕熱フラックスは、物体とその周辺との温度差によって発生する熱量である。なお、物体から周辺に対して熱を輸送する場合を正とする。

$$H = h(T_w - T_a) \quad (2-4)$$

$$h = 6.22 \frac{U^{0.6}}{D^{0.4}} \quad (2-5)$$

ここで、 $h$ は対流熱伝導率 [ $\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2}$ ] であり、物体から周辺大気への熱の逃げやすさを表す。アメリカ暖房冷凍空調学会 (ASHRAE) によれば、 $h$ は風速と球の直径の関係から導かれ、これは直径が小さいほど、 $h$ が上昇することを意味する (式(2-5))。

### 3) 潜熱フラックス $lE$

潜熱フラックスは、物体表面の水分が蒸発するときに使われる気化熱のことである。物体表面が蒸発するときを正とし、式(2-6)のように計算される。

$$lE = h_{lE}(e_{w\_SAT} - e_a) \quad (2-6)$$

$$h_{lE} = 2.2h \quad (2-7)$$

ここで、 $h_{lE}$ は水蒸気伝導率 [ $W m^{-2} hPa$ ] であり、ルイスの関係から導かれ (式(2-7))、水表面から周辺大気への熱の逃げやすさを表す。 $e_{w\_SAT}$ と $e_a$ は湿球表面の飽和水蒸気圧 [ $hPa$ ] および気温の水蒸気圧 [ $hPa$ ] であり、以下の式 (Tetens 1930) から求められる (式(2-8)、式(2-9))。

$$e = e_{SAT} \times \frac{RH}{100} \quad (2-8)$$

$$e_{SAT} = 6.1078 \times 10^{\frac{aT}{b+T}} \quad (2-9)$$

ここで、 $e$ は気温または湿球温度に対する水蒸気圧 [ $hPa$ ] であり、各温度 ( $T$ ) [ $^{\circ}C$ ] に応じた飽和水蒸気圧 ( $e_{SAT}$ ) [ $hPa$ ] から求められる。 $a$ と $b$ は定数であり、水面上 (湿球部) では  $a = 7.5$ ,  $b = 237.3$ である。

式(2-2)、式(2-4)、式(2-6)を、式(2-1)の各項に代入することで、湿球表面の熱収支を考えることができる (式(2-10))。

$$c \frac{m}{A} \frac{dT_w}{dt} = (1 - \alpha)S + \varepsilon L - \varepsilon \sigma T_w^4 - h(T_w - T_a) - h_{lE}(e_{w\_SAT} - e_a) \quad (2-10)$$

式(2-10)における各項の意味について以下に示す。

$c \frac{m}{A} \frac{dT_w}{dt}$  : 湿球への蓄熱項

$(1 - \alpha)S$  : 湿球への入力短波放射量

$\varepsilon L$  : 湿球への入力長波放射量

$\varepsilon \sigma T_w^4$  : 湿球からの射出長波放射量

$h(T_w - T_a)$  : 顕熱フラックス

$h_{LE}(e_{w\_SAT} - e_a)$  : 潜熱フラックス

式(2-10)の蓄熱項は、解析結果において、平均化時間が測器(湿度センサや熱電対)の応答時間より概ね大きいことを踏まえると、省略することができる。したがって、完全な熱収支から湿球温度を求める場合は、式(2-10)の左辺を0として、湿球温度を収束させればよい。ただし、気温や湿度は通風筒内で観測しているため、放射の影響を受けない等温閉塞環境下を仮定することができ、式(2-10)は潜熱フラックスと顕熱フラックスのみの釣り合いとなり、次式のように簡略化することができる。

$$h(T_a - T_w) = h_{LE}(e_{w\_SAT} - e_a) \quad (2-11)$$

さらに、式(2-11)において、等圧断熱過程を考えることでSprung(1988)の乾湿計公式(式(2-12))が導かれる。

$$e_{w\_SAT} - e_a = B(T_a - T_w) \quad (2-12)$$

ここで、 $B$ は乾湿計定数 [ $\text{hPa K}^{-1}$ ] である。乾湿計定数については以下の式で算出した。

$$B \equiv \left(\frac{\gamma}{\beta}\right) \left(\frac{p}{0.622}\right) \quad (2-13)$$

ここで、 $\gamma$ は熱収支式に用いられる数値(20°Cで $0.41 \times 10^3$  [ $\text{K}^{-1}$ ])で算出式は $\gamma = \frac{c_p}{l}$ であり、 $c_p$ は定圧比熱(20°Cで $1.007 \times 10^3$  [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ])、 $l$ は水の気化の潜熱(20°Cで $2.453 \times 10^6$  [ $\text{J kg}^{-1}$ ])である。 $\beta$ は蒸発効率であり、湿球は常時湿っていることから、 $\beta = 1$ とした。

このように、気温、相対湿度、大気圧から簡易的に湿球温度を算出した。

比湿に関しては、以下の式を用いて算出した。

$$q = \frac{(0.622 \times e_a)}{(p - 0.378 \times e_a)} \times 1000 \quad (2-14)$$

#### 2.4.2 乾湿計公式の精度

放射項の有無による湿球温度の差異について、乾湿計公式(式(2-12))と完全な熱収支式(式(2-10))から計算された湿球温度を比較した。熱収支式において、湿球の射出率とアルベドは、仲吉ら(2018)に倣い、それぞれ0.95と0.06とした。Case\_1.3aの観測値を用いて、熱収支式(Tw\_heat)と乾湿計公式(Tw\_Sprung)から計算された湿球温度の空間変動と相関を図2-28に示す。Tw\_heatはTw\_Sprungを過大評価しており、平均1.5°C高く、WBGTに換

算すると約 1°C 高い傾向にあった。また、高温時に誤差が大きく、これは、風速が低下するほど放射による湿球への加熱が大きくなるためである（図 2-29）。絶対温度の正確性に関しては、仲吉ら（2018）の報告にある通り、湿球への給水による冷却効果が熱収支式には含まれていないため、事実上、乾湿計公式の値が真値に近くなる。したがって、本研究で扱う湿球温度は、乾湿計公式に基づくこととする。

乾湿計公式を用いるうえで、相対湿度、気温、大気圧の観測機器による測定誤差について評価する。相対湿度は TR-73U・SHT35・SHT-75 で、気温は SHT-75 で、大気圧は CYG-61302 で観測しているが、いずれも市販されている気象測器のため、公称精度が明記されている。それぞれの公称精度を表 2-9 に示す。表の数値に従い、比湿・湿球温度・WBGT の精度を評価した。公称精度を踏まえて誤差の変動幅を計算した結果を表 2-10 に示す。ここで、気温に関しては熱電対（Thermocouple）を組み合わせた場合の誤差も表記した。絶対値の評価ではこれらの数値を留意した。

## 2.5 黒球温度の算出方法

### 2.5.1 ベルノン式黒球温度への変換

本研究では、黒球温度は自作した径の異なる黒球温度計を用いて観測しているため、アメダス等のルーチン観測値と比較する際、ベルノン式の黒球温度に変換する必要がある。その変換方法について、以下に既往研究とともに理論を示す。

Yuge（1960）は、室内において一定の熱量を与えて加熱した球に、一様な強制風で冷却する実験を行った。その結果、気温と黒球温度との温度差は直径の 0.43 乗に比例することを明らかにした（経験式）。この結果を基に、酒井ら（2009）はピンポン玉を用いて、屋外において検定を行った結果、同様の結果が得られることを確かめた。しかしながら、球の材質や球内を測定する測器が異なる場合、上記の関係が得られるとは限らない。

そこで、本研究でも既往研究と同様に、径の異なる黒球温度計とベルノン式黒球温度計を用いて検定を行い、変換式について検討した。検定は概ね晴れた日中に行い（約 300W m<sup>-2</sup> 以上）、解析では、一定の風向のデータを抽出し評価した。

φ40 mm ( $T_{g,40mm}$ )・φ4 mm ( $T_{g,4mm}$ )・φ12 mm ( $T_{g,12mm}$ ) およびベルノン式の黒球温度 ( $T_{g,v}$ ) と気温との差分値の関係を図 2-30 に示す。φ40 mm（図 2-30 (a)）と φ4 mm（図 2-30 (b)）は複数の自作黒球温度を平均した代表値を用いたため、φ12 mm（図 2-30 (c)）との検定よりバラつきが大きい傾向であった。いずれも経験式のように直径の 0.43 乗に比例しておらず、傾きは φ40 mm が 1.23（経験式：1.76）、φ4 mm が 1.57（4.75）、φ12 mm が 1.91（2.96）であった。上記の結果より、各径とベルノン式の黒球温度との間には以下の式（以降、ベルノン変換式）の関係が成り立ち、これらの式からベルノン式黒球温度へ変換した。

φ40 mm ;

$$T_{g,v} = 1.23(T_{g,40mm} - T_a) + 1.75 + T_a \quad (2-15)$$

φ4 mm ;

$$T_{g,v} = 1.57(T_{g,4mm} - T_a) + 5.72 + T_a \quad (2-16)$$

φ12 mm ;

$$T_{g,v} = 1.91(T_{g,12mm} - T_a) + 1.62 + T_a \quad (2-17)$$

ベルノン変換式(式(2-15)～式(2-17))では、風速項を導入していない。しかしながら、黒球温度は球表面の熱収支からその指示値が決定され、そこには風速が強く関係している。そこで、ベルノン変換式に風速を導入せずに式が成立する理由について以下に説明する。

近藤(近藤純正 HP)によると、黒球温度と気温の差  $\langle T_g - T_a \rangle$  ( $\Delta T$ ) を、球表面に入射する入力放射量  $\langle R_{input} = (S_{dir}/4) + (S_{dif} + S_{up} + L_{down} + L_{up})/2 \rangle$  と気温に対する黒体放射量との差分値  $\langle R_{input} - \sigma T_a^4 \rangle$  (有効入力放射量とよぶ) で除した値(放射に対する黒球温度の上昇率を表す)は、弱風環境下 ( $1.0 \text{ m s}^{-1}$  以下) になると、指数関数的に上昇し、径が小さいほど、その上昇率は大きくなることを示した(図 2-31(a))。逆に、風速が  $1 \text{ m s}^{-1}$  以上であれば、各径の温度上昇率の差は一定値になり、風速依存性は無視できるとしている。つまり、一定以上の風速が得られる場合は、黒球からの顕熱輸送量は強制対流による効果が支配的になり、実質的に、放射に対する各径の黒球温度上昇率の差は一定になると仮定できる。

本研究でも同様の検定を行った。その結果を図 2-31(b)に示す。風速  $0.9 \text{ m s}^{-1}$  未満のサンプルは確認できなかったが、上述したように、風速が  $1 \text{ m s}^{-1}$  以上で各径の温度上昇率の差は概ね一定となった。

本研究の移動観測における移動速度は、平均  $1.1 \text{ m s}^{-1}$  である(標準偏差:  $0.4 \text{ m s}^{-1}$ )。したがって、概ね強制風を受けていたと仮定でき、径の違いによる黒球温度の上昇率の差は無視できる。以上のことから、ベルノン変換式に風速項を導入せずに計算を行った。

上記を踏まえ、屋外の検定に基づき算出された黒球温度の推定誤差(推定値-実測値)と風速の関係を示した図 2-32(a)を見てみる。黒球温度の推定誤差は、風速が  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  以上で徐々に収束することが確認された。また、φ40 mm・φ4 mm・φ12 mm とベルノン式との推定誤差は  $\pm 1^\circ\text{C}$  程度であり(図 2-32(b))、RMSE では、それぞれ約  $1^\circ\text{C}$ 、約  $1.2^\circ\text{C}$ 、約  $0.7^\circ\text{C}$  であり、概ね  $1^\circ\text{C}$  程度の誤差で評価できることが示された。

## 2.5.2 熱収支式に基づいた黒球温度推定方法

黒球温度は、球表面の熱収支に関して、2.4 節で示した物体の熱収支式（式(2-1)）を基に計算することで求めることができる。式(2-2)、式(2-4)の湿球を黒球と読み替え、式(2-3)とともに式(2-1)に代入する。このとき黒球が環境場に十分に応答していることで蓄熱項は省略でき、また、黒球表面は乾燥していることから、潜熱フラックス項も省略できる。

$$0 = (1 - \alpha)S + \varepsilon L - \varepsilon\sigma T_g^4 - h(T_g - T_a) \quad (2-18)$$

ここで、物体温度 ( $T_b$ ) は黒球温度 ( $T_g$ ) [°C] と読み替えた。2.4.1 項で示したとおり、直達および散乱日射量が既知であれば、式(2-3)を式(2-18)に適用することで、以下の式(2-19)が得られる。

$$0 = 0.25S_{dir} + 0.5(S_{dif} + S_{up}) + 0.5(L_{down} + L_{up}) - \varepsilon\sigma T_g^4 - h(T_g - T_a) \quad (2-19)$$

## 2.5.3 MRT を用いた黒球温度の算出方法

1.3.2 項で示した通り、黒球温度と MRT は密接な関係にある。MRT から黒球温度を推定する方法は実験的にいくつか存在するが、本研究では、空気・調和衛生工学会で推奨される *Bedford and Warner* (1934) の算出式と ISO7726 (1998) に認定されている式から黒球温度を推定した。

### 1) *Bedford and Warner* (1934) の式

1.3.2 項で示した式(1-14)に基づいて式(2-20)のように求めることができる。

$$T_g = \frac{(MRT + 2.37\sqrt{v} \times T_a)}{(1 + 2.37\sqrt{v})} \quad (2-20)$$

### 2) ISO7726 (1998) の式

ISO7726 の認定式は、1.3.2 項で示した式(1-15)である。

$$MRT = \left[ (T_g + 273)^4 + \frac{1.10 \times 10^8 \times v^{0.6}}{\varepsilon \times D^{0.4}} (T_g - T_a) \right]^{0.25} - 273 \quad (1-15)$$

上記の式において、黒球温度を収束計算により求める。

## 2.6 気象観測データの取り扱い

### 2.6.1 品質管理

#### (a) エラー値

本研究では、気温や相対湿度は、複数の同一測器を用いて観測した場合があるため、代表値または代替値となる測器を Case ごとに選定した。各 Case における代表値と代替値に使用した測器を表 2-11 に示す。なお、Case\_2.1a~Case\_2.2 における陸上定点観測に関しては、Sta.3 の熱電対に欠損が見られたため、全地点で SHT-75 を用いて統一した。Case\_2.3a~Case\_2.5f における定点観測では、台車同様に表 2-11 のとおりである。

Case\_3.1a, Case\_3.1b の移動観測値では、欠損が多くみられ、データが不安定であったため、野呂ら (2015) によって提案された 4 分位範囲を用いた以下の式から有効なデータを判別し、解析を行った。

$$\text{下限値} = \text{第 1 四分位値} - 1.724 \times \text{四分位範囲} \quad (2-21)$$

$$\text{上限値} = \text{第 3 四分位値} - 1.724 \times \text{四分位範囲} \quad (2-22)$$

ここで、四分位範囲とは、全サンプルを昇順に並べ、上から 50% の位置を中央値と定め、25% を第 1 四分位値、75% を第 3 四分位値とした場合の第 1 四分位から第 3 四分位までの範囲を指す。式 (2-21)、式 (2-22) を用いて下限値と上限値を決定し、その範囲外をエラー値と見なし、解析データから除去した。

#### (b) 時間補正

Case\_3.1a では、観測時間内において気温の上昇および相対湿度の低下が顕著に見られたため、図 2-33 に示すように、定点観測値に対して最小二乗法を適用し、傾き (トレンド) を推定した。この傾きを用いて各 Group の気温と相対湿度のトレンドを除去した。

### 2.6.2 空間分布図の作成方法

#### (a) 緯度・経度の算出

移動気象観測では、緯度・経度も観測しているが、観測領域が都市部であるため、電波障害などの影響を強く受け、ほぼすべての観測において正確な位置情報が得られなかった。そのため、空間分布図のようなマップ化では緯度・経度を改めて算出した。

まず、移動気象観測ルート内において、方位が異なる地点を Control point として緯度・経度を Google satellite data から取得した (図 2-34)。その緯度・経度から、Inverse Solution (国土地理院; Bowring 1996) を用いて地点間の距離と方位を算出した。次に、地点間を 1 m・5 m・50 m・5 s のいずれかで補間できるようにそれに応じた分割数を計算した。最後に、地点間の方位、距離、分割数に応じて Direct Solution (Vincenty 1975) を用いて緯度・経度を算

出した（以降，プロット）．詳しい計算方法は付録に記載する．

#### (b) 平均化処理方法

第3章で示す空間分布図は，1つのプロットに対して移動速度（2.2節 参照）に応じた平均化を行った．たとえば，5 m 間隔のプロットに対して台車速度が  $0.8 \text{ m s}^{-1}$  の場合，1プロット当たりの平均化時間  $= 5 \text{ m} / 0.8 \text{ m s}^{-1} = 6.25 \text{ s}$  である．この際，1プロットあたりに平均化されるデータが，測器の応答時間によって絶対値に誤差が生じないように，台車が停止した時間のデータは除去した．

天空率の関わる解析では，天空写真の計測間隔である 5 s に対して，天空写真を観測した際の台車の速度で除することで距離を算出し，その距離を実際の観測時の台車の速度で除して平均化時間を求めた．

#### (c) 空間分布図中の数値

移動気象観測では，時間による気象場の変化が少なからず含まれている．その変化が線形の場合，それに応じて移動観測値を補正すればよい．しかしながら，気象場は非定常で，すべてが線形的に変化するわけではない．そこで本研究では，ある固定値に基づきその差で評価した．したがって，第3章で示す「熱環境場の空間分布」の数値は，各台車で観測された各地点の値からルート平均値（固定値）を差分した偏差で表した．また，黒球温度は偏差で評価する場合，ベルノン式の値である必要はないため，生データを使用した．

### 2.6.3 天空率の算出

魚眼レンズカメラは 5 秒ごとに自動撮影できるように設定し，撮影した写真は建物や樹木を塗りつぶし，二値化した上で解析を行った（以降，魚眼画像）．

#### (a) 一般的な計算方法：一般定義

一般的な天空率の定義（日本）は，魚眼画像において，画像全体面積に対する天空面積の比を指す．したがって，本研究では，等立体角射影方式の魚眼レンズから得られた画像を Adobe Photoshop を用いて，天空のピクセルをカウントすることで天空率を算出した．本研究ではこれを主の天空率とした．第3章・第4章では，この天空率を用いて解析を行った．

#### (b) SOLWEIG に採用されている計算方法：SOLWEIG 定義

Watson and Johnson (1987) によると，天空率とは，人が受ける放射環境を半球（天球）にたとえ，その放射環境全体に対する水平面（地表面）で受ける放射の割合とされる．この定義に基づく天空率を用いた研究は，すでに国外では行われている (Steyn 1980; Oke 1981; Johnson and Watson 1984; Holmer 1992)．また，UMEP で計算される天空率もこの定義に従っており，SOLWEIG では，この天空率から放射の計算が行われている．したがって，UMEP

や SOLWEIG と実測値を比較する解析では (第 5 章), 実測した魚眼画像に対して, *Johnson and Watson* (1984) の計算方法に基づいた Sky View Factor calculator (University of Gothenburg 提供) によって処理を施した天空率を使用した.

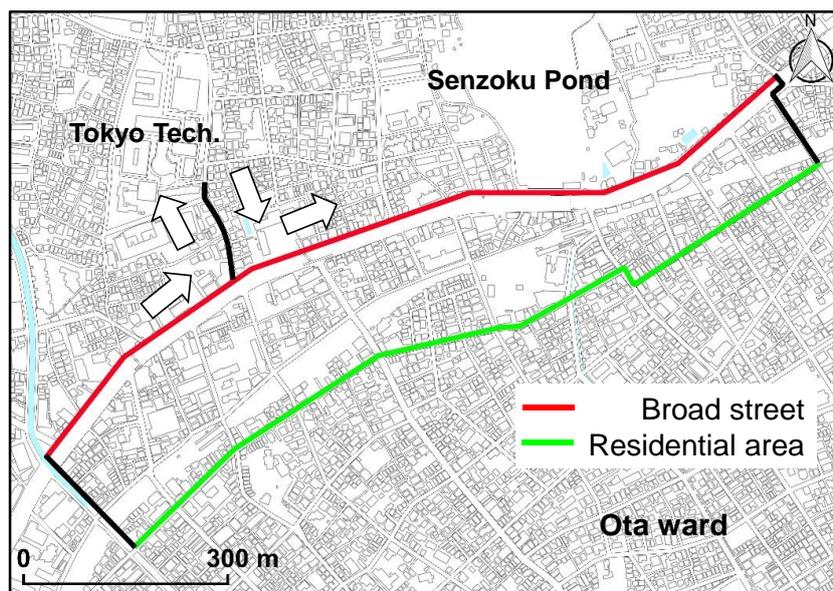


図 2-1 Area\_1 の移動気象観測ルート (実線). 矢印は移動方向を示す. 赤線・緑線はそれぞれ「街道」及び「住宅街」を示す.

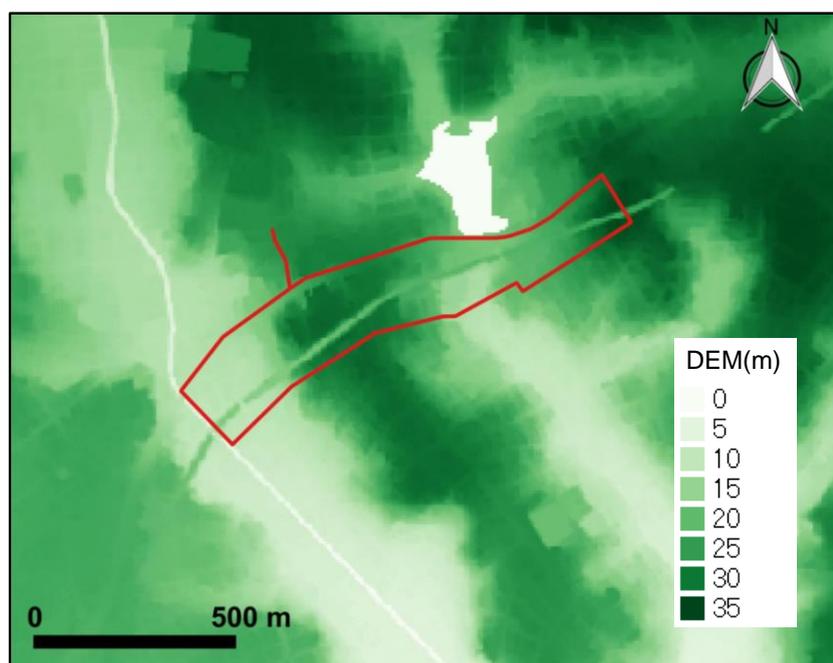


図 2-2 Area\_1 の標高分布 (Digital Elevation Model, DEM). 赤線は移動気象観測ルートを示す.

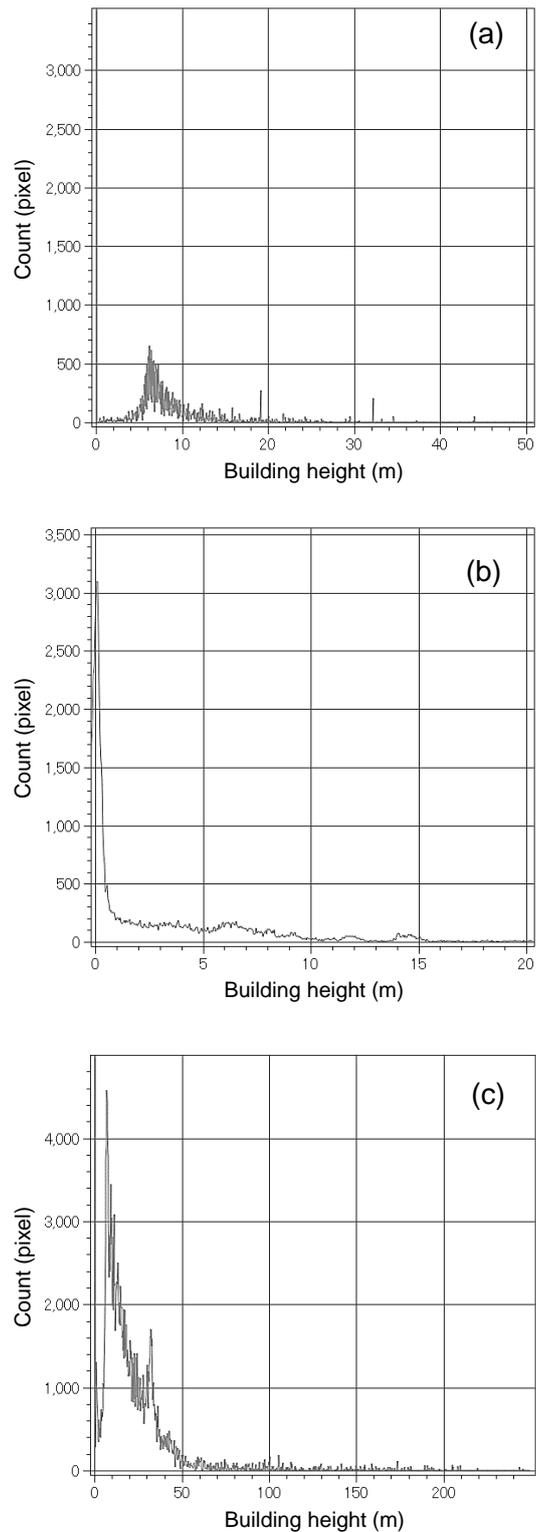


図 2-3 (a)Area\_1, (b)Area\_2, (c)Area\_3 の建物高さ分布. 水平解像度は 1 ピクセルあたり 1m であり, 縦軸は解析対象領域の合計ピクセル数 (南北×東西) を表す.

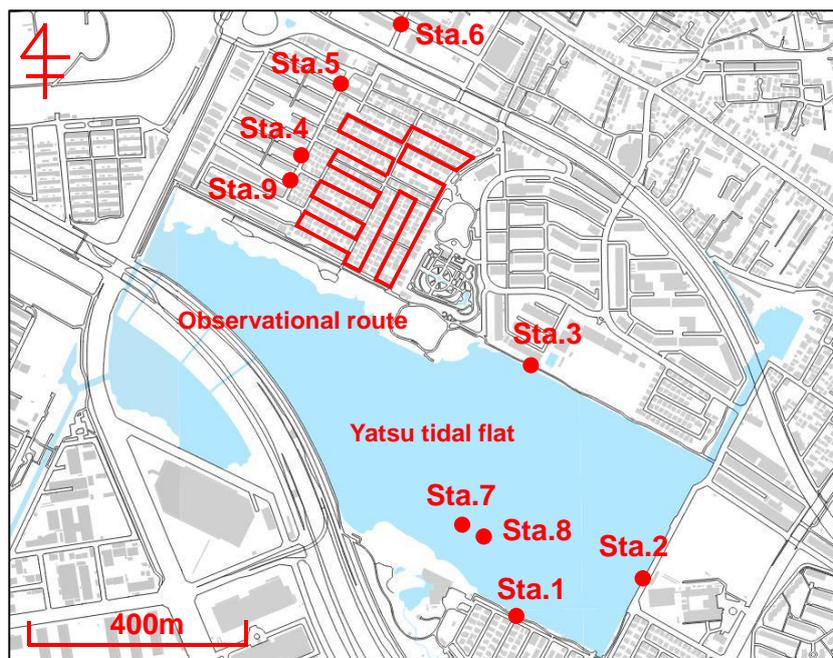


図 2-4 Area\_2 の気象観測領域. 赤線は移動気象観測ルート, 赤点は定点気象観測地点を示す.

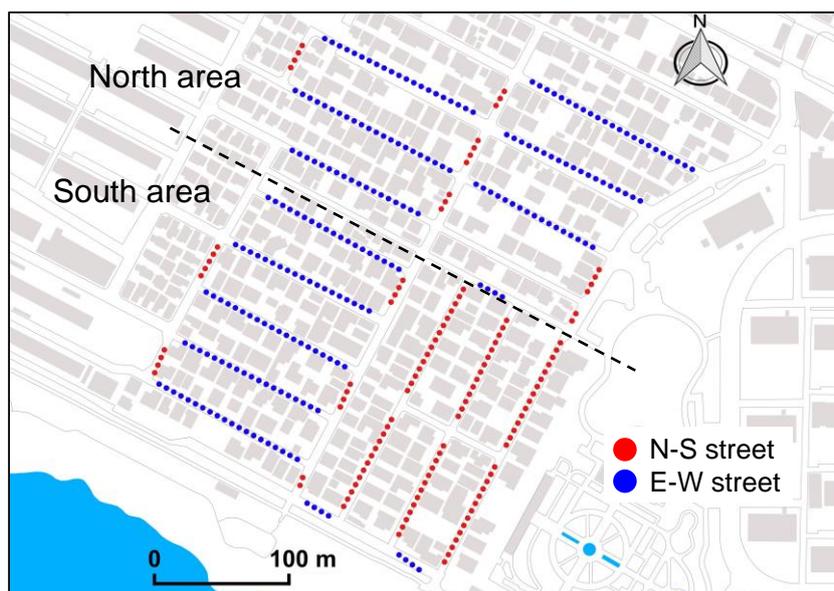


図 2-5 Area\_2 の領域分類. 赤点は南北方向道路, 青点は東西方向道路. 点線は谷津干潟から約 200m の地点.

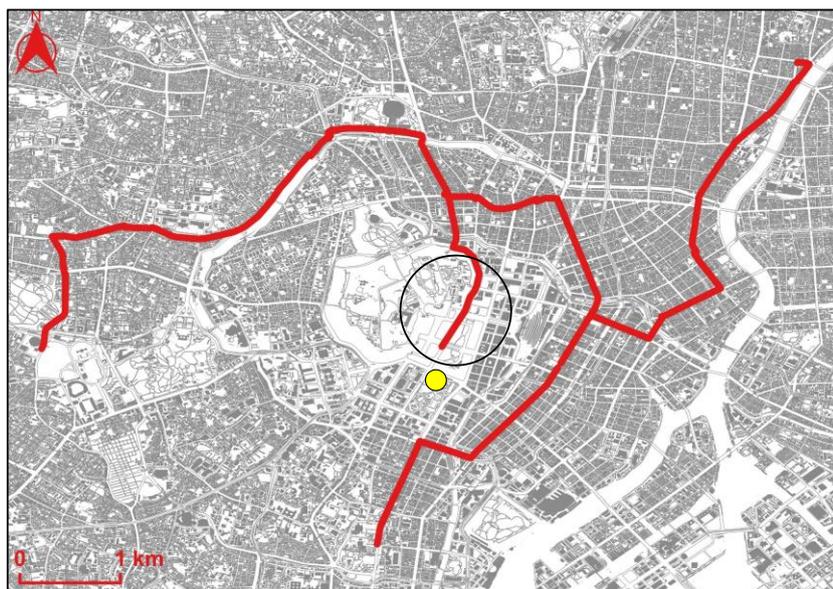


図 2-6 Area\_3 の気象観測領域. 赤線は移動気象観測ルート, 黄色点は定点気象観測地点 (日比谷公園) を示す. 黒丸は皇居周辺を示す.

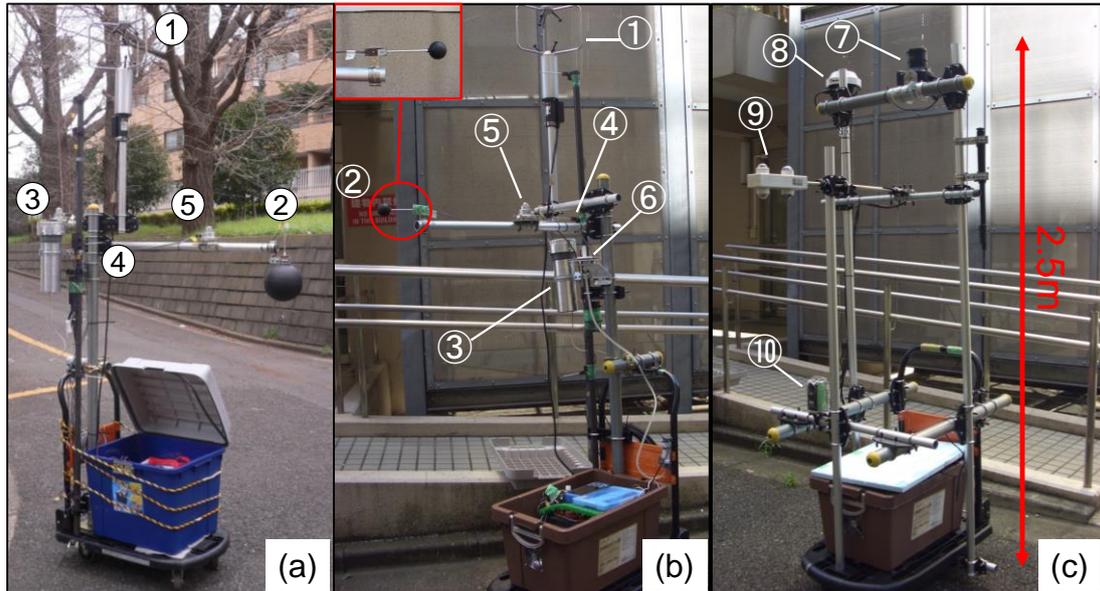


図 2-7 移動気象観測用台車の外観図. 最上部の観測高度は全て約 2.5m である.

表 2-1 Case\_1.1~Case\_1.3b で用いた観測機器の概要

No.	Senser name	Instruments	Item	Interval(sec.)
①	Ultra-Sonic anemometer	CYG-81000	Wind speed Wind direction Air temperature	0.1
②	Globe-thermometer	Ping-Pong ball (40mm dia.) Vernon type (150mm dia.)	Globe temperature	
③	Temp., Humid. and Pre. Sensor	TR-73U	Relative humidity Air temperature	1.0
④	Thermocouple	E-Type	Air temperature	
⑤	Solar radiation sensor	MS602	Global radiation	0.1
⑥	Pressure meter	CYG-61002	Atmospheric pressure	
⑦	Fisheye camera	Body EOS kiss X5 EF-S18-55 IS II	Digital hemispherical photograph	5.0
		Lens SIGMA Circular Fisheye 4.5mm		
⑧	GNSS smart antenna	A325	Longitude Latitude	
⑨	Four-component net radiometer	MR-40	Long wave radiation Short wave radiation	1.0
⑩	Time lapse camera	TLC200 f1.2	Surrounding photograph	

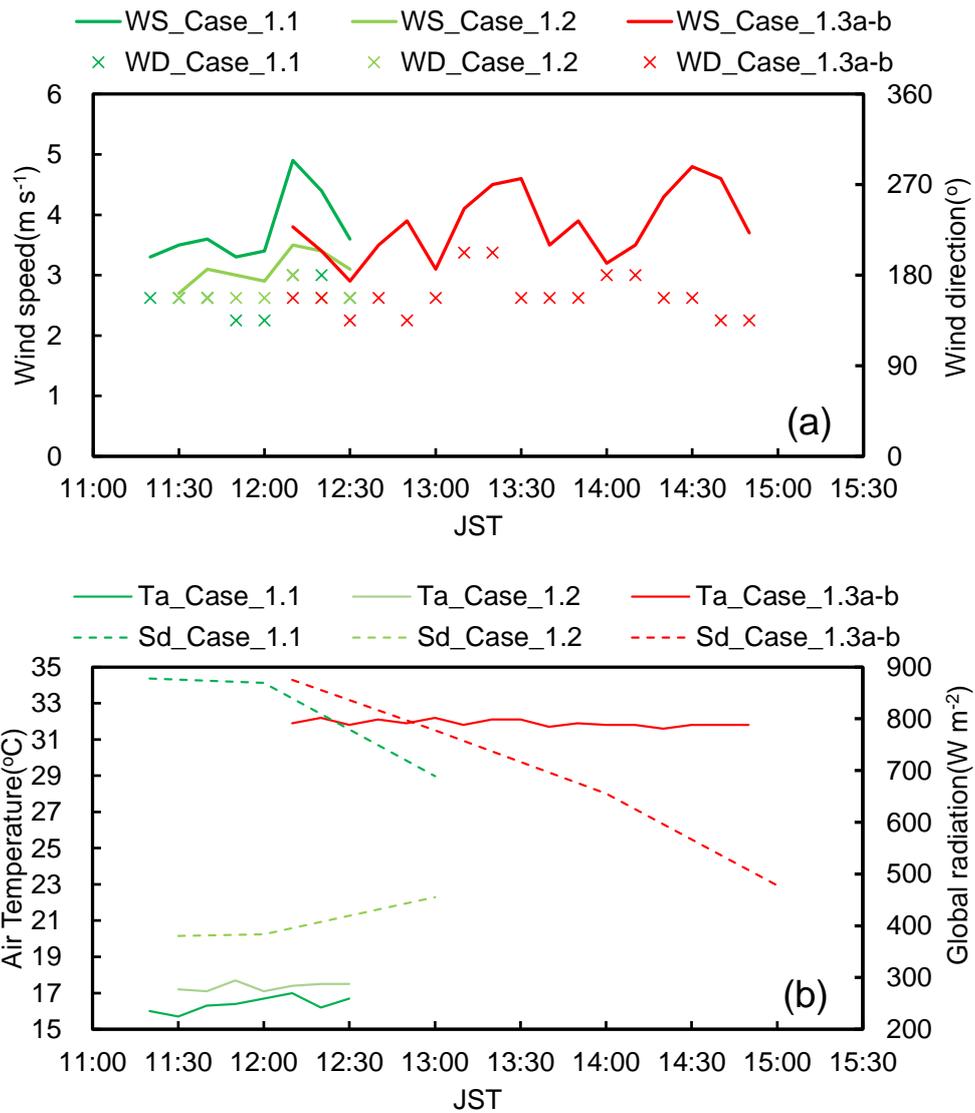


図 2-8 Case\_1.1~Case\_1.3b の東京管区気象台における (a) 風向 (WD) および風速 (WS), (b) 気温 (Ta) および全天日射量 (Sd).

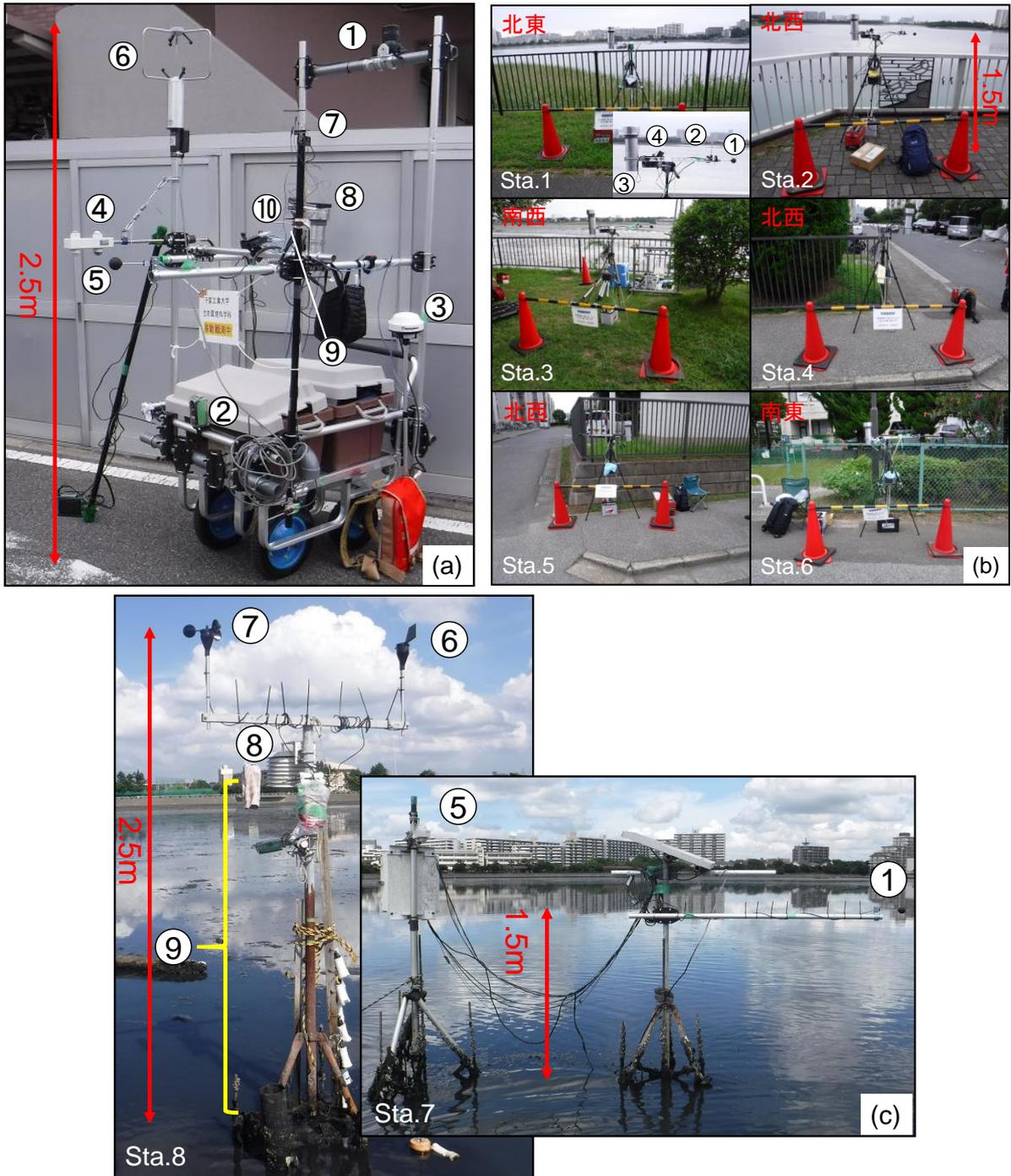


図 2-9 移動および定点気象観測の外観図. (a)移動気象観測用台車,  
 (b)陸上定点気象観測, (c)干潟内定点気象観測.  
 各観測の最上部の高度を図中に記載.

表 2-2 Case\_2. 1a~Case\_2. 2 の台車に設置した観測機器の概要

No.	Sensor name	Instruments	Item	Interval (sec.)
①	Fisheye camera	EOS kiss X5 EF-S18-55 IS II	Digital hemispherical photograph	5.0
		SIGMA Circular Fisheye 4.5mm		
②	Time lapse camera	TLC200 f1.2	Surrounding photograph	
③	GNSS smart antenna	A325	Longitude Latitude	1.0
④	Four-component net radiometer	MR-40	Long wave radiation Short wave radiation	
⑤	Globe thermometer	Ping-Pong ball (40mm dia.)	Globe temperature	
⑥	Ultra-Sonic anemometer	CYG-81000	Wind speed Wind direction Air temperature	
⑦	Globe thermometer	Stainless ball (4mm dia.)	Globe temperature	0.1
⑧	Temp. and Humid. sensor	SHT-75	Relative humidity Air temperature	
⑨	Thermocouple	E-Type	Air temperature	
⑩	Temp., Humid. and Pre. Sensor	TR-73U	Atmospheric pressure	1.0



図 2-10 Area\_2 の移動気象観測ルート. 矢印は各班の観測開始方向.

(a)は Case\_2. 1a~Case\_2. 2, (b)は Case\_2. 3a~Case\_2. 5f.

表 2-3 Case\_2.1a~Case\_2.2 の陸上定点および Case\_2.1a~Case\_2.5f の  
干潟定点で用いた観測機器の概要

No.	Sensor name	Instruments	Item	Interval (sec.)
①	Globe thermometer	Ping-Pong ball (40mm dia.)	Globe temperature	
②	Thermocouple*	E-Type	Air temperature	0.1
③	Temp. and Humid. sensor*	SHT-75	Relative humidity Air temperature	
④	Temp., Humid. and Pre. Sensor	TR-73U	Atmospheric pressure	2.0
⑤	Four-component net radiometer	MR-60	Long wave radiation Short wave radiation	
⑥	Wind direction sensor	S-WDA-M003	Wind direction	600.0
⑦	Wind speed sensor	S-WSB-M003	Wind speed	
⑧	Temp. and Humid. sensor	CO-U23-001	Relative humidity Air temperature	
⑨	Water level logger	U20-001-04-Ti	Water pressure Atmospheric pressure	

\*Air temperature in all stations was used SHT-75

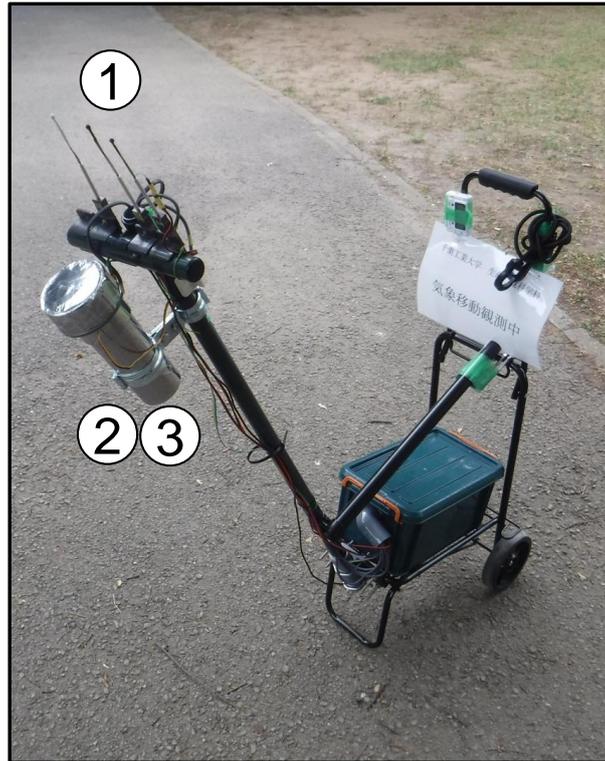


図 2-11 移動気象観測用台車の外観図

表 2-4 Case\_2. 3a~Case\_2. 5f の台車に設置した観測機器の概要

No.	Sensor name	Instruments	Item	Interval(sec.)
①	Globe thermometer	Stainless ball (4mm dia.)	Globe temperature	
②	Temp. and Humid. sensor*	SHT-75/SHT-35	Relative humidity Air temperature	0.1
③	Thermocouple*	E-Type	Air temperature	

\* If SHT-75 was error, used SHT-35. If thermocouple was error, used SHT-75.

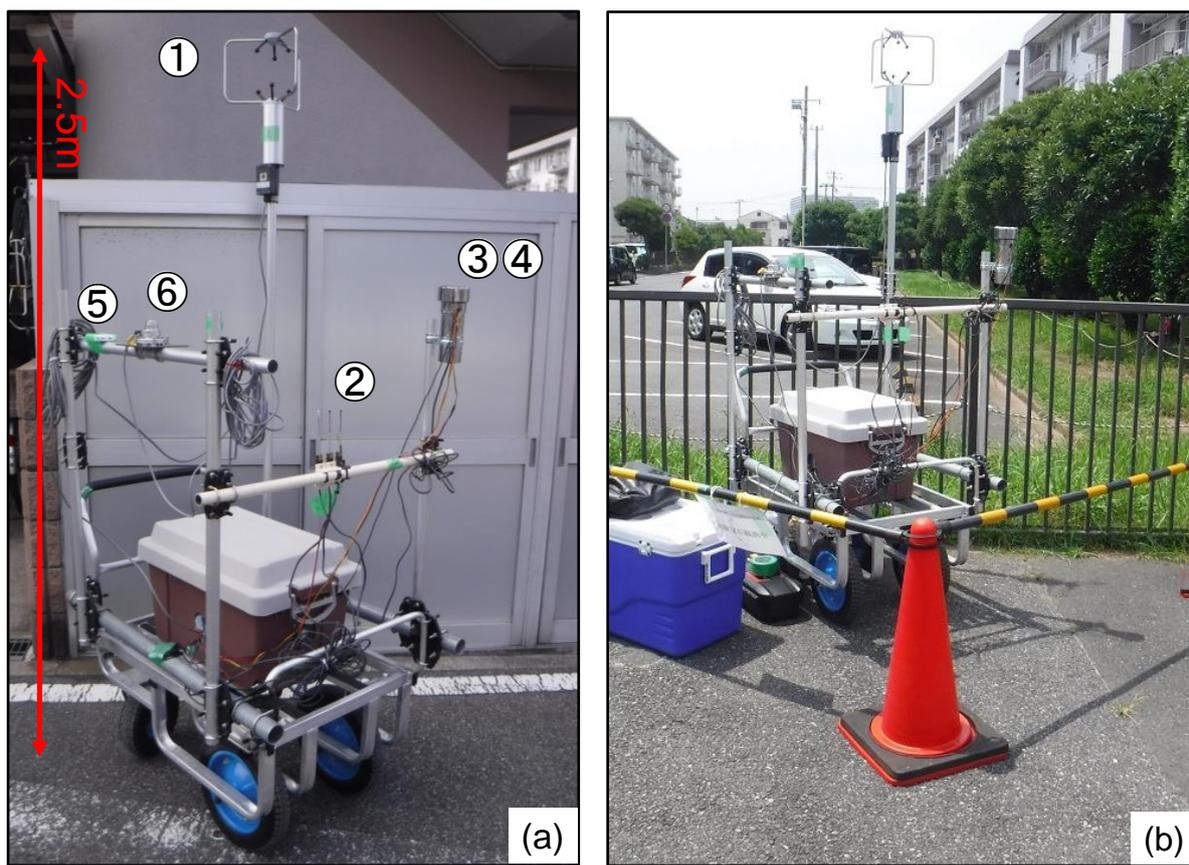


図 2-12 定点気象観測の (a) 外観および (b) 設置風景

表 2-5 Case\_2. 3a~Case\_2. 5f の定点気象観測の観測機器の概要

No.	Sensor name	Instruments	Item	Interval(sec.)
①	Ultra-Sonic anemometer	CYG-81000	Wind speed Wind direction Air temperature	
②	Globe thermometer	Stainless ball (4mm dia.)	Globe temperature	0.1
③	Temp. and Humid. sensor*	SHT-75/SHT-35	Relative humidity Air temperature	
④	Thermocouple	E-Type	Air temperature	
⑤	Temp., Humid. and Pre. Sensor	TR-73U	Atmospheric pressure	1.0
⑥	Solar radiation sensor	MS602	Global radiation	0.1

\* If SHT-75 was error, used SHT-35.

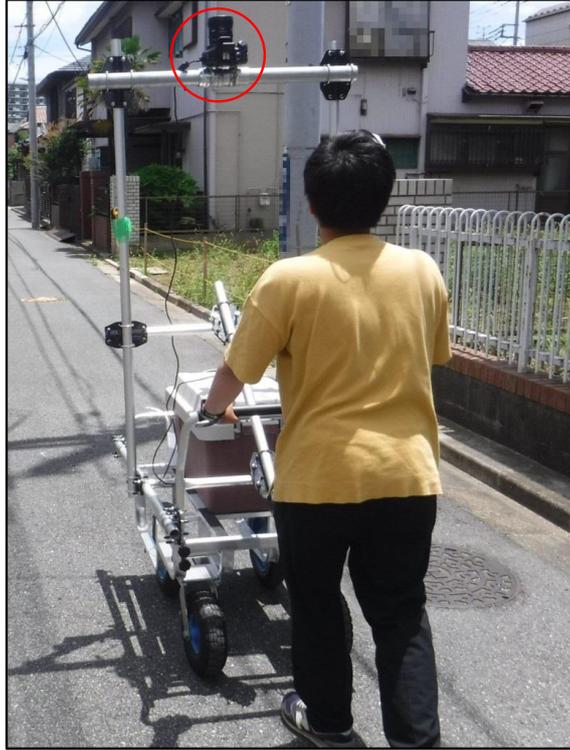


図 2-13 天空写真観測の様子. 赤丸は魚眼カメラを示す.

