

高解像度地上降雨データ取得に向けた 移動観測手法の実験的検討

DEVELOPMENT OF METHODS FOR MOBILE MEASUREMENTS TO OBTAIN GROUND-LEVEL PRECIPITATION OF HIGH SPATIOTEMPORAL RESOLUTION

小野村史穂¹・堀田滋²・仲吉信人³・二瓶泰雄⁴

Shiho ONOMURA, Shigeru HOTTA, Makoto NAKAYOSHI and Yasuo NIHEI

¹正会員 工博 東京理科大学助教 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²非会員 工修 東京理科大学学生 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

³正会員 工博 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

⁴正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

Development of compact low-cost precipitation sensors suitable for mobile observations was explored in this study. We applied compact inexpensive microwave K-band Doppler module and infrared-emitting/receiving diodes to rainfall measurements. Those were rearranged to be precipitation sensors. In order to investigate the applicability of the two sensors, fixed point measurements under actual rainfall and moving measurements under artificial rainfall were conducted comparing with a conventional laser precipitation monitor and a tipping bucket. The variation component of signal from the Doppler sensor showed a high correlation with the rainfall intensity measured by the laser monitor, while the infrared sensor did very low. The Doppler sensor shows the possibility to be a compact sensor for the mobile measurement of precipitation.

Key Words : *Precipitation, rainfall, mobile measurement, K-band transceiver, infrared diodes*

1. 研究背景と目的

毎年豪雨による甚大な水害が発生しており、流域にもたらされる降水量を把握する必要がある。流域雨量は、地上雨量計や気象レーダーの観測データを用い、空間的に積算して求められるが、地上観測点の粗い空間分布やレーダーによる観測誤差を伴い、十分に推定されていない。

近年、市民科学を利用した雨量観測が検討及び実施されている。局所的な降雨イベントやその現象のピークを正確に捉えるため、それらの空間的に密な観測データが有用であることが報告されている¹⁾。さらに、自宅等での定点観測に加え、自動車を用いた降雨移動観測の可能性も検証されている^{2), 3), 4)}。自動車の自動ワイパー情報を用いた降雨の観測では、定量性には欠けるものの、気象レーダーでは捉えにくい弱雨や降雨の始まりを正確に把握できることが示された²⁾。市販のドーム型光学式雨

量計を自動車のルーフに設置して移動観測も行われたが、走行中の計測が困難であることが報告されている⁴⁾。そもそも、既存の雨量計は定点観測向けに設計されており、車載のしやすさや安全性を考慮すると、小型のものでも大きすぎる。今後、自動車交通ネットワークを利用した降雨観測の多点展開を目指すのであれば、車載用として十分に小さく低価格な降雨センサが求められる。

そこで、本研究では、水害を未然に察知する上でも重要な情報となる時空間的に密な地上降雨量を、自動車等の移動体を用いて取得することを目指し、車載型観測装置として適した小型降雨観測システムを開発することを目的とする。定点観測に用いられてきた既存の雨量計(転倒マスや光学式)は、装置の大きさだけでなく、その物理特性や消費電力等から、移動観測には適さない。本研究では、動体検出素子として流通・小型・低コスト化が進む24GHz帯のドップラーモジュール、および赤外線発光・受光ダイオードを用いた2種類の降雨センサを独自に作成した。市販されている24GHz帯のドップラー

レーダ雨量センサや赤外線光学式雨量センサもあるが、それらの降雨推定原理は公開されておらず、また、測定精度も高くないことが報告されている⁴⁾。加えて、本研究で紹介する2種類の降雨センサは2千円以下で構築可能であり（市販センサの約30分の1）、価格面での優位性を持つ。本論ではこれらの降雨センサを、実降雨と人工降雨下で試験し、降雨移動計測手法としての可能性を評価する。

