

# 風況デジタルツインによる都市防災

～都市街区乱流データベースの作成と活用～

稲垣 厚至

東京工業大学 環境・社会理工学院

2024年2月2日 第35回CCSEワークショップ

# 背景 1

## 都市街区と風環境

- ・ 建物幾何に応じた複雑な風速分布
  - ＞ 風の収束による強化，街区空気のベンチレーション
- ・ 熱源，物質排出源
  - ＞ 街区の風に応じて拡散，風速場を修正
- ・ 人の活動空間
  - ＞ 地物への負荷
  - ＞ 航空機（無人，有人）への影響
  - ＞ 歩行者への負荷（熱，物質，風圧）
  - ＞ 火災延焼

→ 街区レベルの詳細な風の分布特性を知る必要がある

# 背景 2

## 街区内風環境評価における数値流体モデル（LES等）の利用

- ・リアルタイム計算

(e.g. Onodera et al. 2021)

- ・データ同化

(e.g. Nakayama & Takemi 2020)

- ・建築物周りの  
風況アセスメント

(都市開発等の現業で実施)

} 非定常な,  
乱流変動の予測

} 街区構造で決まる,  
平衡状態の診断

- 流入条件に依存しない（粗度幾何で決まる）粗度境界層高さ（Cheng & Castro 2002）
- 屋外都市(模型)街区内における乱流統計量の再現性（Christen et al. 2013, Roth et al. 2015）
- 強い乱流状態下では風上1km程度の粗度の影響を受けない（Inagaki et al. 2023）

# 背景 2

## 街区内部環境評価における数値流体モデル（LES等）の利用

- ・リアルタイム計算

(e.g. Onodera et al. 2021)

- ・データ同化

(e.g. Nakayama & Takemi 2020)

- ・建築物周りの  
風況アセスメント

(都市開発等の現業で実施)

非定常な,  
乱流変動の予測

街区構造で決まる,  
平衡状態の診断 + 相似則  
(規格化)

➡ 都市街区乱流データベース

- 流入条件に依存しない（粗度幾何で決まる）粗度境界層高さ (Cheng & Castro 2002)
- 屋外都市(模型)街区内部における乱流統計量の再現性 (Christen et al. 2013, Roth et al. 2015)
- 強い乱流状態下では風上1km程度の粗度の影響を受けない (Inagaki et al. 2023)

# 背景 3

東京都23区のデータベース作成を想定

- ・ 計算領域 : 35 km × 35 km
  - ・ 格子解像度 : 2 m (道幅など)
- } 膨大な計算コスト, メモリ

領域分割による独立した計算, 計算結果の結合を提案

- ・ メモリの削減 (1 計算当たりの)
- ・ 都市開発地域の再計算, データベースの部分的入れ替え
- ・ 流入条件の感度? 側方境界の影響?

# 目的

- (1) 領域分割したLESシミュレーション結果の合成,  
その妥当性を検証  
(流れ方向及びスパン方向の分割)
- (2) LESシミュレーションにより東京都23区全域を  
カバーする都市街区内乱流統計量のデータベース作成

# 街区内風速の相似則

接地境界層の流れ

都市街区内の流れ

街区構造だけで  
決まる関数

相似則の仮定

$$\frac{U(z \in ISL)}{u_{scale}} = \Phi_{ISL}(z, \tilde{H})$$

$$\frac{U(x, y, z \in RSL)}{u_{scale}} = \Phi_{RSL}(x, y, z, H(x, y, z))$$

普遍関数

高さ

地表面パラメータ

$u_{scale}$

3次元空間座標

地表面幾何

代表速度

$$\tilde{H} = (z_0, d)$$

普遍関数

$$u_{scale} = u_*$$

$$u_{scale} = ?$$

$$\Phi_{ISL}(z) = \frac{1}{k} \ln \frac{z - d}{z_0}$$

$$\Phi_{RSL}(x, y, z) = ?$$

# 街区内風速の相似則

接地境界層の流れ

都市街区内の流れ

街区構造だけで  
決まる関数

相似則の仮定

$$\frac{U(z \in ISL)}{u_{scale}} = \Phi_{ISL}(z, \tilde{H})$$

普遍関数

高さ

地表面パラメータ

$$\frac{U(x, y, z \in RSL)}{u_{scale}} = \Phi_{RSL}(x, y, z, H(x, y, z))$$

3次元空間座標

地表面幾何

代表速度

$$\tilde{H} = (z_0, d)$$

普遍関数

$$u_{scale} = u_*$$

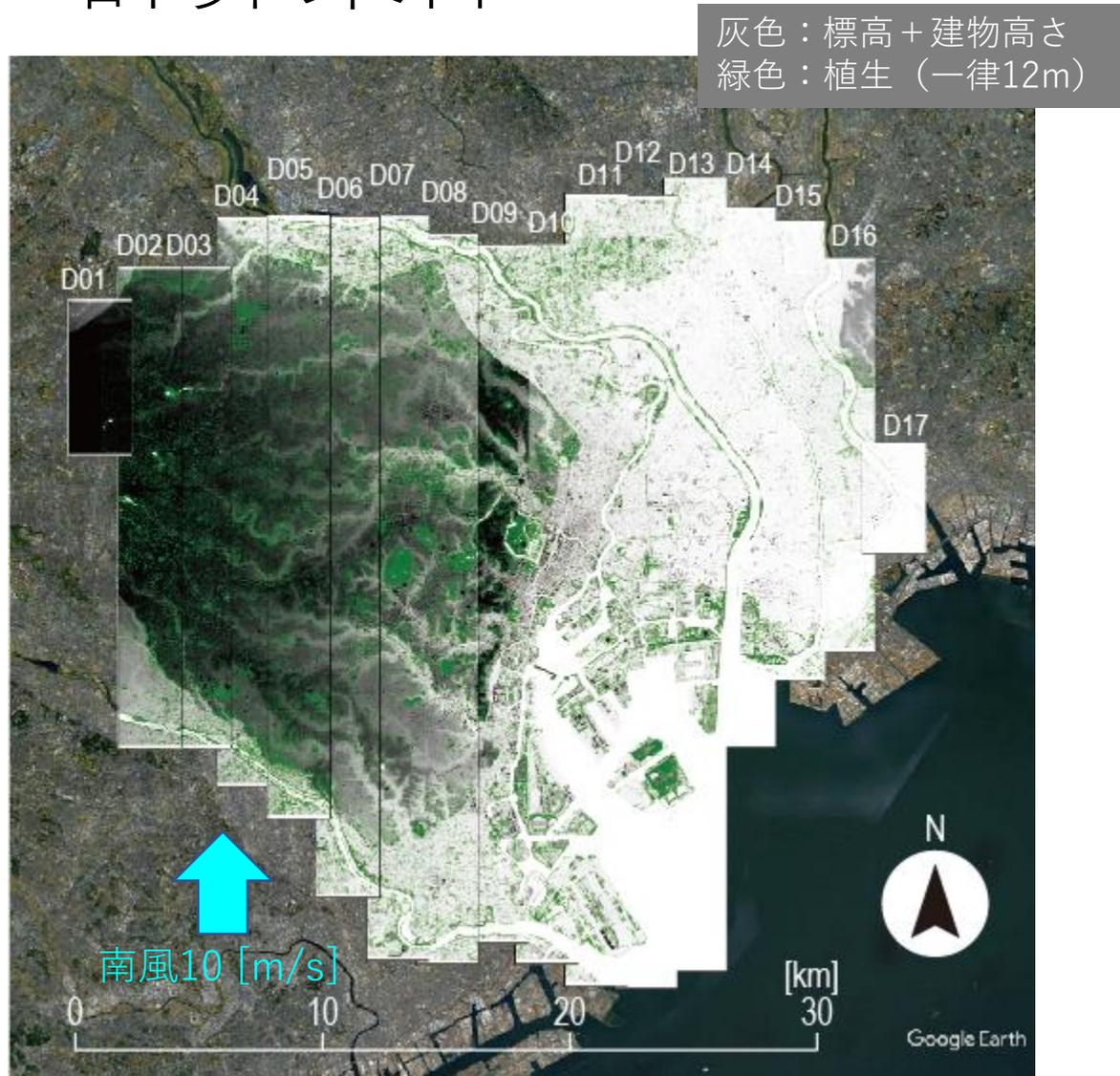
$$\Phi_{ISL}(z) = \frac{1}{k} \ln \frac{z-d}{z_0}$$

$$u_{scale} = ?$$

$$\Phi_{RSL}(x, y, z) = ?$$

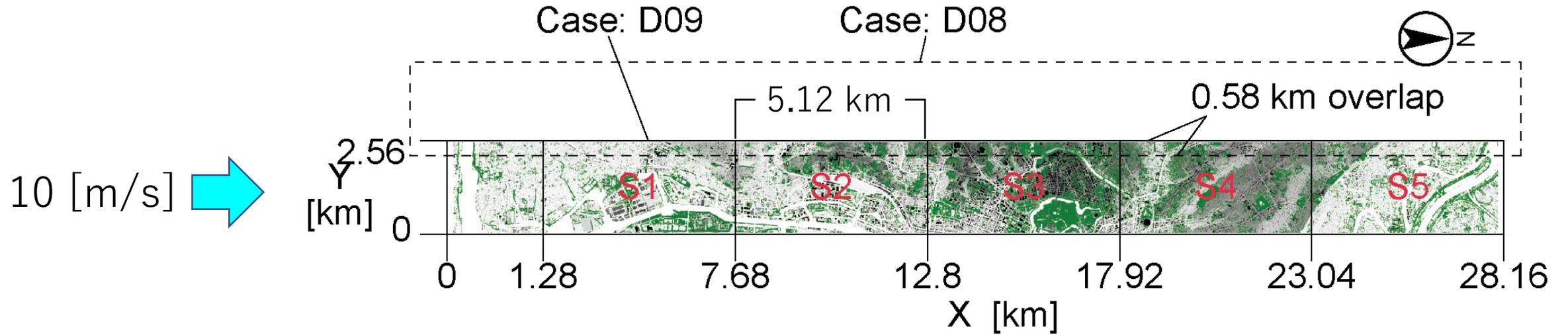
数値解を調べ、  
データベースとして整備

# 計算条件 1



- 東京都23区を東西に17分割  
（ケース：D01～D17）
- 南風（一様風）10m/sで計算
- 建物高さ，標高，植生を考慮
- 計算時間を60分とし，最後の10分間平均値を分析
- 隣接区画とは560m幅で重複

