

富山湾深層水を用いたスラグ系施肥材の 海産藻類に対する効果実証実験

Effects of an iron-enriched fertilizer on marine algae
in Toyama Bay deep seawater

植木知佳¹・熊谷敬之²・藤田大介³

Chika UEKI¹, Takayuki KUMAGAI² and Daisuke FUJITA³

Abstract

The deficiency of iron in seawater has been considered as a factor of the reduction of kelp beds. *In vitro* culture has demonstrated the requirement of iron in maturation of kelp gametophyte; *in situ* fertilization, i.e., deployment of iron-enriched fertilizer (mixture of converter-derived steelmaking slag and mixed with humus) has suggested their positive effects on restoration of kelp beds. However, the gap between the former simplified and the latter complicated conditions have made it difficult to evaluate the results of fertilization. In the present study, a closed fertilization experiments in indoor and outdoor tanks using Toyama Bay deep seawater (known as clean, stable and enriched seawater with less iron concentration than surface seawater) to detect any positive effects on algae caused by the iron-enriched fertilizer. Four 100 L translucent tanks (with or without fertilizer and blackout cover) and two 2000 L FRP tanks (with or without fertilizer) were used for batch cultures in the indoor and outdoor experiments, respectively. In both experiments, elevation of iron and macronutrients (total inorganic N, Phosphate-P, Silicate-Si) were detected and diatom (and green microalgae in one tank) increased to higher concentrations in open fertilized tanks. Diatom also increased in dark and fertilized tanks presumably because of heterotrophy. All of the immature gametophyte of *Saccharina japonica* deployed in the open tanks could produce young sporophytes; the color of sporophyte was deeper and its density was higher in the fertilized tank in the indoor experiment and unfertilized tank in the outdoor experiment. The latter unexpected result might be caused by short of light with vigorous coverage of diatom. These experiments suggest the positive micro- and macroalgal response to iron-enriched fertilizer as well as the competition between them near the fertilized spot at sea.

Key Words: converter-derived steelmaking slag, diatom, fertilization, iron-enriched fertilizer, *Saccharina japonica*

要 旨

海水中の鉄不足は藻場衰退の一因とされ、コンブ配偶体の成熟に鉄が必要なことが示されているほか、海域でも製鋼スラグ系の鉄分供給施肥材の投入でコンブ群落が回復したとの報告もある。この施肥材の藻類への影響を詳細に調べるため、清浄かつ栄養塩 (total inorganic N, Phosphate-P, Silicate-Si) が豊富で鉄濃度が低い富山湾深層水を用い、屋内 100 L 透明水槽 4 基 (施肥と遮光の

¹ 新日本製鐵株式会社 (〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

² 富山県入善漁業協同組合 (〒939-0667 富山県下新川郡入善町芦崎 338)

³ 東京海洋大学海洋科学部 (〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7)

有無)と屋外 2000 L, FRP 水槽 2 基(施肥の有無)でバッチ培養を行った。施肥水槽では鉄と栄養塩の濃度が上昇し、無遮光では主に珪藻が増えた。珪藻は遮光・施肥水槽でも増え、従属栄養が示唆された。無遮光水槽に入れたマコンブの未成熟配偶体はすべて成熟し幼孢子体が出現した。その体色が濃く密度が高かったのは、屋内では施肥、屋外では非施肥水槽で、後者は珪藻の繁茂による光不足が原因と考えられた。海域の施肥投入地点でも施肥材による微細藻と大型藻の増殖効果が期待できるが、両者の競合も懸念された。

キーワード: 海洋深層水, 珪藻, マコンブ, 施肥, 転炉系製鋼スラグ

1. 緒言

日本の沿岸各地でコンブやホンダワラなどの藻場の衰退・消失、すなわち磯焼けの拡大が問題となっている(水産庁, 2007)。磯焼けの発生または持続の実態やその原因は海域によって様々で、海水温の上昇(例えば, Serisawa *et al.*, 2004)、ウニやアイゴなど植食動物による食圧の増加(藤田ら, 2006, 2008)などに関する知見が多いが、コンブ類分布域では海水中の鉄濃度の低下も懸念されている(松永, 1993; 畠山, 2008)。鉄は、海藻の生育には不可欠な微量元素の1つで(Lobban and Harrison, 1994)、国内でも、褐藻ミツイシコンブ *Saccharina angustata* の未成熟の配偶体に鉄を添加すると成熟が誘導できること(Motomura and Sakai, 1981, 1984)、紅藻のスサビノリ *Pyropia yezoensis* において、鉄が色彩の維持、特にクロロフィル *a* の生合成に重要であること(植木ら, 2010)などが示されている。海藻が利用する鉄は、森林の土壤中で生成される腐植酸(フルボ酸)と鉄が錯体化した腐植酸(フルボ酸)鉄と考えられており、河川を通じた供給量が森林の荒廃やダムの増加などにより減少したというのが磯焼けにおける鉄不足仮説である(Matsunaga *et al.*, 1994, 1998)。近年、この仮説に着目し、鉄分を多く含有する転炉系製鋼スラグ(以下、スラグ)や腐植酸(キレーター)を含む腐植物質を混合した鉄分供給材(以下、スラグ系施肥材)が開発されている(木曾ら, 2008; 加藤ら, 2008; 堤ら, 2008)。2004年10月には北海道増毛町において大規模な海域実験が行われ、半年後には海域の優占種であるホソメコンブ *Saccharina japonica var. religiosa* が繁茂したという事例

が報告された(木曾ら, 2008)。現在までに全国20ヶ所以上で実証実験が進められているが、海域では、海藻の生育に対して、光、水温、栄養塩、海水流動、植食動物、競合生物など多くの要因が変動しながら複雑に関与するため(藤田ら, 2010)、海藻の繁茂が鉄分供給による効果かどうかを厳密に判定するのは困難である。スラグ系施肥材の投入に伴う水質の変化やそれに伴う藻類への影響を確かめるためには、大型水槽を用いた培養実験が妥当である。また、その際に用いる海水としては、表層海水と比較して清浄で、水質が安定し、栄養塩が十分に存在する一方で鉄濃度が極めて低いことが示されている富山湾深層水(松永, 2001)が適していると考えた。そこで、本研究では、富山県入善町で取水されている富山湾深層水(以下、深層水)を屋内及び屋外の大型水槽に貯め、製鋼スラグ系の鉄分供給材を加え、深層水中に僅かに含まれる微細藻類や添加したマコンブ配偶体の成熟への影響を調べたので、これらの結果について報告する。

