

28. 気候変動による裏磐梯地域の水環境変化の予測

中村 光宏¹・佐藤 佑哉²・川越 清樹^{2*}

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

²福島大学共生システム理工学類（〒960-1296福島県福島市金谷川1）

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

気候システムの温暖化による影響から懸念される積雪を対象に空間的な特徴を把握する調査分析を阿賀野川流域で試みた。また、その結果を基に裏磐梯における水環境変化の見積もりを検討した。結果として、阿賀野川流域では概ね同様な積雪プロセスが認められ、統計的にも温暖化を示唆する統計的な関係も得た。しかしながら、流域の一部では、特異な領域も存在しており、裏磐梯地域では積雪増加傾向、イオン組成の著しい変化の傾向が把握された。長瀬川流域の湖沼では、一部で環境基準以下の水質、湛水赤潮、湖沼水の色調変化等の変化が認められており、水環境の遷移が示唆されている。

Key Words: Water quality, snow depth, ion composition, Japan sea

1. はじめに

気候システムの温暖化に起因した降水事象の変化による水環境、水災害、水資源等の影響が見積もられており、維持、保全もしくは、将来的変化に適応させるための対策が必要とされている¹⁾。これら水分野の将来の課題に関わり検討しなければならない一つが降雪、積雪の事象変化に伴う影響あり、特に豪雪地域、およびその周辺の地域に対する今後の水管理に大きく関与するものとなる²⁾。将来の水管理策を設計、計画する上で、「近年の降雪、積雪現象の動向」を把握しどのような問題が生じているのか、「近年における降雪、積雪現象の水分野への応答」、「気候システムの温暖化に伴う降雪、積雪の予測」を踏まえて現在の問題がどのように拡大するのかを検討していく必要がある。

これらを背景に本研究では、研究の対象流域として阿賀野川流域を設定し、以下の積雪、降雪調査解析を試みた。

- ① 近年の積雪深状況と周辺環境の関係性検証
- ② 流域における積雪の化学的分布状況の把握

①により近年の積雪動向、②により問題の波及性を見積もることとした。これらの取り組みにより、豪雪地域、およびその周辺の地域に対する今後の水管理の基礎データ取得を試みる意向である。

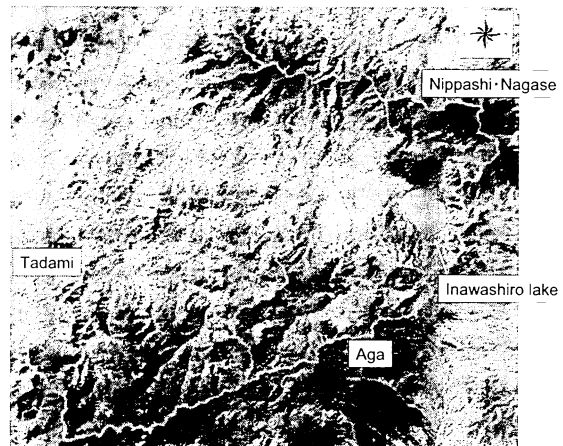


図1 調査対象流域

2. 研究対象流域と特徴

研究対象領域となる阿賀野川(図1 参照)は、上流域に只見川、阿賀川、および猪苗代湖を含んだ長瀬川一日橋川の3つに大別される支川を含む全長210km、流域面積7710km²の流域である。当該河川は、栃木県、福島県、新潟県の急峻な山岳地を水源とし、この領域に分布する豊富な積雪を集水することと、比較的に大きな流域面積であることから日本最大級の年間流量(年平均12,671Mm³、日本4位)を流出している。また、積雪に寄与される安定かつ豊富な流出より、水力発電施設が数多く分布する。

当該流域の豊富な流出量は積雪量に依存しているが、日本海沿岸の持つ気候的な特徴と流域のにおける地形的要因がこのような多雪を生じさせている。東北地方日本海側から北陸地方は、冬季西高東低の気圧配置よりシベリア、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。この東進する気団が、温暖多湿な日本海上空を通過することで大量の水蒸気を含み雲発達をさせることにより多雪を生じさせている³⁾。加えて阿賀野川流域は、北日本の列島の脊梁をなす急峻かつ高標高の出羽山地、奥羽山脈を東西方向に貫き低地が形成されており(図2 参照)、流域全体まで寒冷気の流入しやすい地形状況を呈している。そのため、流域全域が多雪地帯となっている(図3 参照)。