# 計算条件 2

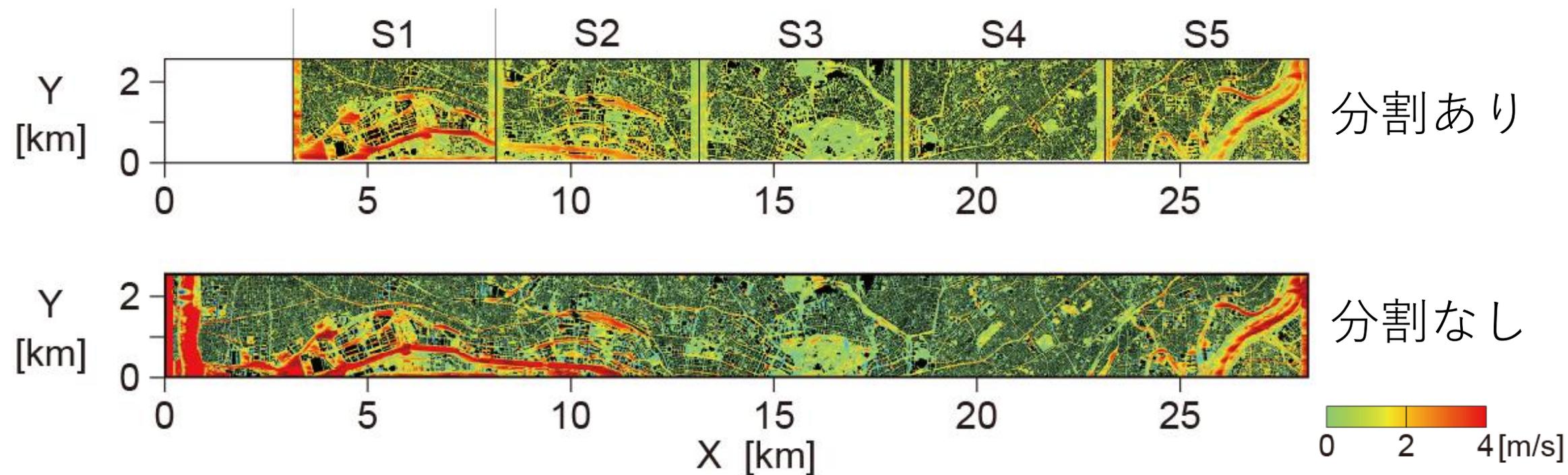


- D09を主流方向に5分割(S1~S5)
- 流れ方向に周期境界条件
- 流入端から200mまで地物撤去
- 分割した計算領域の大きさ：➔

区画	X[km]	Y[km]	Z[km]	dx[km]
D09 S1	5.12	2.56	0.8	0.002
D09 S2	5.12	2.56	0.8	0.002
D09 S3	5.12	2.56	0.8	0.002
D09 S4	5.12	2.56	0.8	0.002
D09 S5	5.12	2.56	0.8	0.002
(D09	28.16	2.56	0.8	0.002)

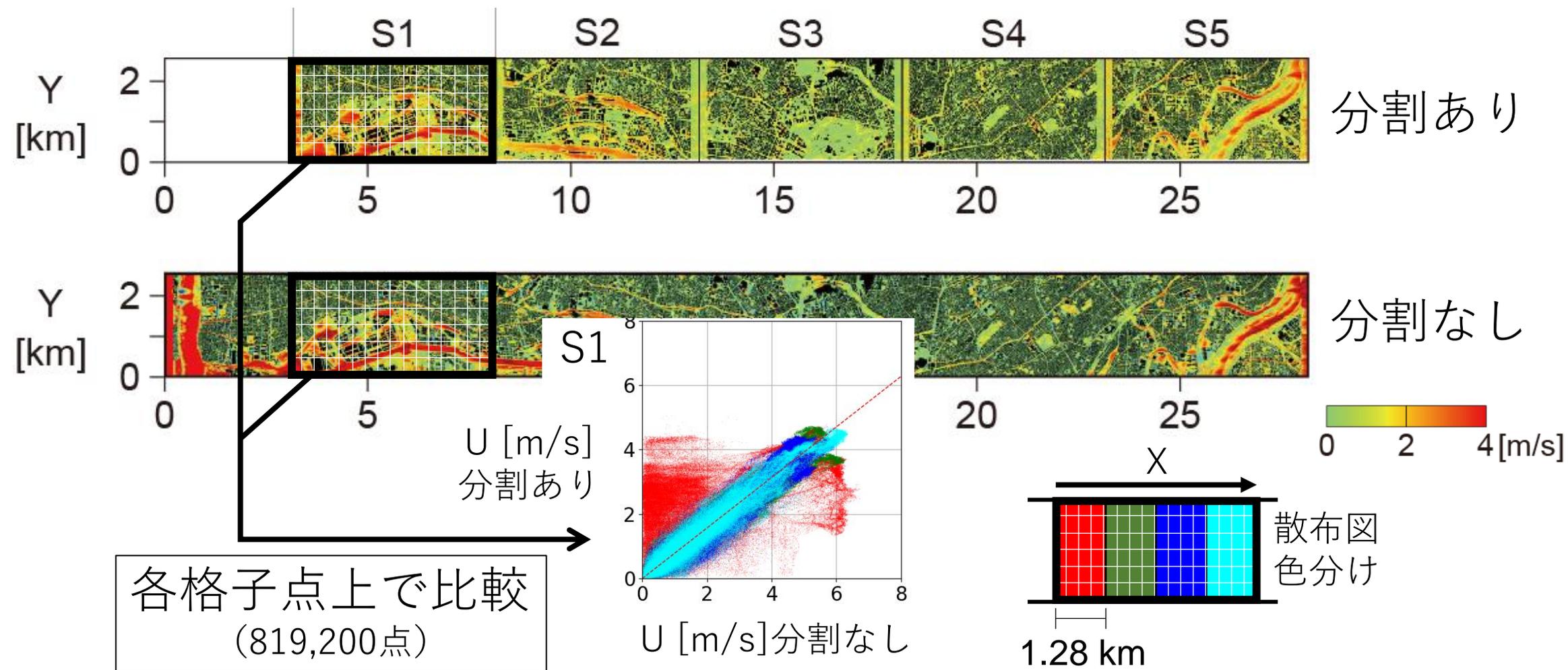
# 結果：流れ方向の領域分割

地上高2mの平均風速



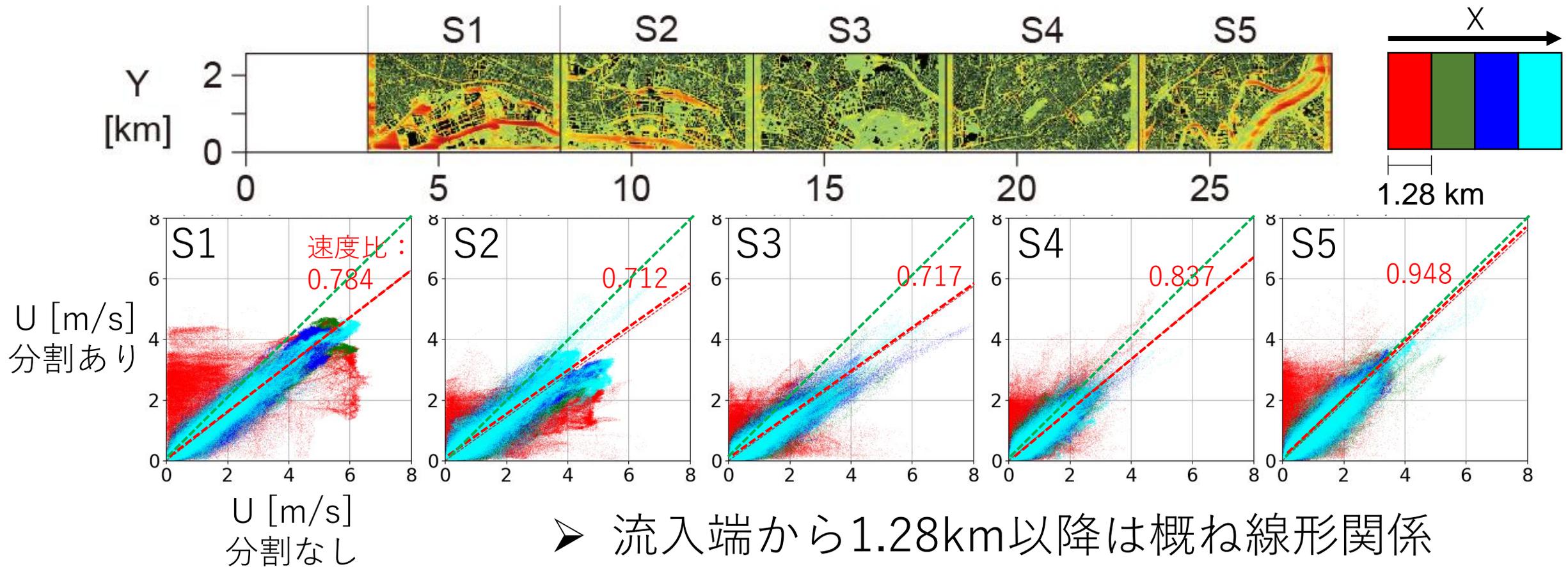
# 結果：流れ方向の領域分割

地上高2mの平均風速



# 結果：流れ方向の領域分割

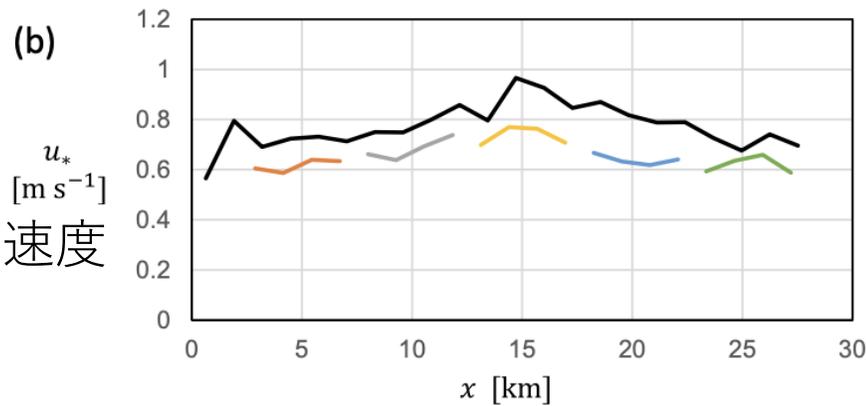
地上高2mの平均風速



- 流入端から1.28km以降は概ね線形関係
- 傾き（速度比）は一定ではない

# 結果：流れ方向の領域分割

摩擦速度によるスケーリングを評価 (Inagaki et al. 2023)

