

# 英虞湾沿岸未利用地における海水導入による環境再生効果の検討

Evaluation of Restoration Effect in the Coastal Unused Reclaimed Area by Promoting Water Exchange in Ago Bay.

国分秀樹<sup>1</sup>・高山百合子<sup>2</sup>・矢持進<sup>3</sup>

Hideki KOKUBU, Yuriko TAKAYAMA and Susumu YAMOCHI

In AGO Bay, approximately 70% of the tidal flat have already been lost because of land reclamation. In this study, attempts were made to enhance the biological productivity, by promoting water exchange between unused reclaimed area and outer sea using pumps, pipeline system was set up in an experimental reclaimed wetland. Improvements were evaluated by monitoring sediment quality, benthic abundance every season for 18 months. The sediment statuses in wetland were gradually changed to the aerobic condition by promoting the decomposition of the hypertrophic sediment under the water exchange. Continuous water exchange would provide enhancement of the biological productivity. This method would lead to wise use of the coastal environment and enhance the biological productivity around the unused reclaimed areas.

## 1. はじめに

東京湾や大阪湾などの都市域の沿岸部には低利用地化した工場跡地が多く残され、また、一見自然豊かな英虞湾においても、耕作放棄地等の未利用地を多く抱えている。沿岸域の環境再生を実施する場合、このような未利用地の面積は無視できない規模であり、東京湾では沿岸域一帯に、英虞湾では現存する干潟の約2倍の休耕田が放置されている(国分ら2008)。このような沿岸未利用地は、英虞湾浅海域を分断し、生物生産性を著しく低下させている(国分ら2008)。こうした実情を背景に、海域の自然再生手法として、沿岸未利用地を干潟に再生する構想が議論されている。本研究では、沿岸未利用地の再生技術開発の第一歩として、沿岸未利用地の生物生産性の向上を図るため、堤防により阻害されている海水流動をポンプにより回復させる海水導入実験を実施し、海水導入前後の底質と底生物の変化特性について整理した。さらに実験データを元に流動・水質・底質シミュレーションを実施し、海水導入による環境再生効果を検討した。

## 2. 現地実験の方法

### (1) 海水導入による堤防後背地の再生実験

現地実験場所と海水導入実験図を図-1, 2に示す。本実験は、2006年5月より阿児町立神杓浦で実施した。実験場所は、英虞湾の入江の奥に位置し、過去には干潟であっ

たが、明治時代に干拓され、現在は耕作放棄されている。海域側はコンクリート堤防により締め切られ、陸側は山々に連続したヨシ原と隣接し、水田として整備された名残から、実験地の周囲はあぜ道で囲まれている。また、堤防には逆流防止用のフラップが設置され、後背地と海域との多少の海水交換はある。本実験では、対象水域を中央で2区画に土嚢で仕切り、1区画はポンプによる海水導入区と

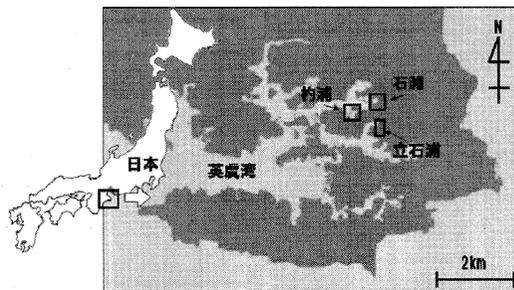


図-1 英虞湾内堤防後背地の調査地点

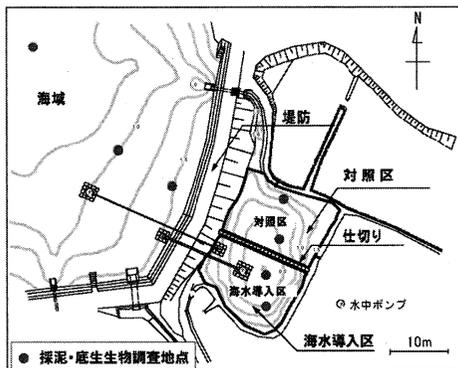


図-2 堤防後背地への海水導入実験の概要(杓浦)

