海底境界面における酸素消費速度―渦相関法による現地連続観測―

Oxygen Consumption Flux Across the Sediment-Water Interface: In Situ Measurements by the Eddy-Correlation Technique

桑江朝比吕¹•中川康之²•三好英一³

Tomohiro KUWAE, Yasuyuki NAKAGAWA and Eiichi MIYOSHI

Conventional approaches determining solute exchange fluxes across the sediment — water interface have been reported to have limitations in terms of the reproducibility of hydrodynamic forcing and the representativeness of spatially-heterogeneous biological processes, when applied to shallow estuarine systems where wave- and tide-induced sediment resuspension regularly occurs. Here we overcome these disadvantages by applying the eddy-correlation technique to *in situ* oxygen consumption flux measurements. Our study is the first to demonstrate a marked flux fluctuation $(0.0-12.5 \text{ mmol } O_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1})$ within several hours and that the oxygen consumption fluxes increase with increasing horizontal velocity on flood tides.

1. まえがき

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(相馬ら, 2008). 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 (例えば長尾ら, 2000; 阿部ら, 2003). しかし, 酸素消費 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 (Jørgensen · Des Marais, 1990), (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(例えば Webb · Theodor, 1968), そして(3) 直上水 の酸素濃度(Rasmussen · Jørgensen, 1992) 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(柳, 2004).

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 (Gerhardt・Schink, 2005)、再懸濁した有機物の直上水へ の露出により(Ståhlberg ら, 2006)、酸素消費フラックス 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消費フラッ クスの検討例は、きわめて稀である(阿部ら, 2003; Ståhlberg ら, 2006;徳永ら, 2007).

1正会員	博(農)	(独法)港湾空港技術研究所 官	主任研究
2 正 会 員	工修	(独法)港湾空港技術研究所 官	主任研究
3		(独法)港湾空港技術研究所 官	主任研究

本研究では、上記の課題を解決するため、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(例えば Dyer ら、2004;田中・滝川,2006; Crusius ら、2008)を、酸素フラックスの測定に適用する (Berg ら、2003;Kuwae ら、2006;桑江ら、2006; McGinnis ら、2008). 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.そこで本研究では、 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、時々刻々の酸素消費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.

2. 観測手法とデータ解析方法

(1) 観測地点と測定方法

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-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



図-1 観測地点(鹿島タワー横)



図-2 海底境界面における酸素消費フラックスの現場実測システム(渦相関法)

(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.

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 $\pm 0.5\% \pm 0.1$ 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 μ m 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). センサー上流部に位置する測定底面(フットプリント) (Berg ら, 2007)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(<5mm)に合わせた.流速と酸素濃度を16Hz 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(塚本ら,2001).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:2min, 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.

超音波式波高計(Wave Hunter 04 Σ , アイオーテクニック)を用いて水深と波高を測定した(バースト間隔:1h,

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:1h,測定時間:10 min, サンプリング間隔:1s)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(中川ら,2002).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.

(2) フラックスの算出

フラックスの算出手順について,図-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.

$$J = wC \tag{1}$$

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 ($w = \overline{w} + w'$, $C = \overline{C} + C'$). ここに、 \overline{w} は平均鉛 直流速、w' は変動鉛直流速、 \overline{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、 \overline{w} をゼロと仮定すると(Anthoni ら、 2004)、(1) 式は次のように表すことができる.

$$\overline{J} = w'C' \tag{2}$$

ここに、 \overline{J} は時間平均フラックスである.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、 $w \ge C$ 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(桑江ら,2006), 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 算出される酸素消費フラックスには,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.

(3) 統計解析

一般化線形モデル(GLM)を用いて酸素消費フラック 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 (Rasmussen・Jørgensen, 1992).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 Imformation 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(Burnham・ Anderson, 2002).

3. 観測結果と考察

(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 cm s⁻¹(平均-2.6 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.現場堆積物には光が到達しないため、光合 成による酸素生成は起きない.っまり、理論的に起こりえ る酸素フラックスは消費(鉛直下向き)のみである.



図-4 水深,底面+20 cmの水平流速・酸素濃度・懸濁物質 濃度(SSC),そして酸素消費フラックスの時系列.酸 素消費フラックスが断続データなのは、浮遊物(ノリ など)の電極への接触によると思われる異常値検出の ため.