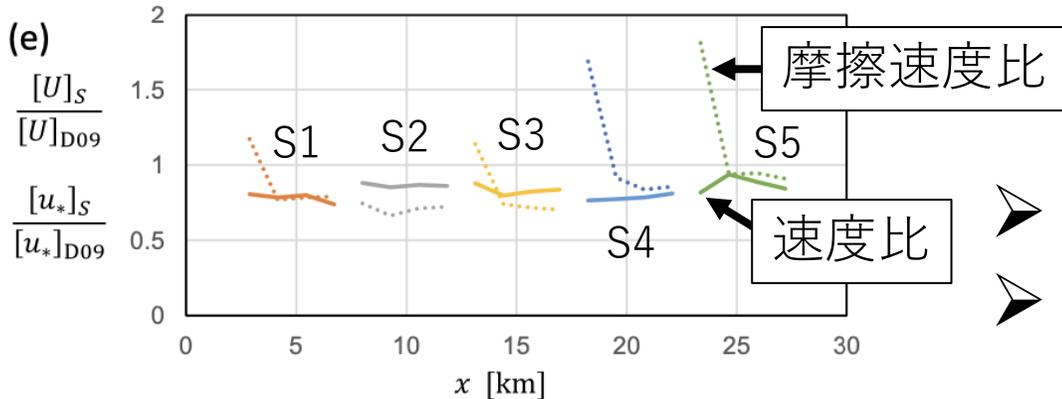


相似則の仮定

$$\frac{U_D(x, y, z)}{u_{*,D}} = \frac{U_S(x, y, z)}{u_{*,S}}$$

分割無      分割有

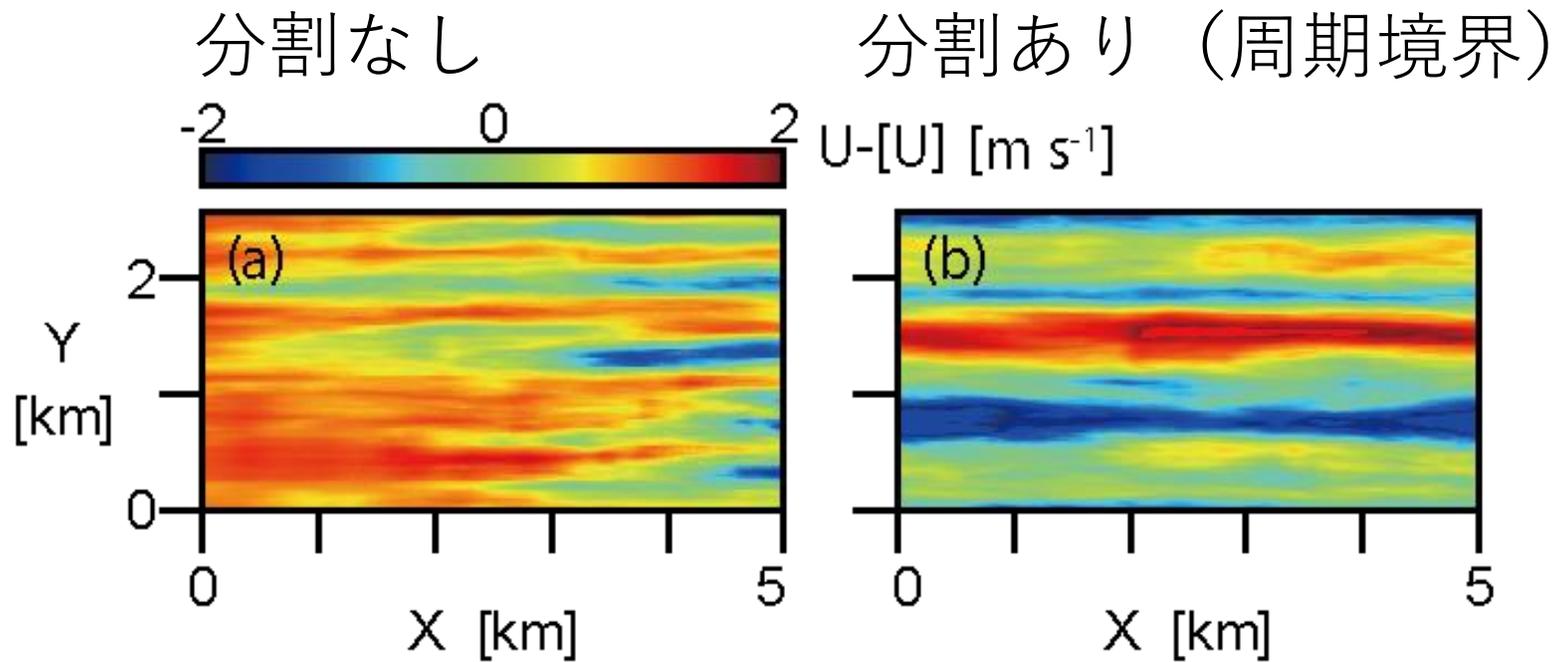
$$\hookrightarrow \underbrace{\frac{U_D(x, y, z)}{U_S(x, y, z)}}_{\text{速度比}} = \underbrace{\frac{u_{*,D}}{u_{*,S}}}_{\text{速度スケール比}}$$



- 摩擦速度をレイノルズ応力から算出
- 速度比と摩擦速度比が一致，摩擦速度によるスケーリングの有効性

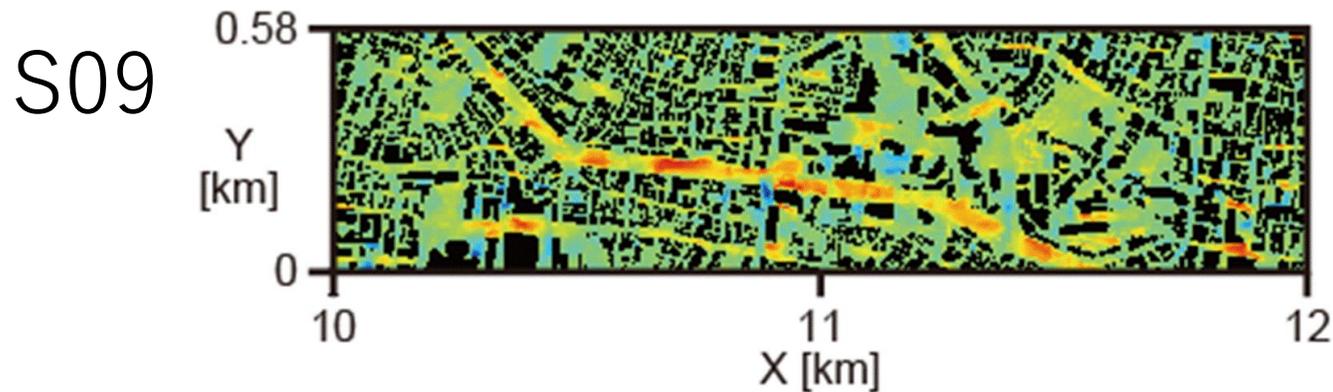
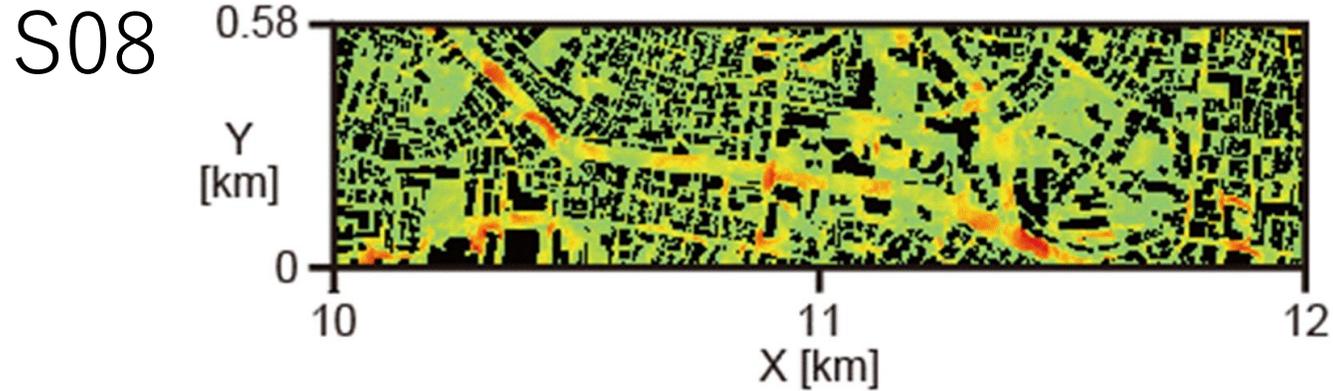
# 結果：流れ方向の領域分割