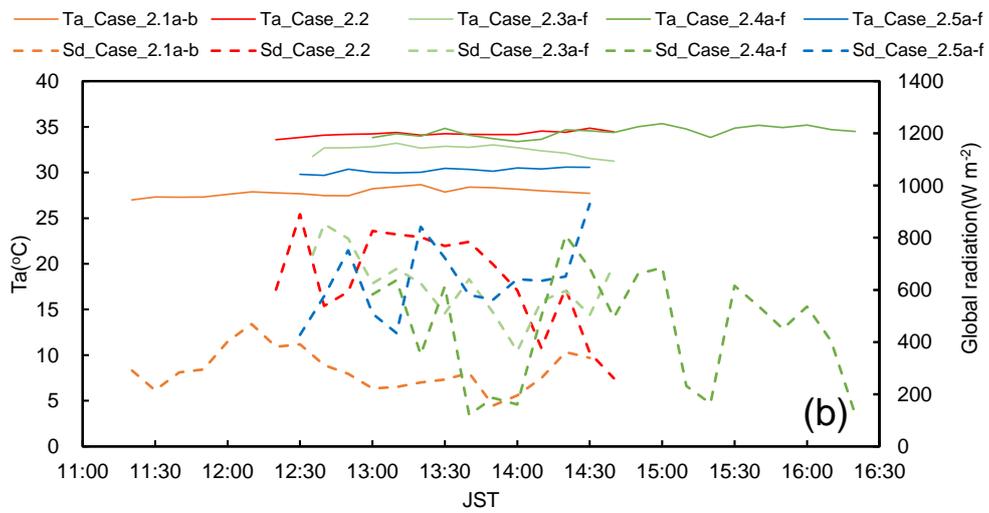
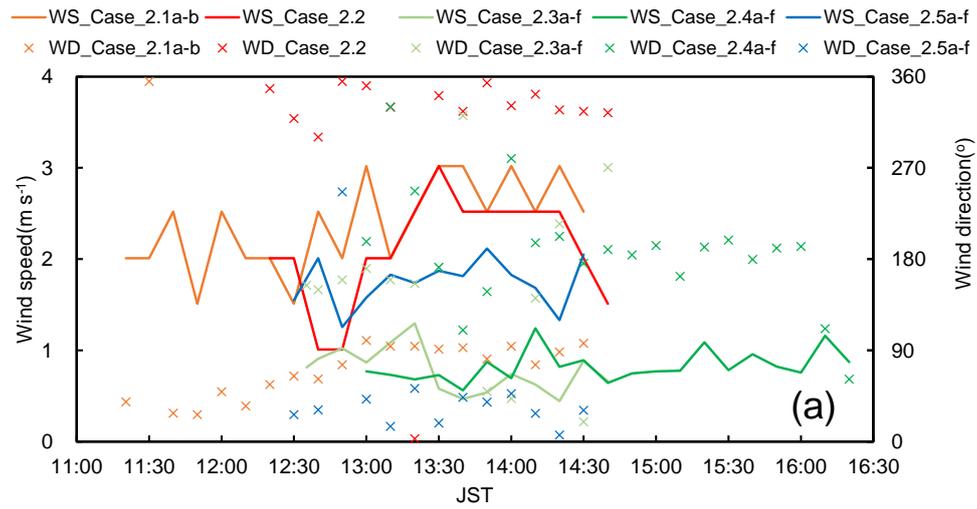


図 2-14 Case\_2.1a~Case\_2.5f の定点気象観測における (a) 風向 (WD) および風速 (WS), (b) 気温 (Ta) および全天日射量 (Sd).

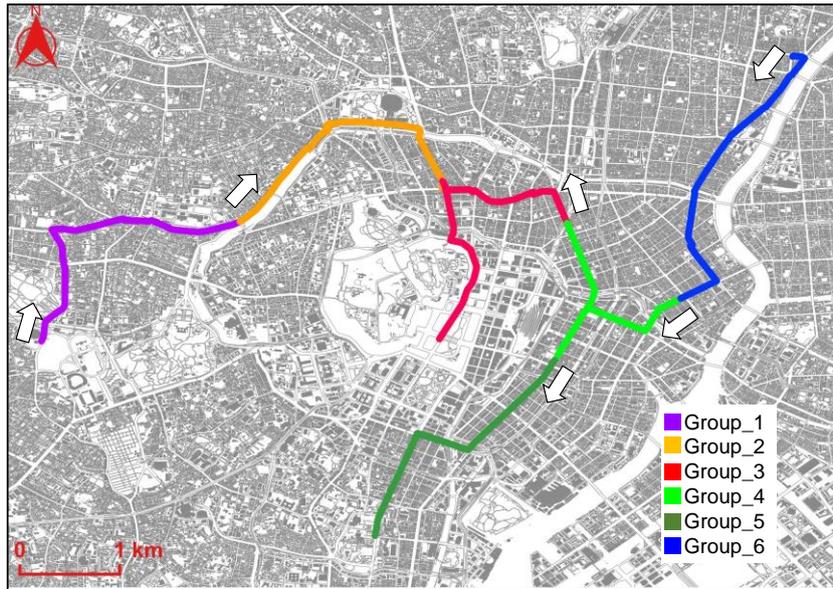


図 2-15 Area\_3 の移動気象観測ルート。  
 矢印は各班の Case\_3. 1a 時の進行方向を示す。



図 2-16 移動気象観測用台車の外観図.

表 2-6 Case\_3.1a, Case\_3.1b の台車に設置した観測機器の概要

No.	Sensor name	Instruments	Item	Interval(sec.)
①	Globe thermometer	Stainless ball (4mm dia.)	Globe temperature	
②	Temp. and Humid. sensor*	SHT-75/SHT-35	Relative humidity Air temperature	0.1
③	Thermocouple*	E-Type	Air temperature	

\* If SHT-75 was error, used SHT-35. If thermocouple was error, used SHT-75.

表 2-7 Case\_3. 1a, Case\_3. 1b の定点気象観測の観測機器の概要

No.	Sensor name	Instruments	Item	Interval(sec.)
①	Ultra-Sonic anemometer	CYG-81000	Wind speed Wind direction Air temperature	
②	Globe thermometer	Stainless ball (4mm dia.)	Globe temperature	0.1
③	Temp. and Humid. sensor*	SHT-75/SHT-35	Relative humidity Air temperature	
④	Thermocouple	E-Type	Air temperature	
⑤	Temp., Humid. and Pre. Senser	TR-73U	Atmospheric pressure	1.0
⑥	Solar radiation sensor	MS602	Global radiation	0.1

\* If SHT-75 was error, used SHT-35.

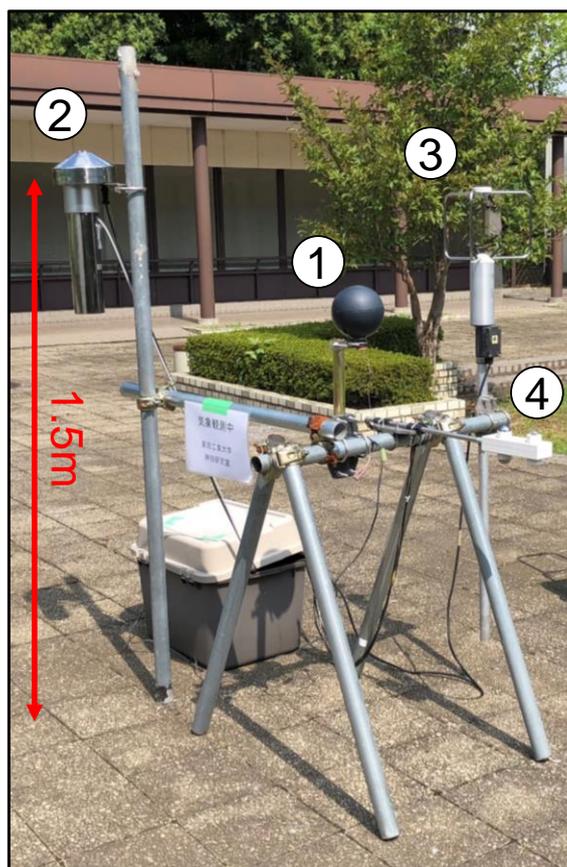


図 2-17 定点気象観測の外観図

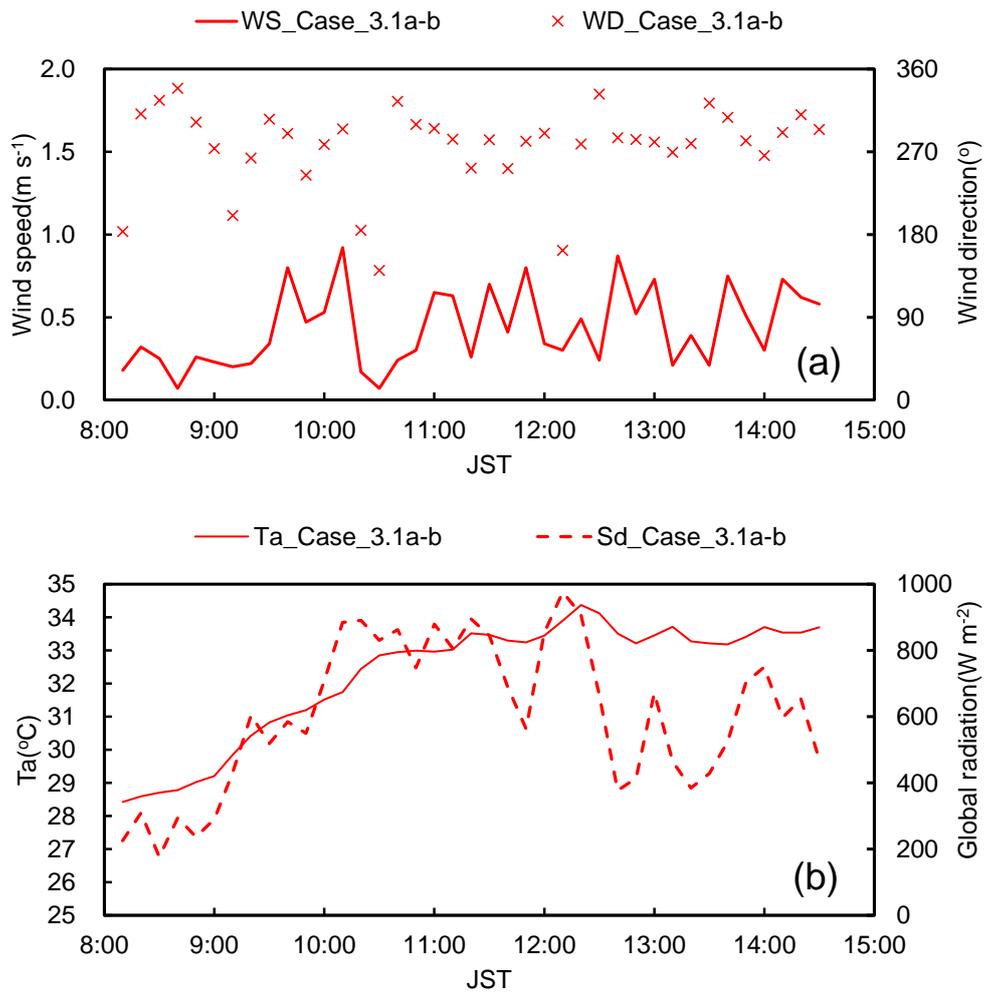


図 2-18 Case\_3.1a, Case\_3.1b の定点気象観測における (a) 風向 (WD) および風速 (WS), (b) 気温 (Ta) および全天日射量 (Sd).

表 2-8 観測概要の一覧

Observation area	Case	Day	Time	Main instruments		
				Air temperature	Relative humidity	Globe temperature
Area_1	Case_1.1	2016/3/29	11:22~12:27			Vernon type (150mm)
	Case_1.2	2016/3/30	11:35~12:29			
	Case_1.3a	2016/8/25	12:12~12:57	Thomocouple(E type)	TR-73U	
	Case_1.3b		14:07~14:52			Ping-Pong ball (40mm)
	Case_2.1a	2017/8/3	12:16~12:42			
	Case_2.1b		13:38~14:02			
	Case_2.2	2017/8/23	12:35~12:59			
	Case_2.3a					
	Case_2.3b					
	Case_2.3c	2018/7/11	12:45~14:39			
Case_2.3d						
Case_2.3e						
Case_2.3f						
Case_2.4a			13:40~13:59			
Case_2.4b			14:00~14:24	Thomocouple(E type), SHT-75		Stainless ball (4mm)
Case_2.4c	2018/7/24		14:30~14:52		SHT-75	
Case_2.4d			14:57~15:16			
Case_2.4e			15:25~15:46			
Case_2.4f			15:52~16:10			
Case_2.5a			12:03~12:22			
Case_2.5b			12:27~12:46			
Case_2.5c			12:55~13:15			
Case_2.5d			13:21~13:40			
Case_2.5e	2018/7/26		13:44~14:04			
Case_2.5f			14:07~14:25			
Area_3	Case_3.1a	2018/8/30	8:00~9:37	Thormocouple (K type), SHT-75		
	Case_3.1b		13:00~14:15			Copper ball (12mm)

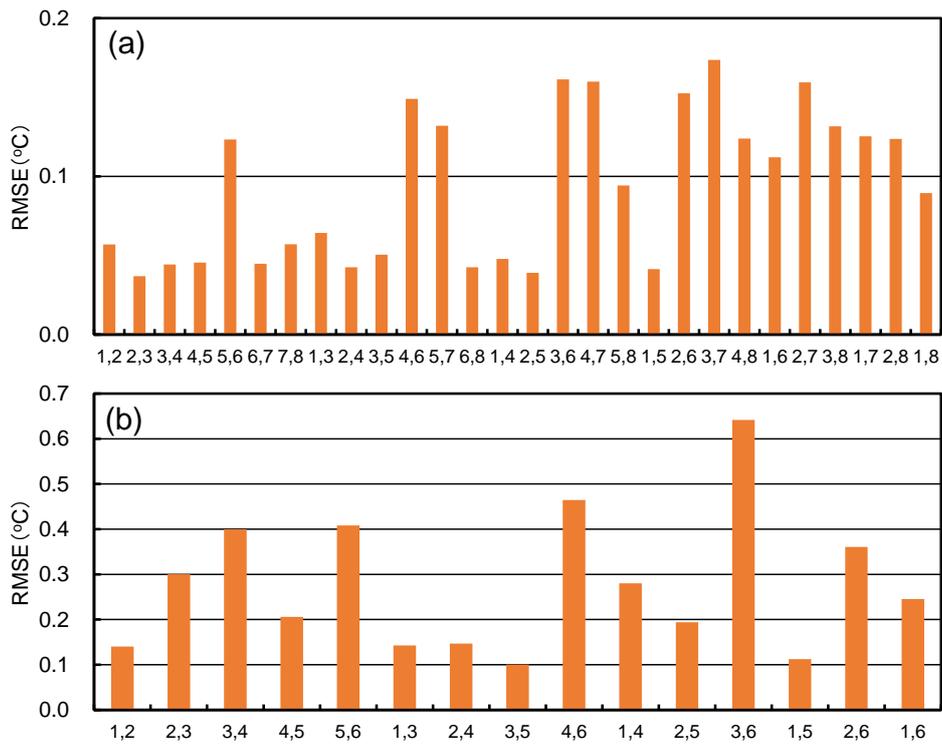


図 2-19 屋内における熱電対の器差. (a)は Case\_2. 1a~Case\_2. 2, (b)は Case\_2. 3a~Case\_2. 5f の熱電対に適用される RMSE.

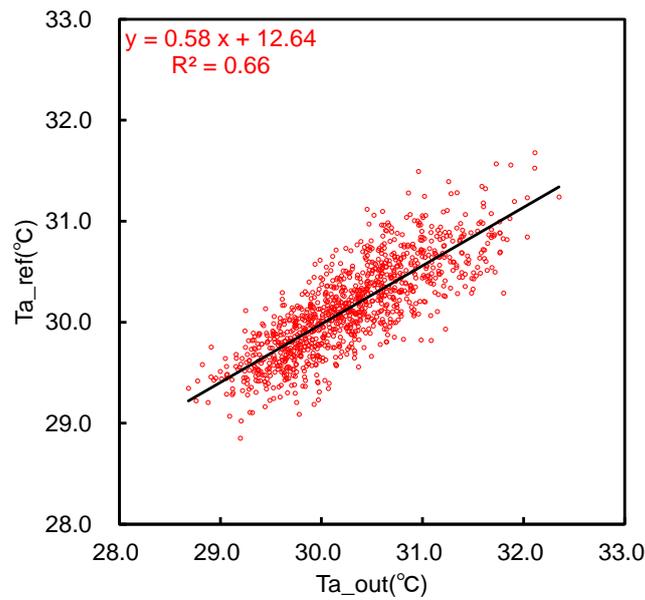


図 2-20 強制通風筒内と曝露時の気温の相関図.  
0.1s サンプルングで 10s 平均値.

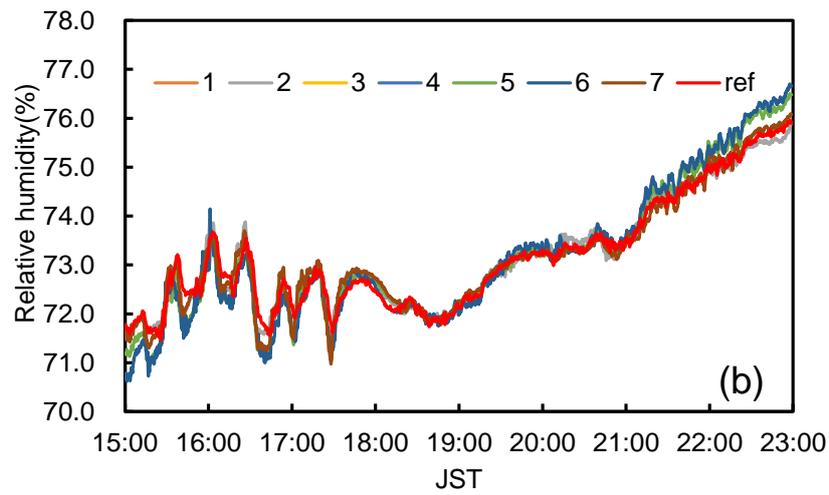
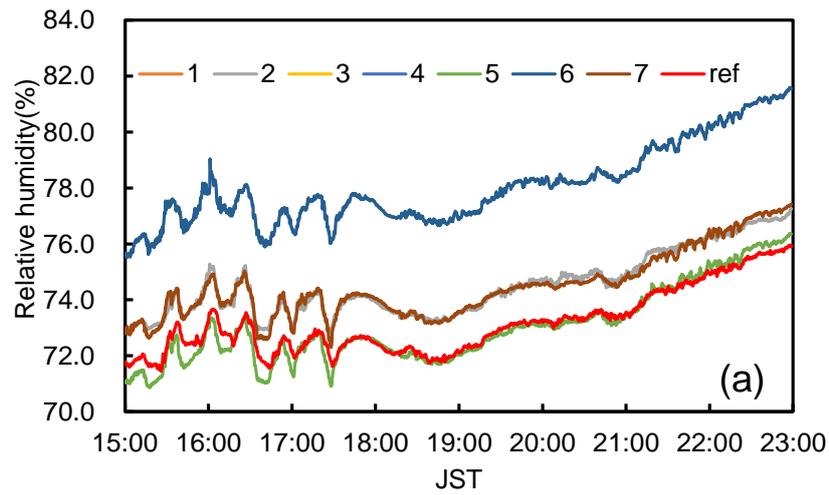


図 2-21 (a)補正前および(b)補正後の SHT-35 の相対湿度の変動.  
1s サンプリングで 10s 平均値.

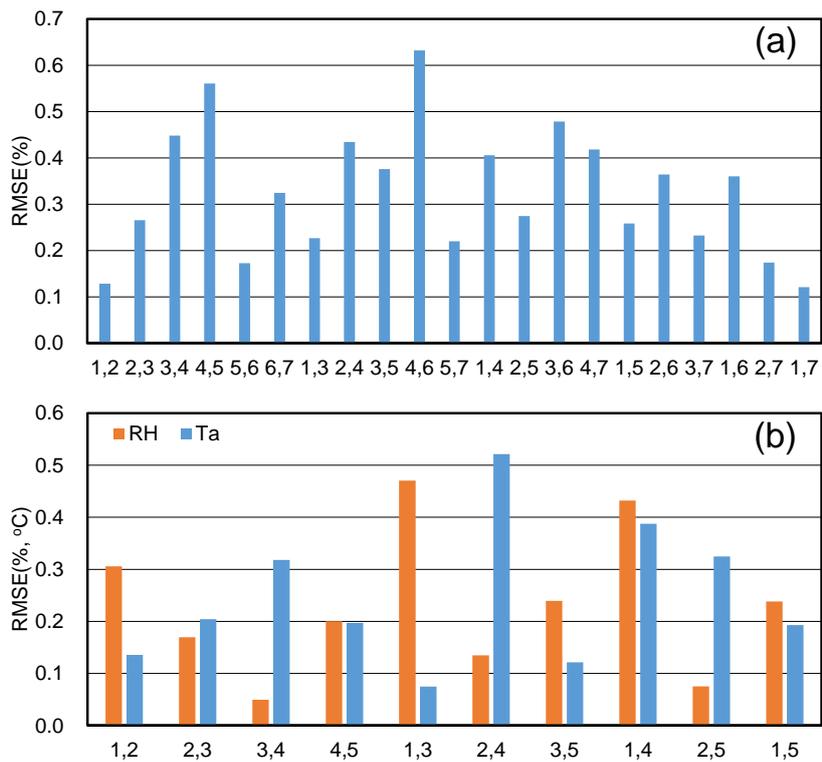


図 2-22 (a) SHT-35 の相対湿度および (b) SHT-75 の相対湿度・気温の RMSE.

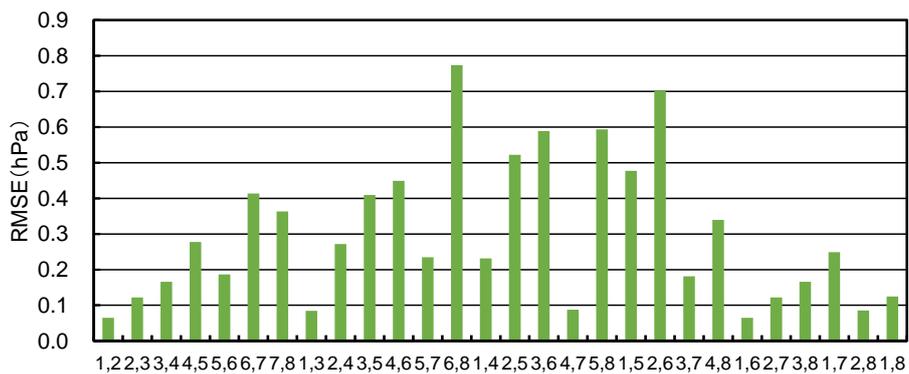


図 2-23 TR-73U の大気圧の RMSE.

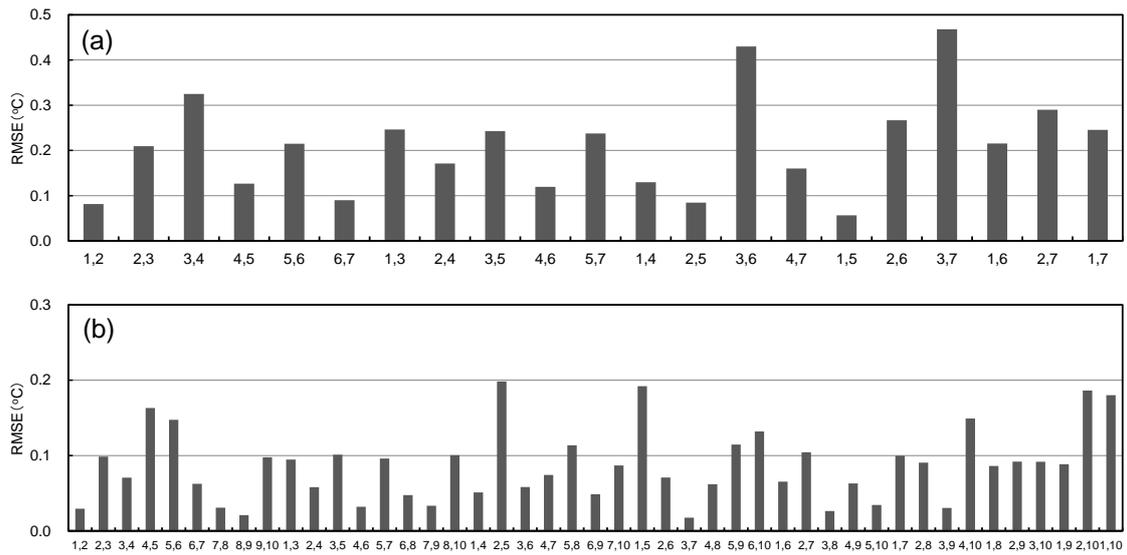


図 2-24 屋内における (a) φ4 mm および (b) φ40 mm の黒球温度の RMSE.

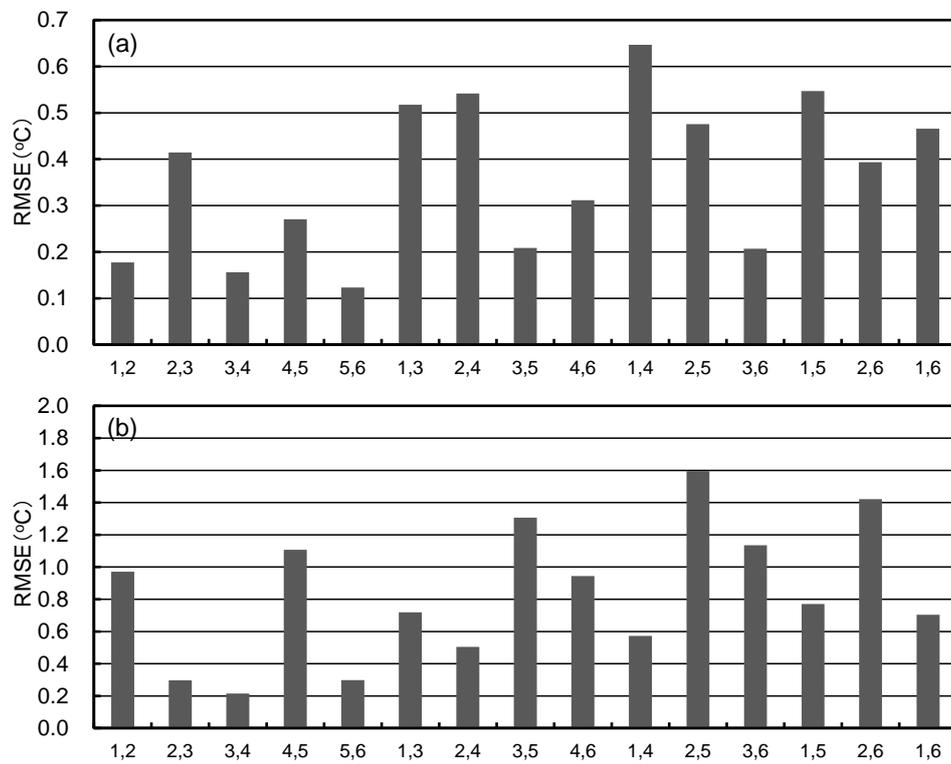


図 2-25 屋外における (a) φ4 mm および (b) φ40 mm の黒球温度の RMSE.

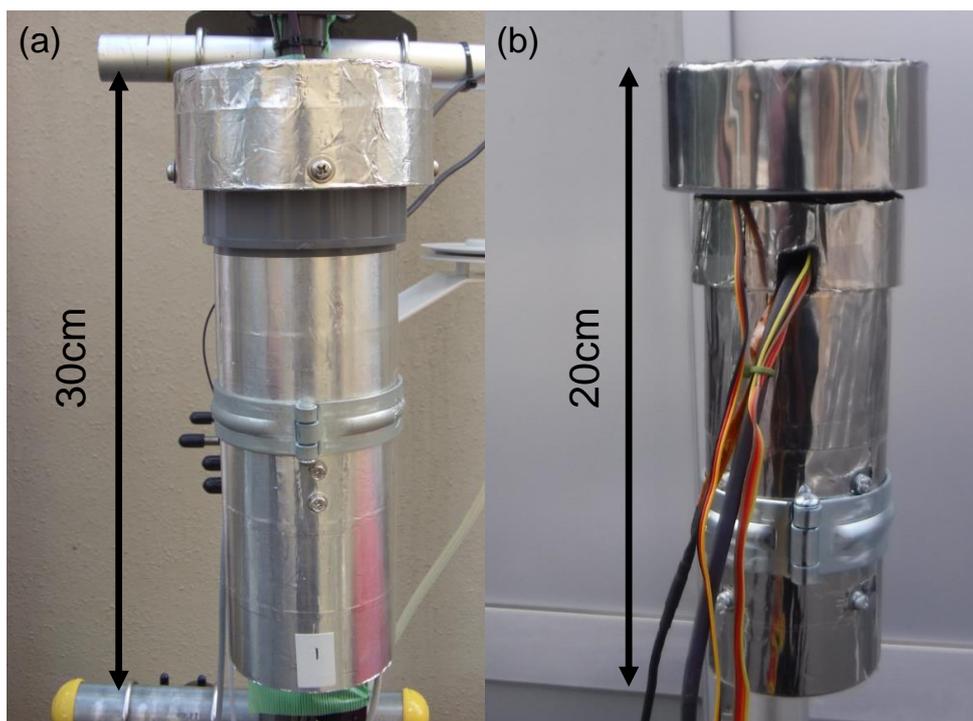


図 2-26 (a) 通風筒 A および (b) 通風筒 B の外観図.

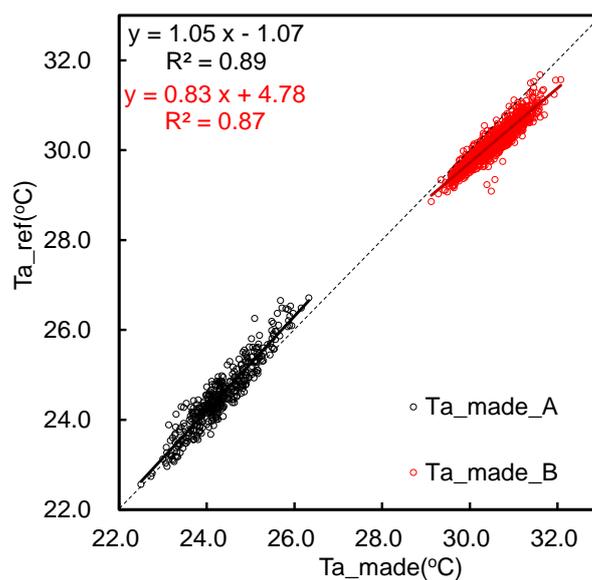


図 2-27 検定された通風筒内と自作通風筒内の比較. 黒は通風筒 A, 赤は通風筒 B を示す. 0.1s サンプルングで 10s 平均値.

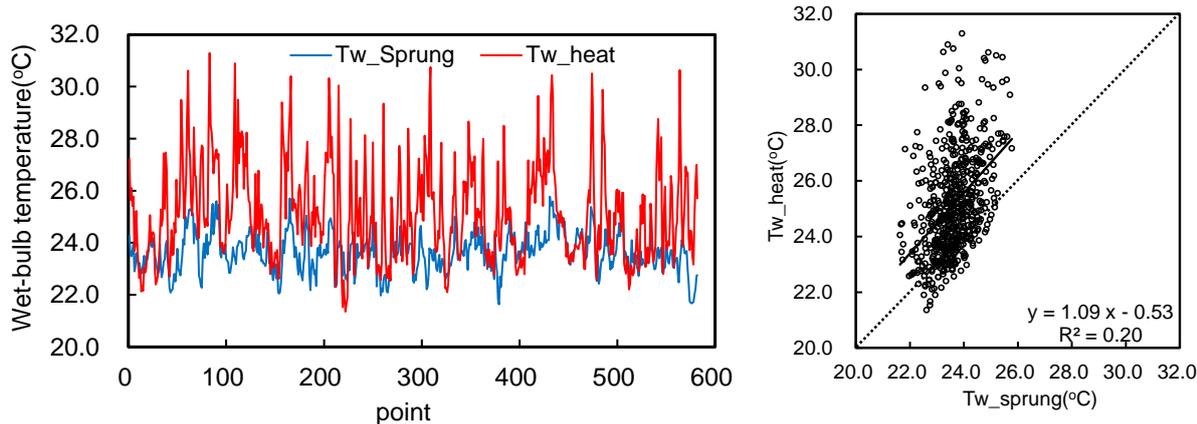


図 2-28 乾湿計公式 (Tw\_Sprung) および熱収支式 (Tw\_heat) から算出した湿球温度の空間変動 (左) と相関 (右). データは Case\_1.3a を使用した.

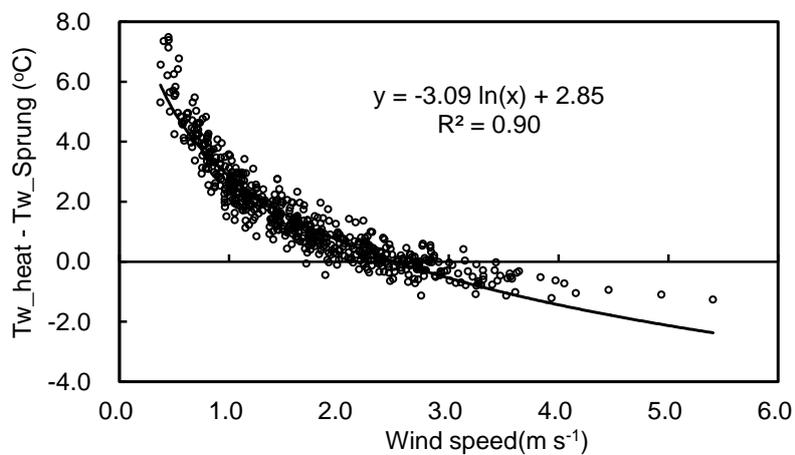


図 2-29 完全な熱収支式と乾湿計公式の数値差と風速の関係.

表 2-9 市販測器の公称精度

Instruments	Item	Nominal error
TR-73U	RH	±5%
	p	±1.5hPa
SHT-35	RH	±1.5%
SHT-75	RH	±1.8%
	Ta	±0.3°C
CYG-61302	p	±0.3hPa

表 2-10 公称精度を考慮した湿球温度・比湿・WBGT の変動幅

Instruments			Error		
Ta	RH	p	Tw	q	WBGT
	TR-73U	CYG-61302	0.82	1.31	0.55
Thermocouple	SHT-35	TR-73U	0.24	0.38	0.17
	SHT-75		0.30	0.46	0.21
SHT-75	SHT-35		0.51	0.70	0.39
	SHT-75	0.57	0.78	0.43	

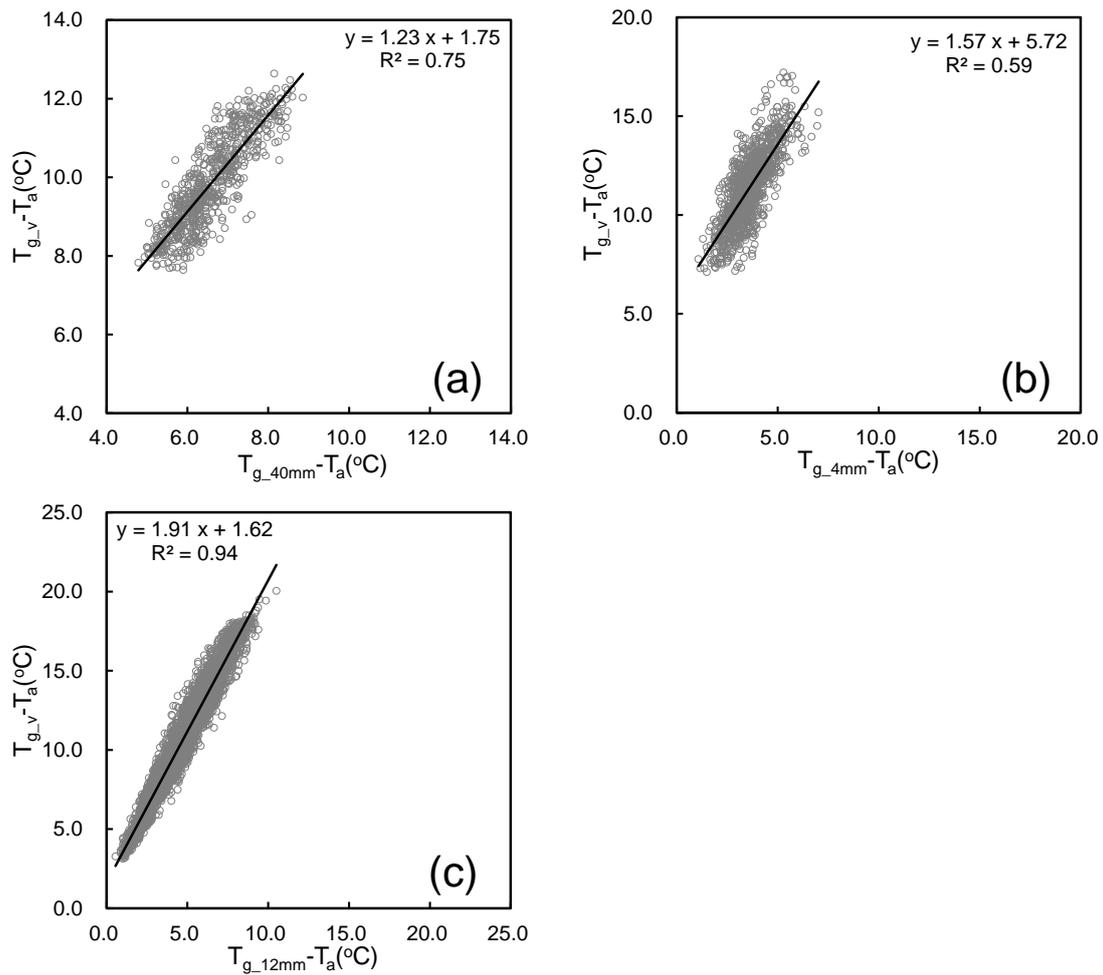


図 2-30 (a)  $\phi 40$  mm, (b)  $\phi 4$  mm, (c)  $\phi 12$  mm およびペルノン式 ( $T_{g,v}$ ) の黒球温度と気温の温度差の関係.

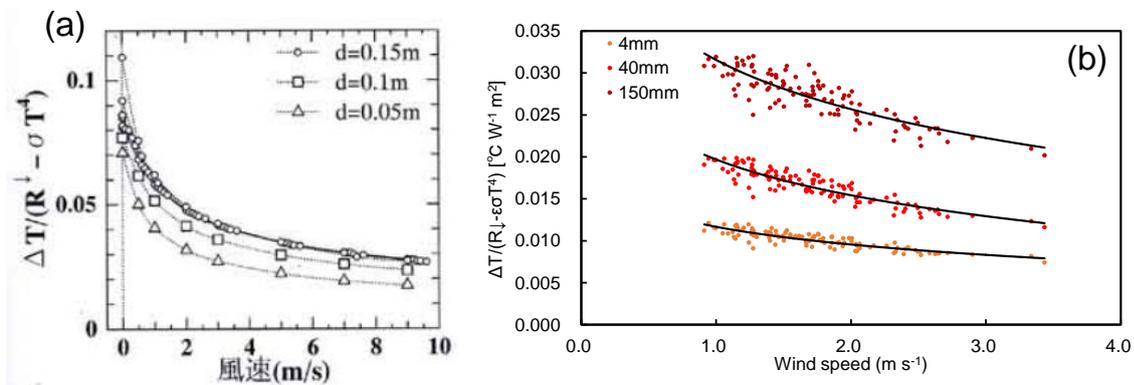


図 2-31 各径の黒球の放射に対する温度上昇率と風速の関係.  
 (a) は近藤 (近藤純正 HP) による実験, (b) は著者の実験.  
 (b) は正味放射量が  $600 \text{ W m}^{-2}$  以上における 10 分平均値である.

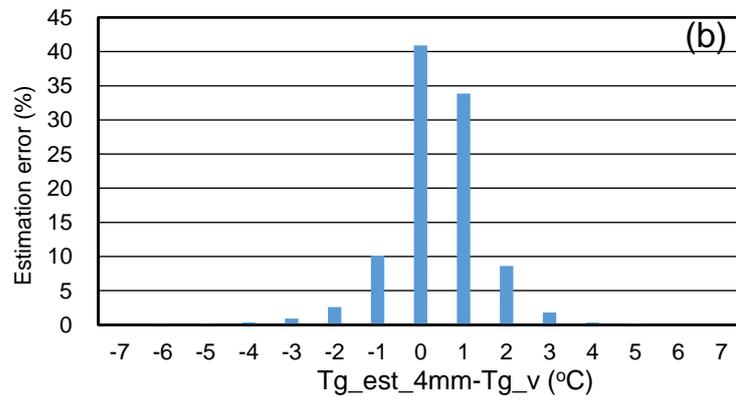
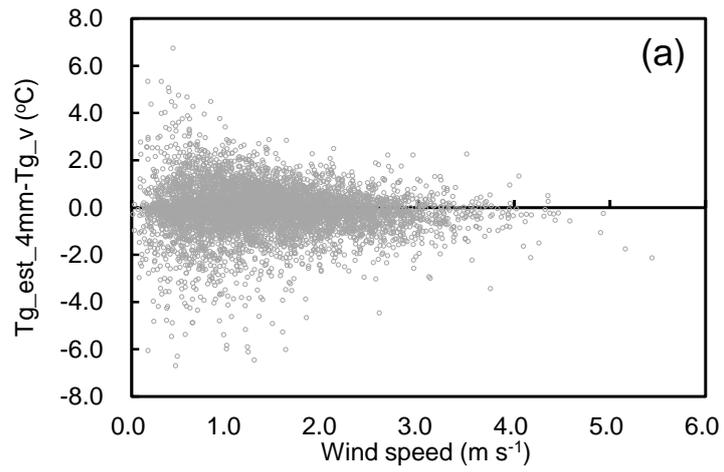


図 2-32 (a)ベルノン式黒球温度変換時の推定誤差と風速の関係と  
(b)推定誤差のヒストグラム.

表 2-11 各 Case における気温 (Ta) および相対湿度 (RH) の代表値と代替値  
に使用した測器一覧

Case number	Ta		RH	
	Main	Sub	Main	Sub
Case_1.1-Case_1.3b	Thermocouple	-	TR-73U	-
Case_2.1a-Case_2.2	Thermocouple	SHT-75	SHT-75	-
Case_2.3a-Case_2.5f	Thermocouple	SHT-75	SHT-75	SHT-35
Case_3.1a, Case_3.1b	Thermocouple	SHT-75	SHT-75	-

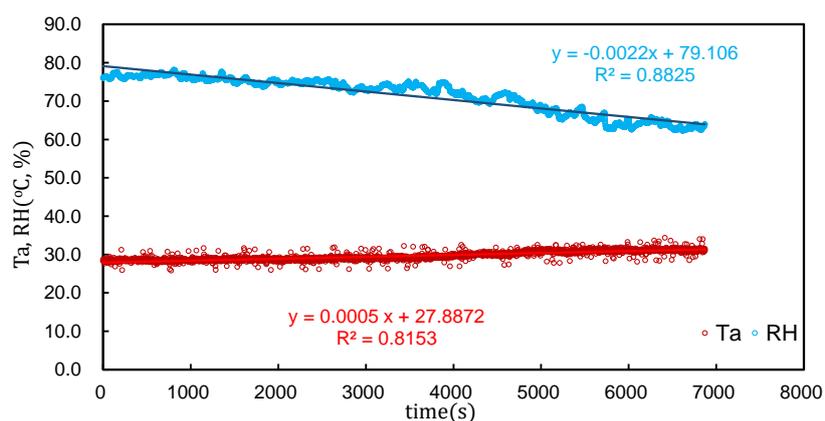


図 2-33 8:05~10:00 までの定点気象観測 (Area\_3) における相対湿度と気温の時間変化

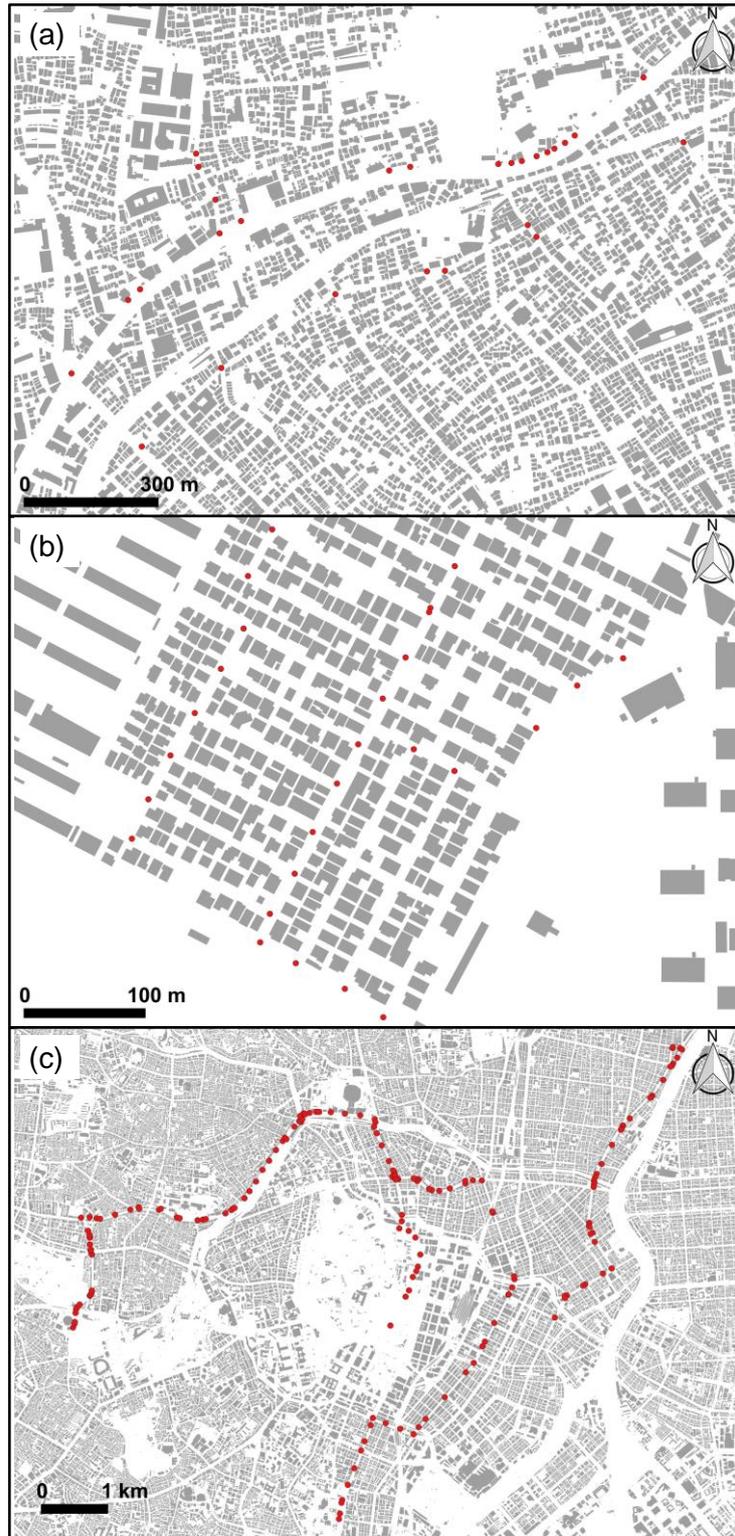


図 2-34 (a)Area\_1, (b)Area\_2, (c)Area\_3 におけるコントロールポイント.

