

# 降雨量推定を目的とした ひずみゲージを用いた小型センサユニットの開発

林 良成<sup>†</sup> 香川 直己<sup>\*†</sup>

Development of a compact sensor unit using strain gauges for rainfall estimation

Ryona HAYASHI<sup>†</sup> Naoki KAGAWA<sup>\*†</sup>

## ABSTRACT

In recent years, disasters caused by localized torrential rains of short duration due to linear precipitation belts have frequently occurred. Therefore, we are considering the early detection of localized heavy rainfall to the extent that a disaster occurs by sound information from a distant place, and as a preparation, we are trying to know the relationship between rain sound and rainfall. In this paper, we report on a modified prototype sensor for measuring the kinetic energy of raindrops using strain gauges, which is mounted on multiple sensor nodes and is intended to be distributed in the field to estimate rainfall.

キーワード：降雨量，推定，音響情報，ひずみゲージ，センサネットワーク

**Keywords:** Rainfall, estimation, acoustic information, strain gauge, sensor networks

## 1. まえがき

近年、線状降水帯に起因する局所短時間の集中豪雨による災害が頻繁に発生している。そこで、我々は遠方からの音情報で災害が発生する程の局所的豪雨を早期に検出することを考えている。ただし、本手法を有効にするためには、現場の音と遠方の音の関係、さらには、降雨強度と現場の音の関係など、明らかにしなければならない因果関係が多く存在する。

そこで、まず、降雨強度と現地の音の関係を明らかにすることから始めている。さらに一か所ではなく、センサネットワークを用いて複数の地点で降雨強度と音を同時継続的に観測することにより、両者の相関関係、さらに、遠方の音との相関関係も明らかになると期待している<sup>1)</sup>。

降雨強度と音の関係に関する先行研究として、金属面上で発する雨音の強度と雨滴の粒径が比例の関係であること、および、雨滴の終端速度と雨滴粒径に関係があることを明らかにし<sup>2)</sup>、この雨滴粒径を用いて

降雨強度を推定することが可能であることを示したものが<sup>3)</sup>。この研究は、音のエネルギーと雨滴粒径の関係より雨滴個数を推定し、さらに、それを用いて降雨強度を推定している。しかしながら、この場合、雨滴の音エネルギーは雨滴が衝突する物質に依存すると推定される。

そこで、雨滴の終端速度と雨滴粒径等の関係より、雨滴の持つ運動エネルギーに基づいて降雨強度を推定可能だと考え、そのセンサとしてひずみゲージを用いることを試みた。ひずみゲージは、小型で応答性がよいことから、時間的にも空間的にも分解能を高く設定でき、雨滴 1 粒の運動エネルギーの測定に適していると考えている。このように雨滴 1 粒毎のデータが測定可能であれば、複数の雨滴が当たった際のデータも雨滴 1 粒のデータの重ね合わせとして、降雨強度の推定が可能になることを期待している。

他に雨滴の動態を測定する他の測定器としては、圧電素子を用いるもの（ウェザートランスミッター

\*スマートシステム学科

†大学院電子・電気工学専攻

WXT530 シリーズ VAISALA 社 など), 光学式のもの(光学式雨量センサ M761EPM-525S 株式会社シロ産業など) が市販されているが, 前者は計測面の面積が大きく, 消費電力と価格の上でも IoT 端末(エッジデバイス)に搭載するセンサとしての利用は難しいと思われる. 光学式のものは, 光学系の防曇のために消費電力が大きくなり, こちらもエッジデバイス搭載の利用は容易ではないと思われる. 以上の観点からひずみゲージを用いたブリッジ回路によるセンサ端末が適していると判断している.

そこで, 先の報告に於いて, ひずみゲージの静特性を確認し, その結果を用いて滴下する水滴の運動エネルギーの計測を試みたが, AD 変換の時間分解能が低いことによりアンダーサンプリングが生じ, 信ぴょう性のある測定にはなっていない.

そこで本稿では, 標本化周期の短い AD 変換器を選定し, 雨滴の運動エネルギーの計測センサの時間分解能を高くする改良を加えるとともに, 滴下物による出力信号を取得し, 当該計測手法および計測システムの有効性を確認したので報告する.