高度256mにおける平均風速分布

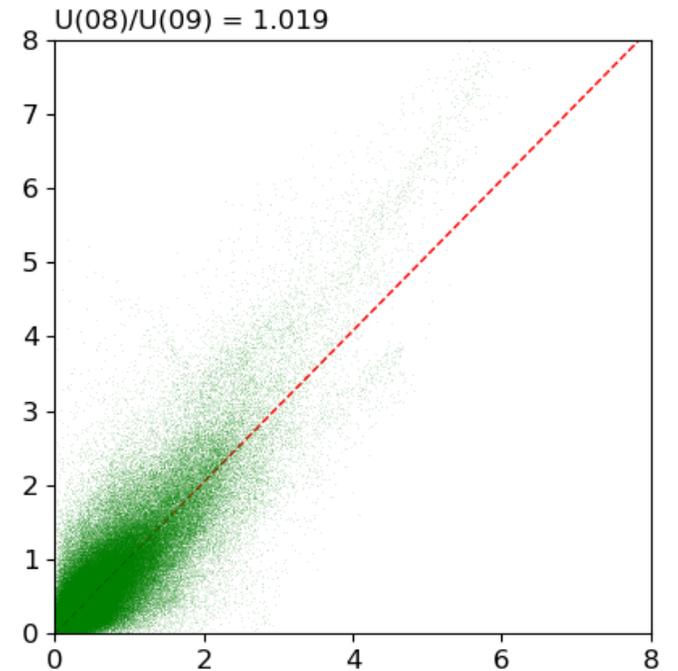


- 周期境界で大規模渦が周回，平均流の空間偏差を強化，その影響が下層に伝わり相関悪化させた

# 結果：スパン方向の領域分割



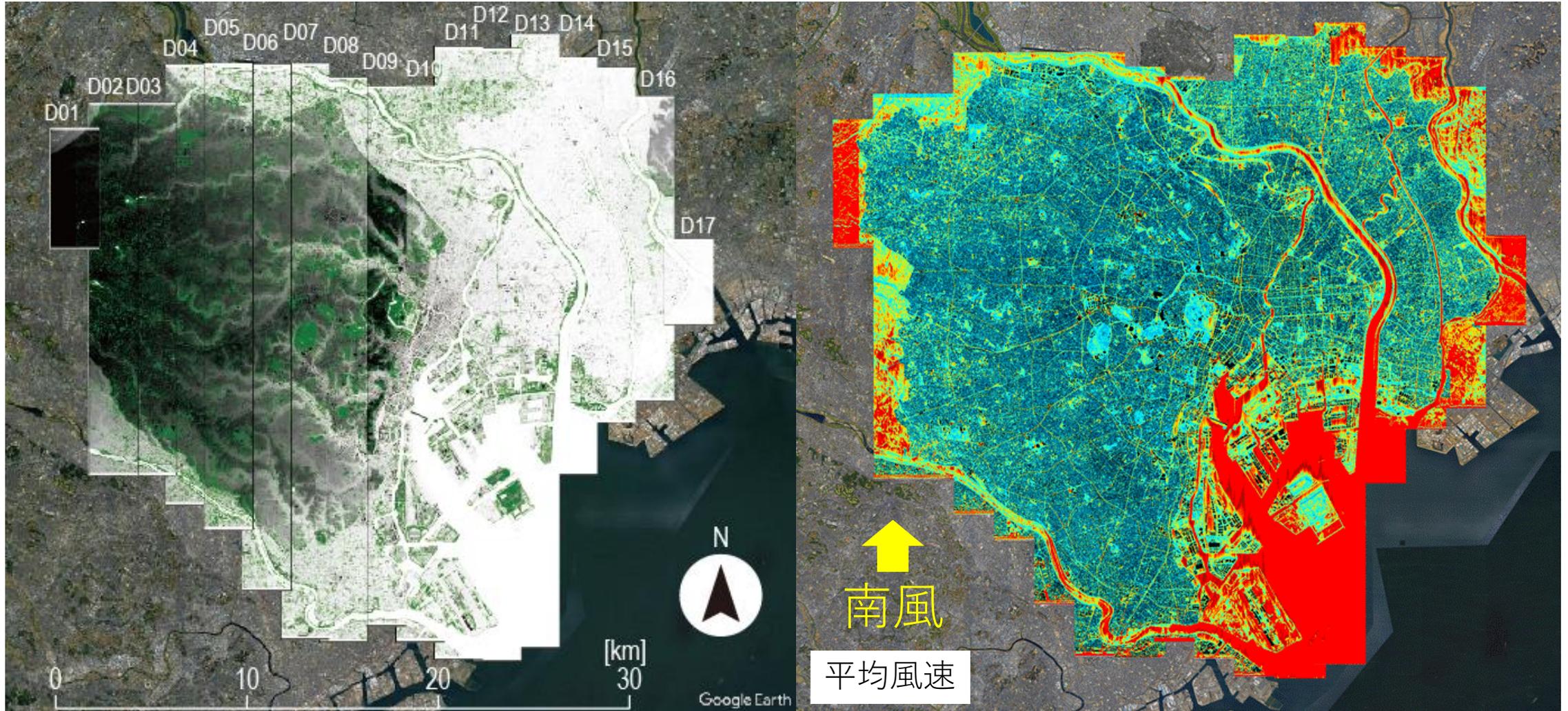
S08  
[m s<sup>-1</sup>]



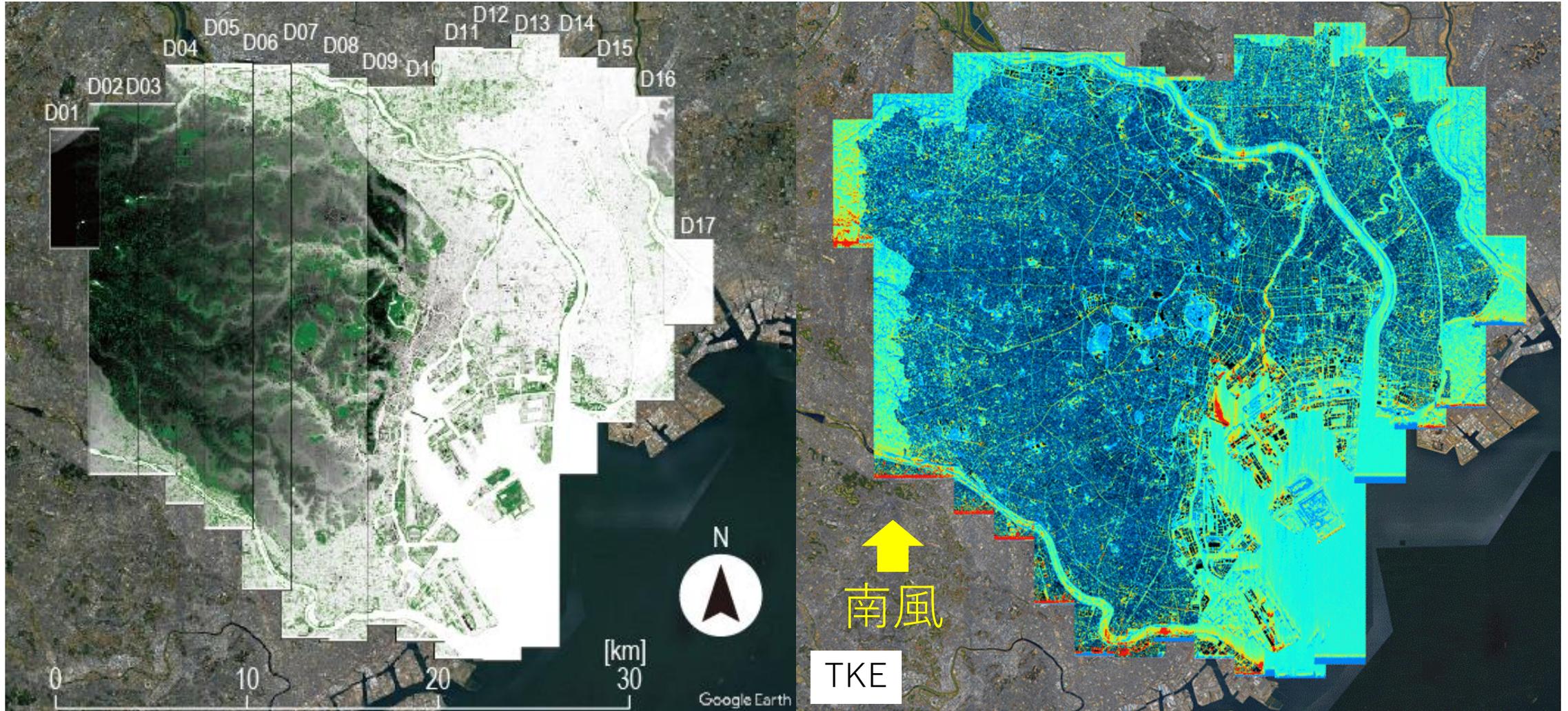
S09 [m s<sup>-1</sup>]