2. 研究手法

(1) 降雨センサの作成

ドップラーモジュールを用いたドップラーセンサと、赤外線発光受光ダイオードを用いた赤外線センサ2種類を作成した。仕様や加工方法について以下に示す。

a) ドップラーセンサ

図-1aに示すドップラーモジュール (InnoSenT GmbH, IPM-165) は、 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ の超小型Kバンドのトランシーバである。アンテナの水平方向 (x) と垂直方向 (y) の3dBビーム幅は、それぞれ 80° と 35° である。信号処理回路が内包されており、被照射体が前方を通過すると、信号が電圧値として出力される。ドップラーモジュール及び配線一式を防水するため、市販の透明アクリルケース（一辺 150 mm の立方体）の内側から張り付け、ケース越しに前を通過する雨を検知できるようにした (図-1b)。

b) 赤外線センサ

赤外線センサは、波長 950 nm の発光・受光ダイオードの一对から成る (図-2a)。それらは、向き合うように針金で固定し、受光部と発光部の距離は 10 mm となるようにした (図-2b)。その間を物体が通過すると、赤外線受光量が減少し、信号が出力される仕組みである。さらに、電気回路の信号処理の過程で、コンデンサ ($470\text{ }\mu\text{F}$) と抵抗 ($0.99\text{ }\Omega$) を用いたCRハイパスフィルタを挿入しており、降雨の計測領域通過時間を考慮し、周波数 0.34 Hz より低い帯域は遮断している。また、発光部と受光部間の指向性の向上と周囲光の影響を除くため、発光・受光ダイオードそれぞれの先端のみを露出し、側面をテープで遮蔽した。配線一式は、樹脂やテープで簡易的に固定及び防水加工を施した。

(2) 屋外定点観測による検証実験

開発した2種のセンサの降雨に対する応答性を確認するため、定点での降雨観測実験を行った。実験は、2019年9月18日10:36から15:16まで、千葉県に位置する東京理科大学野田キャンパス5号館屋上で行った。2種のセンサは、データロガー (GRAPHTEC midi LOGGER GL240) に接続し、出力された信号をアナログ電圧で記

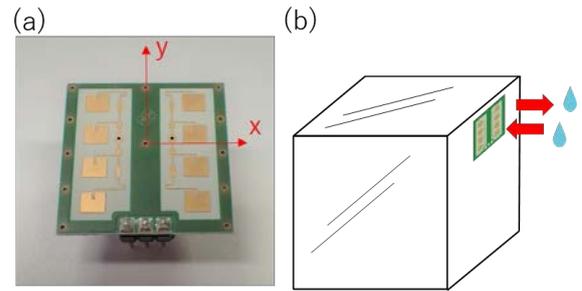


図-1 ドップラーモジュール (a) とそれを用いて作成したドップラーセンサ (b)

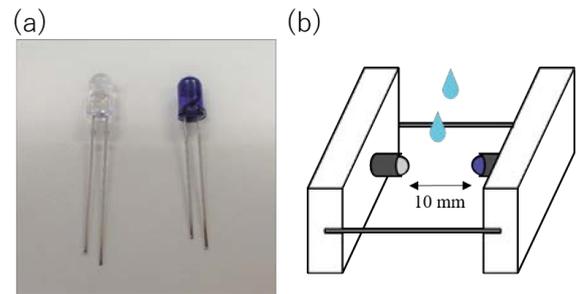


図-2 赤外線発光受光ダイオード (a) とそれを用いて作成した赤外線センサ (b)

録する。サンプリングレートは、 10 Hz である。開発したセンサの信号応答と降雨強度を比較するため、市販の簡易転倒マス雨量計 (Netatmo, NET-OT-000006) とレーザー式雨量計 (Thies, LPM) も併設した。レーザー式雨量計は、1分毎の降雨強度 [mm h^{-1}] を計測する。