## 2. 開発センサの原理と構造

試作した降雨センサは, ロードセルの原理を応用し同一特性の 4 枚のひずみゲージを用いてブリッジ回路を構成した. 図 1 に試作したセンサの回路図を示す. 3 枚のひずみゲージは歪まないように基板上に固定し, 残り 1 枚のひずみゲージ(図 1 中の赤丸)を検出端として雨滴が当たるようにし, 検出端のひずみゲージに雨滴が衝突した際のブリッジ電流を, AD コンバータ付き検出アンプを用いて検出する. また検出端のひずみゲージに水滴が留まらないように撥水性の良いフィルムを貼り付け, 先端を尖らせている. 改良したセンサの構造を図 2 に示す. ひずみゲージは, 両面電子回路基板上に表面実装を行っている.

使用する AD コンバータ付きの検出アンプは, ロードセル用の標本化周波数が最大 10Hz の HX711 から, 最大 2kHz のデルタシグマ型 AD コンバータ付きの検出アンプである ADS122U04 に変更した. 検出ア

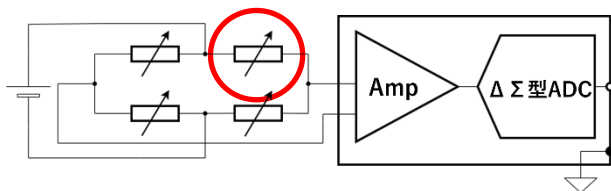


図 1 ひずみゲージを用いた試作センサ回路の概略

Fig.1 Schematic of a prototype sensor circuit using strain gages.

ンプの制御及びデータ取得は TTL-USB 変換ケーブルを介してシリアル接続されたホストコンピュータ(PC)で行う.

## 3. 開発センサの基本性能検証

採用した検出アンプの最高標本化周波数で, 水滴衝突時のブリッジ電流の変動を不足なく捉えるかを確認するために, 化学滴定実験用の自動送液ポンプ(MICRO TUBE PUMP MP-3: 東京理化工機株式会社)を使い同一質量の水滴を同一時間間隔で自由落下させ, 検出端のひずみゲージに衝突させた.

図 3 に使用した実験装置を示す. 図中の赤丸が自動送液ポンプ, 赤四角がポンプの吐出し口, 黒丸が当該センサの検出端である.

この試行における検出アンプの標本化周波数は 2kHz, 水滴の種類は質量 75mg :  $\phi$  (直径) 5.2mm, 質量 107mg :  $\phi$  6.4mm とし, これらの落下高度(検出端

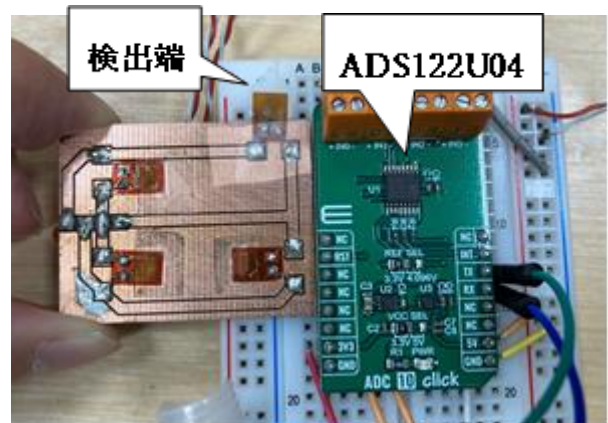


図 2 ひずみゲージを用いたセンサ回路

Fig.2 Sensor circuit using strain gages.

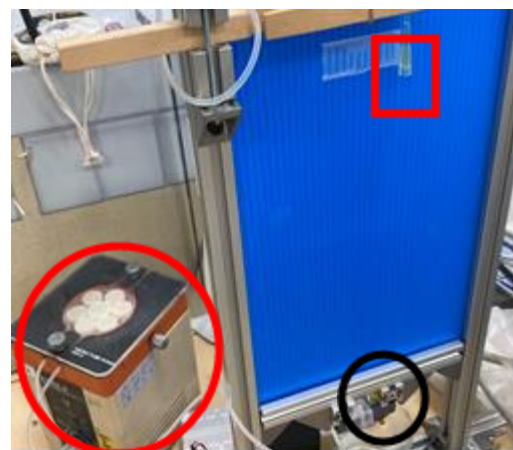


図 3 基本性能測定用実験装置

Fig.3 Experimental equipment for basic performance measurement

からポンプの吐き出し口まで)は 340mm とした。その試行をそれぞれ 10 回ずつ行った。その後、検出アンプの出力値の AD 変換結果のうち衝突時から 100 個分のデータセット取り出し、衝突後の波形の特徴を描画した。

