

堆積物による酸素消費と生成 -渦相関法を適用した新たな測定手法の開発-

桑江朝比呂¹・神尾光一郎²・井上徹教³
三好英一⁴・内山雄介⁵

堆積物による酸素消費と生成は、これまで底生閉鎖系システム内の酸素濃度変化を追跡する方法で測定されていた。しかし、従来法では外力条件や間隙水の移流を再現した測定ができず、その精度には疑問があった。本研究では、ADV・酸素微小電極・渦相関法を用いることにより、従来法とはまったく異なる測定手法を新たに開発し、高精度な測定に成功した。透水性のある砂質堆積物の酸素消費速度を従来法で測定した結果、最大でも渦相関法の 23%であったことから、従来法では速度を著しく過小評価する可能性が高いことがわかった。渦相関法は従来法の欠点が克服され適用範囲も広いことから、今後の標準法になり得ることが確認された。

1. まえがき

堆積物による酸素消費と生成は、浅海域における水質や生態系を決定づけるプロセスとして重要である。これまで、酸素消費・生成速度（堆積物-海水間の酸素フラックス）は、堆積物コアの室内培養やチャンバーの現場設置など、閉鎖系システムを作り直上水中の酸素濃度変化を追跡する方法で測定されていた（長尾ら, 2000; 徳永ら, 2005）。しかし、従来法には欠点がある。堆積物-海水間の酸素フラックスは、堆積物直上流速や、波の作用による圧力勾配や乱れから発生する間隙水の移流に大きく影響されるにもかかわらず（Webb・Theodor, 1968; Huettel・Gust, 1992）、閉鎖系の中ではその水理環境を再現することができない。従来法で実測された酸素フラックスの精度に関する問題は、酸素循環数値モデルとの比較結果からも指摘されている（柳, 2004）。

これまで沿岸域においては、熱や懸濁物質フラックスの測定に渦相関法が用いられていた（例えば Dyer ら, 2004; 成松ら, 2005）。そして近年、高時間解像度で濃度計測ができる酸素電極が利用可能となり、Berg ら（2003）によって酸素フラックス測定に渦相関法がはじめて導入された。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。さらに堆積物の透水性・地形・植生などの、海底面の特性による制限がない。しかし、渦相関法の適用にあたっての実践的な手順やデータの品質管理についてはよくわかっていない。

そこで本研究では、透水性のある堆積物直上において鉛直流速と酸素濃度を高時間解像度で昼夜にわたり測定し、底面境界層における酸素フラックスを渦相関法により求めるまったく新たな手法を開発する。そして、変動

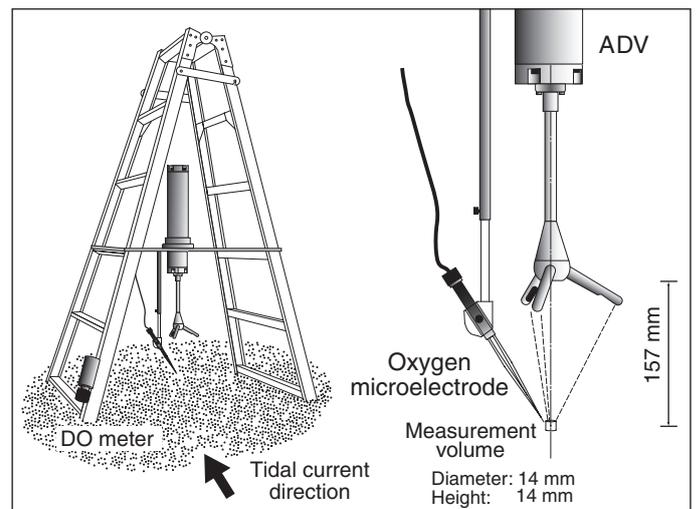


図-1 センサーの設置状況

成分抽出法や、必要とされる測定時間など、正確にフラックスを求めるために重要と考えられるデータ解析手法について検討する。最後に、フラックス計測結果を従来法と比較し、渦相関法の優位性について議論する。

