



Title	GISデータを用いた周辺環境を加味した日射データの大量作成と応用
Author(s)	大沢, 飛智
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15374号
Issue Date	2023-03-23
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k15374
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89697
Type	doctoral thesis
File Information	Hisato_Osawa.pdf



令和4年度 博士論文

GIS データを用いた周辺環境を加味した
日射データの大量作成と応用

Development and application of large-scale solar radiation data with
surrounding environment with GIS data

2023年2月

北海道大学院工学院空間性能システム専攻
建築環境学研究室

大沢 飛智

目次

第1章 序論 1

1.1	本研究の背景.....	1
1.1.1	2050年カーボンニュートラルの背景と各国の目標.....	1
1.1.2	日本の動向.....	3
1.1.3	日射の活用.....	4
1.1.4	地球温暖化による熱中症リスク.....	5
1.1.5	GISの普及.....	5
1.2	本研究の方針.....	6
1.2.1	研究の目的.....	6
1.2.2	既往研究と手法の構築.....	6
1.3	章構成.....	8
1章	参考文献.....	10

第2章 日射データの作成手法の提案 13

2.1	はじめに.....	13
2.2	使用するツールーR言語、EnergyPlus.....	14
2.3	GISデータの統合.....	15
2.3.1	使用するGIS・DEM.....	15
2.3.2	データのファイル形式.....	16
2.3.3	基盤地図情報.....	17
2.3.4	都市計画基礎調査データ.....	18
2.3.5	全世界デジタル3D地形データ.....	19
2.3.6	測地系.....	20
2.3.7	データの範囲.....	21
2.3.8	2つのGISデータの重ね合わせ.....	22
2.3.9	標高の追加.....	23
2.4	正射影画像の作成.....	24
2.4.1	対象建物の選択.....	24
2.4.2	周辺の建物の抽出.....	25
2.4.3	周辺建物の投影.....	26
2.5	日射データの作成.....	28
2.5.1	拡張アメダス気象データ.....	28
2.5.2	直達日射量の算出.....	29
2.5.3	拡散日射量の算出.....	33

2.6	手法の精度確認.....	34
2.6.1	解析範囲の決定.....	36
2.6.2	手法の精度検証.....	38
2.6.3	周辺環境の影響.....	42
2.7	まとめ	46
2章	参考文献.....	47
第3章	ダイレクトソーラーゲインによる暖房負荷の抑制と周辺環境の関係解析	48
3.1	はじめに	48
3.2	外部環境とダイレクトソーラーゲイン効果の分析.....	49
3.2.1	解析範囲.....	49
3.2.2	日射量の算出.....	50
3.2.3	気象データの作成.....	50
3.2.4	計算モデル.....	51
3.2.5	周辺環境が異なる2地点における暖房負荷の計算.....	53
3.2.6	南側天空率を用いたダイレクトソーラーゲイン効果の分析.....	55
3.3	窓面積による暖房負荷の分析.....	57
3.3.1	解析対象.....	57
3.3.2	計算モデル.....	58
3.3.3	窓面積と窓性能と南側天空率の関係.....	59
3.4	まとめ	61
第4章	オフィスビルによるカーボンニュートラルの達成条件解析	62
4.1	はじめに	62
4.2	使用ツール-冷暖房熱負荷簡易計算法プログラム.....	63
4.3	解析範囲	64
4.4	壁面への日射量の算出.....	65
4.4.1	高さによる日射量の影響.....	65
4.4.2	正射影画像の編集.....	69
4.4.3	壁面への入射日射量.....	70
4.5	建物で得られる発電量の算出.....	72
4.6	一次エネルギー消費量の算出.....	74
4.6.1	モデルの作成.....	75
4.6.2	計算条件の設定.....	78
4.6.3	建物の一次エネルギー消費量.....	79
4.7	建物の一次エネルギーに対する発電量の割合 (EG/E) を計算	80
4.8	EG/E の解析.....	81

4.8.1	説明変数の設定.....	81
4.8.2	解析結果.....	82
4.9	まとめ.....	87
4章	参考文献.....	88
第5章	東京五輪・マラソンコースの暑熱環境評価 91	
5.1	はじめに.....	91
5.2	暑熱環境の指標-WBGT.....	92
5.3	使用するツール-QGIS.....	93
5.4	解析範囲.....	94
5.5	解析日時の設定.....	95
5.6	樹木の正射影画像を作成.....	98
5.6.1	DSMの標高データによる樹木の正射影画像作成.....	98
5.6.2	空中写真による樹木のGISデータ作成.....	101
5.6.3	正射影画像の作成.....	104
5.7	建物と樹木の正射影画像の合成.....	105
5.8	日射量算出手法の改善.....	106
5.9	WBGTの算出.....	113
5.10	WBGTの解析.....	116
5.10.1	地域別のWBGTの解析.....	116
5.10.2	日程別のWBGTの解析.....	118
5.10.3	WBGTの減衰量の解析.....	123
5.11	まとめ.....	127
5章	参考文献.....	128
第6章	結論 131	
6.1	本研究の総括.....	131
6.2	今後の展望と課題.....	134

第1章 序論

1.1 本研究の背景

地球温暖化が進行し世界各地で気候災害が顕著になってきている。例えば波や豪雨などの「極端現象」の発生頻度が増え、被害が大きくなることが予想されている。IPCCが2021年8月に報告したAR6によると、地球温暖化と人為起源の温室効果ガスの増加の関連性に疑う余地がないと断定され、2010年～2020年までの10年間で、世界の平均気温が1.09°C上昇していることが報告された[1]。そのため、温室効果ガスの排出を抑制する緩和策と、長期的に避けることのできない地球温暖化に対する適応策の実行が不可欠である。

1.1.1 2050年カーボンニュートラルの背景と各国の目標

2015年のパリ条約により世界共通の長期目標として、産業革命前からの平均気温の上昇を2°Cより十分に下方に保持し、1.5°Cで抑える努力を追求することが求められた[2]。しかし、AR6の報告もあり、2021年のCOP26では、グラスゴー気候合意により世界各国で2050年までにカーボンニュートラルを達成するための野心的な目標を計画と実行を求められ、産業革命前からの平均気温の上昇を1.5°Cで維持することが強調された[3,4]。

世界各国では2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、表1-1のような2030年目標を示し、これらの目標を実現するため緩和策を実行した。例えば、米国では2030年までに洋上風力による再エネ生産量を1,000万世帯以上への年間電力供給が可能な30GWまで増設することを示した[5]。中国では電動車市場が急速に拡大しており、2025年までに新車販売の20%前後は新エネルギー車にするとした[6]。EUは2030年目標を達成するための政策パッケージである「Fit for 55」を発表しており、政策内容にはEUのエネルギーミックスにおける再生可能エネルギーの割合を32%から40%に引き上げるとした[7]。

表 1-1 各国の 2030 年目標、2050 年カーボンニュートラルの目標に対する回答
 (外務省、各国の 2030 年目標より引用[8])

国・地域	2030 年目標	2050 ネットゼロ
日本	-46% (2013 年度比) (さらに、50%の高 みに向け、挑戦を続けていく)	表明済み
アルゼンチン	排出上限を年間 3.59 億 t	表明済み
オーストラリア	-43% (2005 年比)	表明済み
ブラジル	-50% (2005 年比)	表明済み
カナダ	-40 ~ -45% (2005 年比)	表明済み
中国	(1) CO ₂ 排出量のピークを 2030 年より前 にすることを旨す	CO ₂ 排出を 2060 年まで にネットゼロ
	(2) GDP 当たり CO ₂ 排出量を-65%以上 (2005 年比)	
フランス・ドイツ イタリア・EU	-55%以上 (1990 年比)	表明済み
インド	GDP 当たり排出量を-45% (2005 年比)	2070 年ネットゼロ
インドネシア	-31.89% (BAU 比) (無条件)	2060 年ネットゼロ
	-43.2% (BAU 比) (条件付)	
韓国	-40% (2018 年比)	表明済み
メキシコ	-22% (BAU 比) (無条件)	表明済み
	-36% (BAU 比) (条件付)	
ロシア	1990 年排出量の 70% (-30%)	2060 年ネットゼロ
サウジアラビア	2.78 億 t 削減 (2019 年比)	2060 年ネットゼロ
南アフリカ	2026 年~2030 年の排出量を 3.5~4.2 億 t に	表明済み
トルコ	最大-21% (BAU 比)	-
英国	-68%以上 (1990 年比)	表明済み
米国	-50 ~ -52% (2005 年比)	表明済み

1.1.2 日本の動向

日本では2020年に2050年までのカーボンニュートラルの実現を改正地球温暖化対策推進法に明記し、脱炭素への取り組みを加速させるとした。また、2021年には2030年までの二酸化炭素排出量削減目標を2013年度比46%減、さらには50%削減の高みと発表した。この目標は日本政府がパリ協定後に国連に提出した削減目標の2013年比26%減から大幅に引き上げたものである。これらを実現すべく内閣府より「地域脱炭素ロードマップ」が示された[9]。ロードマップには2030年までに脱炭素の地域モデルケースを作るための取組・施策を集中して行うと明記しており、実現したモデルケースを例にして全国に脱炭素の取組・施策を波及させることで2050年までに脱炭素を実現するとしている。この波及を脱炭素ドミノといい、そのための基礎作りとして、直近では地域モデルケースとなる脱炭素先行地域を増やすことに重点を置き、2020年から2025年の5年間で少なくとも100か所の脱炭素先行地域を選定し、2030年までにモデルケースを実行するとされている。現在までの進捗として、脱炭素先行地域募集（第1回）では26件の計画提案が選定され[10]、脱炭素先行地域（第2回）では20件の計画提案が選定された[11]。北海道では第1回目で石狩市、上士幌町、鹿追町が選定され、第2回目で札幌市、奥尻町が選定された。選定された地域では以下の取り組みを求められている。

- ① 再エネポテンシャルの最大活用による追加導入
- ② 住宅・建築物の省エネ・再エネの導入及び蓄電池としてのEV/PHEV/FCVの活用
- ③ 再生可能エネルギー熱や未利用熱、カーボンニュートラル燃料の利用
- ④ 地域特性に応じたデジタル技術を活用した脱炭素化の取組
- ⑤ 資源循環の高度化（循環経済への移行）
- ⑥ CO2排出実質ゼロの電気・熱・燃料の融通
- ⑦ 地域の自然資源等を生かした吸収源対策等

事業開始後は、環境省を中心に関係省庁と密接な連携をすることで、取り組みの成果を把握し、それらのノウハウを横展開に広げていくことで、2050年を待たずに脱炭素で強靱な活力ある地域社会を全国で実現すること目指している。

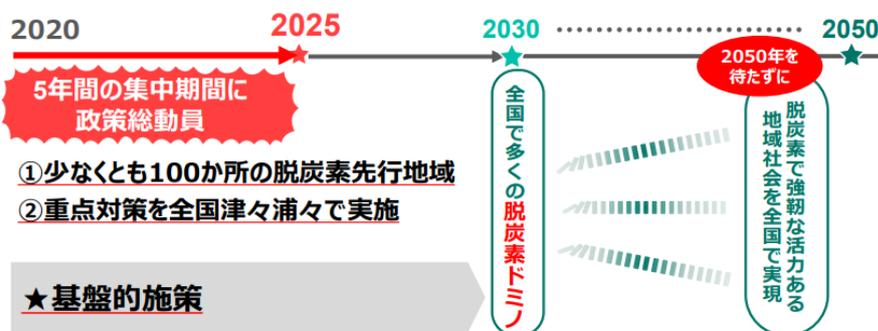


図 1-1 脱炭素ロードマップ（地域脱炭素ロードマップ【概要】より引用[12]）

また、民生部門（業務・家庭部門）は日本の最終エネルギー消費量の約3割を占めており、住宅・建築物のさらなる省エネルギー化、脱炭素化を進めていかなければならないとされている。そのため、国土交通省と経済産業省、環境省により「脱炭素社会に向けた住宅・建築物における省エネ対策等のあり方検討会」が実施され、2050年及び2030年に目指すべき住宅・建築物の姿を示し、それらを実現するための取り組みの進め方を明らかにした[13]。

1.1.3 日射の活用

カーボンニュートラルを達成するためには再生可能エネルギーの利用が重要で、日本で最も有用なのが日射（太陽エネルギー）である。日射の代表的な利用方法として太陽光発電が挙げられる。先の二つの政策においても太陽光発電設備の設置に関する記載が以下にされている。

- ・ 「地域脱炭素ロードマップ」

政府及び自治体の建築物及び土地では、2030年には設置可能な建築物等の約50%に太陽光発電設備が導入され、2040年には100%導入されていることを目指す

- ・ 「脱炭素社会に向けた住宅・建築物における省エネ対策等のあり方検討会」

2030年：新築される住宅・建築物について ZEH・ZEB 基準の水準の省エネ性能が確保され、新築戸建住宅の6割に太陽光発電設備が導入されていること

2050年：ストック平均で ZEH・ZEB 基準の水準の省エネ性能が確保され、導入が合理的な住宅・建築物において太陽光発電設備等の再生可能エネルギーの導入が一般的となること

日本は世界でも有数の太陽光発電の導入量を誇る国であり、中国、アメリカに次いで世界では第3位に位置する。上位2か国に比して狭い国土面積ながらも、高い導入量を誇ることから国内での太陽光発電に対する注目度は非常に高い。太陽光発電はほかのクリーンエネルギーと比較しても、コストが安く、設置場所の制限が少ないため導入しやすい[14]。そして、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて今後も太陽光発電の導入量は増加することが予想されている[15]。また、日射は太陽光発電だけでなく、直接利用による照明負荷や暖房負荷の削減が可能であり、ZEB、ZEHの普及に貢献できる。

1.1.4 地球温暖化による熱中症リスク

地球温暖化に対して、2050年のカーボンニュートラルの実現といった緩和策に取り組む一方で、気温上昇による気候災害や人体への健康被害にも目を向けなければならない。人体への被害に関しては熱中症による死亡数が増加していると報告されている[16]。特に都市化が進む大都市圏においては都心部の気温が郊外部と比較して高くなりやすく、熱中症の危険が増している[17]。

近年では2007年の東京マラソン以降、健康志向が強くなってきたこともあり、ランニングやマラソンに参加する人が増えている。しかし、マラソン中は体内の熱の生産量が増えるため、熱中症になるリスクが高くなる。また、公益財団法人日本スポーツ協会の調べによれば、学校管理下における熱中症死亡事の多くは運動部活動で、運動開始から短時間で熱中症を発症し死亡につながった多くの事例は持久走とされている[18]。このため、マラソン中は通常時よりも熱中症になりやすいため、個人による体調管理が重要であると同時に、都市においても日射を遮り、熱中症のリスクを抑える環境づくりが必要である。

1.1.5 GISの普及

日射はカーボンニュートラルの達成するための創エネとして重要であると同時に都市の熱環境を構成する気象要素であり、日射を扱う場合、周辺の障害物による影響を考慮する必要がある。そこでGISを活用することにより詳細かつ大量のデータ処理を可能にした。

GIS（地理情報システム：Geographic Information System）とは地理・空間に関連付けられた情報である地理空間情報を作成・保存・利用・管理・表示・検索をすることでより高度な解析を可能にした技術である。GISの構想は1960年代ごろから存在していたが、当時の技術では空間情報を紙ベースの地図による利用が限界であった。しかし、近年ではコンピュータ技術の発展により大量の情報をデジタル化し、データとして管理することが可能になったことで、位置情報を付加したデータであるGISデータが登場し、位置をもとに様々な情報を関連付けることで、複数の情報を1つの視覚的な情報として表現することが可能になった。このGISの進歩により1種類の情報を文章より解析していた方法よりも瞬時に大量の情報を把握でき、異種間の隠れた因果関係を効果的に解析することが可能になった。

1995年の阪神淡路大震災時に一部の地域でGISが被害状況の把握や復興計画などに貢献したことで、GISの標準化の重要性が認識された。日本ではこれを契機にGISの本格的な研究や整備・普及が取り組まれ、この結果、政府は地理空間情報に関する標準の制定、紙ベースの数値地図25000のラスターデータ化、数値地図2500の基盤となる項目の整備、GISを利用した情報提供サービスの拡大が行われた。現在では国土交通省の1機関である国土地理院より地理空間情報を整備する際に位置の基準となる「基盤地図情報」が無料で提供されている。また、2007年に地理空間情報活用推進基本法制定以降、各市町村で5年ごとに都市計画の基礎となる土地利用現況・建物現況・都市施設・市街地整備の状況等の調査を行っており、その調査により「都市計画基礎調査データ」が作成されている。

1.2 本研究の方針

1.2.1 研究の目的

1.1 節でも述べたように、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて地域単位での脱炭素化の取り組みが急速に広まっていく。特に日本では地域脱炭素ロードマップにより地域の脱炭素への取り組み強化が予想される。この取り組みに対し日射（太陽エネルギー）の利用が有用な手段である。一方で上昇する気温に適応していくため、日射を遮り熱中症を抑制できるような都市を構築する必要がある。そのため、場所ごとに得られる日射量を正確に把握し、その日射量を用いて多様なパラメトリックスタディが実施できれば、都市の面的な解析が可能となり、地域の脱炭素に向けた良い現実的な計画や暑熱環境を改善する方法を検討できる。そこで本研究では以下の2つを満たす手法を構築した。

- ①周辺環境を加味した日射量を正確に把握する
- ②多様なパラメトリックスタディの実行を可能とする

また、本手法を用いて脱炭素に向けた検討や、都市の暑熱環境の解析を3つ実施し、本手法の有用性を示した。

1.2.2 既往研究と手法の構築

1.2.1 節で提示した①、②の条件を満たす手法を構築するために既往研究を参考した。前提として、日射量は周辺環境の影響によって取得できる量が変わるとしているが、これを既往研究からも証明されている。Liらは8つの都市形状から200の区画を作成し、区画内で得られる日射量を調べた結果、区画内の建物の密度が同じでも、区画内での配置によって得られる日射量に大きく差が出ることを示した[19]。BoccalatteらはGISデータとソーラーキャダスターから、屋上の遮光率は建物の高さ、容積、周囲の高低差は相関性があることを示した[20]。Liuは街路によって形成された空間が日射量に影響を及ぼすことを示し、街路の幅の変化による影響は夏よりも冬や中間期で大きくなるとした[21]。Chatzipoulkaらは建物ファサードと地面の太陽ポテンシャルを解析し、都市形状と季節的な日射の変化に影響されることを示した[22]。

このように日射は周辺環境によって変化するため、正確に把握すること手段が必要である。GISは周辺環境を加味したシミュレーションを行うために有用な手段であり、日射に限らず様々な研究に利用されている。Cumoらは、自然保護サイト内における太陽光利用の可能性な建物の屋根面を解析し、太陽光利用が有効なエリアを特定した[23]。BoccalatteらはGISデータとソーラーキャダスターから、屋上の遮光率は建物の高さ、容積、周囲の高低差は相関性があることを示した[24]。Mohajeriらは都市における日射は都市の密度や区画内の構成、建築の構成など複数の影響を受けることを示し、建物の密度が濃いコンパクトなエリアではファサードによる太陽光発電や太陽熱集熱器で得られるエネルギーや、日射のパッシブ利用が落ちることを示した[25]。

これらの研究はGISをもとに周辺環境を3D化することで、高精度なシミュレーションを

可能にしている。しかし、3Dによる計算は複数のポリゴン情報の処理が必要とされるため、一つの条件の結果を算出するまでに膨大な時間を要する。そのため、周辺環境を加味した日射量を算出するための別の手段を検討した。

周辺環境を加味した日射量を算出する方法として、正射影画像により算出した天空率を用いる手法が挙げられます。既往研究でも天空率と日射に関する関係性があることが示された。斉藤らは曇天時の最高環境評価指標について天空率と曇天時照度を比較し、天空率が曇天時照度を評価する簡便な指標であることを示した[26]。戸田らは全天写真より日射量を推定するプログラムを開発し、日射量の推定値が実測値と良好な関係を示したことを確認した[27]。堀田らは建物の各壁面と屋根面における日射受熱量と地面の天空率の関係より、直達日射受熱量の分布はおおむね地面の天空率で決まることを示した[28]。また、近年では天空率とほかの都市気象の関連を示す研究もあり、ソユファンらは高解像度での天空率と表面温度の関係を分析した解像度 2m の数値表面モデルを用いて天空率ヘリコプターから撮影した 2m 解像度の表面温度の分布図を重ね合わせ、解析した結果、天空率が高いほど表面温度も高いことを示した[29]。平林らは魚眼レンズにより撮影した画像より天空率を算出し、天空率が低い日陰部が比較的快適であることを示した[30]。Liangらは都市で生じる温度差が天空率と負の相関があることを示した[31]。

以上より本研究では GIS データより作成した再射影画像を用いて周辺環境を加味した日射量を算出し、この日射量とその他の気象要素とカップリングをしてシミュレーションを行う手法を提案した。これにより①と②の条件を満たしたため、正確な日射量データで多様なパラメトリックスタディの実施が可能となった。この手法は地域の脱炭素に向けた計画を最適化するに寄与することができる。

1.3 章構成

第 1 章では本研究の背景と既往研究の紹介をすることで、本研究の立ち位置と目的を明確化した。

第 2 章では GIS データを用いた気象データの作成手法を提案した。オープンソースの GIS データを用いることで、周辺環境を再現した正射影画像を作成した。この正射影画像により、時間ごとに直達日射量の取得の有無を判断できるようになった。また、正射影画像より算出できる天空率により、その場所で得られる拡散日射量を算出した。算出した日射量の精度を検証するため、EnergyPlus で周辺の建物を再現して実際に取得できる日射量を比較した。

第 3 章では北海道の高断熱、高气密を有する住宅でダイレクトソーラーゲインによる暖房負荷の抑制効果と周辺環境の関係性を解析した。ダイレクトソーラーゲインには暖房負荷の抑制が期待できる一方で、周辺に建物が密集している敷地であれば、期待通りの日射量を得られずかえって、暖房負荷の増加の原因となる。本手法を用いることでさまざまな敷地の天空率と日射データを算出できるため、日射データを用いて暖房負荷を算出し、天空率との関係性を解析した。建物モデルは寒冷住宅地のリビングを想定した簡易住宅を作成し、窓の性能が異なる 4 ケースと窓の面積の広さが異なる 3 ケースの組み合わせで暖房負荷計算を実施した。

第 4 章では寒冷都市のオフィスビルがカーボンニュートラルを達成するための条件解析を行った。日本では住宅・建築物の一次エネルギー消費量の指標である BEI による規制が年々厳しくなっているため、カーボンニュートラルを実現するための条件を明確化することが急務である。そこで、札幌市に存在するオフィスビルを対象に本手法を用いて壁面で得られる太陽光発電量を算出し、オフィスビルの一次エネルギー消費量と比較することでカーボンニュートラルを達成する建物の条件を解析した。この解析を実施するために、本手法の応用として日射量から太陽光発電を算出する手法を提案した。また、GIS データを用いて解析する建物モデルを自動作成する手法を提案した。4016 件のオフィスビルを対象に壁面で得られる太陽光発電を算出した。そのうち、415 件のオフィスビルで一次エネルギー消費量の算出を行い、建物の形状や建物の性能（壁面の熱貫流率、窓の熱貫流率と日射遮蔽係数）、敷地周辺の環境にカーボンニュートラル達成への影響を解析した。

第 5 章では東京五輪・陸上男子マラソンのマラソンコースを対象として熱中症のリスクを解析した。東京五輪・陸上男子マラソンでは、約三割の棄権者が出るほどの過酷なレースとなった。このような危険を避けるためにはマラソンコースの熱環境を正確に把握する必要があるため、本手法を応用して、5m 間隔でマラソンコースの WBGT を算出した。マ

序論

ラソンコースの熱環境には樹木による影響もある。そこで、DEM データと空中写真より樹木の GIS データの作成、および、正射影画像に樹木を投影することで樹木の影響も考慮した日射量の算出が可能となった。また、拡散日射量を放射輝度分布に変換して解析するように手法を改良し、より精緻な日射量解析が可能となった。

第 6 章では各章の総括し、本手法によって得られた知見を述べる。また、手法の限界を把握し、今後の展望を述べる。

1 章 参考文献

- [1] Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Matthews, J.B.R., Berger, S., Huang, M., Yelekçi, O., Yu, R., et al. :Climate Change 2021 The Physical Science Basis Summary for Policymakers, 2021.
- [2] Unfccc ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT; 2015;
- [3] Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., et al. :Global Warming of 1.5° C,.
- [4] unfccc Glasgow Climate Pact;
- [5] THE WHITE HOUSE FACT SHEET: Biden Administration Jumpstarts Offshore Wind Energy Projects to Create Jobs | The White House Available online: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/03/29/fact-sheet-biden-administration-jumpstarts-offshore-wind-energy-projects-to-create-jobs/> (accessed on 21 December 2022).
- [6] 中華人民共和國中央人民政府 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划（2021-2035 年）的通知（国办发〔2020〕39 号） Available online: http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm?adlt=strict&toWww=1&redig=6E3DC66EB29C4E20827326C9574B263A (accessed on 21 December 2022).
- [7] European Council Council of the European Union Fit for 55 Available online: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/?adlt=strict&toWww=1&redig=55F0D653D5A748E2B5A02FA82184FEB6> (accessed on 21 December 2022).
- [8] 外務省 日本の排出削減目標 Available online: https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000121.html?adlt=strict&toWww=1&redig=AEE31F1F1C394AA0861800D09E8D0238 (accessed on 21 December 2022).
- [9] 内閣官房 国・地方脱炭素実現会議 Available online: <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/datsutanso/index.html> (accessed on 21 December 2022).
- [10] 環境省 脱炭素先行地域選定結果（第1回）について | Available online: <https://www.env.go.jp/press/110988.html> (accessed on 21 December 2022).
- [11] 環境省 脱炭素先行地域選定結果（第2回）について Available online: https://www.env.go.jp/press/press_00776.html (accessed on 21 December 2022).
- [12] 内閣官房 :地域脱炭素ロードマップ **【概要】** .

- [13] 経済産業省 2050年カーボンニュートラルの実現に向けた住宅・建築物の対策を取りまとめました Available online:
<https://www.meti.go.jp/press/2021/08/20210823001/20210823001.html?adlt=strict&toWww=1&redig=CFAC60EA5712432CB6B8660074249D09> (accessed on 21 December 2022).
- [14] 資源エネルギー庁 電気をつくるには、どんなコストがかかる? Available online:
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyō/denki_cost.html (accessed on 21 December 2022).
- [15] IEA Renewable Electricity Available online:
<https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-may-2022/renewable-electricity> (accessed on 21 December 2022).
- [16] 厚生労働省 熱中症による死亡数 人口動態統計(確定数)より | 厚生労働省 Available online:
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/tokusyū/necchusho20/index.html> (accessed on 27 October 2022)
- [17] 国土交通省 国土交通白書2022 Available online:
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r03/hakusho/r04/html/nj030c03.html> (accessed on 27 October 2022)
- [18] 日本スポーツ協会 スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック Available online:
https://www.japan-sports.or.jp/Portals/0/data/supoken/doc/heatstroke/heatstroke_0531.pdf (accessed on 27 October 2022)
- [19] Li, J., Wang, Y., Xia, Y. :A Novel Geometric Parameter to Evaluate the Effects of Block Form on Solar Radiation towards Sustainable Urban Design, *Sustain Cities Soc*, 84, p104001, 2022, doi:10.1016/J.SCS.2022.104001.
- [20] Bocalatte, A., Thebault, M., Ménézo, C., Ramousse, J., Fossa, M. :Evaluating the Impact of Urban Morphology on Rooftop Solar Radiation: A New City-Scale Approach Based on Geneva GIS Data, *Energy Build*, 260, p111919, 2022, doi:10.1016/J.ENBUILD.2022.111919.
- [21] Liu, Y., Zhang, M., Li, Q., Zhang, T., Yang, L., Liu, J. :Investigation on the Distribution Patterns and Predictive Model of Solar Radiation in Urban Street Canyons with Panorama Images, *Sustain Cities Soc*, 75, p103275, 2021, doi:10.1016/J.SCS.2021.103275.
- [22] Chatzipoulka, C., Compagnon, R., Nikolopoulou, M. :Urban Geometry and Solar Availability on Façades and Ground of Real Urban Forms: Using London as a

- Case Study, *Solar Energy*, 138, p53-66, 2016,
doi:10.1016/J.SOLENER.2016.09.005.
- [23] Cumo, F., Garcia, D.A., Gugliermetti, F., Cumo, F., Garcia, D.A.,
Gugliermetti, F. :Assessing the Potential Use of Solar Energy Source in
Urban Areas Located in Natural Protected Sites, *Natural Resources*, 4, p111-
115, 2013, doi:10.4236/NR.2013.41A013.
- [24] Boccalatte, A., Fossa, M., Ménézo, C. :Best Arrangement of BIPV Surfaces
for Future NZEB Districts While Considering Urban Heat Island Effects and
the Reduction of Reflected Radiation from Solar Façades, *Renew Energy*, 160,
p686-697, 2020, doi:10.1016/J.RENENE.2020.07.057.
- [25] Mohajeri, N., Upadhyay, G., Gudmundsson, A., Assouline, D., Kämpf, J.,
Scartezzini, J.L. :Effects of Urban Compactness on Solar Energy Potential,
Renew Energy, 93, p469-482, 2016, doi:10.1016/J.RENENE.2016.02.053.
- [26] 斉藤 圭, 篠崎 道彦, 桑田 仁 :超高層建築物群周辺の曇天時照度比・天空率と晴天
時日射エネルギー比 : 市街地外部空間の日射・採光の質を考慮した形態コントロール
手法に関する研究(その3), *日本建築学会計画系論文集*, 68, p201-208, 2003,
doi:10.3130/AIJA.68.201_1.
- [27] 戸田 健太郎, 中村 彰宏 :全天写真を用いた日射量推定プログラムの開発, *日本緑
化工学会誌*, 27, p154-159, 2001, doi:10.7211/JJSRT.27.154.
- [28] 堀田 裕子西岡 真稔, 中尾 正喜, 鍋島 美奈子, 木下 厚志 :E-3 建物群幾何学形状
の持つ日射受熱特性のモデル化に関する研究 : 地面の天空率に基づく直達日射受熱特
性の類型化, *空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集*, 2009.1, p333-336,
2009, doi:10.18948/SHASETAIKAI.2009.1.0_333.
- [29] ソ ユファン常松 展充, 横山 仁, 本條 毅 :都市表面温度と天空率の関係について,
環境情報科学論文集, ceis33, p55-60, 2019,
doi:10.11492/CEISPAPERS.CEIS33.0_55.
- [30] 平林 聡, 今村 史子, 常松 展充, 徳江 義宏, 阿部 勉, 市橋 新 :東京オリンピッ
クマラソンコースにおける観客の熱的快適度の推定, *日本緑化工学会誌*, 44, p186-
189, 2018, doi:10.7211/JJSRT.44.186.
- [31] Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., He, Z. :Sky View
Factor Analysis of Street Canyons and Its Implications for Daytime Intra-
Urban Air Temperature Differentials in High-Rise, High-Density Urban Areas
of Hong Kong: A GIS-Based Simulation Approach, *International Journal of
Climatology*, 32, p121-136, 2012, doi:10.1002/JOC.2243.

第2章 日射データの作成手法の提案

2.1 はじめに

近年の日射量のシミュレーションは周辺環境を加味した高精度な計算が求められる。一般的には計算対象の周辺環境を3Dで再現することで、現実に即したシミュレーションを行うが、この手法は計算に要するポリゴン情報が多くなるため、計算負荷が高くなる。そのため、地域単位で日射量のシミュレーションを行いたい場合に、計算負荷が膨大となり、様々な条件でパラメトリックスタディを実施するために多くの時間を割く必要がある。

本章では日射量のシミュレーションによる計算負荷を大幅に削減できる手法を提案した。具体的には GIS データから抽出した建物の情報により周辺環境を正射影画像で再現し、その画像を基に場所ごとの周辺環境を加味した日射量を算出した。これらのデータの精度の確認するため、EnergyPlus によるシミュレーション結果と比較した。

2.2 使用するツール-R 言語、EnergyPlus

(1) R 言語

本研究では R 言語をメインに利用し、正射影画像の作成、日射量の算出、および各章のシミュレーションを行った。R 言語は GNU プロジェクトによって提供されているデータ分析に特化したオープンソースの統計解析ソフトである[1]。R 言語は 1990 年代の初頭に開発がすすめられ統計処理に特化したフリーソフトとして注目され始めた。近年では Python とともに機械学習の開発にも利用されるようになってきている。R 言語の操作系統は CUI(command line interface)ベースである。そのため、文字入力による命令形式であるため、処理内容をスクリプト化することでプラットフォーム間の移動が容易である。また、オープンソースであるため、多くのユーザーにより日々機能の拡張が行われており、CRAN(The Comprehensive R Archive Network)を通じて、それらの機能を有するパッケージをダウンロードすることで、必要に応じて簡単に新しい機能を追加できる。そして、R 言語は行列、リスト、配列などさまざまなデータ型の計算に対応しており、膨大なデータも高速で処理を行い、グラフィック化して表示することが可能である。以上のようなメリットにより近年では R 言語を利用する民間企業も増加しており、今後、様々な情報が電子化していく社会において、利用しやすいソフトウェアだといえる。

(2) EnergyPlus

本研究では EnergyPlus を用いて本手法で算出した日射量の精度を確認した。また、第 3 章の暖房負荷計算を行った。EnergyPlus とは米国のエネルギーシミュレーションプログラムである BLAST 及び DOE-2 をベースとして開発された次世代のエネルギーシミュレーションプログラムである[2]。ユーザー登録をすると無料で利用でき、また、ユーザーインターフェイスが全世界で開発されているため、利便性が高いプログラムとして広く利用されている。EnergyPlus の日本語版がないため、日本では未だ知名度が低い。これらの状況を改善するための研究や開発が行われたことで日本人向けのユーザーインターフェイスが増加しており、日本での利用環境も整えられつつある。

2.3 GISデータの統合

本研究では2つのGISデータと2つのDEMデータを利用した。ただし、それぞれのデータは測地系や座標、所持している内容が異なっており、正射影画像の作成に際し余計な誤差が生じやすい。そのため、複数のデータを一つのGISデータに統合した。

2.3.1 使用するGIS・DEM

(1) GISデータ

GIS(Geographic Information System：地理情報システム)とは地勢、建築物、生物や植物の生態分布等のデータベースを位置・空間情報を基に整理することで、情報を視覚的に表示し、従来よりも高度な分析を可能にしたシステムである。

本研究で以下の2つのGISデータを使用した。

- ・基盤地図情報：基本項目(国土地理院より提供[3])
- ・都市計画基礎調査データ(北海道より提供[4])

(2) DEMデータ

DEM(Digital Elevation Model)とは地表面の地形を表した3次元座標の総称である。DEMは複数の地点の衛星画像や空中画像、または航空レーザー測量により、特定の格子間隔で地表面をデジタル化している。DEMは建物や樹木を含めた標高を示すDSM(Digital Surface Model)とそれらを取り除いた標高を示すDTM(Digital Terrain Model)の2種が存在します。DEMの登場により、地形の標高や傾斜をデジタルで把握できるようになったため、DEMとGISの土地利用の情報をレイヤーとして重ね合わせることで、これまで予測できなかった自然災害の防止などが可能になった。

本研究で以下の2つのDEMデータを使用した。

- ・基盤地図情報：数値標高モデル(国土地理院より提供[3])
- ・全世界デジタル3D地形データ(NTTデータより購買[5])

2.3.2 データのファイル形式

4 つのデータはそれぞれ以下のファイル形式で保存されている。データを扱う上でファイル形式を誤って理解しているとデータの取り込みに失敗するため、注意が必要である。

1)Shapefile

Shapefile 形式とは存在する場所と形を示す図形情報(点・線・面で示される)に性質・特長・数値である属性を加えた形式である。GIS データの標準フォーマットとされている。Shapefile 形式は shp 拡張子(図形情報)・dbf 拡張子(属性情報)・shx 拡張子(図形情報と属性情報の対応関係を示す)で構成されており、各データ形式はを単独で使用することはできない。この他、GIS ソフトによって構成するデータ形式が追加されることもある。

都市計画基礎調査データが Shapefile 形式で保存されており、R 言語で専用のパッケージをインストールすることで編集が可能となる。

2)GML

GML(Geography Markup Language)とは地理情報を記載する XML ベースのマークアップ言語である。国際標準化機構 (ISO) によって仕様が標準化されている。Shapefile と同様に図形情報と属性情報をもつが、XML ベースとしているため、web やシステム間でのデータのやり取りが Shapefile と比べて容易に行える。

基盤地図情報の数値標高モデル、基本項目が GML 形式で保存されており、国土地理院より適用されている基盤地図情報ビューアで表示、およびデータの抽出が可能である。

3)TIFF・GeoTIFF

TIFF(Tagged Image File Format)とは画像データのフォーマットの一つであり、複数の画像をタグ情報と 1 つの TIFF ファイルとしてまとめることができる。そのため、データのサイズが大きくなるが、様々なアプリケーションに対応できる。画像データはピクセルを格子状に配置したデータのことである。

GeoTIFF とは TIFF ファイルに地理情報を付加した情報である。後述する DEM も一定間隔のメッシュごとに標高データを与えているため、DEM の保存形式として GeoTIFF が利用される。

全世界 3D 地形データは GeoTIFF 形式であり、R 言語で専用パッケージをインストールすることで編集することが可能である。

2.3.3 基盤地図情報

GIS の強みは地理空間情報で整理した情報をレイヤーとして重ね、考察することができることである。そのため、国や地方公共団体、民間事業者等が調査し作成された GIS データが一つの地理空間情報を基準とすることが望ましい。そして、その基準として提供された電子地図が基盤地図情報である[3]。基盤地図情報として「基本項目」「数値標高モデル」「ジオイド・モデル」の3種類のデータが無料で提供されている。

「基本項目」では地理空間情報活用推進基本法 第二条第三項で定められた地理空間情報に関する以下の13項目が提供されており、これらはGISデータとして利用できる。

- | | |
|---------------------|-------------------------|
| 1) 測量の基準点 | 8) 軌道の中心線 |
| 2) 海岸線 | 9) 標高点 |
| 3) 公共施設の境界線 (道路区域界) | 10) 水涯線 |
| 4) 公共施設の境界線 (河川区域界) | 11) 建築物の外周線 |
| 5) 行政区画の境界線及び代表点 | 12) 市町村の町若しくは字の境界線及び代表点 |
| 6) 道路縁 | 13) 街区の境界線及び代表点 |
| 7) 河川堤防の表法肩の法線 | |

「数値標高モデル」では地表面の標高を格子状に測定した結果を示している。標高とは平均海面からの高さを示し、日本では東京湾の平均海拔である「東京湾平均海面」を標高の基準としている。5mメッシュと10mメッシュの2種類が提供されており、作成には航空レーザー測量による結果、写真測量による結果、地形図の等高線を利用している。

「ジオイド・モデル」では重力データと標高データをもとに求められた250メッシュの格子状に各点のジオイド高の結果を示している。ジオイドとは重力以外の影響を取り除いたときの仮想的な海面である。つまり、生物による振動や風による影響を受けておらず、波が立っていない静かな状態の海面である。ジオイド高とはジオイドを地球表面として、この地球表面をもとに回転楕円体を想定したさいに、ジオイドと回転楕円体に生じる距離を示す。

この3種類のデータはGML形式(拡張子xml)で提供されており、同サイトで配布されている基盤地図情報ビューアを利用することで地理情報として確認でき、また、別の形式に変換し利用することができる。

本研究ではDTMデータとして数値標高モデルの10mメッシュとGISデータとして基本項目を利用した。

2.3.4 都市計画基礎調査データ

都市計画基礎調査データとは各市町村で5年ごとに都市計画の基礎となる土地利用現況・建物現況・都市施設・市街地整備の状況等の調査結果をまとめたデータである[4]。近年、コンピュータのデータ処理能力の向上やGISの利用普及により、都市計画基礎調査データはGISに関する研究資料や都市計画における現状や今後の動向把握の基礎資料として利用されるようになってきている。調査項目は10項目に分類されており、市町村ごとにこの項目のほかに地域の特徴により必要とされる調査を加えたデータが整理されている。表2-1に調査項目を示す。

本研究では北海道より提供していただいた建物に関する都市計画基礎調査データを使用する。このデータは平成23年の調査に基づいており、札幌市に存在する625440件の建物に関する情報が明記されている。保存形式はShapefile形式である。

表 2-1 調査項目

分類	データ項目	分類	データ項目
人口	人口規模	都市施設	都市施設の位置・内容等
	DID		道路の状況
	将来人口	交通	主要な幹線の断面交通量・混雑度・旅行速度
	人口増減		自動車流動量
	通勤・通学移動		鉄道・路面電車等の状況
	昼間人口		バスの状況
産業	産業・職業分類別就業者数	地価	地価の状況
	事業所数・従業者数・売上金額	自然的環境等	地形・水系・地質条件
土地利用	区域区分の状況		気象状況
	土地利用現況		緑の状況
	国公有地の状況		レクリエーション施設の状況
	宅地開発状況		動植物調査
	農地転用状況		公害及び災害
	林地転用状況	防災拠点・避難場所	
	新築動向	公害の発生状況	
	条例・協定	景観・歴史資源等	観光の状況
	農林漁業関係施策適用状況		景観・歴史資源等の状況
建物	建物利用現況		
	大規模小売店舗等の立地状況		
	住宅の所有関係別・建て方別世帯数		

2.3.5 全世界デジタル 3D 地形データ

全世界デジタル 3D 地形データ(AW3D)は株式会社 NTT データと一般財団法人リモート・センシング技術センターが共同で提供している標高データセットである[5]。AW3D は独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)の陸域観測技術衛星「だいち(ALOS)」の観測データより作成されている。「だいち」が搭載しているセンサは「PRISM」と呼ばれており、「だいち」の前方・直下・後方の3方向を同時に、かつ、地表を2.5mの分解能で観測することができるため、世界でも最高精度の標高データが提供できる。現在は最も高精細化されたデータとして2mメッシュの数値標高モデル(DEM)、オルソ画像、加工製品が提供されている。

本研究では5mメッシュのDSMデータを札幌市内の20km四方の範囲で利用している。図2-1に本研究で使用しているDSMデータを示す。

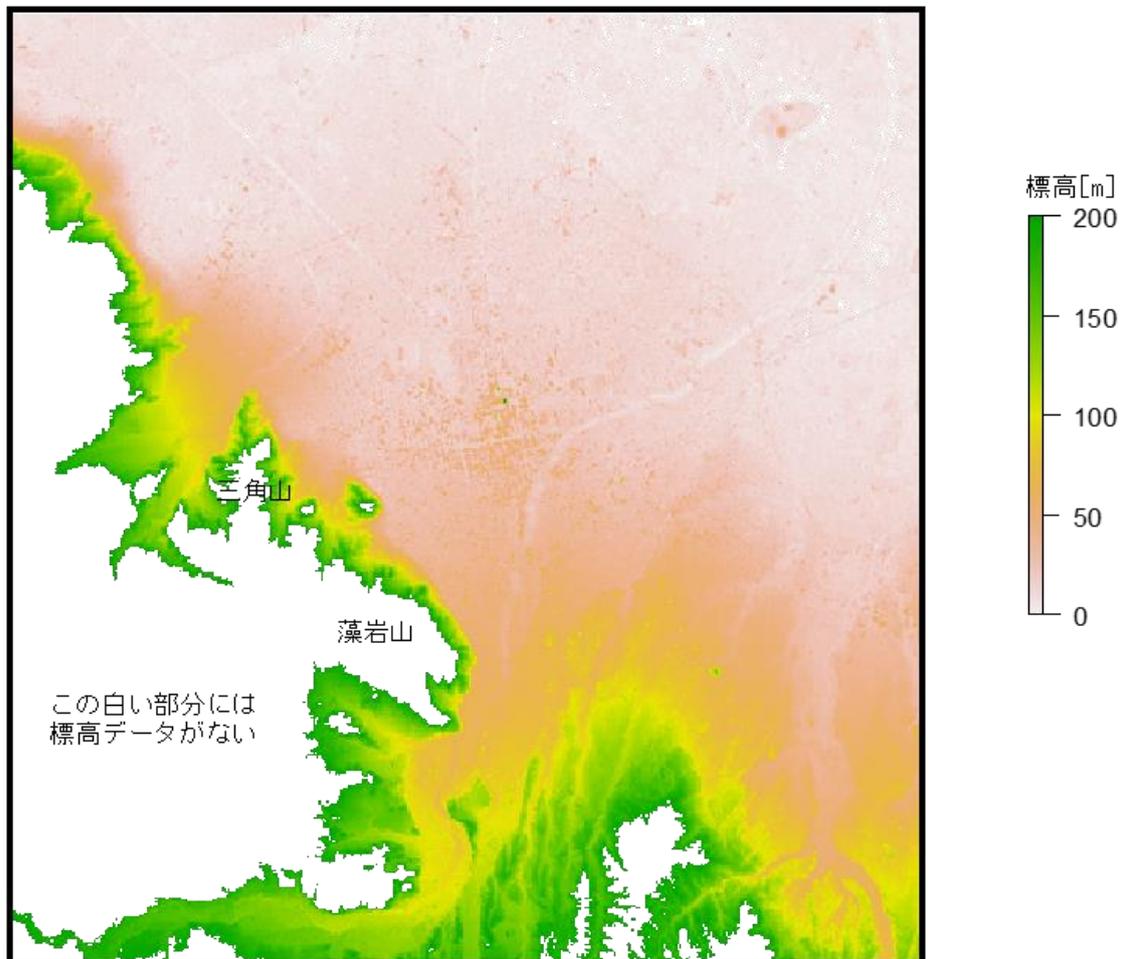


図 2-1 DSM データによる建物高さを考慮した標高

2.3.6 測地系

測地系とは地球上の位置を座標(緯度・経度・標高)により示すシステムである。測地系を定める3要素として準拠楕円体、ジオイド面、測地座標系が存在する。

準拠楕円体と地球を近似したことで想定される楕円体である。測地測量の基準として利用され、緯度経度で示される。WGS84、GRS80等、測量の対象や国により利用されている楕円体異なる。ジオイド面とは2.3.3節でも説明したように、重力以外の要因を取り除いたときに想定される仮想の海面である。標高はこのジオイド面からの高さである。測地座標系とは地球上の位置を直交座標系で示したシステムである。地球は楕円体であるが、緯度経度で示すと赤道から離れるほど経度の 1° の距離が狭くなっていくため、測量では扱いづらいとされている。そのため、測量では扱いやすいXYで示される直交座標系が利用される。ただし、広い範囲を直交座標系で示すと、地球が楕円体であるため、端に行くほど歪みが生じる。そのため、直交座標系は歪みが一定限度で収まる範囲で利用される。面積が広い国では多くの座標系を設けることでカバーしている。