(3) 人工降雨装置を用いた移動計測実験

上記2種のセンサによる降雨移動観測の実現可能性を確かめるため、人工降雨下で計測実験を行った。その詳細を以下に示す。

a) 人工降雨装置

雨を再現するため、実物大スケール開水路 ($1\text{ m} \times 15\text{ m} \times 2\text{ m}$) の上端に人工降雨装置を設置した (図-3)。水路中央上端 1 m おきに、10箇所のノズル取付口があり、散水ノズルを付けることで、水路内に雨を降らすことができる。降雨の強さは、ノズルや水圧、計測高度を変えることで調整可能であり、事前に行った検証実験で、おおよそ $10 - 10^3\text{ mm h}^{-1}$ まで再現することができる。なお、各ノズル取付口の直上配管には水圧計があり、10箇所で一様の水圧がかかっていることを確認している。



図-3 人工降雨装置と実験の様子

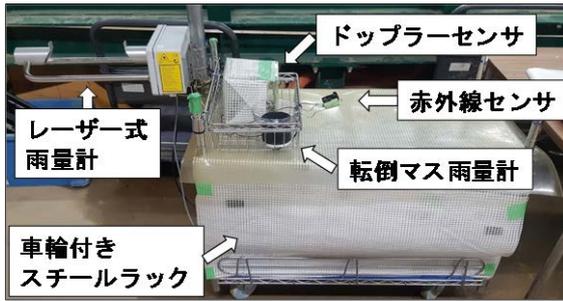


図-4 各種センサを搭載した車輪付きスチールラック

b) 計測手法

計測は、人工降雨装置動作中の開水路内を移動しながら行った。将来的には、自動車等を用いた移動観測を目指す。本実験では、開水路内を移動可能な小型の車輪付きスチールラック(450 mm×460 mm×1530 mm, 図-4)を用いた。ラック前方には、検証用のレーザー式雨量計を固定し、ラック上段には、2種類の開発したセンサと転倒マス雨量計を設置した。本来、転倒マス雨量計の計測方式は、加速度が生じる移動計測には不向きであるが、マスの転倒方向が進行方向と直行するよう雨量計を設置し、滑らかな水路床を等速直線運動で移動するよう注意して計測している。ラックの下段は、データロガーやバッテリーを搭載し、防水シートで覆っている。全てのセンサの計測高度は、水路床から0.5 mである。

降雨の移動計測は、図-3に示すように、開水路内の人工降雨帯長さ約10 mをラックの向きを変えずに往復して行った。移動速度は、一般的な人の歩行速度3-4 km h⁻¹程度とした。

降雨強度の条件は表-1に示す4パターンで実施した。ケースA—Cは、毎分2Lを散水するノズル2を用い、取付間隔を変えることで、降雨強度を調整し、10分間水路内を往復した。ケースDは、水路の下流側5個にノズル2を、上流側5個に毎分4Lを散水するノズル4を取り付けて、空間的に大きな変動を持つ降雨帯を再現した。前半4分は水路全体を単純往復し、後半2分ずつは上流側と下流側のみをそれぞれ往復した。

表-1 移動計測時の降雨パターン

ケース	降雨パターン	計測時間
A	10個全てにノズル2	10分
B	1つおきにノズル2を取付	10分
C	2つおきにノズル2を取付	10分
D	下流側5個をノズル2, 上流側5個をノズル4	全体4分 下流側と上流側 それぞれ2分

