

溶存水質成分の林内雨、リター層、および土壌からの供給に関する研究

A Study on the Supply of Dissolved Water Quality Elements from through Fall, Litter Layer and Soil

余湖典昭
Noriaki YOGO

北海学園大学工学部社会環境工学科教授

要 旨

本研究は、オカバルシ川流域を研究対象として、主要溶存水質成分の林内雨、リター層および土壌からの供給について検討したものである。

2005年6月から11月上旬の期間、雨量、河川水位・水質のほか、林内雨、土壌水、土壌などの自動観測・サンプリングを実施した。その結果、流域に降った雨が、森林、リター層、土壌を通過し河川流出に至る一連のプロセスについて、主要溶存水質成分の濃度（一部負荷量を含む）の増減を把握することができ、各成分の供給源も明らかになった。

一連のプロセスの中で最も水質が大きく変化するのは、森林内と土壌表面（深さが最大15cm程度まで）であった。特に森林内では、カリウムイオン、E260吸収成分の葉からの溶脱が顕著であり、土壌表面（リター層、深さ5cmまで）ではカルシウムイオン、マグネシウムイオン、硝酸窒素の増加が見られた。また深さ10cm～15cmの地層では硫酸イオンの濃度が上昇するなど、各成分の供給プロセスが推定できた。また増水時の河川水質は、土壌水の水質濃度のみでは説明できない成分もあり、流下過程における水質変化を考慮する必要があることが明らかになった。

《キーワード：水質；林内雨；リター層；土壌水；オカバルシ川》

1. はじめに

著者らは、2002年秋からオカバルシ川流域を対象として水および主要水質成分(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-)の流域における物質収支と流出機構について研究を行っている。その結果はすでに報告したが^{1,2,3)}、河川に流出する主要水質成分の主たる起源は、降雨による流域外負荷と、土壌などからの流域内での負荷の二つであり、成分によって寄与率が異なることが明らかになっている。すなわち降雨を主とする成分(Na^+ 、 Cl^-)と、流域内での供給を主とする成分(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 SO_4^{2-})に分けられる。しかし流域内での供給については、その具体的なメカニズムが明らかではなく、また後者に分類される成分の中で K^+ の河川への流出形態が他成分と顕著な差があることも明らかになった。したがって本研究では流域内の主要水質成分の供給起源として、林内雨、リター層と土壌に注目し、調査実験を行った。

2. 流域の概要

オカバルシ川流出試験地は、本学工学部から10kmほどの距離で車による所要時間は20分程度であり、アクセスが容易なフィールドである。

オカバルシ川は真簾峠付近にその源を発し、北流して豊平川右岸側に合流する溪流河川である。図-1にオカバルシ川流域を示す。試験地の流域面積は3.42km²、観測地点の標高は207m、源流部は370mで163mの標高差をおよそ3kmの河川で一気に下っている。上流部東側では標高651mの山が隣接し、崖地や急斜面となっている。そのため崩壊等による土砂生産が多く、砂防ダムや治山ダムが複数個設置されている。St.1より下流では国道230号線まで住宅地が広がっているが、上流側ではゴルフ場、スキー場、霊園があり、その一部は流域内にあるが、大部分は自然林となっている。

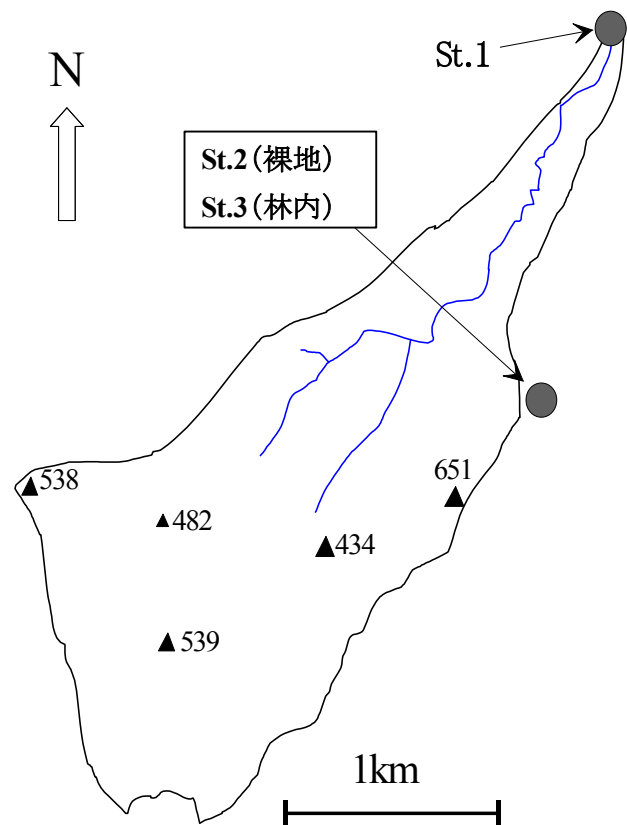


図-1 オカバルシ川流域の概況

3. 調査・実験方法

図-1 に示した St.1、St.2、St.3 を調査地点とした。St.1 では、雨量・降雨水質と河川流量・水質に関する調査を実施した。St.2 と St.3 は距離的には 30m 程度しか離れていないが、St.2 は裸地、St.3 は森林内にある。降雨時の森林内での水質変化を把握するために両地点に雨量計と雨水サンプラーを設置した。また St.3 では土壌水の調査を実施した。写真-1、2 に St.1 と St.3 の様子を示した。



写真-1 調査地点の状況 (St.1)



写真-2 調査地点の状況 (St.3)

観測項目、測定項目等は以下の通りである。

降雨：0.5mm 精度の転倒ます型雨量計（大田計器製作所製、No.34-T）×3台（St.1、St.2、St.3に設置した）

河川水位：投げ込み式水位計（Hub社製、KU681-2.5mH20）×1台（St.1）

河川水質：YSI Model6000 水質モニタリングシステム（水温、pH、DO、電気伝導度、濁度）（St.1）。

土壌水；ポラスカップ式土壌水採取装置（大起理化工業社製、真空ポンプ付）（10、20、30、40、50cmの深度で採取）（St.3）

簡易型ライシメータ（5cmの土壌深度に設置しリター層の重力水を採取）（St.3）

土壌；土壌コアサンプラー使用（大起理化工業社製、DIK-115B）

河川水自動採水；伝導度検出器付き ISCO オートサンプラー Model 3700（St.1）

流速（流量）；電磁流速計（(株)ケネック製、LP1100）使用（20回実施）（St.1）

なお2005年9月7日の台風14号による増水のためSt.1のH鋼が倒れ、その修復に1か月以上を要した。したがって河川水位と水質のモニタリングデータは長期にわたって欠測であった。

ポラスカップ付土壌水採取装置は、真空ポンプを用いて-50kPaに真空度を維持して行った。図-2に土壌水採取装置の概要を示した。

St.1の雨量、水位、水質、およびSt.2、St.3の雨量の自動観測は、2005年6月から11月上旬まで10分間隔で行った。また雨水、土壌水の採取は、出来るだけ一降雨ごとに実施した。土壌の採取は月1回程度実施した。項目別の調査実施日を表-1にまとめた。

河川水の水質測定項目（分析法）は、水温、pH、電気伝導度、溶存酸素（DO）（以上は現地で携帯型センサーを用いて測定）、塩化物イオン（Cl⁻）、硝酸イ

オン（NO₃⁻-N）、硫酸イオン（SO₄²⁻）（以上イオンクロマトグラフ法）、ナトリウムイオン（Na⁺）、カリウムイオン（K⁺）、カルシウムイオン（Ca²⁺）、マグネシウムイオン（Mg²⁺）（以上原子吸光光度法）、アンモニアイオン（NH₄⁺-N）（インドフェノール法）、全窒素、全リン（ペリオキソ二硫酸カリウム分解法）、COD（過マンガン酸カリウム法）、SS（重量法）、E220およびE260（分光光度計で220nm、260nmの吸光度を測定）などである。

雨水水質の測定項目は、塩化物イオン（Cl⁻）、硝酸イオン（NO₃⁻-N）、硫酸イオン（SO₄²⁻）（以上イオンクロマトグラフ法）、ナトリウムイオン（Na⁺）、カリウムイオン（K⁺）、カル

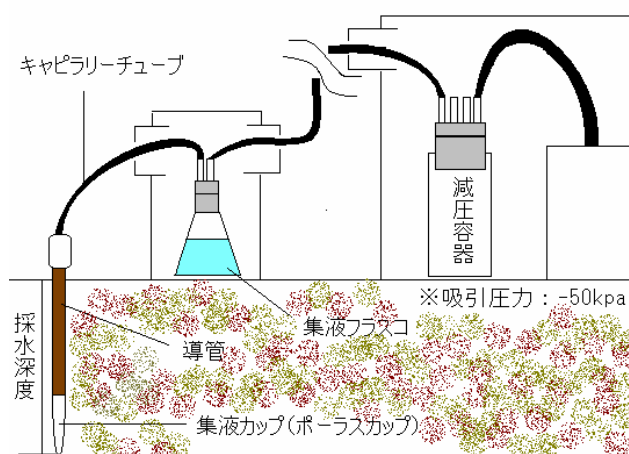


図-2 土壌採取装置の概要

シウムイオン (Ca²⁺)、マグネシウムイオン (Mg²⁺) (以上原子吸光光度法)、アンモニアイオン (NH₄⁺-N) (インドフェノール法)、E220 および E260 である。

土壌試料については、採取後に 2mm の篩によって粗大ゴミを除いた後に、吸引法により陽イオン交換容量 (CEC)、置換性陽イオン量を測定した⁴⁾。

表-1 調査日と調査内容 (2005年)

調査日	雨水		土壌・土壌水			河川水
	裸地域の雨	林内雨	ライシメータ水の回収	土壌水の回収	土壌の採取	河川水の採取・回収
6月16日	×	×	×	×	×	○
6月24日	×	×	×	×	○	○
6月30日	○	×	×	×	×	×
7月7日	○	○	×	×	×	○
7月14日	○	○	×	×	○	×
7月22日	○	○	○	×	×	×
7月23日	×	×	×	○	×	×
7月26日	×	×	×	×	×	○
7月27日	○	○	○	×	×	○
7月30日	○	○	○	○	×	×
8月2日	×	×	×	×	×	○
8月3日	×	×	×	×	×	○
8月10日	○	○	○	×	○	○
8月20日	○	○	○	○	×	○
8月21日	○	○	○	○	×	○
8月22日	○	○	○	○	×	○
8月23日	×	×	×	×	○	○
8月29日	○	○	×	○	×	×
9月7日	×	×	×	×	×	○
9月11日	○	○	○	○	×	○
9月9日	×	×	×	×	○	×
9月14日	×	×	×	×	×	○
9月16日	○	○	○	○	×	×
9月18日	×	×	×	×	×	○
9月20日	○	○	×	○	○	×
9月26日	○	○	×	○	×	×
9月28日	○	○	×	×	×	×
10月3日	○	○	○	○	×	○
10月12日	○	○	○	○	○	×
10月15日	○	○	○	○	×	×
10月22日	×	×	×	×	×	○
10月26日	○	○	○	×	×	×
10月31日	○	○	○	○	×	×
11月7日	×	×	×	×	×	○
11月8日	○	○	○	○	×	○

計35回

4. 林内雨の雨量と水質について

(1) 林内雨について

森林内の雨は一般に林内雨と呼ばれ、裸地域の雨（以下林外雨と記す）とは量・質とも異なる。量的にみると、降雨が樹木に衝突して小粒径の雨滴に分散することによって、蒸発が促進されるため、裸地に比較して雨量は減少する。また広い表面積を持つ樹葉によって晴天時にも乾性沈着物が補足されるため、降雨時に乾性沈着物が溶解し、裸地よりも林内雨の水質成分の濃度が上昇する。さらに一部の成分については降雨によって植物からの溶脱がおこると言われている。このように林内雨は林外雨に比較して量的には少なく、質的には高濃度になることが知られている。したがって本研究では始めに、土壤に降雨が到達する前段階としての林内雨の調査結果について述べる。

(2) 林内雨の雨量

図-3は観測期間における林内雨の雨量（St.3）を示したものである。図中の9月7日の降雨が飛びぬけて雨量が大きいのが、これは台風14号の影響である。また図-4に裸地（St.2）とSt.3の雨量の相関関係を示した。この結果から林内雨量は林外雨量より1割程度少ないことがわかる。京大演習林上賀茂試験地における丸山・岩坪・堤らの研究によると⁵⁾、林外域に比較してヒノキ林では約7割、広葉樹林では約6割に降雨量が減少すると報告されているが、本研究では比較的小さな減少であった。また林内雨とともに樹幹流によっても水質成分が供給されると言われている。現時点では樹幹流は測定対象としていないが、林外と林内の雨量の比較から推定して、この流域では樹幹流の寄与率は比較的小さいのではないかと推測される。

雨量の減少割合は、樹種やその分布密度、気象条件などによって異なるものと推定されるが、この点については現時点では明らかではない。参考までに、St.3に設置した雨量計の上空の様子を写真-3～6に示しておく。

