

同位体の導く流域における降雪の影響度

川 越 清 樹

（福島大学共生システム理工学類）

1. はじめに

日本は、北半球の中緯度付近に位置するものの世界有数の積雪量の認められる稀有な国です。多積雪になることで産業発展の停滞や冬季の生活へ支障を受けることが認識されており、法律上でも豪雪地帯対策特別措置法が制定され、交通通信、農林業、義務教育、医療等の機能維持の対策を講じる取り組みが進められています。一方で、積雪による地上の水循環の一時的な貯留効果は、安定的な水供給への効用を持ち、灌漑、電力、上水道、鉱工業の多岐にわたる水資源の役割を担っています。これらはあくまで代表的な事例として説明したのですが、積雪は社会活動を行う上で多岐にわたる「正」と「負」の側面をもっているといえます。安全かつ安定的な社会活動を行うためには、今後の「正」に対しての持続的な運用、「負」に対しての対応、対策を検討しなければなりません。この検討を進めるために、①大気や水の循環の将来像をふまえて降雪や積雪がどのような量へ変化するか？ ②将来の降雪や積雪がどのような質へ変化するか？ ③量と質の結果からどのような地域の特徴を示すのか？ を明らかにすることが必要とされます。

「どのような量になるか？」は、スーパーコンピュータの普及により GCM（Global Climate Model、General Circulation Model）と呼ばれる数値気候モデルから水と大気の流れを解析することで将来像を予測できるようになりました。最新の結果を参考にすれば、北海道の一部地域を除いて将来は温暖化の影響によって降雪・積雪は減少すると予測されています。一方で、10 年に 1 度の大雪が現状以上に増加する地域も存在すること

が指摘されています。

「どのような質になるか？」は、雪に関すれば、例えば河川水ほど多地域、多地点で性質を同定するための取り組みが実施されていません。そのため、予測するためのベースとなる過去から現在までのデータが不足しています。データが不足していることから、大まかな範囲での積雪、および降雪の特徴を導くプロセスは解明されている一方で、地域の特徴を誘導するための積雪、および降雪の状態は未だ不明瞭な状態です。こうした地域特徴、特徴を導くプロセスに対して、安定同位体のデータを利用しています。安定同位体以外にイオン組成の化学的な性質も分析して雪の「質」のデータを整備しています。現在、取得されているデータの整備と検討により、地域の特徴を示す雪の質、および質に関連付けられる起源、プロセスの将来像を誘導することを目標にしています。

なお、「どのような量になるか？」、「どのような質になるか？」の結果が得られれば、いずれ、将来の「どのような地域の特徴を示すのか？」は明らかにされると考えられます。

2. 対象地域と降雪と積雪の関係

この研究の取り組みが、日本の積雪、降雪の地域の特徴を求めるための模式事例になることを目標に、代表的な豪雪地帯である阿賀野川流域を対象地域に設定しています（図 1 参照）。阿賀野川は、栃木県、福島県、山形県、新潟県の標高 2,000 m 級の急峻な山岳地を水源とした 243 の中小河川、猪苗代湖などの水域により構成されています。河川全長 210 km、流域面積 7,710 km² の日本上位の大規模流域として位置づけられています（全長

