磯焼け対策における施肥に関する技術資料

平成 27 年 3 月

水産庁漁港漁場整備部

はじめに

磯焼けの一因として栄養塩不足が指摘され、その対応策として施肥が検討されている。海藻の生育には栄養塩が必要である。磯焼けした海域において、藻場の回復を期待して施肥の試験が行われることがあり、効果が見られたとする事例も報告されている。しかしながら、試験後も継続的に施肥を行い、効果を維持している事例はない。そのような背景から、これまでの磯焼け対策や藻場造成の参考図書には、具体的な施肥の技術に関して詳細な解説が示されていなかった。

しかしながら、漁業者が取り組む磯焼け対策の一つには、「栄養塩供給（施肥）」が挙げられており、近年では窒素系肥料のみならず、鉄分の供給による磯焼け対策試験が実施されるようになった。そのような中で、漁業者からは施肥材の選定や施肥方法など、導入に関する基礎的な技術資料が切望されるようになった。現在のところ、施肥方法は開発段階のものも多いが、本技術資料では、これまで実施されてきた施肥試験を参考に、磯焼け海域において施肥を実施する際の基本的な考え方や課題を整理した。

本技術資料は「水産生物の生活史に対応した漁場環境形成推進委託事業のうち各生活史段階に応じた漁場機能を強化する技術の開発・実証事業」（平成 23～26 年度）においてに実施した調査の一部を「改訂版　磯焼け対策ガイドライン（平成 27 年 3 月水産庁）」とともにまとめたものである。

本書の使い方

磯焼け海域における施肥の効果については未解明な事項が多く、適切な施肥を計画することは容易ではない。磯焼け海域において、施肥によって藻場の回復に取り組む際に、本技術資料を参考に、解決すべき課題を明解にして目標を設定し、事業の可能性を検討していただきたい。

目　　次

1 海藻と栄養塩 1
1.1 栄養塩とは 1
1.1.1 栄養塩「窒素」、「リン」 1
1.1.2 微量元素「鉄」 2
1.2 沿岸域の栄養塩濃度の傾向 3
1.2.1 窒素やリンの動態 3
1.2.2 鉄の動態 4
1.3 海藻を対象にしたレッドフィールド比 5
1.3.1 レッドフィールド比とは 5
1.3.2 海藻を対象にしたレッドフィールド比 5
1.3.3 海藻中の鉄含量 6
1.4 海藻の生長に必要な栄養塩濃度 7
1.4.1 海藻の生長に必要な窒素とリンの濃度 7
1.4.2 海藻の生長に必要な溶存態鉄濃度 7
1.5 流速と栄養塩濃度（栄養塩フラックス） 9
2 施肥とは 10
2.1 施肥の原則 10
2.2 既往の施肥実験の概要 10
2.3 近年に実施された施肥に関する技術的課題 12
3 施肥の導入時の考え方 14
3.1 施肥の検討フロー 14
3.2 不足する栄養塩の成分の把握 15
3.2.1 水質調査（窒素、リン）の方法 15
3.2.2 溶存態鉄濃度の測定方法 15
3.3 施肥材の選定 16
3.3.1 化学肥料 16
3.3.2 有機肥料 16
3.3.3 鉄分供給施肥材 16
3.4 施肥材の投入量の設計 18
3.4.1 溶出速度の把握 18
3.4.2 簡易な拡散計算による投入量の算定 18
3.4.3 試算例 19
3.5 施肥試験の実施 21
3.5.1 対照区の設定 21

3.5.2 植食動物の除去 21
3.6 モニタリング調査 22
3.6.1 溶出成分の確認 22
3.6.2 海藻の繁茂状況の確認 22
3.6.3 施肥効果の判定 22
4 施肥の事例紹介 23
4.1 液肥の事例 23
4.2 固形肥料の事例 24
4.3 鉄分供給ユニットを海岸に埋設した事例 25
4.4 鋼製ボックスタイプの鉄分供給ユニット 26
5 あとがき 28

1　海藻と栄養塩

1.1　栄養塩とは

栄養塩とは生物の成長や増殖に欠かせない無機塩類のことである。陸上植物では窒素、リン、カリウムやイオウ、カルシウム、マグネシウム、鉄などさまざまである。海洋植物では窒素 N やリン P（植物プランクトンの珪藻類などではケイ素 Si も含む）が不足することが多いので、通常はこれらを栄養塩（多量栄養塩）と呼んでいる。海水中にはカリウムは十分な濃度があるので、その不足が問題になることはない。マンガン、銅や鉄などは窒素やリンに比較して僅かしか海洋植物に摂取されないが、必須の元素であることから微量元素あるいは微量金属，微量栄養塩と呼ばれており、これも栄養塩に含めている（例えば、水田 2010）。

海藻や植物プランクトンはこれらの栄養塩を海水中から取り込み、光合成を行って成長し、繁殖していく。このため、有光層では海水中の栄養塩が枯渇することがある。海藻や植物プランクトンが枯死すると海水中を沈降し、分解されて無機の窒素やリンに分解されていく。光の届かない無光層ではこれらの光合成生物による取り込みが行われないため、栄養塩が豊富にある。

1.1.1　栄養塩「窒素」、「リン」

窒素は大きく無機態と有機態に分類できる。無機態の窒素はアンモニア態窒素（NH_4-N）、亜硝酸態窒素（NO_2-N）、硝酸態窒素（NO_3-N）であり、これらの合計を溶存無機態窒素（DIN）という。有機態窒素は水に溶解しているものと懸濁しているものに分類され、前者を溶存有機窒素（DON）、後者を懸濁態有機窒素（PON）という。この分類は、例えば、孔径 0.45 μm の濾紙でろ過した際の濾液を溶存態、濾紙上の残渣を懸濁態としており、化学的に厳密な分類ではない。

リンも大きく無機態と有機態に分類できる。溶存無機態リン（DIP）はリン酸態リン（PO_4-P）が主である。有機態のリンは窒素と同様にろ過した場合の濾液の部分を溶存有機リン（DOP）といい、濾紙上の残渣を懸濁態有機リン（POP）という。

海藻は無機態でないと藻体表面から吸収できないので、必要な栄養塩は、溶存無機態窒素（DIN）とリン酸態リン（PO_4-P）である。したがって、海藻の生育可能な環境を把握するには、水質分析において、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の三態窒素およびリン酸態リンを測定する。

栄養塩の単位は M（モル；mol/L のこと）で示すことが多いが、g/l や ppm（mg/l）等で表示されることがあり、留意が必要である。M から g/l への換算は原子量（N;14.007g/M、P;30.974g/M、Fe;55.845g/M）を乗ずればよい。栄養塩濃度は低いことから、1/1,000,000 のμM やμg/l で表記することが多い。

（参考）DIN(Dissolved Inorganic Nitrogen)、DIP(Dissolved Inorganic Phosphorus)
DON(Dissolved Organic Nitrogen)、DOP(dissolved Organic Phosphorus)

1.1.2　微量元素「鉄」

1)　鉄の機能と特徴

鉄は地殻中に約 5%と大量に含まれている。しかしながら、溶存酸素濃度が大きい海水中の鉄のほとんどは 3 価(Fe^{3+})の粒状水酸化鉄として存在しており、その溶解度（溶解速度）は極めて小さいとされている。植物プランクトンや海藻などの藻類にとって、鉄は必須微量金属元素の一つであり、光合成や呼吸系における電子伝達、クロロフィルの生合成、硝酸及び亜硝酸の還元などに深く関与し、増殖に不可欠な元素である。藻類が取り込みやすい鉄は 2 価（Fe^{2+}）の鉄イオン（溶存態鉄）であり、3 価の粒状の水酸化鉄は取り込みにくい（例えば、松永 1993, 日本海洋学会 2001)。海藻には鉄以外にも必須の微量金属が数種類あるが、他の金属に比べて海水中の溶存態鉄の濃度が低いこと、外洋には表層の鉄が不足し植物プランクトンが増殖できない海域があることから、近年は沿岸域でも鉄が注目されている。鉄も、窒素やリンと同様、水深が深いと濃度が高く（例えば、Nozaki 2001)、表層付近では藻類に利用されるため枯渇しやすい。

一般に、溶存態と粒子態は濾過によって分離される。以前は孔径 0.45μm のフィルターを通過するものを溶存態とした。しかし、非常に小さなピコプランクトンや細菌はこの孔径のフィルターを通過するので、最近では孔径 0.2μm のフィルターで分けることがある。

2)　フルボ酸鉄

河川水中の溶存態鉄のほとんどは、土壌由来の腐植物質と有機錯体鉄（フルボ酸、腐植酸鉄）を形成していると考えられる。河川水の影響を強く受ける海域ではフルボ酸鉄などが藻類の成長や繁殖に重要な役割を果たしている。海藻にとって必要な海水中の鉄はこのフルボ酸鉄等を含めた溶存態鉄（無機鉄イオン、有機錯体鉄）であり、水質分析においては溶存態鉄の濃度を測定する必要がある。通常、海域の多くは溶存態鉄の濃度は極めて低く、分析可能な大学・研究機関や分析会社が限られる。

1.2　沿岸域の栄養塩濃度の傾向

1.2.1　窒素やリンの動態

栄養塩の濃度は水深が深く水温の低い海水ほど高い。気温の低い時期には表層の海水が冷却されて沈降し、下層の栄養塩濃度の高い海水と混合し、浅所の海藻生育帯の栄養塩濃度も高くなる。逆に、気温が高い時期には、海面が暖められて成層するため鉛直混合が起こりにくく、表層付近では栄養塩が植物プランクトンや海藻などに消費されて枯渇する。したがって、水温の低い親潮が影響する沿岸域では栄養塩濃度が高く、黒潮や対馬暖流が影響する沿岸域では栄養塩濃度は低い傾向にある。また、外洋に面した沿岸域は、内湾域に比較して海水交換が大きいため、栄養塩濃度が低い傾向にある。

近年の我が国の沿岸域において、栄養塩濃度が高い親潮域では、地球温暖化に伴う長期的なリン P の減少傾向が指摘されている（Tadokoro *et al.*，2009）。また、北海道の日本海では、水温が高く栄養塩濃度が低い対馬暖流の流量が増大傾向にあり、窒素 N やリン P の減少により磯焼けが発生したとされている（大谷ら，1992、八田ら，1992）。内湾域では、高度経済成長期には栄養塩の負荷が大きく、栄養塩濃度の高い環境を好むノリの養殖生産量が大きかった。その後、水質汚濁を防止する様々な法整備により、内湾域への栄養塩の負荷が減少し、ノリ養殖では色落ちが問題となっている（和西ら，2005、渡邊ら，2008、原田ら，2008）。図 1-1 は周防灘の表層の DIN の経年変化を示すが、約 30 年にわたり徐々に DIN が減少していることがわかる。このように、我が国では内湾域でも栄養塩濃度が減少している海域がある。

沿岸域の栄養塩の供給は、河川水や伏流水（海底湧水）、島影や岬周りに発生する湧昇流あるいは沿岸の有機物の分解などによってなされる。沿岸域では、河川改修、導流堤の建設による沿岸流の変化などにより、藻場への栄養塩の供給が減少することもある。

