

児島湾で実施した海底耕耘による 栄養塩供給効果と底質改善効果

乾 元 気・高木 秀 蔵・山下 泰 司・古村 振 一

The effects of sea bottom cultivation on nutrient supply and sediment improvement in Kojima Bay

Genki INUI, Shuzo TAKAGI, Yasushi YAMASHITA and Shinichi KOMURA

近年、日本各地の沿岸域において、海域の栄養塩、特に溶存態無機窒素（DIN）の減少に伴って、養殖ノリ *Pyropia yezoensis* の色落ちが頻発するとともに、食物連鎖を通じてマガキ *Crassostrea gigas* などの二枚貝の生産量や漁船漁業の漁獲量が減少した可能性が指摘されている^{1,2)}。一方、一部の内湾域では有機物を含む浮泥が堆積して富栄養化するとともに、貧酸素状態となり、生物にとって有害な硫化水素が発生する場所も存在する³⁾。

海域に栄養塩を供給するための対策⁴⁾として、施肥、下水処理施設の栄養塩管理運転、ダムからの放流量の上乗せなどのほかに海底耕耘がある。海底耕耘とは、小型機船底びき網漁業で使用される漁具や専用の器具を用いて海底に蓄積された栄養塩を海中に放出させる取組であり、漁業者自らが実施できる。

岡山県では、富栄養化がみられる児島湾で耕耘試験を実施し、間隙水中の栄養塩濃度をもとに供給量を評価し、耕耘場所や時期により栄養塩の供給効果が異なることを示唆する結果を得た^{5,6)}。一方、耕耘によって底泥が巻き上げられ、底層付近の濁度と栄養塩濃度が上昇することが分かっているものの、耕耘前と後のスポット的な調査結果を示したものであり^{7,8)}、耕耘中や終了後にかけての栄養塩濃度の連続的な変化、泥中の栄養塩量と海中の栄養塩の濃度上昇の関係については検討されていない。また、耕耘は底泥を攪拌することで、堆積した有機物の好気的環境下での分解を促す効果があるとされており⁹⁾、各地でその実施面積が拡大している。鳥取県の湖底¹⁰⁾や福岡湾¹¹⁾では複数年にわたって定期的に耕耘することで底質が改善することが示されている。一方、広島湾¹²⁾や京都府舞鶴湾¹³⁾では耕耘後に一時的に泥中の硫化物量が増加し、底質が悪化した事例もあり、耕耘によって底質が変化するメカニズムを解明することは非常に重要である。

本報告では栄養塩の供給効果が高いと考えられる湾奥部で秋季に耕耘し、栄養塩濃度の変化を調査し、栄養塩供給効果について検討した。さらに、溶存酸素量が低下すると考えられる夏季にも耕耘し、耕耘前後の底泥の変化について調査したので報告する。

材料と方法

耕耘方法 2021年8月25日、10月19日に岡山市児島湾の湾奥部（図1、水深約4.5m）において、小型機船底びき網漁船（約4.5t、図2（a）2隻を用いて、調査点を中心に円状（半径約50~100m）に時速6km程度で耕耘した。耕耘器具は、図2（b）に示したように底びき網漁具（手繰第三種）であり、横幅3m、高さ30cm、下部には15cmの爪が5cm間隔につき、岡山県では通称えびけた網と呼ばれている。耕耘時間は8月には120分間、10月には180分間とし、満潮時周辺に行った。高木ら⁶⁾の報告に基づき湾内で栄養塩供給効果が最も高いとされる場所および時期を選定した。