2. 観測手法およびデータ解析方法

(1) 調査地点および測定方法

2004年2月25日の昼間と夜間に盤洲干潟（35°24.2'N, 139°53.4'E）で現場測定を実施した。現場堆積物は細砂によって構成されており（>99.5%）、中央粒径は 188-217 μm 、絶対透水係数（ K ）は $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ である。堆積物上には微細藻類の存在が確認される。

ドップラー流速計（ADV）（Vector, Nortek）を用いて流速を測定した。ADVの3つの振動子から 157 mm 離れた中心部にある、高さ 14 mm、直径 14 mm の円柱状の測定部において流速が測定される（図-1）。測定される流速は、温度や塩分によって変化する音波の速さに応じて補正されている。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。微小電極（OX-10, Unisense）を電流

1 正会員 博(農) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
2 修(水) (株) 東京久栄 環境創出部
3 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
4 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
5 正会員 博(工) Institute of Geophysics & Planetary Physics, UCLA

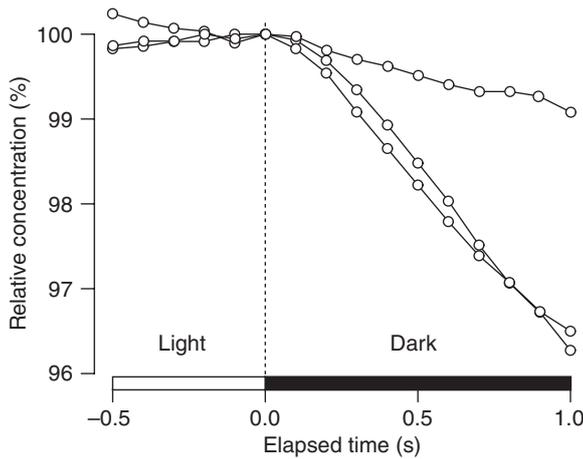


図-2 酸素濃度測定システム（微小電極+電流計）の応答速度実験。堆積物表層に電極を挿入し、明条件（光合成あり）で酸素濃度が定常になるのを待った。その後、急に遮光し（0 s）、一定の速度で酸素濃度が減少するまでに要する時間から、測定システムの応答時間を求めた。

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（図-2）。グラフをみると、どのケースにおいても 0.3 秒以内に一定の速度で濃度が減少していることから、応答速度は <0.3 秒といえる。

ADV と酸素微小電極を頑強な脚立に取り付けた（図-1）。センサー上流部に位置する測定エリア（フットプリント）（Kljun ら, 2002）と脚立の足が重複しないよう、測定時の流向を考慮して干潟上に設置した。したがって、各測定ケースにおける測定エリアは異なっていた。流速計の測定部位が、堆積物表面から 7-17 cm 上になるようにした。微小電極の先端を、流速計の測定部位のごく近傍（<5 mm）に合わせた。流速と酸素濃度を 20Hz で同期サンプリングし、データロガー（NR-2000, Keyence）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。

測定中における微小電極のドリフトや感度変化の影響を除外するため、脚立に設置した溶存酸素計（MDO-I, 三洋測器）（図-1）によって同時計測された酸素濃度データを用いて、微小電極から得られたデータを検証した。最終的にフラックス算出に用いられたデータは、12-40 分間の時系列であった。測定中における水深は 29-62 cm であり、最大波高は 3-9 cm であった。ADV によって測定された平均水平流速と平均鉛直流速は、それぞれ 13.9 -24.5 cm s⁻¹ と -1.2-+1.0 cm s⁻¹ であった。直上水中の水温と酸素濃度は、それぞれ 10.7-14.0°C と 264-311 μM O₂ であった（Kuwae ら, 2006）。