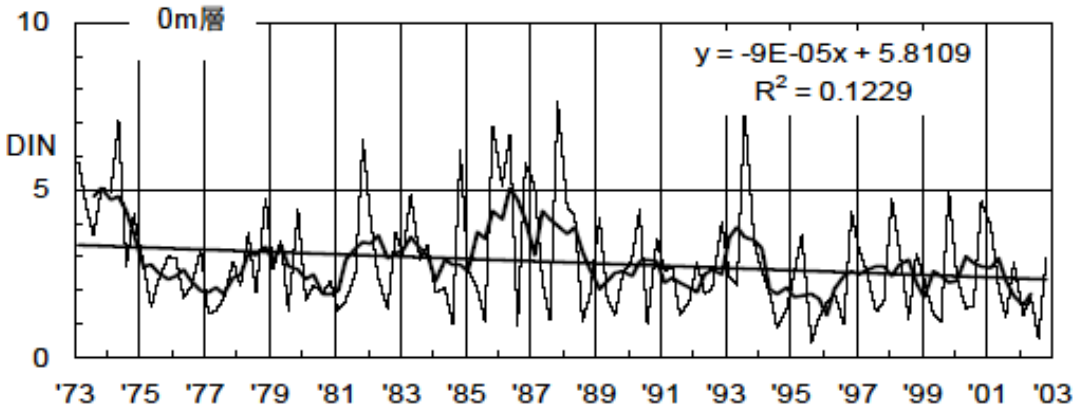


図 1-1　瀬戸内海西部海域（周防灘）の DIN（溶存態窒素；μM）濃度の経年変化（渡邊ら，2008）
細線；実測値、太線；5 項移動平均値

1.2.2　鉄の動態

海水中の溶存態鉄の濃度は極めて低いため測定が困難であり、近年まで、沿岸域の溶存態鉄の濃度はほとんど測定されておらず、経年変化はあまり知られていなかった。

井本ら（2010）は、大分県の佐伯湾の溶存態鉄濃度を 2010 年 6 月と 2010 年 8 月に測定した（図 1-2)。河川の影響の大きい 6 月には溶存態鉄の濃度の平均値は 7.0μg/l であり、河口域で濃度が大きく、沖に向かうほど濃度が小さかった。また、8 月の平均値は 1.8μg/l であり、6 月に比較して濃度が低かったことから、溶存態鉄の供給は河川由来と推察された。さらに、井本らは、佐伯湾奥の上浦地先において、溶存態鉄濃度を 1 年間計測した。梅雨時の降水量が多い期間は溶存態鉄濃度が高く、冬季の降水量が少ない時期に濃度が低い傾向にあった。このように、沿岸域の鉄は河川から供給されている可能性が示された。

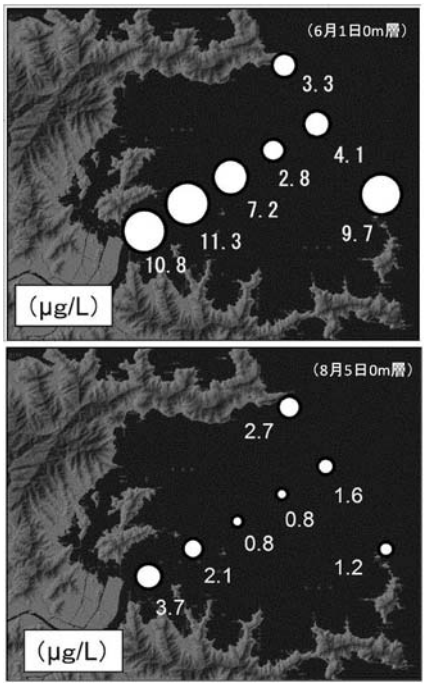


図 1-2　大分県佐伯湾における溶存態鉄濃度（井本ら，2010）

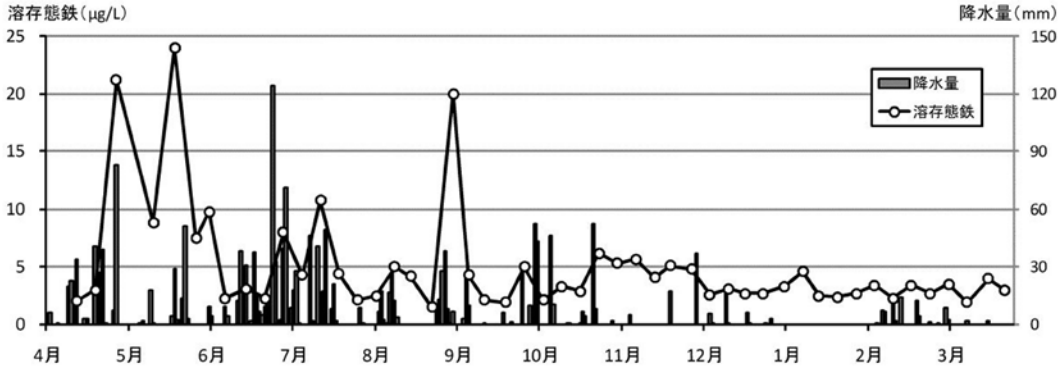


図 1-3　大分県佐伯湾上浦地先における溶存態鉄濃度と降水量（井本ら，2010）

1.3　海藻を対象にしたレッドフィールド比

1.3.1　レッドフィールド比とは

植物の生長は、最も不足する栄養素の供給量によって制限される。これをリービッヒの最小律という。海洋植物でも同様であることが古くから指摘されている。

特に、植物プランクトンや動物プランクトンの成分組成をもとに、植物プランクトンの増殖に必要な栄養塩の比率は、一般的な外洋では、C：N：P＝106：16：1（モル比）とされている。この比は研究者の名前をとってレッドフィールド比と呼ばれている。海域の栄養塩の状態を判断する場合、この比が重要である。例えば、窒素とリンの比（N/P 比）が 16 に近いと植物プランクトンが効率よく、これらの栄養塩を利用して増殖していると考えられるが、N/P 比が 16 より大きいとリンが増殖の制限要因となりうる。逆に、N/P 比が 16 より小さいと窒素が制限要因となっている可能性がある。

Martin *et al.*（1989）は、この比に鉄濃度を付加して、外洋における植物プランクトンに対して、C：N：P：Fe＝106：16：1：0.005（モル比）であることを示した。鉄の要求量はリンの 1/200 と非常に小さく、窒素 N、リン P、ケイ素 Si が豊富で鉄が不足する海域では、わずかな鉄の添加により、植物プランクトンを増殖できることを示唆した。

1.3.2　海藻を対象にしたレッドフィールド比

レッドフィールド比の考え方は海藻にも応用できる。栄養塩は海藻の藻体内に貯留される。藻体内が含有する全窒素・リン含量は海水中の DIN、DIP 濃度と相関するので、対象とする海藻の不足しがちな成分の判断材料になる。ただし、藻体中の栄養塩含有量と海水の栄養塩濃度を比較した研究事例は少ない。藻体中の窒素などの成分は流速や日照条件等の環境変動の影響を受け、海水の栄養塩濃度が大きく変化する海域もあるので、藻体中の栄養塩濃度は海域の栄養塩濃度の履歴を示すともいえる。

表 1-1 に既往の文献による藻体中の炭素・窒素・リンの成分比を示す。植物プランクトンはレッドフィールド比が C：N：P＝106：16：1 であるが、褐藻のコンブ類は N/P＝9～25、ワカメは N/P＝18 と植物プランクトンの N/P＝16 と同等か低い比になっている。オゴノリやヒトエグサでは窒素の要求量が大きい。このような表は不足する栄養塩を決める参考になるが，明らかに情報は少ない。

表 1-1　藻体中の炭素・窒素・リンの成分比

学名	和名	C:	N:	P	参考文献
Acanthophora spicifera	トゲノリ	555	38	1	Atkinson and Smith 1983
Alaria crassifolia	チガイソ	143	16	1	〃
Amphiroa foliacea	ハイカニノテ	295	16	1	〃
Cladophora sp.	シオグサ属	265	38	1	〃
Codium sp.	ミル属	251	31	1	〃
Colpomeria sinuosa	フクロノリ	437	18	1	〃
Gracilaria verrucosa	オゴノリ	291	43	1	〃
Heterochordaria abietina	マツモ	139	17	1	Johnston 1971
Saccharina sculpera	ガゴメ	239	13	1	〃
Saccharina angustata	ミツイシコンブ	279	12	1	〃
Saccharina japonica	マコンブ	183	9	1	〃
Saccharina japonica	マコンブ	211	19	1	柴田ら 2010
Saccharina religiosa	ホソメコンブ	384	25	1	Johnston 1971
Monostroma latissimum	ヒトエグサ	1316	58	1	〃
Pyropia yezoensis	スサビノリ	137	23	1	〃
Undaria pinnatifida	ワカメ	307	18	1	〃

1.3.3　海藻中の鉄含量

海藻の生長には鉄が必要であるが、海藻を対象としてレッドフィールド比を鉄まで拡張した研究は見られない。海藻にとってどの程度の鉄が実海域に存在すれば良いのか、未解明なところが多い。海藻の種によって藻体中の鉄含量が異なることは古くから知られており、鉄含量の大小が海域の鉄濃度の推測に役立つ可能性がある。

山本（1960）は、和歌山市加太町沿岸で採取した海藻の鉄含量を分析し、鉄含量による海藻の便宜的分類を示した（表 1-2)。「特に鉄が多い海藻」は比較的小型でひも状や細枝状の海藻であり、浅所に分布する種が多い。「比較的鉄の多い海藻」は特に鉄が多い海藻以外の緑藻がこの部類に属する。「特に鉄の少ない海藻」としてはアラメやホンダワラ類などの大型褐藻が属している。分析法が異なるので同一には分類できないが、日本食品標準成分表によれば、アオノリやヒジキは鉄分含有量が多く、大型褐藻のコンブやワカメは少ない傾向にある。海藻の藻体中の成分は季節や場所など環境の影響を強く受けると考えられるので、表 1-2 の結果も環境に応じて変化する可能性がある。

表 1-2　鉄含量による海藻の便宜的分類

類　　別	鉄含量の範囲 乾燥体 1g 当中	海　藻　名
特に鉄の多い海藻	1mg 以上	イワヒゲ、カヤモノリ、フトモヅク、ヒトエグサ、フサイワズタ、ミル、カズノイバラ、ユカリ、ナミノハナ、アマモ
比較的鉄の多い海藻	0.1～1mg	ケウルシグサ、アオモズク、ウミウチワ、ヘラヤハズ、マメダワラ、ウミトラノオ、ボタンアオサ、アナアオサ、チャシオグサ、ホソジュズモ、コブシミル、トサカノリ、サイダイバラ
比較的鉄の少ない海藻	0.2～0.4mg	トゲモク、アオサ、マクサ、ユイキリ、アツバノリ
特に鉄の少ない海藻	0.2mg 以下	アラメ、ヒジキ、ホンダワラ、オオバノコギリモク、オオバモク、ノコギリモク、アカモク、ヨレモク、イシゲ、イロロ、コメノリ

（注）山本(1960)より作成

1.4　海藻の生長に必要な栄養塩濃度

1.4.1　海藻の生長に必要な窒素とリンの濃度

海藻の生長に必要な海水中の栄養塩濃度に関する検討は、室内実験で実施されている例が多い。一方、実海域において海藻が生長する際に必要な栄養塩濃度を調査した事例は少ない。海藻は種によって分布が異なり、要求する栄養塩濃度も異なる。吉田ら(2011)は海藻の生長または光合成が飽和する栄養塩濃度について、実験的に明らかにされた文献を整理した。その結果を表 1-3 に示した。海藻は種によって、栄養塩の取り込み速度が異なる。なお、Mizuta *et al.*(2001)はホソメコンブの成熟に必要な DIN は 5μM としている。