日本では平面直角座標系により測地系を示しているが、2002年以前はベッセル楕円体を基準とした日本測地系が採用されており、2002年以降はGRS80の緯度経度を基準とする世界測地系に変更された。日本で平面直角座標系の位置の基準となる緯度経度は19か所存在し、測定する場所に応じた系番号の平面直角座標系を利用する。ただし、先にも述べたように2002年以前の地理情報を利用する場合、最新の地理情報の座標と400mほど誤差が生じるので、注意が必要である。

2.3.7 データの範囲

図 2-2 に使用可能なデータの範囲を示す。図の緑の枠内が都市計画基礎調査データ(以降、本文では都市計画基礎調査データを GIS データと称す)と基盤地図情報の数値標高モデル(以降、本文では数値標高モデルを DTM データと称す)が有している情報の範囲を示し、赤い枠内が全世界デジタル 3D 地形データ(以降、本文では全世界デジタル 3D 地形データを DSM データと称す)が有している情報の範囲である。

本研究では 3 つのデータが確実に存在する範囲として黄色の枠内をシミュレーションの対象とした。計算対象となる建物は 97827 件存在している。エリアの北東部には札幌駅が存在しており、その周辺には北海道大学や商業施設が存在している。エリアの北西部や南東部は住宅街が存在している。エリアの南西部には藻岩山が存在しており、山中や麓に位置する建物は藻岩山の影響を受け、取得日射量の減衰が予想される。

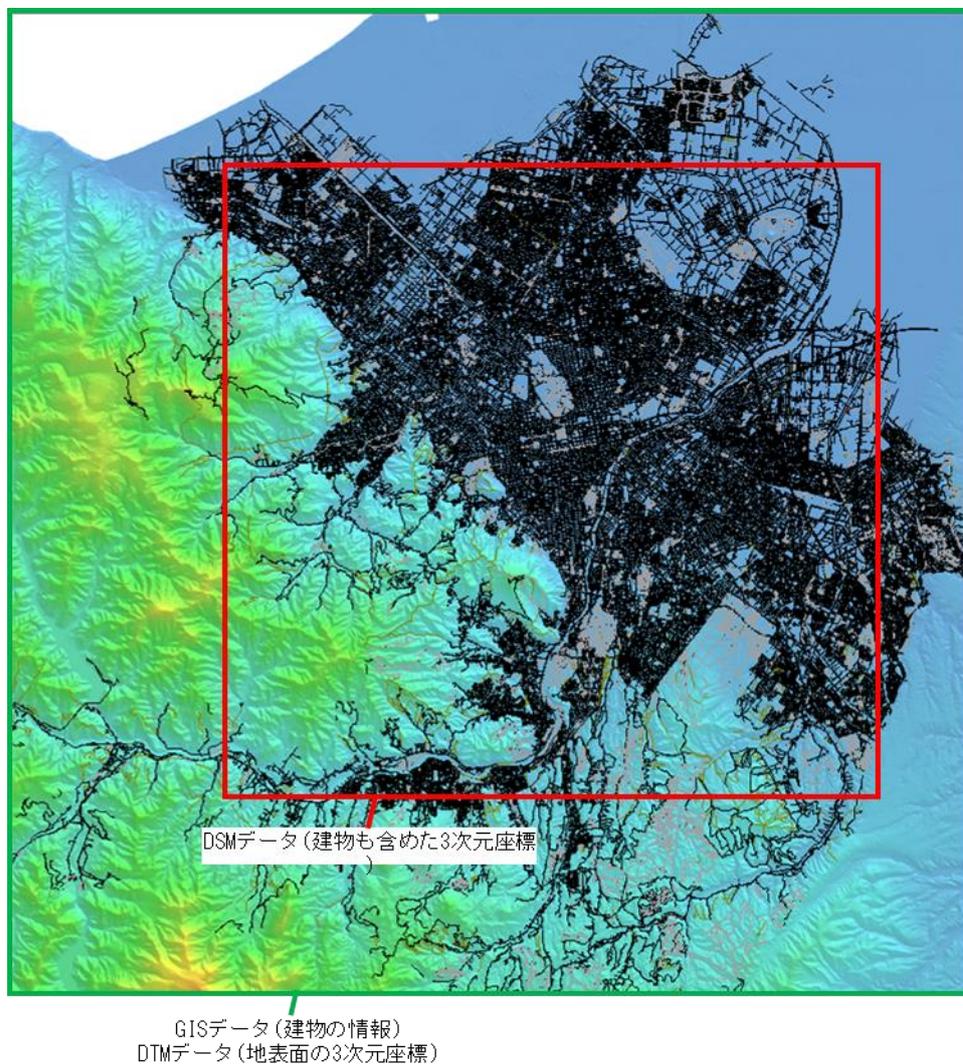


図 2-2 所持しているデータの範囲

2.3.8 2つのGISデータの重ね合わせ

使用したGISデータは都市計画基礎調査データと基盤地図情報-基本項目である。基本項目は都市計画基礎調査データより新しいデータであるため、建物の形体は基本項目より取得した。基本項目には建物の用途が付与されているが、情報量が少なくオフィスビルなどの判断がつきにくい。そのため、都市計画期調査データより建物の用途を基盤地図情報に付与する。基本項目と都市計画基礎調査データのそれぞれの建物が持つ重心座標が同じとき、基本項目に都市計画基礎調査データの建物の用途を付与した。各データの重心座標を比較するとき、基本項目と都市計画基礎調査データの測地系が異なるため注意が必要である。基本項目の測地系は世界座標系（JGD2011）であり、都市計画基礎調査データの測地系は日本座標系（tokyo EPSG 4301）である。世界座標系（JGD2011）と日本座標系（tokyo EPSG 4301）の間には誤差がある。本研究では世界座標系で測地系を統一した。日本座標系を世界測地系に変換する場合は横方向に-306.2613、縦方向に 263.3065 座標をずらす。図 2-3 は日本測地系から世界測地系へ変化するときの例を示す。

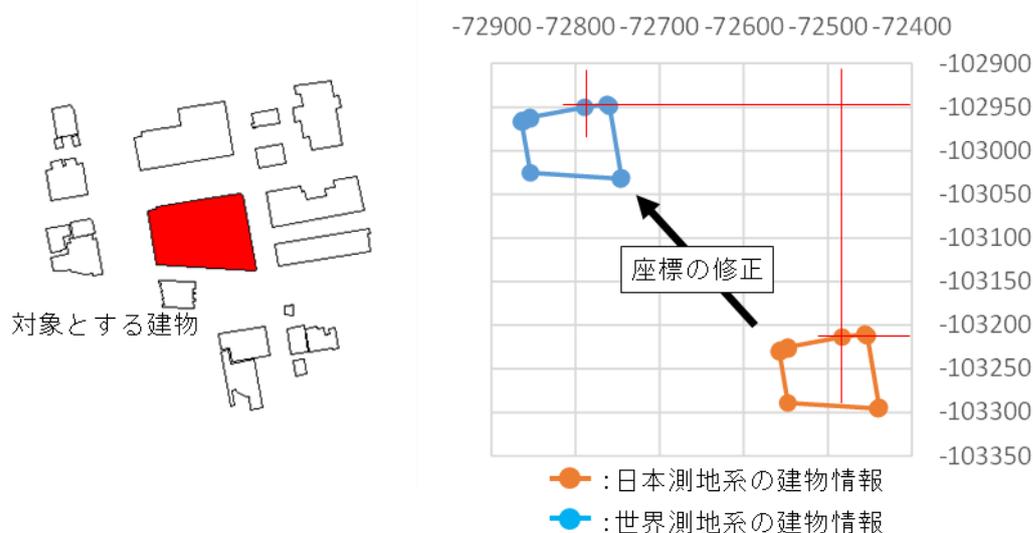


図 2-3 2つのGISデータ間の誤差

2.3.9 標高の追加

正射影画像の作成では建物の高さが必要となる。これらの高さを正確にとらえるためには、建物の高さや地表面の標高座標が必要となる。しかし、GIS データの建物情報には標高座標が存在しないため、基盤地図情報-数値標高モデル (DTM データ) と全世界デジタル 3D 地形データ (DSM データ) の 2 つの DEM データを用いて建物に高さを追加した。基本項目と数値標高モデルの測地系は世界座標系 (JGD2011) であり、AW3D の測地系は世界座標系 (JGD2000) である。JGD2011 は平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震に伴い、大きな地殻変動が観測されたため、JGD2000 から新たに改定された水準標高である。ただし、本研究で対象とする北海道は改定の対象外となる地域であるため、JGD2011 と JGD2000 の位置情報は同じ値として扱った。

2.4 節で既述したように DTM データと DSM データは格子上にデータが保存されている。そのため、格子の間隔を基に抽出する範囲を建物の重心座標を中心として設定することで最も近いデータを抽出することができる。DSM データを抽出する範囲は 5m 四方としている。DTM データは 10 メッシュのデータとされているが実際には若干のずれが生じており、さらに格子が傾いているため、横方向に 9.05m、縦方向に 12.60m の四角を DTM の抽出する範囲としている。図 2-4 に各データの抽出範囲を示す。

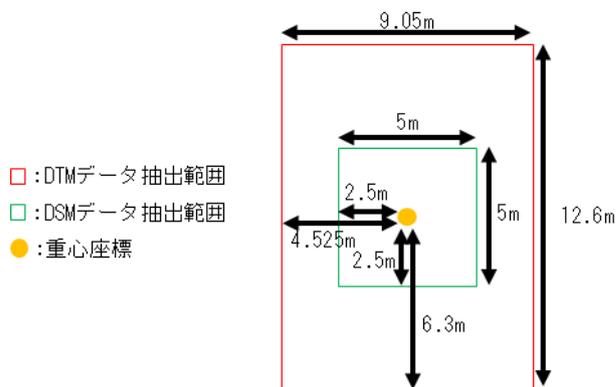


図 2-4 抽出する範囲

2.4 正射影画像の作成

GIS データより正射影画像の作成手法を提案した。作成手順は解析したい建物（以降、対象建物と称す）を 1 件選択し、その対象建物の周辺環境となる正射影画像として作成するための手順を説明した。

2.4.1 対象建物の選択

正射影画像を作成するために、対象建物の重心座標を特定する必要がある。盤地図情報ビューアを用いることで基盤地図情報よりダウンロードした数値標高モデル、基本項目を取り込み地図画像として表示できる。対象建物を地図上で確認し、マウスカーソルを移動することで、画面右下に世界測地系で平面直角座標系の座標と緯度経度が表示される。このようにして解析地点のおおよその座標を確認する。以降の計算処理は R により実施する。

R での解析ではさらに GIS より対象建物を取り出し、建物の正確な情報を得る必要がある。確認した重心座標に最も近い重心座標を持つ建物データを GIS データより抽出する。抽出した建物は一度プロットし、基盤地図情報ビューアの建物の形状と同じか確認する。図 2-5 に対象建物の選択方法を示す。

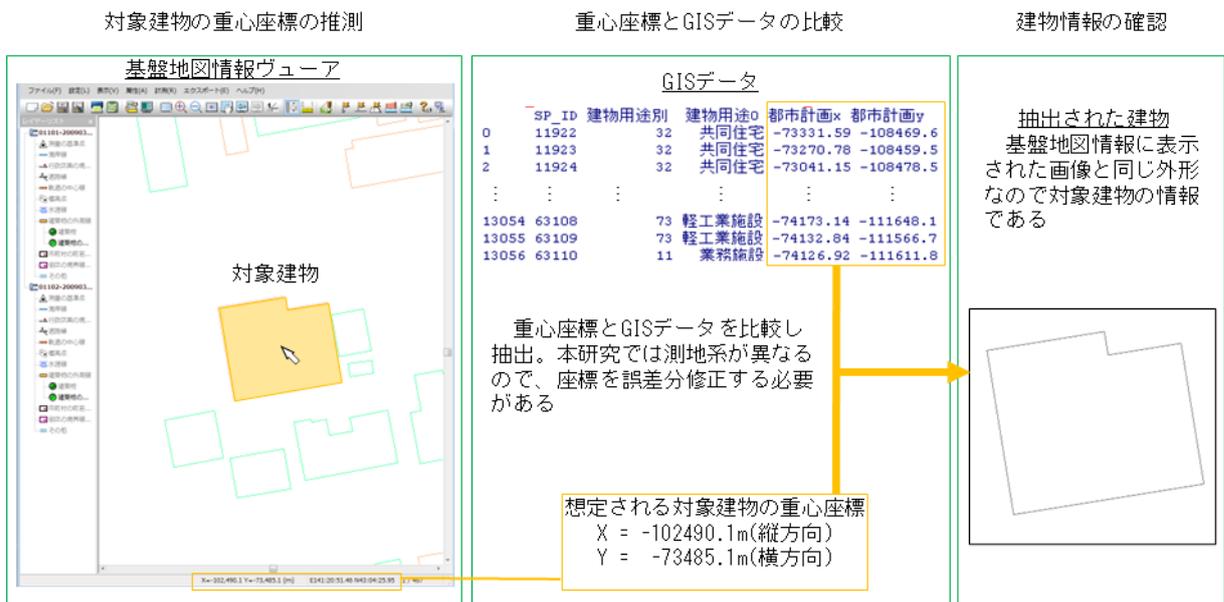


図 2-5 対象建物の選択方法

2.4.2 周辺の建物の抽出

対象建物の周辺に存在する建物（以降、周辺建物と称す）を GIS データより抽出する。抽出する範囲は対象建物の重心座標を中心とした円内に存在する建物としている。円の半径 R (以降、解析範囲と称す) が 0m 以上 200m 未満となる範囲内にある GIS データの情報を周辺建物とする。また、図 2-6 に解析範囲を示す。周辺建物と周辺地形の境目となる解析範囲は本節では 200m としているが、のちの節で適切な解析範囲を検討する。



図 2-6 対象建物の解析範囲

2.4.3 周辺建物の投影

正射影画像へ1件の周辺建物を投影するための手順は以下の通りである。

STEP 1：周辺建物の形状を把握

周辺建物の建物情報より、外形線の頂点の情報を抽出した。

STEP 2：周辺建物の座標の編集

外形線の座標は対象建物の重心座標を中心とした座標に変換した。この時、重心座標の高さはDEMデータより抽出した地表面の標高とした。周辺建物の高さはDSMデータより抽出した標高としたのちに、さらに重心座標の高さを引くことで、重心座標に対する相対的な高さとした。また、この変更により周辺建物の高さが重心座標の標高より低くなった場合は、相対的な建物の高さは0とする。

STEP 3：正射影画像上に周辺建物を射影

図2-7のような対象建物の重心座標 G を原点とした半球体が存在する座標系を想定した。半球体の底面は地表面とした。建物の頂点 N の座標を (N_x, N_y, N_z) としたとき、半球面上に投影される座標 C は以下の式2-1、2-2で示す。

$$(C_x, C_y, C_z) = k(N_x - G_x, N_y - G_y, N_z - G_z) \quad 2-1$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{(N_x - G_x)^2 + (N_y - G_y)^2 + (N_z - G_z)^2}} \quad 2-2$$

N_x ：建物の頂点座標 N の x 座標

N_y ：建物の頂点座標 N の y 座標

N_z ：建物の頂点座標 N の z 座標

G_x ：重心座標 G の x 座標

G_y ：重心座標 G の y 座標

G_z ：重心座標 G の z 座標

C_x ：半球状に投影された N の x 座標

C_y ：半球状に投影された N の y 座標

C_z ：半球状に投影された N の z 座標

C を垂直に下すことで正射影画像上の座標 P を算出した。座標 P は以下の式2-3で示す。

$$(P_x, P_y, P_z) = (C_x, C_y, 0) \quad 2-3$$

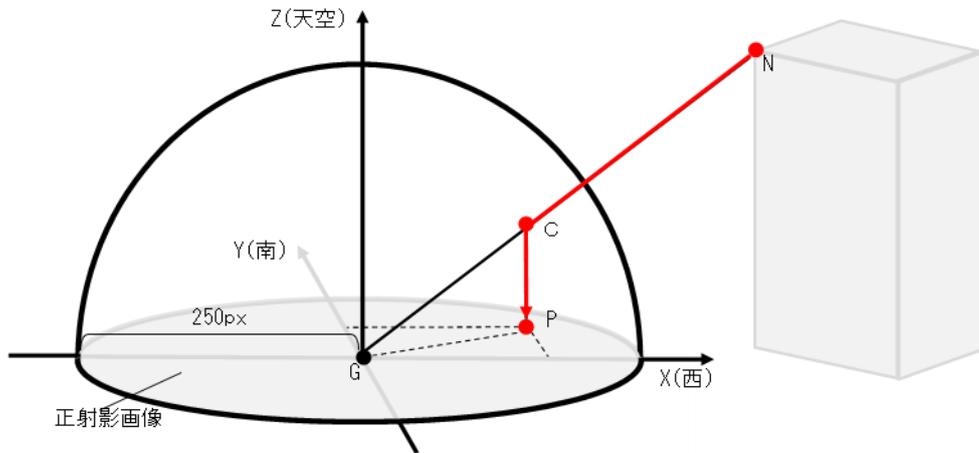


図 2-7 正射影画像作成図

式 2-1～2-3 を繰り返すことで隣接する建物の全ての点 N を正射影画像上に投影する。正投影画像に投影された複数の座標 P からなる多角形を着色することで、建物を取り込んだ正投影画像を表示できる。以上の手順を周辺建物全件に対して行うことで正射影画像上に周辺建物を表示できる。図 2-8 に正射影画像の作成工程を示す。

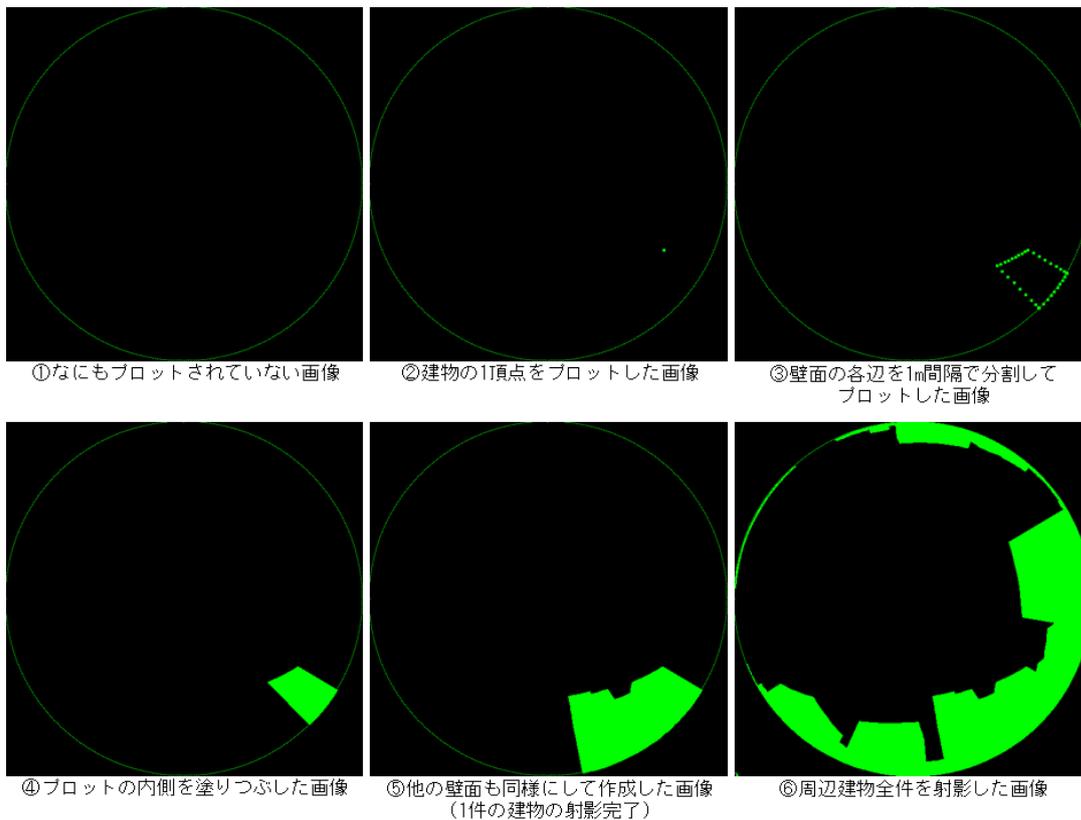


図 2-8 正射影画像の作成工程

2.5 日射データの作成

拡張アメダス気象データの直達日射量と拡散日射量を正射影画像により編集することで、場所ごとの周辺環境を加味した日射データを作成した。

2.5.1 拡張アメダス気象データ

本研究で作成される気象データは対象とする地点の周辺環境により拡張アメダス気象データを編集することで作成される[6]。気象庁から入手可能な気象データは全国の設置されている観測所より計測されており、計測結果をもとに気象災害の防止や軽減を行うシステムが地域気象観測システム(アメダス：AMeDAS)である。地域気象観測システム観測所の観測項目について表 2.1.1 に示す。気象官署の内、約 60 か所ではさらに気圧、湿度、積雪の深さ、降雪の深さ、日射量、雲、視程、大気現象等の気象観測が行われている。

温熱環境、空気環境、光環境等のシミュレーションは気象条件に大きな影響を受ける。そして、気象条件は地域ごとに特徴があるため、シミュレーションを行う場合はシミュレーション対象が存在する地域の気象データを利用する必要がある。気象データとしては測定項目が多く、精度が高い気象官署で観測されたデータを使用することが最も良いとされているが、観測所の数が全国でも 156 か所しかないため、シミュレーションで利用できる箇所が限られている。4 要素観測所で観測されたデータを使用する場合は、観測所の数が多くあるため、様々な場所でシミュレーションが可能であるが、観測の精度が低いため、データの欠落や異常な値を示す場合がある。そこで、室内外環境シミュレーションに用いる目的で開発された気象データが拡張アメダス気象データである。

拡張アメダス気象データは観測された気象データの欠落の補充、異常な値の修正、不足している気象項目の補充をすることで作成されている。基となる気象データは気象官署が近い地域は気象官署で観測されたデータを用い、それ以外の地域は 4 要素観測所で観測されたデータを用いている。シミュレーションでは対象とする地点の複数年の拡張アメダス気象データをもとに、代表的な年間気象データとして作成された標準年拡張アメダス気象データが利用される。

ただし、この気象データによるシミュレーションでは周辺環境が加味されていない。現実に即したシミュレーションをするためには周辺環境を 3D モデルで再現する必要があるが、これはポリゴン情報が増加するため、計算負荷の増加が問題となる。そこで、気象データを正射影画像により編集することで周辺環境を加味したシミュレーションを行った。

2.5.2 直達日射量の算出

法線面直達日射量が取得可能化の判定には正射影画像上の太陽位置を把握する必要がある。太陽位置の算出式は松本らが提唱した手法を利用した[7-11]。松本らは日本で太陽位置計算の精度が高いとされる海上保安庁の水路部の式をもとに、水路部の式の計算結果よりも精度が高く簡易な太陽位置計算式を考案している。以下の式 2-4~2-6 が太陽位置を求めることができる。

$$\sin h = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \quad 2-4$$

$$\sin A = \frac{\cos \delta \cdot \sin t}{\cos h} \quad 2-5$$

$$\cos A = \frac{\sin h \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cdot \cos \varphi} \quad 2-6$$

t : 計算対象とする標準時[時]

φ : 計算対象地点の経度[°]

δ : 太陽の視赤緯[°]

h : 太陽高度[°]

A : 太陽方位角[°]

φ は本研究で解析する札幌の北緯 43.06417 を入力した。太陽方位角は真南を 0 とし、西回りを正、東回りを負としている。また、式に必要な t 、 δ は以下の式 2-7~2-13 で求められる。

$$t = 15(T_m - 12) + (L - L_0) + E_t \quad 2-7$$

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{\sin \Psi \cdot \sin \varepsilon}{\sqrt{1 - \sin^2 \Psi \cdot \sin^2 \varepsilon}}\right) \quad 2-8$$

$$E_t = \left\{ \sum_{i=17}^{18} P_i \cdot \cos(Q_i \cdot T + R_i) - 0^\circ.0057 \right\} \cos \varepsilon + \tan^{-1}\left(\frac{\tan \alpha'_m - \tan \Psi \cdot \cos \varepsilon}{1 + \tan \alpha'_m \cdot \tan \Psi \cdot \cos \varepsilon}\right) \quad 2-9$$

$$\Psi = \sum_{i=1}^{18(i \neq 16)} P_i \cdot \cos(Q_i \cdot T + R_i) + P_{16} \cdot T \cdot \cos(Q_{16} \cdot T + R_{16}) \quad 2-10$$

$$\begin{aligned} \varepsilon = & -23^\circ 26' 21'' .448 + 46'' .8150 \cdot T + 0'' .00059 \cdot T^2 - 0'' .001813 \cdot T^3 \\ & - 0^\circ .00256 \cos(1.934^\circ \cdot T + 235^\circ) \\ & - 0^\circ .00015 \cos(72.002^\circ \cdot T + 201^\circ) \end{aligned} \quad 2-11$$

$$\begin{aligned} \alpha'_m = & 15^\circ (18^h 41^m 50^s .54841 + 8,40184^s .812866 \cdot T + 0^s .093104 \cdot T^2 \\ & - 0^s .0000062 \cdot T^3) \end{aligned} \quad 2-12$$

$$T = \frac{JD_{TCG} - 2451545.0}{36525} \quad 2-13$$

T_m : 計算対象とする標準時[時]

L : 標準時を代表する地点の経度[°]

L_0 : 計算対象地点の経度[°]

日射データの作成手法の提案

E_t : 計算対象時の均時差[°]

P : E_t 、 Ψ を求めるときの係数[-]

Q : E_t 、 Ψ を求めるときの係数[-]

Q : E_t 、 Ψ を求めるときの係数[-]

Ψ : 太陽の視黄経[°]

ε : 真黄道傾斜角[°]

α'_m : 平均太陽の赤経[°]

T : ユリウス世紀数[-]

JD_{TCG} : 地心座標時 TCG に対するユリウス日[-]

L_0 、 L は東経を正としており、 L_0 は日本の標準時である明石の経度である東経 135°を入力する。また、本研究の解析地点は札幌市を対象とする事例のみなので、 L を札幌市の経度である 141.34694°とした。 T_m は計測時間を入力した。 Q 、 R 、 T は Ψ 、 E_t を求めるとき係数であるが、 i によって値が変化する。本研究では MetDS (株) 気象データシステムによって公開された資料に記載の係数を参照した[12]。 T のユリウス世紀であり、地心座標時 TCG から求めることができる。地心座標時は計算対象の時刻より以下の式 2-14~2-16 で求められる。

$$T_u = \frac{JD_u - 2451545.0}{3652} \quad 2-14$$

(1) 1971 年 1 月 1 日 ~ 2010 年 12 月 31 日 のとき

$$\Delta T_1 = \frac{80^s \cdot 84308}{1 + 0.2605601 \cdot \exp(-4.423790T_u)} - 0^s \cdot 311$$

(2) 2011 年 1 月 1 日以降

$$\Delta T_1 = \frac{35^s \cdot 88950}{1 + 0.1494554 \cdot \exp(-9.796888T_u)} - 32^s \cdot 184 + \frac{86400^s}{6.969290134 \cdot 10^{10}} (36525 \cdot T_u + 8611.9996275) \quad 2-15$$

$$TCG = JST - 9^h + \frac{\Delta T_1}{3600} \quad 2-16$$

T_u : J2000.0 を元期とするユリウス世紀数[-]

JD_u : 世界時のユリウス世紀日[-]

ΔT_1 : 時差補正值[-]

TCG : 地心座標時[時]

JST : 計算対象時刻[時]

ユリウス日とは BC4713 年 1 月 1 日の正午から数えた通し日数のことである。計算した年月日までの通し日数に直前の正午からの経過時間を小数点として追加することで求めることができる。 JD_u を求めるときは世界時を用い、 JD_{TCG} を求めるときは TCG を用いる。

日本の場合、誤差を考慮して計算対象時刻から 9 時間引いた値を世界時とした。

式 2-4～2-16 の式により正射影画像に投射する太陽位置を算出した。図 2-7 のような対象建物の重心座標 G を原点とした半球体を想定した。図 2-9 に太陽位置挿入の概念図を示す。半球体の x を東西軸、 y を南北軸、 z を標高とすると、半球体面上に存在する太陽の座標 C_{sun} 、および正射影画像に投影された太陽の座標 P_{sun} は式 2-17、2-18 で示される。

$$C_{sun} = (\cos h \cdot \sin A, \cos h \cdot \cos A, \sin h) \quad 2-17$$

$$P_{sun} = (\cos h \cdot \sin A, \cos h \cdot \cos A, 0) \quad 2-18$$

C_{sun} : 半球面上の太陽の座標

P_{sun} : 正射影画像上の太陽の座標

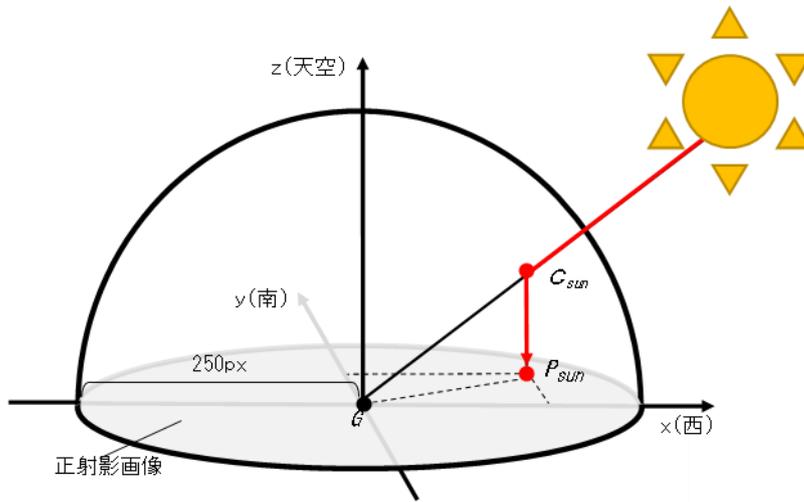


図 2-9 太陽位置挿入の概念図

図 2-10 に太陽を挿入した正射影画像を示す。 C_{sun} の z 座標が 0 以下の時は太陽高度が 0 以下の時である。つまり、夜間の時間帯であるため、正射影画像上には太陽が表示されないようにし、その時間帯の法線面直達日射量は得られないと判断した。求めた正射影画像上の太陽が天空（黒色のエリア）であれば、その時間帯の法線面直達日射量が得られると判断した。

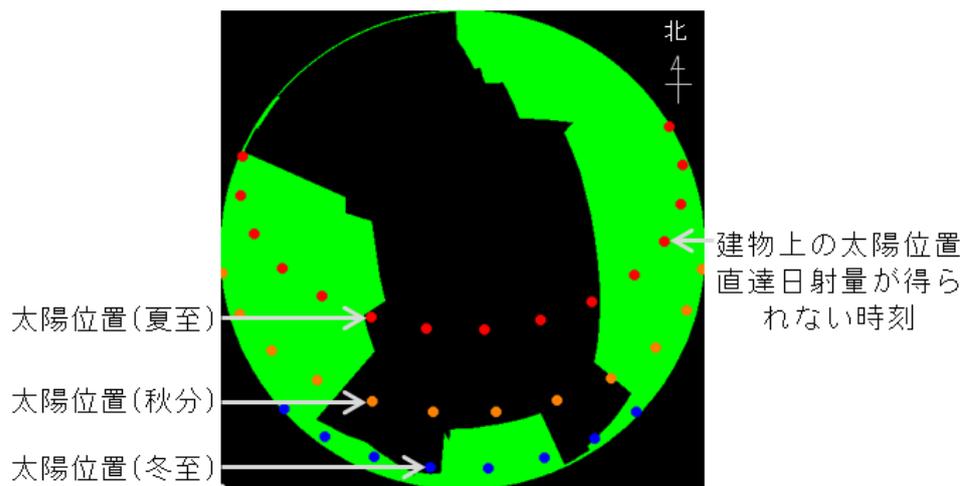


図 2-10 太陽位置の挿入した正射影画像

水平面直達日射量を求める場合は太陽高度より以下の式 2-19 で求めた。

$$I_{dire} = I_{dire-norm} \cdot \sin h \quad 2-19$$

I_{dire} : 水平面直達日射量[W/m²]

$I_{dire-norm}$: 法線面直達日射量[W/m²]

2.5.3 拡散日射量の算出

取得可能な水平面拡散日射量の算出には対象建物の天空率が必要である。天空率とは正射影画像における天空の割合であるため、以下の式 2-20 で示される。

$$SVF = \frac{N_{sky}}{N_{all}} \quad 2-20$$

SVF : 天空率[-]

N_{sky} : 天空部分のピクセル数[px]

N_{all} : 正射影画像全体のピクセル数[px]

図 2-11 に N_{sky} と N_{all} の範囲を示す。正射影画像の場合、円内が N_{all} 、円内の黒色の天空部分が N_{sky} となる。

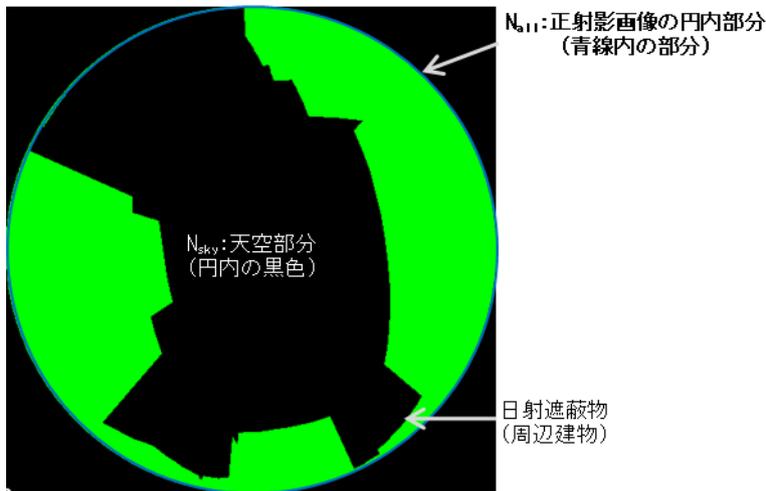


図 2-11 N_{all} と N_{sky} の範囲

水平面拡散日射量は天空率と乗じることで算出した。以下に水平面拡散日射量を算出する式 2-21 を示す。

$$I_{diff} = I'_{diff} \cdot SVF \quad 2-21$$

I_{diff} : 拡散日射量[W/m²]

I'_{diff} : 気象データの拡散日射量[W/m²]

2.5.2 節、2.5.3 節で求めた直達日射量と拡散日射量より全天日射量を算出した。以下に全天日射量を算出する式 2-22 を示す。

$$I_{glob} = I_{dire} + I_{diff} \quad 2-22$$

I_{glob} : 全天日射量[W/m²]

2.6 手法の精度確認

本節では作成した手法の解析範囲の検討と整合性の確認を行った。図 2-12 に解析の対象であるエリア A~C と周辺の建物を示す。また、表 2-2 と表 2-3 に図 2-12 の全体図に表示されているすべての建物の用途と階数を示す。解析の対象とする建物は札幌市に存在するエリア A~C 内に存在する建物とした。ただし、エリア A~C の建物の内、母屋以外の建物（倉庫、車庫、物置、その他）は解析の対象外とし、図 2-12 にグレーで表示した。周辺建物は 3 街区と街区を中心として約 600m 以内の建物とした。周辺建物の中、地上階の階数が判明しない建物は取り除いた。対象とする街区は公園や駐車場といった建物が存在しない空間や逆に建物が密集している空間もある。周辺建物の特徴は住宅・共同住宅が多いため、低層(1~3 階)の建物が全件の中で最も多くなっているが、中層(4~6 階)や高層(7 階以上)の建物も対象街区の周辺に散見している。以上より、対象街区内の各建物に入射する日射量は大きくばらつきがあると考えられる。



図 2-12 解析範囲

表 2-2 解析範囲内に存在する建物の用途と件数

建物用途	件数
運輸・倉庫施設	39
共同住宅	618
文教厚生施設	150
業務施設	183
商業施設	71
宿泊施設	18
作業所併用住宅	50
店舗併用住宅	95
住宅	418
軽工業施設	6
サービス工業施設	6
官公庁施設	10
その他の施設	10
遊技施設	2
家内工業施設	1
合計	1677

表 2-3 解析範囲内に存在する建物の高さと件数

階数	1階	2階	3階	4階	5階	6階	7階	8階	9階	10階
件数	155	676	323	148	73	44	29	48	30	57
階数	11階	12階	13階	14階	15階	16階	18階	20階	40階	合計
件数	37	4	12	13	22	1	1	3	1	1677

2.6.1 解析範囲の決定

正射影画像は周辺建物を抽出する解析範囲が広いほど、周辺環境の高い精度で再現できる。一方で、周辺建物が多すぎると計算負荷が高くなってしまう。そのため、適切な解析範囲を設定するために、解析範囲を 50m から 400m まで 50m ごとに正射影画像を作成のち、取得可能な日射量の変化が微小になる距離を確認した。解析距離別の正射影画像を図 2-13 に示す。

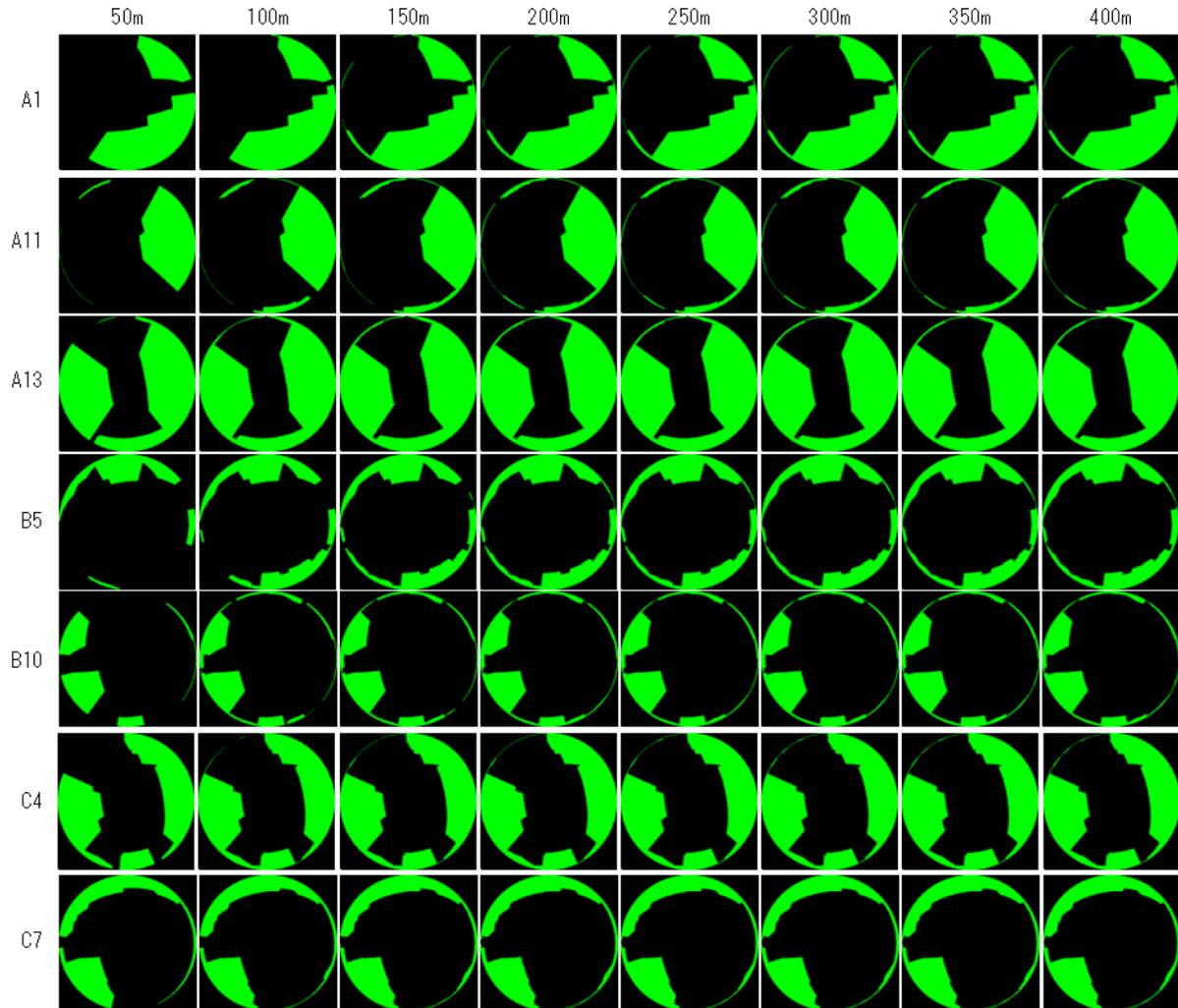


図 2-13 解析範囲の距離別天空率

日射データの作成手法の提案

作成した正射影画像より日射量を算出し、縦軸は解析範囲が最も広い 400m の場合の日射量に対する各解析範囲の日射量の差より誤差の検討を行った。図 2-14 に算出結果を示す。縦軸は解析範囲が最も広い 400m の場合に算出される年積算日射量と横軸に示した解析範囲の場合に算出される年積算日射量の差を絶対値で示している。図内の線は 1 本ごとに 1 地点の差を示している。また、各解析範囲の差の最大値を図中に示す。

図 2-14 より解析範囲が 50m の場合、取得日射量の差は対象建物ごとに異なり、最大で 472 kWh/m² となった。しかし、解析範囲が 100m になると取得日射量の差は 19 kWh/m² まで抑制され、解析範囲が 200m 以上になる場合、日射量の差は 3kWh/m² となり、350m まで一定となった。

以上より、対象建物の解析範囲が近距離である場合、シミュレーション対象の周辺環境によっては取得日射量に大きな誤差が生じるが、200m より伸長する取得日射量に誤差がほとんど抑えられると考えられる。そのため、札幌市を対象にしたエリアでは解析範囲を 200m に設定することで取得日射量の誤差を抑制した正確な日射量が算出されると考えられる。本研究では以降の計算において、対象建物の解析範囲を 200m とする。今回の検討は札幌市を対象として行っているため、今後は他地域の解析範囲を検証する必要がある。

