

3Dプリンタを用いた100ドルAWSの開発

峠嘉哉¹・Temur Khujanazarov¹・田中賢治¹

¹ 京都大学 防災研究所

1. 研究目的

世界各地で種々の気象災害の被害が報告され(Heidarzadeh et al., 2021; Touge et al. 2023), 気候変動の影響が顕在化しているとされる地域もある(Kawase et al. 2020). 気象観測はこうした気象災害へ向けて重要な科学的基礎情報である. しかし, 世界の多くの地域で観測密度は十分でなく, 観測網の充実は水文気象分野の大きな課題の一つである(Hrachowitz et al. 2013). 気象測器の質は, 精度・耐久性・価格等で判断される. ここで市販の測器の多くでは精度・耐久性が重視されており, そのために価格が高額となりやすい. しかし, 観測精度を大きく下げず, 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期待できる. 市販の測器は現業の気象観測に匹敵した長期観測が実現できるように高耐久で設計することが多いが, 例えば研究利用の場合には, 観測目的によって半年間程度でも十分な場合も多い. 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場合も多い. このように, 観測精度の妥協はしにくいとはいえ, 耐久性を利用の範囲・目的に基づいて下げることで安価化できる価値は高いと考えられる.

そこで本研究では, 3Dプリンタや安価なマイコン・センサー等を用いて安価な気象観測器を開発することを目的とする. 材料費の総額を100ドル前後とすることで, 低観測密度領域での気象観測を空間的に補完することや, 研究利用における多地点観測の実現を期待できる.

2. 手法

気象測器は主にセンサー素子・内部構造・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. 本研究ではこれらの構成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すると共に, 精度検証と改良を継続的に実施する.

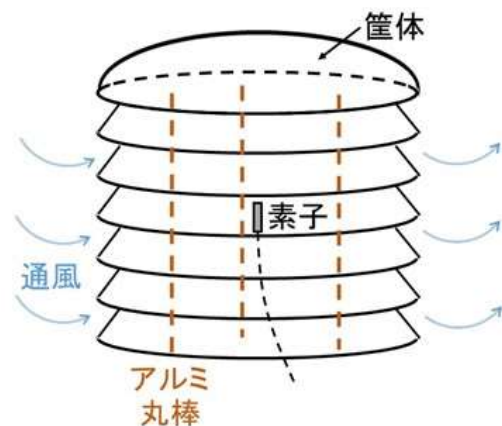
センサー素子は観測対象を電気信号に変換する電子機器である. 一般に安価であり, 近年では多種のセンサー素子が利用可能となっている. 本研究で利用するセンサーは, 温度・湿度・気圧・重量等であり, その価格は500円から2000円程度である.

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,



(a) 放射シールド



(b) 開発した構造

図1 自然通風型温湿度計の放射シールド

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(図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

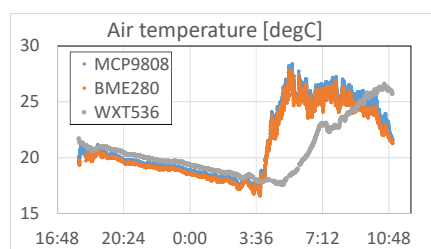
試験観測を2021年9月9～10日に仙台で実施した(図2)。センサー素子にはBME280とMCP9808の双方を用い、検証用の気象測器にWXT536を用いた。図2(b,c)はそれぞれ気温、相対湿度の観測結果である。

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を使用しているが、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が、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。

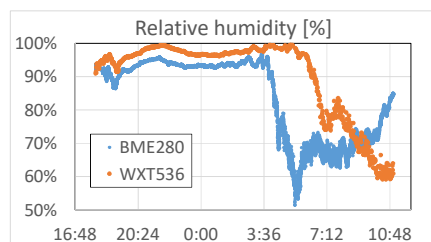
今後は筐体の構造を改良することで精度向上を目指しているが、3Dプリンタ用のフィラメントの熱伝導特性を変えることはできないため、並行して強制通風型の測器開発を進めた。



