

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：64303

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24370010

研究課題名(和文) 流域動脈説に基づく河川生態系の生物多様性とリン代謝機能の関係解明

研究課題名(英文) Biodiversity and phosphorous metabolism in watershed ecosystems: a blood vessel hypothesis

研究代表者

奥田 昇 (OKUDA, Noboru)

総合地球環境学研究所・研究部・准教授

研究者番号：30380281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、琵琶湖・野洲川および安曇川流域を対象として、人間活動が河川生態系の栄養バランスに及ぼす影響、および、栄養バランスの攪乱が生物多様性の空間パターンに及ぼす影響を明らかにした。また、河川生態系の栄養循環、特に、リンの循環パターンを評価する様々な手法(リン酸-酸素安定同位体分析、栄養螺旋長に関する水文学的モデリング、懸濁態リン形態種逐次抽出分析)を駆使することにより、生物多様性と栄養循環機能の関係解明に資する生態学的知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：We examined how human activities disturb nutrient balances and how the resultant nutrient imbalances affect biodiversity and its ecosystem functioning in the Yasu and Ado River Watersheds. We got some ecological knowledge on relationships between fluvial biodiversity and its nutrient cycling functions, using a variety of methods, such as phosphate oxygen isotope analysis, hydrological modeling on nutrient spiral metrics and particulate phosphate speciation analysis with sequential extraction, to study phosphorus cycling in the river ecosystems.

研究分野：水域生態系を対象とした生物多様性と生態系機能の関係解明に関する研究

 キーワード：リン循環 リン酸-酸素安定同位体分析 リン形態種別分析 栄養螺旋長 種数-面積関係 メソコスム  
 実験 生態系エンジニア 生物多様性-生態系機能関係

### 1. 研究開始当初の背景

流域生態系は、近年の人間活動の影響で最も生息地の劣化・消失が著しい生態系の1つと位置づけられる。生物多様性の減少が危惧されるにもかかわらず陸水生物の保全施策が進まない背景には、生物多様性をもたらす生態系サービスが過小評価されてきたこと、さらには、生物多様性と生態系機能の関係を解明する生態学的研究が圧倒的に不足していることが挙げられる。

本研究は、流域の生物多様性によってもたらされる生態系機能としてリン代謝に着目した。リンは生命の根源物質として、様々な生体化学反応に参与する必須生元素である。リンは、その希少性ゆえ、しばしば生態系プロセスの律速因子となる。その反面、農地や宅地造成などの土地利用変化によって、集水域のリン負荷量が増大すると、富栄養化など深刻な環境問題が発生する。このように、リンは、その過不及によって、我々の生存基盤となる流域生態系の物質循環プロセスを左右する。

これまで、流域生態系の物質循環研究は、炭素・窒素安定同位体比を天然トレーサーとして用いる安定同位体分析手法の開発・普及とともに発展してきた。他方、安定同位体の存在しないリンは、原単位法に基づく工学的モデルでしか、その循環パターンを捉えることができなかった。

ここに、我々は、流域生態系のリン循環パターンを解明する手法の開発を試みる。流域生態系の生物多様性低下をもたらす人為駆動因を特定するとともに、生物多様性によってもたらされる流域生態系のリン代謝機能を評価するアイデアを着想するに至った。

### 2. 研究の目的

本研究は、「流域動脈説」に基づいて、流域に張り巡らされる複雑な水系網を生物の血管になぞらえ、河川境界面を介して陸域と水域で交換される栄養物質の流れを生物地球化学的手法により定量的に把握し、流体中の物質変換・交換に関わる運搬因子、いわば、血液中の血球成分として作用する生物の役割を生態学的に評価することを目的とする。

特に、流域生態系の物質循環を駆動する生物プロセスに未解明な点が多いリンの挙動に着目し、河川生態系のリン代謝機能を評価する新しい手法の開発・導入を目指す。また、土地利用変化による河川の物理・化学的攪乱が生物多様性に及ぼす影響を評価することによって、生物多様性と栄養循環機能の関係を因果論的に解明することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、琵琶湖流域の最大流入河川である野洲川、および、集水域面積第三位の安曇川を調査対象とした(図1)。人口規模が大きい野洲川は、下流域に宅地、中流域に農地、上流域に森林が広がり、環境攪乱の空間異質性

