

諏訪湖—天竜川流域における天然物質の循環過程の解析-2003

鈴木啓助・戸田任重・佐藤利幸・樋上照男・朴 虎東・村越直美
信州大学理学部

Cyclic Process of Natural Substances in the Drainage Basin of the Tenryu River

Keisuke SUZUKI, Hideshige TODA, Toshiyuki SATO, Teruo HINOUE, PARK Ho-Dong
and Naomi MURAKOSHI
Faculty of Sciences, Shinshu University

キーワード: 森林源流域、蒸発散、窒素安定同位体、シリカシンク、アオコ毒素

Key words: forested watershed, evapotranspiration, nitrogen stable isotope, silica sink, microcystin

1. はじめに

流域系における自然起源物質の入力は、水としての降水および自然起源化学物質の大気からの沈着である。これに、人為起源物質の大気からの沈着および農業などの人間活動によりもたらさる物質が負荷される。また、流域系における入力と出力の間では、水の流下の過程での岩石土壌とのイオン交換や土壤微生物による窒素化合物の変質、生物体の腐食などがある。本グループでは、これらの流域内での物質循環過程を、自然起源物質を主な研究対象として研究する。

2. 研究の進捗状況と研究成果

2-1. 天竜川流域内の森林源流域における流出高の日変動と蒸発散量の関係 (担当: 鈴木、倉元、久保池)

中央アルプス東側に位置する、天竜川の支流である森林源流域において、河川流量を精度良く観測するとともに、潜熱・顕熱輸送量算出に必要な気象要素の観測を行った。その結果次のことが明らかとなった。

研究対象期間の夜間には顕熱・潜熱輸送量はともにマイナスの値を示し、地表面が夜間に放射によって冷却されており、それを緩和するように顕熱・潜熱輸送により大気から地表面に熱が輸送されている。夜間の絶対値としては顕熱輸送量の方が潜熱輸送量よりも大きく、特に、日没前後に顕熱輸送量は大きなマイナスの値を示す。降雨日以外には潜熱輸送量の方が顕熱輸

送量よりも日最大値が大きくなっており、降雨日より晴天日に潜熱輸送量が大きくなり蒸発散が活発であることがわかる。

日蒸発散量と各気象要素との関係を検討すると、日最小湿度と日蒸発散量との間でのみ負の相関係数(-0.791)を示し、日最大風速、日最高気温、日積算日射量とはそれぞれ 0.595、0.437、0.877 と正の相関係数を示す。また、日蒸発散量を目的変数とする重回帰分析を行った結果、標準偏回帰係数の絶対値は日最小湿度について最大となり(-0.392)、日蒸発散量の変動を規定する要因として日最小湿度が重要であることがわかる。

無降水期間が比較的続いた時の流出高の日変化は、蒸発散量の日変化と鏡像関係にある。蒸発散量は昼間に日最大値を示すが、そのほぼ同じ時間に流出高は日最小値を示す。両者の日変動傾向から、流出高の日変化は流域からの蒸発散の影響によるものであることが強く示唆される。流出高の日較差と日蒸発散量との相関係数は 0.98 と極めて高く、日蒸発散量の多寡によって流出高の日較差の値が規定されていることを示す。このことから、無降雨時に観測される流出高の日変化は、流域内の地表面からの蒸発散の影響であることを強く裏付けるものである。

ここで報告したのは、夏から秋にかけての 70 日間についての観測結果であり、流出高と蒸発散量との関係を明らかにするためには、さらに長期にわたる観測が必要であり、また、植生の異なる流域での観測も必

要であろう。また、蒸発散量のピークと最小流出量の遅れ時間が、流域によって異なる機構については今後の課題である。

『関連業績』

Suzuki, K. (2003): Chemistry of stream water in a snowy temperate watershed. *Hydrological Processes*, 17, 2795-2810.

Suzuki, K. (2003): Chemical property of snow meltwater in a snowy temperate area. *Bulletin of Glaciological Research*, 20, 15-20.

Kameda, T., Fujii, Y., Suzuki, K., Hohno, M., Nakazawa, F., Uetake, J., Savatyugin, L. M., Arkhipov, S. M., Ponomarev, I. A. and Mikhailov, N. N. (2004): Stratigraphy and ice grains of a 25.3m ice core from Sofiyskiy Glacier, Russian Altai Mountains, in 2001. *Bulletin of Glaciological Research*, 21, 65-69.