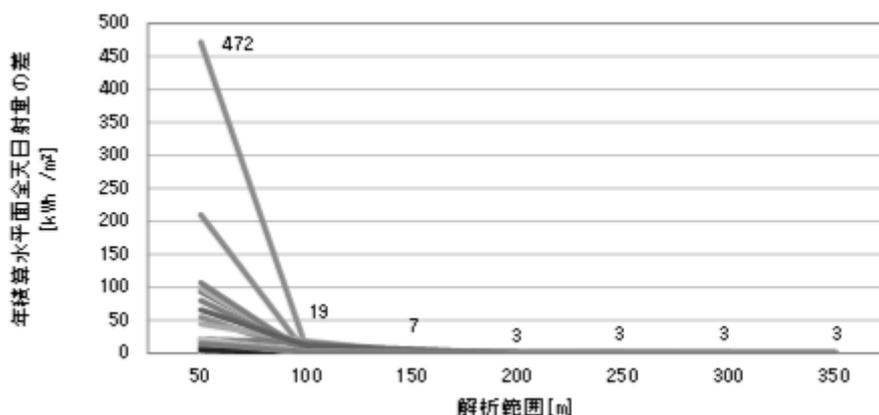


図 2-14 解析範囲毎の年積算水平面全天日射量の差 (各半径 R-半径 R : 400)

2.6.2 手法の精度検証

作成したデータの精度を検証するために、EnergyPlusを用いて解析範囲200m以内の周辺建物の形状を3Dモデルで再現し、水平面全天日射量を算出した。建物の重心座標（高さは地表面）に測定位置を設置して時刻ごとの日射量を求め、本手法を用いて得られた時刻毎日射量との比較を行った。手法により算出したデータをデータ A、EnergyPlusより算出された結果をデータ B とする。図 2-15 に作成したモデルの例を示す。図 2-16 にデータ A とデータ B の時刻毎水平面全天日射量の相関性を示す。図内の赤線はデータ A とデータ B の 1 時間に得られる水平面全天日射量が同値であるときにプロットされる座標を示しており、プロットされた点が赤線に近いほど 2 種のデータ間の誤差が小さいと考えられる。表 2.6.2 に各対象建物の計算結果として天空率、時間最大日射量(RMSE、データ A、データ B)、年積算日射量(データ間の差の絶対値、データ A、データ B)、算出データに対する誤差の割合を示す。RMSE とは精度評価指標の 1 つであり、以下の式 2-23 で示される。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (I_A(t) - I_B(t))^2} \quad 2-23$$

RMSE：精度評価指標[-]

n：データ数[-]

$I_A(t)$ ：データ A の時刻毎水平面全天日射量[Wh/m²]

$I_B(t)$ ：データ B の時刻毎水平面全天日射量[Wh/m²]

図 2-16 よりプロットされた値はおおよそ赤線に沿っていることから、2 種のデータ間に相関性があることが予想される。表 2-4 の RMSE に注目すると最も大きい値は B6 の 63.082Wh/m² となった。また、B6 の 2 種のデータの時刻毎最大水平面全天日射量はデータ A が 794.058 Wh/m²、データ B が 868.768 Wh/m² となり、この値に対する RMSE の値はデータ A が約 8%、データ B が約 7%であることが示された。年積算水平面全天日射量の誤差に注目すると最も大きな値は A17 の 0.053 MWh/m² となった。また、A17 の年積算水平面全天日射量はデータ A が 0.865 MWh/m²、データ B が 0.918 MWh/m² となり、この値に対する誤差の割合はデータ A、B とともに約 6%であることが示された。

以上の事から 2 種のデータ間の誤差は非常に小さいと考えられる。また、それぞれの解析に要した時間を測定した結果、EnergyPlusが30分を要することに対し、本手法では1/120の15秒となった。つまり、1%以下で計算処理が可能である。このことから、多くの計算パターンが必要な場合、本手法の利用が有効である。

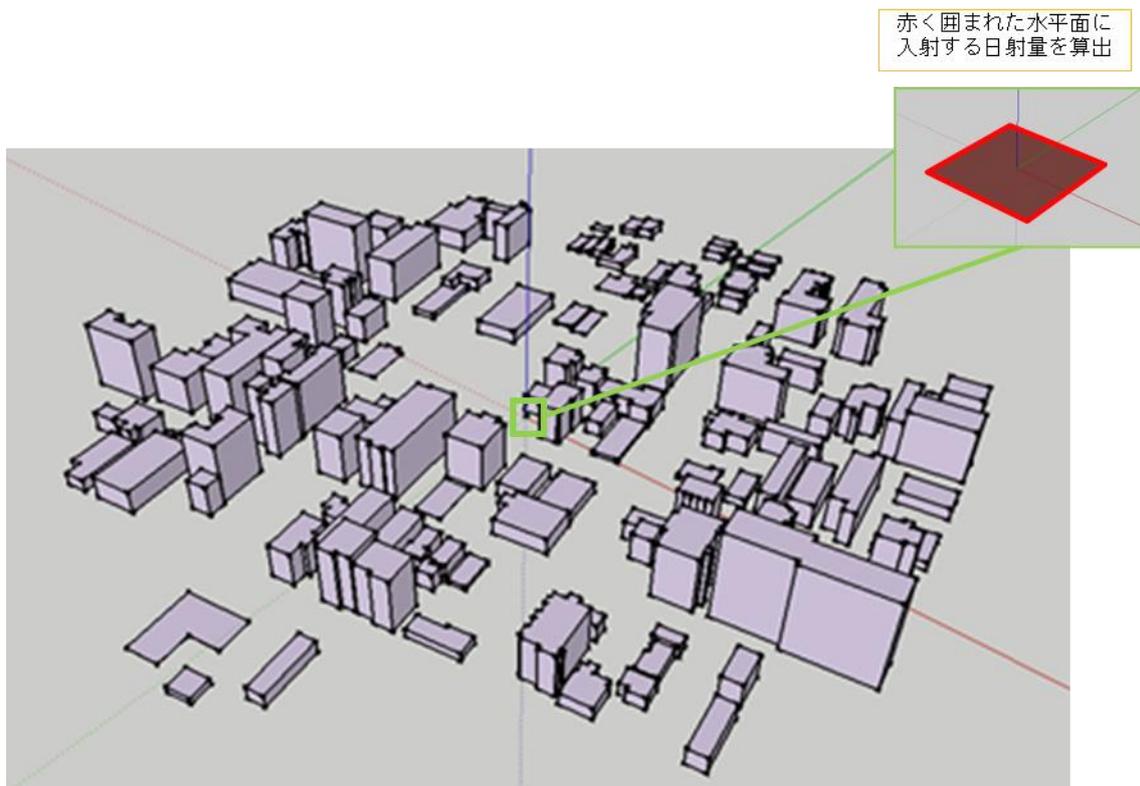


図 2-15 作成したモデルの俯瞰図

日射データの作成手法の提案

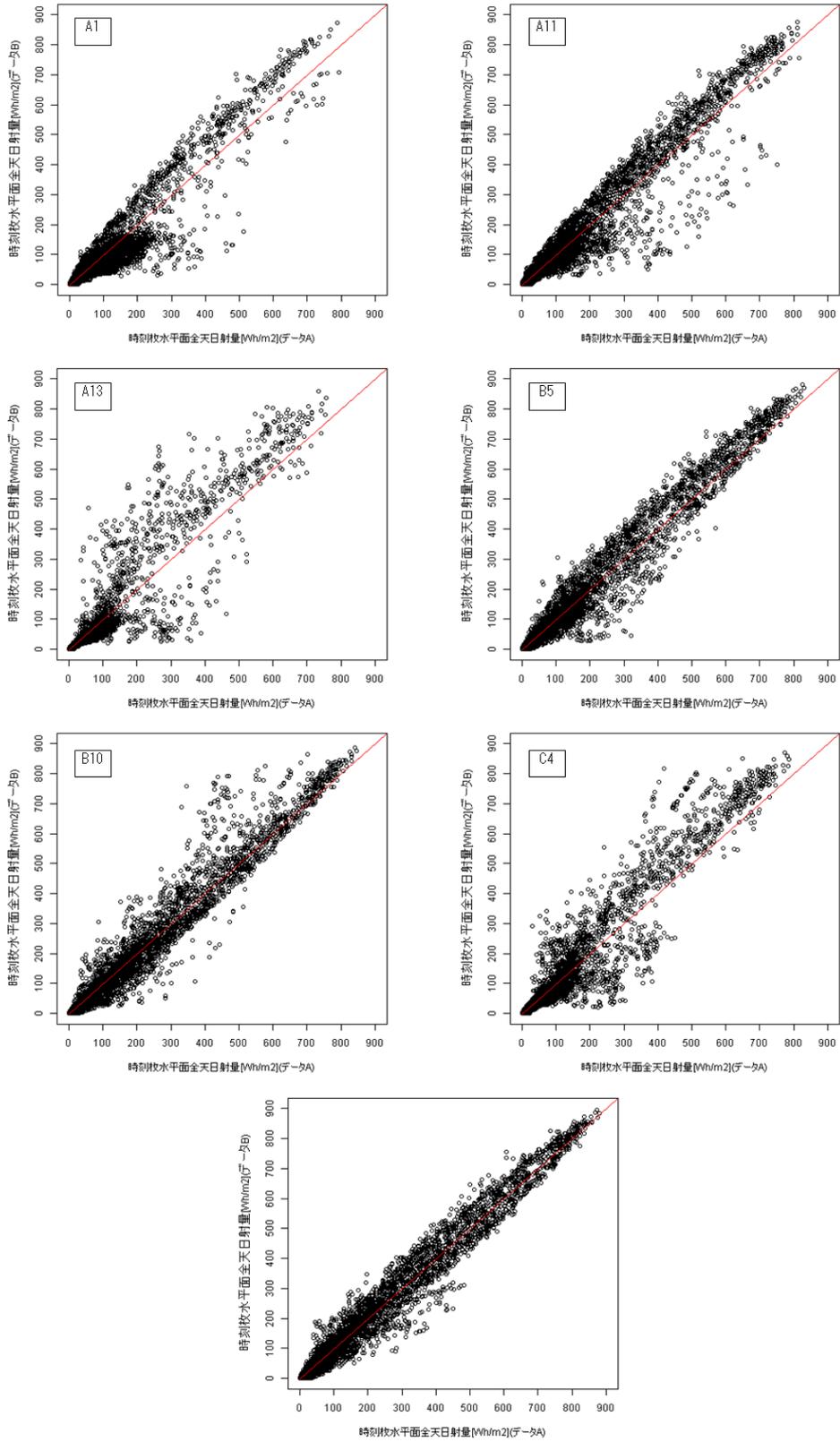


図 2-16 データ A とデータ B の時刻毎水平面全日射量の相関性

表 2-4 各対象建物の計算結果

地点名	天空率[-]	時刻毎最大水平面全天日射量 [W/m2]					年積算水平面全天日射量 [MJ/m2]				
		RMSE	データ A	データ B	データ A	データ B	誤差	データ A	データ B	データ A	データ B
A1	0.602	50.612	794.309	871.788	6.372	5.806	0.036	0.558	0.522	6.419	6.860
A2	0.559	55.025	786.977	869.381	6.992	6.329	0.051	0.759	0.809	6.678	6.260
A3	0.482	57.288	770.884	862.242	7.432	6.644	0.020	0.478	0.458	4.266	4.456
A4	0.730	55.031	826.715	880.081	6.657	6.253	0.015	0.777	0.762	1.948	1.987
A5	0.709	49.028	821.595	880.874	5.967	5.566	0.017	0.788	0.805	2.094	2.051
A6	0.576	52.964	790.005	868.146	6.704	6.101	0.013	0.603	0.590	2.219	2.269
A7	0.469	58.944	771.003	862.899	7.645	6.831	0.001	0.481	0.479	0.304	0.305
A8	0.572	56.492	789.235	870.209	7.158	6.492	0.024	0.653	0.677	3.697	3.566
A9	0.498	58.295	776.034	863.543	7.512	6.751	0.038	0.632	0.670	6.076	5.728
A10	0.874	43.373	863.364	890.933	5.024	4.868	0.013	1.027	1.040	1.281	1.265
A11	0.689	56.847	816.567	877.285	6.962	6.480	0.005	0.818	0.823	0.670	0.665
A12	0.750	57.920	831.861	883.049	6.963	6.559	0.024	0.858	0.882	2.780	2.704
A13	0.391	59.766	757.065	857.833	7.894	6.967	0.016	0.416	0.433	3.929	3.781
A14	0.604	55.310	795.107	873.790	6.956	6.330	0.041	0.686	0.728	6.035	5.692
A15	0.690	50.536	816.702	876.170	6.188	5.768	0.014	0.728	0.714	1.960	1.999
A16	0.778	45.403	838.867	883.875	5.412	5.137	0.029	0.950	0.979	3.066	2.975
A17	0.627	46.305	800.786	872.219	5.782	5.309	0.053	0.865	0.918	6.078	5.729
B1	0.789	46.577	841.855	885.123	5.533	5.262	0.026	0.961	0.987	2.710	2.639
B2	0.688	49.491	816.236	876.734	6.063	5.645	0.014	0.797	0.811	1.764	1.733
B3	0.819	48.905	849.326	887.537	5.758	5.510	0.020	0.927	0.947	2.147	2.102
B4	0.704	46.414	820.207	876.999	5.659	5.292	0.005	0.810	0.814	0.568	0.565
B5	0.750	45.446	832.006	882.534	5.462	5.150	0.027	0.896	0.922	2.969	2.884
B6	0.599	63.082	794.058	868.768	7.944	7.261	0.000	0.649	0.648	0.059	0.059
B7	0.704	46.945	820.343	878.280	5.723	5.345	0.041	0.899	0.940	4.551	4.352
B8	0.735	55.544	828.052	879.067	6.708	6.318	0.028	0.763	0.735	3.704	3.847
B9	0.648	58.096	805.967	876.839	7.208	6.626	0.003	0.626	0.623	0.423	0.424
B10	0.806	50.064	846.042	886.433	5.917	5.648	0.015	0.927	0.943	1.626	1.600
B11	0.843	46.927	855.439	888.601	5.486	5.281	0.027	0.967	0.994	2.793	2.717
B12	0.830	44.035	852.142	886.389	5.168	4.968	0.012	0.977	0.989	1.272	1.256
B13	0.700	55.386	819.292	879.448	6.760	6.298	0.041	0.854	0.894	4.761	4.544
C1	0.611	54.539	796.672	872.927	6.846	6.248	0.044	0.781	0.825	5.694	5.387
C2	0.627	52.396	800.830	873.501	6.543	5.998	0.003	0.655	0.659	0.505	0.503
C3	0.771	52.765	837.244	884.878	6.302	5.963	0.022	0.884	0.906	2.545	2.482
C4	0.549	60.530	785.159	869.755	7.709	6.959	0.036	0.614	0.650	5.781	5.465
C5	0.789	50.849	841.841	887.148	6.040	5.732	0.052	0.949	1.001	5.532	5.242
C6	0.830	46.560	852.228	888.377	5.463	5.241	0.030	0.990	1.020	3.007	2.919
C7	0.732	53.733	827.336	882.528	6.495	6.089	0.039	0.864	0.903	4.539	4.342
C8	0.811	45.525	847.338	886.248	5.373	5.137	0.033	0.980	1.013	3.371	3.261
C9	0.908	48.220	871.963	892.468	5.530	5.403	0.007	1.050	1.056	0.629	0.625
C10	0.910	47.327	872.381	891.664	5.425	5.308	0.007	1.048	1.041	0.631	0.635
C11	0.939	40.486	879.704	895.387	4.602	4.522	0.009	1.100	1.109	0.814	0.808
C12	0.920	44.041	874.992	892.751	5.033	4.933	0.003	1.070	1.067	0.282	0.282
最大値	0.939	63.082	879.704	895.387	7.944	7.261	0.053	1.100	1.109	6.678	6.860
最小値	0.391	40.486	757.065	857.833	4.602	4.522	0.000	0.416	0.433	0.059	0.059

2.6.3 周辺環境の影響

本手法を用いて、2.3.7 節で説明したデータ範囲内に存在する 97827 件の建物の年積算水平面全天日射量を算出した。図 2-17 に年積算水平面全天日射量の取得量が少ない順に建物を並べた持続曲線を示す。また、図内に天空率が 1 になる建物が取得可能な年積算水平面全天日射量を赤線で示す。

天空率が 1 の敷地で得られる年積算水平面全天日射量は 1.16 MWh/m^2 である。この値に対して誤差として許容する値は 10 %以内とした時、許容誤差以内の年積算水平面全天日射量を得られる敷地は対象エリア内の全敷地の内、約 56 %である。ことより許容誤差以外となる敷地は約 44 %存在することが示された。このことから、解析対象エリアに存在する敷地の約 4 割で標準気象データを用いた解析結果が許容誤差以上になることが示された。また、対象エリア内の敷地で得られる水平面全天日射量の最小値は 0.08 MWh/m^2 である。これより、天空率が 1 の敷地で得られる水平面全天日射量に対し、敷地によっては最大で 1.08 MWh/m^2 の誤差が生じる。

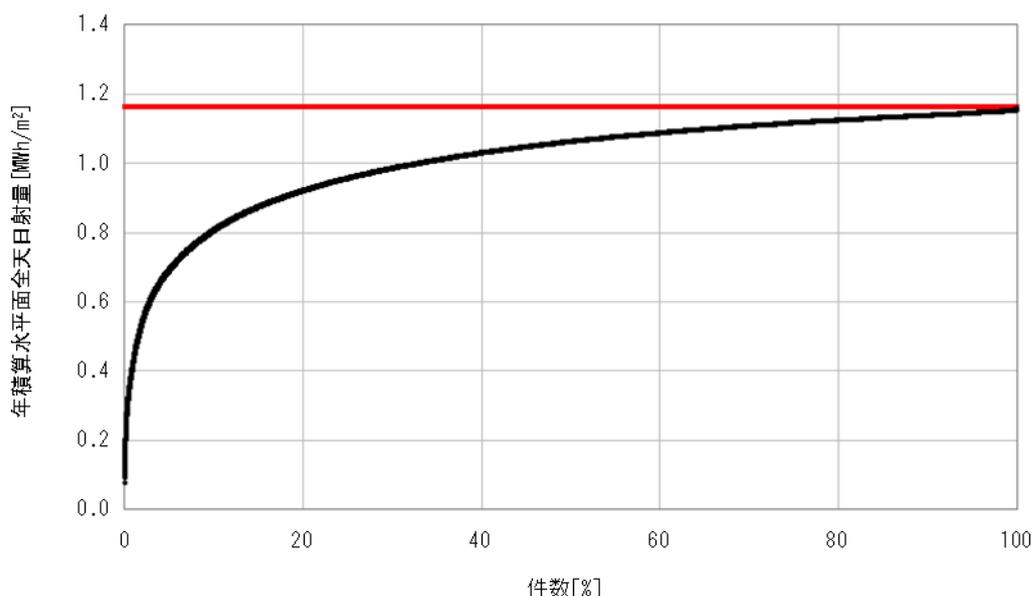


図 2-17 年積算水平面全天日射量 [MWh/m²]

図 2-18~図 2-20 に日射量・地上階の階数・用途ごとの分布マップを示す。取得日射量が少ない敷地は周辺の都心部と琴似駅近くの琴似栄町通沿いに密集している。これらのエリアの地上階の階数を確認すると高層以上の建物が複数存在している。また、これらのエリアの高層建物の用途を確認すると住宅、共同住宅以外の用途の建物や商業施設が多く存在している。このことから、住宅、共同住宅以外の建物が密集しているエリアでは高層となる建物が多く存在するため、取得日射量が少なくなったと考えられる。一方、取得日射量が多い敷地は住宅、共同住宅が多く、それらの建物の多くは低層であることが確認できる。

日射データの作成手法の提案

このことから、低層住宅街では取得日射量が多くなることが示された。

以上より取得可能な日射量は敷地の周辺環境によって大きく変化することが確認できた。そのため、カーボンニュートラルを達成するために日射利用を検討する場合、周辺環境を考慮した計画が必要である。

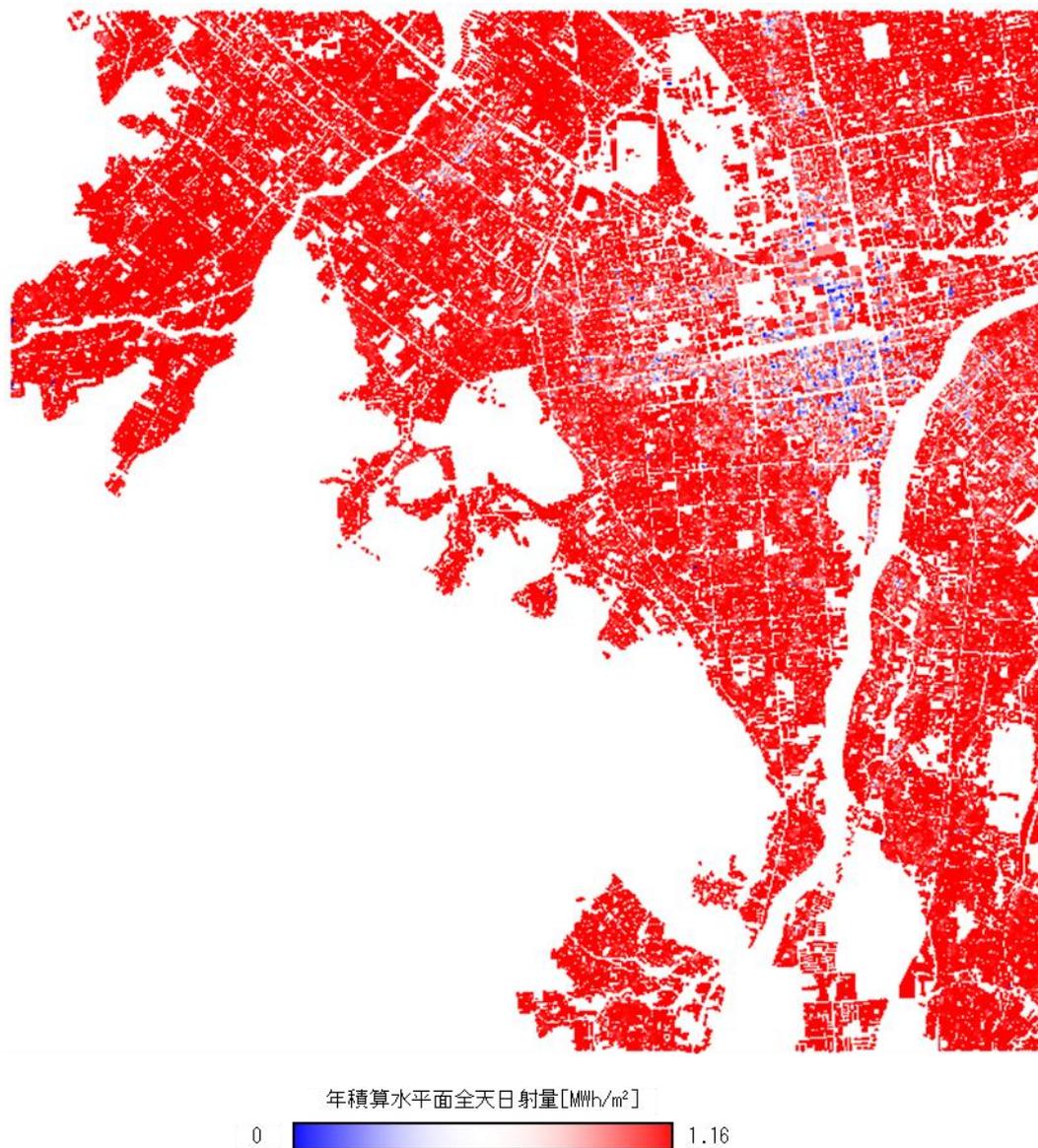


図 2-18 年積算水平面全天日射量の分布図

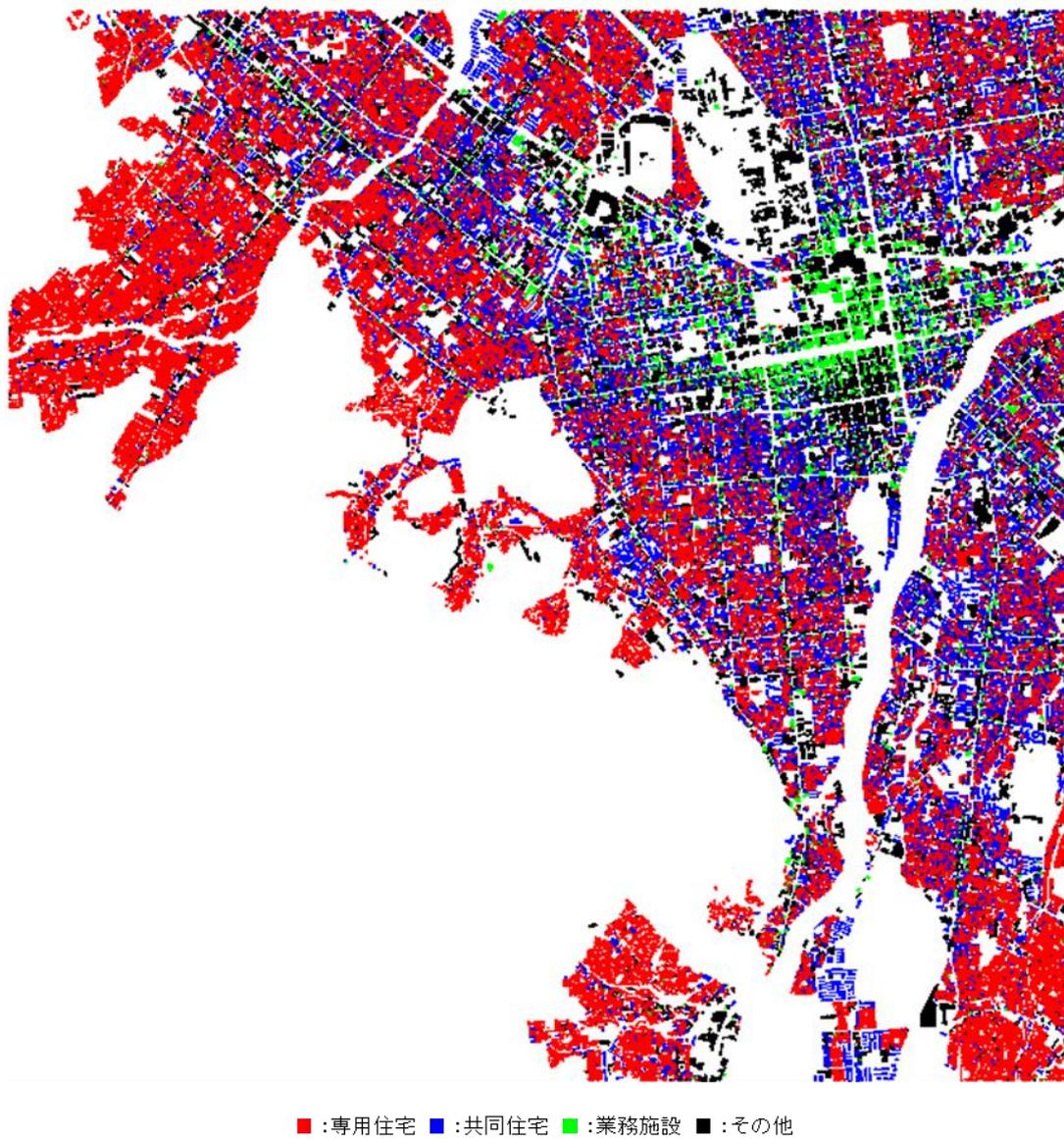
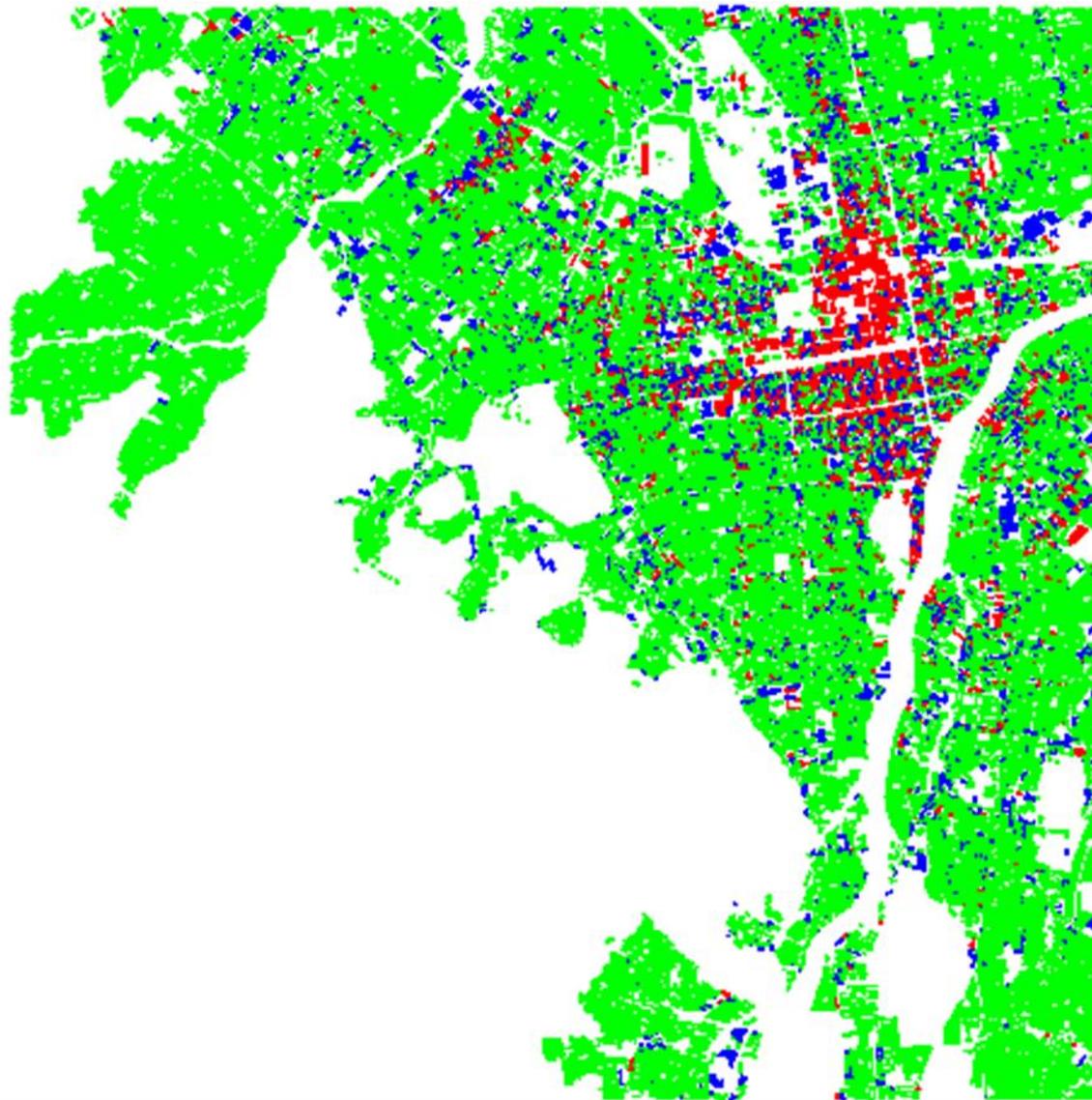


図 2-19 建物用途の分布図



■ :建物高さ19m以上 ■ :建物高さ10m以上19m未満 ■ :建物高さ10m未満

図 2-20 建物高さの分布図

2.7 まとめ

本章では周辺環境を加味した日射量データを作成するための手法を提案した。以下に成果を示す。

- (1) オープンソースの GIS データを用いることで、周辺環境を再現した正射影画像を作成した。この正射影画像により、時間ごとに直達日射量の取得の有無を判断できるようになった。また、正射影画像より算出できる天空率により、その場所で得られる拡散日射量を算出した。
- (2) 算出した日射量の精度を検証するため、EnergyPlus で周辺建物を再現して実際に取得できる日射量を比較した結果、日射量の誤差は小さい値を示した。計算速度を比較すると EnergyPlus だと 30 分要するところ、本手法であれば 15 秒程度で計算可能であった。このことから本手法は大量計算に適した手法であると示した。

2 章 参考文献

- [1] R: The R Project for Statistical Computing Available online: <https://www.r-project.org/?adlt=strict&toWww=1&redig=003305AA01C54F5999C5E2D44F67553C> (accessed on 21 December 2022).
- [2] EnergyPlus Available online: <https://energyplus.net/?adlt=strict&toWww=1&redig=D44D2187730E4FB0B65986DC894AE58A> (accessed on 21 December 2022).
- [3] 国土交通省 国土地理院 基盤地図情報サイト Available online: <https://www.gsi.go.jp/kiban/index.html?adlt=strict&toWww=1&redig=F176BCDBB9024F309ADFDB5E57F3042A> (accessed on 21 December 2022).
- [4] 国土交通省 都市交通調査・都市計画調査 Available online: <https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/kisotyousa001.html> (accessed on 21 December 2022).
- [5] NTT DATA CORPORATION and RESTEC AW3D 標準版地形データ Available online: <https://www.aw3d.jp/products/standard/> (accessed on 21 December 2022).
- [6] 国土交通省 気象庁 地域気象観測システム (アメダス) Available online: <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/kaisetsu.html> (accessed on 21 December 2022).
- [7] 松本 真一 : 太陽視赤緯と均時差計算に関する一考察, 日本建築学会東北支部研究報告集. 計画系, p89-96, 2005.
- [8] 松本 真一 : 太陽視赤緯と均時差の計算精度の検討, 日本建築学会大会 学術講演梗概集, p7-8, 2006.
- [9] 松本 真一 : 太陽視赤緯と均時差の計算法に関する補遺, 日本建築学会東北支部研究報告集. 計画系, p49-56, 2014.
- [10] 松本 真一 : 太陽視赤緯・均時差計算に関する筆者の方法の精度検証, 日本建築学会大会 学術講演梗概集, p25-26, 2014.
- [11] 松本 真一 : 海上保安庁海洋情報部の式の援用による太陽視赤緯と均時差の計算について, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, p97-100, 2019, doi:10.18948/SHASETAIKAI.2019.5.0_97.
- [12] MetDS (株) 気象データシステム 太陽位置の計算 (技術解説一般) Available online: <https://www.metds.co.jp/documents/ea/> (accessed on 21 December 2022).

第3章 ダイレクトソーラーゲインによる暖房負荷の抑制と周辺環境の関係解析

3.1 はじめに

寒冷地である北海道の新築住宅は高断熱・高气密を有しており、ダイレクトソーラーゲインを利用することでさらなる省エネルギー化が期待できる。しかし、得られる日射量は周辺環境によって変化するため、想定通りの日射量が得られなければ、かえって暖房負荷を増加させてしまうリスクがある。そこで本章ではダイレクトソーラーゲインによる暖房負荷の抑制と周辺環境の関係を解析した。

3.2 外部環境とダイレクトソーラーゲイン効果の分析

3.2.1 解析範囲

本節では北海道大学の東に存在する 572 件の建物を計算の対象とした。解析範囲は赤枠内の建物とした。建物ごとにモデリングした住宅の暖房負荷計算を行った。図 3-1 に解析対象を示す。図 3-2 に階数ごとに建物を分け、100%積み上げ棒グラフで示す。このエリアに存在する建物は 1~2 階建ての建物が全体の 41%、3~5 階建ての建物が 30%、6~9 階建ての建物が 14%、10 階建て以上の建物が 15%存在している。低層の建物(1~2 階建て)の件数が最も多いが、中層・高層の建物(3 階建て以上)も少なくない件数が存在している。また、エリア内には周辺の日射環境に大きく影響を及ぼす 40 階建ての建物も存在していることから、場所ごとに取得可能な日射量が大きく変化することが予想される。



図 3-1 解析対象

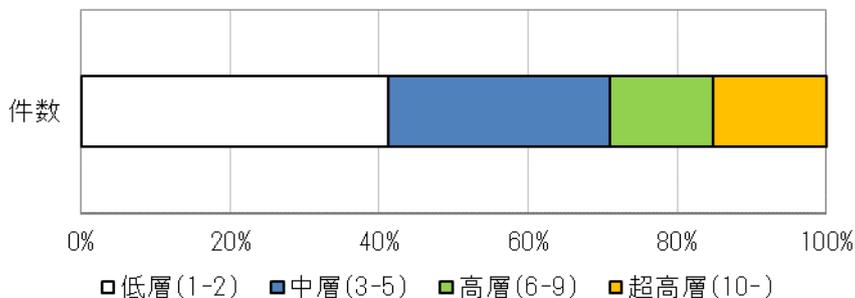


図 3-2 階数別の建物

3.2.2 日射量の算出

2.4 節、2.5 節で提案した方法により解析範囲の建物の水平面全天日射量を算出した。図 3-3 に各建物の年積算水平面全天日射量を求め、値の低い建物から順に並べた持続曲線を示す。解析範囲内で取得可能な水平面全天日射量の最大値は約 1.09 MWh/m²、最小値は約 0.20 MWh/m²を示した。また、曲線がなだらかに上昇した。解析範囲内では低層、中層、高層、超高層の建物がばらついて分布しているため、日射量に影響を及ぼす周辺環境が場所ごとに変化したためだと考えられる。

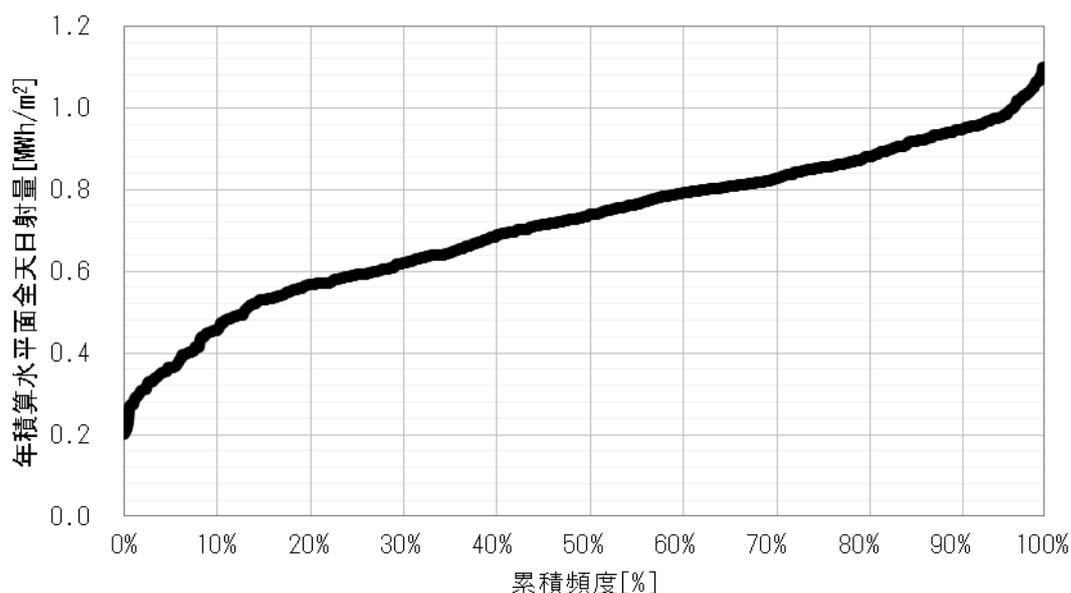


図 3-3 年積算水平面全天日射量の累積頻度分布

3.2.3 気象データの作成

計算モデルの暖房負荷は EnergyPlus により算出した。暖房負荷の計算には専用の気象データである EPW が必要である。EPW は EnergyPlus のホームページよりダウンロードでき、札幌市の気象データも存在している。ただし、ダウンロードできる EPW は周辺環境が加味しておらず、周辺環境の 3D 化が必要である。そこで EPW のフォーマットを基に、本手法で算出した日射量と計算対象の気象に合わせて周辺環境を加味した EPW を作成した。

3.2.4 計算モデル

モデルは札幌市に存在する寒冷地住宅のリビングを想定し作成した。図 3-4、図 3-5 と表 3-1～表 3-3 にモデルの概要を示す。図 3-6 に札幌市に存在する戸建てを対象として 1フロアの面積が狭い建物から順に並べた持続直線を示す。札幌市に存在する戸建ての 1フロアの面積の平均は約 60m²となった。そのため、モデルの面積は 1フロアの平均面積から諸室を引いた値として 50m²とした。また、室内に侵入する日射量の多寡は敷地の周辺環境の他に、建物の窓の断熱性能や面積の広さに影響を受けるので、窓の面積別に 3case、断熱性能別に 4case を想定し、合計 12case のモデルのシミュレーションを行った。また、夜間は窓からの直接の熱損失を緩和させるために、室内側に 0.36m²K/W の熱抵抗を加えた（断熱ブラインドを想定）。

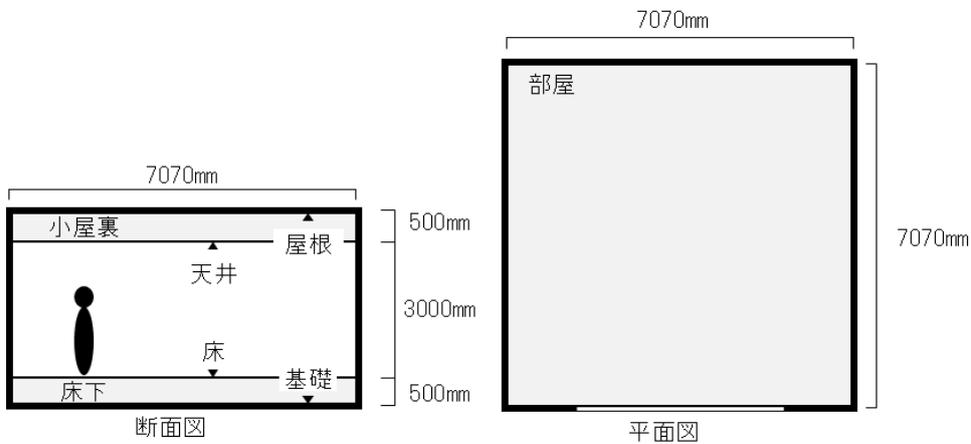


図 3-4 断面図・平面図

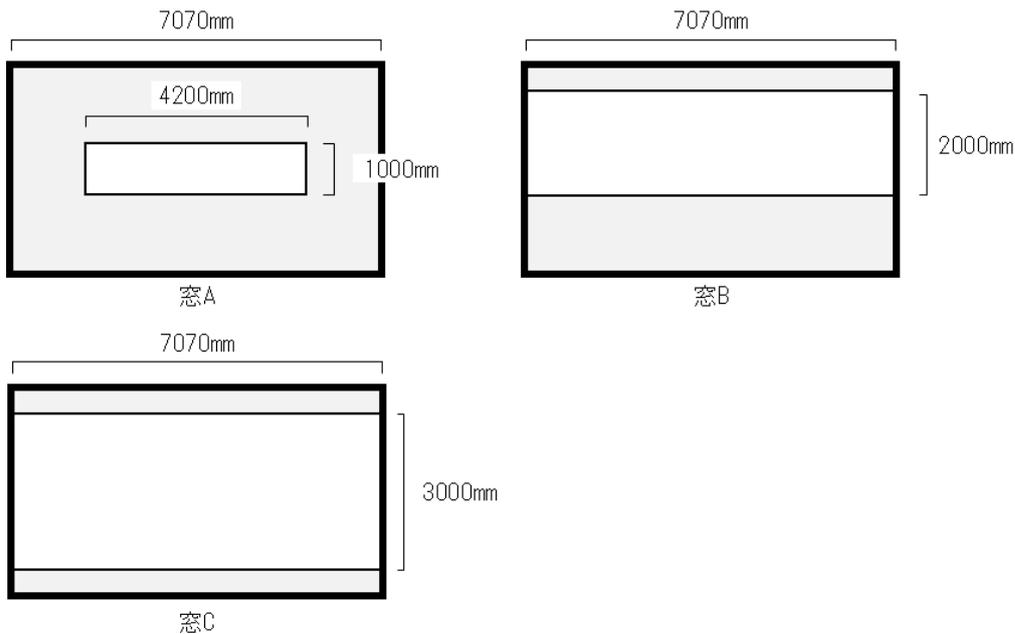


図 3-5 南側立面図（解析する窓の面積パターン）

表 3-1 部位の構成材料

部位名	材料名	熱伝導率[W/(m・K)]	厚さ[m]	熱貫流率[W/(m ² ・K)]
外壁	GW32K	0.036	0.200	0.17
	Plywood	0.129	0.020	
屋根	Plywood	0.129	0.020	3.23
天井	GW32K	0.036	0.400	0.09
	Plywood	0.129	0.200	
床	Plywood	0.129	0.020	3.23
基礎	Concrete	0.900	0.100	3.76

表 3-2 窓の構成材料

名称	構成*	厚さ[mm]	熱貫流率[W/(m ² ・K)]
FF	FL6+A6+FL6	18	3.11
EE	Low-e6+A6+Low-e6	18	1.739
EFF	Low-e6+A6+FL6+A6+FL6	30	1.79
EEF	Low-e6+A6+Low-e6+A6+FL6	30	1.521

