

水草堆肥を施用して土壌のリンを効率的に利用する

The application of aquatic plant manure to efficiently utilize phosphorus in soil

大園 享司^{1*}・松岡 俊将¹・藤永 承平¹・保原 達²・奥田 昇^{1,3}

Takashi OSONO^{1*}, Shunsuke MATSUOKA¹, Shohei FUJINAGA¹, Satoru HOBARA² and Noboru OKUDA^{1,3}

¹ 京都大学 生態学研究センター

² 酪農学園大学 農食環境学群環境共生学類

³ 大学共同利用機関法人 人間文化研究機構 総合地球環境学研究所

¹ Center for Ecological Research, Kyoto University

² Department of Environmental and Symbiotic Sciences, Rakuno Gakuen University

³ Research Institute for Humanity and Nature

摘 要

有限の資源であるリンを集水域のなかで効率的に利用し、なおかつリンによる環境負荷を抑制するためには、農地から河川、湖沼に至る集水域スケールでリン資源の再利用・再資源化・利用削減を推進することが不可欠である。それを効果的に進める方策の一つとして、本稿では「農耕地における水草堆肥の利用」を提案し、その実現可能性を検証した圃場実験の結果を紹介する。異常繁茂する水草の刈取り事業により、琵琶湖から陸域へと運搬される水草の量は乾重で年間 435 トン、そこに含まれるリン量は 2.61 トンと推定された。水草堆肥の施用は土壌への炭素供給をつうじて、菌類の種組成の変化とリンの無機化に関わる酵素の活性化を引き起こし、作物の生長を促進することが圃場実験により示された。この結果は、水草を堆肥として施用すれば、土壌蓄積リンの再利用をつうじて作物生長を維持することができ、化学肥料の利用削減に貢献しうることが示唆されている。

キーワード：菌類、作物収量、土壌リン、琵琶湖、ホスファターゼ、水草堆肥

Key words : fungi, crop yield, soil phosphorus, Lake Biwa, phosphatase, aquatic plant manure

1. はじめに

リン(P)は農耕地や森林において、植物の純一次生産を制限する主要な必須元素の一つである。我が国では、農耕地の生産性を維持するためリン鉱石を原材料とする化学肥料の施用が重視されてきた経緯があり、長年にわたる土壌改良の結果、農耕地の土壌には比較的高い濃度でリンが蓄積する傾向にあるといわれている^{1)~3)}。2009年にまとめられた日本全体でのリンのマテリアルフロー(物質循環)をみても、輸入された年間約 160 万トンのリンのうち、約 90 万トンが化学肥料などとして農耕地に施用されており、このうち約 86 万トンものリンが土壌に蓄積すると推定されている^{4), 5)}。

肥料として農耕地に投入されたリンのうち、作物に吸収され利用される割合は一般に低い²⁾。その多くが有機物や鉄(Fe)・アルミニウム(Al)と結合して、作物が容易に利用できない難溶性の複合体に変換されることによって、土壌にリンが蓄積する(図 1)^{6)~8)}。

施用されたリン酸のうち、土壌に蓄積した難溶性のリンの一部は再び可溶化するが、多くは強雨時に表面流水が発生すると土壌粒子ごと流亡し、濁水として湖沼に流入することで水系の富栄養化を引き起こす一因にもなりうる⁹⁾。

さらに、化学肥料の原材料となるリン鉱石は地球上に局在しているうえに、近い将来に枯渇することが予想されており、コストの上昇が懸念される¹⁰⁾。我が国はリン鉱石を 100%輸入に依存していることから、リンの有効利用技術の開発は喫緊の課題の一つとなっている¹¹⁾。農地や河川、湖沼を含む集水域のスケールでは、生態学的な観点からリンの 3R、すなわち再利用(Reuse)・再資源化(Recycle)・利用削減(Reduce)を促進することが、集水域のなかでリンを効率的に利用しつつ環境への負荷を抑制する上で有効な手段といえる。

