

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00514

研究課題名(和文) 寒冷地固有の物質情報を利用した流域の環境動態解析の高度化

研究課題名(英文) Improvement of environmental dynamics analysis of river basin using specific substance information in cold region

研究代表者

駒井 克昭 (Komai, Katsuaki)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90314731

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：北海道地方の水環境問題の背景には、寒冷地固有の積雪・融雪、河川や湖沼の結氷・解氷などが物質動態を複雑にしていることに加え、流域が有する寒冷地固有の風土と産業活動の様々な汚染起源となる後背地を有することが深く関わっており、これらが物質動態の科学的解明と技術的な問題解決の障壁となっている。本研究では、積雪寒冷地の代表的な流域において自然起源と人為起源の固有の物質起源情報となる溶存イオンや希土類元素、蛍光性溶存有機物、等を利用して物質循環解析手法を開発した。また、それらの物質起源情報を利用して、融雪・積雪時期における水文・水理現象が水生生物などの基礎的な生息環境を支えていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Background to the water environment problems in the Hokkaido region includes snow falling and melting unique to cold regions, ice formation / deicing of rivers and lakes, which complicates material dynamics, as well as a hinterland with the source of various contamination from human activities. These background is deeply involved in the barriers to the scientific elucidation of material dynamics and the solution of technical problems. In this study, we developed a material cycle analysis method using dissolved ions, rare earth elements, fluorescent dissolved organic substances, etc, which are information on intrinsic material origin of natural origin and anthropogenic origin in a typical watershed of cold snow. In addition, using these material origin information, we clarified that hydrological and hydraulic phenomena at snow melting / snow covering season supports the basic habitat environment such as aquatic organisms.

研究分野：水環境工学

キーワード：流域 物質情報 希土類元素 蛍光性溶存有機物 溶存イオン 積雪 融雪

### 1. 研究開始当初の背景

寒冷地である道東地方には世界遺産の知床をはじめ、わが国最大の湿原である釧路湿原、オホーツク沿岸に連なる数々の海跡湖からなる網走国定公園、などの貴重な自然環境が多く残されている。また、同地方はわが国の酪農・食糧生産を支える農業地帯であるが、高度な土地利用に伴う人為起源の水環境汚染が自然環境を脅かしている。近年では、地球規模の気候変化が懸念されており、豊かな寒冷地の水環境をいかにして守るかが産官学を問わず大きな関心事となっている。

積雪寒冷地である北海道地方の水環境問題の背景には、寒冷地固有の積雪・融雪、河川や湖沼の結氷・解氷などが物質動態を複雑にしていることに加え、流域が有する寒冷地固有の風土と産業活動、すなわち、泥炭質土、火山灰質土、畜産排水、畑地、森林、等の様々な汚染起源となる後背地を有することが深く関わっており、これらが物質動態の科学的解明と技術的な問題解決の障壁となっている。既往の研究では、堆積物の由来や起源を代表する物質としては、天然放射性物質 ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ )、鉍物磁気、金属元素 (Al, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr, Zn)、金属元素・金属化合物 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Ba, CaO, Ce, Co, Cr,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , 等)、希土類元素 (REE; La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) 等が有効と考えられる。また、溶存有機物の場合は、CDOM (Colored Dissolved Organic Matter) の蛍光特性を利用した 3D-EEMs (3次元励起蛍光スペクトル) が感度、選択性の点で優位性が高いと考えられている。

### 2. 研究の目的

本研究では、北海道地方の小流域を研究対象として、積雪寒冷地の環境中の物質から有意なトレーサー物質 (追跡可能な物質) を水や栄養物質の由来や起源を表す物質 (fingerprint) として統計的に抽出し、多角的な物質起源情報 (MDF: multi-directional fingerprint) を構築することを第一の目的としている。また、寒冷な流域での代表的生物とトレーサー物質の挙動との対応関係を明らかにすることで、物質起源情報 (MDF) の有効性を検証することを第二の目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究の最終目標は寒冷地固有の流域での物質循環解析手法の確立であるが、本研究課題ではその核となる環境中に存在する有意なトレーサー物質に関する学術的基礎の構築に焦点を絞る。具体的には以下の3段階に分けられる。(1) 種々の環境中に存在する物質を対象とした予備分析、および統計的手法を用いた多角的な物質起源情報 (MDF) の構築。(2) 流域を対象としたモデル等を用いた水文過程の