*A：乾燥空気、FL：フロートガラス、数値は厚さ[mm]を示す。

表 3-3 シミュレーションの設定

部屋	暖房設定温度[°C]	換気回数[回/h]			内部発熱[W]		ブラインド
	小屋裏、床下	小屋裏	部屋	床下	人体発熱	機器発熱	閉
20(6:00~22:00) 15(22:00~6:00)	暖房なし	10	0.5	0	400(18:00~8:00) 100(8:00~18:00)	240(6:00~22:00) 60(0:00~24:00)	20:00~6:00

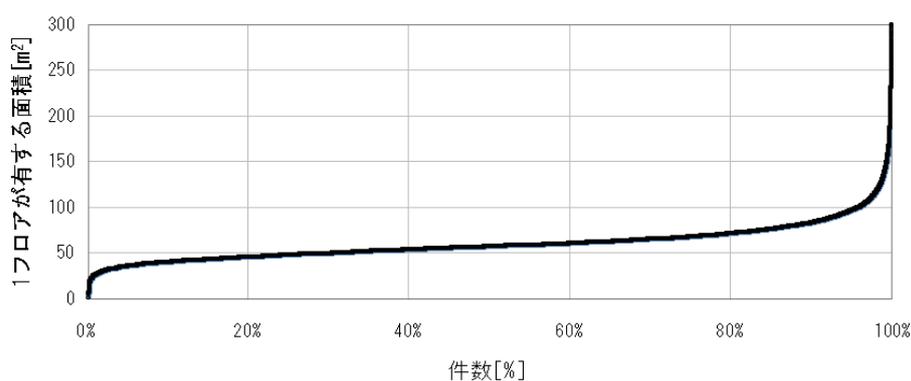


図 3-6 1フロアが有する面積(延べ面積/上下階)

3.2.5 周辺環境が異なる2地点における暖房負荷の計算

図 3-1 で示した地点 A、B で計算モデルの各部の表面温度と暖房負荷を算出した。図 3-7 に 1 月 17 日の南壁面と窓の室内側の表面温度の時系列変化を示す。凡例の名称は「部位名-窓の構成材料の名称」を示している。地点 A の天空率は 0.25 である。地点 B の天空率は 0.77 である。図 3-7 より 6:00~7:00 と 20:00~21:00 の時間帯で窓の表面温度が変化しており、EE の窓では約 10°C の温度差が発生した。これはブラインドの開閉が上記の時間帯で設定されていることから、算出された表面温度が夜間はブラインドの表面を示し、日中は窓の表面を示したことが原因と考えられる。この結果より、ブラインドと窓の表面温度の差により結露が発生する可能性があることが示された。そのため、EFF や EEF のように断熱性能を向上し、ブラインドと窓の温度差を小さくする対策が必要である。南壁面、および窓の表面温度の推移に注目すると夜間は両地点で同様の推移をしているが、日中は地点 B で南壁面が約 36°C、窓が 38°C の表面温度に達した。

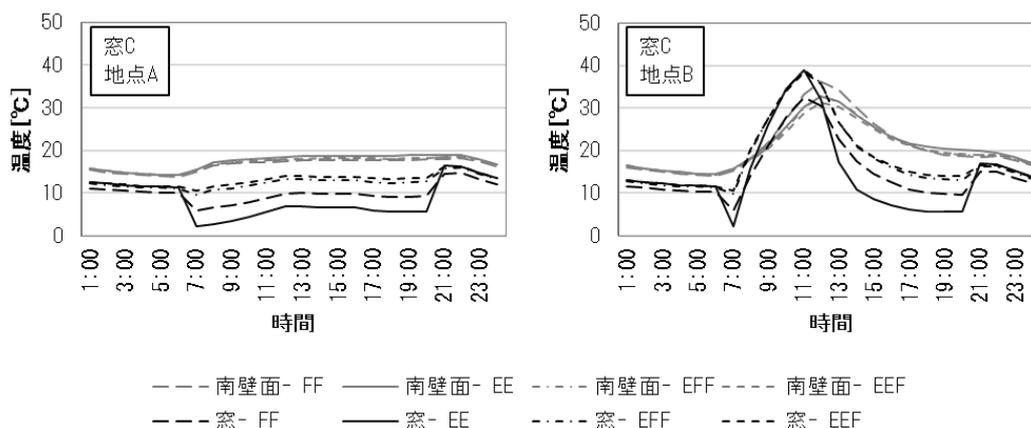


図 3-7 南壁面及び窓の室内側表面温度の時系列変化

図 3-8 に 2 地点の日積算暖房負荷を窓面積別に示す。凡例の名称は「地点-窓の構成材料の名称」を示している。図 3-8 より、地点 A では窓面積が広いモデルほど暖房負荷が増加した。これは地点 A では得られる日射量が少ないため、窓面積の拡大が暖房負荷の抑制に貢献しなかったからだと考えられる。対して、地点 B では EFF、EEF の暖房負荷が窓 A > 窓 C > 窓 B の順に多くなった。地点 B は地点 A と比較して天空率が高く、得られる日射量も多くなるため、ダイレクトソーラーゲインによる暖房負荷の抑制効果が期待できる。そのため、窓 B の窓面積であれば、暖房負荷の抑制効果が熱損失量を上回った。しかし、窓 C のような窓面積まで拡大すると建物の断熱性能の低下によって熱損失量が増加したため、日積算暖房負荷が増加したと考えられる。以上より、地点 B において、3 つの窓面積の内、窓 B が最適な窓になったことから、最も効果的に暖房負荷を抑制できる窓面積は周辺環境と窓の性能に応じて変化することが分かった。

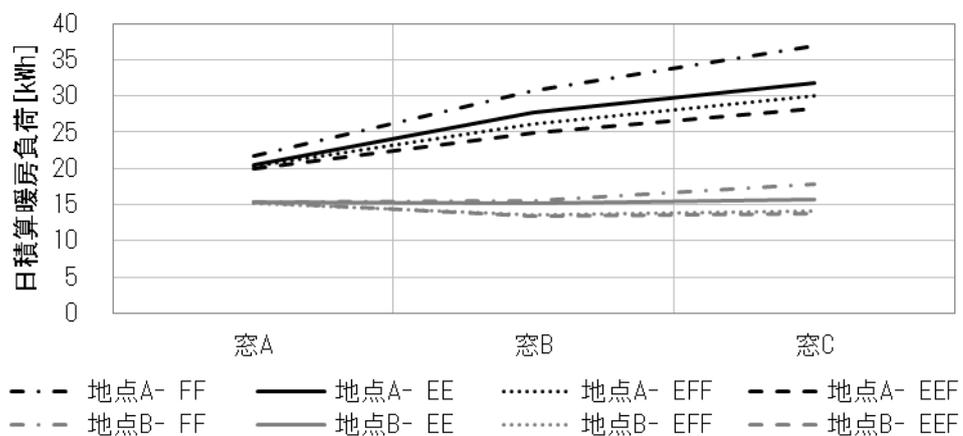


図 3-8 窓別日積算暖房負荷

3.2.6 南側天空率を用いたダイレクトソーラーゲイン効果の分析

3.2.5 節で日射量の多寡により、暖房負荷に違いが生じることが確認できた。本節では解析範囲の全建物の暖房負荷を算出し、新たに定義した南側天空率による日射量と暖房負荷への影響を解析した。

3.2.6.1 南側天空率の定義

ダイレクトソーラーゲインを有効利用するために、南面に窓を設置する住宅はより多い。そのため、天空率も南側半分だけの値のほうが暖房負荷と相関性が高いことが予想される。そこで、正射影画像の南側半分の天空率を南側天空率として定義し、日射量と暖房負荷に対する影響を解析した。

3.2.6.2 南側天空率と暖房負荷の解析

図 3-9 に窓が FF の時の暖房負荷と天空率の関係を示す。また、図 3-10 に窓の構成ごとに暖房負荷と南側天空率の関係を示す。図 3-10 より窓が FF の時のグラフと図 3-9 を比較すると天空率よりも南側天空率の方が高い相関性を示した。これは一日の太陽が東、南、西の順に移動していくため、南側の建物の方が日射の取得料に影響したためだと考えられる。

図 3-10 より FF、EE のモデルは南側天空率に関わらず、窓面積が狭いモデルほど暖房負荷が低くなった。一方で EFF、EEF のモデルは南天空率が 0 から約 0.9 までの間は窓面積が狭い窓 A が最も暖房負荷が低かったが、0.9 以上では窓 B が窓 A よりも暖房負荷が低くなった。窓面積を広くするとダイレクトソーラーゲイン効果の恩恵も受けやすくなるが、窓からの熱損失も増加する。窓の性能が高ければ、熱損失を抑えられるため、日射が多く得られる場所では窓面積を広くすることで、暖房負荷の抑制効果が期待できる。ただし、窓が高性能でも窓面積を広くしすぎてしまった場合にはダイレクトソーラーゲインによる暖房負荷の抑制よりも、熱損失による暖房負荷の増大が上回ってしまうため、3.2.5 節で示したように場所の周辺環境に応じて適切な窓面積を決定する必要がある。

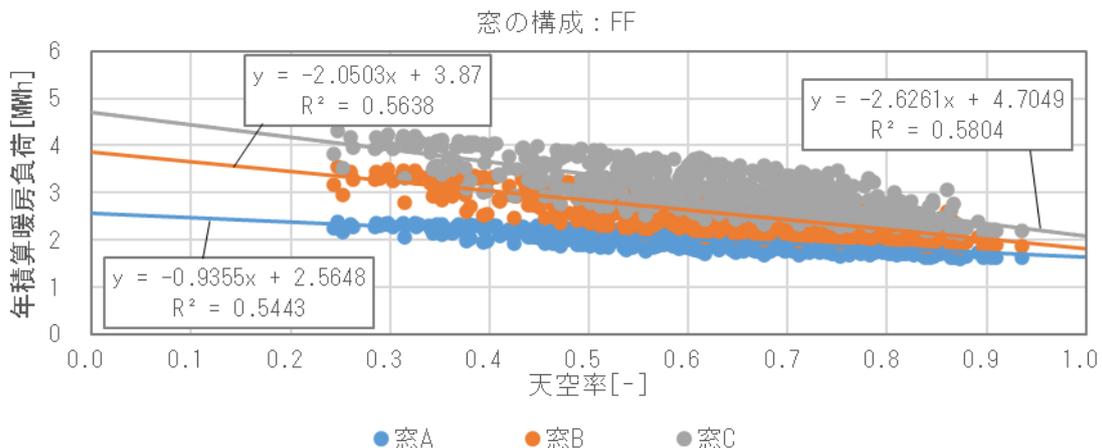


図 3-9 暖房負荷と天空率

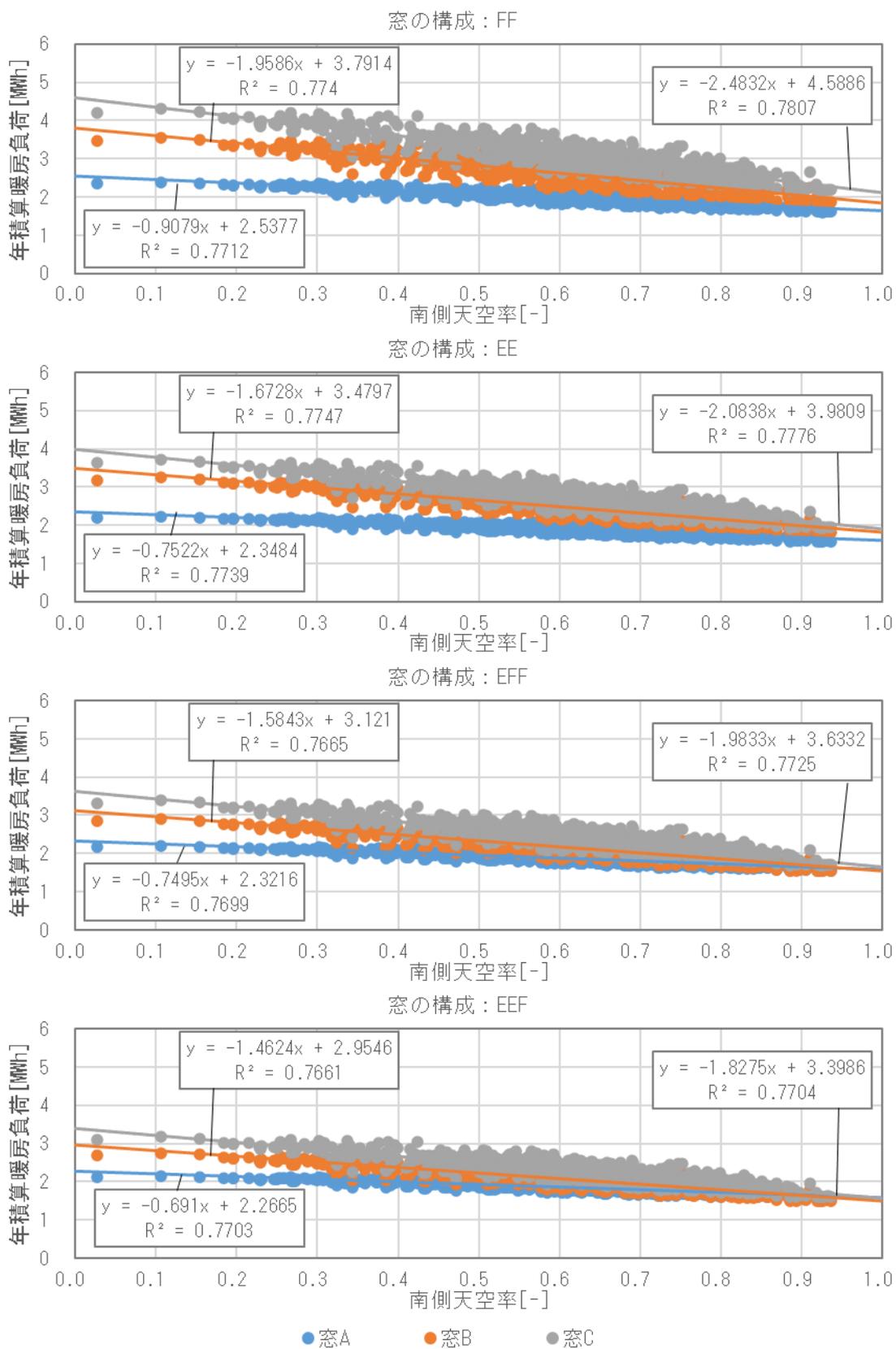


図 3-10 暖房負荷と南側天空率(窓別)

3.3 窓面積による暖房負荷の分析

前節で窓性能と周辺環境によって、暖房負荷が最小となる窓面積が異なることが分かった。そこで本節では解析対象と計算モデルを変更し、南側天空率と窓性能をパラメータとして窓面積による暖房負荷の変化を解析した。

3.3.1 解析対象

解析対象は南側天空率をもとに 97827 件の敷地から選択した。選択方法は南側天空率を 0.0 から 1.0 まで 0.1 ごとに区分し、それぞれの区分よりランダムに 50 の敷地を選択し、その敷地で得られる日射量を用いた。ただし、南側天空率が 0.0 から 0.3 になる敷地が少なかったため、解析対象となる敷地は全件で 384 件となった。表 3-4 に札幌市の 97827 件の南側天空率の特徴を示す。

表 3-4 南側天空率の範囲ごとに存在する件数

南側天空率の 範囲[-]	<=0.1	0.1< <=0.2	0.2< <=0.3	0.3< <=0.4	0.4< <=0.5	0.5< <=0.6	0.6< <=0.7	0.7< <=0.8	0.8< <=0.9	0.9<
件数[件]	2	12	20	70	124	234	599	1546	5162	52671

3.3.2 計算モデル

図 3-11、表 3-5～表 3-7 に解析モデルの概要と設定を示す。解析は EnergyPlus を用いた。窓面積は 0% から 100% まで 10% ごとに検討した。解析モデルは AII の標準モデルを参考にし、断熱性能は札幌次世代版住宅の Q 値が 1 となるスタンダードレベルを参考にした。窓の構成は 4case 想定した。内部発熱は人体発熱と機器発熱の日積算 12kWh を加算した。夜間は窓からの直接の熱損失を緩和させるために、室内側に 0.36m²K/W の熱抵抗を加えた（断熱ブラインドを想定）。

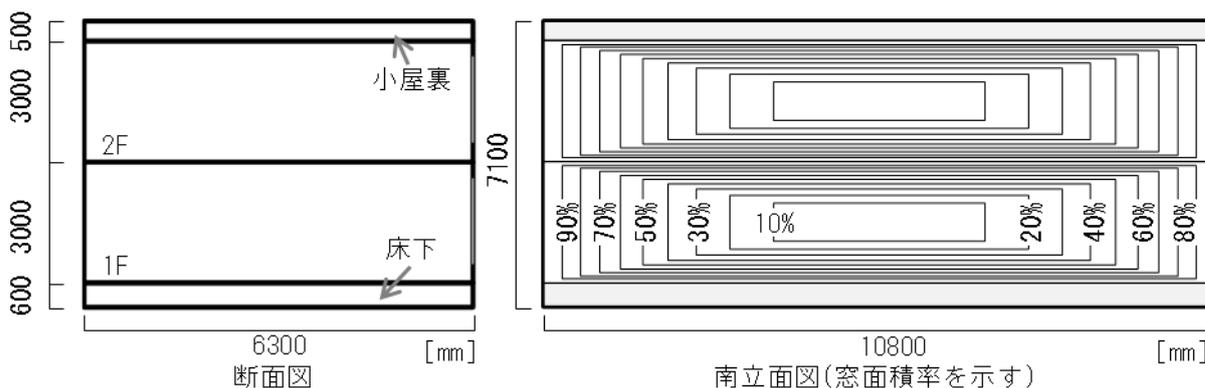


図 3-11 計算モデル

表 3-5 部位の構成材料

部位名	材料名	熱伝導率 [W/m ² ·K]	厚さ [m]	熱貫流率 [W/m ² ·K]
外壁	HGW16K	0.038	0.100	0.128
	HPF	0.020	0.100	
	PlasterBoard	0.213	0.012	
屋根	PlasterBoard	0.213	0.012	4.741
天井	HGW16K	0.038	0.300	0.123
	PlasterBoard	0.213	0.012	
床	PlasterBoard	0.213	0.012	4.741
基礎	XPS3d	0.028	0.150	0.181

表 3-6 シミュレーションの設定

暖房設定温度 [°C]	換気回数 [回/h]	内部発熱 [W/d]	ブラインド
部屋：20 (6:00～22:00) 15 (22:00～6:00) 小屋裏, 床下：暖房なし	小屋裏：10 部屋：0.5 床下：0	人体発熱：6000 機器発熱：6024	20:00 ～6:00

表 3-7 窓の構成材料

名称	構成*	厚さ [mm]	熱貫流率 [W/m ² ·K]	日射取得率 [-]
EF-SHGC	Low-e2-Ar12-FL2	16	1.442	0.559
EF-Uvalue	Low-e2-Ar12-FL2	16	1.383	0.350
EFE-SHGC	Low-e3-Ar16-FL3-Ar16-Low-e3	41	0.734	0.657
EFE-Uvalue	Low-e3-Ar16-FL3-Ar16-Low-e3	41	0.692	0.418

*Ar：アルゴン、FL：フロートガラス、数値は厚さ [mm] を示す。

3.3.3 窓面積と窓性能と南側天空率の関係

図 3-12 に窓面積率と年積算暖房負荷の関係をモデル別に示す。南側天空率による区分ごとに色分けしてプロットした。南側天空率は 0.0～1.0 までを 0.1 間隔で区分した。各区分の年積算水平面全天日射量の平均値を曲線として示す。

図の日射取得を重視した EF-SHGC のモデルに着目すると南側天空率が 0.4 以下の敷地では窓面積率が大きいほど暖房負荷が増加する。南側天空率が 0.4 よりも大きい敷地では南側天空率の値に応じて、暖房負荷が最小になる窓面積率が変化し、天空率が 0.9～1.0 となる対象建物では、暖房負荷が最小となる窓面積率は 70% となった。対して、窓の断熱性を重視した EF-Uvalue に着目すると、南側天空率が 0.6 以下になる敷地では窓面積率が大きいほど暖房負荷が増加した。南側天空率が 0.6 よりも大きい敷地では南側天空率の値に応じて、暖房負荷が最小になる窓面積率が増加し、天空率が 0.9～1.0 となる対象建物では暖房負荷が最小となる窓面積率は 70% となった。しかし、窓面積率の増加に伴う暖房負荷の抑制効果は EF-SHGC よりも低くなった。

三層ガラスは EFE-SHGC では南側天空率が 0.3 以上の時、EFE-Uvalue では南側天空率が 0.4 以上の時、南側天空率が低い敷地で暖房負荷が最小になる窓面積率が変化した。これは複層ガラスよりも三層ガラスは断熱性が向上しているため、窓からの熱損失が抑えられたからだと考えられる。

札幌市の建物の大半は南側天空率が 0.7～1.0 である。そのため、今回のモデルで設定した高性能な窓である場合、広い窓でも暖房負荷抑制の効果が期待できる。また、暖房負荷が最初になる窓面積率が 0% でなければ、窓面積率を 30% 程度増減しても、十分に暖房負荷抑制の効果が認められるため、デザインや光環境など暖房負荷以外の要素で窓面積の選択も可能であるといえる。

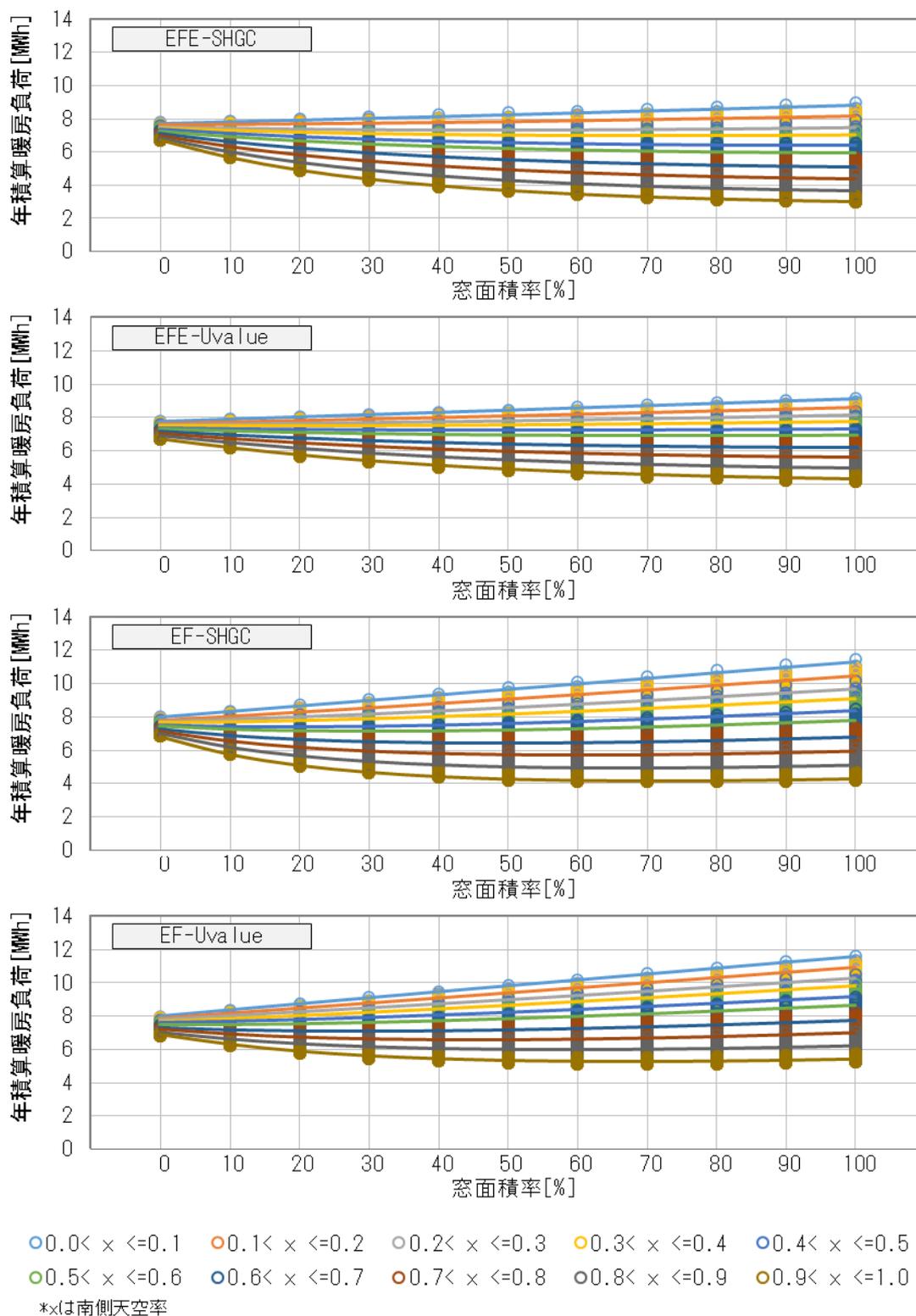


図 3-12 窓面別暖房負荷

3.4 まとめ

本章ではダイレクトソーラーゲインによる暖房負荷の抑制と周辺環境の関係解析を行った。本章の成果を以下に示す。

(1) 札幌市のある街区を対象に 572 件の敷地の日射量を算出した。算出した対象とする敷地の取得可能な日射量は地点ごとに大きく変化することを確認した。

(2) 天空率が異なる 2 地点の暖房負荷解析を行い、暖房負荷と室温、表面温度の時系列変化を算出した。天空率が 0.25 の地点 A では窓面積の拡大により暖房負荷が増加した。天空率が 0.77 の地点 B では高い性能を有する窓であれば窓 B の暖房負荷が最小になることが確認できた。

(3) 敷地内の建物全件の暖房負荷を算出し、新たに定義した南側天空率が天空率よりも暖房負荷との相関性が高いことを示した。また、南側天空率や窓の性能により暖房負荷が最小となる窓面積が存在すると考えられる。

(4) 高性能なモデルを再度設定し、窓面積と窓性能と南天空率の関係を解析した。札幌市の建物の大半は南側天空率が 0.7~1.0 であるため、設定した高性能な窓であれば、広い窓でも暖房負荷抑制の効果が期待できる。また、暖房負荷が最小になる窓面積率が 0% でなければ、窓面積率を 30% 程度増減しても、十分に暖房負荷抑制の効果が認められるため、デザインや光環境など暖房負荷以外の要素で窓面積の選択も可能であるといえる。

第4章 オフィスビルによるカーボンニュートラルの達成条件解析

4.1 はじめに

序章で述べたように世界各国は 2050 年までにカーボンニュートラル達成の野心的目標を計画・実施するよう求められている。日本において建築物から排出される CO₂ は、日本全体の CO₂ 排出量排出量に対して大きな割合を占めており、特に産業用建物のない都市部では、建築物から排出量は 60% から 70% となっている[1,2]。そのため、建築物でカーボンニュートラルを実現することは有効な手段である。内閣府が提示した「地域脱炭素ロードマップ」では 2030 年までの目標を実現するために、政府及び自治体の建築物及び土地で太陽光発電設備を設置できる建築物には、積極的に設備を導入していき、2030 年には建物全体の 50%、2040 年には 100% 導入することを目指すとした。このように太陽光発電 (PV) の導入は今後も加速することが予想される。太陽電池の設置は屋根や屋上に設置するが、都心の建物ではビルの屋上にはすでに空調設備や防火設備、電気設備が設置されているため、新たに PV を設置することは困難である。また、都市部の建物はペンシル型が多く、屋上に PV を設置するスペースが確保しにくい。そのような状況の中で、近年では建物のファサード (外壁) の太陽光発電の可能性について検討されている。Chatzipoulka らは、建物のファサードと地上の太陽ポテンシャルを分析し、それらが都市の形状と太陽放射の季節変化に影響されることを示している[3]。Riaz らは、PV/T と BIPV/T に関する論文をレビューし、これらのシステムが建物外壁の熱性能を向上させ、都市環境を保護できると結論づけた [4]。Liang らは IoT とクラウドを組み合わせることで、オンライン上で複数の PV/T ファサードシステムをリアルタイムに監視する低価格な方法を提案した[5]。

Maghrabic らは、BIPV の研究をレビューし、BIPV の利点とそれを実現するための難題を示した[6]。最近では、太陽電池を外壁や窓と一体化させたエクステリアシステムも開発された[7]。都心において PV を壁面に設置する場合、屋上に設置するよりも周辺環境による日射量の影響が大きい。そのため、PV によって効率的に電力を得るためには、周辺の複雑な都市形状の影響を考慮しなければならない。

本章では日射量の算出手法の応用として、壁面に設置した PV の発電量と、様々な形状のビルモデルのエネルギー消費量を算出し、オフィスビルがカーボンニュートラルを実現のための条件分析を行った。

4.2 使用ツール-冷暖房熱負荷簡易計算法プログラム

オフィスビルの一次エネルギー消費量の算出には有償で提供している SHASE112-2019 の冷暖房熱負荷簡易計算法プログラム (SKB47) を使用した[8]。SKB47 はマイクロソフト社の表計算ソフトウェアである Microsoft Excel 上で動作する空調負荷の計算プログラムである SKB47 は計算条件を入力することで空調設備の最大熱負荷と年間熱負荷、さらに年間一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量を算出できる。計算条件は F 検定により熱負荷と有意差ありとされた因子を適応しており、熱負荷計算の簡易化が実現している。ただし、本プログラムを用いる場合にモデルに制限があるため、後述の冷暖房負荷でモデルの制限に合わせた建物の選定をした。

その他のシミュレーションは R 言語を用いた。

4.3 解析範囲

図 4-1 に解析範囲を示す。図 4-1 に表示されている建物の内、オフィスビル（業務施設）を対象として1年間の発電量と一次エネルギー消費量を算出した。高層オフィスビルが最も密集しているエリアを Area-A とした。表 4-1 に解析範囲内にある建物の用途を示す。GIS で用途が確認できない建物は、その他の建物として分類した。居住用ビルは札幌市内に広く分布している。本研究の対象となるオフィスビル（業務施設）も札幌市内全域に分布しているが、札幌市内最大の駅である札幌駅周辺に建築面積の大きなビルが密集している。札幌は積雪寒冷地であるため、図 4-1 の右の写真のような建物が多く、オフィスビルはフラットなファサードを持つことで、積雪を防いでいる。

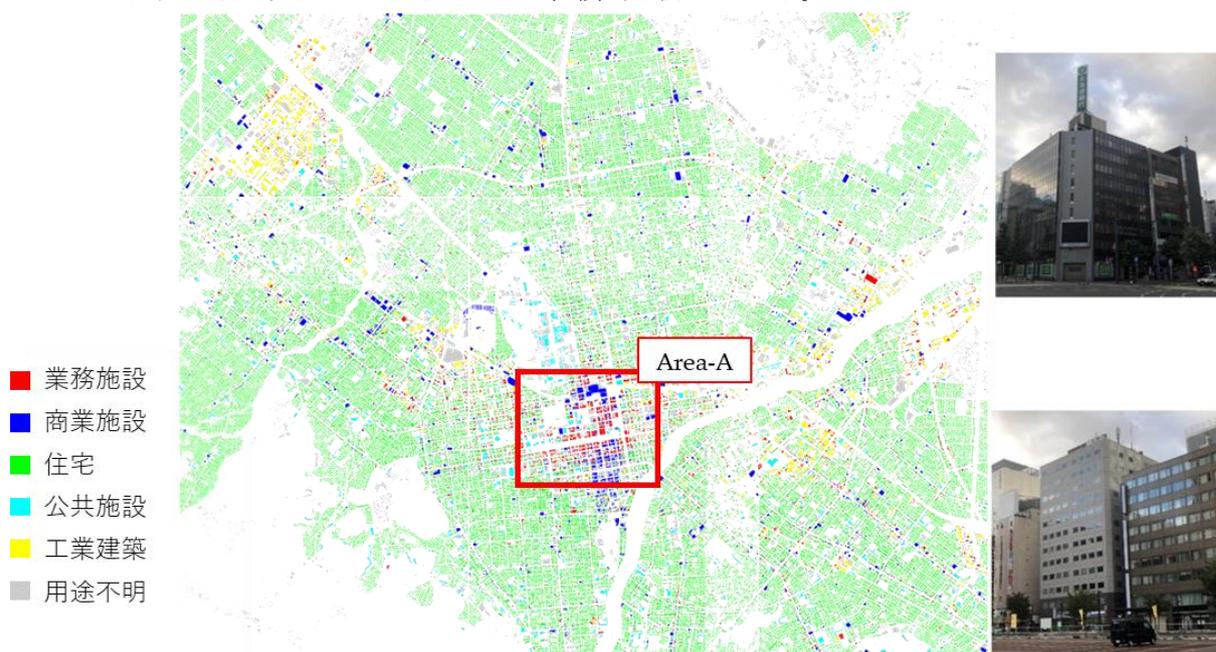


図 4-1 解析範囲

表 4-1 解析範囲内の建物の用途別件数

用途	件数
業務施設	5062
商業施設	3193
住宅	158,223
公共施設	2679
工業建築	3766
用途不明	111490

4.4 壁面への日射量の算出

2.4 節、2.5 節で提案した手法を応用して、オフィスビルで得られる壁面の入射日射量を算出した。

4.4.1 高さによる日射量の影響

日射量は周辺環境によって取得できる量が大きく変化する。特に建物が密集するような場所であれば、解析する高さが高いほど相対的に周辺の建物の高さが低くなる。つまり、壁面設置の太陽電池への入射日射量は高さによって変化すると考えられる。それらを確認すべく正射影画像を高さごとに作成し、水平面全天日射量を算出することで高さによる変化を確認した。

上階の正射影画像を作成するためには2.4.3 節で説明した対象建物の重心座標の高さを変更する必要がある。正射影画像を作成する高さは一番下の高さを地面より 1.5m 高い位置とし、以降建物高さに応じて 3m ずつ解析する高さを設定した。図 4-2 に正射影画像の高さの設定を示す。

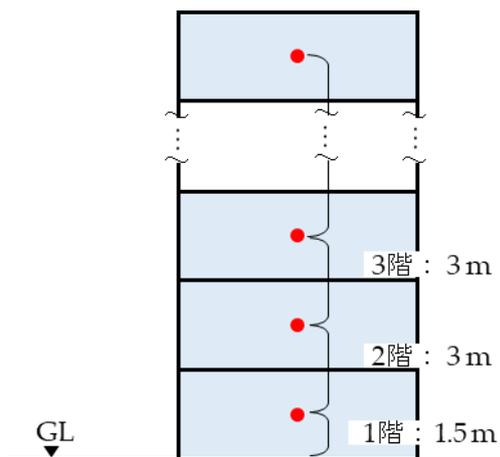


図 4-2 正射影画像の高さの設定イメージ

Area-A の中でも高層ビルが密集しているエリアを解析範囲とし、高さによって得られる日射量の変化を確認した。図 4-3 に解析範囲を示す。この解析範囲は 4.4.1 節でのみ使用した。赤い建物がオフィスビルである。このオフィスビルから高さが 10 階以上ある建物を抽出し、日射量と天空率を算出する。

解析範囲から 4 件の建物を選択し、図 4-4 に高さ毎の正射影画像を示す。高さが最も低い正射影画像は周辺建物の影響で天空部分が狭いが、解析する高さが上がるにつれて、周辺建物の高さが相対的に低くなるため、正射影画像の天空部分が広がった。

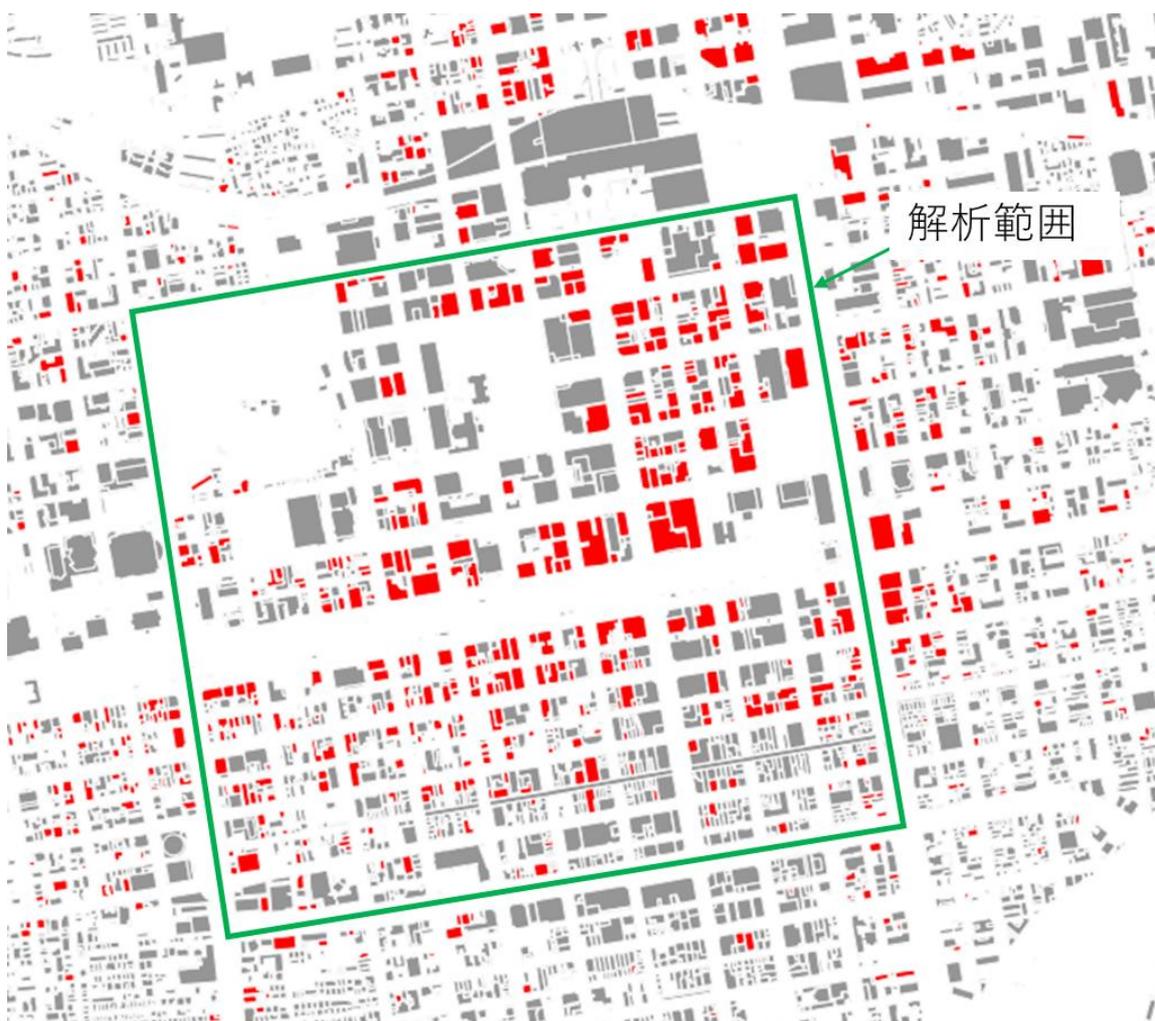


図 4-3 解析範囲（4.4.1 節のみで使用）

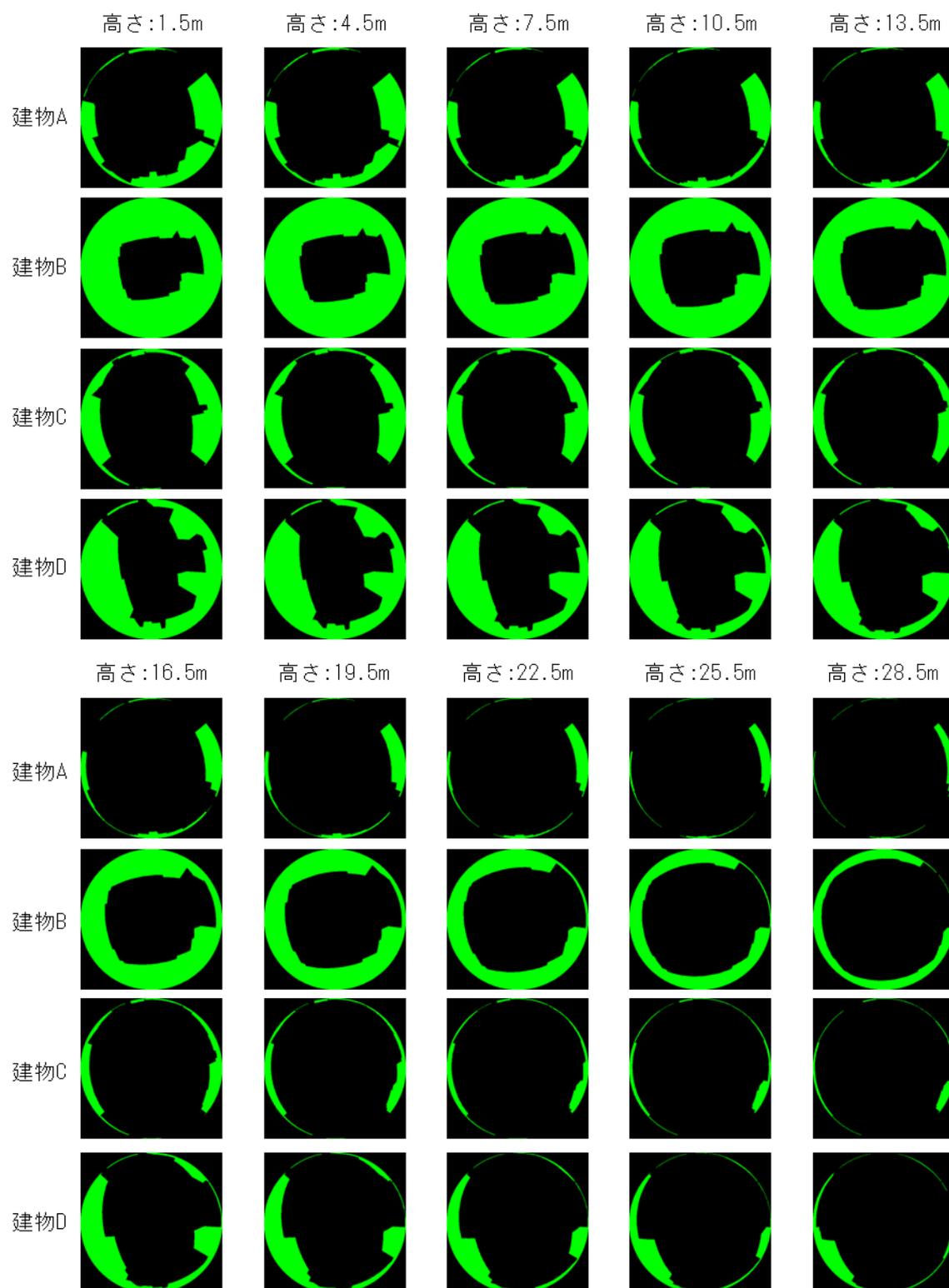


図 4-4 高さ別の正射影画像

図 4-2 に解析対象のオフィスビルの年積算日射量の平均値を示す。図 4-3 に解析対象のオフィスビルの天空率の平均値を示す。年積算日射量は 1 階では 0.53 MWh/m² だが、10 階では 1.2 MWh/m² を示し、1 階と 10 階の年積算日射量で 2 倍以上の差が開いた。天空率は 1 階では 0.47 だが、10 階では 0.90 を示し、年積算日射量同様に高さによる違いが如実に表れた。以上より建物が密集している場所で、オフィスビルのような高い建物は階数によって得られる日射量が大きく変わることが確認でき、壁面設置の太陽電池による発電を検討するのであれば、高さごとに日射量を算出するべきだといえる。