3. 調査解析方法、およびデータセット

以下の①、②に取り組むにあたり、各解析と調査分析を試みた。

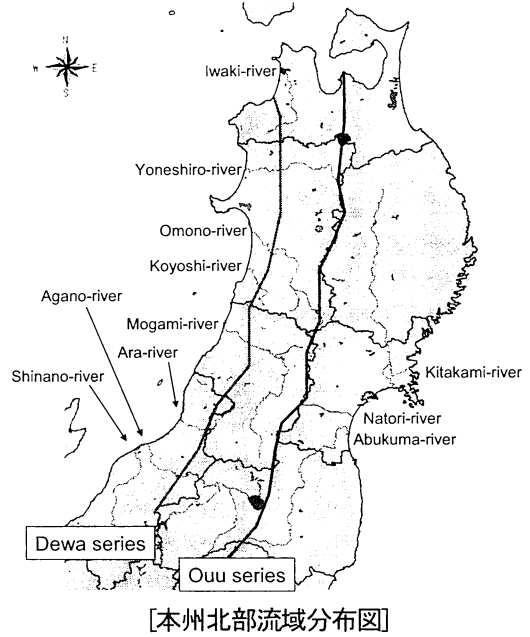
- ① 近年の積雪深状況と周辺環境の関係性検証
- ② 流域における積雪の化学的分布状況の把握

(1) 近年の積雪深状況と周辺環境の関係性検証

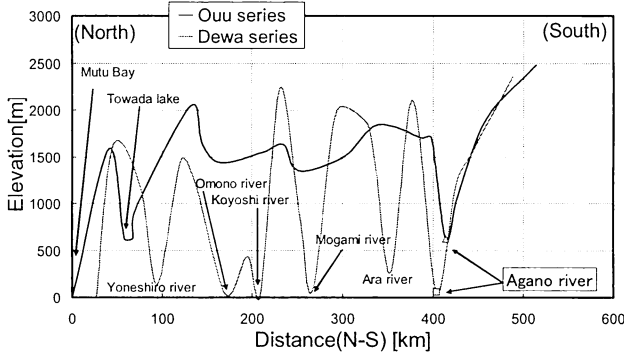
近年の積雪データとして阿賀野川流域内のAMeDAS観測地点の積雪深データ⁵⁾、周辺環境データとして日本海北東部平均海面温度データ⁶⁾を取得し、これらの関係を定式化することで、各地域の積雪特性を判別した。周辺環境データとして設定した日本海北東部平均海面温度に関しては、気候システムの温暖化に関する傾向を把握できる要素になるため、今後の予測研究への発展性を検討できるものである。乾燥、かつ寒冷な気団による日本海上の通過と積雪状況の気候特性を踏まえた解析として、既に安田が只見流域の降雪と日本海側表面海水温の強い相関を示すことを報告している⁷⁾。本研究では、研究事例の追跡検討として、阿賀野川流域全域に積雪検討領域を拡張し、積雪と日本海側表面海水温の関係性を検証する。図4は検証に用いたAMeDAS観測地点(計13ヶ所)を示した位置図である。なお、解析期間は1983年から2011年までである。

(2) 流域における積雪の化学的分布状況の把握

海面、積雪の関係把握に関しては、計測データの関係性を検証するだけでなく、積雪の構成を化学的に求めるアプローチも効果的である。積雪は温度、水蒸気の物理量や大気情報を記録し残される生成物である⁸⁾。そのため、イオン組成を分析し、空間的な広がりと同定していく、もしくは変質を推測していくことは、周辺環境と降水、もしくは水環境の変化を類推ことに有効である。以