- |          |                     |
|----------|---------------------|
| 1 正会員 理修 | 三重県水産研究所            |
| 2 正会員 工博 | 大成建設(株)技術センター       |
| 3 正会員 農博 | 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 |

し、もう1区画は対照区として現状が維持される条件とした(総面積200m<sup>2</sup>)。海水導入区の水位は、海域側の潮位にあわせて変化するようにポンプ流量を設定した。流域負荷を含めた未利用地の環境、未利用地環境が淡水系から海水系に変化することによる水質、底質、底生生物、植生および周辺海域への影響を把握することを目的とし、現在もモニタリングを継続中である。

(2) 現地調査方法

a) 事前調査

堤防後背地の現状を把握するため、図-1に示すように、潮受け堤防後背地の未利用水域について、英虞湾内の代表的な場所をそれぞれ3箇所(杓浦(DL+1.0m, +0.5m, ±0m:海水導入実験予定地)、立石浦(DL+0.5m, ±0m)及び石淵(DL+1.0m, +0.5m, ±0m))選定し、季節ごとに年4回、1年間の底質とマクロベントスの変化を調査した。調査日時を表-3に示した。

b) 海水導入後調査

海水導入実験区造成後、2006年6月より海水導入区と対照区及び堤防前面の海域(干潟)の測点において地盤高毎(DL:0m, +0.5m, 1m)に底質、マクロベントス(種類数、個体数、湿重量)について同様に年に4回、定期的に調査を行った(図-2)。底質は直径8cmの亚克力製コアを用いて干潟底質の未攪乱試料を採取し、クロロフィル-aは表層から1cm、それ以外(含泥率、COD、AVS、T-N、TOC)は表層から12cmを分析試料とした。マクロベントスの調査は、各地点面積0.2m<sup>2</sup>(0.2m×0.2m×5回)、深さ20cmで干潟底泥を採取し、1mmメッシュのふるいにかけた後、残留物についてマクロベントスの種類数、個体数、湿潤重量及び食性を調べた。食性については、風呂田ら(2000)の干潟生物の摂食様式を参照し、分類した。

(3) 海水導入による環境再生効果の検討

a) モデル概要

海水導入による環境再生効果を検討するため、実験データを元に流動・水質・底質シミュレーションを行った。計算プログラムはデルフト水理研究所で開発されたDelft3D-FLOWおよびDelft3D-WAQを使用し(Delft Hydraulics, 2005a, 2005b)、水質と底質の相互作用を考慮した平面2次元シミュレーションを実施した。計算モデルを図-3に示す。計算モデルは、海水導入実験を対象とし、計算領域は、海域は岸沖60m×沿岸75m、堤防後背地は岸沖15m×沿岸15m、グリッド間隔2.5m、水深1.4m(1層)と設定した。海水導入は、海側境界の潮汐周期、振幅に合わせて海域と堤防後背地の中央にそれぞれ設定した取放水口を通じて行われるものとし、上げ潮時は堤防後背地内に流入、下げ潮時は海域に流出する。堤防後背地では、この海水交換により後背地水量の約35%が1日2回外海水と交換される条件である。海側境界は潮汐(M2潮、振幅0.5m)であり海

