

jh250051

数値乱流データベースを用いた統計的ダウンスケーリングによる 街区内乱流場の即時診断

稲垣 厚至（東京科学大学）

本研究は静的ダウンスケール手法を用いて、メソ気象モデルによる空間解像度 1km 程度の気象シミュレーション結果から、都市街区空間を対象とした歩行者レベルの風環境を数 m 程度の解像度で診断するシステムを構築することを目的とする。本年度は、(1) 格子ボルツマン法 LES を用いた都市乱流境界層の数値シミュレーションを実施し、主風向別の都市街区乱流データベースを作成した。(2) 都市微気象過程（都市空力抵抗、放射過程、人工排熱）を考慮したメソ気象シミュレーションを、関東圏の対象として実施した。(3) 上記(1)のデータベースを用いて、都市街区内外の平均風速比を表現する式を、建物幾何特性をパラメータとして構築した。これにより、データベースとして整備された静的な街区内風速分布を、動的な気象計算結果でスケールングでき、街区内風環境の定量診断が可能となった。(4) 実都市観測結果との比較から各システム要素の精度検証を行った。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東京科学大学 情報基盤センター

mdx I

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

データ科学・データ利活用課題分野

(3) 参加研究者一覧と役割分担

・代表者（東京科学大学）

稲垣 厚至：研究総括、LBM 解析結果の分析

・副代表者（プロメテックソフトウェア）

小野寺 直幸：LBM 及び可視化のコード開発

・協力者（プロメテックソフトウェア）

長谷川 雄太：LBM 及び可視化のコード開発

小野 嘉己：LBM 及び可視化のコード開発

・協力者（千葉工業大学）

小田 僚子：WRF を用いた気象計算

北原 愛菜：WRF を用いた気象計算

宍戸 達也：WRF を用いた気象計算

児島 風沙：LBM 解析結果の分析

・協力者（東京科学大学）

丸山 莉子：LBM 解析結果の分析

WIJAYA MIKAEL：LBM 解析結果の分析

2. 研究の目的と意義

都市街区内の風は都市域における人々の生活環境と密接に関わっている。例えば日常の暑熱環境や物質濃度などの動態に直接的な影響を及ぼしている他に、台風通過に伴う突風は地物の倒壊や倒木などの致命的な被害を及ぼし得る。また、都市域における無人航空機が安全に航行するためには都市街区毎の風況特性を把握することは重要である。これらに対して本研究では、日常の街区内風環境を即時に診断するシステム開発を試みるものである。

本研究では静的ダウンスケーリング（Static

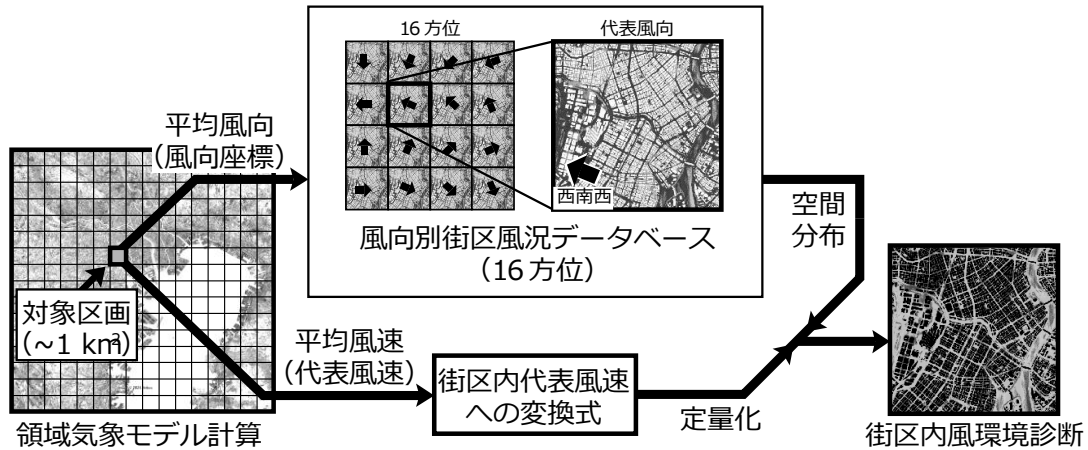


図1 都市街区内風環境即時診断システムの概念図

downscaling) と呼ばれる, 統計的ダウンスケール手法の一種を用いて, メソ気象場から街区内風速を定量的に診断するシステムを開発する. これにはまず, CFD を用いた街区内乱流風速の数値シミュレーションを実施し, その局所時間平均統計量の空間分布をデータベースとして整備する. 次に, メソ気象モデルを実施して街区毎 (1km 程度の範囲を想定) の平均風速及び風向を計算し, それを街区の代表風速としてデータベースの各種乱流統計量を動的にスケールリングすることで, 街区内の風環境を定量的に診断する手法である (図1). データベースは街区内の詳細な空間分布を与えるが流入風速で規格化されたものであり, 一方気象モデルの出力は空間解像度が粗いが動的な時間変化を予測する. 両者を掛け合わせることで, 建物で隔てられた空間の詳細な乱流統計量の分布を動的に予測診断することができるようになる.

