

ペットボトル簡易雨量計の高精度化に関する研究（2）

－ 装置内蒸発の影響 －

大宮奈美・森本真紀
岐阜大学教育学部

Study of improving precision of simple rain gauges that are made of plastic beverage bottles (2) - Effect of internal evaporation -

Nami Oomiya and Maki Morimoto
Faculty of Education, Gifu University

要約

本研究では、山田・森本 (2017)で観測精度を確認した自作のペットボトル簡易雨量計について、観測中の雨量計内部からの水の蒸発量と蒸発に伴う同位体比の変化を調べた。蒸発に伴う水の減少は微量であり観測降水量にほとんど影響を及ぼさないことが示された。降水の水素・酸素同位体比の変化については、1週間で8 mm 以下のような比較的少ない降水の際に若干の同位体濃縮が起こり、詳細な同位体変化を調査する際には結果の取り扱いに注意を払う必要が示された。

1. はじめに

小中学校の理科（地学分野）において気象は重要な分野の一つであり、平成29年中学校学習指導要領解説 理科編では「身近な気象の観察、実験などを行い、その観測記録や資料を基に、気象要素と天気の変化の関心に着目しながら、天気の変化や日本の天気の特徴を、大気中の水の状態変化や大気の動きと関連付けて理解させるとともに、それらの観察、実験などに関する技能を身に付けさせ、思考力、判断力、表現力等を育成することが主なねらいである。」と書かれている。しかしながら、従来、学校に設置されていた気象観測の百葉箱は機器の老朽化と更新予算の不足などにより撤去が進み、現在気象の連続観測を行っている学校は少ない（山口, 2006）。

市販の機器を用いる場合、気温観測と比較して降水観測の測器（雨量計）は大型で高価である。そのため自作することができて安価で簡易な雨量計として、漏斗と使用済みペットボトルを用いた装置が提案され、降水に関する研究や教育教材として用いられている（牛山・松山, 1995; 棚橋, 2002; 四方, 2005 他）。ペットボトル内の試料水の蒸発防止策として、ピンポン球、オイルなどの方法が用いられてきた（Murray, 1972; 若本・山本, 2004; 奈尾, 2013 ほか）。山田・森本 (2017)においては蒸発防止策の有無による蒸発量の違いを調べ、ピンポン玉による蒸発防止策を施した雨量計では、降水量への蒸発の影響は無視できることを示した。

雨の挙動を調べる指標として降水量以外に安定同位体が用いられている。主に、水素では ^1H と ^2H の存在比（水素同位体比(δD))が、酸素では ^{16}O と ^{18}O の存在比（酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$))が用いられ、さらにはd-excessあるいはd値($d = \delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$)も使われている。これらの指標は、水素や酸素の質量数の違いによって、水の蒸発・凝結などの状態変化の際に挙動が異なること、また値の異なる水が混合することによって変化する。よって同位体は、雨量や高度や緯度などとの関係、雨をもたらす水蒸気の起源、雲粒・雨粒の雲中での挙動など、降水に関する様々な研究に用いられてきた（Craig, 1961; Dansgaard, 1964; 檜山ほか, 2008; 田上・一柳, 2016 ほか）。

山田(2017)では、ペットボトル雨量計を用い、夏から冬にかけての濃尾平野の降水量と同位体比を1週間

ごとに観測し、平野内の南北差や季節変化を調べた。その中で、降水量が約 5 mm と少なかった 2016 年 10 月 31 日からの 1 週間の d-excess 値は、その前後の期間と比べると 10 %以上低い値を示していた。この週の値が特異であったことから、もしこの値が雨の挙動に因るものでなければ、降水量が少ない場合に雨量計の内部で蒸発など何らかの原因によって同位体比に大きな変化が起こった可能性を指摘した。ペットボトル雨量計とは種類の異なる雨量計と異なる蒸発防止策（シリコンオイル法）では、雨量計内の水の蒸発（1日当たり約4%の蒸発損失）と若干の同位体濃縮について示された（若本・山中, 2004）。

そこで本研究では、ペットボトル雨量計内に集められた降水が、降水を回収するまでの 1 週間の観測期間中にどの程度蒸発するのか、また、降水量の多少によって蒸発量に違いはあるのかを観測した。さらに、観測期間前後の水素・酸素同位体比の変化も調べ、この雨量計を使用する際の注意点について考察した。