また、水滴は、ひずみゲージに衝突した際に変形や破碎することから、変形や粉碎より運動エネルギーを損失する可能性がある。そこで、剛体も用い、剛体がひずみゲージに衝突した際の波形と運動エネルギーの関係を確認し、水滴がひずみゲージに衝突した際の波形と比較を行うことで、水滴衝突時の波形と水滴の運動エネルギーの関係を確認することとした。

微小鋼球は、 $\phi 1.5\text{mm}$ 、 $\phi 2\text{mm}$ 、 $\phi 2.5\text{mm}$ 、 $\phi 3\text{mm}$  の 4 種類を用い、これらを高さ 56mm から自由落下させひずみゲージに衝突させた。その後、前述の水滴の場合と同じ方法で衝突後の波形の特徴を描画した。

実験により得た各水滴と鋼球による振動波形を図 4 に示す。なお、本データの物理量(縦軸)に関しては、後に検出アンプの指示値をひずみ量に変換する際にひずみゲージ毎に比例定数等を求める必要があること、水滴衝突時の指示値の変動の波形と雨滴の持つ運動エネルギーの関係を確認することから、ここでは変換せずに指示値(電圧)のままとしている。

まず、いずれのデータにおいても水滴衝突時点から指示値が大きく変動していること、振動波形の再現性が高いことから、水滴の衝突時の変動を捉えていると言える。さらに衝突時の振動波形の最大値近辺の変動を円滑に捉えていることから、標本化性能は満たされ

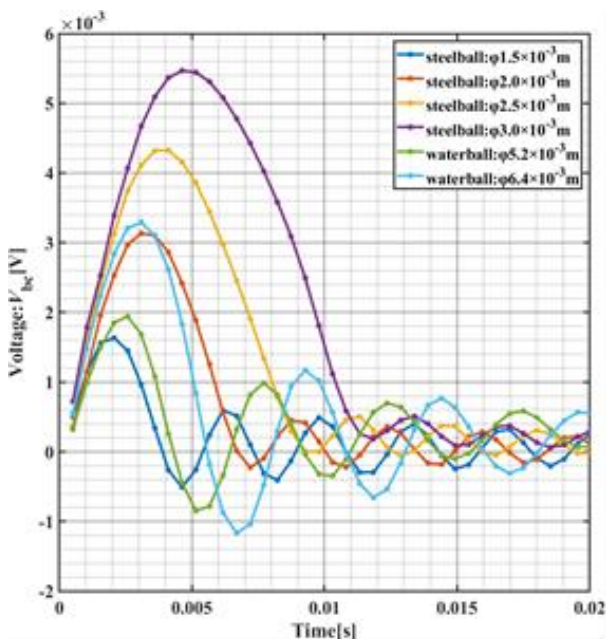


図 4 各種水滴と鋼球の衝突による振動波形

Fig.4 Comparison of each vibration waveform of steel ball and water droplet.

ていることが確認できた。

次に水滴と鋼球共に質量と 1 周期目の振幅(最大波高値)の間に線形性の可能性があることが確認できる。しかしながら、ポンプの吐出口のサイズが 3 種類しかないことから、質量の変化による応答波形の特性を調べるのが困難である。そこで、落下距離と最大波高値の間にも同様の線形性があるとし、後述するように落下距離を変化させて再度実験を行うことにした。

また、鋼球と水滴で応答特性(振動周期)が異なることが推定された。そこで、図 4 を周波数分析した。その結果を図 5 に示す。この結果より鋼球衝突後の減衰振動の周波数が約 300Hz であり、水滴衝突後の減衰振動の周波数は約 200Hz であることが判った。これは、水滴がひずみゲージに衝突した際に水滴の一部がひずみゲージに付着し、ひずみゲージの質量等のパラメータが変化することによる、ひずみゲージの固有角振動数の変化が原因と推定した。これより雨滴の信号と砂礫等の固形物の衝突による外乱信号との判別に活用できる可能性がある。

#### 4. センサヘッド部の保護と自動計測化

##### 4. 1 センサヘッド部の保護

ここまでの試行により、ひずみゲージを雨滴の持つ運動エネルギーのセンサとして利用することができる判断した。ただし、実用化に向けては、ひずみゲージが露出しているセンサヘッド部(検出端)の剛性を高める必要がある。

