

雨滴をトレーサーにした PIV/PTV による 風速推定に関する研究

Study on full-scale wind velocity estimation by
PIV/PTV method using rain drop as tracer

令和 5 年 5 月

May, 2023

研究代表者

栗田 剛

Coordinator

Tsuyoshi KURITA

本報告書は、京都大学防災研究所一般共同研究（課題番号：2021G-04）の助成を受けて実施された研究成果をまとめたものである。

2章から4章については、巻末に記載の本研究に関連する研究成果として公表した論文、梗概の内容を要約し再構成したものである。

目 次

1. 研究の背景と目的	・ ・ ・ 1
2. PTV 技術を用いた雨滴追跡による風速推定とばらつきの要因分析	・ ・ ・ 2
3. 人工気象室における雨滴をトレーサーとした PIV 解析による速度推定	・ ・ ・ 4
4. ステレオ PTV による雨滴追跡に関する屋外実験	・ ・ ・ 6
5. まとめ	・ ・ ・ 9

本研究に関連する公表論文

謝辞

1. 研究背景と目的

気候変動の影響による台風の威力が増加傾向にあると言われており、近年台風などの強風による被害が増加している（例えば、平成 30 年 21 号台風、令和元年 15 号台風）。このような強風被害を低減するためには、風の性状を把握することと外力による破壊メカニズムを解明することが重要である。特に風の性状については、都市空間における風速場を三次元的に明らかにすることが必要である。しかし、現在は気象庁アメダス観測網などに設置されている風速計の観測記録から離散的に地上風向風速時刻歴を知るのみであり、街区・建物スケールで風速場の時空間構造を推定し得る観測記録は存在しない。また、近年ではドップラーライダーによる面的な風速場計測も行われているが、地表付近のデータの取得が難しいことや雨によって S/N 比が低下するためデータ取得率が低下するなどの問題があり、都市空間内における風速場の時空間構造の解明は進んでいない。そこで本研究では、粒子画像流速測定法（PIV）や粒子追跡法（PTV）を雨滴に適用することで、雨滴の軌跡から風速を推定する手法を新たに開発し、都市空間内の風速場の時空間構造に明らかにすることを目的とする。本研究の成果により、現在間接的手法として風速場の時空間構造の解明のために使用されている数値流体解析や風洞実験に代わり、現象の直接的な解明が可能になるとともに、数値流体解析モデルおよび風洞実験手法の精緻化や建物に被害を及ぼす要因の一つである飛散物の飛翔や雪の吹溜りなどの複合現象の解明にも寄与すると考えている。

2. PTV 技術を用いた雨滴追跡による風速推定とばらつきの要因分析

建築物周りに存在する雨滴に対し、PTV 技術を用いて雨滴の軌跡を取得した後に、雨滴の運動方程式を解くことで雨滴に作用する風力を算出し、その風力から風速値を逆算する手法の確立するための基礎実験として、境界層風洞内に発生させた一様流の中に水滴を落下させ、撮影した水滴の軌跡から風速値の推定を行い、推定した風速値を熱線風速計による計測値と比較し精度の検証を行った。

実験は、京都大学防災研究所の境界層風洞で実施した。降雨状態を模擬するための水滴生成装置と水滴を排出するための流路を作成し、風洞内に設置した。写真 2.1 に水滴生成装置を、写真 2.2 に流路の設置状況を示す。

水滴の撮影は、デジタルカメラを用いて、流路を挟んで 2 方向から 2 台同期撮影を行った。撮影条件はフレームレート 120 枚/s、絞り値 5.6、シャッタースピード 1/500s とした。各風速に対し 5 秒間の動画を 10 個ずつ取得した。

風速の推定は、ハイスピード動画を DIPP-Motion V に取り込み、任意の撮影フレームでの水滴の座標を求め、前後の撮影フレームにおける水滴の座標値から、各位置における水滴の速度ベクトル、加速度ベクトルを算出することで行った。水滴の軌跡の一例を図 2.1 示す。

水滴の軌跡から推定された風速値は平均的には計測値との誤差 5% の範囲に収まったものの、水滴 1 粒ごとに注目すると、計測値と大きな誤差を持つ風速値が算出される場合もあり、その原因の解明ならびに風速推定手法の改善の必要性が残されていることが明らかとなった。

