

(11) 積雪の融雪過程に関する基礎研究

STUDIES ON SNOWMELT PROCESS IN SNOWPACK

後藤光亀*・一柳淳一*

Kohki GOTO, Junichi ICHIYANAGI

ABSTRACTS; A snowmelt process in snowpack was discussed from the investigation results of snow type profile, water quality profile and volumetric water content profile at Mt. Gassan in Yamagata prefecture. At the snowpack on a slope, the vertical channel in snowcover was observed at the lowest level region in snowpack. At this channel, the snow type was granular snow and snow color was black-like and conductivity was $2\sim4\mu\text{S}/\text{cm}$. The horizontal channel in a snow cover was observed as a ice layer at the other slope site. At this ice layer, ion storage and ion release was recognized at the same investigation period. The detail profile of the volumetric water content, w , in snowpack was measured by TDR method. The value of w in channel such as a ice layer and a granular snow showed from 10 to 32% and the value of w in non-channel such as a compacted snow showed from 0 to 3%. There is a clear difference between them, so it is useful to investigate the snowmelt process in a snowpack.

KEYWORDS; snowpack, snowmelt, acid precipitation, snow dimple

1. はじめに

雪は大気からの様々な情報を受け取りながら降り積もる。ただし、それらの情報は融雪時まで保存されるわけではなく、積雪内では雪の質的变化が進行している。著者らは、東北地方の中でも比較的遅くまで残雪が認められる山形県月山周辺において、融雪中・後期に相当する5月の残雪融解水の水質について調査し、この時期の雪がイオン濃度からみると蒸留水に匹敵するほど清浄であるが残雪の表層には懸濁成分由来の汚濁物質が多量に存在することを報告した¹⁾。また、積雪期から融雪期にかけての積雪融解水の水質鉛直分布特性とその経時変化について測定し、積雪内に保存されている情報とその時間経過に伴うpH、電気伝導度、濁度の変化について考察した²⁾。積雪中では、冬期の間にも融雪、凍結をくり返ししながら、さまざまなパーコード状の積雪模様が形成されており、それらが融雪時にさまざまな水みちなどを形成する。

一方、積雪の融雪に伴う融雪流出水については一部acidic shockなど生態系に及ぼす影響が懸念されている³⁾。近年、融雪流出水が積雪内と土壌層などを通過した場合について調査が進んできた^{4), 5)}。しかし、斜面上や融雪に伴う水みちの形成及びその地点の水質に関する情報は少ない。また、これら融雪過程の調査時に物理特性として雪の密度がよく測定されるが、融雪の状態をより明確にするには、氷と水分の量が明らかにされることが望まれる。

本研究では、このような積雪中の水質分布と融雪に伴う水みちにおける水質変化を考察するとともに積雪内の水分量を求めることにより、これら水みちの流下過程に関する基礎的検討を加えたものである。

*東北大学工学部土木工学科 Dep. of Civil Eng., Faculty of Eng., TOHOKU Univ.

2. 調査方法

2.1 調査地点

月山周辺の概要と調査地点をFig. 1に示す。積雪調査は月山(標高1,984m)－姥ヶ岳(1,670m)－湯殿山(1,500m)から大越峠を経る分水嶺の南東側と北西側に定点を設定して実施した。分水嶺の南東側は寒河江川流域であり、寒河江ダムがある。今回報告の調査地点は分水嶺北西側のぼん字川流域であり、下流には月山ダムを建設中である。調査地点は湯殿山温泉から大越峠方向へ旧道を300m程度入った南西向きの緩斜面のブナ林内(標高約760m)に設定した(図中:YSP-Y)。調査は1993年1月12日、2月20日、3月30日、4月29日とほぼ40日に一度の頻度で計4回実施した。また、1994年5月7、8日には、後述のTDR法による積雪中の水分計測を行うため、融雪過程の調査を行った。

2.2 水質調査方法

積雪調査地点では、シャベル等を用いて鉛直方向に幅1.5m程度の雪穴を掘り、雪穴のひとつの壁面の雪を採取した。雪穴は原則として地面に到達するまで掘り、その深さは最大3.8m程度に達した。雪の採取層は厚さ5cmを原則とし、表層部では5～10cmごとに、深部では10～20cmごとに採取した。また雪採取時には雪質、雪の密度等も測定した。積雪採取試料はビニール袋に入れて保存し、実験室に持ち帰って自然融解させた。積雪融解水のpH、電気伝導度(以下、ECとする)等はそのまま分析し、イオン成分については0.45μmのメンブランフィルターでろ過した後に分析した。なお、分析方法については既報¹⁾と同じである。

