

(18) 融雪期の森林域における溶存態有機物の流出特性に関する研究

RUNOFF OF DISSOLVED ORGANIC MATTER IN FORESTED WATERSHED
DURING SNOW-MELT PERIOD

林 誠二*・後藤 光亀*・須藤 隆一*

Seiji Hayashi*, Kouki Goto*, Ryuichi Sudo*

ABSTRACT; Runoff of dissolved organic matter(DOM) was examined during snow-melt period in MOTOKISAWA area which is a small forest catchment area located in the suburb of Sendai-city. Leachate from the litter layer and soil water at 10cm depth had always high concentrations(5.0~25.0mgC/l) of DOM during the experiment period, but in the soil deeper than 20cm, the concentrations were kept in low level in spite of changes of soil water content. The concentrations of dissolved organic carbon and the absorbance at 260nm increased rapidly in MOTOKI brook during snow-melt events. From the profile of DOM in the soil water and results of separation of snow-melt runoff hydrograph using SiO₂ as tracer, it was found that the direct runoff including organic components leaching from litter contributed to the increase of DOM concentration in the brook.

KEYWORDS; dissolved organic matter, forested watershed, separation of runoff hydrograph, SiO₂, snow-melt runoff

1. はじめに

山地森林域への積雪は水資源として重要なだけでなく春先の融雪に伴う融雪洪水を引き起こすことから、その流出水量の予測を含めた量的な評価検討は数多く行われてきた。しかしながら、融雪期の森林域河川水質の形成に及ぼす融雪水の影響といった質的な評価に対しては野外調査の困難さもあり詳細な検討が行われてきたとは言い難い。特に、表層部分に多量に有機物を含有した森林土壌の層位構造を考慮し、融雪水の土壌浸透に伴い溶解した有機物の土壌中での挙動及び流出特性について検討を試みた研究事例は少ない。森林域を由来とする溶存態の有機物は前塩素処理や消毒のための塩素添加といった浄水処理過程において生じる発ガン性物質のトリハロメタンの前駆物質を含んでいる恐れがある。また、流入水域においては鉄等の無機物質との関り合いも含めて生態系の維持や変化に影響を及ぼすといったことも考えられることから、融雪流出時においても降雨流出時と同様に森林域由来の溶存態有機物の流出特性を詳細に検討することは重要であると思われる。そこで、本研究は実際の森林域を調査対象として積雪期から融雪期において溶存態有機物の流出過程における土壌中での挙動や渓流水中の濃度変化を求めるとともに、水質をトレーサーとした流出成分の分離手法を用いることにより溶存態有機物の流出特性の評価を試みたのでここに報告する。

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

2. 調査の概要

2. 1. 調査流域

本研究の調査対象流域は仙台市作並の広瀬川水系元木沢流域である。流域の概要図を Fig.1 に、流域特性を Table1 にそれぞれ示した。流域土壌は、土壌表面にほぼ一様に堆積した落葉落枝（リター、 A_0 層）の下に腐植に富んだ土壌が 10~20cm 深まで存在し（腐植土壌層、A 層）、下方に行くにつれ腐植の含有量は減少し無機成分を主体とした土壌（鉱質土層、B 層）が 70~100cm 深まで形成されている。それより以深は、基岩である緑色凝灰岩の強い影響を受けた土壌（母岩層、C 層）と基岩が存在する層位構造を有している。

2. 2. 調査方法

今回の融雪出水に関する調査は、流域に積雪が観測されはじめた'94 年 12 月下旬から流域全体において消雪し融雪が終了したと見なされる'95 年 4 月下旬までを調査期間として行った。森林土壌を由来とする有機物は融雪水や降水の浸透に伴い可溶化し移動、集積の結果その一部分が流出し渓流水質に影響を及ぼすと考えられ、詳細な流出特性を知る上で流出に至る過程を幾つかに区分してそれぞれを検討する必要がある。本研究では流出過程を降水や積雪層、土壌表面のリター層を含めた土壌鉛直方向の履歴、渓流水にそれぞれ分けて調査を行っており、調査手法については以下に示す通りである。