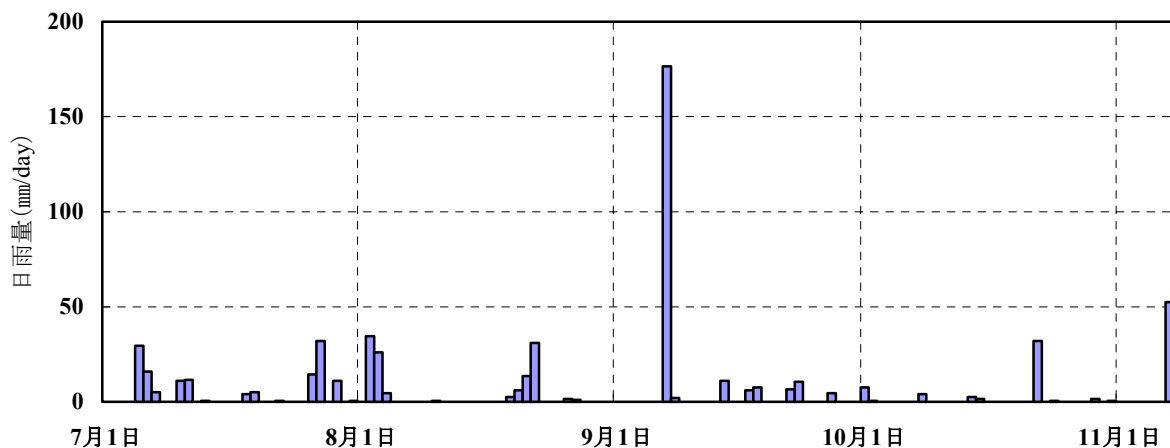


図-3 観測期間の林内の日雨量

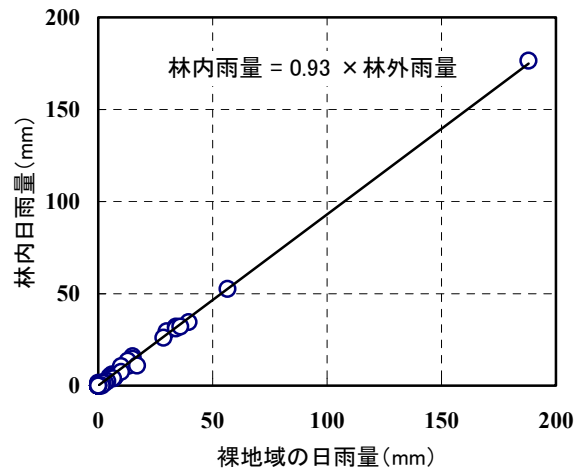


図-4 林外雨量と林内雨量の関係



写真-3 林内雨量計の上空 (6月30日)



写真-4 林内雨量計の上空 (8月31日)

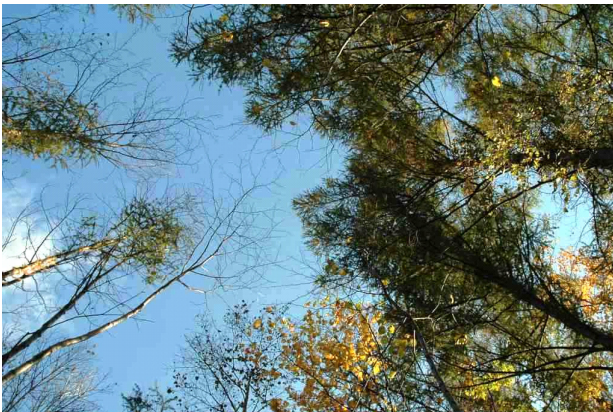


写真-5 林内雨量計の上空 (10月12日)

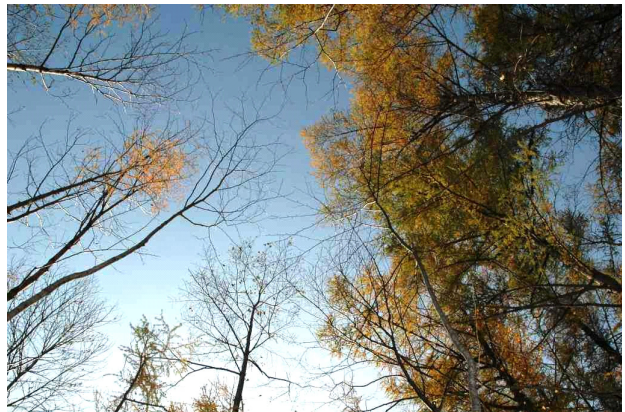


写真-6 林内雨量計の上空 (11月8日)

(2) 林内雨の水質

林外雨と比較しながら、林内雨水質の特徴について述べる。図-5～8に、St.2とSt.3のカルシウムイオン、ナトリウムイオン、カリウムイオン、硫酸イオン、および図-9には溶存有機物濃度の使用であるE260の観測期間中の濃度変化を示した。図中に示した雨量はサンプリング期間中の総雨量を示している。いずれの成分も林内雨の濃度が林外雨と比較して高く、カルシウムイオン、カリウムイオンでは7月22日と10月以降の濃度差が大きく、マグネシウムイオンも同様の傾向にあった。特にカリウムイオンが林内雨で数十倍に濃度が上昇している。E260についても変化のパターンは異なるが、顕著な濃度増加が見られた。ナトリウムイオンについては秋季のみ濃度増加が顕著であり、塩化物イオンも同様の傾向にあった。硫酸イオンは観測期間と通して林内雨濃度が林外雨濃度を上回り、秋季に差が大きくなるが、濃度増加は最大で3倍程度であり、他の成分に比較して低い値となった。