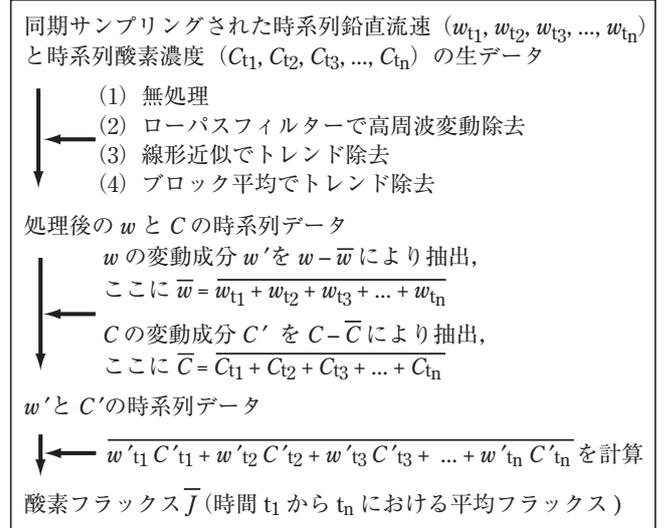


図-3 フラックス算出手順

(2) フラックスの計算

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、乱流による輸送過程が支配的となるため、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 ($w = \bar{w} + w'$, $C = \bar{C} + C'$)。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、時間平均することにより、 w' と C' はゼロになる。スカラーフラックス算出時には、 \bar{w} をゼロと仮定することが可能であることから (Anthoni ら, 2004), (1) 式は次のように表すことができる。

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

ここに、 \bar{J} は時間平均フラックスである。したがって、 \bar{J} を精度よく求めるためには、時系列生データから w' と C' をいかに正確に抽出するかが重要となる。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。

3. 結果および考察

(1) 鉛直流速と酸素濃度の時系列変動

鉛直流速と酸素濃度は、1-3 秒周期の同調したリズムカルな変動を示している（図-4）。この例は昼間における測定結果であり、鉛直流速が上向きときに酸素濃度が上昇している。つまり、堆積物表層で光合成により生成された酸素を豊富に含んだ海水が、鉛直流によって輸

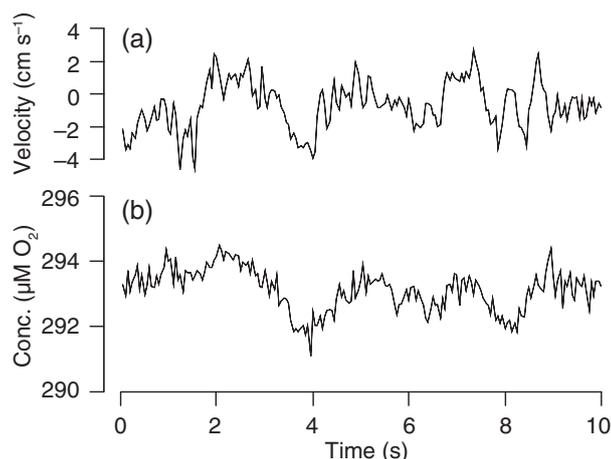


図-4 昼間に 20 Hz で測定された底面上 17 cm における鉛直流速 (a) と酸素濃度 (b) の変動 (Case 1, 無処理生データ). 正の流速値は鉛直上向き.

