

有明海干潟海域環境改善へ向けた泥質干潟耕耘の効果に関する研究

滝川 清* ・増田龍哉** ・森本剣太郎*** ・田中健路****
大久保貴仁***** ・西原孝美***** ・吉田秀樹*****

有明海の疲弊が問題化されている中、その干潟環境の改善に向けての対策法の開発を目的として、泥質干潟を耕耘し、その追跡調査結果から泥質干潟の耕耘効果の検討を行った。泥質干潟の耕耘効果について、物理的、化学的、生物学的に検討した結果、泥質干潟を耕耘する事による直接的な改善効果と、干潟環境を取り巻く食物連鎖からなる波及的な改善効果がみられた。泥質干潟環境の改善は沖合海域環境への負荷削減につながることから、泥質干潟の耕耘は有明海の海域環境改善に有効な改善策であることが示唆された。

1. はじめに

九州西部に位置する有明海は日本を代表する大型閉鎖性内湾であり、約 5 m にも達する大きな干満差の条件の下、我国の干潟総面積の約 40% に及ぶ広大な干潟（約 200 km²）が発達した海域である。その広大な干潟を形成している土粒子は、「有明粘土」と呼ばれる泥質が約 60% を占め、この泥質干潟は陸と海と大気の接する場所として、有明海固有の生物が多種多様に存在し、高い生物生産力を有しており、また、陸域からの有機物や栄養塩などの負荷が、直接沖合の海域へかかるのをやわらげている。近年、有明海では生物相の変化と激減、赤潮の多発、水質・底質の悪化など、急激な環境悪化の悪循環に陥っているものと懸念されており、干潟海域環境の保全、改善策の実施が早急かつ大きな課題である。著者らは、海岸線の人工化や干潟の減少、底質の悪化が著しい有明海の干潟環境を対象に、その改善工法を開発することを目的として数種の対策法を試みている（滝川ら、2003）。本研究では、そのひとつである『耕耘による干潟改善策』の現地実験結果に基づいて、科学的視点から泥質干潟の耕耘による改善効果の検討を行った。

2. 現地実験及び追跡調査の概要

(1) 実験場所

熊本港周辺に広がる前浜干潟（約 390 ha）のうち、底質有機物量の指標のひとつである IL や COD_{sed} の値が高かった、熊本港大橋南側に位置する泥質干潟（含泥率

約 95%）で干潟耕耘実験を行った（図-1）。

(2) 干潟耕耘方法

干潟の耕耘は農作業用のトラクターを用いるなど、いくつかのやり方が存在するが、軟弱な泥質干潟を容易に走行でき、スリット式散気管によってエアレーションしながら耕耘が可能な、国土交通省九州地方整備局（下関港湾空港技術調査事務所）と（株）キューヤマの共同技術開発製品の干潟走行式底質浄化装置を用いた。本装置の主な性能を表-1 に示す。

耕耘時期は河川等から海域に最も負荷がかかると考えられる梅雨の後で、干潟の浄化に寄与している微生物や底生生物の活性が高い夏場の高温時に設定し、2,500 m²（50 m × 50 m）の面積を、縦方向、横方向それぞれ 2 回/日（3 時間/日）、泥深約 30 cm まで耕耘した。

なお、耕耘実施日は昼間に長時間干潟が露出する、若潮から中潮にあたる、2004 年 8 月 11 日から 13 日の 3 日間である。

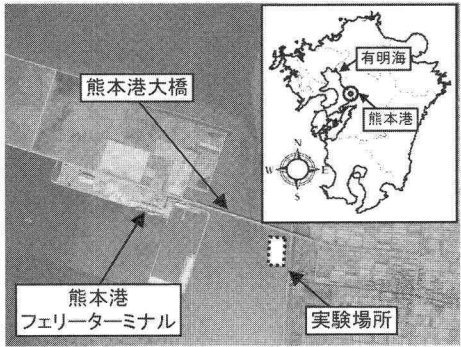


図-1 実験場所位置図

表-1 干潟走行式底質浄化装置の主な性能

主 項 目		性 能 (実測値)	
寸 法	全長 3.1 m 全幅 3.5 m	単純走行	最大 7 km/h
		曝気走行	平均 3 km/h
主機関	空冷ディーゼル	曝気量	約 1000 L/分
重 量	約 560 kg	改良深さ	20~30 cm (調節可能)
曝 気	機械式過給器		