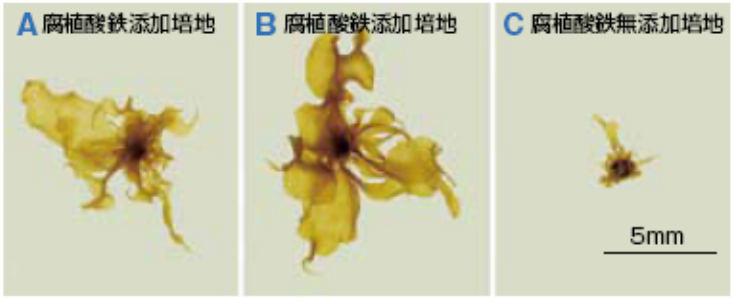
表 1-3　海藻の生長または光合成が飽和する栄養塩濃度の範囲

海藻の種類	DIN（μM）	DIP（μM）
緑藻類（アオサやミル等）	17～63	6.5～19
褐藻類（コンブ・ホンダワラ類）	4～15	0.25～0.75
紅藻類（オゴノリ類 *Gracilaria foliifera*）	5.3～5.5	－

（注）吉田ら(2011)より作成

1.4.2　海藻の生長に必要な溶存態鉄濃度

藻類を培養する際には培養液（培地）を使用するが、培養液にはキレート鉄（EDTA 錯体）や塩化鉄も含まれる。鉄を添加することで配偶体の成熟を促進できることが理由である。人工的なキレート鉄ではなく、フルボ酸鉄で培養した事例もある。藤本ら（2011）はホソメコンブ胞子体の幼体を培養した際にフルボ酸鉄を濃度が（A）30μg/l、（B）3μg/l、となるように添加して 3 週間培養した（図 1-4）。図のように、（B）の溶存態鉄濃度が 5.3μg/l 以上で胞子体の顕著な生長を確認している。



		A	B	C
鉄	[ppb]	31.4*	5.3*	2.9
窒素	[ppm]	131	130	130
リン	[ppm]	2.3	2.3	2.3

※ppb は μg/l、ppm は g/m^3＝mg/l

図 1-4　ホソメコンブ胞子体の生長に及ぼすフルボ酸の効果試験（藤本ら，2011）

このように室内実験では海藻の成長と鉄の相関性が確認されているが、実海域において海藻の成長に及ぼす鉄の影響は十分に検討されているとは言い難い。溶存態鉄の濃度については、外洋の表層では 0.1nM （0.0056μg/l）と非常に濃度が低いが、内湾域では図 1-2 や図 1-3 に示したように、少ない時で 2μg/l（0.03μM）、多い場合は梅雨時に 20μg/l（0.36μM）を超えることもある。図 1-4 で顕著な胞子体の生長が確認された溶存態鉄濃度 5.3μg/l（0.09μM）と同じオーダーの濃度であり、内湾域では鉄の濃度は高い。

外洋域の濃度、沿岸域の濃度、実験室での試験管レベルの濃度をそれぞれ紹介したが、やや混乱を招きがちなので、図 1-5 にフィールドでの溶存態鉄濃度と実験室内の濃度を改めて示した。湧昇などによって窒素 N が過剰にある外洋の表層は鉄が極端に減少し、0.1nM 程度と非常に少ない（例えば、小畑 2005, 野崎 1992)。駿河湾の清水の数 km 沖では 4.7nM（宗林 2005）であり、外洋の表層の約 50 倍の濃度である。さらに、沿岸域で濃度が低い北海道の日本海側の積丹町美国や余市郡余市港では、外洋の表層の約 100 倍以上である。また、室内の培養試験では約 1000 倍以上の溶存態鉄の濃度である。鉄濃度に関する情報は測定方法や測定時期の違いがあるが、濃度の範囲が広いので留意が必要である。

海藻の生長には窒素やリンの濃度が重要であるため、これらとのバランスで検討する必要がある。図 1-6 に大分県佐伯市名護屋湾、北海道美国および余市における溶存態鉄とリンの濃度の比を示す。図には外洋における植物プランクトンの増殖に必要な値 Fe/P＝0.005（Martin ら 1989）を記載した。この結果から、沿岸域の Fe/P は、外洋の鉄濃度の律則値である Fe/P＝0.005 と比較すると、約 10～100 倍高くなっており、少なくとも植物プランクトンの増殖には十分な鉄の濃度である。

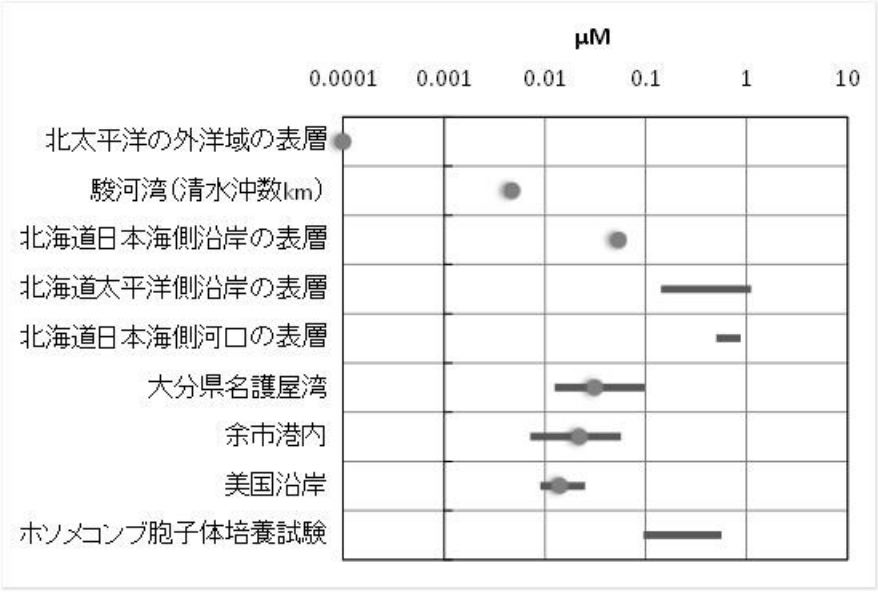


図 1-5　外洋、沿岸域における溶存態鉄濃度と実内実験での溶存態鉄濃度

（注）北海道沿岸の表層の鉄濃度は松永(1993)による

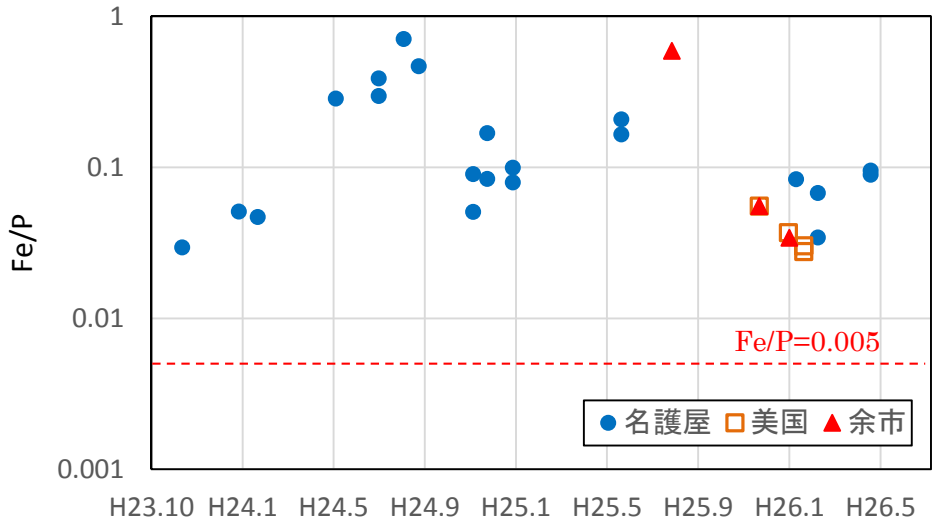


図 1-6　大分県名護屋湾および北海道美国・余市の Fe/P（モル比）

1.5　流速と栄養塩濃度（栄養塩フラックス）

海藻は藻体表面から栄養塩を吸収するが、流速が大きくなるほど栄養塩の取り込み量は大きくなる。川俣（2004）は、アラメの純同化率（単位時間当たり単位面積の葉重量の増加）が栄養塩濃度と流速との積の増加に伴って増加することを示した。栄養塩濃度と流速の積は栄養塩フラックスと呼ばれている。栄養塩濃度が低いとされている海域でも、波当たりの強い表層付近では海藻の生長が早い現象が見られるが、これは栄養塩フラックスの効果と考えられる。したがって、海藻の増殖を促進するには栄養塩濃度のみならず、流動促進も検討することが望ましい。

2　施肥とは

海藻の増殖を促進するために、人為的に肥料を海域に供給することを海域での施肥と呼んでいる。既往の施肥実験では、施肥材として、無機質肥料や有機質肥料などが試験されている。前者は硫酸アンモニウム（硫安）や塩化アンモニウム（塩安）などの窒素肥料が多い。後者は魚かすなど完全に無機化されていない肥料も試験的に使用された事例がある。海域に鉄分を供給する施肥材も単独，あるいは有機質との混合で検討されている。

2.1　施肥の原則

施肥は、海藻の増殖にとって不足する栄養塩の成分を補うことを目的に実施する。海域に豊富に分布する栄養塩の成分を補給しても増殖が期待できない。例えば、ノリ養殖では、ノリの色落ちの原因が窒素不足であることが様々な研究によって判明していることから、ノリの収穫前に無機態窒素を供給しており、効果は限られているものの色落ちを防いでいる。磯焼け対策における施肥も同様と考えられ、対象とする海藻にとって不足する栄養塩を把握し、適正な量を供給することが重要である。

2.2　既往の施肥実験の概要

窒素やリンを対象にした施肥実験は 1990 年代に実施され、その後も件数は少ないが報告されている。表 2-1、図 2-1 に既往の施肥実験の概要を示す。施肥材としては化学肥料、液肥、魚かすなどが使用された。

液肥の事例（菊池ら 1990）では、液肥を一度に供給すると、海中で移流や拡散により、希釈され、その効果は一過性であり持続しない。液肥では連続的もしくは断続的に継続する必要がある。

固形の緩効性無機肥料は、投入量を多くすれば近傍での栄養塩濃度の上昇は確認できる。投入量は、素材にもよるが、既往の実験では、数十 m 四方の範囲の栄養塩濃度を高めるために、数回に分けて合計で数百 kg～数 t の施肥材が投入されている（マリノフォーラム 21 1990、赤池ら 1992）。

魚カス等の有機肥料の場合は、アンモニア態窒素や硝酸態窒素のような無機態の栄養塩にしないと海藻の増殖には効果が期待できない。吉良ら（2002)の報告のように、有機肥料の場合は発酵させて無機化し、海底に無機の栄養塩を溶出させることが重要である。

以上のように、既往の施肥実験からは、広い範囲の栄養塩濃度を高めることは難しく、施肥箇所周辺の数 m～数十 m の範囲のみの効果に限定されるため、投資効果が確認しづらく、継続した事業にまで至っていないようである。