に富む。他方、安曇川は集水域の森林被覆率が90%以上を占め、人為攪乱の少ない対照区と位置付けられる。

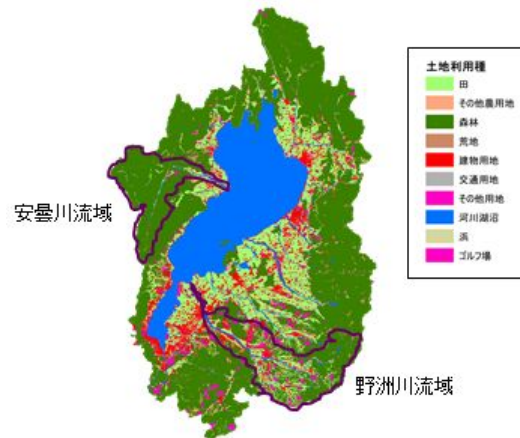


図1 調査地の野洲川と安曇川

#### (1) 生物多様性の空間統計解析

種数-面積曲線(式1)を用いて底生動物の多様性の空間パターンを記述するモデルの構築を試みた。

$$S = c \cdot A^z \quad (\text{式1})$$

ここで、S: 種多様性、A: 集水域面積、z: 種数増加率、c: 定数。c は 多様性の平均値、z は 多様性、 $S(A_{max})$  は 多様性を表す。環境攪乱の大きな流域ほど、z が低い値を示す(多様性の地点間変異が小さい)と予測される。

また、多様性の低下をもたらす直接要因および人為駆動因を統計的に探索した。

#### (2) 栄養塩輸送モデリング

野洲川流域 76 地点および安曇川流域 57 地点において、全リン・全窒素濃度、流量、水深、川幅、流速、水温、日平均光合成有効放射を計測し、高度、河川次数、各種土地利用データとともに、SPARROW の物質輸送モデルを改良した空間参照型回帰モデルに組み込むことによって、流域全体のリン・窒素原子のスパイラルメトリクス( $U$ : 取込み速度、 $v_r$ : 鉛直移動速度、 $S_{p,r}$ : 平均流下距離)を推定した。

さらに、生物多様性が河川生態系のリン代謝機能に及ぼす影響を評価するために、リンの取込み速度または螺旋長を目的変数、底生動物群集や藻類群集データを説明変数とした回帰分析を行った。

#### (3) リン酸-酸素安定同位体分析

野洲川において、土地利用(森林・農地・宅地)、および、河川次数を考慮しながら、集水域全体をカバーするように、37 地点から河川水を採水した。

さらに、流域に負荷される潜在的な人為・自然由来リン源の安定同位体情報の特徴づけるため、生活系負荷源(農業集落排水処理施設排水、市販の歯磨き粉、家庭用洗剤)

農業系負荷源（化学肥料用リン酸水溶液原液、畜産排水）、自然系負荷源（河床母岩の酸および超純水抽出物）の試料を採取した。

これらは、McLaughlin et al. (2004)に従って、マグネシウム誘導共沈法により溶存無機リン酸を濃縮・精製し、リン酸銀に変換した後、熱分解型元素分析装置付き安定同位体比質量分析計を用いてリン酸-酸素安定同位体分析を行った。

この分析結果を考慮の上、安曇川において、一次または二次河川の5地点から採集された河川水試料の処理方法に改良を施した。McLaughlin et al. (2004)による従来法で問題となっていた不完全な共沈反応と溶存有機物の混入を回避するために、Re-MagICプロセスと固相抽出用カートリッジ（OASIS、Waters）を導入し、リン酸銀調整試料の酸素安定同位体分析を実施した。

#### （4）懸濁態リン形態種別分析

降雨時の河川から流出する懸濁態リンに着目し、懸濁物から溶脱するリンの生物による利用しやすさを定量的に評価することを目的として、逐次抽出法を用いたリン形態種別分析を行った。懸濁態リンを塩化アンモニウム、炭酸ジチオン、水酸化ナトリウム、塩酸、過硫酸カリウムで逐次処理（最初の処理から順次、生物によって利用しやすいリンが溶脱）し、各画分の溶存態リン濃度を測定した。

