

高層建築物の周囲に形成される冬季の微気候の形成要因 —熱収支シミュレーションと CFD との連成解析手法を用いた検証—

Formation factors of microclimate around a high-rise building in winter season - Examining by coupled analysis of heat balance simulation and CFD -

陳 侃*¹ 浅輪 貴史*¹ 押尾 晴樹*²
Kan Chen Takashi Asawa Haruki Oshio

*¹ 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology
*² 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies

Corresponding author: Kan Chen, chen.k.ab@m.titech.ac.jp

ABSTRACT

Microclimate in building outdoor spaces is important for thermal comfort and energy saving of buildings. This study focuses on the formation factors of microclimate at the sunshade area of a high-rise building in winter season by using the coupled analysis method of heat balance simulation and computational fluid dynamics (CFD). The remote sensing and mobile observation confirmed that the surface temperature was low and the air temperature was lower than other places at sunshade areas in the winter. These phenomena cannot be reproduced by the heat balance simulation without coupled analysis with CFD. The coupled analysis reproduces the low temperature microclimate in the building shade. It also shows that the low surface temperature and air temperature are caused by interaction between cold storage of the materials of grounds in the sunshade and the cold air generated by them. These phenomena can be confirmed not only in enclosed spaces like a street canyon but also in the open space around the high-rise building.

キーワード：熱収支シミュレーション，数値流体力学，連成解析，微気候，検証，高層建築物
Keywords : Heat balance simulation, CFD, Coupled analysis, Microclimate, Validation, High-rise building

1. はじめに

建築外部空間に形成される微気候は、快適な都市空間や自然エネルギーを利用した建築空間を創出するうえで重要である。微気候は空間特有に形成されるヒューマンスケールの気候であり、建築物や樹木の高さや配置計画、地表被覆といった、空間形態と構成材料によって大きく影響を受ける。既往研究でも実測調査⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾や数値解析⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾により、都市空間に形成される微気候（気温、湿度、気流、放射、等）の特性を明らかにしようとする試みが続けられている。微気候の形成メカニズムを明らかにするうえでは、実測調査に加えて、原理や現象をモデル化した数値解析を行うことが有効である。数値解析手法としては、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics; CFD）シミュレーションに基づくものが近年は一般的になってきている⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。CFD シミュレーションは、風の流れに加えて、熱・湿気の輸送現象などの微気候の主要な特徴を解析可能であるが、熱・湿気のソースとなる、建物や地表面か

らの顕熱・潜熱フラックスを予測するには、建物や地表面における熱・物質収支のシミュレーションモデルとの連成解析が必要となる。吉田ら⁽⁵⁾の対流・放射・湿気連成解析手法は、改良型 $k-\epsilon$ モデルによる CFD シミュレーションに放射解析と湿度輸送方程式を組み込み、都市空間内の気流・気温・湿度・放射温度分布を予測している。原山ら⁽¹³⁾は、これに非定常の熱伝導計算を組み込み、材料の熱容量の違いを考慮した屋外の熱環境予測を行っている。

梅干野ら⁽¹⁴⁾・Asawa et al.⁽¹⁵⁾は、屋外熱環境の設計支援ツールとして、3D CAD (Computer Aided Design) に基づき街区内の空間形態・構成材料を再現し、全表面での非定常・熱収支解析により表面温度の時系列変化を予測する熱収支シミュレーションツールを開発した。このツールは、屋外熱環境における表面温度と熱放射環境の重要性に着目し、表面温度予測に特化したものである。本ツールは、暑熱環境の悪化が問題となる弱風環境下での予測を行うことを前提とし、都市空間内の気温・風速の空間分布を一様と仮定することで、CFD シミュレーションとの連成解析を行わ

ずに、低計算負荷で表面温度予測を行えることを特徴としている。同様の取り扱いは、海外を中心に近年多くの研究者が使用している街区スケールの熱収支シミュレーションモデルである SOLENE model でも行われている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

山村ら⁽¹⁸⁾は、梅干野・浅輪らの熱収支シミュレーションツールを発展させ、屋外熱環境の総合的な予測・評価、すなわち微気候の予測が行えるように、都市空間内の気温・風速の空間分布を考慮できる熱収支と気流の連成解析手法を提案した。具体的には、熱収支シミュレーションと標準 $k-\epsilon$ モデルによる CFD シミュレーションとを連成解析するものであるが、その特徴としては、解析時刻を設定し、対象時刻とその 1 時刻前についてのみ、CFD との連成解析を行うものである。これは、熱収支解析において構成材料の熱容量に伴う蓄熱／蓄冷現象を考慮しつつも、当時（2000 年前後）の計算機の演算能力を前提として CFD シミュレーションの実行回数を最小にすることを主眼としたものである。山村ら⁽¹⁸⁾は、2 時刻分の連成の効果と限界を、数値実験により明らかにしている。その後、Takata et al.⁽¹⁹⁾により、近年の計算機能力の向上を踏まえて、連成解析を一日の全時刻に適用することで、より長時間の蓄熱／蓄冷現象にも適用できるように改良がされてきている。全時刻の連成解析は、その他の既往研究でも取り組まれており、共通の研究課題と考えられる⁽²⁰⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾。

このように、数値シミュレーションの進展により、熱容量の異なる構成材料と空気との局所的な熱交換を考慮した微気候の解析が行えるようになってきたが、一方で、そのような現象を検証するのに適した微気候の実測データがこれまで十分ではなかったという、モデルと実測との不整合が起こっていたと考えられる。これは、高分解能の表面温度分布や微気候の空間分布の取得が容易ではないということにも依存したものである。例えば、Ma et al.⁽²⁰⁾は、街区内の約 10 点で計測された気温・風速、および 2 か所の土地被覆における熱画像撮影より得られた表面温度について、24 時刻の熱収支・気流の連成解析結果と比較している。しかしながら、非定常的な特性である材料の蓄熱／蓄冷の影響については実測データ、シミュレーション結果ともに議論されておらず、非定常的に連成することの効果については明示されていない。Toparlar et al.⁽²¹⁾は 24 時刻の同様の連成解析を 5 日間にわたり実施しているが、実測結果との比較は衛星リモートセンシングデータより得られた数十 m 四方の空間平均的な表面温度についてのみであり、構成材料と空気との熱交換といった局所的な議論はされていない。それに対して、押尾ら⁽²³⁾は、高層建築物の日陰空間に形成される微気候に着目し、冬季においてその日陰空間に、低温の地表面と局所気温が低くなっていることを、それぞれ航空機リモートセンシング観測と現地での高分解能の移動観測により確認した。これらの結果はそれぞれ、上記で指摘した連成解析で対象とする構成材料の蓄熱／蓄冷現象と、近傍空気と地表面との局所的な熱交換に基づ

くものであることが示唆されるが、その形成要因は明らかとなっていない。また夏季の高温な熱環境に対し、冬季の低温な微気候の形成も同様に人々に熱的不快感をもたらすため重要である。

以上により本研究は冬季における高層建築物の周囲の熱環境に注目し、そこに形成される低温の微気候の形成要因を、24 時刻の連成解析手法により明らかにすることを目的とする。^{注1)} 本研究の構成は以下の通りである。

2 章では、熱収支解析と CFD 解析との連成解析の概要及び連成解析の手順を述べる。3 章では、航空機リモートセンシング観測により冬季における高層建築物の日陰空間に低温の地表面が存在していることを示す。また移動観測により同日陰空間では局所気温が低くなっていることを確認し、熱収支の観測結果から、低温の地表面部分と対応していることを示す。4 章では、2 章で述べた連成解析手法を適用し、3 章で示された高層建築物の日陰空間における低温の微気候の形成要因を、構成材料の蓄冷現象と、近傍空気と低温の地表面との局所的な熱交換の観点から明らかにする。