(1) 降水および積雪層

降水については流域に隣接する仙台市作並簡易浄水場敷地内において、降雪を速やかに融解するために加温する工夫を施した自記式転倒升型雨量計を用いて降雪、降水共にその降水量の測定を行った。また、降水水質についても同一地点において採取し分析を行った。積雪調査は'95 年 1 月上旬より渓流水水位測定点に近い北斜面の河岸付近において週に 1~2 回行い、積雪深や積雪水質（いずれも 5~10cm 間隔）の測定を試みた。

(2) 土壌水

土壌水の調査としてはまず、融雪水が土壌表面に堆積したリターとの接触により生じる質的な変換を捉えるため森林内の斜面に、土壌表面より乱さずに採取したリターを充填した簡易ライシメーター（30cm×15cm×5cm）を設置し、融雪が生じる度にその採取を行い分析に供した。土壌水質の鉛直分布を求めるために、ポラスカップを用いた土壌水採取器（DIK-3900、大起理化工業）により鉛直深さ 10,20,70,160cm の 4 点で週に一度採取した。また、土壌水分量についても自記式テンシオメーター（DIK-3020、大起理化工業）を用い同様な鉛直深さ数点において 10 分毎の連続観測を行った。リター層ライシメーターや土壌水採取器、土壌水分計はいずれもほぼ同一地点に設置しており、土壌水分量の連続観測の都合上、渓流水水位測定地点より 100m 程度下流の南斜面（河岸より約 50m 斜面上方の地点、Fig.1 参照）においてその採取および測定を行った。

(3) 渓流水

水位は Fig.1 に記した地点において圧力変換器を用いた水位計により 10 分おきに連続して測定し、予め求めた H-Q 式により流量を算定した。渓流水は浄水場内で採取が可能であり、融雪による出水が徐々に生じ始めた 3 月 15 日より自動採水器等を用い、水位変動に応じて 30 分~3 時間程度の間隔でその採取を行った。

2. 3. 測定項目および分析方法

調査期間において、降水量と共に気温、日射量といった気象項目

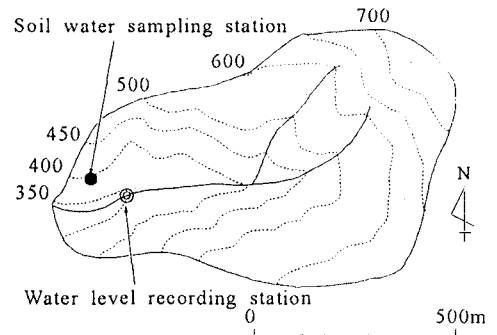


Fig. 1 Topographic map of MOTOKISAWA watershed.

Table 1 Site scription.

Area(km ²)	0.55
Elevation(m)	340~761
Vegetation	Deciduous
Soil Type	Brown Forest Soil

Table 2 Examination method.

Item	Method
DOC	TOC-5000
E ₂₆₀	Spectrophotometry
NO ₃ ⁻	Ion-chromatography method
SiO ₂	Technicon auto-analyzer II
E.C.	Electrical conductivity method

に関する観測や渓流水の電気伝導度といった水質項目についても浄水場内において自動計測により10分間隔での連続測定を行った。採取した試料はいずれも直ちに孔径 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターを用いてろ過し、所定の分析に用いるまで冷蔵庫で 4°C で保存した。主な分析項目とその手法に関してはTable2に示した。

