A 2 1 4

超高速ビデオカメラによる落下雨滴の撮影

高野 保英[○](近畿大学), 江藤 剛治(近畿大学), 竹原 幸生(近畿大学)

Imaging of Fall Raindrop Using High-speed Video Camera

Yasuhide TAKANO, Takeharu ETOH and Kohsei TAKEHARA

ABSTRACT

To measure the diameter and the terminal velocity of the naturally falling raindrops, consecutive images of the falling raindrops were taken by using the ultra-high-speed video camera developed by the authors. The terminal velocity and the diameter of the raindrops were calculated from these images.

As a result, the behavior of the raindrops that moved downward along with the time passage was clearly observed from the consecutive images, and the relationship between the terminal velocity and diameter was obtained.

Keywords: Raindrop, Terminal velocity, High-speed video camera

1. 緒 論^{1)~3)}

落下する雨滴の粒径分布(単位体積当たりの雨滴粒子の直径毎の数濃度)の観測は、前世紀初頭から開始され、様々な計測方法が実施されてきた。機器を用いた計測以前は、ウォーターブルーやメチレンブルーといった化学物質を吸い込ませた濾紙を用いる方法が、広く採用されていた。この方法では、雨滴によってできたしみの大きさから、雨滴の粒径およびその分布を求める。また、雨滴の代わりとして水滴を落下させ、粒径と落下速度(終端速度、後述)の関係を求める実験⁴⁾や、流体力学の理論に基づいた雨滴形状の数値計算⁵⁾も行われた。

その後、地上無線通信や衛星通信の進展あるいは降雨レーダの開発に伴い、降雨による電波の散乱吸収のメカニズムに関する研究が進むにつれて、粒径分布を電気的に測る機器が開発された。雨滴が振動板に衝突した際の振動や圧力を電圧に変えて粒径を調べる方法や、雨滴がレーザー光を通過した際に生じる影から粒径を計測する方法⁶⁾などがその代表例である。また画像計測の進歩に伴って雨滴の撮影も試みられ、例えば、Muramotoによる2台のCCDカメラによる雨滴映像の撮影⁷⁾や、近年開発された2次元ビデオディストロメーター⁸⁾による撮影が試みられている。その結果、より精度の高い雨滴粒径分布の測定や、落下雨滴形状の理論値との比較などが期待されている。

しかしながら、これらの撮影例の多くは静止画像の撮影であり、動画の撮影の例は見られない。静止画像でも、粒径分布や落下速度の計測であれば十分な場合もあるが、雨滴生成・成長のメカニズムの理解に必要となる、落下中の雨滴の変形や衝突分裂などの動的な挙動の把握は困難である。またその撮影に当たって、鉛直風洞を用いた例もある。これは、下方から落下速度に相当する風

速を送る風洞内の水滴を、雨滴とみなして撮影する方法であるが、自然状態で落下する雨滴ではないことは明らかである。

超高速ビデオカメラを用いて、落下雨滴の動画を撮影することを試みた。動画の撮影が可能であれば、自然状態の落下雨滴の粒径、速度、動的挙動などを直接求めることができる。筆者らが開発した最大100万枚/秒で撮影可能なビデオカメラ⁹⁾でその撮影に成功したので、画像例およびそれから求めた粒径と落下速度の関係を紹介する。

2. 撮影方法

2.1 撮影装置の概要

落下雨滴撮影装置の概要をFig.1に示す。

撮影装置は、超高速ビデオカメラ、トリガーおよび照明から構成されている。撮影領域上部にはスリットが、背後には照明のための白色板が、それぞれ設置される。また、超高速ビデオカメラのシャッター制御のためのト

Fig.1 Arrangement for Imaging of Fall Raindrop

Photo. 1 Consecutive Images of Fall Raindrop: Case A (Frame rate: 10,000fps/s)

リガーが、鉛直方向には撮影領域の直下、光軸方向にはレンズ先端から2cm離れた位置に設置される。スリットを通過した雨滴が、撮影領域を横切り、トリガー上に落下した時にのみ、撮影が行われる（後述）。

