

報告書概要

技術研究開発課題名	地域課題分野（河川）
技術研究開発テーマ名	釧路川流域における湿原再生に向けた栄養塩循環評価手法に関する研究
研究代表者	
氏名	所属・役職
駒井 克昭	北見工業大学工学部・准教授
共同研究者	
氏名	所属・役職
中下 慎也	広島大学大学院工学研究院・助教
<p>【1】背景・課題</p> <p>釧路湿原はわが国を代表する自然環境の一つであり、野生動物の重要な生育・生息の場となっている。また、人間にとっても保水・浄化機能、洪水調節機能、地域気候を緩和する機能など重要な価値や機能を有している。しかし、近年、湿原面積が著しく減少し、湿原の多くの部分を覆っていたヨシ・スゲ群落はハンノキ林に急激に変化している^{1),2)}。釧路湿原の植生変化に関しては土砂の流入による乾燥化^{3),4)}等が要因として考えられている。このように、河川管理上、植生繁茂の制限因子として物理的要因は重要であるが、陸化の他に人為的な土地利用の変化等の影響もあり、栄養塩の貯留がハンノキの領域拡大に影響を与えている可能性も指摘されている^{5),6)}。近年の釧路川周囲の湖水（シラルトロ湖、達古武湖、塘路湖）の栄養塩濃度は約30年間で増加しているという報告もある⁷⁾。また、流出モデルを用いて湿原域における水循環の変化に伴う陸化と植生変化の関係について検討を行った研究例^{8),9)}もあるが、湿原域における植生変化に及ぼす栄養塩循環の影響は十分に解明されていない。</p> <p>【2】技術研究開発の目的</p> <p>本研究ではまず、河川水と土壌の栄養塩に焦点を絞って、植生の繁茂する地域での河川水質と土壌有機物の関係性について分析感度や物質の選択性に優れた蛍光性溶存有機物を利用して明らかにし、植生モデルを用いて場所的な栄養状態の違いが植生生長速度に及ぼす影響について感度解析を行った。次に、流域内での栄養塩の輸送へのインパクトが大きいと考えられる出水時に注目し、湿原とその周辺流域における現地観測データに基づいて、栄養物質の分布と土地利用状況との定性的な関係について検討した。最後に、流域における栄養塩の輸送・集積状況を推定するため、小流域で求めた土地利用別の栄養塩発生率を利用して、分布型流出モデルによる湿原周辺流域からの面的な栄養塩流入と集積状況の推定を行い、植生分布との関係性などから本解析手法の検証を行った。</p> <p>【3】技術研究開発の内容・成果</p> <p>(1)湿原流域における栄養塩分布特性と植生生長速度の感度分析</p> <p>まず、河川水と土壌の栄養塩に焦点を絞って、植生の繁茂する地域での河川水質と土壌有機物の関係性について分析感度や物質の選択性に優れた蛍光性溶存有機物を利用して明らかにした。次に、植生モデルを用いて場所的な栄養状態の違いが植生生長速度に及ぼす影響について感度解析を行った。</p>	

・ 試料採取と水質分析の方法

2012年4月の融雪前後、および7月に14地点での水質調査を実施した。また、土壌特性と河川水質の関係を明らかにするため、2月と7月には幌呂地区のヨシあるいはハンノキが優占する2地点において土壌試料と水試料を採取し、水質分析と土壌分析を行った。調査内容は、水試料についてはT-N(全窒素)、T-P(全リン)、EEMs(3次元励起蛍光スペクトル)、DOC(溶存有機炭素)の測定を行った。T-N、T-Pは分光吸光度計(島津、UVmini1240)を用いてペルオキシ二硫酸カリウム分解-紫外線吸光度法およびペルオキシ二硫酸カリウム・水酸化ナトリウム分解法-モリブデンブルー法によって測定した¹⁰⁾。EEMsは分光吸光度計(日本分光、FP-6200)を用いて測定した。DOCは分光吸光度計(Hach、DR2400)を用いて測定した。土壌については含水比、強熱減量、および有機微量元素の測定を行った。有機微量元素であるC(炭素)、H(水素)、N(窒素)、およびS(硫黄)は自動元素分析装置(Perkin Elmer、2400IIシステム)を用いて測定した。

・ 植生モデルの基礎式と計算条件

ハンノキを対象として釧路川中流と幌呂川中流の栄養条件を参考にして植生生長に及ぼす栄養条件の感度解析を行った。基礎式を表-1の式(1)~(4)に示す^{11),12),13)}。

植生はハンノキを対象とし、計算期間は1989~2008年とした。なお、 G_{max} は幌呂地区のうち最も成長量の大きい拡大中のハンノキ林の生長速度に相当する¹⁴⁾。日射量の影響 $r(Q_h)$ 、気温の影響 $r(T)$ は気象庁による観測値を入力データとして与え、植生の生長率 G 、高さ H 、胸高直径 D を計算した。また、ハンノキとヨシ群落の植生分布と関係する化学的な条件の一つとして P_2O_5 が挙げられること¹⁵⁾、および釧路川中流域の瀬文平橋において20年間にわたるT-Pが取得されており、長期の栄養条件の変化傾向を把握しやすいことから、リンに関するT-Pを栄養条件 $r(F)$ に用いた。気温による制限因子は既往の研究^{9),11),12)}を参考にして表-1の式(5)~(6)のように定式化した。日射量と栄養塩による各制限因子は表-1の式(7)~(8)のように定式化した。 T_{max} と T_{min} はそれぞれ3084と1420 degree dayである。気温 T は釧路での観測値を用いたが、全天日射量 Q_a は長期のデータが取得されている帯広の観測値を用いた。T-Pについては、参考値として湿原東部のSt.1では毎月の観測値(国土交通省)が長期間にわたって取得されているが、湿原西部のKIT-3周辺では過去のデータが取得されていない。このため、2012年に実施した現地調査結果から求めたKIT-3でのT-PのSt.1のT-Pに対する濃度比(式(8)中の $a=1.239$)を掛けることで湿原西部に相当する栄養条件とした。case 0では最適な栄養条件を仮定、case 1では湿原西部(KIT-3)に相当する栄養条件を仮定、case 2では湿原東部(St.1)に相当する栄養条件を仮定、case 3と4ではそれぞれcase 2の50%と10%の栄養条件を仮定した。 $r(M)$ と $r(S_b)$ については最適な条件である1.0と仮定した。

・ 植生域における栄養塩特性

T-N、T-Pの濃度変化は上流端のSt.7(屈斜路湖)から下流に向かってT-N、T-Pは増加していき、ハンノキ林が周辺に多く分布する中流域の地点10(シラルトロ湖)でピークとなり、そこから再び河口に向かって濃度は低下していた。また、ハンノキ林が優占する地域の周辺ではT-N、T-Pが他の地点と比べて高濃度であり、東部では地点10(シラルトロ湖)、西部ではKIT-S(幌呂地区:排1,排2)で最も高濃度であった。KIT-3とKIT-Sの周辺においては、流出解析の結果でも栄養塩が蓄積される傾向が強かった。4