その原因について①水滴形状の影響、②水滴の位置特定の影響、③フレームレート・シャッタースピードの影響の 3 つを検討し、形状については見付け面積の時間変化による影響、位置特定方法のさらなる改善、撮影条件の最適化といった課題を抽出した。

今後、本手法を乱流の計測に応用するにあたって、それぞれの水滴の軌跡から推定される風速値がばらつきを持つ原因を特定し、改善の方法を模索すると同時に、本手法が何秒間平均の風速値を推定するのに妥当な手段となりえるのか検討していく必要がある。



写真 2.1 水滴生成装置

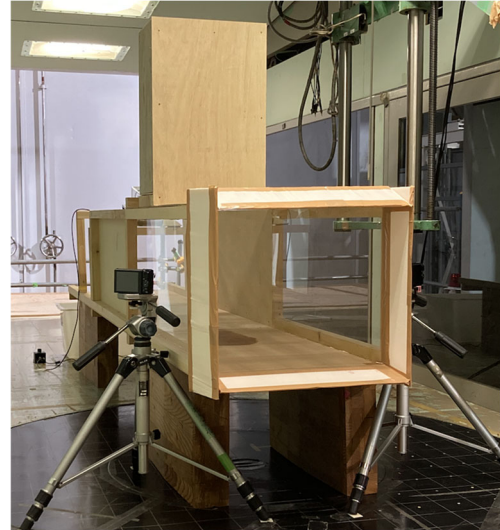


写真 2.2 風洞内流路

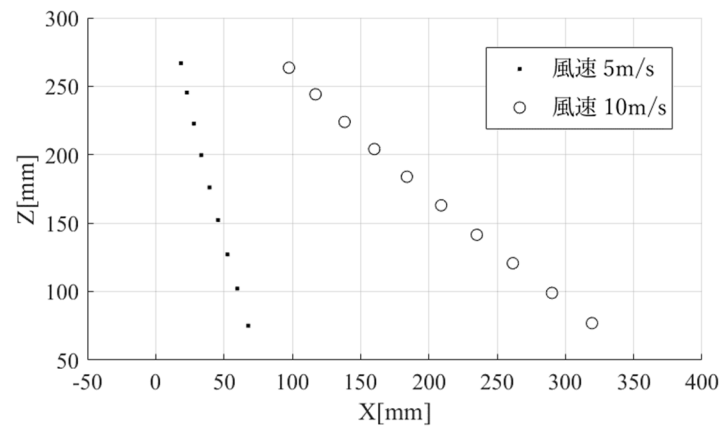


図 2.1 有風下の水滴の軌跡

3. 人工気象室における雨滴をトレーサーとした PIV 解析による速度推定

目的は、人工気象室を用いて、人工的な降雨と風を再現した状況下で画像を撮影し、その画像に対して PIV を適用することで風速を推定する際の課題を抽出することである。

実験は、東急建設（株）技術研究所の人工気象室で実施した。画像の撮影は、LED ランプとレンズを組み合わせて作成したシート状の光源と高速度カメラを用いて行った。降雨は天井の4か所の降水ノズルを用いて降雨強度60mm/hで降らせた。風速は、送風装置（吹出し口サイズ：幅2m×高さ1.4m）を用いて0, 1, 3m/sの3段階で設定した。図3.1に実験状況を示す。

PIV解析は、Dantec社のDynamic Studioを用いて、Adaptive Correlationにより行った。探査領域サイズは32×32pixelで、Overlapは50%とした。

風速0m/s（無風）の解析結果を図3.2に示す。PIVで推定した画像の中央部付近の移動速度は4.3m/sであった。風速1m/s（実風速2.2m/s）の解析結果を図3.3に示す。風速水平方向の移動速度は約2.4m/s、鉛直方向の移動速度は約2.2m/sであった。風速3m/s（実風速2.7m/s）の解析結果を図3.4に示す。水平方向の移動速度は約3.4m/s、鉛直方向の移動速度は2.5m/sであった。PIV解析で推定した風速は、実験風速に近い値を示した。

