

鉄鋼スラグを利用した養殖ノリへの施肥の試み

伊藤龍星*

Trial of Fertilization by Using Iron and Steel Slag for Cultivated Nori *Porphyra yezoensis*

RYUSEI ITO

大分県農林水産研究指導センター水産研究部浅海・内水面グループ

Shallow/Fresh Water Group, Fisheries Research Division
Oita Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries Research Center

キーワード：色調、生長、施肥、鉄鋼スラグ、ノリ、pH

緒 言

ノリ養殖において、葉体の色落ちは大きな問題である。色落ちしたノリは、焼き色が出ず味や食感も良くないため、下級品として低単価で取引される。特に 2000 年 12 月に発生した有明海での養殖ノリの色落ち騒動^{1,3)}以降、瀬戸内海や東京湾、仙台湾、博多湾等の各地からも色落ちに関する報告がなされ⁴⁾、いまや「色落ち」は、日本各地のノリ養殖漁場に共通する問題として認識されている。色落ちの原因は、主に海水中の栄養塩の減少によるが、瀬戸内海では特に 2000 年以降、溶存無機態窒素（DIN）の不足が顕著となっている⁵⁾。周防灘西部沿岸に位置する大分県ノリ養殖漁場でも、2005 年度以降の DIN の平均値は、それまでの 1/2 程度（約 50 μ g/L \approx 3.6 μ M）で推移しており⁶⁾、ノリの色調は薄く単価も低迷している。さらにその沖合域を含む周防灘西部大分県海域全体の DIN も減少傾向にあり、近年はピーク時（1972 年、3.7 μ M）の 1/3 ～ 1/2 に低下する⁷⁾など、当該海域の窒素不足は深刻な状況にある。

ノリ養殖漁場への栄養塩供給のために、施肥の素材や施肥方法に関する試験は古くから各地で実施されて

おり^{8, 9)}、近年では培養による色調回復試験^{10,11)}や色落ち時のノリ細胞内の構造変化等^{12,13)}の報告も見られている。しかし、現場で発生する色落ちに対しての効果的対策はいまだに確立されていない。そこで近年、海藻への施肥効果や藻場造成用基質としての利用が検討されている鉄鋼スラグの養殖ノリへの施肥の可能性を検討するため、スラグ製品とその構成材を用いて、色落ちした養殖ノリの生長と色調回復に関する室内培養実験を行った。また、それらの海水投入後の pH 変化についても調査したので報告する。

方 法

養殖ノリの生長と色調 供試葉体は、中津市沿岸の支柱式ノリ養殖漁場で育苗されていた養殖ノリ（*Porphyra yezoensis*）とした。2010 年 11 月上旬にノリ網から採取して研究室に持ち帰り、砂ろ過した海水を入れたバット内に常温、通常光で約 2 週間静置して、ある程度色落ちしたものを使用した。

鉄鋼スラグは生成工程で高炉スラグと製鋼スラグに大別される¹⁴⁾。今回使用したスラグ製品は、「鉄分供

*現所属：大分県 農林水産部 水産振興課

*1 岩野英樹：周防灘の生物生産を支える栄養塩の動向。おおいたアクア・ニュース No.25：大分県海洋水産研究センター，p7-8（2007）

*2 伊藤龍星：ノリ漁場共同施肥効果調査。平成 8 年度大分県水産業改良普及活動関係実績報告集，p31-34。

給ユニット」¹⁴⁾とよばれ、人工的に腐植酸鉄を生成させる目的で、転炉系製鋼スラグと、木材チップを発酵させた腐植土を混合したもので構成されており¹⁴⁾、対象海域にこの製品を設置して、現場の鉄分濃度を上昇させることを目的としている¹⁴⁾。今回はこの「鉄分供給ユニット」と、それを構成する「製鋼スラグ」（大きさ約 1～3cm の小石状）、「腐植土」の 3 つを用いて実験を行った（図 1-A）。溶媒の培養海水は、培養液（Erd-Schreiber の培地 1L に須藤の改変 P1 溶液 1mL を添加して加熱殺菌したもの¹⁵⁾）と低栄養塩海水（前述の色落ちたノリを静置培養していたバット内のろ過海水）の 2 つとし、これらを組み合わせて、次の 1～5 の 5 区を設定した。