2. 連成解析手法

2.1 解析の概要

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

日変化スケールの熱収支と表面温度の変化に関しては、前記の熱収支シミュレーションツールにより解析が可能である。熱収支シミュレーションツールの計算項目は、直達日射、天空日射、反射日射、大気放射、周辺地物との長波長放射の授受、対流熱伝達、非定常の熱伝導である。詳しくは、梅干野ら⁽¹⁴⁾、Asawa et al.⁽¹⁵⁾を参照されたい。これと連成する CFD シミュレーションは、平均流を対象とする RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations)モデルを用い、乱流モデルに標準 $k-\epsilon$ モデルを採用する。これにより、1 時間ごとに上空の主風向・風速を反映した流れ場と温湿度場を予測し、それを当該時刻の平均的な空間分布として連成解析に使用する。アメダス気象データに代表される地域の気象データは、基本的に 1 時間ごとに整備されていることを考えても、この取り扱いは実用上も妥当であると見なしている。それを、一日の全時刻（24 時刻）で解析し、熱収支シミュレーションとの連成を行う。CFD は各時

刻の平均場の解析であり収束計算を行う（山村らの手法を24時刻分適用したものである）。よって、連成の方法は、いわゆる **Static coupling**（シミュレーションツールは別で、データのみやり取りする連成）でありながら、24時刻分のデータを熱収支解析との間で授受することにより、日変化の非定常特性を再現する。浮力の影響を考慮したCFDの非等温解析には、ブシネスク近似を適用する。

解析メッシュに関して、熱収支シミュレーションツールはVoxelメッシュを使用しており、CFDシミュレーションにも構造格子を採用するため、データ授受の整合性は高い。ツール間での表面近傍のデータの授受は、最近接のセル間で行うこととする。高Re数型のRANSモデルである標準k-εモデルを用いているため、固体表面には壁関数（運動量：一般化対数則、対流熱伝達：ユルゲスの式）を適用する。両ツールでメッシュサイズを変更することも可能であるが、4章の計算では、同一の均等メッシュサイズを採用した。CFDシミュレーションでは湿度解析も可能であるが、本研究では地表面や樹木からの潜熱フラックスを取り扱わず、また湿度分布も評価対象としないため、湿気輸送解析は行わない。

2.2 解析の手順

具体的な解析の手順は、次の通りである（図1）。1) 対象街区を3DCADにより三次元で再現し、構成材料を設定する。2) 熱収支シミュレーションにより、第一段階の表面温度分布を時系列で算出する。このとき、まだ連成を行っていないため、気温・風速の空間分布は一様と設定する。本研究では、比較のために、この段階での表面温度の結果も使用する^{注2)}。3) 次に、この表面温度分布を建物・地表面の境界条件に設定し、非等温のCFD解析を実施することで、気流・気温の空間分布を得る。各時刻の卓越風向と風速に基づきべき乗則を流入条件に設定し、24時刻分の解析を実施する。4) これにより得た24時刻分の気流・気温の空間分布を熱収支シミュレーションに入力し、局所の風速（対流熱伝達率）と気温の影響を考慮した表面温度分布を算出する^{注3)}。5) これを、結果が収束するまで繰り返す。収束の判定方法は時刻ごとである。尚、4章の解析ではすべての時刻において、2回で収束を確認した^{注4)}。

3. 観測データ

3.1 対象地

高層建築物が周囲の市街地の微気候へ影響を及ぼし得る典型的な事例として、茨城県土浦市の駅前市街地を研究対象市街地とした。図2に研究対象地の航空写真及び高層建築物周辺からの写真を示す。高度利用地区を利用した再開発により、31階建ての高さ109mの高層建築物が存在している。周辺は鉄筋コンクリート（RC造）や木造の古い中小規模の建築物が分布している。対象地を、特徴の異なる再

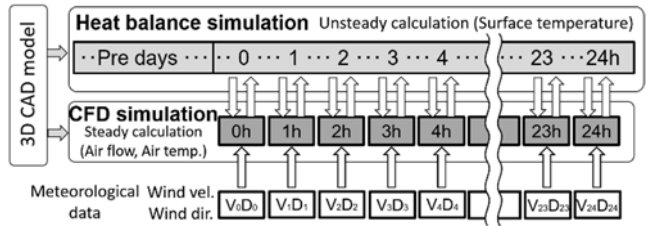


Fig.1 Method of the coupled analysis

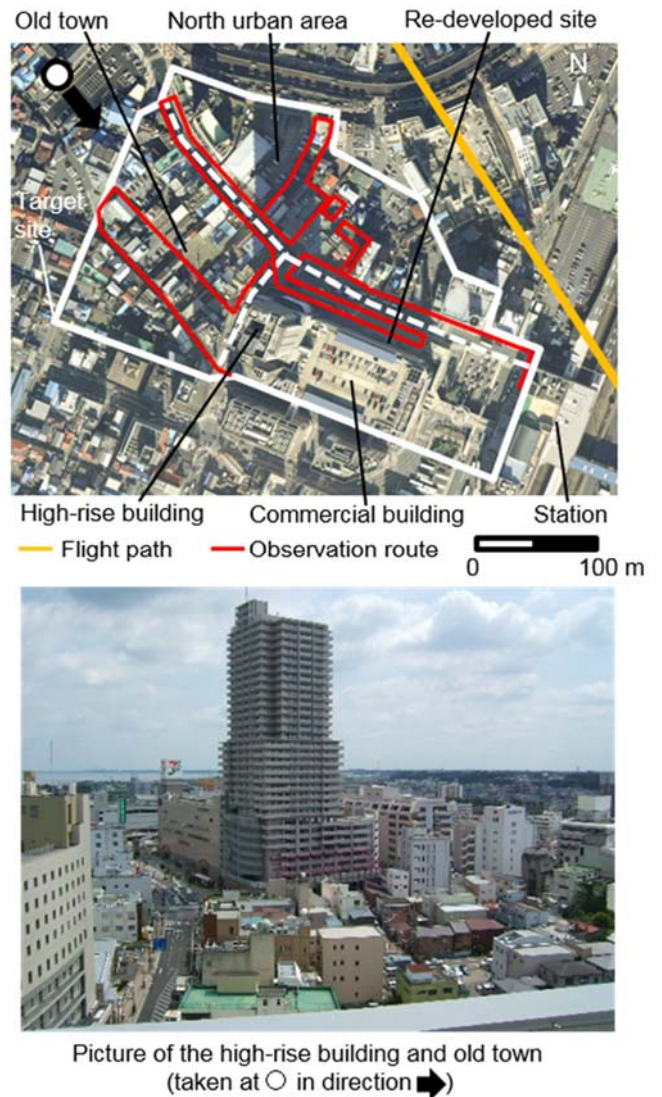


Fig.2 Airborne photograph and photograph in the target urban area

Table 1 Abstract of remote sensing

Date	12:15–12:18, 22 December, 2009 13:06–13:10, 25 August, 2009
Altitude	500 m
Scanner	AZM (Nakanihon Air Service)
Scan angle	80°
Instantaneous field of view	1.25 mrad
Number of bands	0.40–0.85 μm: 5 bands 0.90–1.70 μm: 5 bands Thermal: 2 bands
Thermal infrared band used	10.1–13.5 μm

開発地区、北側市街、旧市街の3つに分類した。この対象地では、孤立した高層建築物と周辺市街地との高さのギャップが大きく、空間形態や構成材料(熱容量, 反射率など)にバリエーションがあり、高層建築物の日陰空間に形成される微気候を議論するうえで、適していると考えられる。

3.2 リモートセンシング観測

航空機リモートセンシングによる観測では、対象市街地における微気候の形成に寄与する表面温度分布(実際に観測されるのは放射温度分布)の把握に着目した。夏季と冬季において、放射温度分布の傾向の違いを比較するため、両季節において観測を行った。以下に、押尾ら⁽²³⁾の航空機リモートセンシング観測の概要について述べる。