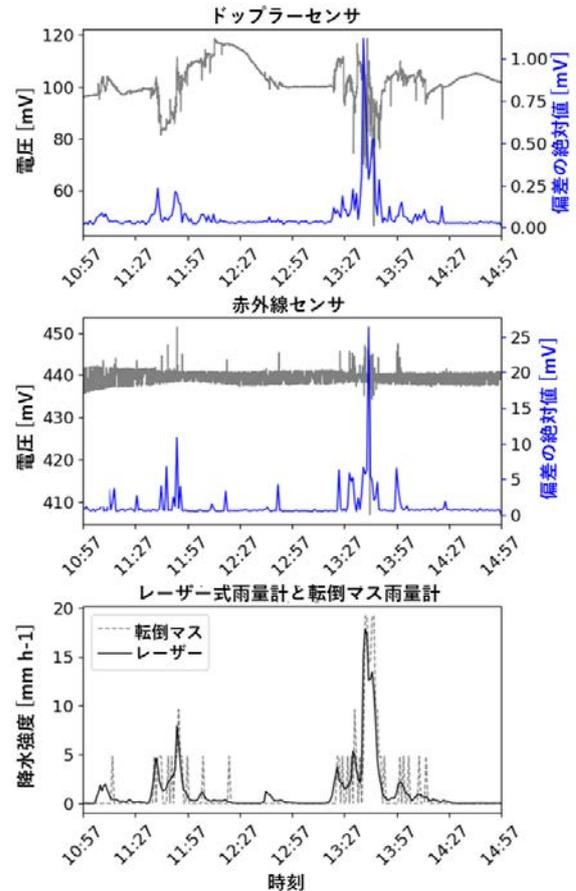


図-5 屋外定点観測におけるドップラーセンサの電圧と1分の移動平均からの偏差の絶対値(上段)、赤外線センサの電圧と偏差(中段)、レーザー式雨量計と転倒マス雨量計で計測した降雨強度(下段)。

3. 検証結果

(1) 屋外定点観測による検証結果

2種のセンサから出力された電圧値を、レーザー式雨量計と転倒マス雨量計で計測した降雨強度と合わせて、図-5に示す。レーザー式雨量計と転倒マス雨量計の測定値は、ほぼ同程度であった。ただし、転倒マス雨量計は、1回の転倒が雨量0.08 mmに相当するため、不連続な変化となっていることから、主にレーザー式雨量計との比較

を示す。

2種のセンサの電圧値は、降雨強度の大小に伴い、若干変動している様子が見られる。しかし、ドップラーセンサの電圧値は、降雨強度によらず大きな変動を含んでおり、赤外線センサの電圧値も440 mV付近に停滞し、かつ降雨に対するシグナルと同程度のノイズを伴っているため、降雨強度との相関をはっきりと確認することはできない。そのため、それら電圧値から降雨による変動成分を取り出すため、以下の処理を行った。ドップラーセンサは、1秒の移動平均値からの偏差の絶対値を1分毎に平均した。一方、赤外線センサは、同様に偏差の絶対値を算出するが、ノイズの影響を軽減するため、毎分の最大値を取り出した。それら偏差の絶対値を図-5の上段と中段それぞれに示す(青線)。上記の信号処理後は降雨強度に伴った明確な変動を見て取ることができる。11時台後半の弱雨と13時台後半の中雨に対し、各種センサともに応答していたことが分かる。

さらに、偏差の絶対値と降雨強度の相関図を図-6に示す。ドップラーセンサの電圧変動成分は、降雨強度と高い相関を示した。回帰分析により線形の関係式($y = 21.0x - 0.27$)が導かれ、決定係数も $R^2 = 0.78$ と高い。一方、赤外線センサでは、降雨強度との相関は低く、決定係数 $R^2 = 0.37$ であった。これより、ドップラーセンサは、赤外線センサに比べ、降雨への応答性が高いことが示された。また、ドップラーセンサについては、上記の回帰式を用いて、計測値から降雨強度を推定できる可能性がある。