➤ スパン方向も概ね線形関係

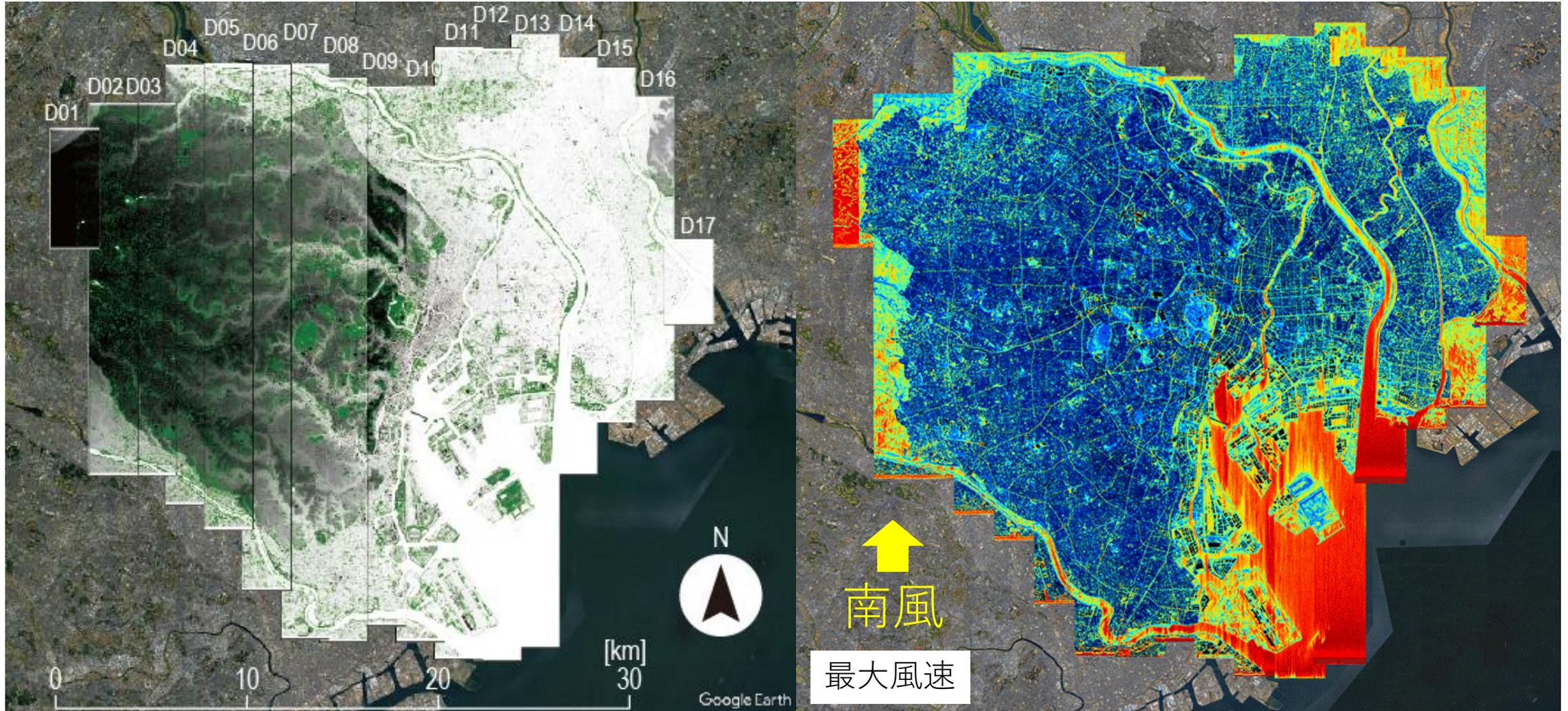
# 東京23区街区乱流データベース



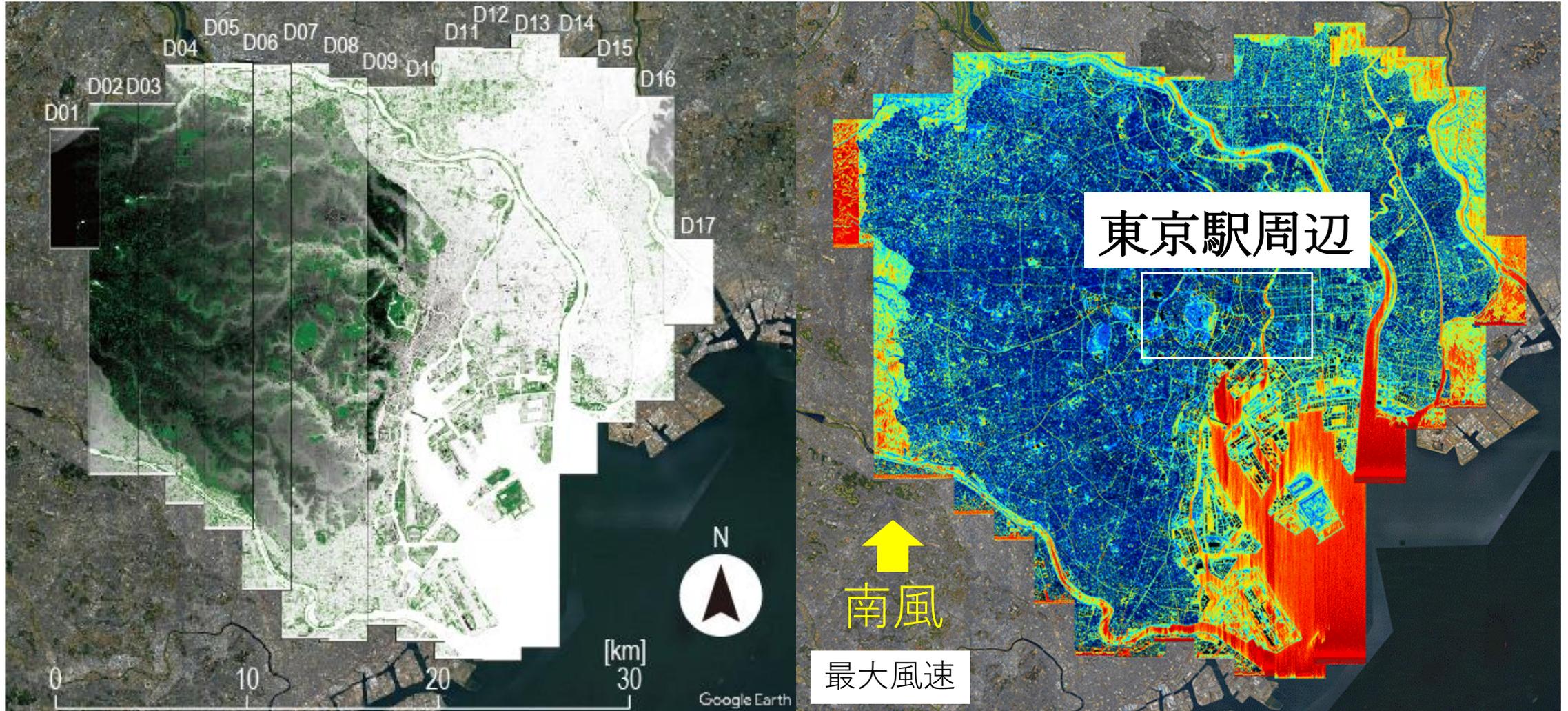
# 東京23区街区乱流データベース



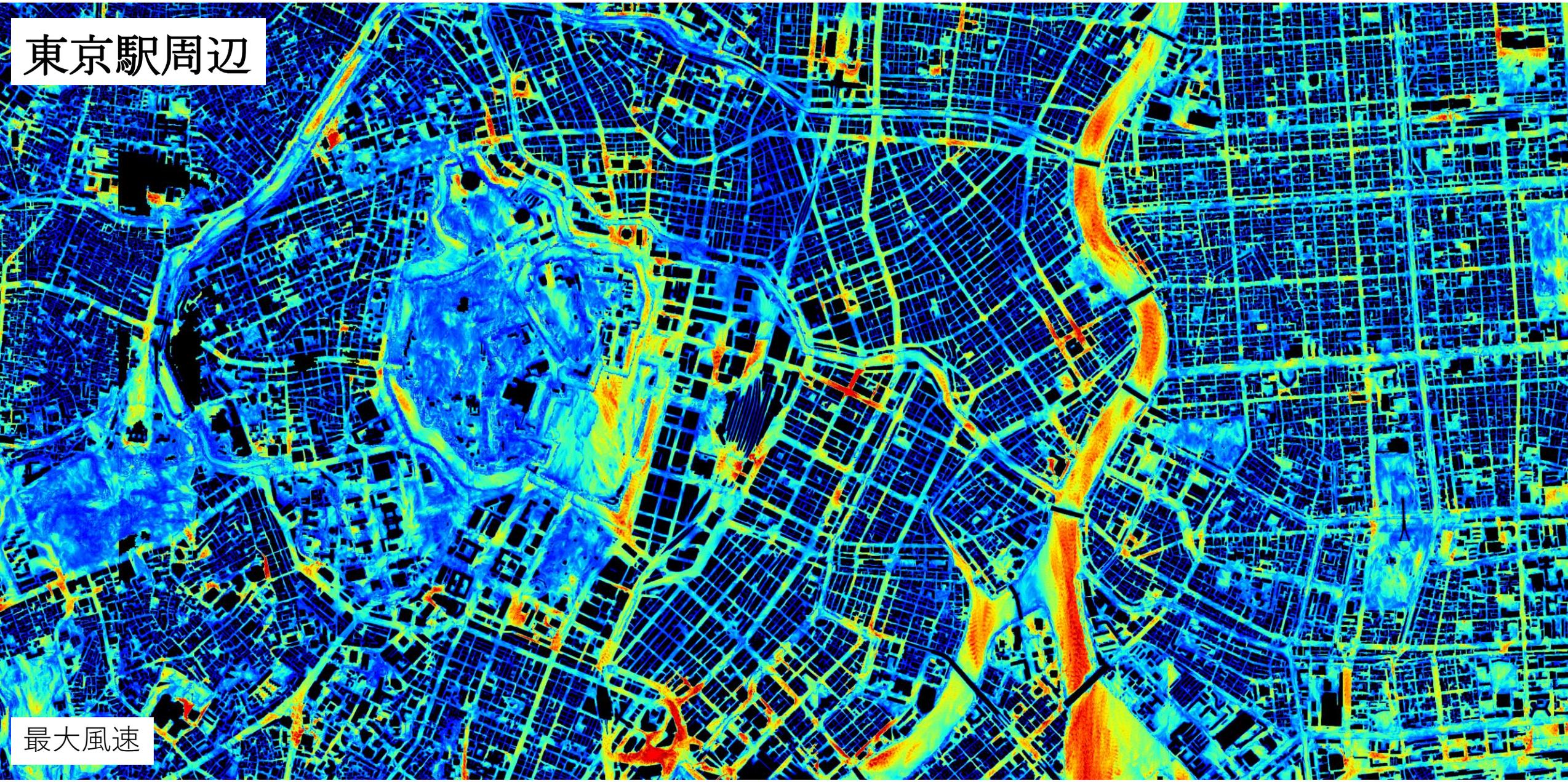
# 東京23区街区乱流データベース



# 東京23区街区乱流データベース

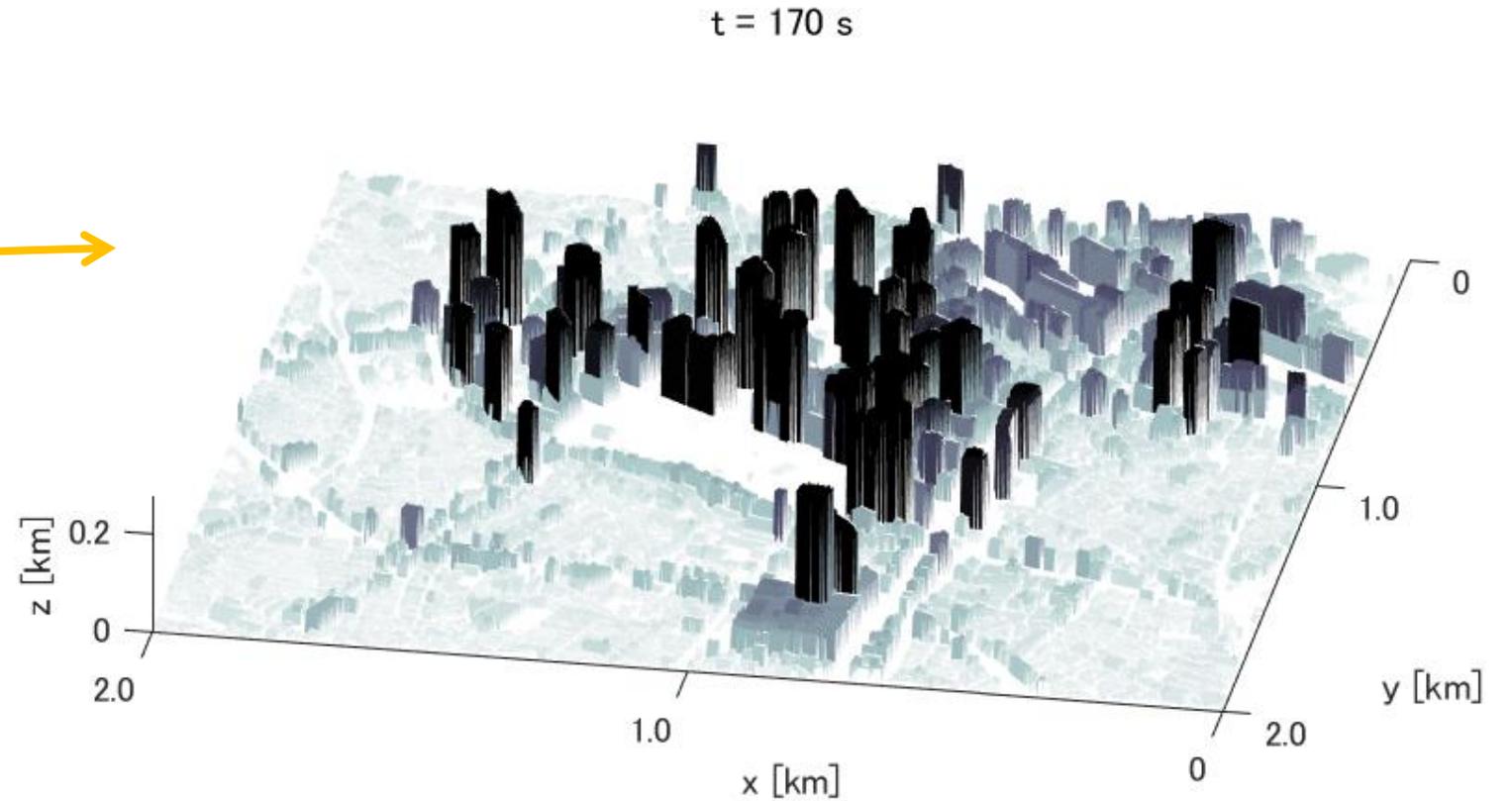
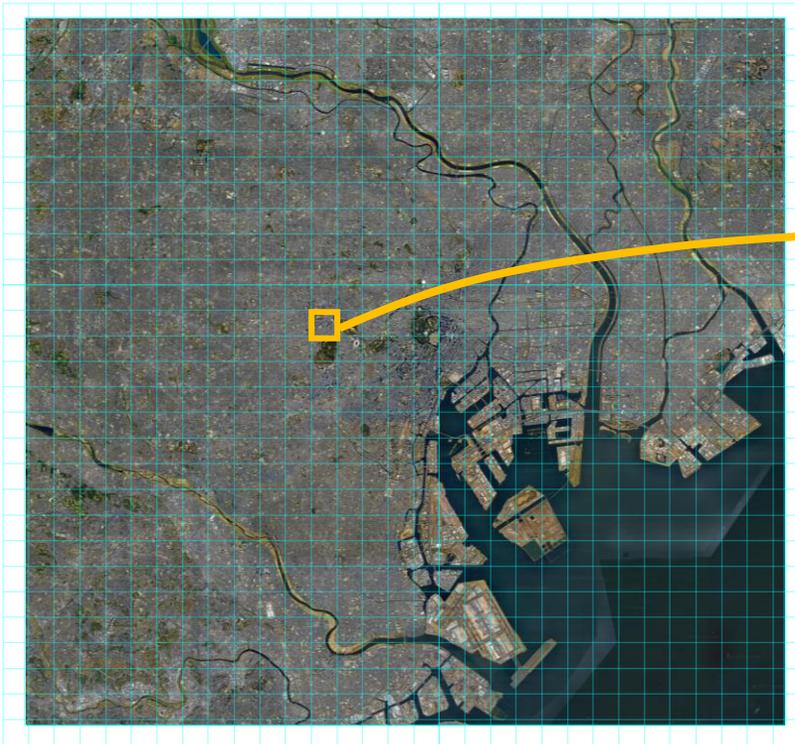