Zhou, S., Narita, H., Suzuki, K. and Nakawo, M. (2004): An estimate of spatial ratios for preferential water flow in a melting snowpack. *Bulletin of Glaciological Research*, 21, 23-29.

鈴木啓助・久保池大輔・倉元隆之(2004)：森林源流域における流出高の日変動と蒸発散量の関係。日本水文科学会誌（印刷中）

鈴木啓助(2004)：渓流水の酸性化をもたらす融雪水。地球環境（印刷中）

2-2. 諏訪湖への流入負荷解析-宮川における 2002 年と 2003 年の観測結果（担当：戸田・石坂・若月）

諏訪湖への主要な流入 4 河川の中では、栄養塩濃度の最も高い宮川において、2002 年はほぼ週 1 回、2003 年は毎日（降水時は 8 時間間隔）の高頻度の水質観測を実施した。

全窒素、全リン濃度ともに、2002 年に比べると 2003 年が全体的に高かった。2002 年の定期観測時の宮川の全窒素濃度は平均 2.50（標準偏差：±0.82）mgN/L、2003 年の日平均に基づく全窒素平均濃度は、3.89（±1.24）mgN/L であった。全リン濃度は、2002 年が平均 0.072（±0.114）mgP/L、2003 年が平均 0.118（±0.069）mgP/L であった。

全窒素、全リン濃度ともに、河川流量の増大に伴い増加するが、相関係数は低かった（全窒素で $r^2=0.109$ 、全リンで $r^2=0.139$ ）。窒素、リンともに、溶存態成分には大きな変化はみられず、増水時の濃度増加は、主

に懸濁態成分によるものであった。2003 年の毎日観測の結果に基づいて算出した流下量は、窒素で 939tonN/yr、リンで 27tonP/yr に達した。この量はこれまでの報告値に比べ、2~4 倍多い。2003 年は、降水日、年間降水量ともに、最近 10 年間では 2 番目に多く、河川流量の増大にともない、窒素、リン流下量が増加したものと思われる。

農耕地のような非特定汚染源の場合には、栄養塩負荷のかなりの部分が降水にともなう増水時に発生しており、諏訪湖への栄養塩負荷削減には、農耕地からの土壌流出防止などの対策が重要であることが示された。

『関連業績』

戸田任重(2003)付着藻類の窒素安定同位体比から河川の汚染源を探る。水, 45: 24-29.

井上芳樹・戸田任重(2003) 諏訪湖、天竜川上流における漂着ゴミ、環境科学会誌 16(3): 167-178.

戸田任重(2003) 14 章山と人と川をつなぐ-窒素循環-、pp. 191-200、信州大学山岳科学総合研究所編、山と里を活かす（自然と人の共存戦略）、信濃毎日新聞社、長野。

2-3. 天竜川流域（標高 1000m以下）におけるシダ植物の出現頻度と多様性（担当：佐藤）

天竜川流域における標高 1000m以下の地域のうち約 400 地点のシダ植物の種組成を調査した。諏訪湖周辺から天竜村までの 5 地域（各 16 地点）のシダ植物相を比較した。地域ごとの対象範囲は約 10 km × 10 kmとなる。1 地点は 100m × 100mでより高い種密度のえられた地点を選択した。北から地域ごとに種数/頻度は 31/117・35/147・49/158・43/147・49/147 となり南ほど種多様度が高い。木曾谷ほどではないが、千曲川水系よりも平均種数・積算種数とも高い。地点間の違い（ベータ多様度）は千曲川水系が高い可能性がある。

『関連業績』

第3回：草本植物の広がり多様性 単著 2003（平15）エル・ネット・オープンカレッジ「ところかわれば生活かわる一環境で違う植物のくらしー（全3回：島野編）」高等教育情報化推進協議会編 pp.1-8.