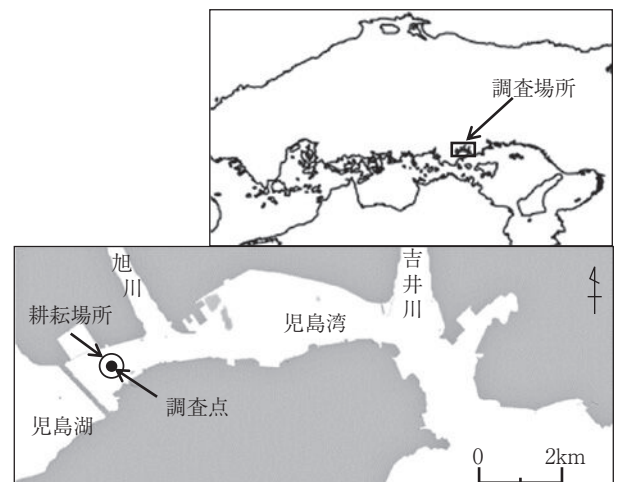


図1 調査場所

水質調査 10月19日に調査点において、耕耘開始15分前から終了45分後までの間、15分に1回、多項目水質計CTD Rinko-profiler (JFEアドバンテック社製)を用いて、表層から海底まで0.1mごとの水温および塩分を測定するとともに、採水器を用いて表層、中層(3m)および底層(底上0.5m)で採水した。採取した試水は研究室に持ち帰った後、積分球式濁度計WA7700(日本電色工業社製)による濁度を計測し、浮遊物質質量(SS)を計算した。また、一部はWhatmanGF/Fフィルターでろ過し、栄養塩分析装置QuAAttro2HR(BLTEC社製)を用いて硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、溶存態無機リン(DIP)、ケイ酸態ケイ素(DSi)の分析に供した。SS, DIN, $\text{NH}_4\text{-N}$, DIP, DSi濃度は、耕耘開始15分前、開始時、開始15分後の平均値を耕耘開始時とし、開始165分後、180分後(終了時)、195分後(終了15分後)の平均値を終了時として、開始時と終了時の変化を u 検定で比較した。また、底層のSSとDIN, $\text{NH}_4\text{-N}$, DIP, DSi濃度の関係をピアソンの相関係数を用いて評価した。なお、統計解析にはエクセル統計((株)社会情報サービス社製)を用いた。

泥質調査 耕耘場所において直径42mmのコアサンプラーを用いて耕耘前、耕耘直後、5日後、30日後にそれぞれ2本ずつ採泥した。なお、8月には30日後の泥は採取しなかった。また、調査点を対照区とし、同様の方法で採泥した。泥は研究室に持ち帰った後、海底下0-3cmおよび3-8cm層に分割し、底質分析に供した。また、対照区の泥は0-5cm層を底質分析に供した。底質分析は水質汚濁調査指針¹⁴⁾に従い、0-3cmおよび3-8cm層の泥は酸揮発性硫化物量(AVS)、酸化還元電位(ORP)

について行った。0-5cm層の泥は化学的酸素要求量(COD)、強熱減量(IL)、AVS、含水率、泥分率(<63 μm)について行うとともに、一部は3,000rpmで10分間遠心分離し、上澄みを抽出した後、人工海水で適宜希釈した。希釈水はWhatmanGF/Fフィルターでろ過し、前述の方法で栄養塩分析に供した。

栄養塩供給量および有機炭素巻上量の推定 10月の耕耘について、既報に従い⁹⁾、深さを5cm、器具の幅を3m、1時間当たりの耕耘距離を6kmとして栄養塩供給量および有機炭素の巻上量を算出した。

栄養塩供給量は底泥表層5cmの間隙水がすべて海中に供給されると仮定し、間隙率(n)は次の式を用いて計算した。

$$u = m_w / (m_w + m_s)$$

$$n = u \rho_s / (u \rho_s + (1-u) \rho_w)$$

u : 含水率, m_w : 泥中の含水量, m_s : 泥中の堆積物の乾燥重量, ρ_s : 堆積物の密度, ρ_w : 海水の密度である。なお, ρ_w は1.03, ρ_s は増沢¹⁵⁾に従い2.7とした。

有機炭素の巻上量も同様に底泥表層5cmのすべてが海中に巻き上げられるものとして、底泥中の有機炭素量は石黒ら¹⁶⁾の報告をもとに22.2mg/dgで計算した。

結 果

水質の変化 調査点におけるSSの推移を図3に示した。表層のSSは耕耘開始、終了時にはそれぞれ 5.2 ± 0.3 , $4.8 \pm 0.4\text{mg/L}$ (平均値 \pm 標準偏差)であり、期間を通じて明確な変化はなかった。中層では開始時は $7.0 \pm 0.6\text{mg/L}$ であったが、60分後以降徐々に上昇し、165分後には最大値となる 54.8mg/L を示した。終了時には $49.9 \pm 5.3\text{mg/L}$ となり、開始時と比べて有意に高い値を示した

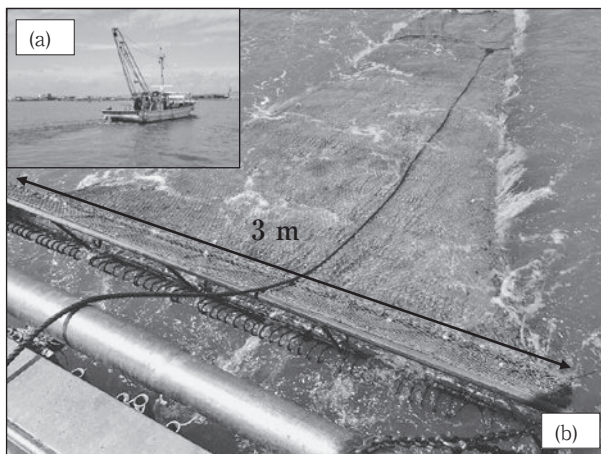


図2 使用した漁船および耕耘器具
(a) 小型機船底びき網漁船(約4.5t).
(b) 底びき網漁具(手操第三種, 通称えびけた網)