そこで著者らは、集水域レベルでリンの 3R を推進する方策の一つとして、「農耕地における水草堆肥の利用」を提案する(図 2)。まず、湖沼に排出さ

受付：2014 年 12 月 26 日、受理：2015 年 3 月 27 日

* 〒 520-2113 滋賀県大津市平野 2 丁目 509-3, e-mail : tosono@ecology.kyoto-u.ac.jp

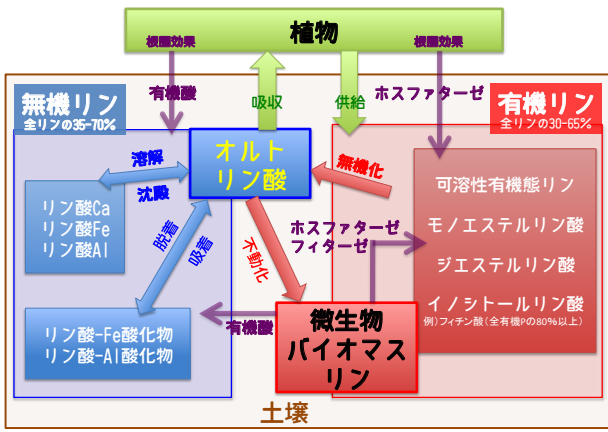


図1 土壌におけるリン循環の簡略図^{6)~8)}。
 土壌におけるオルトリン酸(H₃PO₄)の利用可能性は、土壌水へのオルトリン酸の供給速度に依存する。利用可能性の異なるさまざまな無機リン・有機リン化合物がその供給源となる。溶解-沈殿(無機平衡)、脱着-吸着(溶液中のリンと固体表面との相互作用)、無機化-不動化(生物学的なリンの変換)などにより、リン化合物から土壌水へとオルトリン酸が供給されたり、逆に土壌水から除去されたりする。植物や微生物は、プロトンや有機酸などを放出してオルトリン酸を溶解・脱着させたり、ホスファターゼ(リン酸モノエステル加水分解酵素)やフィターゼ(フィチン酸加水分解酵素)などの酵素を分泌して有機リンを無機化しオルトリン酸を生成したりする。農耕地に施用される化学肥料のリン源は、主にアパタイト(リン酸カルシウム(Ca₃(PO₄)₂))である。リン酸カルシウムから溶解したオルトリン酸は鉄(Fe)やアルミニウム(Al)の酸化物に吸着されたり、有機物と結合してフィチン酸(有機リン酸の一種)となったりして難溶化し、土壌に蓄積する。

れたリンを吸収した水草を刈り取って農耕地へ輸送することで、水域のリンを農耕地で再利用することができる(図2A)。この水草を堆肥として農耕地に施用したとき、土壌に蓄積しているリン酸を可溶化して再資源化できれば(図2B)¹²⁾、化学肥料の利用削減につながる。もしこれが実現すれば、リン資源の有効利用に大きく貢献できると期待される¹³⁾。この提案の実現可能性を検証するため、研究プロジェクト(大学共同利用機関法人人間文化研究機構 総合地球環境学研究所・個別連携プロジェクト「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」、平成24~31年度、研究代表者：奥田昇)の課題の一つとして実証実験を進めている。

本稿では最初に、背景となる水草の異常繁茂の問題と、水草の利用の歴史とこれまでに知られている肥効について述べる。次に、水草の刈取り事業による水域から陸域へのリンの運搬について考察する。そして著者らによるこれまでの研究経過を踏まえて、水草堆肥の施用による土壌蓄積リンの再利用と化学肥料の利用削減の可能性について確認する。

2. 水草の異常繁茂と対策事業

現在、日本のみならず、世界各地のさまざまな湖沼で水草の異常繁茂が問題となっており、人間活動の活性化にともなう窒素(N)やリンなどの栄養素の過剰な排出にともなう湖沼の富栄養化がその一因と



