英虞湾の干潟・アマモ場連続帯における直上水の流入流出フラックスの観測

Quantification of Nutrient Flux in Tidal Flat and *Zostera Marina* Bed under Ebb and Flow in AGO Bay

国分秀樹¹・土橋靖史²・高山百合子³

Hideki KOKUBU, Yasushi TSUCHIHASHI and Yuriko TAKAYAMA

Nutrient fluxes in 3 types of shallow areas (an artificial tidal flat, an artificial *Zostera marina* bed and a successive area of the tidal flat and the *Zostera marina* bed) were estimated by investigating water quality under ebb and flow in AGO Bay. In this study, functions of material circulation above 3 types of shallow areas were considered. It is clear that oxygen was consumed by macrofauna in the artificial tidal flat, and oxygen was produced by photosynthesis in the *Zostera marina* bed. The both areas work as sink for the particulate organic matter and chl. *a*, and source for dissolved nutrient. Nutrient fluxes in continuous both areas were larger than those in the several artificial tidal flat and *Zostera marina* bed, because abundance of macrobenthos was strongly linked with the material circulation.

1. はじめに

これまで干潟、アマモ場単体における物質循環機能について、現地観測（矢持ら2003）・室内実験（桑江ら2000）モデル解析（相馬ら2007）など様々な手法・切り口から検討されている。しかしながら、干潟とアマモ場が連続した生態系における諸現象には未解明な点が多い。本来自然の浅海域では、潮間帯である干潟の沖側には連続してアマモなどの海草が繁茂していたはずであり、それらが連続した生態系における物質循環機能を把握することは、今後内湾域再生事業を進める上で重要であると考えられる。そこで本研究では干潟とアマモ場が連続した浅海域における2潮汐間の流入出フラックスを観測することにより、両者が連続して存在することが、浅海域の物質循環に与える影響について検討した。

2. 現地実験方法

(1) 対象人工干潟およびアマモ場の概要

対象とする人工干潟は、干潟生態系に最適な底質の有機物量と粒度、地盤高条件になるように英虞湾内の浚渫土を用いて造成した干潟である。干潟造成は2004年3月に三重県英虞湾立神浦において行った。面積は4200m²、地盤高がDL+1.2m~-0.8mのエリアで勾配は1/25、底質は表層から1mの深さまでCODが5.6mg/g-dry、粘土・シルト含有量が39.2%に設定しており、河川等の流入がない前浜泥質干潟である。なお、干潟造成方法の詳細は片倉ら（2004）を参照されたい。本人工干潟は実験開始時に造成後約2年半経過しており、生息するマクロベントスの個体数、種類数とともに造成前の干潟の3倍以上に

増加し、底生生物相も安定した干潟である（国分ら2008）。また、2005年11月に、造成干潟の沖合DL-1.5~-2.5mにアマモ場を造成した。造成方法は、50cm×50cmの鉄製の2枚の金網にアマモ種子を播種したジュートマットを挟み、50セットずつ連結することで、船より海底へ設置した。現在では約200株/m²のアマモ群落として繁茂している。詳細は前川ら（2007）を参照されたい。人工干潟およびアマモ場造成場所の概要を図-1に示した。

(2) 観測概要

図-1に示す人工干潟および、連続したアマモ場について、海水の出入り口を1カ所になるようにビニル製のシートで囲い、そこから流入出する水質の経時的な変動を、シート開口部において2潮汐間、1時間ごとに観測した（2008年7月2~3日）。さらに上記の干潟、アマモ場それぞれ単体について、個別にシートで囲うことにより、同様の観測を行った（2008年6月19~20日）。観測はいずれも大潮の晴天時に行った。調査地点を図-1に示した。

観測時は手こぎボートにてシート開口部へ接近し、多項目水質分析計（アレック社製：AAQ1183）を用いて、溶存酸素（以下DO）、塩分、濁度の鉛直分布を0.5m毎に観測した。また同時にメモリ式電磁式流速計を（アレック社製：AEM1-D）用いて、10分毎に開口部の通過流速

図-1 人工干潟とアマモ場における流入出水調査地点
(左：干潟、アマモ場単体、右：干潟、アマモ場連続帯)