今回の実験は、2次元で撮影しているため、雨滴の面外方向の影響は考慮できていない。また、雨滴には鉛直方向の重力と風による抗力が作用しているため、雨滴の加速度を算出して運動方程式を解く必要があるが、PIV解析結果から加速度を精度よく算出する方法については今後検討が必要である。

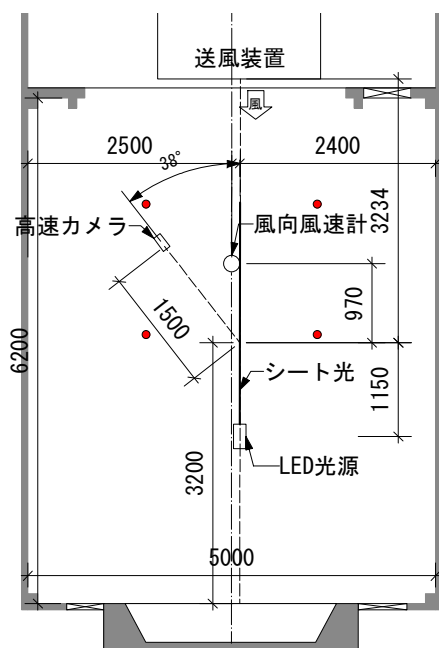
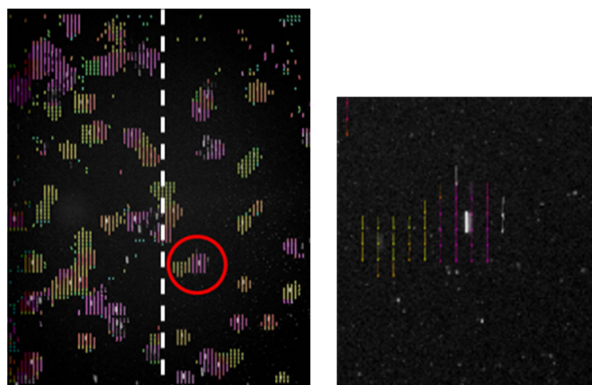
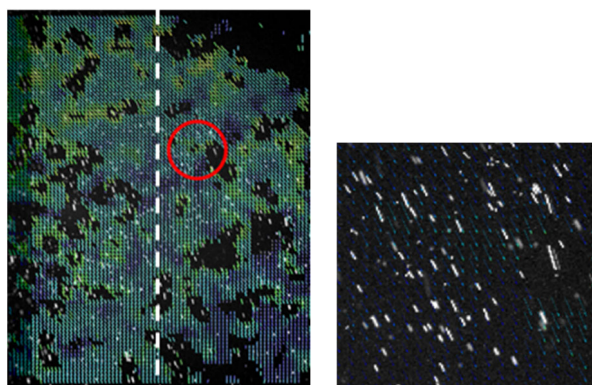


図 3.1 実験状況



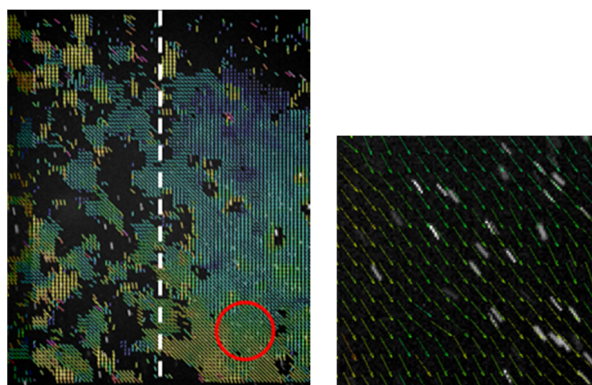
赤丸拡大部

図 3.2 ケース B4-0 の PIV 解析結果



丸拡大部

図 3.3 ケース B4-1 の PIV 解析結果



赤丸拡大部

図 3.4 ケース B4-3 の PIV 解析結果

4. ステレオ PTV による雨滴追跡に関する屋外実験

水滴の軌跡による風速の推定では、1 粒の水滴から推定した風速の値がばらつく結果となり、その原因の特定と改善が必要であることが分かった。そこで、高フレームレートでのステレオ撮影による 3 DPTV において水滴の軌跡や水滴の大きさの変化がどの程度把握できるかを検討した。