(1) 観測概要

表1に冬季及び夏季晴天日に実施した航空機リモートセンシングの概要を示す。また、図3(a), (b)に観測対象日の気象条件を示す。観測には固定翼の航空機搭載型のマルチスペクトルスキャナ(AZM, 中日本航空)を使用した。図2に飛行経路を示す。高分解能の情報を得るために、飛行高度を500mとし、航空機直下における空間分解能が0.63mのデータを取得した。幾何補正については対象地の1/2500都市計画基本図GISデータを用い、主に交差点の中央を特徴点として、1枚の画像につき100点の地上基準点を取り、アフィン1次変換により実施した。大気補正についてはリモートセンシング観測時刻と同時刻に地上で赤外線放射カメラ(TH9100-MR, 日本アビオニクス)を用いて高温、低温、中間の材料の放射温度を観測し、リモートセンシングによって得られた当該箇所の放射温度との対応から線形回帰式を求め、それをすべての画素に適用した。

地表面放射率については対象市街地中に低放射率の材料(金属, レンガ, 花崗岩, ガラス, 金属瓦, 太陽光パネル, 太陽集熱パネル, 低放射率塗装)等がみられるが、本解析ではこれらは議論の対象としない。地表面の大部分を占めるその他の材料(コンクリート, アスファルト, スレート, 瓦, 砂, 土壌, 水面, 植生)は比較的放射率が高い(0.90~0.98)と見なすことができる⁽²⁴⁾。

(2) 観測結果

図4に冬季(a)と夏季(b)晴天日の昼の時間帯におけるリモートセンシング観測結果の熱画像(放射温度分布)を示す。冬季については、北側市街の中央や再開発地域北側を中心として高層建築物及び隣棟の商業施設による日陰空間に、地面のみならず建物屋根面の放射温度の低下が見られる。一方、夏季では、太陽高度が冬季より高いため、日影による放射温度が低下する箇所は冬季ほど広がっていない。また、冬季では、日陰空間において、放射温度が気温より6~7°C低くなっている箇所が多数存在している一方、夏季では同じ日陰空間において、放射温度が気温より低い箇所はほとんど確認できていない。アスファルト舗装面の放射率の影響を考慮して表面温度に換算した場合も、放射率が

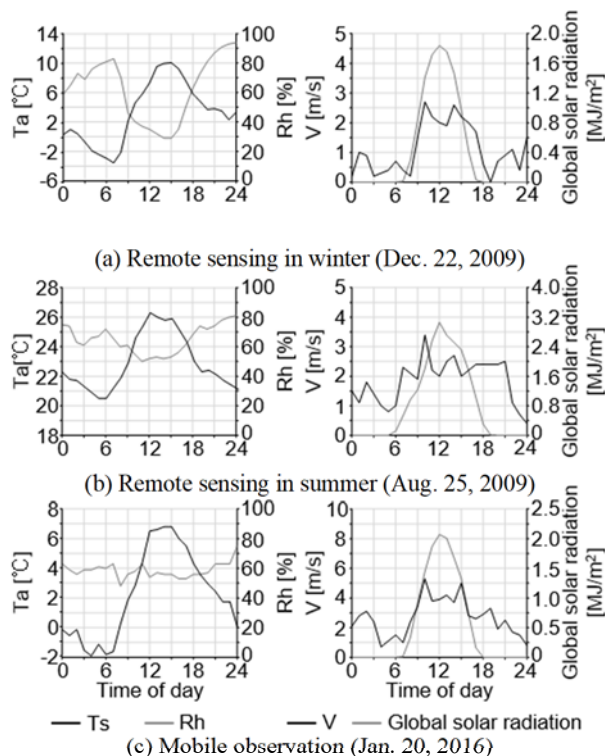
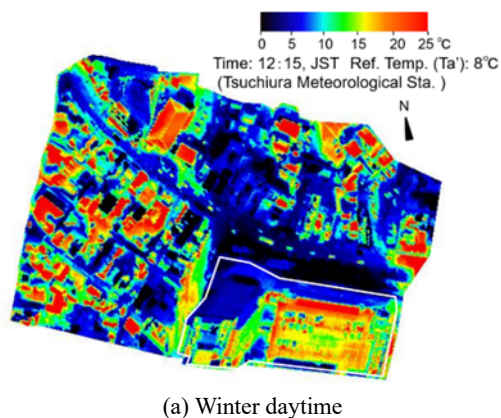
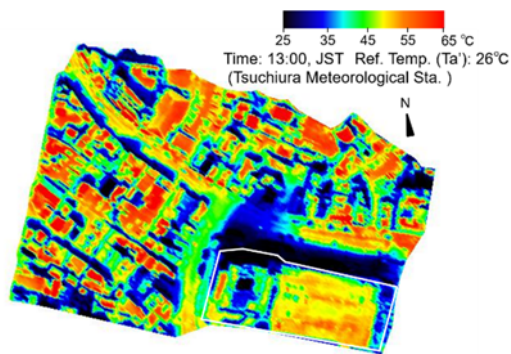


Fig.3 Meteorological condition of remote sensing and mobile observation



(a) Winter daytime



(b) Summer daytime

Fig.4 Radiant temperature for summer and winter (White line shows the area of high-rise building.)

0.95 の場合、表面温度は放射温度+3°C程度となり、表面温度は気温よりも依然低いことになる。低温化の原因としてまず考えられるのが上空大気への放射冷却（夜間放射）である。しかしながら、より低温の地表面は高層建築物の日陰空間に集中しており、長時間の日陰による地表面の蓄冷や高層建築物周囲に特有の微気候の影響を受けていることが推測される。

3.3 移動観測

押尾ら⁽²³⁾は、冬季において自転車による移動観測により、高層建築物の日射遮蔽による短波長放射、長波長放射の熱収支の変化を気温・風速と同時に測定し、局所の気温・風速及び地表面の熱収支を明らかにしている。

(1) 観測概要

観測対象日は冬季晴天日の2016年1月20日であり、気象条件を図3(c)に示す。気象条件は土浦のアメダスデータを使用した。1月の土浦市の日最高气温の平均は9°C程度、風速は2.0m/s程度であり、対象日はやや気温が低く風が強い日であるが、冬季の特徴を議論できる範囲の気象条件となっている。

気温(T_a)、湿度(Rh)、風速(V)、下向きと上向きの短波長放射量($S\downarrow$ と $S\uparrow$)と長波長放射($L\uparrow$ と $L\downarrow$)を地上レベルで観測した。そのうち、 $S\downarrow$ は上方からの日射成分を表し、 $L\uparrow$ は地表面の放射温度に対応する。 T_a の観測にはPCファンによる自作の二重筒式強制通風筒を用い、気温センサーに $\phi 0.1\text{mm}$ の熱電対を用いることで放射の影響を除去した。観測機器を自転車の前かごに取り付け、自転車を一定の速度で押して歩いた。自転車の左側から押すようにし、観測機器が人による日影に入らないように配慮した。また、自転車による日影や自転車自身の形態係数も小さいことを確認した。移動速度とセンサーの時定数を考慮して観測間隔を2秒としてデータを取得した。

図2に観測ルートを示す。高層建築物および隣接する商業施設の前、北側市街、旧市街を網羅するように観測を行った。10時30分、12時、15時、17時、19時を観測時刻に設定し、各時刻を中心とする30分間に観測を行った。一日を通して安定した気象条件であったため、観測時間内における上空の気象変化の影響は小さいことを確認した。記録した場所と通過時刻をもとに各観測地に位置情報を与えた。すなわち記録した場所の位置情報を地図から取得し、記録地点間は速度一定で均等に観測値を割り振った。

(2) 観測結果

図5に各時間帯の移動観測の結果を示す。10時30分(a)、12時(b)、15時(c)の $S\downarrow$ 、 T_a 、 $L\uparrow$ を見ると、1日中高層建築物の日影となっている部分において、 $S\downarrow$ 、 T_a 、 $L\uparrow$ が小さいことから、受熱日射量が小さく、低温（気温と表面温度の低下）の状態が1日中を通して続いたことがわかった。高層建築物による日陰空間で、 $L\uparrow$ （地表面の放射温度に依存）が周辺地域より小さい結果は、航空機リモートセンシング