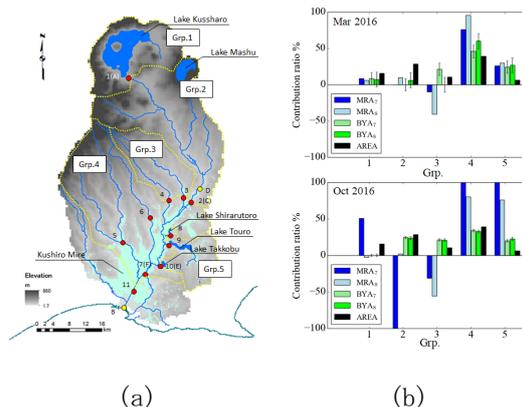


図-1 (a) 釧路川流域内における採水地点と流域のグループ分け。(b) 5つの領域分割 (Grp. 1~Grp. 5) とそれぞれの領域での輸送割合の推定値。MRA: 重回帰分析による結果, BYA: ベイズ理論を適用した結果, 下付き文字: 用いた溶存イオン種の数, AREA: 集水域面積の割合

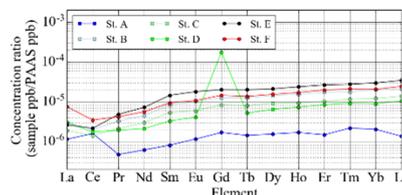


図-2 各地点の規格化された希土類元素濃度

解析、および多角的な物質起源情報 (MDF) を用いた検証。(3) 寒冷な流域での代表的生物と物質起源情報 (MDF) との対応関係の把握と生物情報を含めたシミュレーションの可能性について考察する。

### 4. 研究成果

以下に本課題の主な研究成果を示す。

(1) 種々の環境中に存在する物質を対象とした予備分析、および統計的手法を用いた多角的な物質起源情報 (MDF) の構築

積雪寒冷地の代表的な釧路川流域 (図-1(a)) において自然起源と人為起源の固有の物質情報を利用して河川水と物質の輸送・由来の解析手法を開発した。様々な溶存イオンの濃度パターンを利用した輸送割合の推定にベイズ理論を適用することで溶存態物質の輸送割合の推定が可能であることが確認された。ベイズ理論に基づいて輸送割合を推定した結果、推定誤差数%で輸送割合が推定された (図-1(b))。溶存物質の季節的な輸送割合の変化が見られ、その変化は測定誤差に比べて有意な違いがあることが明らかになった。また、統計的検定によって小流域の特徴を表す成分を予め選別することが望ましいことが示唆された。

さらに、地球化学的な天然物質の存在や反応過程を表す希土類元素に着目し、物質循環のトレーサーとして利用することを目指して、釧路湿原流域で最も大きい釧路川の河川水中の希土類元素の測定を行い、流域における濃

度パターンの変化特性を明らかにした。その結果、釧路川の河川水に含まれる溶存希土類元素の濃度パターンを定量することができた(図-2)。釧路川での希土類元素の濃度は非常に希薄であったが、濃度パターンにはある程度の特徴が見られた。また、既往の研究にあった他流域の結果と比較すると流下方向の濃度の大小関係に逆の傾向がみられ、流域の特徴を表す有効な物質情報となりうることが示唆された。

(2) 流域を対象としたモデル等を用いた水文過程の解析、および多角的な物質起源情報(MDF)を用いた検証

釧路川流域を対象として水文過程を考慮した物質循環解析を行った。まず、出水時における流域の土地利用別のSS(Suspended Solid:懸濁態物質濃度)、栄養塩類、およびCDOMの発生率の推定を行った。TN(Total Nitrogen:全窒素)の発生率は牧草が他の土地利用に比べて高かった。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大きめに現れている可能性があると考えられた。また、林地の発生率が比較的に大きいことから、集水域内に存在する人為的な点源負荷も影響している可能性がある。TP(Total Phosphorous:全リン)は物質起源情報(MDF)の中でも特徴的なCDOMであるフミン酸様物質に近い発生率の傾向を示した。