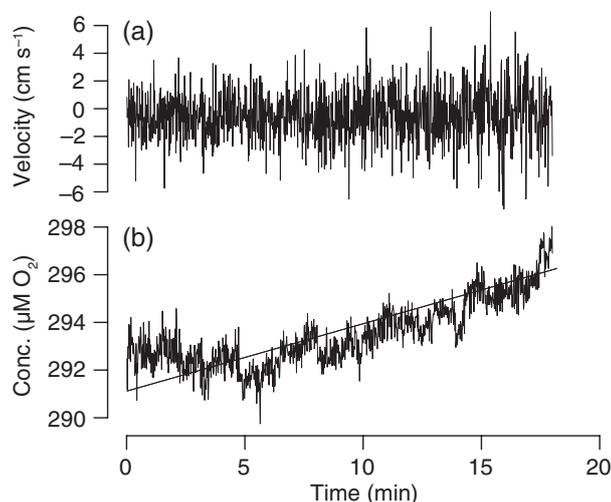


図-5 長い時間スケールでみた鉛直流速 (a) と酸素濃度 (b) の変動 (Case 1, 無処理生データ). 正の流速値は鉛直上

送されている. 反対に, 夜間における測定では, 鉛直流速が上向きのおきに酸素濃度が低下することが確認されている. これは, 堆積物表層で酸素が消費され, 低酸素濃度の海水が鉛直流によって輸送されるためである.

長い時間スケールで変動をみると, 酸素濃度にはトレンドがみられる (図-5). 一方, 鉛直流速には明瞭なトレンドがみられない. 以上の結果はすべてのケースにおいて同様であった.

(2) 高周波およびトレンドの影響

乱れ成分もしくはノイズに由来すると思われる高周波の変動成分 (>5 Hz) が, 図-4 の中にみられる. 高周波の変動成分がフラックスに与える影響を調べるために, 5 Hz のローパスフィルターをかけた鉛直流速酸素濃度のデータを用いたフラックスと, 未処理データを用いたフラックスとを比較してみた. 表-1 の結果をみると, 両

表-1 各データ処理後の酸素フラックス ($\text{mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) の計算結果. 負の値は堆積物による酸素消費を示している. n はブロック分割数を示している. Case 1-4 (明条件) 間および Case 5-6 (暗条件) 間の差は, 主に測定エリアの違いに起因している (Kuwae ら, 2006).

	Light/ Dark	Non- treatment	Filtering	Detrending	Block averaging	
					mean \pm SE	n
Case 1	Light	11.0	10.3	7.0	5.1 ± 0.8	8
Case 2	Light	46.5	46.0	2.9	0.1 ± 1.7	5
Case 3	Light	-3.9	-3.9	0.5	0.4 ± 0.9	6
Case 4	Light	-3.3	-3.3	-3.2	-2.5 ± 0.8	19
Case 5	Dark	-14.7	-14.7	-14.5	-13.8 ± 1.1	8
Case 6	Dark	-6.5	-6.4	-6.6	-6.5 ± 0.4	17

者の差は 0-7% であることから, 高周波の変動成分がほとんどフラックスに寄与していないことがわかる.

さらに, $w'C'$ の one-sided コスペクトルを計算することによって, 各周波数のフラックスへの寄与度を評価することができる (Frieche ら, 1991). そこで, w' と C' を用いて高速フーリエ変換することによりコスペクトルを求めた. 図-6 の結果をみると, 高周波の変動成分がフラックスに寄与していないことがわかる ($0.9 \pm 0.5\%$) (mean \pm SE, $n = 6$). w' と C' の高周波帯に含まれていたと思われるノイズは, ランダムに発生していて相関がないため, フラックスにほとんど寄与しなかったものと考えられる. したがって, 本研究で用いた 20 Hz のデータサンプリングにより, フラックスに寄与する変動成分が十分に捉えられている. また, 本研究で用いた <0.3 s という微小電極の応答時間 (図-2) も, 酸素フラックス測定には