表-1 植生モデルの基礎式と計算条件

$$G = G_{max} (r(Q_h) \cdot r(F) \cdot r(M) \cdot r(T) \cdot r(S_D))^{1/3} \quad (1)$$

$$H = 137 + b_2 - b_3 D^2 \quad (2)$$

$$b_2 = 2 \frac{H_{max} - 137}{D_{max}^2} \text{ and } b_3 = \frac{H_{max} - 137}{D_{max}^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{GD(1 - DH/D_{max} H_{max})}{(274 + b_2 - 4b_3 D^2)} \quad (4)$$

最大生長率: $G_{max}=40 \text{ cm/year} = 0.004566 \text{ cm/h}$, 最大樹高: $H_{max}=1500 \text{ cm}$, 最大胸高直径: $D_{max}=25 \text{ cm}$, 初期胸高直径: $d=1 \text{ cm}$

$$r(T) = \frac{4 \times (T - T_{min})(T_{max} - T)}{(T_{max} - T_{min})^2} \quad (5)$$

$$T = 365 \left\{ \frac{T_{july} - T_{jan}}{2\pi} - \frac{40 - (T_{july} + T_{jan})/2}{2} + \frac{\{40 - (T_{july} + T_{jan})/2\}^2}{\pi(T_{july} - T_{jan})} \right\} \quad (6)$$

$$r(Q_h) = \frac{Q_a(10 - C)/10}{Q_{max}} \quad (7)$$

$$r(F) \approx r(TP) = \frac{TP}{TP_{max}} \times a \quad (8)$$

T: 気温, Q_a : 全天日射量, C: 雲量, Q_{max} : 最大日射量, TP: T-Pの毎月観測値, TP_{max} : T-Pの最適値

月のT-N, T-P濃度は7月よりも高いが, 過去20年間のデータからは同様の傾向は見られなかった. 地点10 (シラルトロ湖) では春から夏にかけての藻類の増殖との関連が推測される. 両地点を除くと, 幌呂川が平均的に高濃度の傾向を示した. なお, T-N, T-Pが高い地点ではDOCの濃度も高かった. 植生による一次生産によって栄養塩が固定され, リターが分解されることで土壌有機物が蓄積された結果, 水循環に伴って水中のDOC濃度も高まったことが考えられた.

・河川水と土壌の有機物と栄養状態の関係

流域での水循環と土壌条件の関係について, ハンノキ林とヨシ群落周辺での表層土壌の有機微量元素と T-N, T-P に基づいて考察した. 表層土壌に関しては有機微量元素分析の結果はヨシ群落のほうがわずかに高濃度であった. 同様に, 排水路に関してもヨシ群落の近くの方が T-N, T-P の濃度は高いことが明らかになった.

ハンノキ林とヨシ群落における土壌の間隙水, および排水路の流水の EEMs について, 既往の研究によって示された DOM の代表的なピーク位置での相対蛍光強度を検討した (ヨシ群落の例: 図-1). その結果, ハンノキ林, ヨシ群落の土壌間隙水はともにフルボ酸様物質 (F₁) とフミン酸様物質 (H₁) と考えられるピークが濃く表れた. さらに, ヨシ群落ではタンパク質様物質のピークが強く表れている. 一方, 排水路ではそれほど濃いピークは表れていないものの, ヨシ群落では土壌間隙水と同様にタンパク質様物質のピーク (P₃) が表れた. これらのことから, 河川水 (排水路) と土壌間隙水の間での水循環を通じて, 河川水と周辺土壌の栄養状態や溶存有機物の濃度には密接な関係があることが示唆された.

・植生生長速度に及ぼす栄養塩の影響評価

20年後のハンノキの樹高HはTP_{max}=0.14の場合で, case 1, 2, 3, および4でそれぞれ981 cm, 937 cm, 804 cm, および567 cmであった. case 1と2の差は44 cmであり, r(F)=1の樹高生長量に対してわずか3.6%であるが, case 4のように栄養条件が悪いと生長量は567 cmとなり, 53%も減少した. ちなみに, 計算条件で用いたTP_{max}=0.14は過去20年間の最大値に相当する濃度であるが, 栄養塩が蓄積された土壌環境ではより早く生長すると考えられ, 栄養条件は過大評価されていると考えられた. このため, TP_{max}を2~3倍に仮定するとTP_{max}=0.28~0.35となった. 最適条件であるcase 0を含め, 全ケースでの20年後の樹高を比較すると, 最も貧栄養の条件であるcase 4では生長速度は最も減少し, 最適条件の39%の樹高にとどまった.

既往の報告¹⁴⁾によると, KIT-3に最も近い調査地点でのハンノキでは樹齢20年で10 m程度であり, case 1は妥当な結果を示している. 本計算では設定した栄養条件の違いのみによっても樹高差は50%近く生じており, 他の制限要因の作用によって植生の生長速度が異なるはずである. 今後, 計算の結果をより実際に近づけるためには, 現地の環境条件と植生生長速度との関係をより詳細に明らかにする必要がある.

(2)出水時における栄養塩と有機物質の流出特性の把握

流域内での栄養塩の輸送へのインパクトが大きいと考えられる出水時に注目し, 湿原とその周辺流域における現地観測データに基づいて, 栄養物質の流出特性と土地利用状況との定性的な関係について検討した.

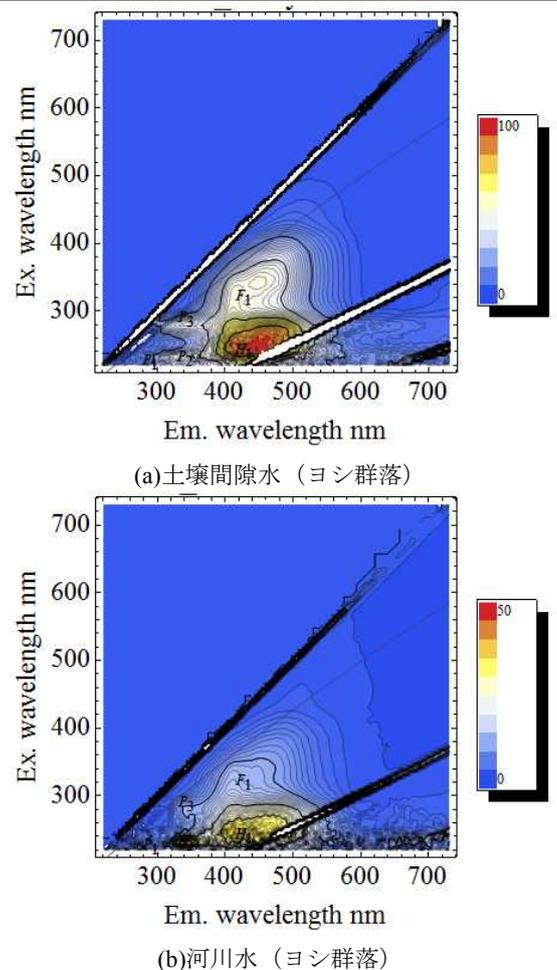


図-1 ヨシ群落での地下水と河川水の EEMs の比較 (H: フルボ酸様物質, F: フミン酸様物質, P: タンパク質様物質)

