

弘前の雪の同位体比からみた 2020/2021 冬季モンスーンの特徴

谷田貝 亜紀代¹・上野 優²・芳村 圭³・西岡 翔太²

¹ 弘前大学大学院理工学研究科, ² 弘前大学理工学部,

³ 東京大学生産技術研究所

1. はじめに

青森県弘前市は日本海側の豪雪地帯に位置し、アメダス最大積雪深記録のある八甲田山系の酸ヶ湯は、弘前の東北東 30km ほどの距離のところにある(図 1)。日本海側の豪雪は、西高東低の冬の気圧配置の時に日本海からの蒸発した水が脊梁山脈により強制上昇してもらたされる、典型的な地形性降水と知られる。しかし、たとえば新潟では、北西季節風が強い時の山雪と、日本海上空に寒気があるときに平地で雪の多くなる里雪があることも知られている。

弘前は 3 方を山岳に囲まれており、酸ヶ湯ほどの豪雪にはならないが、どういう気象条件の時にどこから来た水蒸気で降雪がもたらされるかを調べておくと、これから温暖化時の降水がどのように変化するかを予測したり、古気候の復元に用いる環境資料を解釈したりすることに役立つと考えられる。そこで平成元年～3 年度に弘前大学機関研究の 4 つのテーマの 1 つとして当地の降雪・水蒸気同位体計測を行い、解析を行っているので、結果の一端を紹介する。

2019/2020 冬季は日本全国的に暖冬小雪で、2020/2021 および 2021/2022 冬季はラ・ニーニャ状態が続き、日本のいくつかの地域で豪雪被害が発生したので、2020/2021 冬季のモンスーンと日本の豪雪について調べる際に、本研究が示唆を与えることもあると考えられるので、降水同位体観測結果を中心に報告する。

2. 降水の同位体比

水の安定同位体比は古環境の復元に古くから用いられており、南極やグリーンランドの氷河や、海洋底に沈む生物化石に含まれる酸

素の同位体比は気候復元の重要な指標になっている。これらは地球全体の気候が温暖であったか寒冷であったかという指標である。

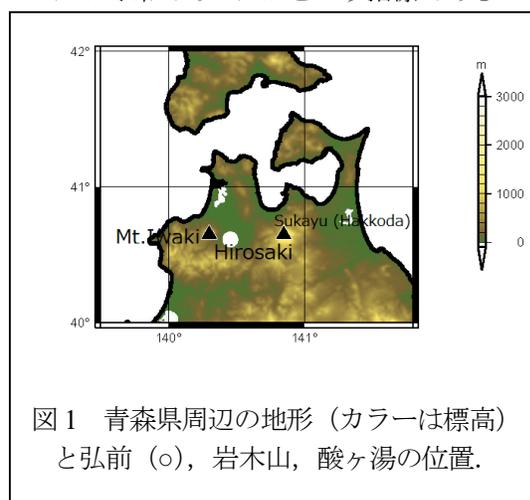


図 1 青森県周辺の地形(カラーは標高)と弘前(o)、岩木山、酸ヶ湯の位置。

一方、1960 年代から地球上の様々な場所で降水の同位体比が観測され、その空間分布も国際的なネットワーク等で明らかになり、データの共有もすすんでいる。これら水(酸素・水素)の同位体比と平均的な気象要素や空間的特徴との相関関係が整理され、温度効果、緯度効果、高度効果、内陸効果、降水量効果と呼ばれている。これらは、高い同位体比(^{18}O の ^{16}O に対する比が大きい、 ^2H の ^1H に対する比が大きい)の水、すなわち重い水ほど先に凝結して降り、一方水面から蒸発するときには軽い水分子から蒸発するという原理から説明される。例えば青森県の複数個所で 2 週間ごとの降水の同位体比変動を計測した研究(Hasegawa et al. (2014))は、八平地と八甲田山の同位体比は高度効果で説明できる(平地が重く、山地である八甲田は軽い)としている。

このような分別には温度の関数である平衡の同位体分別の他、動的同位体分別がある。

動的同位体分別は例えば激しい蒸発時に水面からの分子拡散速度の差により生じるもので、 $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ の相対的な変動の差となって現れる。この指標として、天水線($\delta^2\text{H}=8\times\delta^{18}\text{O}+10$)からのずれを表す **d-excess** ($\delta^2\text{H}-8\times\delta^{18}\text{O}$) という値が用いられる。気象分野でも水安定同位体比が用いられるようになり、解説もされている(芳村ほか2009)。

