

3Dプリンターを用いた低価格気象観測測器の開発と検証

Development and Verification of Low-cost Meteorological Observation Instruments Using 3D Printers

峠嘉哉・Temur KHUJANAZAROV・田中賢治

Yoshiya TOUGE, Temur KHUJANAZAROV and Kenji TANAKA

Synopsis

This research aims to develop a weather-measuring instrument with sufficiently high observation accuracy at a low cost, even if its durability is not high. The instrument body was constructed using a 3D printer, and inexpensive sensors and microcontrollers were used for the sensor and control unit. For the natural ventilation thermo-hygrometer, the radiation shield was constructed with a 3D printer, and the temperature/humidity and control components were developed cheaply. As a result, the temperature inside the enclosure was easily affected by solar radiation due to the thermal conductivity of the 3D printer filament. For the forced ventilation thermo-hygrometer, a forced ventilation tube was made of a fan and a PVC pipe. As a result, the temperature accuracy became higher, removing the influence of solar radiation sufficiently. The water storage rain gauge was constructed using a load cell sensor and could measure changes in rainfall during rainfall cases. However, its use is currently limited to short-term rainfall events. Therefore, a tipping bucket rain gauge is required to develop for future research.

キーワード: 気象観測, 3Dプリンター, 低価格観測, PUB

Keywords: meteorological observation, 3D printer, low cost measurement, PUB

1. 背景・研究目的

近年, 国内外で種々の気象災害の被害が生じている。豪雨被害であれば, 国内では2018年の平成30年7月豪雨(Tsuguti et al., 2019)や2019年の令和元年東日本台風(Takemi and Unuma, 2020)や2020年の令和2年7月豪雨(Hirockawa et al., 2020)のように毎年のように深刻な被害が報告されている。乾燥災害であれば, 近年の林野火災では世界の乾燥域を中心に深刻な被害が報告されており, 国内でも大規模事例が生じている(Touge et al. 2023a)。これらの災害に対する理解や今後の災害対策を探る上では, 気象観測に基づいた詳細な検討が必要である。

一般に気象観測の密度には地域差が大きく, 気象災害に向けて必要な密度や, 貧観測地域での気象観測については多くの議論がなされてきた。世界の多くの地域で観測密度は十分でなく, 観測網の充実

水文気象分野の大きな課題の一つといえる(Hrachowitz et al. 2013)。峠らは中央アジアの水循環解析を実施する中で, 降水量データの精度が解析精度に大きく影響していることを示唆した(峠ら 2015)。

近年では, 気候変動や人間活動の影響による自然災害の激甚化や急激な環境変化が懸念されている(Mori et al. 2021; Touge et al. 2023b)。過去から現在までの長期的な変化傾向として, 日本国内では長期的な気温上昇が広域に生じており(Yue and Hashino 2003a), 降水量の変化は地域による差が大きい(Yue and Hashino 2003b)。こうした検討は気象観測が実施されてきたからこそ可能であり, 気候変動が顕在化の中で観測記録の重要性は今後も高まると予想される。災害のトレンド分析や統計的ジャンプについての議論も広く実施されており(Shi and Touge 2023), 既に気候変動の影響は顕在化しているとの報告もなされており, 豪雨災害についてや(Kawase et al. 2020),

林野火災について等に研究事例がある (Abatzoglou and Williams 2016; Williams et al. 2020; Abram et al. 2021).

ここで、気象測器の品質は精度・耐久性・価格等で評価される。市販の測器の多くは精度・耐久性が重視されており、そのために価格は高額となりやすい。実際、外環境を計測しなければならない気象観測は、当然に雨量・風速・気温等に起因する様々な外力に耐えて継続的な観測をしなければならず、精度・耐久性能は重要である。しかし、観測精度を大きく下げずに、耐久性を観測目的・設置地点の環境条件にとって十分な基準まで落とすが、価格が極めて安価な測器を開発できれば、気象観測の利用の幅を大きく展開できるとも期待できる。例えば研究で気象観測を実施するような場合には、観測目的によって数週間や数カ月程度を耐久する測器で十分な場合も多い。むしろ、多地点観測を要するような研究目的の場合には (Cao et al. 2006)、価格の高額さが課題となる。また、故障・盗難等の危険性が高いような地域での観測では、高額な市販の測器を設置するより、安価で低耐久の測器を設置して高頻度で再設置する方法も有効と考えられる。このように、気象観測として観測精度に対して妥協をしにくいとはいえ、耐久性を利用の範囲・目的に基づいて下げることによって安価化できれば従来とは異なる形で気象観測を設計できると考えられる。

