

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	都市域における気象擾乱を考慮した乱流場・放射場の連成解析手法の構築と暑熱環境評価への展開
Title(English)	
著者(和文)	新井舞子
Author(English)	Maiko Arai
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第332号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:坂田 弘安,鍵 直樹,湯浅 和博,浅輪 貴史,村田 涼
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第332号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

2024 年度 学位論文

都市域における気象擾乱を考慮した  
乱流場・放射場の連成解析手法の構築と  
暑熱環境評価への展開

東京科学大学

環境・社会理工学院 建築学系 建築学コース

新井 舞子



## 論文要旨

本論文は「都市域における気象擾乱を考慮した乱流場・放射場の連成解析手法の構築と暑熱環境評価への展開」と題し、以下の5章から構成されている。

**第1章「序論」**では、近年の猛暑に対して都市部で重要視されている熱中症防止に向けた暑熱環境の予測技術として用いられる CFD (Computational Fluid Dynamics, 数値流体計算) の活用事例について、既往研究から従来の屋外熱環境解析・評価技術の課題点を整理し、本論文の位置づけを明確にした。従来の建築環境工学分野で平均的な流れ場を簡易的に評価する際に使われてきた RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) はモデル化の影響が大きく、建物が密集する乱流場の再現性に課題がある。そこで、モデル化の影響が小さく街区内の流れ場の再現性が高い LES (Large Eddy Simulation) によって非定常な乱流場を再現する必要性を説明するとともに、暑熱環境の悪化が懸念される街区内のような弱風域において、メソ気象スケールからの風速・温度変動の影響や乱流・放射・熱伝導の相互影響を正しく推定することの重要性について示した。建物が密集する街区内での複雑な乱流場における熱中症危険性の正確な評価を実現することを目指して、乱流場と放射場の相互影響やメソ気象スケールからの影響を考慮した暑熱環境評価手法の構築を本研究の目的として述べた。

**第2章「熱放射を考慮した都市乱流場の LES の検証と実市街地への適用性」**では、街区内の乱流・放射・熱伝導の相互作用を考慮した乱流場・放射場の連成解析手法の提案と基礎的な検証を目的とした。提案手法について実測値と比較した基礎的な検証が必要となるため、解析結果の検証に活用できる一般的な夏季日中の街路気温実測データ等がある実都市を対象として市街地における熱放射を考慮した LES を実施し、乱流場と放射場の相互影響を考慮した市街地内の非定常温熱場を示すとともに、提案手法の妥当性の検証と実市街地への適用性があることを確認した。

**第3章「都市気象擾乱に基づく温度不安定性を考慮した流入変動風の作成・検証」**では、猛暑時の暑熱環境解析および暑熱環境評価のための流入境界条件作成手法の構築を目的とした。猛暑時のように、地表面近傍が極端に高温となり熱的な影響が強い条件下の市街地内の非定常温熱場を再現するためには、メソ気象スケールの影響や温度の変動を考慮した流入変動風が必要となることから、気象擾乱に基づく熱的な影響を考慮した流入変動風を作成した。流入変動風の基礎的な物理特性の確認のため、一例として既往研究の風洞実験と比較し、その乱流特性をよく再現していることを確認した。

**第4章「猛暑日の気象擾乱を考慮した都市域の乱流場・温熱場の推定と暑熱環境評価への展開」**では、提案手法の猛暑日への適用例として2018年7月の東京都市域を対象とした暑熱環境解析を実施し、市街地内の暑熱環境の実態把握と暑熱環境評価のために気温、風速、平均放射温度 (Mean Radiant Temperature, MRT) およびそれらの瞬時値から換算した湿

球黒球温度 (Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT) の非定常特性の確認を試みた。先ずメソ気象スケールの影響を考慮した流入変動風を作成する必要があるため、メソ気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting model) および WRF-LES によって猛暑日の気象場を再現し、この解に基づいて、第3章の手法によって作成した気象擾乱を考慮した流入変動風を市街地スケールの解析の流入境界条件として用いた。次に、観測データのある東京管区気象台を含む東京都市域の市街地スケールの解析を行い、気象台観測値との比較検証により本手法の整合性を確認した。続いて、前述の解析により再現された街区内の複雑な乱流場・温度場を確認するとともに、熱中症リスクの評価上重要となる熱放射の影響を考慮した指標である MRT や非定常 WBGT も含めて詳細な時空間分布や時系列データを明らかにした。主要道路の交差点角部や高層建物後流の低風速域かつ日向の領域では、気温や非定常 WBGT の変動が大きく高い値が断続的に発生していることから、熱中症危険性を評価する上で時空間方向に平均化された値だけでなく、建物周辺の複雑な乱流場における局所的な暑熱環境を評価する必要性を示した。

**第5章「結論」**では、前章までに得られた成果を総括し、今後の課題・展望を述べた。

以上より、本研究で用いた市街地における乱流場・放射場の連成解析手法および気象擾乱を考慮した流入変動風作成手法は、建物が密集する街区内の複雑な乱流場における暑熱環境を評価する上で適切な予測精度を有することが確認され、また、猛暑日における都市域の暑熱環境評価に際し、気温、風速、MRT および非定常 WBGT の詳細な時空間分布や変動特性を明らかにすることで、今後の暑熱環境評価の発展に資するデータの取得が可能となることを示した。

# 目次

論文要旨.....	3
1章 序章.....	7
1.1 研究の背景.....	7
1.2 既往研究と本研究の位置づけ.....	10
1.2.1 乱流場・放射場・熱伝導の連成解析手法.....	10
1.2.2 気象擾乱を考慮した流入境界条件.....	11
1.2.3 猛暑時の市街地内暑熱環境評価手法.....	12
1.3 研究の目的.....	15
1.4 論文の構成.....	15
2章 熱放射を考慮した都市乱流場の LES の検証と実市街地への適用性.....	23
2.1 はじめに.....	23
2.2 実市街地における乱流場・放射場の連成解析手法と壁面熱伝達モデル.....	25
2.2.1 乱流場・放射場の連成解析手法.....	25
2.2.2 壁面熱伝達モデル.....	28
2.3 単純建物モデルを対象とした壁面熱伝達モデルの適用性検証.....	30
2.3.1 本節の目的.....	30
2.3.2 風洞実験概要.....	30
2.3.3 解析概要.....	31
2.3.4 実験結果との比較.....	34
2.4 実街区モデルを対象とした解析手法の精度検証.....	36
2.4.1 流入境界条件の設定.....	36
2.4.2 解析概要.....	37
2.4.3 解析結果.....	39
2.5 市街地内の気温変動の非定常特性に関する考察.....	44
2.6 まとめ.....	48
3章 都市気象擾乱に基づく温度不安定性を考慮した流入変動風の作成・検証.....	55
3.1 はじめに.....	55
3.2 メソ気象モデルの解に基づく高周波変動成分を付加した流入変動風の生成手法.....	57
3.2.1 空間フィルタリング・リスケーリング手法の粗面境界層への適用 (region1).....	58
3.2.2 メソ気象モデル結果の大気安定度を考慮した非等温 LES 解析による速度・温度のデータベースの生成 (region2).....	59
3.3 不安定温熱場の実市街地を対象とした流入変動風.....	61
3.3.1 解析概要, 解析条件.....	61
3.3.2 作成した流入変動風の乱流場の確認.....	65

3.3.3	気象擾乱を考慮した流入変動風の乱流特性の比較.....	67
3.4	まとめ .....	71
4 章	猛暑日の気象擾乱を考慮した都市域の乱流場・温熱場の推定と暑熱環境評価への展開 .	75
4.1	はじめに.....	75
4.2	解析手法と猛暑日の気象擾乱を考慮した流入境界条件の作成.....	76
4.2.1	実市街地における乱流場・放射場の連成解析手法.....	76
4.2.2	都市気象擾乱に基づく温度不安定性を考慮した流入変動風作成手法.....	76
4.2.3	WRF,WRF-LES による 2018 年猛暑日の気象場の再現と気象観測値の比較 .	78
4.2.4	猛暑日の気象擾乱を考慮した流入変動風の作成.....	86
4.3	猛暑時の都市域における暑熱環境の評価.....	89
4.3.1	解析概要と気象擾乱を考慮した猛暑時の乱流場・温熱場の確認.....	89
4.3.2	都市域の乱流場における暑熱環境評価 .....	93
4.4	まとめ .....	106
5 章	結論.....	111
5.1	結論.....	111
5.2	今後の展望 .....	113
付録	.....	114
本研究に関連する発表論文	.....	115
謝辞	.....	117

# 1章 序章

## 1.1 研究の背景

近年、夏季の猛暑が社会問題となっており、特に都市部において熱中症防止に向けた暑熱リスク評価が重要なテーマとなっている。気象庁によると2018年7月には関東・東海を中心に記録的猛暑が観測され、埼玉県熊谷市で日本観測史上最高となる41.1°Cを観測した<sup>1)</sup>。また、東京都青梅市でも都内観測史上初の40°Cを超えとなる40.8°Cを観測し、東京管区気象台(北の丸)では観測史上第3位となる39.0°Cを観測した。都内では他にも計4地点で39°C以上となった。夏季の暑熱環境の悪化により熱中症による救急搬送者数も増加傾向であることから、温熱環境は快適性の域を超え、人命に関わる危険性のレベルに達していると言える。環境省では熱中症への警戒を呼び掛けるため、熱中症予防情報サイト<sup>2)</sup>で暑さ指数として湿球黒球温度(Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT)を公開しており、2024年4月から熱中症特別警戒アラート<sup>3)</sup>の運用を開始する等、熱中症の危険性への関心が高まっている。

熱中症の危険性評価という観点ではこれまでの快適性の評価と比べてより正確な評価が求められる。特に人体への影響が懸念される街区空間での温熱環境に着目すると、ヒートアイランド現象のような非等温現象下では、熱が滞留しやすい建物後流や都市キャノピー内のような弱風域で特に悪化が懸念されるため、建物形態や周囲の状況に合わせた熱環境を正しく推定する必要がある。このような都市の地表近傍領域(都市キャノピー内を含む)での気流場・温度場の予測には数値流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)に基づくシミュレーション技術が活用されている。

都市の屋外温熱環境の概念図を図1.1に示す。屋外温熱環境の形成には、主に日射(短波長放射)、長波長放射、気流による熱伝達、地中・建物内部からの熱伝導等の様々な要素が関連している。したがって、このような屋外温熱環境を総合的に解析するためには、空気の輸送、熱の輸送、放射等の関連する物理現象を連成して解析する必要がある。放射場にとって重要となる表面温度の決定には、壁面・地表面周辺気流による対流熱伝達も大きく影響するため、対流場と放射場の連成解析が必要だと考えられる。ここで、本研究では都市域の建物が密集して建ち並ぶ地域を対象と位置付け、建築環境分野での温熱4要素(気温・気流・放射・湿度)のうち、特に建物周辺の気温、気流、放射の時空間変化に着目して、それらと建物・地表面での熱伝導の相互影響を考慮した解析手法の構築を目指す。

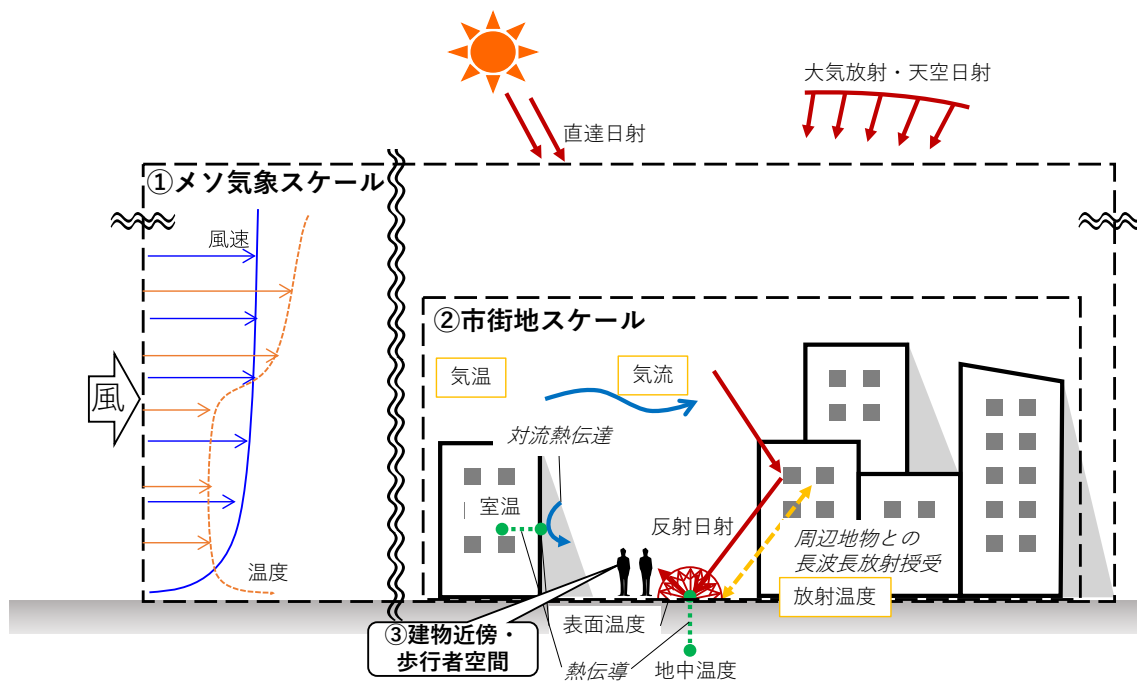


図 1.1 都市の屋外温熱環境の概念図

従来の都市・建築分野におけるヒートアイランド解析<sup>例えば, 4,5)</sup>では, 人工排熱や都市表面での熱放射および蓄熱の影響に着目し, 熱放射と熱伝導の連成解析による表面温度分布と気温分布の推定が中心であり, 都市キャノピー内の乱流構造は再現されていなかった。このため, 対流熱伝達の影響は考慮されていない放射場・温熱場の予測および評価に留まっていた。一方で, 東京の湾岸地域に汐留地区のように 200m を超える高層ビル群によって, 東京湾からの冷涼な海風の流入が妨げられ, 夏期の気温上昇の可能性が指摘されるなど, 気流場によるヒートアイランド現象への影響も注目され始めた。その後, 計算機能力の発達により, RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) モデルを用いた気流解析と熱収支解析の組み合わせによる検討例も出てきた。例えば, 梅干野ら<sup>4)</sup>は屋外熱収支シミュレータを開発し, 街区スケールの表面温度分布の予測を可能にした。山村ら<sup>6)</sup>は梅干野らの熱収支シミュレータと CFD (RANS) を組み合わせた連成解析手法の基本構成を提案しており, その手法を発展させ 24 時間分を 1 時間おきに解いた事例もある<sup>7)</sup>。ここで, 屋外熱環境は乱流場との相互作用があるため, 本来非定常現象である。前述のような建築環境工学分野における実都市を対象とした気流解析との連成解析では, 計算負荷等の理由から RANS による定常解析に基づく評価を行うことが多かった。近年の計算機能力の向上等により, 市街地の複雑な乱流場での熱環境評価において RANS よりも乱れに対するモデル化の影響を抑えて再現できる LES (Large Eddy Simulation) との連成解析も実施できるようになりつつある。RANS モデルは流れの基礎方程式に対してアンサンブル平均や時間平均といった平均化操作を施した

平均流のみを解析対象とし、平均値からのずれの乱れ成分をモデル化するため、乱れに対するモデル化の影響が大きく、建物後方の循環流の大きさや再付着距離の再現性に課題がある<sup>8,9)</sup>ため、都市キャノピー内のような複雑乱流場での予測精度に限界がある。一方で、LESでは、空間フィルタ操作によって、計算格子幅よりも大きなスケールの渦のみを解析対象とし、格子幅以下のスケールの乱れをモデル化している。よって、建物角部での剥離流や非定常な渦構造の再現が可能であるため、RANSモデルよりも精度の良い熱や流れ場の物理量を得た上で熱環境評価に用いることが出来る。RANSモデルとLESで同じように平均場を求めたとしても、街区内の複雑な流れ場をよりモデル化の影響を抑えて再現できる<sup>8,9)</sup>LES結果から得られた平均場の方が実現象に近い分布となることが期待される(例えば、10,11)。

以上より、市街地のような複雑な乱流場における熱環境の評価での気流解析については、一般に実務で使われるRANSモデルよりも、風速や気温の変動や局所的なピーク発生等の非定常現象を再現できるLESの利用および熱放射を考慮した検討が必要となる。LESでは実際の都市の建物形態を再現し、建物群によって形成される大小様々な渦構造を持つ場での熱環境を精度良く推定することが出来るため、現状の市街地での暑熱環境に対する対策に寄与する資料を提示する上で有効だと考えられる。

2018年のような記録的な猛暑日の高温発生要因の一つとしては、山を越えて吹く乾燥した暖かい風によるフェーン現象等が考えられる。このようなメソ気象スケールでの気流や熱の流れを再現する手法として、メソ気象モデルの一つであるWeather Research and Forecasting (WRF)が挙げられる。既往の研究では過去の関東平野内陸部における高温発生について調査されており、フェーン現象の影響を示唆している<sup>12~14)</sup>等)。その中で2018年7月の熊谷での高温発生について、WRFによる解析等から北陸地方からの北西風によるフェーン現象がその一因として考えられると述べている<sup>12)</sup>。また、熱中症危険性を考える上では、人口が集中している東京都市域での温熱環境を明らかにすることも必要となる。同日の東京都市域では、熊谷での高温発生要因の一つであるフェーン現象による移流特性によって温度が上昇し、その後、海風が南東側から侵入し温度が低下したと考えられるが、既往研究<sup>22)</sup>では東京都市域での高温発生状況についてあまり考察されていない。東京都市域では建物が密集しており複雑な乱流場が形成されているため、メソ気象スケールよりも詳細な乱流構造を再現できる市街地スケールでの予測が求められる。

## 1.2 既往研究と本研究の位置づけ

### 1.2.1 乱流場・放射場・熱伝導の連成解析手法

既往研究では、都市を対象とした熱環境解析の例として、実都市を対象とした研究では、熱放射・熱伝導解析のみによって評価するもの<sup>4)</sup>や、熱放射・熱伝導解析によって得られた表面温度を流体解析の境界条件として用いたもの<sup>15)</sup>等がある。また、熱流体解析に主眼を置き、熱画像データから換算した表面温度を境界条件として与えた LES<sup>16)</sup>等も行われている。これらの解析では表面温度算出の際に、熱放射・熱伝導あるいは気流による対流熱伝達による影響が考慮されていないため、放射場の計算上重要となる表面温度に誤差が生じる懸念がある。また、流体解析を行わない場合、人体温熱快適性に大きく影響する風速の値が予測されないという課題もある。

また、RANS を用いて CFD と放射の連成解析を行った既往研究も見られる。例えば、吉田ら<sup>17)</sup>は RANS による CFD シミュレーションと放射解析と湿度輸送方程式を連成することで、対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析手法を提案している。原山ら<sup>18)</sup>は、この手法を非定常問題に適用するため、CFD を除いた非定常放射解析と熱伝導解析を連成するように改良した解析手法を提案し、Chen et al.<sup>19)</sup>等はこの手法を用いて屋外の温熱環境予測を行っている。また、1.1 節でも述べたように、梅干野ら<sup>4)</sup>の屋外熱収支シミュレータと RANS 解析を連成させて、解析対象時刻とその 1 時刻前について RANS 解析との連成解析を行う研究<sup>6)</sup>や、さらに発展させて 24 時間分を 1 時間毎に連成することでより長時間の蓄熱現象も考慮した解析を行っている研究<sup>7,20-21)</sup>等がある。一方で、近年気象モデルを用いて、都市空間の微気象を対象とした対流・放射・伝導と気流場を連成したシミュレーションが行われている。例えば、大気・海洋流れを対象とした PALM<sup>22)</sup>を用いた研究<sup>23)</sup>や、マルチスケール大気海洋結合モデル MSSG により市街地スケールの LES に放射・伝導を連成し、さらに樹木の影響を考慮した解析に関する研究<sup>24)</sup>が挙げられる。しかしながら、これらは気象モデルをベースとした直交格子系であるため、市街地の複雑な建物近傍流れの予測には課題があると考えられる。また、市街地スケールの CFD モデル (URANS) に気象モデルの結果を接続し、詳細な建物形状を解像して温熱環境解析を行った研究<sup>25)</sup>もある。しかし、気象モデル内の都市キャノピーモデルでは放射や熱特性の影響を考慮しているが、市街地スケールの CFD では放射の影響は考慮されていない。また、URANS では建物周辺における弱風域の浮力流と周辺気流のバランスによる複雑な流れ場の再現性等に課題がある。実現象では、都市表面において熱放射・熱伝導及び対流熱伝達が相互に影響して表面温度が決定され、それに伴って温熱場や乱流場が形成されるため、今後は乱流場と熱放射・熱伝導の影響を考慮した連成解析による暑熱環境の予測・評価技術の発展が期待される。また、暑

熱環境の適応策の一つとして街路樹が挙げられる。樹木には緑陰による暑熱環境の改善効果がある一方、風速低減や湿度発生のような悪影響も考えられ、その影響を単純に評価することは難しい。前述の既往研究の中にも、樹木による温熱環境への影響を考慮した検討例がある<sup>18,21,24等</sup>。そこで本研究では、街路樹等の暑熱環境対策の検討のベースとなる市街地内暑熱環境の現象の再現を目的とし、乱流場・放射場・熱伝導の影響を考慮した解析手法の構築によって今後の暑熱環境改善策の評価の発展への貢献を目指す。

実都市を対象とした熱放射を考慮した LES による予測のモデル上の課題として、都市表面と流体場の相互影響や連成プロセスに対して、熱放射解析との連成のモデル化が挙げられる。熱放射解析との連成のモデル化については、都市表面での熱収支を考える上で、流体による対流熱伝達量、壁面からの熱放射量、地中および建物内部からの熱伝導量の流入出を反映させるプロセスが重要となる。そこで本研究では、複雑な都市表面からの熱放散過程を再現する手法として、乱流場・放射場の連成解析を実施する。

## 1.2.2 気象擾乱を考慮した流入境界条件

2018 年猛暑日のように、地表近傍が高温となり流れ場に網目状の構造が見られるような熱的影響が強く大気が不安定な場では、フェーン現象や海風流入等、メソ気象スケールでの風速・温度変動が都市キャノピー内の温熱環境に与える影響も大きいと考えられる。例えば、都市キャノピー内の瞬間的な風速分布は上空で発達する乱流構造の影響を受けていることを示した既往研究もある<sup>26</sup>。そこで、従来の流体力学的な境界層のプロファイルを仮定するのではなく、実際の気象場での風速・温度変動を反映し、熱的な影響を考慮した流入変動風の生成することが課題となっている。

流入変動風の作成手法に関する既往の研究では、予備計算によって風速変動等を得る方法<sup>27~30</sup>等と、目標とする乱流統計量を満たすように乱数を用いて人工的に変動風を生成する手法<sup>31~33</sup>等がある。後者ではデジタルフィルタによる手法によってレイノルズ応力のコレルスキー分解により流入変動風を生成する手法<sup>31,32</sup>やスカラー変動に拡張した変動風生成手法<sup>33</sup>が提案されている。これらの手法は目標とした統計量を満たす変動風を生成できるが、運動方程式や連続条件が成立しない場合がある。一方、前者のうち温度変動を考慮した手法の一つとして、Lund et al.<sup>28</sup>の方法を用いた準周期境界条件によりドライバ領域で中立状態の乱流境界層の変動風を計算<sup>34,35</sup>してから、流入条件に鉛直温度プロファイルを与えて温度を含む予備計算を行い、温度の変動を含む流入変動風を作る手法<sup>27,30</sup>等（以下、準周期型とする）がある。これらの手法は運動方程式や連続条件を満たす結果が得られるが、事前計算が

必要となるため一般的に計算負荷が高くなるとされる。また、流体力学的な境界層のプロファイル（気象場の変動成分が含まれていない乱流境界層を仮定し流体力学の基礎方程式のみによって作成された境界層プロファイル）を仮定しているため、実際の気象場の風速・温度プロファイルや気象場に由来する変動性状は反映されていない。

実際の気象場での速度変動を用いて流入条件を作成する手法の一つとして、河合、田村<sup>36)</sup>は準周期境界を用いたドライバ領域での LES によって生成された高周波な風速の変動を持つ成分を、メソ気象モデルの解に付加することで、メソ気象モデルの結果に高周波な風速変動を付加した流入条件を作成する方法（空間フィルタリング・リスケーリング手法）を提案している。また、都市境界層内での風速変動の断続的なピークの発生について、前述の手法にて再現された都市境界層上空の変動による影響を示唆している<sup>37)</sup>。しかしながら、既往研究では中立場を対象としており、温度変動や大気安定度の影響は考慮されていない。一方で、筆者らはこれまで速度場についてメソ気象モデルではなく準周期型乱流境界層を元にして、温度条件としてメソ気象モデルから得られた鉛直温度プロファイル（時間平均値）を流入条件としてドライバ領域で計算した流入変動風<sup>16,38)</sup>等を用いた解析を行ってきたが、速度場の気象擾乱が考慮されていないことが課題であった。

そこで本研究では、不安定な温熱場における市街地内の乱流場・温熱場予測に用いるための時間変化が抑制された流入境界条件の作成を目的として、空間フィルタリング・リスケーリング手法<sup>36)</sup>に大気安定度等の影響を考慮したドライバ領域を追加し、気象擾乱および大気安定度を考慮した流入変動風作成手法の提案とその乱流特性を確認するとともに、本手法を適用した場合の都市における乱流場・温熱場を検証する。

### 1.2.3 猛暑時の市街地内暑熱環境評価手法

屋外温熱環境を評価する指標として、標準新有効温度（SET\*）が挙げられる。SET\*は室内での定常状態を仮定して温冷感との関係が示されている<sup>39)</sup>。一方で、実際の温熱環境は時々刻々変動していることや、SET\*は Gagge らの Two-Node モデルの人体コア部と皮膚部に対する非定常熱収支式を解いて求めていることから、時間ステップごとの気温・平均放射温度・風速・相対湿度を入力値として求めた「その時刻における SET\*の非定常解」について検討した研究<sup>40)</sup>もある<sup>注1)</sup>。

市街地における暑熱リスク評価指標として、湿球黒球温度（Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT）が挙げられる<sup>2)</sup>。WBGT は気温、風速、放射、湿度の温熱 4 要素を考慮した指標であり、屋外の日射がある場合、湿球温度 $T_w$  [°C]、黒球温度 $T_g$  [°C]、気温 $T_a$  [°C]の関数として、式(1.1)で示される<sup>15)</sup>。

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_a \quad (1.1)$$

このように屋外での実測値を元にした重みづけ平均値で簡易に取得できる。WBGT は気温よりも熱中症による救急搬送者数との相関が高いとされ<sup>41)</sup>、環境省の熱中症予防情報サイト<sup>4)</sup>でも活用されている。表 1.1 のように、日本生気象学会によって日常生活に関する指針が定められている。

既往研究では東京都の街区スケールにおいて実際に歩行者が受ける暑熱ストレスを把握するため、WBGT 等の暑熱環境評価を 0.1 秒～1 秒程度の細かい測定間隔での移動測定が行われている事例<sup>42,43 等)</sup>が見られ、街区内における暑熱環境の詳細な時空間変化の把握が求められていると考えられる。しかしながら、実測で市街地全体を詳細に把握することは困難であることから、広範囲に同時刻の暑熱環境のデータの取得が可能となる数値解析の活用が期待されている。一方で、WBGT は米国の軍事訓練中の熱中症予防を目的とした被験者実験を元にした実験式であり、屋外空間における日常生活へそのまま適用できるかは検討の余地がある。また、温熱 4 要素を考慮しているが人体側の条件（着衣量・代謝量等）は式中には含まれていないため、人体側条件の影響に関して課題がある。今後、人体側の条件も含めて考慮できる SET\*（標準新有効温度）や UTCI（Universal Thermal Climate Index）等の評価指標の発展や、実際の温熱環境が時々刻々変動することを考慮した非定常な暑熱環境および暑熱リスク評価への発展も期待される。

また、危険性評価という視点で考えると、例えば大気汚染物質の拡散解析では、人体への影響を考える上で汚染物質濃度の平均値ではなくピーク値への配慮も不可欠であるため、LES による検討が行われてきた<sup>44)</sup>。熱中症危険性評価でも平均値だけでなく、局所的な高温の発生やその発生頻度、熱ストレスの人体への蓄積や暴露時間等の非定常な情報も重要だと考えられる。高温による熱中症や極端な気温による心疾患と救急搬送の関連性に着目した既往研究<sup>例えば、45)</sup>では、これまでのような日単位の気温等のデータによる調査だけではなく、時間単位の分析や数時間～数日間の熱ストレスの累積の影響評価が必要であると述べている。しかしながら現状の計算機能力では数日間を対象とした LES 解析は困難であるため、本研究ではまずは短時間における熱環境の予測を試みる。

以上より、WBGT は熱中症リスク評価としての検討の余地はあるものの、環境省により熱中症予防に関する指標として活用されており、猛暑時の温熱 4 要素の影響を総合的に評価できる既存指標として考え、本研究では市街地の複雑な乱流場における詳細な暑熱環境を捉えることを目的として、気温、風速、平均放射温度(Mean Radiant Temperature, MRT)、WBGT の時空間データの取得を試みる。本研究で得られた詳細な暑熱環境の時空間データに基づき、将来的な暑熱リスク評価手法の再検討や、市街地の局所的な場所で人体が暴露される環境を考える上で活用できるデータの取得や、そのための解析手法の構築を目指す。

表 1.1 WBGT の日常生活に関する指針（環境省 HP<sup>46</sup>より）

暑さ指数 (WBGT)	注意すべき 生活活動の目安	注意事項
危険 (31 以上)	すべての生活活動で 起こる危険性	高齢者においては安静状態でも発生する危険性が大きい。外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。
厳重警戒 (28 以上 31 未満)		外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。
警戒 (25 以上 28 未満)	中等度以上の生活活動で 起こる危険性	運動や激しい作業をする際は定期的に十分に休息を取り入れる。
注意 (25 未満)	強い生活活動で起こる危険性	一般に危険性は少ないが激しい運動や重労働時には発生する危険性がある。

### 1.3 研究の目的

本研究では、都市域の建物が密集する場所の複雑な乱流場における熱中症危険性の正確な評価を目指して、乱流場・放射場と相互影響やメソ気象スケールからの影響を考慮した暑熱環境評価手法の構築を目的とする。まず、市街地の乱流場と放射場の連成解析手法およびメソ気象モデルの解に基づく気象擾乱を考慮した流入変動風作成手法を構築し、本手法の適用性を吟味する。続いて、本手法を実際の猛暑日における東京都市域に適用して街区内の乱流場・温度場を再現するとともに、風速や気温だけでなく、熱中症リスク評価上重要となる MRT や WBGT の時空間分布や変動特性を明らかにすることで、これまでの実測では把握しきれなかった街区内の詳細な暑熱環境の実態を把握し、今後の暑熱環境評価の発展に資するデータを提供する。

### 1.4 論文の構成

本研究における技術的課題、それに対応する研究項目と論文各章の構成を図 1.2 に示す。

**第2章**では、街区内の乱流・放射・熱伝導の相互作用を考慮した乱流場・放射場の連成解析手法の提案と基礎的な検証を目的とする。提案手法について実測値と比較した基礎的な検証が必要となるため、解析結果の検証に活用できる一般的な夏季日中の街路気温実測データ等がある実都市を対象として市街地における熱放射を考慮した LES を実施し、乱流場と放射場の相互影響を考慮した市街地内の非定常温熱場を示すとともに、提案手法の妥当性の検証と実市街地への適用性の確認を行う。

**第3章**では、猛暑時の暑熱環境解析および暑熱環境評価のための流入境界条件作成手法の構築を目的とする。猛暑時のように、地表面近傍が極端に高温となり熱的な影響が強い条件下の市街地内の非定常温熱場を再現するためには、メソ気象スケールの影響や温度の変動を考慮した流入変動風が必要となることから、気象擾乱に基づく熱的な影響を考慮した流入変動風を作成する。ここでは、流入変動風の基礎的な物理特性を比較するため、例として対流境界層を対象とした既往の風洞実験との比較検証を行い、解析手法の妥当性を示す。

**第4章**では、提案手法の猛暑日への適用例として 2018 年 7 月の東京都市域を対象とした暑熱環境解析を実施し、市街地内の暑熱環境の実態把握と暑熱環境評価のために気温、風速、平均放射温度 (MRT) およびそれらの瞬時値から換算した湿球黒球温度 (以降、非定常 WBGT) の非定常特性の確認を試みる。先ずメソ気象スケールの影響を考慮した流入変動風を作成する必要があるため、メソ気象モデル WRF および WRF-LES によって猛暑日の気

象場を再現し、この解に基づいて、第3章の手法によって作成した気象擾乱を考慮した流入変動風を市街地スケールの解析の流入境界条件として用いる。次に、観測データのある東京管区気象台を含む東京都市域の市街地スケールの解析を行い、気象台観測値との比較検証により本手法の整合性を吟味する。続いて、前述の解析により再現された街区内の複雑な乱流場・温度場を確認するとともに、熱中症リスクの評価上重要となる熱放射の影響を考慮した指標である MRT や非定常 WBGT も含めて詳細な時空間分布や時系列データを明らかにすることで、熱中症危険性を評価する上で、建物周辺の複雑な乱流場における局所的な暑熱環境を評価する重要性を示す。

第5章では、前章までに得られた成果を総括し、今後の課題・展望を述べる。

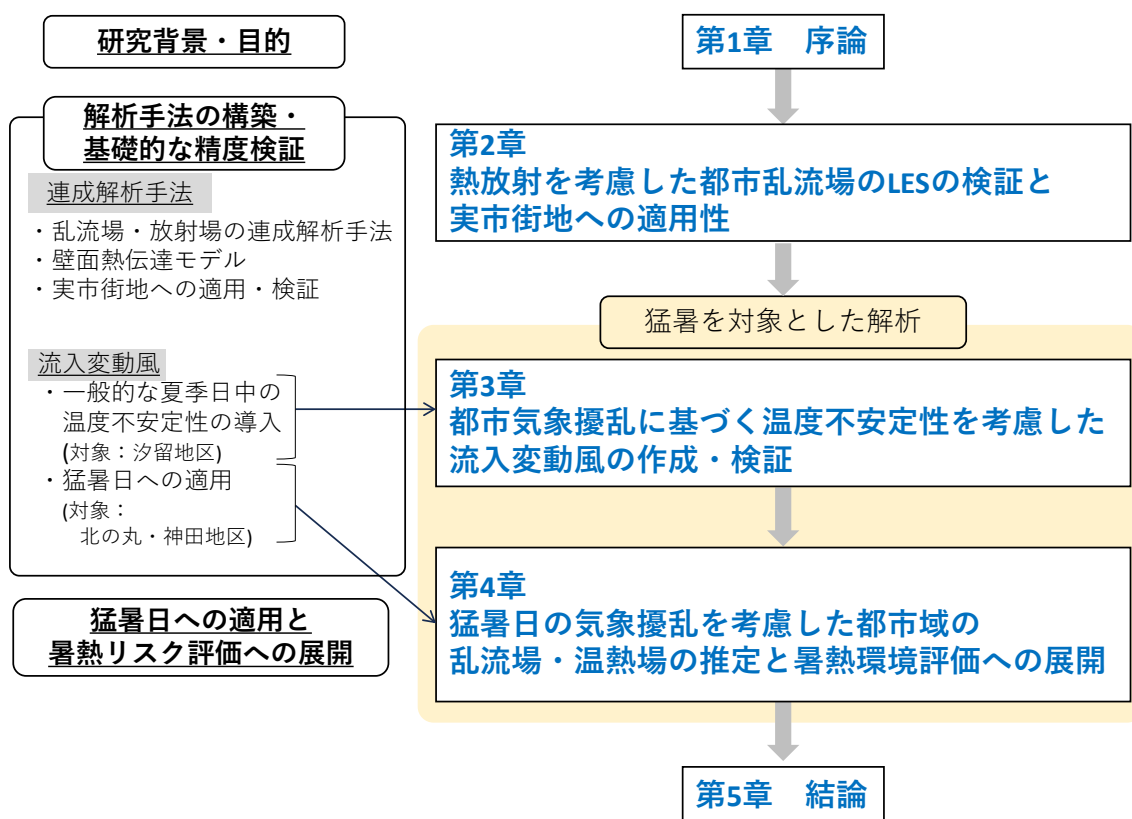


図 1.2 研究項目と章構成

## 注釈

- 注1) 中村ら<sup>40)</sup>の研究は予測対象が冬期のため、暑熱環境への適用性や Two-Node モデルでは考慮されていないコア部と皮膚部の熱伝導速度等の反応速度による誤差は今後の課題だと述べている。

