

令和5年 論文博士学位請求論文

中小規模都市で発生する
ヒートアイランドの3次元構造把握と
その適応策に関する観測的研究

中村祐輔

中小規模都市で発生するヒートアイランドの3次元構造把握と その適応策に関する観測的研究

要旨

本研究は、中小規模都市におけるヒートアイランドの日変化や立体構造の把握、そしてその緩和策について、観測や実験の面からアプローチし、ヒートアイランド形成メカニズムの解明や都市住民の熱ストレス改善に貢献することを目指した。

中小規模都市である埼玉県熊谷市を対象として、長期の複数定点観測に基づき、地上気温の水平分布を調査し、ヒートアイランドの水平構造や季節変動について明らかにした。熊谷市で観測された地上気温の水平分布から、季節を問わず、ヒートアイランドは昼間よりも夜間の方が顕著であることが示された。熊谷市の日中のヒートアイランド強度は夏に最大となり、冬に最小となった。この特徴は、大規模都市と比較して、中小規模都市である熊谷市の建物高度が低く、建物の遮光による冷却効果が小さかったことが一因と考えられる。さらに、夏季晴天時における郊外の比湿は都市部と比較して $1.0\sim 1.5\text{gkg}^{-1}$ 高いことが示された。このことから都市部と郊外の地表面熱収支の違いが、両者の気温差に大きく寄与していることが示唆された。

中規模都市のヒートアイランドの実態把握を目的として、都市境界層高度および3次元風速の空間分布を、ドップラーライダーの移動観測により調査した。その結果、都市内において周辺よりも高い都市境界層高度が確認された。さらに、都市境界層高度のピークは、卓越風によって出現する位置が変化することが明らかとなった。具体的には、風速が 1ms^{-1} 上昇するごとに都市境界層高度のピークの出現位置が600m風下へ変化することが示され、都市境界層の風速依存性が明らかとなった。

都市住民の暑熱適応策である日傘、街路樹などの熱ストレス緩和効果について、温熱指標の一つである UTCI と被験者実験の2つの観点から検証実験を行い、その有効性を評価した。UTCI の観測の結果、日傘による熱ストレス緩和効果が非常に大きいことが示された。具体的には UTCI -4.1°C を示し、街路樹の約65%に匹敵した。UTCI に大きな差が生じた要因は、下向き短波放射のほとんどを遮蔽したことによるものであり、今回使用した日傘の場合98.9%を遮蔽していた。一方、被験者実験の結果、日傘は被験者の温冷感を緩和させたが、その効果は街路樹の約30%に留まった。この要因は、日傘が遮蔽できる日射の面積が小さく、被験者が全身に受ける放射量を十分に遮蔽できなかつたためと考えられる。そのため、日傘の表面積を拡大する等により、全身への放射量を減少させることで、熱ストレス緩和効果を上げられることが考えられる。

最後に、夏季の UHI による熱ストレスの緩和・適応について検討した。中規模都市の夏季 UHI が発達する一要因には、建物高度が低く建物の遮光による冷却効果が小さいことが挙げられる。日傘は、日射の遮蔽効果が高い点や、都市住民自らが容易に実施できる点等から、中規模都市における夏季 UHI の適応策として有効であると考えられる。

An observational study on the three-dimensional structure of heat islands in small and medium-sized cities and its adaptation

Abstract

This study aims to contribute to the elucidation of the formation mechanism of heat island and the improvement of heat stress of urban residents by understanding the daily variation and three-dimensional structure of heat island and its mitigation measures in small and medium-sized cities through observation and experiments.

We investigated the horizontal distribution of surface air temperature in Kumagaya City, Saitama Prefecture, based on long-term observations at multiple fixed points, and clarified the horizontal structure and seasonal variation of the heat island. The daytime heat island intensity in Kumagaya City is maximum in summer and minimum in winter. These characteristics are suggested to be due, first, to the lower building height in Kumagaya City, a small-to-medium-sized city, and the smaller cooling effect of shading by buildings compared to larger cities, and second, to the larger difference in the surface heat balance between urban areas and suburban areas with many rice paddies in summer.

The spatial distribution of urban boundary layer height and three-dimensional wind velocity was investigated by moving Doppler lidar observations in order to understand the actual condition of heat islands in a medium-sized city. The results confirm that it was found that the position of the peak of the urban boundary layer height varied depending on the prevailing wind. Specifically, the position of the peak of the urban boundary layer height changes to 600 m downwind with each 1 ms^{-1} increase in wind speed.

The effectiveness of heat stress mitigation measures such as parasols and roadside trees, which are heat adaptation measures for urban residents, was evaluated by conducting a verification experiment using UTCI and subject experiments. Specifically, UTCI of $-4.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ was observed, which was equivalent to about 65% of that of street trees. On the other hand, the results of the heat mitigation effect of UV parasol were limited to about 30% of that of the street trees. This may be due to the fact that the area of solar radiation that the parasol could shield was small, and the subjects could not sufficiently shield the amount of radiation that they were exposed to all over their bodies.

Finally, mitigation and adaptation to thermal stress caused by summer UHI are discussed. One of the reasons for the development of summer UHI in medium-sized cities is that the cooling effect of shading by buildings is small due to the low building height. Parasols are considered to be an effective adaptation measure for summer UHI in medium-sized cities because of their high shading effect and the fact that they can be easily implemented by urban residents themselves.

目次

1. 序論	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 ヒートアイランド強度	2
1.1.2 ヒートアイランドによって形成される都市境界層	3
1.1.3 都市境界層高度の日変化とその観測	5
1.1.4 ヒートアイランドの影響を受ける都市住民のための熱ストレス 対策	7
1.2 研究目的と本論文の構成	8
2. 中規模都市におけるヒートアイランドの時空間構造	11
2.1 対象地域と手法	11
2.2 地上気温の水平分布	14
2.2.1 年平均	14
2.2.2 季節による違い	14
2.3 ヒートアイランド強度	16
2.3.1 UHI 強度の定義	16
2.3.2 季節変動	16
2.4 2章のまとめ	19
3. ヒートアイランドによって形成される都市境界層の立体構造	21
3.1 ドップラーライダーによる都市境界層高度および移動観測の手法	21
3.1.1 ドップラーライダーの計測原理	21
3.1.2 大気境界層高度の観測機器と DL による算出方法	23
3.1.3 DL を用いた移動観測手法	25
3.1.4 傾斜補正手法の提案	27
3.2 ドップラーライダー観測の精度検証	31
3.2.1 ドップラーライダーと GPS ゾンデによる大気境界層高度の比 較	31
3.2.2 走査型 DL の VAD 3次元風に対する傾斜補正手法の検証	34
3.3 ドップラーライダーの移動観測による都市境界層構造の把握	43
3.3.1 移動観測の概要	43
3.3.2 事例解析	46
3.4 3章のまとめ	60
4. 都市における暑熱適応策の評価	61
4.1 暑熱適応策比較のための実験①	61
4.1.1 手法	61
4.1.2 直達日射, 街路樹, 日傘, ドライミスト下の温熱環境	64
4.1.3 ドライミストに対する風速の感度	67
4.2 暑熱適応策比較のための実験②	69

4.2.1	手法	-----	69
4.2.2	直射日射下, 街路樹下, 日傘下の UTCI	-----	72
4.2.3	各場所の UTCI に違いが生じた要因	-----	74
4.2.4	温冷感アンケートの結果	-----	78
4.2.5	生理測定の結果	-----	80
4.3	4章のまとめ	-----	82
5.	議論	-----	83
5.1	熊谷の UHI 強度における日中と夜間の違い	-----	83
5.1.1	昼間の UHI 強度の季節変動	-----	83
5.1.2	夜間 UHI 強度の季節変動	-----	85
5.2	夜間都市境界層の形成と卓越風の関係	-----	87
5.3	UTCI 観測および被験者実験で生じた日傘効果の違い	-----	91
5.4	中小規模都市のヒートアイランドに対する暑熱適応策	-----	93
6.	結論	-----	95
	謝辞	-----	97
	参考文献	-----	99

図目次

1. 序論

図 1-1 (a)卓越風吹走時の都市ブルームモデルと(b)静穏時の都市ドームモデル (Gyr and Rys, 1995 より引用)	-----	4
図 1-2 境界層の日変化の概念図 (Oke et al., 2017 より引用)	-----	6

2. 中規模都市におけるヒートアイランドの時空間構造

図 2-1 関東平野の中の熊谷の位置	-----	12
図 2-2 熊谷市周辺の土地利用	-----	12
図 2-3 本研究の観測地点	-----	13
図 2-4 年平均の地上気温偏差の水平分布. (a)日平均, (b)昼間平均, (c)夜間平均	-----	15
図 2-5 夏季における地上気温偏差の水平分布. (a)日中および(b)夜間の平均	-----	15
図 2-6 冬季における地上気温偏差の水平分布. (a)日中および(b)夜間の平均	-----	15
図 2-7 クラスタ分析により作成されたデンドログラム	-----	17
図 2-8 クラスタ分析による分類結果のマップ	-----	17
図 2-9 UHI 強度日変化の季節変化	-----	18
図 2-10 月平均 UHI 強度の季節変動	-----	18

3. ヒートアイランドによって形成される都市境界層の立体構造

図 3-1 走査型 DL のスキャン走査方法 (豊田ほか, 2009 より引用)	-----	22
図 3-2 本研究で用いた DL の移動観測車. (a)荷台の全景, (b)DL 固定用の木枠および(c)GPS と気温・相対湿度の測定機器	-----	26
図 3-3 局所直交座標系 xyz とライダー座標系 $x' y' z'$ との関係を示す模式図	-----	29
図 3-4 水平面からの傾斜角 $\theta_{x'}$, $\theta_{y'}$ と座標変換時の(a)方位角, (b)仰角方向の回転角 λ , δ との関係	-----	30
図 3-5 長野県長野市の観測地点	-----	32
図 3-6 2018 年 11 月 2 日 18 時~3 日 18 時における $PBLH_{Sonde}$ および $PBLH_{DL}$ の時系列	-----	32
図 3-7 $PBLH_{Sonde}$ および $PBLH_{DL}$ の散布図	-----	33
図 3-8 2018 年 11 月 2 日 18 時~3 日 18 時における $PBLH_{Sonde}$ および $PBLH_{DL}$ の時系列	-----	33
図 3-9 観測位置. 赤丸が移動 DL, 赤星が固定 DL を示す	-----	35
図 3-10 2018 年 7 月 23 日 9 時における地上天気図 (気象庁 HP 「日々の天気図」より)	-----	36
図 3-11 2018 年 7 月 23 日における(a)気温および日照時間, (b)風向および風速の日変化	-----	36
図 3-12 固定 DL により得られた 2018 年 7 月 23 日における風および SNR	-----	37

の時間-高度断面図. (a)が水平風, (b)が鉛直風を示す	
図 3-13 No.2 (上段) およびNo.3 (下段) の時間帯における移動 DL により得られた VAD3 次元風の鉛直プロファイル. (a)(d)が水平風速, (b)(e)が水平風向, (c)(f)が鉛直風を示す	----- 39
図 3-14 各高度における観測値の絶対値に対する傾斜補正前後の差の絶対値の割合. (a)が水平風速, (b)が水平風向, (c)が鉛直風速を示す	----- 40
図 3-15 各高度における移動 DL の VAD 3 次元風から固定 DL の値を引いた差. (a)が水平風速, (b)が水平風向, (c)が鉛直風速を示す. また, エラーバーは各時刻の 4 地点における各高度の標準偏差を示す	----- 42
図 3-16 移動型ドップラーライダーの観測ルート	----- 44
図 3-17 (a)2018 年 5 月 11 日, (b) 5 月 25 日, および(c)2019 年 5 月 30 日の 9 時における日本付近の地上天気図	----- 49
図 3-18 (a)2018 年 5 月 11 日, (b) 5 月 25 日, および(c)2019 年 5 月 30 日の 9 時から翌日 9 時における熊谷地方気象台の気温[°C]および日照時間[分]の時系列	----- 50
図 3-19 (a)2018 年 5 月 11 日, (b) 5 月 25 日, および(c)2019 年 5 月 30 日の 9 時から翌日 9 時における熊谷地方気象台の風速[ms ⁻¹]および風向[°]の時系列	----- 52
図 3-20 ドップラーライダーの移動観測で得られた σ_W^2 および水平風の緯度-または経度-高度断面図. (a)は 2018 年 5 月 11 日 21 時 13 分~22 時 19 分のルート① (表 3-4 の No.9), (b)は 22 時 15 分~23 時 10 分のルート① (No.10), (c)は 23 時 40 分~12 日 0 時 22 分のルート② (No.11), (d)は 0 時 52 分~1 時 47 分のルート① (No.12), (e)は 1 時 43 分~2 時 52 分のルート① (No.13) の結果を示す	----- 52
図 3-21 ドップラーライダーの移動観測で得られた σ_W^2 および水平風の緯度-または経度-高度断面図. (a)は 2018 年 5 月 25 日 21 時 12 分~22 時 19 分のルート① (表 3-4 の No.15), (b)は 22 時 15 分~23 時 12 分のルート① (No.16), (c)は 23 時 40 分~26 日 0 時 23 分のルート② (No.17), (d)は 0 時 55 分~1 時 49 分のルート① (No.18), (e)は 1 時 44 分~2 時 38 分のルート① (No.19), (f)は 3 時 12 分~3 時 52 分のルート② (No.20) の結果を示す	----- 55
図 3-22 ドップラーライダーの移動観測で得られた σ_W^2 および水平風の緯度-または経度-高度断面図. (a)は 2019 年 5 月 30 日 20 時 47 分~22 時 05 分のルート① (表 3-4 の No.38), (b)は 22 時 12 分~23 時 07 分のルート② (No.39), (c)は 22 時 54 分~23 時 49 分のルート② (No.40), (d)は 23 時 57 分~31 日 1 時 0 分のルート① (No.41) の結果を示す	----- 58
4. 都市における暑熱適応策の評価	
図 4-1 比較観測された 4 地点. (a)日向, (b)街路樹, (c)日傘, (d)ドライミ	----- 62

スト

図 4-2	2021 年 8 月 5 日 11 時 40 分から 15 時 50 分における観測値の時系列. (a)直達日射下での短波放射と長波放射, (b)直達日射下での乾球温度, 湿球温度, 黒球温度, 風速. ここで, S_{down} , L_{down} , T_a , T_w , T_g , WS はそれぞれ短波放射, 長波放射, 乾球温度 (気温), 湿球温度, 黒球温度, 風速である. (c)4 地点の WBGT, (d)4 地点の UTCI	-----	65
図 4-3	(a)日傘下, ドライミスト散布下, 街路樹下, 直達日射下の 4 地点における乾球温度 (灰色), 湿球温度 (青色), 黒球温度 (オレンジ色) の WBGT への寄与の平均値. 2021 年 8 月 5 日 14:00~15:00 に観測されたデータの平均値. (b)直達日射下と他の 3 地点の WBGT の差. (c)日傘下, ドライミスト散布下, 街路樹下, 直達日射下の 4 地点における UTCI. 14:00~15:00 に観測されたデータの平均値. (d)直達日射下と他の 3 地点の UTCI の差	-----	66
図 4-4	(a)WBGT とドライミスト散布時の風速, (b)UTCI とドライミスト散布時の風速, (c)WBGT と直達日射下の風速, (d)UTCI と直達日射下の風速の散布図	-----	68
図 4-5	(a)図 4-3(b)と同じであるが風速が 1 ms^{-1} 以下のときの観測値を用いた場合, (b)図 4-3(d)と同じであるが風速が 1 ms^{-1} 未満の場合の観測値を用いた場合	-----	68
図 4-6	観測地点	-----	70
図 4-7	被験者実験の場所	-----	70
図 4-8	温冷感アンケート	-----	71
図 4-9	観測期間における UTCI. (a)各場所の 11 時~14 時における各日平均値, (b)各場所の全期間平均値	-----	73
図 4-10	観測期間における気象要素の平均値	-----	75
図 4-11	場所間の放射環境の違い	-----	76
図 4-12	日傘および樹木の上向き熱画像	-----	76
図 4-13	各場所の地表面温度	-----	77
図 4-14	日傘内外における風速の比較観測結果	-----	77
図 4-15	温冷感アンケートの結果	-----	79
図 4-16	皮膚表面温度	-----	80
図 4-17	各場所の歩行前後における耳内温度, 心拍数 (収縮期, 拡張期), 血圧の変化率 (歩行後一歩行前)	-----	81
5. 議論			
図 5-1	日中における UHI 強度 の月平均値. 実線が全天候時, 破線が晴天時を示す. 棒グラフは晴天日日数	-----	84
図 5-2	夏季晴天時の都市, 北部郊外, 南部郊外の代表地点における比湿の時系列	-----	86

図 5-3 熊谷地方気象台における 2014 年 3 月から 2015 年 2 月までの月積算降水量の季節変化	-----	86
図 5-4 熊谷地方気象台における 2014 年 3 月から 2015 年 2 月までの比湿の季節変化	-----	86
図 5-5 熊谷地方気象台における風速と風向の季節変化	-----	86
図 5-6 (a)ルート①および(b)ルート②の各地点において $PBLH_{DL}$ のピーク (H_{Max}) が出現した回数	-----	88
図 5-7 図 5-6 と同じ. ただし, 各ルートに平行な風の風速で色分けされている	-----	89
図 5-8 (a)ルート①および(b)ルート②の各地点において $PBLH_{DL}$ のピーク (H_{Max}) が出現した回数	-----	90
図 5-9 ベル型熱源が存在する際の抵抗係数別都市境界層高度の吹走距離分布 (中川ほか, 2019 より引用)	-----	90
図 5-10 日傘による熱ストレス緩和効果の高度依存性を検証するための追加実験. (a)観測風景. 各高度における(b)UTCI および(c)気温, (d)相対湿度, (e)黒球温度, (f)風速の時間変化	-----	92

表目次

1. 序論	
2. 中規模都市における都市ヒートアイランドの時空間構造	
3. ヒートアイランドによって形成される都市境界層の立体構造	
表 3-1 本研究で使用した DL の仕様	----- 22
表 3-2 本研究における DL の主な観測設定	----- 35
表 3-3 移動 DL における各地点の計測時間, 方位角および傾斜角	----- 39
表 3-4 DL 移動観測の実施日時と設定の詳細	----- 45
4. 都市における暑熱適応策の評価	
表 4-1 日本の熱中症危険度の WBGT 基準 (環境省, 2021)	----- 63
表 4-2 UTCI のストレスカテゴリー (Błażejczyk et al., 2014)	----- 63
表 4-3 被験者実験のプロトコル	----- 71
5. 議論	

序論

1.1 研究背景

国連の人口統計 (United Nations, 2019) によれば, 1950 年に 30%程度だった都市圏人口は, 2018 年現在 55%まで増加し, 2050 年には 68%にまで達すると予測されている. このような人口の急増に伴い世界の都市は拡大を続けてきた. このような急激な都市化によって, 都市では緑地の減少, 建物の増加, 人間活動の活発化などが発生し, それに起因して都市特有の大気状態である「都市気候」が形成された. 様々な都市気候の現象の中で最も顕著であるのは, 都市部の気温が周辺郊外と比較して高温となる都市ヒートアイランド (Urban Heat Island ; 以降, UHI) である.

UHI の影響は, 熱中症や睡眠障害といった健康被害 (Tan et al., 2010), エネルギー消費量の変化 (Kikegawa et al., 2006), 生態系の変化 (Shochat et al., 2006) など多岐にわたっている. その中でも, 世界人口の半数以上が都市で暮らす 21 世紀の人類にとって, 熱ストレスによる健康被害は甚大である.

以上のことから, UHI は社会にとっても大きな問題になっており, その実態把握や形成メカニズムの解明, 都市の熱ストレス対策は, 都市気候の研究者にとって極めて重要なテーマである.

1.1.1 ヒートアイランド強度

UHI の研究では、UHI の強さや頻度を定量的に示す指標として、UHI 強度がよく用いられる。UHI 強度は一般に都市部と郊外の気温差で定義される。これまでの研究では、UHI 強度と気象条件 (Oke and Maxwell, 1975)、人口規模 (Oke, 1973)、天空視界係数 (Oke, 1981) との関係について論じられてきた。

例えば、河村 (1977) は、東京の UHI 強度は夏季よりも冬季に大きいことを示している。一方、榊原 (1999) は、長野県小布施町にて観測をおこなった結果、UHI 強度は 5 月に極大であることを報告している。また、関口 (1970) は、多くの都市で日の出前後に UHI 強度が最大となると述べている。しかしながら、夏季と冬季で最大値を示す時刻が異なっているとの指摘もある (重田・大橋, 2009)。このように、UHI 強度の特徴は各都市で大きく異なっており、一様な結論は得られていない。

また、UHI 強度の算出方法についてもたびたび議論がなされ、それらは代表地点の選出方法と観測方法の議論に大別される。例えば、都市においては、同じ街区内でも日向日影の違いや交通量の違いなどにより気温差が 2~3°C 生じることが報告されている (大橋ほか, 2003; 高野ほか, 2003)。郊外においても、土地被覆の違いによって UHI 強度に差が生じることが指摘されている (榊原, 1994; Grimmond et al., 1993)。一方、UHI の観測方法は移動観測と定点観測に大別されるが、研究事例は自動車による移動観測が非常に多い (例えば、福井・矢沢, 1957; 田宮, 1979)。しかし、移動観測の場合、時間の変動をとらえるのが困難である点や道路上でしか観測できない点などが短所として挙げられる。これらの問題を解決し、都市全体規模の UHI を捉えるためには、空間的に高密度なオープンスペースでの定点観測が望ましいと考えられる (日下ほか, 2012)。

中村・重田 (2014) は、夏季の埼玉県熊谷市を対象に地上気温の定点型細密観測をおこなった。その結果、UHI 強度は、水田域を郊外とした場合では日中に極大 (約 4°C)、樹林地を郊外とした場合では夜間に極大 (約 3°C) を示した。このことは、郊外の代表地点の選定が、UHI 強度に大きな影響を与えることを示唆している。また、いくつかの大規模都市において、日中に都市部が低温となる現象の発生が報告されている。しかし、中村・重田 (2014) の観測結果では、日中においても明瞭な UHI が確認されており、非常に興味深い。ただし、中村・重田 (2014) の観測は、夏季のみであるため、年間を通した中小規模都市の UHI の特徴は明らかとなっていない。

1.1.2 ヒートアイランドによって形成される都市境界層

通常、地表面付近において、混合層は日中のみ発達する。しかし、都市部で UHI が形成されている際には、都市内で混合層が形成され、日中だけでなく、夜間にも混合層が形成される。これは都市境界層 (Urban Boundary Layer ; 以降, UBL) と呼ばれる。

UBL の空間構造は、都市ドームと都市プルームの 2 種類が挙げられる。図 1-1 は Gyr and Rys (1995) が示した両者の概念図である。中川 (2011) は、都市ドームと都市プルームの特徴について、以下のようにまとめている。都市ドームは、地衡風速が 3 ms^{-1} 以下の比較的風が弱い条件で表れる。そのような条件では、UHI による水平温度差が原因で出現するヒートアイランド循環による風が明瞭に表れる。一方、地衡風速が 3 ms^{-1} 以上の強風時には、都市プルームが現れる。都市プルームの形を特徴づけている風は、ヒートアイランド循環そのものではなく、都市域の風上側から浸入して都市域を通過していく卓越風である。

UBL に関する初期の観測例として、1960 年代のニューヨークで実施された観測 (Urban Air Pollution Dynamic Research Network) が挙げられる (Davidson, 1967; Bornstein, 1968)。この観測は、ヘリコプターやパイロットバルーン、数値シミュレーションを使用し、ニューヨークの都市と周辺郊外における気温や風の 3 次元構造から、UBL の立体構造が調査された。その結果、地衡風速が 3 ms^{-1} 以下の静穏時において、都市と郊外の水平温度差が要因と考えられるドーム型の UHI 循環が確認された。ドーム型の UHI 循環が実測されたのは、この観測が初めてであった。また、郊外では気温の接地逆転層が形成されているのに対して都市ではそのような層は形成されないため、都市の気温は地上から 300 m まで郊外よりも高温となっている。ただし、その高温層の上部には「クロスオーバー」と呼ばれる郊外よりも低温の層が確認された。一方、Clarke (1969) はヘリコプターと自動車を用いて地上～上空までの気温を測定し、都市プルームを初めて観測した。

多くの研究において、UBL の高度と UHI 強度 (都市温度 - 郊外温度) の関係を規定する式が提案されている (例えば, Sundborg, 1950; 河村, 1964a, b; Summers, 1964, 1965, 1966; Melas and Kambezidis, 1992)。中でも, Summers (1964, 1965, 1966) により提唱された都市表面の熱境界層の定常的な対流に基づく式 1-1 および式 1-2 は、計算研究や実験研究で広く利用されている。

$$h = \sqrt{\frac{2xH_0}{\rho_a c_a U \alpha}} \quad \dots \quad 1-1$$

$$\Delta T_{u-r} = \alpha h = \sqrt{\frac{2x\alpha H_0}{\rho_a c_a U}} \quad \dots \quad 1-2$$

ここで、 T は気温、 α は郊外の温度勾配、 ρ_a は空気密度、 c_a は空気の定圧比熱、 U は風速、 x は郊外の安定気塊が市街地内を吹走した距離、 H_0 は郊外に対して過剰な都市における地表面上向き顕熱フラックス密度である。添え字の u と r は、それぞれ、都心と郊外を意味する。一方、中川ほか (2019) は、Summers の式により予測される都市温度の水平分布は閉

じた等温線を形成せず、市街地の最風下端に最高温度が出現することを指摘した。さらに、その原因は Summers モデルが UBL を加熱するだけで冷却の機能を持たないためとの見解を示した。ただし、実都市での検証は行われていない。

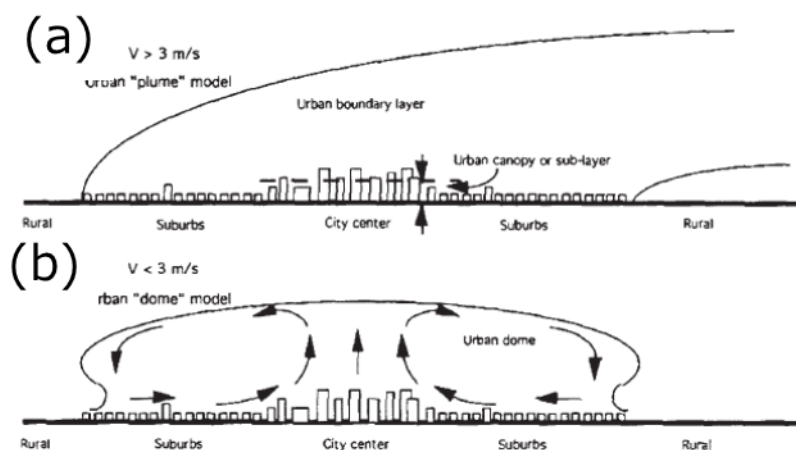


図 1-1 (a)卓越風吹走時の都市プルームモデルと(b)静穏時の都市ドームモデル (Gyr and Rys, 1995 より引用)

1.1.3 都市境界層高度の日変化とその観測

それでは、都市および郊外における境界層高度 (Planetary Boundary Layer Height; 以降, PBLH) は、どのように日変化するのだろうか? 都市とその周辺郊外における境界層の日変化を同時に観測した例は極めて少ないため、ここでは Oke et al. (2017) が示した境界層の日変化の概念図 (図 1-2) を使用して説明する。一般に、日出後に地表面からの顕熱フラックスが増加することで混合層が急速に発達する。そして、太陽の南中後にピークを迎えた後はほぼ横ばいとなる。UBL の日最高高度は、郊外の PBLH と比較して高くなる。これは、地表面からの加熱量および地表面の粗度が大きいためである。日没時刻において、郊外では地表面からの顕熱フラックスが負となることで混合層が消滅し、安定した夜間境界層が地上から形成される。元々混合層が存在した上空の大気は下層と切り離され、弱い乱流を持つ残存層となる。一方、同時刻の都市では日没後も日中の蓄熱や人為起源の熱フラックスにより顕熱フラックスが負とならず、薄い混合層が形成される。夜間の混合層は、日中と比較して鉛直方向の対流が弱い。

UHI に関する研究のほとんどは、UBL の中でも下層 10%程度に当たる、都市の地表面から「キャノピー層」に集中している (Roth, 2000)。ここで、都市のキャノピー層とは、建物や地物の影響を直接的に受ける層を指す。残りの上層 90%程度の研究例が少ない要因の一つには、都市部での観測の困難さが挙げられる。従来の研究では、UBL の観測にラジオゾンデや係留気球、ヘリコプターなどが用いられてきたが、これらを都市部で展開するのは困難である。そのような中、近年ではリモートセンシング技術が発展し、それらの機器によって時空間的に高解像度の観測が可能となってきた。なかでも、UBL 高度は、特に都市の大気汚染との関係から調査されることが多く (Tang et al., 2016; Wagner and Schäfer, 2017)、加えて、シミュレーションモデルの結果と観測値との比較にも用いられる (Dandou et al., 2009; Schäfer et al., 2012)。さらに、UBL 高度の日変化や都市内における空間変動を理解することは、UHI の形成メカニズムを理解する上でも極めて重要である (中川, 2011; 高橋ほか, 2014; 中川ほか, 2019)。

これまでに、シーロメーターやドップラーソーダー、ドップラーライダー (Doppler Lidar; 以降, DL) などのリモートセンシング機器を用いて UBL 高度を連続観測することで、UBL 高度の詳細な日変化が明らかとなっており、いくつかの都市において、UBL 高度が周辺郊外の PBLH よりも高いこと確認されている (Davies et al., 2007; Barlow et al., 2011; Pal et al., 2012)。ただし、Barlow (2014) は夜間における UBL 高度の詳細な空間分布については非常に複雑なため、未解明な部分が多いことを指摘している。その要因として、夜間 UBL の乱流混合が日中と比較して弱いため、風速の違いや都市地表面の複雑さ (建物などの幾何学構造や公園などの冷源の存在) による熱の不均質の影響を強く受けることが挙げられる。

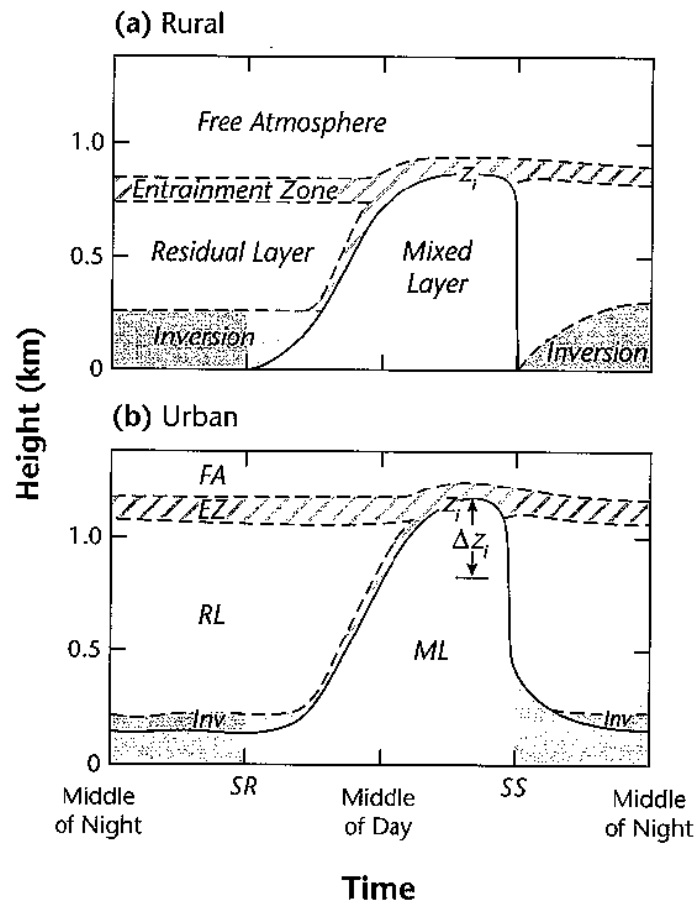


図 1-2 境界層の日変化の概念図 (Oke et al., 2017 より引用)

1.1.4 ヒートアイランドの影響を受ける都市住民のための熱ストレス対策

近年、UHIの進行に伴い、都市住民にかかる熱ストレスが増大し続けている (Kusaka et al., 2022; Ikeda and Kusaka, 2021). 特に、湿潤亜熱帯気候帯に位置する日本の夏は蒸し暑いため、熱中症が社会問題となっている (Fujibe et al., 2018).

都市街区内の歩行者は、屋外にいるため過度の熱ストレスを受けやすい。歩行者が過度な熱ストレスを受けると、熱中症の発症や歩行性・知的生産性の低下などのリスクが増大する (Chen and Ng, 2012; Asano et al., 2022; Jia et al., 2022). 歩行者への熱ストレス低減は社会経済活動の面でも重要である。そのため、歩行者の熱ストレスを緩和するための対策 (以降、熱ストレス緩和策) の検討が必要である。

歩行者が感じる熱ストレスの主な要因は、太陽からの強い放射である (Ali-Toudert and Mayer, 2007; Ng and Cheng, 2012; Middel et al., 2016). したがって、日射を遮蔽することは歩行者の熱ストレスの軽減につながるはずである。街路樹の植樹は、日射を遮ることができるため、歩行者の熱ストレスを軽減する有効な方法の一つである (Klemm et al., 2015; Coutts et al., 2016; Morakinyo et al., 2017; Ren et al., 2022; Zhang et al., 2022). Coutts et al. (2016) は、街路樹によって、夏の日の中での普遍的熱気候指数 (Universal Thermal Climate Index: 以降 UTCI) を非常に強い ($46^{\circ}\text{C} > \text{UTCI} \geq 38^{\circ}\text{C}$) から強い ($38^{\circ}\text{C} > \text{UTCI} \geq 32^{\circ}\text{C}$) に低減できることを発見した。UTCIの詳細は、4.1節で説明する。街路樹の効果は、被験者実験でも検証されている (Ren et al., 2022; Zhang et al., 2022). それ以外に、人工遮光装置や藤棚を設置することも、街路樹と同様の理由で有効な対策である (Sakai et al., 2012; Vanos et al., 2017; Kántor et al., 2018; Kusaka et al., 2022). 一方、ドライミストは当たれば効果的であり (例えば、Wong and Chong, 2010; Ulpiani et al., 2019), 涼やかな景観を提供するという長所もある。そのため、ドライミストは駅前など人が多く集まる場所に設置されている。ただし、風が吹いている場合は、ミストが風に流されるため、その効果は限定的である可能性がある。

以上のように、上記のような対策は、時間や費用のコストが低いうえ、都市住民、特に屋外歩行者の熱ストレスを低減させる効果が期待できる。しかし、上述した適応策の街への設置・実施は、一般に行政機関によるものであるため公助として位置づけられる。ただし、樹木や人工的な遮光装置のない街路では、歩行者自身が熱ストレス緩和策を講ずる必要がある。

日傘は、いつでも携帯できどこでも使用できることから、個人でできる熱ストレス緩和策として期待されている (Watanabe and Ishii, 2017; Lee et al., 2018; Kusaka et al., 2022). 日本の都市住民は暑い日に日傘をさすことが多く、女性の26%が夏の屋外で日傘を使用しているという報告もある (Watanabe and Ishii, 2016). Watanabe and Ishii (2017) は、ポリエステルと綿を混合した白と黒の日傘の下、およびポリエステル製のこげ茶の日傘の下で湿球黒球温度 (Wet Bulb Globe Temperature; WBGT) を測定し、後者が最も熱ストレスを低減することを明らかにした。しかしながら、日傘による熱ストレス軽減効果に関する研究はわずかしかなかく、実験も限定的で有り、他の対策ほど十分に検討されているとは言えない。

1.2 研究目的と本論文の構成

1.1 で述べたように、UHI の研究は、日変化や立体構造、要因の把握、UHI の影響を受ける都市住民への対策について課題が残されている。そこで、本研究は、中小規模都市で発生する UHI に関して、これらの課題の網羅的な解明を目指す。判明した中小規模都市の UHI の実態や要因を基に、今回調査した適応策が都市住民の熱ストレス改善にどの程度貢献するかを明らかにする。本研究で、中小規模都市に着目する理由は以下の通りである。すなわち、①定点型の気象観測の実施例が少ないこと、②都市と郊外の境界が明瞭であることである。①について、中小規模都市を対象とした UHI 研究は移動観測がほとんどである。それに加えて、気象庁などのルーチン観測では、観測網の解像度の不足のため、中小規模都市で発生する UHI を議論することが困難である。②について、本研究は都市と郊外における気象要素を比較することで UHI を議論するが、日本の大規模都市は都市と郊外の境界が明瞭ではない。以上から、本研究は中小規模都市に着目をする。

2 章では、中小規模都市における UHI の気候学的特性を調査する。熊谷の都市気候は、平坦な地形、山や海からの距離、都市と郊外の境界の明確さなどから、過去半世紀にわたり UHI 研究の対象となってきた(河村, 1964a, b)。例えば、松本ほか (2002) は、熊谷の UHI が都市部の形態や地表の熱的性質と密接に関係していることを示唆した。Ku wagata et al. (2014) は熊谷の郊外で定点気象観測を行い、都市部に位置する熊谷気象台の気温が郊外よりも一貫して高いことを示唆した。この傾向は、特に夏の日中に卓越していた。しかし、これまでの研究は、単点観測や特定かつ時間限定の移動観測がほとんどであり、UHI の水平構造や気候学的特性についての詳細な検討はまだ行われていない。また、UHI は複雑な水平構造を持つことが多いため、1 つの観測点のみで UHI を論じるのは誤解を招く恐れがある。例えば、日下ほか (2012) や 中村・重田 (2014) は、都市部における気温の分散が都市と郊外の気温差と同程度に大きい可能性を示唆している。このため、1 点のみの観測を行うと、UHI の計算に偏りが生じる可能性がある。以上の文献から、各都市の UHI の特徴を精度良く議論するためには、空間密度が高く、気温の連続性がある長期観測が必要であることが示唆される。これらの観測は、各都市の空間的広がりや考慮し、UHI の季節変動を捉えることができる。そこで、長期の複数定点観測に基づき、熊谷市の地上気温の水平分布が調査された。さらに、多点観測の気温データを用いて UHI 強度を算出し、各月における日内変動について考察された。さらに、熊谷周辺の UHI の季節変動と気候学的特性についても検討された。最後に、これらの結果が先行研究と比較された。なお、2 章の成果の一部は、中村・重田 (2014)、Nakamura et al. (2018)、および中村ほか (2019a) において公表されている。

3 章では、UHI によって形成される UBL の構造を解明する。これまでにその要因やメカニズムの解明を目的とした、様々な研究がおこなわれてきた。それらは都市境界層下層部に存在する熱源の有無や大きさのみを検討しているものがほとんどである。しかしながら、UHI 形成メカニズムの解明には熱源の大小だけでなく、その熱源が拡散する大気熱容量も考慮すべきである(中川, 2011)。このことから、都市域内で郊外に対して付加的に発生した熱が供給を受ける空間、すなわち都市境界層を考慮に入れる必要がある。特に、UBL 高

度は大きく時間変化するために、大気の熱容量を検討する上で極めて重要である。近年、リモートセンシング機器を用いた UBL 高度の観測が盛んだが、既存の研究は都市内 1 箇所の定点観測がほとんどである。しかしながら、UBL 高度の局所性についてはまだ十分に特徴付けられていない (Barlow, 2014)。そこで本研究は、関東平野内陸部に位置する埼玉県熊谷市において、UBL 高度および 3 次元風速の空間分布の把握を目的とした DL の移動観測を実施した。UBL の構造を把握することで、2 章の水平構造と合わせ、熊谷市における UHI の 3 次元構造が解明されるとともに、中川ほか (2019) が示した Summers モデルの問題点についても検討できる。なお、3 章の成果の一部は、中村ほか (2017)、渡来ほか (2017)、中川ほか (2019)、および中村ほか (2019b) において公表されている。