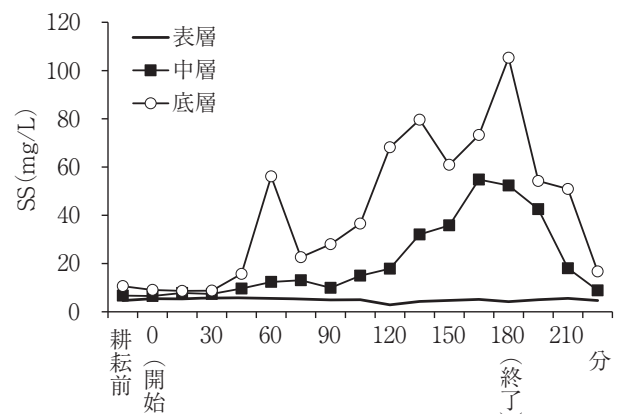


図3 調査点におけるSSの推移

($p < 0.05$)。225分後（終了45分後）には8.9mg/Lまで低下した。底層では開始時は9.4±0.9mg/Lであったが、45分後以降徐々に上昇し、180分後（終了時）には最大値となる114.8mg/Lを示した。終了時には77.6±21.0mg/Lとなり、有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。終了45分後には16.7mg/Lまで低下した。

耕耘前後のDIN, NH₄-N, DIP, DSi濃度の推移を図4に示した。表層のDIN濃度は、開始、終了時にはそれ

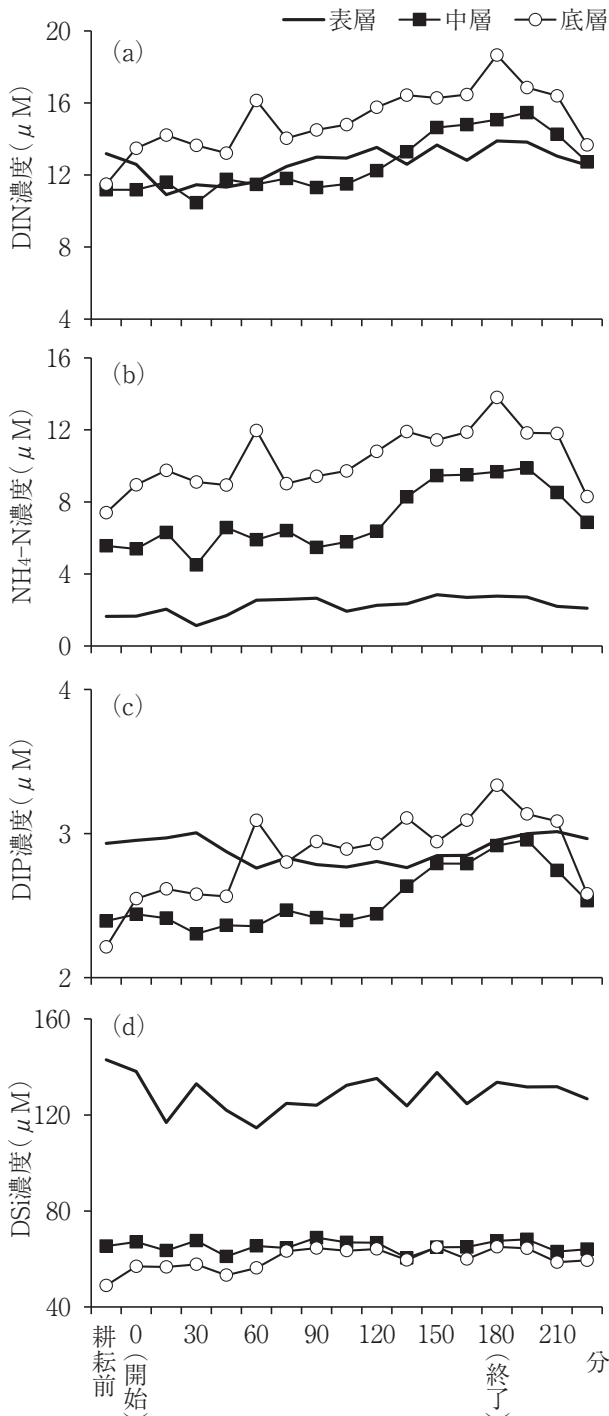


図4 調査点における栄養塩濃度の推移
(a)DIN, (b)NH₄-N, (c)DIP, (d)DSi

ぞれ12.2±1.0, 13.5±1.0 μMであり、明確な変化はなかった。中層、底層では、開始時には11.3±0.2, 13.1±1.2 μMであったが、徐々に上昇し、中層では終了15分後、底層では終了時に最大値となる15.5, 18.7 μMまで上昇した。終了時には15.1±0.3, 17.3±1.0 μMとなり、開始時と比べて有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。終了45分後には12.7, 13.7 μMまで低下した (図4 (a))。