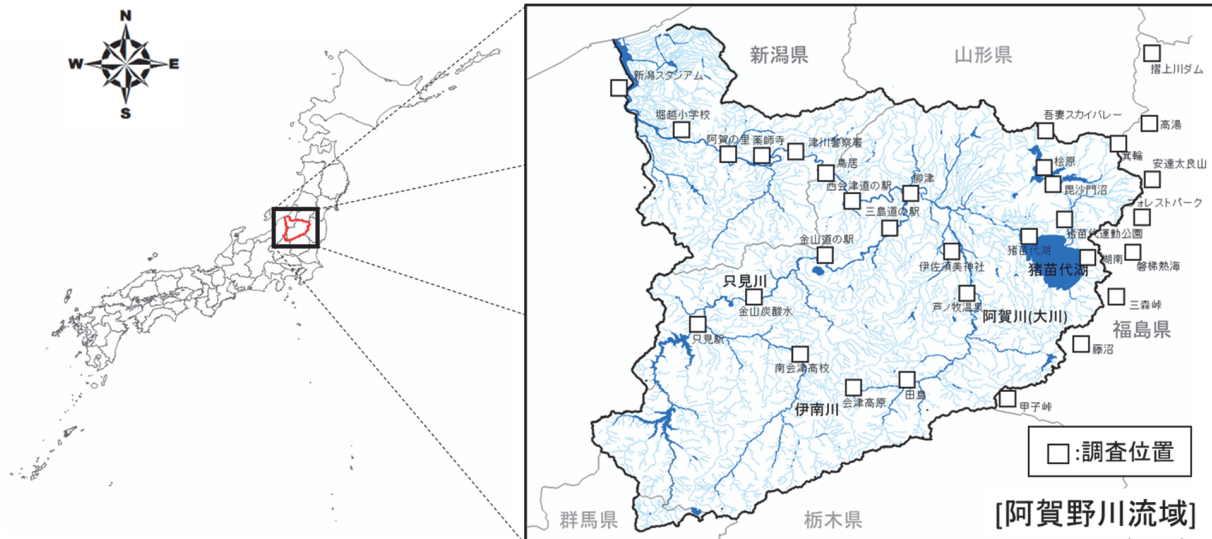


図 1. 研究対象位置図

10 位、流域面積 8 位)。なお、阿武隈川の流量は日本最大級（流量 4 位）であり、年間の流量の約半分が融雪時期の出水に関わることが知られています。この豊富な流量を利用して、流域内では日本最大級の稲作の生産、水力発電がなされています。また、流域の上流域には、磐梯朝日や尾瀬、日光など複数の国立公園が分布しています。いずれの国立公園とも積雪に関与する水の涵養より自然環境が形成されています。また、この自然環境に付随してエコツーリズムも確立されています。これらの状況より阿賀野川では、早急に積雪、降雪の地域特徴と将来に向けた環境遷移を把握しなければならない状況です。同時に積雪、降雪に関わるデータも特に整備していく必要のある地域といえます。なお、特徴や遷移を求める上では「量」だけでなく「質」も把握しなければなりません。「質」を得ることで、自然環境への負荷、もしくは養分の供給も捉えることができます。例えば、世界各地では、酸性雪による河川や湖沼の生物に与える悪影響の問題なども認められています。同様の環境問題が生じないようにするためにデータを蓄積して、①過去から現状を把握する、②将来を予測する、③地域の特徴を知り異常現象を察知する、ことに示される管理を行うことも必要です。

3. 日本列島が多積雪になるプロセスと考察

日本列島では、冬季に西側でシベリア高気圧と東側でアリューシャン低気圧がともに強まります。列島の周辺は西高東低の気圧配置となり、これらに挟まれる等圧線が南北方向へ縦縞模様に発達します。この気圧配置によりシベリアから乾燥した寒気が吹送されることになります。寒気は温暖な日本海上を通過し、海から大量の水蒸気を補給します。補給された水蒸気はその近傍で降水として失われることなく、海上 2～3 km 以下の季節風の気層に蓄積されます。季節風は日本列島の脊梁山脈に当たり、地形性に応じた上昇気流が生じて雲を形成します。この雲の形成と寒冷化した日本列島陸域の状態に応じて降雪が生じます。この一連のプロセスにより日本列島、特に日本海側は世界有数の多積雪地帯になります（以上 図 2 参照）。ただし、稀に太平洋側を中心に多積雪になる事例も認められます。気温の低い冬季に日本の太平洋側北緯 30° 付近に発達した低気圧が東進する場合、関東、東海地方に北側から冷たい湿った空気が流入しやすくなり、大雪になる可能性が高くなります。この日本の南海上を主として東から北東方向に進む低気圧は、南岸低気圧と呼ばれます。以上に示す通り、日本列島は冬季に多積雪になる気象条件を含んでいますが、大気や海域の