中国雲南省の局所植物種密度の解析 共著 2003（平15）立教大学理学研究科学術フロンティア「環境

- 変動に対する生命の適応戦略」2002 年度（第 2 年度）報告書 pp.133-140. 佐藤利幸・中西由佳
- 雲南省山岳におけるシダ植物葉の解析—細胞のサイズについて— 共著 2003（平 15）立教大学理学研究科学術フロンテア「環境変動に対する生命の適応戦略」2002 年度（第 2 年度）報告書 pp.141-150. 中西由佳・佐藤利幸
- 諏訪湖—天竜川流域における天然物質の循環過程の解析 共著 2003（平 15）信州大学環境科学年報, Vol.25 pp. 143-146. 鈴木啓助・戸田任重・佐藤利幸・樋上照男・朴 虎東・村越直美
- スケーリングから見る自然～身の回りの美しい自然と健康～単著 2003（平 15）生命系環境にあわせた健康—講演要旨と受講生メッセージ（公開講座）pp.4-5.
- 生命系のための雪氷環境、耐寒性（Frost resistance）の再考—耐寒性・耐凍性より防凍性？いや傍凍性（傍寒性）！単著 2003（平 15）北方山草 No.20 pp.47-54.
- カラマツ 単著 2003（平 15）プラント No.90 pp.21-27.
- 山岳地域植物研究グループ：山岳植生・植相と植物生態特性 共著 2003（平 15）山岳科学総合研究所年報 No.1 pp. 佐藤利幸・島野光司
- 長野県中央山地におけるシダ植物種密度の標高別分布 共著 2003（平 15）山岳科学総合研究所年報 No.1 pp.102-104. 佐藤利幸・島野光司・中西由佳・福原 隆・増沢武弘
- 浅間温泉山火事跡地における植生の回復 共著 2003（平 15）山岳科学総合研究所年報 No.1 pp.104-105. 島野光司・高橋耕一・藤田淳一・松田行雄・佐藤利幸
- 信州中央部の標高に応じたオシダ属の種・個体・葉脈・細胞密度の分布—生物レベル（種・個体・細胞配列）を紡ぐスケーリング解析 共著 2003（平 15）信州大学環境科学年報 Vol.25 pp.97-105. 中西由佳・増沢武弘・福原 隆・佐藤利幸
- 緑の歩道「ささやきの理路」をめざす局所植物多様性の創出—六角柱穴あき敷石の開発—（実験計画報告）共著 2003（平 15）信州大学環境科学年報 Vol.25 pp.107-111. 佐藤利幸・益永淳二・高橋昌治・常盤哲洋・清澤 浄
- ロシア北東域における異なる植生型から得られた表層花粉群—古植生復元の基礎資料として— 共著 2003（平 15）第四紀研究 Vol.42（6）pp.413-425. 五十嵐八枝子・岩花 剛・仙頭宣幸・露崎史郎・佐藤利幸
- 「山岳・里山が創出維持する局所の植物多様性」共著分担 2003（平 15）山に学ぶ山と生きる 信濃毎日新聞社（山岳科学叢書 1）信州大学山岳科学総合研究所 編 pp.125-137.
- 項目：「寄生植物・耐寒性・着生植物」共著分担 2003（平 15）生態学辞典：共立出版（岩佐・松本・菊沢 編）pp.104-105.378-379.396.
- 「シダの葉形を測る」共著分担 2003（平 16）形の科学辞典：朝倉書店（印刷中）pp.（2003：印刷中）
- 2-4. 陸水域のシリカシンクに関する研究（担当：樋上）**
- 1) 2002 年 8 月～2004 年 2 月まで月 1 回の割で、信濃川の千曲川と犀川のそれぞれ 3 カ所、計 6 カ所において定期的に採水し、ケイ酸およびリン酸の定量を行った。ケイ酸濃度は犀川（平均約 250 μ M）と千曲川（400 μ M）で大きな違いがあるが、総量としては同程度であることを（Si として千曲川から 2.34×10^4 ty、犀川から 2.57×10^4 ty）流量のデータをもとに推定した。犀川流域に点在するダムがシリカシンクとして作用しているかどうかを、犀川上流域の水質調査を行うことによって、引き続き検討する。
- 2) アンモニウムイオン (NH_4^+)、ナトリウムイオン (Na^+)、カリウムイオン (K^+)、マグネシウムイオン (Mg^{2+})、カルシウムイオン (Ca^{2+}) の陽イオン、塩化物イオン (Cl^-)、硝酸イオン (NO_3^-)、硫酸イオン (SO_4^{2-}) の陰イオンについても引き続き調査続行中である。
- 3) DeMaster 法を基礎とした鉱物起源のシリカおよび生物起源のシリカの分別的定量法を開発し、定量するとともに X 線回折法及び NMR 法により生物起源シリカの同定を行っている。
- 2-5. 移流拡散モデルを用いた天竜川の藍藻 *Microcystis* の動態解析（担当：朴、片上）**
- 富栄養湖である諏訪湖では例年夏季に有毒藍藻 *Microcystis* のブルームが発生する。諏訪湖からの流出河川である天竜川において、7 月から 10 月の河川水中の *Microcystis* 細胞濃度を調査したところ、諏訪湖から 32km 下流まで *Microcystis* 細胞が観察された。7