3. 調査結果および考察

3. 1. 渓流水量の季節変化

積雪期から融雪期における元木沢流域の調査地点での積雪深や気温、降水量といった気象要素とともに渓流水量の経時変化をFig.2に示した。また、自動計測水質項目の一つである電気伝導度の経時変化も併せて示した。調査期間における総降水量は 400mm 程度でその内訳は、3月上旬までは降水量のほとんどが降雪で占められ、約 250mm （年平均降水量の20%に相当）である。それ以降は降雨であったことから、調査期間を積雪期（調査開始から3月上旬まで）と融雪期（3月上旬以降）に分けて考えると、積雪期においても気温の日変動は大きく、日中には 10°C 付近まで上昇することが度々観測された。この気温上昇と日射の影響により、流域南斜面では積雪と消雪が繰り返され北斜面でも積雪深の増減が見られた。渓流水量はこれに応答する形で細かな変動を示し、渓流水の電気伝導度も流量のピークに対応して減少し融雪水による希釈の影響が示唆された。元木沢流域では積雪期でも南斜面への降雪と北斜面積雪層の一部が渓流水量形成に寄与していたことがうかがえる。積雪層を形成した北斜面で、融雪が顕著に生じ始めたのは3月中旬からであった。その要因としてはこの時期からの気温の上昇も挙げられるが、3月中旬から下旬における相次ぐ降雨により更に融雪は促進されたと言える。これに対応して渓流水量は二度にわたり著しい流量増加を示し、電気伝導度のそれに併せた急激な低下も観測された。積雪期、融雪期の両期間共に渓流水量は、短時間での急激な流量増加とそれに比して緩やかな減速を示す変動特性を有しており、電気伝導度も流量変動に応じて急激に減少し緩やかに回復するといった傾向を見せた。鈴木ら²⁾の融雪流出時の調査結果も同様な傾向を示しており、また、本流域でこれまでに観測された短時間に著しい降雨量を有するような大規模な降雨時の流出水量の変動にも類似している。

3. 2. 流出過程での溶存態有機物の挙動

流出過程での溶存態有機物の挙動を検討する際、その評価指標として本研究では、試料水中の溶存態有機炭素（以下DOCと略述）と、生物学的難分解性成分の不飽和結合を有する有機物量の指標である紫外部 260nm での吸光度（以下 E_{260} と略述）を用いた。これまでの元木沢流域での降雨時の調査結果から³⁾、降雨に伴う流出量の増加に従い、電気伝導度に表示されるように多くの無機成分が濃度低下を生じるのに対して、溶存態有機物の濃度はそれとは逆に増加する傾向が得られている。この要因として、土壌表面への浸透までに雨水に含まれる樹木の樹冠部や幹、あるいはリターからの溶脱成分や、土壌微生物による分解過程で可溶化し土壌

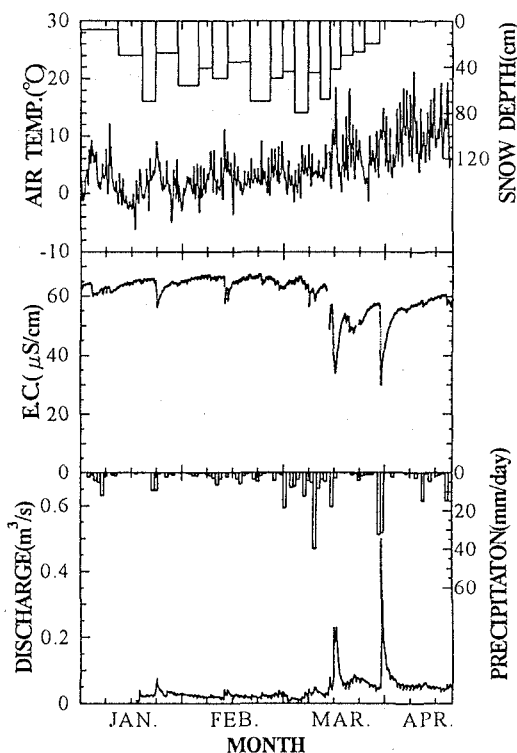


Fig. 2 Changes of runoff, electric conductivity and meteorological factor in snow-fall and snowmelt season.