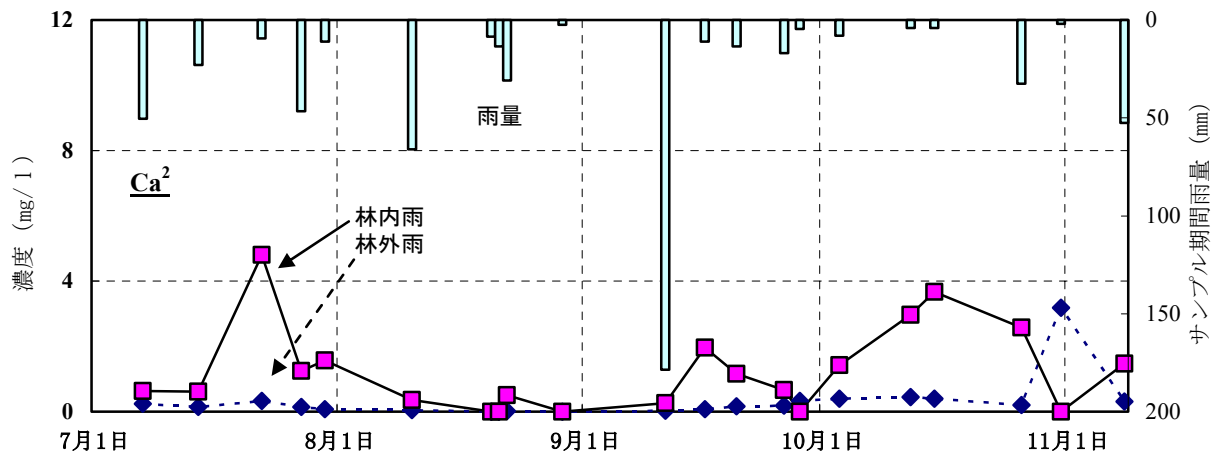


図-5 雨量と雨水中カルシウムイオンの濃度変化

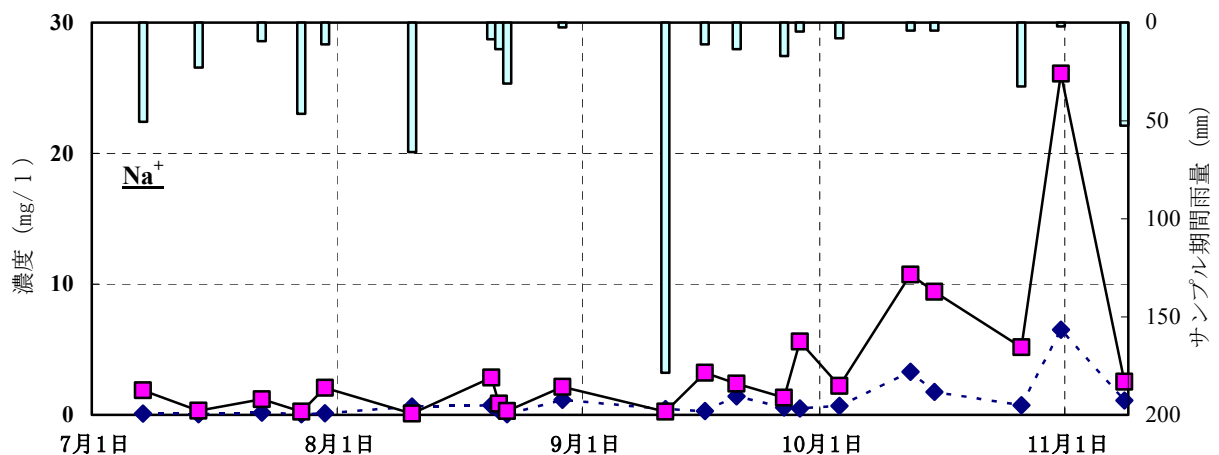


図-6 雨量と雨水中ナトリウムイオンの濃度変化

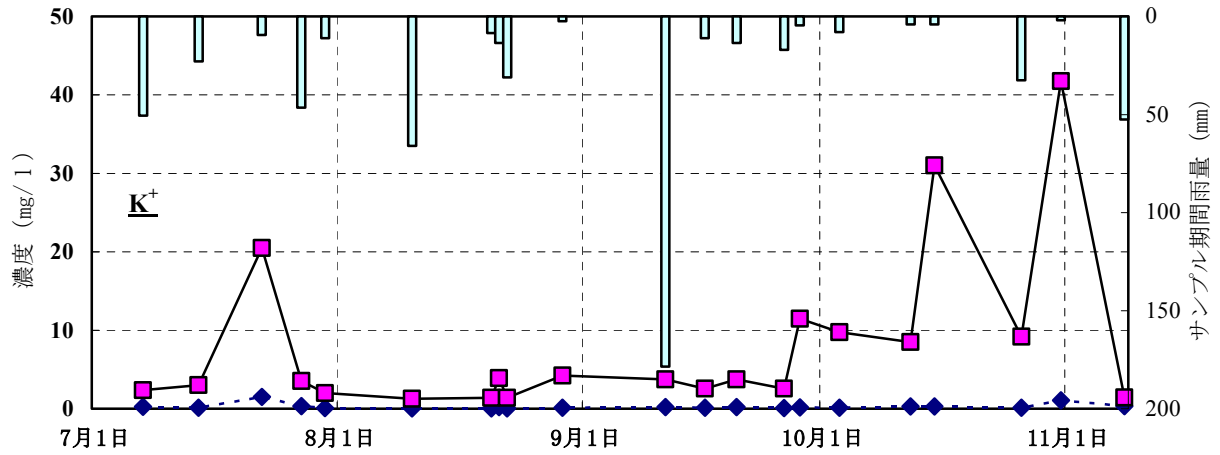


図-7 雨量と雨水中カリウムイオンの濃度変化

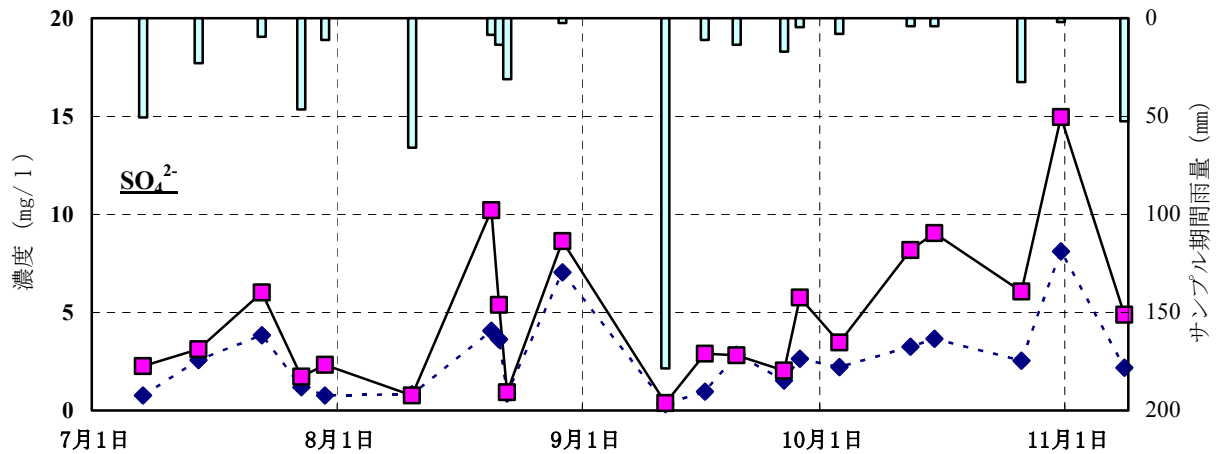


図-8 雨量と雨水中硫酸イオンの濃度変化

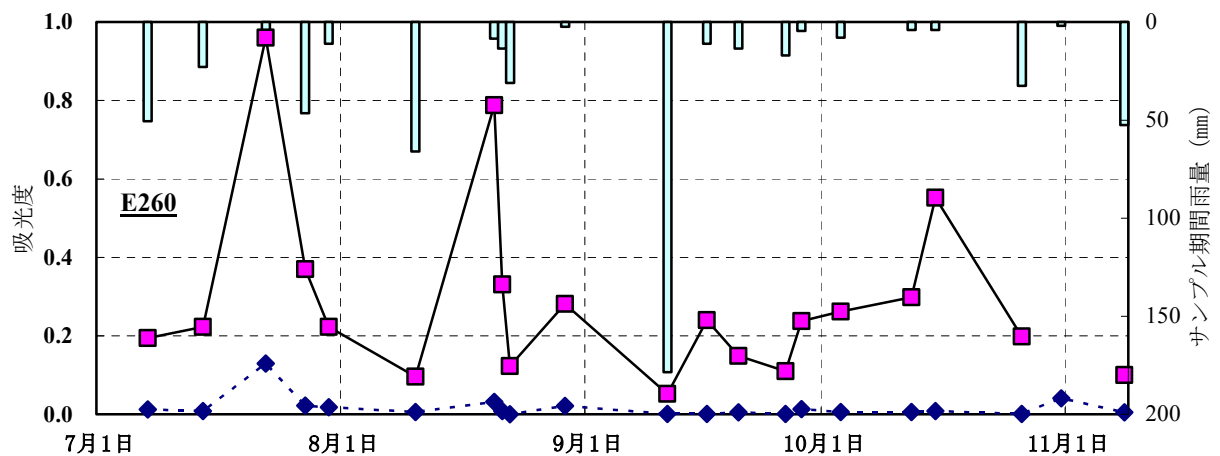


図-9 雨量と雨水中E260の濃度変化

図-10、11、12には各成分の St. 2 と St. 3 の濃度の関係を示した。これらの結果からもナトリウムイオン、カリウムイオン、塩化物イオン、E260 の濃度上昇が著しいことが明らかである（図-10、11）。またカルシウムイオン、マグネシウムイオンについても濃度は低いが、最大 10 倍以上の濃度上昇が見られる。硫酸イオンは最大 2 倍程度の上昇にとどまっているが、硝酸イオンについては逆に林内で濃度の低下が見られた（図-12）。

図-13 は林内雨の雨量と成分濃度の関係を示したものである。全体として雨量が増加すると濃度が減少する傾向にあり、林外雨と同様の結果となった¹⁾。すなわち雨量が少ないときほど林内における濃度上昇が大きく、雨量が増えても濃度は上昇しないことがわかる。

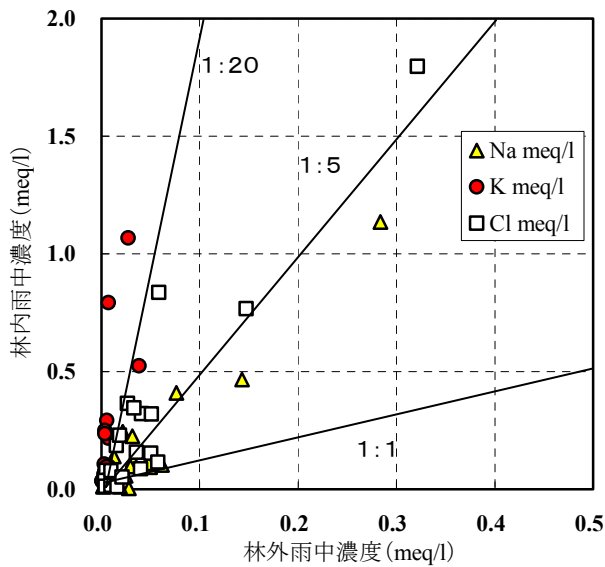


図-10 林外雨と林内雨濃度の関係

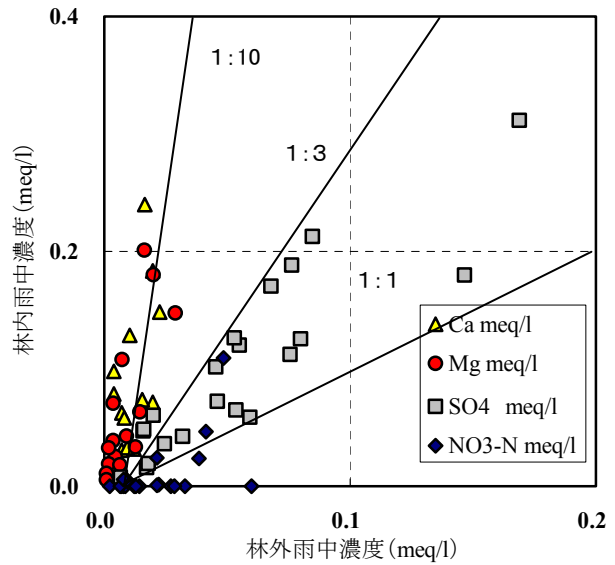


図-11 林外雨と林内雨濃度の関係

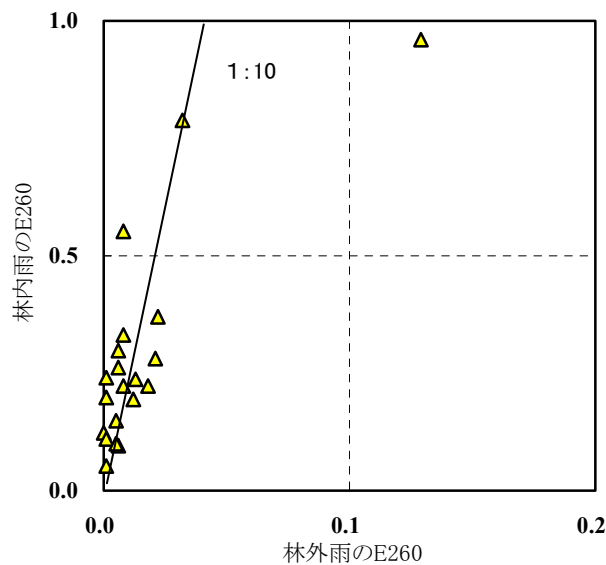


図-12 林外雨と林内雨のE220の比較

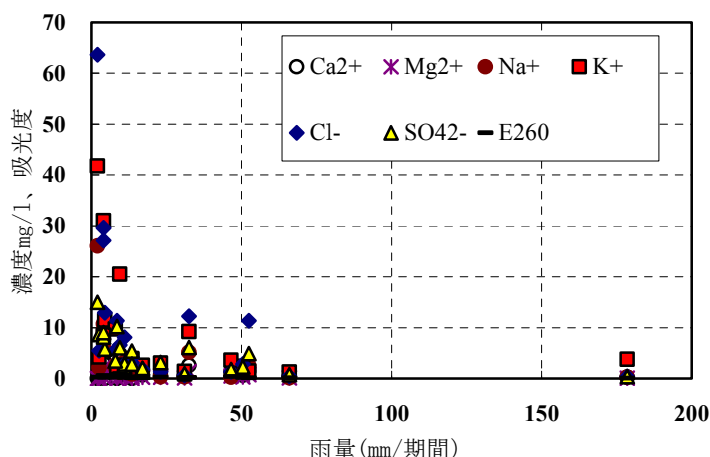


図-13 林内雨の雨量と水質成分濃度の関係

以上のように林内における水質成分の供給は、ナトリウムイオン、カリウムイオン、塩化物イオン、紫外部吸収成分（E260）で林外に比較して特に大きく、林内雨による水質濃度の増加は無視できないことが明らかになった。

カリウムイオンは雨水による木々の葉からの溶脱が早く、落葉期においてはその濃度上昇が顕著であることが知られているが⁶⁾、本研究においても同様の傾向にあることが明らかになった。さらに本研究の結果から、E260についても葉からの溶脱によって林内で供給されているものと推定される。逆に硝酸窒素イオンは葉から植物に吸収されることが知られており、林内雨での濃度低下の原因と考えられる。ナトリウムイオン、塩化物イオンの起源としては、第一に樹葉に吸着していた風送塩が考えられる。しかし図-14に示したように、林内雨では塩化物イオン濃度がナトリウムイオン濃度と比較して海水組成の約2倍に上昇する。したがって林内においては、風送塩以外の塩化物イオンの供給源が存在することが考えられる。例えば林内雨で濃度上昇が顕著なカリウムイオンが、葉からの溶脱する際のペアイオンとして塩化物イオンも共に供給される可能性も考えられるが、現時点では明確な傾向は把握できない。林内雨中の塩化物イオン、ナトリウムイオン、カリウムイオンの相互関係については、過去の文献においても明確な結果が得られていない。今後の検討課題である。

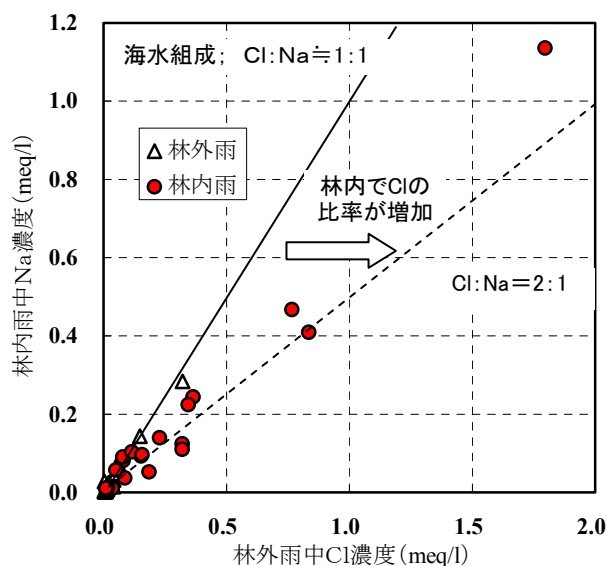


図-14 林外雨と林内雨のClとNaの関係

(3) 裸地域と林内の雨水負荷量の比較

次に雨水中に含まれる成分の負荷量について述べる。図-15、16に、林外雨負荷量と林内雨負荷量の関係を示した。前節で述べた濃度の関係に比較して、全体的にデータのバラツキがやや大きくなるが、カリウムイオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオンについては、濃度と同様に負荷量も林内で顕著に増加する。明らかに減少するのは硝酸窒素イオンであり、硫酸イオンも1：1の線上にプロットされるデータが多い。一方、風送塩由来の割合が大きなナトリウムイオン、塩化物イオンについても、林内負荷量は増加するが、負荷量の大きなデータではバラツキが大きくなり、一部のデータでは減少する場合もある。風向・風速などの気象条件によって大気中の風送塩濃度は大きく変動する。したがって雨量の多いデータ（負荷量の大きなデータ）ほど変動が大きくなるものと推定される。

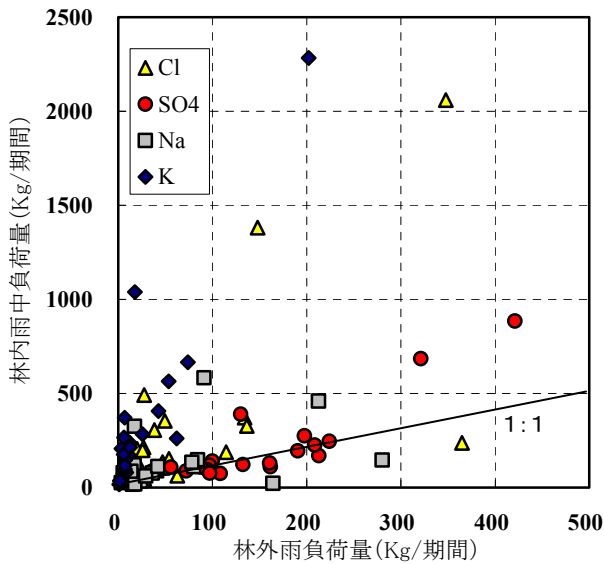


図-15 林外雨と林内雨濃度の関係

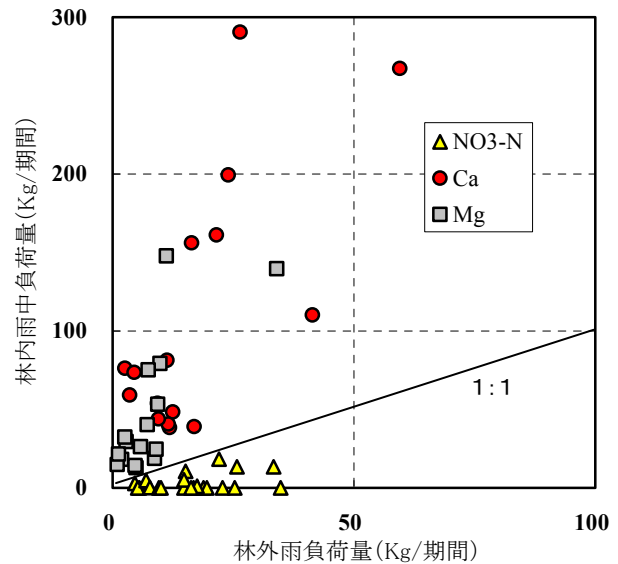


図-16 林外雨と林内雨の負荷量の関係

図-17に調査期間中の流域全体に対する負荷量を示した。グラフの上部が林内における負荷量の増加量（林内純増分）を表している。硫酸イオンの純増負荷量のみが林外雨の0.6倍程度と小さいが、その他の成分においては1.3倍から15倍程度増加しており、特にカリウムイオンの増加量が突出している。著者らは過去に、林外雨による水質成分負荷量と河川への流出量を比較して流域内の物質収支を議論した^{1, 2, 3)}。しかし以上述べたように林内雨による大きな負荷により、土壌表面に達する負荷量のはるかに大きいことが明らかになった。土壌表面に負荷された水質成分は、流域内で貯留、流域から流出、流域内を循環（主に植物による循環利用）の3つの形態に分かれるため、河川流出に至るのはその一部に過ぎない。しかし森林内土壌表面に高濃度の雨水が到達することが、水質成分の流出メカニズムにどのような影響を与えているのか、非常に重要な検討課題である。