1. スラ グ 区：製鋼スラグ 25g
+ 低栄養塩海水 500mL（5%W/V）
2. ユニッ ト 区：鉄分供給ユニット 50g
+ 低栄養塩海水 500mL（10%W/V）
3. 腐 植 土 区：腐植土 50g
+ 低栄養塩海水 500mL（10%W/V）
4. 低栄養塩区：低栄養塩海水 500mL のみ
5. 培 養 液 区：培養液 500mL のみ

試験設定については、実際に海域に設置する場合には製品（鉄分供給ユニット）の形態になると思われるため、これを基準として腐植土区の腐植土は鉄分供給

ユニットと同量の 50g とした。しかしスラグ区は製鋼スラグを 50g（10%W/V）にすると培養海水の pH がほぼ 8.5 になり（後述の実験結果図 4 参照）、ノリの生長や生理への悪影響が懸念されるため¹⁶⁾、半分の 25g とした。また、1、2、3 については、各溶質の所定量を溶媒の低栄養塩海水 500mL に 5 日間浸漬したのち、ろ紙ろ過した抽出液を使って培養を開始した。開始時、1 の抽出液は無色であったが、2 と 3 はわずかに黄褐色を帯びていた。

培養容器は各区 500mL の枝付きフラスコ 1 個とし、それぞれに長さ 20～25mm のノリ葉体 4 枚ずつ（全平均全長 23mm）を投入した。投入前には、エリスロシン染色による葉体健全度の判定と、光学顕微鏡による寄生性病害の有無についての観察を行った。なお、低栄養塩海水の DIN 濃度測定は行っていないが、実験に使用するまでの養殖ノリの代謝活動のために、DIN の多くはすでに消費されていたと推定される。

実験開始は 2010 年 11 月 26 日とし、開始直前に各区の pH を測定した。また、3 日後（11 月 29 日）、6 日後（12 月 2 日）、11 日後（12 月 7 日）にノリ葉体の生長と色調を観察した。11 日後には全長を測定し、値は Tukey-Kramer の多重比較検定（ $p < 0.01$ ）を行った。色調は、葉体を色見本票（アマノリ品種の葉状体の色調評価用の色見本票（暫定版）、平成 19 年度漁場環境・