2.3 TDR法による積雪中の水分計測

積雪の融雪過程は複雑であり、その機構は必ずしも解明されていない。融雪時には雪えくぼや水みちの形成により、融雪水の流下過程や流下時の水質変化などは十分計測されていない。

ここでは土壌等の物質中の水分量の非破壊測定技術として開発されたTDR法(時間領域誘電反射法: Time-Domain Reflectometry)を用いて、積雪内の水分量を評価した。本計測システムの概要をFig. 2に示す。この水分計は、いわゆる容積水分を計測するものである。使用した水分計はTRIME-SYSTEM水分計(I・M・K・O社)である。土壌や他の物質中の水分量と誘電率の間には固有の相関関係があり、また電磁波が物質中を進行する速度 C ($C = C_0 / \sqrt{\epsilon \cdot \mu}$)は唯一物質の誘電率(ϵ)に依存している⁷⁾。ここで、 C_0 : 真空中の光の速度(3×10^8 m/sec)、 μ : 透磁率(非磁性体では $\mu = 1$)。TDRデバイスにより発生された高速立ち上がりパルスは、ちょうど伝送ラインとして動作するプローブへ進行しロッドの先端で反射され同じ経路を通って戻る。この移動距離を $2L$ とすると、電磁波の速度(C)を求めるためには伝搬時間(t)を測定すればよい($C = 2L / t$)。TRIME-SYSTEMはこの伝搬時間を分解能3 psで計測し物質の誘電率を求め、さらに水分量を決定するシステムとなっている。用いたセンサーはP2H型で、プローブの長さが50mm、2本のプローブ間の距離が10mmのものをを用いた。このセンサーを雪の中にプローブと雪の間にすき間のない様にさし込み、startボタンを

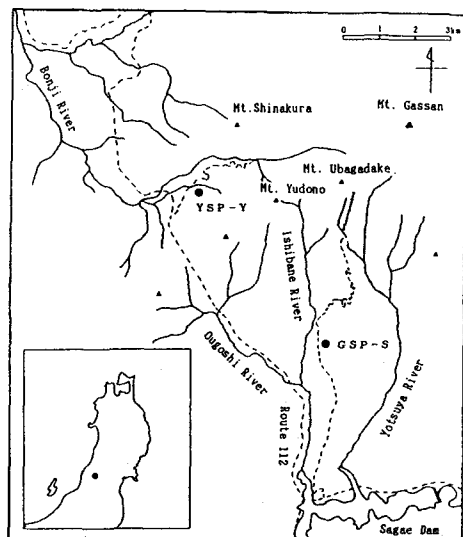


Fig.1 Map of investigation points

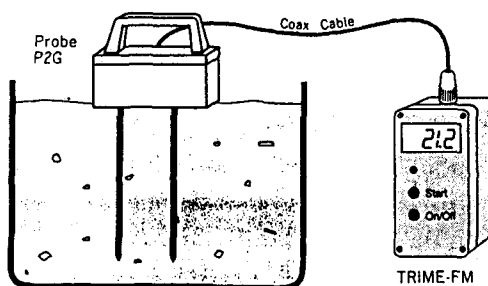


Fig.2 Diagram of TRIME-SYSTEM

押すと10～15秒後に容積水分量が％で表示される。本センサーでは測定範囲が0～95％（容積含水率），測定精度は±2～3％である。

3. 結果及び考察

3.1 積雪分布特性

雪質を新雪(N)，しまり雪(S)，ざらめ雪(G)，氷板層(I)に大別し，調査期間での雪質鉛直分布をFig.3に示す。調査地での1～4月の積雪深は，それぞれ168，350，378，272cmであった。1月では深部で一部しまり雪であったが，他はほとんどざらめ化していた。2月～3月も地面より1～1.5mはざらめ化しており，4月では全層がざらめである。これに伴う雪の密度も4月では約0.5g/cm³程度まで増加し，ほぼ全層均一となる。

3.2 積雪内水質特性

積雪内の水質特性を密度，濁度，pH，電気伝導度(EC)及び陽・陰イオン濃度についてFig.4～7に示す。図中の総陽イオン濃度はH⁺，Na⁺，K⁺，NH₄⁺，Mg²⁺，Ca²⁺の総和，総陰イオン濃度はCl⁻，NO₃⁻，HCO₃⁻，SO₄²⁻の総和を当量濃度で求めたものである。著者らはEC実測値と当量濃度及び当量イオン導電率から算出したEC計算値と比較し，その比がほぼ1：1の良好な対応を示すことを示した²⁾。