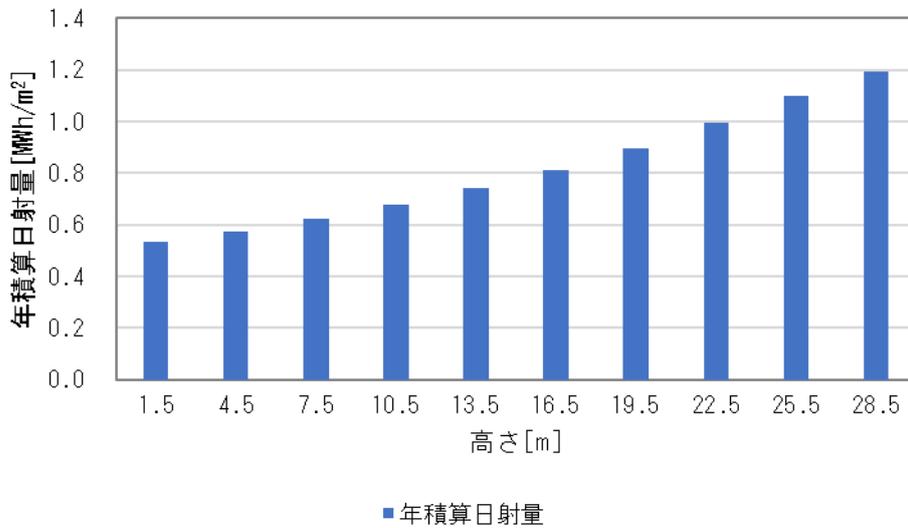


図 4-5 高さ別年積算日射量

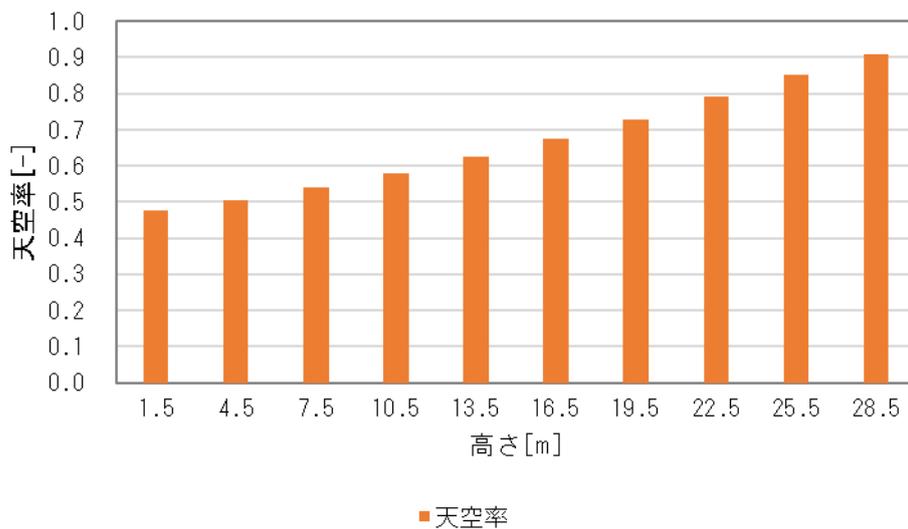


図 4-6 高さ別天空率

4.4.2 正射影画像の編集

2.4節で作成した正射影画像は全天空の日射量の算出を想定している。そのため、正射影画像には壁面への入射日射量を求めるときに不要な天空や建物が表示されている。そこで、外壁の向きに応じて正射影画像を編集し、計算に不要な部分を明確にした。図4-7に外壁の方位に応じた正射影画像を示す。図4-7の右図が編集後の正射影画像であり、青いエリアが計算上不要と判断された箇所である。このエリアは建物と同じ扱いとなる。

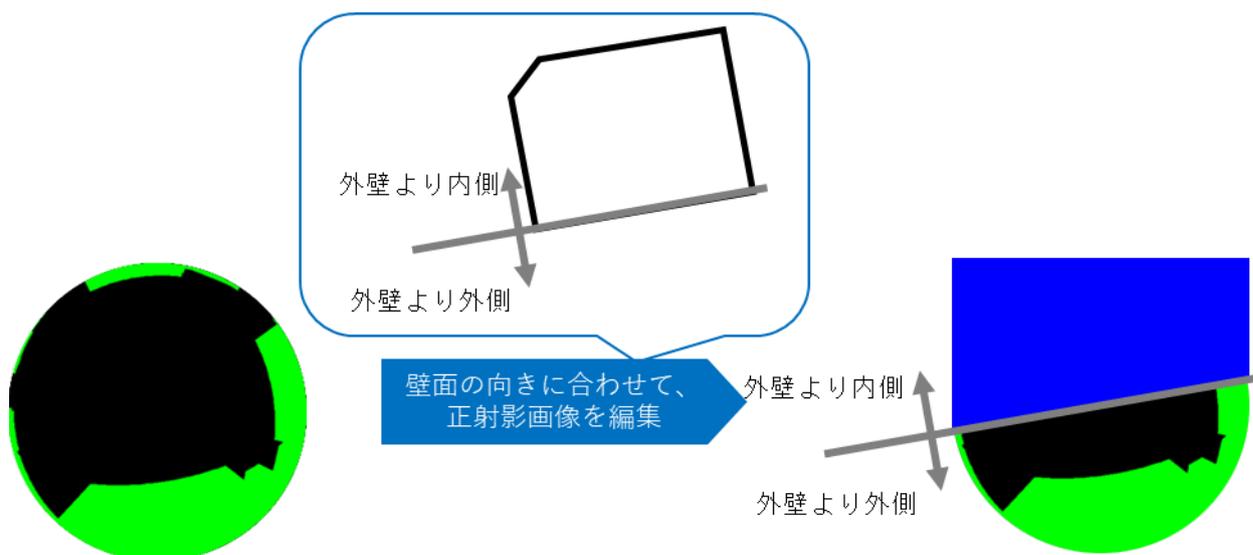


図 4-7 壁面の向きに合わせて正射影画像の編集

4.4.3 壁面への入射日射量

壁面への入射日射量を算出するためには、壁面の方位に応じた法線面直達日射量と拡散日射量を算出しなければならない。

壁面で得られる直達日射量は法線面直達日射量を壁面の垂直方向に変換することで得られる。法線面直達日射量の変換式は2.5.2節の式2-19を参考に以下の式4-1で示す。

$$I_{dire-wall} = I_{dire-norm} \cos h_{sun} \cos(A_{sun} - A_{wall}) \quad 4-1$$

$I_{dire-wall}$: 壁面へ入射する直達日射量[W/m²]

$I_{dire-norm}$: 法線面直達日射量[W/m²]

h_{sun} : 太陽高度[°]

A_{sun} : 太陽方位角[°]

A_{wall} : 外壁に対して垂直な向き[°]

壁面で得られる拡散日射量は4.4.2節で作成した正射影画像より天空率を算出して、拡散日射量にかけることで得られる。算出式は式2-21と同じ式になる。

$$I_{diff-wall} = I'_{diff} \cdot SVF \quad 4-2$$

$I_{diff-wall}$: 壁面へ入射する拡散日射量[W/m²]

I'_{diff} : 拡散日射量[W/m²]

SVF : 天空率[-]

式4-1、4-2により壁面へ入射する直達日射量と拡散日射量を高さごとに算出し、それらの値を合算することで、壁面で得られる日射量を算出した。図4-8に各建物の壁面で得られる日射量の分布を示す。図4-8では壁面ごとに得られる日射量を表示しており、日射量が高くなるにつれて、緑、黄色、赤の順に色を変化させた。南の壁面は赤が多く、壁の向きが北側になるにつれて壁面の色が緑になった。建物が近くにある壁面は壁の向きに関係なく緑に近い色となった。このことから、日射量を多く得るための条件は壁が南向きで、かつ障害となる建物が壁面に隣接してないことである。

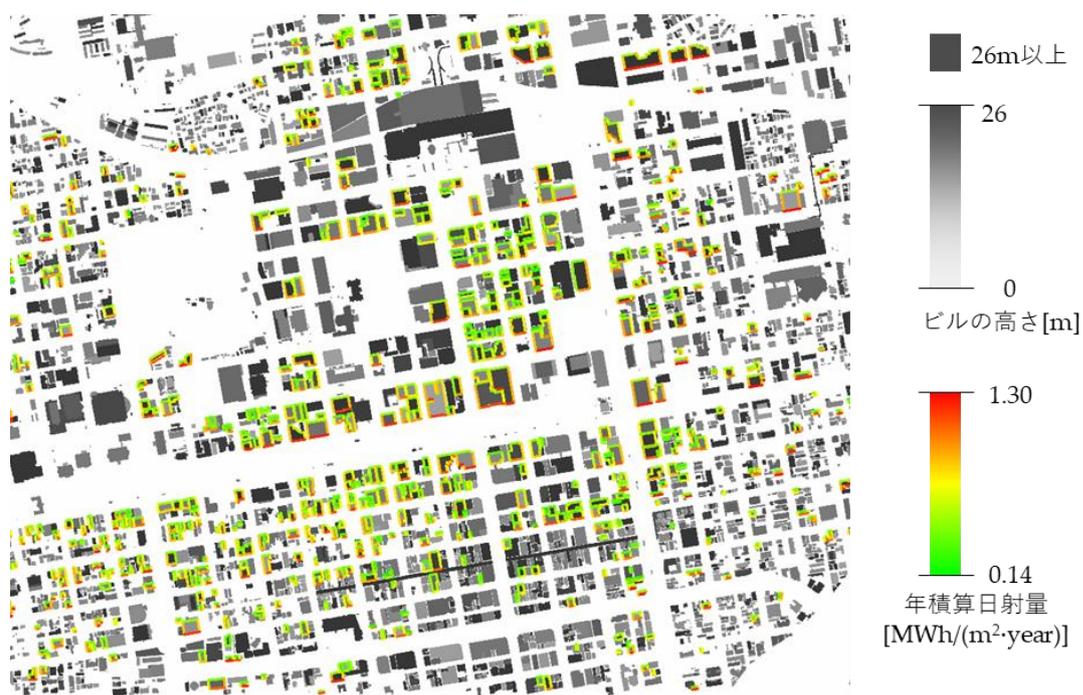


図 4-8 壁面への入射日射量の分布

4.5 建物で得られる発電量の算出

4.4節で算出した日射量をもとに壁面で得られるPVの発電量を算出した。PVは設置するためのイニシャルコストや維持・管理するためのランニングコストが必要とするため、建物すべての壁面を選択するのではなく、十分に日射量を得られる壁面を厳選する必要がある。そのため、以下の2つの基準に当てはまった外壁は太陽電池を設置しない外壁とした。

- (1) 外壁から4m以内に建物がある場合：外壁の直近に隣接建物が存在する場合、隣接建物に多くの日射量が遮られ、発電量が激減する。建築基準法の42条で道路の幅の最小距離は4mとされている[9]。外壁より4m以内に隣接建物がある場合、太陽電池を設置できない外壁とした。
- (2) 外壁の幅が3m以下の場合：外壁の幅3m以下である場合、その外壁は曲面の一部であるか、屋外に突出した部分の側面である可能性が高い。両条件はPVパネルの構造的な問題や十分な日射量を得られない問題から太陽電池を設置できない外壁とした。

(1)、(2)の条件でPVを設置できる壁面を決定し、その壁面への日射量よりPVによる発電量を算出した。PVの発電量の計算式はJISC8907の式を利用した[10]。

$$EG = \frac{K}{G_s \cdot P_{AS} \cdot H_{AM}} \quad 4-3$$

$$K = K_{HD} \cdot K_{PD} \cdot K_{PA} \cdot K_{PM} \cdot \eta_{IND} \cdot K_{PT} \quad 4-4$$

$$K_{PT} = 1 + \frac{\alpha_{Pmax}(T_{Cr} - 25)}{100} \quad 4-5$$

$$T_{CR} = T_{AV} + \Delta T \quad 4-6$$

EG ：発電量[kW/m²]

H_{AM} ：日射量[kW/m²]

G_s ：標準日射強度(=1kW/m²)

P_{AS} ：太陽電池の定格出力(=1kW)

K_{HD} ：日射量変動補正係数(=0.97)

K_{PD} ：経時変化補正係数(=0.95)

K_{PA} ：アレイ回路補正係数(=0.97)

K_{PM} ：アレイ負荷整合補正係数(=0.94)

η_{IND} ：パワーコンディショナ効率(=0.90)

α_{Pmax} ：最大出力温度係数(=-0.5)

T_{AV} ：外気温 [°C]

ΔT ：加重平均太陽光パネル温度上昇 [°C]

太陽光パネルは壁面設置を想定しているため、加重平均太陽光パネル温度上昇は28.0とした。以上の式4-3~4-6で得られる値は各壁面の高さ毎の単位面積当たりの発電量である。そのため、壁面で得られる発電量は各壁面の高さ毎に得られる発電量を合算した値とした。さらに、建物で得られる発電量はすべての壁面で得られる発電量を合算した値とした。た

だし、上記記載の条件(1)(2)をもとに対象外となる外壁の発電量は 0 とした。建物が得られる発電量は以下の式で算出した。

$$EG_{wall} = W_{wall} \left(\sum_i^{N_{build}} EG_{high}(i) \cdot 3 + EG_{high}(N_{build}) \cdot (H_{build} - 3 \cdot N_{build}) \right) \quad 4-7$$

$$EG_{build} = \sum_i^{N_{wall}} EG_{wall}(i) \quad 4-8$$

$EG_{high}(i)$: 建物の壁面の高さごとに得られる発電量[Wh/m²]

H_{build} : 建物の高さ[m]

N_{build} : 建物の階数[-]

N_{wall} : 外壁の枚数[-]

EG_{wall} : 建物の壁面で得られる発電量[Wh/m²]

EG_{build} : 建物で得られる発電量[Wh/m²]

W_{wall} : 壁面の横幅[m]

図 4-9 は年積算発電量のヒストグラムを示す。多くのビルが 0 kWh/(m²・year)から 40 kWh/(m²・year)の発電量であった。場所によっては、170 kWh/(m²・year)~180 kWh/(m²・year)の発電量を持つビルもある。

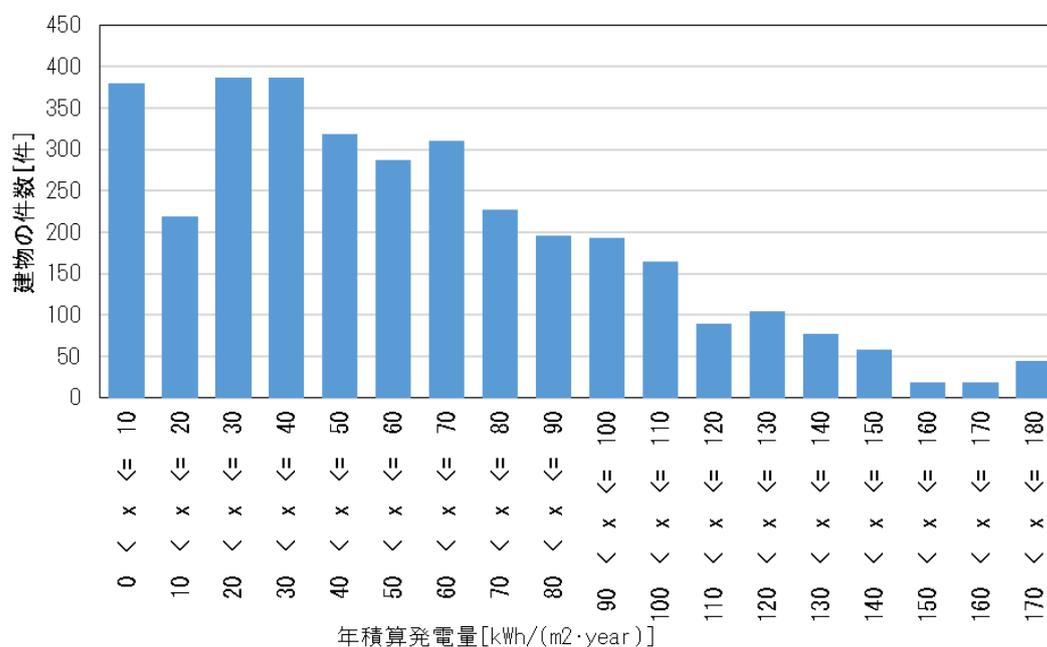


図 4-9 年積算発電量のヒストグラム

4.6 一次エネルギー消費量の算出

本章におけるオフィスビルの一次エネルギー量の対象を定義するために、BEI (Building Energy Index) を参考にした。BEI とは日本で住宅やビルの一次エネルギー消費量の指標として定義されている値である。現在は 300m² 以上の非居住用ビルは BEI が 1 以上であることが再義務付けされている[11]。BEI の計算には一次エネルギー消費量を用いて以下の式 4-9、4-10 で示されている。

$$BEI = \frac{E_T}{E_{ST}} \quad 4-9$$

$$E_T = E_{AC} + E_V + E_L + E_{SW} + E_{SEV} - E_S \quad 4-10$$

E_T : 設計一次エネルギー消費量

E_{ST} : 基準一次エネルギー消費量

E_{AC} : 熱源機器、補機、水搬送動力、空気熱搬送の総消費エネルギー

E_V : 換気設備による消費エネルギー

E_L : 照明設備の消費エネルギー

E_{SW} : 給湯、給水、排水動力の消費エネルギー

E_{SEV} : エレベーターとエスカレーターの消費エネルギー

E_S : 設備のエネルギー効率向上により削減されたエネルギー消費量と、PV による発電量
 一般財団法人省エネルギーセンター (ECCJ) によって、オフィスビルのエネルギー消費量について調査されたデータより、 E_{SW} と E_{SEV} はオフィスビル全体の消費電力量の 6~7% 程度であった[12]。そのため、本研究では E_{AC} 、 E_V 、 E_L の合計を算出したのちに、 E_{SW} と E_{SEV} をオフィスビル全体の 7% と仮定して算出することで、オフィスビル全体の消費電力量を求めた。

4.6.1 モデルの作成

SKB47によってオフィスビルの E_{Ac} と E_V を合算した一次エネルギー消費量を算出した。SKB47でモデルを計算するとき、表4-2に示すパラメータをゾーンごとに設定しなければならない。これらのゾーンはGISデータの建物の外周線をもとに平面を作成し、ゾーンごとのパラメータを設定した。モデルの作成手順を図4-10にフロー図で示す。図4-11に外壁に関連する変数のイメージを示す。札幌市は図4-1に示すようなシンプルなファサードを持つ建物が多いため、モデルのファサードは庇やバルコニーを持たない平坦な平面とした。

表 4-2 モデルのパラメータ

項目	入力	単位
階数	階数	-
階の種類	最上階／中間階	-
窓が最も大きい外壁の外向きの方角	方位	°
ゾーンの種類	インテリア／ペリメータ	-
ゾーンの床面積	数値	m ²
外壁に対する窓面積率	数値	%
室奥行	床面積／外壁の幅	m

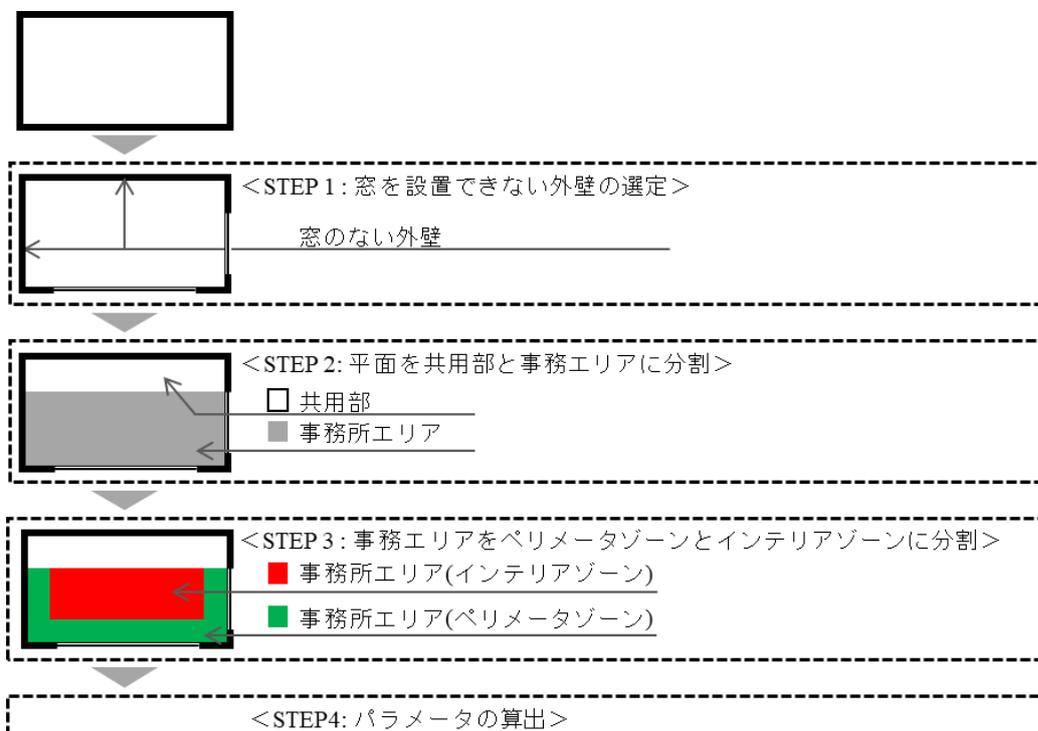
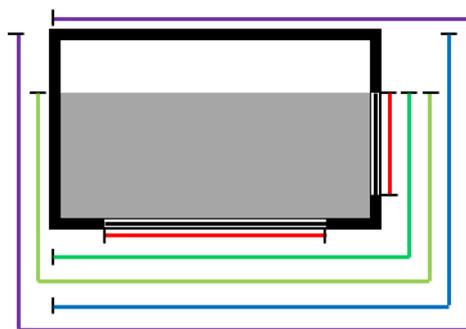


図 4-10 モデルの作成フロー図



平面図

- A_{window} : 窓面積
- $A_{wall-rent-window}$: 事務所エリアに接する窓を設置できる外壁の面積
- $A_{wall-rent}$: 事務所エリアに接する外壁の面積
- $A_{wall-window}$: 建物で窓を設置できる外壁の面積
- A_{wall} : 外壁の面積

図 4-11 外壁に関連する変数のイメージ

図 4-10 に示す手順で以下のようにモデルを作成した。

STEP 1：窓を設置できない外壁を選定した。窓の大きさは冷暖房負荷に影響するため、外壁に窓を設けるかどうかを検討した。例えば、外壁のすぐ近くに隣接する建物がある場合、設計段階でその壁への窓の設置は断念される可能性が高い。4.5 節で PV を設置できない外壁を設定しており、窓を設置できない外壁の条件も同様の条件とした。モデルの平面は GIS データの建物の外周線により決定した。実際に窓を設置する外壁($A_{wall-rent-window}$)は後の STEP で決定する事務所エリアの外壁のみとした。

STEP 2：平面を共用部と事務所エリアに分割した。窓を設置可能な外壁の中から最も幅の長い外壁を選び、その外壁と平行な内壁を作成した。選択した外壁と内壁を含めた平面を事務所エリアとし、残りの平面を共用部とした。事務所エリアの広さはオフィスビルの平均的なレントブル比により決定した。オフィスビルの平均的なレントブル比は日本の投資法人の IR 情報に公開されているオフィスビルの情報より決定した[13-17]。IR 情報とは、企業が事業や財務の状況を公開するものであり、企業が保有する不動産に関する情報は IR 情報から得ることができる。図 4-12 にレントブル比のヒストグラムを示す。本研究で調査した IR 情報から抽出したオフィスビルは 196 件となった。オフィスビルのレントブル比で最も高い値は 70%から 75%と 75%から 80%であった。そのため、各モデルのレントブル比を近い値にするため、モデルのレントブル比は 70%から 75%になるように作成した。

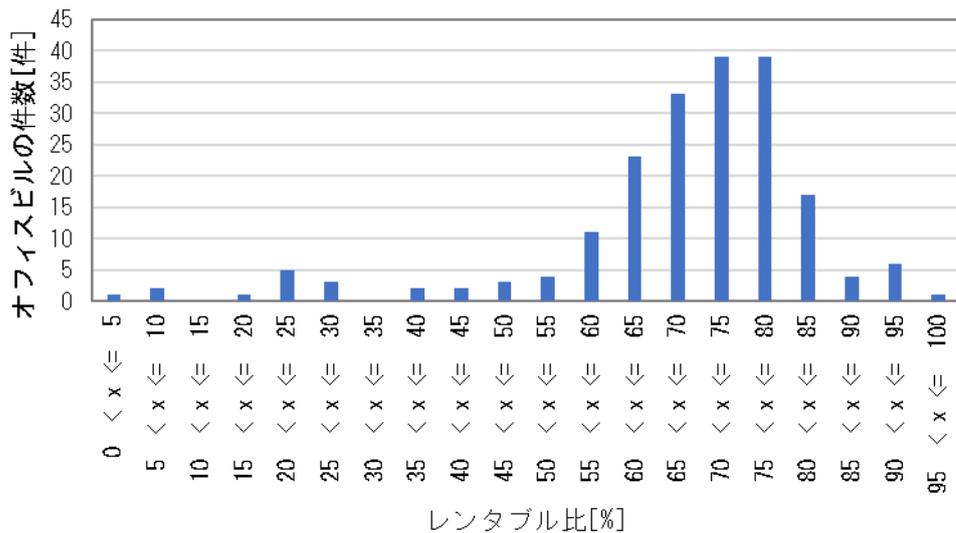


図 4-12 レントブル比のヒストグラム

STEP 3 : 事務所エリアをペリメーターゾーンとインテリアゾーンに分割した。事務所エリアの外壁から 5m 内側に線を引き、その線と外壁からなる平面とペリメーターゾーンとした。残りの事務所エリアの平面をインテリアゾーンとした。作成されたモデルは、図 4-10 の STEP 3 で表されたモデルのように、平面を 3つのエリアに分割した。無色の部分が共用部、赤色の部分がインテリアゾーン、緑色の部分がペリメーターゾーンである。

STEP 4 : 表 4-2 のパラメータを計算した。階数は建物の高さを 4m で割った値とした。小数点以下は切り捨てとした。階の種類は一番上の階を最上階とし、残りの階を中間階とした。窓が最も大きい外壁の外向きの方角は STEP 2 で選択した窓が設置でき最も幅がない外壁の外向きの方角とした。ゾーンの種類と面積は STEP 3 の結果を反映させた。外壁に対する窓面積率は事務エリアの全外壁の面積 ($A_{wall-rent}$) に対する窓面積 (A_{window}) の値とした。窓面積の設定は次節で説明した。室奥行は事務エリアの床面積を事務エリアの全外壁の幅で除した値とした。

以上の STEP 1~4 の手順で GIS データよりモデルを作成した。SKB47 で計算するモデルは室奥行が最低 6m 必要である。その条件を満たし、かつレントブル比が 70~75% となるオフィスビルは解析範囲の中で 415 件存在した。

4.6.2 計算条件の設定

SKB47による空調の一次エネルギー消費量の計算では①外壁の熱貫流率、②窓の熱貫流率、③窓の面積についてのパラメトリックスタディを実施した。外壁については、断熱材の厚さを50mm、100mm、200mmの3つの条件を想定し熱貫流率を設定した。表4-3に各外壁の熱貫流率を示す。窓はダブルガラスとトリプルガラスを想定し、それぞれでブラインドの有無を想定した。表4-4に窓の設定条件を示す。窓の面積は事務所エリアの窓が設置できる外壁の面積に対しての割合で決定した。表4-5に窓の面積の大きさを示す。PVは事務所エリア以外の外壁でも計算できるため、設置面積は窓が設置できる外壁の面積 ($A_{wall-window}$) から窓面積 (A_{window}) を引いた値とした。これらのパラメトリックスタディにより建物1件当たり36ケースのシミュレーションを行った。そのほか、室内の計算条件は表4-6に示す。空調設備はPACのみとした。

表 4-3 外壁性能の設定

ケース	熱貫流率(W/(m ² ・K))
Ow1	0.1792
Ow2	0.3391
Ow3	0.6122

表 4-4 窓性能の設定

	種類	ブラインド	熱貫流率(W/(m ² ・K))	日射遮蔽率(-)
Wq1	三層ガラス	ON	1.0	0.136
Wq2	三層ガラス	OFF	1.3	0.409
Wq3	複層ガラス	ON	2.2	0.470
Wq4	複層ガラス	OFF	2.6	0.690

表 4-5 窓面積の設定

	$A_{window}/A_{wall-rent-window}(\%)$
Case-1)	25
Case-2)	50
Case-3)	75

表 4-6 室内の計算条件

室内条件		設定	単位
室内温度設定	冷房	26	°C
	暖房	22	°C
内部発熱	照明容量	10	W/m ²
	コンセント容量	15	W/m ²
	在室人員	0.1	人/m ²
空調条件	暖房予熱時間	1	hour
	外気量	5	m ³ /(m ² ・h)
空調機器	全熱交換器効率	70	%
	PAC (APF)	5	-

4.6.3 建物の一次エネルギー消費量

SKB47によって、 E_{AC} と E_V の一次エネルギー消費量の合算値を算出した。 E_L は以下の式で算出した。

$$E_L = 9.97 \cdot (Q_L \cdot hr_L \cdot dy \cdot A_{build}) \quad 4-11$$

E_L : 建物の照明設備による一次エネルギー消費量[W]

Q_L : 照明の内部発熱 [W/m²]

hr_L : 空調の稼働時間[hour]

dy : 日本の年間の平日の日数[日]

A_{build} : 建物の延床面積[m]

照明の消費電力は、照明の内部発熱量と等しいと仮定し、表 4-6 の値を参照した。照明の稼働時間は、空調の稼働時間と同じ平日の8:00～21:00とした。また、日本の平日日数は245日とした。これらの値に照明の一次エネルギー換算係数 9.97 MJ/kWh を乗じ、照明の一次エネルギー消費量とした[18]。

以上より算出した E_{AC} 、 E_V 、 E_L 、より E_{SW} と E_{SEV} を算出することで、建物一次エネルギー消費量を求めた。以下に式を示す。

$$E_{build} = E_{AC} + E_V + E_L + E_{SW} + E_{SEV} \quad 4-12$$

$$E_{SW} + E_{SEV} = (E_{AC} + E_V + E_L) \cdot \frac{7}{93} \quad 4-13$$

E_{build} : 建物の一次エネルギー消費量

4.7 建物の一次エネルギーに対する発電量の割合 (EG/E) を計算

壁面設置の PV システムの有効性を検討するため、建物の消費エネルギー量に対する発電量の割合 (EG/E) を算出した。

$$EG/E = \frac{EG_{build}}{E_{build}} \quad 4-14$$

EG_{build} : 建物の発電量

E_{build} : 建物の一次エネルギー消費量

EG/E が 1 のとき、建物の一次エネルギー消費量を PV の発電量が上回ったといえるため、CO₂排出量はほぼゼロとなり、その建物でカーボンニュートラルが達成されたことを示す。

4.8 EG/E の解析

EG/E の要因を探るために 11 個の説明変数によって重回帰分析を行った。EG/E のほかに建物の一次エネルギー消費量である E_{build} と建物の発電量である EG_{build} も重回帰分析を行った。

4.8.1 説明変数の設定

説明変数は 11 個あり、それらを 3 グループに分けた。表 4-7 に説明変数を示す。第一のグループは、建物の性能を表すグループとし、窓の熱貫流率、窓の日射遮蔽率、外壁の熱貫流率の 3 つの説明変数で構成した。第二のグループは、建物の形状を表すグループとし、建築面積、PV 面積を外壁面積で割った値、窓面積を外壁面積で除した値、建築の高さの 4 つの説明変数で構成した。第三のグループは、周辺環境を表すグループとし、正射影画像を図 4-13 のように分割して算出した 4 つの天空率を説明変数として想定した。各説明変数の VIF はすべて 10 以下であり、多重共線性はなかった。

表 4-7 11 つの説明変数

グループ	凡例	内容	単位
建物の性能	U_{window}	窓の熱貫流率	W/(m ² ・K)
	SC_{window}	窓の日射遮蔽率	-
	U_{wall}	外壁の熱貫流率	W/(m ² ・K)
建物の形状	A_{floor}	建築面積	m ²
	AP_{PV}	PV の設置面積 / 外壁の面積 (A_{wall})	-
	AP_{window}	窓の面積 (A_{window}) / 外壁の面積 (A_{wall})	-
	H_{build}	建築の高さ	m
周辺環境	SVF_N	北東から北西にかけての天空率	-
	SVF_W	北西から南西にかけての天空率	-
	SVF_S	南西から南東にかけての天空率	-
	SVF_E	南東から北東にかけての天空率	-

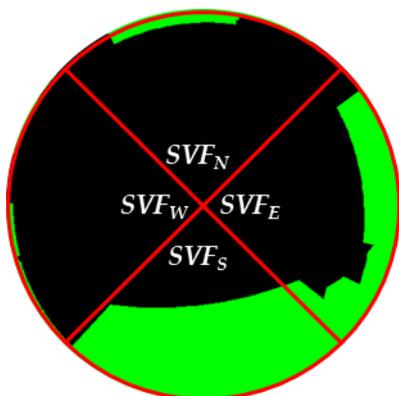


図 4-13 4 つの SVF のイメージ

4.8.2 解析結果

重回帰分析の結果を表 4-8、図 4-14 に示す。建物の性能や近隣環境が建物のエネルギー消費量や壁掛け型 PV の発電量に影響を与えるという研究結果は多いが[19-23]、本研究の結果では、建物の形状が各目的変数に最も大きな影響を与えることが示された。一般に、建物性能は目的変数に大きな影響を与えるが、今回の分析では、建物性能が良好なもののみを対象としたため、その影響は小さかった。建物の一次エネルギー消費量 (E_{build}) に対し、 U_{window} と AP_{PV} 以外の P 値は 0.05 以下となり有意な差が確認できた。 AP_{PV} は PV の発電量に寄与する値なので有意差が見られなかった。建物の性能は空調一次エネルギー消費量に影響を与える項目である。しかし、どの項目も効果量が低いか、もしくは有意差が見られなかった。これは本研究で設定したシミュレーションのケースが全体的に高性能であったためだと考えられる。 E_{build} に対する有意差があった説明変数は E_{build} にと正の相関を示した。中でも H_{build} の効果量が一番高かった。建物の発電量 (EG_{build}) の建物の性能と AP_{window} 以外の説明変数の P 値は 0.05 以下となり有意な差が確認できた。有意差が確認できなかった項目は PV の発電量に影響を及ぼさない項目である。有意差があった説明変数は SVF_N を除いて EG_{build} と正の相関があった。これは説明変数が PV の面積を増やす要因であると考えられる。特に EG_{build} は建物の形状に対し大きな効果量を示している。 SVF_N のみ負の相関を見せたが、効果量はほぼ 0 に近く影響は少ないと思われる。 EG/E の建物性能の U_{window} を除くすべての変数の P 値は 0.05 未満であり、有意な差であった。 EG/E は EG_{build} を E_{build} で割った値なので、 EG/E に対する説明変数の標準偏回帰係数は EG_{build} と E_{build} に対する説明変数の効果量に応じて変化している。例えば、 H_{build} では E_{build} が EG_{build} よりも大きな効果量を示したことで、建物が高くなると発電量もエネルギー消費量も増加するが、エネルギー消費量のほうがより増加することが確認できた。そのため、建物が高くなるほど EG/E は分母のエネルギー消費量のほうがより増大することになるので、 EG/E と H_{build} は負の相関を示した。

以上より、 E_{build} 、 EG_{build} 、 EG/E は建物の形状に対し大きな効果量を示しており、次で周辺環境となった。つまり、建物の形状が EG/E に最も大きな影響与えることが確認できた。今回はオフィスビルを対象にしたが、住宅のような建物の高さが 2 階程度しかない建物で解析すれば、より周辺環境の影響が高くなると考えられる。また、 EG/E に対し建物の性能はほとんど寄与していないことが示されたが、先にも述べたように本研究で設定したシミュレーションのケースが全体的に高性能であったためだと考えられる。そのため極端に熱貫流率の悪い外壁や窓をシミュレーションのケースに採用すれば、より高い効果量を示す可能性がある。

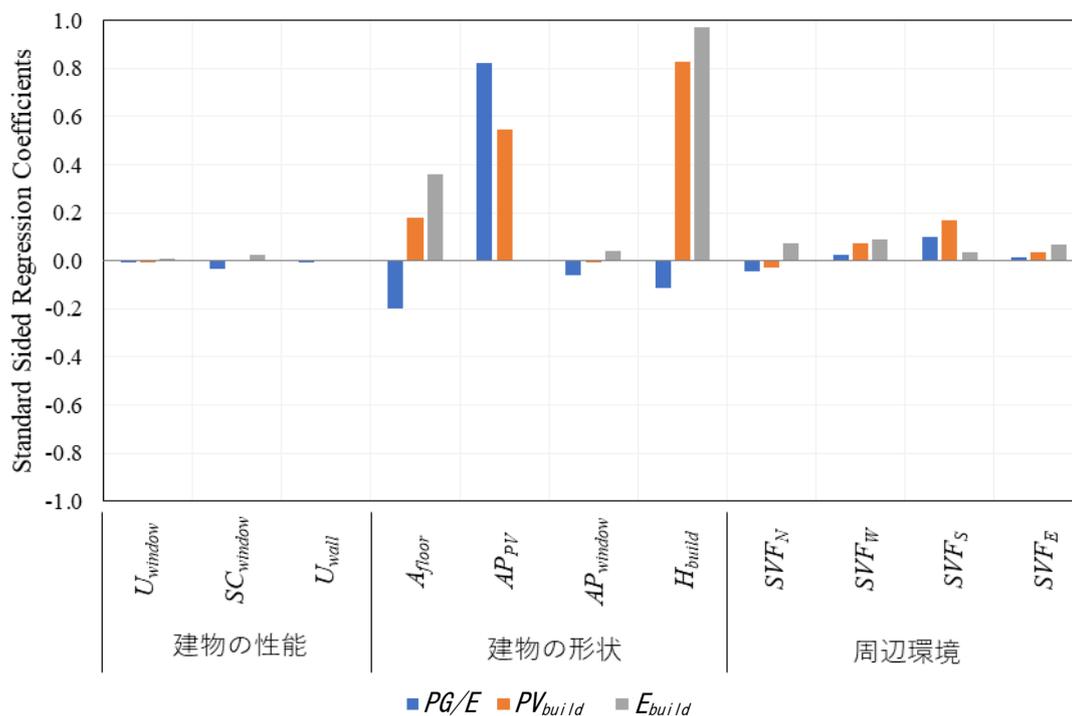


図 4-14 各説明変数の標準偏回帰係数

表 4-8 E_{build}、EG_{build}、PG/Eの重回帰分析結果

E _{build}											
	建物の性能			建物の形状				周辺環境			
	U _{window}	SC _{window}	U _{wall}	A _{floor}	AP _{PV}	AP _{window}	H _{build}	SVF _N	SVF _W	SVF _S	SVF _E
標準偏回帰係数	0.008	0.024	0.006	0.358	0.000	0.039	0.974	0.072	0.088	0.037	0.070
P 値	0.259	0.001	0.038	0.000	0.879	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

EG _{build}											
	建物の性能			建物の形状				周辺環境			
	U _{window}	SC _{window}	U _{wall}	A _{floor}	AP _{PV}	AP _{window}	H _{build}	SVF _N	SVF _W	SVF _S	SVF _E
標準偏回帰係数	0.000	0.000	0.000	0.177	0.546	-0.004	0.829	-0.028	0.074	0.166	0.034
P 値	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.356	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

PG/E											
	建物の性能			建物の形状				周辺環境			
	U _{window}	SC _{window}	U _{wall}	A _{floor}	AP _{PV}	AP _{window}	H _{build}	SVF _N	SVF _W	SVF _S	SVF _E
標準偏回帰係数	-0.008	-0.033	-0.008	-0.198	0.824	-0.062	-0.111	-0.044	0.024	0.100	0.016
P 値	0.311	0.000	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

延床面積に対する EG/E の散布図を図 4-15 に示す。図 4-15 に表 4-5 に示した窓面積のサイズごとに 3 つの図を示す。プロットの色は、窓と外壁の性能ごとに異なっている。窓や外壁の性能の違いによる EG/E の変動幅は最大で 0.13 程度であった。しかし、延べ床面積が大きくなるにつれて、 EG/E の変動幅はほとんどなくなった。窓面積の割合の変化による EG/E の変動は顕著であった。既往研究より窓面積の割合が少ない方が冷暖房負荷の低減に有利であることが示されている[24-27]。Case1、2、3 を比較すると、窓面積が小さい Case1 は冷暖房負荷が小さいく、また、PV の設置面積も広くなるため EG/E が大きくなり、カーボンニュートラルを達成しやすくなった。いずれの Case でも延床面積が狭いとき EG/E が 1 を超える建物があった。

以上より延べ床面積が狭い建物では外壁や窓の性能を向上させ、太陽電池を広く設置することでカーボンニュートラルを達成しやすいことが分かった。一方で、延べ床面積が広い建物では上記の各条件が良好でもカーボンニュートラルの達成が難いため、高効率の設備の導入や、建物の運用方法の最適化を検討し、省エネルギー化を実施する必要があることが判明した。

オフィスビルによるカーボンニュートラルの達成条件解析

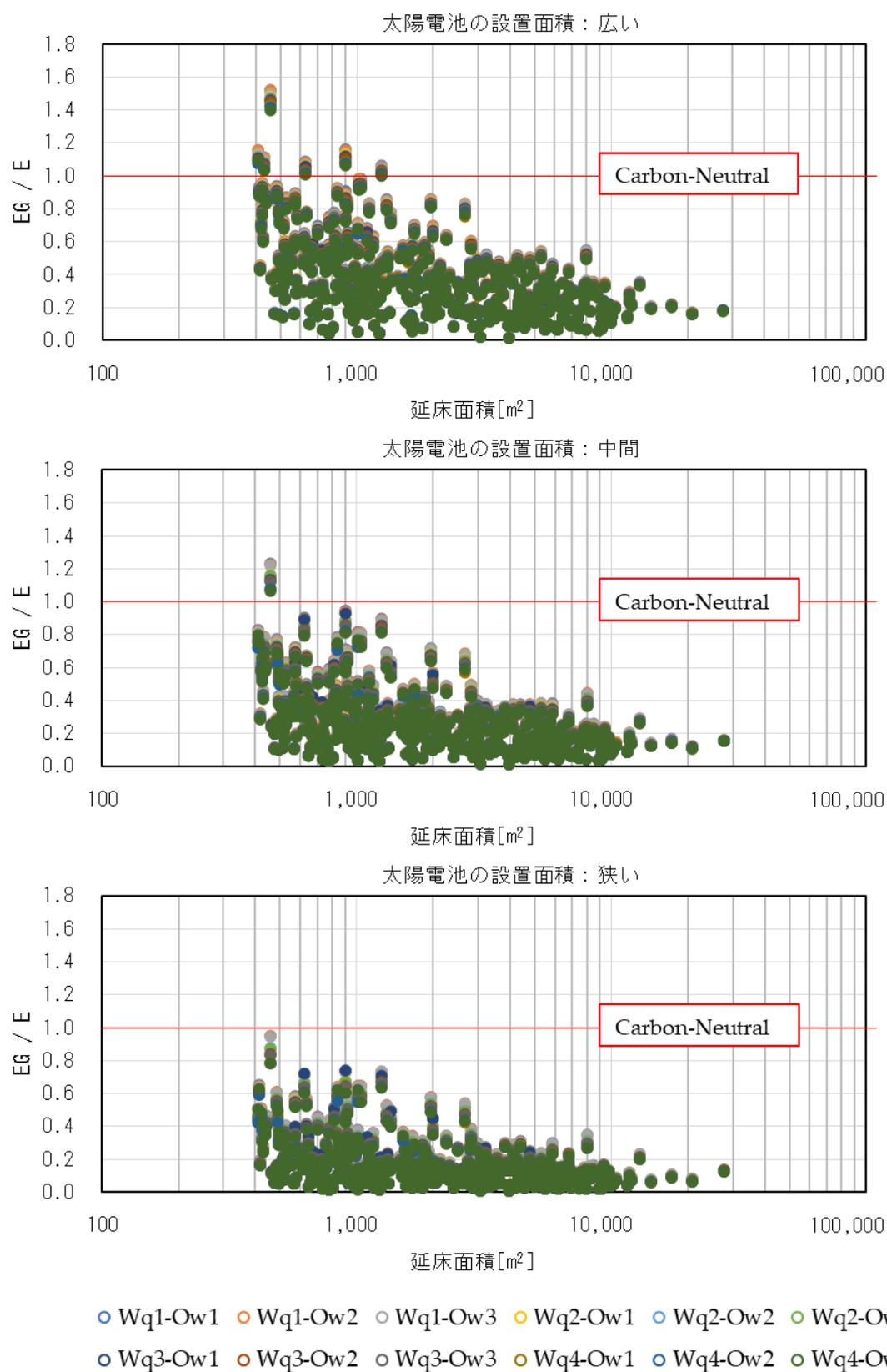


図 4-15 ケースごとの EG/E

図 4-16 に Area-A を対象として、外壁を $Ow1$ 、窓を $Wq1$ 、窓面積を Case-1 の時の EG/E の計算結果を示す。EG/E の EG/E が大きい値である赤色に近い建物は周辺に建物が少なく、かつ、建築面積が小さい。また、地図内で分散して存在する。対して、EG/E が小さい値である緑色に近い建物は札幌駅からすすきのの間で密集している。このエリアの建物は高層のオフィスビルが多く図 4-15 で確認したように窓や壁の性能の改善や太陽光発電だけでは EG/E の改善が難しい建物である。そのため、これらの建物は都市内で電力融通をするなどのサポートが必要だと考えられる。また、EG/E が密集しているため、このエリアを対象とした地域冷暖房を強化することでエリアとしてのカーボンニュートラル化を改善できると考えられる。