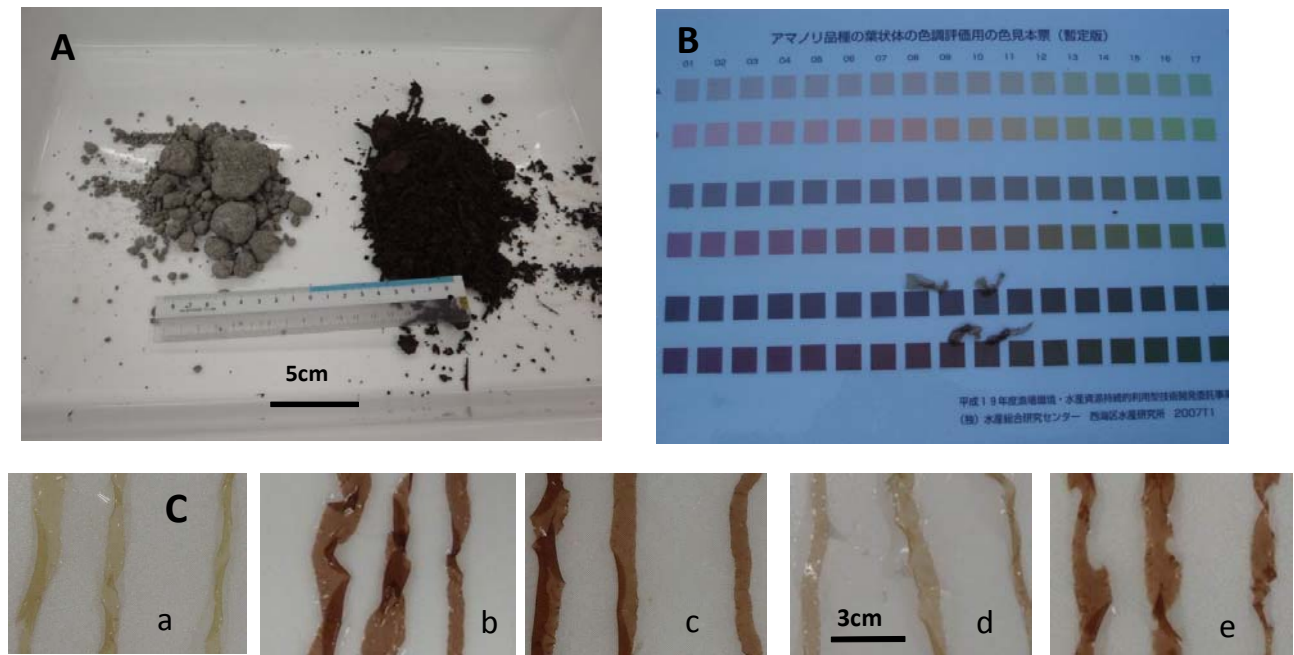


図 1 製鋼スラグと養殖ノリの培養実験

A：実験に使用した製鋼スラグ（左：大きさ約 1～3cm の小石状）と鉄分供給ユニット（右：製鋼スラグと腐植土を混合したもの）、B：色調の評価に使用した色見本票、C：培養 11 日後の各区のノリ葉体の色調（a スラグ区、b ユニット区、c 腐植土区、d 低栄養塩区、e 培養液区）

水産資源持続的利用型技術開発委託事業、西海区水産研究所配布、図 1-B) 上に広げて、肉眼で最も近い色見本票の色を選び、その色を $L^*a^*b^*$ 表色系で測定した値で示した。この表色系でノリの色調を示した場合、 L^* 値 (明度) と a^* 値 (彩度) は肉眼での評価と高い相関が見られ、色が薄くなると、 L^* 値は大きくなり a^* 値は小さくなることが知られている¹⁷⁾。また、 L^* 値 60 以上で色落ちの初期的兆候となり、73 以上で色落ちとするなどの判断基準も示されている¹⁷⁾ ことから、考察ではこれらの知見を利用した。培養環境はすべて温度 15℃、光量 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、光周期 10L:14D とした。観察のあと、各区の海水は再び培養容器に戻してから培養を続けた。

製鋼スラグと鉄分供給ユニット、腐植土の投入による海水 pH の変化 製鋼スラグや鉄分供給ユニット、腐植土をろ過海水に入れた際の pH の変化を調べた。砂ろ過海水 500mL を入れたビーカー 5 つを準備し、それぞれに次の試料 (製鋼スラグ 25g (5%W/V) と 50g (10%W/V)、鉄分供給ユニット 50g (10%W/V)、腐植土 25g (5%W/V) と 50g (10%W/V) を投入した。pH の測定は、投入直前と、投入して攪拌後すぐ (投入約 1 分後)、その後 48 時間静置したのち攪拌後すぐの計 3 回とした。

結 果

養殖ノリの生長と色調 実験に使用したノリのエリスロシン染色率は 5%未満と低く葉体の健全度に問題はなかった。また、アカグサレ病や壺状菌病等の寄生性病害の感染も確認されなかった。実験開始直前の各区の pH は、スラグ区 8.31、ユニット区 7.97、腐植土区 7.50、低栄養塩区 7.88、培養液区 7.84 であり、スラグ区のみ pH8 を超えていた。開始 3 日後は各区の生長にはほとんど差はなかったが、6 日後には差が生じた。11 日後の生長の結果を図 2 に示した。ユニット区、腐植土区、培養液区の葉長はいずれも約 120mm に達した。しかし、スラグ区では約 70mm、低栄養塩区では約 50mm に過ぎず、前 3 区と後 2 区との間では危険率 1% で有意差が見られた。前 3 区内、後 2 区内での有意差は認められなかった。

