

福岡湾における海底耕耘による底質改善効果

江崎 恭志・松井 繁明
(研究部)

福岡湾における海底耕耘について、その底質改善効果を検証し、より効果的な耕耘方法を明らかにするため、各種試験を行った。

耕耘により底質の堆積層を攪乱し酸素を供給することにより、1～2週間程度のタイムスケールで、有機汚染が軽減される効果があることがわかった。

また、その効果は湾中央の砂泥質の海底において最も大きいこと、耕耘を継続的に行うことで改善効果を上乘せすることが可能であること、ただし貧酸素状態や低水温期では効果が十分に得られないことがわかった。

キーワード：福岡湾、海底耕耘、底質改善効果

福岡湾は、半閉鎖的な海域である上、沿岸に大都市を擁し人間活動が盛んであることから、富栄養化が進行し¹⁾、その水域環境は、特に湾奥部において悪化している。

これに伴い、夏季を中心に、プランクトンの異常増殖による赤潮や、海水の鉛直混合が弱まることによる貧酸素水塊の形成等が見られ、これらを原因とする漁業被害も発生し、大きな問題となっている。

これらの現象が引き起こされる主な要因として、有機物の過剰な負荷による底質悪化が指摘されている。

これまで、全国的に、悪化した底質の改善は、主に覆砂等の土木的手法や、底質改良剤の散布等の化学的手法により行われてきた²⁾。しかしこれらの手法は、多大な経費を要するほか、覆砂については近年の海砂採取の禁止・制限措置に伴い今後の継続的な実施が困難となるおそれがあり、また底質改良剤についても副次的に発生する環境悪影響のリスクについて慎重な検討を要する等、問題点も多く抱えている。

これに対して、海底耕耘は、経費が安く、また漁業者自身の手で実施可能な簡便な底質改善手法であり、これまで全国で実施されてきている。実地に作業に携わる漁業者からは、実施効果について一定の評価が得られており、海底耕耘は底質改善に少なからず寄与していると考えられる。このことから、福岡湾における海底耕耘の事業展開により、将来にわたって漁場環境を保全することができると期待される。

この研究では、福岡湾内において海底耕耘試験を行い、その効果を検証するとともに、最も高い効果の得られる

耕耘方法（時期・場所等）について検討を行い、いくつかの知見を得たので、報告する。

方 法

本研究では、まず耕耘による環境変化を精密に測定するための屋内水槽試験（室内試験）を行い、これにより得られた知見をもとに実際の海域での実証試験（フィールド試験）を行う形で検証を進めた。

底質の有機汚染の程度を把握するため、各種環境分析を行った。分析・調査項目および方法を表1に示した。

1. 室内試験

(1) 効果の発現メカニズムの把握

より効果的な耕耘の方法を明らかにするためには、効果の発現メカニズム（各種パラメータの変化量・タイムスケール）を把握する必要がある。このため、福岡湾内底質の3類型、すなわち「砂質（湾口）」「砂泥質（湾中央）」「泥質（湾奥）」を天然海域から採取し、これを用いて室内試験を行った。試験の実施時期は、水温上昇期である6月中～下旬とした。

1) 試料の調整

採取した底質は、ただちに実験室に持ち帰り、測定誤差の原因となるベントス・生物の死骸・れき・貝殻等を除去後、よく攪拌して均質化した。これを、実験室内に設置した水槽にそれぞれ収容・静置し、堆積層を攪乱しないよう海水を静かに水槽に数日間程度かけ流すことにより、湾内の海底を実験室内に再現した。採取日は6月

表1 分析・調査項目および方法

区分	項目	方法
底質分析	粒度組成	日本工業規格A1204
	酸揮発性硫化物量	検知管法
	強熱減量	底質調査方法（昭和63年環水管第127号）
	COD	底質調査方法（昭和63年環水管第127号）
水質測定	水温	現場にて計器測定
	塩分	
	酸化還元電位	
	溶存酸素量	

表2 底質の採取海域および性状

類型区分	海域名	水深帯	底質の性状
砂質(湾口)	唐泊東沖	約14m	灰褐色 無臭
砂泥質(湾央)	姪浜西沖	約6m	灰黒色 磯臭～弱い腐敗臭
泥質(湾奥)	博多港西防波堤西沖	約7m	黒色 腐敗臭

5日～12日とした。

底質の採取海域および性状（呈色・臭気）を表2に示した。

2) 試験区の設定

試験区は、各類型ごとに、耕耘を行うもの（耕耘区）・行わないもの（対照区）を各1水槽、合計6区を設定した。

水槽は、容量20l（長さ38cm×幅21cm×深さ25cm）の透明な人工樹脂製のものをを用いた。底質堆積層の厚さは、いずれも5cmとした。

かけ流す海水の通水量は、毎分2l（換水率：144回転／日）とし、換水が水槽長辺方向に一定してスムーズになされるよう、水槽の設置角度等を適宜調整した。水質の急変や有機物の二次的な負荷といった、試験の妨害となる要素を排除するため、水産海洋技術センター施設内の二次濾過海水を用いた。また、有機物混入の原因となる付着珪藻等の増殖を防止するため、常時全体を暗幕で覆った。