4 章では、UHI の影響を受ける都市住民の熱ストレス軽減を目指し、適応策の有効性を検討する。特に、本研究では歩行者への熱ストレス緩和効果が期待される日傘に着目し、その他の適応策の効果と比較・検証することとする。これまでのほとんどの研究は、熱ストレス緩和策の効果を異なる場所、異なる気象条件下で個別に調査してきた。そのため、それぞれの暑熱緩和デバイスの熱ストレス軽減効果の相対的な優位性は分かっていない。例えば、街路樹やミスト散布などが施されていない場所を歩く場合、代替方法として日傘がどの程度有効かなどに直接答えられてはいない。このような問いに答えるためには、同じ環境、同じ気象条件で日傘と他のデバイスの熱ストレス緩和効果を比較評価する必要がある。そして評価の際には、気温や WBGT だけではなく、UTCI のような人間の熱ストレスをより良く表現できる指標で個々の性能を比較することが望ましい。加えて、これらの緩和効果は被験者実験での比較がほとんど実施されていない (三坂ほか, 2022)。熱的快適性を人々がどのように認識するかは、気象要素だけでは決定されない (Chen and Ng, 2012)。そのため、温熱指標のみでなく被験者による検証も必要である。そこで本研究では、日傘の熱ストレス緩和効果を、UTCI と主観的要因の 2 つの観点からその他適応策の効果と比較した。この研究のオリジナリティは、被験者実験に基づいて日傘と街路樹の熱ストレス緩和効果を比較・検証したことである。なお、4 章の成果の一部は、Kusaka et al. (2022) において公表されている。

5 章では、2~4 章までの結果を受けて議論を行なう。

6 章では、本研究の結論と今後の展望を述べる。

2章 中規模都市におけるヒートアイランドの時空間構造

ここでは、中小規模都市における UHI の気候学的特性について調査した。対象地域には、埼玉県熊谷市を選定した。1.2 節で記述した通り、熊谷市は、市内の標高差が小さいこと、海や山からある程度距離が離れていること、都市と郊外の境界が明瞭であることから、UHI の影響が明瞭に表れると考えられる。

2.1 対象地域と手法

熊谷市は、関東平野の北西部に位置し、面積は約 160 km² (図 2-1)、人口は約 20 万人の中規模都市であり、標高差は小さい。熊谷の南部には標高 50 m の丘陵がある。図 2-2 には、この地域の土地利用分布が示されている。熊谷市街地の南端を西から東へ荒川が流れている。熊谷駅周辺は商業・オフィス街で、市役所など多くの建物がある。市街地の北部は水田を中心とした土地被覆である。一方、南部は森林や畑が多く、かなり異なる土地被覆となっている。

日本は四季があり、夏は温暖で湿潤な気候である。なかでも熊谷市の気候は、次のように説明できる。平年の気温、相対湿度、降水量の年平均値は、熊谷で 15.0 °C、66%、1236.3 mm である。熊谷は関東地方の北西部に位置し、夏場は北太平洋高気圧からの南風の影響を受けて気温や湿度が上昇する。熊谷の夏は、フェーン現象の影響もあり、日中の気温が非常に高くなることが多い (Takane and Kusaka, 2011)。一方、冬には、冬期モンスーンの影響で北西風が強く、乾燥した晴天の日が多くなる。

地表面気温の観測は、東西方向 20 km、南北方向 16 km の範囲にある 56 の定点で行った (図 2-3)。観測地点は、熊谷市内の様々な土地利用形態を含むように選定された。観測は、2014 年 3 月 1 日から 2015 年 2 月 28 日まで行った。欠測率は 0.2%であった。自然換気用シェルターの温度センサー (RTR-502 : T&D 社) を使用した (重田・大橋, 2009)。観測装置は、公園内の地上約 2.5 m の高さに設置されたポールに設置した。測定は 2 分間隔で行った。解析には、2 分ごとの観測値を 20 分移動平均したあと 10 分ごとにサンプリングした値を使用した。また、観測地の中心にある熊谷気象台の気象データも解析に使用した。

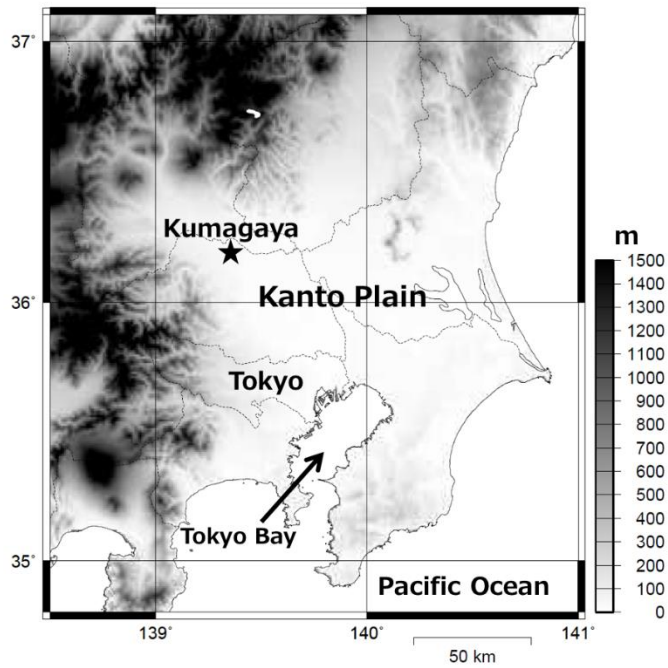


図 2-1 関東平野の中の熊谷の位置

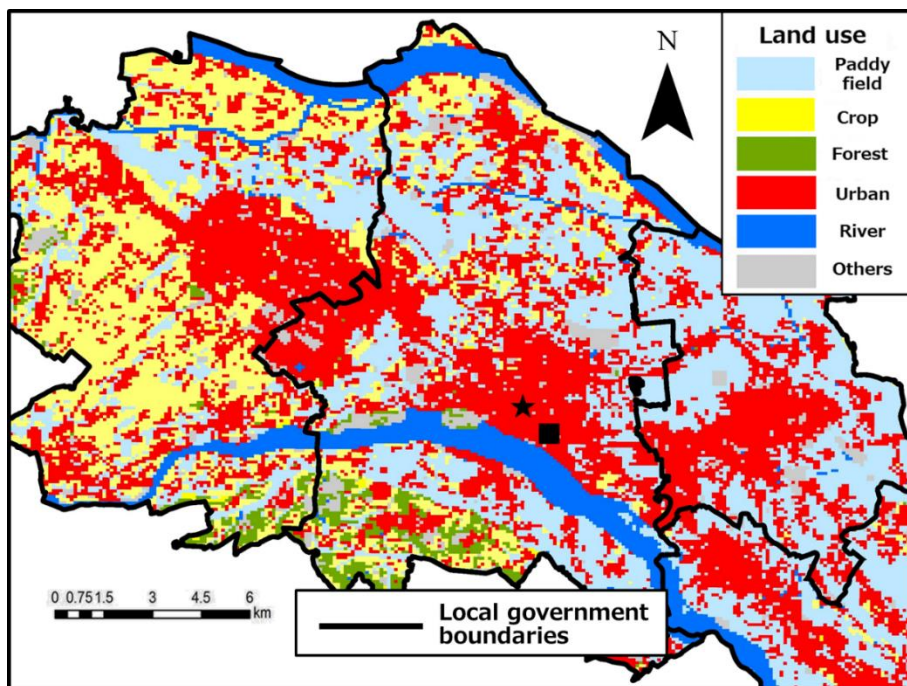


図 2-2 熊谷市周辺の土地利用. ■は熊谷駅, ★は熊谷気象台を表す

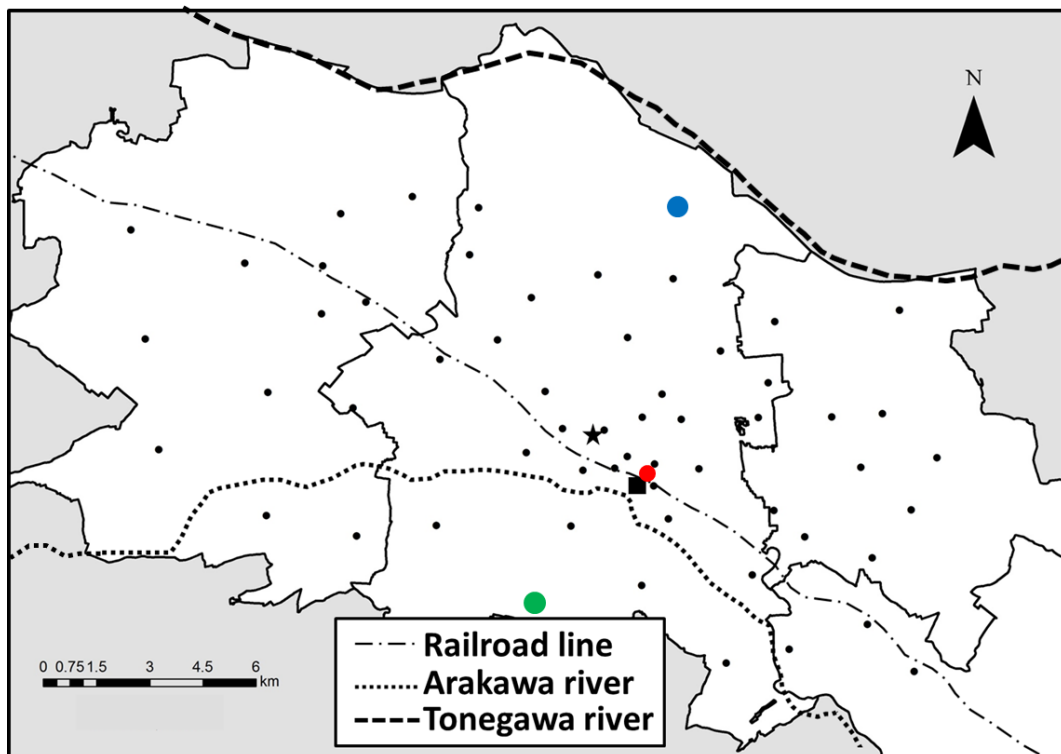


図 2-3 本研究の観測地点. 赤丸は都市部, 青丸は北部郊外, 緑丸は南部郊外の代表点, ■は熊谷観測所, ★は熊谷地方気象台を表す

2.2 地上気温の水平分布

2.2.1 年平均

ここでは、地上気温を空間平均からの偏差で議論する。図 2-4 は、昼間、夜間、日平均の地上気温偏差の水平分布である。昼間は日の出から日没までの時間、夜間は日没から日の出までの時間で定義されている。日平均では、熊谷駅北側の市街地が最も気温の高い観測点であった（図 2-4a）。この市街地周辺には同心円状の等温線が形成され、明確な高温偏差（すなわち UHI）を形成している。UHI の中心部の温度偏差は約 $+0.6^{\circ}\text{C}$ であった。一方、観測エリアの南側では、 -0.4°C 以下の低温偏差が出現している。この地域は主に農耕地や森林で構成されている。

日中の平均気温は、都市部に対応する帯状の高温偏差を形成している（図 2-4b）。しかし、都市部には明確な高温偏差はなく、郊外には明確な低温偏差はない。温度偏差は約 $-0.4\sim+0.4^{\circ}\text{C}$ である。一方、夜間の気温偏差の空間パターンは日平均で見られたパターンと類似していた（図 2-4c）。高温偏差は $+0.8\sim+1.0^{\circ}\text{C}$ 、低温偏差は $-0.8\sim-0.6^{\circ}\text{C}$ であった。また、最高気温の偏差は、昼間や日平均に比べて夜間に高くなった。

これらの結果は、都市温暖化が熊谷の地上気温に絶えず影響を与えていることを示唆している。都市部と郊外の日平均気温の差は $\sim 1^{\circ}\text{C}$ であった。また、夜間（ $1.4\sim 1.8^{\circ}\text{C}$ ）は昼間（ $0.6\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ ）より気温差が大きいことがわかる。

2.2.2 季節による違い

ここでは、地上気温の季節差に着目する。図 2-5 と図 2-6 は、それぞれ夏（6～8月）と冬（12～2月）の地表面気温の偏差（空間平均からの）の水平分布である。両季節とも、日中よりも夜間に UHI が顕著に現れている。夏の昼間は、都市部は周辺の郊外よりも気温が高く、観測地域の北部中央は周辺よりも気温が低かった（図 2-5a）。観測地域の中央北部は、水田を中心とした南部地域（図 2-2）とは土地利用が大きく異なっている。この地域は、図 2-4 に見られるように、全体的に涼しくなっている。都市部と郊外の日中の気温差が 1°C 以上あるのは、夏期のみである。一方、都市部の気温が高く、北部の気温が低いという日中偏差の特徴は、冬にはあまり見られない。調査地域内の昼間の偏差は $-0.4\sim+0.4^{\circ}\text{C}$ の範囲であった（図 2-6a）。夜間は、高温偏差と低温偏差を示す地域に大きな違いがない（図 2-5b, 図 2-6b）。熊谷駅のすぐ北側にある偏差の極大値と南側にある最小偏差の温度差は、夏で 1.2°C 、冬で 2.2°C であった。

この結果から、高い気温偏差を示す地域には、顕著な季節変化がないことがわかった。しかし、以下の点では大きな季節変化が見られた。日中では、低温を示す領域は夏季にのみ出現した。夜間では、偏差の極大値と極小値との差は、夏より冬の方が約 1°C 大きくなっている。

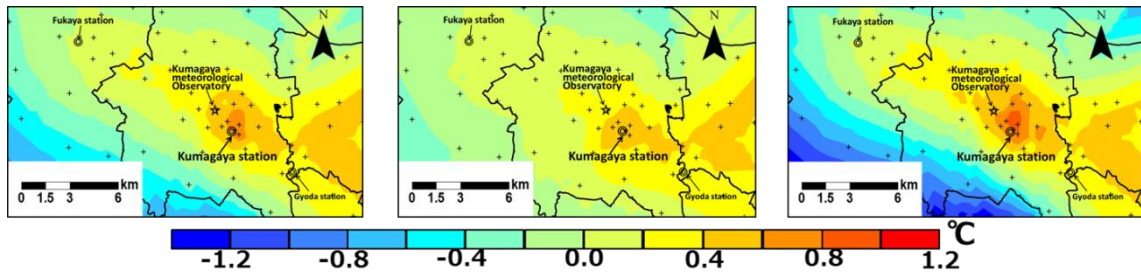


図 2-4 年平均の地上気温偏差の水平分布. (a)日平均, (b)昼間平均, (c)夜間平均

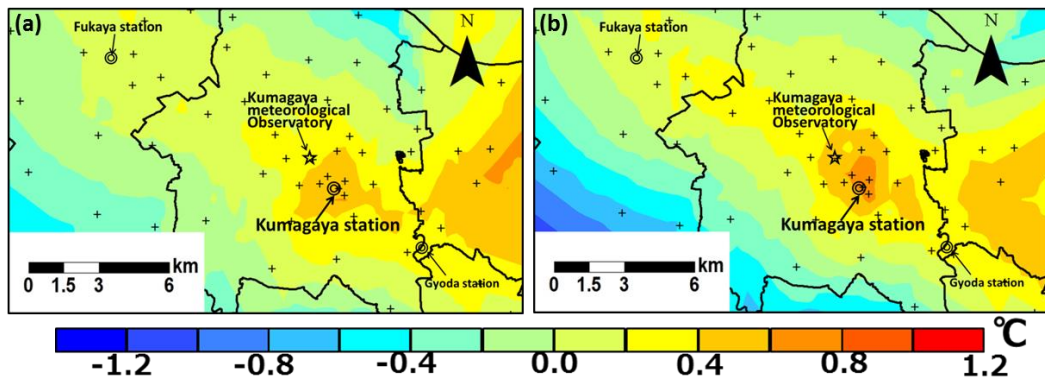


図 2-5 夏季における地上気温偏差の水平分布. (a)日中および(b)夜間の平均

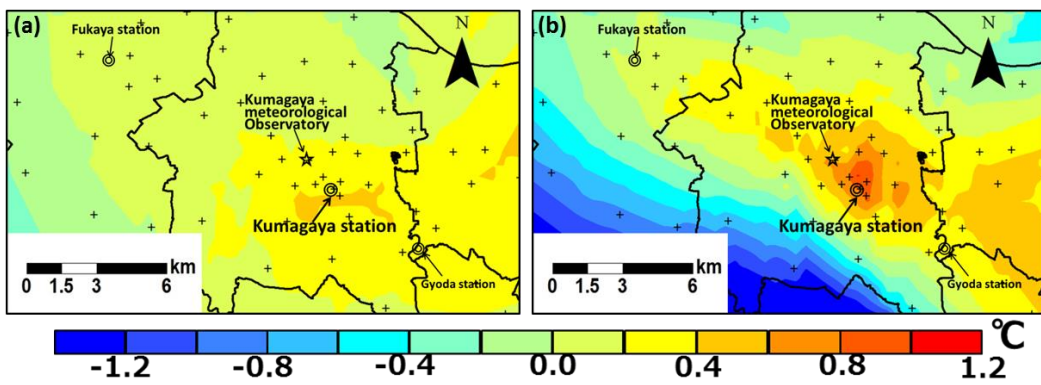


図 2-6 冬季における地上気温偏差の水平分布. (a)日中および(b)夜間の平均

2.3 ヒートアイランド強度

2.3.1 UHI 強度の定義

本研究では、UHI の強度と頻度を定量的に示す指標として UHI 強度 を用いる。しかし、UHI 強度は代表地点の選定によって大きく変化する（例えば、Sakakibara and Owa, 2005; 中村・重田, 2014）。そのため、都市部と郊外の代表地点は客観的に選択する必要がある。奥・梶元 (2014) は、クラスター分析を用いて多点地表面温度観測を都市部と郊外のグループに分類した。本研究でも、クラスター分析を用いて、56 地点の気温の全観測データにより都市部と郊外のグループに分類することとする。ここでは、56 地点における気温の観測値を正時毎に平均し、年平均の気温日変化を作成した。この日変化データをクラスター分析に使用した。階層型クラスター分析によりデンドログラムが作成された (図 2-7)。デンドログラムは、データ間のユークリッド距離を表す。なお、本研究におけるクラスター分析には Word 法を採用した。ここでは、デンドログラムの結果より、データを最上階層で 2 クラスに分類することとする。図 2-8 において、分類結果が地図上にプロットされた。27 地点がクラスター 1 (C1)、29 地点がクラスター 2 (C2) に割り振られた。日中の気温変化と各点の土地被覆を考慮すると、クラスター 1、2 はそれぞれ都市と郊外の特徴を持つと判断された。したがって、本研究では、都市的特性を有する C1 と郊外的特性を有する C2 の平均気温の差を UHI 強度と定義する。

2.3.2 季節変動

ここでは、熊谷の UHI 強度の季節変動について調査する。図 2-9 は、UHI 強度の日周リズムの季節変動を示す。なお、15 日移動平均値を示している。UHI 強度 はすべての季節で昼間より夜間の方が高いことがわかる。UHI 強度は日没後に急激に増加した。UHI 強度の最小値は日の出から数時間後に現れた。ほとんどの季節で、日中の UHI 強度 は 0.5°C 未満であった。11 月と 12 月は、UHI 強度 が負になることが多かった。しかし、この負の UHI 強度 の大きさは 0.5°C 未満で、夜間に観測された正の UHI 強度 よりもはるかに小さいものであった。逆に、暖候季 (6~8 月) の日中 (特に午後) の UHI 強度は $+1^{\circ}\text{C}$ 以上となり、他の季節と区別されるようになった。この観測は Kuwagata et al. (2014) と一致する。4~5 月の夜間の UHI 強度は $1.3\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ と比較的大きな値であった。一方、夏期 (特に 6 月中旬から 7 月上旬) の夜間の UHI 強度は小さく、平均して 0.5°C 以下であった。

図 2-10 は、昼間と夜間の月平均の UHI 強度 の季節変化を示している。誤差棒は各月の UHI 強度 の標準偏差を示す。日中の UHI 強度 は、7~9 月に他の月より約 0.3°C 大きくなった (図 2-10a)。UHI 強度 の最大値と最小値は、8 月に 0.6°C 、1 月に 0.3°C であった。夜間の UHI 強度 は 4 月と 5 月が他の月に比べて大きく、5 月には最大 1.2°C となった (図 2-10b)。一方、夏期の夜間 UHI 強度 は小さく、6 月に 0.7°C となった。秋から冬にかけての夜間の UHI 強度 は $0.9\sim 1.1^{\circ}\text{C}$ で、明確な季節変動は見られなかった。しかし、10 月と 1 月から 2 月にかけては、UHI 強度 がやや小さくなった。また、月ごとの標準偏差は、夏より冬の方が 0.3°C ほど大きかった。

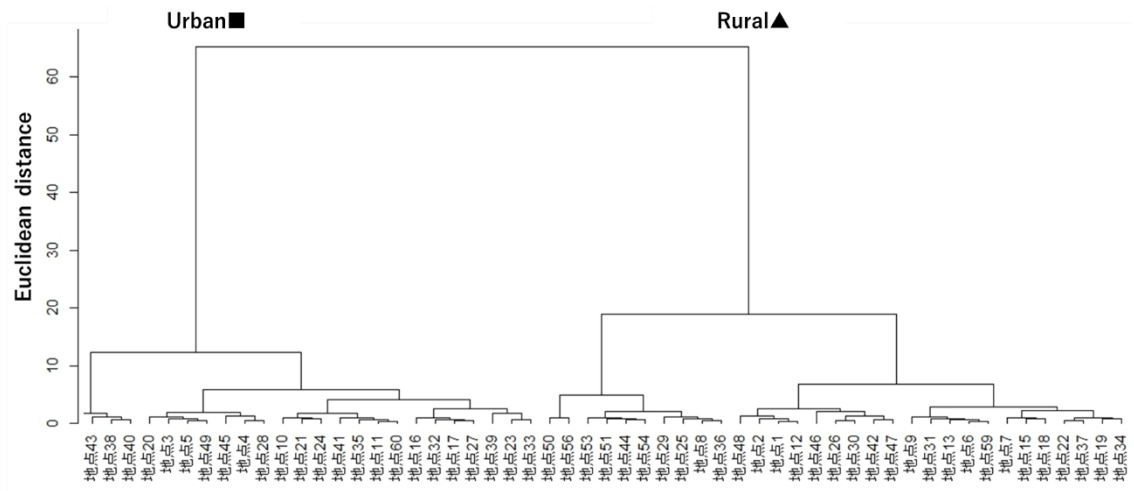


図 2-7 クラスター分析により作成されたデンドログラム

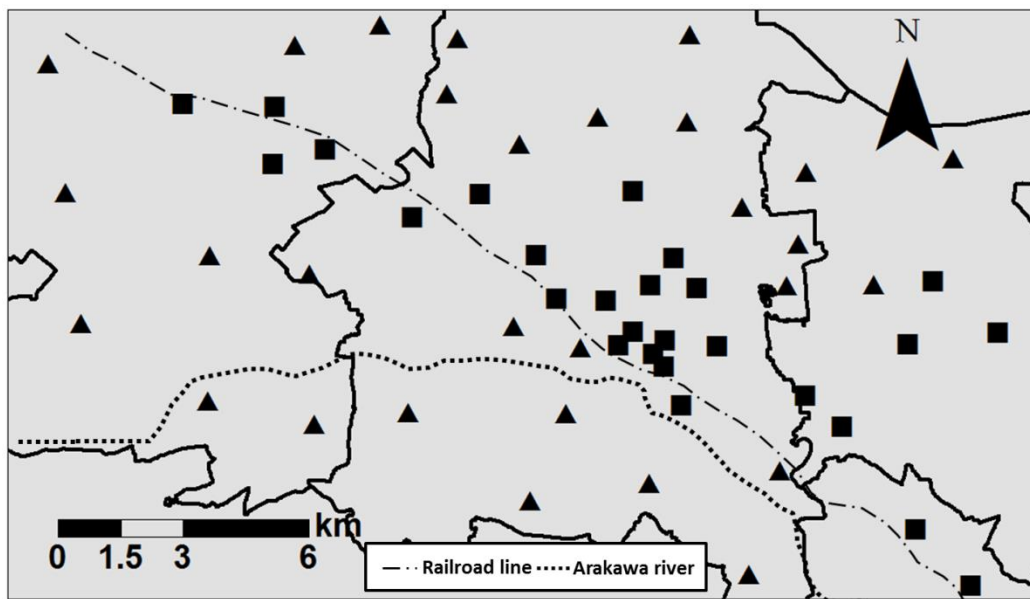


図 2-8 クラスター分析による分類結果のマップ。■はクラスター1 (C1), ▲はクラスター2 (C2) を表す

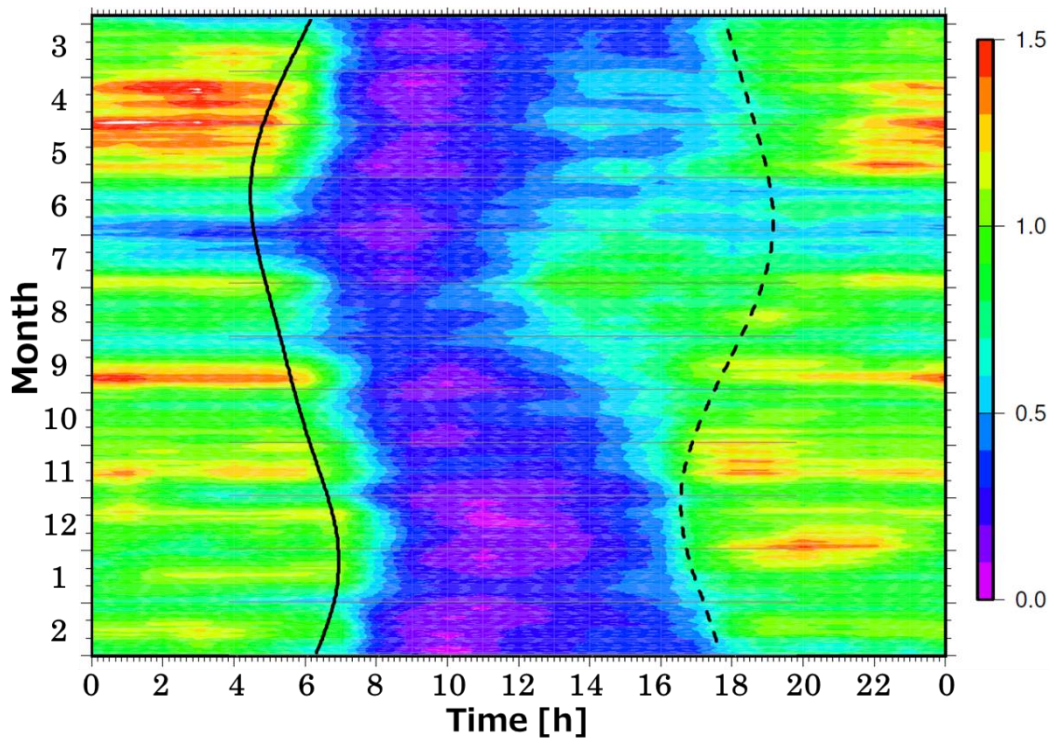


図 2-9 UHI 強度日変化の季節変化 (単位: °C). 実線と破線はそれぞれ日の出と日の入りの時刻を示す

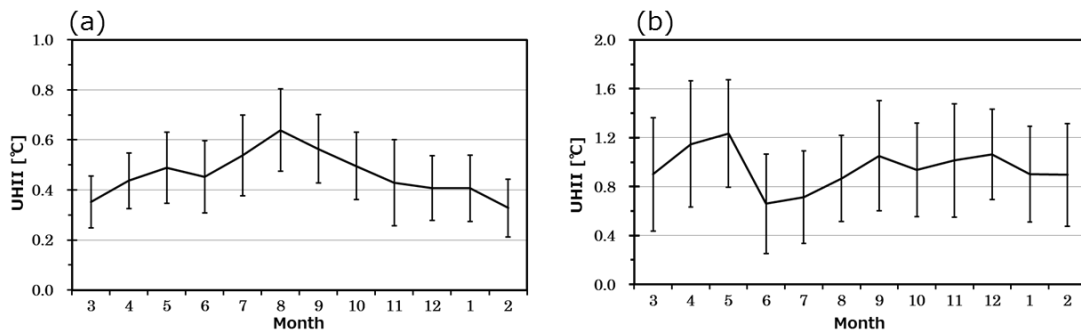


図 2-10 月平均 UHI 強度の季節変動 (エラーバーは標準偏差). (a) 昼間, (b) 夜間

2.4 2章のまとめ

2章では、中小規模都市における UHI の気候学的特性を調査するため、埼玉県熊谷市において長期の複数定点観測を実施し、熊谷市の地上気温の水平分布が調査された。熊谷市は、市内の標高差が小さいこと、海や山からある程度距離が離れていること、都市と郊外の境界が明瞭であることから、UHI の影響が明瞭に表れると考えられる。さらに、UHI の強度と頻度を定量的に示すために、UHI 強度を算出した。本研究では、都市と郊外を客観的に選定するため、クラスター分析が実施された。

UHI の特性は以下のようにまとめられる。年平均値として、熊谷駅北側の市街地において明確な高温偏差、すなわち UHI の形成が確認された。UHI の中心部の温度偏差は約 $+0.6^{\circ}\text{C}$ であった。一方、観測エリア南側の農耕地や森林において約 -0.4°C 以下の低温偏差が出現した。また、夜間 ($1.4\sim 1.8^{\circ}\text{C}$) は昼間 ($0.6\sim 0.8^{\circ}\text{C}$) より気温差が大きかった。ただし、夏 (6~8月) の昼間にのみ、都市部と郊外の日中の気温差が 1°C 以上確認された。この際の低温域は、観測エリア南側ではなく、観測エリア北部の水田地域に出現した。この特徴は UHI 強度でも確認され、6~8月の暖候期日中は $+1^{\circ}\text{C}$ 以上が示されたが、11~12月の寒候期には負の UHI 強度が確認された。さらに、UHI 強度の最大値は、寒候期ではなく5月に示された (1.2°C)。

季節により UHI の特性に違いが生じた要因や UHI 強度の最大値が5月に示された要因については、5章で考察する。

3章 ヒートアイランドによって形成される都市境界層の立体構造

2章では、夜間の埼玉県熊谷市における UHI が、季節を通して恒常的に発生していることが確認された。そこで、3章では、埼玉県熊谷市において発生した UHI によって形成される UBL の立体構造を把握するために、DL による PBLH および 3次元風速の移動観測を実施した。

3.1 ドップラーライダーによる都市境界層高度および移動観測の手法

3.1.1 ドップラーライダーの計測原理

DL は、近赤外のパルスレーザーを大気中に向けて発射して、浮遊するエアロゾルからの後方散乱光を受信し、エアロゾルの移動方向や速度を風向風速として計測する機器である。ただし、この測定原理のため、エアロゾルが大気中に十分に存在していない場合や、より下層に多量のエアロゾルが存在する場合には、受信される後方散乱強度が小さくなる。そのため、一般に下層よりもエアロゾル量が少ない上空ほどデータの検出率は低下する。

表 3-1 は、本研究で使用する 3次元コヒーレント DL (三菱電機: LR-S1D2GA) の主な仕様を示す。LR-S1D2GA は走査型ライダーで、水平方向に $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 、垂直方向に $-5^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の走査が可能である。また、LR-S1D2GA は観測範囲を 60~630 m (パルス幅: 200 ns), 75~1500 m (500 ns), 150~3000 m (1000 ns) から設定できる。観測範囲を広げる場合、遠方に存在するエアロゾルから反射された信号を受信する必要がある。ただし、遠方になるほど受信信号は弱まるため、解析に十分なデータを得るためにはレーザー出力を高めるか送信パルス幅を広げなければならない。LR-S1D2GA は、パルス幅を調整することで観測範囲を広くしているが、パルス幅の増加にしたがって距離分解能が粗くなる。LR-S1D2GA の走査方法には、視線方向の POINT 走査、高度角を固定してスキャナーを方位方向に回転させる PPI (Plane Position Indicator) 走査、方位角を固定してスキャナーを鉛直方向に回す RHI (Range Height Indicator) 走査がある (図 3-1)。

LR-S1D2GA では、本体装置内蔵のソフトウェアにより、高仰角 PPI 操作を行なった際に 1 回の観測ごとに VAD (Velocity Azimuth Display) 法によって 3次元風速・風向を算出している。VAD 法では、一定仰角で 360° PPI 走査した際に走査円上の風が一様であれば測定されるドップラー速度が方位角に対する正弦関数となることを利用し、観測されたドップラー速度をフーリエ変換するか正弦関数にフィッティングさせるかして、水平風を求める (Browning and Wexler, 1968)。このように、本来の VAD 法では 360° 走査したドップラー速度から水平風を求める。しかしながら、LR-S1D2GA は 1 台につき最大で 180° までしか水平走査できないため、 180° 水平走査して得られたドップラー速度を正弦関数にフィッティングさせ、水平風を算出している (三菱電機株式会社, 2015)。また、LR-S1D2GA では、データの品質管理のため、測定値の信号対雑音比 (以降, SNR) が 7 dB 以下の場合にはドップラー風速を出力しない。

表 3-1 本研究で使用した DL の仕様

レーザー光波長	1.55 μ m 帯		
距離分解能	30m	75m	150m
観測範囲	60~630m	75~1,500m	150~3,000m
送信光パルス幅	200ns	500ns	1,000ns
レンジピン数	20 (0~19)		
ドップラー速度範囲	-30~+30m/s		
照射方式	走査方式		
方位角走査範囲	-90°~+90°		
仰角走査範囲	-5°~+90°		
駆動速度	1.0~20.0°/s (水平方向) 1.0~10.0°/s (垂直方向)		
走査パターン	POINTING, PPI, RHI, VPPI, VRHI		

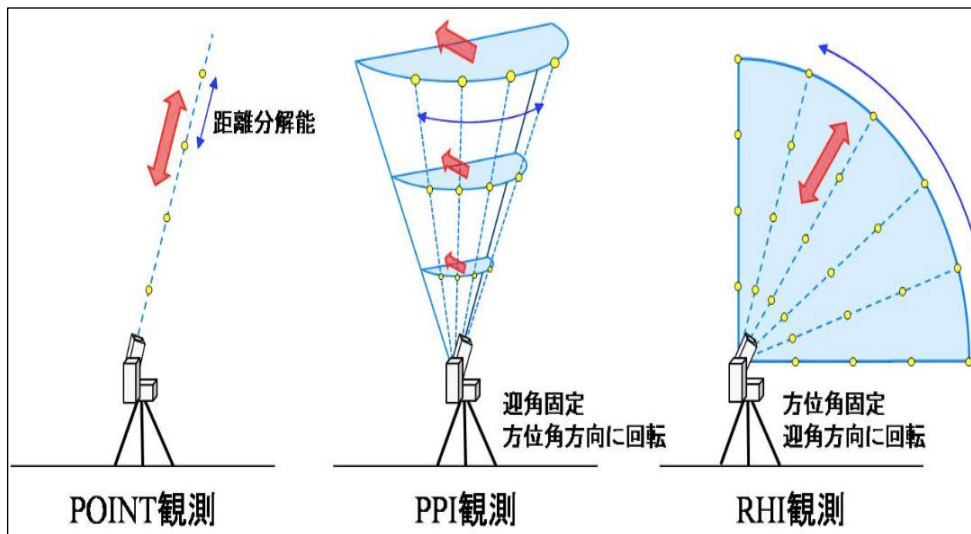


図 3-1 走査型 DL のスキャン走査方法 (豊田ほか, 2009 より引用)

3.1.2 大気境界層高度の観測機器と DL による算出方法

観測データから PBLH を算出するための多数の手法が存在する (Seibert et al., 2000). それらのほとんどは, 気温や湿度, リチャードソン数などの気象要素の混合を検出することによって PBLH を算出する. これらの気象要素の鉛直観測には, 主にゾンデが使用される. これは, その場で観測された要素に基づいているため最も信頼性が高い手法と考えられ, いくつかの研究で参照として使用される (Eresmaa et al., 2006; Sicard et al., 2006; Münkel et al., 2007; O'Connor et al., 2010). しかしながら, ゾンデ観測は時間や場所が限られる場合が多い. 現在, 日本国内で得られるラジオゾンデのルーチン観測データは計 17 地点であり, 関東に限れば館野における 9 時および 21 時 (日本時間) のみである.

近年ではリモートセンシング装置によって時空間的に高解像度の観測が可能となってきた. PBLH の観測に用いられるリモートセンシング装置は, 音波を発射し大気中の温度勾配による散乱強度を利用するソーダー (例えば, Lokoshchenko, 2002; Liu and Liang, 2010), 電波から大気の揺らぎを利用するウィンドプロファイラーやドップラーレーダー (例えば, Angevine et al., 1994; Quan et al., 2013), 電波より波長の短い光波からエアロゾルまたは大気分子を利用するライダーやシーロメーター (例えば, Davis et al., 2000; Barlow et al., 2011), 鉛直混合の代用値となる鉛直風を直接観測できる DL (例えば, Pearson et al., 2010; Barlow et al., 2010) などが挙げられる. この中で, ライダーやシーロメーターは他の機器と比較して機器の価格や使用電力が低く, 騒音などの環境影響も小さいため, 多くの観測で用いられる.

一方, シーロメーターによる PBLH 観測で生じる誤差を指摘した研究例もある. 例えば, Barlow et al. (2011) は, イギリスのロンドンにおいてシーロメーターおよび DL による PBLH を比較した. その結果, 日中において, シーロメーターによる PBLH が DL による値より過少評価となることを示した. また, Schween et al. (2014) は, ドイツにおいてシーロメーターおよび DL, ラジオゾンデによる PBLH を比較した. その結果, シーロメーターよりも DL による PBLH の方が, ラジオゾンデによる値に良く一致することが確認された. 特に日の出や日の入り時刻の前後においては, シーロメーターによる PBLH が他の機器による PBLH よりも顕著に過大評価となることを示した. そして, この要因にはそれらの時刻においてエアロゾルの鉛直勾配が不明瞭となることを挙げている.

以上のことより, 本研究では PBLH の算出には DL を使用することとした. DL を用いて PBLH の算出した既往研究では, 後方散乱強度や SNR (Hayden et al., 1997; Haeffelin et al., 2012; 中村ほか, 2017), 鉛直風の分散 (Barlow et al., 2011; Schween et al., 2014) によってその発達過程が明瞭に捉えられている. ただし, 後方散乱強度や SNR による算出はエアロゾルベースであるため, シーロメーターの際に記した通り, 時間帯によっては誤差が生じることがある. そこで, 鉛直風の分散を使用する算出方法を採用した. 具体的には, DL

によって観測された鉛直風 W の分散を求め、その値が閾値を超えている領域の最高高度を DL による PBLH (以降, $PBLH_{DL}$) と定義した (以降, σ_W^2 閾値法). $PBLH_{DL}$ は、以下の式 3-1 のように求める.

$$PBLH_{DL} = \sigma_W^2 > 0.16 \text{ m}^2\text{s}^{-2} \quad \dots 3-1$$

σ_W^2 の閾値は Schween et al. (2014) を参考に $0.16 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ と定義した. なお, σ_W^2 は VAD 法によって算出された W を用いる.

Schween et al. (2014) では、ある時刻の σ_W^2 を算出するために、その時刻の前後 15 分間 (計 30 分間) のデータを使用している. この 30 分間という時間は、平均上昇速度が 1 ms^{-1} の対流プルームが、日中の高さ 1 km の混合層を通過するのに約 16 分必要であるという考えに基づいており、その約 2 倍の時間のデータを使用することで誤差が抑えられるとしている. また、この時間は乱流フラックスの導出にも一般的に使用されている.

