

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301
 研究種目：基盤研究（A）海外学術調査
 研究期間：2009～2012
 課題番号：21255002
 研究課題名（和文） 超長大水系フブスグルーバイカルーエニセイ流域における物質動態と生態遷移
 研究課題名（英文） Material dynamics and ecological change in extra long water system, Hovosgol-Baikal-Yenisei area
 研究代表者
 杉山 雅人（SUGIYAMA MASAHIRO）
 京都大学・大学院人間・環境学研究科・教授
 研究者番号：10179179

研究成果の概要（和文）：

研究対象とするフブスグルーバイカルーエニセイ水系 5500 km の約 1/2 に当たるフブスグル湖からウストイリムスクダム湖までの水系上流域を調査した。これにより、2006 年から 2008 年の科研費を得て進めた同一課題による前研究（基盤研究（A）海外学術調査、18255001）での調査と合わせて研究水系のほぼ全域が踏査できた。河川での水の流下と湖での水の停滞によって、水質と生態が大きな変動を遂げることが明らかになった。特に、源流域とダム湖流入河川河口域でその傾向が顕著であった。

研究成果の概要（英文）：

We conducted a limnological field survey in the upper half of Hovosgol – Baikal – Yenisey water system (length: 5500 km) from Lake Hovosgol (Mongolia) to Lake Ust-Ilimsk (Russia). Therefore, almost whole area of the water system was surveyed by the present work and the previous research with same research title during from 2006 to 2008 promoted with the Grants-in-Aid Scientific Research-KAKENHI (Scientific Research (A) Overseas Academic Research, 18255001). Water quality and ecological system of micro-organisms were elucidated to be changed with flowing down of water in rivers and water stagnation in lakes in the water system. Its tendency was markedly observed around the source of this water system and the mouth of the main river flowing into a large artificial lake.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2010 年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2011 年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2012 年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
年度			
総計	36,600,000	10,980,000	47,580,000

研究分野：陸水学・水圏化学・分析化学

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：超長大水系、物質動態、生態遷移、フブスグル湖、バイカル湖、エニセイ川

1. 研究開始当初の背景

本研究は、2006 年から 2009 年の 4 年間の

 予定で申請し採択された科研費基盤研究（A）
 海外学術調査「超長大水系フブスグルーバイ

カルーエニセイ流域における物質動態と生態遷移」(課題番号:18255001)の最終年度前年度応募として申請したものである。前研究開始の2006年の時点では、研究対象とした超長大水系フブスグルーバイカルーエニセイ流域の物質動態と生態系がどのような状況にあるのか、また、水の流下とともにそれらがいかなる遷移を見せるのかについては、全く不明であった。なぜなら、このような水系の総合科学調査については、現地のロシア人研究者に尋ねても、これまでに例がないとされていたからである。微生物や水質などの単一分野からの調査報告はあるものの、それは30年近く前のものであって水系環境が著しく変化した近年における報告は未だない。したがって、本研究によって超長大水系における物質動態と生態系の遷移の機構が明らかにされるなら、陸水科学・水圏科学における物質循環と生態系の研究において、その関連を考えるうえで極めて意義深く、環境科学の面からもその知見は流域管理にとって極めて重要になるものと考えた。また、近年、特にシリカ欠損の問題に端的に見られるような、河川中途停滞水域の出現による河川環境と沿岸海洋環境の変化、ならびに河川から沿岸域への物質輸送の変化に由来する問題についても、重要な視点を与えるであろうと考えた。こうした経緯により、本研究を構想した。前研究では、対象とした全流域の踏査が予定期間内には終了できないと判断されたために、最終年度前年度の応募を行って、研究の完結を図った。

2. 研究の目的

モンゴル北部に端を発し、フブスグル湖ーエギン川ーセレンゲ川ー(モンゴル/ロシア国境)ーセレンゲ川ーバイカル湖ーアンガラ川ーブラツクダム湖ーアンガラ川ーウストイリムスクダム湖ーアンガラ川ーエニセイ川と連なり、ロシア国内を通過して極北のカラ海に流れ込むフブスグルーバイカルーエニセイ水系は、わが国には見ることでできない極めて長大な水系である。このため、流域の環境条件は地理・水理構造・生物相・地質帯・気候など様々な点から、地域によって大きな変化を示す。本研究の目的は、この超長大な水系において環境条件の変化並びに河川での水の流下と中途に点在する湖やダムでの水の停滞に伴って、

