

技術紹介

7 豪雨計測に対応した雨量計の開発

Development of Rain Gauge with Capability for Heavy Rainfall Measurement

松崎 政彦	Masahiko Matsusaki	商品開発センター 主任
田村 博規	Hironori Tamura	商品開発センター 主任
早川 将太郎	Shotaro Hayakawa	商品開発センター
市川 真太郎	Shintaro Ichikawa	商品開発センター 技術マネージャー

キーワード: 貯水型雨量計、静電容量センシング、閉ループ制御、斜面崩壊

Keywords: Storage-type rain gauge, Capacitive sensing, Closed-loop control, Landslide

要 旨

当社はこれまで培ってきたセンシング技術を応用し、社会課題を解決する IoT のシステム開発ならびにサービスへの展開を推進して参りました。現在、気候変動により予想される水害の激甚化に対し防災分野で貢献するべく、加速度計開発で培った静電容量検出技術を応用した水位計測に関する技術開発を行っております。

防災に関連したセンサのなかで気象観測装置は重要な役割を果たしています。特に雨量計は局所的な気象観測に対して有効であり、近年雨量計の設置に対する関心が高まっています。しかし、現在普及している雨量計は豪雨において正確な雨量を計測することが難しく、近隣住民の避難率を左右する雨量計測の信頼性に課題があります。そこで当社の水位計測技術を展開し、これまでの雨量計では困難であった豪雨の計測にも対応できる雨量計を開発しました。本稿では雨量計に使用されている独自の計測手法ならびに産学連携による斜面崩壊予測システムへの応用例を紹介いたします。

SUMMARY

We have been developing of IoT systems and services that solve social issues over the years. We are now developing technology for measuring water levels using capacitance detection of JAE accelerometers in response to flood disasters caused by heavy rains, which are increasing due to climate change.

Weather observation equipment plays an important role. Rain gauges are particularly useful for local weather observation and have been increasingly installed in recent years. However, conventional rain gauges are difficult to measure in obtaining accurate rainfall in heavy rains. We have developed a rain gauge that can measure heavy rainfall by applying our water level measurement technology. This paper presents our unique measurement method used in our rain gauge and its application to a landslide prediction system.

1. はじめに

新型コロナウイルスのパンデミックによって、将来の危機に対する備えの重要性と社会システムの課題があらわになりました。ポストコロナ時代を迎え、これらの危機感を通じて持続可能性への意識が高まり、中でも気候変動対策に関しては各国が再生可能エネルギーへの投資や温室効果ガスの排出削減目標の設定などの政策を推進しています。一方で干ばつや洪水などの災害は、現在進行形で人々の生活、農業、都市計画、水資源管理に深刻な影響を及ぼしています。世界各地で報告されている災害への対策は喫緊の課題であり、社会のレジリエンスを高める適応策が欠かせません。わが国内においても水害の激甚化が進んでおり、統計データなどから豪雨の増加傾向が見られ災害の被害額も増加しています。¹⁾特に地方都市の地元住民や自治体が管理している小規模水域は氾濫・決壊・土砂崩れのリスクに対して脆弱であることから、国土交通省は流域治水を推進しています。

第一級河川は国や都道府県単位の管轄であるため、流域治水に対する予算が配分されやすく、国土交通省が決めた仕様をもとに大規模な観測システムが構築されています。しかし、小規模河川においては一律の仕様で対応することは難しい状況となっています。ゼロベースではなく既存システムに機能を追加するケースが多く、デバイスの設置個所や設置方法、通信インフラ環境が一律でないという問題があるからです。そこで、気象庁が提供するレーダー観測結果（ナウキャスト）、国土交通省が提供する X バンド MP レーダーの三次元降雨データなどのオープンデータを使って災害を予測する試みが進められています。²⁾しかし、局所的な天気は予測が難しくレーダーによる推定値と誤差をもつことが報告されています。³⁾さらに現在運用されているゲリラ豪雨の早期探知・予報システムは、危険なゲリラ豪雨となる積乱雲を見逃すことはないものの危険なゲリラ豪雨に発達しなかった空振り率が 20%程度あるといわれています。⁴⁾このような空振りは、避難率が低下する事象いわゆるオオカミ少年効果を誘発することが報告されています。⁵⁾

