

RF-074 再懸濁現象の海洋環境変動への影響解明に向けた海底境界での物質動態詳細測定法の開発

(2) 巻き上げ時における化学物質フラックスの定量化

独立行政法人港湾空港技術研究所

海洋・水工部

桑江朝比呂

平成19～20年度 合計予算額 4, 201千円

(うち、平成20年度予算額 1, 966千円)

※上記の合計予算額には、間接経費970千円を含む

[要旨] 本研究では、泥質堆積物直上において流速と酸素濃度を高時間解像度で同時測定し、渦相関法を適用することにより、海底境界面における酸素フラックスを連続観測した。本研究により、酸素フラックスが海底境界面における流動に応じて数十分～数時間という時間スケールで大きく変動する動態が現場で実測された。また、渦相関法によって測定されたフラックスは、既報値を大きく上回るものであった。海底面における水平流速や懸濁物質濃度と酸素フラックスとの間に明瞭な関係性はみられなかった。一方、海底面に作用する乱れエネルギーと巻き上げフラックスとの間および巻き上げフラックスと酸素フラックスの間には有意な関係性がみられた。これらの結果から推定されるメカニズムは以下のとおりである。(1) 酸素フラックスの増大には巻き上げフラックスの増大が大きく寄与している。(2) 巻き上げを伴わない場合には、単に底面における乱れが強くなることに起因する酸素フラックスを増大させるような諸過程の効果は覆い隠されてしまう。(3) しかしながら、巻き上げフラックスの増大に伴う酸素フラックスの増大は、再懸濁物質自身による酸素消費によっては説明できないことから、巻き上げに伴う底面の侵食により、間隙水が直上水中へ放出するによって、間隙水中に含まれていた還元物質が酸素を消費するというプロセスが重要である。本成果は、海底境界面における酸素フラックスが浅海域の水質変動や生態系に与える影響の解明や予測に大きく寄与しうる。

[キーワード] 海底境界面、酸素フラックス、渦相関法、再懸濁物質、現地観測

1. はじめに

海底境界面における酸素消費は、貧酸素水塊の形成と深く関わるなど、浅海域における水質や生物相を決定づけるプロセスとして重要である。底面における酸素フラックスは、閉鎖系システム(堆積物コアの室内培養やチャンバーの現場設置など)を作り、直上水中の酸素濃度変化を追跡する方法でこれまで測定されていた^{1),2)}。しかし、酸素フラックスは、(1) 堆積物直上の流れが引き起こす乱れによる濃度境界層厚の変化³⁾、(2) 波が引き起こす圧力勾配による間隙水の直上水への放出⁴⁾、そして(3) 直上水の酸素濃度⁵⁾などに大きく影響されるにもかかわらず、閉鎖系の中ではその水理・水質環境を再現することができない。従来法で測定された酸素フラックスの精度に関する課題は、数値シミュレーションとの比較結果からも指摘されている⁶⁾。

さらに、堆積物が再懸濁・沈降を繰り返す場においては、底面の侵食による間隙水中の還元物質の直上水への供給や⁷⁾、再懸濁した有機物の直上水への露出により⁸⁾、酸素消費速度が短い時間スケールで大きく変動していることが予想される。しかしながら、再懸濁を念頭においた酸素フラックスの検討例は、きわめて稀である^{2), 8), 9)}。

2. 研究目的

上記の課題を解決するため、本研究では、これまで熱・二酸化炭素・懸濁物質などのフラックス測定に用いられていた渦相関法^{10), 11), 12)}を、酸素フラックスの測定に適用する^{13), 14), 15), 16)}。渦相関法は、現場環境を一切改変することがなく、真の現場測定が可能である。したがって、潮流や波などの外力による堆積物の再懸濁が常時みられる海域において酸素フラックスを測定する場合には、渦相関法の適用が理想であると考えられる。本研究では、佐賀県鹿島沖の海底境界面において渦相関法を用いた現地観測を実施し、時々刻々の酸素フラックス変動の実態とそのメカニズムを解明することを目的とする。

3. 研究方法

(1) 観測地点

2008年2月20日から21日の大潮期に佐賀県鹿島市地先の鹿島タワー近傍（33°04.8'N, 130°12.1'E）で現地観測を実施した（図2-1）。現場堆積物（泥深0-0.5 cm, 0.5-2.5 cm, 4-6 cm, 9-11 cm, 19-21 cmの5層）はシルト（66-67%）と粘土（33-34%）によって構成されており（中央粒径10-11 μm）、泥深方向に一様な粒度組成を呈している。含水率は70-79%、強熱減量は8-10%である。

