

裏磐梯流域の環境遷移に関する水循環要素の検討

神内 亮太・川越 清樹（福島大学共生システム理工学類）

中村 光宏（福島大学大学院共生システム理工学研究科）

要 旨

裏磐梯湖沼の水環境遷移の原因となる要因の因果関係、影響度を見積もる目的で、陸域内の流出を促進させる積雪に関わる分析を試みるとともに、融雪時期の裏磐梯内の水質イオン組成調査と積雪との関係性を解析した。日本海海水温上昇と並行して地上も気温上昇するため降雪率が阿賀野川流域で減少し、積雪も減少する傾向が明らかにされた。また、気温上昇傾向が流域内で異なるため、裏磐梯湖沼を含む長瀬川流域の積雪傾向が特異になる可能性を示した。水質イオン分析の空間的検討より、融雪時期の桧原湖と小野川湖の境界における湿原化は、融雪による高い依存性をもつ結果を得た。また、裏磐梯湖沼群では、地域固有的な地表水、地下水分布を示し、水質に応じて空間的に区分できる可能性をもつ。

I. はじめに

1888 年 7 月の磐梯山大噴火に伴う山体崩壊、岩屑なだれより猪苗代湖北部の自然、および社会環境は激変した。社会的側面では、噴火当時、約 500 名にのぼる犠牲者をだした災害になった一方、自然的側面では、土砂の堆積過程の堰き止めにより多くの湖沼群を形成させた。現在、噴火に関わり形成された裏磐梯高原の湖沼群(図 1 参照)は、600 万人の観光客の訪れる県内有数の観光エリアである他、水力発電や灌漑用水としての貴重な水源として活用され、地域資源として親水、利水の両面で社会に大きな貢献を果たしている。しかしながら、近年、一部で環境基準以下の水質、湛水赤潮、湖沼水の色調等の変化が認められ、湖沼群下流に位置する猪苗代湖でも PH 上昇、大腸菌類の増殖が明らかにされている(福島県, 2012)。これらの湖沼群の水環境変化は、地域資源の基盤となる自然環境遷移を示すと同時に、現在に至るまで形成、蓄積された地域資源の改変の可能性を示唆するものである。そのため、自然環境の保全や、持続的な親水、利水機能を計画する上で、各々の水環境変化要因の解明と影響予測が必要である。

湖沼群の水環境変化は、緩慢な表流水を引き起こす閉鎖水域の連続性、地下水包蔵帯を形成させ

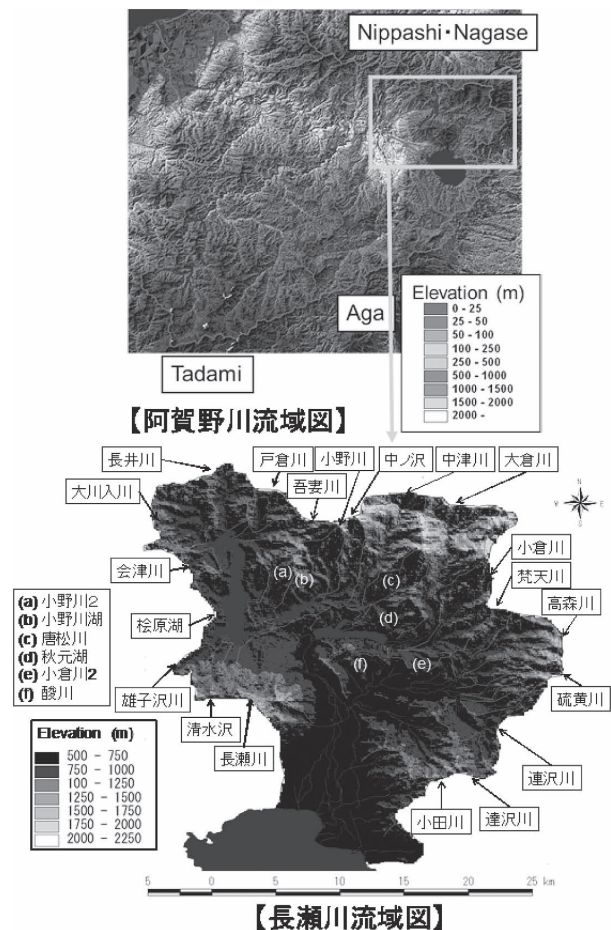


図 1 研究対象領域

る泥流堆積物の分布、火山に関連付けられる温泉の湧出、土地利用変化に伴う水質負荷量の変化等の地域固有の水循環系の条件が関与していると

推測される。地域固有性とその一方で、列島各地で地球温暖化、大陸由来の微小粒子状物質等の環境改変因子の影響(例えば環境省、温暖化影響総合予測プロジェクト, 2009)が見積もられている。これら環境改変因子は、更なる水域の環境変化を助長させる可能性をもつ。

こうした背景をふまえて、本研究チームは、裏磐梯湖沼の水環境遷移に対する各要因の因果関係、影響度を見積もる目的で調査解析に取り組む意向である。水環境の指標になりうる水質と気象状況、土地被覆、および利用状況、地形状況との関連性を系統付け、この系統に関わる各種条件との比較検討より、水環境遷移の支配的な要素、もしくは影響の寄与率を求めていくことを最終目標とする。こうした最終目標にむけて、特に裏磐梯湖沼群流域の地表、地中水を飽和、溢水させるイベントである融雪時期に関連付けて以下の調査、分析を試みた。

① 積雪調査、分析

② 融雪時期の水質(湖沼、河川と湧点)

本論では、各々の調査、分析の結果を示すとともに、積雪と湖沼群流域内の水質の総合解析結果を示した。

II. 積雪調査・分析

1. 調査・分析の概要

I 章に示す通り、地域固有水循環系の条件以外に、グローバル規模の環境改変因子が、水環境の変化に及ぼす影響も指摘される。気象に関わる降雪、積雪はグローバル規模の環境改変因子に関わるものであり、水環境遷移を支配する要素を把握する上で現状をよく理解しなければならない。当該地域の位置する日本海側に分布する流域に着目すると、巨視的に雪氷圏の境界に付近に位置し、また、冬季西高東低の気圧配置より雪氷圏のシベリア、中国大陸から乾燥、かつ寒冷な気団の流れ込みやすい地域である。東進する寒冷・乾燥な気団が日本海上空を通過することで大量の水蒸気

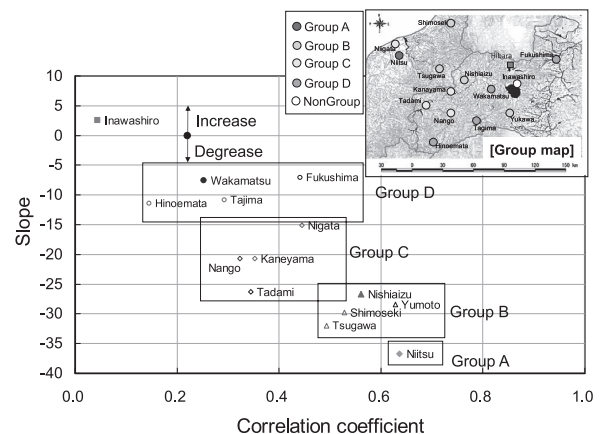


図2 積雪深-海面水温線形式の傾きと相関係数の関係

を含み冬季に降雪を与える雲を発達させる(例えば Akiyama, 1981)ため、冬期間は豪雪にみまわれる。他方では、近年、海水温上昇の傾向が全球的に示され、日本海もこれと同調していることが明らかにされている。また、海面水温の長期変化傾向から、日本海北東部冬季平均海面水温温度は $2.40^{\circ}\text{C}/100$ 年上昇するトレンドが見積もられており、日本列島周辺海域で最も高い温度上昇が予測されている(以上 気象庁, 2013)。海水温上昇が生じた場合、海洋からの水蒸気量の増加も見込まれるため降雪量増加も予見される。日本海沿岸域の水循環過程を検証するため、昨年度調査では日本海北東部冬季平均海面水温度と当該地域を含む阿賀野川流域の最大積雪量の比較検討を行った。結果として、以下の結果を得ている(中村他, 2013)。