間隙水中に蓄積した成分の寄与が挙げられる。しかしながら積雪および融雪期において、落葉広葉樹林を主な植生とする元木沢流域では樹冠部での降水の遮断や反応は小さく、積雪層から採取し融解後測定した試料の DOC 濃度は 1mg/l 以下であった。また、積雪下の土壌表層部分の地温は 1℃前後だったことから、土壌生物の働きは小さく抑えられていたと考えられる。このように、これまで調査を行ってきた降雨流出時とは異なる環境条件下で、融雪による流出水量の増加に対する溶存態有機物の流出特性を土壌水および渓流水質調査結果に基づいて以下に示した。

(1) 土壌鉛直分布

上記したように、土壌水の採取を行ったのは流域の南斜面側であり、積雪と融雪を比較的短い間隔で繰り返していた。そのため、融雪期には出水に寄与するだけの積雪は観測されておらず、得られた土壌水質の鉛直分布は 3 月中旬以降の融雪出水時の土壌中での、溶存態有機物の挙動を必ずしも示していない。しかしながら、短いサイクルであるが、積雪時あるいはその融雪に伴う融雪水の土壌浸透時の土壌水質の変動特性を十分示していると考えられることから、北斜面の融雪時における溶存態有機物の土壌鉛直分布の変化を理解する上でも重要なデータである。Fig.3, Fig.4 にはそれぞれ調査期間における各鉛直深さ毎の土壌水の DOC 濃度と E_{260} 値の経時変化を示した。融雪水や降水の浸透量の影響で大きく変動したものの、調査期間を通じてリター層浸透水と 10cm 深さでの土壌水の DOC 濃度、 E_{260} 値は共に下層土壌や渓流水に比べ高い値が観測された。これはリター層浸透水のみが高濃度で、土壌浸透時に急激に減少する濃度分布を示していた昨年（'94 年）の夏期から秋期における調査結果とは異なる結果となった。融雪水や降水はリター層を浸透する際に、リターからの溶脱により高濃度の難分解性成分を主体とした溶存態有機物を含有する。土壌表層部分は腐植に富んでおり下層土壌に比べ固相の無機成分含有量が少ないため溶存態有機物に対する吸着能は低い、また、冬期は夏期に比べ土壌温度が著しく低く、生物化学的な変化は抑えられている。そのため冬期においては、土壌へ浸透したリターから溶脱した有機物は、吸着や分解を余り受けずに腐植土壌からの溶脱成分も加えて、10cm 深さ程度の表層土壌間隙水中に貯留されていたことが推測される。また、20cm 深さにかけて DOC 濃度、 E_{260} 値は共に急激に減少しそれより以深ではどちらも調査期間中、低く一定な値を示していた。土壌水の採取がリター層浸透水を除き融雪や降水の有無に関らず定期的に行っていたことから、表層土壌間隙水中の溶存態有機物は土壌鉛直下方への浸透時に土壌固相へ吸着され減少し、更に土壌固相の吸着能の高さから融雪水等の浸透による土壌水分量の変動が生じたとしても土壌 20cm 以深ではその影響を受けずに安定した濃度分布を形成していたと考えられる。

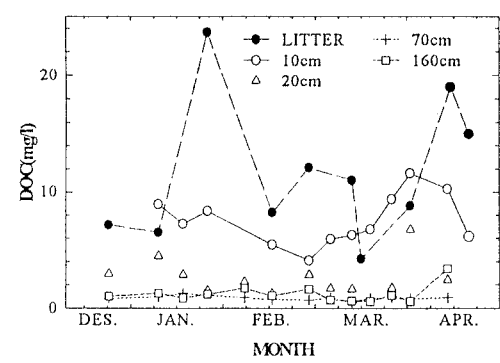


Fig.3 Profile of soil water DOC during experiment period.

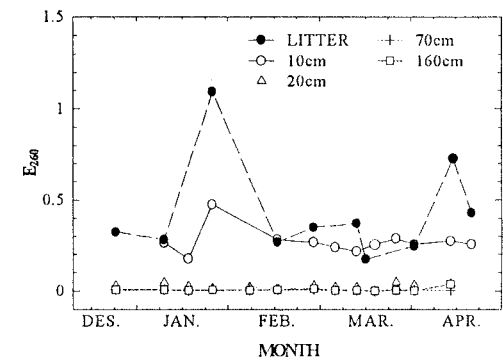


Fig.4 Profile of soil water E_{260} during experiment period.