・ 試料採取, 水質分析, および使用データ

出水時における河川水中の細粒土砂や栄養塩濃度の変動特性の解明に先だって, 平水時の水質の変動特性を見極める必要がある. そこで, 2012年4月, 7月, 2013年2月, 9月に釧路湿原の周辺流域において平水時に採水調査を行った. そのうち, 本研究では結氷期と融雪期を除く時期(2012年7月, 2013年9月)のデータを主な解析対象とした.

解析には1+2(釧路川・五十石橋), No.7(オソベツ川・下オソベツ橋), No.29(久著呂川・境橋), KIT-2(新釧路川・釧路湿原大橋)のデータを用いた. 現地での調査項目は, DO(溶存酸素), EC(電気伝導度), ORP(酸化還元電位)であり, 水試料をポリびんに採取した. 採取した水試料は速やかにクーラーボックスに入れて実験室に持ち帰るまでは保冷剤で冷却した. 実験室に持ち帰った後, 水試料の一部をあらかじめ105°Cで2時間乾燥させたガラス繊維濾紙(Whatman GF/B)を用いて吸引ろ過を行い, ろ紙は電気炉内で105°Cで乾燥させ, 乾燥重量からSSを求めた. 測定までは前処理した水試料を冷凍保存した. 原水の水試料はT-N, T-P, ろ水はNO₂-N, NO₃-N, NH₄-N, PO₄-Pの分析に供した. これらの水質項目の分析には連続流れ分析(BLTEC社, QuAAtro 2-HR)に供した. さらに, 釧路市上下水道部による2012年7月, 9月, 10月の水質調査データを加え, 平水時の水質データとした. また, 出水時のデータとしては国土交通省北海道開発局による2012年10月1~2日の水質調査データを利用した. 調査地点は平水時と同じ, 1+2, No.7, No.29, およびKIT-2であり, およそ1~2時間間隔で採水し平水時と同様の水質項目およびTOCの測定データを解析に利用した.

・ 平水時の水質特性

同地点での平水時のSS, T-N, T-Pに関しては, 地点毎のばらつきはあるが, 濃度はそれぞれ1~18 mg/L, 0.2~1.6 mg/L, 0.02~0.06 mg/Lであった. 同地点での平水時のDIN(溶存態無機窒素: NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N)およびDIP(溶存態無機リン: PO₄-P)に関しては, NO₃-NとPO₄-Pはそれぞれ0.2~0.4 mg/L, 0.01~0.03 mg/L, NO₂-NとNH₄-Nは最大で0.005 mg/Lと0.06 mg/Lであった.

・ 出水時の流量変化と水質特性

出水時の流量とSSの関係は各地点ともに概ね比例関係を示したが, 地点によって勾配が異なっており, 小流域ごとの土地利用や地形の違いなどによってSSの発生速度が異なることが考えられた. 特に, 流量の少ないNo.29, No.7においては流量に対するSSが比較的に高濃度になる傾向がみられた.

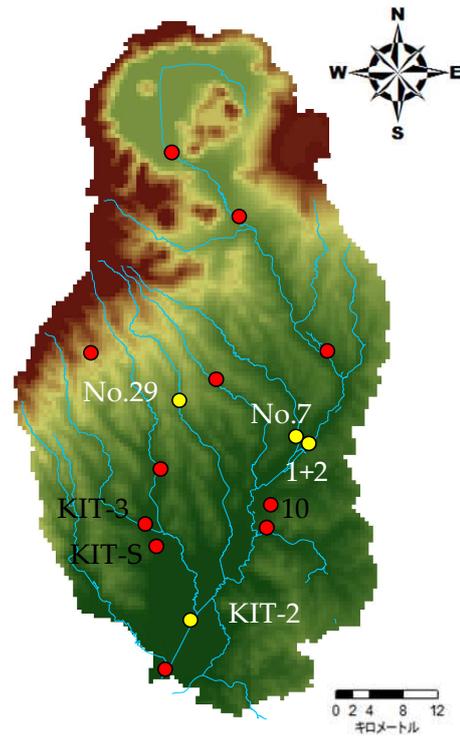


図-2 観測地点 (黒字は図-4に示す地点)

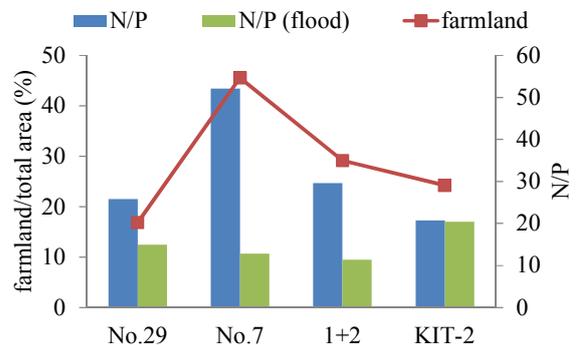


図-3 平水時と出水時におけるN/P比と集水域での農用地利用の面積率

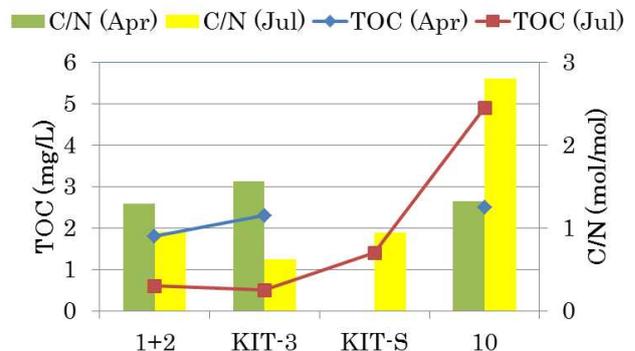


図-4 2012年4月と7月のTOCとC/N比. KIT-Sはヨシ群落直近の河川水, 10は湖水(シラルトロ湖)

No.29, No.7, 1+2, および KIT-2 における出水時の SS と T-P の関係について、1+2 はややばらついてはいるものの、その他の地点については SS と T-N, T-P, TOC はともに良好な比例関係にあった。このことから、栄養物質である N, P は総量としては懸濁物質との関係が深いことが確認された。