近年、局所的な気象を直接観測するデバイスとして気象観測装置が注目され様々な研究が行われています。中でも雨量計は水害予測から農業の最適化まで多岐にわたる応用例があります。⁶⁾防災用途で使用する雨量計は信頼性の高さに加え正確な雨量を得ることが重要であり、気象庁の検定に合格した機器を使用することが気象業務法により義務付けられています。気象庁における検定登録数は年間 4000 件程度、さらに過去 10 年間で増加傾向を示しており雨量計への関心の高さがうかがえます。⁷⁾ところが、従来型の雨量計は土砂災害を引き起こす恐れのあるゲリラ豪雨のような降雨強度の強いとき正確な降雨量を得られないことが報告されています。⁸⁾

そこで、当社の加速度計で使われている閉ループ制御を応用した独自の雨量検出方式を考案し、低コスト/省スペースでかつ豪雨でも正確に計測できる貯水型の雨量計を実現しました。本稿では雨量計の検出方式の詳細と、雨量計のユースケースの一つとして斜面崩壊予測システムについて紹介します。

2. これまでの雨量計

気象業務支援センターへの雨量計の検定の申請数はその約 99%が転倒ます型雨量計と呼ばれるもので、⁷⁾内部の構造は図 1 のようになっています。⁸⁾受水器で雨水を集め漏斗状になった先端から転倒ますに注水します。転倒ますはシーソーのように動作する構造をしており、その両端にある一定量の雨水（雨量に換算して 0.5 mm 分のものが多い）をためることができます。ますに一定量の雨水がたまるとシーソーのように転倒してたまった雨水を排水口に流します。転倒ますが傾くと今度はもう一方のますが雨水を集めるようになります。この転倒時に転倒ますと一体化したマグネットがリードスイッチを ON または OFF するようになっておりこれを出力として取得します。このようにすることで 1 パルスが決まった雨量（例えば 0.5 mm）として計測できます。転倒ます型雨量計は構造が簡単で少ない消費電力で検出できるという利点がある一方、ますが転倒している間に雨水が流入するため、降雨強度が増加するほど出力が低下するとの報告があります。⁸⁾

図 2 に貯水型雨量計と呼ばれる雨量計の内部の構造を示します。⁹⁾貯水型雨量計は、受水器で集めた雨水を貯水槽と呼ばれる目盛りのついた容器にため雨量を読み取るものです。雨量の読み取り方には、目視で計測するタイプまたはゼンマイの動力をはたらかせて自動的にペンで記録するタイプがありますが、近年電子秤を用いて重量を計測し雨量に換算するタイプがあります。その後ある程度まで雨水が雨水ますにたまるとバルブを開け、たまった雨水をすべてまたはある基準値まで排水します。貯水型雨量計は豪雨に対して高い精度で計測できる反面、定期的に排水しなければならずその間の降水は計測できないという欠点を持ちます。その間隔は豪雨であるほど頻度が高く、防災システムへの組み込みが困難であると考えられます。

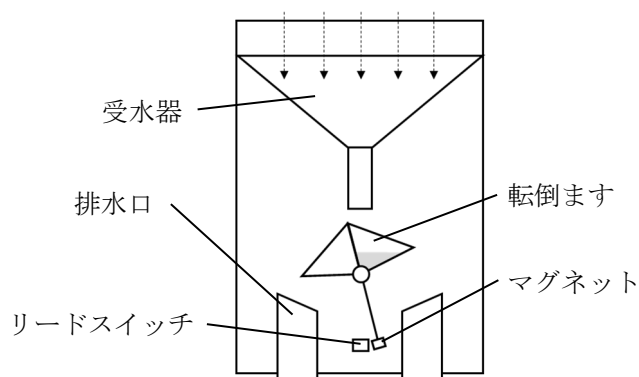


図 1. 転倒ます型雨量計の仕組み

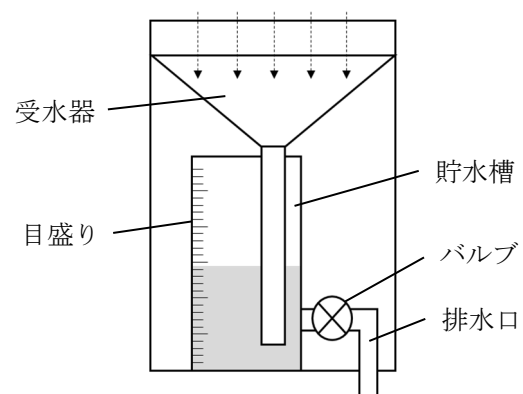


図 2. 貯水型雨量計の仕組み

3. 雨量計の開発

3.1 測定原理

開発した雨量計は貯水型と同様の構造ですが排水制御と水位検出に特徴を持ちます。図 3 に排水制御のフローを示します。貯水槽に集められた雨水の増加量は水位センサによって水位として読み取ります。このとき水位がある基準値（雨量 0 の水位）から上昇している場合は、一定時間バルブを開け貯水を排