色調の結果を図 3 に示した。 L^* 値は培養 3 日後までは 5 区ともに約 41.48 ~ 41.82 の範囲で差はみられなかった。6 日後、11 日後ともにユニット区、腐植土区、

培養液区の 3 区は同じ 40 台で推移した。しかし、スラグ区と低栄養塩区は、6 日後には色落ちの初期的兆候といわれる 60 を超えて 61.83 に、11 日後には 62.02 となった (図 3-A)。 a^* 値は開始時 12.60 であった。ユニット区と腐植土区では培養期間を通じて 12 ~ 13 の範囲で推移した。培養液区では 3 日後に 17.60、6 日後には 20.74、11 日後は 13.58 となり、これら 3 区の終了時の値は開始時とほぼ同じであった。対して、スラグ区と低栄養塩区では、3 日後にはそれぞれ 7.43、11.25 と開始時より低下した。6 日後には両区ともに 3.83、11 日後には 6.56 となり、開始時より低下したままであった (図 3-B)。

肉眼では、ユニット区、腐植土区、培養液区の 3 区は 3 日後の観察で、わずかながら他区よりも色調が濃くなった。6 日後、これらの 3 区はともにより色濃くなり、11 日後には 3 区ともに濃い茶色にやや赤みが混じる色調にまで回復した。3 区間の色調の違いはほと

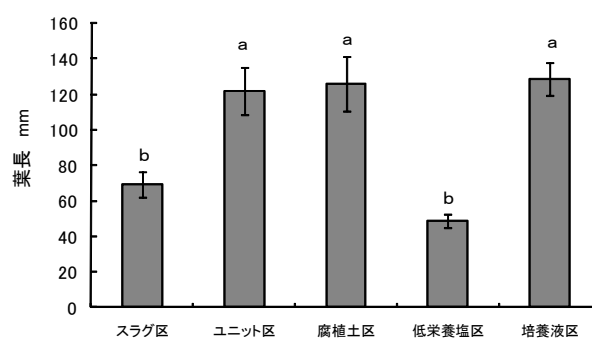


図 2 培養 11 日後の各区の養殖ノリの生長

(縦棒は標準偏差、同一アルファベット間には有意差がないことを示す、 $p < 0.01$)

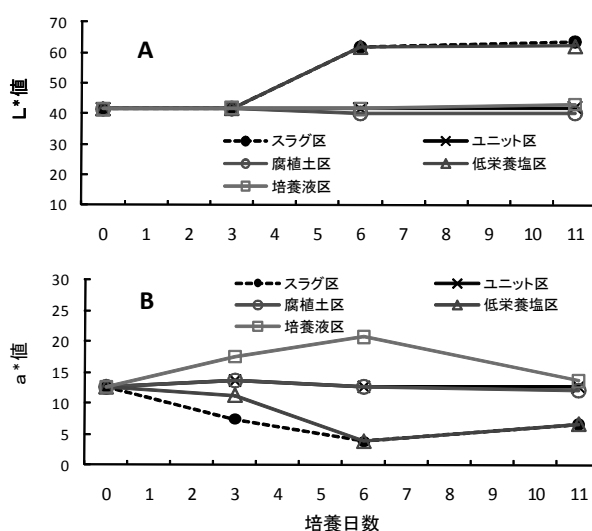


図 3 培養による養殖ノリの色調の変化

A: L^* 値 (明度) B: a^* 値 (彩度)