気象モデルと CFD の結合による力学的ダウンスケールリングは正攻法として多くの研究開発がなされているが, 予測計算の都度, 大規模な計算が必要となる. それに比べて本研究が提案する手法は, データベースを一度作成してしまえばそれ以上の計算コストがほとんどかからず, 即時に診断結果が得られることが本手法の特色である. これによって, 日々の天気予報のように汎用的かつ, 広大な範囲に対して運用することが可能となる.

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

本研究が研究対象とする, 建物に隔てられた都市街区空間の流れを CFD で陽に取り扱うためには, 都市のような数 km 以上の広がりを持った計算領域を, 建物等の地物や街路が陽に解像することができるような, 数 m の細かい空間解像度で解く必要がある. また, 主風向 16 方位に対する独立した定常条件下での計算を実施することや, 各々について安定した乱流統計量を得るための十分な積分時間が確保することなど, 総じて膨大な計算量が必要となる.

これに対し, 申請者らはこれまでにエクサスケール計算機の有望なアーキテクチャの一つである GPU に適した CFD 手法の一つである格子ボルツマン法 (LBM) のモデルを構築している. 本モデルを効果的に活用するためには, 東京科学大学の研究拠点にて運用される TSUBAME4.0 のような大規模なマルチ GPU 計算環境において実行する必要がある. これによって, 本研究目的の一つである, 都市微気象環境データベース作成のための計算が実施できる.

また, 本研究は計算機科学を専門とするプロメテックソフトウェアと, 都市メソ気象シミュレーションを専門とする千葉工業大学, そして都市微気象シミュレーションや微気象観測を専門とする東京科学大学のグループによる学際的研究体制を構築することで実現可能な計画となっており, 本

公募型共同研究として実施した意義がある。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

該当なし。

5. 今年度の研究成果の詳細

本研究目的は、静的ダウンスケール手法を用いて街区内風環境を即時に診断するシステムを開発することである。本システムはメソ気象モデル（WRF）と、主風向 16 方位に対する、空間解像度数メートル程度の街区乱流データベース（格子ボルツマン法 LES モデルで作成）と、街区内平均風速の診断式など、3つの要素モデルの組み合わせにより構成される。本年度はそれらの各要素モデル構築及び計算設計について検討し、各出力を組み合わせて最終出力が得られる枠組みを構築した。また、各要素モデルに対して、実測値との直接比較による精度検証を行った。

(1) 格子ボルツマン法 LES モデルを用いた都市乱流境界層の数値シミュレーション

東京科学大学大岡山キャンパスを中心とした領域に対して、格子ボルツマン法 LES モデルを用いた格子幅 2m での乱流計算を実施した。底面境界条件には個々の建物形状、標高、植生を考慮した。建物および地形の境界は剛体面として取り扱い、壁関数を用いて壁面抵抗を表現した。植生グリッドには抵抗係数及び葉面積密度を定義し、透過する流れに抗力を与えた。植生の高さは一律 12m とした。流入風は 10m/s の一様風速を与えた。側方の境界条件は周期境界条件とし、上端は鉛直風速ゼロのスリップ条件を設定した。

主風向 16 方位に対する街区内風速の局所統計量に関するデータベースを作成するため、地形を 16 方位（各 22.5° 時計回り）に回転させ、主風向と風速を固定した定常計算を実施した。計算時間は 1 時間とし、最後の 10 分間の局所風速に関する時間平均統計量をデータベースとして保存した。統計量の種類は、平均風速、各種速度分散、乱流強度、最大瞬間風速、運動量フラックスなどで、

