

## 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

藪崎 郁子<sup>1,2)</sup>・金子 命<sup>1,3)</sup>・大園 享司<sup>4)</sup>・保原 達<sup>3,5)</sup>

### Effects of composting years on chemical properties of waterweed compost and yield of Japanese mustard spinach

Ikuko YABUZAKI<sup>1,2)</sup>, Mikoto KANEKO<sup>1,3)</sup>, Takashi OSONO<sup>4)</sup> and Satoru HOBARA<sup>3,5)</sup>  
(Accepted 11 July 2014)

#### はじめに

滋賀県の琵琶湖では、水草が年々増加しており生活環境に様々な悪影響を及ぼしている（滋賀県 2009）。特に南湖では、1994 年の大渇水を期に水草が急激に増え、従来の生態系に大きな影響を与えるとともに、漁業への障害、腐敗に伴う悪臭の発生など深刻な問題が続いている。そのため滋賀県では、1930 年～50 年代の望ましいとされる水草繁茂の状態に近づけるための水草の刈取・除去対策と、刈り取った水草の有効利用を進めている。有効利用の 1 つの方策として、農地に施与する目的で堆肥化する事業が進められている。水草堆肥が作物生長を促進する効果は古くから確かめられていた（長谷川 1939, 平塚ら 2006）。滋賀県民モニターに対する水草堆肥の配付も行われ、農地や家庭菜園に水草堆肥を施与することで作物の収量が増加することが確かめられている（滋賀県 2013）。

水草堆肥は作物の生長に必須の元素の供給源として、また有機物資材であるため土壌改良材としての効果が期待される。水草や水草堆肥には、窒素、リン、カリウムといった主要な栄養素が含まれる（長谷川 1939）。このうちリンは作物生産をしばしば律速する栄養素であり、リン資源の確保は食糧の生産

を維持する上で重要な問題となっている（Abelson 1999）。リンは、世界中で年間約 1 億 400 万トンがリン鉱石から産出され、現在の消費傾向が続けば約 130 年で枯渇するとされる（United States Geological Survey 2004）。しかし河川や湖沼の底質には、リン肥料が施与された農地土壌から作物に吸収されることなく流出したリンが集積している（黒田ら 2005）。水草の堆肥としての利用が広がれば、河川や湖沼の底質に集積したリンを、水草を介して回収することができ、それを肥料として再利用すればリン資源の有効利用と環境の保全に大きく寄与するものと期待される（Ashley et al. 2011）。

水草堆肥を農地で実際に利用する上で、その肥料資源的な価値に関する情報が必要となる。水草の堆肥化の事業では、1 年以上の期間にわたって水草を堆肥化する試験を行っているが（滋賀県 2013）、堆肥化の年数によってその化学性がどう変化するかについては、これまでほとんど明らかにされていない。そこで本研究では、まず堆肥化年数の異なる水草堆肥で化学特性を比較するとともに、それら堆肥化年数の異なる堆肥を用いてコマツナの栽培試験を行い、堆肥化の年数やその化学組成が作物の収量に及ぼす影響を検証した。

<sup>1)</sup> 2013 年度酪農学園大学環境システム学部生命環境学科生態系物質循環研究室卒業生  
Laboratory of Biogeochemical Cycles, Department of Biosphere and Environmental Sciences, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501, Japan  
<sup>2)</sup> 現在、雪印メグミルク株式会社  
Megumilk Snow Brand Company, Limited  
<sup>3)</sup> 酪農学園大学大学院酪農学研究科修士課程生態系物質循環研究室  
Laboratory of Biogeochemical Cycles, Graduate School of Dairy Science, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501, Japan  
<sup>4)</sup> 京大大学生態学研究センター  
Center for Ecological Research, Kyoto University, Japan  
<sup>5)</sup> 酪農学園大学環境共生学類生態系物質循環研究室  
Laboratory of Biogeochemical Cycles, Department of Environmental Symbiotic Sciences, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501, Japan