したがって，イオン濃度分布は計測値の多いEC分布で，そのイオン構成の詳細はこれらの図より求まる。陰イオンでは，Cl⁻とSO₄²⁻の構成比が大きく，特にCl⁻は総陰イオン濃度に対する比(Cl⁻/T-Anion)でみると約0.8を示し，積雪上層のイオン濃度が低い部分でやや小さくなる。また，陽イオンはNa⁺，Mg²⁺，Ca²⁺が多く，Na⁺の総陽イオン濃度に対する比(Na⁺/T-Cation)は約0.6～0.7となり，積雪上部で小さくなる。平成3年1月から3月の降雪期における海塩由来の降雪が多い新潟の一降水成分平均濃度（降水量による重み付けした降水成分濃度）の一例を示すと，pH，EC，SO₄²⁻，NO₃⁻，Cl⁻，Na⁺，K⁺，Ca²⁺，Mg²⁺，NH₄⁺がそれぞれ4.88，130μS/cm，7.6，1.4，16.0，18.1，0.67，1.6，2.5，0.42(mg/l)である⁸⁾。これによるとCl⁻/T-Anion=0.78，Na⁺/T-Cation=0.79程度となる。また，Cl⁻/Na⁺比は新潟で0.9～1.8でNa⁺に対してCl⁻は多い。一方，積雪内でのEC分布は3月に50cm以深で大きく変化するがCa²⁺/T-Cationの比はほとんど変化せず，Cl⁻/T-Anion，Na⁺/T-Cationの比も変化は小さい。特にCa²⁺は積雪内ではほとんどイオン構成比が変化しないことは興味深い。また，ECの変動幅に対し，雪の物理的状態を示す雪

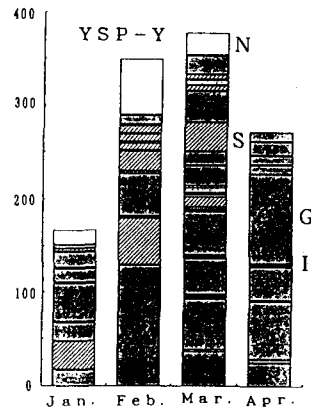


Fig.3 Profile of snow type in snowpack
N:New snow, S:Compacted snow
G:Granular snow, I:Ice layer

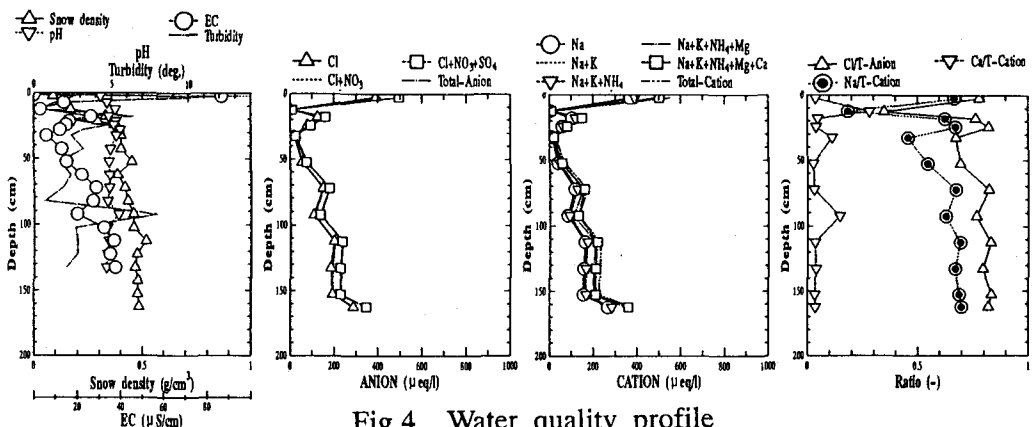


Fig.4 Water quality profile
(January)