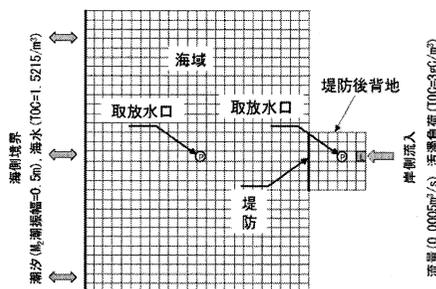


図-3 計算モデル

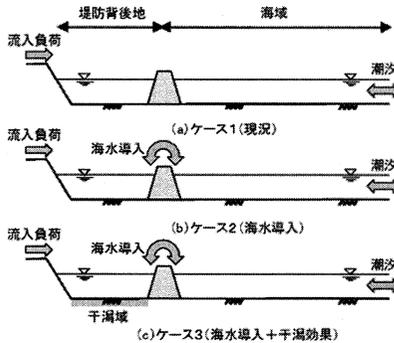


図-4 計算ケース

表-1 流入負荷および海側境界の物質濃度

項目	海域	流入負荷
植物プランクトン (gC/m <sup>3</sup> )	0.0015	0.0
デトリタス (gC/m <sup>3</sup> )	0.02	2.0
溶存態有機物 (gC/m <sup>3</sup> )	1.5	1.0
栄養塩 (NH <sub>4</sub> , gN/m <sup>3</sup> )	1.0	1.0
栄養塩 (NO <sub>3</sub> , gN/m <sup>3</sup> )	1.0	1.0
栄養塩 (PO <sub>4</sub> , gP/m <sup>3</sup> )	0.2	0.2

表-2 底質上の物質収支の設定条件

項目	海域	堤防後背地			
	全ケース	ケース1, 2	ケース3	ケース4	
溶出速度NH <sub>4</sub> (gN/m <sup>2</sup> /day)	0.040	-0.014	-0.035	0.048	
溶出速度PO <sub>4</sub> (gP/m <sup>2</sup> /day)	0.014	-0.005	-0.010	0.008	
酸素消費速度 (gO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /day)	-0.46	-4.61	-2.84	-3.69	
POCフラックス (gC/m <sup>2</sup> /day)	-0.087	-0.019	-0.030	-0.307	
PONフラックス (gN/m <sup>2</sup> /day)	-0.010	-0.002	-0.004	-0.037	
POPフラックス (gP/m <sup>2</sup> /day)	-0.0017	-0.0004	-0.0006	-0.0061	

域の物質濃度を与えた。堤防後背地には、流域からの流入負荷を陸側の中央から与えた。流入負荷と海域境界の物質濃度は海水導入実験の調査結果を参考に設定した(表-1)。海側境界濃度は、植物プランクトン、デトリタス、溶存態有機物の濃度をそれぞれ表-1のとおり設定した。流入負荷の値は、降雨時に堤防後背地に流れ込む流量および流入物質濃度を実測した結果を用い、流域からの流量Qは0.0005m<sup>3</sup>/s、物質濃度は表-2に示す。

b) 計算ケース

計算ケースを図-4、表-2に示す。計算は、堤防で海と

表-3 英虞湾内堤防後背地の底質と底生生物の特徴

		堤防後背地(未利用水域)		
		杓浦	立石浦	石淵
調査日		06.02., 06.06. 05.08., 05.11.	05.05., 05.07. 05.10., 06.01.	05.05., 05.07. 05.10., 06.01.
調査水深		+1.0m, +0.5m, 0m	+0.5m, 0m	+1.0m, +0.5m, 0m
底質 (DL+0.5m)	外観性状	泥質	泥質	泥質
	含泥率 (%)	78.6 ± 5.4	82.4 ± 6.9	75.1 ± 5.7
	COD (mg/g-dry)	86.1 ± 5.3	97.2 ± 2.0	74.2 ± 4.6
	TOC (mg/g-dry)	56.7 ± 1.5	51.8 ± 2.4	43.5 ± 2.4
	TN (mg/g-dry)	4.6 ± 0.2	4.6 ± 0.4	3.8 ± 1.9
	AVS (mg/g-dry)	4.7 ± 2.1	3.0 ± 0.8	2.9 ± 0.2
	C/N比	12.5 ± 1.5	11.4 ± 1.4	12.7 ± 0.4
マクロ ベントス	個体数 (個/0.2m <sup>2</sup> )	109.4 ± 17.2	94.2 ± 39.9	176.2 ± 32.8
	種類数 (種/0.2m <sup>2</sup> )	7.1 ± 0.8	7.3 ± 2.6	13.0 ± 1.4
	湿重量 (g/0.2m <sup>2</sup> )	3.6 ± 1.2	6.6 ± 3.1	5.4 ± 1.3