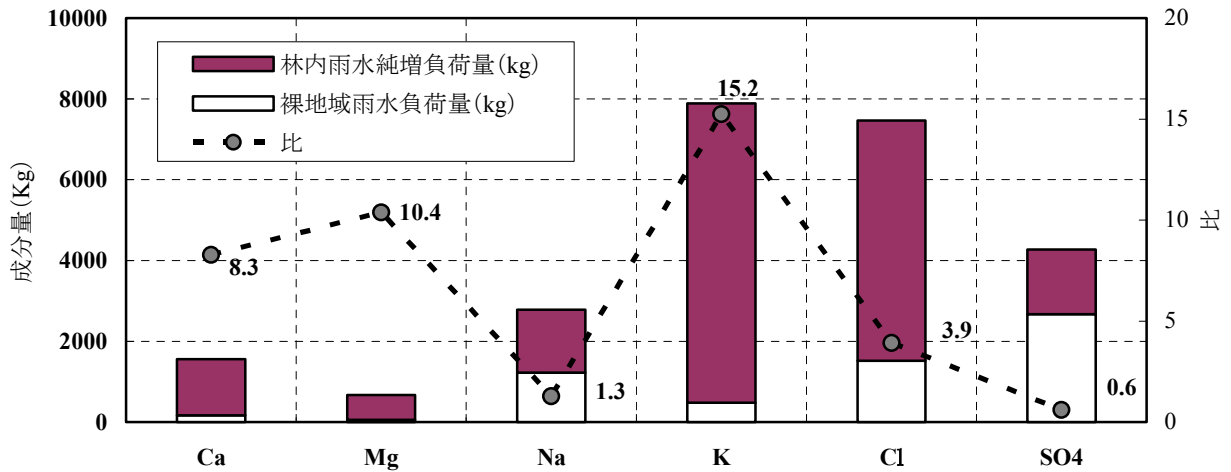


図-17 林外雨と林内雨の雨水負荷量の比較（オカバルシ川流域）

5. リター層水、土壌水について

(1) 試料採取量

土壌水は、2種類の方法で採取した。第一は、主に土壌表面のリター層を通過した重力水を採取するために、土壌深さ5cmに設置した簡易型ライシメータを設置した。第二の方法は、ポーラスカップ型土壌水採取装置を真空ポンプで連続吸引して10cmから50cmまで採取した。

初めに、各方法による試料採取量について述べる。図-18は採取期間中の降雨量とライシメータによる試料採取量の関係を示したものである。降雨量15mm程度までは降雨量と試料量はほぼ比例しているが、降雨量が大きくなるとバラツキが大きくなる。ライシメータは、土中に掘った穴から深さ5cmの土壌断面に差込まれ、土穴中に設置したポリタンクに水を受ける構造となっている。そのため降雨量が大きい場合にはライシメータ上の土壌の流出や土壌断面の破壊が起りやすい。またポリタンクが穴に溜まった雨水によって浮上してチューブが折れ曲がり、試料の採取が中断したケースもあった。したがってデータのばらつきはこのようなサンプリング手法の問題が原因である可能性が高い。しかしポーラスカップ式採取装置は10cm以上の深さにしか使用できないため、土壌表面の水を採取する方法としては有効な方法であり、今後の改良が必要と考えている。

図-19は、ポーラスカップによる採取期間中の降雨量と試料採取量の関係を深さごとに示したものである。降雨量が大きいほど表層に近い深さで採取量が大きくなるが、20mm以下の降雨量では、表層部よりも10~50cmの深さでの採取量が増加している。これは小さな雨の場合ほど深さ方向へ雨水が浸透することを示している。今回は深さ50cmまでしか測定していないが、以上の結果から考えて、降雨時の雨水の土壌への浸透を把握するには、今後さらに深い深度まで採取することが必要と考えられる。

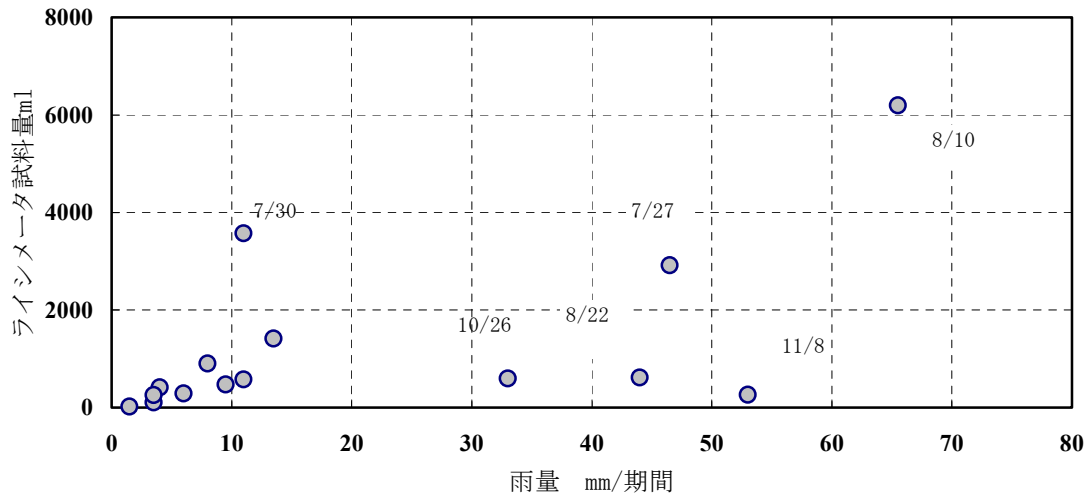


図-18 林内雨量とライシメータ試料量の関係

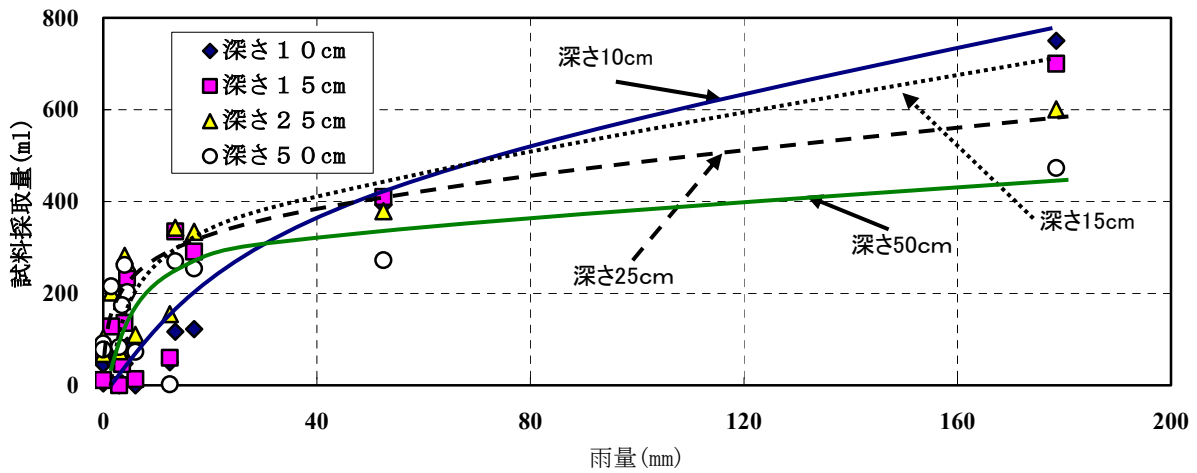


図-19 深さ毎の試料採取量の分布

(2) 土壌表層水（リター層水）の水質

深度 5cm に設置したライシメータによる採取試料（以下、リター層水と記す）は、林内雨が土壌表面に到達した直後の水質である。土壌表面には、落葉などリターが多量に存在し生物分解が活発に行われている。したがって土壌粒子とリターを厳密に分けることは手法的に難しいが、土壌表面で新たに、リターの分解に由来する水質成分が供給される可能性は高い。

図-20、21 にリター層水の水質変化を示した。陽イオン 4 成分の変化パターンは類似しており、7月 22 日と秋季に高濃度が検出されている。7月 22 日は 10 分間に 5mm の強い降雨時のデータであり、この時には前述の林内雨でも高濃度が検出されている。強い雨により、通常よりも大きな溶出があったものと推定される。秋季に記録された高い濃度についても、林内雨が同様の変化を示しており、落葉などのリターの分解によって供給されたものと推定される。一方陰イオンの濃度変化パターンは、陽イオンに比較して成

分による違いが大きく、塩化物イオンでは陽イオンと同様に 10 月に大きなピークが見られるが、他の成分については明確な傾向は認められない。

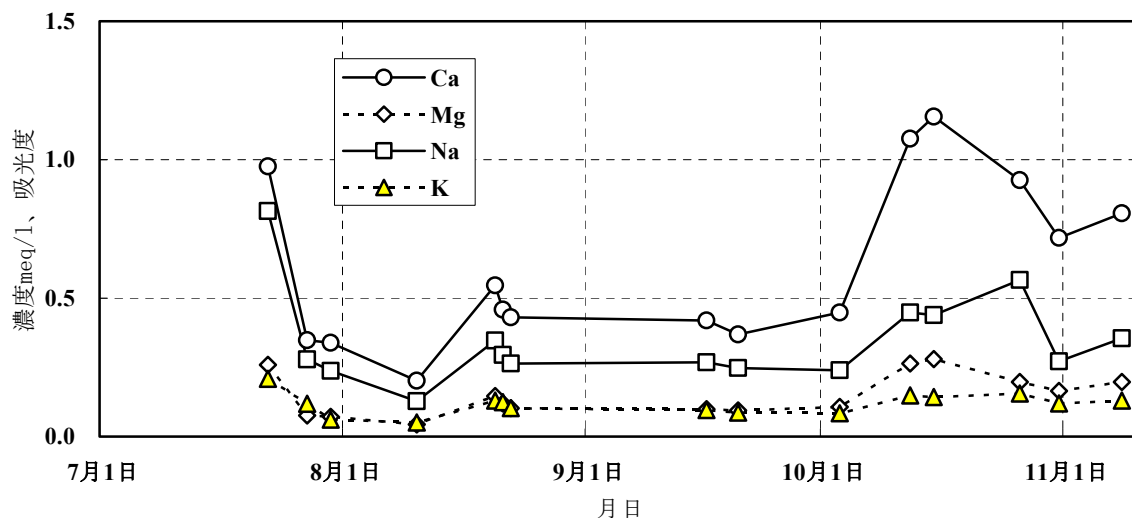


図-20 リター層水中の陽イオン濃度変化

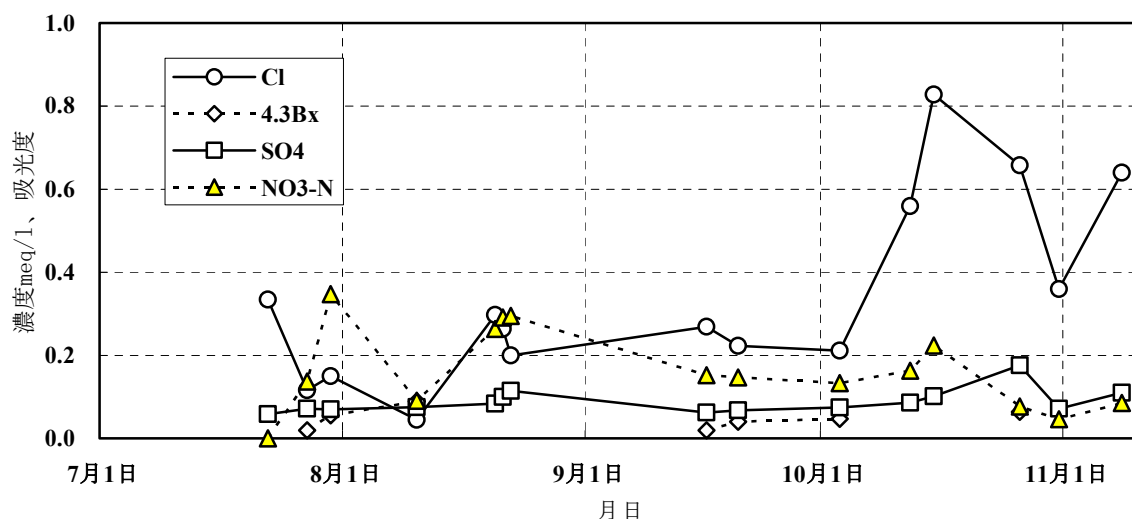


図-21 リター層水中の陰イオン濃度変化

次に、林内雨の濃度とリター層水の濃度の関係について検討する。図-22 は、林内雨とリター層水の成分濃度の関係を示したものである。この図から、土壌表面に到達した林内雨が、わずか 5cm の土壌表層を通過する間に、水質が大きく変化することが明らかとなる。すなわち、以下のような傾向となる；