(2) 人工降雨装置を用いた移動計測による検証結果

次に移動計測実験による結果を図-7に示す。(1)の定点観測のケースと同様の信号処理を施したドップラーセンサと赤外線センサの出力を図中の上段と中段に示す。ケースA—Cの人工降雨の降雨強度は、それぞれ約100, 50, 30 mm h⁻¹で一樣な値となっており、ケースDの降雨強度は80-180 mm h⁻¹の範囲で大きく変動していた。ただし、ケースAやDの降雨強度100 mm h⁻¹以上になる時に、レーザー式雨量計が転倒マス雨量計の計測値より低くなっていた。レーザー式雨量計は、仕様上最大250 mm h⁻¹まで計測できるが、20 mm h⁻¹以上の強い雨で15%以上のエラーを許容している。一方、転倒マス雨量計も測定可能な降雨強度の上限値は150 mm h⁻¹である。それらを踏まえると、今回の実験における人工降雨は、既存の雨量計の精度が担保される計測上限を超える豪雨が含まれていた可能性があるため、ここでは両方の測器による降雨強度と比較し、定性的検討に留めることとする。

まず、ドップラーセンサに着目する。ケースA—Cにおける偏差の絶対値は、比較的一様となっており、移動しながらも安定して計測できていたことが分かる。一方、降雨強度が大きく変化するケースDでは、偏差の値も類似して変動しており、降雨強度の変化を捉えていたこと

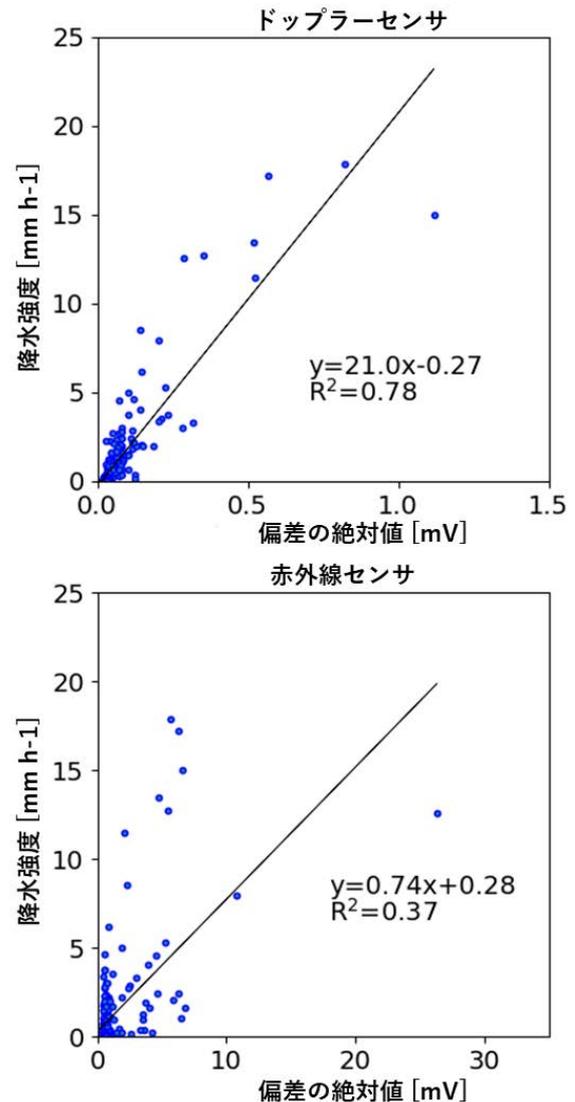


図-6 ドップラーセンサと赤外線センサにより出力された電圧の1分移動平均値からの偏差の絶対値とレーザー式雨量計で計測された降雨強度の相関図
が確認できる。時系列の変化を示すグラフでは、ケースA—C間の違いは明らかでないが、平均値では1.56, 1.22, 1.19と減少しており(図中の赤破線)、移動しながらも降雨強度100 mm h⁻¹以下の変化に反応していたことが分かる。

赤外線センサもケースA—Cでは、比較的一様な偏差の値を示した。各ケースの偏差の平均値は、12.6, 12.5, 12.0 mVであり、降雨強度に応じて電圧変動が小さい。しかし、ドップラーセンサと異なり、降雨強度の変動が大きいケースDでは、電圧の変化は小さく、降雨強度の変化を捉えきれていない。また、強い降雨にも関わらず、偏差の絶対値はケースA—Cの値と変わらず、平均で見ても11.6 mVと低くなった。以上のことから、定点観測の結果と同様に、ドップラーセンサの方が降雨への応答性は高く、移動観測でも降雨強度の変動を捉えていた。