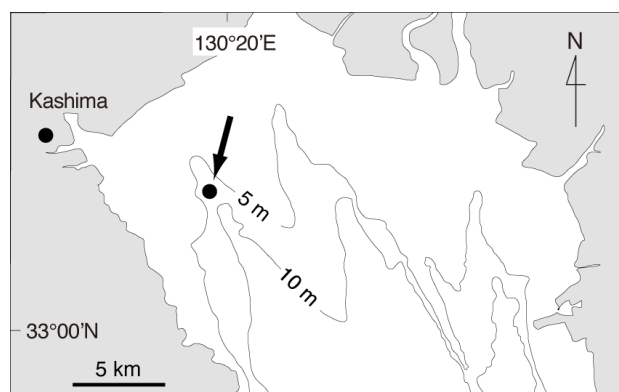


図2-1 観測地点（鹿島タワー横）

(2) 酸素フラックス

ドップラー流速計（ADV）（Vector, Nortek）を用いて流速を測定した。流速値は、温度や塩分によって変化する音波の速さに応じて自動的に補正される。測定精度の保証値は測定値の $\pm 0.5\% \pm 0.1 \text{ cm s}^{-1}$ である。酸素微小電極（OX-10, Unisense）を電流計（PA-2000, Unisense）に接続し、電極から発する微弱電流を増幅することにより酸素濃度を測定した。電極先端径は10 μmである。この酸素濃度測定システムの応答速度を事前に室内実験で調べたところ、0.2-0.3 sであった。

ADVと酸素微小電極を頑強な架台に取り付けた（図2-2）。センサー上流部に位置する測定底面（フットプリント）¹⁷⁾と架台の足が重複しないよう、潮汐による主流軸を考慮して設置した。流速の測定部が底面+20 cmになるように調整し、微小電極の先端をその測定部のごく近傍（<5 mm）に合わせた。流速と酸素濃度を16 Hzで同期サンプリングし、データロガー（NR-2000, キーエンス）に記録した。電源由来の同調ノイズの発生を防止するため、ADV・電流計・データロガーの各々の内部電源から電力を供給した。

ADVで得られた3次元の流速値を新たな座標系（主流方向を水平第1軸、そしてその水平面に直交する軸を鉛直軸）に変換した¹⁸⁾。底面+20 cmに別途設置された溶存酸素計（Compact-DOW, アレック電子）によって同時測定された酸素濃度値（バースト間隔：2 min, 測定時間：12 s, サンプリング間隔：1 s）を用いて酸素微小電極から得られた値を検定することにより、測定中における微小電極の感度変化の影響を除去した。

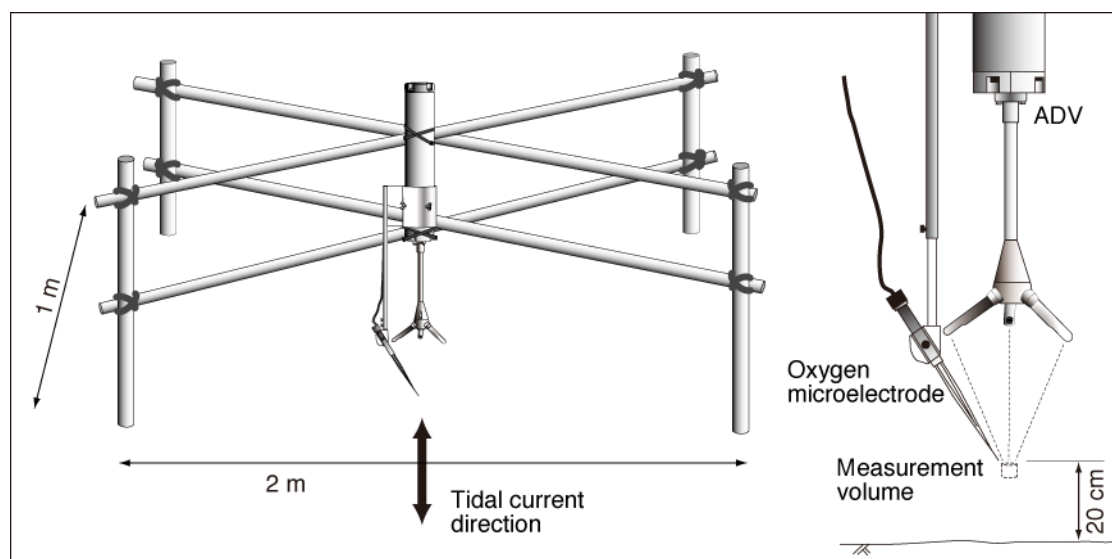


図2-2 海底境界面における酸素フラックスの現場実測システム（渦相関法）

フラックスの算出手順について、図2-3にまとめた。堆積物表面のごく近傍に存在する濃度境界層の上部においては、分子拡散による物質輸送が無視できるため、溶存物質の鉛直フラックスは次式で表すことができる。

$$J = wC \quad (1)$$

ここに、 J は瞬間フラックス、 w は鉛直流速、そして C は溶存物質濃度を示す。 w と C は2成分に分解することができる（ $w = \bar{w} + w'$, $C = \bar{C} + C'$ ）。ここに、 \bar{w} は平均鉛直流速、 w' は変動鉛直流速、 \bar{C} は平均溶存物質濃度、そして C' は変動溶存物質濃度である。これらを(1)式に代入して時間平均し、平均鉛直流速をゼロと仮定すると¹⁹⁾、(1)式は次のように時間平均フラックスとして表すことができる。

$$\bar{J} = \overline{w'C} \quad (2)$$

ここでは、連続した時系列データから異常値を除外し、9-33分間（平均18分）の時系列データに分割した。続いて、 w と C にみられるトレンド（時系列中データ中にみられる一定の増減傾向）を線形近似によって除去後¹⁵⁾、 w' と C' を抽出しフラックスを算出した。なお、本研究で扱う w' と C' には、乱れ成分と波動成分の両方が含まれている。さらに、ここで算出される酸素フラックスには、堆積物による酸素消費と底面0-20 cm（測定部水深）の水柱による酸素消費の両方が含まれることになる。