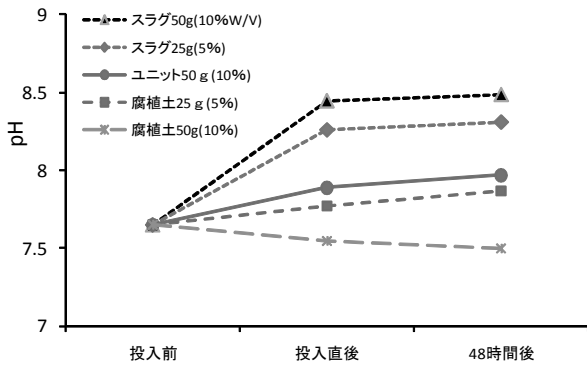


図 4 製鋼スラグと鉄分供給ユニット、腐植土の投入による海水 pH の変化

んど認められなかった（図 1-C の b, c, e）。対して、スラグ区と低栄養塩区のノリ葉体の色調はいずれも非常に薄く、明らかに色落ちした状態であった。スラグ区の色調は低栄養塩区よりもわずかに黄色がかってみえた（図 1-C の a, d）。

製鋼スラグと鉄分供給ユニット、腐植土の投入による海水 pH の変化 投入前のろ過海水の pH は 7.65（水温 12.4℃）であった。投入後、スラグ 25g（5%W/V）と 50g（10%W/V）、鉄分供給ユニット 50g（10%W/V）、腐植土 25g（5%W/V）の pH は上昇した。スラグ 25g と 50g の pH 上昇は他よりも大きく、50g で投入直後に 8.45、48 時間後に 8.49 であり、25g ではそれぞれ 8.26、8.31 であった。対してユニット 50g と腐植土 25g の pH 上昇は小さく、48 時間後でもそれぞれ 7.97 と 7.87 であった。腐植土 50g（10%W/V）の pH は投入前よりもわずかに低下し、48 時間後には 7.50 であった（図 4）。

考 察

製鋼スラグの水産分野への利用としては、北海道など北日本での磯焼け海域を中心とした場所での鉄分供給の目的や、水和固化体人工石による投石、浚渫土に混合し土壌改良に使用した例など¹⁴⁾が見られる。また、岡山県海域における試験¹⁸⁾では、スラグ礁（炭酸固化体）は、海藻の付着基質としてコンクリートと同等の評価がなされている。一方、高炉水砕スラグでは、覆砂材として利用する場合の海水中での固結や全硫化物、pH 上昇、水産生物体内への残存等の課題が指摘されている。^{19,20)}また、大分県海域に設置した鉄鋼スラグ礁における海藻植生調査によると、現状では実験区は対照区や周辺海域との差が明確にはみられていない状況にあ

る²¹⁾。

今回、実験を行った範囲では、養殖ノリの生長、色調回復とともに、製品の状態である鉄分供給ユニット区、腐植土のみを使用した腐植土区、そして従来の培養液を使用した培養液区の 3 区が良好であった。対して、製鋼スラグのみのスラグ区と低栄養塩区での生長と色調は、いずれも不良であった（図 1C、図 2、図 3）。張ら¹²⁾は、有明海の色落ちノリを分析した結果、N、P に加えて微量元素 Fe、Zn、Mn、Cu の欠乏がノリの色落ちを誘起する直接原因であるとしているが、ユニット区、腐植土区、培養液区ではこれらの供給により色調が回復したものと思われる。対してスラグ区と低栄養塩区では、これらの供給がなかったか微量であったために、生長や色調が不良であったと推察される。また、スラグ区ではノリ葉体の色調がわずかに黄色みを帯びていたが（図 1C の a）、これはスラグ投入による pH 上昇の影響とも推察される。

生長や色調回復が良好であった 3 区について、DIN や微量元素、腐植酸鉄¹⁴⁾等の濃度を調べていないため、何が有効に作用したのかは明言できないが、ユニット区と腐植土区に共通している腐植土の成分に由来すると思われるので、今後は各成分分析等を念頭においた試験設定を行いたい。また、今回の実験では、養殖ノリに対する製鋼スラグや鉄分供給ユニット、腐植土の至適な濃度についての検討はしておらず、これらの知見も現状ではほとんどない。このため、成分の過剰投与や pH 上昇による生長阻害、あるいは投与不足の可能性も否定できず、今後はこれらについても検討していく必要がある。