3.1.3 DLを用いた移動観測手法

移動観測は、DLを軽トラックの荷台に設置し実施した。図3-2に移動観測車を示す。設置の際には、軽トラックの荷台にDLを直接固定することが困難であったため、DL固定用の木枠を作成した。そして、DLを固定した木枠をゴムロープおよび突っ張り棒を用いて荷台上に固定した(図3-2a)。また、移動によるDLへの振動を和らげるために木枠と荷台の間に防振ゴムを敷いた。観測モードはVPPI走査とし、ビーム仰角 69° および 90° の2仰角での観測を交互に実施した。各高度における観測データの平均間隔は約45秒である。DLは視線方向風速およびSNRを測定した。その他、DLが固定されている木枠上に、デジタル水準器(DWL-3000XY: Digi-Pas社製)を設置し(図3-2b)、DLの x' 軸の傾斜角 $\theta_{x'}$ および y' 軸の傾斜角 $\theta_{y'}$ を1秒間隔で測定した。これらの値は、後述する傾斜補正のため使用される。さらに、GPS(eTrex-Vista-C: garmin社製)と気温・相対湿度センサー(RTR-502: T&D社製)を軽トラック上部に設置し(図3-2c)、それぞれ1秒間隔で測定した。なお、気温・相対湿度センサーは、自然通風式の日射遮蔽シェルター内部に設置した。

本研究で使用したDLは走査型DLであるため、一つの仰角をスキャンし、風向・風速を算出するのに数十秒程度の時間を要する。そのため、移動観測の場合、一回のスキャン中に、自動車の移動速度、DLの方向や傾斜が大きく異なってしまう、VAD法への反映や、後述する傾斜補正の適用が困難である。よって、本観測では、自動車が停車中のデータのみを使用することとした。

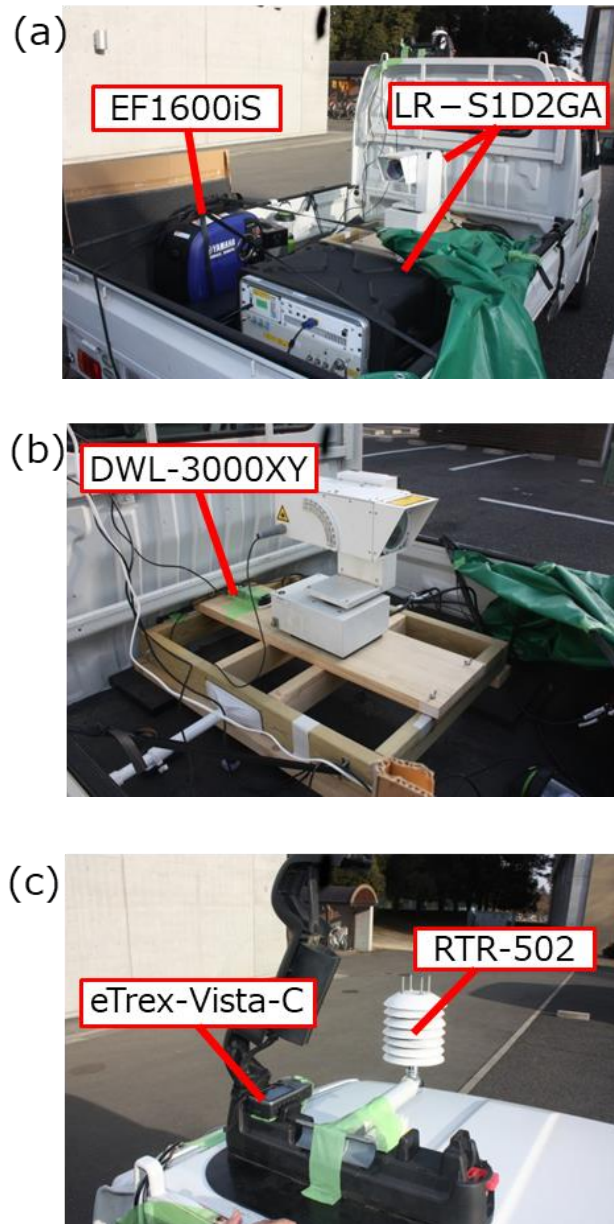


図 3-2 本研究で用いた DL の移動観測車. (a)荷台の全景, (b) DL 固定用の木枠, および (c)GPS と気温・相対湿度の測定機器をそれぞれ示す

3.1.4 傾斜補正手法の提案

DL 観測において、機器の水平が正しく調整されず機器が傾斜している場合の、DL 観測風 (VAD 3次元風) の補正について検討する。図 3-3 のように、3次元 (局所) 直交座標 (右手系) xyz をとり、 xy 平面を真の水平面とし、 x 軸を東向き、 y 軸を北向き、 z 軸を鉛直上向きとする (黒)。また、DL の座標を $x'y'z'$ とし、 $x'y'$ 平面を DL の水平面とする (赤)。両座標系の原点 O は共通とする。直線 $\ell_1, \ell_2, \ell_3, \ell_4$ は全て原点 O を通り、直線 ℓ_1 は $x'y'$ 平面上、 ℓ_2, ℓ_3, ℓ_4 は xy 平面上にある。また、直線 ℓ_1, ℓ_2 は z 軸と z' 軸のなす平面上にある。DL 水平面の真の水平面からの傾きについては、 x' 軸の傾斜角 $\theta_{x'}$ と y' 軸の傾斜角 $\theta_{y'}$ の 2 角が既知であるとする。

まず、 $x'y'z'$ 系から xyz 系への座標変換を考える。ここで、 xyz 系において x, y, z 軸方向の単位ベクトルをそれぞれ $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 、 $x'y'z'$ 系において x', y', z' 軸方向の単位ベクトルをそれぞれ $\mathbf{i}', \mathbf{j}', \mathbf{k}'$ とする。この座標変換は、 z' 軸から z 軸に角度 δ 回転する変換と集約できる。ただし、 z' 軸と z 軸とのなす平面と真の水平面 (xy 平面) との交線 (ℓ_2) は一般的には x 軸とは一致しない (両者のなす角 λ がゼロではない)。そこで、この座標変換を以下の 3 ステップに分けて表現する。すなわち、(1) z' 軸を回転軸として角度 λ ぶん回転 ($x' \rightarrow \ell_1$; 式 3-2)、(2) y 軸を回転軸として角度 δ ぶん回転 ($\ell_1 \rightarrow \ell_2, z' \rightarrow z$; 式 3-3)、(3) z 軸を回転軸として角度 $-\lambda$ ぶん回転 ($\ell_2 \rightarrow x$; 式 3-4)。これらの変換行列をそれぞれ A_1, A_2, A_3 とすると、以下のように表される。

$$A_1 = \begin{pmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots 3-2$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} \cos \delta & 0 & \sin \delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \delta & 0 & \cos \delta \end{pmatrix} \quad \dots 3-3$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots 3-4$$

xyz 系、 $x'y'z'$ 系での 3次元風ベクトルをそれぞれ $\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$ 、 $\mathbf{V}' = u'\mathbf{i}' + v'\mathbf{j}' + w'\mathbf{k}'$ とすると、上記の座標変換は

$$\mathbf{V} = A_3 A_2 A_1 \mathbf{V}' \quad \dots 3-5$$

と表される。合成変換 $A_1 A_2 A_3$ は

$$\begin{aligned} A_3 A_2 A_1 &= A_3 (A_2 A_1) \\ &= \begin{pmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left\{ \begin{pmatrix} \cos \delta & 0 & \sin \delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \delta & 0 & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right\} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \lambda \cos \delta & \sin \lambda \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \lambda \sin \delta & -\sin \lambda \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos^2 \lambda \cos \delta + \sin^2 \lambda & \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) & \cos \lambda \sin \delta \\ \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) & \sin^2 \lambda \cos \delta + \cos^2 \lambda & \sin \lambda \sin \delta \\ -\cos \lambda \sin \delta & -\sin \lambda \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \quad \dots 3-6 \end{aligned}$$

となるから，式 3-5, 3-6 より

$$\begin{cases} u = u' (\cos^2 \lambda \cos \delta + \sin^2 \lambda) + v' \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) + w' \cos \lambda \sin \delta & \dots 3-7 \\ v = u' \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) + v' (\sin^2 \lambda \cos \delta + \cos^2 \lambda) + w' \sin \lambda \sin \delta & \dots 3-8 \\ w = -u' \cos \lambda \sin \delta - v' \sin \lambda \sin \delta + w' \cos \delta & \dots 3-9 \end{cases}$$

となる．

以上のように，式 3-7~3-9 に DL で観測された風速各成分 u', v', w' を与えることで水平風 u, v および鉛直風 w を求めることができるが，2つの角 λ, δ を求める必要がある．上述の座標変換より， x' 軸方向の単位ベクトル \mathbf{i}' は xyz 系では

$$\mathbf{i}' = \mathbf{i}(\cos^2 \lambda \cos \delta + \sin^2 \lambda) + \mathbf{j} \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) - \mathbf{k} \cos \lambda \sin \delta \quad \dots 3-10$$

と表せる．このベクトル \mathbf{i}' と \mathbf{i}' を xy 平面上に投影したベクトル \mathbf{i}'_{xy}

$$\mathbf{i}'_{xy} = \mathbf{i}(\cos^2 \lambda \cos \delta + \sin^2 \lambda) + \mathbf{j} \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) \quad \dots 3-11$$

とのなす角が $\theta_{x'}$ であるから，内積の関係より

$$\cos \theta_{x'} = \frac{\mathbf{i}' \cdot \mathbf{i}'_{xy}}{|\mathbf{i}'_{xy}|} = \sqrt{\cos^2 \lambda \cos^2 \delta + \sin^2 \lambda} \quad \dots 3-12$$

また，外積の関係より

$$\sin \theta_{x'} = \frac{|\mathbf{i}' \times \mathbf{i}'_{xy}|}{|\mathbf{i}'_{xy}|} = \cos \lambda \sin \delta \quad \dots 3-13$$

となる．一方， y' 軸方向の単位ベクトル \mathbf{j}' は xyz 系では

$$\mathbf{j}' = \mathbf{i} \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) + \mathbf{j}(\sin^2 \lambda \cos \delta + \cos^2 \lambda) - \mathbf{k} \sin \lambda \sin \delta \quad \dots 3-14$$

となり，これと \mathbf{j}' を xy 平面上に投影したベクトル \mathbf{j}'_{xy}

$$\mathbf{j}'_{xy} = \mathbf{i} \sin \lambda \cos \lambda (\cos \delta - 1) + \mathbf{j}(\sin^2 \lambda \cos \delta + \cos^2 \lambda) \quad \dots 3-15$$

とのなす角が $\theta_{y'}$ であるから，内積の関係より

$$\cos \theta_{y'} = \frac{\mathbf{j}' \cdot \mathbf{j}'_{xy}}{|\mathbf{j}'_{xy}|} = \sqrt{\sin^2 \lambda \cos^2 \delta + \cos^2 \lambda} \quad \dots 3-16$$

また，外積の関係より

$$\sin \theta_{y'} = \frac{|\mathbf{j}' \times \mathbf{j}'_{xy}|}{|\mathbf{j}'_{xy}|} = \sin \lambda \sin \delta \quad \dots 3-17$$

式 3-17 を式 3-13 で割ると，

$$\tan \lambda = \frac{\sin \theta_{y'}}{\sin \theta_{x'}} \quad \dots 3-18$$

となるから、 λ は

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_{y'}}{\sin \theta_{x'}} \right) \quad \dots 3-19$$

により求まる。また、式 3-12, 3-16 の両辺を 2 乗して足し合わせると、

$$\cos^2 \theta_{x'} + \cos^2 \theta_{y'} = \cos^2 \delta + 1 \quad \dots 3-20$$

さらに、式 3-13, 3-17 の両辺を 2 乗して足し合わせると、

$$\sin^2 \theta_{x'} + \sin^2 \theta_{y'} = \sin^2 \delta \quad \dots 3-21$$

となるから、式 3-20, 3-21 より、

$$\tan \delta = \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_{x'} + \sin^2 \theta_{y'}}{\cos^2 \theta_{x'} + \cos^2 \theta_{y'} - 1}} = \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_{x'} + \sin^2 \theta_{y'}}{\cos^2 \theta_{x'} - \sin^2 \theta_{y'}}} \quad \dots 3-22$$

したがって、 δ は

$$\delta = \tan^{-1} \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_{x'} + \sin^2 \theta_{y'}}{\cos^2 \theta_{x'} - \sin^2 \theta_{y'}}} \quad \dots 3-23$$

により求まる。

図 3-4 は、 x' 軸、 y' 軸の水平面に対する傾斜角 $\theta_{x'}$ 、 $\theta_{y'}$ と、座標変換時の方位角および仰角方向の回転角 λ 、 δ との関係を示す（単位はすべて°）。取り得る範囲は白背景の領域である。

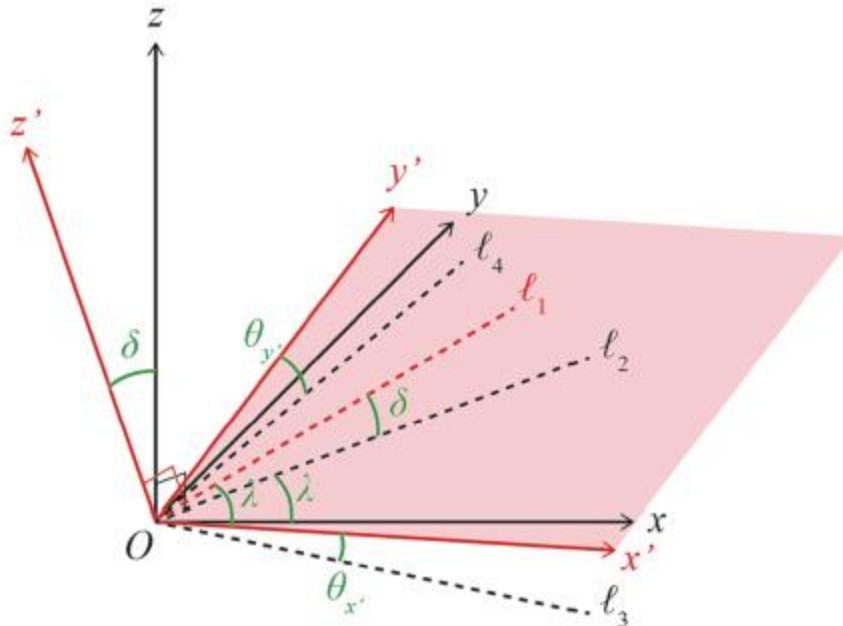


図 3-3 局所直交座標系 xyz とライダー座標系 $x'y'z'$ との関係を示す模式図

(a) Azimuth; λ (b) Elevation; δ

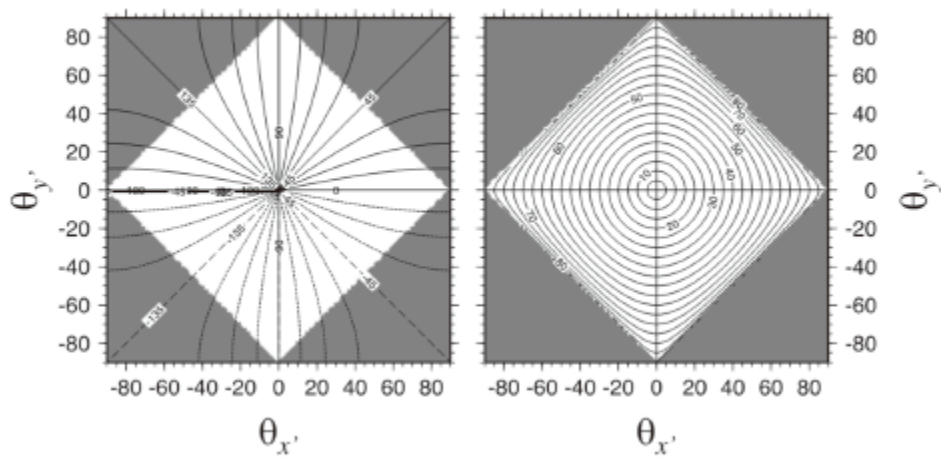


図 3-4 水平面からの傾斜角 $\theta_{x'}$, $\theta_{y'}$ と座標変換時の (a) 方位角, (b) 仰角方向の回転角 λ , δ との関係

3.2 ドップラーライダー観測の精度検証

3.2.1 ドップラーライダーと GPS ゾンデによる大気境界層高度の比較

ここでは、3.1.2 項で示した σ_W^2 閾値法によって算出した $PBLH_{DL}$ と、ゾンデによる $PBLH$ (以降、 $PBLH_{Sonde}$) を比較することで、 σ_W^2 閾値法の検証を実施する。

比較観測は、2018年11月2～3日の長野県長野市において実施した。図3-5は、観測地点を示す。GPS ゾンデ (iMS-100: 明星電気社製) は、長野商業高校グラウンド (以降、長商; 標高約 390 m) から放球した。ゾンデは、11月2日18時～3日18時まで、1.5時間毎に計17回を放球した。上記の観測期間は晴れており、長野気象台の観測データによると、期間中に降水はなく、雲量も3日9時の8を除いて1以下であった。ゾンデの観測項目は、気温、相対湿度、位置情報である。データのサンプリング間隔は1秒である。さらに、DLを信州大学長野キャンパス理科棟屋上 (標高約 410 m) に設置し、PPI観測を実施した。信州大学屋上に設置したDLは観測範囲を75～1500 m、距離分解能を75 mに設定した。DLは仰角 0° , 5° , 10° , 15° , 69° , 90° 、方位角 [140.6° , 320.6°] の範囲をスキャンし、各仰角におけるスキャンは平均5分毎に実施した。解析には、観測の中から仰角 69° のスキャンデータを用いた。また、 σ_W^2 の算出には、日中の熱的プルームを考慮して前後15分間のデータを使用した。例えば、11月2日21時の σ_W^2 算出には、20時45分～21時15分における観測値を使用した。なお、 $PBLH_{Sonde}$ の算出には Holzworth (1964) の手法を用いた。この手法では、日射による地表の加熱に伴い地表付近の気塊が乾燥断熱過程で上昇することを仮定し、地表付近と仮温位が等しい高度を $PBLH_{Sonde}$ と定義する。

図3-6は、2018年11月2日18時～3日18時における $PBLH_{Sonde}$ および $PBLH_{DL}$ の時系列を示す。また、図3-7は $PBLH_{Sonde}$ および $PBLH_{DL}$ の散布図を示す。決定係数は0.83が示された。長野市における11月3日の日出時刻は6時12分、日没時刻は16時50分であった。 $PBLH$ は日出後から上昇し、15時に最高高度を示す ($PBLH_{Sonde}$ は817 m, $PBLH_{DL}$ は750 m)。その後、高度は急低下する。 $PBLH_{Sonde}$ および $PBLH_{DL}$ は類似した日変化を示すが、両機器の差 ($PBLH_{DL} - PBLH_{Sonde}$) は $12.9 \text{ m} \pm 80.6 \text{ m}$ を示す。特に、日中の差は $17.3 \text{ m} \pm 94.7 \text{ m}$ であり、夜間の $9.4 \text{ m} \pm 67.3 \text{ m}$ と比較して大きい。この差の要因の一つは、 $PBLH_{Sonde}$ および $PBLH_{DL}$ を算出する際に用いる観測データの時間差が考えられる。 $PBLH_{Sonde}$ はゾンデ放球時刻における観測データのみを使用して算出されるが、 $PBLH_{DL}$ は鉛直風の分散であるため、一定時間における観測データを使用 (本解析では30分間) することとなる。その結果、特に熱的対流が大きいと予想される日中において、両機器の差が大きくなったものと推測される。

さらに、 σ_W^2 の算出時間による誤差を検証するため、各時刻における σ_W^2 の算出を30分間、10分間、5分間のデータを使用して行なった。それを、比較したのが図3-8である。図3-6と同様に、2018年11月2日18時～3日18時における $PBLH_{Sonde}$ および各時間で平均し

た $PBLH_{DL}$ の時系列を示す。その結果、各時間で平均した $PBLH_{DL}$ の時系列は概ね同様の傾向が示された。しかしながら、各時刻においては差異が生じており、特に日中では11月3日の13時30分に最大285 mの差が発生した。一方、夜間にはその差が小さく、最大でも75 m程度であった。この理由として、4.1.3項でも記述した対流プルームの時間変動が挙げられる。日中の $PBLH$ は、上空まで発達するうえに日射の影響も大きいため、時間変動が非常に大きい。一方で夜間の $PBLH$ は、日射の影響がなく高度も低いため、日中と比較して時間変動が小さい。これらのことから、たとえ σ_W の算出時間を30分未満に設定した場合でも、夜間であれば大きな誤差が生じないことが示唆された。

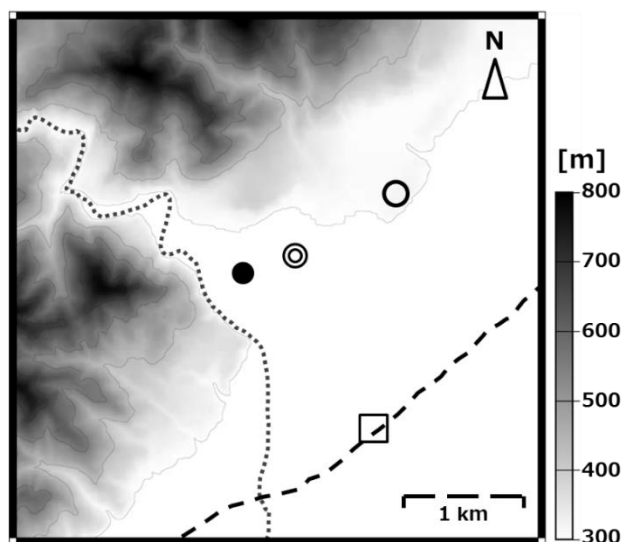


図 3-5 長野県長野市の観測地点。◎が信州大学長野キャンパス，●が長野商業高校，○が長野地方気象台，□がJR長野駅，点線が裾花川を示す

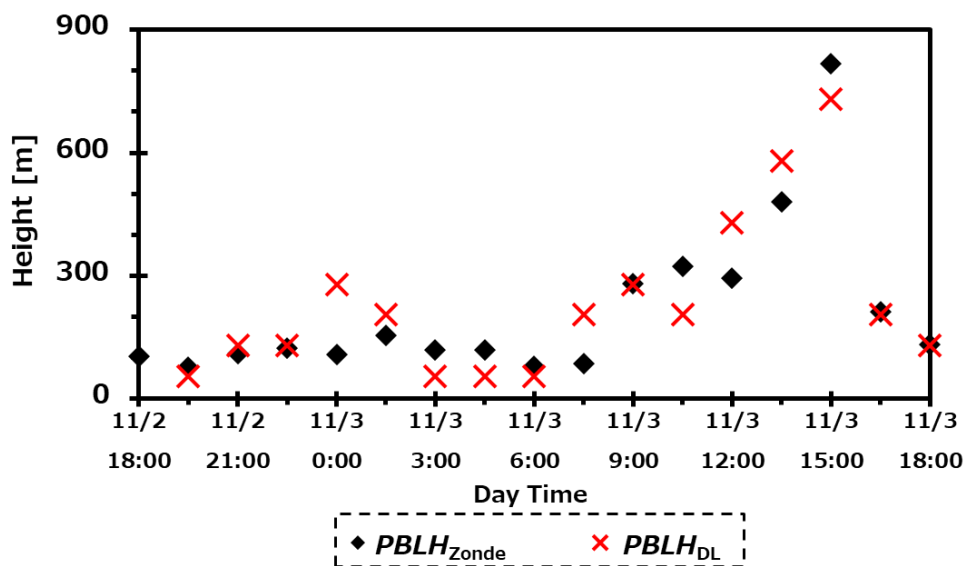


図 3-6 2018年11月2日18時～3日18時における $PBLH_{Sonde}$ および $PBLH_{DL}$ の時系列

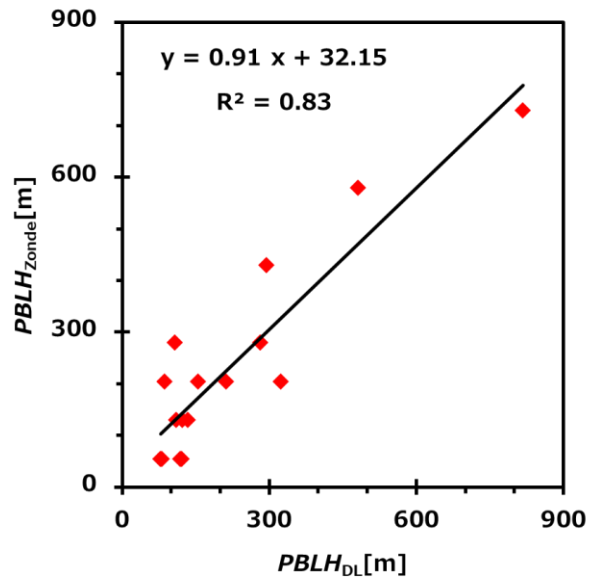


図 3-7 $PBLH_{Sonde}$ および $PBLH_{DL}$ の散布図

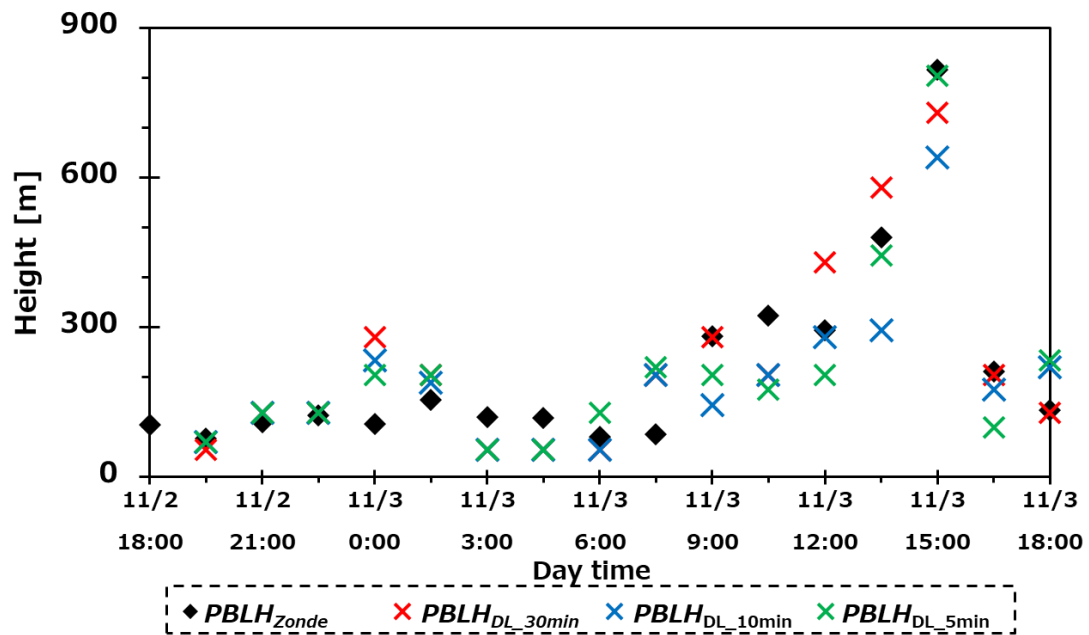


図 3-8 2018 年 11 月 2 日 18 時～3 日 18 時における $PBLH_{Sonde}$ および $PBLH_{DL}$ の時系列。
 ここで、 $PBLH_{DL_{30min}}$ は $PBLH_{DL}$ 算出のための σ_w^2 に 30 分間のデータ、 $PBLH_{DL_{10min}}$ は 10 分間、 $PBLH_{DL_{5min}}$ は 5 分間のデータをそれぞれ使用した

3.2.2 走査型 DL の VAD 3 次元風に対する傾斜補正手法の検証

(a) 検証実験の概要

2018 年 1 月 23 日から熊谷市役所において、DL を用いた都市境界層の連続定点観測が実施されている。そこで本研究では、2018 年 7 月 23 日に熊谷市役所の周辺において自動車による移動 DL 観測を実施し、観測データに対して 3.1.4 項において提案した傾斜補正を施した。その上で、定点観測と移動観測の結果を比較し傾斜補正手法を検証した。

検証は自動車が停車中のデータのみを使用することとし、熊谷市役所から半径 150 m 範囲内の計 4 地点においてそれぞれ約 10 分間停車観測し、その補正結果を固定観測と比較することとした。図 3-9 は観測位置を示す。4 地点の停車観測を合わせた時間は、各地点間の移動も含めて約 1 時間である。その観測を、7 月 23 日の 13 時 04 分～14 時 16 分 (No. 1)、16 時 27 分～17 時 36 分 (No. 2)、21 時 36 分～22 時 36 分 (No. 3) の計 3 回実施した。また LR-S1D2GA は、ソフトウェア起動時におけるセンサー正面の方位を方位角 0° に設定する。そのため、各停車観測時におけるセンサー正面の方位を、コンパスグラス (HB-7M : 石神井計器製作所) により計測し、データ解析時に補正した。

また、移動観測と比較するための固定観測は、観測モードが PPI 走査、各高度における観測データの平均間隔が約 60 秒である以外は、移動観測と同様の設定とした (表 3-2)。さらに、地上気象観測データとして熊谷市役所から西北西方向へ約 800 m の位置にある熊谷地方気象台の露場データを使用した。

観測を実施した 2018 年 7 月 23 日の 9 時における地上天気図を図 3-10 に示す。7 月 23 日は全国的に高気圧に覆われ、気象庁の気温観測地点 242 地点で日最高気温 35°C 以上の猛暑日となった。さらに、熊谷地方気象台においては日本国内観測史上 1 位の 41.1°C が記録された。熊谷地方気象台における気象要素の時系列を図 3-11 に示す。7 月 23 日は降水がなく、日積算日照時間は 13.4 時間であった (図 3-11a)。気温は日出頃から上昇し、14 時 16 時に日最高気温が出現した。その後、日没時刻まで急激に低下し、日最低気温が出現する日出前まで徐々に低下した。平均気温は 33.5°C (8 月の平年値は 26.8°C) であった。風速は時間とともに徐々に大きくなっていくが、正午過ぎを境に急激に低下した (図 3-11b)。また、風向は 14 時頃まで西～北西寄りであったが、その時刻を境に急変し 15 時以降は東～南寄りの風が吹いた。日最大風速は、12 時 9 分に 7.2 ms^{-1} (北西) が記録された。



図 3-9 観測位置. 赤丸が移動 DL, 赤星が固定 DL を示す

表 3-2 本研究における DL の主な観測設定

距離分解能	75m
観測範囲	75~1,500m
観測モード	PPI (固定観測), VPPI (移動観測)
ビーム仰角	69°, 90°
方位角走査速度	10.0° / s
パルス積分回数	8,000

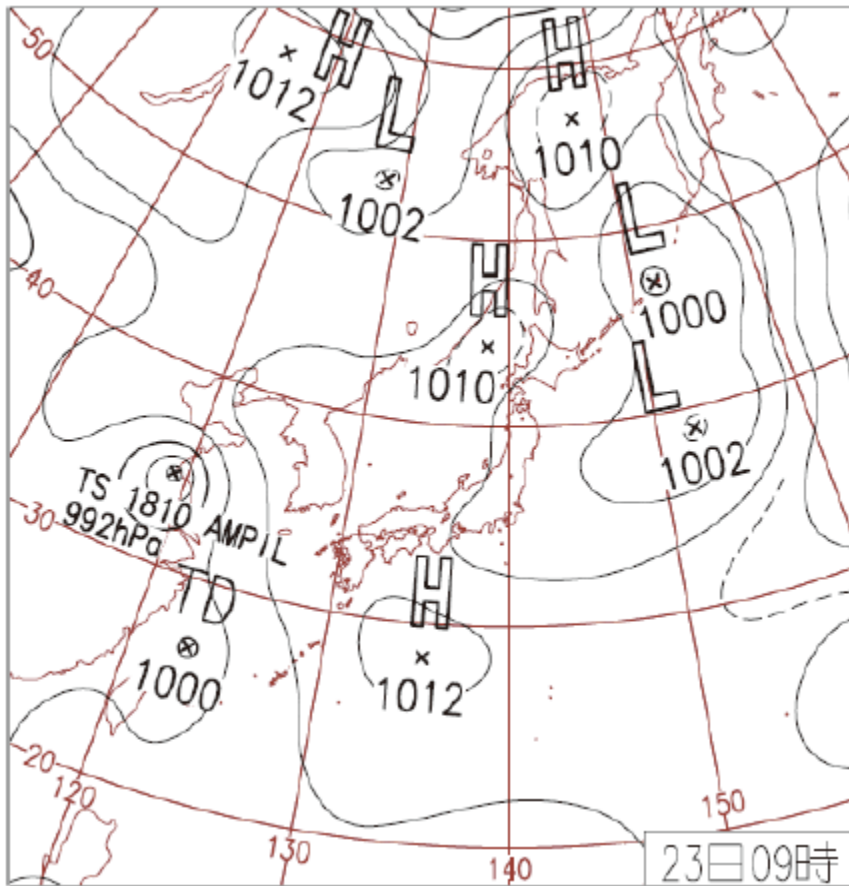


図 3-10 2018 年 7 月 23 日 9 時における地上天気図（気象庁 HP「日々の天気図」より）

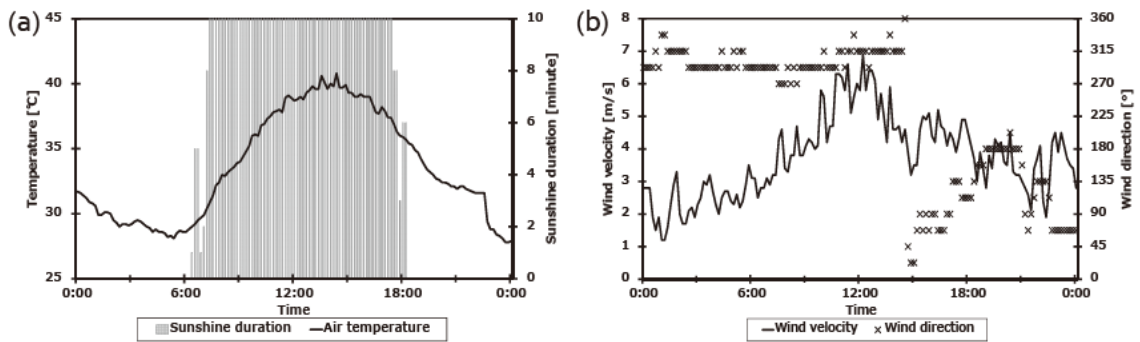


図 3-11 2018 年 7 月 23 日における (a) 気温および日照時間, (b) 風向および風速の日変化。使用データは熊谷地方気象台の 10 分値

(b) 固定 DL の観測結果

本節では、固定 DL 観測によって得られた結果を示す。図 3-12 は、熊谷市役所に設置された固定 DL の観測により得られた、7 月 23 日 0 時から翌日 0 時における風および SNR の時間-高度断面図を示す。風および SNR は前 30 分間のデータを平均した値を使用している。VAD 法によって風速が出力される SNR 7dB 以上の領域は、0 時から 6 時において地上から高度 300 m 前後であるが日出とともに上昇する。この結果は、日出とともに熱的混合が生じ、混合層の発達に伴ってエアロゾルが上層へ拡散する過程を捉えているものと推測される。ただし、正午過ぎから 14 時頃の時間帯において、地上から高度 600 m 前後の層の SNR が急激に低下する。この時間帯は、DL の移動観測 (No. 1) が実施された時刻である。その後、SNR 7dB 以上の領域は 18 時前後に高度 1000 m に達し、それ以降は徐々に低下する傾向を示す。

出力された水平風は、0 時から正午過ぎにおいて北西寄りの風向を示す (図 3-12a)。また、水平風速は 8 時頃から大きくなり、13 時 00 分の高度 350 m において日最大風速 14.7 ms^{-1} (北西) が示される。14 時以降は風向が東～南寄りへ急変し、それ以前と比較して風速も非常に小さくなる。0 時から 6 時頃における地上から高度 300 m 前後までの鉛直風は、風速が非常に小さく ($\pm 0.1 \text{ ms}^{-1}$ 前後)、高度によって正負も様々である (図 3-12b)。ただし、日出以降は上昇流傾向が強くなり、風速も大きくなる。この時刻は、SNR が上層へ拡散する時刻と整合的である。正午から 13 時頃における高度 400 m 以下では、やや強い下降流傾向が示される。ただし、14 時以降は地上から上層まで概ね上昇流傾向が示されている。

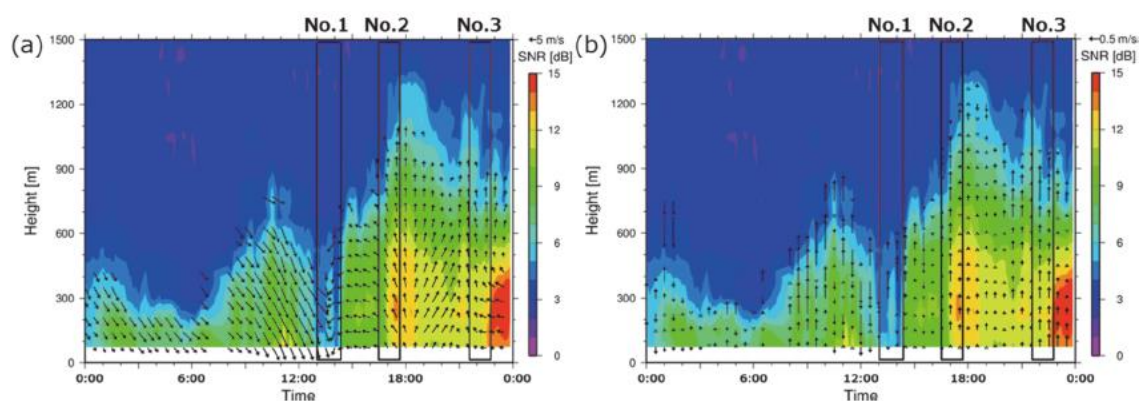


図 3-12 固定 DL により得られた 2018 年 7 月 23 日における風および SNR の時間-高度断面図。(a) が水平風、(b) が鉛直風を示す

(c) 移動 DL の観測結果

ここでは、移動 DL の 3 次元風に対して傾斜補正を施した結果を示し、補正前後の値を比較する。ただし、移動 DL 観測の No. 1 が実施された時間帯は SNR が非常に小さくなり、VAD 3 次元風はほとんど検出されなかった。そのため、これ以降は No. 2 および No. 3 の観測結果のみを使用することとした。表 3-3 は、No. 2 および No. 3 観測における各地点の計測時間、コンパスグラスにより計測された DL 方位角 0° および傾斜角を示す。地点④は、その他地点と比較して急斜面であったため、自動車を斜面に対して上向き（地点④ I）と下向き（地点④ II）に停車させて観測した。ちなみに、今回の移動観測では、DL が最大で 3.74° 傾斜していた。

図 3-13 は、移動 DL により観測された VAD 3 次元風の鉛直プロファイルを示す。ここでは、No. 2 および No. 3 の時間帯において、それぞれ 4 地点で観測された風を平均した。また、各高度の VAD 3 次元風に対して傾斜補正前の値と補正後の値をそれぞれ示した。No. 2 の時間帯における傾斜補正後の水平風速は、地上から高度 600 m までが約 7 ms^{-1} で一定の値を示し、それより上層では高度とともに小さくなった。No. 2 における傾斜補正後の水平風向は、地上から上層まで $100^\circ \sim 130^\circ$ でほぼ一定の値を示す。No. 3 の時間帯における傾斜補正後の水平風速は、地上から上層へ向けて徐々に値が大きくなり、高度 700 m で最大値 7.5 ms^{-1} を示す。それより上層では高度とともに小さくなった。No. 3 における傾斜補正後の水平風向は、地上から上層まで $140^\circ \sim 160^\circ$ でほぼ一定の値を示す。No. 2 の時間帯における鉛直風は、地上から上層まで上昇流傾向を示し、その傾向は地上から上層へ徐々に強まっている。No. 3 の時間帯においても地上から上層まで上昇流傾向であるが、高度 600 m 前後に極大値が示される。