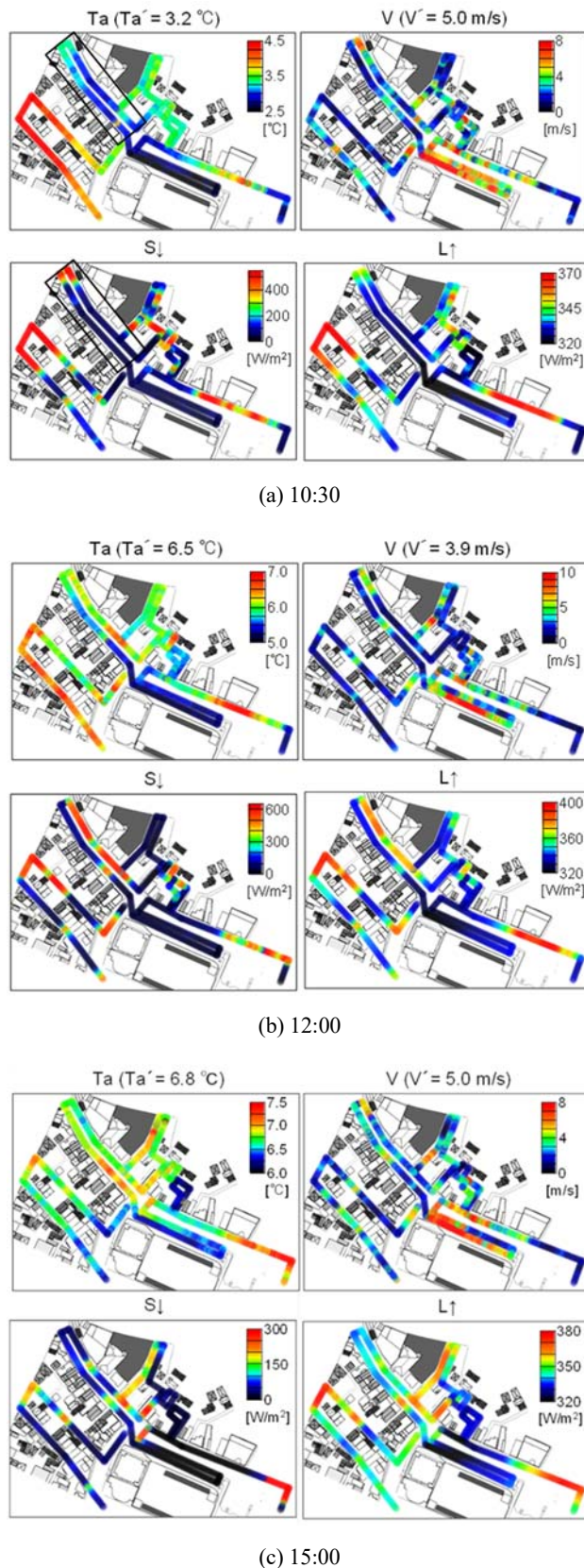


Fig.5 Results of mobile observation

観測結果と一致するものである。その場所の T_a は周囲より低く、上空気温 (T_a') よりも低い結果は、航空機リモート

トセンシング観測から示唆された可能性を裏付けるものである。図 5(a)の $S\downarrow$ と T_a と $L\uparrow$ を見ると、旧市街地の北側（黒枠）はこの時間帯で高層建築物の日影に入り高層建築物近傍の日陰空間と同程度に日射量を表す $S\downarrow$ が小さいところが確認できたが、 T_a は周囲と大きな差がなく、高層建築物の日陰空間よりも 1°C から 2°C 程度高くなっている。また表面温度に対応する $L\uparrow$ は旧市街地の北側より高層建築物の日影空間の方が $10\text{W}/\text{m}^2$ 程度小さく、 V は大きい。すなわち、高層建築物の日陰空間において局所気温が低くなっていることは、広大な日影空間であるため、周辺空気との移流による熱交換よりも、近傍空気と低温の地表面との局所的な熱交換により冷気が生成し続けられているためであることが示唆される。一方、旧市街地の北側では比較的大きい $L\uparrow$ によって、高層建築物の日影空間のような気温低下が見られない。

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

4. 連成解析による検証

4.1 解析の概要

2.2 節で示した 24 時刻の連成解析（CASE 3）のプロセスは、局所熱交換と局所蓄冷の影響の両方が考慮されたものである。比較として、連成解析をせずに熱収支解析のみを行ったケース（2.2 節の 1）のプロセスの結果（CASE 1）及び対象時刻 12 時のみを連成解析の対象にしたケース（CASE 2）も計算した。CASE 1 は気温・風速の空間分布を一様としているため、局所熱交換が考慮されておらず、放射収支の影響（日射、上空大気への放射冷却）が考慮されたものである。CASE 2 は対象時刻のみ気温・風速の空間分布を計算し、局所熱交換が考慮されたものである。その概要を表 2 に示す。すなわち、CASE 1 と CASE 2 との比較により、局所熱交換の影響が確認でき、CASE 2 と CASE 3 との比較により、局所蓄冷の影響が確認できる。

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

CASE 3 は、解析対象日（2009 年 12 月 22 日）に対して、

Table 2 Outline of simulation cases

Case name	Process of analysis	Validated factors
CASE 1	Without coupled analysis	Sun shading, Radiative cooling
CASE 2	With coupled analysis only at 12:00	Wind speed, air Temp. distribution
CASE 3	With coupled analysis for 24 hours	Time history, Cold storage

Table 3 Models and conditions of CFD simulation

Calculation domain	1272m(x)×1176m(y)×300m(z)
Cell division	578(x)×536(y)×154(z)=47million
Minimum cell size	0.8m
Turbulence model	Standard k-ε model
Calculation algorithm	SIMPLE
Difference scheme	QUICK
Inlet boundary	Power law 0.25
Outlet boundary	Natural runoff
Side, Sky	Free-slip
Wall boundary	Logarithmic law

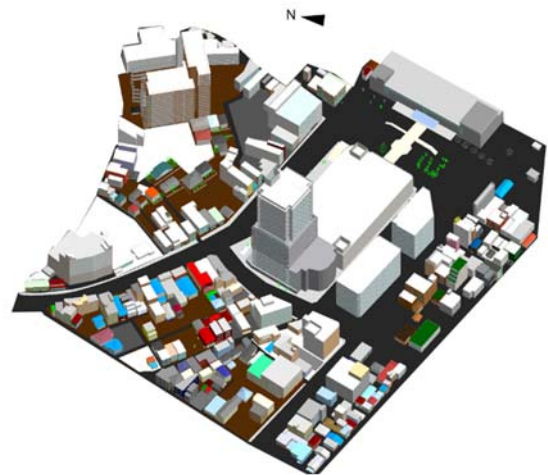


Fig.6 Three-dimensional model of the target site

1 時間ごとに連成解析を実施した^{注 5)}。熱収支解析における 4 日間の助走計算に対しては連成解析を行っておらず、計算対象日当日のみ連成解析を行った点から、より長期間にわたって蓄冷する影響は考慮されていない。CFD 解析の概要を表 3 に示す。流入風の鉛直勾配にはべき乗則（べき指数 0.25）⁽²⁵⁾を適用した。地表面と近傍空気との間の熱交換に注目するため、流入風の気温鉛直分布は一様とし、流入境界面における成層安定度による鉛直気温分布などを考慮していないが、解析領域内部においては非等温 CFD 解析を行い、浮力による自然対流を考慮している。すなわち、高層建築物の日影などの局所的な影響のみを確認することを解析の目的とする。