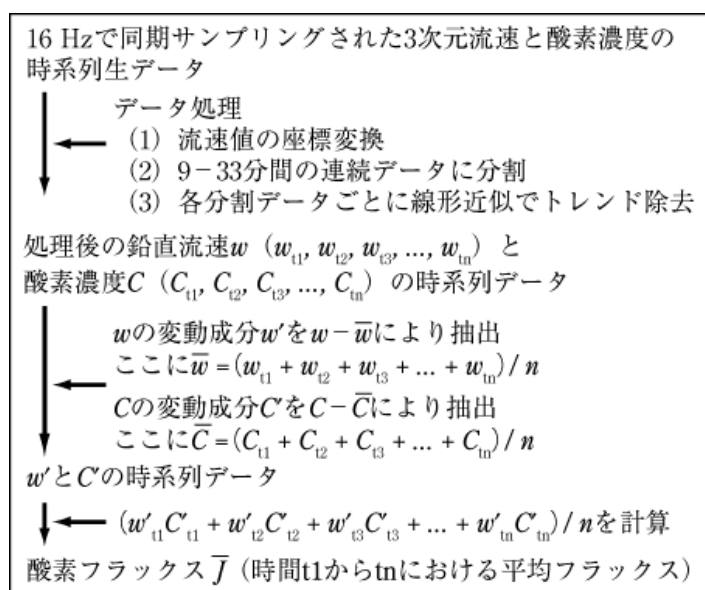


図 2-3 渦相関法によるフラックス算出手順

(3) 巻き上げフラックス

巻き上げフラックスを測定するため、酸素フラックス測定に用いたADVとは別のADVを頑強な架台に取り付け、測定上流部に位置するフットプリントと架台の足が重複しないよう、潮汐による主流軸を考慮して設置した。流速の測定部が酸素フラックスと同様に底面+20 cmになるように調整した。ADVによる3次元の流速測定および超音波の反射強度の信号を16 Hzでサンプリングし、ADV本体内部のデータロガーに記録した。現場で採取した堆積物を濃度調整した試水を用いた検定により²⁰⁾、懸濁物質濃度として出力される光学式濁度計の測定結果との比較を通じて、超音波反射強度と懸濁物質濃度に変換した²¹⁾。

巻き上げフラックスの算出は、酸素フラックスの算出と同様(2)式に従った。ただし、(2)式中 C' は、ここでは懸濁物質濃度の変動成分である。 w' と C' はいずれもバースト計測(10分間)ごとの平均値からの偏差として求め、トレンド除去処理はしなかった。

(4) その他の観測項目

超音波式波高計(Wave Hunter 04S, アイオーテック)を用いて水深と波高を測定した(バースト間隔: 1 h, 測定時間: 20 min, サンプリング間隔: 0.5 s)。底面+20 cmに設置した塩分水温計(Compact-CT, アレック電子)を用いて、塩分と水温を1分間隔で計測した。また、同水深に設置した後方散乱光学式濁度計(ATU, アレック電子)の出力値(バースト間隔: 1 h, 測定時間: 10

min, サンプリング間隔：1 s) と現場で採取した堆積物を濃度調整した試水とを用いて検定することにより、懸濁物質濃度を求めた¹⁹⁾。2月21日の7時30分ごろ（上げ最強時）、10時00分ごろ（満潮時）、13時00分ごろ（下げ最強時）、そして16時00分ごろ（干潮時）の計4回、底面+20 cm付近の海水を採取し、懸濁物質中の有機物含有量(mg TOC/ mg SSC)を測定した。乱れエネルギー(TKE)についてはテーマ1における算出方法と同様とした。

(5) 統計解析

一般化線形モデル (GLM) を用いて酸素フラックスに影響をおよぼす要因について検討した。水平流速・懸濁物質濃度・潮汐（上げ潮・下げ潮）の3つの要因ならびにそれらの交互作用項を説明変数として選択した。直上水中の酸素濃度も説明変数の候補としてあげられる⁵⁾。しかし、観測期間中の酸素飽和度は109–132%と高く、濃度の絶対値の変動幅も小さかったことから、本研究では説明変数から除外した。説明変数をすべて含んだモデルから1つも説明変数を含まないモデルまで総当たりでCorrected Akaike's Information Criterion (AICc) を求めた。そして、算出された各々のモデルのAICcに応じて重み付けされた値 (Akaike weight) を用いて、各説明変数の選択率を算出した²²⁾。