- (1) 物質動態はどのような変化を示すか
- (2) 生態系はいかなる遷移を見せるか
- (3) 両者はどのような関連にあるか

を調査して、流域環境の変化による物質動態・生態系変動のメカニズムを明らかにし、その知見を国内外の河川・湖沼環境保全に資することにある。

具体的には研究水系に点在する自然成因の湖(フブスグル湖とバイカル湖ほか)と人工湖(ダム湖)並びに水系内河川に、環境条件の変化を考慮していくつかの調査定点を設定し、物理・化学・生物に渡る複合的総合調査を実施して、

- ① 河川流量、河川水・湖水の流向・水温分布の測定による河川水・湖水の流動機構の解明
- ② 栄養塩の濃度分布ならびに代謝速度の測定による水域での栄養塩動態の解明
- ③ 微量重金属の濃度分布測定による水系の人為汚染レベルの把握
- ④ 溶存・懸濁有機物の濃度分布測定による水域での有機物動態の解明
- ⑤ 湖での沈降粒子組成・沈降粒子束の測定による水域での物質鉛直輸送機構の解明
- ⑥ 動・植物プランクトン、バクテリア、付着藻類の群集分布測定による微生物生態遷移の解明
- ⑦ 水生植物のリン酸代謝速度の測定による水域の栄養度、栄養代謝機構の解明を行う。また、各水域での上記項目の相互の関連、すなわち

(I) ①、②、⑤、⑥、⑦に基づく栄養塩動態と生態遷移の関連

(II) ①、④、⑤、⑥の関連解析による有機物動態と生態遷移の関連

を解析する。これらを通して上述(1)~(3)の観点に基づく超長大水系における物質動態・生態系変動の遷移を明らかにする。

3. 研究の方法

研究水系であるフブスグルーバイカルーエニセイ流域のさまざまな地点で、物理・化学・生物に渡る総合科学調査を行う。電気伝導度や溶存酸素濃度などの現地で直ちに測定可能な項目は現場観測を行う。それら以外のものについては、採取した試料を日本に持ち帰り分析する。次に示すような各種の項目を観測・解析して、上述「2. 研究の目的」に示した事項について研究する。

(1) 物理指標と一般水質項目： 三次元流向・流速(風と湖水)、河川流量、水位、水温、電導度、溶存酸素、クロロフィル蛍光、pH、濁度、透明度、水中分光特性。これらの項目の測定は主に現場自動観測装置で行う。

(2) 生物群集解析： 動・植物プランクトン、バクテリア、沿岸・底生藻類、沈降粒子中の生物組成。

(3) 化学分析： 溶存物質(栄養塩、無機・有機炭素、無機主要イオン、微量生元素、重金属、糖、アミノ酸)、懸濁物質・沈降粒子・堆積物(クロロフィル、生物色素、その他の項目は溶存物質と同じ)。

(4) 培養実験： 基礎生産量、植物プランク

トンによる窒素とリンの取込み速度、水生植物のリン酸代謝速度、動物プランクトン摂食速度。

4. 研究成果

(1) 研究水系であるフブスグルーバイカルーエニセイ流域のうち2009年度から2012年度にかけて次の水域を調査した。

2009年：フブスグル湖

2010年：エギン川、セレンゲ川、セレンガ川

2011年：アンガラ川(イルクーツク～ブラーツク)、ブラーツクダム湖

2012年：アンガラ川(ブラーツク～ウストイリムスク)、ウストイリムスクダム湖

これらの地域は全水系の上流部約1/2に当たる。前研究と本研究によって、ウストイリムスクダム湖～アンガラ川・エニセイ川合流点までの水域を除く研究水系全域を調査できた(上述の水域は、川幅が狭く急流であること、交通の便が極端に悪く陸路で川に近づくことは多大な労力と時間を要することから、調査が難しいとされる。しかし、できればいつの日か踏査したいと考えている)。この結果、現在までに次のような成果が得られた。

① 研究水系の源流域であるフブスグル湖のクロロフィル *a* は水深50～60 mで極大値1.8 μg/Lに達した。この極大値自体は大きな値ではないが、極大値の水深が観測地点での透明度20 mの3倍にもあたることは極めて興味深い。これまでの報告で、透明度との相対関係において、このような深い位置にクロロフィル *a* 極大が現れた例はほとんどない。極大値形成機構の解明は、今後の重要な研究課題であろう。

② フブスグル湖において、水草類の採集と生育環境の観察を行った。湖岸においては多数種の水草の繁茂が観察された。2010年・2011年にはそれぞれバイカル湖・アンガラ川においても、水草類の生育状況の観察と一部採取を行った。これらによるリン取り込み機構について現在解析中である。