野洲川において、農地の優占する下流河川の灌漑期、および、下流河川と上流森林河川の非灌漑期のそれぞれ降雨時に採水し、懸濁態リンの形態種別分析を実施した。

#### （5）メソコスム実験

河川のキーストン種の生態系エンジニア効果の地理的変異を検証するために野外調査とメソコスム実験を実施した。

造網性のヒゲナガカワトビケラを国内8河川で採集し、各地点の河床礫サイズと営巣行動形質を比較した。また、屋内に人工水路を作成し、各河川で採集されたヒゲナガカワトビケラを導入・営巣させ、河床の物理的安定性に及ぼす影響を水路流量操作実験により評価した。

### 4. 研究成果

#### （1）生物多様性の空間統計解析

底生動物の総出現種数は、野洲川で163種、安曇川で156種となった。集水域面積当たりの種多様性は両河川でほぼ等しいが、種数-面積曲線の傾き  $z$ （多様性）は野洲川で有意に低い値を示した（図2）。

野洲川において、Shannon-Wienerの多様度指数で表される局所多様性（多様性）に影響する直接的な環境要因を検討したところ、全リン・全窒素濃度と強い負の相関を示した。また、これらの栄養塩濃度は集水域の人口密度や農地被覆率によって説明できた。

本研究は、種数-面積曲線を用いることに

よって、土地利用改変に伴う栄養塩負荷が流域スケールで生物多様性の空間パターンに影響することを明らかにした。この種数-面積曲線からの負の偏差を引き起す集水域（図2の回帰曲線より下方のプロット）には、生物多様性を減少させる攪乱が作用していると考えられる。集水域スケールで生物多様性を減少させる人為駆動因を特定するために、今後、メタ群集理論を組み込んだモデルの構築が必要とされる。

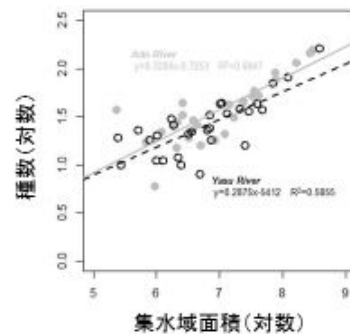


図2 野洲川(破線)と安曇川(実線)の底生動物の種数-面積曲線

#### （2）栄養塩輸送モデリング

野洲川のリン・窒素の取り込み速度  $U$  は、森林河川で低く、農地・市街地河川で高かった。また、栄養塩除去効率の指標となる  $v_f$  も農地・宅地河川で高い値を示した。一方、栄養螺旋長（リンまたは窒素1分子が代謝回転するのに要する流下距離）の指標となる  $S_w$  は下流河川ほど長くなり、河川本流の下流域に負荷されたリン・窒素の多くは河川生物に取り込まれることなく琵琶湖に流入することが明らかとなった（図3）。他方、流域末端の小河川では、栄養螺旋長が相対的に短く、生物によるリン・窒素代謝活性が高いことが示唆された。

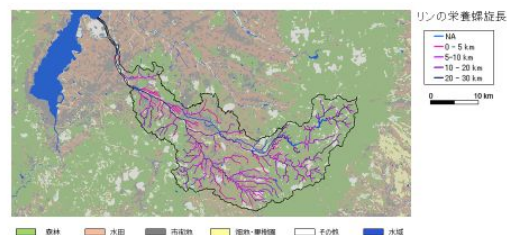
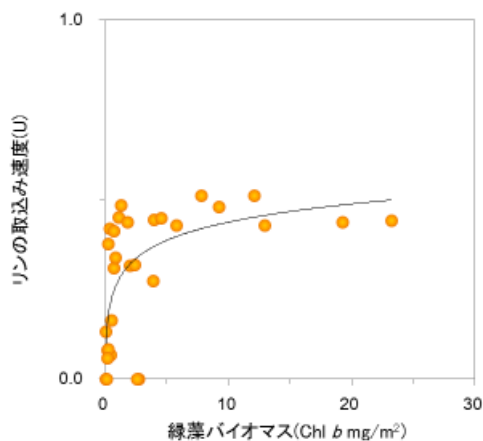


図3 野洲川流域におけるリンの栄養螺旋長マップ

リンの取込み速度は河床礫に付着した緑藻のバイオマスと高い相関を示し（図4）、リン代謝が河床微生物によって駆動されていることが実証された。緑藻のバイオマスは、河川水のN/P比にリニアに反応することから、土地利用改変による栄養バランスの攪乱が藻類群集組成やバイオマスを変化させることによって、栄養循環機能に影響することが示唆された。また、緑藻のバイオマスは底生