1 正会員 工博 三重県水産研究所
2 非会員 学博 三重県水産研究所
3 正会員 工博 大成建設(株)技術センター

を測定した。さらに内径3cmのホースを用いて、堆積物直上から海水表面までの水柱を採取し、十分混合した後、分析試料とした。水温、水深 (STS社製: MC1100WT)、光量 (ライカ社: LI-1400) については、メモリ式の観測機器を用いて10分間隔で測定した。採水試料は、現場で速やかに濾過し (GF/F)、冷蔵保存した後、クロロフィル *a*、全窒素・リン (TN・TP)、全溶存態窒素・リン (DTN・DTP) (島津製: TOC-VCPH)、無機溶存態窒素・リン (DIN・DIP)、(BRAN LUEBBE社製: TRAACS2000) について分析した。また、懸濁態窒素 (PN) 及び懸濁態リン (PP) については、それぞれTNからDTN、TPからDTPを差し引くことにより算出した。有機溶存態窒素 (DON) 及び有機溶存態リン (DOP) については、それぞれDTNからDIN、DTPからDIPを差し引くことにより算出した。

(3) 堆積物と直上水間の栄養塩フラックス調査

図-1に示した、干潟およびアマモ場について、堆積物と直上水間の無機栄養塩の溶出と堆積物への取り込みを把握するために、水質観測と併せて現場実験を行った。内径88mm、長さ30cmのアクリルコアをDL+0.5m、-2.5mの地点に深さ15cmまで各4本設置し、最大潮位で設置、最低潮位で回収した下げ潮時と、最低潮位で設置、最高潮位で回収した上げ潮時にそれぞれ現場で培養した。培養開始時にはコア周辺の海水を採取し試料とした。培養後は直上水を堆積物の巻き上げのないように採取し、均一に混合した後、速やかに濾過を行い、濾過水を冷蔵保存し、無機溶存態栄養塩 (以下DIN, DIP) を分析した。開始時と培養終了時の直上水濃度の差から、式 (1) より堆積物からの無機溶存態栄養塩の溶出速度を求めた。

$$F = \frac{C_t - C_0}{t} \times \frac{V}{A} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F はDIN, DIPの溶出速度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) を表す。 C_0 および C_t はそれぞれ、実験開始直後と実験終了時の海水中的DIN, DIPの濃度を表す。 V は直上水の体積、 A はコア内の堆積物の表面積、 t は培養時間を表す。また最大満潮時と最低干潮時にコア設置場所付近の干潟底質の柱状採泥を行い、表層より1cmを切り取り、速やかに実験室に持ち帰り、遠心分離器 (2500rpm, 20min) により間隙水を分離し、濾過後間隙水中のDIN, DIPを分析した。

(4) 海水交換量及び流入出フラックスの解析方法

シート開口部における通過海水量 Q_p ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) は、開口部の水位を10分間隔で観測し、式 (2) で算出した開口部の通水断面面積 A_t (m^2) と0.5m毎の実測平均流速と式 (3) で算出した平均通過流速 V_a ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) との積で求めた。

$$A_t = W_t \times H_t \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$V_a = \sum_{h=0.5}^h v_h / N_L \quad \dots\dots\dots (3)$$

式 (2) と式 (3) の W_t はシート開口部の幅 (m)、 H_t は開口部の水深 (m)、 v_h は0.5m毎に観測した水深毎の実測平均流速、 N_L は観測層数である。そして1時間毎の開口部通過海水量 Q_p ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) は以下の式 (4) で得られる。

$$Q_p = \sum_{i=10}^{60} A_t \times \frac{(V_t + V_{t+10})}{2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 A_t は水位観測から算出された開口部における通水断面面積 (m^2)、 V_t は式 (3) から算出した時刻 t における平均通過流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、 V_{t+10} は時刻 t から10分後の平均通過流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) である。1時間毎にシート内に流入出した各物質質量は、毎時観測した各物質濃度 C_t および C_{t+60} の平均濃度を Q_p にかけあわせることで求められる。そして全物質質量 M は2潮汐間の時間積分となる式 (5) から算出した。

$$M = \int Q_p \times \frac{(C_{pt} + C_{p(t+60)})}{2} dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 M は観測期間中の流入流出した全物質質量、 C_{pt} は時刻 t における開口部の各物質濃度、 $C_{p(t+60)}$ は60分後に採水した開口部の各物質濃度である。