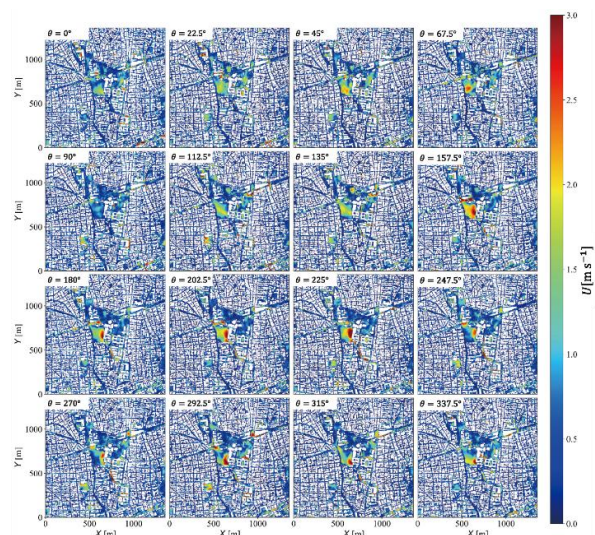


図2 都市街区内風速データベース（地上高 2m の平均風速，主風向 16 方位）

それぞれについて 2m の空間解像度で整備されている。

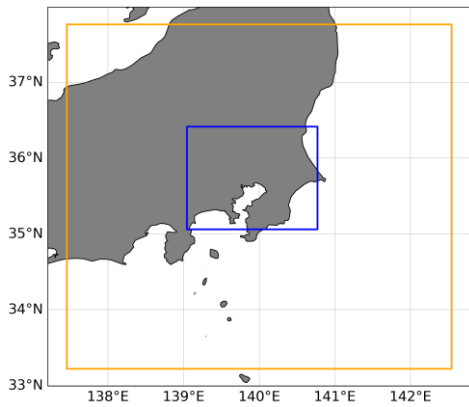
図2はデータベースの一例として、地上高 2m における平均風速の空間分布を、主風向 16 方位について示している。風向の違いにより空間分布が大きく異なっていることが確認できる。また、補足計算を実施して、各種統計量の空間分布の主流風速の感度分析や、乱流強度に対する SGS 成分の寄与を評価し、最下層で 10%未満であることなどを確認した。

(2) 東京 23 区を包含するメソ気象シミュレーション

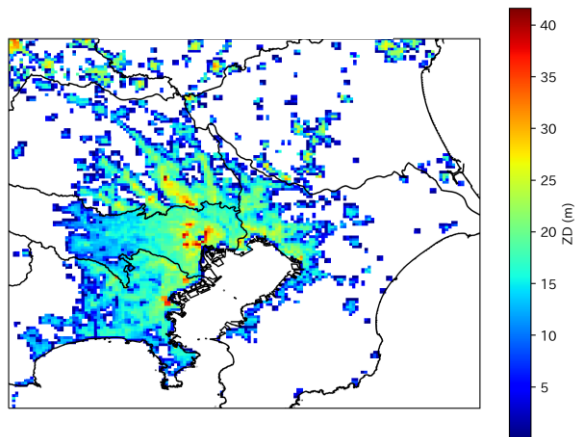
気象モデル（WRF）を用いて、東京 23 区を包含する領域のメソ気象シミュレーションを実施した。対象期間は 2019 年 9 月の 1 か月間の計算を実施した。

主な計算条件として、計算範囲と解像度の異なる 2 つの領域にネスティングした計算を実施した。第一計算領域の大きさは約 500km 四方程度で水平解像度が約 4km, 第二計算領域の大きさは 150km 程度で水平解像度は約 1km となっている（図 3 a）。

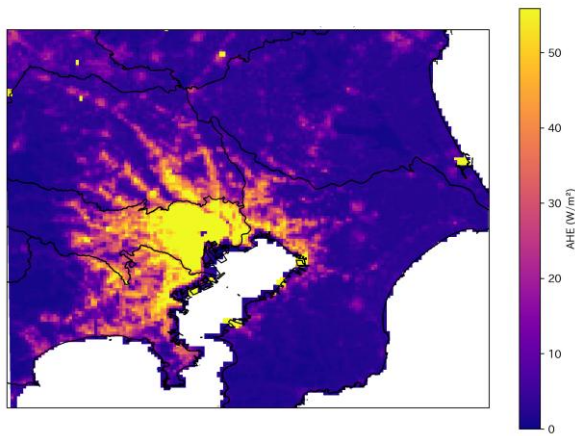
本研究は都市域の地表面近傍風速に注目した予測診断システム構築を目的としていることから、それに見合うような詳細な都市地表面条件を与え



(a)



(b)



(c)