動物のバイオマスを増加させるボトムアップ効果を示し、結果として、底生動物のバイオマスはリンの栄養螺旋長の代替指標として利用できることが明らかとなった。

図 4 野洲川における緑藻バイオマス（緑



藻特異的な Chl a 濃度で評価) とリンの取込み速度の関係

他方、安曇川では、リンの栄養螺旋長に関して、野洲川と同様の空間パターンを示したものの、先行研究に較べてかなり高い推定値を示し、シミュレーションの収束条件も極めて限定的であった。窒素の栄養螺旋長に関して、シミュレーションは全く収束しなかった。安曇川でパラメータ推定がうまくいかなかった原因について、今後、さらなる検討が必要である。

### (3) リン酸-酸素安定同位体分析

野洲川流域で採集された 37 の河川水調整試料の内、24 試料で夾雑物の混入が認められた。これらの夾雑物混入は農地・宅地河川で顕著であった。また、潜在的リン負荷源の内、畜産排水、農業集落排水処理施設排水、家庭用洗剤でも夾雑物の混入が観察された。これらの試料に溶存態有機物が多く含まれること、および、これらの分析値の酸素含量がリン酸銀標準試料に基づく検量線より上方に位置することを考慮すると、これらの夾雑物は溶存態有機物に由来する酸素と推測される。リン酸銀試料作製の従来法で推奨されていた樹脂カラム (DAX-8、Supelite) によるバッチ処理では溶存態有機物の除去が不十分であったことが原因と考えられる。実際、安曇川流域での調査において有機物除去に固相抽出用カートリッジ (OASIS、Waters) を用いたところ、夾雑物混入は解消された。河川水質にも依存するが、琵琶湖水系では、改良法の適用が推奨される。

また、野洲川および安曇川の河川水試料からリン酸を濃縮・精製する過程でマグネシウム誘導共沈反応がうまくいかない事例がしばしば観察された。おそらく、淡水中に含まれる何らかのイオンが干渉作用を引き起こしているものと推察される。改良法で導入し

た Re-MagIC プロセスは、リン酸銀試料作製に至る工程で無機リン酸の回収が不完全であった場合に共沈条件を再検討するのに重要なプロセスであり、特に、イオン組成・濃度の異なる河川水でリン酸-酸素安定同位体分析を実施する場合に適用が推奨される。

以上の技術的問題点を考慮の上、分析値の入念な検討をおこなった後に採択された野洲川 13 地点のデータを図 5 に示す。

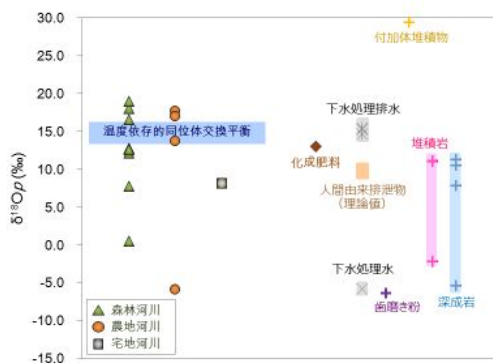


図 5 野洲川流域における河川水および潜在的リン負荷源のリン酸-酸素安定同位体比。河川水データ上の青色の網掛けは、河川水に含まれる全てのリン酸が生物によって代謝回転された場合の理論値を示す。

データ数が少なく断定することはできないが、宅地河川は人間由来排泄物、農地河川は化成肥料由来のリン酸を色濃く反映することが示唆された。一方、人為攪乱の影響が小さい上流域森林河川では、生物による再循環から期待される理論値 (図中の青色の網掛け) に収束することなく、-5.8‰から 19.0‰まで地点間で大きな同位体比の変異を示した (図 5)。野洲川流域の地質分布がモザイク性を示し、母岩のリン酸-酸素安定同位体比に顕著な変異が認められることから、森林河川に含まれる溶存態無機リン酸は母岩から溶脱した自然系負荷源の同位体情報を強く反映すると示唆された。