(a) 試験観測の様子



(b) 気温



(c) 相対湿度

図2 自然通風型温湿度計の試験観測

3. 2 強制通風型温湿度計

3. 2. 1 測器の概要

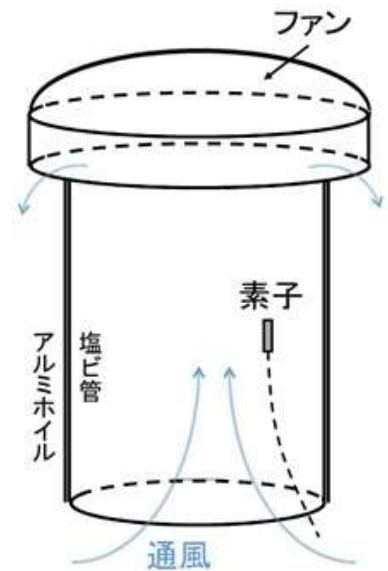
前節までの検討で、自然通風型の測器では安価に日射量の影響を除去しにくいことが分かったため、本節では強制通風型温度計の開発に取り組んだ。

図3が開発した測器である。強制通風型の温湿度計には通風筒が必要であるが、通風筒のように細長い構造は3Dプリンターで積層する際に誤差が生じやすいことと、フィラメントは単位重量当たりの価格が安価ではないため、通風筒に塩ビ管を用いることで低価格化、施工精度の向上を実現した。通風筒の外側にはアルミホイルを巻くことで断熱を図った、強制通風に用いるファンには市販のトイレ用ファンを用いた。

センサー素子には、前節と同様にMCP9808を用いた。BME280を用いることもできたが、強制通風の効果が最も高いのは温度観測であると考えられたことから、相対湿度の観測は今回実施しなかった。制御部にはRaspberryPiを用いた。強制通風型の場合は電力消費が大きいため、今回はポータブルバッテリーから給電した。長期観測では、太陽光パネルとバッテリーとの併用が必要と考えられる。



(a) 放射シールド

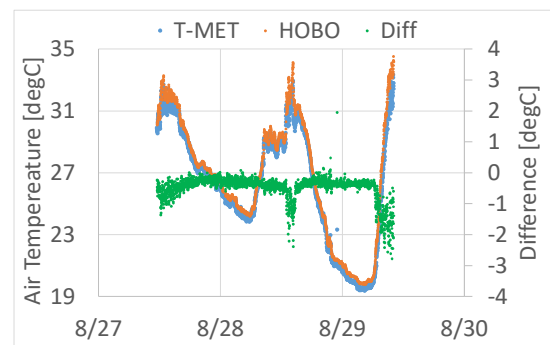


(b) 開発した構造

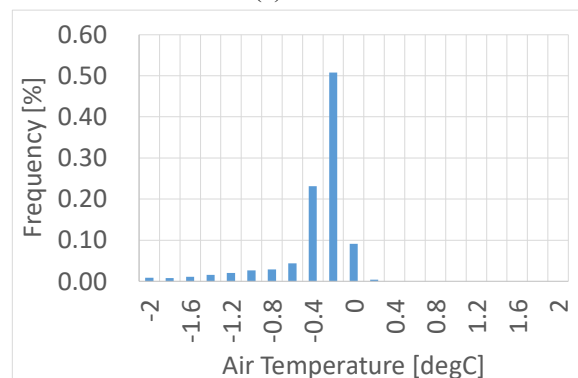
図3 自然通風型温湿度計の放射シールド



(a) 試験観測の様子



(b) 気温



(c) 気温差のヒストグラム

図4 自然通風型温湿度計の試験観測

3. 2. 2 試験観測・精度検証

試験観測を2022年8月27～29日に宇治市で実施した(図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。図4(a)は設置イメージであり、図4(b)は気温の観測結果、図4(c)は温度差のヒストグラムである。

