

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02253

研究課題名(和文)実都市歩行者空間の乱流空間分布計測

研究課題名(英文) Measurement of the spatial distribution of turbulent flows within urban district at a pedestrian level

研究代表者

稲垣 厚至 (Inagaki, Atsushi)

東京工業大学・環境・社会理工学院・助教

研究者番号：80515180

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は熱画像風速測定法と、多点定点観測を複合的に用いることで、都市街区内の風速空間分布を実測し、その特性について検討するものである。熱画像風速測定法により、T字路の地面近傍の流れの分布を、1m以下の水平空間解像度で実測した。超音波風速計と温湿度計を搭載した簡易気象観測システムを8台作成し、東京工業大学構内8か所に設置し、数カ月間の観測を行った。以上の観測から、都市街区内の局所的な風速や乱流強度などの時間平均統計値が、街区構造及び、領域代表風向・風速の関数として概ね決定されることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

都市街区の流れについて、近年多くの数値計算を用いた研究がなされているが、その精度評価をするための包括的な風速の観測データが必要である。本研究はそのための手法を開発し、実都市において1m以下の空間解像度での風の実測値を示したことに意義がある。また、街区内の風は大気安定度や風上影響を受けるものの街区構造の影響が特に顕著であるとの実測結果に基づき、街区構造のみで規定される速度分布を仮定した風速即時診断方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the horizontal distribution of airflows within urban districts. This is accomplished by means of the thermal image velocimetry and multi-point observation of turbulent fluctuation. A set of simple meteorological observation system, which is composed of sonic anemometer, temperature/humidity sensor, and solar panel, were deployed within a range of several hundred meters. These observations can measure the turbulent flow distribution near the ground at spatial grids smaller than 1 m. It revealed that the temporal mean wind statistics, which are the mean wind speed, turbulent kinetic energy, etc. are robustly dependent on the regionally representative wind speed and directions, together with the geometries and arrangements of the surrounding buildings.

研究分野：都市気象、環境流体力学

キーワード：熱画像風速測定法 都市キャノピー層 大気境界層 多点気象観測 ドップラーライダー 街区 風速分布

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化と都市化がもたらす気温上昇により、都市大気環境問題(集中豪雨、ヒートアイランド、突風災害等)の激化が危惧されており、現存あるいは将来の都市形態に対する気候学的な観点からの診断が必要である。特に歩行者レベルの熱や物質の動態を把握することは街区の暑熱環境や大気質を評価する上で重要であるが、そのためには都市街区の複雑な風の空間分布特性を明らかにすることが必要である。さらに、無人航空機が都市街区内を往来する社会の実現が具体的に議論されているが、その安全航行のためには詳細な街区風環境の診断、監視、予測する技術が必要である。街区内の風速分布は近年数値計算の利用により多く検討されているが、計算モデルの妥当性や、街区毎のサブグリッドスケールの複雑性などのため、直接観測による評価検証は不可避である。

都市街区内は主に、空間が水平方向に建物で隔てられているため、気象観測で主に用いられるドップラーライダーなどのリモートセンサでは、その空間(水平)分布構造を捉えることは難しく、数m単位で劇的に変化する街区風速場を捉えることも分解能の面で容易ではない。これに対し、熱画像風速測定法は、サーモカメラの撮影範囲内であれば原理的にその中の風速分布を計測が可能である。また、サーモカメラはパッシブなセンサであることから人や車が往来する街区内でも適用可能である。本手法はこれまでに建物壁面、屋外運動場、山岳域、都市内緑地や河川敷などの風速分布測定に適用実績がある(引用文献)。実都市街区内での利用実績は無いが、この手法と従来の定点観測手法を併用することで、都市街区風速の空間分布を高解像度かつ広域で直接モニタリングできる可能性が拓ける。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、都市街区内で実際に生じている複雑な風の流れについて考えるものであり、都市街区空間を数メートルで空間解像する高解像度分布計測に基づき、その物理過程を検討する。上述の通り、街区風速分布を把握することの重要性は一般的に認識されているものの、その観測の困難さから、街区内の風速を面的に捉える試みはほとんどなされていない。これに対し本研究は、熱画像風速測定法と多点乱流同期計測を組み合わせることで、建物に隔てられた広域の空間を高解像度で捉えることを試みる。

### 3. 研究の方法

都市街区における熱画像風速測定法を用いた風速分布計測を行う。東京工業大学構内の建物屋上(高度17m)にサーモカメラを設置し、建物T字路の撮影を行った。カメラの画角内に超音波風速計2台を設置した。また、同建物屋上に超音波風速計とドップラーライダーを設置し、それぞれリファレンス風速や大気安定度の計測を行った。上記の観測を、晴天日の正午前後に、合計20日間実施した。