・土地利用と有機微量元素の流出特性

No.29, No.7, 1+2, および KIT-2 における出水時の N/P 比（ここでは、T-N と T-P のモル比と定義する）は、流量のピークに減少した。同じく、出水時における C/N 比（ここでは、TOC/T-N 比と定義する）はピーク時に増大する傾向にあった。

図-3 は平水時と出水ピーク時の N/P 比および農用地利用の面積率を示している。各地点において、平水時のデータに基づいて N/P 比を算出すると 20~50 であり、N が過多の状態にあった。既往の研究^{16),17)}で求められた負荷量を N/P 比に換算すると、森林由来の N/P は約 60, 畑地、牧草地由来の N/P は 15~17 である。一方、出水時には N/P 比が 10~20 程度になることから、平水時には森林域に近い栄養成分が比較的によく流出し、出水時には農用地から P が供給されていることが考えられた。

図-4 は 2012 年 7 月の採水調査における TOC と C/N 比の分布を示している。KIT-S はヨシ群落直近の河川水、10 は湖水（シラルトロ湖）である。ヨシ群落や湖沼の付近では比較的 TOC が高いが、特に 7 月には湖沼の TOC が 5 mg/L を超え、C/N 比は 2.8 程度と大きかった。これらのことから、出水時には中流~下流部に存在する湿原や湖沼から C が多く流出し、下流での C/N 比が増大していることが考えられた。

(3)湿原上流域の農林地に由来する栄養塩流出と集積域の解析手法の開発

流域における栄養塩の輸送・集積状況を推定するため、小流域で求めた土地利用別の栄養塩発生率を利用して、分布型流出モデルによる湿原周辺流域からの面的な栄養塩流入と集積状況の推定を行い、植生分布との関係性などから本解析手法の検証を行った。

・解析に用いたデータ

図-5 に示す久著呂川・オンネナイ川の流域内の計 11 地点において 2014 年 4 月~9 月までの 6 ヶ月分の毎月採取された水試料と 2014 年 10 月の降雨による出水時に採取された水試料を 3 次元励起蛍光スペクトル分析に供した。各採取地点は集水域の土地利用を考慮して配置されている。分析は分光蛍光光度計(日本分光, FP-6200)を用いて行い、精製水の蛍光強度をブランクとして EEMs (Excitation-Emission Matrices)が求められ、水のラマン光を基準²⁰⁾として既往の研究で報告されている 13 個^{21)~28)}の DOM のピーク位置での相対蛍光強度を求めた。また、同水試料について TN, TP, DTN, DTP, および SS の水質データが北海道開発局によるデータを利用した。

・土地利用別の発生率と負荷量の推定

平水時に比べて比較的に水質変化が大きい 2014 年 10 月の降雨による出水時に採水された水サンプル

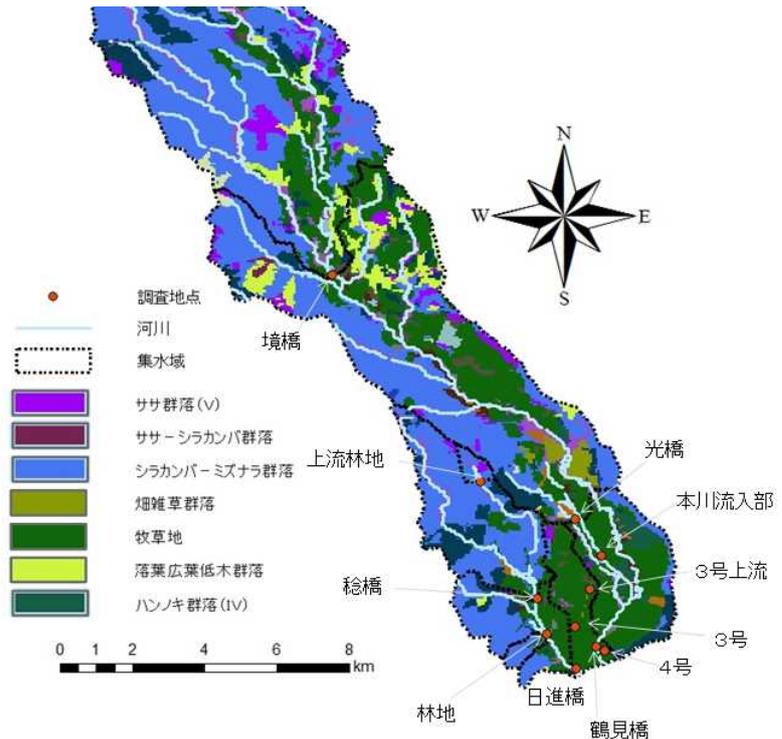


図-5 久著呂川・オンネナイ川の土地利用分布、調査地点、および集水域。点線は集水域を示す。環境省・自然環境保全基礎調査データ¹⁸⁾と国土交通省・国土数値情報データ¹⁹⁾を基に作成。

の水質データを用いて、土地利用別の面源負荷量の推定を行った。すなわち、流出点 K の集水域内における面的な物質の流出量と流出点 K における流出量の関係に基づいて、最適な土地利用別の物質の発生率を求めた。なお、物質の発生率は降雨強度にも依存すると仮定して、以下のように定式化した。

$$C_{jk} Q_k = \sum_{i=1}^4 P_{ij} \left(\frac{r}{r_0} \right)^n f r A_{ik} \quad (9)$$

ここに、 C_{jk} ：流出点 K での物質 j の濃度、 Q_k ：流出点 K での流量、 P_{jk} ：土地利用 i の単位面積当たりの物質 j の発生率、 r ：流出点 K の集水域での降水量、 r_0 ：基準となる降水量、 f ：流出率、および A_{ik} ：流出点 K の集水域内での土地利用 i の面積である。

各採水地点の集水域は国土数値情報の標高データをもとに GIS を用いて求めた。各集水域は図-5 の点線で示されている。土地利用データは環境省の自然環境保全基礎調査データベース¹⁸⁾をもとに GIS を利用して植生・土地利用別の面積を算出した。土地利用は牧草地、林地、畑地、湿地に大別して整理した。

また各地点での河川流量は直近にある気象庁所管のアメダス地点である標茶の降水量データに貯留関数法を適用して求めた。貯留関数のパラメータは 2012 年 10 月の光橋の実測値からパラメータを決定した上で、久著呂川・オンネナイ川流域の各集水域にも適用し、流量の経時変化を推定した。なお、平水時には水位、河床形状、および流速の測定値から流量が算出されており、その値から負荷量を求めた。

・出水時における栄養塩流出の解析手法

解析は上流域から湿原への流入部を対象とする。流出モデルは表面流に Kinematic 方程式、不飽和浸透流（飽和域の地下水流も含む）では Richards 式を基礎式としている（モデルの詳細は中山ら²⁹⁾を参照）。なお、表面流の速度は最適値にチューニングされており、洪水到達時間に換算すると五十石で 6 時間である。五十石での 2012 年 10 月出水時の流量の再現結果は CoD が 0.95 と良好な再現結果を得ることができた。