表 2-1　過去の主な施肥実験の事例

地区，出典	対象種	施肥材と投入量	成　　果
土佐清水 ﾏﾘﾉﾌｫｰﾗﾑ 21(1990)	ホンダワラ類	緩効性窒素肥料、粒状リン肥料，10 月から 4 回施肥、合計で窒素 1t、リン 0.24t を施肥箱に設置	施肥を行った実験礁でフタエモクの被度が高くなった
稚内 菊池ら(1990)	コンブ	魚かすの煮汁 10t、硝酸ｱﾝﾓﾆｱ 26kg、重過ﾘﾝ酸石灰 2.6kg を混合しホースで漁場に散布、数回にわけて合計 200 t 以上放水	放水後に COD、NH_4-N、PO_4-P は上昇したが一過性でコンブへの効果は疑問
礼文 赤池ら(1992)	コンブ	緩効性化学肥料約 20kg×20 袋を 4 月～11 月に 9 回設置（計 3.6t）	施肥区では N、P は高濃度に維持、コンブの色が黒く、肥大度が大きく、成熟期が早まり、2 年コンブの品質が向上
増毛 吉良ら(2002)	コンブ	魚かす（内蔵を微生物分解したもの）を海岸に穴を掘って埋設。H10 は 2.5t、H11 は 7.5t、H12 は 6.4t 埋設	N、P は 500m 離れた対照区に比べやや高く、海藻の種数に差が出たが、コンブの生長は河川の影響が大きく効果は不明確

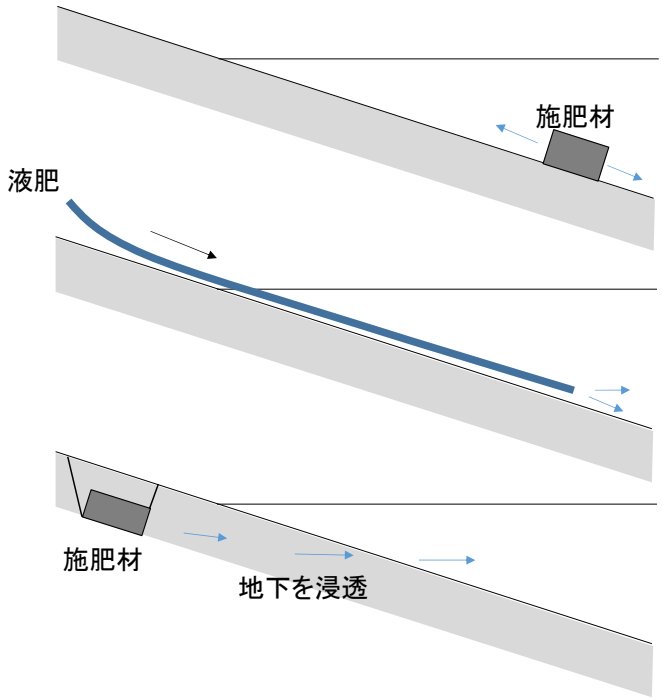


図 2-1　既往の実験の施肥方法

上）　海底に施肥材を設置；マリノフォーラム 21(1990)、赤池ら(1992)
中）ホースで液肥を供給；菊池ら(1990)
下）海岸線に溝を形成し、礫層内から栄養塩を供給；吉良ら(2002)

2.3　近年に実施された施肥に関する技術的課題

近年、磯焼け対策の技術の１つとして施肥への注目が集まっているが、実施事例の中には、栄養塩濃度を測定せずに、単に他の海域で実施された実験結果をまねて、施肥を行っている例も見られる。この背景には施肥に関する情報の不足があり、特に、海藻の増殖に必要な栄養塩の情報が少ないことから、目標を立てにくいものと考えられる。施肥を実施または計画している漁業者にアンケートとヒアリングを行った結果、表 2-2 に施肥に関する技術的課題が明らかになった。以下に解説する。

表 2-2　施肥に関する技術的課題

項　　目	主 な 課 題
目標とする濃度	対象海域の栄養塩濃度はどの程度か、対象とする海藻の生育に必要な目標濃度が不明果な場合がある。
施肥材の種類	藻類の生長や成熟には窒素、リン、鉄などが必要だが、対象海域でどの成分が不足し、どの施肥材で補給すれば良いか、選定条件が不明な事例がある。
施肥の時期	種によって生活史が異なる。種毎の適切な施肥時期の情報が不足している。
施肥材の投入量	施肥成分は潮流や波浪により移流・拡散し、その濃度は大きく希釈される。保全すべき藻場の流動環境に合わせた施肥材の投入量に関する情報が不足している。
効果の継続期間	固形肥料等では効果の継続期間が明らかではない。
周辺環境への影響	大量の施肥材の投入は局所的に高濃度の栄養塩濃度となり、底生生物への悪影響が懸念される。
効果の検証方法	対照区の設定がなく、施肥の効果が不明確な場合が見られる。

1)　目標濃度の設定

海藻の生育に必要な栄養塩濃度の情報が少ないため、栄養塩濃度の目標を設定しにくい。まず、磯焼け海域で栄養塩の不足が懸念される場合、水質調査を実施して、不足する栄養塩の成分を把握しなければならない。特定の種については、表 1-1～表 1-3 を参考に目標濃度を設定することができる。大学・研究機関（水産試験場等）の専門家とよく協議し、栄養塩濃度を設定することが重要である。

2)　施肥材の種類の選定方法

海藻の生育に必要な目標濃度が明確ではないため、施肥材を選定しにくい状況であるが、表 1-1～表 1-3 に基づき、不足している窒素、リンあるいは鉄について、どのような施肥材によって供給するのかを決定すべきである。表中にない海藻が対象種の場合は、専門家とよく協議して決めることが望ましい。

3)　適切な施肥の時期

海藻は冬から春にかけて生長する。施肥の適期に関する研究事例は少ない。テングサの生育促進のための施肥は収穫の 20～30 日前がよいとされている（山田，1967）が、他の海藻ではその生活史を把握し、栄養塩の不足する時期と発芽・生長する時期を総合的に検討して、適切な時期を検討すべきである。冬は海水の上下混合が起こるので栄養塩不足になりにくい。海藻が大きく生長する冬から初春は、植物プランクトンのブルーミング（大量

発生）により海域の栄養塩が枯渇し始めるので、そのような現象も理解して施肥の時期を検討すべきである。ただし、競合する海藻が分布する場合、対象種の生活史のみでなく、競合種の生活史も考慮しないと、競合種が優占してしまうこともあるので、留意する必要がある。

4） 施肥材の投入量

無機態の栄養塩を溶出する固形肥料や液体肥料では、その溶出速度や流出流量をもとに移流や拡散による濃度の希釈を予測し、施肥の影響範囲を把握すべきである。当該海域の流速を実測し、3 次元の拡散シミュレーションを実施することが望ましいが、簡易な計算等で投入量の目安を算出することができる。

5）効果の継続期間

液肥の場合は投入し続けないと効果は持続できない。固形肥料のように緩効性の肥料では、単位時間あたりの溶出量は多くなく、長時間継続して少しずつ溶出する。一般的に、固形肥料は水温や流速によって溶出量が変化する。水温が高く流速が比較的速い場合には溶出速度が速く、水温が低く、流速が遅い場合には溶出濃度は低いが長期間継続する。設置した施肥材の効果がいつまで継続しうるのか、予備調査や溶出試験を行い事前に予測しておく必要がある。設置後は栄養塩濃度が高いことを確認し、効果がなくなったら追肥することも計画する必要がある。

6）底生生物への影響

施肥材から溶出した栄養塩は海中でただちに希釈されるため、必要な濃度に長期間維持させるには、大量の施肥材を投入しなければならない。肥料として、アンモニア態窒素を高濃度で使用すると、その毒性のため底生生物に悪影響を及ぼす危険性がある。毒性が危惧される場合は施肥材の配置を工夫し、局所的に高濃度にならないように配慮が必要である。

7）効果の検証方法

従来の施肥試験では施肥区に対して対照区を設定していない例が多い。施肥に関する既往の研究が少なく、確実な効果を把握できていない現状では、河川水の影響、流動や植食動物密度などが施肥区と類似した海域を対照区に選定し、両区の比較で施肥の効果の把握や栄養塩濃度の管理をすべきである。

3　施肥の導入時の考え方

3.1　施肥の検討フロー

前節に示したような技術的課題を承知したうえで施肥を検討する場合は、図 3-1 の施肥の検討フローを参考にするとよい。施肥の原則は、海域で不足しがちな栄養塩の成分を人為的に供給することである。食害や激浪、浮泥などの影響は少なく、磯焼けの原因が栄養塩の不足にあると判断した場合には、施肥の導入を検討する。施肥は、海藻以外の生物への影響も想定されるので、最初は小規模な試験を実施し、効果が確認できてから規模を拡大するとよい。

最初の取組は、海域における栄養塩の実態を把握することから始める。磯焼け海域とその周辺の藻場で定期的に水質調査を実施し、両者の比較により、磯焼け域で不足する成分を把握する。次に、目標濃度と施肥の範囲を設定し、施肥材を選定する。そして、施肥材の溶出速度を確認し、栄養塩の供給目標（目標濃度）を維持するために必要な施肥材の投入量を設定する。

目標濃度を維持できる目途が立った場合は、現地で施肥試験を実施し、定期的な水質調査でこれを確認する。目標濃度が確保できなければ、施肥材や投入量を変更する。

施肥期間の終了後、海藻の繁茂期にモニタリングを実施する。海藻が繁茂しない場合は、磯焼けの継続要因が栄養塩不足とは別の要因である可能性が高いので、対策を見直す。海藻が繁茂した場合は、事業化に向け、施肥範囲の拡大による経済性（費用対効果）を検討する。なお、施肥の範囲の拡大や濃度の引き上げは、環境への負の影響についても配慮が必要である。

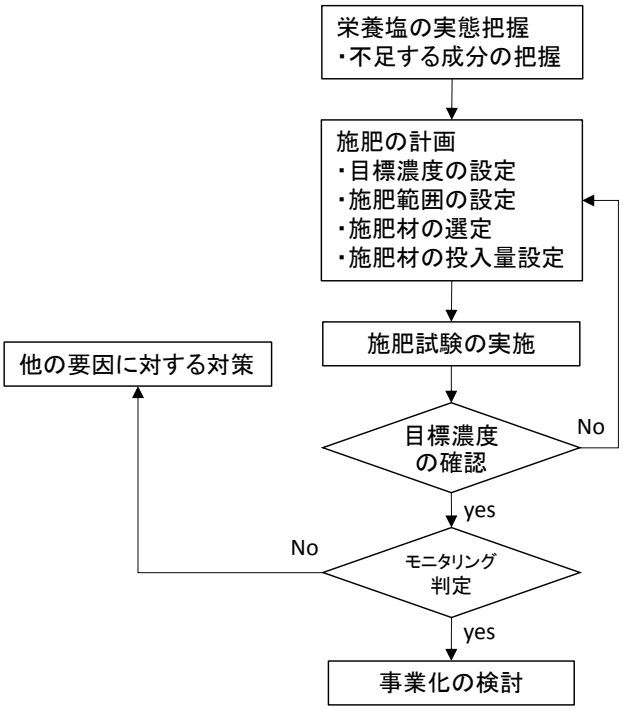


図 3-1　施肥の検討フロー

3.2　栄養塩の実態把握

磯焼け域と近隣の藻場において、波当たりや流動環境が類似した場所を選定し、海底から採水し、水質分析を行う。水質調査は、毎月、あるいは、近隣の藻場で優占する海藻の発芽期、生長期、繁茂期などの節目で行う。水質は、時間的にも空間的にも変動するので、調査は可能な範囲で頻度を高め、複数地点で実施することが望ましい。