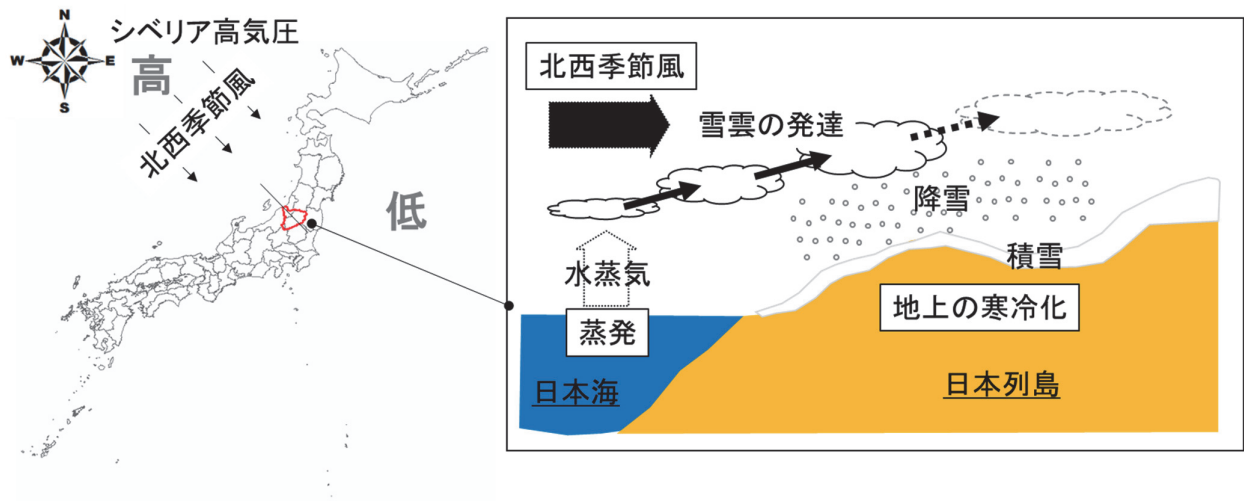


図2. 日本海起源の降雪プロセス

状況の変化により、積雪、降雪の状況は変動することも推測されます。なお、地上、および地上付近の大気の状態も積雪、降雪の条件に影響を与えます。現在までの経験上、地上の気温が 2°C 以下、上空約 $1,500\text{ m}$ が -4°C 以下だと雪、それ以上の高い気温が認められた場合は雨になる可能性が高いことも知られています。これらの条件も気候システムの温暖化により大きく変化しうるものです。数値気候モデルより将来の積雪、降雪の予測もなされていますが、微妙な変化が生ずれば予測結果も変化する可能性をもちます。

4. 阿賀野川流域の積雪量の経験値

図3は、阿賀野川流域内の気象観測機器が流域全域で運用された1990年からの流域平均積雪深を示したグラフです。おおよそ1990～2020年までの流域平均積雪深の最大値は約 164 cm （2015

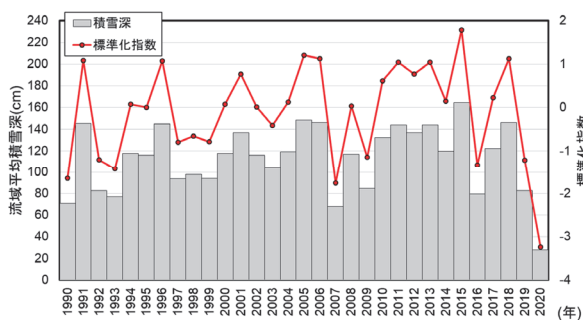


図3. 阿賀野川流域の平均積雪深の経年変化

年)、最小値は約 28 cm （2020年）、平均値は約 115 cm で示されます。全期間を通じた変動傾向を捉えることは難しいですが、最近では、少雪年の出現が多くなっていると同時に、多雪の出現するケースも認められています。極端な積雪深の変化が生じやすくなっているものと解釈でき、積雪、降雪の大小の変化に及ぼす気象要素が敏感に反応しているものと推測します。