製鋼スラグを海水に投入すると CaO（石灰）の溶出等で pH が大きく上昇するため¹⁹⁾、生物への悪影響が懸念される²⁰⁾。今回使用した製鋼スラグは、炭酸化製鋼スラグ²²⁾とよばれ、製鋼スラグに炭酸ガスを接触させ、表面に炭酸カルシウムを生成させて中性化させたものであった。このため、実験での pH 変化も無処理のスラグに比べるとかなり小さかったと推定され、濃度 10%W/V で pH8.49 までの上昇であった（図 4）。しかし、ノリ養殖の場合、pH8.4 を超すとノリの生長が遅れるなどの生理的悪影響が生じ、9.0 以上で葉体の死細胞が増加し、生長に顕著な影響がみられるとされている¹⁶⁾。実際のノリ漁場では、常に海水交換が起こっており、今回のフラスコ実験のような閉鎖的環境にはなりえないと思われるが、今後ノリ漁場周辺でスラグ関連品を使用する場合には、海域の pH 変化について留意しておくべきであろう。またノリ養殖の場合、生

産されたノリはすべてが食用に供されるため、施肥用素材の環境に与える影響や人体への安全性については、関係団体で組織される漁場造成・再生用資器材の技術評価の仕組み^{*3}を利用するなどして十分に確認しておく必要がある。

藤原⁵⁾は、「瀬戸内海はすでに十分美しい海になっており、透明度 8m 以上ではクロロフィル a 濃度は 2 μ g/l 以下であり、このような海域では餌不足でアサリ、養殖カキが育たなくなる。河口域型生態系に根ざした漁業（ノリ養殖等）は、現状形態のままでの継続は困難になる」としている。当該海域の窒素不足は深刻であり、ノリ養殖に限らず多くの漁業や養殖業がその影響を受けるものと懸念される。即効性のある肥料や施肥技術、河川水や下水・汚水処理施設を利用した栄養塩添加技術の開発等について早急に検討すべきと考える。

摘 要

鉄鋼スラグの養殖ノリへの施肥効果を検討するため、スラグ製品（鉄分供給ユニット）とその構成材（製鋼スラグ、腐植土）を用いて、色落ちした養殖ノリの生長と色調回復に関する室内培養実験を行った。また、それらの海水投入後の pH 変化について調査した。

- 1 養殖ノリの生長、色調回復ともに、ユニット区（鉄分供給ユニット：製鋼スラグと腐植土を混合したもの、10%W/V）、腐植土区（10%W/V）、培養液区の 3 区が良好であった。
- 2 スラグ区（5%W/V）と低栄養塩区では生長、色調回復ともに不良であった。
- 3 海水に投入すると、製鋼スラグ 25g（5%W/V）と 50g（10%W/V）の pH は上昇し、50g で投入直後 8.45、48 時間後には 8.49 であった。鉄分供給ユニット 50g（10%W/V）と腐植土 25g（5%W/V）の pH 上昇は小さく、腐植土 50g（10%W/V）の pH はわずかに低下した。

謝 辞

本論文をとりまとめるにあたり、色見本票の表色系構成や各色の L * a * b * 表色系の値をご教示いただいた（独）水産総合研究センター西海区水産研究所の玉城泉也殿に深謝いたします。また、培養実験や色調判定にご協力いただいた企業組合すくらむの澤井香織様、土谷園子様にお礼申し上げます。

