

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

Vol.49 No.3 September 2010

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 49 卷 第 3 号 (Vol. 49, No. 3), 2010年9月 (September 2010)

## 目 次 (CONTENTS)

- 微小溶存酸素分布を比較対象とした摩擦速度推定手法の評価  
—底面境界層における乱流と溶存酸素の同時観測—  
……………井上徹教・Ronnie N. GLUD・Henrik STAHL・Andrew HUME …… 3  
(Assessment of shear velocity determinations referring DO microprofiles  
- Simultaneous field observation of turbulence and DO in the benthic boundary layer -  
…………… Tetsunori INOUE, Ronnie N. GLUD, Henrik STAHL, Andrew HUME)
- アマモ分布域の拡大とそれを支える種子散布  
……………細川真也・仲岡雅裕・三好英一・桑江朝比呂 …… 31  
(Seed dispersal supporting areal expansion of meadow in the seagrass, *Zostera marina* L.  
…………… Shinya HOSOKAWA, Masahiro NAKAOKA, Eiichi MIYOSHI, Tomohiro KUWAE)
- 網チェーン把持装置によるブロック撤去及びその把持モデルの開発  
……………野口仁志 …… 51  
(Block Removal Using Holding Device with a Chain Net and its Modeling  
……………Hitoshi NOGUCHI)
- 地震動波形の影響を考慮した液状化の予測・判定に関する提案  
……………山崎浩之・江本翔一 …… 79  
(Study on Liquefaction Prediction Method Considering Wave Forms of Seismic Motions  
…………… Hiroyuki YAMAZAKI, Shouichi EMOTO)
- 波形インバージョンにより推定された最近のわが国における内陸地殻内地震の震源過程  
……………野津厚 ……111  
(Rupture Process of Recent Crustal Earthquakes in Japan Estimated by Waveform Inversion  
……………Atsushi NOZU)
- 多チャンネル型表面波探査に基づいた干潟土砂堆積構造の評価  
～せん断波速度構造の考察と人工干潟安全管理手法の提案～  
……………渡部要一・佐々真志・桑江朝比呂・梁順普・田中政典 ……157  
(Evaluation of intertidal flat stratigraphy by MASW technology  
— Interpretation of shear wave velocity structure and  
safety assessment of artificial intertidal flats —  
……………Yoichi WATABE, Shinji SASSA, Tomohiro KUWAE, SoonBo YANG, Masanori TANAKA)

## 微小溶存酸素分布を比較対象とした摩擦速度推定手法の評価

— 底面境界層における乱流と溶存酸素の同時観測 —

井上 徹教\*・Ronnie N. GLUD\*\*・Henrik STAHL\*\*・Andrew HUME\*\*

### 要 旨

スコットランド西部に位置する Loch Etive における流動場観測の結果から、渦相関法、乱流運動エネルギー法、慣性散逸法により摩擦速度を推定した。また、摩擦速度を入力パラメーターとすると溶存物質の鉛直濃度分布が計算可能であることを利用し、同時に観測された溶存酸素濃度の微小分布の再現性を相互比較することにより各手法の評価・検討を行った。上記 3 手法から推定された摩擦速度を比較した結果、乱流運動エネルギー法による推定値は他の 2 手法よりも明らかに大きな値を示した。また、摩擦速度の増加は拡散境界層厚さの減少、その中での溶存酸素濃度の増加を引き起こすため、乱流運動エネルギー法による推定値は拡散境界層内の溶存酸素濃度を過大評価する結果となった。一方、渦相関法と慣性散逸法から推定された値では、有意な差がみられなかった。それぞれの手法から推定された溶存酸素濃度の値と観測値との誤差は、渦相関法では 0.2%、乱流運動エネルギー法では 9.8%、慣性散逸法では 0.7%であった。以上より、本観測場所のように比較的静穏な海域においては渦相関法および慣性散逸法の利用が望ましく、乱流運動エネルギー法の利用は避けるべきであるとの結論に至った。

キーワード：拡散境界層，渦相関法，乱流運動エネルギー法，慣性散逸法

---

\* 海洋・水工部 沿岸環境研究領域 主任研究官

\*\* Dunstaffnage Marine Laboratory, Scottish Association for Marine Sciences  
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5046 Fax：046-844-1274 E-mail：inoue-t@ipc.pari.go.jp

**Assessment of shear velocity determinations referring DO microprofiles  
- Simultaneous field observation of turbulence and DO  
in the benthic boundary layer -**

**Tetsunori INOUE\***  
**Ronnie N. GLUD\*\***  
**Henrik STAHL\*\***  
**Andrew HUME\*\***

**Synopsis**

Three approaches; eddy-correlation (EC), turbulent kinetic energy (TKE), and inertial dissipation (ID) methods were compared to evaluate their potential for estimation of shear velocity in a Scottish sea Loch. As an independent assessment parameter we used simultaneous dissolved oxygen (DO) recordings of the diffusive boundary layer (DBL) that were compared with theoretical distribution as derived from the respective shear velocity estimates. Shear velocities were calculated based on the three approaches using continuously measured turbulent properties, and values estimated by the TKE method were significantly higher than values of the two other approaches. Time series of calculated shear velocity were subsequently employed as input parameters for non-steady calculations of the DO distribution within the DBL. The shear velocity is a controlling factor for the eddy diffusivity distribution immediately above the sediment surface and for the DBL thickness, and shear velocity values of the TKE method derived significantly higher theoretical DO concentration while the EC and the ID approach provided results that not were significantly different. Overall differences from measured DO concentration in the DBL were 0.2% for EC method, 9.8% for TKE method, and 0.7% for ID method. The results reveal that the EC method appear to be the best approach for estimating shear velocities though not significantly different from the ID method, while the TKE method was unreliable at the ~70 m depth relatively calm study site.

**Key Words:** Diffusive boundary layer; Eddy correlation; Turbulent kinetic energy; Inertial dissipation.

---

\* Senior Researcher of Coastal and Estuarine Environment Research Division, Marine Environment and Engineering Department

\*\* Dunstaffnage Marine Laboratory, Scottish Association for Marine Sciences  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5046 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:inoue-t@ipc.pari.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	7
2. 方法 .....	8
2.1 現場観測 .....	8
2.2 摩擦速度の推定 .....	10
2.3 DO拡散モデルの概要 .....	12
3. 結果 .....	13
3.1 観測概要 .....	13
3.2 溶存酸素分布の計算 .....	14
4. 考察 .....	16
4.1 EC法 .....	16
4.2 TKE法 .....	16
4.3 ID法 .....	16
4.4 各手法間の比較 .....	17
5. 結論 .....	19
謝辞 .....	19
参考文献 .....	19
付録 .....	22



## 1. まえがき

摩擦速度は底面近傍における乱流拡散の分布を特徴づけ、底面境界層 (benthic boundary layer ; 以下, BBLとする) における最も重要なパラメーターである (Gross et al. 1994; Reidenbach et al. 2006; Sherwood et al. 2006). これは底面摩擦応力を表現するパラメーターであり、その定量化に対しては、本来であれば底面における摩擦応力を直接測定できることが理想的である。しかし現実には、現場海底において摩擦応力の直接測定 (Rankin and Hires 2000) を適用することは技術的に難しく (Wilcock 1996; Reidenbach et al. 2006), 専ら室内実験において適用されているのみである (Graham et al. 1992). そのため、現場海域を対象としたほとんどの研究では、BBL内の流動観測に基づいた間接的な手法により摩擦速度を求めているのが現状である (Pope et al. 2006).

BBL内の流速観測については、高分解能を有する音波ドップラー式流速プロファイラー (Acoustic Doppler Current Profiler ; 以下, ADCPとする) や粒子画像流速測定法 (particle image velocimetry ; 以下, PIVとする) を用いた観測が最も精度の高い手法であると考えられている (例えば, Doron et al. 2001; Burchard et al. 2008). しかし ADCPを用いた観測では、時間分解能については乱流計測に対して十分な能力を有すると考えられるが、空間分解能については、典型的には3 cmから5 cmとやや粗い観測となる (Ali and Lemckert 2009). また、ADCPを用いた乱流諸量の推定においては、機材設置の傾きによる誤差が大きく影響を与えることが指摘されている (Doron et al. 2001). PIVを用いた観測では、ステレオタイプの機材を用いない限りは2方向の流速成分しか測定できないという欠点があり (Bertuccioli et al. 1999), さらに正確な測定には高い透明度が要求され、濁度が高い海域では十分な精度が得られないとされている。

一方、音波ドップラー流速計 (Acoustic Doppler Velocimeter ; 以下, ADVとする) は、その精度の高さと取り扱いの容易さにより近年しばしば用いられるようになってきており (例えば, Nikora and Goring 1998; Trowbridge and Elgar 2001; Elgar et al. 2005), 乱流緒量の算定を含む底面境界層における流動観測事例も増えてきている (例えば, Inoue et al. 2008).

現場における摩擦速度は、いくつかの手法から推定することができる。対数分布法 (log-profile method ; 以下, LP法とする) は最も一般的な方法であると考えられており (例えば, Ali and Lemckert 2009), 底面境界層が成層していない限りは適用可能である。しかし、摩擦速度を精

度良く算定するためには十分な数の流速計を配置する必要がある (例えば10台程度, Huntley 1988), 観測点が少ない (例えば3台程度) 場合には精度の低下につながるということが指摘されている (Gross et al. 1992). これに対して、いくつかの研究事例では1台の流速計を鉛直方向に移動させることにより、単一の機材で観測点数を増加させる試みがなされている (Trowbridge and Agrawal 1995; Inoue et al. 2008; Ali and Lemckert 2009). しかし、潮汐による影響が卓越するような流れが非定常的な場では、鉛直方向の流速分布は対数分布とはならず (Cheng et al. 1999), この手法を適用することができない (Pope et al. 2006). さらに、底面境界層内に成層が存在する場合には、LP法は摩擦速度を過大評価してしまう傾向があることが指摘されている (Sherwood et al. 2006). このような状況から、現場では単一の高さでの計測で摩擦速度の推定が可能である、以下の3手法が常用されている。

第一に、レイノルズ応力の直接的な計測手法である渦相関法 (eddy-correlation method ; 以下, EC法とする) が挙げられる。これは、流速分布について対数則が成り立つ範囲、すなわちconstant stress layer内で計測されたレイノルズ応力が、底面における摩擦応力と等しいと考え、(底面における) 摩擦速度を推定する方法である。EC法ではconstant stress layer内で計測を行わなければならないという制限があるが、測定位置の底面からの距離についてはそれほど厳密性を要求しないという利点がある。加えて、原理的に計測点における乱流場の等方性も要求しないため、非等方性が現れる壁面近傍においても適用が可能であるとされている。これらの特徴から、EC法は最も常用される方法である (Shaw and Trowbridge 2001; Sherwood et al. 2006). しかしながら一方では、観測機材の傾き (Dyer et al. 2004) や二次流の影響を強く受ける (Kim et al. 2000; Pope et al. 2006) ため、現場での使用は不適であるとの指摘もある。

第二の手法として、乱流モデルにおいて定式化される (Ali and Lemckert 2009) 乱流エネルギーとレイノルズ応力との単純な関係から摩擦速度を求める手法 (turbulent kinetic energy method; 以下, TKE法とする) が挙げられる。これは定式化された乱流エネルギーとレイノルズ応力との比例関係を基に、経験的に求められた比例定数を用いて乱流エネルギーからレイノルズ応力を求め、EC法と同様にconstant stress layer内のレイノルズ応力は摩擦応力と等しいと考え、摩擦速度を推定する方法である。TKE法もまた、測定位置の底面からの距離について厳密性を要求しないという利点に加えて、観測機材の傾きや乱れの非等方性にも影響を受けにくいという利点を併せ持つ。

よって、Kim et al. (2000)はTKE法は最も矛盾がなく、信頼できる方法であるとしている。しかし、潮流場のような加減速はTKE法において誤差の原因となる (Pope et al. 2006) ため、平均流速の時系列データから移動平均値によりトレンド除去を行う等の処理が必要になる場合がある。さらに、摩擦応力が小さい場合には ‘inactive turbulence’ (Townsend 1961; Gordon and Dohne 1973) の影響により、摩擦速度を過大評価する傾向があることが指摘されている。

第三の手法として、その場の乱流生成と散逸が平衡状態にあると考え、乱れの散逸率から乱流生成と直接的な関係があるレイノルズ応力を推定する、慣性散逸法 (inertial dissipation method; 以下、ID法とする) が挙げられる。ID法においても、constant stress layer内のレイノルズ応力は摩擦応力と等しいと考え、摩擦速度を推定する。本手法は、現場観測データの取り扱いにおいて乱流成分と波動成分を分離する必要があり、解析上の困難をもつという欠点がある (Gross et al. 1994; Sherwood et al. 2006)。しかし、機材の設置の傾きや平均流速の変動 (流れ場の非定常性) にそれほど大きな影響を受けず (Huntley 1988)、一方向成分の乱れのデータから計算することが可能であるという利点をもつため、これまで摩擦速度の観測には頻繁に用いられてきている。そのため、表面波の影響は受けないが潮汐の影響を受けるような比較的穏やかな沿岸域においては、最も信頼できる方法であるとの主張がある (Huntley 1988)。この方法においては、測定位置の底面からの距離について正確な情報が必要とされ、限界高さよりも上方で計測される必要がある (後述)。しかし、限界高さ以下で計測した場合でも、修正されたID法を用いることで、解析において計測データの補正を行うことが可能であるとされている (Huntley 1988)。

これらの乱流諸量からの摩擦速度の推定法がLP法と比較して優れている点は、一点の計測で良いという点であり (Sherwood et al. 2006)、ID法を除いては測定位置と底面との距離に関する正確な情報も必要としない。近年では、鉛直方向流速と溶存物質濃度の摂動量を用いて渦相関法により水・堆積物界面における物質収支を評価する手法も採用されるようになってきているため (Berg et al. 2003; 2009; Kuwae et al. 2006)、固定された一点での観測結果からの摩擦速度を推定する方法の確立は、底面境界層における観測の発展に大きく寄与すると考えられる。

摩擦速度の推定に関する上記の手法間の比較はこれまでいくつかの検討事例があり、それらの長所や短所が検討されてきた (例えば、Williams et al. 2003; Sherwood et al. 2006)。しかしながら、現場において直接的に摩擦速度 (ま

たは摩擦応力) を測定することは困難であるため、既存の研究では単なる手法間の比較にとどまっており、どの手法が最も優れているかを定量的に判断することは難しかった (Gust 1988; Rankin and Hires 2000)。そのため、複数の手法を同時に採用し、柔軟に評価することが推奨されている (Ali and Lemckert 2009)。