次に、流域を対象とした水文過程を表せるモデルを用いて出水に伴う栄養塩類の貯留特性の推定を行った。雪裡川上流から湿原への流入部における2012年10月の降雨後について発生源の異なる物質の集積域の分布状況の考察を行った(図-3)。この結果から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。久著呂川で推定された発生率を与えた場合には雪裡川流域では下流部のSSの濃度とともにTN、TPの濃度も高くなっていることから牧草地や畑地由来の物質が植生の繁茂域に集積していることが示唆された。

(3) 寒冷な流域での代表的生物と物質起源情報(MDF)との対応関係の把握と生物情報を含めたシミュレーションの可能性

オホーツク沿岸域や十勝地方においては、物質起源情報(MDF)となる溶存イオンや蛍光性溶存有機物を利用し、融雪・積雪時期における水文・水理現象が水生生物の基礎的な生息環境と関わっていることを明らかにした。

①汽水湖での解析(オホーツク沿岸域)

オホーツク沿岸の代表的な渡り鳥の飛来地の一つとなっているコムケ湖では、塩分の経時変化から、融雪期から夏期にかけて特にタイドプール内での塩分の上昇が見られ、既往の研究と同様に融雪期に干潟での低塩分が

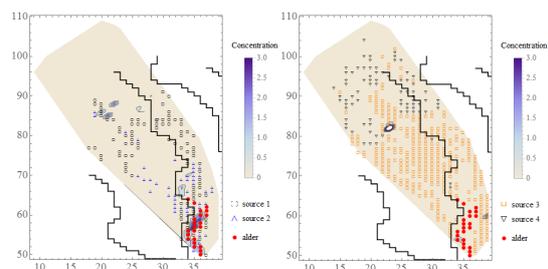


図-3 出水後の物質濃度の分布。背景色:物質濃度(初期濃度が基準)。○, △, □, ▽:物質の発生源。●:ハンノキ群落。実線:河川。

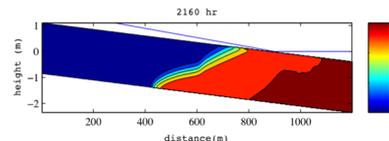


図-4 陸域地下水位による塩分の変化。地下水位1.6 mのケース

確認された(図-4)。溶存有機物については、タンパク質様物質は易分解性のため地中で分解され、融雪期に相対蛍光強度が大きかったものが夏期に向けて減少傾向にあったと考えられた。物質起源情報(MDF)となるフルボ酸様物質とフミン酸様物質ともに融雪期には干潟域の地中で相対蛍光強度が強い場所が見られ、塩分と同様に、特に満潮汀線付近に位置するタイドプール内では浸透流の循環によって干潟表面の有機物が地中に輸送・蓄積されるためと考えられた。また、特にタイドプール内では生成された有機物が滞留することで濃縮される。栄養塩のうち、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度が融雪期から夏期にかけて増加しており、主に水温上昇に伴って有機物の分解による酸素消費が進み、嫌気的条件が形成されたと考えられた。また、干潟域岸側では浸透流の発生によって物質輸送に影響を及ぼすと共に、干出・冠水時に干潟表層での酸化還元状態が大きく変化し、地中の栄養塩の濃度分布に影響していると考えられる。夏にかけて有機物の生成が活発になったためDON(Dissolved Organic Nitrogen:溶存有機窒素)、DOP(Dissolved Organic Phosphorous:溶存有機リン)の濃度が夏期にかけて上昇していると考えられた。

②森林流域での解析(十勝地方)