多点計測ではソーラーパネルで駆動される、超音波温度風速計を搭載した小型の気象観測システムを開発した。システムは2次元及び3次元超音波風速温度計、温湿度計、強制通風筒、バッテリー、ソーラーパネル、防水箱等で構成され、最大2カ月程度の連続観測データを取得した。システムは東京工業大学構内に、外灯や電柱などを利用して高度2.5mの高さに8台設置した。

### 4. 研究成果

#### (1) 熱画像風速測定法を用いた街区乱流分布の実観測(引用文献)

熱画像風速測定法を用いて、都市街区内の流れの実測を行った(図1左)。図に示すT字路の流れ場測定を目的とし、正午付近を対象とした、合計20日間の観測を行った。撮影範囲内に超音波風速計2台を設置し、熱画像風速測定法の精度検証を行った。

その結果、熱画像の時空間変動から、アスファルトのような熱容量の大きな物体においても、画像処理により0.01K程度の微弱な、風に対応した表面温度の変化を捉えられることを示し、それが組織化された空間構造を持って時空間的に推移していることを明らかにした。また、定点観測との比較から、その移動速度が地表面近傍風速と線形関係にあることを示した。建物屋上で取得したリファレンス風速の風向毎に、条件付きアンサンブル平均を施し、各代表風向に対するアンサンブル平均速度場の空間分布を示した(図1中、右)。本観測ではその他に、ドップラーライダーによる風速分布観測に基づき接地境界層発達高度の定量評価を行い、接地境界層内外の平均風速の接続についての検討を行った。

#### (2) 多点計測による空間分布

ソーラーパネルで駆動される、超音波温度風速計を搭載した小型の気象観測システムを開発し、街区内の高度2.5mの高さに、合計8台の機器を設置した(図2左)。観測地点から最も近い、地域気象観測システム点である大手町の観測データと比較した結果、気温、湿度のみならず、風

速についても領域代表値と高い相関があることを示した。観測点間比較では、各測定値がそれぞれ近傍の街区形状に応じて大きく異なるが、風向風速共に、領域代表値風速の関数として概ね表現できることを示した。

### (3) アンサンブル平均場を仮定した乱流変動の即時診断システム開発 (引用文献)

以上の街区内部での微気象観測から、街区内部の風環境は主に領域代表した平均風速と風向(街区構造)によって規定されていることが示された。この平均速度分布形状の堅牢性に基づき、街区内部風環境を即時に診断する方法を提案した。これはまず、アンサンブル平均された街区内部乱流統計量(平均風速、乱流強度、突風率、等)の空間分布を風向ごとにデータベースとして整備する。気象モデルの予測値や広域気象観測データを参照して、その代表風速に対応したデータベースの選定し、それを代表風速でスケールしなおすことで、街区内部風速を数メートルの空間解像度で診断する手法である。本研究では、流体計算を用いて整備された乱流統計量のデータベースを用い、代表風速情報については、最寄りの広域気象観測データを用いて診断を行い、上記(2)で得られた街区内部実測値との比較を行った(図2右)。その結果、風の強さについては同程度の値を示し、単純な風速間の線形関係では表現できない、風向変化の影響も再現することができている。

### 引用文献

- Inagaki A, Kanda M: Use of Thermal Image Velocimetry to Measure a Dust-Devil-Like Vortex Within a Sports Ground in a Residential Area. *Boundary-Layer Meteorol* 183: 121-141, 2021
- 桐谷蒼介, 稲垣厚至, 神田学: 熱画像風速測定法(TIV)の都市への適用. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 77(2), I\_1297-I\_1302, Dec. 2021
- 伊藤雄基, 小田僚子, 稲垣厚至, 清野直子: ドップラーライダーで観測された平均風速鉛直分布の変動. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 78(2), I\_325-I\_330, 2022
- 稲垣厚至, 野村希良々, 神田学: 東京都心部を対象とした都市街区乱流データベースの作成. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 80(16), 23-1610079, 2023