2. 材料と方法

実験は、2010年12月3日より約1ヵ月間行った。富山県入善町にある海洋深層水あわび蓄養施設にて行い、通気によって水流を起こし、施肥材からの溶出量、また非施肥水槽での水質の変化を調べるために、海水のかけ流しは行わなかった。

屋内水槽実験は、100 L水槽(製品名; アルテミア孵化槽, ポリカーボネート製)4基(A~D)に海洋深層水100 Lをそれぞれ入れた(Fig. 1)。水槽AとBにはスラグ系施肥材(炭酸化処理を施したスラグ: 腐植物質 = 2:1 重量比)をそれぞれ10

Table 1 The experimental regime of batch cultures in an indoor experiment.

Tank	A	B	C	D
Fertilizer	10 kg	5 kg	-	-
Light condition	Dark	Sunlight*	Dark	Sunlight*
Gametophyte of <i>S. japonica</i>	-	Present	-	Present
Objective	Measuring nutrients eluted from the fertilizer	Evaluation on the effect of fertilizer on kelp	Control for tank A	Control for tank B

*The translucent tanks were deployed just beside the windows in a culture house.

kg, 5 kg をメッシュ袋に詰めたものを沈設した。水槽 A と C は暗幕で遮光し、微細藻類の発生を抑えた (Table 1)。1 週間に 1 回 250 ml を採水し、水質分析を行った。水槽内で増殖した微細藻類の量を評価するために、水中のクロロフィル *a* 濃度を多波長励起蛍光光度計 (bbe 社製 Algae Online Analyser (AOA)) を用いて測定した。本機種は、クロロフィル *a* だけでなく、藻類が有するアンテナ色素を識別し、珪藻類、クリプト藻類、緑藻類、ラン藻類の 4 種に分別することができる。pH, 無機態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, 以下 TIN), リン酸態リン (以下 Phosphate-P) (オートアナライザー, ブランベール社製 TRAACS2000), ケイ酸態ケイ素 (以下 Silicate-Si) (モリブデン青法) については, 平均目合 $1\mu\text{m}$ のメンブランでろ過を行った後に分析に供した。鉄については, サンプルを静置し, 上澄みのみを分取し, 全鉄 (以下 T-Fe) として分析を行った (ICP-MS, 相本ら, 2010)。

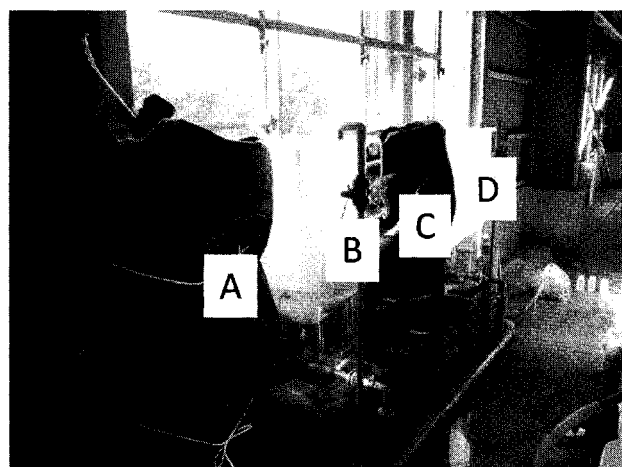


Fig. 1. The translucent 200 L tanks used for indoor batch cultures
A: Shaded and fertilized, B: open and fertilized, C: shaded and unfertilized and D: open and unfertilized.

このほか, コンプの生育に対する効果を検証するため, 水槽 B と D に未成熟のコンブ配偶体を投入し, 胞子体の形成の有無を調べた。

屋外水槽実験は, FRP 製 2000 L 水槽 2 基 (E, F) に深層水 1000 L をそれぞれ入れ, 一方 (水槽 E) にのみスラグ系施肥材 10 kg を設置した (Fig. 2)。実験条件や水質分析項目等は前述の屋内水槽実験と同様である (Table 2)。屋外水槽実験では, 浮遊性の微細藻類だけでなく, 水槽内壁に付着する付着性の微細藻類の増殖量も評価した。実験開始時に塩ビ板 (10×16 cm, 厚さ 1 mm) を内壁に貼り付け, 海水のサンプリングの際に一枚ずつ回収した。

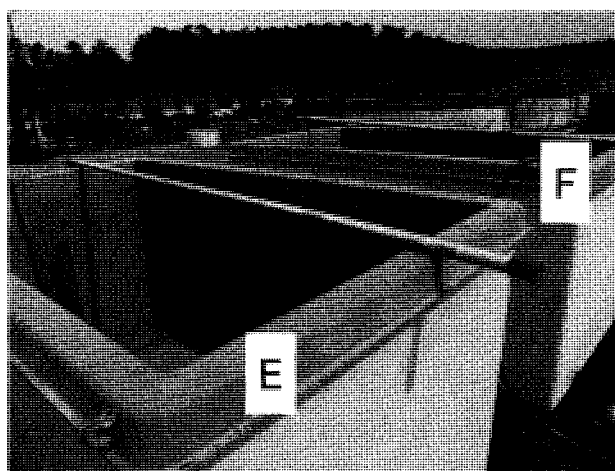


Fig. 2. The 2000 L FRP tanks used for outdoor batch cultures.

Table 2 The experimental regime for indoor batch cultures.