NH₄-N濃度は、表層、中層、底層で開始時にそれぞれ1.8±0.2, 5.8±0.4, 8.7±1.0 μMであったが、徐々に上昇し、終了時前後には最大値となる2.8, 9.9, 13.8 μMまで上昇した。終了時には2.7±0.0, 9.7±0.2, 12.5±0.9 μMとなり、開始時と比べて有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。終了45分後には2.1, 6.9, 8.3 μMまで低下した (図4 (b))。中層および底層では、耕耘によってNH₄-N濃度が上昇したことで、DIN濃度も上昇していた。

表層のDIP濃度は、開始、終了時はそれぞれ3.0±0.0, 2.9±0.1 μMであり、明確な変化はなかった。中層、底層では開始時にそれぞれ2.4±0.0, 2.5±0.2 μMであったが、終了時には2.9±0.0, 3.2±0.1 μMとなり (図4 (c))、有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。

表層、中層のDSi濃度は、開始時にはそれぞれ132.7±11.4, 65.3±1.5 μM, 終了時には130.0±3.8, 66.9±1.4 μMであり、明確な変化はなかった。底層では、開始時に54.8±2.8 μMであったが、終了時には63.1±2.3 μMとなり (図4 (d))、有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。

底層のSSとDIN, NH₄-N濃度の関係を図5に示した。両者の関係はそれぞれ $y = 0.05x + 12.81$, $y = 0.05x + 8.18$ ($y = \text{DIN, NH}_4\text{-N濃度, } x = \text{SS}$)、相関係数 (r) は0.92, 0.92となった。有意な正の相関が見られ ($p < 0.05$)、濁度が高いほどDIN, NH₄-N濃度は高かった。なお、DIP, DSi濃度についても同様に相関が見られた ($r = 0.88, 0.54$,

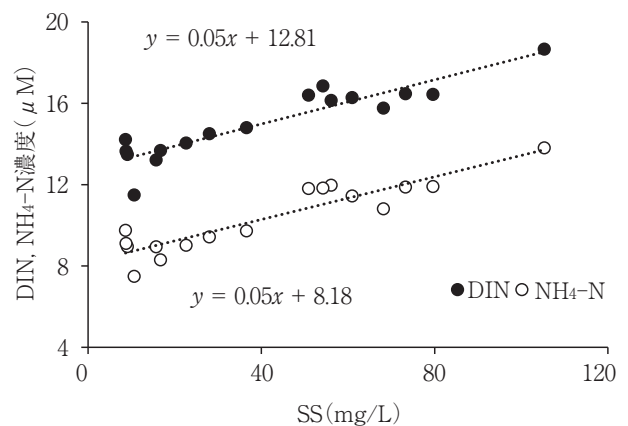


図5 調査点底層におけるSSとDIN, NH₄-N濃度の関係

か<0.05)。

調査点における60分ごとの塩分の鉛直分布を図6に示した。いずれの調査時も同様の傾向を示し、表層では20以下であったが、水深1mまでに26前後まで上昇しており、塩分躍層が存在していた。なお、水温は表層から海底まで概ね一様であり、塩分の差異に起因して成層躍層が生じていた。

底質の変化 10月19日に採泥した海底下0-5cm層の泥質および間隙水中の栄養塩濃度を表1に示した。COD, IL, AVS, 含水率, 泥分率はそれぞれ30.1mg/dg, 10.3%, 2.3mgS/dg, 75.8%, 84.4%であった。間隙水中のNO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, DIP, DSi濃度はそれ