林内雨濃度に比較して；

リター層水濃度が明らかに増加する成分；

カルシウムイオン（約 6 倍）、マグネシウムイオン（約 2 倍）

硝酸窒素イオン（林内雨では非検出の試料が多いが、リター層水で検出）

リター層水濃度が減少し、ほぼ一定な成分；

カリウムイオン（特に大きく減少）、硫酸イオン
ばらつきが大きく一定の傾向が見られない成分；

ナトリウムイオン、塩化物イオン、E260

の3つの傾向に分類される。この中でも、特にカルシウムイオン、硝酸窒素イオンの濃度上昇と、逆にカリウムイオンの濃度減少が顕著に見られ、多量のリターを含む土壌表層部分で、大きな水質変化が生じていることが明らかになった。

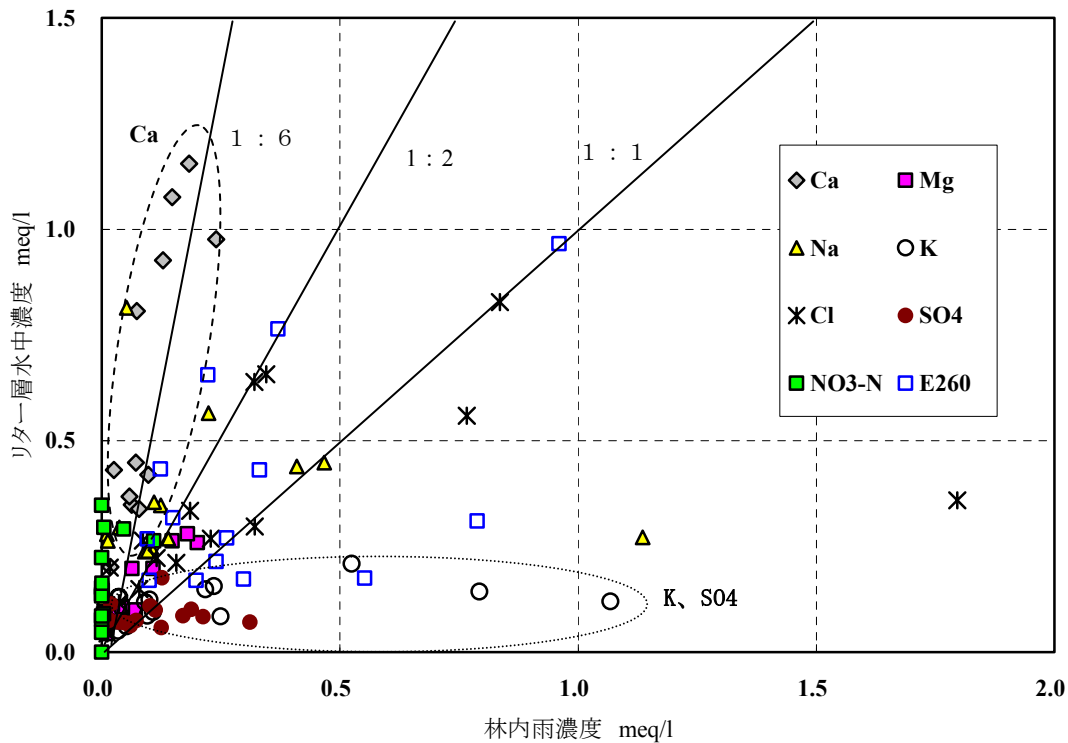


図-22 林内雨濃度とリター層水濃度の関係

(3) 土壌水の水質

深度 10~50cm の土壌水の水質について述べる。採取期間中の雨量と、10cm および 50cm の土壌水中の濃度の関係を示すと、**図-23~26** が得られる。陽イオンと陰イオンの濃度変化を比較すると、陽イオンで変化が少なく、かつ各イオンの濃度順位も一定に保たれている。これは土壌粒子の負荷電に吸着した陽イオン量と土壌水中イオン濃度に吸着平衡が成立しているためであり（後述）、雨の影響を受ける 10cm では濃度がややばらつくが、50cm の陽イオン濃度はほぼ一定である。一方陰イオンでは、雨量が小さい降雨時ほど 10cm の濃度のバラツキが大きく、塩化物イオンと硫酸イオンの濃度の逆転も一部見られ、雨量の増加に伴って濃度が低下する傾向がある。これは、降雨量が大きくなると降雨中のイオン濃度が低下することに対応しており（前出**図-13**）、吸着成分が補給されない陰イオンでその影響が明確に現れたものと考えられる。しかし 50cm では濃度変動幅は小さくなる。データは省略するが、他の成分も含めて、土壌水の濃度変化は 10cm、15cm で大きく、25cm、50cm ではほぼ一定の値に落ち着く結果となった。したがって降雨時の水質成分の流出に直接関与する地層は、15cm 程度と想定することが出来る。

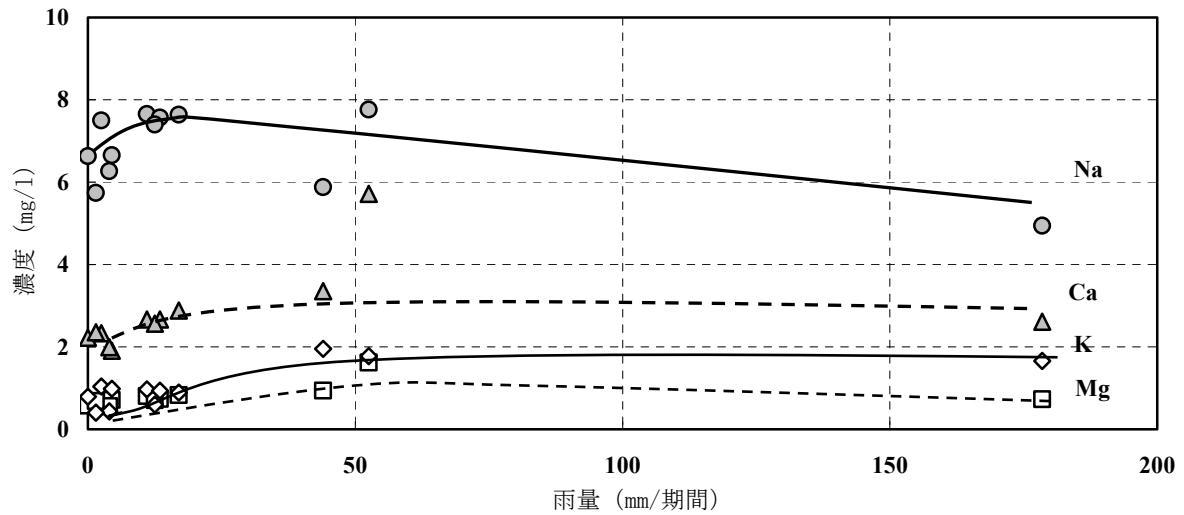


図-23 土壤水（深さ10cm）の陽イオン濃度分布

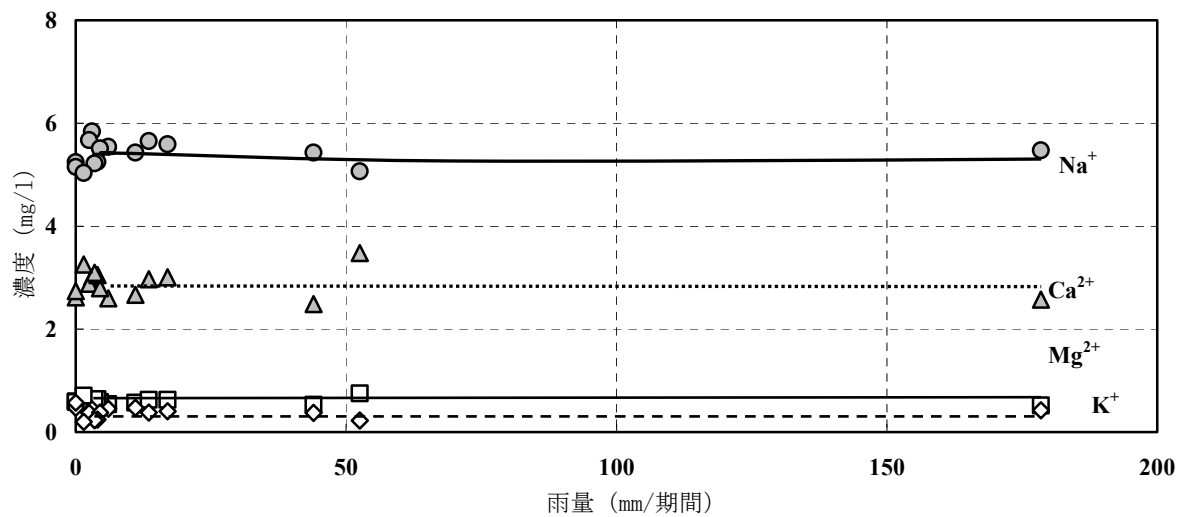


図-24 土壤水（深さ50cm）の陽イオン濃度分布

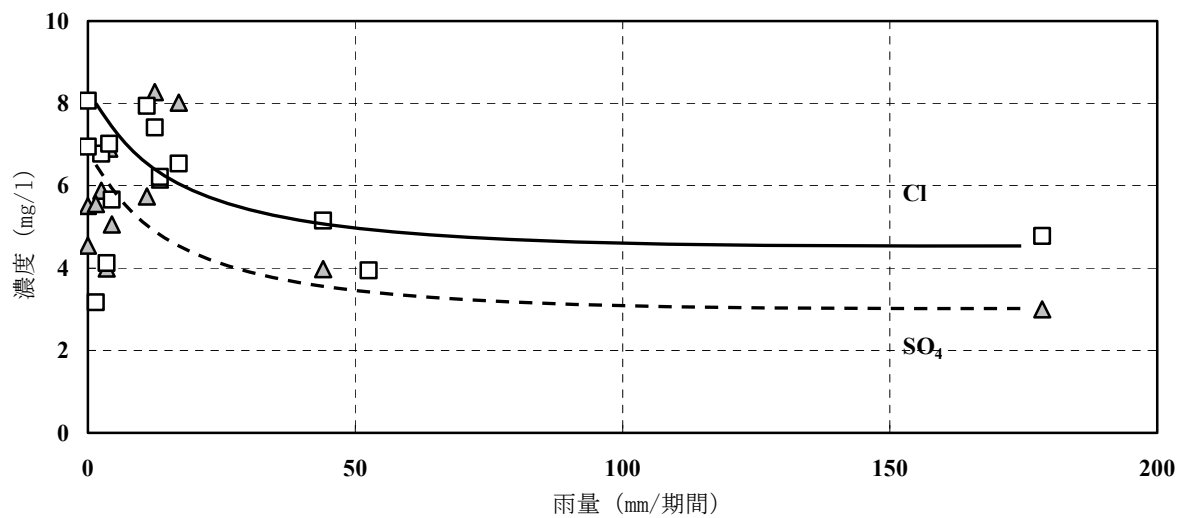


図-25 土壤水（深さ10cm）の陰イオン濃度分布

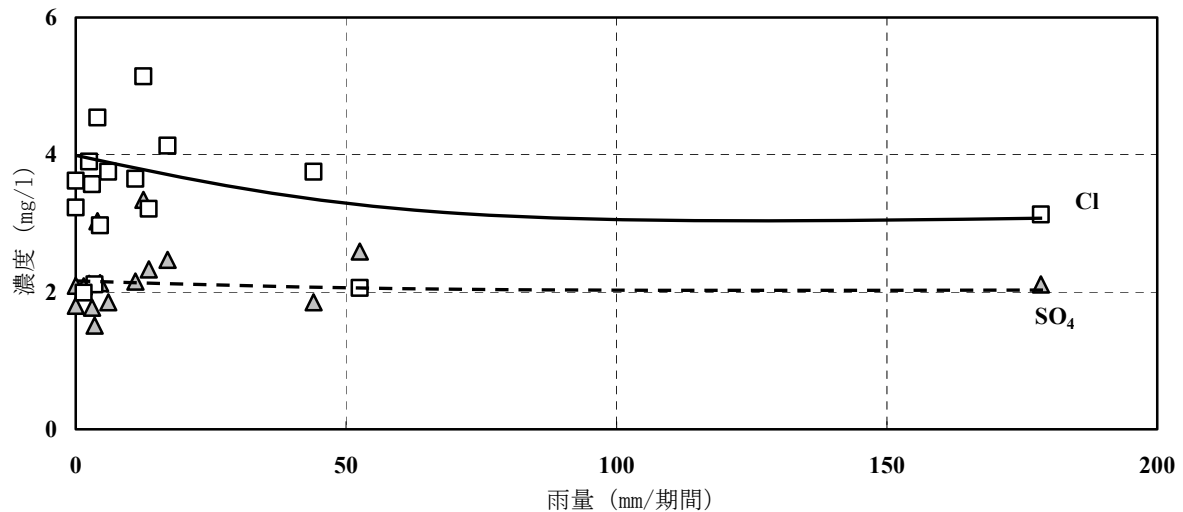


図-26 土壤水（深さ50cm）の陰イオン濃度分布

ここで土壤水中の陽イオン濃度が、陰イオンに比較して濃度が一定に維持される原因について土壤の調査結果を用いて触れておく。表2に土壤の分析結果から計算した、土壤の単位重量中の陽イオン吸着量と土壤水中溶存量の比をまとめた。成分により巾があるが、土壤中には土壤水に溶存している量の、約60倍から3000倍以上の量が土壤の負荷電にイオン交換的に吸着していることがわかる。溶存濃度と吸着量は互いに平衡状態を維持しようとするため、