ここで、傾斜補正前後の値を比較する。水平風の鉛直プロファイルの特徴は、No. 2 および No. 3 の時間帯ともに傾斜補正前後で違いはない。両者の差の絶対値は全高度の平均値で No. 2 が水平風速 0.01 ms^{-1} 、水平風向 3.0° 、No. 3 が水平風速 0.06 ms^{-1} 、水平風向 3.0° であった。鉛直風に関しても、傾斜補正前後で鉛直プロファイルの特徴に大きな違いは生じていない。しかしながら、両者の差の絶対値は水平風と比較して大きく、全高度の平均値で No. 2 が 0.15 ms^{-1} 、No. 3 が 0.06 ms^{-1} を示す。

続いて、補正前後の差が観測値に対してどの程度の割合を占めるのかを検討する。図 3-14 は各高度における観測値の絶対値に対する傾斜補正前後の差の絶対値の割合を示す。水平風速および風向に対する傾斜補正の割合は非常に小さく、風速が 1.0% 以下、風向が 3.0% 以下を示した。一方、鉛直風に対する傾斜補正の割合は相対的に大きく、平均で 15.1% を示す。特に No. 2 の時間帯における高度 150 m の割合は大きく、31.1% を示す。

以上のように、傾斜補正前後において水平風の観測値は大きく変化しないことが示された。一方、鉛直風の値は観測値に対して最大 30% の変化が生じることが示された。

表 3-3 移動 DL における各地点の計測時間, 方位角および傾斜角

(a)	地点①	地点②	地点③	地点④ I	地点④ II
計測時間	16 : 27~16 : 38	16 : 40~16 : 51	16 : 52~17 : 02	17 : 03~17 : 13	17 : 03~17 : 13
DL方位角 0°	207°	264°	227°	28°	199°
傾斜角 x	-0.05°	-0.04°	-0.18°	-0.82°	$+1.03^\circ$
傾斜角 y	-0.19°	-1.85°	-1.18°	$+2.08^\circ$	-3.07°

(b)	地点①	地点②	地点③	地点④ I	地点④ II
計測時間	21 : 36~21 : 46	21 : 50~22 : 03	22 : 05~22 : 15	22 : 16~22 : 25	22 : 26~22 : 36
DL方位角 0°	208°	190°	7°	37°	197°
傾斜角 x	$+0.03^\circ$	-0.28°	-0.36°	-0.57°	$+0.61^\circ$
傾斜角 y	-0.04°	-0.66°	-0.30°	$+1.91^\circ$	-3.74°

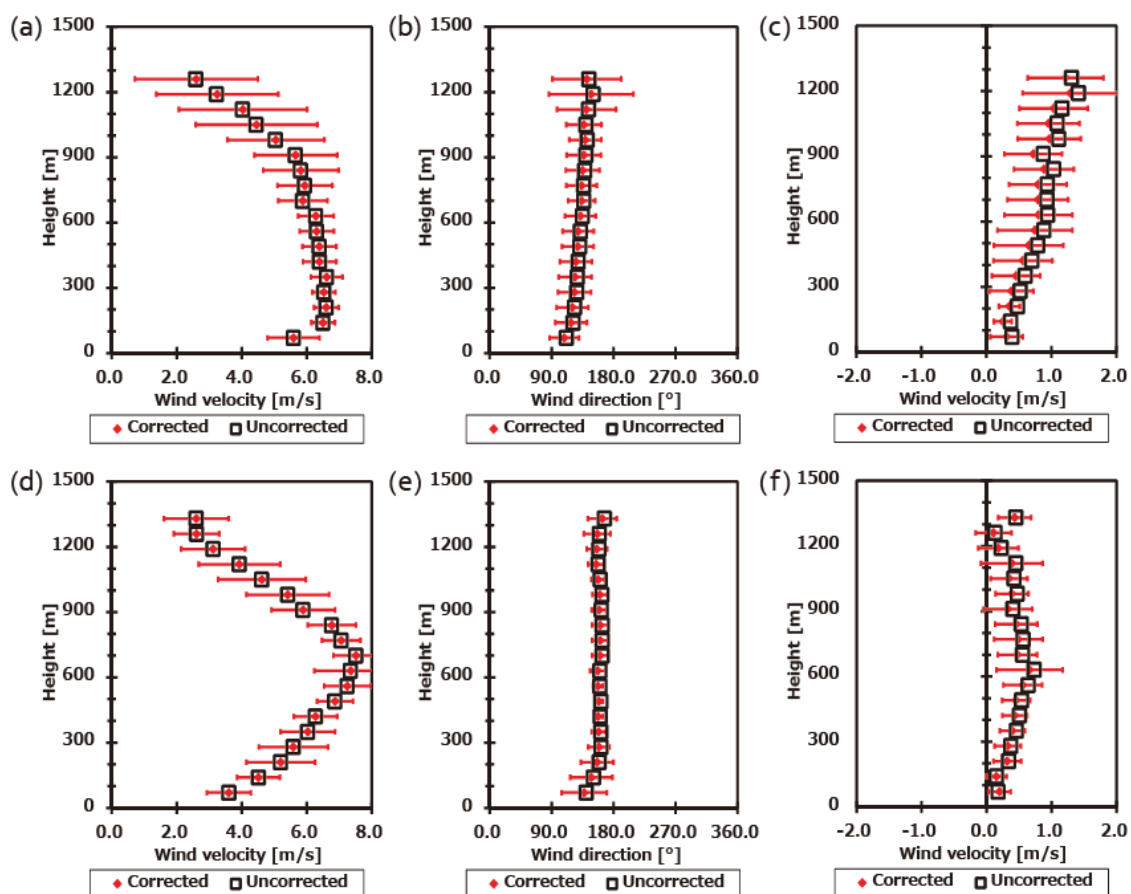


図 3-13 No. 2 (上段) および No. 3 (下段) の時間帯における移動 DL により得られた VAD 3 次元風の鉛直プロファイル. (a) (d) が水平風速, (b) (e) が水平風向, (c) (f) が鉛直風を示す. また, エラーバーは各時刻の 4 地点における各高度の標準偏差を示す

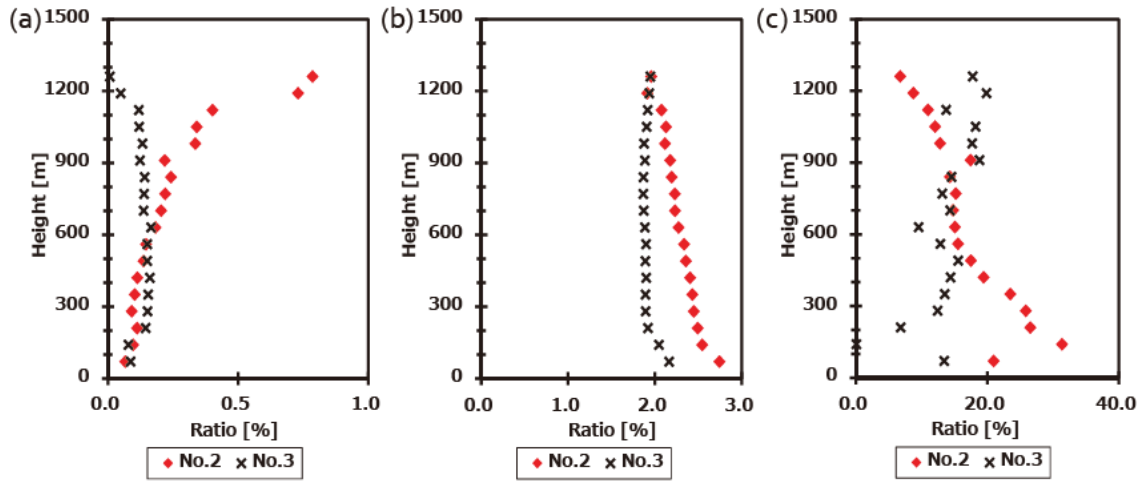


図 3-14 各高度における観測値の絶対値に対する傾斜補正前後の差の絶対値の割合。(a) が水平風速, (b) が水平風向, (c) が鉛直風速を示す

(d) 移動および固定 DL の比較

最後に、移動および固定 DL の観測値を比較することで、本研究で提案した傾斜補正手法を検証する。ただし、ここではNo.2 およびNo.3 の観測において、VAD 3次元風速が十分に出力された地上～高度 650 m までの値のみを使用した。図 3-15 は、各高度における移動 DL の VAD 3次元風から固定 DL の値を引いた差を示す。ここでは、No.2 およびNo.3 の結果を平均した。また、図 3-13 と同様に移動 DL の VAD 3次元風は傾斜補正前後の値を用いた結果をそれぞれ示した。傾斜補正後の水平風速における移動および固定 DL の差の絶対値は、全高度の平均値で 0.3 ms^{-1} を示した。この値は、傾斜補正前の差と比較して 0.1 ms^{-1} 小さい。また、高度別では高度 75 m で最も大きいものの ($+0.9 \text{ ms}^{-1}$)、上層へ向かうにつれて差が小さくなる傾向が示された。傾斜補正後の水平風向における移動および固定 DL の差の絶対値は、全高度の平均値で 13.1° を示した。この値は、傾斜補正前との差と比較して 0.1° 差が小さい。また、高度別の値に違いは少なく、差の鉛直プロファイルに大きな特徴は認められない。一方、傾斜補正後の鉛直風速における移動および固定 DL の差の絶対値は、全高度の平均値で 0.2 ms^{-1} を示した。この値は、傾斜補正前との差と比較して 0.1 ms^{-1} 小さい。高度別では上層へ向かうほど差が大きくなる傾向が示された。さらに、高度 150 m の値は傾斜補正をすることにより、差の正負が入れ替わることが示された。

ここで、移動 DL および固定 DL の間に差が生じた要因について考察する。水平風速は、地上付近のみに約 1 ms^{-1} の風速差が生じていた。これは、固定 DL を設置した場所が熊谷市役所と隣接していたため、風速が弱化したものと推測される。特に、南側は 30 m 程度の建物が建っており、その影響を受けた可能性が高い。これは、風向別で解析をすることで検証できるが、本研究で比較された時間帯は風向が東～南に偏っていたため、本観測のデータのみでの検証は困難である。

以上のように、移動 DL の 3次元風に本研究で提案した傾斜補正手法を施すことによって、固定 DL の観測値との差が小さくなることが示された。特に、鉛直風速に対しては、観測値に対する補正值の割合が大きいことが示唆された。このことから、本研究で提案した傾斜補正手法の有用性が検証された。

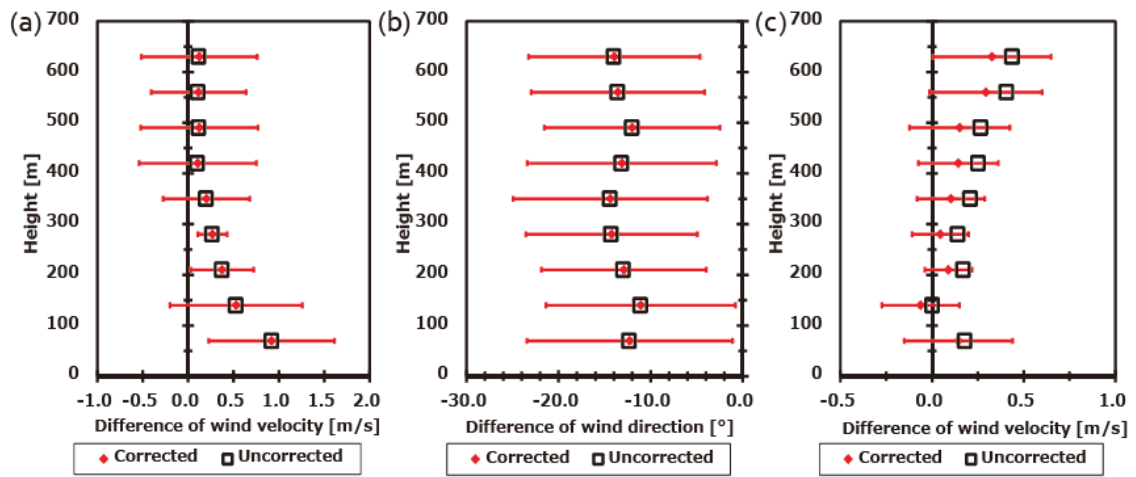


図 3-15 各高度における移動 DL の VAD 3 次元風から固定 DL の値を引いた差. (a) が水平風速, (b) が水平風向, (c) が鉛直風速を示す. また, エラーバーは各時刻の 4 地点における各高度の標準偏差を示す

3.3 ドップラーライダーの移動観測による都市境界層構造の把握

3.3.1 移動観測の概要

図 3-16 は移動観測のルートを示す。本研究では、熊谷市街地を南北方向へ縦断するルート①と、東西へ横断するルート②を設定した。ルート①は、南または北側の郊外 (N1 または N10) を出発地点として、市街地を通過した後、北または南側の郊外 (N10 または N1) を到着地点とする。ルート②は、西または東側の郊外 (E1 または E9) を出発地点として、市街地を通過した後、東または西側の郊外 (E9 または E1) を到着地点とする。また、N1～N10 および E1～E9 の駐車スペースにおいてそれぞれ 2～3 分間程度停車し、DL の観測を実施した。走行距離は、ルート①が約 9.6 km、ルート②が約 8.3 km である。

表 3-4 は、移動型 DL 観測の実施日と DL 設定の詳細を示す。観測は、2018 年 4 月 20 日～2019 年 9 月 13 日の期間において、ルート①を 28 回、ルート②を 17 回の計 45 回実施した。ルート①の走行時間は最長で 1 時間 30 分、最短で 49 分、平均±標準偏差で 1 時間 2 分±10 分であった。一方、ルート②は最長で 1 時間 14 分、最短で 41 分、平均±標準偏差で 55 分±9 分であった。走行時間に差が生じた要因としては、各事例で交通状況が異なることや、走行途中で計測機器の調整が必要となる場合があったことが挙げられる。DL の観測範囲や距離分解能は、各事例によって設定が異なる。観測範囲は、最大で 60～630 m、最小で 60～345 m に設定した。このように設定した理由は、各事例でエアロゾル量やその分布に差が生じていたためである。DL の計測は大気中に浮遊するエアロゾルを利用する。エアロゾル量やその分布は日々の大気状態により大きく異なるため、DL の観測範囲や距離分解能を同様に設定した場合、事例によっては後方散乱強度が低下し、観測の質も低下してしまう。このような理由から、各事例で観測範囲や距離分解能の設定を変更し、観測の質を一定以上に保つこととした。なお、観測の主目的である夜間の都市境界層は、大都市の事例でも地上から高度 300 m 前後であるため、今回設定した観測範囲であれば観測に問題がないと判断した。

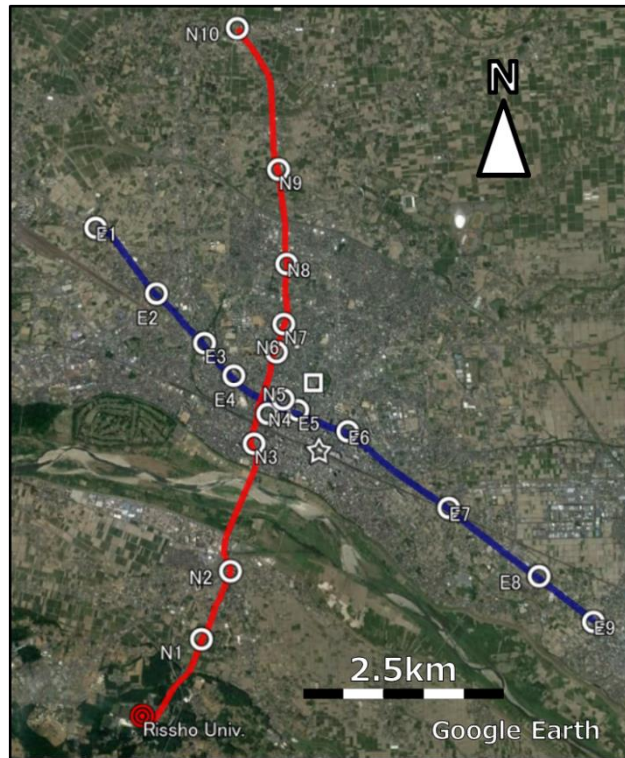


図 3-16 移動型ドップラーライダーの観測ルート．赤実線は南北方向へ縦断するルート①，青実線は東西方向へ横断するルート②，◎は停車観測地点を示す

表 3-4 DL 移動観測の実施日時と設定の詳細

No.	Start time	Span	Route No.	Mode	Elevation	Azimuth	Distance resolution	Time resolution	Range
1	18/4/20 18:37	1:13	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
2	18/4/20 19:48	0:58	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
3	18/4/20 21:11	0:54	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
4	18/4/20 22:03	0:53	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
5	18/4/21 0:06	0:54	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
6	18/4/21 0:55	0:50	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
7	18/4/21 2:56	0:51	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
8	18/4/21 3:43	0:49	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
9	18/5/11 21:13	1:06	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
10	18/5/11 22:15	0:55	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
11	18/5/11 23:40	0:42	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
12	18/5/12 0:52	0:55	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
13	18/5/12 1:43	1:09	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
14	18/5/12 3:10	1:13	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
15	18/5/25 21:12	1:07	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
16	18/5/25 22:15	0:57	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
17	18/5/25 23:40	0:43	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
18	18/5/26 0:55	0:54	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
19	18/5/26 1:44	0:54	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
20	18/5/26 3:12	0:40	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	30m	20s	60~630m
21	18/7/23 22:46	0:59	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
22	18/8/29 18:25	1:14	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
23	18/8/29 19:53	0:58	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
24	18/8/29 21:19	0:56	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
25	18/8/29 22:24	0:47	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
26	18/12/21 18:45	1:30	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
27	18/12/21 20:27	1:06	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
28	18/12/21 21:39	0:52	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
29	18/12/21 22:39	0:58	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
30	19/2/26 18:01	1:02	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
31	19/2/26 19:14	1:09	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
32	19/2/26 21:01	1:14	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
33	19/2/26 22:24	0:51	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
34	19/2/26 23:19	0:45	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
35	19/2/27 0:12	1:01	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
36	19/2/27 1:33	0:52	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
37	19/2/27 2:34	1:09	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	15m	20s	60~345m
38	19/5/30 20:47	1:17	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	25m	20s	75~550m
39	19/5/30 22:12	0:55	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	25m	20s	75~550m
40	19/5/30 22:54	0:55	②	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	25m	20s	75~550m
41	19/5/30 23:57	1:03	①	VPPI	69°,90°	-90°~+90°	25m	20s	75~550m
42	19/9/12 20:52	1:01	①	PPI	69°	-90°~+90°	28m	20s	56~616m
43	19/9/12 22:01	0:54	②	PPI	69°	-90°~+90°	28m	20s	56~616m
44	19/9/12 23:03	1:04	②	PPI	69°	-90°~+90°	28m	20s	56~616m
45	19/9/13 0:16	1:14	①	PPI	69°	-90°~+90°	28m	20s	56~616m

3.3.2 事例解析

ここでは、移動型 DL 観測を実施した事例の中から、連続にルート①とルート②を走行しており、季節が統一されている 2018 年 5 月 11 日および 5 月 25 日、2019 年 5 月 30 日の 3 事例を解析する（表 3-4 を参照）。

図 3-17 は、(a)2018 年 5 月 11 日、(b)5 月 25 日、および(c)2019 年 5 月 30 日の 9 時における日本付近の地上天気図を示す。各日で低気圧や高気圧の位置に違いはあるものの、関東付近は移動性高気圧の支配下にあり、天気は概ね晴天であった。また、観測日当日から翌日にかけて降水はなかった。なお、各日の日出および日没時刻は、2018 年 5 月 11 日が 4 時 39 分および 18 時 37 分、25 日が 4 時 29 分および 18 時 48 分、2019 年 5 月 30 日が 4 時 27 分および 18 時 52 分であった。

図 3-18 は、(a)2018 年 5 月 11 日、(b)5 月 25 日、および(c)2019 年 5 月 30 日の 9 時から翌日 9 時における熊谷地方気象台の気温および日照時間の時系列を示す。5 月 11 日 9 時から翌日 9 時における最高気温および最低気温、平均気温は、24.5°Cおよび 11.4°C、18.2°Cを示す。5 月 25 日 9 時から翌日 9 時においては、29.4°Cおよび 18.0°C、23.8°Cを示す。2019 年 5 月 30 日 9 時から翌日 9 時においては、28.2°Cおよび 17.6°C、22.1°Cを示す。また、各日の日積算日照時間は、2018 年 5 月 11 日が 12.6 時間、5 月 25 日が 10.9 時間、2019 年 5 月 30 日が 13.3 時間であった。

図 3-19 は、(a)2018 年 5 月 11 日、(b)5 月 25 日、および(c)2019 年 5 月 30 日の 9 時から翌日 9 時における熊谷地方気象台の風速および風向の時系列を示す。2018 年 5 月 11 日と 25 日の事例は、日中における風速に違いはあるものの時系列は概ね類似している。両日ともに、日中は南東から南寄りの風向であり、15 時頃に風速のピークが出現する。その後は、日没前後から徐々に風速が低下し、それに伴って東から北寄りの風向に変化する。さらに、23 時頃には風向が北西から北寄りへ変化し、日中とは真逆を示す。一方、2019 年 5 月 30 日の事例は、日中から夜間の風系へ移行する変化が大きく異なる。日中は他事例と同じく南東から南寄りの風向を示すが、風速のピークの時刻は日没後に出現する（19 時 40 に最大値 5.6 ms⁻¹）。風向は 23 時頃まで南東から南寄りであり、その後風速の低下とともに南南西から西寄りに変化する。

図 3-20 は、2018 年 5 月 11 日における移動 DL 観測で得られた σ_w^2 および水平風の緯度-または経度-高度断面図を示す。ここで、黒の実線は $PBLH_{DL}$ を表す。なお、ルート①中の立正大学熊谷キャンパスでも DL 観測は実施したが、この地点は高台となっており他の地点と比較して標高が約 20 m 高いため、結果の図中には参照値として示すものの議論からは除外することとした。この日は、ルート①を往復した後、ルート②を走行して観測し、それを 2 回繰り返した。ただし、表 3-4 の No.14 にあたる 12 日 3 時 10 分からの観測は、機器操作の誤りにより十分なデータが得られなかったため、観測結果から除外した。全走行の観測結果において、高度 300 m 以上の上層は一部を除いて σ_w^2 が 1.5 m²s⁻² 以下を示し、下層と比較して小さい。ルート①の $PBLH_{DL}$ は、都市部が周辺郊外と比較して高く、N4~N6 までの中心市街地に位置する地点の高度が最高値を示す（図 3-20a, b, d, e）。この特徴は、気温分布において高温域が現れた分布と特徴が一致する（図 3-20b）。ルート①における

$PBLH_{DL}$ の最高値は、No.13 の 12 日 1 時 43 分から観測された走行における N4 の 224 m であった。一方、ルート②を走行した No.11 において、 $PBLH_{DL}$ の最高値 224 m は E6 および E7 で示された (図 3-20c)。この特徴は、気温分布において高温域が現れた分布と特徴が一致する。ただし土地利用に着目すると、E6 はともかく、E7 周辺は住宅などが広がっているが高層建築物はほとんどない。さらに、E6 および E7 の次に $PBLH_{DL}$ が高いのも E8 であり、中心市街地からは離れている。つまり、No.11 において $PBLH_{DL}$ の高い領域は、中心市街地よりも東側で出現している。

図 3-21 は、2018 年 5 月 25 日における σ_W^2 および水平風の緯度-または経度-高度断面図を示す。この日も 11 日と同じく、ルート①を往復した後、ルート②を走行して観測し、それを 2 回繰り返した。ルート①における $PBLH_{DL}$ は 11 日の結果と類似した傾向を示しており、N3~N5 の都市部において最高高度が示される (図 3-21a, b, d, e)。これと同様に、ルート②における $PBLH_{DL}$ も、最高高度が示されたのは E6 および E7 であり、11 日の結果と類似している (図 3-21c, f)。ただし、No.19 および No.20 の σ_W^2 は高度 300 m 以上の上層においても値が大きくなっており、他の時間と比較して異なる特徴を有する。 $PBLH_{DL}$ についても、最高高度は都市部で出現するものの、N2 や N10, E2, E9 などでも高い高度が示される。この要因の一つとして、走行時間中における風系の変化が挙げられる。ここで、No.19 および No.20 における各地点の水平風の高度分布に着目する。No.19 において、N1 や N2 では最下層から 200 m 前後の風速はそれより上空と比較して大きく風向は北から東寄りであるが、N10 は全層において風向は南東寄りであり風速の変化も小さい。また No.20 においては、各地点で風向が大きく異なっており、下層から高度 200 m の層においても南東から西まで風向が変化する。さらに、No.20 の走行時間とほぼ同時刻における (3 時 20 分~4 時 00 分) 熊谷地方気象台の風向は、北西から東北東まで 112.5° 変化している。これらのことから、No.19 および No.20 において、 σ_W^2 の分布が他の事例と比較して大きく異なった要因には、走行時間中における風系の変化が示唆される。また、No.19 および No.20 の時間帯における熊谷周辺のアメダスの風系は、熊谷地方気象台と同様に北から東寄りの風向が確認されたため、風系の変化は本項で議論している一つの都市スケールの現象より大きい。よってその要因は、都市 UHI による局地循環の影響である可能性は非常に低いと推測される。

図 3-22 は、2019 年 5 月 30 日における σ_W^2 および水平風の緯度-または経度-高度断面図を示す。この日は、ルート①を北方向へ走行した後、ルート②を往復し、最後にルート①を南方向へ走行して観測した。この日の観測結果は、2018 年 5 月 11 日および 25 日と比較して大きく特徴が異なる。No.38 の 20 時 47 分における σ_W^2 は、下層から高度 500 m まで、一部を除き $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 以上を示しており、 $PBLH_{DL}$ も観測範囲の上限に示される (図 3-22a)。この要因として、日没時刻と海風の 2 点に着目する。No.38 の観測開始時刻は 20 時 47 分であり、日没時刻から 1 時間 55 分後であった。これは、ここまで示した 3 事例の中で最も日没時刻に近かったため、日中の日射によって形成された混合層が残存していたことが推測される。さらに、No.38 の走行時間中は熊谷地方気象台において 23 時頃まで南東から南寄りの風が非常に強かった。これは上述の通り、他の 2 事例では見られなかった特徴で

ある。移動 DL で観測された水平風も、ほとんどの地点の全層において 5 ms^{-1} 程度の南東から南寄りの風が示された。同時刻における関東のアメダスの風系を確認したところ、東京湾から群馬県南部の地点まで南東から南寄りの風が吹走していた。つまり、5月30日の熊谷周辺は23時頃まで海風が吹走していたことが示された。以上2点の要因により、No.38の結果が他と比較して大きく異なる特徴を示したものと推測される。続いて、No.39の22時12分からの観測において、都市部の $PBLH_{DL}$ が周辺郊外より高くなっているものの、E5やE6の高度は400mを超えており、No.38と同様の特徴が示された。一方、No.40やNo.41の走行時間には強い海風が吹き終わっており、高度300m以上の上層に大きい σ_W^2 も示されない。No.40およびNo.41における $PBLH_{DL}$ の最高高度は、高度200mがE4および高度224mがN8にそれぞれ示された。この特徴は、気温分布において高温域が現れた分布と特徴が一致する(図3-22b)。この出現位置は、2018年5月11日および25日の事例とは大きく異なっている。

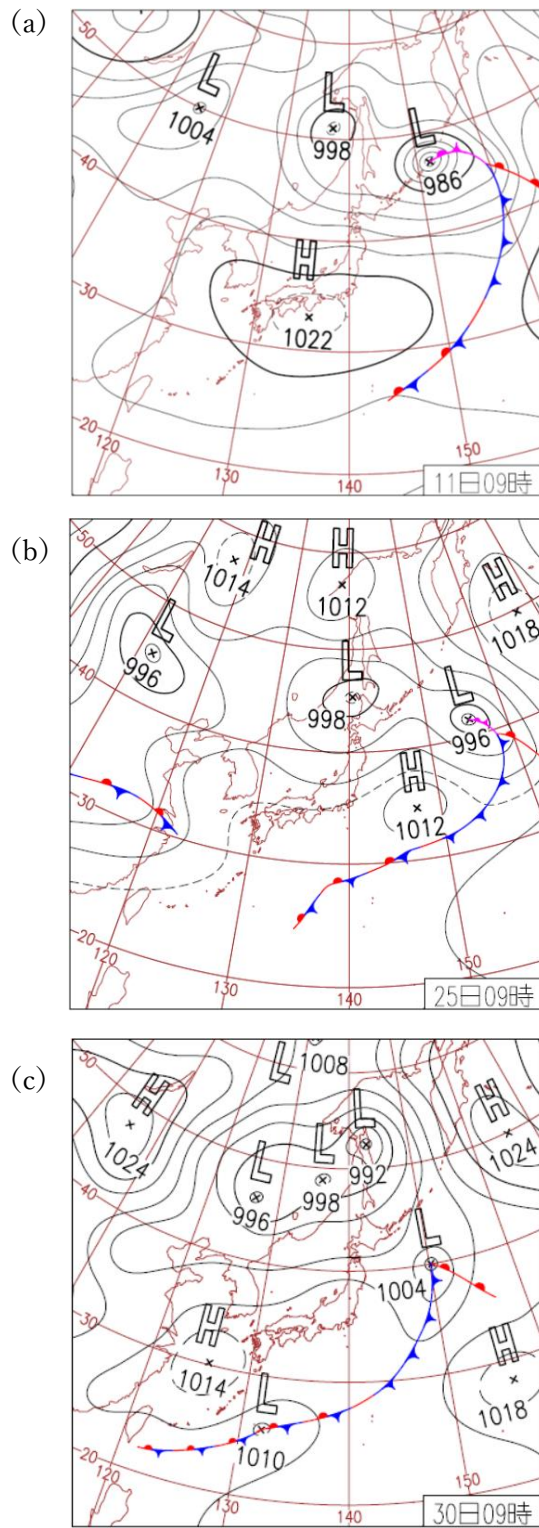


図 3-17 (a)2018年5月11日, (b)5月25日, および(c)2019年5月30日の9時における日本付近の地上天気図

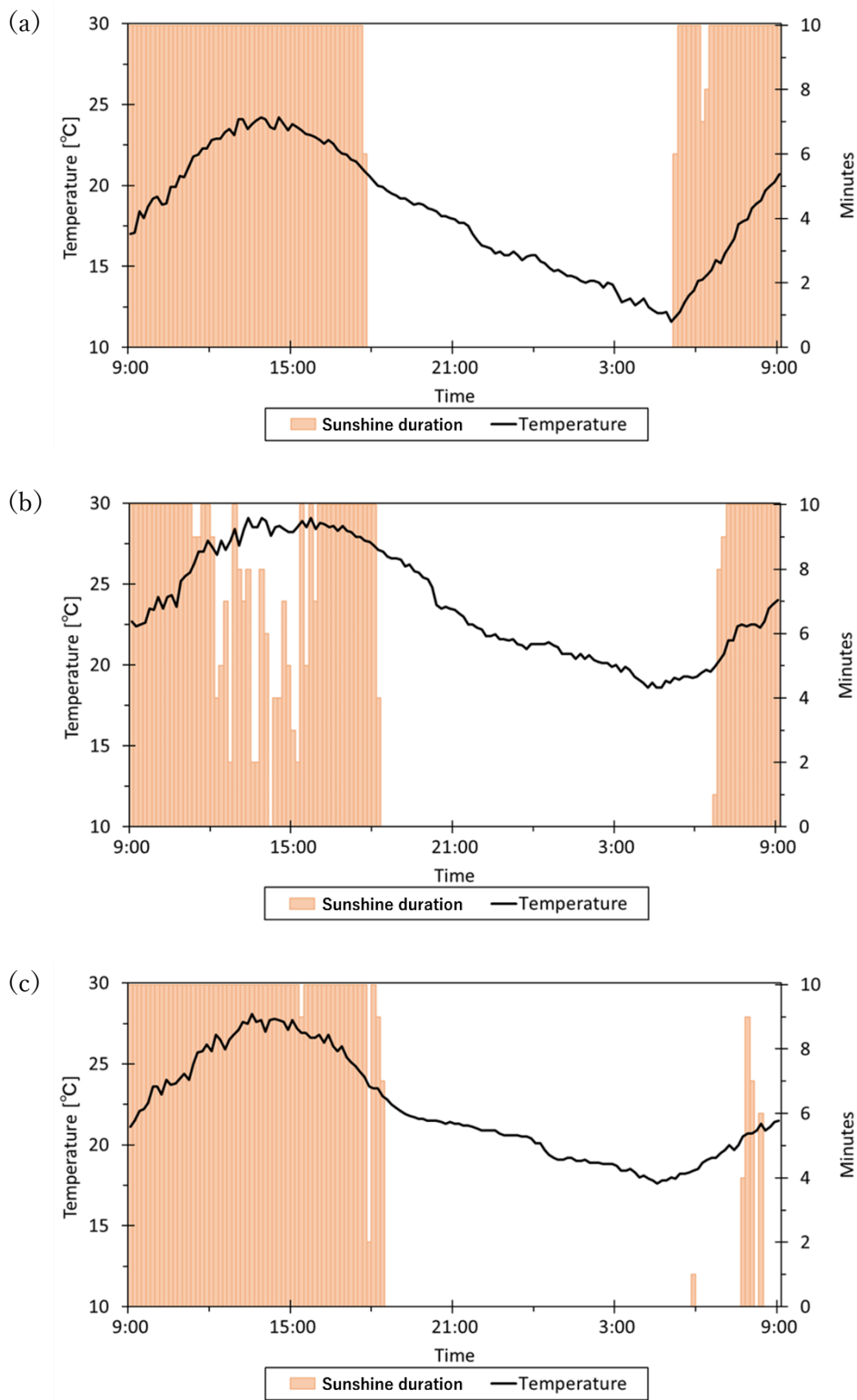


図 3-18 (a)2018年5月11日, (b)5月25日, および(c)2019年5月30日の9時から翌日9時における熊谷地方気象台の気温[°C]および日照時間[分]の時系列

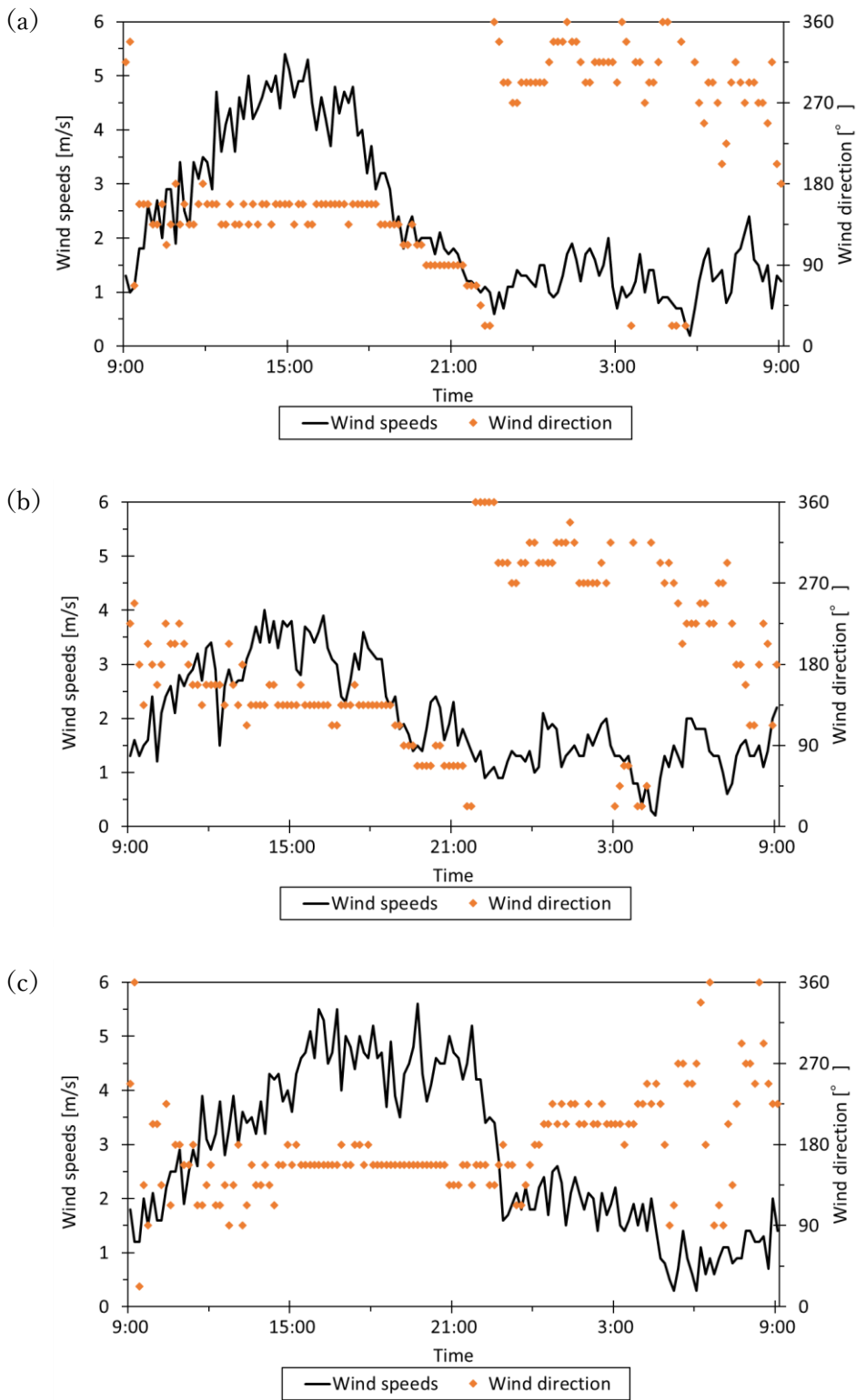


図 3-19 (a)2018年5月11日, (b)5月25日, および(c)2019年5月30日の9時から翌日9時における熊谷地方気象台の風速[ms^{-1}]および風向[$^{\circ}$]の時系列