水質調査の結果を磯焼け域と藻場の間で比較し、磯焼け域で不足する栄養塩の成分や時期を把握する。不足する栄養塩の成分が明確でない場合は、施肥による効果が期待できないので、他の磯焼け対策を検討する。不足する栄養塩の成分が判明した場合は、施肥の計画を進める。

3.2.1　水質調査（窒素、リン）の方法

窒素は硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リンはリン酸態リンを計測する。計測は、バンドン採水器等によって、海藻が分布する水深帯から海水を汲み取り、可能な限り現地で濾過した後、洗浄済みのポリビンに所定量を入れ、冷蔵状態で直ちに専門の分析機関に送付して分析を行う。得られたデータは窒素三態の栄養塩濃度を合計して DIN とする。リン酸態リンはそのまま DIP とする。水質調査の計画や実施については、専門家や分析機関と相談をすると良い。なお、水質調査を実施する場合は、降雨や洪水等により淡水の影響が現れないように静穏な日に実施する。

3.2.2　溶存態鉄濃度の測定方法

近年、計測機器の進歩に伴い微量の鉄も測定できるようになった。しかし、海水中の鉄濃度は非常に低いので、一般の水質分析機関では分析できないことがある。分析はクリーンルーム施設を完備し、ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析法）等の計測装置を有しているなど海水中の微量な鉄の分析の実積のある機関に依頼する必要がある。採水ビンは硝酸溶液でよく洗浄し、精製水で洗い流したものを使用する。ここで、洗浄しない採水ビンを使用すると、鉄汚染により正確なデータをとることはできない。また、採水時は鉄さびや砂粒等が混入すると鉄の濃度が非常に高くなるので、採水瓶内に底質が混入しないように配慮しなければならない。

採水方法では、バンドン式採水器等を使用すると、海中のごみや底泥などを巻き込むことがあるので、避けた方が良い。潜水士が採水ビンの蓋をしっかり閉めたまま測定水深帯に潜行し、不純物が入らないように静かに採水ビンの蓋を開け、海水を入れたら直ちに蓋を閉めて船上に運搬する。

採水後はすぐに冷蔵し、0.45μm のフィルターでろ過を行い、粒状鉄等を分離除去する。ろ過したろ過水は 1 L につき硝酸 1mL を添加して、冷蔵したまま分析機関へ送付する。なお、現地でろ過できない場合は、専門家か分析機関に相談する。

3.3 目標濃度と施肥範囲の設定

多くの海藻では、生活史を通じた栄養要求に関する研究例が少なく、どの成分が、いつ、どの程度必要かを決定することは難しい（表 1-1)。施肥の計画では、必要な栄養塩の成分と目標濃度を設定しなければならないが、既往の研究を参考にするか、近隣で残存する藻場の栄養塩濃度を目標にする。施肥を実施する時期は、栄養塩が不足する期間、あるいは、対象とする海藻の生活史で必要な時期とする。

施肥は、最初は小規模な試験を実施し、その効果が確認できてから徐々に拡大することが望ましい。当初の施肥範囲は、地形にもよるが、まず 10～100 ㎡とし、試験の成果が良ければ、徐々に拡大する。

3.4 施肥材の選定

3.4.1 化学肥料

海藻の生長には無機態の窒素が利用されている。化学肥料としては安価な硫酸アンモニウム（硫安）や塩化アンモニウム（塩安）が一般的である。硫安は代表的な窒素肥料である。無色透明な結晶（斜方晶系）であり、水に容易に溶け、速効性の窒素肥料である。塩安は塩化物イオンとアンモニアを結合させたもので水溶性の白色、無臭の結晶である。速効性の窒素肥料として利用されている。リンは過燐酸石灰、重過リン酸石灰などが使用されている。

3.4.2 有機肥料

魚粉やイカゴロなどの水産加工残渣の利用として有機肥料が使用されることがある。海藻は栄養塩を藻体表面から吸収するが、栄養塩は無機態でないと利用できない。有機肥料は分解され、無機化されると海藻に有効となる。そのため、有機肥料を発酵させるなど、無機化して使用する必要がある。有機物の発酵した完熟堆肥等は炭素分が多く、窒素は数%の含有量しかない場合もあるので、化学肥料と比較して体積の割には有効成分が少ないことに注意する。

なお、有機物のまま溶出してしまうと海藻に吸収されることなく、磯焼け対策としての速効性は期待できない。また、海洋汚染防止の規制対象になる場合もあるので留意が必要である。

3.4.3 鉄分供給施肥材

鉄分を供給する施肥材としては、鉄鋼スラグと堆肥（腐植土）を混合した施肥材や鉄粉と炭を混合して固化した施肥材などが開発されている。

海水中の鉄の溶解形態について、三木ら（2003）は海水中の鉄の相安定図を作成した。図 3-2 は 2 価の鉄と 3 価の鉄の pH に対する溶解度を示す。藻類が吸収し易い 2 価の鉄 $Fe(OH)_2$ は pH が高くなると溶けにくく、pH=10.5 で最小になる。通常の海水は pH＝8.2

～8.3 であり鉄は溶けるものの、pH が低いほどよく溶ける。また、鉄は溶解して溶存態鉄が溶出する。溶存酸素 DO が高いと酸化されて水酸化鉄となって不溶化するため、その場合には藻類には直接利用しにくくなる。したがって、2 価の鉄を溶出させるには、pH が低く、DO が低い環境が良い。

鉄鋼スラグも pH が低く、DO が低い環境であると鉄が溶出しやすい。また、腐植土由来のフルボ酸・腐植酸が存在するとフルボ酸鉄・腐植酸鉄のような有機態の鉄となり溶存態鉄として維持される。このメカニズムに着目して、鉄分供給ユニットが開発されている（図 3-3)。鉄鋼スラグと木材チップを発酵させた堆肥（人工腐植土）を組み合わせ、藻類が吸収できるフルボ酸鉄等の溶存態の鉄を供給し、藻場の再生と漁場環境の改善を図るアイデアである。鉄分供給ユニットとしては、転炉系製鋼スラグと人工腐植土を一定の割合で混合しヤシ繊維などでできた袋に入れたものが試行されている。これまで、このユニットの設置方法としては、海岸付近に埋設する方法とユニットを鋼製のボックスに入れて沈設する 2 通りの方法がある。鉄分供給ユニットの設置事例を 4 章で紹介する。

その他、鉄分供給ユニットのほかにも、鉄粉を利用した施肥材が別途提案されているが、海域に投入すると溶存態鉄は溶出するため、投入直後は鉄分の供給はあるが、すぐに酸化されて粒子状の鉄となることが予想されるため、長期間にわたって鉄を継続的に溶出する手法の検討が必要と考えられる。

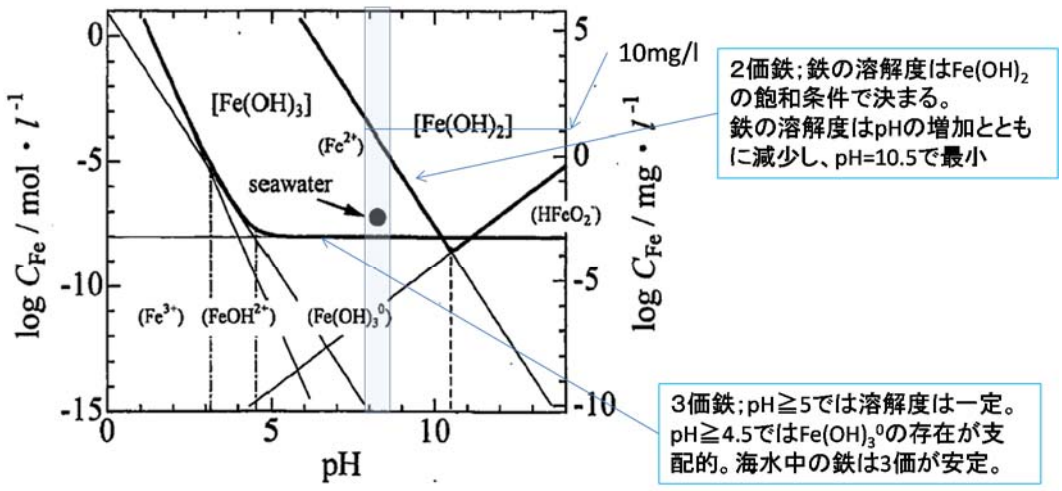


Fig. 6. Stability diagram of iron in seawater at 298K.

図 3-2　海水中の鉄の相安定図（三木ら, 2003）

図 3-3　鉄分供給ユニットの原理

3.5 施肥材の投入量設定

3.5.1 溶出速度の把握

設定した範囲内で栄養塩が目標濃度となるように、施肥材の投入量を設定する。正確な予測は三次元の拡散計算を実施することが望ましいが、次項に示す比較的簡易な算定方法により施肥量を予測することができる。

その場合に最も重要な項目は、施肥材の溶出速度の把握である。液肥であれば海水に散布した量や施肥材の濃度から、栄養塩濃度の推定が可能である。

固形肥料や有機肥料では溶出速度が小さく、緩効性の肥料に分類される。固形肥料の溶出速度は、一定水温かつ流速が小さい条件で測定することが多いが、実際の海域では水温や流速が変動するので、溶出速度が測定値と異なることに留意が必要である。

3.5.2 簡易な拡散計算による投入量の算定

施肥材から溶出した栄養塩は海中ではただちに希釈混合されるため、希釈されることを前提に施肥量を決める必要がある。ここでは簡易的な拡散方程式の解析解（岩井の解）を使用して施肥による栄養塩濃度の概略値を求める方法を紹介する。この式には第 2 種ベッセル関数が含まれているが、エクセルの関数の BESSELK（値、次数）を利用して次数を 0 とすれば、任意の x、y 地点の濃度が算出できる。

$$S = \frac{q \cdot exp\left(\frac{ux}{2K}\right)}{2\pi HK} \cdot IK_0\left[\frac{u}{2K}\sqrt{x^2+y^2}\right]$$

ここで、

S	任意の地点の濃度（mg/l）
q	溶出速度（g/s）
H	水深（m）
K	水平方向の拡散係数（m²/s）
u	平均流速（m/s）
x, y	原点からの距離(m)
$IK_0[x, y]$	第 2 種ベッセル関数

拡散係数 K（㎡/s）は、現地で流速を測定して決定するのが望ましいが、求められない場合には既往文献を参考にする。村上（1983）は、潮流を移流とした場合に水深 7m での水平拡散係数を 0.134～0.317 ㎡/秒としている。横浜市公害対策局（1985）は、岩井の解の Kについて、広島湾では 0.096 ㎡/秒、東海村沖では 0.079 ㎡/秒、相模灘では 0.20 ㎡/秒としている。

上記の岩井の解をエクセルで計算する場合、施肥の範囲よりやや広く計算範囲（x 軸、y 軸）を決める。例えば、原点を中央に x=-100～100m、y=-100～100m と設定し、計算したい間隔、例えば 10m 間隔に上式を設定すれば、各 x、y での濃度 S が求められ、エクセルのグラフ機能でコンタ図も作成できる。