### 第3章 屋外暑熱環境の実態把握

本章では、街区内における熱環境場の時空間変動を、移動および定点気象観測を実施した結果に基づいて評価した。熱ストレスは、1.3.1項の表1-2で示したWBGT指標の日常生活指針に基づいて評価した。熱環境場の空間変動とルーチン観測値との比較は、全ての領域に対して行った。また、2.1節で示したとおり、領域内の街区特性に着目して、3.1節ではArea\_1内を「住宅街」と「街道」に、3.2節ではArea\_2内を「北側領域」と「南側領域」または「東西道路」と「南北道路」にそれぞれ分類し、領域間の熱環境場を比較し、人体の感じる暑さの違いについて評価した。これについては、観測者の感覚を基に、放射に由来する場合は“ジリジリ”、湿度に由来する場合は“ムシムシ”といった表現で議論する。

#### 3.1 Area\_1

本節では、Area\_1において建物間の高さや標高の変動が大きく、さらに幹線道路である「街道」と、商店や住宅が立ち並ぶ「住宅街」に分類できる街区特性に着目する。

##### 3.1.1 熱環境場の空間分布

Case\_1.1～Case\_1.3bの熱環境場の空間変動について評価する。熱ストレスが最も高かったCase\_1.3bのWBGT、湿球温度、黒球温度、気温、比湿の空間分布を図3-1に示す。

5項目の変動幅はそれぞれWBGT：4.7℃（4 Caseでの最大値：5.7℃）、湿球温度：4.4℃（6.3℃）、黒球温度：8.5℃（10.5℃）、気温：4.6℃（9.0℃）、比湿：5.2 g kg<sup>-1</sup>（5.2 g kg<sup>-1</sup>）であった。領域内でのWBGTの変動幅から、指標レベルが2～3段階の変化であることに相当し、地点によって危険度が大きく異なることが示された。WBGTの分布は湿球温度や比湿に概ね類似しているが、WBGTの高い地点は必ずしも湿球温度が高い地点とは限らず、気温や黒球温度に依存する地点も見られた。

気象変動に着目すると、最も大きかったのは黒球温度であった。大橋ら(2009)によると、黒球温度は天空率が高くなるほど、上昇すると報告されている。図3-2に示す天空率との関係を見てみると、既報と同様に黒球温度が高い地点は天空率が著しく高くなっていたが、一方、一部の地点では天空率の低い地点とも対応していた（図3-2 赤丸）。これは天空率が高い場合、日射供給量が上昇し、低い場合は建物からの赤外放射量が増加するためだと考えられる。これが周囲を建物で囲われている都市街区放射環境の特徴であるといえる。

さらに統計的に街区特性を評価するために各Caseの各気象要素の空間変動に着目する。Case\_1.1～Case\_1.3bの各気象要素の空間変動および1プロットあたりの標準偏差を図3-3に示す。WBGT、湿球温度、気温、比湿の標準偏差の変動は黒球温度より小さく、季節や大局的な気象場に左右される傾向は見られなかった。一方、黒球温度の標準偏差の変動は大きく、Caseによってバラつきが大きかった。これは、日ごとの気温や風速、観測時間帯（i.e. 太陽高度）が異なるためである。一方で、図3-3のD領域のように標準偏差が小さく、街区特性が表れている地点もあった。

街区内の温熱環境の変動を評価できたことを踏まえ、次項では、第2章で記した通り領域内を「街道」と「住宅街」に分類し、熱ストレスを比較する。

### 3.1.2 用途地域が異なる領域間の比較

「街道」および「住宅街」における黒球温度、湿球温度、気温、比湿、WBGTの偏差を図3-4に示す。黒球温度は道路幅員が広く（約25m）、日射供給量の大きい「街道」の方が高い傾向があり、最大で約1.4℃高かった。湿球や比湿に関しては有意ではないが、気温と同様に「住宅街」の方が高い傾向にあり、最大で湿球温度は約0.4℃、比湿は約0.3 g kg<sup>-1</sup>、気温は約1.0℃高かった。足永ら（2004）によると観測領域は道路交通より建物からの人工排熱（顕熱・潜熱）が多いと報告されている。南中時刻前後であることも相まって、民家の換気扇や夏場はエアコンの室外機から放出された熱や水蒸気により、気温や水蒸気量が高くなったと考えられる。これに伴ってWBGTも有意ではないが「住宅街」の方が高い傾向であった。

以上のことから、「街道」では日射量の増大に伴う“ジリジリ”とした暑さ、「住宅街」では人工排熱の増加による“ムシムシ”とした暑さがあり、人体の感じる暑さの感覚は異なる可能性が示唆された。

### 3.1.3 ルーチン観測網との比較

ルーチン観測網として、気象台（東京）の北の丸公園（北緯35°41'30"、東経139°45'6"）および小石川植物園（北緯35°41'12"、東経139°45'54"）を対象とし、前者については気温、後者についてはWBGTおよび黒球温度を移動気象観測結果と比較した。Area\_1での移動気象観測および気象台（東京）の同時刻におけるWBGT、黒球温度、気温の関係を図3-5に示す。ここで、Case\_1.1、Case\_1.2は冬季であり、環境省からWBGT・黒球温度が提供されていないため、図3-5ではCase\_1.3a、Case\_1.3bのみの結果を用いて比較した。WBGTと気温は最大で約3℃、約5℃の差異が生じたものの、RMSEは1~2℃であった。一方、黒球温度は変動幅が大きく、最大で約11℃の差異が生じており、RMSEは4.8℃であった。これは、気象台（東京）の地表面が芝生で周辺が樹々に囲まれた環境であり、街区内とは大きく異なるためである。

### 3.1.4 小まとめ

都市の一般的な市街地として、東京都大田区の市街地を対象として熱環境場の評価を行った。時間変化が1時間以内であっても、観測ルート内におけるWBGTは約5℃の変動があり、WBGT指標にして2~3段階の変動が確認された。これは湿球温度や気温に依存する傾向がみられたが、WBGTの高い地点では黒球温度が著しく高く、天空率も高い傾向にあった。「街道」と「住宅街」ではどちらも熱ストレスに大きな相違はなかったが、「街道」では道幅が広いことで日射供給量が増加し“ジリジリ”と、「住宅街」では家庭からの人工排

熱により水蒸気や熱が増加し“ムシムシ”と、暑さの感覚が異なる可能性が示唆された。また、ルート内の WBGT、黒球温度、気温を気象台（東京）と比較すると、WBGT や気温より黒球温度の差異が大きく、最大で約 11°C の差異が生じており、気象台の結果は街区内を一概に代表できないことが示された。

## 3.2 Area\_2

本節では、Area\_2 において領域内が一様に平坦で、低層住宅が立ち並び、道路幅員が異なる地点が多く存在する街区特性があり、さらに干潟から 200 m を境に「北側領域」と「南側領域」、道路方向で「南北道路」と「東西道路」に概ね分類できることに着目する。

### 3.2.1 熱環境場の空間分布

Case\_2.1a～Case\_2.5f の熱環境場の空間変動について評価する。ここでは、Case\_2.3a～Case\_2.3f（2018 年 7 月 11 日）、Case\_2.4a～Case\_2.4f（2018 年 7 月 24 日）、Case\_2.5a～Case\_2.5f（2018 年 7 月 26 日）が、各日時間連続的に観測され、1 回あたりの観測時間が短かったことから、それぞれ地点ごとに日アンサンブル平均を施し、Case\_2.3a～Case\_2.3f を Case\_A、Case\_2.4a～Case\_2.4f を Case\_B、Case\_2.5a～Case\_2.5f を Case\_C とした。

熱ストレスが最も高かった Case\_B の WBGT、湿球温度、黒球温度、気温、比湿の空間分布を図 3-6 に示す。5 項目の変動幅はそれぞれ WBGT：1.7°C（6 Case での最大値：3.7°C）、湿球温度：1.5°C（3.7°C）、黒球温度：3.6°C（7.4°C）、気温：2.0°C（4.6°C）、比湿：1.9 g kg<sup>-1</sup>（4.8 g kg<sup>-1</sup>）であった。Area\_1 より領域が狭く、平坦であることから、WBGT の変動幅は Area\_1 より小さいが、気象状況によっては、指標レベルが 2 段階変化することが示された。WBGT の変動は、Area\_1 同様に湿球温度や気温に依存する傾向であったが、WBGT が急激に上昇する地点では、黒球温度の寄与が大きい地点も見られた（図 3-6(a)(c)、緑丸）。

気象変動に着目すると、Area\_1 同様に、最も大きかったのは黒球温度であった。ルート内の黒球温度の変動について、図 3-7 に示す天空率との関係性を評価する。ルート内は高層建築物が存在しないため、全体の約 9 割で天空率 70% 以上（ルート全体平均は 74.5%）を示す空間であった。全体的に、黒球温度が高い地点は天空率も高い傾向にあったが、図 3-7 の赤枠のような領域では、天空率と黒球温度の関係は不明瞭であった。このような結果から、本領域では広い道路（約 6 m）では路面からの輻射熱、狭い道路（約 4 m）では路面に日陰エリアが増えるものの建物が接近することによる側方からの輻射熱の影響が増え、黒球温度に顕著な相違が見られなかった可能性が考えられる。

Area\_1 同様に、さらに統計的に街区特性を評価するために、各 Case の各気象要素の空間変動に着目する。街区特性が風向によって不明瞭にならないように、ここでは風向が南寄りであった Case\_A、B の結果を用いる。Case\_2.3a～Case\_2.4f（Case\_A、B）の各気象要素の空間変動および 1 プロットあたりの標準偏差を図 3-8 に示す。Area\_2 も Area\_1 同様の要因で、黒球温度の標準偏差は他の項目に比べ大きかったと考えられる。図 3-8 の B 領域のよ

うに標準偏差が小さく、街区特性が表れている地点もあった。

街区内の温熱環境の変動を評価できたことを踏まえ、3.2.2項、3.2.3項では、2.1.2項で記した通り領域内を「北側領域」と「南側領域」、または「南北道路」と「東西道路」に分類し、比較する。

### 3.2.2 水域からの距離が異なる領域間の比較

谷津干潟は、都市に存在する水域として熱緩和効果が期待されている（小田ら、2013）。そこで、隣接する住宅街内でその効果が確認されるかについて、風上が干潟のとき、すなわち南風時に着目した。その際、水蒸気が流入する距離を把握するため、2.1.2項で示したとおり、領域内を「北側領域」と「南側領域」に分類した。使用データは、観測時間帯の主風向が南であった Case\_A と Case\_B とし、それらを平均化したのち解析を行った。

「北側領域」と「南側領域」に分類した WBGT、湿球温度、黒球温度、気温、比湿のルート平均値からの差分平均値を図 3-9 に示す。いずれも数値的に有意な差とは言えないが、WBGT は「南側領域」で高く、「北側領域」で低い傾向にあった。これについて、他の気象要素を見ると、湿球温度および比湿は「南側領域」で高く、「北側領域」で低い傾向が見られた。これは、「北側領域」が干潟から遠く、「南側領域」が干潟に近いことに加え、「南側領域」では植生が多く存在するためだと考えられる。ただし、「北側領域」と「南側領域」の差が小さいことから、干潟の水蒸気が流入していると仮定すると、干潟から 300 m 以上までその効果が及んでいる可能性が示唆された。これについて、街区内部と干潟内における定点観測結果を用いて考察する。

南風時（Case\_A と同日）または北風時（Case\_C と同日）における街区内部および干潟内での気温および比湿の平均値を図 3-10 に示す。これらの平均値を用いて、街区内部の風向が、北風から南風にシフトしたときの気温と比湿の変化率を見してみる。気温は約 1.1 倍（平均値：30.0°C→32.6°C）、比湿は約 1.4 倍（13.5 g kg<sup>-1</sup>→18.9 g kg<sup>-1</sup>）であり、気温の変化率に対する比湿の変化率（比湿の変化量）は約 1.3 であった。一方、干潟内では、気温が約 0.9 倍（平均値：29.8°C→27.9°C）、比湿が 1.1 倍（14.4 g kg<sup>-1</sup>→15.9 g kg<sup>-1</sup>）であり、比湿の変化量は、約 1.2 であった。この結果から、北風から南風にシフトした際の比湿の変化量は、街区内部の方が大きいことがわかる。したがって、南風時には、干潟の水蒸気が流入した可能性が説明できる。また、上述したように「南側領域」では植生が多く存在することから、植生の蒸散も街区内部の比湿の上昇に寄与したと考えられる。

したがって、「干潟から水蒸気が流入している」ことと、街区内部の「北側領域」と「南側領域」で比湿差が小さかったことから、干潟から 300 m 以上まで水蒸気が流入していることを概ね説明することができる。

一方、黒球温度と気温は、「北側領域」で高く、「南側領域」で低い傾向が見られた。これは、「北側領域」には駐車場が多く、特に開けた空間（天空率が 0.9 以上）が多いこと（図 3-11）で日射供給量が増加したためと考えられる。

以上のことから、「南側領域」では水蒸気由来の“ムシムシ”とした暑さ、「北側領域」では放射由来の“ジリジリ”とした暑さがあり、人体の感じる暑さの感覚は異なる可能性が示唆された。

### 3.2.3 道路方向が異なる領域間の比較

「風の道」は、元はドイツで用いられていた用語であるが（ドイツ工業協会，2004），日本でも暑熱環境緩和の一環として注目されている（e.g. 三上，2006；一ノ瀬，2006）。「風の道」は建物の配置等で作りだされ，河川や海からの冷気流入が期待されている（成田，2006；成田ら，2010；菅原・成田，2012）。Area\_2でも道路方向によって「風の道」が形成される可能性があるため，干潟を風上とした風向（南寄り）に着目し，そのときの熱ストレスについて評価する。2.1.2項で示した通り，ルート内は概ね「南北道路」と「東西道路」に分類でき，主風向が南寄りであるCase\_A, Bの平均値を用いて，主風向に対する道路方向がもたらす熱ストレスの特徴について解析した。

「南北道路」と「東西道路」に分類した黒球温度，湿球温度，気温，比湿，WBGTのルート平均値からの差分平均値を図3-12に示す。いずれも有意な差ではないが，湿球温度および比湿は，「南北道路」で高く，「東西道路」で低い傾向が見られた。観測領域の南側には植生や干潟が存在するため，水蒸気を多く含んだ空気塊が，南北道路沿いに流入しやすい環境であったと考えられる。一方，黒球温度と気温は，「南北道路」で低く，「東西道路」で高い傾向が見られた。観測時の風速が弱かったため（図2-14参照），顕著な差は見られなかったが，「南北道路」は「風の道」に相当するため，気温や黒球温度が低下したと考えられる。

以上のことから，風向に対して，平行する道路（南北道路）では水蒸気の流入による“ムシムシ”とした暑さ，直行する道路（東西道路）では風の遮蔽による“ジリジリ”と暑さがあり，人体の感じる暑さの感覚は異なる可能性が示唆された。また，「南北道路」は「風の道」としての気温低減効果がある可能性が示唆された。

### 3.2.4 ルーチン観測網との比較

Area\_2でも気象庁や環境省の値と比較を行った。ここでは，移動気象観測に加え，定点気象観測も比較対象とした。比較対象地点は，解析領域に最も近いAMeDASの船橋（北緯35°42'42"，東経140°2'36"）（以降，AMeDAS船橋）とした。Case\_2.1a～Case\_2.5fとその時間に対応したAMeDAS船橋のWBGT，黒球温度，気温の関係を図3-13に示す。定点および移動気象観測のWBGTおよび気温は，AMeDAS船橋との対応が良く，RMSEは約1.5℃（移動：約2.0℃）以下の差異であった。一方，黒球温度は，WBGTや気温に比べて温度差が大きい傾向にあり，AMeDAS船橋より極端に高いもしくは低い場合が確認された。これは，観測時間帯における局所的な雲の流れの違いによるものと考えられる。RMSEは最大で約5℃（移動：約6℃）であり，移動気象観測値に関しては，約13℃も異なる時間帯が見られた。これは，Area\_1同様にAMeDAS船橋の周辺環境の相違によるものと考えられる。

### 3.2.5 小まとめ

都市に存在する水域に隣接する住宅街として、千葉県習志野市谷津干潟北側住宅街の熱ストレス評価を行った。Area\_1 より領域が小さいことから、気象要素の空間的な変動も小さい傾向であったが、気象状況によっては、指標レベルが 2 段階変化する可能性が示された。WBGT は、湿球温度や比湿、気温に依存する傾向であったが、黒球温度と WBGT の高い地点は概ね対応していた。

また、干潟を風上とする南風時では、干潟から近い「南側領域」と風向に直行する「東西道路」では水蒸気量が多く“ムシムシ”と、干潟から遠い「北側領域」と風向に平行な「南北道路」では日射供給量が増加し“ジリジリ”と人体の感じる暑さの感覚は異なる可能性が示唆された。

さらに、街区内の WBGT、黒球温度、気温を AMeDAS 船橋の観測値と比較すると、Area\_1 同様に WBGT や気温より黒球温度の差異が大きく、RMSE の最大値は、定点観測で約 5℃、移動観測では約 6℃であり、Area\_2 でも AMeDAS が代表的ではないことが示された。

## 3.3 Area\_3

本節では、街区特性が複雑に存在する Area\_3 において、特に地点の特徴が明確である皇居周辺に着目する（図 2-6 参照）。

### 3.3.1 熱環境場の空間分布

Case\_3.1a, Case\_3.1b の熱環境場の空間変動について評価する。熱ストレスが高かった Case\_3.1b における WBGT、湿球温度、黒球温度、気温、比湿の空間分布を図 3-14 に示す。5 項目の変動幅はそれぞれ WBGT:8.3℃ (2 Case での最大値:8.3℃), 湿球温度:9.2℃ (9.2℃), 黒球温度:8.8℃ (8.8℃), 気温:10.8℃ (10.8℃), 比湿:10.2 g kg<sup>-1</sup> (10.2 g kg<sup>-1</sup>) であった。2.6.1 項で除去しきれなかった気温のエラー値が多少含まれていることから、湿球温度や比湿、WBGT の変動幅が大きい傾向にあった。ただし、エラー値のほぼなかった黒球温度の変動幅が 3 領域の中で大きい傾向にあったことから、各気象要素の変動幅も大きかったと予想される。

WBGT の変動は、どの気象要素ともよく対応しており、特に WBGT の高い地点では黒球温度の上昇が顕著であった。これについて図 3-15 に示す天空率を見ると、皇居周辺（図 3-15 赤丸）のように天空率が高い地点では、黒球温度および WBGT も高い傾向にあった。これは、天空率が高いことによって日射供給量が増加したためであると考えられる。

Area\_1, 2 同様に、さらに統計的に街区特性を評価するために 2 Case の各気象要素の空間変動に着目する。Area\_3 も、Area\_1, 2 と同様に、黒球温度の標準偏差は他の項目に比べ大きかった（図 3-16）。皇居周辺（図 3-16, H 領域）のように、周辺環境の特徴が明確な領域では、標準偏差が小さく、街区特性が表れていた。

### 3.3.2 ルーチン観測網との比較

Area\_3でも気象庁や環境省の値と比較を行った。Area\_2と同様に移動気象観測に加え、定点気象観測も比較対象とした。比較対象地点はArea\_1と同様の気象台（東京）である。Case\_3.1a, Case\_3.1bの観測時間に対応した気象台（東京）との関係を図3-17に示す。この領域は商用地域で、建物用途が複雑に混在していたが、定点および移動気象観測のWBGTおよび気温は気象台（東京）との対応が良く、RMSEは約1.0℃（移動：約2.0℃）以下の差異であった。一方、黒球温度はWBGTや気温に比べ、差異が大きい傾向にあり、定点観測では気象台（東京）より平均的に約5℃の差異が生じ、移動観測では最大約13℃低い地点が確認された。これら要因について、定点観測地点では、地表面性状や周辺環境が気象台（東京）と異なることが挙げられる。また、移動観測地点では、領域内は建物や樹木が密集しており、図3-15で示す通り、天空率が低く日陰が多いためであると考えられる。

### 3.3.3 小まとめ

都心部の建物用途が複雑に混在する商用地域として、東京都千代田区を中心とした2020年東京オリンピックマラソンコース（東京開催時）の熱環境場の評価を行った。3領域の中で最も解析領域が広く、それに伴って、WBGTの変動も大きく、WBGTの最大値に相当する地点では、天空率が高いことによる黒球温度の上昇が顕著であった。また、皇居周辺など街区特性が明確な地点ではそれに応じた気象変動が見られた。街区内のWBGTや気温は気象台との対応が良かったが、黒球温度は大きく異なり、移動観測地点が建物や樹木が密集しているため、日陰の形成による黒球温度の低下が顕著であった。

## 3.4 まとめ

本章では、街区特性の異なる3領域において移動および定点気象観測を行い、街区内の気象場の空間変動、街区特性の違いによる暑さの感覚の相違、ルーチン観測網と街区内の温熱環境の相違について評価した。

街区内ではWBGTをはじめ、湿球温度、黒球温度、気温、比湿は有意に変動しており、特に黒球温度の変動は大きく、黒球温度が顕著に高い場合はWBGTも高い傾向にあった。さらに、黒球温度の高い地点と天空率の高い地点が概ね対応していたことから、WBGTを評価する上では、黒球温度と天空率の空間変動を適切に把握することが重要であることがわかった。

解析対象領域を街区特性である道路幅、建物用途、道路方向、水域からの距離で分類した場合、街区特性が対称的に異なっても、WBGTは概ね同等であったが、人体の感じる暑さの感覚は“ムシムシ”または“ジリジリ”と異なる可能性が示唆された。

3領域に共通して街区内の黒球温度は、気象官署の結果と大きな相違が生じていることが示された。

以上の結果から、黒球温度を把握することの重要性が示された。しかしながら、1.1節(b)

で述べたように、都市街区内の黒球温度は一般的に観測されないため、**次章**では黒球温度を簡易的に推定できる方法について検討する。

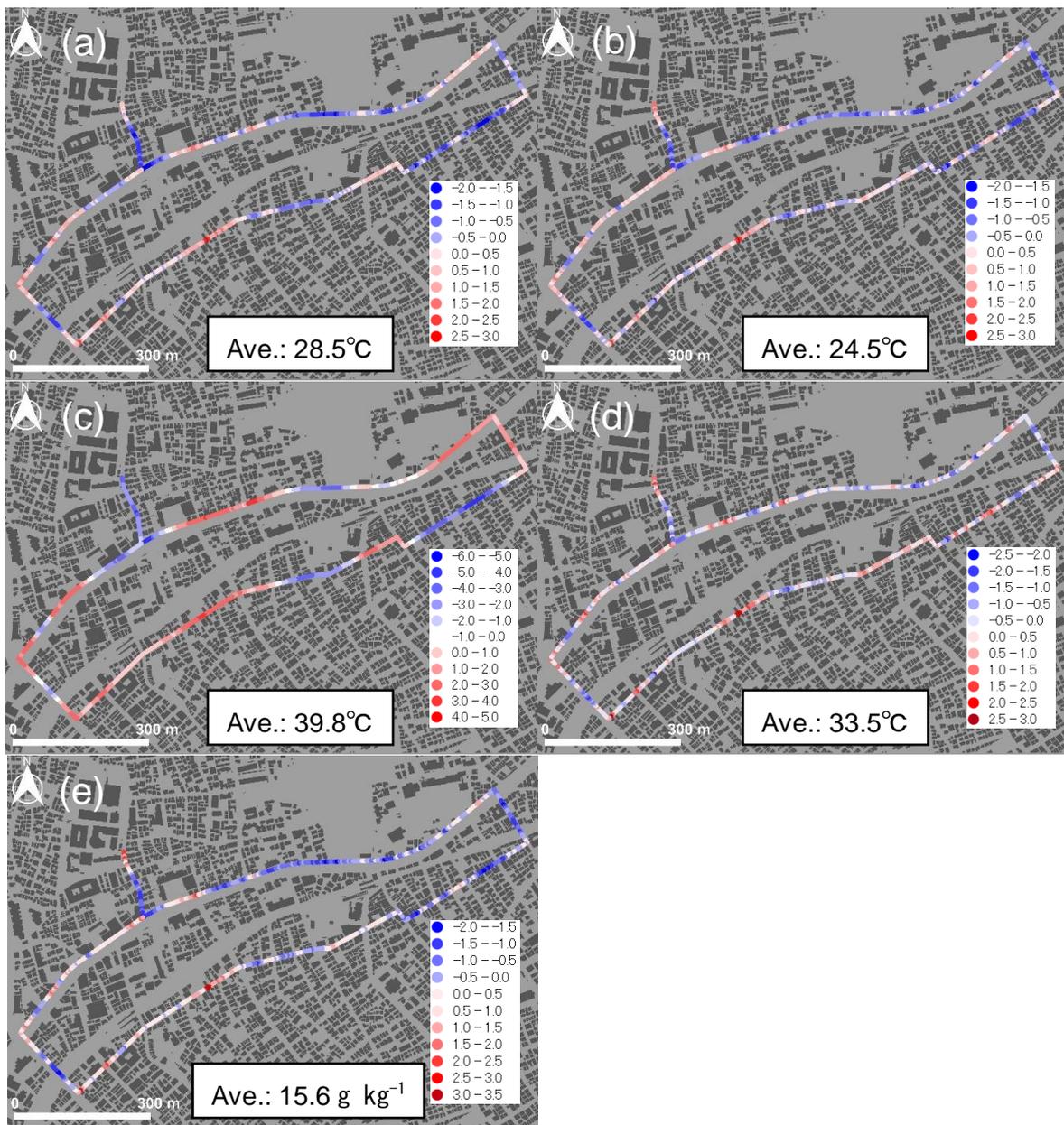


図 3-1 Case\_1.3b における (a) WBGT, (b) 湿球温度, (c) 黒球温度, (d) 気温, (e) 比湿の空間分布.

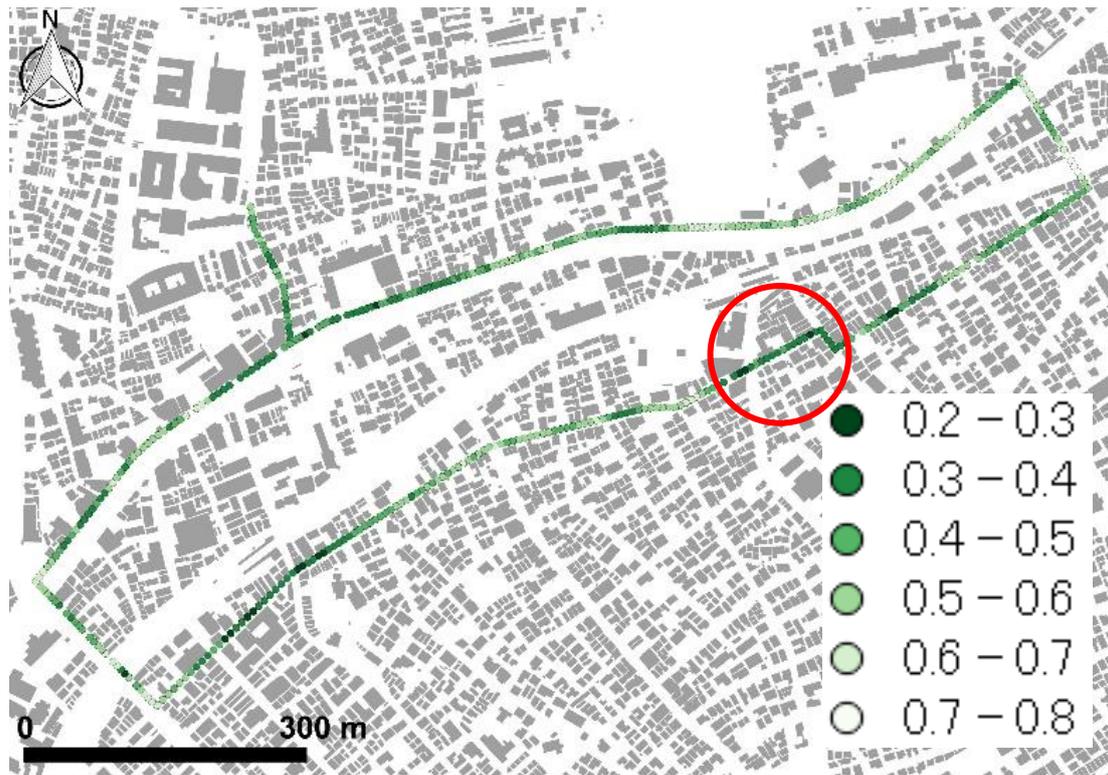


図 3-2 Area\_1 の天空率分布. 赤丸は天空率が低いにも関わらず黒球温度が高い地点の例.

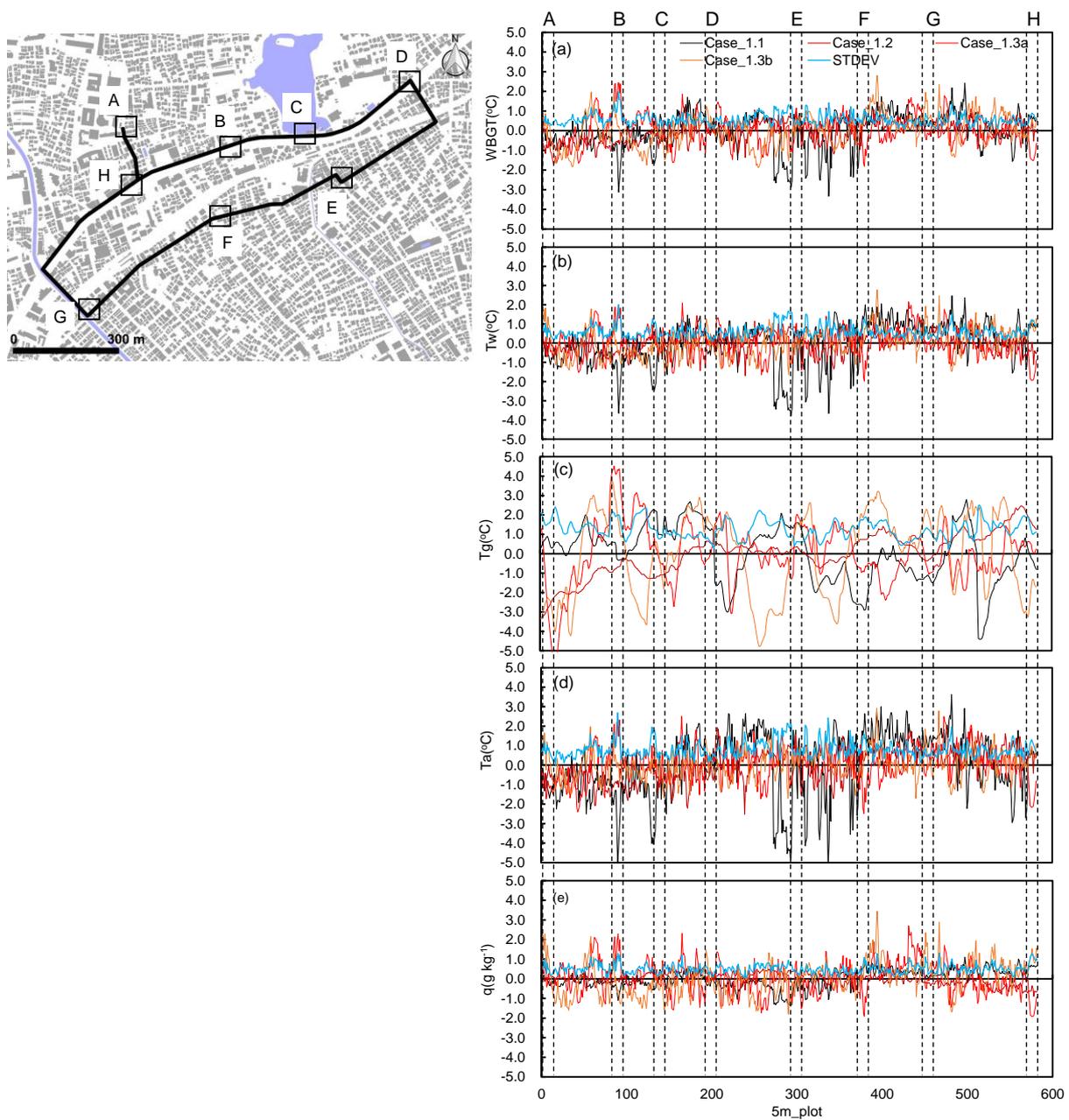


図 3-3 Case\_1.1~Case\_1.3b における (a)WBGT, (b)湿球温度, (c)黒球温度, (d)気温, (e)比湿の空間変動と標準偏差 (STDEV). 左図と右図の地点は大文字英字で対応している.

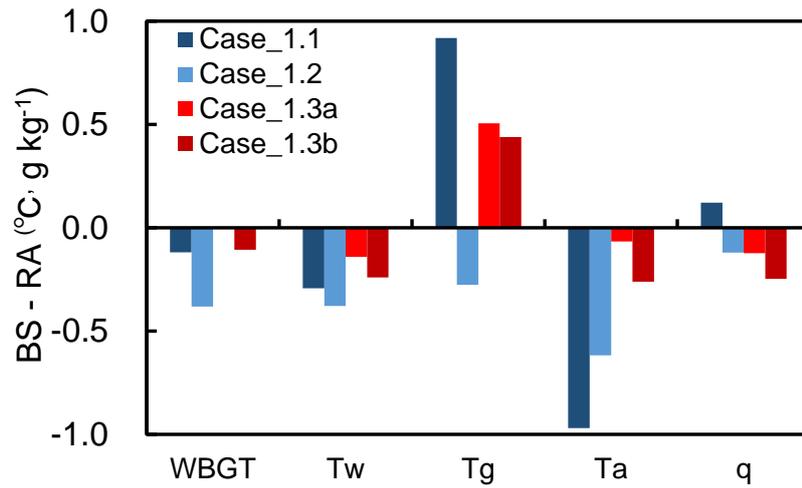


図 3-4 「街道」(BS) および「住宅街」(RA) の WBGT, 湿球温度, 黒球温度, 気温, 比湿の差分平均値.

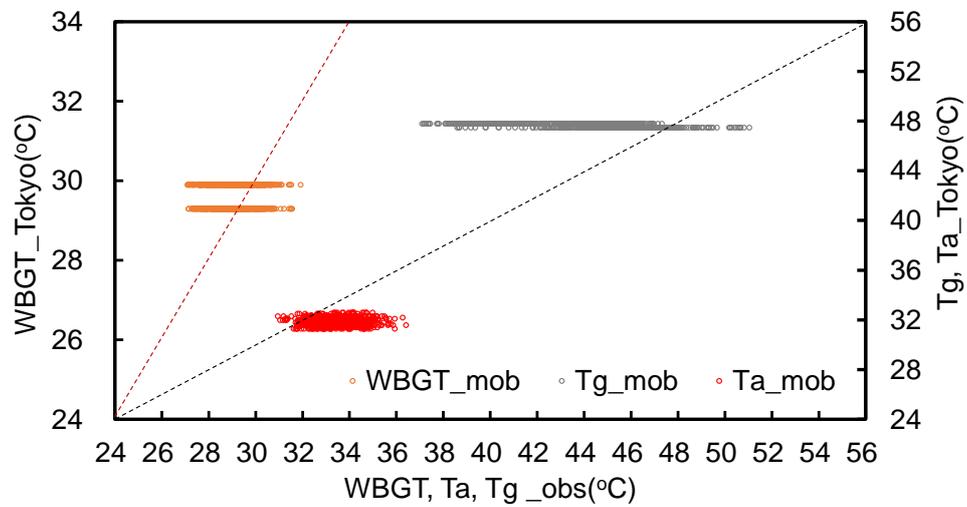


図 3-5 気象台 (東京) および移動気象観測で得られた WBGT, 黒球温度, 気温の比較. mob は移動気象観測結果を示す. 赤破線は WBGT, 黒破線は黒球温度および気温の比率 1:1 を表す.

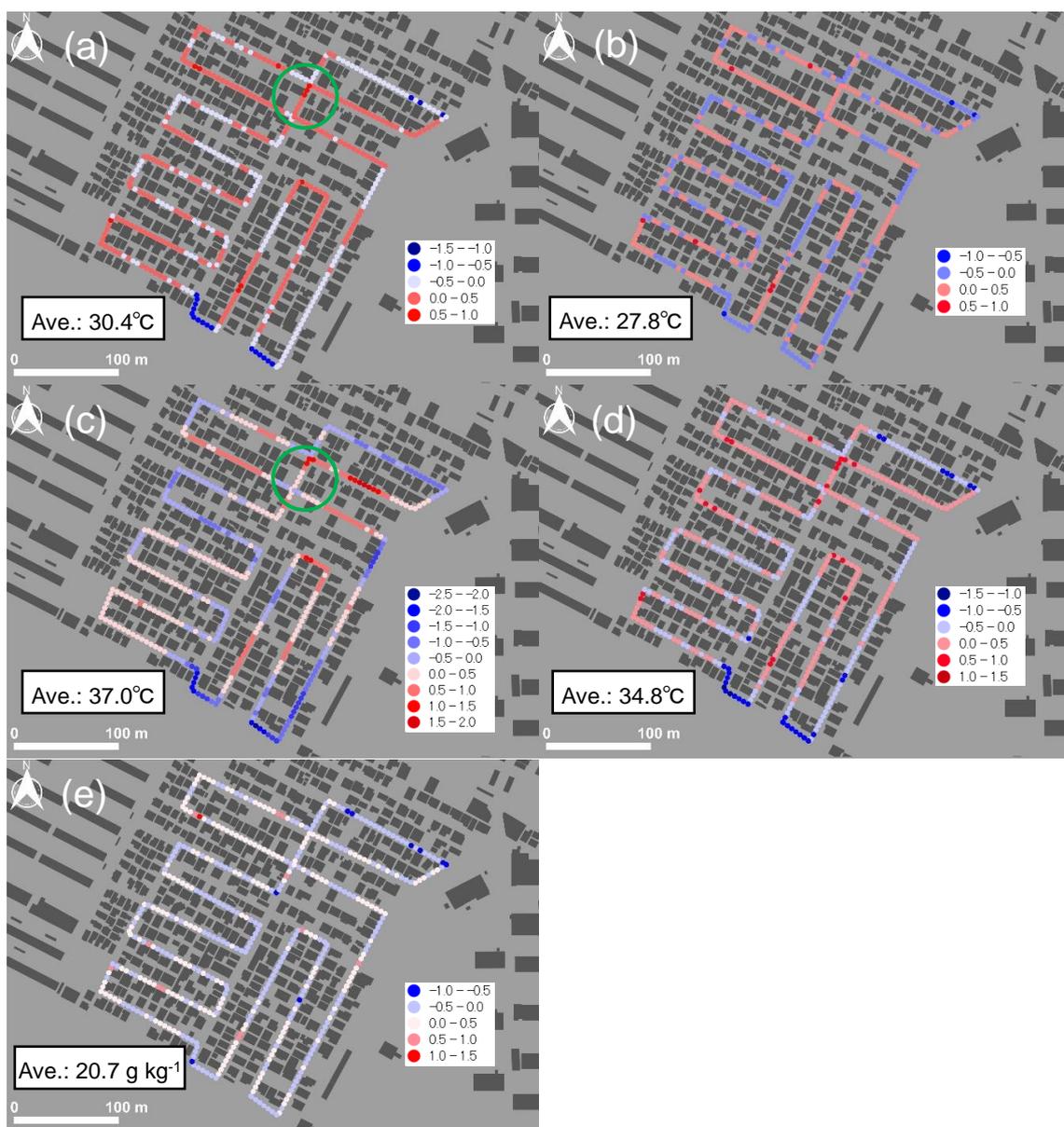


図 3-6 Case\_B における (a)WBGT, (b)湿球温度, (c)黒球温度, (d)気温, (e)比湿の空間分布.

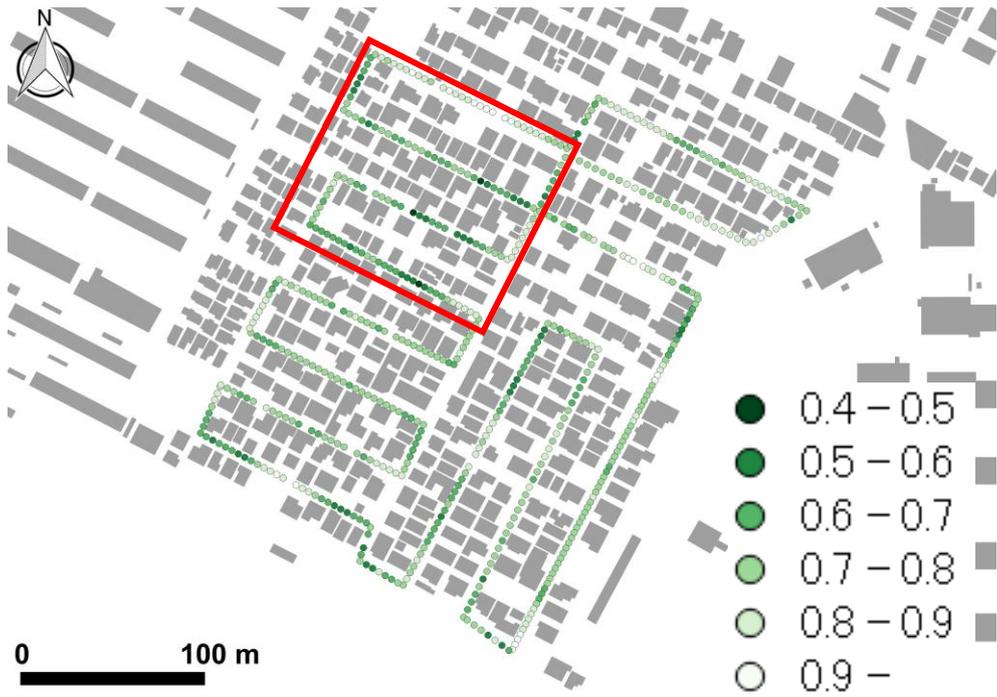


図 3-7 Area\_2 の天空率分布. 天空率と黒球温度の関係が不明瞭な領域の一例 (赤枠).

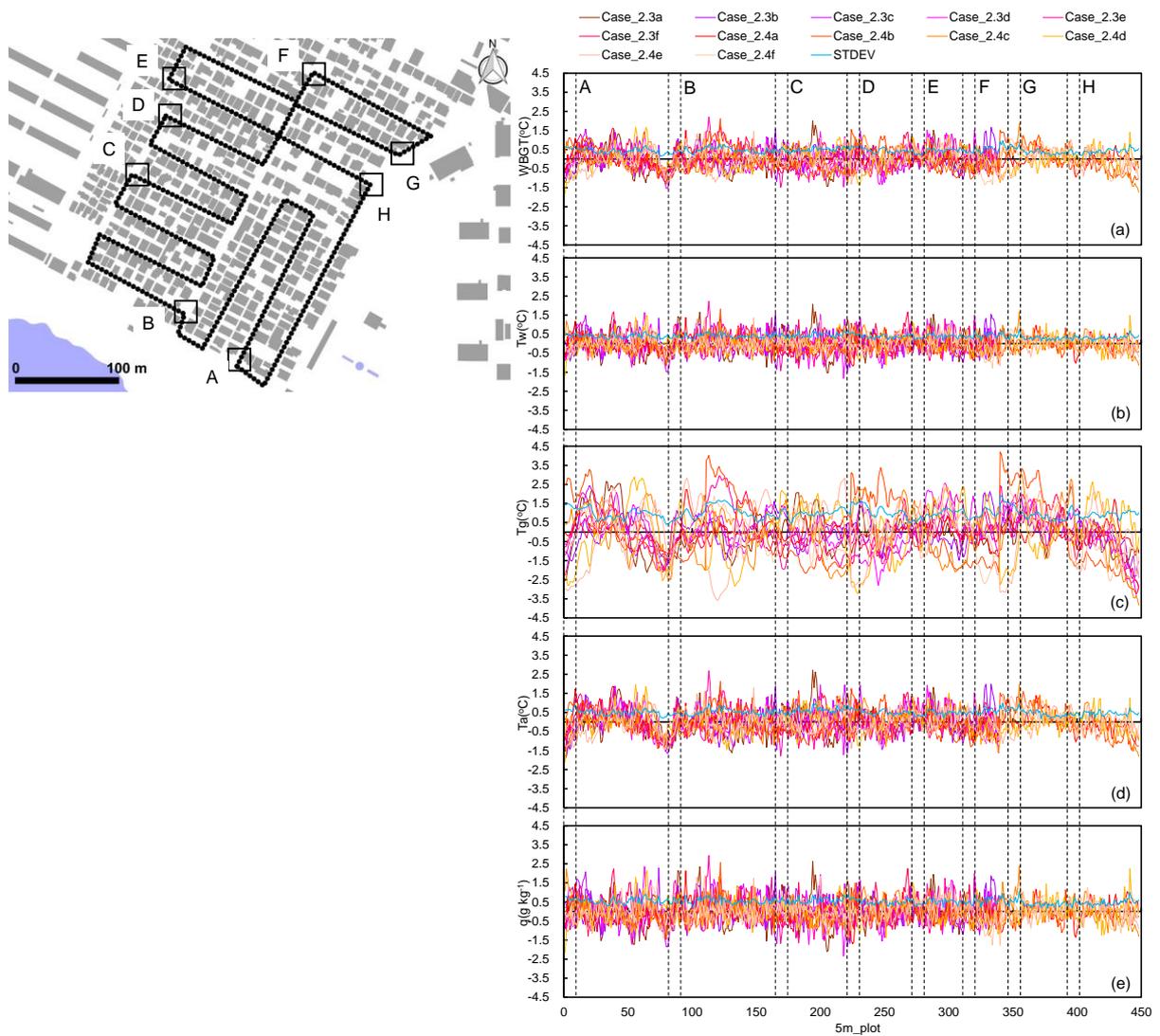


図 3-8 Case\_2.3a~Case\_2.4f における (a)WBGT, (b)湿球温度, (c)黒球温度, (d)気温, (e)比湿の空間変動と標準偏差 (STDEV).

(c)以外で 350 プロット付近から Case\_2.3a~Case\_2.4f で欠損あり.

左図と右図の地点は大文字英字で対応している.

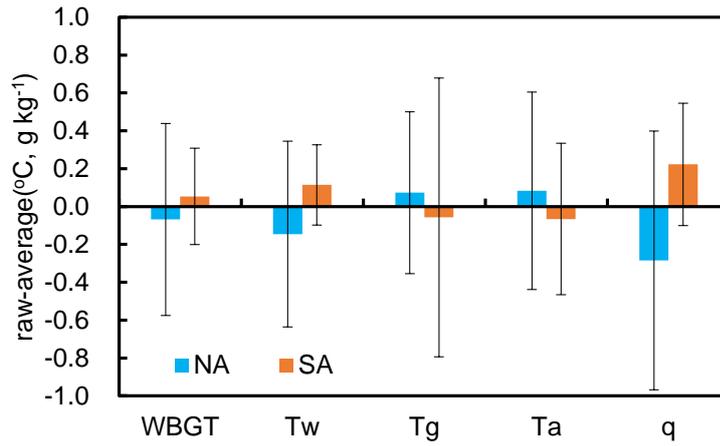


図 3-9 「北側領域」(NA) と「南側領域」(SA) に分類した WBGT, 湿球温度, 黒球温度, 気温, 比湿のルート平均値からの差分平均値. 黒棒は標準偏差を示す.

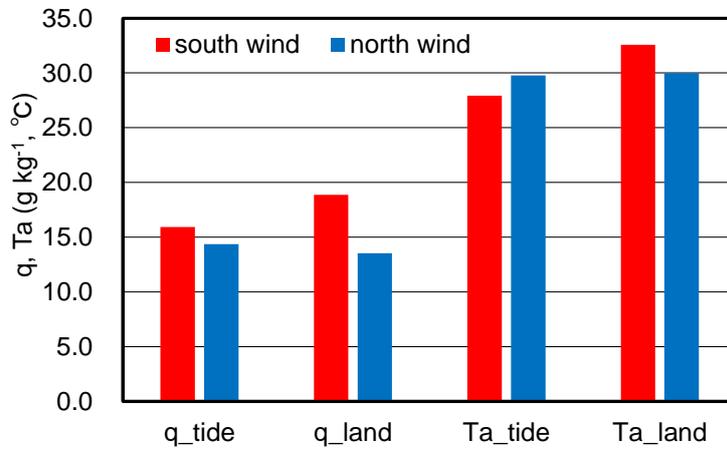


図 3-10 異なる風向における街区内および干潟内での比湿 (q) と気温 (Ta) の平均値. tide: 干潟内, land: 街区内

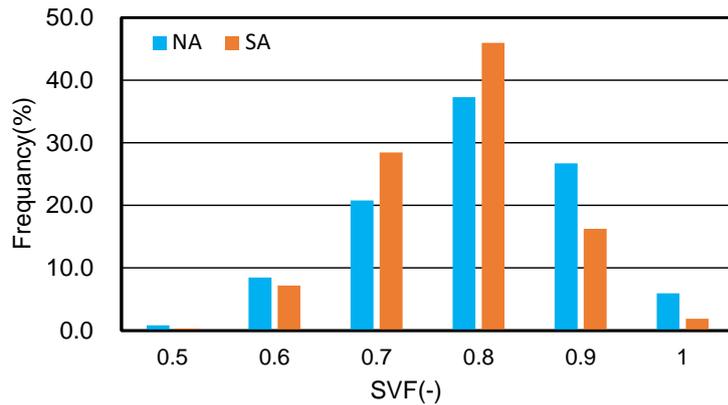


図 3-11 「北側領域」(NA) と「南側領域」(SA) における天空率の度数分布.

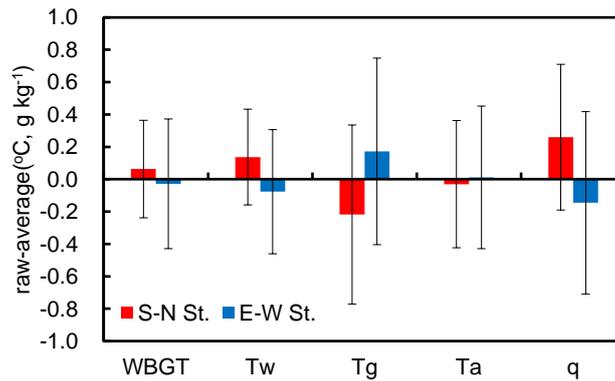


図 3-12 「南北道路」(S-N St.) と「東西道路」(E-W St.) に分類した WBGT, 湿球温度, 黒球温度, 気温, 比湿のルート平均値からの差分平均値. 交差点付近のデータは除外した. 黒棒は標準偏差を示す.

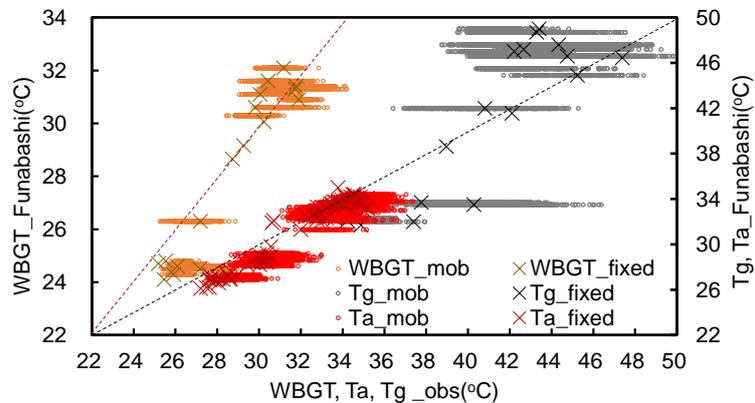


図 3-13 Case\_2. 1a~2. 5f における AMeDAS 船橋および移動・定点で観測された WBGT, 黒球温度, 気温の比較. mob は移動気象観測, fixed は定点気象観測である. 赤破線は WBGT, 黒破線は黒球温度および気温の比率 1:1 を表す.

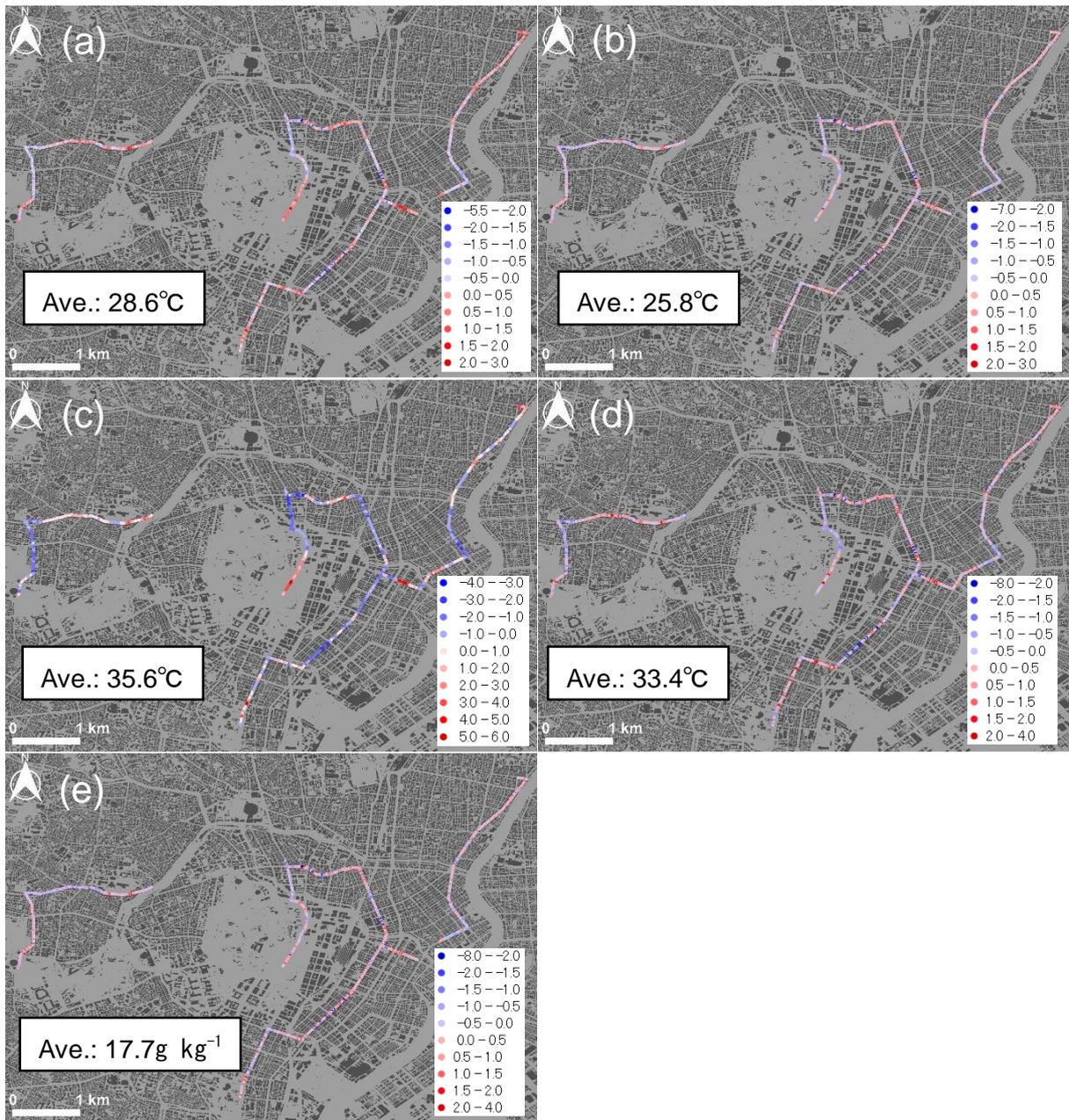


図 3-14 Case\_3.1b における (a)WBGT, (b)湿球温度, (c)黒球温度, (d)気温, (e)比湿の空間分布.