* フェロー 工博 熊本大学教授 沿岸域環境科学研究センター
** 正 会 員 アジアプランニング㈱ 水環境部
*** 正 会 員 工博 熊本大学大学院研究員 自然科学研究科
**** 正 会 員 理修 熊本大学助手 工学部 環境システム工学科
***** 学生会員 工修 熊本大学大学院 自然科学研究科修士過程
***** 国土交通省 熊本港湾・空港整備事務所 所長
***** 国土交通省 下関港湾空港技術調査事務所 所長

(3) 追跡調査方法

図-2 に示す調査地点において耕耘前、直後、3日後、2週間後、1ヶ月後、2ヶ月後に水質、底質、底生生物(マクロベントス)、微生物の追跡調査を実施した。調査項目は表-2 に示すとおりである。本調査は現場実験であるため、水質や底質などの海象、気象、季節による変化は避けられない。そこで、耕耘区の25 m 北西側に、耕耘を行わない比較区を設け、耕耘区と同様の調査を行った。

水質は、直径30 cm の塩ビパイプを干潟に挿入し、調査区における干潟直上水を明条件と暗条件でトラップし、干潟が露出する前の水質から干潟が露出して3時間後の水質の変化を調査した。

底質は、直径75 mm のコアサンプラーを泥深30 cm 挿入して柱状採泥し、表層(0～1 cm)、上層(-3～-7 cm)、下層(-18～-22 cm)を分析試料とし、底質の物理性状、有機物量、栄養塩、酸化還元状態の変化を調査した。なお、ORP、pH、泥温は東亜ディーケーケー社製のポータブル測定器のセンサーを直接干潟に挿入して測定した。

底生生物は、25 cm × 25 cm の方形枠(コドラート)を泥深30 cm 挿入して採泥し、採泥試料を1.0 mm 目の篩でふるい、篩上に残った底生生物を採集・分析し、種類、個体数等の変化を調査した。また、1.0 m × 1.0 m の方形枠を調査区に設置し、目視で確認できる直径約5

mm 以上の巣穴をカウントした。なお、目視観察の結果、巣穴はヤマトオサガニのものが主であった。

微生物は、底質分析試料から直接微生物のDNAを抽出した後、16S rRNA 遺伝子のPCR増幅およびクローン解析を行った。その解析結果を国際遺伝子データベースに照会し、相同性の高い遺伝子から、微生物相の変化を調査した。

3. 追跡調査結果と耕耘効果の検討

(1) 水質調査結果と耕耘効果の検討

貧酸素や赤潮対策としての耕耘効果を検討するために、DO、無機態窒素、無機態リンの濃度変化から、単位時間・単位面積当たりの生産・消費・回帰速度を試算した結果、耕耘3日後と2週間後に比較区との差が見られた(図-3、4)。

純生産速度(明条件でのDO濃度変化)は耕耘区の3日後が $330 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ 、2週間後が $430 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ であったのに対し、比較区の3日後が $30 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ 、2週間後が $180 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ であった。酸素消費速度(暗条件でのDO濃度変化)は耕耘区で3日後、2週間後とも $0 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ であったのに対し、比較区の3日後が $30 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ 、2週間後が $20 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ であった。総生産速度(明条件と暗条件の差)は耕耘区が比較区よりも3日後に $270 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ 、2週間後が $230 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ 上回った。

表-2 追跡調査日及び調査項目

水 質	調査日	耕耘前、3日後、2週間後、1ヶ月後
	項 目	pH、DO、SS、COD _{Mn} 、T-N、NO ₃ -N、NO ₂ -N、NH ₄ -N、T-P、PO ₄ -P、Chl-a、塩分、水温
底 質	調査日	耕耘前、直後、3日後、2週間後、1ヶ月後
	項 目	粒度分析、含水率、IL、COD _{sed} 、T-N、T-P、T-S、ORP、pH、泥温
底生生物	調査日	耕耘前、2週間後、1ヶ月後、2ヶ月後
	項 目	マクロベントスの種類、個体数、湿重量、巣穴数
微 生 物	調査日	耕耘前、直後、3日後、2週間後、1ヶ月後
	項 目	微生物相(PCR-DGGE法によるクローン解析)