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

4.2 市街地モデルの作成

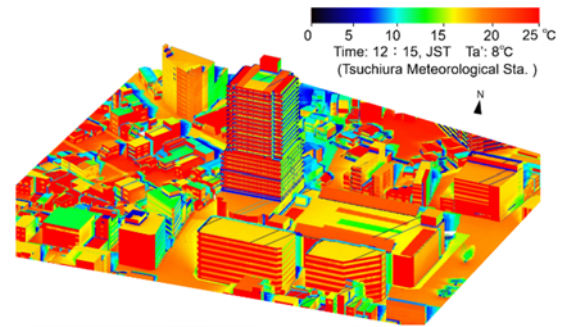
対象市街地の3Dモデルを図6に示す。梅干野ら⁽²⁶⁾は3D-CADに基づいて、市街地へ適用できる熱収支解析手法を開発してきており、建物や地面の構成材料のデータベースも構築してきている。本研究は、そこで提示された空間形態と構成材料のモデリング方法及びデータベースを本解析対象地へも適用した。壁や窓、一部の地面などのデータは現地調査により特定した。詳細な空間形態と構成材料が表面温度に及ぼす影響を明らかにするため、空間分解能0.8mの均等メッシュを熱収支シミュレーションに採用した。1:2500のGISデータ、1:5000の航空写真と住宅地図を基本地図データとして使用した。東京のGISデータは建物用途や構造、階数などの属性を含むが、土浦のデータにはない。このような属性は写真や現地調査から取得した。建物の高さは階数と基準階の高さから推定した^(注6)。建物の壁、屋根、地面の構成材料は、建物構造、用途、写真や現地調査から取得した表面材料により推定した。日射反射率については、表面の色をマンセル色表と比較し、明度値を割り当てたうえで、反射率に変換した。CFD解析においては、街区周辺の乱流による影響を考慮し、より広範囲の建物を再現した。

4.3 熱収支解析と航空機リモートセンシング観測の比較

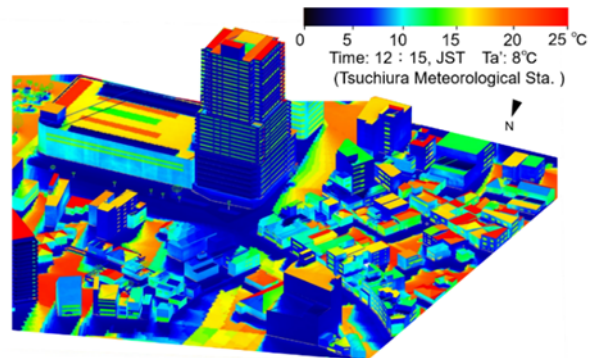
まず、熱収支解析の実態との整合性を確認するために、CASE 1の結果と航空機リモートセンシング観測結果とを比較する。尚、リモートセンシング観測結果は放射温度分布であるため、熱収支解析の表面温度も放射率を考慮して放射温度に換算して算出した。図7の(a)、(b)に、それぞれ冬季昼(12:15)における日向側と日影側の熱収支解析による結果を示す。構成材料の違いのみならず、高層建築物による日陰空間で低温の地表面を含めて、低温の壁面や屋根面が確認できる。

図8の(a)、(b)にそれぞれ航空機リモートセンシング観測結果(Trr)と熱収支解析結果(Trs)の比較を示す。12:15における放射温度分布の比較結果である。両者の結果について、建物の屋根面、道路、駐車場などにおいて、全体的に類似した結果を示している。ただし、高層建築物の日陰空間では、Trrが3℃程度Trsより低くなっている部分も見られる。ここは、リモートセンシング観測や移動観測において、低温の地表面が確認された箇所である。

TrrとTrsを定量的に比較するため、同じエリアに対して、等間隔で112点をサンプリングして散布図としてプロットした。これらの点の平均間隔は20mで、典型的な表面(建物や地面、日向や日影)、異なる物性値(反射率、放射率、熱容量)と天空率などの要素が含まれるよう抽出した。物性値と天空率のレンジは:反射率0.1-0.5[-]、熱容量22-515[kJ/m²K]、放射率0.8-0.95[-]、天空率0.21-0.96[-]である。図9に比較結果を示す。横軸はTrsで、縦軸はTrrである。この結果から、大多数の点はy=xの線上に位置することが示される。これは熱収支解析が大部分のエリアにおいて、

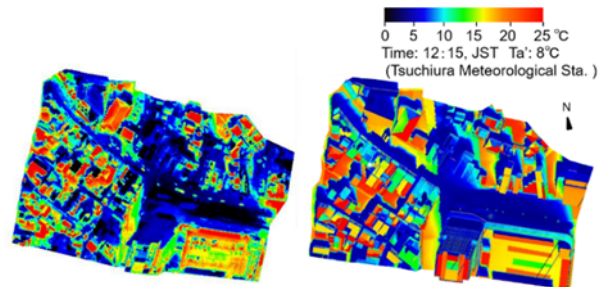


(a) Sunshine side



(b) Shaded side

Fig.7 Radiant temperature calculated by the heat balance simulation



(a) Remote sensing observation(Trr) (b) Heat balance simulation(Trs)

Fig.8 Comparison of remote sensing and the heat balance simulation

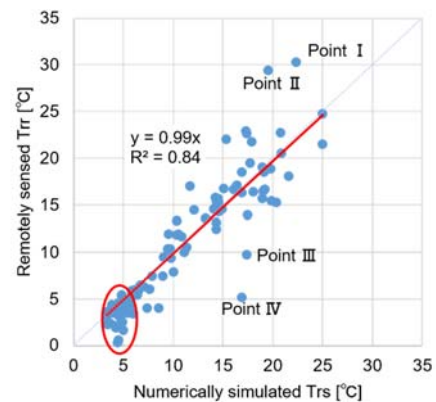


Fig.9 Comparison of radiant temperature by remote sensing (Trr) and the heat balance simulation (Trs) for selected points in winter.

リモートセンシング観測の結果に近い結果を算出していることを表している。点ⅠとⅡ（屋根）に対して、 T_{rr} は T_{rs} より8-10°Cも高くなっている。これは調査により設定した物性値が現状と完全に一致していないことが原因だと考えられる。一方、点ⅢとⅣ（北側市街地の駐車場）は反対の傾向を示している。これは熱収支解析において、駐車場周辺の建物の高さをモデリングする際の誤差で、本来が影になるはずの場所が日向になっていることが原因だと考えられる。このような物性値や形状情報の再現精度が十分でない点を除いて、観測値から計算値が外れている地点は放射温度が5°C付近の点であり、複数確認できる（赤丸）。これらの点は高層建築物の日陰空間に集中しており、リモートセンシング観測において低温の地表面が確認された場所である。連成解析を行っていない熱収支シミュレーションでは、これらの場所でも気温・風速を空間分布一様として計算を行ったため、局所熱交換による局所気温が低くなっていることの影響や局所蓄冷が表面温度に反映できなかったと考えられる。

4.4 連成解析結果

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

(1) 冷気の生成要因

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

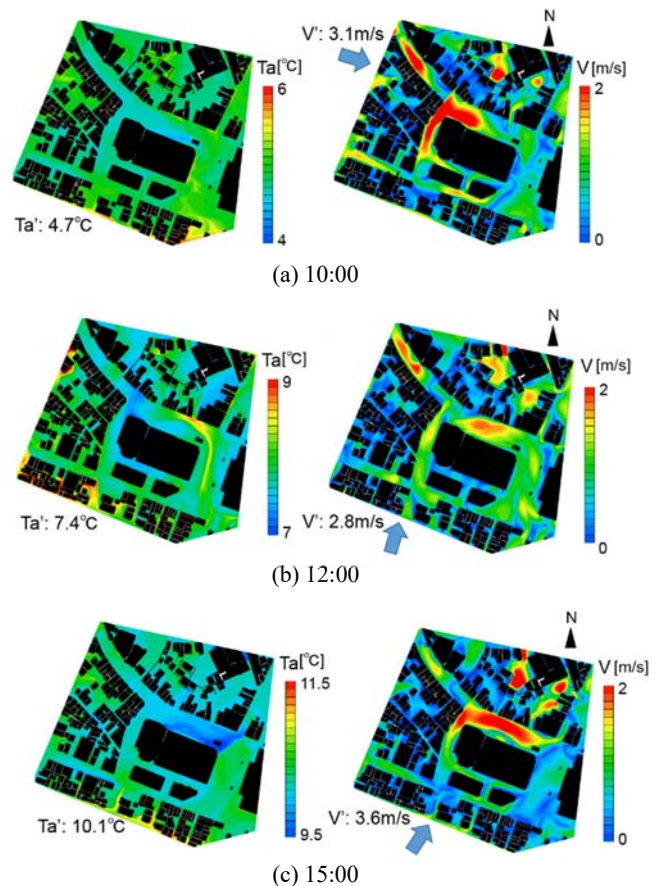


Fig.10 Air temp. and wind speed distribution of the target urban area (1 m height)