Tank	E	F
Fertilizer	10 kg	-
Light condition	Sunlight	Sunlight
Gametophyte of <i>S. japonica</i>	Present	Present
Objective	Evaluation of the fertilizer effect on algae	Control for E

これを実験室内に持ち帰り、板に繁茂した付着性珪藻類をゴムベラでそぎ落として、滅菌ろ過海水に懸濁させた。この懸濁液を前述の浮遊性微細藻類と同じ手順でクロロフィル *a* 量を測定した。

本実験に用いたコンブの配偶体は、以下の手順で作製した。2010年10月下旬に宮城県女川町にて子嚢斑を形成したマコンブ *Saccharina japonica* 孢子体を採取し、実験室に持ち帰り、子嚢斑部分を切り取り、洗浄し、水気を拭きとった後、一晩の冷暗処理（4℃）を施した。その後、冷やした海水の中で遊走子の放出を促し、得られた遊走子を着生板（30×160×1 mm、サカイオーベックス（株）製海藻プレート）に植え付け、恒温器内で15℃、長日条件（明期：暗期=14 h：10 h）で培養した。遊走子の放出から培養まで、配偶体が成熟しないように、ASP₁₂-NTA（Provasoli, 1963）を改変した鉄欠の人工合成培地 Fe free ASP₁₂-NTA を使用した。実験に使用する直前に、成熟していない、つまり造卵器や造精器が形成されていないことを確認し、実験に使用した。

実験終了後、着生板を実験室に持ち帰った。配偶体の成熟および受精によって得られた孢子体の観察を光学顕微鏡下で行い、葉長を計測した。得られた計測値の有意差は、*t* 検定（*p* < 0.01, *n* = 20）で確認した。

3. 結 果

2010年6月から12月にかけて、屋内・屋外水槽実験に先立って行った計4回の水質分析の結果をTable 3にまとめた。深層水の T-Fe は 1.2~3.9 μg/L と低く、変動が小さかった。pH は 7.5 以下で、表層海水よりも約1低かった。4回の分析を通して、

TIN, Phosphate-P についても濃度の変動は小さく安定していたが、Silicate-Si は 160~1700 μg/L と変動が非常に大きかった。また、深層水中に含まれるクロロフィル *a* 量は 0.64~2.21 μg/L であった。参考までに、マコンブ採集地である女川町指ヶ浜の湾口域における T-Fe は 2.8~15.0 μg/L（2010年9月~12月、未発表）であり、深層水に比べ高い濃度で大きく変動していた。

屋内水槽実験

水温は、気温の影響を受けて変動し、実験開始日に最高 20.7℃に達し、日数を経るごとに徐々に低下し、実験後期の2010年12月25日には4.2℃となった（Fig. 3）。

実験期間中の水槽 A~D における水質変化を Fig. 4 にまとめた。施肥を行い遮光した水槽 A では、実験開始直後から栄養塩（TIN, Phosphate-P, Silicate-Si, T-Fe）の濃度が上昇し、各溶出速度は、4.41 mg-N/kg-unit/day, 0.07 mg-P/kg-unit/day, 1.72 mg-Si/kg-unit/day と算出された。T-Fe は、実験開始直後に急激に上昇したが（1.2 μg/L⇒82.0 μg/L）、その後、36.0 μg/L まで減少し、再び上昇した。28日までの溶出速度は 0.02 mg-Fe/kg-

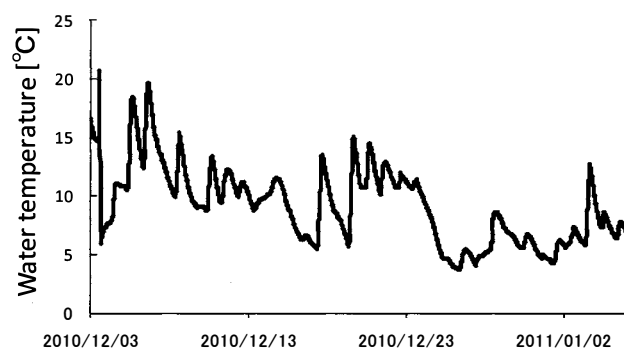


Fig. 3. Water temperature recorded during the indoor culture experiment.

Table 3 Nutrient levels of deep seawater pumped from a depth of 394 m through a pipeline at Nyuzen, Toyama.

	Inorganic nitrogen [μg/L]			Phosphate-P [μg/L]	Silicate-Si [μg/L]	T-Fe [μg/L]	pH	Chl. <i>a</i> [μg/L]
	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N					
2010/6/29	<10	<10	130	48	160	2.0	ND	ND
2010/8/20	<10	<10	70	56	1700	3.9	7.69	0.47
2010/11/4	10	<10	130	52	870	2.5	7.43	1.7
2010/12/3	50	<10	210	61	1100	1.2	7.27	0.62