底面+20cmの水平流速・酸素濃度・懸濁物質濃度の時 系列をみると(図-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(中川ら,2002;阿部ら,2003;山 本ら,2007).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消費フラックス

渦相関法によって得られた酸素消費フラックスは、 $0.0-12.5 \text{ mmol } O_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ と大きく変動し、単純平均は3.4 mmol $O_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ となっている(**図**-4). この値は、阿部ら (2003) 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 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 mmol O₂ m⁻² h⁻¹)より著しく小さかっ たことが報告されている(桑江ら, 2006).

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10µm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-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。

(3) 酸素消費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消費 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.酸素消費フラックスは上げ潮時において水平流速と統 計的に有意な相関を示し、水平流速が上昇すると酸素消費 フラックスも上昇している(図-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.

水平流速と酸素消費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,濃度境界層 (分子拡散による輸送が卓越する層)の厚さが減少するこ 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(Gerhardt・Schink, 2005; 徳永ら, 2007).

懸濁物質による酸素消費が卓越する場合には、懸濁物質 濃度と酸素消費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うえ に(図-5)、統計モデル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)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の一致(図-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.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消費フラックス(直上 水深20 cmの水柱1 m²当たり)は0.5-0.7 mmol O; m⁻² h⁻¹



図-5 酸素消費フラックスと水平流速との関係(上図)ならびに酸素消費フラックスと懸濁物質濃度との関係(下図)
○は下げ潮時,●は上げ潮時を示す.上げ潮時における酸素消費フラックスと水平流速の間に有意な相関(P < 0.05)がみられる.

と小さい値にとどまっている(阿部ら,2003).もし懸濁 物質中の有機物含有量が変化しているならば,懸濁物質濃 度と酸素消費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.

以上により,海底境界面(堆積物と直上水の両方を含 む)における酸素消費は,堆積物表面もしくは間隙水中の 溶存還元物質の直上水中への放出による酸素消費が卓越し, 上げ潮時におけるそのフラックスの変動は水平流速の変動 によってある程度説明可能であると結論づけられる.しか し,下げ潮時のフラックスの変動メカニズムについては, 本研究結果からは不明である.波による変動流速が底面へ 与える乱れの影響(中川ら,2007)や,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(Vogel, 1981)も, 今後検討すべき課題であろう.

4. あとがき

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消費フラックスを連続観測し た.本研究により、酸素消費フラックスが流速の変動に追 随し、わずか数時間のうちに大きく変動しうることが世界 で初めて現場で実測された.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. 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.

謝辞:現地観測にご協力いただいた(独)港湾空港技術 研究所の細川真也氏と(株)いであの諸氏,そして有益な 議論をいただいた同研究所の井上徹教氏に感謝いたしま す.本研究の一部は,環境省地球環境研究総合推進費 (RF-074,研究代表者:中川康之)の支援により実施さ れた.

参考文献

- 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.
- 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一渦相関法を適用した新た な測定手法の開発一.海岸工学論文集,53巻,pp.1411-1415.
- 相馬明郎・関口泰之・桑江朝比呂・中村由行(2008):東京湾 の底生系における酸素消費メカニズム一内湾複合生態系モデ ルの解析―.海岸工学論文集,55巻,pp.xxxx-xxxx.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 中川康之・吉田秀樹・田中克己・大波多昌志(2007):底泥の 巻き上げと底面境界層内の乱れの現地観測.海岸工学論文 集,54巻,pp.446-450.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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 eddycorrelation technique. Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.261, pp. 75-83.
- 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.
- Burnham, K. P. and D. R. Anderson (2002): Model Selection and Multimodel Inference: a Practical Information-Theoretic Approach. Springer, 488 p.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Kuwae, T., K. Kamio, T. Inoue, E. Miyoshi and Y. Uchiyama (2006): Oxygen exchange flux between sediment and water in an intertidal sandflat, measured *in situ* by the eddycorrelation method. Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.307, pp. 59– 68.
- McGinnis, D. F., P. Berg, A. Brand, C. Lorrai, 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.
- 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.
- Stahlberg, 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.
- Vogel, S. (1981): Life in Moving Fluids: the Physical Biology of Flow. P. W. S. Kent Publishing, 352 p.
- Webb, J. E. and J. L. Theodor (1968): Irrigation of submerged sands through wave action. Nature, Vol.220, pp. 682-683.