過去の研究成果を参考にすれば、北日本の日本海側の流域の中で阿賀野川流域は、日本海の蒸発に関与する日本海表面海水温度と最も関係性が小さく、安定的に積雪の見込まれることが知られていました。このような特徴の示される流域で極端な積雪深の変化が認められている最近の状況は、経験則だけでは解釈しきれない影響要素が波及していること、なおかつ敏感に積雪、降雪に反応しやすくなっている可能性を示しています。

5. 阿賀野川流域の安定同位体による降雪の影響

図4は、2014年から2020年まで継続して観測した積雪の安定同位体比のデータを用いて流域内の各地域に「どこを起源にした降雪が到達しているのか？」を求めた結果です。水素同位体比 $\delta^2\text{H}$ と酸素同位体比 $\delta^{18}\text{O}$ の関係（天水の式）より求めることのできるd-excess値[%]より降雪の到達を推測しています。既に今までの研究成果が

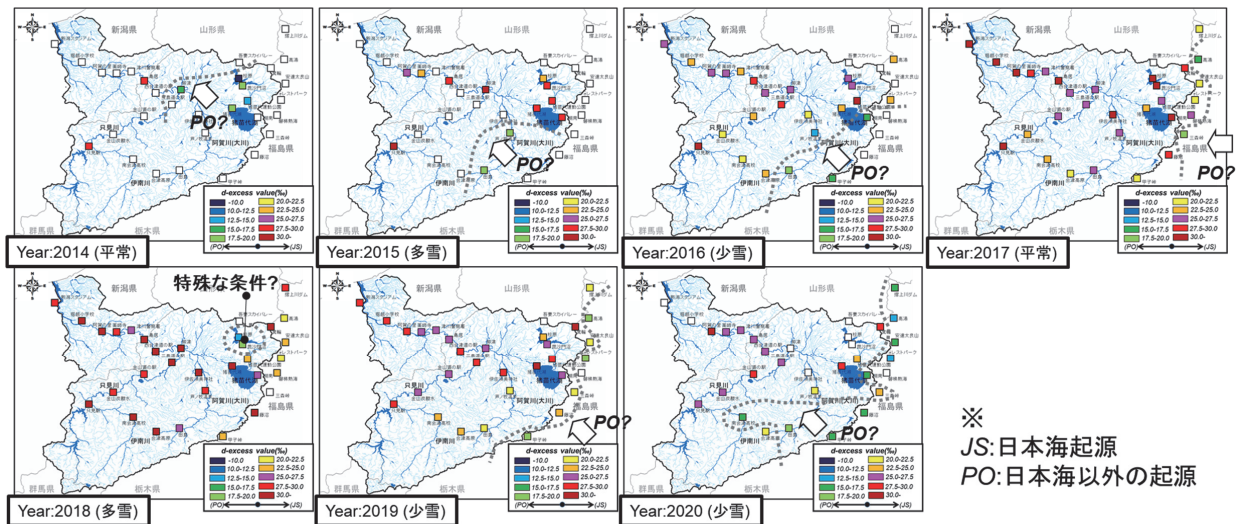


図 4. 阿賀野川流域の平均積雪深の経年変化

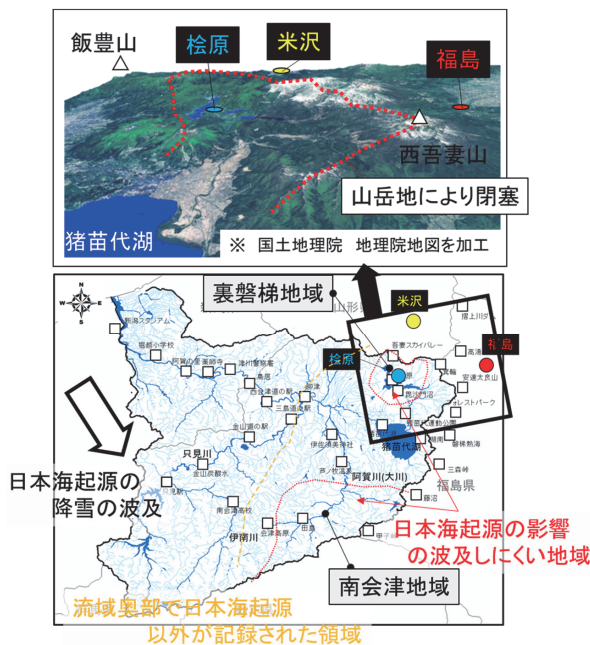


図 5. 阿賀野川流域の積雪分析の統合結果図

ら得られている日本海起源は 20% より大きな値、太平洋起源は 10% より小さい値になる d-excess 値の基準より判別を行いました。結果として積雪の多い状態、少ない状態に関わらず日本海起源の影響が影響を及ぼす範囲は年々変化していることが明らかにされました。また、今までの日本海起源以外の影響を受けやすい地域が存在することも明らかにされました。具体的には、流域の南東部に位置する南会津地域と北東部に位置する猪苗代湖周辺の地域（図 5 参照）は日本海以外の影響も受ける結果を得ました。日本海から距離のある流域

の奥部では、日本海以外の降雪を起源とする降雪が寄与している結果を明らかにしました。南会津地域に関しては、比較的に太平洋側と距離が近いこと、南岸低気圧に伴う降雪の影響を受けやすい地域であることが推測されます。一方で、太平洋側から距離の離れた猪苗代湖周辺の地域に関しては、解釈の整理が難しい状況でした。