月から9月中旬には *Microcystis* の細胞濃度は16.5km 下流する間に13%、32km 下流では8%まで減少した。9月下旬から10月には流下に伴う *Microcystis* 細胞濃度の減少は緩やかになり、32km 下流においても63%の *Microcystis* 細胞が残存していた。移流拡散モデルを適用し天竜川における *Microcystis* の動態を解析した結果、*Microcystis* の細胞濃度は河川の流量変化に最も大きく依存した。また *Microcystis* 細胞およびコロニーの沈降と河床の濾過作用によっても河川水中の *Microcystis* 細胞濃度が減少することが示唆された。これは水生昆虫により *Microcystis* が摂食される可能性を示す。従って天竜川において藍藻毒が生態系上位の生物に移行する可能性がある。

本研究の結果は生態学的にも重大な意義を持つ。天竜川上流域には早瀬が点在し、ここには多数の水生昆虫が棲息していることが知られている。中でも礫に捕獲網を張って流下する藻類を摂食する造網性トビケラの個体数が非常に多く、諏訪湖から流下してくる *Microcystis* も摂食している。天竜川上流域では古来よりこれらのトビケラ幼虫を佃煮にして珍味として食す習慣があり、このトビケラ幼虫およびそれらを餌とする魚類を介してヒトがマイクロシスチンを経口摂取する可能性がある。"アオコモデル ver. 1. 2"において粒子の沈降量として示された *Microcystis* の減少は特にトビケラ幼虫の個体数が多いとされる天竜川上流部（釜口水門から約16km 下流までの区間）で顕著に見られ、トビケラ幼虫を含め水生動物へのマイクロシスチンの影響やさらにそれらを餌とする上位の生物に移行する可能性も示唆しており注目に値する。また、天竜川のもう一つの特徴として、西天竜用水路が農業灌漑用水として周辺の水田に給水しており、供給される水中には高濃度の *Microcystis* が含まれることが挙げられる。しかし現段階では西天竜用水路に分岐された分流中の *Microcystis* の動態および作物に与える影響は不明であり詳細な研究が必要である。

天竜川は富栄養湖を水源とする山岳河川であり、上流域にダム湖を持つ他の河川においても同様の状況が考えられる。"アオコモデル"はこのようなケースにおける下流域への影響予測に応用が可能である。水源地あるいは河川上流部の富栄養化水域を対象とするリスクアセスメントの有効手段としても活用を広げられるであろう。

【関連業績】

Maruyama Tomoko, Park Ho-Dong, Atsushi Yokoyama, Toshiyuki Tanaka and Kenji Kato (2003): Population dynamics of bacteria degrading in a colony of *Microcystis*. FEMS Microbiology Ecology 46:279-288.

Katagami Yukimi, Keisuke Nakayama, Ho-sub Kim, Sayoko Yonedzuka and Park Ho-Dong (2003) Analysis of the dynamics of the cyanobacterium *Microcystis* using an advection-diffusion model in Tenryu River, Japan. Japanese Journal of Limnology 64:121-131.

Takeshi Saito, Kunihiro Okano, Ho-Dong Park, Tomoaki Itayama, Yuhei Inamori, Brett A Neilan, Brendan P. Burns, Norio Sugiura(2003): Detection and sequencing of the microcystin LR-degrading gene, *mlrA*, from new bacteria isolated from Japanese lakes. FEMS microbiology Letter 229 : 271-276.

Ozawa Kazuhiko, Atsushi Yokoyama, Kanako Ishikawa, Michio Kumagai, Mariyo F. Watanabe and Park Ho-Dong (2003): Accumulation and depuration of microcystin produced by cyanobacteria *Microcystis* in freshwater snail. Limnology 4:131-138.