以上より、EG/E を地図化することで、カーボンニュートラルを達成するための支援を必要とする建物の位置関係が把握できるようになった。この図を用いることで電力融通や地冷の最適な経路を把握することが可能であり、都市としてのカーボンニュートラル化の実現に貢献できる。

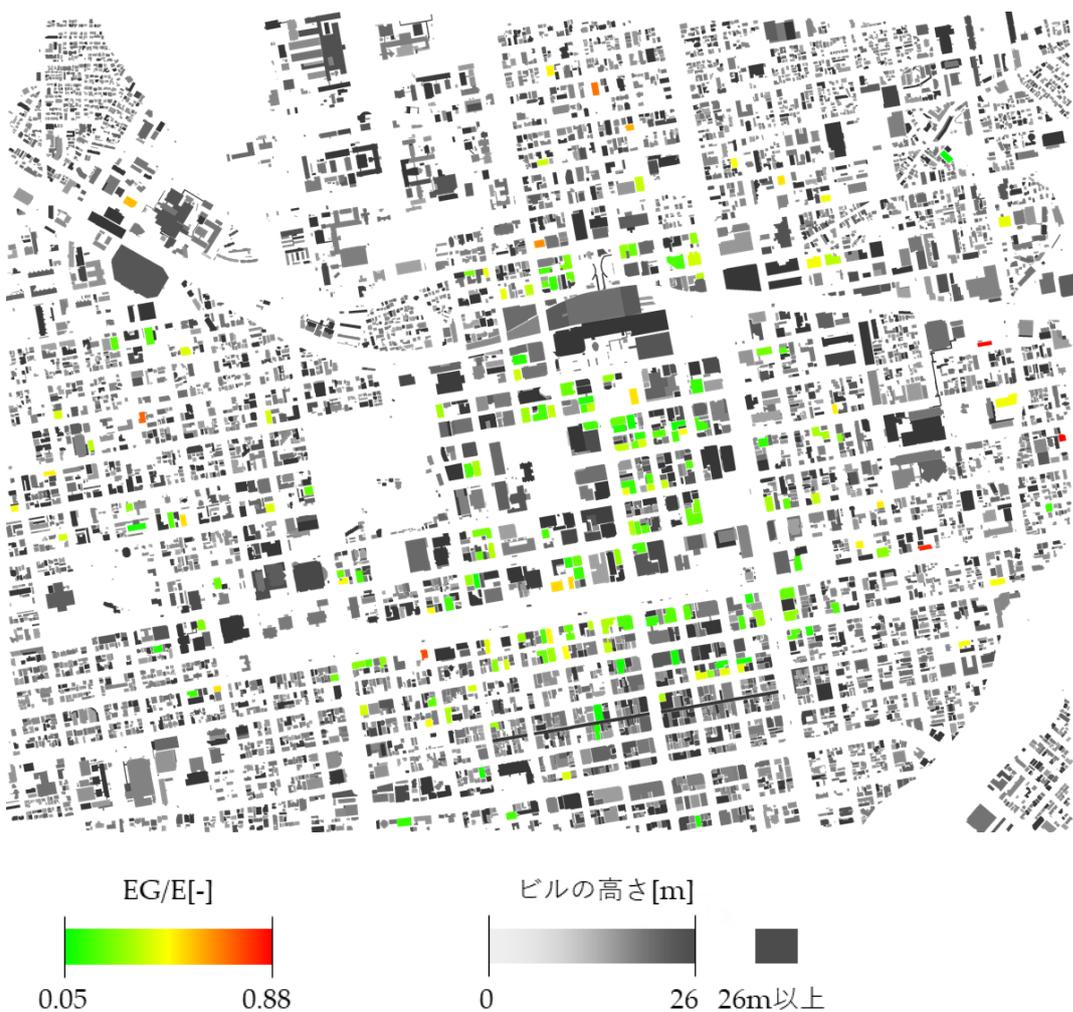


図 4-16 EG/E の分布図 ($Ow1$ 、 $Wq1$ 、Case-1)

4.9 まとめ

本章では日射量の算出手法の応用として、壁面に設置した PV の発電量と、様々な形状のビルモデルのエネルギー消費量を算出し、オフィスビルがカーボンニュートラルを実現のための条件分析を行った。本章の成果を以下に示す。

(1) 提案手法を応用して、壁面への入射日射量の算出する手法を提案した。外壁が大きな日射量を得るための条件として、外壁が南向きであること、外壁の周辺に隣接する建物がないことが確認された。算出された日射量から発電量を算出した。札幌のオフィスビルの多くは、 $0\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{年}) \sim 40\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ の発電量である。場所によっては $170\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{年}) \sim 180\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ の発電量が期待できることが確認された。

(2) GIS から建物のモデルを作成し、建物の一次エネルギー消費量を算出した。また、建物の一次エネルギー消費量に対する発電量 (EG/E) も算出した。Area-A では、同じような環境のオフィスビルでも、建物自体の形状や性能によって、 EG/E が大きく異なる建物があった。算出されたビルの中には、 EG/E が 1 より大きいものもあった。

(3) 11 個の説明変数を用いて、 EG/E 、 E_{build} 、 EG_{build} について重回帰分析を行った。その結果、延べ床面積が小さい建物では、窓や外壁の性能を向上させ、PV 面積を大きく確保すれば、 EG/E は 1 以上となり、カーボンニュートラルが達成できることが示された。しかし、延べ床面積が大きい建物では、窓や外壁の性能向上や PV 面積の確保で EG/E を向上させることは困難であることが確認できた。そのため、 EG/E を向上させるためには、使用する機器の性能向上や空調設備の効率的な運用を検討する必要がある。

(4) EG/E を地図化することで、カーボンニュートラルを達成するための支援を必要とする建物の位置関係が把握した。この図を用いることで電力融通や地冷の最適な経路を把握することが可能であり、都市としてのカーボンニュートラル化の実現に貢献できる。

4章 参考文献

- [1] 札幌市 札幌市気候変動対策行動計画の進行管理について (accessed on 21 December 2022).
- [2] 東京都環境局 東京都における最終エネルギー消費及び温室効果ガス排出量総合調査 (2018年度実績) (accessed on 21 December 2022).
- [3] Chatzipoulka, C., Compagnon, R., Nikolopoulou, M. :Urban Geometry and Solar Availability on Façades and Ground of Real Urban Forms: Using London as a Case Study, *Solar Energy*, 138, p53-66, 2016, doi:10.1016/J.SOLENER.2016.09.005.
- [4] Riaz, A., Liang, R., Zhou, C., Zhang, J. :A Review on the Application of Photovoltaic Thermal Systems for Building Façades, *Building Services Engineering Research and Technology*, 41, p86-107, 2020, doi:10.1177/0143624419845117/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0143624419845117-FIG2.JPEG.
- [5] Liang, R., Guo, Y., Zhao, L., Gao, Y. :Real-Time Monitoring Implementation of PV/T Façade System Based on IoT, *Journal of Building Engineering*, 41, p102451, 2021, doi:10.1016/J.JOBE.2021.102451.
- [6] Maghrabie, H.M., Abdelkareem, M.A., Al-Alami, A.H., Ramadan, M., Mushtaha, E., Wilberforce, T., Olabi, A.G. :State-of-the-Art Technologies for Building-Integrated Photovoltaic Systems, *Buildings* 2021, 11, p383, 2021, doi:10.3390/BUILDINGS11090383.
- [7] 株式会社カネカ Kaneka Announces Development of T-Green® Multi Solar, an Exterior System That Generates Electricity by the Outer Wall and Window Surfaces of Buildings -Realizes Multi-Functional and Exterior Design-Friendly Solar Power Generation Integrated into Building Materials Available online:
<https://www.kaneka.co.jp/topics/uploads/2019/12/%E3%80%90Kaneka%E3%80%91Kaneka-announces-development-of-T-Green%C2%AE-Multi-Solar-an-exterior-system-that-generates-electricity-by-the-outer-wall-and-window-surfaces-of-buildings.pdf> (accessed on 21 December 2022).
- [8] 空気調和・衛生工学会 SHASE-S112-2019 冷暖房熱負荷簡易計算法 Available online: <http://www.shasej.org/tosho/shase-s.html> (accessed on 21 December 2022).

- [9] 建築基準法 Available online: <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=325AC000000201&adlt=strict&toWww=1&redig=1F26F1C3FD954FB490C4B13083A8F2CF> (accessed on 21 December 2022).
- [10] ISO :JIS C 8907:2005 太陽光発電システムの発電電力量推定方法 , JIS ハンドブック.
- [11] 環境省 ZEB・PORTAL [ゼブ・ポータル] Available online: <https://www.env.go.jp/earth/zeb/detail/01.html> (accessed on 21 December 2022).
- [12] 一般財団法人省エネルギーセンター オフィスビルの省エネルギー Available online: https://www.eccj.or.jp/office_bldg/img/office2.pdf (accessed on 21 December 2022).
- [13] 日本リート投資法人 IR 情報 Available online: <https://www.nippon-reit.com/ja/ir/library.html> (accessed on 21 December 2022).
- [14] 大和証券オフィス投資法人 IR 情報 Available online: <https://www.daiwa-office.co.jp/ja/ir/disclosure.html> (accessed on 21 December 2022).
- [15] 野村不動産マスターファンド投資法人 IR 情報 Available online: <https://www.nre-mf.co.jp/ja/ir/library.html> (accessed on 21 December 2022).
- [16] 日本都市ファンド投資法人 ポートフォリオ Available online: <https://www.jmf-reit.com/portfolio/list.html> (accessed on 21 December 2022).
- [17] 日本ビルファンド投資法人 IR ライブラリ Available online: <https://www.nbf-m.com/nbf/ir/library.html> (accessed on 21 December 2022).
- [18] エネルギーの使用の合理化等に関する法律施行規則 Available online: <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=354M50000400074> (accessed on 21 December 2022).
- [19] Zhang, X., Nie, S., He, M., Wang, J. :Energy-Saving Renovation of Old Urban Buildings: A Case Study of Beijing, *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, p101632, 2021, doi:10.1016/J.CSITE.2021.101632.
- [20] Arriazu-Ramos, A., Monge-Barrio, A., Bellod, J.S.M., Martínez, P.G., Gutiérrez, A.S.O. :Difficulties in the Energy Renovation Processes of District Heating Buildings. Two Case Studies in a Temperate Climate, *Sustainable Cities Soc*, 75, p103246, 2021, doi:10.1016/J.SCS.2021.103246.
- [21] Yu, H., Wang, M., Lin, X., Guo, H., Liu, H., Zhao, Y., Wang, H., Li, C., Jing, R. :Prioritizing Urban Planning Factors on Community Energy Performance Based on GIS-Informed Building Energy Modeling, *Energy Build*, 249, p111191, 2021, doi:10.1016/J.ENBUILD.2021.111191.

- [22] Leng, H., Chen, X., Ma, Y., Wong, N.H., Ming, T. :Urban Morphology and Building Heating Energy Consumption: Evidence from Harbin, a Severe Cold Region City, *Energy Build*, 224, p110143, 2020, doi:10.1016/J.ENBUILD.2020.110143.
- [23] Javanroodi, K., Mahdavinejad, M., Nik, V.M. :Impacts of Urban Morphology on Reducing Cooling Load and Increasing Ventilation Potential in Hot-Arid Climate, *Appl Energy*, 231, p714-746, 2018, doi:10.1016/J.APENERGY.2018.09.116.
- [24] Feng, G., Chi, D., Xu, X., Dou, B., Sun, Y., Fu, Y. :Study on the Influence of Window-Wall Ratio on the Energy Consumption of Nearly Zero Energy Buildings, *Procedia Eng*, 205, p730-737, 2017, doi:10.1016/J.PROENG.2017.10.003.
- [25] Poirazis, H., Blomsterberg, Å., Wall, M. :Energy Simulations for Glazed Office Buildings in Sweden, *Energy Build*, 40, p1161-1170, 2008, doi:10.1016/J.ENBUILD.2007.10.011.
- [26] Troup, L., Phillips, R., Eckelman, M.J., Fannon, D. :Effect of Window-to-Wall Ratio on Measured Energy Consumption in US Office Buildings, *Energy Build*, 203, p109434, 2019, doi:10.1016/J.ENBUILD.2019.109434.
- [27] Goia, F. :Search for the Optimal Window-to-Wall Ratio in Office Buildings in Different European Climates and the Implications on Total Energy Saving Potential, *Solar Energy*, 132, p467-492, 2016, doi:10.1016/J.SOLENER.2016.03.031.

第5章 東京五輪・マラソンコースの暑熱環境評価

5.1 はじめに

マラソンは過酷な耐久スポーツである。コースの環境によっては熱中症や脱水症状のリスクを伴う。2021年に開催された東京オリンピックのマラソンで106人中30人の棄権があった[1]。これは30°C近い気温と高い湿度が原因で体温が下がらなかったのではないかとされている。Robertsらはレース開始時のWBGTが13°Cを超えるとマラソンを棄権する人数が増加することを示し、北緯40°以上の地域において、21°Cを超える高温条件下でのレースの開催はすべきではないとした[2]。Tanらは3年間のシンガポールマラソンのデータより、乾球温度と湿球温度の微小な変化でもマラソンのパフォーマンスに影響を与えることを示した[3]。Helouらは温度、湿度、露点、海面気圧の4つの環境要因とNO₂、SO₂、O₃、PM₁₀の4つの大気汚染物質がマラソンランナーのパフォーマンスに与える影響を調べ、気温の影響が最も大きいことを示した[4]。ArmstrongらはWBGTが28°Cを超えると労作性熱射病を発症するリスクが高いことを示し、イベントの延期もしくは中止を考えるべきだとした[5]。このように高温環境におけるマラソンのリスクは高いことが示される一方でIPCCの報告より世界の平均気温は年々上昇を続けており[6]、屋外の熱環境が悪化し続けている。その為、マラソンランナーの熱中症リスクを抑えるためには事前にマラソンコースの暑熱環境を把握しなければならない。

暑熱環境に影響を及ぼす要因の中で、日射量や赤外放射は周辺地形の影響を最も受けやすい。日射量や赤外放射は地表面の温度やグローブ温度にも寄与する。Otaniらは日射量の増大が持久的運動能力の低下につながることを示した[7]。そのため、マラソンコースの各場所で得られる日射量を正確に把握することは重要である。

本章では日射量の算出手法の応用として、東京五輪・マラソンコースの日射量を算出し、その値をもとにWBGTを算出することで、マラソンコースの暑熱環境を評価する。

5.2 暑熱環境の指標—WBGT

WBGT は暑熱環境を把握するための指標として用いられる。WBGT は米国陸軍と海兵隊の屋外訓練において熱中症の発生を抑制するために開発された指標である[8]。現在の研究でも WBGT はスポーツや労働活動を行う環境の評価に利用される[9-11]。また、日本では ISO7243 を基に日本工業規格に準じた JIS Z8504 により WBGT を定義しており[13]、公益財団法人日本スポーツ協会(JSPO)により、熱中症を予防するための活動基準が WBGT で示されている[14]。表 5-1 に日本スポーツ協会が示した運動に関する指針を記載する。環境省はこの指針を基に日本全国の暑熱環境を予測し、警戒が必要な地域を情報提供している[15]。WBGT は暑熱環境の指標として日本では標準的に使用されている。本研究でも暑熱環境の指標として WBGT を使用した。

表 5-1 運動に関する指針（日本スポーツ協会「スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック」（2019）より引用[14]）

気温 (参考)	暑さ指数 (WBGT)	熱中症予防運動指針	
35°C以上	31 以上	運動は原則中止	特別の場合以外は運動を中止する。特に子どもの場合には中止すべき。
31~35°C	28~31	厳重警戒 (激しい運動は中止)	熱中症の危険性が高いので、激しい運動や持久走など体温が上昇しやすい運動は避ける。10~20 分おきに休憩をとり水分・塩分の補給を行う。暑さに弱い人は運動を軽減または中止。
28~31°C	25~28	警戒 (積極的に休憩)	熱中症の危険が増すので、積極的に休憩をとり適宜、水分・塩分を補給する。激しい運動では、30 分おきくらいに休憩をとる。
24~28°C	21~25	注意 (積極的に水分補給)	熱中症による死亡事故が発生する可能性がある。熱中症の兆候に注意するとともに、運動の合間に積極的に水分・塩分を補給する。
24°C未満	21 未満	ほぼ安全 (適宜水分補給)	通常は熱中症の危険は小さいが、適宜水分・塩分の補給は必要である。市民マラソンなどではこの条件でも熱中症が発生するので注意。

5.3 使用するツール-QGIS

5.6.2 章で樹木の GIS を作成するときに QGIS を用いた。QGIS は、オープンソースの地理空間情報データの閲覧・編集・分析機能を持つ地理情報システム (GIS) である[16]。QGIS は世界中の有志が共同で開発したアプリケーションであるため、グの修正や開発コードも日々提供されており、無償でありながら高い機能・操作性を有する。また、オープンソースであるためユーザー自身でカスタマイズも可能であり、使用用途に沿った利用が可能である。QGIS では GIS に関連する形式のデータや、ラスタ形式、ベクタ形式のデータも取り扱うことが可能であるだけでなく、CSV で作成した座標群を取り込むことで地図上に表記可能である。次節の図 5-1 で示した地図画像は QGIS で作成しており、建物は shp データを基に表現し、樹木は画像データより選択した個所を基に表現している。マラソンコースは QGIS 上に表示されたデータより目視で設定し、CSV として保存している。このように QGIS は地図データを扱う上で非常に優れたツールである。

その他のシミュレーションは R 言語を用いた。

5.4 解析範囲

解析範囲は東京五輪・男子マラソンのマラソンコースが対象である。コースは、木陰の多い北海道大学や大通公園、高層ビルが集中する札幌駅前通り、南北に一直線に伸びる幅の広い創成川通、住宅地に囲まれた白石藻岩通で構成されている。図 5-1 にマラソンコースを示す。図 5-1 の赤い線がマラソンコースである。緑が樹木を示し、灰色が建物を示す。女子マラソンが開催された 8 月 7 日の平均気温は 28.0℃、最高気温は 31.9℃。男子マラソンが行われた 8 月 8 日の平均気温は 26.7℃、最高気温は 29.7℃。両大会とも、札幌市の 8 月の平均気温を上回った。日本体育協会の「運動時の熱中症予防対策ガイドライン」では、乾球温度 28℃～31℃では、激しい運動時には約 30 分おきに休憩を取ることが望ましいとされている[14]。したがって、フルマラソンを実施する場合、マラソンコースの暑熱環境を正確に把握する必要がある。

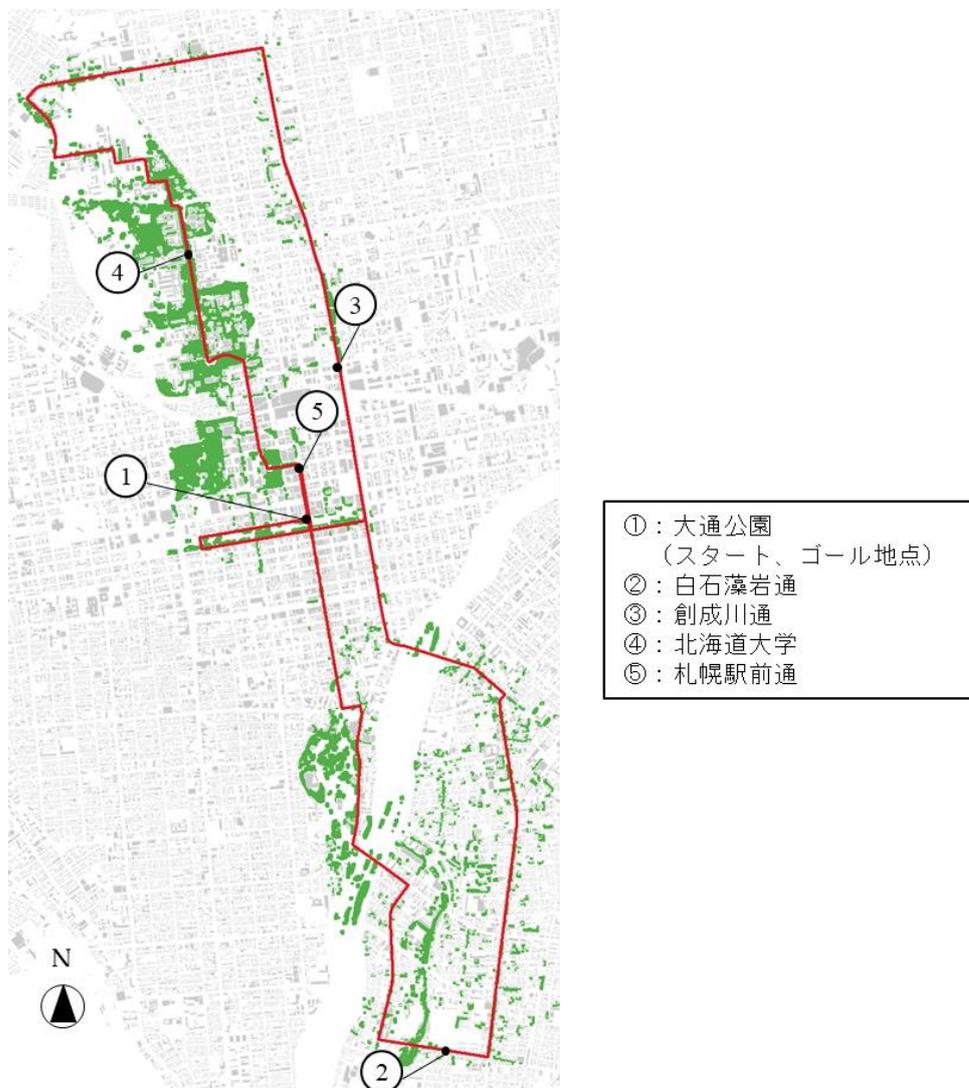


図 5-1 解析範囲 (マラソンコース)

5.5 解析日時の設定

本研究では東京五輪・男子マラソン開催日の2021年8月8日の1分気象データが入手できなかったため、2020年8月1日～31日より、最も近い気象データを使用した。各日程を比較するときのデータは気象庁が公開している1時間データを利用した。5～14時の日射量、外気温、湿度の3つの気象データを比較した。初めに2020年8月の各日の時間帯ごとの気象データと開催日の時間帯ごとの気象データより以下の式5-1を入力し、 $\Delta X(dy)$ を求めた。

$$\Delta X(dy) = \frac{\sum_{hr=5}^{14} \sqrt{(X(dy, hr) - X_{2021}(hr))^2}}{n} \quad 5-1$$

$\Delta X(dy)$: 2021年8月8日（開催日）と2020年8月の気象データの差の平均

$X(dy, hr)$: dy, hr に応じた気象データ

$X_{2021}(hr)$: 開催日の hr に応じた気象データ

n : データ数 (=10)

dy : 日 (2020年8月1日 < dy < 2020年8月31日)

hr : 時間 (5時 < hr < 14時)

$\Delta X(dy)$ が小さいほど開催日の5～14時の気象データの推移に近いとした。各気象データは1日ごとに $\Delta X(dy)$ を算出しており、気象データごとに以下の式5-2で標準化を算出した。

$$z(dy) = \frac{\Delta X(dy) - \overline{\Delta X}}{\Delta X_{\sigma}} \quad 5-2$$

$z(dy)$: dy に応じた気象データの標準化した値

$\overline{\Delta X}$: $\Delta X(dy)$ の平均値

ΔX_{σ} : $\Delta X(dy)$ の分散

各気象データを標準化することで、異なる単位でも比較検討が可能になる。各気象データの標準化された値の平均が最も小さい日を開催日の気象データに最も近い日とした。表5-2に式5-1、5-2で算出した値を示す。表5-2の $z(dy)$ の合計の値が最も低いには8月5日である。次いで、8月9日、4日となった。これらの3つの日の気象データと開催日の気象データを図5-2に示す。選択された3日間の気象データは開催日の気象データと近い挙動を示している。8月5日の相対湿度は7時ごろに相対湿度100%に近く、天候が雨だった可能性がある。8月9日は相対湿度が開催日の変動とかなり近いが、それ以外の値が開催日の変動から外れている。本章では外気日射量、外気温、相対湿度の変動が、開催日の値と近い8月4日の気象データにより解析をする。

表 5-2 男子マラソン開催日と 2020 年 8 月の各日の気象データの差

日付	2022 年 8 月 8 日の気象データとの差 $\Delta X(dy)$			標準化した値 $z(dy)$			$z(dy)$ の 合計値
	日射量 (MJ/m ²)	外気温 (°C)	相対湿度 (%)	日射量	外気温	相対湿度	
2020/8/1	0.96	2.11	8.70	1.92	-0.62	0.25	1.55
2020/8/2	0.72	1.60	7.10	0.46	-0.84	-0.15	-0.53
2020/8/3	0.80	2.94	2.30	0.97	-0.26	-1.35	-0.65
2020/8/4	0.53	1.51	5.50	-0.71	-0.88	-0.55	-2.14
2020/8/5	0.38	0.90	7.20	-1.63	-1.14	-0.12	-2.90
2020/8/6	0.58	1.31	5.70	-0.39	-0.97	-0.50	-1.86
2020/8/7	0.65	2.60	6.50	0.01	-0.41	-0.30	-0.70
2020/8/8	0.29	6.55	3.00	-2.18	1.29	-1.18	-2.07
2020/8/9	0.43	4.26	2.60	-1.32	0.30	-1.28	-2.29
2020/8/10	0.79	4.10	10.50	0.89	0.24	0.71	1.83
2020/8/11	0.72	1.70	6.40	0.47	-0.80	-0.32	-0.66
2020/8/12	0.65	2.35	8.70	0.04	-0.52	0.25	-0.22
2020/8/13	0.80	1.53	13.70	0.98	-0.87	1.51	1.62
2020/8/14	0.53	5.44	4.50	-0.70	0.81	-0.80	-0.69
2020/8/15	0.55	3.94	3.80	-0.61	0.17	-0.98	-1.42
2020/8/16	0.57	4.16	10.20	-0.46	0.26	0.63	0.43
2020/8/17	0.69	1.90	7.20	0.30	-0.71	-0.12	-0.54
2020/8/18	0.71	2.82	9.40	0.38	-0.32	0.43	0.49
2020/8/19	0.53	2.47	6.60	-0.73	-0.47	-0.27	-1.47
2020/8/20	0.80	4.28	11.00	0.98	0.31	0.83	2.12
2020/8/21	0.37	6.88	5.10	-1.71	1.43	-0.65	-0.93
2020/8/22	0.52	5.95	16.90	-0.79	1.03	2.31	2.56
2020/8/23	0.80	4.81	7.70	0.93	0.54	0.00	1.47
2020/8/24	0.70	3.34	9.40	0.37	-0.09	0.43	0.70
2020/8/25	0.66	2.83	1.80	0.06	-0.31	-1.48	-1.73
2020/8/26	0.67	1.43	6.80	0.13	-0.92	-0.22	-1.01
2020/8/27	0.67	1.88	5.30	0.14	-0.72	-0.60	-1.18
2020/8/28	0.58	2.35	7.80	-0.43	-0.52	0.03	-0.92
2020/8/29	0.81	2.09	10.70	1.00	-0.63	0.76	1.12
2020/8/30	1.02	10.63	20.40	2.31	3.05	3.19	8.55
2020/8/31	0.54	9.53	5.80	-0.67	2.58	-0.47	1.43

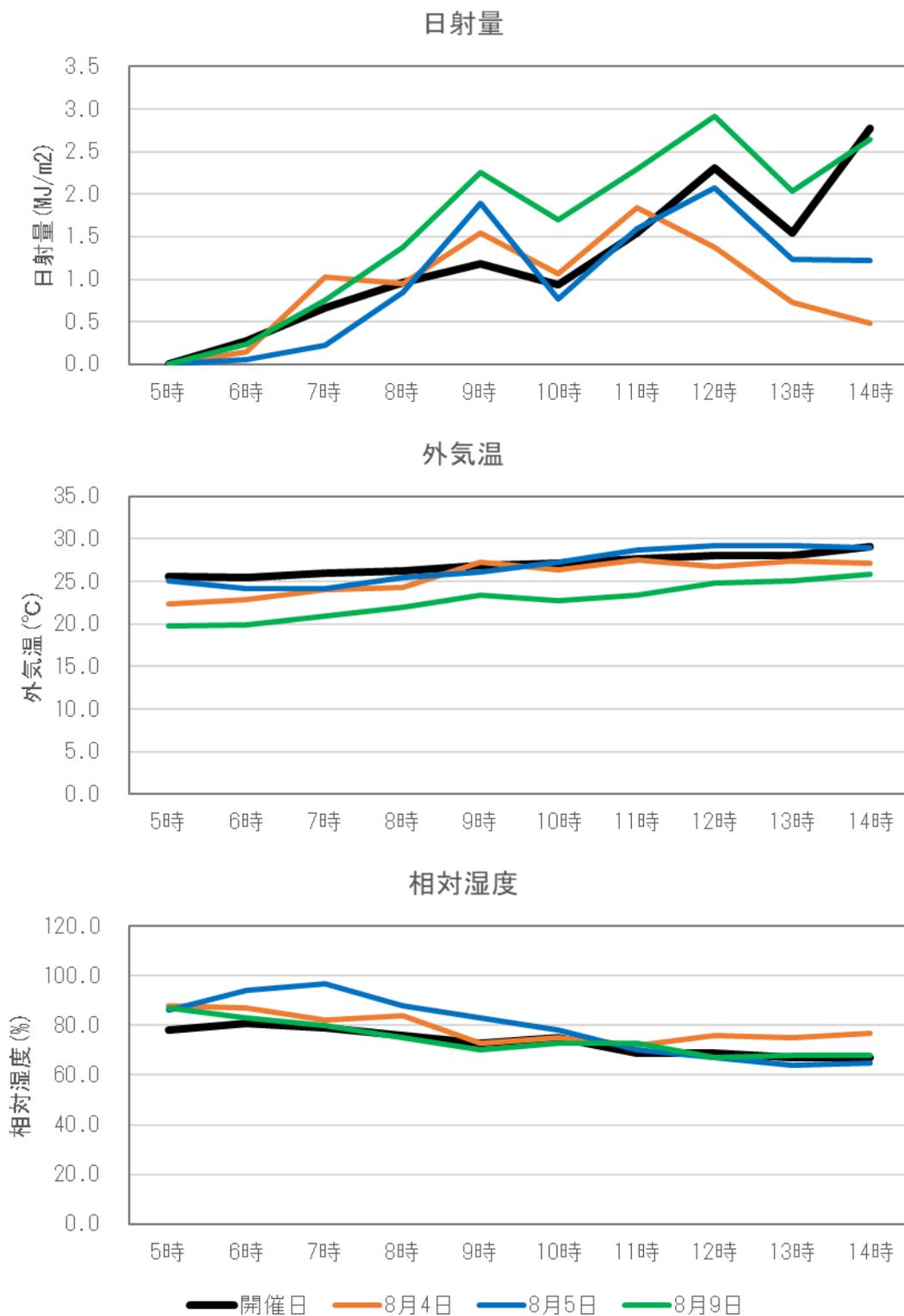


図 5-2 開催日と8月4日、5日、9日の気象データ（上が日射量、真ん中が外気温、下が湿度）

5.6 樹木の正射影画像を作成

都市の暑熱環境に影響を及ぼす障害物として、建物のほかに樹木が存在する。樹木が熱環境に影響を与えることは既往の研究からも明らかである。Loyde らは熱環境への影響は樹木からの距離よりも樹冠の構造に依存するとし、常緑樹よりも落葉樹の方が年間を通して都市の熱環境にいい影響を与えることを示した[17]。Ling Kong らは樹木が放射温度と PET の両方を下げることが示唆された[18]。BauShow らは樹木による気温、地表面温度の減少を確認し、温度低下には日射量がかかわっていることを示した[19]。その為、樹木の位置を把握することは重要である。

日本では建物の GIS データのほか、国土交通省の国土数値情報ダウンロードサービスより景観重要建物・樹木の GIS データを入手できる。しかし、札幌市を対象とした場合、樹木の GIS が整備されている場所は少なく、解析範囲を網羅していなかった。そのため、樹木を正射影画像上に投影する方法を検討した。

5.6.1 DSM の標高データによる樹木の正射影画像作成

以下の図 5-3 に示す範囲で建物と DSM データを抽出し、樹木と建物の正射影画像を作成した。赤い点はマラソンコースより選択した点（以降、解析点と称す）である。赤い円は樹木として DSM を抽出した範囲である。建物は解析地点を中心に半径 200m 以内のみ抽出した。

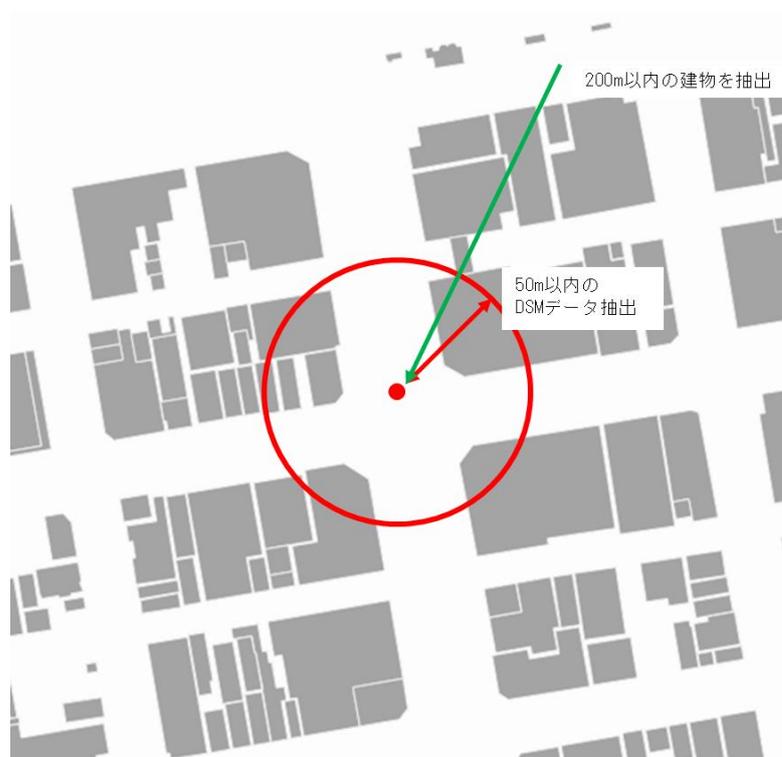


図 5-3 樹木の抽出範囲

2.4.3 節の式 2-1～2-3 を参考に樹木の正射影画像を作成した。解析点に地表面の高さは解析地点に最も近い DEM の標高とし、地表面の高さから 1.1m の位置を重心座標 G とした。1.1m の高さは JIS Z 8504 に記載されている作業者が立位の時の腹部の高さである[13]。GIS データより解析点の重心座標 G から半径 50m 以内の樹木の画素を抽出した。抽出された画素はドロネーの三角形分割により複数の三角形に変換した。この三角形の集まりが正射影画像上に投影される樹木の影となる。三角形の頂点を 2.4.3 節の式 2-1 の N とし、式 2-1～2-3 を繰り返し解くことで、すべての N を正投影画像上に投影する。正投影画像に投影された複数の点 P からなる多角形を赤色で着色することで、樹木を正投影画像に投影している。

図 5-4 に作成した正射影画像、図 5-5 に抽出した DSM の座標のプロット図を示す。図 5-5 は DSM の座標の標高に応じて色を変えており、青い色ほど高い標高を示す。重心座標よりも低い標高を持つ DSM の座標は図 5-5 にはプロットされていない。図 5-4 の合成画像を確認すると、建物と樹木が重なっている箇所は、もともと建物があり、その高さを反映したものだと考えられる。そのため、緑の丸で示したように建物が重なっていない箇所が樹木であると考えられる。図 5-4 で緑の丸で示した箇所を図 5-5 に緑の丸で示す。投影された箇所は建物と建物の間であり、街路樹が植えられている。しかし、図 5-4 のみどり丸の箇所を確認すると、高い樹木が建物間を埋め尽くすように植えられているようにも見える。このため、本来樹木がない箇所に樹木があるように誤認する恐れがある。そのため、別の手段で樹木がある範囲を示す必要がある。本研究で使用している DSM より細かいメッシュのデータであればより高い精度で投影できる可能性もあるが、計算処理するデータ量も多くなるため、計算負荷が膨大になり、時間がかかる懸念もある。

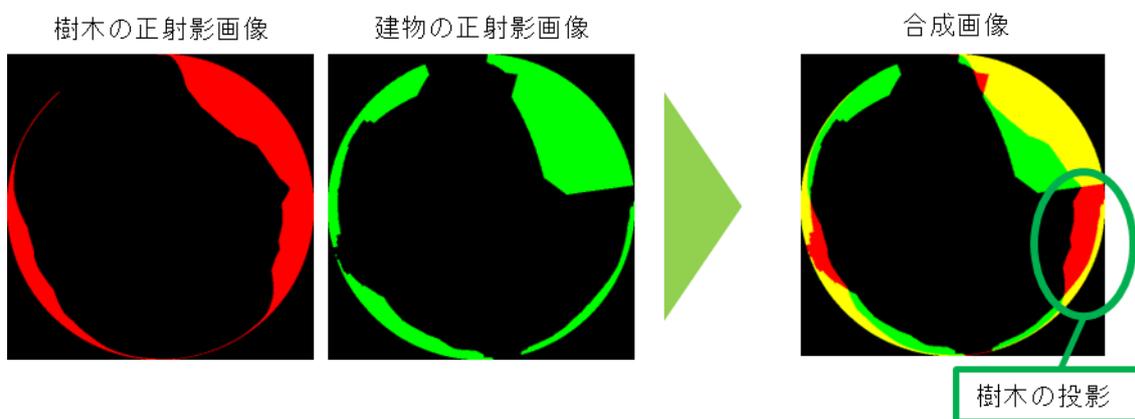


図 5-4 樹木と建物の正射影画像、および、合成画像

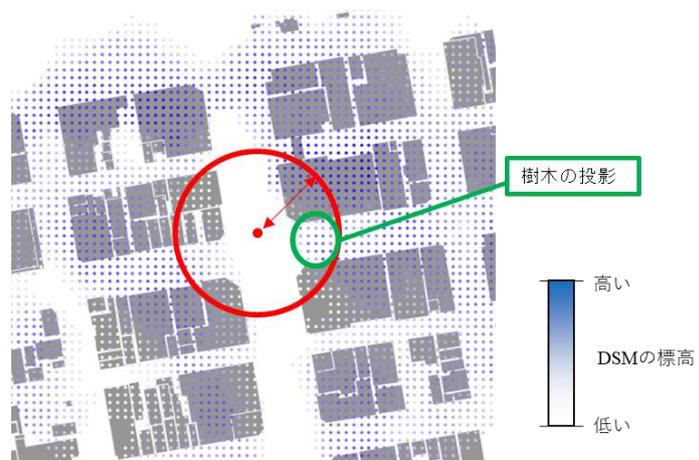


図 5-5 DSM のプロット地図

5.6.2 空中写真による樹木の GIS データ作成

都市内の樹木の場所を確認するために空中写真を使用した。空中写真は国土地理院の地図・空中写真閲覧サービスより無料で入手できる。本研究では 2020 年 9 月の画像を使用した[20]。空中写真を基に樹木の場所を指定したのち、QGIS により専用の樹木の GIS データを作成した。授網の GIS データの作成手順は以下の通りである。

STEP1：空中写真より写る樹木を目視で赤塗りし、写真のすべてのピクセルに座標を付与した。QGIS のジオリファレンス機能を用いることで、空中写真のすべてのピクセルに位置情報を追加できる。位置情報は参照した GIS に合わせて設定される。本研究では FGD と同じ測地系の座標を付与した。座標間の距離は 0.6m 間隔となっている。つまり、0.6m のごとに樹木のある箇所が確認できる。

空中写真は画像の端の方に写っている建物ほど、GIS データの建物の位置とずれる。そのため、画像の位置補正が必要となる。QGIS のジオレファレンス処理の機能を用いることで GIS データに合わせて画像を補正することができる。補正した画像に表示される樹木は目視により赤塗る。図 5-6 に補正した画像の写真を表示する。図 5-6 の左図はオリジナルの画像である。図 5-6 の右図は補正した画像であり、赤塗の箇所は樹木である。図 5-6 は国土地理院の空中写真を編集した画像である[20]。右図の画像の四隅に黒色となっている部分は補正により色情報がなくなった部分である。

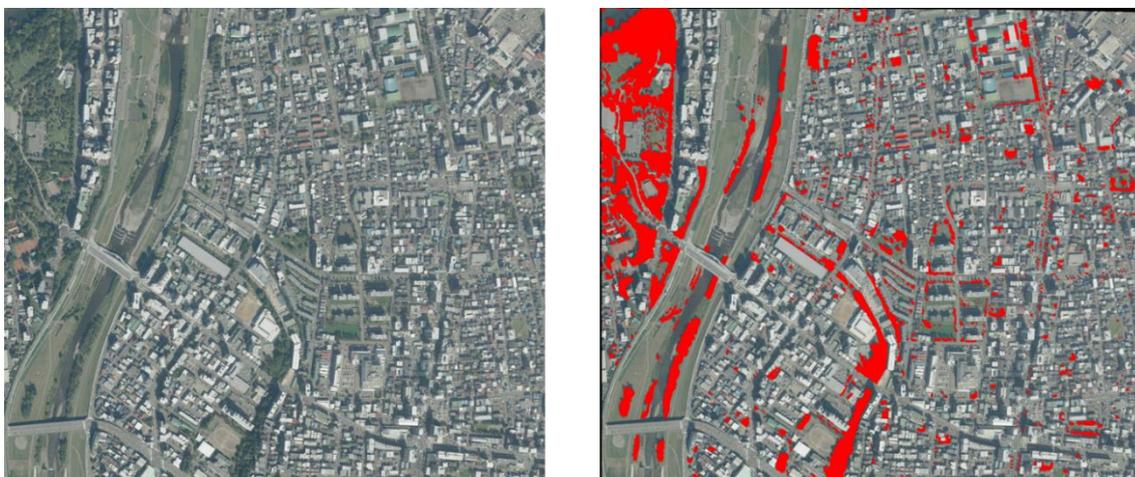


図 5-6 補正前後の空中写真（左図が補正前、右図が補正後）

STEP2：補正後の画像で赤く塗られた部分の画素を樹木とし、その画素に高さ情報を付与する。画素の位置情報を TP としたとき、 TP を以下の式で示した。

$$TP = (TP_x, TP_y, TP_{z-high}, TP_{z-ground})$$

TP ：画素の位置情報

TP_x ：画素の x 座標

TP_y ：画素の y 座標

TP_{z-high} ：画素の樹木の標高の z 座標

$TP_{z-ground}$ ：画素の地面の標高の z 座標

画素の TP_x と TP_y をもとに、その画素を取り囲む DSM データを 3 つ抽出する。この 3 つのデータで構成される平面を想定する。画素の TP_x と TP_y から、平面上の画素の位置を想定して、 TP_{z-high} に高さを付加する。図 5-7 に TP_{z-high} に DSM を付与する図を示す。左図は地図画像であり、オレンジの点が DSM データ、青が画素、緑の丸で囲まれた点が抽出された画素と DSM データある。左図が TP_{z-high} を付与する図であり、赤い点が平面上の画素である。同様に、 $TP_{z-ground}$ は、地形図の DEM データの高さを付与した。図 5-8 に樹木の参考図を示す。正射影画像に投影される樹木の箇所は樹冠のみである。そのため、幹の高さを設定する必要がある。本研究では、幹の高さを 3m とし、DSM 標高から DTM 標高と幹の高さを引いて樹冠を求めた。ただし、樹冠が 0.6m 以下であれば、その場所に樹木はないものと判断した。