そこで、ロードセルに倣いセンサヘッド部(検出端)

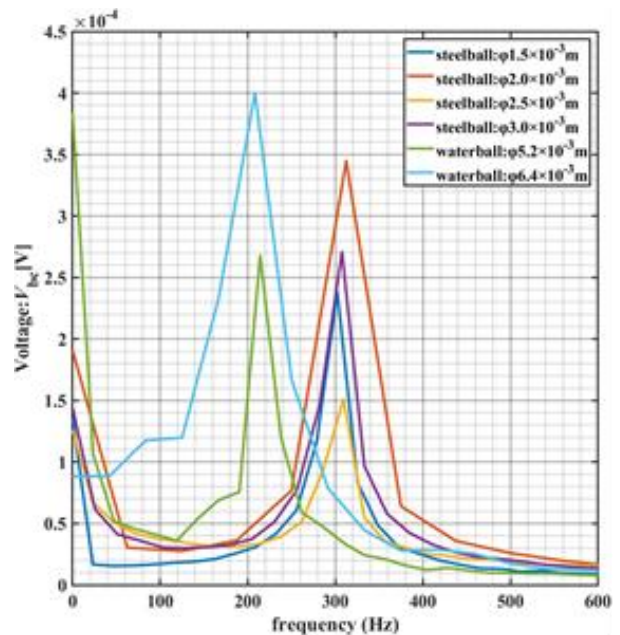


図 5 振動波形の周波数分析結果

Fig.5 Spectra of damped vibration part estimation.



を線形変形する剛体で覆い保護することを考え、熱膨張率が小さく、ひずみゲージ本体よりもヤング率が高く、かつ、内部状況が観察できる透明な素材ということでホウ珪酸ガラス製の顕微鏡用カバーガラス（ $18\text{mm}\times 18\text{mm}\times t0.13 \sim 0.17\text{mm}$ ，ヤング率  $72.9\text{kN/mm}^2$ ：松浪硝子工業株式会社）を用いることにした。図 6 に当該カバーガラスでひずみゲージを挟み込んだセンサヘッドを示す。これにより、感度は低下するが、脆性材料であるガラスを用いることにより、応力対ひずみの線形性を保ったまま、応力のダイナミックレンジを広くとることができる。一方で、破断が危惧されるが、後述するセンサ部のあおり角の調整で回避することができると考えている。

#### 4. 2 滴下位置（高さ）移動の完全自動化

前述したように、水滴の大きさの設定に自由度が無いため、滴下位置を変えることで水滴の持つエネルギーを調整する必要がある。その際に、統計的に有意なデータとするため、滴下位置を自動的に変えながら、一定の時間間隔で水滴を滴下するように高さ調整機能を自動化し、大量のデータを取得できるように実験装置を改良した。

図 7 に高さ調整機能を自動化した実験装置を示す。この装置は 3D プリンタ製で、引上げ型のエレベータ構造になっており、垂直に立てられたガイドレールを移動できるように把持した治具（垂直台車：図中赤四角）に自動送液ポンプに繋がった滴下ノズルが固定されている。この台車は樹脂製の歯付きベルトを介して上部にあるステッピングモータと繋がっており、ステッピングモータ（図 7 中の赤丸）の回転で高さを変える。

このステッピングモータは Arduino マイコンを介してホストコンピュータにシリアル接続している。モータの制御とデータ収集はホストコンピュータ上のソフトウェアによって行われ、垂直方向に  $1\text{mm}$  の分解能で移動させることができる。レールの上部にはイ

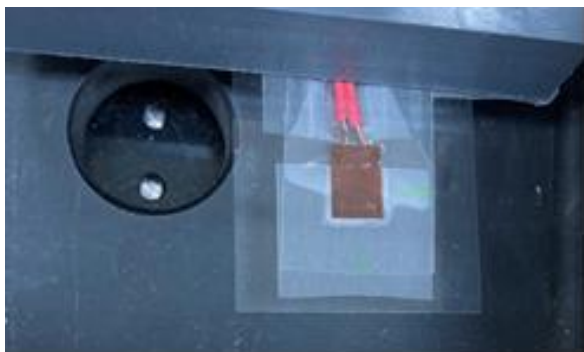


図 6 顕微鏡用カバーガラスで補強した検出端

Fig.6 Sensor head covered with the borosilica thin glasses. .