## 参考文献

- 1) 気象庁：気候変動監視レポート，2018，  
[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2018/pdf/ccmr2018\\_all.pdf](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2018/pdf/ccmr2018_all.pdf)
- 2) 環境省，熱中症予防サイト，暑さ指数（WBGT）について，暑さ指数の詳しい説明  
[https://www.wbgt.env.go.jp/doc\\_observation.php](https://www.wbgt.env.go.jp/doc_observation.php)
- 3) 環境省：熱中症予防情報サイト，熱中症特別警戒アラート・熱中症警戒アラート，  
[https://www.wbgt.env.go.jp/about\\_special\\_alert.php](https://www.wbgt.env.go.jp/about_special_alert.php)
- 4) 梅干野晃，浅輪貴史，中大窪千晶：3D-CAD と屋外熱環境シミュレーションツールを一体化した環境設計ツール，日本建築学会技術報告集，第 20 号，pp.195-198, 2004
- 5) 藤原耕平，名本裕太郎，須賀達也，他 2 名：実測及び数値シミュレーションに基づく長野市市街地の屋外熱環境の把握，日本建築学会環境系論文集，第 76 巻，第 669 号，pp.1009-1015, 2011
- 6) 山村真司，梅干野晃，浅輪貴史：建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱放射環境の予測手法の開発，日本建築学会計画系論文集，第 560 号，pp.73-80, 2002
- 7) 高田真人，梅干野晃，浅輪貴史：屋外熱収支シミュレーションと CFD による熱と気流の全時刻連成解析手法の開発，日本建築学会技術報告集，第 24 巻，第 57 号，pp.715-719, 2018
- 8) 持田灯，富永禎秀，石田泰之：LES を用いた都市環境の解析 —環境工学分野の過去 20 年の歩み—，日本風工学会誌，第 34 巻第 4 号，pp.416-425, 2009
- 9) 富永禎秀，持田灯，村上周三，佐脇哲史：建物後方の周期的変動と再付着距離の予測精度に関する検討，LES による高層建物周辺気流の解析（その 1），日本建築学会環境系論文集，第 581 号，pp.45-51, 2004
- 10) 中島慶悟，大岡龍三，菊本英紀：温度成層条件下の都市キャニオン流れに関する LES と標準  $k-\epsilon$  モデルの予測精度評価，日本風工学会論文集，第 42 巻第 1 号，pp.9-21, 2017
- 11) L. W. Chew, L. R. Glicksman, L. K. Norford: Buoyant flows in street canyons: Comparison of RANS and LES at reduced and full scales, Building and Environment, Vol.146, pp.77-87, 2018
- 12) A. Nishi, H. Kusaka: Effect of Foehn Wind on Record-Breaking High Temperature Event (41.1° C) at Kumagaya on 23 July 2018, SOLA, Vol.15, pp.17-21, 2019
- 13) 桜井美菜子，篠原善行，眞下国寛，須永次雄：関東地方で日最高気温が 40°C を超えた 2007 年夏の高温，その 1，2007 年 8 月 15 日と 16 日の事例解析，天気，56，pp.248-253, 2009
- 14) Takane, Y., and H. Kusaka: 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,

- pp.1827-1841, 2011
- 15) 浅輪貴史：LES と熱収支計算による建物外部空間に形成される微気象の非定常解析 その2 実在街区を対象とした表面温度分布と気温場との関連性の検討，日本建築学会学術講演梗概集(環境工学 I)，pp.803-804，2012
  - 16) Nozu, T., Tamura, T. and Okuda, T. et al.: LES analysis on heat environment in densely arrayed tall buildings -Thermal boundary treatment in actual urban area-, *Turbulence, Heat and Mass Transfer* 7, pp.2439-2448, 2012
  - 17) 吉田伸治, 村上周三, 持田灯, 他 3 名：対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析，日本建築学会計画系論文集，第 529 号，pp.77-84，2000
  - 18) 原山和也, 吉田伸治, 大岡龍三, 他 2 名：非定常放射・伝導解析による数値解析と精度検証，日本建築学会計画系論文集，第 556 号，pp.99-106，2002
  - 19) Hong Chen, Ryoza Ooka, Kazuya Harayama, Shinsuke Kato, Xiaofeng Li: Study on outdoor thermal environment of apartment block in Shenzhen, China with coupled simulation of convection, radiation and conduction, *Energy and Buildings*, 36, pp.1247-1258, 2004
  - 20) 浅輪貴史, 梅干野晁：3D-CAD 対応熱収支シミュレータと CFD との連成解析による建物表面からの顕熱流量の予測手法に関する検討，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，H-37，pp.1623-1626，2011
  - 21) 陳侃, 浅輪貴史, 押尾晴樹：高層建築物の周囲に形成される冬季の微気候の形成要因 - 熱収支シミュレーションと CFD の連成解析を用いた検証 -，日本ヒートアイランド学会論文集，Vol.12，pp.9-20，2017
  - 22) The PALM (Parallelized Large-Eddy Simulation Model) model system, <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac>
  - 23) J. Resler, P. Krc, M. Belda et al: PALM-USM v1.0: a new urban surface model integrated into the PALM large-eddy simulation model, *Geoscientific Model Development*, 10, pp.3635-3659, 2017
  - 24) K. Matsuda, R. Onishi, K. Takahashi: Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 173, pp.53-66, 2018
  - 25) P. Piroozmand, G. Mussetti, J. Allegrini et al.: Coupled CFD framework with mesoscale urban climate model: Application to microscale urban flows with weak synoptic forcing, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 197, 104059, pp.1-17, 2020
  - 26) 稲垣厚志：都市大気境界層の大規模計算が示す多スケール間の流れの相互作用，*低温科学*，77，pp.97-104，2019
  - 27) 安部諭, 田村哲郎, 中山浩成：逆転層を有する対流境界層中の乱流構造と拡散挙動に関する LES 解析，日本風工学会論文集，第 33 巻，第 4 号，pp131-148，2008

- 28) Lund, T.S., Wu, X., and Squires, K.D.: Generation of Turbulent Inflow data for Spatially-developing Boundary Layer Simulations, *J. Comput. Phys.*, Vol.140, pp.233-258, 1998
- 29) 義江龍一郎, 野村佳祐, 堅田弘大, Guiyoi JIANG: 都市街区内の非等温流れ場における汚染物質拡散・熱拡散に関する風洞実験と LES, 第 22 回風工学シンポジウム論文集, pp.61-66, 2012
- 30) 田村哲郎, 古澤卓士, 森厚平: 空間発達する温度成層乱流境界層の DNS・LES, 第 18 回風工学シンポジウム論文集, 2004
- 31) Xie, Z.-T., Castro, I. P.: Efficient Generation of Inflow Conditions for Large Eddy Simulation of Street-Scale Flows, *Flow, Turbulence and Combustion*, 81(3), pp.449-470, 2008
- 32) 近藤亮彦, 飯塚悟: 気象モデルと工学 LES モデルのシームレスな結合手法の開発 その 1 Reynolds 応力のコレスキー分解に基づく人工的な LES 流入変動風生成手法の検討, 日本建築学会環境系論文集, Vol.77, No.678, pp.661-669, 2012
- 33) Okaze, T., Mochida A.: Large-eddy Simulation of Non-isothermal Flow around a Building using Artificially Generated Inflow Turbulent Fluctuations of Wind Velocity and Air Temperature. *J. Heat Island Institute International*, Vol.12, pp.29-34, 2017
- 34) 野澤剛二郎, 田村哲郎: ラフネス上に空間発達する乱流境界層の LES と変動風の評価, 日本建築学会構造計論文集, 第 541 号, pp.87-93, 2001
- 35) 野澤剛二郎, 田村哲郎: 空間発達型境界層 LES の都市域強風への適用性 - 乱れ特性の対応に関する検討 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 554 号, pp.37-44, 2002
- 36) 河合英徳, 田村哲郎: メソ気象モデルにより再現された風速場への高周波変動成分付加方法の提案 空間フィルタリング・リスケーリング手法の適用, 日本建築学会構造計論文集, 85, 767, pp.19-27, 2020
- 37) 河合英徳, 田村哲郎, 巢山裕記: 気象擾乱を含んだ流入条件による都市境界層の LES, 2019 年度日本風工学会年次研究発表会, pp.131-132, 2019
- 38) H. Kawai, M. Arai, T. Tamura: LES coupling with thermal radiation model for actual urban districts with high-rise building cluster - Analysis on intermittent change of turbulent and temperature field-, *The 15<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering*, p.1-10, 2019
- 39) 空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧 基礎編, pp.333-335, 2010
- 40) 中村安広, 井田大助, 水野稔: 屋外非定常不均一温熱環境場の快適性評価, 空気調和・衛生工学会論文集, No.93, pp.1-10, 2004
- 41) 環境省: 夏季のイベントにおける熱中症対策ガイドライン 2020, p.8, 2020
- 42) 河野恭佑, 植田弥月, 稲垣厚士, 小田僚子: 移動観測手法に基づく東京都市街地の暑熱環境評価, 環境情報科学学術研究論文集, 31, pp.143-148, 2017
- 43) 三坂育正, 高橋希: 暑熱環境に適応したまちづくりに向けた歩行空間の温熱環境に関する研究 東京都千代田区の観光ルートにおける歩行空間の熱中症リスクの実測調査, 日

- 本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1875-1878, 2024
- 44) Nozu, T., Tamura, T. : LES of turbulent wind and gas dispersion in a city, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 104-106, pp.492–499, 2012
- 45) Y. Cui, S. Ai, Y. Liu et al.: Hourly associations between ambient temperature and emergency ambulance calls in one central Chinese city: Call for an immediate emergency plan, Science of The Total Environment, 711, 135046, pp.1-8, 2020
- 46) 環境省ホームページ, 熱中症予防情報サイト, 暑さ指数 (WBGT) について, 暑さ指数とは? <https://www.wbgt.env.go.jp/wbgt.php>



## 2章 熱放射を考慮した都市乱流場の LES の検証と実 市街地への適用性

### 2.1 はじめに

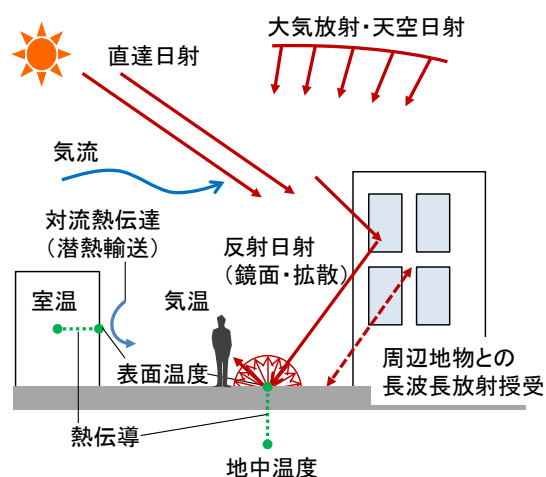
1章で述べたように、市街地のような複雑な乱流場における熱環境の評価での気流解析については、一般に実務で使われる RANS モデルよりも、風速や気温の変動や局所的なピーク発生等の非定常現象を再現できる LES の利用および熱放射を考慮した検討が必要となる。実都市を対象とした熱放射を考慮した LES による予測のモデル上の課題として、都市表面と流体場の相互影響や連成プロセスに対して、熱放射解析との連成のモデル化や壁面境界条件の与え方が挙げられる。熱放射解析との連成のモデル化については、都市表面での熱収支を考える上で、流体による対流熱伝達量、壁面からの熱放射量、地中および建物内部からの熱伝達量の流入出を反映させるプロセスが重要となる。そこで本研究では、図 2.1 のように複雑な都市表面からの熱放散過程を再現する手法として、乱流場・放射場の連成解析を実施した。また、市街地での温熱環境を考える際、建物・地表面からの対流熱伝達の影響も大きいことから、都市キャノピー表面の熱伝達のモデル化が重要となる。市街地のような複雑形状を対象とする解析では、格子数や計算負荷を考慮し、対数則に基づく壁関数が用いられることがある。本章では、壁面が加熱された市街地建物群の構成要素である、単純形状の立方体を取り上げ、乱流下に配置された加熱立方体を対象とする風洞実験<sup>1)</sup>の再現解析により、壁面熱伝達モデルの適用性を確認する。

本章では、街区内の乱流・放射・熱伝達の相互作用を考慮した乱流場・放射場の連成解析手法の提案と基礎的な検証を目的とする。提案手法について実測値と比較した基礎的な検証が必要となる。そこで、一般的な夏季日中を対象として、解析結果の検証に活用できる街路気温実測データ等がある実都市を対象として、市街地における熱放射を考慮した LES を実施し乱流場と放射場の相互影響を考慮した市街地内の非定常温熱場を示すとともに、提案手法の妥当性の検証と実市街地への適用性の確認を行う。

2.2 節では解析手法を示す。2.3 節では、建物・地表面からの対流熱伝達の影響を適切に評価するため、乱流中の単純建物モデル（立方体）を対象とする風洞実験<sup>1)</sup>の再現解析を実施し、立方体内部を加熱した場合の壁体内の熱伝達性まで考慮し得られた表面温度特性に基づき、壁面熱伝達モデルの適用性を確認する。2.4 節では、2.3 節で有効性を確認した壁面熱伝達モデルを実市街地（汐留）に適用し、Nozu et al.<sup>2)</sup>によりまとめられた実測結果との

比較によって、熱放射を考慮した LES の連成解析手法の検証を行う。熱放射を考慮した LES により、放射・対流熱伝達・熱伝導の相互影響を考慮することでより実現象に近い市街地内の表面温度分布や気温場の再現が期待される本解析手法について実市街地への適用性を確認する。なお、実測データが時間平均値のため、ここでは平均温度場に関する検証とした。2.5 節では、輸送過程における渦構造を再現する本 LES モデルの精度を踏まえ、LES によって得られる非定常値を整理し、その活用性を考える上で、市街地の乱流構造と熱環境の非定常特性の関連性について考察を試みる。

[a] 都市表面の熱収支



[b] 熱収支の各項目の算出方法

直達日射	レイトレーシング法による日影解析とブーゲの式によって推定された法線面直達日射量によって算出。
天空日射	$2\pi$ 方向に対し等分割された立体角方向にレイを飛ばすことにより求めた天空率とペルラーへの式によって求めた水平面天空日射量によって算出。
長波長放射の輸送	放射強度の輸送式(13)を解くことで算出。大気放射についてはBruntの式により与える。
対流熱伝達	対数則に基づく壁関数モデルにより算出。
熱伝導	非定常1次元熱伝導方程式に基づき算出。

[c] LESと熱放射・熱伝導解析の連成プロセス

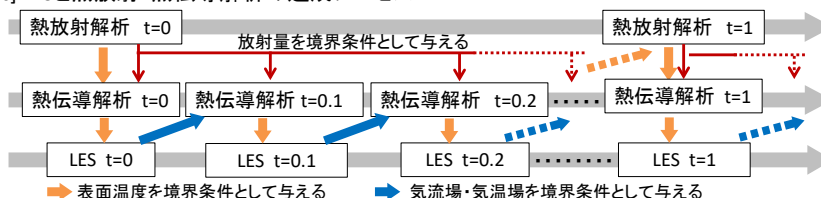


図 2.1 熱放射と熱伝導を考慮した LES の連成解析手法

## 2.2 実市街地における乱流場・放射場の連成解析手法と壁面熱伝達モデル

### 2.2.1 乱流場・放射場の連成解析手法

本研究では、都市での乱流場・放射場の連成解析による予測のモデル上の課題として、都市表面と流体場の相互影響や連成プロセスにおける熱放射解析との連成のためのモデル化や壁面境界条件の与え方に着目した。

熱放射解析との連成のモデル化は、都市表面での熱収支として、流体による対流熱伝達量、壁面からの熱放射量、地中および建物内部からの熱伝導量の流入出を反映させることが重要となる。また、3者を全て同時に連成することは計算負荷の観点からも難しいことから、変化の時間スケールの小さい乱流場の時間刻みを細かくし、その他はそれよりも大きな時間刻みとする等の工夫が必要となる。

そこで本研究では、LES によって得られた気流場と熱伝導解析によって得られた表面温度を時間発展させながら連成させ、放射場は長い時間スケールで計算しても非定常性を表現できると考え、流体と熱伝導よりも大きな時間刻みとした熱放射解析によって得られた放射量を熱伝導解析の境界条件として与えることとした。

本節では、非構造格子に基づく有限体積法 (FVM) のソルバーとして FrontFlow/Red (以下, FFR) を使用した。建物・地表面の熱収支を式(2.1)<sup>注1)</sup>に示す。熱放射解析において長波長放射は放射強度の輸送式を有限体積法に基づいて解くことで算出している。直達日射, 天空日射, 大気放射については図 2.1 に示す方法で算出している。地面・建物壁面については各面に対して断面を分割し 1次元非定常熱伝導方程式 (式(2.2))を解く。また、乱流場・温度場は非構造格子に基づく有限体積法の LES による数値解析を行う。LES の基礎方程式は以下に示すフィルター操作を施された連続の式, Navier-Stokes 方程式, 温度の輸送方程式 (式(2.3)~(2.5)) とする。浮力項では, Boussinesq 近似を行っている。SGS (Sub Grid Scale) モデルは標準 Smagorinsky モデルを使用し, SGS 応力 $\tau_{ij}$ , SGS 温度フラックス $h_j$ は式(2.8), (2.11)により算出する。SGS 渦粘性係数 $\nu_{SGS}$ , SGS 温度拡散係数 $\alpha_{SGS}$ は式(2.9), (2.12)により求められる。熱放射の輸送方程式は式(2.13), 放射計算の表面での境界条件式を式(2.14)とする。なお,  $I(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ は関与する媒体を通過する小さな光線束中の方向 $\mathbf{s}$ 中の, 位置ベクトル $\mathbf{r}$ によって示す位置における放射強度とする。LES と熱放射・熱伝導解析の連成においては乱流場と熱伝達の相互作用を考慮するため, 熱伝導計算を LES と同じ時間刻み (本章の実市街地を対象とした解析では 0.1 秒) において計算した。なお, 放射場の時間スケールは乱流場に比べて十分大きいことから, 放射場を長い時間スケールで解析しても乱流場と連成させた温度場においても非定常性を表現できると考え, 熱放射解析は図 2.1 [c]

に示すように1秒ごとに実施する。ただし、その妥当性については今後の課題である。

$$Q_{SR} + Q_{LR} + Q_{CV} + Q_{EV} + Q_{CD} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_v} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + g\beta(\bar{T} - T_0)\delta_{i3} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{T} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial h_j}{\partial x_j} \quad (2.5)$$

$$\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j} \quad (2.6)$$

$$h_j = \overline{T u_j} - \bar{T} \bar{u}_j \quad (2.7)$$

$$\tau_{ij} = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} \quad (2.8)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2 (2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.10)$$

$$h_j = \alpha_{SGS} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad (2.11)$$

$$\alpha_{SGS} = \frac{\nu_{SGS}}{Pr_{SGS}} \quad (2.12)$$

$Q_{SR}$  : 短波長放射量[W/m<sup>2</sup>],  
 $Q_{LR}$  : 正味の長波長放射量(長波長放射の授受)[W/m<sup>2</sup>],  
 $Q_{CV}$  : 対流熱伝達量[W/m<sup>2</sup>],  $Q_{EV}$  : 潜熱交換量[W/m<sup>2</sup>],  
 $Q_{CD}$  : 熱伝導量[W/m<sup>2</sup>],  $\lambda$  : 熱伝導率[W/(mK)],  $C_v$  : 容積比熱[J/(m<sup>3</sup> K)]  
 $u_i$  : 速度[m/s],  $t$  : 時間[sec],  $\rho_0$  : 基準密度[kg/m<sup>3</sup>],  
 $\nu$  : 動粘性係数[m<sup>2</sup>/s],  $g$  : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>](= -9.8),  
 $\beta$  : 体積膨張率[1/K],  $T$  : 温度[K],  $T_0$  : 基準温度[K],  
 $\alpha$  : 分子温度拡散係数[m<sup>2</sup>/s](=  $\nu/Pr$ ),  $\tau_{ij}$  : SGS 応力[Pa],  
 $h_j$  : SGS 温度フラックス[K m/s],  $\nu_{SGS}$  : SGS 渦粘性係数[m<sup>2</sup>/s],  
 $\alpha_{SGS}$  : SGS 温度拡散係数[m<sup>2</sup>/s],  $Pr_{SGS}$  : 乱流プラントル数,

$S_{ij}$  : ひずみ速度テンソルの GS 成分,  $C_S$  : Smagorinsky 定数,  
 $\Delta$  : グリッドフィルタ幅,  $\delta_{ij}$  : クロネッカーのデルタ

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} = \kappa I_b(\mathbf{r}) - \kappa I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) - \sigma_s I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I_-(\mathbf{s}_i) \Phi(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}) d\Omega_i \quad (2.13)$$

$$I(\mathbf{r}_w, \mathbf{s}) = \varepsilon I_b(\mathbf{r}_w) + \frac{\rho^d(\mathbf{r}_w)}{\pi} \int_{\mathbf{n} \cdot \mathbf{s}_i < 0} I(\mathbf{r}_w, \mathbf{s}_i) |\mathbf{n} \cdot \mathbf{s}_i| d\Omega_i + \rho^s(\mathbf{r}_w) I(\mathbf{r}_w, \mathbf{s}_s) \quad (2.14)$$

$I(\mathbf{r}, \mathbf{s})$  : 位置ベクトル  $\mathbf{r}$  の方向ベクトル  $\mathbf{s}$  における放射強度 [ $\text{W}/(\text{m}^3 \text{sr})$ ],  
 $\kappa$  : 吸収係数 [ $1/\text{m}$ ],  $\sigma_s$  : 散乱係数 [ $1/\text{m}$ ],  $I_b(\mathbf{r})$  : 黒体強度 [ $\text{W}/(\text{m}^3 \text{sr})$ ],  $I_-(\mathbf{s}_i)$  : すべての方向  $\mathbf{s}_i$  からの  $\mathbf{r}$  における点に入射する強度 [ $\text{W}/(\text{m}^3 \text{sr})$ ],  $\Phi(\mathbf{s}_i, \mathbf{s})$  : 散乱位相関数,  $\Omega_i$  : 立体角 [ $\text{sr}$ ],  $\varepsilon$  : 長波放射率 [-],  
 $\rho^d(\mathbf{r}_w)$  : 拡散反射率 [-],  $\rho^s(\mathbf{r}_w)$  : 鏡面反射率 [-],  $\mathbf{n}$  : 法線ベクトル,  
 $\mathbf{s}_s$  : 鏡面反射の方向ベクトル

$$z^+ = u^+ + e^{-\kappa B} \left[ e^{\kappa u^+} - 1 - (\kappa u^+) - \frac{(\kappa u^+)^2}{2} - \frac{(\kappa u^+)^3}{6} \right] \quad (2.15)$$

$$u^+ = u_p / u_\tau \quad (2.16)$$

$$T^+ = \begin{cases} Pr_t \left( \frac{1}{\kappa} \ln(Ez^+) + P_j \right), & z^+ > z_T^+ \\ Pr z^+, & z^+ \leq z_T^+ \end{cases} \quad (2.17)$$

$$T^+ = \frac{\rho C_p u_\tau (T_w - \bar{T})}{q_w} \quad (2.18)$$

$z^+$ ,  $z_T^+$  : 壁面直交方向の無次元化高さ [-],  
 $u_p$  : 第一格子点の速度 [ $\text{m/s}$ ],  $u^+$  : 無次元化風速 [-] ( $= u/u_\tau$ ),  
 $u_\tau$  : 摩擦速度 [ $\text{m/s}$ ],  $B$ ,  $E$ ,  $P_j$  : 定数,  $\kappa$  : カルマン定数 ( $= 0.41$ ),  
 $T^+$  : 無次元化温度 [-],  $Pr$  : プラントル数,  
 $Pr_t$  : 乱流プラントル数 ( $= Pr_{SGS}$ ),  $\rho$  : 密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  
 $C_p$  : 定圧比熱 [ $\text{J}/(\text{kg K})$ ],  $q_w$  : 対流熱伝達量 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

## 2.2.2 壁面熱伝達モデル

非定常な気流・熱環境解析を行う際、2.1 節で述べたように、周辺地物からの対流熱伝達の影響も大きいことから、都市キャノピー表面の熱伝達のモデル化が重要となる。

表面熱伝達のうち対流による熱伝達に関して整理すると、既往研究では、CFD の壁面温度境界条件として表面温度を与える方法<sup>3,4)</sup>や、対流熱伝達率を与える方法、壁関数を用いる方法<sup>5)</sup>が挙げられている。対流熱伝達率を与える場合、建築環境工学で古典的な実験式として使われる Jurges の式を用いた場合<sup>例えば 6)</sup>や、対流熱伝達の実験・実測値に基づくモデル式を用いる場合<sup>7)</sup>がある。Jurges の式は対流熱伝達率を風速の関数として定義しているが、代表風速の場所が不明確であること、風洞の一樣流中に設置された加熱銅板の熱伝達率の実験式であるため、建物外表面への適用には課題があることが指摘されてきた<sup>7)</sup>が、気象モデルをベースとした市街地スケールの LES との結合モデルのように都市の広範囲を対象とした解析では Jurges の式を用いた解析例も見られる<sup>8)</sup>。また、対流熱伝達の実測値を用いる方法は実測場所固有の気流性状の影響を含むため、あまり汎用的な手法とは言い難い。この他の手法として、対数則に基づく壁関数は、計算負荷や実用性を考慮して粗い格子でも壁面近傍の影響を再現する壁面境界条件の一つである。本章では、複雑な街区形状である市街地を対象として高層建物周辺の流れ場を再現するため、格子数や計算負荷を考慮し、対数則に基づく壁関数<sup>9,10)</sup>を用いた。

また、表面熱伝達のモデル化と合わせて建物・地表面への熱伝導のモデル化も重要である。実際の壁体内熱伝導は 3 次元に変化するため、より正確な解を得ようとする場合は壁体内にもメッシュを作成し、3 次元熱伝導計算による固体・流体連成解析をする方法がある。2.3 節の単純建物モデル（立方体）の解析では、対象となる立方体の 1 辺の長さ  $H=15\text{mm}$  に対して、エポキシ層の厚み  $1.5\text{mm}$  と面に対する厚みの比率が比較的大きいため、3 次元熱伝導計算が必要だと考えられる。一方で、市街地を対象とした解析の場合、通常建築物の壁体はその厚さに比べて十分に広いことから、上下左右に無限に広がった一次元壁体と近似的にみなすことが多い。その場合、熱伝導による熱流束は壁面に垂直方向のみに流れると仮定する。既往の研究でも、市街地の温熱環境解析において建物の熱伝導を 1 次元熱伝導解析によって評価している事例が多数ある<sup>3,11,12)</sup>。また、市街地の解析において壁体内に適切な格子数を確保した上で 3 次元熱伝導計算を行うのは格子数や計算負荷の観点から現実的ではない。そこで、2.3 節の立方体を対象とした解析では 3 次元熱伝導計算により風洞実験値の再現を目指すと共に、1 次元熱伝導計算も実施し、表面温度の再現性を与える影響を比較した。2.4 節の市街地解析では格子数や計算負荷を考慮し、1 次元非定常熱伝導解析を実施することとした。

本研究では、LES の速度場の輸送方程式の境界条件について式(2.15)、(2.16)に示す Spalding 則を、温度方程式の境界条件について式(2.17)、(2.18)に示す対数則に基づく壁関数モデル（二層モデル）を用いたケースを実施した。ここで、 $u_p$  [m/s] は第一格子点の速度

であり,  $u^+$ と $T^+$ は式(2.16), (2.18)によって求まる無次元化した値とする。

なお, 本研究では式(2.15), (2.17)において用いた定数は $\kappa = 0.41$ ,  $B = 5.5$ ,  $z_T^+ = 12.40$ ,  $E = 9.8$ ,  $P_f = -1.914$ とした。

## 2.3 単純建物モデルを対象とした壁面熱伝達モデルの適用性検証

### 2.3.1 本節の目的

本節では、2.2 節に示した壁面熱伝達モデルの適用性を確認の確認を目的とする。2.2 節に示した温度の壁関数は、元々実スケールのような高レイノルズ数流れを対象とした解析において、no-slip 条件のような非常に細かい格子解像度を適用できない場合への適用を目的としている。しかし、実スケールの実測では周辺気流状況等をコントロールすることが難しく表面温度を測定した事例は非常に少ない。そこで本研究では、市街地での建物群の構成要素である、単純形状の立方体を取り上げ、乱流境界層中の地面に設置された加熱立方体の風洞実験 (Meinders et al.<sup>1)</sup>) を再現した解析を行い、実験値と比較した。

### 2.3.2 風洞実験概要

風洞実験は高さ 50mm、幅 600mm の 2 次元風洞の中央に配置された一辺  $H=15\text{mm}$  の立方体を対象とした。流入風は立方体の風上面から 75cm 風上側に設置されたワイヤによって乱れを付加している。立方体は 12mm の銅コアとそれを覆う 1.5mm のエポキシ層で構成されている。風洞の概要と立方体周りの詳細を図 2.2 に示す。また、バルク風速  $U_{bulk} = 4.47\text{ m/s}$ 、摩擦速度  $u_{\tau} = 0.25\text{ m/s}$ 、立方体高さとバルク風速から求まるレイノルズは数  $Re_H = 4440$  である。流入風の温度は  $21^{\circ}\text{C}$  一定とし、風洞の壁面は  $21^{\circ}\text{C}$ 、立方体の銅コア部分は  $75^{\circ}\text{C}$  に保たれ、エポキシ層の熱伝導率は  $0.24\text{ W/mK}$  である。実験では、赤外線サーモグラフィによってエポキシ層の外表面温度を測定した。文献<sup>1)</sup>では赤外線サーモグラフィによって取得した表面温度の精度として、距離の測定誤差が  $0.5\text{mm}$  ( $H/30$ ) 以内、温度の測定誤差が立方体中央部で  $0.4^{\circ}\text{C}$ 、端部で  $0.6^{\circ}\text{C}$  と報告している。

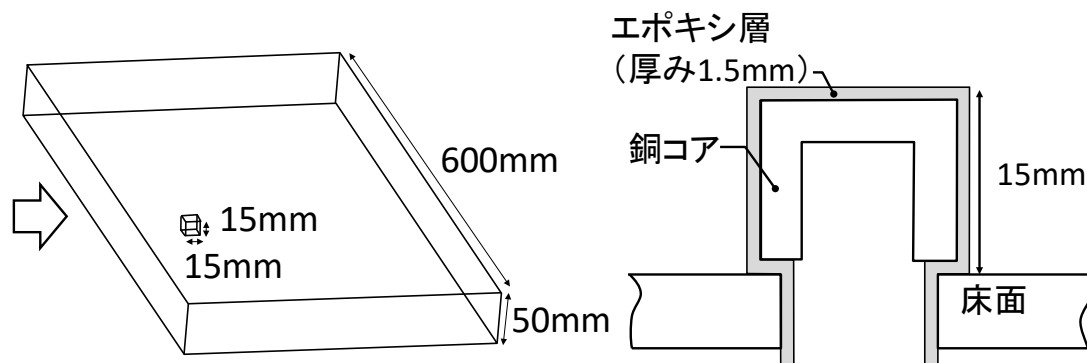


図 2.2 風洞実験の概要<sup>1)</sup>

### 2.3.3 解析概要

前節で述べた風洞実験を再現し、内部を 75°C に加熱した立方体を対象として乱流場・熱伝導連成解析を行った。解析モデルの概念図を図 2.3 に示す。流入変動風は風洞実験<sup>1)</sup>で立方体を配置せずに測定した平均風速と乱流強度の鉛直プロファイルをもとに、LES によりチャネル流の流入変動風を作成した<sup>注 2)</sup>。図 2.4 に流入風の平均風速  $u_{ave}$  と  $u_{rms}$  の鉛直プロファイルを示す。流入風温度は実験と同じ 21°C とした。なお、本節では壁面熱伝達モデルの適用性の確認を目的としていることから、放射場の計算は行わず、実験で得られた固体内部温度を境界条件として解析を実施している。

解析ケースは表 2.1 に示す 2 ケースとした。Case1-FL ではエポキシ層も格子分割し、3 次元熱伝導計算を行った。温度境界条件はフーリエの法則に基づき、式(2.19)のように流体・固体の各々の熱伝導率と第一セルの厚みによって熱伝達係数を設定した。

$$Q = \frac{k_f}{\Delta_f} (T_w - T_f) = \frac{k_s}{\Delta_s} (T_s - T_w) \quad (2.19)$$

$Q$  : 流体・固体の境界面での熱流束 [W/m<sup>2</sup>],  
 $T_w$  : 壁面温度 [K],  $T_f$  : 流体側第一セル温度 [K]  
 $T_s$  : 固体側第一セル温度 [K],  $k_f$  : 流体の熱伝導率 [W/(m K)]  
 $\Delta_f$  : 流体側第一セル高さ [m],  $k_s$  : 固体の熱伝導率 [W/(m K)]  
 $\Delta_s$  : 固体側第一セル高さ [m]

エポキシ層内の初期温度にフーリエの法則から求めた定常状態の温度分布を与えることで、エポキシ層内の温度が定常状態に到達するまでの計算時間の短縮を図った。Case2-WF では 1 次元熱伝導解析を行い、温度境界条件には 2.2 節の対数則型壁関数を適用した<sup>注 3)</sup>。ここ

で、立方体の表面から 1.5mm のエポキシ層（熱伝導率 0.24 W/m K）と銅コア（内部温度 75°C 固定）の 1 次元熱伝導を仮定した。格子解像度と総格子数を表 2.2 に示す。なお、境界層レイヤーは立方体表面、地表面、上面に 3 層ずつ挿入している。表中の境界層レイヤーの数値は立方体表面の境界層厚さを示す。その他の解析条件と境界条件を表 2.3, 表 2.4 に示す。

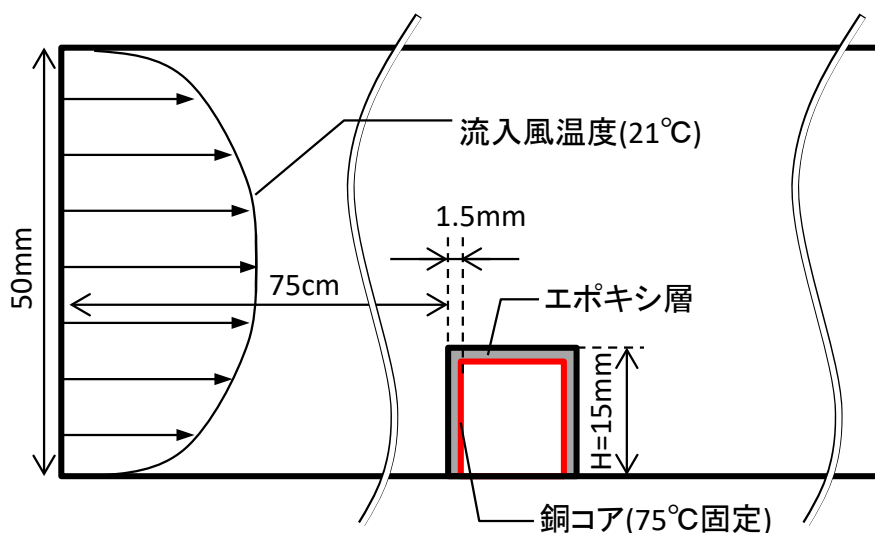


図 2.3 解析モデルの概要

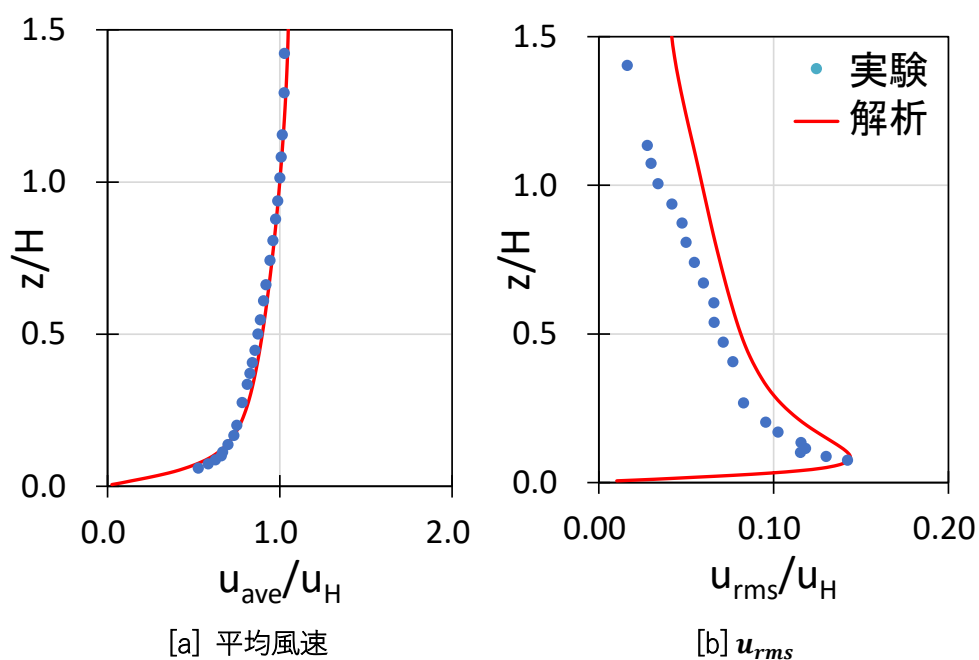


図 2.4 流入変動風の鉛直風速分布

表 2.1 解析ケース

ケース	熱伝導計算	温度境界条件
Case1-FL	3次元	フーリエの法則に基づく 熱伝達係数
Case2-WF	1次元	対数則型壁関数 (2.2節参照)

表 2.2 格子解像度

ケース	格子解像度	総格子数
Case1-FL	立方体表面, エポキシ層内: 0.214mm (H/70), 境界層レイヤー: 0.0555mm (H/270)	約 5890 万
Case2-WF	立方体表面: 0.6mm (H/25), 境界層レイヤー: 0.15mm (H/100)	約 5630 万

表 2.3 解析条件

評価時間	熱伝導・LES: 約 0.6 秒間(模型スケール)
計算方法/時間積分	SMAC 法 / Euler 陰解法
空間離散化	2次精度中心差分
数値粘性	一部領域に 5%の 1次精度風上差分を混合
乱流モデル	標準 Smagorinsky Model ( $C_s=0.1$ )
解析領域	0.315m(主流)×0.225m(直交)×0.05m(鉛直)
格子	テトラヘドラルメッシュ, 節点中心

表 2.4 境界条件

	速度場	温度場
上面, 下面	Spalding 則	ノイマン条件
側面	Free-slip	ノイマン条件
立方体	Spalding 則	表 2.1 参照

### 2.3.4 実験結果との比較

立方体周辺の時間平均流れ場における渦構造を図 2.5 に、立方体高さ  $H$  を基準として渦構造サイズを比較したものを表 2.5 に整理した。風上面のよどみ点高さ ( $L2$ ) は実験の傾向を再現しており、風上側馬蹄形渦の分離位置 ( $L1$ ) と風下側後流渦の再付着距離 ( $L3$ ) は実験との差が約 1 割となった。この差は流入条件の  $u_{rms}$  の差等が影響したと考えられる。本章では、この風速場の条件下にて表面温度の比較を行った。