図3 メソ気象モデルの計算設定 (a) 計算領域, (b) ゼロ面変位, (c) 人工排熱

る必要がある。本研究では WRF のリポジトリに整備されている都市地表面パラメータに基づきモデル化されている空力抵抗 (図 3b) や人工排熱 (図 3c) などについて、非一様な空間分布が考慮されている。また、単層キャノピーモデルを使用して

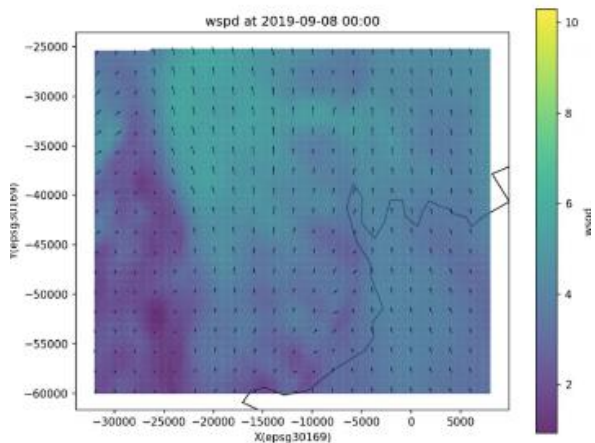
都市の熱収支が考慮されている。初期の気象場は気象庁の局地客観解析データを使用して与えた。解析された各種気象要素について精度検証を行い、入力データや使用するモデルなどの最適な組み合わせについて検討を行った。

(3) メソ気象モデルと街区乱流統計量データベースとの結合

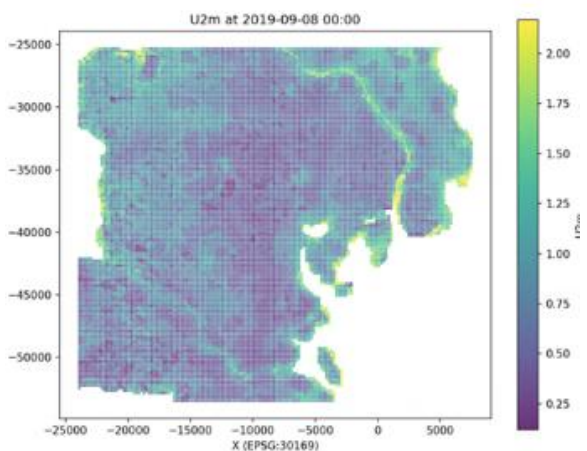
格子ボルツマン法 LES モデルで作成した街区内乱流統計量の数値データベースは、一定主流風速条件に対する値であるため、そのままでは時間変動する主流風速に応じた街区内の流れの分布を定量的に診断することができない。そこで、データベースの値を正規化し、ダイナミックに変動する広域気象場に対応した、街区の代表 (平均) 風速でスケールリングする必要がある。しかしながら WRF が出力する、最下層のグリッド内で平均された風速は、地表面近傍の建物凹凸の影響を陽には考慮できないため、実際の建物で隔てられた空間内で平均された値とは一般的に異なるものと考えられる。

そこで都市街区内乱流データベースを用いて、街区内の地上 2mにおける水平空間平均風速と、WRF の最下層出力高度の平均風速との関係を分析し、都市幾何形状および都市空力抵抗を説明変数とした回帰式を作成した。

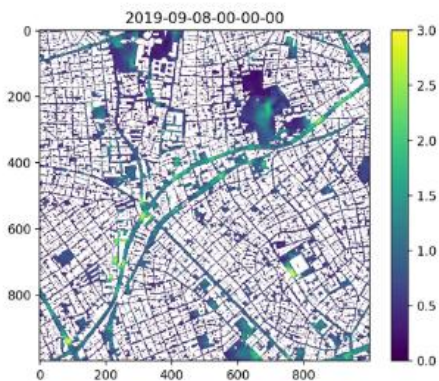
図 4a はメソ気象モデルで計算した、第二計算領域における最下層高度の平均風速を示しており、計算領域内 (関東圏) で空間不均一に分布していることが確認できる。図 4b は回帰式を介して診断された、地上高 2mの平均風速分布である。回帰式を介することで、WRF の最下層風速には見られなかった、河川や沿岸域などの比較的地物が少なく開けたところでの大きな風速となっている箇所や、都心部では速度が比較的低くなっている傾向など、定性的に妥当な結果が得られていると考えられる。図 4c は高度 2mの街区平均風速でスケールリングした、街区内の局所的な時間平均風速の分布であり、街区内のある地点、ある時刻の診断結果が示されている。



(a)