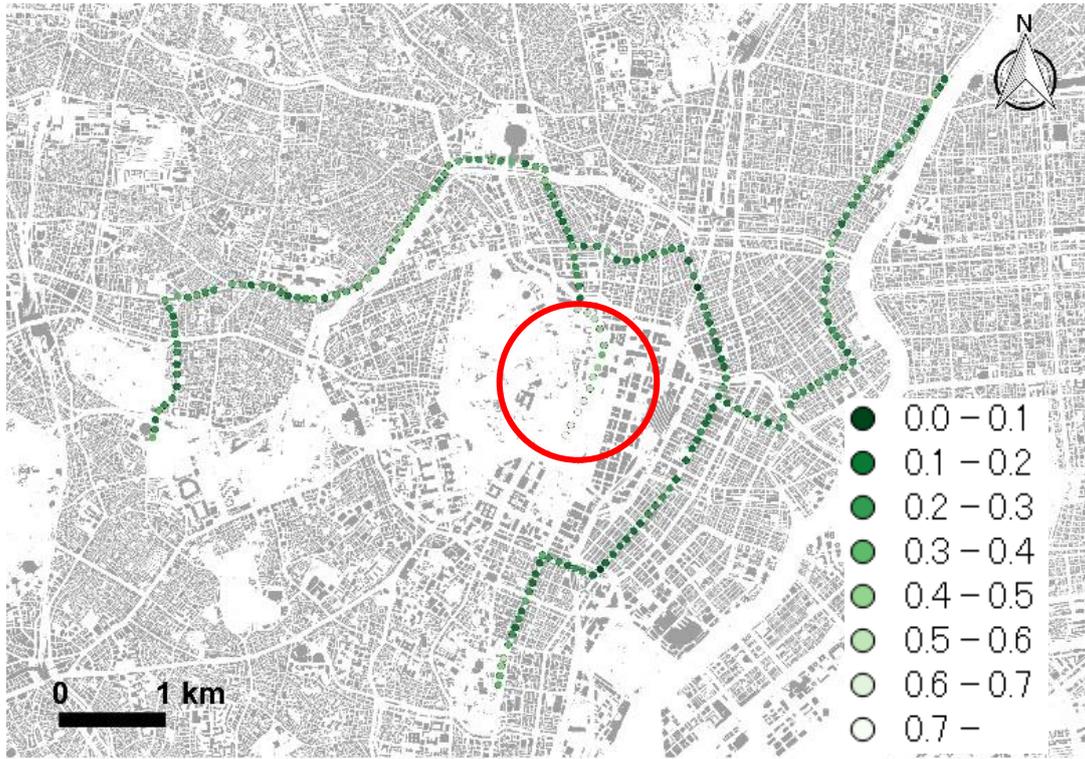


図 3-15 Area\_3 の天空率分布

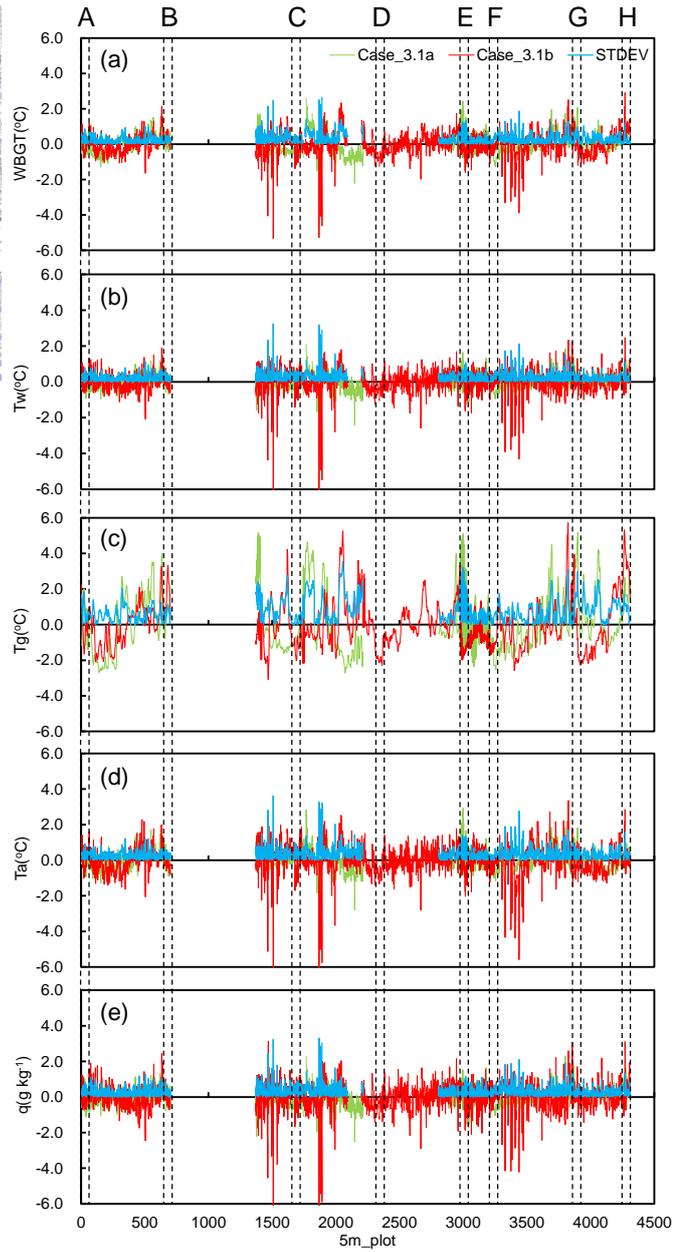
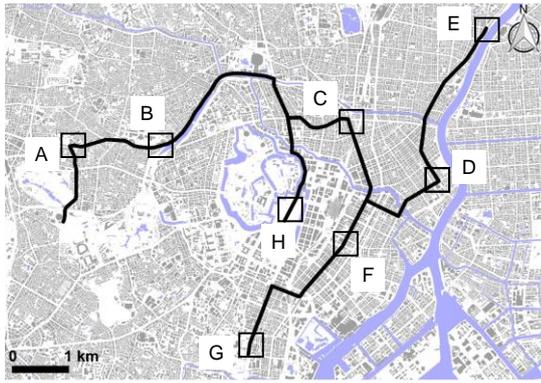


図 3-16 Case\_3.1a, Case\_3.1b における (a)WBGT, (b)湿球温度, (c)黒球温度, (d)気温, (e)比湿の空間変動と標準偏差 (STDEV).  
約 700~1300, 約 2000~2800 プロットで欠損あり.  
左図と右図の地点は大文字英字で対応している.

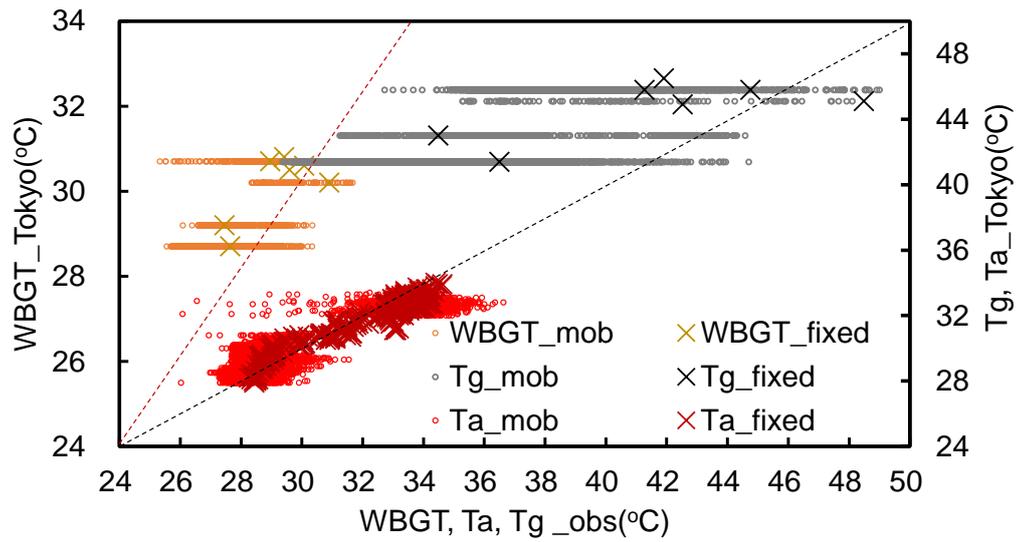


図 3-17 Case\_3.1a, Case\_3.1b における気象台（東京）および移動・定点で観測された WBGT, 黒球温度, 気温の比較. mob は移動気象観測, fixed は定点気象観測である. 赤破線は WBGT, 黒破線は黒球温度および気温の比率 1:1 を表す.

## 第4章 都市街区内の黒球温度推定式の提案

第3章では、街区内部における黒球温度は、空間変動が大きく、WBGTの上昇に大きく寄与していたこと、さらにルーチン観測網と大きな相違が生じていたことから、黒球温度を把握することの重要性が示された。また、1.1節(b)で示したように、都市街区内の黒球温度の観測は困難で、かつ一般的な気象要素でないことから、本章では、観測結果から簡易的に黒球温度を推定できる式を提案する。その際、工学的観点を重視して、「街区内部での空間変動の再現」と「簡易的な推定」を目指す。

### 4.1 説明変数

黒球温度の推定では、全天日射量・気温・天空率を説明変数とした。天空率は、黒球温度と相関があることで知られ(e.g. 大橋, 2009)、本観測結果からも黒球温度の高い地点は、天空率の高い地点とよく対応していた。全天日射量は、入力する短波放射量および壁面・地表面温度の決定に関与する指標値であり、黒球温度の絶対値を左右する重要なパラメータである。気温は、黒球表面の熱収支において熱交換に関わる重要なパラメータである。黒球温度と気温の差分値は、熱交換係数を乗ずることで黒球表面の熱交換を再現する。ここで、熱交換係数は、風速によって決定されるパラメータであるが、街区では風速の非定常性が高く、黒球温度との相関は、風速より気温の方が高い。また、街区内部における風速の観測は、極めて困難であり、数値シミュレーションを用いた場合でも計算負荷が大きい。これらのことから、風速の導入は「簡易的な推定」の概念から逸脱する。したがって、風速は省略して考えることとする。

以上のことから、全天日射量・気温・天空率を説明変数として重回帰分析を行い、黒球温度の推定を試みる。天空率に関しては、2.6.3項で示したとおり、日本で一般的な計算方法(一般定義)とSOLWEIGで採用されている計算方法(SOLWEIG定義)の2通りの定義に基づくため、黒球温度は双方の天空率から推定することとする。

### 4.2 黒球温度推定式の提案

#### 4.2.1 移動気象観測結果による推定

定点気象観測(Area\_2, Area\_3)または気象台(東京)(Area\_1)から得られた全天日射量( $S_{global}$ )、各Caseで得られた気温( $T_{a,mob}$ )、各Areaで得られた天空率( $SVF$ )と各Caseで得られた黒球温度( $T_{g,est}$ )との重回帰分析を行った。サンプル数は天空率を算出した地点数である12854地点である。一般定義およびSOLWEIG定義に基づいた天空率を用いて、重回帰分析によって得られた推定式は以下の式である。

一般定義：

$$T_{g,est} = 0.0056S_{global} + 1.31T_{a,mob} + 2.53SVF - 6.27 \quad (4-1)$$

SOLWEIG 定義：

$$T_{g\_est} = 0.0056S_{global} + 1.31T_{a\_mob} + 2.18SVF - 5.56 \quad (4-2)$$

ここで、3変数の単位は、 $S_{global}$ ：W m<sup>2</sup>、 $T_{a\_mob}$ ：°C、 $SVF$ ：無次元である。2式の解析結果は概ね同様であったため、本項では式(4-1)について議論する。

推定された黒球温度と実測値の関係を図4-1(a)に示す。決定係数およびRMSEは、0.90、1.70°Cであった。RMSEは、1.1節(b)で示した岡田ら(2013)の推定式の推定誤差(2.39°C)より小さく、1) 街区内での非定常性の高いデータでの検証、2) 街区特性の異なる領域を合算させて近似、したことを考慮すれば、非常に高い精度で推定できたことがわかる。

推定された黒球温度の誤差のヒストグラムを図4-2(a)に示す。誤差分布は-11~9°Cと大きいですが、約80%が-1~2°Cに収束した。各Caseに式(4-1)を適用させた場合のRMSEおよびWBGT算出時の誤差を表4-1に示す。RMSEは1.2°C~3.2°Cで推移し、領域が大きくなるほどその値が大きくなる傾向であった。これらの誤差はWBGT算出時には0.7°C以下となる。現在、環境省の熱中症予防情報の実況推定値および予測値で用いられる小野・登内(2014)のWBGT推定式の推定誤差は約0.5°Cであるため、WBGT算出時の誤差からも黒球温度は高い精度で推定できていることがわかった。

#### 4.2.2 定点気象観測結果による推定

式(4-1)の各説明変数の性質について述べる。全天日射量は、定点気象観測による領域代表値を適用すればよい。天空率は、季節に応じた値を示すため、葉の付き方が極端に変化する冬季と夏季に観測することで適用でき、数値モデルでも再現できる(第5章)。しかしながら、街区内の気温に関しては、モデルでの再現も行われているが、非定常性が高く、現在でもモデルの開発・検証が行われている(e.g. Ohashi et al. 2007; Takane et al. 2017)。また、移動気象観測から得ることは容易であるが、領域を代表する定点気象観測の方が観測負荷は少なく、汎用性は高くなる。

そこで、定点気象観測(または気象台)によって得られた気温( $T_{a\_fixed}$ )を用いて再度推定式を考案する。

推定された式を以下に示す。

一般定義：

$$T_{g\_est} = 0.0066S_{global} + 1.13T_{a\_fixed} + 1.67SVF + 0.54 \quad (4-3)$$

SOLWEIG 定義：

$$T_{g\_est} = 0.0066S_{global} + 1.13T_{a\_fixed} + 1.02SVF + 1.17 \quad (4-4)$$

この2式も移動観測気温で推定した場合と同様で、解析結果に大きな相違はなかったため、

本項では式(4-3)について議論する。

定点気象観測の気温を使用した場合でも、図4-1(b)および図4-2(b)に示すとおり、式(4-1)と同様の傾向を示した。決定係数およびRMSEは0.89、1.75℃であり、式(4-1)と同等の精度であった。各Caseに適用した場合の推定誤差は、式(4-1)より小さくなる場合があるが(表4-1)、式(4-1)および式(4-3)の各項の係数に着目すると、気温変動に最も重みづけされており、街区内の気温変動を導入する方が、より実態に即した黒球温度を推定することができる。ただし、3.1.3項、3.2.4項、3.3.2項で示したように、气象台や近傍の定点気象観測の気温は街区内と大きな差異がないため、代表的な気温を用いた場合でも、十分に黒球温度を推定できる可能性が示された。

#### 4.2.3 黒球温度推定式の適用範囲および利点

本研究で提案した黒球温度推定式(以降、本提案式)の適用条件は、領域に代表的な風速が $4\text{ m s}^{-1}$ 以下(図2-8, 2-14, 2-18 参照)で、かつ日向である。熱中症が発生しやすい条件として、弱風環境下、日向、南中時刻前後、暑熱未順化、幼児・高齢者などが挙げられる。したがって、上記の適用範囲は、より熱中症が発生しやすい熱環境場を再現できることがわかる。

本提案式が既存式に対してアドバンテージがある点について説明する。

本提案式の変数について、既存式と異なる点は、風速ではなく、天空率の導入である。観測から天空率を得る場合、機器のコストや観測の容易さから、風速よりもデータの取得は容易である。一方、数値シミュレーションから天空率を得る場合、建物データ(位置、高さ)のみから求めることが可能である。しかしながら、風速の推定では、同一のデータに併せて、気温や大気圧などの気象条件も詳細に設定する必要があるため、天空率の推定の方が容易である。

これらのことから、本提案式への天空率の導入は、風速の導入に対してアドバンテージがあると言える。

以降では、本提案式を用いて、本観測領域以外での適用可能性および既存の提案式との差異について評価する。

### 4.3 他領域への適用

本提案式(式(4-1))を多地点への適用を可能にするため、本研究対象領域以外の領域において、本提案式を適用し、評価した。解析対象領域およびデータは、久保田ら(1996)と大橋ら(2010)を参照した。これらの領域の地表面や周辺環境は、大部分が人工被覆面であり、Area\_1~Area\_3の観測ルート沿いの構成要素と大きな差異はないと考えられる。

#### 4.3.1 検証用データ

久保田ら(1997)は、1995年9月9日に図4-3(赤枠)に示す東京都文京区の東京大学本

郷キャンパス内にある高層ビルの周辺 4 地点において、定点気象観測を実施した。本節では、1 日を通して日陰であった北側 (N) を除く、東側 (E)、南側 (S)、西側 (W) の観測結果を使用した。各地点において、黒球温度が最大となる時間の黒球温度、気温、全天日射量を抽出した。

大橋ら (2010) は、2007 年 8 月 6 日～14 日にかけて、**図 4-4 (赤枠)** に示す大阪府大阪府中央区の商業地区内 (Commercial-building streets, C-b St.) の 3 地点、住宅街区内 (Residential-housing streets, R-h St.) の 3 地点において、定点気象観測を行った。各日、黒球温度が最大値となる南中時に着目し、C-b St. と R-h St. に該当する地点における黒球温度の最大値と、その時間の気温や全天日射量を抽出した。

上記の条件から抽出した気象データ (全天日射量・天空率・気温) は**表 4-2** に示すとおりである。

#### 4.3.2 検証結果

本研究 (around\_Tokyo) および E, S, W, C-b St., R-h St. で観測された黒球温度と本提案式から推定された黒球温度の関係を**図 4-5** に示す。他の領域でかつ異なる観測条件で黒球温度を推定した場合でも、around\_Tokyo の推定精度 ( $-11^{\circ}\text{C}\sim 9^{\circ}\text{C}$ ) の範囲内に収束し、許容の精度で推定できた。RMSE は E, S, W が平均して  $4.77^{\circ}\text{C}$  と最も大きく、次いで R-h St. の  $3.10^{\circ}\text{C}$ 、C-b St. の  $1.43^{\circ}\text{C}$  であった。それぞれの観測地点の特徴に着目すると、「街区内」かつ「道路上」で観測された R-h St. と C-b St. は、「道路上」ではない E, S, W より、本観測領域の地表面に近しく、推定誤差が小さくなったと考えられる。

このように、本提案式を他の領域で適用できる可能性が示された。

#### 4.4 既存式との比較

本節では、1.1 項 (b) で示した、高市ら (2003)、登内・村山 (2008)、岡田ら (2013) の既存式と本提案式 (式 (4-1)) から推定した黒球温度を比較した。解析対象データは、Case\_1.3a と Case\_1.3b とした。

**図 4-6** は、既存式と本提案式から推定された黒球温度および実測値の空間変動を示し、**図 4-7** には、それらの相関関係を示す。いずれの提案式も、変動は概ね捉えられているものの、既存式は過大評価する傾向にあった。RMSE は、高市ら： $7.42^{\circ}\text{C}$ 、登内・村山： $4.32^{\circ}\text{C}$ 、岡田ら： $5.41^{\circ}\text{C}$ 、本提案式： $2.55^{\circ}\text{C}$  であり、本提案式の推定誤差が最も小さかった。既存式が過大評価する要因について、各提案式の共通項目である全天日射量に着目する。例えば、同じ全天日射量でも、气象台のように広い空間と街区内のように狭い空間では、推定される黒球温度は、周囲に日陰がある街区内の方が低い結果になると考えられる。したがって、街区内の黒球温度の推定に対しては、本提案式を適用する方が望ましいと考えられる。

#### 4.5 まとめ

街区内の黒球温度は、領域に代表的な全天日射量，街区内の天空率の空間変動，領域に代表的もしくは街区内の気温変動を用いることで，簡易的に推定できることを示した。

移動および定点気象観測で得られた気温を用いて黒球温度を推定した場合，それぞれの決定係数は 0.90, 0.89, 推定誤差は 1.70°C, 1.75°Cであり，高い推定精度であった。

また，時空間の全く異なる領域において本提案式を適用した結果，十分な精度で黒球温度を推定することができた。さらに，本提案式を既存式と比較した結果，街区内の黒球温度は，本提案式が実測値に最も近い値をとった。

以上より，「街区内での空間変動の再現」と「簡易的な推定」を網羅した推定式を提案することができた。次章では，数値モデルに基づき，広域における本提案式の適用可能性について評価する。

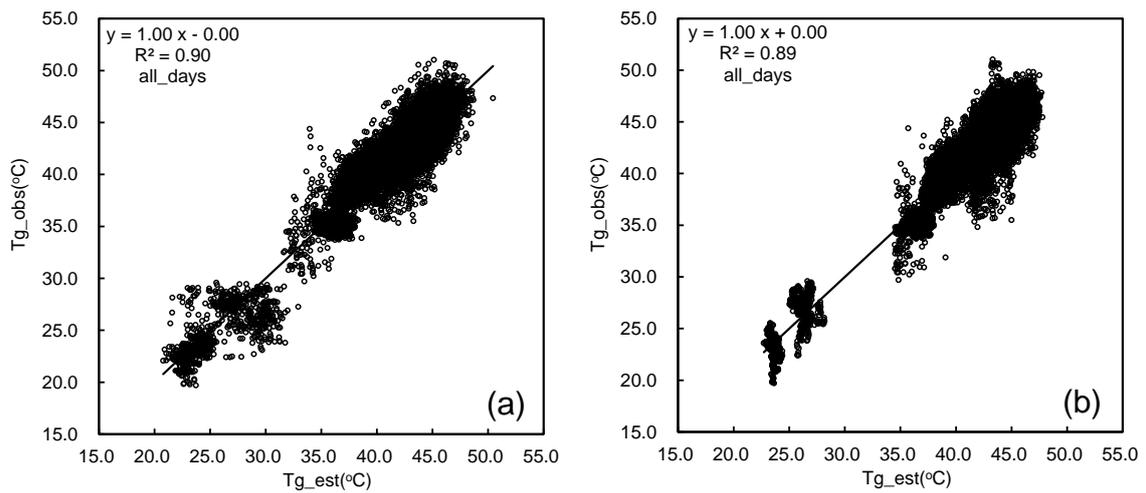


図 4-1 推定および実測された黒球温度の関係. Case\_1.1~Case\_3.1b の各地点アンサンブル値を使用し, サンプル数は 12862 地点である. (a)は式 (4-1), (b)は式 (4-3) から得られた結果である.

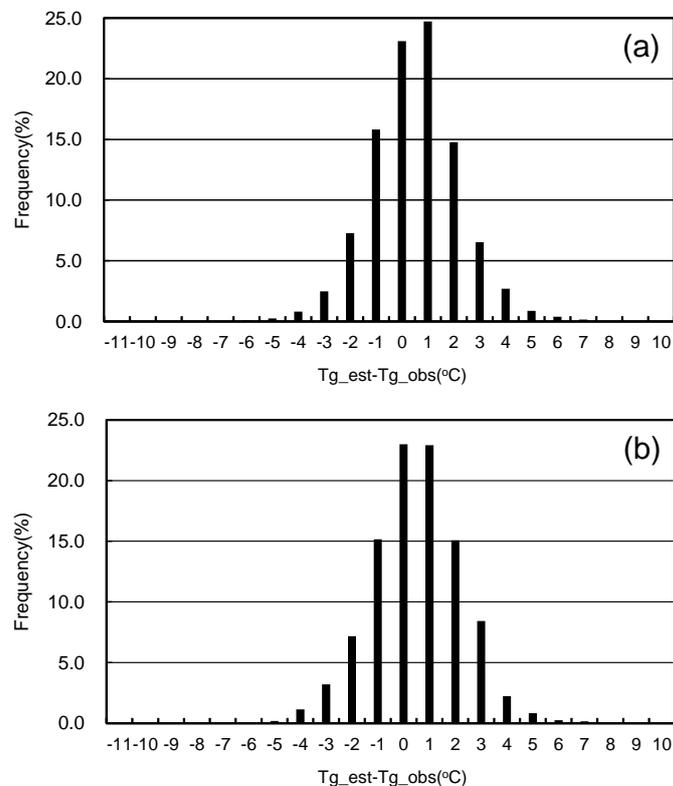


図 4-2 黒球温度推定時の誤差分布. (a)は式 (4-1), (b)は式 (4-3) から得られた結果.

表 4-1 各 Case に適用させた場合の RMSE および WBGT 算出時の推定誤差.

	Eq.(4-1)		Eq.(4-3)	
	RMSE(°C)	WBGT error(°C)	RMSE(°C)	WBGT error(°C)
Case_1.1	3.1	0.6	1.7	0.3
Case_1.2	1.2	0.2	1.4	0.3
Case_1.3a-b	2.6	0.5	2.9	0.6
Case_2.1a-b	1.5	0.3	1.7	0.3
Case_2.2	2.3	0.5	1.8	0.4
Case_2.3a-f	1.2	0.2	1.4	0.3
Case_2.4a-f	1.4	0.3	1.5	0.3
Case_2.5a-f	1.6	0.3	1.6	0.3
Case_3.1a-b	3.2	0.6	3.8	0.8

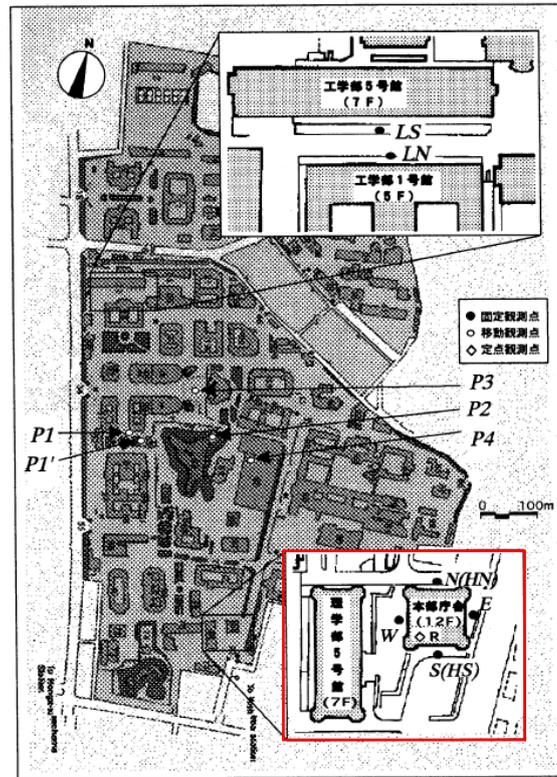


図 4-3 東京大学本郷キャンパスでの観測地点 (久保田ら, 1996)

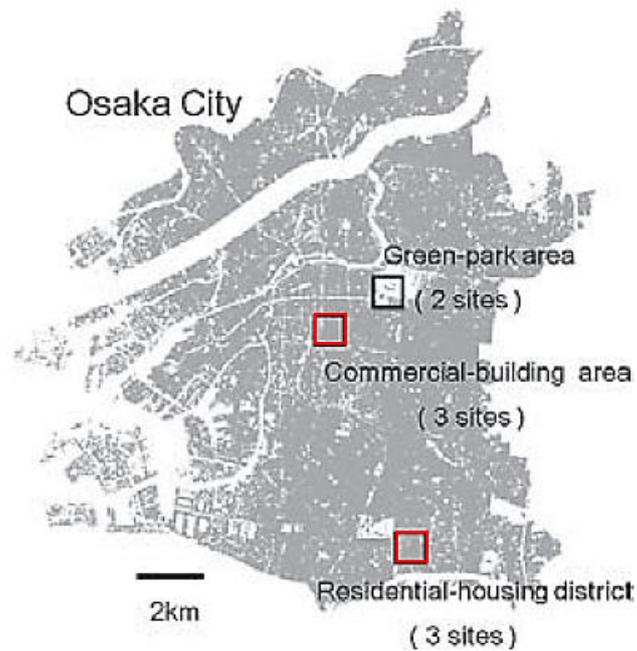


図 4-4 大阪府大阪市中央区での観測地点 (大橋ら, 2010)

表 4-2 久保田ら (1996) および大橋ら (2010) から参照した  
全天日射量・天空率・気温.

Study	Area	Date	Time	$S_{\text{global}} (\text{W m}^{-2})$	SVF (-)	$T_a (^\circ\text{C})$
Kubota et al., 1996	E	1995/9/9	1030 JST	720	0.442	27.3
	S	1995/9/9	1200 JST	780	0.426	28.2
	W	1995/9/9	1200 JST	780	0.267	28.0
Ohashi et al., 2010	C-b St.	2007/8/6	around 1200 JST	894	0.220	32.0
		2007/8/7		867		33.0
		2007/8/8		875		33.0
		2007/8/9		925		33.5
		2007/8/10		933		34.5
		2007/8/11		917		33.0
		2007/8/12		619		35.0
		2007/8/13		319		35.5
		2007/8/14		928		35.0
		Ohashi et al., 2010		R-h St.		2007/8/6
2007/8/7	867		34.5			
2007/8/8	875		35.0			
2007/8/9	925		35.5			
2007/8/10	933		36.0			
2007/8/11	917		35.5			
2007/8/12	619		35.5			
2007/8/13	319		35.5			
2007/8/14	928		35.5			

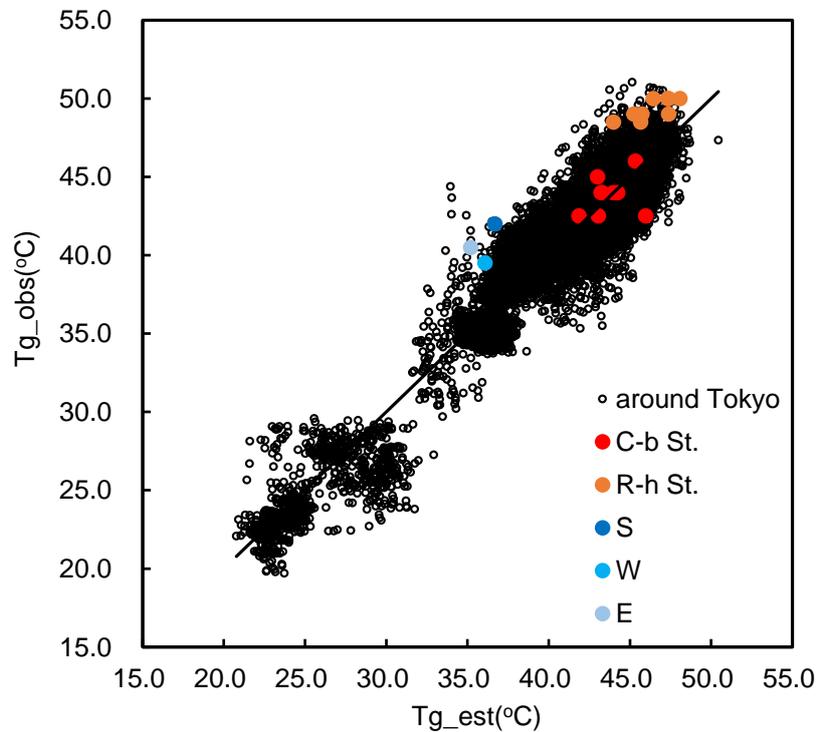


図 4-5 本研究および久保田ら (1996), 大橋ら (2010) の観測した黒球温度と推定された黒球温度の関係.

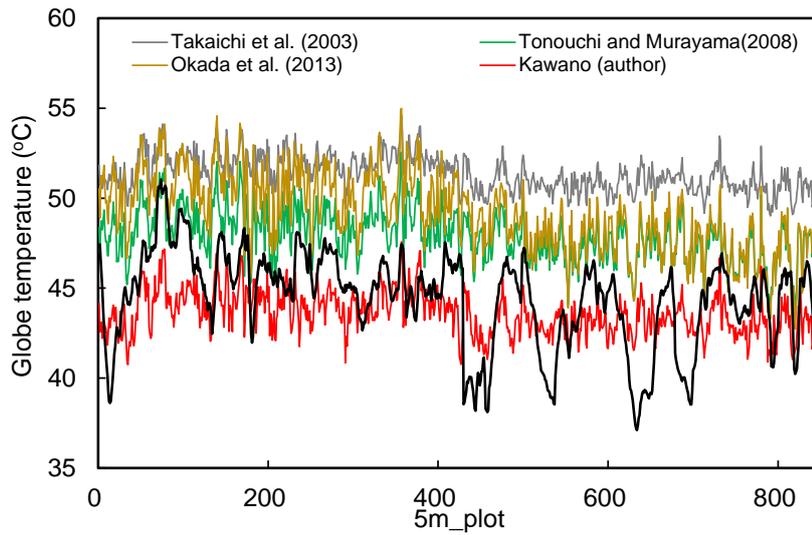


図 4-6 各提案式から推定された黒球温度の空間変動。  
データは Case\_1. 3a を使用した。

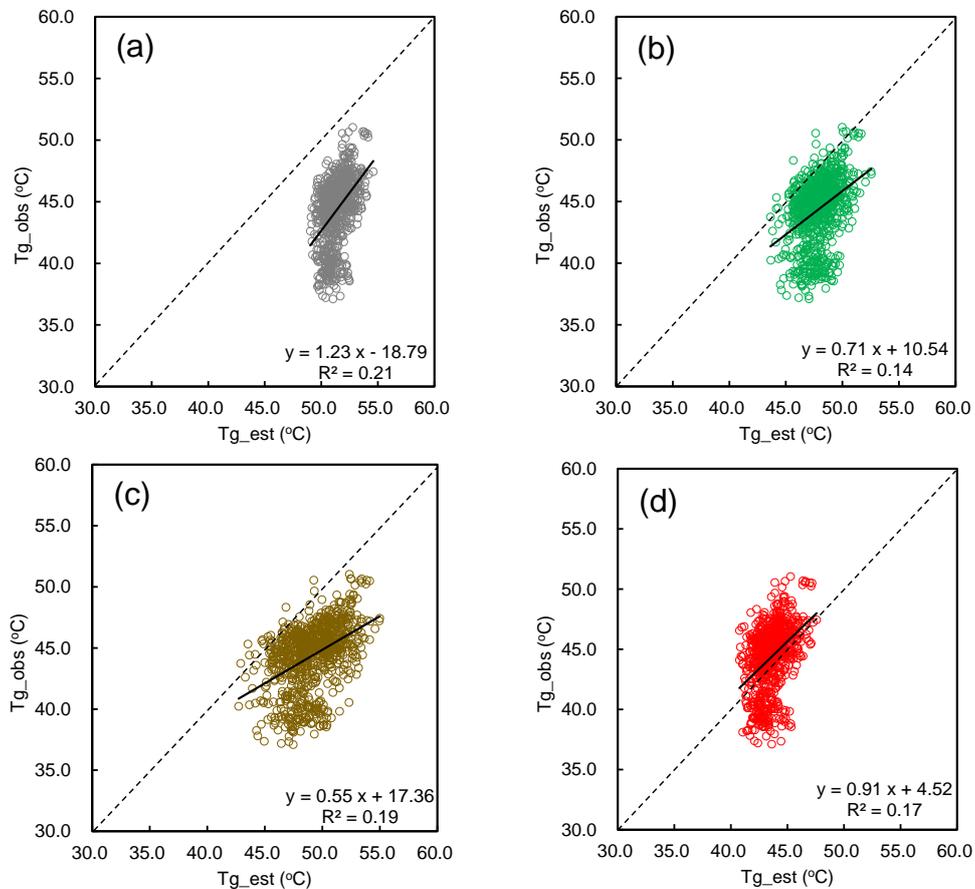


図 4-7 (a)高市ら, (b)登内・村山, (c)岡田ら, (d)著者の提案式による黒球温度の推定値 (Tg\_est) と実測値 (Tg\_obs) の関係。

## 第5章 広域における黒球温度推定式の有用性評価

実観測は、真値を得られるという利点がある一方で、準備や設置などには時間を要し、特に都市における観測は容易ではない。都市街区全体を時空間的に密に評価するには、従来の移動・定点観測に加えて数値モデルの活用が期待される。ただし、数値モデルは計算負荷が大きく、本提案式のように簡易的に温熱環境を評価できるならば、その方が良い。そこで、本章では、広域における本提案式の有用性を、数値モデルに基づき評価する。そのためにまず、数値モデルから黒球温度を推定し、実測値に基づいて数値モデルの妥当性・再現性を評価する。

### 5.1 数値放射モデル：SOLWEIG

#### 5.1.1 解析領域

定点での検証には、Area\_3 内の日比谷公園を対象とした（図 2-6 参照）。街区内での検証には、Area\_1 と Area\_3 を対象とし、それぞれの対象領域は東西に約 2,100 m（Area\_3：約 8,800 m）、南北に約 1,700 m（約 7,000 m）である。

#### 5.1.2 デジタルデータ

SOLWEIG に入力するデジタルデータは、数値表層モデル（Digital surface model, DSM）、樹高（Tree canopy DSM, cdsm）、樹冠（葉の付いた部分）までの高さ（Tree trunk zone DSM, tdsd）、土地利用分布（Land cover grid）、壁面の高さ（Wall height）、壁面のアスペクト比（Wall aspect）、天空率（SVF）の計 7 つである。例として、Area\_1 のデジタルデータを図 5-1 に示す。また、各データの詳細な情報は表 5-1 を参照されたい。

以下に、各データの作成方法について説明する。

DSM は標高（DEM）と建物高さ（3D building model）を合算したものである。樹木に関するデータは、解析ルート沿いのみ、図 5-2 のようにレーザー距離計（Nicon: 550AS）を用いて樹高（Tree height）と樹冠までの高さ（Tree trunk height）を、目視により樹冠幅を計測し、それらのデータを実際の位置に配置させ、UMEP 内の Tree Generator（Lindberg et al. 2011b; Lindberg et al. 2016）で仮想樹木を構築した（図 5-1 (b), 右下枠内（Tree model））。この仮想樹木は樹冠密度が 97% で再現される。土地利用は舗装道路（Paved）、建物（Buildings）、常緑樹（Evergreen Trees）、落葉樹（Deciduous Trees）、芝生（Grass）、土壌（Bare soil）、水域（Water）に分類した。壁面の高さとアスペクト比は、UMEP 内の Wall Height and Aspect で計算し（Lindberg et al. 2015a; Lindberg et al. 2015b）、天空率は UMEP 内の Sky View Factor Calculator で計算した（Watson and Johnson 1987; Lindberg et al. 2010; Konarska et al. 2013）。

デジタルデータは、表 5-1 のとおり、それぞれの空間解像度が異なるため、3次元空間解像度が 1 m になるよう分割処理を施した。

### 5.1.3 気象データ

SOLWEIG に入力した気象データは、気象台（東京）で得られた気温、相対湿度、全天日射量、大気圧であり、定点での検証では1分値、街区内での検証では1時間値を使用した。SOLWEIG では、散乱日射量は、*Reindl et al.* (1990) に基づき、気温と相対湿度から推定され、全天日射量と散乱日射量から直達日射量が推定される。なお、風速は入力することができるものの、SOLWEIG 内の計算には直接関係ない。

### 5.1.4 MRT および黒球温度の推定方法

#### (a) MRT

SOLWEIG から得られる MRT は、1.3.2 項で示した式(1-7)および式(1-8)から計算される (*Lindberg et al.* 2008; *Lindberg and Grimmond* 2011; *Lindberg et al.* 2016)。

$$S_{str} = \zeta_k \sum_{i=1}^6 S_i F_i + \varepsilon_p \sum_{i=1}^6 L_i F_i \quad (1-7)$$

$$MRT = \sqrt[4]{(S_{str}/(\varepsilon_p \sigma))} - 273.15 \quad (1-8)$$

ここで、短波放射量と長波放射量に対する人体への吸収係数である $\zeta_k$ と $\varepsilon_p$ は、それぞれ 0.7 と 0.97 である (*Höppe* 1992; *VDI* 1998)。人体と周辺の物体表面との間の形態係数である $F_i$ は、4方位に対しては 0.22、上下方向に対しては 0.06 である (*Fanger* 1970)。また、人体の射出率である式(1-8)の $\varepsilon_p$ は日本でも一般的に用いられる 0.97 とした (e.g. *Kusaka et al.* 2001; *Kikegawa et al.* 2014)。

SOLWEIG から得られる MRT の導出順序は次に示すとおりである。

- 1) DSM, cdsm, tdsM から天空率と影が計算される。
- 2) 天空率、気温、相対湿度から下向き長波放射量が計算される。
- 3) 地表面と建物表面の温度は影と気温から推定され、これが上向きおよび 4 方位からの長波放射量にも変換される。
- 4) 上下と 4 方位からの短波放射量は全天日射量、SVF、太陽高度、影、地表面および壁面のアルベドから計算される。
- 5) 1)~4)で計算された上下および 4 方位からの長短波放射量から Stefan-Boltzmann の法則に従って MRT が計算される。

詳細な計算方法は *Lindberg et al.* (2008) および *Lindberg et al.* (2016) を参照されたい。

## (b) 黒球温度への変換方法

SOLWEIG で推定された MRT から黒球温度へ変換する方法は、2.5.3 項で示した *Bedford* の式 (式 (2-20)) および ISO7726 の式 (式 (1-15)) である。

$$T_g = \frac{(MRT + 2.37\sqrt{v} \times T_a)}{(1 + 2.37\sqrt{v})} \quad (2-20)$$

$$MRT = \left[ (T_g + 273)^4 + \frac{1.10 \times 10^8 \times v^{0.6}}{\varepsilon \times D^{0.4}} (T_g - T_a) \right]^{0.25} - 273 \quad (1-15)$$

また、長短波放射量から黒球温度へ変換する場合は、球表面の熱収支式を用いる。2.5.2 項で示したとおり、直達および散乱日射量を分類した式 (2-19) を用いる。

$$0 = 0.25S_{dir} + 0.5(S_{dif} + S_{up}) + 0.5(L_{down} + L_{up}) - \varepsilon\sigma T_g^4 - h(T_g - T_a) \quad (2-19)$$

ここで、散乱日射量 ( $S_{dif}$ ) [ $\text{W m}^{-2}$ ] は、SOLWEIG で計算された日陰面の  $S_{down}$  を空間平均することで、仮想的に推定した。ただし、空間平均が適用できる街区内での解析にのみ使用した。また、このときの直達日射量 ( $S_{dir}$ ) [ $\text{W m}^{-2}$ ] は、散乱日射量と全天日射量の差分値を太陽高度 ( $h_{sun}$ ) [ $^\circ$ ] で角度補正することで求めた (式 (5-1))。

$$S_{dir} = \frac{(S_{global} - S_{dif})}{\sin h_{sun}} \quad (5-1)$$

## 5.2 定点における放射量 (SOLWEIG) の妥当性評価

本節では、SOLWEIG で推定された長短波放射量、MRT、および MRT から変換された黒球温度の時間変化の再現性を定点観測値に基づき評価した。

### 5.2.1 気象状況および SOLWEIG への入力気象場

日比谷公園での観測時間帯である 8:10~14:20 において、午前中は局所的な雲の影響で全天日射量が気象台 (東京) と大きく異なったため、比較対象時間は 12 時以降とした。

気象台 (東京) と日比谷公園で得られた気温 ( $T_a$ )、比湿 ( $q$ )、全天日射量 ( $S_{global}$ )、大気圧 ( $P$ )、風速 ( $WS$ ) の時間変動を図 5-3 に、それらの相関を図 5-4 に示す (大気圧はなし)。2 地点間の距離は約 1 km と短い、周辺環境が異なることから、日比谷公園の方が気温は約  $1^\circ\text{C}$  高く、比湿は約  $2 \text{ g kg}^{-1}$  低かった (図 5-3(a)、図 5-4(a)(b))。全天日射量と大気圧は、変動・数値ともに同等であり、領域一様な気象場であったことがわかる (図 5-3(b)、図 5-4(c))。風速に関しては、気象台 (東京) の風速計が地上 35 m に設置されているため、

日比谷公園で観測される高度（地上 1.5 m）とは、大きく異なる。それを踏まえ、**図 5-3(c)**、**図 5-4(d)**を見ると、両者の変動に相関はなく、約  $3 \text{ m s}^{-1}$  のバイアスが生じていた。このことから、大局的な循環と地上付近の風の性質は大きく異なると考えられるため、**本節**では、MRT から黒球温度への変換は、日比谷公園の風速を用いた。

### 5.2.2 長短波放射量, MRT, および黒球温度の比較検証

まず、SOLWEIG で計算された長短波放射量について評価する。**図 5-5** は、実測値および SOLWEIG で計算された長短波放射量の時間変化を示し、その相関図を**図 5-6** に示す。下向き短波放射量（Sdown）と上向き長波放射量（Lup）は、実測値との対応が良く、相関係数は 0.9, 0.6 であり、RMSE は約  $100 \text{ W m}^{-2}$ 、約  $20 \text{ W m}^{-2}$  であった（**図 5-5**、**図 5-6(a)(d)**）。しかしながら、上向き短波放射量（Sup）と下向き長波放射量（Ldown）に関しては、変動は捉えられていたものの（**図 5-5**、**図 5-6(b)(c)**）、どちらも平均約  $60 \text{ W m}^{-2}$  のバイアスが生じていた（**図 5-5**）。このうち、下向き長波放射量のバイアスは、時間変化より大きかった。これについては、射出率などのパラメータ調整の検討も含めて、**付録**で記載する。

次に、SOLWEIG で推定された MRT と黒球温度について評価する。実測した黒球温度から MRT への変換、また、SOLWEIG で推定された MRT から黒球温度への変換は、*Bedford* の式と *ISO* の式を用いた。

**図 5-7** は、実測値と SOLWEIG から得られた MRT および黒球温度の時間変化を示し、その相関図を**図 5-8** に示す。SOLWEIG で推定された MRT と黒球温度は、変換式によらず、どちらも実測値より過小評価する傾向にあった。実測値と推定値の RMSE および相関係数を**表 5-2** に示す。MRT と黒球温度の相関係数から、時間変化はよく再現できていることがわかった。また、RMSE は黒球温度に変換するときには、約  $3^{\circ}\text{C}$  に収束することが示された。

この結果から、定点における長短波放射量は、一部の放射量の推定誤差が大きかったものの、黒球温度は高い精度で時間変化を再現できることが示された。

### 5.3 街区内における天空率（UMEP）の妥当性評価

街区内の放射量の再現性を評価する前に、**第 3 章**で示したように、黒球温度の上昇への寄与が高かった天空率の再現性について評価する。比較対象領域は Area\_1 と Area\_3 である。

ここで比較する実測値の天空率は、**2.6.3 項(b)**で示したとおり、SOLWEIG 定義から算出したものである。

数値モデルの天空率は、UMEP に DSM, cdsm, tdsM を入力することで計算される。

UMEP で計算した天空率（樹木あり：model\_vege, なし：model\_nonvege）と実測値の空間変動を**図 5-9** に示す。UMEP で計算される天空率は、変動傾向および絶対値ともに概ね再現できていることがわかる。樹木ありのモデル値と実測値の相関係数は、Area\_1 で 0.5, Area\_3 で 0.7 であった。RMSE は Area\_1 で 13.6%, Area\_3 で 14.1% であった。model\_vege と model\_nonvege を比較すると、model\_vegeの方が平均約 5~7% 低く、最大で 50~60% 低

下している地点があった。このことから、樹木を考慮することで、より細かい街区環境が再現できているものと考えられる。

また、2領域の実測値とモデル値の誤差に関しては、モデル内での樹冠密度が高い傾向にあること（97%）や天空写真を撮影した時期、樹冠幅を計測した時期のズレなどによって生じるものと考えられる。

以上のことから、UMEPでは街区内の天空率を概ね再現できていることがわかった。次節では、この天空率に基づき計算される黒球温度について再現性を評価する。

## 5.4 街区内的における黒球温度（SOLWEIG）の妥当性評価

### 5.4.1 SOLWEIG への入力気象場

街区内の妥当性評価では、Area\_1の移動気象観測ルートを対象とし（図2-1参照）、比較対象データはCase\_1.3aとした。

入力した気象データは、2016年8月25日の気象台（東京）における12時の1時間値とし、気温は31.7℃、相対湿度は59%、全天日射量は888.9 W m<sup>-2</sup>、大気圧は1005.8 hPa、風速は2.7 m s<sup>-1</sup>であった。黒球温度の変換式（式(2-20)、式(1-14)、式(2-19)）にも同様の値を代入した。SOLWEIGで推定されるMRT（i.e. 黒球温度）の空間変動は、領域一定の気象場を入力していることから、天空率や日陰状態（日の当たり方）に依存する。

### 5.4.2 黒球温度の比較検証

実測値とSOLWEIGで推定されたMRTを各変換式から算出した黒球温度の空間変動を図5-10に示す（これを初期結果とする）。いずれの式も、空間変動は再現できなかった（相関係数=-0.1~0.0）。この要因として、実測値は時空間で変動するのに対して、SOLWEIGでは、時間一定値を入力していることが挙げられる。また、絶対値を見ると、熱収支式から求めた黒球温度が、最も実測値に近い値であった。

SOLWEIGで推定されるMRTは、人体におけるアルベドや射出率、建物への形態係数を長短波放射量に乗ずることで求められる。これらのパラメータが妥当でない場合、MRTから変換される黒球温度（Bedfordの式、ISOの式）は、長短波放射量から変換される黒球温度（熱収支式）と差異が生じることになる。各パラメータの妥当性は、現段階では不明であるが、熱収支式の絶対値が実測値に近いことから、SOLWEIGで計算される長短波放射量の総量は、概ね妥当であることがわかった。一方、Bedfordの式とISOの式から求めた黒球温度は、平均約7.6℃（日向：7.3℃）、6.7℃（6.4℃）の大きなバイアスが生じた。

この結果から、以降の議論では、Bedfordの式およびISOの式から求めた黒球温度について議論する。なお、SOLWEIG内でのパラメータ調整については、付録に記載する。