以上の手順を繰り返すことで、樹木の高さと地表面の標高を持つ GIS データを作成した。

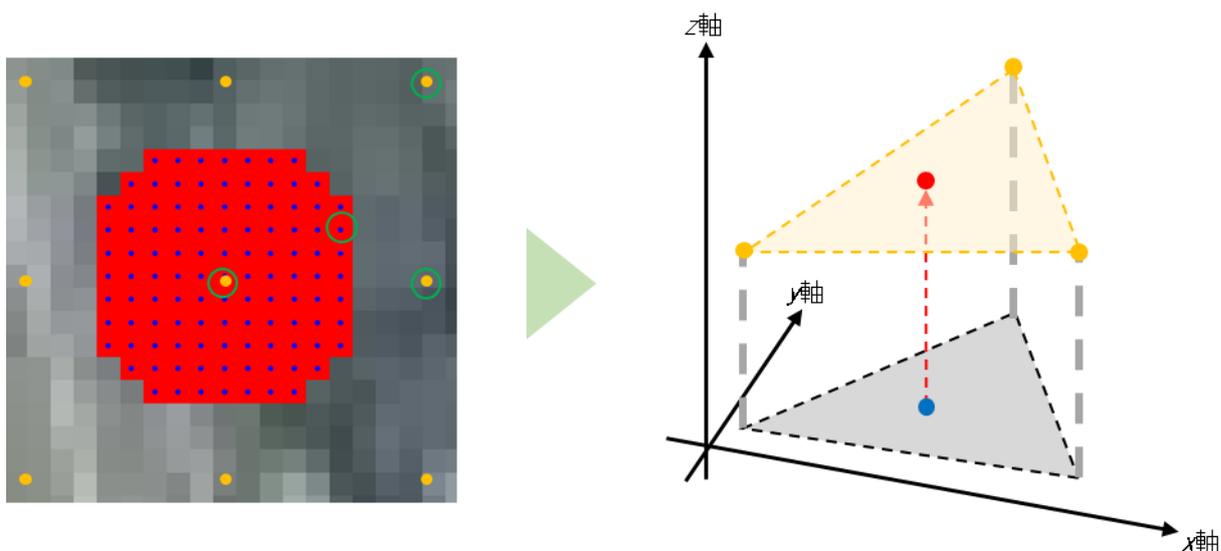


図 5-7 TP_{z-high} の付与

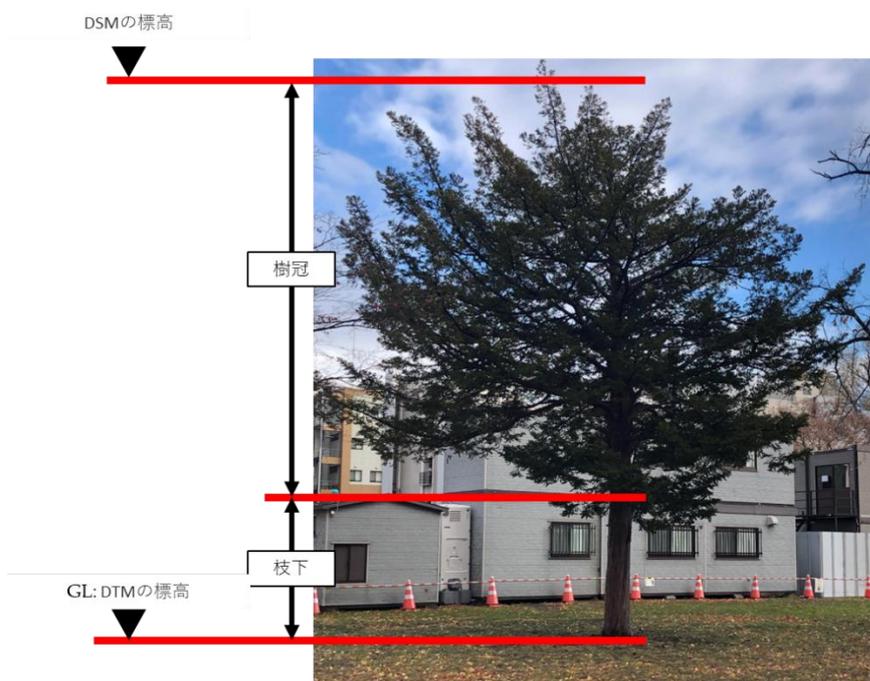


図 5-8 樹木の参考図

5.6.3 正射影画像の作成

樹木の GIS データより、5.6.1 節で説明した手順で樹木の正射影画像を作成した。図 5-9 に作成した樹木の正射影画像を示す。樹木の正射影画像はマラソンコースに沿って 20m ごとに示した。樹木がある場所を設定したことで、樹木の位置に応じて正射影画像が作成できていることを確認できた。また、20m ごとでも表示されている画像が大きく異なることが示された。

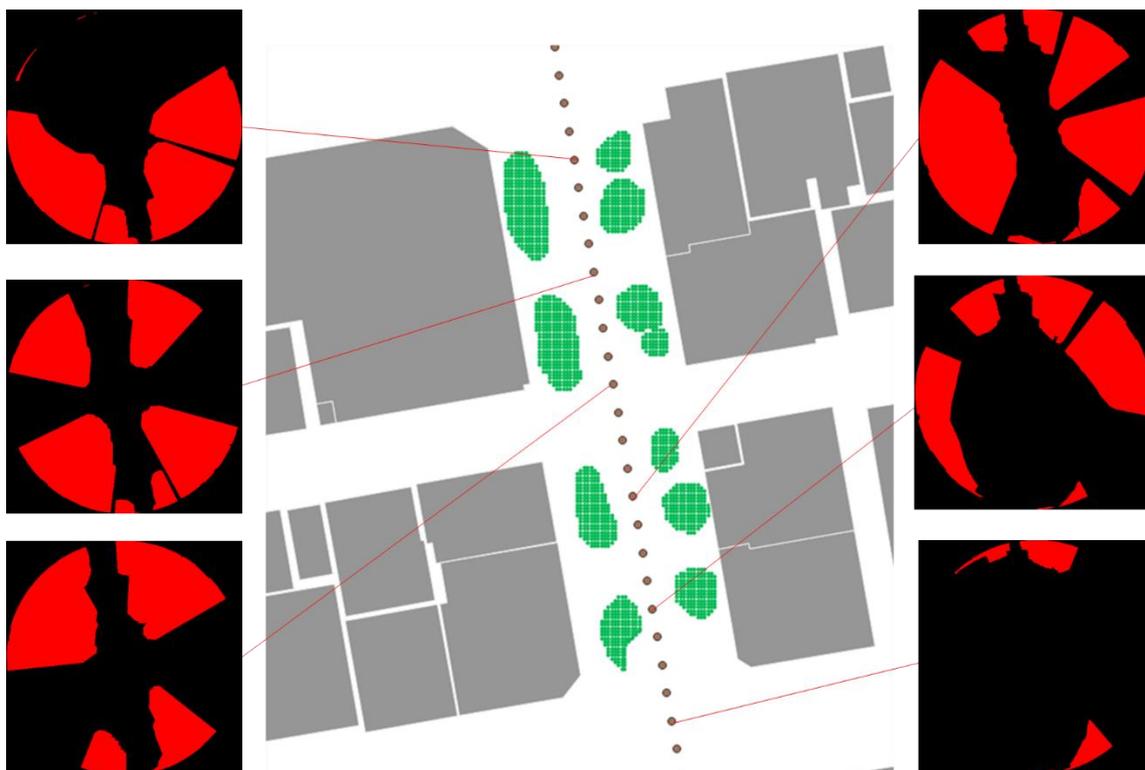


図 5-9 樹木の正射影画像 (20mごとに表示)

5.7 建物と樹木の正射影画像の合成

建物の正射影画像は解析点を 2.4.3 節の式 2-1 の N とし、式 2-1~2-3 と同様の方法で作成した。作成した建物と樹木の正射影画像を合成する。図 5-10 に合成した画像を示す。図 5-10 の正射影画像内の黄色い箇所は建物と樹木が重なっている箇所である。この場合、日射は建物に遮られるため、日射量が得られないとした。そのため、合成した正射影画像は赤の部分が樹木を樹木とし、緑と黄の部分建物をとし、残りの黒い部分を天空とした。四隅の黒色部分は対象外である。

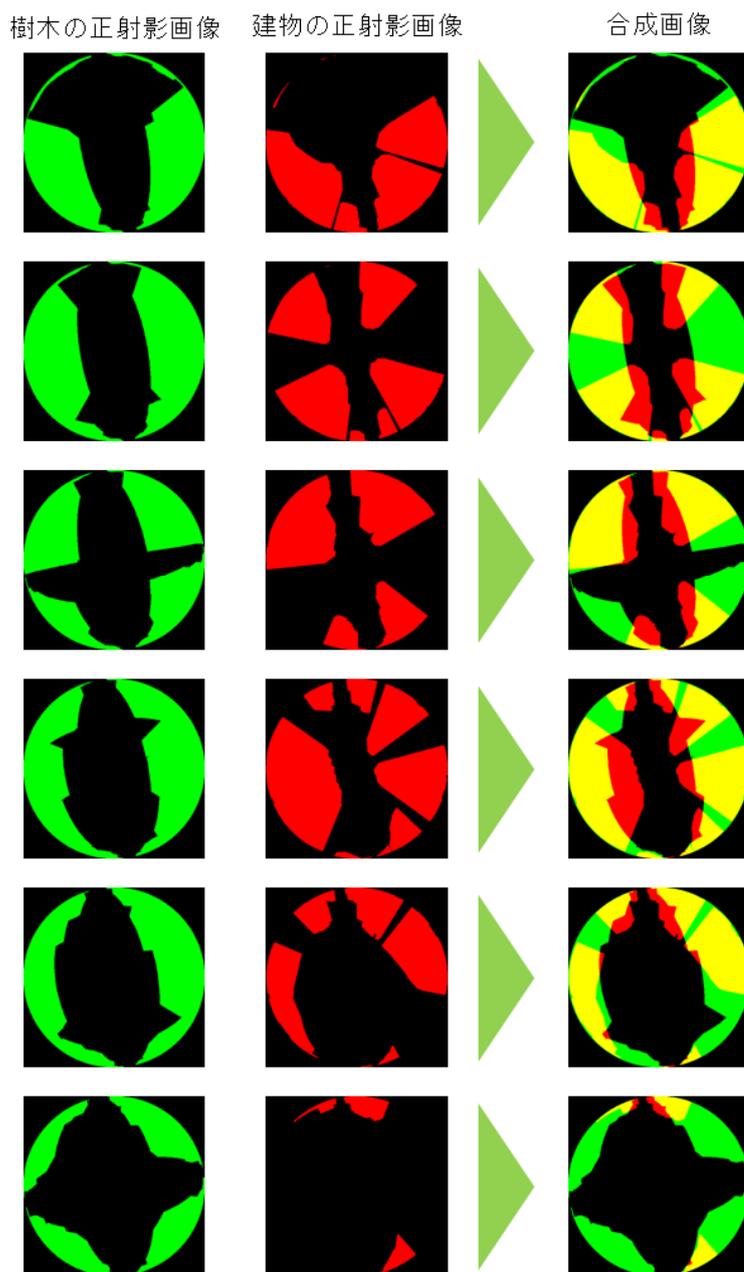


図 5-10 樹木と建物の正射影画像、および、合成画像

5.8 日射量算出手法の改善

作成した正射影画像を基に法線面直達日射量と拡散日射量を算出する。気象データは、気象業務支援センターから提供された1分値データを使用した[21]。測定値は、外気温、相対湿度、全天日射量、日照時間、蒸気圧である。これらのデータを基に、WBGTの計算に必要な値、すなわち、法面直達日射量、水平面直達日射量、水平面拡散日射量、下方大気放射量が算出された。以下の手順でWBGTの計算に必要な値を算出する。

STEP1：マラソンコースの解析はコースに沿って5m間隔で行ったため、1秒ごとの気象データが必要となった。そのため、1分間のデータを1秒間のデータに変換した。外気温、相対湿度、蒸気圧は瞬時値であるため、1秒値は現在値と1分前の値から線形補間で算出した。全天日射量は1分間の全天日射量の和であるため、これを1秒間の瞬時値に再変換し、その1分間の1秒値はすべて同じ瞬時値であると仮定した。日照時間は、1分間に直達日射が到達する時間である。日照時間が0であれば、その1分間の1秒間の値も0とし、それ以外の場合はその1分間の1秒の値を1とした。

STEP2：1秒ごとの太陽位置を算出した。2.5.2節の式2-4～2-18を参考に算出した。計算時刻は秒ではなく時に合わせる必要があるので注意が必要である。のちの手順で大気圏外放射量が必要となる。松本らの計算モデルを参照し、以下の式5-3、5-4で求めた。

$$r = \sum_{i=1}^8 P'_i \cdot \cos(Q'_i T + R'_i) + P'_9 \cdot T \cdot \cos(Q'_9 \cdot T + R'_9) \quad 5-3$$

$$I_{0-norm} = \frac{J_0}{r^2} \quad 5-4$$

I_{0-norm} ：大気の外縁における法線面日射量[W/m²]

r ：地心距離[-,AU]

J_0 ：太陽定数 (=1.367[W/m²])

P'_i ： r を求めるときの係数[-]

Q'_i ： r を求めるときの係数[-]

R'_i ： r を求めるときの係数[-]

T は式2-13より算出した値を使用した。 Q' 、 R' 、 T' は r を求めるときの係数であるが、 i によって値が変化する。本研究ではMetDS（株）気象データシステムによって公開された資料に記載の係数を参照した[22]。

STEP 3：1 分値には全天日射量しかないため、全天日射量より拡散放射量と直達放射量を算出した。直達日射量と全天日射量を分離するためのモデルは今日まで様々なモデルが提案されてきたが、気象データシステム (MetDS) によって、日本に適したモデルの検討された [23]。その結果、Perez のモデルが最も正確であり、Erbs のモデルは十分に正確であるとされた[24,25]。Erbs のモデルは計算式が簡易でありながらも、十分な制度があるとされたため、全天日射量の直散分離モデルを使用した。拡散日射量を算出する式 5-5、5-6 を以下に示す。

$$Kc = \frac{I'_{glob}}{I_{0-norm} \sin h_{sun}} \quad 5-5$$

(1) $Kc < 0.22$ のとき

$$I'_{diff} = I'_{glob}(1.0 - 0.09Kc)$$

(2) $0.22 < Kc \leq 0.80$ のとき

$$I_{diff} = I_{glob}(0.9511 - 0.1604 \cdot Kc + 4.388 \cdot Kc^2 - 16.638 \cdot Kc^3 + 12.336 \cdot Kc^4) \quad 5-6$$

(3) $Kc > 0.80$ のとき

$$I'_{diff} = 0.165 \cdot I'_{glob}$$

h_{sun} : 太陽高度[°]

Kc : 晴天指数[-]

I'_{glob} : 全天日射量[W/m²]

I'_{diff} : 拡散日射量[W/m²]

直達日射量は算出した拡散日射量を全天日射量から引くことで求めた。さらに、太陽高度より法線面直達日射量を求めた。以下に直達日射量と拡散日射量の算出する式 5-7、5-8 を示す。

$$I_{dire} = I_{glob} - I_{diff} \quad 5-7$$

$$I_{dire-norm} = \frac{I_{dire}}{\sin h_{sun}} \quad 5-8$$

I_{dire} : 水平面直達日射量[W/m²]

$I_{dire-norm}$: 法線面直達日射量[W/m²]

h_{sun} : 太陽高度[rad]

STEP 4：拡散日射量を放射輝度分布に変換する。井川らは太陽高度と大気外放射と全天日射量と拡散日射量より、天空状態を分類する指標として定義される晴天指数と清澄指標を算出し、すべての天空状態の天空輝度と天空放射輝度の分布の絶対値を連続的に表す式を提案した[26]。式は改良が重ねられたことで、非常に再現性の高いモデルとなった。本研究では松本らの太陽位置の計算式と、Erbs の日射直散分離の計算式を用いることで、全天日射量のみ計測していれば、拡散日射量の天空放射輝度分布を算出できるように整理した。以下の天空放射輝度分布を算出する式 5-9～5-22 を以下に示す。

$$Lea(h, h_{sky}, \zeta_{sky}) = Lez(h) \cdot Le(h, h_{sky}, \zeta_{sky}) \quad 5-9$$

$$Le(h, h_{sky}, \zeta_{sky}) = \frac{\varphi(h_{sky}) \cdot f(\zeta_{sky})}{\varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot f\left(\frac{\pi}{2} - h\right)} \quad 5-10$$

$$\varphi(h_{sky}) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\sin h_{sky}}\right) \quad 5-11$$

$$f(\zeta_{sky}) = 1 + c \left\{ \exp(d \cdot \zeta_{sky}) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right\} + e \cdot \cos^2 \zeta_{sky} \quad 5-12$$

$$\zeta_{sky} = \arccos\{\sin h_{sun} \sin h_{sky} + \cos h_{sun} \cos h_{sky} \cos|\alpha_{sun} - \alpha_{sky}|\} \quad 5-13$$

$$Kc = \frac{I_{glob}}{Seeg} \quad 5-14$$

$$Cle = \frac{1 - Ce}{1 - Ces} \quad 5-15$$

$$Ce = \frac{I'_{diff}}{I'_{glob}} \quad 5-16$$

$$Seeg = \frac{0.84 \cdot I_{0-norm}}{m} \exp(-0.054 \cdot m) \quad 5-17$$

$$Ces = 0.08302 + 0.5358 \cdot \exp(-17.394 \cdot h) + 0.3818 \cdot \exp(-3.289 \cdot h) \quad 5-18$$

$$m = \frac{1}{\cos(h_z) + 0.50572 \cdot (96.07995 - h_z)^{-1.6364}} \quad 5-19$$

$Lea(h, h_{sky}, \zeta_{sky})$: 絶対値で示す天空放射輝度分布[W/(m²·sr)]

$Lez(h)$: 天頂放射輝度[W/(m²·sr)]

$Le(h, h_{sky}, \zeta_{sky})$: 相対天空放射輝度分布[-]

h_{sun} : 太陽高度[rad]

h_{sky} : 天空要素の高度[rad]

α_{sun} : 太陽方位角[rad]

α_{sky} : 天空要素の方位角[rad]

ζ_{sky} : 太陽と天空要素の各距離[rad]

Cle : 清澄指数[-]

Ce : クラウドレイシヨ[-]

Ces : 基準クラウドレイシヨ[-]

$Seeg$: 基準全天日射量[W/m²]

h : 太陽高度[°]

h_z : 天頂角[°]

m : 大気経路[-]

式 5-11、5-12 の係数 a、b、c、d、e は以下の式により求められる。

$$x = A + B \cdot \exp\left(-\frac{G_{Kc}}{2}\right) + E \cdot \exp\left(-\frac{G_{Cle}}{2}\right) + H \cdot \exp\left(-\frac{G_{Kc} + G_{Cle}}{2}\right) \quad 5-20$$

$$G_{Kc} = \left(\frac{Kc - C}{D}\right)^2 \quad 5-21$$

$$G_{cle} = \left(\frac{Cle - F}{G} \right)^2 \quad 5-22$$

$A \sim G$: $a \sim e$ を求めるための係数

A, B, C, D, E, F, G, H は x で求める係数によって変わる。 $A \sim H$ の係数表は井川によって公表された値を用いた[27]。式 5-9 の $Lez(h)$ は以下の式 5-23~5-26 で求められる。

$$Lez = LzEd \cdot I_{diff} \quad 5-23$$

$$LzEd = \sum_{k=0}^5 [A(k) \cdot Kc^k] \quad 5-24$$

$$A(k) = \sum_{j=0}^6 [B(j, k) \cdot Cle^j] \quad 5-25$$

$$B(j, k) = \sum_{i=0}^5 [C(i, j, k) \cdot h^i] \quad 5-26$$

$A(k), B(j, k), C(i, j, k)$: $LzEd$ を求めるための係数

$A(k), B(j, k), C(i, j, k)$ は i, j, k の値で変化する係数である。 $A(k), B(j, k), C(i, j, k)$ の係数表は井川によって公表された値を用いた[27]。図 5-11 に作成した天空放射輝度分布を示す。水色の点が太陽位置である。赤が輝度分布拡散を示している。

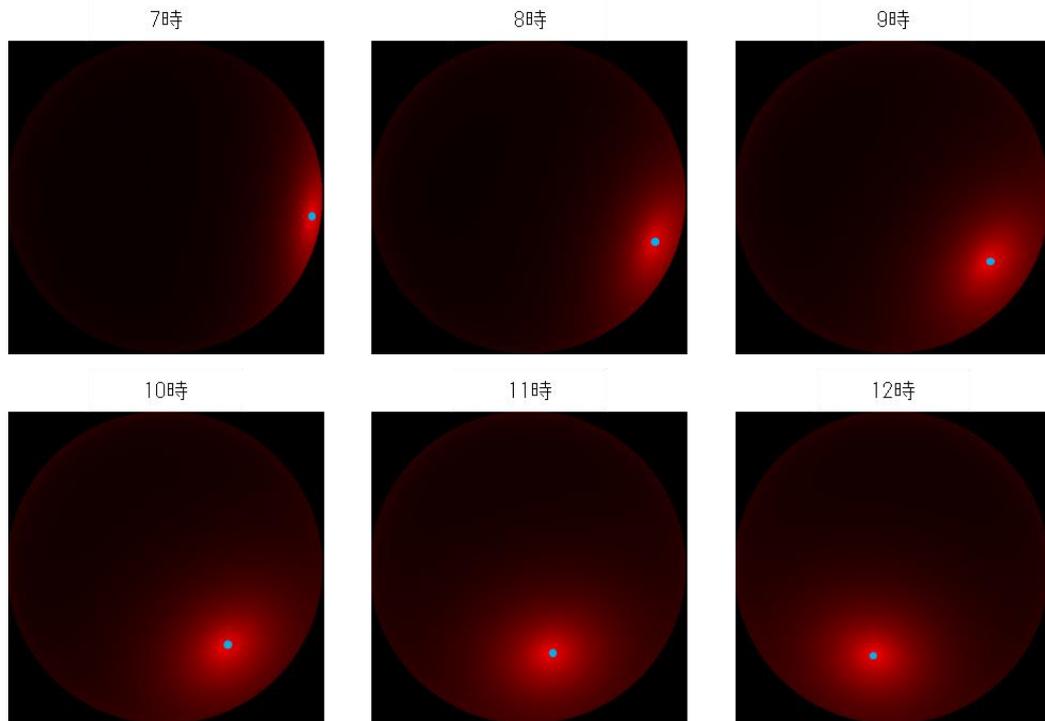


図 5-11 放射輝度分布 (7~12 時)

STEP 5：大気放射量を算出する。WBGTを計算する過程で日射量とは別に大気放射量が必要とであり、藤枝の大気放射量の計算モデルにより算出した[28]。藤枝はBrutsaertのモデルを基に日本の5か所の気象特性に応じた大気放射量の改善式を提案しており、曇天時の大気放射量も算出することができる。改善式には札幌の気象特性を反映した式があるため、本研究では札幌の改善式を利用した。晴天時の大気放射量を以下の式5-27、5-28で示す。

$$\varepsilon_{\alpha 0} = \frac{R_{CLR}}{\sigma \cdot T_0^4} \quad 5-27$$

$$\varepsilon_{\alpha 0} = C_0 \left(\frac{e_0}{T_0} \right)^{C_1} \quad 5-28$$

$\varepsilon_{\alpha 0}$ ：晴天時の大気の射出率[-]

R_{CLR} ：晴天時の下向き大気放射量[W/m²]

σ ：ステファン・ボルツマン定数 (=5.67×10⁻⁸W/(m²·K⁴))

T_0 ：地上の気温[K]

C_0 、 C_1 ：地域の気象特性の係数[-]

e_0 ：蒸気圧[hPa]

C_0 と C_1 は地域の気象特性によって変化する。札幌の場合は C_0 が1.0376、 C_1 が1/10.857である。蒸気圧は1分値から補間した1秒の蒸気圧を使用した。日照時間に応じて、晴天時以外の大気放射量は以下の式5-29、5-30で示す。

$$m_r = 1/(\sin h + 0.50572(h + 6.07995))^{-1.6364} \quad 5-29$$

(1) $SD > 0$ のとき

$$\begin{aligned} IR'_{down} &= f(SD, m_r) \cdot R_{CLR} \\ f(SD, m_r) &= y_0 + A \left(\frac{m_r}{SD} \right)^{pow} \end{aligned} \quad 5-30$$

(2) $SD = 0$ のとき

$$\begin{aligned} IR'_{down} &= f(m_r) \cdot (\sigma \cdot T_0^4) \\ f(m_r) &= K_0 + K_1 \cdot m_r + K_2 \cdot m_r^2 \end{aligned}$$

SD ：日照時間

h ：太陽高度[deg]

m_r ：相対大気経路[-]

IR'_{down} ：曇天時の大気放射量

$y_0, A, pow, K_0, K_1, K_2$ ：地域の気象特性の係数

$y_0, A, pow, K_0, K_1, K_2$ 地域の気象特性によって変化する。札幌の場合は y_0 が1.222、 A が-0.244、 pow が-0.398、 K_0 が0.9503、 K_1 が-0.0072、 K_2 が0.00028である。SDは晴天時が1であり、1分値から補間した1秒の日照時間を使用した。

STEP 6：周辺環境を加味したデータに日射量と大気放射量を変換した。STEP 3 で算出した直達日射量、STEP 4 で算出した放射輝度分、STEP 5 で算出した大気放射量は周囲に建物や樹木がない状態の値である。正射影画像によって、これらのデータをして周辺環境を加味したデータに変換する。正射影画像は建物と樹木と天空に分かれている。樹木は明確な透過率が決まっていない。本研究では藤原らが参考した以下の式 5-31 を採用している[29]。

$$\tau_{tree} = \exp(-k \cdot a \cdot l) \quad 5-31$$

τ_{tree} ：樹木の日射透過率[-]

k ：消散係数[-]

a ：葉面積密度[m⁻¹]

l ：樹木内を通過した経路長[m]

吉田らのモデルを参考に、 a は 1m⁻¹、 k は 0.6 とした。樹木の GIS データは 5.6.2 節で述べたように、0.6m メッシュで作成している。また、樹冠が 0.6m 以上としているので、日射が樹木を透過する場合、どの高度や方位からも 0.6m 以上は樹木を貫通することになる。そのため、本研究では l を 0.6 とし、樹木の日射透過率は 0.7 とした。

直達日射量は 2.5.2 節の式 2-4～2-18 で算出した太陽高度、太陽方位角を基に太陽を正射影画像上に投影し、投影された箇所に応じて日射透過率を掛けることで算出した。式 5-32 は以下の通りである。

$$I_{dire-norm} = I'_{dire-norm} \cdot \tau \quad 5-32$$

(1) 建物に投影された場合

$$\tau = 0$$

(2) 樹木に投影された場合

$$\tau = \tau_{tree} = 0.7 \quad 5-33$$

(3) 天空に投影された場合

$$\tau = 1$$

$I_{dire-norm}$ ：周辺環境を加味した法線面直達日射量

$I'_{dire-norm}$ ：周辺環境を加味されていない法線面直達日射量

τ_{tree} ：日射透過率[-]

拡散日射量は天空放射輝度を基に天空要素ごとに計算し、算出した値を合算することで周辺環境を加味した値を求めた。各天空要素では Lea と立体投射角の積に日射透過率を掛け、水平面へ入射する値に変換している。各天空要素では以下に式 5-34 を示す。

$$I_{diff} = \sum_{h_{sky}=0}^{\frac{\pi}{2}} \sum_{A_{sky}=0}^{2\pi} Lea(h_{sky}, A_{sky}) \cdot \frac{\Delta h_{sky} \cdot \Delta A_{sky}}{r^2} \cdot \tau(h_{sky}, A_{sky}) \cdot \sin h_{sky} \quad 5-34$$

I_{diff} ：周辺環境を加味した拡散日射量[W/m²]

$Lea(h_{sky}, A_{sky})$ ：天空要素ごとの絶対値で示す天空放射輝度分布[W/(m²·sr)]

$\tau(h_{sky}, A_{sky})$ ：天空要素ごとの日射透過率[-]

h_{sky} ：天空要素ごとの高度[rad]

A_{sky} : 天空要素ごとの方位[rad]

r : 正射影画像の半径

正射影画像は 1 ピクセルの集まりで構成されており、この 1 ピクセルは正射影画像の全体の面積に対し微小な値である。本手法を用いた場合、 $Lea(h_{sky}, A_{sky})$ は半球面上で得られる値であるが、その半球面上の面積は正射影画像の 1 ピクセルを垂直に上げたときに半球面に投影される面積と同じ値とした。そのため、半球面上の面積は以下の式 5-35 で算出した。また、図 5-12 に半球面上の面積を想定する概念図を示す。

$$\Delta h_{sky} \cdot \Delta A_{sky} = \frac{1}{\sin h_{sky}} \quad 5-35$$

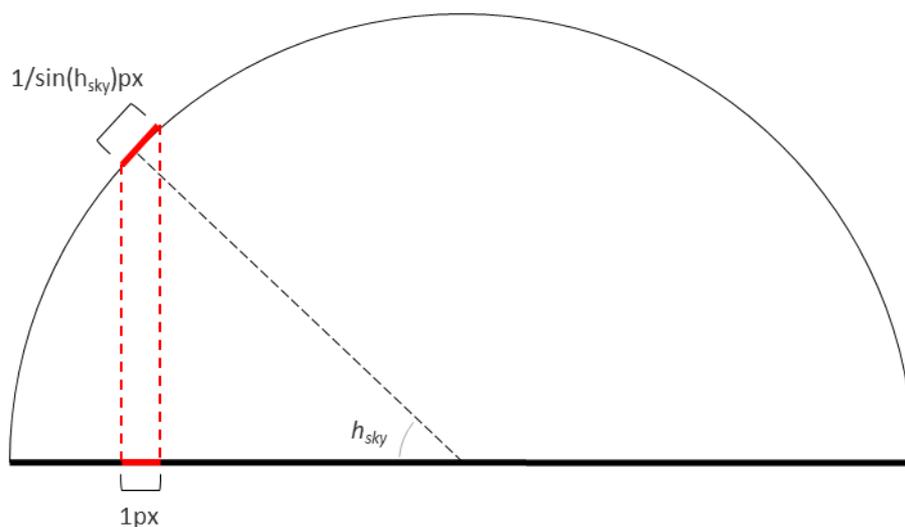


図 5-12 半球面上の面積を想定する概念図

大気放射量は天空率と樹木の形態係数の合算値を掛け合わせることで周辺環境を加味した値を算出した。以下に算出した式 5-36 を示す。

$$IR_{down} = IR'_{down} \cdot (VF_{tree} \cdot \tau_{tree} + SVF) \quad 5-36$$

IR_{down} : 周辺環境を加味した大気放射量

IR'_{down} : 周辺環境を加味されていない大気放射量

VF_{tree} : 樹木の形態係数

SVF : 天空率

樹木の形態係数は 2.5.3 節の式 2-20 の N_{sky} を正射影画像上の樹木の面積に置き換えることで算出した。 IR_{down} を算出するとき、樹木の形態係数には日射透過率を掛けた。

5.9 WBGT の算出

気象データと周辺環境に合わせた日射量と大気放射量を基に WBGT を算出した。WBGT は JIS Z8504 を参照し、日射量の影響を考慮した以下の式で算出した[13]。

$$WBGT = 0.7 \cdot T_{wet} + 0.2 \cdot T_{glob} + 0.1 \cdot T_{air} \quad 5-37$$

T_{air} : 外気温

T_{glob} : 黒球温度

T_{wet} : 湿球温度

外気温は気象データを用いた。残りの T_{glob} と T_{wet} は気象データと算出した日射量と大気放射量を基に算出した。

STEP 1 : T_{wet} の算出には JIS Z8806 に記載の SPRUNG の式と SONNTAG の式により算出した。以下に式を示す[12]。

$$T_k = T_{air} + 273.15 \quad 5-38$$

$$P_w = \exp \left\{ -6096.9385 \cdot T_k^{-1} + 21.2409642 - 2.711193 \cdot 10^{-2} \cdot T_k + 1.673952 \cdot 10^{-5} \cdot T_k^2 + 2.433502 \cdot \text{Log}(T_k) \right\} \quad 5-39$$

$$P_v = P_w - A \cdot P(T_{air} - T_{wet}) \quad 5-40$$

$$P_v = P_w \cdot \frac{RH}{100} \quad 5-41$$

P_w : 水の飽和水蒸気圧[Pa]

RH : 相対湿度[%]

P_v : 水蒸気分圧[Pa]

A : 乾湿計係数[-]

P : 大気圧[Pa]

式 5-40 によって求めた水蒸気分圧と式 5-41 によって求めた水蒸気分圧が一致するように湿球温度を求めた。

STEP 2: T_{glob} を算出するために、解析点に黒体の球（以降、黒球と称す）があると仮定した。まず外気温の熱平衡式により、上向き大気放射量と上空の温度を以下で算出した。

$$IR_{up} = \sigma \cdot (273 + T_{air})^4 - IR_{down} \quad 5-42$$

$$T_{sky} = \sqrt[4]{\frac{IR_{down}}{\sigma}} - 273 \quad 5-43$$

IR_{up} : 上向き大気放射量[W/m²]

IR_{down} : 大気放射量[W/m²]

T_{sky} : 空温度[°C]

次に黒球に到達する日射量を以下の式で算出した。

$$I_{ref} = (I_{dire} + I_{diff}) \cdot (1 - a_{ground}) \quad 5-44$$

$$I_{glob-therm} = 0.25 \cdot I_{dire-norm} + 0.5 \cdot I_{diff} + 0.5 \cdot I_{ref} \quad 5-45$$

$I_{glob-therm}$: 黒球に到達する日射量[W/m²]

I_{ref} : 反射日射量[W/m²]

I_{dire} : 水平面直達日射量[W/m²]

$I_{dire-norm}$: 法線面直達日射量[W/m²]

I_{diff} : 水平面拡散日射量[W/m²]

a_{ground} : 地面の日射吸収率 (=0.9)

黒球から見た形態係数とは全方位に対する値である。 $I_{dire-norm}$ 、 I_{diff} 、 I_{ref} はすべて半球面に対し作用する値であるため、すべて 0.5 倍した。また、法線面直達日射量の黒球へ入射する値は黒球面に対して、垂直な値に変換する必要がある。法線直達日射量を半球面の各要素に対して垂直に変換した値の合計はもとの値の 0.5 倍となる。

次に地表面の熱平衡式により地表面の温度を以下の式で算出した。

$$T_{ground} = \frac{(I_{dire} + I_{diff}) \cdot a_{ground} - IR_{up} + h_{c,ground} \cdot T_{air} + \frac{\lambda_{ground}}{d_{ground}} \cdot T_{day}}{h_{c,ground} + \frac{\lambda_{ground}}{d_{ground}}} \quad 5-46$$

T_{ground} : 地面の表面温度[°C]

$h_{c,ground}$: 地表面の対流熱伝達率(=23W/(m²·K))

λ_{ground} : 地中の熱伝達率(=2.1 W/(m²·K))

d_{ground} : 地上からの深さ (=0.3m)

T_{day} : 平均気温[°C]

地表面から深さ 0.3m の地中温度は 1 日の平均気温と同等になる。そのため、 d_{ground} は地中の深さであり、0.3m とした。

次に平均放射温度を算出した。

$$\Phi_{sky} = 0.5 \cdot SVF \quad 5-47$$

$$\Phi_{build} = 0.5 \cdot VF_{build} \quad 5-48$$

$$\Phi_{tree} = 0.5 \cdot VF_{tree} \quad 5-49$$

$$\Phi_{ground} = 0.5 \quad 5-50$$

$$MRT = \sqrt[4]{\Phi_{ground} \cdot T_{ground}^4 + \Phi_{build} \cdot T_{build}^4 + \Phi_{tree} \cdot T_{tree}^4 + \Phi_{sky} \cdot T_{sky}^4} \quad 5-51$$

Φ_{sky} 、 Φ_{build} 、 Φ_{tree} 、 Φ_{ground} : 黒球から見た天空、建物、樹木、地面の形態係数

MRT : 平均放射温度[°C]

先にも説明した通り、黒球から見た形態係数とは全方位に対する値である。そのため、地面の形態係数は 0.5 とし、建物、樹木、天空の形態係数は前章で算出した天空率に 0.5 を掛けた値とした。

最後に上記で算出した各値より、黒球温度を算出した。

$$h_{c,glob} = 0.356 + 5.93 \cdot v^{\frac{1}{2}} + 4.063 \cdot v^{\frac{2}{3}} \quad 5-52$$

$$h_{r,glob} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (273 + MRT)^3 \quad 5-53$$

$$T_{env} = \frac{h_{c,glob} \cdot T_{air} + h_{r,glob} \cdot MRT}{h_{c,glob} + h_{r,glob}} \quad 5-54$$

$$T_{glob} = T_{env} + \frac{a_{glob} \cdot I_{glob-therm}}{h_{c,glob} + h_{r,glob}} \quad 5-55$$

v : 走行速度[m/s]

$h_{c,glob}$: 黒球の対流熱伝達率[W/(m²·K)]

$h_{r,glob}$: 黒球の放射熱伝達率[W/(m²·K)]

ε : 黒球表面の放射率(=0.95)

σ : ステファン・ボルツマン定数 (=5.67×10⁻⁸ W/(m²·K⁴))

T_{env} : 作用温度[°C]

T_{glob} : 黒球温度[°C]

走行速度はフルマラソンを 2 時間で完走することを想定して、5.86 m/s とした。

以上により気象データの計測地である T_{air} と算出した T_{wet} 、 T_{glob} を式 5-37 に代入して WBGT を算出した。

5.10 WBGT の解析

東京オリンピックで使用されたマラソンコースを評価するため、前節で述べた方法でマラソンコースの WBGT を算出した。WBGT は地域別のシミュレーションと日程別のシミュレーションを実施した。

5.10.1 地域別の WBGT の解析

東京と札幌の 2 つの気象で WBGT を算出した。解析した日程は 5.5 節で決定した 8 月 4 日とした。表 5-3 に札幌と東京の気象データを示す。表 5-3 は 5 時から 13 時までの気象データを参考に作成している。解析時間は 5 時～7 時、7 時～9 時、9 時～11 時、11 時～13 時の 4 つの時間帯とした。表 5-1 の運動に関する指針に記載されているようにマラソンは WBGT が 21°C 以下でも熱中症になる可能性がある[14]。Roberts らは、北緯 40 度以上の地域で 21°C 以上の環境下でレースを開催しないよう勧告しています。札幌は北緯 43 度に位置するため、WBGT が 21°C を超えるようであれば、札幌でのマラソン開催は再考すべきと考えられる[2]。

表 5-3 東京と札幌の気象データ

	気温 (°C)			日射量 (W/m ²)
	平均	最高	最低	平均
東京	28.6	31.9	24.6	483.6
札幌	25.4	27.5	22.4	267.6

図 5-13 にスタート時間ごとの WBGT の推移を示す。図の横軸は走行距離である。図 5-1 の①～⑤の凡例も追加で記載している。WBGT の値は 5 時スタートが最も低く、次点で 7 時スタートが低くなっている。9 時スタートと 11 時スタートの WBGT は似た推移をしている。WBGT の減少がはっきりと確認できるのは 9 時スタートより前の時間であるため、熱中症リスクを抑えるためにも 9 時よりも前の時間帯でマラソンを開始すべきである。札幌の WBGT では 5 時スタートでも最低値は 21°C を超えている。既往研究では 21°C を超える場合はマラソンを開催すべきではないとしている研究や、マラソンのパフォーマンスが落ちたことを示した研究もある[30-32]。東京オリンピックと同じ 7 時スタートでは WBGT が最大で 27°C を超えるような箇所も存在する。9 時スタートや 11 時スタートでは WBGT が 25 度前後を推移している。環境省が提示している熱中症予防運動指針では WBGT が 25°C を超えると、30 分ごとに休憩を取り、適宜休憩をとることとされている。つまり、2020 年 8 月 4 日の 9 時以降の時間帯はマラソンのような 2 時間を超える運動には適していないといえる。東京の WBGT は 5 時スタートでも 25°C を超えており、11 時スタートでは WBGT が 30°C 前後を推移していたことから、マラソンに適していない気候だったといえる。

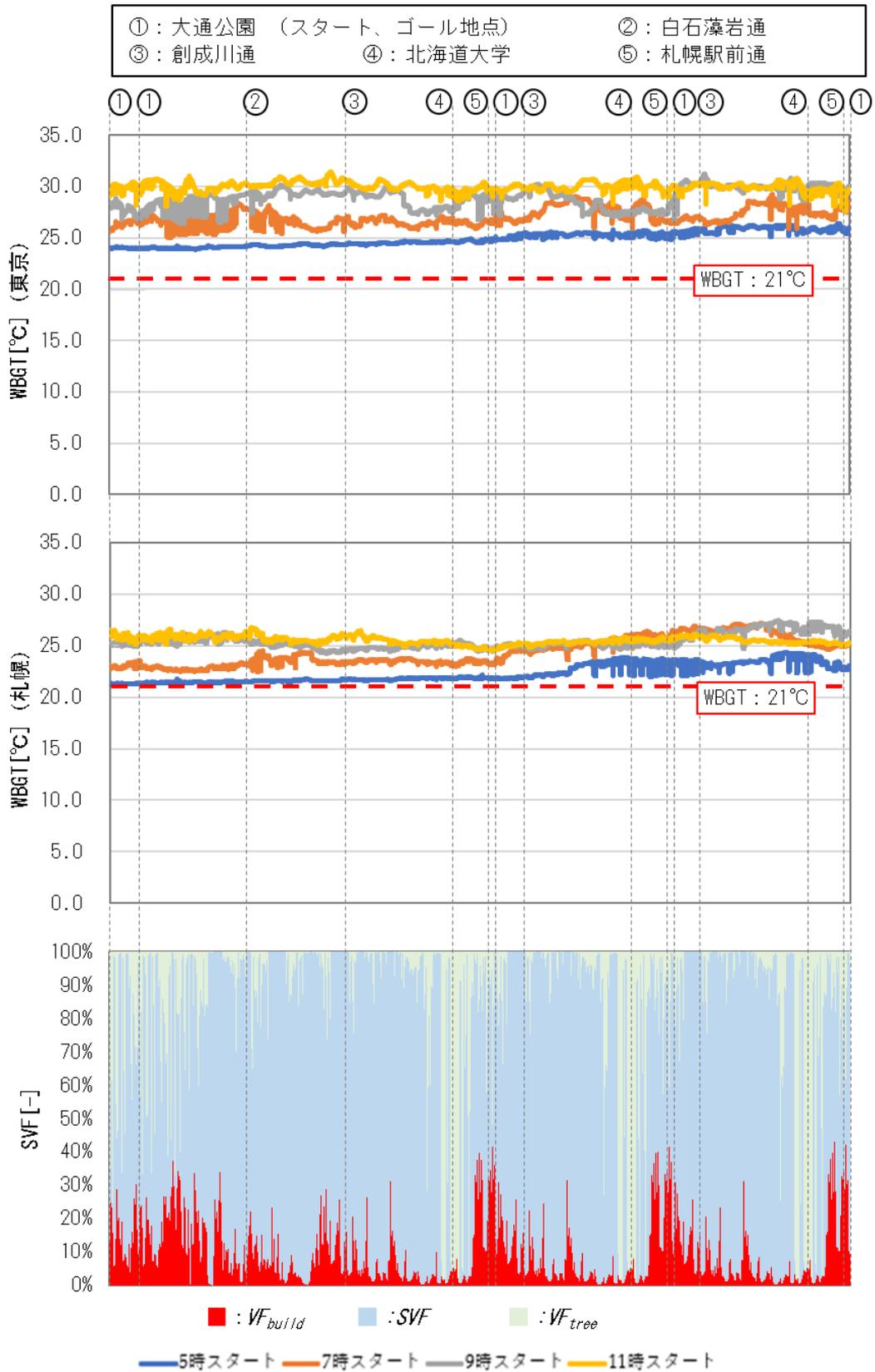


図 5-13 WBGT の推移 (2020 年 8 月 4 日、東京と札幌のデータ)

5.10.2 日程別の WBGT の解析

WBGT に影響を与える要因を調べるために、札幌の 2020 年の気象データから 6 日間の気象データを選択し、その日の WBGT を解析した。表 5-4 に日程別の気象データを示す。気象データは、天気が晴れで暑い日（8月26日）、涼しい日（6月5日）、寒い日（4月13日）と天気が曇りで暑い日（8月4日）、涼しい日（8月31日）、寒い日（4月2日）を選択した。晴れの日には日射量が多く、曇りの日は日射量が少ない。これらの気象データをもとに、それぞれ4つの時間帯の WBGT を算出した。そして、算出した WBGT を目的変数として、6つの説明変数による重回帰分析を行った。表 5-5 に説明変数を示す。6つの説明変数は外気温、相対湿度、晴天指数、全天日射量、建物の形態係数、樹木の形態係数である。各説明変数の VIF はすべて 10 以下であり、多重共線性はなかった。

表 5-4 日程別の気象データ

	平均	気温(°C)		日射量(W/m ²)
		最高	最低	平均
2020/4/2	8.3	10.1	7.1	202.9
2020/4/13	5.8	11.2	0.0	440.2
2020/8/31	17.2	21.7	13.7	270.6
2020/6/5	20.4	22.3	17.1	474.5
2020/8/4	25.6	28.6	22.4	218.7
2020/8/26	26.8	30.6	23.1	394.3