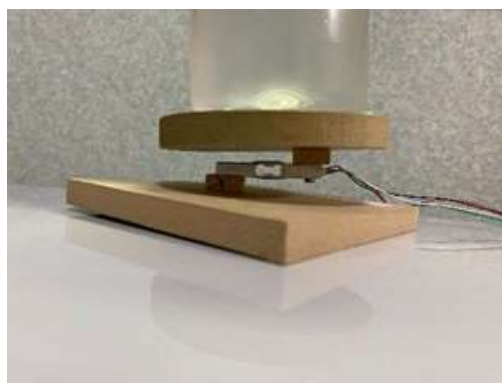
試験観測の結果、気温の観測精度は極めて高かった。3日間においてほぼ市販の気温計と同様の結果が観測されていた。図4(b)中のT-METは開発した測器であり、HOBO測器との差が緑線で示されている。図から分かるように、日射量が高い正午付近でHOBOの方が温度が高くなった。その原因は、市販の自然通風型測器でも日射量の影響を除去できていないためと考えられる。図4(c)は温度差のヒストグラムであるが、多くの場合で温度差は0.5℃以内に収まっており、HOBOが気温を過大評価する影響が示されていた。そのため、安価に開発した強制通風型測器は市販の温度計と同様の精度を実現しており、特に日射量が高い時間帯では精度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

図5が貯水型雨量計の計測部と構造である。センサー素子にはロードセルセンサーを使用しており、図5(a)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。

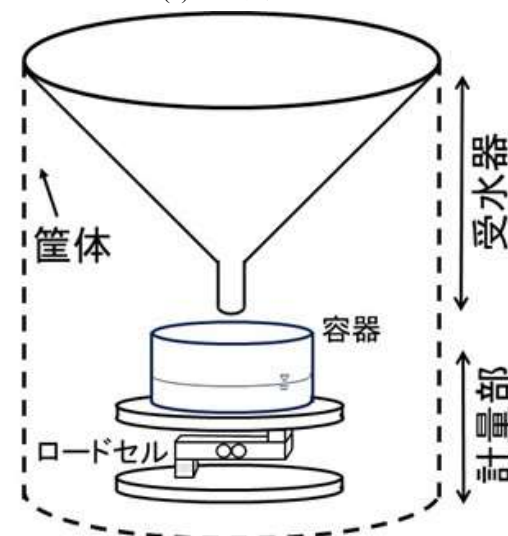


(a) 計測部の写真

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。その結果が図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。



(b) 開発した構造

図5 貯水型雨量計

4. まとめ

本研究では、安価な気象観測の実現に向けて、3Dプリンタ、安価なマイコン、センサー素子、材料を用いた気象測器の開発を行った。特に強制通風型温湿度計は高精度が得られており、貯水型雨量計の精度も悪くないと考えられることから、各測器の欠点・利点を踏まえた実利用への検討ができる段階にある。今後は、精度検証の事例を増やす必要があ

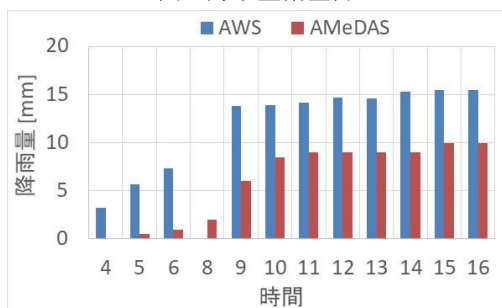


図6 雨量観測結果

ることと、太陽光パネル等を用いて長期的に給電する仕組みを開発し、長期観測に向けた準備を進めている。

5. 研究成果

峠嘉哉, Temur Khujanazarov, 田中賢治 (2023): 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. 防災研究所研究発表講演会, 21st Feb. 2023, Uji.

6. 参考文献

Heidarzadeh, M., Iwamoto, T., Takagawa, T., Takagi, H., 2021. Field surveys and numerical modeling of the August 2016 Typhoon Lionrock along the northeastern coast of Japan: the first typhoon making landfall in Tohoku region. *Natural Hazards* 105. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04112-7>.

Touge Y., Hasegawa M., Minegishi M., Kawagoe S., Kazama S.: Multitemporal UAV surveys of geomorphological changes caused by postfire heavy rain in Kamaishi city, northeast Japan. *Catena*, 220, 106702, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106702>

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. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0173.1>

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*, 58:6, 1198-1255, DOI: 10.1080/02626667.2013.803183

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*, 20(5), 1057-1073.