

弘前の降雪の同位体比変動

谷田貝 亜紀代

（弘前大学大学院理工学研究科）

1. 弘前

青森県弘前市は、日本海側の豪雪地帯に位置する、落ち着いた城下町です。アメダス最大積雪深記録のある酸ヶ湯は、八甲田山系に位置し、弘前の東北東 30 km ほどの距離のところにあります（図 1）。日本海側の豪雪は、西高東低の冬型の気圧配置のときに冬季の季節風（シベリアからの冷たく乾いた風）が日本海からの蒸発した水を含み、それが脊梁山脈により強制上昇してもたらされると誰もが聞いています。しかし、実際の気圧配置は日々かわります。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は知られています（図 2）。弘前は、3 方を山に囲まれていますので、酸ヶ湯ほどの豪雪にはならないのですが、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、古文書や古気候の復元に用いる環境資料を解釈したりに役立つと思います。もちろん、土や水の溶存物質や年輪などの分析結果を解釈す

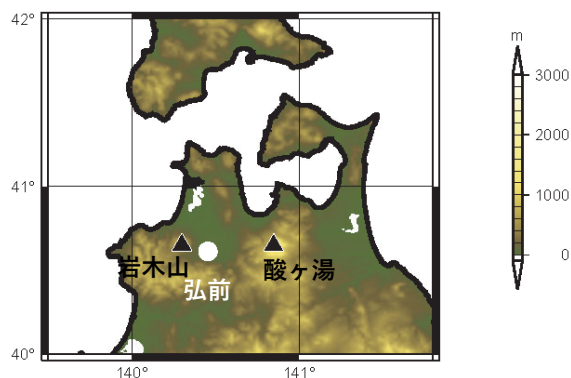


図 1. 青森県周辺の地形。カラーは標高（スケール参照）。○：弘前、▲：岩木山（西側）と、八甲田山系の酸ヶ湯（東側）

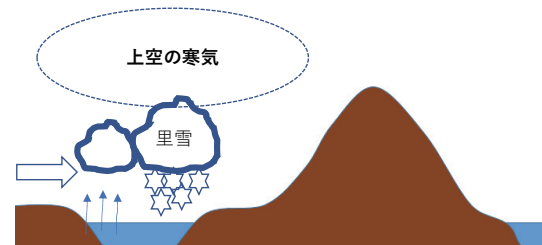
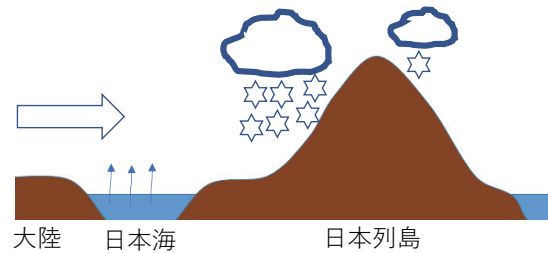


図 2. 山雪と里雪の模式図。（上）強い北西季節風により山地で降雪が多くみられる。（下）日本海上空の寒気により、平地で降雪が多くみられる。

るときにも、降雪の同位体比の結果は、参考になると思います。

2. 降水の同位体比

水や酸素の安定同位体比は古環境の復元に古くから用いられてきました。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ます。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となっています。

一方で、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、地理的な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ます。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が発見・整理されて、それらは、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

できました。これらは、重い水、すなわち高い同位体比の水（ ^{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）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ています。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)）では、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）としています。

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ほかに、動的同位体分別があります。この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ます。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ます。気象分野でも水安定同位体比が用いられるようになり、解説もされているので（芳村ほか 2009）、詳しく知りたい場合は読まれると良いと思います。

興味深いのは、冬季日本海の激しい蒸発をうけた水、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す。そこ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や、年々の違いをみることは面白いし、前述のように、他の資料と比較することや、過去や将来を知るにも役立つと思って、この研究を行いました。

3. 大気循環と水循環の結果としての弘前の降水 ～2 冬季の結果から～

弘前で降雪のサンプリングは、大学の屋上にポリバケツを設置して、日本時間の12時にバケツを交換することで行いました。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時も

ありますが、3年間の冬季に計測をしています。

- ・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 月終わり
- ・第3 冬季 2021 年 12 月～（現在）

第2 冬季の途中からは、水蒸気の同位体比の計測も行ったのですが、ここでは説明を省略します。

第1 冬季は、暖冬小雪でした。これに対し、第2 冬季は、弘前の降水量は平年並みでしたが、日本各地で豪雪被害がありました。第3 冬季の現在と第2 冬季は、ラニーニャの状態にあります。また、上記の観測期間には、雨として降った日もあります。溶ける時には同位体比は変わらないので、ここでは同様に降水として扱って示します。

図3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 を、図4は、第2 冬季の酸素同位体比、水素同位体比、d-excess を表しています。