まで風速が大きく、特に商業施設の北東側の気温が低いことが目立っている。該当する場所はこの時間帯の日陰空間と一致している。

図11に、高層建築物日陰空間の鉛直断面の気温分布の結果を示す。断面位置は図12に示す。高層建築物の日陰空間（地面と北側の壁面）近傍の気温が周囲より0.1~0.3°C程度低くなっており、 T_a' よりも0.1°C以上低いことが確認できる（図11(a)）。この結果より、高層建築物の日陰空間の地表面付近の冷気は上空から低温の空気の吹き下ろしが無くても、局所熱交換により、地表面付近で生成・移流することが示される。また高層建築物北側の壁面付近での気温も低いことから、地表面だけでなく日射の当たらない北側壁面での冷気の生成も示される（図11(b)）。

(2) 地表面の低温化の形成要因

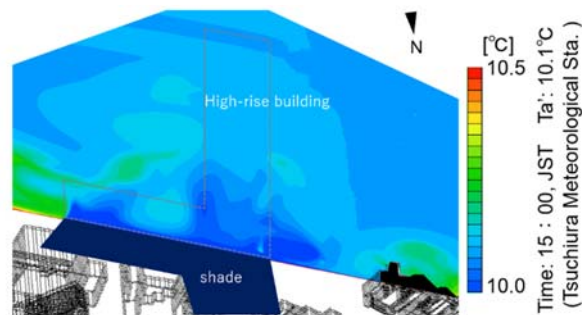
次に、地表面の低温化は局所熱交換と局所蓄冷とのいずれが寄与しているかを詳細に確認するため、図13にCASE 1, CASE 2とCASE 3の高層建築物の周辺における表面温度の比較を示す。低温域を強調するために、温度レンジを4°C以下の低温側に絞って表示した。表4にそれぞれのケースに対して、高層建築物の日陰空間とその周囲の地点の表面温度値を示す（地点位置は図12より）。CASE 2は高層建築物の日陰空間の表面温度がCASE 1より低くなる場

所が多いことが確認できる（表 4: B, C, D, E, F）．これは長時間の日陰と上空大気への放射冷却（CASE 1）を考慮したうえで、局所熱交換が解析結果に寄与したためである．また、CASE 3 では同日陰空間において CASE 2 よりさらに表面温度が低いことが確認でき、場所により 0.5℃の差も生じている（表 4: B）．すなわち、局所蓄冷が表面温度の低下に寄与していることが確認された．また表 4 から、高層建築物の日陰空間付近以外の場所（表 4: A, H, I）では連成前後で表面温度の変化が小さいことから、上記の低温の地表面を形成する原因はこの高層建築物周辺特有な微気候によるものであることがわかった．

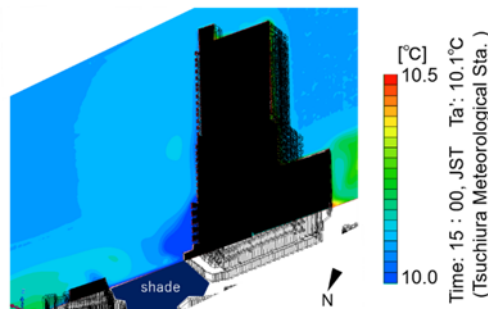
24 時刻の連成解析を行うことによって、地表面の局所蓄冷と局所熱交換が反映され、日陰空間の表面温度の過大評価を最大 1℃程度低減することができた．ただし、連成解析から得た高層建築物の日陰空間における表面温度及び気温の低下幅は観測値と比べてより小さい．それについては次節にて考察する．

続いて、地表面の熱収支の観点から、局所熱交換の影響を評価する^{注7)}．図 14 に高層建築物の日陰空間に位置する D 点の連成前後（CASE 1, CASE 2 と CASE 3）における地表面熱収支の各成分の比較結果を示す．プラスは、地表面に向けた熱フラックスがあることを意味する．3 ケースいずれも長波長放射の授受は上空大気への放射冷却により、常にマイナス（すなわち、地表面が冷却されている）である．天空日射や周囲からの反射日射の影響は、朝方を除いて限定的である．よって、地表面の熱容量により、高層建築物の日陰空間における地表面温度が日中低く維持され、対流による熱フラックスはプラス（近傍空気から地表面へ）になる．一方、CASE 1, CASE 2 と CASE 3 で他の熱収支項が大きく変わらない中、対流熱伝達量に差が生じている．具体的には、12:00 において、CASE 2 と CASE 3 の対流熱伝達による近傍空気から地表面への熱フラックスが、CASE 1 より小さくなった．これは気温・風速の空間分布を考慮したことで、地表面近傍で生成された冷気が再現されたためである．CASE 3 はさらに 11:00 頃から近傍空気から地表面への熱フラックスが CASE 2 より小さくなり、蓄冷の継続が再現された．これは CASE 3 の表面温度がより低くなった原因となる．

連成解析により、高層建築物の日陰空間における局所熱交換によって、冷気が生成され（4.4(1)）、その近傍の冷気を再現することによって、上空気温を境界条件とする場合よりも、地表面に向かう熱フラックスが減少し、より低温の地表面の形成に寄与する（CASE 1 と CASE 2 の比較）．すなわち、低温の地表面や壁面と冷気との相互作用が確認された．またこの相互作用が時間的に継続することで、蓄冷効果も起こることが示された（CASE 2 と CASE 3 の比較）．



(a) Vertical cross section in front of the high-rise building



(b) Vertical cross section truncated the high-rise building

Fig.11 Vertical air temp. distribution in the sun shade area of the high rise building

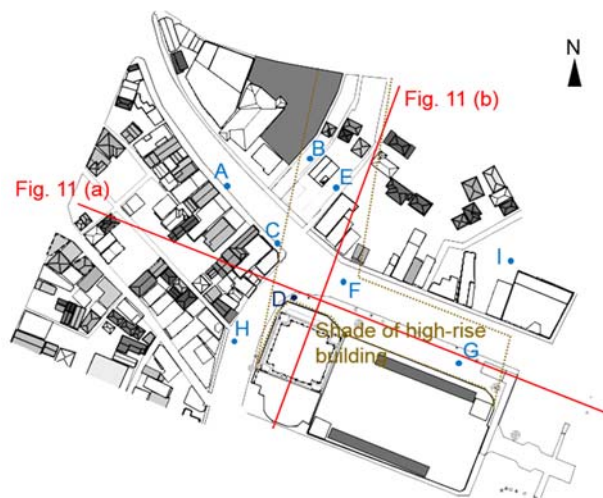


Fig. 12 Position of cross section in Fig.10 and points' position in Table 3 and Fig. 14

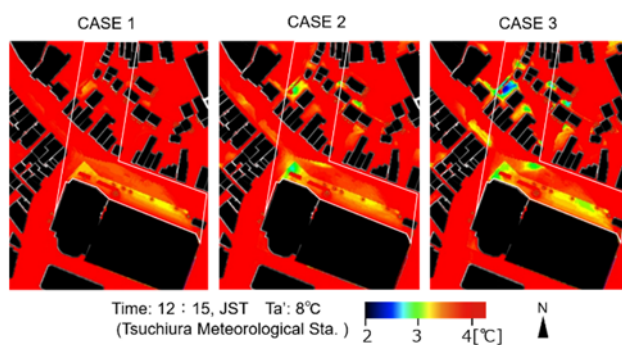


Fig.13 Surface temp. distribution of different cases of coupled analysis

4.5 考察

今回の連成解析手法による冬季における低温の微気候の検証では、高層建築物の日陰空間を対象に実施した。建物に囲まれた閉鎖的なキャニオン空間における蓄冷と日中における気温の低減は神田ら⁽²⁷⁾、Johansson ら⁽²⁸⁾、Parlow ら⁽²⁹⁾によって示されている通り明らかであるが、本研究のような開放的な空間であっても、大規模な高層建築物の日陰空間であれば、近傍空気と低温の地表面との局所的な熱交換と構成材料の蓄冷現象により、冷気が生成することが数値解析からも示されたことは意義深いものである。これは、同様に 24 時刻の連成解析を行った既往研究^(20,21,22)でも得られていない結果である。数値解析上、得られた知見として、非連成解析における仮定（気温と風速の空間分布が一樣）が局所的に誤差を生んでいたことと（CASE 1 と CASE 2 の表面温度の比較）、過去の履歴を考慮することで局所的な蓄冷の再現性が高まった（CASE 2 と CASE 3 の表面温度の比較）ことの 2 点が明らかとなった。