4. 結果・考察

(1) 測定パラメータの時系列変動

観測時における最大波高は25–36 cmと静穏であった。底面+20 cmの鉛直流速（座標変換前, 2分平均データ）は、 $-12.4+6.6 \text{ cm s}^{-1}$ であった。底面+20 cmの水温は7.7–8.6°C、塩分は29.8–31.0の範囲で変動した。潮汐による主流向は湾軸に沿っており、下げ潮時に南東向き、上げ潮時に北西向きであった。水温・塩分・酸素濃度は水深方向にほぼ一様であり、水塊はよく混合していた。

底面+20 cmの水平流速・酸素濃度・懸濁物質濃度の時系列をみると（図2–4）、懸濁物質濃度と水平流速との間には明瞭な関係性がみられていない。一方、懸濁物質濃度は干潮時に酸素濃度とともに上昇し満潮時に低下している。これは、有明海湾奥の干潟・浅場域に存在する高濁度かつ高酸素濃度の水塊が潮流により岸沖方向に移動していることによると考えられる^{2), 20), 23)}。したがって、観測時における懸濁物質濃度の変動は、観測地点近傍における堆積物の再懸濁過程よりも高濁度水塊の移流過程に強く支配されていたと予想される。

(2) 渦相関法による酸素フラックス

渦相関法によって得られた酸素フラックスは、 $0.0-12.5 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ と大きく変動し、単純平均は $3.4 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ となっている（図2–4）。この値は、阿部ら（2003）²⁾が本研究の観測地点周辺から採取した堆積物コアを用いて現場温度（28°C）で室内培養して得られた値（最大で $2.0 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、底面0–20 cmの水柱による消費を含む）よりもかなり大きい。さらに、そのコア法によるフラックスは消費活性の高い高水温時に測定されたことも考慮すると、外力や間隙水の移流過程などが再現できない従来法では、実際の現場でのフラックスを過小評価してしまう可能性が高いことを示唆している。実際、透水性のある砂質堆積物においてコア法によって測定された値（ $1.0-1.5 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ）は、渦相関法を用いて測定された値（ $6.6-14.5 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ）より著しく小さかったことが報告されている¹⁵⁾。

今回の研究で明らかになった渦相関法における今後の課題として、酸素微小電極に関する事項があげられる。1つは、電極が破損しやすいことである。先端径が10 μm のガラス製の電極を現場で設置・回収するには、細心の注意を払う必要がある。もう1つは、電極出力値の外部からの衝撃に対する不安定性である。図2-4に示した棒グラフの空白部分は、異常値発生によるデータ欠損である。目視による状況観察から、この異常値は現場周辺で養殖されているノリなどの浮遊物の電極への接触（破損はしない）によるものと推定される。