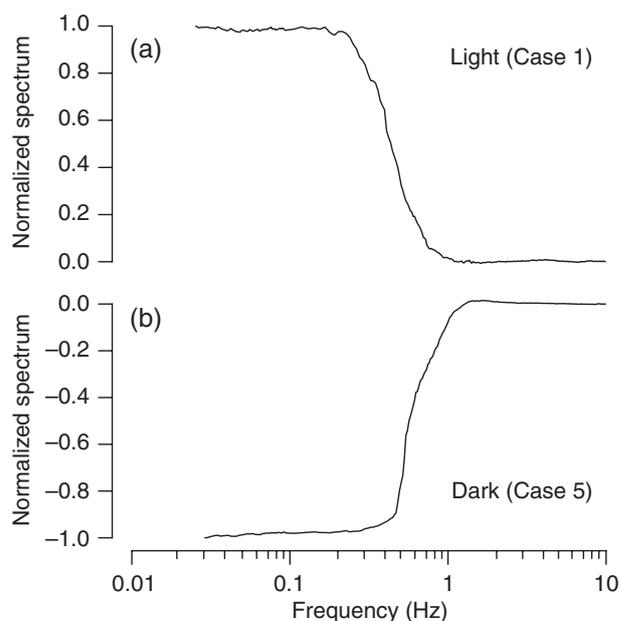


図-6 明条件 (a) および暗条件 (b) における $w'C'$ の累積コスペクトル (トレンド除去後データ). スペクトル値を高周波側から積算している. トータルコスペクトル (トータルフラックス) に大きく寄与する周波数帯に急勾配がみられる. 正の値は堆積物による酸素生成を示している.

十分であったと考えられる。

鉛直流速や濃度にトレンドがみられるケースにおいては (図-5),トレンド成分に実際の変動成分が重なっていると考えられる。したがって,トレンドを除去せずに変動成分を抽出すると,過大になってしまう (Panofsky・Dutton, 1984)。現場環境では通常,流速や濃度にトレンドがみられるので,フラックス算出手順としてトレンド除去は必須と思われる。計算手法上は,線形・曲線・移動平均による近似データを生データから差し引くことによってトレンドが除去できる。まず,線形近似を用いてトレンドを除去し,トレンド除去後のデータと除去前のデータを用いて計算されたフラックス同士を比較してみた。表-1の結果をみると,いくつかのケースにおいて顕著な違いが認められる (0-94%)。トレンドの影響を取り除く別の方法として,短時間ごとの平均処理 (ブロック平均) という方法がある。そこで次に,測定データを2分間ごとにブロック分割し,その間の平均値を生データから差し引いてトレンドを除去してみた。表-1をみると,先ほどのトレンド除去後データによるフラックスに近い値を示している。また,どのケースもばらつきが小さく,フラックスが時間的に安定していたことがわかる。ただし,注意しなければならないのは,この計算結果には2分よりも長い周期のフラックスの寄与が含まれていないことである。つまり,ブロック平均法では,低周波の寄与が無視されてしまう。

以上の結果より,鉛直流速や濃度に大きな時間変化がみられる干潟のような場において渦相関法を用いる場合には,トレンド除去が必要であることが示唆される。ただし,トレンド除去の際には,フラックスに寄与する低周波まで除去しないように配慮し,平均時間を決定する必要がある。

(3) 波の重要性

w' を高速フーリエ変換してスペクトル解析を行った結果をみると (図-7), 0.3-1.4 Hz (0.7-3.3 秒) の周波数帯がトータルスペクトルパワーに大きく寄与していることがわかる ($60.8 \pm 5.1\%$) (mean \pm SE, $n = 6$)。この周波数帯は調査地点における波高のピーク周波数と一致することから (Uchiyama, 2006), 風波によって引き起こされる軌道流速が現場の流れを支配していたと推定できる。さらに, $w'C'$ の累積コスpectrumにも, w' とほとんど同じ周波数帯にピークがみられている (図-6)。実際, 0.3-1.4 Hz におけるフラックス (コスpectrum) のトータルフラックスに対する寄与率は $84.0 \pm 9.1\%$ (mean \pm SE, $n = 4$) と高い。これらの結果より, 風波によって駆動される 0.3-1.4 Hz の周波数を持つ鉛直流速が, 堆積物-海水間の酸素フラックスに影響を及ぼすもっとも重要な因子であったと結論づけられる。