一方、著者が想定したよりも、リモートセンシング観測と移動観測により示された地表面温度と局所気温がより低く、これに関しては、連成解析を行っても完全には再現しきれておらず、1 日のみを連成解析した現状の手法の限界とも言える。今後の課題としては、より長期の局所蓄冷を考慮した場合に、どの程度観測結果に近づいた解析結果が得られるかということがあるが、その場合、必然的に計算負荷が膨大になってくる。よって、長期の影響については、連成の頻度を抑えて、時間積分的な局所蓄冷と局所の冷気の影響を考慮するなど、時間方向のモデル化が必要となると考えられる。その他に、CFD シミュレーションには、各時刻の流入風条件に基づき平均流を解析する RANS モデルを用いた。これは、各時刻の流入風に代表性があることに基づくものであるが、より短い時間スケールでの風向・風速の変動が冷気分布に影響をした可能性も考えられる。これらの影響要因の分析についても、今後の課題としたい。

5. まとめ

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

- ① 航空機リモートセンシング観測で高層建築物の日陰空間において、低温の地表面が確認された。これは構成材料の蓄冷や日陰空間特有の微気候による可能性が示唆された。
移動観測により同日陰空間における低温の地表面（上向き長波長放射量が小さい）を確認したとともに、局所気温が低くなっていることを確認した。ま

Table 4 Surface Temp. of different points among different cases of coupled analysis

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

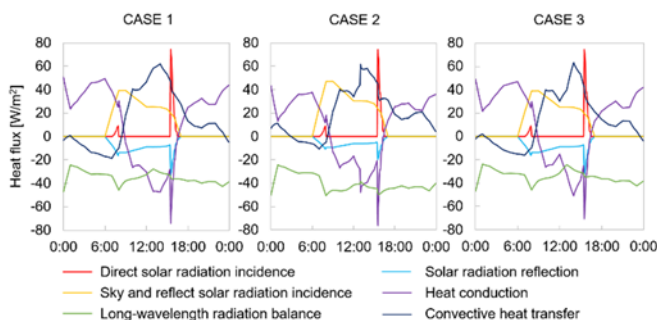


Fig.14 Difference of heat balance items among different cases of coupled analysis at Point D

た、局所気温が低くなっていることは局所熱交換により冷気が生成されたことを示唆した。

- ② 航空機リモートセンシング観測と熱収支解析により、上空大気への放射冷却は低温の地表面の主要な形成要因であることを確認した。ただし、高層建築物の日陰空間において局所的に、より低温化する現象は、連成を行わない熱収支解析では再現されなかった。
- ③ 熱収支解析と CFD 解析との連成解析によって、高層建築物の広大な日陰空間において、近傍空気と低温の地表面や壁面との局所的な熱交換により、冷気が生成されたことを確認できた。
- ④ 連成なしの熱収支解析、12 時のみの連成解析と 24 時刻の連成解析を実施・比較し、冷気の生成と地表面への局所的な蓄冷がそれぞれ表面温度へ及ぼす寄与を確認した。連成解析により、高層建築物の日陰空間に、より低温の地表面が形成される現象を再現したとともに、低温の地表面や壁面と冷気との相互作用が時間的に継続することで、蓄冷効果を起こしたことを明らかにした。

ただし、高層建築物の日陰空間における低温の地表面は、解析よりも観測の方の表面温度がより低くなっていた。これは、より長期間の局所蓄冷の影響であることが推察されるため、長期の連成を行う必要性を示唆した。ただし、長期間の連成解析は計算負荷の増大を招くため、時間を遡るにしたがって連成の頻度を減らすなど、計算を簡略化する工夫が必要と考えられる。また、より短い時間スケールでの風向・風速の変動も冷気分布に影響している可能性もあるため、今後の研究課題としたい。

参考文献

- (1) 吉田伸治・村上周三・成田健一・高橋岳生・大岡龍三・持田灯・富永禎秀, 団地内キャニオン空間内における夏季の屋外温熱環境の実測, 日本建築学会計画系論文集, 552(2002), pp.69-76.
- (2) 浅輪貴史・梅干野晃・武澤秀幸・清水敬示, 緑の茂った戸建住宅地の屋外空間に形成される夏季の微気候に関する実測調査 屋外空間の微気候と居住者の開放的な住まい方との関わりに関する研究 その1, 日本建築学会計画系論文集, 563(2003), pp.77-84.
- (3) 萩島理・成田健一・谷本潤・三坂育正・松嶋篤・尾之上真弓, 大規模な階段状緑化屋根を有する建築物周辺の微気象に関する実測調査, 日本建築学会環境系論文集, 577(2004), pp.47-54.
- (4) 佐藤愛・吉田治典・伊藤麻美子・村上大輔, 集合住宅の住棟間における樹木の気候緩和効果に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 587(2005), pp.79-85.
- (5) 吉田伸治・大岡龍三・持田灯・富永禎秀・村上周三, 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会計画系論文集, 536(2000), pp.87-94.
- (6) 佐々木澄・岩田達明・持田灯・渡辺浩文・吉野博, 街路樹がストリートキャニオン内の温熱空気環境に及ぼす影響に関する数値解析, 日本建築学会環境系論文集, 605(2006), pp.139-146.
- (7) 西岡真稔・松尾陽, 都市キャノピーにおける建築の放散熱とその影響 その1 建築の熱放散に関する伝熱モデル, 日本建築学会計画系論文集, 508(1998), pp.29-34.
- (8) 中大窪千晶・梅干野晃, 屋外生活空間における空間形態や構成材料の違いを考慮した放射環境の数値解析, 日本建築学会環境系論文集, 630(2008), pp.957-964.
- (9) H. Chen, R. Ooka, K. Harayama, S. Kato, X. Li, Study on outdoor thermal environment of apartment block in Shenzhen, China with coupled simulation of convection, radiation and conduction, Energy and Buildings, 36(2004), pp.1247-1258.
- (10) C. Gromke, B. Blocken, W. Jassen, B. Merema, T. van Hooff, H. Timmermans, CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands, Building and Environment, 83(2015), pp.11-26.
- (11) R. Priyadarsini, W.N. Hein, C.K.W. David, Microclimatic modeling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island, Solar Energy, 82(2008), pp.727-745.
- (12) J. Allegrini, V. Dorer, J. Carmeliet, Coupled CFD, radiation and building energy model for studying heat fluxes in an urban environment with generic building configurations, Sustainable Cities and Society, 19(2015), pp.385-394.
- (13) 原山和也・吉田伸治・大岡龍三・持田灯・村上周三, 非常放射・伝導解析による数値解析と精度検証: 非常な対流・放射・伝導を考慮した3次元の屋外温熱環境予測評価手法の開発 第1報, 日本建築学会計画系論文集, 556(2002), pp.99-106.
- (14) 梅干野晃・浅輪貴史・中大窪千晶, 3D-CAD と屋外熱環境シミュレーションを一体化した環境設計ツールの開発, 日本建築学会技術報告集, 20(2004), pp.195-198.
- (15) T. Asawa, A. Hoyano, K. Nakaohkubo, Thermal Design Tool for Outdoor Spaces Based on Heat Balance Simulation Using a 3D-CAD System, Building and Environment, 43(2008), pp.2112-2123.
- (16) M. Idczak, D. Groleau, P.G. Mestayer, J.-M. Rosant, J.-F. Sini, An application of the thermo-radiative model SOLENE for the evaluation of street canyon energy balance, Building and Environment 45 (2010), pp.1262-1275.
- (17) A. Hénon, P.G. Mestayer, D. Groleau, J. Voogt, High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign, Building and Environment 46 (2011), pp.1747-1764.
- (18) 山村真司・梅干野晃・浅輪貴史, 建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱収支・気流連成シミュレーション手法開発の基礎的検討, 日本建築学会計画系論文集, 560(2002), pp.73-80.
- (19) M. Takata, A. Hoyano, Spatial Structure of City Blocks with Vacant Lands in Edo, Early Modern Tokyo –Introducing the Appropriate Wind into Outdoor Living Spaces–, Proceedings of 30th International PLEA Conference (2014), p.2259.
- (20) J. Ma, X. Li, Y. Zhu, A Simplified method to predict the outdoor thermal environment in residential district, Building Simulation, 5(2012), pp.157-167.
- (21) Y. Toparlar, B. Blocken, P. Vos, G.J.F. van Heijst, W.D. Janssen, T. van Hooff, H. Montazeri, H.J.P. Timmermans, CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam, Building and Environment, 83(2015), pp.79-90.
- (22) K. Ikejima, A. Kondo, A. Kaga, The 24-h unsteady analysis of air flow and temperature in a real city by high-speed radiation calculation method, Building and Environment, 46(2011), pp.1632-1638.
- (23) 押尾晴樹・浅輪貴史・陳侃, 高層建築物が周辺低層市街地の温熱環境に及ぼす影響 その1 航空機リモートセンシングと移動観測による実態把握, 日本建築学会学術講演梗概 D-1(2016), pp.897-898.
- (24) D.A. Artis, W.H. Carnahan, Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. Remote Sensing of Environment, 12(1982), pp. 313-329.
- (25) 日本建築学会, 市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック-ガイドラインと検証用データベース-, 流体数値計算による風環境評価ガイドライン作成 WG(2007).
- (26) 梅干野晃・浅輪貴史・村上暁信・佐藤理人・中大窪千晶, 実在市街地の 3D-CAD モデリングと夏季における街区のヒートアイランドポテンシャル: 数値シミュレーションによる土地利用と土地被覆に着目した実在市街地の熱環境解析 その1 日本建築学会環境系論文集 Vol. 72 (2007) No. 612 p. 97-104.
- (27) M. Kanda, R. Moriwaki, Y. Kimoto, Temperature profiles within and above an urban canopy, Bound.-Lay. Meteorol., 115(2005), pp.499-506