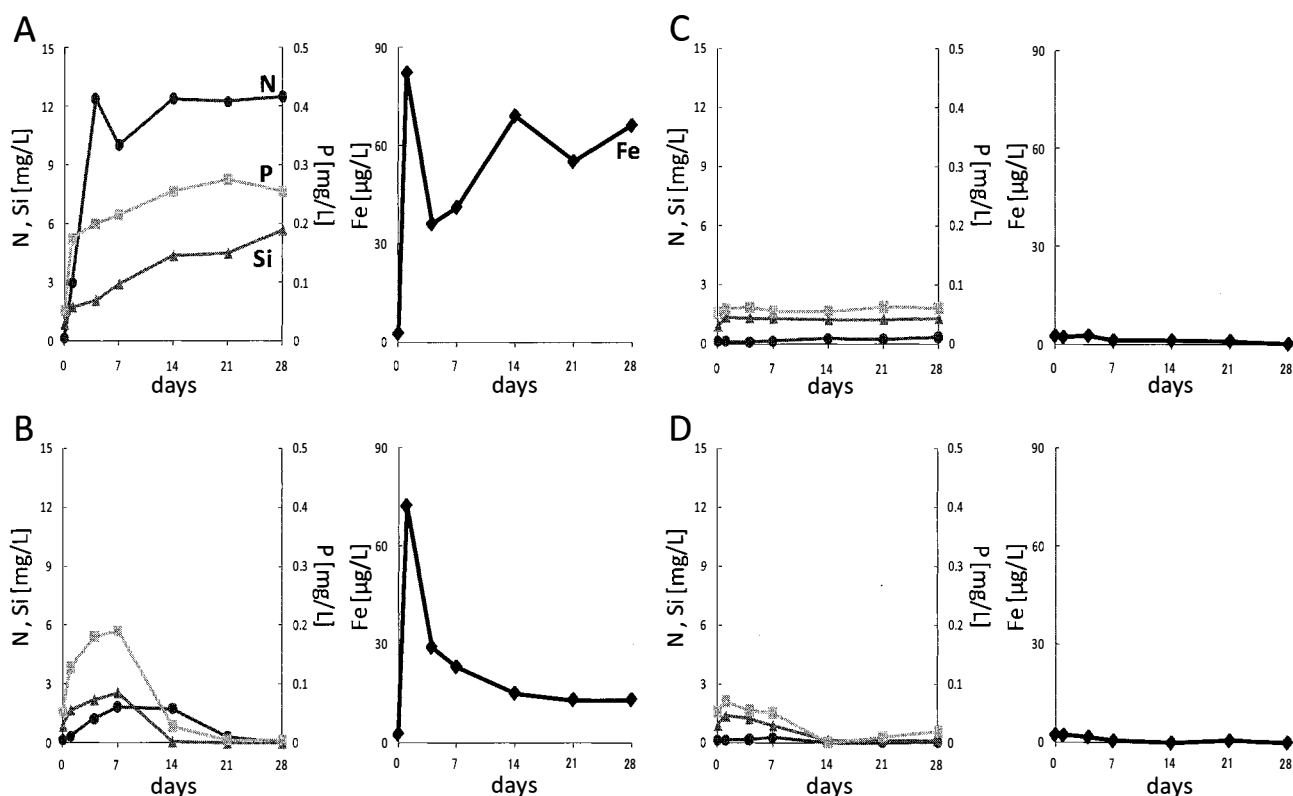


Fig. 4. The time course changes of N, P, Si and Fe concentrations in indoor batch culture tanks (A to D)
 ●: total inorganic nitrogen (N), ■: phosphate-P (P), ▲: silicate-Si (Si) and ◆: T-Fe (Fe).

unit/day となった。一方、施肥をせずに遮光した水槽 C では、実験期間中、TIN, Phosphate-P, Silicate-Si, T-Fe の濃度変化がほとんど認められなかった。施肥を行い明条件に置いた水槽 B では、水槽 A と同様に、実験開始から 7 日目頃まで TIN, Phosphate-P, Silicate-Si の濃度上昇がみられたが、それ以降、濃度は低下した。T-Fe に関しては、実験開始から 3 日目までの急激な濃度の上下動の後、緩やかに減少し、3 日目の $29.0 \mu\text{g/L}$ から $13.0 \mu\text{g/L}$ まで減少した。施肥をせずに明条件に置いた水槽 D では、実験開始以降、各種栄養塩の濃度の上昇は認められず、14 日目までには全ての分析項目で定量下限値を下回った。

水槽 A~D における深層水中のクロロフィル *a* の変化を Fig. 5 に示した。水槽 A では、遮光を施したにも関わらず、珪藻が優占して 14 日目まで増殖し ($1.7 \mu\text{g/L} \Rightarrow 11.8 \mu\text{g/L}$)、それ以降は緩やかな増殖であった。一方、水槽 C において、総クロロフィル *a* 量は、初期値 ($1.7 \mu\text{g/L}$) が 4 日目までに 1/3 以下に減少した以降、ほとんど変化が見

られなかったが、組成をみると、優占種は初期に珪藻、14 日目までにクリプト藻および藍藻、そして 28 日目には藍藻に変化していた。水槽 B では、7 日目から徐々に増殖し始め、24 日目にピークとなった ($28.1 \mu\text{g/L}$)。この水槽では、終始、珪藻が優占したが、13 日目から緑藻が増え始めた。水槽 D は、7 日目から増殖し始め、13 日に主に珪藻がパルス的に増殖し、ピークとなった ($9.14 \mu\text{g/L}$) が、24 日目以降は、ほとんどクロロフィル *a* が検出されなかった。

水槽 B および D に設置したマコンブ配偶体の着生板からは孢子体の発芽が観察され、雌雄の配偶体の成熟およびそれによって形成された卵と精子の受精が起きたと考えられた。発芽した孢子体密度は、水槽 B では 6.5×10^4 個体/cm²、水槽 D では 4.5×10^4 個体/cm² となり、スラグ系施肥材の添加区で多かった。また、水槽 D の孢子体は平均葉長が $84.2 \mu\text{m}$ ($\pm 24.6 \mu\text{m}$) であるのに対し、水槽 B では $113 \mu\text{m}$ ($\pm 22.9 \mu\text{m}$) と有意に大きく ($p < 0.01$)、色彩も鮮やかであった (Fig. 6)。