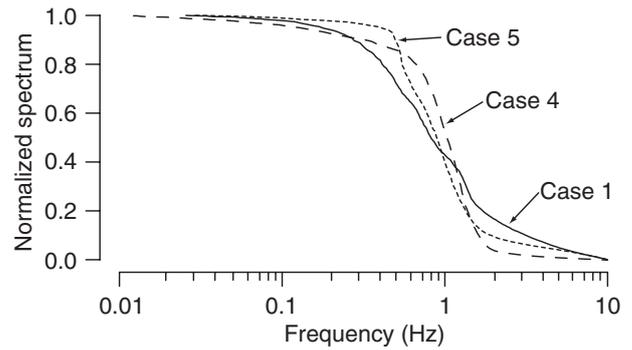


図-7 w' の累積スペクトル (トレンド除去後データ)。スペクトル値を高周波側から積算している。トータルスペクトルに大きく寄与する周波数帯に急勾配がみられる。

渦相関法による結果と従来法による結果を比較することにより, 透水性のある堆積物-海水間の酸素フラックスにおける波の重要性を再認識できる。観測翌日に同一地点において採取された未攪乱の堆積物コアを培養して求めた酸素消費フラックスは, 渦相関法によって求めたフラックスに対し, 最大でも 23% にとどまった (図-8)。これは, 砂質の堆積物中の溶存有機物や粒状有機物の無機化にともなう大量の酸素消費が, 間隙水の移流によって促進されるにもかかわらず (Malan・McLachlan, 1991), 閉鎖系培養システムの中ではその流動が再現できないためであると考えられる。波によって駆動される振動流によって, 間隙水の移流が起き (Webb・Theodor, 1968), 間隙水と直上水との交換が分子拡散に比べて 50 倍から 1000 倍以上増加する事例も報告されている (Precht・Huettel, 2004)。波の作用にともなう動圧の変化により, 間隙水はリップルの頂点から放出され, 直上水はリップルの谷から浸入する (Shum, 1992) (図-9)。明条件では, 堆積物表層において光合成により生成された酸素を多く含む間隙水が, リップルの頂点から放出され, 風波によって駆動された鉛直流とともに上方へ輸送されていたと考えられる。同様に暗条件では, 堆積物表層において呼吸や化学的酸化によって酸素が消費され, 低酸素濃度の間隙水が堆積物から放出されていたと考え

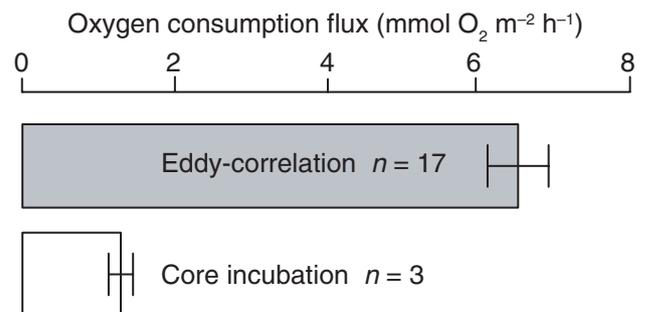


図-8 相関法と従来法 (コア培養法) による酸素消費速度の測定結果 (暗条件)。Error bar は標準誤差。

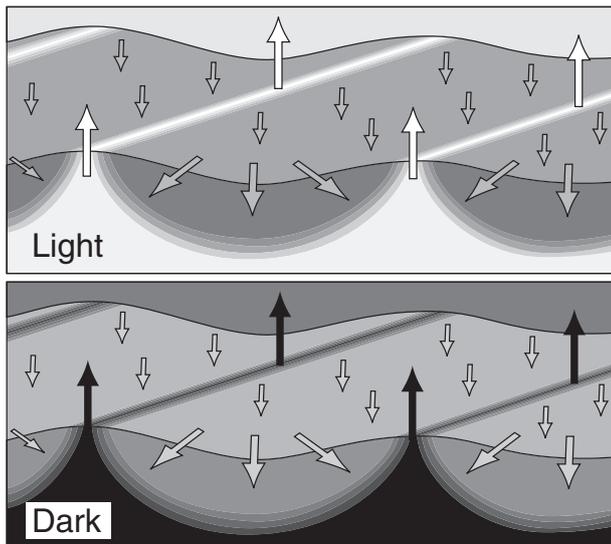


図-9 明条件と暗条件における酸素動態の概念図。コンターは酸素濃度（暗色が低濃度）、矢印は流向を示している。波の作用にともなう動圧の変化により、リップルの谷間から直上水が浸入し、リップル先端から間隙水が放出される。Precht・Huettel (2003) の図を改変・追加。