③ フブスグル湖において主要化学成分と生元素成分を測定した。本研究(2009年夏)においてもフブスグル湖では栄養塩現存量がきわめて低かったが、以前(2000年夏)に観測した値よりは高く、クロロフィル *a* 濃度も増加していた。フブスグル湖はこの10年間で観光開発等が活発に行われてきたことから、これら人間活動の影響による水質汚濁が懸念される。

④ フブスグル湖において、微生物の現存量を鉛直的に調べた。その結果、①でも述べたようにクロロフィル *a* 濃度は水深60 m付近で最大となった。これに対し、細菌類の細胞密度は水深60 m以深で高く保たれた。ピコ植

物プランクトン細胞密度は、水深30 mから50 mで高くなり、細菌やピコ植物プランクトンを摂食する鞭毛虫の細胞密度もこの深度で高かった。これらの結果から、本湖におけるピコ植物プランクトンと鞭毛虫の食物連鎖が示唆された。

⑤ フクスブルグ湖において植物プランクトンの採集と観察を行うとともに水源噴出泉の調査を行った。群集組成の変動について現在解析中である。

⑥ フブスグル湖での各種溶存・懸濁化学成分の分布と動態について調査した。その結果、フブスグル湖の生物地球化学過程は、高緯度・高標高にあることによる低水温と強紫外線照射、貧栄養、湖西部集水域に存する石灰岩地質に強く影響されていることが分かった。強紫外線照射が一因となって植物プランクトンが強光阻害を受け、フブスグル湖は水温躍層以深の深い位置にクロロフィル *a* 極大を持っていると考えられた。石灰岩地帯を集水域に持つために、フブスグル湖では溶存態、懸濁態のカルシウム濃度がともに高い特異な水平・鉛直分布を示した。

⑦ フブスグル湖でのカルシウムの特異的分布は、エギン川、セレンゲ川にかけて水系が流下するにつれ、石灰岩以外の地質帯からの河川水と懸濁粒子の流入によって、その特徴が減殺された。その後さらに水が流下したセレンゲ川では溶存態、懸濁態の化学組成の特徴はあまり変化しなかった。このことはフブスグルーバイカル水系の河川水質はモンゴル国内で規定されてしまうことを示唆していた。この態様はバイカル湖の下流でも同じであって、ヘキサダイアグラムによる水質解析からすれば、全ての流域で主要水質は Ca^{2+} - HCO_3^- 型にあると判断された。

⑧ フブスグル湖ーバイカル湖間では炭酸カルシウムの濃度積を規定するのに、二酸化炭素の分圧変動が大きく関わっていると推測された。これは、この水域で水の流下とともに標高が大きく低下して、二酸化炭素分圧が上昇するためと考えられた。

⑨ ブラーツクダム湖、ウストイリムスクダム湖では、いずれもその主要流入河川であるアンガラ川の河口域で栄養塩濃度が激減した。しかし、主要イオンである Na^+ の濃度には大きな変動はなく、この変化は水量増加によるものではなく、河口域での活発な生物生産によるものと考えられた。河川流下過程での中途停滞水域の出現によるシリカ欠損(湖底へのシリカ貯留)が起こっているものと推測される。この意味で本水系は、当初の予測通りこの課題を解析するに好適な研究フィールドであると言える。

⑩ アンガラ川のクロロフィル *a* は、ブラーツクダム湖より上流域での2～10 μg/Lに対し、下流では0.3～2 μg/Lと際立って低く、

あたかもブラーツクダム湖が水処理場の役割を果たしているかの如くであった。ブラーツクダム湖の上流にも下流にも 20~40 µg/L と高濃度の観測点も見られたが、これら高濃度水域は局所的であり、局所的な人為汚染を示しているものと考えられた。

(2) フブスグルーバイカルーエニセイ流域の調査とともにバイカル湖の物理・化学・生物動態の研究も並行して行った。

① 2010 年~2012 年の 3 年間に渡ってバイカル湖南湖盆の各地点で水中細菌を計数し、植物プランクトン量との関係を考察した。その相関について現在解析中である。

② 2012 年には、バイカル湖およびアンガラ川において水中に溶存する亜酸化窒素濃度の鉛直分布を測定した。バイカル湖、アンガラ川ともに表層から底層まで濃度に大きな変化は見られなかったが、大気飽和濃度と比較すると若干高い傾向が観られた。この原因について、現在検討中である。