推定された黒球温度の大きなバイアスは、1)変換式の特徴と2)変換式に代入したMRTに起因する。

まず、変換式の特徴を説明する。各変換式で算出される黒球温度は、気温と風速に大きく

依存する。一例として、*Bedford* の式を用いて説明する。図 5-11 は、*Bedford* の式における MRT が 65°C のときの気温 (図 5-11 (a)) および風速 (図 5-11 (b)) と黒球温度の関係を示している。風速が  $2.7 \text{ m s}^{-1}$  (入力値) の一定値であった場合、気温 1°C の上昇に伴い、黒球温度は 0.8°C 上昇する (図 5-11 (a))。また、気温が 31.7°C (入力値) の一定値であった場合、風速が  $2.7 \text{ m s}^{-1}$  から  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  低下すると、黒球温度は最大の 4.9°C まで、指数関数的に上昇する (図 5-11 (b))。

このように、気温や風速の変化は、黒球温度の推定に大きな影響を与える。街区内の気温や風速の変動に着目すると、移動気象観測で得られた (Case\_1.3a) ルート内の気温および風速の変動幅は、それぞれ 30.9°C~36.1°C,  $0.4 \text{ m s}^{-1}$ ~ $5.4 \text{ m s}^{-1}$  であった。したがって、SOLWEIG への入力値 (気温: 31.7°C, 風速:  $2.7 \text{ m s}^{-1}$ ) とは、大きく異なる時間帯が存在した。そこで、街区内の気温および風速の空間変動を *Bedford* の式と ISO の式に代入し、再度検証する。なお、この解析を「1次補正」と定義づける。

*Bedford* の式および ISO の式に、移動気象観測で得られた (Case\_1.3a) 気温および風速の変動を代入して計算された黒球温度の空間変動を図 5-12 に示す。実測値とモデル値で日向/日陰の不整合があると、その地点での両者には大きな相違が生じてしまうため、図 5-12 では、SOLWEIG で日向と認識された地点でのみの再現性を評価した。街区内の気温と風速の空間変動を代入すると、黒球温度の空間変動は、大きく改善された (相関係数=0.3~0.4)。しかしながら、どちらの式もまだ過小評価しており、バイアスは平均約 3~4°C であった。

ここで、*Bedford* および ISO の式の項に着目すると、MRT は時間一定値で計算された値である。この項にも上記と同様に、街区内の気象変動を考慮させる必要がある。そのためには、細かい時空間分解能でシミュレートすることが望ましいが、計算負荷が大きく、現実的ではない。

そこで、SOLWEIG への入力値である気温・相対湿度・全天日射量に着目して、これらと MRT の関係性を評価し、街区内の空間変動を関連付けることで、MRT の補正を試みる。なお、この解析を「2次補正」と定義づける。

#### 5.4.3 SOLWEIG 内での MRT と各気象要素の関係

解析領域内において、日陰状態の異なる 3 地点 (日向, 樹木のみの日陰, 建物と樹木を含めた日陰) を定め、それぞれの地点において各気象要素を強制的に変動させることで、MRT との関係について解析を行った。なお、3 地点の天空率はそれぞれ 0.89, 0.37, 0.34 である。各気象要素の変動幅は夏季を想定し、気温は 28~36°C, 相対湿度は 45~80% とした。全天日射量に関しては 2018 年 8 月の 12 時の最大日射量である  $938.89 \text{ W m}^{-2}$  から 1/5 ずつ低下させた値に加え、日射量の低い時間帯である 6 時のデータ ( $11.67$ ~ $58.33 \text{ W m}^{-2}$ ) も含め、表 5-3 に示す全ての組み合わせ (2160 ケース) で MRT を算出した。

#### (a) 全天日射量・相対湿度・気温と MRT の関係

異なる日陰状態における全天日射量が最大時 (=938.89 W m<sup>-2</sup>) の相対湿度の変化 (=45～80%) に伴う、気温 ( $T_{ainp}$ ; モデル入力値) [°C] と MRT ( $MRT_{model}$ ; モデル出力値) [°C] の関係を図 5-13 に示す。  $T_{ainp}$  と  $MRT_{model}$  は日陰状態によらず、式 (5-2) のような線形関係にあり、RH の増加に伴い  $MRT_{model}$  が概ね一定の割合で上昇することが示された。

$$MRT_{model} = aT_{ainp} + b \quad (5-2)$$

ここで、傾き (a) と切片 (b) は、全天日射量 ( $S_{global}$ ; モデル入力値) [W m<sup>-2</sup>] と相対湿度 (RH; モデル入力値) [%] によって変化する関数である。したがって、これらの関係を  $f(RH, S_{global}) = a$  and  $b$  と表すことができる。

#### (b) $f(RH, S_{global})$ と傾き (a) および切片 (b) との関係

まず、RH と式 (5-2) の a との関係について、図 5-13 から評価する。図より、RH が変化しても、a はほとんど変わらない (45%～80% で 0.01 の変化)。そのため、a は全天日射量ごとに平均された値を用いた。次に、b との関係を見ると、RH の変化に対して、全天日射量が最大時の日向における  $MRT_{model}$  の上昇率は、約 0.04°C %<sup>-1</sup> であった。これに対して、 $T_{ainp}$  は、1°C の上昇に対して、 $MRT_{model}$  は約 0.4°C の上昇が見られた。このことから、RH が  $MRT_{model}$  に及ぼす影響は小さいことがわかる。したがって、b についても全天日射量ごとに平均された値を用いた。

以上より、a と b は、 $S_{global}$  との関係について評価すればよい。

3 パターンの日陰状態における  $S_{global}$  と a および b との関係を図 5-14 に示す。図より、a と b は、 $S_{global}$  の 3 次方程式で回帰され、式 (5-3)、式 (5-4) のように表せることがわかる。

$$a = a_1 S_{global}^3 + a_2 S_{global}^2 + a_3 S_{global} + b_1 \quad (5-3)$$

$$b = a_4 S_{global}^3 + a_5 S_{global}^2 + a_6 S_{global} + b_2 \quad (5-4)$$

なお、本章で検討した式 (5-2)～式 (5-4) は、日陰状態や土地利用が変化する場合でも、傾き ( $a_1 \sim a_6$ ) や切片 ( $b_1, b_2$ ) の数値を適切に設定することで適用可能である。

次項では、SOLWEIG で推定された  $MRT_{model}$  に対し、式 (5-2)～式 (5-4) の考え方に基づく補正量を加えることで、実測値との空間変動およびバイアスを修正することを試みる。

#### 5.4.4 SOLWEIG で計算された MRT に対する補正量の検討

SOLWEIG で推定される  $MRT_{model}$  への補正量は、モデル入力値である  $T_{ainp} \cdot S_{global}$  と、移動気象観測で得られた (Case\_1.3a) ルート内の各地点の気温 ( $T_{aobs}$ ) [°C] ・下向き短波放

射量 ( $S_{dobs}$ ) [ $\text{W m}^{-2}$ ] との差分から、以下の式のように求めた。

$$MRT_{add} = \left[ a_1(S_{dobs} - S_{global})^3 + a_2(S_{dobs} - S_{global})^2 + a_3(S_{dobs} - S_{global}) + b_1 \right] \\ (T_{aobs} - T_{ainp}) + \left[ a_4(S_{dobs} - S_{global})^3 + a_5(S_{dobs} - S_{global})^2 + \right. \\ \left. a_6(S_{dobs} - S_{global}) + b_2 \right] \quad (5-5)$$

なお、移動気象観測で得られた (Case\_1.3a) ルート内の気温・相対湿度・下向き短波放射量の変動幅は、それぞれ  $30.9\sim 36.1^\circ\text{C}$  (平均  $33.4^\circ\text{C}$ )、 $42.0\sim 48.0\%$  (平均  $44.0\%$ )、 $119.2\sim 990.7 \text{ W m}^{-2}$  (平均  $845.5 \text{ W m}^{-2}$ ) であった。

#### (a) MRT および黒球温度の算出

式(5-5)から  $MRT_{add}$  を推定し、それを式(5-2)の  $MRT_{model}$  に付与することで黒球温度を補正した。日向における「初期結果」(old)と「2次補正」(new)時の黒球温度の空間変動を図5-15に示す。どちらの式で算出した場合でも、「2次補正」の黒球温度は、「初期結果」と比較して明らかに変動幅が増幅され、平均的に約  $7^\circ\text{C}$  のバイアスが補正された。全体的に黒球温度は、下向き短波放射量の変動(図5-15 黒線)に大きく依存していることがわかる。

#### (b) 黒球温度の比較検証

日向における「2次補正」の黒球温度と実測値の空間変動を図5-16に示す。「1次補正」(図5-12 参照)に比べ、各式から求めた黒球温度は、明らかに実測値に近づいており、相関係数に大きな変化はなかったものの、バイアスは、*Bedford* の式では  $4.3^\circ\text{C}$  から  $1.1^\circ\text{C}$ 、*ISO* の式では  $2.9^\circ\text{C}$  から  $0.3^\circ\text{C}$  と大きく改善された。また、*RMSE* も、*Bedford* の式では  $7.3^\circ\text{C}$  から  $3.9^\circ\text{C}$ 、*ISO* の式では  $6.4^\circ\text{C}$  から  $4.4^\circ\text{C}$  と大きく改善される結果となった。

*SOLWEIG* では、計算対象領域内での局所的な雲の存在は再現できないが、本研究で対象としたような街区スケールの黒球温度(≒MRT)を評価する場合、下向き短波放射量の変化は、空間的なバラつきよりも時間的な変動が大きいと考えられる。そのため、本論では *SOLWEIG* の出力結果(MRT)に対し、時々刻々と変化する下向き短波放射量の値を用いて補正量を求め、実測値に近づくことを示した。

以上のことから、*SOLWEIG* への入力条件として、評価したい時間・空間スケールに応じた適切な(時間分解能が細かい)気象場(主に下向き短波放射量)を与えることで、街区スケールの局所的な MRT および黒球温度を再現できる可能性が示された。

## 5.5 黒球温度推定式の有用性評価

本章では、SOLWEIG や UMEP の妥当性を評価し、ある時間・空間における放射環境の再現性は高いことが示された。したがって、SOLWEIG と本提案式（式(4-4)）にそれぞれ時間一定値を導入し、比較することで、広域における本提案式の有用性を評価する。なお、SOLWEIG の結果と比較するため、この解析に用いる本提案式は、SOLWEIG 定義に基づいて得られた黒球温度推定式（式(4-4)）を用いた。

### 5.5.1 検証条件

検証領域は Area\_1 とし、気象条件は 5.4 節と同様である。天空率は、Area\_1 において UMEP で計算された値（図 5-1(f) 参照）を導入した。SOLWEIG で推定された MRT は、式(2-20)を用いて黒球温度に変換した。また、本提案式の適用条件から、日向の結果で議論する。

### 5.5.2 SOLWEIG との比較検証

本提案式および SOLWEIG から推定された黒球温度の空間分布を図 5-17 に示す。日向における黒球温度の平均値と変動幅は、本提案式では 43.7℃（変動幅：1.0℃）、SOLWEIG では 39.8℃（2.9℃）であった。平均値の差は 4℃程度であるが、定点および街区内部での推定誤差（定点：約 3℃、街区内部：約 1℃）を考慮すると、許容範囲内の差異であると考えられる。

また、天空率を 0.5 以下と 0.5 以上に分類し、それぞれの相関係数を見ると、それぞれ 0.3、0.4 であり、天空率の高い方が相関係数は高い傾向にあった。これは、本提案式が、比較的高い天空率（全 Area の平均 0.85（SOLWEIG 定義））から導出されているためであると考えられる。

以上の結果から、本提案式は、高い空間解像度を保持しつつ、広域で温熱環境を評価できる可能性が示された。

## 5.6 まとめ

都市街区内部の放射量を計算できる SOLWEIG と、その入力条件である天空率を計算できる UMEP の再現性を定点および街区内部の実測値に基づき比較検証し、各種物理量の再現性について評価した。また、それらの数値モデルに基づき、本提案式の広域での有用性について評価した。

定点では、MRT・黒球温度・長短波放射量の再現性を検証した。一部の長短波放射量に大きな誤差は生じたものの、それらに基づく MRT から計算された黒球温度は、実測値の時間変化をよく再現しており、推定誤差は約 3℃に収束することが示された。

街区内部では、MRT・黒球温度に加え、天空率の再現性も検証した。UMEP で計算された街区内部の天空率は、空間変動をよく再現できていた。しかしながら、MRT から計算される黒球温度は、大きなバイアスが生じていた。これに対して、移動気象観測で得られた高い時空

間分解能の気温，下向き短波放射量を導入すると，バイアスが補正され，変動を概ね捉えることができた。

以上のことから，**SOLWEIG** は，ある時間・空間の再現性は高いことが示された。

この数値モデルに基づき，本提案式の広域における有用性を評価した。平均的なバイアスや相関係数から，黒球温度は許容範囲内の誤差で，空間変動を再現できる可能性が示された。したがって，本提案式は，広域の温熱環境を再現するために，有用であることが示された。

表 5-1 入力データ概要

	Input data	Data source	Spatial resolution
DSM	3D building model	CAD Center Corporation, Tokyo, Japan(MAPCUBE®)	1m×1m×1m
	DEM	Geospatial Information Authority of Japan	7m×7m×7m
	Land cover grid	JAXA(ALOS-2, ALOS)	30m×30m
	SVF	Calculation in UMEP	1m×1m
	Wall height	Calculation in UMEP	1m×1m×1m
	Wall aspect	Calculation in UMEP	1m×1m×1m
	cdsm	Observation	1m×1m×1m
	tdsm	Observation	1m×1m×1m

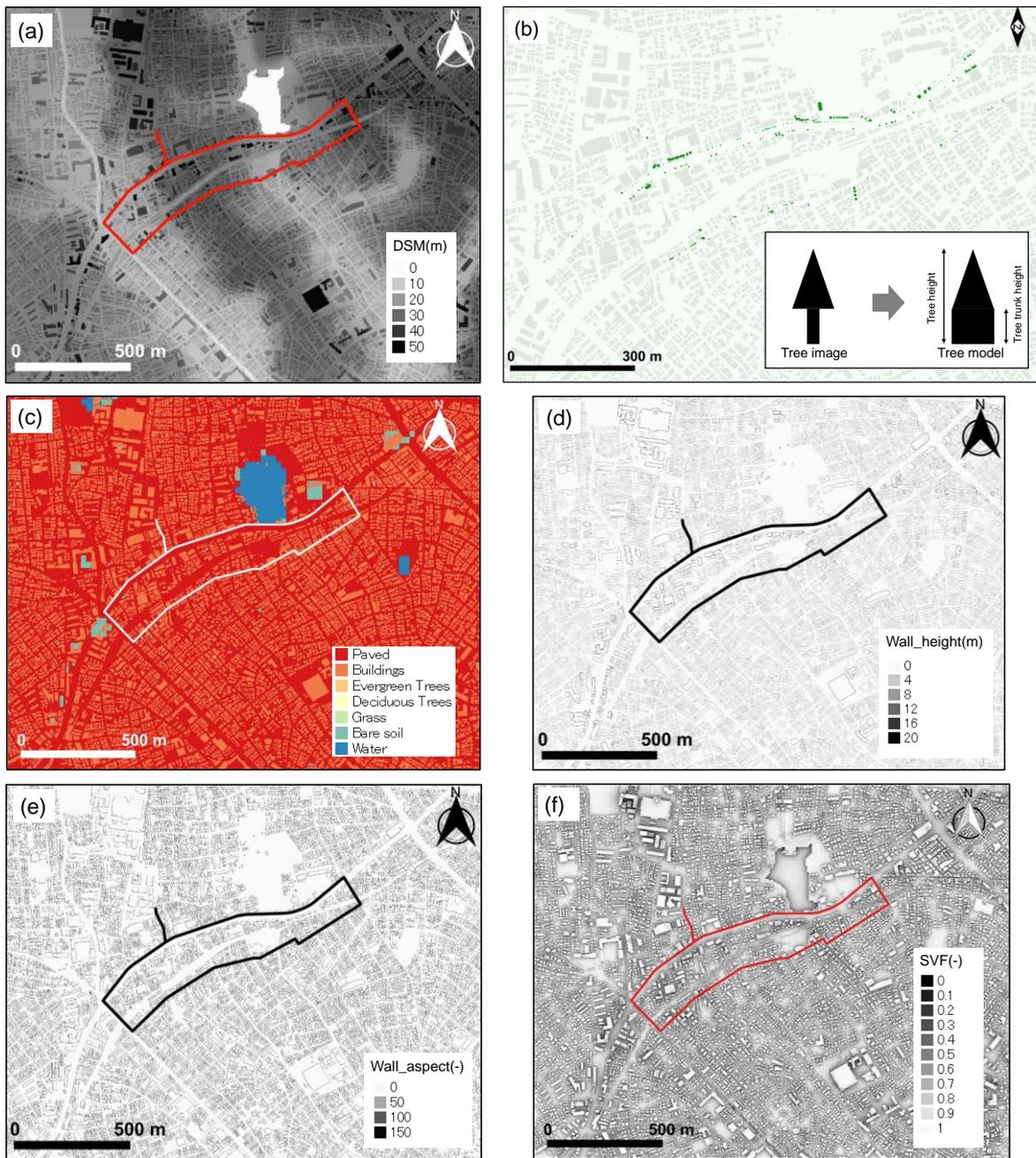


図 5-1 Area\_1 の (a)DSM, (b)樹木の位置, (c)land cover grid, (d)Wall height, (e)Wall aspect, (f)SVF のデジタルデータ. (b)の右下枠内は構築した仮想樹木の概略図である.



図 5-2 樹木調査の様子 (Area\_1).

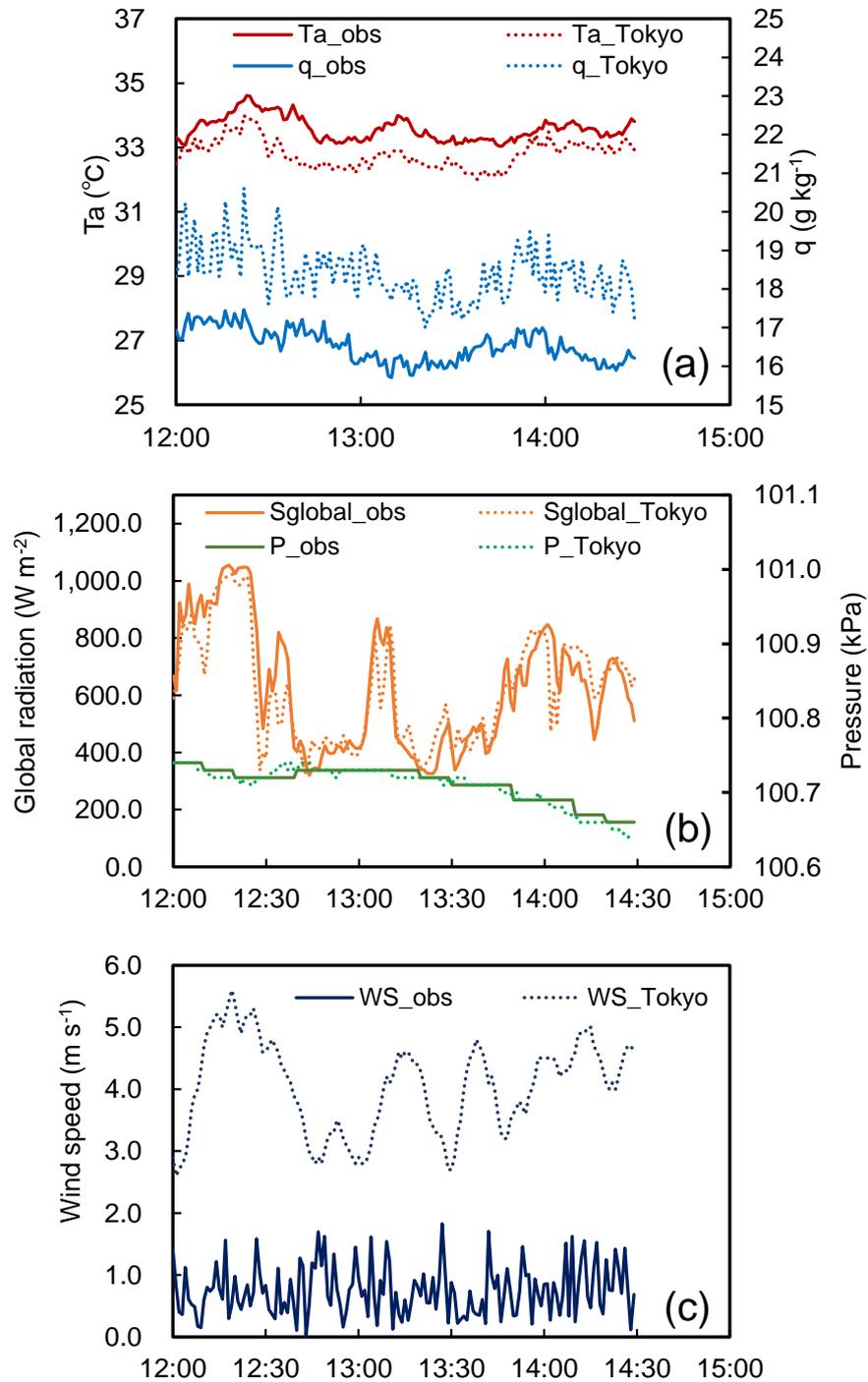


図5-3 気象台（東京）および日比谷公園における(a)気温 ( $T_a$ ), 比湿 ( $q$ ), (b)全天日射量 ( $S_{global}$ ), 大気圧 ( $P$ ), (c)風速 ( $WS$ ) の時間変動. 実線は日比谷公園, 破線は気象台（東京）の観測値を示す.

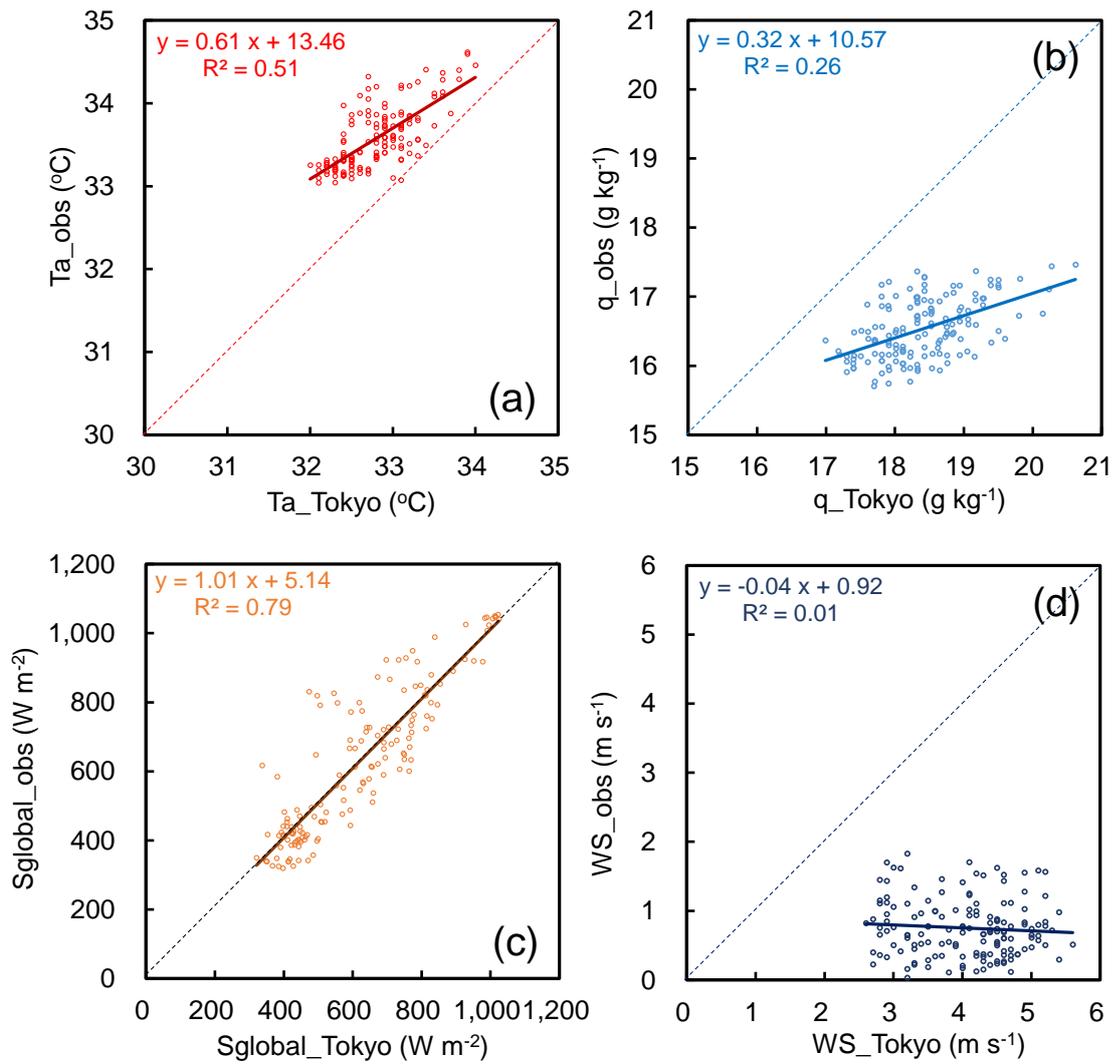


図5-4 気象台（東京）と日比谷公園の(a)気温，(b)比湿，(c)全天日射量(d)風速の関係。破線は気象台（東京）と日比谷公園の値が1:1であることを示す。

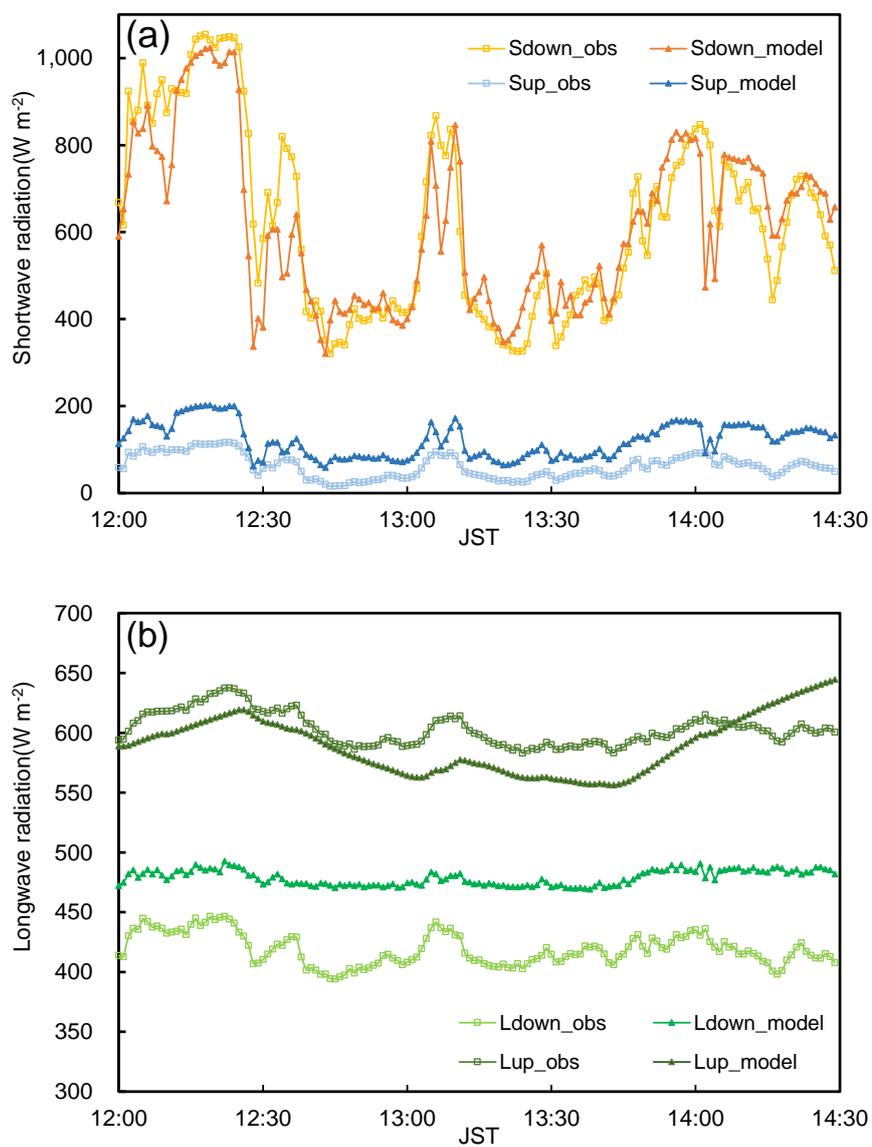


図 5-5 実測および SOLWEIG から得られた (a)短波放射量および (b)長波放射量の時間変化. 四角プロットは実測値, 三角プロットはモデル値を示す.

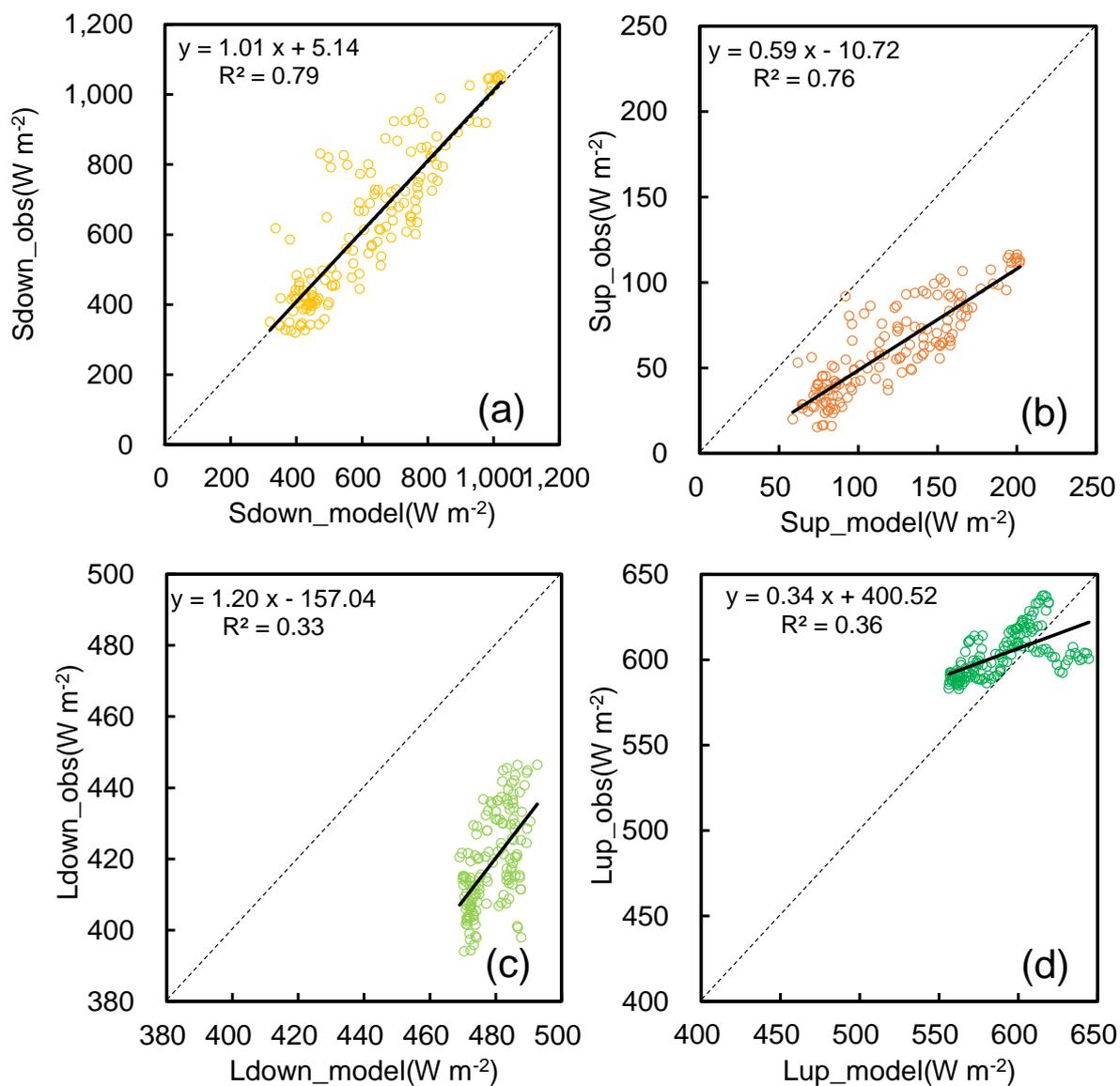


図 5-6 実測および SOLWEIG から得られた (a) 下向き短波放射量, (b) 上向き短波放射量, (c) 下向き長波放射量, (d) 上向き長波放射量の関係。

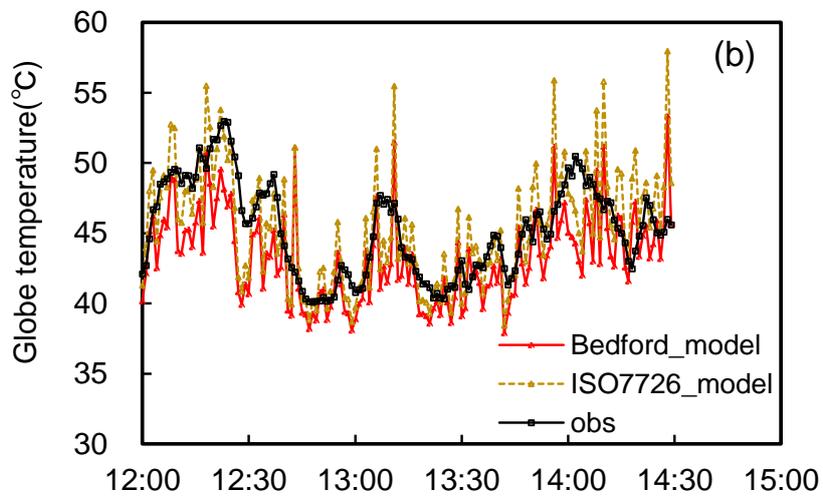
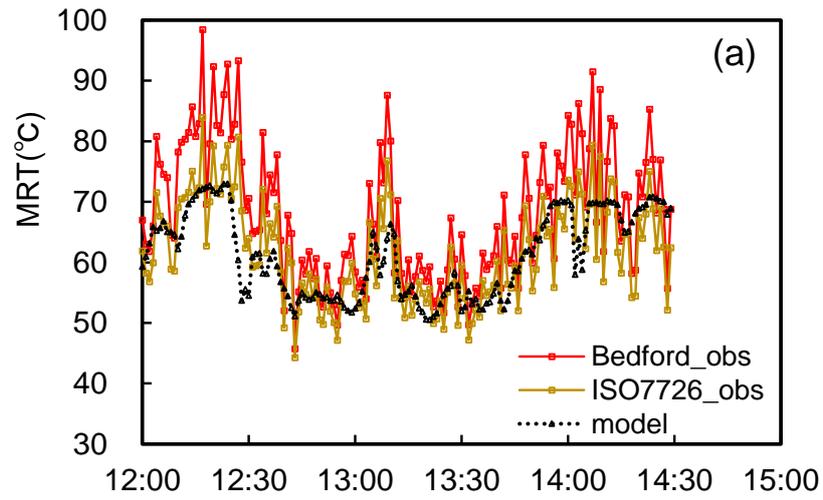


図 5-7 実測および SOLWEIG から得られた (a)MRT と (b)黒球温度の時間変化.  
obs は実測値, model はモデル値.

Bedford: Bedford and Warner (1934), ISO7726: ISO7726 (1998) の式に基づく.

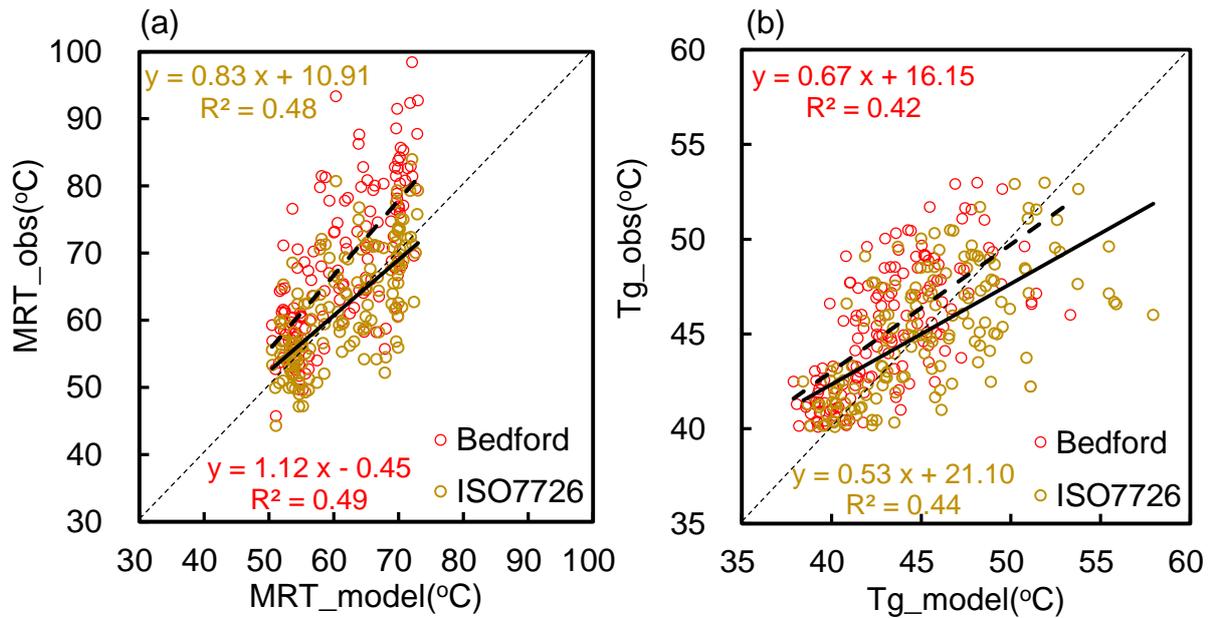


図 5-8 実測および SOLWEIG から得られた (a)MRT と (b)黒球温度の関係.  
 Bedford: Bedford and Warner (1934), ISO7726: ISO7726 (1998) の式に基づく.

表 5-2 実測値およびモデル値の RMSE および相関係数.

	Bedford		ISO7726	
	RMSE	correlation coefficient	RMSE	correlation coefficient
MRT	10.46	0.70	6.20	0.69
Tg	3.36	0.65	3.18	0.66

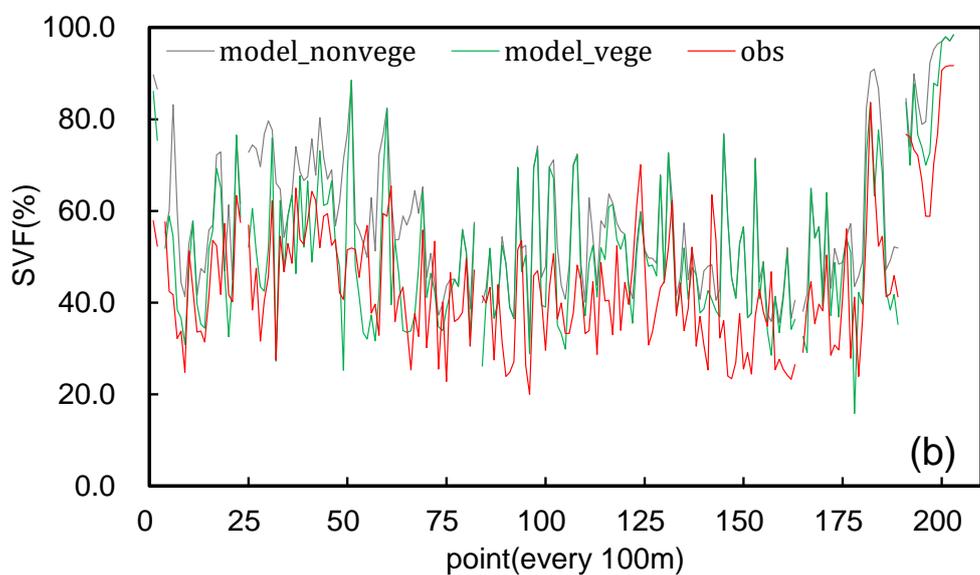
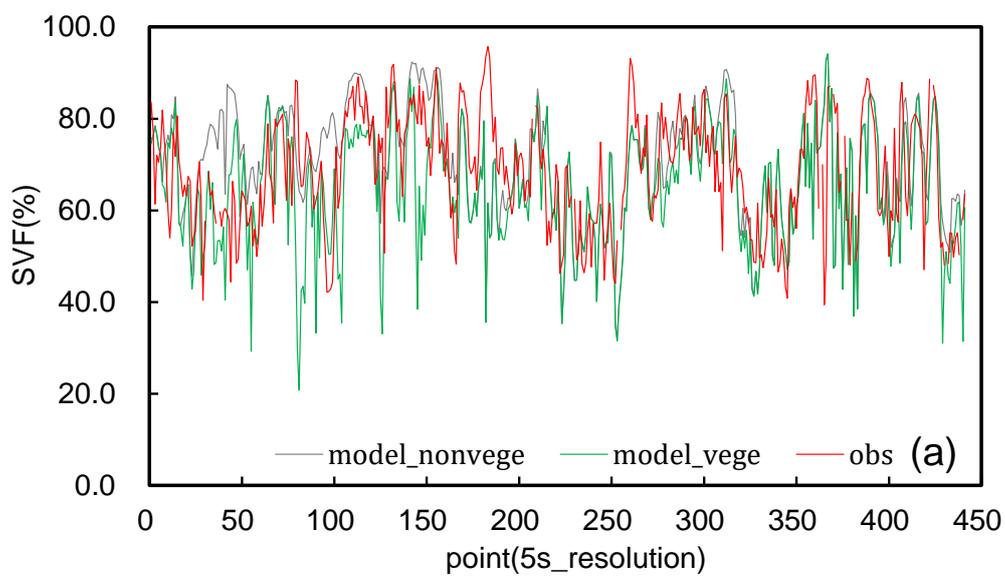


図 5-9 (a) Area\_1 および (b) Area\_3 における実測および UMEP から得られた天空率の空間変動。

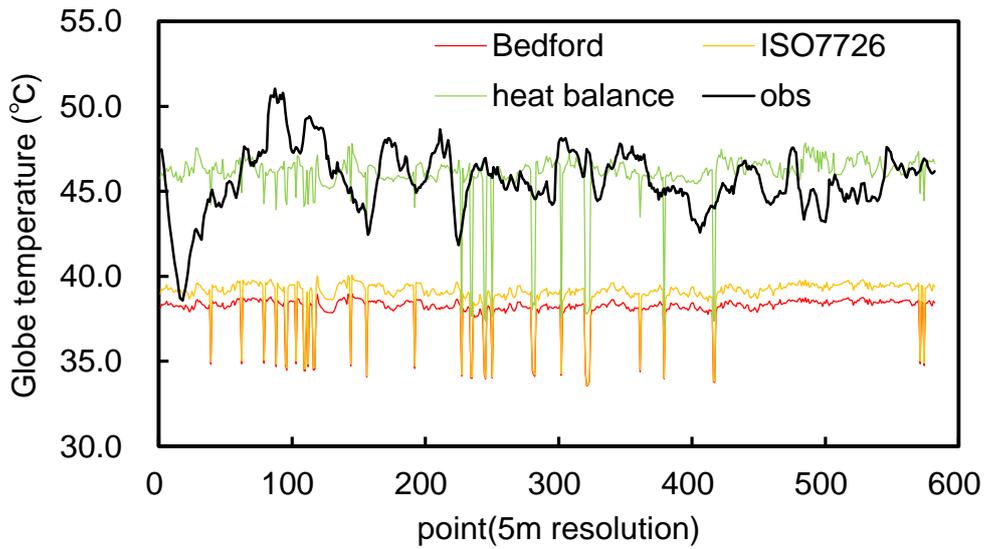


図 5-10 実測および SOLWEIG から得られた黒球温度の空間変動.  
 Bedford: Bedford and Warner (1934), ISO7726: ISO7726 (1998),  
 heat balance: 球表面の熱収支式に基づく.

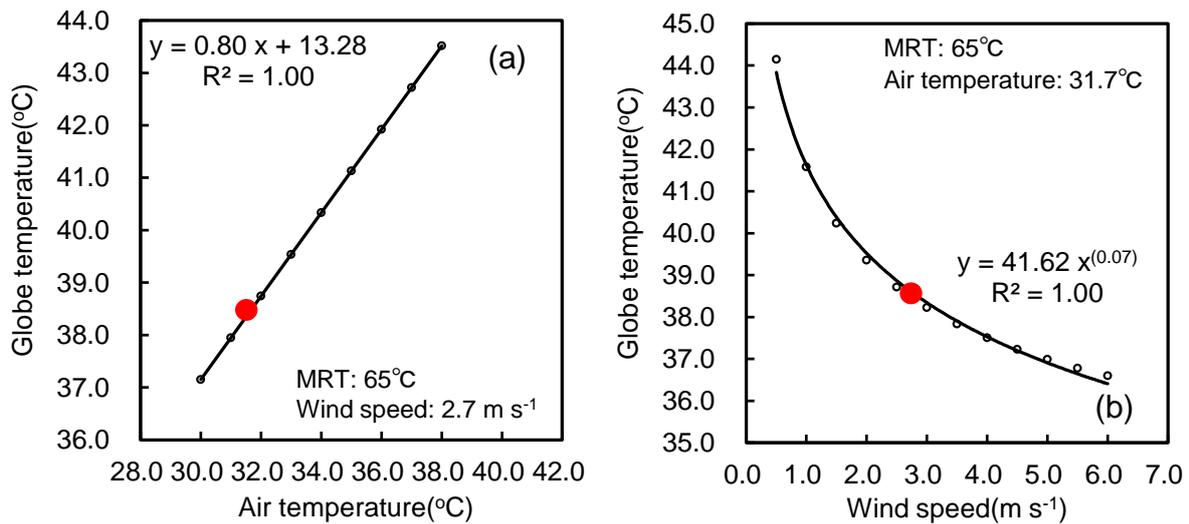


図 5-11 MRT が 65°C のときの Bedford 式における (a) 気温と (b) 風速に  
 対する黒球温度の変化. 赤丸は入力値.

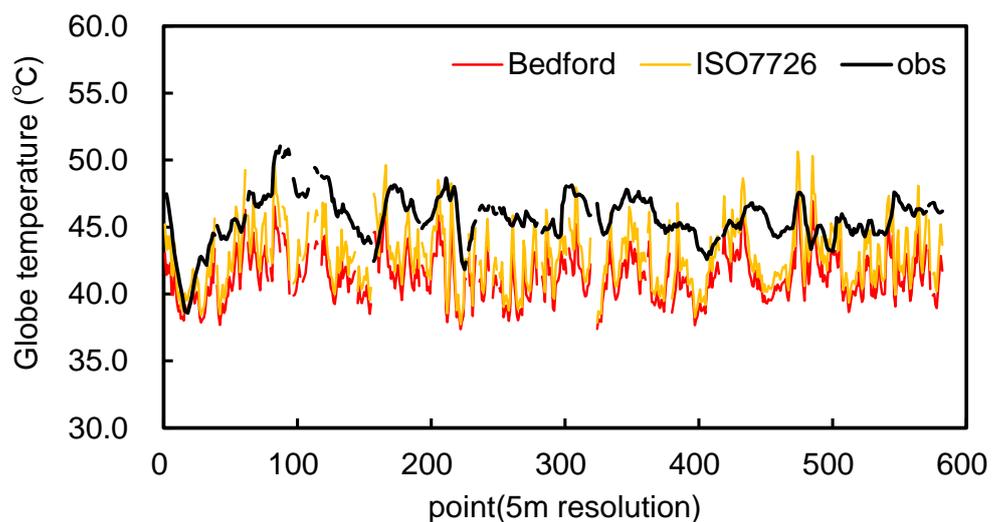


図 5-12 「1次補正」時の黒球温度の空間変動. 日向のみの結果.

Bedford: Bedford and Warner (1934), ISO7726: ISO7726 (1998)の式に基づく.

表 5-3 各気象要素の強制変動幅

$T_a(^{\circ}\text{C})$	RH(%)	$S_{\text{global}}(\text{W m}^{-2})$
28	45	11.67
29	50	23.33
30	55	35.00
31	60	46.66
32	65	58.33
33	70	187.78
34	75	375.56
35	80	563.33
36		751.11
		938.89

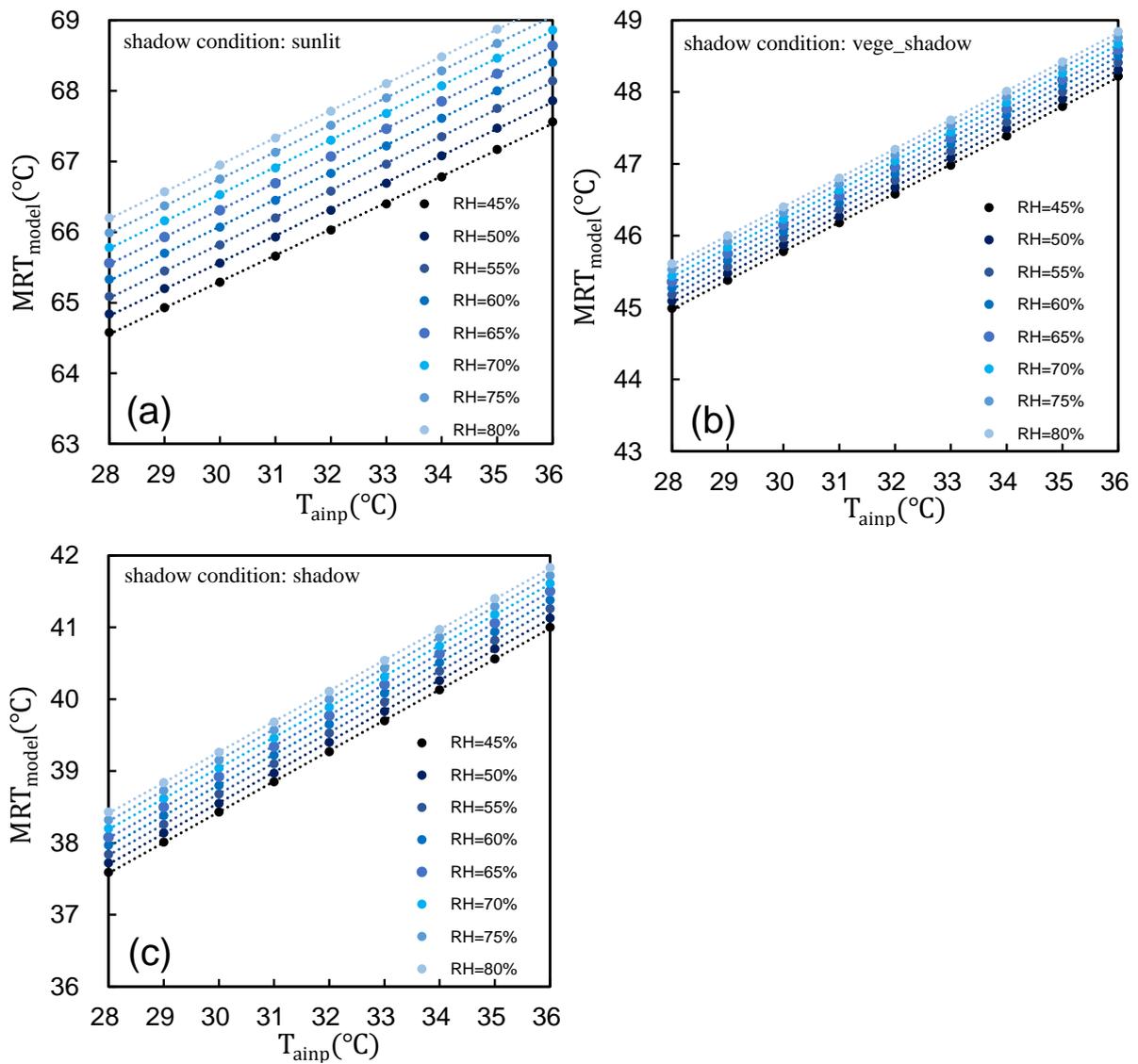


図 5-13 最大日射量時 ( $938.89\text{W m}^{-2}$ ) の相対湿度の変化に伴う気温と MRT の関係. (a) 日向, (b) 樹木のみの日陰, (c) 建物と樹木を含む日陰.