一方、一般的に堆積物内での酸素消費速度は水中におけるそれよりもはるかに大きいため、通常水・堆積物界面近傍では後述されるような特徴的な溶存酸素 (dissolved oxygen; 以下、DOとする) 濃度の分布が観察される。水・堆積物界面直上における拡散係数の分布は摩擦速度によって一意的に支配されるため、そこでのDO濃度の分布も摩擦速度に依存することとなる。このため、上記の手法からは独立した過程により、DO濃度分布から摩擦速度を求めることが可能である。

そこで本研究では、流動場観測から独立した観測である堆積物表面近傍におけるDO濃度の鉛直分布のデータから摩擦速度を間接的に評価し、同時に測定された流速データから上記の3手法により推定された摩擦速度と比較することで、どの手法が最も確からしい方法であるかを検討した。本稿における検討手順は以下の通りである。

1. 現場での流動観測結果からEC法、TKE法、ID法を用いて、摩擦速度を推算する。
2. それぞれの推算された摩擦速度と計測された環境条件を基に、拡散方程式を用いて堆積物表面近傍のDO濃度の鉛直分布を計算。
3. 計算されたDO濃度分布と、流動観測と同時に測定したDO濃度分布とを比較し、3つの摩擦速度推定手法の良否について検討。

## 2. 方法

### 2.1 現場観測

観測はスコットランド西部に位置するLoch Etive (図-1) において行われた。Loch Etiveはフィヨルド地形による、細長い水路上の開口部をもつ長さ30 kmにおよぶ細長い形状をした閉鎖性の内湾である (Edwards and Edelsten 1977)。このフィヨルド地形は2つの浅瀬をもち、これにより上流側 (河川側) と下流側 (外海側) に分けられる。Loch Etiveは3つの水域に分かれており、幅300 m、長さ4 km、水深10 mの水路によって海とつながっている。潮汐振幅は最大4 m、内部潮汐幅は2 mである。底質はほぼ均質なシルト粒子で構成されており、観測地点付近ではほぼ平坦な地形であることが確認されている。本研究では下流側の海域で行われた観測結果を用いて解析を行う。



観測対象となった水域の平均水深は54-72 mであり、これは密度成層界面よりも十分下に位置している。

流動観測は、高さ0.9 m、幅1.3 mの三脚の中心に鉛直方向に立てた状態で設置したADV (Nortek AS社製、ノルウェー) により行った (写真-1)。ADVは、その円柱状の流速測定部 (高さ1.5 cm×直径1.5 cm) が海底上4- 15.5 cmの位置となるように設置した。観測は3方向の流速成分を64 Hzまたは32 Hzの周波数で測定するように設定した。14分30秒間連続した測定を行った後、30秒の無測定時間を設け、この間にADV本体からパソコンへのデータ転送を行った。これを1バーストとし、32バーストから108バースト行うことで、8時間から24時間の観測を行った。このような観測を水平方向の観測位置を変え、計16回行った。観測概要を表-1に示す。

乱流特性の解析に使用した観測期間は、微小DO電極による拡散境界層内の測定期間、およびそれ以前の数時間とした。この解析対象の観測期間については、後述する。

解析に使用する入力条件として、観測現場付近で底層水の採水により測定した塩分25 psuと、ADVに併設されている水温計により1秒間隔で測定された水温が用いられ

た。測定地点における底層DO濃度は、上記の三脚に設置した光学式DO濃度計 (Aanderaa Data Instruments社製、ノルウェー) (Tengberg et al. 2006) を用いて測定し、機材の校正には底層水の採水によりウィンクラー法で測定した値を用いた。表層堆積物の間隙率は、0.5 cm間隔で層状に分取した堆積物を100°Cで24時間乾燥させ、その重量減少分と堆積物の密度から計算した。

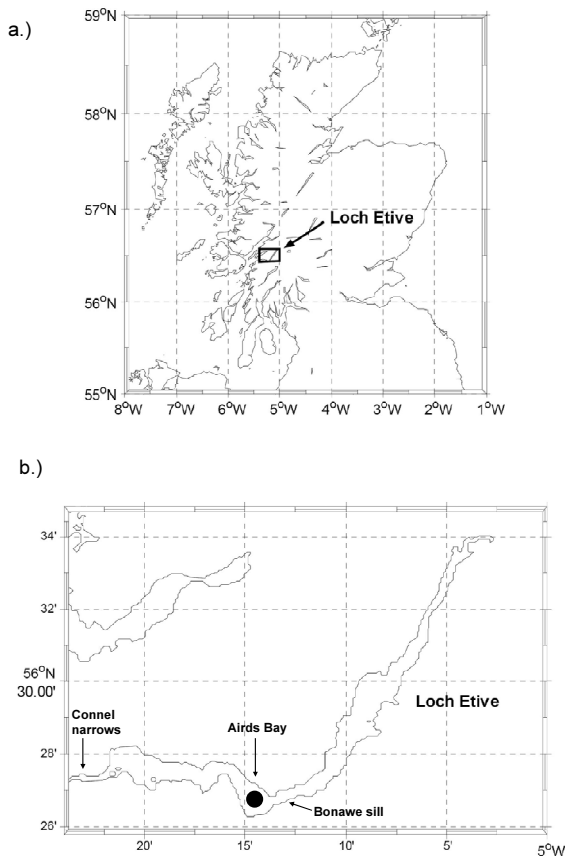


図-1 観測現場周辺の地図 (●は観測地点を示す)



写真-1 観測機材の様子

表-1 観測概要

profile number	depth (m)	water temperature (°C)	DO concentration in bulk region ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	mean flow direction* (°)	longitudinal velocity ( $\text{cm s}^{-1}$ )	latitudinal velocity ( $\text{cm s}^{-1}$ )	vertical velocity ( $\text{cm s}^{-1}$ )	$w/\bar{u}$ ratio** (-)	(rms of $w'$ )/ $\bar{u}$ ratio*** (-)
1	68	13.43	181.5	208±57	1.46±1.11	0.00±1.88	-0.03±0.40	0.021	0.17
2	68	13.43	181.5	134±72	1.10±1.40	0.00±1.30	0.00±0.36	0.000	0.18
3	67	13.41	178.3	275±20	2.99±1.45	0.00±1.41	-0.04±0.52	0.013	0.12
4	67	13.41	178.3	272±23	3.47±1.41	0.00±1.18	-0.09±0.26	0.026	0.12
5	54	13.39	177.3	80±37	1.98±1.00	0.00±1.05	-0.02±0.24	0.010	0.11
6	59	13.38	172.3	294±13	6.69±1.66	0.00±1.47	0.37±0.82	0.055	0.12
7	70	13.34	171.9	335±72	1.36±1.86	0.00±2.54	0.05±0.43	0.037	0.14
8	70	13.31	171.9	6±21	5.06±1.58	0.00±1.82	0.21±0.55	0.042	0.10
9	70	13.33	171.9	354±24	4.39±1.94	0.00±1.48	0.19±0.43	0.043	0.09
10	70	13.31	171.9	326±27	3.69±1.32	0.00±1.76	0.21±0.39	0.057	0.09
11	72	13.26	170.7	329±19	3.43±1.11	0.00±1.06	-0.13±0.39	0.038	0.11
12	72	13.26	170.9	94±21	2.76±1.11	0.00±0.80	0.04±0.41	0.014	0.17
13	72	13.26	170.5	94±21	2.76±1.11	0.00±0.80	0.04±0.41	0.014	0.17
14	72	13.22	171.7	8±25	2.03±0.77	0.00±0.80	-0.03±0.25	0.015	0.13
15	72	13.25	170.9	131±25	3.19±1.52	0.00±1.02	0.03±0.34	0.009	0.10
16	72	13.22	170.9	158±25	4.10±1.58	0.00±1.49	-0.08±0.43	0.020	0.10

\* 東向きを0°とし、反時計回りを正とする

\*\* 平均鉛直方向流速 ( $w$ ) と平均主流方向流速 ( $\bar{u}$ ) との比

\*\*\* 鉛直方向流速の摂動成分の平均二乗根と平均主流方向流速との比

現場でのDO濃度分布はGlud et al. (2009)により紹介された、微小濃度分布測定装置を用いて観測された。測定装置には鉛直方向に移動可能な電動シリンダーが取り付けられており、シリンダー可動部にはDO濃度分布を測定するための微小酸素電極3本と、水・堆積物界面位置を検知するための微小電気抵抗センサー1本が取り付けられており、これら計4本の電極の同時観測の出力値は独立したデータとして保存される。これらの装置は水平方向に90 cm移動可能なトラバース装置に取り付けられており、1回の鉛直分布を測定し終えた後、水平方向に移動して未攪乱の箇所において次の鉛直分布を測定することが可能である。鉛直分布測定装置の全ての部分は、係留された三脚に取り付けられ、底面に対して固定される。三脚は観測船より静かに海中に降ろされ、海底に設置されたことが確認されてから、プログラム化された測定ルーチンを開始する。三脚の着底後は、まず電動シリンダーが連続的に下降し、暫定的な鉛直分布の測定を行う。微小電気抵抗センサーからの出力値が（堆積物表面位置を意味する）急激な10%の減少を検知すると、電動シリンダーが30 mm上昇し測定ルーチンは初期化される。その後、トラバース装置の移動により水平方向に7 mm移動し、電動シリンダーが0.1 mm間隔で70 mm下降、その後初期の鉛直

位置に戻る。それぞれの位置におけるセンサーからの出力値は、耐圧ハウジング内のコンピューターに保存される。その後、トラバース装置の移動によりさらに水平方向に7 mm移動し、測定ルーチンを繰り返す。

微小電気抵抗センサーは本観測用に特別に設計、作成したものであり、直径0.8 mmのセンサー先端に2本のワイヤーが組み込まれている。センサー先端のワイヤーの間隔は0.5 mmであり、予備的に観測地点近傍で採取されたような細粒子の堆積物で試験を行ったところ、0.5 mm程度の鉛直方向の空間分解能を持つことが示されている。微小酸素電極は内部参照とガードカソードを持つクラークタイプの電極であり、先端の直径は約10  $\mu\text{m}$ である。90%応答時間は2秒以下であり、周囲の水の攪拌による影響は2%以下である (Revsbech 1989; Gundersen et al. 1998)。DO濃度が既知（本観測期間中は180  $\mu\text{mol L}^{-1}$ 程度）の底層水バルク領域の出力値と堆積物中の還元層（DO濃度が0となる層）における出力値の2点により、微小酸素電極の校正を行った。

## 2.2 摩擦速度の推定

渦相関法 (EC法) においては、測定時の受信信号の相関係数が70以下、S/N比が5以下、平均流速からの偏差が標準偏差の3倍以上である流速データについては

考察対象から削除した (Ali and Lemckert 2009). EC法では、摩擦速度は次式により計算した (Huthnance et al. 2002).

$$u_* = \sqrt{-u'w'} \quad (1)$$

ここで、 $u_*$ は摩擦速度、 $u$ は主流方向流速、 $w$ は鉛直方向流速、プライム (') は平均値からの偏差、オーバーバー ( ) は時間平均を示す。Dyer et al. (2004)によると、EC法による摩擦速度の推定は流速計の設置状況に多大な影響を受け、機材の傾きは大きな誤差の原因となる。このため、一般的には計測された流速成分に対して軸回転を行うことにより、時間平均を行った鉛直方向流速が0となるように座標変換を行うことが推奨されている。しかし本観測結果では、鉛直方向流速の平均値は水平方向の平均値の6%以下であり、主流方向流速よりも十分小さいと判断された。またDoron et al. (2001)は、鉛直方向流速成分は計測地点直下の微地形により影響を受けるため、これを軸回転により補正することは望ましくないとしている。さらに、Agrawal and Aubrey (1992)は主流方向流速が小さい場合に軸回転による座標変換を行うと誤差の原因となることを指摘している。以上の観点から、ここではADVのジャイロコンパスによる変換値 (出力値) をそのまま解析に用いることとした。

乱流運動エネルギー法 (TKE法) においても、測定時の相関係数が70以下、S/N比が5以下、平均流速からの偏差が標準偏差の3倍以上である流速データについては考察対象から削除した。TKEの値と摩擦速度との関係は、乱流モデルにおいて以下のように簡潔に表記される (Ali and Lemckert 2009).

$$u_* = \sqrt{\frac{1}{2} C_1 (u'^2 + v'^2 + w'^2)} \quad (2)$$

ここで $C_1$ は数値定数 (=0.19~0.21, Soulsby and Dyer 1981; Kim et al. 2000; Huthnance et al. 2002; Thompson et al. 2003),  $v$ は横断方向流速である。本稿では上記数値定数 $C_1$ として、最も一般的な値であると考えられる0.19を採用することとする。この数値定数の値が0.02変化した場合の摩擦速度計算結果への影響は5%以下であり、この数値定数の選択により本稿の結論が大幅に変わることはない。

慣性散逸法 (ID法) においては、摩擦速度は次式により計算される。

$$u_* = (\kappa z \varepsilon)^{1/3} \quad (3)$$

ここで、 $\kappa$ はカルマン定数、 $\varepsilon$ は散逸率、 $z$ は底面からの

距離を表し、ADVからの出力値から直接得ることができる。本稿では、カルマン定数 $\kappa$ にはLong et al. (1993)が提唱している0.408を採用した。カルマン定数 $\kappa$ の通常取り得る範囲0.40-0.41以内での変化では、摩擦速度 $u_*$ への影響は1%以下であり、カルマン定数 $\kappa$ の選択が本検討の結論に影響を与えることはない。

Fedderson et al. (2007)は散逸率 $\varepsilon$ の計算の妥当性を確認するための指標として、以下の値を提唱している。

$$R = \frac{(12/21) \langle \omega^{5/3} [S_{uu}(\omega) + S_{vv}(\omega) - \text{noise}] \rangle}{\langle \omega^{5/3} S_{ww}(\omega) \rangle} \quad (4)$$

ここで、 $\omega$ は角周波数、 $S_{uu}(\omega)$ ,  $S_{vv}(\omega)$ ,  $S_{ww}(\omega)$ はそれぞれ主流方向、横断方向、鉛直方向の流速スペクトル、 $\langle \rangle$ は周波数に関する平均値を表す。Fedderson et al. (2007)によると、 $R$ の値が1付近であるとき乱流慣性領域が存在し、スペクトル $E(f)$ からの散逸率計算が可能であるとしている (次式参照-)。

$$E(f) = \frac{A}{(2\pi)^{2/3}} u^{-2/3} \varepsilon^{2/3} f^{-5/3} \quad (5)$$

ここで、 $A$ はコルモゴロフ定数、 $f$ は周波数を表す。Green (1992)によると、コルモゴロフ定数 $A$ は主流方向については0.51、横断・鉛直方向については0.69としている。式(5)では、波数スペクトルを流速スペクトルに変換する際に凍結乱流の過程を用いるが (Huntley and Hazen 1988), そこでは乱流速度スケールと平均流速との比が十分に小さいこと、および次式の条件を満たすことが必要とされる (Huntley 1988; Stapleton and Huntley 1995)。

$$\frac{f \cdot E(f)}{u^{-2}} \ll 1 \quad (6)$$

本研究では、観測地点の水深が54-74 m程度と比較的深く (表-1)、表面波の影響は無視できるものと考え、スペクトルからの波の影響の除去については特段の操作を加えなかった。

底面付近では鉛直方向流速の方が波動成分の影響を受けにくく、その変動成分に対しては乱流成分が支配的であるとされている (Huntley and Hazen 1988; Doron et al. 2001; Lozovatsky et al. 2008)。従って本稿では、スペクトルは流速の鉛直方向成分 (Lee et al. 2003) を用いて、512秒間 (64 Hzでの観測では32768個、32 Hzでの観測では16384個) のデータに対して計算された。計算されたスペクトルは $1.95312 \times 10^{-3}$  HzからNyquist周波数 (32 Hzまたは16 Hz) の範囲のデータより構成される結果となる。

ドップラー効果を利用した流速計において共通の間

題として、ドップラーノイズの影響が挙げられる (Ali and Lemckert 2009). このため、スペクトルの計算結果から高周波数帯に見られるノイズフロアの値を減じ、その後  $\log(E(f))$  と  $\log(f)$  との直線回帰を行い、慣性領域の周波数帯を見積もった (Reidenbach et al. 2006).