そこで本研究では、やや耐久性は劣るものの安価な気象観測器を開発することを最終的な目的と見据える。その上で今回は、(i)3Dプリンタや安価なマイコン・センサー等を用いて実際に気象観測器を開発すること、(ii)その観測精度を検証し利用可能性について議論することを研究目的とする。

2. 手法

今回は低価格測器の開発のために3Dプリンタや安価なマイコンやセンサーを用いて、高耐久性を求めるのではなく、精度を重視した開発と検証を行う。

気象測器は主にセンサー素子と筐体から構成され、一般にセンサー素子自体は安価である。そのため、特に筐体部分と内部構造を安価な電子機器や3Dプリンタで作成することで低価格化を実現し、精度検証と改良を継続的に実施する。

センサー素子は観測項目を電気信号に変換する電子機器である。一般に安価であり、近年では多種のセンサー素子が利用可能となっている。本研究で利用するセンサーは、温度・湿度・気圧・重量等であり、その価格は500円から2000円程度である。一方で制御部はデータロガー等に対応する部分である。市販の

測器は一般に高価であるが、本研究ではRaspberryPiやArduino等の安価なマイコンを使用した。これらは500円から3000円程で購入可能であり、汎用的であることから利用の幅が近年拡大している。多様なセンサー素子との接続が可能のため、単一のマイコンに多種のセンサー素子を接続・制御することも可能である。

筐体部の機能は、センサー素子による理想的な計測環境を実現する内部構造を構築することと、防水・防塵等によりセンサー部の耐久性を向上させることである。高機能な防水・防塵を3Dプリンタ等で実現することは容易でないため、安価な測器で高耐久性を実現することは困難である。そのため、本研究では特に観測精度を安価でも実現できるように設計する。3Dプリンタによる筐体の作成に必要なデータは、Fusion360を用いてCADにより設計した。

3. 測器の概要と検証

3.1 自然通風型温湿度計

3.1.1 測器の概要

自然通風型温湿度計は、放射シールド (筐体) によってセンサー素子に直射日光が当たらないようにしつつ、日射による内部の温度上昇が生じないように外気との大気交換を可能とするものである。大気交換をファン等に依らないものが自然通風型である。

筐体部である放射シールドは3Dプリンターで作成した [Fig. 1, Photo 1]。放射シールドの各層は個別に作成されている。最上層以外の層では、センサー素子用とアルミ丸棒用に計4つの穴が開いた構造になっている。各層の接続は、3Dプリンターで細長い円柱を作成することも試みたが、3Dプリンターは下部から積層するため細長い構造を構築すると測器ごとに施工精度がばらつくことが分かったため、アルミ丸棒を用いることとした。

センサー素子にはBME280やMCP9808を用いた。BME280では温度・湿度・気圧を計測可能であるが、温度の観測精度が1℃前後とやや低い。MCP9808は観測項目が温度のみであるが、温度の観測精度は0.25℃程度である。制御部にはRaspberryPiを用いており、電源には乾電池を用いた。

3.1.2 試験観測・精度検証

試験観測を2021年9月9～10日に仙台で実施した [Photo. 2]。センサー素子にはBME280とMCP9808の双方を用い、検証用の気象測器にWXT536を用いた。Fig. 2 (a,b)はそれぞれ気温、相対湿度の観測結果である。

温度観測の結果では、夜間の観測精度が高かったものの、日射量が増加すると温度を過大評価した。その原因は、日射量の影響を除去できておらず筐体内部の温度上昇を自然通風のみによって除去することができなかったためと考えられる。市販の測器ではプラスチック等を筐体中使用しているが、今回使用した3Dプリンタ用のフィラメントは熱伝導特性が異なり、温度上昇が大きいためと考えられた。相対湿度の観測精度は、夜間においても3~5%程度の差が見られ、気温の観測精度が落ちた日照時には過小評価となった。気温を過大評価していたため、飽和水蒸気圧も過大評価していたことで相対湿度を過小評価したものと考えられる。夜間の観測精度も低い。BME280の相対湿度の観測精度が3%程度であることからセンサー素子の観測精度が影響したと考えられる。今回は、MCP9808では湿度を観測できないためBME280を用いて相対湿度を観測したが、他のセ