2. 研究方法

(1) ペットボトル雨量計

本研究では山田・森本(2017)と同型の雨量計を作成した。棚橋(2002)の結果より口径 18 cm の漏斗を用い、2 L ペットボトルの口に漏斗を差し込み、油粘土で取り付けた。山田・森本(2017)より、漏斗の口をピンポン玉で塞ぐ蒸発防止策の有用性が示されたため、本研究でも同様の蒸発防止策を施した。この雨量計で観測できる最大降水量は、ボトルの満水時で 84.1 mm（水量は 2140 mL）である。

強風による雨量計の転倒を防止する対策として、山田・森本(2017)では木製すのこコンクリートブロックを用いており強度は充分であったが、大きさと重さの点で複数の観測地点への運搬に手間を要した。そこで、転倒防止策の軽量化を検討し、籠状のバケツと木材、畑用の杭を使用した雨量計固定装置を作成した（図 1）。この装置により、2017 年 10 月 22～23 日に東海・関東地方に上陸した台風 21 号の接近時でも（岐阜气象台における最大瞬間風速：23.7 m(10 月 23 日 8:10))、連続観測を行っている全 5 地点で装置が倒れたり飛ばされることはなく観測を継続することができた。



図 1：地面に固定された口径 18cm 漏斗付きペットボトル雨量計

(2) 雨量計内の水の蒸発量観測

(1)のペットボトル雨量計について、回収した降水が 1 回の観測期間中（1 週間）に雨量計内部で蒸発して装置外に拡散し、回収量が減少するのかどうか、また減少に伴って回収した降水の同位体に変化するのかどうかについて調査した。ペットボトル雨量計に重さを量った水道水を入れて屋外に設置し、一定期間後の変化を調べた。

降水量の多少に因る蒸発量の違いを調べる為に、100 ～ 2000 mL の範囲の異なる量の水道水を入れた雨量計を用意し、岐阜大学教育学部棟北側の庭に設置した。降雨による重量増加を防ぐために、晴天日を選んで、実際の観測期間と同じ 7 日間屋外に放置した。テストは 2 回実施した。いずれの回も比較実験として、屋外に設置した雨量計と同じ水道水を満水にして蓋で密閉したペットボトルを、室内の直射日光のあたらない場所に同じ期間保管した。雨量計と室内のペットボトルを一週間後に回収し、電子天秤(Chyo PD1-1600W、測定精度 ± 0.1 g)によって重量を測定した。この値からペットボトル本体の重量を引き、テスト前後の重量変化を求めた。

(3) 水素・酸素同位体測定

(2)の蒸発テストについて、7 日間放置した後の雨量計内の水と、比較対象である室内放置の水について同

位体比が異なっているかどうかを調べた。水素・酸素同位体比は、総合地球環境学研究所において分析した。分析には PICARRO 社の水同位体アナライザー (L2120-i, L2130-i) を用い、波長スキャンキャビティリングダウン分光法により測定された。同位体測定の前処理として、試料水中のゴミ等の懸濁物を 0.2 μm フィルターを用いてろ過した。試料水 1 mL を測定用バイアルに入れ、セプタムをつけた蓋をしてオートサンプラーにセットした。測定は 1 試料につき 6 回行い、結果には最後の 3 回の値を平均したものを使用した。標準試料は 3 種類の作業標準試料((1) δD:-97.3 ‰, δ¹⁸O:-13.39 ‰; (2) δD:-51.6 ‰, δ¹⁸O:- 7.94 ‰; (3) δD:-9.2 ‰, δ¹⁸O:- 2.69 ‰) を使用し、結果は SMOW (標準平均海水) からの千分率偏差である δ 値として示す。測定精度は水素同位体比(δD)で±0.3 ‰、酸素同位体比(δ¹⁸O)で±0.1 ‰である。

3. 結果

(1) テスト期間①：2017年8月28日～2017年9月5日

約 200 mL、約 1000 mL、約 2000 mL の水道水を入れた雨量計をそれぞれ 2 本ずつ用意し、連続した 7 日間設置した。テスト期間中の気象状況 (気温、湿度、風向風速、天気) を図 2 に示す。気象データは、岐阜大学から南南東へ約 8 km に位置する、気象庁岐阜地方気象台のアメダスデータを用いた。設置期間中の日平均気温は、2 日目の 8 月 29 日の 27.5 °C 以降低下し、9 月 4 日は 24.2 °C であった。日平均湿度は、8 月 29 日から 9 月 1 日にかけて約 20 % 低下し、曇りの日の湿度が高く、晴れの日の湿度が低かった。さらに、湿度が高い日には南寄りの風が、低い日には北寄りの風が吹き、期間中の風力は 2~3 と安定していた。