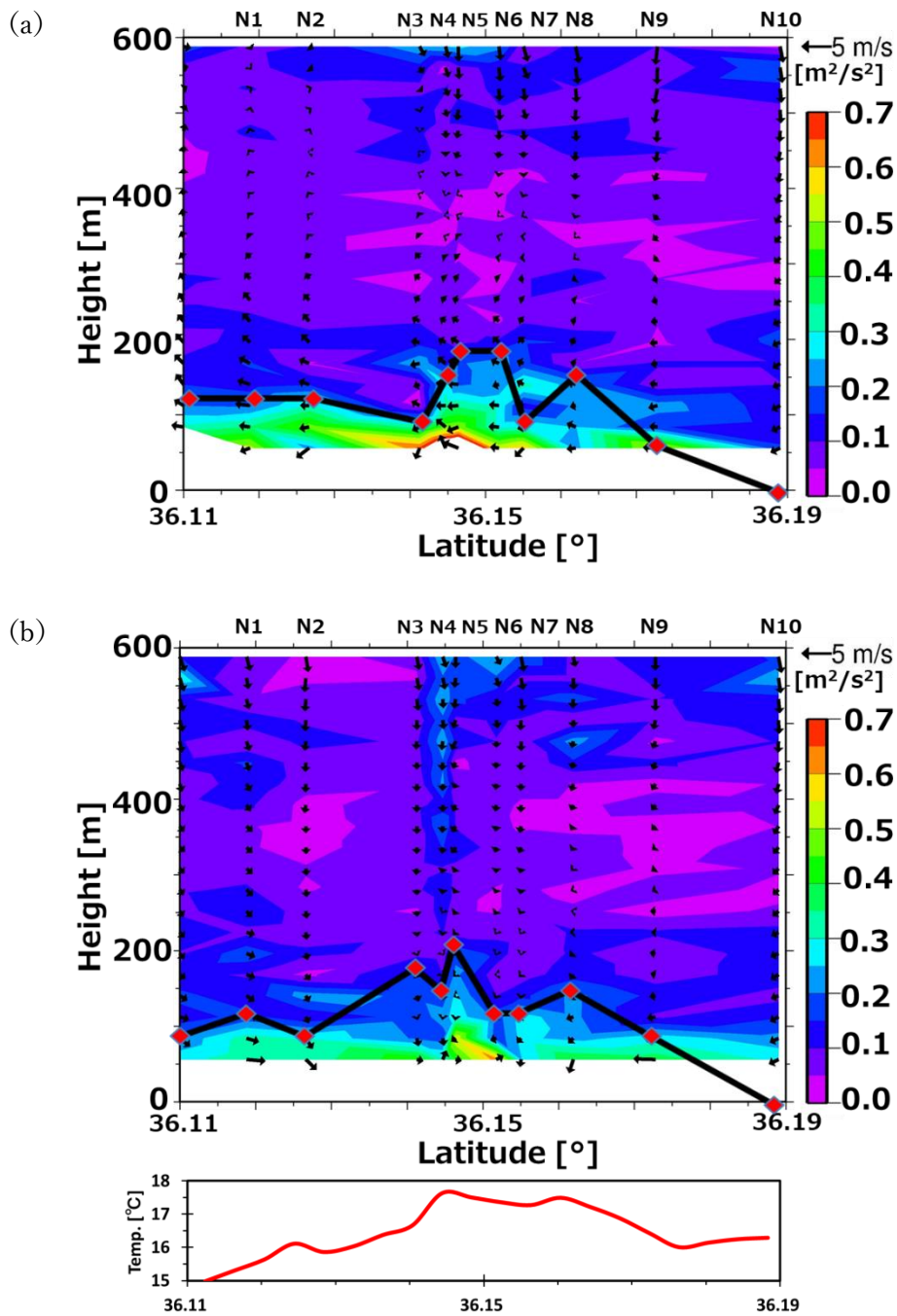


図 3-20 ドップラーライダーの移動観測で得られた σ_w^2 および水平風の緯度-または経度-高度断面図. (a)は 2018 年 5 月 11 日 21 時 13 分~22 時 19 分のルート① (表 3-4 の No.9), (b)は 22 時 15 分~23 時 10 分のルート① (No.10), (c)は 23 時 40 分~12 日 0 時 22 分のルート② (No.11), (d)は 0 時 52 分~1 時 47 分のルート① (No.12), (e)は 1 時 43 分~2 時 52 分のルート① (No.13) の結果を示す. 黒の実線は $PBLH_{DL}$ を表す. (b)(c)の下部図は移動観測された気温分布を表す

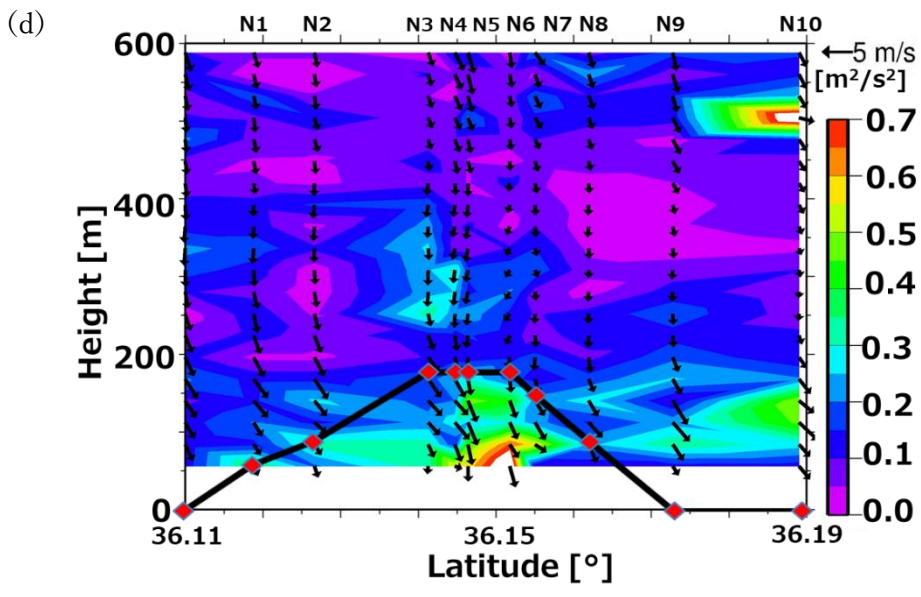
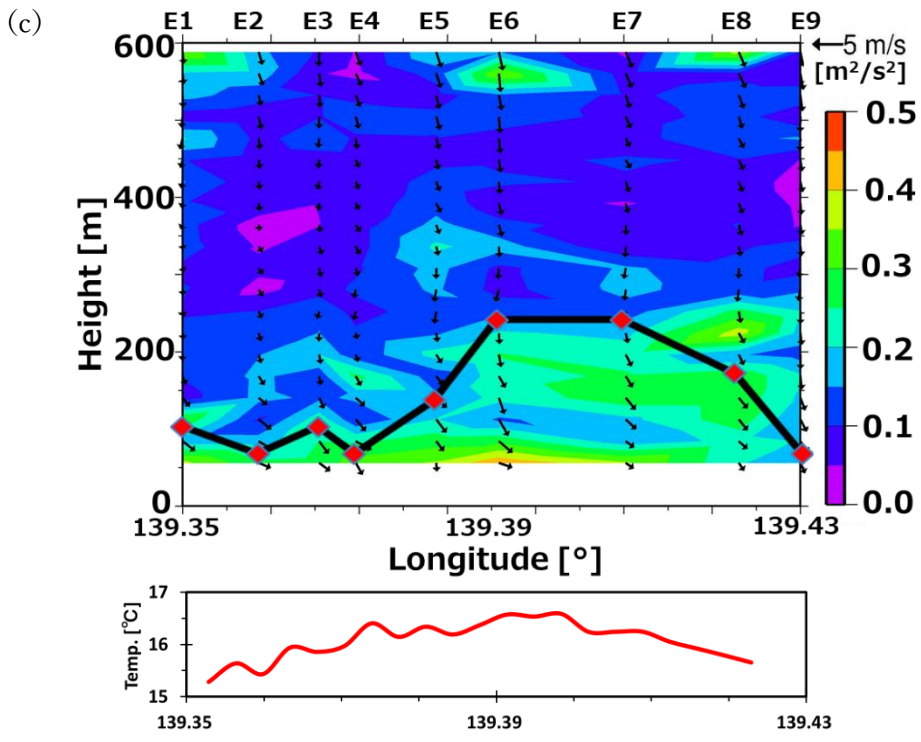


図 3-20 (続き)

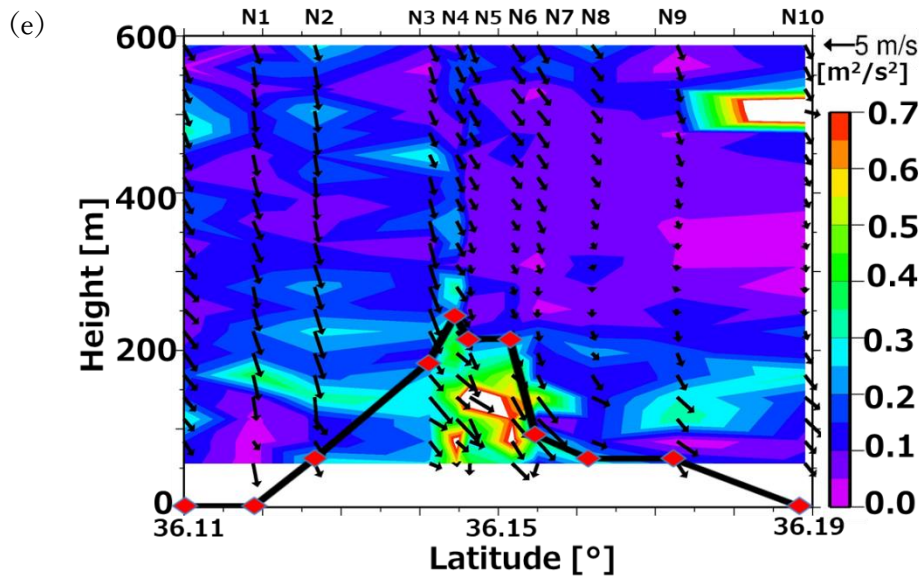


図 3-20 (続き)

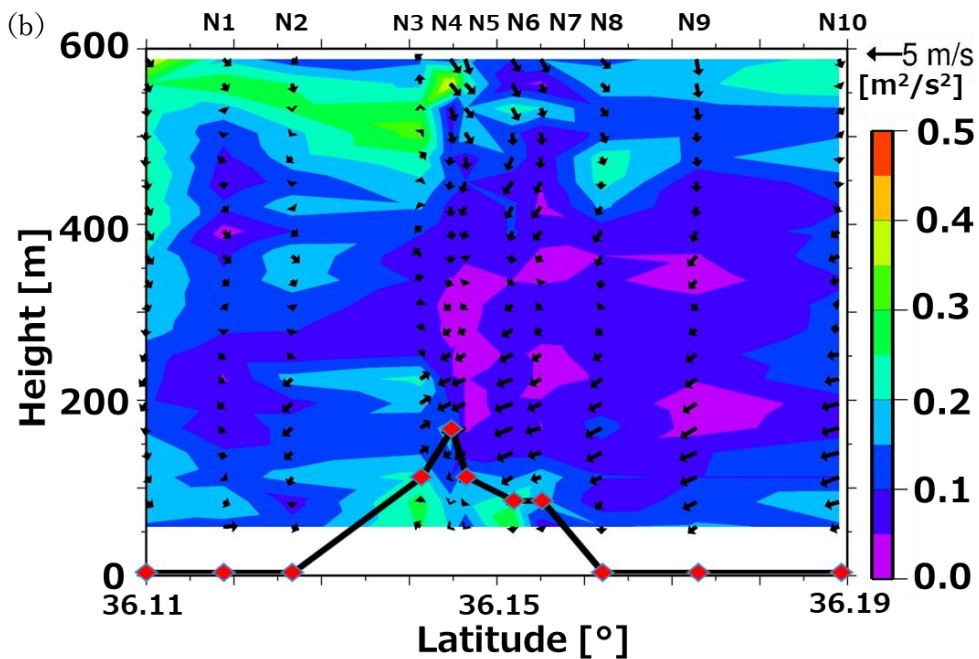
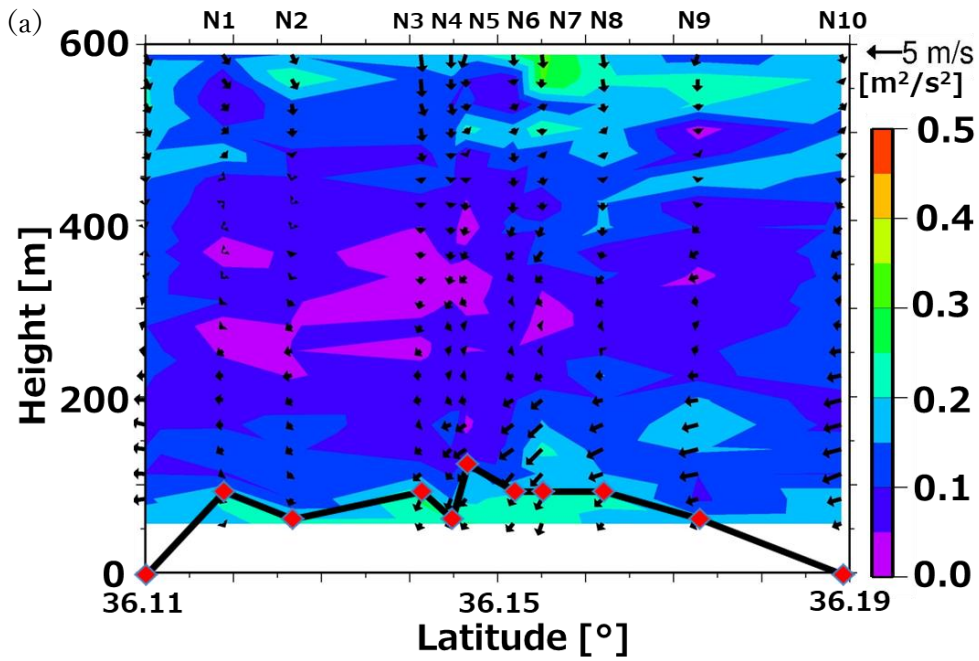


図 3-21 ドップラーライダーの移動観測で得られた σ_w^2 および水平風の緯度-または経度-高度断面図. (a)は2018年5月25日21時12分~22時19分のルート①(表3-4のNo.15), (b)は22時15分~23時12分のルート①(No.16), (c)は23時40分~26日0時23分のルート②(No.17), (d)は0時55分~1時49分のルート①(No.18), (e)は1時44分~2時38分のルート①(No.19), (f)は3時12分~3時52分のルート②(No.20)の結果を示す. 黒の実線は $PBLH_{DL}$ を表す

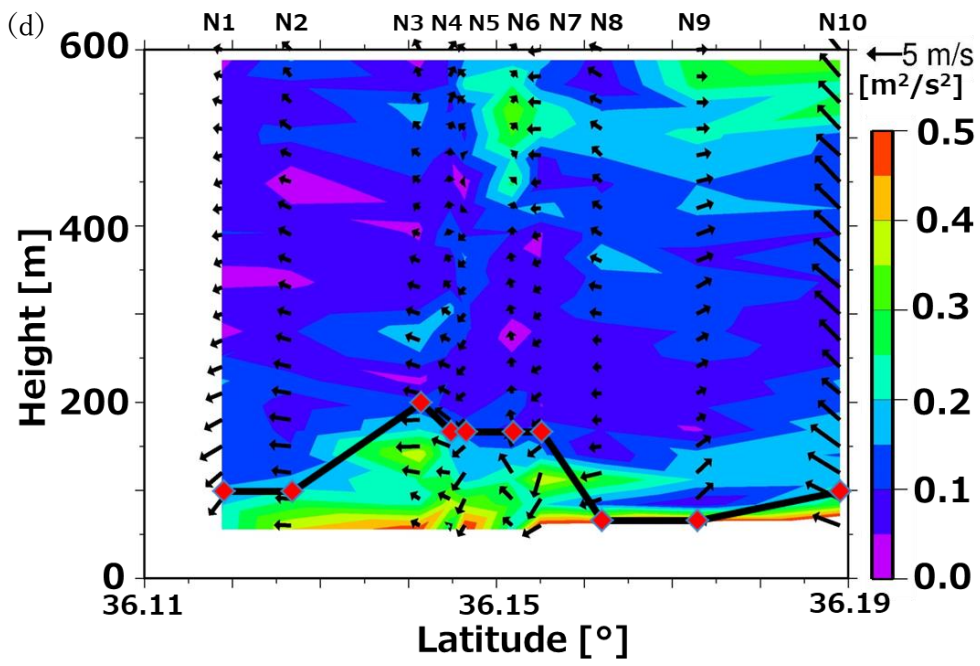
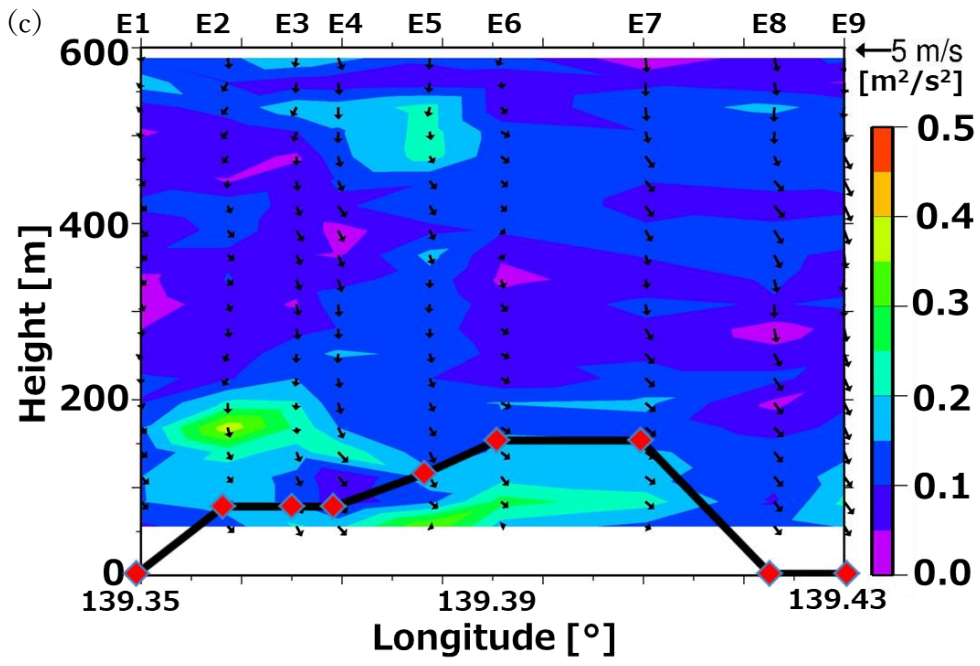


図 3-21 (続き)

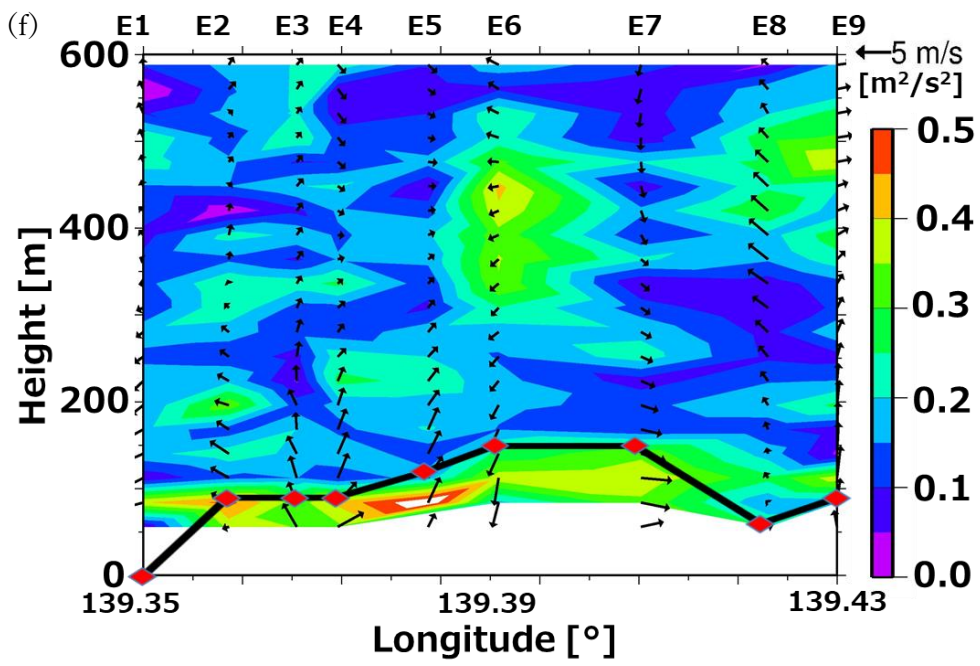
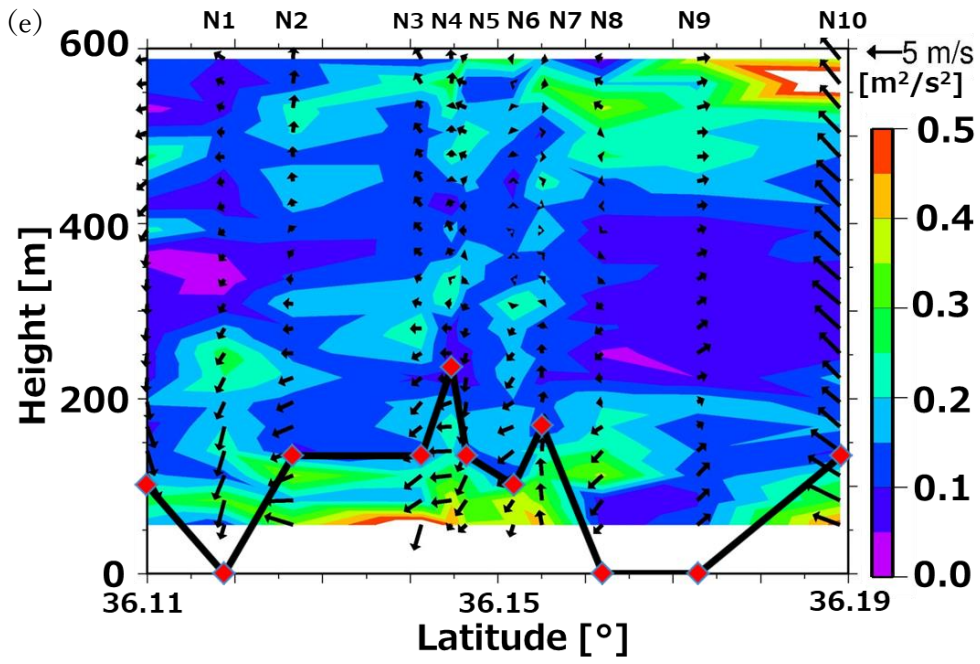


図 3-21 (続き)

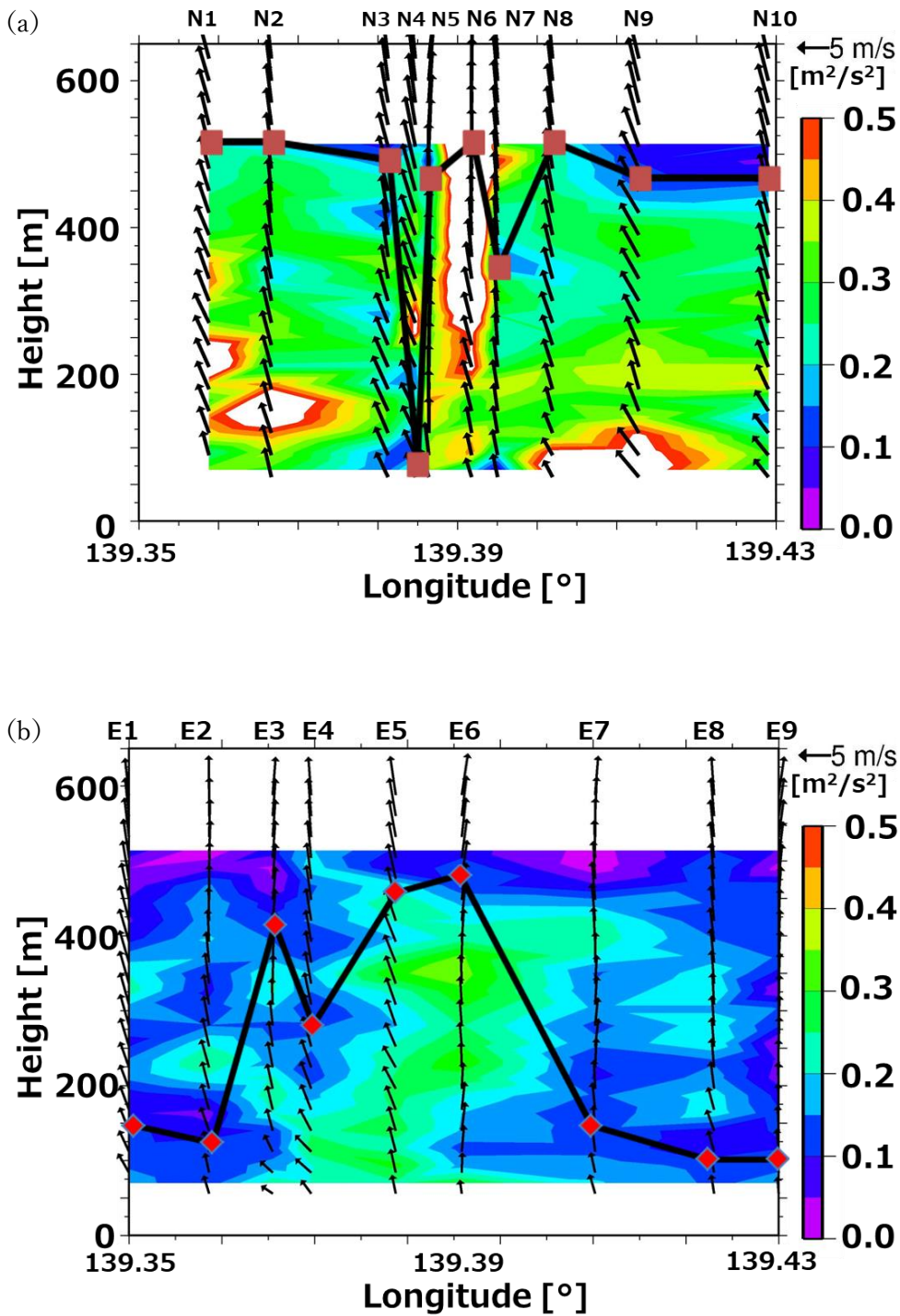


図 3-22 ドップラーライダーの移動観測で得られた σ_w^2 および水平風の緯度-または経度-高度断面図. (a)は2019年5月30日20時47分~22時05分のルート①(表3-4のNo.38), (b)は22時12分~23時07分のルート②(No.39), (c)は22時54分~23時49分のルート②(No.40), (d)は23時57分~31日1時0分のルート①(No.41)の結果を示す. 黒の実線は $PBLH_{DL}$ を表す. (c)の下部図は移動観測された気温分布を表す

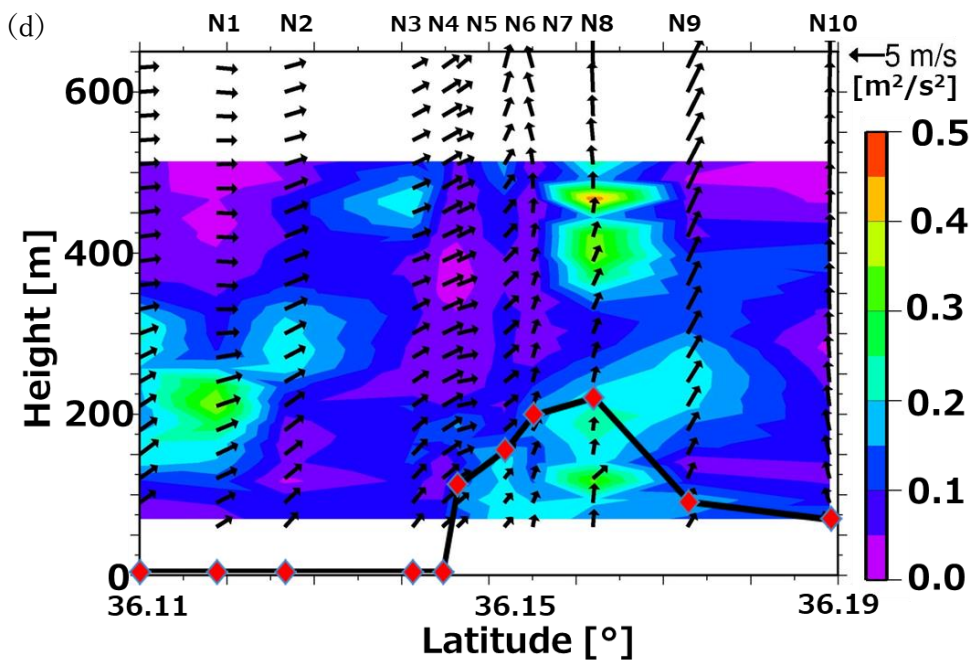
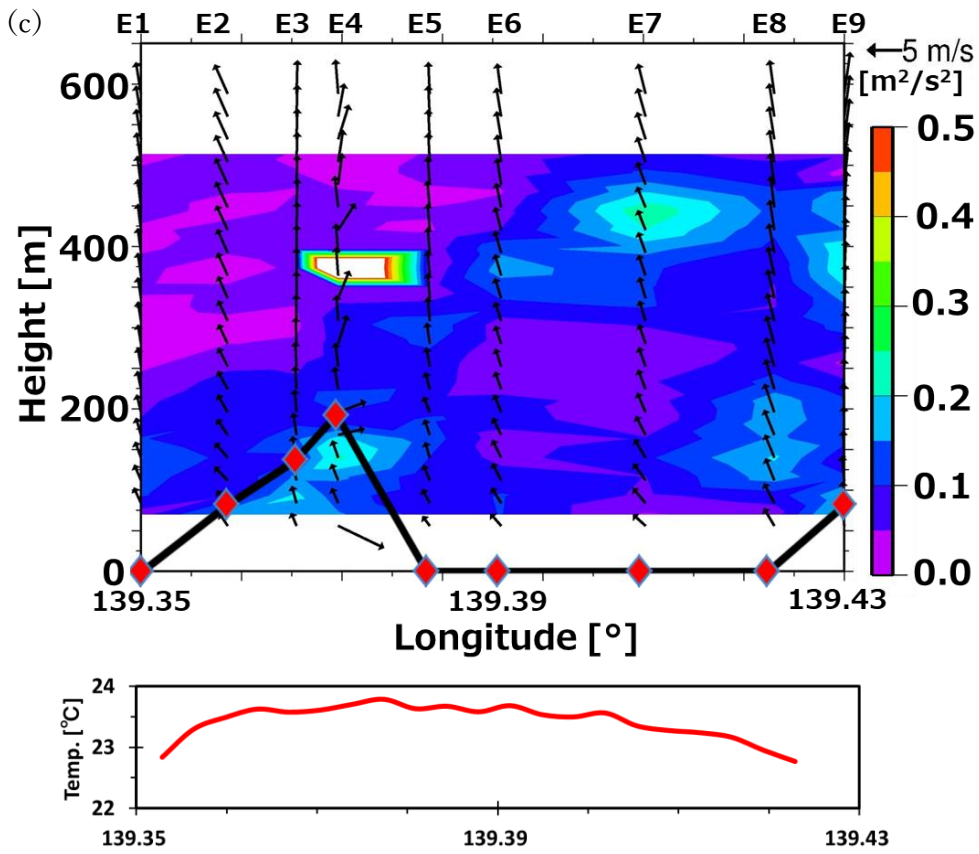


図 3-22 (続き)

3.4 3章のまとめ

埼玉県熊谷市において発生した UHI によって形成される UBL の立体構造を把握するために、DL による PBLH および 3次元風速の移動観測を実施した。

はじめに、DL によって算出される PBLH ($PBLH_{DL}$) の精度を検証するために、ゾンデによって算出された PBLH ($PBLH_{Sonde}$) との比較実験が実施された。30 分間の鉛直風分散 σ_W^2 による $PBLH_{DL}$ と $PBLH_{Sonde}$ の差の平均値は、日中が 17.3 m、夜間が 9.4 m を示し、UBL の立体構造を議論するうえで十分な精度であることが認められた。ただし、 σ_W^2 の算出時間を変化させた実験では $PBLH_{DL}$ に差が生じており、特に日中は夜間に比べて両者の差が大きいことが示された (最大 285 m)。その要因としては、対流プルームの影響によって、そもそもの時間変動が大きいことが挙げられる。このことから、短時間の σ_W^2 では日中の UBL を捉えることが困難であることが示されたため、移動観測による UBL 算出の際は、夜間の値のみを解析することとした。

次に、DL による PBLH の移動観測手法を確立するため、DL が傾斜した際の補正手法を提案した。さらに、補正手法を検証するため、移動観測による値 (移動 DL) と傾斜していない固定観測値 (固定 DL) を比較した。その結果、移動 DL の 3次元風に本研究で提案した傾斜補正手法を施すことによって、固定 DL の観測値との差が小さくなることが示された。特に、鉛直風速に対しては、観測値に対する補正值の割合が大きいことが示唆された。このことから、本研究で提案した傾斜補正手法の有用性が検証された。

上記により精度検証された観測手法を用いて、熊谷市の UHI によって形成される UBL の立体構造を調査した。移動 DL の観測により、地上から高度 200 m 前後までの層に PBLH が確認された。また、多くの結果において都市部の $PBLH_{DL}$ は周辺郊外よりも高かった。さらに、いくつかの事例では、この特徴が南北を走行するルート①および東西を走行するルート②の連続した観測でも確認された (例えば、地点 No.11~No.12, No.16~No.17, No.40~No.41 など)。このことから、都市部で確認された $PBLH_{DL}$ の高い領域が 3次元構造を有していることが示されており、この領域は都市境界層であると示唆される。また、ルート①の結果において $PBLH_{DL}$ の最高高度は、中心市街地に出現していた。しかしながら、ルート①の一部やルート②の結果では、都市部ではあるものの中心市街地から外れた位置に $PBLH_{DL}$ の最高高度が出現した。特に、ルート②の結果を比較したところ、大きく異なった位置に最高高度が出現している (例えば、No.11 の E7 と No.40 の E4 など) が示された。この要因については、5章で議論する。

4章 都市における暑熱適応策の評価

2章の結果、夏季の熊谷市において、UHIが顕在化していることが示された。このことから、中小規模都市の市街地内は、周辺郊外と比較して、暑熱ストレスが増加していることが示唆される。そこで4章では、中小規模都市住民の熱ストレス緩和のため、暑熱適応策の有効性を評価する。特に、その他の適応策と比較して研究例が少ない日傘に着目をする。

4.1 暑熱適応策比較のための実験①

実験①は、日傘、ドライミスト、街路樹の熱ストレス緩和効果について、WBGTとUTCIという2つの熱指標の観点から比較され、その有効性を評価した。

4.1.1 手法

本実験は、2021年8月5日において、つくば市にある筑波大学のキャンパスで実施された。日本ではWBGTが熱環境指数や熱中症危険度指数として広く用いられているが、国際的にはUTCIの方が標準化されている。WBGTと異なり、UTCIは風の影響をより直接的に考慮しており、より代表的な暑熱環境指数であると考えられている(例えば、Jendritzky et al, 2012; Blazejczyk et al, 2012; Potchter et al, 2018; Iwamoto and Ohashi, 2021)。そこで本研究では、WBGTだけでなくUTCIも用いて各熱ストレス緩和策を比較・評価した。

WBGTとUTCIを推定するための気象要素の測定は、街路樹の下、日傘、ドライミスト散布、直達日射の下で行った(図4-1)。各測定地点は互いに約8m離れており、熱ストレス緩和装置の違いを除けば、これら4地点の気象・環境条件はほぼ同じである。日傘は一般的なもので、素材はポリエステル100%(+裏面スパッタリング加工)、リブ長さは 0.58 m^2 、色は黒である。街路樹は高さ11mのトウカエデで、日本の街路樹の中で5番目に多い樹種である。ドライミストの性能は以下の通りである。水量は 1.3 L min^{-1} 、粒径は約 $20\ \mu\text{ m}$ 、高さは2m、面積は 1.5 m^2 である。ドライミストは地上2mの高さから下向きに噴霧した。

地上1.5mの気温とブラックグローブ温度はT&D社製のTR-5106で、地上1.5mの相対湿度はHHB-3101で観測した。2.0m上空の風向・風速は、Davis Instruments社製のVantage Proで観測した。街路樹、日傘、ドライミスト噴霧、直達日射の表面温度は、サーモグラフィR300SR-S(日本アビオニクス)を用いて測定した。直達日射中の下向き短波放射および長波放射のデータは、筑波大学同位体・環境動態研究センターから提供された。

WBGTは、式4-1(Yaglou and Minard, 1957)に示すように、湿球温度、乾球温度、黒球温度を用いて計算した：

$$WBGT = 0.1T + 0.2T_g + 0.7T_w \quad \dots 4-1$$

ここで、 T 、 T_g 、 T_w はそれぞれ乾球温度、黒球温度、湿球温度である。WBGTはISO7243プロトコルにおける暑熱ストレスの指標である。日本では気象庁、環境省、日本生気象学会をはじめ、多くの機関や研究者が熱中症リスクの指標としてWBGTを使用している(表4-1)。なお、WBGTは人の衣服や風速のパラメータを考慮していない(Budd, 2008)。

UTCIは、地球上の気候(季節)を問わず温熱環境の評価に使える指標として、国際生気象学会によって開発された熱指標であり、最近の屋外熱快適性研究で最も頻繁に使用され

ている指標の1つである (Potchter et al., 2018). UTCI は, 12 部位に分割した Fiala の人体数理モデルを採用しており (Fiala et al., 1999), multi-node の人体に対して体温調節も含んだ熱収支を解いている. このモデルの検証実験においても良好な結果が得られている (Psikuta et al., 2012). UTCI は, 実際の気象環境 (気温, 相対湿度, 風速, 平均放射温度) における人体モデルの生理応答が, 「相対湿度 50% (または水蒸気圧 20hPa), 風速 0.5m/s, 気温 = 平均放射温度, 歩行時速 4km」 という基準環境下だと何°Cの気温の生理応答と等しくなるかを算出する. 式(4-2)が示す通り, $Offset$ が, 実際の気温 T_a からのずれを表す.

$$UTCI = T_a + Offset \quad \dots 4-2$$

UTCI は, すべての気象要素が人体に作用した際の体感温度に相当しており, 式(1)中の Offset は気温だけでなく湿度, 風速, 平均放射温度の関数である. 本研究では, UTCI を, 気温, 湿度, 風速, 平均放射温度による近似多項式 (Bröde et al., 2012) から算出した. なお, 温熱指標の有効性を比較した研究において, UTCI が他の温熱指標よりも優れている結果が報告されている (Nassiri et al., 2017; Zare et al., 2018). UTCI は, Bröde et al. (2012) によって確立された尺度に従って 10 段階に分類される (表 4-2).

気象観測から 10 分間平均の WBGT と UTCI を算出し, 街路樹の下, 日傘, ドライミスト散布, 直達日射の下での WBGT と UTCI の変化を評価した. 統計的有意性はウェルチの t 検定を用いて評価した. 検定の多重性の問題を避けるため, t 検定の後にボンフェローニ法による多重比較を行った (Bonferroni, 1936).