2-6-1. 碎屑物移動に対するバイオコントロール (担当: 村越)

中部山岳地域は山から供給される土砂量が群を抜いて多く、ダムへの堆砂が問題となっている。三峰川では1989年から三峰川総合開発事業が進められ、美和ダム再開発事業では恒久堆砂対策として洪水バイパス(延長約4.3km、流過能力300m³/s)を建設して、2005年から、流下してくる浮遊土砂を洪水とともに美和ダム湖を迂回して下流に放流する予定である。このとき予想される高濃度の濁水流下にもなると、三峰川下流さらに三峰川が流入している天竜川の河床堆積環境および生態系が影響を受ける。

河床礫に付着成長している藻類の存在が河床付近の微少地形や流速を変化させ、浮遊土砂の堆積プロセスに影響を与え、堆積量を増大させる。三峰川の現地調査では、浮遊土砂の堆積量に関して、深度平均流速が20cm/sec 以下では深度平均流速にほぼ比例し、深度平均流速がそれより速いときには流速よりも有機物量すなわち付着藻類量との相関が高かった。

明・暗条件を設定した一定期間の現地実験では、深度平均流速 20cm/sec 以上の地点で、明条件すなわち

付着藻類の存在下で、浮遊土砂堆積量の増加（約2倍）と堆積した土砂の平均粒径とモード径の粗粒化が起こった。

実験水路を使用して、異なる流速条件下で陶土粉を浮遊させた濁水を流し、浮遊土砂の堆積プロセスに与える付着藻類の影響を定量的に調べた。水路河床表面近傍の流速が5cm/secでは付着藻類の有無によって浮遊土砂からの堆積量に違いはほとんど無かったが、流速が上がるとともに付着藻類がある場合に堆積量が増大し、流速が15cm/secでは約13倍にも達した。また、このとき堆積した土砂の粒度組成は流速が速い条件下のものほど著しく粗粒化した。

この粗粒化の原因は付着藻類が河床につくるバイオマットの構造にあるだろう。付着藻類の断面構造の顕微鏡観察方法を開発し、マット内の空隙の空間分布を調べた。その結果、付着藻類がある場合の堆積物の粗粒化におもに寄与しているのは、マット内の隙間の大きさよりわずかに大きいサイズの粒子群だった。したがって藻類マットの網目を抜けられない粒子がマット内にトラップされ、浮遊土砂からの堆積量を増加させたと考えられる。

2-6-2. 遠州灘海岸前浜砂の粒度変化（担当：村越）

遠州灘の海浜砂の現状を把握するため、海岸に沿って前浜を構成する砂を採集した。前浜は常に波に洗われている地形面で、沿岸漂砂の状況をよく反映する場所の一つである。一般に一つの沿岸漂砂系の中では、砂の供給源すなわち河口から離れるほど粒径が細くなる。遠州灘では天竜川河口から離れるほど全体に平均粒径が小さくなる傾向と、伊良湖や御前崎などの岬部では後背地の影響を強く受け平均粒径が特に粗くなる傾向とが重なり合っている。河川によって海岸に運ばれた砂は沿岸の波や流れによって沿岸漂砂として移動・堆積する。河川に造られたダムなどの人工物によって陸から海への碎屑物供給が阻害され、海岸侵食の主な原因と考えられている。岬部での粗粒化は漂砂の減少を反映しているかもしれない。

【関連業績】

村越直美（2003）女鳥羽川がつくる地形と堆積環境。

平成15年度女鳥羽川遺跡発掘調査報告書、松本市教育委員会（印刷中）

村越直美（2003）市街地河川に見られる河床地形変動—女鳥羽川の例。信州大学山岳科学総合研究所

年報、1, 94-95

村越直美・川野幸朗（2003）泥質堆積物のコルターカウンタによる粒度分析とその応用。汽水・沿岸堆積物における堆積性有機物を用いた海水準変動と気候変動指標の確立。平成13年度—平成14年度科学研究費補助金（基盤研究B(2)）研究成果報告書（課題番号13440146）, 228-240

村越直美（2003）基礎理学教科書「地球の科学」5章-4 侵食と運搬・堆積

村越直美・2000年度地球システム解析学実習履修生（2003）女鳥羽川の河床地形改変にともなった急激な測方侵食と土砂収支。環境科学年報-信州大学, 25, 5-11

鈴木啓助・戸田任重・佐藤利幸・樋上照男・朴虎東・村越直美（2003）諏訪湖—天竜川流域における天然物質の循環過程の解析。科研費補助金「諏訪湖・天竜川水系の物質循環、水循環とマネーフローからの研究」中間報告、環境科学年報-信州大学, 25, 143-146

公文富士夫・福島和夫・朴虎東・村越直美（2003）山岳地域の湖沼堆積物から読みとる環境変遷。堆積物・堆積環境研究グループ、信州大学山岳科学総合研究所年報、1, p. 87