細粒土砂と栄養物質の流出に関しては、本モデルでは、表面流と浸透流による移流・拡散による物質の集積状況を保存物質として追跡する。物質の発生量は GIS により作成した土地利用データを組み込み、土地利用別に単位面積あたりの物質の発生率を与える。本研究では湿原域周辺における物質の流入・貯留量の基礎的特性を検討するため、①土地利用に依らない一定の面源負荷に相当する発生率を仮定した場合（Case 1）、②土地利用別に SS、TN、および TP に相当する発生率を与えた場合（Case 2～4）、の各物質の集積状況について検討する。

なお、水文学的な与条件としては、基底流量の状態に相当する 180 日の助走計算を行った後、2012 年 10 月 1 日の出水時の降水量データを用いて出水時における物質毎の集積特性の検討を行う。この時のピーク時の降水量は 15 mm/h である。

・出水時における土地利用別の SS、栄養塩類、および DOM の発生率の推定

式(1)に従って、土地利用別の TN、TP、DTN、DTP、フミン酸様物質（Em/Ex=430 nm/240 nm）、フルボ酸様物質（Em/Ex=430 nm/320 nm）、および SS の回帰分析を行い、単位面積当たりの発生率が推定された。ここでは、図-5 に示す調査地点のうち、久著呂川本川は境橋、光橋、鶴見橋の 3 地点、オンネナイ川は林地上流、稔橋、林地、日進橋の 4 地点の計 7 地点を解析対象とした。なお、各地点での牧草地、林地、畑地、湿地の合計面積は流域全体の 80～99% であり、本解析ではその他の土地利用からの流出はゼロとみなしている。

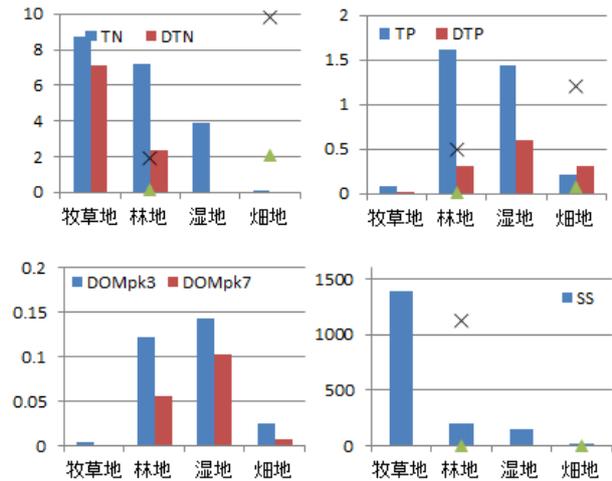


図-6 土地利用ごとの単位面積当たりの物質の発生率。DOMpk3：フミン酸様物質，DOMpk7：フルボ酸様物質。TN、TP、DTN、DTP、SS 単位：kg km⁻² d⁻¹、DOM 単位：km⁻² d⁻¹。×、▲：文献^{17), 30)}による最大値と最小値

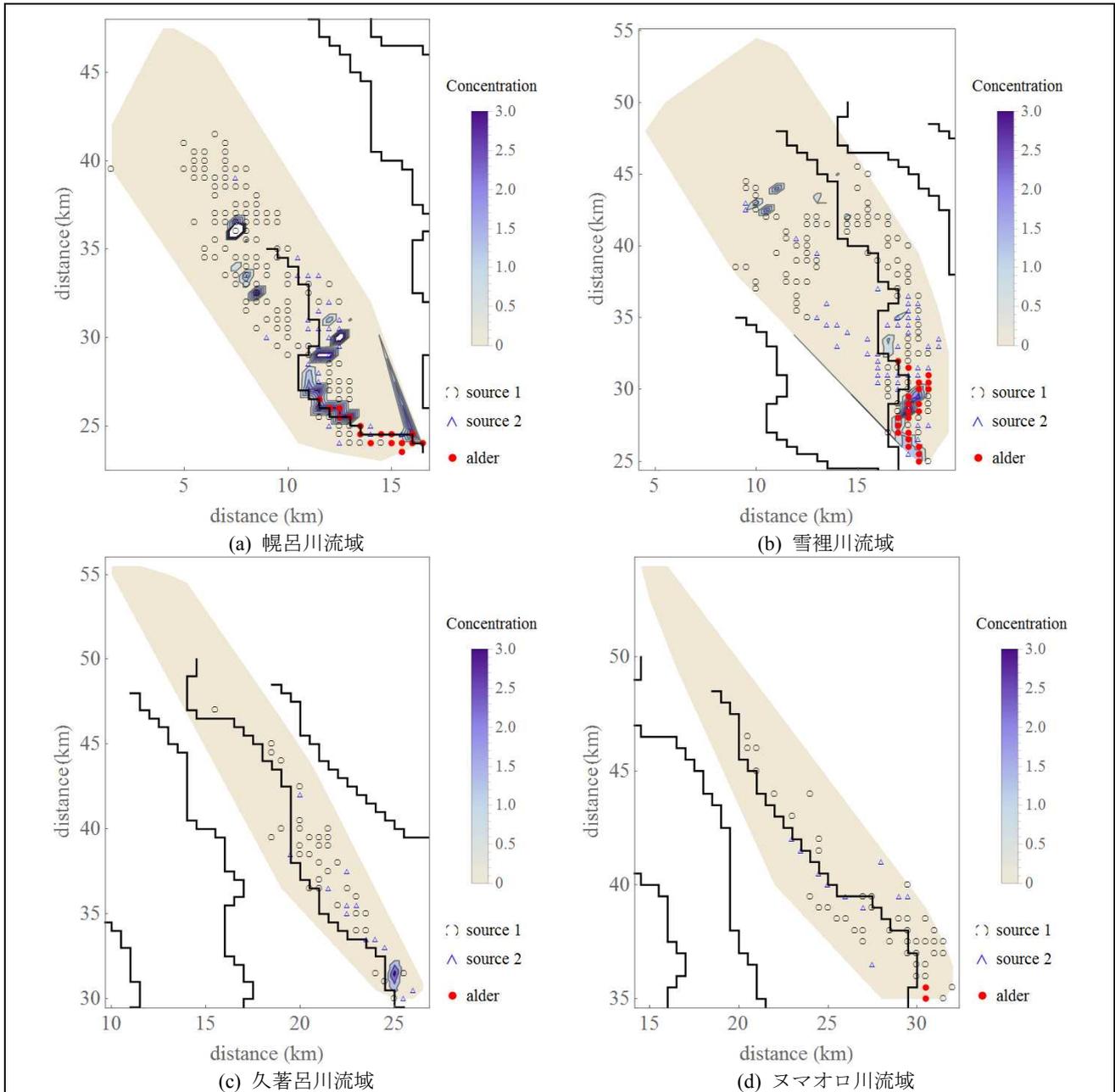


図-7 出水後の物質濃度の分布とハンノキ分布。背景色：物質濃度（初期濃度が基準）。○、△：物質の発生源。●：ハンノキ群落。実線：河川。source 1：牧草地，source 2：畑地。