(b)



(c)

図4 速度診断システムの出力 (a) メソ気象モデルの最下層風速, (b) 地上高 2m 平均風速, (c) 街区内の平均風速分布

(4) 精度検証

本システムは 3 つの独立した要素モデル (気象モデル, 格子ボルツマン法 LES モデル, 街区内平均風速の診断式) で構成されており, 各々が不確実

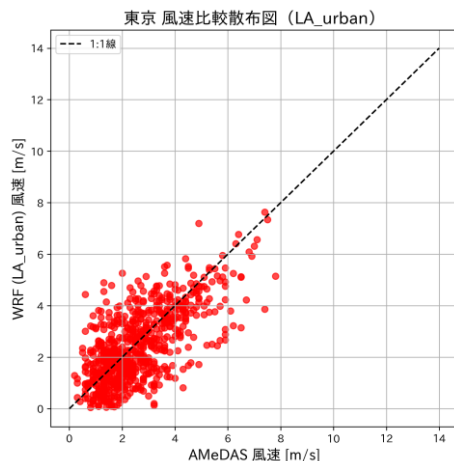


図5 メソ気象モデルと地上観測風速の比較

性を有している. これに対して各要素モデルの精度検証を以下のように実施した.

(a) 格子ボルツマン法 LES モデルと都市タワー観測結果との比較

東京都大田区久が原の気象観測タワーで測定された乱流統計量と数値計算の比較を行った. 平均風速および鉛直風速の乱流強度を摩擦速度で無次元化した. データベースは南風のケースを参照し, 気象観測データは南風時且つ大気安定度が中立付近の測定値のみを選別し, 無次元化したのちにアンサンブル平均した. 各統計量の鉛直分布を示しており, 概ねシミュレーション及び観測結果が一致する結果が得られており, 都市街区上空の接地境界層あるいは対数層の高度については, 現実に即した風況場が再現されている.

(b) 気象モデルとアメダス観測点との比較

アメダス観測点における平均風速について, 気象モデルの精度検証を行った. 図5は横軸に東京アメダスで観測された高度 30m 付近の平均風速, 縦軸は同時刻を対象に WRF で計算された平均風速を示している. この散布図を見ると, 両者にある程度のばらつきはあるものの, 特に際立った正負のバイアスはないことが確認できる. なお, 都市地表面パラメータから計算される都市空力特性を考慮しない計算を比較として実施したところ, アメダスによる実測値と比べて過大評価側に偏る結