興味深いのは、冬季日本海の激しい蒸発を受けた水、すなわち日本海側の降雪は、**d-excess**が高いことが知られており(例えば芳村・一柳、2009)、弘前の降雪には、非常に特徴的な **d-excess** を持つものと、気流系によってはそうでないものが混ざっていると考えられることである。そこで、日々弘前で降水サンプリングを行った上で、水蒸気輸送経路の違い、つまり水分子の通った履歴や混合過程の結果である日々の降雪水の同位体比変動を解析することは興味深く、それを踏まえて年々の違いを調べることで、季節全体の循環場偏差や降水量偏差と、個々のイベントの関係を紐解くことにつながると考えられる。

3. 観測と用いたモデル

降水観測は弘前大学理工学部屋上(青森県弘前市)でポリ袋を入れたバケツを24時間設置して行い、採集した降水は水同位体分析計(Picarro L2120-i)で分析し、水の安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$)と **d-excess** を求めた。週末は計測せず金曜日から月曜日の降水をまとめて計測したサンプルもあるが、ここ(図2, 3)には示さない。また、3年間の冬季は以下のように定義する。

- ・第1冬季 2019年12月~2020年3月初め
- ・第2冬季 2020年12月~2021年2月終り
- ・第3冬季 2021年12月~(現在)

第2冬季の途中からは、水蒸気のドライアイスとエタノールによる捕捉(1日1, 2回)を行い、第3冬季は、水蒸気の連続観測が可能な Picarro を設置して屋上から水蒸気同位体比に計測を行っているが、ここでは、第1冬季(図2)と第2冬季(図3)の降水サンプルの同位体比を示す(赤丸でプロット)。

第1冬季は、暖冬小雪で、第2冬季は、日

本各地で豪雪被害があったが、弘前の冬季降水量は平年並みだった。上記の観測期間には、雨として降った日もあるが、溶ける時には同位体比は変わらないので、ここでは降雪・降雨の区別なく降水として示す。

モデルは、米国環境予測センター(NCEP)とスクリプス海洋学研究所(ECPC)にて開発された領域気象スペクトルモデル(RSM)に、新たなトレーサーとして水の安定同位体を導入した領域スペクトルモデル IsoRSM(Yoshimura et al., 2011)を用いた。初期境界条件は、NCEP 解析データによる全球同位体スペクトルモデル Iso-GSM を用いている。対象期間は観測と同じ第1, 第2冬季を対象とし、結果は図2, 3に青で記した。なお第2冬は、2020年11月26日00UTCから実行し、Iso-RSMの計算領域は28.277~50.158°N、119.58~146.258°E、解像度30kmで実行した。モデルの降水出力は前1時間値で得られるが、図には観測と同じ日本時間正午から翌日正午の24時間積算値を示す。なお、本研究では、降水を回収した日の日付で示し、例えば2月15日の降水とは、2月14日12JST~2月15日12JST すなわち2月14日3UTC~2月15日3UTCの降水を指すものとする。

4. 結果

4.1 全体的な特徴と2冬季の比較

図2は、第1冬季の酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)、水素同位体比($\delta^2\text{H}$)、**d-excess**、降水量を、図3は第2冬季のものを表す。全体的な特徴として、両冬季とも、それぞれ $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ は似たような変動傾向で、それぞれ同位体比が高い(水が重い)時と低い(水が軽い)時があり、1週間から10日の間に次第に重くなるように見える時期がある。**d-excess**は、従来から言われているように、日本海からの激しい蒸発を受けたと考えられる高い値を示している。芳村・一柳(2009)は、中部地方・東北地方における降水・地表水の同位体比季節変化を再考察し北西季節風時に **d-excess** > 20、南岸低気圧通過時は **d-excess**=20 との概念モデルを提示した、本研究での第1, 第2冬季の降水 **d-excess** の幅は5~40と大変大きく、北西

風の強い時の多かった第2冬季では、d-excessが40を超えるときもある。平均的にも第2冬季のd-excessのほうが高い。また δ 値を兩年で比較すると、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ とも低い（水が軽い）日が第2冬季に多くみられる。

Iso-RSM（モデル）の再現性は、第1冬季は2月は比較的変動傾向があっているものの、全体的には判断が難しいが、第2冬季はモデルによる弘前の降水同位体比の変動の再現は極めてよい（ $\delta^{18}\text{O}$ について観測とモデルの日値の相関係数0.68、 $\delta^2\text{H}$ は0.71、d-excessは0.54）。モデルは、高いd-excessを再現できていないが、変動傾向はあっているといえる。

西岡（2021）は第1冬季の同位体比変化と循環場について調べ、同位体比が高い（水が重い）時は南西方向からの水蒸気輸送があり、軽い時は北西季節風が強く、一週間ほどの間に次第に重くなる時は、d-excessが低くなる傾向があり、混合の結果と解釈した。例えば2/9は冬型（北西季節風）で北西季節風が水蒸気を運び、一方2/13には南西からの湿った