引用文献

- 1) 川村嘉応. 平成 12 年度佐賀県有明海のノリ養殖の不作と珪藻の大増殖. 海苔と海藻 2001 ; 62 : 1-12.
- 2) 藤井弘治. 有明海減産の影響. 海苔と海藻 2001 ; 62 : 13-16.
- 3) 鬼頭 鈞. 有明海問題に関連して. 海苔と海藻 2001 ; 62 : 17-19.
- 4) 藤原建紀, 渡邊康憲, 樽谷賢治編. 海の貧栄養化とノリ養殖. 海洋と生物 2009 ; 31 (2) : 109-172.
- 5) 藤原建紀. ミニシンポジウム記録 瀬戸内海の栄養塩不足とその対策—河川水利用技術の開発— 1. 瀬戸内海の栄養塩と生物生産. 日本水産学会誌 2011 ; 77 (1) : 111.
- 6) 伊藤龍星, 原 朋之, 樋下雄一, 岩本郁生. 資源・環境に関するデータの収集・情報の提供— 5 ノリ養殖安定対策推進事業（情報の提供と技術指導）. 平成 22 年度大分県農林水産研究指導センター水産研究部事業報告 2011 ; 230-233.
- 7) 三浦昭雄. ノリ養殖における施肥の方法. 水産増殖 1957 ; 4 (4) : 43-48.
- 8) 松尾新一, 広吉正昭, 藤田孟男, 山下輝昌, 本田清一郎. 有明海福岡海域のノリ養殖における集団施肥— I 昭和 52 年度の施肥効果について. 昭和 52 年度福岡県有明水産試験場研究業務報告 1979 ; 58-81.
- 9) 石川佑司, 田染博章, 国武和人, 吉武 肇. ノリ漁場における施肥に関する調査— I . 長洲地先における連続観測結果. 昭和 55 年度大分県浅海漁業試験場事業報告 1982 ; 10-17.
- 10) 白石日出人. ノリ葉体の色調変化に関する研究. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 2010 ; 20 : 131-134.

*3 原 武史：製鋼スラグの安全性と水産業界への利用の展望—製鋼スラグの海生生物への安全性試験と今後の利用の展望—。平成 22 年度海洋理工学会秋季大会要旨集, p22 (2010)

- 11) 藤原宗弘. ミニシンボジウム記録 瀬戸内海の栄養塩不足とその対策－河川水利用技術の開発－ 3.ノリの栄養塩取り込み－ノリは間欠的な栄養塩供給を利用できるか－. 日本水産学会誌 2011 ; **77**(1) : 113.
- 12) 張 経華, 佐藤友規, 丸山亮馬, 高尾雄二, 畝中佑, 藤田雄二, 山崎素直. 有明海のノリの色落ちと微量元素欠乏－特に鉄欠乏について. 日本海水学会誌 2009 ; **63**(3) : 158-166.
- 13) 植木知佳, 村上明男, 加藤敏朗, 嵯峨直恆, 本村泰三. 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. 日本水産学会誌 2010 ; **76**(3) : 375-382.
- 14) 横尾正義. 新日本製鐵の海域環境改善への取組みについて～鉄鋼スラグ（製鉄副産物）の有効利用～. 瀬戸内海 2009 ; **57** : 41-43.
- 15) 田宮 博, 渡辺 篤. 「藻類実験法」南江堂, 東京. 1971 ; 88-104.
- 16) 中尾義房. コンクリート"アク"がノリにおよぼす影響. 佐賀県有明水産試験場研究報告 1986 ; **10** : 123-125.
- 17) 小谷正幸. ノリ葉体の色落ちの数値化. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 2000 ; **10** : 49-50.
- 18) 亀井良則, 杉野博之, 佐藤二郎. 鉄鋼スラグの藻場造成基質としての機能評価. 岡山県水産試験場報告 2008 ; **23** : 15-19.
- 19) 三上信雄, 石岡 昇, 川岸 寛, 松尾章子. 鉄鋼水砕スラグを利用した漁場造成の可能性. 日本水産工学会学術講演会講演論文集 2007 ; 271-274.
- 20) 俵積田貴彦, 佐藤利幸, 江藤拓也, 中川浩一. 水砕スラグの覆砂材としての機能評価. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 2008 ; **18** : 39-45.
- 21) 井本有治, 景平真明, 岩野英樹, 宮村和良, 大屋寛, 松井崇憲, 森 京子. フルボ酸鉄による藻場造成力実証試験. 平成 22 年度大分県農林水産研究指導センター水産研究部事業報告 2011 ; 137-146.
- 22) 三木 理, 加藤敏朗, 楠井隆史. 海洋性発光細菌および動物性プランクトンを用いた鉄鋼スラグ溶出液のバイオアッセイ. 水環境学会誌 2010 ; **33**(9) : 141-146.