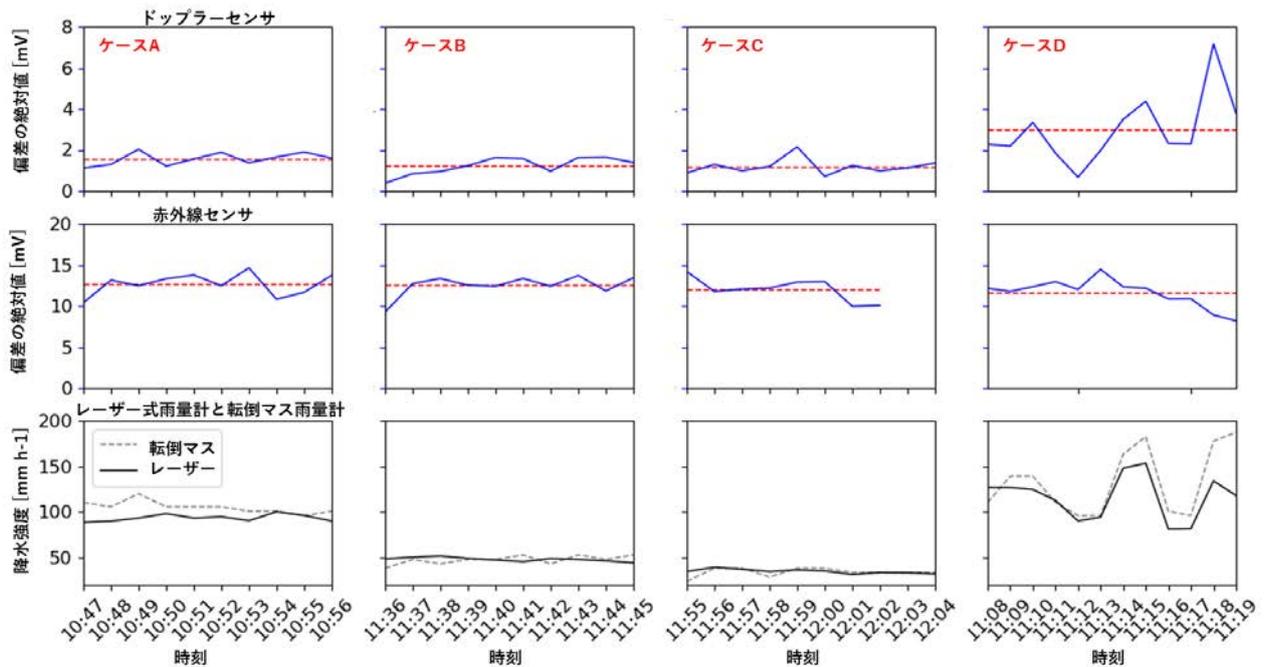


図-7 人工降雨移動観測におけるドップラーセンサの電圧の1分移動平均からの偏差の絶対値（上段），赤外線センサの電圧の偏差（中段），レーザー式雨量計と転倒マス雨量計で計測した降雨強度（下段）を示す。上段と中段の赤色の破線は、平均値を示す。

上記の結果を踏まえ、ドップラーセンサについてのみ、偏差の絶対値と降雨強度の相関を図-8に示す。ドップラーセンサの偏差の絶対値は、いずれの降雨強度とも正の相関を持っており、図-6上段で示した定点観測から得られた関係式と比較すると、回帰分析による平均変化率はレーザー式雨量計の降雨強度の場合に近いが、切片が 0 mm h^{-1} から大きくずれており、弱雨域から強雨域までの降雨強度を推定する線形回帰モデルとして明らかに適切でない。屋外定点観測で得られたように、ドップラーセンサの信号と降雨強度に明確な関係を導くことはできなかったものの、人工降雨装置による中～強雨下での移動計測でも応答していることは分かった。