2.2 超高速ビデオカメラ

超高速ビデオカメラは筆者らが開発したものであり、斜行直線 CCD 型画素周辺記録型撮像素子 (ISIS) により、最高 100 万枚/秒で 81,120 (312×260) 画素の画像を、103 枚連続して撮影することが可能である。詳細については、参考文献 9) を参照されたい。雨滴の撮影に当たっては、このビデオカメラに焦点距離 80~200mm の望遠レンズと接写リングを取り付ける。

2.3 トリガー

今回使用するトリガーは、市販のイヤフォンのカバー部を取り外して、内部の振動膜を露出させたものである。振動膜に雨滴が衝突した際に生じる電圧を、オペアンプで増幅し、その増幅された電圧が一定の値を超えた場合に、ビデオカメラのシャッターが作動する。振動膜そのものの直径は 1.2cm であり、どの部分に雨滴が落下しても信号が発生する。

これを用いて撮影を行った結果、以下のような事態が生じた。すなわち、望遠レンズおよびリングを用いてかなり接写・拡大しているため、その焦点深度が非常に浅くなり、焦点から外れた位置に雨滴が落下し、明瞭に撮影されない場合がある。この問題を解決するために、振動膜の上に直径 3mm の穴を開けたプラスチック板を載

せることで、トリガーが動作する位置を絞り、その位置に焦点を合わせた。ただしこの場合、雨滴の撮影できる回数が激減するため、今後、画像トリガーなどを導入することを検討している。

2.4 照明

キセノンランプおよびメタルハライドランプを、カメラの左右に設置し、撮影領域背後の白色板に向けて光を照射する。従って、反射光を利用して撮影することになるが、光量をより大きくするため、撮影領域背後からの照明や、レーザー照明の利用を試みている。

3. 撮影結果

撮影した落下雨滴の画像例を Photo. 1 および Photo. 2 に示す。事前にトリガーと同じ地点にキャリブレーション板を設置し、その画像を元に撮影領域の大きさを計測した。両画像とも、撮影領域の大きさは横 7.56mm、縦 6.30mm である。また、撮影速度も 1 万枚/秒で同じであり、ここに示す画像の時間間隔は 0.1ms となる。なお、これより撮影速度が遅い場合には、撮影された雨滴にはブレが生じた。参考のために、5,000 枚/秒で撮影した画像を、Photo. 3 に示す。

両画像とも、全体的に光量が不足しているため、雨滴の輪郭、特に下部のそれが若干不明瞭である問題があるものの、時間の経過に伴い下方へ移動する雨滴の様子が分かる。また撮影速度を上げた場合には、さらに明瞭に撮影することも可能であり、今後、照明光量やカメラの

Photo. 2 Consecutive Images of Fall Raindrop: Case B (Frame rate: 10,000fps/s)

Photo. 3 Example Image of Fall Raindrop: Case C (Frame rate: 5,000fps/s)

感度の向上を図ることで、落下速度や形状の高精度な計測が十分可能であることが確認された。

4. 落下速度の計測

静止流体中を落下する粒子は、流体抵抗を受けて最終的に重力と抵抗力が平衡した状態で落下する。このときの落下速度を、終端速度 (Terminal velocity) という。落下中の雨滴も同様に、落下中のある時点で終端速度に達し、その速度を維持しながら落下を続ける。GunnとKinzer¹⁾は、粒径毎の水滴の落下速度を実験的に求めた。その結果をFig. 2 に実線で示す。この結果を基にした落下速度を表す式も、幾つか提案されている。なお、落下

Photo. 4 Expanded Image of Fall Raindrop

中の水滴の形状は必ずしも真球ではなく、形状に関する理論計算においても、水滴が大きくなるにつれて扁平な楕円体に近づくとされている。ここで示される直径は、体積を基に水滴を真球とみなした場合の直径に換算したもの (相当直径あるいは実効直径) である。

Fig. 2 には、超高速ビデオカメラで撮影した 5 組の落下雨滴の動画から求めた粒径と落下速度の関係を、○印でプロットしている。それぞれの値の求め方は、以下の通りである。