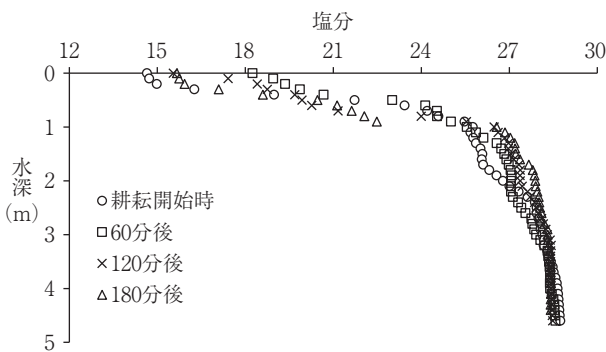


図6 調査点における60分ごとの塩分の鉛直分布

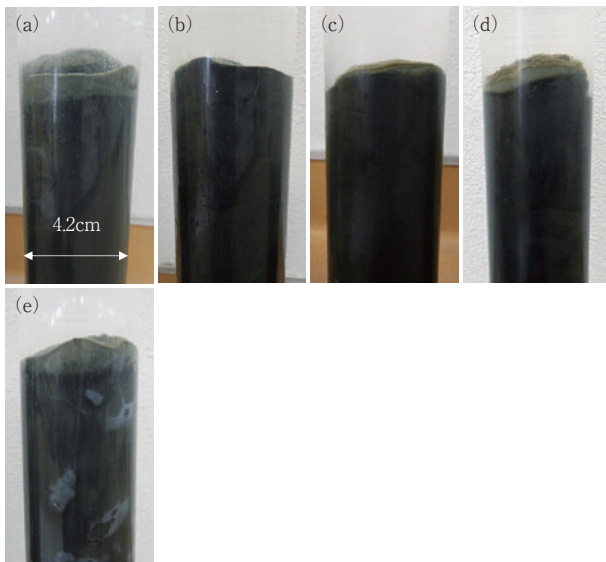


図7 10月の耕転前後の底泥の様子
(a) 耕転前, (b) 耕転直後, (c) 5日後,
(d) 30日後, (e) 対照区

ぞれ4.0, 1.2, 1,766.2, 114.0, 405.3 μMであった。

コアサンプルの様子を図7に示した。耕転前および対照区のコアサンプルは海底表面から1cm前後の灰色の層とそれ以深の黒色の層(還元層)の2層に分かれていた。耕転直後は上層の灰色部分がなくなり、5日後、30日後には再び確認された。

10月19日の耕転前後の底質の推移を図8に示した。AVSは0-3cm層で耕転直前, 耕転後, 5日後, 30日後にそれぞれ1.4, 2.3, 1.9, 1.8mgS/dgであり, 耕転直後に一旦増加したものの, 時間の経過とともに減少した。3-8cm層ではそれぞれ2.8, 2.8, 3.1, 3.0mgS/dgであった。ORPは0-3cm層でそれぞれ-311.2, -332.1, -321.4, -306.1mVであり, 耕転後に低下したものの, 時間の経過とともに上昇した。

8月25日の耕転前後の底質の推移を図9に示した。AVSは0-3cm層で耕転前, 耕転直後, 5日後にそれぞれ2.2, 2.3, 2.3mgS/dg, 3-8cm層でそれぞれ3.4, 3.3, 3.4mgS/dgであった。ORPは0-3cm層でそれぞれ-336.5, -329.9, -323.7mV, 3-8cm層で-389.1, -381.1,

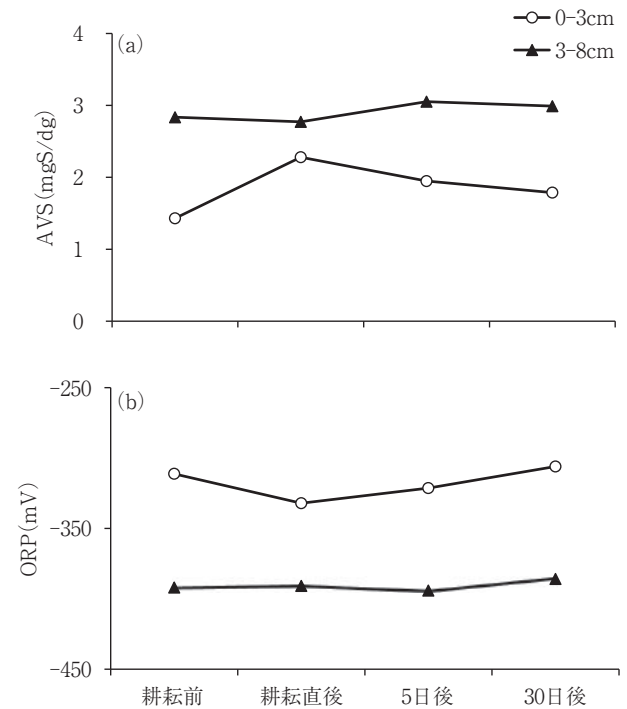


図8 10月の耕転前後の底質の推移
(a) AVS, (b) ORP

表1 児島湾湾奥(対照区)の泥質および底泥間隙水中の栄養塩濃度(10月19日)