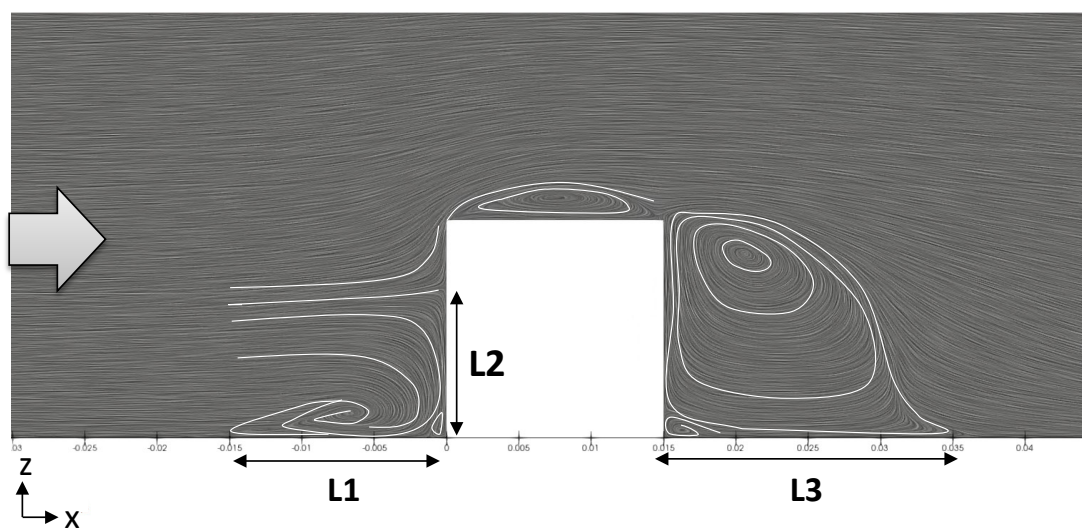


図 2.5 立方体周辺の時間平均流れにおける渦構造( $y/H=0$ )

表 2.5 立方体周辺流れ場における渦構造サイズの比較

	風上側		風下側
	L1： 馬蹄形渦の 分離位置	L2： 風上面の よどみ点高さ	L3： 後流渦の 再付着距離
風洞実験 <sup>1)</sup>	1.4H	0.7H	1.5H
Case1-FL	1.3H	0.7H	1.4H
Case2-WF	1.3H	0.7H	1.4H

次に図 2.6 に立方体の表面温度を示す。図 2.6 [a][b]はそれぞれ、立方体の水平方向と鉛直方向の分布を示す。図をみると、Case1-FL は全体的に実験の傾向を良く再現している。後流側の角部の点 C, D, G では、実験では面中央から角部に向かってゆるやかに温度が低下しているが、解析では角部近傍で急激に温度が低下している。これは温度場の境界条件で

は壁関数を用いていないが、速度場の境界条件で Spalding 則を用いており、後端渦の逆流領域では境界層が発達していないため風速場の再現性が低下し、実験との差異が生じたと考えられる。

Case2-WF は風上面および側面・上面の風上側（点 B, F 側）の分布はよく再現しているものの、風下面（C-D 面, G-H 面）では面平均で約 7~8°C 過大評価している。この要因の一つとして、Case2-WF は 1 次元熱伝導計算を行っているので、立方体内部からの放熱量が制限されたためだと考えられる。また、温度の壁関数では風速と壁面温度、気温の差によって対流熱伝達量を算出するため、Case2-WF の方が後流域の風速場の再現性の影響を強く受け、表面温度が実験よりも高くなったと考えられる。なお、床面側の点 E, H において解析値が過大評価となったのは、解析モデルの設定上、立方体内部の銅コアが風洞下部の壁まで伸びた形に簡略化した影響だと考えられ、既往研究の解析<sup>9,10</sup>でも同様の傾向が示されている。

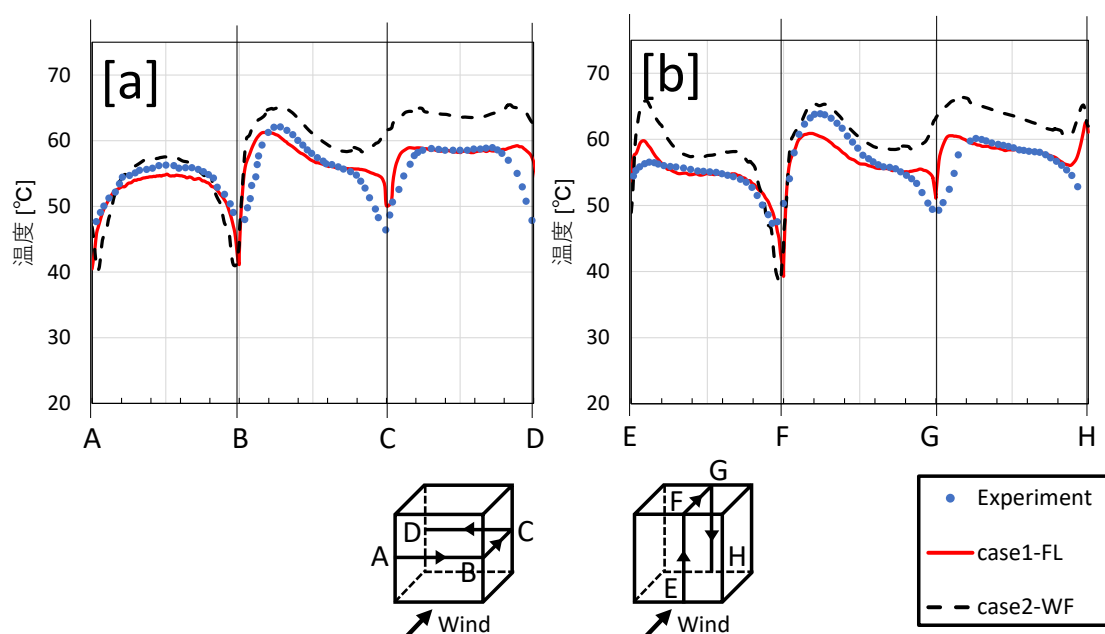


図 2.6 表面温度分布の比較

以上より、乱流下に設置された単純建物モデルに対する温度の壁関数の適用性が確認できた。本節で対象とした単体立方体では後端渦における対流熱伝量の過小評価の影響が顕著に出たため、後流域では表面温度が過大評価された。一方で、実市街地の建物群では後方の空間の広がりや抑制されるので、後端渦の発生が緩和される傾向にある。そのため、風下側の表面温度分布および対流熱伝達量は後端渦の影響を受けにくいと期待される。ここでは、その検証も含め、実市街地に対し、計算負荷や格子数を配慮した温度の壁関数の適用を試みる。

## 2.4 実街区モデルを対象とした解析手法の精度検証

実市街地を対象とした解析において提示した数値モデルの有効性を確認するため、沿岸部に立地する実市街地を対象として熱放射を考慮した LES を実施し、夏季観測データ<sup>2)</sup>との比較を行った。観測データは、汐留の沿岸部に位置する浜離宮恩賜庭園（以下、浜離宮）で行われたパイロットバルーン観測とドップラーライダー観測（風向風速）、ビル屋上気象観測（気温、風向風速等）、汐留周辺の街路灯（地上 2.5m）に設置した温度ロガーによる地上街路気温観測である。

### 2.4.1 流入境界条件の設定

本研究では、パイロットバルーンの観測データから地表面粗度区分Ⅲ（べき指数 0.2）として、準周期境界条件<sup>13)</sup>により流入変動風を作成した。次にドライバー領域において、メソ気象モデル（WRF-LES）の結果から得られた対象時刻の水平方向の平均気温分布の鉛直プロフィールを流入面に与え、非等温 LES 解析に基づき流速・温度のデータベースを作成し、これを本解析の流入条件として使用した。流入変動風の鉛直プロフィールを図 2.7 に示す。また、ビル屋上観測、ドップラーライダー観測の結果から、対象時刻の卓越風向である南南東を流入風向とした。

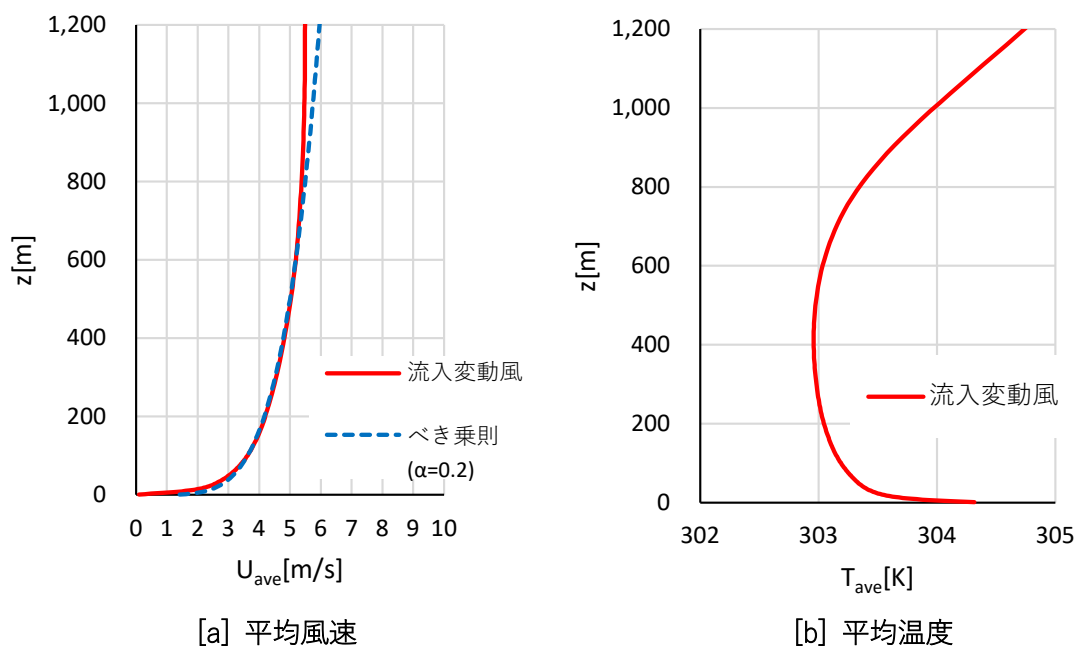


図 2.7 流入条件

## 2.4.2 解析概要

解析対象街区である汐留地区は南から南東にかけて東京湾に面した沿岸部に立地し、高層建物群を有している。夏季には海陸風循環により海から南南東の風が吹き、冷涼な海風が沿岸部から内陸部へ侵入する。本節では建物・地表面の蓄熱効果を考慮するために、助走計算として評価対象時間の前 24 時間分の熱放射・伝導解析によって建物および地表面温度を求め、その結果と流入変動風を境界条件として乱流場・放射場の連成解析を行った。解析に用いた建物モデルは実市街地の街区形状を再現している。図 2.8、図 2.9 に解析領域と計算格子を示す。高層建物群の範囲を vol.1 として、vol.6 まで格子解像度を徐々に変化させて格子を生成した。非構造格子（テトラメッシュ）を用いており、総格子数は約 3060 万要素とした。vol.1 には形状表面に境界層メッシュ 0.3m を 3 層挿入した。また、高層建物の最小表面格子サイズは 1.5m、テトラ要素の最小空間解像度は 5m とした。解析領域に含まれる建物の最高高さは約 150m である。建物・地表面の境界条件<sup>注4)</sup>は高層建物群の屋根面と壁面、低層建物および周辺建物の壁面、地表面でそれぞれ熱物性値を設定している。浜離宮は水面と芝生面に分類しており、植栽については再現していない。なお、建物の窓ガラスは窓面積率によって考慮している。水面は表面温度の固定値を LES の境界条件として与えた。その他の解析条件を表 2.6 に示す。また、太陽位置の更新間隔は 5 分とした。

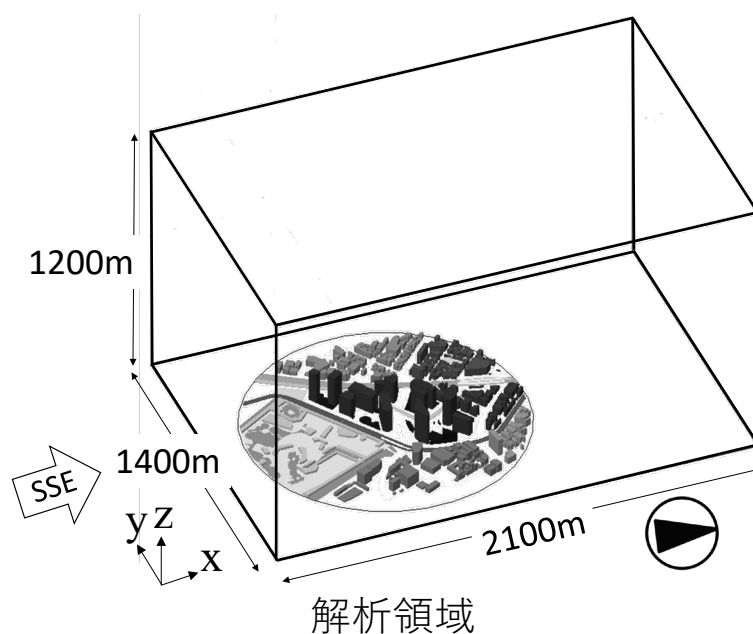
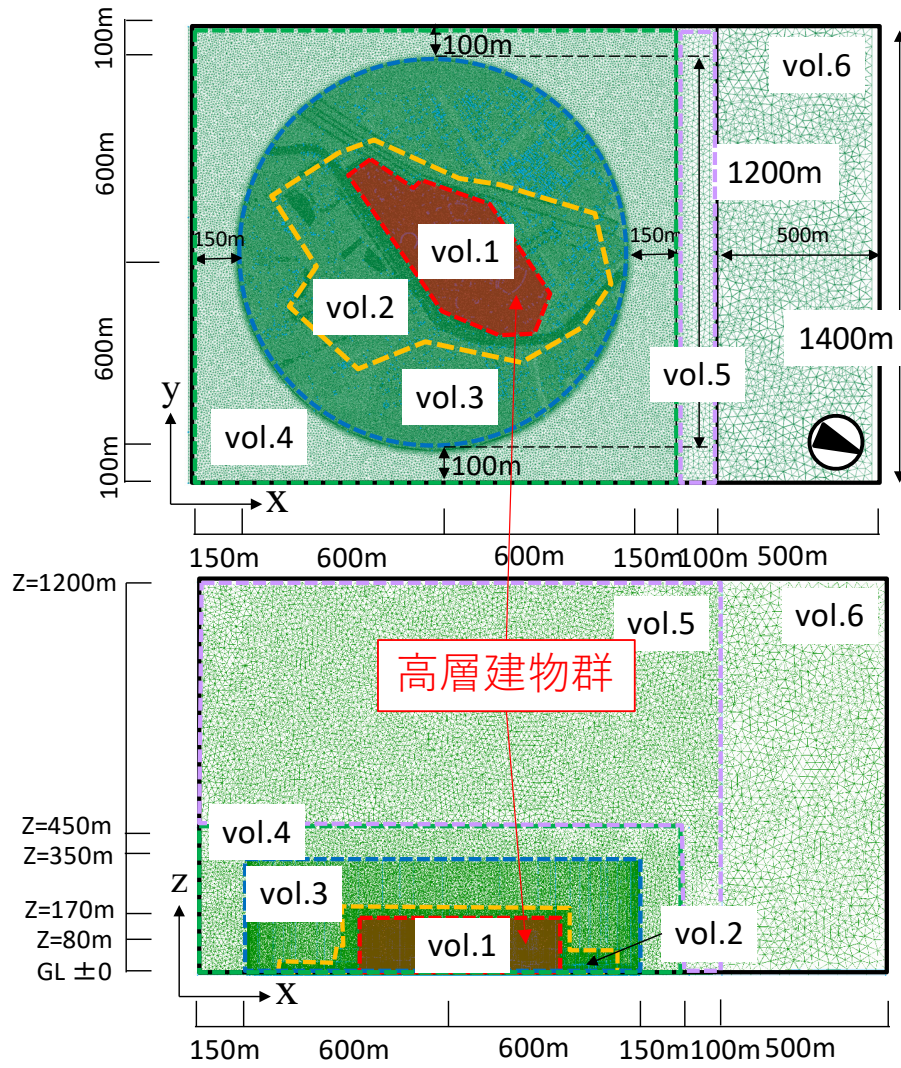


図 2.8 解析領域図



	建物地表面	空間	建物表面・地表面 プリズム厚さ
Vol1	1.5	5	0.3
Vol2	3	8	0.45 (地表面のみ)
Vol3	3	12	0.45 (地表面のみ)
Vol4	10	15	2 (地表面のみ)
vol5	20	20	4 (地表面のみ)
vol6	30	30	6 (地表面のみ)

各領域の格子解像度 (単位[m])

図 2.9 計算格子図と格子解像度

表 2.6 解析条件

評価時間	表面温度（助走計算）：24 時間 熱放射・伝導・LES：約 10 分間 （2006.8.7 13:00～13:10）
dt	LES・熱伝導：0.1 秒，放射：1 秒 （太陽の移動：5 分おき）
計算方法	SMAC 法
時間積分	Euler 陰解法
空間離散化	2 次精度中心差分
数値粘性	一部領域に 5%の 1 次精度風上差分を混合
乱流モデル	標準 Smagorinsky Model (Cs=0.1)
解析スケール	実スケール
解析領域	2100m(主流)×1400m(直交)×1200m(鉛直)
総格子数	約 3060 万要素
格子系	節点中心
格子解像度 (市街地再現範囲)	建物地表面：1.5～3m，空間(テトラ要素)：5～12m， 境界層メッシュ：0.3～0.45m
流入条件	粗度条件（観測）と温度分布（WRF-LES の平均温度分布）に基づく
流入風向	南南東
室内／地中温度	26°C／27°C

### 2.4.3 解析結果

助走計算の熱収支計算によって得られた表面温度の解析結果を図 2.10 に示す。図を見ると、道路や地面、次に屋根面の温度が高く、芝生面や水面の温度が低くなっており、壁面・地表面の材料の違いによる表面温度の違いが確認できる。この結果を境界条件として乱流場・放射場の連成解析を実施した。風速・気温の実測値と比較用に、流入変動風が観測地点に到達する時間を考慮し、連成解析開始直後 5 分のデータを除いた 13:00～13:10 の結果から 10 分間の時間平均値を求めた。高さ 50m における風速と気温の平均場を図 2.11 に示す。風速分布を見ると、風上側高層建物から剥離した風が高層建物群に入り込み、後流域に位置する建物に風が当たってさらに風の流れが分岐して、増速領域と減速領域が形成される。そのうち、減速領域の流入風が十分に到達していない場所では流入側と比べて気温が約 2～3°C 高くなっており、建物風下の弱風域のような浮力による効果が卓越する場所にて地表面からの対流放熱等によって冷涼な海風が暖められている様子が確認できた。このように実市街地の形態に応じて、日射によって加熱された都市表面からの熱輸送過程を考慮した気温、

風速分布の特性が再現され、本手法の実市街地への適用性が確認できた。

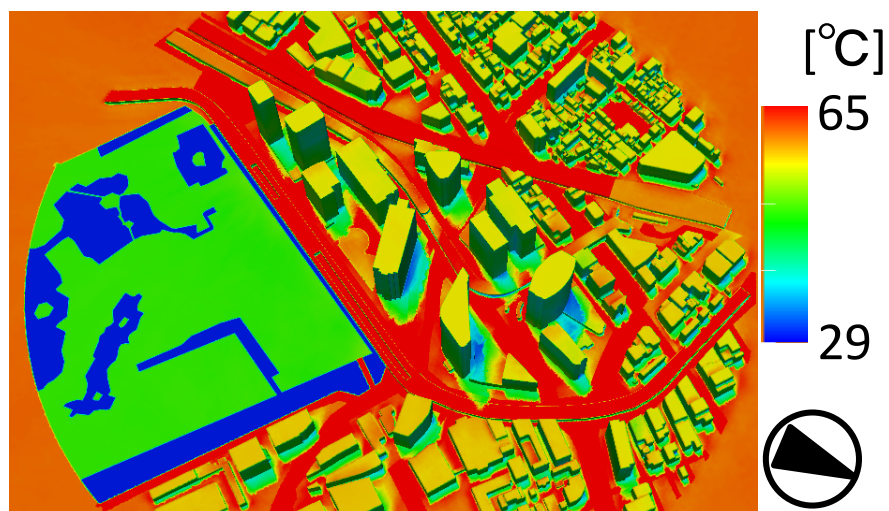


図 2.10 表面温度 (2006/8/7 12:55)

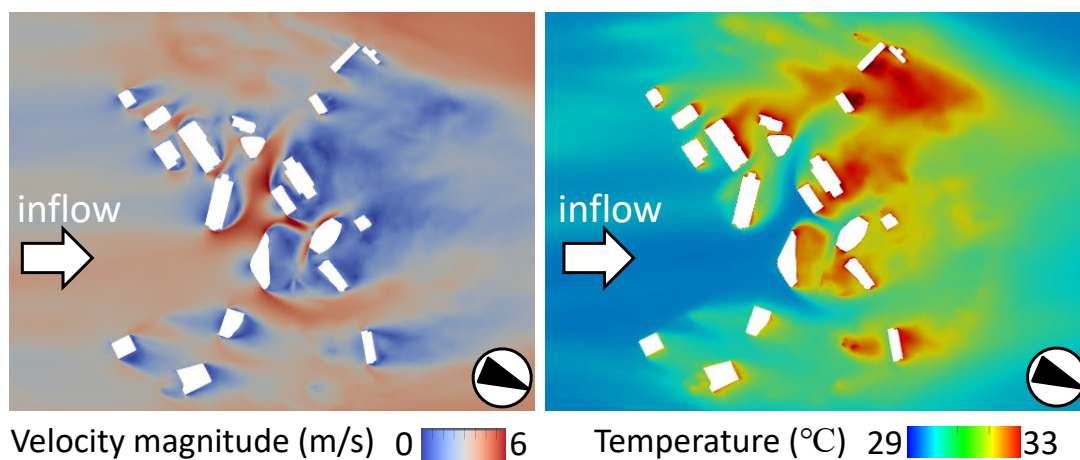


図 2.11 風速・温度の水平分布  
(時間平均値, GL+50m, 2006/8/7 13:00~13:10)

図 2.12 に観測地点の場所 (図 2.12 [a]) および各地点における観測値と比較した結果を示す。図 2.12 [b] のドップラーライダー観測による風速の鉛直分布と解析結果を比較すると、高さ 60~400m では解析の方が風速は低く、60m より低層部では観測値よりも高くなっている。低層部での差異は本解析で植栽を再現しなかったことにより、浜離宮部分での風速が実際よりも増加したと考えられる。また、風向について、高さ 60m~200m では観測と

同じ傾向を示したが、観測では低層部で風向変化が生じているのに対して、解析では主風向と同様の風向を示した。これは、解析での周辺地物の再現性による影響だと推察される。次に、図 2.12 [c] のビル屋上観測との比較結果を見ると、ビル屋上観測の風速値は観測と解析で概ね一致しているが、地点 1 では観測よりも低い値に、地点 2, 4 では観測よりも高い値となった。一方、風向に関して観測と比較すると、地点 2 を除いて観測と概ね同じ傾向を示した。地点 1~4 は建物群の中に位置するため、風上側の建物群のモデル化や表面熱物性値の再現性の影響を受けて観測との差が生じたと考えられる。ここで地点 2 に着目すると、比較に用いた 13:10 の観測では風向 W、解析では風向 SE を示しており、他の地点と比べて観測との差が大きい。ただし、比較対象時刻の前後の時間帯の観測値はそれぞれ、13:00 が S、13:20 が SSE となっており、本解析の主風向である SSE と近い風向を示している。このことから、13:10 の観測値は一時的な時間変化の過程で異なる風向になったとも推察される。なお、本章では流入変動風の速度データに、流体力学的に作成した境界層乱流を用いたため、気象場で発生する風向の一時的な変化を再現することが困難である。

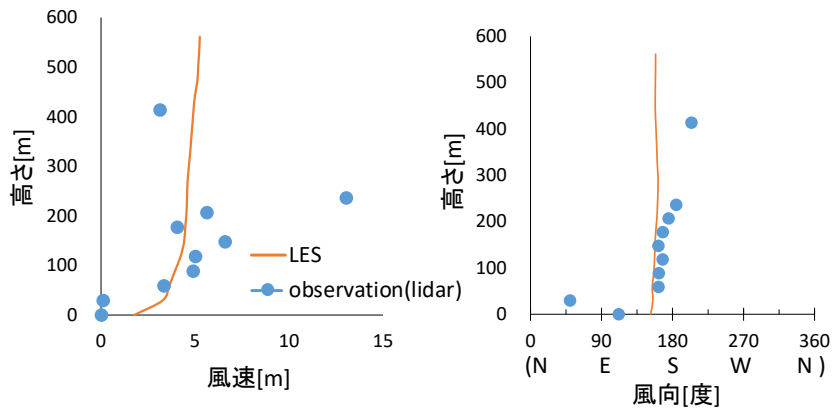
図 2.12 [d] において街路気温観測と比較した。実測と 1°C 以上差があった地点について、実測よりも高い場合は赤枠、低い場合は青枠で図上に示した。市街地内の観測点では、今回解析対象としている高層市街地内に位置する地点 7~10 では、実測と同様の値を示しており、実測との差は 4 地点の平均で約 1°C となった。ここで例として、地点 10 に到達する流線図を図 2.13 に示す。流線は平均風速に基づき作成し、流線の色は平均気温とした。図のように浜離宮を通過した流入風が市街地内に入り、日射によって加熱された地表面からの対流熱伝達によって加熱されたのち、移流によって建物角部の剥離流に乗って地点 10 に到達し、建物角部近傍の渦構造によって建物壁面上空および後流側に流れていく様子が確認できた。このように、2.3 節で検証した加熱された壁面表面での対流熱伝達の効果について実市街地を対象とした解析でも再現できていることを確認した。



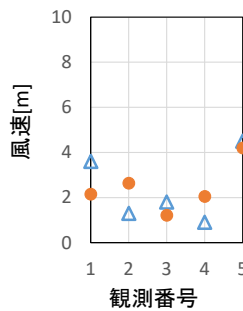
観測地点

- ・ドップラーライダー: ●
- ・ビル屋上観測(5点): ○①~④(50m), ⑤(190m)
- ・街路気温観測(10点): ○⑥~⑮(2.5m)

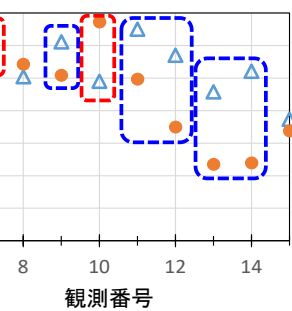
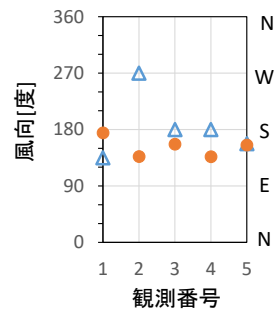
[a] 観測地点



[b] ドップラーライダー観測(風速・風向)



[c] ビル屋上観測(風速・風向)



[d] 街路気温観測

△ 観測データ  
● 解析結果

図 2.12 観測地点および観測データと解析値の比較 (2006/8/7 13:10)

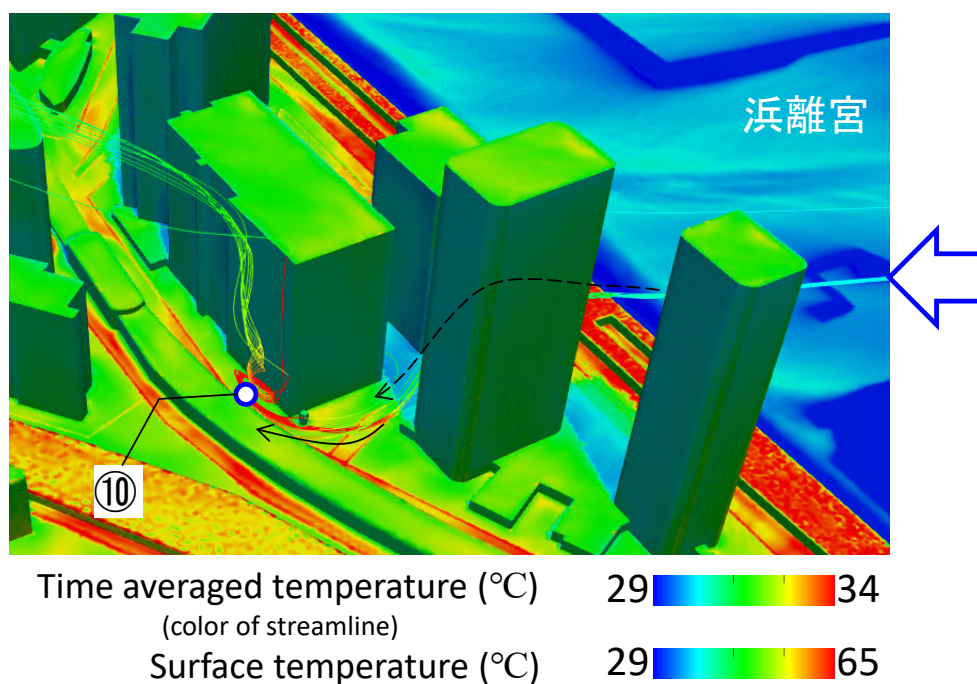


図 2.13 平均風速に基づいた地点 10 を通過する流線図  
(流線色：平均気温，建物・地表面色：13:10 頃の表面温度分布)

参考として、解析対象の高層市街地内から離れた地点（市街地風上の地点 6, 11, 12, および浜離宮内の地点 13~15）の気温を見ると、特に地点 11, 12~14 では実測との温度差が大きい。地点 11, 12 は解析領域の風上側のため、市街地再現範囲よりさらに風上側の周辺環境の再現性の影響だと考えられる。また、浜離宮内の地点 13, 14 の実測値は市街地と同程度となっていることから、芝生や水面だけでなく砂利道や樹木等の周辺地物の影響を受けていると推察される。解析では芝生面と水面のみでモデル化しているため、低温の地表面によって冷やされた風が測定点に移流して実測より低い値になったと推測される<sup>注5)</sup>。

以上より、実市街地を対象として熱放射を考慮した LES 解析を実施し、高層市街地内の風速場と温度場について実測との比較によって本解析手法の精度検証を行った。ビル屋上での風速・風向については観測と概ね同じ傾向を示しており、市街地内風速場の再現性が確認できた。高層市街地内で気温測定について解析でも実測に近い気温となっており、2.3 節で検証した壁面熱伝達モデルや熱放射を考慮した本解析手法の妥当性を確認できた。また、放射特性の異なる表面や建物群によって構成される実市街地の形態に応じて、日射、長波放射によって加熱された都市表面からの熱輸送過程が再現され、実市街地への本手法の適用性が確認された<sup>注6)</sup>。

## 2.5 市街地内の気温変動の非定常特性に関する考察

前節では、実市街地を対象とした熱放射を考慮した LES 解析を行い、時間平均された温熱場に着目して解析手法の適用性を確認した。本節では、LES によって得られる非定常値の今後の活用性を考える上で重要となる市街地内における気温の非定常特性について 2.4 節の LES 結果を用いて分析し考察を試みた。

ここでは、高層市街地内の測定点のうち、高層建物周辺の地点 8~10 と高層市街地後流側の低層建物周辺の地点 7 に着目した。各地点の建物との位置関係を整理すると、地点 8,10 は高層建物の角部の後流側に位置しており、角部の剥離流域に位置する。地点 9 は 2 棟の高層建物の後流側にあるため、建物角部の剥離流の影響を比較的受けにくい場所となっている。

図 2.14 に各地点における温度の時系列データを示す。ここでは、各地点の平均気温からの温度差で表した。なお、4 地点での平均気温は約 33.9°C、平均風速は約 2.2m/s であった。図を見ると、高層市街地内の地点 8~10 では比較の変動周期が細かい変動が見られている。特に地点 9 や地点 10 は細かい変動が全時間帯を通してみられる。温度変動幅（振幅）は平均気温±約 1~2°C の時間帯がほとんどであるが、地点 8, 9 では瞬間的に平均気温+5°C を超える時間帯も見られた。

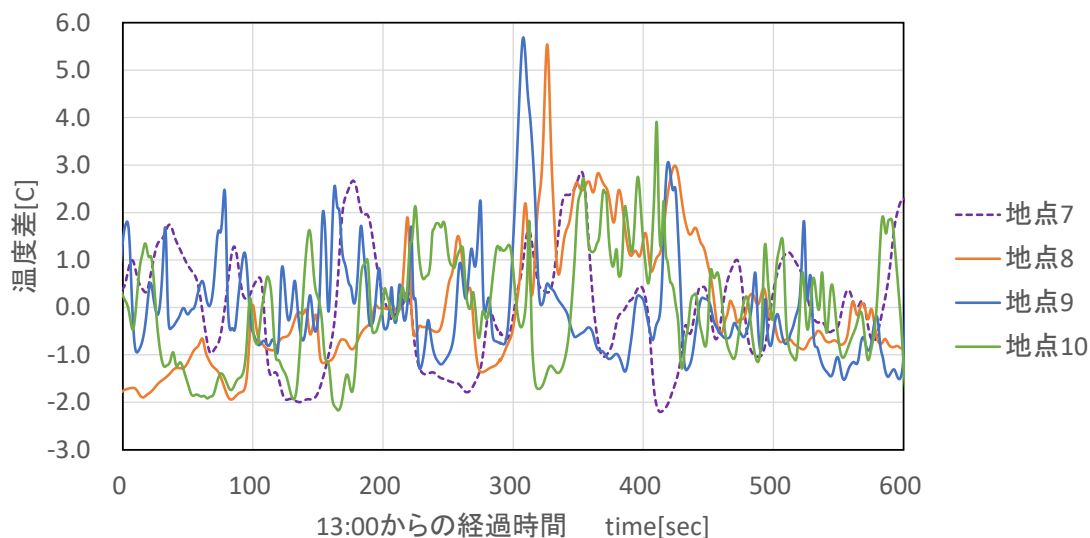


図 2.14 各地点での平均気温からの温度差の時系列データ

各地点について気温のピーク値 $T_{max}$ と10分間平均値 $T_{ave}$ の差を気温変動の標準偏差 $\sigma_t$ で除して式(2.20)から気温のピークファクター $PF_t$ を求めた。水平方向の風速 $U(=\sqrt{u^2+v^2})$ のピークファクター $PF_U$ も同様に求めた。

$$PF_t = (T_{max} - T_{ave}) / \sigma_t \quad (2.20)$$

表 2.7 に各地点の気温、風速のピークファクターと時間平均値を示す。気温のピークファクター $PF_t$ は、高層市街地の地点では3~5程度となったが、低層市街地の地点7ではそれよりもやや低めになっている。一方、風速のピークファクター $PF_U$ は全体的に $PF_t$ よりも4地点の差は小さいが、地点7が最も大きな値となった。このことから、気温と風速のピークファクターは逆相関の傾向があると考えられる。

表 2.7 各地点での気温、風速のピークファクターと時間平均値

地点	高層市街地			低層市街地
	地点 8	地点 9	地点 10	地点 7
$PF_t$	4.18	5.04	3.34	2.42
$PF_U$	2.73	2.96	3.65	3.74
$T_{ave}$	33.4	33.1	34.7	34.5
$U_{ave}$	1.8	3.3	2.4	1.4

次に、13:00~13:10のデータから算出した自己相関係数を図 2.15 に示す。自己相関係数は時間をずらしたときに同一の時系列データの変動の相関を示す指標で、ここでは隔たり時間（ラグ時間）を横軸に取り、縦軸に自己相関係数を示した。図示したラグ時間では、全ての地点においてラグ時間が大きくなるにつれて自己相関係数は小さくなった。各地点での自己相関係数を比較すると、図 2.14 で細かい変動が見られた地点 9、10 は他の地点と比べて自己相関係数が低い値となり、地点 8 は高い値となった。また、自己相関係数の低下傾向は平均風速が大きい地点 9 が最も傾きが大きく、平均風速が小さい地点 7 では緩やかになっており、自己相関係数と平均風速の関係性が確認できた。

ここで、自己相関係数から時間の積分スケールを求め、各地点の平均風速から気温変動の長さスケールを算出した。地点 7~10 の気温変動の長さスケールは、約 14.5m、約 97.7m、約 27.7m、約 35.2m となった（表 2.8 参照）。低層市街地の地点 7 が最も小さい値となり、高層市街地の中では地点 8 が最も大きな値となった。地点 8 はサンプリング点の後流側に大きな開けた空間があることから、より大きな渦構造による周期的な気温変動が見られたと推察される。よって、周囲が開けた場所の方がより大きな空間スケールの乱流構造による