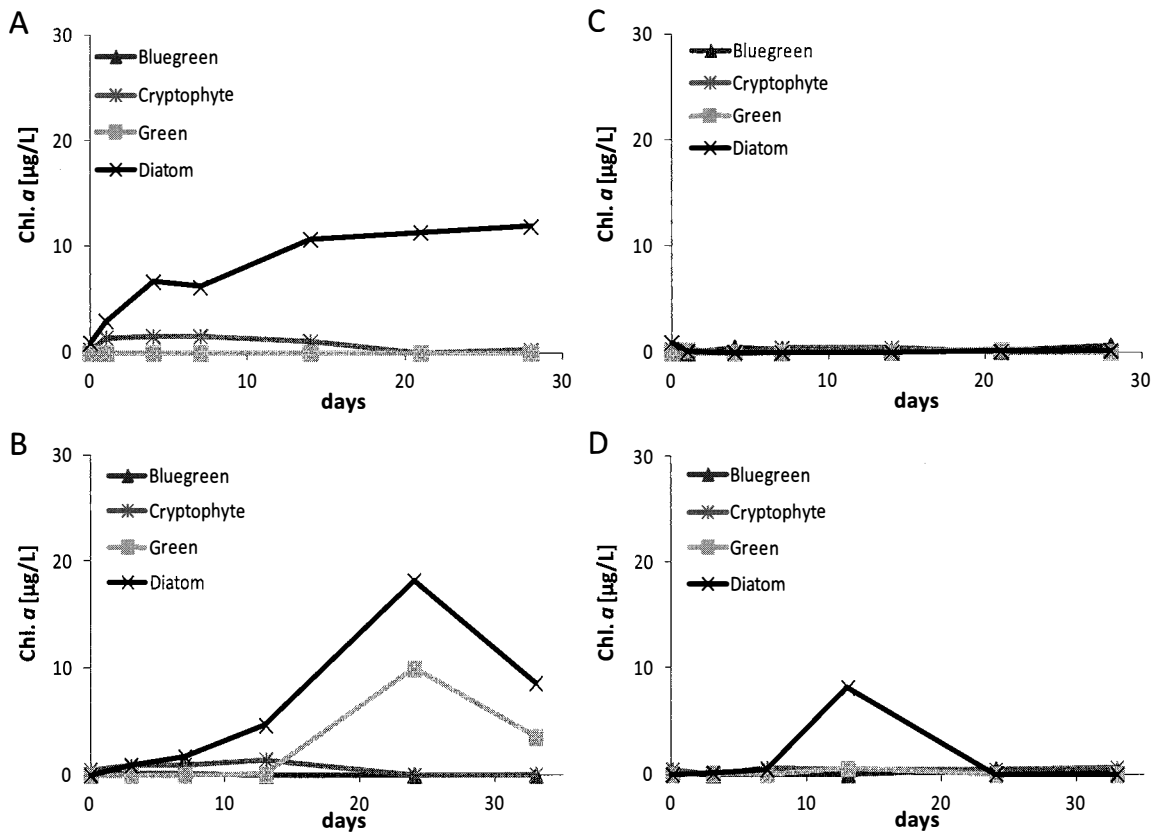


Fig. 5. Time course changes in Chl. *a* indicating densities of planktonic microalgae in indoor batch cultures (A-D).

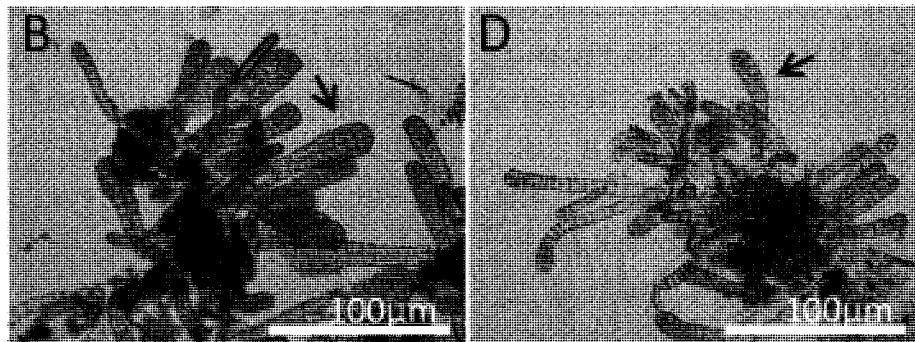


Fig. 6. The sporophytes (arrows) of *S. japonica* in indoor batch culture tanks (B and D), 33 days after the commencement of the experiment.

屋外水槽実験

水温は、実験開始日に最高 14.9 $^{\circ}\text{C}$ を記録した後、徐々に下降し、2010年12月25日には-1.0 $^{\circ}\text{C}$ にまでなった (Fig. 7).

水質は、水槽 E において6日目まで TIN, Silicate-Si の濃度が、3日目まで Phosphate-P, T-Fe の濃度がそれぞれ上昇したが、その後、TIN, Phosphate-P, Silicate-Si は減少し、24日目には分析の定量下限値を下回った。T-Fe は、13日目まで

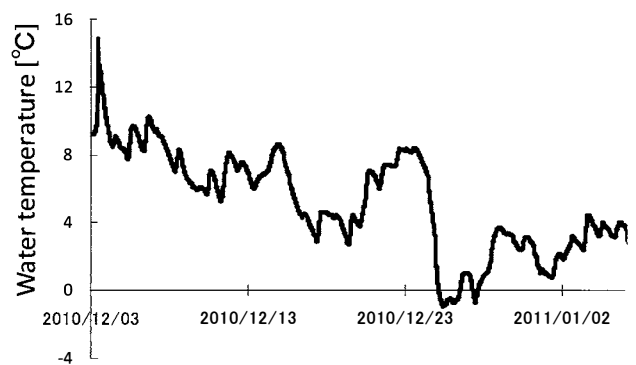


Fig. 7. Water temperature recorded during the outdoor experiment.

減少し、その後、緩やかに上昇した。一方、水槽 F では、Silicate-Si 以外は実験期間を通して減少し続けた。ただし、T-Fe に関しては 13 日目に濃度が上昇した (Fig. 8)。

水槽 E における植物プランクトン (浮遊性) の増殖は、水槽 B に類似しており、6 日目以降から主

に珪藻が増殖し始め、23 日にピークとなり (42.1 $\mu\text{g/L}$)、33 日目には約 1/4 (10.6 $\mu\text{g/L}$) にまで減少した。水槽 F では、水槽 E と同様に、6 日目から珪藻が優占して増殖し始め、13 日目にピークとなったが (5.16 $\mu\text{g/L}$)、それ以降は緩やかに減少した (Fig. 9)。付着性藻類に関しては、水槽 E で