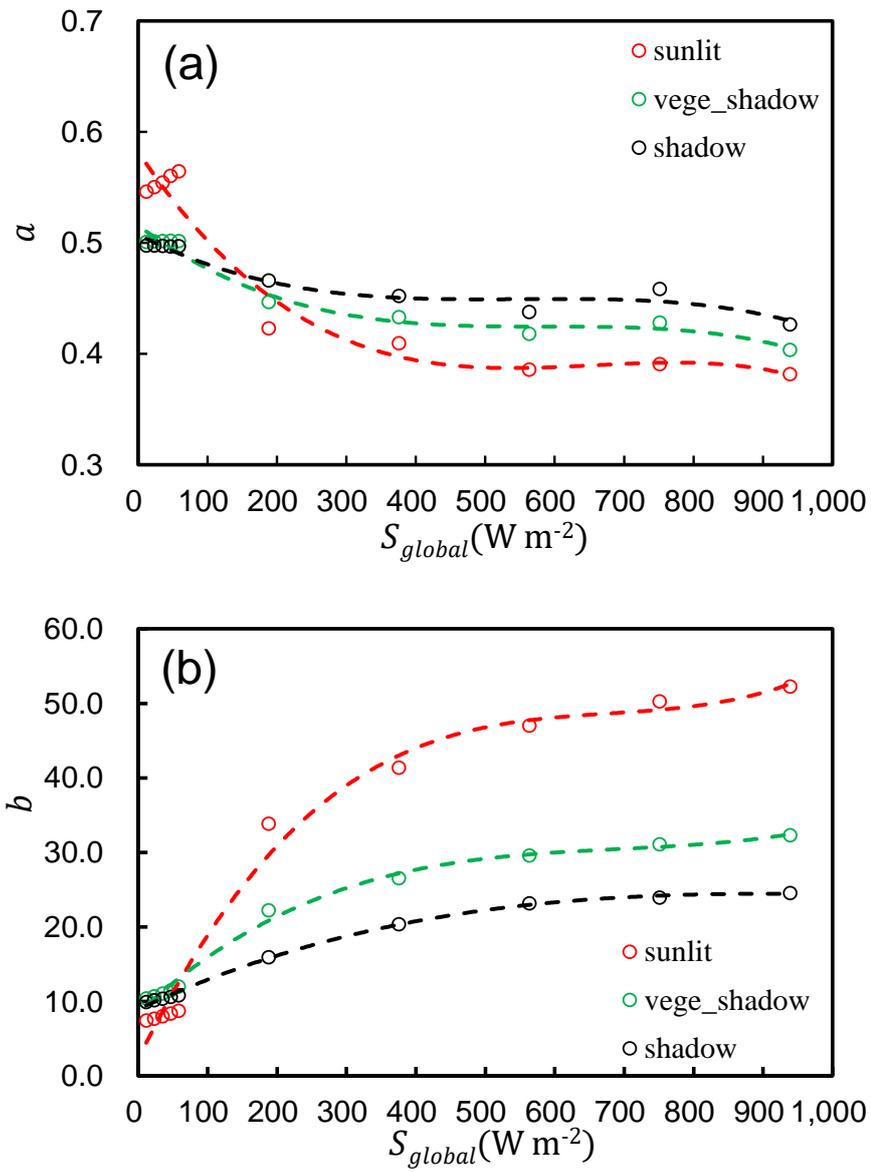


図 5-14 全天日射量と (a) 傾き  $a$  と (b) 切片  $b$  の関係. sunlit : 日向, vege\_shadow : 樹木のみの日陰, shadow : 建物と樹木を含む日陰.

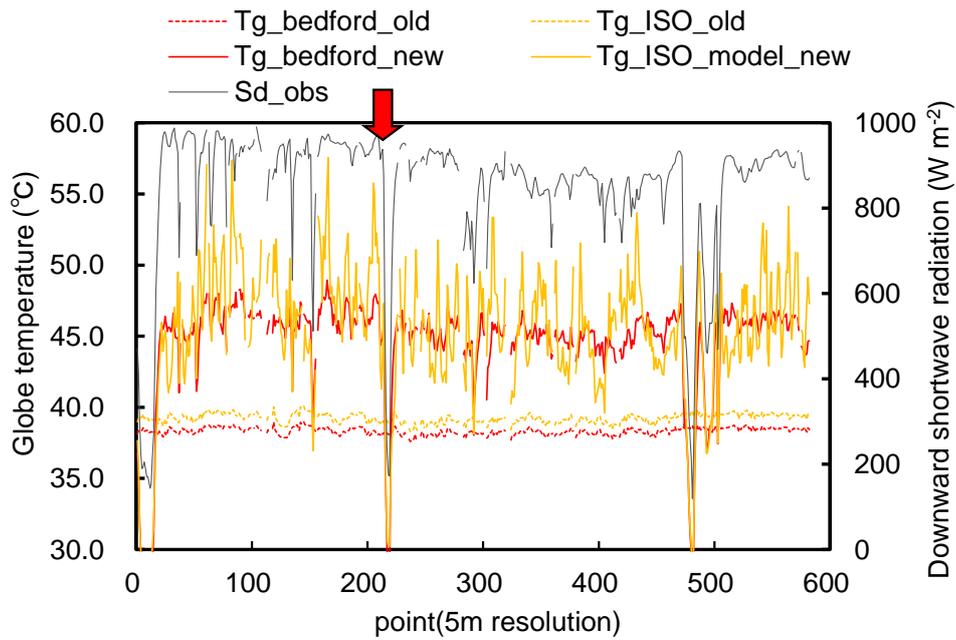


図5-15 「初期結果」(old) および「2次補正」(new) 時の黒球温度と下向き短波放射量の空間変動. 矢印は下向き短波放射量が著しく低下していた地点の一例.

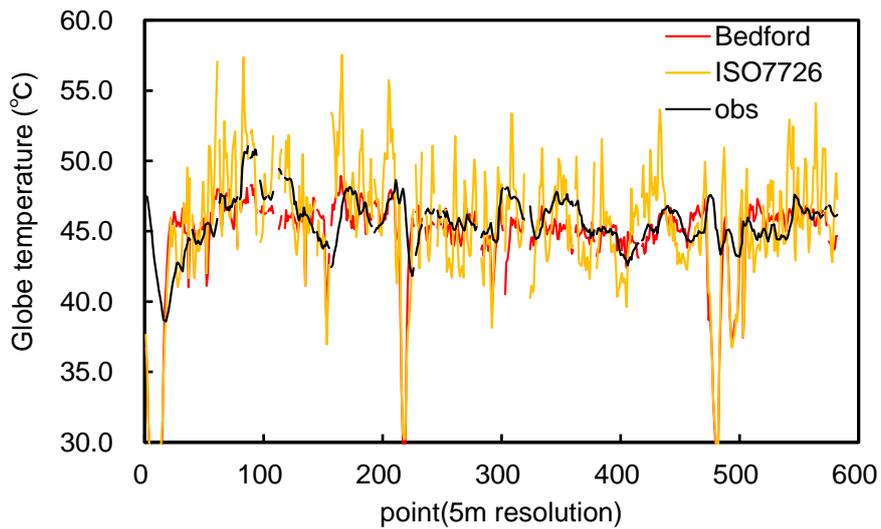


図5-16 「2次補正」(赤線, 橙線) と実測(黒線) した黒球温度の空間変動.

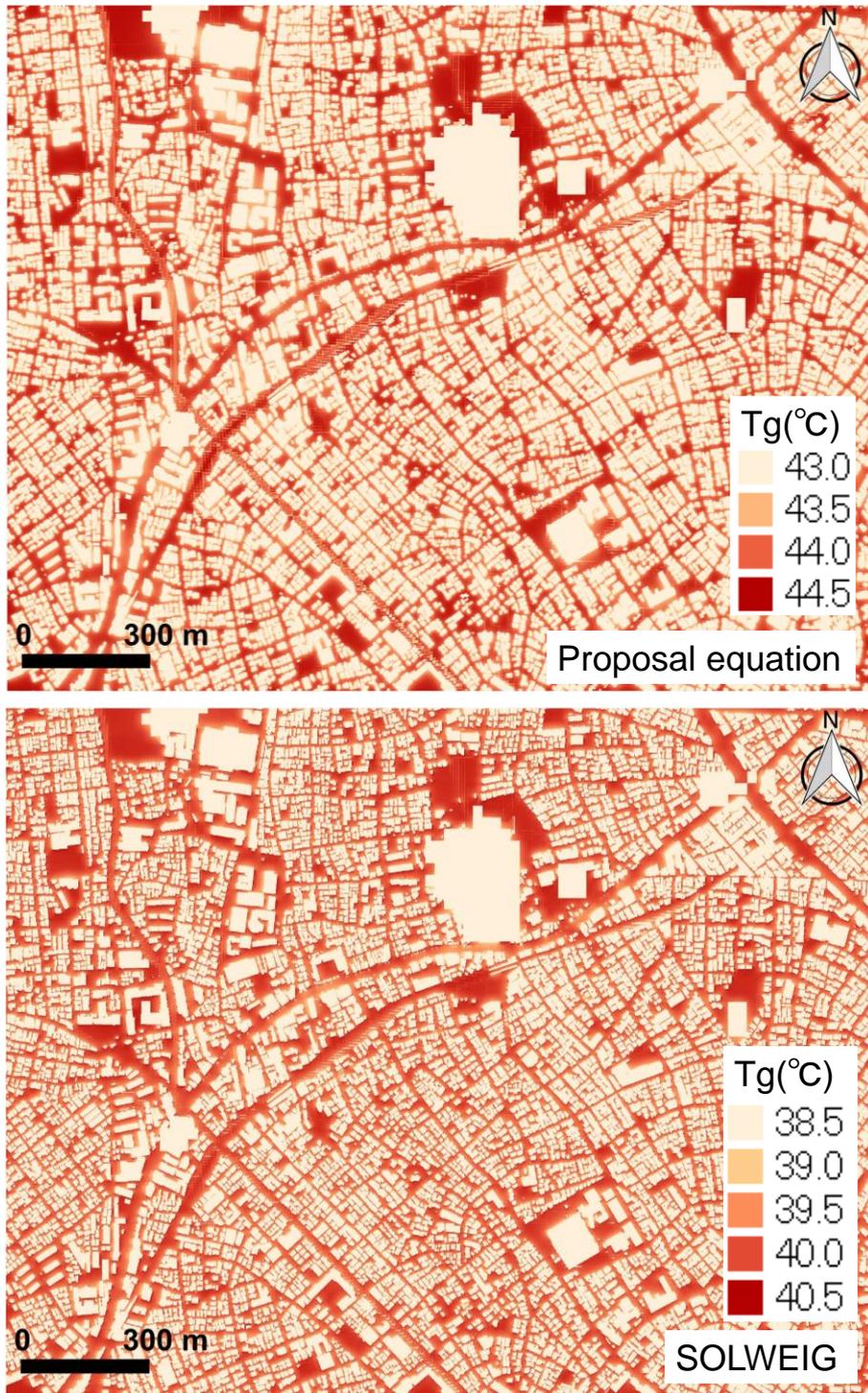


図 5-17 (上段)本提案式と(下段)SOLWEIG から推定された黒球温度の空間分布.

## 第 6 章 2020 年東京オリンピックマラソンコースの熱ストレス予測

第 5 章では、数値放射モデル SOLWEIG において、街区内における黒球温度 ( $\approx$ MRT) は、高い精度で空間変動を再現できることが示された。そこで、本章では広域における温熱環境を評価することを目的として、SOLWEIG を用いて、2020 年に開催される東京オリンピックに焦点を当て、特に曝露時間の長いマラソンにおける熱ストレスを評価した。本章で扱う WBGT は、1.3.1 項で示した表 1-2 の運動指針に基づき評価する。

2019 年 11 月 1 日にマラソンコースが東京から札幌に変更されたが、本研究では、東京で開催した場合のコースを想定した評価を行った。

### 6.1 背景

2013 年、国際オリンピック委員会 (IOC) は、「2020 年のオリンピックは東京で開催する」ことを決定した。東京は、過去開催された国の中でも特に熱ストレスが高いことで知られている (Kakamu *et al.* 2017)。それゆえ近年では、東京の温熱環境の現状についていくつか報告されている (e.g. Tunematsu *et al.* 2016; Matzarakis *et al.* 2018, 2019)。その現状に対して、東京都では、熱緩和を目的としたミストステーションや保水性・断熱舗装などが計画・実施されており (東京都庁)、オリンピック開催に向けて準備が進められている。

しかしながら、東京都の熱ストレスが高いことを踏まえ、2019 年 11 月 1 日にマラソンコースは、東京から札幌へ変更された。マラソンは走者・観客含め、曝露時間が長く、熱負荷が特に大きいと、人体に対する熱ストレスを適切に評価する必要がある。本研究では、東京が札幌よりも熱ストレスが高いことから、「もし 2020 年東京オリンピックのマラソンが、東京で行われていたら、予測される熱ストレスはどの程度であるか」について評価する。また、次のオリンピックは「フランス」で開催される。フランスでは、2019 年に熱波が到来し、過去最高気温が更新された (45.9°C)。そのため、本解析は、開催国フランスに対して、有益な情報になることが期待される。

すでに、既往の研究によって、マラソンコース内の温熱環境は、評価・報告されている (e.g. Kosaka *et al.* 2018; Honjo *et al.* 2018; Vanos *et al.* 2019)。しかしながら、これらの評価は、現実的な走者の速度や樹木などは考慮されておらず、時間変化に伴う走者や観客が受ける熱ストレスの実態については未評価である。

そこで、本章では、SOLWEIG を用いて現実的な樹木を導入し、走者の速度に応じた熱ストレスを WBGT に基づき評価を行った。

### 6.2 解析領域

解析領域は、5.1.1 項で示した Area\_3 の領域と同様であり、東西に約 8,800 m、南北に約 7,000 m である。

### 6.3 SOLWEIG への入力気象場

解析対象年は、2014～2018年の8月の中で、日平均気温が最も高かった2018年8月とした（気象庁）。解析データは、気象台（東京）で得られた気温、相対湿度、全天日射量、大気圧を使用し、解析対象時間は、6時から11時（実際に走者が走行する時間+2時間）とした。夏季の暑熱環境を再現するために、降水がなく、日照率70%以上であり、台風の通過を除外した日を、1時間ごとにアンサンブル平均した。これを暑い夏（Hot summer, HS）と定義した。また、比較のために、2016年の台風通過時のみを除去した1時間アンサンブル平均値も使用し、これを平年の夏（Normal summer, NS）と定義した。HSとNSの気象場のアンサンブル日変動を図6-1に示す。入力値である6時から11時におけるHSの気象変化は、気温：26.23～32.32℃（NS, 24.7～29.3℃）、相対湿度：82.38～58.54%（88.2～69.0%）、全天日射量：36.32～788.89 W m<sup>-2</sup>（22.9～529.1 W m<sup>-2</sup>）である。大気圧の入力値は、2016年から2018年の8月の平均値（1004.5 hPa）とした。

### 6.4 コース上のデータ処理

#### 6.4.1 黒球温度の算出方法

SOLWEIGで推定される黒球温度は、5.4節の結果から、MRTに依存しない熱収支式（式(2-19)）を用いて、長短波放射量から変換した。

$$0 = 0.25S_{dir} + 0.5(S_{dif} - S_{up}) + 0.5(L_{down} - L_{up}) - \varepsilon\sigma T_g^4 - h(T_g - T_a) \quad (2-19)$$

ここで、対流熱伝導率（ $h$ ）の計算に用いる風速は、暑熱環境を再現するために、1 m s<sup>-1</sup>の一定値を代入した。図6-2は、HSにおいてSOLWEIGで日陰と認識された下向き短波放射量の空間変動を示し、その平均値、最大最小値、標準偏差を表6-1に示す。図6-2より、日陰における下向き短波放射量は、時間経過とともに増加している。ただし、領域内の標準偏差に大きな増加は見られず（表6-1）、解析対象領域の中でArea\_3は最も解析面積が大きいものの、散乱日射量は一定値として扱った。

#### 6.4.2 走者に即した熱環境場の再現方法

本研究では、熱ストレスを評価する指標・物理量として、WBGT, MRT, 黒球温度を用いた。これらは、走者の走行速度を考慮して、熱環境場の時空間変動を再現した値とした（ $R_{course}$ ）。空間解像度は1 mであり、走者は日本男子の参加標準記録に相当する5 m s<sup>-1</sup>で走行すると仮定し、走行中の時間変化を以下の式のように計算した。

$$R_{course} = R_x + \left( \frac{R_{diff}}{P} \right) \quad (6-1)$$

$$R_{diff} = R_{x+1} - R_x \quad (6-2)$$

ここで、 $R_x$ は  $x$  時における物理量 [°C] を示す。したがって、 $R_{diff}$ は  $x$  時から  $(x+1)$  時までの物理量 [°C] の変化量を表している。 $P$ は、初期値を 18000 ((走者の速度 (5 m s<sup>-1</sup>) × 1 時間 (3600 s)) / 空間解像度 (1 m) = 18000) とし、1 時間ごとに  $(\frac{R_{diff}}{P}) = R_{diff}$  となる時間変化の重みを表す。

### 6.4.3 コース設定

本研究では、走者と観客でコースを区別した。図 6-3 に走者と観客の位置取りを示す。走者は、道路の中央を通るように設定した (図 6-3 赤点)。沿道の観客は、走者に対して左右の歩道を対象とした (図 6-3 緑点、青点)。

### 6.5 走者に対する熱ストレス評価

図 6-4 は、SOLWEIG から推定されたマラソンコース内の WBGT の空間分布を示し、WBGT、黒球温度、MRT の空間変動を図 6-5 に示す。往路における MRT、黒球温度、WBGT は、それぞれ最大 34.8°C、33.9°C、26.5°C であった (図 6-4(a)、図 6-5)。早朝であるものの、WBGT 指標は 26°C 以上の「警戒」レベルに達すると予測された。一方、復路では、全ての要素が往路より顕著に高く、MRT と黒球温度は約 50°C、約 40°C に達し、WBGT は最高で「嚴重警戒」レベルの 29°C まで上昇すると予測された (図 6-4(b)、図 6-5)。特に、皇居周辺は周囲より WBGT が高い傾向にあり、約 36 km 以降は、ゴールまで高い状態が続くと予測された (図 6-4)。

全体的に WBGT、黒球温度、MRT は、急激に変動することが予測された。これは、日陰から日向になる地点より、日向から日向になる地点の方が、温度上昇率が高くなることを示している。このような往路と復路の熱ストレスの結果に関して、図 6-6 に示す標高・影の状態・天空率の空間変動、図 6-7 に示す日陰の時間変化も含めて考察する。

往路では、7 時前であり、日陰の割合が 96.3% (樹木のみ：1.0%) と高いため (図 6-6、図 6-7(a))、全体的に熱ストレスが低く予測されたと考えられる。

復路では、日陰の割合が 76.8% となり、往路より 20% 近く日向が増加するため、日射による熱ストレスの悪化が懸念される (図 6-6、図 6-7(b)(c)(d))。また、皇居周辺のように、天空率が顕著に高い地点 (0.9 以上) が増えることも熱ストレス増大の要因である (図 6-8)。36 km 付近では、南側に河川があることで天空率が高く、通過時は 8 時過ぎと予想されるため、日射供給量が高くなると考えられる (図 6-7(c) 左枠)。その後は、ゴールに向けて日向の増加・WBGT の最大値到達・標高の上昇・走者の疲労が複合することで、最も過酷な領域になることが予測される (図 6-5、図 6-6、図 6-7(c))。

競技開始時間が、原案である 8 時であった場合、コース内の日向の割合が 1.3 倍増加し、

WBGT は最大 31.6°C となると予測された。この結果から、競技開始時間を 2 時間早めたことは、適切な判断であったと言える。

また、HS の WBGT は、NS と比較すると、日向では平均約 3.4°C、日陰では 1.7°C 高く、日向では、指標レベルが 1 段階上昇するため、暑熱時がより危険であることが示された。

## 6.6 黒球温度最大時における WBGT の変動幅

SOLWEIG では、気温や相対湿度は時間一定値であるが、実際にはこれらは変動する。そこで、本節では、6.5 節で予測されたマラソンコースにおける黒球温度の最大値 (43.9°C) に着目し、気温や相対湿度を変化させた場合の WBGT の変動幅について評価する。

湿球温度は夏季を想定して、気温 28~37°C (1°C ごと)、相対湿度 45~100% (5% ごと) の全 120 パターンにおいて計算した (図 6-9)。それに応じた WBGT の変化を図 6-10 に示す。さらに、現実的な気象場を想定して、各時間 (6~9 時) における相対湿度 (45~100% (10% ごと)) に応じた最高気温を 2016 年~2018 年の 8 月のデータ (気象庁) から 7 ケースを抽出した。そのときの WBGT の変動幅が、図 6-10 の網掛けに示す範囲となる。図 6-10 の黒点はコース内における WBGT の最大値であるが、実際に起こりうる WBGT の変動幅は大きく、最も危険である 31°C 以上を超える場合が推定された。

このことから、競技開始が 6 時であっても、相対湿度が 75% 以上で、気温が 31°C を超えると、復路では WBGT が「運動は原則中止」以上になる地点が多くなり、さらなる注意が必要であると考えられる。

## 6.7 沿道観客に対する熱ストレス評価

マラソンは走者のみならず、観客も長時間の曝露状態が想定される。そこで、本節では沿道 (主に歩道上) で観戦する観客の熱ストレスについて評価する。

コース内における走者 (center) と観客 (left, right) に対する WBGT および MRT の頻度分布を図 6-11 に示す。WBGT および MRT の頻度分布は、走者と観客で大きな相違はなく、WBGT の最大値はともに約 29°C であった。WBGT のピークは 2 極化しており、約 25°C (MRT: 約 25°C) と約 28.5°C (約 47°C) であった。この 2 極化は日向と日陰によるもので、日陰のピークを往路、日向のピークを復路 (特に皇居以降) と考えることができる。また、WBGT において 28.5°C のピークは 30 km 以降で出現することがわかった。

そこで、30 km 以降で、WBGT が 28.5°C 以上 (図 6-11 黒丸) の出現率について評価する。left のピークは right に比べ約 10% 低く、これは距離にして約 1 km 分の日陰が多いことを示す。これについて、図 6-12 に示す各距離 (~10 km, 10~20 km, 20~30 km, 30~40 km) におけるコース別の日陰・樹木のみの日陰・日向の割合で考察する。スタート~30 km まではどのコースも日陰状態に大きな相違はないが (図 6-12 (a)~(c))、30~40 km 地点では、明らかに left の樹木による影が多かった (図 6-12 (b))。この区間には河川沿いを通るコースがあり (図 6-7 左側赤枠 参照)、太陽の位置から推定すると、南東側の樹木によつ

て日陰になる地点が多くなるため、leftにおいて、樹木のみの日陰が多くなったと考えられる。

以上の結果から、30 km以降の領域において観戦する場合、走者に対して左側の歩道の方が右側より熱ストレスを低減できる可能性が示された。

## 6.8 まとめ

候補として挙げられていた2020年東京オリンピックマラソンコースにおいて、近年最も暑熱化した2018年8月の月平均値を用いて、SOLWEIGから得られる放射量に基づきWBGTを算出し、走者と観客に対して熱ストレス評価を行った。

走者と観客は、30 km以降においてWBGTが最大29℃の「厳重警戒」に達すると予測された。また、気温や相対湿度が変化すると、最大で31℃以上の「運動は原則中止」にまで達することも予測された。

コース内の特徴的な領域として、皇居周辺は天空率が高く、それに伴い、WBGTは周辺より顕著に高くなると予測された。

沿道で観戦する観客に対しては、30 km以降の領域において、右側より左側の歩道で観戦することで熱ストレスを低減できる可能性が示された。

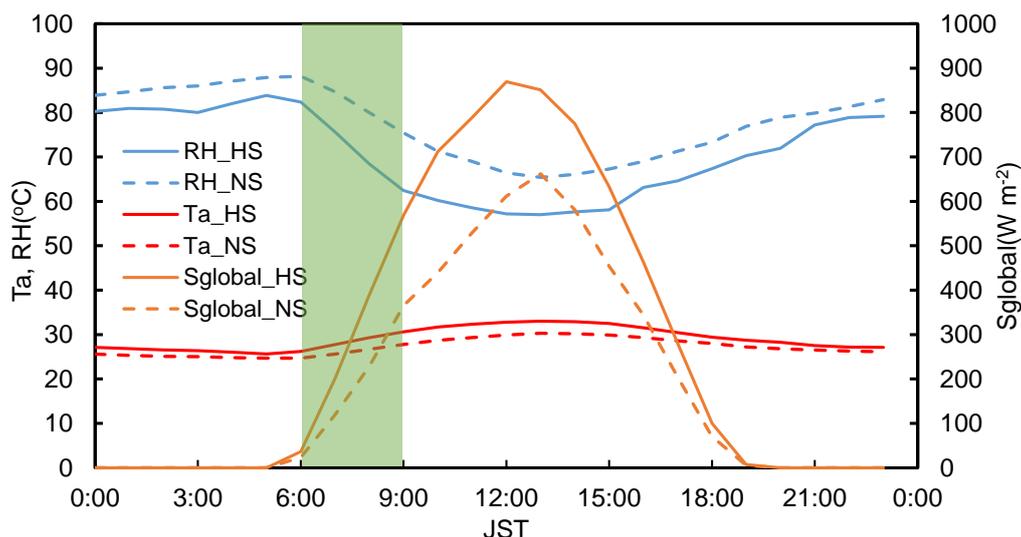


図 6-1 HS と NS の相対湿度 (RH) ・ 気温 (Ta) ・ 全天日射量 (Sglobal) の 1 時間アンサンブル日変化. 緑網掛けは実際に走者が走行する時間帯を示す.

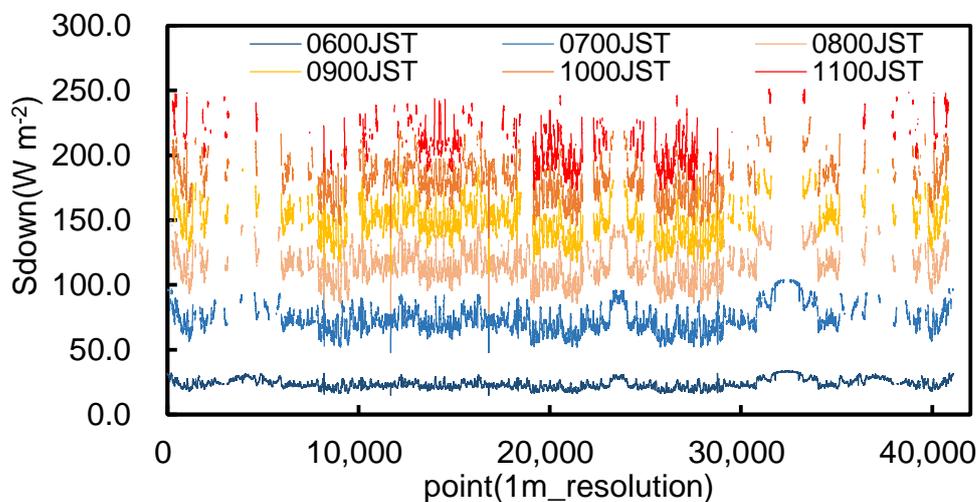


図 6-2 HS の 6 時から 11 時における SOLWEIG での日陰地点における 下向き短波放射量の空間変動.

表 6-1 HS の 6 時から 11 時における SOLWEIG での日陰地点における 下向き短波放射量の平均値, 最大値, 最小値, 標準偏差.

time(JST)	average(W m <sup>-2</sup> )	maximum(W m <sup>-2</sup> )	minimum(W m <sup>-2</sup> )	STDEV(W m <sup>-2</sup> )
0600	23.8	33.5	14.8	3.7
0700	72.9	103.9	47.8	10.1
0800	113.6	154.4	78.6	12.2
0900	148.6	192.3	109.0	13.8
1000	179.2	229.6	136.4	15.4
1100	205.8	251.0	173.0	17.5

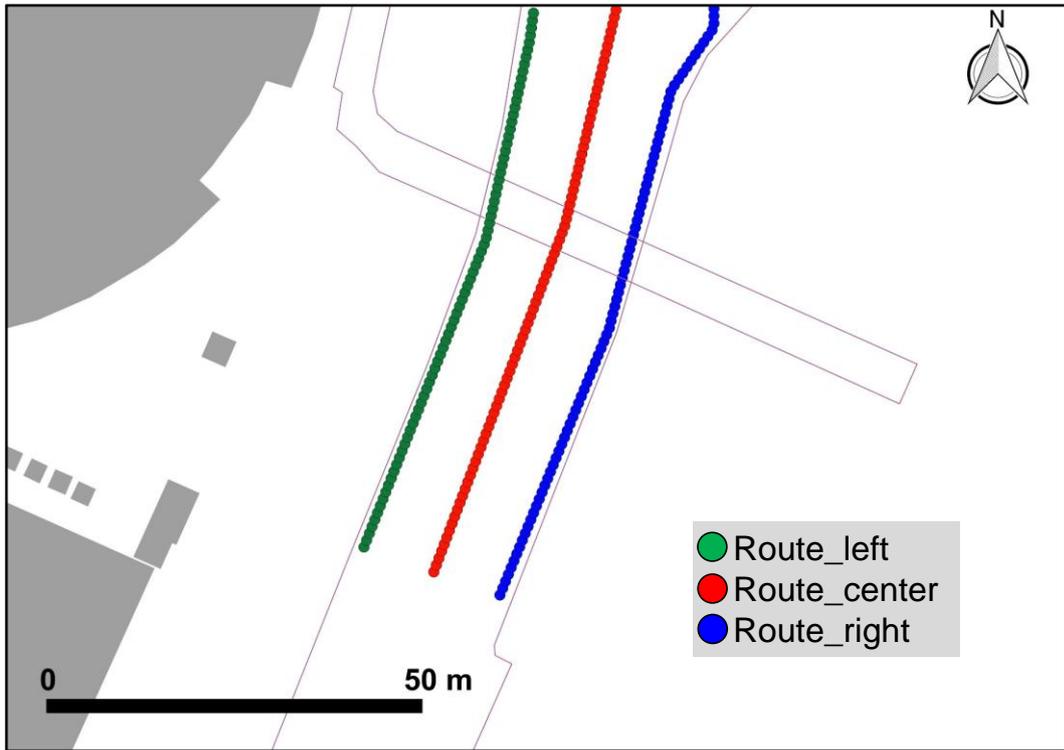


図 6-3 マラソンコースにおける位置取り. 図の領域は競技開始地点.

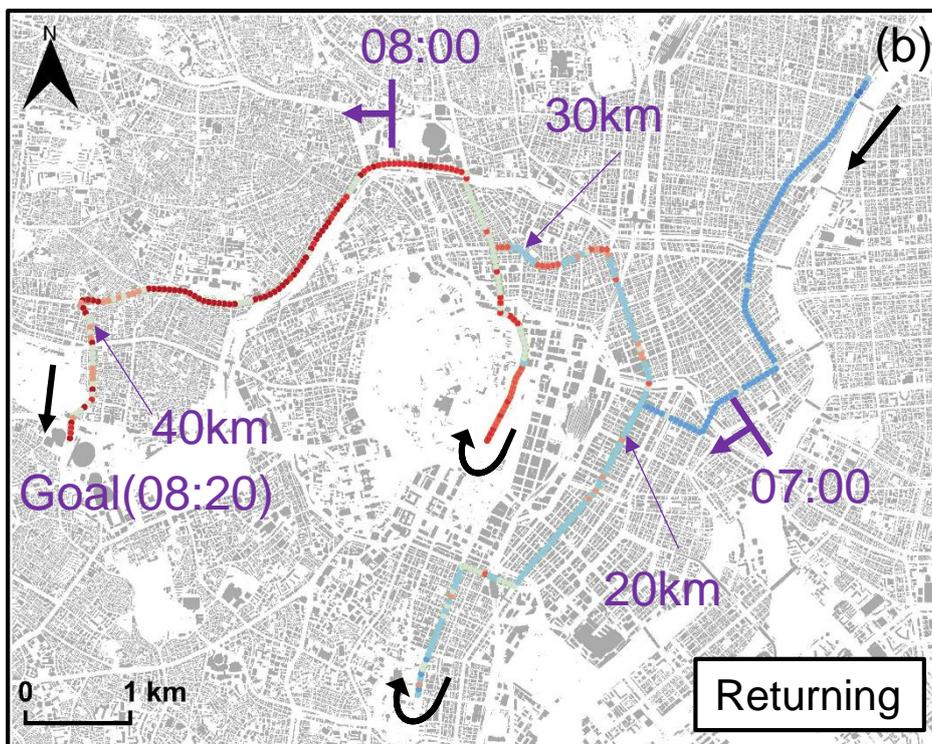
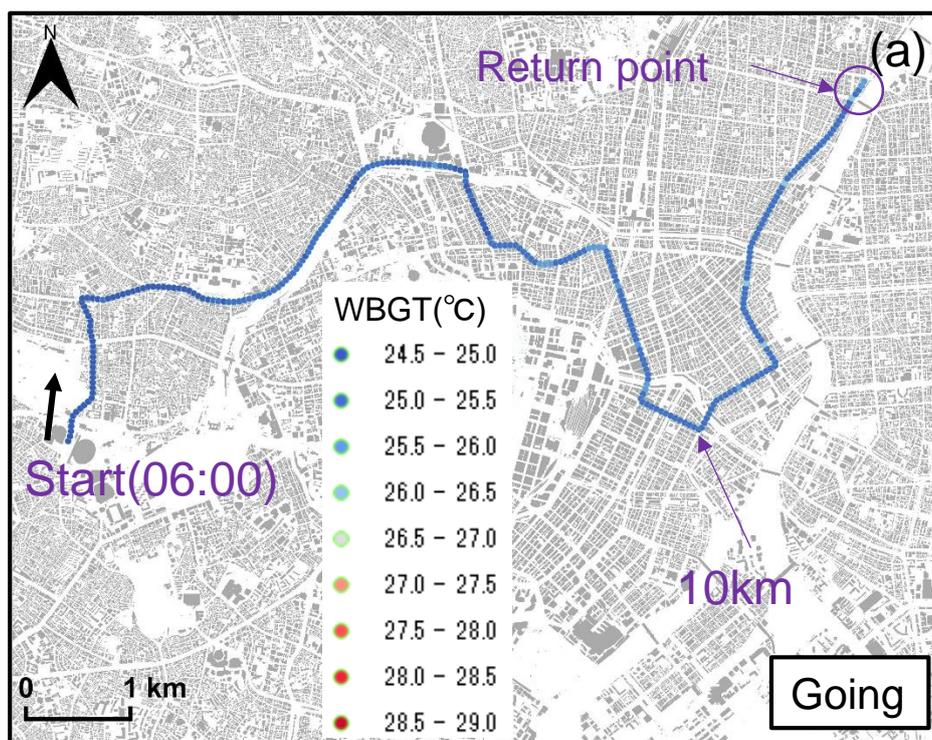


図 6-4 HS の (a) 往路および (b) 復路における WBGT の空間分布. 矢印は走者の進行方向を表す. 赤丸は皇居周辺を示す.

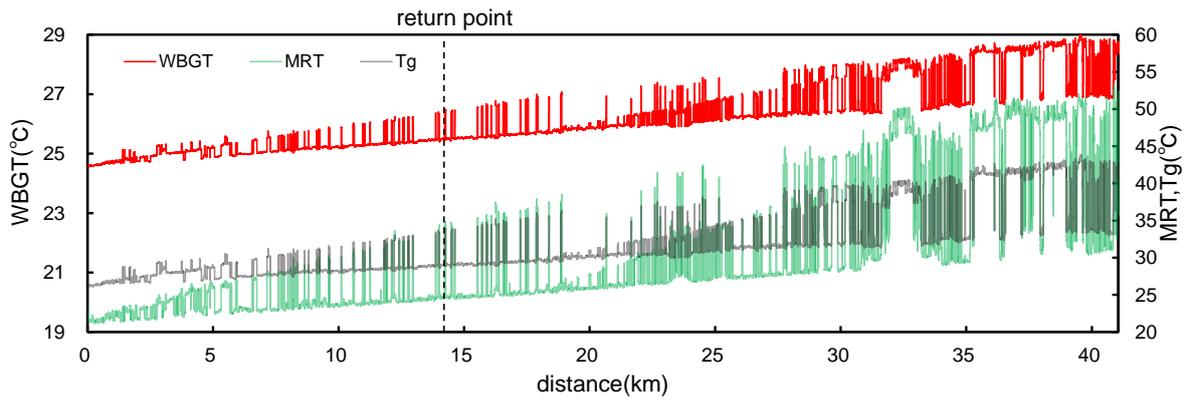


図 6-5 走者に対する WBGT・MRT・黒球温度 (Tg) の空間変動.

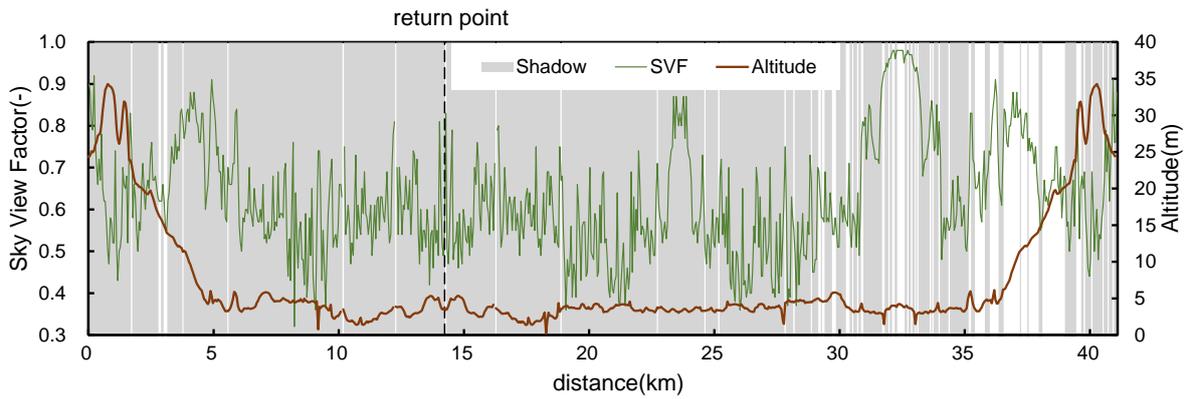


図 6-6 マラソンコース内の日陰状態 (shadow)・天空率 (SVF)・標高 (Altitude) の空間変動. 日陰状態は灰色部分が日陰であることを示す.

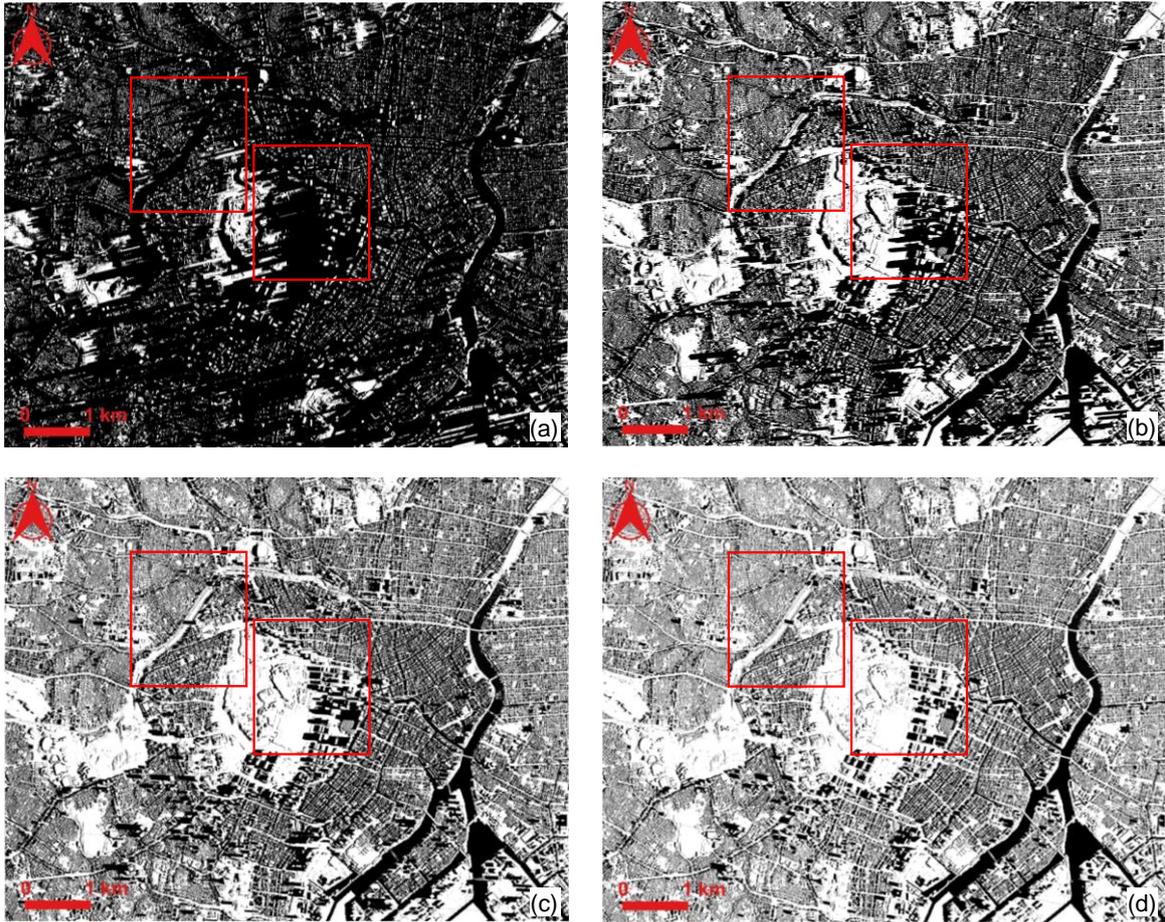


図 6-7 解析領域内の日陰の時間変化. (a) 6 時, (b) 7 時, (c) 8 時, (d) 9 時. 赤枠はマラソンルートにおける河川周辺 (西側) および皇居周辺 (東側) を示す.

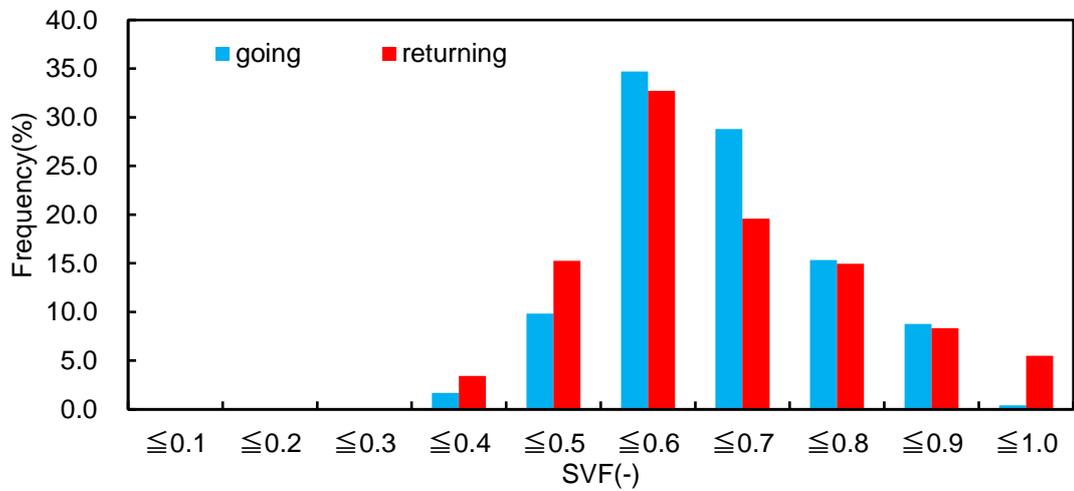


図 6-8 往路と復路における天空率の度数分布.

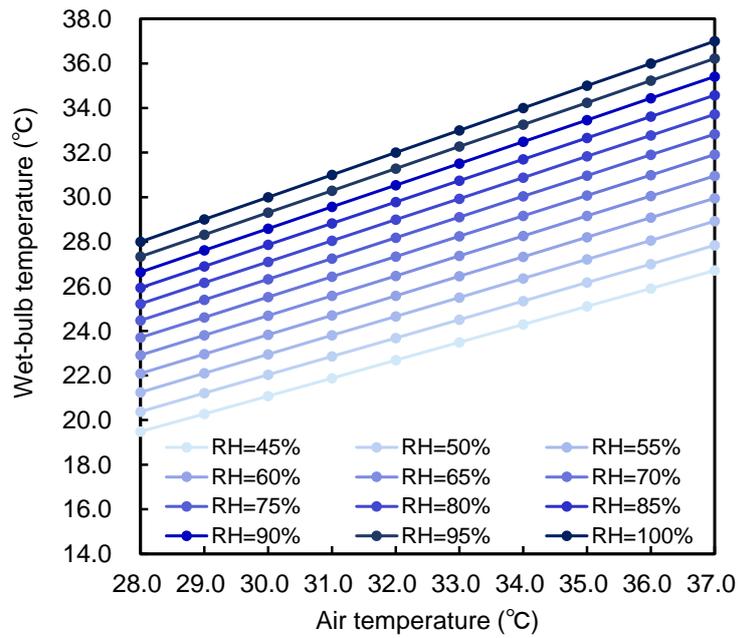


図 6-9 各相対湿度における気温と湿球温度の関係。

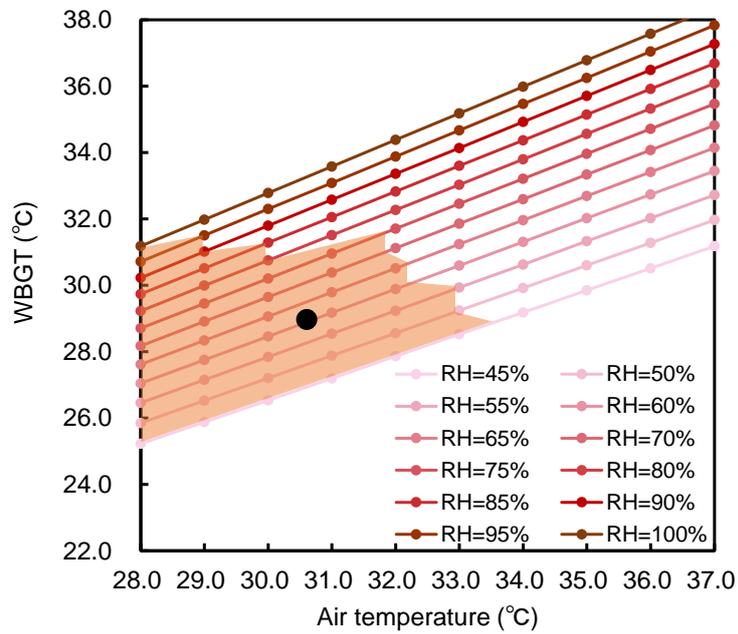


図 6-10 各相対湿度における気温と WBGT の関係。網掛けは実現象から推定された WBGT の変動幅を示す。黒点はコース内最大 WBGT を示す。

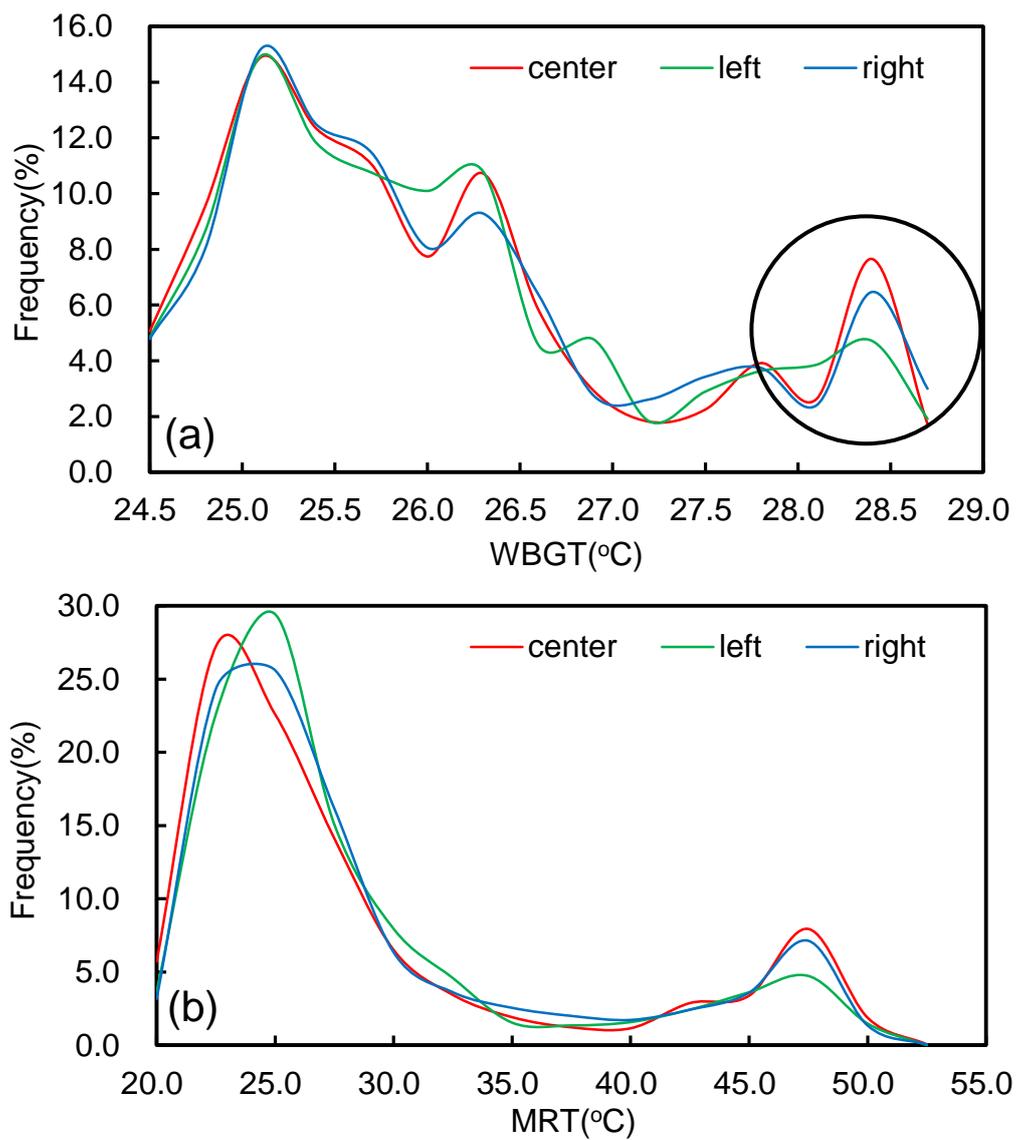


図 6-11 コース別の (a) WBGT および (b) MRT の度数分布. center : 道路中央, left, right : 走者に対して左側, 右側の歩道を表す.