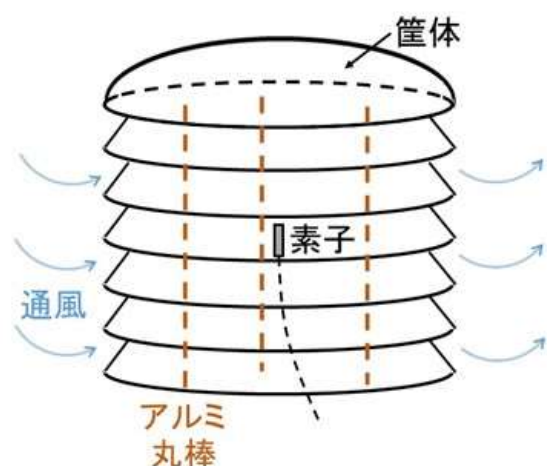


Fig. 1 Structure of radiation shield



Photo 1 3D-printed radiation shield

ンサー素子を用いた検証も必要である。

今後は筐体の構造を改良することで精度向上を目指しているが、3Dプリンタ用のフィラメントの熱伝導特性を変えることはできないため、並行して強制通風型の測器開発を進めた。

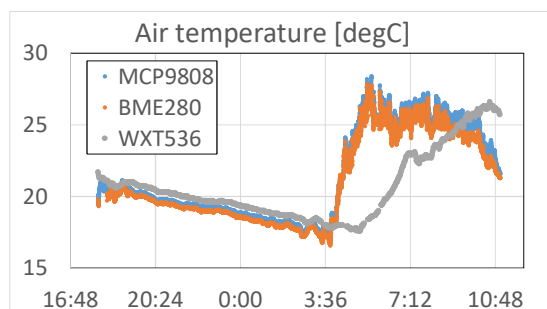
3.2 強制通風型温湿度計

3.2.1 測器の概要

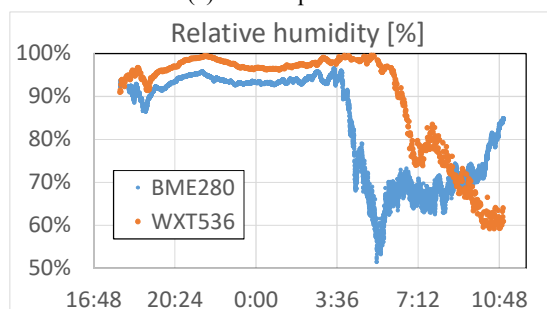
前節で3Dプリンタによって作成した自然通風型の測器では熱伝導特性の影響で日射量の影響を除去することが難しいことが分かった。放射シールドの



Photo 2 Test observation of air temperature and air humidity sensor with 3D-printed radiation shield. Left side is developed system and right side is WXT536 for validation.



(a) Air temperature



(b) Air relative humidity

Fig. 2 Validation of air temperature and humidity sensor with 3D-printed radiation shield.

構造を改良する方向性もあり得るが、本節では強制通風型温度計の開発に取り組んだ。強制通風筒は断熱性能の高い筒内にセンサー素子を置き、ファンによって通風することによって絶えず外気と筐体内部の環境を同等に維持した [Fig. 3, Photo 3]。通風筒のように細長い構造は3Dプリンタで積層して作成するのに不向きであることと、3Dプリンタ用のフィラメントより安価で強固であることから塩ビ管を通風筒に使用した。通風筒の上部には市販のファンを接続し、通風筒の外側はアルミホイルで断熱化した。強