水させます。このときの排水量は貯水槽水位に対するフィードバック量としてはたらし、水位が基準値になるまで繰り返すような閉ループ制御が構成されます。排水量は毎回一定であるので、排水指令（パルス）を雨量出力とみなせば転倒ます型雨量計と同様の出力を得ることができます。水位が基準値になるまで排水を繰り返すので、排水している間の雨量の増加についても算出しており、貯水型雨量計で問題となっていた断続的な計測を回避することができます。

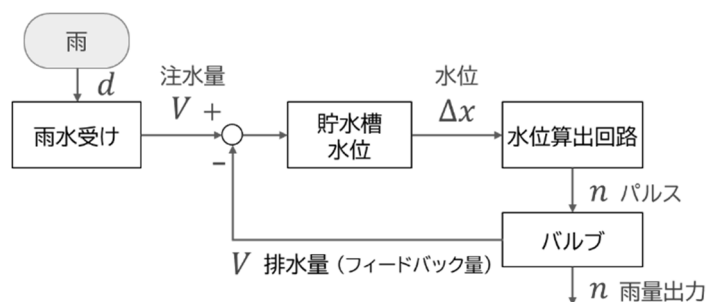


図 3. 排水の制御

3.2 水位算出回路の動作

水位算出回路は図 4 のような静電容量検出回路であり、基準容量と検出容量の差に応じた電圧を出力します。基準容量と検出容量を構成する電極は、図 5 のようにプリント基板上に構成します。水の比誘電率は 80 以上あるため、水に触れている電極の面積すなわち水位が増加すると静電容量が増加します。基準容量を構成する基準電極は、雨量が 0 であっても貯水水面の下に位置しているため常にある一定の静電容量を維持しますが、検出電極は雨量による水位の上昇で静電容量が増加します。そのとき発生する容量差がローパスフィルタにおける時定数の差になり入力正弦波の振幅に差を生じさせます。これをダイオードなどで平滑化し増幅回路を通して出力します。

本構成の回路は計測する静電容量が大きく変化する場合に適しませんが、基準容量と検出容量の差が 0 付近の微小な変化を差動増幅回路のゲインを上げることで感度よく計測することができます。この回路は静電容量型の加速度計において使用されている回路であり、サーボ型加速度計においては $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 以下の微弱な加速度を計測することができます。¹⁰⁾開発した雨量計で計測する静電容量は、すべての範囲にわたって高いダイナミックレンジの計測が必要ありません。基準容量と検出容量の差を高感度で計測できれば良いので本構成の回路が適しています。本構成の回路で使用する増幅回路は一か所のみであるので部品点数（特にオペアンプ）を少なく構成できます。さらに貯水は基準の水位になるまで自動で排水されるので、製造時に回路内で寄生容量などの影響を調整する必要がなく安価に製造することが可能です。

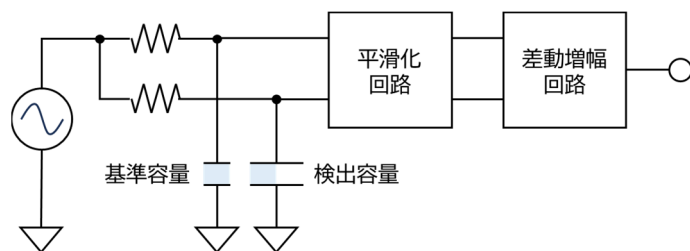


図 4. 水位算出回路の構成

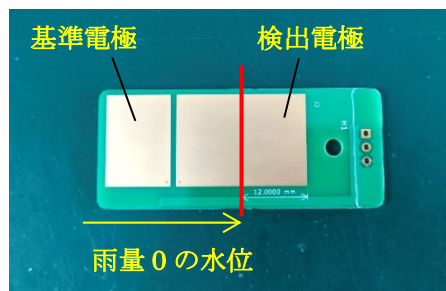


図 5. 電極の構成

3.3 雨量計の試作

試作した雨量計を図 6 に示します。貯水槽はステンレス製であり、その電位を GND とすることで図 5 の基板の各電極と静電容量を形成します。一般的に受水器の口径は $\phi 200$ mm の雨量計が多いですが、試作品の口径はより小さい $\phi 100$ mm とし設置のしやすさを考慮しました。パルス 1 回あたりの排出量は雨量に換算すると 0.1 mm でありこれが分解能に相当します。この排出量はトリチェリの式や連続の式を用いて算出することができますが、バルブや排水口までの水路の影響により実測値と異なるため、実際は口径と雨量から計算したある量の水を注水し雨量出力がそれに合うようにバルブ開の時間を調整します。