影響を受けていると考えられる<sup>注7)</sup>。

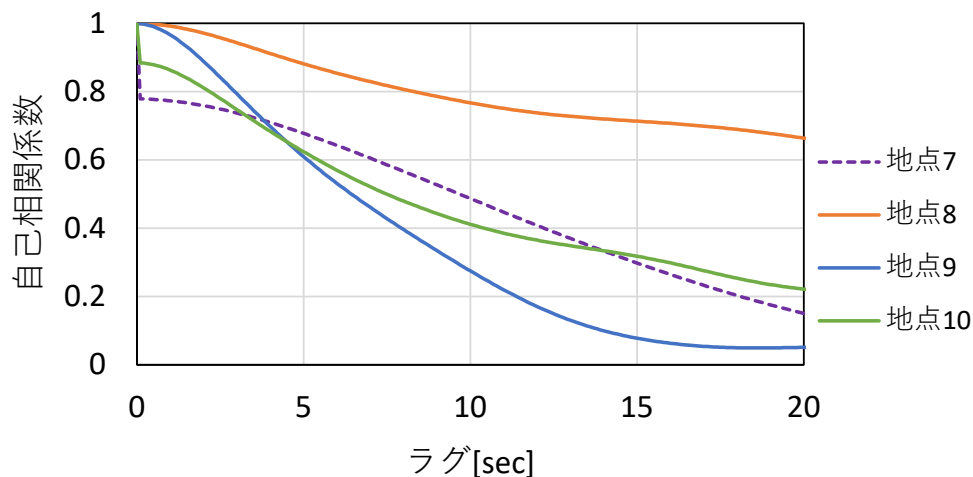


図 2.15 各地点での温度変動の自己相関係数

表 2.8 各地点での気温変動の長さスケール

地点	高層市街地			低層市街地
	地点 8	地点 9	地点 10	地点 7
気温変動の長さスケール[m]	97.7	27.7	35.2	14.5

なお、Nozu et al.<sup>2)</sup>によりまとめられた実測結果は時間平均値となっており、非定常な変動の値は掲載されていない。また、市街地内における気温の細かな変動の測定は困難であるため、事例がほとんどない。そこで参考として、気温の非定常な変動特性を実測した川端ら<sup>14)</sup>の研究<sup>注8)</sup>における熱電対温度計で測定した気温変動（測定間隔 1 秒）と比較した。川端らの論文では、夏季日中の 30 分間の気温データから自己相関係数や気温変動の長さスケールを算出している。測定高さ 2.0m における気温変動の長さスケールは、周囲が開けた場所（平均風速 1.5m/s）では 17m、周囲が植栽などで囲まれた場所（平均風速 0.6m/s）では 12m と示されていた。川端らの実測環境と本研究での解析の周辺環境等の条件が異なるため、明確な関連性を示すことは困難であるが、2.5 節で確認した地点のうち、平均風速が川端らの実測に近く、周囲に高層建物がない地点 7 から得られた気温変動の長さスケールは約 15m と実測と同程度の値となった。また、川端らの研究で示されている、周囲が開けた場所の方が気温変動の長さスケールが大きくなる傾向も解析結果より確認できた。

本節では市街地内の気温の非定常特性について整理した。気温のピークファクターは高層市街地内で約 3~5、低層市街地内で約 2.5 程度となった。また、気温変動の長さスケール

ルより、周辺が開けた場所の方がより大きな空間スケールの乱流構造の影響を受けていると考えられる結果となり、乱流構造と気温変動の特性を確認できた。

このような気温変動が激しいエリアにおいて熱中症危険性評価をする場合、解析から得られた気温や風速の時系列データを用いて、それらの非定常な変動による人体への熱ストレスの蓄積・暴露頻度等を考慮できる暑熱リスク評価手法の発展が今後期待される。

## 2.6 まとめ

本章では、乱流・放射・熱伝導の相互作用を考慮した市街地の複雑な乱流場・温度場の再現を目的として、市街地での熱放射を考慮した LES による非定常な温熱場の解析手法の検証と実市街地への適用性の確認を行った。以下のような結果が得られた。

- ・数値解析上のモデル（壁面熱伝達モデル）の検証を目的として、チャンネル流に配置された単純建物モデル（立方体）の風洞実験<sup>1)</sup>の再現解析を実施し、立方体内部を加熱した場合の表面温度や周囲の風速場について比較を行い、壁面熱伝達モデルの適用性を確認した。
- ・実測との比較により熱放射を考慮した LES の連成解析手法の妥当性検証を行った。高層市街地内における気温について、本解析でも実測と近い値を示していることから、2.3 節にて検証した壁面熱伝達モデルおよび熱放射を考慮した本解析手法の妥当性を確認した。また、高層建物群によって形成される複雑な乱流場と、放射特性の異なる多数の面によって構成される実市街地の形態に応じて、日射、長波放射や対流熱伝達の相互影響による都市表面からの熱輸送過程が再現されており、本手法の実市街地への適用性があることを確認できた。
- ・LES によって得られる非定常値の今後の活用性を考える上で、市街地の乱流構造と熱環境の非定常特性について考察を試みた。解析結果より、気温の自己相関係数と平均風速から算出した気温変動の長さスケールは、サンプリング点周辺に大きく開けた空間がある方が大きくなることが確認できた。このことより、周囲が開けた場所の方がより大きな空間スケールの乱流構造の影響を受けていると考えられ、この傾向は川端らの実測において周辺環境の異なる 2 地点の比較から得られた傾向と同様であることを確認した。

以上の結果より、本章で提案した乱流場と放射場の連成解析の妥当性と実市街地への適用性があることを示した。

注釈

注1) 建物・地表面の熱収支の各項は以下の式から求めている。短波長放射量 $Q_{SR} = \alpha_s(E_D + E_S)$ と算出している。ここで、 $E_D$ はブーゲの式から求めた直達日射量、 $E_S$ はベルラーゲの式から求めた天空日射量、短波吸収率 $\alpha_s$ とする。

$$Q_{LR} = \int_{2\pi} I(\mathbf{r}_w, \mathbf{s}_i) \mathbf{n} \cdot \mathbf{s}_i d\Omega' / A_i - \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.21)$$

$$Q_{CV} = q_w \quad (2.22)$$

$$Q_{EV} = L \alpha_w W_i (f_a - f_s) \quad (2.23)$$

$$Q_{CD} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.24)$$

$A_i$ : メッシュ $i$ の面積[m <sup>2</sup> ], $T_s$ :表面温度[K], $\sigma$ :ステファンボルツマン定数[W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )](=5.67×10 <sup>-8</sup> ), $L$ :蒸発潜熱[J/kg], $\alpha_w$ :湿気伝達率[kg/(m <sup>2</sup> s kPa)], $W_i$ :蒸発効率[-], $f_a$ :空気の水蒸気分圧[Pa], $f_s$ :表面の飽和水蒸気圧[Pa], $\lambda$ :熱伝導率[W/(m K)], $T$ :固体温度[K], $n$ :壁面法線方向
---

注2) 流入風は実験と同様のチャンネル流を想定し、周期境界条件によりフルチャンネルの流入変動風データベースを作成した。解析条件を表 2.9 に示す。

表 2.9 チャンネル流の解析条件

乱流モデル	Smagorinsky model ( $C_s=0.1$ )
減衰関数	Van Driest type
空間離散化	4 <sup>th</sup> order central difference
時間進行法	2 <sup>nd</sup> order Adams-Bashforth
壁面境界条件	Top, bot : no-slip, side : periodic
解析領域	( $X, Y, Z$ ) = (12.0 $\delta$ , 10.0 $\delta$ , 2.0 $\delta$ )
メッシュ解像度	( $dx^+, dy^+, dz^+$ ) = (27, 11, 0.9-11)
総メッシュ数	( $N_x, N_y, N_z$ ) = (135, 275, 90)
時間刻み	$\Delta t u_\tau / \delta = 0.0001$
Reynolds 数	$U\tau \cdot \delta / \nu = 400$

注3) 一般的な壁関数の適用範囲は $z^+ \approx 30$  と言われているが、実験が低レイノルズ数流れのため $z^+=30$  とすると  $H/10$  となり、流れ場の再現性の低下が懸念される。本研究で用いる対数則型壁関数は $z^+$ の値で場合分けされた二層モデルとなっているため、

Case2-WF では $z^+=4$ としたメッシュにて風洞実験の再現解析を試みた。

- 注4) 室内温度や地中温度は固体内熱伝導計算において一定値として与えた。建物の窓ガラスは放射率・透過率・吸収率を各壁面について壁と窓ガラスの面積で重み付け平均し、鏡面反射は考慮していない。建物・地表面の境界条件及び熱物性値は下記の値を用いた。なお、芝面の表面熱収支式における式(2.23)の大気中の水蒸気分圧 $f_a$ は一律と仮定して2.8kPaとし、人工排熱は考慮していない。各種熱物性値は文献<sup>15)</sup>を参考に表2.10のように設定した。

表 2.10 主な建物・地表面の熱物性値

種類	日射反射率	日射透過率	長波放射率	蒸発効率
高層建物群/屋根,壁面 低層建物・周辺建物	0.20	0.00	0.90	
道路(アスファルト)	0.10	0.00	0.90	
コンクリート面	0.20	0.00	0.90	
芝面	0.30	0.00	0.95	0.30

種類	熱伝導率 [W/m K]	容積比熱 [kJ/(m <sup>3</sup> K)]	材料名 (厚さ [mm])
高層建物群/屋根	0.27	1670	コンクリート [230], アスファルトルーフィング [10], 断熱材 [30], 石膏ボード [10]
高層建物群/壁面 低層建物・周辺建物	0.15	1410	コンクリート [150], 断熱材 [50], 石膏ボード [10]
道路(アスファルト)	0.61	1660	アスファルト [100], 砂 [40], 土 [400]
コンクリート面	0.67	1640	コンクリート [100], 砂 [40], 土 [400]
芝面	0.55	1590	芝 [100], 砂 [40], 土 [400]

- 注5) 浜離宮にある地点 13 や 14 は樹木の後流側に位置するため、今後樹木を考慮した解析を行うことで現状の解析結果よりも周囲の風速が小さくなり、その分地面からの対流熱伝達の影響が強くなって気温が上昇し、解析値が観測値に近づくことが期待される。
- 注6) 本解析手法は暑熱環境を対象とした手法ではあるが、冬期や夜間の屋外空間等の乱流場・放射場の解析にも適用できると考えられる。
- 注7) 各地点の気温変動や標準偏差について、乱流場の変動の影響だけではなく各地点での周囲の表面温度の不均一性や表面温度と空気温度の差の大小の影響も受けられていると考えられるが、実市街地内で周辺環境条件をそろえることは困難であるため、地表面・道路からの距離条件を凡そ統一した地点についてまずは乱流場と温度場の関

係性について考察を試みた。

- 注8) 川端ら<sup>14)</sup>は、気象庁が2014年12月まで東京の気温観測を行っていた大手町露場において、周囲が開けた場所と周囲が植栽と小屋に囲まれた場所の2か所で気温、風向風速、湿度を取得している。気温は強制通風式温湿度計（高さ1.5m設置）と、細かい変動を捉えるため、極細熱電対温度計（E型クロメルコンスタンタン、高さ0.1～2.0mに設置）によって、測定間隔をそれぞれ1分、1秒として測定した。川端らによると、熱電対型温度計はセンサ部分が小さく多点配置が可能であることや、応答性が良く細かい変動を捉えられることから、熱電対を鉛直方向に多点配置し、地表面近傍の気温の変動を計測したと記載されている。また、風向風速は超音波風速計により、高さ2.5mにて1分間隔で測定している。

## 参考文献

- 1) Meinders ER, Hanjalic K, Martinuzzi RJ :Experimental study of the local convection heat transfer from a wall-mounted cube in turbulent channel flow, Transactions of the ASME J Heat Trans, Vol.121, pp.564-573, 1999
- 2) Nozu, T., Tamura, T. and Okuda, T. et al.: LES analysis on heat environment in densely arrayed tall buildings -Thermal boundary treatment in actual urban area-, Turbulence, Heat and Mass Transfer 7, pp.2439-2448, 2012
- 3) 大黒雅之, 村上周三, 森川泰成, 他 5 名 : CFD を利用した屋外温熱空気環境設計手法に関する研究—川風の温熱空気環境改善効果の解析—, 日本建築学会技術報告集, 第 16 号, pp.185-190, 2002
- 4) 河野孝昭, 足永靖信, 尹聖皖, 李海峰 : 都市スケールを対象とした 5m メッシュ解像度による風速・気温場の CFD 解析, 第 18 回風工学シンポジウム, pp.117-120, 2004
- 5) 河西昌隆, 大風翼, 石田泰之, 他 2 名 : WRF と LES を結合したメソ・マイクロ気象一貫解析手法の開発と実街区における温熱環境の将来予測, 第 25 回風工学シンポジウム, pp.223-228, 2018
- 6) 陳侃, 浅輪貴史, 押尾晴樹 : 高層建築物の周囲に形成される冬季の微気候の形成要因 — 熱収支シミュレーションと CFD の連成解析を用いた検証 —, 日本ヒートアイランド学会論文集, Vol.12, pp.9-20, 2017
- 7) 萩島理, 谷本潤, 成田健一 : 都市表面の対流熱伝達率に関する既往研究のレビュー, 水文・水資源学会誌, Vol.17, No.5, pp.536-554, 2004
- 8) K. Matsuda, R. Onishi, K. Takahashi: Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 173, pp.53-66, 2018
- 9) Thijs Defraeye, Bert Blocken, Jan Carmeliet: CFD analysis of convective heat transfer at the surfaces of a cube immersed in a turbulent boundary layer, International Journal of Mass Transfer, 53 pp.297-308, 2010
- 10) Ze-Xi Hu, Gui-Xiang Cui, Zhao-Shun Zhang: Numerical study of mixed convective heat transfer coefficients for building cluster, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 172, pp.70-180, 2018
- 11) 梅干野晃, 浅輪貴史, 村上暁信, 他 2 名 : 実在市街地の 3D-CAD モデリングと夏季における街区のヒートアイランドポテンシャル, 数値シミュレーションによる土地利用と土地被覆に着目した実在市街地の熱環境解析 その 1, 日本建築学会環境系論文集, 第 612 号, pp.97-104, 2007
- 12) 原山和也, 吉田伸治, 大岡龍三, 他 2 名 : 非定常放射・伝導解析による数値解析と精度検証, 日本建築学会計画系論文集, 第 556 号, pp.99-106, 2002

- 13) 野澤剛二郎, 田村哲郎: ラフネス上に空間発達する乱流境界層の LES と変動風の評価,  
日本建築学会構造計論文集, 第 541 号, pp.87-93, 2001
- 14) 川端康弘, 山本哲, 志藤文武, 清野直子: 観測環境の違いによる鉛直分布と変動の特徴  
について, 第 25 回風工学シンポジウム, pp.139-144, 2018
- 15) 田中俊六, 他 5 名: 最新 建築環境工学[改訂 4 版], 井上書院, 2017



## 3章 都市気象擾乱に基づく温度不安定性を考慮した 流入変動風の作成・検証

### 3.1 はじめに

2018年猛暑日の東京のように、メソ気象スケールでの高温空気の移流の影響を受けている可能性があり、特に熱的な影響が強く地表面近傍の大気が局所的に不安定となっている場では、気象場由来の風速・温度変動が市街地内の温熱環境に与える影響も大きいと考えられる。このような条件下での市街地内の非定常温熱場を再現するためには、メソ気象スケールの擾乱の影響や温度の変動を考慮した流入変動風が必要となる。

既往の研究では、実際の気象場での速度変動を用いて流入条件を作成する手法の一つとして、準周期境界を用いたドライバ領域でのLESによって生成された高周波な風速の変動を持つ成分を、メソ気象モデルの解に付加することで、メソ気象モデルの結果に高周波な風速変動を付加した流入条件を作成する方法（空間フィルタリング・リスケーリング手法、河合、田村<sup>1)</sup>）が提案されている。しかしながら、既往研究では中立場を対象としており、温度変動や大気安定度の影響は考慮されていない。本章では前述の手法を元に、さらに大気安定度等の熱的影響を考慮した手法を提案する。

気象分野の解析では、評価の時空間スケールが大きいため、良く晴れた日中の大気は対流境界層（対流混合層）として取り扱われることが多い<sup>3)</sup>等。ここで、対流境界層とは境界層高さ付近に逆転層があり、上空側への熱フラックスの出入りが抑制される構造とする。また、逆転層高さ付近で温度変動が極大になり、鉛直熱フラックスが負の値になるものとする<sup>4)</sup>。対流境界層の内部は中立条件、下面近傍は不安定条件、境界層より上空は弱安定条件とする。対流境界層の厚さは～1000m程度であり、境界層内の対流（プルーム等）の水平スケールは数百m～1000m程度とされている<sup>5)</sup>。境界層内の変化は数時間～数日といった大きな時間スケールで議論されることが多い。一方で、都市・建築分野における市街地スケールでのLESでは、街区内において建物スケールで生成される数m～数十m単位の渦構造や対流構造の再現や数分～数十分の短時間の非定常特性の評価を目的としている。地表面近傍（地上数m～数十m）における乱流構造は、日射により加熱された地表面からの対流熱伝達や浮力による効果、建物等の障害物等の局所的かつ瞬時的な影響を強く受けると考えられる。しかしながら、気象スケールの大気境界層と都市・建築スケールの風速場・温度場は空間が連続しており各々の乱流構造が影響していると考えられるため、気象スケールの風速・温度変

動も考慮した市街地の乱流場・温熱場予測が重要となる。本章では市街地の乱流場・温熱場予測で用いる流入変動風を対象とし、境界層内部における気象擾乱や大気安定度を考慮した乱流特性や温度変動特性に着目している。

対流境界層は一般的に温位が急激に変わる逆転層を持つとされるが、夏季日中の観測データや気象モデルの解では強い逆転層を持つ一般的な対流境界層とは異なり、境界層高さ付近での温位変化が緩やかで逆転層がほぼないようなケースも多く見られる。その場合、逆転層による境界層外への熱フラックスの流出を抑える機構が弱まるため、下面で暖められた空気は徐々に境界層の上空に放出されて変化する非定常状態だと考えられる。気象スケールにおける非定常特性を市街地スケールでも考慮するために、市街地スケールの LES の境界条件として流入変動風が用いられるが、市街地の温熱環境解析において、乱流統計量の普遍的な特性を確認の上では時間方向の変化の割合が小さい流入変動風を用いることが望ましいと考えられる。また、気象モデルの計算結果は高周波な変動成分を生成することが困難であるため、高周波成分を付加した流入変動風を生成する必要がある。

以上より、本章では、不安定な温熱場における市街地内の乱流場・温熱場予測に用いるための時間変化が抑制された流入境界条件の作成を目的として、気象擾乱および大気安定度を考慮した流入変動風作成手法の提案とその乱流特性を確認するとともに、本手法の適用性を吟味する。なお、本章では流入変動風の基礎的な検証を目的として、一般的な夏季の日中を対象として解析手法の構築を行った。

3.2 節では、WRF-LES の解に基づき、空間フィルタリング・リスケーリング手法および大気安定度や地表面の加熱による影響を再現するドライバ領域を用いて、気象擾乱及び大気安定度を考慮した流入変動風の作成手法を提案する。3.3 節は、3.2 節の手法を夏季日中における東京の実市街地への接続を想定した解析に適用し、作成した流入変動風の特性について把握する。流入変動風のベースとなる WRF-LES や各ドライバ領域から得られた結果について風速・温度の平均値や変動特性を比較する。また、流入変動風の基礎的な物理特性を吟味するため、例として対流境界層を対象とした既往の風洞実験（大屋ら、1998<sup>5)</sup>）との比較による乱流特性の確認を行い、本手法の適用性を確認する。本手法の流入変動風を市街地の乱流場・温熱場の予測に適用することにより、都市気象擾乱の影響を考慮した地表面近傍の乱流場・温度場の非定常特性を吟味することの妥当性を考察する。

## 3.2 メソ気象モデルの解に基づく高周波変動成分を付加した流入変動風の生成手法

本章では、WRF-LESの結果を元に、気象擾乱と大気安定度を考慮した流入変動風を生成した。生成手順は、(1)WRF-LESによる大気境界層の時空間データの生成、(2)空間フィルタリング・リスケーリング手法による高周波変動成分の付加(region1)、(3)WRF-LESから得られた対象時刻の温度の鉛直分布を流入面に与えた非等温LES解析(region2)の3段階で構成される。図3.1に流入変動風生成手順の概念図を示す。

まずWRFおよびWRF-LESによって、大気境界層の時空間データを生成する(手順(1))。ここで、メソ気象モデルから得られる風速は低周波な変動を含むが、数秒以下のスケールの高周波な変動成分の生成は困難であることが知られている<sup>1)</sup>。そこで、WRF-LESの解に河合、田村<sup>1)</sup>の提案した空間フィルタリング・リスケーリング手法を適用し、ドライバ領域(region1)のLESにおいて風速の高周波な変動成分を付加した中立境界層を作成する(手順(2))。最後に、ドライバ領域(region2)において、WRF-LESによって得られた平均温度の鉛直分布を流入面に与えて非等温LES解析を実施し、大気安定度を考慮した流入変動風の速度・温度のデータベースを生成する(手順(3))。本章では、手順(2)、(3)について説明する。

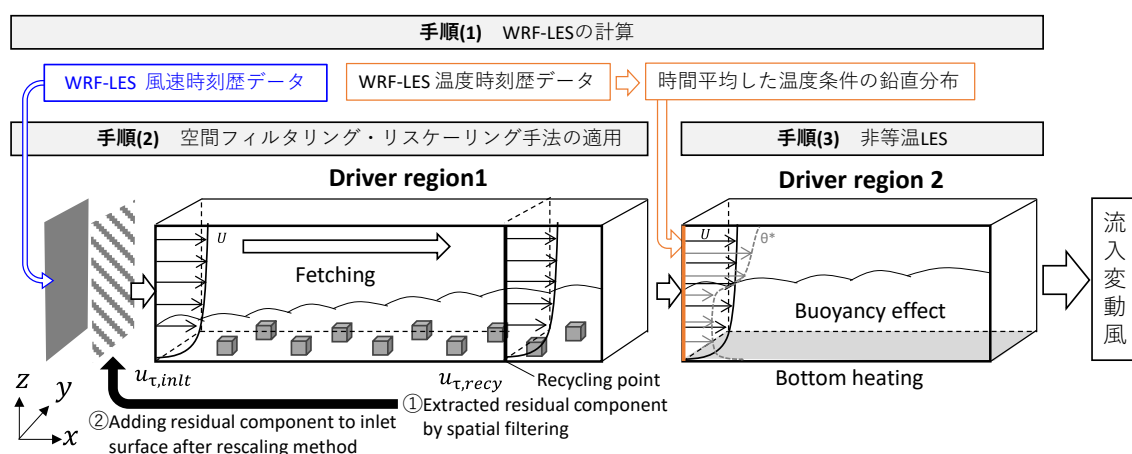


図 3.1 空間フィルタリング・リスケーリング手法と非等温 LES のドライバ領域による流入変動風生成手順の概念図

### 3.2.1 空間フィルタリング・リスケーリング手法の粗面境界層への適用 (region1)

本章では、空間フィルタリング・リスケーリング手法（河合，田村，2020）<sup>1)</sup>について、市街地のような粗面上を発達する乱流境界層への適用を検討した。この手法は、気象モデルの解析結果のような、比較的粗い解像度で解かれた低周波の風速変動を空間フィルタリングによって粗視化された流れ場と仮定した上で、空間フィルタリングと適切なスケールで風速の変動成分を再導入するリスケーリングを用いた方法である。リサイクル点での乱流変動の空間フィルタリングされた流速 $\tilde{u}_i$ （以下，Spatial filtered 成分とする）と空間フィルタリングとの偏差成分として得られる偏差成分 $u''_i$ （以下，偏差成分とする）をリサイクル点に対する流入面の摩擦速度比 $\gamma$ を用いてリスケーリングすることで、流入風の乱流特性に対応した偏差成分が流入面に付加できる。河合，田村<sup>1)</sup>の手法では Lund et al.<sup>6)</sup>の手法と同様にリスケーリングを内層と外層に分けて行っており、本研究でも同様の方法を用いた。内層は壁法則，外層は速度欠損則に基づく代表長さ $z_0$ と速度を決めてリスケーリングを行っている。

リスケーリングに用いる摩擦速度比 $\gamma$ は、既往研究<sup>18)</sup>では滑面を想定して、流入境界・下流境界の運動量厚比 $\beta (= \theta_{inlt}/\theta_{recy})$ から算出している。本研究では空間フィルタリング・リスケーリング手法を粗面へ適用するため、準周期条件を用いる Lund et al.<sup>6)</sup>の手法を粗面に拡張した野澤，田村<sup>7)</sup>の手法を参考に摩擦速度比 $\gamma$ を算出し、リスケーリングを行った。最後に、スケール変換された内層および外層の風速の偏差成分を Lund et al.<sup>6)</sup>の方法で示されている重み付け関数によって合成し、メソ気象モデルの解等の変動成分の付加が必要な流れ場に対して合成された偏差成分を付加する<sup>1)</sup>。また、本研究では、解析領域の粗度効果は feedback-forcing 法<sup>8)</sup>により外力項として Navier-Stokes 方程式に付与することで、固体壁面の no-slip 条件を与えた。

### 3.2.2 メソ気象モデル結果の大気安定度を考慮した非等温 LES 解析による速

#### 度・温度のデータベースの生成 (region2)

Region2 では、温度による大気安定度の影響を考慮するため、region1 の風速の時系列データと WRF-LES の時間方向及びスパン方向に平均化した温度の鉛直分布を流入境界条件として、非等温 LES 解析により市街地領域に接続する速度・温度のデータベースを作成する。ここでは、WRF-LES の温位分布が一定（中立条件）となる部分を境界層高さとして仮定して計算を行う。

市街地の温熱場・乱流場の解析において、乱流統計量等の普遍的な特性を確認する上で速度場・温度場の物理量の時間変化が小さい流入変動風データを得ることが望ましいと考えられる。WRF-LES から得られた結果が逆転層を持たない温度条件の場合、そのまま region2 の流入条件に用いると、時間経過とともに熱フラックスが境界層上空側に流出して非定常状態となることが予想される。また、この場合、境界層より上空は強い安定成層となり、上面境界と境界層の間で非物理的な周期構造が発生して上空側から境界層内への影響が懸念される。本研究では流入変動風の乱流に関する統計的な特性を吟味するため、時間方向に安定したものを対象とする。

本研究では、境界層内部、特に地表面近傍の乱流場・温度場予測のための流入変動風の作成を目的とし、境界層内部では WRF-LES の温度分布を用いて、境界層高さ付近に逆転層を設けることで境界層内部について時間変化が抑制された流入変動風の作成を試みた。また、安部ら<sup>3)</sup>による対流境界層の計算を参考に境界層より上空のエリアでは弱安定条件を与えた。速度場に関しても一般的な対流境界層の特性を想定し、境界層より上空の速度変動について、速度変動が 0 になるように時間平均プロファイルを流入条件とした。

Region2 における基礎方程式は、フィルター操作された連続の式、Navier-Stokes 方程式、温度の輸送方程式を用いる。 $\tau_{ij}^*$ ,  $h_j^*$ ,  $\nu_{sgs}^*$ ,  $\alpha_{sgs}^*$  は SGS レイノルズ応力, SGS 熱フラックス, SGS 渦粘性係数, SGS 温度拡散係数である。これらを基準温度  $\theta_0$ , 代表長さ  $L$ , 代表速度  $U$ , 代表的な温度差  $\Delta\theta$  で無次元化した。以下に無次元化された連続の式, Navier-Stokes 方程式, 温度の輸送方程式を示す。無次元化された物理量は\*で表現している。ここで,  $u_i$  は速度 ( $u, v, w$ ),  $\nu$  は動粘性係数,  $\alpha$  は熱拡散係数を表す。式(3.9), 式(3.10)が無次元化した式におけるパラメータであり, レイノルズ数, プラントル数, リチャードソン数である。

$$\frac{\partial \overline{u_i^*}}{\partial x_i^*} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \overline{u_i^*}}{\partial t^*} + \frac{\partial \overline{u_i^* u_j^*}}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial \overline{p^*}}{\partial x_i^*} + \frac{\partial}{\partial x_j^*} \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial \overline{u_i^*}}{\partial x_j^*} + \frac{\partial \overline{u_j^*}}{\partial x_i^*} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}^*}{\partial x_j^*} + Ri \overline{\theta^*} \delta_{i3} \quad (3.2)$$

$$\tau_{ij}^* = \overline{u_i^* u_j^*} - \overline{u_i^*} \overline{u_j^*} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \overline{\theta^*}}{\partial t^*} + \frac{\partial \overline{\theta^* u_j^*}}{\partial x_j^*} = \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left( \frac{1}{Re} \frac{1}{Pr} \frac{\partial \overline{\theta^*}}{\partial x_j^*} \right) - \frac{\partial h_j^*}{\partial x_j^*} \quad (3.4)$$

$$h_j^* = \overline{u_j^* \theta^*} - \overline{u_j^*} \overline{\theta^*} \quad (3.5)$$

$$\tau_{ij}^* = -2\nu_{SGS}^* \overline{S_{ij}} + \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{ij}^*, \quad \overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u_i^*}}{\partial x_j^*} + \frac{\partial \overline{u_j^*}}{\partial x_i^*} \right) \quad (3.6)$$

$$\nu_{SGS}^* = (C_S \overline{\Delta})^2 (2\overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}})^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

$$h_j^* = \alpha_{SGS}^* \frac{\partial \overline{\theta^*}}{\partial x_j^*}, \quad \alpha_{SGS}^* = \frac{\nu_{SGS}^*}{Pr_{SGS}} \quad (3.8)$$

$$Re = \frac{LU}{\nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.9)$$

$$Ri = g\beta \frac{\Delta\theta\delta}{U^2} \quad (3.10)$$

本研究では、大気安定度の指標の一つであるリチャードソン数 $Ri$  (式(3.10)) を浮力項のパラメータとした。ここで、 $g$ は重力加速度、 $\beta(=1/\theta_0)$ は体積膨張率、 $\theta_0$ は基準温度、 $\Delta\theta$ は代表温度差、 $\delta$ は境界層高さとし、ここでは代表風速 $U = u_\tau$  (摩擦速度)とした。また、 $\theta_m$ および $\theta_{bot}$ はそれぞれ境界層厚での温度 (境界層内で一様になった温度) と下面の温度とし、ここでは $\theta_0 = \theta_m$ とした。温度の流入条件は $\theta_m$ と $\theta_{bot}$ の温度の差によって、式(3.11)のように無次元化して設定した。

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_m}{\theta_{bot} - \theta_m} \quad (3.11)$$

また、本研究では空気を想定してプラントル数  $Pr=0.71$  を用いた。下面の温度境界条件は、夏季日中の日射により地面が暖められている不安定条件を想定し、 $\theta^* = 1$ としてディリクレ条件を課した。なお、本手法はドライバ領域を用いて流入風を一定方向に吹走させる必要があるため、気象モデルから得られた流入風データの主風向の変化が小さい場合を適用対象とする<sup>注1)</sup>。

### 3.3 不安定温熱場の実市街地を対象とした流入変動風

#### 3.3.1 解析概要, 解析条件

本研究では2章にて検討した汐留地区を解析対象とした。まずWRFおよびWRF-LESによって大気境界層の時空間データを生成した。WRFでは、5段階のネスティングにより実施し、最小のDomain5では東京都心部の12km四方の領域を空間解像度40mで再現した解析を実施した。一般的な夏季晴天日の日中を対象とした流入変動風を作成するため、解析期間は2006年8月6日9時～8月7日15時(JST)とした。解析条件, 物理モデルを表3.1, 表3.2に示す。WRF-LESから得られた温位場, 風速場は高さ600m付近まで温位が一定となっており, 風速の分布も0.6δ付近までほぼ一定となっていた。

表 3.1 WRF, WRF-LES の解析条件

Domain	WRF モデル	解析領域 [km]	水平 格子数	水平格子 解像度[km]	時間刻み[秒]
1	WRF	900×900	100×100	9	27
2	WRF	408×408	136×136	3	9
3	WRF	136×136	136×136	1	3
4	WRF-LES	40.2×40.2	201×201	0.2	0.6
5	WRF-LES	12.0×12.0	301×301	0.04	0.12

表 3.2 WRF, WRF-LES の物理モデル, 解析条件

Microphysics	Lin et al. scheme
Longwave/Shortwave radiation	RRTMG scheme
Surface-layer	MYNN
Land surface	Unified Noah land-surface model
Planetary Boundary Layer	MYNN 3 <sup>rd</sup> level TKE (Domain1-3) None (Domain 4-5)
Target period	2006/8/6 9:00～8/7 15:00(JST) (Domain1-3) 2006/8/7 12:00～8/7 15:00(JST) (Domain 4-5)

次に、WRF-LESの結果に空間フィルタリング・リスケージング手法を適用した。region1の流入境界に接続する際の境界層厚はWRF-LESの鉛直温位プロファイルより温位が一定となっている高さを境界層厚 $\delta=600$ [m]と仮定し、摩擦速度はレイノルズ応力 $-\langle u' w' \rangle$ より $u_\tau=0.683$ [m/s]とし、無次元化した上で流入境界に接続した。ここで、物理量の瞬時値 $A$ に対する時間平均成分を $\langle A \rangle$ 、時間平均からの差(変動成分)を $A' = A - \langle A \rangle$ とする。その他の解析条件を表3.3に示す。ここでは無次元化時間を $t^* = tu_\tau/\delta$ とし、8/7 12時(JST)を $t^*=0$ とした。粗度効果はfeedback-forcing法<sup>5)</sup>を用いて、粗度ブロックを高さ約 $0.04\delta$ 、粗度密度を約1%の千鳥格子配置として表現した。図3.2に空間フィルタリング・リスケージング手法のプロセスを示す。WRF-LESの結果と比較して、リサイクル点( $x/\delta=10$ )での流れ場から抽出された偏差成分を付加して吹走させることで、図3.2の②のように風速変動成分が付加されていることが確認できた。

表 3.3 region1 の解析条件

Turbulence model	Smagorinsky model ( $C_s=0.1$ ) (Damping function: Van Driest type)
Spatial discretization	4th order central difference
Time marching	2nd order Adams-Bashforth
Pressure solver	SOR
Domain size	$(X, Y, Z) = (12.5\delta, 3.0\delta, 4.0\delta)$
Grid number	$(N_x, N_y, N_z) = (500, 150, 150)$
Spatial resolution	$(dx^+, dy^+, dz^+) = (10, 8, 0.6 - 48)$
Time resolution	$\Delta tu_\tau/\delta=0.000025$

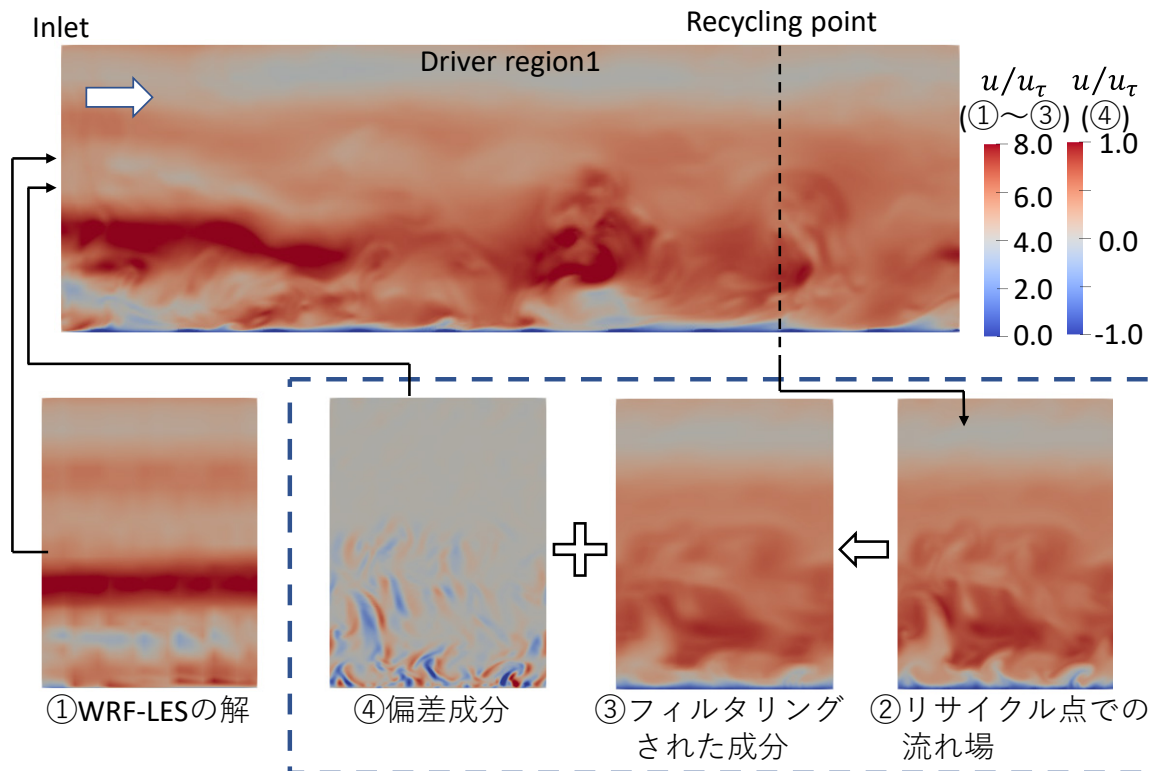


図 3.2 空間フィルタリング・リスケーリング手法のプロセス

最後に region1 の速度時系列データと WRF-LES の 8 月 7 日 13 時頃の平均温度の鉛直分布を region2 の流入面に与え、非等温 LES 解析に基づき、流速・温度の流入変動風を生成した。Region2 の解析条件<sup>注 2)</sup>を表 3.4 に示す。ここでは、境界層上空の温度・速度条件の影響を確認するため、流入条件の異なる 2 ケースを検討した。境界層内は case1, 2 とも共通とし、下面近傍が不安定条件でそれ以外の範囲は中立条件、速度データは region1 の時系列データを流入条件とした。境界層上空について、case1 では 3.2.2 項に記載したように、弱安定条件で速度変動が 0 となるようにべき乗則（べき指数 0.2）の時間平均プロファイルを設定した。Case2 では WRF-LES の鉛直温度プロファイルの時間平均値をそのまま与えて安定条件とし、速度データも region1 の時系列データをそのまま用いた。図 3.3 に温度の流入条件を示す。

表 3.4 region2 の解析条件

Turbulence model	Smagorinsky model ( $C_s=0.1$ ) (Damping function: Van Driest type)
Spatial discretization	4th order central difference
Time marching	2nd order Adams-Bashforth
Pressure solver	SOR
Domain size	$(X, Y, Z) = (8.0\delta, 3.0\delta, 4.0\delta)$
Grid number	$(N_x, N_y, N_z) = (320, 150, 150)$
Spatial resolution	$(dx^+, dy^+, dz^+) = (10, 8, 0.6 - 48)$
Time resolution	$\Delta t u_\tau / \delta = 0.000025$
Ri	-56.1
Pr, Pr <sub>SGS</sub>	0.71 <sup>9)</sup> , 0.5 <sup>10)</sup>
Inlet	Velocity: 境界層内は region1 の結果を接続, 境界層上空はべき乗則 Temperature: 図 3.3 参照