対照的に、安曇川の小規模河川で採集された溶存態無機リン酸の酸素安定同位体比は 18‰前後の値を示し、地点間変異は軽微であった (SD=±2.1‰)。安曇川流域の事例は予備研究の域を脱しないが、本流域の地質分布が比較的均一で人為攪乱が小さいことを考慮すると、安曇川河川水のリン酸-酸素安定同位体比は自然負荷源のバックグラウンド情報を反映すると示唆される。

本研究により、従来法の技術的課題となっていた夾雑物混入を解消する改良法が確立され、信頼性の高い分析値を得ることができた。リン循環研究の標準的手法として、今後の普及・発展が期待される。

### (4) 懸濁態リン形態種別分析

灌漑期の降雨時に下流河川に流出した懸濁態リンは、生物が利用可能な塩化アンモニウ

ム抽出リンが約 10%、次に利用しやすい炭酸ジチオン抽出リンが 20%を占めた(図 6)。非灌漑期に下流河川から流出する懸濁態リンに塩化アンモニウム抽出リンはほとんど含まれなかったが、炭酸ジチオン抽出リンは約 30%含まれた。他方、森林から流出する懸濁態リンに塩化アンモニウム抽出リンはほとんど含まれず、炭酸ジチオン抽出リンも約 10%と少なかった。生物に利用可能な懸濁態リンは、農地の優占する下流河川において灌漑期の降雨時に流出しやすいと結論された。

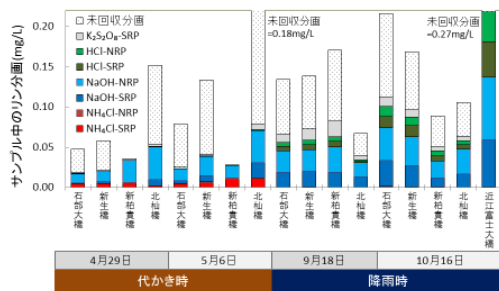


図 6 逐次抽出法による野洲川河川水中の懸濁態リン形態種別濃度の地点間および季節間変異

河川から湖沼や海洋に負荷されるリンの多くは、降雨時に流出する懸濁態リンであることが知られている。これらのリンの輸送過程、あるいは、湖底・海底沈降後の生物利用可能性については不明な点が多い。本研究は、農地から流出する懸濁態リンの生物利用可能性が地質由来の鉱物性リンと質的に異なり、湖沼・海洋生態系でのリン循環に影響を及ぼす可能性を示唆した。

#### (5) メソコスム実験

造網性ヒゲナガカワトビケラによる栄養行動の地理的変異を調べたところ、網の強度が地域間で異なっており、生息河川の流量変動が大きい集団ほど、太く強い糸で網を張ることが明らかとなった。実験水路にトビケラを導入・営巣させ、出水による物理かく乱を再現する実験を行ったところ、強い網を張る集団を導入した水路ほど、河床礫が安定化するという結果が得られた(図 7)。河床安定化は、底生動物群集構造や物質循環機能に影響すると示唆される。

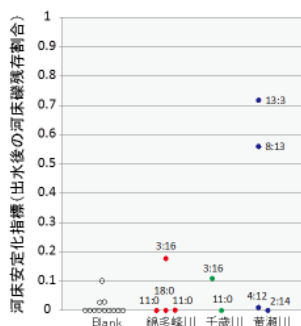


図 7 異なる河川集団の個体が営巣後の水路

#### 河床礫の安定性

#### 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 16 件)

奥田 昇、安定同位体を用いた水田生態系の構造と機能の評価手法、日本生態学会誌、査読有、vol.62、2012、pp.207-215

福森 香代子、奥田 昇、生物代謝のスケールアップ：個体から生態系へ、日本生態学会誌、査読有、vol.63、2013、pp.113-123

Sakai Y., Z. Karube, T. Takeyama, A. Kohzu, C. Yoshimizu, T. Nagata, I. Tayasu, N. Okuda, Seasonal and site-specific variability in terrigenous particulate organic carbon concentration in near-shore waters of Lake Biwa, Japan, Limnology, vol.14, 2013, pp.167-177, DOI 10.1007/s10201-012-0394-4

奥田 昇、リン酸 酸素安定同位体分析が拓くリン循環研究の黎明、地球環境、査読有、vol.20、2015、印刷中

(学会発表)(計 58 件)