③ 夏季のバイカル湖の重要な一次生産者であるピコシアノバクテリアの増殖に対する栄養塩制限について検討した。2010 年~2012 年の 3 年間に渡って合計 6 回の培養実験を行った。その結果、ピコシアノバクテリアの増殖速度は栄養塩によって制限されていないと考えられた。近年、バイカル湖に隣接する湖 (Lake Kotokel) では、Microcystis や Anabaena のブルームが発生するなど、富栄養化が懸念されている。しかし本研究結果からは、流入河川からバイカル湖への栄養塩負荷が増大したとしてもピコシアノバクテリアの増殖速度は促進されないと考えられた。

④ 多項目自動水質測定装置によるバイカル湖鉛直断面観測と、水温ロガーの長期繫留により、南湖盆では成層期に急な水温低下が繰り返り起こること、西岸での降温時に東岸では昇温することが分かった。この現象は、何らかの外力に起因する水温躍層上下振動を反映しているものと考えられた。

(3) 前述したように本研究は、2006 年度から 2009 年度の予定で計画された同一課題による前研究を研究計画最終年度前年度申請研究として引き継いだものである。このため、前研究で採取したエニセイ川 (研究水系フブスグルーバイカルーエニセイ流域の下流域に当たる) の試料の解析も引き続いて行った。

① エニセイ川における溶存有機物質の組成と化学特性の解析を前研究に引き続いて行った。永久凍土活性層を含む地域を通過すると河川水溶存有機物質濃度が劇的に上昇すること (北緯 65~67 度) が分かった。フーリエ変換イオンサイクロトロン質量分析法による組成分析から、凍土の融解に伴って付加される有機物は縮合リグニンやタンニン

などであると推測された。

② エニセイ川における原生生物の現存量と組成を調べた。調査した 10 数地点のいずれでも、小毛類繊毛虫の Strobilidium 属と Strombidium 属が優占した。特に、アンガラ川との合流点付近では、繊毛虫の現存量が高くなり、この地点での高い生物生産が窺えた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① M. Sugiyama, A. Dulmaa and V. V. Drucker: Report of the scientific field survey on Lake Hovsgol and its tributaries. Proceed. Mongolian Acad. Sci., **194**, 101-102 (2009).
- ② Y. Satoh, T. Satoh, Y. Tadaki, Y. Watanabe, H. Ueno, T. Katano, S. Nakano, K. Anbutsu, M. Kihira, O. Mitamura, V. Drucker, Y. Tanaka, T. Mimura and M. Sugiyama: Nutrient and Chl. *a* distributions in surface waters of Lake Baikal before and after the thermal stratification development. Bull. Yamagata Univ., Nat. Sci., **17**, 7-17 (2011).

[学会発表] (計 14 件)

- ① 杉山雅人: 懸濁態有機炭素・窒素の分析による水圏の生物地球化学的動態の解析 (招待講演). 第 76 回日本分析化学会有機微量分析研究懇談会, 大宮ソニックシティ, 2009 年 6 月 5 日.
- ② S. Nakano, T. Katano, O. Mitamura, Y. Sugiyama, Y. Satoh, T. Mimura, Y. Tanaka, Y. Watanabe, V. Drucker and M. Sugiyama: Microbial food webs in the near and off-shore areas in Lake Baikal. 第 19 回日本 BICER 協議会シンポジウム, 静岡商工会議所会館, 2009 年 6 月 20 日.
- ③ Y. Sugiyama, P. G. Hatcher, T. Suzuki, C. Wada, T. Kumagai, O. Mitamura, T. Katano, S. Nakano, Y. Tanaka, V. V. Drucker, V. A. Fialkov, M. Sugiyama: Riverine organic matter transport to the transition zone and deep water of Lake Baikal studied by 3D excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy and ultra high resolution Fourier transition ion cyclotron resonance mass spectrometry. International scientific Conference "Actual problems in the activity of academic natural-scientific museums", Irkutsk, Russia, 5 February, 2010.
- ④ 杉山雅人: 超長大水系フブスグルーバイカルーエニセイ流域での物質動態 (招待講