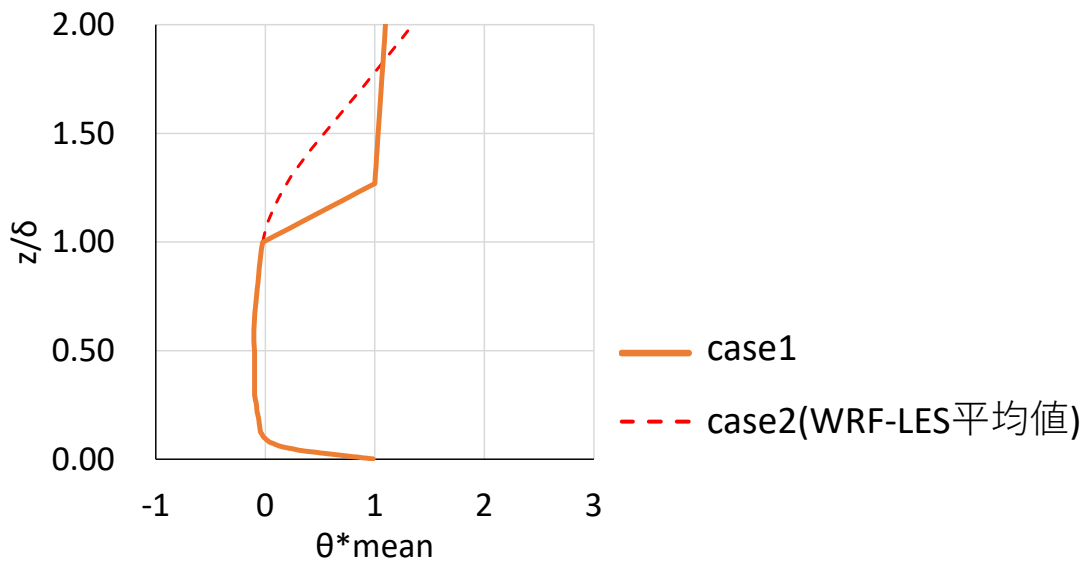


図 3.3 region2 流入条件 (温度)

### 3.3.2 作成した流入変動風の乱流場の確認

図 3.4 に region2 によって得られた風速と温度場の yz 断面 ( $x/\delta=7.5$ ) を示す。図 3.2 のプロセスによって生成した乱れと底面からの加熱によって、温度の変動を含む流入変動風が生成されたことが確認できる。図 3.5 に  $z/\delta=0.08$  における xy 断面の鉛直方向風速と温度の瞬間分布を示す。鉛直方向速度場（上図）では赤色が下方から上昇する流れ、青色が上方から地表面側への流れを表している。鉛直方向速度場を見ると、主流方向に伸びるロール構造が再現されており、対流境界層でも見られる傾向である。ロール構造のスパン方向間隔は約  $0.5\sim 0.75\delta$  であった。また、温度場についても似た構造が見られ、温度場と速度場が関連して高温域における上昇流や低温域での下降流が形成されている様子が見られた。

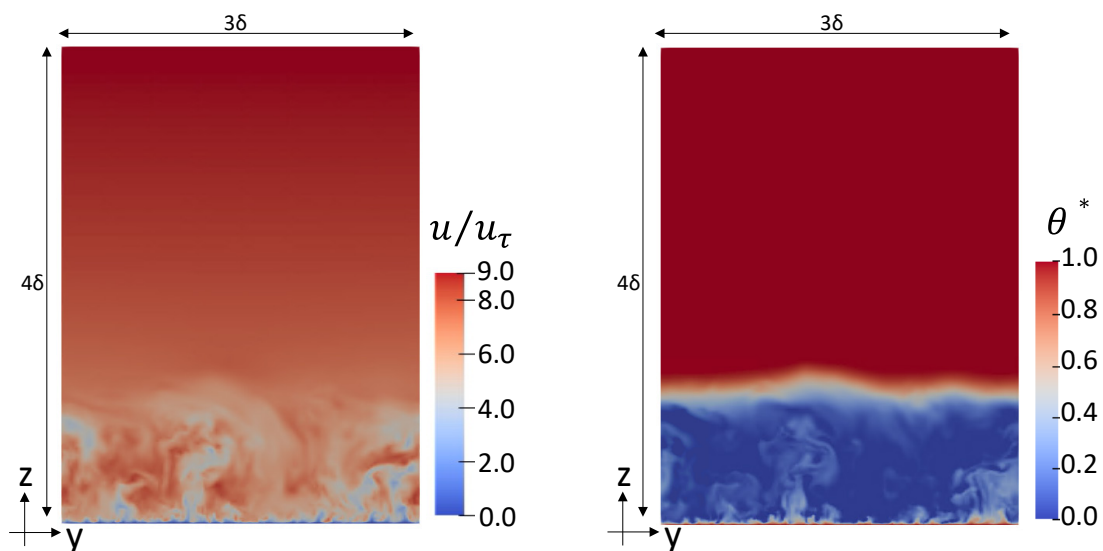


図 3.4 region2(case1)の主流方向風速, 温度の瞬間分布  
( $x/\delta=7.5$ ,  $t^*=4.75$ )

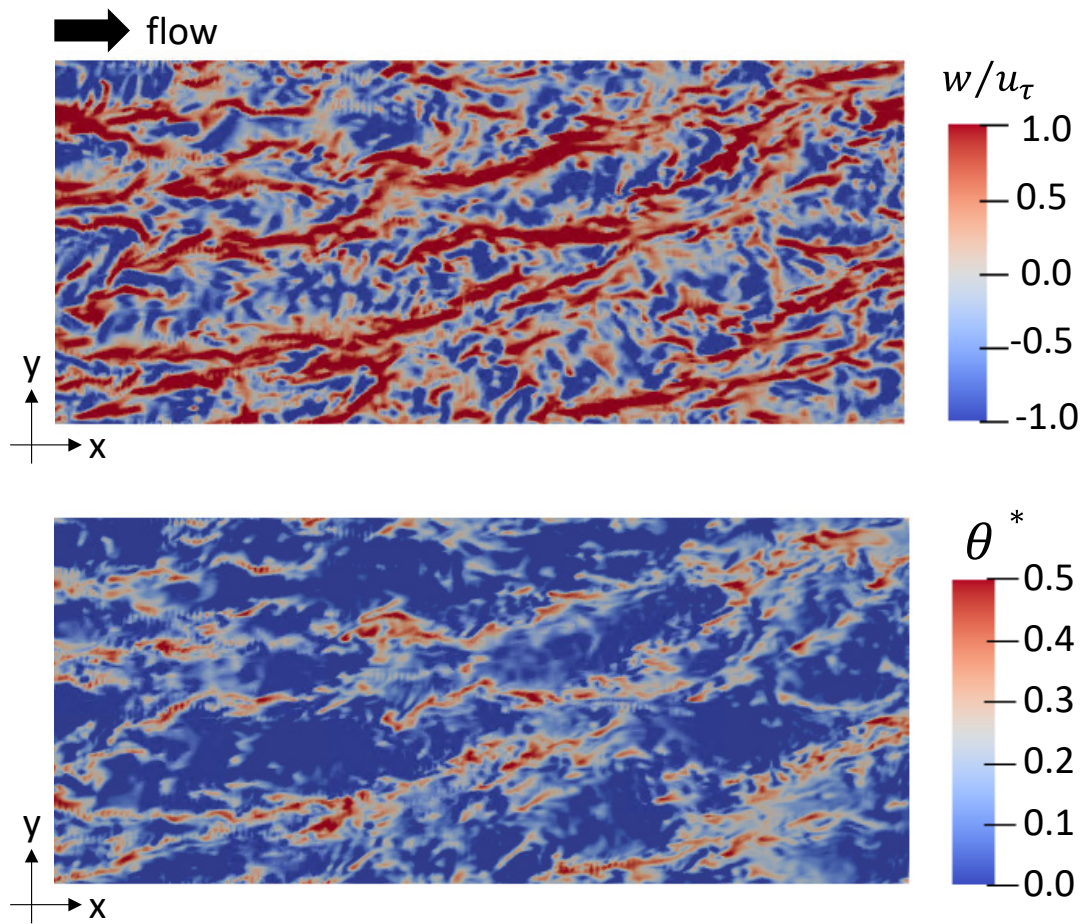


図 3.5 region2(case1)の鉛直方向風速, 温度の瞬間分布  
 ( $z/\delta=0.08$ ,  $t^*=4.75$ )

### 3.3.3 気象擾乱を考慮した流入変動風の乱流特性の比較

WRF-LES, region1, region2 (case1, 2) の乱流統計量 (統計時間  $t^*$ =約 4.1~4.8) を比較した。図 3.6 に風速, 温度の鉛直分布の時間平均値 (Region1 はリサイクル点 ( $x/\delta=10$ ), region2 は  $x/\delta=7.5$ ) を示す。ここでは, 平均風速 ( $U_{mean}$ ) を境界層内でほぼ一様となる流速 ( $U_m$ ) で無次元化した値を整理した。Region1 の風速分布はほぼ一様となる流速の判断が難しいため, 参考として WRF-LES の  $U_m$  で無次元化した。風速分布を比較すると, Region1 では下面近傍の浮力の影響が考慮されていないため境界層下部の流れ場がべき乗則に近づいているものの, WRF-LES, region2 の case1, case2 では高さ方向にほぼ一様な風速となり, 対流境界層で見られる傾向と同じであった。温度分布を見ると, 境界層内では WRF-LES, region2 の case1, 2 で差は小さい。境界層上空では, case2 では流入条件 (グラフ上の WRF-LES) から変化する様子が見られたが, case1 では流入条件とほぼ変わらない分布となっていた。以上より, 境界層内部の平均風速, 平均温度は case1, 2 であまり差が見られなかった。

次に, 乱れの強さ  $lu$  と鉛直熱フラックス  $\langle w' \theta' \rangle / Q_s$  を比較した。ここで, 地表面近傍における鉛直熱フラックスの最大値を  $Q_s$  とする。高周波成分の付加と温度効果の考慮により, 地表面近傍では WRF-LES よりも region1, region2 の方が乱れの強さ  $lu$  が大きくなった。境界層内部に着目すると case1, 2 とともに地表面近傍 ( $z/\delta = 0.03$ ) で鉛直熱フラックスは最大値を取り, その後境界層厚近傍で負の値を取る傾向は同じである。しかし, case1 では  $z/\delta = 1.3$  近傍で熱フラックスは 0 に漸近するが, case2 では  $z/\delta = 2$  でも負の値となっている。また, case1 は時間経過とともに統計量の変化が小さくなったが, case2 は温度プロファイルや熱フラックスの鉛直分布がこの後も変化する様子が見られた。これは case2 では逆転層を持たず境界層上空が安定条件となっているため, 通常の大気境界層において逆転層によって上空への流出が抑えられる機構がなく, 徐々に上空側に熱フラックスが流出してしまうためだと考えられる。一方, case1 では逆転層があることによりこの流出が抑えられ, 時間方向に安定した境界層が生成されていると判断し, 作成した流入変動風の普遍的な特性を確認する上で case1 を対象とした。

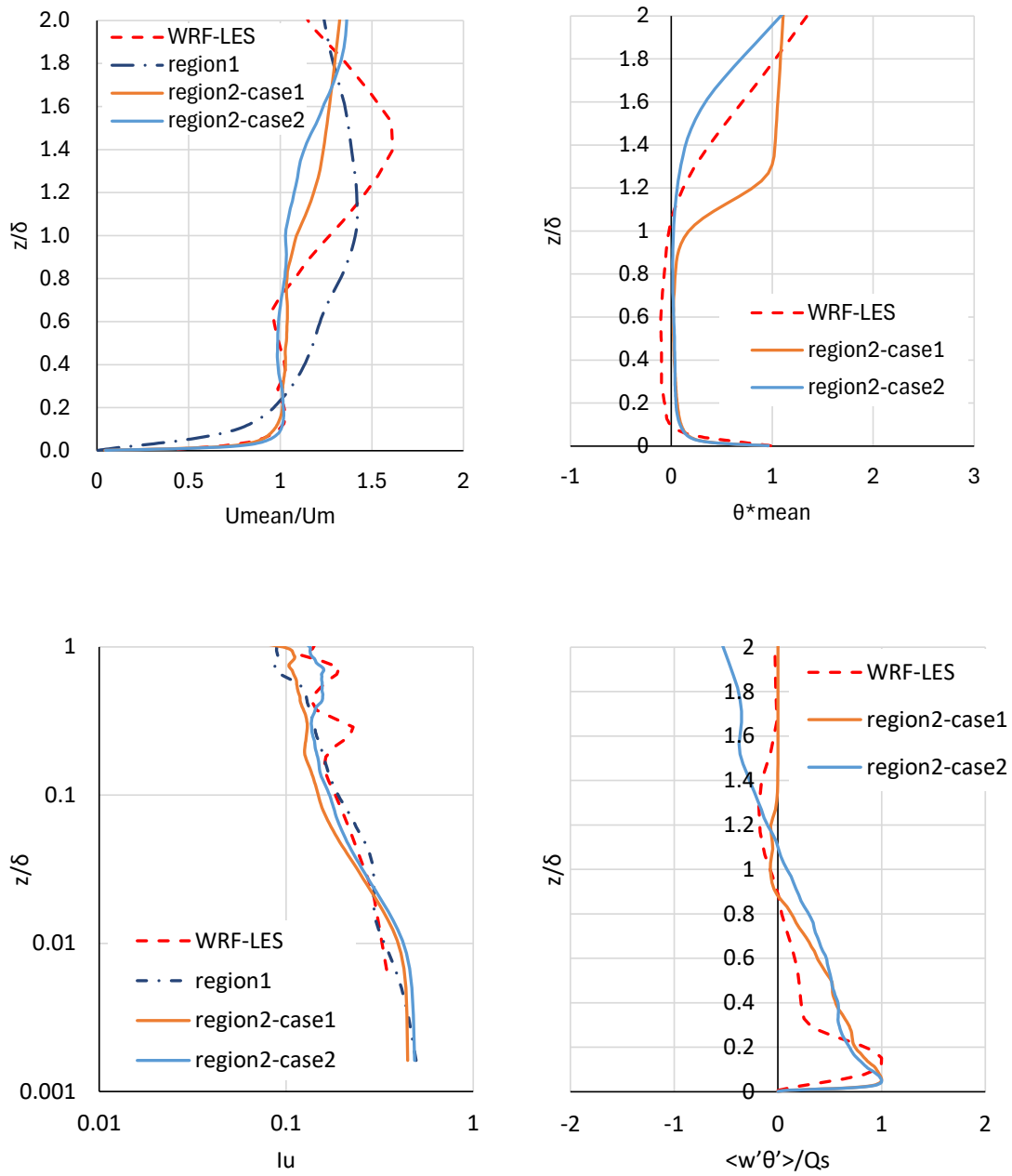


図 3.6 平均風速, 平均温度, 乱れの強さ, 鉛直熱フラックスの鉛直分布の比較

次に、作成した流入変動風の基礎的な乱流特性を確認するため、region2 の case1 と対流境界層を対象とした既往実験値<sup>5)</sup>と比較した(図 3.7, 図 3.8)。ここでは、既往研究<sup>3)</sup>にない、鉛直熱フラックスの最大値 $Q_s$ や自由対流速度スケール $w_*$ (式(3.12))で無次元化した値を比較した。ここで $z_i$ は逆転層高さとする。

$$w_* = (g\beta \cdot Q_s \cdot z_i)^{1/3} \quad (3.12)$$

図 3.7 を見ると、境界層下部で平均風速が一樣となる様子や、平均温度分布の下面近傍で局所的に高い値となってそのあと一定値になり、逆転層近傍で値が上昇する分布も既往実験と同じ傾向となっており、対流境界層の特性を良く再現している。図 3.8 の鉛直熱フラックスも下面近傍で最大値を取り、上空に行くにしたがって減少し、逆転層近傍で負の値を取る傾向も再現されている。また、温度変動や鉛直速度変動の鉛直分布を見ると、温度変動は下面近傍と逆転層近傍で極大値となる様子が見られ、鉛直速度変動は逆転層上空では実験値より小さくなるものの、境界層内部では既往実験と同様に上下混合によって全体に速度変動が大きくなる傾向が再現されている。よって、region2 の case1 の計算によって対流境界層の基本的な特性をよく再現した流入変動風のデータを得られたと考えられる。以上より、市街地の不安定な温熱場予測のための気象擾乱および大気安定度を考慮した流入変動風時系列データの作成手法を提示した。

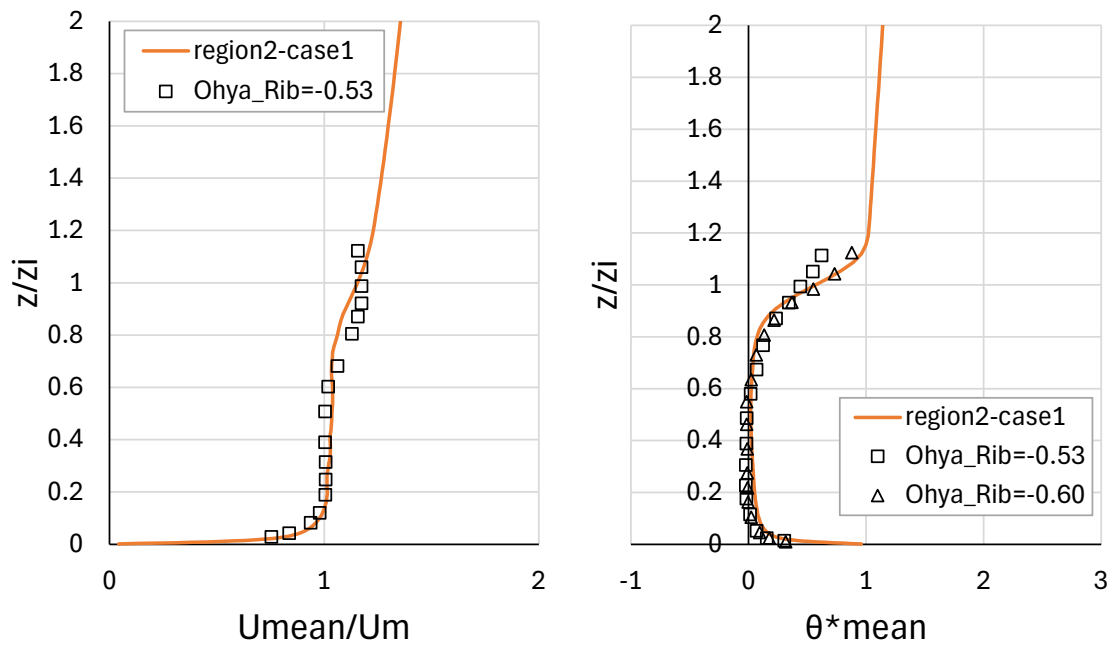


図 3.7 Region2 case1 と既往の実験値<sup>5)</sup>との比較  
(平均風速, 平均温度)

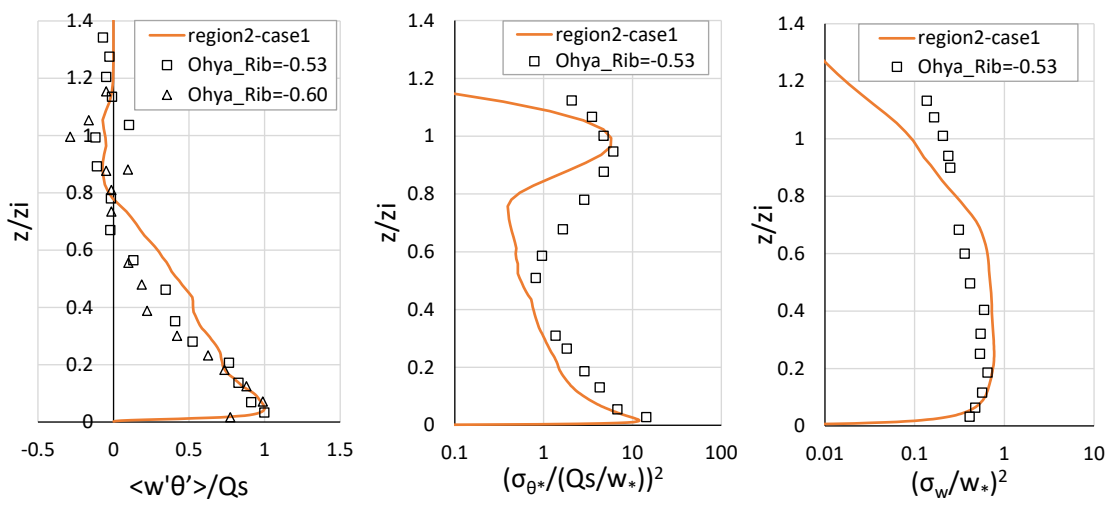


図 3.8 Region2 case1 と既往の実験値<sup>5)</sup>との比較  
(鉛直熱フラックス,  $\sigma_{\theta^*}$ ,  $\sigma_w$ )

### 3.4 まとめ

本章では、不安定な温熱場における実市街地内の乱流場・温度場予測への適用を目的として、気象擾乱および大気安定度を考慮した流入変動風の作成方法を提案し、以下のような結果が得られた。

- ・ メソ気象モデル WRF-LES の解に基づき、ドライバ領域 region1 において空間フィルタリング・リスケーリング手法<sup>1)</sup>によって高周波変動成分を付加し、さらにドライバ領域 region2 で大気安定度や地表面からの加熱の影響を考慮した流入変動風を作成した。Region2 の鉛直方向風速場や温度場から、主流方向に伸びるロール構造が再現されていることを確認した。
- ・ Region2 の温度条件の影響を確認するため、逆転層を設けて境界層上空を弱安定条件とした case1 と、逆転層を持たない WRF-LES の結果を境界層上空まで適用した case2 の比較を行った。両ケースで境界層内部の風速、温度の平均値の差は小さい結果となったが、case1 の方が風速・温度の物理量の時間変化が抑制された結果が得られ、境界層上空の鉛直熱フラックスの分布等、対流境界層の特性に近い傾向が見られた。以上より、case1 は時間方向に安定した変動風データが生成されていると判断し、作成した流入変動風の普遍的な特性を確認する上で case1 を対象とした。
- ・ 作成した気象擾乱及び大気安定度を考慮した流入変動風 (region2 の case1) の基礎的な物理特性を吟味するため、例として、対流境界層を対象とした既往実験<sup>5)</sup>と比較し、その特性の再現性を確認した。鉛直速度変動は逆転層付近で実験値より小さくなるものの、逆転層で鉛直熱フラックスが負の値を取り、温度変動が逆転層と地表面近傍で極大となるような対流境界層の基本的な特性がよく再現されていた。

以上の結果より、夏季における市街地の不安定な温熱場の解析において、都市気象擾乱の影響を考慮した乱流場・温度場の特性を有する流入変動風が作成され、それを時系列的に用いることで都市表面近傍での乱流及び温熱の非定常構造が検証されるものと判断される。

## 注釈

- 注1) 本手法を適用する際、気象モデルから得られたデータについて、吹走距離の数倍程度の区間において大気境界層の近似が成立する範囲で吹走距離を設定することが望ましい。
- 注2) Region2 の解析領域の広さについて、図 3.9 より case1 の境界層内部における無次元化した主流方向風速や温度の時間平均分布の変化の割合が小さくなり、安定した境界層が生成されていると判断した場所に基つき、主流方向の解析領域を $x/\delta = 8$ 、流入変動風データ出力位置を $x/\delta = 7.5$ と設定した。参考として、図 3.9 には $x/\delta = 10$  (点線) まで解いた結果も載せている。

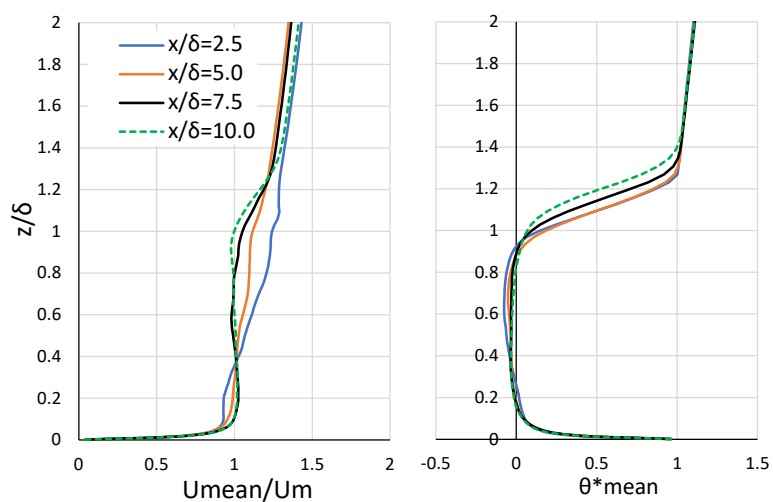


図 3.9 Region2 case1 の統計量の空間変化 (平均風速, 平均温度)

## 参考文献

- 1) 河合英徳, 田村哲郎: メソ気象モデルにより再現された風速場への高周波変動成分付加方法の提案 空間フィルタリング・リスケーリング手法の適用, 日本建築学会構造計論文集, 85, 767, pp.19-27, 2020
- 2) 服部康男, 他 5 名: 対流境界層の乱流熱輸送機構における都市キャノピの影響, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.76, No.2, I\_481-I\_488, 2020
- 3) 安部諭, 田村哲郎, 中山浩成: 逆転層を有する対流境界層中の乱流構造と拡散挙動に関する LES 解析, 日本風工学会論文集, 第 33 巻, 第 4 号, pp131-148, 2008
- 4) 高谷美正: 大自然の作る熱気球のお話: 対流混合層についての分かり易い説明, 天気, 日本気象学会, 42 巻, 7 号, pp.445-450, 1995
- 5) 大屋祐二, 林賢一, 三枝卓, 馬奈木謙次: 上空に強い逆転層を伴う対流境界層の風洞実験, 日本風工学会論文集, vol.26, No.75, pp.25-30, 1998
- 6) Lund, T.S., Wu, X., and Squires, K.D.: Generation of Turbulent Inflow data for Spatially-developing Boundary Layer Simulations, J. Comput. Phys., Vol.140, pp.233-258, 1998
- 7) 野澤剛二郎, 田村哲郎: 空間発達型境界層 LES の都市域強風への適用性 - 乱れ特性の対応に関する検討 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 554 号, pp.37-44, 2002
- 8) Goldstein, D., Handler, R., and Sirovich, L.: Modeling a no-slip flow boundary with an external force field, J. Comput. Phys., 105, 354-366, 1993
- 9) 笠木伸英: 乱流工学ハンドブック, p.353, 2009
- 10) 日本建築学会: 都市の風環境予測のための CFD ガイドブック, p49, 2020



## 4章 猛暑日の気象擾乱を考慮した都市域の乱流場・ 温熱場の推定と暑熱環境評価への展開

### 4.1 はじめに

2章では、猛暑のような極端事象ではない一般的な夏季を対象として提案した解析手法の基礎的な検証を行ったが、本章では、提案手法の猛暑日への適用例として、過去の記録的な猛暑日(2018年7月23日)における東京都都市域での高温発生に着目し、その高温発生状況や乱流場・温度場の再現を目的として、北の丸地区・神田地区周辺市街地の乱流場・放射場の連成解析を実施する。さらに市街地内の乱流場における暑熱環境評価を試み、市街地内の暑熱環境の実態把握とともに今後の熱中症危険性予測・対策に寄与することを目指す。

4.2節では、まずメソ気象スケールの影響を考慮した流入境界条件作成のため、メソ気象モデルWRFおよびWRF-LESにより、2018年7月23日の猛暑日における東京、青梅、熊谷の気象場を再現する。市街地スケールの解析の流入境界条件として、第3章の手法によってWRF-LESの解に基づく気象擾乱を考慮した流入変動風を作成する。4.3節では、4.2節で作成した流入境界条件を用いて、猛暑日の東京都北の丸地区の実市街地を対象とした乱流場・放射場の連成解析を実施し、東京管区気象台の観測データ(風速、気温)との比較を行い、解析手法の妥当性を検証する。さらに、解析結果より建物密集エリアの乱流場・温熱場の特性を把握し、平均放射温度(MRT)やWBGTを算出することで市街地において人体が暴露される暑熱リスクの評価を試みる。

なお、2章では連成解析手法の基礎的な検証として、猛暑のような極端事象ではない夏季を対象とし、流体力学的な乱流境界層プロファイルに基づく流入変動風を用いて、実測値との比較により解析手法の妥当性を検証した。一方で、4章でターゲットとした猛暑日のような極端な事象下では、気象擾乱を考慮する必要があるため3章で検証した気象擾乱を考慮した変動風作成手法を用いる。気象場を考慮した流入変動風を用いることで、流体力学的な境界層プロファイルよりもより実現象に近い状況を考慮できているものと考えて4章に適用している。

## 4.2 解析手法と猛暑日の気象擾乱を考慮した流入境界条件の作成

### 4.2.1 実市街地における乱流場・放射場の連成解析手法

本研究では、都市における乱流場・放射場の連成解析手法として、第2章にて提案した熱放射を考慮した LES 解析手法を使用した。非構造格子に基づく有限体積法 (FVM) のソルバーとして、FrontFlow/Red を使用した。熱放射解析において長波長放射は放射強度の輸送式を有限体積法に基づいて解くことで算出した。直達日射、天空日射、大気放射は図 4.1 に示す方法で算出した。地面・建物壁面については各面に対して断面を分割し 1 次元非定常熱伝導方程式を解いている。LES の速度場の輸送方程式の境界条件として Spalding 則を使用した。建物・地表面の対流熱伝達モデルについて、本章では第2章と比べて評価対象とする市街地再現範囲が広いと、格子解像度と計算負荷の観点から Jürges の式を用いた。LES の基礎方程式等は第2章を参照されたい。

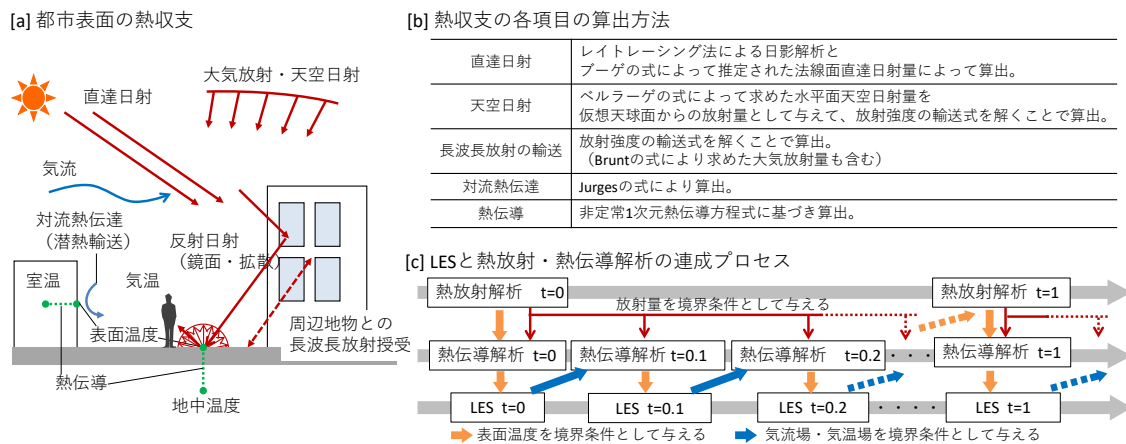


図 4.1 乱流場・放射場の連成解析手法

### 4.2.2 都市気象擾乱に基づく温度不安定性を考慮した流入変動風作成手法

本章で対象とした 2018 年 7 月 23 日の東京における猛暑はメソ気象スケールでの高温空気の移流の影響を受けている可能性があり、後述の 4.2.3 項でのメソ気象モデル WRF-LES の解析で気温分布の水平断面に網目状構造が見られた。このように特に熱的な影響が強く地表近傍の大気が局所的に不安定となっている場では、気象場由来の速度・温度変動の影響

も大きいと考えられるため、従来の流体力学的な境界層プロファイル（気象場由来の変動成分が含まれていない、乱流境界層を仮定して流体力学の基礎方程式のみによって作成された境界層プロファイル）を仮定するのではなく、メソ気象モデルの解に基づく気象擾乱を考慮した流入変動風を生成する必要がある。そこで本研究では、猛暑日のような不安定な温熱場予測のための都市気象擾乱を考慮した流入変動風を作成する手法（第3章）を適用した。生成手順は、(1)WRF-LESによる大気境界層の時空間データの生成、(2)空間フィルタリング・リスケーリング手法<sup>11)</sup>による高周波変動成分の付加(region1)、(3)WRF-LESから得られた対象時間帯の温度の鉛直分布を流入面に与えた非等温LES解析(region2)の3段階で構成される。ここでは、WRF-LESの温位分布が一定（中立条件）となる部分を境界層高さとして仮定して計算を行う。Region2での温度の流入条件は、境界層厚での温度（境界層内で一様になった温度） $\theta_m$ と下面の温度 $\theta_{bot}$ の温度差によって、式(4.1)のように無次元化して設定した。

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_m}{\theta_{bot} - \theta_m} \quad (4.1)$$

下面の温度境界条件は、夏季日中の日射により地面が暖められている不安定条件を想定し、 $\theta^* = 1$ としてディリクレ条件を課した。また、大気安定度の指標の一つであるリチャードソン数 $Ri$ （式(4.2)）を浮力項のパラメータとした。ここで、 $g$ は重力加速度、 $\beta (= 1/\theta_0)$ は体積膨張率、 $\theta_0$ は基準温度、 $\Delta\theta$ は代表温度差、 $\delta$ は境界層高さとし、ここでは代表風速 $U = u_\tau$ （摩擦速度）とした。

$$Ri = g\beta \frac{\Delta\theta\delta}{U^2} \quad (4.2)$$

流入変動風の作成手順を図4.2に示す。詳細は第3章を参照されたい。本手法により、メソ気象モデルの解に基づく温度条件を考慮した流入変動風の作成が可能となる。

市街地の温熱場・乱流場の解析において、乱流統計量等の普遍的な特性を確認する上で速度場・温度場の物理量の時間変化が小さい流入変動風データを得ることが望ましいと考えられる。そこで本研究では境界層内部、特に地表面近傍の乱流場・温度場予測のための流入変動風の作成を目的とし、境界層内部ではWRF-LESの温度分布を用いて、境界層高さ付近に逆転層を設けることで境界層内部について時間変化が抑制された流入変動風の作成を試みた。また、安部ら<sup>12)</sup>による対流境界層の計算を参考にして、境界層より上空では弱安定条件を与えた。速度場は一般的な対流境界層の特性を想定し、境界層より上空の速度変動が0になるように時間平均プロファイルを流入条件とした。

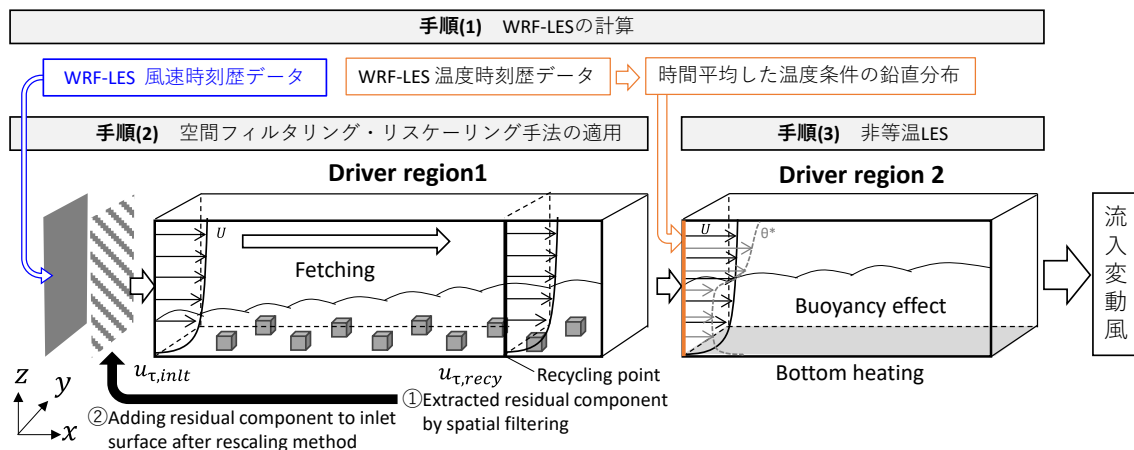


図 4.2 流入変動風の作成手法の概念図

#### 4.2.3 WRF,WRF-LES による 2018 年猛暑日の気象場の再現と気象観測値の比較

##### 4.2.3.1 解析手法

4.2.2 項の手法によって気象擾乱を考慮した流入変動風を作成するため、本項では WRF および WRF-LES (Version 3.7.13)を用いて気象モデルでの解析を実施した。解析対象は関東地方で高温が観測された 2018 年 7 月 23 日 13 時 (JST) 頃とした。解析期間は助走計算を考慮し、2018 年 7 月 22 日 21 時から 24 日 0 時までの 27 時間とした。解析領域は図 4.3 のように Domain1~4 とし、Domain1~2 では WRF, Domain3~4 では WRF-LES を用いた。Domain1~4 の解析領域の大きさはそれぞれ、900km×900km, 500km×500km, 81.3km×111.3km, 18km×18km とし、最小の Domain4 では東京を中心とした範囲を設定した。水平方向の格子解像度は 4.5km, 1.5km, 0.3km, 0.06km とし、WRF と WRF-LES の接続は 1-way ネスティングとした。その他の解析条件は表 4.1, 表 4.2 に示す。