3) 耕耘および効果の測定

以下に耕耘の手順を記す。各水槽とも通水を止め、海水をサイホンで抜いて水深9cmに調整した。その後、耕耘区については底質全体を金属製スプーンを用いてよく攪拌し、底質が沈降し再度堆積するまで1時間程度静置した。一方、対照区については、底質の堆積層を攪拌しない程度に海水を緩く攪拌し、同様に静置した。最後に、各水槽とも通水を再開した。

試験期間は、耕耘を行った6月15日から7日間とし、定期的に試料採取および各種環境項目の測定を行い、耕耘区と対照区間、また底質類型間で、比較検討した。底質試料は、内径1.3cmのポリプロピレン製のチューブを用いて柱状採取し、これを均質化して各種分析に供した。酸化還元電位については、底質の表面を測定した。

分析・測定項目および日時（耕耘後経過時間hまたは日数d）を表3に示した。

(2) 効果の持続性の把握

耕耘を継続的に行っていく上で、より効率よく底質の改善効果を得るには、効果の持続性を明らかにする必要がある。このため、耕耘効果がどの程度の期間発現し続けるかを把握するため、長いスパンでの室内試験を行った。

ここでは、姪浜西沖の砂泥域の底質を採取し、前述の試験（1）と同様の方法により試験を行った。この砂泥域においても、水深帯により、底質が互いに異なる3態、すなわち「砂質に近い（水深約3m帯。以下「砂寄り）」」「泥質に近くれき混じる（同約5m帯。以下「れき混）」」「泥質に近い（同約7m帯。以下「泥寄り）」」が存在することから、この態別ごとに試験を行った。試験の実施時期は、高水温期である7月下旬～8月中旬、水温下降期である10月上旬～11月上旬、低水温期である1月下旬～2月下旬、水温上昇期である3月中旬～3月下旬とした。

表3 分析・測定項目および日時

日時（耕耘後経過時間）		耕耘前	1h	6h	12h	18h	1d	2d	4d	7d
水質 (底層)	水温	○					○	○	○	○
	溶存酸素量	○	○							
底質	酸化還元電位	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	酸揮発性硫化物量	○					○		○	○
	強熱減量	○					○		○	○
	COD	○					○		○	○

表4 底質の採取海域および性状

態別	海域名	水深帯	底質の性状
砂寄り	姪浜西沖	約3m	灰色 磯臭
れき混	同上	約5m	灰黒色 磯臭～弱い腐敗臭
泥寄り	同上	約7m	黒色 弱い腐敗臭

表5 区画の設置位置および底質の性状

態別	水深帯	位置		中央粒径値	泥分率
砂寄り	約3m	N38 35.000'	E130 18.000'	2.4	21.4%
れき混	約5m	N38 35.291'	E130 17.894'	2.8	29.6%
泥寄り	約7m	N38 35.411'	E130 18.085'	3.4	38.5%

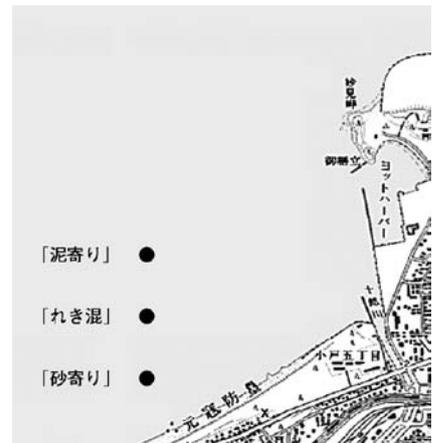


図1 区画の設置海域

1) 試料の調整

前述の試験（1）と同様の方法によった。採取日は7月12日～17日、10月4日、1月22日、3月11日とした。

底質の採取海域および性状（呈色・臭気 7月採取分）を表4に示した。

2) 試験区の設定

試験区は、各類型ごとに、耕耘を1回行うもの（1回区）・1回目の耕耘後一定期間をおいて再度耕耘を行うもの（2回区）・行わないもの（対照区）を各1水槽、合計9区を設定した。

試験の条件は、前述の試験（1）と同様とした。

3) 耕耘および効果の測定

耕耘の手順は、前述の試験（1）と同様とした。

試験期間は、第1回の耕耘を行った日（7月19日・10月10日・1月25日・3月16日）から、7月期・10月期・1月期については4週間、3月期については2週間とし、1週間ごとに底質試料を採取、強熱減量の測定を行い、耕耘した各区と対照区間、また底質3態間で、比較検討した。第2回の耕耘は、7月期・10月期・1月期については2週目の、3月期については1週目の試料採取の直後とした。底質試料採取は、前述の試験（1）と同様の方法によった。

2. フィールド試験

前述の室内試験の（2）の材料に用いた砂泥域の海底に、鉄筋とナイロンロープによる50cm×50cmの区画を、同試験を行った態別ごとに、3カ所設置した。

区画の設置位置および底質の性状（中央粒径値・泥分率 7月採取分）を表5に、設置海域を図1に、それぞれ示した。これらの区画の中の底質を、潜水により海底表面から5cmの深さ（漁業者が耕耘で使用するけた爪の長さに等しい）までよく攪拌することで、耕耘を行った。その後、耕耘の1時間後・1日後・1週間後に、耕耘した底質（耕耘区）およびその直近の耕耘をしていない底質（対照区）をそれぞれ潜水により採取、ただちに実験室に持ち帰り各種分析を行い、耕耘区と対照区間、また底質類型間で、比較検討した。底質の採取は、内径3.8cmのアクリル製コアサンプラーを用いて、海底表面から15cmの深さで、堆積層を攪乱しないよう静かに柱状採取した。このとき、サンプリング誤差を排除するために、1試験区当たり3検体を採取した（ただし7月期は1検体のみ）。酸化還元電位は、底質の表面・表面から5cm・同10cmの3層を測定した。