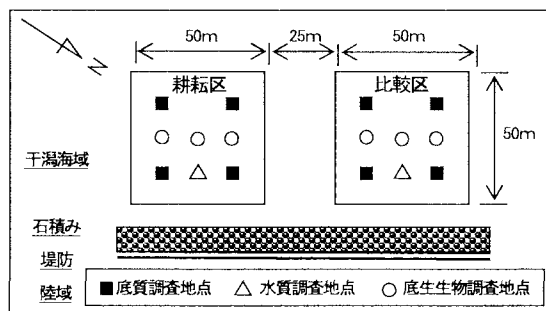


図-2 調査区の概要

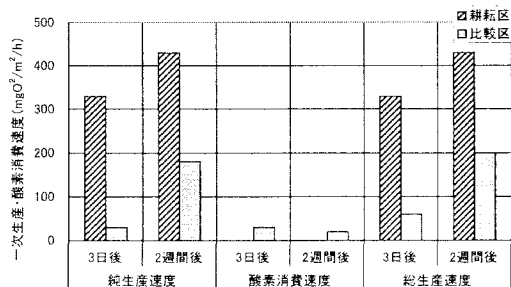


図-3 一次生産・酸素消費速度の比較

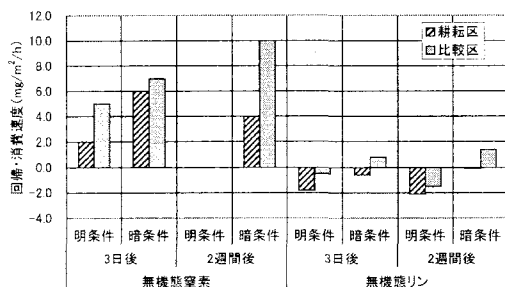


図-4 無機態窒素、無機態リンの回帰・消費速度の比較

無機態窒素の回帰・消費速度は耕耘区が比較区よりも3日後明条件で $3.0 \text{ mg/m}^2/\text{h}$ 、暗条件で $1.0 \text{ mg/m}^2/\text{h}$ 、2週間後暗条件で $6.0 \text{ mg/m}^2/\text{h}$ 回帰速度が抑えられ、無機態リンは耕耘区が比較区よりも3日後明条件で $1.3 \text{ mg/m}^2/\text{h}$ 、暗条件で $1.4 \text{ mg/m}^2/\text{h}$ 、2週間後明条件で $0.6 \text{ mg/m}^2/\text{h}$ 、暗条件で $1.5 \text{ mg/m}^2/\text{h}$ 消費速度が促進された。

これらの変化は、後に述べる底生物調査結果からも明らかであるが、耕耘後一時的に底生物などの消費者が少なくなることにより、生産者である底生藻類等が繁殖しやすい環境が創生されたためと考えられる。

水質調査結果から、波及的ではあるが、泥質干潟の耕耘が貧酸素や赤潮対策に有効な手段であることが示唆された。

(2) 底質調査結果と耕耘効果の検討

底質は、1回の調査で4地点/区域ずつ分析し、データの均質化を図るため、4つの分析値のうち、最大値と最小値を除いた平均を算出し、耕耘による変化のみを明確にするために、耕耘区で得られた値を比較区の値で補正したものを検討に用いた。

耕耘後の物理性状の変化を粒度、含水率の分析結果からみてみると、粒度は耕耘前後で大きな変動は無く、含泥率95%前後で推移した。含水率は表層で2週間後まで増加し、1ヶ月後には減少して耕耘前よりも低い値であった。上層、下層は2週間後まで減少し、1ヶ月後には減少はおさまり、耕耘前よりも低い値で落ち着いた(図-5)。

表層で含水率が高くなったのは、海水が干潟表面にたまりやすくなったためと考えられる。これは、後に述べる巣穴観測の結果からも明らかであるが、耕耘によって、一時的に底生生物の巣穴が無くなったことによるもので、

1ヶ月後の含水率の減少も、巣穴が増えた時期と一致することから、底生生物の巣穴の中に海水がたまり始めたことによる減少と考えられる。なお、上層、下層で含水率が減少したのは、底泥の自重圧密によるものと考えられる。

耕耘後の有機物量の変化をCODsedの分析結果(図-6)からみてみると、表層は、耕耘直後に減少し、3日後、2週間後と徐々に増加して耕耘前よりも高い値を示すが、1ヶ月後には再度減少して耕耘前よりも低い値を示した。上層、下層では、耕耘後に減少し、1ヶ月後も持続した。

全層で耕耘直後に減少したのは、有機物や無機性亜酸化物等が耕耘することによって減少したためと考えられ、この事は直接的な耕耘効果として挙げられる。表層で3日後、2週間後と増加し続けたのは、底生藻類の増殖によることが、現場での目視観察によって確認されており、1ヶ月後に減少したのは、底生藻類が底生生物の摂食によって減少したためと考えられる。上層、下層の1ヶ月後の減少は底生生物の生物攪乱によるもので、波及的な耕耘効果と考えられる(原田ら、2002)。