実験は、東急建設（株）技術研究所の屋外ヤードで実施した。撮影のための水滴は、雨滴を人工的に発生できるレインカーテン（テクノコア社製）の粒径 2 mm 相当のノズルを用いて高さ 3m から散布した。解析画像は、2 台の高速カメラ（ナックイメーজテクノロジー製：M-cam）と 2 台の高輝度 LED ランプを用いてステレオ撮影した。撮影条件は、撮影速度 2000fps で露光時間 200 μ sec、光源を水滴の奥側から照射したケース 1 と撮影速度 2000fps で露光時間 500 μ sec、光源を水滴の奥側から照射したケース 2 の 2 種類とした。撮影領域は、カメラの前方 5m の位置を中心に 600 mm 四方、奥行方向に ± 150 mm の範囲とした。水滴の軌跡の解析はフローテックリサーチ社の FtrPTV-3D で行った。空間の位置は、撮影領域の中心に設置したキャリブレーションボードに対して、カメラを 50mm ピッチで ± 150 mm の範囲で前後させた撮影画像を用いて幾何光学モデルによるキャリブレーションから算定した。図 4.1、写真 4.1 に実験状況を示す。

水滴は図 4.2 に示す結果から直線的に移動しており、ステップごとのばらつきは小さかった。水滴毎の軌跡は十分に推定できていると考えられる。

水平方向(x方向)の移動速度を図 4.3 に示す。水平方向の移動速度は、データによって平均値が異なる結果を示した。平均値はケース2のほうがやや大きかったが、水滴ごとの値のばらつきはケース1のほうが大きかった。

鉛直方向(z方向)の移動速度を図 4.4 に示す。水滴ごとのばらつきは水平方向と同様にケース1のほうが大きかった。粒径 2mm 程度の雨滴の落下速度は 6m/s 程度であり、今回の結果も近い値を示してはいるが、ケースごとの差異については検討が必要である。

粒子の体積の推定値を図 4.5 に示す。水滴の軌跡、移動速度に比べてステップごとの変化、データごとの差異が大きかった。風速の推定精度向上には水滴の大きさと形状の関係を把握する必要がある、そのためには今回得られた大きさのばらつきが何に起因しているかなどより詳細な検討が必要である。