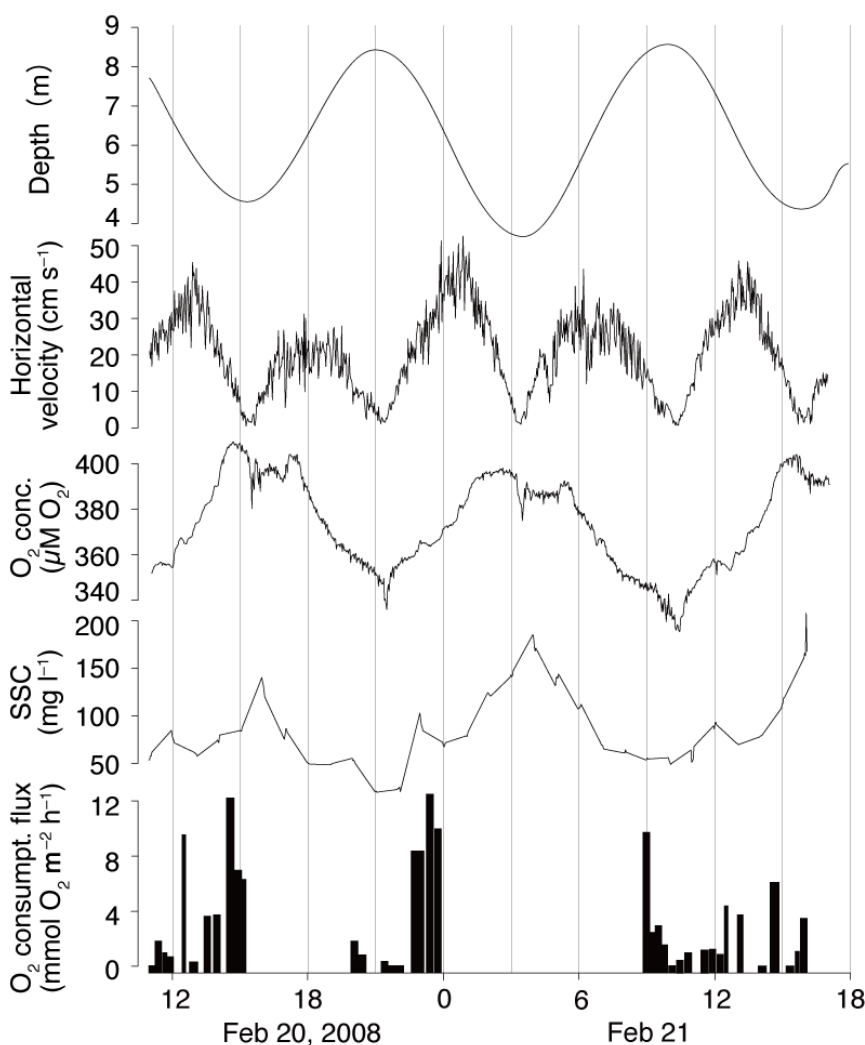


図2-4 水深、底面+20 cmの水平流速・酸素濃度・懸濁物質濃度（SSC）、そして酸素フラックスの時系列。

(3) 酸素フラックスの変動メカニズム

一般化線形モデルによる統計解析から得られた酸素フラックスの説明変数の選択率は、水平流速（46.8%）、潮汐（38.9%）、懸濁物質濃度（26.2%）、水平流速と潮汐との交互作用項（25.2%）、懸濁物質濃度と潮汐との交互作用項（0%）の順であり、どの変数もそれほど高くなかった。酸素フラックスは上げ潮時において水平流速と統計的に有意な相関（ $P < 0.05$ ）を示し、水平流速が上昇すると酸素フラックスも増大している（図2-5）。しかし、下げ潮時には、水平流速と酸素フ

ラックスとの間に有意な相関はみられていない。また、酸素フラックスと懸濁物質濃度との間には、潮汐にかかわらず有意な相関がみられていない。

水平流速と酸素フラックスとの間の正の相関は、流速の上昇によって底面付近の乱れが増大し、拡散境界層厚が減少することにより、堆積物表面もしくは間隙水中の硫黄・鉄・マンガンなどの溶存還元物質の直上水への放出量が増加し、急激な酸素消費が起きたことが大きく寄与していると考えられる。微生物による有機物の分解にともなう酸素消費では、数時間の時間スケールでフラックスの大きな変動は発生し得ない。一方、還元物質による化学的酸素消費は、本研究におけるフラックス変動を説明するのに十分な速度を有していることが知られている^{7),9)}。

懸濁物質による酸素消費が卓越する場合には、懸濁物質濃度と酸素フラックスとに相関がみられるはずである。しかし、本研究ではそのような関係はみられていない上に（図2-5）、統計モデルによる懸濁物質濃度の変数選択率も低いことから、懸濁物質に含まれる有機物の分解による酸素消費の寄与は小さかったと考えられる。実際、懸濁物質中の有機物含量が2.8-3.2%と速水ら（2006）²⁴⁾が本研究の観測地点周辺で夏季に観測した値（9%）よりずっと低く、かつ低水温であった条件において、直上水中の懸濁物質濃度と酸素濃度にみられた変動パターン的一致（図2-4）は、懸濁物質による酸素消費が活発でなかったことを示唆していると考えられる。