6. 裏磐梯地域の安定同位体による降雪の影響

日本海起源以外の降雪の影響の生じる裏磐梯地域の降雪を調べるために裏磐梯地域内の松原、およびその近傍に位置する米沢（日本海側）、福島（太平洋側）の降雪日の降雪試料を 2016 年から 2018 年にかけてサンプリングし、それらの d-excess 値の推移を分析しました。その結果を図 6 に示しま

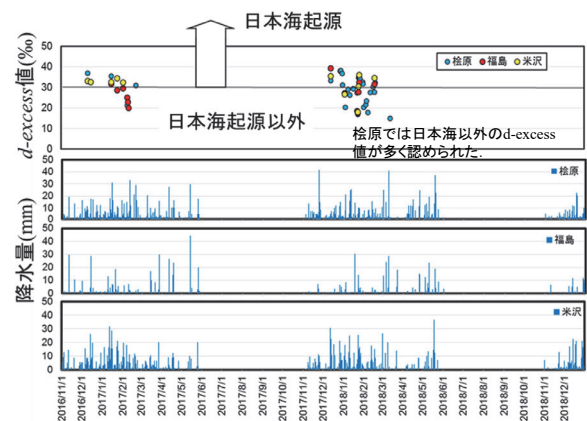


図 6. 松原・米沢・福島の降雪日の d-excess 値の推移図

す。結果として、桧原は日本海起源以外の d-excess 値を示す降水が特に多く認められている結果を得ました。また、米沢、福島との比較より、桧原の地域のみ日本海起源以外の降雪が出現していることを把握しました。この結果は日本海起源、太平洋起源の影響を受けない地域固有の降雪の出現を示唆しています。桧原を含む裏磐梯地域は、急峻な山岳地に囲まれた高い標高の平地であり、特に日本海側から季節風の吹送される北西側には、飯豊山などの標高 2,000 m 級の山地が連なっています（図 5 参照）。こうした遮閉されやすい地形の高度条件が日本海外側からの影響を弱めると推測します。また、遮閉された地形の中で比較的解放された南側には日本最大規模水域面積（面積 103.24 km²）の猪苗代湖が分布しています。日本海と同様に猪苗代湖の湖水温度による水蒸発気が降雪に変化している可能性も示されます。こうした大規模な水域面積の湖沼の水蒸気が降雪をもたらす現象は世界各地でも認められており、北米の五大湖付近の湖の熱変化の影響が降雪現象にまで及ぶことは有名です。なお、世界山岳気象観測史上 1 位の積雪深は琵琶湖北側に位置する滋賀県の伊吹山で記録されており、1927 年 2 月 14 日に 1,182 cm の積雪深となりました。湖沼の水蒸気の発生が降雪、積雪に影響することは有力です。地域としての降雪、積雪の特徴は、概ねの要素から説明できますが、そのプロセスは明確にされたわけではありません。そのため、このプロセスを明瞭にするための調査、分析を継続して実施しています。