- ① 阿賀野川流域における概ねの AMeDAS 観測地点が積雪量減少の傾向を示し、日本海側表面海面水温と増加と同調した。
- ② 裏磐梯高原を含む長瀬川流域のみ、積雪量増加傾向を示し、特異であることが明らかにされた。

これらの関係性検証結果(図2 参照)を得たものの、この結果の過程が整理されていない。また、水環境に関して、影響を見積もるための調査分析を追加する必要がある。そのため、今年度はこの結果

以下の調査，分析を試みている．

- ① 積雪と周辺気象条件の統合的分析
- ② 阿賀野川流域の積雪イオン組成の比較
- ③ 特異な傾向を示す長瀬川上流端の積雪鉛直方向の断面観測と含有物質の検証

2. 解析方法，およびデータセット

各調査，データセットを以下の(1)から(3)に説明する．

1) 積雪と周辺気象条件の統合的分析

積雪に関わるデータとして阿賀野川流域内の AMeDAS 観測地点の積雪深，および寒候期(11月～12月，1月～3月)降水量，日平均気温データ，周辺環境データとして日本海北冬季東部平均海面水温データを取得し，これらの関係性について検証した．解析に利用した気象関連データに関して，積雪深は計 13 ヶ所，降水量，日平均気温は計 14 ヶ所のデータを利用した(図 3 参照)．降水量，日平均気温で追加された AMeDAS 観測所は長瀬川流域に設置されている桧原である．解析に利用したデータ期間は，1983 年から 2011 年の計 29 年間である．検証として以下の(a)から(c)を試みた．

(a) 最大積雪深と降雪量の関係

(b) 寒候期平均気温と降雪率の関係

(c) 日本海水温と寒候期平均気温の関係

これらの比較検証から，積雪の過程を解明する．

2) 阿賀野川流域の積雪イオン組成の比較

積雪は温度，水蒸気の物理量や大気情報を残存させる特性をもつため(鈴木，2000)，複数の積雪の物質構成を化学的に分析して比較し，地域固有性，および周辺環境との関連性を明らかにすることも可能である．ここでは，流域内の多点で採雪を行い，各々の試料についてイオン組成を分析し，空間的な広がりをもつことを試みた．こうした研究のアプローチから積雪の空間的特徴を把

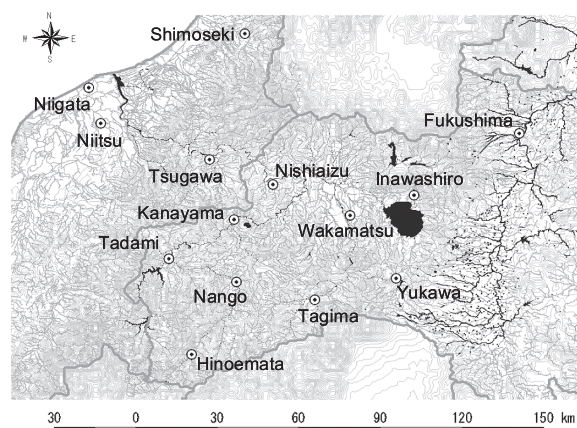


図 3 気象関連利用データの観測位置

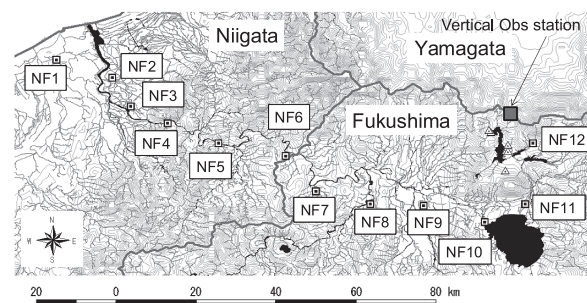


図 4 阿賀野川流域採雪ポイント位置

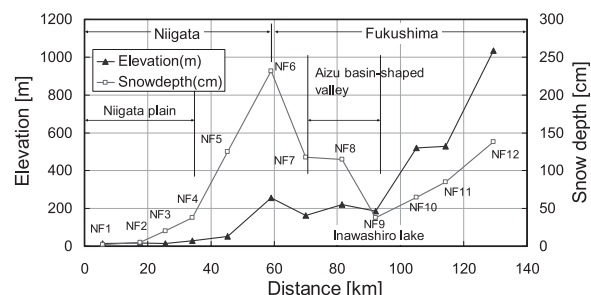


図 5 採雪時の積雪状況，および標高的な位置関係

握する取り組みは既に数多く実施されている(例えば Asaoka et al, 2012)が，本研究では，阿賀野川沿いに交通路として整備されている国道 49 号線沿線を中心に積雪を採取し，積雪のイオン組成の分析を実施した．この採雪は，もっとも積雪深が最大になる 2 月(実施日：平成 25 年 2 月 22 日)に実施した．図 4 に阿賀野川流域で行われた採雪ポイント(採雪ポイントは NF1 から NF12 の計 12 ヶ所)を示す．採雪は，道路沿線の自然積雪地点

を抽出しながら実施された。イオン組成の分析は、採雪試料を低温融解し、イオンクロマトグラフィーを用いて行われた。採雪時の積雪状況、および標高的な位置関係を図5に示す。図5より、新潟・福島県境で約240 cmの積雪が認められている一方で、新潟平野、会津盆地の平地の積雪量は50 cmの状況であることが理解できる。平地に関する積雪は、根雪でない可能性も示唆される。

3) 長瀬川上流端の積雪鉛直方向の断面観測と含有物質の検証

流域の空間に対する水平方向の積雪イオン組成の調査分析と並行して、長瀬川流域最奥部の上流端地域である長瀬川上流の福島県・山形県の県境(西吾妻スカイバレー沿線白布峠の自然積雪地点、標高：1,408m)で鉛直方向の断面の採雪を施し、イオン組成の分析を行った。図4に採雪位置を示す。この採雪は、冬季通行止め解除された5月(実施日：平成25年5月1日)に実施されたものである。実施時の積雪深は207 cmであり、10 cm間隔で鉛直方向に採雪し、計18ヶ所の積雪試料を取得した(上端、下端は除く)。水平方向のイオン組成と同様に採雪試料を低温融解し、イオンクロマトグラフィーを用いてイオン組成を分析した。また、本分析では、積雪中に含まれる含有物質も分析することにも試みた。高標高位置での含有物質を分析することにより、流出への影響度、および水源に対する水環境の変化を議論することが可能になる。方法として、融解した積雪水を濾紙に通して含有物質を抽出した。含有物質については走査式電子顕微鏡(以下 SEM：Scanning Electron Microscope)を用いて、形状、粒径を観察するとともに、蛍光 X 線を利用した元素分析を行った。

これら分析の試みより、積雪中の化学的精査より降雪の特性が理解でき、阿賀野川流域に及ぼす積雪の波及影響を誘導させる因子を求めることができる。しかしながら、こうした因子がどのよ