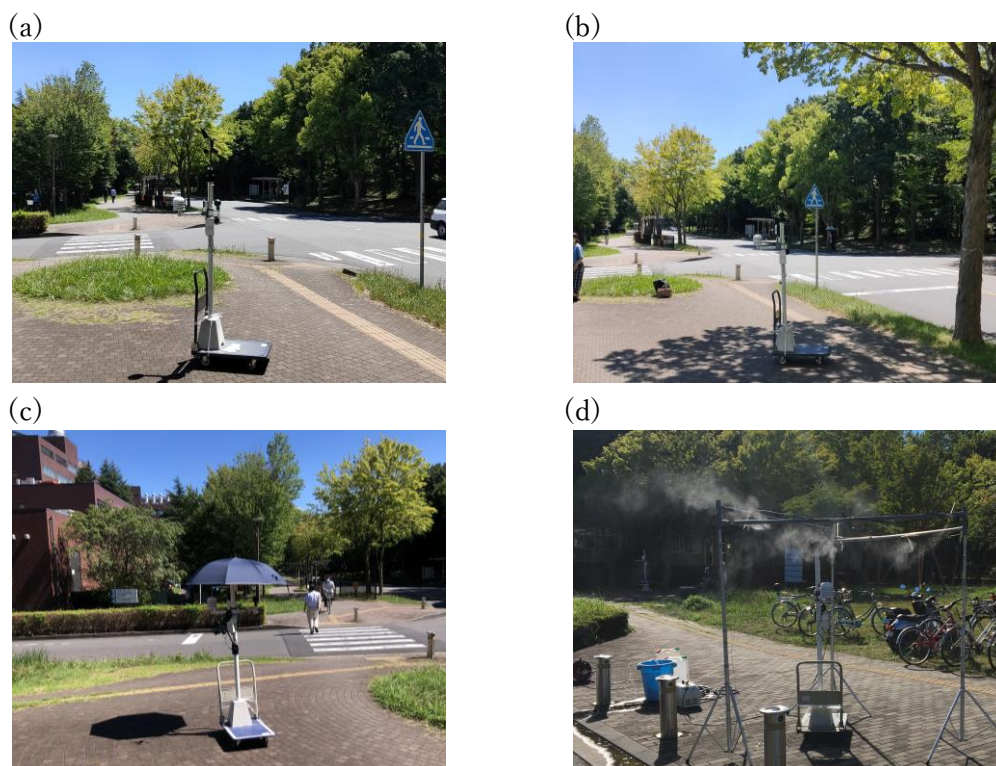


図 4-1 比較観測された 4 地点. (a)日射, (b)街路樹, (c)日傘, (d)ドライミスト

表 4-1 日本の熱中症危険度の WBGT 基準 (環境省, 2021)

Criteria [°C]	Heat stroke risk level
WBGT \geq 31	Danger
28 \leq WBGT < 31	Severe Warning
25 \leq WBGT < 28	Warning
21 \leq WBGT < 25	Caution
WBGT < 21	Almost Safe

表 4-2 UTCI のストレスカテゴリー (Błażejczyk et al., 2014)

Criteria [°C]	Stress category
UTCI \geq 46	Extreme heat stress
38 \leq UTCI < 46	Very strong heat stress
32 \leq UTCI < 38	Strong heat stress
26 \leq UTCI < 32	Moderate heat stress
9 \leq UTCI < 26	No thermal stress
0 \leq UTCI < 9	Slight cold stress
-13 \leq UTCI < 0	Moderate cold stress
-27 \leq UTCI < -13	Strong cold stress
-40 \leq UTCI < -27	Very strong cold stress
UTCI < -40	Extreme cold stress

4.1.2 直達日射, 街路樹, 日傘, ドライミスト下の温熱環境

図 4-2(a)は 2021 年 8 月 5 日 11:40~15:50 (日本標準時) の下向き短波放射量の時間変化, 図 4-2(b)は乾球温度 (気温), 湿球温度, 黒球温度, 直射風速を示す. 観測期間中の下向き短波放射量は $547.5\sim 959.6\text{ Wm}^{-2}$, 下向き長波放射量は $434.3\sim 449.7\text{ Wm}^{-2}$ であった. 観測期間中の乾球温度, 湿球温度, 黒球温度の平均値は, それぞれ 33.4°C , 24.3°C , 43.9°C と高かった. 観測期間中の風速は概ね弱く, $1.0\sim 1.7\text{ ms}^{-1}$ であった. ただし, 14:00 頃には弱まり, 15:00 頃には強まるなど, 風には若干の時間差があった.

図 4-2(c)は, 観測期間中の 4 地点の WBGT である. 直達日射下での WBGT は, 観測期間中常に 28°C 以上であり, 最高は 30.2°C であった. これは, 観測期間中, WBGT が熱中症の重篤な危険レベルにあったことを意味する (表 4-1). 観測期間中の時間平均値は 28.8°C であった. ここで, 街路樹, 日傘, ドライミスト散布の熱ストレス緩和効果について考察する. 街路樹下の WBGT は観測期間中 $26.8\sim 27.8^{\circ}\text{C}$ であった. 全地点で観測を行った日本時間 14:00~15:00 の平均値は 26.9°C であり, 直達日射下より 1.9°C 低い (図 4-3a, b). t 検定およびボンフェローニ法によると, この偏差は 1%水準で有意であった (街路樹, 日傘, ドライミスト間の多重性を考慮). 同様に, 日傘下での値は $27.3\sim 28.8^{\circ}\text{C}$ であり, 平均値は 27.9°C であった. 日本時間 14:00~15:00 の日傘下の平均値は, 直達日射下よりも 1.3°C 低かった. t 検定とボンフェローニ法により, この偏差は 1%水準で有意であることが示された. 一方, ドライミスト噴霧下と直達日射下との平均 WBGT の差は 0.4°C と小さく, その差は 5%レベルでも統計的に有意ではなかった.

街路樹や日傘の下で WBGT が低くなった理由を解明するため, 黒球温度, 乾球温度, 湿球温度の寄与を調べた. その結果, 街路樹と日傘の下での黒球温度の寄与はそれぞれ -1.7°C と -1.4°C であり, 乾球温度と湿球温度は黒球温度ほど WBGT 低下に寄与していないことが確認された.

各装置の熱緩和効果を UTCI で分析した結果は, WBGT で分析した結果と非常によく似ている. 例えば, 4 地点間の UTCI 値の順序は, WBGT 値の場合と同じであった (図 4-2d). しかし, 両者の値は 14:00 前後で乖離している. これは, UTCI が風速に依存するのに対し, WBGT は風速の影響をあまり受けないためである. 街路樹の下での UTCI は $35.1\sim 35.6^{\circ}\text{C}$ であり, 平均値は 35.4°C で, 直達日射の下よりも 5.9°C 低い. t 検定とボンフェローニ法によると, 乖離は 1%水準で有意であった (図 4-3c, d). これと同様に, 日傘下での値は $36.7\sim 37.2^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり, 平均値は 36.9°C で, 直達日射下よりも 4.4°C 低いことが示された.

t 検定とボンフェローニ法により, 偏差は 1%水準で有意であることが示された. 街路樹下と日傘の観察結果から, 本実験のような気象条件下では, 日傘の暑熱ストレス緩和効果は街路樹の約 75%であり, 街路樹のない道路を歩行する場合, 日傘は有効な代替装置であることが示唆された. 一方, ドライミスト噴霧下と直達日射下との差は 1.1°C と小さく, その差は 5%水準でも統計的有意差は認められなかった.

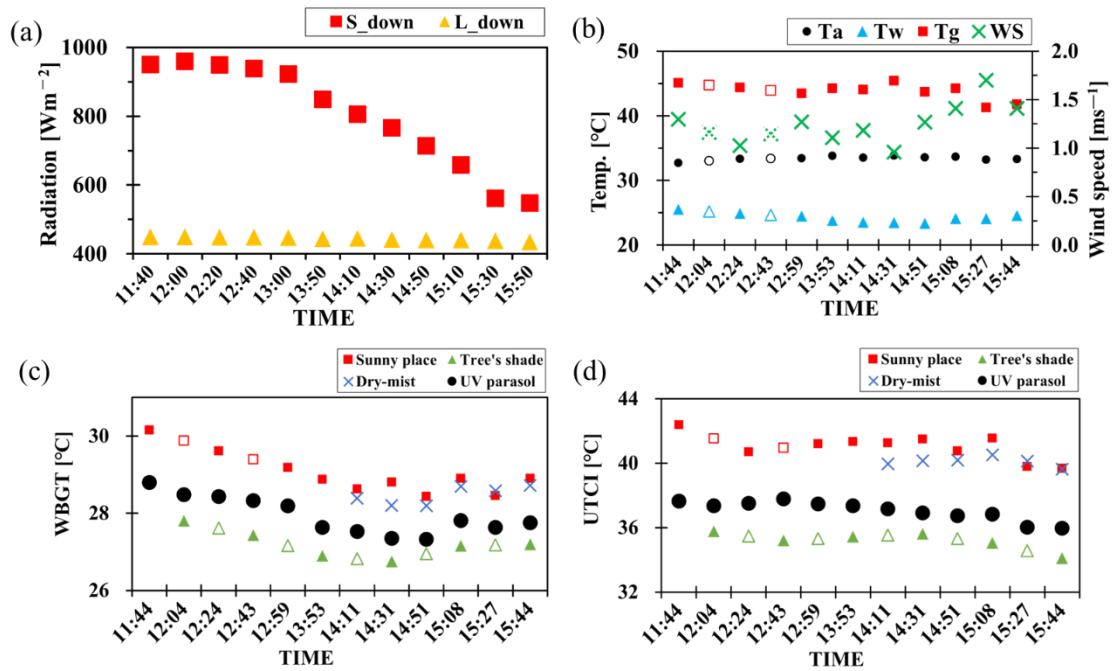


図 4-2 2021 年 8 月 5 日 11 時 40 分から 15 時 50 分における観測値の時系列。(a)直達日射下での短波放射と長波放射，(b)直達日射下での乾球温度，湿球温度，黒球温度，風速。ここで， S_{down} ， L_{down} ， T_a ， T_w ， T_g ， WS はそれぞれ短波放射，長波放射，乾球温度（気温），湿球温度，黒球温度，風速である。(c)4 地点の WBGT，(d)4 地点の UTCI。ここで，赤四角，青十字，黒丸，緑三角は，直達日射下，ドライミスト散布下，日傘下，街路樹下を示す。外枠のみ色の付いた記号は測定時刻の前後における時刻の観測値を用いて補間した値である

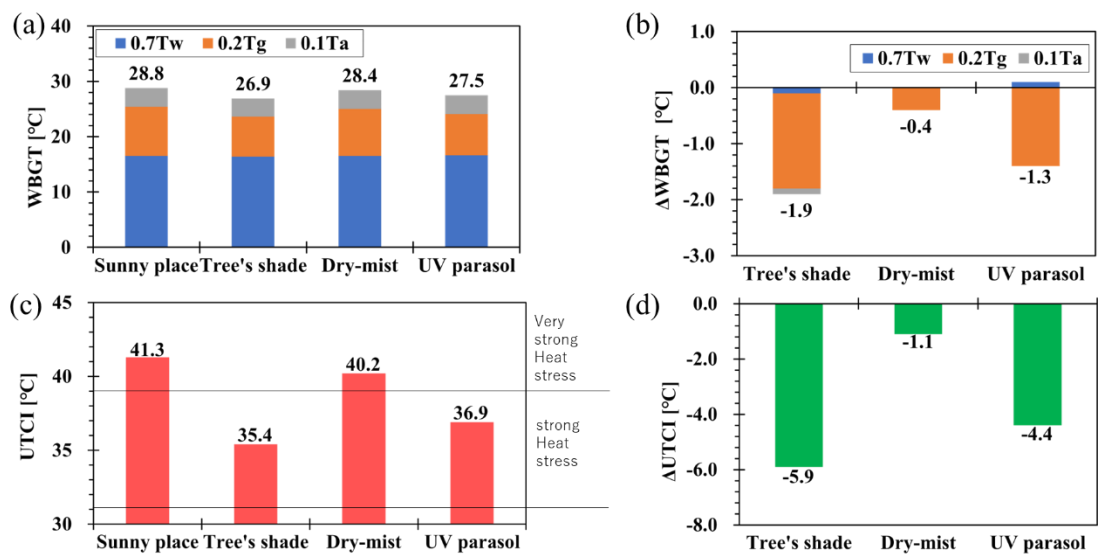


図 4-3 (a)日傘下, ドライミスト散布下, 街路樹下, 直達日射下の 4 地点における乾球温度 (灰色), 湿球温度 (青色), 黒球温度 (オレンジ色) の WBGT への寄与の平均値. 2021 年 8 月 5 日 14:00~15:00 に観測されたデータの平均値. (b) 直達日射下と他の 3 地点の WBGT の差. (c)日傘下, ドライミスト散布下, 街路樹下, 直達日射下の 4 地点における UTCI. 14:00~15:00 に観測されたデータの平均値. (d) 直達日射下と他の 3 地点の UTCI の差

4.1.3 ドライミストに対する風速の感度

4.1 節において、ドライミストはその他の暑熱適応策と比較して緩和効果が小さかった。そこで、ドライミスト噴霧が効果的でなかった理由を述べる。それは、風が強くなるとミストが風に流され、その結果、黒い球体の周りの蒸発量が少なくなったからと考えられる。図 4-4(a), (b)を見ると、ドライミスト噴霧の場合、風が強いほど WBGT と UTCI が大きくなっている。これとは逆に、直達日射下での観測結果ではこのような関係は見られない (図 4-4c, d)。風が弱くない場合のドライミスト噴霧のこの弱点は、図 4-3 と図 4-5 の比較でも裏付けられている。ドライミスト噴霧を効果的な暑熱ストレス緩和対策として利用するためには、ミストが歩行者の周囲に届くように、横から噴霧するなどの工夫が必要であろう。

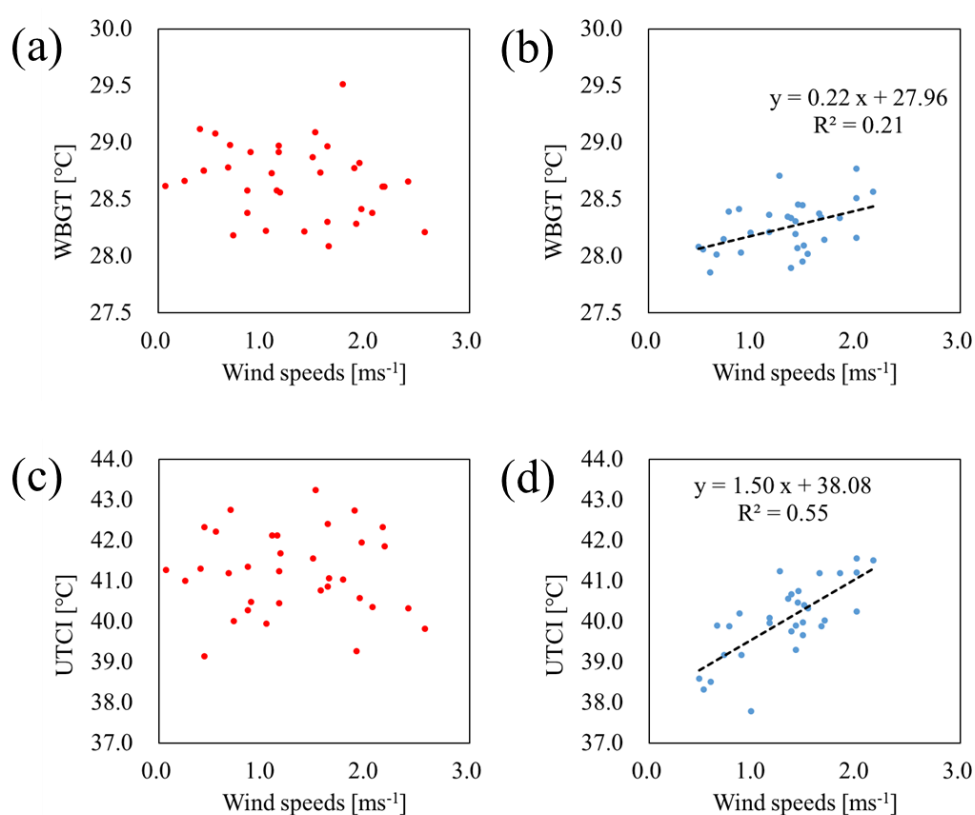


図 4-4 (a)WBGT とドライミスト散布時の風速, (b)UTCI とドライミスト散布時の風速, (c)WBGT と直達日射下の風速, (d)UTCI と直達日射下の風速の散布図

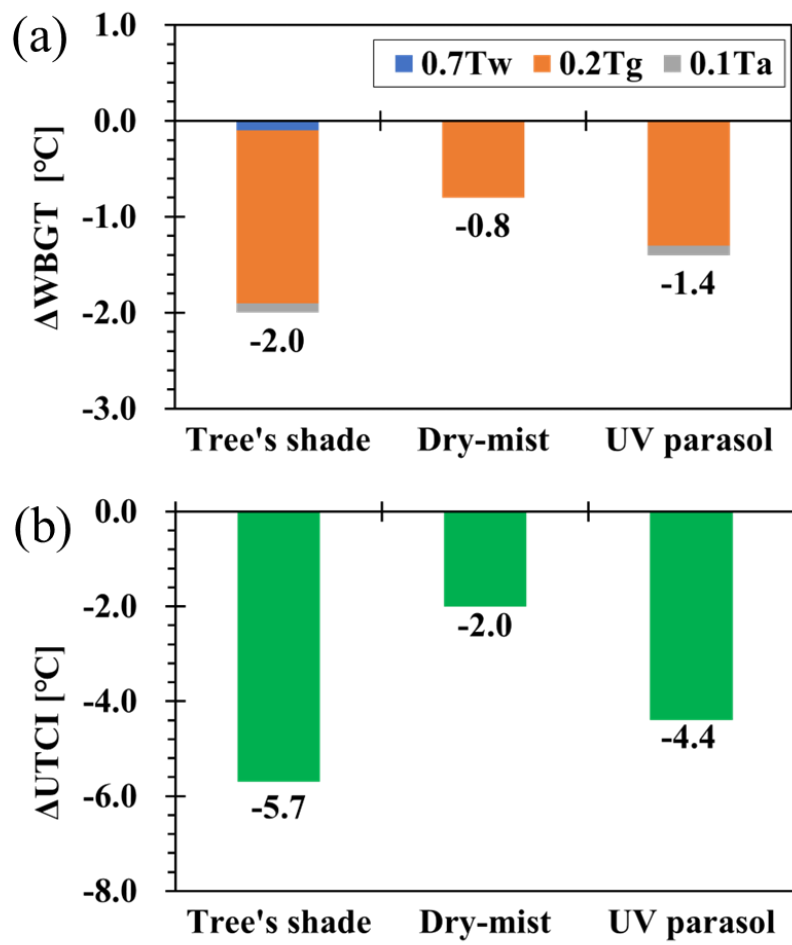


図 4-5 (a)図 4-3(b)と同じであるが風速が 1 ms^{-1} 以下のときの観測値を用いた場合, (b)図 4-3(d)と同じであるが風速が 1 ms^{-1} 未満の場合の観測値を用いた場合

4.2 暑熱適応策比較のための実験②

実験②は、日傘の熱ストレス緩和効果を、UTCI と被験者実験の 2 つの観点からその他適応策の効果と比較された。実験②は、実験①に比べて、被験者実験および放射 4 成分の観測が追加された。なお、実験①の結果から、ドライミストの熱ストレス緩和効果は、日傘や街路樹と比較して十分に小さいことが示されたため、比較対象から除外した。

4.2.1 手法

実験場所は、実験①と同じくつくば市にある筑波大学のキャンパスで実施された。実験は、2022 年 7 月 29～31 日、8 月 8～9 日、11 日までの計 6 日間に実施された。

各場所の熱ストレス緩和効果を比較するために、街路樹、日傘、直射日射下の UTCI が測定された (図 4-6)。それと同時に、緩和策による歩行者の心理的および生理学的な効果を検証するため、被験者実験が実施された (図 4-7)。街路樹とその他場所の間は約 20 m 離れている。しかし、熱ストレス緩和策の違いを除けば、これら 3 地点間での気象・環境条件はほぼ同じである。

ポリエステル製 (100%, +裏面コーティング) で、rib length が 0.58 m の、標準的な日傘が使用された。この日傘の色は、表が白、裏が黒である。街路樹は、高さ 11 m のトウカエデである。

各地点を比較するための温熱指標には、UTCI が採用された。UTCI を推定するための気象観測は、街路樹、日傘、直射日射の下で実施された (図 4-7)。測定時間は、すべての場所で 11～14 時である。地上 1.5m の気温・黒球温度および相対湿度は、それぞれ T&D 社製 TR-5106 および T&D 社製 HHB-3101 で測定された。地上 2.0 m の風向・風速は、Davis Instruments 社製の Vantage Pro で測定された。ただし、直達日射下と日傘下の風は同一の機器で測定された。地表面温度は、R300SR-S サーモグラフィ (日本アビオニクス) で測定された。1.5 m の放射 4 成分は、CHF-NR01 (Hukseflux Thermal Sensors 社製) および SE-CNR4 (Kipp&Zonen 社製) で測定された。

日傘と街路樹が歩行者の心理および生理に与える効果を検証するため、被験者実験が実施された。実験には、それぞれの日に 5～10 名ずつ、6 日間で計 46 名の被験者が参加した。表 4-3 に被験者実験のプロトコルを示す。まず、被験者は室内で実験に関するレクチャーを約 1 時間受けた。その間、被験者は着座している。次に、被験者は直達日射下に移動し、そこで 15 分間の歩行運動を行なった。直達日射下での歩行後、被験者は熱ストレスの回復のため、約 1 時間の屋内着座を行なった。熱ストレスが十分に回復したのち、被験者は、再び屋外へ移動し、各緩和策下において 15 分間の歩行運動を行なった。人体生理反応 (深部体温、最高血圧、最低血圧、脈拍、皮膚温度) の測定と熱ストレスに関するアンケートは、歩行前後において各被験者へ実施された (表 4-3 の Physiological MMs. 1-7, Survey 1-11 および Thermal image 1-4)。アンケートは、室内および屋外で実施された (図 4-8)。被験者の深部体温および最高血圧、最低血圧、脈拍は、それぞれオムロン社製の耳式体温計 MC-510 および手首式血圧計 HEM-6022 を使用して室内で測定された。皮膚温度は、上記のサーモグラフィを使用して、額、両手甲、両足首の 5 か所を撮影した熱画像から屋外で測定さ

れた。

各データ間の統計的な有意性は、Welch の t 検定を用いて評価された。検定の多重性の問題を避けるため、 t 検定に続いて、ボンフェローニ法による多重比較が実施された。

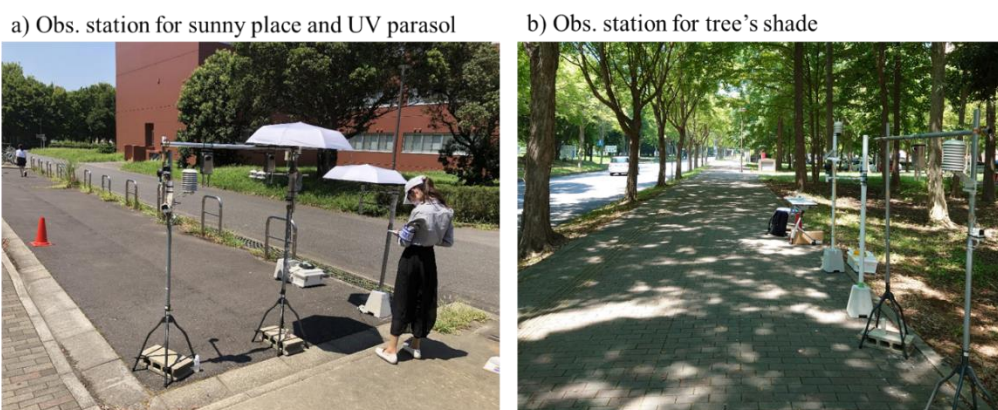


図 4-6 観測地点

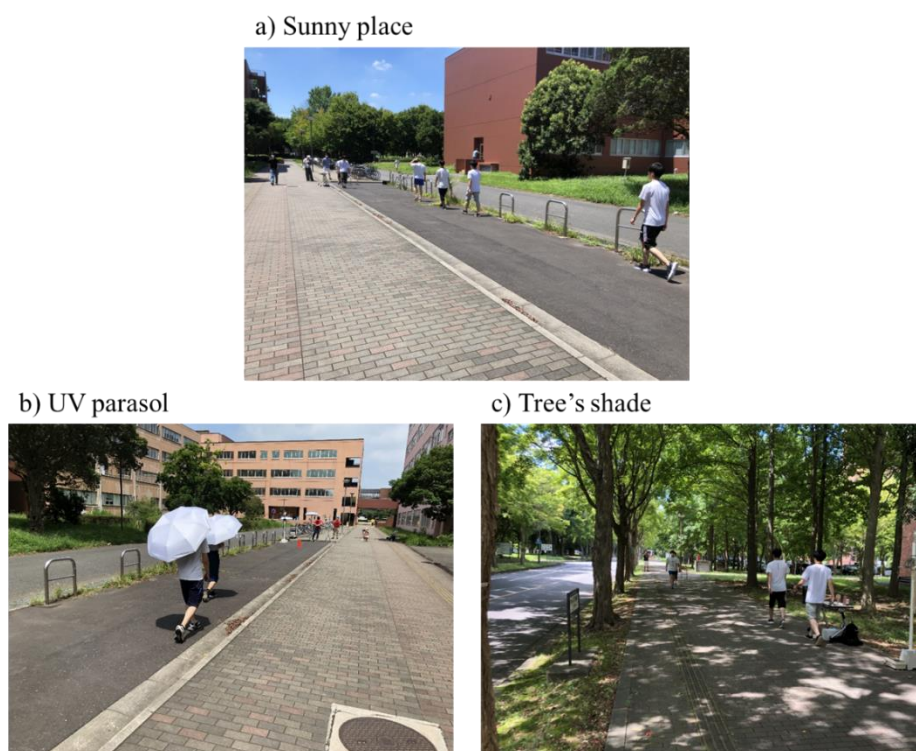


図 4-7 被験者実験の場所

表 4-3 被験者実験のプロトコル

Time	Group A	Group B
	60min	Orientation and pre-survey
11:00	10min	Physiological MMs. 1, Thermal sensation survey 1
11:10	2min	Moved outdoor
11:12	3min	Thermal sensation survey 2, Thermal image 1
11:15	15min	Walk in sunny place
11:30	2min	Thermal sensation survey 3, Thermal image 2
11:32	3min	Moved outdoor
11:35	10min	Physiological MMs. 2, Thermal sensation survey 4
11:45	20min	Rest indoor
12:05	10min	Physiological MMs. 3, Thermal sensation survey 5
12:15	20min	Rest indoor
12:35	10min	Physiological MMs. 4, Thermal sensation survey 6
12:45	2min	Moved outdoor
12:47	3min	Thermal sensation survey 7, Thermal image 3
12:50	15min	Walk in tree's shade
13:05	15min	Walk in sunny place with UV parasol
13:08	3min	Thermal sensation survey 8, Thermal image 4
13:10	2min	Moved outdoor
13:20	10min	Physiological MMs. 5, Thermal sensation survey 9
13:40	20min	Rest indoor
13:50	10min	Physiological MMs. 6, Thermal sensation survey 10
14:10	20min	Rest indoor
14:20	10min	Physiological MMs. 7, Thermal sensation survey 11
		Post-survey

★今の感覚に一番合うものに○をつけてください。

1. 暑さ・涼しさ

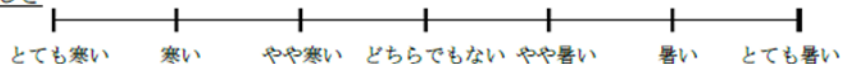


図 4-8 温冷感アンケート

4.2.2 直射日射下，街路樹下，日傘下の UTCI

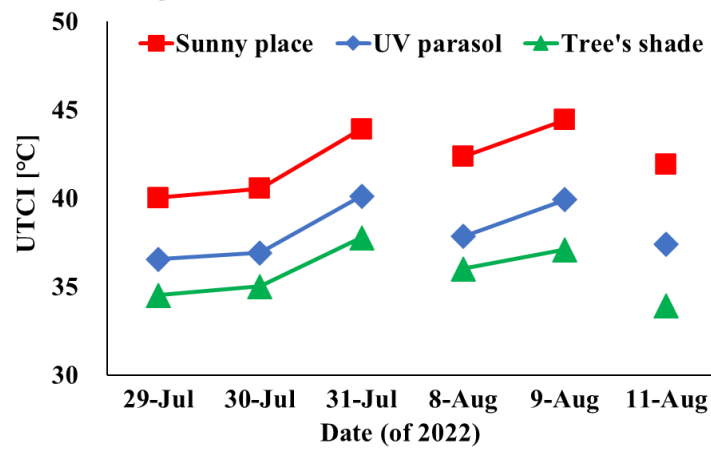
ここでは，直達日射下，街路樹および日傘下における UTCI の測定結果を報告する．観測が行われたすべての日は晴天弱風日であり， 800 Wm^{-2} 以上の直達日射が観測された．図 4-9 は，観測を実施した 6 日間の 11 時から 14 時までの，3 地点の UTCI を示す．

直射日射下での UTCI は，観測期間中常に 40°C 以上で，8 月 9 日に最大 45.1°C であった．これは，観測期間中の UTCI が「Very strong heat stress ($46^\circ\text{C} > \text{UTCI} \geq 38^\circ\text{C}$)」レベルであったことを意味する．なお，観測期間中の平均値は 42.2°C であった．

街路樹下の UTCI は，観測期間中 $33.7\sim 36.7^\circ\text{C}$ の範囲にあった．全観測期間の平均値は 35.8°C であり，直達日射下より 6.4°C 低い．両者の差は， t 検定とボンフェローニ法により，1%水準で有意であることが示された．日傘下の UTCI は $36.0\sim 39.8^\circ\text{C}$ の範囲にあった．その平均値は 38.1°C であり，直射日射下よりも 4.1°C 低い．両者の差は， t 検定とボンフェローニ法により，1%水準で有意であることが示された．

UTCI の観測結果から，本実験の環境下において，街路樹および日傘が熱ストレスを「Very strong heat stress」から「Strong heat stress ($38^\circ\text{C} > \text{UTCI} \geq 32^\circ\text{C}$)」へ軽減できることが示された．そして，日傘による熱ストレス緩和効果を UTCI に基づいて比較すると，街路樹による効果の 64.1%に匹敵することが分かった．

a) Average of UTCI (11:00-14:00)



b) Average of UTCI (6 days)

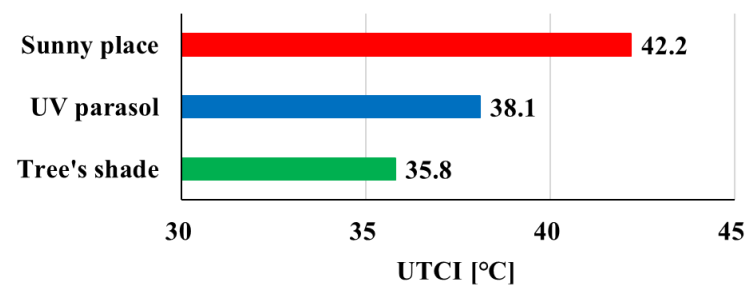


図 4-9 観測期間における UTCI. (a) 各場所の 11 時～14 時における各日平均値, (b) 各場所の全期間平均値

4.2.3 各場所の UTCI に違いが生じた要因

ここでは、各場所の UTCI に差が生じた要因を検討する。図 4-10 は、観測を実施した 6 日間の 11 時から 14 時までの、各地点の気象要素の日平均値を示す。なお、日傘地点は日向と並んでいるため、風速は計測していない。各場所の気温は、日向と日傘で差がないが、木陰は約 1°C の低下傾向を示した。また、各場所で最も大きな差が生じたのは黒球温度である。日向と比較して、日傘および木陰下の黒球温度は、それぞれ 6.6°C および 9.6°C 低下した。この低下傾向と、UTCI 差の傾向は類似している。これらから、直達日射下と比較して、日傘および街路樹の黒球温度が低下したことで、UTCI の違いが生じたことが示唆される。そこで、各場所の間に黒球温度の差が生じた要因を検討するため、放射と風環境に着目して解析する。

図 4-11 は各場所の間における放射環境の違いを示す。直達日射下での正味放射量は 1858 Wm^{-2} であった(図 4-11a)。街路樹下の正味放射量は 1204 Wm^{-2} であり、直達日射下と比較して 654 Wm^{-2} 低減された。一方、日傘下の正味放射量は 1241 Wm^{-2} であり、直達日射下と比較して 617 Wm^{-2} 低減された。

次に、各場所の放射環境の特徴を示すために、放射 4 成分を確認する。直達日射下における下向き短波放射は 732.1 Wm^{-2} であった。街路樹下および日傘下の下向き短波放射は、直達日射下と比較して 547 Wm^{-2} および 718 Wm^{-2} 低減された(図 4-11b)。つまり、街路樹下および日傘下が、太陽の下向き短波放射の約 74.7% および約 98.9% を遮蔽したことを意味する。これは、直達日射下と比較した場合、放射 4 成分の中で最大差である。なお、街路樹下の下向き短波放射が日傘より大きいのは、木漏れ日が入っているからと考えられる(図 4-11a, c)。一方、街路樹下および日傘下の下向き長波放射は、直達日射下と比較して 6.6% および 22.6% 増加している(図 4-11b)。これは、街路樹および日傘が日射により加熱されるためである(図 4-12)。観測期間中における表面温度の平均値は、街路樹および日傘下で、それぞれ 33.0°C および 43.8°C が示された。これらの結果から、日傘は日射のほとんどを遮蔽する反面、自らが日射により加熱されることで赤外放射を増加させてしまうことが分かった。

街路樹下の上向き短波放射と上向き長波放射は、直達日射下と比較して顕著な低下傾向が示された(58.3%と 16.4%)。しかし、日傘下では差が生じなかった(3.1%と -0.1%)。図 4-13 は、観測期間中の各場所における地表面温度の平均値である。各場所の地表面温度は、赤外画像から黒球温度計下の 1.0 m^2 の領域の温度を平均化した。直達日射下の地表面温度と比較して、街路樹下は 20.1°C も低下するが、日傘下は 2.0°C の低下に留まった。これらの結果より、街路樹は日傘より広い領域に影を落とすことで地表面への入力放射量を低減することが示唆された。

放射観測の結果より、街路樹と日傘下の正味放射が、直達日射下と比較して、それぞれ 35.2% および 33.5% 低下することが示された。そして、この低下が黒球温度の差に寄与していると考えられる。一方、街路樹と日傘の正味放射の差は 31.1 Wm^{-2} に留まるが、黒球温度では 3.0°C もの差が生じている(図 4-10c)。つまり、放射環境の違いに加えて、別の要因が街路樹と日傘の黒球温度に違いをもたらしていることが考えられる。そこで、各場所の風速

の違いを検討する。

まず、平均風速の違いが黒球温度の差にもたらす影響を解析するために、両地点の風速差が $\pm 0.5 \text{ ms}^{-1}$ 以下の時間における黒球温度を平均した。その結果、黒球温度は、直達日射、日傘および街路樹下で、それぞれ 44.2°C 、 37.8°C 、 34.6°C である。これらの値は、観測期間平均値と比較して、大きな差ではない。そのため、各場所における風速の平均場の違いが黒球温度の差に影響を及ぼしたとは言い難い。

次に、日傘による風の遮蔽効果について検討する。しかし、この観測では、日傘地点は、直達日射下と並んでいたため、両地点の風は同一と定義していた。そこで、追加実験として、2023年8月20日に日傘内外における風速の比較観測を実施した(図4-14)。その結果、日傘内の風速が大きく低下する傾向が示された。

以上の観測結果より、日傘は直達日射のほとんどを遮蔽することで大きな熱ストレスの緩和(UTCIの低下)をもたらすが、輻射熱の増加および風速の低下により熱ストレスを増加させてしまうことが示唆された。そのため、街路樹と比較すると、熱ストレスの緩和効果が小さくなってしまふと考えられる。

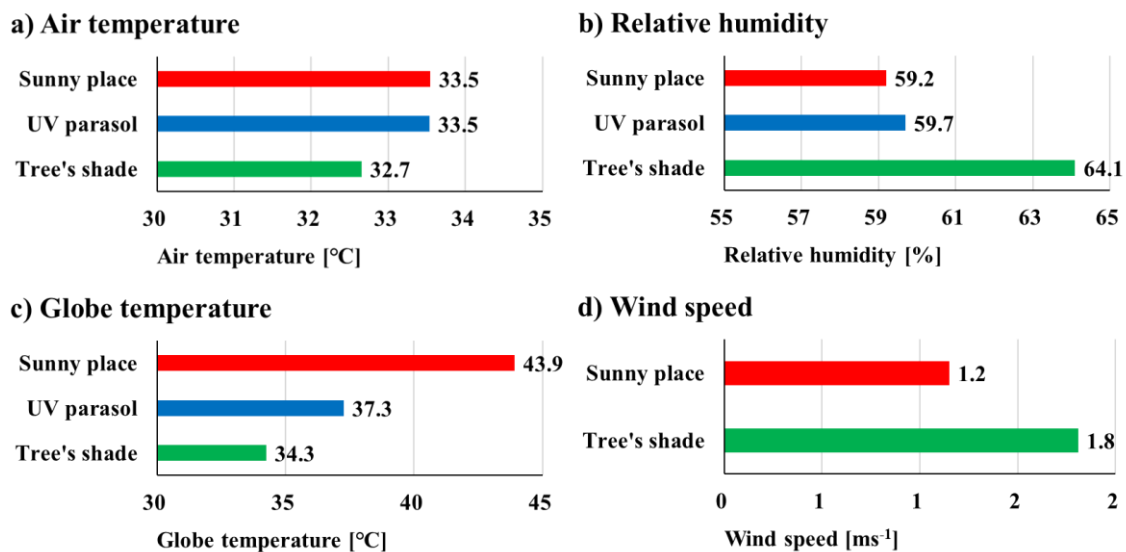


図 4-10 観測期間における気象要素の平均値

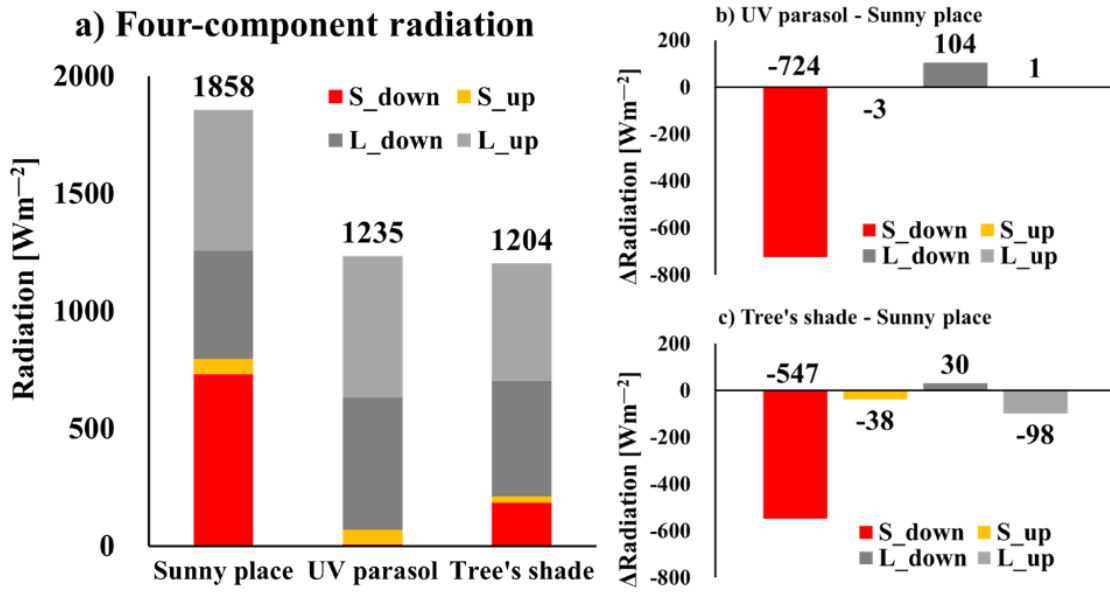


図 4-11 場所間の放射環境の違い

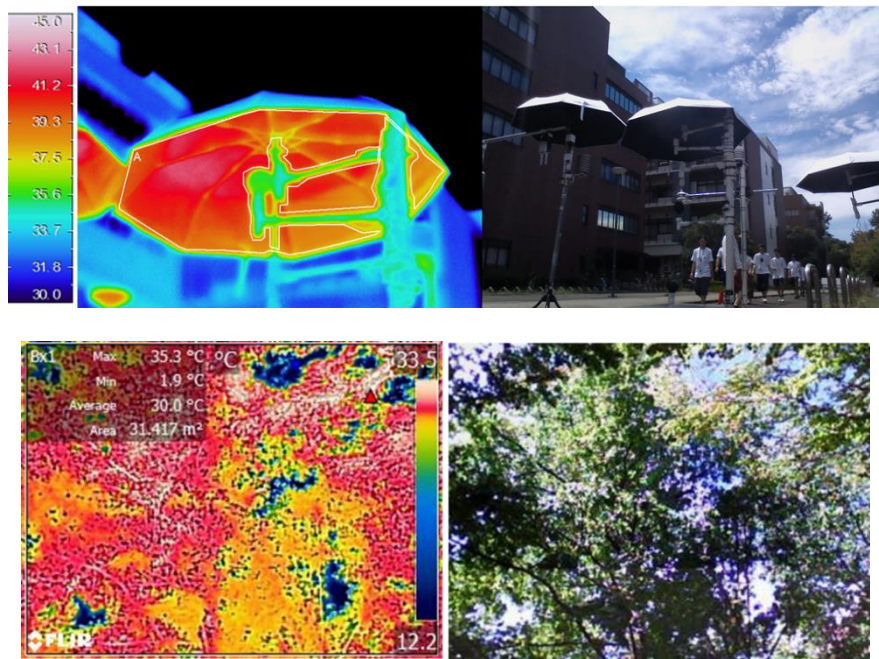


図 4-12 日傘および樹木の上向き熱画像

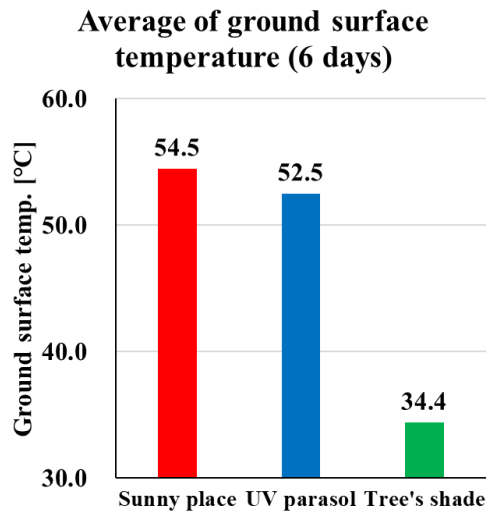


図 4-13 各場所の地表面温度

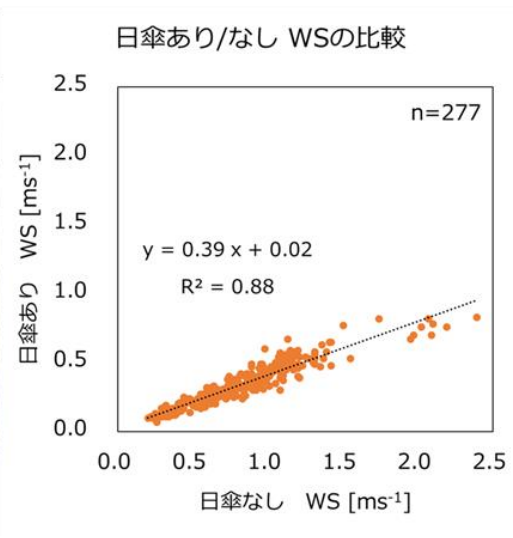


図 4-14 日傘内外における風速の比較観測結果

4.2.4 温冷感アンケートの結果

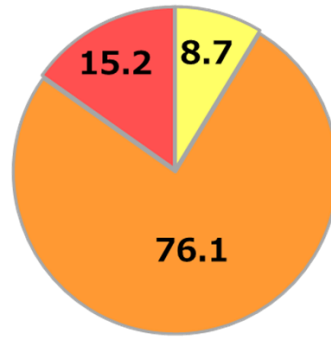
15 分間の歩行前後における被験者の心理的および生理学的要因を調査し、街路樹と日傘の影響を調査した。最初に、歩行後の温冷感アンケートの結果を示す (図 4-15a)。暖かさと冷たさの感覚についての質問に対して、直達日射下を歩いた 91.3%の被験者は「非常に暑い (+3)」(15.2%)と「暑い (+2)」(76.1%)と答えた。街路樹下の被験者は「暑い」(53.3%)と「やや暖かい (+1)」(26.7%)、日傘で「暖かい (+2)」(54.8%)と「やや暖かい (+1)」(32.3%)と答えた。特に、街路樹下の 13.3%の被験者は「快適 (±0)」と回答した。