画像中の雨滴には、Photo. 4(Photo. 1 の画像の拡大図) の丸で囲った部分のように、水滴表面における照明光の反射によるものと思われる明るい部分が生じる。この明るい部分は、どの時間においても雨滴内のほぼ同じ位置

Fig. 2 Relationship between Raindrop Diameter and Terminal Velocity

にある。この部分の中心に当たる位置の画素を、X 軸（水平方向）および Y 軸（鉛直方向）それぞれについて求め、Y 軸座標の変化量から画像毎の落下速度を求めた。雨滴が映っている画像総ての落下速度を求め、平均値を採用している。

今回撮影された雨滴は総て、X 軸方向への移動も生じており、落下速度のベクトルは鉛直軸に対して若干の角度を有する。従って、求められた落下速度は、正しくは“落下速度の鉛直方向成分”となる。正しく落下速度を評価するために、撮影領域内あるいは周囲の（水平方向の）風速の計測、あるいは垂直に落下する雨滴のみを撮影する工夫が必要である。

直径の計測については、前章で述べたように雨滴の輪郭が若干不明瞭であったため、コンピュータ等による画像処理で輪郭を決定し、直径を求めることが困難であった。従って、目視で決定した雨滴上下端および左右端の境界の座標から、上下および左右方向の径を求め、その平均値を直径とした。

このような問題はあるものの、画像から求めた粒径と落下速度の関係は、Gunn と Kinzer が求めた結果と概ね一致している。しかしながら、粒径が大きくなるに従って、ずれが大きくなる傾向がある。今後、撮影画像の雨滴形状の明確化に努め、精度向上を図るとともに、より多くの雨滴画像を得ることが課題となる。

4. まとめ

動画像による自然状態で落下中の雨滴の粒径、速度、動的挙動などの計測の可能性を調べる試みとして、筆者らが開発した超高速ビデオカメラで、雨滴の動画像の撮影を行い、その画像例を紹介した。またそれらの画像から、落下速度と粒径の関係を求め、これまでの実験値との比較を試みた。

その結果、今回の撮影では雨滴の輪郭が若干不明瞭であったものの、時間の経過に伴い下方へ移動する雨滴の様子が確認され、落下速度や形状の計測が十分可能であ

ることが示された。

より高精度な計測に向けての当面の課題は、以下の通りである。

- (1) 背後からの照明やレーザー照明による光量の増加
- (2) 撮影速度の向上
- (3) より多くの雨滴を撮影するためのトリガーの改良
- (4) 雨滴の水平方向移動成分の計測あるいは除去
- (5) 2 台のカメラによる雨滴形状の三次元画像計測

参考文献

- 1) 水野量：雲と雨の気象学，朝倉書店（2000）pp.58-67.
- 2) 吉野文雄：レーダ水文学，森北出版（2002）pp.65-70
- 3) 武田喬生：雨の科学，成山堂（2005）pp.1-23
- 4) Gunn, R. and Kinzer, K. D.: The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air, Journal of Meteorology, Vol.6 (1949) pp.243-248
- 5) Pruppacher, H. R. and Pitter, R. L.: A Semi-Empirical Determination of the Shape of Cloud and Rain Drops, Journal of Atmospheric Science, Vol.28 (1971) pp.86-94
- 6) 例えば，山田正，日比野忠史，鈴木敦，義島弥成，中津川誠：新しいタイプのレーザー雨滴計の開発とこれを用いた降雨の雨滴粒径分布の観測，土木学会論文集，No.539/II-35 (1996) pp.15-30
- 7) Muramoto, K: Determination of Shape and Fall Velocity of Raindrops by Image Processing, IECE Trans. Inf. and Syst., Vol.E78-D, No.8 (1995) pp.1051-1057
- 8) Kruger, A. and Krajewski, W. F.: Two-Dimensional Video Disdrometer: A Description, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol.19, No.5 (2002) pp.602-617
- 9) Etoh, T.G. et al.: An Image Sensor which Captures 100 Consecutive Frames at 1,000,000 Frames/s, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.50, No.1 (2003) pp.144 - 151