項目	COD (mg/dg)	IL (%)	AVS (mgS/dg)	含水率 (%)	泥分率 (%)	DIN (μM)			DIP (μM)	DSi (μM)
						NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₄ -N		
	30.1	10.3	2.3	75.8	84.4	4.0	1.2	1,766.2	114.0	405.3

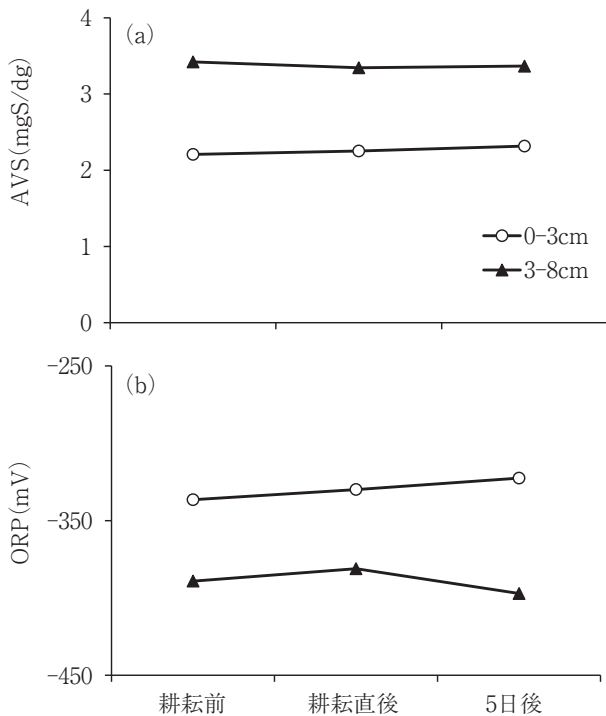


図9 8月の耕耘前後の底質の推移
(a)AVS, (b)ORP

表2 耕耘による栄養塩供給量および有機炭素巻上量

	総量 (2隻, 3時間) (kg)	1隻, 1時間当たり (kg)
栄養塩 (DIN)	119.2	19.9
有機炭素 (TOC)*	356.0	59.3

* 推定値

-397.2mVであった。AVS, ORPともに10月の0-3cm層で確認された耕耘直後の数値の変化は見られなかった。

栄養塩供給量および有機炭素巻上量の推定 底泥の含水率から求めた間隙率は0.89であった。耕耘した総面積は、漁具幅(3m)×耕耘速度(6km/時)×3時間×2隻=108,000m²、巻き上げた泥は、総面積×深さ(5cm)=5,400m³であった。窒素(DIN)の総供給量は、泥の容積×間隙率×間隙水中のDIN濃度=119.2kg(窒素換算)、1隻の1時間あたりでは19.9kgとなった。有機炭素の総巻上量は、泥の容積×堆積物の割合(1-間隙率)×堆積物の密度×泥中のTOC=356.0kg、1隻の1時間あたりでは59.3kgとなった(表2)。

考 察

本研究では、海域で耕耘試験を実施し、耕耘前後の水質および底質の変化を調べた。耕耘場所の底泥は含水率が高く、微細粒子からなる浮泥で構成されており、春季から夏季に大量発生する植物プランクトンの死骸や旭川

や児島湖から流入する有機物の堆積によって^{16,17)}、COD, AVSが水産用水基準¹⁸⁾を上回るなど富栄養化が進んだ場所である。また、間隙水中には栄養塩が豊富に含まれており、有機物の分解によって生じるNH₄-Nの濃度は1,766.2μMと海水中の100倍以上であった(表1)。

海水中のDIN, NH₄-N, DIP, DSi濃度は底層を中心に耕耘後に有意に上昇した。瀬戸内海ではN/P比がレッドフィールド比(海産植物プランクトンのN/P比:16)を下回っており¹⁹⁾、DINが相対的に不足している。そこでDINおよびNH₄-Nの供給効果を検討した。耕耘前後のSSは、調査点の中層では開始60分後、底層では30分前後から徐々に上昇し、終了時付近でピークに達した(図3)。漁具を曳航することで底泥が巻き上がり、濁りが生じたと考えられる。SSが上昇するとともに間隙水中のNH₄-Nが海中に放出され(図5)、底層のDIN, NH₄-N濃度がそれぞれ4.3, 3.8μM上昇した(図4(a), (b))。DIN, NH₄-N濃度の上昇が同程度であったことは、底泥中からNH₄-Nが供給され、DIN濃度が上昇したことを示しており、底泥間隙水中のDINの主成分がNH₄-Nであることから強く示唆される(表1)。耕耘終了後はSS, DINおよびNH₄-N濃度は低下し、終了45分後には耕耘開始前とほぼ同等の値となった。供給された栄養塩は潮流などによって耕耘場所の外に流出したものと考えられた。一方、表層ではNH₄-N濃度がわずかに上昇したものの、SSに変化は見られなかった(図3, 図4(b))。耕耘前から終了以降まで表層から水深1m付近に塩分躍層が存在していたことから(図6)、調査点付近に流入する淡水と海水の密度の違いにより濁りが表層まで到達しなかったものと考えられる。なお、本試験では底層を中心にDIP, DSi濃度が上昇しており(図4(c), (d))、DINと同様に供給できると考えられる。