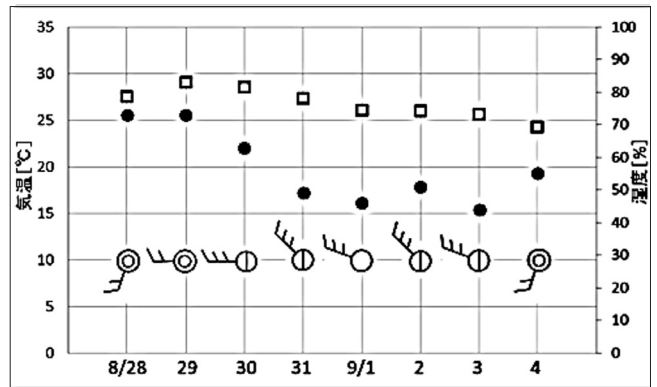


図 2：2017年8月28日～2017年9月4日の
気象状況：気温、湿度、風向風速、天気
□は気温を、●は湿度を示す。

テスト前後の水の重量と水素・酸素同位体比を表 1 に示す。200 mL の雨量計では 1.0 g と 1.5 g 減少し、1000 mL では、1 つは 1.0 g 減少し、もう一方は 2.9 g 増加した。増加した雨量計には、外部から何らかの水の侵入があったと考えられるので、考察には使用しない。2000 mL の雨量計ではそれぞれ 0.4 g、1.1 g 減少していた。比較対象の室内保管のペットボトル(2000 mL)では、1 つは水量の変化がなく、もう一方は 0.3 g の水量が減少した。雨量計の水量に関係なく、変化量は -1.0 g 前後と変わらなかった。水量の減少のほとんどは蒸発に因ると考えられる。この蒸発量をテスト前の水量で割った蒸発率は、0.02~0.74 % の間で水量が少ない雨量計ほど大きい。蒸発量を降水量に換算すると、200 mL(降水量換算で 8.0 mm)の水量の 1 試料では 0.1 mm の蒸発が起こっていたが、その他の試料では 0.05mm 未満であった。

表 1：蒸発テスト① 結果：水の重量と水素・酸素同位体比 (2017年8月28日～2017年9月5日)

水量	テスト前		テスト後						
	重量[g]	換算雨量 [mm]	変化量[g]	蒸発率[%]	換算蒸発量 [mm]	δ ¹⁸ O[‰]	δ ¹⁸ O平均 [‰]	δD[‰]	δD平均 [‰]
200 mL	203.1	8.0	-1.5	0.74	0.1	-7.8	-7.8	-48.8	-48.8
	203.5	8.0	-1.0	0.49	0.0	-7.8		-48.7	
1000 mL	1087.3	42.7	-1.0	0.09	0.0	-7.9	-7.9	-49.1	-49.1
	1088.9	42.8	+2.9	-0.27	-0.1	-7.9		-49.0	
2000 mL	2118.8	83.3	-0.4	0.02	0.0	-8.0	-8.0	-49.1	-49.1
	2110.9	83.0	-1.1	0.05	0.0	-7.9		-49.0	
室内保管 (比較対象)	2066.4	81.2	0.0	0.00	0.0	-8.0	-8.0	-49.2	-49.3
	2066.4	81.2	-0.3	0.01	0.0	-8.0		-49.3	

水素・酸素同位体比は雨量計の水量別に平均を取り、 $\delta^{18}\text{O}$ と δD の値はそれぞれ、200 mL では-7.8 ‰と-48.8 ‰、1000 mL では-7.9 ‰と-49.1 ‰、2000 mL では-8.0 ‰と-49.1 ‰であった。比較対象の室内保存のペットボトルでは、 $\delta^{18}\text{O}$ が-8.0 ‰、 δD が-49.3 ‰であった。

(2) テスト期間②：2017年9月14日～2017年10月11日

約 100 mL、約 300 mL、約 2000 mL の水道水を入れた雨量計をそれぞれ 2 本ずつ用意し、不連続ではあるが期間中の 7 日間屋外に設置した。テスト期間中の気象状況（気温、湿度、風向風速、天気）を図 3 に示す。設置期間中の平均気温は 23～25 °C と概ね一定であったが、9 月 29 日は 20 °C と低かった。平均湿度は 50～70 ‰の間で変化がみられた。風向は西北西の日が一番多く、南からの風は 9 月 26 日のみであった。期間中の風力は 2～3 と安定していた。