耕耘後の栄養塩類の変化をT-Nの分析結果(図-7)からみてみると、表層、上層は耕耘直後に減少したが、下層では耕耘前と同程度であった。表層、下層は3日後から2週間後と増加して耕耘前よりも高い値であったが、1ヶ月後には減少し、表層は耕耘前よりも低い値であった。上層は3日後に増加したものの、2週間後、1ヶ月後と減少し、耕耘前と同程度の値であった。

表層、上層で耕耘直後に減少したのは硝化・脱窒によるものと考えられ、耕耘・混気による直接的な耕耘効果として挙げられる。また、下層で減少がみられなかったことから、耕耘・混気による硝化促進作用が下層までは

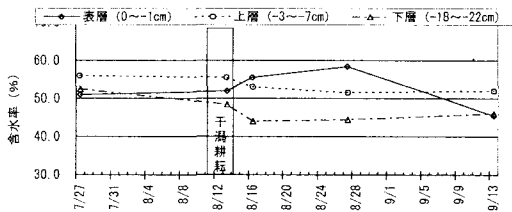


図-5 耕耘前後における含水率の変化

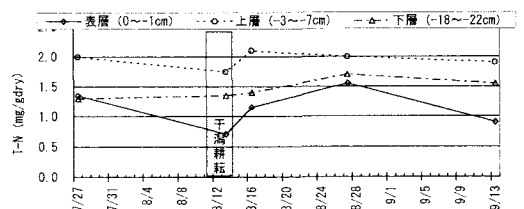


図-7 耕耘前後における T-N の変化

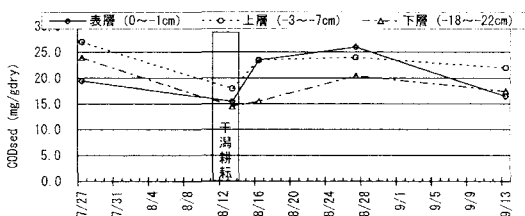


図-6 耕耘前後における CODsed の変化

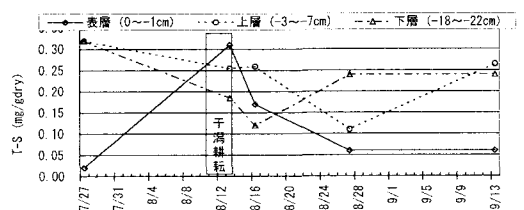


図-8 耕耘前後における T-S の変化

及んでいないことが示唆された。表層における3日後から2週間後までの増加は底生藻類の増殖、1ヶ月後の減少は底生生物の摂食による底生藻類の減少によるものと考えられる。3日後から1ヶ月後までの上層、下層での増加は外部からの負荷が主要要因で、減少は底生生物の生物攪乱による波及的な耕耘効果と考えられる。

耕耘後の酸化還元状態の変化をT-S, ORPの分析結果からみている(図-8, 9)。

T-Sは表層で耕耘直後に増加し、3日後、2週間後と減少したものの、1ヶ月後においても耕耘前よりも高い値を示した。上層、下層は耕耘直後に減少し、2週間後まで増減するものの、1ヶ月後には耕耘前よりも低い値を示した。

ORPは3日間の耕耘期間中の耕耘直後と2ヶ月後のデータが得られている。全層で1日目の耕耘直後に低下し、2日目直後、3日目直後には上層、下層で上昇がみられた。表層は3日後、2週間後と上昇、低下を繰り返す。1ヶ月後、2ヶ月後には耕耘前の値である 0 ± 50 mVの範囲に落ち着いた。上層は3日後から1ヶ月後までは耕耘前の値である -100 ± 50 mVの範囲に落ち着き、2ヶ月後には表層と同程度の値まで上昇がみられた。下層は3日後には耕耘前の値である -150 ± 50 mVに戻り、2ヶ月後までそのまま推移した。

耕耘直後に表層でT-Sの増加、ORPの低下がみられるのは、泥質干潟底泥内部での割合を多く占める、還元層を混合する影響と考えられる。しかし、2週間後から1ヶ月後には概ね耕耘前の状態に戻っている。一方、耕耘直後に還元層である上層、下層のT-Sが減少しているのは、耕耘・混気によって硫化物が揮散、酸化分解したためと考えられ、直接的な耕耘効果として挙げられる。また、3日後から2週間後までに上層でT-Sが減少しているのは、底生生物の生物攪乱による波及的な耕耘効果と考えられる。