4. 検証実験を踏まえた考察

作成した2種類の降雨センサのうち、ドップラーセンサは降雨に高い応答を示し、とりわけ屋外定点観測において、レーザー式雨量計の降水強度と高い相関を示した。しかし、降水強度 5 mm h^{-1} 以上のデータ数は少なく、中～強雨にかけて十分な検証ができなかった。一方、人工降雨装置を用いた降雨強度 30 mm h^{-1} 以上の降雨においても、ドップラーセンサは応答していた。検証用2台の測器の計測値が降雨強度 100 mm h^{-1} 以上で大きく異なるため、定量評価はできなかったものの、中～強雨への適用可能性も示された。

一方、赤外線センサは降雨への応答は示したものの、

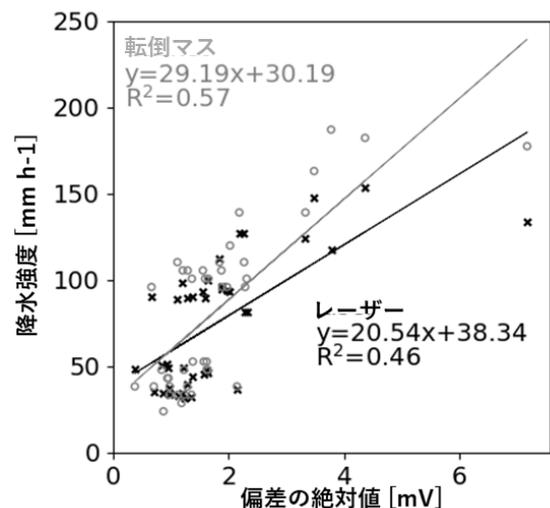


図-8 ドップラーセンサにより出力された電圧の1分移動平均値からの偏差の絶対値と、レーザー式雨量計（黒）または転倒マス雨量計（灰色）で計測された降雨強度との相関図

降雨とのはっきりとした相関を認めることはできなかった。その理由として、図-5で見られるようにノイズが大きく出ていたことが挙げられる。弱雨に対する小さな反応がノイズに埋もれてしまい、それらの時間帯で、十分な反応が得られていない。さらに、赤外線センサの発光部と受光部の水平計測面積は、わずか $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ と非常に小さく、弱雨時の空間的に疎らな雨滴が検査領

域を通過していなかった可能性もある。また強雨時には、小さな計測領域は多数の雨滴で飽和してしまい、計測が不可になっていたことも考えられる。移動計測のケースDでは、降水強度の変動が大きいにも関わらず、変動成分に顕著な変化が見られなかった。

ドップラーセンサの電圧の偏差の絶対値と降雨強度の関係が、屋外定点観測と人工降雨を用いた移動計測で大きく異なった原因として、様々な要因が考えられる。動体検出に用いられるドップラーモジュールの信号は、照射体との相対速度が効いてくる。使用したドップラーモジュールは、近づく照射体に対しては徐々に大きな電圧変動を示し、離れていく照射体に対しては徐々に小さな変動を示すことが検証されている⁵⁾。そのため、屋外の定点観測で降雨計測に大きく影響するものとして、風が挙げられる。しかし、観測地に最も近い気象庁アメダス越谷の観測日11-15時の平均風速は、 0.8 m s^{-1} と比較的穏やかであったことを確認しており、顕著な影響は考えにくい。一方、人工降雨下の移動計測では、実降雨と異なる人工降雨特有の性能や移動計測による影響を受けていた可能性が挙げられる。人工降雨は、水路上端のノズルから真下に向けて角錐状に広がりながら水平一様に散水する。計測高さ(0.5 m)から、わずか1.5 m上から噴出する雨滴は若干水平方向の速度を持って落下しており、相対速度に寄与した可能性はある。また、移動計測により、雨滴の照射範囲との相対速度が大きくなり、過大評価する傾向が含まれている可能性がある。これらの要因を軽減する手法として、今回使用したドップラーモジュールを垂直に立てるのではなく、天井に向けて設置し、降雨センサを作成することが考えられる。そうすることで、雨滴の水平移動や移動計測による相対速度の変化を減らせる可能性がある。また、実降雨では雨滴の終端速度を捉えやすくなり、雨滴粒径等の付加情報を得られることも期待できる。