## 材料と方法

4種類の水草堆肥を2012年6月に入手し、栽培試験に用いた。それらは2012, 2011, 2010, 2009年に滋賀県琵琶湖で刈り取られ、滋賀県近江八幡市の津田干拓地にある集積場(露地, 3 ha)で堆肥化された、堆肥化年数がそれぞれ0, 1, 2, 3年の水草である。堆肥化は、露地に集積させ、半年に一度の間隔で切り返しを行って実施した。堆肥化0年目の水草は、水揚げ後1週間以内のため堆肥化がほとんど進んでいないが、ここでは便宜的に「堆肥化0年目の水草堆肥」と呼ぶ。琵琶湖には在来種、外来種を含めさまざまな水草が生育する(大塚ら2004)。今回の試験に用いた水草堆肥に含まれる水草の種組成は明らかではないが、南湖ではコカナダモ(*Elodea nuttallii*)、オオカナダモ(*Egeria densa*)、および最近ではセンニンモ(*Potamogeton maackianus*)、クロモ(*Hydrilla verticillata*)、マツモ(*Ceratophyllum demersum*)の現存量が多いことが明らかにされている(滋賀県琵琶湖博物館 私信)。割合は不明だが、水草堆肥には藻類も附着している。

栽培試験は、2012年6~7月に、滋賀県大津市の京都大学生態学研究センター実験圃場において行った。ワグネルポット(高さ197.5 mm, 直径174 mm, 下部に内径23 mmの排水孔1つ)の底に、鉢底石1 Lを入れ、その上に寒冷紗(2 mmメッシュ)を敷き、その上に水草堆肥4 Lを入れた。水草堆肥の表面に、市販のコマツナ種子(照明コマツナ, トーホク交配315) 0.7 gを播種し、排水溝から水が出てくるまで水やりをした。これを4種類の水草堆肥ごとに6ポットずつ、合計24ポット作成し、28日間栽培した。栽培後はコマツナの地上部と、ポット内の水草堆肥を表面から深さ5 cmまで採取した。採取したコマツナと水草堆肥は、新鮮重量を測定してから、40℃の恒温送風乾燥機で1週間乾燥して乾燥重量を測定した。

乾燥したコマツナについて、全炭素濃度および全窒素濃度を測定した。水草堆肥については、pH(H<sub>2</sub>O), pH(KCl), 全炭素濃度, 全窒素濃度, 交換性カルシウム, 交換性マグネシウム, 交換性カリウム, トルオーグリン酸(可給態リン酸), 交換性アンモニア態窒素, 交換性硝酸態窒素, 純無機化速度, 純硝化速度の各項目を測定した。

全炭素濃度および全窒素濃度については、乾燥した植物と水草堆肥をそれぞれ粉砕機(ミルサーミル, MM400 Retsch社製)と乳鉢を用いて粉末にした後、NCアナライザー(NC-22F, SCAS社製)を用

いて燃焼法により測定した。

土壌試料のpH(H<sub>2</sub>O)およびpH(KCl)については、未粉碎の水草堆肥約0.5 gに対して、水または1 M塩化カリウム溶液を5 mL加え、振盪機(MMS-210, 東京理化工機社製)にて30分振盪し、1時間静置した後、懸濁した状態でpH計(D-51, 堀場エステック社製)にて測定した。

交換性カルシウム, 交換性マグネシウム, 交換性カリウムの定量については、水草堆肥0.35 gに1 M酢酸アンモニウムを35 mL加え30分振盪し、濾過した。得られた濾液について。原子吸光光度計(AA800, PerkinElmer社製)によりカルシウム, マグネシウム, カリウムの各濃度を測定した。