られる。以上のような酸素動態を示す透水性堆積物において酸素フラックスを測定する場合には、現場の水理環境を改変しない渦相関法を用いるべきであろう。

4. あとがき

本研究では、現場の砂質堆積物直上において、鉛直流速と酸素濃度を高時間解像度で同時計測し、渦相関法を適用した新たな酸素フラックス測定手法を開発した。得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 従来の閉鎖系培養法の欠点が克服され、高精度な測定が可能であるため、今後の標準法になり得る。
- (2) 透水性のある堆積物・サンゴ礁・藻場など、適用範囲が広い。
- (3) 鉛直流速や酸素濃度の時系列データに含まれる高周波の変動成分は、フラックスにほとんど影響を与えない。一方、トレンドは大きな誤差を生み出すため、適切な方法でトレンドを除去する必要がある。
- (4) 風波によって駆動される振動流が、間隙水や直上水の輸送過程として重要であるとともに、酸素フラックスにも大きく寄与する。

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小沼晋氏および細川真也氏に感謝いたします。本研究は、（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構「平成14年度運輸分野における基礎的研究推進制度」および（独）日本学術振興会「平成16年度海外特別研究員制度」から筆頭著者への助成によって実施された。

参考文献

- 徳永貴久・松永信博・阿部淳・児玉真史・安田秀一 (2005) : 有明海西部海域における高濁度層の観測と懸濁物質による酸素消費の実験. 土木学会論文集, No. 782/II-70, pp. 117-129.
- 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.
- 成松明・田中健路・森本剣太郎・滝川清 (2005) : 乱流渦相関法を用いた有明海干潟上の地表面フラックス直接観測. 海岸工学論文集, 52巻, pp. 1081-1085.
- 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.
- 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.
- 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.
- Frieche, C. A., W. J. Shaw, D. P. Roger et al. (1991): Air-sea fluxes and surface layer turbulence around a sea surface temperature front. *J. Geophys. Res.*, Vol.96, pp. 8593-8609.
- Huettel, M. and G. Gust (1992): Solute release mechanisms from confined sediment cores in stirred benthic chambers and flume flows. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.82, 187-197.
- Kljun, N., M. W. Rotach and H. P. Schmid (2002): A three-dimensional backward Lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications. *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol.103, pp. 205-226.
- 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.
- Malan, D. E. and A. McLachlan (1991): *In situ* benthic oxygen fluxes in a nearshore coastal marine system: a new approach to quantify the effect of wave action. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* Vol.73, pp. 69-81.
- Panofsky, H.A. and J. A. Dutton (1984): *Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications*. John Wiley & Sons, 418 p.
- Precht, E. and M. Huettel (2003): Advective pore-water exchange driven by surface gravity waves and its ecological implications. *Limnol. Oceanogr.*, Vol.48, pp. 1674-1684.
- Precht, E. and M. Huettel (2004): Rapid wave-driven advective pore water exchange in a permeable coastal sediment. *J. Sea Res.*, Vol.51, pp. 93-107.
- Shum, K. T. (1992): Wave-induced advective transport below a rippled water-sediment interface. *J. Geophys. Res.*, Vol.97, pp. 789-808.
- Uchiyama, Y. (2006): Hydrodynamics and associated morphological variations on an estuarine intertidal sand flat. *J. Coast. Res.*, Vol. xx, pp. xxxx-xxxx.
- Webb, J. E. and J. L. Theodor (1968): Irrigation of submerged sands through wave action. *Nature*, Vol.220, pp. 682-683.