まず、全体的な特徴として、 $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ は似たような変動傾向をしていると言えます。また、それぞれの値の中でも同位体比が高い（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ことです。

この両者の関係（動的同位体分別の指標）である 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ます。また、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の報告（早稲田・中井、1983）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 との概念モデルを表していますが、ここでの 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を超えるときもありました。

それぞれの日の大気循環や水蒸気輸送過程との関係をすべて示すことは紙面の都合上難しいので、第2 冬季の豪雪災害のあった日との対応と、第1 冬季のだんだん重くなる時の例と、第2 冬季の極端に軽い降水の日について簡単に紹介します。

第1冬季

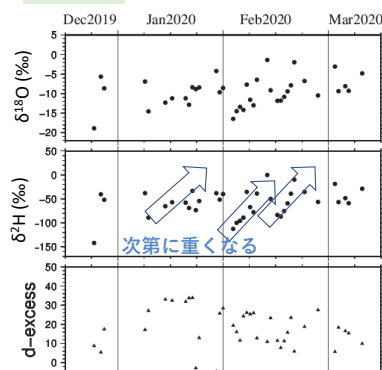


図 3. 弘前における第 1 冬季（2019 年 12 月～2020 年 3 月）の降水の酸素同位体比、水素同位体比、d-excess。

第2冬季

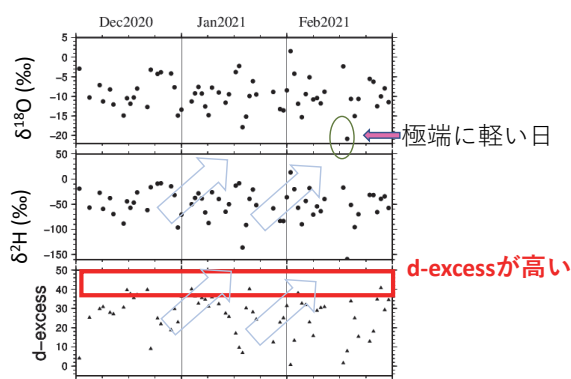


図 4. 弘前における第 2 冬季（2020 年 12 月～2021 年 2 月）の降水の酸素同位体比、水素同位体比、d-excess

4. 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な期間と弘前の降雪同位体比の特徴を記します。

・ 2020/12/14-12/21

日本海側断続的豪雪。d-excess は高く、同位体比も高い。

・ 2021/1/7-1/11

秋田で強風、広範囲で大荒れ。d-excess 高く、同位体比も高い

・ 2021/2/17

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。

・ 2021/2/23-25

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ます。同位体比が高い原因、高くなる原因については今後の詳細な解析が期待されます。

5. 重い日とだんだん重くなる時

第 1 冬季には、3 回、だんだん同位体比が高くなる現象がありました。このうち 2020 年 2/9 から 2/13 への循環場の変化を図 5 に示します。

2/9 は大陸から低温・乾燥した空気が弘前に流入していました。これは西高東低の冬型の時です。

一方、2/13 には、南西からの湿った空気が弘前上空にきています。この変化があった時、水が重くなっていく ($\delta^{18}\text{O}$ 上昇) と共に、d-excess は減少しました。これは、冬型（同位体比低く、

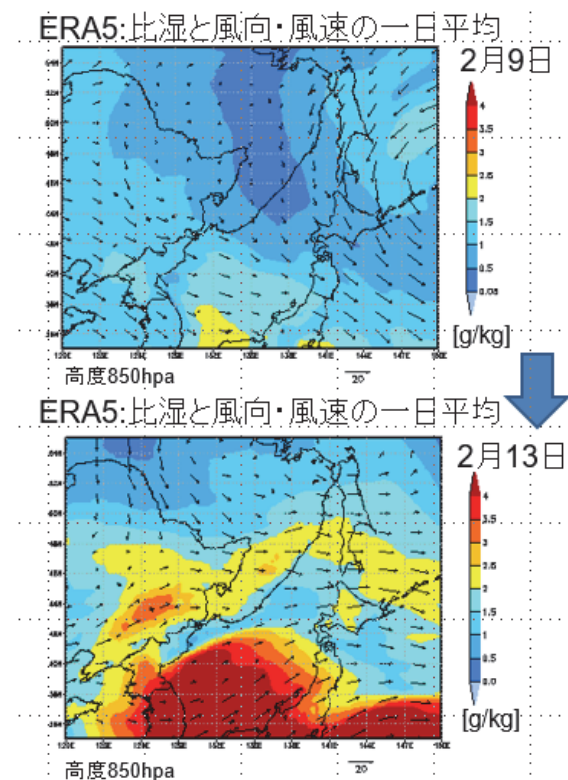


図 5. ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）作成の大気再解析データによる 850hPa 高度面の比湿、風向・風速

d-excess 高い) がゆるみ移動性の低気圧による降水(同位体比高く、d-excess 低い)に変わっていく際の、南西からの水蒸気の混合の結果と推察されます。このときの模式図を図6に示します。

