

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	高層建築物が周辺低層市街地の温熱環境に及ぼす影響に関する観測と数値解析
Title(English)	Numerical simulation and field measurement of the influence of a high-rise building on the thermal environment of surrounding low-rise urban areas
著者(和文)	陳侃
Author(English)	Kan Chen
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10838号, 授与年月日:2018年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:浅輪 貢史,田村 哲郎,山中 浩明,中村 恭志,錦澤 滋雄,小林 秀樹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10838号, Conferred date:2018/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成 29 年度 学位論文

高層建築物が周辺低層市街地の温熱環境に
及ぼす影響に関する観測と数値解析

指導教員 浅輪 貴史 准教授

田村 哲郎 教授

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

環境理工学創造専攻 博士課程

陳 侃

平成 29 年度 学位論文

高層建築物が周辺低層市街地の温熱環境に
及ぼす影響に関する観測と数値解析

Numerical simulation and field measurement of the influence
of a high-rise building on the thermal environment of
surrounding low-rise urban areas

指導教員 浅輪 貴史 准教授

田村 哲郎 教授

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

環境理工学創造専攻 博士課程

陳 侃

概要

本論文は「高層建築物が周辺低層市街地の温熱環境に及ぼす影響に関する観測と数値解析」と題し、以下の7章から構成されている。

第1章「序論」では、我が国の市街地再開発の現状として、大都市部のみならず地方中小都市においても駅前を中心市街地に高層建築物が建設されていることを述べるとともに、高層建築物に関する法規制や環境影響評価の現状について概観している。そのうえで、都市生活者にとって著しく快適性が損なわれる可能性がある夏季と冬季の温熱環境については、高層建築物の建設による影響は十分明らかにされておらず、各自治体の環境影響評価においても評価対象となっていないことを指摘している。以上の背景を踏まえて本研究の目的を述べるとともに、対象市街地として駅前再開発において高層建築物が建設され周辺低層市街地との高さのギャップが存在する茨城県土浦市の中心市街地を選定すること、及び研究方法として現地での観測と数値解析とを併用することを述べている。

第2章「航空機リモートセンシングと数値解析による高層建築物周辺の表面温度分布の把握」では、温熱環境に影響を及ぼす主要な要因である表面温度分布に着目し、高層建築物の周辺低層市街地の表面温度分布の特徴を調べている。まず、航空機リモートセンシングにより取得した夏季と冬季の熱画像より表面温度分布の実態を明らかにしたうえで、熱収支解析により表面温度分布形成のメカニズムを分析している。その結果より、冬季において、航空機リモートセンシングにより観測された高層建築物の広大な日影部の表面温度が、熱収支解析により算出された値よりも低温であることを示し、その原因として、観測値の表面温度には高層建築物周辺の微気候の影響や地表面の蓄冷効果が寄与している可能性と、熱収支解析では局所の微気候、すなわち気温と気流の空間分布を考慮していないことが実態との差を生じさせている点について考察している。

第3章「冬季における高層建築物周辺の温熱環境の実測」では、冬季に低温の地表面が観測された高層建築物周辺に形成される温熱環境の実態を明らかにするため、自転車を用いた移動実測により気温、風速、放射収支の分布を調査している。上向き長波長放射量の計測結果より把握できる地表面温度に関して、高層建築物の日影部の低温領域は航空機リモートセンシング観測の結果と一致すること、及び日中を通して日影部には気温も低下した空間特有の微気候が形成されていることを明らかにしている。そして、計測地点ごとに、放射収支と気温との関係を調べた結果より、上向き長波長放射量と気温とには日中において相関関係があることから低温の気温場がその場の地表面温度に大きく依存していることを確認し、地表面と近傍空気との局所的な熱交換により冷気が生成されている可能性を指摘している。

第4章「熱収支解析とCFDの連成解析手法に関する検討」では、建物や地表面と近傍空気との熱交換を数値シミュレーションにより再現するために、熱収支解析とCFD(数値流体

力学)との連成解析の方法について検討を行っている。熱容量が大幅に異なる地表面の材料と空気との間の対流による熱交換の解析を行うために、各表面における 24 時間の非定常の熱収支解析と、各時刻における定常の非等温 CFD シミュレーションとを連成させる方法を採用することとし、乱流モデルやメッシュ性状、建物形状の影響について解析的に比較検討を行ったうえで、次章の解析に使用するのに適したモデルや計算条件を提示している。

第 5 章「高層建築物周辺の温熱環境の形成機構に関する熱収支・気流の連成解析」では、3 章までに確認された高層建築物の日影部における低温の地表面と冷気に関する形成機構を明らかにするために、熱収支と気流の連成解析を適用している。その結果、日影部の地表面や高層建築物の北側壁面にて空気が冷却され、特に日影空間が高層建築物の風下側になるときに冷気の生成が起りやすいことを明らかにしている。また、連成解析を行うことで気温と気流の空間分布の影響と、地表面材料の非定常的な伝熱特性が反映されることで、地表面温度の低下傾向がより現れることが確認でき、地表面近傍の局所の熱交換と蓄冷現象が、それぞれ低温の温熱環境形成に寄与していることを明らかにしている。

第 6 章「高層建築物周辺の微気候を考慮した温熱環境評価」では、高層建築物周辺の市街地において熱収支・気流の連成解析を実施した結果に基づき、冬季における温熱環境を熱的快適性の視点から評価している。その結果、従来の環境影響評価で適用される日影やビル風の評価指標では問題ないと判断される日影部の領域においても、冬季の典型的な気象条件のもとで熱的快適性の評価指標である標準新有効温度 SET*を用いると 90%以上の人が不快と感じる温熱状態にあることを示し、高層建築物の環境影響評価において温熱環境を考慮することの重要性を論じている。

第 7 章「結論」では、各章で得られた知見と結果を総括して結論を述べるとともに、今後の課題を示している。

キーワード：高層建築物、温熱環境、リモートセンシング、熱収支シミュレーション、数値流体解析 (CFD)、移動観測、連成解析、微気候、冷気、蓄冷、温熱快適性、環境影響評価

Summary

The purpose of this study is to clarify the influence of high-rise building on the thermal environment of surrounding low-rise areas and the formation mechanism of thermal environment by observation and numerical simulation, then evaluate the thermal environment around an isolated high-rise building which is typical in local cities in Japan.

First, the study focuses on the surface temperature, which is the key factor of the thermal environment and analyzed the characteristics of the surface temperature of the target area by airborne remote sensing observation and numerical simulation. In winter, surface temperature at the shade of the high-rise building observed by remote sensing is lower than that calculated by simulation. It suggested that the microclimate around the high-rise building and cold storage may contribute to the low surface temperature. And the difference is supposed to be caused by the assumption of the constant of wind and temperature in the canopy space.

Next, in order to clarify the actual situation of thermal environment around the high-rise building, this study measured temperature, wind speed, heat balance items. In the daytime, the air temperature in the shade of the high-rise building is low and it is related to the low surface temperature of the shaded surface. It suggested that the heat exchange between air and cold surface caused cold air.

After that, in order to take wind and temperature distribution into account for the numerical simulation, this study analyzed the method of coupled analysis of heat balance simulation and CFD, and examined the calculation model and condition.

Then, in order to clarify the mechanism of the formation of cold air and cold surface suggested by previous charters, this study applied the coupled analysis to the target site. The cold air is caused by the surface of shaded walls and grounds by the high-rise building. And the cold air contributes to the formation of the cold surface in the shade.

Finally, this study evaluated thermal comfort of target site in winter based on the results calculated by coupled analysis of the heat balance simulation and CFD. The result presented that the shaded areas, where have no problem by conducting previous environmental impact assessment such as sunshade regulation and strong wind, are thermally uncomfortable in winter. The study showed that it is important to take account of thermal environment for environmental impact assessment.

2.6.3 考察	40
2.7 まとめ	43
参考文献	44
第3章 冬季における高層建築物周辺の温熱環境の実測	50
3.1 はじめに	51
3.2 実測方法（移動観測）	52
3.3 実測方法及び実測当日の気象条件（実測の概要）	53
3.4 移動観測の結果	55
3.5 各区画における観測結果の分析	60
3.6 気温と他の観測項目の関係	62
3.7 実測値とリモートセンシング観測平均値との比較	64
3.8 考察	66
3.9 まとめ	68
参考文献	69
第4章 熱収支解析とCFDの連成解析手法に関する検討	73
4.1 はじめに	74
4.2 連成解析の手法及び流れに関する検討	76
4.3 連成手法検討用のモデル及び解析条件	78
4.3.1 高レイノルズ数 $k-\epsilon$ モデル	78
4.3.2 低レイノルズ数 $k-\epsilon$ モデル	80
4.3.3 メッシュサイズの感度分析	82
4.3.4 解析の条件	85
4.4 建物細部形状の再現に関する検討	87
4.5 CFD乱流モデルに関する検討	90
4.6 連成回数に関する検討	91
4.7 まとめ	93
参考文献	94
第5章 高層建築物周辺の温熱環境の形成機構に関する熱収支・気流の連成解析	101
5.1 はじめに	102
5.2 実在街区における連成解析手法	104
5.2.1 解析の概要	104
5.2.2 解析の手順	105
5.3 対象地の再現と解析の概要	106
5.4 冬季の連成解析の結果	109

5.4.1 冷気の生成要因	109
5.4.2 地表面の低温化の形成要因.....	112
5.5 考察.....	115
5.6 まとめ.....	120
参考文献.....	121
第6章 高層建築物周辺の微気候を考慮した温熱環境評価	123
6.1 はじめに.....	124
6.2 高層建築物に対する法規制	124
6.2.1 都市再開発と地域地区	125
6.2.2 斜線制限及び天空率	127
6.2.3 日影規制	129
6.2.4 CASBEE による評価.....	131
6.3 高層建築物に対する従来の環境影響評価手法	133
6.4 従来の環境影響評価手法の対象市街地への適用	133
6.4.1 日影図	133
6.4.2 ビル風	135
6.5 温熱環境の視点からの環境影響評価	136
6.5.1 12:00 の SET*分布.....	138
6.5.2 SET*への各影響要素による影響度.....	139
6.5.3 今後の環境アセスメントに向けた課題.....	142
6.6 まとめ.....	142
参考文献.....	143
第7章 結論.....	146
7.1 研究の総括.....	147
7.2 今後の課題.....	148
謝辞	149
既発表論文等	151

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

1.2 既往研究と課題

1.3 研究の目的

1.4 研究の構成

参考文献

1.1 研究の背景

近年、世界的に人口が都市部へ集中し、その生活水準の向上および商業需要に応じて、都市化した地域で高層建築物を建設することが恒常化している。高層建築物は限られた土地でより広い室内空間を提供することで土地の利用率が向上するメリットがある一方、様々な環境問題を引き起こしている。特に周辺低層市街地への不配慮が問題となっている。典型的な例として、高層建築物による景観の悪化、日射遮蔽、日射反射、ビル風や遮風などが挙げられる（図 1.1）。

快適で環境に配慮した街づくりには、高層建築物が周辺環境に及ぼす影響を評価することが重要である。都市開発や再開発により高層建築物が建造される場合、高層建築物が周辺の市街地の住環境に及ぼす影響は、日影や風環境（ビル風）、景観等の観点から幅広く評価が行われてきており、従来から建築基準法^{注 1-1)}における斜線制限や自治体の環境アセスメント（ミニアセス^{注 1-2)}など、法制度や条例等で影響を最小化する取り組みがなされている。従来の環境アセスメントにおいてもビル風、景観、日影、電波障害などが評価項目となっている。しかし、現在の法規制や環境アセスメント項目では高層建築物が周辺低層市街地の温熱環境への影響評価が不十分となっている。温熱環境の観点から高層建築物の影響に注目し、環境アセスメント（ミニアセスを含む）をサポートできる知見が必要と考えられる。

温熱環境の観点から高層建築物の影響評価を行う試みとしては、東京湾岸の汐留地区の再開発により建設された高層ビル群で注目されたように、建築物が複数まとまることによって風通しの阻害をもたらし、夏季の温熱環境の悪化（風下側の気温上昇など）を招く可能性があるとして、これまで主に研究がなされてきている^[1-1, 1-2]。これに関しては CASBEE-HI（建築物総合環境性能評価システム、ヒートアイランド版）^[1-3]においても評価対象とされているなど、高層建築物が周辺環境に与える負荷の低減は、温熱環境の視点からも重要視されている。ただし、これまではそのような効果は主に大都市の市街地を対象として議論されることが多い現状である。

地方中小都市の中心市街地に着目すると、人口密度が高くないことから中低層の街並みが主である。高層建築物が周辺の低層建物への日照を遮らないように、高層建築物の建設が日影規制によって制限されている。しかし、近年、規制緩和に基づく特定の地域地区（高度利用地区^{注 1-3)}、都市再生特別地区など）の指定により、建物の高さに関する規制が緩和されてきている。そのような地域地区の指定による再開発によって、既存の市街地に高層建築物が建設される事例も多々見られ、低層市街地に隣接する単棟の高層建築物が見られることが一般的になっている（土浦、金沢、浜松、酒田など）。同様な状況は、多くのアジアの都市（ソウル、釜山、北京、上海）でも見られる。この場合、高層建築物と周辺の低層の街並みとの間に著しい高さのギャップが存在する。そのため、高層建築物は複数の建築群になっていなく、単棟においても、その周辺の低層エリアへの影響が顕著に現れることが想定され

る。特に冬季においては太陽高度が低く、高層建築物の日影が広範囲に広がるため、その影響が顕著になると考えられる。前記の日影やビル風の影響評価は、日照と風環境の面からその点に注目されたものであるが、温熱環境については前記のような高層ビル群を対象とした研究の他、調査事例は少なく、研究レベルで明らかにしてゆく必要がある。日本の多くの都市では、季節的な温度変化が大きいため、冬季の寒さは夏季の暑さと同様に重要な環境問題になる。

そこで本研究では、夏季の“高温”よりも、太陽高度が低くなり日影の影響範囲が広がる冬季において“低温”の温熱環境が問題となるのではと予想し、単棟の高層建築物周辺の夏季と冬季両季節における温熱環境の実態を把握・分析したうえで、特に、冬季において高層建築物が周辺の低層市街地の温熱環境に及ぼす影響を数値解析により明らかにしてゆく。

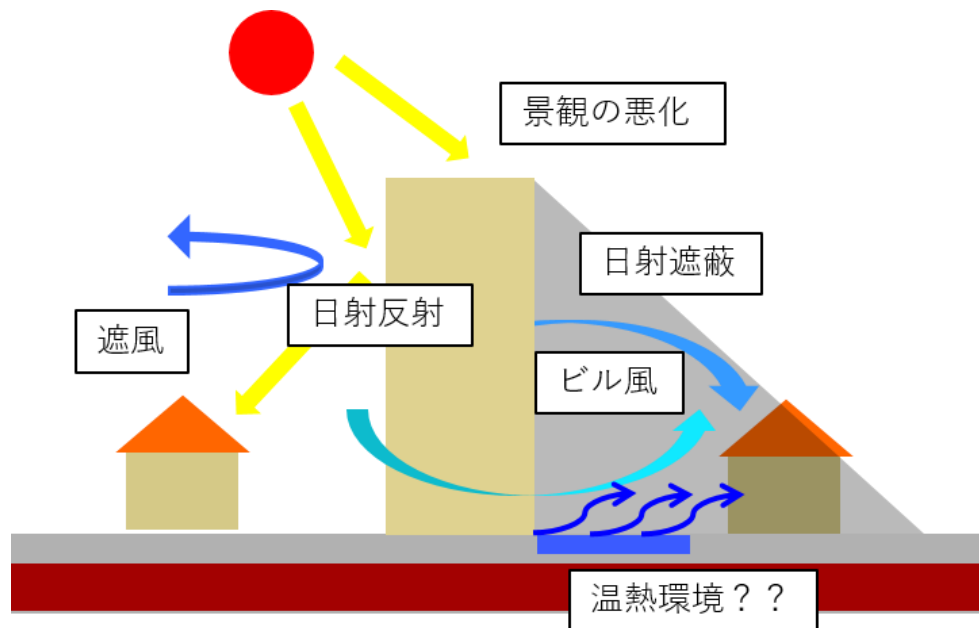


図 1.1 高層建築物が引き起こす環境問題

1.2 既往研究と課題

これまでに高層建築物が温熱環境へ及ぼす影響に関する研究について、日影・熱放射の観点からの研究と気温・気流の観点からの研究がある。前者は、例えば、香港の高密高層建築群のヒートアイランド効果^[1-4]について表面反射率を操作することで建物のエネルギー効率が改善できることや高層建築群の向い合いの壁面間の日射反射^[1-5]が熱を建物間に蓄積させる効果があるなどが挙げられる。建物表面から反射された反射日射による光害も研究されている^[1-6]。後者は高層建築物を中心とした風工学や環境研究の中で主な関心課題であり、高層建築物が風環境に及ぼす影響に関する研究が多く見られる。現地実測^[1-7, 1-8]や風洞実験^[1-9, 1-10]、数値流体解析 (CFD) ^[1-11, 1-12]による研究が行われてきた。しかし、これらの研究はそれぞれの個別の環境要素だけに注目したものであるが、実在都市における微気候現象を分析するためには気温・気流の観点と日影・熱放射の観点両者の相互作用を考え、総合的な評価が必要と考えられる (図 1.2)。

微気候に関する研究では、高層建築物群が海風を妨げ、沿岸都市の風下に位置する地域の夏季における微気候を悪化させる (すなわち、気温上昇) ことが示されている。例えば、東京湾沿岸部 (汐留) の再開発は、日本の研究者の関心を集めている^[1-13, 1-14]。しかし、そのような効果は主に高層建築物が複数集中する大都市で議論されてきた。前述のとおり、地方中小都市でも高度利用地区における都市再開発によって、高層建築物が建設される場合が多いため、これらの地域でも単棟の高層建築物により形成される特有な微気候があり、温熱環境に地方中小都市特有の問題が生じていると考えられる。

温熱環境を把握するうえで、まず主要なパラメータである表面温度 (T_s) を把握しなければならない。 T_s が低いほど都市空間に放出される顕熱と長波長放射は少ない (またはより多くの顕熱と長波長放射を都市環境から吸収する) ため、都市の温熱環境の重要な指標として、定量的に評価する必要があると考えられる。市街地における T_s の特性を把握するためには、リモートセンシング技術による放射温度 (T_r) の分布を取得することが有効である。都市規模のヒートアイランド現象は、衛星リモートセンシングによる調査が行われてきている^[1-15~1-17]。地域スケールでは、 T_r の詳細分布や、都市の形状、及び表面の材料の影響を分析するために、航空機リモートセンシングが適用されている^[1-18~1-20]。 T_s の主な形成要因である微気候と放射収支を解明するためには、現地実測もしくは数値シミュレーションが必要である。これらの物理量は、航空機リモートセンシングによって直接得ることができないためである。

都市部のヒートアイランド現象が問題となっているが、既往研究では、都市キャノピー空間において、日中に低温域が形成されていることが確認されている。例えば、夏季において、キャニオンの内部が夜間のヒートアイランドになったにもかかわらず、深いストリートキャニオン (建物の高さは道路幅より数倍大きい) 内の気温 (T_a) は外側の T_a よりも低い状

況が示された^[1-21~1-23]。また放射収支に関して、天空率の減少が大気放射冷却を弱め、夜間の都市キャノピーにおける T_s と T_a の減少を妨げることが示された^[1-24,1-25]。上記の研究は都市キャノピーの空間的形態、 T_a と放射収支との関係にのみ注目し、単棟の高層建築物が T_s や T_a といった微気候へ及ぼす影響を明らかにしていない。具体的には、単棟の高層建築物が各季節において、周辺に高温の環境をもたらすのか、または都市キャノピー空間で示唆されたような低温の環境をもたらすのかは明白ではない。また、以上のように高解像度のリモートセンシング観測による熱画像と数値シミュレーションとの比較により、 T_s や T_a の形成メカニズムを明らかにする試みが重要と考えられるが、都市キャノピー空間を対象とした一部の先駆的な研究^[1-26, 1-27]を除いて実施されていない。

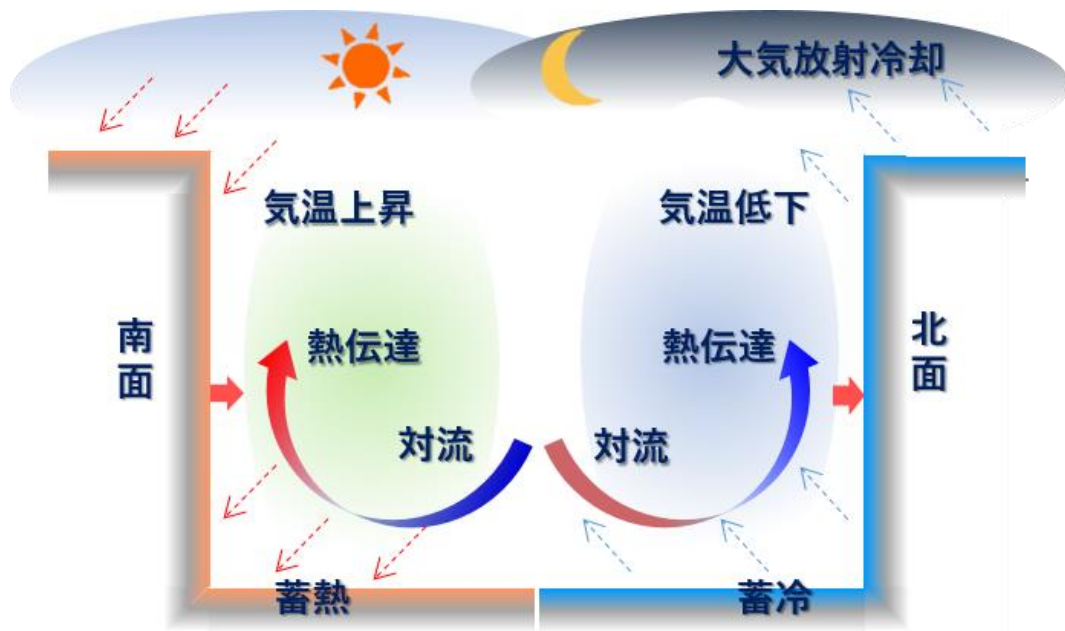


図 1.2 高層建築物の表面と近傍空間で起きる熱的な現象

1.3 研究の目的

高層建築物が周辺低層エリアの温熱環境へ及ぼす影響及びその形成機構を観測と数値解析の手法を用いて明らかにしたうえで、高層建築物周辺の温熱環境を評価することを目的とする。

具体的には、以下のことを実施する。

- 1) 航空機リモートセンシング観測と移動観測により、高層建築物周辺の温熱環境の実態を把握する。
- 2) 数値解析（熱収支シミュレーションと CFD 解析との連成解析）により、冬季における高層建築物周辺の温熱環境の形成機構を明らかにする。
- 3) 既往の環境アセスメント手法と比較しながら、今後の環境アセスメントに向けた知見を得る目的で、冬季において高層建築物が周辺エリアの温熱快適性に及ぼす影響を評価する。

1.4 研究の構成

本研究の全体の概要を図 1.3 に示す。本論文は序論と結論を含め、全 7 章から構成される。各章の構成は次の通りである。

第 1 章「序論」では、研究の背景を述べ、既往研究と比較しながら課題を整理し、高層建築物が周辺低層エリアの温熱環境へ及ぼす影響を明らかにして評価する目的を明確にした。

第 2 章「航空機リモートセンシングと数値解析による高層建築物周辺の放射温度分布の実態把握」では、航空機リモートセンシング観測と熱収支解析により高層建築物が周辺低層市街地の放射温度に与える影響を明らかにする。具体的には、航空機リモートセンシング観測による熱画像から放射温度分布の実態を把握し、熱収支シミュレーションによる放射温度分布を解析したうえで、両者の比較を通して、放射温度分布から見られる高層建築物の影響を明らかにする。

第 3 章「冬季における高層建築物周辺の温熱環境の実測」では、2 章にて冬季に放射温度の低下を確認した高層建築物周辺に形成される温熱環境の実態を明らかにする。具体的には、移動観測方法を検討したうえで、気温・気流分布、および放射収支の実態把握を行い、それぞれの関係性を分析する。また 2 章で指摘した局所的な蓄冷がある可能性に対し、その形成要因の一つである地表面近傍での冷氣生成を指摘する。

第 4 章「熱収支解析と CFD の連成解析手法に関する検討」では、2 章と 3 章で高層建築物周辺の温熱環境を検討した結果より示された冷氣との相互作用による蓄冷の可能性に対して、数値解析の手法で形成機構を確認するため、熱収支シミュレーションと CFD との連成解析の手法について検討する。

第 5 章「高層建築物周辺の温熱環境の形成機構に関する熱収支・気流の連成解析」では、土浦駅前地域を対象として、冬季における高層建築物周辺の温熱環境（蓄冷現象と冷氣生成）の形成機構を熱収支解析と CFD の連成解析手法を用いて、明らかにする。

第 6 章「高層建築物周辺の微気候を考慮した温熱環境評価」では、5 章で得られた知見に基づいて、高層建築物の影響に対し、従来の環境アセスメントの評価方法を踏まえたうえで、今後の温熱環境を考慮した環境アセスメントに関する知見を得る目的で、冬季における高層建築物周辺の温熱快適性を評価する。

第1章 序論

第7章「結論」では、本研究の総括と今後の予定を述べる。

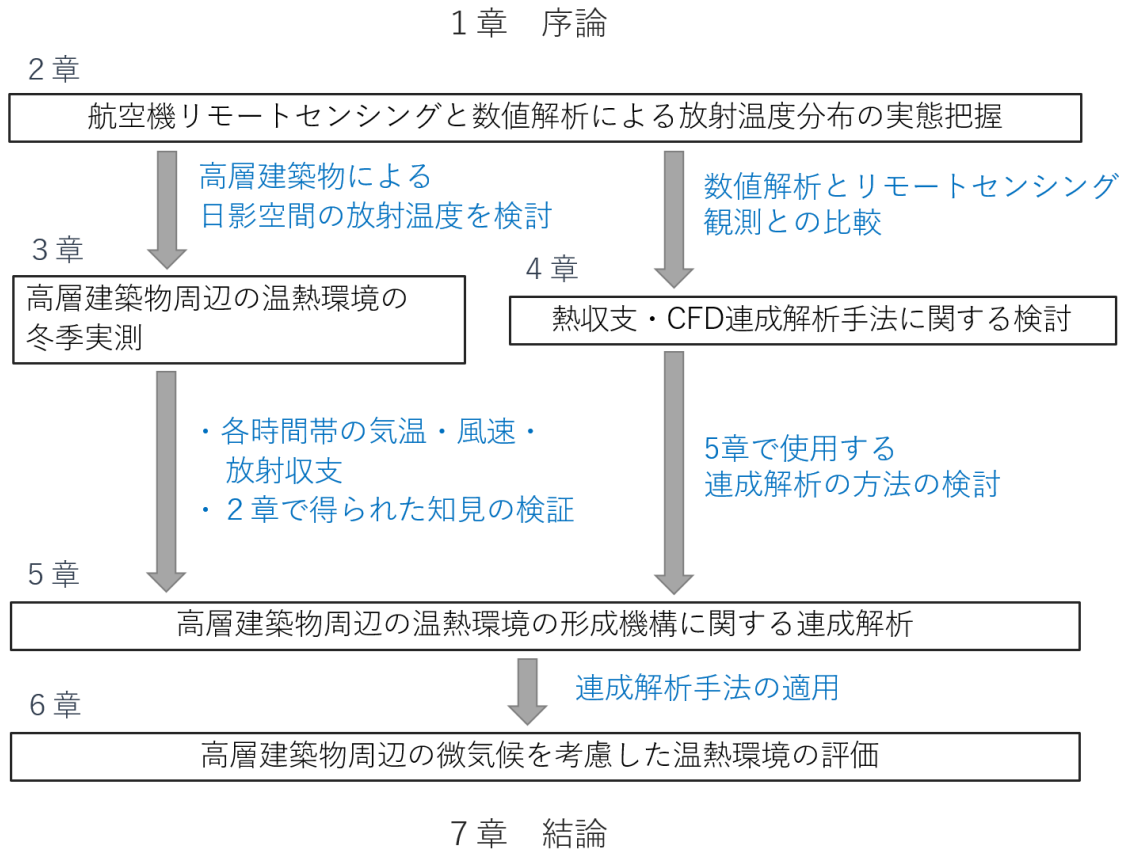


図 1.3 本研究の構成

参考文献

- [1-1] 成田健一：汐留エリアの高層ビル群による風環境の変化に関する風洞実験，日本建築学会技術報告集，24, pp.237-240, 2006.
- [1-2] 田中博春，瀬戸芳一，三上岳彦，又吉直樹：汐留地区のビル群が海風の風下地域に及ぼす影響評価(3)：パイロットバルーン・ヘリコプタ・ドップラーライダーによる同期観測の結果から，日本気象学会大会講演予稿集，pp.258, 東京，2007.5.
- [1-3] 建築環境・省エネルギー機構，CASBEE-HI(ヒートアイランド)，2010.
- [1-4] Giridharan R., Ganesan S., Lau S.S.Y. 2004. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 36(6): 525-534.
- [1-5] Wa-Gichia M. 1998. THE HIGH-RISE OPPOSING FACADE IN CLEAR SKY CONDITIONS—NOT ALWAYS AN “OBSTRUCTION” TO DAYLIGHT. *Solar Energy*, 64(4-6): 179-188.
- [1-6] Danks R., Good J., Sinclair R. 2016. Assessing reflected sunlight from building facades: A literature review and proposed criteria. *Building and Environment*, 103: 193–202.
- [1-7] Murakami S. 1983. Turbulence characteristics of wind flow at ground level in built-up area. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 15: 133–134.
- [1-8] Kawamura S., Kimoto E., Fukushima T., Taniike Y. 1988. Environmental wind characteristics around the base of a tall building - a comparison between model test and full scale experiment -. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 28: 149–158.
- [1-9] Stathopoulos T. 1985. Wind environmental conditions around tall buildings with chamfered corners. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 21: 71–87.
- [1-10] Tsang C.W., Kwok K.C.S., Hitchcock P.A. 2012. Wind tunnel study of pedestrian level wind environment around tall buildings: Effects of building dimensions, separation and podium. *Building and Environment*, 49: 167–181.
- [1-11] Mochida A., Tominaga Y., Murakami S., Yoshie R., Ishihara T., Ooka R. 2002. Comparison of various $k-\epsilon$ models and DSM applied to flow around a high-rise building - Report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment. *Wind Struct.*, 5: 227–244.
- [1-12] Tominaga Y., Mochida A., Shirasawa T., Yoshie R., Kataoka H., Harimoto K., Nozu T. 2004. Cross comparisons of CFD results of wind environment at pedestrian level around a high-rise building and within a building complex. *J. Asian Archi. Build.*, 3: 1-8.
- [1-13] Ashie Y., Komatsu N., Kono T., Takahashi K. 2005. Numerical simulation of urban

- thermal environment in the waterfront area of Tokyo. Rep. Earth Simulator Center, 83–87.
- [1-14] Masuda M., Ikeda N., Seno T., Takahashi N., Qjima T. 2005. A basic study on utilization of the cooling effect of sea breeze in waterfront areas along Tokyo Bay. *J. Asian Archi. Build.*, 4: 483–487.
- [1-15] Roth M., Oke T.R., Emery W.J. 1989. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *Int. J. Remote Sens.*, 10: 1699–1720.
- [1-16] Chen X.L., Zhao H.M., Li P.X., Yin Z.Y. 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sens. Environ.*, 104: 133–146.
- [1-17] Weng Q., Lu D., Schubring J. 2004. Estimation of land surface temperature - vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sens. Environ.*, 89: 133–146.
- [1-18] Barring L., Mattsson J.O., Lindqvist S. 1985. Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in malmö, Sweden. *J. Climatol.*, 5: 434–444.
- [1-19] Eliasson I. 1992. Infrared thermography and urban temperature patterns. *Int. J. Remote Sens.*, 13: 869–879.
- [1-20] Kottmeier C., Biegert C., Corsmeier U. 2007. Effects of Urban Land Use on Surface Temperature in Berlin: Case Study. *J. Urban Plan. D-ASCE.*, 128: 128–137.
- [1-21] Bourbia F., Awbi H.B. 2004. Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate Part 1: Air and surface temperature measurements. *Renew. Energ.*, 29: 249–262.
- [1-22] Johansson E. 2006. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41: 1326–1338.
- [1-23] Georgakis Ch., Santamouris M. 2006. Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. *Energy and Buildings*, 38: 367–376.
- [1-24] Nunez M., Oke T.R. 1976. Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere II: Within an urban canyon. *Bound.-Lay. Meteorol.*, 10: 121–135.
- [1-25] Oke T.R. 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Int. J. Climatol.*, 1: 237–254.
- [1-26] Hénon A., Mestayer P.G., Lagouarde J., Voogt J. 2012. An urban neighborhood temperature and energy study from the CAPITOUL experiment with the SOLENE

model Part 1: analysis of flux contributions. *Theoretical and Applied Climatology*, 110: 177-196.

- [1-27] Hénon A., Mestayer P.G., Lagouarde J., Voogt J. 2012. An urban neighborhood temperature and energy study from the CAPITOUL experiment with the SOLENE model Part 2: influence of building surface heterogeneities. *Theoretical and Applied Climatology*, 110: 197-208.

注釈

- 注 1-1) 建築基準法：建築基準法（昭和 25 年 5 月 24 日法律第 201 号）は、国民の生命・健康・財産の保護のため、建築物の敷地・設備・構造・用途についてその最低基準を定めた日本の法律である。前身は市街地建築物法（大正 8 年法律第 37 号）である。
- 注 1-2) ミニアセス：簡易な環境アセスメント
- 注 1-3) 高度利用地区：高度利用地区とは、都市計画法第 8 条に規定されている「地域地区」の 1 つである。都市計画法第 9 条に定める「用途地域内の市街地における土地の合理的かつ健全な高度利用と都市機能の更新とを図るため、建築物の容積率の最高限度及び最低限度、建築物の建ぺい率の最高限度、建築物の建築面積の最低限度並びに壁面の位置の制限を定める地区」である。用途地域の指定があるところに重ねて指定され、用途地域の指定を補完する。小規模建築物の建築を抑制するとともに建築物の敷地内に有効な空地を確保することで土地の高度利用に特化した制限を設ける地区に定められる。高度利用地区内においては、建築物の容積率・建ぺい率・建築面積・壁面の位置は、都市計画で定められた内容に適合するものでなければならない（建築基準法第 59 条より）。具体的な制限内容は自治体によって異なる。「高度利用」とは有効活用という趣旨であり、建築物の「高さ」そのものは他の規制に反しない限り制限されない。なお、市街地再開発事業の施行区域は高度利用地区内である必要はない（都市再開発法第 3 条より）。

第 2 章

航空機リモートセンシングと数値解析による 高層建築物周辺の放射温度分布の把握

- 2.1 はじめに
- 2.2 航空機リモートセンシングによる観測
 - 2.2.1 対象市街地
 - 2.2.2 観測方法
 - 2.2.3 観測概要
 - 2.2.4 気象条件
 - 2.2.5 幾何補正
 - 2.2.6 大気補正
- 2.3 航空機リモートセンシングによる対象地の放射温度の観測
 - 2.3.1 地表面表面材料の放射率の扱い
 - 2.3.2 表面の放射率による T_r と T_s の違い
 - 2.3.3 夏季昼間の放射温度分布
 - 2.3.4 冬季昼間の放射温度分布
 - 2.3.5 冬季日没後の放射温度分布
 - 2.3.6 北側市街と旧市街の比較
- 2.4 熱収支シミュレーションの方法
 - 2.4.1 解析用 3D モデリングと計算アルゴリズム
 - 2.4.2 対象市街地の CAD モデルの作成
 - 2.4.3 解析条件
- 2.5 熱収支シミュレーションによる対象地の放射温度分布
 - 2.5.1 夏季昼間の放射温度分布
 - 2.5.2 冬季昼間の放射温度分布
 - 2.5.3 表面温度の形成機構
- 2.6 航空機リモートセンシングと熱収支シミュレーションとの放射温度の比較
 - 2.6.1 夏季昼間の比較
 - 2.6.2 冬季昼間の比較
 - 2.6.3 考察
- 2.7 まとめ
- 参考文献

2.1 はじめに

表面温度 (T_s) は都市気候学や微気候学で重要視され、街区の温熱環境を把握するうえで、重要な要素である。 T_s が高くなると、表面から大気への対流熱伝達量 (顕熱流量) と長波長放射量が促進され、逆に T_s 自体は周囲からの短波長放射や長波長放射、顕熱フラックスなどの熱収支要素によって左右される。したがって、 T_s は表面の熱収支が平衡状態になった結果の指標として見なすことができる。

これまでの研究では、都市域の放射温度 (T_r) を観測し、そこから T_s ^[2-1]を推定するためにリモートセンシング技術が適用されてきた (T_r と T_s との関連性は 2.3.1 節にて説明)。リモートセンシングの利点として、一回の観測で広範囲をカバーし、少ない時間で充実なデータを取得することが可能であることが挙げられる。衛星リモートセンシングは、広範囲に及ぶ観測をすることができ、対象都市域全体に対する T_r の平面分布を観測することができる^[2-2]。熱赤外域においては、衛星リモートセンシングの空間分解能は 100m 以下で比較的粗い。これは 1 画素 (ピクセル) が建物、地面、樹木、及び他の都市構成要素の T_r を含んでいる。このような混合ピクセルはミクセルとして知られている。地表面ヒートアイランド (SUHI)^[2-2]を示すための衛星リモートセンシングにおいては、地表面温度もミクセルで評価される。SUHI と土地被覆との関係については既に多くの研究がなされている^[2-3~2-7]。

より領域の狭い地域~都市スケールでは、航空機リモートセンシング技術が適用されてきた。飛行高度が低い場合、航空機リモートセンシングは都市構成要素をより高い空間分解能 (1m 以下) で識別することができる^[2-8~2-10]。天底観測では得られない三次元 (3D) 都市構造の鉛直面に対しては、地上観測も適用されてきた^[2-11, 2-13]。しかし、密集した複雑な都市の空間形態に隠れた表面に対して、面全体を観察する場合には、天底観測と地上観測両方ともに限界がある。さらに、リモートセンシングによる鉛直面に対する入射角は、地上観測を適用しても比較的大きい。またこれは入射角の依存性によって表面放射率の違いを引き起こすため、 T_r が T_s から大幅に離れる原因となる^[2-13]。Voogt et al.^[2-14, 2-15]は航空機リモートセンシングと地上リモートセンシングを組み合わせて都市の全表面の T_s を調べている。

T_s の特性を分析するもう 1 つの方法は数値シミュレーションである。この方法は、モデル化や仮定によって避けられない限界があるが、都市の全表面を含む熱収支の理論に基づいて都市の T_s 及びその形成機構を解析することができる^[2-11, 2-16~2-19]。これまでの多くの研究は、都市気候学の観点から、都市キャノピー層とその上空の大気との平均的な熱交換に注目していたため、シミュレーションの研究の多くは単純形状の建物を使用し、単一な材料が設定された。しかし、建物周辺の微気候を分析するマイクロスケールでは、都市表面の空間形態や構成材料によって T_s 分布は複雑である^[2-14, 2-20, 2-21]。したがって、詳細を考慮できるシミュレーションモデルを用いて都市の T_s を詳しく評価する必要がある。実在都市の空間

第2章 航空機リモートセンシングと数値解析による 高層建築物周辺の表面温度分布の把握

形態と構成材料を考慮して、 T_s 分布を計算できるシミュレーションモデルがいくつか存在する。SOLENE ソフトウェアは、都市地域スケールで熱放射収支を計算するモデルの1つである^[2-17]。SOLENE は当初、光環境の評価と設計のために作成され、都市部の熱放射によるエネルギー交換と T_s を解析できるように改良された。他のモデルは、浅輪ら^[2-22]によって開発された 3D CAD (Computer-Aided Design) 対応熱収支シミュレーションモデルが挙げられる。このモデルは、3D CAD システムと高解像度のメッシュを使用することによって、詳細な 3D 形状（ベランダ、バルコニー、庇やペントハウスなど）と材料の分布（窓、地面の被覆や植生）を再現して分析することができる。両者では、 T_s を計算する基本方程式はほぼ同様であるが、SOLENE モデル（m スケール）よりも熱収支シミュレーションモデル（浅輪らのモデル）の形状や空間分解能のほうの再現性が高い（dm スケール）。これは、熱収支シミュレーションモデルが、都市空間におけるマイクロスケールの熱放射環境及び歩行者を取り巻く微気候を評価することに注目しているためである。

前述したように、リモートセンシング技術と数値シミュレーションは、都市の T_s を研究するうえで、それぞれ利点と限界がある。Hénon et al. は都市域において、都市のマクロとマイクロスケールの不均一性が表面温度に及ぼす影響を SOLENE モデルを用いて評価するために、航空機リモートセンシングの観測結果とシミュレーション結果の都市表面の放射温度の比較を行っている^[2-23, 2-24]。これは、航空機リモートセンシングデータと比較することによって、熱収支モデルを用いてモデル化した T_s に対する詳細な評価を行った先駆的な取り組みであり、その有効性が示されている。

そこで、本章では、航空機リモートセンシングで観測した高分解能の T_r と三次元の熱収支シミュレーションから計算した T_r を比較することで、放射温度 (T_r) 分布に見られる高層建築物の影響を明らかにする。

第2章 航空機リモートセンシングと数値解析による 高層建築物周辺の表面温度分布の把握

2.2 航空機リモートセンシングによる観測

2.2.1 対象市街地

日本の典型的な地方中小都市である茨城県土浦市の中心市街地を研究対象地として選定した。図 2.1 に対象市街地の航空写真と市街地内の写真を示す。この市街地は土浦駅の西側に位置し、高度利用地区を利用した再開発により大規模な建築物を有する地区（再開発地区）、その北側の小規模商店や住宅等が分布する地区（北側市街）、古くからの住宅地（旧市街）に分かれており、それぞれが隣接している。再開発地区には 31 階建ての高さ 109 m の高層建築物、ソリッドタワーをはじめ、RC（鉄筋コンクリート）造の中層の商業施設が複数存在する。北側市街には主に RC 造の中小規模建築物が、旧市街には木造の低層戸建住宅が多く分布している。このように該当街区には空間形態や構成材料にバリエーションがあり、高層建築物と周辺との高さのギャップが大きく、単棟であってもその周辺の温熱環境に大きな影響を及ぼしていると考えられることから対象地とした。

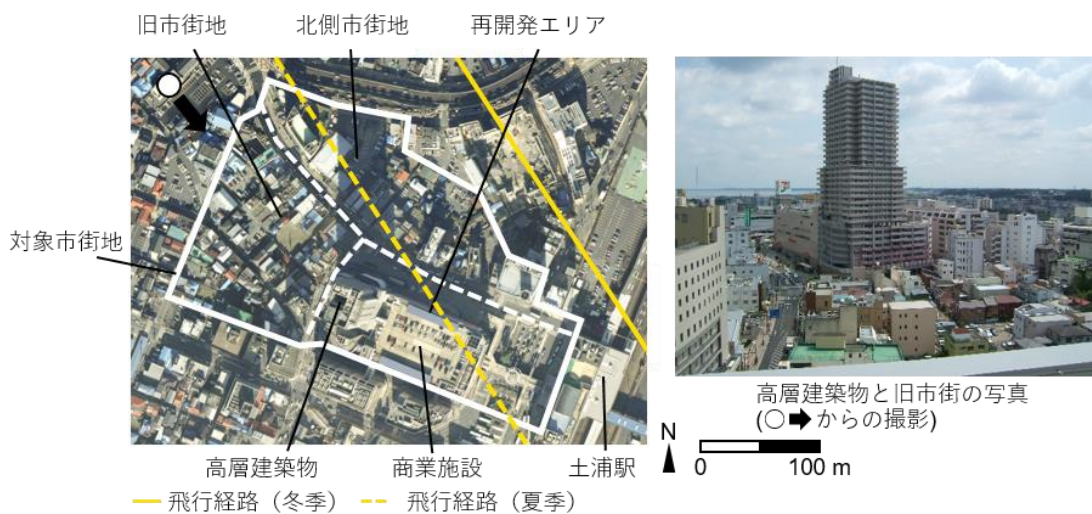


図 2.1 対象市街地と航空機リモートセンシングの飛行経路

2.2.2 観測方法

対象市街地における高解像度の放射温度 (T_r) データを取得するために、夏季と冬季両季節に対して、低高度の航空機リモートセンシング観測を行った。観測には固定翼の航空機搭載型のマルチスペクトルスキャナ (MSS) (AZM、中日本航空、名古屋) を使用した。表 2.1 に MSS の仕様と航空機リモートセンシング観測の概要を示す。可視域、近赤外域、中赤外

第2章 航空機リモートセンシングと数値解析による
高層建築物周辺の表面温度分布の把握

域、熱赤外域など複数の波長帯が選択できる。表 2.1 に使用した熱赤外域の波長帯を示す。この観測値（指向性放射輝度）をスキャナ固有の放射温度(T_r)との関係式により T_r に変換した。 T_r 測定時のスキャナ自身の精度は 0.3°C である。 T_r は表面材料の指向性放射率に加えて、大気中の分子の吸収作用や熱放射の影響を受ける。大気の影響は、大気放射伝達モデルを用いて補正することが可能である。したがって、補正後の T_r から材料の表面温度(T_s)を分析する際も表面の放射率の影響に注意が必要である。瞬間視野 (IFOV) が異なる材料を含む場合、複数の材料からの放射値が混在し、ミクセルが生じる。MSS の IFOV は熱赤外を含むすべての波長領域で小さく、従って、この特徴は都市部での高解像度観測に有利であり、ミクセルを回避し、均質なピュアピクセルをより高い精度で識別することに寄与する。

表 2.1 観測の概要と MSS の仕様

観測時間帯	2009年12月22日 12:15~12:18 2009年12月22日 16:52~16:55 2009年8月25日 13:06~13:10
観測高度	500 m
スキャナ	AZM (中日本航空)
スキャン頻度	60, 37, 19 scans/s
観測角度	80° ($\pm 40^{\circ}$)
瞬間視野	1.25 mrad
バンド数	0.40–0.85 μm : 33 bands 0.90–1.70 μm : 16 bands 1.90–2.50 μm : 6 bands
利用する熱赤外域波長帯	熱: 2 bands 中心波長: 11.82 μm 半値幅: 1.71 μm 10.96–12.67 μm
T_r の観測精度	0.3°C

2.2.3 観測概要

天底観測による航空機リモートセンシング観測は、冬季晴天日の昼間（12月22日の12:15~12:18）、冬季晴天日の日没後（2009年12月22日の16:52~16:55）、夏季晴天日の昼間（2009年8月25日の13:07~13:10）の、それぞれの時間帯で行った。冬季晴天日について、建築物の日陰になっている場所の特徴を把握する目的で昼間に、また日中に日陰になっていたことの影響を確認するために日没後にも観測を行なった。比較のために夏季の昼間にも観測を行なった。観測時刻は現地時間の日本標準時間であり、飛行経路は図 2.1 に示す。高分解能の情報を得るために飛行高度を 500 m とし、観測パスの出発地点から終着地点まで約 10km であった。対象市街地の熱画像は全撮影画像の中から抽出した。使用する

第2章 航空機リモートセンシングと数値解析による
高層建築物周辺の表面温度分布の把握

熱画像は、飛行経路に沿ってスキャンされたデータ（横方向）の積分画像である。航空機の直下における空間分解能が 0.63 m であり、観測画像の両サイドの空間分解能は 1.06m である。対象市街地における画素間の空間分解能の差は 0.16m 以内に収まっている。

2.2.4 気象条件

図 2.2 に観測日の気象条件を示す。これらのデータは 2.5 の熱収支シミュレーションにも使用する。気温 (Ta) と風速 (V) は、対象市街地の 2km 北にある土浦市の気象庁自動気象データ収集システム (アメダス) の観測値から求めた。土浦市では相対湿度 (RH) は観測されていなかったため、RH は対象市街地の 7.5km 西にあるつくば市の高層気象台の観測値から求めた。水平面全天放射量は全天日射計 (ML-020VM、EKO 英弘精機株式会社、東京) を用い、対象市街地における建物の屋上で観測した。夏季において観測時は晴れていたが、その前後には曇りの時間帯があった。V は対象市街地の夏季に平均レベルであり、日平均 Ta は夏季の平均より約 2°C 程度低くなっていた。ただし、この条件は夏季晴天日の場合を表している。観測日より前の 4 日間の平均 Ta は夏季の平均レベルであった。冬季における観測について、日中は晴れの状態であり、観測日の日平均 Ta は冬季の平均値とほぼ一致し、観測日と観測日より前の 4 日間の平均値の差は 0.5°C 以内であった。風速は平均より少し小さいが、冬季晴天日としての代表性が確認できる。

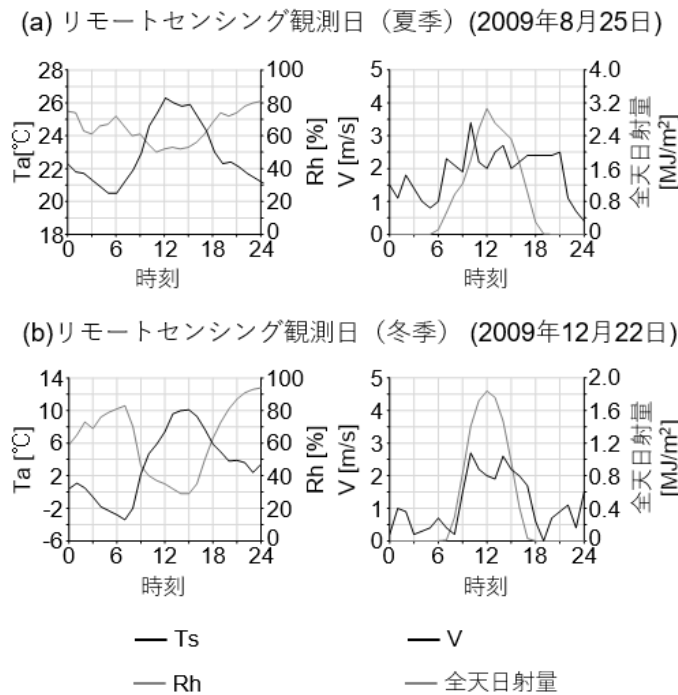


図 2.2 航空機リモートセンシング観測日の気象条件

2.2.5 幾何補正

観測システムには全地球測位システム (GPS) と慣性制御装置 (IMU) が搭載されていたが、システムの内部揺らぎや航空機の姿勢の変動により、取得した画像に揺らぎが見られた。そこで、幾何補正を実施した。対象地の 1/2500 の地理情報システム (GIS) データを用いて 1 枚の画像につき 100 点の地上基準点 (GCP) をとり、アフィン 1 次変換により幾何補正を行なった。

2.2.6 大気補正

取得した T_r には大気の吸収・散乱、大気自身の放射、地表面の放射率の影響が含まれるため、まず大気の影響の補正を行なった。冬季においては、リモートセンシング観測と同時に赤外線放射カメラ (TH9100-MR、日本アビオニクス) により地表面の T_r を観測しており、リモートセンシングの観測値と対応させることで温度回帰式を作成し補正した^[2-29]。地上観測の対象被覆は、日中については、高温の材料としてアスファルト舗装面、低温の材料として水面、中間的なものとして砂地とした。日没後については、アスファルト舗装面、草地、水面とした。