### 2.3 DO 拡散モデルの概要

DO濃度の鉛直分布は、水・堆積物界面近傍の拡散方程式と堆積物中での生化学的な反応式を含む、非定常モデルにより計算された。計算においては流動条件やDO濃度などは水平方向に一様であると仮定し、次式の鉛直一次元拡散方程式により計算を行った。

$$\frac{dC_o(z)}{dt} = \frac{d}{dz} \left\{ (D_0 + D_i(z)) \frac{dC_o(z)}{dz} \right\} \quad (\text{水中}) \quad (7)$$

$$\phi(z) \frac{dC_o(z)}{dt} = \frac{d}{dz} \left\{ \phi(z) D_s(z) \frac{dC_o(z)}{dz} \right\} - r_s(z) \quad (\text{堆積物中}) \quad (8)$$

ここで、 $C_o$ はDO濃度、 $t$ は時間、 $D_0$ はDOの分子拡散係数、 $D_i$ は乱流拡散係数、 $\phi$ は間隙率、 $D_s$ は堆積物中でのDOの拡散係数、 $r_s$ は単位体積当たりの堆積物によるDO消費速度を表す。Deissler (1955)は壁面近傍での渦動粘性係数の分布について定式化しており、渦動粘性係数と乱流拡散係数との比である乱流シュミット数を1と仮定すると、水中での拡散係数の鉛直分布は以下の式で表される。

$$\frac{D_z(z_+)}{\nu} = n^2 u_+ z_+ \{ 1 - \exp(-n^2 u_+ z_+) \} \quad (9)$$

ここで、 $\nu$ は動粘性係数、 $n$ は数値定数 (=0.124, Deissler 1955)、 $u_+$ 、 $z_+$ はそれぞれ無次元化された流速と鉛直方向の位置を示し、次式で表される。

$$u_+ = \frac{\bar{u}}{u_*} \quad (10)$$

$$z_+ = \frac{z u_*}{\nu} \quad (11)$$

ここで、壁面近傍 (粘性底層内) では  $u_+$  は  $z_+$  に等しいと仮定できるため、式(9)は以下のように書き換えられる。

$$\frac{D_z(z_+)}{\nu} = n^2 z_+^2 \{ 1 - \exp(-n^2 z_+^2) \} \quad (12)$$

この場合、摩擦速度が拡散係数の鉛直分布を支配する唯一のパラメーターとなる。

一方、Berner (1980)によると、 $D_s$ は次式のように表される。

$$D_s = \frac{D_0}{\theta^2} = \frac{D_0}{\phi F} = \phi^{m-1} D_0 \quad (13)$$

ここで、 $\theta$ は屈曲度 (tortuosity)、 $F$ はformation factor、 $m$ は数値定数 (=3, Ullman and Aller 1982) を表す。拡散境界層は十分に薄く、そこでのDOの消費は無視できると仮定すると、式(7)と(8)で表される2つのフラックスは一致しなければならない。よって、水・堆積物界面におけるDO濃度を消去し、2式は統合される。 $r_s$ はBerg et al. (1998)に従い、堆積物中のDO濃度の鉛直分布に対して拡散方程式により計算された濃度分布が最小二乗法により最も誤差が少ないと計算される値として計算された。また、 $r_s$ は考察対象となる時間 (5時間以下) 内において変化しないと仮定した。

DO濃度分布観測期間中の直上水中のDO濃度の変化率 (約-0.20  $\mu\text{mol L}^{-1} / 5 \text{ h}$ ) は十分小さく無視できると考えられたため、堆積物界面から5 mm以上の部分のDO濃度の平均値 (約180  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) を定常的な上側境界条件として採用した。一方、堆積物中へのDOの浸透深さは6 mm以下であったため、界面下10 mmの位置で下側の境界条件、DO濃度0  $\mu\text{mol L}^{-1}$ を採用した。

微小鉛直分布観測機材はADV観測機材から15 mから30 m離れた場所に設置されていた。本稿では、これらの観測点周辺では乱流諸量は一様であると仮定して、以下の解析を行った。DO濃度分布の計算においては、数時間程度という比較的短い時間スケールの非定常計算が対象となるため、DO濃度分布について適切な初期条件を設定する必要がある。しかし、本観測においては初期条件として利用できるDO濃度分布の観測は行っていない。そのため、DO濃度観測に対して十分に以前のDO濃度分布をあらかじめ定常計算により計算しておき、これを非定常計算における初期条件として利用した。DO濃度分布の時間応答に関しては、堆積物中におけるDOの拡散に要する時間スケールが最も長い時間スケールであると考えられるので (Inoue et al. 2000)、ここでは次式により定義される時間スケールを非定常計算における助走時間とみなした。

$$\tau_s = \frac{\delta_s^2}{2D_s} \quad (14)$$

ここで、 $\delta_s$ は堆積物中へのDOの浸透深さである。それぞれの観測に対して計算された助走時間は、17分から3時間20分の範囲で変動していた。

図-2に流動条件をコントロール可能な室内実験系により得られたDO濃度分布 (Inoue and Nakamura 2009) と上記のDO拡散方程式より計算されたDO濃度分布との比較を示す。この室内実験系では矩形循環水路の底面下に円形堆積物コアをねじ込むことが可能となっており、微小DO電極を用いることで水・堆積物界面近傍

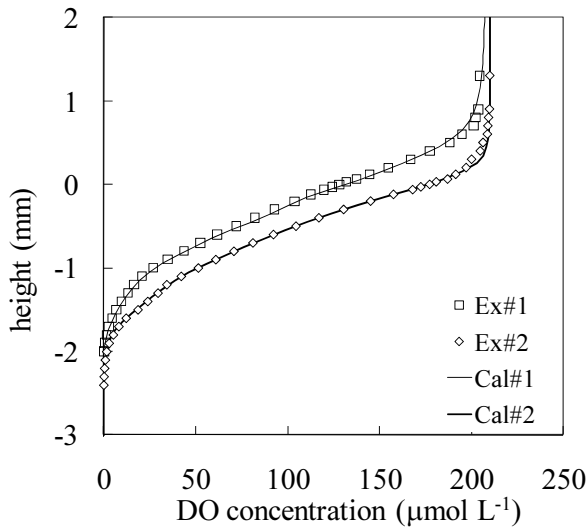


図-2 DO濃度分布に関する計算結果（実線）と室内実験による計測結果（プロット）との比較

のDO濃度分布を計測することが可能となっている。水路内の水は回転数が可変式のポンプ用いて循環されており、内部の流速はポンプの回転数を変化させることで任意の値に調整可能になっている。実験に先立って、様々なポンプ回転数における流速分布を予め測定しておき、それらを対数則にあてはめることで、摩擦速度とポンプ回転数との関係を別途求めている。拡散境界層内のDO濃度の測定値と計算値とを比較した結果、決定係数が0.99と高い値を得た。この結果から、正確な摩擦速度を与えれば、DO濃度分布を精度良く再現できることがわかる。つまり、様々な方法で推定した摩擦速度が正しく見積もられているかどうかの判定に、DO濃度分布の再現性を利用することができると考えられる。

### 3. 結果

#### 3.1 観測概要

ADVによる流動の観測高さは海底面上約4-15.5 cmの位置であった。Loch Etive底層の流動は比較的穏やかであり、平均流速は1.1-6.7 cm s<sup>-1</sup>程度で、明確な表面波による往復振動流は観測されなかった。いくつかの観測では乱れが弱く摩擦速度の計算ができなかったため、以後の考察の対象から外した。流速スペクトルのノイズ除去に関して、Trowbridge and Elgar (2001)とSherwood et al. (2006)では、それぞれ3 Hz以上または5 Hz以上をノイズと判断している。本観測においては5 Hzの付近からスペクトル形状が平坦になるケースが

多かったため、10 Hz以上の平均値をノイズと仮定し、計算されたスペクトルからその値を減じた(Nikora and Goring 1998)。

乱流速度スケールと平均流速との比は、ID法の使用（凍結乱流の仮説の採用）の可否を判定する指標の一つである。本観測では、鉛直方向成分におけるこの比は0.09-0.18、水平方向成分での比は0.24-0.51の範囲であった。さらに、式(6)の左辺の値は、鉛直方向成分では0.002-0.021の範囲で変動し平均値は0.005、水平方向成分では0.003-0.064の範囲で変動し平均値は0.010となった。以上の結果から、鉛直方向成分に対しては両者の値は十分に小さいと判断されたため、テイラーの凍結乱流の仮定は成立し、ID法の使用は可能と判断した。一方、水平方向成分には適用が難しいと判断した。Feddersen et al. (2007)は、式(4)で計算される比 $R$ の値が1から1.5の範囲で変動し、平均的には1.08であった場合に慣性領域は存在し、スペクトルからの散逸率の評価が可能であるとした。本観測結果では、 $R$ の値が0.9から1.4の範囲で変動しており、平均的には1.13 ± 0.24であったため、本稿においても慣性領域は存在し、スペクトルからの散逸率の評価が可能であると考えた。スペクトルの計算例を図-3に示す。

Gross et al. (1994)によると、流動測定高さはconstant stress layer内、つまり海底面からの距離が $0.05\kappa u_* / F$ （ここで $F$ はコリオリ周波数で、北緯56° 26.840'では $1.22 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ である）以下でなければならない。観測結果から推定された摩擦速度を用いると、本観測での測定高さは全てこの条件を満足していた。

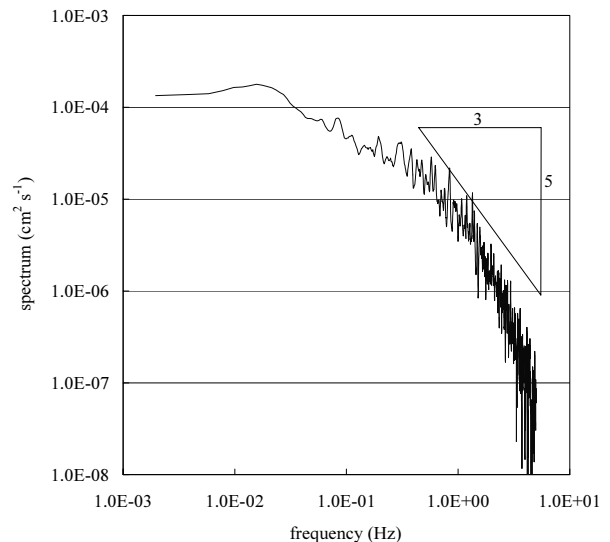


図-3 スペクトルの計算例

表-2 各手法により推定された摩擦速度

profile number	shear velocity		
	EC	TKE	ID
	(cm s <sup>-1</sup> )		
1	0.25~0.35	0.51~0.78	0.22~0.43
2	0.18~0.35	0.51~0.78	0.18~0.43
3	0.11~0.47	0.52~0.71	0.12~0.41
4	0.24~0.49	0.56~0.70	0.18~0.41
5	0.11~0.28	0.48~1.05	0.12~0.29
6	0.12~0.55	0.38~0.81	0.11~0.54
7	0.17~0.32	0.41~0.74	0.12~0.37
8	0.12~0.34	0.41~0.93	0.20~0.46
9	0.12~0.26	0.41~0.93	0.12~0.43
10	0.17~0.49	0.53~0.67	0.13~0.49
11	0.39~0.55	0.55~0.77	0.33~0.41
12	0.21~0.24	0.43~0.50	0.18~0.29
13	0.17~0.55	0.39~0.77	0.18~0.41
14	0.17~0.47	0.37~0.60	0.13~0.40
15	0.12~0.30	0.41~0.69	0.11~0.33
16	0.11~0.30	0.41~0.55	0.11~0.24

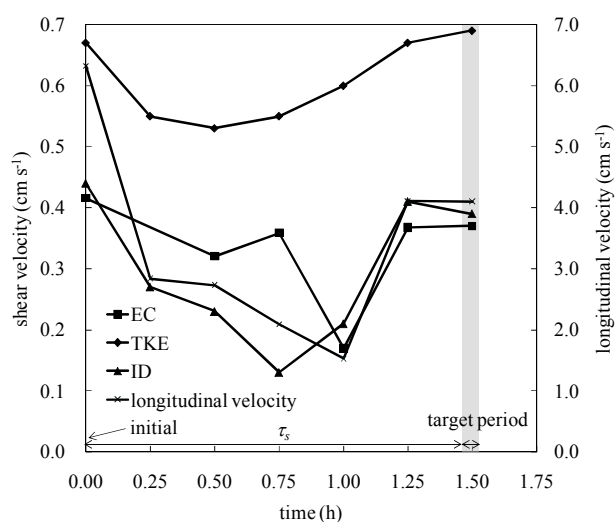


図-4 計算された摩擦速度の例

計算結果を概観すると、TKE法により推定された摩擦速度は、他の手法から求められた値よりも明らかに大きな値を示していた。一方で、EC法とID法による推定値はほぼ同様の値を示していた(表-2)。計算された摩擦速度の時系列の一例を図-4に示す。本対象期間における助走期間 $\tau_s$ は約1.5 hと計算されたため、測定結果と計算結果との比較対象となる時刻(図-4においてtarget periodと記載)から1.5 h前から摩擦速度の推算を行っている。図-4における観測期間中は、主流方向の平均流速(longitudinal velocity)が1.53 cm s<sup>-1</sup>から6.32

