

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

桑江朝比呂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, in particular, 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 ($0.0\text{--}12.5 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 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拡散境界層厚の変化(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).

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(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), 泥深方向に一樣な粒度組成を呈している。含水率は70–79%, 強熱源量は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

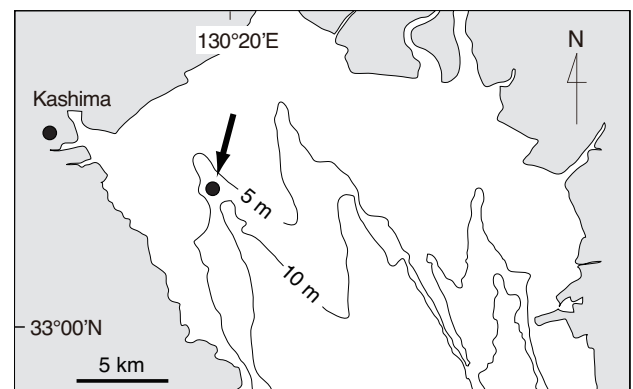


図-1 観測地点(鹿島タワー横)

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

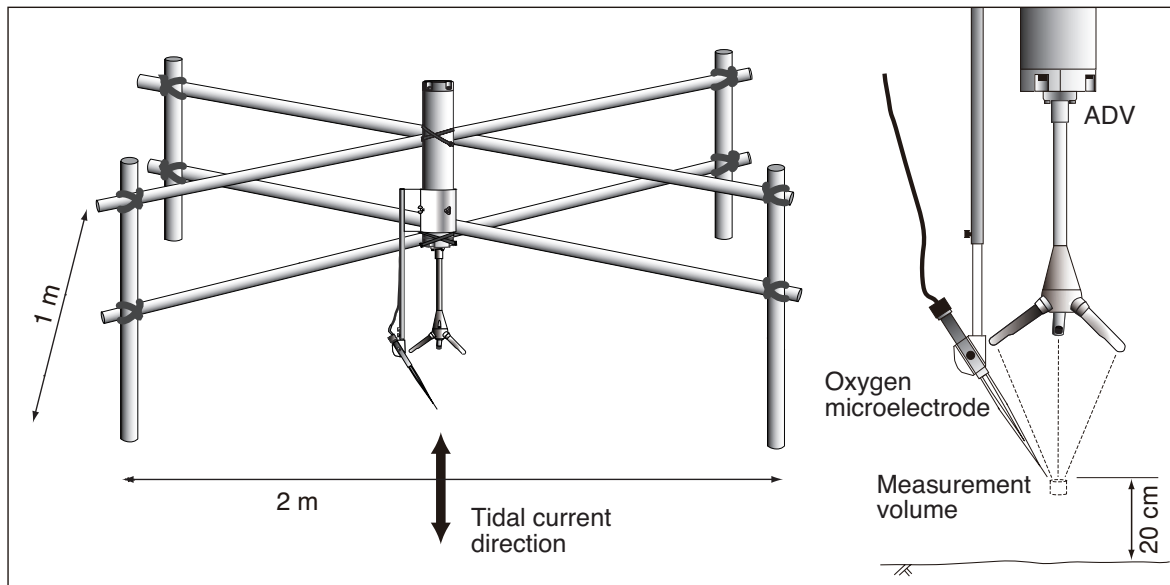


図-2 海底境界面における酸素消費フラックスの現場実測システム（渦相関法）

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 $10 \mu\text{m}$ 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、 $0.2\text{--}0.3 \text{ s}$ 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 ($<5 \text{ mm}$) 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 (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: 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。

超音波式波高計 (Wave Hunter 04Σ, アイオーテクニク) 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 (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 ($\text{mg TOC}/\text{mg SSC}$) 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。

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

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、 \bar{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。

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

ここに、 \bar{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 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 (桑江ら, 2006), w' と C' を

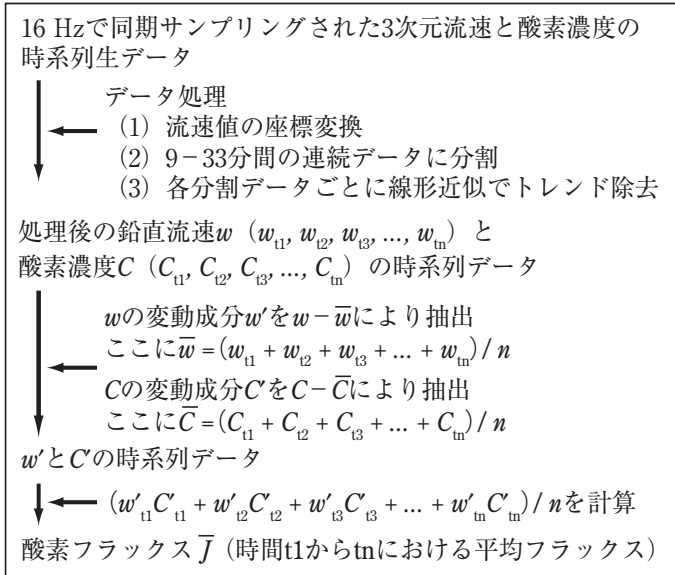


図-3 渦相関法によるフラックス算出手順

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 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 (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、 $-12.4 \sim +6.6 \text{ cm s}^{-1}$ であった。底面+20 cmの水温は $7.7 \sim 8.6^\circ\text{C}$ 、塩分は $29.8 \sim 31.0$ 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。