(2) 渓流水における濃度変化

渓流水における溶存態有機物の測定は融雪流出が顕著に観測され始めた3月15日より開始しており、Fig.5に渓流水量と併せてDOC濃度、 E_{260} 値の経時変化を示した。昨年観測された降雨流出時と同様に融雪出水時に流出量の増加に応じて溶存態有機物の流出量も増加し渓流水中での濃度上昇が見られる。特に、出水時の渓流水量の急激な増加に対応して、DOC濃度、 E_{260} 値は共に著しく増加する一方で、渓流水量がピーク後比較的緩やかに減少していくのに対して両指標の値はいずれもピーク後は速やかに低下するという流出特性が示された。

濃度上昇の要因として、土壌水濃度の鉛直分布から融雪に伴うリターからの溶脱有機成分やそれが表層土壌に貯留されていた成分の寄与

が挙げられる。すなわち、濃度増加時の渓流水中の溶存態有機物はフルボ酸やフミン酸といった土壌腐植生成過程において分解・縮重合が進んだ低分子のものよりも、リター溶脱成分であるリグニン、タンニンといった分解過程にある比較的高分子のものが主体であると推測される。浄水処理における対応や鉄、アルミニウムとの関わりも含めた水域生態系への影響といったことも踏まえて、その組成に関する検討を今後進めていく必要がある。またその流出形態については、森林土壌への鉛直浸透時に土壌固相の吸着作用が働いたため融雪水や降水が土壌表層のみを経由するような直接的な流出が濃度上昇に寄与していると考えられる。このため、次に水質をトレーサーとして用いた流出成分の分離手法により、その検証と定量的な評価を試みた。

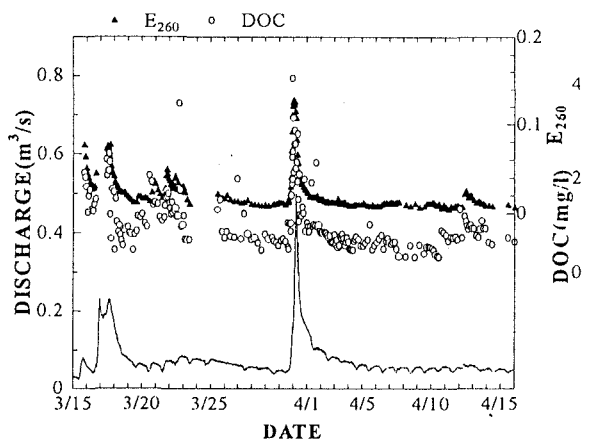


Fig.5 Changes of discharge,DOC and E_{260} in MOTOKI brook during snow-melt period.

4. 水質をトレーサーとした流出成分分離手法による検討

水質をトレーサーとした流出成分の分離は、電気伝導度等をトレーサーとしてこれまでに数多くの研究がなされてきており⁴⁾、時間と場の両方のスケールで流出過程を把握し得るキネマティック・ウェブ法や貯留関数法等の数値モデルに比べ、算定結果の持つ物理的な意味は小さい。しかしながら、それら数値モデルのように複雑な計算過程を要することなく、流量と水質項目の測定を行い適切な仮定を定めて計算すれば、ある時点での渓流水量において、それぞれ異なる経路により流出してきた成分がどの程度含まれているのか求め得る利点があり、本研究での出水時の溶存態有機物の濃度上昇を生じる流出機構を把握する上で、充分満足し得る手法であると言える。ここでは水質トレーサーとして土壌固相を由来とする溶存態の二酸化珪素（以下 SiO_2 と略述）を用い、融雪出水時の流出成分の分離結果と渓流水中での溶存態有機物の濃度変化との関係を検討した。