ンターロックが取り付けられており、この位置を起点に下降し、 $160\text{mm}$  移動のステップ数をカウントすると再び上端に戻る。インターンロックからの垂直台車のレール上端への到達情報を検出すると、制御系は都度、高さ情報の校正を行う。計測は、上端から下端に移動中に行い、何度でも繰り返して計測できる。

また大量のデータを収集するため、データ処理の自動化も行った。取得データより最大波高値を検出するために、元波形より、移動平均を計算し、元波形から引くことで、ベースラインをフラットにし、縦軸（検出アンプの電圧値）に閾値を設け時間窓と併用して最大波高値のみを検出することにした。

#### 5. 落下水滴の運動エネルギーの推定実験

##### 5. 1 実験方法

図 7 の実験装置を用いて水滴の持つ運動エネルギーと最大波高値の関係を調べる実験を行った。実験にお



図 7 自動化に適応させた実験装置

Fig.7 Laboratory equipment adapted to automation.

いては、 $\phi 4.6\text{mm}$ 、 $\phi 6.4\text{mm}$  の異なる直径の水滴を発生できるノズルを用いて、対応する異なる質量の 2 種類の水滴をそれぞれ高さ 230~390mm、160~320mm (10mm 間隔) から送液ポンプを使い自由落下させ、当該検出端に衝突させた。また再現性の確認のために、1 週間後に  $\phi 4.6\text{mm}$  の水滴ノズルを用いて上記と同様の実験を行った。その後、前述した方法で取得した最大波高値と水滴の質量と落下距離より算出した位置エネルギーより推定した水滴の運動エネルギーをヴァイオリン図に描画し、データ分布や線形性、再現性の確認を行った。

## 5. 2 実験結果および考察

図 8、図 9 および図 10 に実験結果より作成したヴァイオリン図を示す。データ数はそれぞれ 18000、14000、40000 個である。これらの図より推定した運動エネルギーと最大波高値の間には線形性が認められる<sup>5)</sup>。また原因は不明であるが、図 8、図 10 のような同一条件下のデータにおいても落下距離によって分布が変化すること、図 8 と図 9 の図のように質量によっても分布が変化することが判明した。これについては、水滴衝突時に水滴に生じる破碎や変形等が原因の可能性がある。

次に図 11 に 2 つの質量のデータと後日取得したデータを箱ひげ図にし、また 3 つのデータより求めた回帰直線を示す。また、この図から求めた相関係数を表 1 に示す。この図と表より、雨滴の持つ運動エネルギー

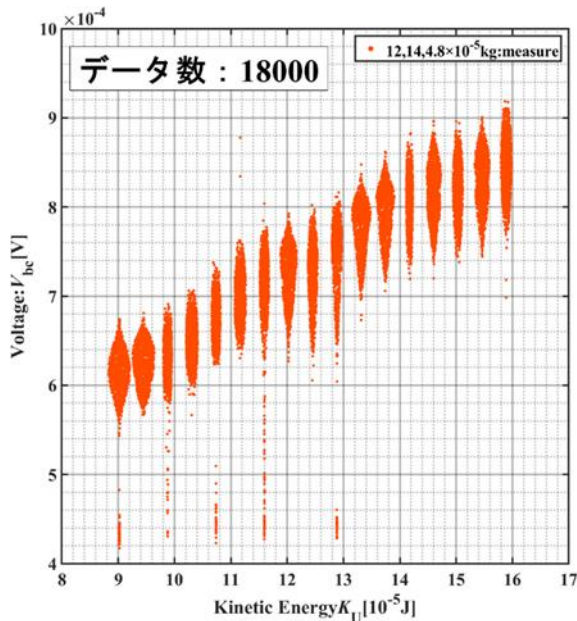


図 8  $\phi 4.6\text{mm}$  水滴質量と落下距離から推定した運動エネルギーに対する振動波形第 1 周期の振幅の関係

Fig.8 Relation of the amplitude of the first period of the vibration waveform to the kinetic energy estimated from the  $\phi 4.6\text{mm}$  droplet mass and fall distance.