Murakami, A., N. Okuda, T. Iwata, R. Williams, S. Nakano, Different land use patterns affect responses of river epilithic biofilms: A case study in Yasu River watershed, Shiga, Japan, 13<sup>th</sup> Symposium on Aquatic Microbial Ecology, September 2013, Stresa (Italy)

岡野 淳一、奥田 昇、生態系エンジニアの地域変異による環境改変効果の差異、第 61 回日本生態学会、2014 年 3 月、広島大学(広島市)

奥田 昇、生物多様性が駆動する栄養循環と流域圏社会 - 生態システムの健全性、第 11 回リン資源リサイクルシンポジウム、2014 年 7 月 24 日、インテックス大阪(大阪市)

奥田 昇、Abigail P. Cid、陀安 一郎、井手 淳一郎、リン酸 酸素安定同位体分析が拓くリン循環研究の黎明、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015 年 5 月 24 日、幕張メッセ(千葉市)

千代 真照、尾坂 兼一、永淵 修、奥田 昇、野洲川における降雨時の生物利用可能懸

濁態リンの流出量の測定、日本地球惑星科学連合2015年大会、2015年5月27日、幕張メッセ(千葉市)

〔図書〕(計5件)

Okuda, N., K. Watanabe, K. Fukumori, S. Nakano, T. Nakazawa, Biodiversity in aquatic systems and environments: Lake Biwa, Springer Japan, 2013, 91, ISBN 978-4-431-54150-9

仲澤 剛史、奥田 昇、生物標本を利用した湖沼生態系の復元、In:湖沼近過去調査(占部編) 共立出版、2014、193-214、ISBN 978-4-320-05735-7

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.chikyu.ac.jp/rihn/project/D-06.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

奥田 昇 (OKUDA, Noboru)  
総合地球環境学研究所・研究部・准教授  
研究者番号: 30380281

### (2) 研究分担者

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

### (3) 研究分担者

岩田 智也 (IWATA, Tomoya)  
山梨大学・医学工学総合研究部・准教授  
研究者番号: 50362075

### (4) 研究分担者

大手 信人 (Ohte, Nobuhito)  
京都大学・情報学研究所・教授  
研究者番号: 10233199

### (5) 連携研究者

陀安 一郎 (Tayasu, Ichiro)  
総合地球環境学研究所・研究部・教授  
研究者番号: 80353449

### (6) 研究協力者

シッド アビゲイル (CID Abigail)  
大阪大学・国際交流オフィス・非常勤講師

### (7) 研究協力者

尾坂 兼一 (OSAKA, Ken-ichi)  
滋賀県立大学・環境科学部・助教

### (8) 研究協力者

伊藤 雅之 (Itoh, Masayuki)

京都大学・東南アジア研究所・助教

### (9) 研究協力者

ソン ウーラン (SONG Uham)  
済州大学校・生物学科・助教

### (10) 研究協力者

岡野 淳一 (OKANO, Jun-ichi)  
京都大学・生態学研究センター・研究員

### (11) 研究協力者

石川 尚人 (ISHIKAWA, Naoto)  
海洋研究開発機構・海洋・極限環境生物圏領域・学振研究員

### (12) 研究協力者

村上 綾 (MURAKAMI, Aya)  
京都大学・生態学研究センター・大学院生

### (13) 研究協力者

富樫 博幸 (Tayasu, Ichiro)  
水産総合研究センター・東北水産研究所  
資源生産部・研究員

### (14) 研究協力者

林 拓矢 (HAYASHI, Takuya)  
山梨大学・循環システム工学科・学部生

### (15) 研究協力者

酒井 陽一郎 (SAKAI, Yoichiro)  
京都大学・生態学研究センター・研究員

### (16) 研究協力者

柯 佳吟 (KO, Chia-Ying)  
臺灣中央研究院・環境変遷研究センター・研究員

### (17) 研究協力者

千代 真照 (CHISHIRO, Masateru)  
滋賀県立大学・環境科学部・大学院生

### (18) 研究協力者

井手 淳一郎 (IDE, Jun-ichiro)  
九州大学・持続可能な社会のための決断科学センター・助教

### (19) 研究協力者

ペイタン アディナ (PAYTAN, Adina)  
カリフォルニア大学・サンタクルーズ校・教授