3.5.3 試算例

上記の解析解を使用して、北海道のホソメコンブを対象にした液肥試験を参考に、施肥量と栄養塩濃度の分布を試算した。

［試算条件］

・液肥試験に準じてコンブの遊走子が着底する秋から冬まで施肥を継続する。
・目標の濃度は、コンブが発芽する冬季に 70μg/l（=5μM）以上の窒素態の栄養塩が必要と考えられるので、数 10μg/l の濃度の増加を想定する。
・水深 Hは 5m で一定。水平拡散係数 Kは 0.1 ㎡/s（潮流を移流とした場合の一般的な値）とする。
・平均流速は一方向（y 軸の＋方向）で 0.02m/s とする。

［試算結果］

図 3-4 に施肥が必要なコンブの生長期間を 240 日間とし、その期間中に窒素 N を 500kg と 1t 設置した場合の結果を示す。この期間中にすべての肥料が溶出すると仮定し、溶出速度は 2.08kg/day、4.17kg/day とした。500kg の設置では、流下方向の 30m 程度で 5～10μg/l の濃度の上昇がある。1t の設置では流下方向 100m 以上までその範囲は拡がる。

これらの結果から約 40×30m のコンブ漁場の窒素濃度を 5～10μg/l（0.4～0.7μM）上昇させるには、1 日 2kg 以上の窒素 N の供給が必要となる。硫安とすれば 4.8 倍して 9.6kg/day 以上の施肥量となる。硫安の単価を 65 円/kg（2014 年の農家の購入価格）とすると、0.62 千円/日の材料費になる。ただし、図 3-4 に示したように、栄養塩濃度を上昇させられる範囲が狭いので、数カ所で施肥を実施するとなるとかなりの金額になることが推定できる。

このように、この拡散の解析解によって施肥量の目安が立てられる。固形肥料の場合は、施肥材の溶出速度 q（g/s）が既知量でなければならない。なお、この解析解はあくまでも概略値を予想するものであり、施肥の実施に当たっては水質調査により栄養塩濃度を測定し、その効果を確認する必要がある。

なお、施肥により海藻が増殖できたとしても、植食動物の食害に遭遇すると藻場は回復しないため、施肥のみでなくウニや植食性魚類の除去も同時に実施する必要がある。

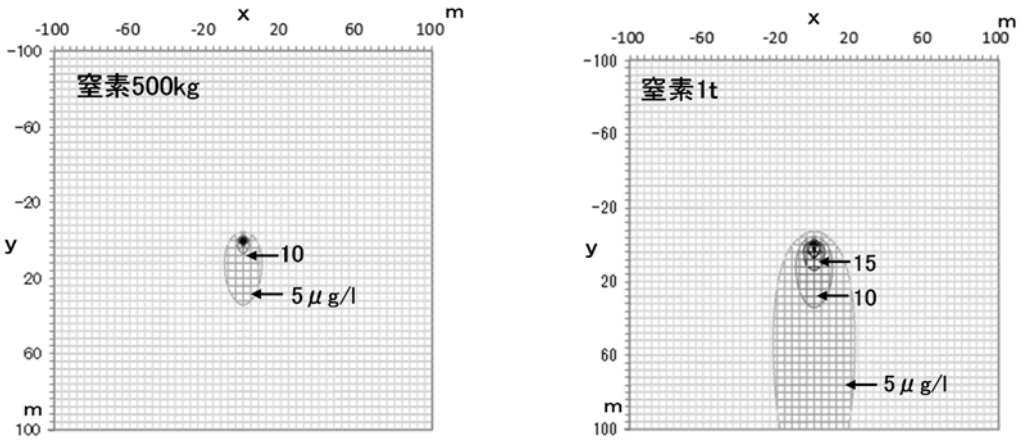


図 3-4　窒素を散布した場合の濃度分布

3.6　施肥試験の実施

3.6.1 対照区の設定

施肥材の投入量を決定後、小規模な施肥試験を実施し、モニタリング調査でその効果を判定する。その後、本格的な実施を検討することが望ましい。最初に取り組む小規模な施肥試験は溶出量の検定を行うため、海水流動の激しい場所は避けることが望ましい。施肥試験では施肥区のみならず、必ず対照区を設定するものとする。対照区は施肥区と同じ水深帯とし、底質や波当たりが同じような環境であり、海藻が繁茂している場所とする。また、対照区を設ける位置は、施肥区から溶出した栄養塩が影響しないように、施肥材の影響範囲の外に設定することとする。この試験により、流動条件に応じた効果範囲が明確になるため、施肥範囲を拡大する際には、施肥材の配置間隔の決定に参考にするとよい。

3.6.2 植食動物の除去

ウニ等の植食動物が多く分布する海域では、栄養塩を供給して海藻が生長しても、食害に勝つことは難しいため、施肥の効果が判断できなくなる。したがって、施肥試験ではウニや巻貝等の植食動物を徹底して除去することが望ましい。なお、植食動物の除去は施肥区と対照区で実施する。除去後に周辺からの植食動物の再侵入が危惧される場合は、施肥区と対照区の周辺にウニフェンス等を設置して再侵入を防ぐようにする。

植食性魚類による食害が懸念される場合は、施肥区と対照区をそれぞれカゴで囲って食害を防ぐ必要がある。

ウニフェンスやカゴの設置については「改訂版　磯焼け対策ガイドライン（平成 27 年 3 月水産庁)」を参照するとよい。

3.6.3 目標濃度の確認

施肥試験では定期的に水質調査を実施し、施肥区で目標濃度が維持できているか確認する。水質に関しては、予め施肥前の周年データを則得しておくほか、施肥前、施肥中、施肥直後に数回、調査を実施する。海水は鉛直混合しにくいので、施肥材が溶出している水深と同じ水深で採水する。なお、流れが強いと、溶出した栄養塩がすぐに希釈される。したがって、採水は流れが弱い時に実施する。施肥期間中に溶出濃度が低く、目標濃度が維持できない場合は、追肥を検討する。

3.7　モニタリング調査

表 2-2 に技術的な課題を示したように、施肥には検討すべき課題が多く、精緻な計画を立てにくいのが現状である。施肥により、必ずしも想定していた対象種が増殖できるとは限らず、雑海藻が繁茂した事例もある。したがって、施肥の実施後は、定期的に溶出している栄養塩の成分や濃度を水質分析によって把握しながら、海藻の状況をモニタリングする必要がある。モニタリング調査では施肥区と対照区において実施し、両区の比較から施肥材の効果を把握する。

3.7.1　溶出成分の確認

モニタリングでは定期的に水質調査を実施し、施肥材から栄養塩等が目標濃度に達しているかを確認し、溶出濃度が低いようであれば、追肥を検討する。水質調査は施肥区と対照区で実施し、その比較で施肥材からの栄養塩の溶出を確認する。

緩効性の固形の施肥材では、溶出濃度は低い可能性があるため、溶出の確認のためには施肥材の近傍（1m 以内）で採水するとよい。流れがある場合には溶出した栄養塩がすぐに希釈されるので、採水は流れが小さい時に実施する。分析項目は対象とする施肥材によって決める。採水や分析方法については 3.2 を参考にする。

水質調査の測定間隔は、施肥材の想定される溶出期間を参考に、施肥材の設置後、溶出期間の中間、溶出期間の満了前とすると、施肥材の溶出特性が把握できる。

3.7.2　海藻の繁茂状況の確認

海藻が繁茂する時期に、海藻の状況をモニタリングする。モニタリングは、施肥区と対照区において実施し、両区の比較から施肥材の効果を把握する。海藻は種ごとに被度や葉長を測定する。また、施肥区と対照区において、50×50cm あるいは 1×1mの枠内の海藻を刈り取り、優占種の湿重量、葉長、個体数などを測定するほか、体色や成熟状況、種組成なども調べ、両区で現存量や生育密度、品質および種の多様性について比較する。これらの結果をもとに効果の判定を行う。

なお、施肥によって海藻の質が変化する場合がある。例えば、コンブ類では施肥によって色が濃く、葉体の厚みが増し（成熟も進行）、紅藻では施肥によって赤味が増すので、モニタリング時には写真で海藻を撮影し、葉体の厚みはノギス等で計測する。

3.7.3　事業化の検討

モニタリング調査の結果、目標濃度が維持でき、対照区と同程度の藻場の現存量となれば、事業化の可能性がある。施肥材の購入や設置・維持に支出する金額と海藻の現存量が増えたことによる水産物の水揚げ量の増加を比較し、事業計画を立て、藻場の拡大を図るようにステップアップする。

4 施肥の事例紹介

4.1 液肥の事例

北海道のホソメコンブを対象にした液肥試験が、北海道立総合研究機構水産研究本部によって平成 21 年度から 24 年度まで実施された(北海道水産林務部，2014)。試験場所は磯焼けが継続する日本海に面する上ノ国地区である。試験方法は硫酸アンモニウム（硫安）を海水に溶かし、液肥として防波堤背後の静穏域（施肥区）に供給した。対照区は漁港外である。ウニが分布するため、実験開始前にウニ除去を実施した。平成 21 年度はコンブの遊走子が着底する 10 月からコンブが生長する 5 月末まで液肥を供給した。平成 24 年度は 10 月からコンブの発芽期の 2 月までを施肥期間とし、合計で硫安 3.5t（窒素量換算 0.7t）を供給した。目標濃度は窒素 1.0mg/l である。その結果、施肥の効果により海藻が増えたが、コンブの胞子（遊走子）の供給源がなく繁茂しなかった。一方、波浪の強い対照区ではホソメコンブが入植した。コンブの胞子付基質では液肥による生長促進効果が見られ、液肥を実施する際に、ウニ除去とコンブの胞子の供給源を確保する必要があると考えられた。

写真 4-1　施肥施設（液肥供給）と平成 24 年度調査時の施肥区と対照区

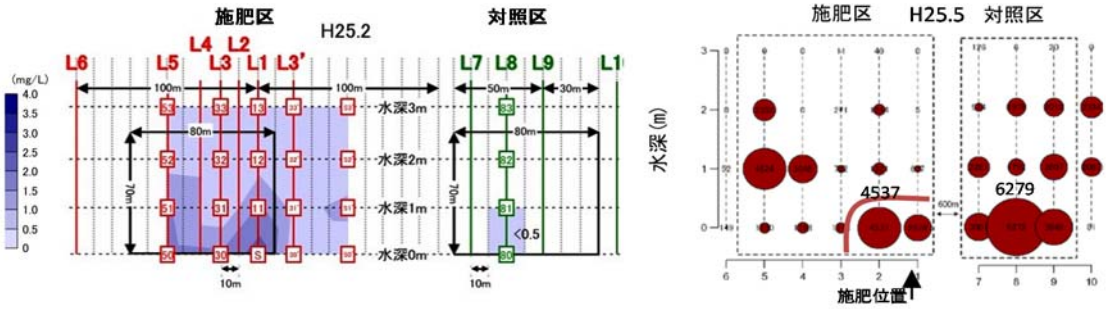


図 4-1　施肥時(H25.2)の窒素濃度(mg/l)の分布と繁茂時(H25.5)の海藻の現存量(g/㎡)