電極は貯水への電荷の漏れを防がなければならず、防災システムでは長期間の使用が想定されるため腐食が問題となります。そこで電極はパリレンコーティングによって保護しました。パリレンコーティングは蒸着プロセスにより形成される保護膜です。化学的に安定な性質を有するため、優れた耐水性・耐薬品性・絶縁バリア性を備えており、高い信頼性が期待できます。

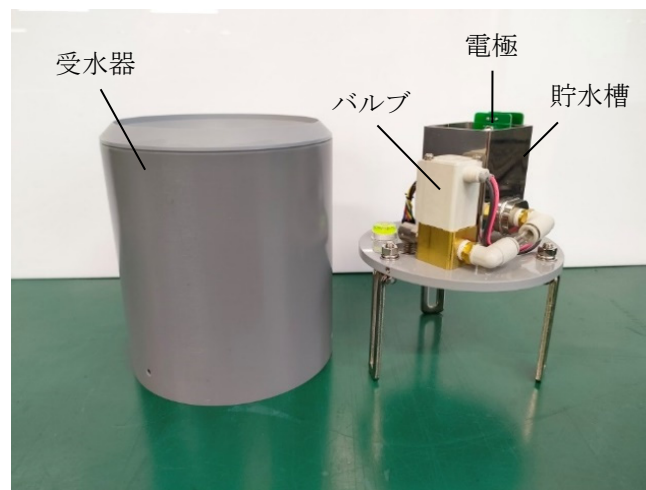


図 6. 開発した雨量計の試作品

3.4 試作雨量計の評価

開発した雨量計が気象庁の検定に合格する精度を有するか検証するため、試作品に水を注入して評価しました。このとき水の注入はあらゆる降雨強度における精度を評価するため、チューブポンプを用いて一定の割合で注水しました。注水量は受水器の口径と目標雨量の積から求めました。雨量に換算して 5 mm となる注水量における出力誤差を表 1 に、雨量換算で 50 mm における誤差を表 2 に示します。雨量計の検定において気象庁が定める計測精度は雨量 20 mm 未満で誤差 ± 0.5 mm、雨量 20 mm 以上で誤差 $\pm 3\%$ 以内ですが、どちらの雨量においてもあらゆる降雨強度で気象庁が定める計測精度を満たしています。図 7 および図 8 は注水時間ごとに雨量出力をプロットしたグラフですが、時間の経過とともに雨量の出力が 0.1 mm ずつ一定の割合で増加し、注入量まで達したところで出力が一定になっていることがわかります。転倒ます型雨量計が精度よく計測できなかった 300 mm/h を超える強い降雨強度において、開発した雨量計は気象庁の検定を満足することが確認できました。

表 1. 雨量 5 mm に対する計測誤差

降雨強度	入力雨量 [mm]	出力 [mm]	誤差 [mm]
5 mm/h	5.01	5.0	-0.01
22 mm/h	5.03	5.0	-0.03
50 mm/h	5.03	5.1	0.07

表 2. 雨量 50 mm に対する計測誤差

降雨強度	入力雨量 [mm]	出力 [mm]	誤差 [%]
22 mm/h	50.04	50.1	0.1%
72 mm/h	50.01	50.3	0.6%
164 mm/h	50.07	50.4	0.7%
312 mm/h	50.07	50.6	1.0%