仕切られた堤防後背地の状況を再現したケース1(現況), 海水導入を実施したケース2(海水導入), 海水導入に干潟の浄化効果を付加したケース3, ケース4(海水導入+干潟)の4ケースを実施した。底質上の物質収支条件として, 現地観測から得られた溶出速度, 酸素消費速度, 粒子状有機物PONのフラックスの値を与えた(表-2)。POCとPOPのフラックスの値は, PONの現地観測値からレッドフィールド比C:N:P=50:6:1を用いそれぞれ算出した。表-1に示す海域およびケース1, 2の値は海水導入実験開始直後, ケース3の値は, 実験開始から1年半後の観測結果を用いた。ケース4の値は, 英虞湾に造成された泥質の人工干潟における造成3年後の物質収支観測結果を用いた(国分ら, 2006)。表-2より, ケース3は, ケース2に比べ, 溶出速度, 酸素消費速度, 粒子状有機物のフラックスが大きいたことが分かる。これは, 海水導入実験の継続により得られた堤防後背地の干潟効果と言える。ケース4におけるPONの除去速度は, ケース2に対して約10倍であることが分かる。計算は100日間, すなわち降雨が連続して100日続き堤防後背地に流入負荷が流入し続けた場合を計算した。

### 3. 結果と考察

#### (1) 堤防後背地の現状

事前調査を行った図-1に示す堤防後背地3地点における底質および出現したマクロベントスの分析結果について, 1年間の平均値±標準誤差を表-3に示した。

外観性状は泥質で, 底質の有機物含有量は高く, 杓浦, 立石浦, 石淵ともに富栄養化しており, AVSも水産用水基準0.2mg/g-dry(社団法人日本水産資源保護協会(2000))をはるかに超える高い値を示した。また, 底質のクロロフィル-*a*量は12.2-37.0mg/kgと底質の有機物含有量と同様に高い値を示した。底質のC/N比をみると, 堤防後背地で11.4-12.7となり, 湾内の一般的な干潟底質の7.8-8.9(国分ら2008)と比較し, 特に高い値を示した。これは, 陸からの影響を示すと考えられる。陸上の高等植物ほど, セルロースの割合が大きくなり, C/N比が上昇する

ことが知られている(寺島ら(1999))。つまり, 潮受け堤防後背地の底質には, 陸上植物由来のリター等が流入し, 堤防により後背地に堆積していることが推測された。

マクロベントスは, 塩分も15-22‰と低いことから, イトゴカイ(*Capitella sp.*)やユスリカ(*Chironomidae*)のような小型でかつ汽水域で生息する生物が優占していた。また湿重量は極端に小さく, 多様性の低い生物相であった。これは, 過去の干拓による潮受け堤防の建設が, 原因として考えられる。堤防により分断された後背地は, 海水の交換も悪く, 陸域から流入するリター等の有機物を蓄積するため, 底質の有機物含有量が高く, それにより夏季にはAVSが高い, 過栄養かつ還元的な底質環境となり, 生物の生息を妨げていることが推測された。それにより, ベントスの餌となるクロロフィル-*a*は高い値にもかかわらず, 多様性や生物量が低く, 比較的富栄養な環境に強い多毛類が優占する貧弱な生物相になることが推測された。

#### (2) 海水導入後の底質とマクロベントスの変化

##### a) 底質の変化

海水導入区, 対照区および堤防前面海域の潮間帯(地盤高DL+0.5m)の測点におけるTOCとAVSについて, 事前調査より海水導入後1年半の変化を図-5に示した。事前調査および海水導入直後では, TOC, AVS共に高く嫌気的な状態であった。しかし, 実験開始後約6ヶ月で海水導入区でTOC, AVSが減少し, 1年半後には対照区と明確な差がみられた。一方, 堤防前面の干潟底質については, 特に変化は見られなかった。これは, 海水導入を行うことにより, 堤内外との海水交換が促進され, 徐々に海水導入区が好気的な状態に変化していることを示す。そのため底質中の有機物が分解され, AVSで示される還元物質の量が減少していることが考えられた。

##### b) マクロベントスの変化

海水導入区, 対照区および堤防前面海域の潮間帯(地盤高DL+0.5m)の測点で出現した底生生物について, 事前調査より造成後1年半の変化を図-6に示した。実験開始後, 海水導入区では塩分が29-32‰に上昇したため, マクロベントスは前述の汽水性のものから, ミズヒキゴカイ(*Cirriiformia tentaculata*)やホトトギスガイ(*Musculus senhousia*)のような海水性かつ富栄養化した場所に生息する生物相に変化した。さらに1年半後では, 種類数も29種類まで増加し, ウメノハナガイ(*Pillucina pisidium*)やマメコブシガニ(*Philyra pisum*)のような二枚貝類や甲殻類も出現した。また湿重量については堤防前面海域の潮間帯と比較するとまだ少ないが, 徐々に増加した。底質についても, 前述のとおり, 徐々に好気的に変化していることから, 堤内に堆積している高濃度の有機物の分解が徐々に進行し, ベントスの生息に適した底質環境へ変化していることが推測された。一方, 堤防前面海域についても, 徐々に

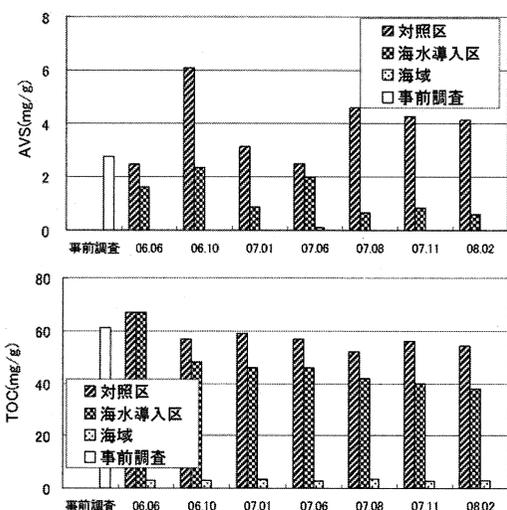


図-5 海水導入実験後の底質（上段：AVS、下段：TOC）の変化

ではあるが、湿重量が増加傾向にあった。これについては、干潟底質等に明確な変化はみられないが、海水交換により堤防後背地から有機物等の栄養が豊富な水が供給されるため、堤防前面のマクロベントスが増加した可能性が考えられた。しかし、現段階のデータは不十分であり、今後継続した調査が必要である。

以上より、今後継続して調査する必要があるが、海水導入により過栄養かつ嫌気的状態になっている潮受け堤防後背地の底質環境の改善と生物量を向上できる可能性が示唆された。

### (3) 海水導入による環境再生効果の検討

#### a) 水質の TOC の変化

ケース 1, 2, 3 における海水導入100日後の水質 TOC について、堤防後背地と海域の中央点での比較を図-7 に示す。水質 TOC は、植物プランクトン、デトリタス、溶存態有機物の総和とし、図中には水質 TOC の構成および総和の値も示した。

水質 TOC は、ケース 1 では海域に比べて堤防後背地で増加した。それ以外のケースでは、堤防後背地と海域で均一になる傾向となった。ケース 2, 3 の堤防後背地および海域の値はケース 1 の海域と同レベルであった。各ケースの水質 TOC の構成を見ると、ケース 1 の堤防後背地は、溶存態有機物が $3.50\text{gC/m}^3$ と最も多く、植物プランクトンが $7.68\text{gC/m}^3$ 、デトリタスが $0.44\text{gC/m}^3$ であった。これは、堤防後背地では、沈降性のデトリタスに対し浮遊性の溶存態有機物と植物プランクトンの濃度が著しく増加することを示している。ケース 1 の海域、ケース 2, 3 の堤防後背地および海域の水質 TOC の構成は、ほぼ全てが溶存態有機物であった。これは、堤防後背地の水質は、海水導入に

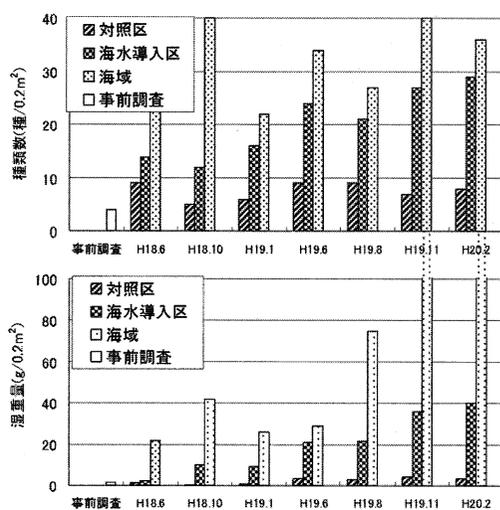


図-6 海水導入実験後のマクロベントス（上段：種類数、下段：湿重量）の変化

より外海水との交換が促進され外海水濃度と同等の水質になったことを示す。これは現地実験における降雨時の対照区と海水導入区、海域における平均 TOC 濃度がそれぞれ、 $4.31$ ,  $1.98$ ,  $1.78\text{ mg/l}$  となることから同様の傾向を示す。また、ケース 3 に付加した干潟の効果は、水質 TOC にはみられなかった。

以上より、堤防後背地に海水導入を行うと、堤防後背地では、今まで封じ込まれていた高い有機物濃度の水質が外海と交換されることにより、海域と同程度の水質に改善できることが分かった。また、著者らが事前に実施した海水導入により与えられる海域への水質・底質への影響の事前検討によれば、堤防後背地の高い有機物濃度の水質を海域に流出することにより、海域の水質を悪化させる場合もあることを確認している（高山ら、2006）。現在実施中の海水導入実験の流入負荷では、海域の水質を悪化させることなく堤防後背地の水質を改善することができることが分かった。

#### b) 底質の TOC の経時変化

図-8 にケース 1~ケース 4 における100日後の堤防後背地の底質 TOC について、堤防後背地の中央点での比較を示す。底質 TOC は、底質中のデトリタスとした。堤防後背地の底質 TOC の計算初期値は $50\text{mgC/g}$ である。

底質 TOC について、初期値 ( $50\text{mgC/g}$ ) に対する増減を比較する。ケース 1 では初期値に対して大幅に増加し、それ以外のケースでは初期値に対して減少した。底質 TOC の減少は、水質 TOC と同様に、海水導入により底質 TOC に寄与するデトリタスが海域に流出したことに加え、流入負荷に比べて底泥の分解速度が大きいためであった。このようにケース 1 と 2 を比較することにより、海水交換を行うことで、堤防後背地底質の改善（有機物の減少）が可能で