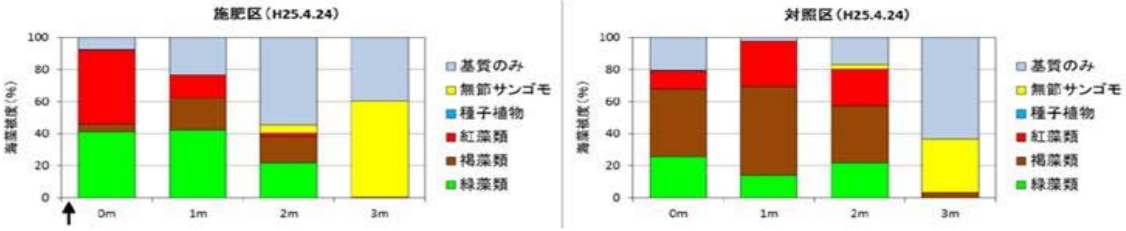


図 4-2　平成 25 年 4 月のモニタリング結果（水深ごとの海藻の被度）

施肥区では緑藻が多く、褐藻が少ない。対照区では緑藻が少なく褐藻が多い。

4.2 固形肥料の事例

北海道の寿都町では、水産加工残渣や発酵木材チップ・オガクズ等の有機物を利用した施肥材を研究開発している。発酵させた施肥材は粉状であるが、固化剤を使用して造粒したり、ブロック化したり、多様な用途に使用できるようにしている。効果実験では、天然の静穏域を利用してウニを除去し、コンブの生長する春に施肥を実施した。

当初は、ペレットを充填した麻袋を岩礁に開削した溝内に設置する実験を行った。3 月に設置して合計 5 トンを投入した。水質調査では栄養塩濃度を明確に上昇させるまでには至っていないが、施肥材を設置した試験区のコンブは対照区に比べて色が濃く、健常なコンブであった。

次に、固形化ブロックを写真 4-2 の位置に設置したところ、施肥材の周辺のコンブは良好に成長したと報告している。ただし、鉄鋼スラグをウエイトとして施肥材に混入しているものの重量が小さいことから、波で動きやすく、安定性に課題が残されている。また、栄養塩の溶出量が小さい等の課題が残されている。

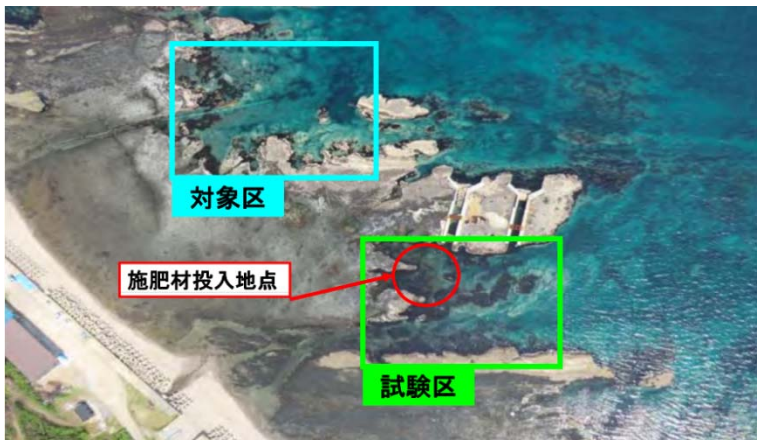


写真 4-2　現地調査場所（寿都地先；5 月）

麻袋（溶出量が大）　ブロック固形化（溶解速度小）　ペレット固形化（直接投入）

写真 4-3　研究開発中の施肥材

4.3 鉄分供給ユニットを海岸に埋設した事例

北海道の日本海に面する増毛町の海岸において、ホソメコンブの成熟期に先立ち、鉄鋼スラグと腐植土を容積で 1:1 に混合した鉄分供給ユニットが 2004 年に海岸に埋設された（図 4-3）。この渚付近はウニの生息密度が低く、水深約 1m 以深にはキタムラサキウニが分布している。設置後の半年（1 年目）は特に変化がなかったが、2 年目の 2006 年には実験区の浅所における海藻の現存量が対照区より多くなった。同時に実施された水質調査で全窒素と全リンの濃度は調査区と対照区とも同じであったため、海藻が増殖した理由は鉄分供給効果と考えられた。溶存態鉄の測定は 3 年目から実施されたが、5 年目までは実験区で濃度が高かった。沿岸の海水は pH や溶存酸素が高く、鉄鋼スラグから鉄は溶出しにくいことが予想されるが、海岸に埋設したことによる還元条件、pH の低い地下水の浸透によって鉄の溶出量が多かった可能性がある。鉄の溶出が持続した要因の更なる解明が望まれる。

図 4-3　北海道の増毛町の海岸線に埋設された鉄分供給ユニット

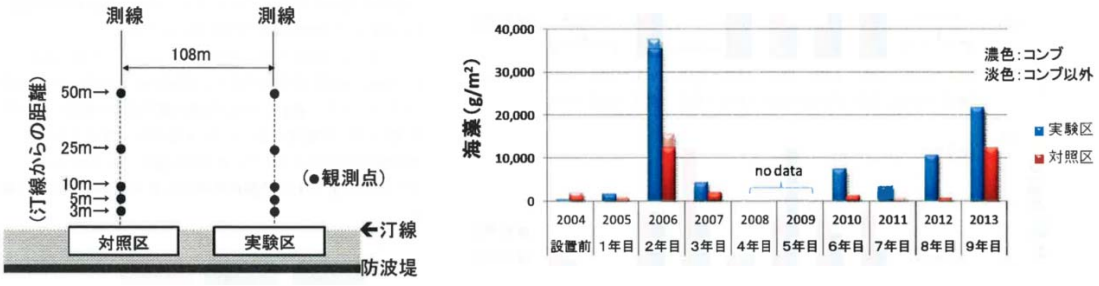


図 4-4　実験区と対照区の位置と海藻の現存量の推移

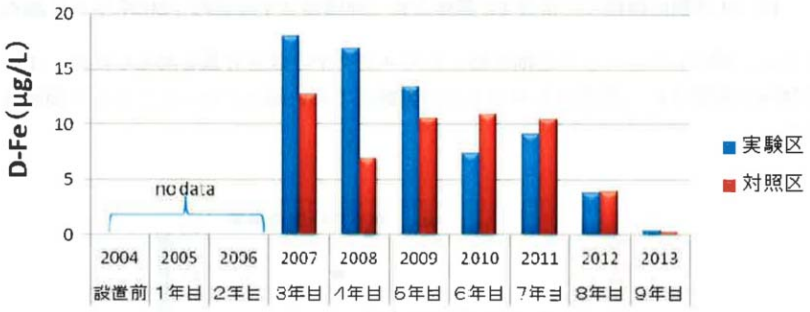
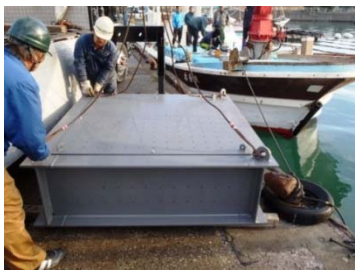


図 4-5　海水中の溶存態鉄の濃度の経年変化

4.4　鋼製ボックスタイプの鉄分供給ユニット

平成 24 年から 26 年度に本業務において、穴の空いた鋼製の箱に鉄鋼スラグと腐植土を装填した鉄分供給ユニットの効果調査を実施した。鉄鋼スラグからの鉄分の溶出を調べるため、全鋼板に重防食塗料を塗布して鋼板から鉄が溶出しないようにした。平成 24 年度では、大分県佐伯市名護屋湾、北海道余市郡の余市港、積丹町の美国地区に鉄分供給ユニットを設置した。その結果、名護屋湾と余市港では、ユニットの孔部から約 5cm の位置の溶存態鉄濃度が対照区と同じかやや高い傾向があったが、周辺の海水中の鉄分を有意に上昇させるほどの高濃度ではなかった。鉄が溶出しにくい原因は、高 pH で溶存酸素の高い海水が鋼製の箱の中に入るためと推察された。



重防食塗布した鋼製ボックス

内部の施肥材と強化型施肥材

鉄分供給ユニット（腐植土と鉄鋼ｽﾗｸﾞ）

写真 4-4　鉄分供給ユニット

平成 25 年度（2013 年度)は、ユニットに強化型の施肥材を追肥し、その後、強化型施肥材を約 3 ヶ月ごとに交換することとした。また、水質調査に加え、名護屋湾ではマクサ、ヨレモクモドキ、クロメ、ノコギリモク、余市と美国ではホソメコンブを対象種として、藻体中の鉄分量を測定し、取り込まれた鉄分量と海藻の現存量や葉長、ホソメコンブでは肥大度と比較した。各地区とも対照区を設定し、上記項目における対照区との差で鉄の溶出効果を判定した。

名護屋湾での結果の一部を図 4-6 に示す。追肥は 11/8、3/3 に実施した。ユニット近傍(孔口から 5cm)とユニットから 1m 離れた位置では、11 月の調査以外は対照区と比較して溶存態鉄の濃度が高く、施肥の効果が確認できた。ただし、濃度は対照区の 1.5 倍程度で、ユニットからの鉄の溶出範囲は狭いと推察された。3 月の追肥後、2 ヶ月経過した 5 月の水質調査では、ユニット近傍と対照区で大きな差はなくなった。図 4-7 にマクサの藻体中の鉄分含有量を示す。実験区ではユニットから 1m の範囲に分布しているマクサ、対照区ではユニットから約 10m 離れた位置のマクサを採取した。藻体中の鉄分含有量は季節変化を示し、2 月に最も鉄が多く取り込まれていたが、繁茂期の 5 月には鉄分含有量が少なく、実験区と対照区の差がなくなった。これから、本海域における強化型施肥材の効果の発現期間は数ヶ月と想定された。

図 4-8 はユニットから 1m、5m の位置および対照区で 10×10cm の枠内のマクサの藻体中の鉄分含有量と現存量の関係を示した。ユニット近傍の実験区と対照区との現存量の差

は認められず、鉄分含有量と現存量に正の相関は確認できなかった。名護屋湾のクロメ、ノコギリモク、ヨレモクモドキおよび美国のホソメコンブでも同様な傾向であり、藻体中には鉄分が吸収されているが、現存量やコンブの肥大度の増大には効果が見られない結果となった。なお、余市ではウニの食害により実験区のホソメコンブが消失し、施肥の効果があったか否か答えは出せなかった。

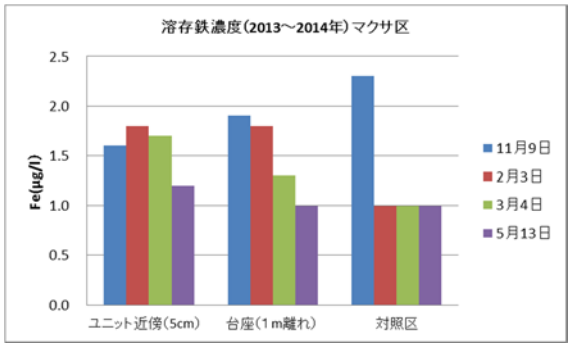


図 4-6　マクサの実験における溶存態鉄の濃度

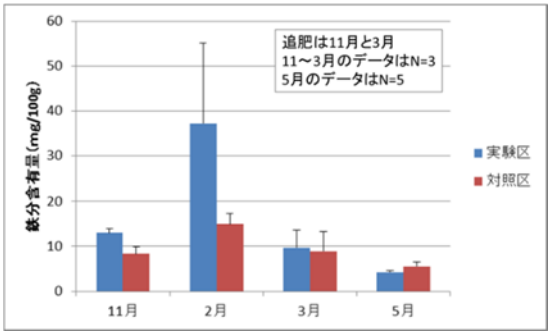


図 4-7 マクサの藻体中の鉄分含有量

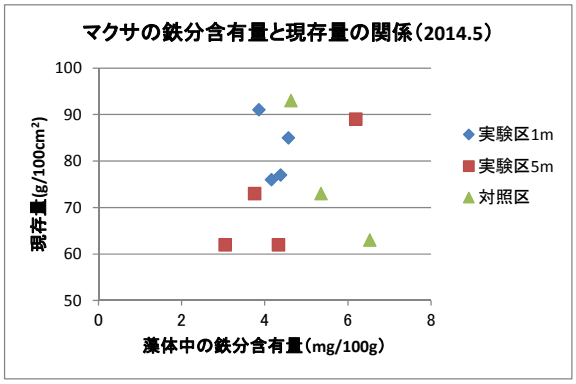


図 4-8　マクサの鉄分含有量と現存量との関係

写真 4-5 鉄分供給ユニット上のマクサ

鋼製ボックスの実験に先立って、函館や寿都に設置された鋼製ボックスで鉄濃度を調べたところ、ボックスに空けられた穴部分では 30～60 μg/l と高濃度であった。本実験のように、鋼板に重防食塗装を施すと鉄の溶出濃度が低く、既往の調査結果や函館や寿都での結果と大きく異なった。このことから、既往の調査では鋼板自体からの鉄の溶出も加えた鉄濃度を測定していた可能性が高いと推察された。