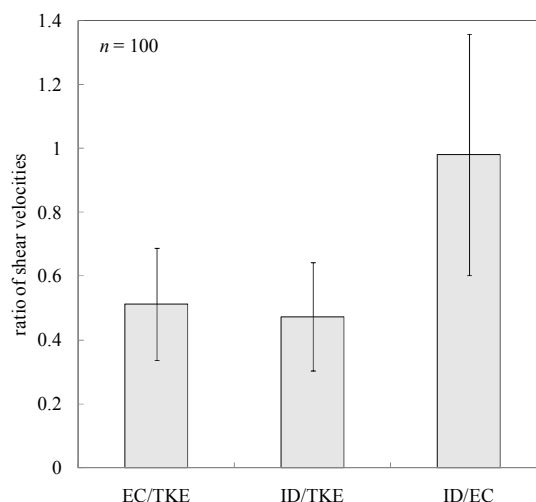


図-5 各手法により計算された摩擦速度の比  
(棒グラフはそれぞれの比の平均値、  
エラーバーは標準偏差を示す)

cm s<sup>-1</sup>の範囲で変化しており、各手法から計算された摩擦速度も基本的には主流方向平均流速の変動に応じた変化を示していた。しかし、平均流速と計算された摩擦速度との関係は、単純な線形関係で表現することはできなかった。

また、図-4においてみられる様に、TKE法による摩擦速度の推算値は他の2手法による推算値よりも明らかに大きな値をとっており、0.37 cm s<sup>-1</sup>から1.05 cm s<sup>-1</sup>の範囲で変動していた。一方、EC法とID法は同程度の値をとり、0.11 cm s<sup>-1</sup>から0.55 cm s<sup>-1</sup>の範囲で変動していた(表-2, 図-5)。これらの値は海岸域で観測された値(0.5 cm s<sup>-1</sup>から1.5 cm s<sup>-1</sup>, Feddersen et al. 2007)と比較すると小さい値であり、大陸棚において観測された値(0.41 cm s<sup>-1</sup>から0.48 cm s<sup>-1</sup>, Grant et al. 1984)と同程度であった。

### 3.2 溶存酸素分布の計算

ADVによる流動観測データ、および微小酸素電極によるDO濃度分布の測定データが共に有効であるデータセットは計16セット得られた。本稿において解析対象となる観測期間中については、直上水中のDO濃度の時間変化は無視できる(0.04 μmol L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>以下の変化速度)と考えられたため、解析対象となる期間中に測定されたDO濃度の平均値を、濃度分布計算の定常的な上側境界条件として与えた。また、測定された堆積物中の酸素浸透厚さは最大で約6 mm、平均的には3.7 ± 1.1 mm (n = 16)であった。そのため、堆積物中z = -10 mmにおいて0 μmol L<sup>-1</sup>を濃度分布計算の定常的な下側

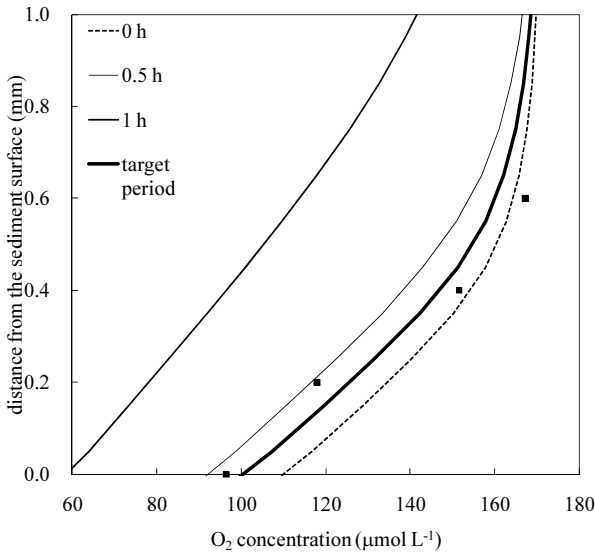
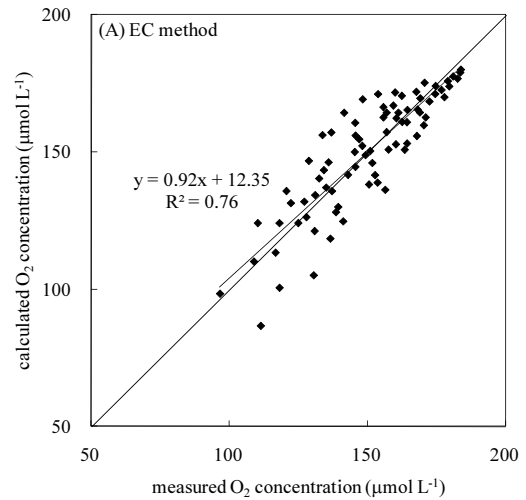


図-6 DO濃度分布の非定常計算結果の例

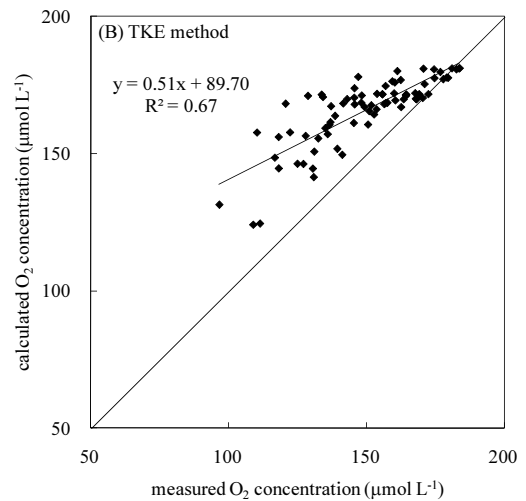
境界条件として与えた。

上記モデルにより計算されたDO濃度の微小鉛直分布は、摩擦速度の変化を反映し時間変動を示す。一例として、図-4に示されるEC法による摩擦速度の推算結果を用いたDO濃度分布の非定常計算結果について図-6に示す。濃度分布の変動は、明らかに摩擦速度が堆積物表面直上の乱流拡散係数の分布と拡散境界層厚さに対する主たる支配要因であることを示している。図-6の計算条件の場合、拡散境界層厚さは摩擦速度が  $0.42 \text{ cm s}^{-1}$  の場合に  $0.5 \text{ mm}$ 、摩擦速度が  $0.17 \text{ cm s}^{-1}$  の場合に  $1.2 \text{ mm}$  となり、これを受けて水・堆積物界面における濃度勾配も変動していた（本稿においては、拡散境界層厚さは水・堆積物界面における濃度勾配と水中バルク領域での濃度から計算することとしている）。本研究結果では、拡散境界層厚さはEC法およびID法による推算結果を用いた場合  $0.4 \text{ mm}$  から  $1.6 \text{ mm}$  の範囲で、TKE法による推算結果を用いた場合  $0.2 \text{ mm}$  から  $0.6 \text{ mm}$  の範囲で変動していた。拡散境界層内のDO濃度の分布は、摩擦速度の変動に対して十分速やかに応答するため（Inoue et al. 2000）、その変動は比較的短時間のうちに動的に変動する。

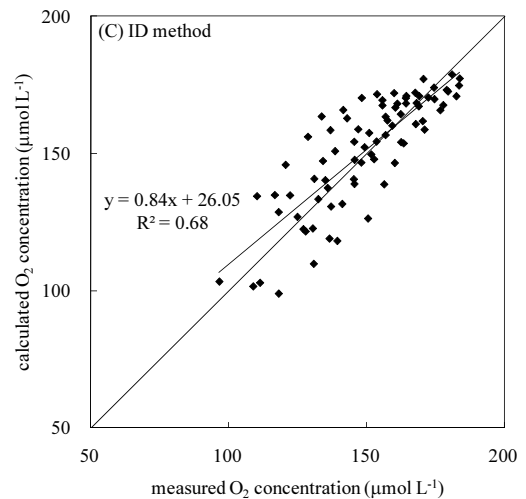
図-7に16の全てのデータセットに対し、拡散境界層内におけるDO濃度の測定値と計算値を比較した結果を示す。TKE法により推算された摩擦速度を用いた計算では、摩擦速度が相対的に大きな値として推算されたため、拡散境界層厚さも小さくなり、結果として他の2手法と比較して相対的に大きなDO濃度の値を示した。一方で、EC法とID法により推算された摩擦速度を用いた計算は、同程度のDO濃度の値を示していた。測



(a) EC法



(b) TKE法



(c) ID法

図-7 測定結果と計算結果との比較

定されたDO濃度に対する計算値の全体としての誤差は、EC法については0.2%、TKE法については9.8%、ID法については0.7%となった。また、測定値と計算値との決定係数は、EC法については $R^2 = 0.76$ 、TKE法については $R^2 = 0.67$ 、ID法については $R^2 = 0.68$ となった。さらに、測定値と計算値との回帰直線の切片は、理想的には0となるべきであるが、実際には3手法全てに対して正の値となった。切片の値は、EC法については12.35、TKE法については89.70、ID法については26.05となった(図-7)。

これら上記の検討項目(測定値と計算値との間の回帰直線の傾きと切片、決定係数、統計解析の結果)を総合して考えると、本研究の観測条件に対してはEC法が最も適した方法であると考えられる。

## 4. 考察

本稿において検討しているEC法、TKE法、ID法の3手法は全て乱流解析の概念に基づく手法であり、これらの3手法に共通する条件として、水平方向の平均流速が対数分布則に従う、つまりconstant stress layer内において観測が行われることが要求される。以下ではそれ以外にも考慮しなければならない条件を踏まえつつ、それぞれの手法の特長について考察を行う。

### 4.1 EC法

理論的な観点からは、乱流フラックスの直接的な測定(EC法)は、他の2手法と比較して少ない条件を満足すれば良い。つまり、EC法においては観測点の底面からの正確な距離の算定、乱れの等方性については要求されない。このため、EC法は摩擦速度算定手法として最も利便性の高い手法の一つであると考えられている(Shaw and Trowbridge 2001; Sherwood et al. 2006)。しかしながらいくつかの研究事例においては、機材の傾きによる誤差の発生や(Stapleton and Huntley 1995; Dyer et al. 2004)、二次流の影響による誤差の発生(Kim et al. 2000; Pope et al. 2006)等により、現場での使用は適さないとの指摘がある。本研究で採用されたADV観測のシステムにおいては、流速データは信頼できるジャイロコンパスによって正確な補正がなされているため、機材の傾きによる誤差の影響は無視できると考えられた。また、全てのデータセットにおいて観測された鉛直方向流速は、水平方向流速の6%以下という小さい値であったので、二次流の存在による誤差の影響についても無視できると判断した。本研究においてEC法

が最も適した手法であるとの結論に達した理由は、Loch Etiveが閉鎖性の比較的穏やかな水域で、EC法の誤差要因が無視できる程度の観測条件であったためであると考えられる。より開放的で強い流動場を持ち二次流が卓越するような水域では、EC法の使用は適さない可能性がある。

### 4.2 TKE法

TKE法は、乱流解析において定式化される、乱流運動エネルギーと摩擦応力との単純な関係を元に摩擦速度を評価する手法である。Kim et al. (2000)によると、EC法やID法と比較して、TKE法は潮汐流が卓越する沿岸域において最も信頼できる手法であるとしている。しかし、流動の加減速が存在するような場では、それらがTKE法における誤差の要因となることが指摘されており(Pope et al. 2006)、流動の加減速については移動平均処理などにより、時系列データからのトレンド除去を行う必要がある。本研究においては5秒から14.5分(本研究における最大連続観測時間)までの間でいくつもの移動平均処理によるトレンド除去を行ったところ、摩擦速度の評価において移動平均処理の違いによる特段の差は見られなかった。このため、流動の加減速は本稿におけるTKE法の誤差要因ではないと判断した。

一方で、摩擦応力が $0.2 \text{ N m}^{-2}$ 以下(摩擦速度に換算すると $1.4 \text{ cm s}^{-1}$ 以下)の摩擦応力が小さい場合には、レイノルズ応力に寄与しない“inactive turbulence”が存在するとの指摘がある(Townsend 1961; Gordon and Dohne 1973; Dyer et al. 2004)。本研究におけるレイノルズ応力と摩擦速度は、全ての観測データにおいて上記の値を下回っていた。よって、本研究においてTKE法による摩擦速度の推算値が他の2手法よりも大きな結果となったのは、この“inactive turbulence”の存在によるものと考えられる。平均的には、EC法による摩擦速度の推算値とTKE法による推算値との差は $0.32 \text{ cm s}^{-1}$ であり、これを摩擦応力に換算すると $0.05 \text{ N m}^{-2}$ に等しい。この値が、本研究におけるLoch Etiveでの観測期間中の平均的な“inactive turbulence”であると考えられる。以上の考察から、TKE法はLoch Etiveのような比較的穏やかで乱れ強度の小さい水域においては、摩擦速度の算定手法として適しないと結論した。

### 4.3 ID法

スペクトルにおいて波動成分と乱流成分との分離は実用上困難であるにもかかわらず(Gross et al. 1994;



Sherwood et al. 2006), 平均流速算定に関する誤差や機材の傾きなどの影響を受けずらいことや (Huntley 1988), 一方向成分のみの乱流計測で良いといった利点のため, ID法は現場での底面境界層における摩擦速度の推定に頻繁に用いられている. これらの原理上, 実用上の利便性から, ID法もまた, Loch Ettiveのように潮汐流が卓越しており表面波の影響が少ない比較的穏やかな海域において最も信頼できる手法の一つであると考えられている (Huntley 1988).

本研究においては, 主流 (水平) 方向の乱流成分を用いたID法による摩擦速度の推定についても試みている. しかしながら, その結果は観測されたDO濃度分布を十分に再現するものではなく, 本観測データに対しては有効でないという結論に至った. これは本研究において観測されたデータが, 主流 (水平) 方向については乱流速度スケールと平均流速との比が比較的大きく (0.24~0.51), 流速スペクトルからの摩擦速度の推定において必要となる凍結乱流の仮定を適用することができなかったためであると考えられる.