表 5-5 6つの説明変数

凡例	内容	単位
T_{air}	外気温	°C
H	相対湿度	%
Kc	晴天指数	-
I_{glob}	全天日射量	W/m ²
VF_{build}	建物の形態係数	-
VF_{tree}	樹木の形態係数	-

重回帰分析の結果を図 5-14 と表 5-6 に示す。すべての説明変数の P 値が 0.05 以下になり、有意差が確認できた。WBGT への寄与度が最も高い値は T_{air} であり、次点で H である。この二つの説明変数は WBGT と正の相関を示した。ISO 7243 の WBGT の推定式より、 T および H は高い影響力があることがわかる[13]。また、過去の研究でも外気温と相対湿度の上昇が WBGT の上昇要因となることが示唆されており、同様の結果が得られた[33-35]。3 番目に寄与率が高いのは I_{glob} であり、WBGT と正の相関を示した。 I_{glob} が高くなることで、地表面温度やグローブ温度の上昇するためである。 Kc は低い寄与度を示し、WBGT と正の相関を示した。 Kc は天候の指標であり、 Kc が高いほど天候は晴れとなる。 Kc が高いほど地上に到達する日射量が増えることになるため、WBGT の上昇に寄与した。 VF_{build} と VF_{tree} も寄与率は低いですが、WBGT と負の相関があることを確認できた。この 2 つの SVF は値が上昇するほど、地上に到達する日射量を減衰させるため、WBGT の抑制に寄与した。計算に使用した説明変数の中では、この二つのみが負の相関を示したことから、高温環境となる地域では VF_{build} と VF_{tree} の値に着目し、WBGT の負担が少ないコースを選ぶことが重要である。

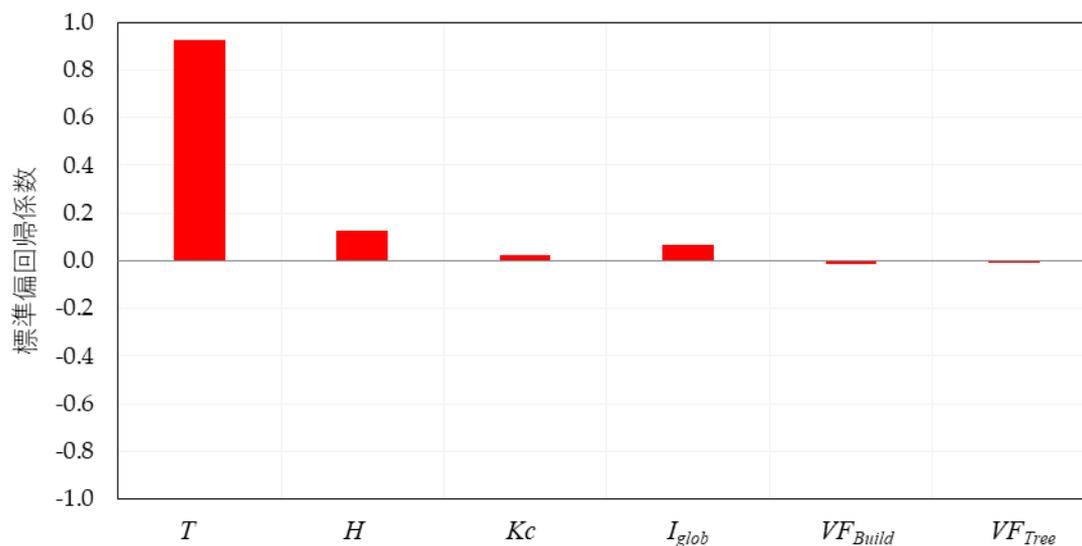


図 5-14 各説明変数の標準偏回帰係数

表 5-6 WBGT の重回帰分析結果

	T	H	Kc	I_{global}	VF_{Build}	VF_{Tree}
標準偏回帰係数	0.923	0.126	0.023	0.064	-0.014	-0.011
P 値	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

図 5-15 と図 5-16 に WBGT の推移を示す。各図の下に天空率(SVF)と建物と樹木の形態係数 (VF_{build} 、 VF_{tree}) の推移を示す図を追加した。横軸は走行距離を示しており、上下の図で同じ値としている。また、図 5-1 のコースの位置を示す①～⑤の凡例を追加している。

図 5-15 と図 5-16 より平均温度が高い日のほど WBGT が高くなりやすいことが確認できた。また、最小気温と最大気温の差が大きいところほど、WBGT の振れ幅が大きくなった。平均気温が 25°C 以上に暑い日だと、1 日を通して WBGT が 21°C を超えるため、マラソンのようなハードなスポーツの実施は進められない。6 月 5 日のように日射量が多い日も平均気温が 20°C 程度であれば、早朝からマラソンを始めることで熱中症のリスクを回避できるといえる。逆に 4 月 13 日のように気温の低い日だと、WBGT が 5°C 以下になる可能性がある。そのため、気温の低い日は早朝の運動は避け、昼間にマラソンを実施する方がよい。8 月 31 日の気象データは 4 つの時間帯を通して WBGT が 21°C を超えることはほとんどなかった。札幌の気象であれば、八月中でも熱中所のリスクを抑えて開催できる日があることが示された。

以上をより、札幌市の場合、平均気温が 25°C を超える日は建物や樹木によって WBGT が遮蔽されたとしても WBGT が 21°C を超えるため、マラソンを実施は検討すべきだと考えられる。一方で、8 月でも気象次第ではほとんどの時間帯で WBGT が 21°C を下回る日が存在した。このことから、札幌市ではマラソンの候補日を複数設け、当日の気象状況に応じてマラソン実施の可否を決定することで熱中症のリスクが少ない日を選択することができる。

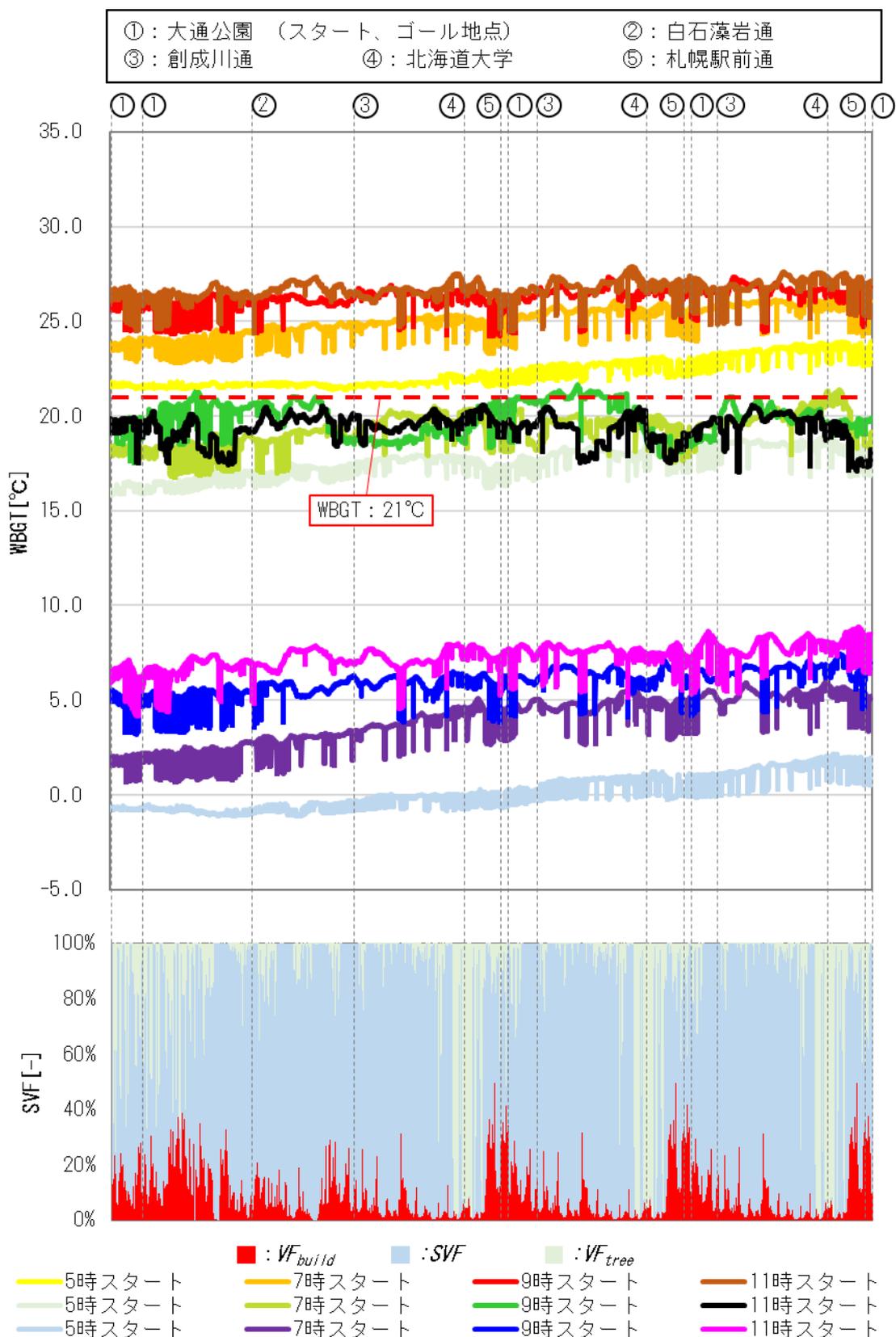


図 5-15 晴れの日 WBGT の推移

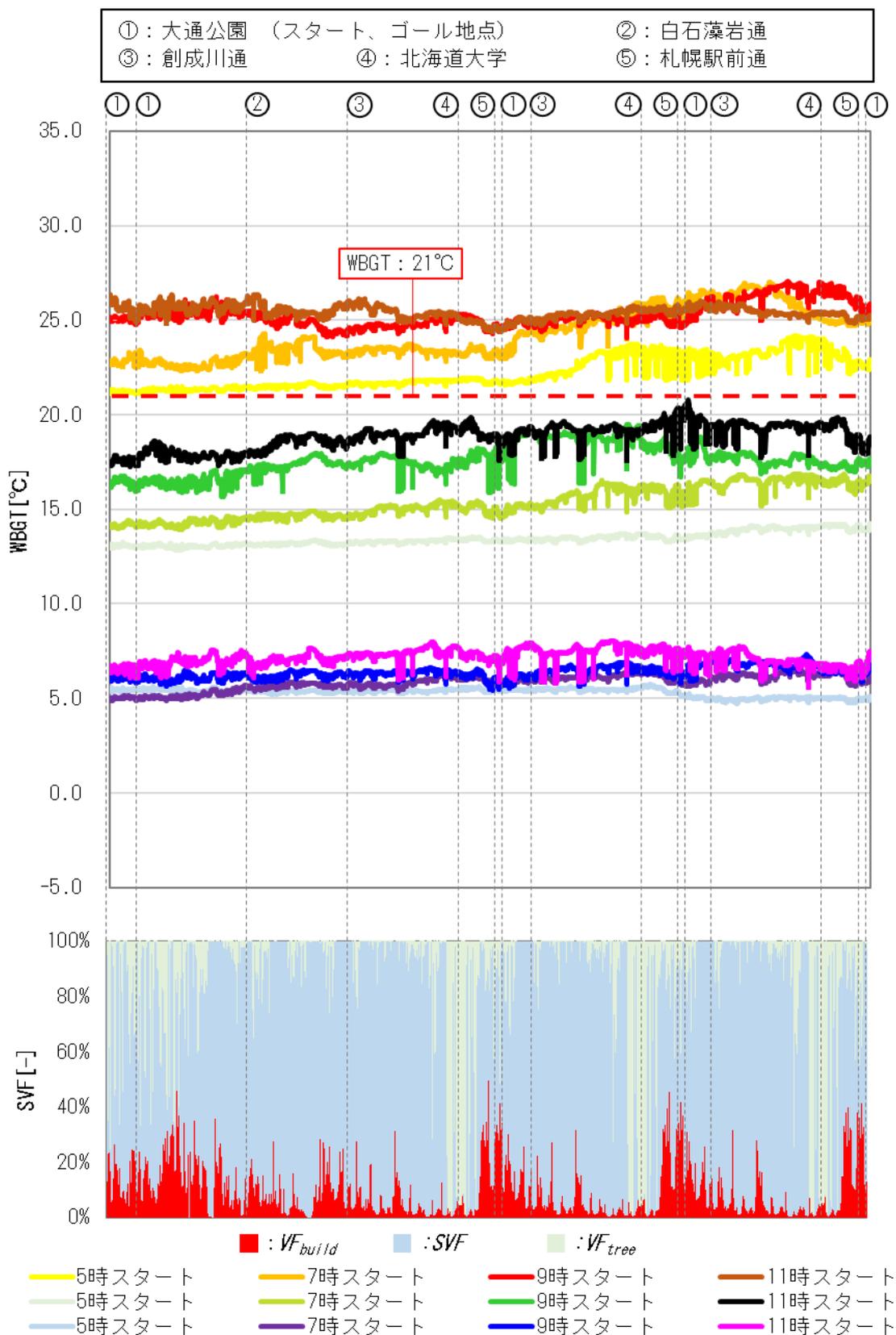


図 5-16 曇りの日の WBGT の推移

5.10.3 WBGTの減衰量の解析

WBGTに対する周辺環境の影響をより明確に確認するために、解析地点のWBGTと周辺環境を無視した場合のWBGTの差を算出した。この差をWBGTの減衰量とした。図5-17とはWBGTの減衰量とSVF、 VF_{tree} と VF_{build} の関係を示す。また、図5-18、図5-19に8月4日を対象にWBGTの減衰量をマラソンコースにプロットした図を示す。

図5-17の VF_{build} に注目すると、 VF_{build} の値が大きいくほどWBGTの減衰量が増加している。これは建物が多くなるほど日射量が多く遮られるからである。 VF_{tree} に注目すると0から0.4まではWBGTの減衰量が増えているがそれ以降はWBGTの減衰量にあまり変化がない。樹木は日射を透過するため、建物ほどWBGTの減衰は期待できない。そして、 VF_{tree} が大きくなるほど VF_{build} の大きさ制限される。そのため、 VF_{tree} が0.4程度の時が、樹木の日射遮蔽効果が得られつつ、 VF_{build} の日射遮蔽の恩恵を受けやすかったのだと考えられる。SVFに着目すると0.4から0.5の天空率の時が最もWBGTを減衰することができ、その天空率から離れた値になるほどWBGTの減衰量が減っていった。SVFが大きい場合、日射を遮るものがなくなるためWBGTの減衰がほとんどない。一方でSVFが小さい場合、 VF_{build} と VF_{tree} が大きくなる。 VF_{tree} と同様に形態係数は VF_{build} の占める割合が大きいくほうがWBGTの減衰が期待できる。今回のマラソンコースに関しては、SVFが0.4~0.5の時が VF_{build} の恩恵を最も受けやすく、以降SVFが小さくなる場合 VF_{tree} の割合が VF_{build} よりも大きくなる場所が多かったため、WBGTの減衰量が小さくなったと考えられる。外値を考慮するとこのマラソンコースでは最大で2.5°CのWBGTの減衰が見込める場所が存在することが分かった。

図5-18、図5-19に注目すると、北大の南門からすすきのまでのコースはWBGTの減衰量が多かった。これは建物が密集しているため、日射が多く遮られたためだと考えられる。創成川沿いは数か所かでWBGTの減衰が確認されており、WBGTの減衰量が最も多かった開始時刻は5時スタートだった。創成川通りが南北の通りであるため、日中よりも早朝の方が日射量を遮りやすかったと考えられる。一方で豊平川付近や北海道大学の北側に当たる道路では日射を遮るものがないため、日中を通してWBGTの減衰が確認できなかった。

以上より、日射量が遮られたことでWBGTの減衰が確認できる場所もある一方で、日中を通してWBGTの減衰が確認されない場所を把握することができた。把握できた場所に樹木の設置などの対策をすることで暑熱環境の改善ができる。

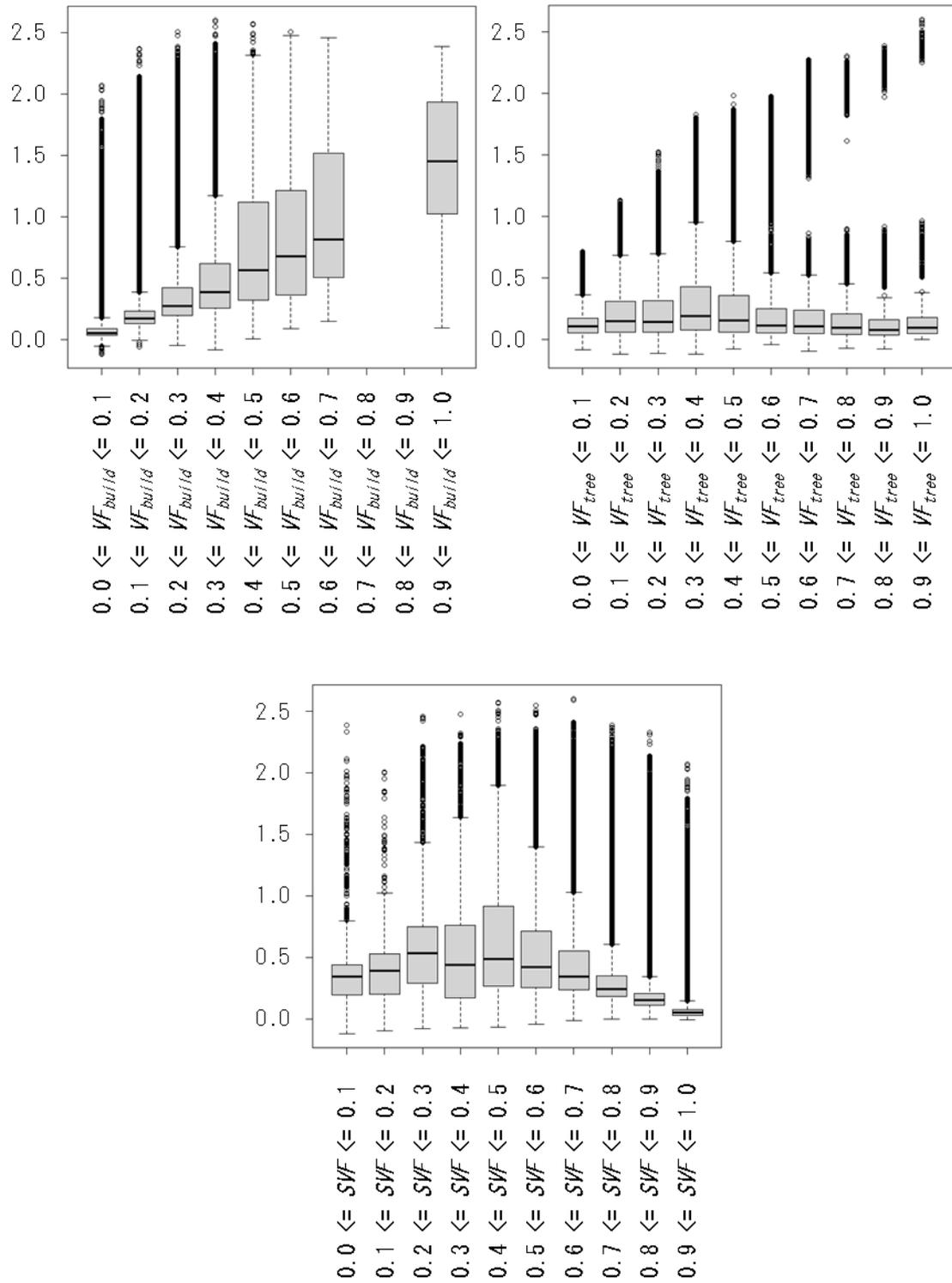


図 5-17 SWF 、 VF_{tree} 、 VF_{build} に対する WBGT の減衰量



図 5-18 マラソンコースにおける WBGT の減衰量 (8 月 4 日 : 5 時スタート、7 時スタート)

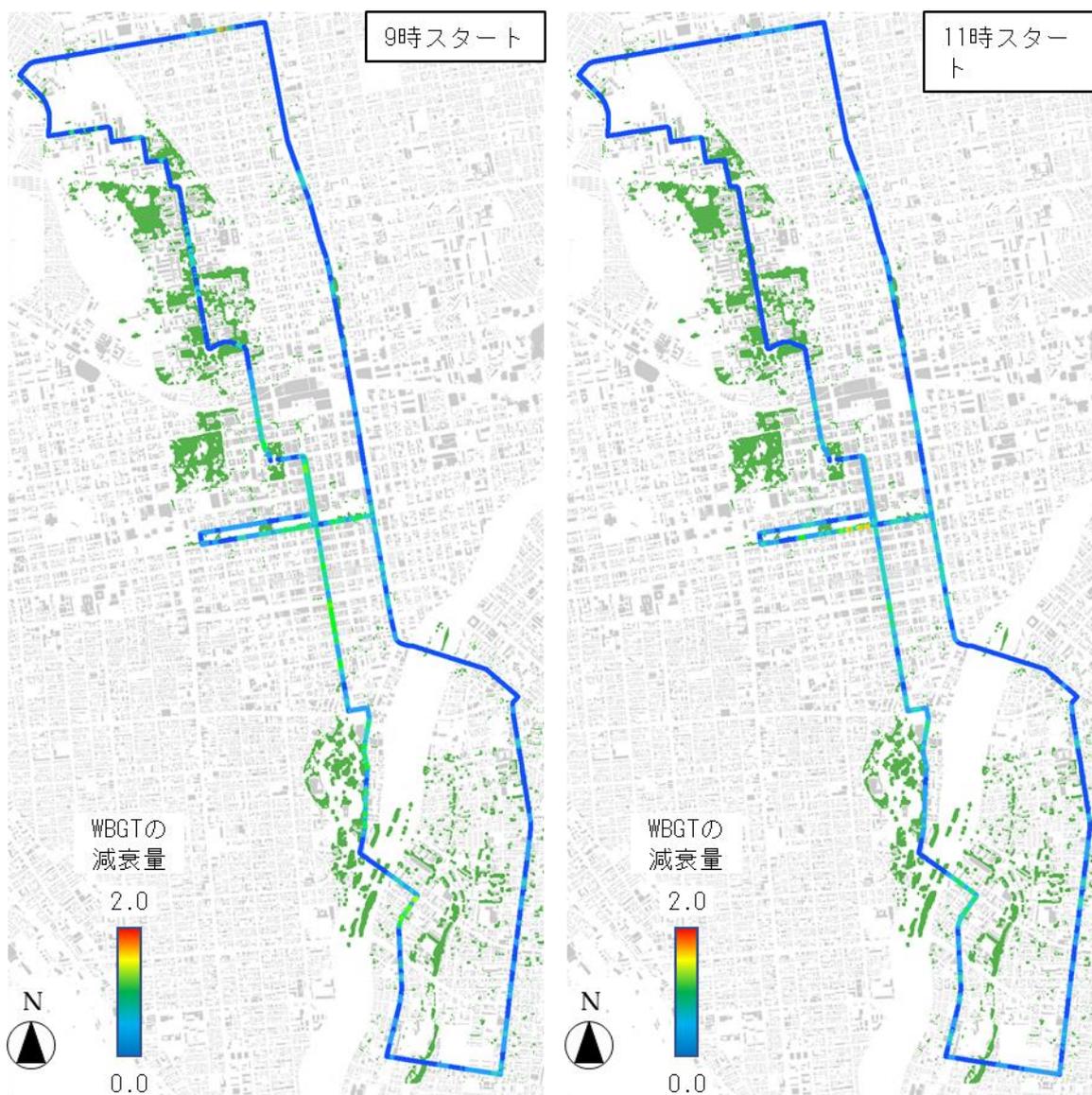


図 5-19 マラソンコースにおけるWBGTの減衰量（8月4日：9時スタート、11時スタート）

5.11 まとめ

本章では、周辺環境を加味した日射量により WBGT の算出し東京五輪・マラソンコースの温熱評価を行った。本章の成果を以下に示す。

- (1) 樹木の影響を考慮するために、FGD、AW3D データ、航空写真から樹木の GIS データを作成し、正射影画像に樹木の影響を反映した。
- (2) WBGT に必要な数値は、実測した気象情報から算出した。Matsumoto らの太陽位置の式と Erbs の直達日射分離の式を用いて、測定した全天日射量のみで拡散日射量の天空放射照度分布を算出できるように整理した。算出された散乱日射量、直達日射量、大気放射量の天空輝度分布は、正射画像を用いて周囲の地形の影響を考慮した値に変換された。この値を用いて、JIS Z8504 に準拠した周辺環境を考慮した WBGT の算出方法を提案した。
- (3) 提案した WBGT 算出方法を用いて、東京オリンピックのマラソンコースの環境評価を、札幌と東京の 2 つの気象データで比較しました。東京の WBGT は 5 時スタートでも 25°C を超えており、マラソン開催に適さない天候であることがわかります。札幌の WBGT も 5 時スタートで 21°C を超えており、マラソン開催には厳しい天候であったことがわかった。
- (4) 重回帰分析により、WBGT に影響を与える要因を 6 つの説明変数で分析した。6 つの説明変数のうち、 VF_{build} と VF_{tree} だけが WBGT と負の相関があることがわかった。しかし、札幌の場合、平均気温が 26°C 前後の日は、建物や樹木による遮蔽で WBGT が減衰しても 21°C を超えるので、マラソンの開催は再考する必要がある。一方で、8 月でもほとんどの時間帯で WBGT が 21°C を下回る日が存在したので、札幌市ではマラソンの候補日を複数設け、当日の気象状況に応じてマラソン実施の可否を決定することで熱中症のリスクが少ない日を選択することができる。
- (5) WBGT の減衰値を定義し、 SVF 、 VF_{tree} 、 VF_{build} の関係を解析した。また、8 月 4 日を対象にマラソンコースの WBGT を地図で表した。WBGT の減衰量は VF_{build} に最も依存している。WBGT の地図より日射量が遮られたことで WBGT の減衰が確認できる場所もある一方で、日中を通して WBGT の減衰がほとんどない場所を把握することで、都市内で暑熱環境の改善が必要箇所を確認できた。

5章 参考文献

- [1] International Olympic Committee Tokyo 2020 Men' s Marathon Results - Olympic Athletics Available online: <https://olympics.com/en/olympic-games/tokyo-2020/results/athletics/men-s-marathon> (accessed on 21 December 2022).
- [2] Roberts, W.O. :Determining a “Do Not Start” Temperature for a Marathon on the Basis of Adverse Outcomes, *Med Sci Sports Exerc*, 42, p226-232, 2010, doi:10.1249/MSS.0B013E3181B1CDCF.
- [3] Tan, G.C.W., Zheng, K., Cheong, W.K., Byrne, C., Iversen, J.N., Lee, J.K.W. :Small Changes in Thermal Conditions Hinder Marathon Running Performance in the Tropics, <https://doi.org/10.1080/23328940.2022.2086777>, 9, p373-388, 2022, doi:10.1080/23328940.2022.2086777.
- [4] el Helou, N., Tafflet, M., Berthelot, G., Tolaini, J., Marc, A., Guillaume, M., Hausswirth, C., Toussaint, J.F. :Impact of Environmental Parameters on Marathon Running Performance, *PLoS One*, 7, pe37407, 2012, doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0037407.
- [5] Armstrong, L.E., Casa, D.J., Millard-Stafford, M., Moran, D.S., Pyne, S.W., Roberts, W.O. :Exertional Heat Illness during Training and Competition, *Med Sci Sports Exerc*, 39, p556-572, 2007, doi:10.1249/MSS.0B013E31802FA199.
- [6] Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Matthews, J.B.R., Berger, S., Huang, M., Yelekçi, O., Yu, R., et al. :Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Edited By, 2021.
- [7] Otani, H., Kaya, M., Tamaki, A., Watson, P., Maughan, R.J. :Effects of Solar Radiation on Endurance Exercise Capacity in a Hot Environment, *Eur J Appl Physiol*, 116, p769-779, 2016, doi:10.1007/S00421-016-3335-9/METRICS.
- [8] Budd, G.M. :Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT)-Its History and Its Limitations, *J Sci Med Sport*, 11, p20-32, 2008, doi:10.1016/J.JSAMS.2007.07.003.
- [9] James, C.A., Willmott, A.G.B., Dhawan, A., Stewart, C., Gibson, O.R. :Increased Air Temperature Decreases High-Speed, but Not Total Distance, in *International Field Hockey, Temperature*, 9, p357-372, 2022, doi:10.1080/23328940.2021.1997535/SUPPL_FILE/KTMP_A_1997535_SM3779.DOCX.
- [10] Nassis, G.P., Brito, J., Dvorak, J., Chalabi, H., Racinais, S. :The Association of Environmental Heat Stress with Performance: Analysis of the 2014 FIFA World Cup Brazil, *Br J Sports Med*, 49, p609-613, 2015, doi:10.1136/BJSPORTS-2014-094449.

- [11] Vanos, J.K., Thomas, W.M., Grundstein, A.J., Hosokawa, Y., Liu, Y., Casa, D.J. :A Multi-Scalar Climatological Analysis in Preparation for Extreme Heat at the Tokyo 2020 Olympic and Paralympic Games, *Temperature*, 7, p191-214, 2020, doi:10.1080/23328940.2020.1737479.
- [12] ISO : JIS Z 8806:2001 湿度—測定方法 , JIS ハンドブック.
- [13] ISO :JIS Z 8504:2021 熱環境の人間工学—WBGT (湿球黒球温度) 指数を用いた熱ストレス評価 , JIS ハンドブック.
- [14] JSPO (公益財団法人日本スポーツ協会) 医・科学ガイドブック Available online: <https://www.japan-sports.or.jp/publish/tabid776.html#guide01> (accessed on 21 December 2022).
- [15] 環境省 環境省熱中症予防情報サイト Available online: <https://www.wbgt.env.go.jp/> (accessed on 21 December 2022).
- [16] QGISプロジェクトへようこそ! Available online: <https://qgis.org/ja/site/> (accessed on 21 December 2022).
- [17] Matzarakis, A. Different Trees and Configuration as Microclimate Control Strategy in Tropics Available online: https://www.researchgate.net/publication/262560304_Different_Trees_and_configuration_as_microclimate_control_strategy_in_Tropics (accessed on 21 December 2022).
- [18] Kong, L., Lau, K.K.L., Yuan, C., Chen, Y., Xu, Y., Ren, C., Ng, E. :Regulation of Outdoor Thermal Comfort by Trees in Hong Kong, *Sustainable Cities Soc*, 31, p12-25, 2017, doi:10.1016/J.SCS.2017.01.018.
- [19] Lin, B.S., Lin, Y.J. :Cooling Effect of Shade Trees with Different Characteristics in a Subtropical Urban Park, *HortScience*, 45, p83-86, 2010, doi:10.21273/HORTSCI.45.1.83.
- [20] 国土交通省 国土地理院 地図・空中写真閲覧サービス Available online: <https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1> (accessed on 21 December 2022).
- [21] 気象業務支援センター Available online: <http://www.jmbcs.or.jp/jp/> (accessed on 21 December 2022).
- [22] MetDS (株) 気象データシステム 太陽位置の計算 (技術解説一般) Available online: <https://www.metds.co.jp/documents/ea/> (accessed on 21 December 2022).
- [23] MetDS (株) 気象データシステム 日射直散分離と斜面日射の計算 (技術解説 (日射・昼光関係)) Available online: <https://www.metds.co.jp/documents/ea/> (accessed on 21 December 2022).

- [24] Ineichen, P., Perez, R., Seal, R., Maxwell, E., Zalenka, A. :Dynamic Global-to-Direct Irradiance Conversion Models, ASHRAE Trans, 1992.
- [25] Erbs, D.G., Klein, S.A., Duffie, J.A. :Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation, Solar Energy, 28, p293-302, 1982, doi:10.1016/0038-092X(82)90302-4.
- [26] 井川 憲男 :Improving the All Sky Model for the Luminance and Radiance Distributions of the Sky, Solar Energy, 105, p354-372, 2014, doi:10.1016/J.SOLENER.2014.03.020.
- [27] 井川 憲男 :天空輝度・放射輝度分布を推定する天空モデルの整備, 日本建築学会環境系論文集, 78, p393-399, 2013, doi:10.3130/AIJE.78.393.
- [28] 藤枝 鋼 :日本国内における昼間の地表付近の大気放射量推定法, 気象研究所研究報告, 67, p1-14, 2018, doi:10.2467/mripapers.67.1.
- [29] Fujiwara, K., Asawa, T., Kiyono, T. :暑熱適応策とヒートアイランド緩和策からみたオープンスペースにおける樹木配置の最適化と影響評価, 日本建築学会環境系論文集, 85, p475-484, 2020, doi:10.3130/AIJE.85.475.
- [30] Ely, M.R., Cheuvront, S.N., Roberts, W.O., Montain, S.J. :Impact of Weather on Marathon-Running Performance, Med Sci Sports Exerc, 39, p487-493, 2007, doi:10.1249/MSS.0B013E31802D3ABA.
- [31] Mantzios, K., Ioannou, L.G., Panagiotaki, Z., Ziaka, S., Périard, J.D., Racinais, S., Nybo, L., Flouris, A.D. :Effects of Weather Parameters on Endurance Running Performance: Discipline-Specific Analysis of 1258 Races, Med Sci Sports Exerc, 54, p153-161, 2022, doi:10.1249/MSS.0000000000002769.
- [32] Montain, S.J., Ely, M.R., Cheuvront, S.N. :Marathon Performance in Thermally Stressing Conditions, Sports Med, 37, p320-323, 2007, doi:10.2165/00007256-200737040-00012.
- [33] Gasparetto, T., Nessler, C. :Diverse Effects of Thermal Conditions on Performance of Marathon Runners, Front Psychol, 11, 2020, doi:10.3389/FPSYG.2020.01438.
- [34] Bouscaren, N., Millet, G.Y., Racinais, S. :Heat Stress Challenges in Marathon vs. Ultra-Endurance Running, Front Sports Act Living, 1, p59, 2019, doi:10.3389/FSPOR.2019.00059.
- [35] Weiss, K., Valero, D., Villiger, E., Scheer, V., Thuany, M., Cuk, I., Rosemann, T., Knechtel, B. :The Influence of Environmental Conditions on Pacing in Age Group Marathoners Competing in the “New York City Marathon,” Front Physiol, 13, 2022, doi:10.3389/FPHYS.2022.842935.

第6章 結論

6.1 本研究の総括

気候変動対策として 2050 年までのカーボンニュートラルの実現が世界の共通目標になり、脱炭素社会への取り組みが活発になっている。日本でも喫緊の目標として 2030 年までに、温室効果ガスを 2013 年度比 46%減することを宣言した。このような状況で、再生可能エネルギーとして日射の有効活用が注目されている。日射は太陽光発電による創エネや、ダイレクトソーラーゲインによる直接利用で ZEB、ZEH の普及に貢献できる一方で、多すぎる日射は熱環境の悪化を生じさせるため正確な予測が必要である。日射量は周辺環境によって大きく変化する。特に都市内では、日射を遮る障害物が多く存在し、日射量の正確な予測が難しい。近年では GIS が普及したことで、都市の周辺環境を高精度で再現できるようになってきた。しかし、都市形状を高精度で再現した 3D モデルによるシミュレーションは計算負荷が高くパラメトリックスタディを実施するためには膨大な負荷があり、検討できるケースが制限されてしまう。そこで、本研究では GIS により周辺環境を加味した日射データを作成し他の気象要素とカップリングを行いシミュレーションデータとして利用する手法を提案した。この手法は計算負荷が小さく、大規模なパラメトリックスタディが可能である。以下に本論文の構成を示す。

第 1 章では本研究の背景と既往研究の紹介をすることで、本研究の背景と目的を説明した。

第 2 章では GIS データを用いた気象データの作成手法を提案した。オープンソースの GIS データを用いることで、周辺環境を再現した正射影画像を作成し、この画像により、時間毎に直達日射量の取得の有無を判断し、正射影画像より算出できる天空率により、その場所で得られる拡散日射量を算出した。算出した日射量の精度を検証するため、EnergyPlus で周辺建物を再現して実際に取得できる日射量を比較したところ、日射量の誤差は十分小さく、計算時間を比較した結果、1%以下となった。このことから本手法は大量計算に適した手法であることを示した。

第 3 章では北海道の高断熱、高气密を有する住宅でダイレクトソーラーゲインによる暖房負荷の抑制効果と周辺環境の関係性を解析した。ダイレクトソーラーゲインには暖房負荷の抑制が期待できる一方で、周辺に建物が密集している敷地であれば、期待通りの日射量を得られずかえって、暖房負荷の増加の原因となる。本手法を用いることでさまざまな敷地の天空率と日射データを算出できるため、日射データを用いて暖房負荷を算出し、天空率との関係性を解析した。建物モデルは寒冷住宅地のリビングを想定した簡易住宅を作成し、窓の性能が異なる 4 ケースと窓の面積の広さが異なる 3 ケースの組み合わせで暖房負荷計算を実施した。解析の結果、暖房負荷と天空率に相関性があることが確認できた。また、天空率の南側のみの値とした南側天空率は天空率よりも暖房負荷と高い相関性を示した。南側天空率の高さと窓の性能次第では、暖房負荷が最小となる窓の面積の広さが異なることが分かったため、再度窓面積の異なるモデルでシミュレーションを実施した。札

幌市であれば南側天空率が 0.7~1.0 の敷地が大半であるため、高性能な窓にすることで、広い窓でも暖房負荷抑制の効果が期待できる。また、暖房負荷が最初になる窓面積率が 0% でなければ、窓面積率を 30%程度増減しても、十分に暖房負荷抑制の効果が認められるため、デザインや光環境など暖房負荷以外の要素で窓面積の選択も可能であることが分かった。

第 4 章では寒冷都市のオフィスビルがカーボンニュートラルを達成するための条件解析を行った。日本では住宅・建築物の一次エネルギー消費量の指標である BEI による規制が年々厳しくなっているため、カーボンニュートラルを実現するための条件を明確化することが急務である。そこで、札幌市に存在するオフィスビルを対象に本手法を用いて壁面で得られる太陽光発電量を算出し、オフィスビルの一次エネルギー消費量と比較することでカーボンニュートラルを達成する建物の条件を解析した。この解析を実施するために、本手法の応用として日射量から太陽光発電を算出する手法を提案した。また、GIS データを用いて解析する建物モデルを自動作成する手法を提案した。4016 件のオフィスビルを対象に壁面で得られる太陽光発電を算出した。そのうち、415 件のオフィスビルで一次エネルギー消費量の算出を行い、建物の形状や建物の性能（壁面の熱貫流率、窓の熱貫流率と日射遮蔽係数）、敷地周辺の環境にカーボンニュートラル達成への影響を解析した。解析の結果、延べ床面積が狭い建物では外壁や窓の性能を向上させ、太陽電池を広く設置することでカーボンニュートラルを達成しやすいことが分かった。一方で、延べ床面積が広い建物では上記の各条件が良好でもカーボンニュートラルの達成が難いため、高効率の設備の導入や、建物の運用方法の最適化を検討し、省エネルギー化を実施する必要があることが判明した。また、EG/E を地図化することで、カーボンニュートラルを達成するための支援を必要とする建物の位置関係が把握した。この図を用いることで電力融通や地冷の最適な経路を把握することが可能であり、都市としてのカーボンニュートラル化の実現に貢献できる。

第 5 章では東京五輪・陸上男子マラソンのマラソンコースを対象として熱中症のリスクを解析した。東京五輪・陸上男子マラソンでは、約三割の棄権者が出るほどの過酷なレースとなった。このような危険を避けるためにはマラソンコースの暑熱環境を正確に把握する必要があるため、本手法を応用して、5m 間隔でマラソンコースの WBGT を算出した。マラソンコースの熱環境には樹木による影響もある。そこで、DEM データと空中写真より樹木の GIS データの作成、および、正射影画像に樹木を投影することで樹木の影響も考慮した日射量の算出を行った。また、拡散日射量を放射輝度分布に変換して解析するように手法を改良し、より精緻な日射量解析を行った。解析の結果、平均気温が 25°C を超える場合、建物や樹木による影響を考慮しても WBGT が 21°C を下回る時間帯がほとんど存在しないため、マラソンの実施は危険であった。一方で、同じ月でも気象次第ではほとんどの時間帯で WBGT が 21°C を下回る日が存在した。このことから、札幌市ではマラソンの候補日を複数設け、当日の気象状況に応じてマラソン実施の可否を決定することで熱中症のリス

結論

クが少ない日を選択することができる。また、WBGT の減衰値を定義、 SVF 、 VF_{tree} 、 VF_{build} の関係を解析した。また、8 月 4 日を対象にマラソンコースの WBGT を地図で表した。WBGT の減衰量は VF_{build} に最も依存していた。WBGT の地図より日射量が遮られたことで WBGT の減衰が確認できる場所もある一方で、日中を通して WBGT の減衰がほとんどない場所を把握することで、都市内で暑熱環境の改善が必要箇所を確認することができた。

6.2 今後の展望と課題

本研究の今後の課題と展望を以下に示す。

(1) 人体の影響を考慮した温熱環境評価の実施

本手法を用いることで、マラソンコースの温熱環境を詳細に把握することができ、短距離でも周辺環境が変化することが確認できた。今後はコース内を移動することで人体に対し WBGT の累積がどのように影響を及ぼすか検討する。また、その検討結果を基に WBGT の減衰量のマップで暑熱環境の改善が必要と思われる場所にどのような対応をすべきか検討する。

(2) EG/E マップの広域化

EG/E を地図化することで、地域でのカーボンニュートラル化の検討を実施した。しかし、一次エネルギー消費量を計算するためのモデルの自動作成の過程で計算対象とできるオフィスビルが制限されてしまった。今後はこれらの制限を取り除き、札幌市のオフィスビルや他用途の建物の EG/E を計算できるように改良していき、札幌市全域で電力融通の効率的な計画や地域熱暖房の強化などを検討できるようにする。また、札幌市だけでなく、対象地域を広げていき、広域での効率的なカーボンニュートラルの連携を検討できるようにする。

(3) 樹木による影響

本手法では樹木による日射透過率を 0.7 で統一している。式 5-31 に記述した通り、日射透過率は消散係数 (k)、葉面積密度 (a)、樹木内を通過した経路長 (l) によって計算でき、 a や k に関しては条件によって値を固定することができる。しかし、 l は日射が樹木を通過した距離になるため、場所によっては大きく変化する。本研究では提示した 0.7 は本手法の設定上、日射透過率の最低限の値であり、樹木が密集した場所ではさらに日射透過率が低くなる可能性がある。現在のコードで l を算出することは可能であるが、計算負荷が高くなっている。今後は l を作成するコードの計算負荷を低くする手法を検討し、樹木による日射透過率の精度を上げていく。

また、樹木は日射を遮蔽するだけでなく、蒸散作用によって周辺環境の気温上昇を抑制することが可能である。しかし、本手法では正射影画像より樹木の蒸散作用による効果を反映することができていない。樹木の蒸散作用による周辺環境への影響を定量化した既往研究は多くあるため、本手法にも既往研究の計算モデルを取り込む方法を検討する。

(4) 実測結果との精度検証

本手法の精度検証は EnergyPlus のシミュレーション結果と比較して行われた。この結果、本手法の計算精度と計算処理速度を確認することができた。今後は実測

結論

の結果と本手法の精度検証を進めていき、手法の精度確認、もしくは手法の補正や改善を実施する。

(5) 積雪の反射光

本手法の日射量計算では反射光は見込んでいない。しかし、寒冷地では冬期に高い反射率となる雪が積もるため、その影響を見込んだ場合、冬期に得られる日射量が増加する可能性がある。そのため、雪による取得可能な日射量の変化を見込む方法を検討する必要がある。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、北海道大学大学院工学院 森太郎教授にはご多忙の中にも関わらず、終始、ご指導・ご鞭撻いただいたことを深く感謝申し上げます。森太郎教授からいただいた多くのご助言やご支援のおかげで本研究を作成することができました。また、学位取得の機会を与えていただいたことを深く感謝申し上げます。

北海道大学大学院工学院 長野克則教授、林基哉教授、若林斉准教授には論文の審査委員として多くの有益かつ貴重なご意見・ご指摘をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

北海道大学大学院工学院 瀬戸口剛教授、岡崎太一郎教授、北垣亮馬教授、小澤丈夫教授、高井 伸雄准教授、葛隆生准教授、菊田弘輝准教授には審議委員として論文の課題や今後の展開を促す貴重なご意見・ご指摘をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

愛知工業大学 細淵勇人准教授、岡山理科大学 中山哲士准教授、室蘭工業大学 桑原浩平准教授には、5章の天空放射輝度分布、および WBGT の計算において、多大なるご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

株式会社アズビルの社員の皆さんにはご多忙の中、博士号取得に向けて取り組む機会を与えていただき、心より感謝申し上げます。

最後に博士号取得に理解を示し、支えてくれた両親と親族に深く感謝申し上げます。

2023年2月