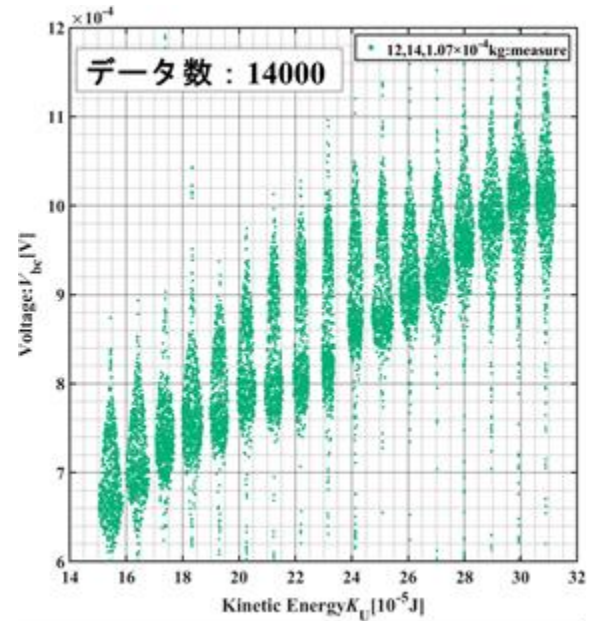


図 9  $\phi 6.4\text{mm}$  水滴質量と落下距離から推定した運動エネルギーに対する振動波形第 1 周期の振幅の関係

Fig.9 Relation of the amplitude of the first period of the vibration waveform to the kinetic energy estimated from the  $\phi 6.4\text{mm}$  droplet mass and fall distance.

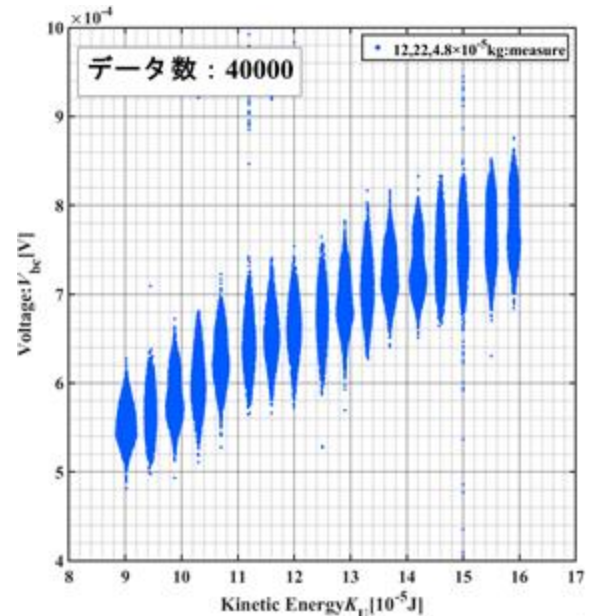


図 10 図 8 より 1 週間後に測定した  $\phi 4.6\text{mm}$  水滴質量と落下距離から推定した運動エネルギーに対する振動波形第 1 周期の振幅の関係

Fig.10 Relationship of the amplitude of the first period of the vibration waveform to the kinetic energy estimated from the  $\phi 4.6\text{mm}$  droplet mass and fall distance measured one week after Figure 8.

と最大波高値の相関係数が 0.9 以上と強い正の相関があることが判る。また  $\phi 4.6\text{mm}$  の水滴のデータより傾きが等しく、切片についても桁が小さいことから



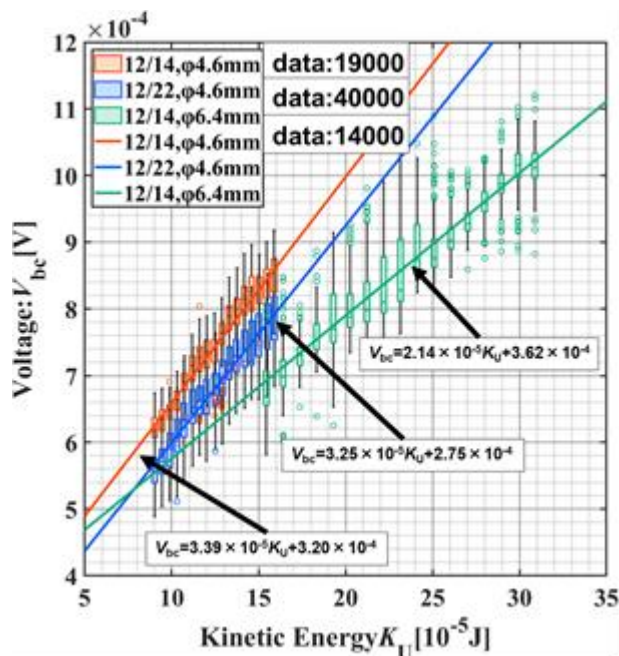


図 11 図 8 から図 10 の結果とそれらの回帰直線

Fig.11 Results from Figures 8 through 10 and their regression lines.