試験の実施時期は、水温上昇期である7月中～下旬（耕耘日は7月17日、以下同じ）、高水温期である9月下旬

～10月上旬（9月26日），下降期である10月下旬～11月上旬（10月23日），低水温期である3月中旬～3月下旬（3月11日）とした。

分析・測定項目および日時を表6に示した。

表6 分析・測定項目および日時

日時（耕耘後経過時間）		1時間	1日	1週
水質 (底層)	水温	○	○	○
	塩分	○	○	○
	溶存酸素量	○	○	○
底質	酸化還元電位※	○	○	○
	酸揮発性硫化物量※	○	○	
	強熱減量	○		○

※7月・3月は欠測

結果

1. 室内試験

(1) 効果の発現メカニズムの把握

試験結果を図2に示した。

試験期間中の水槽内の水温は，21.5～22.1℃であった。

1) 溶存酸素量の変化

耕耘前後の直上水の溶存酸素量の変化について，図2-①に示した。

耕耘前は，いずれの試験区も，4.5mg/L前後と生物の生存に適したレベルにあった。

耕耘1時間後，対照区では大きな変化は見られなかったが，耕耘区ではいずれの底質でも溶存酸素量の減少が見られた。砂質では，生物生存に影響のない3.0mg/L以上のレベルにあったが，砂泥質ではこのレベルを下回り，さらに泥質では無酸素状態となった。

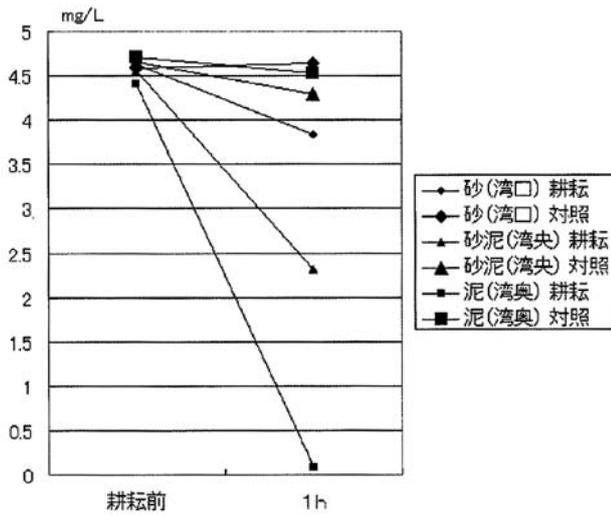


図2-① 溶存酸素量の変化

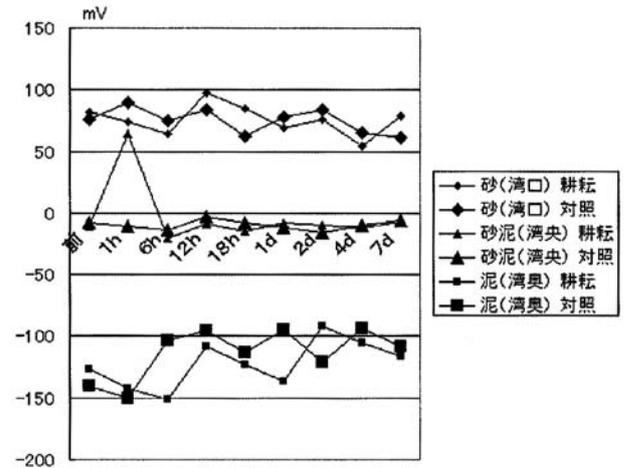


図2-② 酸化還元電位の変化

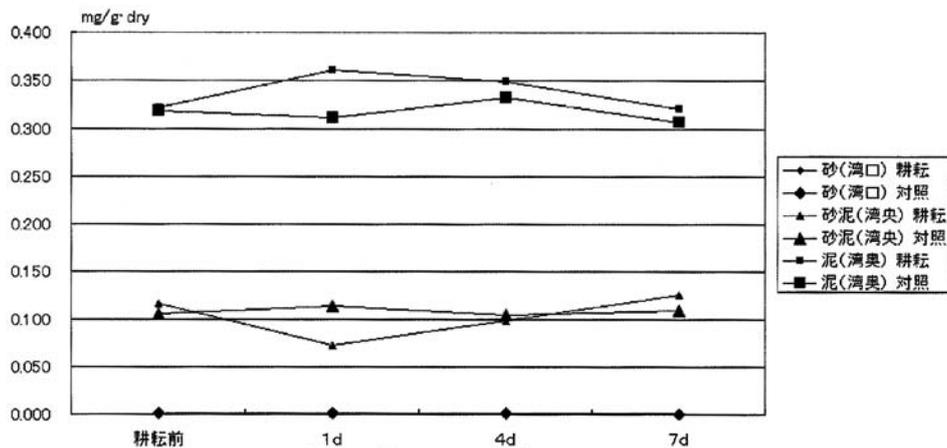


図2-③ AVSの変化

2) 酸化還元電位の変化

耕耘前および耕耘後の酸化還元電位の変化について、図2-②に示した。

試験期間を通じて、酸化還元電位は概ね耕耘区・対照区とも、砂質では50～100mV、泥質では-100～-150mVの範囲内で、それぞれ安定して推移していた。これに対して砂泥質では、耕耘1時間後に、耕耘前のマイナスレベルから50mV以上に上昇し、酸化的な環境となった。その後、酸化還元電位は下降し、0～-30mVの範囲で推移した。