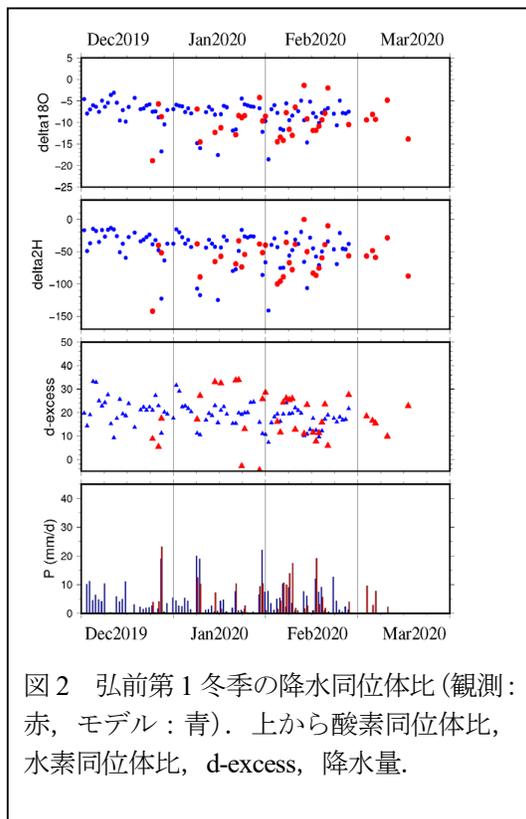


図2 弘前第1冬季の降水同位体比（観測：赤，モデル：青）。上から酸素同位体比，水素同位体比，d-excess，降水量。

空気が弘前上空に輸送されており、水が重くなる（ $\delta^{18}\text{O}$ 上昇）と共にd-excessは減少し、2種類の水蒸気の混合と考えられる。

モデルの再現性が両冬季で異なるのでここでは定量評価は示さず、次に第2冬季について、第2冬季の豪雪災害のあった日と、極端に軽い降水の日について紹介する。

4.2 豪雪災害のあった日

第2冬季に日本で豪雪災害が発生した主要期間と弘前の降雪同位体比の特徴を記す。

①2020/12/14 - 12/21

日本海側断続的豪雪。d-excessは高く、同位体比も高い。

②2021/1/7 - 1/11

秋田で強風，広範囲で大荒れ。d-excess高く，同位体比も高い。

③2021/2/17

上越市高田で豪雪。d-excess高い。

2/15-16は同位体比が低かったが2/17は高くなった。

④2021/2/23-25

北海道岩見沢で豪雪。d-excess，同位体比とも次第に高くなる。

以上から、いずれもd-excessが高く、強い北西季節風で日本海から激しい蒸発による降雪が弘前でももたらされたことが推察される。

図4に①の期間の中盤の12/18の下層（850hPa）風と、この日の降水への日本海で蒸発した水の寄与をIso-RSMにより計算したものを示す。（各日について、36Nを境に北側と南側の寄与を算出した結果の一部である。）①の期間を通じて、図4が示すように、東北の降水の80%以上が北西季節風による日本海の蒸発による降水であることがわかる。この期間、最終日を除き、d-excessは高い状態が続いており、第1冬季に見られた混合とは異なる特徴を示している。JPCZによる収束も図4には現れており、今後詳細な解析を行う予定である。

4.2 特に軽い日

図3の③の期間の前日2/16の同位体比が極めて低く（酸素同位体比は観測結果とモデルで共に最低値（-20.9‰, -17.4‰）, d-excessはやや低い値（7.8, 10.0）で、降水量も共に多かった（14.9 mm, 26.1 mm）。なお2/15は雨が、2/16には降雪が見られた。

この日の降水は、発達した低気圧によるもので、Iso-RSMの結果とERA5の解析から、低気圧の後面で tropopause folding が発生し、渦位（PV）が高く成層圏起源の極めて軽い水蒸気も弘前上空に到達したことがわかった。この低気圧の発達要因に山口（2021）は、太平洋（小笠原沖）起源の水蒸気の潜熱と報告している。蒸発水の起源は日本海北部南部とも寄与がほとんどない（図略）こと、HIMAWARI-8の画像解析、1時間値の解析から、2/16の降水は、発達した低気圧の太平洋起源の水蒸気であり、降水量効果が変動原因であると考えられる。その後北領域（図4青枠）起源の水蒸気の地表面降水への割合が2月15