- (28) Johansson, E., Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco, *Build. Environ.*, 41(2006), pp.1326–1338.
- (29) E. Parlow · R. Vogt · C. Feigenwinter, The urban heat island of Basel – seen from different perspectives, *J. Geogr. Soc. Berlin*, 145(2014), pp.96–110.

注記

- 注1) 局所的な地表面への蓄冷と近傍空気との熱交換により冷気が生成されていることは、測定装置に限界のある観測からは完全に解明することは非常に困難である。これが、前に指摘したモデルと実測との不整合という点である。すなわち、本研究では、実測調査で完全にメカニズムが確認されていない現象を、数値解析によって再現し、その形成要因を明らかにするという主旨の取り組みと見なすことが出来る。
- 注2) 連成回数を最小化するには、等温場の CFD シミュレーションを先に実施してから（：気流分布のみを算出）、熱収支シミュレーションを実施する（：局所対流熱伝達率を踏まえた表面温度を算出する）方が連成の収束に至るまでの回数は減らせることが分かっている。本研究では、連成を行わない場合の表面温度分布についても比較に使用するために、熱収支シミュレーションを先に実施した。
- 注3) 本研究では、比較のために、対象時刻 12 時の気流・気温の空間分布のみを熱収支シミュレーションに入力し、その他の時間帯の気温・風速の空間分布は一樣と設定するケースについても実施した。詳細は 4.1 に示す。
- 注4) 時刻ごとに、全表面の対流熱伝達量の度数分布を分析した。図 15 に 12 時の比較の結果を示す。1 回目と 2 回目の連成結果の比較を(a)に示す。2 回目と 3 回目の結果を(b)に示す。1 回目の対流熱伝達量は 2 回目より大幅に過小評価した。1 回目は上空風速をそのまま表面に適用したためである。一方、2 回目と 3 回目の差は 0 と 10W/m² の区分以外、5%以内の差に収まったことから、連成解析は 2 回で収束したと判断した。
- 注5) 連成解析は 1 時間間隔で実施しているため、各時刻の時間代表性が問題となる。図 16 の(a), (b)にそれぞれ土浦アメダス気象データから風配図と風速の出現頻度分布図を作成した。10 分間と 1 時間の測定データ、それぞれについて作成している。本結果から、両者はほぼ一致した傾向を示していることから、1 時間以内に風向や風速の変化がほとんどなく、1 時間ごとの風向風速の代表性が高いと言える。
- 注6) 樹木は、本研究では主要な解析対象ではなく、対象地内には多く存在していないが、熱収支シミュレーション上では樹木モデルとして再現した。樹木の高さはレーザー距離計（550AS, Nikon, Tokyo）と現地調査の写真から決定した。樹冠の形は樹種の違いによって、5 種類に分けて設定した。落葉樹と常緑樹の日射透過率はそれぞれ 15%と 20%に設定した。

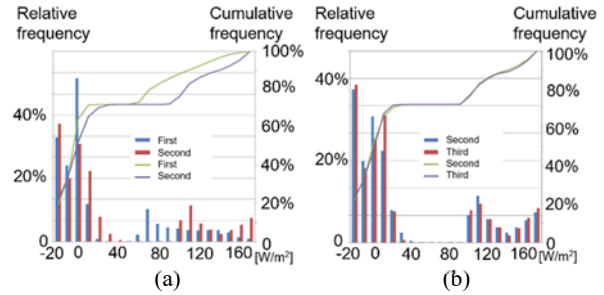
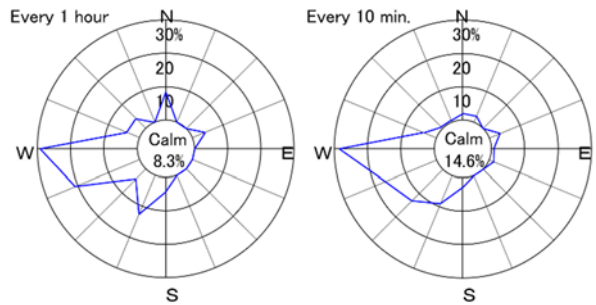
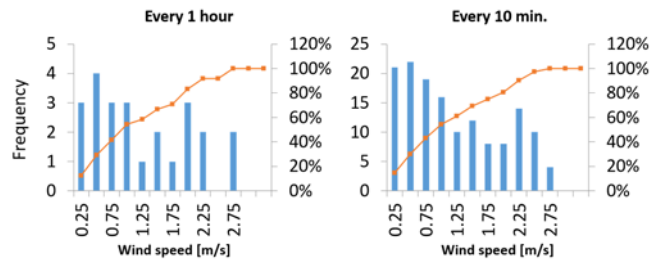


Fig.15 Comparison of convective heat flux, (a) first and second step, (b) second and third step



(a) Wind rose of the target site



(b) Frequency distribution of wind speed of the target site

Fig.16 Comparison of the wind condition between every 1 hour and every 10 minutes

- 注7) ここでは、主に対流熱伝達による顕熱フラックスを評価しているが、移動観測では計測が困難ため、観測と数値解析との結果については比較せずに、連成解析による影響を、連成前、12 時のみ連成と 24 時刻の連成（CASE 1, CASE 2 と CASE 3）の比較から評価する。

(Received October 3, 2017, Accepted November 28, 2017)