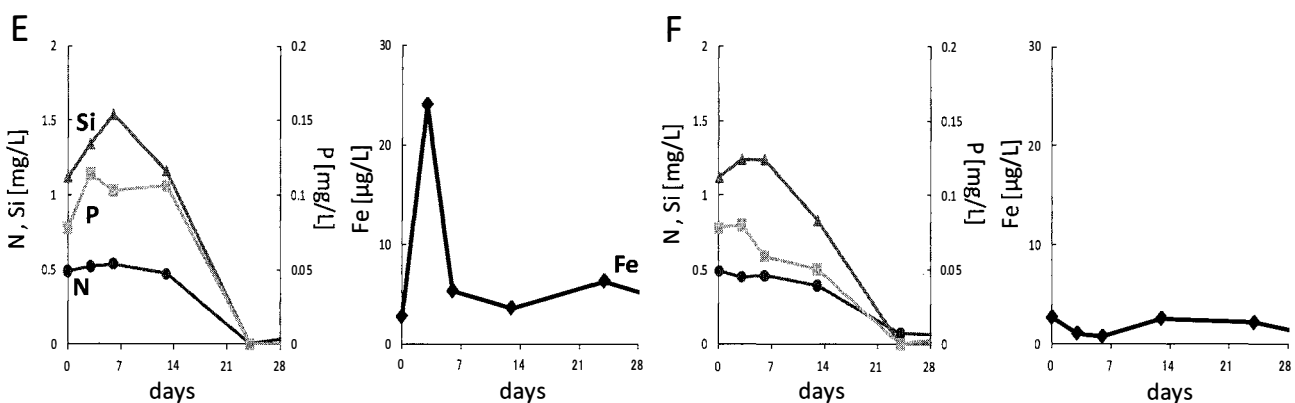
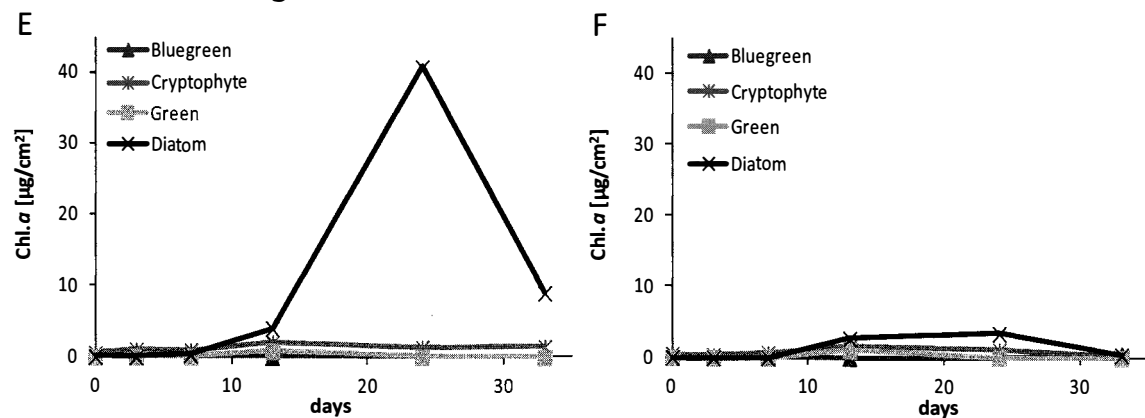


Fig. 8. The time course changes of N, P, Si and Fe concentrations in outdoor batch culture tanks (E, F) ●: total inorganic nitrogen (N), ■: phosphate-P (P), ▲: silicate-Si (Si) and ◆: T-Fe (Fe).

Planktonic microalgae



Attached microalgae

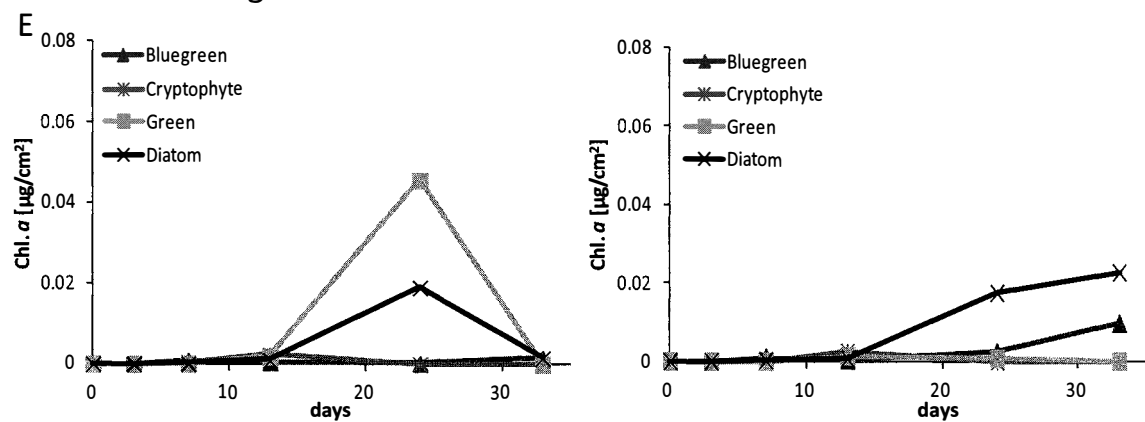


Fig. 9. Time course changes in Chl. a indicating densities of planktonic (upper) and attached (bottom) microalgae in outdoor batch culture tanks (E, F).

は浮遊性と同調的に増殖し、23日目にピークとなり、珪藻と緑藻が優占していた。水槽Fでは、13日目から緩やかに増加したが、33日目時点で水槽Eのピーク時の約1/3にとどまった (Fig. 9)。

水槽EおよびFに設置した着生板から発芽した孢子体は、水槽Eにおいて 6.7×10^4 個体/cm²、水槽Fにおいて 9.2×10^4 個体/cm² であった。さらに、水槽Fにおける孢子体は、色が濃く、細胞中に葉緑体が充満している様子であったのに対し、水槽Eでは色が薄く、脆弱であった (Fig. 10)。葉長に関しては、水槽Eで平均葉長が $66.4 \mu\text{m}$ ($\pm 12.2 \mu\text{m}$)、水槽Fで $43.3 \mu\text{m}$ ($\pm 10.3 \mu\text{m}$) となり、水槽Eで有意に大きく、施肥の効果を反映した結果となった ($p < 0.01$)。