(3) 底生生物調査結果と耕耘効果の検討

底生生物調査結果から、底生生物の種類数、個体数、巣穴数の変化を耕耘区と比較区で比較し、耕耘の効果を検討した。

耕耘前はゴカイなどの環形動物種が多く、耕耘区、比較区とも大きな種の違いはみられなかった。耕耘後は耕耘区において環形動物種、ハゼなどの脊椎動物種の減少がみられたが、アラムシロガイ、ササゲミエガイなどの軟体動物種、ヤマトオサガニ、ムツハリアケガニなどの節足動物種の増加がみられ、2ヶ月後も持続した。総種類数でみても耕耘後に比較区よりも種類が多くなっている(図-10)。

耕耘区における個体数は、耕耘前は環形動物のみ比較区より多く、それ以外は比較区より少ない。1ヶ月後に

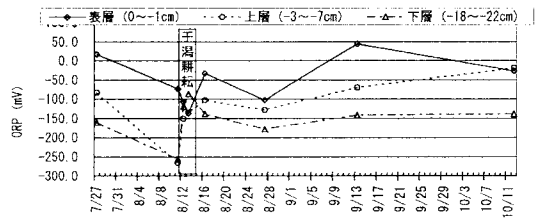


図-9 耕耘前後における ORP の変化

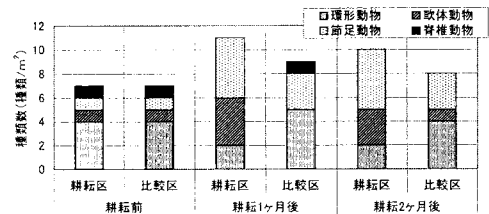


図-10 種類数の変化の比較

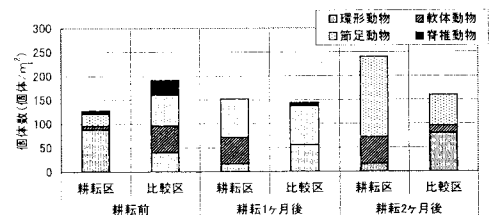


図-11 個体数の変化の比較

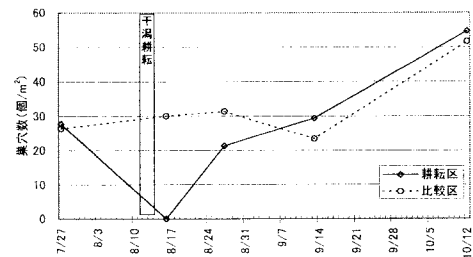


図-12 巣穴数の変化の比較

は環形動物は減少し、節足動物は比較区と同程度まで、軟体動物は比較区以上に増加した。2ヶ月後は環形動物と軟体動物の個体数は1ヶ月後と同程度で、節足動物は比較区の2倍以上に増えた。総個体数でみると、耕耘前は比較区より少ないが1ヶ月後には比較区と同程度となり、2ヶ月後には比較区を上回った(図-11)。

耕耘により底生生物の種類数や個体数が増加したことは耕耘効果として挙げられる。

耕耘前は耕耘区、比較区とも巣穴数は同程度であった。耕耘後は巣穴が破壊され、3日後まで巣穴が無い状態であるが、2週間後には巣穴が確認され、1ヶ月後、2ヶ月後と比較区よりも巣穴が多くなった(図-12)。このこ

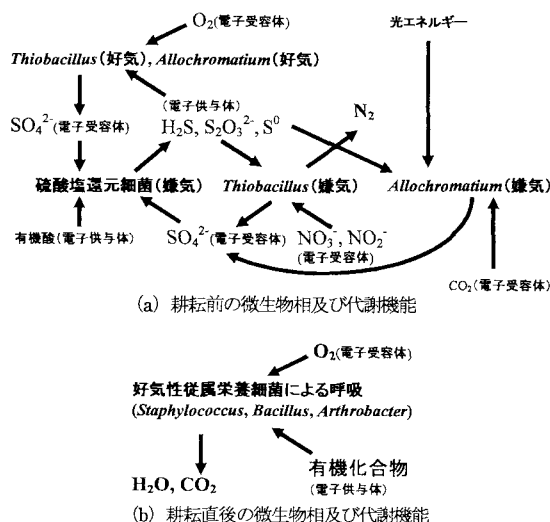


図-13 (a) 耕耘前と (b) 耕耘直後の微生物相および代謝機能

とは、個体数の増加と対応しており、このように巣穴が増加した場合、溶存酸素を多く含んだ海水が巣穴を通じて還元層まで供給されるようになり、底質浄化には望ましいことから、耕耘効果として挙げられる。実際、巣穴が増え始めた時期に、底質の CODsed や T-S が減少していることから明らかである。