観測結果の出水時と平水時の流出負荷量を比較すると、出水時における負荷量が平水時の10~20倍ある。図-6は推定されたTN、TP、DTN、DTP、SS、フミン酸様物質、およびフルボ酸様物質の発生率を示している。なお、図-6にはTN、TP、およびSSに関する年平均の発生率の文献値も示されている。

TNは牧草地からの発生率が他の土地利用に比べて高い。文献値と比較すると概ね妥当な値が得られているがやや大きめの値もあり、出水時であるために発生率が大きめに現れている可能性がある。また、林地の発生率が比較的に大きいことから、人為的な点源負荷も影響している可能性がある。湿地と畑地に関しては全ての集水域において面積割合が小さく、推定誤差が大きいと考えられた。TNにはDOMのピーク特性に近い傾向を示すものがなく、この流域のTNに関係が深いDOMは見当たらなかった。一方、TPは林地や湿地からの発生率が高い傾向にあり、DOMの中でも比較的にフミン酸様物質に近い発生率の傾向を示している。フミン酸やフルボ酸は金属錯体を形成することでPの可溶性を助長し、移動しやすくなる^{31),32)}ことが知られていることから、この流域でのTPとフミン酸様物質の発生率は無関係ではなく、フミン酸様物質とTPの動態は互いに関係があることが示唆される。

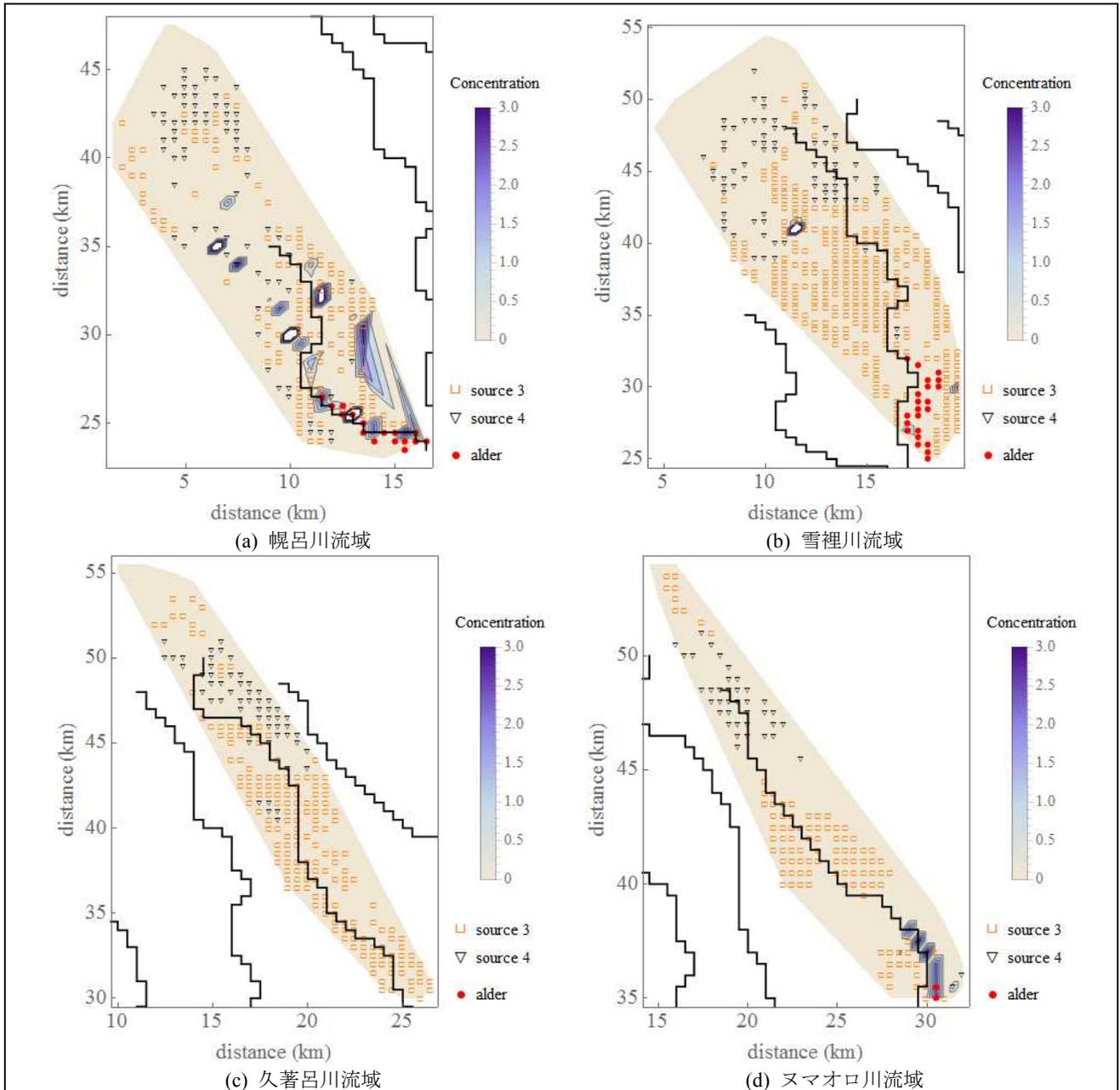


図-8 出水後の物質濃度の分布とハンノキ分布. 背景色: 物質濃度 (初期濃度が基準). □, ▽: 物質の発生源. ●: ハンノキ群落. 実線: 河川. source 3: エゾイタヤーシナノキ群落, source 4: 落葉針葉樹植林.

・流出に伴う栄養塩類の貯留特性と植生分布との対応

栄養塩類の流出を想定して, a)物質の発生場所の違いによる集積域の変化と b)土地利用別に物質の発生率を考慮した場合の集積域の違いの推定に分けて, 結果と考察を示す. なお, ここでは, 釧路湿原に流入する幌呂川, 雪裡川, 久著呂川, およびヌマオロ川の各流域に焦点を絞って降雨発生後の35日後の分布について考察を行った.

a) 発生場所の違いによる集積域の変化 (Case 1)

面的に発生した物質の行方を追跡するため, まず発生率が土地利用に依存しない場合について考察を行う. 牧草地, 畑地をそれぞれ発生源 (source 1, 2) とする物質の集積域 (物質が集中して濃度が增大している場所) の分布状況を図-7, 林地に相当するエゾイタヤーシナノキ群落, 落葉針葉樹植林を発生源 (source 3, 4) とする物質の集積域の分布状況を図-8 に示す. 図中の値は発生初期の濃度との比を表しており, 図中の記号は発生源 (source 1~4) の位置 (○, △, □, ▽), およびハンノキ群落 (●) の位置を示している.