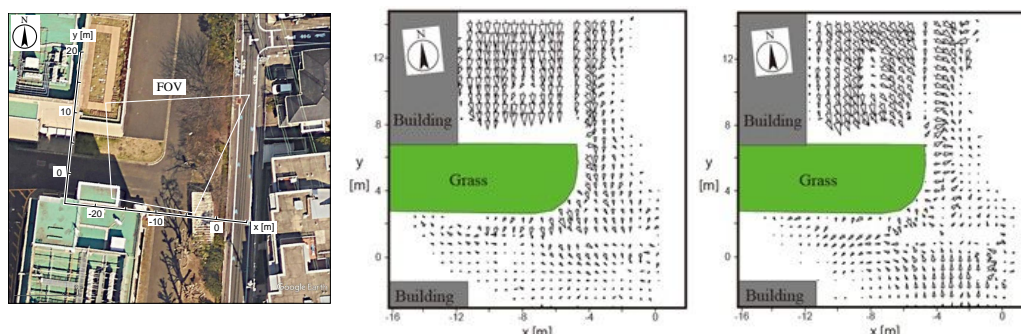


図1 熱画像風速測定法で観測された地表面近傍風速分布の条件付アンサンブル平均. 左: 観測範囲、中: 北風時の平均風速分布、右: 南風時の平均風速分布

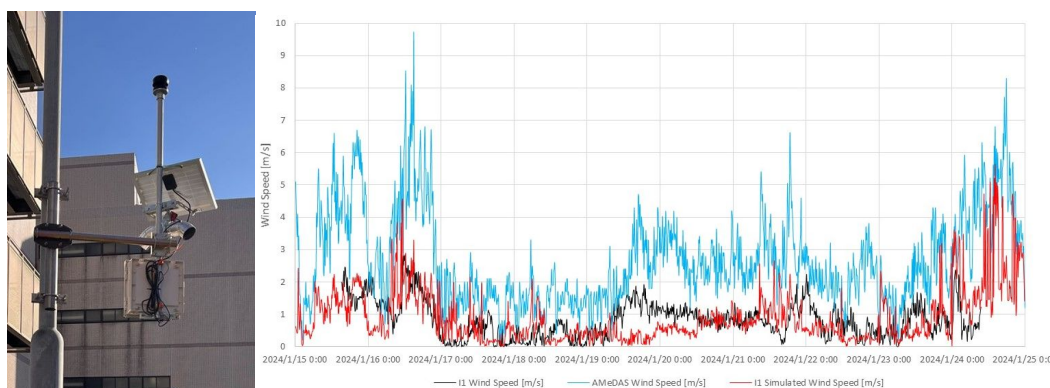


図2 気象場の動的診断による10分平均風速の時系列変化と実測値の比較. 左: 定点観測点、右: 観測点近傍の診断値と観測値との比較. 赤: 診断値、黒: 実測値、青: リファレンス値

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 伊藤雄基, 小田僚子, 稲垣厚至, 清野直子	4. 巻 78
2. 論文標題 ドップラーライダーで観測された平均風速鉛直分布の変動	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_325-I_330
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.78.2_I_325	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Atsushi Inagaki, Ryo Inoue, Manabu Kanda, Yasuaki Mori	4. 巻 186
2. 論文標題 Robustness of the Mean Flow Similarity in an Urban Roughness Sublayer to Different Inflow Properties	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Boundary-Layer Meteorology	6. 最初と最後の頁 455-474
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10546-022-00764-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Atsushi Inagaki, Manabu Kanda	4. 巻 183
2. 論文標題 Use of Thermal Image Velocimetry to Measure a Dust-Devil-Like Vortex Within a Sports Ground in a Residential Area	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Boundary-Layer Meteorology	6. 最初と最後の頁 125-141
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10546-021-00674-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 桐谷蒼介, 稲垣厚至, 神田学	4. 巻 77(2)
2. 論文標題 熱画像風速測定法(TIV)の都市への適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1297-I_1302
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_I_1297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 井上 涼・稲垣 厚至・神田 学・森 康彰・新納 幸成	4. 巻 76(2)
2. 論文標題 実都市LES 数値計算に基づく街区内平均風速分布の診断手法の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_265-I_270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 横山 彩希・稲垣 厚至・神田 学・輪嶋 正隆	4. 巻 76(2)
2. 論文標題 TIVに基づく面的顕熱フラックス 測定の天然芝サッカーグラウンドへの適用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_247-I_252
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Inagaki A, Inoue R, Kanda M, Mori Y
2. 発表標題 Mean flow similarity within the urban roughness sublayer for different inflow conditions
3. 学会等名 11th International Conference on Urban Climate (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Inagaki A, Kanda M, Asai Y
2. 発表標題 Application of thermal image velocimetry in urban environments
3. 学会等名 11th International Conference on Urban Climate (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Watanabe T, Inagaki A, Makedonas A, Kanda M
2. 発表標題 Numerical evaluation of the aerodynamic characteristics of the densely packed high-rise buildings
3. 学会等名 11th International Conference on Urban Climate (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浅井友花, 稲垣厚至, 神田学
2. 発表標題 熱画像測定法を用いたランドマークタワー壁面に沿う速度分布計測
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野村希良々, 稲垣厚至, 神田学
2. 発表標題 東京23区の乱流データベース作成
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	小田 僚子  (Oda Ryoko)  (50553195)	千葉工業大学・創造工学部・教授    (32503)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------