2 台の高速カメラでステレオ撮影した画像を用いた 3 次元 PTV 解析により、水滴の大きさおよび軌跡を判別することができた。

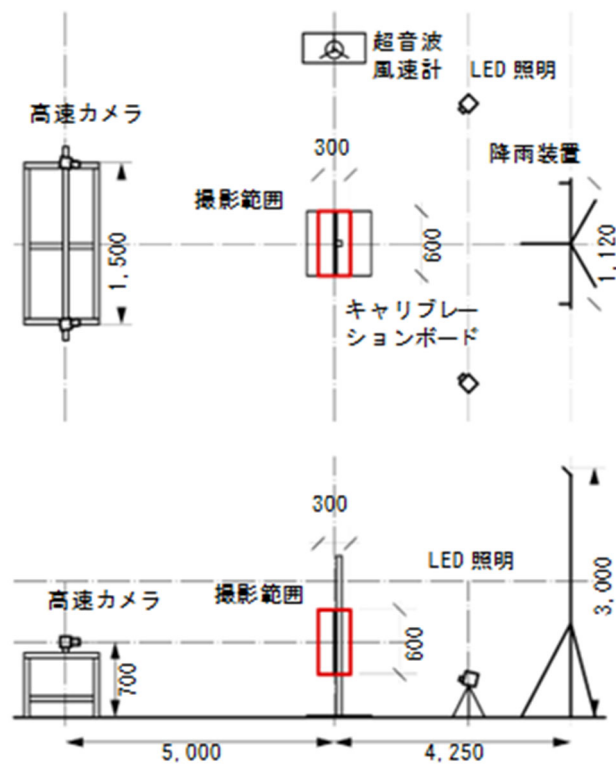


図 4.1 配置図

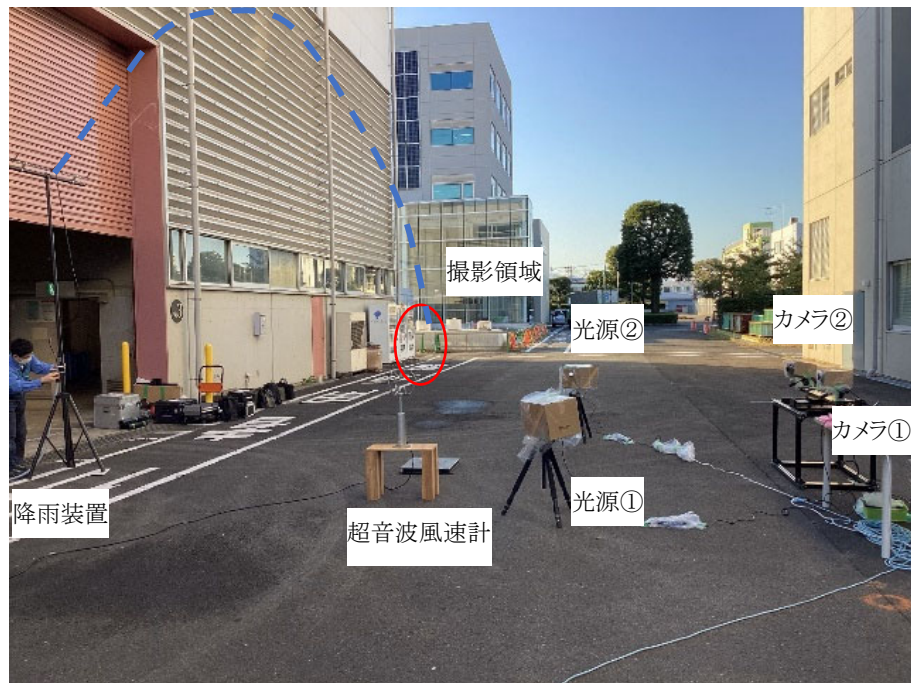
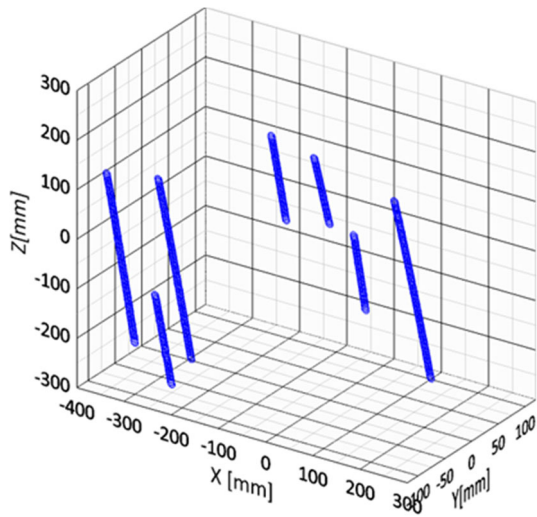
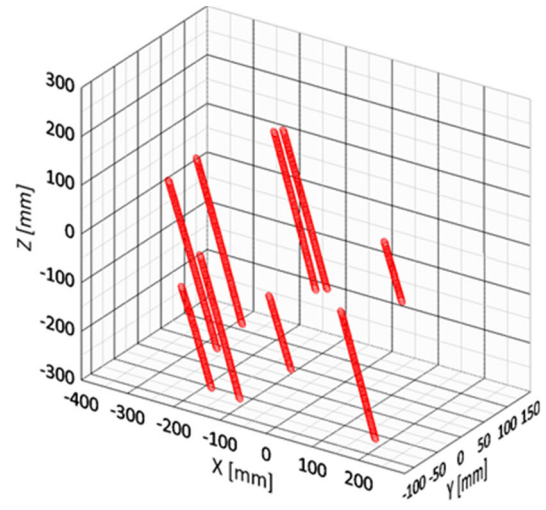