夏季においては地上観測データが得られなかったため、大気放射伝達モデル (MODTRAN 5, Spectral Science, INC. and US Air Force Research Laboratory) を用いて補正を行なった。入力データには、 T_a の鉛直分布、気圧 (P)、エアロゾルと大気分子の密度 (H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 N_2O 、 CO 、および CH_4) が含まれている。気象データとしては、土浦市のアメダスで測定した地上レベルの T_a と、対象市街地 7.5km の西に位置するつくば高層気象台で測定した T_a 、 P 、 R_h の鉛直分布を用いた。観測所は気象庁によって運営されており、毎日 09:00~21:00 に 2 回測定している。リモートセンシング観測期間の T_a の鉛直分布は T_a の地上レベルと対流圏における T_a の平均逓減率 ($-0.65^\circ C / 100m$) を用いて得られた。研究対象地における観測データがなかったため、平均逓減率を使用した。混合層の発達により、対流圏下層部の乾燥断熱減速率 ($-0.98^\circ C / 100m$) と類似する消失率である可能性があるが、 $-0.65^\circ C / 100m$ と $-0.98^\circ C / 100m$ を使うことによる T_r の差は、夏期は $0.2^\circ C$ 未満である。したがって、逓減率の仮定による影響は限定的である。エアロゾルに関しては、観測所での観測の可視範囲に従って、気象学的範囲が 23km のデフォルトの RURAL 消滅モデル^[2-30, 2-31] が使用された。水蒸気 (H_2O) については、高層気象台で測定した 09:00 の T_a 、 P 、 R_h の鉛直分布を用いて、絶対湿度の鉛直分布を求め、入力データとして放射伝達モデルに適用した。 CO_2 は 380ppm の混合比を用いた。他の大気分子については、使用した放射伝達モデルに含まれる中緯度モデル^[2-30, 2-31] を用いた。以上の条件により、複数の地表面 T_r に対して観測高度における T_r を計算した ($20\sim 60^\circ C$ 、 $10^\circ C$ 間隔)。この際、地表面放射率は 1 とし

第2章 航空機リモートセンシングと数値解析による 高層建築物周辺の表面温度分布の把握

た。観測高度における T_r と地上レベルでの T_r との間に線形関係が得られ、補正式を求めた。線形相関係数 (R^2) は各季節にほぼ 1 であるため、推定誤差を引き起こさなかったことを意味する。

2.3 航空機リモートセンシングによる対象地の放射温度の観測

2.3.1 地表面表面材料の放射率の扱い

純粋なピクセルやミクセルを含むすべてのピクセルの放射率を特定することは難しく、都市の複雑な形状を含む熱画像から放射率の影響を特定することも困難である。したがって、この項では、放射率が T_s と T_r の差に及ぼす影響を確認する。低放射率材料を含むピクセル、例えば、アルミニウム合金、亜鉛めっき鉄、およびステンレスなどの金属、花崗岩、レンガ、砂、ガラス、太陽光パネル、太陽熱集熱パネル及びその他の低放射率被覆が、得られた T_r 及び 3.4 に記載された現地調査の結果に従って同定された。その他の水平面の大部分を占めるコンクリート、アスファルト、スレート屋根、粘土屋根タイル、土壌、水及び植生などの材料の放射率は 0.90-0.99 と考えられ、大気の下向放射の反射が観測値に及ぼす影響は小さいと考えられる。これらの放射率は、各材料の一般値を記述するいくつかの文献から得られたものである。したがって、これらの材料の T_r と T_s との差が小さいと考えられる。その差を定量的に確認するために、上記の放射伝達モデルによる計算（感度分析）を行なった。夏季については、大気の入力データは 2.2.4 項のものと同様とし、地表面放射率を 1.00、0.95、0.90 にそれぞれ設定して計算を行った。冬季昼間についても、夏季と同様の方法で気象データから入力データを作成し、地表面放射率を 1.00、0.95、0.90 に設定して計算を行なった。冬季日没後については、21:00 の高層気象台のデータを使用して計算を行なった^{注 2-1)}。これらの計算はいくつかの T_s 値について実行され、 T_r と T_s との関係を調べた。計算には建物は含まれていなかった。全ての計算において天空率は 1 とし、空からの大気放射と放射率の影響が支配的であった。

2.3.2 表面の放射率による T_r と T_s の違い

図 2.3 に放射率 1.00 のときの地表面の T_r ($T_{r=1,ground}$) ごとの $\Delta T_r (= T_{r<1,remote} - T_{r=1,remote})$ を示す。 $T_{r<1,remote}$ は地表面放射率を 1 より小さく（本計算では 0.95 と 0.90）設定して大気放射伝達モデルにより計算した観測高度における T_r であり、 $T_{r=1,remote}$ は放射率を 1.00 として計算した T_r である。 ΔT_r は大気補正済の T_r と $T_{r=1,ground}$ の差を表す。夏季において放射率が 0.95 のとき、 $T_{r=1,ground}$ が 26.2° C (T_a に等しい) に対して ΔT_r は -1.4° C であ

る。放射率が 0.90 のとき ΔTr は 2 倍になるが、市街地では天空率が本計算に比べて低い
ため、実際の $|\Delta Tr|$ はこの値よりも小さいと考えられる。冬季の昼間において放射率が 0.95
のとき、 $Tr_{=1, ground}$ が $8.1^\circ C$ (Ta に等しい) に対して ΔTr は $-2.6^\circ C$ である。冬季にお
いて $|\Delta Tr|$ が大きいのは、夏季に比べて大気透過率が高いためである。以上より、放射率が
比較的高い材料に対しては、大気の下向放射の反射の影響は $1\sim 3^\circ C$ 程度であることを確
認した。この差は、以下の Tr と Ts を分析するうえでの許容範囲内であり、2.6 節にて Ts
を検証する目的で、 Tr の観測値と計算値を比較する際に考慮することとする。

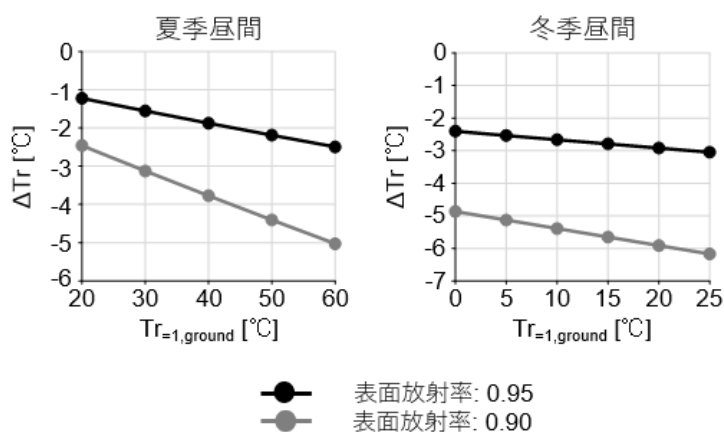


図 2.3 放射率が 1 のときの Tr (Ts) に対して、平坦な表面で放射率=1.00 と放射率
<1.00 との間の Tr の差 (ΔTr)

2.3.3 夏季昼間の放射温度分布

図 2.4 は夏季昼間のリモートセンシングによる Tr の分布を示す。全街区にわたって、場
所により、表面の放射温度が異なり、分布が確認できる。午前中には曇りの時間帯があっ
たにも関わらず、代表気温(Ta') が $26.2^\circ C$ に対して、図 2.4 の (a) は屋根面の Tr が $60^\circ C$
に達したことを示し、それは Tr が Ta より $35^\circ C$ 高くなっていることを意味している。 Tr は
道路の舗装面によって異なっていて、日向のアスファルト舗装では $50\sim 55^\circ C$ に達している
(図 2.4 の (b))。しかし、これらの日向に位置する材料であっても、午前中の建物の影の
影響や、熱容量の大きい材料の熱伝導が不安定であるため、 Tr 値が比較的に低いことが図
2.4 の (c) に示されている。車や路面標示も Tr の分布に影響を与えた。図 2.4 の (d) は、
車体の Tr が $40\sim 45^\circ C$ であることを示している。これらの表面の Ts については、材料の放
射率が低いため議論されていない。図 2.4 の (e) に示すように、白線の Tr は周囲の舗装よ
りも数度低くなっていた。日向の樹木の Tr は Ta より $2\sim 4^\circ C$ しか高くない (図 2.4 (f))。

ビルの近くの影のあるエリアの T_r は T_a との差が小さい (図 2.4 (g))。これらの地域では、図 2.4 (h) に示すように、 T_r は建物の近くに向かって低くなる。日陰に位置する低木 (図 2.4 (i)) の場合、 T_r は T_a より $1\sim 3^\circ\text{C}$ 低くなっている。すなわち、実際の T_s は、前項で議論された放射率の効果に従って T_a と同等かそれ以下であると考えられる。図 2.4 (j)、(k) にそれぞれ示されたように、金属屋根や石材の場合、 T_r は T_a よりも低い。しかしながら、実際の T_s は、それらの材料の放射率が低いため、 T_a よりも高いと考えられる。夏季の太陽高度が高いため、高層建築物の日影によって放射温度が低い場所が広がっていない。

図 2.5 に T_s が T_a よりも低い場所を示す。すなわち 2.3.1 の放射率 0.95 の場合の結果から、 T_r が 24.8°C 以下の部分を抽出した。このうち多くが金属屋根や石材など放射率が低い材料であり、実際に T_s が低いのは日陰の植生や建物等の隙間でほとんど日射が当たらない一部の部分であった。

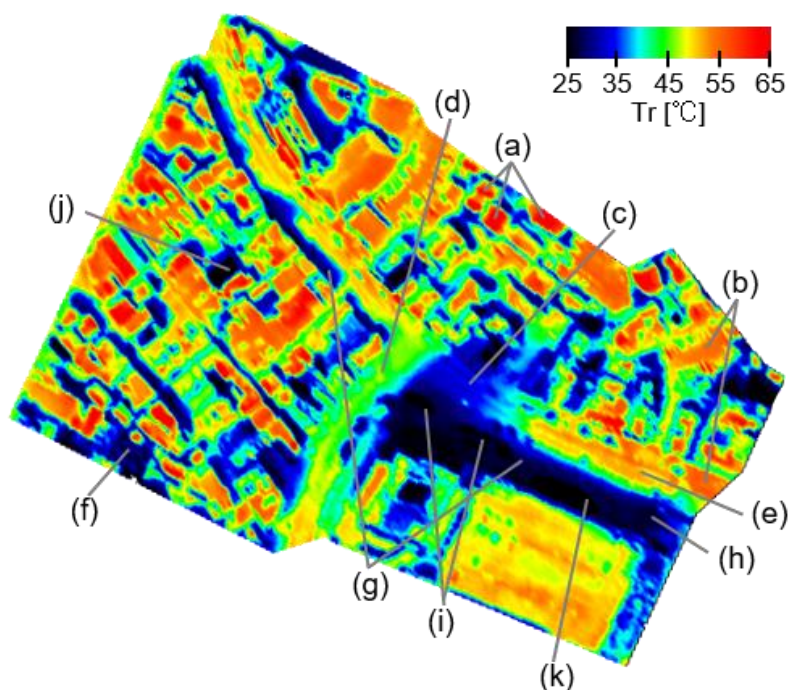


図 2.4 リモートセンシング観測による放射温度 (T_r) の分布 (夏季昼間)

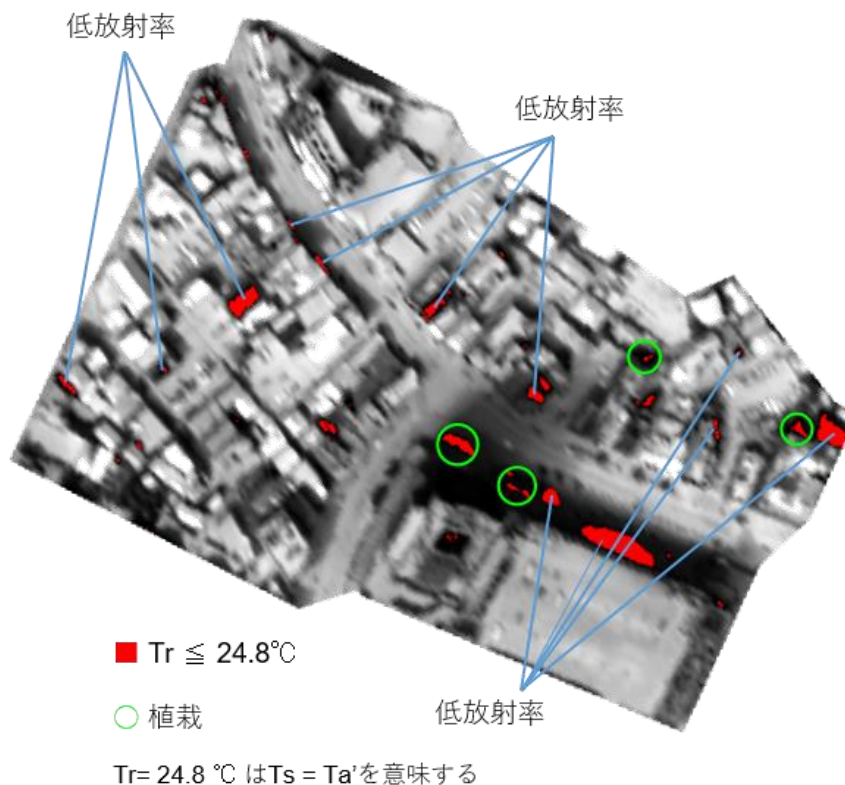


図 2.5 表面温度 T_s が代表気温 T_a' 以下となる放射温度 Tr を示すピクセル (夏季昼間)

2.3.4 冬季昼間の放射温度分布

図 2.6 は、冬季昼間のリモートセンシングによる Tr の分布を示す。夏季と同じく、表面の放射温度の分布が確認できる。図 2.6 (a) に屋根面が 30°C に達したことを示している。すなわち、 Tr と T_a の差は 20°C 以上である。早朝から日射に晒された アスファルト舗装の Tr は $20\sim 23^{\circ}\text{C}$ である (図 2.6 (b))。高層建築物の北側の建物では、高層建築物の日影に位置するため、屋根と舗装でも Tr はそれぞれ T_a よりも低い (図 2.6 (c)、図 2.6 (d)) ことが見られた。同地点では、夏季において、 Tr は T_a より $25\sim 30^{\circ}\text{C}$ 高くなっていた。図 2.6 (e) では、夏季の結果と同様に、日陰の低木では Tr が T_a より $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 低いことを示している。植物付近の舗装での Tr は約 0°C であり (図 2.6 (f))、したがって T_s は T_a よりも 5°C 以上低い可能性が高いと考えられる。夏季には、 T_a より低い Tr 値は日陰の植物にのみ示された。しかし、冬季には、より低い水蒸気圧によって、大気放射冷却がより大きかったため、低い Tr 値は日影空間に広く分布した。日影空間であっても、 Tr にバリエーションがあり、特に建物に囲まれた駐車場 (図 2.6 (d)) や高層建築物と隣接する商業施設の前の歩道

など(図2.6 (f))では T_r は極端に低いことが確認できた。それは周囲の三次元構造や材料の熱容量の違いによる蓄熱の違いが T_r のバリエーションを引き起こしたと考えられる。可能な物理的プロセスは5章で議論される。全体的に、冬季では太陽高度が夏季より低いため、高層建築物及び隣棟の商業施設による日影空間が広範囲に及んでいる。その空間では、地面のみならず建物屋根面の放射温度の低下が見られる。

図2.7に T_s が T_a' よりも低い場所を示す。夏季においては T_s が T_a' よりも低い場所は日陰の植生など一部だけであったが、冬季においてはそのような場所が広く分布していて、放射温度が気温より $6\sim 7^\circ\text{C}$ 低くなっている箇所が多数存在している。これは冬季においては日陰が広範囲に渡っていることに加えて、大気放射冷却が顕著になったためである。また、建物付近で T_r が低くなっていることから蓄冷の影響の可能性も考えられる。さらに、旧市街に比べて北側市街では、 T_a' より低い部分が面的に分布しており、高層建築物の影響が表れている。

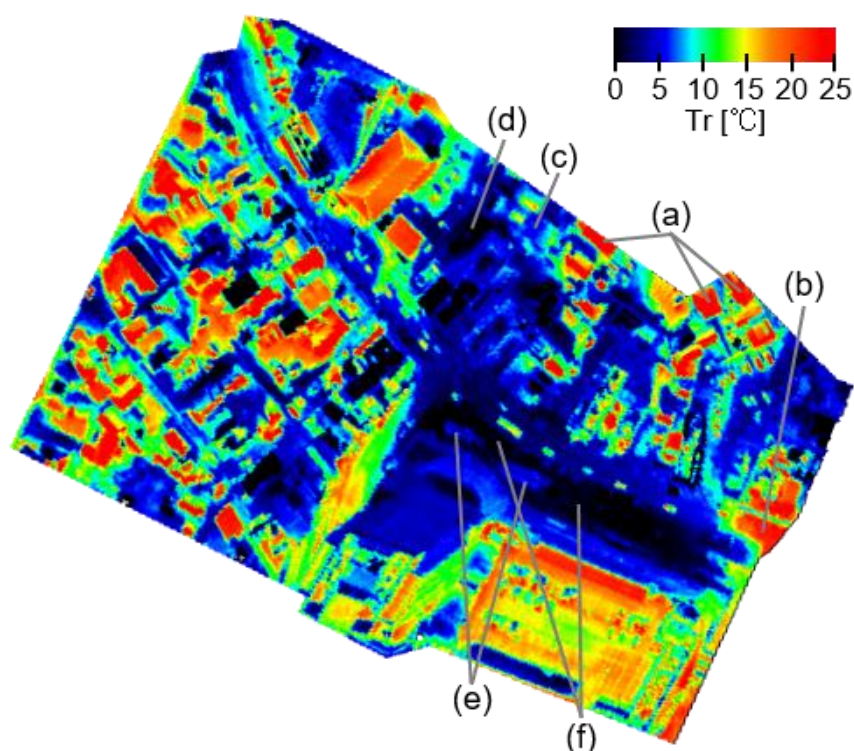


図2.6 リモートセンシング観測による放射温度 (T_r) の分布 (冬季昼間)

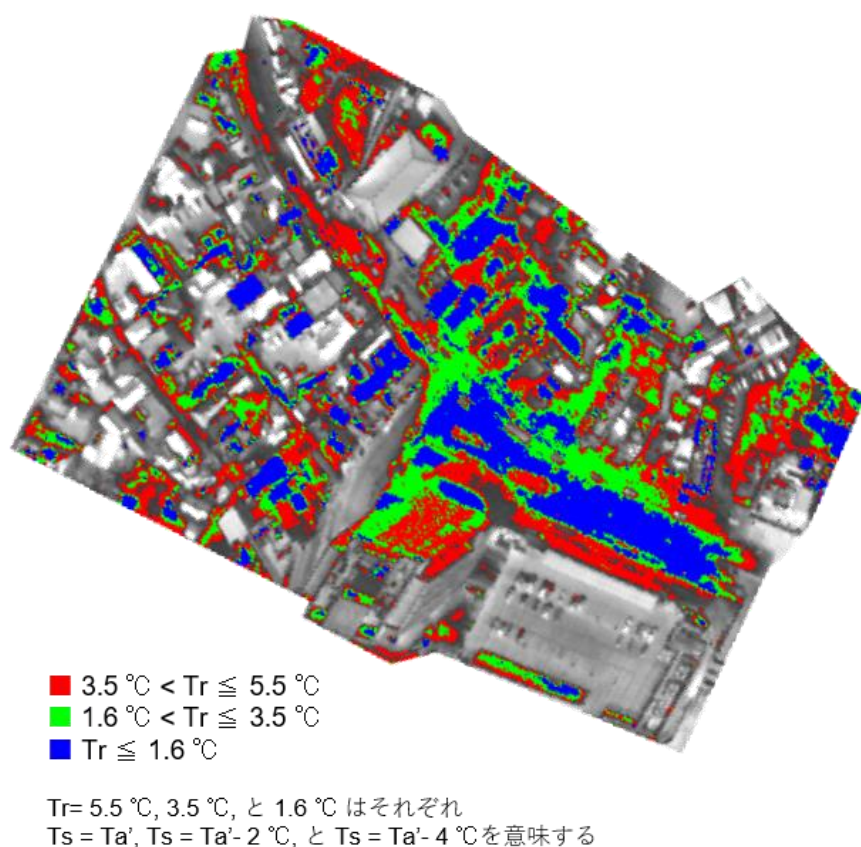


図 2.7 表面温度 T_s が代表気温 Ta' 以下となる放射温度 Tr を示すピクセル (冬季昼間)

2.3.5 冬季日没後の放射温度分布

最も Tr が高いのは長時間日射が当たっていた舗装面で 9°C 以上である (Ta' は 7.9°C) (図 2.8 (a))。旧市街には Tr が Ta' 相当の道路や駐車場が見られる (図 2.8 (b)) が、北側市街にはほとんど見られない。北側市街では周囲に高い建物がない駐車場の Tr も低い (図 2.8 (c))。また、住宅地内には道路であっても低い Tr が見られる (図 2.8 (d))。これらは高層建物による日陰の影響と考えられる。高層建築物と商業施設前の歩道は昼間では最も Tr が低かったが、夜間においては熱容量の小さい材料に比べて高くなり $-1\sim 0^{\circ}\text{C}$ である (図 2.8 (e))。若干放射率が低いことを考慮しても、熱容量の小さい屋根面が最も Tr が下がり -2°C 以下となった (図 2.8 (f))。これは特に旧市街に多く見られる。日没直後であっても大気放射冷却の影響が大きいことが分かる。

T_s が Ta' より低い場所を抽出すると (図 2.9、2.3.1 項の昼間と 21 時の計算結果の平均値を閾値とした)、北側市街においては $\langle Ta' - 2^{\circ}\text{C} \rangle \sim Ta'$ 相当の領域が面的に広がっており、

第2章 航空機リモートセンシングと数値解析による 高層建築物周辺の表面温度分布の把握

全体的に T_r が低い。旧市街では北側市街に比べて、 $\langle Ta'-2^\circ C \rangle \sim Ta'$ 相当の割合は小さいが、 $\langle Ta'-6^\circ C \rangle$ 以下と極端に低くなっている場所は多く見られる。なお、基準とした Ta' に関して、3章の図3.1と3.4節で述べる移動観測の結果(図3.6)を比較すると、17時と19時において市街地の Ta の方がアメダス観測サイトの Ta' よりも高い。すなわち、実際の市街地内の Ta と T_s の差はより大きかったと考えられる。

以上より、冬季における高層建築物の日影空間では、低温化の現象が起き、低温化の原因としてまず考えられるのが上空大気への放射冷却(夜間放射)である。しかしながら、より低温の地表面は高層建築物の日陰空間に集中してあり、長時間の日陰による地表面の蓄冷や高層建築物周囲に特有の微気候の影響を受けていることが推測される。

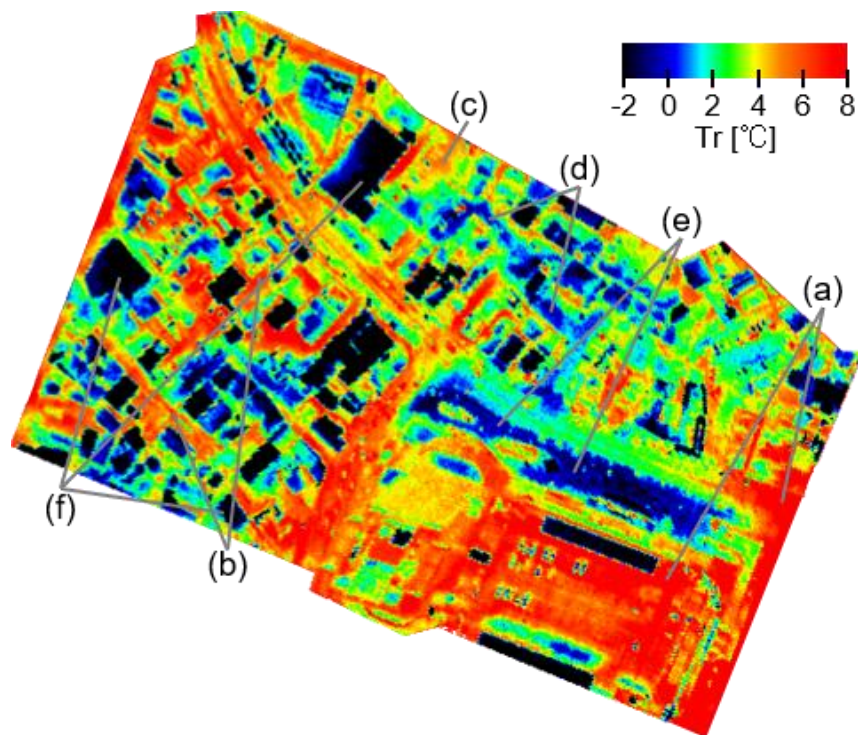


図 2.8 リモートセンシング観測による放射温度 (T_r) の分布 (冬季夜間)

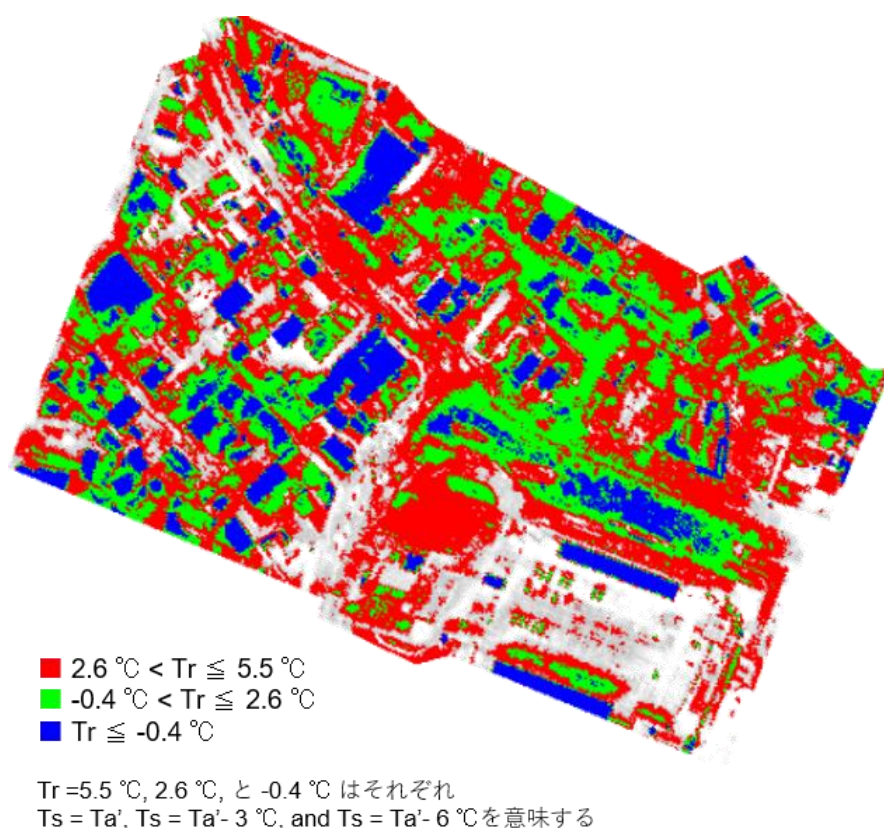


図 2.9 表面温度 T_s が代表気温 Ta' 以下となる放射温度 Tr を示すピクセル (冬季夜間)

2.3.6 北側市街と旧市街の比較

上記の特徴を定量的に確認するために、北側市街と旧市街において Tr のヒストグラムを作成した。図 2.10 に各季節・時刻の結果を示す。夏季昼間においては北側市街と旧市街ではほぼ差がなく、ピークは Tr が $\langle Ta' + 25^{\circ}\text{C} \rangle$ であり、 25°C 以下は極端に少ないという分布である。冬季昼間においては、2.3.1 項の結果を考慮して T_s に換算してもピークは Ta' より低い。また夏季とは異なり、北側市街と旧市街では大きな差が見られる。 Tr が $0 \sim 5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ において北側市街では旧市街より出現割合が顕著に多く、高層建築物の日陰が大きく影響していると考えられる。夜間においては、 Tr が 6°C 以上の頻度について、北側市街の方が旧市街より顕著に少ない。北側市街には熱容量の大きい材料が多く分布するが、日中に日陰になったことで、建物付近と同様に蓄冷の影響が生じていると考えられる。旧市街では蓄熱の影響で Tr が高い部分が残る一方で、熱容量の小さい木造の建物が多いため低い Tr を示す部分も多く、全体的になだらかな分布である。

以上より、夏季よりも冬季において、日陰部に T_s が低い空間が形成され、その範囲も冬

第2章 航空機リモートセンシングと数値解析による
高層建築物周辺の表面温度分布の把握

季の方が大幅に広い。特に、日陰部にある材料の熱容量により広い範囲で蓄冷が顕著に見られることを確認した。そこで次章(3章)において、 T_a への影響やその形成要因について、エリアごとに移動観測結果を分析することで考察する。

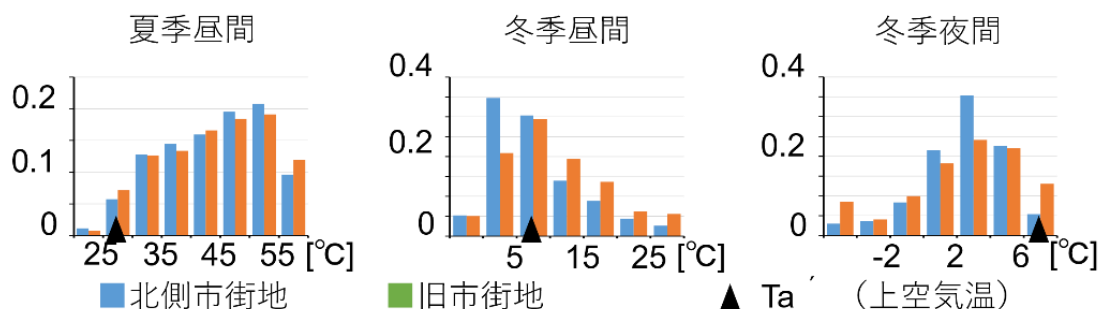


図 2.10 北側市街と旧市街における放射温度 T_r のヒストグラム

2.4 熱収支シミュレーションの方法

2.4.1 解析用 3D モデリングと計算アルゴリズム

熱収支シミュレーションモデル^[2-22]を用いて、対象市街地の 3D の T_s 分布を算出した。まず、建物、樹木、その他の構造物の三次元空間形状や二次元 (2D) の地面を 400mm メッシュサイズのボクセルメッシュに分割した。ボクセルは、3D 空間内の規則的な格子状の値を表し、表面に関するいくつかの情報及び構成材料を含む。各表面ボクセルについて、表面の法線ベクトル及び構成材料が含まれ、熱収支及び一次元の非定常熱伝導が計算される。使用された方程式は付録 1 に示されている。

レイトレーシング法を用いて、ボクセルが受けた直達日射量 (IDR) を解析した。日射吸収率と表面の法線ベクトルを用いて IDR の吸収量を推定した。各面の反射日射 (IRR) は鏡面反射と均等拡散反射を含み、どちらも第 1 反射を考慮した。鏡面反射による放射量は、鏡面反射の方向に向けてレイトレーシング解析を行うことによって計算された。均等拡散反射による放射量はランベルトの余弦則に従って均等拡散反射の仮定のもと、推定した。ボクセルが受けた均等拡散反射による放射量は周囲のボクセルに対してマルチトレーシング解析を実行することによって計算した。鏡面反射率は窓などのガラス材料にのみ適用され、拡散反射率は他のすべての構成材料に設定した。

ボクセルが受けた天空日射量 (ISR) は、気象データから求めた晴天日の ISR の量にボクセルの天空率を掛けて推定した。天空率は、ボクセルから半球方向に向かってマルチトレーシング解析を行うことによって計算した。ボクセルが受けた大気放射 (RLA) の量も晴天日

に対するプラントの式によって計算された RLA の量及び天空率によって推定した。天空放射分布について、空からの短波と長波の両方の拡散放射に対して無視され、均一とみなして計算した。一般的に、長波放射計算には大きな計算負荷が必要となるため、周辺地物からの長波長放射量 (RLW) は近似的な方法で計算した。まず、周辺の建物や樹木の Ts 値を気温相当と仮定し、これらの表面から放射される長波長放射をマルチレーシング法で推定した。次に、表面全体の熱収支を解くことにより近似 Ts 値の日変化を計算した。続いて、近似された Ts 値に基づいて、周辺地物の表面から放射される長波長放射量を計算した。

対流熱伝達量 (顕熱流量) は、対流熱伝達率 (CHTC) に、表面温度と表面近傍の気温との差をかけることによって計算した。CHTC はユルゲスの式によって推定した。本章では、都市キャノピーにおける気温・風速の空間分布が一様であると仮定した。これは単純な簡略化のようであるが、弱風の条件では有効である。このモデルを CFD 解析と連成解析をすると、計算負荷が大幅に増加する。この簡略化は、リモートセンシングの結果との比較によって確認する必要があると考えられる。キャノピーにおける気温・風速の空間分布を考慮した CFD 解析と連成解析による分析は 5 章にて紹介する。気温と風速データは土浦アメダスで観測されたデータを用いた。アメダス観測所も都市部に設置され、対象市街地の気温との対応性が確認された。さらに、本研究では潜熱フラックスは計算されておらず、解析では土壌に水分が含まれていない状態と仮定した。建築物の表面と地面の断面温度分布と Ts は一次元の非定常熱伝導方程式と 1 日の熱収支によって計算した。時間積分を伴う一次元の非定常熱伝導に後退差分法を用い、5 分の時間間隔で計算を行った。

2.4.2 対象市街地の CAD モデルの作成

本項では 3D-CAD を用いて建物・地面・植栽の空間形状を再現し、構成要素の断面仕様とその熱物性値を付加することで計算用の街区モデルを作成する。梅干野らは都市部の詳細な Ts を解析するための CAD ベースのモデリング手法を発表した^[2-32]。梅干野らの研究では、建物や地面の空間形態及び構成材料データの収集・整備手法を構築した。本研究では、対象となる都市部の空間形態と構成材料に同じモデリング手法とデータベースを適用した。一部入手困難なデータを現地調査により補うことでデータを収集・整備した。再現精度は、建物の凹凸等の空間形態や構成材料の分布が Ts に与える影響を明確にするために、空間分解能 0.4m のメッシュサイズを適用した。

図 2.11 に空間形態と構成材料のモデリング方法を示す。空間形態・構成材料のデータ収集については整備済の情報として、1/2500 都市計画基本図 GIS データ^[2-32]、1/5000 デジタルオルソ航空写真^[2-33]、1972 年～2008 年の約 10 年ごとの住宅地図を入手した。既往研究^[2-34]で使用された東京地区の GIS データには、建物の用途、構造、階数などの属性が含まれていたが、土浦市の GIS データにはこれらの値が含まれていないため、不足データで

第 2 章 航空機リモートセンシングと数値解析による 高層建築物周辺の表面温度分布の把握

ある建物階数・階毎の用途・建物構造を対象市街地の写真や現地調査から取得した。建物の高さは、階数と標準階高さから推定した。構成材料データは、建物用途・竣工年代等に基づく既往研究^[2-34]の構成材料データベースを一部修正し、設定した。また地面についても既往研究^[2-34]と同様の手法により設定した。壁、屋根、及び地面の部材は、現地調査の写真から建物の構造、用途、表面材質から推定した。反射率データについては、表面色をマンセル表色系と比較し、輝度値を割り当てた。次に、輝度値を日射反射率に変換した。また本研究においては高層建築物による日射遮蔽の効果を検証することを主眼にしているため、建物の日射熱取得に影響を与える塀は再現するが、高さ 1m 以下の構造物・植栽は再現していない。また建物屋根面の形状も同様の理由により屋上の付属物に関しては周辺の建物の日射環境に影響を与えないものは再現していない。樹木の高さは、簡易式レーザ距離計（NIKON 社製，550AS，高さ精度±0.2m）による実測データと実地調査から得られた写真を基に設定した。樹形は樹種に応じて 5 種類に分類した。落葉樹と常緑樹の日射透過率はそれぞれ 15%と 20%と設定した。これらの値は、樹冠下で撮影した魚眼写真から求めた。樹冠内の葉の間のギャップの比を、太陽透過率を推定する際に使用された。図 2.12 に対象市街地 3D CAD モデルを示す。

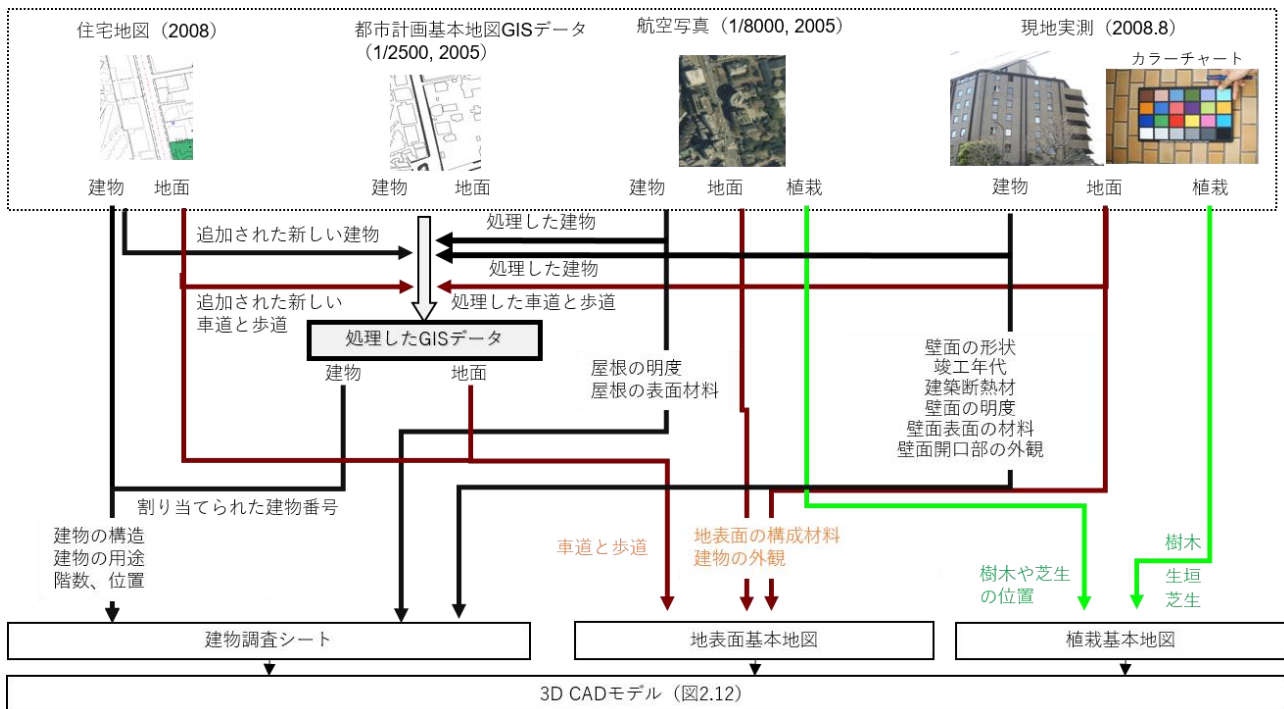


図 2.11 熱収支シミュレーションに使用される 3D CAD 対応のモデリング方法

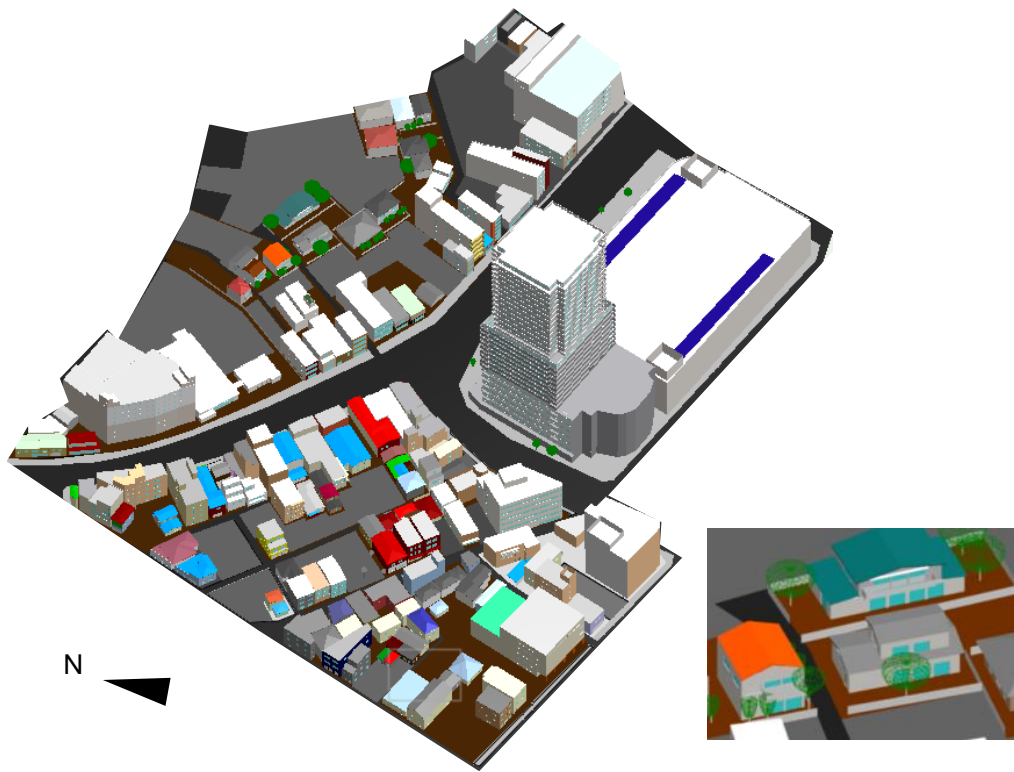


図 2.12 対象市街地の 3D CAD モデル

2.4.3 解析条件

気象データは、航空機リモートセンシングの観測日である 2009 年 8 月 25 日と 12 月 22 日の土浦アメダス（気象庁）とつくば高層気象台のデータを取得した。構成材料の熱容量の影響を考慮するため、4 日間の助走計算を行った。そのため、2009 年 8 月 25 日と 12 月 22 日それぞれより前 4 日間の気象条件（気温・風速・日射量・雲量・湿度・気圧）なども取得した。12 月 18～22 日には晴れたが、8 月 21～24 日には曇りや雨の日であった。気温・風速データは土浦市のアメダスから得られたものである。水平面全天日射量と相対湿度のデータは、リモートセンシング観測による分析に使用された観測データと同じである(2.3節)。

熱収支解析は、5 日間の連続気象データを用いて、3D の T_s 分布を計算する。出力して分析に使用する T_s は 5 日目の結果である。すなわち、対象日前の 4 日間の気象条件が考慮され、その時間積分の計算が対象日の結果に与える影響も考慮されている。建物内部や地面の境界条件として、室温と地中温度を既往研究^[2-34]で用いた方法と同様に設定した。地中温度は各月で一定と仮定した。室内境界条件の室内気温の日変化パターンは建物の用途によって異ってくる。商業施設には空調時の室温を適用した（夏季は 26°C、冬季は 20°C）。住

宅には非空調時の室温を適用した。これらの値は、夏季と冬季両方の住宅の熱負荷シミュレーション^[2-35]によって設定した。

2.5 熱収支シミュレーションによる対象地の放射温度分布

2.5.1 夏季昼間の放射温度分布

図 2.13 (a) に、夏季のリモートセンシング観測日 (2009 年 8 月 25 日) の熱収支解析によって計算された 13:00 の T_r の分布を示す。この地域の建物の材質は、主に木材と RC である。図 2.13 (a) の (1) は、木造住宅の日向に位置する屋根 (日射反射率 0.3、熱容量 40 [kJ / (m²K)]) の T_r が約 55°C までに上昇し、 T_a より 30°C 程度高いことがわかった。RC 屋根 (日射反射率 : 0.3、熱容量 : 515 [kJ / (m²K)]) の T_r は約 47°C である (図 2.13 (a) の (2))。この温度差は、材料の熱容量の差に起因する。日向に位置する壁の場合、RC 建物の T_r も T_a より 14°C 高い。木造住宅の T_r は RC 建物よりも 8°C 高くなっていることが確認できた。

図 2.13 (a) の (3) から建物 A について、日向に位置する屋根 (日射反射率 0.3、熱容量 515 [kJ / (m²K)]) の T_r は約 46°C であり、 T_a より 20 度しか高くない。これは、午前中この区域が図 2.13 (a) の (4) の高層建築物 S の影に入り、RC 材の熱容量によって低温が 13:00 まで続いたためである。

図 2.13 (a) の (4) から、高層建築物 S の南側の壁面では、ベランダの上層階の T_r 値よりも下層階のほうが高いことを示している。これは、下層階のベランダの壁が高い T_r 値を有する周辺の屋根や地面からより多い長波長放射を受けたためである。大通り (県道 275 号) (図 2.13 (a) の (5)) では、日向部分の T_r は約 48°C であり、 T_a よりも 22°C 高くなっている。一部の駐車場 (図 2.13 (a) の (6)) の地面では、 T_r は 55°C 近くまで上昇した。それは駐車場のアスファルト舗装の日射反射率 (0.1) は、大通り (0.3) (図 2.13 (a) の (5)) よりも低いためである。

図 2.13 (b) に壁、屋根、及び地面の日影部の T_r 値を示す。日影部の T_r 値 (図 2.13 (b) の (1)) は、午前中の日射の影響により、 T_a よりも 3°C 高い約 29°C である。窓の T_r 値 (図 2.13 (b) の (2)) は、窓ガラスの低い日射吸収率と熱抵抗の影響および室温によって約 26°C である。

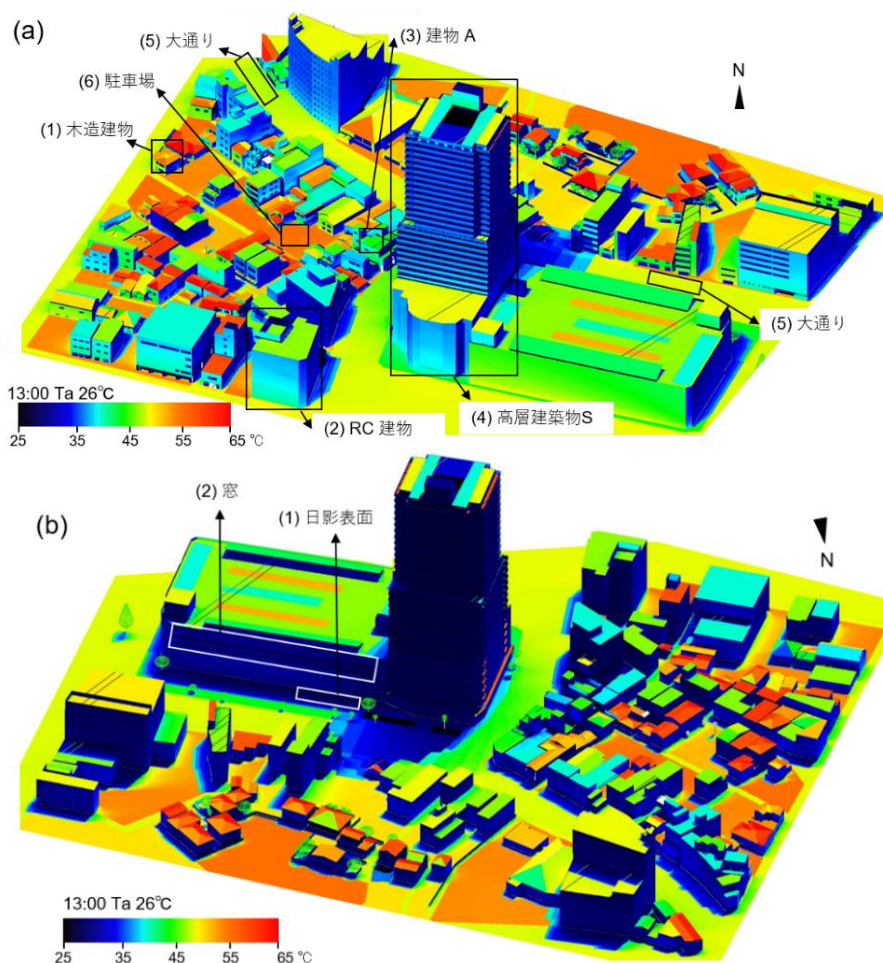


図 2.13 夏季の数値シミュレーションによる放射温度 (Trs) の分布 (a) 日向側、(b) 日陰側

2.5.2 冬季昼間の放射温度分布

図 2.14 (a) は、冬季のリモートセンシング観測日 (2009 年 12 月 22 日) の熱収支解析によって計算された 12:15 の Tr の分布を示す。木造住宅 (図 2.14 (a) の (1)) の屋根 (日射反射率: 0.3、熱容量: 40 [kJ/(m²K)]) の Tr 値は、RC 建物 (図 2.14 (a) の (2)) の屋根 (日射反射率は 0.3、熱容量は 515 [kJ/(m²K)]) より 6°C 高く、熱容量の違いによるものと考えられる。図 2.14 (a) の (3) と (4) に示す RC 建物の B と C について、屋根の Tr の差は、日射反射率 (建物 B: 0.5、建物 C: 0.3) の差によるものと考えられる。建物 B と C の南側の壁面の Tr 値は屋根の Tr 値よりも高いことが見られる。この結果は、太陽高度が低いほど壁に入射する日射放射が大きくなるためである。また、夏とは逆の結果になっている。

第2章 航空機リモートセンシングと数値解析による
高層建築物周辺の表面温度分布の把握

図 2.14 (b) に日影側の Tr 値を示す。冬季の太陽高度が夏季より低いため、高層建築物 S (図 2.14 (b) の (1)) の影は、より広範囲に及ぼし、北側街区に位置する木造建物の屋根の Tr 値 (図 2.14 (b) の (2)) は日向に位置する木造建物の屋根より約 16°C 低くなっている。この値は T_a よりも 4°C 低くなっていることがわかった。大通りの南側に位置する低層建物 (図 2.14 (b) の (3)) は日向に位置するが、屋根の Tr 値は日向に位置する他の建物の屋根 (図 2.14 (b) の (4)) よりも約 4°C 低いことが確認できる。午前中の高層建築物 S の影の影響が正午まで、Tr に寄与したと考えられる。

図 2.14 (b) に示すように、高層建築物 S の北側は日影となった。同じ影でも、タイル (日射反射率 0.4、地層 0.25m の熱容量: $493 [\text{kJ}/(\text{m}^2\text{K})]$) の歩道 (図 2.14 (b) の (5)) の Tr はアスファルト (日射反射率: 0.3、地層 0.25m の熱容量: $452 [\text{kJ}/(\text{m}^2\text{K})]$) 舗装道路 (図 2.14 (b) の (6)) より 1°C 低いことがわかった。タイルの日射反射率はアスファルトの日射反射率より 0.1 しか高くなく、これらの点はいずれも陰に位置するため、この微小な温度差は、主にタイルのより高い熱容量によって引き起こされたと考えられる。

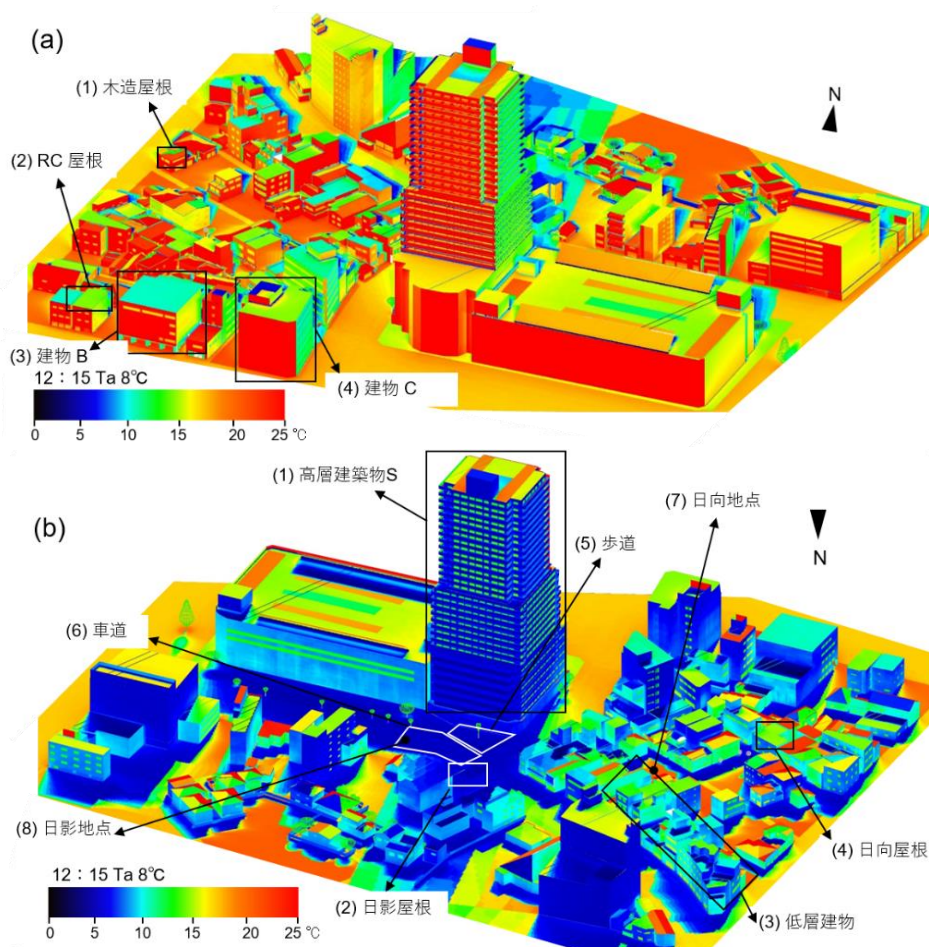


図 2.14 冬季の数値シミュレーションによる放射温度 (Trs) の分布 (a) 日向側、(b) 日陰側。

2.5.3 表面温度の形成機構

Tr 結果の代表点に対して熱収支を分析した。冬季の解析結果に対して、2つの地点をサンプリングした(図 2.14 (b))。1つは高層建築物 S の北側に位置する大通りに位置し(図 2.14 (b) の (8)) (日射反射率 0.3、地層 0.25m の熱容量: $452 \text{ [kJ/(m}^2\text{K)]}$)、その日のほとんどは日陰に位置した。もう1つは日向に位置する駐車場にあり(図 2.14 の (7)) (日射反射率 0.1、地層 0.25m の熱容量: $452 \text{ [kJ/(m}^2\text{K)]}$)、低層木造住宅に囲まれている。熱収支の各成分: 日射と反射、周辺地物及び空との長波長放射の授受、対流熱伝達、熱伝導などを出力した。