可給態リン酸については、トルオーグ法(土壤環境分析法編集委員会2003)を用いた。トルオーグ法により評価されるリン酸は、主にCaやMgに固定された可給態リン酸とされる。9.996 Lの超純水に硫酸アンモニウム30 gを加え攪拌した後、4 mLの5 N硫酸を加え攪拌しこれを抽出液とした。水草堆肥4 gに対して抽出液を80 mL加え30分振盪後、濾過し、濾液を得た。また、10 M硫酸400 mLに特級モリブデン酸アンモニウムを4 g加えた溶液130 mLに、アスコルビン酸1.7 gを超純水100 mLに溶かした溶液を60 mL加え、攪拌したのち、酒石酸アンチモニルカリウム270 mgを超純水100 mLに溶かした溶液を10 mL加え攪拌したものを発色液とした。水草堆肥から得た濾液1 mLに超純水4 mLを加え攪拌した後、発色液1 mLを加え再度攪拌し、15分静置した後、吸光光度計(V-630, 日本分光社製)で710 nmの波長の吸光を測定してリン酸濃度を求め、トルオーグリン酸濃度を計算した。

交換性アンモニア態窒素と交換性硝酸態窒素は、まず水草堆肥を圃場容水量60%に調整した。そのサンプル7 gに対して、2 M塩化カリウム溶液70 mLを加えて2時間振盪した後、濾過した。濾液を用いてオートアナライザー(オートアナライザーⅢ型, BLTEC社製)によりアンモニア態窒素および硝酸態窒素を測定して求めた。純無機化速度および純硝化速度は、まず堆肥土壌試料を圃場容水量60%に調整した水草堆肥サンプルを、培養器(LCL100, アズワン社製)内において摂氏24度下で28日間培養し、培養の前後のサンプルそれぞれについて交換性アンモニア態窒素および交換性硝酸態窒素を上記と同様の手法により求めた。培養期間中の総交換性無機態窒素の純生成を純無機化速度, 硝酸態窒素の純生成を純硝化速度とした。

植物および水草堆肥のサンプルの分析値について

は、統計ソフトウェア (JMP 8.0, SAS Institute Japan 社製) を用いて、堆肥化年数の異なる水草堆肥間で Tukey の多重比較検定を行ったほか、分析項目間で相関解析を行った。

### 結果と考察

コマツナおよび水草堆肥の分析結果を表 1 に示す。コマツナの収量は、堆肥化 0, 1, 2 年目の水草堆肥で 4 g/pot 以上の収量が得られたが、3 年目の水草堆肥では 1.7 g/pot と低かった。コマツナの全炭素濃度は、4 タイプの水草堆肥間で有意な差はなかったが、全窒素濃度は 0 年目の水草堆肥でもっとも高かった。コマツナの C/N 比は、0 年目の水草堆肥でもっとも低く、1 年目の水草堆肥でもっとも高かった。

pH (H<sub>2</sub>O) は、0, 1 年目の水草堆肥で中性付近であったが、2, 3 年目の水草堆肥ではややアルカリ性を示した。pH (KCl) は pH 5~6 と弱酸性を示し、0 年目の水草堆肥でもっとも低かった。全炭素および全窒素濃度は 1 年目の水草堆肥でもっとも高く、次に 0 年目で高く、2, 3 年目では 0, 1 年目よりも 1 桁低い値であった。C/N 比は 0 年目の水草堆肥で、1, 2, 3 年目の水草堆肥より低かった。交換性カルシウム、交換性マグネシウム、交換性カリウム、トルオーグリン酸、交換性硝酸態窒素、純無機化速度、純硝化速度の各項目についても、全炭素、全窒素と同様に、堆肥化 0, 1 年目の水草堆肥

で 2, 3 年目の水草堆肥より値が高かった。交換性アンモニア態窒素については、0 年目の水草堆肥でもっとも高く、堆肥化年数にともなって減少した。

土壌交換性塩基の比は、水草堆肥の塩基特性の指標となる。Ca/Mg 比は、0 年目の水草堆肥では 6 以下だったが、1, 2, 3 年目の水草堆肥では 9 以上となった。これらの値は農耕地で推奨される「6 以下」(北海道 2002) という基準値を上回っており、カルシウムよりマグネシウムが相対的に不足していることを示す。同様に、Mg/K 比は 4 タイプのいずれでも 2 以下であったが、これらの値も、農耕地で推奨される「2 以上」(北海道 2002) より低く、カリウムに対してマグネシウムが不足していることを示す。農地では、カルシウムやカリウムに比してマグネシウムの供給が相対的に少なくなる場合がある (Verbruggen and Hermans 2013)。土壌にたとえマグネシウムが豊富に含まれていたとしても、カルシウムやカリウムが比較的多く蓄積している場合、吸収においてマグネシウムがこれらのカチオンと拮抗し、吸収されにくくなる (松中 2003)。琵琶湖の水草堆肥の利用に際しては、この点に留意が必要といえる。