うに流域に到達するのかを明らかにしなければ、本質の波及影響を解明できない。そのため、積雪深度に応じた降雪状況を特定することが必要になる。特定には、高頻度の緻密な降雪の観測と分析の実施を伴うが、既に積雪鉛直方向断面観測に並行した降雪分析は実施されていないこと、また、観測点が流域の谷頭に近隣しており交通支障のため高頻度の緻密な観測は現実的でないことから、現時点では解析を進めることは実現できない。ただし、積雪内内部の固有変化等もあり不確実性も含まれるが、遠隔的手法による各種の空間情報や現在まで蓄積された一般的な積雪シミュレーション解析手法を利用すれば、積雪深度に応じた降雪状況をおおよそ推測することも可能である。以上より、気象空間情報や積雪シミュレーションの数値解析手法を利用して、積雪深度に応じた降雪状況を推測することも試みた。解析手法として Snow Water Equivalent モデル(以下 SWE モデルと呼称)(例えば So Kazama et al, 2008)を利用し、積雪の再現計算を行い積雪の逆算から各深度の降雪時期を推測した。SWE モデルは広範領域の空間情報に対応できる積雪水当量モデルであり、降雪量、日平均気温等の少数の計算パラメータで積雪状況を推定できる特徴を有している。以下、SWE モデルについて説明する。式(1)が SWE の基本式である。

$$\frac{d}{dt}(SWE) = SF - SM \text{-----}(1)$$

ここで、SWE は積雪水当量(mm)、SF は日降雪量(mm/day)、SM は日融雪量(mm/day)である。レーダアメダス合成雨量計(解像度 1km×1km)を利用することで観測地点の日降雨量を抽出し、雪氷比変換式(Byun, K.Y., et al, 2008)を用いることで降雪量 SF は求めた。式(2)は降雪量変換式、式(3)は雪氷比変換式を示している。なお、雪氷比変換式の係数 α, b, c に関しては日本列島に適用した事例(古市ら, 2010, 高野, 2013)を参考に $\alpha=1.74$,

b=1.93, c=-0.42 設定した.

$$SF = SWR \cdot P \text{-----}(2)$$

$$SWR = \alpha / (1 + \exp\{(T - b)/c\}) \text{-----}(3)$$

ここで SWF:雪水比(cm/mm), P:日降水量(mm), T:日平均気温(°C), α, b, c :回帰係数である. 融雪量 SM は Degree day 法を利用することで求める(例えば So Kazama et al, 2008)が, 表面融雪量しか考慮されていないモデルである. 本解析では, 柏らの手法(柏ら, 2010)にならない底面融雪量 2 mm/day を加えて融雪量 SM の評価を行った. 式(4)に融雪量推定式を示す.

$$SM = K \cdot T + 2(T > 0) \text{-----}(4)$$

ここで K:融雪係数(mm/°C・day)である. なお, 融雪係数は一般的に 4 から 8 の範囲であるが, 本解析では, 全体検討より実測日と一致する最適な値を採用することとした. 結果として K=4 を設定した. これら式(1)から式(4)により積雪水当量 SWE を求めることとするが, ここまでの積雪シミュレーションの数値解析手法には 2 つの課題条件が残される.

- ① 観測地点の日平均気温が不明である.
- ② 求められる値は積雪水当量であり積雪深と異なる.

課題①に関しては, 流域内の AMeDAS 気象観測所である檜原の日平均気温を利用して標高補正により日平均気温を求めることとした. この設定を根拠づける検討として流域内の AMeDAS 気象観測所である猪苗代, 檜原の日平均気温の比較をした. 検討過程結果として, 図 6 に猪苗代と檜原の気温比較検討図を示す. 図 6 より猪苗代, 檜原の日平均気温の関係は線形であり, 決定係数として $R^2=0.95$ 前後の極めて強い相関が理解できる.

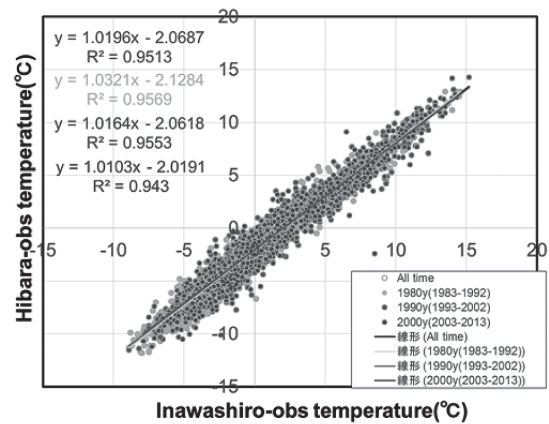


図 6 猪苗代と檜原の気温比較検討図

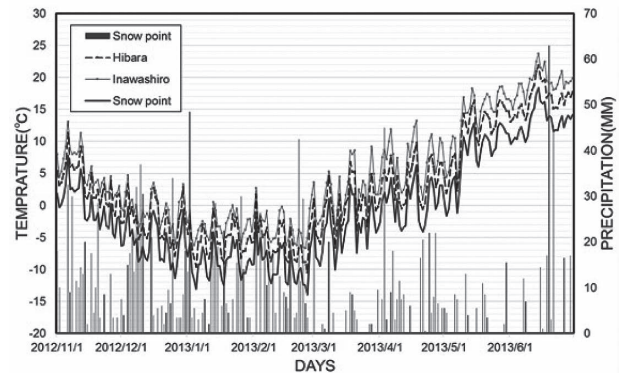


図 7 積雪鉛直方向断面観測位置の日降水量, 日平均気温

こうした結果は, 流域内の標高に対し定量的な気温低下する可能性を示している. また, 求められた関係式の切片から, 標高の低い AMeDAS 猪苗代から標高の高い AMeDAS 檜原に対して概ね 2°C の気温低下している状況が示されている. 標高関係より AMeDAS 猪苗代(EL=522 m)と, AMeDAS 檜原(EL=824 m)との比高差は 302 m であり, 比高差, 気温低下の関係を考慮すれば約 0.006°C/m の気温減率が見積もられる. この値は一般的な気温減率と一致し, 流域では普遍的な標高, 気温低下の関係が成立していることを示唆する. これらの結果から, 観測地点の日平均気温は, 気温減率 0.006°C/m の条件下で最近隣の AMeDAS 檜原の日平均気温を標高補正することで求めた. 図 7 に積雪鉛直方向断面観測位置の日

平均気温を示す。おおよそ11月中旬から3月下旬までは氷点下であり降水量が確実に降雪になる状況が見てとれる。また、上空の気温も踏まえ降雪シミュレーションモデル等で採用する降雪識別気温である2℃に着目した場合には、概ね11月中旬から4月中旬まで降雪になった可能性をもつ。

課題②に関しては、積雪深断面観測結果から積雪密度の平均値を求めて、積雪水当量から積雪深を変換することとした。

3. 積雪と周辺気象条件の統合的分析結果

日本海側表面海面水温と同調する阿賀野川流域における積雪量減少の傾向、および長瀬川流域の特異な積雪量増加傾向を分析するため、気象観測データを用い、「最大積雪深と降雪量の関係」、「寒候期平均気温と降雪率の関係」、「日本海水温と寒候期平均気温の関係」を検証した。検証より、海洋から地上までの気象状況の関連性を系統的に捉えることができる。

図8は阿賀野川流域における各 AMeDAS の積雪量と降雪量の関係を示している。図より、積雪量と降雪量は線形的な関係を示し、決定係数 $R^2=0.73$ の強い相関が認められている。したがって、降雪量が増加に並行して、積雪量も増加することが明らかである。こうした関係性から、近年に及ぶ積雪量減少は降雪量減少に起因し、例えば、温暖化により融雪加速して積雪量が減少していることではないことが理解できる。また、強い相関から、おおよそ降雪量の推計に従って積雪量を見積もれる可能性が明らかにされた。

図9は寒候期平均気温と降雪率の関係を示している。なお、降雪率とは、降水量に対する降雪量の比率と定義する。積雪量と降雪量の関係と同様に、寒候期平均気温と降雪率は線形の強い関係が示され、寒候期平均気温が高まれば降雪量が減少する傾向を示している。なお、線形関係は決定係数 $R^2=0.66$ の強い相関で示される。この検証よ

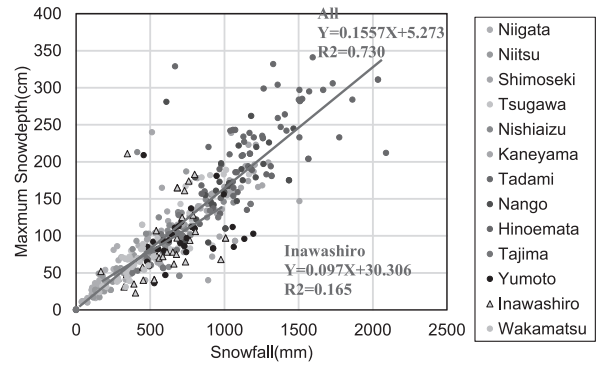


図8 阿賀野川流域における各 AMeDAS の積雪量と降雪量の関係

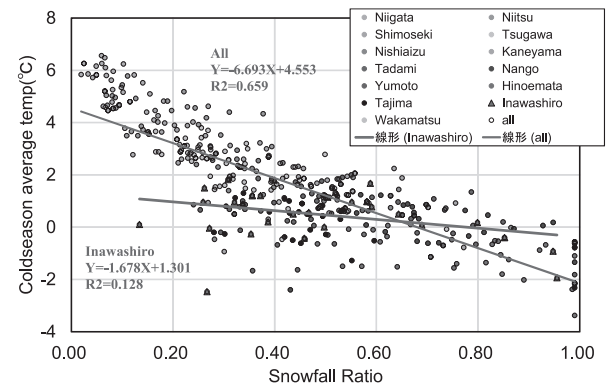


図9 寒候期平均気温と降雪率の関係

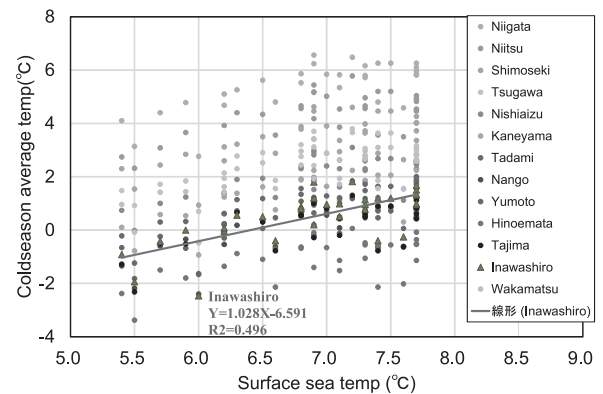


図10 日本海水温と寒候期平均気温の関係

り求められる結果として、平均気温上昇が寒候期の降雪、降雨の発生過程に影響していることを示唆する。また、図9の結果と比較すれば、現時点の現象から地上気温上昇は、融雪、降雪の過程において、降雪側への高い影響度をもつ可能性を示している。

図10は日本海水温と寒候期平均気温の関係を示している。図より、各観測地点に応じて海水温

上昇と並行して平均気温が上昇している傾向が見て取れる。最大積雪深と降雪量の関係、寒候期平均気温と降雪率の関係と比較すると、日本海水温と寒候期平均気温の関係は、全観測所を統括的に表現できるものではなく、地域的に温度上昇範囲のばらつきが認められる。

「最大積雪深と降雪量の関係」、「寒候期平均気温と降雪率の関係」、「日本海水温と寒候期平均気温の関係」の各々の関係より、現時点の現象から地上気温上昇に反応した降雪率の低下に伴い積雪量が減少している可能性が示唆される。この過程を考慮すれば、温暖化により少降雪となり、積雪量減少していくと見積もられる。しかしながら、この過程は、現在により成立している可能性もあり、例えば、春季の気温範囲まで上昇度が推移すること等によって更なる融雪過程の変化も生ずると推測される。気温に関しては地域固有性も含むため更に細かな分析が必要である。また、長瀬川の積雪の特異性に関しては、これらの検証から精読された結論が求められていないものの、日本海水温と寒候期平均気温までは周辺の AMeDAS 観測所のデータと調和した傾向を示しているものの、「最大積雪深と降雪量の関係」、「寒候期平均気温と降雪率の関係」から周辺と差異をもつ傾向が認められている。参考までに、現資料を利用した流域全体の比較表を表 1 に示す。例えば上空も含めた気温分布や長瀬川流域の水循環過程も踏まえた検討を加えて、特異な傾向を精読する必要がある。

4. 阿賀野川流域の積雪イオン組成の比較結果

図 11 に積雪のイオン含有量を沿岸域より配列させた結果を示す。図中の U は上層、M は中層、L は下層である。この結果から、内陸側になるにしたがってイオン含有量が減少していること、特に沿岸沿占拠率多く存在した Na^+ 、 Cl^- が大きく減少することが見てとれる。 Na^+ 、 Cl^- については、

表 1 長瀬川流域と阿賀野川全体の気象関係性比較

Relation	Obs point	Liner equation		determination coefficient
		Coe	Inter	
Snow depth and Snow fall	All	0.155	5.273	0.730
	Inawashiro	0.097	30.306	0.165
Snowfall and Temperature	All	6.690	4.553	0.659
	Inawashiro	1.678	1.301	0.128
Surface sea temperature and Temperature	All average	0.876	-4.352	0.453
	Inawashiro	1.028	-6.591	0.496

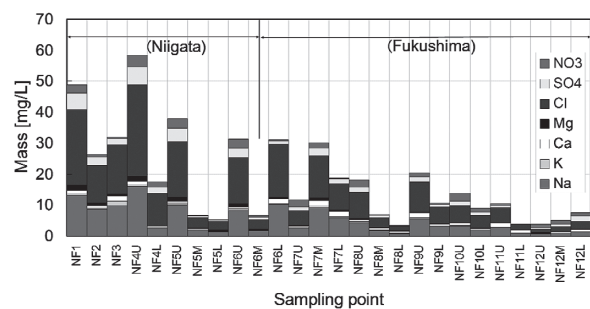


図 11 積雪のイオン含有量縦断面図

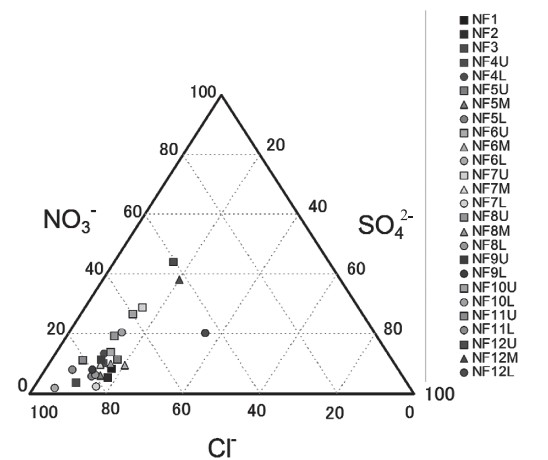


図 12 積雪中の陰イオン含有率の関係

海塩起源物質である可能性が高いが、こうした海塩起源の含む降雪は落下速度が大きいいため沿岸域付近で落下する形態が知られている(鈴木, 2012)。ただし、減少量著しいながらも、流路変更され、海岸距離 100 km を超過する長瀬川流域内(NF11, NF12)にも相応の Na^+ 、 Cl^- が含有されており、日本海沿岸起源の物質の到達とその影響も示唆される。図 12 は積雪中の陰イオン含有率の

関係を示した図である．ここでは湿性沈着に限定して支配的なイオン組成になる NO_3^- 、 SO_4^{2-} そして、日本海塩起源となりうる Cl^- の関係を示している．なお、ここに示される SO_4^{2-} は非海塩成分の $\text{Nss(Non Sea Salt)-SO}_4^{2-}$ であり、 Na^+ の全てが日本海塩起源と仮定し、以下の(5)式で求めたものである．

$$nss - \text{SO}_4^{2-} = \text{SO}_4^{2-} - 0.25 \cdot \text{Na}^+ \text{-----}(5)$$

また、図 13 に日本海沿岸からの距離にあわせた Na^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} の含有率、そして Cl^- と Na^+ の濃度比を示した．これらの結果より、 SO_4^{2-} は各地域共に含有率に変化は認められないものの、内陸側になるにしたがい Na^+ 、 Cl^- が減少、 NO_3^- が増加する傾向を把握した． Cl^- の減少に関しては、海塩起源の含む降雪落下速度が大きい形態を示し、沿岸域付近で落下する過程を示すと推測される．また、 NO_3^- の増加する傾向に関しては、排気ガス中などの人為的活動による窒素酸化物の酸化が影響しているものと推測される．特に、変動が大きいエリアは長瀬川流域の NF12 である．こうした背景として、河道流路、および斜面傾斜方向が阿賀野川流域と異なり北→南に変化していること、水面面積の大きな猪苗代湖を挟んでいること可能性が挙げられる．イオン組成の変化は、地形方向変化や土地被覆の地局的条件に応じた降雪、もしくは積雪形成過程の影響を含む可能性を示している．

5. 長瀬川上流端の積雪鉛直方向の断面観測と含有物質の検証結果

特異な積雪状況を示す長瀬川流域水源部で実施した鉛直方向断面の積雪イオン含有量と積雪密度の関係を図14に示す．図中のD1が最上層(GLより190 cm 以下ポイントにおける位置をGL+〇〇mと表示する)、D18が最下層(GL+20 cm)であ

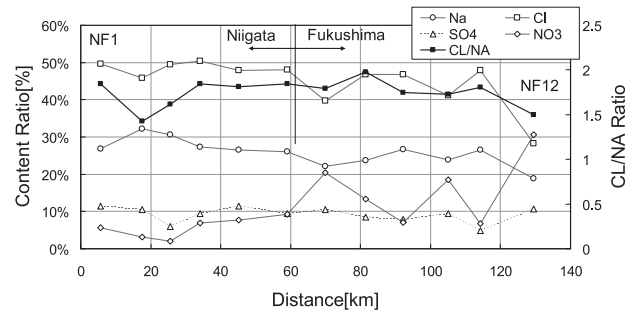


図 13 Na^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} の含有率推移

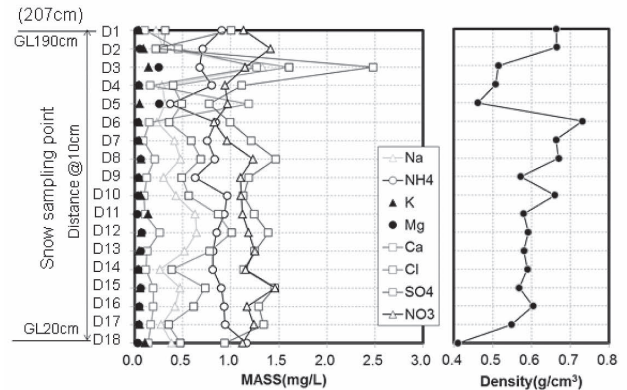


図 14 鉛直方向断面の積雪イオン含有量と積雪密度の関係

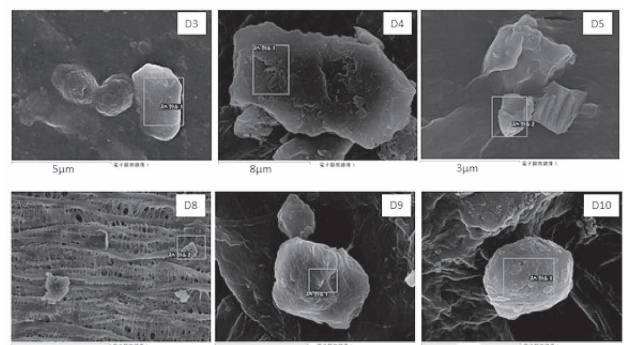


図 15 各ポイントの SEM 分析画像

表 2 各ポイント代表的含有物質の元素分析結果

ポイント位置	粒径(μm)	形状	元素組成
D3	GL+170cm	3.0μm	垂円形
D4	GL+180cm	12.0μm	五角形
D5	GL+190cm	1.0μm	垂円形(結合)
D8	GL+120cm	6.0μm	三角形
D9	GL+110cm	7.0μm	四角計
			MgO (6.17%), Al_2O_3 (21.40%), SiO_2 (42.19%), K_2O (1.30%), TiO_2 (6.74%), FeO (22.19%)
			CO_2 (99.08%), Al_2O_3 (0.16%), SiO_2 (0.17%), SO_3 (0.59%)
			MgO (4.95%), Al_2O_3 (30.28%), SiO_2 (55.14%), K_2O (2.90%), FeO (6.74%)
			MgO (0.75%), Al_2O_3 (7.05%), SiO_2 (17.29%), K_2O (2.04%), FeO (2.5%), O (62.15%)
			MgO (2.28%), Al_2O_3 (7.06%), SiO_2 (28.26%), K_2O (1.71%), FeO (6.67%), O (62.36%)

る．イオン含有量の明瞭に変化するポイントは D3(GL+170 cm)から D5(GL+150 cm)の範囲、およ

びD8(GL+120 cm)から D10(GL+100 cm)である。双方のポイントで特に著しい増減を示すものが SO_4^- , Cl^- の陰イオンであり、このポイントに関するれば、並行して Ca^{2+} が増減すること、概ね積雪密度 0.4 から 0.7 g/cm^3 であり、ざらめ雪の範囲にあるものの周辺ポイントで積雪密度が変化していること等の特徴が見てとれる。こうしたポイントの相互関係より、積雪の融解過程の中で析出されたイオンが流出した状況が推測される。これらの推測の結果は、鉛直方向での融解現象であるため、空間的な代表性を示すものではない。しかしながら、こうした積雪中の各々のポイントでの融解現象が降雪による特徴に起因している可能性もある。以上より特徴的なポイントに対する含有物質をSEMにより分析した。ここでは各ポイントで可視化された主要な含有物質について説明する。図15はD3, D4, D5, D8, D9, D10のSEM画像、表2は含有物質の元素組成を示したものである。D8からD10に関するれば、酸化物が多く含まれており、D3からD5に関するれば、D3で土粒子であることを示唆するSi, Fe, Al, Tiが含まれている。また、Tiを含まないものの相対的にD5もD3に似通った元素組成をなしている。こうした元素の由来として、大陸からの風送が示唆される。大陸由来である場合、 Na^+ , Cl^- もしくは Ca^{2+} の海塩粒子の存在も考えられるが、内陸側になるにしたがい Na^+ , Cl^- が減少する過程と、積雪のイオン組成に Ca^{2+} が多く含まれている。以上よりD3,D5の状況から、地形条件等に関わらず比較的に積雪履歴の新しい春季の降雪は大陸起源の物質の送風、日本海で降雪粒子に吸収されている影響を示唆する。また、 Ca^{2+} の溶出もこの過程を示唆するものである。

積雪シミュレーション解析手法の結果として、図16に観測ポイントの日平均気温・降雪量・積雪水当量推測結果図、図17に積雪内訳分類図を示す。図16より積雪鉛直方向断面観測の実施日である2013年5月1日は最深積雪記録期間(およそ積雪水当量130から140 cm)の末期であるこ

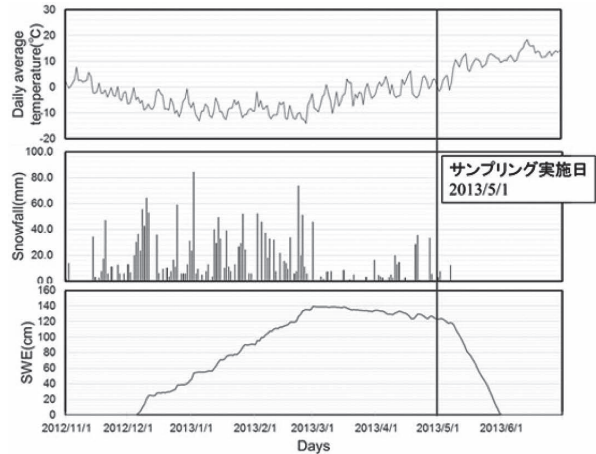


図16 観測ポイントの日平均気温・降雪量・積雪水当量推測結果

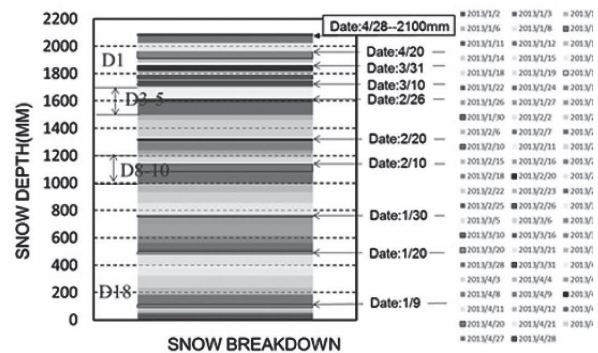


図17 積雪内訳分類図

とが見積もられる。これ以降の5月中旬以降は気温上昇に従い加速的に融雪が進んでおり、およそ観測は降雪情報の集積した時期に実施された可能性が高い。図17に示された積雪内訳分類から、積雪鉛直方向断面観測により明らかにされた積雪深度に応じたイオン含有量、および含有物質の特徴的深度の積雪時期は以下と推定される。

- ① GL+170 cm から 150 cm (D3 から D5) → 2014年2月23日から2014年3月6日
- ② GL+120 cm から 100 cm (D8 から D10) → 2014年2月6日から2014年2月16日

GL+170 cm から 150 cm(D3 から D5) の範囲で含有物質として酸化物が多く認められることに関しては、酸化の過程が多様であるため特定が困難である。その一方で、GL+120 cm から 100 cm(D8

から D10)の範囲における含有物質の Si, Fe, Al, Ti に関しては基質の化学原子であるため、相対的に推測可能なものと考えられる。そこで、SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species ; 大気浮遊粒子状物質 (エアロゾル) 移流拡散シミュレーションモデル) (Takemura et al, 2009, 竹村, 2014)を用いてエアロゾルの大気移流, 拡散の空間情報と降雪の関係を時間的に比較した。SPRINTARS は東京大学大気海洋研究所, 国立環境研究所, 海洋研究開発機構が開発した対流圏に存在する自然起源・人為起源の主要エアロゾルシミュレーションモデル結果であり, 黒色炭素, 有機物, 硫酸塩, 土壌粒子, 海塩粒子等によるエアロゾル時空間情報が示されている。この結果によれば, 福島県領域に大陸起源のエアロゾル濃度の高まりは 2 月上旬から断続的に認められている。常時高濃度エアロゾルの常時停滞する時期はおおよそ 2 月 27 日以降である。なお, 2 月下旬から 3 月までの降雪量発生日を確認すれば, 2 月 26 日までは連続的に降雪が認められるが, 3 月 1 日(SF=46 mm), 3 月 5 日(SF=4 mm), 3 月 6 日(SF=2 mm), 3 月 8 日(SF=7 mm), 3 月 10 日(SF=8 mm), 3 月 16 日(SF=5 mm), 3 月 19 日(SF=1 mm), 3 月 21 日(SF=17 mm)と疎らになる。Si, Fe, Al, Ti を含有する層厚は 1 m と比較的に幅広いこと, 黄砂であることを示唆する Ca^{2+} が積雪のイオン組成として増加していることより, 降雪イベントを通じてエアロゾルが湿性沈着し積雪内に含有物質となった可能性も推測される。なお, この考察は, 阿賀野川流域で特異な積雪傾向を示す長瀬川流域であるが, 流域を覆うような大陸からの由来のエアロゾルの影響も受けている可能性を示唆している。エアロゾルが高濃度になりやすい時期は 2 月下旬以降と考えた場合, 固有的な影響が 2 月下旬以前に生じていることも考えられる。こうした流域の積雪固有性を誘導する要因としては長瀬流域下流に位置する猪苗代湖の水温変化に伴う水循環変化, 気温

冷却効果等の影響なども挙げられ, 猪苗代湖を含めた広域の気象, 水文量の緻密な比較分析や追加調査を引き続き検討する必要がある。

III. 融雪時期の現地調査・水質分析

1. 調査・分析の概要

I 章に示す通り, 現地踏査から, 融雪時期に桧原湖, 小野川湖, 秋元湖の三湖の間は湿地帯に変化することが確認され, 他の湖沼への水質の影響が示唆される。ただし, 単純な湖沼水の流入が水質に影響を与えているだけではなく, 五色沼の一つである竜沼では, 柳沼と弁天沼の異なる水質の水が流入しているにも関わらず, 水質がその二つの湖沼の平均にならないことも確認されている(千葉ら, 1986)。そのため, 多岐に存在する水質を把握し, 相互関連性を求めることが必要である。本研究では, 融雪時期に, 裏磐梯湖沼群および, 周辺の湿地帯の多点で採水を行い, 水質分析に取り組んだ。水質の空間的な分布状況を把握するとともに, 水質の位置的な相互関係より, 水質形成過程の推測を試みた。

2. 解析方法, およびデータセット

裏磐梯湖沼群の空間的な水質分布の把握を目的に, 集水面積の大きな裏磐梯北部エリアを中心に現地調査, および採水を実施した。採水位置は図 18 に示すとおりであり, 流域内の河川, 湖沼, 湧点(計 60 地点)で採水を試みている。採水した試料は, イオンクロマトグラフィーよりイオン測定された。これらの水質結果についてトリリニアダイアグラム, 水質マップに図化し, 分析を試みた。水質マップは, トリリニアダイアグラムにより 4 タイプ(アルカリ土類非炭酸塩: I 型, アルカリ土類炭酸塩: II 型, アルカリ炭酸塩: III 型, アルカリ非炭酸塩: IV 型)に分類した結果を記載したものである。空間的な水質の相互関係を把握できるアウトプット作成を試みた。

3. 調査、分析の解析結果

採水試料のイオン組成分析結果を図 19 のトリリニアダイアグラム、図 18 の水質イオン分類マップに示す。なお、図 18 は近隣関係よりデコ平湿原、桧原湖、曾原湖、小野川湖、五色沼、秋元湖の 6 ブロック領域に分類した結果を示している。

採水を行った湖沼群および周辺の湿地帯における 60 地点のうち、多くがⅡ型、Ⅳ型に分類されていることが確認された。Ⅱ型に関すれば、桧原湖と小野川湖の境界に位置する湖沼、湧点に偏り分布する。Ⅱ型は一般的に Ca-HCO_3 に富む河川水や浅層地下水の影響を受けたものである。また、参考として前章に示した当該地上流域の積雪もおおむねⅡ型に分類される。こうした相互関係から、流域上部の融雪と、桧原湖と小野川湖の境界に位置する湖沼、湧点の地表水、地下水と同じイオン組成である可能性が示唆された。この結果は、以下の 2 つの流出過程を示唆している。

- ① 現地で融解した雪が、地下浸透しきれずに滞水する。
- ② 流域上流からの融雪水が、周辺の帯水と混合することなく、地表、表層で速い流出をしながら桧原湖と小野川湖の境界で湧出する。

現地調査より桧原湖と小野川湖の境界に位置する湖沼、湧点の地表水、地下水は、季節により量が増減するものの、冬期間も湧出している様子が確認されている。絶えず地下水が高位であることが示されており、流出過程①、②ともに想定される現象である。今後、これらの過程を解明するための緻密な調査の実施を行う必要がある。Ⅳ型に関すれば、特に流域の西部側に磐梯山周辺に偏り分布する傾向が明らかにされた。Ⅳ型は、 Na-Cl に富む温泉水に属するが、火山性地下水の影響を強く帯びている可能性を示唆している。なお、大局的な偏りをもつⅣ型の分布のなかで特異なポイントは、桧原湖北部の流域谷頭付近に広がるデコ平湿原(EL=約 1,310 から 1,320 m、ポイント D3

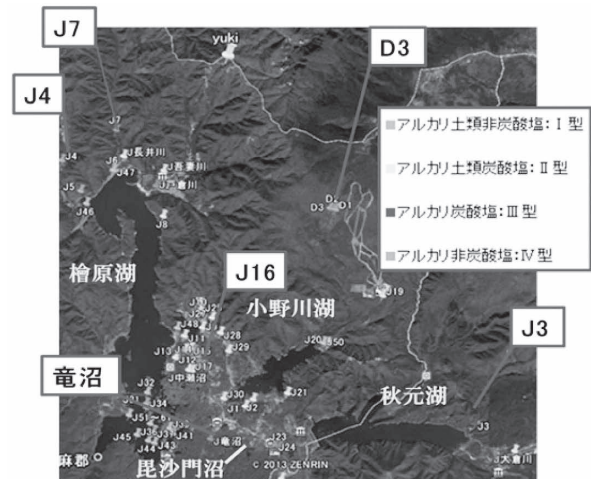


図 18 採水位置、および水質イオン分類マップ

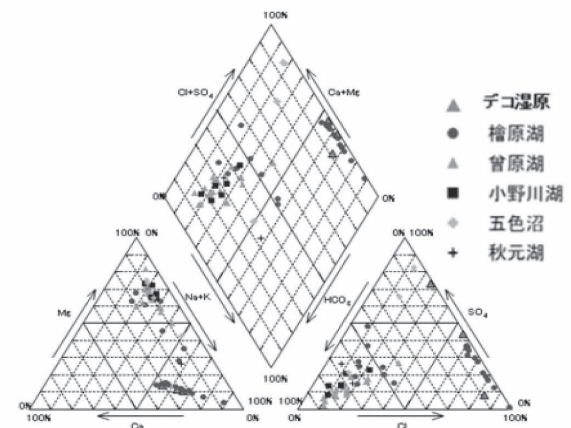


図 19 トリリニアダイアグラム結果

等)である。デコ平湿原に関すれば、位置的に多積雪地域のため、Ⅱ型に示される表流水、浅層地下水に関連深いことが有力である。この過程と反する結果は、空間性よりも特異な流出系統で湿原が形成されていることを示唆している。

Ⅳ. 積雪と地表水、地下水の関係性分析

裏磐梯湖沼群の採水、および水質分析の結果として、多くがⅡ型、Ⅳ型に分類されていることが確認された。また、融雪時期のイオン組成の空間分布は、図 20 に示される区分になると推測される。概ね桧原湖周辺でⅡ型、Ⅳ型に分類され、磐梯山の分布する西側が Na-Cl に富む温泉水、流域の奥部となる標高の高まる山の連なる北東側が

Ca-HCO₃ に富む河川水や浅層地下水の影響を受けている結果を得た。なお、北東側には一部でⅣ型とⅢ型の局所的な区域が分布する。Ⅲ型の分布するエリアが湖沼群流末側の湖沼、Ⅳ型の分布するエリアがデコ平湿原から小野川湖である。北西側のⅣ型領域に関してはスポット的に存在しており、極めて特異な分布を示している。本章では、水質分析より大局的に分類されたイオン組成について、特徴的なポイントを抽出したのち、各々のイオン組成の濃度を細かに比較検討することとした。また、比較のベースデータを地形的に当該対象地域の水循環に支配的になりうる流域上端部の積雪(底部、Ⅱ型)、桧原湖(底部、Ⅳ型)を設定して検討を試みた。なお、比較として抽出したポイントのイオン組成は、①秋元湖流入口付近(ポイント：J3、地表水、Ⅲ型)、②大川入川(ポイント：J4、地表水、Ⅳ型)、③長井川(ポイント：J7、地表水、Ⅲ型)、④レンゲ沼付近(ポイント：J16、湧水、Ⅱ型)、⑤デコ平湿原(ポイント：D3、湧水、Ⅳ型)である。

図 21 は流域上端部の積雪(底部)と桧原湖(底部、Ⅳ型)と諸ポイント試料のイオン組成比較検討図である。これらの比較より特に変動幅の大きなイオンが SO₄²⁻と Na⁺である。顕著な増加を示すポイントは、SO₄²⁻について竜沼、Na⁺について竜沼、デコ平湿原である。なお、裏磐梯温泉のイオンに関すれば SO₄²⁻、Na⁺、Cl⁻が多いため、竜沼、デコ平湿原はこうした地域固有性を帯びているといえる。ただし、SO₄²⁻については、水源から流末に至るまで脱窒反応生成物の NO₃⁻の減衰過程により増加する過程もある。竜沼は、Ⅱ型、Ⅳ型、Ⅲ型の境界付近であり溶存成分の多さから SO₄²⁻も著しく増加している可能性も推測される。また、デコ平湿原における特異な流出系統で湿原は、Na⁺が多い特徴を有していることが理解でき、同じⅢ型の大川入川と異なることが明らかにされた。

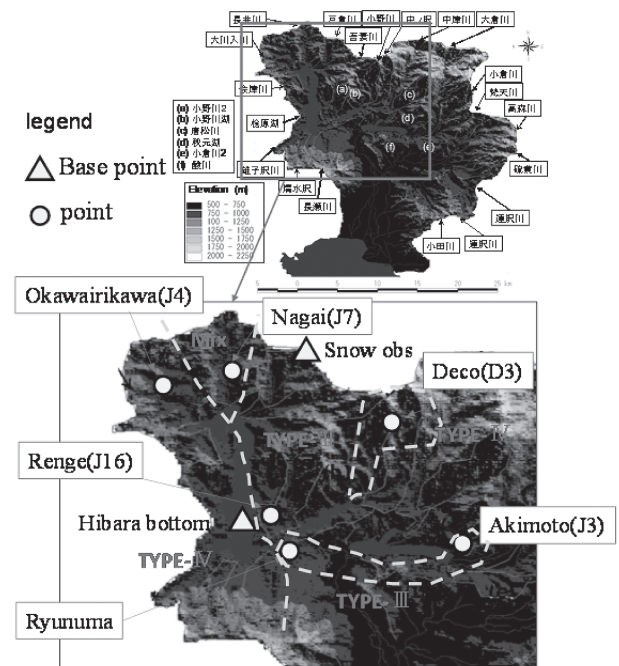
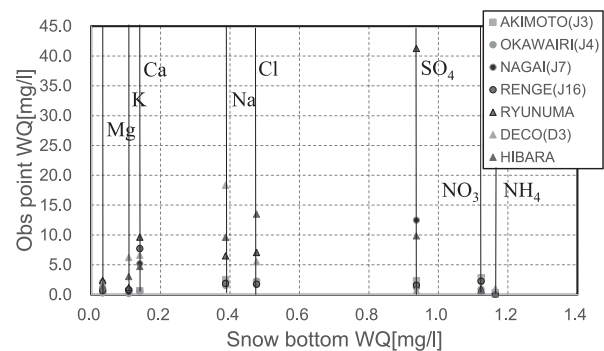
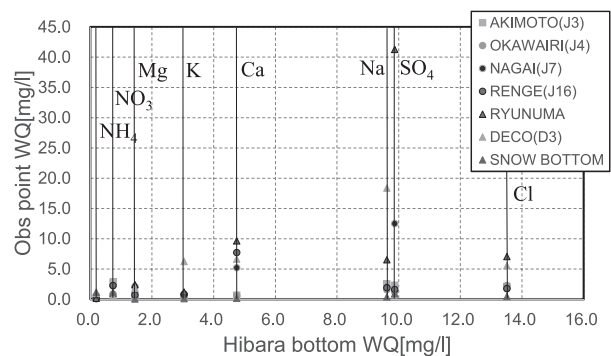


図 20 水質イオン分類統括図



(a) 積雪ベース



(b) 桧原湖ベース

図 21 イオン組成比較検討図

V. おわりに

裏磐梯湖沼の水環境遷移の原因となる要因の因果関係、影響度を見積もる目的で、陸域内の流出を促進させる積雪に関わる分析を試みるとともに、融雪時期の裏磐梯内の水質イオン組成調査と積雪との関係性を解析した。解析結果を以下の①から⑦に列挙する。

- ① 近年の積雪、および寒候期気象状況と日本海側表面海面水温の関係性検証より、阿賀野川は地上気温上昇に反応した降雪率の低下に伴い積雪量が減少している可能性が明らかにされた。
- ② 積雪、および寒候期気象状況と日本海側表面海面水温の関係性検証より、長瀬川の積雪の特異性に関しては、最大積雪深と降雪量の関係、寒候期平均気温と降雪率の関係で流域全体と差異をもつ傾向が明らかにされた。
- ③ 積雪イオン組成の空間分布より、内陸側になるにしたがい Na^+ 、 Cl^- が減少、 NO_3^- が増加する傾向が明らかにされた。 Cl^- の減少に関しては、海塩起源の含む降雪落下速度が大きい形態を示し、沿岸域付近で落下する過程を示すと推測される。また、 NO_3^- の増加する傾向に関しては、排気ガス中などの人為的活動による窒素酸化物の酸化が影響しているものと推測される。
- ④ 積雪イオン組成の空間分布より、イオン組成の変動が大きいエリアは長瀬川流域であることが明らかにされた。
- ⑤ 席切断面観測より、GL+170 cm から 150 cm, GL+120 cm から 100 cm で固有性をもつ含有物質が認められ、数値シミュレーションより、エアロゾルが高濃度になりやすい時期2月下旬以降の積雪であることが求められた。
- ⑥ 裏磐梯湖沼群の採水、および水質分析より、多くがⅡ型、Ⅳ型に分類されていることが確認された。また、融雪時期のイオン組成の空間分布は、概ね桧原湖周辺でⅡ型、Ⅳ型に分

類され、磐梯山の分布する西側が Na-Cl に富む温泉水、流域の奥部となる標高の高まる山の連なる北東側が Ca-HCO_3 に富む河川水や浅層地下水の影響を受けている結果を得た。

- ⑦ 裏磐梯湖沼群の採水、および水質分析より、なお、北東側には一部でⅣ型とⅢ型の局所的な区域が分布することが明らかにされた。

これらの結果を得たことで、裏磐梯流域はグローバル規模の影響が認められる一方で、その影響は流域固有の気象、水文現象により阿賀野川流域では特異な傾向を示すことが確認された。今後、裏磐梯の気象、水文現象のデータを更に取得、整備し、裏磐梯湖沼の水環境遷移の原因となる要因の因果関係、影響度を見積もる予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、走査式電子顕微鏡分析において高瀬つぎ子特任准教授、水質分析において藪崎志穂特任助教、数値地理情報解析において江坂悠里教務補佐員の協力を得た。また、流域環境システム研究室の学生には採水、採雪の協力を得た。この場を借りて深く感謝する。

引用文献

- Akiyama, T. (1981) Time and spatial variations of heavy snowfalls in the Japan Seasonal region. Part II: Large-scale situations for typical spatial distribution of heavy snowfalls classified by EOF. Journal of Meteorological Society of Japan, 59, 591-590.
- Byun, K.-Y., J. Yang, and T.-Y. Lee (2008) A Snow-Ratio Equation and Its Application to Numerical Snowfall Prediction. Wea. Forecasting, 23, 644-658.
- 千葉茂・朝倉誠司・松本仁志(1986)裏磐梯五色沼の水質とその成因について、福島大学理科報告, 38, 19-29.
- 福島県 (2012) 猪苗代湖及び裏磐梯湖沼水環境保

- 全推進計画(中間整理案), <http://wwwcms.pref.fukushima.jp/download/1/keikaku.pdf>, Cite Viewed 03/02/2014.
- 古市豊・小泉友延・松澤直也(2010) 気象庁における降雪量ガイダンス. ワークショップ「降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究(第8回)」, (独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター, http://www.bosai.go.jp/seppyo/kenkyu_naiyou/confws/kouws201003/ws-abst/abst/HURUICHI.pdf, Cite Viewed 03/02/2014.
- 環境省(2009) 温暖化影響総合予測プロジェクト報告書, <http://www.env.go.jp/press/press.php>, Cite Viewed 03/02/2014.
- 柏俊輔・風間聡・朝岡良浩(2010) 降雪分布推定と融雪洪水解析モデルの構築, 河川技術論文集, 16, 289-294.
- 気象庁(2013) 海面水温の長期変化傾向(日本近海), http://www.data.kishou.go.jp/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html, Cite Viewed 03/02/2014.
- 中村光宏・佐藤佑哉・川越清樹(2013) 気候変動による裏磐梯地域の水環境変化の予測, 第21回地球環境シンポジウム講演集, 167-172. So Kazama, Hirokazu Izumi, Priyantha Ranjan, Takayuki Nasu, and Masaki Sawamoto(2008) Estimating snow distribution over a large area and its application for water resources, Hydrological Processes, 22, 2315-2324.
- 鈴木啓助(2000) わが国における雪氷化学研究, 雪氷, 62, 185-196.
- 鈴木啓助(2012) 季節積雪地域の雪氷化学, 低温科学, 70, 119-129.
- 高野哲夫(2013) 新潟県中越地方における降雪量と時間帯の関係, 天気, 60, 89-94.
- Takemura, T., M. Egashira, K. Matsuzawa, H. Ichijo, R. O'ishi, and A. Abe-Ouchi (2009) A simulation of the global distribution and radiative forcing of soil dust aerosols at the Last Glacial Maximum. Atmospheric Chemistry and Physics, 9, 3061-3073.
- 竹村俊彦(2014) SPRINTARS, <http://sprintars.riam.kyushu-u.ac.jp/index.html>, Cite viewed 03/02/2014.
- Yoshihiro ASAOKA, Yukari Takeuchi and Ranjan Sarukkalige(2012) TEMPORAL VARIATIONS IN ACIDITY AND ION CONCENTRATIONS OF PRECIPITATION, SNOWPACK AND OUTFLOW FROM SNOWPACK IN A TEMPERATE SNOW AREA OF JAPAN, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 30, 63-76.