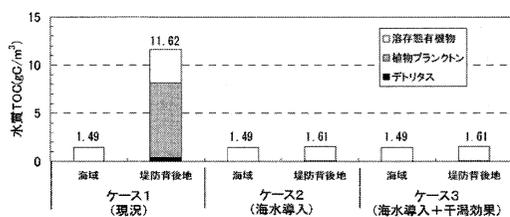


図-7 各ケースにおける水質 TOC の比較

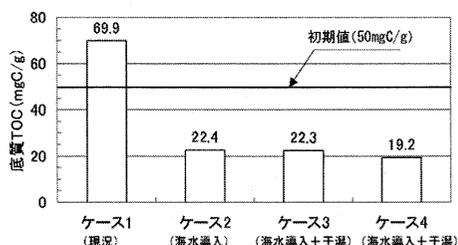


図-8 各ケースにおける底質 TOC の比較

あることが示唆され、減少量は過大評価であるが、前述した現地実験結果とも同様の傾向を示した。

次に、ケース2～ケース4を比較することにより干潟の効果を検討した。堤防後背地の底質 TOC は、ケース2に対し、ケース3、ケース4の順で減少した。この低減効果の大きさは、表-2 に示した粒子状有機物（以下 POM）の除去能力に依存したものである。これは、干潟の POM 除去能力は底生生物量に依存することから（三重県2008）、底生生物の増大にともなって干潟の POM 除去能力が大きくなれば、さらに底質 TOC 濃度の低下が期待できることを示す。しかし、現状の生物量では、ケース3に示す POM 除去能力しか発揮できないために、ケース2と大差はない。そのため、ケース4の POM 除去能力が発揮できる生物量に後背地の底質を改善する必要がある。しかし海水導入のみに任せた干潟の発達だけでは、前述した現地実験で示されたように、生物量が豊富な底質 TOC に低下するまでに1年半以上を要すると考えられた。

以上より、海水導入は、堤防後背地の水質浄化効果が大きい利点はあるものの、効果的な海水導入を実施するためには、堤防後背地の浄化能力を発揮させることを目的とした利用が望ましいことが分かった。そのため、予め堤防後背地の底質を底生生物に適度な有機物量に改善することが有効であり、その底質環境を維持するための干潟浄化能力の検討が不可欠である。

#### 4. まとめ

本論文では、過栄養化した潮受け堤防後背地の生物生

産性の向上を図るため、阻害されている海水流動を回復させる海水導入実験を実施し、海水導入前後の底質と底生生物の変化特性について整理し、数値シミュレーションにより、海水導入による環境再生効果を検討した。本研究の主要な結論を以下に示す。

- ①潮受け堤防により干拓された後背地は、海水の交換も悪く、陸域から流入する有機物を蓄積するため、底質の有機物含有量が高く、過栄養かつ還元的な底質環境となり、生物の生息を妨げていることがわかった。
- ②海水導入実験後1年半で底質の好気化と堆積した高濃度の有機物の分解が進行し、それに伴ってマクロベントスも種類数と湿重量共に増加することが分かった。
- ③数値シミュレーションの結果、海水導入することにより海域への負荷を増加させることなく、堤防後背地の水中 TOC 濃度を低下させることができることが示された。また、底生生物の増大にともなって干潟の浄化効果が大きくなれば、さらに底質 TOC 濃度の低下が期待できることが分かった。

以上より、海水導入により過栄養化した潮受け堤防後背地の生物生産性を向上できる可能性が示唆された。さらに海水導入効果を発揮するためには、予め堤防後背地の底質を適度な有機物量に改善することが有効であることが示された。

**謝辞**：本研究は三重県地域結集型共同研究事業の一部で実施された。また、現地実験にあたり、英虞湾再生コンソーシアム、立神真珠研究会、志摩の国漁協立神支所、芙蓉海洋開発から多大な協力を得た。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 国分秀樹・奥村宏征・松田治（2008）：英虞湾における干潟の歴史の変遷とその底質、底生生物への影響、水環境学会誌、Vol.31, No.6, pp.305-311
- 国分秀樹・奥村宏征・高山百合子・湯浅城之・上野成三（2006）：英虞湾の浚渫ヘドロを用いた人工干潟における潮汐に伴う水質変動の連続観測、海岸工学論文集、第53巻、pp.1231-1235。
- 高山百合子・国分秀樹・奥村宏征・湯浅城之・片倉徳男・上野成三・松田治（2006）：沿岸未利用地への海水導入による環境再生実験に関する水質シミュレーション、海岸工学論文集、第53巻、pp.1246-1250。
- 寺島美南子・宮宮正利・寺島滋（1999）：北海道西方海域から得られた海底堆積物中の有機物組成と初期続成分解の地球化学的研究、地質調査所月報、50, pp. 307-319。
- 風呂田利夫（2000）：干潟底生生物の分布と摂食様式、月刊海洋、Vol.28, No. 2, pp. 166-177。
- 社団法人日本水産資源保護協会（2000）水産用基準。
- 三重県（2008）：三重県地域結集型共同研究事業 英虞湾物質循環調査報告書、第8章、pp. 353-434。
- Delft Hydraulics（2005a）：Delft3D-FLOW User Manual。
- Delft Hydraulics（2005b）：Delft3D-WAQ User Manual。