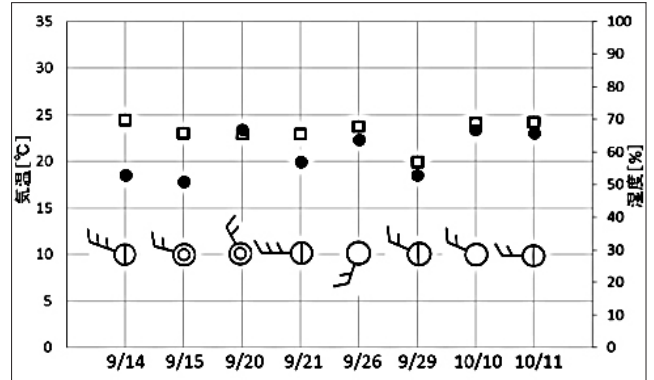


図 3：2017年9月14日～2017年10月11日の気象状況：気温、湿度、風向風速、天気
□は気温を、●は湿度を示す。

テスト前後の、水の重量と同位体比を表 2 に示す。100 mL の雨量計では 0.5 g と 1.1 g 減少し、300 mL では 2 本とも 1.2 g、2000 mL では 1.8 g と 2.0 g 減少していた。比較対象の室内保管のペットボトル(2000 mL)では、水量の変化はなかった。減少量を蒸発量とみなし、蒸発量をテスト前の水量で割って蒸発率を求めると、全て 1 ‰以下ではあるが、水量が少ない雨量計ほど蒸発率は大きい。蒸発量を降水量に換算すると、2000 mL(降水量換算でそれぞれ 81.3 mm、81.9 mm)の試料で 2 本とも 0.1 mm の蒸発が起こっていたが、その他の試料では 0.05 mm 未満であった。

雨量計の水量別に平均を取った $\delta^{18}\text{O}$ と δD の値はそれぞれ、100 mL では-7.5 ‰と-47.4 ‰、300 mL では-8.0 ‰と-49.4 ‰、2000 mL では-8.1 ‰と-49.6 ‰であった。比較対象の室内保管のペットボトルでは、 $\delta^{18}\text{O}$ が-8.1 ‰、 δD が-49.5 ‰であった。

表 2：蒸発テスト② 結果：水の重量と水素・酸素同位体比 (2017年9月14日～2017年10月11日)

水量	テスト前		テスト後						
	重量[g]	換算雨量[mm]	変化量[g]	蒸発率[%]	換算蒸発量[mm]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ 平均[‰]	δD [‰]	δD 平均[‰]
100 mL	102.0	4.0	-0.5	0.49	0.0	-7.4	-7.5	-47.2	-47.4
	111.3	4.4	-1.1	0.99	0.0	-7.6		-47.6	
300 mL	298.1	11.7	-1.2	0.40	0.0	-8.0	-8.0	-48.9	-49.4
	301.5	11.9	-1.2	0.40	0.0	-8.0		-49.8	
2000 mL	2068.1	81.3	-1.8	0.09	0.1	-8.1	-8.1	-49.5	-49.6
	2083.2	81.9	-2.0	0.10	0.1	-8.1		-49.6	
室内保管 (比較対象)	1992.0	78.3	0.0	0.00	0.0	-8.1	-8.1	-49.5	-49.5
	2007.9	78.9	0.0	0.00	0.0	-8.1		-49.4	

4. 考察

(1) 観測期間中の雨量計内の水の蒸発

本研究では、100～2000 mL の範囲（降水量換算で 4～83 mm）で雨量計内の水量を変化させて 7 日後の変化を調べた。0.4～2.0 mL の水が減少していたが、雨量計に入れた水量の多少との明確な関係はみられな

かった。水の減少を蒸発に因るものとみなすと、2000 mL 以外の水量では、ペットボトルの断面積が水の蒸発が起こる水面の面積であるため、水量に関係なく同様の量の蒸発が起こっていると考えられる。しかし、2000 mL の雨量計では水道水をボトルの首近くまで入れてほぼ満水にしているため、水の表面の面積が小さい。よって、観測された減少量は、ボトル内で蒸発した水が装置外に放出された量、すなわち漏斗とピンポン玉の間や、漏斗とボトルのつなぎ目から漏れた水蒸気の量と考えられる。