水草堆肥の測定項目について相関解析を行ったところ、交換性カルシウムや交換性マグネシウム、純無機化速度、トルオーグリン酸と全炭素とのあいだに有意な相関関係が認められた (図 1)。水草堆肥ではカルシウム、マグネシウム、リン酸が有機物に吸

表 1 植物体の収量ならびに植物体および水草堆肥の化学特性。

	堆肥化年数			
	0 年目	1 年目	2 年目	3 年目
植物体 (コマツナ)				
収量 (g/pot)	6.91 (1.23) a	4.14 (1.00) b	5.47 (1.05) ab	1.70 (1.28) c
全炭素 (C) 濃度 (%)	35.1 (0.95) a	35.6 (0.81) a	34.9 (1.47) a	33.6 (1.70) a
全窒素 (N) 濃度 (%)	2.86 (0.50) a	1.49 (0.25) c	1.92 (0.23) bc	2.13 (0.27) b
C/N 比	12.6 (2.38) c	24.4 (3.77) a	18.4 (3.04) b	15.9 (1.63) bc
水草堆肥				
pH (H <sub>2</sub> O)	7.06 (0.24) b	7.19 (0.18) b	7.72 (0.16) a	7.63 (0.05) a
pH (KCl)	5.35 (0.13) d	6.37 (0.10) b	6.03 (0.11) c	6.58 (0.07) a
全炭素 (C) 濃度 (%)	16.4 (2.34) b	23.9 (5.42) a	5.1 (0.49) c	4.0 (0.26) c
全窒素 (N) 濃度 (%)	1.97 (0.23) b	2.48 (0.50) a	0.51 (0.06) c	0.40 (0.03) c
C/N 比	8.3 (0.27) b	9.6 (0.75) a	10.1 (0.38) a	10.1 (0.11) a
交換性カルシウム (mg CaO/100 g soil)	755 (88.4) b	1465 (423) a	362 (158) c	451 (31.9) bc
交換性マグネシウム (mg MgO/100 g soil)	101.4 (17.0) a	77.6 (13.1) b	26.9 (12.1) c	28.7 (2.58) c
交換性カリウム (mg K <sub>2</sub> O/100 g soil)	168.6 (123) a	86.8 (29.4) ab	52.5 (25.4) b	55.5 (6.39) b
トルオーグリン酸 (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/100 g soil)	53.4 (16.1) b	110.2 (24.3) a	26.5 (11.5) c	33.9 (6.33) bc
Ca/Mg 比	5.4 (0.7) a	13.5 (3.5) a	9.6 (0.5) b	11.3 (0.6) ab
Mg/K 比	1.19 (1.18) a	1.12 (0.28) a	0.60 (0.09) a	0.61 (0.07) a
交換性アンモニア態窒素 (mg NH <sub>4</sub> -N/kg soil)	72.4 (14.1) a	47.8 (7.34) b	21.4 (3.39) c	14.4 (3.92) c
交換性硝酸態窒素 (mg NO <sub>3</sub> -N/kg soil)	103.3 (59.7) a	132.9 (24.0) a	43.8 (24.3) b	44.9 (12.6) b
純窒素無機化速度 (mg N/kg soil/d)	53.4 (55.9) ab	80.2 (39.0) a	10.3 (11.3) b	11.3 (8.41) b
純硝化速度 (mg N/kg soil/d)	55.6 (55.9) ab	81.8 (39.1) a	10.9 (11.2) b	11.8 (8.46) b