主流 (水平) 方向の流速成分から計算された乱流速度スケールは, 一般的に鉛直方向の流速成分から計算された乱流速度スケールよりも大きいことが知られており, 底面境界層内における乱流構造は非等方的であることが指摘されている. 乱流構造の等方性は, 流速時系列の周波数スペクトルから散逸率を抽出するために必要とされる条件である (Gross et al. 1994). しかし, Doron et al. (2001)やNimmo Smith et al. (2005)によると, 乱流構造がかなり非等方的である場合でさえ, スペクトルにおいて-5/3乗則が成り立つ領域が確認され, 散逸率の推定が可能であることが指摘されている. 一方, Lozovatsky et al. (2008)によると, 乱流場が非等方的であるにもかかわらず局所等方性を仮定して鉛直方向の乱流成分から散逸率を推定した場合, 散逸率を若干過小評価する可能性があることが指摘されている. 上述のように, 本研究ではほとんどの観測において非等方的であることが示されたが, 多くの場合明瞭な慣性領域が確認され, ID法による散逸率, 摩擦速度の推算が可能であった. また, 本研究におけるID法による摩擦速度の推算結果は平均的には $0.28 \text{ cm s}^{-1}$ であり, これはEC法による平均値 $0.30 \text{ cm s}^{-1}$ よりもやや小さな値であった. 両者の帰無仮説に対してスチューデントのt検定を行ったところ, P値は0.0434でありこれらの間にはかろうじて有意な差があることが示された. これは, Lozovatsky et al. (2008)による指摘と矛盾しない結果であった.

摩擦速度の推定をID法により行う場合, レイノルズ数は十分に大きい必要があり, 観測高さ (底面からの観測点の距離) はレイノルズ数が3000以上になるように設定する必要がある (例えば, Lee et al. 2003; Ali and Lemckert 2009). しかし, Huntley (1988)やHuntley and Hazen (1988)は, より低レイノルズ数においてもスペクトルにおいて-5/3乗の勾配を持つ慣性領域は確認され, 散逸率の計算が可能であることを指摘している. 本研究においても観測時のレイノルズ数は100のオーダーであったが, 多くの周波数スペクトルにおいて慣性領域が確認され, 散逸率の計算が可能であった.

低レイノルズ数 (つまり観測点が限界高さよりも低い) 条件での観測の場合, ID法による散逸率の推定は, 一般的に過小評価となることが指摘されている. これに対して, Huntley (1988)は修正された慣性散逸法 (Modified Inertial Dissipation method, MID法)による修正を提案している. 限界レイノルズ数を3000と仮定すると, 本研究において議論された観測データは, 全て限界高さ以下で観測された結果となる. しかし, 本研究において推算された摩擦速度の値は拡散境界層 (diffusive boundary layer; 以下, DBLとする) 内のDO濃度の分布を表現するのに十分大きなものであり, MID法による修正の必要はなかった. 観測された乱流時系列からの摩擦速度推算におけるMID法の重要性は広く認識されてはいるものの, その物理的な意味や重要性は必ずしも十分に理解されておらず, 限界レイノルズ数の値についても十分な検討がなされていない (Lee et al. 2003). これらについては, 今後の検討課題であると考えられる.

#### 4.4 各手法間の比較

EC法は, 平均流速の鉛直分布が対数分布となる領域においては, 摩擦応力 (レイノルズ応力) は底面摩擦応力と等しいとの仮定に基づく手法である. つまりEC法の使用にあたっては, constant stress layer内で乱流計測が行われることが要求される. TKE法は乱流エネルギーとレイノルズ応力との間にある比例関係を利用した方法で, その比例定数としては経験的に0.19-0.21が採用される場合が多い. TKE法の使用にあたっては, EC法において要求される条件に加えて, 乱流エネルギーとレイノルズ応力が比例関係にあることが要求される. ID法は乱れの生成とエネルギー散逸が平衡関係にあり, 散逸率-乱れ生成-レイノルズ応力の間に一意的な関連があることを仮定した手法である. ID法の使用にあたっては, スペクトルにおいて乱れの生成と

表-3 各手法間の比較

○印は各条件に適するまたは容易であること、×印は不適または困難、△印はそれらの中間であることを示す

手法	要件	各条件に対する適否または難易度				
		機材の設置	二次流の存在	静穏	強流動・高波浪	非定常性
EC法	constant stress layer内での計測	×	×	○	×	×
TKE法	constant stress layer内での計測 乱流エネルギーとレイノルズ応力とが比例関係にあること	○	△	×	○	×
ID法	constant stress layer内での計測 慣性領域が存在すること	○	○	○	×	△

散逸を明確に区別できることが必要であり、十分な慣性領域が存在することが要求される。いくつかの研究においては、本研究により採用された3手法を含む複数の異なる手法により摩擦速度の推定を行い、それらの長所・短所について議論がなされている（例えば、Williams et al. 2003）。

Sherwood et al. (2006)によると、LP法と比較して、EC法やID法は流速が低い場合に摩擦速度の値を相対的に高く評価し、流速が高くなるにつれて相対的に摩擦が小さくなる傾向があるとされている。Thompson et al. (2003)は環状水槽を用い、8種類の手法により底面摩擦応力を推算し、それぞれの比較を行った。それによると、プラントルの1/7乗則と流速減速法による推算値が最も相関が高く、他の手法は相対的に高い値を導く傾向があった。これら既存の研究では摩擦速度の真値が把握できないため単なる比較にとどまっている事例が多い。しかし本研究では、DO濃度分布を摩擦速度を定量的に評価するための独立したパラメータとして用いており、これとの相対的な比較により各手法の推定精度を定量的に検討することができる。本研究成果、および上述した既存の知見を基にそれぞれの手法の特徴をまとめると、表-3のようになる。

本研究において得られたDO濃度の値の特性から、統計解析手法としてノンパラメトリック検定を行うことが妥当と判断された。そこで本研究結果から、ウィルコクソンの符号付順位和検定を行ったところ、測定されたDBL内のDO濃度とEC法およびID法を用いて計算されたDO濃度との間には有意な差は見られなかった。本検定結果から得られたP値は、EC法による計算結果に対しては0.876、ID法による計算結果に対しては0.443となっていた。また、EC法による計算結果とID法による計算結果との間にも有意な差は見られなかった。これに対して、TKE法による計算結果は、観測値と他の2手法による計算結果に対して、有意に差がある結果となった。またパラメトリック検定としてスチューデントのt検定、およびDO濃度の正規分布を仮定したウェルチ検定も行った結果、これらの検定においてもウィルコクソンの符号付順位和検定と同様の結果が得られた。以上の結果か

ら、ここではEC法とID法は観測値を精度良く再現しているが、TKE法では再現が難しいとの結論に達した。

本研究では、ADVを用いた乱流構造の観測地点と微小酸素電極を用いたDO濃度分布の観測地点とは15~30 m程度離れているが、乱流特性は両地点間で同様であるとして解析を行っている。本研究の観測地点周辺での流れ場は一般的に潮汐流により支配されており、底面地形もそれぞれの観測地点間で同様であった。これらの空間スケールは典型的には1 km以上のオーダーであると考えられるため、それぞれの観測地点間で乱流特性が同様であるとの仮定は有効であると考えている。さらに、水中カメラによる目視観察においても、それぞれの地点間では底面の状態に差異は無いことを確認している。

もう一つの注意しなければいけない点は、設置した機材そのものがそれぞれの観測地点での乱流構造を乱す可能性である。このような設置機材そのものによる攪乱の影響を完全に取り除くことは非常に難しい。しかし、今回のADVを用いた流動観測では、流向と乱流特性との間に明瞭な関係は認められなかった。このため、ADVや微小酸素電極を設置した三脚等からの影響は小さかったと判断している。微小酸素電極に対しては、このような機材による影響を見積もることはより困難である。

一方、流動条件が詳細に測定された室内実験では、微小酸素電極の存在により、DBL厚さが25~45%減少し、そこでのDO濃度を過大評価してしまう可能性が指摘されている（Glud et al. 1994）。この知見はいくつかの条件において確認されているが、局所的な測定条件によりこの効果が隠れてしまうこともある（Lorenzen et al. 1995）。さらに現場での観測条件に対して、これらの影響を評価することは困難である。しかし、ここで微小酸素電極の存在によりDBL厚さが単純に30%減少すると仮定し、微小酸素電極の影響を考慮してDO濃度分布を再計算し、得られた結果について測定結果との比較を行った。その結果、測定結果との誤差は、EC法の場合1.9%、TKE法の場合9.1%、ID法の場合2.6%にそれぞれ誤差が変化した。また、それぞれの決定係数は、EC法

の場合で $R^2=0.66$ と最も高く、続いてID法の場合の $R^2=0.53$ 、最も低い値となったのはTKE法の場合で $R^2=0.47$ であった。この考察から、微小酸素電極の存在による測定結果への影響は、本研究における結論を定性的には変えることは無いことが確認された。

## 5. 結論

底面境界層内における物理的特性を特徴付けるパラメータとして、摩擦速度は最も重要なものの一つであると考えられ、結果として堆積物における生物地球化学的過程や生態系に対して非常に重大な影響を与えている。対数則を用いた摩擦速度の推定手法とは異なり、一点での測定結果から摩擦速度を精度良く推定することができる手法について定量的に検討した点が、本研究成果の研究遂行上の実用的な進歩である。

本研究では、現場観測において摩擦速度推定法として広く用いられている3手法について、拡散境界層内において測定されたDO濃度の分布を摩擦速度を評価する独立したパラメータとして利用し、それぞれを定量的に比較・検討した。測定結果および解析結果から、Loch EtiveにおいてはEC法とID法が摩擦速度推定に適した手法であり、この海域においてはTKE法は避けるべきであることが示された。本研究成果は潮汐流が卓越し、表面波の影響が少ない水域にのみ有効な結論であると考えられる。一般的に、堆積物による酸素消費、それに伴う底層の貧酸素化が問題となる水域は、このような表面波の影響が少なく堆積傾向にある水域であるため、本稿で示された結果は特に底層の貧酸素化を議論する上で有用な知見であると考えられる。一方で、本研究における結論は閉鎖的であり比較的低い流れを持つ穏やかな水域において適用されるものであり、多様な水域で適用されるものではないことに注意が必要である。より強い流れを持つ水域に対する評価については更なる検討が必要である。

(2010年4月26日受付)

## 謝辞

本研究は、「独立行政法人港湾空港技術研究所長期在外研究」制度による、平成21年5月から平成22年3月にかけてのScottish Association for Marine Scienceにおける滞在期間中に行った成果である。ここに記して謝意を示す。

## 参考文献

Ali, A., and C. J. Lemckert. 2009. A traversing system to measure

- bottom boundary layer hydraulic properties. *Estuar., Coast. Shelf Sci.* 83: 425-433.
- Berg, P., R. N. Glud, A. Hume, H. Stahl, K. Oguri, V. Meyer, and H. Kitazato. 2009. Eddy correlation measurements of oxygen uptake in deep ocean sediments. *Limnol. Oceanogr.: Methods* 7: 576-584.
- Berg, P., N. Risgaard-Petersen, and S. Rysgaard. 1998. Interpretation of measured concentration profiles in sediment pore water. *Limnol. Oceanogr.* 43: 1500-1510.
- 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.* 261: 75-83.
- Boudreau, B. P. 2001. Solute transport above the sediment-water interface, p. 104-126. In B. P. Boudreau and B. B. Jørgensen [eds.], *The Benthic Boundary Layer: Transport Processes and Biogeochemistry*. Oxford University Press.
- Doron, P., L. Bertuccioli, J. Katz, and T. R. Osborn. 2001. Turbulence characteristics and dissipation estimates in the coastal ocean bottom boundary layer from PIV data. *J. Phys. Oceanogr.* 31: 2108-2134.
- 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.* 59: 237-248.
- Edwards, A., and D. J. Edelsten. 1977. Deep water renewal of Loch Etive: A three basin Scottish fjord. *Estuar., Coast. Mar. Sci.* 5: 575-595.
- Feddersen, F., J. H. Trowbridge, and A. J. Williams III. 2007. Vertical structure of dissipation in the nearshore. *J. Phys. Oceanogr.* 37: 1764-1777.
- Glud, R. N., J. K. Gundersen, N. P. Revsbech, and B. B. Jørgensen. 1994. Effects on the benthic diffusive boundary layer imposed by microelectrodes. *Limnol. Oceanogr.* 39: 462-467.
- Glud, R. N., P. Berg, H. Fossing, and B. B. Jørgensen. 2007. Effect of the diffusive boundary layer on benthic mineralization and  $O_2$  distribution: A theoretical model analysis. *Limnol. Oceanogr.* 52: 547-557.
- Glud, R. N., H. Stahl, P. Berg, F. Wenzhöfer, K. Oguri, and H. Kitazato. 2009. In situ microscale variation in distribution and consumption of  $O_2$ : A case study from a deep ocean margin sediment (Sagami Bay, Japan). *Limnol. Oceanogr.* 54: 1-12.
- Gordon, C. M., and C. F. Dohne. 1973. Some observations of