森林域に位置する小流域とそれに接続する貯水池に着目し、数年にわたる溶存イオンと電気伝導度(以下EC)の観測値を物質起源情報(MDF)として利用することで求めたクラスターに基づいて、厳冬期における溶存有機物と栄養塩( $\text{NO}_3\text{-N}$ )の動態を明らかにした。まず、厳冬期の基底流出において、小河川と貯水池、また小河川Sの上流と下流における水質に相違があることをクラスター分析より明らかにした(図-5)。春季や冬季の底生動物の群集組成の縦断変化は濁度と関係があることから、クラスターには対応がみられ、水質と

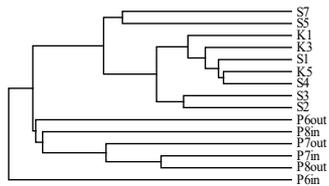


図-5 光合成速度の感度分析. 青:積雪あり, 赤:積雪なし, 緑:積雪なし・濁質なし, 灰:積雪なし・濁質なし・N,Pなし

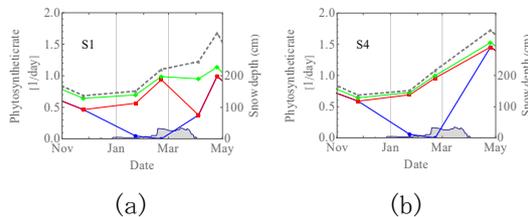


図-6 光合成速度の感度分析. 青:積雪あり, 赤:積雪なし, 緑:積雪なし・濁質なし, 灰:積雪なし・濁質なし・N,Pなし

の関係が示唆された。貯水池周辺の基底流出水は森林土壌を經由した表層の地下水由来成分が多く、溶存有機物が多く含まれている可能性があり、貯水池に接続する集水域が溶存有機物の発生源になることが示唆された。上流部から  $\text{NO}_3\text{-N}$  が比較的に発生していることが推定され、冬期に  $\text{NO}_3\text{-N}$  が増加することは自生性栄養構造の基礎生産を支えている可能性が見出された。さらに、森林域に位置する小流域において、水質、付着藻類量、光量子量、および積雪量の観測を行うとともに、現地の雪を用いた光の減衰実験を行った。これらの結果から厳冬期における付着藻類の基礎生産に及ぼす積雪の影響について定量的に評価した。積雪を考慮した場合には光合成速度が 0 付近まで下がるが、積雪初期 (12~1 月末) にはある程度の光合成速度が確認できる (図-6)。したがって、厳冬期においても付着藻類の基礎生産がある程度維持される可能性が本研究で示唆された。