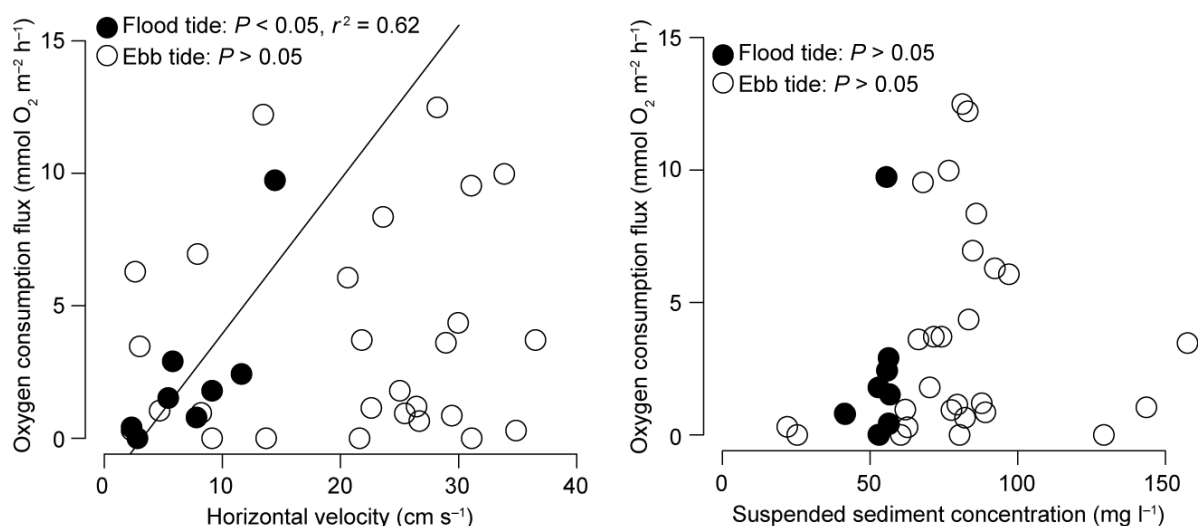


図2-5 酸素フラックスと水平流速との関係（左図）ならびに酸素フラックスと懸濁物質濃度との関係（右図）。○は下げ潮時，●は上げ潮時

また、既存の研究事例では、本研究と同程度の濃度の懸濁物質による酸素フラックス（直上水深20 cmの水柱1 m²当たり）は0.5-0.7 mmol O₂ m⁻² h⁻¹と小さい値にとどまっている²⁾。もし懸濁物質中の有機物含有量が増えているならば、懸濁物質濃度と酸素フラックスとは直接リンクしないことも考えられる。しかし、観測期間中の有機物含量の変動幅は0.4%と小さいことから、そのような仮説も棄却される。

乱れエネルギーと巻き上げフラックスとの間には有意な関係性がみられ、乱れエネルギーが増大するにつれて巻き上げフラックスも増大している（図2-6左）。さらに、巻き上げフラック

スと酸素フラックスとの間にも有意な関係性がみられ、巻き上げフラックスが増大するにつれて酸素フラックスも増大している（図2-6右）。

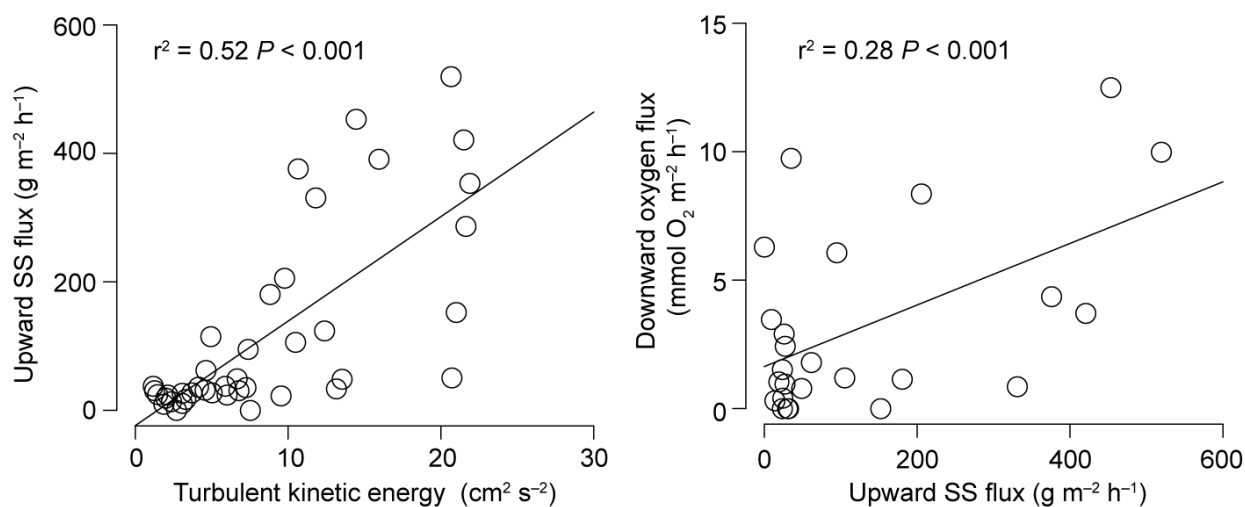


図2-6 乱れエネルギーと巻き上げフラックスとの関係（左図）ならびに巻き上げフラックスと酸素フラックスとの関係（右図）。

これらの結果から推定されるメカニズムは以下のとおりである。（1）酸素フラックスの増大には巻き上げフラックスの増大が大きく寄与している。（2）巻き上げを伴わない場合には、単に底面における乱れが強くなることに起因する酸素フラックスを増大させるような諸過程の効果は覆い隠されてしまう。（3）しかしながら、巻き上げフラックスの増大に伴う酸素フラックスの増大は、再懸濁物質自身による酸素消費よっては説明できないことから、巻き上げに伴う底面の侵食により、間隙水が直上水中へ放出するによって、間隙水中に含まれていた還元物質が酸素を消費するというプロセスが重要である（図2-7）。

酸素フラックスに影響を与える要因としては他に堆積物直上の流れが引き起こす乱れによる濃度境界層厚の変化³⁾や波が引き起こす圧力勾配による間隙水の移流・放出⁴⁾などが知られている。もしこの2つの要因が重要であるならば、乱れエネルギーと酸素フラックスとの間に相関がみられるはずである。しかしながら、本研究では相関がみられていないことから、乱れエネルギーの増大が引き起こす濃度境界層厚の変化や圧力勾配による間隙水の移流・放出過程の寄与は小さいと考えられる。

今後の検討課題としては、巻き上げフラックスを説明する乱れエネルギー以外の要因（例えば、再懸濁現象の履歴効果）や、酸素フラックスを説明する生物過程（例えば、数時間の時間スケールで起きる底生生物活性の変動の影響²⁵⁾）があげられる。これらの要因の検討には、先に述べた海底流動実験水槽を用いた実験による検証が有効であると思われる。