次に歩行前後における温冷感ランクの変化の平均値を示す (図 4-15b)。直達日射下を歩いた被験者の温冷感は、2.2 ランク上昇した。それに対して、木陰下を歩いた被験者の温冷感は 1.5 ランク、日傘を持って歩いた被験者の温冷感は 2.0 ランクの上昇をそれぞれ示した。これらを直達日射下と比較すると、それぞれ 0.7 ランクおよび 0.2 ランク低下させた。これらの結果より、日傘を持った被験者は直達日射下よりも涼しく感じるものの、熱ストレス低減効果は木陰による効果の 28.6%に過ぎないことが示された。

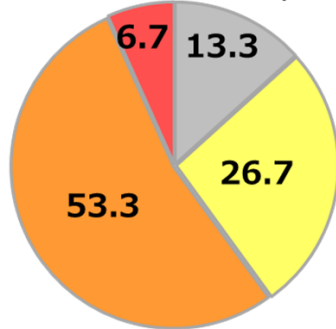
a) Response rate [%]



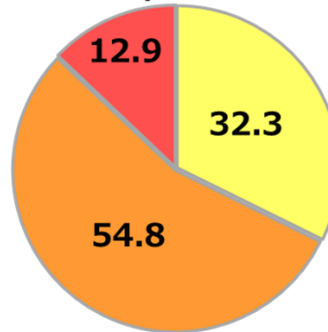
Sunny place (N=46)



Tree's shade (N=15)



UV parasol (N=31)



b) Δ Rank of survey (After - Before walking)

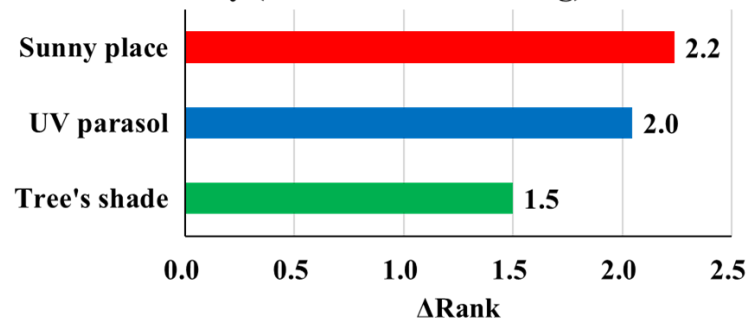


図 4-15 温冷感アンケートの結果

4.2.5 生理測定の結果

熱ストレス対策を施した被験者の生理応答を調査した。

初めに、直達日射下、街路樹下および日傘下の歩行前後における、被験者の歩行前後における表面皮膚温度の変化を示す(図 4-16)。歩行前後において、ほとんどの被験者は表面温度が上昇した。直達日射、街路樹、日傘における全身の表面温度の平均値は、それぞれ+0.8°C、+0.1°C、+0.5°Cを示し、街路樹のみ温度上昇が小さい。特に、部位毎の温度変化には場所ごとに違いが生じた。街路樹は、直達日射と比較してすべての部位の表面温度上昇が抑えられている。対して、日傘は、足首および手首の表面温度変化は直達日射と差が小さいが、額の表面温度が-0.5°Cの変化を示した。つまり、街路樹は被験者の全身を冷やすことができるが、日傘は額しか冷やさなかったことが分かる。

最後に、各場所の歩行前後における、耳内温度、血圧、心拍数の変化率を示す(図 4-17)。ここでは、直達日射下を歩いた歩行者の変化率に対する日傘および街路樹下の変化率との差を比較した。その結果、心拍数および血圧に対して、両者の変化率は直達日射下と有意な差は認められなかった(図 4-17b-d)。一方、耳内温度は街路樹のみ有意な差が認められ、顕著な低下傾向が示された(図 4-17a)。具体的には、直達日射下および日傘下の被験者の耳内温度は歩行後に0.5°C以上上昇していたが、街路樹下の被験者は0.2°Cの上昇に留まった。

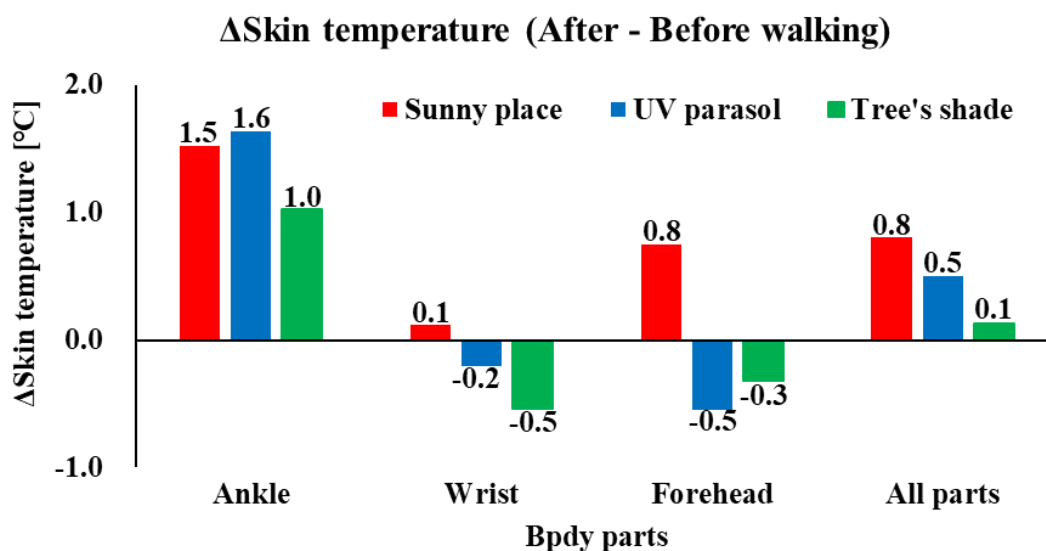


図 4-16 皮膚表面温度。All parts は全部位の平均値

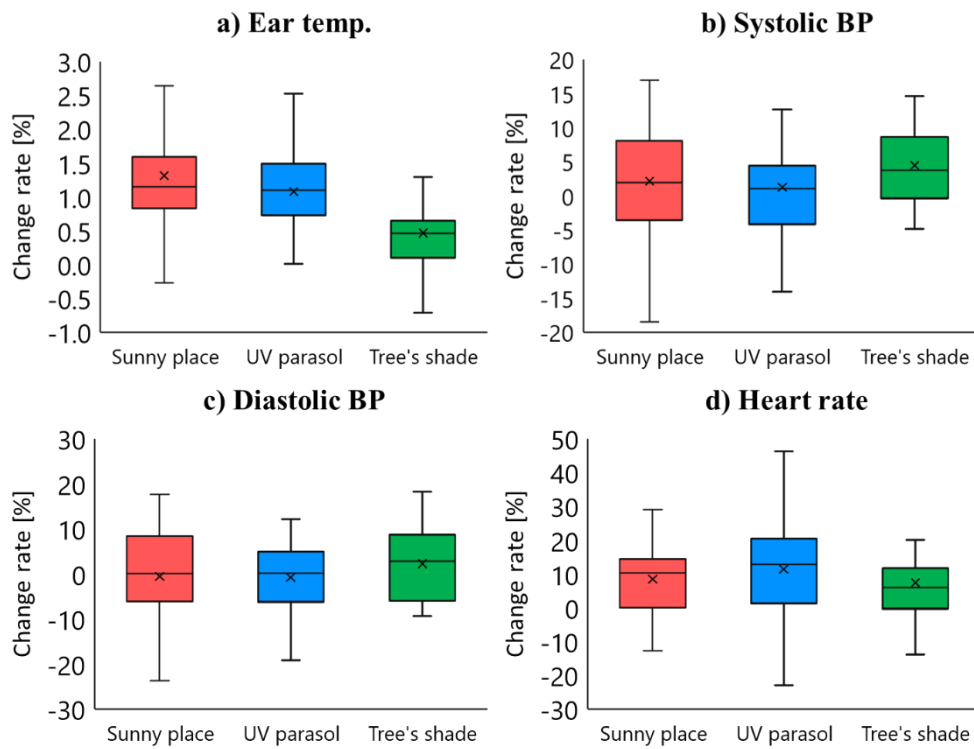


図 4-17 各場所の歩行前後における耳内温度, 心拍数 (収縮期, 拡張期), 血圧の変化率 (歩行後一步行前)

4.3 4章のまとめ

UHI の影響を受ける都市住民の熱ストレス軽減を目指し、適応策の有効性を検討する。特に、本研究では歩行者への熱ストレス緩和効果が期待される日傘に着目し、その他の適応策の効果と比較・検証することとする。

実験①では、日傘の熱ストレス緩和効果を、UTCI と WBGT を用いて、街路樹やドライミストと比較して評価した。街路樹は、今回の実験で行った対策の中で最も優れており、直達日射下と比較して UTCI を 5.9°C 、WBGT を 1.9°C 低下させた。その結果、熱中症リスクが 1 段階低下した。日傘も同様に、熱中症リスクを 1 段階減少させた。日傘の熱緩和効果は、街路樹の 75% に相当した。具体的には、日傘は UTCI を 4.4°C 、WBGT を 1.3°C 低下させることができた。一方、ドライミストの温熱緩和効果は、日傘よりも小さかった。ドライミストは、中程度の風 ($\geq 2 \text{ ms}^{-1}$) が吹いている条件では熱ストレスをほとんど緩和しなかったが、弱い風 ($< 1 \text{ ms}^{-1}$) が吹いている条件では UTCI と WBGT を 2.0°C と 0.8°C 低下させた。これは、より大きな風速条件では、ミストを吹き飛ばされ、気象測定機器周辺の冷却を減少させたためである。

実験②では、日傘の熱ストレス緩和効果が、UTCI と被験者実験によって、その他適応策の効果と比較された。実験②は、日傘の特性を定量的に調査するために、実験①に比べて、被験者実験および放射 4 成分の観測が追加された。なお、実験①の結果から、ドライミストの熱ストレス緩和効果は、日傘や街路樹と比較して十分に小さいことが示されたため、比較対象から除外された。実験の結果、街路樹および日傘が熱ストレスを「Very strong heat stress」から「Strong heat stress ($38^{\circ}\text{C} > \text{UTCI} \geq 32^{\circ}\text{C}$)」へ軽減できることが示された。そして、日傘による熱ストレス緩和効果を UTCI に基づいて比較すると、街路樹による効果の 64.1% に匹敵することが分かった。さらに、放射観測の結果、街路樹と日傘下の正味放射が、直達日射下と比較して、それぞれ 35.2% および 33.5% 低下することが示され、この低下が熱ストレス緩和をもたらすことが示された。一方、街路樹と日傘の正味放射の差は 31.1 Wm^{-2} に留まるが、日傘の UTCI は街路樹と比較して 2.3°C 高かった。そこで、両者の風環境の違いを調査した結果、日傘内の風速が日傘外と比較して大きく低下する傾向が示された。さらに、被験者実験の結果、日傘を持った被験者は直達日射下よりも涼しく感じるものの、その熱ストレス低減効果は木陰による効果の 28.6% に過ぎないことが示された。これは、UTCI で比較した際の割合と比較して非常に小さい。また、生理測定の結果も、街路樹は耳内温度や皮膚温度に有意な緩和効果が認められたが、日傘はその効果が非常に小さい、または有意な差が認められないことが示された。この要因については、5 章で考察する。

5章 議論

5.1 熊谷のヒートアイランド強度における日中と夜間の違い

熊谷の UHI 強度の日中と夜間の変動は、季節によって異なる特徴を持っている。Oke (1982)は近年の UHI 研究をレビューし、UHI の形成要因は昼間と夜間では大きく異なることを示唆した。そこで、本節では、昼間と夜間の UHI 強度 の季節変動を分けて議論する。

5.1.1 昼間のヒートアイランド強度の季節変動

本節では、昼間 UHI 強度の季節変動の要因に着目する。2章では、熊谷の昼間 UHI 強度の季節変動は、全季節の中で夏が最も大きいことが明らかとなった。その理由として考えられるメカニズムを以下に概説する。

アメリカのシカゴで夏季に日中 UHI 強度が高くなることを示した Ackerman (1985)は、この観測を都市部と郊外の地表熱収支の違いに起因するとしている。晴天時の地表面からの熱輸送は大きいので、晴天時における平均 UHI 強度の季節変化を全天候時における平均 UHI 強度と比較する。図 5-1 は、日中の UHI 強度 の月平均の季節変化を全天候時と晴天時で示したものである。ここでいう晴天とは、熊谷气象台での日照時間が 8 時間以上の日を指す。日中 UHI 強度の晴天日平均は、全天候時と比較して、夏場に大きく、春・冬場に小さくなっている。

さらに、夏の晴天時に、都市部、北部の郊外、南部の郊外の代表的な地点で比湿の観測を行なった。これらの地点は、気温と土地利用の水平分布に基づいて選択された。観測期間は、2015 年 8 月 6 日から 13 日までの連続した 8 日間の晴天である。この期間の日平均最高気温（熊谷气象台）は 35.3°Cであった。観測パラメータは、気温、相対湿度、気圧である。図 5-2 は、都市部、北部郊外、南部郊外の代表地点における比湿の 8 日間平均日変化量である。気温が日中の最高気温に達したとき、北部および南部の郊外の比湿は、それぞれ都市部より 1.5 g kg^{-1} および 1.0 g kg^{-1} 高くなった。これは、特に北部の地点で水田からの蒸発散が促進されたためと思われる。したがって、正味の放射のほとんどが潜熱に変換され、周辺地域の温度上昇を抑制している可能性が高い。榊原 (1994)でも、灌漑期間中の水田では日中の気温が低くなることが報告されている。

以下では、熊谷の日中 UHI 強度の季節変化について、他の都市の報告と比較する。熊谷の日中 UHI 強度は夏に大きく、冬に小さいことがわかった。しかし、他の都市では夏の日中に都市部が低温となる現象が頻繁に発生することが報告されている (Gaffin et al, 2008; 重田・大橋, 2009 など)。近藤・劉 (1998)や菅原ほか (2005)は、日中における都市部の低温を引き起こす要因の一つとして、建物による陰影を挙げている。熊谷の市街地の建物は、都市部の低温を報告している都市の建物と比較して、一般に低層である。したがって、熊谷では建物による遮光による冷却効果が他の都市よりも小さいと推定される。

熊谷における郊外の土地被覆は、作物畑、森林、水田が中心であり、自然や農村地域である。一方、先行研究では、都市と郊外の気温を比較する際、市街地と住宅地などを比較することも多い。その場合、都市と郊外で熱収支の差が小さいため、夏場の気温にそれほど差が

生じないことが推測される。UHI 強度の計算では、郊外の土地被覆を考慮することで、先行研究との結果の違いを説明できる可能性がある。この問題に対し、Stewart and Oke (2012) は、都市観測データの定量分析に用いるために、都市と郊外の景観をそれぞれ数百メートル単位で細分化することを提案した。これらの結果は、各都市の UHI を比較するためには、周辺郊外の土地利用を十分に考慮する必要があることを示唆している。

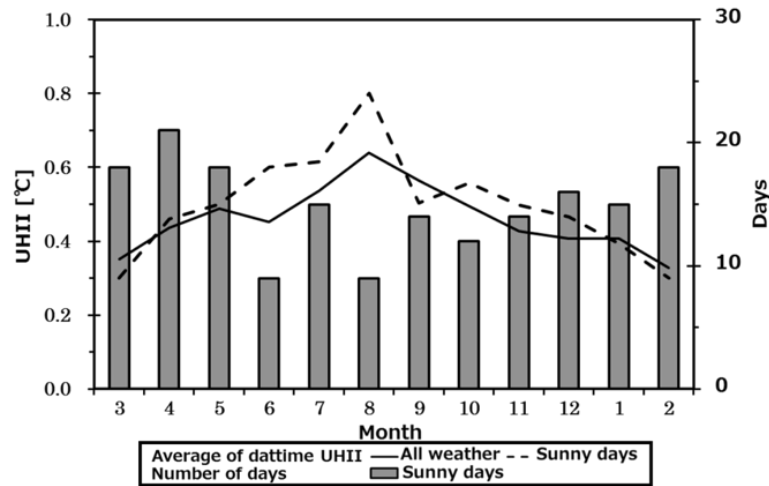


図 5-1 日中における UHI 強度 の月平均値。実線が全天候時、破線が晴天時を示す。棒グラフは晴天日日数

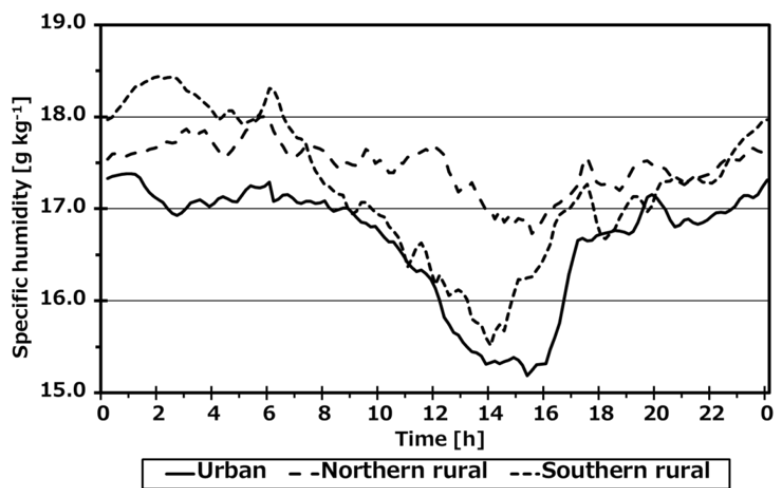


図 5-2 夏季晴天時の都市、北部郊外、南部郊外の代表地点における比湿の時系列

5.1.2 夜間ヒートアイランド強度の季節変動

ここでは、夜間 UHI 強度の季節変動の要因に注目する。熊谷の夜間 UHI 強度は、夏季に最も小さく（6月に最小 0.7°C ）、春季に最も大きく（5月に最大 1.2°C ）なった。しかし、日本の多くの都市では、夜間の UHI 強度は冬に最大となることが報告されており（例えば、榊原, 1994; 重田・大橋, 2009）、本研究の観測結果とは矛盾している。そこで、4月と5月に熊谷で夜間の UHI 強度が大きくなった要因について考察する。夜間の UHI 強度は気象条件によって大きく変動することが示唆されている (Oke and Maxwell, 1975)。夜間の UHI 強度の発生には、地方における地表逆転層の形成が重要である。そこで、本節では、地表逆転層の形成に関係すると思われる熊谷の気象の季節変化を概説する。

図 5-3 は、熊谷気象台における 2014 年 3 月から 2015 年 2 月までの月積算降水量の季節変化を示したものである。夏は局所的なメソスケール循環に伴う降水が多く、積算降水量、降水日数ともに他の季節に比べ大きな値を示した。6月と10月は他の月に比べて降水量が多く、それぞれ梅雨と台風シーズンの影響と思われる。冬の降水量は、北西の乾燥した気流の影響で、夏よりも少なかった。春は、高気圧の通過が多く、降水量は夏より少なかった。特に、2014 年春は高気圧の通過頻度が高く、総降水量や降水日数はそれぞれ約 100 mm, 7日と平年より少ない値であった。

図 5-4 は、熊谷地方気象台の月平均比湿の季節変化である。比湿は夏場が他の季節よりも高く、8月には最大 16.5 g kg^{-1} を記録した。このような夏の高い比湿は、降水量の増加と西北太平洋亜熱帯高気圧からの湿った南風に起因していることと考えられる。これらの結果は、夜間の豊富な水蒸気により放射冷却が抑制され、夜間の UHI 強度が夏季に小さいままであることを示唆される。

降水量と比湿は冬に最も低くなったが、UHI 強度は春より冬の方が小さかった。このように、夜間の UHI 強度の季節変化を降水量と比湿だけで説明することは難しい。Oke (1976) は、強風時に弱風時よりも UHI 強度が小さくなることを報告し、強風が地上気温の接地逆転を破壊し、都市部からの水平方向の暖気移流を増加させることを示唆した。図 5-5 は、熊谷地方気象台における風速と風向の季節変化を示している。風の季節変動は、全天候日と晴天日の月平均で示されている。全天候日では、風向は概ね北から西の範囲にあり（夏季を除く）、冬季の風速は平均して他の季節の風速よりも $\sim 1\text{ ms}^{-1}$ 大きいことがわかる。1月には最大風速 3.2 ms^{-1} が観測された。全天候型平均と比較すると、晴天時の平均風速は 4~5月に 0.3 ms^{-1} 小さく、冬季に 0.3 ms^{-1} 大きい。これらの結果は、夜間の UHI 強度は冬季の強い北西流の下では抑制され、春季の高気圧の頻繁な通過によって増強され、表面逆転層の発達に有利に働くことを示唆するものである。このため、夜間の UHI 強度は冬よりも春に大きくなる。

最後に、熊谷の夜間 UHI 強度の季節変化を他都市の報告値と比較した。その結果、熊谷の UHI 強度の季節変動は、シノプティック規模以上の現象（例えば、移動性高気圧や山越え気流など）に大きく寄与していることが示唆された。Chow and Roth (2006) は、シンガポールで夏と冬にそれぞれ UHI 強度が最大と最小になることを報告した。彼らはこのパターンを、モンスーンの影響による夏の乾燥と冬の雨に起因するものと考えている。Kim and

Baik (2005)は、韓国ソウルの UHI 強度 が秋に最大、夏に最小となることを示した。彼らは、これらの気候学的特性がモンスーン気候に関連していることを示唆しており、本研究とよく似た結果を報告している。

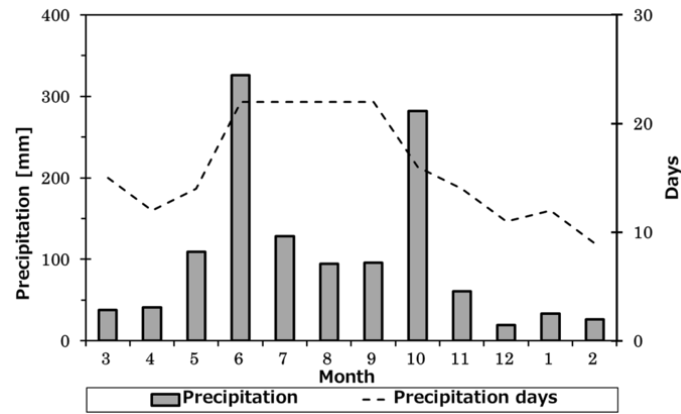


図 5-3 熊谷地方気象台における 2014 年 3 月から 2015 年 2 月までの月積算降水量の季節変化

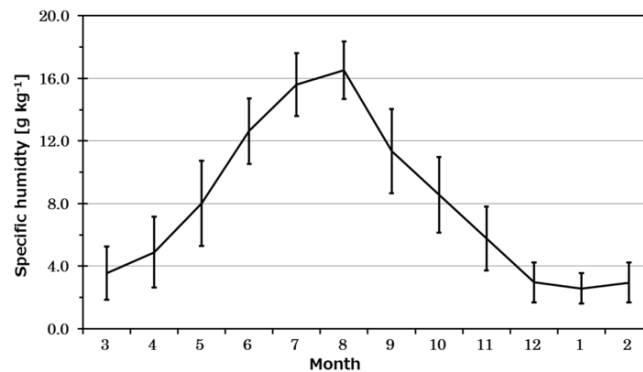


図 5-4 熊谷地方気象台における 2014 年 3 月から 2015 年 2 月までの比湿の季節変化

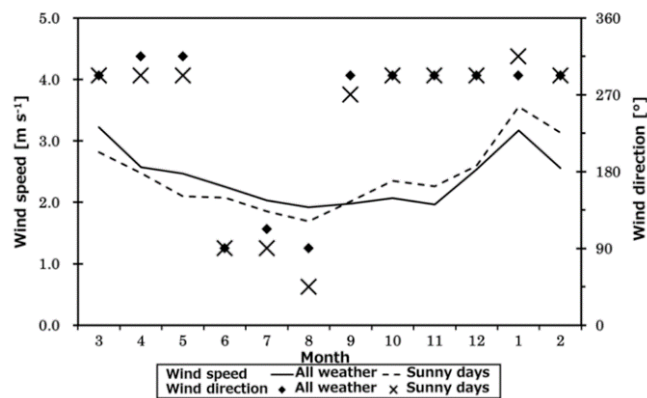


図 5-5 熊谷地方気象台における風速と風向の季節変化

5.2 夜間都市境界層の形成と卓越風の関係

3.3 節において、熊谷市街の $PBLH_{DL}$ が周辺よりも高いことが示され、UBL の 3 次元構造が明らかとなった。さらに、 $PBLH_{DL}$ のピーク (H_{Max}) が出現した地点は、都市内であるものの、事例によって大きく異なっていた。そこでこの節では、 H_{Max} の出現位置と卓越風の間関係を議論する。

図 5-6 は、ルート①およびルート②の各地点において H_{Max} が出現した回数を示す。ルート①において、 H_{Max} は N3 および N4 に最も出現し (7 回)、N5、N6 と郊外に行くにつれて減少する。N3 および N4 は都市の中心位置と一致することから、都市の中心部で $PBLH_{DL}$ が高いことが分かる。一方、ルート②の結果では、 H_{Max} の出現位置が 2 分化されており、西側地点の E3 および E4 で計 4 回、東側地点の E6 および E7 で計 6 回出現している。

この結果について、地上付近の卓越風の影響を検討する。図 5-7 は、 H_{Max} 頻度分布を各ルートに平行な風の風速で分類した結果を示す。分類には、各移動観測時の熊谷地方気象台における風向・風速を基に、各ルートに平行な風を算出して使用した。ルート①の結果、ほとんどの事例 (14 事例) は $\pm 1.0 \text{ ms}^{-1}$ 以下の卓越風であり、 H_{Max} の出現位置も都市の中心位置に近いことを示した (図 5-7a)。ただし、南寄りの風が 1.0 ms^{-1} 以上吹走した事例では、 H_{Max} が都市中心より北側の N5~N8 に出現した (1 事例を除く)。一方、ルート②の H_{Max} は、東寄り 1.0 ms^{-1} 以上の事例で西側の E3 および E4、西寄り 1.0 ms^{-1} 以上の事例で東側の E6 および E7 に出現した。これらの結果より、 H_{Max} が卓越風の風下側に出現することが示唆される。

図 5-8 は、 H_{Max} の出現位置と各ルートの都市中心位置からの距離に対する風速の関係を示している。両者の間に、正の相関関係が示された。さらに、両者を線形関係と仮定した場合、風速が 1.0 ms^{-1} 上昇毎に H_{Max} が風下へ約 600 m 流されることが示唆される。この結果を、中川ほか (2019) の解析解の結果と比較する。中川ほか (2019) は Summers モデルに対して、都市境界層内に都市温度に対応するニュートン冷却機能を付加した。図 5-9 は、ベル型熱源が存在する際の抵抗係数 β 別都市境界層高度の吹走距離分布を示している。 β は以下の式 5-1 で表される。

$$\beta = \frac{\gamma W}{U \pi} \quad \dots 5-1$$

ここで、 γ はニュートン冷却率、 U は風速、 W は都市の幅、 π は円周率である。図 5-9 より、都市幅が一定と仮定した場合、風速が大きくなるにつれて、UBL 高度のピークが風下側へ変化していることが分かる。この特徴は、本研究の観測結果を支持するものである。一方で、都市幅や風速などの定量的な数値は異なっているため、今後のさらなる検討が必要と考えられる。

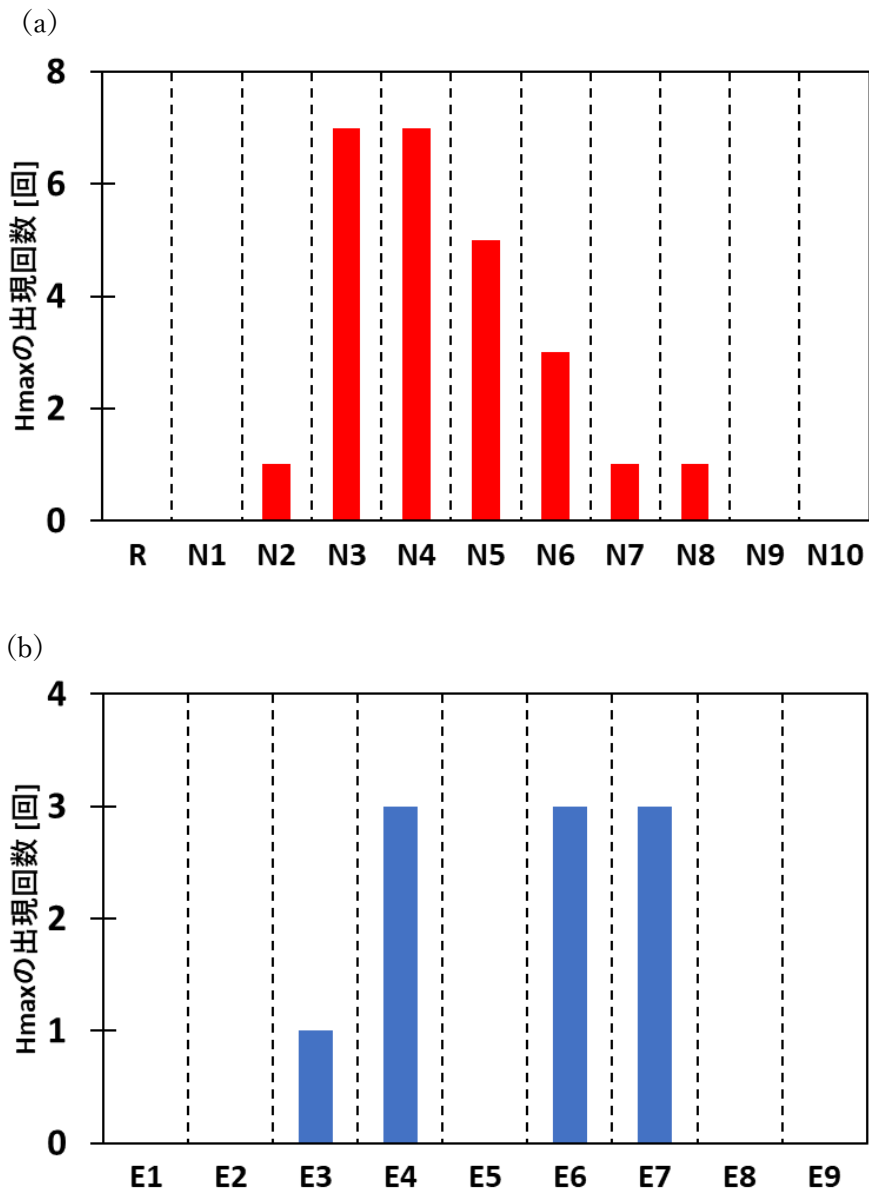


図 5-6 (a)ルート①および(b)ルート②の各地点において $PBLH_{DL}$ のピーク (H_{Max}) が出現した回数

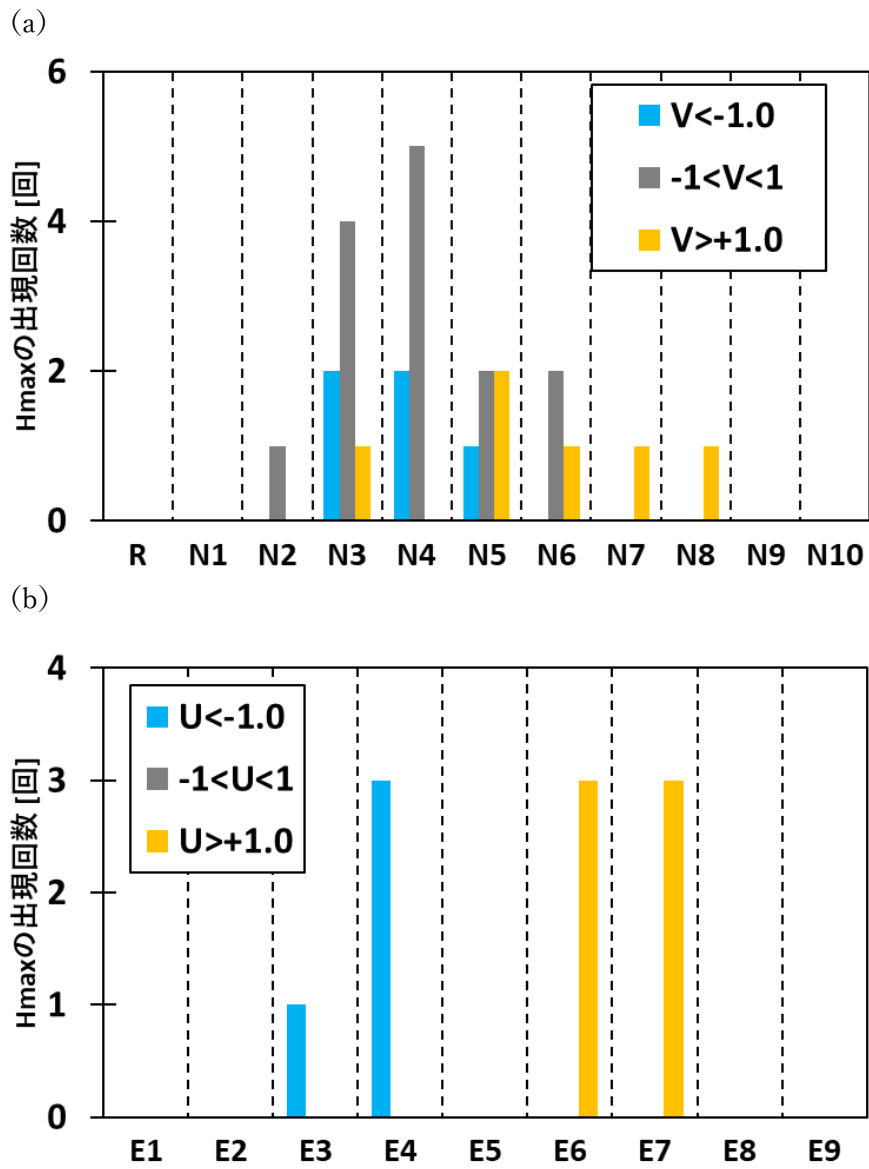


図 5-7 図 5-6 と同じ。ただし、各ルートに平行な風の風速で色分けされている

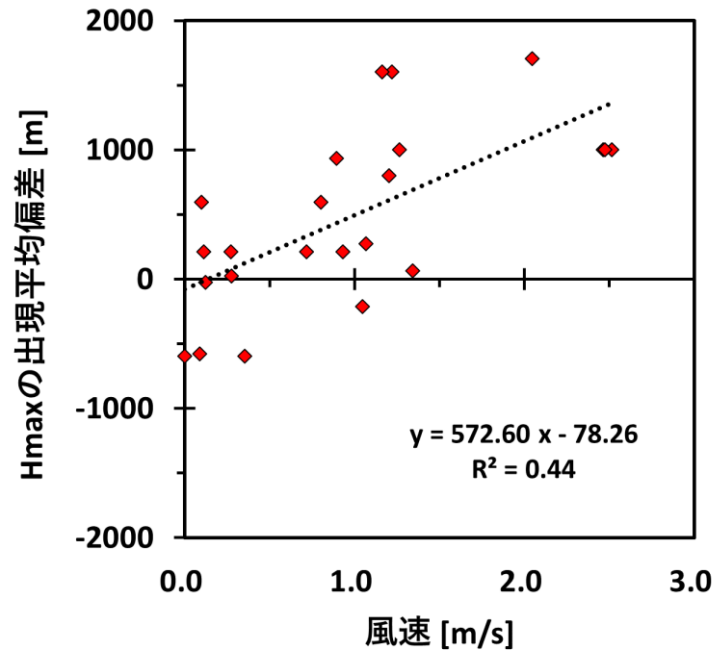


図 5-8 (a)ルート①および(b)ルート②の各地点において $PBLH_{DL}$ のピーク (H_{Max}) が出現した回数

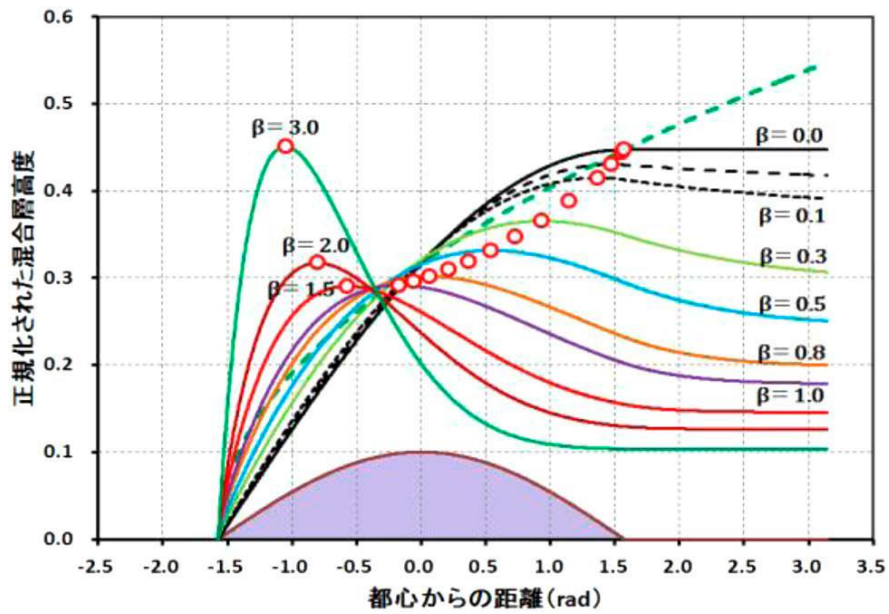


図 5-9 ベル型熱源が存在する際の抵抗係数別都市境界層高度の吹走距離分布 (中川ほか, 2019 より引用)