各雨量計の水量と蒸発率（減少率）の関係を図4に示した。水量が少ないほど蒸発率が高い。特に 300 mL 以下での増加がみられ、最も高かったのは 100 mL の1試料で 0.99%であった。水量と蒸発量を降水量に換算して考える。水量が 100 mL の換算降水量は 4.4 mm であり、その蒸発量を降水量に換算すると 0.05 mm 未満であった。最も水量の多い 2000 mL の換算降水量は 81 mm であり、蒸発量は約 0.1 mm であった。山田・森本(2017)で求めた同型雨量計の観測精度は平均で ± 0.3 mm であり、気象庁で用いている転倒ます型雨量計の採水精度は、降水が 20 mm 以下の場合 ± 0.5 mm 以内、20 mm 以上では $\pm 3\%$ である(気象庁, 2002)。今回観測された蒸発量はいずれもこれらの観測精度以下の値である。よって、本研究で用いた雨量計の、7日間の観測期間中の装置内からの水の蒸発は、降水量の観測において無視して良い量であると言える。

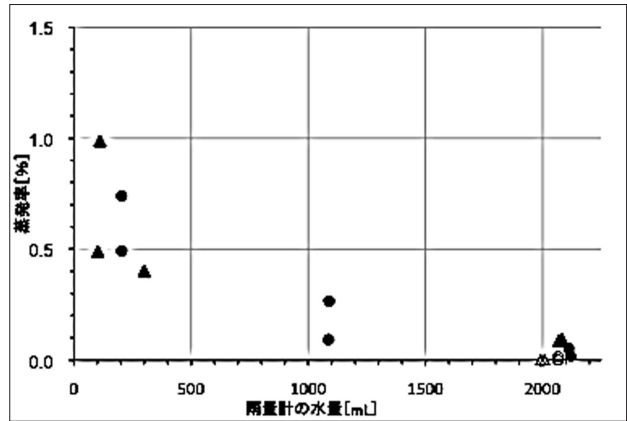


図4：雨量計の水量と蒸発率の関係

●はテスト(1)、▲はテスト(2)の結果を示し、○と△はそれぞれのテストの比較対象の結果を示す。

(2) 観測期間中の雨量計内の水の同位体変化

屋外に7日間設置した後の各雨量計内の水と比較対象の室内保管のペットボトル内の水の酸素・水素同位体比の差を図5に示した。同じ水量の雨量計の平均値を用いて差を求めると、 $\delta^{18}\text{O}$ では、300~2000 mL の雨量計では比較対象と 0.1 ‰以下の差であるが、200 mL では 0.2 ‰高く、100 mL では 0.6 ‰高い値を示した。 δD では、300~2000 mL の雨量計では比較対象と 0.2 ‰以下の差であるが、200 mL では 0.5 ‰高く、100 mL では 2.1 ‰高い値を示した。同位体比の測定誤差は $\delta^{18}\text{O}$ で ± 0.1 ‰ (1 σ)、 δD で ± 0.3 ‰ (1 σ)である。300~2000 mL の雨量計では、観測前後の差は測定誤差範囲内であった。一方、100 mL と 200 mL (降水量換算で 4 mm と 8 mm) では $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD ともに測定誤差よりも大きな値であった。これは(1)で示した雨量計内の水の蒸発と装置外への放出によって、同位体比が高くなっている可能性を示している。よって1週間

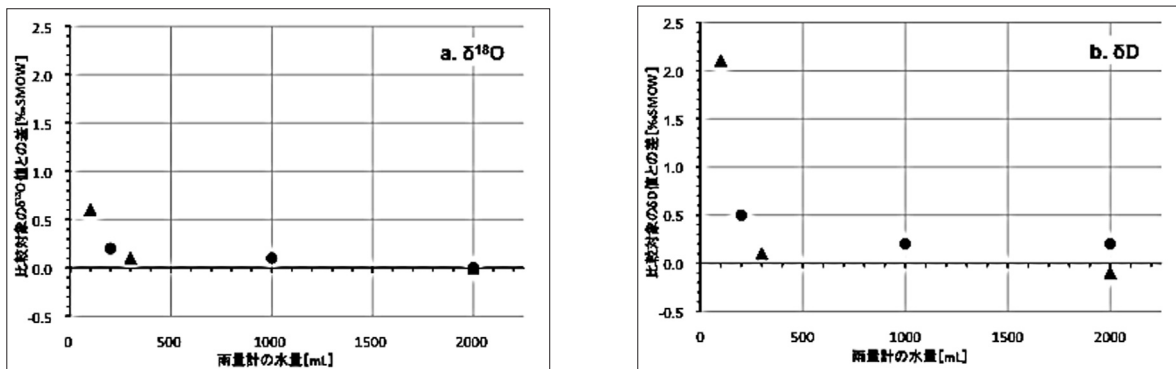


図5：雨量計の水量と同位体比変化の関係 (a. $\delta^{18}\text{O}$, b. δD)