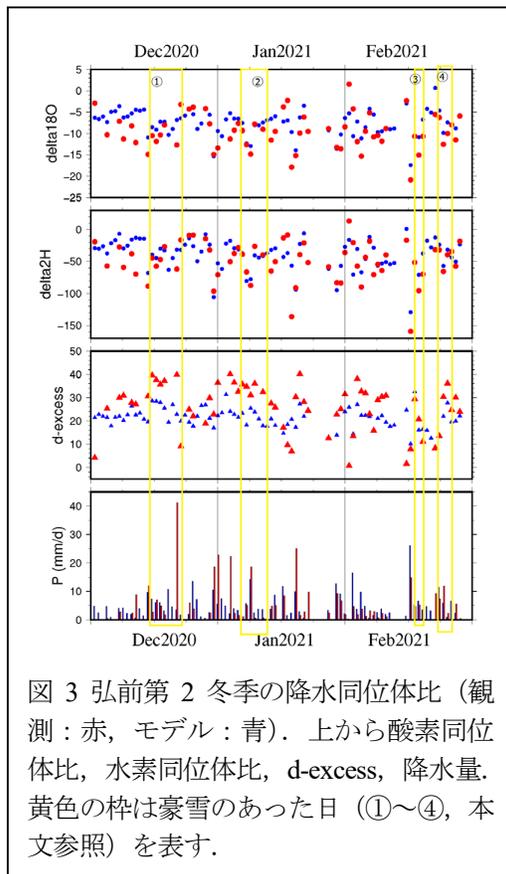


図3 弘前第2冬季の降水同位体比（観測：赤，モデル：青）。上から酸素同位体比，水素同位体比，d-excess，降水量。黄色の枠は豪雪のあった日（①～④，本文参照）を表す。

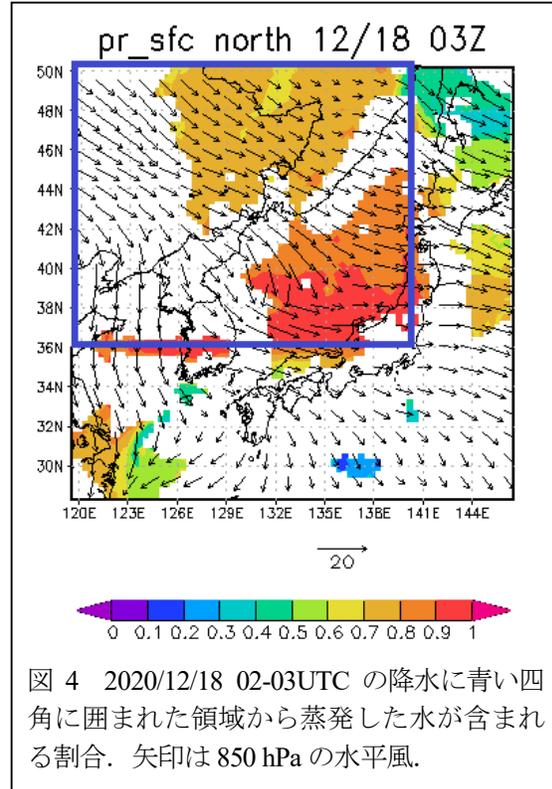


図4 2020/12/18 02-03UTCの降水に青い四角に囲まれた領域から蒸発した水が含まれる割合。矢印は850 hPaの水平風。

日12UTCに最大42%まで増加した。太平洋起源の水の寄与の定量評価は解析中である，成層圏起源の水蒸気量は少ないが，物質循環の点では成層圏大気の混合は興味深いので引き続き解析を続ける。

参考文献

Hasegawa H, Akata N, Kawabata H, Sato T, Chikuchi Y, Hisamatsu S (2014) Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotope ratios in precipitation collected in a snowfall region, Aomori Prefecture, Japan, *Geochemical Journal* 48:9-18.
 上野優, 谷田貝亜紀代, 芳村圭 (2021) 2020/2021年の弘前市における降水の安定同位体比の特徴について, 令和3年度日本気象学会東北支部気象研究会予稿集 P27-28.
 西岡翔太 (2021) 「弘前における冬季降水安定同位体比変動の原因 ~2019年から2020年冬季~」弘前大学理工学部地球環境防災学科平成2年度卒業論文, 65pp.
 山口純平(2021), 令和3年度2月15日から17日にかけての発達した低気圧の解析, 令和3年度日本気象学会東北支部気象研究会・仙台管区気象台東北地方調査研究合同発表会予稿集, 28pp.
 芳村圭, 一柳錦平 (2009) 東アジアにおける降水 d-excess 季節変動に関する再考察, *水文・水資源学会誌*, 22, pp262-276.
 芳村圭, 一柳錦平, 杉本敦子 (編) (2009) 「気象学における水安定同位体比の利用」*気象研究ノート* 第220号, 日本気象学会, 128pp.