図-7 では(a)幌呂川流域と(b)雪裡川の下流域で濃度が増大した. (a)幌呂川流域では物質濃度の大きい

場所が下流部から中流部にかけての河川湾曲部に集中的に存在した。(b)雪裡川流域では物質濃度の大きい場所が最下流部に存在した。(c)久著呂川流域では最下流部にわずかに集積している場所があり、(d)ヌマオロ川流域では極端に集積する場所は現れなかった。

図-8 では、(a)幌呂川流域に加えて、図-7 では集積域がなかった(d)ヌマオロ川流域で物質が集積する場所がみられた。一方、図-8 で最下流部で集積域があった(c)久著呂川流域では物質の集積はみられなかった。

以上、source 1~2 と source 3~4 の結果の比較により、物質の発生場所の違いが集積域に影響を及ぼす可能性があることが確認された。これは、物質の流出後に輸送経路上の表面流の発生状態や地表面での水分量等も影響していると考えられた。

b) 土地利用別に物質の発生率を考慮した場合の集積域の推定 (Case 2~4)

次に、図-6 で示された結果に基づいて土地利用別に SS, TN, および TP に相当する発生率を与えた (Case 2~4)。

SS の場合(case 2)では、case 1 の結果とは異なり、幌呂川流域では下流部での集積は発生しなかったことから、相対的に発生率の小さい source 3 が大部分を占めていたことが原因と考えられた。雪裡川流域では下流部に集中して SS が集積していたことから、比較的発生率の大きい source 1~2 に起因する集積域と考えられた。ヌマオロ川流域では下流部への SS の集積は小さく、source 1~2 に似ている。同様に、久著呂川流域においても source 1~2 に似たわずかな集積域が存在していた。

TN の場合(case 3)では、(a)幌呂川の下流域で集積域が拡大していること、(d)ヌマオロ川の下流域で集積域が発生していることなどの違いがみられ、SS とは異なって TN では林地の発生率も大きいことが原因となっていると考えられた。TP の場合(case 2)では、比較的図-8 に似た分布となっており、TP が林地からの発生率が多いためと考えられた。集積場所の分布とハンノキ群落の分布を比較すると全てのハンノキ群落の集積場所で TN が高いが、その他にも久著呂川では SS、幌呂川とヌマオロ川では TP も同地域に集積していることがわかった。

(4)まとめ

・ 湿原流域における栄養塩分布特性と植生生長速度の感度分析

- 1) ハンノキ林周辺やヨシ群落周辺では T-N, T-P, DOC の濃度が他の地点と比べて高濃度であり、釧路湿原東部では地点 10 (シラルトロ湖)、釧路湿原西部では KIT-S (幌呂地区の排水路) で最も高濃度であった。KIT-S のハンノキ林やヨシ群落においては、排水路の水と土壌間隙水の栄養状態の大小関係が一致していることに加えて、ハンノキ林ではフルボ酸様物質とフミン酸様物質、ヨシ群落ではそれらに加えてタンパク質由来のピーク強度が大きく表れた。これらのことから、水循環によって河川水と周辺土壌の栄養状態が同様の傾向に保たれていることが示唆された。
- 2) 植生生長モデルを用いてハンノキの生長を計算した結果、栄養条件の違いによって 20 年間で約 50% の生長量の差が生じた。地下水位などの他の制限要因との相互作用によってはより植生の生長が制限される可能性がある。

・ 出水時における栄養塩と有機物質の流出特性の把握

- 1) 平水時と出水時における水質データを整理した結果、釧路湿原の周辺流域においては T-N, T-P は出水時には平水時に比べて最大で数倍、SS は数 100 倍となり、出水が栄養塩循環に及ぼすインパクトが大きいことが示唆された。
- 2) 出水時には SS と T-N, T-P は概ね比例関係にあり、懸濁態の濃度レベルが溶存態に比べて高い。
- 3) 農用地利用の面積割合の大きい流域では出水時に N に比べて高濃度の P が供給されるため、N/P 比は平水時に比べて小さくなる。また、湿原や湖沼からの C が多く流出し、下流域での C/N 比が増大していることが考えられる。

・ 湿原上流域の農林地に由来する栄養塩流出と集積域の解析手法の開発

- 1) 久著呂川とオンネナイ川における出水時の水質と流量から土地利用別の SS, TN, および TP の面源負荷の発生率を推定した。DOM の中でも比較的フミン酸様物質の発生率が TP のそれに近い傾向を示し、この流域での TP とフミン酸様物質の動態は互いに関連がある可能性が示唆された。TN に関しては流出特性が一致する DOM は確認されなかった。

- 2) 分布型流出モデルを用いて小規模な流出に伴う栄養塩類に相当する物質を発生させた解析を行った。発生源の位置の違いによる物質の集積状況の違いがみられたことから、物質が輸送される経路上の表面流の発生状態や地表面での水分量が河川によって異なっていること等が影響していると考えられた。各河川流域のハンノキ群落の位置と TN の集積場所は最も良く一致し、次に SS や TP の集積場所が一致する傾向が見られた。

【4】今後の課題・展望

- ・ 植生モデルと流出モデルの組み合わせにより、現地の植生分布の変化状況との比較を進めることにより、効果的な湿原再生のための適地選定などに活用できる可能性がある。ただ、栄養条件や水分条件等を含めた様々な環境条件における植生の生長速度を知るためには、より複数地点での詳細なモニタリングデータの蓄積が望ましいと考えられる。
- ・ 湿原に流入する栄養物質の面源負荷について、上流域での観測データを取得することで、広範囲な流域全体での土地利用別の発生率を推定することが期待できる。今後、土地利用の異なる他流域での観測に基づいて、より汎用性の高いデータを収集することが望ましい。
- ・ 分布型流出モデルに栄養塩輸送サブモデルを組み込んだ基礎的な評価手法を構築し、実際の発生率を用いて流域での栄養塩の貯留特性の検討を実施した。適用限界はあるものの評価手法としては多様な土地利用形態を考慮できること等、流域特有の問題に対する優位性を持っている。しかし、本技術の導入には寒冷地気候と湿原流域特有の水文特性を表せるモデルの精度改善等も今後の課題である。
- ・ 本研究課題において栄養塩の発生源と蓄積域の関係性を把握できる手法の開発を達成できたことから、第一段階として技術的な課題解決に資する研究を推進することが出来た。
- ・ 釧路湿原自然再生協議会、等との連携も行っており、栄養塩の発生源による集積域の違いを示すなど、限定的ではあるが植生保全に向けた流域での汚濁負荷対策の適地選定等に役立つと考えられる。また、本研究成果の一部は溶存有機物等の発生源対策にも応用可能であり、溶存有機物の多い釧路湿原流域の水道事業にとっても有益な知見を得られると考えている。