4. 考 察

これまで、富山湾の深層水は鉄濃度が低いことが知られており (松永, 2001)、本研究でも確かめることができた。また、このような鉄濃度の低い海洋深層水を用い、100 L 規模の屋内水槽および2000 L 規模の屋外水槽で、スラグ系施肥材からの栄養成分の溶出を確認することができた。スラグ系施肥材からは、鉄だけでなく、窒素、リン、ケイ素の添加効果も認められた。スラグ系施肥材を投入した場合には、いずれの場合も投入直後に鉄濃度が上昇し、その後、水槽A ($10 \text{ kg}/100 \text{ L} = 0.1 \text{ kg/L}$) では高い水準で維持されたが、深層水容量に対するスラグ投入量が少ない水槽B ($5 \text{ kg}/100 \text{ L} = 0.05 \text{ kg/L}$) や水槽E ($10 \text{ kg}/1000 \text{ L} = 0.01 \text{ kg/L}$) では、対

照区よりは高いが、水槽Aよりも低い水準で維持された。これは、溶出した一部が藻類 (マコンプ配偶体、微細藻類) に摂取されたものと考えられた。なお、屋外水槽Eでは鉄濃度が13日目で上昇したことは、降雨、降雪、風などによる大気からの混入が考えられる。今回は、止水によるバッチ培養試験であったが、海域、特に海水流動の大きい場所では、当然のことながら拡散が起こるので、今回の実験で得られた鉄濃度水準が短期間でも海水中で維持されるのは、施肥箇所の近傍もしくは下流側に限られると推察される。

今回、スラグ系施肥材によるこれらの栄養塩の添加効果を受けて実際に藻類が反応することを屋内および屋外の水槽実験によって確かめることができた。微細藻類は、施肥材を入れた水槽 (A, B, E) において入れていない水槽 (C, D, F) よりも多く出現した。なお、屋外水槽Eでは、同じ施肥+自然光条件である屋内水槽Bと比べてスラグ系施肥材の濃度が低い (1/5程度) にも関わらず、微細藻類の濃度が高めに推移した。これは、同じ自然光でも屋内 (窓際) より屋外で日当たりが良かったこと、屋外では上記で示唆された大気由来の鉄供給が示唆されたことなどが原因と考えられる。

これまで、入善町海洋深層水施設のアワビ飼育水槽等では、珪藻の自然繁茂が知られていた (鈴木ら, 2005) が、今回の屋内および屋外の水槽実験においては、珪藻以外に、藍藻、クリプト藻および緑藻の出現も確認することができた。このうち、珪藻は水槽Cを除く全水槽で優占的に出現し、施肥+遮光条件 (水槽A) においても増殖が認められた。

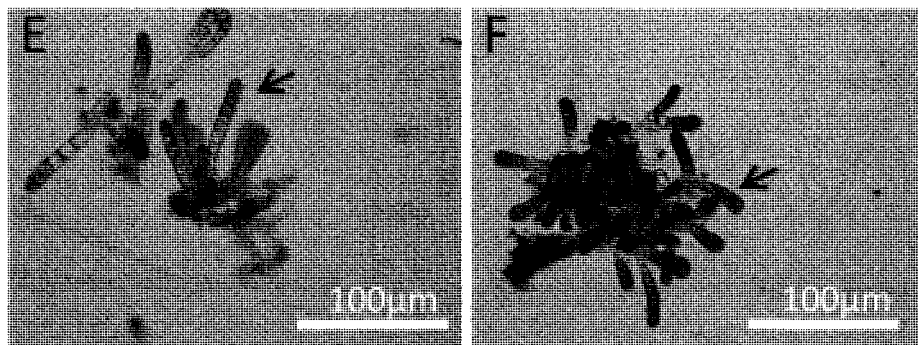


Fig. 10. The sporophytes (arrows) of *S. japonica* in outdoor batch culture tanks (E and D) on 33rd days after the commencement of the experiment (E, F).

施肥+遮光条件における珪藻の繁茂は、珪藻の従属栄養能力および暗黒中での増殖能力 (Lewin, 1953) が関与していると考えられ、スラグ系施肥材が栄養源となる有機物を供給している可能性が示唆された。珪藻以外では、施肥+自然光条件 (水槽 B, E) のみで緑藻が出現した。今回観測された珪藻や緑藻の由来は深層水中に含まれていたと断定できるわけではないが、これらの微細藻類が施肥に対して増殖したことは事実であり、海域においても施肥材の投入後に増殖する可能性が高い。

なお、珪藻 (および緑藻) を主体とする微細藻類の増殖パターンは、遮光条件下 (水槽 A) と自然光条件下 (水槽 B および E) において異なり、前者では培養当初からの漸増であったのに対して、後者では 13 日目以降増加しはじめ、24 日後にピークを迎えた。今回は、光条件以外の違いとして、スラグ投入量の違い (前者が後者の 5~10 倍) やコンブ配偶体の有無などもあり、一概に増殖パターンの違いをもたらした要因を絞り込むことはできないが、上記の珪藻の従属栄養能力などが関係しているとすれば、非常に興味深い。今後、珪藻の種の同定や詳細な検証実験を行う必要がある。

一方、スラグ系施肥材が大型藻類の増殖に貢献しているかどうかは、これまでもよく知られているマコンブ配偶体の成熟の制御 (Motomura and Sakai, 1981, 1984) を用い、雌雄の配偶体でそれぞれ形成された卵と精子の受精の結果として生じる孢子体の出現によって確認することができた。ただし、今回の実験ではマコンブ孢子体はスラグ系施肥材の有無に関わらず出現し、これまでの培養 (例えば、藤田, 2000) でも特に鉄を添加しない深層水において孢子体を得られることから、深層水程度の微量の鉄でも孢子体の形成には支障がないと考えられた。

スラグ系施肥材による栄養塩添加効果は、孢子体の体色の違いにも認められた。富山湾深層水でマコンブを培養すると、PESI 培地 (Provasoli, 1963) で培養した場合と比べて幼孢子体の体色が薄くなるのが以前から知られていた (藤田, 2000)。今回、屋内水槽実験 (水槽 B および D) では、スラグ系施肥材を投入した水槽で鉄その他の栄養塩が十分に