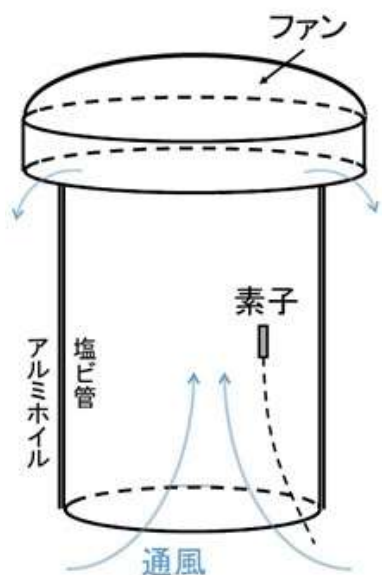


Fig. 3 Structure of Forced ventilation system

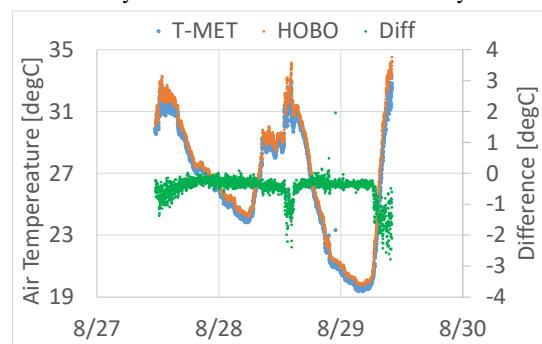


Photo 3 Forced ventilation system

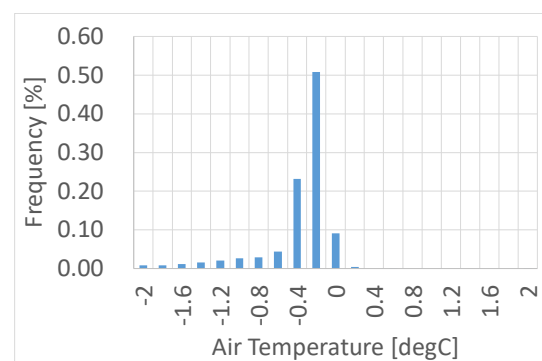
制通風型は、制御部・センサ素子に加えてファンの動作に電力を消費するため、自然通風型に比べて消費電力が大きい。通風筒の大きさを小さくすることによってファンを小規模化・省電力化することが可能であるが、通風筒を小さくすると外壁からの熱量を見逃できなくなり、通風筒内部の温湿度環境を外気と同等に維持することが困難になる。今回は消費



Photo 4 Test observation of air temperature and humidity sensor with forced ventilation system.



(a) Air temperature



(b) Difference in air temperature. The value observed by developed sensor minus the value observed by HOBO sensor.

Fig. 4 Validation of air temperature and humidity sensor with forced ventilation system.

電力よりも観測精度を実現することを目的としたため、通風筒の大きさを変えた検討は行わなかったが、消費電力を抑える必要がある観測の場合などでは検討が必要になると考えられる。今回は短期間の試験であったためポータブルバッテリーから給電した。長期観測では、太陽光パネルとの併用が必要と考えられる。

センサー素子にはMCP9808を用い、制御部にはRaspberryPiを用いた。前節ではセンサー素子にBME280も用いたが、今回は自然通風筒と強制通風筒の違いが明瞭になりやすい温度観測を重視し、その精度が高いセンサー素子のみを対象とした。

3.2.2 試験観測・精度検証

試験観測を2022年8月27～29日に京都府宇治市で実施した[Photo 4]。センサー素子にはMCP9808を用い、検証用の気象測器にはOnset社のHOBO測器を用いた。なお、HOBOの気温計は自然通風型である。Fig. 4 (a)は気温の観測結果、Fig. 4 (b)は温度差のヒストグラムである。

試験観測の結果、気温の観測精度は極めて高かった。3日間においてほぼ市販の気温計と同様の結果が観測されていた。Fig. 4 (a)中のT-METとは開発した測器であり、HOBO測器との差が緑線で示されている。図から分かるように、日射量が高い正午付近でHOBOの方が温度が高くなった。その原因は、市販の自然通風型測器でも日射量の影響を除去できていないためと考えられる。Fig. 4 (b)は温度差のヒストグラムであるが、多くの場合で温度差は0.5℃以内に収まっており、HOBOが気温を過大評価する影響が示されていた。そのため、安価に開発した強制通風型測器は市販の温度計と同様の精度を実現しており、特に日射量が強い時間帯では精度が高いことが示唆された。

3.3 貯水型雨量計

3.3.1 測器の概要

雨量計として今回は貯水型雨量計を開発した。貯水型雨量計は転倒ます型雨量計と比べて構造が単純であり、安価な測器で高精度を実現しやすいと考えたためである。

Fig. 5が貯水型雨量計の計測部と構造である[Photo 5]。センサー素子にはロードセルセンサーを使用しており、Photo 5のように上部と下部の台座をネジで固定している。上部の台座にかかる重量が増加した場合にセンサー部に生じるひずみを計測することで重量を測定する。筐体には3Dプリンタのフィラメントより更に安価な木材等の材料を使用している。

3.3.2 試験観測・精度検証

試験観測を2023年2月19日に宇治市で実施した。その結果がFig. 6である。検証用のデータにはAMeDAS京都観測所の観測値を用いた。その結果、AMeDAS観測所の結果と比べると過大評価となっていたが、その理由は空間的な位置の違いによるものと考えられる。貯水型雨量計は重量を計測するのみであるため、精度に影響する要因が少ないと考えら