1/10-1/14 の変化でも、次第に西から湿った空気が流入したのですが、この事例では、同位体比は高くなっていくものの、d-excess の変動は小さいものでした。

第2冬季の同位体比の変化(図4)では、重くなっていく時に d-excess が高くなっていくようにも見えます。この解釈は別の機会に報告をしたいと考えています。

6. 特に軽い日

第2冬季の2/16、すなわち2/15の日本時間正午から2/16の日本時間正午に降った雪は、最も低い同位体比(軽い水)でした。この事例で2/16正午に弘前上空850hPaにあった空気塊は、一日前(降雪サンプリング開始時刻)2/15 12JSTには朝鮮半島の付け根付近~中国東北にあり、非常に乾燥し、同位体比の低いものでした(詳しくは上野ほか(2021))。この空気塊は、2/15-16に

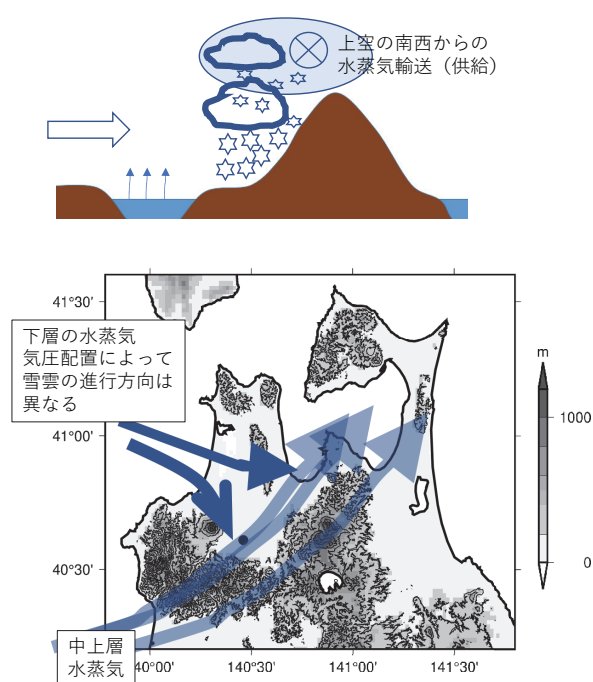


図6. 北西季節風に南西からの水蒸気輸送が混合する模式図

急発達した爆弾低気圧の西側で、圏界面が折れ曲がったもの(tropopause folding)でした。成層圏由来の乾燥した空気が700hPa付近まで下りてきており、これが弘前上空に移動したのです。

ただし成層圏の空気は乾燥していますので、それが豪雨豪雪の源とは考えにくいです。図4をよく見るとこの降水事例(2/16)の前日と翌日のd-excessは高いのですが、このイベント(2/16正午に回収した雪)のd-excessは前後に比べて少し低くなっていて、日本海の激しい蒸発による水蒸気とは異なる起源でありそうです。低気圧が進行するときに日本の東側の太平洋からの蒸発とその凝結熱により、低気圧が急発達することがあります。その水蒸気による降水が軽い水の起源ではないかと考えています。

7. 今後の展開

降雪をもたらす水蒸気輸送源について示唆を与える水同位体分析が出来ましたが、降雪はあくまで蒸発や混合、そして凝結過程を経た履歴が重なっています。そのため、水蒸気同位体比の計測も行うことにし、水蒸気同位体比の連続観測も第3冬季に行っているところです。また今回書いていませんが、水同位体過程を組み込んだ数値モデルもあわせて実行して、比較検討を行っています。モデルは同位体比の相対的変動をよく表現できていますが、d-excessの絶対値はまだ表現が難しいようです(非常に高いd-excessを表現していません)。弘前で降雪・水蒸気同位体比の計測値は、モデルの開発にも役立つと考えています。

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.
<https://doi.org/10.2343/geochemj.2.0279>

上野 優，谷田貝重紀代，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

https://www.metsoc.jp/tohoku/workshop/abstract_2021.pdf

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.

早稲田周，中井信之（1983）「中部日本・東北日本における天然水の同位体組成」地球化学，17，83-91.

著者情報



谷田貝重紀代（弘前大学大学院理工学研究科教授）1996 年筑波大学大学院地球科学研究科修了、博士（理学）。専門は気候・気象学。2002.3～2011.2 総合地球環境学研究所助教。中国、インド、トルコなどの学際調査に携わる傍ら、2016 年からアジアの日降水量グ

リッドデータ (APHRODITE) を作成公開し、データは世界的に用いられる。

2016 年に弘前大学に着任（准教授）、2018 年より現職。

（2022 年 3 月 31 日掲載）