- turbulent flow in a tidal estuary. *J. Geophys. Res.* 78: 1971-1978.
- Graham, D. I., P. W. James, T. E. R. Jones, J. M. Davies, and E. A. Delo. 1992. Measurement and Prediction of Surface Shear Stress in Annular Flume. *J. Hydraul. Eng.* 118: 1270-1286.
- Grant, W. D., A. J. Williams, and S. M. Glenn. 1984. Bottom stress estimates and their prediction on the northern California continental shelf during CODE-1: The importance of wave-current interaction. *J. Phys. Oceanogr.* 14: 506-527.
- Green, M. O. 1992. Spectral estimates of bed shear stress at subcritical Reynolds numbers in a tidal boundary layer. *J. Phys. Oceanogr.* 22: 903-917.
- Gross, T. F., A. E. Isley, and C. R. Sherwood. 1992. Estimation of stress and bed roughness during storms on the Northern California Shelf. *Cont. Shelf Res.* 12: 389-413.
- Gross, T. F., A. J. Williams, and E. A. Terray. 1994. Bottom boundary layer spectral dissipation estimates in the presence of wave motions. *Cont. Shelf Res.* 14: 1239-1256.
- Gundersen, J. K., and B. B. Jørgensen. 1990. Microstructure of diffusive boundary layers and the oxygen uptake of the sea floor. *Nature* 345: 604-607.
- Gundersen, J. K., N. B. Ramsing, and R. N. Glud. 1998. Predicting the signal of O<sub>2</sub> microsensors from physical dimensions, temperature, salinity, and O<sub>2</sub> concentration. *Limnol. Oceanogr.* 43: 1932-1937.
- Gust, G. 1988. Skin friction probes for field applications. *J. Geophys. Res.* 93: 14121-14132.
- Gust, G., and G. L. Weatherly. 1985. Velocities, turbulence, and skin friction in a deep-sea logarithmic layer. *J. Geophys. Res.* 90: 4779-4792.
- Huntley, D. A. 1988. A modified inertial dissipation method for estimating seabed stresses at low Reynolds numbers, with application to wave/current boundary layer measurements. *J. Phys. Oceanogr.* 18: 339-346.
- Huntley, D. A., and D. G. Hazen. 1988. Seabed stresses in combined wave and steady flow conditions on the Nova Scotia Continental Shelf: Field measurements and predictions. *J. Phys. Oceanogr.* 18: 347-362.
- Huthnance, J. M., J. D. Humphery, P. J. Knight, P. G. Chatwin, L. Thomsen, and M. White. 2002. Near-bed turbulence measurements, stress estimates and sediment mobility at the continental shelf edge. *Prog. Oceanogr.* 52: 171-194.
- Inoue, T., and Y. Nakamura. 2009. Effects of hydrodynamic conditions on sediment oxygen demand: Experimental study based on three methods. *J. Environ. Eng.* 135: 1161-1170.
- Inoue, T., Y. Nakamura, and Y. Adachi. 2000. Non-steady variations of SOD and phosphate release rate due to changes in the quality of the overlying water. *Wat. Sci. Tech.* 42: 265-272.
- Inoue, T., Y. Nakamura, and M. Sayama. 2008. A new method for measuring flow structure in the benthic boundary layer using an acoustic Doppler velocimeter. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 25: 822-830.
- Kim, S. C., C. T. Friedrichs, J. P. Y. Maa, and L. D. Wright. 2000. Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic Doppler velocimeter data. *J. Hydraul. Eng.* 126: 399-406.
- 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 eddy-correlation method. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 307: 59-68.
- Lee, G. H., W. B. Dade, C. T. Friedrichs, and C. E. Vincent. 2003. Spectral estimates of bed shear stress using suspended-sediment concentrations in a wave-current boundary layer. *J. Geophys. Res.* 108: 3208.
- Long, C. E., P. L. Wiberg, and A. R. M. Nowell. 1993. Evaluation of von Karman's Constant from Integral Flow Parameters. *J. Hydraul. Eng.* 119: 1182-1190.
- Lorenzen, J., R. N. Glud, and N. P. Revsbech. 1995. Impact of microsensor-caused changes in diffusive boundary layer thickness on O<sub>2</sub> profiles and photosynthetic rates in benthic communities of microorganisms. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 119: 237-242.
- Lorke, A., B. Müller, M. Maerki, and A. Wüest. 2003. Breathing sediments: The control of diffusive transport across the sediment-water interface by periodic boundary-layer turbulence. *Limnol. Oceanogr.* 48: 2077-2085.
- Lozovatsky, I., Z. Liu, H. Wei, and H. J. S. Fernando. 2008. Tides and mixing in the northwestern East China Sea, Part II: Near-bottom turbulence. *Cont. Shelf Res.* 28: 338-350.
- Nikora, V. I., and D. G. Goring. 1998. ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation? *J. Hydraul. Eng.* 124: 630-634.
- Nimmo Smith, W. A. M., J. Katz, and T. R. Osborn. 2005. On the structure of turbulence in the bottom boundary layer of the coastal ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 35: 72-93.
- Pope, N. D., J. Widdows, and M. D. Brinsley. 2006. Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach - A comparison of annular flume and field data.

- Cont. Shelf Res. 26: 959-970.
- Rankin, K. L., and R. I. Hires. 2000. Laboratory measurement of bottom shear stress on a movable bed. *J. Geophys. Res.* 105: 17011-17019.
- Reidenbach, M. A., S. G. Monismith, J. R. Koseff, G. Yahel, and A. Genin. 2006. Boundary layer turbulence and flow structure over a fringing coral reef. *Limnol. Oceanogr.* 51: 1956-1968.
- Revsbech, N. P. 1989. An oxygen microsensor with a guard cathode. *Limnol. Oceanogr.* 34: 474-478.
- Røy, H., M. Huettel, and B. B. Jørgensen. 2004. Transmission of oxygen concentration fluctuations through the diffusive boundary layer overlying aquatic sediments. *Limnol. Oceanogr.* 49: 686-692.
- Shaw, W. J., and J. H. Trowbridge. 2001. The direct estimation of near-bottom turbulent fluxes in the presence of energetic wave motions. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 18: 1540-1557.
- Sherwood, C. R., J. R. Lacy, and G. Voulgaris. 2006. Shear velocity estimates on the inner shelf off Grays Harbor, Washington, USA. *Cont. Shelf Res.* 26: 1995-2018.
- Stapleton, K. R., and D. A. Huntley. 1995. Seabed stress determinations using the inertial dissipation method and the turbulent kinetic energy method. *Earth Surf. Process. Landforms* 20: 807-815.
- Tengberg, A., J. Hovdenes, H. J. Andersson, O. Brocandel, R. Diaz, D. Hebert, T. Arnerich, C. Huber, A. Körtzinger, A. Khripounoff, F. Rey, C. Rønning, J. Schimanski, S. Sommer, and A. Stangelmayer. 2006. Evaluation of a lifetime-based optode to measure oxygen in aquatic systems. *Limnol. Oceanogr.: Methods* 4: 7-17.
- Thompson, C. E. L., C. L. Amos, T. E. R. Jones, and J. Chaplin. 2003. The manifestation of fluid-transmitted bed shear stress in a smooth annular flumed comparison of methods. *J. Coast. Res.* 19: 1094-1103.
- Townsend, A. A. 1961. Equilibrium layers and wall turbulence. *J. Fluid Mech.* 11: 97-120.
- Ullman, W. J., and R. C. Aller. 1982. Diffusion coefficients in nearshore marine sediments. *Limnol. Oceanogr.* 27: 552-556.
- Wilcock, P. R. 1996. Estimating local bed shear stress from velocity observations. *Wat. Resour. Res.* 32: 3361-3366.
- Williams, J. J., P. S. Bell, and P. D. Thorne. 2003. Field measurements of flow fields and sediment transport above mobile bed forms. *J. Geophys. Res.* 108: 3109.