東京駅周辺



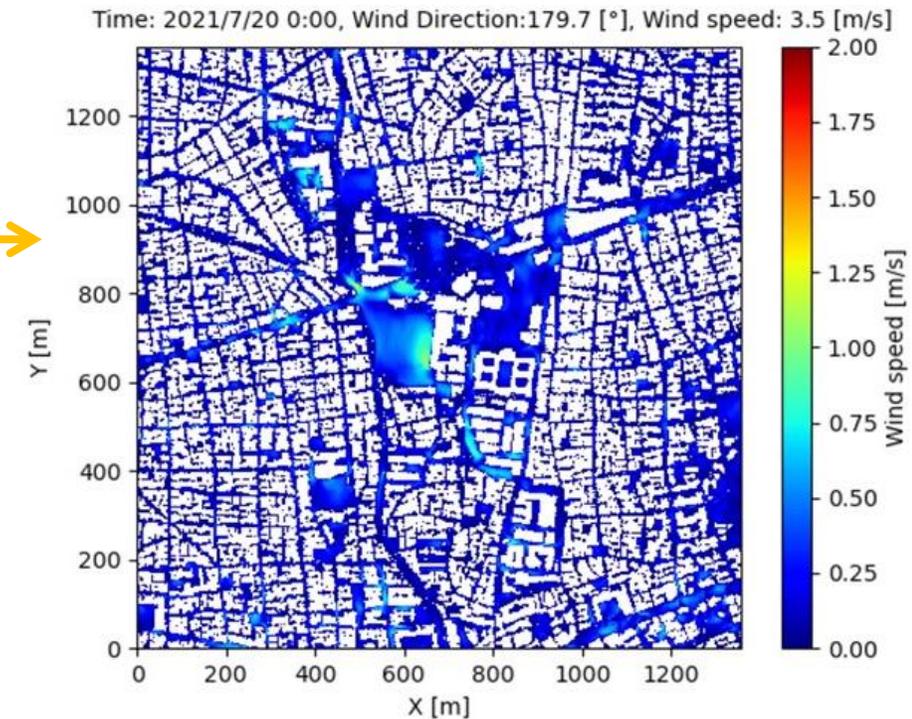
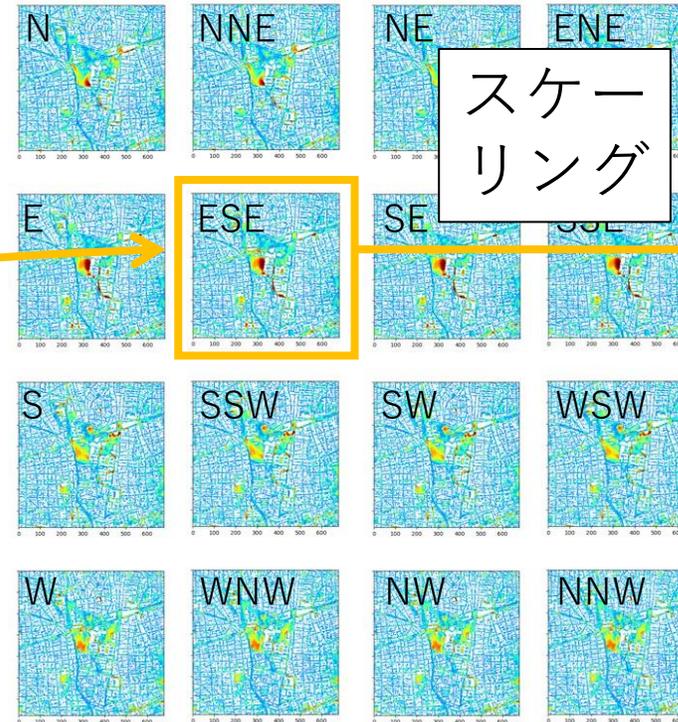
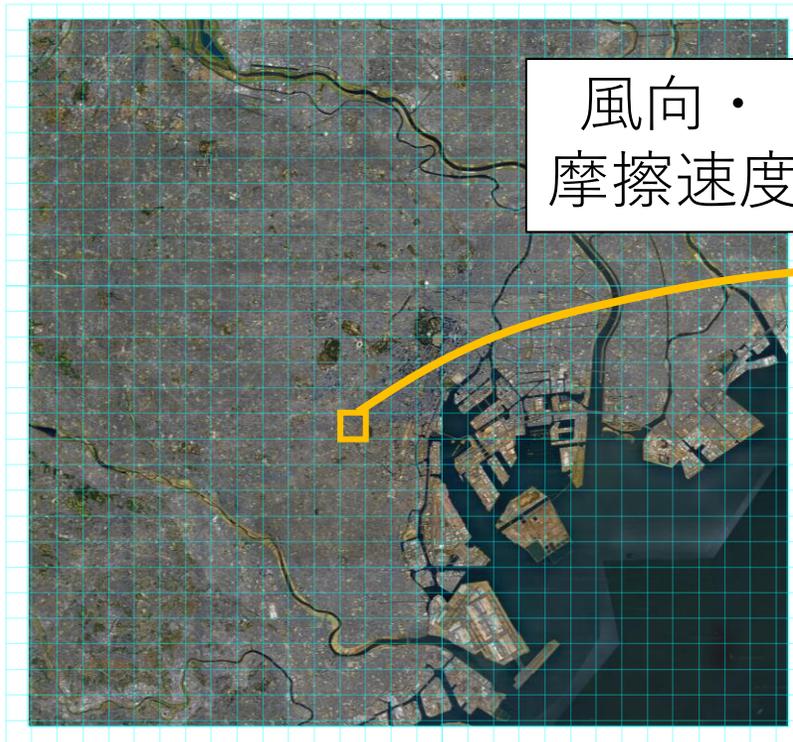
最大風速

# ドローン航行のための風況診断



データベースを元に、  
突風域や乱流変動が大きいと診断される地点を回避

# 街区内風環境の動的な診断

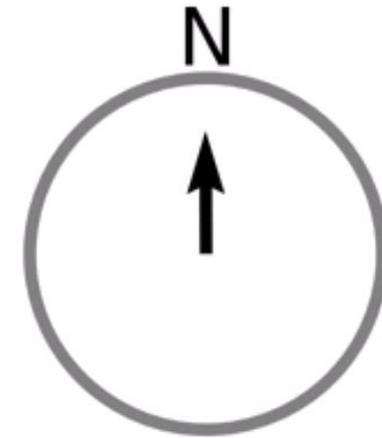
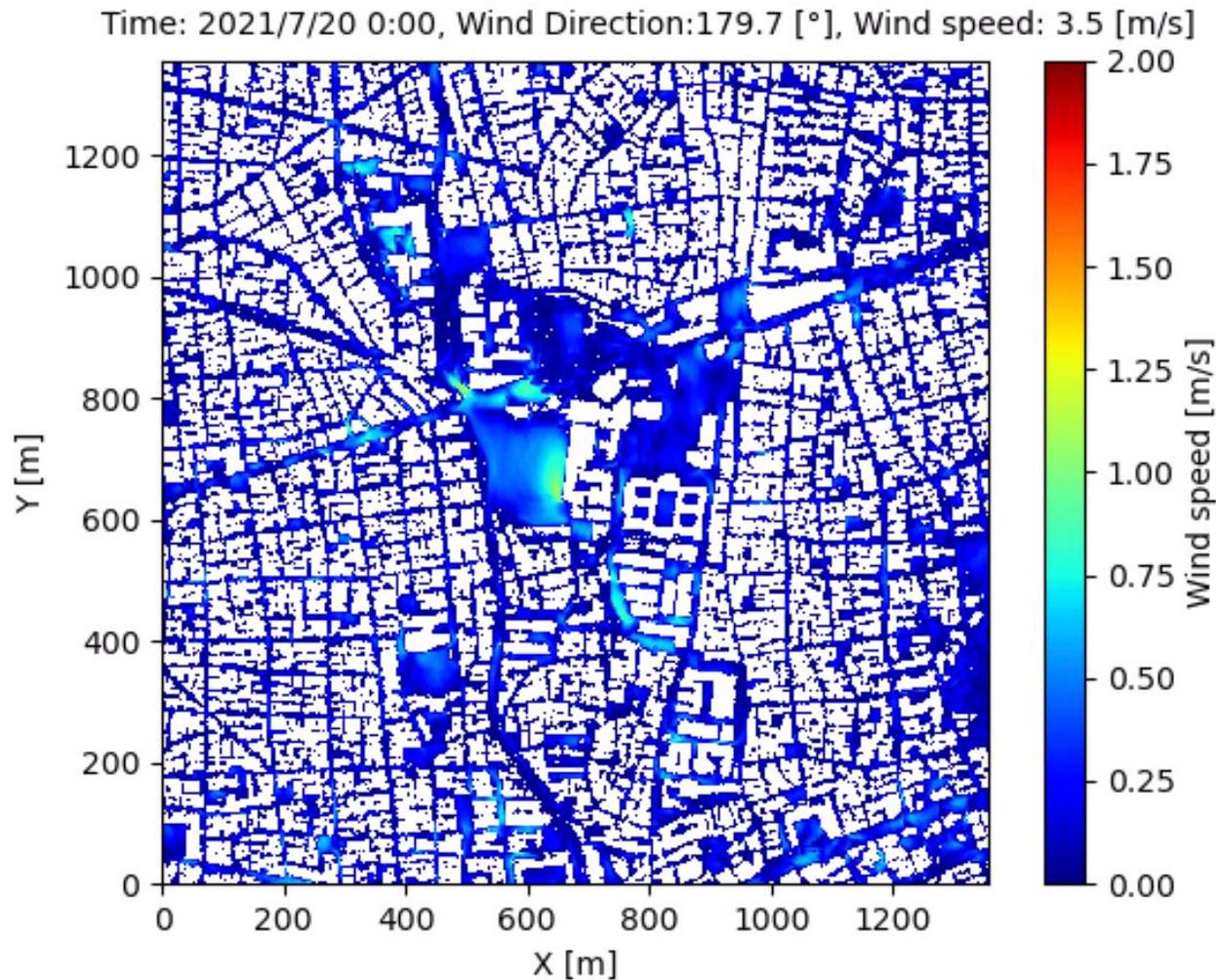