今回の耕耘では1時間あたり19.9kg、総量で119.2kgの栄養塩を海域に供給したと考えられる(表2)。今回の耕耘範囲は半径50-100mの円状であったことから、DIN濃度が上昇した範囲を半径100mの円内とし、高さを海底から躍層までの3.5mと仮定した場合、推定上昇濃度は約12.9μMとなる。海域で実測されたDINの上昇濃度は約4.0μM(中層と底層の平均値)であり、双方には乖離が見られた。耕耘終了後約45分で概ね耕耘前の値に近づいたことから、約60分で水塊が耕耘場所から流出すると仮定すると180分間の耕耘中に海水が3回入れ替わる。つまり、水塊が移動しないと考えた場合、海中の総上昇濃度は3倍の約12.1μMとなる。これは推定値の94%に相当し、間隙水中の栄養塩量をもとに供給量を

評価する手法が有効である可能性が示された。ただし、この妥当性については、海域の潮流や河川水の影響などを詳細に考慮するとともに、泥中の栄養塩量の異なる場所でも試験を重ね、再現性を確認する必要がある。

10月の耕耘前および対照区の底泥には、海底下約1cmに灰色の層が見られた(図7(a), (e))。この層を含む0-3cm層の泥は、3-8cm層に比べてAVSが1.4mgS/dg低く、ORPが80.8mV高かったことから、この層は海底直上の海水から酸素が供給され、還元状態が緩和された酸化層と考えられた。耕耘後、酸化層は消失し、0-3cm層では耕耘前と比べてAVSは0.9mgS/dg高く、ORPは20.9mV低下し、一時的に底質が悪化した。その後、時間の経過とともに再び酸化層が形成され、底質も耕耘前の値に近づいた(図8)。一方、8月の耕耘では、耕耘前後で0-3cm層のAVSとORPの値に変化がなかった(図9)。調査点の位置する児島湾奥部は夏季には底層の貧酸素または無酸素化が見られるなど溶存酸素が低下する^{17,20)}。そのため、酸素の供給が不足し、酸化層も形成されづらかったと考えられる。これらの結果から、耕耘には嫌気状態の底泥を巻き上げ、泥中に酸素を供給する効果と露出した底泥表層に酸素を供給する効果があり(図10)、有機物の分解が促されると考えられる。ただし、泥中のAVSも放出されることで、還元物質として海水中の酸素を大きく消費する恐れもあり²¹⁾、耕耘する際は溶存酸素が低下する時期を避ける必要がある。なお、今回の試験は浮泥が堆積した場所でも実施したものであったが、有機物の堆積が比較的少ない場所などでは耕耘の効果も異なる可能性がある。

今回の耕耘では1時間当たり39.6kg、総量で237.4kgの有機炭素を嫌気状態の海底から巻き上げた(表2)。その後湾内で再び堆積することが想定されるが、その過程で一部は好気分解が進み、それによって硫化物の発生などが抑制されることが期待される。

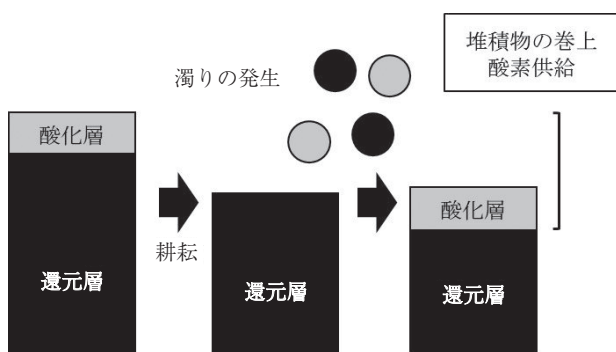


図10 耕耘による底質の変化(イメージ図)

要 約

1. 児島湾湾奥部において耕耘試験を行い、水質および底質の変化を調査した。
2. 底層でDIN, NH₄-N濃度がそれぞれ約4.3, 3.8μM上昇するなど、耕耘によって海域の栄養塩濃度が上昇した。終了後は、1時間以内に濃度は低下し、耕耘場所の外に流出した。また、海中の栄養塩濃度の上昇は概ね巻き上げられた泥の間隙水中の栄養塩によるものと考えられた。
3. 耕耘によって底泥表層が巻き上げられ、嫌気状態の下層が露出した。巻き上げられた泥および露出した泥中に酸素を供給する効果があることがわかり、有機物の分解が促進されることが期待された。

文 献

- 1) 反田 實・赤繁 悟・有山啓之・山野井英夫・木村 博・園昭紀・坂本 久・佐伯康明・石田祐幸・壽 久文・山田卓郎, 2014: 瀬戸内海の栄養塩環境と漁業, 水産技術, 7, 37-46.
- 2) 石井光廣・長谷川健一・松山幸彦, 2008: 東京湾のノリ生産に影響を及ぼす環境要因: 栄養塩の長期変動および最近の珪藻赤潮発生の影響, 水産海洋研究, 72, 22-29.
- 3) 松田 治, 1999: 瀬戸内海の水質・底質の現状と環境管理, 日本海水学会誌, 53, 229-240.
- 4) 反田 實, 2011: 瀬戸内海の栄養塩不足とその対策-多様な窒素源を求めて-, 日本水産学会誌, 77, 115.
- 5) 濱崎正明・山下泰司・佐藤二期・村山史康, 2018: 備讃瀬戸ノリ養殖場における海底に存在する未利用栄養塩を活用した栄養塩供給実証試験, 平成29年度漁場環境・生物多様性保全の総合対策事業「漁場生産力向上のための漁場改善実証試験」成果報告書, 19-27.
- 6) 高木秀蔵・濱崎正明・山下泰司・片山貴之・阿保勝之, 2020: 児島湾周辺海域における底泥間隙水中の栄養塩濃度と海底耕耘による栄養塩供給量の評価, 岡山水研報, 35, 1-9.
- 7) 中西 敬・高瀬博文・中谷明康・今井一郎, 2012: 貧栄養状態での栄養塩供給手法としての海底耕耘の効果に関する調査研究, 土木学会論文集B3(海洋開発), 68, 1115-1120.
- 8) 柳川竜一・中西 敬・高瀬博文・中谷明泰・西田愛実, 2013: 栄養塩供給手法としての海底耕耘による海底土粒子分布の現地観測および拡散範囲推定, 土木学会論文集B3, 69, 527-532.
- 9) 中西 敬, 2002: 生物生産に係る沿岸の環境修復技術, 水産業における水産環境保全と修復機能, 松田 治・古谷 研・谷

- 口和也・日野明德編日本水産学会監修，水産学シリーズ，**132**，60-70.
- 10) 藤井貴敏・伊達勇介・日野英壺・磯山美華・青木 薫，2022：湖底耕耘による底質環境改善効果，環境技術，**51**，93-98.
- 11) 江崎恭志・松井繁明，2009：福岡湾における海底耕耘による底質改善効果，福岡県水産海洋技術センター研究報告，**19**，41-50.
- 12) 鐺木 豊，1979：カキ漁場海底耕うんの効果について，広島県水産試験場研究報告，**10**，15-26.
- 13) 田中俊次・藤田真吾・西村元延・林 優行，1968：海底耕耘による底質改善について，京都府水産試験場業績，**31**，72-89.
- 14) 日本水産資源保護協会，1980：水質汚濁調査指針.
- 15) 増沢敏行，1985：堆積物の初期造成過程と物質の回帰，海洋の動態，梶浦欣二郎（編），恒星社厚生閣，東京，295-309.
- 16) 石黒貴裕・辻本 彰・野村律夫，2014：児島湾における堆積物中有機物の分布と炭素・窒素安定同位体比，岡山水研報，**29**，51-55.
- 17) 高木秀蔵・石黒貴裕・弘奥正憲，2013：児島湾における底質環境の現状と貧酸素水塊の動態に関する現地観測，LAGUNA，**20**，45-59.
- 18) 日本水産資源保護協会，2018：水産用水基準（2018年版）.
- 19) 阿保勝之・秋山 諭・原田和弘・中地良樹・林 浩志・村田憲一・和西昭仁・石川陽子・益井敏光・西川 智・山田京平・野田 誠・徳光俊二，2018：瀬戸内海における栄養塩濃度等の水質変化とその要因，沿岸海洋研究，**55**，101-111.
- 20) 高木秀蔵・岩本俊樹・飯野浩太郎，2009：児島湾における底質環境の現状と近年の変化，岡山水試報，**24**，1-5.
- 21) 入江政安・西田修三・寺中恭介・辻 陽平・平澤充成・藤原敏晴・中筋みゆき，2010：硫化水素の発生・溶出に着目した水底質モデルによる貧酸素水塊の動態解析，土木学会論文集B2（海岸工学），**66**，1066-1070.