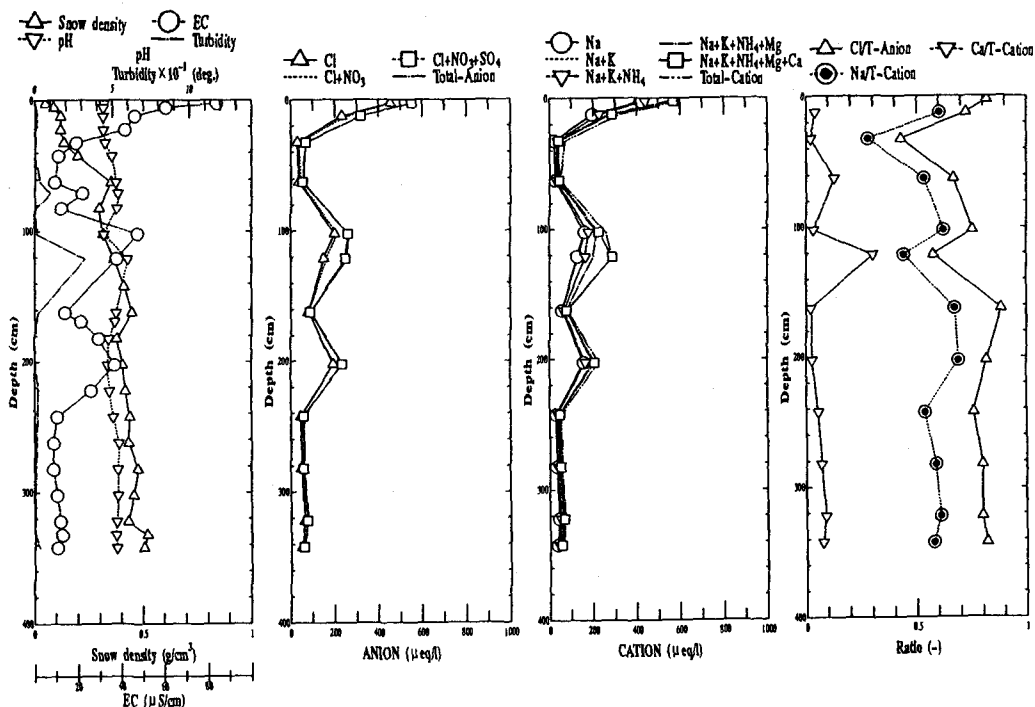


Fig.5 Water quality profile
(February)

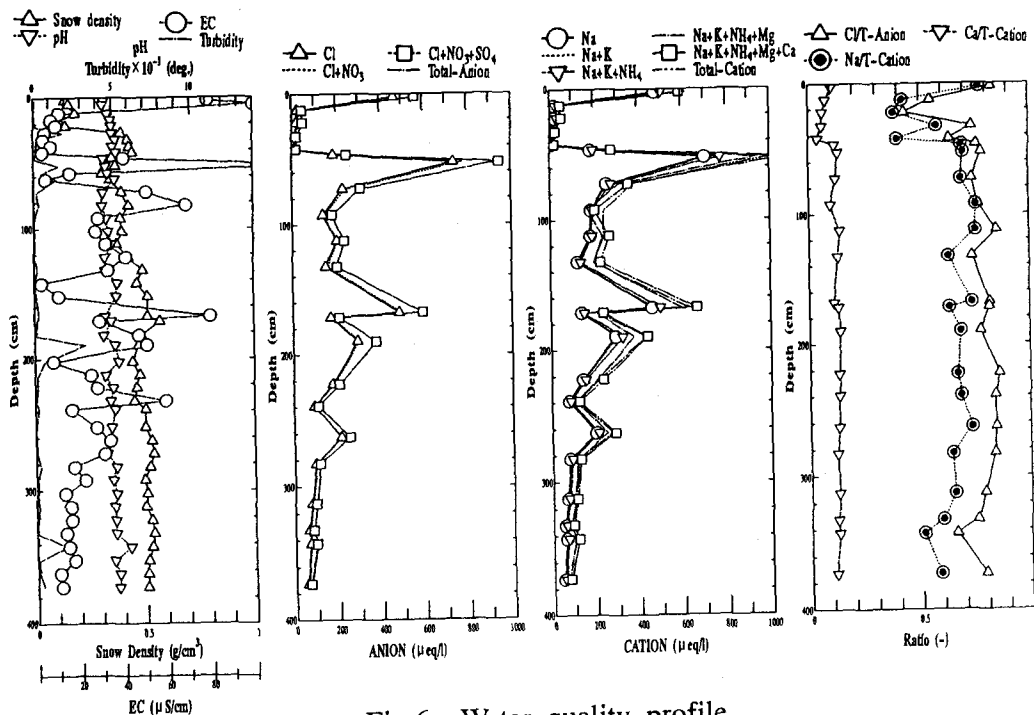


Fig.6 Water quality profile
(March)