5.3 UTCI 観測および被験者実験で生じた日傘効果の違い

各場所の温熱環境を比較した結果、UV パラソルは直達日射下より UTCI を 4.1°C 低減させ、その効果は街路樹による低減効果の約 65% に匹敵した。これは、Watanabe and Ishii(2020)の−3.7°Cや、Kusaka et al.,(2022b)の−4.4°Cと、同程度の低減効果を示している。一方、被験者の温熱感覚アンケートによる UV パラソルの熱ストレス緩和効果は、街路樹の約 30% に過ぎず、その他の生理測定結果にも大きな緩和効果は認められなかった。そこで、ここでは UTCI と被験者実験において、UV パラソルの緩和効果に差が生じた要因について考察する。

歩行前後における被験者の表面皮膚温度は、街路樹は全身を低下させていたが、UV パラソルは額にのみ低下傾向が認められた。このことから、UV パラソルは被験者の全身に入射する放射を十分に遮蔽できていないことが推測される。そこで、UV パラソルによる暑熱ストレス緩和効果の高度依存性を検証するための追加実験を実施した。観測は、筑波大学キャンパス内において 2023 年 9 月 19 日の 8 時~16 時に実施した。UTCI は、UV パラソル下の高度 1.5m, 1.0m, 0.5m で観測された (Fig.12a)。主な実験結果は以下の通りである。日平均 UTCI は、他の高度と比較して高度 1.5m が最も低い (日平均 36.2°C) (Fig.12b)。この結果は、日傘を持って歩行した被験者の表面皮膚温度が、その他の部位と比較して額のみ低下したことと一致する。各気象要素をみると、気温および相対湿度は、高度間の差が小さい (Fig.12c, d)。一方、高度 1.5m は、その他の高度よりも風が弱いにもかかわらず、黒球温度が最も低い (Fig.13e, f)。これらの結果から、高度 1.5m における UTCI が他の高度よりも低いのは、同高度における UV パラソルの日射遮蔽効果が他の高度よりも大きいためであると示唆された。したがって、UV パラソルが日射を遮蔽する面積は街路樹と比較して小さく、被験者の全身に入射する日射を十分に遮蔽できていなかったことが、日傘による被験者の熱ストレス緩和が小さかった要因であると考えられる。次に、UV パラソルによる暑熱ストレス緩和効果の時間依存性についても検討する。高度 1.5m の UTCI は、ほとんどの時間において、他の高度よりも低い。しかし、12 時~13 時のみ、高度 1.0m の UTCI が高度 1.5m の UTCI よりも 0.3~0.5°C 低い。これは、同時刻において、高度 1.0m の黒球温度が急低下することに起因している (Fig.13e)。この急低下は、太陽高度の時間変化と一致している。つまり、太陽高度が約 70° 以上となった場合のみ、高度 1.0m の黒球温度計への直達日射が UV パラソルによって遮断されたことを示している。これは、UV パラソルを用いた歩行者に対する暑熱ストレス緩和効果が、太陽高度の違いに伴って、時間変化することを示している。

本研究における被験者実験において、歩行実験が実施されたのは 13 時以降であった。そのため、UV パラソルによる暑熱ストレス緩和効果が最大でなかった可能性がある。UV パラソルによる暑熱ストレス緩和効果の最大を調査するには、被験者が歩行する時間帯を変更した実験が必要と考えられる。また、これまでのいくつかの研究は、UV パラソルの調査する際、UV パラソル下の 1 点のみで気象観測を実施していた。それらの研究結果は、UV パラソルの人体に対する暑さ軽減効果を過大評価している可能性がある。

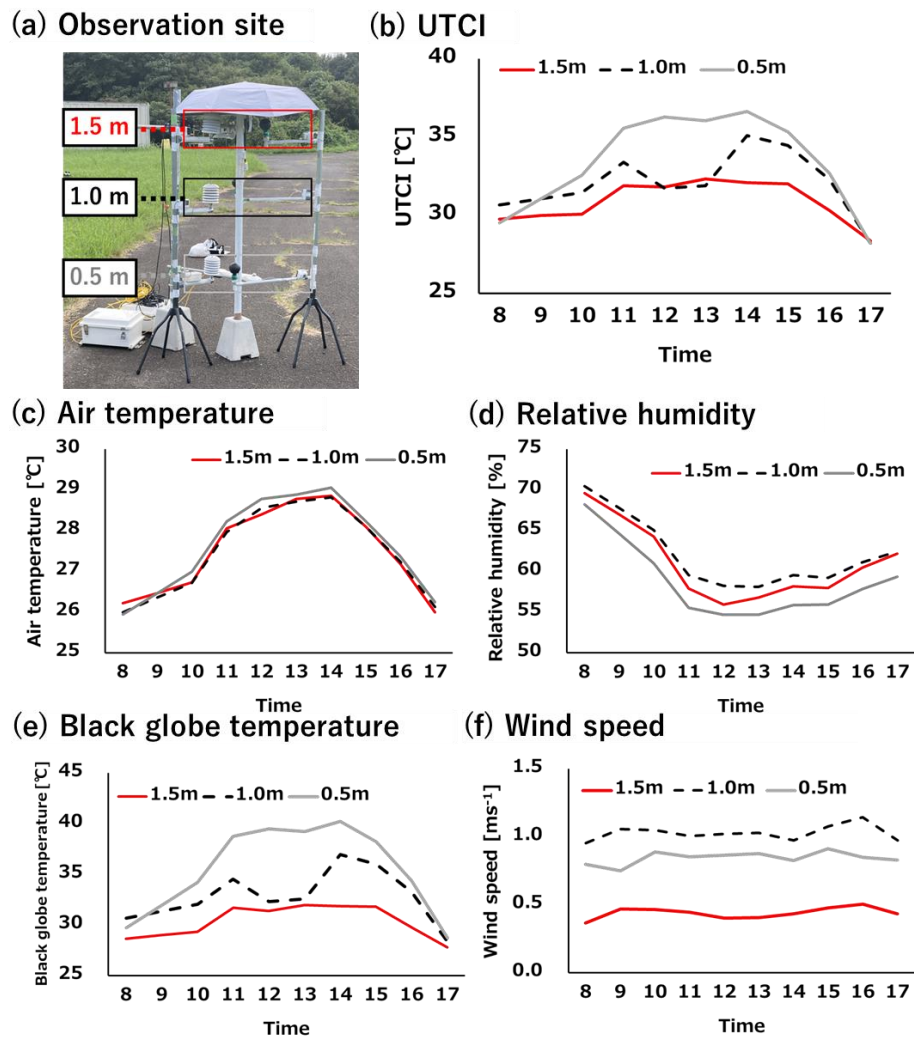


図 5-10 日傘による熱ストレス緩和効果の高度依存性を検証するための追加実験. (a)観測風景. 各高度における(b)UTCIおよび(c)気温, (d)相対湿度, (e)黒球温度, (f)風速の時間変化. 高度 1.5m, 1.0m, 0.5mの日傘下での 2023 年 9 月 19 日 8:00~16:00 の観測値. 各値は前 1 時間の平均値 (測定は 5 分毎)

5.4 中小規模都市の都市ヒートアイランドに対する暑熱適応策

熊谷市の夏季において、都市は郊外と比較して、都市部と郊外の日中の気温差が1°C以上確認された。5.1節において、この要因は、①都市と郊外の熱収支差（特に水田による蒸発散）が大きいことと、②大規模都市と比較して建物による遮光効果が小さいことが指摘された。

蒸発散が増加する効果は、気温低下のみならず湿度の上昇をもたらす。湿度が上昇することで発汗量が減少し、平均皮膚温度や皮膚水分量が増加することが指摘されている（張・田村, 2014）。さらに彼らは、これらの増加が不快感や交感神経活動に悪影響をもたらすことを指摘している。このことから、人に対する熱ストレス改善の観点からすると、中小規模都市においては、建物による遮光効果が小さいことに対処したほうが、より効率的に高い効果が期待される。

4章で指摘したように、街路樹や日傘は人体に入力する放射量を減らすことで、熱ストレスを緩和させる。特に、日傘は直達日射を街路樹以上に遮光する効果を有しており、その遮光効果は98.9%を示した。このことから、中小規模都市のUHIに対する熱ストレス改善策として、日傘による暑熱適応策が推奨される。

6章 結論

本研究は、中小規模都市における UHI の日変化や立体構造の把握、そしてその緩和策について、観測や実験の面からアプローチを実施し、UHI の形成メカニズムの解明や都市住民の熱ストレス改善に貢献することを目指した。

中小規模都市である埼玉県熊谷市を対象として、長期の複数定点観測に基づき、地表気温の水平分布が調査し、UHI の水平構造や季節変動について明らかにした。熊谷市で観測された地上気温の水平分布から、季節を問わず、UHI は昼間よりも夜間の方が顕著であることが示された。また、日中の UHI は夏季に顕著であり、夜間の UHI は冬季に顕著であった。熊谷市の日中の UHI 強度は夏に最大であり、冬に最小となる。この特徴の要因は、大規模都市と比較して、中小規模都市である熊谷市の建物高度が低く建物の遮光による冷却効果が小さかったこと、都市部と水田が多い郊外の地表面熱収支の違いが夏季に大きいことが一因であること示唆された。さらに、夜間の UHI 強度は、他の都市とは対照的に 4～5 月に最大値を示した。この特徴の要因は、4～5 月は移動性高気圧下であることが多く、冬期の山越え北西気流が強い環境と比較して、静穏な晴天日が多いためと考えられる。

UBL 高度および 3 次元風速の空間分布の把握を目的とした DL の移動観測を実施した。はじめに、走査型 DL に対する傾斜補正手法や $PBLH_{DL}$ の算出方法について、精度検証を実施し、それらの有用性を検証した。そのうえで、熊谷市を対象地域として、DL の移動観測を実施した。その結果、都市内において周辺よりも高い $PBLH_{DL}$ が示され、UBL 構造が確認された。さらに、 $PBLH_{DL}$ のピークである H_{Max} は、卓越風によって出現する位置が変化することが明らかとなった。具体的には、風速が 1 ms^{-1} 上昇するごとに H_{Max} の出現位置が約 600 m 風下へ変化した。この特徴は、中川ほか (2019) の解析解による結果を支持するものであった。

都市住民の暑熱適応策である日傘、街路樹などの熱ストレス緩和効果について、温熱指標と被験者実験の 2 つの観点から比較実験を行い、その有効性を評価した。UTCI 観測の結果、日傘の熱ストレス緩和効果は非常に大きいことが示された。具体的には日傘の UTCI は直達日射下と比較して 4.1°C の低下を示し、その低下効果は街路樹の約 65% に匹敵した。UTCI に大きな差が生じた要因は、下向き短波放射のほとんどを遮蔽したことによるものであり、今回使用した日傘の場合 98.9% を遮蔽していた。一方、被験者実験の結果、日傘は被験者の温冷感を緩和させたが、街路樹と比較してその効果は小さかった。具体的には、街路樹の約 30% に留まった。この要因は、日傘が遮蔽できる日射の面積が小さく、被験者が全身に受ける放射量を十分に遮蔽できなかつたためと考えられる。ただし、日傘が遮蔽できる日射量は、太陽高度の変化によって変化するため、適切な場所や時間帯、使用方法を検討することで、被験者への効果は改善が見込まれることが予想される。

最後に、夏季の UHI による熱ストレスの緩和・適応について検討した。中小規模都市の夏季 UHI が発達する一要因には、建物高度が低く建物の遮光による冷却効果が小さいことが挙げられる。日傘は、日射の遮蔽効果が高い点や、都市住民自らが容易に実施できる点等から、中規模都市における夏季 UHI の適応策として有効であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始熱心なご指導をいただいた立正大学の中川清隆名誉教授、渡来靖教授、鈴木パーカー明日香准教授に感謝の意を表します。さらに、増田耕一教授には、本論文を執筆するにあたって、大変なご尽力をいただきました。副査の東京都立大学の高橋日出夫教授には、審査の際に貴重なご意見をいただきました。

筑波大学の日下博幸教授には、被験者実験の設定や調査に関するご助言・ご協力にとどまらず、査読論文の書き方などについて熱心なご指導をいただきました。心より感謝いたします。

都市ヒートアイランド調査の実施及び分析にあたり、公立鳥取環境大学の重田祥範准教授にはひとかたならぬお世話になりました。ありがとうございました。

立正大学の後輩である青木翔太君、伊藤智洸君、田中千尋さん、大津佑介君とは、共同研究を進めることができただけでなく、私生活でも大変お世話になりました。その他、熊谷での調査にあたっては、立正大学の先輩方、同期、後輩の皆様を始め、多くの方々のご協力をいただきました。

筑波大学博士後期課程の浅野裕樹君とは、被験者実験を共同で進め、多くの刺激と示唆を得ることができました。感謝の意を表します。そして、筑波大学日下研究室の研究員ならび学生の皆様には、被験者実験のご協力をいただき、感謝の念にたえません。本当にありがとうございました。

最後に、あたたかい励ましをいつも送り続けてくれた家族に心から感謝します。

参考文献

- Ackerman, B., 1985: Temporal march of the Chicago heat island. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **24**, 547-554, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1985\)024<0547:TMOTCH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1985)024<0547:TMOTCH>2.0.CO;2).
- Ali-Toudert, F. and H. Mayer, 2007: Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy*, **81**(6), 742-754, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.10.007>.
- Angevine, W. M., A. B. White and S. K. Avery, 1994: Boundary-layer depth and entrainment zone characterization with a boundary-layer profiler. *Boundary-Layer Meteorology*, **68**, 375-385, <https://doi.org/10.1007/BF00706797>.
- Asano, Y., Y. Nakamura, A. Suzuki-Parker, S. Aiba and H. Kusaka, 2022: Effect of walking in heat-stressful outdoor environments in an urban setting on cognitive performance indoors. *Building and Environment*, **213**, 108893, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108893>.
- Barlow, J. F., 2014: Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate*, **10**, 216-240, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.011>.
- Barlow, J. F., T. M. Dunbar, E. G. Nemitz, C. R. Wood, M. W. Gallagher, F. Davies, E. O'Connor and R. M. Harrison, 2010: Boundary layer dynamics over London, UK, as observed using Doppler lidar. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, **10**(8), 19901-19938, <https://doi.org/10.5194/acpd-10-19901-2010>.
- Barlow, J. F., T. M. Dunbar, E. G. Nemitz, C. R. Wood, M. W. Gallagher, F. Davies, E. O'Connor and R. M. Harrison, 2011: Boundary layer dynamics over London, UK, as observed using Doppler lidar during REPARTEE-II. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**(5), 2111-2125, <https://doi.org/10.5194/acp-11-2111-2011>.
- Blażejczyk, K., Y. Epstein, G. Jendritzky, H., Staiger and B. Tinz, 2012: Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, **56**, 515-535, <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>.
- Błażejczyk, K., M. Kuchcik, A. Błażejczyk, P. Milewski and J. Szmyd, 2014: Assessment of urban thermal stress by UTCI—experimental and modelling studies: an example from Poland. *Die Erde—Journal of the Geographical Society of Berlin*, **145**(1-2), 16-33, <https://doi.org/10.12854/erde-145-3>.
- Bonferroni, C. E., 1936: Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilita. *Pubblicazioni del R Istituto Superiore di Scienze Economiche e Commerciali di Firenze*, **8**, 3-62.
- Bornstein, R. D., 1968: Observations of urban heat island in New York City. *Journal of Applied Meteorology*, **7**, 575-581, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1968\)007<0575:OOTUHI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1968)007<0575:OOTUHI>2.0.CO;2).
- Bröde, P., D. Fiala, K. Błażejczyk, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, B. Tinz and G. Havenith, 2012: Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate

- Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, **56**, 481-494, <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.
- Browning, K. A. and R. Wexler, 1968: The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, **7**, 105-113, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1968\)007<0105:TDOKPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1968)007<0105:TDOKPO>2.0.CO;2).
- Budd, G. M., 2008: Wet-bulb globe temperature (WBGT)—its history and its limitations. *Journal of Science and Medicine in Sport*, **11**, 20-32, <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.07.003>.
- Chen, L. and E. Ng, 2012: Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade. *Cities*, **29**, 118-125, <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.08.006>.
- Chow, W. T. and M. Roth, 2006: Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. *International Journal of Climatology*, **26**, 2243-2260, <https://doi.org/10.1002/joc.1364>.
- Clarke, J. F., 1969: Nocturnal urban boundary layer over Cincinnati, Ohio. *Monthly Weather Review*, **97**, 582-589, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0582:NUBLOC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0582:NUBLOC>2.3.CO;2).
- Coutts, A. M., E. C. White, N. J. Tapper, J. Beringer and S. J. Livesley, 2016: Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, **124**, 55-68, <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1409-y>.
- Dandou, A., M. Tombrou, K. Schäfer, S. Emeis, A. P. Protonotariou, E. Bossioli, N. Soulakellis and P. Suppan, 2009: A comparison between modelled and measured mixing-layer height over Munich. *Boundary-Layer Meteorology*, **131**, 425-440, <https://doi.org/10.1007/s10546-009-9373-7>.
- Davidson, B., 1967: A summary of the New York urban air pollution dynamics research program. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **17**(3), 154-158, <https://doi.org/10.1080/00022470.1967.10468961>.
- Davis, K. J., N. Gamage, C. R. Hagelberg, C. Kiemle, D. H. Lenschow and P. P. Sullivan, 2000: An objective method for deriving atmospheric structure from airborne lidar observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **17**(11), 1455-1468, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<1455:AOMFDA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<1455:AOMFDA>2.0.CO;2).
- Davies, F., D. R. Middleton and K. E. Bozier, 2007: Urban air pollution modelling and measurements of boundary layer height. *Atmospheric Environment*, **41**, 4040-4049, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.01.015>.
- Eresmaa, N., A. Karppinen, S. M. Joffre, J. Räsänen and H. Talvitie, 2006: Mixing height determination by ceilometer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **6**(6), 1485-1493, <https://doi.org/10.5194/acp-6-1485-2006>.
- Fiala, D., K. J. Lomas and M. Stohrer, 1999: A computer model of human thermoregulation

- for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of Applied Physiology*, **87**(5), 1957-1972, <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.5.1957>.
- Fujibe, F., J. Matsumoto and H. Suzuki, 2018: Regional features of the relationship between daily heat-stroke mortality and temperature in different climate zones in Japan. *SOLA*, **14**, 144-147, <https://doi.org/10.2151/sola.2018-025>.
- 福井英一郎, 矢沢大二, 1957: 最近における都市気候研究の展望. *地理学評論*, **30**, 36-54, <https://doi.org/10.4157/grj.30.36>.
- Gaffin, S. R., C. Rosenzweig, R. Khanbilvardi, L. Parshall, S. Mahani, H. Glickman, R. Goldberg, R. Blake, R. B. Slosberg and D. Hillel, 2008: Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. *Theoretical and Applied Climatology*, **94**, 1-11, <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0368-3>.
- Grimmond, C. S. B., T. R. Oke and H. A. Cleugh, 1993: The role of "rural" in comparisons of observed suburban-rural flux differences. Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales. *IAHS Publications*, **212**, 165-174.
- Gyr, A. and F. S. Rys, 1995: *Diffusion and Transport of Pollutants in Atmospheric Mesoscale Flow Fields*. Kluwer Academic Publishers Group, 232pp.
- Haeffelin, M., F. Angelini, Y. Morille, G. Martucci, S. Frey, G. P. Gobbi, S. Lolli, C. D. O'Dowd, L. Sauvage, I. Xueref-Rémy, B. Wastine and D. G. Feist, 2012: Evaluation of mixing-height retrievals from automatic profiling lidars and ceilometers in view of future integrated networks in Europe. *Boundary-Layer Meteorology*, **143**, 49-75, <https://doi.org/10.1007/s10546-011-9643-z>.
- Hayden, K. L., K. G. Anlauf, R. M. Hoff, J. W. Strapp, J. W. Bottenheim, H. A. Wiebe, F. A. Froude, J. B. Martin, D. G. Steyn and L. G. McKendry, 1997: The vertical chemical and meteorological structure of the boundary layer in the Lower Fraser Valley during Pacific'93. *Atmospheric Environment*, **31**(14), 2089-2105, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(96\)00300-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(96)00300-7).
- Holzworth, G. C., 1964: Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States. *Monthly Weather Review*, **92**(5), 235-242, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1964\)092<0235:EOMMMD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1964)092<0235:EOMMMD>2.3.CO;2)
- Ikeda, T. and H. Kusaka, 2021: Development of models for predicting the number of patients with heatstroke on the next day considering heat acclimatization. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **99**, 1395-1412, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-067>.
- Iwamoto, I. and Y. Ohashi, 2021: Assessing the climatological relationship between heatstroke risk and heat stress indices in 47 prefectures in Japan. *GeoHazards*, **2**, 321-331, <https://doi.org/10.3390/geohazards2040017>.
- Jendritzky, G., R. de Dear and G. Havenith, 2012: UTCI—why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, **56**, 421-428, <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>.

- Jia, S., Y. Wang, N. H. Wong, W. Chen and X. Ding, 2022: Influences of the thermal environment on pedestrians' thermal perception and travel behavior in hot weather. *Building and Environment*, **226**, 109687, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109687>.
- 環境省, 2021: 熱中症予防情報. https://www.wbgt.env.go.jp/wbgt_data.php/ (2021.9.9 閲覧).
- Kántor, N., L. Chen and C. V. Gál, 2018: Human-biometeorological significance of shading in urban public spaces—Summertime measurements in Pécs, Hungary. *Landscape and Urban Planning*, **170**, 241-255, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.030>.
- 河村 武, 1964a: 熊谷市における気温分布の解析. *地理学評論*, **37**, 243-254, <https://doi.org/10.4157/grj.37.243>.
- 河村 武, 1964b: 熊谷市の都市温度の成因に関する二, 三の考察. *地理学評論*, **37**, 560-565, <https://doi.org/10.4157/grj.37.560>.
- 河村 武, 1977: 都市気候の分布の実態. *気象研究ノート*, **133**, 26-47.
- Kikegawa, Y., Y. Genchi, H. Kondo and K. Hanaki, 2006: Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning. *Applied Energy*, **83**, 649-668, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.06.001>.
- Kim, Y. H. and J. J. Baik, 2005: Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, **44**, 591-605, <https://doi.org/10.1175/JAM2226.1>.
- Klemm, W., B. G. Heusinkveld, S. Lenzholzer and B. van Hove, 2015: Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort. *Landscape and Urban Planning*, **138**, 87-98, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.009>.
- 近藤裕昭, 劉 発華, 1998: 1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究. *大気環境学会誌*, **33**(3), 179-192, https://doi.org/10.11298/taiki1995.33.3_179.
- 日下博幸, 高根雄也, 阿部紫織, 高木美彩, 重田祥範, 大橋唯太, 布和宝音, 2012: オープンスペースで実施した定点観測によって捉えられた夏季晴天日におけるつくば市のヒートアイランド: 都市内外の気温差に関する不確実性の評価. *日本ヒートアイランド学会論文集*, **7**, 1-9.
- Kusaka H., Y. Nakamura, Y. Asano, 2022: UV parasol, dry-mist spraying, and street trees as tools for heat stress mitigation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **100**, 677-685, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-035>.
- Kuwagata, T., Y. Ishigooka, M. Fukuoka, M. Yoshimoto, T. Hasegawa, Y. Usui and T. Sekiguchi, 2014: Temperature difference between meteorological station and nearby farmland: Case study for Kumagaya city in Japan. *SOLA*, **10**, 45-49, <https://doi.org/10.2151/sola.2014-010>.
- Lee, I., J. A. Voogt and T. J. Gillespie, 2018: Analysis and comparison of shading strategies to increase human thermal comfort in urban areas. *Atmosphere*, **9**, 91, <https://doi.org/10.3390/atmos9030091>.

- Liu, S. and X. Z. Liang, 2010: Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height. *Journal of Climate*, **23**(21), 5790-5809, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3552.1>.
- Lokoshchenko, M. A., 2002: Long-term sodar observations in Moscow and a new approach to potential mixing determination by radiosonde data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **19**(8), 1151-1162, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<1151:LTSOIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<1151:LTSOIM>2.0.CO;2).
- 松本 太, 福岡義隆, 後藤真太郎, 2002: 熊谷市における都市域の形態や構造の変化に伴うヒートアイランドの変化. *環境情報科学論文集*, **16**, 58, <https://doi.org/10.11492/ceispapers.ceis16.0.58.0>.
- Melas, D. and H. D. Kambezidis, 1992: The depth of the internal boundary layer over an urban area under sea-breeze conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, **61**, 247-264, <https://doi.org/10.1007/BF02042934>.
- Middel, A., N. Selover, B. Hagen and N. Chhetri, 2016: Impact of shade on outdoor thermal comfort—a seasonal field study in Tempe, Arizona. *International Journal of Biometeorology*, **60**, 1849-1861, <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1172-5>.
- 三坂育正, 奥津ノンナパット, 山口 竜, 石丸 泰, 2022: 暑熱環境下における個人の適応策としての日傘の効果評価に関する研究. *環境情報科学論文集*, **36**, 75-80, https://doi.org/10.11492/ceispapers.ceis36.0_75.
- 三菱電機株式会社, 2015: ドップラーライダー (LR-S1D2GA) 取扱説明書. TM-P72516.
- Morakinyo, T. E., L. Kong, K. K. L. Lau, C. Yuan and E. Ng, 2017: A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment*, **115**, 1-17, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.005>.
- Münkel, C., N. Eresmaa, J. Räsänen and A. Karppinen, 2007: Retrieval of mixing height and dust concentration with lidar ceilometer. *Boundary-Layer Meteorology*, **124**, 117-128, <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9103-3>.
- 中川清隆, 2011: わが国における都市ヒートアイランド形成要因, とくに都市ヒートアイランド強度形成要因に関する研究の動向. *地学雑誌*, **120**(2), 255-284, <https://doi.org/10.5026/jgeography.120.255>.
- 中川清隆, 中村祐輔, 渡来 靖, 2019: 非一様地表面熱源や境界層内冷熱源を有する場合の Summers 型都市境界層高度の式. *E-journal GEO*, **14**(1), 163-179, <https://doi.org/10.4157/ejgeo.14.163>.
- 中村祐輔, 重田祥範. 2014: 定点型観測と多変量解析によるヒートアイランド強度の日変化パターンの抽出. *環境情報科学論文集*, **28**, 379-384, https://doi.org/10.11492/ceispapers.ceis28.0_379.
- 中村祐輔, 渡来 靖, 中川清隆, 2017: ドップラーライダー観測による大気境界層高度算出の試み, *地球環境研究*, **19**, 73-82.
- Nakamura, Y., Y. Shigeta, and Y. Watarai, 2018: Seasonal variations of the urban heat island in Kumagaya, Japan. *Geographical Review of Japan series B*, **91**(2), 29-39, <https://doi.org/>

10.4157/geogrevjapanb.91.29.

- 中村祐輔, 重田祥範, 渡来 靖, 2019a: 熊谷地方気象台周辺域における地上気温の空間的なばらつきの評価. *E-journal GEO*, **14**(1), 213-222, <https://doi.org/10.4157/ejgeo.14.213>.
- 中村祐輔, 渡来 靖, 中川清隆, 2019b: 走査型ドップラーライダーに対する傾斜補正手法の提案および検証, *地球環境研究*, **21**, 23-34.
- Nassiri, P., M. R. Monazzam, F. Golbabaie, S. F. Dehghan, A. Rafieepour, A. R. Morteza pour and M. Asghari, 2017: Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for assessment of occupational heat stress in open-pit mines. *Industrial Health*, **55**(5), 437-443, <https://doi.org/10.2486/indhealth.2017-0018>.
- Ng, E. and V. Cheng, 2012: Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong. *Energy and Buildings*, **55**, 51-65, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.025>.
- O'Connor, E. J., A. J. Illingworth, I. M. Brooks, C. D. Westbrook, R. J. Hogan, F. Davies, and B. J. Brooks, 2010: A method for estimating the turbulent kinetic energy dissipation rate from a vertically pointing Doppler lidar, and independent evaluation from balloon-borne in situ measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **27**(10), 1652-1664, <https://doi.org/10.1175/2010JTECHA1455.1>.
- 大橋唯太, 玄地 裕, 亀卦川幸浩, 2003: 東京都心の街区内気温の空間分布とその形成要因について. *環境情報科学論文集*, **17**, 59-64, <https://doi.org/10.11492/ceispapers.ceis17.0.59.0>.
- Oke, T. R., 1973: City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, **7**, 769-779, [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6).
- Oke, T. R., 1976: The distinction between canopy and boundary-layer heat islands. *Atmosphere*, **14**, 268-277, <https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>.
- Oke, T. R., 1981: Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *International Journal of Climatology*, **1**, 237-254, <https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>.
- Oke, T. R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **108**, 1-24, <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>.
- Oke, T. R. and G. B. Maxwell, 1975: Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment*, **9**, 191-200, [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(75\)90067-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(75)90067-0).
- Oke, T. R., G. Mills, A. Christen and J. A. Voogt, 2017: *Urban climates*. Cambridge University Press, 546pp.
- 奥勇一郎, 榭元慶子, 2014: 大阪市における夏と冬のヒートアイランド現象の違いに関する観測的研究. *日本ヒートアイランド学会論文集*, **9**, 1-12.
- Pal, S., I. Xueref-Remy, L. Ammoura, P. Chazette, F. Gibert, P. Royer, E. Dieudonne, J. -C. Dupont, M. Haeffelin, C. Lac, M. Lopez, Y. Morille and F. Ravetta, 2012: Spatio-temporal variability of the atmospheric boundary layer depth over the Paris agglomeration: An assessment of the impact of the urban heat island intensity. *Atmospheric Environment*, **63**,

- 261-275, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.046>.
- Pearson, G., F. Davies and C. Collier, 2010: Remote sensing of the tropical rain forest boundary layer using pulsed Doppler lidar. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **10**(13), 5891-5901, <https://doi.org/10.5194/acp-10-5891-2010>.
- Potchter, O., P. Cohen, T. P. Lin and A. Matzarakis, 2018: Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of The Total Environment*, **631**, 390-406, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.276>.
- Psikuta, A., D. Fiala, G. Laschewski, G. Jendritzky, M. Richards, K. Błażejczyk, I. Mekjavič, H. Rintamäki, R. de Dear and G. Havenith, 2012: Validation of the Fiala multi-node thermophysiological model for UTCI application. *International Journal of Biometeorology*, **56**, 443-460, <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0450-5>.
- Quan, J., Y. Gao, Q. Zhang, X. Tie, J. Cao, S. Han, J. Meng, P. Chen and D. Zhao, 2013: Evolution of planetary boundary layer under different weather conditions, and its impact on aerosol concentrations. *Particuology*, **11**(1), 34-40, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.04.005>.
- Ren, Z., H. Zhao, Y. Fu, L. Xiao and Y. Dong, 2022: Effects of urban street trees on human thermal comfort and physiological indices: a case study in Changchun city, China. *Journal of Forestry Research*, **33**(3), 911-922, <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01361-5>.
- Roth, M., 2000: Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **126**(564), 941-990, <https://doi.org/10.1002/qj.49712656409>.
- Sakai, S., M. Nakamura, K. Furuya, N. Amemura, M. Onishi, I. Iizawa, J. Nakata, K. Yamaji, R. Asano and K. Tamotsu, 2012: Sierpinski's forest: New technology of cool roof with fractal shapes. *Energy and Buildings*, **55**, 28-34, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.052>.
- 榑原保志, 1994: 越谷市に見られるヒートアイランド強度. *天気*, **41**, 515-523.
- 榑原保志, 1999: 長野県小布施町におけるヒートアイランド強度と郊外の土地被覆との関係. *天気*, **46**, 567-575.
- Sakakibara, Y. and K. Owa, 2005: Urban–rural temperature differences in coastal cities: Influence of rural sites. *International Journal of Climatology*, **25**, 811-820, <https://doi.org/10.1002/joc.1180>.
- Schäfer, K., P. Wagner, S. Emeis, C. Jahn, C. Muenkel and P. Suppan, 2012: Mixing layer height and air pollution levels in urban area. *Proceedings SPIE 8534, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XVII; and Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VIII*, **8534**, 36-45, <https://doi.org/10.1117/12.974328>.
- Schween, J. H., A. Hirsikko, U. Löhnert and S. Crewell, 2014: Mixing-layer height retrieval with ceilometer and Doppler lidar: from case studies to long-term assessment. *Atmospheric Measurement Techniques*, **7**(11), 3685-3704, <https://doi.org/10.5194/amt-7-3685-2014>.
- Seibert, P., F. Beyrich, S. E. Gryning, S. Joffre, A. Rasmussen and P. Tercier, 2000: Review

- and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmospheric Environment*, **34**(7), 1001-1027, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00349-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00349-0).
- 関口 武, 1970: 都市気候. *天気*, **17**, 89-96.
- 重田祥範, 大橋唯太, 2009: 岡山市を対象とした細密な気象観測によるヒートアイランド強度の解析. *天気*, **56**(9), 443-454.
- Sicard, M., C. Pérez, F. Rocaadenbosch, J. M. Baldasano and D. García-Vizcaino, 2006: Mixed-layer depth determination in the Barcelona coastal area from regular lidar measurements: methods, results and limitations. *Boundary-Layer Meteorology*, **119**, 135-157, <https://doi.org/10.1007/s10546-005-9005-9>.
- Shochat, E., P. S. Warren, S. H. Faeth, N. E. McIntyre and D. Hope, 2006: From patterns to emerging processes in mechanistic urban ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, **21**, 186-191, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.11.019>.
- Stewart, I. D. and T. R. Oke, 2012: Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**, 1879-1900, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.
- 菅原広史, 池 東旭, 遠峰菊郎, 2005: ヒートアイランド強度算定のための都市気温分布の検討: ソウル (韓国) の例. *天気*, **52**(2), 119-128.
- Summers, P. W., 1964: An urban ventilation model applied to Montreal. Unpub. Ph.D. thesis, McGill University, Montreal.
- Summers, P. W., 1965: An urban heat island model; its role in air pollution problems, with applications to Montreal. Paper presented to 1st Canadian Conference on Micrometeorology, Toronto, April 12-14, 1965.
- Summers, P. W., 1966: The seasonal, weekly, and daily cycles of atmospheric smoke content in central Montreal. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **16**, 432-438, <https://doi.org/10.1080/00022470.1966.10468496>.
- Sundborg, Å., 1950: Local climatological studies of the temperature conditions in an urban area. *Tellus*, **2**(3), 222-232, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v2i3.8544>.
- 高橋日出男, 清水昭吾, 大和広明, 瀬戸芳一, 横山 仁, 2014: 稠密観測データに基づく晴天弱風の冬季夜間における東京都区部を中心とした気温分布について. *地学雑誌*, **123**(2), 189-210, <https://doi.org/10.5026/jgeography.123.189>.
- Takane, Y. and H. Kusaka, 2011: Formation mechanisms of the extreme high surface air temperature of 40.9°C observed in the Tokyo metropolitan area: Considerations of dynamic foehn and foehnlike wind. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **50**, 1827-1841, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-10-05032.1>.
- 高野武将, 成田健一, 三上岳彦, 菅原広史, 本條 毅, 2003: 街路空間における放射量と温度の空間平均と変動—新宿御苑周辺市街地を例として. *環境情報科学論文集*, **17**, 47-52, <https://doi.org/10.11492/ceispapers.ceis17.0.47.0>.

- 田宮兵衛, 1979: 小気候・局地気象—特に移動観測の方法について—. 天気, **26**(10), 633-640.
- Tan, J., Y. Zheng, X. Tang, C. Guo, L. Li, G. Song, X. Zhen, D. Yuan, A. J. Kalkstein, F. Li and H. Chen, 2010: The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*, **54**, 75-84, <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0256-x>.
- Tang, G., J. Zhang, X. Zhu, T. Song, C. Munkel, B. Hu, K. Schäfer, Z. Liu, J. Zhang, L. Wang, J. Xin, P. Suppan and Wang, Y. 2016: Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16**(4), 2459-2475, <https://doi.org/10.5194/acp-16-2459-2016>.
- 豊田康嗣, 中屋 耕, 橋本 篤, 松宮央登, 田中伸和, 2009: ドップラーライダーを用いた風速観測手法についての検討. 研究報告 N08032, 電力中央研究所報告, 32.
- Ulpiani, G., Di Giuseppe, E., Di Perna, C., D’Orazio, M. and Zinzi, M. 2019: Thermal comfort improvement in urban spaces with water spray systems: Field measurements and survey. *Building and Environment*, **156**, 46-61, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.007>.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019: World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations, <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>.
- Vanos, J. K., A. J. Herdt and M. R. Lochbaum, 2017: Effects of physical activity and shade on the heat balance and thermal perceptions of children in a playground microclimate. *Building and Environment*, **126**, 119-131, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.026>.
- Wagner, P. and K. Schäfer, 2017: Influence of mixing layer height on air pollutant concentrations in an urban street canyon. *Urban Climate*, **22**, 64-79, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.11.001>.
- Watanabe, S., and J. Ishii, 2016: Effect of outdoor thermal environment on pedestrians’ behavior selecting a shaded area in a humid subtropical region. *Building and Environment*, **95**, 32-41, <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.015>.
- Watanabe, S. and J. Ishii, 2017: Mitigation of pedestrian heat stress using parasols in a humid subtropical region. *International Journal of Biometeorology*, **61**, 2009-2019, <http://doi.org/10.1007/s00484-017-1393-2>.
- 渡邊慎一, 石井 仁, 2020: 日傘による暑熱環境緩和効果の実証的研究. 日本生気象学会雑誌, **56**(4), 133-144, <https://doi.org/10.11227/seikisho.56.133>.
- 渡来 靖, 中村祐輔, 青木翔太, 2017: 単ードップラーライダーによる VAD 水平風推定値の品質評価—ダブルセオドライト法によるパイバル観測値との比較—, 地球環境研究, **19**, 83-94.
- Wong, N. H. and A. Z. M. Chong, 2010: Performance evaluation of misting fans in hot and humid climate. *Building and Environment*, **45**, 2666-2678, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.026>.

- Yaglou, C. P. and D. Minard, 1957: Control of heat casualties at military training centers. A.M.A. Archives of Industrial Health, **16**, 302-316.
- Zare, S., N. Hasheminejad, H. E. Shirvan, R. Hemmatjo, K. Sarebanzadeh and S. Ahmadi, 2018: Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year. Weather and Climate Extremes, **19**, 49-57, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.01.004>.
- Zhang, X., Y. Lei, R. Li, A. Ackerman, N. Guo, Y. Li, Q. Yang and Y. Liu, 2022: Research on thermal comfort of underside of street tree based on LiDAR point cloud model. Forests, **13**(7), 1086, <https://doi.org/10.3390/f13071086>.
- 張 静風, 田村照子, 2014: 環境温湿度が人体に与える暑熱ストレスに関する基礎研究—生理・心理・自律神経・唾液アミラーゼ反応から—. 繊維製品消費科学, **55**(10), 756-765, https://doi.org/10.11419/senshoshi.55.10_756.