(4) 微生物調査結果と耕耘効果の検討

耕耘前の底質試料中には、*Allochromatium* 属が優占して存在することが判明した。*Allochromatium* 属以外は、*Desulfobacter* 属、*Thiobacillus* 属がそれぞれ検出されたことから、これらの細菌もかなりの菌数存在することが示された。これらの3種類の細菌により、干潟底質において、図-13(a)に示す硫黄サイクルを中心とした微生物生態系が存在することが示唆された。

耕耘直後には、それまで優占していた硫黄代謝細菌群の菌数が低下し、それらに代わり *Staphylococcus* 属、*Bacillus* 属、*Arthrobacter* 属に近縁な好気性従属栄養細菌群が優占した(図-13(b))。これらの細菌群は耕耘に伴って、酸素を電子受容体とした有機物の分解反応を進めているものと考えられる。しかし、硫黄酸化細菌が完全に消滅するわけではないことが分かった。また、3日後には、耕耘前と同様な微生物相に戻ることが示された。一過的な好気環境により好気性従属栄養細菌群が優占した後、底質は浅い部分が好気性、深い部分が嫌気性の環境に戻り、それに伴い、硫酸塩還元細菌と硫黄酸化細菌による硫黄サイクルが再び復活するものと考えられる。

耕耘により好気性従属栄養細菌群が優占して効率的底質浄化が行われることが示唆されが、好気環境は一過的で3日後には、耕耘前の微生物相に戻ることが明らかとなった。

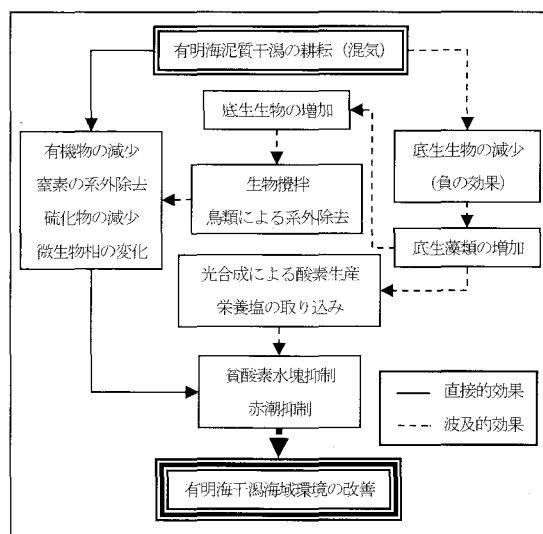


図-14 泥質干潟耕耘概念図

4. おわりに

泥質干潟の耕耘効果について、物理的、化学的、生物学的に調べた結果、泥質干潟を耕耘する事による直接的な改善効果と、干潟環境を取り巻く食物連鎖からなる波及的な改善効果がみられた。泥質干潟環境の改善は沖合海域環境への負荷削減につながることから、泥質干潟の耕耘は有明海の干潟海域環境改善に有効な改善策であることが示唆された(図-14)。

本研究を遂行するにあたり、国土交通省九州地方整備局熊本港湾・空港整備事務所ならびに下関港湾空港技術調査事務所、特定非営利活動法人みらい有明・不知火、アジアプランニング㈱、㈱同仁グローバル、㈱キューヤマ、熊本大学工学部物質生命科学科木田研究室ならびに環境システム工学科海岸環境工学研究室の方々から多大な協力を得たことに対し、記して謝意を表します。

参考文献

- 滝川清・古川憲治・鈴木敦己・北園芳人・原田浩幸・田中健路・柿本竜治・山下隆男(2002): 有明・八代海沿岸域の自然環境評価と環境共生型社会基盤整備に関する研究, 平成10~13年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(2))研究成果報告書, (課題番号10308026), 453p.
- 滝川清・田中健路・外村隆臣・増田龍哉・森岡三郎・酒井勝(2003): 有明海干潟環境改善へ向けた対策工とその効果, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1226-1230.
- 原田浩幸・滝川清(2002): 有明海干潟底泥の水質浄化機能と物理的攪乱による能力強化に関する研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1121-1125.