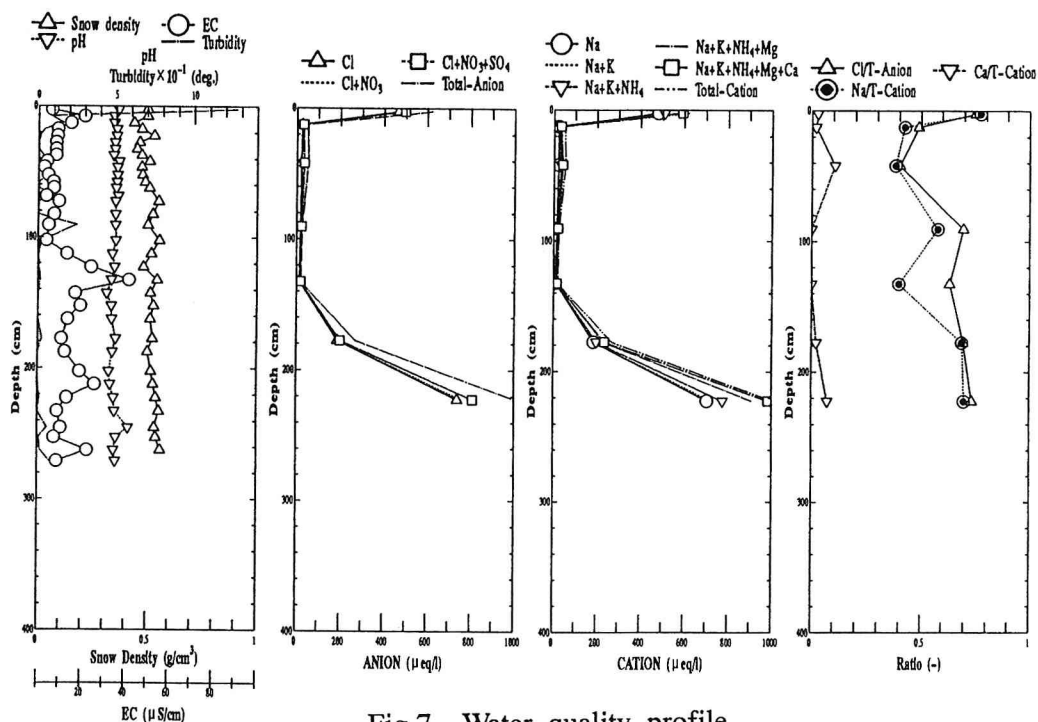


Fig.7 Water quality profile (April)

の密度ではその相関性は見出しにくい。これは積雪が0℃の水と水とがどの様に存在するか明確にできないことによる。すなわち、積雪内の融雪状態には密度ではなく、水としての存在形態を明確に評価できることが重要となる。

3.3 融雪と水みち

融雪は、降雨や大気との熱交換により起こる。融雪に寄与する熱源は、晴天日には日射が主要因となり、曇天日で湿った暖かい風が吹くときは大気からの伝達熱が大きく左右する。融雪最盛期には毎日5～10cmの雪解けが続き、25～50mmの連続降雨に相当するとされる⁶⁾。また、積雪底面における地熱による融解も冬期間の気温の低いときでも生じるとされる⁶⁾。

一方、融解水や降雨の浸透によってPhoto-1の様な雪面上に無数のくぼみが生じる。それぞれのくぼみの下にはPhoto-2に示すように水が集中しており、水みちを形成し、ある箇所を選択的に流下するようになる。水が選択的により多く流下した跡は積雪の粒子が粗大化し、他の箇所と比較してより水が流下し易くなる。

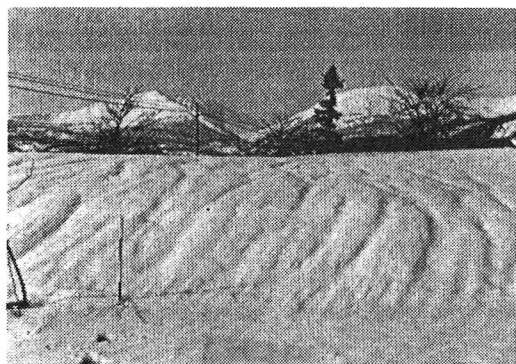


Photo.1 Snow dimple

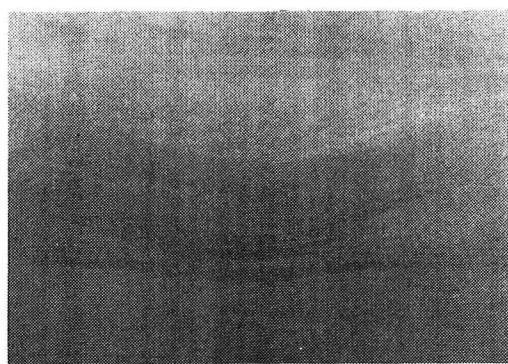


Photo.2 Cross section of snow dimple

この雪えくぼの間隔には、代表的な波長が存在し、その波長発生条件は、ざらめ雪化していない新雪層に水が供給された時点での雪の状態に深く関係するとされる⁶⁾。雪えくぼの代表的波長は数cmから1mをこえる長いものまで観測されている。また、Photo-1に示すように傾斜面ではそれぞれの雪えくぼが連なり、すじ状に流下する形態が観測される。