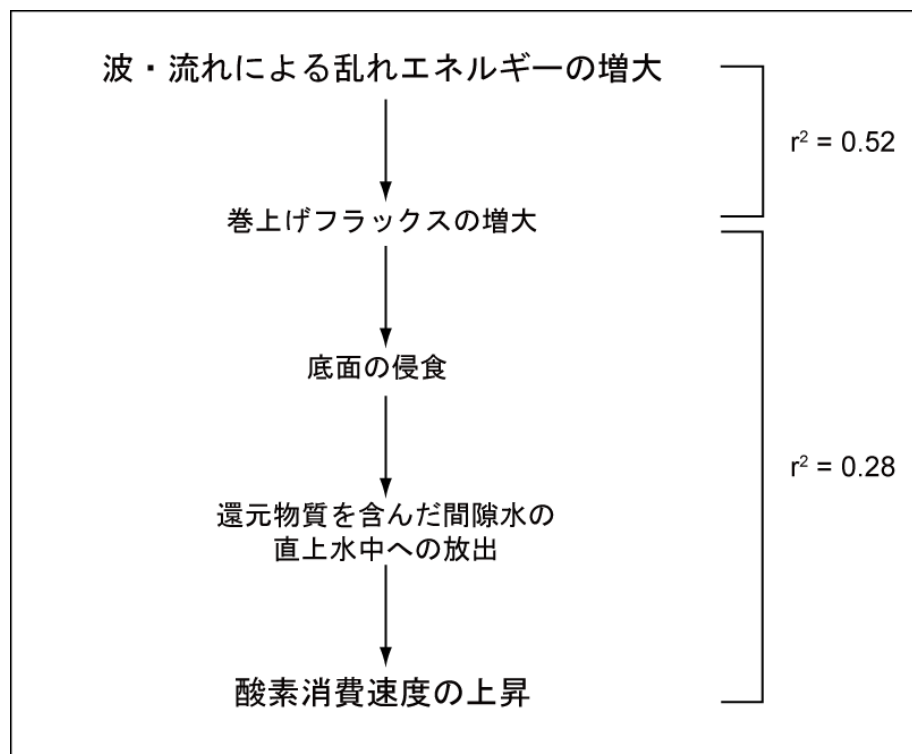


図 2-7 本研究で推定された酸素フラックス変動の主要なメカニズム。 r^2 は決定係数（統計学的にその現象を説明する確率）。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、泥質堆積物直上において流速と酸素濃度を高時間解像度で同時測定し、渦相関法を適用することにより、海底境界面における酸素フラックスを連続観測した。本研究により、酸素フラックスが海底境界面における流動に応じて数十分～数時間という時間スケールで大きく変動する動態が現場で実測された。また、渦相関法によって測定されたフラックスは、既報値を大きく上回るものであった。酸素フラックスの増大には巻き上げフラックスの増大が大きく寄与していた。その主要メカニズムは、巻き上げに伴う底面の侵食により間隙水が直上水中へ放出し、間隙水中に含まれていた還元物質が酸素を消費するという一連のプロセスであると推定された。

(2) 地球環境政策への貢献

本成果は、海底境界面における酸素フラックスが浅海域の水質変動や生態系に与える影響の解明や予測に大きく寄与する。具体的には、渦相関法を用いることにより、アジアをはじめとする世界の内湾で頻発する貧酸素水塊の消長メカニズムや、貧酸素化にともなう硫化水素などの有害化学物質の溶出のメカニズムを解明するうえで基礎となる現地観測データを精確かつ高時間解像度で取得することが可能となる。