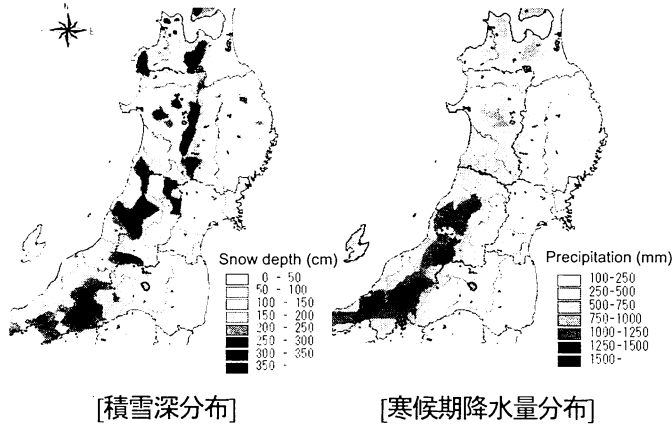


[本州北部流域分布図]



[本州北部標高縦断面図]

図2 流域地形概要図



[積雪深分布]

[寒候期降水量分布]

図3 本州北部気候分布図

(気象庁監修:メッシュ気候値 2010⁺をマップ化)

上より、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号線沿線の積雪を採取し、積雪のイオン組成を分析することを試みた。この調査は、平成25年2月22日に実施されたものであり、国道49号線沿線で自然積雪地点を抽出して採雪を行った。その後、イオンクロマトグラフィーを用いて採雪試料のイオン組成を分析

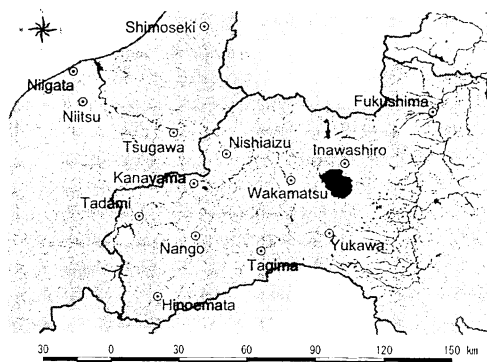


図4 調査解析AMeDAS観測地点位置図

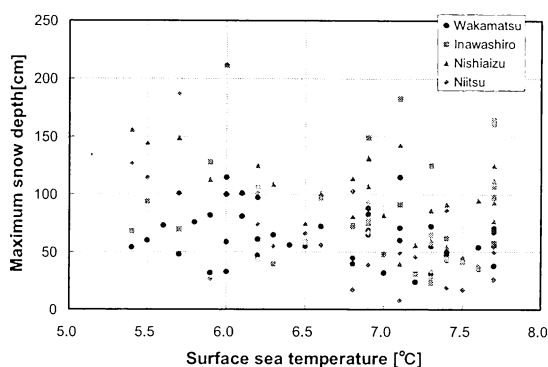
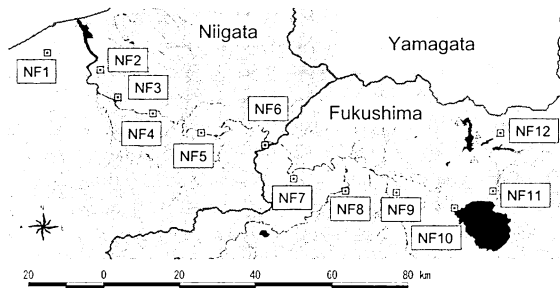
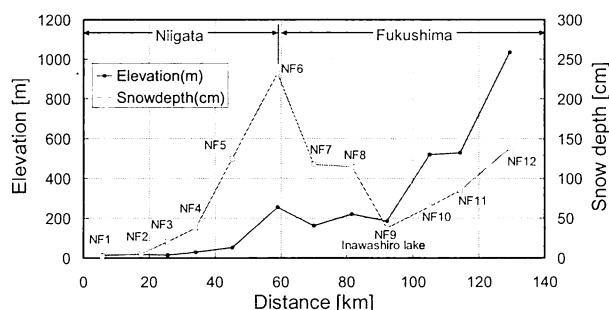


図7 調査解析 AMeDAS 観測地点位置図



[採雪位置図]



[採雪縦断面図]