高く、幼孢子体の体色も濃く、密度も高くなった。しかし、屋外水槽実験 (水槽 E および F) では、逆に、スラグ系施肥材を入れなかった水槽でマコンブ孢子体の体色が濃く、密度が低くなった。屋外水槽実験で予想に反する結果が得られた理由について、水槽 E と F では、屋内水槽のように壁が透明ではなく側面からの光が入らず、また、水槽 E ではスラグ系施肥材を投入したために珪藻や緑藻が繁茂して微小なマコンブの孢子体がこれらに被われて光不足となった可能性があると考えている。

なお、今回、屋内、屋外の両実験とも水温は特に調節しなかったため、気温の影響を大きく受け、屋内水槽では 4.2~20.7°C、屋外水槽では -1.0~14.9°C で推移し、屋内では高めであったが、いずれも 15°C 以上の変動幅があった。このような急激な温度変化は、潮間帯では起こりうるがマコンブの生育する漸深帯では稀で、このような環境においてもマコンブが成熟し孢子体を形成できたことは、本種の水温変動耐性を考えるうえで、貴重な知見であろう。

以上、水槽スケールの実験で、スラグ系施肥材による栄養添加が藻類の生育に及ぼす効果を、鉄が少ないことで知られる海洋深層水を用いて示すことができた。今回の実験から明らかのように、スラグ系施肥材による栄養添加は、大型海藻のみならず、微細藻類にも影響を及ぼすため、海域での効果を考える場合には、両者の競合が起こりうることを念頭に置くべきであろう。今後、スラグ系施肥材による栄養添加効果に関する知見を深めるために、マコンブについては、さらに成長した孢子体を用いて流水培養実験を行う予定である。また、海洋深層水のように窒素やリンの濃度が低い貧栄養海水を用いた試験も行い、スラグ系施肥材による栄養塩添加技術の有効な範囲を明らかにしていきたい。

参考文献

- 相本道宏, 加藤敏朗, 木曾英滋, 堤直人, 三木理 (2010) 固相キレート抽出-誘導結合プラズマ試料分析法による海水中極微量 Fe の分析. 新日鐵技報, 390, 89-95.
- 藤田大介 (2000) 海洋深層水を利用した藻類の培養. 月刊海洋/号外, 22, 76-80.

- 藤田大介, 町口裕二, 桑原久実 (2008) 磯焼けを起こすウニ-生体・利用から藻場回復まで-. 成山堂書店, 東京.
- 藤田大介, 村瀬 昇, 桑原久実 (2010) 藻場を見守り育てる知恵と技術. 成山堂書店, 東京.
- 藤田大介, 野田幹雄, 桑原久実 (2006) 海藻を食べる魚たち-生態から利用まで-. 成山堂書店, 東京.
- 畠山重篤 (2008) 鉄が地球温暖化を防ぐ. 文芸春秋, 東京.
- 加藤敏朗, 相本道宏, 三木 理, 中川雅夫 (2008) 製鋼スラグ等の海域施肥試験における海域 Fe 濃度分布に関する検討-転炉系製鋼スラグ等を用いた藻場造成技術開発(2)-. 第 20 回海洋工学シンポジウム.
- 木曾英滋, 堤 直人, 渋谷正信, 中川雅夫 (2008) 海域施肥時のコンブ等の生育に関する実海域実験-転炉系製鋼スラグ等を用いた藻場造成技術開発(1)-. 第 20 回海洋工学シンポジウム.
- Lewin, J. C. (1953) Heterotrophy in diatoms. *J. Gen. Microbiol.*, 9, 305-313.
- Lobban, C. S. and P. J. Harrison (1994) *Seaweed ecology and physiology*, Cambridge University Press, New York, 366 pp.
- 松永明信 (2001) 深層水の成分及び清浄性, 21 世紀の資源 富山湾深層水 (富山湾深層水利用研究会編), pp. 4-5. 桂書房, 富山.
- 松永勝彦 (1993) 森が消えれば海も死ぬ 陸と海を結ぶ生態学. 講談社, 東京.
- Matsunaga, K., J. Nishioka, K. Kuma, K. Toya and Y. Suzuki (1998) Reverine input of bioavailable iron supporting phytoplankton growth in Kesennuma Bay (Japan). *Water Res.*, 11, 3436-3442.
- Matsunaga, K., Y. Suzuki, K. Kuma and I. Kudo (1994) Diffusion of Fe(II) from an iron propagation cage and its effect on tissue iron and pigments of macroalgae on the cage. *J. Appl. Phycol.*, 6, 394-403.
- Motomura, T. and Y. Sakai (1981) Effect of chelated iron in culture media on oogenesis in *Laminaria angustata*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 47, 1535-1540.
- Motomura, T. and Y. Sakai (1984) Regulation gametogenesis of *Laminaria* and *Desmarestia* (Phaeophyta) by iron and boron. *Jpn. J. Phycol.*, 32, 209-215.
- Provasoli, L. (1963) Growing marine seaweeds. In "Proc. IVth Internat. Symp. 1961" (ed. by AD. DeVirville and J. Feldmann), Pergamon Press, Oxford, pp. 9-17.
- Serisawa, Y., Z. Imoto, T. Ishikawa and M. Ohno (2004) Decline of the *Ecklonia cava* population associated with increased seawater temperatures in Tosa bay, southern Japan. *Fish. Sci.*, 70, 189-191.
- 水産庁 (2007) 磯焼け対策ガイドライン, 水産庁.
- 鈴木秀和, 藤田大介, 南雲 保 (2005) 富山県入善町の海洋深層水アワビ養殖施設に出現した付着珪藻. *日本歯科大学紀要・一般教育系*, 34, 55-62.
- 堤 直人, 加藤敏朗, 本村泰三, 中川雅夫 (2008) 海域施肥時のコンブ等の生育に及ぼす施肥原料成分の影響に関する水槽実験結果-転炉系製鋼スラグ等を用いた藻場造成技術開発(3)-. 第 20 回海洋工学シンポジウム.
- 植木知佳, 村上明男, 加藤敏朗, 嵯峨直恆, 本村泰三 (2010) 紅藻スサビノリの光合成色素と葉緑体微細構造における栄養欠乏応答. *日水誌*, 76, 375-382. (2011 年 12 月 19 日受付; 2012 年 2 月 27 日受理)