ほぼ等しいことより、降雨量推定の可能性がある。一方で、φ6.4mm の水滴のデータでは傾きがφ4.6mm の水滴と比べて小さいことが判った。これは、水滴が検出端に衝突時に破碎や変形を行う際に運動エネルギーが消費され検出端へのエネルギーの伝達効率が下がったことに起因する可能性がある。したがって、前述した検出端の角度を設ける機構を用いることで、破碎や変形の影響を小さくして再度実験を行うことで、感度が下がることが予想されるが、再現性が向上するのではないかと考えている。

雨滴の運動エネルギーと降雨強度に関係については先行研究が存在しており、降雨強度に応じてより大きな水滴が存在する確率が高くなること、雨滴の持つ運動エネルギーと降雨強度の間に強い正の相関があることを示唆している<sup>6,7)</sup>。この結果を用いることで、雨滴の運動エネルギーより降雨強度の推定が可能であると考えている。

## 6. まとめ

検出端にひずみゲージを用いた際の水滴衝突後の波形と鋼球衝突後の波形の比較を行った。また検出端にカバーガラスを用いて水滴の大きさと落下距離を変化させた際の、水滴の衝突後の波形の比較を行った。水滴の落下距離と質量を変化させた際の、運動エネルギーと最大波高値の間の線形性と再現性を確認した。

鋼球衝突後の減衰振動の周波数は、水滴衝突後の減衰振動の周波数よりも高いことから、衝突した物体を雨滴とそれ以外に判別し、降雨の判定を行うことで、

表 1 図 8 から図 10 の結果の相関係数

Table.1 Correlation coefficients in Figures 8,9,10.

水滴の直径	4.6mm		6.4mm
日付	12月14日	12月22日	12月14日
相関係数:R	0.930	0.903	0.920

雨滴の誤検出の低減が期待できる。

運動エネルギーと最大波高値の関係を調べる実験では、R が 0.9 と高い正の相関があることが判った。この結果より、ひずみゲージを用いて運動エネルギーの推定が可能であることが判った。再現性については、水滴の質量に依存するが高いことが判った。分布が異なることや、水滴の質量に応じて回帰直線の傾きが変化することについては、水滴衝突時の破碎や変形等による雨滴の持つエネルギーの損失に起因する可能性がある。これについては、検出端の角度を変更することで、水滴の変形や破碎の影響を軽減できる可能性があるため、検出端の角度調整による水滴の変形について調査することで、原因が追究できると考えている。

また実際の降雨時での降雨量推定では、雨滴の当該センサの検出端への衝突頻度が増加するはずであるが、本実験より水滴衝突後の減衰波形は約 0.1s 以内で収束すること、検出端の面積が 24mm×32mm と比較的小さいことから、独立した応答波形の取得は可能であると期待している。もし、連続的なデータになった際も、降雨量と頻度に関係があれば、波形の特徴から降雨量の推定の可能性がある。故に、実際の降雨における当該センサに使用したカバーガラスのサイズに雨滴が当たる頻度については今後の課題としたい。

今後はこれらの仮説を追究することで、小型雨量計の開発に向けた対応を進める予定である。

謝辞 送液ポンプ、カバーガラスは生物工学科山口泰典教授から貸与頂いた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 香川ほか、福山大学工学部紀要、第 45 巻、pp.7-12(2022)
- [2] 林ほか、水工学論文集、第 41 巻、pp.985-990(1997)
- [3] 石川ほか、可視化情報学会誌、Vol.18, No.69, pp.141-148(1998)
- [4] 林ほか、第 24 回 IEEE HISS (2022)
- [5] 林ほか、第 31 回計測自動制御学会中国支部 学術講演会(2022)
- [6] C.Salles, J.Poesen, D.Sempere-Torres, Journal of Hydrology, 257, pp256-270 (2002)
- [7] J.S.Marshall, W.McK.Palmer, Journal of Meteorology, Vol.5, pp165-166(1948)