参考文献

- 1) 北海道開発局釧路開発建設部 (2008) : 第2回釧路湿原水循環検討会資料, 釧路湿原水循環検討会, pp. 163.
- 2) 釧路湿原自然再生協議会運営事務局 (2009) : 第8回釧路湿原水循環小委員会資料, 釧路湿原水循環小委員会, pp. 17.
- 3) 寶三英子, 中村太士, 矢島崇, 孫田敏, 渋谷健一 (1996) : 釧路湿原の河川流入部における植物群落の構造と表層体積土砂の特性, 砂防学会研究発表会概要集, pp. 47-48.
- 4) 新庄久志 (1997) : ハンノキ林に見る釧路湿原の変容. 北海道の湿原の変遷と現状の解析—湿原の保護を進めるために—(北海道湿原研究グループ編), 財団法人自然保護助成基金1994・1995年度研究助成報告書, pp.223-239.
- 5) 橘治国, 中村信哉, 中川亮 (2002) : 釧路湿原温根内地区の地下水質と土壌, 北海道の湿原—財団法人前田一歩園財団創立20周年記念論文集, pp. 9-12.
- 6) 橘治国, 辰巳健一 (2007) : 泥炭地環境保全と地下水質, 土壌の物理性, 第105号, pp. 99-109.
- 7) Takamura N., Kadono Y., Fukushima M., Nakagawa M., and Kim B.-H. O. (2003): Effects of aquatic macrophytes on water quality and phytoplankton communities in shallow lakes, *Ecol. Res.*, Vol. 18, pp. 381-395
- 8) Nakayama T. and Watanabe M. (2004): Simulation of drying phenomena associated with vegetation change caused by invasion of alder (*Alnus japonica*) in Kushiro Mire, *Water Resources Research*, Vol. 40, W08402, doi:10.1029/2004WR003174
- 9) Nakayama T. (2008): Factors controlling vegetation succession in Kushiro Mire, *Ecological Modelling*, Vol. 215, pp. 225-236.
- 10) 日本分析化学会北海道支部編 (2007) : 水の分析第5版, 化学同人(株), 472pp
- 11) Botkin, D. B., Janak, J.F. and Wallis, J. R. (1972): Some ecological consequences of a computer model of forest growth, *Journal of Ecology*, Vol. 60, pp. 849-872.
- 12) Botkin D. B., Janak J. F., and Wallis J. R. (1972): Rationale, Limitations, and Assumptions of a Northeastern Forest Growth Simulator, *IBM J. Res. Develop.*, Vol. 16, pp. 101-116.

- 13)Urban D. L. and Shugart H. H. (1992): Individual-based models of forest succession, in *Plant Succession, Theory and Prediction*, Chapman & Hall, London, pp. 249-292.
- 14)釧路湿原自然再生協議会(2008)：第5回湿原再生小委員会資料，釧路湿原湿原再生小委員会
- 15)Negishi T. (2003): Gradients controlling vegetation in *Alnus japonica* forests in Kushiro mire, Hokkaido, Japan, *Landscape Ecol Eng*, Vol. 5, pp. 23-31.
- 16)丸谷靖幸，菅原庸平，Aynur Abliz，石田哲也，中山恵介：1970年代と比較した釧路湿原における水循環機構解析，*水工学論文集*，第55巻，pp. 547-552，2011.
- 17)矢挽哲也，中津川誠，常呂川・網走川流域の汚濁負荷量について－流域の土地利用と負荷量の特徴－，*北海道開発土木研究所月報*，No.625，pp.2-19，2005.
- 18)環境省自然環境局生物多様性センター：自然環境保全基礎調査植生調査，<http://vegetation.jp/index.html>，最終閲覧日2013年3月13日
- 19)国土交通省：国土数値情報ダウンロードサービス，<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>
- 20)Lawaetz A. J. and Stedmon C. A. (2009): Fluorescence intensity calibration using the Raman scatter peak of water, *Applied Spectroscopy*, 63 (8), pp. 936-940. DOI: 10.1366/000370209788964548
- 21)Mopper K. and Schultz. C.A. (1993): Fluorescence as a possible tool for studying the nature and water column distribution of DOC components, *Mar. Chem*, 41, pp. 229-238.
- 22)Mayer L.M., Schick L.L. and Lober III T.C. (1999): Dissolved protein fluorescence in two Maine estuaries, *Mar. Chem.*, 64, pp. 171-179.
- 23)Ewald M., Bellin C, Berger P. and Weber J.H. (1983): Corrected fluorescence spectra of fulvic acids isolated from soil and water, *Environ. Sci. Tech.*, 17, pp. 501-504
- 24)Coble P.G, Green S.A., Blough N.V. and Gagosian R.B. (1990): Characterization of dissolved organic matter in the Black Sea by fluorescence spectroscopy, *Nature*, 348(29), pp. 432-435
- 25)Westerhoff P., Chen W. and Esparza M. (2001): Fluorescence Analysis of a Standard Fulvic Acid and Tertiary Treated Wastewater, *J. Environ. Qual.*, 30, pp. 2037-2046.
- 26)Yamashita Y. and Tanoue E. (2003): Chemical characterization of protein-like fluorophores in DOM in relation to aromatic amino acids, *Mar. Chem.*, Vol. 82, pp. 225-271.
- 27)亀田豊，橋治国，清水達雄 (1999)：三次元励起・蛍光スペクトルを用いたDOMのキャラクタリゼーション，*環境工学研究論文集*，第36巻，pp. 209-215
- 28)Nagao S., Matsunaga T., Suzuki Y., Ueno T., and Amano H. (2003): Characteristics of humic substances in the Kuji River waters as determined by high-performance size exclusion chromatography with fluorescence detection, *Water Research*, 37, pp. 4159-4170. DOI: 10.1016/S0043-1354(03)00377-4.
- 29)中山恵介，新谷哲也 (2015)：オブジェクト指向型水循環・物質輸送モデルGeoCIRCの開発と浸透過程の検証，*土木学会論文集B1(水工学)*，第71巻，印刷中.
- 30)山崎晃裕，中津川誠 (1997)：積雪寒冷地流域の土地利用と水質成分負荷量について，*開発土木研究所月報*，No. 529.
- 31)Weir C. C. and Soper R. J. (1963): Interaction of phospharates with ferric organic complexes, *Canadian Journal of Soil Science*, 43, pp. 393-399. DOI: 10.4141/cjss63-046.
- 32)Sinha M. K. (1971): Organo-metallic phosphates I. Interaction of phosphorus compounds with humic substances, *Plant and Soil*, 35, pp. 471-484. DOI: 10.1007/BF0137268