付録

付録A 計算された摩擦速度の時系列

本研究において、本文中で検討された16回のそれぞれの測定に対して計算された摩擦速度の時系列を、以下に示す。

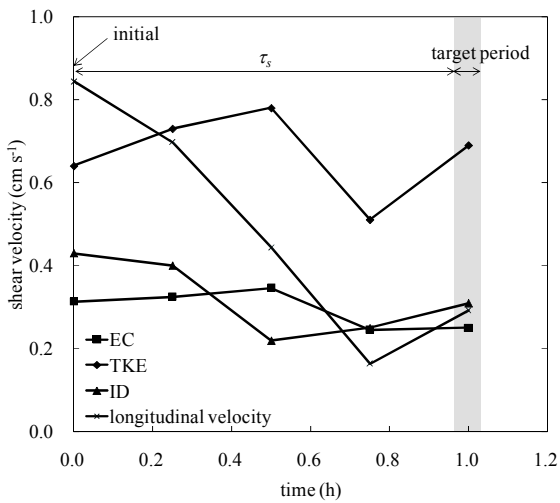


図-A.1 profile1における摩擦速度の計算結果

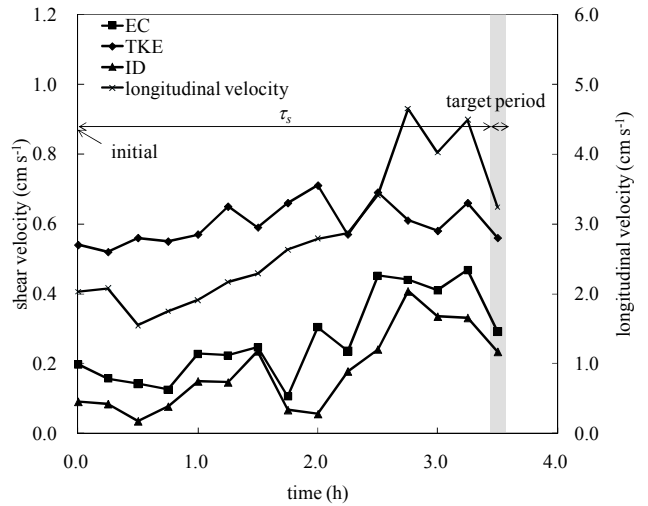


図-A.3 profile3における摩擦速度の計算結果

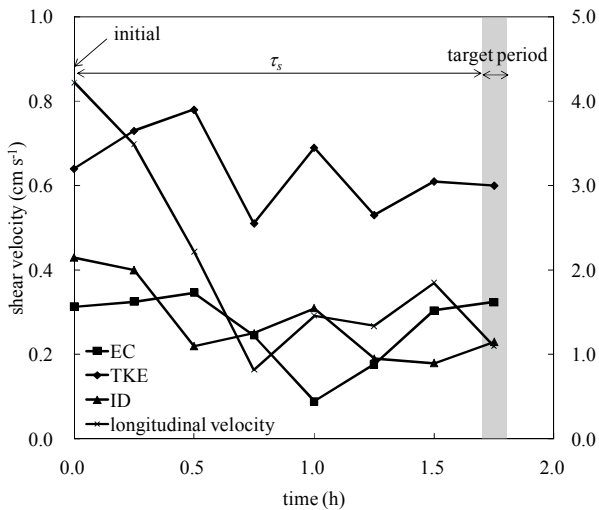


図-A.2 profile2における摩擦速度の計算結果

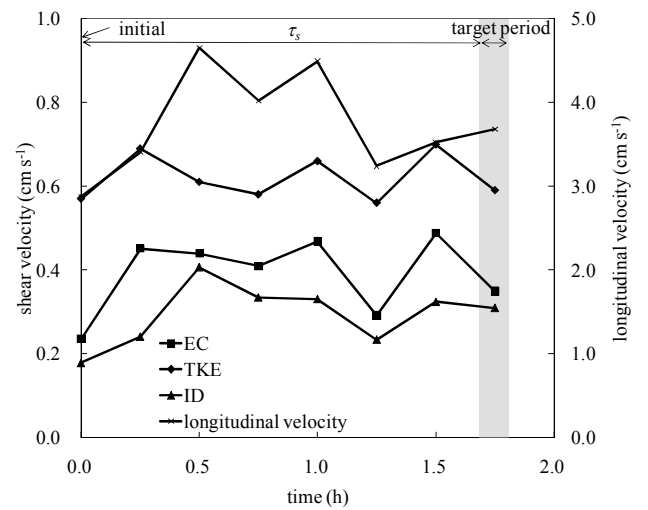


図-A.4 profile4における摩擦速度の計算結果

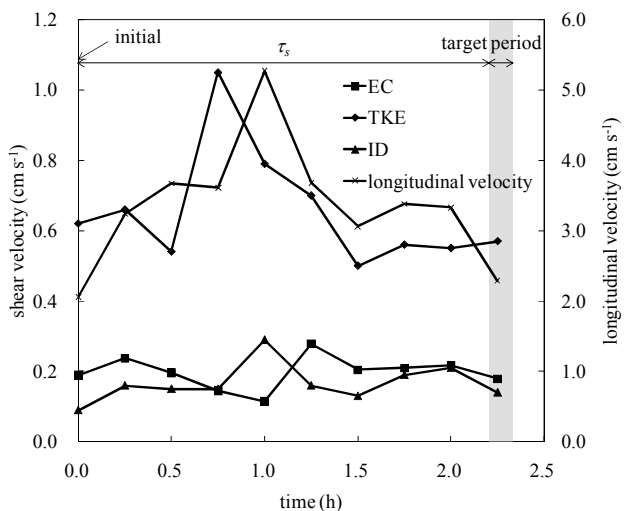


図-A.5 profile5における摩擦速度の計算結果

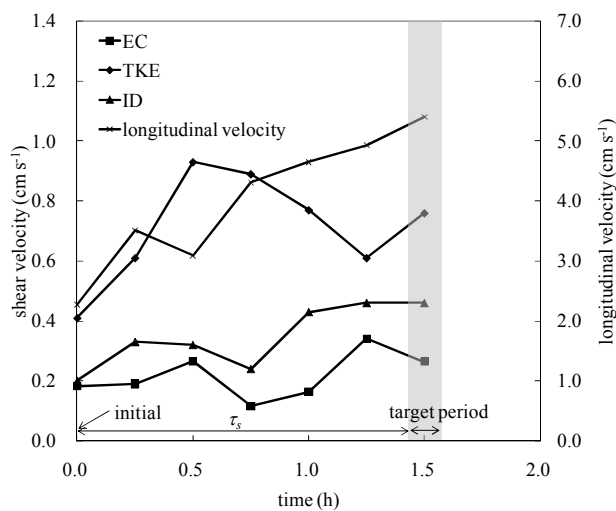


図-A.8 profile8における摩擦速度の計算結果

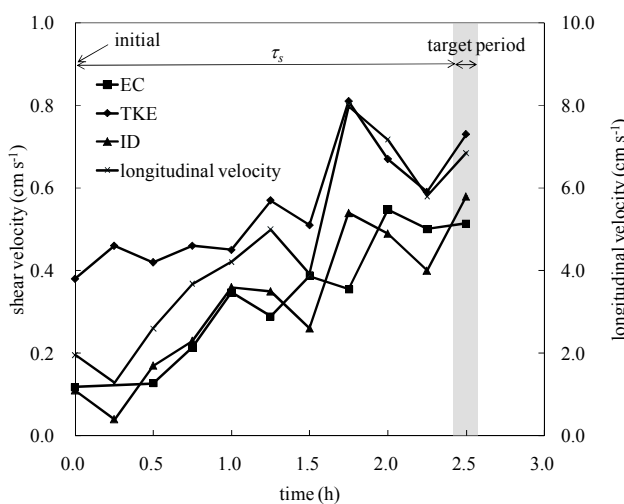


図-A.6 profile6における摩擦速度の計算結果

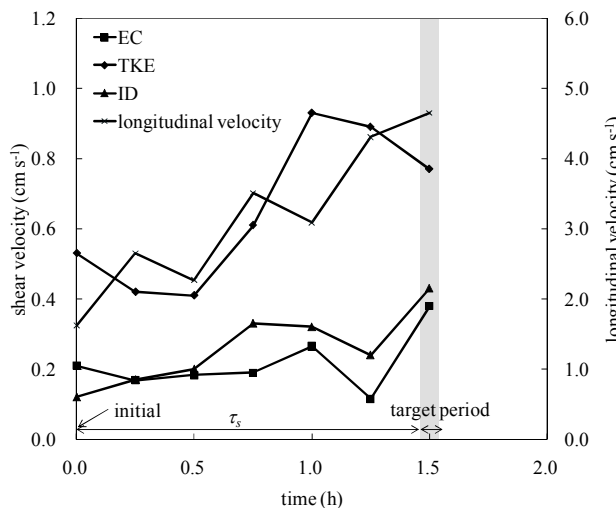


図-A.9 profile9における摩擦速度の計算結果

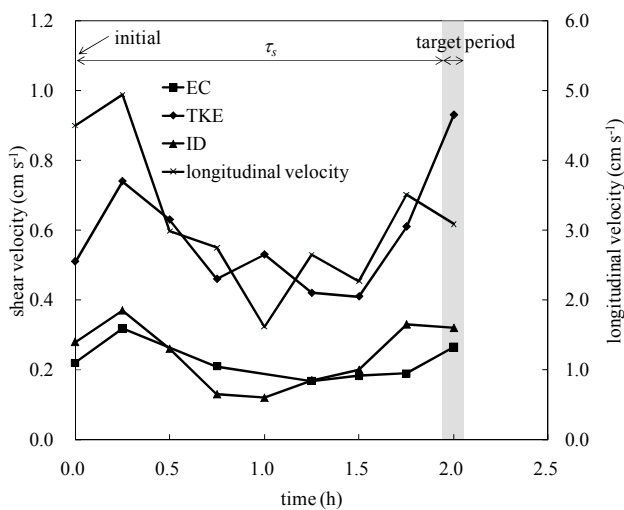


図-A.7 profile7における摩擦速度の計算結果

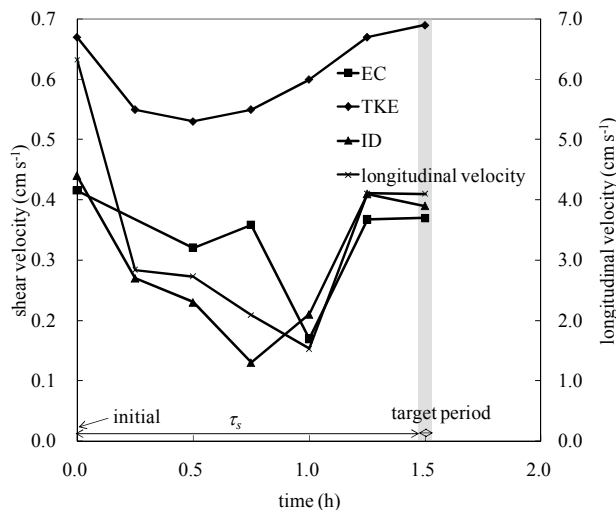


図-A.10 profile10における摩擦速度の計算結果

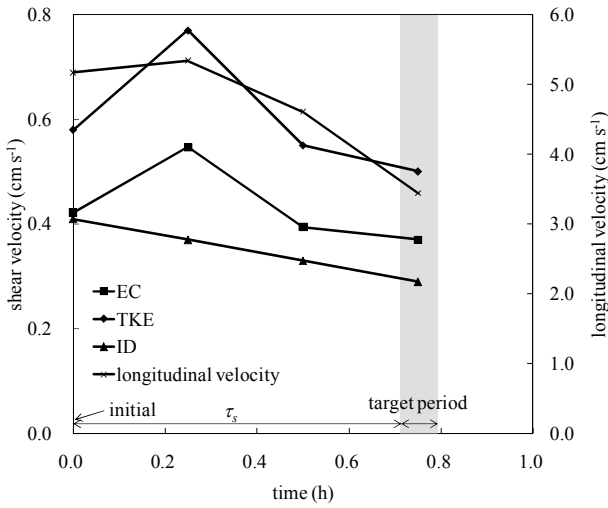


図-A.11 profile11における摩擦速度の計算結果

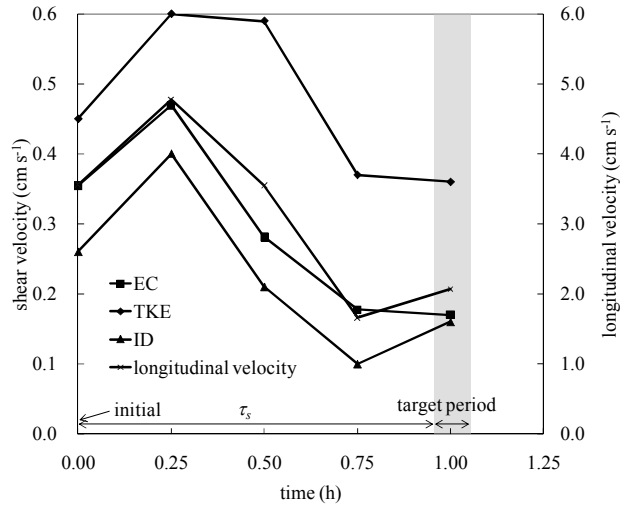


図-A.14 profile14における摩擦速度の計算結果

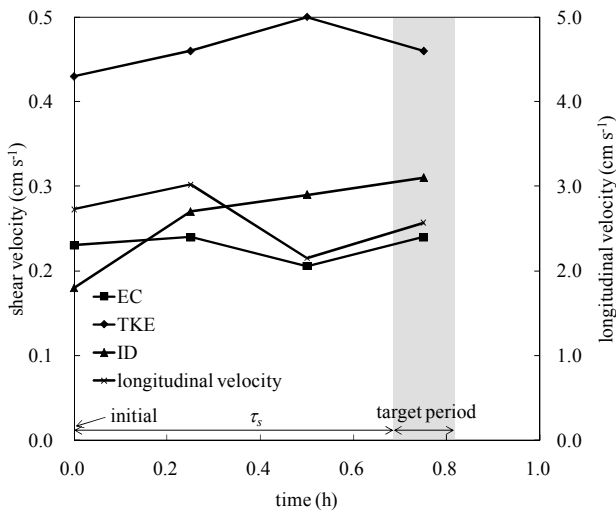


図-A.12 profile12における摩擦速度の計算結果

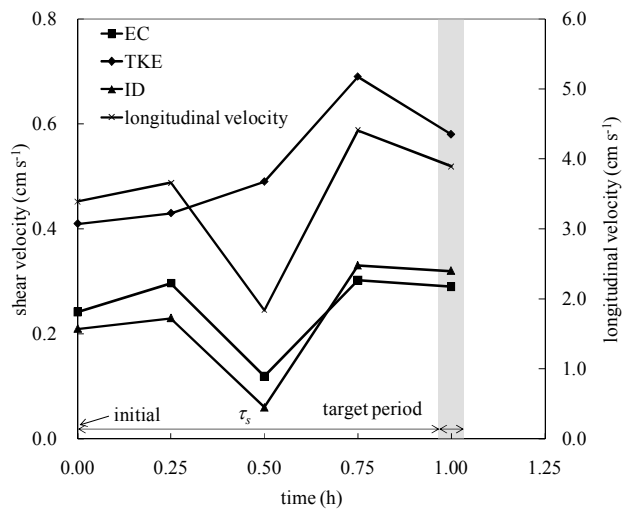


図-A.15 profile15における摩擦速度の計算結果

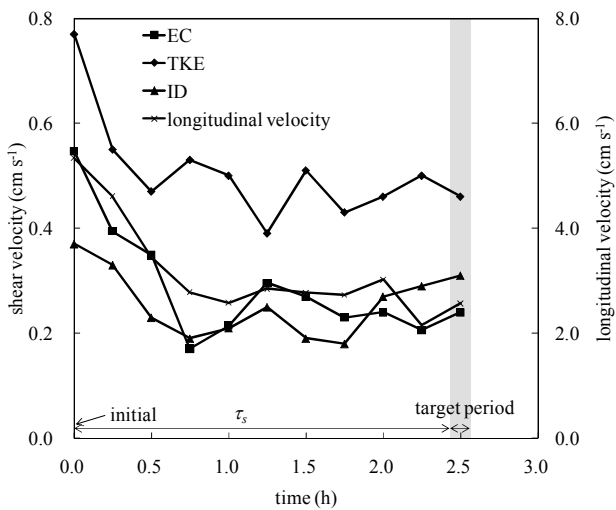


図-A.13 profile13における摩擦速度の計算結果

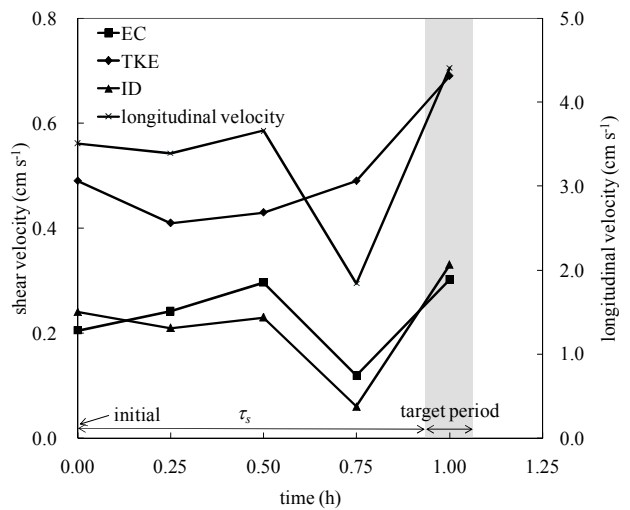


図-A.16 profile16における摩擦速度の計算結果



付録 B 非定常計算における D0 濃度分布

本研究において、本文中で検討された16回のそれぞれの測定に対して上記EC法で得られた摩擦速度の時系列を用いて計算された、D0濃度分布の非定常計算の結果を、以下に示す。