7. おわりに

本文では「同位体の導く流域における降雪の影響度」として、研究対象地域にしている阿賀野川流域の研究事例を報告しました。①大気や水の循環の将来像をふまえて降雪や積雪がどのような量へ変化するか？ ②将来の降雪や積雪がどのような質へ変化するか？ ③量と質の結果からどのような地域の特徴を示すのか？ の内の「質」

に対しての調査と分析を進めて、流域内の地域特徴を把握することができました。また、この研究から地形条件と大規模湖沼による降雪、積雪の影響を示す結果が明らかにされました。同位体がトレーサーとなり影響を誘導する結果が得られたものとなります。地上では水循環システムが形成されていますが、地球全体の規模で動く大規模循環の他に、ある程度の領域で動く中小規模のスケールの循環も存在しています。先に示した「量」の予測研究では数値気候モデルを解析することで将来を予測することを説明しました。しかしながら、このモデルは何百年にもわたる予測計算を行わなければならないため、スーパーコンピュータを用いても計算できる単位当たりの面積や、単位時間には限りがあります。現段階の数値気候モデルの結果は地球全体の規模で動く大規模循環に特化する傾向に則した予測がなされているものと解釈できます。今後のスーパーコンピュータの進化にもよりますが、ある程度の領域を緻密に予測するためには、まだ、時間がかかるものと思います。この研究で示されるデータが予測を補完するものになります。また、将来的には予測された結果への検証の材料になることと思います。このような関係は、「質」の研究が「量」の研究を補完して、更に精度をたかめているような状況になると思います。結果的に「①大気や水の循環の将来像をふまえて降雪や積雪がどのような量へ変化するか？」と「②将来の降雪や積雪がどのような質へ変化するか？」の個別の研究が相互作用し、「③量と質の結果からどのような地域の特徴を示すのか？」の精度を上げているものと捉えることができるかもしれません。また、この精度の向上が、地域の特徴を知ることによって反映されて、異常現象を察知できるような知見に繋がっているものと考えます。まだまだ、現在までの結果も途上段階です。引き続き研究を進めて、進化を図りたいと思います。

引用文献

文部科学省・気象庁（2020）「日本の気候変動」

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2020/pdf/cc2020_honpen.pdf, Site Viewed: 2020/12/24.

Kawase, H., A. Murata, R. Mizuta, H. Sasaki, M. Nosaka, and I. Takayabu (2016) Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations. *Climatic Change* 139: pp. 265-278.

<https://doi.org/10.1007/s10584-016-1781-3>

川越清樹, 鈴木絢美, 井上浩太, 神内亨太, 佐藤佑哉, 中村光宏 (2016) 「阿賀野川流域の積雪特性と水循環の関係性」 In: 裏磐梯・猪苗代地域の環境学、福島民報社、pp. 79-94

井上浩太, 鈴木絢美, 川越清樹 (2015) 東北地方日本海沿岸の積雪比較分析と考察. 土木学会論文集 G (環境) 71 (5) : I_295-I_304.

https://doi.org/10.2208/jscejer.71.I_295

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 : pp. 83-91.

Dewey, K.F (1975) The prediction of lake Huron lake-effect snowfall system, *Journal of applied meteorology and Climatology* 14: pp. 3-7.

鈴木絢美, 川越清樹, 藪崎志穂 (2018) 化学分析による地域スケールに対する降雪イベントの特徴の同定. 土木学会論文集 G (環境) 74 (5) : I_1-I_9.

https://doi.org/10.2208/jscejer.74.I_1

著者情報



川越清樹 (福島大学共生システム理工学類教授)、博士 (環境科学)、2007 年東北大学大学院環境科学研究科博士課程後期修了、2005 年東北大学大学院環境科学研究科産学官連携研究員、2008 年カーティン工科大学客員研究員、2009 年福島大学共生システム理工学類准教授、2018 年国立環境研究所客員研究員、2019 年より現職。

(2021 年 3 月 31 日掲載)