Photo-3, 4は、Fig. 3に示した雪穴より約30m離れた沢筋にあたる断面である。測定時期は4月末である。この写真の積雪状況をスケッチしたのがFig. 8である。流下方向は紙面奥より手前に流下する方向にある。またFig. 9では断面Aが最も低く、断面A→B→C、A→D→Eに従い高くなる緩斜面である。Fig. 9は流下方向に直角な積雪横断面で、断面Aでの最深部が深さ140cmである。また、Fig. 9にはPhoto-4に示したサンプリング位置でのECの測定結果を示す。単位は $\mu\text{S}/\text{cm}$ である。Fig. 8とFig. 9とに示してある各々6つの「+」のマーカーを重ね合わせると雪質とECの関係を良く知ることができる。

積雪は、新雪による圧密を受けるとともに、凍結・融解によってざらめ雪へと変質する。このざらめ化の過程でイオン成分の排除が起こり、融雪初期に多量のイオン溶出により、pHの低下が指摘されてきた³⁾。Fig. 7の4月調査時は、表層のpHは5付近で、ECも深さ1mまでは10~15 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 層を除けば10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下と低く、イオンの溶脱が伺える。また、1m以深でECは10~40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と大きく、上層での溶脱イオンの蓄積が伺える。

Fig. 8の濃い黒い部分は氷板、灰色の部分はざらめ化した部分、ハッチングの部分は汚れのある雪、点線で囲まれた部分はしまり雪の部分である。Fig. 8とFig. 9より、断面AでECが2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と最も小さく、断面Cで最大34 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の幅がある。断面Aでは顕著な鉛直方向の水みちが認められ、汚れ成分が多いがECは2~4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と低く、イオン成分の流出が認められる。この部分はほとんどざらめ化した雪質である。また断面X、Yでの測定箇所は氷板に当たるが、

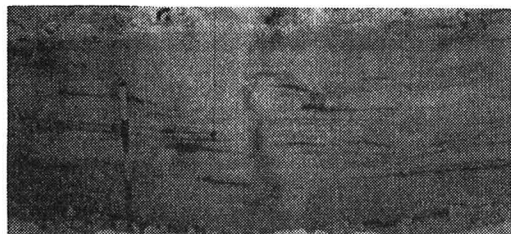


Photo.3 Cross section of snowpack

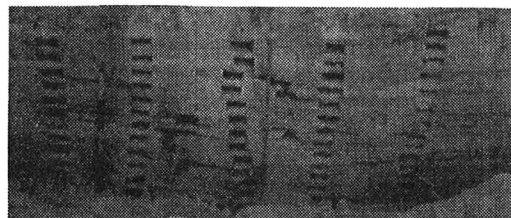


Photo.4 Sampling point in snowpack

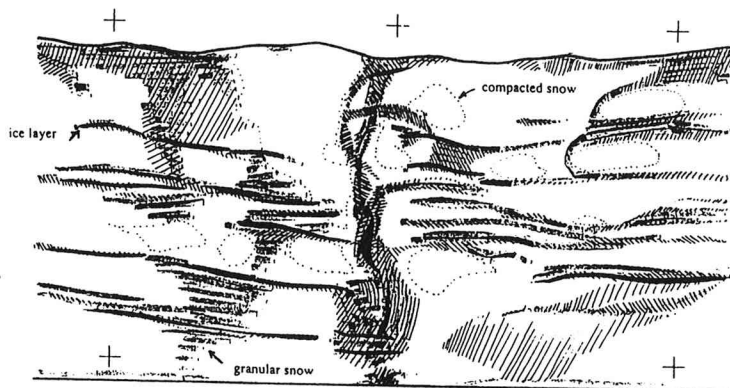


Fig.8 Profile of snow type in snowpack

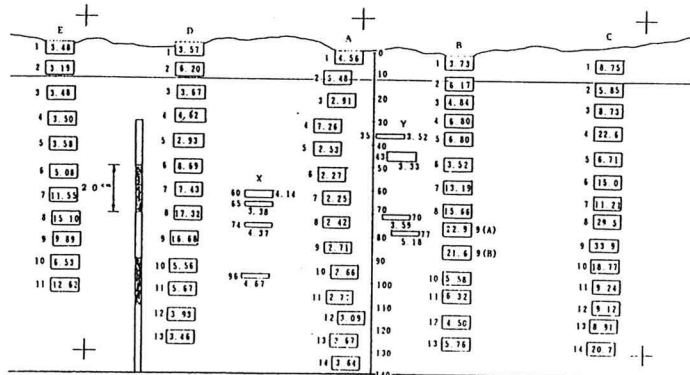


Fig.9 EC profile in snowpack

そのいずれも EC が $3 \sim 5 \mu\text{S}/\text{cm}$ と小さい値を示す。

一方、断面 B, C, D, E の様に、水平あるいは斜め方向の水みちが形成される部分では様子が異なる。断面 C では、水平に近いざらめ層が多く、EC は $8 \sim 9 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度であるが、そのざらめ層にはさまれたしまり雪の部分の EC は $9 \sim 34 \mu\text{S}/\text{cm}$ と高い。一方、C-10 断面（ざらめ層と氷板）の EC は $19 \mu\text{S}/\text{cm}$ と、イオン成分の蓄積が認められる。この時期は他の断面でも、一般にしまり雪の部分で EC が高い場合は多い。これらは、氷板層が必ずしも平面的に水平でないことや「雪えくぼ」によって生じた「水みち」を通じて、イオン流出あるいは蓄積が生じ、融雪水が鉛直方向のみならず水平方向にかなり移動することにより、断面方向に水質の分布の差が生じるものと考えられる。

3.4 水みちと積雪内の容積水分

融雪時の積雪内の水みちがどの様に形成されているかは色素をトレーサーとした方法で求められる。今回はこの色素トレーサー法と TDR 法による容積水分量で融雪水の流下過程を評価した。尚、積雪中の水分と固体である氷とは、その誘電率が大きく異なるので、本計測法による積雪内の容積水分の計測が可能である。色素トレーサーは赤色絵具を 0°C の氷水中で溶かし、 $1\text{m} \times 1\text{m}$ の矩形の雪表面に10分間で約 2mm の降水量として散布した。

その2時間後、Photo-5に示すように深さ20～60cmの雪の鉛直断面上で容積水分量分布を計測した。

結果をFig. 10に示す。同図の黒い線は氷板部、灰色の部分は色素部、点線で囲まれた部分はしまり雪の部分である。また、図中の矢印部はざらめ雪化した鉛直方向の水みち部である。約 2mm の降水は2時間後に深さ60cmに達している。容積水分が最も大きい場所で、 31.6% 、小さい場所で 0.4% を示した。容積水分の大きい所は、氷板上が最も多く、次にざらめ部である。また、ざらめが発達した水みちでは容積水分の値は氷板上程大きくない。これらは、ざらめ部と氷板部での水分の保水力の差が1つの原因と考えられる。また、しまり雪では容積水分は $0.4 \sim 3\%$ と極めて小さい。したがって、降雨や融雪水は氷板部方向に、また雪えくぼ等によって形成されるざらめ化した水みちを鉛直方向に流下することが知れた。さらに、Fig. 7に示した雪の物理特性に関する情報である密度では、 1m 以浅では $0.4 \sim 0.5\text{g}/\text{cm}^3$ の変化幅しかなく、かつ、その測定にはPhoto-4に示した $3 \times 8\text{cm}$ の断面が必要であることから、詳細な積雪内の水分量測定には不適である。本調査で用いた水分計は、2本のプローブ幅である 10mm の2倍程度の断面での測定が可能であり、その利点は大きい。

この様に、雪質の差により、水みちの流下過程が異なることが知れたが、本法は色素トレーサーの色あいという表現でなく、容積水分という数値で表示できかつ測定も $10 \sim 15$ 秒で行えることより、融雪過程を定量的に評価する手法として簡便で有用であると考えられる。