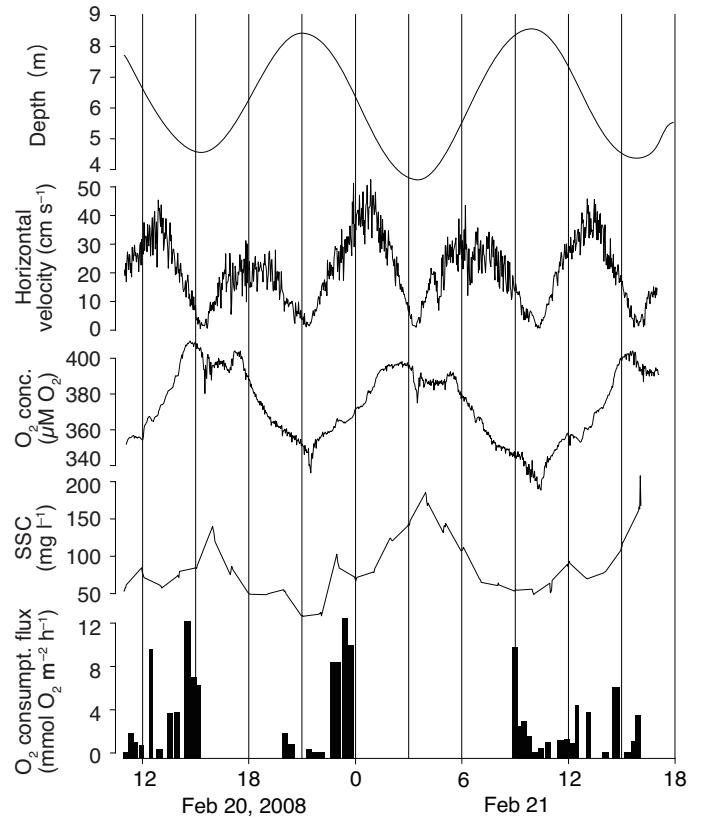


図-4 水深、底面+20 cmの水平流速・酸素濃度・懸濁物質濃度 (SSC)、そして酸素消費フラックスの時系列。酸素消費フラックスが断続データなのは、浮遊物 (ノリなど) の電極への接触によると思われる異常値検出のため。

底面+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-4)、懸濁物質濃度と水平流速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、 $0.0 \sim 12.5 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 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-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 $2.0 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 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 ($1.0\text{--}1.5 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) は、渦相関法を用いて測定された値 ($6.6\text{--}14.5 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) より著しく小さかったことが報告されている(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 $10 \mu\text{m}$ 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、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(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の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(図-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

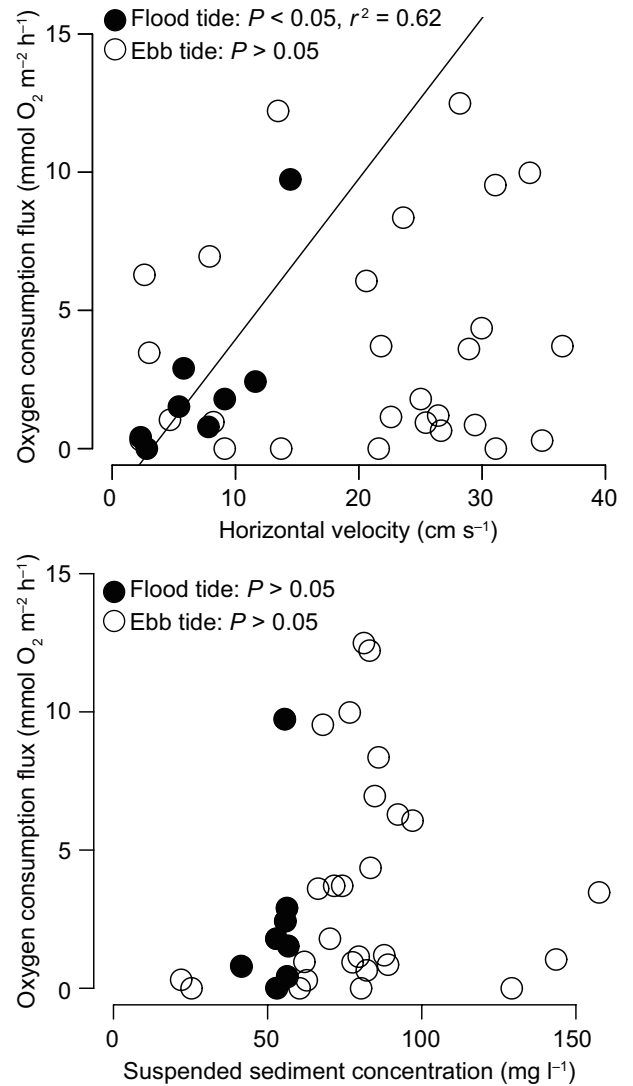


図-5 酸素消費フラックスと水平流速との関係(上図)ならびに酸素消費フラックスと懸濁物質濃度との関係(下図)。○は下げ潮時、●は上げ潮時を示す。上げ潮時における酸素消費フラックスと水平流速の間に有意な相関($P < 0.05$)がみられる。

(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20cmの水柱1 m^2 当たり)は $0.5\text{--}0.7 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 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-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。
相馬明郎・関口泰之・桑江朝比呂・中村由行(2008)：東京湾底生系の酸素消費メカニズム-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)：有明海大授揚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 eddy-correlation 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 by *in situ* by the eddy-correlation 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。
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。
Vogel, S.(1981)：Life in Moving Fluids: the Physical Biology of Flow. P.W.S.Kent Publishing, 352 p。