土壤水の濃度変化に対応して吸脱着が行われる。仮に土壤水濃度に相当の変化が生じて、圧倒的に大きな吸着量の存在は、土壤水濃度を維持するための十分なストックとなりうるため、結果として土壤水の陽イオン濃度は一定レベルに維持されることになる。したがって、浸透する水の陽イオン濃度が多少変動しても、浸透過程で吸着平衡を維持しようとする力によって、特に陽イオン濃度の変動が小さくなるものと推定される。

表-2 土壤中の吸着量と溶存量の比較

(A) 土壤中の置換性吸着量 (meq/100g・dry)

成分名	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
7月	5.2659	1.6604	1.4524	0.9294
8月	4.1275	1.0969	1.0762	1.8093
9月	4.2498	1.1767	0.6757	1.7287
10月	4.2982	1.3929	0.9752	1.3932

(B) 土壤水中の溶存量 (meq/100g・dry)

成分名	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
7月	0.0051	0.0022	0.0108	0.0010
8月	0.0052	0.0020	0.0104	0.0008
9月	0.0055	0.0022	0.0105	0.0008
10月	0.0050	0.0020	0.0090	0.0004

(C) 吸着量と溶存量の比 (A/B)

成分名	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
7月	1039	753	135	930
8月	794	544	103	2324
9月	777	524	64	2085
10月	854	691	109	3223

次に、前節で述べたリター層水と 10cm 土壌水の水質について述べる。両者の関係を図-27 に示した。この図から、硫酸イオンと、一部のナトリウムイオンおよび E260 のデータを除いて、10cm 土壌水の濃度は全体的に低下し、かつその変動幅が小さくなっていることがわかる。特にリター層水で幅広い濃度変動を示していたカルシウムイオン、ナトリウムイオン、塩化物イオンでその傾向が顕著である。このようにサンプリング手法は異なるものの、深度 5cm のリター層水と、10cm の土壌水では水質に大きな違いが見られた。

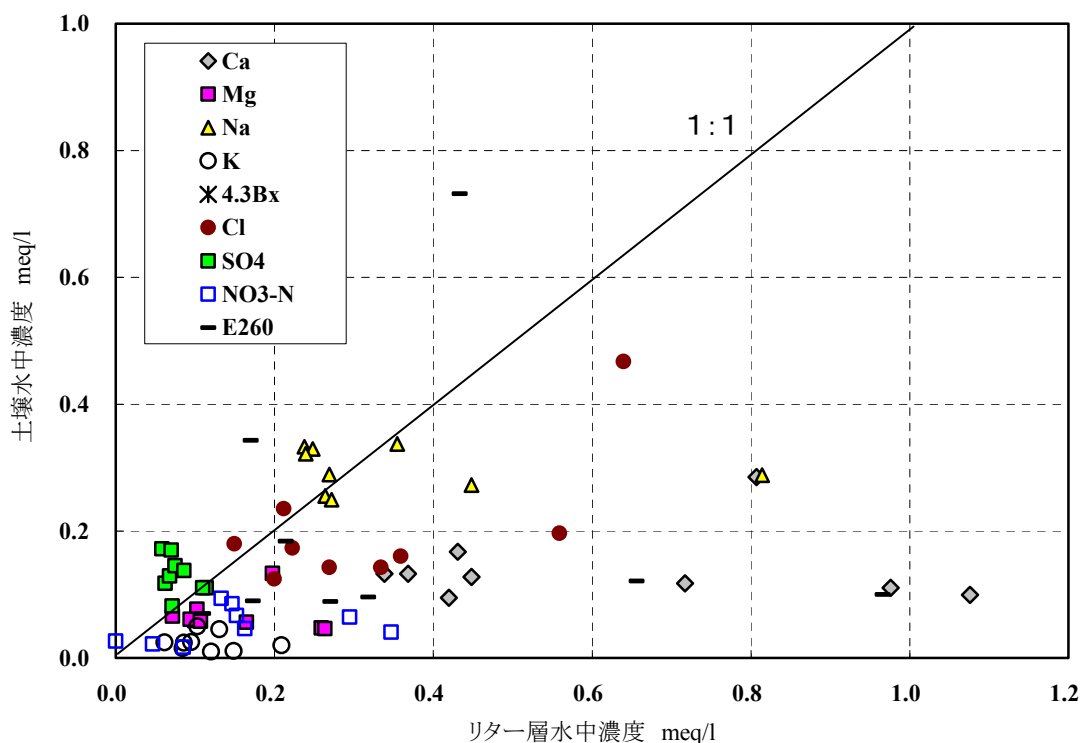


図-27 リター層水濃度と土壌水（10cm）濃度の関係

6. 降雨から河川流出までの水質変化とその要因

ここでは前節までの結果を利用して、降雨が、森林内、土壌を経て、河川流出に至るまでの水質変化について考察を加えたい。

林外雨、林内雨、リター層水、土壌水、河川水（増水時）の水質分布を各成分についてまとめると、図-28～36 が得られる。なお河川水については図-37 に成分ごとの分布を示したが、9月7日の台風による出水時（163mmの豪雨）のデータは他の増水時のデータと異なる傾向があったため、図にはこの時のデータを除いた濃度範囲を示した。アルカリ度を除く多くの成分では、林内雨あるいはリター層水の濃度幅が最も大きく、深度 50cm の土壌水に向かって徐々に濃度が低下し、かつ分布幅が狭くなっていく様子が明らかである。すなわち林内雨から土壌表面 15cm での部分で非常に大きな濃度変化が生じているのが大きな特徴である。