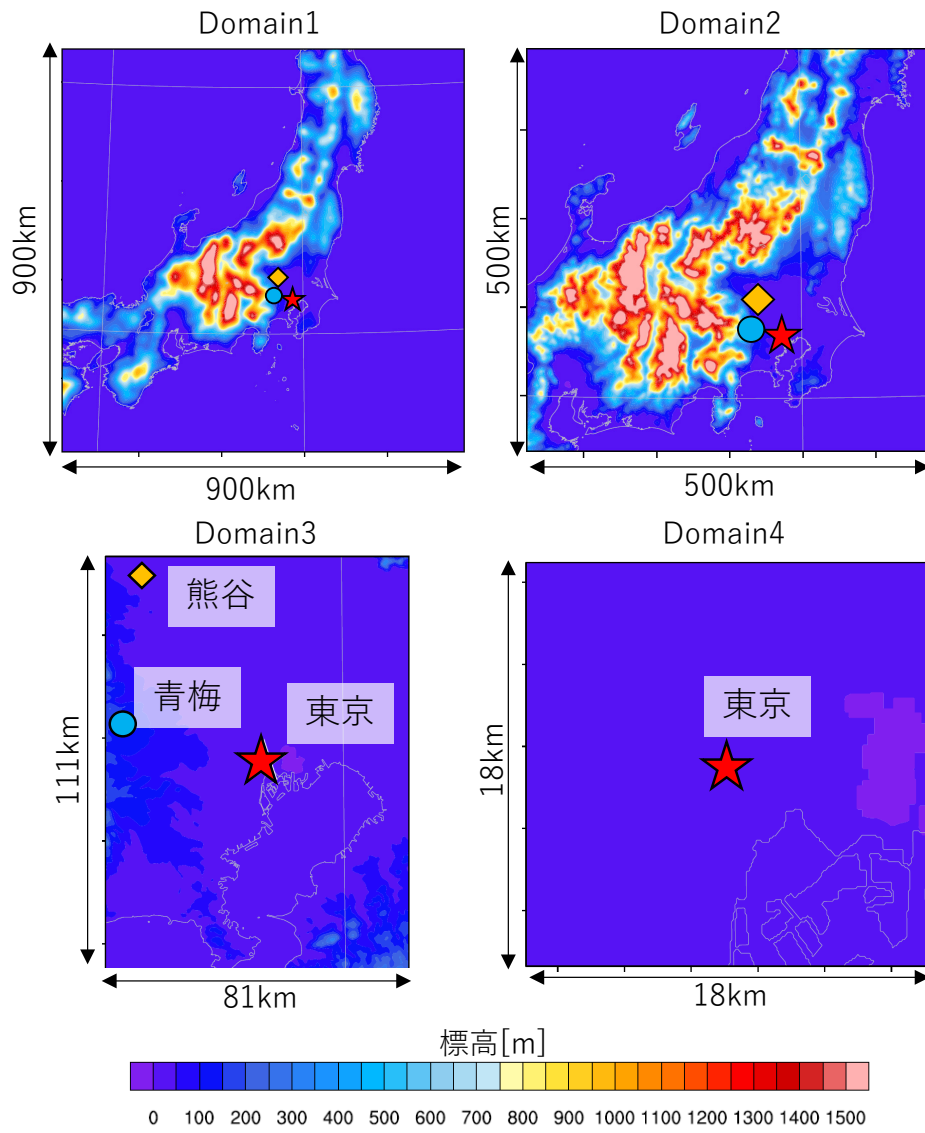


図 4.3 解析領域

表 4.1 Domain1~4 の解析条件

Domain	WRF モデル	解析領域 [km]	水平 格子数	水平格子 解像度[km]	時間刻み[秒]
1	WRF	900×900	201×201	4.5	4
2	WRF	500×500	334×334	1.5	0.8
3	WRF-LES	81×111	271×371	0.3	0.4
4	WRF-LES	18×18	301×301	0.06	0.13

表 4.2 解析条件

初期値・ 境界値	気象データ：気象庁 GPV データ 海水面・地表面温度，土地水分量等： 米国国立環境予測センター(NCEP) FNL 地形データ：国土数値情報
解析期間	2018/7/22 21:00~7/24 0:00 JST (Domain1-2) 2018/7/23 09:00~7/24 0:00 JST (Domain 3) 2018/7/23 11:00~7/24 0:00 JST (Domain4)
鉛直格子数	62 (Domain1-3), 81 (Domain4)
雲物理	Morrison 2-moment scheme
長波長	RRTM scheme
短波長	RRTMG scheme
接地層	Monin-Obukhov (Janjic) scheme
地表面	Unified Noah land-surface model
大気境界層	MYJ TKE (Domain1-2), None (Domain 3-4)

#### 4.2.3.2 気象台観測データとの比較

東京都心部に位置する「東京」と、参考として関東地方で観測史上最高気温を更新した「熊谷」, 「青梅」の観測データ（10分値）と、WRF（Domain1）の気温、風速、風向を比較した（図4.4）。WRFの結果は全て10分間の移動平均値とした。

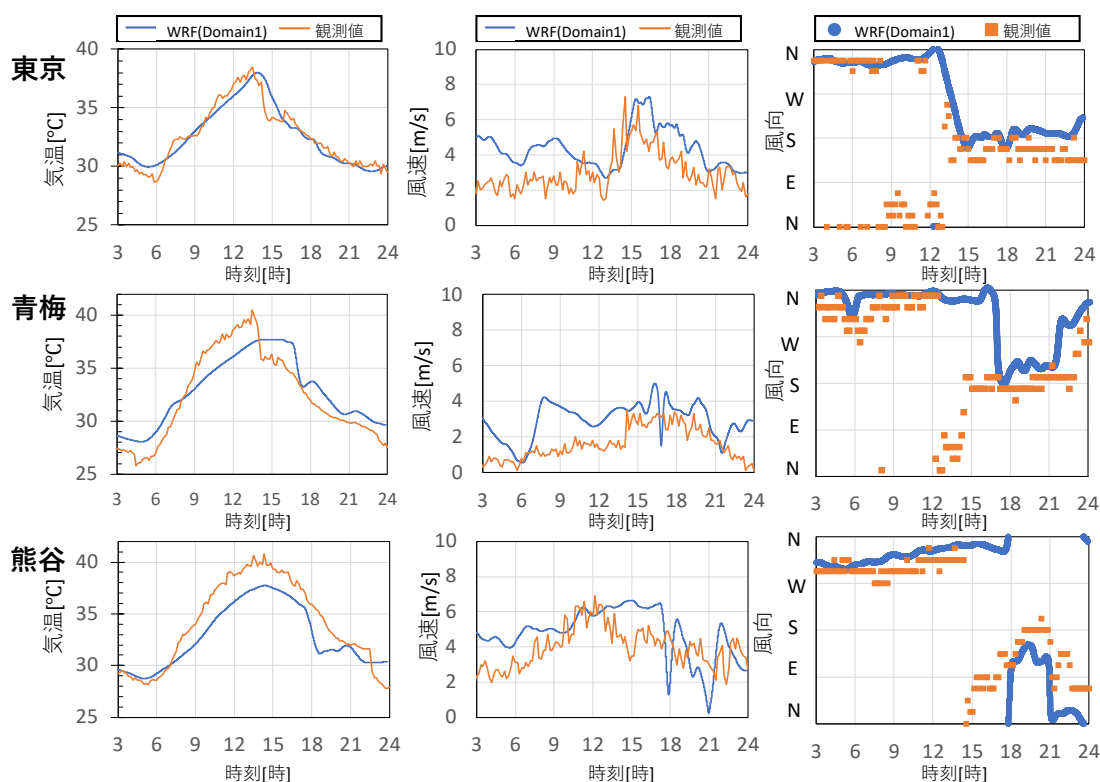


図4.4 東京, 青梅, 熊谷における観測データとWRF結果(Domain1)の気温, 風向風速の比較 (2018/7/23)

まず、東京の結果を見ると、気温の日変化については概ね観測と同じ傾向を示している。最高気温やその発生時刻は、観測では13時30分に38.5°C, WRFでは13時57分に38.0°Cとなっており、最高温度に到達した時刻はWRFの方が約27分遅い結果となったが、最高気温は観測と非常に近い値が得られた。風速は全体的にWRFの結果の方が過大となった。これは、WRFでは地表面近傍の粗度の影響が過小評価されているためだと考えられる。風向を確認すると、観測では3時~8時頃まで北~北北西寄りの風を、9時~13時頃までは北西~北東寄りの風を示しているが、WRFでは3時~13時頃までほぼ一定で北西~北北西の風となっている。その後、観測では13時過ぎから徐々に南風に切り替わる。これは13時過ぎから海風が進入しているためだと考えられる。同じ時間帯の気温や風速も合わせて確認すると、13時ごろから気温の低下、風速の上昇がみられる。WRFでもこの北風から南風への移り変わりが再現されている。

次に、青梅、熊谷の結果を観測と比較すると、両者ともに最高気温の値は観測よりも WRFの方が過小評価されている。最高気温の発生時間帯は観測では 13 時 30 分頃であるのに対して、WRFの方が約 1 時間遅い時間となっている。また、風向変化をみると、青梅では、観測では午前中が北西～西風となっており、14 時 30 分頃から東風を経由して南風に変化している。一方で、WRFの結果では観測よりも約 2 時間遅れて 16 時過ぎから西風を経由して南風に変化している結果となった。熊谷では、観測結果は 3 時～15 時頃にかけて北西～西風となっており、15 時頃から徐々に南風に移り変わる様子が見られる。一方、WRFの結果では 3 時～18 時頃まで北寄りの風が吹いており、南風に切り替わる時間帯は観測よりも約 3 時間遅い 18 時頃となっている。これは初期値の海面温度や地形データの解像度によって、海風の侵入時間帯や経路に差異が生じ、WRFでは観測よりも海風の侵入が遅れたためだと考えられる。以上より、東京だけでなく青梅や熊谷を含めた広域では午前中は北寄りの風の時間帯に気温が上昇し、13 時頃から徐々に風向が南寄りの風に移行している中、各気象台の場所では、午後に風向が南風に変化する過程で、湾岸に近い東京、続いて青梅や熊谷で気温が低下していく関係性が再現された。

#### 4.2.3.3 東京周辺を対象とした WRF-LES の結果(Domain4)との比較

図 4.5 にて東京に着目して、WRF-LES の Domain4 の結果と観測データ (10 分値) の風向風速、気温の時系列変化を比較した。WRF-LES の結果は 10 分間の移動平均値とした。

気温を比較すると、WRF-LES の結果は 11 時から 13 時 20 分頃まで観測値と同様の傾向を示した。観測では 13 時 30 分に最高気温 38.5°C となっており、そこから緩やかに気温が低下している。気温と風向の変化を合わせて見ると、観測では 13 時過ぎから南風に切り替わり、冷涼な海風の侵入により気温が低下したと考えられる。WRF-LES では 11 時～13 時 20 分頃まで北西～北北西の風向きとなっており、その後 13 時 30 分～14 時にかけて、北～東側に風向が振れながらも 14 時過ぎには南～南東風に落ち着いている。気温についても、南風 (海風) に切り替わる直前に観測の最高気温と同程度である 38.4°C に到達した。4.2.3.2 の Domain1 の結果と同様に、東京での海風の到達が WRF-LES の方が観測よりも約 30 分遅れているが、北側の風が吹いている時間帯での気温上昇や南～南東風 (海風) の侵入による気温低下の過程は同様の傾向を示した。

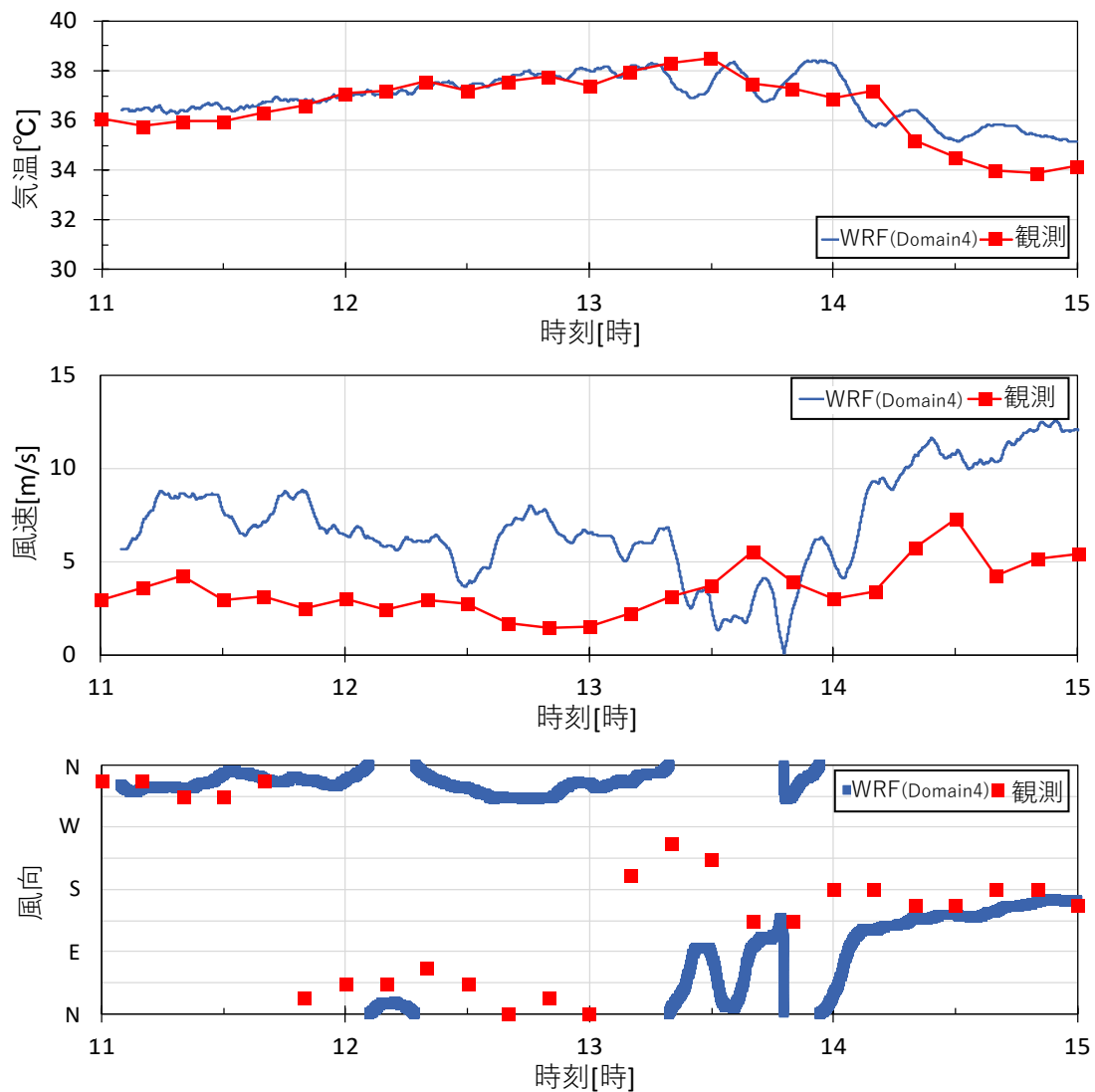


図 4.5 東京における観測値と WRF-LES 結果(Domain4)の  
気温、風向風速の比較 (2018/7/23)

鉛直方向の風向の差異を確認するため、東京における鉛直方向の風向と時間変化を図 4.7 に示す。11 時、12 時の結果では地上から上空 2000m まで北北西風となっている。13 時の結果を見ると、高さ 100~800m において北北西~北西の範囲で高さごとに風向変化がみられる。14 時の結果では地上から高さ約 400m までが北北東風を、それより上空では北北西~北を示している。15 時には地上から高さ 1200m 付近まで南寄りの風 (南東~南風) となっている。このことから、14 時から 15 時の間に低い位置から海風の侵入が始まり、15 時頃には海風が東京に到達して南寄りの風となっていることがわかる。

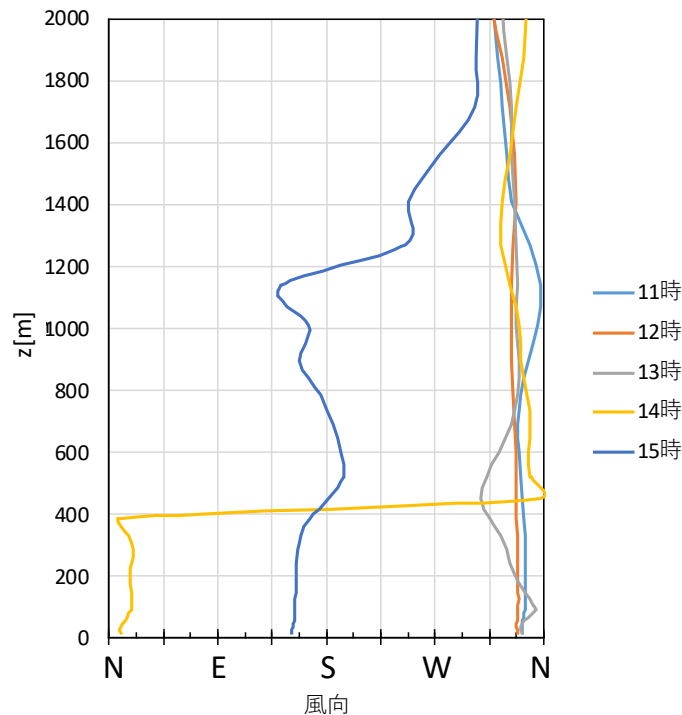


図 4.7 東京における WRF-LES(Domain4)の風向の時間変化

図 4.8 に WRF-LES (Domain4) の高さ 100m 地点での風速，温位分布を示す。東京は各図の中央の赤点に位置する。左図のコンターは南北方向の風速値（北風をマイナス）とした。海風の侵入の様子を図 4.8 の風速分布と温位分布の水平断面で確認すると，温度が低い部分では南寄りの風となっており，冷涼な海風が到達していると考えられる。また，12 時，13 時，15 時の結果を比較すると，12 時は南東から冷たい海風が徐々に侵入してきているがまだ東京には到達していないため，東京での風向は北北西となっている。13 時は東京付近まで海風が到達しており，15 時には東京よりもさらに北側まで海風が到達していると考えられる。以上，東京地区での北西側からの風と南東側からの海風の変化の様子が再現されたことが確認できた。

以上より，関東地方や東京都心で記録的な高温を観測した 2018 年 7 月 23 日における東京都都市域での高温発生状況の再現を目的として，関東近郊から東京都内を対象とした WRF および WRF-LES を用いた解析を実施した。最高気温到達時刻や海風侵入による風向変化に関して，全体的に WRF および WRF-LES の方が観測よりも遅れている傾向はあるものの，特に東京での高温の陸風による気温上昇から，冷涼な海風による気温低下に変化する際の気温変化の傾向を再現することができた。

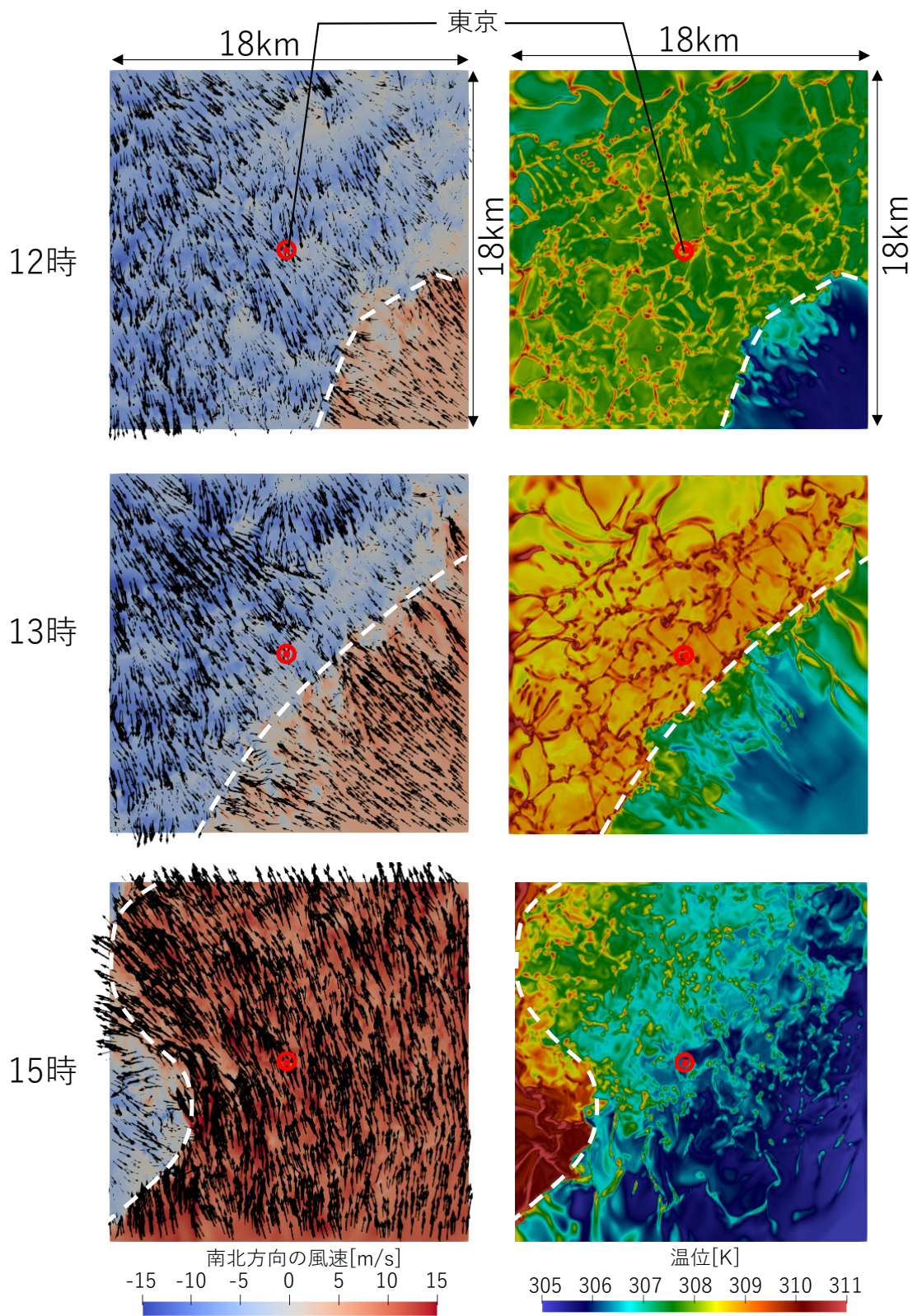


図 4.8 WRF-LES(Domain4)の南北方向の風速・温位分布  
(水平断面  $z=100\text{m}$ )

#### 4.2.4 猛暑日の気象擾乱を考慮した流入変動風の作成

##### 4.2.4.1 解析概要・解析条件

4.2.3 項の WRF-LES の結果をもとに、4.2.2 項の手法により気象擾乱と大気安定度を考慮した流入変動風を作成した。

解析対象は後述（4.3 節参照）の東京管区気象台観測場所を含む北の丸・神田地区を解析対象とした。まず WRF 及び WRF-LES によって、大気境界層の時空間データを生成した。また、無次元化時間  $t^* (=tu_\tau/\delta)$ 、7 月 23 日 11 時を  $t^*=0$  として結果を整理した。統計処理期間は WRF-LES の結果より最高気温に到達するまでの温度上昇過程だと考えられる  $t^* = 0.28 \sim 0.56$ （7 月 23 日 11 時 30 分～12 時）とした。WRF-LES から得られた風速、温位分布は高さ 1700m 付近まで温位がほぼ一定であった<sup>注1)</sup>。

次に region1 にて、WRF-LES の結果に空間フィルタリング・リスケーリング手法を適用した。解析条件を表 4.3 に示す。region1 の流入境界に接続する際の境界層厚は  $\delta=1700[\text{m}]$  と仮定し、摩擦速度はレイノルズ応力  $\langle u'w' \rangle$  より  $u_\tau=0.266[\text{m/s}]$  とし、無次元化した上で流入境界に接続した。ここで、物理量の瞬時値  $A$  に対する時間平均成分を  $\langle A \rangle$ 、時間平均からの差（変動成分）を  $A' = A - \langle A \rangle$  とする。

最後に、WRF-LES の  $t^*=0.28 \sim 0.56$  の平均温度の鉛直分布を region2 の流入面に与え、非等温 LES 解析に基づき、流速・温度の流入変動風を生成した。Region2 の解析条件を表 4.4 に示す。温度の流入境界条件は、 $\theta_m$  と  $\theta_{bot}$  の温度差によって、式(4.1)のように無次元化した温度  $\theta^*$  として設定した。流入条件は、境界層内部では温度条件は下面近傍が不安定条件でそれ以外の範囲は中立条件、速度データは region1 の時系列データを流入条件とした。また、境界層高さ ( $z = \delta$ ) 付近に逆転層を設けて、境界層上空では 4.2.2 項に記載したように、弱安定条件で速度変動が 0 となるように region1 の時間平均プロファイルを設定した。下面の温度境界条件は  $\theta^* = 1$  としてディリクレ条件を課した。図 4.9 に region2 の風速と温度場の yz 断面を示す。region1 で生成した乱れと下面からの加熱の影響を受けて、温度の変動を含む流入変動風が作成されたことが確認できた。

表 4.3 region1 の解析条件

Turbulence model	Smagorinsky model ( $C_s=0.1$ ) (Damping function : Van Driest type)
Spatial discretization	4 <sup>th</sup> order central difference
Time marching	2 <sup>nd</sup> order Adams-Bashforth
Pressure solver	SOR
Domain size	$(X, Y, Z) = (4.0\delta, 2.0\delta, 2.0\delta)$
Grid number	$(N_x, N_y, N_z) = (200, 150, 150)$
Spatial resolution	$(dx^+, dy^+, dz^+) = (16, 10.7, 0.7-24)$
Time resolution	$\Delta tu_\tau/\delta=0.00002$
Reynolds number	$U\tau \cdot \delta/\nu=800$

表 4.4 region2 の解析条件

Turbulence model	Smagorinsky model ( $C_s=0.1$ ) (Damping function : Van Driest type)
Spatial discretization	4 <sup>th</sup> order central difference
Time marching	2 <sup>nd</sup> order Adams-Bashforth
Pressure solver	SOR
Domain size	$(X, Y, Z) = (8.0\delta, 2.0\delta, 2.0\delta)$
Grid number	$(N_x, N_y, N_z) = (400, 150, 150)$
Spatial resolution	$(dx^+, dy^+, dz^+) = (16, 10.7, 0.7-24)$
Time resolution	$\Delta t u_\tau / \delta = 0.00002$
Reynolds number	$U_\tau \cdot \delta / \nu = 800$
Ri	-1595.67
Pr, Pr <sub>SGS</sub>	0.71, 0.5
Inlet	Velocity: region1 の結果を接続 Temperature: WRF-LES の時間平均値の鉛直分布を設定

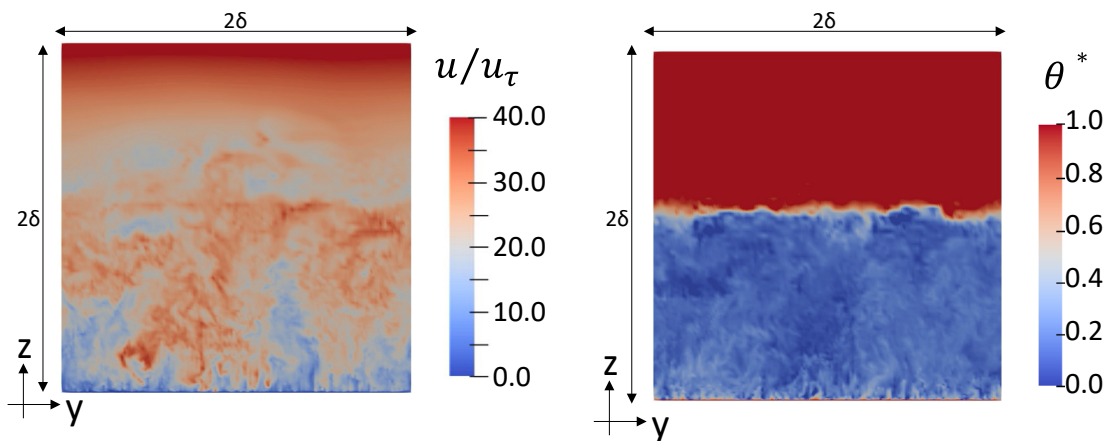


図 4.9 region2 での風速, 温度の瞬間場 ( $x/\delta = 7, t^*=0.42$ )

#### 4.2.4.2 気象擾乱を考慮した流入変動風の乱流統計量の確認

図 4.10 に WRF-LES, region1, region2 の平均風速, 乱れの強さ, 平均温度の鉛直分布を示す。平均風速  $U_{mean}$  は境界層内でほぼ一様となる流速  $U_m$  で無次元化して比較した。平均風速は WRF-LES, region1, 2 で境界層高さ付近までほぼ一様となるような分布の傾向が示されている。平均温度分布についても境界層下部で温度が微増しているものの境界層高さ ( $z/\delta = 1$ ) まで中立条件, 地表面近傍でお不安定条件となり, WRF-LES と同じ傾向となっている。乱れの強さを見ると,  $z/\delta \leq 0.01$  において WRF-LES, region1, region2 の順で増加している。これは region1, 1 において風速の高周波変動成分と温度条件を考慮したことにより, 地表近傍での変動が増加したと考えられる。

以上より, 本研究では 2018 年猛暑日を対象として, メソ気象モデルの解に基づく空間フ

フィルタリング・リスケーリング手法と WRF-LES の温度条件を考慮した流入変動風を生成した。

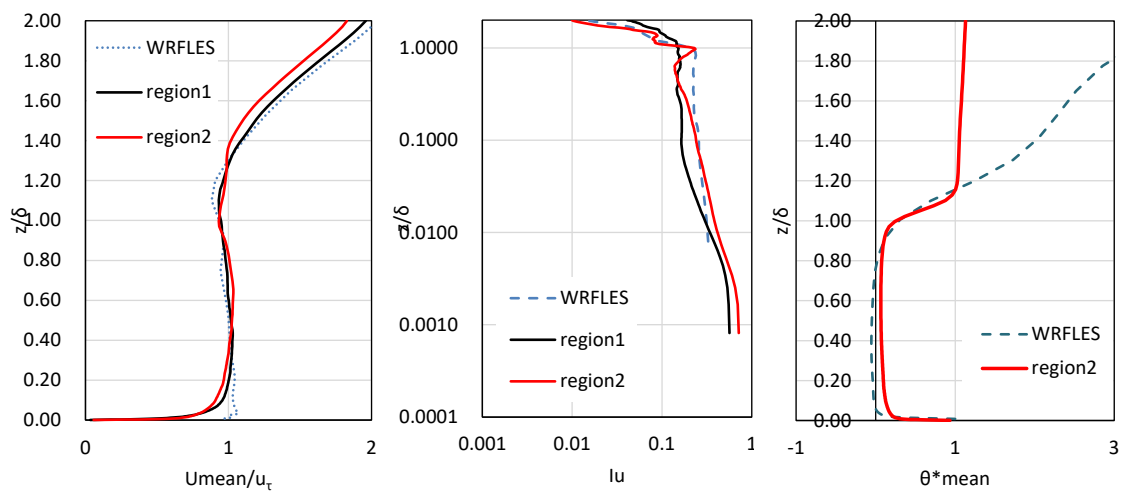


図 4.10 平均風速, 乱れの強さ, 平均温度の鉛直分布

## 4.3 猛暑時の都市域における暑熱環境の評価

### 4.3.1 解析概要と気象擾乱を考慮した猛暑時の乱流場・温熱場の確認

本章では関東地方で記録的猛暑日となった2018年7月23日の11時32分～12時頃を対象に、市街地の乱流場・放射場の連成解析を実施した。対象時刻の主風向は北北西であった。解析と比較する観測データは東京管区気象台(北の丸)の風速(科学技術館屋上, 地上35.3mにて測定)と気温(北の丸公園露場, 地上1.5mにて測定)とし, ここでは10分値と10秒値<sup>注2)</sup>を用いた。解析領域は観測データがある東京管区気象台と, 猛暑時の市街地内の暑熱環境を確認するため神田地区の市街地を含む領域とした。解析領域を図4.11に示す。建物形状はAW3Dを元に作成し, 地形は国土地理院のデータに基づき作成した。建物・地表面の境界条件は建物および道路・芝面・コンクリート面等に分類し, それぞれ熱物性値を与えた。その他の解析条件, 境界条件を表4.5, 表4.6に示す<sup>注3)</sup>。また, 流入境界条件は4.2.2項の手法によって作成した4.2.4項の流入変動風を市街地解析領域に接続した。流入条件の平均風速と平均温度の分布は前章の図4.10のregion2の結果を参照されたい。

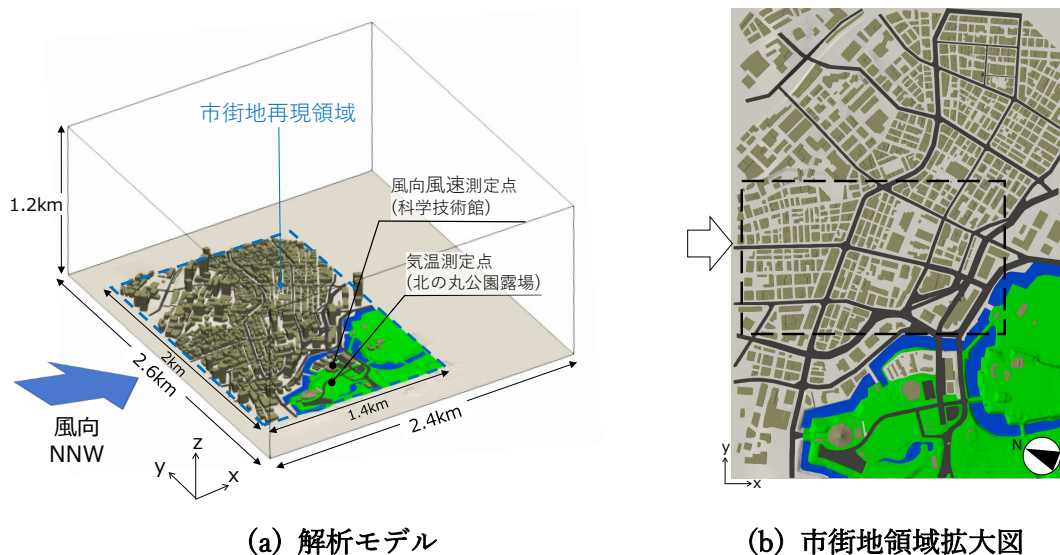


図 4.11 解析領域, 解析モデル

表 4.5 解析条件

解析対象時刻	約 28 分間 (2018/7/23 11:32~12:00) ※助走計算(熱放射・熱伝導解析)： 2018/7/22 11:00~7/23 11:32 (約 24.5 時間)
天候・流入風向	晴天日・NNW
時間刻み	LES・熱伝導：0.1 秒，放射・日射 (太陽位置の移動)：5 分
計算格子	総格子数：約 6 千万，テトラメッシュ(節点中心) 最小格子サイズ：表面 1m，境界層 0.2m×3 層
解析領域	2.4km(主流)×2.6km(直交)×1.2km(鉛直) (市街地再現範囲：1.4km(主流)×2km(直交))
計算方法	SMAC 法
時間積分	Euler 陰解法
空間離散化	2 次精度中心差分 + 1 次精度風上差分(5%)
乱流モデル	標準 Smagorinsky Model (Cs=0.1)

表 4.6 境界条件

	速度	温度
流入面	WRF-LES の結果から空間フィルタリング・リスキューリング手法によって作成した流入変動風 (4.2.4 項参照)	
流出面	自由流出	
上部，側面	Free-slip	Dirichlet 条件
建物，地面	Spalding 則	Jurges の式

図 4.12 に 12 時頃の表面温度分布を示す。観測地点が含まれる北の丸公園は芝面を想定しているため、周辺の地面よりも表面温度が低くなっている様子が解析でも再現されている。また、市街地内の日向の主要道路で表面温度が約 60~65℃、建物の日陰に位置する部分は周囲よりも低い温度となった。図 4.13 に z=22m (露場の地面+1.5m) における気温と風速の水平断面図を示す。市街地再現領域に入ると主流方向に沿ってある主要道路沿いは風速が 5m/s 以上あるが、建物密集域では全体的に風速が弱まり複雑な乱流場を形成している。市街地内部の建物後流で弱風となるエリアでは気温が高い傾向が見られる。これは地表面近傍で加熱された暖かい空気が浮力効果で上昇し移流していく様子が再現されていると考えられる。

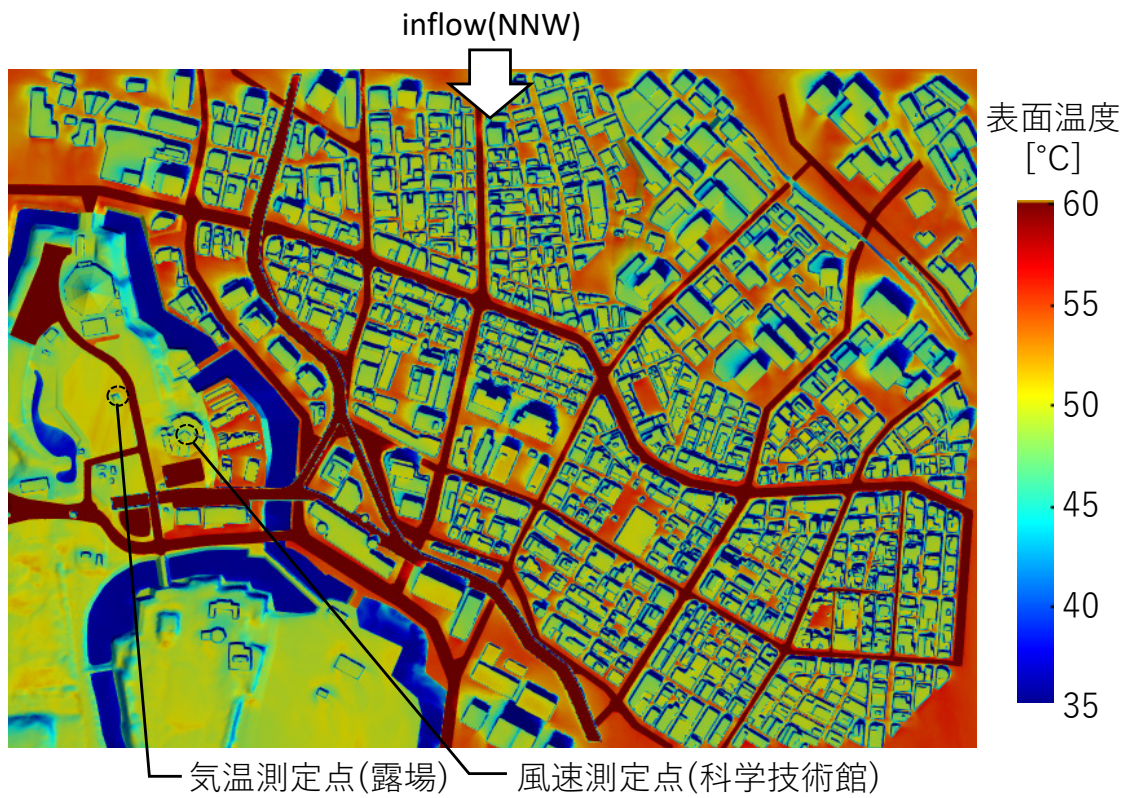


図 4.12 表面温度分布 (12:00 頃)