4. 1. 流出成分の分離手法

一般に水質をトレーサーとした流出成分の分離は、主に降水および融雪水の質的および量的な影響を直接受けた成分（新水）と基底流出成分も含めて土壌中に貯留されていて押し出されてきた成分（古水）とに流出量を分けるものであり、水質流出現象において質量保存の関係が成り立つならば以下の式からその分離が可能となる。

$$Q_t = Q_o + Q_n \quad (1)$$

$$C_t Q_t = C_o Q_o + C_n Q_n \quad (2)$$

$$Q_o = \frac{(C_t - C_n)}{(C_o - C_n)} Q_t \quad (3)$$

Q_t, C_t : ある時刻における総流出量とその水質濃度、 Q_o, C_o : 古水の流れ出量と水質濃度、

Q_n, C_n : 新水の流れ出量と水質濃度

Q_t は渓流水量を、 C_t は渓流水質濃度を意味しており共に測定が可能であり、古水の水質濃度 C_o と新水の水質濃度 C_n の値が求められれば(3)式より Q_o が算出でき、総流出量から差し引くことにより Q_n が求められる。

4. 2. SiO_2 を用いた流出成分の分離

元木沢流域における SiO_2 は調査期間において、降水および融雪水中の濃度は $0.0 \sim 0.5 \text{ mg/l}$ の範囲にあり、土壌鉛直深さ方向での濃度分布に関しては Fig.6 に示す結果が得られた。図から土壌水中の SiO_2 はリター層浸透水ではほとんど含まれず、土壌浸透に伴う土壌固相無機成分との接触時間の増加により急激に濃度上昇をし、更に、母岩層から基底流出を形成する地下水帯にかけて緩やかに上昇していることがうかがえる。上述したように土壌水の採取は降水や融雪の有無に関らず定期的に行っていたので、各土壌深さでの SiO_2 濃度は融雪水等の浸透による土壌水分の変動の影響を余り受けず

にほぼ一定な値であったといえる。流出成分の分離において、新水は渓流水中の溶存態有機物濃度の上昇に寄与すると見なした融雪水および降水が土壌表層のみを経由して直接流出してくる成分を、古水は基底流出と 20cm 以深の土壌中に貯留されていて押し出されて来た成分に、融雪水や降水が土壌鉛直浸透した後、土壌内部を斜面方向に流れることにより流出してくる成分を加えた中間流出の混合成分を、それぞれ対象としている。

SiO_2 が積雪中や融雪水および降水においてほとんど含まれず、リターとの反応による影響も小さく調査期間中浸透水の濃度が低く一定に保たれていたことは、新水と土壌との接触により濃度が増加している古水との違いを明確にするものであり、本研究における SiO_2 のトレーサーとしての有用性を示すものである。そこで新水の水質濃度 C_n としては調査期間におけるリター層浸透水中の平均濃度 0.522 mg/l から土壌 10cm 深での平均濃度 1.759 mg/l の範囲において幾つかの濃度を設定し計算に用いた。一方、古水の水質濃度である C_o についてはその流出成分が基底流出成分と中間流出成分の混合により決定されるため、その混合の程度により濃度変動することから渓流水量的変化に対して一定値を用いることは好ましくない。Fig.7 は調査期間の渓流水量（ここでは l/s で表示）とその時の SiO_2 負荷量を両対数グラフ上にプロットしたものである。図より水量が 100 l/s 以下の場合では両者の関係がグラフ上において直線的であるのに対して、 100 l/s を越えるのに従いその直線関係から下方にずれて水量の増加に対する負荷量の増加は抑えられていることが分か

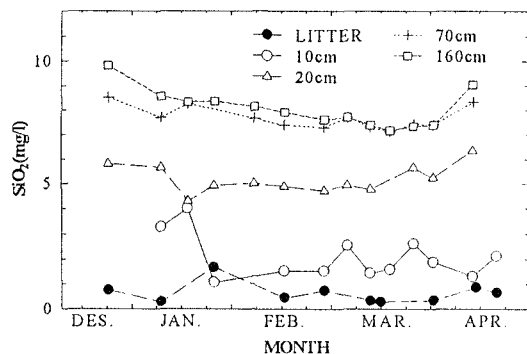


Fig.6 Profile of soil water SiO_2 during experiment period.