3) 酸揮発性硫化物量の変化

耕耘前および耕耘後の酸揮発性硫化物量（以下「AVS」）の変化について、図2-③に示した。

試験期間を通じて、AVSは、耕耘区・対照区とも、砂質では0.001mg/g乾泥以下、砂泥質では0.1mg/g乾泥前後、泥質では0.3mg/g乾泥以上で、それぞれ推移していた。このレベルは、『福岡市水質測定結果報告書（福岡市環境局）』により例年報告されているものと概ね同等であり、天然海域の状態が実験室内によく再現されていることがわかった。

耕耘区と対照区を比較すると、砂泥質については、対照区では大きな変化がなかったのに対して、耕耘区では1日後に耕耘前からAVSが約38%減少し、4日後以降は対照区と同等のレベルに戻っていた。

4) 有機物量の変化

耕耘前および耕耘後の強熱減量およびCODの変化について、図2-④に示した。

試験期間を通じて、強熱減量は、砂質では3.0%以下、砂泥質では7.0～11.0%、泥質では13.0～16.0%の範囲内で、それぞれ推移していた。同じくCODは、砂質で

は2.0mg/g乾泥以下、砂泥質では7.0～11.0mg/g乾泥、泥質では16.0～20.0mg/g乾泥の範囲内で、それぞれ推移していた。このレベルは、『福岡市水質測定結果報告書（福岡市環境局）』により例年報告されているものと概ね同等であり、やはり前述の3)で示したように、天然海域の状態が実験室内によく再現されていることが確認された。

砂泥質・泥質の耕耘区では、強熱減量・CODとも、時間と共に減少傾向が見られ、1週間後では耕耘区が対照区を下回っていた。1週間での減少率は、砂泥質では強熱減量26.7%・COD 28.5%、同じく泥質では16.0%・10.1%であり、砂泥質の方が泥質より減少率が大きかった。砂質では、値の絶対レベルが低く、明らかな減少傾向は見られなかった。

(2) 効果の持続性の把握

試験結果を図3に示した。

試験期間中の水槽内の水温は、7月期は24.3～26.1℃、10月期は21.1～25.3℃、1月期は10.3～11.5℃、3月期は12.2～13.4℃であり、天然海域での水温のレベルおよび変動傾向をよく反映していた。

7月期・10月期については、耕耘区（1回区・2回区）では、砂泥質3態とも、耕耘後1～2週間のタイムスケールで、強熱減量の減少が見られた。対照区では、減少が見られなかった。さらに、その後、2回区については、2回目の耕耘の後に、さらに1～2週間のタイムスケールで、強熱減量の減少が見られた。1回区および対照区では、減少が見られなかった。

以上の傾向は、水温の低い1月および3月期には明確でなかった。

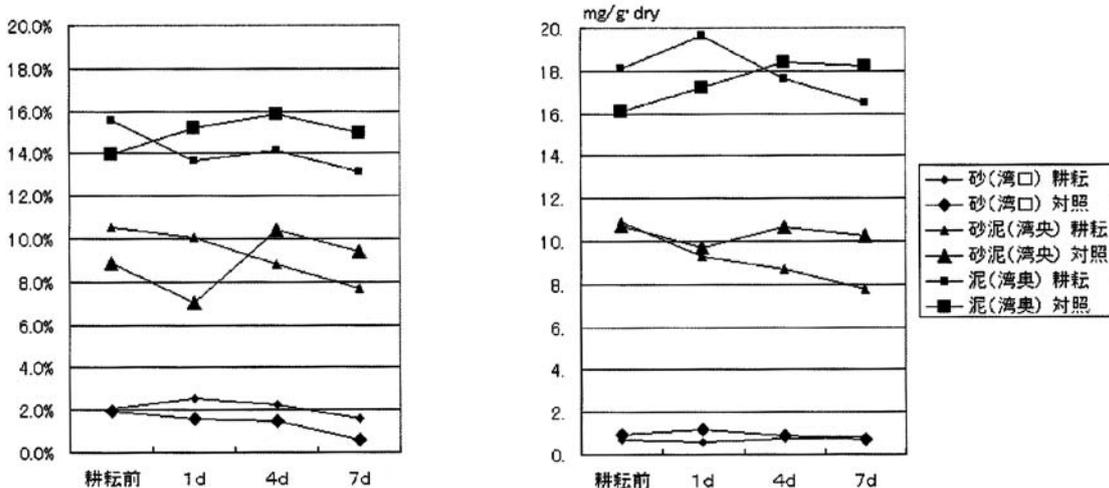


図2-④ 強熱減量（左）及びCOD（右）の変化

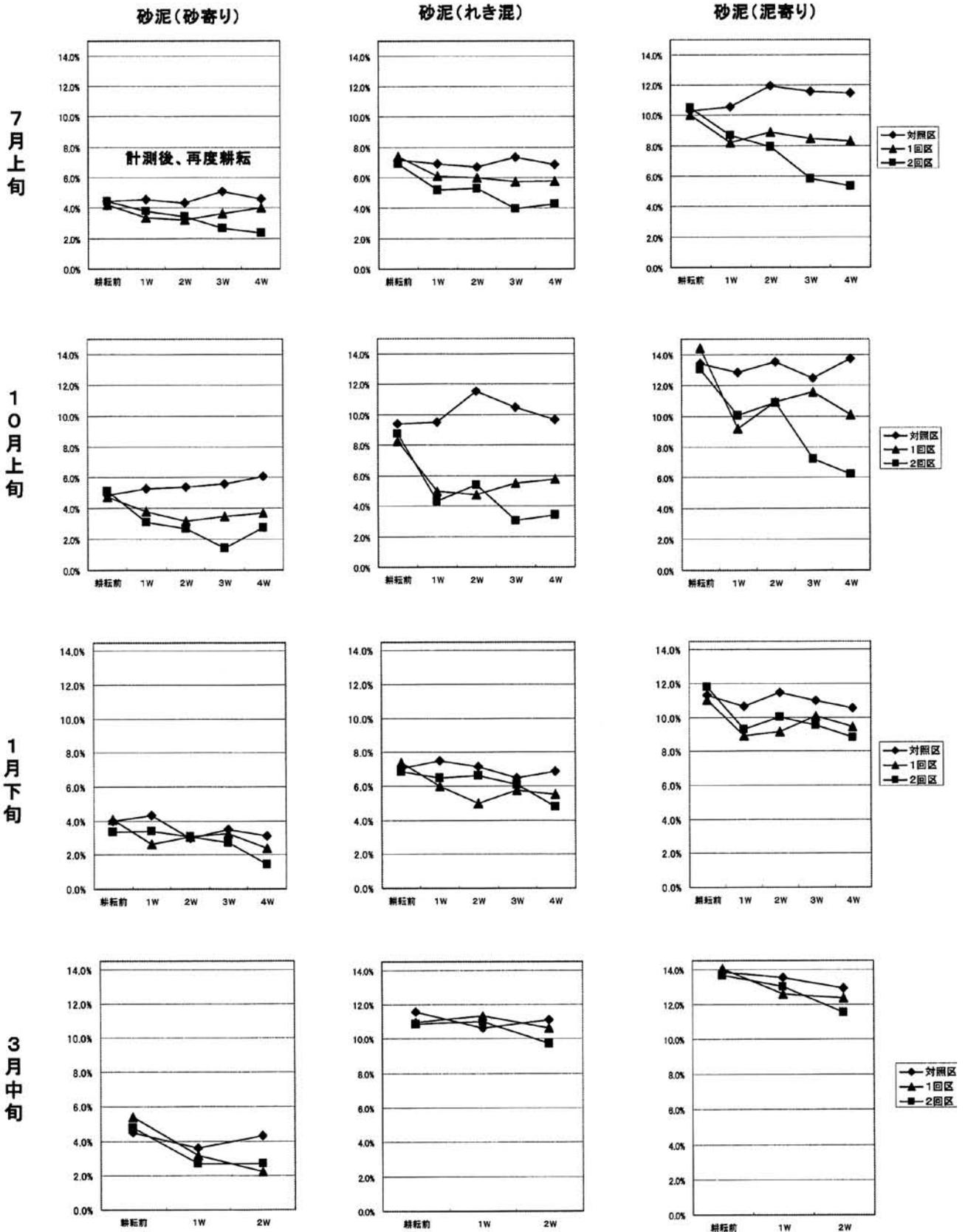


図3 強熱減量の変化

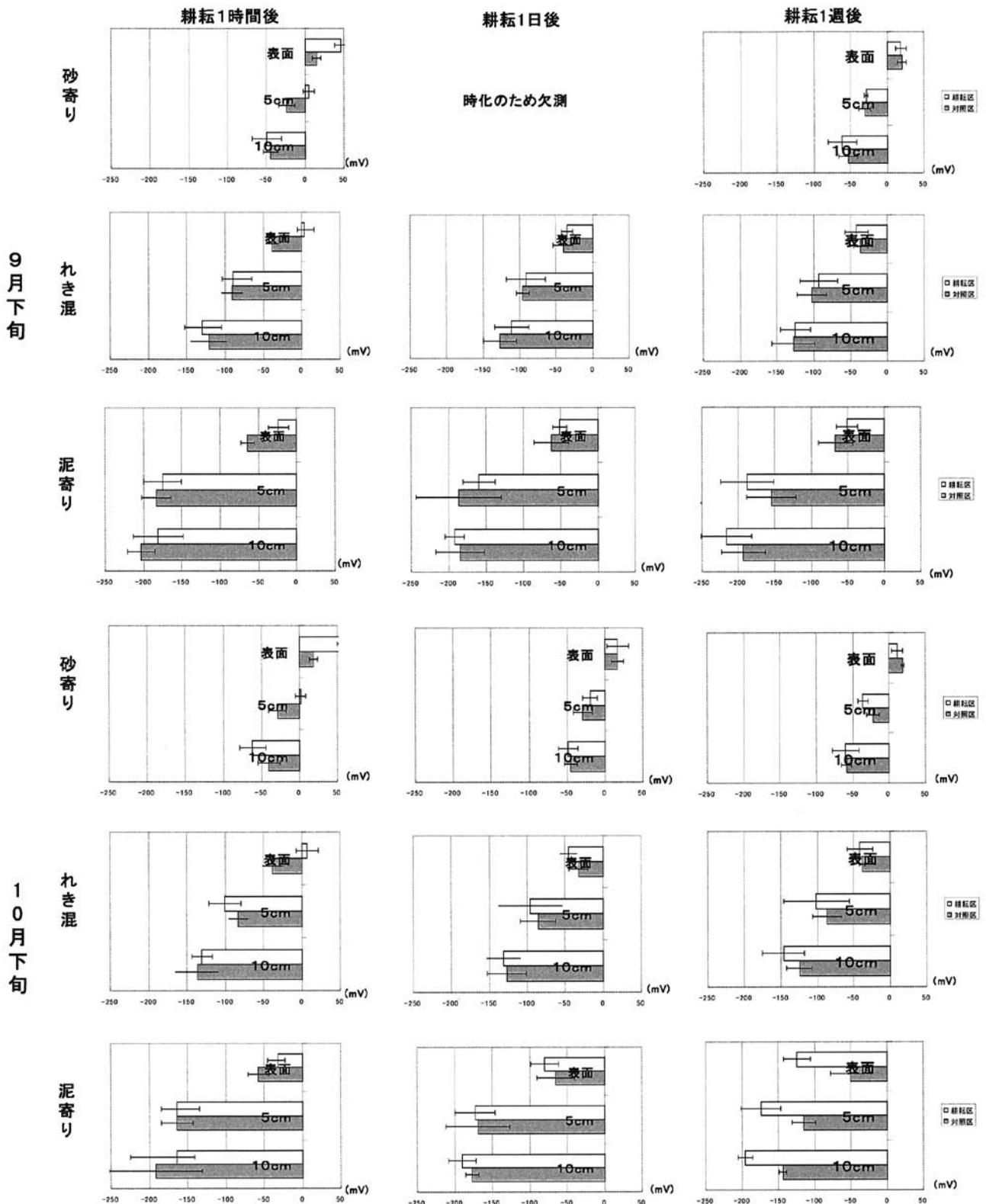


図4-① 酸化還元電位の変化

2. フィールド試験

試験結果を図4に示した。

試験期間中の水温は、7月期は23.0～23.2℃、9月期

は25.9～27.2℃、10月期は20.4～21.4℃、3月期は11.5～13.5℃であった。期間中、水温・塩分による成層・貧酸素状態は観察されなかった。

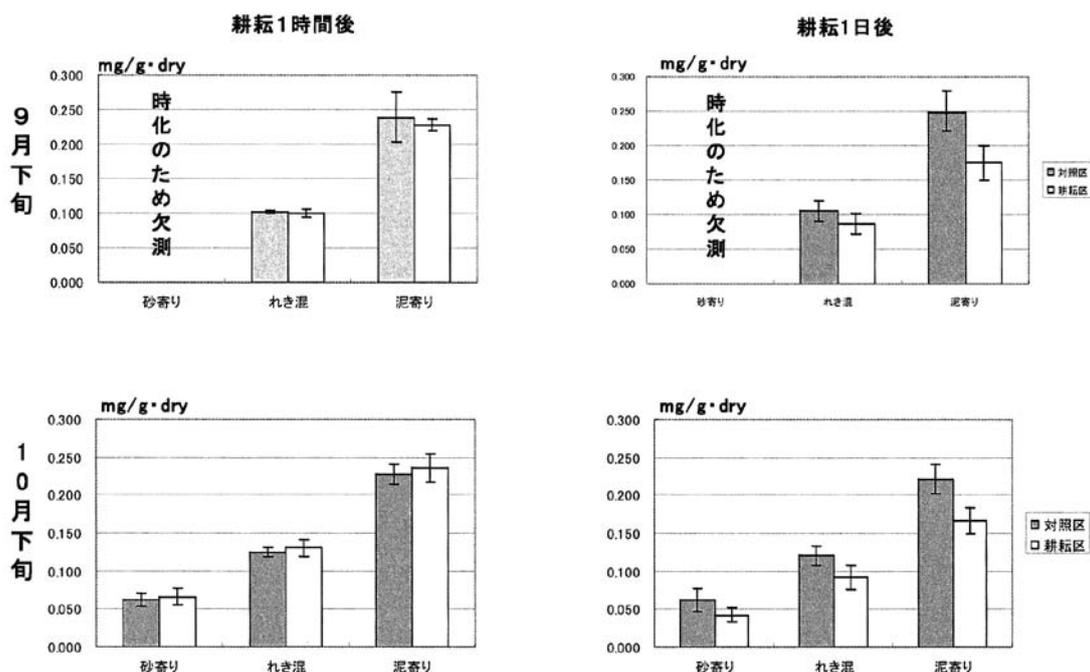


図4-② AVSの変化

(1) 酸化還元電位の変化

9月期および10月期における、耕耘前および耕耘後の酸化還元電位の変化について、図4-①に示した（平均値と標準偏差）。

対照区では、砂質の表面のみ酸化環境であり、砂寄りの5cm以深およびれき混・泥寄りの各層では還元環境であった。これに対し、耕耘区では、耕耘1時間後には、砂泥質3態のすべてで、表面の酸化還元電位が有意（分散分析による5%有意水準。以下同じ）に上昇していた。特に砂寄りでは、電位の上昇は5cm層まで及んでいた。また、耕耘後1日および1週間後では、すべての耕耘区で、対照区と同レベルにまで下降していた。

(2) AVSの変化

9月期および10月期における、耕耘前および耕耘後のAVSの変化について、図4-②に示した（平均値と標準偏差）。

耕耘1時間後では、砂泥質3態のいずれも、耕耘区と対照区の間には差が見られなかった。これに対し、耕耘1日後では、耕耘区のAVSが有意に減少していた。

(3) 有機物量の変化

7月期・9月期・10月期・3月期における、耕耘前および耕耘後の強熱減量の変化について、図4-③に示した（平均値と標準偏差）。耕耘1時間後では、砂泥3態のいずれも、耕耘区と対照区の間には差が見られなかった。これに対し、耕耘1週間後では、3月期を除くすべての時期で、耕耘区の強熱減量が有意に（検定をしていない

7月期除く）減少していた。

考 察

1. 室内試験

(1) 効果の発現メカニズムの把握

いずれの底質でも耕耘によって直上水中の溶存酸素量が減少していることは、底質中の物質が直上水と接触することで、水中の酸素が消費されていることを示している。また、その減少量が、砂質<砂泥質<泥質の順となっていることは、湾奥に近い海域ほど底質の酸素を消費する傾向が大きいことを示している。

酸化還元電位について見ると、砂泥質において耕耘後に一時的な電位の上昇が見られるが、これは底質中への酸素供給によって、ある程度の時間、底質環境が還元から酸化にシフトすることを示している。一方、砂質及び泥質では顕著な変化が見られなかったが、これは、砂質では耕耘による酸素供給がなくとも酸化環境が保たれていること、また逆に泥質では強い還元状態にあるため1回の耕耘によって長時間にわたって酸化環境になることはないことを示している。

AVSについて見ると、砂泥質において耕耘後に一時的に低下が見られるが、このことは底質中に酸素が供給され底質中の硫化物が1日程度のタイムスケールで酸化を受けたこと、また、その後堆積層の攪乱が終息した後底質中の酸素が消費され再度硫化物が生成されたこと

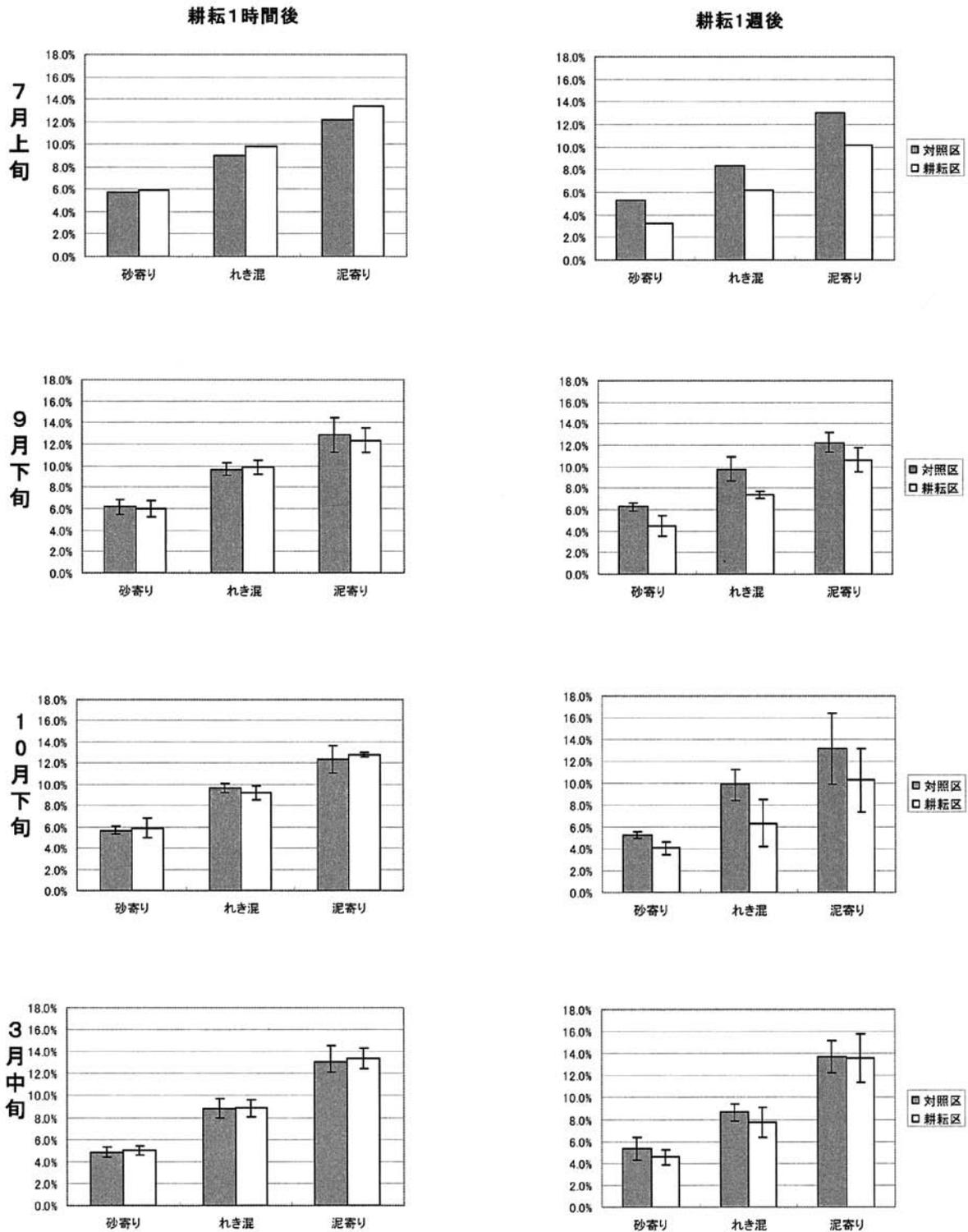


図4-③ 強熱減量の変化

を示している。つまり耕耘により「底質が酸化的にシフトし、再度還元的に戻っていく」過程を通じて、底質中の物質が酸化を受けているものと思われる。このことは、前述の酸化還元電位の変化と符合する。なお、AVSについては、海域の有機汚染に関する指標として『水産用水基準2000年度版（社団法人水産資源保護協会）』にお

いて0.2mg/g乾泥という基準値が設定されている。砂泥質については、試験期間を通じて、この基準より低いレベルで推移したが、泥質ではこれを大きく上回っているため耕耘によってこれをクリアすることは困難であると思われる。また逆に、砂質では汚染レベルの極めて低い結果となっており、底質改善を行う必要がないと思われ

る。

最後に、底質汚染の原因である有機物量について見ると、砂泥質・泥質で耕耘後に減少していることは、耕耘を行うことにより1週間程度のタイムスケールで有機物が分解を受けていることを示している。このことから、耕耘には底質の有機汚染を軽減する効果があると考えられる。ただし、泥質については、耕耘後も、依然としてCODの水産用水基準値 20mg/g 乾泥に近いレベルであり、有機汚染に起因する貧酸素水塊形成等のリスクを脱するには相当の労力を要すると思われる。

以上を総合すると、耕耘の底質改善効果は、還元状態にある底質中への酸素の供給により有機物を分解することによって発現すること、そのタイムスケールは1週間程度であること、またその効果は砂泥質において最も大きいことが示唆された。

なお、耕耘効果が以上のメカニズムによって発現する以上、実際の海域において夏季の貧酸素水塊形成時に耕耘を実施しても効果が十分に得られないことは自明であるため、耕耘作業実施に当たっては時期及び場所の選定を慎重に行う必要がある。

(2) 効果の持続性の把握

7月・10月における試験の結果は、比較的高水温期での砂泥域における耕耘による有機汚染軽減効果は耕耘後1～2週間発現し続けること、また、発現が終息して後も（逆戻りせず）効果は持続すること、さらに、再度耕耘を行うことで効果の上乗せが期待できることを示している。水温の低い時期に強熱減量の減少が明らかでなかったのは、環境中の有機物分解活性が低くなっていることが考えられる。

すなわち、比較的高水温期に、2週間に1回程度（月2回程度）の耕耘を継続的に行い、併せて有機物の新たな負荷削減を図ることにより、海域の有機汚染を解消し、漁場環境の回復を実現することが可能であると示唆された。

2. フィールド試験

酸化還元電位の変化は、耕耘1時間後に底質中の耕耘

を行った深さまで酸素が供給されたこと（特に粒径の大きい砂寄りの砂泥においてより深い層までその影響が及ぶ）、また耕耘1日後までには底質内で酸素が消費されたことを示している。このことは、前述の室内試験で得られた知見と符合する。

AVSの変化は、耕耘により、底質中に酸素が供給され、硫化物が1日程度のタイムスケールで酸化を受けたことを示している。この結果も、前述の室内試験で得られた知見と符合する。

また、有機物量の変化も、耕耘によって有機物が1週間のタイムスケールで分解されたことを示している。3月期では、他の時期に比べてその傾向が明確でなかったが、これは低水温により環境の有機物分解活性が低くなっていたものと思われる。この結果も、前述の室内試験で得られた知見と符合する。

すなわち、室内試験で得られた仮説が、実際の海域においても実証された。

この研究により、耕耘に最適な海域が砂泥域であることが明らかになったが、このような場所はクルマエビ等の重要漁業対象種の成育場所であり、福岡市漁協が実施している栽培事業における種苗放流海域を含んでいる。放流が行われる高水温期は、底質の有機汚染に起因する貧酸素水塊形成等のリスクが高まる時期でもあるが、海底耕耘によってこのような場所の有機汚染を軽減することで、栽培事業のより効果的な運営を図ることが可能となり、重要漁業資源の回復に大きく資するものと期待される。

文 献

- 1) 篠原満寿美:福岡湾における貧酸素水塊の発生状況。福岡県水産海洋技術センター研究報告, 12, 81-87 (2002).
- 2) 江藤拓也・佐藤利幸・長本篤・上妻智行:豊前海沖合域における覆砂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, 16, 115-120 (2006).