

降水粒子自動判別小型 IoT デバイスの開発

東京都市大学 ○小野村史穂 1*
東京理科大学 仲吉信人 2**

降水観測 IoT デバイス ディストロメータ
降水強度 雨滴粒径

研究の目的

雨や雪をはじめとする降水粒子の情報は、気象の物理過程、水循環の把握、顕著な降水現象に対する防災対策など、多様な分野で必要とされるデータである。本研究では、比較的手に入りやすい部品のみで作成したイメージ・ディストロメータ（小野村ら 2019）をさらに改良し、雪や霰等を含めた降水粒子を測定する小型かつ安価で低消費電力な IoT デバイスを作成することを目的とする。

研究の内容

イメージ・ディストロメータは、画像解析によって雨滴粒径及び降水強度を測定する技術である。基本的な原理は、水平に置かれた透明平板に付着した雨滴を下から連続撮影し、雨滴の画像から輪郭を自動抽出する。室内実験から導き出された雨滴と平板の表面張力に基づく関係式より、雨滴の輪郭から雨滴の体積へと変換する。雨滴体積から球換算した直径（つまりは雨滴粒径）を算出し、体積を一定間隔で積算することで降水強度を求める。イメージ・ディストロメータの観測原理は比較的シンプルでありながら、市販のレーザー式雨滴計 LPM との降雨観測による比較で、降雨強度および雨滴粒形分布を推定できることが分かっている。しかしながら、観測機器には、以下の課題が残っている。①シンプルな観測原理に対し、ハードウェアが大きく過剰であること、②光量が足りない夜間の観測精度が著しく低いこと、③平板上における雨滴同士の衝突などにより過大評価の傾向が見られること、④雨滴を対象として設計されており、雪などの固体降水粒子の観測を想定していない。本研究では、上記①～③の課題に対し装置の改良を施し、④の可能性を確認するため、降雪観測を実施した。

a) ハードウェアの小型化

本研究では、多地点観測や観測場所が整わない環境での設置を想定し、ハードウェアの小型化を行った。小野村ら（2019）の装置は外寸 480mm×280mm×250mm からさらに小型化を追求し、ほぼ半分程度の外寸 240mm×170mm×110mm と片手で運べる大きさとした。小型化かつ軽量にすることで、三脚やアームを用いた固定も可能となり、雪深い場所などでの設置が容易になった。

b) マイクロコンピュータ導入による観測システムの制御

マイクロコンピュータを用いてイメージ・ディストロメータの観測システム構築を行った。後述する各種センサやモジュールを用いた効率的な観測を実現するように、以下の手順を内部のプログラムに書き込んでいる。①30秒に一度降水センサで降水の有無を確認し、降水ありの場合②に進む。②照度センサで明るさを判定し、画像の撮影に明るさが足りないときは LED テープライトを点灯する。③①からの降水ありの信号をもとに、ワイパー稼働させ、透明平板上に落ちている雨滴を除去する。④カメラモジュールを用い、10秒間0.1秒間隔で画像を連続撮影する。①で降水が検知される限り、②～④を繰り返していく。

c) 観測を各種モジュールおよびセンサの導入

以下のモジュールおよびセンサを導入した。

カメラモジュール：透明平板に落下した降水粒子を撮影するため、マイクロコンピュータに合わせてカメラモジュールを用いた。そのカメラモジュールは、近距離のフォーカス調整が可能であるため、透明平板から 4.5cm の位置に設置しピント調整を行うことで、降水粒子の判別に十分な解像度を得るように設定した。

感光センサと LED テープライトの導入：これまでの夜間の観測では、装置全体を照らすライトを点灯していたが、全体的に明るくなるため、撮影した画像上で雨滴が見えにくく、精度低下に繋がっていた。その問題を解決するために、感光センサと 3mm 幅の極細 LED テープライトを導入した。感光センサをカメラモジュールの横に設置し、撮影に必要な光量の有無を判定する。夜間だけでなく雨天などの照度が低下した場合に、照度センサからマイクロコンピュータに信号が送られ、透明平板側面に巻き付けた LED テープライトが点灯するよう設定した。

雨滴検知センサ：降水時のみ観測を行うため、雨滴センサを取り付けた。雨滴センサは、静電容量の変化を監視する仕組みとなっており、水滴が付着すると外部信号を出力し、その信号をマイクロコンピュータが受け取る。雨が上がった場合でも水滴が付着していると降水ありとの判定となるため、降雨センサを傾けて設置し、極力水滴が落下するようにした。