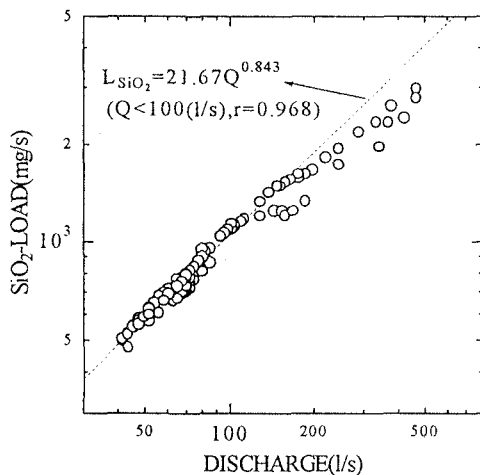


Fig.7 Relationship between discharge and SiO_2 -load in MOTOKISAWA watershed.

る。これは、融雪水や降水の直接流出成分による渓流水中の SiO_2 濃度の希釈が生じたためである。直線関係にある水量 100l/s 以下の場合には渓流水中の SiO_2 濃度が中間流出と基底流出の両成分の混合のみによって決定されると考え、渓流水量が 100l/s 以下の水量と負荷量のデータを用いて回帰分析を行い、次の回帰式が得られた。

$$L_{\text{SiO}_2} = 21.67Q_t^{0.843} \quad (r = 0.968) \quad (4)$$

$$L_{\text{SiO}_2} : \text{SiO}_2 \text{ 流出負荷量}(\text{mg/s})$$

その水質濃度 C_o は(4)式を用いて以下の式から算出し得る。

$$C_o = 21.67Q_t^{-0.157} \quad (5)$$

また、渓流水量が 100l/s 以上となった時、水量の増加につれて古水の流出量の中で、融雪水や降水が土壌内部を斜面方向に流れることにより流出してくる成分の占める割合が増加するため、古水の SiO_2 濃度は低下する。ここで、(5)式は Q_t が増加するにつれて C_o が減少する形をとっており、水量が 100l/s 以上における渓流水量の増加に対する古水の水質濃度 C_o の低下も(5)式によって表されると仮定し⁵⁾、その算定を行った。このように求めた C_n 、 C_o を用いて行った流出成分の分離結果を以下に示す。Fig.8 は調査期間中最も出水規模の大きかった 3 月 29 日～4 月 2 日における観測データを基に、流出成分の分離計算を行った結果である。古水の流出成分である Q_o のピークが中間流出成分のトレーサの働きを有する硝酸イオンのピークと十分対応していることは⁶⁾、この計算結果が妥当なものであることを示唆するものである。この図には新水の水質濃度としてはリター層浸透水の平均 SiO_2 濃度 0.522mg/l を用いたものを示したが、併せて行った土壌深さ 10cm での平均濃度 1.759mg/l での平均濃度を用いた場合についても、流出パターンに変化はなく SiO_2 濃度 0.522mg/l を用いたものに比べ総流出量が 18% 程度増加する結果を得た。また、直接流出成分発生時の渓流水量の合計量に対する直接流出成分の総流出量の占める割合は $18\sim 21\%$ となった。図から土壌表層のみを経由する直接流出成分を示す Q_n は渓流水量のピーク時付近でのみ発生しているが、必ずしもそのピークは一致しておらず併せて示した溶存態有機物の指標である E_{260} のピークとも一致しなかった。しかしながら Q_n のヒドログラフは E_{260} の変化に良く対応しており、特にピーク後の減衰部分は E_{260} のそれと一致していることから、浸透に伴いリターからの溶脱成分等により高濃度な溶存態有機物を含んだ融雪水の出水時の渓流水中における溶存態有機物の濃度上昇に対する直接的な寄与がこの分離結果から確認されたといえる。ピークのずれについては、図示した SiO_2 の濃度の極小値が渓流水量のピークや E_{260} のピークと一致せず遅れて生じたことがその要因であるが、リター層を経由せず直接渓流へ流出した融雪水の影響や、あるいは融雪水や降水の浸透量の増加に対してリターからの溶脱量は必ずしも比例関係