街区内風向・風速の観測値  
OR  
気象シミュレーション予測値

乱流データベース (16風向)

街区内風環境診断

# 街区内風環境の動的な診断



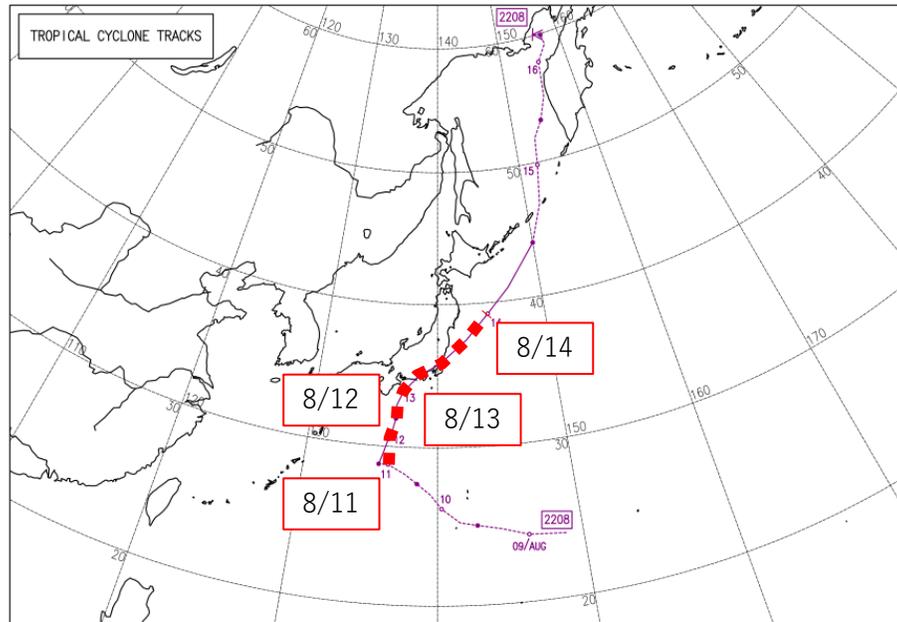
Wind Direction:179.7 [°]  
Wind speed: 3.5 [m/s]

代表風向風速

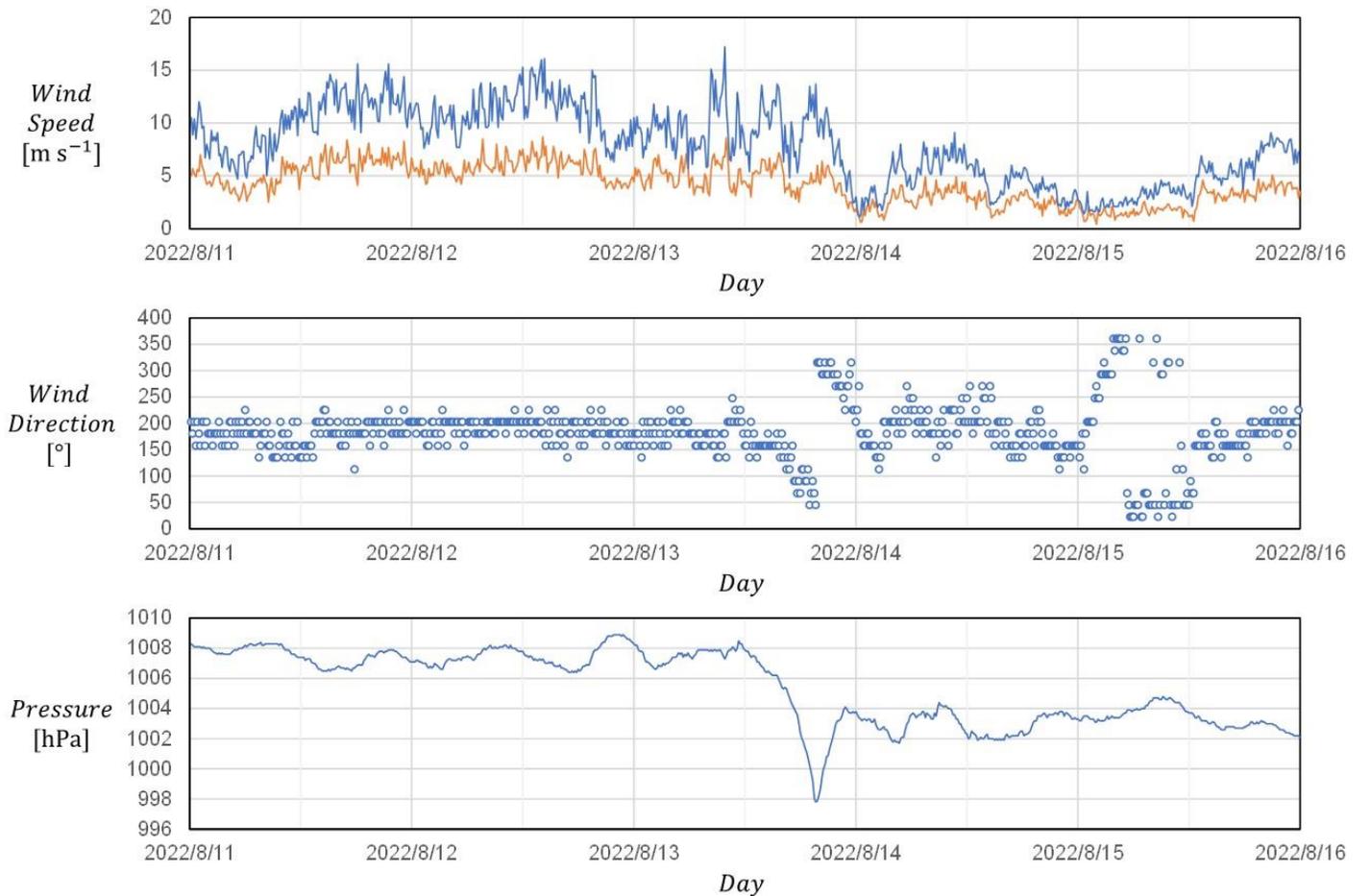
- 高度 2 m 平均風速
- 入力値（代表風向・速度）を更新して時間変化を表現
- 観測値の他に、メソ気象予測や気候変動予測値でも代用可

# 街区内風環境の動的な診断

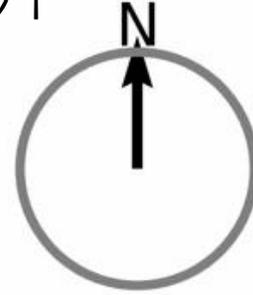
2022年台風8号進路図



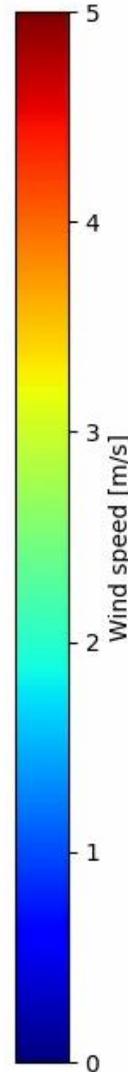
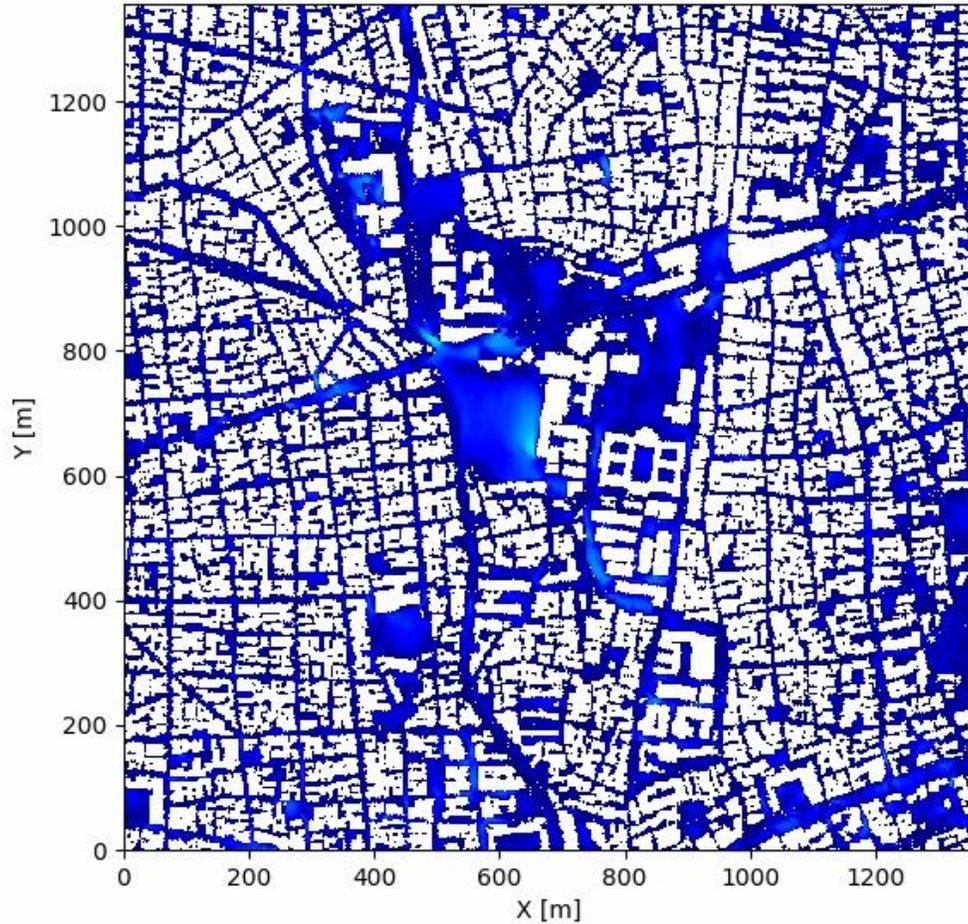
大手町アメダス