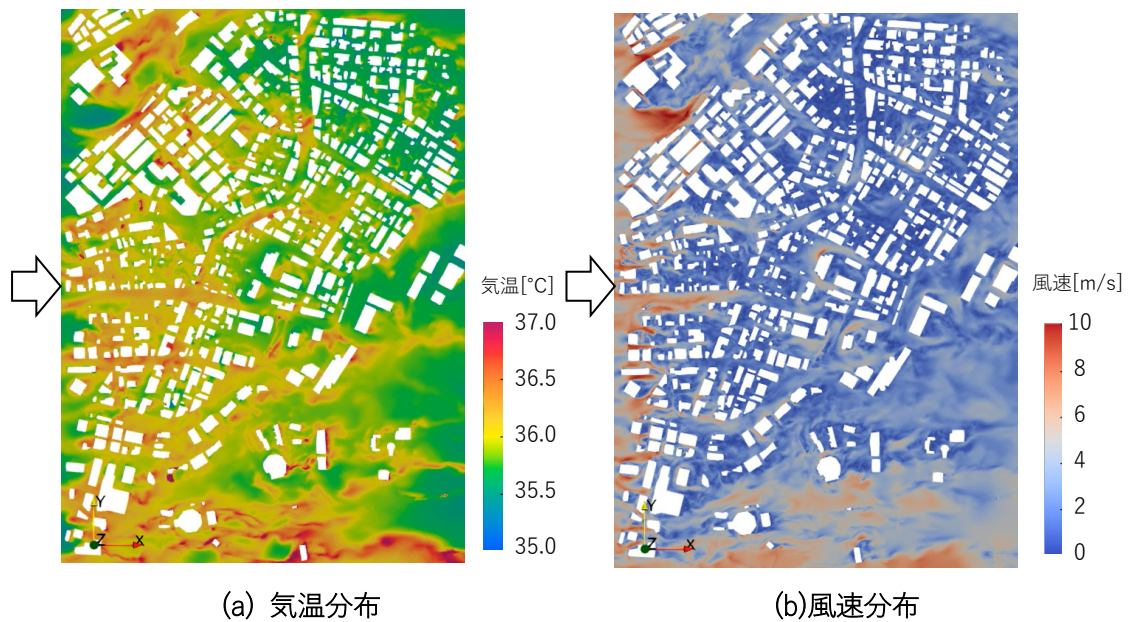


図 4.13 気温と風速の瞬間場, 水平断面 ( $z=22\text{m}$ , 11:47 頃)

第2章, 第3章で提案手法の妥当性を確認しているが, ここで改めて猛暑日の東京管区気象台の観測データ(科学技術館屋上の風速, 北の丸公園露場の気温)との比較を行った。ここでは11時35分~12時の結果を評価対象とした。図4.14に観測値(10分値, 10秒値)と解析値の比較を示す。観測の10秒値と比較するため, 解析値は10秒ごとの平均値とした。気温を比較すると, 実測と解析の差が $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$ と小さく, 解析では実測よりも細かな変動が再現されている。また, 11時50分~12時のような気温が上昇・低下する傾向は解析でも再現されていた。参考として, 風速を比較すると実測よりも解析の方が過大評価している。これは本解析で北の丸公園の樹木を再現していない影響だと考えられる。以上より, 気象台観測データの時間変化を対象に解析手法の妥当性が検証された。

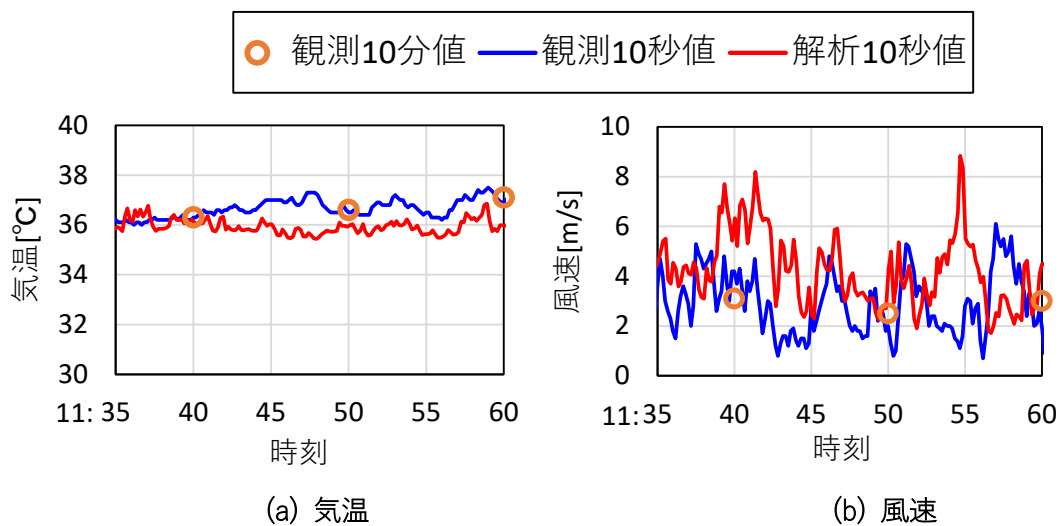


図 4.14 観測データとの比較 気温・風速の時系列データ

### 4.3.2 都市域の乱流場における暑熱環境評価

猛暑時の都市域における暑熱環境を確認するため、市街地内の高さ 1.5m における風速、気温、平均放射温度 (MRT) と、風速・気温・MRT の瞬間値から換算した WBGT (以降、非定常 WBGT) の瞬間場を確認した。

ここで、MRT は次式から求めた。

$$T_{MRT} = \sqrt[4]{(\alpha S_p + \varepsilon R_p) / \sigma \varepsilon} \quad (4.3)$$

$$\left( \begin{array}{ll} R_p, S_p & : \text{微小球の長波受熱量} [W/m^2], \text{短波受熱量} [W/m^2] \\ \varepsilon & : \text{放射率} (=0.95^{1)}) \text{ (グローブ球を想定)} \quad [-] \\ \alpha_g & : \text{短波吸収率} = 0.95 \text{ (グローブ球の黒色を想定)} \quad [-] \\ \sigma & : \text{ステファンボルツマン定数} (=5.67 \times 10^{-8}) [W/(m^2 K^4)] \end{array} \right)$$

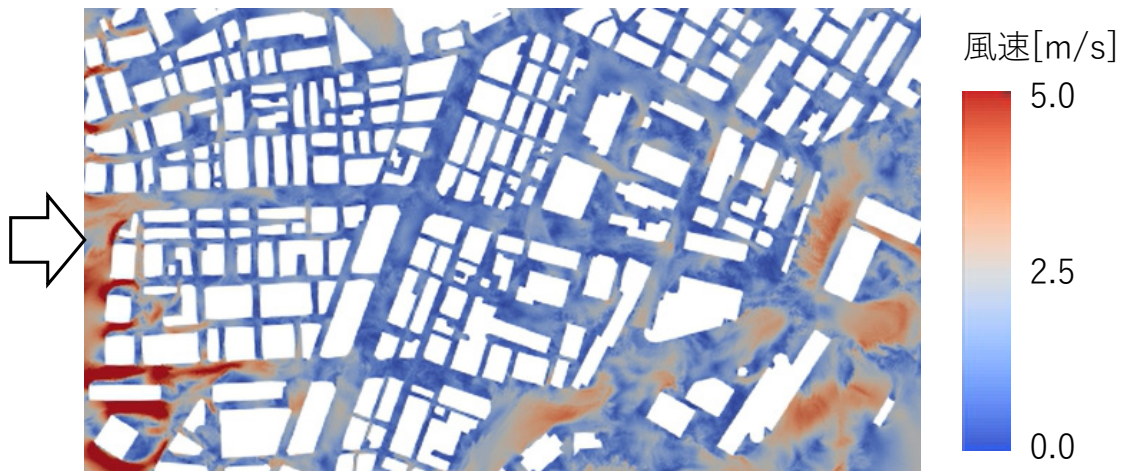
屋外の日射がある場合、WBGT は湿球温度  $T_w$  [°C]、黒球温度  $T_g$  [°C]、気温  $T_a$  [°C] の関数として、次式で示される<sup>2)</sup>。本研究では非定常 WBGT の算出にも下記の式を用いた。

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_a \quad (4.4)$$

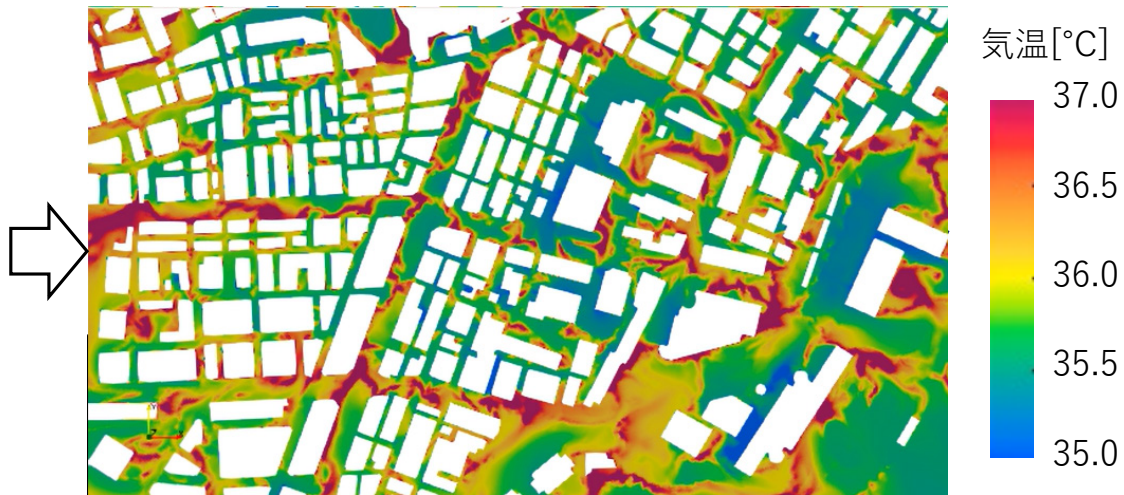
本章では数値解析結果から得られた気温  $T_a$ 、風速  $V$ 、MRT  $T_{MRT}$  と、気象観測値の相対湿度より、 $T_g$  と  $T_w$  を求めた。ここでは、解析領域内の湿度一定と仮定し、東京管区気象台の観測値 (10 分値) を参照し、解析対象時間帯の平均値として、相対湿度 39% と気温 36.5°C より絶対湿度を約 0.0150kg/kg(DA) とした。また、WBGT を求める際、空気の水蒸気圧や気温から求めた湿球温度  $T_w$ <sup>3)</sup>、MRT や風速、気温から求めた黒球温度  $T_g$ <sup>4)</sup> を用いた<sup>注4)</sup>。計算結果から求めた非定常 WBGT と各値との関係を図 4.16 に示す。なお、WBGT は本来気温や黒球温度等の実測値に基づく換算値であり、環境省の熱中症予防情報サイトによると、WBGT の換算式に用いる黒球温度、湿球温度、乾球温度はそれぞれ、直径 15cm のグローブ球に入れた温度計、水で湿らせたガーゼを温度計の球部に巻いて観測した湿球温度計、通常の温度計の値を参照することとなっている。測定器の応答速度を考えると、時空間的に定常状態で変化が少ない空間での測定を対象に考え、黒球温度、湿球温度および乾球温度の重み付け割合を算出したものと考えられる。しかしながら、現状は非定常場で暑熱リスクを評価する手法があまり確立されていないことと、式(4.4)の WBGT の式が国内で広く普及しており熱中症危険性を判断する際に用いられていること、本研究では、非定常場を評価する際にも既存の WBGT の算出式の重み付け割合を適用した。そのため、非定常 WBGT の瞬時値は解析より得られた瞬時の風速、気温等を用いて上記の式より換算した値であり、実測における黒球温

度や湿球温度の測定器の熱容量等を考慮した値ではないので、環境省の熱中症予防情報サイトで掲載される定常場での長時間暴露を想定した WBGT とは異なる点に注意されたい。また、本章で用いた非定常 WBGT は式(4.4)のように湿球温度の寄与率が高いが、本研究では樹木等による水蒸気発生の影響が少ない場所での暑熱環境の把握を目的としたため、空間中の湿度は一律と仮定している。ここで、湿球温度は気温、気温における空気の水蒸気圧、湿球温度における飽和水蒸気圧から求まるモデル式を用いているため、湿度を一定とした場合、湿球温度は主に気温の影響が反映された値となる。

$z=1.5\text{m}$  (解析領域中央の市街地内  $GL+1.5\text{m}$ ) における風速、気温、平均放射温度 MRT と非定常 WBGT の瞬間場の例を図 4.15(a)~(d) に示す。図示した範囲は図 4.11(b) の点線枠内とする。図 4.15(a) の風速分布より、市街地内は全体的に弱風域であることが分かる。中高層建物周辺や開けた場所では風速が高い場所も見られる。気温分布 (図 4.15(b)) を見ると、主要道路や高層建物後流域の低風速域で網目状に高温が分布している様子が見られる。これは弱風域において地面近傍で加熱された空気が浮力によって上昇していると考えられる。幅が広い南北道路と東西道路 (それぞれ図上左右方向, 上下方向の道路) について気温分布の傾向を比べると、東西道路は気温が高い場所は道路北側の建物群・道路境界面側に偏りが見られたが、南北道路では時間帯によって高温の位置が道路直交方向に対して左右に揺らいでいた。東西道路は低層建物群の後流域に位置しており全体的に低風速領域かつ北側の方が日向であることから高温域が北側寄りに発生したと考えられる。一方、南北道路は主流方向からの風が東西道路よりは流れやすく、建物群に挟まれた領域内で風の変動を受けて高温域も揺らぐ様子が見られたと推察される。MRT 分布 (図 4.15(d)) は直達日射の影響を強く受けており、主要道路や高層建物付近の開けた場所で日向の部分は  $60\sim 65^{\circ}\text{C}$ 、図中央部の高層建物の日陰部分や図左側~中央の低層市街地の建物の陰となる部分、図右側の高架道路下は低い値となっている。一方、WBGT (図 4.15(d)) は日本生気象学会が定める日常生活に関する指針 (表 4.7) の中で「嚴重警戒:  $28^{\circ}\text{C}$  以上  $31^{\circ}\text{C}$  未満」や「危険:  $31^{\circ}\text{C}$  以上」の領域が、主要道路沿いや高層建物後流域のような弱風域で気温が高く MRT が高い場所 (日向) に見られる。MRT の値が高いエリアの中でも非定常 WBGT の分布に差が見られ、非定常 WBGT は気温と同じような網目状の分布となっていることから、非定常 WBGT は MRT 分布よりも気温分布の影響を強く受けていることが分かる。これは非定常 WBGT の算出式で気温、黒球温度、湿球温度から重み付け平均して求める際に湿球温度の寄与率が高いこと、また、湿球温度は気温を関数としたモデル式を今回使用しているためと考えられる。また、風速が高い場所では非定常 WBGT は低くなり、弱風域では非定常 WBGT が高くなる傾向はみられるが、低層市街地や主要道路のように広範囲に弱風域である場合、非定常 WBGT が局所的に高い場所では気温の局所的なピーク位置の方が非定常 WBGT との相関がみられた。図 4.15(e), (f) に同時刻の黒球温度と湿球温度を示す。黒球温度および湿球温度がともに高い場所は気温および非定常 WBGT も高い傾向がみられた。



(a) 風速

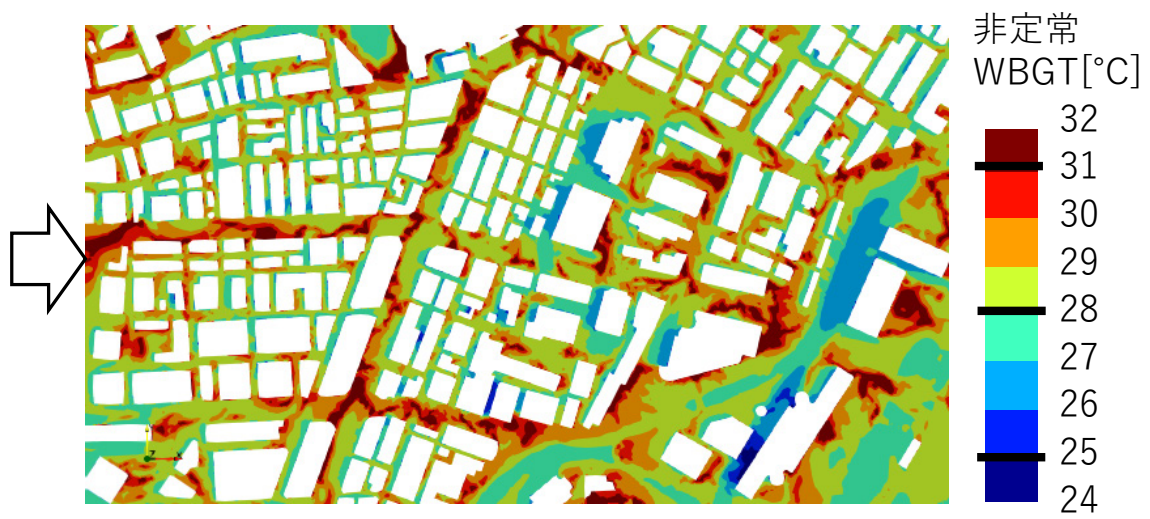


(b) 気温

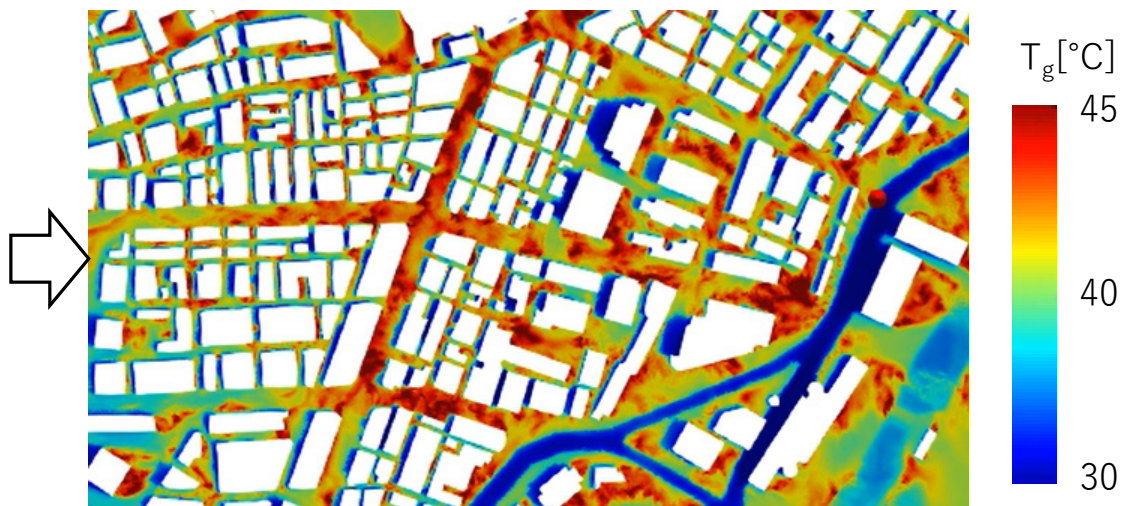


(c) MRT

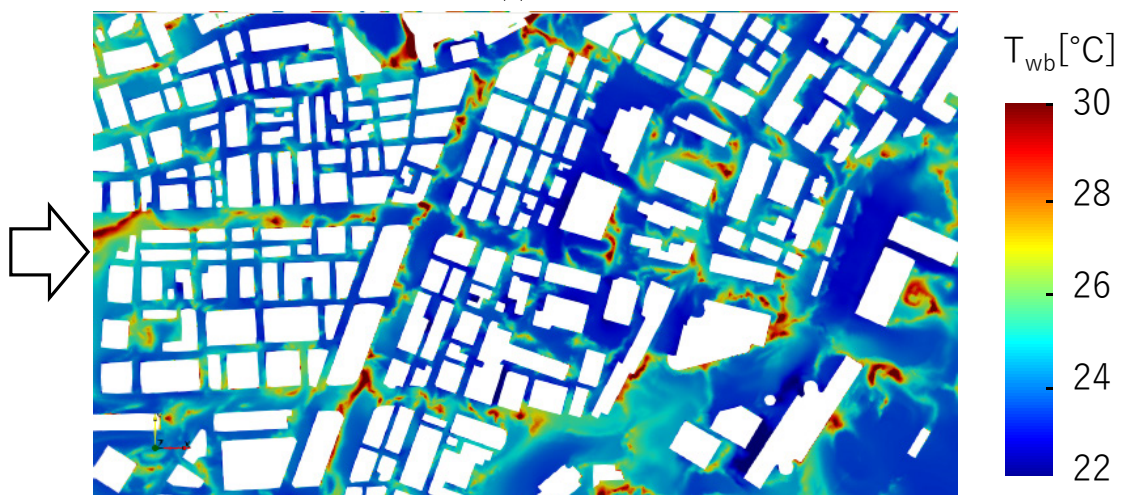
図 4.15(1) 市街地内の風速, 気温, MRT, 非常 WBGT, 黒球温度, 湿球温度の水平分布(z=1.5m, 11:47 頃の瞬間場)



(d) 非定常 WBGT



(e) 黒球温度



(f) 湿球温度

図 4.15(2) 市街地内の風速, 気温, MRT, 非定常 WBGT, 黒球温度, 湿球温度の水平分布( $z=1.5m$ , 11:47 頃の瞬間場)

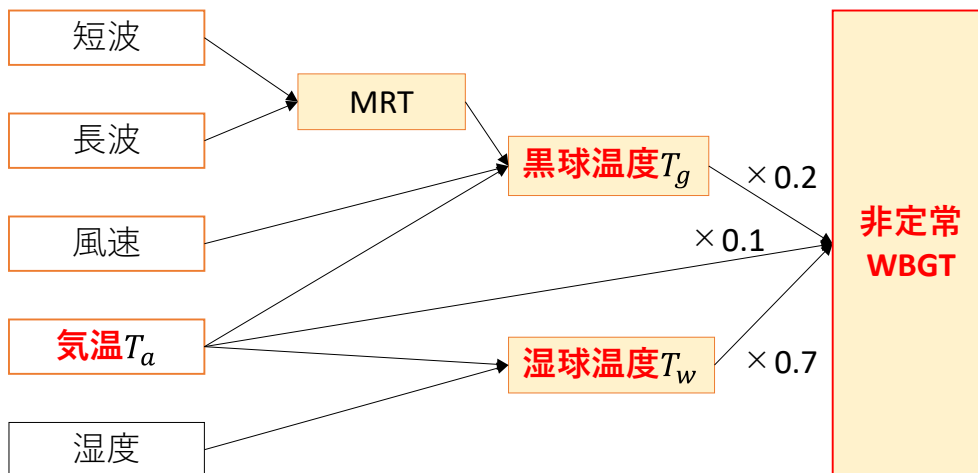


図 4.16 計算結果から求めた非定常 WBGT と各値の関係

表 4.7 WBGT の日常生活に関する指針（環境省 HP<sup>2)</sup>より）

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

次に非定常 WBGT について気温や風速等の瞬間値から求めた場合と時間平均値から求めた場合の市街地内における空間分布の差を確認するため、図 4.17 にて  $z=1.5\text{m}$  における 12:00 の瞬間場と 11:50~12:00 の 10 分間の時間平均場を比較した。LES は RANS よりも建物後流の流れ場の再現精度が高いとされていることから、時間平均分布についても従来の RANS と放射場の連成解析よりも実現に近い分布が得られたと考えられる。図上点線枠内の主要道路の交差点や道路沿い、中高層建物の後流域において、平均値では非定常 WBGT が  $28\sim 31^{\circ}\text{C}$  (WBGT 評価では「嚴重警戒」に相当) であっても瞬間的に非定常 WBGT が  $31^{\circ}\text{C}$  以上 (WBGT 評価では「危険」に相当) となる領域が見られる。このことから、特に非定常 WBGT の変動が大きい場所では、非定常 WBGT の時間平均値を精度よく評価するだけでなく局所的に発生するピーク値や人体が暴露される暑熱ストレスの蓄積等の非定常特性を考慮することで、暑熱リスクを適切に評価する必要があると考えられる。

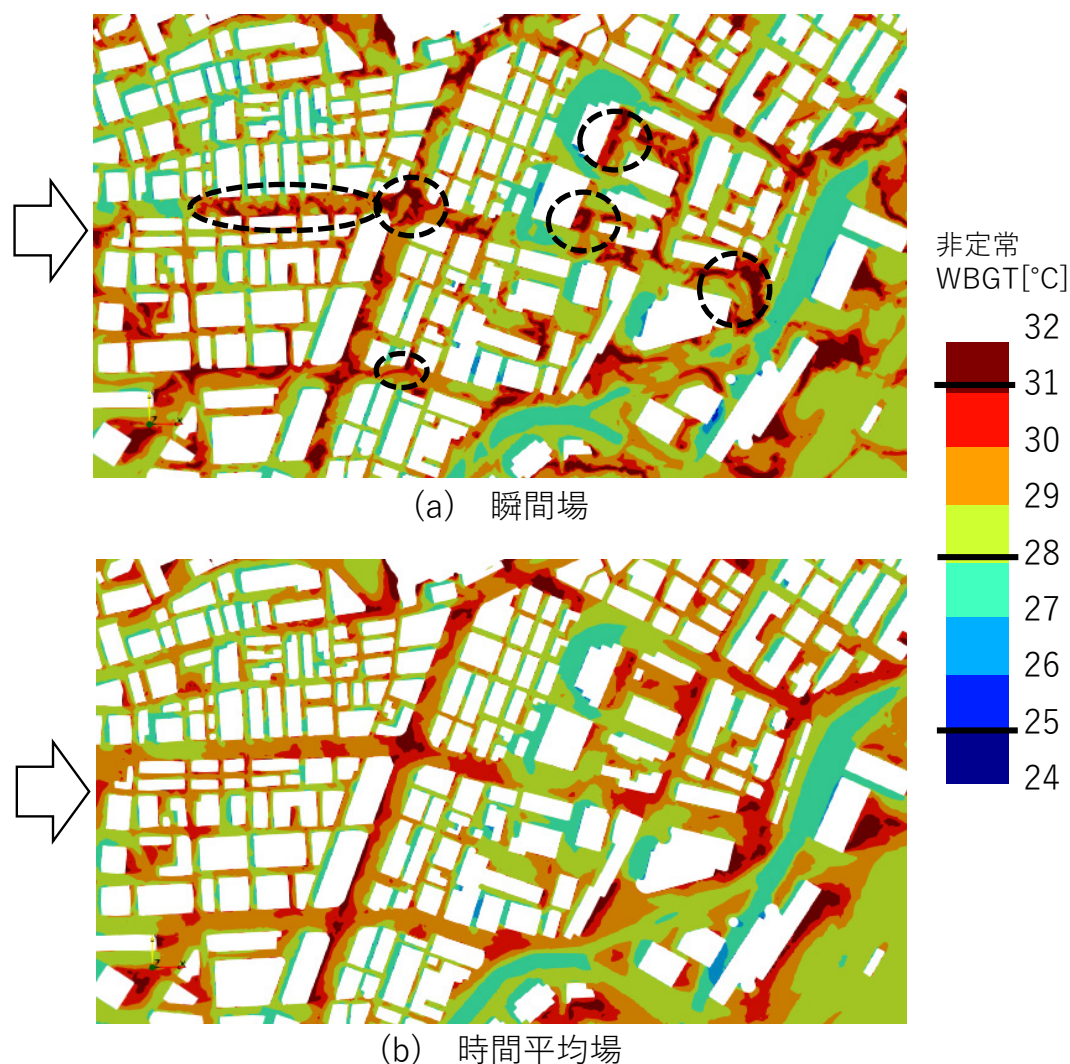


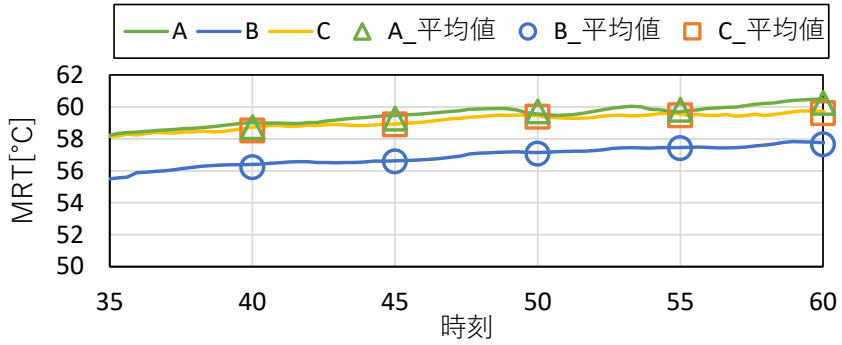
図 4.17 市街地内の非定常 WBGT 瞬間場と 10 分間時間平均場の比較  
( $z=1.5\text{m}$ , 瞬間場: 12:00, 時間平均場: 11:50~12:00)

ここで、市街地内の日向における  $z=1.5\text{m}$  の計 3 点（主要道路の交差点付近の歩道（A 点）、高層建物の風上側（B 点）と後流域（C 点））について、MRT、非定常 WBGT、気温、風速の大きさの時系列データを比較した（図 4.18）。ここでは、20 秒おきの瞬時値を用いた。参考として、図 4.18(a)～(d)に各値の前 5 分間の時間平均値を記号（△○□）で示す。気温、非定常 WBGT、MRT は各地点で 11 時 35 分～11 時 55 分の 5 分平均値はほぼ一定であった。図 4.18(a)や(b)を見ると、MRT は時間経過に伴って上昇傾向を示しているが非定常 WBGT と比較して変化量は小さく瞬間的に値が著しく変動する様子は見られなかった。非定常 WBGT は時々刻々と細かな変動が見られ、例えば A 点では 11 時 47 分や 11 時 58～59 分頃に瞬間的なピークが発生している。前者のピークが含まれる 11 時 46 分～11 時 50 分の平均値は約  $30.6^{\circ}\text{C}$  に対し、最大で瞬間的に約  $37.5^{\circ}\text{C}$  となった。先ほど非定常 WBGT との相関が高いと考察した気温の時系列データ（図 4.18(c)）と比較すると、気温と非定常 WBGT で同じ時間帯にピークが見られ、最大で約  $40^{\circ}\text{C}$  であった。一方で、MRT は時間方向の変化が緩やかであった。以上より時系列データからも非定常 WBGT が MRT よりも気温の影響を強く受けていることが確認された。次に風速(図 4.18(d))と気温や非定常 WBGT の関係性に着目すると、A 点と C 点では気温や非定常 WBGT のピーク時間帯は風速が弱まり、風速が強い時間帯には気温や非定常 WBGT は小さくなる傾向がみられる。B 点は風速値が 11 時 45 分～11 時 50 分において C 点の風速波形と近いが、11:47 頃に C 点は気温および非定常 WBGT が瞬間的に上昇した一方で B 点はほとんど変化が見られなかった。地点 B は午前中に日陰となる領域で地表面温度が低い場所であるため、風速が低い場合でも地面近傍で対流熱伝達によって空気が暖められる効果が小さいことから気温変化も小さいためだと考えられる。

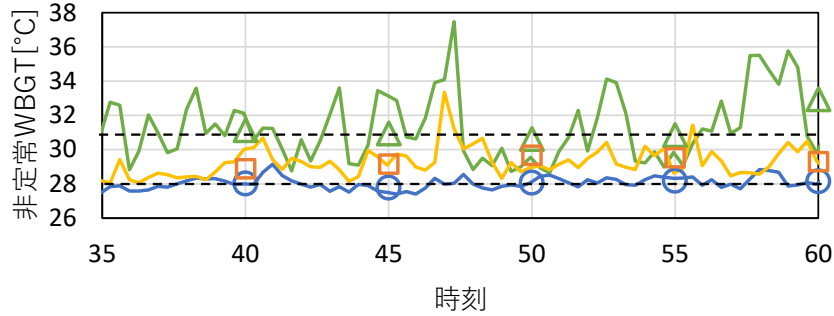
ここで、MRT の時間平均値がほぼ同じで、11 時 36 分～11 時 55 分の時間帯では風速の時間平均値も近い値を示した A 点と C 点についてその変動特性を比較するため、各指標の平均値と標準偏差を表 4.9 に示す。ここでは、グラフ上の風速の値、つまり主流方向・直交方向・鉛直方向の風速 3 成分を考慮した風速の大きさと合わせて、鉛直方向風速の値も整理した。なお、鉛直上向きを正とした。MRT の平均値、標準偏差ともに地点間の差はほとんど見られなかった。非定常 WBGT と気温について、平均値は両地点で近い値であるが、標準偏差は A 点の方が高く、C 点の 2～3 倍となる時間帯も見られた。気温と非定常 WBGT の平均値および標準偏差は正の相関がみられた。また、風速の大きさは時間帯によって平均値及び標準偏差の地点間の大小関係が入れ替わるが、鉛直方向風速は両地点で平均値の差は小さく、標準偏差は C 点の方が若干高い値となり、風速の大きさと異なる傾向が見られた。このように地点によって、時間平均値は近くとも標準偏差が異なる様子が見られ、A 点、つまり主要道路の交差点角部では気温、非定常 WBGT の標準偏差が高い結果となった。また、風速の大きさは時間帯によって標準偏差に両地点でばらつきが見られたが、気温や WBGT の標準偏差が大きい時間帯（③11 時 46 分～11 時 50 分）には風速の大きさの標準偏差が他の時間帯と比べて 1.829 と大きかったが、風速の標準偏差が最大となる④11 時 51



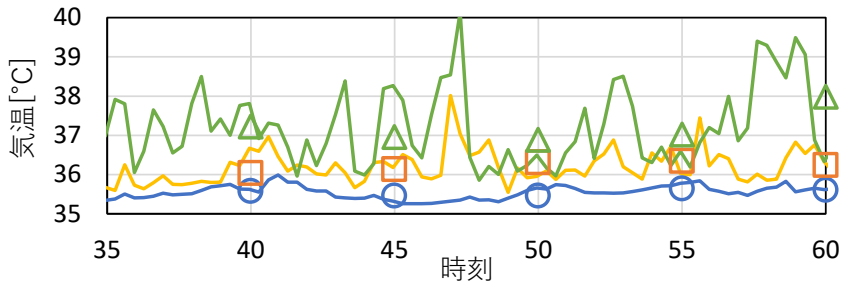
probe点の位置



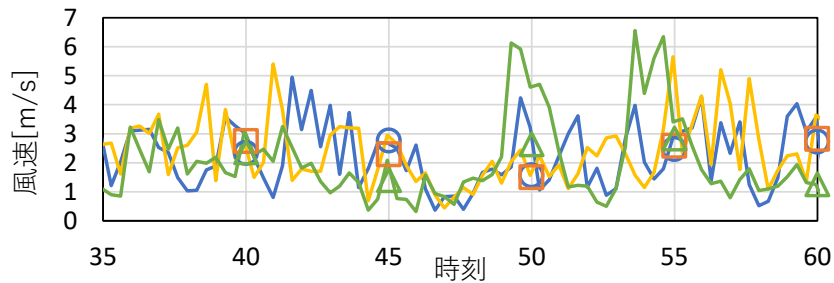
(a) MRT



(b) 非定常WBGT



(c) 気温



(d) 風速

図 4.18 各点の位置と MRT, 非定常 WBGT, 気温, 風速の時系列データ  
(横軸: 11:00 からの経過時間)

表 4.9 A点とC点の各値の時間平均値と標準偏差

	時間帯	平均値		標準偏差	
		A	C	A	C
MRT[°C]	①11:36-11:40	58.7	58.5	0.195	0.164
	②11:41-11:45	59.3	58.9	0.205	0.071
	③11:46-11:50	59.7	59.4	0.151	0.114
	④11:51-11:55	59.8	59.5	0.144	0.091
	⑤11:56-12:00	60.3	59.6	0.225	0.117
非定常 WBGT[°C]	①11:36-11:40	31.1	28.9	1.186	0.776
	②11:41-11:45	31.0	29.2	1.611	0.477
	③11:46-11:50	30.6	29.7	2.498	1.247
	④11:51-11:55	30.9	29.5	1.621	0.731
	⑤11:56-12:00	32.9	29.3	2.073	0.633
気温[°C]	①11:36-11:40	37.2	36.0	0.604	0.399
	②11:41-11:45	37.0	36.1	0.840	0.218
	③11:46-11:50	36.9	36.3	1.198	0.595
	④11:51-11:55	37.0	36.4	0.736	0.406
	⑤11:56-12:00	38.0	36.2	1.096	0.318
風速の大きさ[m/s]	①11:36-11:40	2.4	2.7	0.621	0.903
	②11:41-11:45	1.4	2.3	0.794	0.875
	③11:46-11:50	2.6	1.5	1.829	0.562
	④11:51-11:55	2.8	2.6	1.994	1.176
	⑤11:56-12:00	1.3	2.8	0.398	1.290
鉛直方向風速[m/s] (鉛直上向きが正)	①11:36-11:40	0.3	-0.1	0.242	0.469
	②11:41-11:45	0.2	0.1	0.192	0.370
	③11:46-11:50	0.1	0.2	0.203	0.229
	④11:51-11:55	0.1	0.0	0.231	0.344
	⑤11:56-12:00	0.4	0.1	0.222	0.359