6. 引用文献

- 1) 長尾正之・橋本英資・朱小華・吉田みゆき・高杉由夫 (2000) : 広島湾における海底酸素消費量の連続測定. 土木学会論文集, No.663/II-53, pp. 109-117.
- 2) 阿部淳・松永信博・児玉真史・徳永貴久・安田秀一 (2003) : 有明海西部海域における高濁度層の形成と酸素消費過程. 海岸工学論文集, 50巻, pp. 966-970.
- 3) Jørgensen, B. B. and D. J. Des Marais (1990): The diffusive boundary layer of sediments: oxygen microgradients over a microbial mat. *Limnol. Oceanogr.*, Vol.35, pp. 1343-1355.
- 4) Webb, J. E. and J. L. Theodor (1968): Irrigation of submerged sands through wave action. *Nature*, Vol.220, pp. 682-683.
- 5) Rasmussen, H. and B. B. Jørgensen (1992): Microelectrode studies of seasonal oxygen uptake in a coastal sediment: role of molecular diffusion. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.81, pp. 289-303.
- 6) 柳哲雄 (2004) : 生態系モデルは有明海を再現できるか. 沿岸海洋研究, 42巻, pp. 61-65.
- 7) Gerhardt, S. and B. Schink (2005): Redox changes of iron caused by erosion, resuspension and sedimentation in littoral sediment of a freshwater lake. *Biogeochem.*, Vol.74, pp. 341-356.
- 8) Ståhlberg, C., D. Bastviken, B. H. Svensson and L. Rahm (2006): Mineralisation of organic matter in coastal sediments at different frequency and duration of resuspension. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol.70, pp. 317-325.
- 9) 徳永貴久・松永信博 (2007) : 有明海湾奥部における底泥の巻き上げと酸素消費に関する研究. 2007年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 104.
- 10) Dyer, K. R., M. C. Christie and A. J. Manning (2004): The effects of suspended sediment on turbulence within an estuarine turbidity maximum. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol.59, pp. 237-248.
- 11) 田中健路・滝川清 (2006) : 有明海干潟上における二酸化炭素フラックス観測. 海岸工学論文集, 53巻, pp. 1136-1140.
- 12) Crusius, J., P. Berg, D. J. Koopmans and L. Erban (2008): Eddy correlation measurements of submarine groundwater discharge. *Mar. Chem.*, Vol.109, pp. 77-85.
- 13) Berg, P., H. Røy, F. Janssen, V. Meyer, B. B. Jørgensen, M. Huettel and D. de Beer (2003): Oxygen uptake by aquatic sediments measured with a novel non-invasive eddy-correlation technique. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.261, pp. 75-83.
- 14) Kuwae, T., K. Kamio, T. Inoue, E. Miyoshi and Y. Uchiyama (2006): Oxygen exchange flux between sediment and water in an intertidal sandflat, measured by *in situ* by the eddy-correlation method. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.307, pp. 59-68.
- 15) 桑江朝比呂・神尾光一郎・井上徹教・三好英一・内山雄介 (2006) : 堆積物による酸素消費-渦相関法を適用した新たな測定手法の開発-. 海岸工学論文集, 53巻, pp. 1411-1415.
- 16) McGinnis, D. F., P. Berg, A. Brand, C. Lorrain, T. J. Edmonds and A. Wüest (2008): Measurements of eddy correlation oxygen fluxes in shallow freshwaters: towards routine applications and analysis. *Geophys. Res. Lett.* Vol.35, L04403. Doi:10.1029/2007GL032747.
- 17) Berg, P., H. Røy and P. L. Wiberg (2007): Eddy correlation flux measurements: the sediment surface area that contributes to the flux. *Limnol. Oceanogr.*, Vol.52, pp. 1672-1684.

- 18) 塚本修・文字信貴・伊藤芳樹（2001）：乱流変動法による運動量・顕熱・潜熱（水蒸気）のフラックス測定. 気象研究ノート, 199巻, pp. 19-55.
- 19) Anthoni, P. M., A. Freibauer, O. Kolle and E. D. Schulze (2004): Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany. *Agric. For. Meteorol.*, Vol.121, pp. 55–67.
- 20) 中川康之・今林章二・末次広次（2002）：底泥輸送現象に関する現地データの解析. 海岸工学論文集, 49巻, pp. 566–570.
- 21) 中川康之・桑江朝比呂（2008）：底泥の巻き上げフラックスと乱れ強度との関係～有明海湾奥部での観測例～. 2008年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 121.
- 22) Burnham, K. P. and D. R. Anderson (2002): *Model Selection and Multimodel Inference: a Practical Information-Theoretic Approach*. Springer, 488 p.
- 23) 山本浩一・槻木（加）玲美・速水祐一・吉野健児・濱田孝治・山田文彦（2007）：有明海大授搦干潟における底泥の再懸濁および沈降に関する現地観測. 海岸開発論文集, 23巻, pp. 1159–1164.
- 24) 速水祐一・山本浩一・大串浩一郎・濱田孝治・平川隆一・宮坂仁・大森浩二（2006）：夏季の有明海奥部における懸濁物輸送とその水質への影響. 海岸工学論文集, 53巻, pp. 956–960.
- 25) Vogel, S. (1981): *Life in Moving Fluids: the Physical Biology of Flow*. P. W. S. Kent Publishing, 352 p.

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 桑江朝比呂・中川康之・三好英一：海岸工学論文集第55巻（2008）：pp.1001-1005
“海底境界面における酸素消費速度－渦相関法を用いた現地連続観測”
- 2) Y.Nakagawa and T. Kuwae：International conference on Physics of Estuarine and Coastal Seas (PECS08)(2008)：pp.107-111 “Field observation of fine sediment transport processes and oxygen fluxes in estuarine bottom boundary layer”

（2）口頭発表（学会）

- 1) 桑江朝比呂・中川康之・三好英一（2008）：2008年度日本海洋学会秋季大会要旨集(2008)：p.163：“渦相関法を用いた有明海湾奥部海底境界面における酸素消費フラックスの観測”
- 2) Y.Nakagawa and T. Kuwae：Ocean Science Meeting, Florida, USA, March 2-7, 2008, “Field studies on fine sediment transport dynamics and oxygen fluxes near the bed”

（3）出願特許

なし

（4）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし