

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 Basic Study on Raindrop Tracking in Wind Using PTV Technology

○三宅克典・栗田剛・西嶋一欽

○Katsunori MIYAKE, Tsuyoshi KURITA, Kazuyoshi NISHIJIMA

This study investigates the possibility to estimate wind velocity based on the trajectories of raindrops by using the Particle Tracking Velocimetry (PTV) technology. The underlying idea behind the wind velocity estimation is that the velocity and acceleration of a raindrop subjected to wind are first estimated with the estimated trajectory of the raindrop by PTV. Then, applying the equation of the motion to the raindrop and assuming parameters required for defining the equation, the wind velocity is estimated by solving the equation. The idea is tested with a wind tunnel experiment by observing and analyzing trajectories of water drops dropped into uniform flow with given wind speeds. The accuracy of the estimated wind speed is satisfactory; approximately, 5% or less deviation in the tested cases.

1. はじめに

耐風設計はもとより、強風被害分析や予測のためには建築物周りの風速場を知る必要がある。実環境下での建築物周りの風速測定には、三杯式風速計、矢羽根式風速計、超音波風速計などの風速計を用いる方法、ドップラーライダーなどのリモートセンシング技術を用いる方法などが考えられる。しかしながら、前者は風速計を設置した位置での風速しか計測できないという欠点がある。一方、後者は直線上あるいは面上の風速を計測できるものの、装置近傍の風速を計測することは困難である。さらに雨が降っている状況では、雨滴がノイズ要因になるので計測自体が難しい。

そこで、本研究では台風が通過する際の強風・降雨時における建築物周りの風速場計測を目的として、雨滴の軌跡から風速を推定する手法を開発する。本手法の基本的な考えは、PTV (Particle Tracking Velocimetry) 技術を用いて雨滴の軌跡を計測し、計測された軌跡をもとに風速を逆算するというものである。ただし、屋外での計測を考慮して、PTV に用いる光源はレーザー光源ではなく、LED 光源 (コリメートレンズとシンドリカルレンズを用いてシート状にしたもの) を用いる。

2. 実験概要

本研究では、風洞を用いて一様流下での水滴の軌跡を 2 台のカメラで撮影する実験を行う。以下に実験に用いた装置と、実験手法を説明する。

2. 1. 水滴生成装置

室内で実験を行うにあたり、降雨状態を模擬するための水滴生成装置 (写真 1) を作成した。装置はタンク、コネクタ、注射針で構成される。今回使用した注射針 (内径 0.25mm) では直径 2.44mm の水滴が生成可能である。これは自然界での雨滴の粒径を想定したものである¹⁾。



写真 1
水滴生成装置

2. 2. 風洞内流路

風洞実験室内にある計測機器に水が触れないように、実験で使用する水滴を排出するための流路 (図 1) を作成した。流路は主に 4mm 厚のベニヤ板、4mm 厚の亚克力板、36mm×36mm 断面の角材で構成される。流路上面には風速計測のためのスリットおよび水滴を落とすための穴を設けている。また、流路風上側断面にはスタイロフォームで作成した剥離防止材を取り付けた。水滴を落とす穴の重心位置を XY 原点とし、風主流方向を X、流路床面からの高さを Z として流路内座標を定義する。本研究では、この流路を京都大学防災研究所境界層風洞内に設置し実験を行った。

2. 3. 実験の流れ

初めに、風洞内に設置した流路内部の風の性状を把握するため $(X, Y) = (200, 0)$, $(-200, 0)$, $(0, 180)$ の 3 点で熱線風速計による計測を行い平均風速と乱れ強さの鉛直プロファイルを確認する。

次に、風洞内に 5m/s あるいは 10m/s の風を吹かせた状態で水滴を落下させ、水滴の軌跡を撮影

する。撮影に使用したカメラはCASIO EX-100PROで、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である。各風速に対し5秒間の動画を10個ずつ取得した。

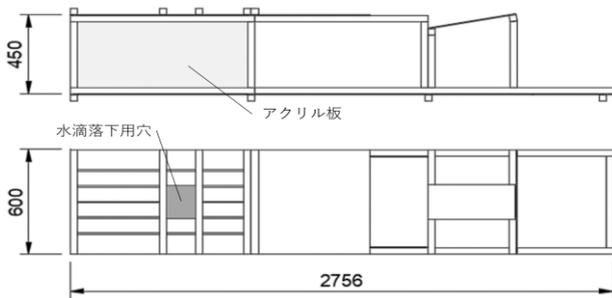


図1 流路図面(上:側面図、下:伏図)
寸法単位: mm

3. 実験結果および解析

3. 1. 流路内風速計測結果

(X, Y)=(200, 0)における平均風速と乱れ強さの鉛直プロファイルを図2に示す。なお、風速はZ=225mm位置の風速値で基準化している。実線は風速5m/s、点線は風速10m/sの場合の鉛直プロファイルを表す。また、(X, Y)=(0, 180)での計測結果より、水滴落下穴位置付近の流れに流路の側壁は影響を及ぼさないことを確認した。

図2よりZ=100mm~250mmの範囲では一様流が形成されていることが分かる。本研究では一様流下にある水滴が対象であるため、Z=100mm~250mmを解析対象範囲とする。解析対象範囲にある5つの計測点での風速値を平均し一様流の風速 $\overline{U_{sX_5}}$ 、 $\overline{U_{sX_{10}}}$ とする。この値と後述の水滴の軌跡から算出される風速推定値とを比較する。

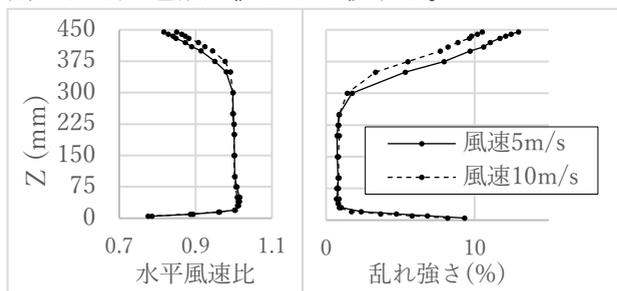


図2 (X, Y) = (200, 0)での平均水平風速比と乱れ強さ鉛直プロファイル

3. 2. DIPP-Motion Vによる撮影動画の解析

次に撮影動画から解析ソフト DIPP-Motion Vを用いて水滴の3次元座標データを得る。取得した動画データのうち各風速6個ずつ、さらに各動画先頭から20粒目までの水滴を解析の対象とした。座標データから各位置におけるX、Z方向の速度

v_x 、 v_z およびX方向の加速度 a_x を求め、(1)式を用いて各位置における風速値 U_x を推定する。動画ごとに解析対象範囲内の各位置で求めた推定値を20粒すべてで平均し、風速推定値 $\overline{U_x}$ として表1にまとめる。風速算出式(1)は水滴に働く抗力から運動方程式を解くことで導出した。

$$U_x = v_x + \sqrt{\frac{\sqrt{v_z^4 + 4K} - v_z^2}{2}}, K = \left(\frac{2ma_x}{\rho C_d A}\right)^2 \quad (1)$$

m は水滴の質量、 ρ は空気密度、 A は水滴見附面積を表す。運動中の水滴は完全な球であると仮定し、抗力係数 C_d は0.5とする。全ての水滴の大きさは同一であり、流路内のZ方向の空気の移動はなく、水滴の移動方向と垂直な方向に抗力は作用しないものと仮定する。また解析結果より水滴のY方向の移動はほとんどないことが確認されたため、2次元の運動に近似して計算を行っている。

表1 $\overline{U_x}$ 算出結果と $\overline{U_{sX_5}}$ 、 $\overline{U_{sX_{10}}}$ との比較

動画番号	$\overline{U_x}$ (m/s)	動画番号	$\overline{U_x}$ (m/s)
5_255	6.0	10_268	12.2
5_256	6.2	10_269	12.3
5_257	6.4	10_270	12.2
5_260	6.4	10_273	12.4
5_261	6.2	10_274	12.3
5_262	6.5	10_275	12.3
$\overline{U_{sX_5}}$	6.2	$\overline{U_{sX_{10}}}$	12.1

4. まとめ

表1より、熱線風速計による計測値と水滴の軌跡から推定される風速値は概ね一致することが確認できる。ただ、今回の解析では水滴の形状を完全な球とする仮定の下で計算を行っているが、自然界での雨滴は楕円形¹⁾であり、本研究の結果がどれほど応用可能であるかの検証は今後の課題である。また乱流下にある水滴を対象とした研究を進めていくことも今後の課題となる。

謝辞 実験にご協力頂きました京都大学防災研究所技術職員米田格さん、土井こずえさん、清水勝さんの名前をここに記し、感謝の意を表します。また、本研究は京都大学防災研究所一般共同研究(2021G-04)の成果である。

参考文献

1) 高野保英、竹原幸生：超高速撮影による落下雨滴の速度・粒径 および形状の計測、土木学会論文集 B1(水工学) Vol.70, No.4, I_523-I_528, 2014.