3. 結果及び考察

(1) 人工干潟とアマモ場における2潮汐間の水質変化

シートにより干潟とアマモ場単体を個別で囲った実験条件における2潮汐間の水質の変化をそれぞれ図-2, 3に、アマモ場と干潟全体を囲った実験条件における2潮汐間の水質変化を図-4に示した。また全調査時の上げ潮時と下げ潮時における無機溶存態窒素・リン濃度、クロロフィル *a* 濃度、DO、濁度の平均濃度を表-1に示した。表-1より、干潟単体を囲う条件において、DOは上げ潮時の方が下げ潮時よりも高い濃度を示した。この傾向は、国分ら (2008) によって同じ手法で行われた、英虞湾内の干潟における調査結果と一致した。これは沖合の高いDOの水が干潟に流入し、干潟上で低くなったDOの水塊が沖合へ流出していることを示す。つまり人工干潟上では、ベントス等の呼吸とバクテリア等の活動によって干潟底質中の有機物が分解され、酸素消費が行われていることが考えられる。これは国分ら (2009) による、チャンパーを用いた干潟堆積物の酸素消費速度の報告とも一致し、バクテリアを含む底生動物の呼吸が1次生産速度を上回っていることを示している。

また、直上水中のクロロフィル *a* 濃度は、上げ潮時に増加、夜間の下げ潮時に減少する傾向を示した。また表-1より、上げ潮時のほうが下げ潮時よりも高い濃度を示した。これらの結果から、上げ潮時に濃度の高い植物プランクトンを含む海水が干潟へ流入し、干潟上のベントス等により摂食されて減少していることが推測できた。ま

図-2 人工干潟における、2潮汐間の水質および溶出フラックスの変化 (2008年6月19日～20日)

図-4 干潟アマモ場連続帯における、2潮汐間の水質および溶出フラックスの変化 (2008年7月3日～4日)

図-3 アマモ場における、2潮汐間の水質および溶出フラックスの変化 (2008年6月19日～20日)

たDIN, DIP濃度の変動は、上げ潮時に減少、下げ潮時に増加する傾向を示した。表-1をみると、常に下げ潮時のDIN, DIP濃度の方が、上げ潮時よりも高い値を示していた。これは上げ潮時に沖から低濃度の水が流入することと、下げ潮時に干潟堆積物から溶出したDIN, DIPによって高濃度になった水塊が流出することが原因であると考えられる。さらにこの傾向は前述したDOの変化パターンとは逆位相になることから、ベントスやバクテリアの活動による流入懸濁物の分解と、干潟堆積物中の有機物の分解による無機栄養塩の溶出が原因として考えられる。また上記の原因の他にDIN, DIPの変化については、干潟上の底生微細藻類や大型海藻等の光合成による吸収が考えられる。矢持ら (2003) によるアオサの繁茂する大阪南港野鳥園における観測結果では、日中に底生微細藻類やアオサ類の光合成に伴うDINの消費によって、海水中的DIN濃度が低下したと報告されている。一方、野村ら (2002) による盤州干潟の観測結果では、同様に下げ潮のDIN, DIPの低下が報告されている。本研究で対象とした人工干潟には、大型海藻類の繁茂は見られなかったことから、日中の底生微細藻類の光合成よりも、マクロベントスやバクテリアによる堆積物からのDIN, DIPの溶出の方が上回っていた可能性が考えられた。以上より、人工干潟では酸素消費の場として機能し、そこに生息するマクロベントスやバクテリア等の生物によって、

有機物等の好氣的分解が行われていることが推測できた。

一方、アマモ場単体と干潟アマモ場連続帯を囲う条件で共通する傾向として、DOは潮汐よりも光量子量に影響を受け、昼間に増加、夜間に減少していた。さらに、干潟とアマモ場それぞれ単体を囲った観測で、DL+0.5mとDL-1.5mにおける直上水中DOの鉛直分布の2潮汐間の経時変化を図-5に、干潟アマモ場連続帯を囲った観測で、DL+0.5mにおける直上水中DOの鉛直分布の2潮汐間の経時変化を図-6に示した。図-5より干潟、アマモ場単体の観測では、光量子の影響を強く受け、昼間にDOが上昇、夜間に減少がみられた。特にアマモ場では、昼間に底層付近が過飽和になるほど光合成による酸素生成が行われていた。特に水深毎のDOの変化を示した図-5, 6のほうで、水柱あたりのDOの平均濃度を示した図-2, 3, 4よりも明確にその傾向が示された。昼間ではアマモの光合成により海水中の酸素濃度が上昇し、夜間では干潟とアマモ場底質が酸素消費を行うため、海水中の酸素濃度が減少することが考えられる。一方干潟アマモ場連続帯を囲った条件では、それぞれ単体で囲った時と同様に、DOは日中に増加、夜間に減少はしていたが、干潟域のDOの減少は、光量子量が低いにもかかわらず、単体で囲った際よりも抑えられていた。これは、干潟前面のアマモ場からの酸素供給が原因として考えられる。以上より、干潟とアマモ場が連続して存在することは、干潟前面でアマモの光合成により生成された高い酸素濃度の海水が、干潟域に流入することにより、夜間の酸素濃度低下を改善するだけでなく、干潟域の酸素環境を変えていることが推測された。また、無機態の窒素、リンについては、前述の干潟の結果とは異なり、明確な変化を示さなかった。しかし、図-3, 4に示す堆積物からの溶出実験の結果を見ると、昼間に海水中の溶存態窒素、リンは干潟に吸収され、夜間には逆に放出されるという傾向を示した。これは、アマモの光合成による栄養塩吸収が考えられる。前述の干潟単体での観測結果に示した、ペントスによる懸濁物の分解に伴うDIN, DIPの放出と、アマモ場によるDIN, DIPの吸収が同時に起こっているため、DIN, DIPは明確な変化を示さなかったと考えられる。