図 2.15 の (a) と (b) にそれぞれ日向と日影の熱収支の各成分の日変化を示す。両地点の天空と反射日射の入射量と周辺地物及び空からの長波長放射量が日中類似の傾向が示された。これは両地点の天空率がほぼ等しいためである(日向地点: 0.60、日影地点: 0.57)。天空率がこれらの入射フラックスを支配する。日向地点の直達日射の入射量の日最大値は日陰地点よりも約 8 倍高いことが確認できた。日影地点における直達日射は 16:00 頃にしかならず発生しなく、その時は高層建築物 S による日射遮蔽はなかったと考えられる。直達日射量の顕著な差異は、日向地点の Tr が日陰地点よりも 14.5°C 高くなることを引き起こす。日影地点の Tr は、8:00~16:00 の間、Ta よりも低いことがわかった。それは夜間の大気放射冷却と地表面の構成材料の熱容量による蓄冷によって引き起こされた可能性があることが示唆された(図 2.14 (b))。これらの要因は、日向地点と日陰地点の間の対流熱伝達量の差に寄与し、2 番目の重要性を持つと考えられる。その影響度合いは 5 章にて具体的に分析してゆく。2 地点の対流熱伝達は、日中の中で逆の傾向を示した。具体的には、日向地点の熱フラックスはマイナスで日影地点の熱フラックスはプラスであり、すなわち、日影地点では地面が表面近傍の大気から、顕熱を吸収する形となる。さらに、Tr によって決める長波長放射量も 2 地点の間で、昼間に最大 74 W/m^2 の差を示した。

日向地点の Tr は、日中の直射日射が支配的な影響を及ぼす一方、日影地点の Tr は、天空と反射日射、長波長放射の授受と対流熱伝達など詳細な熱収支の影響を受けた。これは対流熱伝達量及びその方向、すなわち Tr 及び Ta の差が、天空日射、反射日射と長波長放射の授受を含む詳細な熱収支によって容易に変化することを意味する。

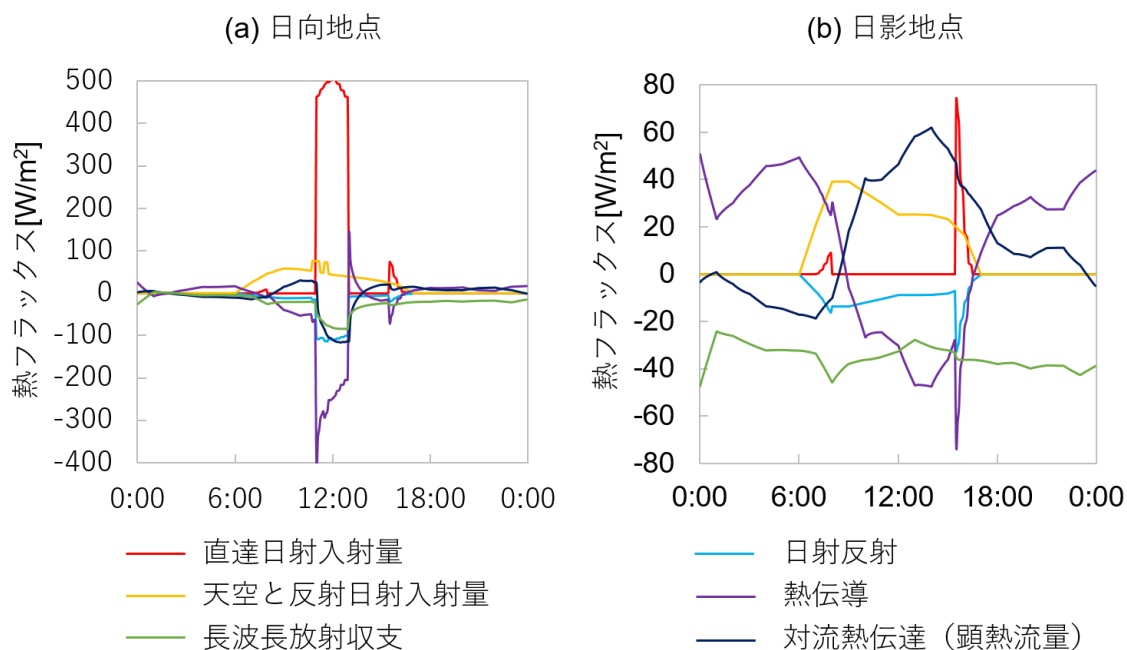


図 2.15 冬季における日向地点 (a) と日影地点 (b) の熱収支各成分の日変化 (負の値は、熱フラックスが表面から大気へ向かうことを意味する)

2.6 航空機リモートセンシングと熱収支シミュレーションとの放射温度の比較

図 2.16 と図 2.17 はそれぞれ夏季と冬季において、航空機リモートセンシング観測した放射温度 (T_{rr}) と数値シミュレーションによって計算した放射温度 (T_{rs}) を比較する図である。

一部の表面を除いて、屋根、道路、駐車場及び影における T_{rs} は、夏季と冬季の両ケースで T_{rr} と非常に類似していることが確認できる。 T_{rs} と T_{rr} の結果分析は、この節で定量的に比較する。

数値シミュレーションと航空機リモートセンシングによって得られたそれぞれの熱画像の同じ領域を分析に使用した。 T_{rs} と T_{rr} を同じ位置でサンプリングして比較した。サンプリング位置は、比較の客観性を保つため、等間隔 (20 m) で選択され、112 箇所が抽出した。グリッドの配置は、異なる種類の表面 (建物または地面、日向または日影)、物理特性 (日射反射率、放射率、熱容量など) と天空率を含むように決定した。各グリッドの頂点について、航空機リモートセンシングの熱画像から純粋なピクセルが選択した。これらの物理特性及び天空率の範囲は、日射反射率 0.1~0.5、熱容量 22~515 [kJ / m^2K]、放射率 0.8~0.95、天空率 0.21~0.96 である。数値シミュレーションの 3D CAD モデルで再現されなかった建物は、評価から除外した。また、図 2.16 と図 2.17 の全画素の T_{rr} 、 T_{rs} のヒストグラムを比較した。

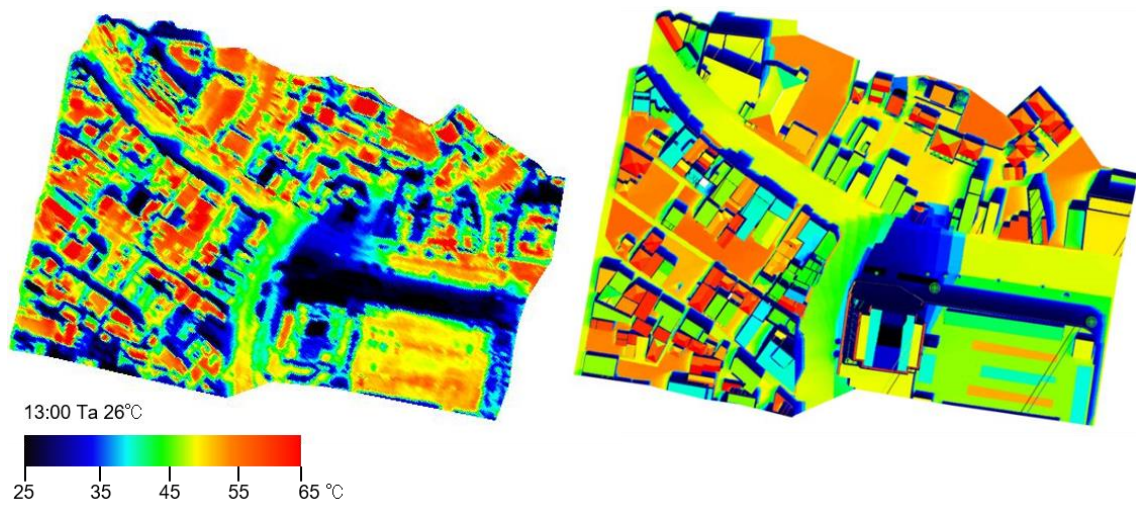


図 2.16 夏季におけるリモートセンシング観測による放射温度 (Trr、左) と数値シミュレーションによる放射温度 (Trs、右) の比較

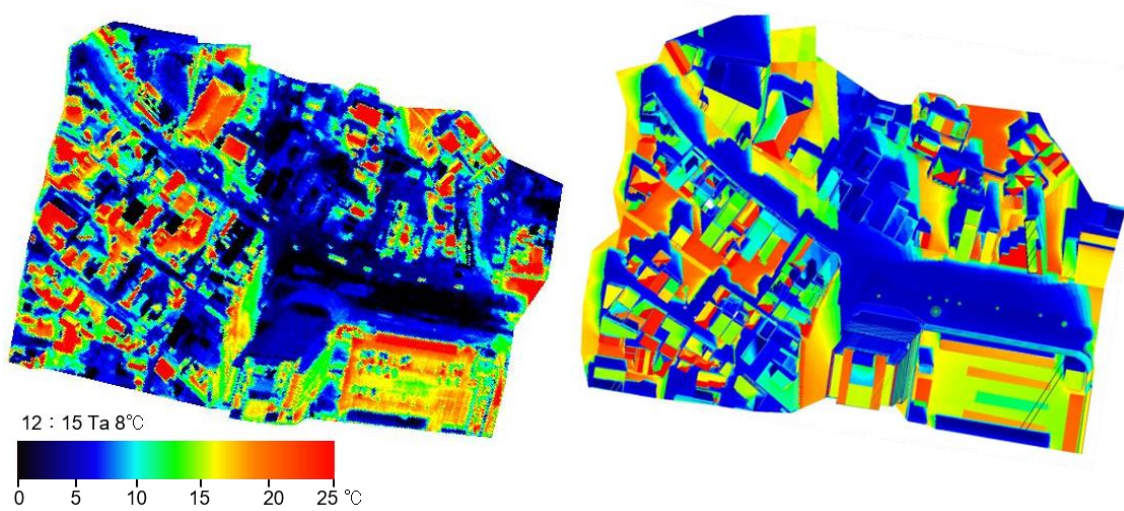


図 2.17 冬季におけるリモートセンシング観測による放射温度 (Trr、左) と数値シミュレーションによる放射温度 (Trs、右) の比較

2.6.1 夏季昼間の比較

図 2.18 に夏季の熱画像に対して選択された地点の T_{rr} と T_{rs} の比較結果を示す。横軸は T_{rs} を表し、縦軸は T_{rr} を表している。点の大部分は線 $y = x$ (1:1) の周りに位置している。これは、ほとんどの位置で T_{rs} が T_{rr} と近い値であることを意味する。近似線の勾配はほぼ 1 に近い。一部の位置 (特に点 A、点 B、点 C) では、 T_{rs} と T_{rr} は一致していない。点 A は傾斜屋根に位置し、CAD モデルが再現された傾きは実際よりも勾配があるため、 T_{rs} は T_{rr} より約 10°C 高くなった。点 B は太陽光パネルに位置する。太陽光パネルの熱収支と放射率は複雑で完全に計算することが難しいため、 6°C の誤差が生じた。点 C は、平らな屋根の上に位置しているが、 T_{rs} は、材料の物理特性の再現誤差に起因して、 T_{rr} より約 8°C 低くなっている。本研究では、すべての建物の構成材料を調査し、それらの材料を複数の典型的なカテゴリに分類したが、構成材料のすべての特性を正確に再現することには限界がある。

図 2.19 に全画素に対して、 T_{rs} と T_{rr} のヒストグラムを示す。ほぼ同じ温度範囲内で同じピークが現れた T_{rs} と T_{rr} の分布は類似していた。このように同様の特性を有する結果が得られたため、熱収支シミュレーションは基本的に T_r を再現することができると言える。しかしながら、 T_{rs} と T_{rr} の間にはいくつかの異なる点を確認された。 T_{rs} は、 28°C 及び 48°C により集中する傾向を示した。 T_r の分布はより分散的な傾向を示した。これらの類似点と相違点については 2-6-3 で論じる。

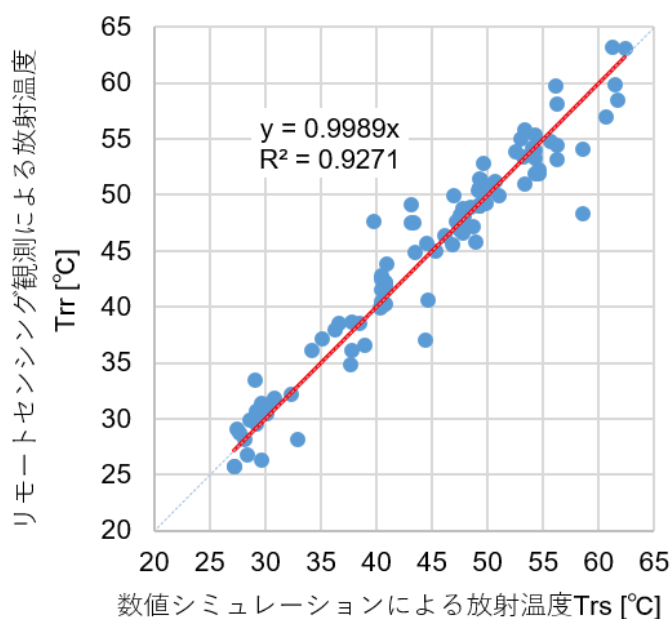


図 2.18 夏季のサンプル点の T_{rs} と T_{rr} との比較

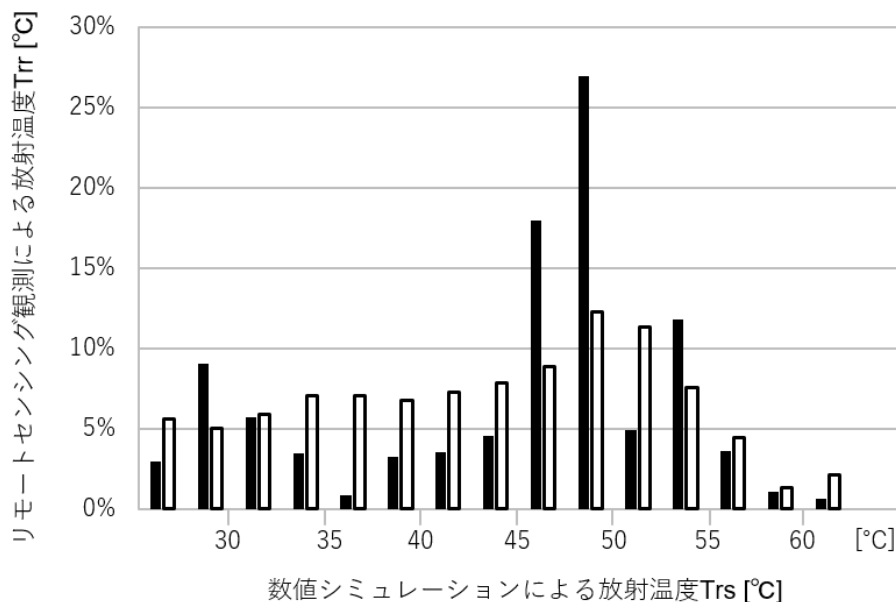


図 2.19 夏季の熱画像の全ピクセルに対して Trr と Trs のヒストグラム

2.6.2 冬季昼間の比較

図 2.20 に冬季の熱画像に対して選択された地点の Trr と Trs の比較結果を示す。夏の場合と同様に、大部分の点は $y = x$ 線の付近にプロットされている。勾配は 0.99 で、夏季の場合よりもやや低かった。それは冬季の大気の水蒸気圧は低いため、大気放射の反射が Trr への影響が夏季の場合より大きくなる。点 A と B については、Trr 値は Trs より 8~10°C 高い。この違いは、夏季と同様に CAD モデルの屋根形状の再現誤差が原因であると考えられる。点 C と D については、反対の結果（すなわち、Trs の値は Trr より高い）が得られた。これは、周辺の建物によって陰となる地面である。CAD モデルでは、該当地面近傍の建物の高さに再現誤差があり、日向の地面となっているためである。また Tr が 5°C 付近で、Trr が Trs より小さい点が複数存在していることが確認できる。それは高層建築物の陰に位置する点である。その原因について、5 章にて詳しく分析してゆく。

図 2.21 に全画素に対して、Trs と Trr のヒストグラムを示す。夏季の場合と同様な傾向が確認された。しかし、ピーク時の温度は、夏季よりも全体の範囲内の低い位置で現れた。それは冬季の太陽高度が夏季より低く、建物の影がより広範囲に分布するためである。

第2章 航空機リモートセンシングと数値解析による
高層建築物周辺の表面温度分布の把握

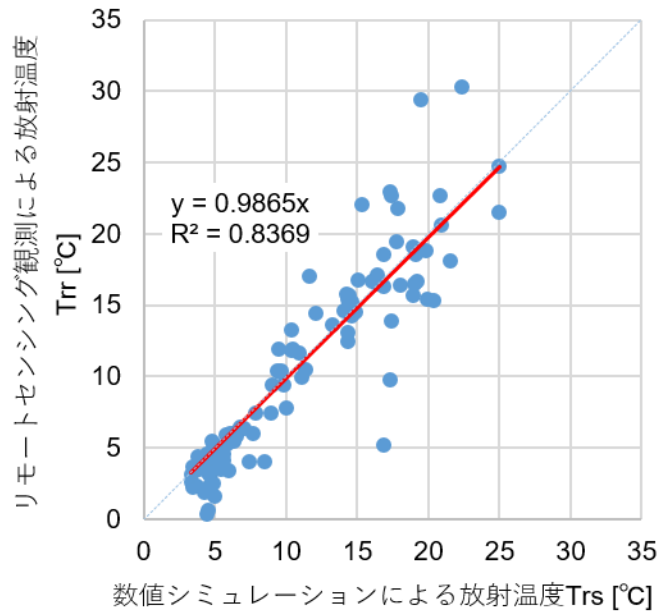


図 2.20 冬季のサンプル点の (Trs) と Trr との比較

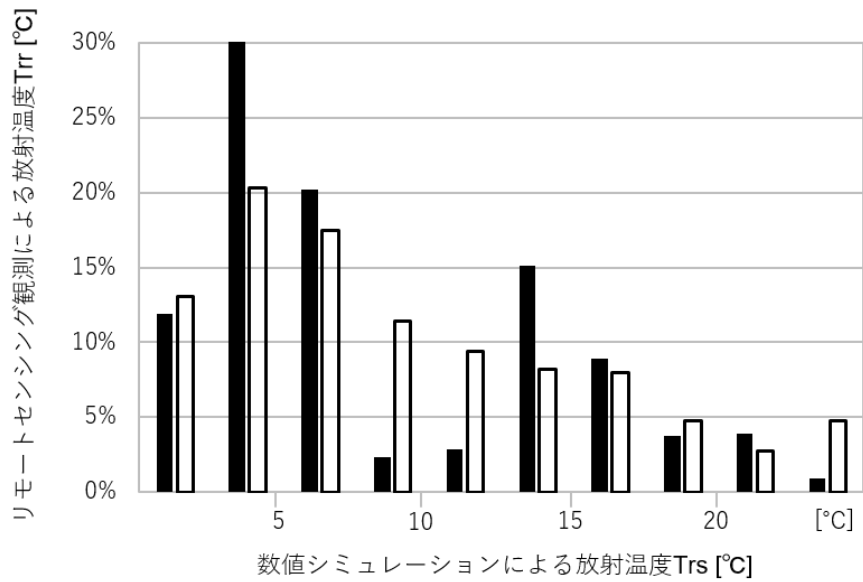


図 2.21 冬季の熱画像の全ピクセルに対して Trr と Trs のヒストグラム

2.6.3 考察

本項では、2.5節による熱収支シミュレーションの結果の不確実性と、数値解析モデルの利点と限界について述べる。本項はまた、上記の結果と Hénon et al.^[2-23, 2-24]の結果と比較することによって、重要な知見及び課題を明らかにする。

図 2.19、夏季の場合のヒストグラムに対して、 T_{rr} は分散する傾向があり、 T_{rs} はより集中的な分布を見せた理由は次の点であると考えられる。

(1) 航空機リモートセンシング観測で得られた熱画像にはミクセルがあり、それが放射温度分布に影響を与えた。図 2.22 に特定エリアの T_{rs} と T_{rr} の熱画像の比較を示す。この部分の熱画像は屋根と地面との境界を同じ位置にプロットしている。図 2.22 (b) の T_{rr} について、境界部分はミクセルが存在し、その放射温度は屋根の T_{rr} より高く、陰の地面の T_{rr} が小さい値を表した。 T_{rs} を示す図 2.22 (a) では、中間値を示すピクセルはなかった。

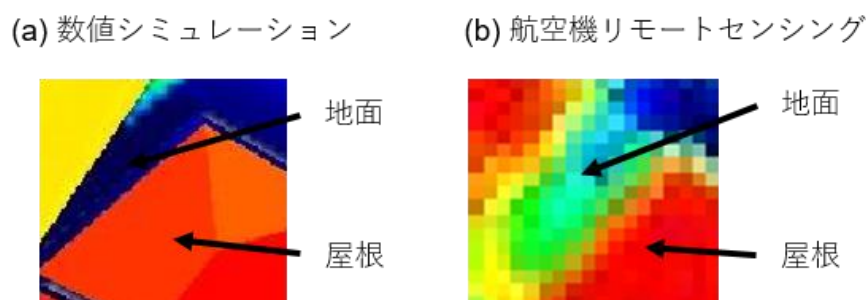


図 2.22 地表面温度の比較 (a) 数値シミュレーションによる T_{rs} (b) 航空機リモートセンシング観測による T_{rr}

(2) 実際には街区の各構成材料には、物理特性にある程度のばらつきがある。熱収支シミュレーションにて、構成材料のモデル化の方法は各材料の典型的な特性を適用した。さらに、微気候としての表面近傍の気温・風速の分布は、 T_r の詳細的な分布に影響する可能性もある。ただし、 T_{rs} と T_{rr} のヒストグラムは同じピークを有しており、典型的な材料と都市表面の物理的特性が良好に再現されていることが示された。

(3) 空調設備、自動車排熱やその他の熱源機器などの人工排熱は、その周辺の表面における実際の T_{rr} 値を高くし、それは熱収支シミュレーション上では再現されなく、 T_{rs} へ反映されなかった。

(4) 熱収支シミュレーションは各表面メッシュから内部への伝熱は一次元の熱伝導を考慮して計算した。 T_{rr} の熱画像は、表面における三次元の熱伝導の影響も含むため、異なる材料と日射条件との間の T_{rr} の差は T_{rs} より小さくなった。

冬季の場合、図 2.21 の T_{rr} と T_{rs} の違いの理由は次の点であると考えられる。

(1) その差は主に、夏季の場合で言及したように、材料の物理特性によるものである。屋根について、タイル張り屋根の典型的な特性を熱収支シミュレーションに設定した。実際は同じタイル張りの屋根でも、色と日射反射率が異なる。地点 D の駐車場では、異なる日射反射率及び熱容量が T_{rr} に影響を与えた可能性がある。さらに、モデル上の建物形状の再現性が結果に影響を与えた。地点 E では、実際に正午において隣の建物によって日陰となり、低い T_{rr} を有していた。しかし、建物の高さの再現誤差で、数値シミュレーションでは日向となり、 T_{rr} より高い T_{rs} を有していた。

(2) 冬季の場合にも人工排熱からの熱の影響が確認された。道路上では、車からの排熱により、近傍 T_s が高くなり、それはリモートセンシング観測の T_{rr} に現れた。一般的な日本の家屋は煙突を備えておらず、夏の場合とは対照的に建物からの人工排熱は見られなかった。

(3) 約 5°C での T_{rr} は、 T_{rs} より $2\text{-}4^{\circ}\text{C}$ 低くなっていることが確認できた。これらの地点の大半は高層建築物及び隣の商業施設の北側の陰に位置し、その中の一部は北側街区の低層建物に囲まれていて、それも高層建築物の陰に入り、日射が遮られていた。2.5.2 項では、熱収支解析による夜間の大気放射冷却と構成材料の蓄冷(図 2.14 (b))の影響を数値シミュレーションで考慮した。しかし、 T_{rr} は T_{rs} よりもはるかに低く、他に付加的な原因が考えられる。 T_s が低い地域は主に高層建築物の大きな影に現れるため、実際の日影空間では低気温が形成されている可能性があると考えられる。この現象は、現在の熱収支シミュレーションモデルでは再現されなかった。それは気温・風速分布がモデル上で考慮されなかったためと考えられる。これは、5章にて都市キャノピーにおける気温・気流の分布を考慮した計算(CFDとの連成解析)により検証してゆく。 T_s 形成に伴う都市空間の気温・風速分布の重要性は、既往研究にてすでに理論的に説明されているが^[2-14, 2-26, 2-27]、本研究では航空機リモートセンシング観測結果と熱収支シミュレーション結果を比較することで実際の効果をマイクロスケールで示している。マイクロスケールでの市街地の表面と微気候との間の相互作用を明らかにするために、5章では、具体的に対象市街地に対して、非等温数値流体力学(CFD)解析による熱収支解析と CFD との連成解析を行う。本章の結果は、連成解析における時間積分計算の重要性を示した。

Hénon et al.^[2-23, 2-24]の結果との比較は、類似点と相違点両方から、以下の知見が得られた。Hénon et al.は対象都市域の放射温度の観測値と計算値の散布図は、ほとんど 1:1 の線に位置し、いくつかのクラスタに分類されることが示された。また、有効面と屋根の反射率をそれぞれ 0.25 と 0.17 に導いた^[2-23]。小さな構造要素はシミュレーションに考慮されなかった。Hénon et al.はほとんどの構造物は平均温度に顕著な偏りをもたらさなかったが、分散に寄与していると結論した^[2-24]。また、観測値と計算値の温度差について、全ピクセルの 2/3 が 5°C 以内であり、1/3 が 2.5°C 以内であることを示した。

第2章 航空機リモートセンシングと数値解析による 高層建築物周辺の表面温度分布の把握

本研究では、放射温度の観測値と計算値が1:1の線の周りにプロットされていることも示している(図2.18と図2.20)。本解析で用いられている反射率は0.1~0.5であり、使用された構成材料と物理特性が異なることを再現された。それにもかかわらず、散布図上の点はほとんど近似直線上に位置し、夏季と冬季の両方で相関が高い($R^2 = 0.93$ と 0.84)。Hénon et al.と同じ基準^[2-24]を使用すると、観測値と計算値の温度差について、全ピクセルの90%は5°C以内であり、70%が2.5°C以内である結果が得られた。詳細な空間形態と構成材料を高解像度なシミュレーションに適用し、航空機リモートセンシング観測による高分解能熱画像から均質なピュアピクセルを選択して比較することによって、シミュレーション結果が観測結果に近づいたことが示された。その違いは、シミュレーションモデル上では許容可能であるとみなされる。

Ts形成メカニズムについて、Hénon et al.は、日影面と日向面、表面の種類、反射率の影響、ミクロとマクロの不均一性がTsの違いにもたらす影響を示した。本研究は、これらの点だけでなく、材料の熱容量の影響を考慮した蓄熱/蓄冷効果も分析した。特に、高層建築物の日影空間の表面に低いTrが存在し、それは日射遮蔽と舗装材(アスファルト)や屋根材(コンクリート)による蓄冷の可能性があり、すなわち、空間形態(高層建築物)と構成材料(高い熱容量)による作用であることを示唆した。日影にある舗装におけるTrのシミュレーションの過大評価は、Hénon et al.も指摘したが、その理由は詳細的に議論されなかった。それは上記の原因により特定することができる。シミュレーションモデルの限界として、対流熱伝達率の単純化、土壌水分のモデル化の不足、及び建物と車からの人工排熱の無視は、Hénon et al.の研究と本研究で議論された。

複雑な空間形態や構成材料を含む実在の都市空間では、航空機リモートセンシング観測と点レベルの比較によって、大部分の場所において、熱収支シミュレーションモデルがTs分布を効果的に再現することが確認された。一方、高層建築物の日影空間において、航空機リモートセンシングは低温域を観測した。この低温域は現在の熱収支シミュレーション上では十分再現できなかった。それは解析モデル上、都市キャノピー空間内の気温・風速分布を一様と仮定したことに原因があることを考察した。

2.7 まとめ

本章では、都市部における T_r 分布の特性を分析するうえで、 T_r に見られる高層建築物の影響を確認し、周辺の放射温度分布を把握することを目的として、リモートセンシング観測と熱収支解析を行なった。それらの間で比較することを通して、都市表面の T_s を評価するために、シミュレーションモデルの能力と限界も確認した。既往研究と比較し、本研究で発展した部分も確認した。

- 1) 航空機リモートセンシング観測の方法及び観測結果を示した。
- 2) 数値シミュレーションのモデリング方法及び計算アルゴリズムを示した。
- 3) リモートセンシング観測の結果及び数値シミュレーションの結果それぞれに対して、 T_r の再現性を検討し、高層建築周辺の放射温度、及び高層建築が放射温度に与える影響を確認した。
- 4) リモートセンシング観測から、高層建築物が周辺地域の放射温度の影響は夏季よりも、太陽高度の低い冬季が広範囲で日陰となり、日中でも放射温度が気温より数度低い箇所を多数確認した。この現象に対して、3章の冬季実測にて地上レベルで各熱収支成分を詳しく確認してゆく。
- 5) 熱収支解析とリモートセンシング観測値の比較を通して、放射温度分布の大部分に良い対応が見られたが、一部の箇所では両者に違いが現れた。モデル上再現できない部分以外に、長時間の日陰による地表面の蓄冷や高層建築物周囲に特有の微気候の影響を受けている可能性があることが示唆された。すなわち、数値シミュレーション上でキャノピー空間内の気温 (T_a) と風速 (V) を一定と仮定しているため、高層建築物周囲に特有の微気候が正確に再現できないことが示唆された。この点について、4章にて熱収支解析と CFD との連成解析により明らかにする手法を検討する。

参考文献

- [2-1] Voogt J.A., Oke T.R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86: 370-384.
- [2-2] Rao P.K. 1972. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53: 647-648.
- [2-3] Balling R.C., Brazel S.W. 1988. High-Resolution Surface Temperature Patterns in a Complex Urban Terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54: 1289-1293.
- [2-4] Roth M., Oke T.R., Emery W.J. 1989. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*, 10: 1699-1720.
- [2-5] Lougeay R., Brazel A., Hubble M. 1996. Monitoring intraurban temperature patterns and associated land cover in Phoenix, Arizona using Landsat thermal data. *Geocarto International*, 11: 79-90.
- [2-6] Chen X.L., Zhao H.M., Li P.X., Yin Z.Y. 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104: 133-146.
- [2-7] Weng Q., Lu D., Shubring J. 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89: 467-483.
- [2-8] Quattrochi D.A., Ridd M.K. 1994. Measurement and analysis of thermal energy responses from discrete urban surfaces using remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 1991-2022.
- [2-9] Shoshany M., Aminov R., Goldreich Y. 1994. The extraction of roof tops from thermal imagery for analyzing the urban heat island structure. *Geocarto International*, 9: 61-69.
- [2-10] Eliasson I. 1992. Infrared thermography and urban temperature patterns. *International Journal of Remote Sensing*, 13: 869-879.
- [2-11] Iino A., Hoyano A. 1996. Development of a method to predict the heat island potential using remote sensing and GIS data. *Energy and Buildings*, 23: 199-205.
- [2-12] Voogt J.A., Oke T.R. 1998. Effects of urban surface geometry on remotely-sensed surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 895-920.
- [2-13] Lagouarde J.P., Moreau P., Irvine M., Bonnefond J.M., Voogt J.A., Sollic F. 2004. Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France). *Remote Sensing of Environment*, 93:

- 443-462.
- [2-14] Voogt J.A., Oke T.R. 1997. Complete urban surface temperatures. *Journal of Applied Meteorology*, 36: 1117-1132.
- [2-15] Voogt J.A. 2000. Image representations of complete urban surface temperatures. *Geocarto International*, 15: 21-32.
- [2-16] Krayenhoff E.S., Voogt J.A. 2007. A microscale three-dimensional urban energy balance model for studying surface temperatures. *Boundary Layer Meteorology*, 123: 433-461.
- [2-17] Idczak M., Groleau D., Mestayer P.G., Rosant J.M., Sini J.F. 2010. An application of the thermo-radiative model SOLENE for the evaluation of street canyon energy balance. *Building and Environment*, 45: 1262-1475.
- [2-18] Hénon A., Mestayer P.G., Groleau D., Voogt J. 2011. High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign. *Building and Environment*, 46: 1747-1764.
- [2-19] Kanda M., Kawai T., Kanega M., Moriwaki R., Narita K., Hagishima A. 2005. Simple energy balance model for regular building arrays. *Boundary Layer Meteorology*, 116: 423-443.
- [2-20] Hoyano A., Asano K., Kanamaru T. 1999. Analysis of the sensible heat flux from the exterior surface of buildings using time sequential thermography. *Atmospheric Environment*, 33: 3941-3951.
- [2-21] Nichol J.E. 1998. Visualisation of urban surface temperatures derived from satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 1639-1649.
- [2-22] Asawa T., Hoyano A., Nakaohkubo K. 2008. Thermal design tool for outdoor spaces based on heat balance simulation using a 3D-CAD system. *Building and Environment*, 43: 2112-2123.
- [2-23] Hénon A., Mestayer P.G., Lagouarde J., Voogt J. 2012. An urban neighborhood temperature and energy study from the CAPITOUL experiment with the SOLENE model Part 1: analysis of flux contributions. *Theoretical and Applied Climatology*, 110: 177-196.
- [2-24] Hénon A., Mestayer P.G., Lagouarde J., Voogt J. 2012. An urban neighborhood temperature and energy study from the CAPITOUL experiment with the SOLENE model Part 2: influence of building surface heterogeneities. *Theoretical and Applied Climatology*, 110: 197-208.
- [2-25] Takata M., Hoyano A., Murakami A. 2011. The city without a nighttime heat island: Reproduction and evaluation of summer thermal environment in urban residential areas

- in early modern Tokyo using numerical simulation. PLEA-27 - Architecture and Sustainable Development, Conference Proceedings of the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, 465-470.
- [2-26] He J., Hoyano A. 2009. Measurement and simulation of the thermal environment in the built space under a membrane structure. *Building and Environment*, 44: 1119-1127.
- [2-27] He J., Hoyano A. 2010. Measurement and evaluation of the summer microclimate in the semi-enclosed space under a membrane structure. *Building and Environment*, 45: 230-242.
- [2-28] He J., Hoyano A. 2009. A 3D CAD-based simulation tool for prediction and evaluation of the thermal improvement effect of passive cooling walls in the developed urban locations. *Solar Energy*, 83: 1064-1075.
- [2-29] 梅干野晁, 内山一雄: 航空機 MSS 熱赤外域データに対する大気補正手法の検討, 日本リモートセンシング学会第9回学術講演会論文集, pp.149-152, 東京, 1989.12.
- [2-30] Berk A., Anderson G.P., Acharya P.K. 2013. MODTRAN®5.3.2 User's manual
- [2-31] Abreu L.W., Anderson G.P. 1996. The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 Model
- [2-32] 例えばゼンリン: ゼンリン電子住宅地図デシタウン土浦市1, 2008.3.
- [2-33] 土浦市: 1/5000 デジタルオルソ航空写真, 2005.1.
- [2-34] 梅干野晁, 浅輪貴史, 村上暁信, 佐藤理人, 中大窪千晶: 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, 612, pp.97-104, 2007.
- [2-35] He J., Hoyano A., Asawa T. 2009. Numerical simulation tool for predicting the impact of outdoor thermal environment on building energy performance. *Applied Energy*, 86: 1596-1605.

2章の付録

熱収支の計算式：

各表面における熱収支

$$R_S + R_L + Q_H + Q_E - Q_G = 0$$

$$R_S = a_{su}(\cos \theta \cdot I_{DR} + F_{sky}I_{SR} + I_{RR})$$

$$R_L = F_{sky}R_{La} + R_{Lw} - \varepsilon_s \sigma T_s^4$$

$$= F_{sky}(R_{La} - \varepsilon_s \sigma T_s^4) + (R_{Lw} - F_w \varepsilon_s \sigma T_s^4)$$

$$F_{sky} + F_w = F_{sky} + \sum_{i=1}^n F_i = 1,$$

$$R_{La} = \varepsilon_s \sigma T_a^4 \left((a + b\sqrt{e}) \left(1 - \frac{c}{10} m \right) + \frac{c}{10} m \right),$$

$$R_{Lw} = \varepsilon_s \sum_{i=1}^n F_i \varepsilon_{wi} \sigma T_{wi}^4,$$

$$Q_H = \alpha_c (T_a - T_s),$$

$$Q_E = \beta k (X_a - X_s) \quad (\text{濡れた表面、緑化した表面、本研究では } Q_E = 0),$$

$$Q_G = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

一次元非定常熱伝導 (各表面内部)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

建物内部の境界条件

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_o (T_{sr} - T_r)$$

用語：

R_S 正味放射量 [W/m²]

R_L 正味長波長放射量 [W/m²]

R_{La} 大気放射量 [W/m²]

R_{Lw} 周辺の建物や地面からの長波長放射量 [W/m²]

Q_H 対流熱伝達量 (顕熱流量) [W/m²]

Q_E 潜熱フラックス [W/m²]

Q_G 伝導熱 [W/m²]

T 温度 [K]

第2章 航空機リモートセンシングと数値解析による
高層建築物周辺の表面温度分布の把握

- a_{su} 日射吸収率 [-]
 θ 直達日射の入射角 [rad]
 I_{DR} 直達日射量 [W/m^2]
 F 形態係数 [-]
 F_{sky} 天空率 [-]
 I_{SR} 天空日射量 [W/m^2]
 I_{RR} 反射日射量 [W/m^2]
 ε 長波長放射率 [-]
 σ ステファン・ボルツマン定数 [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$]
 a, b プラントの式の定数 [-]
 e 地表面近傍の水蒸気圧 [Pa]
 c 雲量 ($0 \leq c \leq 10$) [-]
 m 雲高係数 [-]
 α_c 対流熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
 l 蒸発熱 [J/kg]
 β 蒸発効率 [-]
 k 物質伝達率 [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}(\text{kg}/\text{kg}'))$]
 X 絶対湿度 [kg/kg']
 λ 熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
 C_p 容積比熱 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
 α_o 全体の熱伝達係数 [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
 T_{sr} 室内側の表面温度 [K]
 T_r 室温 [K]
下付き
 s 表面
 a 大気
 w 周辺の建物や地面
 n 長波長放射を放出する地物の総数

第2章 航空機リモートセンシングと数値解析による 高層建築物周辺の表面温度分布の把握

注釈

注 2-1) 高層気象台による観測は9時と21時に行われる。昼間は一定の気温逡減率を仮定し、リモートセンシング観測時の地上気温を用いて計算を行った。日没後については、夜間大気放射冷却により鉛直温度勾配が変わり一定の逡減率を仮定できないため、21時に観測された気温の鉛直分布を用いて計算を行い、結果を参考として使用した。

第3章

冬季における高層建築物周辺の温熱環境の実測

3.1 はじめに

3.2 実測方法（移動観測）

3.3 実測方法及び実測当日の気象条件（実測の概要）

3.4 移動観測の結果

3.5 各区画における観測結果の分析

3.6 気温と他の観測項目の関係

3.7 実測値とリモートセンシング観測平均値との比較

3.8 考察

3.9 まとめ

参考文献

3.1 はじめに

2章の航空機リモートセンシング観測と数値シミュレーションによる対象市街地の放射温度の把握について、高層建築物の日影空間における放射温度の解析値よりも観測値のほうが 5°C 程度低いことが確認できた。すなわち、実態の表面温度 (T_s) が数値シミュレーションより低いことが確認できた。この現象の形成要因を調べるために、まず、現地で T_s の形成を決める各熱収支成分を調べる必要があると考えられる。したがって、本章では高層建築物周辺に形成される温熱環境の実態を明らかにするために、冬季における温熱環境の実測を行った。

本章の構成は以下の通りである。

- 1) 移動観測による実測方法を検討する。
- 2) 高層建築物の日影空間を含む周辺街区における気温・風速分布及び他の熱収支成分の実態把握と分析を行う。
- 3) 2章で提示した高層建築物の日影空間には地表面の蓄冷や高層建築物周囲に特有の微気候の影響を受けている可能性に対し、実測にてそれを明らかにする。

また既往研究と比べて、単棟の高層建築物の冬季の微気候へ及ぼす環境影響を議論するために、以下の研究課題が残されており、明らかにするべきである。

- 1) 高層建築物の周辺でどのような放射収支と微気候が形成されているか？
- 2) 高層建築物が周辺街区の放射収支や微気候に及ぼす影響はどの程度か？

したがって、本章は現地での気温 (T_a) や放射収支の移動観測により、高層建築物周辺に形成される温熱環境の特徴を詳しく明らかにしてゆく。

3.2 実測方法（移動観測）

実測には定点観測と移動観測に分けることができる。定点観測^[3-1]は限られた点しか観測できなく、ただし、観測地点における各観測項目の時系列変化を確認できる。それに対して、移動観測は各観測項目が広範囲での分布を得ることが可能である。ただし、実測の間で気象条件が変化することが考えられる。また既往研究で定点観測の方法を用いられていた研究は天空率など空間の形態との関係に着目したものが中心である^[3-1~3-4]。街路やオープンスペースにおける温熱環境の主要な形成要因となる放射収支などの詳細分布を把握するには、定点観測によりも移動観測による都市域における空間分布（主に下向長波放射量）を把握しようとする試みが多く見られる^[3-5~3-8]。

2章（図2.1）で紹介したように、対象市街地は日本の典型的な地方中小都市であり、単棟の高層建築物と周辺の低層街区が混在する特徴がある。こうした単棟の高層建築物の周辺の微気候の特徴を把握するためには、広範囲にわたって各熱収支成分を把握必要があるため、定点観測での把握は困難であると考えられる。したがって、移動観測は、各熱収支成分のデータを取得するために実現可能で有効な方法であると考えられている。

都市部の温熱環境を把握するための実測に関する既往研究では、 T_a 分布に着目したものは比較的多く見られ、時空間的な分布特性が調べられてきている^[3-9~3-12]。都市部におけるヒートアイランド（UHI）の空間構造に関する調査でも T_a 分布がよく観測されてきた^[3-13~3-16]。他に、複数の研究では、都市構造が UHI へ及ぼす放射影響を説明するために、下向き長波長放射の分布が明らかにされてきた^[3-5, 3-17]。一部の研究では、局所的な T_s と T_a の分布との関係を調べるために、航空機から観測した T_r データと移動観測で得られた T_a を用いた^[3-18~3-20]。上述のように、単棟の高層建築物の影響を評価するには、 T_s 、微気候、及び放射収支の関係が重要である。したがって、2章で行った航空機リモートセンシングによる T_r 観測以外も微気候及び放射収支成分の移動観測を行う必要があると考えられる。

3.3 実測方法及び実測当日の気象条件（実測の概要）

移動観測の対象市街地は2章と同様（図2.1）であり、観測日は冬季の晴天日である2016年1月20日である。図3.1にアメダスから得られた観測日の気象条件を示す。リモートセンシング観測日に比べて1日の最高気温は3.5°C低く。風は強い日であった。具体的に実測当日の平均気温は2.3°C、日最高気温は7.3°Cであり、平均風速は2.7m/sである。主風向は西である。1月の土浦市の日最高気温の平均は9°C程度、風速は2.0 m/s程度であり、この条件に比べても気温が低めで風がやや強い日であったが、1月下旬の平均日平均気温2.4°Cと平均日最高気温7.7°C、平均風速2.2m/sから見ると、この時期にとっては風速がやや高いが気温は平均的であると判断できる。また1月の31日中風向が西の日数は11日である。よって、この日の条件は典型的な冬日と考えられ、平均条件とやや違いがあっても、高層建築物の日影空間をはじめ、対象市街地の冬季におけるTrと微気候の特徴を議論することが、可能であると考えられる。表3.1に観測項目と使用機器を示す。Ta、Rh、V、下向と上向の短波放射量(S↓, S↑)と長波放射量(L↓, L↑)を観測した。Taの観測にはPCファンによる自作の二重筒式強制通風筒を用い、気温センサーにØ0.1mmの熱電対を用いることで、放射の影響を除去した。移動観測は自動車を用いた観測が見られる^[3-11, 3-12]が、本研究では、狭い路地が存在する低層住宅地や駐車場などを通るため、自転車による移動観測を行った。観測機器を図3.2のように自転車の前かごに取り付け、自転車を一定の速度で押して歩いた。観測者は自転車の左側から押すようにし、人の日陰の影響は入らないよう配慮した。また、自転車の日陰や形態係数も小さいことを確認した。移動速度とセンサーの時定数を考慮して観測間隔を2秒としてデータを取得した^{注3-1) 注3-2)}。

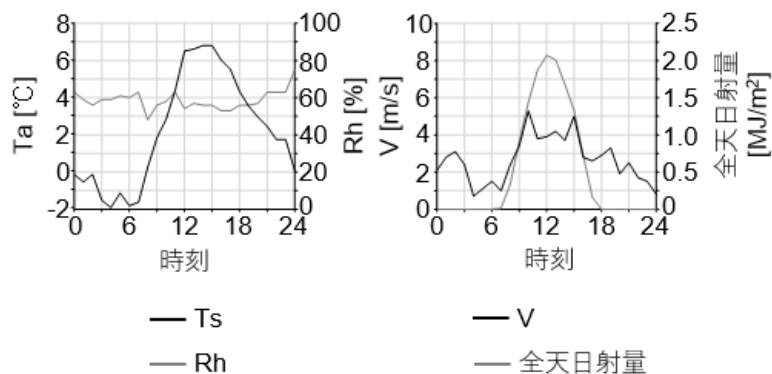


図 3.1 移動観測日の気象条件

表 3.1 移動観測の観測項目と使用機器

項目	装置
下向きと上向き放射量 (短波と長波)	4成分放射収支計(MR-60, 英弘精機株式会社)
気温と相対湿度	Ø 0.1mm T-type 熱電対と湿度 センサー (CHS-UPS, TDK) 強制換気パイプ搭載
風速	熱線式携帯風速計(Climomaster Model 6501series, KANOMAX)
記録	データロガー(Thermic Model 2300A, 江藤電気)

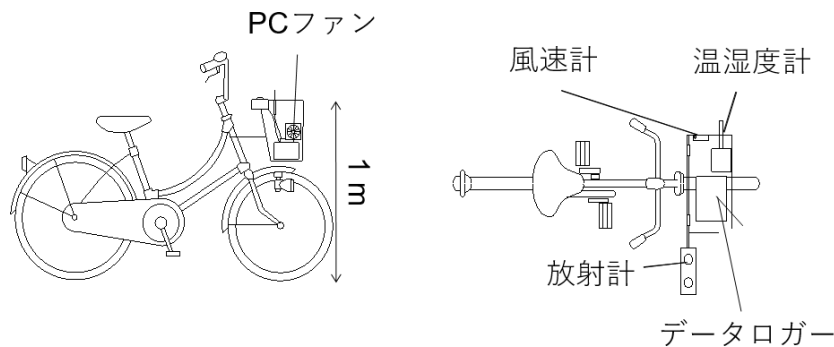


図 3.2 移動観測用自転車の模式図

図 3.3 に移動観測のルートを航空写真上で示す。駅前、高層建築物及び隣接する商業施設の前、北側市街、旧市街を網羅するように観測を行った。観測は2名で行い、1名が自転車を押し、もう1名はチェックポイントを通じた時刻を記録した。チェックポイントは数十メートルの間隔で設定された。道路の曲り角、横断歩道における横断の開始と終了地点、及び建物の正面入口がチェックポイントとして設定された。10時30分、12時、15時、17時、19時を観測時刻に設定し、各時刻を中心とする30分間（観測時刻±15分）に観測を行なった。安定した気象条件であったため、観測時間内における上空の気象変化の影響は小さいことを確認した。チェックポイントと通過時刻をもとに、各観測値に位置情報を与えた。すなわち、チェックポイントの位置情報を地図から取得し、記録地点間は速度一定で均等に観測値が存在するとした。

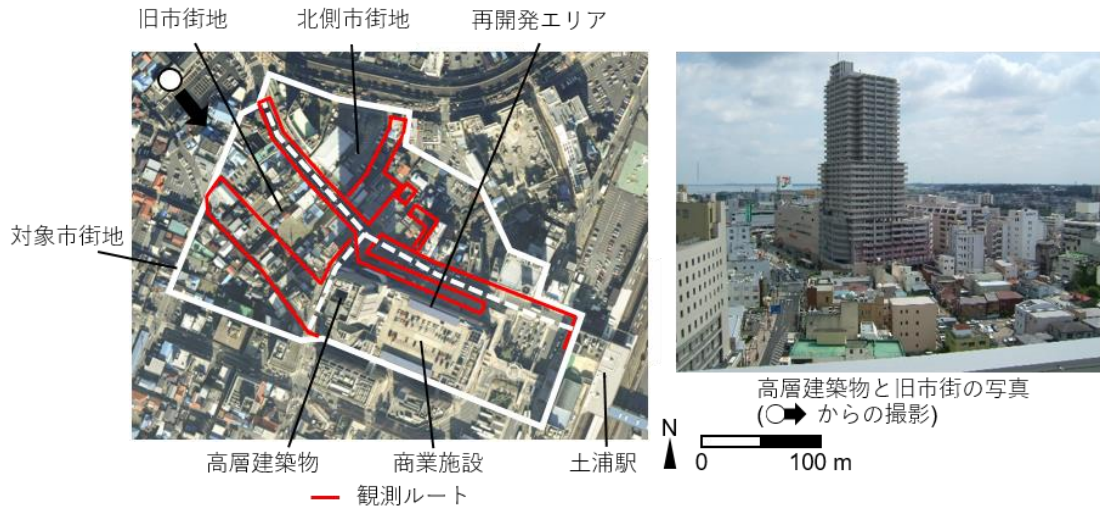


図 3.3 対象市街地の写真及び移動観測のルート

3.4 移動観測の結果

2章のリモートセンシング観測の結果から、対象市街地ではエリアごとに特徴が異なると考えた。また、本節では移動観測の結果を分析することによって、日影空間を中心としたエリアで T_r が低いことを微気候と放射収支成分の移動観測で明らかにする。微気候と放射収支成分はエリアごとで異なると予想され、観測ルートを図 3.4 のような区画に分けて特徴を考察する。また、高層建築物の等時間日影図 (図 3.5) ^{注 3-3)} も考慮して分析を行う。この地区は商業地域のため、日影規制は適用されていないが、2 時間以上の日影時間は北側市街地にはほとんど及んでいないが、2 章の結果から 1-2 時間程度の日陰であっても温熱環境に大きく影響している可能性がある。

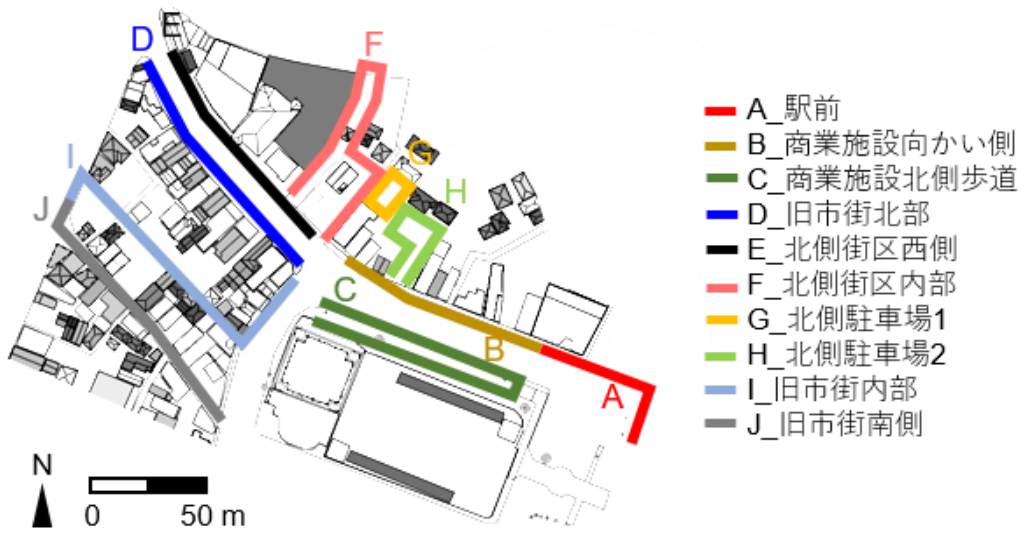


図 3.4 移動観測ルート of 区画への分割

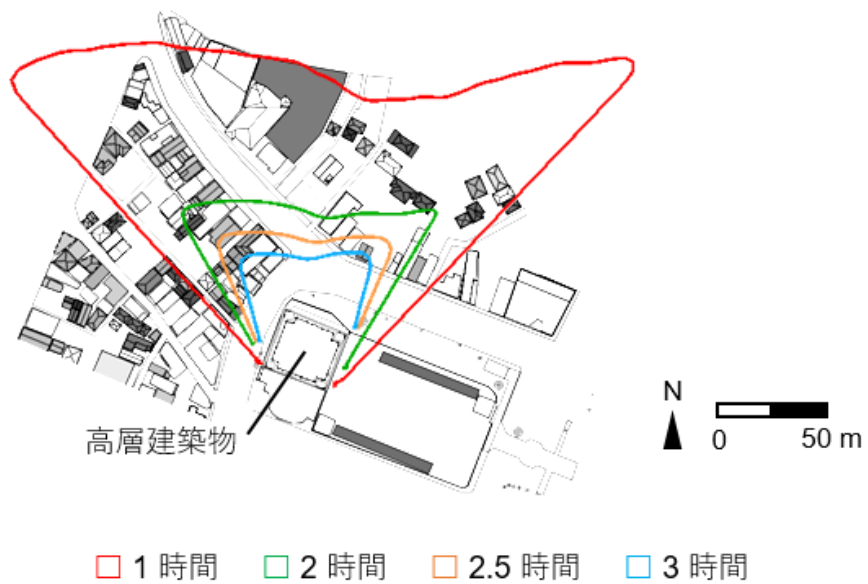


図 3.5 4 m 高さにおける高層建築物の等時間日影図 (冬至日)

図 3.6 に各観測時刻の結果をルート上にマッピングして示す。3次元 CAD モデルから導いた高層建築物の影の位置も併せて図上で示す。昼間において、調査対象市街地の T_a の範囲は T_a' の範囲と同等であった (図 3.6 と図 3.1)。逆に 17:00 と 19:00 の間においては、観察された T_a 値の大部分は、 T_a' よりも高かった。それはアメダスサイト周辺に熱容量の低い材料が対象市街地より多く存在したためであると考えられる。したがって、 $T_r \leq T_a'$ の物質については、 T_r と対象市街地における T_a の差が T_r と T_a' の差よりも大きい (T_a' の代わりに対象市街地における T_a を用いると、 T_a より低いピクセルがより多く抽出される) と考えられる。10時や12時においては T_a の差が 2°C に達しており、それほど広くない市街地の中でも大きな分布がある。区画 A_駅前は午後高温の状態が続く、区画 C_商業施設前は午前中から正午にかけて非常に低温、区画 J_旧市街南側は 10 時では最も T_a が高いが 19 時では最も低いなどエリアごとに異なる特徴が見られる。高層建築物の下ではどの時刻においても V が大きく、ビル風が生じていると考えられる。 $S\downarrow$ から日陰の分布が読み取れる。12 時において、南側に建物が隣接する道路が日陰になっているが、区画 F_北側市街内部も一面日陰になっており、高層建築物の影響が 130 m 先まで及んでいることが確認できる。 $L\downarrow$ の差は $60\text{--}80\text{ W/m}^2$ であり、天空率の違いが影響していると考えられる。区画 C の東側は常に $L\downarrow$ が大きい、これは歩道の上に屋根が設置されたためである。この屋根は可視光を透過する素材でできており、リモートセンシング観測時には設置されていなかった。 $L\uparrow$ は主に地面の T_s に関係しており、 T_a の分布によく対応している傾向が見られる。

高層建築物の日陰空間について、 $S\downarrow$ 、 T_a 、 $L\uparrow$ が小さいことから、受熱日射量が小さく、低温 (気温と表面温度の低下) の状態が 1 日中を通して続いたことがわかった。高層建築物による日陰空間で、 $L\uparrow$ (地表面の放射温度に依存) が周辺地域より小さい結果は、2 章の航空機リモートセンシング観測結果と一致するものである。その場所の T_a は周囲より低く、上空気温 (T_a') よりも低い結果は、航空機リモートセンシング観測から示唆された可能性を裏付けるものである。10:30 の $S\downarrow$ と T_a と $L\uparrow$ を見ると、旧市街地の北側 (灰色の枠) はこの時間帯で高層建築物の日影に入り高層建築物近傍の日陰空間と同程度に日射量が小さいところが確認できたが、 T_a は周囲と大きな差がなく、高層建築物の日陰空間よりも 1°C から 2°C 程度高くなっている。また高層建築物の周囲は V も高いことから、高層建築物の日陰空間において局所気温が低くなっていることは、長時間の日陰となり、近傍空気と低温の地表面との局所的な熱交換により冷気が生成し続けられているためであることが示唆される。

上記で観測された高層建築物の日陰空間における局所気温が低くなっている現象に対し、これが近傍空気と低温の地表面との局所的な熱交換によるものか、また低温の地表面には構成材料の蓄冷現象の影響がどの程度含まれているか (2 章の航空機リモートセンシング観測から示唆された) を 5 章の 24 時刻の連成解析手法で明らかにする。

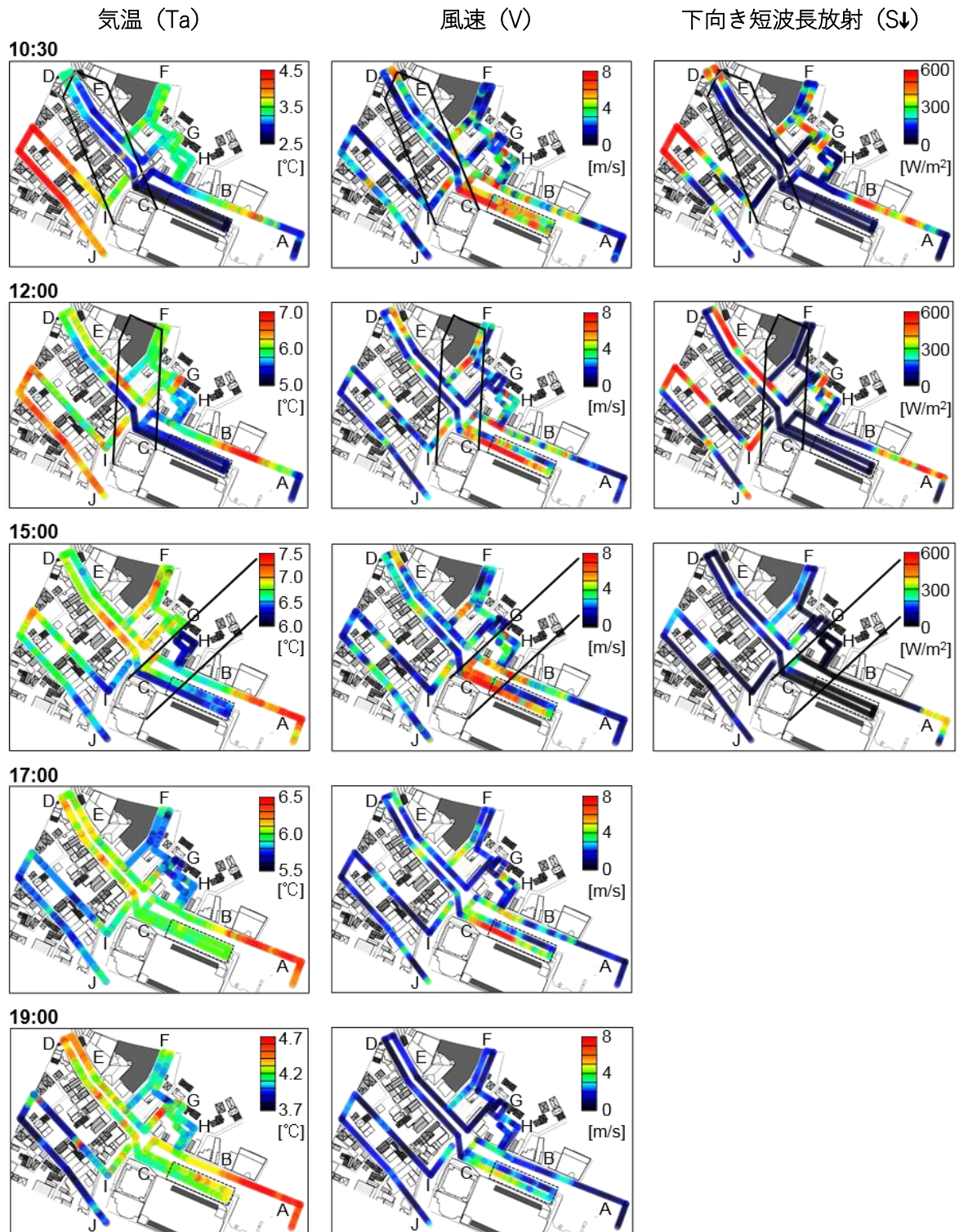


図 3.6 移動観測の結果。 黒い線は、高層建築物が該当時刻に落す影の輪郭を示す。 破線は、商業施設の前に建設された大きな屋根を表す。 区画区分も示されている (A~J)。

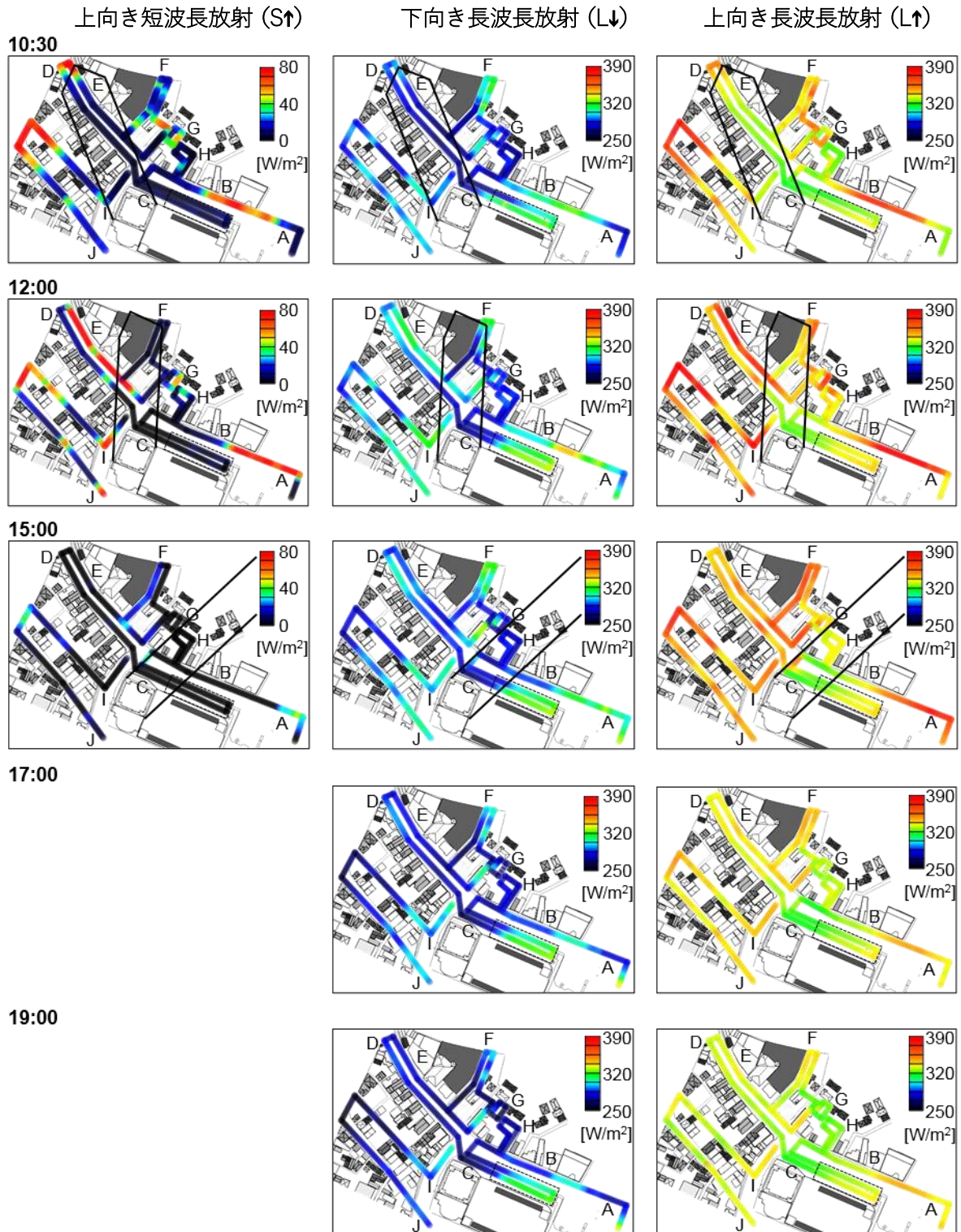


図 3.6 移動観測結果 (続き)

3.5 各区画における観測結果の分析

各区画における観測結果を分析する前に、実測データのばらつきについて検討する。図3.7の(a)、(b)に移動実測対象日のそれぞれ風速と気温の時系列変化を示す。図から、気温に対して、実測対象時刻では、上空気象データがほぼ変動がないことが明らかになった。風速については、気温よりばらつきが大きい、日変化に対して、測定30分間の変化が限定的と判断できる。12時の実測については、高層建築物の日影空間を通る時刻は12:00前後であり、その時の上空風速は前後の時刻と比べ最も小さいことがわかった。一方、実測結果では高層建築物の日影空間でその他のエリアより高い風速が観測された。ただし、実際の微気象としては風向・風速と気温の時間変動はあると確認したので、下記の分析においては実測エリアを各特徴のある区画に分類し、それぞれの区画に対して、実測値の平均化を行った。

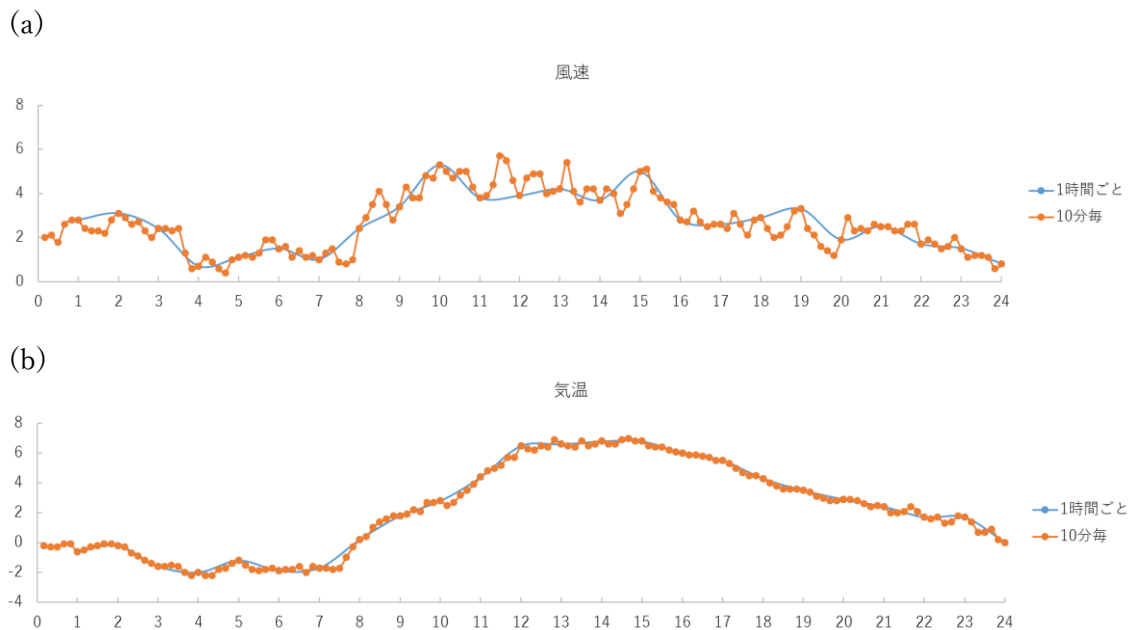


図3.7 実測対象日の風速・気温の時系列変化

図3.8に観測結果を各区画で平均した値の日変化を示す(以下、空間平均的な値を示す場合 \bar{T}_a のように表記する)。区画A(駅前)では、地面がアスファルト舗装に覆われていて、南に建物がないため、12:00から以降 $\overline{S\downarrow}$ が増加し、 $\overline{L\uparrow}$ が大きい状態が夜まで続き、 \bar{T}_a も高く保たれている。区画B_商業施設向側では、午前中に区画の東側に日射が当たり $\overline{L\uparrow}$ が大きくなるが、 \bar{T}_a はあまり上がっていない。区画Cは高層建築物と商業施設のすぐ北側にある歩道である。この区画では $\overline{S\downarrow}$ と $\overline{L\uparrow}$ が1日中最も小さい。 \bar{V} は大きい、流れ込んだ空気が

高層建築物の日影の壁面や地面によって冷却されたことから $\overline{T_a}$ も低くなっている可能性があると考えられる。 $\overline{T_a}$ は10:30と12:00に最も低い。(また、冷却された空気が流れ込んだ可能性があるために区画Bの $\overline{T_a}$ も低かったとみられる。)区画Cは透明な屋根でも長波長放射に対して透過できないため、図3.6によると、屋根が設置された場所においても $L\uparrow$ は屋根が設置されていない場所より小さい。大気放射冷却が低い T_s の形成にとって重要であることを示している。一方、屋根の下と屋根の外の T_a の差は小さかった。 $L\uparrow$ は19時まで小さい状態が続くが、 $\overline{T_a}$ は他の区画に比べて低くはない。旧市街に多く見られる木造建物の屋根面のように T_s が急激に下がる材料がないこと、風が強く空気の混合が盛んであることが要因と考えられる。

区画D_旧市街北側は日射が当たりやすく、 $L\uparrow$ が小さい状態が続いた。しかしながら、12時以降の $\overline{T_a}$ は高い。歩道沿いのRC造建物の屋根面の温度が下がりにくいことが影響している可能性がある。また、リモートセンシング観測時には建物が存在したが、移動観測時には駐車場に変化した場所も存在した。区画E_北側市街西側には昼から日射が当たり、 $L\uparrow$ が大きく $\overline{T_a}$ も比較的高い状態が続いた。区画F(北側市街地内部)では、高層建築物の影響で12時に日射が得られなく、 $\overline{S\downarrow}$ が低かった。 $\overline{S\downarrow}$ 分布は高層建築物の日影図(図3.5)と一致していることから、高層建築物と130m離れた場所にも高層建築物の日影に入っていることが推測される。高層建築物と隣接する道路(区画C)と旧市街における低層建物と隣接する道路(区画D)や、一日を通して日射が当たりにくい建物に囲まれた駐車場(区画H)について $L\uparrow$ と $\overline{T_a}$ が低い。1-2時間程度の日陰(図3.5)であっても $L\uparrow$ だけでなく T_a にも影響している。午後には日射が当たるようになり $L\uparrow$ が増加するが、17時以降 $\overline{T_a}$ は低い。木造建物(区画Fのうち北側のルートに隣接する建物(図3.3))の影響や区画内の比較的高い建物に隣接する地面の蓄冷の影響と考えられる。この場所は高層建築物から70m離れた居住空間であり、それでも厳しい温熱環境が形成されていることが示されている。高層建築物の温熱環境への影響は数十mまでに及ぶと推定されている(3.1節の課題(2))。

区画Fの隣に存在する駐車場(区画G_北側駐車場1)では、10~12時に日射を受けて $L\uparrow$ が大きくなり $\overline{T_a}$ も上昇した。しかしながら、午後からは高層建物の日陰に入り $L\uparrow$ は減少してゆく。日射が当たる時間が短いためあまり蓄熱していないと考えられる。15時において $L\uparrow$ が小さいにも関わらず $\overline{T_a}$ は比較的高い。一方、17時では全区画の中で最も $\overline{T_a}$ が低い。 \overline{V} のグラフによるとこの場所は風が弱く、空気の混合が少なく徐々に $\overline{T_a}$ が低下したと考えられる。その隣の駐車場(区画H_北側駐車場2)では、一日を通して日射量が少ない傾向がある。これは午前には東側の建物の影響を、昼からは高層建築物の影響を受けるためであり、 $L\uparrow$ が小さく $\overline{T_a}$ も低い状態が一日中続く。15時から商業施設の前(区画C)よりも $\overline{T_a}$ が低いのは、区画Cに比べると風が弱いと思われる。これらの駐車場の周囲には住宅も存在しており、日射が得られず T_s が低いだけでなく実際に T_a も低くなっており、高層建築物が低温の居住空間をもたらしていることを確認できた。この場所の日影時間は2

時間程であり（図 3.5）、この程度の日影時間であっても温熱環境への影響は大きい。

区画I_旧市街内では、10時から12時において日射があたり、 $S\downarrow$ と $L\uparrow$ が大きく Ta も高い。午後も $L\uparrow$ が大きい状態が続くが、17時から Ta が低い。リモートセンシングの結果（図 2.8）で述べたように、屋根面の温度が急激に下がる木造建物が分布していることが影響していると考えられる。区画Jでは、区画Iよりもさらに Ta の変化が大きい。10時、12時には最も Ta が高く、19時には最も低い。これは区画Iと同様の理由であるが、区画Iには駐車場も隣接するのに対し、区画Jは多くの木造建物が囲まれており区画としての熱容量が小さかったためと考えられる。

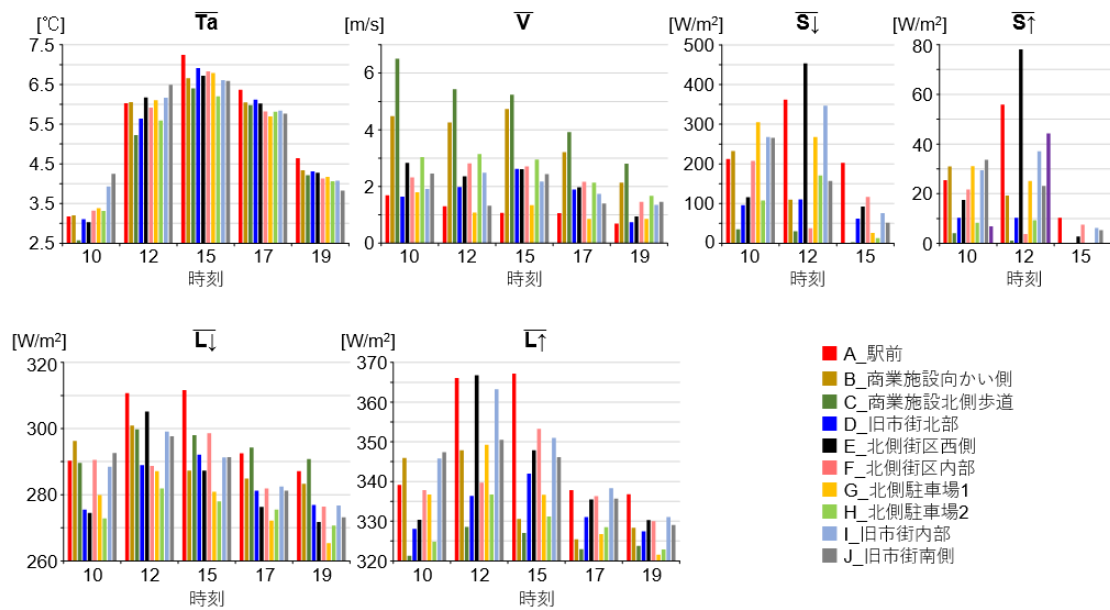


図 3.8 各区画における観測結果の平均値の日変化

3.6 気温と他の観測項目の関係

Ta が Ts に及ぼす影響は広範囲な大気・熱現象、地域スケールの大気・熱移動に依存する。どの要因がより支配的であるのかは、大気安定度、風環境、空間形態によって異なるが、ここでは Ts 、局所微気候、及び放射収支の間の関係性から確認される。気温場の形成要因を考察するために、各時刻の全ての観測点の結果を対象に Ta と他の観測項目の相関係数を調べた（図 3.9）。17時と19時においてはどの項目も Ta との相関は低いですが、10時から15時においては $L\uparrow$ が高い相関を有する。そこで Ta と $L\uparrow$ の関係を詳しく見るために

区画ごとに両者の散布図を作成した。

図 3.10 に各時刻の T_a と $L\uparrow$ の関係を示す。グラフの 1 点が 1 つの観測点の結果を表す。前述のように、移流は T_a の分布に影響を与えたが、 T_a の回帰直線を求めると、 $L\uparrow$ は 15:00 まで T_a によく一致した。回帰直線の傾きは、10:30 から 17:00 まで徐々に減少した。10:30 から 12:00 については、 $S\downarrow$ (日向と日陰) の違いによる T_s の大きな違いが T_a の違いを引き起こした可能性が高い。12:00 以降では、日射量の減少や日陰の部分が増えたことにより、 T_s が高かった場所で T_s が大きく低下し。それは日影における蓄冷の影響が T_s を影響したと推測される。特に区画 C ではその影響が大きいと見られる。それによって、全体的に T_a の差が小さくなったとみられる。17 時においては T_a と $L\uparrow$ の間に関係がほとんどなくなった。特に区画 I と J では、道路の T_s は高いままであったが、大気放射冷却により周辺木造建物の屋根面の T_s が低下し、 T_a の低下につながったためと考えられる。19 時には再び傾きが生じており、区画 A や区画 B の蓄熱の影響と考えられるが、ほとんど相関は見られない (図 3.10)。要するに、日射による T_s の増加は、15:00 まで局所 T_a に影響を及ぼし、日没時に T_a と T_s の相関が消えた後、夜間に T_s と T_a に対して熱容量の影響が顕著になった。これらの結果は、昼間における低い T_s が局所的に低い T_a との相互作用によって引き起こされたという仮説を裏付けている。

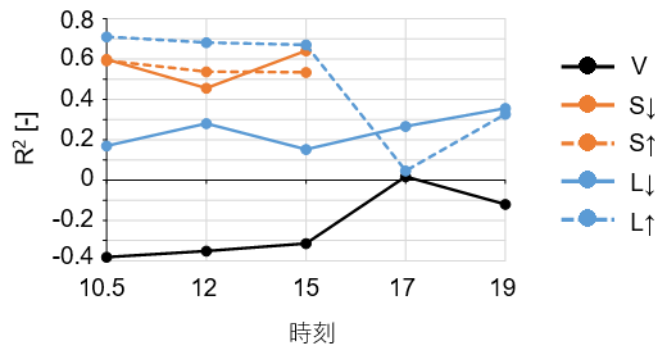


図 3.9 気温 T_a と他の観測項目の相関

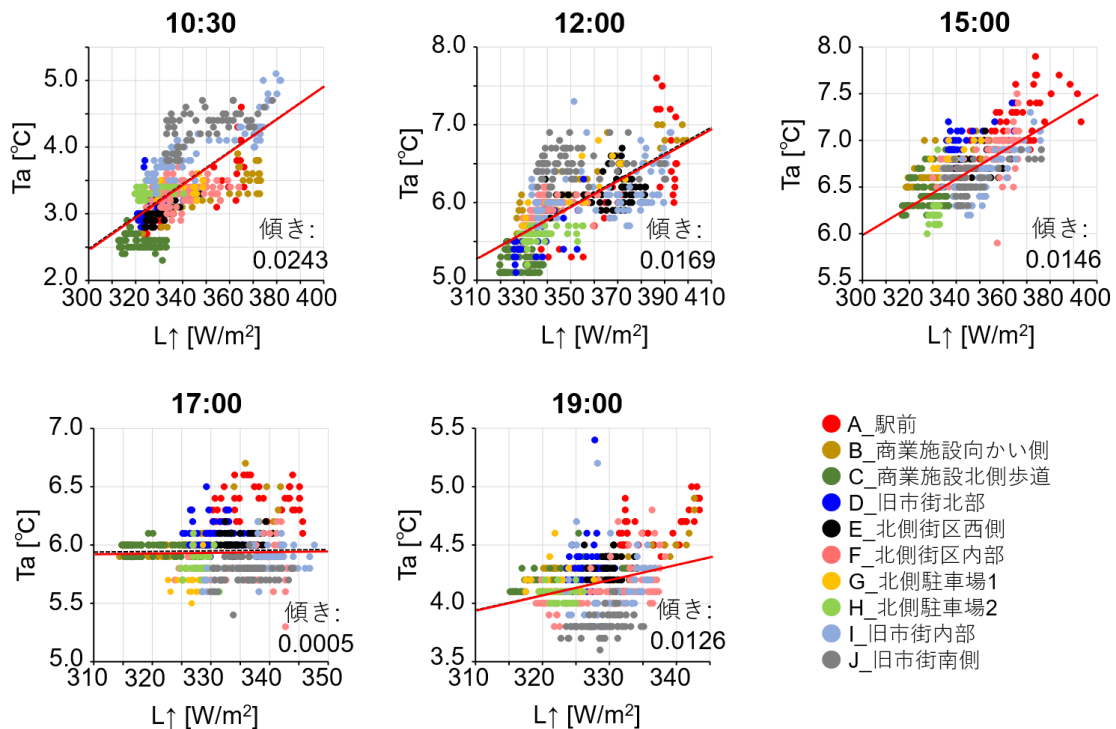


図 3.10 各時刻において、気温 T_a と上向長波放射量 L_{\uparrow} の関係

3.7 実測値とリモートセンシング観測平均値との比較

上記の結果や 2.5.2 項の結果から観測点近傍よりもその周辺を含むエリアの T_s の T_a との関係が推測された。そこで T_a とリモートセンシングによる空間平均的な T_r の関係を調べた。図 3.11 に各区画の $\overline{T_a}$ と $\overline{T_r}$ の関係を示す。 $\overline{T_r}$ を用いたことによる変化を示すために $\overline{L_{\uparrow}}$ との関係も示す。 $\overline{T_r}$ には観測ルートから約 15 m の範囲に含まれる T_r を用いた。このとき次のピクセルは除いた。放射率が低い材料、区画 A・区画 B・区画 E (熱画像において建物の倒れ込みの影響が見られたため)、区画 G (駐車場内に存在した建物が移動観測時には撤去されていたため)。リモートセンシング観測日と移動観測日は異なるため日射の当たり方などに多少の差はあるが、観測ルートに隣接する建物の影響などは確認することができると思われる。

12 時において $\overline{L_{\uparrow}}$ と $\overline{T_r}$ はともに $\overline{T_a}$ と関係している。 $\overline{T_r}$ を用いた場合には、区画 J が $\overline{T_a}$ 、 $\overline{T_r}$ ともに最も高く、屋根面の高い T_s が街路の T_a の上昇に寄与したことを示す結果である。区画 F の $\overline{T_a}$ が高いのは、午前中に日射を受けて T_s が高かったためと考えられる。17 時において $\overline{L_{\uparrow}}$ と $\overline{T_a}$ には相関がないが、 $\overline{T_r}$ と $\overline{T_a}$ の間には相関が見られる。 $\overline{L_{\uparrow}}$ から輝度温度を求めると、区画 H と区画 I の差は 2 °C 程度であるが、 $\overline{T_r}$ では 1°C の差であり、両区画の気温の差が小さいことと整合している。また、気温が最も高い区画 D は $\overline{T_r}$ も最も高い。壁面の

影響や T_a への各地物の影響範囲については5章での検討が必要である。

以上のようにいずれの時間においても空間平均的な T_r と T_a の間に相関が見られた。すなわち、高層建築物の日陰は T_s に影響するだけでなく、その場所に低温な空間を形成する。またそのような温熱環境を議論する際、街区としての熱容量も重要であることが分かる。

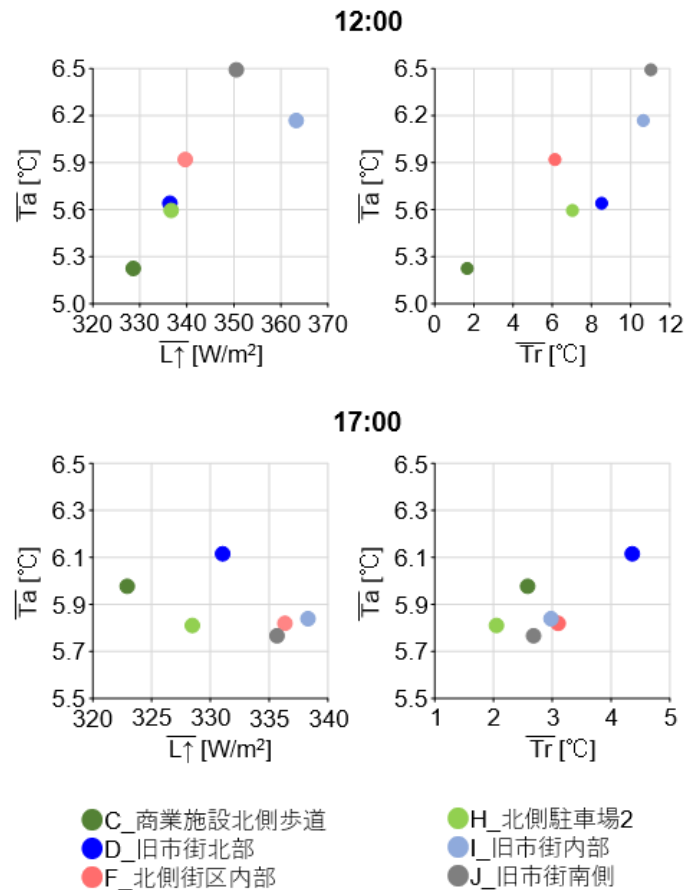


図 3.11 各区画における気温の平均値(\bar{T}_a)と長波放射量の平均値 $\bar{L}\uparrow$ およびリモートセンシング観測による放射温度の平均値(\bar{T}_r)の関係

3.8 考察

区画IとJにおいて、17:00と19:00に観測された道路レベルでのTsとTa間の上記の不一致に関して、Parlow et al.^[3-21]は、地上と屋根レベルでのTaの差を指摘した。屋根のTsが地面のTsよりも高かったにもかかわらず、屋根付近のTaは地面付近よりも低かった。しかしながら、Parlow et al.は、平均的な建物の高さは15-18mであったが、地上から33mの高さで測定されたTaを屋根レベルのTaとして使用した。Johansson^[3-22]は、屋根の放射冷却によって、キャニオンへ流れ込む冷気が、ストリートキャニオンの夜間温度が著しく低下することを示した実験結果により説明できることを示唆した。同様な議論は本章の結果にも適用できると思われる。17:00と19:00にTaの分布の原因を議論するために、Taが記録された地点周辺の航空機リモートセンシング観測のTrと比較することができる(3.7節)。ただし、商業施設北側の歩道の上に屋根が新しく設置されたこと、材料の低放射率によるTrがTsより顕著に小さい場合、リモートセンシング観測と移動観測の間に発生したいくつかの土地被覆の変化などがあるため、誤差を考慮すべきである。

航空機リモートセンシング観測から得られた熱画像の空間分解能によるTrとTaの関係の差異を議論する必要がある。Coutts et al.^[3-23]は、0.5mの空間分解能を持つ航空機リモートセンシング観測から得たTrデータと深夜における自動車観測によるTa分布を用いて、夏季の都市域のホットスポット(Taが比較的高い地域)を検出するために、航空機リモートセンシングの能力を調査した。Coutts et al.は、高空間分解能のTrデータは、ホットスポットを検出するために、より粗い解像度(>30m)に集めるべきであると結論付けた。2章と本章は、高い空間分解能のTrデータが、昼間に日陰になる場所が多い冬季における都市部のTa分布を議論するのに有利であることを示し、さらに、日影空間におけるTsと局所的に低いTaとの相互作用がある可能性を示唆した。

10:30と12:00は、昼間に広範囲スケールの不安定層による熱対流で、鉛直方向と水平方向の気流拡散が加速され、対象市街地の中のTaの差、及びL↑とTaの相関は、本来小さくなるはずである。しかし、その相関が大きく、低いTsがある地域ではTaが局所的に低い結果を示した。この傾向は、高層建築物と隣接する商業ビルの前で高まった。Kanda et al.^[3-24]は、高密度の低層建物を含む都市キャノピーでは、キャノピー外の大気が昼間に不安定であってもキャノピー内の空気が安定していることを示している。本章の結果から、高層建築物と商業施設の北側の歩道のようなキャノピーの外に開いた空間でも、Taが周囲のTaよりも低い低温な環境が形成されることを示した。日中、周囲の建物や高層建築物の影になっている高層建築物から数十m離れた場所であっても、Taは対象市街地の他の地域と比べて低かった。

これまでに、都市部の熱容量は夜間の都市ヒートアイランドの観点から論じられてきた(Runnels et al.^[3-25]、Oke^[3-26, 3-27])。キャノピーの外側と比較してキャノピー内部のTaが

低いことを示す研究 (Bourbia et al.^[3-28]、Johansson^[3-22]、Georgakis et al.^[3-29]) では、日射と気流分布は低 T_a を引き起こす主な原因として示されている。都市キャニオンにおける熱収支の詳細な測定を行う研究 (Nunez et al.^[3-30]、Yoshida et al.^[3-31]) では、夏の蓄熱が主に問題視されてきた。しかし、本章の研究結果からは、持続的な日影、長期間にわたる大気放射冷却、街区構成材料の高い熱容量、及び T_s と局所 T_a との相互作用の可能性によって、日中では日影地域において顕著に低い T_s が形成されていることを示唆した。本章の結果は、発生頻度や複雑な熱・気流現象である低 T_s と T_a の詳細な生成メカニズムを解明するには不十分であった。したがって、今後の研究では、様々な気象条件での多点 (水平、鉛直) 観測が必要と考えられる。また、5章では、都市キャノピーの空間形態と構成材料、地面と壁面の蓄熱／蓄冷、そして表面と大気との相互作用を考慮した三次元の数値シミュレーションを実施する。

3.9 まとめ

移動観測により、高層建築物周辺を含む対象市街地における気温 (T_a)、風速 (V) 及び熱収支成分に対して、実測・分析を行った。2章の航空機リモートセンシング観測から得られた放射温度 (T_r) と併せて、高層建築物周辺の冬季における温熱環境に実態把握をした。冬季と夏季の T_r 分布から、高層建築物の影が冬季の T_r 分布に大きな影響を与えていることがわかった。冬季において、長時間日射遮蔽された区域では、熱容量の大きい舗装の屋間の T_r は著しく低く、表面温度 (T_s) は放射率を考慮すると T_a よりも低いと考えられ、蓄冷が T_s に影響を及ぼしている可能性が高いことを示している。特に、高層建築物と隣接する商業施設の北側歩道では午前から正午にかけて気温も低く保たれることが明らかになった。ビル風の影響を受けるにも関わらず、同じ市街地内の日向に比べて 2°C 以上低かった。長波放射を遮蔽する屋根が設置されたにも関わらずこのような低温な空間が形成されたことから、屋根の下の地表面への蓄冷の影響と考えられる。高層建築物の影響範囲については、周辺の建物や高層建築物などで長時間遮蔽されていた数十 m 離れた場所でも、 T_r と T_a の上昇は抑制されていた。これまで主に都市の熱容量は夜間のヒートアイランドの観点から問題点が指摘されてきたが、このように局所的には冬季の蓄冷についても温熱環境を議論する上で重要であることが示される結果である。

高分解能のリモートセンシングデータからの T_r と局所微気候及び放射収支との関係については、屋間において T_a の分布は上向き長波長放射 ($L\uparrow$) の分布によく一致した。建物密度が低い市街地であっても、日中 T_s が比較的低い地域では、局所的に低い T_a が形成される可能性がある。 T_s と局所的に低い T_a との間の相互作用は、極端に低い T_s の重要な形成要因であることを示唆している。例えば、高層建築物の北側の地区では、日中は日陰により表面温度の上昇が抑制され、それがその場所の気温に大きく影響していた。日没後は木造建物が多く分布する地区で T_a の低下が顕著であったが、道路の $L\uparrow$ (T_s) は依然として高く、 $L\uparrow$ と T_a の相関関係は消えた。リモートセンシングの T_r データから読み取れる大気放射冷却による木造住宅の屋根の T_s の減少は、道路レベルでの T_a に影響を与えたと推測された。

本章は高層建築物の日影空間において、 T_a が低いこと、すなわち、冷気が生成されていることを確認した。また持続的な日影、長期間にわたる大気放射冷却、街区構成材料の高い熱容量、及び可能性のある T_s と局所 T_a との相互作用によって、高層建築物の日影空間における日中の極端に低い T_s が形成されることを示唆している。それに関して、5章の数値シミュレーションによる分析を加えることで、低い T_s と T_a の形成機構をより詳細に明らかにしてゆく。

参考文献

- [3-1] Oke T.R. 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *International Journal of Climatology*, 1 (3): 237-254.
- [3-2] 小林守:都市の地表面と屋上面における長波放射収支の比較観測, 地理学評論, 52 (5), pp.251-260, 1979.
- [3-3] Nunez M., Oke T.R. 1976. Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere II: Within an urban canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, 10 (2): 121-135.
- [3-4] 朴憲淑:ヒートアイランドの形成要因としての都市キャニオンの天空比と夜間の長波放射収支, 天気, 304, pp.579-587, 1987.
- [3-5] Oke T.R., Fuggle R.F. 1972. Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. *Boundary-Layer Meteorology*, 2 (3): 290-308.
- [3-6] Aida M., Yaji M. 1979. Observations of Atmospheric Downward Radiation in the Tokyo Area. *Boundary-Layer Meteorology*, 16 (4): 453-465.
- [3-7] 成田健一:都市域における下向長波放射量の移動観測, 環境情報科学学術研究論文集, 15, pp.249-254, 2001.
- [3-8] 長森修平, 高木直樹, 菅沼渉:街区構成による放射収支への影響に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), pp.629-630, 平塚, 2015.9.
- [3-9] 清田忠志, 谷口明, 清田誠良, 中村安弘:都市域におけるヒートアイランド現象の緩和対策に関する研究:その1 広島市の都市域における海陸風および風の時間帯での気温の特性, 日本建築学会環境系論文集, 71, pp.69-75, 2006.
- [3-10] 菊池信, 堀越哲美:夏季と冬季における名古屋の都市気候観測調査, 日本建築学会環境系論文集, 70, pp.83-89, 2005.
- [3-11] 鍋島美奈子, 古崎靖朗, 中尾正喜, 西岡真稔:移動観測によるヒートアイランド現象の実測 大阪平野の夜間気温分布, 日本ヒートアイランド学会論文集, 1, pp.23-29, 2006.
- [3-12] 水野雅士, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 西岡真稔:自動車を用いた移動実測による市街地気温分布調査 —セミバリオグラムとクリギング補間による気温水平分布の分析—, 日本建築学会環境系論文集, 74, pp.1179-1185, 2009.
- [3-13] Oke T.R. 1975. Urban heat island Dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmos. Environ.*, 9: 191-200.
- [3-14] Park H.S. 1986. Features of the heat island in seoul and its surrounding cities. *Atmos. Environ.*, 20: 1859-1866.
- [3-15] Yamashita S. 1996. Detailed structure of heat island phenomena from moving

- observations from electric tram-cars in Metropolitan Tokyo. *Atmos. Environ.*, 30: 429–435.
- [3-16] Hart M.A., Sailor D.J. 2009. Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. *Theor. Appl. Climatol.*, 95: 397–406.
- [3-17] Aida M., Yaji M. 1979. Observations of Atmospheric Downward Radiation in the Tokyo Area. *Bound.-Lay. Meteorol.*, 16: 453–465.
- [3-18] Spronken-Smith R.A., Oke T.R. 1998. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *Int. J. Remote Sens.*, 19: 2085–2104.
- [3-19] Saaroni H., Ben-Dor E., Bitan A., Potchter O. 2000. Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel. *Landscape Urban Plan.*, 48: 1–18.
- [3-20] Coutts A.M., Harris R.J., Phan T., Livesley S.J., Williams N.S.G., Tapper N.J. 2016. Thermal infrared remote sensing of urban heat: Hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning. *Remote Sens. Environ.*, 186: 637–651.
- [3-21] Parlow E., Vogt, R., Feigenwinter C. 2014. The urban heat island of Basel – seen from different perspectives. *J. Geogr. Soc. Berlin.*, 145: 96–110.
- [3-22] Johansson E. 2006. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Build. Environ.*, 41: 1326–1338.
- [3-23] Coutts A.M., Harris R.J., Phan T., Livesley S.J., Williams N.S.G., Tapper N.J. 2016. Thermal infrared remote sensing of urban heat: Hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning. *Remote Sens. Environ.*, 186: 637–651.
- [3-24] Kanda M., Moriwaki R., Kimoto Y. 2005. Temperature profiles within and above an urban canopy. *Bound.-Lay. Meteorol.*, 115: 499–506.
- [3-25] Runnells R.C., Randerson D., Griffiths J.F. 1972. An observational study of winter temperatures in the urban area of Houston, Texas. *Int. J. Biometeorol.*, 16: 119–129.
- [3-26] Oke T.R. 1973. City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.*, 16: 769–779.
- [3-27] Oke T.R. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 108: 1–24.
- [3-28] Bourbia F., Awbi H.B. 2004. Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate Part 1: Air and surface temperature measurements. *Renew. Energ.*, 29: 249–262.
- [3-29] Georgakis Ch., Santamouris M. 2006. Experimental investigation of air flow and

temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. *Energ. Buildings.*, 38: 367–376.

- [3-30] Nunez M., Oke T.R. 1977. The energy balance of an urban canyon. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 16: 11–19.
- [3-31] Yoshida A., Tominaga K., Watatani S. 1990–1991. Field measurements on energy balance of an urban canyon in the summer season. *Energ. Buildings.*, 15: 417–423.
- [3-32] Sato R., Hoyano A., Asawa T. 2009. Modeling method of substantial urban area using 3D-CAD and its application to thermal environment simulation in rural cities. ICUC-7 - The 7th International Conference on Urban Climate, proceedings.

注釈

- 注 3-1) 長短波放射計の応答時間(95%)は日射計と赤外放射計についてそれぞれ 17 秒と 18 秒である。歩行速度は約 1 m/s としたため、観測点と同一の放射環境下を 18 m 程度移動することが必要となる。ただし、実際に現地で確認したところずれは数 m であった。湿度センサーの応答時間(90%)は 1 秒、風速計は 4 秒であり、ずれはほとんどないと考えられる。したがって、得られたデータに対する応答時間の影響は小さい。
- 注 3-2) 移動観測のため風速は相対風速である。歩行速度は約 1 m/s であったのに対し、数 m/s の風が吹いていたため、移動観測であることの影響は小さい。
- 注 3-3) この図はコンピューター支援設計 (CAD) ソフトウェアで生成された高層建築物の 3 次元モデル (GIS データと現地調査に基づいて生成された^[3-32]) から導かれ、冬至日において、各地点に高層建築物の陰が投影される時間の長さを表す。CAD モデルはまた対象空間の空間形態を示すために使用された (図 3.11)。

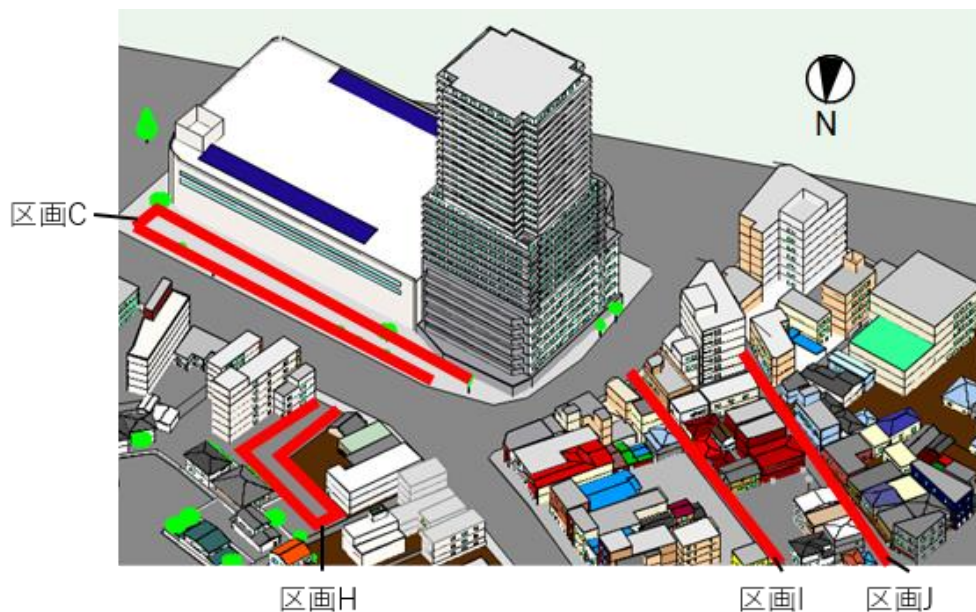


図 3.11 移動実測の主な対象空間の 3-D CAD モデル

第 4 章

熱収支解析と CFD の連成解析手法に関する検討

- 4.1 はじめに
 - 4.2 連成解析の手法及び流れに関する検討
 - 4.3 連成手法検討用のモデル及び解析条件
 - 4.3.1 高レイノルズ数 $k-\varepsilon$ モデル
 - 4.3.2 低レイノルズ数 $k-\varepsilon$ モデル
 - 4.3.3 メッシュサイズの感度分析
 - 4.3.4 解析の条件
 - 4.4 建物細部形状の再現に関する検討
 - 4.5 CFD 乱流モデルに関する検討
 - 4.6 連成回数に関する検討
 - 4.7 まとめ
- 参考文献

4.1 はじめに

建築外部空間に形成される微気候は、快適な都市空間や自然エネルギーを利用した建築空間を創出するうえで重要である。微気候は空間特有に形成されるヒューマンスケールの気候であり、建築物や樹木の高さや配置計画、地表面被覆といった、空間形態と構成材料によって大きく影響を受ける。既往研究でも実測調査^[4-1~4-4]や数値解析^[4-5~4-8]により、都市空間に形成される微気候（気温、湿度、気流、放射、等）の特性を明らかにしようとする試みが続けられている。微気候の形成メカニズムを明らかにするうえでは、実測調査に加えて、原理や現象をモデル化した数値解析を行うことが有効である。数値解析手法としては、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics; CFD）シミュレーションに基づくものが近年は一般的になってきている^[4-5, 4-6, 4-9~4-12]。CFDシミュレーションは、風の流れに加えて、熱・湿気の輸送現象などの微気候の主要な特徴を解析可能であるが、熱・湿気のソースとなる、建物や地表面からの顕熱・潜熱フラックスを予測するには、建物や地表面における熱・物質収支のシミュレーションモデルとの連成解析が必要となる。吉田ら^[4-5]の対流・放射・湿気連成解析手法は、改良型k- ϵ モデルによるCFDシミュレーションに放射解析と湿度輸送方程式を組み込み、都市空間内の気流・気温・湿度・放射温度分布を予測している。原山ら^[4-13]は、これに非定常の熱伝導計算を組み込み、材料の熱容量の違いを考慮した屋外の熱環境予測を行っている。

梅干野ら^[4-14]・Asawa et al.^[4-15]は、屋外熱環境の設計支援ツールとして、3D CAD（Computer Aided Design）に基づき街区内の空間形態・構成材料を再現し、全表面での非定常・熱収支解析により表面温度の時系列変化を予測する熱収支シミュレーションツールを開発した。2章で述べるように、このツールは、屋外熱環境における表面温度と熱放射環境の重要性に着目し、表面温度予測に特化したものである。本ツールは、暑熱環境の悪化が問題となる弱風環境下での予測を行うことを前提とし、都市空間内の気温・風速の空間分布を一様と仮定することで、CFDシミュレーションとの連成解析を行わずに、低計算負荷で表面温度予測を行えることを特徴としている。同様の取り扱い、海外を中心に近年多くの研究者が使用している街区スケールの熱収支シミュレーションモデルであるSOLENE modelでも行われている^[4-16, 4-17]。

山村ら^[4-18]は、梅干野・浅輪らの熱収支シミュレーションツールを発展させ、屋外熱環境の総合的な予測・評価、すなわち微気候の予測が行えるように、都市空間内の気温・風速の空間分布を考慮できる熱収支と気流の連成解析手法を提案した。具体的には、熱収支シミュレーションと標準k- ϵ モデルによるCFDシミュレーションとを連成解析するものであるが、その特徴としては、解析時刻を設定し、対象時刻とその1時刻前についてのみ、CFDとの連成解析を行うものである。これは、熱収支解析において構成材料の熱容量に伴う蓄熱／蓄冷現象を考慮しつつも、当時（2000年前後）の計算機の演算能力を前提としてCFDシ

シミュレーションの実行回数を最小にすることを主眼としたものである。山村ら^[4-18]は、2時刻分の連成の効果と限界を、数値実験により明らかにしている。その後、Takata et al.^[4-19]により、近年の計算機能力の向上を踏まえて、連成解析を一日の全時刻に適用することで、より長時間の蓄熱／蓄冷現象にも適用できるように改良がされてきている。全時刻の連成解析は、その他の既往研究でも取り組まれており、共通の研究課題と考えられる^[4-20~4-22]。

連成解析の精度を左右するパラメータの一つは、熱収支シミュレーションの境界条件として、CFDから引き受けた解析結果の対流熱伝達量（顕熱流量 q_c ）である。 q_c と対流熱伝達率（CHTC）との関係は、下記の式で表すことができる。

$$q_c = CHTC(T_s - T_{ref}), \quad (\text{式 4-1})$$

その中、 q_c は顕熱流量[W / m²]、CHTCは対流熱伝達率[W / m²K]、 T_s は表面温度[K]、 T_{ref} は温度境界層外の参照気温 [K] である。したがって、 q_c 及びCHTCを正確に予測する方法が重要であると考えられる。

これまでの研究では q_c 及び CHTC を把握するものが多く、そのアプローチは様々である。その中では実測^[4-23~4-35]、風洞実験^[4-36~4-38]、数値シミュレーション^[4-39~4-45]と大きく3つに分けられる。ただし、実測は測定機器による誤差や限られた点しか観測できない限界があり、風洞実験はスケール効果やモデルの再現性、コストなどの問題が存在する。それに加え、本研究では顕熱流量以外にも建物や地面近傍の気温・風速などを含む微気候を評価対象になっているため、数値シミュレーションによる検討方法を用いる。数値シミュレーションによる q_c あるいは CHTC の予測の研究でも、建物の基本形状を再現する研究^[4-46~4-49]がほとんどで、実在街区に存在するような建物の細部形状（ベランダ、庇など）を再現した研究が少ない。また、建物の細部形状を考慮したうえで、CFDの乱流モデルによる予測精度への影響を検討する研究も少ない。

そこで、本章では、2章と3章では高層建築物周辺の表面温度と気温を検討した結果より示された1) 高層建築物の日影空間で放射温度が極端に低く、熱収支シミュレーション（現在のモデル：気温・風速分布一様）では再現が不十分である。2) 高層建築物の日影空間における気温は1日中周辺より低く、冷気が生成されたことに対し、冷気と低温の地表面の相互作用による蓄冷の可能性がある。

2つの点に対して、数値解析の手法で明らかにする前段階として、CFDを用いる熱収支シミュレーションとの連成手法について検討する。具体的には連成の手法、CFDの乱流モデル、建物細部形状の取り扱い、連成回数について検討を行う。

4.2 連成解析の手法及び流れに関する検討

連成解析の熱収支解析について、2章で使用した都市の空間形態と構成材料を細部まで再現して熱収支計算できる熱収支シミュレーションツールを用いる。CFD 解析について、RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations)、LES(Large Eddy Simulation)、DNS(Direct Numerical Simulation)などのアプローチが挙げられる。それぞれの概要と特徴を以下のように述べる。

DNS：乱流の基礎方程式系に対して特別な操作（モデル近似）を施すことなく、そのまま直接数値的に解く。モデル近似を含めないため最も高精度な解を与えるが、一方で乱流に含まれる全てのスケールの渦変動を解像することが必須となり、乱流の最小渦スケールまで正しく解像できるように十分細かい計算格子点を設ける必要がある。そのため、次元解析から現在の計算機能力ではレイノルズ数が数千程度までの流れ場が限界であり、建築外部空間の乱流場に適用することは現実的ではない。

LES：乱流の基礎方程式系に対して空間フィルタ操作を施し、「粗視化」した乱流を解析対象とする。計算格子で捉えられるスケールの渦変動については直接数値的に解析し、格子スケール以下の変動成分のみをモデル化するため、非定常解析が可能である。計算負荷については DNS に対し大幅に削減できる。また LES では Smagorinsky モデルをはじめ数多くのモデルが提案されており、予測対象とする流れ場の性状に応じてその選定が可能である。また昨今計算機能力の向上に伴い、LES を高 Re（レイノルズ）数の乱流場に適用する研究が活発化しており、建築や都市スケールにおける乱流場の解析においても多くの研究が見られるが^[4-50~4-54]、複雑な形状を有する大きな街区に対して長時間にわたる計算に対して、計算負荷が依然と大きい。

RANS：乱流の基礎方程式系に対して Reynolds 平均操作を施し、平均流のみを解析対象とする。そのため変動成分を非定常解析することができない。一方で LES よりも大幅に粗い計算格子を用いることができ、計算負荷が小さく、街区レベルの解析に向いている。都市の対象とした研究にも多く用いられていて、その中でも標準 k-ε モデルを用いて、解析するケースが多く見られる^[4-55~4-59]。なお山村らの手法ではこれを採用している。

ここで特に本研究で RANS を採用する理由を述べる。本研究で用いる熱収支解析は 5 分ステップおきの非定常計算を行い、LES は秒オーダーの計算を行うため、計算負荷上経済的ではない。また、本研究で注目する蓄熱／蓄冷などの現象は熱容量と関係する時間スケールの長い（数時間～数日）現象であり、それを検討するため、1 時間ごとに連成解析を行う。この時間オーダーに対して、LES が再現できる変動による影響は平均化で再現できると考えられる。

図 4.1 に連成解析の流れを示す。まず熱収支解析より、全表面温度分布を算出する。次に、これを CFD 解析の境界条件とし、非等温 CFD 解析を行い、対流熱伝達率分布を算出する。

また算出されたCHTC分布を熱収支解析の境界条件とし、式4-1を適用し、表面近傍の気流・気温分布を考慮した熱収支解析を行い、表面温度分布を算出する。本章では、4.1で述べた検討項目を確認する目的で、24時刻の気流解析は行われず、12時のみに対して、気流解析をした。また、熱収支シミュレーションでは蓄熱／蓄冷を考慮した非定常計算をし、CFDで得られた12時の対流熱伝達率分布と気温分布を熱収支解析の24時刻分の境界条件として適用した。同じ操作を繰り返し、連成解析が収束（隣接する連成回数の中の q_c の差は5%未満）するまで行う。熱収支シミュレーションとCFD解析におけるメッシュサイズは異なるが、それらの間のデータ転送プログラムを使用して、CHTCまたは T_s の値を最も近いメッシュの中心から与えを抽出し、境界条件とすることができた。

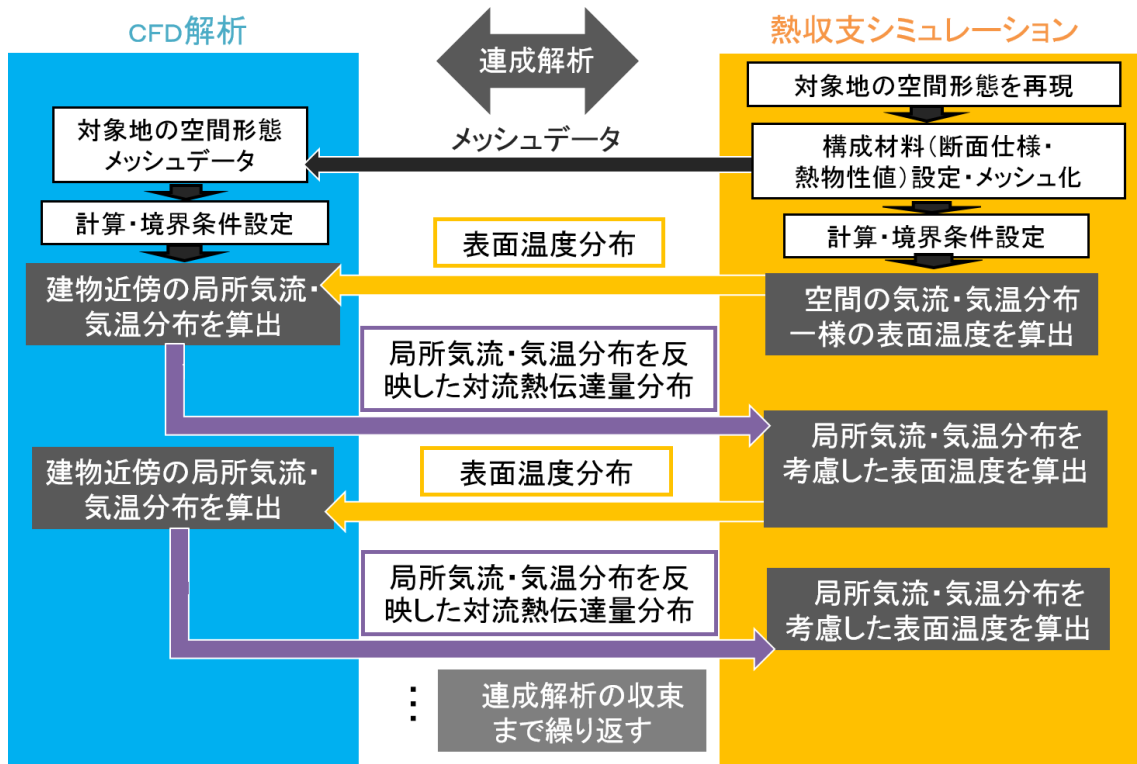


図 4.1 連成解析のフローチャート

4.3 連成手法検討用のモデル及び解析条件

k-εモデルは壁近傍における境界層内部のモデリング方法の違いで、壁関数を使う高Re数型k-εモデル（以下、高Reモデル）とno-slip条件を使う低Re数型k-εモデル（以下、低Reモデル）に分けられる。

4.3.1 高レイノルズ数k-εモデル

高Reモデルは、都市環境工学、特に建物の通風や都市部の風環境に関する研究に広く適用されている^[4-60, 4-61]。一部の研究では、High-Reモデルを使用してCHTCを同定していた。他の研究は、乱流モデルの精度の比較^[4-62]、CHTCと上空風速との相関^[4-63]、CFDとエネルギー解析の連成による室内環境の熱伝達に注目していた^[4-64]。高Reモデルは第一メッシュのセル中心を対数層に配置するようメッシュを生成する。壁面の境界条件について、壁関数(Launder et al.^[4-65]，式4-2)は、壁に隣接するメッシュの風速と温度を計算するために適用される。温度場の解析に対し、境界条件として壁面の温度 θ_w が与えられることが多く、この場合、壁関数は壁面近傍の温度差 $(\theta_w - \theta_p)$ と壁面熱流束 h_w をブリッジするものとなる。したがって、計算結果はCHTCに影響を与える境界層内の挙動を考慮せず(図4.2)。CHTCは、壁面近傍の風速との相関によって再現することができる。

$$\frac{\theta_w - \theta_p}{h_w / (\rho C_p)} \cdot (C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2} = \left(\frac{\rho \gamma_t}{\kappa} \right) \ln \left[\frac{\bar{E} \cdot (1/2) h_p \cdot (C_\mu^{1/2} \cdot k_p)^{1/2}}{\nu} \right] \quad (\text{式 4-2})$$

以下に示すユルゲス方程式^[4-66]は、都市環境及び建築環境の分野における伝統的で一般的に使用されるCHTC相関の1つである。

平滑面：

$$\begin{aligned} CHTC &= 5.8 + 3.9v, \quad v \leq 5 \text{ m/s} \\ CHTC &= 7.1v^{0.78}, \quad v > 5 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (\text{式 4-3})$$

粗い表面：

$$\begin{aligned} CHTC &= 6.2 + 4.2v, \quad v \leq 5 \text{ m/s} \\ CHTC &= 7.5v^{0.78}, \quad v > 5 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (\text{式 4-4})$$

その中、 v [m/s]は表面境界層の上端の風速である。既往研究ではいくつかのCHTC相関

がある^[4-67, 4-44]。これらの相関方程式の大部分は、 ν を説明変数として使用する。したがって、相関式の種類は、シミュレーション結果上のCHTCの絶対値に影響を与えるが、CHTCの分布特性は基本のものであり、影響されにくい。本研究では、高ReモデルにおいてCHTC相関の代表としてユルゲスの式(平滑面)を用いた。境界層上端にメッシュを生成することとCHTCの相関は、高Reモデルの計算負荷が低いことを示している^[4-68]。これはこのモデルの利点である。

また、建築分野では慣用的に対流熱伝達率CHTCに基づき熱流束 h_w を算出する。この方法では h_w は式4-5により算出される。

$$h_w = CHTC(\theta_w - \theta_{ref}) \quad (\text{式 4-5})$$

顕熱流量を表示すると、

$$q_c = CHTC(T_s - T_{ref}) \quad (\text{式 4-6})$$

になる。

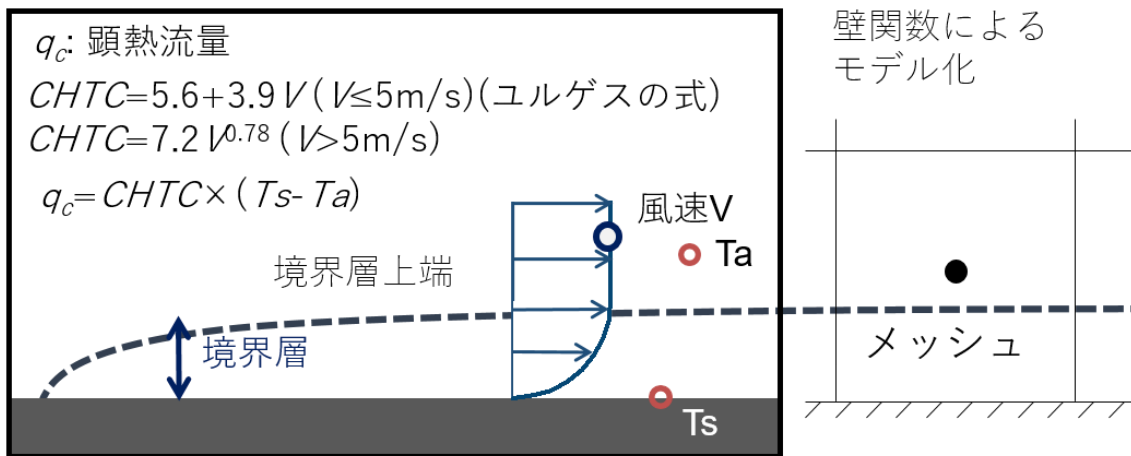


図 4.2 高 Re 数値 CFD 表面近傍の境界層とメッシュ分割

4.3.2 低レイノルズ数 $k-\varepsilon$ モデル

低 Re モデルも、 $CHTC$ と q_c を予測することができる。既往研究は、低 Re モデルを用いて立方体の建物の風上側の外表面における $CHTC$ 予測に注目した^[4-41, 4-42, 4-62]。低 Re モデルは、壁の境界近くで壁関数を使用しない。このモデルは、非常に細かいメッシュを境界層内部に施すことによって、境界層内部の流れ及び温度プロファイルを分析できる。高 Re モデルとの違いは、境界層のモデリングレベルである。低 Re モデルは no-slip 条件をレイヤに適用し、 q_c と $CHTC$ は次の式によって計算される。

$$q_c = -\lambda \cdot \frac{dT}{dy}, \quad (\text{式 4-7})$$

$$h_c = \frac{q_c}{T_s - T_{ref}}, \quad (\text{式 4-8})$$

その中、 λ は空気の熱伝導率 [$W / (m \cdot K)$]、 dT / dy は粘性層内部の温度勾配 [K / m]、 T_s は壁面の温度 [K]、 T_{ref} は温度境界層 [K] の上端の気温である。

低 Re モデルでは、高 Re モデルの問題点を解決するために、以下に示す改善点が施されている。

- 1) 渦動粘性係数の算出の際に壁座標、乱流レイノルズ数などをパラメータとする減衰関数 f_μ を導入する。
- 2) ε の輸送方程式の生産項、散逸項に対してモデル関数 $f_1 f_2$ を導入する。
- 3) 壁近傍の領域に十分細かい計算格子を施し、no-slipの壁面境界条件の下で得ることにより、壁近傍の乱流挙動、低レイノルズ効果を正しく再現する。

表 4.1 にブジネスク近似を用いた低 Re モデルの基礎方程式を示す。

なお、表 4.1 において $f_\mu = f_1 = f_2 = 1$, $D = E = 0$, とすれば通常の高 Re モデルとなる。

表 4.1 ブジネスク近似を用いた低 Re 数型 k - ε モデルの基礎方程式

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \langle u_i u_j \rangle \right) - g_i \beta (\langle \theta \rangle - \theta_0 \tilde{\varepsilon})$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - (\tilde{\varepsilon} + D) + G_k$$

$$\frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_j} \right\} + \frac{\tilde{\varepsilon}}{k_k} (C_{\varepsilon 1} f_1 P_k - C_{\varepsilon 2} f_2 \tilde{\varepsilon} + C_{\varepsilon 3} f_3 G_k) + E$$

$$\frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\alpha + \frac{\nu_t}{P \gamma_t} \right) \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_j} \right\} \quad \langle u_i u_j \rangle = \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k$$

$$\nu_t = C_u f_u \frac{k^2}{\tilde{\varepsilon}} \quad \tilde{\varepsilon} = \varepsilon - 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_n} \right)^2 \quad P_k = \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}$$

$$f_u = \exp \left\{ \frac{-3.4}{\left(1 + \frac{R_t}{50} \right)^2} \right\} - 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_n} \right)^2 \quad f_1 = 1.0 \quad f_2 = 1 - 0.3 \exp \left\{ \frac{-R_t}{50} \right\}$$

$$R_t = \frac{k^2}{\nu \varepsilon} \quad D = 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_n} \right)^2 \quad E = 2\nu \nu_t \left(\frac{\partial^2 \langle u \rangle}{\partial x_n^2} \right)^2 \quad G_k = g_i \beta \frac{\nu_t}{P \gamma_t} \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_j}$$

$$C_u : 0.09 \quad C_{\varepsilon 1} : 1.44 \quad C_{\varepsilon 2} : 1.92 \quad \sigma_k : 1.0 \quad \sigma_\varepsilon : 1.3$$

CHTC 値に影響を及ぼす境界層内部の熱及び運動量の伝達に関する挙動は、低 Re モデルを用いて再現することができる (図 4.3)。以下の研究で用いた低 Re モデルは、Launder-Sharma モデル^[4-69]を適用している。壁座標 y^+ は、少なくとも 1 つの第一メッシュが粘性低層の内側にあることを保証するために、約 1 でなければならない。壁座標 y^+ は以下として定義される^[4-70]。

$$y^+ = \frac{u_\tau y_p}{\nu}, \quad (\text{式 4-9})$$

その中、 U_τ は摩擦速度[m / s]、 y_p は第一メッシュの中心点 p から壁までの距離[m]、 ν は空気の動粘性係数[m² / s]である。

低 Re モデルは伝熱理論に基づいているため、特に境界層が未発達の場合では、CHTC 及び q_c 予測の精度が高い。それは境界層内部の熱的挙動を再現することができるためである。それにもかかわらず、非常に細かいメッシュの使用のために、計算負荷は高い。また、低 Re モデルの建物や街区キャニオン空間における予測精度はすでに chen et al.^[4-71]にて、二次元街路建物群モデルと三次元建物の模型を対象とした風洞実験の結果と比較によって検証された。

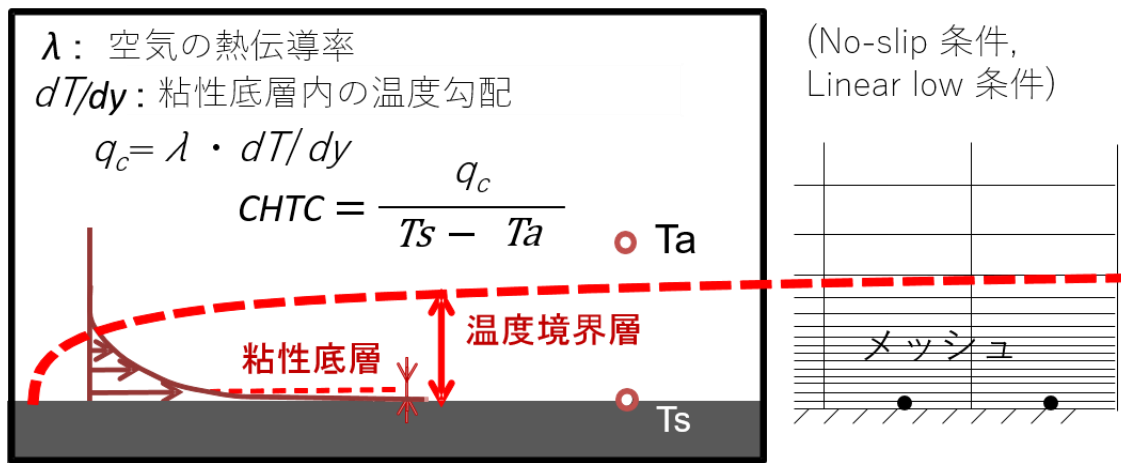


図 4.3 低 Re 数型 CFD 表面近傍の境界層とメッシュ分割

4.3.3 メッシュサイズの感度分析

chen et al.^[4-71]の 2.3 節による比較は、低 Re モデルが建物表面の CHTC 分布の基本特性を再現できることを確認した。風洞実験とこれから検討する実大の建物間でスケールが異なるため、低 Re モデルを実大建物に適用する前に、CHTC 結果に対するメッシュ感度について検討する必要があると考えられる。3つのメッシュサイズが異なる（粗い、中間、細かい）(AIJ 2016^[4-72]) ケースを比較して、低 Re モデルの計算結果にメッシュ感度を分析する。中間のケースのメッシュサイズは、 y^+ が式 4-9 に従って 1 であることを保証するように生成された。したがって、第一メッシュのサイズは $61 \mu\text{m}$ であった。粗いケースと細かいケースの場合は、中程度の場合よりも粗く、細かいものであった^[4-71]。メッシュ感度の検討

は、4.4節以降の詳細な形状を持つ実大建物モデルを用いた。各ケースのメッシュ構造は2つの部分で構成されている。建物の周辺空間については、各ケースの間辺長が2倍異なる正6面体メッシュを使用した。この空間では、3つのケースの間にメッシュ数の差は8倍である。建物の近傍空間では、一番近傍となる六面体のメッシュをリファインすることによってレイヤが生成された(図4.4)。粗いケースから細かいケースまで、レイヤの層数が1つずつ増加した。2つの連続したメッシュ間の拡張比は1.3以上であったが^[4-73, 4-74]、メッシュ感度の検討結果から、本節で使用された大きな比はほとんどCFD解析の結果に影響を与えないことがわかった。

高Reモデルのメッシュサイズの感度分析は既往研究^[4-21, 4-75, 4-76, 4-79]ですで行われていた。また既往研究で多くの解析例^[4-46, 4-76]が高Reモデルを用いて検討を行った。本研究は高Reモデルを用いて顕熱流量を算出する際に、ユルゲスの式によって対流熱伝達率を算出した上、式4-6によって顕熱流量を求めている。そのため、対流熱伝達率を計算する際に使用する参照風速はユルゲスの実験の時に参照した位置に決めた。すなわち、参照風速は表面から10数cm程度で取得した。そのため、参照風速の位置より壁面と近い場所でメッシュを施す必要がある。また高Reモデルでは、壁面近傍の速度場を求める時に、壁関数を使っている。本研究は標準k-εモデルを使用するため、対数則を適用している。そのため、第一メッシュを粘性底層と緩衝層の上にある対数則領域に施す必要がある。そのため、第一メッシュのサイズは壁座標 y^+ が30~100になるようにメッシュサイズの上限と下限を決めた。ただし、本研究の対象建物の空間形態はベランダなどの細部形状を含んで複雑であるため、エッジ部分など境界層の未発達が起こりやすい場所では第一メッシュが対数則領域に入らない場合がある。この部分の影響に対しては、顕熱流量を直接に求める低Reモデルで検証をする(4.5節)。

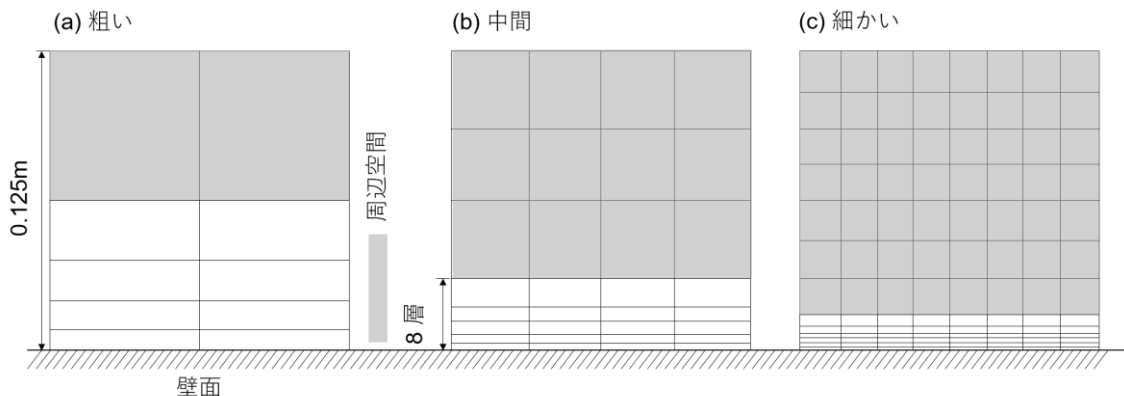
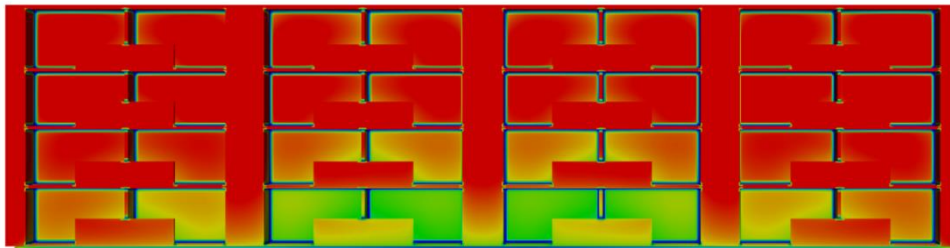


図4.4 メッシュ感度分析のメッシュ分割：(a) 粗い、(b) 中間、及び (c) 細かい

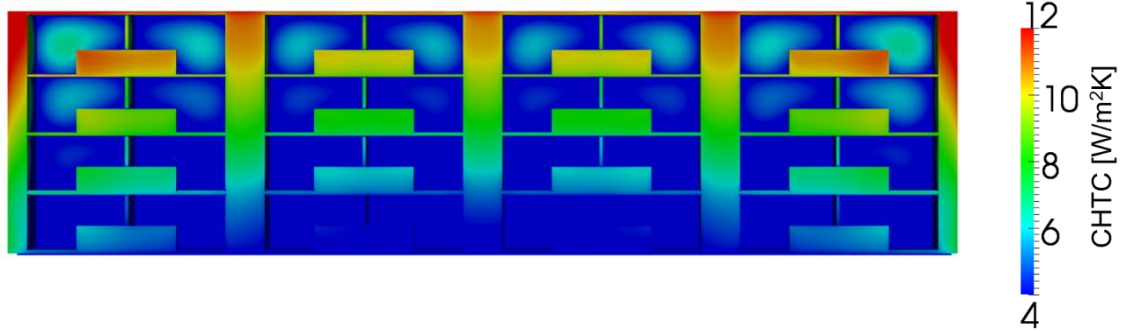
表 4.2 メッシュ感度分析の3つのケースの比較

メッシュ種類	メッシュ数	総計算時間	CHTC [W/m ² K]の 平均値	CHTCの 標準偏差
粗い	350万	48時間	7.0	2.9
中間	2600万	336時間	3.2	2.5
細かい	1億3760万	2448時間	3.0	2.1

(a) 粗い



(b) 中間



(c) 細かい

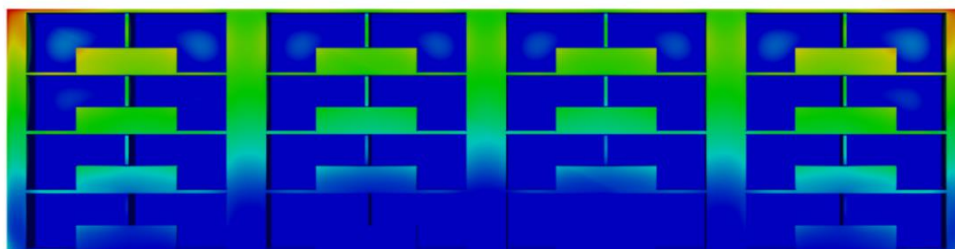


図 4.5 風上面における CHTC の分布: (a) 粗い、(b) 中間、及び (c) 細かい

図 4.5 に、3つのケースについて、対象建物の風上面における CHTC 分布の結果を示す。CHTC 分布の基本的な特徴は、すべてのケースにおいて風洞実験の 3D 建物模型（修士論文 3.2.2 項）の結果と同じであった。これは、スケールの相似性^[4-77,4-78]が確認されたことを意味する。表 4.2 に 3つのケース間の違いを示す。粗いケースと中間ケースの間の違いが大きい。風上面における CHTC の平均値差は粗いケースと中間のケースの違いは約 2 倍であり、一方、中間ケースと細かいケースの違いは約 10%であり、非常に小さいと考えられる。各ケースの計算時間について、計算が収束するまで細かいケースの所要時間は中間ケースの 8 倍であった。したがって、中間ケースのメッシュは、次節からの検討（実大建物）で低 Re モデルを用いた CHTC シミュレーションに適していると言える。

4.3.4 解析の条件

本章は典型的な細部形状（ベランダや庇）及び構成材料（壁や窓）を有する実大の単棟集合住宅を検証用モデルとして選定した（図 4.6）。表 4.3 に建物の物性を示す。熱収支シミュレーションは、実際の気象条件（表 4.4 に示す）を用いて実施した。CFD 解析の計算領域は、 $200 \times 140 \times 60\text{m}$ である^[4-79,4-74]。大気境界層プロファイルとしてべき乗則を用いる風速プロファイルを使用した^[4-70]。解析条件も表 4.4 に示す。

図 4.7 に高 Re ケースと低 Re ケースのメッシュ分割を示す。低 Re ケースではベランダなどの細部形状でさえ、メッシュが非常に細かいであり、表面と密接に適合していることを確認した。メッシュは、4.3.3 項のメッシュ感度分析から導かれた。計算の収束は、CFD 解析で用いる OpenFOAM 2.0.1 での残差の設定によって判断され、相対残差は 0.01 と設定した。



図 4.6 詳細な形状を有する対象建物の 3D モデル

表 4.3 建物の構成材料の物理特性

部位仕様	構成材料 (外側から)	厚さ [mm]	反射率	放射率	容積比熱 [J/(m ³ ·K)]
コンクリート (断熱なし)	石綿セメント板	15	0.2	0.9	800000
	空気層	45			1298
	コンクリート	180			1900000
	空気層	25			1298
	せっこうボード	10			900000
	プラスターボード	10			1000000
単層ガラス	フロートガラス	6	0.072	0.94	1913862

表 4.4 解析条件と気象条件

	CASE1	CASE2
乱流モデル	標準k-εモデル (高Re) Launder-Sharmaモデル (低Re)	
CFD解析ツール	OpenFOAM-2.0.1	
移流項スキーム	風上差分	
流入境界	べき乗則： $v = 2.17 (Z/30)^{0.2}$ $k = \frac{u^*2}{\sqrt{C_\mu}}, C_\mu = 0.09, u^* (m/s) [4-70]$	
流出境界	全圧境界 (境界面における圧力は0[Pa])	
建物表面のメッシュ数	約10万 (高Re), 約400万 (低Re)	約16万 (高Re), 約2500万 (低Re)
近傍メッシュ幅	12.5cm (高Re), 6.1e-5m (低Re)	
地表面・壁面境界条件	壁関数 (高Re), No-slip条件 (低Re)	
対流熱伝達量の算出方法	CHTC相關： ユルゲスの式 (高Re) 定義式 (低Re)： $q_c = \lambda \cdot dT/dy$ $CHTC = \frac{\lambda \cdot dT/dy}{T_s - T_{ref}}$	
気象条件	2004年11月5日12時 気温20.2℃	建物高さ1.8倍の風速：2.0m/sの南風

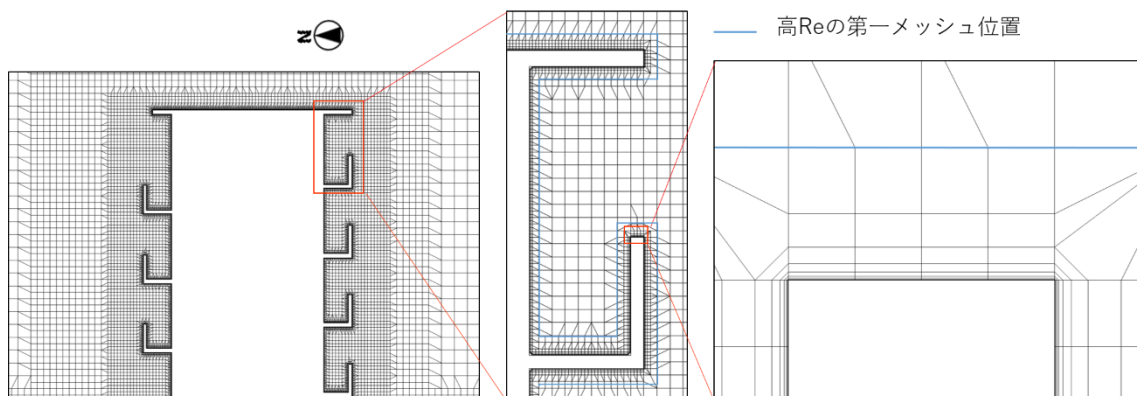
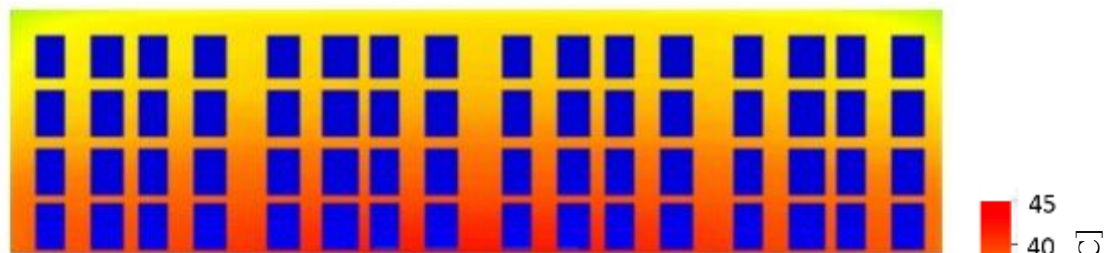


図 4.7 高 Re モデルと低 Re モデル CFD の建物及び表面付近のメッシュ分割

4.4 建物細部形状の再現に関する検討

本節は低 Re モデルの CFD 解析との連成解析の結果を用いた。細部形状を含んでいないケースを CASE1 とし、細部形状を含んでいるケースを CASE2 とする。非等温 CFD 解析を使用することにより、浮力を考慮することができる。自然対流が q_c および気温・気流場に及ぼす影響も考慮することができる^[4-80]。図 4.8 は、12:00 の風上面の表面温度分布を示す。表面温度は CHTC 分布^[4-46]の傾向とは逆の傾向を示し、高い CHTC は表面からの対流熱伝達を大きくし、それによって表面温度を低下させることを確認した。CASE2 では、ベランダ内の空間の表面は日影のため、低い表面温度を示した。

(a) CASE1



(b) CASE2

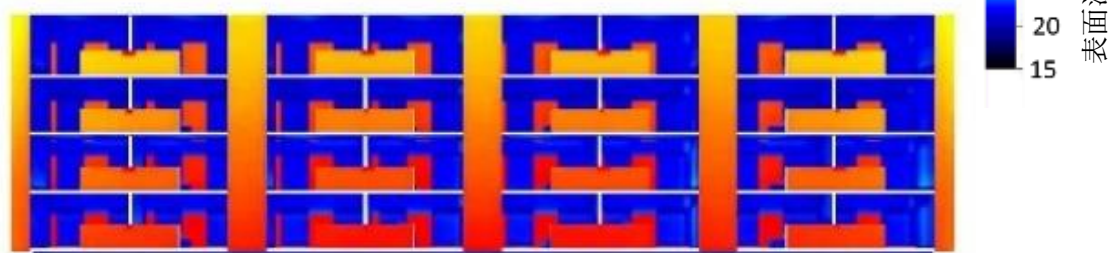


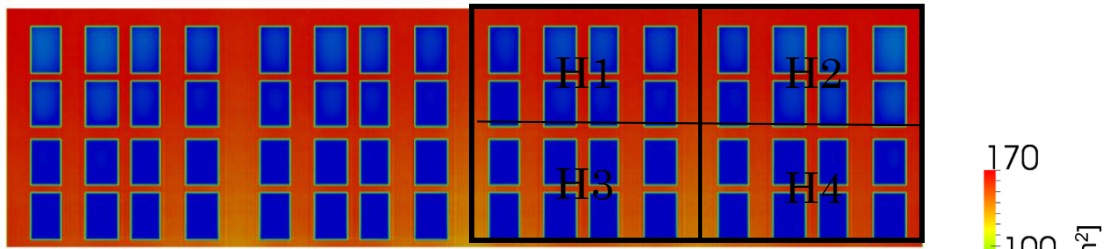
図 4.8 12:00 時の CASE1 (a) と CASE2 (b) の風上面における表面温度分布

図4.9に、12:00に風上面における q_c 分布を示す。ベランダ空間を除いて、表面付近の気流によるCHTCと表面温度の分布は逆の傾向を示したが、 q_c とCHTCの分布はほぼ同じ傾向を示した。式(4-1)は、同じ日射を有する表面では、CHTCが q_c よりも表面温度に重要な役割を果たすことを示している。したがって、このケースでは、風速が速いと表面温度が低下するが、CHTCを増加させることによって q_c を増加させる。

図4.10に、両ケースの風上面における q_c のヒストグラムを示す。この図からは、どのケースも同様の q_c の一般的傾向を示している。 $0\text{W}/\text{m}^2$ 付近のピークは、窓と影がついた部分の壁からの q_c である。熱収支シミュレーションでは、室温を 20°C に設定した。窓付近の T_a は窓の T_s よりも高かった。したがって、窓上の q_c はマイナスであった。 $120\text{W}/\text{m}^2$ 前後の別のピークは、風上面(日向面)のコンクリート壁からの q_c である。累積頻度から、CASE2は、CASE1よりも $0\text{W}/\text{m}^2$ 前後の q_c の割合が高いことを示している。それは陰になる面の面積の割合は、ベランダや庇からの日射遮蔽によって増加したからである。しかし、CASE2の表面積の合計が増加したため、CASE2の合計 q_c がCASE1よりも低いことを意味するものではない。したがって、投影面積当たりの平均 q_c を調べる必要がある。表4.5は、風上面における単位投影面積の合計と区画ごと(H1、H2、H3、及びH4)の平均 q_c を示している。各区画の平均 q_c を比較すると、どのケースも、建物の外周部(H2及びH4)の q_c が中央(H1及びH3)の q_c よりも大きいことが示されている。風上面の上部(H1及びH2)の q_c は下部(H3及びH4)の q_c よりも大きいことが示されている。この分布の傾向はCHTC分布の性質に従った。上半部と下半部の q_c 差は、外周部と中間部の q_c 差より大きかったことがわかった。CASE2で詳細な形状が再現されることによって、単位投影面積からの平均 q_c の合計は、風上面でCASE1よりわずかに大きくなった。このケースでは風上面は日向面なので、ベランダや庇などの複雑な形状の存在は、日射の多重反射を促進し、太陽エネルギーを吸収しやすくなった。一方、CASE1と比較すると、CASE2ではH1とH2は大きくなり、H3とH4が小さくなった。この場合、詳細な形状を再現することによって、建物の上部の q_c が増加し、下部の q_c が減少したことを意味する。詳細な形状によって、H1とH2における q_c の増加は、それぞれ $16\text{W}/\text{m}^2$ と $20\text{W}/\text{m}^2$ であった。前述のようにCHTCが q_c 分布に支配的役割を果たしたので、詳細な幾何学的形状によるCHTCの変化が q_c 分布に影響を与えたと考えられる。建物の詳細な形状は、風速が比較的高い上部のCHTCと q_c を増加させたが、風速が比較的低い下部の詳細な形状はCHTCと q_c を減少させた。これは、CHTC及び q_c に対する詳細な形状の影響が、風速の高いエリアでより敏感であることを意味する。

以上から、細部形状が風上面にある場合、建物の空間形態と構成材料両方から顕熱流量(q_c)に影響を与えた。特に顕熱流量の局所分布に大きな影響を及ぼしている。5章で街区の局所的な微気候を議論する際に建物の細部形状を再現する必要性を示唆している。

(a) CASE1



(b) CASE2

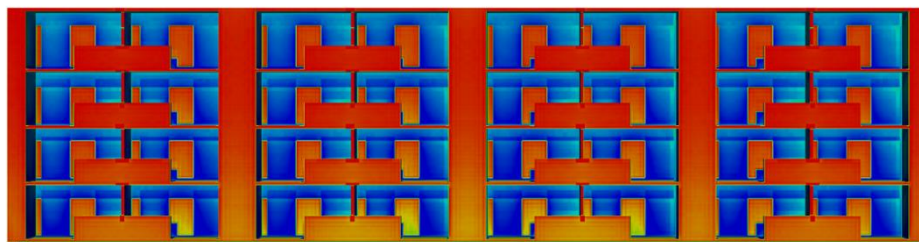


図 4.9 12:00 時の CASE1 (a) と CASE2 (b) の風上面における顕熱流量分布

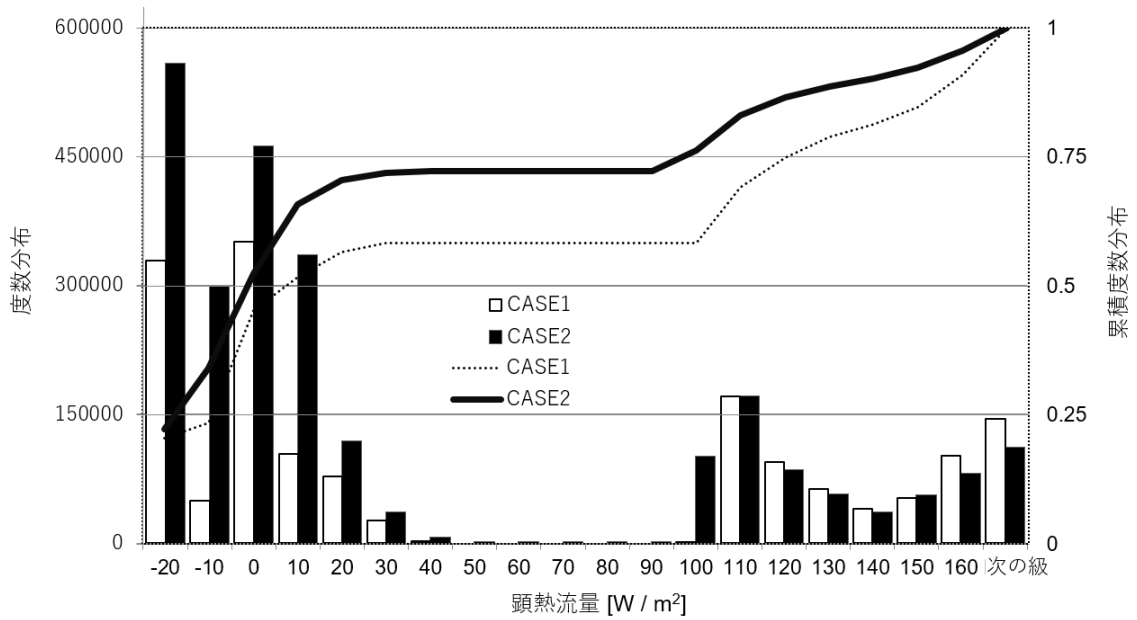


図 4.10 CASE1 と CASE2 の顕熱流量のヒストグラム

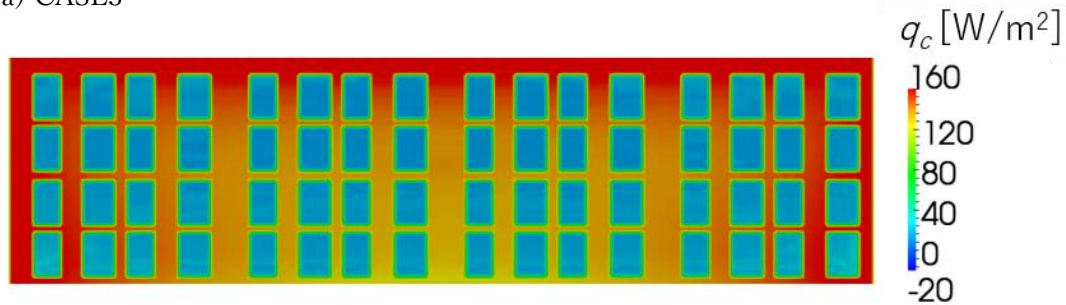
表 4.5 風上面の投影面積での合計と異なる区画における平均顕熱流量[W / m²] (図 4.9 にその区画を示す)

顕熱流量[W / m ²]	H1	H2	H3	H4	合計
CASE1	78.2	82.5	53.9	59.6	68.7
CASE2	94.2	103.0	45.0	50.0	73.3

4.5 CFD 乱流モデルに関する検討

本節は乱流モデルが建物の外表面から大気への顕熱流量の予測に及ぼす影響を確認するため、細部形状なしの実大建物を検証対象とし、高 Re モデルと低 Re モデルを用いて、連成解析を行った。それぞれ CASE3 と CASE4 とする。解析結果は図 4.11 に示す。図 4.11(a)(b) の比較から、高 Re モデルと低 Re モデルによる解析した顕熱流量の分布特性が類似している。4.3 節と同様な区画ごとに見ると、CASE3 は、壁面両端の下部 (H4) でやや過大評価が見られる。表 4.6 に両ケースの区画ごとと全体の顕熱流量を示す。両ケース間の顕熱流量の総量の差は、平均して 3.5W/m² と小さいことがわかった。また各区画においても、差が全体の 15%以内にとまったことがわかった。街区スケールにおける 1 日をわたる連成解析では、計算負荷を考えると、高 Re モデルでも適用可能であることを示した。

(a) CASE3



(b) CASE4

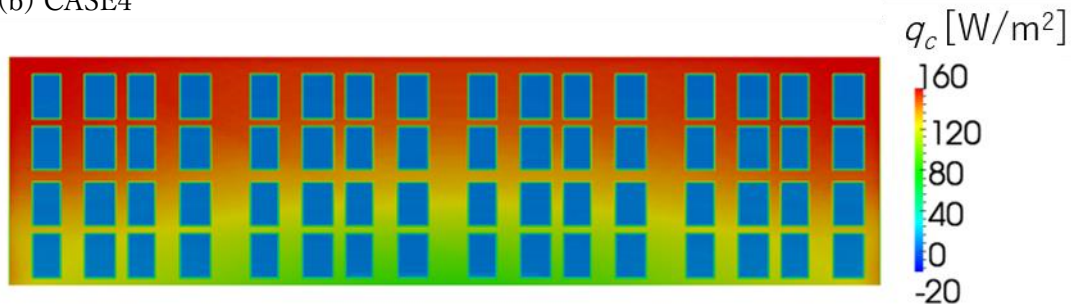


図 4.11 12:00 時の CASE3 (a) と CASE4 (b) の風上面における顕熱流量分布

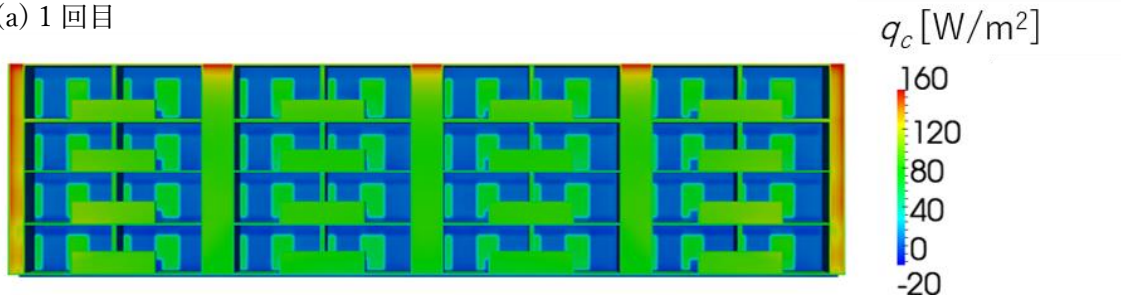
表 4.6 風上面の合計と異なる区画における平均顕熱流量[W / m²] (図 4.9 にその区画を示す)

顕熱流量[W / m ²]	H1	H2	H3	H4	合計
CASE3	84.7	91.4	78.4	92.6	86.8
CASE4	91.1	95.0	68.4	78.1	83.2

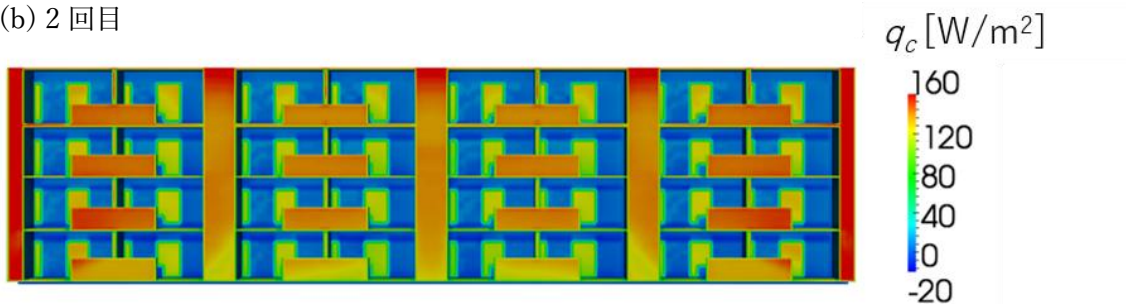
4.6 連成回数に関する検討

本節は 4.3.4 項で述べた連成解析の収束回数を確認するため、前節の直方体実大建物を解析対象とし、連成解析を行った。図 4.12 に、連成 1 回目、2 回目及び 3 回目の顕熱流量分布の可視化結果を示す。顕熱流量分布図から、1 回目の結果は 2 回目より顕熱流量の値が小さく、3 回目の結果は 2 回目と相似している。原因としては、連成 1 回目の表面温度はキャノピー内の気流・気温分布を考慮せずに上空風速と気温を用いたため、表面温度の予測に対しては過小評価が生じたことが考えられる。また図 4.13 に、連成 1 回目と 2 回目及び 2 回目と 3 回目の度数分布図を示す。この結果からも、連成 1 回目と 2 回目の顕熱流量予測は差が大きく、1 回目の対流熱伝達量は 2 回目より大幅に過小評価したことがわかった。2 回目と 3 回目は近い値を示している。3 回目の顕熱流量が 2 回目と比べ、0 と 10W/m² の区分以外、差が 5% に収まったことから、連成 2 回目の段階で収束に達したとみなし、連成解析の必要回数は 2 回と判断する。