図5 国道49号採雪ポイント概要図

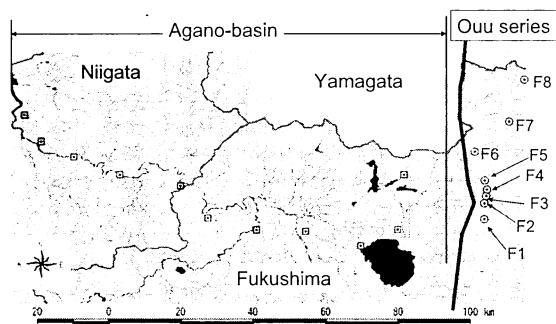


図6 阿賀野川流域地外採雪ポイント概要図

した。また、参考として、阿賀野川流域境界付近(阿武隈川流域内)の奥羽山脈でも同様の採雪、分析を行った。

図5は国道49号線沿線の積雪地点の位置(採雪ポイントはNF0)、および縦断関係と積雪深を示したものである。図6は阿武隈川流域で採雪したポイント(採雪ポイントはFo)を示したものである。なお、計測実施時の積雪状況が図5に示されているが、新潟・福島県境で約240cmの

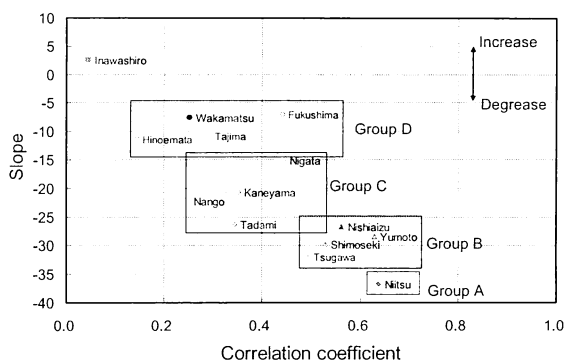


図8 日本海水温と積雪量の関係性分析図

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50cmの状況であった。平地に関する積雪に関しては、根雪でない可能性も示唆される。

4. 日本海水温と積雪量の関係性の検証

阿賀野川流域全域の年最大積雪深と日本海側表面海水温の関係性を検証した。図7に関係図の一例を示す。また、図8は、年最大積雪深と日本海側表面海水温の関係を線形式で示した場合の傾きと相関係数の関係を図化したものである。傾きは海水温度による積雪深の変動量を示す。相関係数はその関係性の強さを示す。相関係数が低い場合は海水温と無関係であることを示唆している。

各AMeDAS観測所の傾きの状況より、阿賀野川流域の概ねは海水温の上昇に従って積雪深が減少する特徴を示すことが明らかにされた。なお、解析期間である1983年から2011年よりさかのぼって北東部平均海面温度を検証すると、1950年から1980年の平年値が6.47℃、1980年から2010年の平年値が6.88℃であるため近年の海面温度の上昇が認められている。最近10年間においては、7.18度であり水温上昇増加量が増している。この結果より、近年になり日本海東部の水温は上昇傾向にあることが示され、また、この水温変化に応じて阿賀野川流域の積雪量は減少傾向にあることを示唆している。実際に各AMeDAS観測所の最大積雪深を経年変化で確認すると、

多少のバラツキが認められるものの近年の積雪深は減少の傾向にある。ただし、物理的な解釈を加えると、この海水面温度の上昇は、従来よりも多くの蒸発を促す要因にもなるため、実際には東北地方日本海側から北陸地方には多降雪を生じさせるものになりうる。本田らによる2009-2010年の日本海沿岸域の豪雪の研究成果によると、この時に日本海の海面水温が記録的な高温異常が生じていたとも報告されている⁹⁾。水温上昇と積雪深の関係に対する物理的解釈と可逆な関係が示されることに関しては、①平均的水温と短期スパンの水温の時間スケールの差異より平均的气温による積雪評定は現象を再現できていない可能性があること、②陸域も温暖化しているため寒候期の降水量自体は海水温の影響により増加しているものの、降雪量が減少、および降雨量による融解の影響により、積雪深さが減少していることの2つの原因が挙げられる。理由②に関しては、別途の調査解析より¹⁰⁾、寒候期の降水量自体は明瞭な傾向は認められないものの、降水量に対する降雪の占拠率が減少していることが明らかにされている。降雪の占拠率に関しては、金山、只見、桧枝岐、桧原の標高1,000m以上のAMeDASは概ね一定の値を示すものの、標高1,000m未満の標高で降雪の占拠率が低下していることが明らかにされている。今後は、理由①、②に対する検討を行うこととあわせて、雪自体の化学的な根拠になりうるデータも取得していくことが必要である。また、傾きに関して、特徴を示す結果がAMeDAS猪苗代のみ水温上昇に対して積雪深の増加する傾向を示していることである。