5. まとめ

本研究では、降雨の移動観測手法として、安価で超小型なKバンドドップラーモジュールと赤外線発光受光ダイオードを用い、それぞれドップラー降雨センサと赤外線降雨センサを作成し、その降雨への応答性を検証した。

実際の降雨下で、作成した2種類のセンサと検証用レーザー式雨量計を用いて定点観測したところ、ドップラーセンサは降雨への応答性が高く、出力された電圧の移動平均からの偏差が降雨強度と高い相関を持つことが分かった。一方、赤外線センサはノイズが大きく、弱雨ほど捉えきれていなかった。ドップラーセンサについては、上記の関係から、降雨強度を算出する回帰直線の変換式を得ることができた。

また、人工降雨下において、2つのセンサを用いた移動計測を行った。人工降雨では、検証用の市販の雨量計

の測定限界を超える豪雨の事例が含まれたため、十分な定量評価はできなかったが、移動計測においても、ドップラーセンサは降雨強度 $30-100 \text{ mm h}^{-1}$ の変化を捉えており、中～強雨への適用可能性も示された。定点観測同様、赤外線センサでは、降雨強度の大小に伴った信号の変化を確認することはできなかった。

さまざまな課題は残るものの、既存の雨量計と比較して、かなり小さく低価格に降雨センサを作成できた成果は大きい。市民科学を利用した観測では、多点展開するために、安価でメンテナンス負荷の少ないツールが必要不可欠である。また、赤松ら⁴⁾は自動車に定点観測用の雨量計を設置して移動観測を行っているが、今後の自動車交通ネットワークを利用した降雨観測の展開を構想すると、車両への設置のしやすさや安全性の面からセンササイズは小さい方が望ましい。本研究で作成した降雨センサを新たに車に取り付けることも考えられるが、自動車にはすでに多様な超小型センサが搭載されつつある。例えば、対物検知の目的に、準ミリ波レーダーは採用されている。また、自動ワイパーのために降雨を感知する赤外線センサが埋め込まれた車もある。そうした既に利用されているセンサにより計測された生データを収集することで、自動車を用いたより定量的な降雨移動観測が実現できる日も近い。

謝辞：本研究は、JSPS科研費JP19K15103の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Starkey, E., Parkin, G., Birkinshaw, S., Large, A., Quinn, P., Gibson, C.: Demonstrating the value of community-based (‘citizen science’) observations for catchment modelling and characterisation. *J. Hydrol.*, pp.801-817, 2017.
- 2) Bartos, M., Park, H., Zhou, T., Kerkez, B., Vasudevan, R.: Windshield wipers on connected vehicles produce high-accuracy rainfall maps. *Sci. Rep.*, Vol.9, pp.1-9, 2019.
- 3) Rabiei, E., Haberlandt, U., Sester, M., Fitzner, D.: Rainfall estimation using moving cars as rain gauges – Laboratory experiments. *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, pp.4701-4712, 2013.
- 4) 赤松良, 齋藤和, 齋藤大: 車載雨量モニタリングシステムの開発に向けた光学式雨量計の実用性の検証. 土木学会論文集 B1(水工学), 75(2), I_649-I_654, 2019.
- 5) 劉宏浩: マイクロ波ドップラーセンサを用いたジェスチャー認識システムの開発. 法政大学大学院理工学部研究科紀要, vol.57, pp.1-4, 2017.

(2020. 4. 2受付)