# 街区内風環境の動的な診断

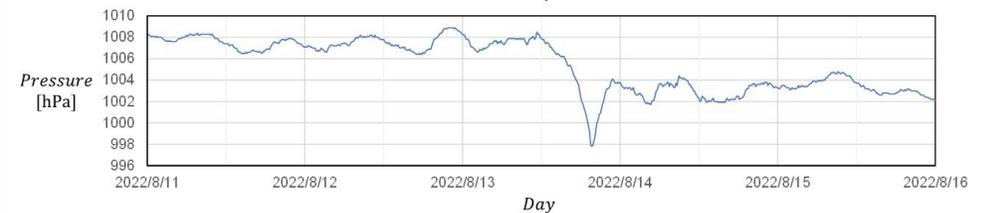
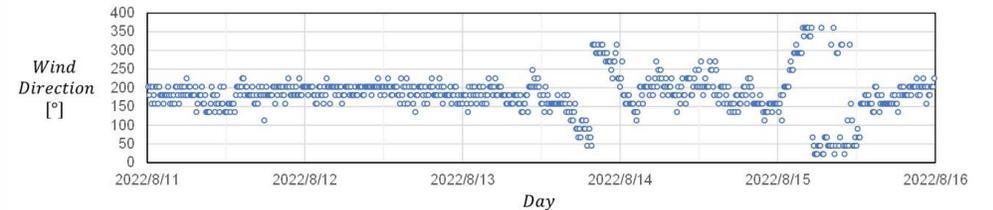
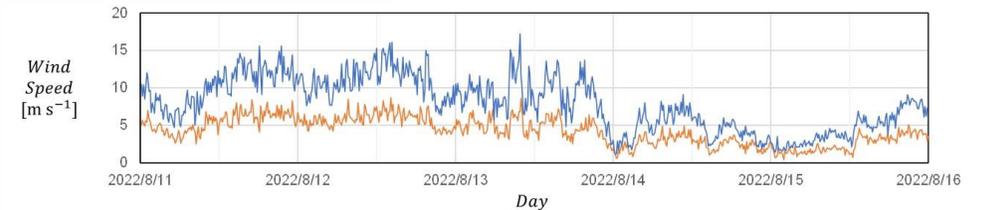


Time: 2022/8/11 0:20, Wind Direction:180.0 [°], Wind speed: 5.7 [m/s]



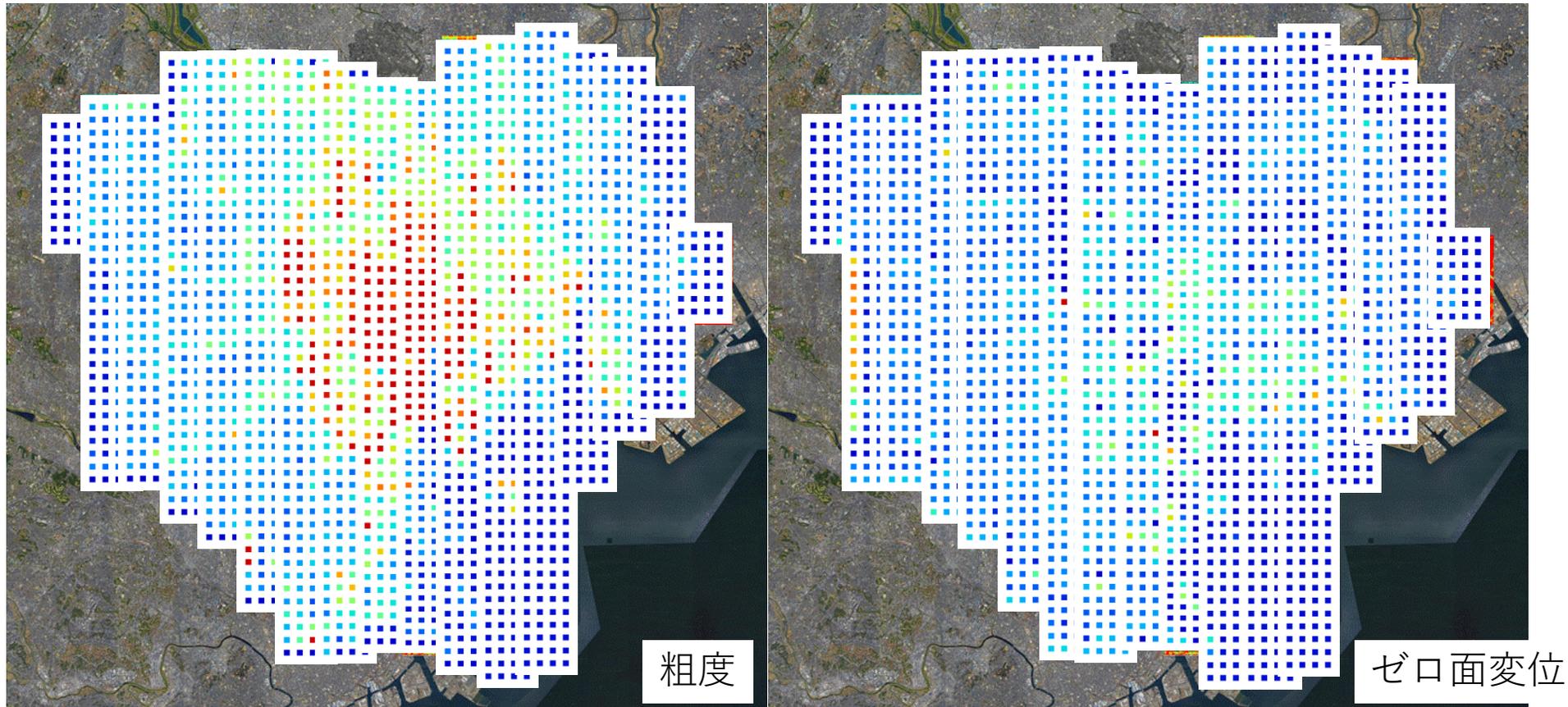
Wind Direction:180.0 [°]  
Wind speed: 5.7 [m/s]  
Time: 2022/8/11 0:20

大手町アメダス



# 流体抵抗データベース

都市気象・気候予測計算（都市温暖化，集中豪雨，物質動態，等）における  
底面境界条件を与えるパラメータを直接算定



# グローバル展開

世界の都市面積 [km<sup>2</sup>]

全世界 : 1,907,334

日本 : 53,452

東京23区 : ~800

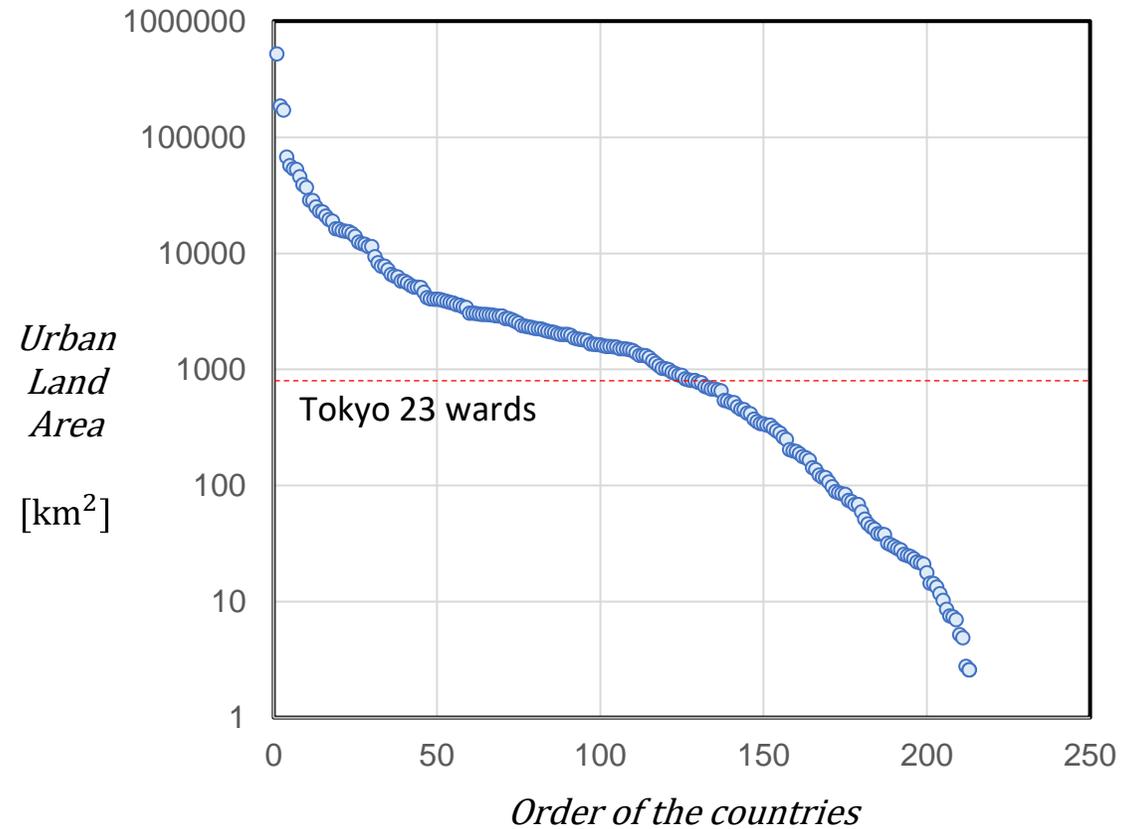
フリーの建物モデル

PLATEAU

OSM Building

Open buildings (footprint)

...



World Bank

Center for International Earth Science Information Network ( CIESIN )/Columbia University. 2013. Urban-Rural Population and Land Area Estimates Version 2. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center ( SEDAC ).

# まとめ

- 街区内の平均風の空間構造は，境界付近を除いて流入条件や側方境界の影響をあまり受けない．境界の影響は概ね500m程度の範囲にとどまり，それ以降は近傍の街区構造のみでほぼ決定されることを示した．
- 街区内平均風速について，領域を代表した摩擦速度で規格化できることを示し，データベースを一般的な形式で作成することの有意性を示した．
- 上記の特性から，メソ気象計算や気候変動予測計算から得られる，領域を代表した摩擦速度を用いてデータベースをスケーリングすることで，その状況に応じた尤もらしい街区内風環境の即時診断が可能となる．