各AMeDAS観測所の相関係数に関して、阿賀野川流域の新潟側は概ね係数R0.5以上で海水温度と積雪深が強い関係を示していること、流域境界付近のAMeDAS観測所程に相関係数が低くなることが明らかにされた。なお、水温上昇に対して積雪深の増加する傾向を示したAMeDAS猪苗代は相関係数R0.1以下である。

図8の傾きと相関係数の関係から、AMeDAS猪苗代を除くAMeDAS観測所で概ね集団が4つのグループに分けられることが見てとれる。

[Group A] → 新津

[Group B] → 西会津、湯本、下関、津川

[Group C] → 新潟、金山、南郷、只見

[Group D] → 若松、桧枝岐、田島、(福島)

GroupAに示される海水温度と積雪深が強く変動量の温度による積雪量減少の感度の大きな枠組みとなり、AMeDAS観測所は新津のみである。流域内では相対的に日本海沿岸に近い山地に属する。GroupBには、海水温度と積雪深が強く、変動量の温度による積雪量減少の感度のやや大きいグループと解釈される。ここに属するAMeDAS観測所は、この概ねが新津に同様の日本海沿岸

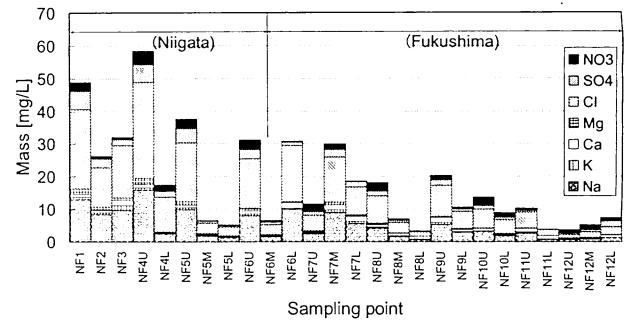


図9 積雪中のイオン含有量

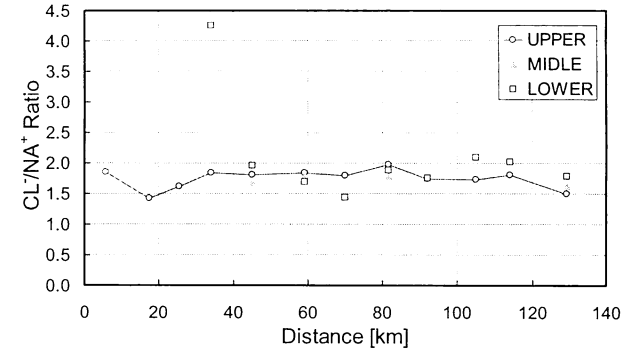


図10 ClとNa⁺の濃度比

に近い山地、または流域境界付近の急峻な山地である。GroupCは海水温度と積雪深に関係性が認められ、積雪量減少感度5~15cmの枠組みとなり、新潟以外は只見川流域のAMeDAS観測所が含まれる。GroupDは海水温度と積雪深に関係性に乏しく、積雪量減少感度5~15cmの枠組みであり、会津若松以外は只見川上流の伊南川沿いAMeDAS観測所が含まれる。総じた傾向として、平地、および只見川、伊南川の積雪地域は海水温と積雪深さの関係性が相対的に薄いこと、その他の急峻な山地は海水温と積雪深さに強い関係性が示されており、特に新潟側は特に関係が強いことが明らかにされた。また、猪苗代付近は海水温と積雪深さの関係が特異である結果を得た。