鋼製ボックスを利用した鉄分供給ユニットから鉄を溶出させるには、ユニット内部の pH を低くしなければならない。海水の pH はおおむね 8 以上の海域が多く、鉄鋼スラグから鉄を溶出させるには、海水の pH を下げる工夫が必要である。強化型施肥材は、pH を下げるために腐植土の選定や木酢液の利用等の配慮がなされているが、効果の継続期間が数ヶ月であることから、長期的な利用のためには更なる改良が必要と考えられる。安定して鉄分供給ユニットから鉄を溶出させるには、pH の低い河川水や地下水などの利用が期待される。

5　あとがき

本資料では、水槽での培養実験、海藻の含有成分の分析から想定される栄養塩の要求成分を整理し、施肥を実施する際の目安としてまとめた。藻場では、光条件や流動環境が刻々と変化し、食害を受けたり、浮泥などに覆われたり、様々なインパクトが海藻に作用している。このように変動する環境の中で、栄養塩は水温と同様に最もベースとなる環境要因であるが、フィールドでのデータが乏しく、精緻な計画が立てにくい状況にある。このため、現時点で施肥に取り組む際に必要な検討のフローを提示した。

施肥は、これまでは費用対効果が明確ではなく、成果があっても局所的である場合が散見され、本格的な事業化に至っていない。施肥が継続できない理由は、費用対効果が合わないことによるものと思われる。しかし、本資料にも紹介した通り、最近になって、科学的根拠に基づく施肥の取り組みも進められている。また、水温上昇や栄養塩濃度の低下は各地で進んでおり、藻場の衰退にさらに影響してくる可能性があるため、今後も海藻の成長と栄養塩（施肥）の関係については研究が継続されることを期待する。

沿岸域の溶存態鉄濃度は、窒素やリンに比べると非常に低いが、外洋の鉄濃度に比較すると高いのも事実である。一方で、藻場の主要構成種である大型褐藻には、海藻の中では鉄の要求量が比較的少ない種が多い。藻類には鉄は必須の元素であるが、藻場に必要な鉄の研究が少なく今後更なる研究の進展が望まれる。大分県や北海道で実施した溶存態鉄濃度は鉄不足とされる外洋の表層水の 10 倍から 100 倍高い濃度（Fe/P 換算）であったこともあり、鉄の効果を十分に把握できていない。施肥の基本は不足する成分を供給することであるから、沿岸域において鉄が不足する磯焼け海域を選定することが最も重要であることが改めて考えられた。

【参考文献】

- 赤池章一・門間春博・菊池和夫(1992)；2．施肥によるコンブの生残率向上試験，稚内水試事報，pp.209-224.
- 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(2010)；フルボ酸鉄による藻場造成力実証試験，大分水研事業報告，pp.137-146.
- 大谷清隆・八田光代(1992)；磯焼け問題と対馬暖流北海道西岸北上流の変動，日本海洋学会秋季大会講演要旨集，pp.257-258.
- 小畑元(2005)；1.8.1　Martin の鉄仮説，海と湖の化学，pp.130-136.，京都大学出版会.
- 川俣茂(2004)；振動流中におけるアラメ幼胞子体の成長速度，平成 16 年度日本水産工学会学術講演会講演要旨集，pp.25-28.
- 菊池和夫・野沢靖・赤池章一(1990)；(3)リシリコンブ，稚内水試事報，pp144-164.
- 木曽英滋・山本光夫・福嶋正巳・沖田伸介・堀家茂一・長谷部廣行・定方正毅(2006)；製鋼スラグを用いた海域施肥効果の実海域検証，日本沿岸域学会講演概要集.
- 吉良道子・竹内廣中・吉野大仁(2002)；魚かすを用いた海域施肥実験(第 1 報),平成 14 年度日本水産

工学会学術講演会講演論文集，pp.75-78.
・ 国土交通省港湾局(2004)；資料 9 岩井の解，港湾工事における濁り影響予測の手引き，pp.78-91.
・ 柴田竜馬･堀田建治･岡本強一(2010)；大型海藻による環境修復効果に関する研究－コンブによる CNP 固定効果に関して－,平成 22 年度日本大学理工学部学術講演会論文集, pp.663-664.
・ 水産庁(2007)；磯焼け対策ガイドライン，pp.208.
・ 宗林由樹(2005)；海洋深層水の微量元素　駿河湾，海と湖の化学，pp.130-136.，京都大学出版会.
・ 日本海洋学会(2001)；海と環境，講談社サイエンティフィック，pp.244，講談社.
・ 野崎義行(1992)；海洋の元素鉛直分布，地球化学，26，pp.25-39.
・ 八田光代・大谷清隆(1992)；対馬暖流の北上流と津軽暖流への分岐，日本海洋学会秋季大会講演要旨集，pp.267-268.
・ 原田和弘(2008)；播磨灘の栄養塩環境とノリ養殖，ノリ色落ちと内湾域の栄養塩動態，2008 年度日本海洋学会秋季大会シンポジウム講演要旨集，pp.6-7.
・ 藤本健一郎・加藤敏朗・植木知佳・堤直人(2011)；製鉄副生スラグによる海の森づくり(藻場造成技術開発)，新日鉄技報，391，pp.206-209.
・ 北海道水産林務部(2014)；磯焼け対策総合推進事業 栄養塩添加による磯焼け漁場藻場再生調査報告書(平成 21～24 年度).
・ 牧田佳己・山本潤(2007)；発酵魚かす投入による海域栄養塩の増加効果について，平成 19 年度日本水産工学会学術講演会.
・ 松永勝彦(1993)；森が消えれば海も死ぬ，pp.190，講談社.
・ マリノフォーラム 21 海洋牧場開発研究会人工肥沃を加えた海藻磯根資源礁開発グループ(1990)；人工肥沃を加えた海藻磯根資源礁開発に関する報告書(浅海域の海洋牧場化システム計画のマニュアル，平成元年度研究開発報告書，11，pp.12-19.
・ 三木貴博・粟田清輝・佐間田優輔・長坂徹也・日野光兀(2003)；海水中相安定図を用いたスラグ成分溶出挙動の解析，鉄と鋼，89(4)， pp.388-392.
・ 水田浩之(2010)；3.4 栄養塩，藻場を見守り育てる知恵と技術，pp.51-54，成山堂書店.
・ 村上和男(1983)：潮流の観測と解析，第 19 回水工学に関する夏期講習会講演集，B8-1～B8-27.
・ 山田信夫(1967)；寒天原藻テングサ類の施肥に関する研究．静岡水試伊豆分場研報，32，pp.1-96.
・ 山本俊夫(1960)；海藻の化学的研究(その 7)，海藻中の鉄含有量について，日本化学雑誌，81(3)，pp.384-388.
・ 横浜市公害対策局(1985)：水質汚濁・土壌汚染に係る環境影響評価，指導・審査マニュアル.
・ 吉田吾郎・新村陽子・樽谷賢治・浜口昌巳(2011)；海藻の一次生産と栄養塩の関係に関する研究レビュー，水研センター研報，34，pp.1-31.渡邉康憲・樽谷賢治(2008)；ノリ養殖と珪藻赤潮・栄養塩(背景と趣旨説明を含む)，ノリ色落ちと内湾域の栄養塩動態，2008 年度日本海洋学会秋季大会シンポジウム講演要旨集，pp.3-5.
・ 和西昭仁・佐藤利幸・平澤敬一(2005)；周防灘．瀬戸内海ブロック浅海定線調査観測 30 年成果集，独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内水産研究所，pp. 114-159.

- Atkinson, M. J., Smith S. V. (1983); C:N:P ratios of benthic marine plants, Limnol. Oceanogr.,28, pp.568-574.
- Duarte, C.M.(1992) ; Nutrient concentration of aquatic plants, Limnol. Oceanogr. 37, pp.882-889.
- Martin, J. H., Gordon, R. M., Fitzwater, S. E. Broenkow, W. W. (1989); Vertex: phytoplankton/iron studies in the Gulf of Alaska, Deep Sea Res, 36(5), pp.649-680.
- Johnston, H.W. (1971); A detailed chemical analysis of some edible Japanese seaweeds. Proc.7th Int. Seaweed Symp, pp.429-435.
- Mizuta, H., Narumi, H. , Yamato, H.(2001); Effects of Nitrate and Phosphate on the Growth and Maturation of Gametophytes of *Laminaria religiosa Miyabe* (Phaeophyceae), SUISANZOSHOKU, 49(2), pp.175-180.
- Nozaki, Y.(2001) ; Elemental distribution, In Encyclopedia of Ocean Science, edited by J.H. Steele, K.K. Turekian and S. A. Thope. Academic Press San Diego, pp.840-845.
- Tadokoro, K., Ono, T., Yasuda, I., Osafune, S., Shiomoto, A., Sugisaki, H. (2009) ; Possible mechanisms of decadal - scale variation in PO4 concentration in the western North Pacific, Geophys. Res. Lett., pp.36.

水産生物の生活史に対応した漁場環境形成推進委託事業のうち各生活史段階に
応じた漁場機能を強化する技術の開発・実証に係わる検討委員会

	氏 名	所 属
委員長	藤田大介	東京海洋大学 大学院 准教授
委 員	秋山清二	東京海洋大学 大学院 准教授

施肥専門部会

	氏 名	所 属
委員長	藤田大介	東京海洋大学 大学院 准教授
委 員	小畑 元	東京大学大気海洋研究所 海洋化学部門 准教授
委 員	山本光夫	東京大学 海洋アライアンス 特任准教授
委 員	斉藤 聡	北海道水産振興課 主幹
委 員	真田康広	大分県水産振興課 課長補佐

施肥専門部会 オブザーバー

加藤敏朗	(一社)日本鉄鋼連盟	
佐藤英明	(一社)日本鉄鋼連盟	
木曽英滋	(一社)日本鉄鋼連盟	
越智 昭彦	(一社)日本プロジェクト産業協議会 事業企画部	次長

(委員等は技術資料作成時の担当者を示す)

本技術資料に関する問い合わせ先
水産庁 漁港漁場整備部 整備課
100-8907 東京都千代田区霞が関 1-2-1
TEL ; 03-6744-2390 FAX ; 03-3502-2668