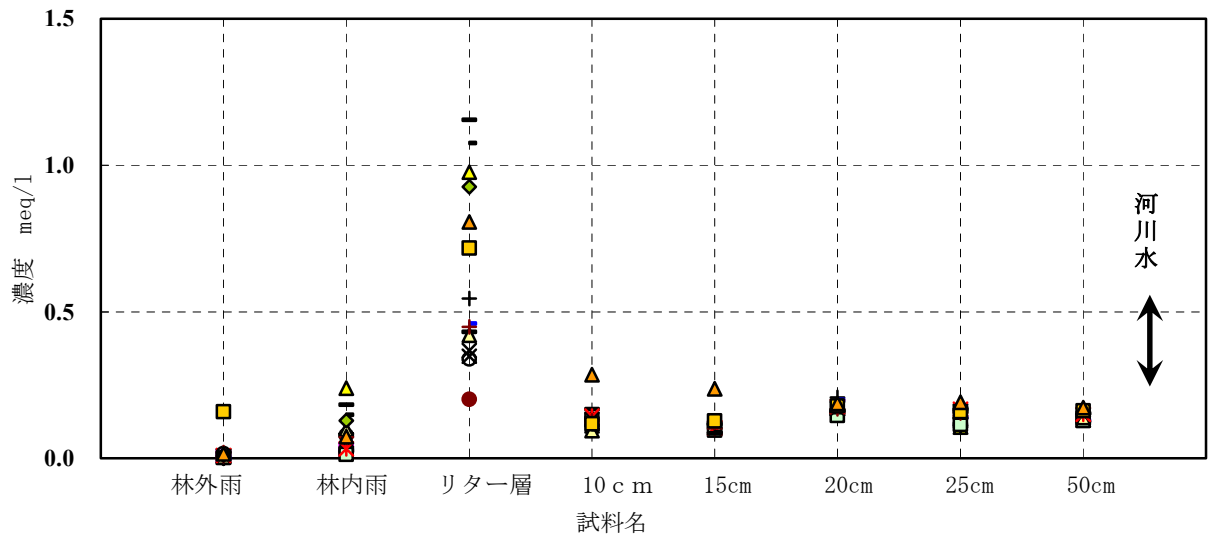


図-28 カルシウムイオンの濃度分布

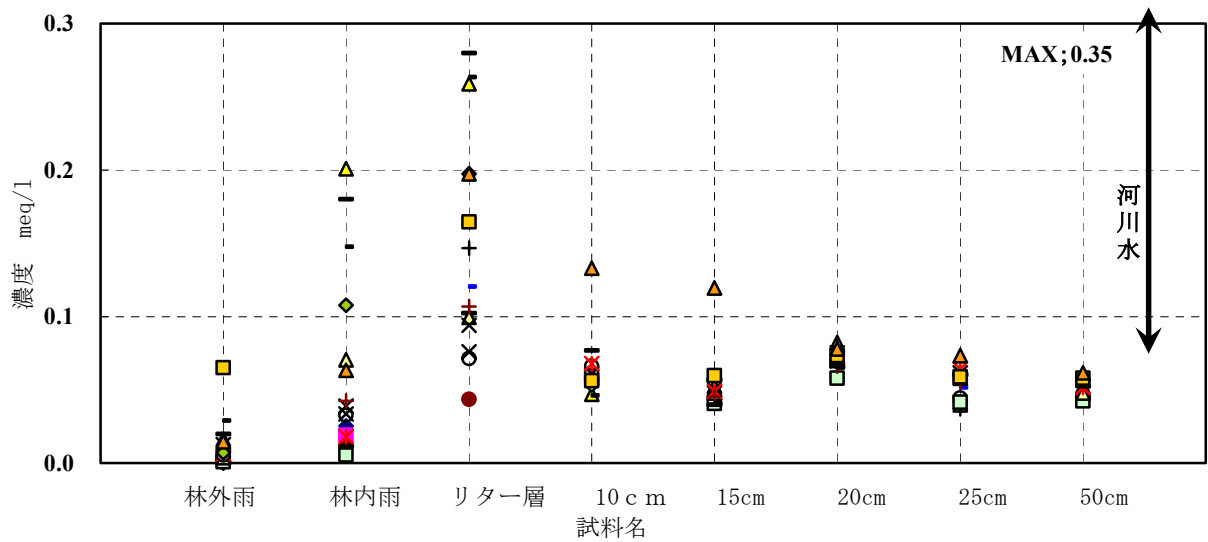


図-29 マグネシウムイオンの濃度分布

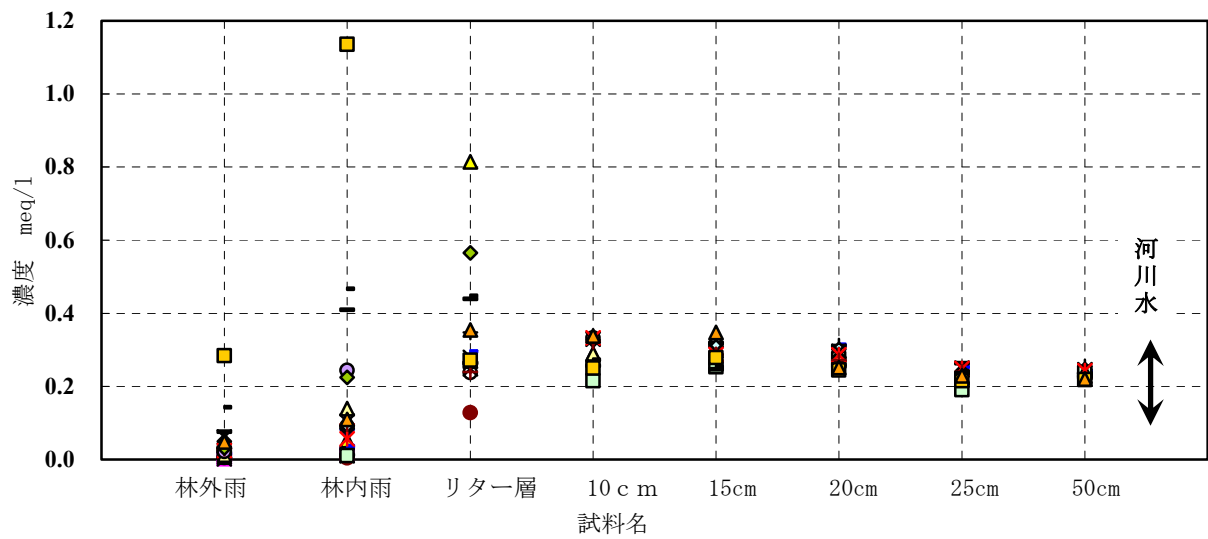


図-30 ナトリウムイオンの濃度分布

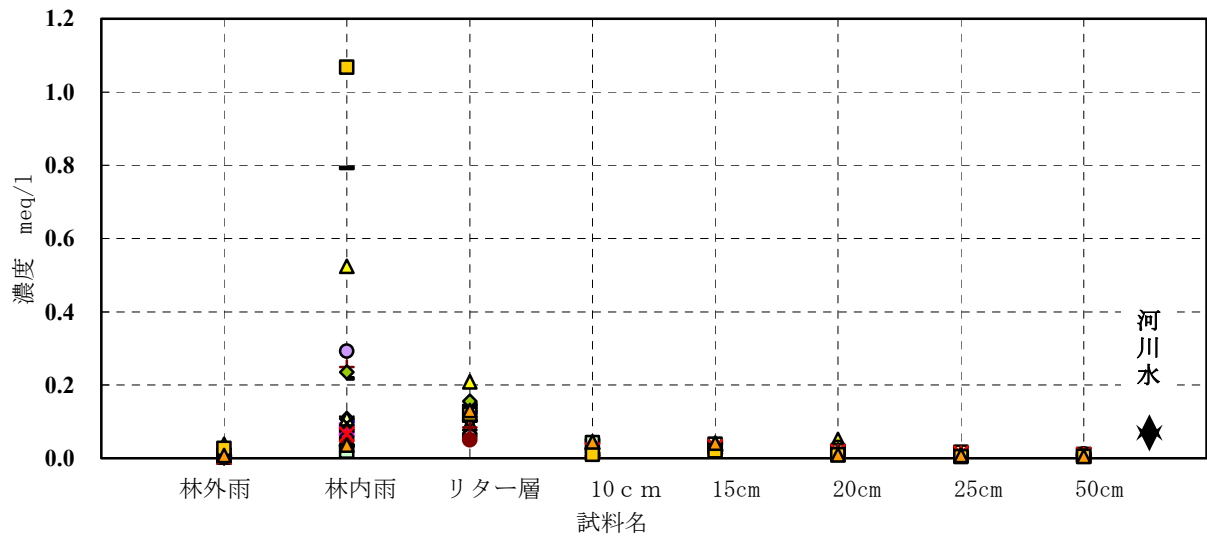


図-31 カリウムイオンの濃度分布

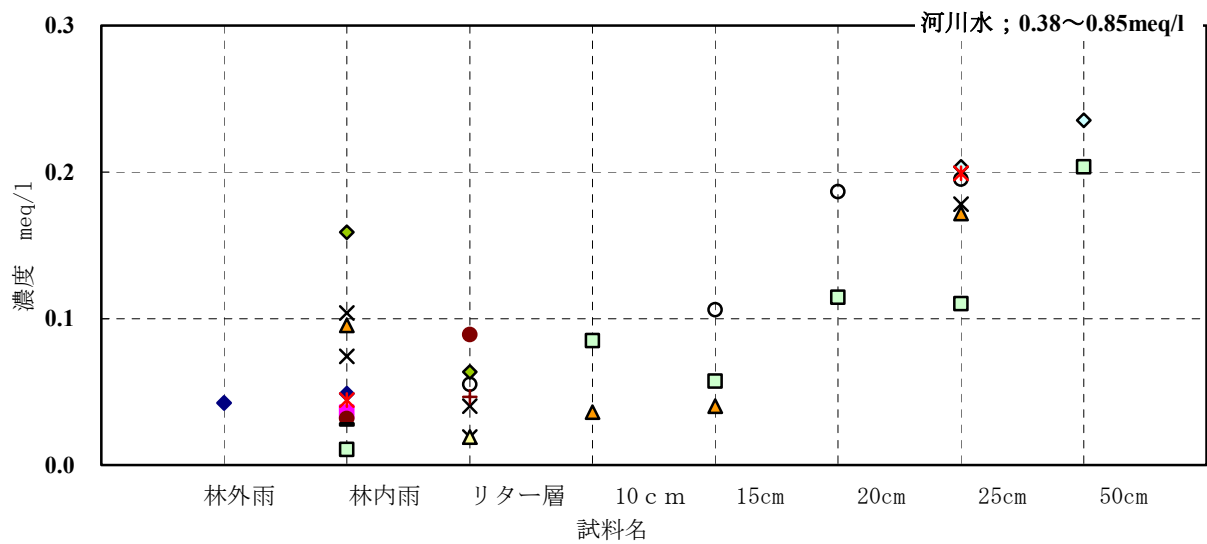


図-32 アルカリ度 (4.3Bx) の濃度分布

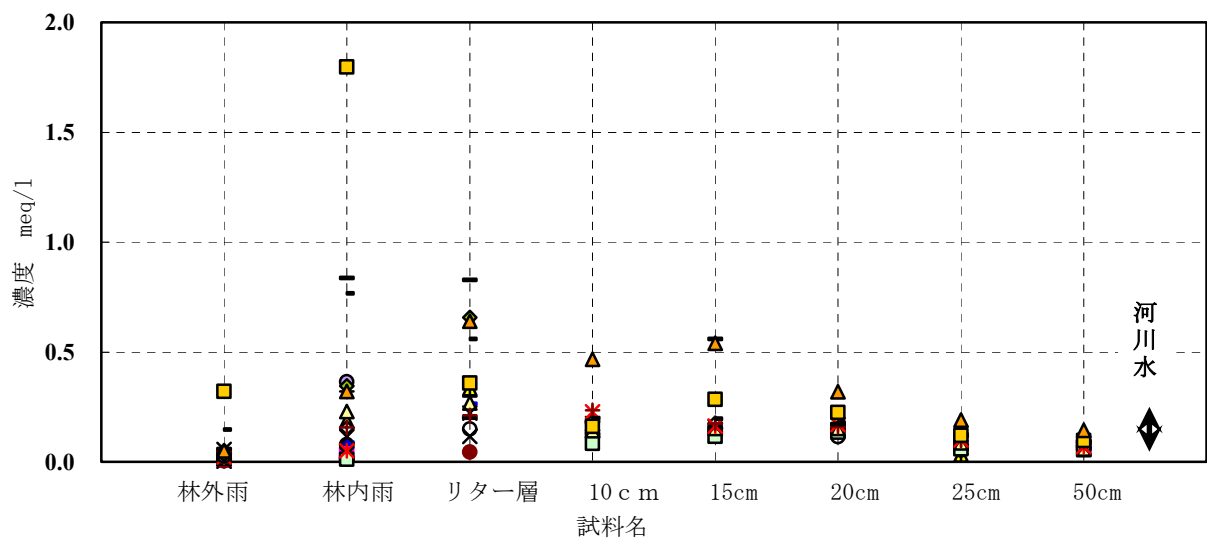


図-33 塩化物イオンの濃度分布

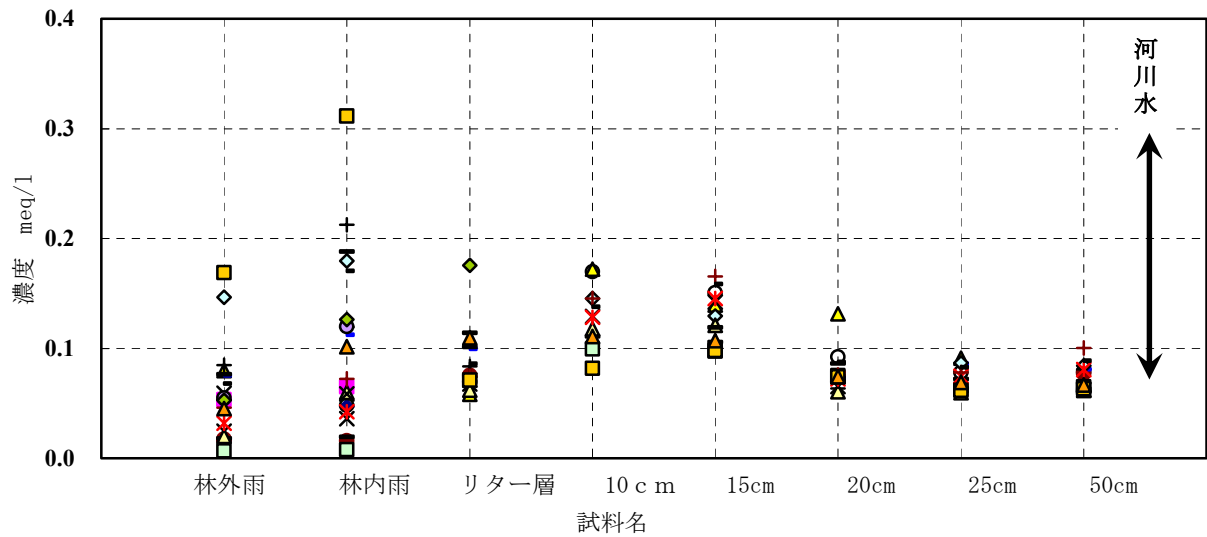


図-34 硫酸イオンの濃度分布

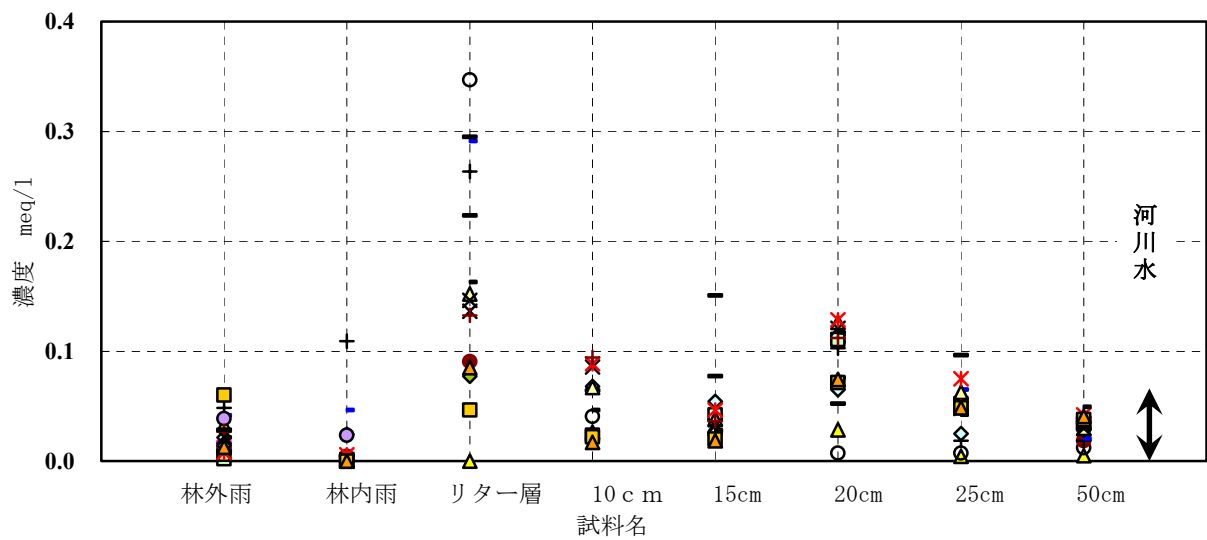


図-35 硝酸窒素イオンの濃度分布

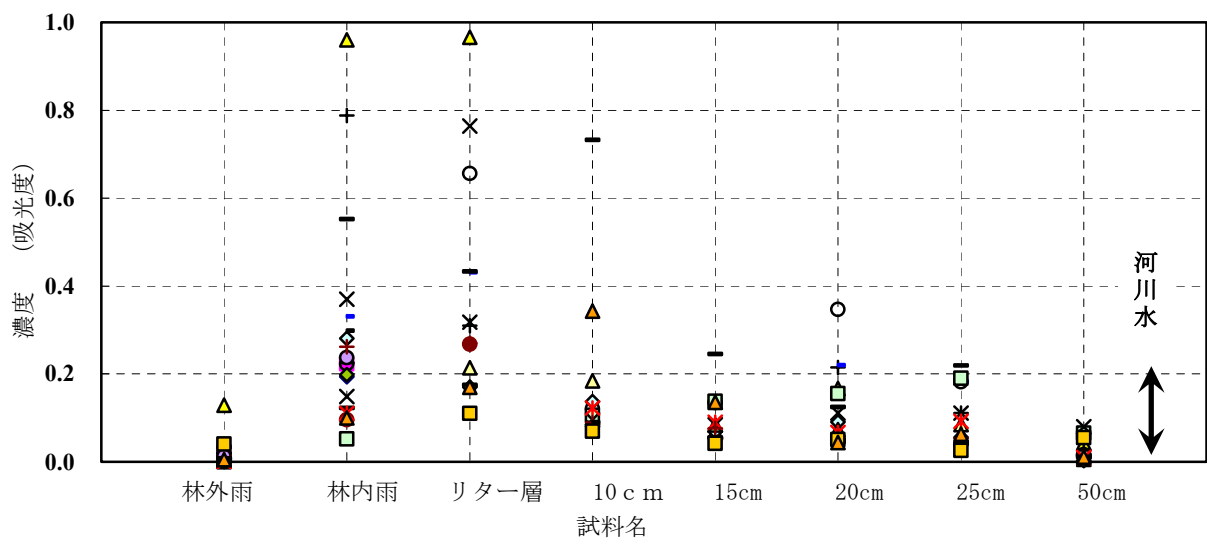


図-36 E260の濃度分布

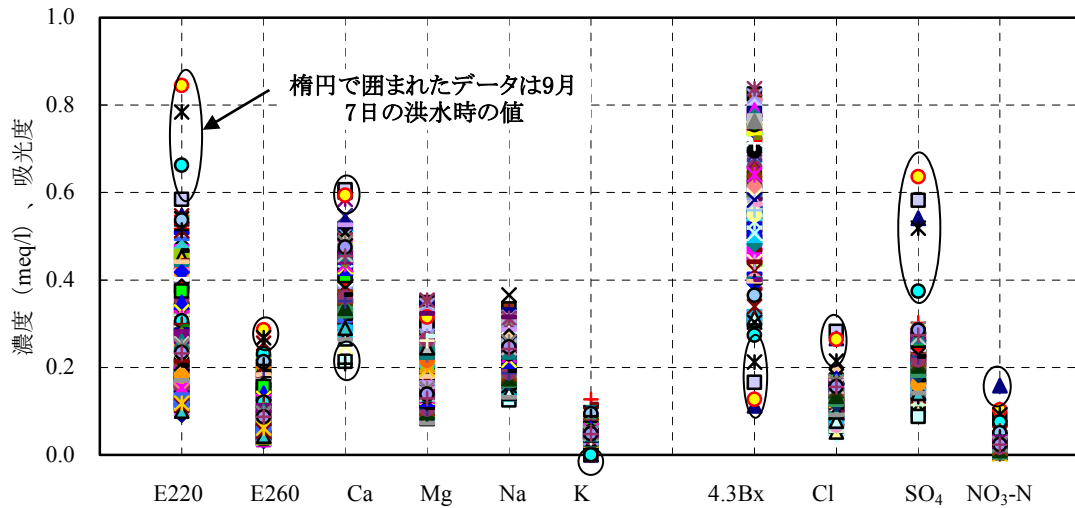


図-37 増水時河川水の水質濃度分布

本研究で対象としている水質成分は、アルカリ度、硫酸イオン、硝酸窒素イオン以外は生物化学的に安定な成分であり、物質は保存される。一部の例外を除き（後述）、増水時の河川水濃度分布は、土壌表面の濃度分布に近い範囲にある。したがって、林内雨から土壌表面 15cm での濃度変化が、水質成分の流出と強く関係していると考えられる。各成分の濃度推移を整理するために、平均濃度によってその順位と増減をまとめると表-3 が得られる。さらにこの結果を用いて、林外雨から河川水に至る水質成分の濃度変化を平均濃度の順位で表すと表-4 になる。表中には濃度の増加（あるいは減少）を伴う大きな変化を矢印で示してある。また各プロセスで考えられる供給成分についても記した。林内雨ではカリウム、塩化物イオン、E260 が主に植物からの溶脱によって供給される。土壌表面ではカルシウム、マグネシウム、硝酸窒素イオンが供給される。硝酸窒素イオンはリターの分解が供給源と思われるが、カルシウム、マグネシウムはその副生産物としてリターから供給されていると考えられる。硫酸イオン、アルカリ度は主に土壌中で微生物分解によって供給されることが推定される。

次に林内雨から土壌水の濃度順位と、河川水の濃度順位を比較して河川水の流出について考察する。河川水の陽イオンの濃度順位と一致しているのは、リター層水である。しかし、河川水のマグネシウムイオン濃度は土壌水表面付近の濃度に比較して高い値である（図-29）。また陰イオンではアルカリ度、硫酸イオンの濃度が河川水中で大きく、リター層水と順位が一致しない（図-32、34）。これらの成分については、流下過程における供給が原因と推定される。すなわちアルカリ度、硫酸イオンは流出過程で、土壌や河床から微生物分解により供給されることが原因と思われる。マグネシウムイオンについては、アルカリ度、硫酸イオンが供給される際の対陽イオンとして同時に供給されている可能性がある。あるいは流下過程で吸着平衡の変化により土壌粒子から脱着し、河川水では濃度が上昇している可能性も否定できない。現段階では、流下過程における

水質成分の供給プロセスは研究対象としていないが、これらの点については今後の検討課題としたい。

表-3 林外雨から河川水に至る水質成分の濃度変化

(1) 林外雨、林内雨、リター層水

成分名	林外雨			林内雨			リター層水		
	平均濃度 meq/l	濃度 順位	平均 濃度比	平均濃度 meq/l	濃度 順位	平均 濃度比	平均濃度 meq/l	濃度 順位	平均 濃度比
Ca ²⁺	0.0197	2	-	0.0809	3	4.1	0.6145	1	7.6
Mg ²⁺	0.0119	3	-	0.0630	4	5.3	0.1482	3	2.4
Na ⁺	0.0428	1	-	0.1675	2	3.9	0.3466	2	2.1
K ⁺	0.0073	4	-	0.2061	1	28.2	0.1173	4	0.6
			-						
Cl ⁻	0.0462	2	-	0.2856	1	6.2	0.3433	1	1.2
SO ₄ ²⁻	0.0553	1	-	0.1010	2	1.8	0.0880	3	0.9
4.3Bx	0.0424	3	-	0.0632	4	1.5	0.0475	4	0.8
NO ₃ ⁻ -N	0.0209	4	-	0.0105	3	0.5	0.1633	2	15.6
			-						
E260	0.0164	-	-	0.2894	-	17.6	0.3618	-	1.3
					林内雨 林外雨				リター層水 林内雨

(2) 土壌水

成分名	土壌水 10cm			土壌水 15cm			土壌水 25cm			土壌水 50cm		
	平均濃度 meq/l	濃度 順位	平均 濃度比	平均濃度 meq/l	濃度 順位	平均 濃度比	平均濃度 meq/l	濃度 順位	平均 濃度比	平均濃度 meq/l	濃度 順位	平均 濃度比
Ca ²⁺	0.1383	2	0.2	0.1166	2	0.8	0.1458	2	1.3	0.1442	2	1.0
Mg ²⁺	0.0653	3	0.4	0.0540	3	0.8	0.0539	3	1.0	0.0495	3	0.9
Na ⁺	0.2959	1	0.9	0.2910	1	1.0	0.2360	1	0.8	0.2359	1	1.0
K ⁺	0.0265	4	0.2	0.0203	4	0.8	0.0108	4	0.5	0.0092	4	0.9
Cl ⁻	0.1935	1	0.6	0.1698	1	0.9	0.0870	2	0.5	0.0757	2	0.9
SO ₄ ²⁻	0.1291	2	1.5	0.1292	2	1.0	0.0746	3	0.6	0.0748	3	1.0
4.3Bx	0.0604	3	1.3	0.0678	3	1.1	0.1763	1	2.6	0.2194	1	1.2
NO ₃ ⁻ -N	0.0537	4	0.3	0.0467	4	0.9	0.0459	4	1.0	0.0291	4	0.6
E260	0.1826	-	0.5	0.0982	-	0.5	0.1008		1.0	0.0261		0.3
			土壌水10cm リター層水			土壌水15cm 土壌水10cm			土壌水25cm 土壌水15cm			土壌水50cm 土壌水25cm

(3) 河川水

成分名	河川水(増水時)	
	平均濃度 meq/l	濃度 順位
Ca ²⁺	0.417	1
Mg ²⁺	0.212	3
Na ⁺	0.236	2
K ⁺	0.053	4
Cl ⁻	0.121	3