写真 4.1 実験状況



(a) Case1



(b) Case2

図 4.2 水滴の軌跡

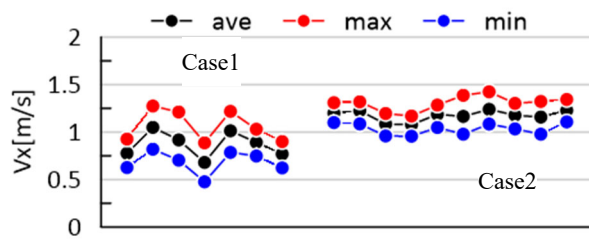


図 4.3 水平方向の移動速度

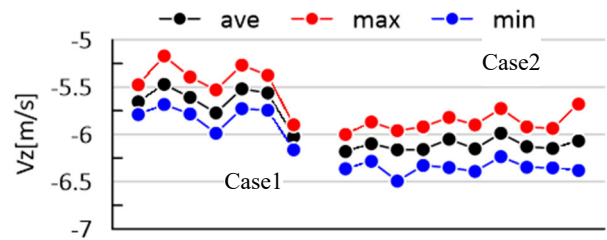


図 4.4 鉛直方向の移動速度

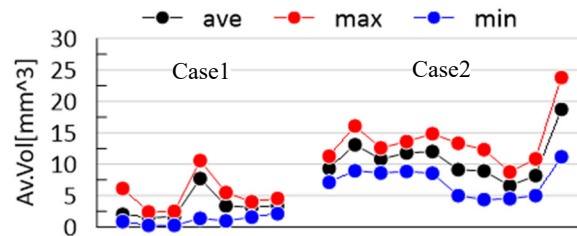


図 4.5 水滴の体積

5. まとめ

水滴の軌跡から風速を推定するために、水滴落下装置を作成し、境界層風洞に設置して実験を実施した。水滴群の画像から水滴の軌跡を解析し、水滴の加速度と大きさを用いて運動方程式を解くことで風速を推定した。推定した風速値は熱線風速計で測定した風速値とほぼ一致することが確認できた。

推定した風速値は、平均的には計測値との誤差が小さかったものの 1 粒ごとに着目するとばらつきが大きかったため、その原因について①水滴形状の影響、②水滴の位置特定の影響、③フレームレート・シャッタースピードの影響の 3 つを検討し、形状については見付け面積の時間変化による影響、位置特定方法のさらなる改善、撮影条件の最適化といった課題を抽出した。また、屋外においてステレオ撮影した画像の PTV 解析を行い、水滴の軌跡、移動速度、体積を求められることを確認した。

以上より、PTV/PIV 等の技術を用いて、雨滴の粒径および軌跡を解析することで、雨滴をトレーサにした風速推定が可能であることを明らかにした。

風速の推定精度向上には水滴の大きさと形状の関係を把握する必要があるため、そのためには今回得られた大きさのばらつきが何に起因しているかなどより詳細な検討が必要である。また、3 次元での風速推定のための運動方程式の展開が必要である。

本研究に関連する研究成果の公表

三宅克典, 栗田剛, 西嶋一欽, PTV 技術を用いた有風下での雨滴追跡に関する基礎的検討, 令和 3 年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概, A114, 2022

胡家流, 栗田剛, 西嶋一欽, 人口気象室における雨滴をトレーサーとした PIV 解析による速度推定, 令和 3 年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概, D214, 2022

三宅克典, 栗田剛, 西嶋一欽, PTV 技術を用いた有風下での雨滴追跡による風速推定とばらつきの要因分析, 風工学研究論文集, 27, p. 217-226, 2022 (査読論文)

栗田剛, 西嶋一欽, ステレオ PTV による雨滴追跡に関する屋外実験, 令和 4 年度京都大学防災研究所研究発表講演会梗概, C317, 2023

栗田剛, 西嶋一欽, ステレオ PTV による雨滴追跡に関する屋外実験の追加検討, 日本風工学会年次研究発表会梗概, 2023

謝 辞

2 章の実験において, 京都大学防災研究所技術職員米田格氏, 土井こずえ氏, 清水勝氏にご協力いただいた。4 章の実験, 解析においてフローテックリサーチ後藤様にご協力いただいた。ここに記して感謝申し上げる。