ワイパーモジュール：装置全体の小型化に伴い、ワイ

パーもブレードの長さ 8cm の超小型のものを採用した。

上記モジュールやセンサを固定するため、治具を 3D プリンターにより制作し、小型になったハウジング内部に収まるように配置している。

d) 雨滴画像の解析方法の改良と追加

イメージ・ディストロメータで観測された連続画像から雨滴を抽出する方法として、連続した 2 枚の画像の差分を取り、新たに落下した雨滴の輪郭のみを抽出している。そのため、既に平板上に存在する雨滴が風などにより変形したり、新しく落下した雨滴と衝突または合体したりすると、同じ雨滴が二重でカウントされる事象が見られた。そのため、画像上で一度雨滴を抽出した箇所についてはマスキングを施し、解析エリアから除去することとした。また、この解析手法では、固体降水粒子の抽出はできるものの、粒子の種類については判別することは困難であるため、機械学習を用いた降水粒子の判別方法についても検討する必要がある。

本研究では、東京理科大学（千葉県野田市）、東京都市大学（東京都世田谷区）、北海道大学（北海道札幌市）の三ヶ所において、装置の改良を進めながら降水観測を実施した。イメージ・ディストロメータの観測値を検証するため、市販の転倒マス雨量計やレーザー式雨滴計（Adolf-Theis 社）を併設し、比較データを取得している。

研究の成果、新発見

千葉県野田市において、2022 年夏頃より長期の降水観測を実施した。当初は機器の不具合などが発生したが、安定的な観測が可能になった 11 月から観測された代表的な 2 事例の降水（11 月 8 日の弱雨、11 月 30 日の強雨）について結果を述べる。イメージ・ディストロメータは、レーザー式雨滴計や転倒マス型雨量計で観測された降水強度の変動をよく捉えていた。雨滴の重複カウントを防ぐため解析方法に改良を加えた前後の結果を比較してみると、改良前はどちらのケースにおいても、降水強度を過大に評価していたが、改良後はそうした過大評価が少なく、市販の機器の観測結果に追随している。とりわけ、雨滴の数が多い強雨の方で過大評価の改善が顕著であった。過大評価が改善される一方、11 月 8 日のイベントでは、イメージ・ディストロメータがやや過小評価となる傾向が見られた。その理由として、雨滴粒径分布を見てみると、市販の雨滴計 LPM より小さな雨滴の割合がやや多くなっていた。解析画像を確認してみると、天気の状態により、雨滴の輪郭がはっきりみえている部分とそうでない部分が確認でき、はっきり見えている部分の一部に対して、小さな雨滴と判断していることが分かった。

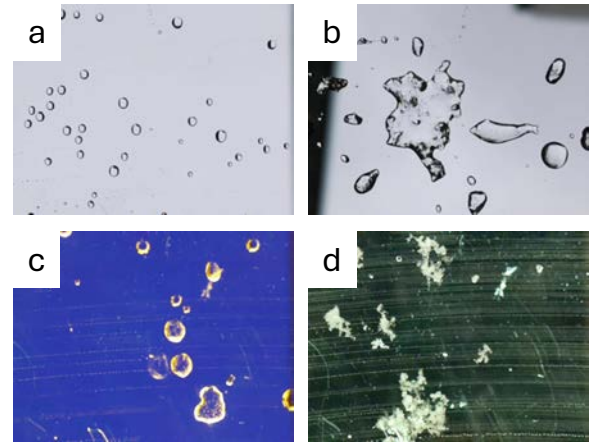


図-1 観測された降水粒子の画像（a 雨滴、b みぞれ、c 雨滴に近いみぞれ、d 雪片）

さらに、照度が低い夜間などにおいて、照明方法を変更したことで、雨滴の検出率も改善した。LED テーブライトを用いた改良版では、側面から入射した LED ライトの光がアクリル平板の中で反射を繰り返して、付着した雨滴のみが明るく照らされている。この手法は、測定デバイス本体に設置できることから、装置のコンパクト化にも寄与する。

イメージ・ディストロメータによる降雪観測を実施した。図-1 に示すとおり、改良した装置を用い、雨滴、みぞれ、雪片など様々な降水粒子を観測できることが確かめられた。また、照明方法の改善が大きく寄与し、a と b のような日中だけでなく、c のような夕方や d の夜間なども、降水粒子の詳細を捉えられており、b や c のようなみぞれでは、水滴の中に細かな氷が混ざっていることが観察できる。d の雪片では、複数の氷晶が合着している様子が見られ、サイズも大小さまざまな固体降水粒子であることが視認された。

今後の予定

今回降水粒子判別モデルの作成までは到達しなかったが、改良したイメージ・ディストロメータを用いて、みぞれや雪片など液体～固体の降水粒子の観測が可能であることが確かめられた。今後は降水粒子の判別を目指し、観測から得られた詳細な降水粒子の画像を教師データとした深層学習等による判別モデルの構築を行っていく予定である。

謝辞

本研究は、大成学術財団の助成を受けたものである。2022 年より開始した研究課題ですが、産休育休による中断を経て、再開継続する形となりました。多大なるご配慮をいただきましたこと、心より感謝申し上げます。

*東京都市大学 建築都市デザイン学部 都市工学科

**東京理科大学 創域理工学部 社会基盤工学科

*Tokyo City University

**Tokyo University of Science