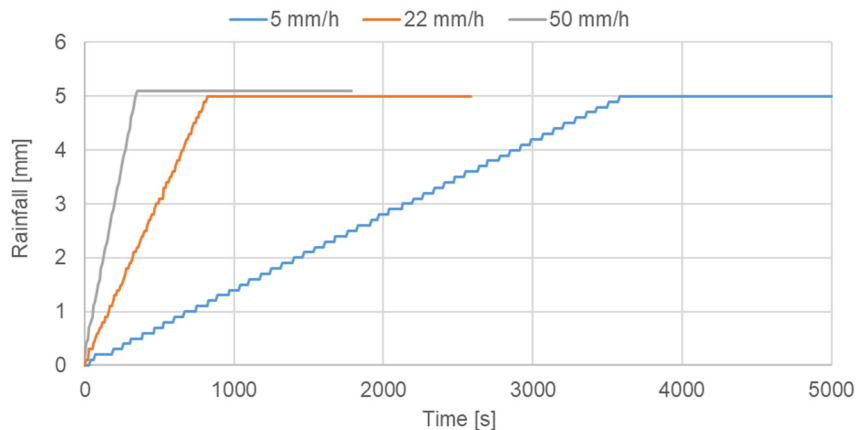


図 7. 雨量 5 mm のときの雨量計の出力

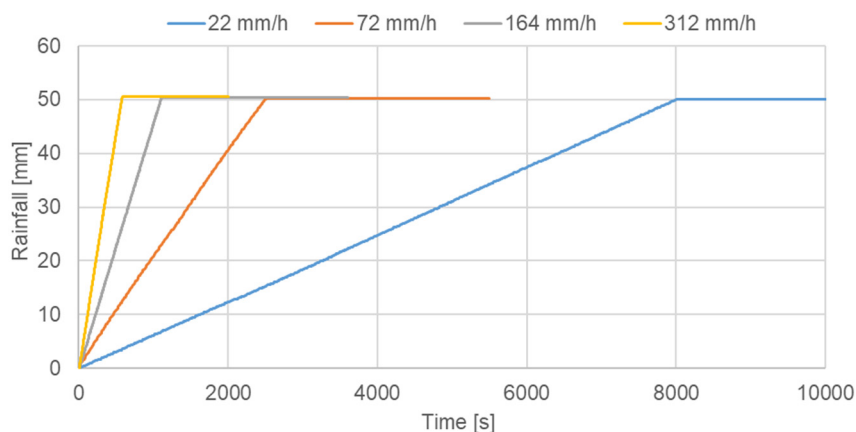


図 8. 雨量 50 mm のときの雨量計の出力

4. 雨量計の応用例

図 9 に雨量計を斜面崩壊予測システムに応用した例を示します。斜面崩壊は斜面表層の土砂や岩石が地中のある面を境にして滑り落ちる現象です。大雨による斜面崩壊ではそれに先だって地下水の増加や斜面の変形などが生じるため、これらの先駆現象をあらかじめ設置した計器により観測することによって崩壊発生の予測が可能であるといわれています。¹⁾そこで当該システムは斜面の変形をとらえるため加速度計を使用し、得られた加速度データを二階積分することにより変位を算出します。このほかにレーザー変位計による計測が考えられますが、その場合には変位を計測したい点のほかに崩壊によって位置が動かない不動点が必要です。斜面が崩壊する範囲をあらかじめ予想することは難しく、加速度計を使用した計測が適していると考えられます。

加速度データを二階積分すると、データの誤差の蓄積が変位算出に大きな影響を与えるため、精度の良い加速度計を使用しなければなりません。そこで当社の高精度 MEMS 加速度計 JA-70SA (図 10) を使用しました。JA-70SA は 3 軸の加速度を低ノイズで計測できる加速度計で、不動点と計測対象との距離が離れている橋梁の変位計測に使用した事例が報告されています。¹²⁾一般的に変位を算出するためにはサンプリング周波数を上げなければならず、得られたデータを処理する計算機は電力を消費します。昼間のシステムの電力は太陽光パネルから得ることができますが、山中は日照時間が限られており電力を有効に使用する電力マネジメントが必要です。したがって災害が危惧される気象状況のときは確実に起動し、かつ降雨のないときはシステムの電源を落とす構成が望まれます。そこでシステム近傍に雨量計を設置して、雨量計が降雨を観測したときにトリガ信号を発信する構成としました。具体的にはゲートウェイが 1 分ごとにデータベース側から雨量データを取得し、その間の積算雨量が閾値をこえたときにパソコンをスリープ状態から復帰させます。