以上、本研究では、北海道地方各地の流域を研究対象として、環境中の物質から溶存イオンや希土類元素、蛍光性溶存有機物の中から有意なトレーサー物質 (追跡可能な物質) を水や栄養物質の由来や起源を表す物質 (fingerprint) として抽出して、多角的な物質起源情報 (MDF) として統計的な有意性や水文学的過程に基づいて物質循環解析に応用できることが示された。また、寒冷な流域での水生生物や植生などの自然環境とトレーサー物質の挙動との対応関係を融雪や積雪に伴う水質環境の変化や水環境中での一次生産から明らかにすることで、物質起源情報 (MDF) の有効性が確認された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- 1) 笠間 基, 駒井克昭, 丸谷靖幸, 佐藤辰哉, 釧路川流域が親潮沿岸域に供給する溶存炭素量の将来予測に向けて, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 74, No. 4, I\_133-I\_138, 2018, 査読有
- 2) 駒井克昭, 中山恵介, 広木駿介, 阪口詩乃, 河川水中の溶存イオンを利用した釧路川流域における溶存物質動態の推定, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 74, No. 4, I\_505-I\_510, 2018, 査読有
- 3) 中山恵介, 駒井克昭, R. W. Elner, 桑江朝比呂, Roberts Bank tidal flat における干潟内流動と塩分濃度, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 73, No. 2, I\_618-I\_623, 2017, 査読有
- 4) S. Bouragba, K. Komai, K. Nakayama, Heavy metals transport simulation by physically based distributed modeling approach (Case study: Harrach River, ALGERIA), Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 73, No. 4, I\_1159-I\_1164, 2017, 査読無
- 5) 中山恵介, 駒井克昭, 丸谷靖幸, 松本経, 阪口詩乃, 桑江朝比呂, 蛍光 X 線分析を利用した細粒土砂の輸送割合と安定同位体比による窒素循環量の推定, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 73, No. 4, I\_1177-I\_1182, 2017, 査読有
- 6) 中山恵介, 駒井克昭, R. W. Elner, 桑江朝比呂, Roberts Bank tidal flat における biofilm 形成に重要な物理・塩分環境の要因解析, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 72, No. 2, I\_1063-I\_1068, 2016, 査読有
- 7) C. Beitia, K. Nakayama, Y. Maruya, N. Ohtsu, S. Yamasaki, M. Yamane, A. S. J. Wyatt, K. Komai, Suspended sediment transport estimation by X-ray fluorescence analysis, Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 72, I\_1039-1044, 2016, 査読有
- 8) 竹内友彦, 駒井克昭, 中山恵介, 渡辺謙太, 一見和彦, 山田俊郎, 桑江朝比呂, 融雪期のコムケ湖干潟における溶存有機物と栄養塩の分布・変動特性, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 72, No. 4, I\_661-666, 2016, 査読有
- 9) 竹内友彦, 駒井克昭, 中山恵介, 渡辺謙太, 一見和彦, 佐藤之信, 桑江朝比呂, 融雪に伴う浸透流がコムケ湖の干潟水質に及ぼす影響, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 71, No. 2, I\_856-I\_861, 2015, 査読有

[学会発表] (計 2 3 件)

- 1) H. Kasama and K. Komai, Characteristics of organic matter in stream water supplied to the coast of