■はテスト①、▲はテスト②の結果を示す。

の降水量が 8 mm 以下のような比較的少ない降水の時は、観測中に同位体変化が起こっている可能性がある。結果の取り扱いに注意する必要がある。しかしながら、降水の同位体比は 1 回の雨ごとに数%の変化を示すことが多く、さらに季節変化では、例えば岐阜市では $\delta^{18}\text{O}$ で約 20%、 δD では 100%を超える大きな年変化を示す(山田, 2017)。よって、本研究から得られた雨量計内の蒸発の同位体に対する影響は、降水量が少なく、さらに 1%以下のような詳細な同位体比の変化を議論する場合において、注意を払う必要があると言える。

5. まとめ

本研究では、自作のペットボトル簡易雨量計について、観測期間中の雨量計内部からの水の蒸発量と蒸発に伴う同位体比の変化を調べた。蒸発に伴う水の減少は微量であり観測降水量に大きな影響を及ぼさないことが示された。降水の水素・酸素同位体比の変化については、1 週間で 8mm 以下のような比較的少ない降水量で測定誤差を上回る同位体濃縮が起こり、詳細な同位体変化を調査するには注意を払う必要がある。今回の蒸発テストでは雨量計を設置してから 1 週間後の変化を調べたが、1 日ごとの水量と同位体比の変化を調べることにより、1 日単位や 1 ヶ月単位など様々な期間の観測に対して有用な情報を示すことができるだろう。

業務や研究での気象観測では自動化・デジタル化・リモート化が進んでいる。しかしながら、本研究で用いたような安価で自作可能な観測機器は、多数の機器を準備することや設置が容易であり、またメンテナンスが簡単で破損してもすぐに再作成することができる。盗難やいたずらのリスクも低いため、現在観測を行っている金華山(岐阜市)の頂上のような毎日の観測がおこないにくい場所への設置も行うことができる。学校での教育用教材として適しており、さらに本研究のように測定精度の確認を行うことによって、気象の研究にも用いることができるだろう。

<参考文献>

- 牛山素行・松山洋 (1995) 簡易雨量計の試作と比較観測. 水文・水資源学会誌, **8** (5), 492-498.
- 気象庁 (2002) 気象観測ガイドブック, 55p.
- 四方瑞穂 (2005) 雨量測定の問題点 ～漏斗サイズによる測定値のばらつき～. 岐阜大学教育学部卒業論文, 35p.
- 棚橋舞 (2002) メソスケールの降水分布について. 岐阜大学教育学部卒業論文, 33p.
- 田上雅浩・一柳錦平 (2016) 日本における降水の d-excess と水蒸気の起源. 日本水文学会誌, **46**(2), 101-115.
- 奈尾雅浩 (2013) カンキツ黒点病の防除適期判定に用いる簡易雨量計の製作法. 第 19 回農作物病害虫防除フォーラム講演要旨, 5p.
- 檜山哲哉・阿部 理・栗田直幸・藤田耕史・池田健一・橋本 重将・辻村真貴・山中 勤 (2008) 水の酸素・水素安定同位体を用いた地球水循環研究と今後の展望. 水文・水資源学会誌, **21**(2), 158-176.
- 文部科学省 (2017) 中学校学習指導要領解説 理科編. 125p.
- 山口隆子 (2006) 日本における百葉箱の歴史と現状について. 天気, **53** (4), 3-13.
- 山田浩加 (2017) 同位体分析による濃尾平野の降雨の特徴. 岐阜大学教育学部卒業論文, 110p.
- 山田浩加・森本真紀 (2017) ペットボトル簡易雨量計の高精度化に関する研究. 岐阜大学教育学部研究報告(自然科学), **41**, 101-105.
- 若本実希・山中勤 (2004) 降水分取器内部での蒸発に伴う試水の同位体濃縮について. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **5**, 73-79.
- Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702-1703.
- Dansgaard, W. (1964) Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, **16**, 436-468.
- Murray, D.L. (1972) Comparison of raingauge evaporation suppressants. *J. Hydrology (N.Z.)*, **11** (2), 99-104.