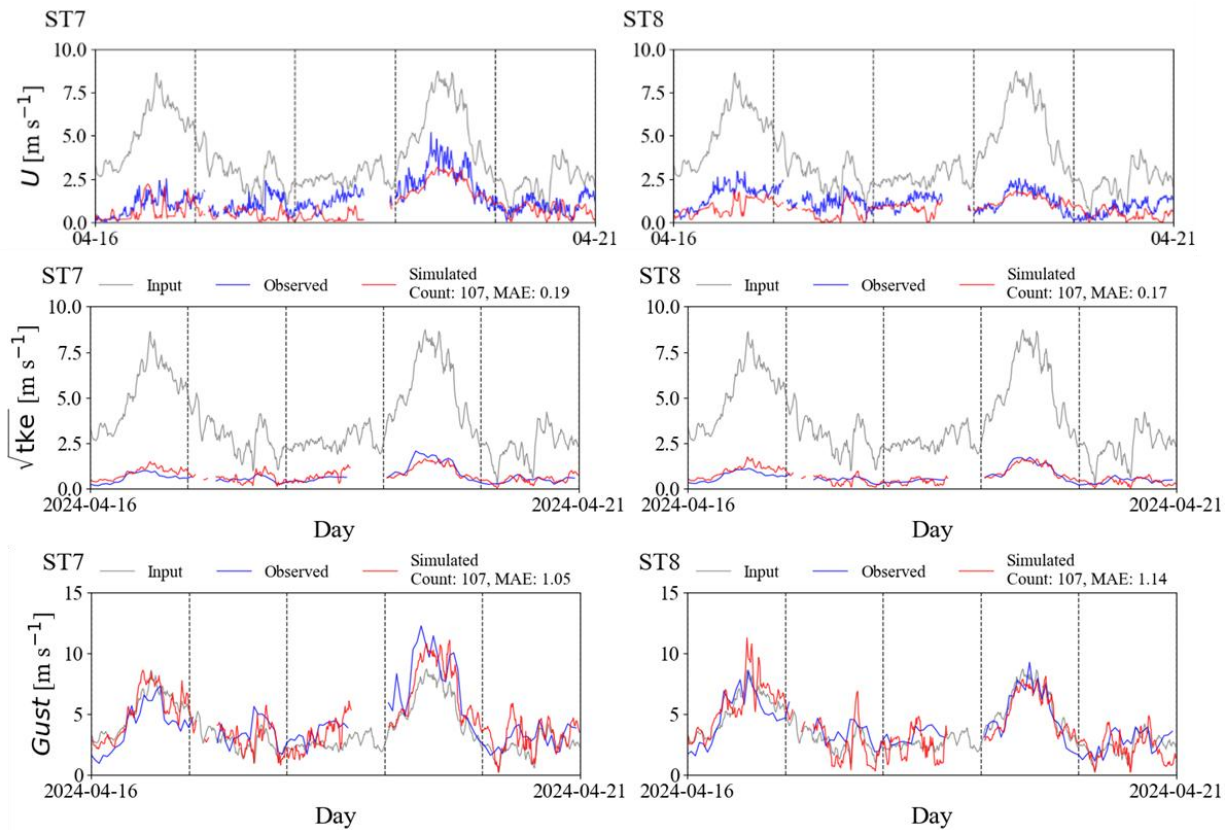


図6 街区内局所風速診断の結果 上段：平均風速，中段：TKE，下段：最大風速
赤：診断値，青：観測値，灰：代表風速

果が得られた。つまり，都市の建物凹凸が作る流体抵抗を考慮することは，都市地表面近傍風速を精度良く診断することに不可欠であることが，本比較検討により示された。

(c) 静的ダウンスケールにより得られた局所乱流統計量の空間分布と街区内の実測値との比較
静的ダウンスケールを用いて診断した局所乱流統計量の空間分布と実測値の直接比較を行った。その際に，気象モデルに含まれる不確実性を省くため，代表風速を実測値（AMeDASの観測値）に置き換えた検証を行った。図6は平均風速，乱流強度，10分最大風速の時系列を示しており，本システムによる推定値に加え，実測値及び代表風速がプロットされている。推定値は実測値を追随しており，手法の有意性を示している。代表風速と比較すると，推定値は代表風速の単純な定数倍ではなく，複雑な挙動を示している。速度スケールの動的な変化に加え，風向変化による非線形的な変

化が考慮されているためである。

(5) mdxを用いた情報公開

試験的にオンデマンドでデータベースに蓄積されている街区内速度分布のデータを可視化するシステムを開発した(図7)。今後，速度診断システムをmdx内に実装することで，視覚的に診断結果が得られることが可能となる。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

進捗状況として，本年度成果により診断システムを構築し，システムを構成する各モデルの精度検証を行った。mdx上でデータベースとして蓄積されている風速分布をオンデマンドで可視化するシステムを構築した。以上より今年度予定していた最低限のシステム構築を行うことができた。

今後の展望として，CFDによるデータベース構築は，より広範な範囲に展開する場合に計算負荷が膨大になるため，これが今後の発展のボトルネ

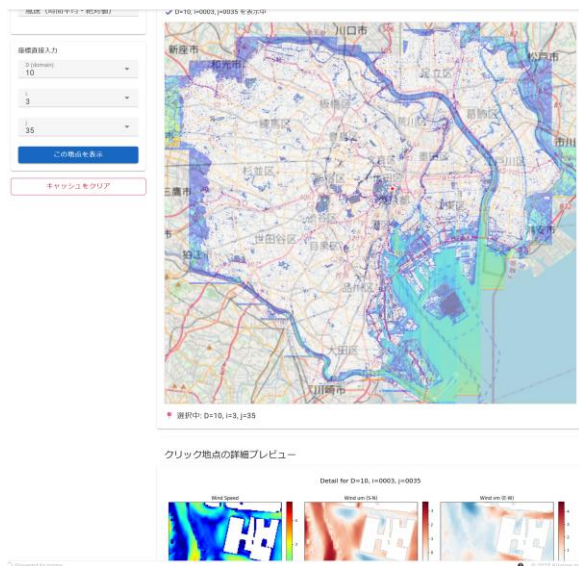


図7 風速分布可視化システムの出力例

ックとなり得ると考えられる．そこで，本データベースを活用することで CFD のサロゲートモデルを構築し，データベースが担っていた街区内空間分布診断の部分をサロゲートモデルに置き換えることを検討している．サロゲートモデルを組み込んだ診断システムの mdx での運用を想定している．