※1：平均値の単位は表左端の単位を参照

※2：赤字は各地点での最大値

分～11時55分には気温と非定常 WBGT の標準偏差は③よりも小さくなっていることから、気温・非定常 WBGT と風速の関係性には周辺状況も含めた考察が必要だと考えられる。

A 点における気温および非定常 WBGT のピーク発生状況を詳細に確認するため、図 4.19 に 11 時 47 分頃における A 点近傍の水平断面図を示す。気温や非定常 WBGT が高いエリアは湿球温度や鉛直方向の風速が高いことが分かる。また、黒球温度も周囲と比べて高い部分が気温や非定常 WBGT の高い場所に近い傾向がみられる。気温が高い場所、つまり非定常 WBGT が高い場所では周囲に比べて弱風域に位置し、鉛直上向きの風が吹いていることから、風上側から移流してきた空気や地面近傍で対流熱伝達により加熱された暖かい空気が浮力によって運ばれる過程で A 点を通過し、気温や非定常 WBGT で瞬間的なピークが発生したと推察される。ここで、街区内の乱流構造および暑熱環境の変化の過程を確認するため、図 4.20 に A 点におけるピーク発生時間までの気温、非定常 WBGT 分布の時間変化を示す。ここでは A 点を通る水平断面 ( $z=1.5\text{m}$ )、鉛直断面 (D-D'断面) を図示した。気温分布の変化を見ると、A 点近傍の建物壁面に沿って高温域が移動して交差点の角部、つまり建物 E (図 4.20 に図示) の角丸部に集まっていく様子が見られる。鉛直断面では非定常 WBGT の高い領域が下面近傍から建物壁面に沿って移動しながら A 点付近の建物角丸面近傍で鉛直上向きに広がり上空へ昇っていく様子が確認できた。表面温度の高い道路面近傍で加熱された高温空気が市街地内の乱流場や浮力の影響を受けて非定常に変化しながら市街地内の交差点の角部近傍で非定常 WBGT が高くなる傾向が確認された。このように解析によって得られた周辺の詳細な流れ場から暑熱ストレスの蓄積を考慮することで熱中症危険性や暑熱リスクの高い場所を予測することが可能となる。また、本手法では LES を用いているため、従来の RANS による解析で課題であった建物後流域の流れ場の再現精度も高いと推察される。したがって、時間平均値を対象とした場合でも従来手法より本手法の方がより実現象に近い結果が得られると考えられる。ここで、ある経過時間の中で環境側の変動を考慮した暑熱環境評価の一例として、非定常 WBGT の時間平均値と標準偏差を組み合わせた値の確認を試みた。ここでは人体への熱ストレスが平均よりも強い場合の評価を目的として、表 4.9 に基づき時間平均値に標準偏差  $\sigma$  を足し合わせた値 (以下、平均 +  $\sigma$ ) を算出した。図 4.18(b)に「平均 +  $\sigma$ 」を追記したグラフを図 4.21 に示す。参考として既存の WBGT の評価範囲と比べると、A 点の 11:45～11:50 等のように変動が大きい時間帯・地点では評価が一段階上がる可能性を示唆している。今後、解析値の統計処理時間を WBGT の実測機器や人体への熱ストレス蓄積を考慮した時間スケールに合わせることで、変動を考慮した暑熱環境評価手法の発展が期待される。

以上より、市街地内における気温、非定常 WBGT の非定常特性について考察し、複雑な乱流場が形成されている場所ではその時の時空間構造に応じて気温や風速だけでなく、数値計算より求めた非定常 WBGT の値が時々刻々と変動することを示した。将来、気候変動により街区内の暑熱環境悪化が懸念される中、今後は代表地点における気温や風速、非定常 WBGT 等の暑熱環境の時空間平均値だけではなく、それらの空間分布や人体が暴露される

暑熱リスクの変動特性に配慮した詳細な熱環境データに基づく熱中症危険性評価手法の検討が必要だと考えられる。

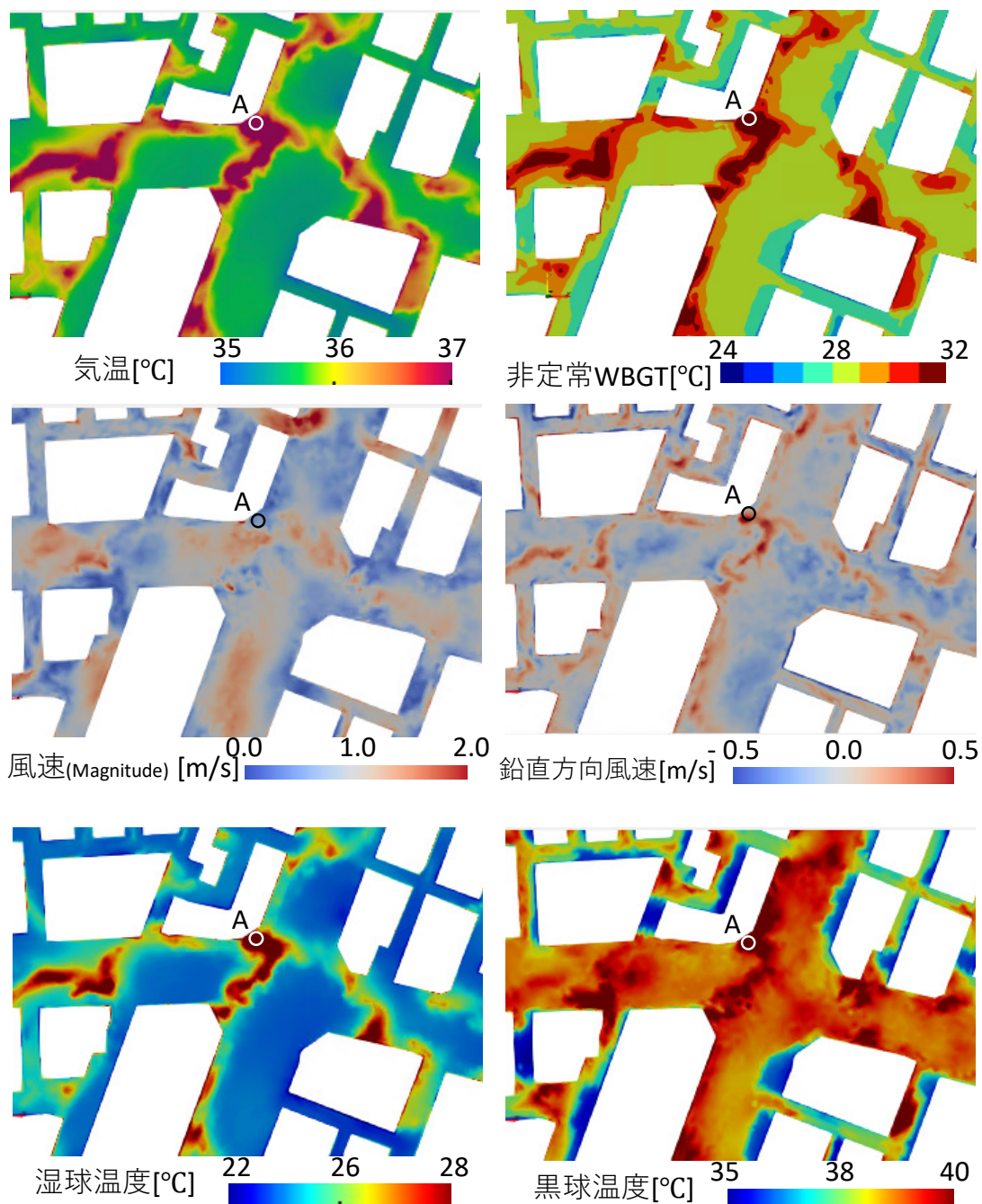


図 4.19 A 点近傍の水平断面図 ( $z=1.5\text{m}$ , 11 時 47 分頃)

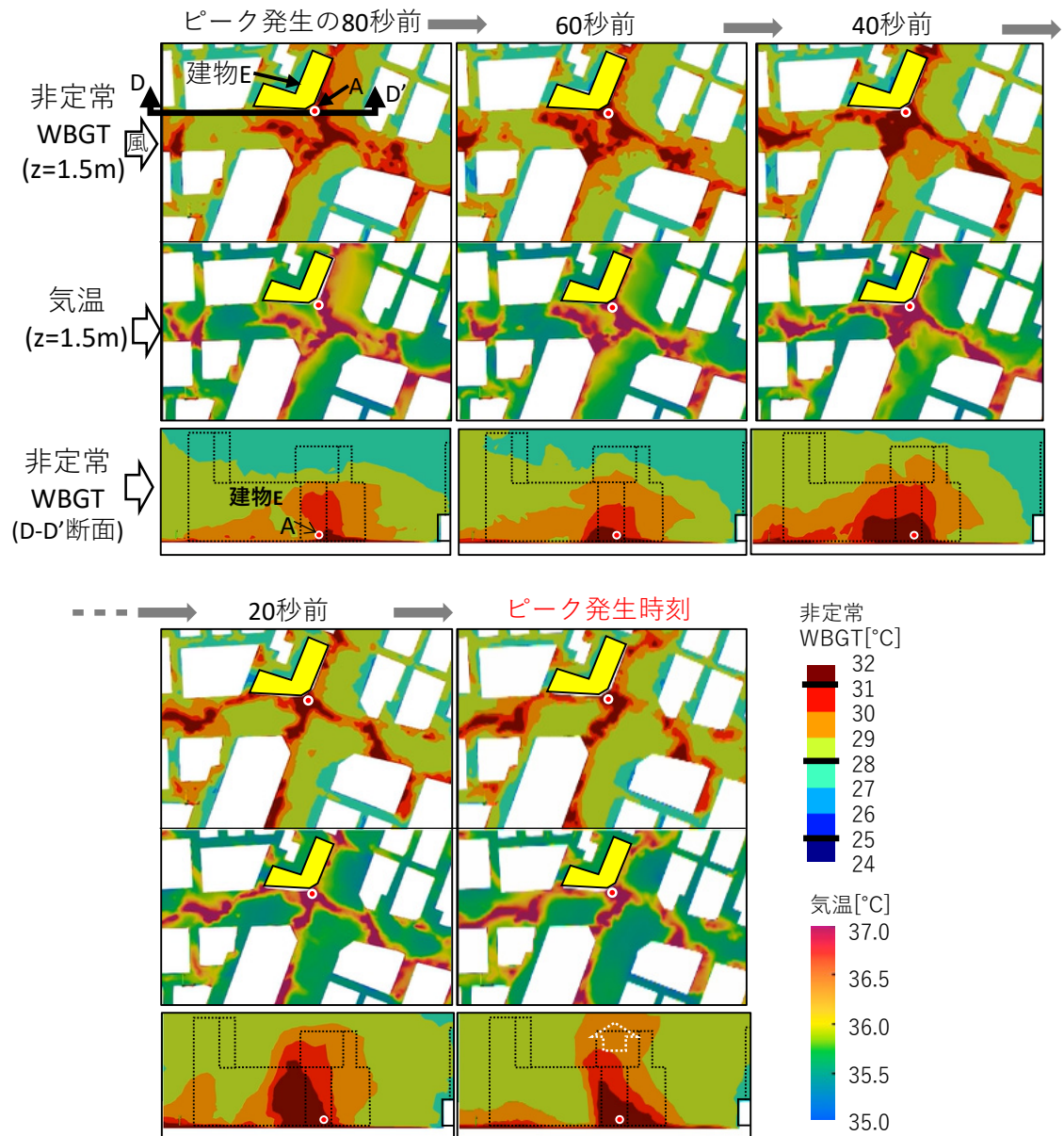


図 4.20 A 点近傍における気温，非正常 WBGT の時間変化

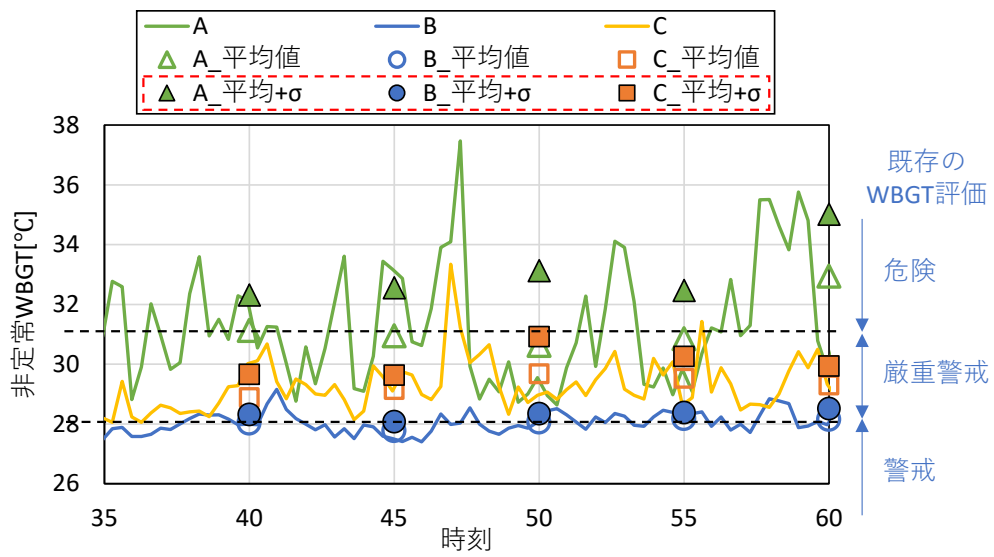


図 4.21 各点における非定常 WBGT の時系列データ, 平均値, 平均値 + 標準偏差  
(横軸: 11:00 からの経過時間)

## 4.4 まとめ

本章では、第2章の手法の猛暑日への適用例として、2018年7月の東京都市域を対象として、市街地内の乱流場・温度場の連成解析を行った。流入境界条件には3章の手法によって作成した気象擾乱と大気安定度を考慮した流入変動風を用いた。将来的な熱中症危険性予測・対策検討への貢献を目的として、市街地内の複雑な乱流場における非定常な気温や風速、MRT および気温・風速・MRT 等の瞬時値から換算した非定常 WBGT による暑熱環境評価を試みた。以下のような結果が得られた。

- ・気象擾乱を考慮した流入変動風を作成するため、先ずメソ気象モデル WRF および WRF-LES によって、2018年7月23日の猛暑日における東京、青梅、熊谷の気象場を再現した。続いて、得られた WRF-LES の結果から第3章の手法によって気象擾乱と大気安定度を考慮した流入変動風を作成した。
- ・解析手法の検証のため、第2章の手法を同日の東京都北の丸地区・神田地区を対象とした解析に適用し、東京管区気象台の観測値と比較した。気温は解析と実測の差が小さく、解析では実測よりも細かな変動が再現されていることから、気象台観測データの時間変化を対象に解析手法の妥当性が確認できた。
- ・観測では広範囲の空間分布を同時に取得することが困難である建物密集域を対象として、気温、風速、MRT、非定常 WBGT 等の時空間データを示し、複雑な乱流場において人体が暴露される暑熱環境の評価を試みた。市街地内の暑熱環境の分布を見ると、低層建物が密集する市街地内では全体的に低風速域となっており、その中でも MRT が高い主要道路の交差点角部や高層建物後流域にて気温や非定常 WBGT が局所的に高い値を示した。気温と非定常 WBGT の空間分布が網目状となっていることから、弱風域における地面近傍から高温な空気が浮力によって上昇した影響を受けていると考えられる。また、非定常 WBGT の時間平均場についても確認した。本手法によって非定常な流れ場を詳細に再現できるだけでなく、時間平均分布についても従来の RANS による解析よりも建物後流域の流れ場の再現精度が高い結果が得られたと考えられる。
- ・気温や非定常 WBGT が局所的に高い地点について気温、風速、MRT、非定常 WBGT の時系列データを比較した。気温、風速、非定常 WBGT は時々刻々と変動していたが、MRT は変動が小さく時間方向の変化も緩やかであった。市街地内の乱流場の変動特性は気温や風速および非定常 WBGT への影響が大きいことが確認できた。また、気温や非定常 WBGT の変動が大きい主要道路の交差点角部では、気温はピーク時に約 40°C、非定常 WBGT は5分間の時間平均値で約 30.6°C に対してピーク値で約 37.5°C となった。参考として、長時間暴露を想定した WBGT の日常生活に関する指針を参照すると「危険 (31°C 以上)」評価を大きく上回る値をとる場所も見られた。以上のように、本解析手法によっ

て市街地における暑熱環境の非定常な変動や局所的な高温発生を再現することができ、歩行者が暴露される街区内の暑熱環境の詳細な時空間分布を把握することができた。

本研究によって得られた解析結果から、乱流場・温熱場の時空間の僅かな変化により気温や非定常 WBGT、風速等の暑熱環境が大きく変動することを考えると、熱中症危険性を評価する上では、時空間方向に平均化した評価だけではなく、建物周辺の複雑な乱流場において熱負荷を受ける時刻や場所によって局所的に暑熱環境が大きく変化することに配慮した評価が不可欠だと考えられる。

## 注釈

- 注1) 風速分布では地面から 2000m 付近までほぼ一定値で地表面近傍の風速低下がほとんどみられなかったが、これはサンプリング点の風上側の連続した谷地形の影響だと考えられる。
- 注2) 東京管区気象台観測データの 10 秒値は一般財団法人気象業務支援センターにて購入した 10 秒ごとの平均風速、気温の値を用いた。
- 注3) 室内温度や地中温度は固体内熱伝導計算において一定値として与えた。建物の窓ガラスは放射率・透過率・吸収率を各壁面について壁と窓ガラスの面積で重み付け平均し、鏡面反射は考慮していない。建物・地表面の境界条件及び熱物性値は下記の値を用いた。各種熱物性値は文献<sup>5)</sup>を参考に表 4.10 のように設定した。

表 4.10 主な建物・地表面の熱物性値

種類	日射反射率	日射透過率	長波放射率	蒸発効率
高層建物/屋根,壁面 低層建物	0.20	0.00	0.90	
道路(アスファルト)	0.10	0.00	0.90	
コンクリート面	0.20	0.00	0.90	
芝面	0.30	0.00	0.95	0.10

種類	熱伝導率 [W/m K]	容積比熱 [kJ/(m <sup>3</sup> K)]	材料名 (厚さ[mm])
高層建物/屋根	0.27	1670	コンクリート[230], アスファルトルーフィング[10], 断熱材[30], 石膏ボード[10]
高層建物/壁面 低層建物	0.15	1410	コンクリート[150], 断熱材[50], 石膏ボード[10]
道路(アスファルト)	0.61	1660	アスファルト[100], 砂[40], 土[400]
コンクリート面	0.67	1640	コンクリート[100], 砂[40], 土[400]
芝面	0.55	1590	芝[100], 砂[40], 土[400]

- 注4) 非定常 WBGT を求める際、解析領域内で絶対湿度一定と仮定し、乾湿計公式（式(4.5)、式(4.6)）<sup>3)</sup>より空気の水蒸気圧や気温から求めた湿球温度 $T_w$ 、Bedford の式（式(4.8)）<sup>4)</sup>より MRT や風速、気温から求めた黒球温度 $T_g$ を用いた。飽和水蒸気圧は Tetens(1930)の実験式（式(4.7)）<sup>6)</sup>より算出した。式は以下の通り。WBGT を数値計算から求める方法は他にもあるため、今後精度向上のために湿球温度計の熱収支を考慮したモデル式<sup>7)</sup>等の適用も期待される。

$$P_{wbs} - P_a = A_s P_0 (T_a - T_{wb}) \quad (4.5)^3$$

$$T_{wb} = T_a - \frac{P_{wbs} - P_a}{A_s P_0} \quad (4.6)$$

$$P_{as}(T) = 6.11 \times 10^{(7.5T/(T+237.3))} \times 10 \quad (4.7)^6$$

$$T_g + 273.15 = \frac{MRT_g + 2.44\sqrt{V}(T_a + 273.15)}{1 + 2.44\sqrt{V}} \quad (4.8)^4$$

$P_{wbs}$	: $T_{wb}$ における飽和水蒸気圧	[kPa]
$P_a$	: $T_a$ における空気の水蒸気圧	[kPa]
$P_0$	: 標準大気圧 (=101.325)	[kPa]
$A_s$	: Sprung の乾湿計係数 (=0.000662)	[K <sup>-1</sup> ]
$T_a$	: 乾球温度	[°C]
$T_{wb}$	: 湿球温度	[°C]

$P_{as}(T)$ : 温度 $T$ における飽和水蒸気圧 [kPa]

$T_g$	: 黒球温度	[°C]
$MRT_g$	: グローブ球の MRT	[K]
$V$	: 風速	[m/s]

## 参考文献

- 1) ISO7726: Ergonomics of the thermal environment, 1998
- 2) 環境省ホームページ, 熱中症予防情報サイト, 暑さ指数 (WBGT) について, <https://www.wbgt.env.go.jp/wbgt.php> (2024.11 アクセス)
- 3) 空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧, 第14版, 基礎編, p.221, 2000
- 4) 小林壽太郎: アスマン通風乾湿計の乾湿計公式について, 天気, 47-10(2000-10), pp.747-752, 2000
- 5) 田中俊六, 他5名: 最新 建築環境工学[改訂4版], 井上書院, 2017
- 6) Tetens O: Uber einige meteorologische Begriffe. Z. Geophys, 6: 297-309, 1930
- 7) 佐藤大樹, 大黒雅之, 新井舞子: 数値解析結果を用いた WBGT の算出方法, 空気調和・衛生工学会論文集, No.286, pp.47-53, 2021

## 5章 結論

### 5.1 結論

本研究では、建物が密集する街区内部での複雑な乱流場における熱中症危険性の正確な評価を実現することを目指して、乱流場と放射場の相互影響やメソ気象スケールからの影響を考慮した暑熱環境評価手法の構築することを目的として、市街地の乱流場と放射場の連成解析手法およびメソ気象モデルの解に基づく気象擾乱を考慮した流入変動風作成手法を構築し、妥当性を検証した。また、本手法を過去の猛暑日の実市街地を対象とした解析に適用し、街区内部の乱流場・温度場を再現するとともに、風速、気温だけでなく、熱中症リスク評価上重要となる MRT や非定常 WBGT の詳細な時空間分布や変動特性を明らかにした。

以下に本研究で得られた知見を述べる。

**第2章**では、街区内部の乱流・放射・熱伝導の相互作用を考慮した乱流場・放射場の連成解析手法の提案と基礎的な検証を目的とした。提案手法について実測値と比較した基礎的な検証が必要となるため、解析結果の検証に活用できる一般的な夏季日中の街路気温実測データ等がある実都市を対象として市街地における熱放射を考慮した LES を実施し、乱流場と放射場の相互影響を考慮した市街地内の非定常温熱場を示すとともに、提案手法の妥当性の検証と実市街地への適用性があることを確認した。

**第3章**では、猛暑時の暑熱環境解析および暑熱環境評価のための流入境界条件作成手法の構築を目的とした。猛暑時のように、地表面近傍が極端に高温となり熱的な影響が強い条件下の市街地内の非定常温熱場を再現するためには、メソ気象スケールの影響や温度の変動を考慮した流入変動風が必要となることから、気象擾乱に基づく熱的な影響を考慮した流入変動風を作成した。基礎的な物理特性の確認のため、一例として既往研究の風洞実験と比較し、その乱流特性をよく再現していることを確認した。

**第4章**では、第2章の提案手法を猛暑日へ適用した例として2018年7月の東京都市域を対象とした暑熱環境解析を実施し、市街地内の暑熱環境の実態把握と暑熱環境評価のために気温、風速、平均放射温度 (MRT) およびそれらの瞬時値から換算した湿球黒球温度 (非定常 WBGT) の非定常特性の確認を試みた。先ずメソ気象スケールの影響を考慮した流入変動風を作成する必要があるため、メソ気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting model) および WRF-LES によって猛暑日の気象場を再現し、その結果から、第3章の手法によって気象擾乱を考慮した流入変動風を作成し、市街地スケールの解析の流入境界条件として用いた。次に、観測データのある東京管区気象台を含む東京都市域の市街地スケールの解析を行い、気象台観測値との比較検証により本手法の妥当性を確認した。続いて、前述の

解析により再現された街区内の複雑な乱流場・温度場を確認するとともに、熱中症リスクの評価上重要となる熱放射の影響を考慮した指標である MRT や非定常 WBGT も含めて詳細な時空間分布や時系列データを明らかにした。主要道路の交差点角部や高層建物後流の低風速域かつ日向の領域では気温や非定常 WBGT の変動が大きく高い値が断続的に発生していることから、熱中症危険性を評価する上で時空間方向に平均化された値だけでなく、建物周辺の複雑な乱流場における局所的な暑熱環境を評価し得る本手法の有効性を示した。

以上より、本研究で用いた市街地における乱流場・放射場の連成解析手法および気象擾乱を考慮した流入変動風作成手法は、建物が密集する街区内の複雑な乱流場における暑熱環境を評価する上で適切な予測精度を有することが確認され、また、猛暑日における都市域の暑熱環境評価に際し、気温、風速、MRT および非定常 WBGT の詳細な時空間分布や変動特性を明らかにすることで、今後の暑熱環境評価の発展に資するデータの取得が可能となることを示した。

## 5.2 今後の展望

気象擾乱や乱流場・放射場の相互影響を考慮した市街地の暑熱環境に関する解析手法は、熱中症危険性を適切に予測・評価し対策を考えていく上で今後さらなる発展が期待される。ここでは、本手法を元に高精度な屋外暑熱環境評価技術として発展させていくための将来的な展望を述べる。

### (1) 樹木の影響や湿度輸送を考慮した暑熱環境評価の精度向上

本研究では市街地内の建物周辺の暑熱環境を再現することを目的として、樹木がない歩行者空間での評価を試みた。弱風時の暑熱環境の適応策として樹木による日陰効果がある一方、風速低減効果や水蒸気の発生による暑熱環境の悪化も考えられる。今後樹木や湿度輸送を考慮した解析を行うことで、公園のような樹木や水面といった水蒸気発生要因が多い場所での適用が可能となり、都市域だけでなく街区空間全体の予測・評価の精度向上が期待される。

### (2) メソ気象モデルの温度変動を接続した流入境界条件の高度化

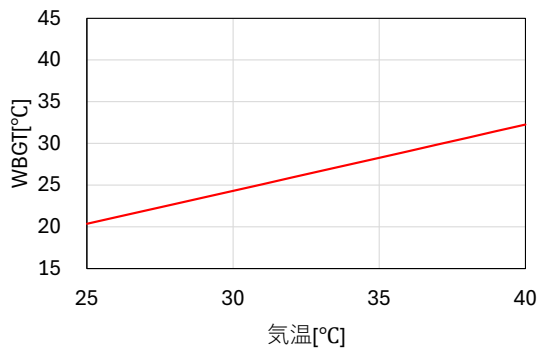
メソ気象モデル（WRF や WRF-LES）の解には温度変動も含まれる。将来的に風速・温度ともに WRF-LES の時系列データを接続した流入変動風を作成することで、メソ気象スケールでの温度変動や長時間にわたる温度変化の傾向を維持した市街地内の暑熱環境評価が可能となる。

### (3) 暑熱リスク評価手法・指標の発展

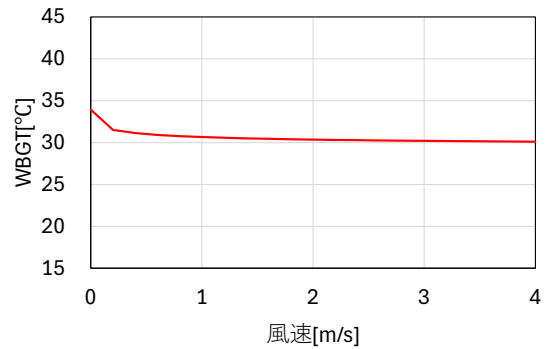
本研究では既存の暑熱リスク評価指標のうち、環境省の熱中症予防サイトで暑さ指数として使われており、温熱4要素から簡易に算出できる WBGT を用いた。WBGT は人体側の条件（着衣量・代謝量）に関する補正值はあるものの、被験者実験による実験式であるため Two-Node モデルのような人体温熱生理を考慮した指標ではないことや、屋外空間の日常生活への適用に関して検討の余地がある。また、本研究で示した通り市街地内の暑熱環境は変動が大きいため、それらが人体に与える影響についても今後検討されることで、将来的な暑熱リスク評価の発展に繋がると考えられる。

## 付録 気温・風速・MRT・湿度の変化量に対する WBGT への影響

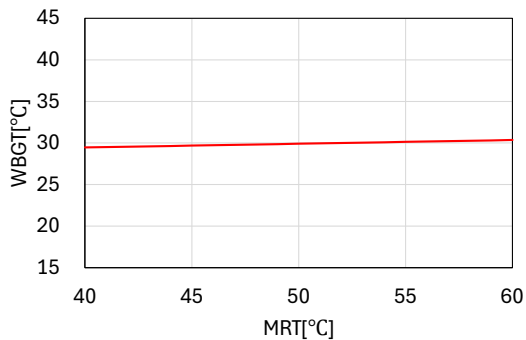
4章で使用した計算値に基づき WBGT に換算するモデル式を用いて、気温、風速、MRT および絶対湿度の変化量が WBGT に与える影響を確認した。実環境における温熱4要素は互いに影響しながら変化すると想定されるが、ここではモデル式の特性を確認することを目的として、対象とする指標以外の値を基準値に固定した。ここで、4章の地点 A における解析結果を参考に基準値を設定し、気温 37°C、風速 2.0m/s、MRT60°Cとした。絶対湿度は東京管区気象台の観測値より気温 36.5°C、相対湿度 39%より算出した絶対湿度約 15g/kg(DA)を基準とした。各指標の感度解析の平均値を求めると、気温 $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$ に対して $\Delta\text{WBGT}=\text{約 } 0.8^{\circ}\text{C}$ 、風速 $\Delta V=1\text{m/s}$ に対して $\Delta\text{WBGT}=\text{約 } 0.4^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta T_{\text{MRT}}=1^{\circ}\text{C}$ に対して $\Delta\text{WBGT}=\text{約 } 0.05^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $\Delta\text{RH}=1\%$ （絶対湿度 $\Delta\text{AH}=0.4\text{g/kg(DA)}$ ）に対して $\Delta\text{WBGT}=\text{約 } 0.2^{\circ}\text{C}$ となった。



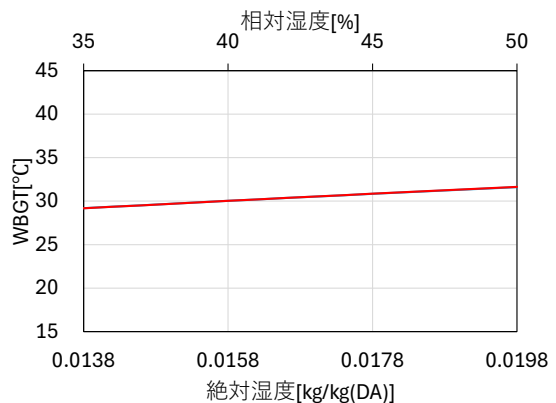
(a) 気温



(b) 風速



(c) MRT



(d) 絶対湿度・相対湿度

図 各指標と WBGT の変化量の関係性

## 本研究に関連する発表論文

### 【査読付論文】

- 1) 新井舞子, 河合英徳, 田村哲郎: 熱放射を考慮した市街地の LES に基づく気流・熱環境解析, 第 25 回風工学シンポジウム, pp.217-222, 2018.12
- 2) 新井舞子, 田村哲郎, 河合英徳: 熱放射を考慮した LES の検証と実市街地への適用性, 日本建築学会環境系論文集, 第 89 巻, 第 819 号, pp.258-269, 2024.5
- 3) 新井舞子, 田村哲郎, 河合英徳: 都市気象擾乱に基づく温度不安定性を考慮した流入変動風に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 90 巻, 第 827 号, pp.45-51, 2025.1
- 4) 新井舞子, 田村哲郎, 河合英徳: 猛暑日の都市域における気象擾乱を考慮した乱流場・温熱場の評価に関する研究 -2018 年猛暑日における東京都市域を対象とした非等温乱流場の解析-, 日本建築学会環境系論文集, 審査中

### 【国内学会】

- 1) 新井舞子, 河合英徳, 田村哲郎: 熱放射を考慮した市街地の LES に基づく気流・熱環境評価 高層建築物群における複雑な乱流場・熱放射場の微細構造の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.857-858, 2018
- 2) 新井舞子, 河合英徳, 田村哲郎: 熱放射を考慮した LES に基づく実市街地の気流・熱環境解析に関する検証, 日本流体力学会年会 2019, 2019
- 3) 新井舞子, 河合英徳, 田村哲郎: 熱放射・LES 連成解析手法の適用と検証 -実市街地の乱流場・温度場の解析-, 第 33 回数値流体力学シンポジウム, C08-1, 2019
- 4) 新井舞子, 河合英徳, 田村哲郎: 熱放射・LES 連成解析手法の適用と検証 壁関数による対流熱伝達モデルの検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1377-1378, 2020
- 5) 新井舞子, 河合英徳, 田村哲郎: 夏季の都市における気象擾乱を考慮した温度を含む流入変動風に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2047-2048, 2021
- 6) 新井舞子, 河合英徳, 道岡武信, 田村哲郎: 局所的な熱効果が導入された立方体周りの乱流場・温度場に関する LES, 日本流体力学会年会 2021, 2021
- 7) 新井舞子, 河合英徳, 田村哲郎: 2018 年猛暑日における東京都市域での弱風・温熱場予測に関する研究, 第 35 回数値流体力学シンポジウム, 2021
- 8) 新井舞子, 河合英徳, 田村哲郎: 2018 年猛暑日の東京都市域における気象擾乱を考慮した流入変動風に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2175-2176, 2022
- 9) 新井舞子, 河合英徳, 田村哲郎: 2018 年猛暑日の東京都市域における市街地スケールの暑熱環境解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2097-2098, 2023

**【国際会議】**

- 1) Maiko Arai, Hidenori Kawai, Tetsuro Tamura, LES Coupling with Thermal Radiation for Actual Urban District -Unsteadiness of Turbulent and Thermal Field around High-Rise Buildings-, 14th American Conference on Wind Engineering (ACWE), 2022.5
- 2) Maiko Arai, Hidenori Kawai, Tetsuro Tamura, A Study of LES Coupling with Thermal Radiation for Actual Urban District - Validation of LES Coupling with Thermal Radiation and Inflow Turbulence including Weather Disturbance in Summer-, 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII), 2022.8

**【その他，屋外温熱環境に関する発表論文】**

・ 査読論文

- 1) 佐藤大樹，大黒雅之，新井舞子：数値解析結果を用いた WBGT の算出方法，空気調和・衛生工学会論文集，No.286，pp.47-53，2021

## 謝辞

本研究は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム『富岳』が拓く Society 5.0 時代のスマートデザイン」の一環としてスーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け(課題番号：hp210262)、また都市・建築 CFD コンソーシアムの研究活動で実施したものです。

本論文の執筆にあたり、指導教員であります坂田弘安博士には大変お世話になりました。学位論文について丁寧にご指導いただきまして誠にありがとうございました。心から感謝の意を表しますとともに厚く御礼申し上げます。

修士論文の指導教員であります東京工業大学名誉教授 田村哲郎博士には、修士課程在籍時から都市建築風工学・環境乱流力学について丁寧にご指導いただき、研究に取り組む姿勢から論文執筆に至るまで全て教えていただきました。本論文の執筆にあたりまして入学時から最後までご指導いただき、心より深く感謝を申し上げます。

お茶の水女子大学准教授 河合英徳博士には、著者が修士課程在籍時に田村研究室助教でいらっしゃるときから大変お世話になりました。論文に関するご指導だけでなく、計算環境の整備や解析結果の分析方法に至るまでとても細やかにご指導いただきまして、誠にありがとうございました。

東京科学大学准教授 大風翼博士には修士課程の副指導教員と博士課程 1 年～3 年 (2019 年～2021 年) の指導教員になっていただきまして、ゼミや研究発表の場等様々な機会でご指導いただき大変お世話になりました。誠にありがとうございました。

本論文の審査におきまして、貴重なご指摘を賜りました、東京科学大学教授 鍵直樹博士、同准教授 湯浅和博博士、同准教授 浅輪貴史博士、同准教授 村田涼博士に熱く御礼申し上げます。

私が初めて建築環境工学や CFD に関わる機会をいただいたのは、明治大学の学部 4 年時でした。卒業論文の指導教員であります明治大学教授 酒井孝司博士には大変お世話になりました。改めて御礼を申し上げます。

都市・建築 CFD コンソーシアムでは、コンソーシアム代表の横浜国立大学教授 山田貴博博士や、「猛暑時の暑熱リスク WG」の近畿大学教授 道岡武信博士をはじめ、本研究分野を専門とされる方々から大変貴重なご助言をいただきました。コンソーシアムの皆様に御礼を申し上げます。

博士課程在籍時には田村研究室、大風研究室、坂田研究室の皆様に大変お世話になりました。誠にありがとうございました。

著者の勤務先である大成建設株式会社 技術センターにおきましては、坂本成弘博士、横井睦己博士、関根賢太郎博士より本研究に取り組む機会をいただき、入社以来にお世話になっております佐藤大樹博士に建築環境工学についてご指導いただきました。また、研究を進めるにあたり、

空間研究室の吉川優博士，樋渡潔博士，庄司研博士，鹿毛比奈子氏より多くのご助言や励ましの言葉をいただきました。改めまして感謝申し上げます。

最後になりますが，長期間にわたる研究生生活を温かく見守り，励まし，支えてくれた家族や友人の皆様に心から感謝いたします。

2025年2月

新井 舞子