以上より干潟では、ペントス等による呼吸が行われることにより、直上水に対して酸素消費の場として機能し、アマモ場では、特に昼間には、酸素生産の場として機能することが示唆された。このように海域で有機物を分解するために、酸素が必要となるが、浅場の物質循環における酸素の供給という観点からも、干潟単体ではなく、連続的にアマモ場を造成することで、光合成で酸素を供給する相乗的な機能を有することが示唆された。

(2) アマモ場における2潮汐間の物質フラックスの算定 各調査において、シートにより囲まれたエリアの水塊

が、85%以上シートの開口部を経由して流入出していることから、式(5)より物質収支を算出し、表-2に示した。また、本調査はシートで囲った静的条件で行ったため、懸濁物の沈降や潮流等の影響を考慮しておらず、特に干潟を繰り返す干潟域では、それらの影響の可能性が考えられるが、英虞湾は通常波浪が0.2m以下の静穏な海域であることから、今回はその影響を除外した。

負の値は干潟への吸収、正の値は干潟からの放出を表す。干潟単体の調査結果では、懸濁有機態の窒素・リンおよびクロロフィルaが常に干潟に吸収される傾向を示した。これは基礎生産により植物プランクトン等の懸濁有機物濃度の高くなった沖合の水が、上げ潮とともに干潟に流入し、懸濁物食者等のペントスによって取り込まれることにより水中から除去されたと推測できる。それに対し、DIN, DIPが常に干潟から沖合へ放出されており、ペントスからの排泄やバクテリアによる干潟堆積物中の有機物の分解により、DIN, DIPが干潟から沖合へ放

表-1 上げ潮および下げ潮時の干潟直上水質の平均値

	人工干潟		アマモ場		人工干潟アマモ場連続帯	
	上げ潮	下げ潮	上げ潮	下げ潮	上げ潮	下げ潮
Chl.a ($\mu\text{g/L}$)	2.1	1.9	2.3	1.8	3.6	2.1
濁度 (mg/L)	3.3	2.3	2.6	1.7	2.8	2.4
DO (mg/L)	6.2	5.7	6.9	5.7	6.6	5.7
DIN (mgN/L)	14.6	23.1	15.5	21.2	17	21.3
DIP (mgP/L)	1.3	1.7	1.7	3.0	1.1	1.4

図-5 干潟 (DL+0.5m) とアマモ場 (DL-1.5m) 単体における直上水中DOの鉛直分布の経時変化 (2007年6月)

図-6 干潟およびアマモ場全体 (DL+0.5m) の観測における直上水中DOの鉛直分布の経時変化 (2007年7月)

出されていることが考えられる。これは図-2に示した堆積物からの溶出速度が増加している結果とも一致する。さらに上記の傾向は、野村ら（2002）が千葉県盤洲干潟、矢持ら（2003）が大阪南港野鳥園で行った報告例とも一致した。一方、アマモ場単体と干潟アマモ場連続帯を囲う条件では、共通する傾向として前述した干潟のフラックスと同様に、懸濁態の窒素リン、クロロフィル a については常に、吸収されているのに対し、溶存態の窒素リンについては、常に沖合に放出されていた。

各調査地点内に生息する生物の湿重量を図-7に示した。アマモ場と干潟を比較するとアマモ場のほうが干潟単体と比較するとアマモ場の蠕集効果により、生物が大きいことが分かる。また、表-3に示す、水質に最も関係すると考えられる懸濁物食者の湿重量をみると、同様にアマモ場のほうが多く生息していた。流入出フラックスの絶対量をみると、懸濁物食者の湿重量の大きい干潟アマモ場連続帯のほうが干潟やアマモ場単体と比較して大きくなった。これは干潟における流入出フラックスはそこに生息するマクロベントスの湿重量と相関があるという、国分ら（2006）の報告とも同様の傾向を示した。