図2 水草の刈取り(A)と農耕地への施用(B)¹²⁾をつうじたP(リン)のリサイクルの模式図。詳細は本文を参照。

考えられる¹⁴⁾。近年では逆に、下水道整備や工場排水規制にともなう貧栄養化による湖沼の透明度の上昇や、水草の過少利用も異常繁茂の引き金となりうる。著者らが研究を行っている琵琶湖の南湖では、1994年の大湖水をきっかけに水草が急激に増加した^{15), 16)}。水位が低下して湖底まで光が届くようになり水草が大量に芽吹いたことと、南湖の透明度が高くなって水草が生長しやすくなったことが原因と考えられている。

水草が適度に繁茂するなら、魚介類の産卵や発育の場を提供することで生物多様性を増加させ、また水中の栄養塩を取り込んで生長するため水質浄化にも役立つだろう。しかし、現在みられるような異常繁茂は、漁業被害、船舶の航行障害、腐敗による悪臭の発生といった生活環境への悪影響、湖底の溶存酸素の低下による底生生物など自然環境への悪影響といった問題を引き起こしている¹⁶⁾。

このため滋賀県では水草の繁茂状況を1930~1950年代のレベルに近づけ、在来魚介類にとって好適な生育環境を取り戻すことを目標に、刈取り専用船や人力による「刈取り事業」と、刈り取った水草を堆肥化して配付する「有効利用事業」を進めている¹⁷⁾。この対策事業により刈り取られる水草の量は年間約5,000トンにのぼり、また水草堆肥は約1,600名の県民に対して配布された(いずれも2013年度の実績、滋賀県琵琶湖政策課、私信)。水草堆肥には貝などのゴミが含まれるなど利用上の注意点が指摘されているものの、利用者の多くが施用によって作物や花卉の生長が促進されることを実感している¹⁸⁾。水草堆肥の配布は何より、県民が琵琶湖の環境保全の重要性を再認識する機会を提供している。

3. 水草の肥効は昔から確認されていた

琵琶湖では、古くから水草が湖岸住民によって大量に採取されていた。琵琶湖のみならず、日本各地の湖沼周辺の集落では1950年代に化学肥料が普及するまで、水草が肥料として利用されていた¹⁹⁾。過去の水草の採取量は明らかでないが、1930年頃の水産統計に基づく推定では、琵琶湖全体で年間10万トンともいわれている¹⁹⁾。人間は伝統的に、水草の刈取りと農地での施用をつうじて、水域のリンや窒素、カリウム(K)といった栄養素を陸域で再利用していた(図2A)。

水草の肥効も古くから検討されていた。水草の施用がイネやコムギの生長を促進するという報告²⁰⁾、水草堆肥が23品目の作物の生長や収量を促進するという報告¹⁸⁾などがある。しかしこれまで、水草堆肥の肥効が、どのような化学的・微生物的なメカニズムによるのかについて詳細に検討されていない。作物がアンモニア態窒素(NH₄⁺)やオルトリン酸(H₃PO₄)といった無機の栄養素を吸収して生長することを考慮すると、肥効のメカニズムとして、水草堆肥に含まれる栄養素の直接的な効果と、水草堆肥により土壌に蓄積した栄養素が可溶化する間接的な効果が考えられる。

このうち水草自体の成分面に着目すると、特にカリウムに富むことが1930年代に指摘されている²⁰⁾。ただし、今日用いられる化学肥料、特に肥料の三要素(窒素・リン・カリウム)を含む化学肥料に比べると、栄養塩の含有率は圧倒的に低い。水草堆肥では、交換性マグネシウム(Mg)が相対的に欠乏している点が指摘されており²¹⁾、栄養塩そのものの供給源としての直接的な効果は小さいといえる。

その一方で、水草堆肥は有機物であるため炭素(C)の含有率が23~33%(重量パーセント)と化学肥料に比べて高く²⁰⁾、土壌構造の発達や陽イオン交換能の促進、微生物活性の促進など、化学肥料にはない機能を発揮しうる¹⁸⁾。特に、土壌中の菌類や細菌といった従属栄養性の微生物を活性化することで、土壌に蓄積している難溶性の栄養素を可溶化するという間接的な効果が予想される(図2B)。しかし、この仮説を実証したデータは限定的で⁸⁾、水草堆肥の施用が化学肥料の利用削減にどれほど貢献しうるかについての情報も少ない。