5. 積雪イオン組成の分析

阿賀野川本線沿いに供用されている国道49号沿線付近の自然積雪状態のエリアを採雪ポイントにし、積雪のイオン組成を分析した。なお、4章の結果を踏まえて、特異な積雪変動を示した猪苗代も包括している長瀬川流域も積雪イオン組成分析の検討に加えている。

図9は積雪のイオン含有量を沿岸域より配列させた結果である。Uは上層、Mは中層、Lは下層を示す。この結果から、内陸なるにしたがってイオン含有量が減少していること、特に沿岸沿いで占拠率多く存在したNa⁺、Clが徐々に変化している傾向を示していることが見てとれる。Na⁺、Clについては、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ため沿岸域付近で落下する形態が知られている¹¹⁾。しかし、減少量著しいながらも、流路変更され、海岸距離100kmを超過する長瀬川流域内(NF11, NF12)にも相応のNa⁺, Cl⁻が含有されている。そのため、日本海沿岸起源の物質の到達とその影響も推測される。なお、積雪試料中に含有するCl⁻とNa⁺の濃度比より起源を同定する手法を利用した解析結果を図10に示す。この図から、積雪上層に関すれば概ね一定になることがみてとれる。そのため起源は概ね同一にあることが有力である。

図11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NO₃⁻, SO₄²⁻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SO₄²⁻は非海塩成分のNss(Non Sea Salt)-SO₄²⁻であり、Na⁺の全てが日本海塩起源と仮定し、以下の式で求めたものである

$$nss - SO_4^{2-} = SO_4^{2-} - 0.25 \cdot Na^+ \text{ ————— (1)}$$

(a)は阿賀野川流域内、(b)は流域境界の阿武隈川流域の分析結果を示している。この結果より、SO₄²⁻は各地域共に含有率に変化は認められないものの、内陸に向かうにしたがってCl⁻が減少、NO₃⁻が増加する傾向を把握した。Cl⁻の減少に関しては前述に示すとおり、海塩起源の含む降雪は落下速度が大きいため沿岸域付近で落下する形態が推測される。また、NO₃⁻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。

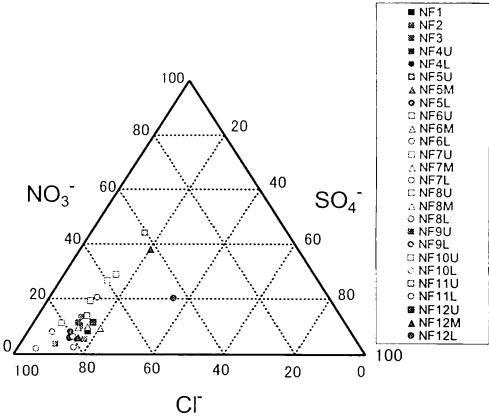
現在まで実施された分析結果より、内陸に向かうほどイオン成分が徐々に変化するプロセスが明らかにされた。しかしながら、阿賀野川流域の大きな特徴を示す結果は認められていない状況である。強いて特徴を挙げるとすれば、阿賀野川流域中の長瀬川はイオン成分的には阿武隈流域に類似した結果を示すことであり、地理的な関係を考慮すれば、猪苗代湖を挟んでイオン組成の状況が変化している可能性を示唆する。

6. まとめ

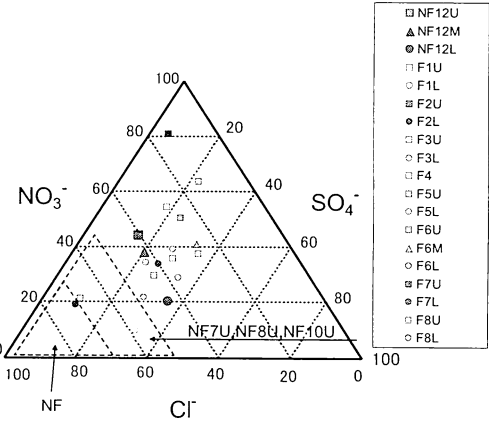
気候システムの温暖化に起因した冬季降水事象の変化を見積もるために、阿賀野川流域を対象に以下の①、②の取り組みを行った。むにあたり、各解析と調査分析を試みた。