3.5 水みち部での水質分布

Fig. 11は積雪内に局所的にざらめ化した雪の水みち部が形成された部分を 20cm の幅で深さ方向に約 35cm 分

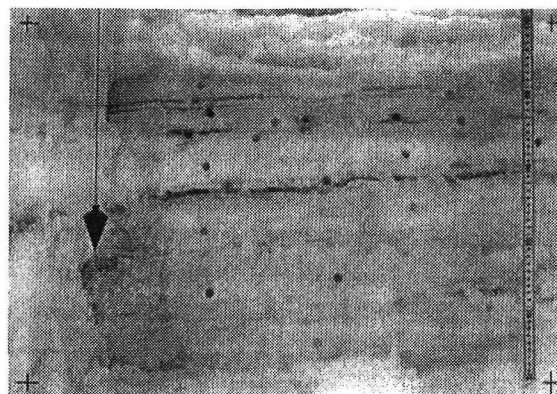


Photo.5 Cross section of water channel in snowpack after tracer investigation

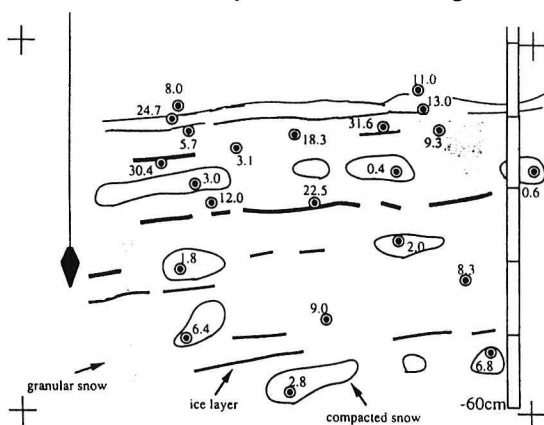


Fig.10 EC profile of water channel in snow cover

の水質分布を測定した結果である。また、Fig. 12には同じ地点で横に約20cm離れた水みちでない部分の積雪内水質分布である。両図より、水みちのある部分では130cmの積雪深さにECの低下があり明確な差が生じており、またその下層ではイオンの蓄積が生じpHの低下があり、さらにその下層の148cm付近では再びイオンの流出とpH上昇、152cmでは再度ECの増加とpHの低下が生じる。この様に、ほぼ同地点でも水みち部での水質分布は異なり、融雪過程の複雑さが伺える。

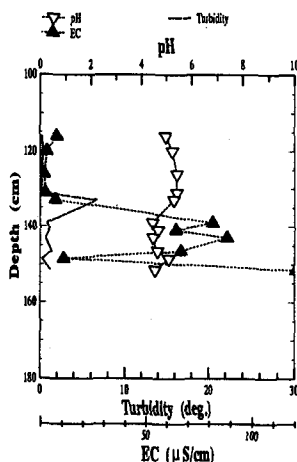


Fig.11 Water quality profile of water in snow cover

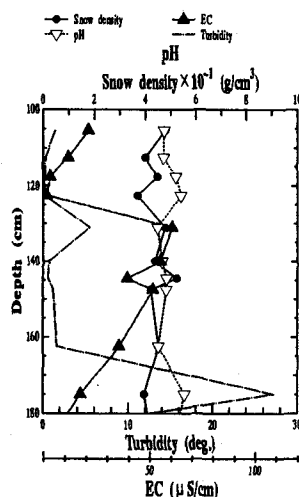


Fig.12 Water quality profile in snowpack channel in snow cover

4. 結論

山形県月山において1月～4月にかけての積雪内の融雪過程を雪質分布、水質分布及び容積水分分布の調査結果から解析し、次の結論を得た。

- 1) 1月～4月までの積雪内のイオン濃度から、1月では積雪下部に蓄積が、3～4月では流出と蓄積層が重なり合い、融雪水の流下過程は複雑に変化した。特に3月時には氷板上でのイオンの流出及び蓄積両方が観察された。
- 2) 融雪期である4月末での緩斜面の積雪横断面の雪質分布とEC分布の結果より、水みちは横断面方向で最も低い位置に集中して生じ易く、そこへの流下に至る場合、氷板による水平方向の水みちが重要な役割を果たしていることが知れた。また、氷板にはさまれたしまり雪の部分ではイオンの流出が起りにくいことと考えられた。
- 3) TDR法を用いた容積水分測定法によれば、水みち部で32%から水みち部でないしまり雪部で1%と融雪水の流下を明確に分離できることより、TDR法は積雪内の融雪過程を詳細に検討する上で有用な方法である。

参考文献

- 1) 後藤光亀・一柳淳一・野田修二：残雪および融雪水の水質特性に関する基礎研究，環境工学研究論文集，Vol. 29，pp. 93-101，1992
- 2) 一柳淳一・後藤光亀：積雪内の水質鉛直分布とその経時変化に関する研究，環境工学研究論文集，Vol. 30，pp. 81-89，1993
- 3) 酸性雨－生態系に与える影響：ゴルファーの緑化促進協力会，pp. 178-180，1989
- 4) 鈴木啓助：融雪水中の溶存成分濃縮の日変化，日本雪氷学会誌，雪氷，53巻1号，pp. 21-31，1991
- 5) 鈴木啓助・遠藤八十一：十日町市における酸性の融雪水，森林立地33(2)，pp. 71-75，1991
- 6) 日本雪氷学会編：雪氷辞典，pp. 130, 132，1990
- 7) TDR法による水分計測システム，カタログ，東北電子産業(株)，1993
- 8) 北海道・東北ブロック酸性雨合同調査結果報告書，－平成2年度降雪期－，pp. 9-24，北海道・東北ブロック公害研究所連絡会第1分科会