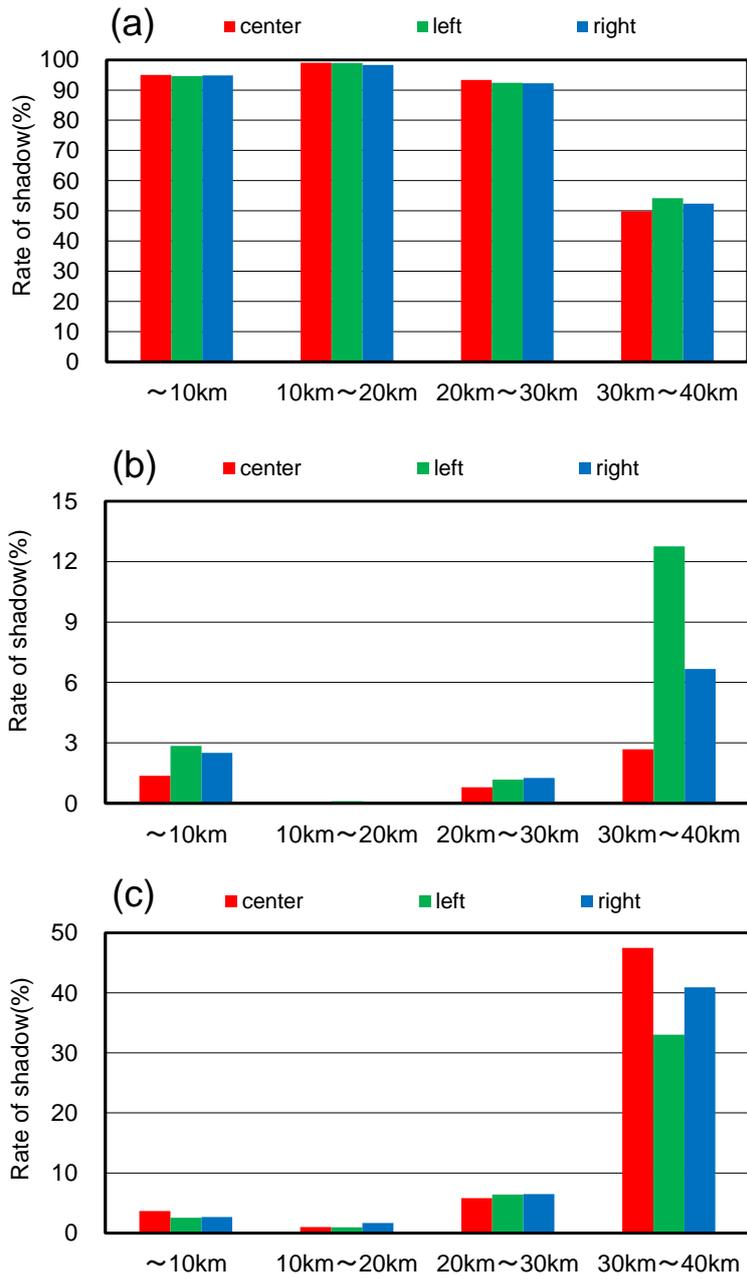


図 6-12 各距離における (a) 日陰, (b) 樹木のみの日陰, (c) 日向のコース別の割合.

## 第7章 結論

本研究では、都市域における街区特性の異なる3領域において、計27Caseの気象条件下で微気象観測を実施した。温熱環境を評価する指標として、熱中症に対して、日本で最も一般的に用いられる湿球黒球温度(WBGT)を用いた。観測結果に基づいて、学術上・工学上において有益な結果が得られたため、以下に総括する。また、本論の結果に対する改善策や方針については、今後の展望で述べる。

### 7.1 本論の総括

#### 1) 都市街区内の温熱環境の空間分布特性

どの領域においてもWBGTの変動は湿球温度や気温に依存する傾向にあったが、特に黒球温度の変動は大きく、ルーチン観測の結果とも大きな差異が生じ、黒球温度が高い地点では、WBGTも高い傾向にあった。さらに、領域内を「住宅街」や「街道」、「北側領域」や「南側領域」、「南北道路」や「東西道路」のように対照的な街区特性で分類した場合、建物の用途や配置によって、人体の感じる暑さの感覚は“ムシムシ”や“ジリジリ”と異なる可能性が示唆された。

#### 2) 数値モデルの妥当性評価

SOLWEIGで計算される長短波放射量・MRT・MRTから推定される黒球温度やUMEPから計算される天空率は、空間変動の再現性が高く、街区内の放射を概ね推定できることが示された。

#### 3) 広域に適用可能な簡易的な黒球温度推定式の提案

領域を代表する全天日射量、街区内で変動する天空率や気温(または代表的な気温)から弱風( $4\text{ m s}^{-1}$ 以下)かつ日向において、推定誤差約 $1.70^{\circ}\text{C}$ で黒球温度を推定できる式を提案した。さらに、UMEPで計算された天空率を導入し、SOLWEIGから推定された黒球温度の空間分布と比較すると、誤差は許容範囲内に収束し、相関係数が $0.3\sim 0.4$ であった。このことから、本提案式は街区内の空間変動を再現しながら、広域に適用できる可能性が示された。

#### 4) 数値モデルを用いた広域における熱ストレス評価

SOLWEIGを用いて、2018年8月を例に、2020年東京オリンピックマラソンコース(東京開催時)における走者と観客に対する熱ストレスを評価した。走者と観客に対して、皇居周辺は天空率が高く、その周辺よりWBGTが顕著に高かった。さらに、スタートから30km以降の領域では、WBGTが最大 $29^{\circ}\text{C}$ に達し、標高の上昇や走者の疲労などから、最も過酷であることが予測された。また、観客は同領域で観戦する場合、右側より左側の歩道の方が熱ストレスを低減できる可能性が示された。

以上の結果から、未解明であった街区内の統計的な温熱環境の空間分布特性を、観測と数値モデルから包括的に評価することができ、観測が困難であった黒球温度を簡易的に推定できる式を提案することができた。

## 7.2 今後の展望

本研究で示した結果に対して、さらに解析が必要な事柄や対応策などを本節でまとめる。

### (a) 熱ストレス指標

本研究では、主に WBGT 指標を用いて解析を行った。WBGT 指標の不利点として、人体の衣服や年齢などの生理的要素を考慮することはできない。したがって、それらが考慮された予測平均温熱感申告 (Predicted mean vote, PMV)、標準新有効温度 (Standard new effective temperature, SET<sup>\*</sup>)、UTCI (Universal temperature climate index) などと併せて解析することで、環境場と人体の双方から、熱ストレスを評価することができる。

### (b) 移動観測用台車の選択

本研究の観測では、4種類の台車を用いた。それぞれの台車の特徴を以下に示す。

Case\_1.1～Case\_1.3b では、軽量かつ丈夫な荷物運搬用台車を使用した (図 2-7 参照)。単管やアルミパイプで支持機構を作製し、各測器を取り付けて観測を行った (以降、台車 A)。本台車は 7.9 kg と軽量であるが、耐荷重は 200 kg であり、測器自体の大きさによるが、5 項目以上の気象要素を計測することができる。しかしながら、本台車の車輪は平坦な路面を想定しており、振動を抑制させるためには車輪の改良が必要である。

Case\_2.1a～Case\_2.2 では、台車 A の改善点を踏まえ、車輪をオフロード使用にして、かつ安定性の高い、農業用台車を使用した (図 2-9(a) 参照)。台車 A 同様に、単管やアルミパイプで支持機構を作製し、各測器を取り付けて観測を行った (以降、台車 B)。本台車は安定性が高く、耐荷重は台車 A より大きく、1 回の観測で多くの気象要素を設置・同期することができる。しかしながら、台車自体が重く、稼働効率に欠ける。統計的な熱環境場を評価するためには、同ルートにおいてサンプル数を増やすことが望ましい。そのため、台車自体を軽量化し、稼働効率を向上させることが望ましい。一方で、本台車をそのまま利用するにあたっては、一度に多くの気象要素を観測できる側面から、移動できる定点観測用台車としての活用が期待される。

Case\_2.3a～Case\_2.5f では、台車 B での改善点である“稼働効率”に着眼点を置き、軽量かつ機動性の高い多目的折り畳みキャリーカートを使用した (図 2-11 参照)。河本ら (2018) に基づいて作製され、観測項目および測器を最小限にすることで、1 回の観測の負荷を低減させた (以降、台車 C)。本台車は、軽量すぎるため、安定性に欠けるが、歩行速度を低減させることで改善できるため、汎用性は高いと考えられる。

Case\_3.1a, Case\_3.1b では、台車 C と同様の構想から、旅行用キャリーケースを使用し、

設置機器は最小限とした（図 2-16 参照）（以降，台車 D）．都心部の人口が密集する地域で観測する場合，台車に対して測器がむき出しの場合，住民や通行人からは不審に捉えられることが経験的にわかっている．その点キャリーケースは，場所を選ばずに観測でき，持ち運びが容易である．

以上より，各台車には，それぞれ異なる特徴があるため，観測・解析の目的や環境に応じた台車を選択する必要がある．また，現在では，測器自体の最小化・軽量化を試みた研究も多くある．これが実現することで，台車が小さい場合でも，観測項目を増やすことができる．したがって，本論では，移動観測には台車 C と D，定点観測では台車 B を用いることを推奨する．

#### (c) 移動速度による黒球温度の低下

本研究の移動観測では，黒球温度計は前方張り出しの状態である．そのため，測器が移動する際は，強制風を受けることになる．しかしながら，その風による黒球温度の低下率は，未知数である．したがって，台車の移動速度に応じた黒球温度の低下率を検証する必要がある．

#### (d) 簡易的な体感指標の作成

第 3 章では，領域内を対照的な街区特性に分類し，比較した．その際，人体に対する熱ストレスの感覚を，「ジリジリ」や「ムシムシ」といった表現で表したが，あくまで観測者のみの体感であり，一般性はない．したがって，放射や湿度の数値を指標化するとともに，住民や観測参加者などに対してアンケートを実施し，簡易的な体感指標を作成することで一般住民への理解が深まる．

#### (e) 本提案式の気温の項の扱い

本提案式によって，より正確な黒球温度を導くには，街区内の気温分布が必要である．そのため，街区内の気温を簡易的に推定できる手法（数値モデルや推定式）を確立することで，本提案式の汎用性はより高くなると考えられる．

#### (f) 本提案式の気象官署への適用

本提案式は，全天日射量，気温，天空率から構成されている．全天日射量や気温は，気象台や多くの AMeDAS 観測点で得ることができる（推定値の場合あり）．これらの気象官署の天空率は公開されていないが，測定は容易である．そのため，各気象官署の天空率が取得できれば，本提案式を用いて黒球温度を推定することができる．

#### (g) SOLWEIG 内のパラメータ調整

SOLWEIG はフリーツールであることから，今後，日本でも活用される機会が増えると考え

える。しかしながら、スウェーデンで開発された数値モデルであり、解析領域に適した大気の射出率や地表面の物性などを導入する必要がある。本解析ですでにパラメータ調整が必要な項目については、**付録**に記載する。

## 参考文献

- 1) Bedford, T., Warner, C. G.: The globe thermometer in studies of heating and ventilation, *J. Hyg.*, **34**, 458-473, 1934.
- 2) Bowring, B. R.: Total Inverse Solutions for the Geodesic and Great Elliptic, *Survey Review*, **33**(261), 461–476, 1996.
- 3) Chen, Y-C., Lin, T-P. and Matzarakis, A.: Comparison of mean radiant temperature from field experiment and modelling: a case study in Freiburg, Germany, *Theor. Appl. Climatol.*, **118**, 535-551, 2014.
- 4) Chow, W. T. L., Assyakirin Binte Ali Akbar, S. N., Heng, S. L. and Roth, M.: Assessment of measured and perceived microclimates within a tropical urban forest, *Urban For. Urban Greening*, **16**, 62-75, 2016.
- 5) Doan, Q. V., Kusaka, H. and Ho, Q. B.: Impact of future urbanization on temperature and thermal comfort index in a developing tropical city: Ho Chi Minh City, *Urban Climate*, **17**, 20-31, 2016.
- 6) Fanger, P. O.: Thermal Comfort-Analysis and Applications in Environmental Engineering, *Danish Technical Press*, Copenhagen, 256 pp, 1970.
- 7) Herrmann, J. and Matzarakis, A.: Mean radiant temperature in idealized urban canyons – examples from Freiburg, Germany, *Int. J. Biometeorol.*, **56**, 199-203, 2012.
- 8) Holmer, B.: A simple operative method for determination of sky view factors in complex urban canyons from fisheye photographs, *Meteorol. Zeitschrift*, **1**, 142-148, 1992.
- 9) Honjo, T., Seo, Y., Yamasaki, Y., Tsunematsu, N., Yokoyama, H., Yamato, H. and Mikami, T.: Thermal comfort along the marathon course of the 2020 Tokyo Olympics, *Int. J. Biometeorol.*, **62**, 1407-1419, 2018.
- 10) Houghten, F. C., Yaglou, C. P.: Determining lines of equal comfort. *Am. Soc. Heat Ventil. Eng. Trans.*, **29**, 163-176, 1923.
- 11) Höppe, P.: A new procedure to determine the mean radiant temperature outdoors, *Wetter Leben*, **44**, 147-151, 1992.
- 12) ISO7243: Ergonomics of the thermal environment –Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index, *Int. Org. Sta.*, Geneva, 2017.
- 13) ISO7726: Ergonomic of the thermal environment- Instruments for measuring physical quantities, *Int. Org. Sta.*, Geneva, 1998.
- 14) Inagaki, A., Kanda, M., Ahmad, N. H., Yagi, A., Onodera, N. and Aoki, T.: A Numerical Study of Turbulence Statistics and the Structure of a Spatially-Developing Boundary Layer Over a Realistic Urban Geometry, *Boundary-Layer Meteorol.*, **164**, 161-181, 2017. DOI 10.1007/s10546-017-0249-y
- 15) Johnson, G. T. and Watson, I. D.: The Determination of View-Factors in Urban Canyons, *J. Climate and Applied Meteorol.*, **23**, pp329-335, 1984.

- 16) Kakamu, T., Wada, K., Smith, D. R., Endo, S. and Fukushima, T.: Preventing heat illness in the anticipated hot climate of the Tokyo 2020 Summer Olympic Games, *Environmental Health and Preventive Medicine*, **22**, 68, 2017. DOI 10.1186/s12199-017-0675-y
- 17) Kanda, M., Inagaki, A., Miyamoto, T., Gryschka, M. and Raasch, S.: A New Aerodynamic Parametrization for Real Urban Surfaces, *Boundary-Layer Meteorol.*, **148**, 357-377, 2013. DOI 10.1007/s10546-013-9818-x
- 18) Kikegawa, Y., Tanaka, A., Ohashi, Y., Ihara, T. and Shigeta, Y.: Observed and simulated sensitivities of summertime urban surface air temperatures to anthropogenic heat in downtown areas of two Japanese Major Cities, Tokyo and Osaka, *Theor. Appl. Climatol.*, **117**, 175-193, 2014. DOI 10.1007/s00704-013-0996-8
- 19) Konarska, J., Lindberg, F., Larsson, A., Thorsson, S. and Holmer, B.: Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees—application for outdoor thermal comfort modelling, *Theor. Appl. Climatol.*, **117**, 363-376, 2014. DOI 10.1007/s00704-013-1000-3
- 20) Kosaka, E., Iida, A., Vanos, J., Middel, A., Yokohari, M. and Brown, R.: Microclimate Variation and Estimated Heat Stress of Runners in the 2020 Tokyo Olympic Marathon, *Atmosphere*, **9**, 192, 2018. DOI: 10.3390/atmos9050192
- 21) Kusaka, H., Hara, M. and Takane, Y.: Urban Climate Projection by the WRF Model at 3-km Horizontal Grid Increment: Dynamical Downscaling and Predicting Heat Stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya Metropolises, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **90**(B), pp. 47-63, 2012.
- 22) Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. and Kimura, F.: A Single-layer Urban Canopy Model for Atmospheric Models: Comparison with Multi-layer and Slab Models, *Boundary-Layer Meteorol.*, **101**, 329-358, 2001.
- 23) Lau, K. K-L., Ren, C., Ho, J. and Ng, E.: Numerical modelling of mean radiant temperature in high-density sub-tropical urban environment, *Energy and Buildings*, **114**, 80-86, 2016.
- 24) Lindberg F. and Grimmond, C. S. B.: Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city: Influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London, *Urban Ecosyst*, **14**, 617-634, 2011b. DOI 10.1007/s11252-011-0184-5
- 25) Lindberg, F. Grimmond, C. S. B. and Martilli, A.: Sunlit fractions on urban facets – Impact of spatial resolution and approach, *Urban Climate*, **12**, 65-84, 2015a. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.11.006
- 26) Lindberg, F. Onomura S. and Grimmand, C. S. B.: Influence of ground surface characteristics on the mean radiant temperature in urban areas, *Int. J. Biometeorol.*, **60**, 1439-1452, 2016. DOI: 10.1007/s00484-016-1135-x
- 27) Lindberg, F. and Grimmond, C. S. B.: Continuous sky view factor maps from high resolution urban digital elevation models, *Climate Research*, **42**, 177-183, 2010. doi: 10.3354/cr00882

- 28) Lindberg, F. and Grimmond, C. S. B.: The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation, *Theor. Appl. Climatol.*, **105**, 311-323, 2011a.
- 29) Lindberg, F., Holmer, B. and Thorsson, S.: SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings, *Int. J. Biometeorol.*, **52**, 697-713, 2008.
- 30) Lindberg, F., Jonsson, P., Honjo, T. and Wästberg, D.: Solar energy on building envelopes – 3D modelling in a 2D environment, *Solar Energy*, **115**, 369-378, 2015b.  
DOI.org/10.1016/j.solener.2015.03.001
- 31) Matsuda, M., Onishi, R. and Takahashi, K.: Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **173**, 53-66, 2018.  
DOI.org/10.1016/j.jweia.2017.11.015
- 32) Matzarakis, A., Fröhlich, D., Bermon, S. and Adami, P.E.: Quantifying Thermal Stress for Sport Events—The Case of the Olympic Games 2020 in Tokyo, *Atmosphere*, **9**, 479, 2018. DOI: 10.3390/atmos9120479
- 33) Matzarakis, A., Fröhlich, D., Bermon, S. and Adami, P.E.: Visualization of Climate Factors for Sports Events and Activities—The Tokyo 2020 Olympic Games, *Atmosphere*, **10**, 572, 2019. DOI: 10.3390/atmos10100572
- 34) Nakayoshi, M., Kanda, M. and de Dear, R.: Globe Anemo-radiometer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **155**, 209-227, 2015. DOI 10.1007/s10546-014-0003-7
- 35) Ohashi, Y., Genchi, Y., Kondo, H., Kikegawa, Y., Yoshikado, H. and Hirano, Y.: Influence of Air-Conditioning Waste Heat on Air Temperature in Tokyo during Summer: Numerical Experiments Using an Urban Canopy Model Coupled with a Building Energy Model, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **46**, 66-81, 2007.
- 36) Ohashi, Y., Kikegawa, Y., Ihara, T. and Sugiyama, N.: Numerical Simulations of Outdoor Heat Stress Index and Heat Disorder Risk in the 23 Wards of Tokyo, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 583-597, 2014.
- 37) Okada, M. and Kusaka, H.: Proposal of a new equation to estimate globe temperature in an urban park environment, *J. Agric. Meteorol.*, **69**(1), 23-32, 2013.
- 38) Oku, Y., Yoshino, J., Takemi, T. and Ishikawa, H.: Assessment of heavy rainfall-induced disaster potential based on an ensemble simulation of Typhoon Talas (2011) with controlled track and intensity, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **14**, 2699-2709, 2014. DOI: 10.5194/nhess-14-2699-2014
- 39) Reindl, D. T., Beckman, W. A and Duffie, J. A.: Diffuse Fraction Correlations, *Solar energy*, **45**(1), 1-7, 1990.
- 40) Sprung, A.: Über die Bestimmung der Luftfeuchtigkeit mit Hilfe des Assmannschen Aspirationspsychrometers, *Wetter*, **5**, 105-108, 1988.

- 41) Steyn, D. G.: The calculation of view factors from fisheye-lens photographs, *Atmosphere Ocean*, **18**, 254-258, 1980.
- 42) Takane, Y., Kikegawa, Y., Hara, M., Ihara, T., Ohashi, Y., Adachi, S. A., Kondo, H., Yamaguchi, K. and Kaneyasu, N.: A climatological validation of urban air temperature and electricity demand simulated by a regional climate model coupled with an urban canopy model and a building energy model in an Asian megacity, *Int. J. Climatol.*, **37**, 1035-1052, 2017. DOI: 10.1002/joc.5056
- 43) Tan, C. L., Wong, N. H. and Jusuf, S. K.: Outdoor mean radiant temperature estimation in the tropical urban environment, *Building and Environment*, **64**, 118-129, 2013.
- 44) Tetens, O., 1930: Uber einige meteorologische Begriffe, *Z Geophys*, **6**, 297-309.
- 45) University of Gothenburg: The SkyViewFactorCalculator,  
<<https://gvc.gu.se/english/research/climate/urban-climate/software/skyviewfactorcalculator>>  
(2019.10.17 参照)
- 46) VDI: Methods for the human-biometeorological assessment of climate and air hygiene for urban and regional planning, Part I: climate, *VDI 3787*, Part 2, Belin, 29pp, 1998.
- 47) Vanos, J. K., Kosaka, E., Iida, A., Yokohari, M., Middel, A., Scott-Fleming, I. and Brown, R. D.: Planning for spectator thermal comfort and health in the face of extreme heat: The Tokyo 2020 Olympic marathons, *Sci. Total Env.*, **657**, 904-917, 2019.  
DOI.org/10.1016/j.scitotenv.2019.11.447
- 48) Vernon, H. M.: The measurement of radiant heat in relation to human comfort, *J. Physiol.*, **70**, *Proc*, 15, 1930.
- 49) Vincenty, T.: Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with Application of Nested Equations, *Survey Review*, **123**(176), 88-93, 1975.
- 50) Watson, I. D. and Johnson, G. T.: Graphical estimation of sky view-factors in urban environments, *Int. J. Climatol.*, **7**(2), 193-197, 1987.
- 51) Yaglou, C. P., Minard, C. D.: Control of casualties at military training centers. *AMA Arch. Ind. Health*, **16**, 302-316, 1957.
- 52) Yuge, T.: Experiments on Heat Transfer From Spheres Including Combined Natural and Forced Convection, *J. Heat Transfer*, **82**(3), 214-220, 1960.
- 53) Zare, S., Hemmatjo, R., Shirvan, H. E., Hasheminejad, N., Sarebanzadeh, K., Zare, K. and Faridan, M.: Investigating the Levels of Thermal Stress in Kerman City in 2016 Using Thermal Indices: WBGT, ESI, HI, HSI, and SWreq, *J. Kerman Univ. Med. Sci.*, **25**(4), 339-354, 2018.
- 54) 足永靖信, 李海峰, 尹聖皖: 顕熱潜熱の違いを考慮した東京 23 区における人工排熱の排出特性に関する研究, *空気調和・衛生工学会論文集*, **92**, 121-130, 2004.
- 55) 一ノ瀬俊明: 都市河川のヒートアイランド抑制効果, *環境技術*, **35**(7), 497-501, 2006.
- 56) 上野賢仁, 赤嶺吉治, 神坂一成: 熊本市街区の暑熱環境の調査と評価に関する研究, *環境システム研究論文発表会講演集*, **39**, 387-392, 2011.

- 57) 大橋唯太：都市域における熱中症指標 WBGT の変動特性，環境情報科学論文集，**24**，417-422，2010.
- 58) 大橋唯太，亀掛川幸浩，山口和貴，井原智彦，岡和孝：数値気象モデルを利用した屋外活動空間の暑熱評価，日本生気象学会誌，**47**(2)，91-106，2010.
- 59) 大橋唯太，竜門洋，重田祥範：都市域のさまざまな活動空間での WBGT の比較，日本生気象学会誌，**46**(2)，59-68，2009.
- 60) 岡田牧，岡田益己，日下博幸：岡田・日下の黒球温度推定式の広域適用とパラメータ調整，日本ヒートアイランド学会論文集，**8**，13-21，2013.
- 61) 小田僚子，伴内祐太，番場勇介，高岡大晃，仁平学，矢内栄二：シンチロメータを用いた都市干潟における夏季の顕熱フラックスの変動特性，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，**69**(2)，I\_1012-I\_1017，2013.
- 62) 小野雅司，登内道彦：通常気象要素を用いた WBGT (湿球黒球温度) の推定，日本生気象学会誌，**50**(4)，147-157，2014.
- 63) 樫村修生，南和広，星秋夫：2020 年東京オリンピックマラソン時の WBGT の予測，日本生気象学会誌，**53**(4)，139-144，2016.
- 64) 河本陸，稲垣厚至，神田学，Ferdiansyah, M. R., 石橋耀二：移動観測に基づく都市街区内の微気候のアンサンブル平均特性，土木学会論文集 B1 (水工学)，**74**(4)，I\_253-I\_258，2018.
- 65) 環境省：熱中症予防情報サイト<<http://www.wbgt.env.go.jp>> (2019.10.22 閲覧)
- 66) 環境省：平成 21 年度 WBGT 観測による熱中症予防情報の提供業務報告書；3. 2 WBGT 推定方法の精度検証，2010. <[http://www.env.go.jp/air/report/h22-04/03\\_2.pdf](http://www.env.go.jp/air/report/h22-04/03_2.pdf)> (2019 年 10 月 17 日閲覧)
- 67) 久保田孝幸，花木啓祐，一ノ瀬俊明，小宮英孝，神島奈央子：微気候からみた街区計画に関する研究，環境システム研究，**24**，141-148，1996.
- 68) 国土地理院：世界測地系に対応した測量計算プログラムの作成，国土地理院技術資料 B5，No. 19.
- 69) 近藤純正：近藤純正 HP -K17. 暑熱環境と黒球温度-，<<https://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/kenkyu00.html>> (2019 年 12 月 28 日閲覧)
- 70) 斎藤一，三浦豊彦：日本の高温労働 -その実態と対策-，労働科学研究所出版部，1963.
- 71) 酒井敏，梅谷和弘，飯澤功，伊藤文，小野耕作，矢島新，飴村尚起，森永修司：都市熱環境観測システムの開発研究，天気，**56**，337-351，2009.
- 72) 菅原広史，成田健一：都市内河川による暑熱環境の緩和効果，水文・水資源学会誌，**25**(6)，pp. 351-361，2012.
- 73) 高市益行，細野達夫，黒崎秀仁，渡辺慎一，川嶋浩樹，中野有加：高軒高温室における WBGT 値を用いた快適作業領域の解析，野菜茶業研究所 2003 年の成果情報，2003. <<https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/vegetea/2003/vegetea03-24.html>>

(2019年10月21日閲覧)

- 74) 東京都環境局：都営バス停留所へのドライ型ミスト導入検証事業，  
<[http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/heat\\_island/toeibus.html](http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/heat_island/toeibus.html)> (2019年10月17日  
閲覧)
- 75) 東京都環境局：保水性舗装・遮熱性舗装，  
<[http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/heat\\_island/water\\_retentive.html](http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/heat_island/water_retentive.html)> (2019年10月  
17日閲覧)
- 76) 登内道彦，村山貢司：熱中症危険度の地域特性とHWDI，日本生気象学会雑誌，**45**(3)，  
S62，2008.
- 77) 中井誠一：熱中症予防対策の歴史，日本生気象学会誌，**48**(1)，9-14，2011.
- 78) 仲吉信人：人の動線に沿った熱環境・温熱生理評価のための人体装着型計測システムの  
開発と応用，東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻博士学位論文，2012.
- 79) 仲吉信人，柴田朝葉，小澤史周，高野眞一：種々のWBGT測定手法に伴う不確実性評  
価，土木学会論文集B1(水工学)，**74**(5)，I\_1159-I\_1164，2018.
- 80) 成田健一：風の道と都市気候形成，日本風工学会誌，**31**(2)，109-114，2006.
- 81) 成田健一，鍵屋浩司：臨海都市における中小河川の風の道としての効果，日本建築学会  
環境系論文集，**75**(653)，637-644，2010.
- 82) 日本生気象学会：「日常生活における熱中症予防指針」Ver.3 確定版，2013.
- 83) 日本体育協会：「スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック」，2013.
- 84) 野呂竜夫，和田かず美：統計実務におけるレンジチェックのための外れ値検出方法，統  
計研究彙報，**72**，41-54，2015.
- 85) 星秋夫，稲葉裕：人口動態統計を利用した発生場所からみた暑熱障害の死亡率，日本生  
気象学会誌，**39**(1,2)，37-46，2002.
- 86) 星秋夫，中井誠一，金田英子，山本享，稲葉裕：わが国における熱中症死亡の地域差，  
日本生気象学会誌，**47**(4)，175-184，2010.
- 87) 三上岳彦：風と緑の効果を活用した街づくり—東京都内の「風の道」とヒートアイラン  
ド緩和効果，環境研究，**141**，29-34，2006.
- 88) 山崎雄大，常松展充，横山仁，梅木清，本條毅：温熱快適感マップと夏季マラソンコー  
スの温熱環境予測，環境情報科学学術研究論文集，**30**，43-48，2016.
- 89) ドイツ工業協会：環境気象学—都市・地域計画のための気候環境地図—，環境情報科  
学センター，56pp，2004.

## 参照データ

- 1) 環境省：熱中症予防情報サイトー過去データ-データリスト，東京，2016年8月；2018年5月～9月，  
<[http://www.wbgt.env.go.jp/record\\_data.php?region=03&prefecture=44&point=44132](http://www.wbgt.env.go.jp/record_data.php?region=03&prefecture=44&point=44132)>
- 2) 環境省：熱中症予防情報サイトー過去データ-データリスト，船橋，2017年8月，2018年7月，  
<[http://www.wbgt.env.go.jp/record\\_data.php?region=03&prefecture=45&point=45106](http://www.wbgt.env.go.jp/record_data.php?region=03&prefecture=45&point=45106)>
- 3) 国土交通省気象庁：過去の気象データ・ダウンロード，東京；船橋，気温・相対湿度・現地気圧・風速・風向・全天日射量・日照時間，2016年～2018年，  
<<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>>
- 4) 国土交通省国土地理院：基盤地図情報ダウンロードサービスー基本項目；DEM，東京；千葉，5339-5340，<<https://www.fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>>
- 5) 総務省消防庁：熱中症情報ー熱中症による救急搬送人員に関するデータ，東京，2018年5月～9月，<<https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/post3.html>>
- 6) JAXA：ALOS-2・ALOS～日本域高解像度土地利用土地被覆図～，東京；千葉，30 m解像度，2014年～2016年，<[https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/lulc\\_jindex.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/lulc_jindex.htm)>
- 7) SKYNET：Data and Site information (Chiba)ーSky radiometerー，Direct solar radiation, August, 2019，<<http://atmos3.cr.chiba-u.jp/skynet/data.html>>，※サイトおよびデータ所有者の承諾あり

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、また、本論文を作成するにあたり、多くの方にご指導とご鞭撻を賜りました。

主査の千葉工業大学大学院工学研究科工学専攻の矢内栄二教授には、流体圏環境研究室のグループに所属してから6年間、研究や人格形成、モラルなど、総合的なご指導、ご助言を頂きました。学部時代は、日常生活含めて、大変ご迷惑をおかけしましたが、そんな私に呆れることなく、ご指導してくださりました。そのご指導があったからこそ、今の私がいると強く感じています。深く感謝申し上げます。

私が所属する研究室の教員である、千葉工業大学大学院工学研究科生命環境科学専攻の小田僚子准教授にも、6年間、多大なご指導・ご支援を頂きました。修士2年次には、進路決定が遅く、当初、学会仲間との談話の中で安易に博士進学を決め、研究生活を送っていました。そんな私に、小田先生は時には厳しく、真摯に相談してくださり、研究者の道へと導いてくださりました。感謝の言葉もございません。

矢内先生と小田先生には、博士に進学しながらも、中学高等学校の教員を志望する私の背中を強く推していただきました。それは私にとって、今日まで、研究に励むことができた原動力であったと感じています。さらに、研究面だけでなく、先生方との他愛もない会話は、何よりも自信や責任感に繋がりました。先生方の研究への姿勢や社会人として所業は、いつも勉強になるばかりでした。いつか胸を張って、先生方のようになれる日を目指し、精進して参ります。

また、本論文の審査、公聴会を通じまして、千葉工業大学大学院工学研究科生命環境科学専攻の五明美智男教授、及び、千葉工業大学大学院工学研究科工学専攻の松島大教授、及び、東京理科大学理工学部土木工学科の仲吉信人准教授からは親切丁寧なご指導とご意見を頂戴いたしました。ご多忙の中、先生方にご指導頂いたことにより、本論文をより一層充実させることができました。ここに記して、深く御礼を申し上げます。

東京工業大学環境・社会理工学院の神田学教授には、共同研究の打ち合わせ等で有益なご助言を頂戴いたしました。また、本研究に関連する資金の大部分は、神田先生を代表とする科研費から支援して頂きました。ここに記して、深く感謝申し上げます。

東京工業大学環境・社会理工学院の稲垣厚至助教には、学部時代からご指導いただき、共同研究や学術論文の執筆では、幾度となくお力添え頂きました。深く感謝申し上げます。

東京工業大学神田研究室及び東京理科大学仲吉研究室の皆様には、観測や解析にお力添え頂きました。特に、神田研究室の河本陸氏、仲吉研究室の光吉勇人氏、金子凌氏には、多大なご尽力を賜りました。ここに記して、感謝申し上げます。

谷津干潟自然観察センター、環境省成田自然保護官事務所、習志野市役所公園緑地課及び協働政策課、習志野警察署、谷津町内会、谷津遊園ハイツ、の皆様には、谷津干潟および周辺住宅街の観測の際にご協力頂きました。ここに記して、御礼申し上げます。

本研究は科学研究費補助基盤研究 (A) (課題番号: 25249066, 17H01292, 代表: 神田学) の財政的支援を受けました。併せて、御礼申し上げます。

矢内研究室及び小田研究室の皆様には、幾度の観測で、多大なサポート、尽力を賜りました。日常生活においても、皆さんの笑顔を見て、快適な学生生活を送ることができました。特に、本研究に直接携わった、植田弥月氏、高田峻也氏、渡辺彩氏、荒井仁氏、飯泉みなみ氏、財賀祐也氏、柴崎一氏には、観測の準備や本観測、データ解析の面において、大いに貢献してくれました。大変感謝しています。また、学部生以外として、矢内研究室の藤原誠司氏、橋本崇氏、田賀利輝氏、小田研究室の橋北太樹氏、松井貴裕氏、白井健氏、伊落貴之氏、白川尚樹氏には、TA や研究室の運営など、ご相談やご協力を頂きました。お陰様で、充実した研究生生活を送ることができました。

他にも、多くの方々のご協力やご支援があり、本論文を執筆することができました。心から感謝申し上げます。ありがとうございました。

最後に、ここまで温かく見守り、私の我が儘に付き合ってくれた家族の皆さんには、感謝しきれない恩があります。気持ちを折らずに、学業に専念できたことは、あなた方のお陰です。本当にありがとうございました。私にとっては、ここからが本当のスタートだと思っています。この経験を活かし、人生を一步ずつ歩んでいきたいと思えます。

## 研究業績

<博士論文に関連する査読付論文> [4件]

1. 河野恭佑, 小田僚子, 稲垣厚至: 街区放射モデルを用いた黒球温度の算出および移動気象観測値との比較検証, 土木学会論文集 B1 (水工学), **75(2)**, I\_25-I\_30, 2019.
2. 小田僚子, 河野恭佑, 稲垣厚至, 矢内栄二: 低層住宅街区内の道路構造に着目した熱ストレス評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), **75(2)**, I\_31-I\_36, 2019.
3. 河野恭佑, 植田弥月, 稲垣厚至, 小田僚子: 街区領域における晴天時と曇天時の WBGT 分布の特徴, 土木学会論文集 B1 (水工学), **74(4)**, I\_247-I\_252, 2018.
4. 河野恭佑, 植田弥月, 稲垣厚至, 小田僚子: 移動観測手法に基づく東京都市街地の暑熱環境評価, 環境情報科学学術研究論文集, **31**, p143-p148, 2017.

<博士論文に関連する国際学会発表> [2件]

1. R. Oda, Kawano K., A. Inagaki and E. Yauchi: Spatial distribution of heat stress within urban districts around Tokyo, *the 16<sup>th</sup> Asia Oceania Geosciences Society*, Singapore, July, 2019.
2. Kawano K., R. Oda and A. Inagaki: Mobile observation of human heat stress within urban residential district around Tokyo, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate*, 6 pages, 2018.

<博士論文に関連する国内学会発表> [6件]

1. 河野恭佑, 財賀祐也, 小田僚子, 稲垣厚至: 気象移動観測における熱電対の設置方法の検討, 気象学会 2019 年度春季大会, 渋谷, 2019.5.
2. 河野恭佑, 高田峻也, 小田僚子, 稲垣厚至: 千葉県谷津干潟周辺における熱環境評価, 気象学会 2018 年度春季大会, つくば, 2018.5.
3. 河野恭佑, 小田僚子, 稲垣厚至: 天空率の違いによる都市街区内の WBGT の変化, 気象学会 2017 年度秋季大会, 札幌, 2017.10.
4. 河野恭佑, 植田弥月, 小田僚子, 稲垣厚至: WBGT の移動観測に基づく東京都市街地の暑熱環境特性, 土木学会平成 29 年度全国大会第 72 回年次学術講演会, 福岡, 2017.9.
5. 河野恭佑, 植田弥月, 小田僚子, 稲垣厚至: 東京都市街地における WBGT 移動観測, 気象学会 2017 年度春季大会, 渋谷, 2017.5.
6. 河野恭佑, 植田弥月, 小田僚子, 稲垣厚至: 東京都市街地における WBGT の移動観測結果, 第 44 回土木学会関東支部技術研究発表会, さいたま, 2017.3.

## 付録

### A SOLWEIG での計算について

#### (a) 下向き長波放射量について

5.2.2 項で示した下向き長波放射量が過大評価される要因について説明する。SOLWEIG 内での下向き長波放射量の計算式を以下に示す。

$$\begin{aligned} L_{down} = & (\psi_{sky_b} + \psi_{sky_v} - 1)\varepsilon_{sky}\sigma T_a^4 \\ & + (2 - \psi_{sky_v} - \psi_{sky_{vb}})\varepsilon_{wall}\sigma T_a^4 \\ & + (\psi_{sky_{vb}} - \psi_{sky_b})\varepsilon_{wall}\sigma T_s^4 \\ & + (2 - \psi_{sky_b} - \psi_{sky_v})(1 - \varepsilon_{wall})\varepsilon_{sky}\sigma T_a^4 \end{aligned} \quad (A-1)$$

ここで、 $\psi_{sky_b}$ 、 $\psi_{sky_v}$ 、 $\psi_{sky_{vb}}$ は、天空と建物、樹木、建物および樹木との形態係数（物体から見た空の割合）である。 $\varepsilon_{sky}$ と $\varepsilon_{wall}$ は、天空および壁面の射出率を示す。 $T_a$ および $T_s$ は、気温と表面温度である。式(A-1)の第1項～第4項は、順に、天空、樹木、壁面、反射から入射する長波放射量を意味する。各項について、過大評価される要因について検討する。

まず、第1項および第4項の $\varepsilon_{sky}$ について評価する。 $\varepsilon_{sky}$ は、大気の混濁度や緯度の違いなどに応じて、様々な推定方法が提案されている。例えば、相対湿度 60%、気温 32.5°C、大気圧 1007.4 hPa のとき、表 A-1 のように、推定される射出率は異なる。したがって、日本に適した計算式を導入することが望まれる。

次に、第1項および第4項の $T_a$ について評価する。天空からの長波放射量の計算に用いられる $T_a$ については、本来、上空の気温が用いられる。しかしながら、気温の鉛直分布を推定することは難しいため、簡単にするため、地上の気温が用いられている。したがって、この気温は、過大評価に大きく影響することが考えられる。

最後に、第3項の $T_s$ について評価する。SOLWEIG 内での $T_s$ は、壁面および地表面温度の平均値が用いられ、それは物性によって異なる。2年間の実測に基づき、太陽高度 ( $\eta_{max}$ ) と、表面温度と気温の差分値 ( $T_s - T_a$ ) を線形的な関係で示し、それを適用させることで $T_s$ を求めている。一例として、以下にアスファルトに適用される関係式を示す。

$$T_s - T_a = 0.58\eta_{max} - 9.78 \quad (A-2)$$

このように、表面温度と気温の差分値を用いることで、地域差を最小限にしている。ただし、検証に用いられた物体の蓄熱・反射特性は、日本で一般的かどうかは不明であり、今後、日本でも実測値に基づいた検証が必要である。

以上のことから、 $L_{down}$ を適切に再現するためには、各パラメータに対して多方面からアプローチしていくことが望まれる。

## (b) アルベドの相違による MRT (黒球温度) の変化

本論における一連の解析が終了した後に、人体に対するアルベド (i.e. 人体の短波放射吸収係数,  $\zeta_k$ ) 変更時 (0.7→0.94) の MRT の相違が確認された。本項では、その結果を示す。今後の研究では、アルベドの適切な設定を検討する必要があるが、本論に関しては、アルベド変更時の差異は、本論の結果を大きく左右するものではない。

人体に対するアルベドの設定は、長短波放射量ではなく MRT に変化を与える (式 (1-7), 式 (1-8) 参照)。したがって、5.4.2 項で示したように、MRT から変換される *Bedford* 式および ISO 式において、アルベドによる黒球温度の変化が見られる。図 A-1 に、Area\_1 において、 $\zeta_k$  を 0.06, 0.1, 0.3 と変化させて計算した MRT と *Bedford* 式から変換された黒球温度を示す。SOLWEIG では、人体が灰色と仮定されているため、 $\zeta_k$  は 0.3 と設定されている。例えば、本研究で扱った黒球温度計では、 $\zeta_k$  は一般的に 0.06 と言われている。したがって、SOLWEIG での黒球温度は実測値と比較する際、大きな差異が生じる可能性がある。それを踏まえて、図 A-1 を見ると、 $\zeta_k$  が 0.3 と 0.06 の場合で、MRT は平均約 7°C の温度差が生じているものの (図 A-1 (a)), 黒球温度では、その差は平均約 1.5°C であった (図 A-1 (b))。

また、5.4 節で示した「初期結果」における各式の黒球温度の差異について評価する。まず、熱収支式の放射項を MRT に変更し (以下の式)、*Bedford* 式との比較を行った。

$$\varepsilon\sigma(MRT + 273)^4 = \varepsilon\sigma(T_g + 273)^4 + h(T_g - T_a) \quad (\text{A-3})$$

図 A-2 は、各式から計算された黒球温度と風速の関係を示している。弱風速ほど、または高温域ほど、黒球温度の差異は大きくなる傾向にあった。しかしながら、「初期結果」において、風速の入力条件が 2.7 m s<sup>-1</sup> であったこと、黒球温度が 40°C 前後であったことを踏まえると、各式から得た黒球温度の差異は約 1°C と大きな相違は見られなかった。そこで、式 (A-3) におけるアルベド変更時 (0.3→0.06) の黒球温度の変化を計算すると、約 4°C であった。このことから、5.4 節で示した熱収支式と *Bedford* 式との大きな差異は、アルベドの相違によるところが大きいことがわかった。

表 A-1 既往の研究から計算された射出率の違い

Proposer	sky emissivity
Ångström and Linke, 1981	0.80
Brutsaert, 1975	0.88
Elsasser and Dines, 1981	0.83
Satterland, 1979	0.87
Yamamoto and Brunt, 1950	0.85
Idso and Jackson, 1969	0.89

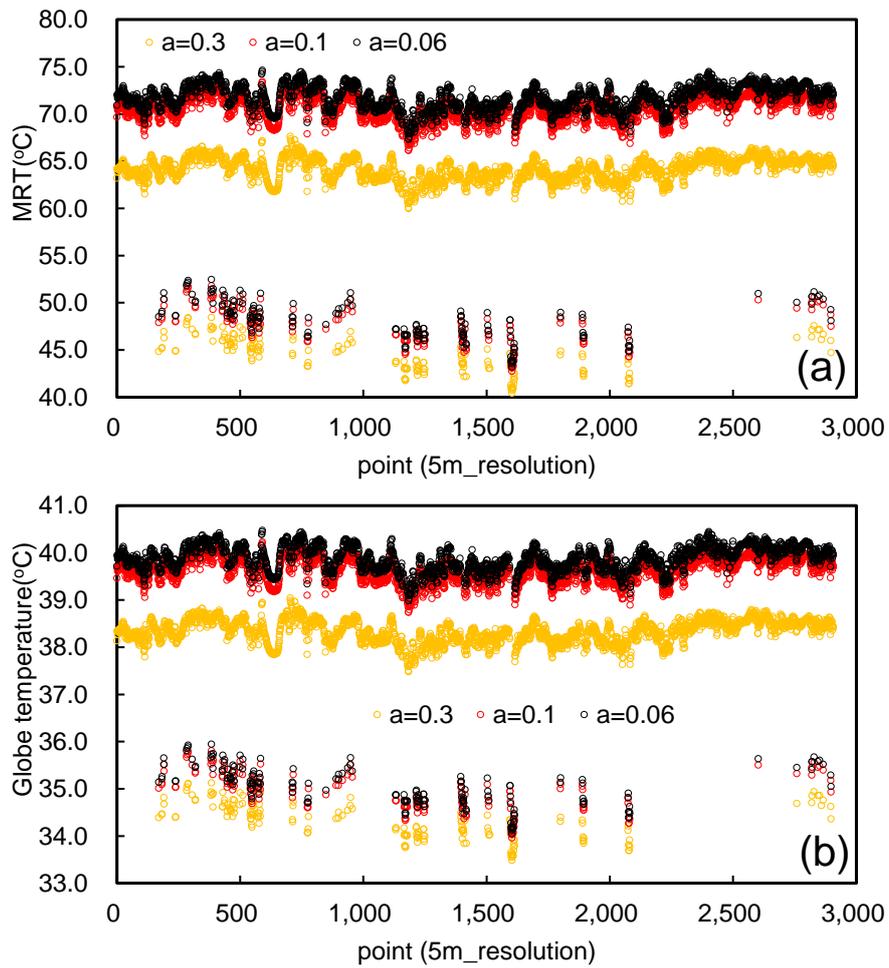


図 A-1 SOLWEIG 内で人体に対するアルベドを変更させたときの (a) MRT と (b) 黒球温度の空間変動

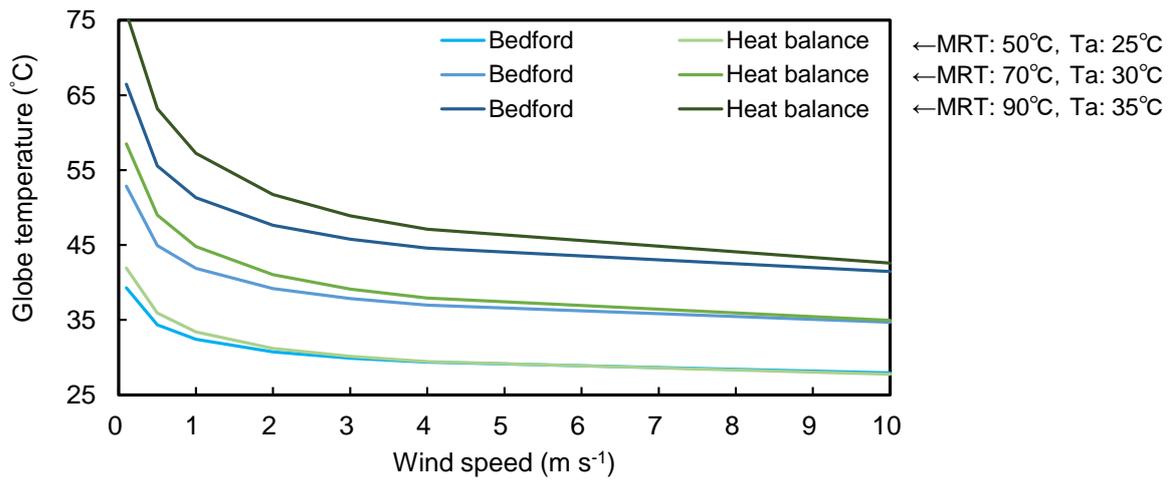


図 A-2 風速に応じた Bedford 式と熱収支式から計算した黒球温度の変動.

