

積雪・降雪の環境形成過程の解明に向けた 流域の降水試料の分析

鈴木 絢美¹・藪崎 志穂²・川越 清樹^{3*}

¹福島大学大学院環境システム理工学研究科（〒960-1296福島県福島市金谷川1）

²総合地球環境学研究所研究基盤国際センター（〒603-8047 京都市北区上賀茂本山457）

³福島大学共生システム理工学類環境システムマネジメント専攻（〒960-1296福島県福島市金谷川1）

* E-mail: kawagoe@sss.fukushima-u.ac.jp

2013年から2016年まで継続して阿賀野川を対象に流域内の地域的な積雪環境構成と特徴を把握する解析を試みている。その中で、流域内でサンプリングされた積雪試料の安定同位体比と経年の積雪深の分析を進めて、流域内の積雪環境の解明を試みた。解析より以下の流域内の地域特徴の結果を得た。①経年との比較より、近年、阿賀野川流域では積雪の地域差異が広がっている。②流域内に日本海起源の積雪が広く分布する傾向を示すが、流域東部では、日本海起源とは異なる可能性を持つ積雪も認められた。③日本海起源と異なる積雪環境は多雪、少雪に関係なく認められる。④積雪環境の境界は年単位で変化した。⑤裏磐梯地域では2014年、2016年に短期の気温上昇に関連した特異な積雪も認められた。気候変動により減少の危機されている積雪を対象に、気候モデルによる数値情報も検証できる実測データベースの開発を行うことと同時に、地域固有的な冬季の水循環過程のプロセスを明らかにすることを考慮して本研究が進められたが、今後、短時間の空間特徴も加味した気候変動の基礎データの構築を図る予定である。

Key Words : Climate change data base, regional scale, d-excess value, seasonal snow depth index

1. はじめに

気候変動に伴う様々な環境下の遷移が見積もられており、正と負の影響を明らかにするための影響の評価が取り組まれている。また、現況の環境と将来の影響との比較より、負荷の少ない持続的な発展を遂げる将来を設計していくため、緩和策と適応策の両面からのアプローチの対策を講じることが計画されようとしている。影響評価の解析を進めるに当たり、将来の気候を時空間的に定量化した気候モデルの出力データをベースを利用する研究のアプローチを主体としている。ただし、求められる結果は全球の巨視的な空間の循環に基づいたものである。また、導出される出力データも全球にあわせた莫大な量になるため平滑化された巨視的な時間を対象としたものが多い。このため、実際に解析の検討で入手できるデータは地域のニーズに応じた緻密な適応策を設計すること、極端な現象を反映させることに対して不足した情報になりうる。これに対して、領域を狭めて限定化し、

力学的、および統計的なダウンスケーリングより時間と空間の解像度を高める解析が進められている²⁾。ダウンスケーリングにあわせて地域に対する将来の気候情報は、今後、更に精緻な時空間情報として示される可能性が高い。そのため、地域に対する緻密な適応策の設計、極端な現象を求めるための有用な情報になりうるものと期待できる。ただし、こうした数値解析結果が、実質的な現象と関係付けていく取り組みを強化していくことも不可欠である。数値解析結果と実質的な現象が高い相関で結合することでモデルアウトプットとして高い精度が保障される。そのため、気候変動の影響を投影させることのできる実測データを取得してデータベースを構築させることも積極的に進めなければならない。

本研究は、気候変動により減少の危機されている積雪を対象に、気候モデルによる数値情報も検証できる実測データベースの開発を行うことと同時に、地域固有的な冬季の水循環過程のプロセスを明らかにすることを考慮して取り組まれたものである。Gormanは「これまでのモ

デルでは、冬期における平均降雪量を注目してきたが、温暖化が進行すると毎年生じる降雪の振幅幅が拡大することで極端な豪雪になる可能性があることが見過ごされている」ことを指摘している³⁾。また、Kawaseらによる地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）を基にした日本及び周辺域における将来の日別降雪量の将来変化を高精度で求めた結果によると、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第五次評価報告書のRCP8.5シナリオでの21世紀末に相当する気候状態では、本州の内陸部で十年に一度しか発生しない豪雪が現在より高頻度で現れ、豪雪に伴う降雪量も増加する可能性が高いことが把握されている⁴⁾。これらの研究結果は、気候変動に伴う温暖化による積雪の減少は一意的な現象でなく、短期間スケールでは変動性が高いことを示唆している。これに対して、積雪量の多少を特徴付ける短時間変化(年単位以下のタイムスケール)プロセスの解明を実測データより明らかにすることを目的に、時間に応じた積雪試料の安定同位体比を求め、地域に対する時空間的な積雪環境の構成の把握を試みた。流域内の地域に対する積雪環境の空間特徴を明らかにし、降雪起源となる水循環過程も推察することで、気候の予見を誘導させる地域スケールに対する積雪の情報化を試みた。

2 研究対象領域、および研究方法とデータセット

研究対象領域は、地域スケールの検証として福島・新潟・栃木を流れる阿賀野川流域を対象とする。なお、この流域の山側には、Kawaseらの研究成果⁴⁾より十年に一度しか発生しない豪雪が現在より高頻度で現れる地域として示されている。

研究の方法は、以下の①、②に示すとおりである。

- ① 流域内で積雪試料をサンプリングし安定同位体比を分析して、その結果を基に空間的な積雪環境構成を解析した。
- ② ②経年の積雪深と安定同位体比の空間分布を比較し、流域内の多雪・少雪に伴う地域的な特徴の把握を試みた。

安定同位体分析に用いるサンプリングを行ったのは2013年から2016年であり流域内最大32ヶ所（2016年）。積雪深の解析には1985年から2016年の流域内12ヶ所のAMeDASデータを用いた。なお、それぞれの評価基準として、安定同位体比について早稲田らが説明しているd-excess値20‰を基準に日本海由来と太平洋由来の分類を行った⁵⁾。積雪深は中井により開発された多雪指数(Seasonal

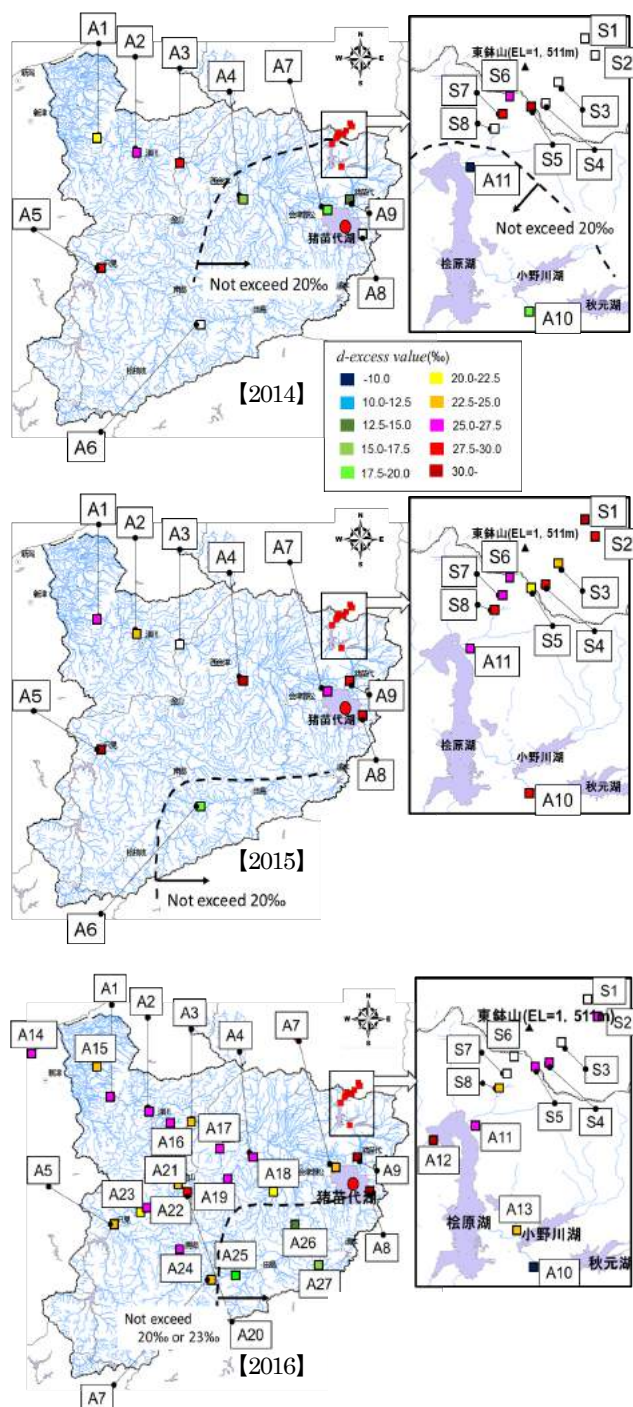


図1 各年のd-excess値分布

Snow Depth Index：以下SSDI)を用いて解析した⁶⁾。これらの結果に対する2015年までの結果は鈴木らにより解析され⁷⁾ており、結果は以下の①～④に示すとおりである。

- ① 経年との比較より、近年、阿賀野川流域では積雪の地域差異が広がる中で、流域内に日本海起源の積雪が広く分布する傾向を示す。
- ② 流域東部に位置する上流域では、日本海起源とは異なる可能性を持つ南岸低気圧起源の積雪環境の構成も認められる地域であることが示された。

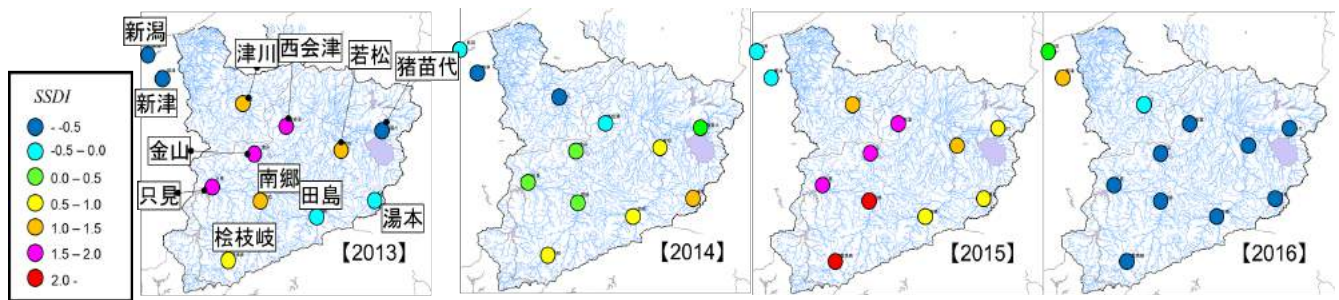


図2 経年のSSDIの推移分布図

- ③ 影響範囲の境界は、乾燥したシベリア気団と南岸低気圧の関係により遷移することも示唆された。
- ④ 水域面積の大きな裏磐梯地域では蒸発の影響を受ける可能性も示された。

これらの結果より気候の予見に反映できる地域スケールに対する積雪環境の情報化が図られている。

3. 安定同位体比の空間解析結果

図1に2014年から2016年のd-excess値の分布情報を示す。図1より、日本海影響のd-excess値20‰の境界は阿賀野川流域東部に位置する流域上流側で明瞭に分離されていることが見てとれる。2014年時は流域東部の広い範囲に20‰以下の領域が認められている。その一方で、2015、2016年時は、流域南東部のみに限定されて20‰以下の領域が認められていることが明らかにされた。積雪環境は日本海起源の降水に大きく依存されて形成されるが、年によって影響度が異なることが分かる。また、注目すべき結果として、特異な傾向を示すエリアが阿賀野川支流の長瀬川流域内(以下、裏磐梯地域と呼称する)に存在することも2014、2016年の低いd値から明らかにされた。つまり、2014年と同様な現象が2016年にも認められており、水域面積の大きな裏磐梯地域の蒸発の影響を受ける可能性の再現性が証明された。

4. 積雪量の経年評価との比較

図2に2013年から2016年のSSDIの分布情報を示す。2013年から2015年にかけては河口付近を除いて0.0以上の値であり安定的積雪状態にあり、2013年と2014年は流域全体としてみて平年の積雪で2015年は平年と比較し多雪だったことが見て取れる。しかし、2016年はこれまでの結果とは反対に河口付近は平年の積雪であるのに対し、それ以外では少雪の傾向にあった。また、流域全体としてみても平年よりも少雪の傾向にあったことが分かる。以上に示すとおり、積雪量に違いがあっても、流域南東部で

安定同位体比には変化が起こっていることが把握された。

5. 積雪量の経年評価との比較

検討より、安定同位体比による流域内の積雪環境の空間的な特徴を把握することができた。特に明瞭な空間特性を示した流域東部と裏磐梯地域の2点について評価、考察する。

(1) 流域東部の地域特徴に関する波及影響

阿賀野川流域東部に位置する上流域の日本海起源とは異なる可能性を持つ積雪は、多雪、少雪に関係なく平常的に分布する結果を得ているものの、その空間的な波及範囲が異なる。特に、2014年は広い領域で日本海起源と想定ににくい結果を得た。この年に関すれば、2月7日から16日に南岸低気圧による断続的な降雪が認められ、関東地方を中心とした日本列島東側で記録的な積雪が認められている。この現象の発生は、南岸低気圧の影響が阿賀野川流域にも及び、広い範囲で太平洋起源の降水が生じて積雪として分布された可能性を示唆している。流域東部の積雪環境は、太平洋と日本海の双方の影響を受ける地域であるが、その境界は年単位の勢力の違いで遷移していくプロセスが推測される。

(2) 裏磐梯地域の特異な積雪環境

安定同位体比の結果より、裏磐梯地域では、少雪の場合に特異な積雪環境が現れることが示された(ポイントA10, A11)。流域東部の考察に示すとおり、当該地域も南岸低気圧の多降雪型の境界に位置し、年々の境界遷移も想定できる地域である。ただし、本地域の安定同位体比の特異な結果は、天水に近似した $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD の関係、およびd-excess値を示していること、標高に関わらずに $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD の値が小さいことを示している。レイリー過程に従うと、水は同位体比の軽いもの($\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 値が小さい)から蒸発する性質をもつ。位置的にA10は毘沙門沼、A11は桧原湖の近傍であり、双方の下流側には猪苗代湖も存在し

ている。そのため、水域の蒸発の影響を受けた可能性も示唆される。なお、この試料をサンプリングした直前の2月2, 3日は著しい気温上昇が記録されていたことも明らかにされており、蒸発に関連した降雪が生じた可能性も推測される。

6. 現在の取り組み

気候モデルによる数値情報も検証できる実測データベースの開発を行うことと同時に、地域固有的な冬季の水循環過程のプロセスを明らかにすることを考慮し、2017年も同様の研究を継続実施している。なお、この研究継続の中で、ある期間の積雪過程が把握されているものの、積雪に寄与した短時間スケールの降雪の影響は求められていない。以上より、阿賀野川流域とその周辺の阿武隈川、最上川の降雪時の分析にも着手した(図3 参照)。降雪直後の安定同位体他の化学要素と流域近傍、列島周辺の気象状況を比較し、日単位の短時間での検証を実施している。

サンプリングされた降雪の起源推定を補足するための気象要素を把握するため、以下①～②のデータを整備した。

① サンプリング近傍気象要素データ

降雪サンプリング側近の気象観測所の風向、降水量、積雪深のデータを整理した。サンプリングポイントに合わせて、福島气象台、米沢地域気象観測所(AMeDAS)、桧原地域気象観測所(AMeDAS)のデータを対象とする。ただし、桧原地域気象観測所では積雪のデータを計測していない。そのため、井上らの手法⁹⁾と同様に環境省生物多様性センターの管理するライブカメラ画像を利用して、積雪深データを推計した。

② 列島概観の気象要素データ

地域的な降雪・積雪の特徴を把握するためには、日本列島に対する気象場の傾向も比較する必要がある。以上より日毎(AM9:00時)の日本列島の気圧配置を整理して日本列島の気象外観データを整備した。気圧配置は、気象庁データサイト(<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/>)に整理した天気図、および記事をデータセットとして、表1に示したタイプに分類した。気圧配置だけを考えれば概ねTYPE1から4に分類することができる。ただし、特に冬の典型的なTYPE1の西高東低を考えても、ユーラシア大陸から日本海を通過した降雪以外にも、オホーツク海側、太平洋側、日本列島南域側の低気圧発達に伴うものも含まれる。そのため、データセッ

トの記事による低気圧発達情報も含めて特記されるものも分類に加えた。

これらの気象状況の結果を図4, 5に示す。

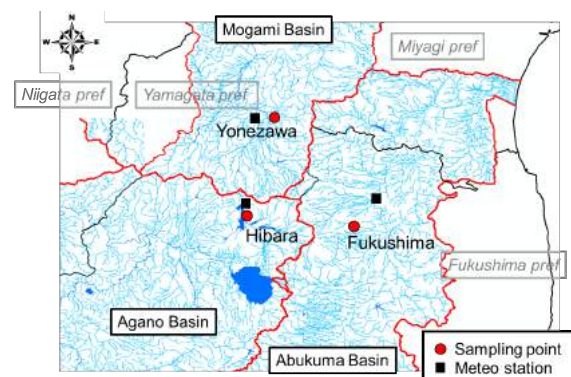


図4 日単位採雪調査位置図

表1 日本列島気圧配置分布分類表

Type	種 類	備 考 欄
1	西高東低	列島の典型的な冬型気圧配置
2	南高北低	列島で夏に多い気圧配置
3	高気圧停滞	列島全域に高気圧が停滞した配置
4	低気圧停滞	列島全域に低気圧が停滞した配置
5	オホーツク側低気圧発達	列島への湿った北東風の流入
6	太平洋側低気圧発達	列島への湿った東風の流入
7	南岸低気圧発達	列島への湿った南風の流入

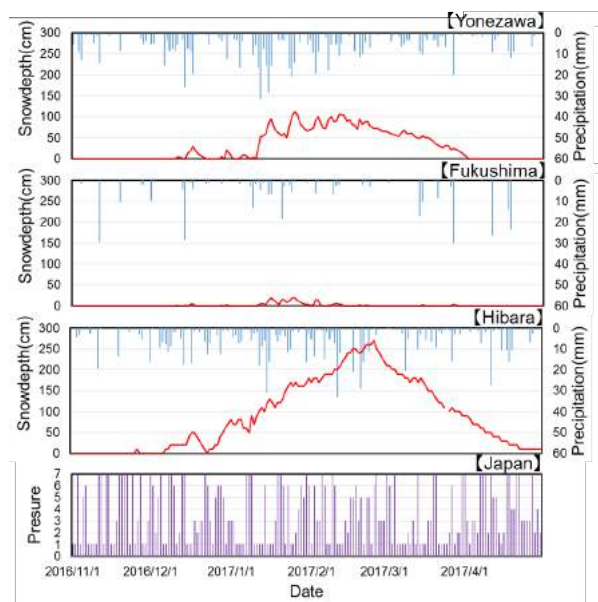


図4 採雪地点の降水量・積雪量グラフ

年単位、および採雪場所も拡張した日単位の短時間スケールに対する地域固有的な冬季の水循環過程のプロセ

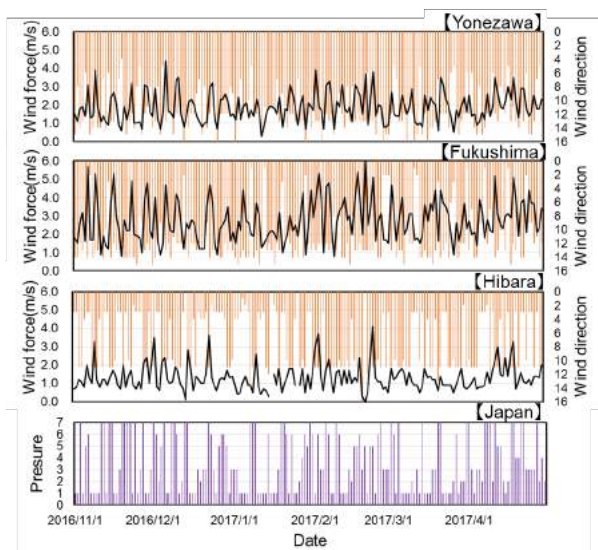


図5 採雪地点の降水量・積雪量グラフ

スを明らかにすることで、気候変動に対する精緻な地域的な降水特性を求めていく意向である。

謝辞：本研究の一部は、河川環境財団研究助成と文部科学省気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)、総合地球環境学研究所同位体環境学共同研究事業、財団法人福島県学術教育振興財団によって実施された。ここに謝意を示す次第である。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change : Climate Change 2014: Scientific Basis, Summary for Policymakers. WGI AR5 Report, 2013.
- 2) 例えば Ryusuke Kuno, Masaru Inatsu : Development of sampling downscaling: a case for wintertime precipitation in Hokkaido, *Climate Dynamics*, Vol.43, pp.375-389, 2014.
- 3) Paul A. O' Gorman : Contrasting responses of mean and extreme snowfall to climate change, *Nature*, Vol.512, pp.416-418, 2014.
- 4) 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*, Vol.139, pp.265-278, 2016.
- 5) 早稲田周・中井信之：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，Vol.17, pp.83-91, 1983.
- 6) 中井専人：“多雪指数”を用いた全国が多雪・少雪の年々変動と分布，天気，Vol.62, No.3, pp.187-199,

2015.

- 7) 鈴木絢美・藪崎志穂・川越清樹，安定同位体比を用いた阿賀野川流域の積雪環境評価，土木学会論文集G(環境), Vol.72, pp.I_155-I_164, 2016.
- 8) 井上浩太・鈴木絢美・川越清樹，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), Vol.71, pp.I_295-I_304, 2015.