またアマモ場単体のDIN, DIPのフラックスは、前述の干潟単体のフラックスと比較して低くなっていた。さらに、干潟アマモ場連続帯のフラックスも同様に、吸収したPN, PPに対して放出されるDIN, DIPの割合が低くなっていた。これはアマモ場の光合成による吸収が考えられる。干潟やアマモ場のマクロベントス等により分解され、放出された溶存態の無機栄養塩を、アマモ場によって吸収されている可能性が示唆された。

表-2 英虞湾内各干潟およびアマモ場における2潮汐間の流入流出フラックス（負の値は干潟への吸収）

観測場所	干潟単体	アマモ場単体	干潟+アマモ場	単位
懸濁物食者重量	445.5	475.6	695.5	(g/m ²)
TN	-46.1	-11.5	-33.7	(mg-N/m ² ·day)
DIN	42.5	2.5	59.1	(mg-N/m ² ·day)
PN	-54.2	-41.0	-92.8	(mg-N/m ² ·day)
TP	-5.8	-37.0	-22.2	(mg-P/m ² ·day)
DIP	8.9	0.6	5.3	(mg-P/m ² ·day)
PP	-3.7	-8.6	-18.9	(mg-P/m ² ·day)
Chl.a	-1438.6	-571.2	-756.0	(mg/m ² ·day)

図-7 調査干潟及びアマモ場における生物量

4. まとめ

本論文では、干潟とアマモ場が連続した浅海域における2潮汐間の流入出フラックスを観測することにより、両者が、浅海域の物質循環に与える影響について検討した。本研究の主要な結論を以下に示す。

- ①干潟では、直上水に対しては酸素消費の場、アマモ場では特に昼間に酸素生産の場として機能することが示唆された。また干潟とアマモ場が連続して存在することにより、アマモの光合成により生成された、干潟前面の高酸素濃度の海水が、干潟域に流入することにより、干潟域の酸素環境を変えていることが示唆された。
- ②干潟、アマモ場における2潮汐間の窒素、リンの収支を解析した結果、懸濁態窒素リンは干潟やアマモ場に対してシンク、無機態窒素リンはソースとして機能することが明らかになった。また、流入出フラックスの絶対量は、生息生物の湿重量に影響を受け、湿重量の大きい干潟アマモ場連続帯のほうが干潟やアマモ場単体と比較して大きくなることが分かった。

以上より、アマモ場は海水中の懸濁物を除去する機能と、光合成による無機態窒素リンを吸収する機能を有することがわかった。そのため干潟単体では、ベントスにより分解した懸濁物を無機態として海域に放出するが、同時にアマモ場を造成することにより、沖合への溶存態窒素リンの放出を抑制できる可能性が示唆された。

参 考 文 献

- 桑江朝比呂、細川恭史、木部英治、中村由行（2000）：メソコスム実験による人工干潟の水質浄化機能の評価、海岸工学論文集、第47巻、pp.1096-1100。
- 片倉徳男・高山百合子・上野成三・小林峯男・国分秀樹（2004）：浚渫ヘドロを用いた干潟再生工法におけるヘドロ混合の設計・施工計画、海洋開発論文集、第30巻、pp.885-890。
- 国分秀樹、奥村宏征、高山百合子、湯浅城之、（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。
- 国分秀樹、矢持 進（2009）：英虞湾内自然干潟および浚渫土を用いた人工干潟における酸素消費速度と総基礎生産速度の定量的観測、水環境学会誌、第32巻、6号、pp.109-116。
- 相馬明郎（2007）：「きれいな海」から「豊かな海」へ～干潟・浅海域と湾央域および底生系と浮遊系のカップリングからみえてきたもの、海洋理工学会誌、Vol.13, No.1, pp.49-60。
- 野村宗弘・小沼 晋・桑江朝比呂・三好英一・中村由行（2002）：盤洲干潟における潮汐に伴う栄養塩収支に関する現地観測、港湾空港技術研究所試料、No.1020, pp.1-19。
- 前川行幸（2007）：アマモ場造成技術、第16回沿岸連環ジョイントシンポジウム 英虞湾再生プロジェクト、pp.34-36。
- 矢持 進、宮本宏隆、大西 徹（2003）：浚渫土砂を活用した人工干潟における窒素収支－大阪湾阪南2区人工干潟現地実験場について－、土木学会論文集、No.748/Ⅶ-8, pp.13-21。
- 矢持 進、柳川竜一（2003）：大阪南港野鳥園における物質収支と水質浄化能の評価、海岸工学論文集、第50巻、pp.1241-1245。