- 演) . 第 71 回分析化学討論会, 島根大学松江キャンパス, 2010 年 5 月 15 日.
- ⑤ 杉山雅人: 水中懸濁粒子中の多元素を同時に測る (招待講演). 日本分析化学会第 59 年会, 東北大学川内北キャンパス, 2010 年 9 月 16 日.
- ⑥ 村田貴拓, 劉福全, 佐藤泰哲, 三田村緒佐武, 中野伸一, 三村徹郎, 渡辺泰徳, A. Dulmaa, 杉山雅人: フブスグル湖における物質の化学動態. 日本陸水学会第 75 回大会, 弘前大学文京町キャンパス, 2010 年 9 月 18 日.
- ⑦ 村田貴拓, 三村徹郎, 渡辺泰徳, 佐藤泰哲, 三田村緒佐武, 中野伸一, A. Dulmaa, V. V. Drucker, 杉山雅人: フブスグルバイカル流域における物質の化学動態. 日本陸水学会近畿支部会第 22 回研究発表会, 瑞宝園, 2011 年 2 月 27 日.
- ⑧ 杉山裕子, P. Hatcher, R. Sleighter, 和田千弦, 鈴木智代, 熊谷哲, 三田村緒佐武, 片野俊也, 中野伸一, 渡辺泰徳, V. V. Drucker, V. A. Fialkov, 杉山雅人: バイカル湖における溶存有機物の遷移過程—質量分析と主成分分析による考察—. 日本陸水学会第 76 回大会, 島根大学松江キャンパス, 2012 年 9 月 25 日.
- ⑨ T. Katano, T. Mimura, H. Azumi, O. Mitamura, Y. Satoh, V. V. Drucker, V. A. Fialkov, T. Mimura, Y. Watanabe, M. Sugiyama: Effect of nutrient limitation on picocyanobacterial growth in Lake Baikal. 3rd Baikal Symposium on Microbiology, Irkutsk, Russia, 5 October, 2011.
- ⑩ M. Sugiyama, Y. Akagashi, T. Nakamura, T. Katano, Y. Tanaka, Y. Sato, Y. Watanabe, O. Mitamura, S. Nakano, T. Mimura, V. V. Drucker: Flux and chemical composition of settling particle in Lake Baikal. 3rd Baikal Symposium on Microbiology, Irkutsk, Russia, 5 October, 2011.
- ⑪ Y. Sugiyama, P. Hatcher, R. Sleighter, C. Wada, S. Hashida, T. Kumagai, S. Nakano, T. Mimura, Y. Watanabe, Y. Satoh, V. Drucker, V. Fialkov and M. Sugiyama: Dissolved organic matter dynamics in river Yenisei studied by ultrahigh resolution mass spectrometry. Association for the Science of Limnology and Oceanography, 15 June, 2012, Otsu.
- ⑫ V. V. Drucker, M. Sugiyama, N. V. Dutova, A. S. Gorshkova and Y. Watanabe: Bacteriophages as regulators of bacterioplankton abundance in biggest Khubsugul-Selenga-Baikal-Angara-Yenis

ei aquatic ecosystem. 日本陸水学会第 77 回大会, 名古屋大学全学教育棟, 2012 年 9 月 16 日.

- ⑬ 杉山裕子, Hatcher Patrick, Sleighter Rachel, 和田千弦, 橋田紳乃介, 熊谷哲, 中野伸一, 三村徹郎, 渡辺泰徳, 佐藤泰哲, V. Drucker, V. Fialkov, 杉山雅人: バイカル湖・エニセイ川流域における溶存有機物の遷移過程. 日本陸水学会第 77 回大会, 名古屋大学全学教育棟, 2012 年 9 月 16 日.
- ⑭ 細田耕, 望月陽人, 村田貴拓, V. V. Drucker, V. A. Fialkov, 杉山雅人: バイカル湖 - アンガラ川水系における溶存化学物質の濃度分布. 日本陸水学会近畿支部会第 24 回研究発表会, 滋賀大学教育学部, 2013 年 3 月 3 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山 雅人 (SUGIYAMA MASAHITO)
 京都大学・大学院人間・環境学研究所・教授
 研究者番号: 10179179

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

渡辺 泰徳 (WATANABE YASUNORI)
 立正大学・地球環境科学部・元教授
 研究者番号: 20112477

佐藤 泰哲 (SATO YASUHIRO)
 山形大学・理学部・名誉教授
 研究者番号: 60007177

三田村 緒佐武 (MITAMURA OSAMU)
 滋賀大学・教育学部・特任教授
 研究者番号: 50030458

三村 徹郎 (MIMURA TETSURO)
 神戸大学・理学部・教授
 研究者番号: 20174120

田中 祐志 (TANAKA YUJI)
 東京海洋大学・海洋学部・教授
 研究者番号: 90207150

中野 伸一 (NAKANO SHINICHI)
 京都大学・生態学研究センター・教授
 研究者番号: 50270723

杉山 裕子 (SUGIYAMA YUKO)
 兵庫県立大学・環境人間学部・准教授

研究者番号：40305694

片野 俊也 (KATANO TOSHIYA)
佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター・
准教授
研究者番号：00509820

(4) 研究協力者

千賀 有希子 (SENGA YUKIKO)
東邦大学・理学部・講師
研究者番号：30434210