(a) 1回目



(b) 2回目



(c) 3回目

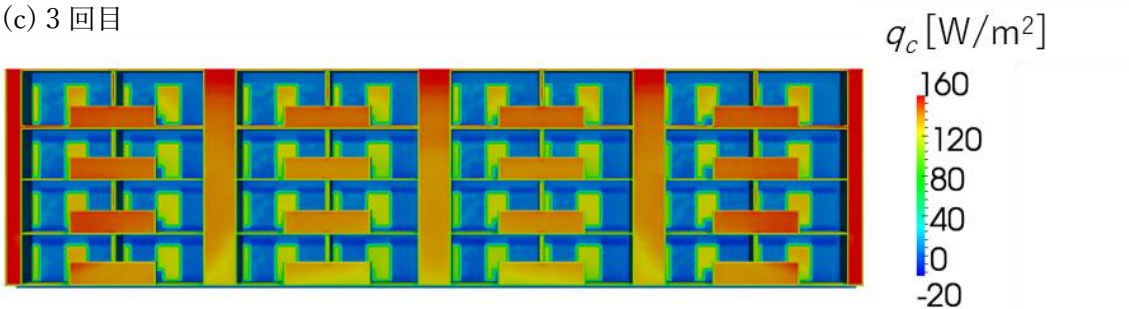


図 4.12 連成解析各回の風上面における顕熱流量分布

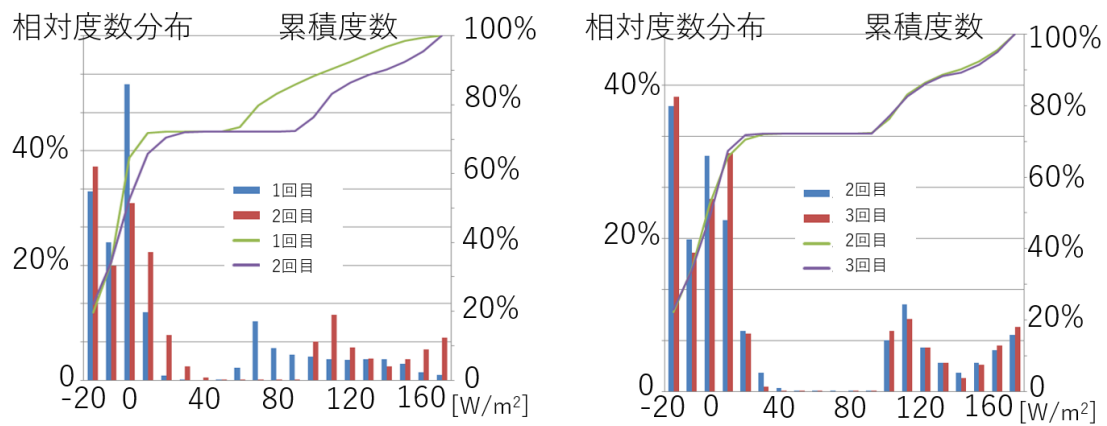


図 4.13 顕熱流量の比較、1回目と2回目(左)、2回目と3回目(右)

4.7 まとめ

本章では、連成解析を研究対象地（土浦駅前）へ適用し、表面温度低下の形成機構を明らかにするため、その準備として、熱収支解析とCFDとの連成解析の手法について検討した。

具体的には、既往研究と比べながら、材料の熱容量による非定常の熱収支と、周辺気流との対流熱伝達を連成解析により予測する方法を提示した。選定した乱流モデル高 Re 数型 k- ϵ モデルと低 Re 数型 k- ϵ モデルについて、それぞれの概要及び特徴を分析した。

建物細部形状が対流熱伝達量予測へ及ぼす影響を確認し、細部形状を有する場合は投影面積当たりの平均顕熱流量 (q_c) の予測結果は、詳細形状がない場合よりもわずかに高かった。ベランダや庇などの複雑な形状の存在は、多重反射を促進し、日射エネルギーを吸収しやすくなったためと考えられる。また詳細形状を考慮すると、建物の上部の q_c が増加し、下部の q_c が減少したことから、局所的な微気候を分析する際に、実際の都市の詳細な形状を、再現すべきである。

連成解析が収束するまでに必要とする連成回数に関して検討し、連成 1 回目と 2 回目の q_c の差が大きく、2 回目と 3 回目の q_c の差は 0 と $10\text{W}/\text{m}^2$ の区分以外 5% 以内に収まっている結果から、連成解析は 2 回必要であることを確認した。

CFD の乱流モデルについて検討し、実大建物については、高 Re 数型 k- ϵ モデルによる顕熱流量分布予測の再現性が低 Re 数型 k- ϵ モデルと類似していて、差が全体の 15% 以内に収まったことを確認した。高 Re 数型 k- ϵ モデルの計算負荷が低 Re 数型 k- ϵ モデルより小さいことから、次章以降では計算負荷の少ない高 Re 数型 k- ϵ モデルを対象市街地の微気候形成要因の分析に適用してゆく。

参考文献

- [4-1] 吉田伸治, 村上周三, 成田健一, 高橋岳生, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀: 団地内キャニオン空間内における夏期の屋外温熱環境の実測, 日本建築学会計画系論文集, 552, pp.69-76, 2002.
- [4-2] 浅輪貴史, 梅干野晁, 武澤秀幸, 清水敬示: 緑の茂った戸建住宅地の屋外空間に形成される夏季の微気候に関する実測調査 屋外空間の微気候と居住者の開放的な住まい方との関わりに関する研究 その1, 日本建築学会計画系論文集, 563, pp.77-84, 2003.
- [4-3] 萩島理, 成田健一, 谷本潤, 三坂育正, 松嶋篤, 尾之上真弓: 大規模な階段状緑化屋根を有する建築物周辺の微気象に関する実測調査, 日本建築学会環境系論文集, 577, pp.47-54, 2004.
- [4-4] 佐藤愛, 吉田治典, 伊藤麻美子, 村上大輔: 集合住宅の住棟間における樹木の気候緩和効果に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 587, pp.79-85, 2005.
- [4-5] 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三: 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会計画系論文集, 536, pp.87-94, 2000.
- [4-6] 佐々木澄, 岩田達明, 持田灯, 渡辺浩文, 吉野博: 街路樹がストリートキャニオン内の温熱空気環境に及ぼす影響に関する数値解析, 日本建築学会環境系論文集, 605, pp.139-146, 2006.
- [4-7] 西岡真稔, 松尾陽: 都市キャノピーにおける建築の放散熱とその影響 その1 建築の熱放散に関する伝熱モデル, 日本建築学会計画系論文集, 508, pp.29-34, 1998.
- [4-8] 中大窪千晶, 梅干野晁: 屋外生活空間における空間形態や構成材料の違いを考慮した放射環境の数値解析, 日本建築学会環境系論文集, 630, pp.957-964, 2008.
- [4-9] Chen H., Ooka R., Harayama K., Kato S., Li X. 2004. Study on outdoor thermal environment of apartment block in Shenzhen, China with coupled simulation of convection, radiation and conduction. *Energy and Buildings*, 36: 1247-1258.
- [4-10] Gromke C., Blocken B., Jassen W., Merema B., van Hooff T., Timmermans H. 2015. CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Building and Environment*, 83: 11-26.
- [4-11] Priyadarsini R., Hein W.N., David C.K.W. 2008. Microclimatic modeling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island. *Solar Energy*, 82: 727-745.
- [4-12] Allegrini J., Dorer V., Carmeliet J. 2015. Coupled CFD, radiation and building energy

- model for studying heat fluxes in an urban environment with generic building configurations. *Sustainable Cities and Society*, 19: 385-394.
- [4-13] 原山和也, 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 村上周三: 非定常放射・伝導解析による数値解析と精度検証: 非定常な対流・放射・伝導を考慮した3次元の屋外温熱環境予測評価手法の開発 第1報, 日本建築学会計画系論文集, 556, pp.99-106, 2002.
- [4-14] 梅干野晁, 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を一体化した環境設計ツールの開発, 日本建築学会技術報告集, 20, pp.195-198, 2004.
- [4-15] Asawa T., Hoyano A., Nakaohkubo K. 2008. Thermal Design Tool for Outdoor Spaces Based on Heat Balance Simulation Using a 3D-CAD System. *Building and Environment*, 43: 2112-2123.
- [4-16] Idczak M., Groleau D., Mestayer P.G., Rosant J.M., Sini J.F. 2010. An application of the thermo-radiative model SOLENE for the evaluation of street canyon energy balance. *Building and Environment*, 45: 1262-1275.
- [4-17] Hénon A., Mestayer P.G., Groleau D., Voogt J. 2011. High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign. *Building and Environment*, 46: 1747-1764.
- [4-18] 山村真司, 梅干野晁, 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収支・気流連成シミュレーション手法開発の基礎的検討, 日本建築学会計画系論文集, 560, pp.73-80, 2002.
- [4-19] Takata M., Hoyano A. 2014. Spatial Structure of City Blocks with Vacant Lands in Edo, Early Modern Tokyo –Introducing the Appropriate Wind into Outdoor Living Spaces–. 30th International PLEA Conference, proceedings, 2259.
- [4-20] Ma J., Li X., Zhu Y. 2012. A Simplified method to predict the outdoor thermal environment in residential district. *Building Simulation*, 5: 157-167.
- [4-21] Toparlar Y., Blocken B., Vos P., van Heijst G.J.F., Janssen W.D., van Hooff T., Montazeri H., Timmermans H.J.P. 2015. CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. *Building and Environment*, 83: 79-90.
- [4-22] Ikejima K., Kondo A., Kaga A. 2011. The 24-h unsteady analysis of air flow and temperature in a real city by high-speed radiation calculation method. *Building and Environment*, 46: 1632-1638.
- [4-23] 萩島理, 月松孝司, 谷本潤, 片山忠久: 屋外熱環境予測を目的としたk-εモデルの壁面境界条件としての建物外表面の対流熱伝達率推定式の提案: 第1報 水平屋上スラブ及び試験家屋鉛直壁面における実測, 日本建築学会計画系論文集, 550, pp.23-29, 2001.

- [4-24] Hagishima A., Tanimoto J. 2003. Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces. *Building and Environment*, 38 (7): 873-881.
- [4-25] Yumino S., Uchida T., Sasaki K., Kobayashi H., Mochida A. 2015. Total assessment for various environmentally conscious techniques from three perspectives: Mitigation of global warming mitigation of UHIs, and adaptation to urban warming. *Sustainable Cities and Society*, 19: 236-249.
- [4-26] Voogt J.A., Grimmond C.S.B. 2000. Modeling Surface Sensible Heat Flux Using Surface Radiative Temperatures in a Simple Urban Area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56 (9): 1679-1699.
- [4-27] Scherba A., Sailor D.J., Rosenstiel T.N., Wamser C.C. 2011. Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. *Building and Environment*, 46 (12): 2542-2551.
- [4-28] Ito N., Kimura K., Oka J. 1972. A field experiment study on the convective heat transfer coefficient on exterior surface of a building. *ASHRAE Trans*, 78: 184-191.
- [4-29] Sharples S. 1984. Full-scale measurements of convective energy losses from exterior building surfaces. *Building Environment*, 19 (1): 31-39.
- [4-30] 小林定教, 黒谷靖雄: 夏期の屋上面对流熱伝達率に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 465, pp.11-17. 1994.
- [4-31] Yazdani M., Klems J.H. 1994. Measurement of the exterior convective film coefficient for windows in low-rise buildings. *ASHRAE Trans*, 100(1): 1087-1096.
- [4-32] Jayamaha S.E.G., Wijesundera N.E., Chou S.K. 1996. Measurement of the heat transfer coefficient for walls. *Building and Environment*, 31 (5): 399-407.
- [4-33] Loveday D.L., Taki A.H. 1996. Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building façade. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39 (8): 1729-1742.
- [4-34] Taki A.H., Loveday D.L. 1996. Surface convective coefficients for building facades with vertical mullion-type protrusions. *Journal of Power and Energy*, 210: 165-176.
- [4-35] 萩島理, 成田健一, 菅原広史, 谷本潤: 実大スケール都市キャノピーの表面对流熱伝達率分布に関する観測, 日本建築学会環境系論文集, 73 (626), pp.511-518. 2008.
- [4-36] 大塚順基, 中村泰人: 風洞実験による建物群模型の対流熱伝達率の特性把握, 日本建築学会計画系論文集, 520, pp.83-90. 1999.
- [4-37] Barlow J.F., Belcher S.E. 2002. A wind tunnel model for quantifying fluxes in the urban boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 104 (1): 131-150.
- [4-38] 香月壮亮, 佐藤歩, 道岡武信, 萩島理: 実在都市キャニオン内における実測値と風

- 洞実験による流れ場の比較 実在都市キャニオン内の流れ場に関する風洞実験 (その1), 日本建築学会環境系論文集, 77 (674), pp.313-319. 2012.
- [4-39] Awbi H.B. 1998. Calculation of convective heat transfer coefficients of room surfaces for natural convection. *Energy and Buildings*, 28 (2): 219-227.
- [4-40] Manz H. 2003. Numerical simulation of heat transfer by natural convection in cavities of facade elements. *Energy and Buildings*, 35 (3): 305-311.
- [4-41] Blocken B., Defraeye T., Derome D., Carmeliet J. 2009. High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building. *Building and Environment*, 44 (12): 2396-2412.
- [4-42] Defraeye T., Blocken B., Carmeliet J. 2011. Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling. *Energy Conversion and Management*, 52 (1): 512-522.
- [4-43] Karava P., Jubayer C.M., Savory E. 2011. Numerical modelling of forced convective heat transfer from the inclined windward roof of an isolated low-rise building with application to photovoltaic/thermal systems. *Applied Thermal Engineering*, 31 (11-12): 1950-1963.
- [4-44] Mirsadeghi M., Cóstola D., Blocken B., Hensen J.L.M. 2013. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty. *Applied Thermal Engineering*, 56 (1-2): 134-151.
- [4-45] Mirzaei P.A., Haghighat F. 2010. Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations. *Building and Environment*, 45 (10): 2192-2201.
- [4-46] Montazeri H., Blocken B., Derome D., Carmeliet J., Hensen J.L.M. 2015. CFD analysis of forced convective heat transfer coefficients at windward building facades: Influence of building geometry. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 146: 102-116.
- [4-47] Perén J.I., van Hooff T., Leite B.C.C., Blocken B. 2015. CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location. *Building and Environment*, 85: 263-276.
- [4-48] Perén J.I., van Hooff T., Ramponi R., Blocken B., Leite B.C.C. 2015. Impact of roof geometry of an isolated leeward saw tooth roof building on cross-ventilation: Straight, concave, hybrid or convex? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145: 102-114.
- [4-49] van Hooff T., Blocken B., Tominaga Y. 2017. On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments. *Building and Environment*, 114: 148-165.

- [4-50] Kato S., Murakami S., Mochida A., Akabayashi S., Tominaga Y. 1992. Velocity-pressure field of cross ventilation with open windows analyzed by wind tunnel and numerical simulation. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 44 (1-3): 2575-2586.
- [4-51] Jiang Y., Alexander D., Jenkins H., Arthur R., Chen Q. 2003. Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 91 (3): 331-353.
- [4-52] Jiang Y., Chen Q. 2002. Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation. *Building and Environment*, 37 (4): 379-386.
- [4-53] Kurabuchi T., Ohba M., Endo T., Akamine Y., Nakayama F. 2004. Local dynamic similarity model of cross-ventilation Part 1-Theoretical framework. *Int. J. Vent.*, 2 (4): 371-382.
- [4-54] Hu C.H., Ohba M., Yoshie R. 2008. CFD modelling of unsteady cross ventilation flows using LES. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 96 (10-11): 1692-1706.
- [4-55] Bartzanas T., Boulard T., Kittas C. 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosyst. Eng.*, 88: 479-490.
- [4-56] Fatnassi H., Boulard T., Poncet C., Chave M. 2006. Optimisation of greenhouse insect screening with computational fluid dynamics. *Biosyst. Eng.*, 93: 301-312.
- [4-57] Teitel M., Ziskind G., Liran O., Dubovsky V., Letan R. 2008. Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperature distributions. *Biosyst. Eng.*, 101: 351-369.
- [4-58] Norton T., Grant J., Fallon R., Sun D.W. 2010. Optimising the ventilation configuration of naturally ventilated livestock buildings for improved indoor environmental homogeneity. *Building and Environment*, 45: 983-995.
- [4-59] Mohamed M.F., King S., Behnia M., Prasad D. 2013. Coupled outdoor and indoor airflow prediction for buildings using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Buildings*, 3 (2): 399-421.
- [4-60] Mistriotis A., Bot G.P.A., Picuno P., Scarascia-Mugnozza G. 1997. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85 (3-4): 217-228.
- [4-61] Lo L.J., Novoselac A. 2013. Effect of indoor buoyancy flow on wind-driven cross ventilation. *Building Simulation*, 6 (1): 69-79.
- [4-62] Defraeye T., Blocken B., Carmeliet J. 2010. CFD analysis of convective heat transfer at the surfaces of a cube immersed in a turbulent boundary layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 (1-3): 297-308.
- [4-63] Emmel M.G., Abadie M.O., Mendes N. 2007. New external convective heat transfer

- coefficient correlations for isolated low-rise buildings. *Energy and Buildings*, 39 (3): 335-342.
- [4-64] Zhai Z., Chen Q.Y. 2004. Numerical determination and treatment of convective heat transfer coefficient in the coupled building energy and CFD simulation. *Building and Environment*, 39 (8): 1001-1009.
- [4-65] Launder B.E., Spalding D.B. 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3 (2): 269-268.
- [4-66] Jürges W. 1924. Der Wärmeübergang an einer ebenen Wand (in German). Beihefte zum Gesundheits-Ingenieur / herausgegeben von der Schriftleitung des Gesundheits-Ingenieurs, Reihe 1. Arbeiten aus dem Heiz- und Lüftungsfach, Beiheft, 19.
- [4-67] 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, 17 (5), pp.536-554. 2004.
- [4-68] Sandham N.D., Johnstone R., Jacobs C.T. 2017. Surface-sampled simulations of turbulent flow at high Reynolds Number. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 85 (9): 1-13.
- [4-69] Launder B.E., Sharma B.I. 1974. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in Heat and Mass Transfer*, 1 (2): 131-137.
- [4-70] 流体数値計算による風環境評価ガイドライン作成 WG: 市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック –ガイドラインと検証用データベース–, 日本建築学会, ISBN: 4818926655, 9784818926653.
- [4-71] Chen K., Asawa T. 2015. Advanced numerical analysis on sensible heat flux from building external surfaces to the surrounding atmosphere using a heat balance simulation and CFD. ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, proceedings.
- [4-72] AIJ. 2016. AIJ Benchmarks for Validation of CFD Simulation Applied to Pedestrian Wind Environment. Architectural Institute of Japan, ISBN: 978-4-8189-5001-6.
- [4-73] Mochida A., Tominaga Y., Yoshie R. 2006. AIJ Guideline for Practical Applications of CFD to Wind Environment around Buildings. The 4th CWE proceedings, 533-536.
- [4-74] Franke J., Hellsten A., Schlunzen H.K., Carissimo B. 2011. The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary. *Int. J. Environment and Pollution*, 44 (1-4): 419-427.
- [4-75] van Hooff T., Blocken B. 2010. Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam ArenA stadium. *Environmental Modelling & Software*, 25: 51-65.

- [4-76] Allegrini J., Dorer V., Carmeliet J. 2012. Analysis of convective heat transfer at building facades in street canyons and its influence on the predictions of space cooling demand in buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104-106: 464-473.
- [4-77] 構造工学委員会風洞実験相似則検討小委員会：風洞実験相似則に関する調査研究，土木学会論文集，489 (27), pp.17-25. 1994.
- [4-78] Uehara K., Murakami S., Oikawa S., Wakamatsu S. 2000. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 34 (10): 1553-1562.
- [4-79] Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa T. 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96 (10-11): 1749-1761.
- [4-80] Dimitrova R., Sini J.F., Richards K., Schatzmann M., Weeks M., García E.P., Borrego C. 2009. Influence of Thermal Effects on the Wind Field Within the Urban Environment. *Boundary-Layer Meteorology*, 131 (2): 223-243.

第 5 章

高層建築物周辺の温熱環境の形成機構に関する 熱収支・気流の連成解析

5.1 はじめに

5.2 実在街区における連成解析手法

5.2.1 解析の概要

5.2.2 解析の手順

5.3 対象地の再現と解析の概要

5.4 冬季の連成解析の結果

5.4.1 冷気の生成要因

5.4.2 地表面の低温化の形成要因

5.5 考察

5.6 まとめ

参考文献

5.1 はじめに

2章では対象街区に対する航空機リモートセンシング観測の放射温度と熱収支シミュレーションによる解析した放射温度との比較した結果、冬季において、12時における高層建築物の日影において、放射温度は解析値より観測値のほうが低いことが確認できた。この低温化の原因としてまず考えられるのが大気放射冷却である。しかしながら、より低温の地表面は高層建築物の日陰空間に集中してあり、長時間の日陰による地表面の蓄冷や高層建築物周囲に特有の微気候の影響を受けていることが推測された。またそれが現在の熱収支シミュレーション（大気放射冷却による効果が考慮されるが、局所の気温・気流場による効果は考慮していない）では再現しきれなく、正確な表面温度を再現できないと考察した。

3章では航空機リモートセンシング観測日と気象条件が似た冬季日において、高層建築物周辺の微気候を把握するために、気温・放射収支の移動観測を行った。高層建築物の日影空間では航空機リモートセンシング観測と同様な表面温度低下の現象を確認した。また同地域の表面温度と気温の実測値を分析した結果、高層建築物の日陰空間において局所気温が低くなっていることは、長時間の日陰となり、近傍空気と低温の地表面との局所的な熱交換により冷気が生成し続けられているためであることを示唆した。高層建築物の日陰空間において、蓄冷と冷気の間ではどのような相互作用があり、局所気温が低くなっている現象に対し、これが近傍空気と低温の地表面との局所的な熱交換によるものか、また低温の地表面には構成材料の蓄冷現象の影響がどの程度含まれているか。これらの現象と示唆された仮説は局所気温・気流分布を考慮した熱収支解析、すなわち、熱収支シミュレーションとCFDとの連成解析が必要であると考察した。

そこで、4章では熱収支シミュレーションとCFDとの連成解析手法に関して検討し、高Re数型k- ϵ モデルを用いたCFDと熱収支シミュレーションとの連成解析が有効であることを確認した。また街区の細部形状は表面からの顕熱流量を予測し、微気候を議論するうえで、再現する必要があることを確認した。連成解析は2回まで必要であることを確認した。検討ケースでは1時刻分の気象条件しか使われていないが、材料の熱容量を考え、本章では24時刻連成解析を行う必要がある。

既往研究では温熱環境の数値シミュレーションが進化した背景で、熱容量の異なる構成材料と空気との局所的な熱交換を考慮した微気候の解析が行えるようになってきた。例えば、Ma et al. ^[5-1]は、街区内の約10点で計測された気温・風速、および2か所の土地被覆における熱画像撮影より得られた表面温度について、24時刻の熱収支・気流の連成解析結果と比較している。しかしながら、非定常的な特性である材料の蓄熱／蓄冷の影響については実測データ、シミュレーション結果ともに議論されておらず、非定常的に連成することの効果については明示されていない。Toparlar et al. ^[5-2]は24時刻の同様の連成解析を5日間にわたり実施しているが、実測結果との比較は衛星リモートセンシングデータより得られ

た数十 m 四方の空間平均的な表面温度についてのみであり、構成材料と空気との熱交換といった局所的な議論はされていない。それに対して、本研究は、高層建築物の日陰空間に形成される微気候に着目し、冬季においてその日陰空間に、低温の地表面と局所気温が低くなっていることを、それぞれ航空機リモートセンシング観測（2章）と現地での高分解能の移動観測（3章）により確認した。これらの結果はそれぞれ、上記で指摘した連成解析で対象とする構成材料の蓄熱／蓄冷現象と、近傍空気と地表面との局所的な熱交換に基づくものであることが示唆されるが、その形成要因は本章の数値解析にて明らかにする。

以上により、本章では前章（4章）で検討された局所気温・気流分布を考慮した熱収支解析を実現するための熱収支解析と CFD との 24 時刻の連成解析の手法を用いて、土浦駅前地域を対象とした高層建築物周辺に冬季において形成される温熱環境の形成要因を明らかにする。具体的には、冬季における高層建築物の日影地域の低い表面温度と冷気の形成メカニズム及び蓄冷との相互影響を明らかにする（図 5.1）。

高層建築物の日影における冷気形成メカニズムに対し、3つの仮説が挙げられる。

- 1) ビル風によって、上空の気温の低い空気が吹き下ろす。
- 2) 上空風が吹き下ろした途中、高層建築物の日影壁面により冷却される。
- 3) 地表面付近に到達するもしくは滞留している空気が高層建築物の日影によって蓄冷している地表面により冷却される。（図 5.1 に示している）

それにあたり、本章は、まず対象地の再現と解析の概要を述べる。次に、対象地に対して、冬季晴天日のリモートセンシング観測日である 2009 年 12 月 22 日に対して、熱収支解析と CFD との連成解析をし、解析結果（風速分布、気温分布、表面温度分布）を分析する。また、2章と3章で示された高層建築物の日陰空間における低温の微気候の形成要因を、構成材料の蓄冷現象（局所蓄冷）と、近傍空気と低温の地表面との局所的な熱交換（局所熱交換）の観点から明らかにする。

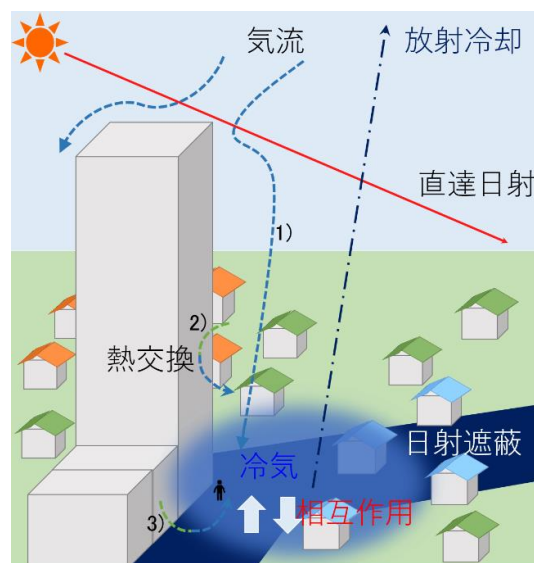


図 5.1 高層建築物の日影空間における温熱環境及びその影響要因の模式図

5.2 実在街区における連成解析手法

連成解析手法は 4 章で検討したが、5 章では実在街区へその手法を適用するため、24 時刻の連成解析を行う。具体的には以下に示す。

5.2.1 解析の概要

ある時刻の表面温度は、その時刻の熱収支に加え、構成材料の熱容量のオーダー ($\sim \text{MJ}/\text{m}^3\text{K}$) に依存する数日～数時間という時間スケールの蓄熱／蓄冷現象が関与する。一方、地表面付近の空気の流れ場や温度場の非定常性は、秒スケール (またはそれ以下) の高周波の変動から、気象場によって支配される卓越風向・風速の日変化の時間スケールまで幅広い。材料の蓄熱／蓄冷現象と、高層建築物の日陰の影響、地表面付近の空気との熱交換を考えるうえでは、これらに共通する日変化のスケールで非定常的な物理現象を解析することが重要となる。

日変化スケールの熱収支と表面温度の変化に関しては、前記の熱収支シミュレーションツールにより解析が可能である。熱収支シミュレーションツールの計算項目は、直達日射、天空日射、反射日射、大気放射、周辺地物との長波長放射の授受、対流熱伝達、非定常の熱伝導である。詳しくは、梅干野ら^[5-3]、Asawa et al.^[5-4]を参照されたい。これと連成する CFD シミュレーションは、前章で示した通り、平均流を対象とする RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations)を用い、乱流モデルに高 Re 数型の標準 k- ϵ モデルを採用する。これにより、1 時間ごとに上空の主風向・風速を反映した流れ場と温湿度場を予測し、それを当該時刻の平均的な空間分布として連成解析に使用する。アメダス気象データに代表される地域の気象データは、基本的に 1 時間ごとに整備されていることを考えても、この取り扱いも実用上も妥当であると見なしている。それを、一日の全時刻 (24 時刻) で解析し、熱収支シミュレーションとの連成を行う。CFD は各時刻の平均場の解析であり収束計算を行う (山村ら^[5-5]の手法を 24 時刻分適用したものである)。よって、連成の方法は、いわゆる Static coupling (シミュレーションツールは別で、データのみやり取りする連成) でありながら、24 時刻分のデータを熱収支解析との間で授受することにより、日変化の非定常特性を再現する。浮力の影響を考慮した CFD の非等温解析には、ブシネスク近似を適用する。

解析メッシュに関して、熱収支シミュレーションツールはボクセルメッシュを使用しており、CFD シミュレーションにも構造格子を採用するため、データ授受の整合性は高い。ツール間での表面近傍のデータの授受は、最近接のセル間で行うこととする。高 Re 数型の RANS モデルである標準 k- ϵ モデルを用いているため、固体表面には壁関数 (運動量：一般化対数則、対流熱伝達：ユルゲスの式) を適用する。両ツールでメッシュサイズを変更することも可能であるが、4 章の計算では、同一の均等メッシュサイズを採用した。CFD シ

ミュレーションでは湿度解析も可能であるが、本研究では地表面や樹木からの潜熱フラックスを取り扱わず、また湿度分布も評価対象としないため、湿気輸送解析は行わない。

5.2.2 解析の手順

具体的な解析の手順は、次の通りである（図 5.2）。1) 対象街区を 3D CAD により三次元で再現し、構成材料を設定する。2) 熱収支シミュレーションにより、第一段階の表面温度分布を時系列で算出する。このとき、まだ連成を行っていないため、気温・風速の空間分布は一律と設定する。本研究では、比較のために、この段階での表面温度の結果も使用する^{注 5-1)}。3) 次に、この表面温度分布を建物・地表面の境界条件に設定し、非等温の CFD 解析を実施することで、気流・気温の空間分布を得る。各時刻の卓越風向と風速に基づきべき乗則を流入条件に設定し、24 時刻分の解析を実施する。4) これにより得た 24 時刻分の気流・気温の空間分布を熱収支シミュレーションに入力し、局所の風速（対流熱伝達率）と気温の影響を考慮した表面温度分布を算出する^{注 5-2)}。5) これを、結果が収束するまで 2 回繰り返す（4 章で確認した）。

連成解析の収束について、今回は逐次収束ではなく、2 つの独立としたプログラムによる連成となる。熱収支解析は非定常で解析しているが、気流は各時刻で定常計算を行っている。このような連成解析は、都市熱環境の解析では近年見られるようになってきており、本研究でも実用上への可能性を考え、上記の方法で、連成による各時刻の収束の判定を行い、その結果、いずれの時刻においても前の時刻での連成打ち切りによる誤差は次の時刻にはほぼ影響しておらず、2 回での収束を確認した。

夜では日射がないため、一般的に風速が小さく、気温の分布が小さいことがわかっている。また、気温と表面温度の差も小さいである。そのため、連成解析は前日の深夜 12 時からスタートすれば、次の日の日中の温熱環境を予測するうえで十分であると考えられる。既往研究^[5-1]でも当日からの連成解析を一般的に行われている。また本研究では実測調査の結果より連成解析の実施回数と開始時間を検討した。実測結果より、夜から深夜にかけて、風速は 0.5m/s 程度、局所気温と上空気温の差は 0.2°C 程度である。このとき、対流熱伝達量の差は 1.5W/m² である。このような状態が数時間続く場合では、地面の表面温度に 1/100°C オーダーの違いが生じるが微小な影響である。日の出後、午前中では風速 2m/s 程度、局所気温と上空気温の差は 2°C 程度になり、対流熱伝達量の差は 27W/m² である。このような状態が 1 時間続く場合、地面の表面温度に 0.2°C 程度の差が生じる。すなわち、そのオーダーが 10 倍以上となり、午前中の 9 時前後で、前夜の上空気温と上空風速を境界条件として熱収支計算をすることによる誤差の影響がなくなることを確認した。（冬季典型日では深夜に風速が小さく、気温と表面温度との差が小さいである。一方、日の出後は風速が大きくなり、気温と表面温度との差も大きくなり、対流熱伝達による影響が大きくなる。）その結果から、日

中の評価を行う場合は、前夜から連成解析を行えば十分であるという知見が得られたので、0時を連成の開始時刻とした。

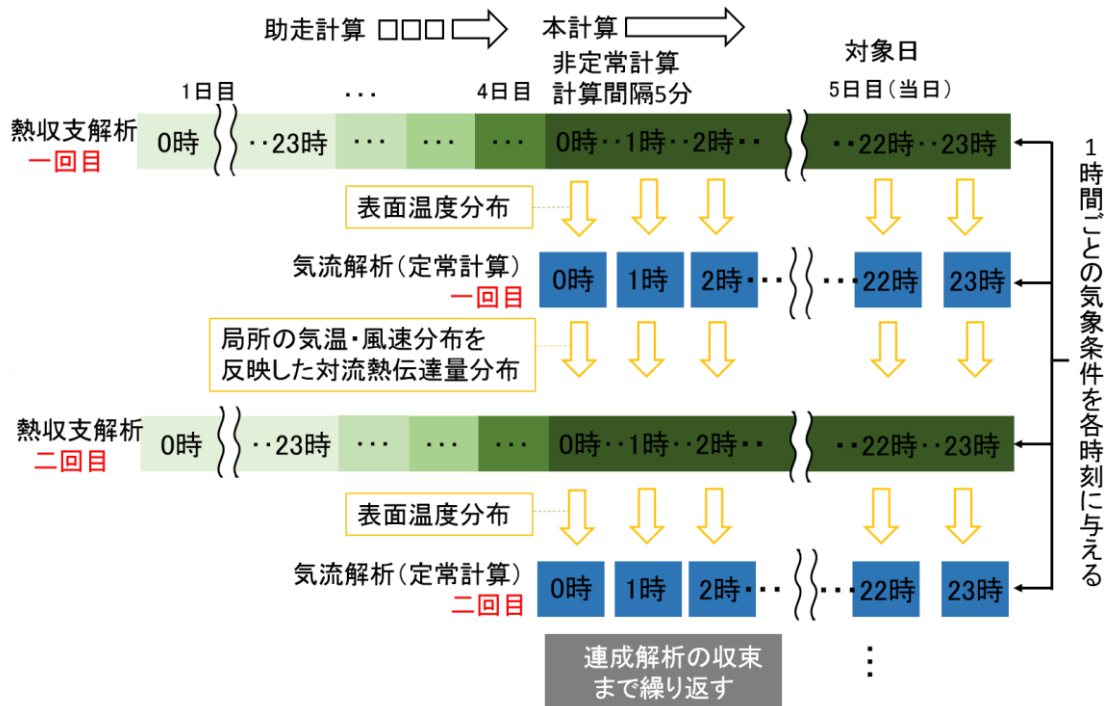


図 5.2 対象市街地へ適用する連成解析の手順

5.3 対象地の再現と解析の概要

対象市街地の 3D CAD の作成方法は 2.4.2 項で説明した。本章では CFD 解析を行うため、周辺の街区形状も気流性状に影響を及ぼすことにより、分析対象箇所に影響を与えるため、対象街区の 3D 建築モデルを 2 章より広範囲に再現した。また、時刻別に異なる風向を初期条件として解析をし、冬季における高層建築物の日影部は重要な評価対象になるため（高層建築物の影響を分析することが目的であるため）、高層建築物を中心とした街区を 3D モデルで再現した（図 5.3）。

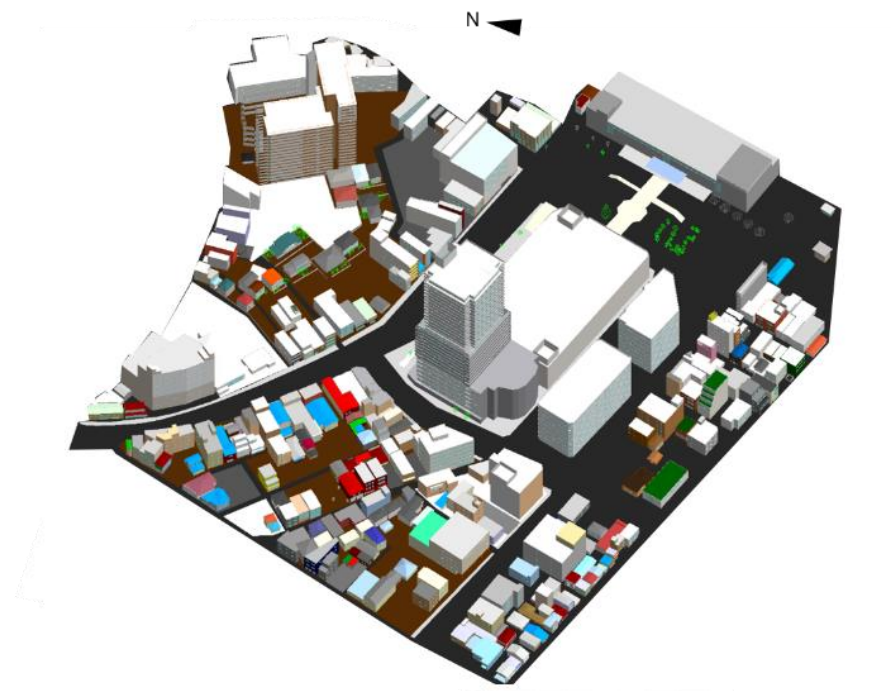


図 5.3 連成解析用の対象市街地の 3D モデル

熱収支解析は各部材には熱容量があるため、温度の変動に必要な時間は長く、蓄熱の累積効果がある。よって、気流の変動特性を解析する LES モデルよりも時間的平均値を反映する RANS モデルを使って、熱収支シミュレーションと連成解析をする方が適していると思われる。また RANS は計算負荷が小さく、本解析対象のような細部形状が再現された街区スケールでの解析に適用可能と考えられる。

5.2.2 項で示した 24 時刻の連成解析 (CASE 3) のプロセスは、局所熱交換と局所蓄冷の影響の両方が考慮されたものである。比較として、連成解析をせずに熱収支解析のみを行ったケース (5.2.2 項の 1) のプロセスの結果 (CASE 1) 及び対象時刻 12 時のみを連成解析の対象にしたケース (CASE 2) も計算した。CASE 1 は気温・風速の空間分布を一様としているため、局所熱交換が考慮されておらず、放射収支の影響 (日射、上空大気への放射冷却) が考慮されたものである。CASE 2 は対象時刻のみ気温・風速の空間分布を計算し、局所熱交換が考慮されたものである。ただし、上空風速・気温から対流熱伝達量を算出しているため、対流による効果自体が考慮されている。その概要を表 5.1 に示す。すなわち、CASE 1 と CASE 2 との比較により、局所熱交換の影響が確認でき、CASE 2 と CASE 3 との比較により、局所蓄冷の影響が確認できる。

表 5.1 解析ケースの概要

ケース名	解析のプロセス	検証された影響要因
CASE 1	連成しない	日射遮蔽、大気放射冷却
CASE 2	12:00のみ連成	気温・風速分布
CASE 3	24 時刻連成	時間歴、蓄冷

CASE 1 は、気温・風速を空間分布一様とし、計算対象日の気象データの風速に基づいてユルゲスの式より対流熱伝達率を算出した。この解析は 2 章の解析と同様な方法を用いている。気温も気象データから与えた。気象データは冬季リモートセンシング観測と同じ 2009 年 12 月 22 日の土浦アメダスデータを用いた。計算対象日に遡って 4 日間、2009 年 12 月 18 日～21 日の気象データを用いて助走計算をした。地中温度は一定とし、商業施設の室温を 20°C と設定し、住宅室内は空調なしと設定し、熱収支解析を実施した。

CASE 3 は、解析対象日（2009 年 12 月 22 日）に対して、1 時間ごとに連成解析を実施した^{注 5-3)}。熱収支解析における 4 日間の助走計算に対しては連成解析を行っておらず、計算対象日当日のみ連成解析を行った点から、より長期間にわたって蓄冷する影響は考慮されていない。CFD 解析の概要を表 5.2 に示す。流入風のプロファイルとして、駅前の高層建築以外は中低層建築を中心とした街区で、流入風の鉛直勾配にはべき乗則（べき指数 0.25）^[5-6]を適用した。地表面と近傍空気との間の熱交換に注目するため、流入風の気温鉛直分布は一様とし、流入境界面における成層安定度による鉛直気温分布などを考慮していないが、解析領域内部においては非等温 CFD 解析を行い、浮力による自然対流を考慮している。すなわち、高層建築物の日影などの局所的な影響のみを確認することを解析の目的とする。

CASE 2 は解析対象日の 12 時のみに対して、連成解析を実施した。12 時における CFD 解析の条件は CASE 3 と同じであり、他の時間帯は CASE 1 と同じ扱いで解析を行った。

表 5.2 対象市街地の連成解析の CFD 解析の解析概要

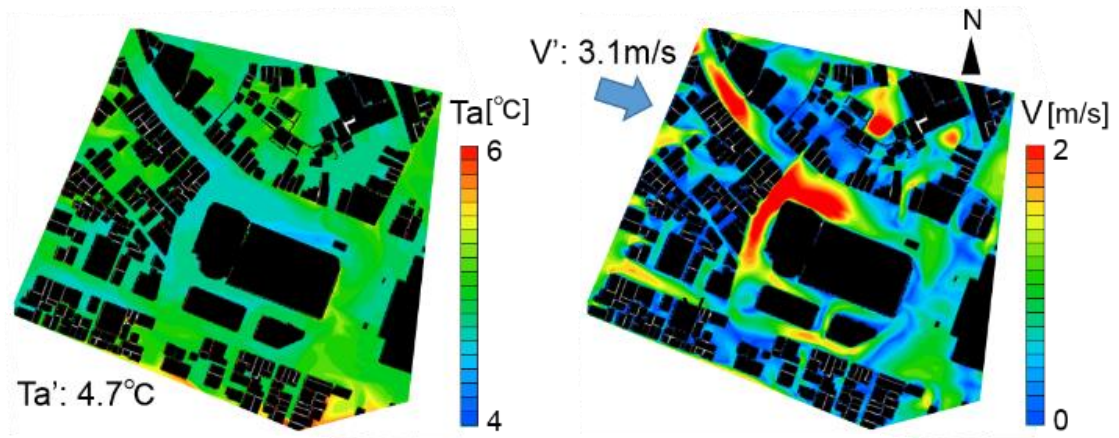
解析領域	1272m(x)×1176m(y)×300m(z)
メッシュ分割	578(x)×536(y)×154(z)=約4771万
最小メッシュサイズ	0.8m
乱流モデル	標準k-εモデル
計算アルゴリズム	SIMPLE
差分法	QUICK
表面温度	3D-CAD対応熱環境シミュレータ
流入境界	べき乗則(べき指数:0.25)
流出境界	自然流出
両サイドとスカイ	Free-slip
壁面境界	対数則

5.4 冬季の連成解析の結果

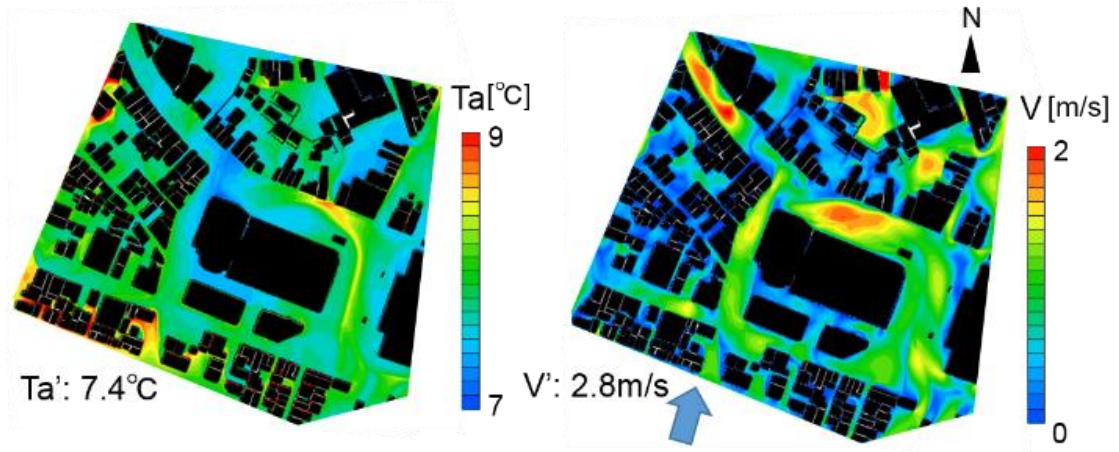
本節では、3.3の移動観測が示唆した同日陰空間における冷気の生成要因は局所熱交換によることを、24時刻の連成解析により検証する。また、前節の熱収支解析による高層建築物の日陰空間の表面温度の過大評価（リモートセンシング観測値より計算値のほうが高い）を24時刻の連成解析で改善できるか、すなわち、同日陰空間における低温の地表面の形成は局所熱交換や局所蓄冷によるものかを、24時刻の連成解析により明らかにする。

5.4.1 冷気の生成要因

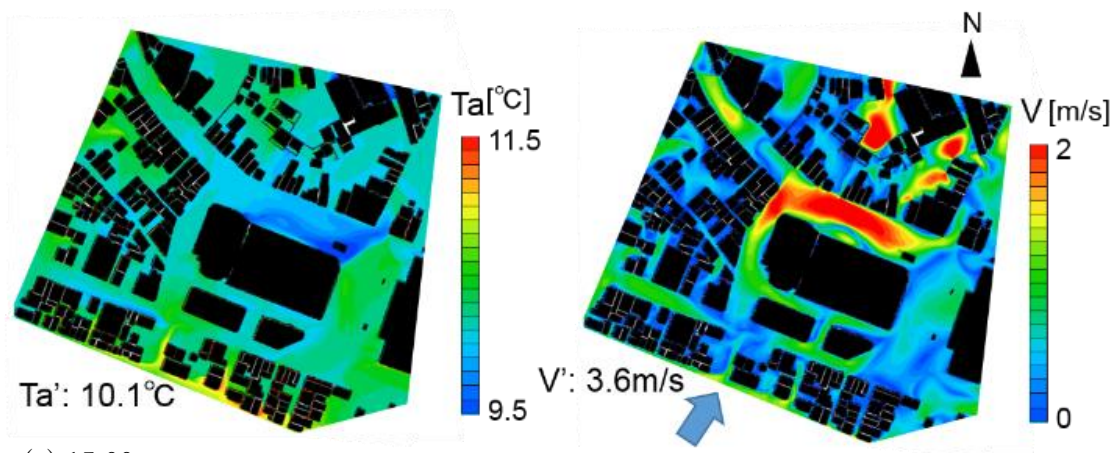
まず、図5.4に、連成解析によって得た水平面の気流・気温分布の結果を示す。午前、昼、午後の代表的な時間帯について検討できるように、10:00 (a)、12:00 (b)、15:00 (c)の1m高さの結果である。いずれの時刻でも、高層建築物周辺での風速の増加、および日陰空間での気温の低下が見られ、移動観測と同様の傾向が確認できた。ただし、移動観測の方の局所気温がより低くなっている。時刻別に見ると、10:00では上空風の風速はそれほど高くないが、風向は大通りに沿うような北西方向からであるため、高層建築物の日陰空間では他の時間帯よりもやや強い風が吹いていた。また同日陰空間の近傍気温は日向部より0.5°C程度低いことが確認できる。12:00では風向は南西方向に変わり、風速は全体的に10:00より低下したが、高層建築物の北側の風速は依然として高い。同日陰空間の気温も周囲と比べて比較的低温で、地上1mにもかかわらず、上空気温(T_a')よりも0.1°C程度低いことが確認できた。これは移動観測の結果と一致するものである。一方、旧市街地の気温は他のエリアに比べて比較的高いことが示された。15:00では他のエリアに比べ、高層建築物の北側から隣の商業施設の北側まで風速が大きく、特に商業施設の北東側の気温が低いことが目立っている。該当する場所はこの時間帯の日陰空間と一致している。



(a) 10:00



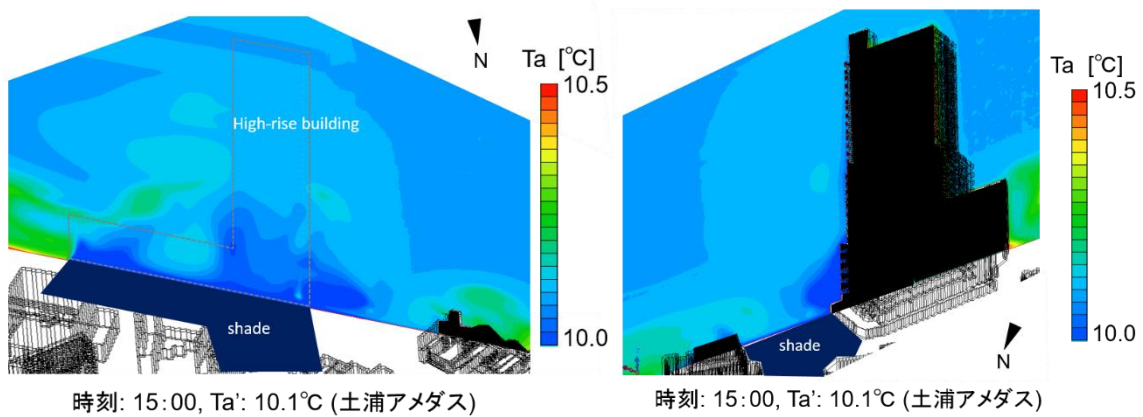
(b) 12:00



(c) 15:00

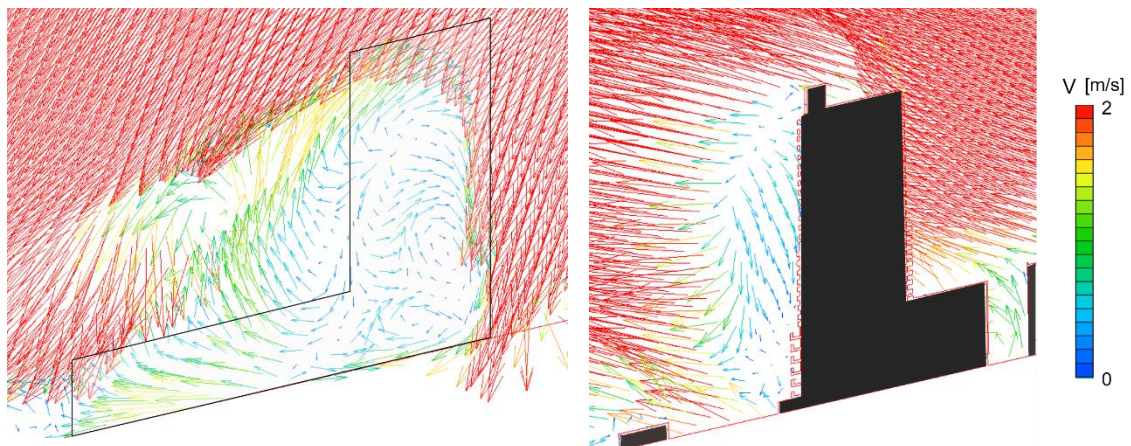
図 5.4 対象市街地の気温分布と風速分布 (高さ 1m)