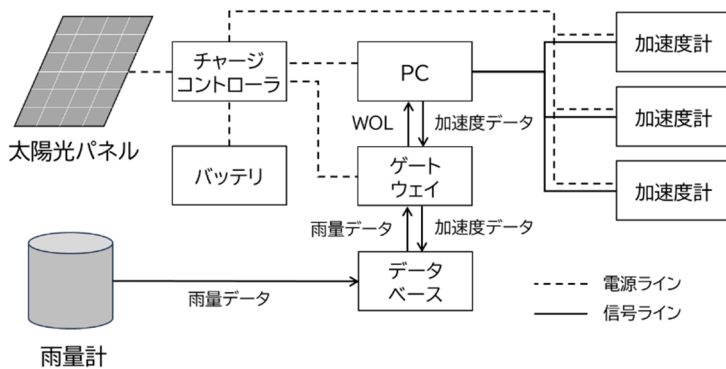


図 9. 斜面崩壊予測システムの構成

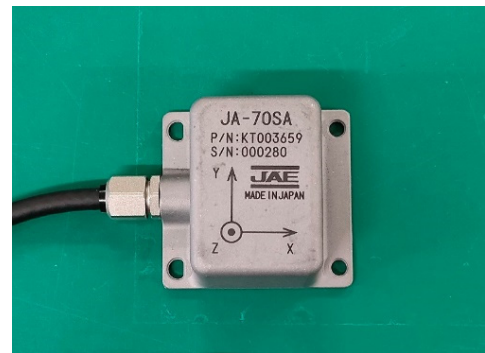


図 10. MEMS 加速度計 JA-70SA

5. まとめと今後の展望

閉ループ制御を応用した独自の検出方式を考案し、低コストかつ豪雨で正確に計測できる貯水型の雨量計を実現しました。開発した雨量計は、現在最も普及している転倒ます型雨量計の課題であった強い降雨強度の雨量計測に対し、降雨強度が 300 mm/h 程度であっても気象庁が定める検定において要求される計測出力の精度を満足することが確認できました。

さらに、開発した雨量計を適用した事例として斜面崩壊予測システムにおける電力マネジメントを紹介しました。本システムは、雨量計が降雨を観測した場合のみシステムを起動することによって省電力化を図っています。本システムは長野県茅野市の山中に設置しデータを取得中です。雨量に対する斜面の変動量の実証データが蓄積されることで、今後は被害予測を踏まえた運用などに応用可能であると考えています。

【謝辞】

本開発において雨量計の評価ならびに斜面崩壊予測システムへの応用に多大なご協力をいただきました公立諏訪東京理科大学の菊地輝行准教授に深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 中小企業庁, “防災・減災対策”, 中小企業白書 2019
- 2) 野村康裕, 中谷洋明, “土砂災害警戒避難のための線状降水帯等の自動抽出システム”, 建設機械施工, Vol.71, No.10 (2019).
- 3) Lucie Almasiova, “A Relationship Between Radar Reflectivity and Rainfalls Recorded by The Ground Gauges”, International Conference on Military Technologies (ICMT) 2015, pp.285-288.
- 4) 中北英一, 高尾充政, 新保友啓, 山口弘誠, 中川勝広, “フェーズドアレイレーダを用いたゲリラ豪雨発達初期の積乱雲詳細解析”, 京都大学防災研究所年報, No.62 B (2019).
- 5) 及川康, 片田敏孝, “避難勧告等の見逃し・空振りが住民対応行動の意思決定に及ぼす影響”, 災害情報, No.14 (2016).
- 6) J.S.A.N.W. Premachandra, P.P.N.V. Kumara, “A novel approach for weather prediction for agriculture in Sri Lanka using Machine Learning techniques”, Smart Computing and Systems Engineering, No.SE-08 (2021).
- 7) 気象技術支援センター, “気象測器の検定実施状況について”, http://www.jmbse.or.jp/jp/topics/2021/2106-07_1.pdf.
- 8) 気象システム技術協会, “転倒ます型雨量計の特性評価に関する報告書 (2020 年 6 月)” .
- 9) 矢崎敬三, “雨量計について”, 天気, 21(1), pp.13-28 (1974).
- 10) 日本航空電子工業株式会社, “JA-40GA シリーズ”, https://www.jae.com/Motion_Sensor_Control/Accelerometer/JA-40GA/
- 11) 防災科学技術研究所 自然災害情報室 防災基礎講座, “自然災害について学ぼう 15.斜面崩壊・地すべり”, https://dil.bosai.go.jp/workshop/01kouza_kiso/15houkai.html.
- 12) 大胡拓矢, 市川真太郎, 富岡昭浩, “加速度計による橋梁の変位計測”, 航空電子技報 No.42, pp.35-41 (2020).