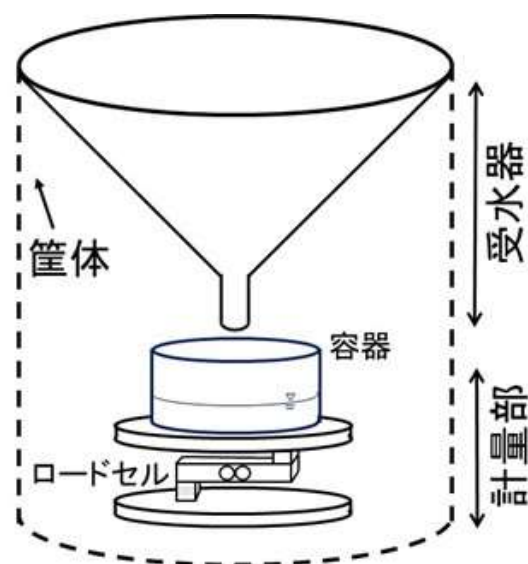


Fig. 5 Structure of water storage rain gauge

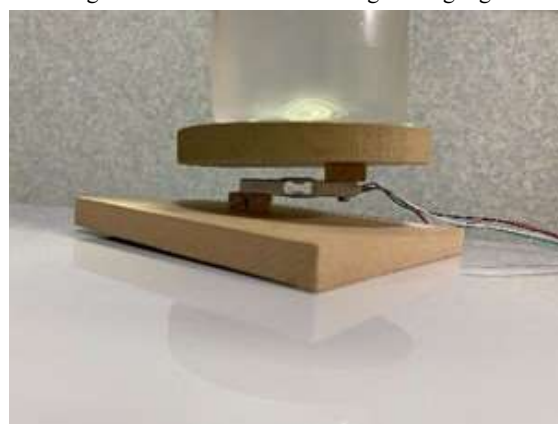


Photo 5 Internal structure of water storage rain gauge.

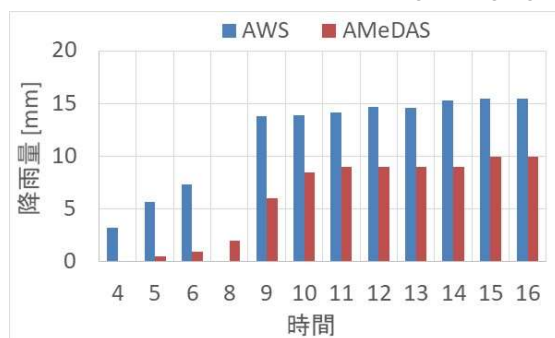


Fig. 6 Validation of rainfall observation. The AMeDAS station utilized was Kyoto around 10km far from observation point in Uji city.

れるためである。今後は精度検証の事例を増やす必要がある。

貯水型雨量計の課題は長期観測の実現である。雨量事例の度に排水することも可能であるが煩雑であるためである。煩雑さの欠点と高精度を得られやすい利点に基づき、実利用を考える必要がある。仮に転倒ます型雨量計を開発する場合には、まずに流入した水量による均衡を設計しないといけないため高精度の実現には緻密な設計が必要である上に、微小の劣化等の影響も受けやすいと考えられる。そのため、キャリブレーションを定期的実施するなどの対策が必要である。

4. 結論

本研究では、耐久性については市販の測器に比べれば劣るものの、低価格で十分に観測精度が高い気象測器を開発した。近年では低価格なセンサー素子が多様に開発されているため、開発に際しては測器の筐体部を3Dプリンターで構築し、センサー素子や制御部に安価なセンサーやマイコンを利用した。自然通風型温湿度計は、放射シールドを3Dプリンターで構築した。その結果、3Dプリンターのフィラメントの熱伝導特性が市販の放射シールドとは異なっており、筐体内部の温度は日射の影響を受けやすく、温度の観測精度が低かった。そのため、構造自体を変更する方向性もあったが、本研究では強制通風型温湿度計を試みた。強制通風筒をファンと塩ビ管で作成した結果、極めて高い観測精度を実現し、特に日中の日射量が高い時間帯においては日射の影響を市販の測器よりも除去できていたと考えられる。次に、貯水型雨量計をロードセルセンサーを用いて開発した。その結果、降雨事例の雨量変化を計測できた。今後は、強制通風型の消費電力を抑えることと、各測器の耐久性を向上させることなど、長期観測に向けた準備が必要である。

謝 辞

本研究は、京都大学防災研究所共同研究（令和3年度一般共同研究2021G-01）に加え、文部科学省気候変動予測先端研究プログラム領域課題4（JPMXD0722678534）と科学研究費補助金（20H02248、代表：峠嘉哉）の成果により実施された。ここに謝意を示す。

参考文献

峠嘉哉，田中賢治，小尻利治，浜口俊雄：集水域の灌

漑地拡大の影響を考慮した水・熱収支解析によるアラビヤ海の経年的縮小の再現，環境科学会誌，26-2，180-190，2013。

Abatzoglou, J.T., Williams, A.P. (2016): Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 113, pp. 11770–11775.