4. 水草の刈取りによる水域から陸域への物質輸送

滋賀県による水草の刈取りと有効利用の事業によって、どれくらいの量のリンが琵琶湖から陸域へと運搬されているのだろうか。前出の年間の刈取り量5,000トン(湿重、2013年度)をもとに試算した。水草の乾湿重比(乾重量/湿重量×100)を8.7%¹⁵⁾として換算すると、刈り取られた水草の乾重量は435

トンとなる。

この水草の刈取り量に、水草のリン含有率を乗じればリン量となる。ただし水草のリン濃度は、水草の種間や季節で変動することが知られている。滋賀県農事試験場の1939年の報告²⁰⁾によると、8月下旬に採取した淡水産水草18種のリン濃度(リン当量、重量%, 以下同じ)は0.33~1.01%(最小値~最大値)、平均値±標準偏差0.70±0.19%、中央値0.69%であった。また同じ報告によると、水草のリン濃度は5月から10月にかけて減少傾向を示した。2013年のデータでも水草3種のリン濃度は0.29~0.70%と、1939年の報告と同じくらいの値が得られている(滋賀県琵琶湖政策課、未発表資料)。

滋賀県により刈り取られている水草の種組成は明らかでないが、滋賀県琵琶湖博物館の資料によると、南湖に出現する水草のうち、センニンモ、クロモ、マツモ、ホザキノフサモ、ササバモが現存量全体の3分の2を占めていた(2012年9月時点)。2001年の調査でも、南湖ではクロモ、センニンモ、オオカナダモ、マツモが高頻度で認められた¹⁵⁾。先に述べたリン濃度のデータから、ここに挙げた水草6種のデータ8点を抜き出すと、リン濃度は0.29~0.82%、平均値±標準偏差0.59±0.17%、中央値0.60%であった。以上に基づいて、水草のリン濃度の代表値を決めることは難しいが、0.60%という値を用いて試算を進める。この値を乗じると、南湖で刈取られて陸揚げされた水草435トンには、2.61トンのリンが含まれる計算になる。

なお、琵琶湖への年間リン負荷量(2010年)は、原単位法を用いた推定により237トンと見積もられている²²⁾。水草の刈取りにより陸域へと輸送されるリン量(2.61トン)は、この年間負荷量の1.1%に相当する。このうち、農業系に由来するリンの面源負荷量は年間38.3トンと見積もられている²²⁾。水草により再び陸域へと輸送される2.61トンのリンは、その6.8%に相当する。

水草には養分源だけでなく、有機資材としての側面もある。同様の方法により、水草の刈取りに伴って水域から陸域へと輸送される炭素量を求めた。1939年の滋賀県農事試験場報告²⁰⁾にある水草18種の炭素濃度は29.1±2.7%(平均値±標準偏差)であり、種間差は比較的小さい。水草の刈取り量435トンの29.1%が炭素とすると、炭素量は127トンとなった。

炭素についても、リンと同様に負荷量に対する割合を求めることができる。琵琶湖への年間の全有機炭素負荷量(2010年)は8,003トン、このうち農業系に由来する面源負荷量は年間1,444トンと見積もられている²²⁾。水草の炭素が全て有機炭素であると仮定すると、水草の刈取りにより陸域へと輸送される炭素量は、この年間負荷量のそれぞれ1.6%、8.8%に相当する。

5. 水草堆肥の施用による土壌と作物生長の変化

水草堆肥の施用が、化学肥料を連用した土壌の化学性、微生物の組成・活性と、作物生長に及ぼす影響を定量的に評価するため、ワグネルポットを使った栽培実験系を確立した(図3)。化学肥料を連用した滋賀県草津市のハウス土壌を培養土として用い、そこに、1)化学肥料のみ、2)水草堆肥のみ、あるいは3)化学肥料と水草堆肥を半量ずつ混合したものを施用した。水草堆肥は堆肥化年数が1年目のものを²¹⁾、化学肥料は市販のものを用いた。施用量は、処理によらずポットあたりのリン酸の投入量が0.24gとなるように調整した。これらに、4)土壌に何も施用しない対照区も加え、合わせて4処理区で実験を行った。

市販の種子から発芽させたコマツナ苗をポット内の実験土壌に移植し、滋賀県大津市の京都大学生態学研究センター実験圃場の網室内にて、2013年5～6月の26日間にわたって栽培した。栽培後にコマツナを収穫し、収量(地上部の乾燥重量)とリン吸収量(地上部の植物体に含まれるリン量)を測定した。栽培後の土壌については、pH(KCl, 塩化カリウム)、pH(H₂O, 脱塩水)、ホスファターゼ活性、菌類の種組成、全炭素濃度、及びトルオーグリン酸(有効態リン酸の指標の1つ)濃度を測定した。紙面の制約上、これら分析手法の詳細は省略する。

その結果、水草堆肥の施用区と混合施用区で、コマツナの生長促進が認められた(図3)。一般化線形モデルにより検討したところ、水草堆肥の施用区と混合施用区のコマツナの収量は、化学肥料の施用区と対照区のそれよりも有意に高かった(危険率0.1%以下)。コマツナのリン吸収量は混合施用区で最も高く、次に水草堆肥の施用区で高かった。混合施用区のリン吸収量は、化学肥料の施用区と対照区のそれよりも有意に高かった(一般化線形モデル、危険



図3 ワグネルポットを用いた栽培試験。栽培開始から26日目。左から、施用なし(対照区)、化学肥料の施用区、化学肥料と水草堆肥の混合施用区、水草堆肥の施用区、処理区あたり6ポットを準備した。

率1%以下)。

このようなコマツナの生長促進は、実験処理による土壌のどのような変化をつうじて生じたのだろうか。土壌pH(KCl・H₂O)、全炭素濃度、菌類の種組成(主成分1軸)、土壌のホスファターゼ活性、トルオーグリン酸濃度のそれぞれについても、処理区間での差の有無を一般化線形モデルで検討した。その結果、水草堆肥の施用区と混合施用区では化学肥料の施用区と対照区に比べて、土壌の全炭素濃度が有意に高く、菌類の種組成が有意に変化し、ホスファターゼ活性も有意に高かった(いずれも危険率0.1%以下)。土壌pH(KCl・H₂O)、トルオーグリン酸濃度は処理区間で有意差が認められなかった(危険率5%以上)。ホスファターゼは菌類や細菌などの土壌微生物や植物が生産する酵素であり、有機態のリン酸エステル化合物を加水分解する²³⁾(図1)。今回の結果は、有機質である水草堆肥の施用により炭素が土壌中に供給されると菌類の種組成が変化するとともに、酵素活性が促進されたことを示唆している。

以上をまとめると、水草堆肥の施用は、土壌への炭素供給をつうじて菌類の種組成を変化させてホスファターゼによるリンの無機化を活性化し、それによりコマツナの生長とリン吸収が促進されたと考えられることができる。この結果は、化学肥料を連用した土壌への水草堆肥の施用により、化学肥料を使わなくても作物の生長を(少なくとも短期的には)維持できる可能性を示唆している。ただし、本稿で紹介したのは、あくまでも予備的な解析の結果であり、パラメータ間の多重共線性が考慮されていないなどの問題点がある。また、堆肥施用による菌類以外の微生物(細菌など)の群集構造の変化や、カリウムやマグネシウムなどの栄養素の効果も考えられる。水草堆肥が効果を発揮するメカニズムについては、今後、測定項目を増やすとともに、構造方程式モデリングなどを用いてさらに詳細に検討していく必要があるだろう。

6. まとめと今後の課題

本稿では、水草の刈取りとその堆肥の施用により琵琶湖から陸域へと輸送されるリンの量を推定するとともに、リンの蓄積した土壌において、水草堆肥の施用がリンの可溶化と作物の収量維持に貢献していることを示した。この結果は、少なくとも短期的には、水草堆肥が化学肥料の代替物となりうることを示唆している。水草の刈取りと水草堆肥の利用は、生態学的な観点から、土壌-水域系内でのリンの再利用・土壌蓄積リンの再資源化・リン肥料の利用削減を促進し、集水域レベルでのリンの効率的な利用に貢献しうる取組といえる。

水草の利用をつうじて水域から陸域へと運搬されるリン量に関しては、今後さらに推定の精度を上げ

る調査が必要だろう。水草の種組成と、水草の種ごとのリン濃度の測定を長期的に継続していく必要がある。琵琶湖と、琵琶湖以外の湖沼との比較も今後の課題といえる。

水草堆肥の施用が農耕地土壌におけるリン循環に及ぼす影響についても、今後さらに検討すべき課題が多い。栄養面では、土壌中の難溶性リン画分が実際、どのように変化しているのかを確かめる必要がある。土壌における水草自体の分解プロセスについての理解も不可欠である。リン酸の酸素安定同位体を分析すれば、作物が土壌蓄積リンと水草堆肥由来リンをどのような割合で利用しているのかが推定できる可能性がある(本特集, 奥田の章を参照)²⁴⁾。リン以外の栄養素, 例えばカリウムやマグネシウムの効果についても検討が必要であろう。

難溶性リンの可溶化に関わる微生物の特定も進めていきたい。菌類と細菌は、ホスファターゼや有機酸の生産, 微生物バイオマスへの変換などをつうじてリンを可給化する働きを担う²⁵⁾。今回の実験では、土壌中の菌類の種組成をリボゾーム DNA(rDNA)の ITS(Internal Transcribed Spacer)配列を対象としたメタゲノミクス(環境中から直接収集, 抽出される微生物の遺伝情報(メタゲノム)についての研究)により評価したが, 今後は細菌を対象とした解析や, リンの可溶化に関わる機能的遺伝子, 例えば, ホスファターゼ遺伝子^{26), 27)}をターゲットにした解析が必要である。

「農耕地における水草堆肥の利用」は、地球レベルでのリン資源問題を念頭に置きつつ, 地域的なリン利用を効率的に進める取組のモデルケースとして位置づけられよう。今後も継続して実証実験を実施することで, 水草堆肥の施用にともなう土壌リン循環の変化についての知見を蓄積していくことが肝要である。水草堆肥の利用という伝統知の現代的な意義を, 土壌の栄養素や微生物に着目して再評価することができれば, 集水域のスケールでのリンの効率的な利用を促進する取組に科学的な根拠を与えることができるものと期待される。

謝 辞

本研究を進めるに当たって, 滋賀県琵琶湖政策課より水草堆肥に関する情報を提供いただいた。平塚純一氏には伝統的な水草利用についてご教示いただいた。鈴木依子氏, 藪崎郁子氏, 山村知子氏, 平田美由紀氏には栽培試験と成分分析で助力いただいた。本研究は, 大学共同利用機関法人 人間文化研究機構 総合地球環境学研究所・個別連携プロジェクト「栄養循環プロジェクト」と公益財団法人 淡海環境保全財団の助成を受けて行われた。

引用文献

- 堀田 悟・園田敬太郎・武久邦彦・西堀康士・山田善彦(2010)滋賀県における農耕地土壌の実態と変化(第2報)土壌理化学性の変化と施肥の実態. 滋賀県農業技術振興センター研究報告, 49, 33-43.
- 三島慎一郎・神山和則(2010)近年の日本・都道府県における窒素・リン酸フローと余剰窒素・リン酸の傾向に関する算出方法とデータベースおよび運用例. 農業環境技術研究所報告, 27, 117-139.
- 齋藤政典(2011)リン資源の枯渇と農業生産への有効利用. 生物の科学・遺伝, 65, 32-38.
- 後藤逸男(2010)バイオマス資源と製鋼スラグ中のリン. 日本土壌肥料学会(編), 文化土壌学からみたりん, 65-100, 博友社.
- Matsubae-Y. K., H. Kubo, K. Nakajima and T. Nagasaka (2009) A material flow analysis of phosphorus in Japan. The iron and steel industry as a major phosphorus source. *Journal of Industrial Ecology*, 13, 687-705.
- Bünemann, E. K., A. Oberson and E. Frossard eds. (2011) Phosphorus in Action – Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling. Springer-Verlag, Berlin.
- 武田容枝(2010)土壌リンの存在形態と生物循環. 土と微生物, 64, 25-32.
- McLaughlin, M. J., T. M. McBeath, R. Smernik, S. P. Stacey, B. Ajiboye and C. Guppy (2011) The chemical-nature of P accumulation in agricultural soils-implications for fertiliser management and design: an Australian perspective. *Plant and Soil*, 349, 69-87.
- Kleinman, P. J. A., A. N. Sharpley, R. W. McDowell, D. N. Flaten, A. R. Buda, L. Tao, L. Bergstrom and Q. Zhu (2011) Managing agricultural phosphorus for water quality protection: principles for progress. *Plant and Soil*, 349, 169-182.
- 大竹久夫(2011)リン資源枯渇危機とはなにかーリンはいのちの元素. 阪大リーブル, 29, 大阪大学出版会.
- 黒田章夫・滝口 昇・加藤純一・大竹久夫(2005)リン資源枯渇の危機予測とそれに対応したリン有効利用技術開発. 環境バイオテクノロジー学会誌, 4, 87-94.
- 古賀野完爾(1984)寒地水田における蓄積リン酸の肥効と変動. 日本土壌肥料学会(編), 水田土壌とリン酸-供給力と施肥, 59-86, 博友社.
- Ashley, K., D. Cordell and D. Mavinic (2011) A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere*, 84, 737-746.
- Khan, F. A. and A. A. Ansari (2005) Eutrophication: an ecological vision. *The Botanical Reviews*, 71, 449-482.
- 大塚泰介・桑原靖典・芳賀裕樹(2004)琵琶湖南湖に

- における沈水植物群落の分布および現存量－魚群探知機を用いた推定. 陸水学雑誌, 65, 13-20.
- 16) 滋賀県(2009)水草繁茂に係る要因分析等検討会, 検討のまとめ.
 〈<http://www.pref.shiga.lg.jp/d/biwako/files/kentoumatome.pdf>〉
- 17) 滋賀県(2011)琵琶湖総合保全整備計画マザーレイク21計画－第2期改訂版.
 〈<http://www.pref.shiga.lg.jp/biwako/ml21/ml21keikaku.html>〉
- 18) 滋賀県(2013)平成24年度水草有効利用の取り組みについて, 中間報告書.
- 19) 平塚純一・山室真澄・石飛 裕(2006)里湖モク採り物語－50年前の水面下の世界. 生物研究社.
- 20) 長谷川精作(1939)琵琶湖沿岸に於ける水藻の利用とその肥効. 滋賀県農事試験場報告.
- 21) 藪崎郁子・金子 命・大園享司・保原 達(2014)水草の堆肥化年数が堆肥の化学特性とコマツナ収量に与える影響. 酪農学園大学紀要, 39, 87-92.
- 22) 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター(2011)第6期湖沼水質保全計画に係る将来水質予測シミュレーションについて.
 〈http://www.pref.shiga.lg.jp/shingikai/biwako_mizukankyou/files/20111027-3.pdf〉
- 23) Nannipieri, P., L. Giagnoni, L. Landi and G. Renella (2009) Role of phosphatase enzymes in soil. *In*: E. K. Bünemann, A. Oberson and E. Frossard, eds., Phosphorus in action – biological processes in soil phosphorus cycling, *Soil Biology*, 26, 215-243, Springer Verlag, Berlin.



大園 享司/Takashi OSONO

大阪府出身。2001年, 京都大学大学院農学研究科助手。2003年, 博士(農学)京都大学。2008年より京大大学生態学研究センター准教授(現職)。2012年から大学共同利用機関法人 人間文化研究機構総合地球環境学研究所 共同研究員。専門は生態学, 生物多様性科学。熱帯から極域までをフィールドに土壌分解系の機能, 菌類の多様性などを研究。主な著書に、『菌類の生物学』(京都大学学術出版会, 共訳), 『微生物の生態学』(共立出版, 共同編集担当・共著), 『カナディアンロッキー・山岳生態学のすすめ』(京都大学学術出版会)など。



松岡 俊将/Shunsuke MATSUOKA

京都大学大学院博士後期課程在籍。陸上生態系における菌類の多様性の創出・維持メカニズムに興味をもって研究を行っている。樹木との共生菌である外生菌根菌に注目し, 時間・空間の変化にともしない多様性がどのように変化するかを, 熱帯林から北方林までさまざまな森林において調査を進めている。

- 24) 奥田 昇(2015)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, 20, 103-110.
- 25) Jones, D. L. and E. Oburger (2009) Solubilization of phosphorus by soil microorganisms. *In*: E. K. Bünemann, A. Oberson and E. Frossard, eds., Phosphorus in action – biological processes in soil phosphorus cycling, *Soil Biology*, 26, 169-198, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- 26) Sakurai, M., J. Wasaki, Y. Tomizawa, T. Shinano and M. Osaki (2008) Analysis of bacterial communities on alkaline phosphatase genes in soil applied with organic matter. *Soil Science and Plant Nutrition*, 54, 62-71.
- 27) Tan, H., M. Barret, M. J. Mooij, O. Rice, J. P. Morrissey, A. Dobson, B. Griffiths and F. O’Gara (2013) Long-term phosphorus fertilization increased the diversity of the total bacterial community and the *phoD* phosphorus mineraliser group in pasture soils. *Biology and Fertility of Soils*, 49, 661-672.



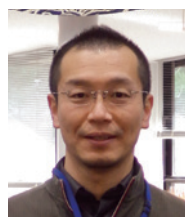
藤永 承平/Shohei FUJINAGA

京都大学理学研究科修士課程修了。修士(理学)。専門は微生物学と陸水学。顕微鏡の下で銀河のように輝く細菌を見て研究を始める。細菌がなぜそこにいるのか, 何をしているのかに興味をもっている。水域, 特に琵琶湖で細菌と彼らを取り巻く環境を明らかにする傍ら, 微生物の染色・培養・群集解析, 栄養塩分析, 酵素活性測定等, お役に立てそうな共同研究には進んで参加中。今回は酵素活性の測定を担当し, 土壌生態系へも一歩踏み出せた。現在は京都大学理学研究科博士後期課程1年。



保原 達/Satoru HOBARA

北海道出身。京都大学大学院農学研究科修了。博士(農学)。専門は生態学, 生物地球化学。特に, 土壌中の鉱物及び有機物特性が植物成長, 温室効果ガス放出, 溪流への養分流出などに及ぼす影響の解明を目指している。植生, 地質, 微生物などが生み出す土壌の個性と普遍性に大きな興味を抱いている。出身地である北海道をはじめ, アラスカ, シベリアといった北方での調査・研究を好む。酪農学園大学農食環境学群環境共生学類准教授。



奥田 昇/Noboru OKUDA

1969年, 山梨県生まれ。京都大学大学院理学研究科生物科学科博士後期課程修了。京大大学生態学研究センター准教授を経て, プロジェクト研究「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」を主宰するため2014年より大学共同利用機関法人 人間文化研究機構総合地球環境学研究所に赴任。学部では分子生物学, 大学院では行動生態学, その後, 群集・生態系生態学に関する研究を展開し, ミクロとマクロをつなぐ生物学の統合を図る。現在は, 超学際アプローチによって, 地球環境問題の解決に資する社会と科学の共創を目指す。人と自然と酒をこよなく愛する。