## B 一般定義と SOLWEIG 定義に基づく天空率の相違

本研究で扱った天空率の定義の違いによる数値差について記載する。一般定義と SOLWEIG 定義の天空率の関係を図 B-1 に示す。定義の違いにより、両者の間には、指数関数的な関係が見られた。また、SOLWEIG 定義の天空率の方が、平均的に約 20% 高いことがわかった。

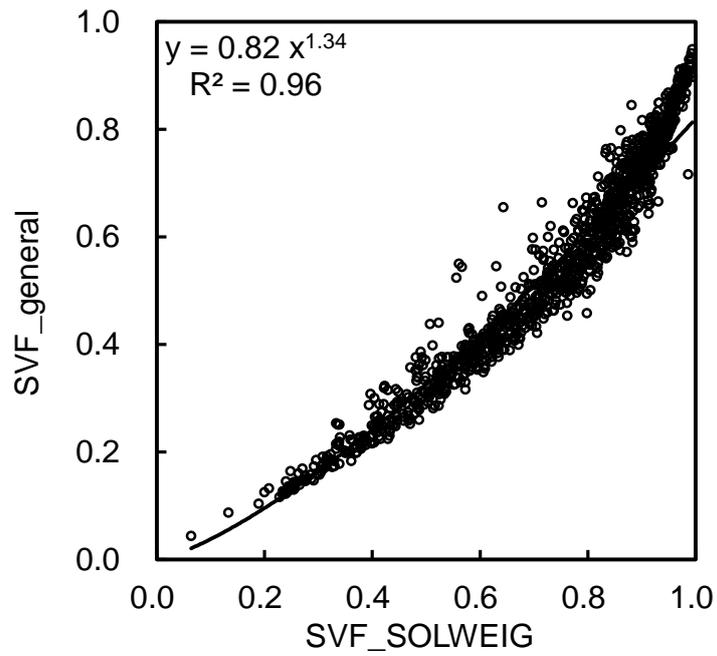


図 B-1 一般定義 (SVF\_general) と SOLWEIG 定義 (SVF\_SOLWEIG) に基づく天空率の関係

## C 空間分布図の経緯度算出方法

計算方法は、逆解法 (Inverse solution) によってある地点 (出発点, 添え字: 1) からある地点 (終着点, 添え字: 2) までの方位と距離を求め, その地点間で求めたい地点数 (i.e. 空間解像度) を決定した後, 直接解法 (Direct solution) によって, 各地点の経緯度を計算するものである。上記の流れを図 C-1 に示す。

経緯度を求める際の地球の形状は, 回転楕円体と仮定した。回転楕円体は, 地球のジオイドの形に近似する場合, 「地球楕円体」と呼ばれる。地球楕円体に適用される測地系の定義は, 最も多く使用される GRS80 とした。GRS80 で定義される赤道半径 ( $a$ ) および極半径 ( $b$ ) は, それぞれ 6378137 m と 6356752.314 m である。これに従うと, 扁平率 ( $f$ ) は  $1/298.257222101$  である。

### C-1.1 逆解法 (Inverse solution, 国土交通省 国土地理院; Bowring 1996)

出発点から終着点まで (図 2-34 参照) の方位と距離を計算する。緯度・経度は, 全て 10 進法度数に従い, 正をそれぞれ北緯・東経としている。

#### a) 出発点から見た終着点への方位角

まずは, 1) 計算する領域が世界のどの位置に属するか, 2) 地点間ほどの程度離れているかについて,  $c$  の値に基づき決定する。

出発点 (経度 ( $L_1$ ) [°], 緯度 ( $\phi_1$ ) [°]) から終着点 (経度 ( $L_2$ ) [°], 緯度 ( $\phi_2$ ) [°]) までの経度差を以下の式から求める。

$$l = L_2 - L_1 \quad (\text{C-1})$$

この経度差に応じて,  $l'$  [°] を計算する。

$$\begin{aligned} l' &= l - 360^\circ \quad (l > 180^\circ), \\ l' &= l + 360^\circ \quad (l < -180^\circ), \\ l' &= l \quad (-180^\circ \leq l \leq 180^\circ) \end{aligned} \quad (\text{C-2})$$

この  $l'$  は, 出発点から見て終着点が, 東→西または西→東の方向であることを表す。  $l'$  が 0 未満なら西→東,  $l'$  が 0 以上なら東→西である。方位角を決定するために, 最も重要な閾値となる。

経度方向の絶対経度差 ( $L$ ) [°] は, 以下の式から計算する。

$$L = |l'| \quad (\text{C-3})$$

これは、経度方向の距離を度数で表したものである。

緯度差 ( $\Delta$ ) [°] は、 $l'$ に応じて計算する。

$$\begin{aligned}\Delta &= \phi_2 - \phi_1 \quad (l' \geq 0^\circ), \\ \Delta &= \phi_1 - \phi_2 \quad (l' < 0^\circ)\end{aligned}\tag{G-4}$$

中心が地球楕円体の中心と一致し、半径が地球楕円体の赤道半径に等しい球を考える。これを、「補助球」と呼ぶこととする。各地点の緯度 ( $\phi_1$ ;  $\phi_2$ , 地理緯度と呼ぶ) を補助球上で表した更成緯度 ( $u_1$ ,  $u_2$ ) [°] は、以下の計算式から求められる。なお、更成緯度は、地理緯度を通る赤道からの垂線と補助球の外周との交点である。

$$\begin{aligned}u_1 &= \tan^{-1}[(1-f)\tan\phi_1] \quad (l' \geq 0^\circ), \\ u_1 &= \tan^{-1}[(1-f)\tan\phi_2] \quad (l' < 0^\circ)\end{aligned}\tag{G-5}$$

$$\begin{aligned}u_2 &= \tan^{-1}[(1-f)\tan\phi_2] \quad (l' \geq 0^\circ), \\ u_2 &= \tan^{-1}[(1-f)\tan\phi_1] \quad (l' < 0^\circ)\end{aligned}\tag{G-6}$$

更成緯度から、 $x$  [-],  $y$  [-] を計算する。

$$x = \sin u_1 \sin u_2\tag{G-7}$$

$$y = \cos u_1 \cos u_2\tag{G-8}$$

$x$ ,  $y$ ,  $L$ から、 $c$  [-] が決定される。

$$c = y \cos L + x\tag{G-9}$$

ここで、日本国内での計算では、 $c$ は0以上となる。もし、国外または国外との地点間を求める場合 ( $c < 0$ ) は、国土地理院 HP (<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/algorithm/bl2st/bl2st.htm#zone3>) を参照されたい。

次に、方位角の計算で直接的に関わる $\theta$ から計算していく。 $\theta$ は収束計算によって求められる。初期値 ( $\theta_0$ ) [°] は以下の計算式で計算する。

$$\theta_0 = L(1 + fy)\tag{G-10}$$

最終的に $|F| < 1 \times 10^{-15}$ となるまで $\theta$ を反復計算する。以下に、収束までの計算式を連ねる。

更成緯度 ( $u_1, u_2$ ) から,  $\Sigma'$  [°] と  $\Delta'$  [°] を計算する.

$$\Sigma' = u_1 + u_2 \quad (\text{C-11})$$

$$\Delta' = u_2 - u_1 \quad (\text{C-12})$$

$\Sigma'$  と  $\Delta'$  から,  $\xi$  [-],  $\xi'$  [-],  $\eta$  [-],  $\eta'$  [-] を計算する.

$$\xi = \cos\left(\frac{\Sigma'}{2}\right) \quad (\text{C-13})$$

$$\xi' = \sin\left(\frac{\Sigma'}{2}\right) \quad (\text{C-14})$$

$$\eta = \sin\left(\frac{\Delta'}{2}\right) \quad (\text{C-15})$$

$$\eta' = \cos\left(\frac{\Delta'}{2}\right) \quad (\text{C-16})$$

$\xi, \xi', \eta, \eta'$  から,  $g$  [-] と  $h$  [-] を計算する.

$$g = \sqrt{\eta^2 \cos^2\left(\frac{\theta_n}{2}\right) + \xi^2 \sin^2\left(\frac{\theta_n}{2}\right)} \quad (\text{C-17})$$

$$h = \sqrt{\eta'^2 \cos^2\left(\frac{\theta_n}{2}\right) + \xi'^2 \sin^2\left(\frac{\theta_n}{2}\right)} \quad (\text{C-18})$$

ここで, 式 (C-17) と 式 (C-18) の  $\cos^2\left(\frac{\theta_n}{2}\right)$  および  $\sin^2\left(\frac{\theta_n}{2}\right)$  は, 半角の公式を用いて計算する.

$g$  と  $h$  から, 補助球上の弧の長さである  $\sigma$  [°], および  $J$  [-],  $K$  [-] を計算する.

$$\sigma = 2 \tan^{-1}\left(\frac{g}{h}\right) \quad (\text{C-19})$$

$$J = 2gh \quad (G-20)$$

$$K = h^2 - g^2 \quad (G-21)$$

$J$ から,  $\gamma$  [-] を計算する.

$$\gamma = \frac{y \sin \theta_n}{J} \quad (G-22)$$

$\gamma$ から,  $\Gamma$  [-] を計算する.

$$\Gamma = 1 - \gamma^2 \quad (G-23)$$

$\Gamma$ から,  $\zeta$  [-] と  $D$  [-] を計算する.

$$\zeta = \Gamma K - 2x \quad (G-24)$$

$$D = \frac{1}{4}f(1+f) - \frac{3}{16}f^2\Gamma \quad (G-25)$$

$\zeta$ から,  $\zeta'$  [-] を計算する.

$$\zeta' = \zeta + x \quad (G-26)$$

$E$  [°] を計算した上で,  $F$  [°] を計算する.

$$E = (1 - D\Gamma)f\gamma\{\sigma + DK(2\zeta^2 - \Gamma^2)\} \quad (G-27)$$

$$F = \theta_n - L - E \quad (G-28)$$

$G$ を計算した上で,  $\theta_{n+1}$ を計算し, 式(G-28)と式(G-30)の $F$ が,  $|F| < 1 \times 10^{-15}$ となるまで収束計算を行う.

$$G = f\gamma^2(1 - 2D\Gamma) + f\zeta' \left( \frac{(\sigma \times R)}{J} \right) \left( 1 - D\Gamma + \frac{1}{2}f\gamma^2 \right) + \frac{1}{4}f^2\zeta\zeta' \quad (G-29)$$

$$\theta_{n+1} = \theta_n - \frac{F}{1-G} \quad (\text{C-30})$$

ここで、式(C-29)の $R$  [rad] はラジアンを表し、数値は $\pi/180$ である。 $G$ を無次元化するため、 $\sigma$ にラジアンを乗じている。

収束した $\theta$  [°] を用いて、方位角を計算する。

まず、 $\xi$ と $\eta$ から、 $a$  [°] を計算する。

$$a = \tan^{-1} \left[ \frac{\xi \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\eta} \right] \quad (\text{C-31})$$

$\xi'$ と $\eta'$ から、 $\Delta a/2$  [°] を計算する。

$$\frac{\Delta a}{2} = \tan^{-1} \left[ \frac{\xi' \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\eta'} \right] \quad (\text{C-32})$$

$a$ と $L$ の数値によって、 $a'$  [°] が決定される。

$$\begin{aligned} a' &= a \quad (a \geq 0, L \geq 0^\circ \text{または} a < 0, L = 0^\circ), \\ a' &= a + 180^\circ \quad (a < 0, L > 0^\circ) \end{aligned} \quad (\text{C-33})$$

$a'$ と $\frac{\Delta a}{2}$ から、 $a'_1$  [°] と $a_2$  [°] を計算する。

$$a'_1 = a' - \frac{\Delta a}{2} \quad (\text{C-34})$$

$$a_2 = a' + \frac{\Delta a}{2} \quad (\text{C-35})$$

$a_2$ から、 $a'_{21}$  [°] を計算する。

$$a'_{21} = 180^\circ + a_2 \quad (\text{C-36})$$

$l'$ を境界条件として、方位角 ( $a_1$ ) [°] が決定される。この方位角は、出発点における終着

点への方位を表す.

$$\begin{aligned} a_1 &= a'_1 \quad (l' \geq 0^\circ), \\ a_1 &= a'_{21} \quad (l' < 0^\circ) \end{aligned} \quad (C-37)$$

ここで,  $a_1$  が  $0^\circ \sim 360^\circ$  の範囲外の場合, その範囲に収まるよう,  $360$  の整数倍を加算する. また, 以下に該当する場合は,  $a_1$  を更新する.

$$\begin{aligned} a_1 &= 0^\circ \quad (L=0^\circ, \Delta \geq 0 \text{ または } |L|=180^\circ, \sigma \geq 0), \\ a_1 &= 180^\circ \quad (L=0^\circ, \Delta < 0 \text{ または } |L|=180^\circ, \sigma < 0) \end{aligned} \quad (C-38)$$

#### b) 出発点から到着点までの距離

以下の式から  $\varepsilon$  [-] を計算する.

$$\varepsilon = \frac{f(2-f)}{(1-f^2)} \quad (C-39)$$

$\varepsilon$  と  $\Gamma$  から,  $n_0$  [-] を計算する.

$$n_0 = \frac{\varepsilon \Gamma}{(\sqrt{1 + \varepsilon \Gamma} + 1)^2} \quad (C-40)$$

$n_0$  から,  $A$  [-] と  $B$  [-] を計算する.

$$A = (1 + n_0) \left( 1 + \frac{5}{4} n_0^2 \right) \quad (C-41)$$

$$B = \frac{\varepsilon \left( 1 - \frac{3}{8} n_0^2 \right)}{(\sqrt{1 + \varepsilon \Gamma} + 1)^2} \quad (C-42)$$

$A$  と  $B$  を計算すれば, 出発点から終着点の距離 ( $s$ ) [m] を求めることができる.

$$s = (1-f)aA \left( \sigma - BJ \left\{ \zeta - \frac{1}{4} B \left[ K(\Gamma^2 - 2\zeta^2) - \frac{1}{6} B \zeta (1 - 4K^2)(3\Gamma^2 - 4\zeta^2) \right] \right\} \right) \quad (C-43)$$

### C-1.2 順解法 (Direct solution, Vincenty 1975)

まず, 式(C-5)によって得られた出発点の更成緯度 ( $u_1$ ) から,  $\sigma_1$  [°] を計算する.

$$\sigma_1 = \text{ATAN2}(\tan u_1, \cos a_1) \quad (\text{C-44})$$

赤道上から終着点を望む方位角 ( $\alpha$ ) [°] は, 以下の式から求められる.

$$\alpha = \text{ASIN}(\cos u_1 \sin a_1) \quad (\text{C-45})$$

赤道上から終着点を望む方位角と赤道半径および極半径から,  $u$  [-] を計算する.

$$u^2 = \cos^2 \alpha \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (\text{C-46})$$

$u$ から $AA$  [-] と $BB$  [-] を計算する.

$$AA = 1 + \frac{u^2}{16384} \{4096 + u^2[-768 + u^2(320 - 175u^2)]\} \quad (\text{C-47})$$

$$BB = \frac{u^2}{1024} \{256 + u^2[-128 + u^2(74 - 47u^2)]\} \quad (\text{C-48})$$

終着点の経緯度の算出に最も重要な補助球上の弧の長さ ( $\sigma'$ ) [°] を収束計算により求める. 初期値は, 距離, 極半径,  $AA$ から求められる.

$$\sigma' = \frac{s'}{bAA} \quad (\text{C-49})$$

ここで, 距離 ( $s'$ ) は, 空間分解能 (e.g. 1 m, 5 m, 50 m, 5 s) を表す.

この初期値を以下の3式に導入し,  $\sigma'$ の前後の変化が, 微小 ( $10^{-10}$ ) になるまで計算を行う.

$$2\sigma_m = 2\sigma_1 + \sigma' \quad (\text{C-50})$$

$$\Delta\sigma = BB \sin \sigma \left\{ \cos 2\sigma_m + \frac{1}{4}BB \left[ \frac{\cos \sigma (-1 + 2 \cos^2 2\sigma_m)}{-\frac{1}{6}B \cos 2\sigma_m (-3 + 4 \sin^2 \sigma)(-3 + 4 \cos^2 2\sigma_m)} \right] \right\} \quad (C-51)$$

$$\sigma' = \frac{S}{bAA} + \Delta\sigma \quad (C-52)$$

$\sigma'$ が収束したら、以下の計算から、終着点の緯度 ( $\phi_2$ ) と経度 ( $L_2$ ) を計算する.

$$\phi_2 = ATAN2 \left\{ \frac{(\sin u_1 \cos \sigma + \cos u_1 \sin \sigma \cos a_1)}{([1-f][\sin^2 \alpha + (\sin u_1 \sin \sigma - \cos u_1 \cos a_1)^2]^{0.5})} \right\} \quad (C-53)$$

$$\lambda = ATAN2[(\sin \sigma \sin a_1), (\cos u_1 \cos \sigma - \sin u_1 \sin \sigma \cos a_1)] \quad (C-54)$$

$$C = \frac{f}{16} \cos^2 \alpha [4 + f(4 - 3 \cos^2 \alpha)] \quad (C-55)$$

$$L_2 = \lambda - (1 - C)f \sin \alpha \{ \sigma + C \sin \sigma [\cos 2\sigma_m + C \cos \sigma (-1 + 2 \cos^2 2\sigma_m)] \} \quad (C-56)$$

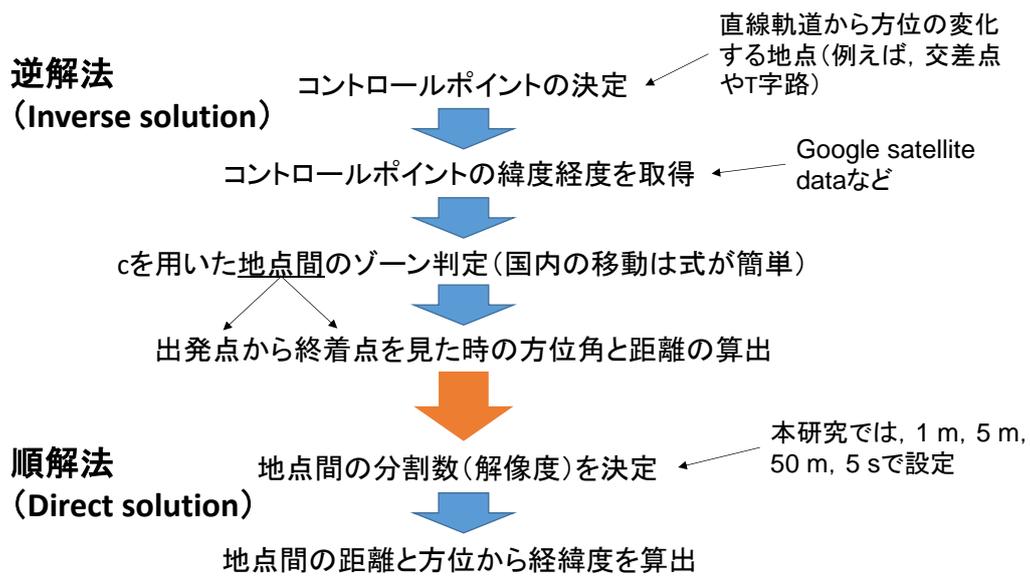


図 C-1 空間分布図に使用する経緯度の計算過程.  
コントロールポイントは図 2-34 を参照.

#### D 各 Case の空間分布図

本論で示せなかった各 Case の空間分布図を図 D-1～図 D-9 に示す。各図の数値は、ルート平均からの差分値である偏差を表し、(a) WBGT, (b) 湿球温度, (c) 黒球温度, (d) 気温, (e) 比湿の空間分布である。

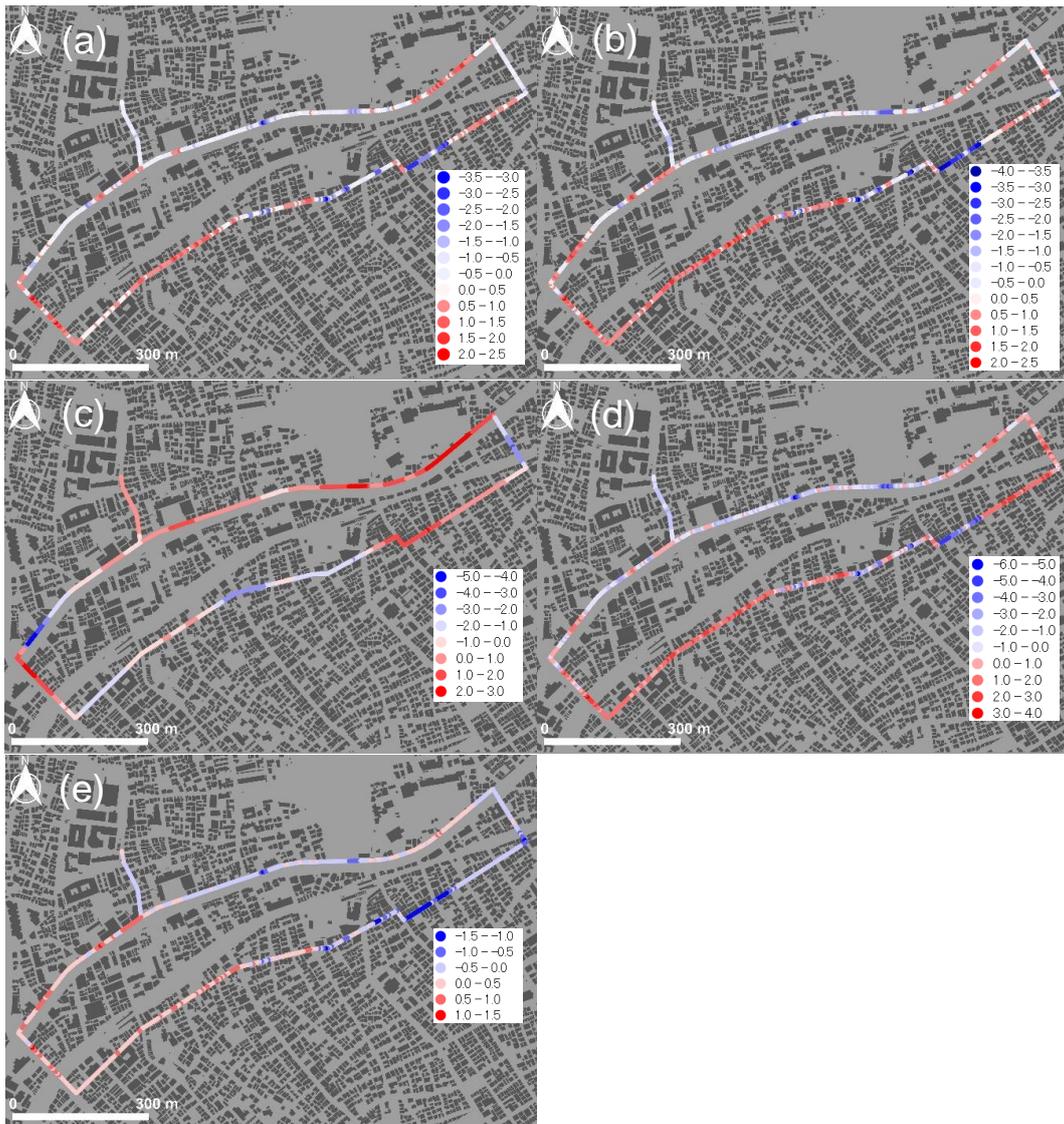


図 D-1 Case\_1.1 の空間分布図

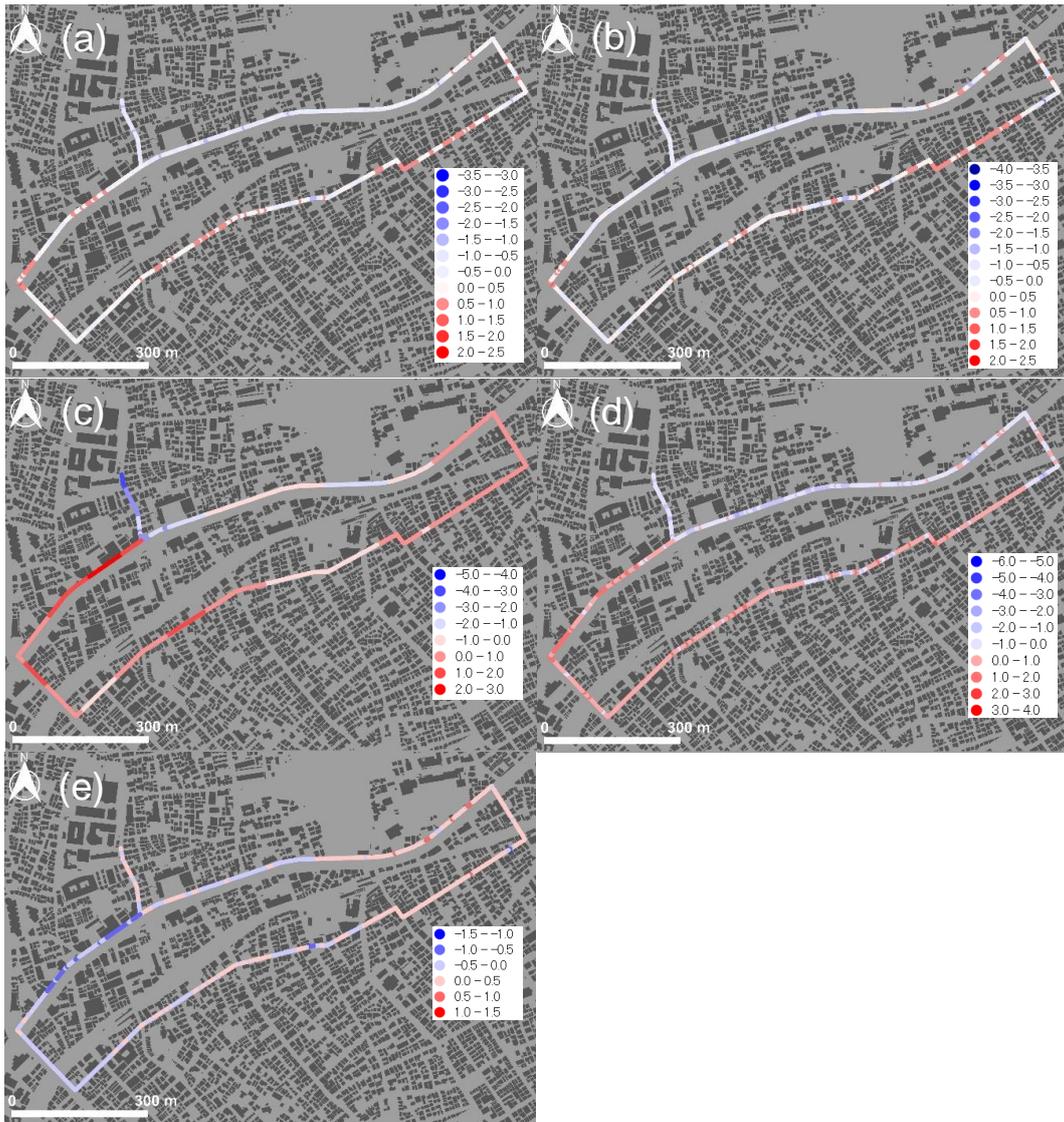


図 D-2 Case\_1.2 の空間分布図

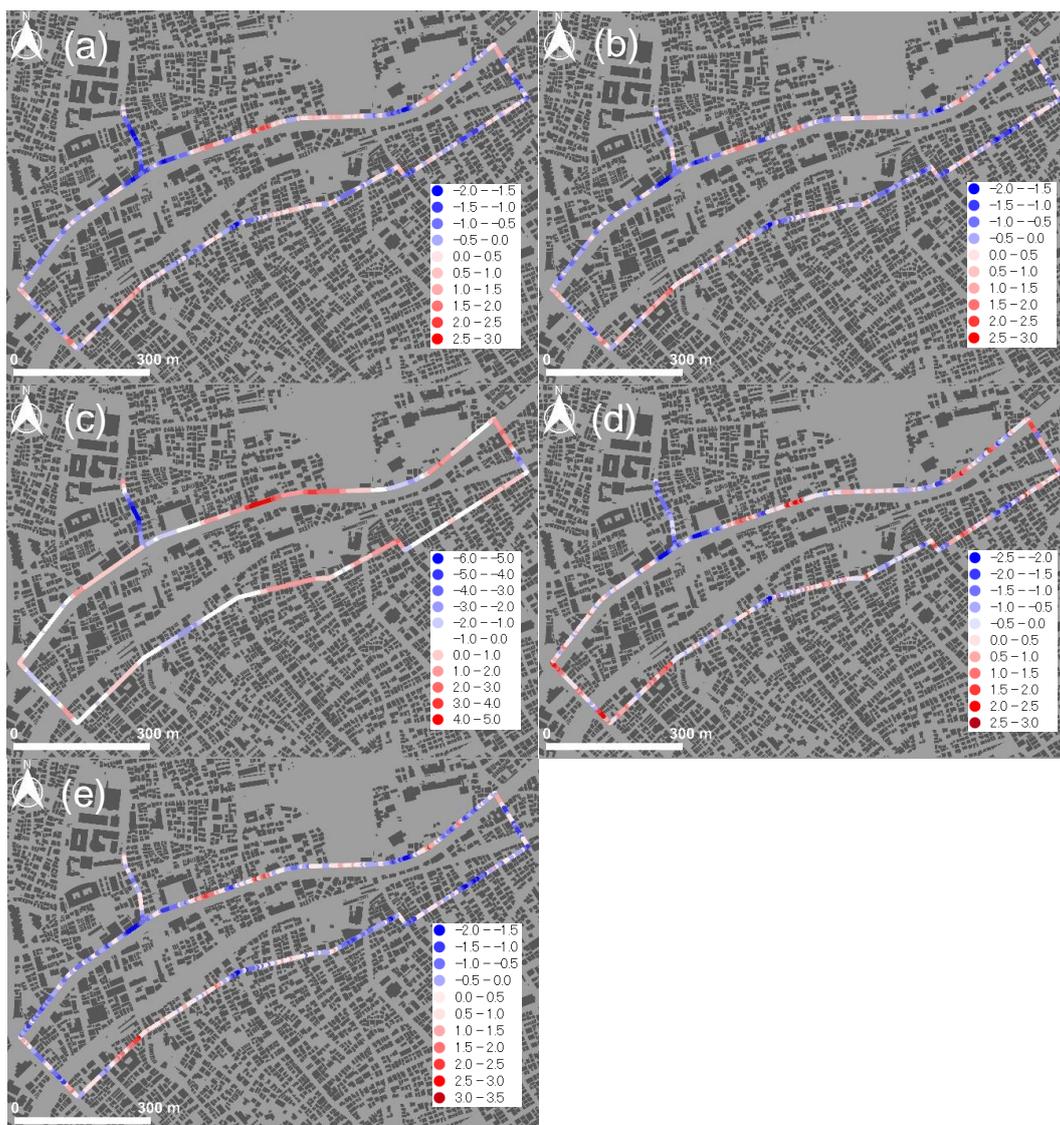


図 D-3 Case\_1.3a の空間分布図

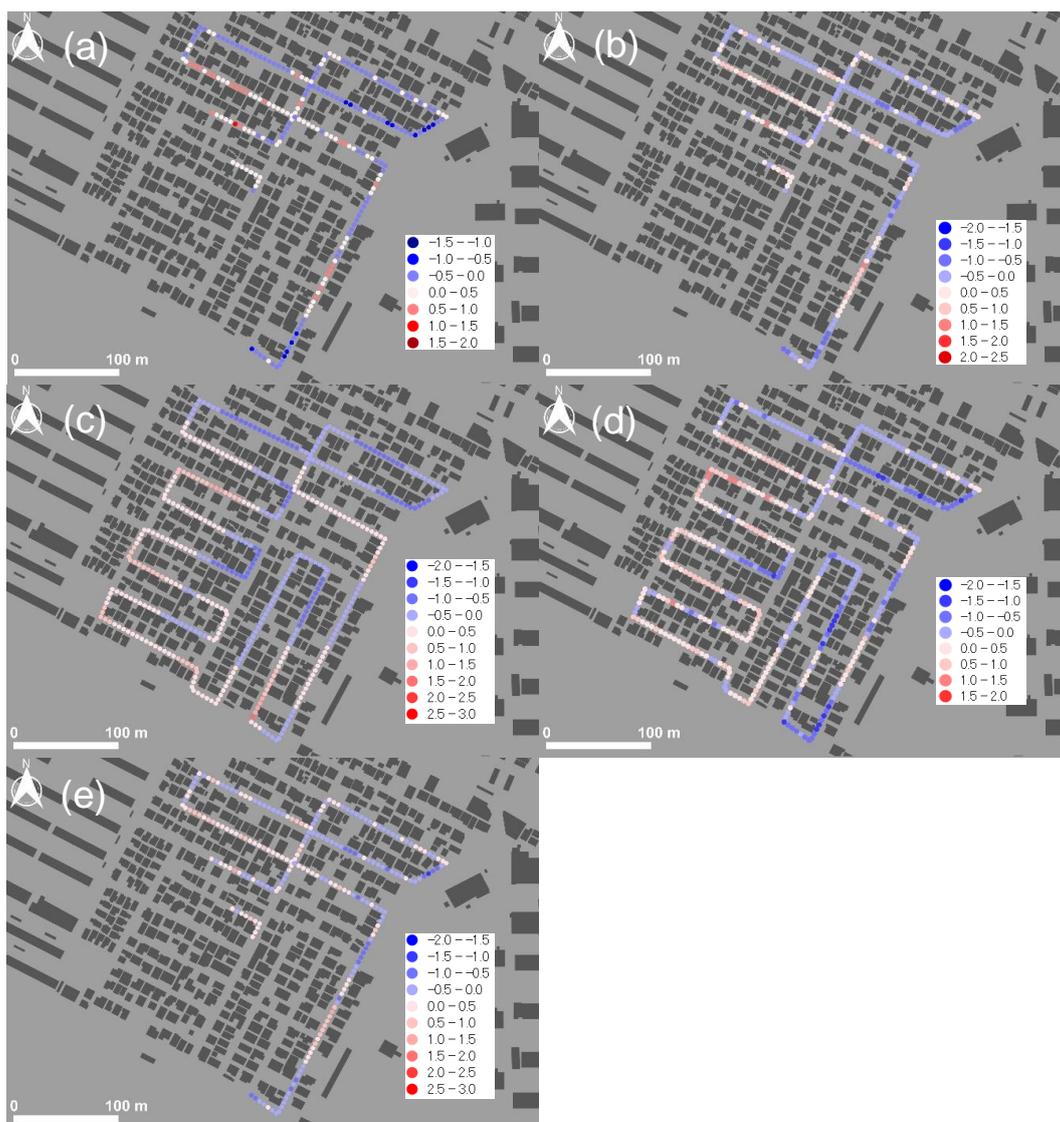


図 D-4 Case\_2.1a の空間分布図

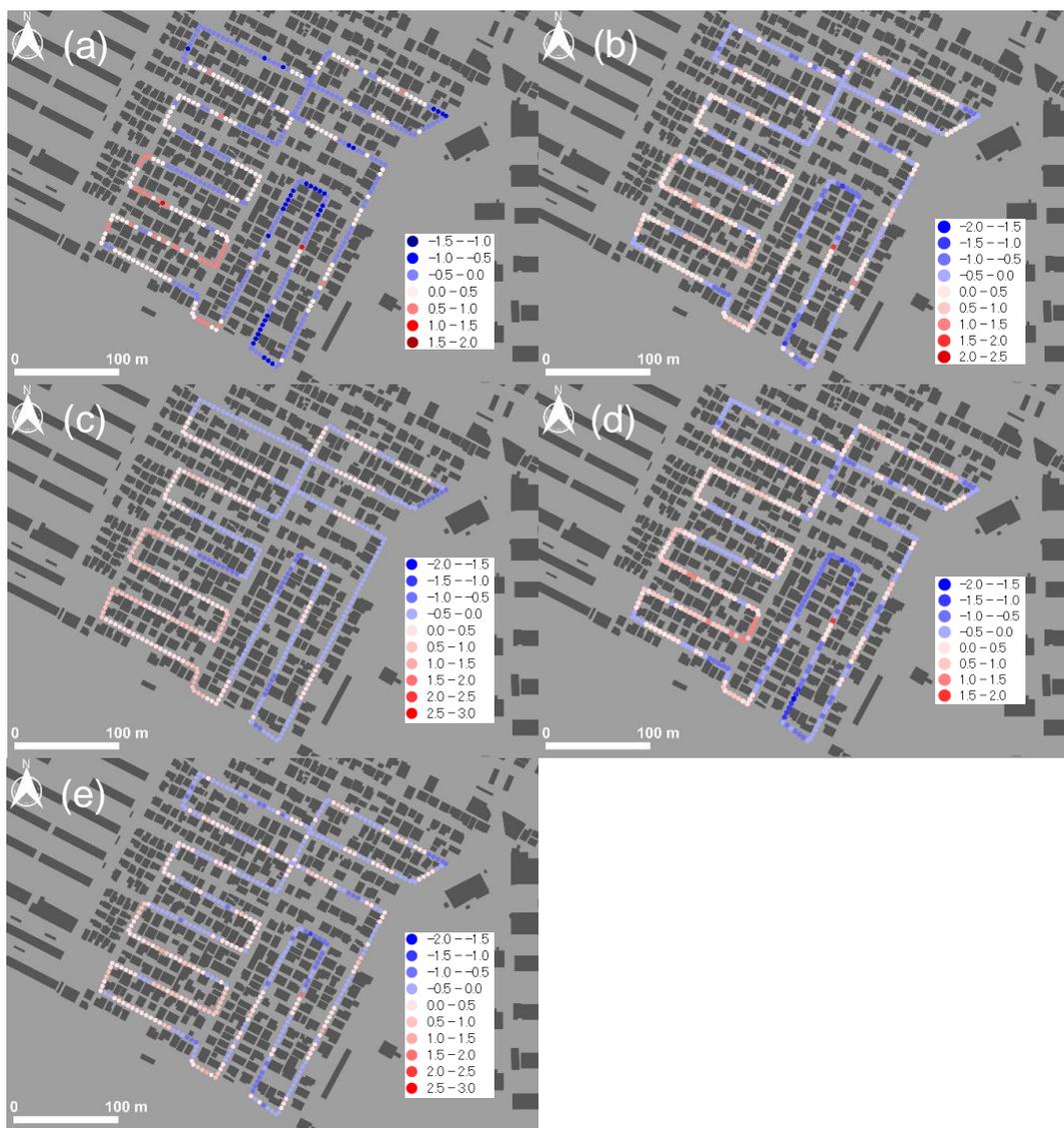


図 D-5 Case\_2.1b の空間分布図

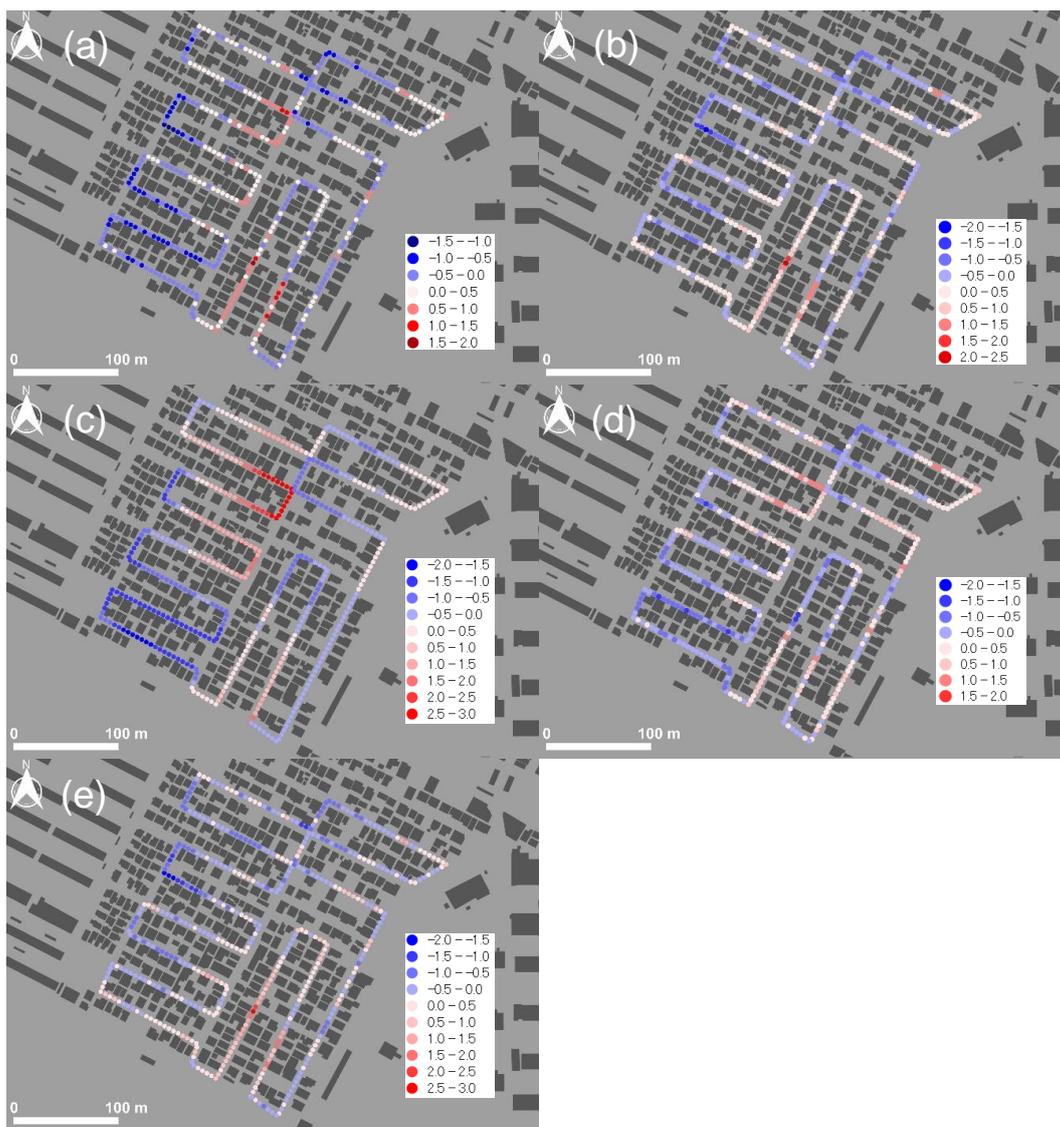


図 D-6 Case\_2.2 の空間分布図

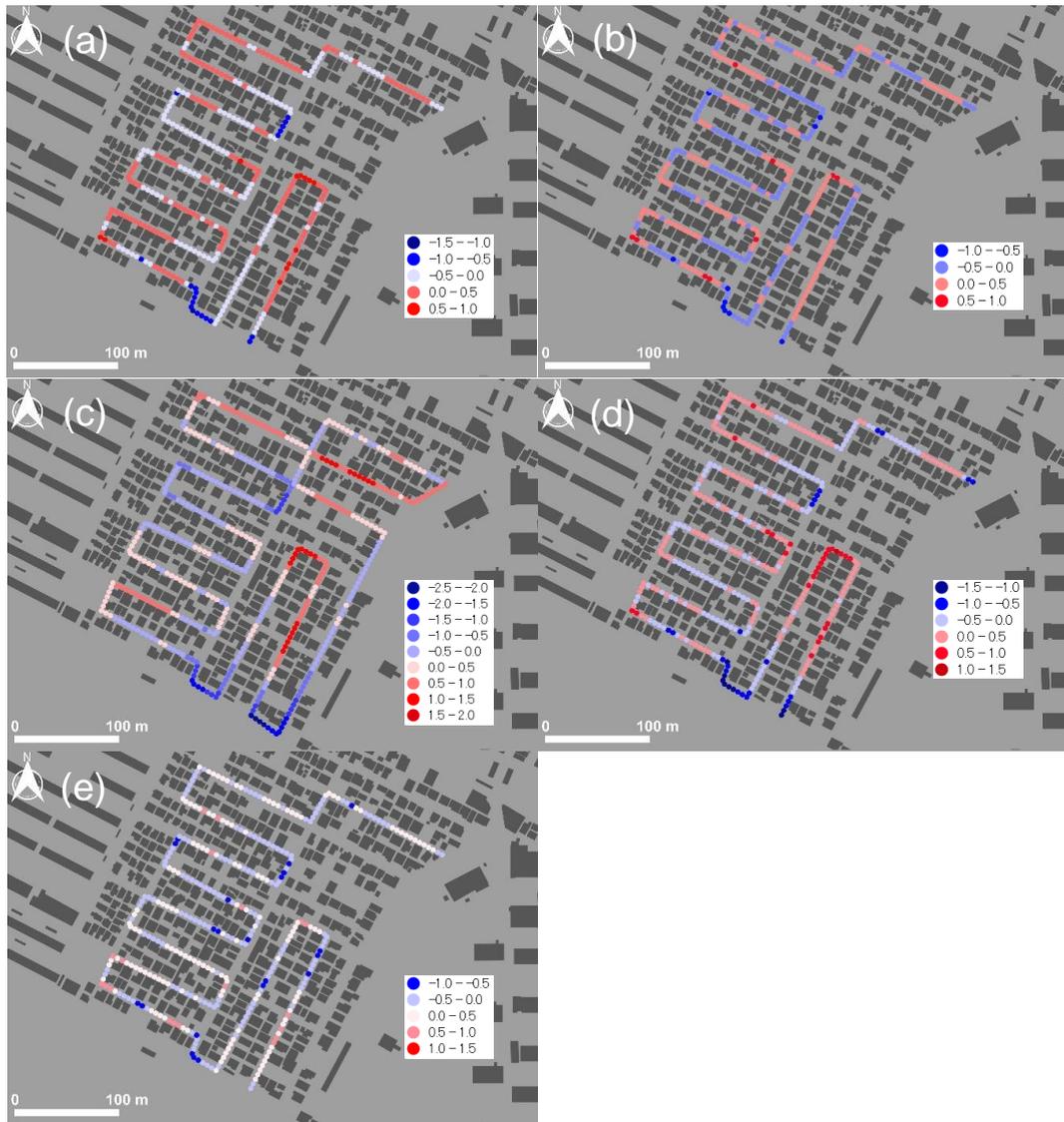


図 D-7 Case\_A の空間分布図

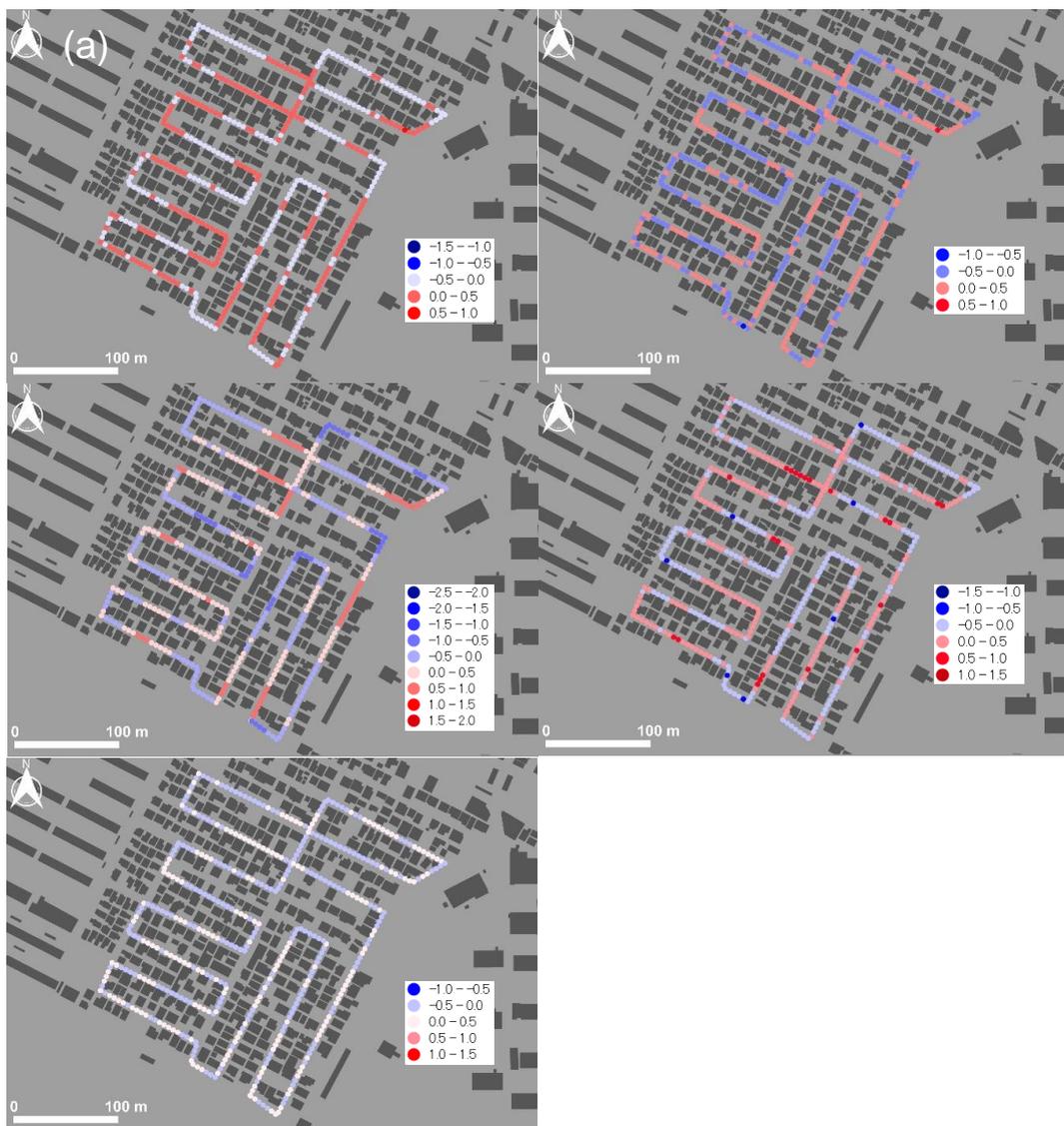


図 D-8 Case\_C の空間分布図

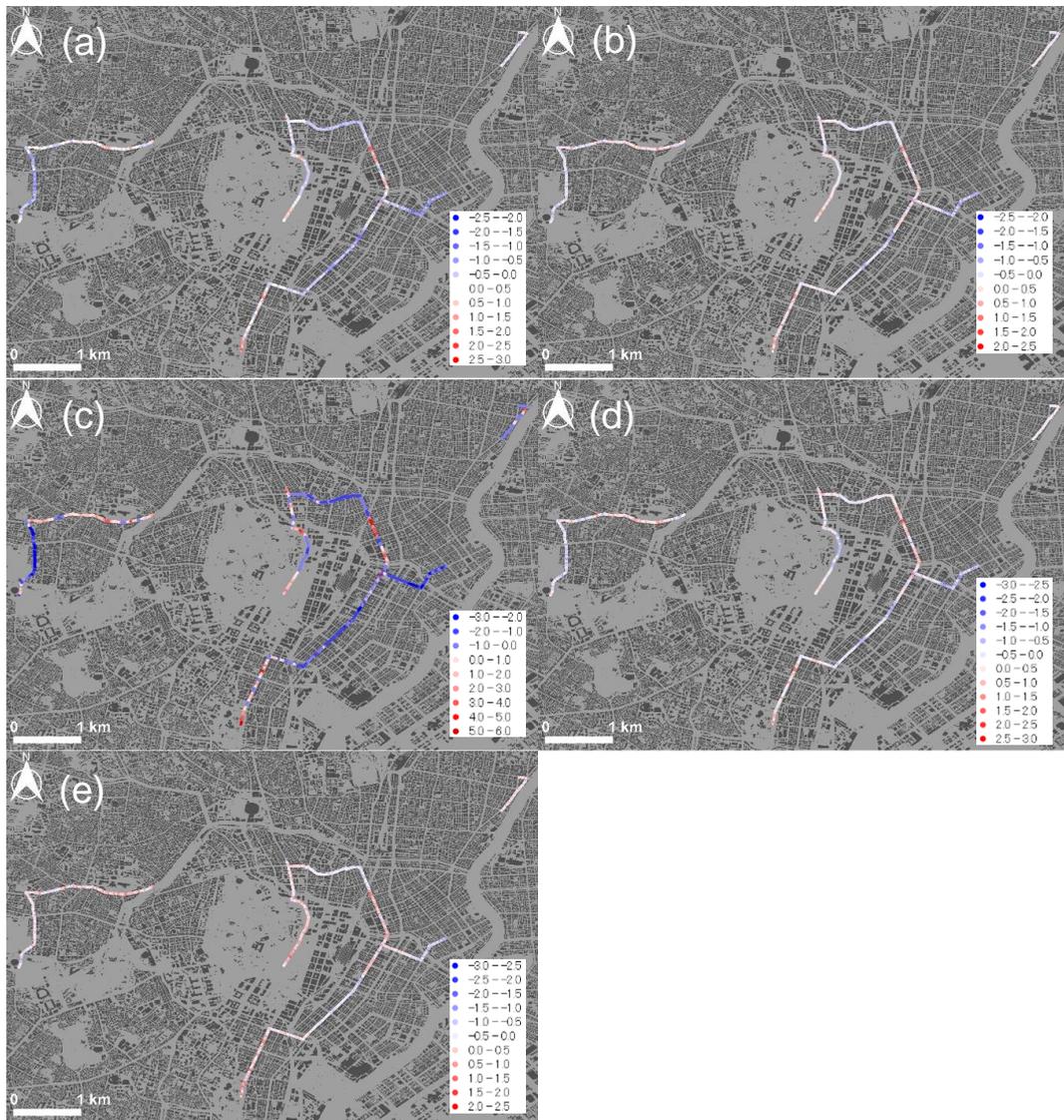


図 D-9 Case\_3.1a の空間分布図