SO ₄ ²⁻	0.219	2
4.3Bx	0.547	1
NO ₃ ⁻ -N	0.025	4
E260	0.104	

表-4 林外雨から河川水に至る主要溶存成分の濃度順位

平均濃度 順位		林外雨	林内雨	ライシメータ 水	土壌水				増水時 河川水
					10cm	15cm	25cm	50cm	
カチオン	1	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Na ⁺	Na ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺
	2	Ca ²⁺	Na ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Ca ²⁺	Ca ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺
	3	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺
	4	K ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	K ⁺	K ⁺	K ⁺	K ⁺	K ⁺
アニオン	1	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Cl ⁻	Cl ⁻	Cl ⁻	4.3Bx	4.3Bx	4.3Bx
	2	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
	3	4.3Bx	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	4.3Bx	4.3Bx	SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
	4	NO ₃ ⁻ -N	4.3Bx	4.3Bx	NO ₃ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N
水中への供給成分			K ⁺ の溶脱 E260の溶脱 Cl ⁻ の溶脱	Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ NO ₃ ⁻ -N (微生物分解)	SO ₄ ²⁻ 、 4.3Bx (微生物分解)		4.3Bx (微生物分解)		

この層から下流へ移動？ → (河川に流出するまでに、Ca²⁺、Mg²⁺、4.3Bx、SO₄²⁻の濃度がさらに増加)

最後に、カリウムイオンと E260 について触れておく。すでに報告したように³⁾、増水時には、河川水中の多くの溶存水質成分濃度は低下し、減衰と共に濃度が回復する。しかしカリウムイオンと E260 については全く正反対の変化を示し、流量ピーク直後に濃度ピークを記録し、増水時には濃度が低下する特徴を持っている。この現象は、水質成分の流出を考える上で極めて興味深い現象であるが、これまで述べた結果から、カリウムイオンと E260 の共通点は、葉からの溶脱による森林内での供給量が非常に大きいことである。森林内ではナトリウムイオン、塩化物イオンも供給されるが、カリウムイオンと E260 の濃度増加率が圧倒的に大きい(表-3)。リター層水以降のプロセスでは、微増あるいは減少に転じており、土壌中での供給量は無視できる程度に過ぎない。したがって、降雨時に森林内で大量に負荷されるこれら 2 成分は、土壌のごく浅い部分を流下して河川に流出している可能性が高いものと推定される。他の成分は、林外雨の濃度やその変動が大きい、あるいは土壌中で供給されるなど供給源が複雑である。しかしカリウムイオンと E260 は供給源が単一で、かつ降雨と対応して供給されるため、流出メカニズムを考える際に、環境トレーサーとして使用できる可能性があることを指摘しておく。

7. 結論

オカバルシ川流域を対象に、降雨が森林、土壌を経て河川に到達する一連の過程を対象に調査を行い、主要水質溶存成分の濃度・負荷量の変化を把握し、特に林内雨、リタ

一と土壌内における供給と、河川への流出メカニズムについて検討した。結論を以下に記す。

(1) 林外と林内の雨水中成分濃度を比較すると、成分により増加割合が違うが、硝酸窒素イオン以外の成分濃度は林内で上昇する。特にカリウムイオンおよび E260 成分の濃度・負荷量の増加が顕著である。樹木の葉からの溶脱が原因と推定され、植物の活性が低下する秋季に顕著に見られた。

(2) 森林内で変化した雨の水質は、土壌表面約 5cm の層を通過することによって、再び大きく変化する。カルシウムイオン、マグネシウムイオン、硝酸窒素イオン濃度の上昇が著しく、土壌表面のリターの分解によって供給されているものと推定された。

(3) 土壌深度 25cm 以上になると、土壌水の水質変化は小さくなる。特に土壌粒子吸着成分と平衡関係が維持される陽イオンではほぼ一定となる。

(4) 硫酸イオンは主に土壌表層付近で濃度が上昇し、アルカリ度は深い層ほど濃度が高くなる。いずれも微生物分解による生産が原因と思われる。

(5) カリウムイオンと E260 は、林内雨での供給が圧倒的に大きい成分である。この 2 成分は増水時に河川水中濃度が上昇する特性があり、濃度が低下する他の溶存成分と異なった流出メカニズムを持っている。したがって降雨に対応した単一供給源をもつカリウムイオンと E260 を、環境トレーサーとして利用できる可能性がある。

(6) 降雨から流出に至るプロセスにおける水質成分の濃度遷移を明らかにしたが、河川水の水質成分濃度・順位を説明するには、流下過程における変化も考慮する必要がある。

謝辞:本研究は、(財団法人)北海道河川防災研究センターの研究助成により遂行された。観測に際し北海道開発局石狩川開発建設部札幌河川事務所には多大なる協力を得た。また(財)聖山会には観測機器の設置にご協力頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 余湖典昭：小流域における水質成分流出モデルに関する基礎的研究，(財)北海道河川防災研究センター・研究所紀要，XIV，pp.145-160，2003.
- 2) 余湖典昭：小流域における水質成分流出モデルに関する基礎的研究(Ⅱ)，(財)北海道河川防災研究センター・研究所紀要，XV，pp.171-187，2004.
- 3) 余湖典昭：小流域における水質成分流出モデルに関する基礎的研究(Ⅲ)，(財)北海道河川防災研究センター・研究所紀要，XVI，pp.227-245，2005.
- 4) 土壌養分測定法委員会編：土壌養分分析法，pp.38-43，養賢堂，1970.
- 5) 丸山明雄・岩坪五郎・堤 利夫：森林内外の降水中の養分量について(Ⅰ)，京大演報，第36巻，pp.25-39，1965.
- 6) 堤 利夫：森林の物質循環，東京大学出版会，1987.