- cold region in Japan, The 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans, P-10, Monbetsu, Japan, 2018, 査読無
- 2) T. Sato and K. Komai, Influence of snowmelt on longshore distribution of tidal flats soil salinity in a lagoon of the Sea of Okhotsk, The 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans, P-9, Monbetsu, Japan, 2018, 査読無
  - 3) S. Hiroki, K. Komai, and K. Matsumoto, Geochemical Characteristics of Patterns of Dissolved Rare Earth Elements in Rivers in the East Coast of Shiretoko Peninsula, Japan, The 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans, P-8, Monbetsu, Japan, 2018, 査読無
  - 4) K. Matsumoto, T. Kameda and K. Komai, Traveling route of a black-eared kite in relation to salmon abundance in south Okhotsk area, The 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans, I-14, Monbetsu, Japan, 2018, 査読無
  - 5) 広木駿介, 駒井克昭, 松本 経, 知床半島東岸知床半島東岸河川におけるレアアースの定量, 平成 29 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会, G-11, 札幌市, 2018, 査読無
  - 6) 佐藤辰哉, 駒井克昭, 中山恵介, コムケ湖沿岸における地下水位と地形が干潟塩分の分布に及ぼす影響, 平成 29 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会, B-31, 札幌市, 2018, 査読無
  - 7) 笠間 基, 駒井克昭, IR スペクトルを用いた河川水中の粒状態有機物の構造解析, 平成 29 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会, G-05, 札幌市, 2018, 査読無
  - 8) 駒井克昭, 大石将己, 佐藤辰哉, 広木駿介, 園田武, 丸谷靖幸, 濤沸湖における流入栄養塩類の分布特性と滞留・輸送機構に関する考察, 第 52 回日本水環境学会年会, P-A44, 札幌市, 2018, 査読無
  - 9) 丸谷靖幸, 駒井克昭, 笠間 基, 信山直紀, 佐藤辰哉, 生態系評価に向けた流域圏における長期アンサンブルによる溶存有機炭素(DOC)流出量の将来予測, 第 65 回日本生態学会大会, P2-299, 札幌市, 2018, 査読無
  - 10) 佐藤辰哉, 笠間 基, 出島広大, 丸谷靖幸, 駒井克昭, 釧路川流域における有機炭素流出予測にむけた基礎的検討, ELR2017, G-89, 名古屋市, 2017, 査読無
  - 11) 丸谷靖幸, 駒井克昭, 笠間 基, 信山直紀, 佐藤辰哉, 生態系評価に向けた流域圏における溶存有機炭素(DOC)流出量の将来予測-釧路川流域を対象として-, JaLTER Open Science Meeting, 松江市, 2017, 査読無
  - 12) 塚本優祐, 長尾麻未, 駒井克昭, 十勝地方の森林小流域における厳冬期の溶存有機物と栄養塩の動態, 平成 28 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会, G-03, 北見市, 2017, 査読無
  - 13) 台丸谷星花, 小森 葵, 駒井克昭, 釧路川流域における溶存希土類元素パターンの分析, 平成 28 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会, G-04, 北見市, 2017, 査読無
  - 14) T. Takeuchi, Y. Tsukamoto, K. Komai, T. Yamada, K. Matsumoto, Influence of seasonal variation in brackish water environment on primary production, The 32nd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans, Monbetsu, Japan, 2017, 査読無
  - 15) T. Takeuchi, F. Sano, K. Komai, and K. Nakayama, Dynamics of nutrient and dissolved organic matter in snowmelt season in tidalflat sediment in Lake Komuke, The 7th International Conference on Water Resources and Environment Research, Kyoto, Japan, 5-9, 2016, 査読無
  - 16) K. Komai, A. Nagao, M. Nunokawa, N. Watanabe, Y. Maruya, and K. Nakayama, Influence of nutrient and fine sediment control to primary productivity by benthic attached algae in forest watershed, IWA World Water Congress & Exhibition, Brisbane, Australia, 2016, 査読無
  - 17) H. Kasama, K. Komai, Y. Maruya, and K. Nakayama, Organic carbon transport during flood due to rainfall in a headwater catchment of Kushiro Wetland, JAPAN, Libro de articulos del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Peru, 2016, 査読無
  - 18) 笠間 基, 駒井克昭, 中山恵介, 釧路湿原流域における溶存有機炭素の流出特性に関する検討, 平成 27 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会, 2016, 札幌市, 査読無
  - 19) 竹内友彦, 駒井克昭, 中山恵介, コムケ湖における融雪期の地下水浸透流が干潟水質に及ぼす影響, 平成 27 年度土木学会全国大会年次学術講演会, 岡山市, 2015, 査読無
  - 20) 駒井克昭, 中山恵介, 河合 守, 新谷哲也, 中下慎也, 釧路川流域における湿原再生に向けた栄養塩輸送量の評価手法に関する研究, 土木学会平成 27 年度全国大会年次学術講演会, 岡山市, 2015, 査読無
  - 21) 長尾麻未, 駒井克昭, 中山恵介, 布川雅典, 渡辺のぞみ, 北海道十勝地方の森林流域における溶存有機物と栄養物質の動

- 態解析，応用生態工学会第19回研究発表会，郡山市，2015，査読無
- 22) 笠間 基，布川雅典，駒井克昭，中下慎也，長尾麻未，中山恵介，農林地由来の栄養物質と溶存有機物の流出特性解析，応用生態工学会第19回研究発表会，郡山市，2015，査読無
- 23) 布川雅典，渡辺のぞみ，駒井克昭，長尾麻未，中山恵介，北海道十勝地方の森林流域における底生動物群集の縦断分布，応用生態工学会第19回研究発表会，郡山市，2015，査読無

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

駒井 克昭 (KOMAI Katsuaki)  
北見工業大学・工学部・准教授  
研究者番号：90314731

### (2) 研究分担者

中山 恵介 (NAKAYAMA Keisuke)  
神戸大学・工学研究科・教授  
研究者番号：60271649

布川 雅典 (NUNOKAWA Masanori)  
国立研究開発法人土木研究所（寒地土木研究所）・研究員  
研究者番号：90389651

中下 慎也 (NAKASHITA Shinya)  
広島大学・工学研究院・助教  
研究者番号：90613034