図 5.5 に、高層建築物日陰空間の鉛直断面の気温分布の結果を示す。断面位置は図 5.6 に示す。高層建築物の日陰空間（地面と北側の壁面）近傍の気温が周囲より $0.1\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 程度低くなっており、 Ta' よりも 0.1°C 以上低いことが確認できる（図 5.5 (a)）。また気流が地面と熱交換した後、地表面近傍空間に移流していることが確認できる（図 5.5 (c)）。この結果より、高層建築物の日陰空間の地表面付近の冷気は上空から低温の空気の吹き下ろしが無くても、局所熱交換により、地表面付近で生成・移流することが示される。また高層建築物北側の壁面付近での気温も低いことから、地表面だけでなく日射の当たらない北側壁面での冷気の生成も示される（図 5.5 (b)）。生成した冷気が下降流に乗って、高層建築物の日影空間の地表面付近まで降下していることも確認できる（図 5.5 (d)）。すなわち、5.1 節の仮説 1) と 2) は確認された。



(a) 高層建築物及び隣接の商業施設の日影空間の断面

(b) 高層建築物を切断する断面



(c) 高層建築物及び隣接の商業施設の日影空間の断面

(d) 高層建築物を切断する断面

図 5.5 高層建築物の日影空間における気温分布及び風速ベクトル（鉛直断面）

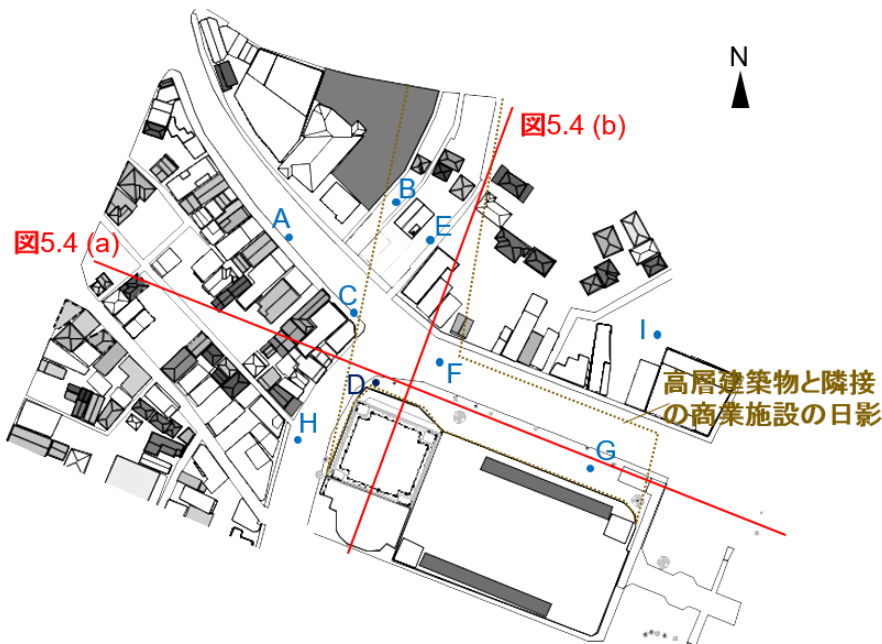


図 5.6 図 5.5 の断面位置と表 5.3 及び図 5.7 の点の位置

5.4.2 地表面の低温化の形成要因

次に、地表面の低温化は局所熱交換と局所蓄冷とのいずれが寄与しているかを詳細に確認するため、図 5.7 に CASE 1, CASE 2 と CASE 3 の高層建築物の周辺における表面温度の比較を示す。低温域を強調するために、温度レンジを 4°C 以下の低温側に絞って表示した。CASE 1 は気温・気流場一様（上空気温・上空風速）であり、CASE 2 と CASE 3 の地表面高さ 1m の気温・気流場分布は図 5.4 (b) に示す。表 4 にそれぞれのケースに対して、高層建築物の日陰空間とその周囲の地点の表面温度値を示す（地点位置は図 5.6 より）。局所風速や気温及びその時間履歴を確認するため、連成解析の影響が顕著に表れた箇所を比較した。CASE 2 は高層建築物の日陰空間の表面温度が CASE 1 より低くなる場所が多いことが確認できる（表 5.3: B, C, D, E, F）。これは長時間の日陰と上空大気への放射冷却（CASE 1）を考慮したうえで、局所熱交換が解析結果に寄与したためである。また、CASE 3 では同日陰空間において CASE 2 よりさらに表面温度が低いことが確認でき、場所により 0.5°C の差も生じている（表 5.3: B）。すなわち、局所蓄冷が表面温度の低下に寄与していることが確認された。また表 5.3 から、高層建築物の日陰空間付近以外の場所（表 5.3: A, H, I）では連成前後で表面温度の変化が小さいことから、上記の低温の地表面を形成する原因は高層建築物周辺特有な微気候によるものであることがわかった。

24 時刻の連成解析を行うことによって、局所的には地表面の局所蓄冷と局所熱交換が反

映され、日陰空間の表面温度低下が場所によって最大1°C程度低減することができたが、日影空間の広範囲にわたる現象までは再現できなかった。図5.8に高層建築物の日影空間を中心に、地上1mの風速ベクトル分布を示す。高層建築物の日影空間において、一部のエリアではビル風によって、2m/s以上の強風域が確認できる。一方、高層建築物の後流域では高層建築物の両側から回り込む風により、水平方向の循環流が形成している箇所が確認できる(図5.8の①)。特にこの渦の中心付近では風速1m/s以下の弱風域が見られる。図5.4(b)では連成後、高層建築物の日影空間で局所冷気が生成し、連成前と比べて表面温度と近傍気温の差 ΔT が減少したことがわかる。風速、すなわち対流熱伝達率については渦の中心をはじめ、連成後の局所近傍風速が連成前と比べて減少したが、一部のエリア(図5.8の②)では連成前と比べて減少しなかった。そのため、空気から地表面への熱フラックスが場所によって減少し、連成後は局所性に表面温度低下が確認できた。

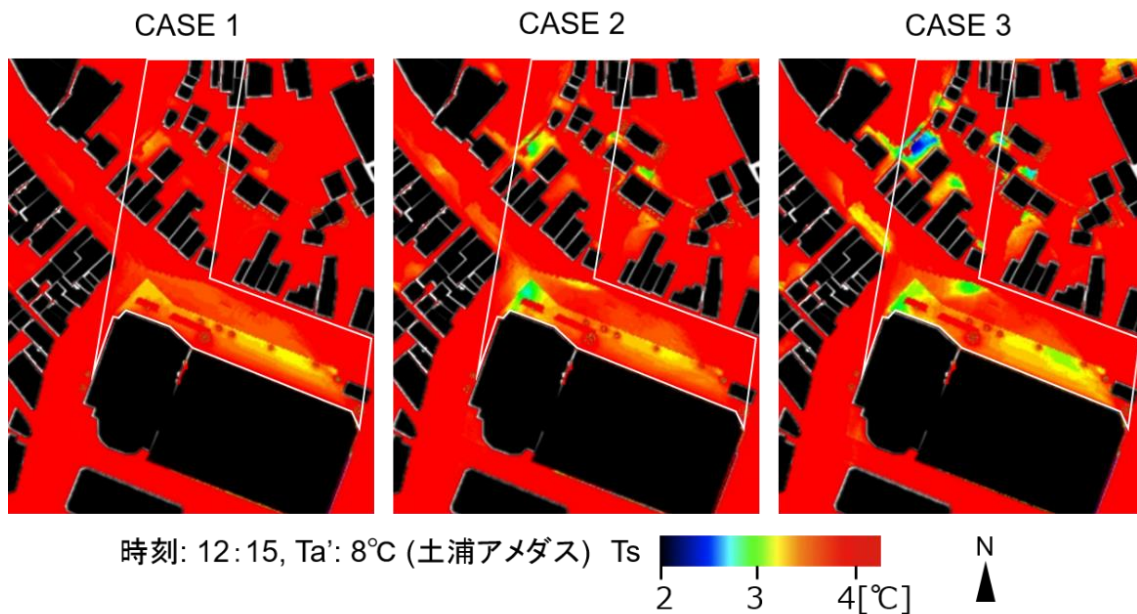


図5.7 各連成プロセスのケースの表面温度分布(低温域強調)

表5.3 各地点における各連成プロセスのケースの表面温度分布

表面温度 [°C]	A	B	C	D	E	F	G	H	I
CASE 1	3.9	3.4	4.2	3.4	3.8	3.4	3.3	17.8	3.9
CASE 2	3.8	3.0	3.7	3.1	3.3	3.2	3.2	17.9	3.8
CASE 3	3.8	2.5	3.6	2.9	3.1	2.9	3.0	17.9	3.9

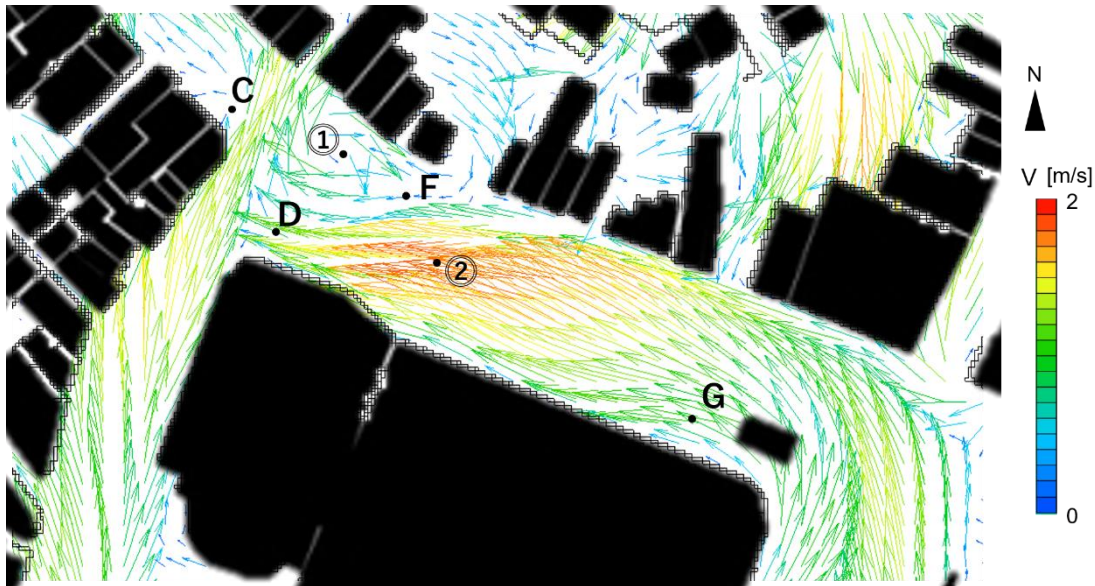


図 5.8 高層建築物の日影空間付近の風速ベクトル分布図（水平高さ 1m）

続いて、地表面の熱収支の観点から、局所熱交換の影響を評価する^{注5-4}。図 5.9 に高層建築物の日陰空間に位置する D 点の連成前後（CASE 1, CASE 2 と CASE 3）における地表面熱収支の各成分の比較結果を示す。プラスは、地表面に向けた熱フラックスがあることを意味する。3 ケースいずれも長波長放射の授受は上空大気への放射冷却により、常にマイナス（すなわち、地表面が冷却されている。）である。天空日射や周囲からの反射日射の影響は、朝方を除いて限定的である。よって、地表面の熱容量により、高層建築物の日陰空間における地表面温度が日中低く維持され、対流による熱フラックスはプラス（近傍空気から地表面へ）になる。一方、CASE 1, CASE 2 と CASE 3 で他の熱収支項が大きく変わらない中、対流熱伝達量に差が生じている。具体的には、12:00 において、CASE 2 と CASE 3 の対流熱伝達による近傍空気から地表面への熱フラックスが、CASE 1 より小さくなった。これは気温・風速の空間分布を考慮したことで、地表面近傍で生成された冷気が再現されたためである。CASE 3 はさらに 11:00 頃から近傍空気から地表面への熱フラックスが CASE 2 より小さくなり、蓄冷の継続が再現された。これは CASE 3 の表面温度がより低くなった原因となる。

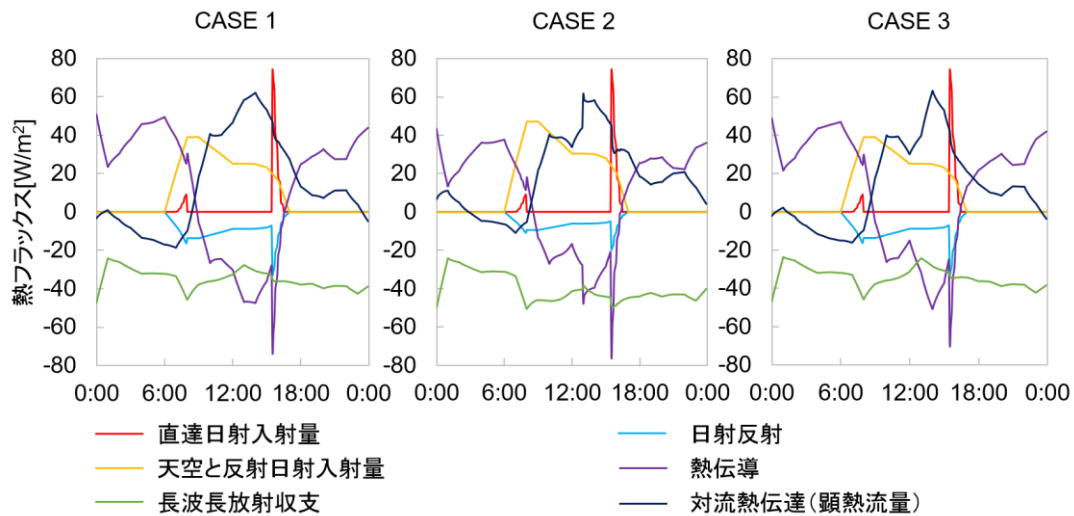


図 5.9 点 D における連成プロセスのケースの熱収支成分を表すグラフ

連成解析により、高層建築物の日陰空間における局所熱交換によって、冷気が生成され (5.4.1 項)、その近傍の冷気によってさらに地表面温度の低下も促進される (CASE 1 と CASE 2 の比較)。すなわち、低温の地表面や壁面と冷気との相互作用が確認された。またこの相互作用が時間的に継続することで、蓄冷効果も起こることが示された (CASE 2 と CASE 3 の比較)。

5.5 考察

今回の連成解析手法による冬季における低温の微気候の検証では、高層建築物の日陰空間を対象に実施した。建物に囲まれた閉鎖的なキャニオン空間における蓄冷と日中における気温の低減は Kanda et al.^[5-7]、Johansson^[5-8]、Parlow et al.^[5-9]によって示されている通り明らかである (図 5.10(a)) が、本研究は開放的な空間 (図 5.10(b)) であっても、大規模な高層建築物の日陰空間であれば、近傍空気と低温の地表面との局所的な熱交換と構成材料の蓄冷現象により、冷気が生成可能であることが数値解析からも示されたことは意義深いものである。これは、同様に 24 時刻の連成解析を行った既往研究^[5-1, 5-2, 5-10]でも得られていない結果である。低温の地表面の再現について、非連成解析における仮定 (気温と風速の空間分布が一様) が局所的に誤差を生んでいたことと (CASE 1 と CASE 2 の表面温度の比較)、過去の履歴を考慮することで局所的な蓄冷が影響を及ぼす (CASE 2 と CASE 3 の表

面温度の比較) ことの2点が明らかとなった。ただし、上記の連成解析を行い、対流効果と蓄熱/蓄冷の影響を加味することで、より低温の地表面の再現に対しては、局所的にとどまり、日影空間の広範囲にわたる現象までは再現されなかった。

本章で得られた結果、すなわち、冷気の生成と低温の地表面について、一般化する可能性を検討する。図 5.11 に示すように、低温の地表面と局所冷気は相互に影響を及ぼし、局所冷気は風環境によって影響される。低温の地表面はさらに大気放射冷却と風環境が影響を及ぼす。大気放射冷却と風環境はまたそれぞれ気象条件と微気候に影響される。さらに微気候の影響要素は街区の空間形態と構成材料である。

まず、冷気の生成機構については 5.4.1 項で確認したように、近傍空気と日影に位置する低温の地表面と壁面との局所的な熱交換によって生成された。局所冷気が生成する唯一の冷却源は低温の地表面と壁面である。冷却源がなければ、卓越の移流によって、冷気が飛散され、気温が低いエリアが現れないはずであるが、地表面と壁面という熱容量が空気の 500 倍程度の冷却源があれば、近傍空気を冷却しつつも、自身の表面温度がほとんど上がらず、近傍空気を冷却し続けることができると考えられる。そこで、移流が卓越しても対流熱伝達によって冷気が生成され続け、その場は動的な平衡状態となり、気温が低いエリア、すなわち冷気が形成されることが確認された (図 5.11 の⑨)。解析結果の 10 時、12 時、15 時、17 時で風向が異なるが、広大な日影空間でフェッチ距離が長い場合はこのような状況が起こることが高さ 1m の水平気温分布からも確認された。ただし、冷気の生成の度合いは、風向条件によって異なってくると考えられる (図 5.11 の⑧)。上流側から上空気温よりも高い空気が直接に流れ込む場合について、南風の場合 (すなわち、高層建築物の日影空間が後流域にある場合) 日影空間における風速が小さく、冷却された空気が滞留しやすく、気温が低いエリアが形成されると考えられる。日影空間が後流域ではない場合について、比較的高温な空気が流れ込み、移流効果により低温の表面を経ても上空気温より低く冷却されない場合が考えられるので (図 5.11 の④、⑤)、以下の試算を行った。

周囲から移流で流れ込む空気が日影空間で低温地表面との熱交換によりどの程度冷却するのかを、日影の面積とフェッチ距離との関係で算出すると (図 5.11 の①)、

$$A \frac{s}{v} (5.8 + 3.9v) (T_a - T_s) \cong 1301 \times V (T_a - T_a')$$

空気の熱エネルギーの変化と対流によって得る熱と等しいことから、上記の式で表す。

A: 高層建築物の日影空間における低温の地表面と低温の壁面の総面積[m²]、s: 空気が日影空間に流入し、冷却できるフェッチ距離 (日影の幅) [m]、v: 風速[m/s]、T_a: 日影空間外の気温[K]、T_s: 表面温度[K]、V: 冷却される空気の体積[m³]、T_a': 日影空間で冷却後の気温 [K]、1[m³]の空気を 1°C 上昇させるのに必要な熱量は、1.006[J/gK] × 1293[g] × 1[K] ≅ 1301[J]。

上記の式によると、日影空間が後流域ではない場合でも、v に対して、A と s が十分大き

い（すなわち、高層建築物が十分大きく、日影の壁面が大きい、広大な日影がある。また空気が日影に流入する時から、十分冷却されるまでのフェッチ距離が十分ある）場合には、日影空間において、冷気の生成が可能と考えられる。本研究の対象市街地において、観測と数値解析により、高層建築物の日影空間が後流域ではなくても、冷気が生成されていることが確認された。

次に、冬季における高層建築物の日影空間に形成される低温の地表面について、本章の連成解析の結果から、局所の気温・気流分布と時間履歴・蓄冷の考慮はより低温の地表面形成に寄与するが、大気放射冷却は唯一の冷却源として存在する。それは気象条件、街区の空間形態と構成材料によって左右される（図 5.11 の②、③）。気象条件に対して、対象市街地は関東地方に位置するため、冬季は晴天日が多く、空気が冷たく乾燥し、大気放射冷却が促進される。対象市街地の空間形態的な特徴として、高層建築物と併設する中層商業施設による広大な日影が存在している。12 時時点で高層建築物による日影が 45m×140m まで及び、高層建築物と離れるエリアまで影響が及んでいる。中層商業施設は横幅が大きく（100m×45m）、中層商業施設近辺で東西方向にフェッチ距離の長い日影を作っている（高層建築物の日影と重なると幅が 145m に達している）。また、大気放射冷却には天空率が大きいことが必要ですが、単棟で建つ高層建築物では、その条件が満たされる。対象空間の構成材料について、主な構成材料は熱容量の大きいアスファルト、コンクリートとタイルで、他のサイトでも一般的に使われている材料である。本研究の対象市街地の高層建築物の日影空間のような一日中を通して、直達日射が少なく（もしくはない）、すなわち長時間に日影であるエリアは図 5.9 のような熱収支の時系列変化が起き、主な受熱は対流熱伝達と天空日射及び反射日射からである。天空日射及び反射日射は日影であれば、本研究のような開放空間と構成材料の場合、同程度の天空率と反射率があり、同程度の受熱が考えられる。対流熱伝達について、上記冷気の生成部分で分析したように、もしくは日影空間が広大であり、十分なフェッチ距離がある場合、日影空間の地表面の表面温度は上空気温より高くなるなく、低温の地表面は形成されると考えられる。局所の気温・気流分布と時間履歴・蓄冷の考慮がより低温の地表面形成への寄与に対して、上記冷気の生成の条件が満足され、冷気が生成されれば、局所の気温・気流分布が低温の地表面は形成に寄与し、また対象時刻より前の時刻で冷気が生成されれば、時間履歴・蓄冷の考慮がより低温の地表面形成への寄与することになる。

すなわち、構成材料は一般化できるもので、気象条件は関東地方の冬季という条件下におけるものである。空間形態について、高層建築物の広大な日影があり、もしくは十分なフェッチ距離がある中層建築物の日影空間が存在すれば、本研究のような開空間でも、低温の地表面や冷気が生成する可能性が十分あると考えられる。

一方、著者らが想定したよりも、リモートセンシング観測と移動観測により示された地表面温度と局所気温がより低く、これに関しては、連成解析を行っても完全には再現しきれて

おらず、1日のみを連成解析した現状の手法の限界とも言える。図5.12に図5.6のD点の連成前後の対流熱伝達量の比較を示す。連成後、表面温度が低くなった点に対して、連成後では対流により得る熱フラックスが対象日1日の積算値が減っていることが確認できる。気象条件が安定した冬日であれば、前日も類似な状況が生じ、長期の連成は対流による得た熱フラックスの差の積算値を表面温度に反映できると考えられる。そこで、今後の課題としては、より長期の局所蓄冷を考慮した場合に、どの程度観測結果に近づいた解析結果が得られるかということがあるが、その場合、必然的に計算負荷が膨大になってくる。よって、長期の影響については、連成の頻度を抑えて、時間積分的な局所蓄冷と局所の冷気の影響を考慮するなど、時間方向のモデル化が必要となると考えられる。その他に、CFDシミュレーションには、各時刻の流入風条件に基づき平均流を解析するRANSモデルを用いた。これは、各時刻の流入風に代表性があることに基づくものであるが、より短い時間スケールでの風向・風速の変動が冷気分布に影響をした可能性も考えられる。これらの影響要因の分析についても、今後の課題としたい。

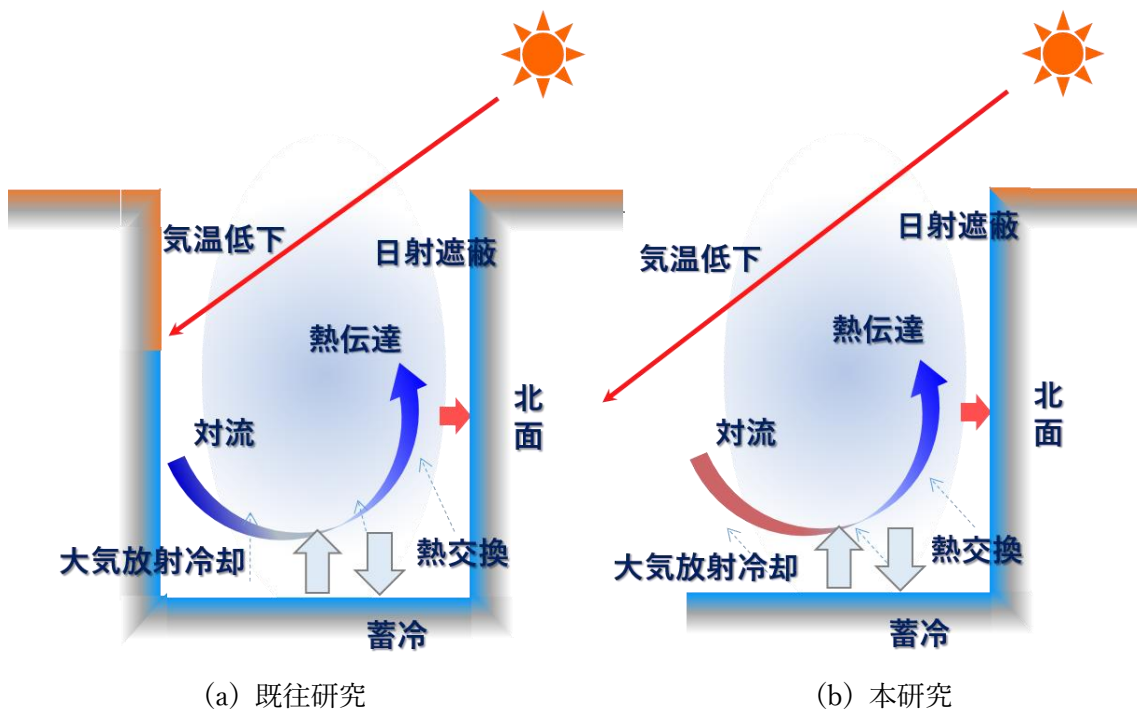


図 5.10 高層建築物の日影空間で起きる熱的な現象

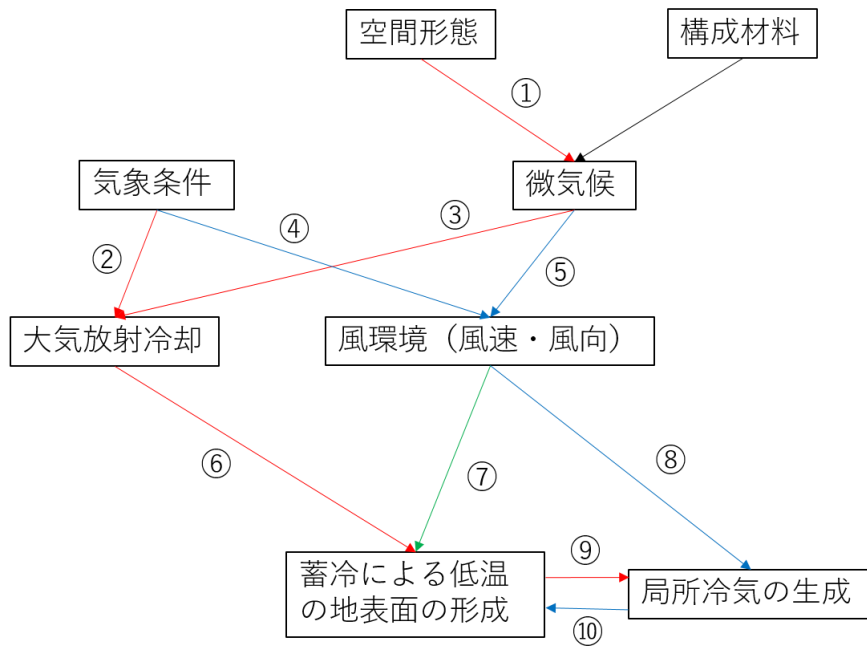


図 5.11 高層建築物の日影空間で起きる熱的な現象を引き起こす原因と流れ

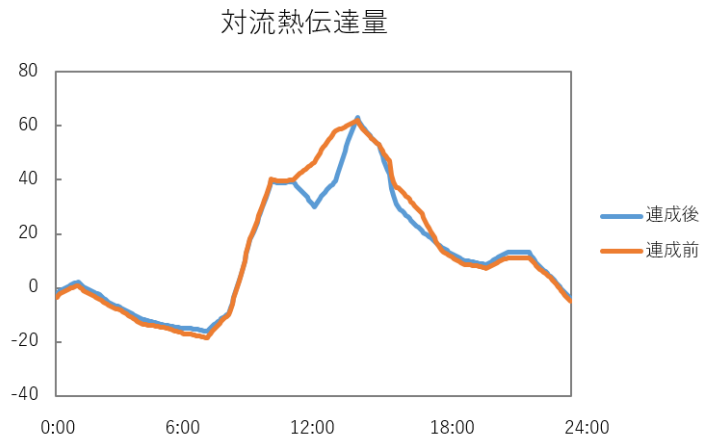


図 5.12 D 点における連成前後の対流熱伝達量の変化

5.6 まとめ

本研究では、高層建築物の日陰空間において冬季に形成される低温の微気候の形成要因を明らかにするために、24時刻の熱収支・気流連成解析手法により検証を行った。近傍空気と低温の地表面という熱容量の大きく異なる対象間での局所的な熱交換を確認できた。

- 1) 熱収支解析と CFD 解析との連成解析によって、十分な放射冷却と広大な日影という条件が揃う本事例では、高層建築物の日陰空間において、近傍空気と低温の地表面や壁面との局所的な熱交換により、冷気が生成されたことを確認した。
- 2) 連成なしの熱収支解析、12時のみの連成解析と24時刻の連成解析を実施・比較し、冷気の生成と地表面への局所的な蓄冷がそれぞれ表面温度へ及ぼす寄与を確認した。連成解析により、地表面温度の低下を数値解析において24時刻の対流効果と蓄熱／蓄冷の影響を加味することで再現しようと試みたが、局所的には温度低下が確認されたが、日影空間の広範囲にわたって観測値ほどの温度低下までは再現されなかった。

これは、より長期間の局所蓄冷の影響であることが推察されるため、長期の連成を行う必要性を示唆した。ただし、長期間の連成解析は計算負荷の増大を招くため、時間を遡るにしたがって連成の頻度を減らすなど、計算を簡略化する工夫が必要と考えられる。また、より短い時間スケールでの風向・風速の変動も冷気分布に影響している可能性もあるため、今後の研究課題としたい。

6章では本章で確認した高層建築物周辺の温熱環境に対して、環境アセスメントの観点から人の温熱快適性に及ぼす影響を評価する。

参考文献

- [5-1] Ma J., Li X., Zhu Y. 2012. A Simplified method to predict the outdoor thermal environment in residential district. *Building Simulation*, 5: 157-167.
- [5-2] Toparlar Y., Blocken B., Vos P., van Heijst G.J.F., Janssen W.D., van Hooff T., Montazeri H., Timmermans H.J.P. 2015. CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. *Building and Environment*, 83: 79-90.
- [5-3] 梅干野晁, 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を一体化した環境設計ツールの開発, 日本建築学会技術報告集, 20, pp.195-198, 2004.
- [5-4] Asawa T., Hoyano A., Nakaohkubo K. 2008. Thermal Design Tool for Outdoor Spaces Based on Heat Balance Simulation Using a 3D-CAD System. *Building and Environment*, 43: 2112-2123.
- [5-5] 山村真司, 梅干野晁, 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収支・気流連成シミュレーション手法開発の基礎的検討, 日本建築学会計画系論文集, 560, pp.73-80, 2002.
- [5-6] 日本建築学会: 市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック-ガイドラインと検証用データベース-, 流体数値計算による風環境評価ガイドライン作成 WG, 2007.
- [5-7] Kanda M., Moriwaki R., Kimoto Y. 2005. Temperature profiles within and above an urban canopy. *Bound.-Lay. Meteorol*, 115: 499-506.
- [5-8] Johansson E. 2006. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41: 1326-1338.
- [5-9] Parlow E., Vogt R., Feigenwinter C. 2014. The urban heat island of Basel – seen from different perspectives. *J. Geogr. Soc. Berlin*, 145: 96-110.
- [5-10] Ikejima K., Kondo A., Kaga A. 2011. The 24-h unsteady analysis of air flow and temperature in a real city by high-speed radiation calculation method. *Building and Environment*, 46: 1632-1638.

注釈

注 5-1) 連成回数を最小化するには、等温場の CFD シミュレーションを先に実施してから（：気流分布のみを算出）、熱収支シミュレーションを実施する（：局所対流熱伝達率を踏まえた表面温度を算出する）方が連成の収束に至るまでの回数は減らせることが分かっている。本研究では、連成を行わない場合の表面温度分布についても比較に使用するために、熱収支シミュレーションを先に実施した。

注5-2) 本研究では、比較のために、対象時刻12時の気流・気温の空間分布のみを熱収支シミュレーションに入力し、その他の時間帯の気温・風速の空間分布は一様と設定するケースについても実施した。詳細は4.1に示す。

注5-3) 連成解析は1時間間隔で実施しているため、各時刻の時間代表性が問題となる。図5.10の(a), (b)にそれぞれ土浦アメダス気象データから風配図と風速の出現頻度分布図を作成した。10分間と1時間の測定データ、それぞれについて作成している。本結果から、両者はほぼ一致した傾向を示していることから、1時間以内に風向や風速の変化がほとんどなく、1時間ごとの風向風速の代表性が高いと言える。

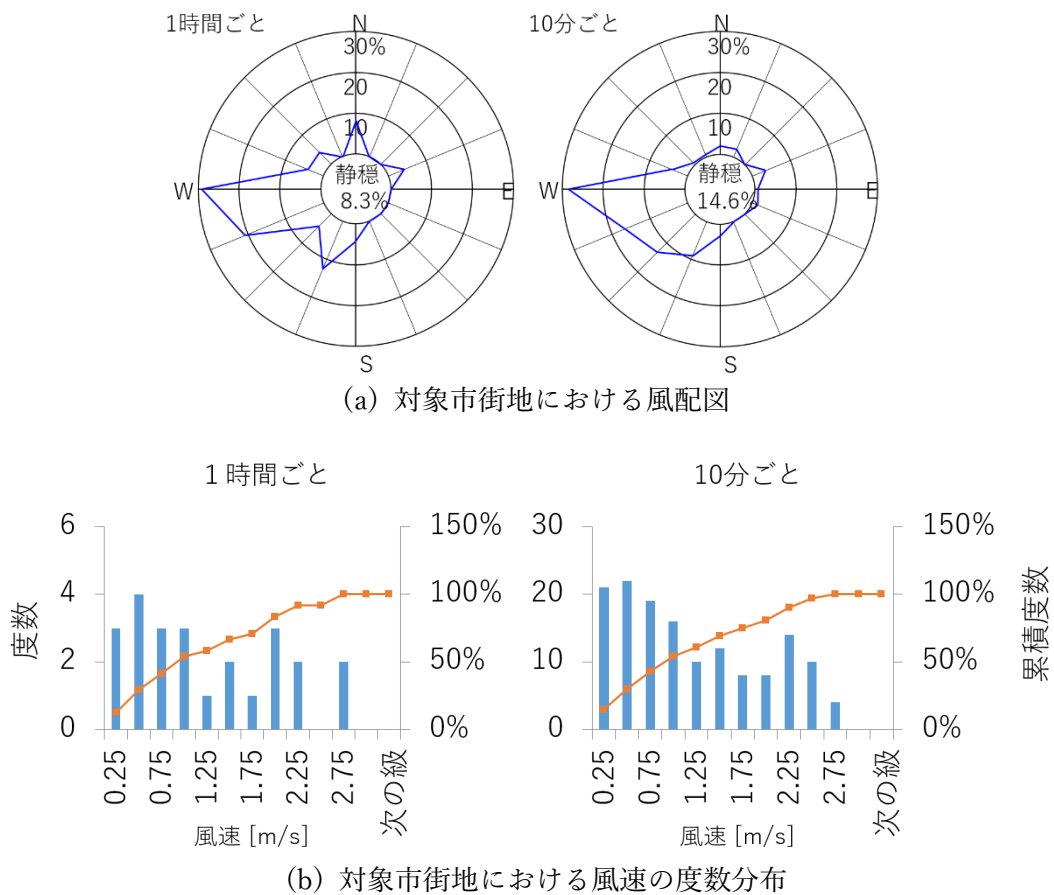


図5.10 対象市街地における1時間ごとと10分ごとの風速条件の比較

注5-4) ここでは、主に対流熱伝達による顕熱フラックスを評価しているが、移動観測では計測が困難ため、観測と数値解析との結果については比較せずに、連成解析による影響を、連成前、12時のみ連成と24時刻の連成(CASE 1, CASE 2とCASE 3)の比較から評価する。

第 6 章

高層建築物周辺の微気候を考慮した温熱環境評価

- 6.1 はじめに
- 6.2 高層建築物に対する法規制
 - 6.2.1 都市再開発と地域地区
 - 6.2.2 斜線制限及び天空率
 - 6.2.3 日影規制
 - 6.2.4 CASBEE による評価
- 6.3 高層建築物に対する従来の環境影響評価手法
- 6.4 従来の環境影響評価手法の対象市街地への適用
 - 6.4.1 日影図
 - 6.4.2 ビル風
- 6.5 温熱環境の視点からの環境影響評価
 - 6.5.1 12:00 の SET* 分布
 - 6.5.2 SET* への各影響要素による影響度
 - 6.5.3 今後の環境アセスメントに向けた課題
- 6.6 まとめ
- 参考文献

6.1 はじめに

前章では高層建築物が単棟として存在し、周辺は低層住宅地という比較的開放的な空間でも高層建築物の日影空間において、蓄冷した低温の地表面と近傍空気との熱交換が行われ、冷気が生成された。また生成された冷気により、局所的な気温が低いことによって、大気から地表面に向かう熱フラックスが抑制され、地表面の低温を促進されるという知見が得られた。また、温熱環境は人々が生活する上での健康や快適性を保障する意味で重要である。一方、高層建築物の周辺地域では生活者の温熱快適性が担保されていないことが現状である。本章ではこの知見に基づき、高層建築物の影響に対し、従来の環境アセスメントの評価方法を踏まえたうえで、既存の環境アセスメントの中に十分でない部分、温熱環境を考慮し、今後の温熱環境を考慮した環境アセスメントに関する知見を得る目的で、冬季における高層建築物周辺の温熱快適性を評価する。本章の構成は以下の通りである。

まず高層建築物に関する現在の法規制や環境アセスメントについて調査したうえで、従来の環境影響評価である日射遮蔽とビル風の観点から、高層建築物の周辺環境を評価する。

次に、温熱快適性を表す指標：標準新有効温度（SET*）を用いて、温熱環境の視点から、高層建築物が対象市街地への環境影響を評価してゆく。

6.2 高層建築物に対する法規制

日本では高層建築物による環境問題が取り上げられるようになったのは、1960～70年代のマンションブームによる中高層住宅の一般市民への定着以降である。そのため、中高層住宅による市街地形成は歴史が浅く、幹線道路沿いや商業系用途地域に散発的に中高層住宅群が形成されていることが多い^[6-1]。これらの市街地の中には、隣接する住宅への配慮がないこと等により問題が生じている場合が見られる。

高層建築物は都市再開発によって建設されることが多いが、都市再開発を行う場合は都市再開発法に則って特定の地域地区で行わなくてはならない。

前述のように、高層建築物が周辺環境に与える影響については日射障害・ビル風・景観の悪影響等が挙げられるが、日照時間の減少は法律で規制され、自治体によっては特定の高さ以上の建物の建設について環境アセスメントが義務付けられている。本節においては、これらの高層建築物に対する法規制を整理し、次節において、環境影響評価手法を整理することうえで、6.5節は対象市街地において、今までの環境影響評価手法に基づいて、評価を行う。

6.2.1 都市再開発と地域地区

都市再開発とは、市街地再開発事業、土地区画整理事業等の市街地開発事業にとどまらず、特定街区、地区計画等の規制誘導手法による修復型まちづくり、特定の市街地の整備を目的とした助成事業及び工場等の跡地利用や都市施設の整備と一体となった土地利用の面的転換等を含むものとされている^[6-2]。この内市街地再開発事業は、市街地内の、土地利用の細分化や老朽化した木造建築の密集、十分な公共施設が無い等の都市機能の低下が見られる地域において、土地の合理的かつ健全な高度利用と都市機能の更新を図ることを目的としている^[6-3]。市街地再開発事業は第 1 種事業の「権利変換方式」と第 2 種事業の「管理処分方式（用地買収方式）」の 2 種類に分かれるが、第 2 種事業は公共性・緊急性が著しく高い区域において行われるため、基本的には第 1 種の方式で行われる。

市街地再開発事業はどこでも行えるわけではなく、高度利用地区、都市再生特別地区または地区計画、防災街区整備地区計画もしくは沿道地区計画の地域地区で行うことができる。地域地区とは都市計画区域を用途毎に区切ったもので、最も基本的なものである全 12 種類の用途地区の他に、高度利用地区等のその他の地域地区が 20 種類存在する。自治体はこれらの地域地区を指定することによって都市計画を進めてゆく。

都市計画法で定める用途地域は、表 6.1 のように住居系 7 地域・商業系 2 地域・工業系 3 地域に分かれ、それぞれの地域に対し建てられる建築物の用途と容積率の上限が決められている（表 6.2）。このうち住居系・商業系地域では、第 1,2 種低層住居専用地域では最高 200%、第 1,2 種中高層住居専用地域・第 1,2 種住居地域・準住居地域・近隣商業地域では最高 500%、商業地域では最高 1300%の容積率上限が指定される。商業地域は容積率の上限が大きく、地方都市の中心街に指定されることが多いため、高層建築物を建設しやすい用途地域であると言える。また、商業地域は一部の工場を除けば全ての用途の建物を建設することができるので、戸建て住宅や集合住宅が混在する等、日照問題が起こりやすい地域でもある。

本研究の対象市街地は商業地域に該当するため、これからは商業地域に対する法規制を中心に展開する。

表 6.1 都市計画法で定める用途地域の種類

	用途地域	内容
住居系	第1種低層住居専用地域	低層住宅のための地域。小規模な店舗、事務所を兼ねた住宅や、小中学校を建てることのできる
	第2種低層住居専用地域	主に低層住宅のための地域。小中学校のほか、150m ² までの一定の店舗などが建てられる
	第1種中高層住居専用地域	中高層住宅のための地域。病院、大学、500m ² までの一定の店舗などが建てられる
	第2種中高層住居専用地域	主に中高層住宅のための地域。病院、大学等のほか、1,500m ² までの一定の店舗や事務所等が建てられる
	第1種住居地域	住居の環境を守るための地域。3,000m ² までの店舗、事務所、ホテル等は建築可能
	第2種住居地域	主に住居の環境を守るための地域。店舗、事務所、ホテル、カラオケボックス等は建築可能
	準住居地域	道路の沿道において、自動車関連施設等の立地と、これと調和した住居の環境を保護するための地域
商業系	近隣商業地域	まわりの住民が日用品の買物等をするための地域。住宅や店舗の他に小規模の工場も建設可能
	商業地域	銀行、映画館、飲食店、百貨店等が集まる地域。住宅や小規模の工場も建設可能
工業系	準工業地域	主に軽工業の工場やサービス施設等が立地する地域。危険性、環境悪化が大きい工場のほかは、ほとんど建設可能
	工業地域	どんな工場でも建てられる地域。住宅や店舗は建築できるが、学校、病院、ホテル等は建築不可
	工業専用地域	工場のための地域。どんな工場でも建築できるが、住宅、店舗、学校、病院、ホテル等は建築不可

表 6.2 容積率の基準

容積率 (%)	用途地域													
	1低	2低	1中	2中	1住	2住	準住	近商	商業	準工	工業	工専	無指定	
指定容積率	50				100				200	100	100		(50)	
	60				150				300	150	150		(80)	
	80				200				400	200	200		(100)	
	100				300				500	300	300		(200)	
	150				400				600	400	400		(300)	
	200				500				700	500			(400)	
					※1				800	※1				※2
									900					
									1000					
									1100					
									1200					
									1300					

※1：高層住居誘導地区内の建築物は除く

※2：カッコ内は特定行政庁が都市計画審議会の議を経て指定する区域内の数値

6.2.2 斜線制限及び天空率

斜線制限とは道路の開放性や道路に面した建築物の日射・通風・採光の確保を目的に建築物の高さを制限するものである。斜線制限には道路斜線制限・隣地斜線制限・北側斜線制限の 3 種があるが、商業地域においては北側斜線制限が適用されない。

(1) 道路斜線制限

道路斜線制限は敷地に面した道路を基準とした斜線制限で、建物の高さは原則として図 6.1 のように前面道路の反対側の境界線からの水平距離に 1.5 を乗じた数値以下としなければならない。また、道路斜線は適用距離（20 m～50 m）を超える範囲には及ばない。

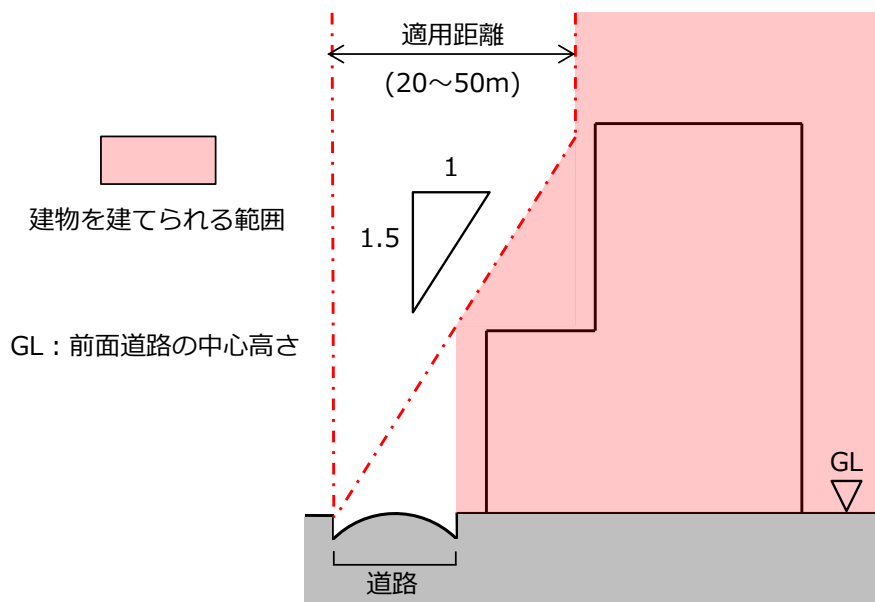


図 6.1 商業地域における道路斜線制限の模式図

(2) 隣地斜線制限

隣地斜線制限は、高層部分の通風・採光を目的に、隣地境界線からの水平距離に応じて建築物の高さを制限するものである。商業地域においては、図 6.2 のように隣地境界線からの水平距離の 2.5 倍に 31m を加えた数値以下とする。

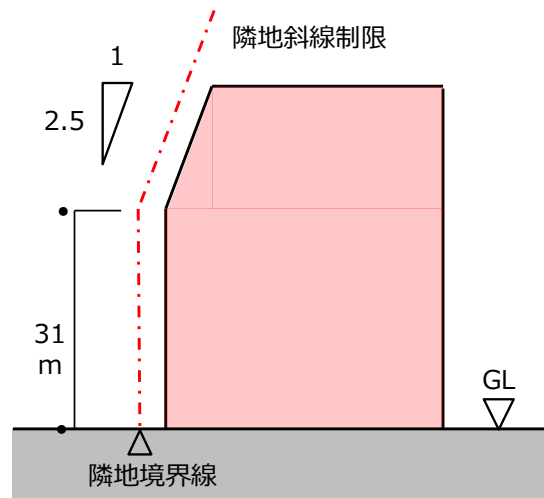


図 6.2 商業地域における隣地斜線制限の模式図

(3) 天空率

天空率は、2003 年 1 月から施行された斜線制限の緩和規定である。天空率により採光、通風、開放の確保が評価され、斜線制限によって確保されている採光、通風と同程度以上確保されているかが判断される。天空率の定義は図 6.3 に示す。斜線制限は決められた基準に基づき建物の高さを制限する仕様規定型の制限であったが、天空率は斜線制限の性能規定版であると言える。計画建築物の天空率が、現行の斜線制限に適合した建築物の天空率以上であれば、現行の斜線制限によって確保されている採光、通風等が同程度以上確保されると判断される。天空率を使用すると、斜線制限による計画よりも建物の高さを高く計画することや、斜線制限によって切り取られた不整形な建物を整形な形状に計画することができる。

$$R_s = (A_s - A_b) / A_s$$

- R_s : 天空率
- A_s : 想定半球（地上のある位置を中心としてその水平面上に想定する半球）の水平投影面積
- A_b : 建築物およびその敷地の地盤をA_sと同一の想定半球に投影した投影面の水平投影面積

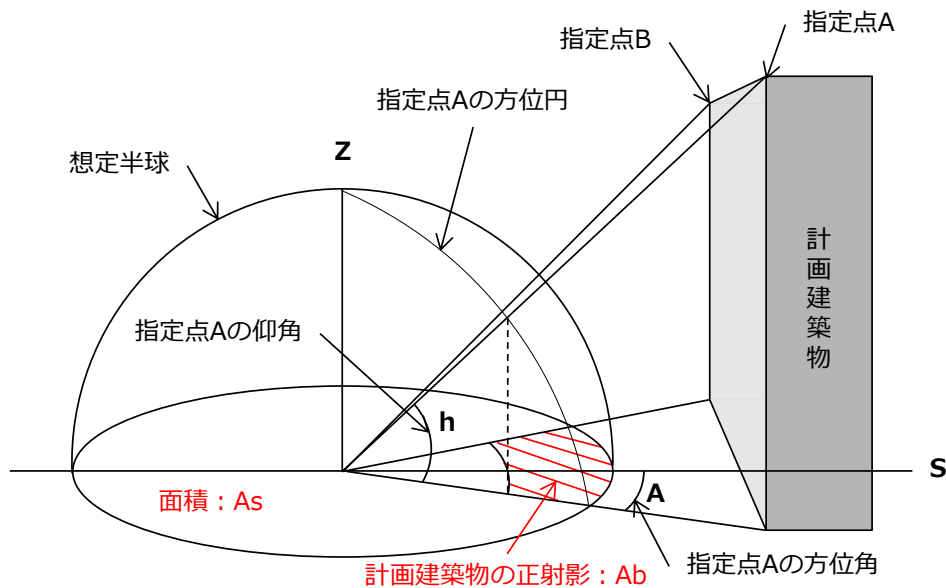


図 6.3 天空率の定義

6.2.3 日影規制

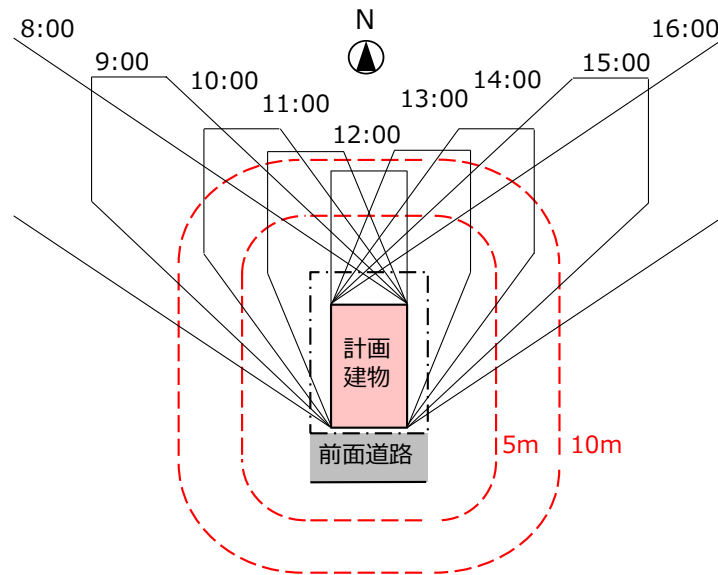
日影規制は 1976 年に導入された。導入の背景には、都市部の過密化により日照紛争やその他都市環境を阻害する事態が随所に発生したことにある。日影規制は日影の影響が大きい中高層建築物を規制対象とし、建築物が周囲に落とす日影の時間を制限して日照条件の悪化を防ぐものである。日影規制は殆どの用途地域で適用されるが、商業地域・工業地域・工業専用地域では反映されない。これは日影規制が住居系の地域を中心として考えられた制度だからである。しかし先に述べたように商業地域内であっても住宅は建設可能であり、現行の制度が全住居に対し公平に適用されているかどうかは疑問である。なお、商業地域内の建物であっても、高さが 10 m を超える建築物は、他の地域の規制区域に影を落とす場合、その地区の規制を受ける。

日影規制の審査基準は、冬至日の真太陽時による午前 8 時から午後 4 時まで（北海道においては午前 9 時から午後 3 時まで）の間において、その区域に設けた平均地盤面より用

途地域により指定された高さ(1.5 m, 4 m, 6.5 m のいずれか)の水平面に、敷地境界線からの距離が 5m 及び 10m の位置に対して条例で指定した時間以上日影となる部分を生じさせていないかの判断となる。図 6.4 に概要を示す。敷地境界線からの距離が 2 段階となっているのは、まず 5m の範囲で建築物が直接隣地に及ぼす影響を規制し、10 m の範囲ではこれを超えて広がる日影や他の建物との複合日影を考慮して規制している。