\* 括弧内は標準誤差を表す。アルファベットの違いは、堆肥化年数間で、多重比較検定により有意な (p<0.05) 違いがみとめられたことを示す

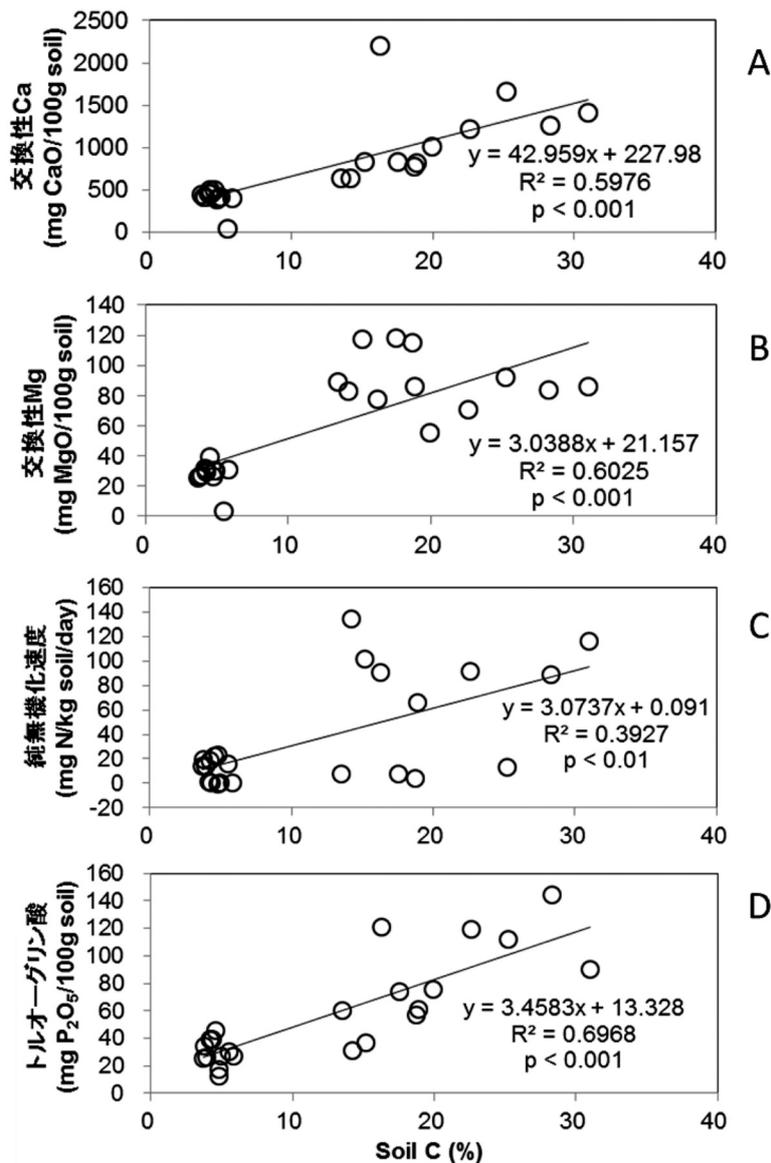


図1 水草堆肥における全炭素濃度と交換性カルシウム(A), 交換性マグネシウム (B), 純無機化速度 (C), トルオーグリン酸 (D) の関係

着して保持されると考えられる。純無機化速度や純硝化速度と土壤炭素との正の相関関係は、窒素の無機化に関わる微生物の活性が、有機物の含有量に依存する可能性を示唆している。

コマツナの収量と、水草堆肥の交換性マグネシウム、C/N比、pH (KCl) とのあいだに有意な相関関係が認められた(図2)。コマツナの収量と交換性マグネシウムの相関関係については、前段落で考察したように、今回用いた水草堆肥では、マグネシウムが他のカチオンに対して比較的欠乏傾向にあったため、コマツナの収量をマグネシウムが制限する状況になっていたためと考えられる。また、C/N比が低い水草堆肥ほどコマツナの収量が高かったが、これ

は窒素もコマツナの生長に必須となっていたことを示唆している。

堆肥化0、1年目の水草堆肥では、コマツナの収量が比較的大きく、栽培期間を通じて養分が植物体に吸収されていたにも関わらず、2、3年の水草堆肥より多くの養分が残っていた。よって0、1年目の水草堆肥は堆肥化2、3年のものより肥料の供給源としての持続性が高く、長期間、作物へ養分を供給できると考えられた。

## 結 論

本研究により、堆肥化年数の異なる水草堆肥間で、化学性やコマツナの生育が変化することが分かつ

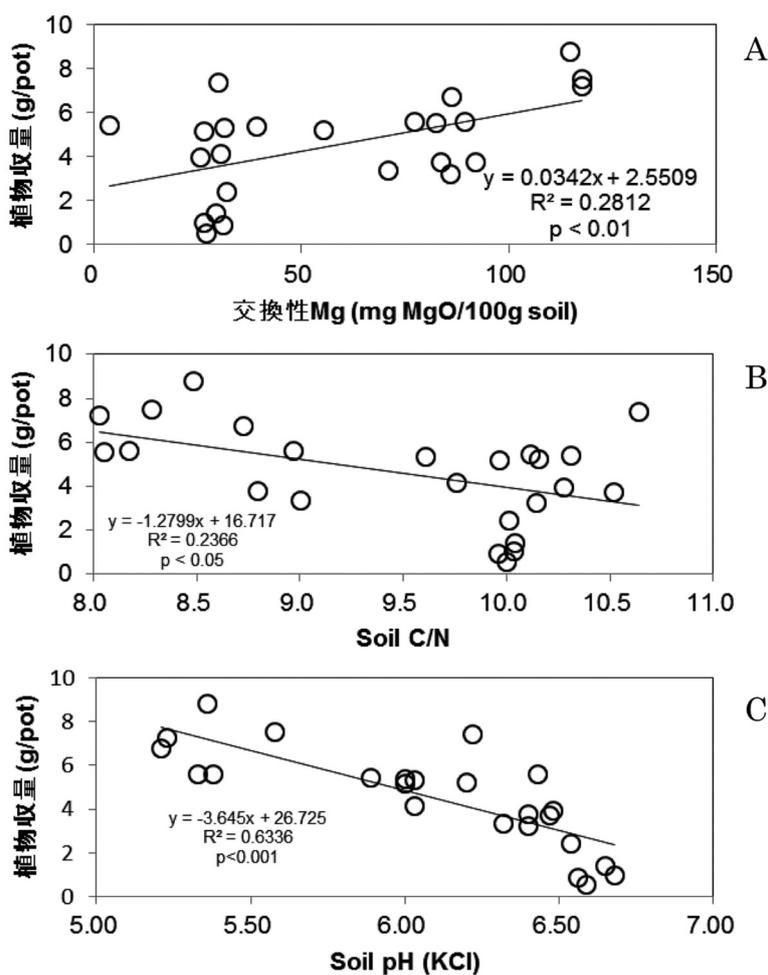


図2 植物収量と水草堆肥の交換性マグネシウム (A), 土壌 C/N 比 (B), pH (KCl) (C) との関係

た。堆肥化1年までは、有機物含量の高さが各種栄養分の供給や微生物活性の高さに影響しており、化学組成からいえば、堆肥化1年目の水草堆肥が肥料としての有用性が高いと判断できる。ただし、堆肥化年数によらず、交換性マグネシウムの相対的な欠乏が全般的に見られた点には留意が必要である。場合によっては、苦土処理によるマグネシウムの補給も有効であろう。本研究に用いた水草堆肥は水揚げ年度が異なるので、今後は水草の堆肥化にともなう化学性の変化や肥料としての効果の経年変化を、時系列で追跡する研究が必要といえる。

#### 謝 辞

本研究を進めるにあたって、水草堆肥のテーマを提案いただいた京大生態学研究センターの奥田昇准教授、水草堆肥に関する情報をいただいた滋賀県琵琶湖政策課、栽培試験に協力いただいた松岡俊将氏、分析に協力いただいた酪農学園大学の中谷暢

丈准教授、音道まりん氏はじめ水質化学研究室のメンバー、そして生態系物質循環研究室のメンバーに、心より感謝申し上げます。本研究は、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」、淡海環境保全財団の援助を受けて行われた。

#### 引用文献

- Abelson, P. H. (1999) A potential phosphate crisis. *Science* 283: 2015.
- Ashley, K., Cordell, D., Mavinic, D. (2011) A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere* 84: 737-746.
- 土壤環境分析法編集委員会 (2003) 土壤環境分析法. 博友社, pp 195-269.
- 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想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.
- 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, pp 30.
- 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, pp 141.
- 北海道 (2002) 北海道施肥ガイド, p 77-201.
- 松中照夫 (2003) 土壌学の基礎. 農文協, pp 389.
- 日本土壌協会 (2012) 土壌診断と作物生育改善, pp 35-40.
- 大塚泰介・桑原靖典・芳賀裕樹 (2004) 琵琶湖南湖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.
- 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, pp 15.
- 滋賀県 (2013) 平成 24 年度 水草有効利用の取組みについて, 中間報告書, pp 59.
- United States Geological Survey (2004) Mineral Commodity Summaries. pp 122-123.
- Verbruggen, N., Hermans, C. (2013) Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant and Soil* 368: 87-99.

## 要 旨

近年, 琵琶湖で増加している水草を引き上げ, 農地に施与する目的で堆肥化する事業が行われている。水草堆肥を実際に農地に施肥する上で, 最適な堆肥化の期間や, 堆肥の化学性に関する情報が重要となる。そこで本研究では, 水草の堆肥としての質と効果を検討するため, 堆肥化年数が 0, 1, 2, 3 年と異なる 4 種類の水草堆肥を用いて, コマツナのポット栽培試験を行った。栽培後にコマツナの収量を測定するとともに, ポット内の水草堆肥を採取してその化学性を分析した。交換性塩基や純窒素無機化速度, トルオーグリン酸などの土壌栄養項目は, 堆肥化 0, 1 年目の水草堆肥で値が高く, またこれら測定値と水草堆肥の全炭素濃度とのあいだに有意な相関関係が認められた。コマツナの収量は, 堆肥化年数 0, 1, 2 年目の水草堆肥で多く, また収量と水草堆肥の交換性マグネシウム, C/N 比, および pH (KCl) と間に有意な相関関係が認められた。交換性マグネシウムは, 交換性カルシウム・カリウムに比べて相対的に少なく, 収量の制限要因となり得ることが示された。化学組成からいえば, 水草堆肥は堆肥化 1 年目のものが肥料効果は高いと判断されたが, 使用においてはマグネシウムの相対的な欠乏に留意する必要がある。

## Abstract

Waterweeds have recently increased in Lake Biwa and have been harvested and used as compost. Understanding the chemical properties of the compost and the optimum composting period is necessary when the compost is applied as a fertilizer to agricultural fields. In the present study, the chemical composition and effectiveness of the waterweed compost were examined with a pot experiment using Japanese mustard spinach (*Brassica rapa* var. *perviridis*) cultivated on four composts with different composting period (0, 1, 2, and 3 years). Soil nutrient measures such as extractable bases, nitrogen mineralization rate, and Truog-phosphate were higher in the 0- and 1-year composts than in the 2- and 3-year composts, and were correlated with total organic carbon (C) content. The yield of Japanese mustard spinach was greater in the 0-, 1-, and 2-year composts than in the 3-year compost, and was correlated with exchangeable magnesium, C/N ratio, and pH (KCl) in compost. Magnesium was relatively deficit in the composts as compared to calcium and potassium, indicating an importance of magnesium as a limiting element of the spinach yield. The present study suggests that the waterweed composted for 1 year is effective as a fertilizer in terms of the chemical composition, but attentions should be paid to relative deficit of magnesium.