Abram, N.J., Henley, B.J., Sen Gupta, A., Lippmann, T.J.R., Clarke, H., Dowdy, A.J., Sharples, J.J., Nolan, R.H., Zhang, T., Wooster, M.J., Wurtzel, J.B., Meissner, K.J., Pitman, A.J., Ukkola, A.M., Murphy, B.P., Tapper, N.J., Boer, M.M. (2021): Connections of climate change and variability to large and extreme forest fires in southeast Australia, *Commun. Earth Environ.* Vol. 2, pp.8.

Cao, W., Bowden, W. B., Davie, T., & Fenemor, A. (2006): Multivariable and multisite calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrological Processes: An International Journal*, Vol. 20, No. 5, pp. 1057-1073.

Hirockawa, Y., Kato, T., Araki, K., Mashiko, W. (2020): Characteristics of an extreme rainfall event in Kyushu District, southwestern Japan in early July 2020. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 16, pp. 265–270.

Hrachowitz M., Savenije H.H.G., Blöschl G., McDonnell J.J., Sivapalan M., Pomeroy J.W., Arheimer B., Blume T., Clark M.P., Ehret U., Fenicia F., Freer J.E., Gelfan A., Gupta H.V., Hughes D.A., Hut R.W., Montanari A., Pande S., Tetzlaff D., Troch P.A., Uhlenbrook S., Wagener T., Winsemius H.C., Woods R.A., Zehe E. & Cudennec C. (2013) A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 58, No. 6, pp. 1198-1255.

Kawase, H., Imada, Y., Tsuguti, H., Nakaegawa, T., Seino, N., Murata, A., Takayabu, I. (2020): The heavy rain event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming. *Bulletin of the American Meteorological Society* 101, S109–S114.

Mori, N., Takemi, T., Tachikawa, Y., Tatano, H., Shimura, T., Tanaka, T., Fujimi, T., Osakada, Y., Webb, A., Nakakita, E. (2021): Recent nationwide climate change impact assessments of natural hazards in Japan and East Asia. *Weather and Climate Extremes*, Vol. 32, 100309.

Shi, K., Touge, Y. (2023): Identifying the shift in global wildfire weather conditions over the past four decades: an analysis based on change-points and long-term trends, *Geoscience Letters*, Vol. 10, pp. 1-16.

Takemi, T., Unuma, T. (2020): Environmental factors for

- the development of heavy rainfall in the eastern part of Japan during Typhoon Hagibis (2019). *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 16, pp. 30–36.
- Touge, Y., Hasegawa, M., Minegishi, M., Kawagoe, S., Kazama, S. (2023): Multitemporal UAV surveys of geomorphological changes caused by postfire heavy rain in Kamaishi city, northeast Japan. *Catena*, Vol. 220, 106702.
- Touge, Y., Shi, K., Nishino, T., Sun, C., Sekizawa, A. (2024): Spatial-temporal characteristics of more than 50,000 wildfires in Japan from 1995 to 2020. *Fire Safety Journal*, Vol. 142, 104025.
- Tsuguti, H., Seino, N., Kawase, H., Imada, Y., Nakaegawa, T., Takayabu, I. (2019): Meteorological overview and mesoscale characteristics of the Heavy Rain Event of July 2018 in Japan. *Landslides*, Vol. 16, pp. 363–371.
- Williams, A.P., Cook, E.R., Smerdon, J.E., Cook, B.I., Abatzoglou, J.T., Bolles, K., Baek, S.H., Badger, A.M., Livneh, B. (2020): Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought, *Science*, Vol. 368, pp. 314–318.
- Yue, S., Hashino, M. (2003a): Temperature trends in Japan: 1900–1996, *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 75, pp. 15–27.
- Yue, S., Hashino, M. (2003b): Long term trends of annual and monthly precipitation in Japan, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 39, pp. 587–596.
- (論文受理日 : 2023年8月31日)