日影規制の問題点は商業地域では反映されないことや、日影にかかる時間の基準の決め方も科学的知見に基づいたものではないことが挙げられる。本研究の対象市街地である土浦駅前地域は商業地域に該当するため、日影規制はない。

時刻日影図



等時間日影図 (5時間・3時間の例)

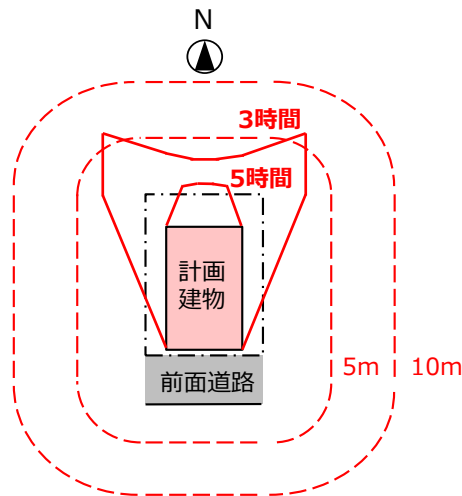


図 6.4 日影規制の概要

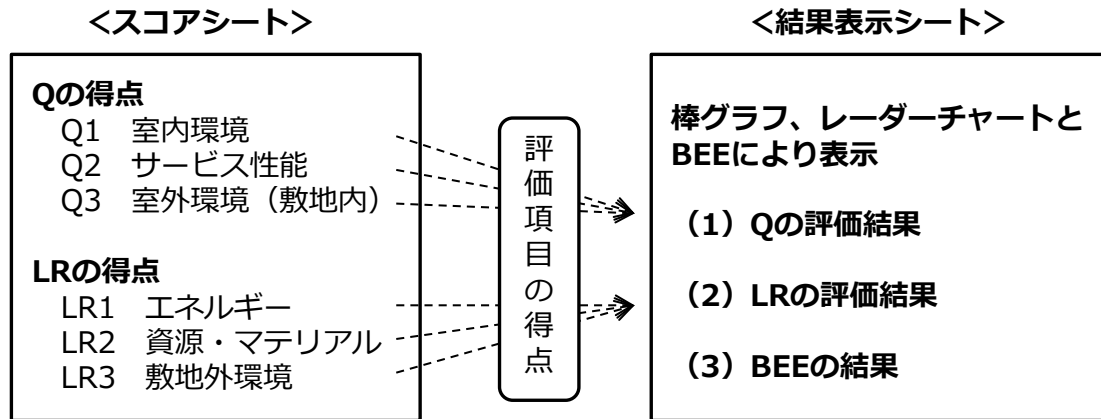
6.2.4 CASBEE による評価

建築物一般に対する環境評価手法としては「建築環境総合性能評価システム (CASBEE=Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency)」による評価がある(10)。

CASBEE は 1980 年代後半からのサステナブル建築推進の動きを受け、英国の BREEAM (Building Research Establishment Environment Environmental Assessment Method) や北米の LEED (Leadership in Energy and Environment Design) を参考にして 2001 年 4 月から日本で開発されてきた環境評価手法である。

CASBEE では Q(Quality:建築物の環境品質)と L(Load:建築物の環境負荷)をそれぞれ別個に採点し、最終的にその結果を基に BEE(Built Environment Efficiency:建築物の環境効率)を指標として評価している(図 6.5)。その際、L はまず LR(Load Reduction:建築物の環境負荷低減性)として評価される。

CASBEE 新築では屋外熱環境の評価は「LR3.敷地外環境」で行われており、LR の内 3 割の重みを占めている。LR3 は「1.地球温暖化への配慮」、「2.地域環境への配慮」、「3.周辺環境への配慮」で構成されており、この内周辺地域の熱環境に関連する評価項目は「2.2 温熱環境悪化の改善」と「3.2 風害、日照障害の抑制」である。2.2 に関しては主に風下の地域の風通しの良さや建物や地表面の表面温度低下への取り組みを評価対象としている。3.2 に関しては風害に関しては事前調査の有無、机上やシミュレーションによる予測の有無、対策のランク付け等によって評価されているが、日照障害に関しては日影規制を基にした評価しか行っておらず、日影規制が無い用途地域においては全て一律の評価としている(表 6.3)。このため日影規制の無い商業地域等においては建築物による日射遮蔽が周辺地域の熱環境に与える影響については評価されないことになる。



Q : 建築物の環境品質
LR : 建築物の環境負荷低減性

BEE : 建築物の環境効率

$$BEE = \frac{Q: 建築物の環境品質}{L: 建築物の環境負荷} = \frac{25 \times (SQ - 1)}{25 \times (5 - SLR)}$$

SQ, SLR : Q, LRの得点

図 6.5 CASBEE の基本構成^[6-5]

表 6.3 CASBEE 新築による日照障害の評価方法^[6-5]

レベル1	(該当するレベルなし)
レベル2	(該当するレベルなし)
レベル3	日影規制を満たしている、または当該地域に日影規制が無い場合
レベル4	日影規制に対して1ランク上 ^{注)} の基準を満たしている
レベル5	(該当するレベルなし)

注) 日照障害の抑制において、1ランク上とは、例えば近隣商業地域で日影規制が5時間/3時間(5m,10m)の場合、それより1つ厳しい基準が準住居地域で、4時間/2.5時間とすると、準住居地域の日影規制を満たしている場合である。なお、既に最も厳しい規制を受けている場合、規制基準より-1時間/-0.5時間(5m,10m)を1ランク上の基準とみなす。

6.3 高層建築物に対する従来の環境影響評価手法

高層建築物に対する環境アセスメントによる評価は特定の高さ以上の超高層建築物を対象に地方自治体によって行われている。それは主に東京などの大都市や北九州などの地方中核都市で行われていて、対象市街地が位置する茨城県土浦市では行われていないことが現状である。具体的に、土浦市は環境基本条例が存在しているが^[6-6]、その中には高層建築物に対する規制はない。また土浦市は茨城県の環境アセスメント手法を適用しているが、高層建築物はアセスの対象となっていないことが現状である^[6-7]。

大都市や地方中核都市などでは環境アセスメントの具体的な項目として、施設の存在・併用の区分で景観、日照、風害、電波障害、ヒートアイランドの項目で評価を行っている。

風害（ビル風）に関する評価は様々な調査研究の結果を元に行われており、例えば村上ら^[6-4]によって長期間にわたる住民の風環境に関する意識調査と風観測の結果を元にした風環境評価基準が提案されている。森川ら^[6-8]も気温の影響を考慮した風環境評価尺度を提案している。

一方、日照の項目では対象建築物の時刻別日影図及び等時間日影図をコンピュータにより計算・作図して評価を行っているが、その評価手法は既存の建物の日影図との比較によるもので、実際の周辺地域の環境を調査検討した上で行われてはいなかった。また対象事業実施区域周辺は商業地域であることから日影規制による評価も行っていない。

6.4 従来の環境影響評価手法の対象市街地への適用

6.4.1 日影図

図 6.6 に対象市街地における高層建築物の日影図を示す。この日影図は 2 章と同様に、CAD モデルから、3D CAD 対応熱環境シミュレータによって、対象日において、直達日射の範囲を計算した結果となる。12:00 の日影の範囲は当日の航空機リモートセンシング観測で日影によると思われる北側街区における放射温度が低い地域と一致していることを確認した。日影図から見ると、合計 1 時間が高層建築物の日影に入るエリアは、午前中の旧市街の北側、昼頃から午後にかけて北側街区と広く分布している。一方、合計 2 時間から 3 時間以上高層建築物の日影に入っているエリアは高層建築物から半径 50m 程度以内の交差点の車道と北側駐車場を含むごく限られているエリアである。



図 6.6 対象市街地における高層建築物の日影図

図 6.7 に土浦市の日影による中高層建築物の制限を示す。対象市街地は商業地域に分類されている。図示の情報から、商業地域では日影規制はないことに対し、低層住居専用地域でも日影規制は 2 時間から 3 時間であることが確認できる。従来の日影規制の観点から見ると、図 6.6 で示された日影図に囲まれたエリアでは、ほとんど環境影響評価上問題がない地域に当たる。

●土浦市の高さ制限一覧表(用途別)

項目	用途地域													
	第1種低層住居専用地域	第2種低層住居専用地域	第1種中高層住居専用地域	第2種中高層住居専用地域	第1種住居地域	第2種住居地域	準住居地域	近隣商業地域	商業地域	準工業地域	工業地域	工業専用地域	用途指定のない区域	
絶対高さ制限(高さの限度)	10m													
外壁の後退距離	なし													
斜線制限	道路斜線	適用距離	容積制限の限度が200%以下の地域は20m, 300%の場合は25m						400%以下=20m 600%以下=25m		20m		20m 虫掛30m	
	隣地斜線	勾配	1.25						1.25		1.5		1.5	
		立上がり	20m						20m		31m		20m 虫掛31m	
	北側斜線	勾配	1.25						1.25		2.5		1.25 虫掛2.5	
立上がり		5m						5m		5m		5m		

虫掛: 大字虫掛字東地区

●土浦市の日影による中高層建築物の制限

地域または区域	用途地域														
	第1種低層住居専用地域	第2種低層住居専用地域	第1種中高層住居専用地域	第2種中高層住居専用地域	第1種住居地域	第2種住居地域	準住居地域	近隣商業地域	商業地域	準工業地域	工業地域	工業専用地域	用途指定のない区域		
対象建築物	軒高>7m又は地上階数≥3		建築物高さ>10m		建築物高さ>10m *近隣商業地域は容積率200%の区域のみ								なし		
平均地盤面からの高さ	1.5m		4m		4m								なし		
日影規制時間	(一)		(二)		(二)								なし		
	5m<敷地境界線からの水平距離≤10m ①		3		4		5								なし
	敷地境界線からの水平距離>10m②		2		2.5		3								なし

図 6.7 土浦市の建物の高さ制限 (土浦市公式ホームページより)

6.4.2 ビル風

ビル風は都市開発によって、特に高層建築物が周辺の風環境を改変させ、不快な風環境を形成していることを指す。夏季では高層建築物の遮風によって、弱風域が形成され、熱的不快感を増すケースもあれば、風が極端に強くなり、帽子が飛ばされたり、人が転倒したりするケースもある。このような被害は夏季だけでなく、冬季でも問題になっている。冬季においては、風速が弱いほど快適になる一方、強風の場合、歩行者に対しては、夏季の場合と同様な問題をもたらすと同時に、風速が少しでも強くなれば、非常に寒く感じ、熱的不快感をもたらす。

森川ら^[6-7]は気温を考慮した風環境評価尺度を提案した。表 6.4 にこの尺度に基づいて、日平均気温が 0~10°C の場合の分類をまとめる。森川らの尺度によると、対象市街地の冬季における風環境について、風速 1.3m/s は適風域とし、快適な場所と見なしている。風速が 1.3m/s~2.0m/s は中間域とし、「適風」から強風による非適風」に移行する風速である。風速が 2.0m/s を超えると、大多数の人が強すぎると感じ始める風速になり、強風域としている。

図 6.8 の(a)(b)(c)(d)にそれぞれ午前、昼、午後、日没後の代表的な時刻 10:00、12:00、15:00、17:00 における風環境を示す。水平断面は人間の居住域高さである地上 1.5 m と設定した。結果から見ると、10:00 と 15:00 では高層建築物の周辺の一部限られたエリアでは強風域が現れたものの、その他の場所（高層建築物の一部の日影空間を含む）では中間域や適風域に属している。17:00 では対象市街地全域で強風域が現れなかった。特に、リモートセンシング観測の対象時刻である 12:00 でも強風域がほとんど見当たらない。森川らの尺度によると、12:00 では高層建築物の日影空間の車道の一部を除いて、対象市街地のほぼ全域が問題にならない地域であることがわかった。

表 6.4 気温を考慮した風環境評価尺度（日平均気温が 0~10°C の場合）

		日平均気温[°C] (0~10°C)
日平均風速	適風域	ランクⅠ (1.3 m/s未満)
	中間域	ランクⅡ (1.3 m/s~2.0 m/s)
	強風域	ランクⅢ (2.0 m/s以上)

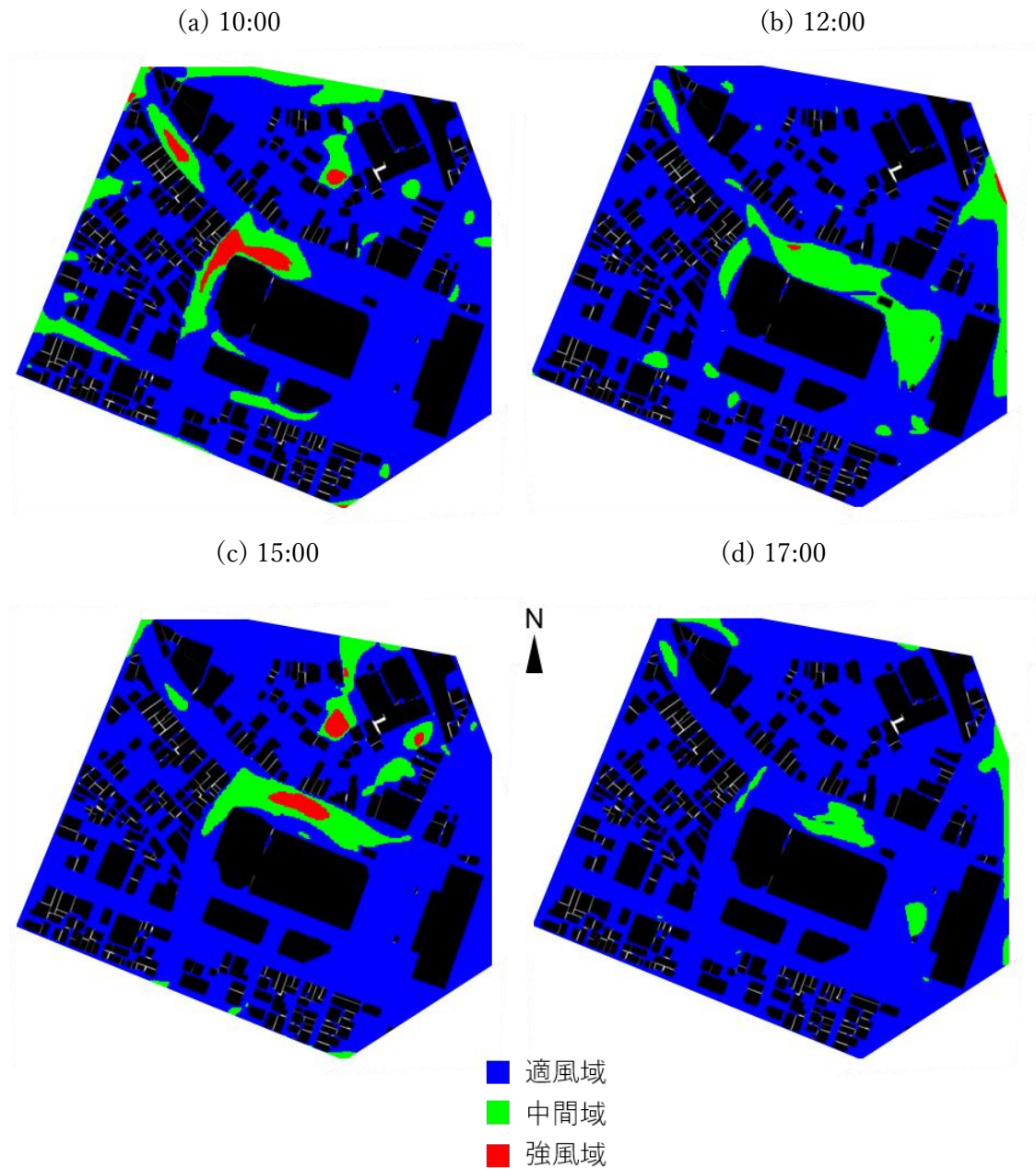


図 6.8 気温を考慮した風環境評価尺度に基づく風環境分類図 (高さ 1.5 m)

6.5 温熱環境の視点からの環境影響評価

これまでに温熱快適性に対する評価には、OT (作用温度)、ET (有効温度)、PMV (予想平均温冷感申告)、WBGT (湿球黒球温度) などの指標が提案されている。その中では、標準新有効温度 (SET*)^[6-9]が提案された。SET*は気温・湿度・気流・放射熱・着衣量をも

とに、気流の無い相対湿度 50%の場合と同じ体感となる気温で表す。既往研究では SET* に関する研究^[6-10]や、それを評価指標として屋外空間における温冷感を研究する^[6-11]試みが見られるが、高層建築物の日影空間が冬季における温熱環境を予測する研究はまだない。SET*は環境側の要素、気温・湿度・風速・日射・表面温度を考慮することができ、かつ人間側の要素、着衣量・代謝量などを考慮する複数のモデルにより、温熱快適性を定量的に評価できるため、本研究でも SET*を対象市街地の温熱環境の評価指標として採用する。図 6.9 に高層建築物周辺の環境の評価及びその中の温熱環境評価の概念を示す。本研究では人間側要素をモデル化し、米国空調学会の基準である ASHRAE Standard^[6-12, 6-13]を適用している。環境側要素について、湿度はつくば高層気象台のデータしかなく、気温条件を使って、絶対湿度に換算し、また土浦アメダスの気温データを使って、現地の湿度に換算した。日射や長波長放射、表面温度は連成解析の熱収支シミュレーションの計算結果を使用した。気温、風速は連成解析の CFD で計算された局所気温と風速を使用した。

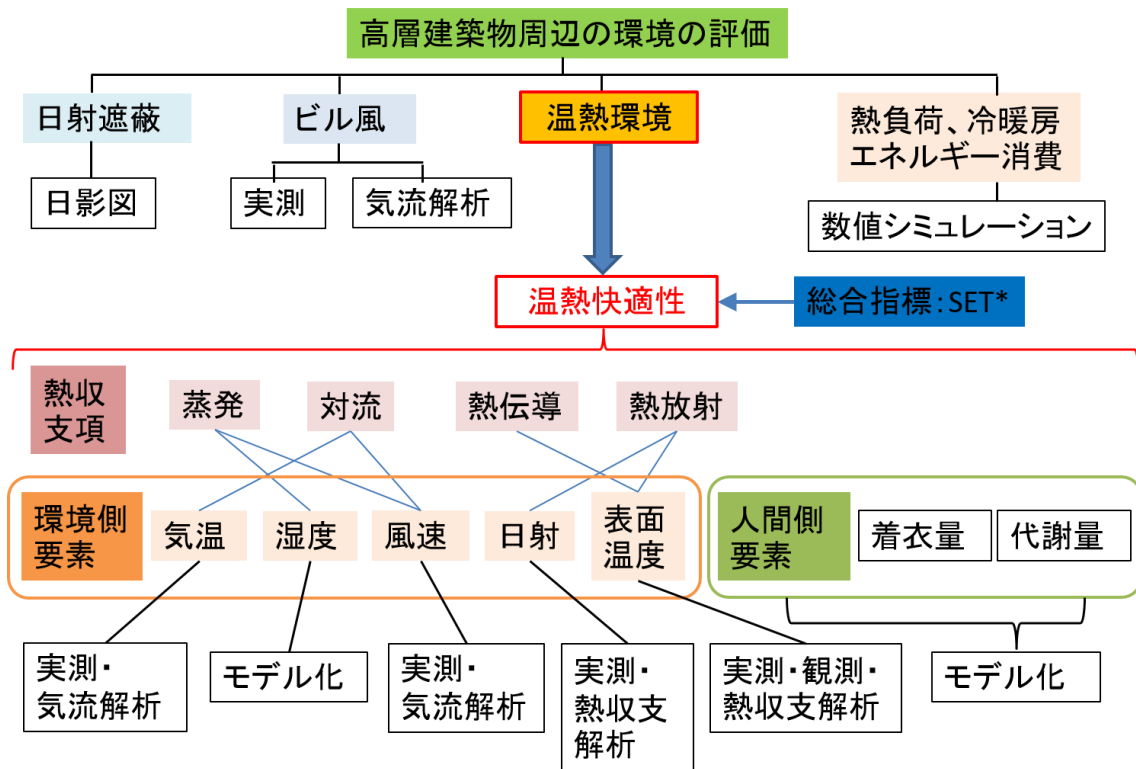


図 6.9 高層建築物周辺の環境の評価に関する概念図

6.5.1 12:00 の SET* 分布

図 6.10 に研究対象日の対象市街地における SET* の平面分布を示す。水平断面はビル風を評価する時と同様に人間の居住域高さである地上 1.5 m としている。桑原ら^[6-14]の実験研究によると、SET* は 10°C の場合、すでに不快側申告率が 60% に達し、すなわち、60% の人はすでに温熱的不快を感じる状態にあると見なされる。SET* は 5°C の場合、不快側申告率がさらに 90% に達し、すなわち、90% の人は温熱的不快を感じる状態にあると見なされる。対象市街地の SET* の分布から見ると、12:00 において、高層建築物の東側、北側、旧市街地と北側街区の間の通りでは SET* が 5°C 以下の場所が多く、温熱環境が不快になっていることがわかる。特に高層建築物と隣接する商業施設の北側の歩道と車道では SET* が 2°C 程度しかなく、ほとんどの人は温熱的不快を感じる状態にあると考えられる。また従来の日影規制やビル風の評価では問題にならないエリア（例えば、北側街区の高層建築物の日影空間に位置するエリア）においても、SET* が 5°C 未満になり、90% 以上の人は温熱的不快を感じる状態にあることから、温熱的には不快な環境が形成され、高層建築物によって問題が生じる地域であることが示された。本対象市街地のみならず、5.5 節の条件が満たされた街区であれば、上記の温熱環境が生じる可能性が十分であると判断する。

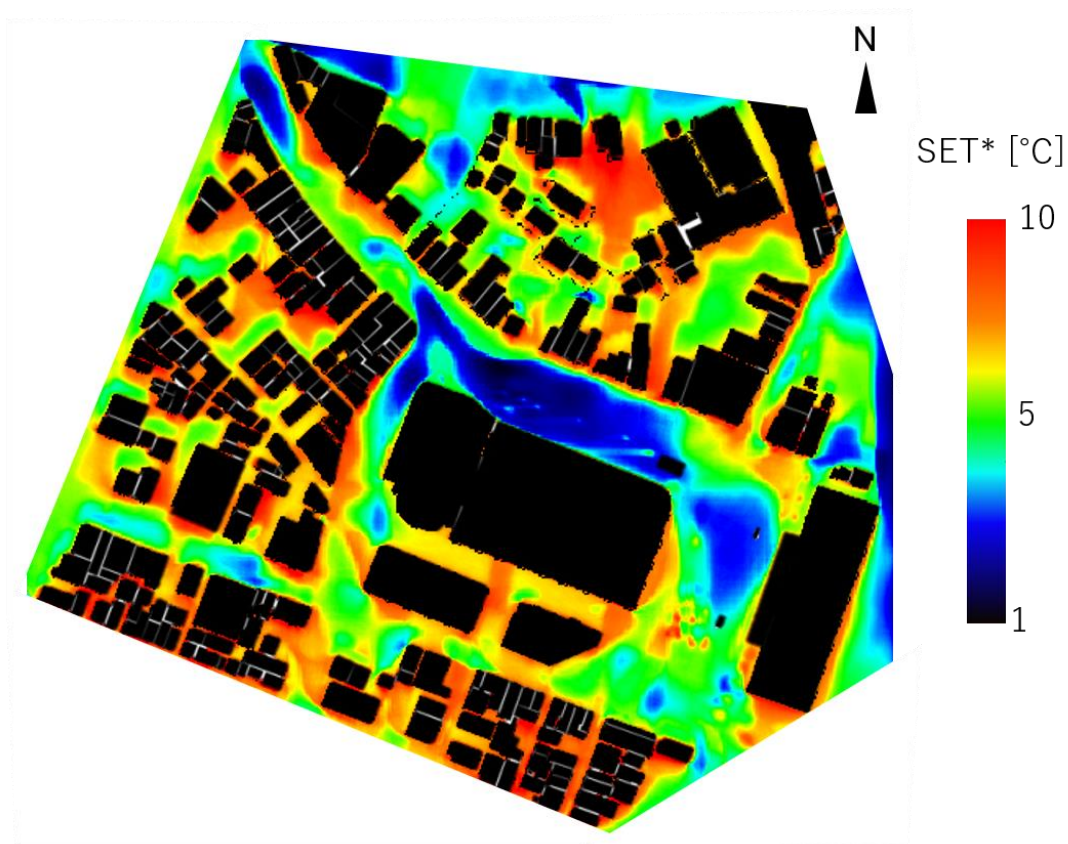


図 6.10 12:00 における人間の居住域高さでの SET* 分布 (地上 1.5 m)

6.5.2 SET* への各影響要素による影響度

本項は本研究がこれまでに高層建築物周辺の微気候に対する分析を踏まえて、数値シミュレーション上で微気候を再現することによって、各要素が SET* への影響度合い（すなわち、SET* への寄与）を明らかにする。定量化の方法は、図 6.11 に示された SET* から対象要素のみ一定値にした SET* を引いた結果を可視化する。

図 6.11 に対象市街地における 12:00 の局所風速が SET* への寄与を示す。計算式は次の通りである。

$$SET^*_{v'} = SET^* - SET^*_{v'} \quad (\text{式 6.1})$$

その中、 $SET^*_{v'}$ は局所風速が SET* への寄与、 SET^* は微気候を考慮した SET*、 $SET^*_{v'}$ は土浦アメダスの風速（上空風）を用いて、空間風速分布を一定と設定して算出された SET* である。

計算結果を確認すると、市街地によって上空風を減衰し、地表面付近の風速が上空風より弱まる傾向があるため、対象市街地の広い範囲にわたって、局所風速が SET* が 2°C~4°C 程度上昇するように寄与している。ただし、一部のエリア、特に高層建築物の周辺エリアでは、局所風速が SET* への寄与は 0°C 程度で、すなわち、上空風を用いるの場合と同様な与えが現れた。それは高層建築物によるビル風がその周辺の風速を上空風程度に上昇させ、風環境が悪化することと同時に、温熱環境へも悪影響を与えていることを示している。

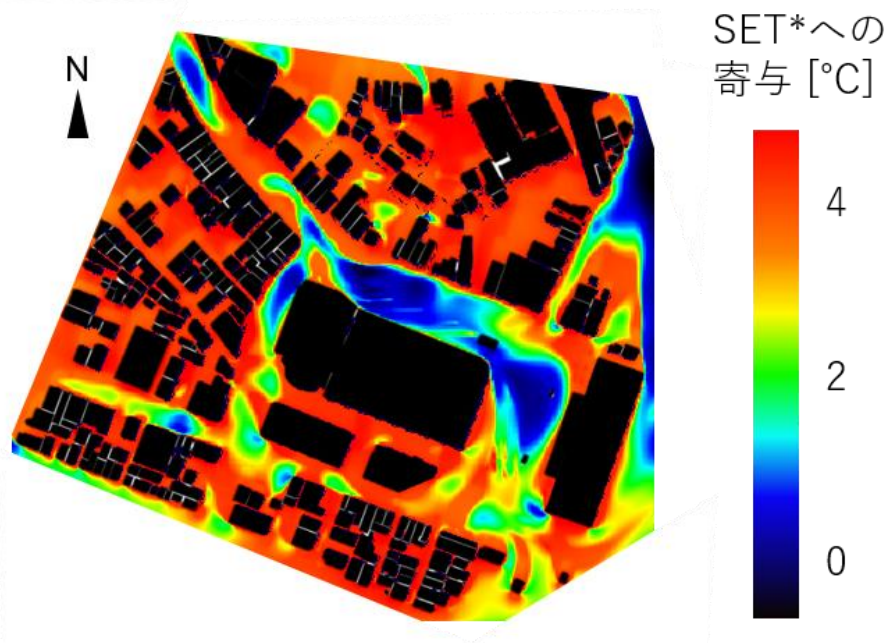


図 6.11 12:00 の局所風速が SET* への寄与（高さ 1.5 m）

図 6.12 に対象市街地における 12:00 の局所気温が SET* への寄与を示す。計算式は次の通りである。

$$SET^*_{Ta} = SET^* - SET^*_{Ta'} \quad (\text{式 6.2})$$

その中、 SET^*_{Ta} は局所気温が SET* への寄与、 SET^* は微気候を考慮した SET*、 $SET^*_{Ta'}$ は土浦アメダスの気温（上空気温）を用いて、空間気温分布を一定と設定して算出された SET* である。

計算結果を確認すると、旧市街においては局所気温が SET* への寄与が 0.3°C 以内にとどめ、局所的な影響が限定的だとわかった。一方、高層建築物の周辺及び北側街区の広い範囲にわたって、局所気温が SET* への寄与が -0.2~-0.6°C 程度あり、このような場所では、蓄冷した地表面と近傍空気との熱交換により、局所的な冷気の生成による温熱的不快感を生じたことが明らかになった。

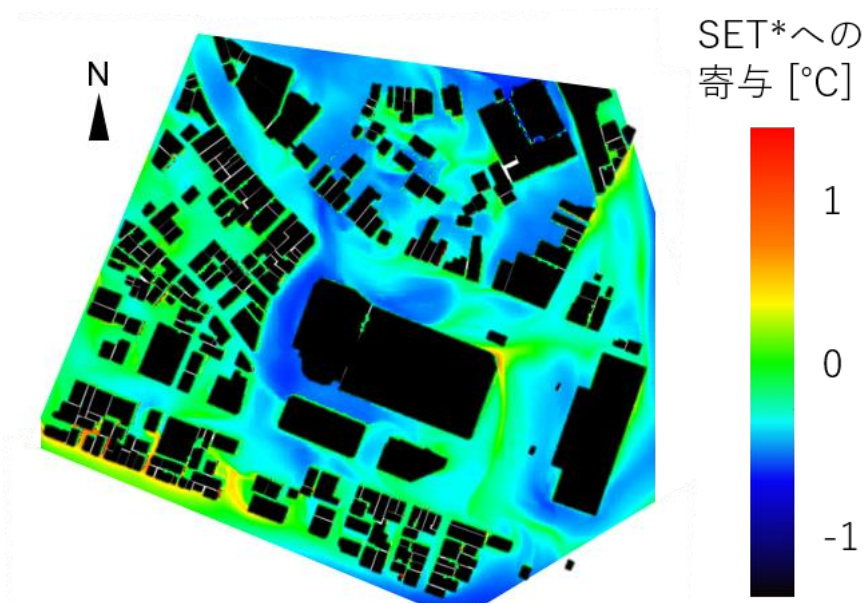


図 6.12 12:00 の局所気温が SET* への寄与（高さ 1.5 m）

図 6.13 に対象市街地における 12:00 の局所 MRT（平均放射温度）^{注 6.1}が SET* への寄与を示す。計算式は次の通りである。

$$SET^*_{MRT} = SET^* - SET^*_{MRT'} \quad (\text{式 6.3})$$

その中、 SET^*_{MRT} は局所 MRT が SET* への寄与、 SET^* は微気候を考慮した SET*、 $SET^*_{MRT'}$ は熱放射が温度へ及ぼす影響を考慮しなく、連成解析の局所気温を用いて、MRT 値として設定し、算出された SET* である。

計算結果を確認すると、局所 MRT の SET* への寄与はマイナスの場所が確認できたのは、主に北側街区の一部を含む高層建築物の日影空間に集中している。特に高層建築物の周辺の日影空間（歩道）においては、 -2.5°C 程度寄与している。これらの場所においては、冷気の生成以外にも、蓄冷した表面からの冷放射（実際は、周囲の表面温度が低いため、人体からより多くの熱放射が周辺環境へ放散することで、熱が奪われてしまう現象）を受けることで、温熱的不快感を生じたことが明らかになった。

高層建築物と南側に位置する中層建物の間のキャニオン（灰色の枠）においては、比較的に閉鎖的な空間で日影による冷気滞留（局所的な低温）^[6-15]が確認でき、高層建築物の北側日影空間と同程度に SET* へマイナスの寄与を与えている。しかし、高層建築物の北側日影空間と比べると、天空率が低く、またそれによる大気放射冷却の効果が弱いため、表面温度はそれほど下がっていない。それによって、キャニオン空間の MRT が高層建築物の北側日影空間より高く、SET* へのマイナスの寄与が小さい。また、風速は高層建築物の北側日影空間のほうが大きいので、SET* は北側日影空間のほうが低いことになった。

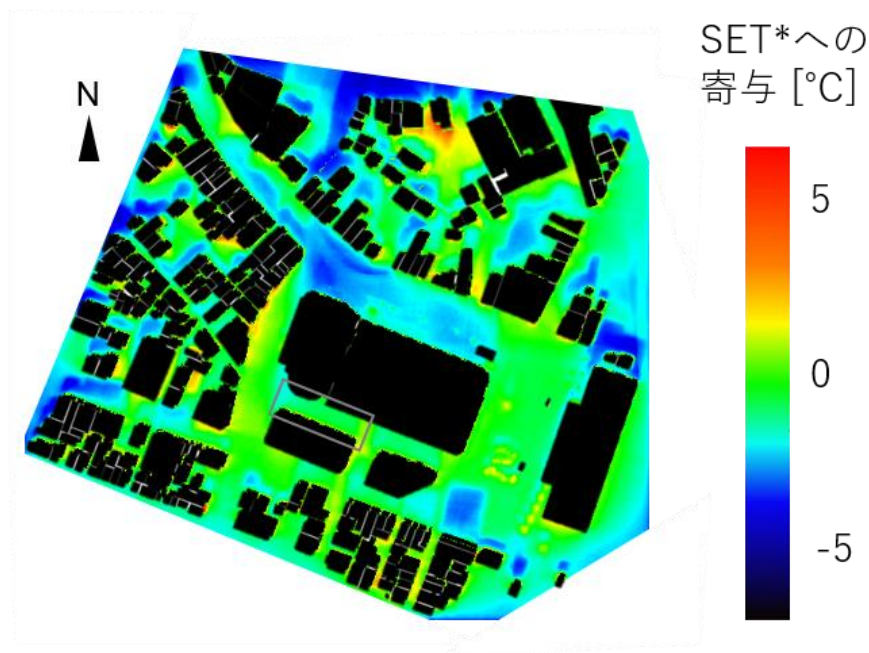


図 6.13 12:00 の局所 MRT が SET* への寄与（高さ 1.5 m）

本項では、SET* へ微気候の各影響要素による影響度合いを確認した。高層建築物の日影空間や周辺エリアでは、局所的な要因によって、温熱的に非常に不快な微気候が形成されていることが明らかになった。また、研究対象地において、冬季には、中層建物に囲まれたキャニオン空間よりも、高層建築物の北側にある日影空間のような比較的に開放的な空間でより劣悪な温熱環境が形成されていることが確認された。風速、熱放射、気温で総合的な評価の重要性を示した。

6.5.3 今後の環境アセスメントに向けた課題

以上から、高層建築物が大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。本結果から、将来的に環境アセスメントにおいて温熱環境の評価を加えてゆくことが重要であると示唆されるが、その方法については、知見のさらなる一般化とあわせて、今後の課題としたい。実務上のコストの観点については、例えば、現在の緩和適用もある日影規制を強化するという観点から、日照と温熱環境両方に着目することによって、従来の日影規制をより厳格に適用（例えば、規制適用の除外を無くしたりするなど）することも選択肢ではないかと考えられる。

また実務上のコストに関して、本研究は数値解析の前に冷気の形成の実態と熱収支成分を把握するために、実測を行ったが、熱収支解析と CFD との連成解析の実用的手法を整備してゆくことで、今後はこのような日影空間に対して、温熱環境を把握することも可能と考えられる。例えば、環境アセスメントにおける数値解析手法の実態として、現在、多くの自治体で風害（ビル風）の評価に風洞実験に加えて CFD の適用が認められており、一般化してきている。また、温熱環境についても、オフィスビルや商業施設、競技場などの大規模な開発を行う際に、建設会社が数値解析により評価を行うことも幅広く行われるようになってきた。本研究ではこのような取り組みが必要と考えられるが、実用上は計算負荷が大きく、コストもかかるため、24 時間連成手法をより簡易な連成にしてゆくなども重要と考えられる。

6.6 まとめ

本章は温熱環境を考慮した環境影響評価を行なうために、まず高層建築物に関する現在の法規制と環境アセスメントについて調査したうえで、従来の評価方法である日影規制とビル風の観点から、対象市街地に対して評価を行った。

日影規制の評価では、対象市街地における高層建築物の日影規制がないが、低層住居専用地域の比較的厳しい制限を適用しても、高層建築物の日影が 1 時間程度である北側街区は問題にならない地域にあたることを確認した。

ビル風に対する評価では、一部の時刻に対して、高層建築物の周辺のエリアで強風域が現れたが、それは限定的であった。また研究対象時刻を含む複数の時間では高層建築物の周辺でも問題にならない風速域であることがわかった。

次に、高層建築物周辺の温熱環境を評価するために、評価指標である SET*を導入し、熱収支シミュレーションと CFD との連成解析から得られた結果に適用した。その結果、対象市街地のような広大な日影を有する高層建築物の周辺のほぼ全域に加えて、高層建築物

から70m以上離れた地域（特に北側街区の日影空間）においても90%以上の人は不快を感じる環境にあり、温熱環境的に問題がある地域が広く分布していることがわかった。

以上より、温熱環境の観点を加わると、従来の環境影響評価では問題ではない地域でも、環境問題がある可能性が指摘され、本研究では環境アセスメント（ミニアセス）をサポートできる知見が得られたと言える。ただし、その代表性については今後の課題にしたい。すなわち、環境アセスメントに適用するには、期間、時間帯の代表性を議論するか、また平均的な気象条件で評価するか、といった点がある。温熱条件が極端に悪い日を選んで評価することも選択肢として考えられる。また温熱環境を考慮した環境アセスメントを実際に適用する際には、快適・不快の基準や適用範囲などもさらに議論する必要があると考えられる。

参考文献

- [6-1] 国土交通省ホームページ：政策課題対応型都市計画運用指針，D. 職住バランスのとれた大都市の都心構造の構築，pp.2.
<http://www.mlit.go.jp/crd/city/plan/ppg/syokujubalance.pdf>, 2017-12-21, 閲覧.
- [6-2] 東京都都市整備局ホームページ：都市再開発の方針の概要，IV. 概要をまとめた参考資料，pp.1.
http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/seisaku/master_plan/master02_04.pdf, 2017-12-21, 閲覧.
- [6-3] 国土交通省ホームページ：市街地再開発事業（住宅局所管）.
<http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/seido/06sigaichisai.html>, 2017-12-21, 閲覧.
- [6-4] 村上周三，岩佐義輝，森川泰成：居住者の日誌による風環境調査と評価尺度に関する研究：市街地低層部における風の性状と風環境評価に関する研究-III，日本建築学会論文報告集，325, pp.74-84. 1983.

- [6-5] 財団法人 建築環境・省エネルギー機構(IBECE)：建築環境総合性能評価システム CASBEE-新築 評価マニュアル(2010 年版)
- [6-6] 土浦市ホームページ：土浦市環境基本条例。
http://www.city.tsuchiura.lg.jp/inform/rules/reiki_honbun/e004RG00000418.html,
2017-12-24, 閲覧.
- [6-7] 茨城県ホームページ：環境アセスメント。
<http://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukankyo/kansei/kankyo/05kankyo-assessment.html>,
2017-12-24, 閲覧.
- [6-8] 森川泰成, 村上周三：気温の影響を考慮した風環境評価尺度に関する研究, 第 6 回風工学シンポジウム論文集, 1980.
- [6-9] Gagge A.P., Nishi Y., Gonzalez R.R. 1973. Standard Effective Temperature - A Single Temperature Index of Temperature Sensation and Thermal Discomfort. Proceeding of The CIB Commission W 45 (Human Requirements) Symposium, Thermal Comfort and Moderate Heat Stress, Building Research Station, published by HMSO, 229-250.
- [6-10] 深井一夫：標準新有効温度 (SET*) における放射, 湿度, 気流, 着衣の影響の温度換算, 日本建築学会計画系論文集, 59(465), pp.19-26, 1994.
- [6-11] 木内豪：屋外空間における温冷感指標に関する研究, 日本気象学会, 天気, 48 (9), pp.661-671, 2001.
- [6-12] Gagge A.P., Stolwijk J.A. Nishi Y. 1971. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, 77: 247-262.
- [6-13] Gagge A.P., Nishi Y., Nevins R.G. 1976. The role of clothing in meeting FEA conservation guidelines. *ASHRAE Transactions*, 82: 234-247.
- [6-14] 桑原浩平, 堀越哲美, 持田徹：屋外環境における温冷感と快適感に関する研究, 日本建築学会北海道支部, 研究報告集, 77, pp.197-200. 2004.
- [6-15] Kanda M., Moriwaki R., Kimoto Y. 2005. Temperature profiles within and above an urban canopy. *Bound.-Lay. Meteorol*, 115: 499-506.

注釈

注 6.1) 人間の温冷感は気温だけでなく、気流や熱放射など様々な要素が影響を及ぼす (6.3 節)。その中、人間の周囲に存在する地物からの熱放射が大きく影響している。MRT は、人間が周囲から受ける熱放射の影響を全方位で平均化し、温度換算したものである。建物や地面からの熱放射は、その表面温度に依存し、外部空間の空間形態と構成材料により直接的に規定される。その計算式は以下の通りである。

$$MRT = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^N F_i \cdot T_{s_i}^4} - 273.2 \quad (\text{式 6.4})$$

その中、 MRT は平均放射温度[°C]、 F_i はある解析メッシュから微小面への形態係数 [-]、 T_{s_i} は微小面の表面温度[°C]、 N は参照する微小面の総数である。

第 7 章

結論

7.1 研究の総括

7.2 今後の課題

7.1 研究の総括

高層建築物が周辺低層エリアの温熱環境へ及ぼす影響及びその形成機構を観測と数値解析の手法を用いて明らかにしたうえで、高層建築物周辺の温熱環境を評価することを目的とした。

2章では市街地の放射温度分布に見られる高層建築物の影響を確認することを目的として、夏季と冬季におけるリモートセンシング観測と熱収支解析を行なった。両者の結果を比較することによって、観測と解析結果の一致性と差異を確認するとともに、冬季において高層建築物の日影部に形成される低温域の理由として、長時間の日陰による地表面の蓄冷や高層建築物周囲に特有の微気候の影響を受けている可能性があることが示唆された。

3章では冬季において高層建築物周辺における移動実測を行い、高層建築物周辺の気温、風速及び熱収支に対して分析を行った。その結果高層建築物の日影部には低温の気温場が形成されていること及び局所的な表面温度と気温の間は日中において相関関係があることを示した。これが近傍空気と低温の地表面との局所的な熱交換によって冷気が生成されていることを示唆した。

4章では既往研究において提案された24時刻の連成解析手法を研究対象地へ適用するにあたって、局所的な温熱環境を対象に熱容量の大きい材料を対象とした蓄熱・蓄冷現象を再現する日変化スケールの熱収支解析と、定常計算に基づくCFDとの非定常的な連成解析の手法について検討し、その原理的妥当性を確認するとともに、使用する乱流モデル、メッシュ性状、建物形状の再現性、連成回数について決定した。

5章では研究対象地に対する連成解析を行うことで、十分な放射冷却と広大な日影を有する高層建築物の日影空間における冷気生成と蓄冷の形成機構を明らかにした。すなわち、局所の気温・気流分布を考慮することで、開放的な日影空間でも低温の地表面と壁面との局所的な熱交換により冷気が生成され、この冷気と地表面・壁面と相互作用が時間的に継続することで、局所的に蓄冷効果を起こしたことを明らかにした。一方で、今後の課題としてより長期の連成解析も指摘した。

6章では高層建築物に対して、従来の環境影響評価における評価方法に加えて、温熱環境を考慮した影響評価を実施した。従来の日影規制やビル風の評価では問題とならない領域においても、冬季に温熱的には非常に不快な環境が形成されることを示した。また、局所的な風速、気温、熱放射による温熱環境への寄与も定量的に分析した。

以上より、従来はヒートアイランドの観点から指摘されることが多かった都市の熱容量に関して、高層建物周辺の日影空間などの局所的には冬季に低温な環境をもたらすことを明らかにした。これは、高層建築物の開発に対する温熱環境を考慮した環境影響評価の重要性を示す結果である。

7.2 今後の課題

冬季における高層建築物周辺の温熱環境に対する現地実測に対して、本研究では対象市街地の一部の地域に対して、高さ1mのみのデータしか取得していないが、今後では、様々な場所で異なる高さで、多点（水平、鉛直）の観測が必要と考えられる。また、より詳細な時系列のデータも取得した方が良いと考えられる。それは高層建築物の周辺における温熱環境を空間的に把握する必要があるためである。

5章では高層建築物の日影空間における連成後の表面温度は連成前と比べて低くなったが、放射温度に換算して航空機リモートセンシング観測値と比べると、まだ観測値のほうが低かったことも示された。これは、より長期間の局所蓄冷の影響であることが推察されるため、長期の連成を行う必要性を示唆した。ただし、より長期の局所蓄冷を考慮した場合に、どの程度観測結果に近づいた解析結果が得られるかということがあるが、その場合、必然的に計算負荷が膨大になってくる。よって、長期の影響については、連成の頻度を抑えて、時間積分的な局所蓄冷と局所の冷気の影響を考慮するなど、時間方向のモデル化が必要となると考えられる。その他に、CFDシミュレーションには、各時刻の流入風条件に基づき平均流を解析するRANSモデルを用いた。これは、各時刻の流入風に代表性があることに基づくものであるが、より短い時間スケールでの風向・風速の変動が冷気分布に影響をした可能性も考えられる。これらの影響要因の分析する必要があると考えられる。また、リモートセンシング観測だけで冷気を判別する可能性の検討に向けて、今後日影空間の範囲と冷気の生成の間の関係を明らかにしてゆく。

高層建築物の周辺エリアの温熱快適性へ及ぼす影響について、より正確に評価するため、人体モデルの改善や、通行人への快適性申告のアンケートを実施することが考えられる。また本研究は限られた時間帯において実施したため、その代表性については今後の課題にしたい。すなわち、環境アセスメントに適用するには、期間、時間帯の代表性を議論するか、また平均的な気象条件で評価するか、といった点がある。温熱条件が極端に悪い日を選んで評価することも選択肢として考えられる。また温熱環境を考慮した環境アセスメントを実際に適用する際には、快適・不快の基準や適用範囲などもさらに議論する必要があると考えられる。

謝辞

留学生として修士から入学し、学部と異なる専門分野に変えて、生活と学業を両立しながら、頑張ってきました。本研究を遂行するには様々な困難を伴いましたが、まわりの人に恵まれて支えられながら、博士論文をまとめることができました。皆様に心より感謝を申し上げます。

本論文の主査である東京工業大学准教授 浅輪貴史先生には、論文をまとめるにあたり、丁寧で的確なご指導を頂きました。研究や論文のスタンス、研究ストーリーの作り方、研究結果の解釈方法などが厳密で美しく、研究の魅力を教えて頂きました。また、仕事の進め方など、今後の人生の糧となるご指導を頂き、心救われることも少なからずありました。心より深く感謝申し上げますとともに敬意を表します。

博士課程の副指導教員である東京工業大学教授 田村哲郎先生には、短期留学による勉強の機会を頂きました。授業などで CFD に関する知識も教えて頂きました。また、中間発表会、最終発表会など、機会あるごとに貴重なご助言を頂き、日頃にも研究の進捗状況に対するご関心を頂いたことに心より深く感謝申し上げます。

修士課程の副指導教員である梅干野晁先生（当時 東京工業大学教授）には修士の時、研究の進め方を教えて頂きました。心より深く感謝を申し上げます。

東京工業大学教授 山中浩明先生、同准教授 中村恭志先生、錦澤滋雄先生、同特任准教授 小林秀樹先生には中間発表会、最終発表会など、機会あるごとに貴重なご助言を頂きましたこと、心より深く感謝申し上げます。

国立環境研究所研究員 押尾晴樹氏には、冬季寒い日に野外実測を一緒に行い、そのデータ処理や論文のまとめにご助力を頂きました。心より深く感謝申し上げます。

東京工業大学助教 河合英徳先生には、数値シミュレーションのデータ分析にご助力を頂き、心より深く感謝申し上げます。

株式会社ミサワホーム総合研究所 佐藤理人氏（当時 東京工業大学特別研究員）には、研究対象地の 3D 空間形態と構成材料の整備にご助力を頂き、心より深く感謝申し上げます。

熊本大学助教 高田真人先生（当時 東京工業大学特別研究員）には、修士論文の訂正にご助言を頂き、心より御礼申し上げます。

東京工業大学研究員 清野友規氏には、ゼミや中間発表などでご助言を頂き、心より御礼申し上げます。

浅輪研究室秘書 薄葉千景氏には、常に日頃から温かいお心遣いを頂き、生活面全般で支えられ、心より御礼申し上げます。

謝辞

研究室で一緒に過ごした同輩・後輩たち、特に論文をまとめる最後の半年で、苦楽を共にしてきた李泰徹氏、Maria Del Rio 氏、許溪氏、高橋優佳氏、吉田央氏、林茶正氏、阿部日向子氏、光崎瑞季氏、眞鍋悠太氏、松本海斗氏、曹勇氏のおかげで、研究生活を愉快地過ごせたものと思い、御礼申し上げます。

最後に、博士課程進学を快く受け入れ、研究に専念できるよう生活面で支えてきた妻と両親に心より感謝致します。

本論文は多くの方に支えられてまとめることができたものであり、そのすべての方に心より御礼申し上げます。

2018 年 2 月 陳侃

本研究に関する公表論文リスト

【審査付論文】

- 1) 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 との連成解析手法を用いた検証 –, *日本ヒートアイランド学会論文集*, Vol.12, pp.9-20, 2017 (5章)
- 2) Haruki Oshio, Kan Chen, Takashi Asawa: High resolution observation of radiant temperature and microclimate of low-rise urban areas around a high-rise building in winter, *Remote Sensing of Environment* (査読中) (3章)
- 3) Kan Chen, Takashi Asawa: Numerical study of the effects of complex building geometry and surface temperature distribution on the prediction of sensible heat flux from building external surfaces, *Building Simulation* (査読中) (4章)

【国際会議 (全文審査付プロシーディング)】

- 1) Kan Chen, Takashi Asawa: Numerical simulation method for sensible heat flux from building external surfaces to the surrounding atmosphere using a heat balance simulation and CFD, The 10th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia (ISAIA), Hangzhou, China, 2014.10 (口頭発表)
- 2) Kan Chen, Takashi Asawa: A basic study on numerical simulation methods for sensible heat flux from building external surfaces to the atmosphere, The 2nd Asia Conference on International Building Performance Simulation Association (ASim), Nagoya, Japan, 2014.11 (口頭発表)

【国際会議 (アブストラクト審査あり)】

- 1) Kan Chen, Takashi Asawa: Advanced numerical analysis on sensible heat flux from building external surfaces to the surrounding atmosphere using a heat balance simulation and CFD, 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment (ICUC 9), Toulouse, France, 2015.7 (口頭発表)

【口頭発表】

- 1) 陳侃, 浅輪貴史, 押尾晴樹: 航空機リモートセンシングと移動観測による街区温熱環境の実態把握—高層建築物の日影の影響について—, 日本リモートセンシング学会学術講演会, 北海道, pp.243-244, 2017.11
- 1) 陳侃, 浅輪貴史: LES と熱収支計算との連成による建築外部空間に形成される微気象の非定常解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 名古屋, pp.801-802, 2012.9
- 2) 陳侃, 浅輪貴史, 梅干野晁: 建物周辺の気流性状を考慮した建物表面からの顕熱流量の予測手法に関する検討, 日本ヒートアイランド学会第6回全国大会, つくば, pp.126-127, 2011.7

【その他】

- 東京工業大学博士リーディングプログラム—環境エネルギー協創教育院 (ACEEES) 所属
- ・2013年12月, 第2回国際教育フォーラム (Los Angeles, USA.) へ参加、研究発表
 - ・2014年12月, 第3回国際教育フォーラム (Perth, Australia) へ参加、研究発表
 - ・2015年12月, 第4回国際教育フォーラム (Maui, USA.) へ参加、研究発表

研究実績

- ・2016年3月 第5回キャリアデベロップメントフォーラムへ参加、自主設定論文の研究発表
- ・副専攻として 創造エネルギー専攻 奥野研究室でMHDプラズマ発電に関する研究を行った。