① 近年の積雪深状況と周辺環境の関係性検証

近年の積雪データとして阿賀野川流域内のAMeDAS観測地点の積雪深データ、周辺環境データとして日本海北



(a) 阿賀野川流域内



(b) 阿武隈川(阿賀野川流域境界付近)

図 11 陰イオンの関係

東部平均海水面温度データを取得し、これらの関係を定式化することで、各地域の積雪特性を判別した。

② 流域における積雪の化学的分布状況の把握

阿賀野川本線沿いに供用されている国道49号沿線付近の自然積雪状態のエリアを採雪ポイントにし、積雪のイオン組成を分析した。

その結果として、阿賀野川流域では概ね同様な積雪プロセスが認められ、統計的にも温暖化を示唆する統計的な関係も得た。しかしながら、流域の一部では、特異な領域も存在しており、長瀬川流域では積雪増加傾向、イオン組成の著しい変化の傾向が把握された。長瀬川流域の湖沼では、一部で環境基準以下の水質、湛水赤潮、湖沼水の色調変化等の変化が認められており、水環境の遷移が示唆されている。また、裏磐梯高原を集水域とし、流末に位置する猪苗代湖でも水環境の変化が報告されており、PH上昇、大腸菌類の増殖も認められている¹²⁾。一概に水循環と水環境の特異な現象が関連付けられるものか不明であるが、今後は、このような関係性も把握し、

緻密な調査も合わせて地球温暖化による影響を検討したい意向である。

謝辞：本研究は文部科学省特別経費（プロジェクト）採択事業「遷移途中にある自然環境を自然遺産として良好に保全するための研究モデルの策定 磐梯朝日国立公園の人間—自然環境系（生物多様性の保全）に関する研究」の一環として実施された。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 例えば鼎信次郎，平林由希子：地球温暖化による水循環の変化－AR4・SREX から AR5 へ－，水環境学会誌，Vol. 35(11)，pp. 356-362, 2012.
- 2) 吉田武郎，増本隆夫，堀川直紀，工藤亮治：暖地積雪流域における積雪・融雪モデルの構築と分布型水循環モデルへの適合，農業農村工学会論文集，Vol. 277, pp. 21-29, 2012.
- 3) Akiyama, T. : Time and spatial variations of heavy snowfalls in the Japan Seacoastal region. Part II: Large-scale situations for typical spatial distribution of heavy snowfalls classified by EOF. Journal of Meteorological Society of Japan, 59, pp.591-590,, 1981.
- 4) 国土交通省国土政策局国土情報課：国土数値情報平年値メッシュデータ，<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G02.html>, Cite viewed 2013/06/18.
- 5) 気象庁：過去のデータ・ダウンロード，<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, Cite viewed 2013/06/18.
- 6) 気象庁：海面水温の長期変化傾向（日本海）過去のデータ，http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/maizuru/maizuru_warm/areaG_SS_T.txt, Cite viewed 2013/06/18.
- 7) 安田正次：只見における積雪量と日本海海面温度との長期的関係，海洋バイオシステム研究，Vol.24, pp.1-6, 2010.
- 8) 鈴木啓助：わが国における雪氷化学研究，雪氷，Vol.62, pp.185-196, 2000.
- 9) Hori, M. E., J. Inoue, T. Kikuchi, M. Honda, and Y. Tachibana : Recurrence of Intraseasonal Cold Air Outbreak during the 2009/2010 Winter in Japan and its Ties to the Atmospheric Condition over the Barents-Kara Sea, SOLA, Vol.7, pp.25-28, 2011.
- 10) 中村光宏，佐藤佑哉，川越清樹，福島県を対象にした降雪特性と水環境の影響評価，東北地域災害科学研究，Vol.49, pp.133-138, 2013.
- 11) 鈴木啓助：季節積雪地域の雪氷化学，低温科学，Vol.70, pp.119-129, 2012.
- 12) 福島県：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://www.wcms.pref.fukushima.jp/download/1/keikaku.pdf>, Cite viewed 2013/06/18.