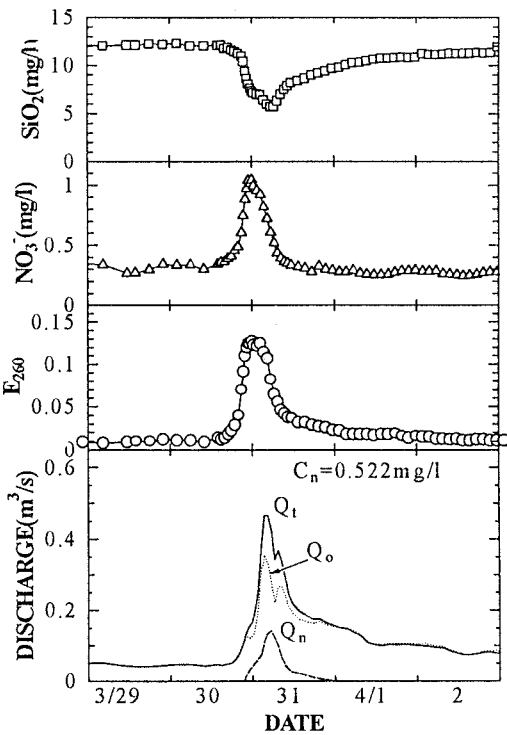


Fig.8 Separation of snow-melt runoff hydrograph using SiO_2 and changes of concentration of E_{260} , NO_3^- and SiO_2 for MOTOKISAWA watershed('95/3/29-4/2).

になく有機物濃度の低下が生じていたのではないかといったことが考えられる。また、出水時の流出パターンから、洪水が行ったように E_{260} が本流域の直接流出成分のトレーサーとして有効であることが推測される。しかしながら、その供給源であるリターからの溶脱特性については不明な点も多く、森林土壌中での溶存態有機物の挙動を理解する上でも土壌固相への有機物の吸着機構とともに、降水の浸透に伴うリターからの溶脱特性をさらに検討する必要がある。

5. まとめ

元木沢流域における融雪時の流出調査により森林域を由来とする溶存態有機物は降雨流出時と同様に、流出水量の増加に応じて渓流水中において濃度上昇を生じることが明らかとなった。土壌水中の DOC 濃度と E_{260} 値の鉛直分布および SiO_2 をトレーサーとして用いた流出成分の分離から、浸透過程においてリターからの溶脱有機成分を含んだ融雪水が、森林土壌表層のみを経由する流れによって直接渓流水質に影響を与えていることがその要因として示された。

参考文献

- 1) 丹保憲仁編著：水道とトリハロメタン, 技報堂出版, pp.83-91, 1983
- 2) 鈴木啓助・小林大二：森林小流域における融雪流出の形成機構, 地理学評論 60-11, pp.707-724, 1987
- 3) 林 誠二・後藤光亀・須藤隆一：森林域由来の溶存態有機物が渓流水質に及ぼす影響に関する研究, 水工学論文集, 第 39 巻, pp.223-228, 1995
- 4) 例えば松林宇一郎・ハーマン T. ウェルズ・高木不折：比電気伝導度－接触時間特性を考慮した流出成分の分離, 水工学論文集, 第 35 巻, pp.99-104, 1991
- 5) 志水俊夫：電導度による融雪流出の成分分離と融雪流出過程に関する研究, 森林総合研究所研究報告, 第 359 号, pp.123-140, 1990
- 6) 坂本 康・竹内邦良：融雪流出水水質の特徴と流出解析への利用についての基礎的検討, 第 29 回水理講演会論文集, pp.143-148, 1985
- 7) 洪 延芳・山田 正・亀井 翼・長谷川和義：宮の森小試験地の流出特性－ E_{260} 及び EC 発現成分をトレーサーとした解析－, 第 32 回水理講演会論文集, pp.55-58, 1988