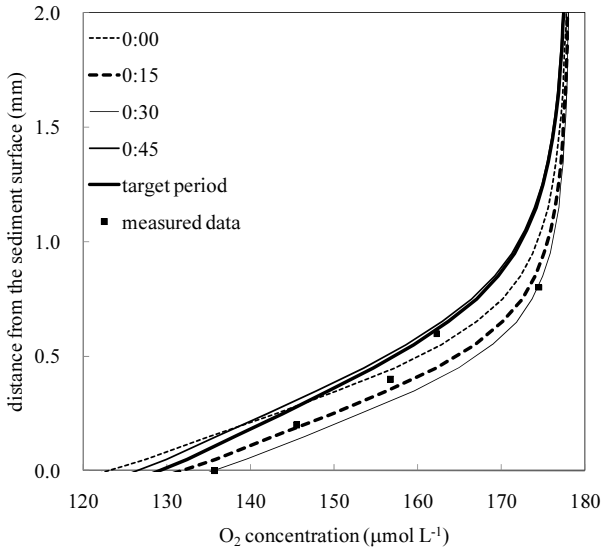


図-B.1 profile1におけるD0濃度の計算結果

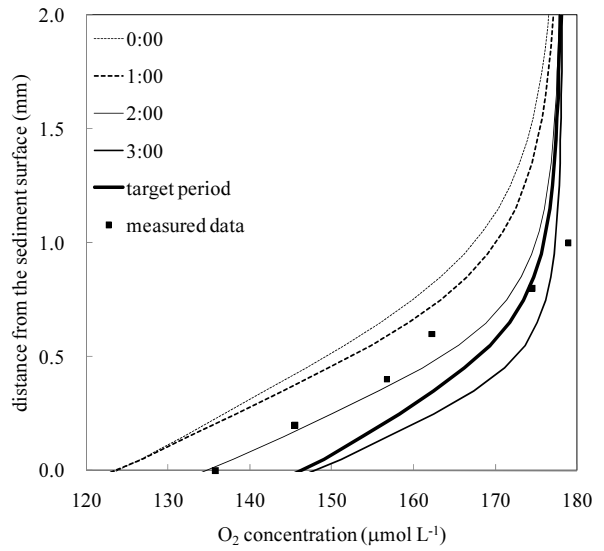


図-B.3 profile3におけるD0濃度の計算結果

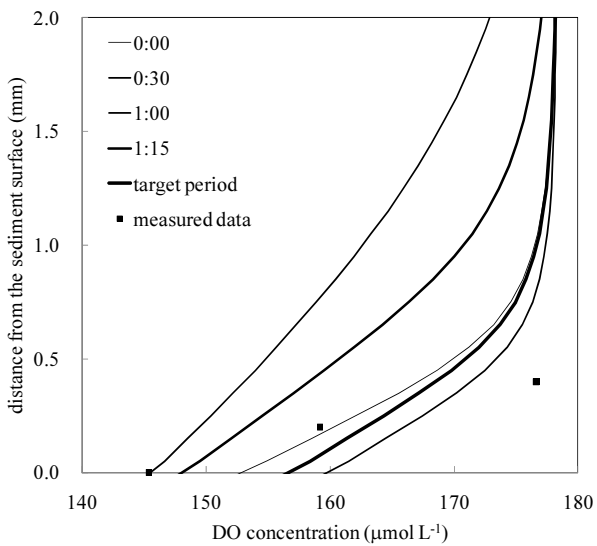


図-B.2 profile2におけるD0濃度の計算結果

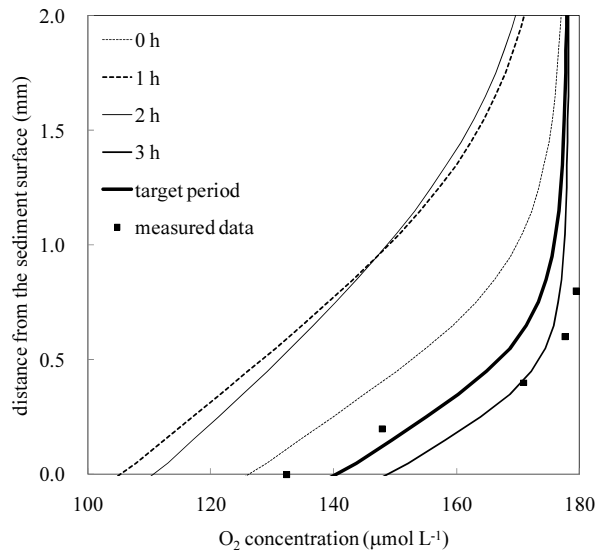


図-B.4 profile4におけるD0濃度の計算結果

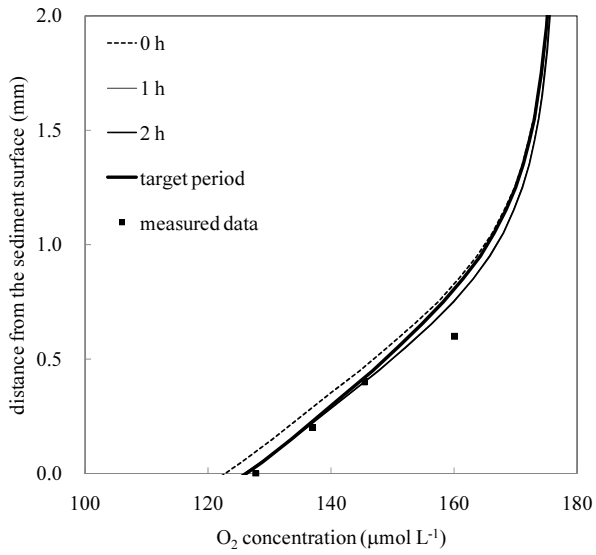


図-B.5 profile5におけるDO濃度の計算結果

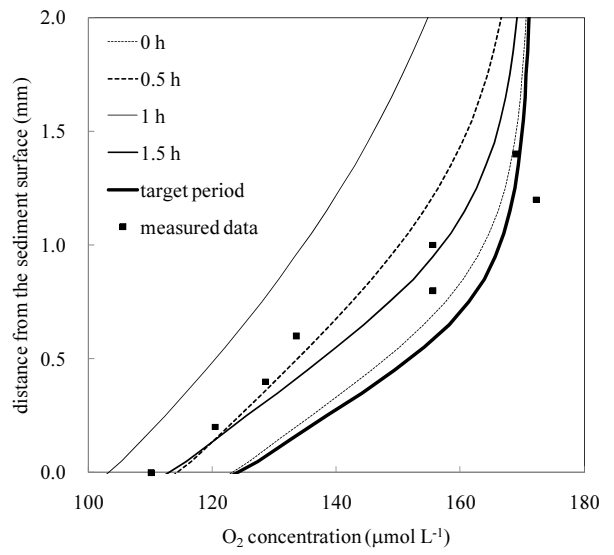


図-B.7 profile7におけるDO濃度の計算結果

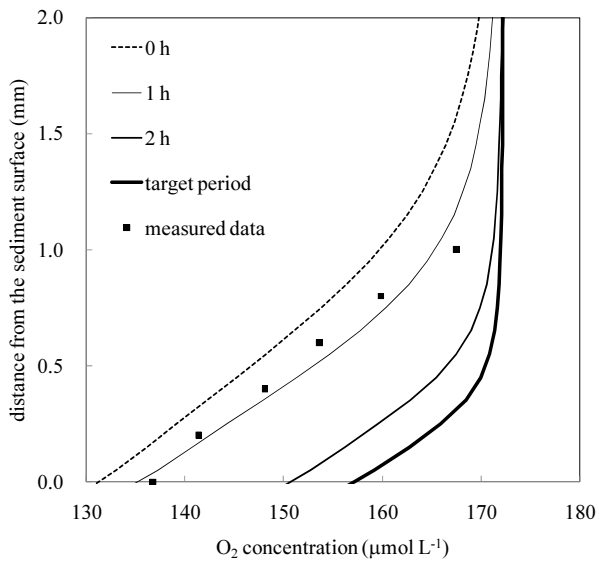


図-B.6 profile6におけるDO濃度の計算結果

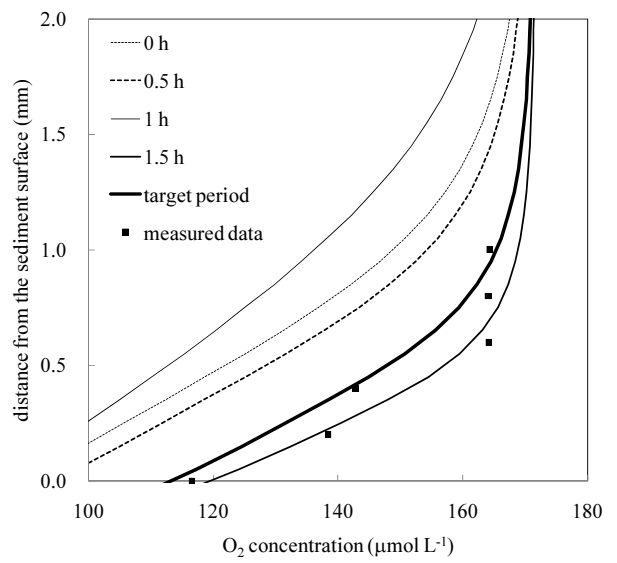


図-B.8 profile8におけるDO濃度の計算結果

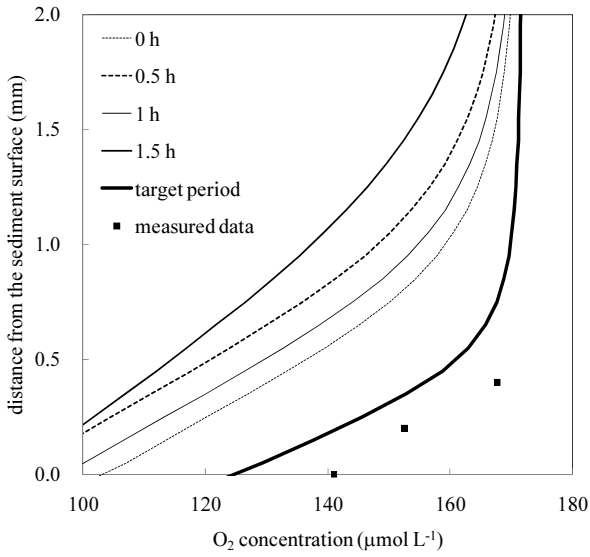


図-B.9 profile9におけるDO濃度の計算結果

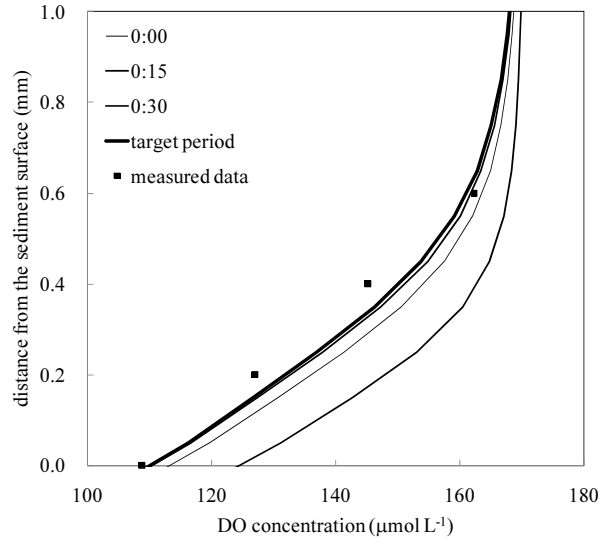


図-B.11 profile11におけるDO濃度の計算結果

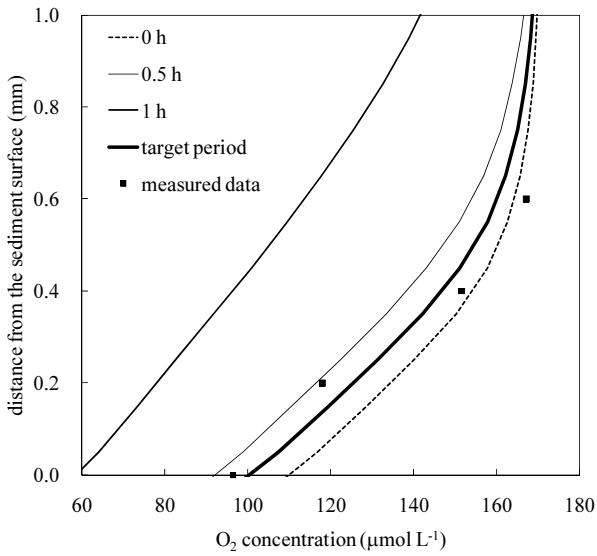


図-B.10 profile10におけるDO濃度の計算結果

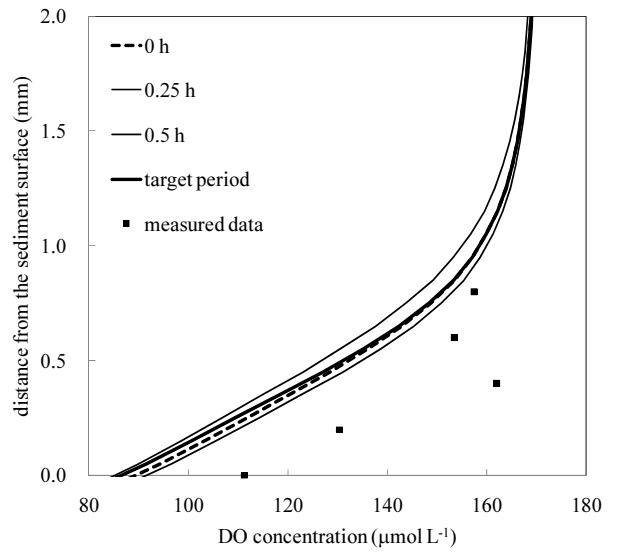


図-B.12 profile12におけるDO濃度の計算結果

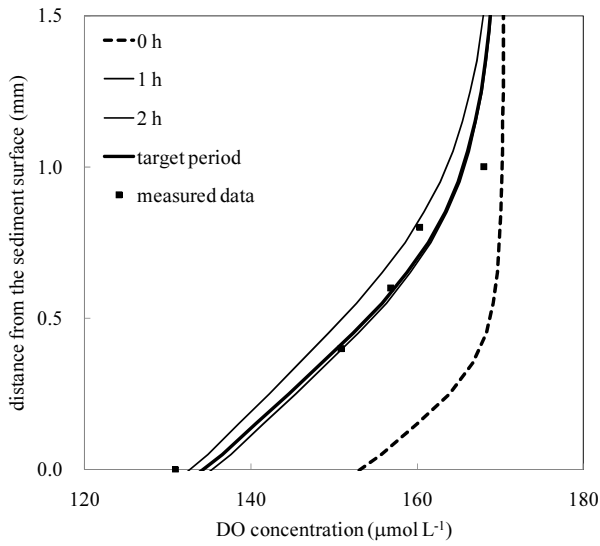


図-B.13 profile13におけるDO濃度の計算結果

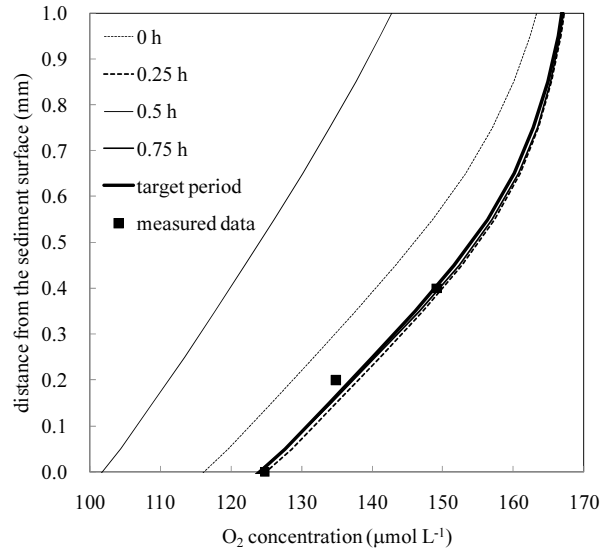


図-B.15 profile15におけるDO濃度の計算結果

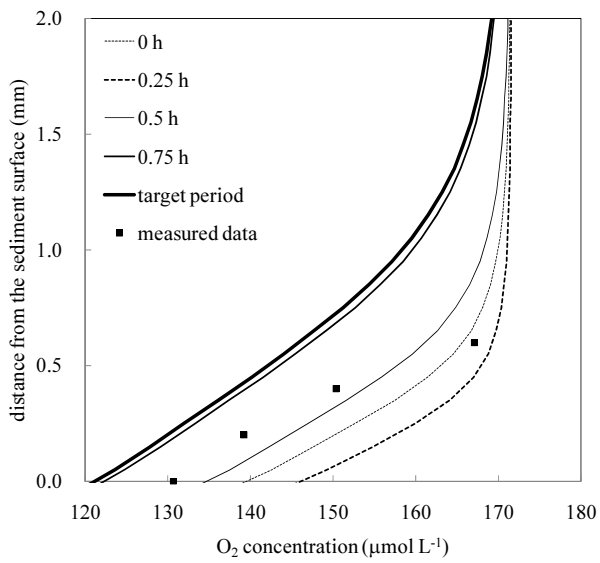


図-B.14 profile14におけるDO濃度の計算結果

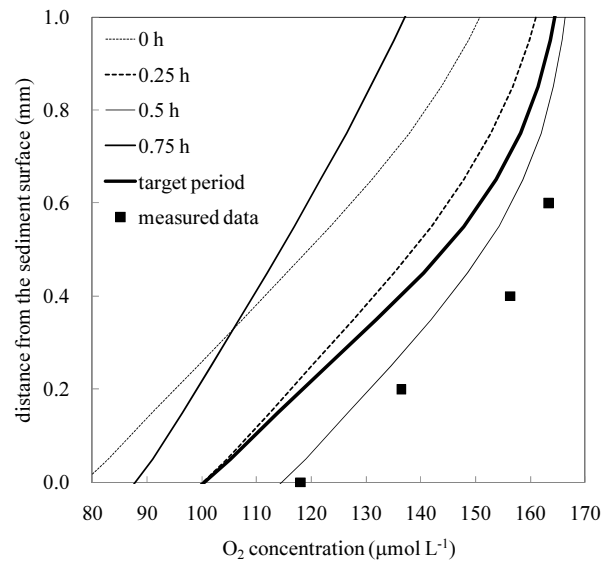


図-B.16 profile16におけるDO濃度の計算結果

付録 C ダムケラー数

Boudreau (2001)によると、定常条件下における反応項 (DO 消費項) を含む無次元化された拡散方程式は式(C.1)により表される。

$$\frac{d}{dZ} \left\{ \Delta(z) \frac{dC_o}{dZ} \right\} - \frac{r\delta^2}{D_{zt \max}} C_o = 0 \quad (C.1)$$

$$Z = \frac{z}{\delta} \quad (C.2)$$

$$\Delta(z) = \frac{D_{zm} + D_{zt}(z)}{D_{zt \max}} \quad (C.3)$$

ここで、 $C_o$ はDO濃度、 $r$ は水中におけるDO消費に関する反応速度係数、 $D_{zm}$ は境界層内における乱流拡散係数の最大値を表す。

式(C.1)の左辺第二項の無次元反応速度係数がダムケラー数 (Damkohler number,  $Da$ ) であり、次式により定義される。

$$Da = \frac{r\delta^2}{D_{zt \max}} \quad (C.4)$$

ダムケラー数が十分に小さいとき (0.1以下のとき) は、拡散に比べて反応項は小さく、DO消費は無視できる。これに対し、ダムケラー数が大きいとき (10以上のとき) は、拡散に比べて反応項は大きく、DO消費が主たる支配過程となる。

・ DO浸透層

堆積物表層における、DOが存在する層。

・ 酸化層

堆積物表層における、酸化還元電位 (試料中の酸化還元状態の程度を示す指標で、酸化性物質と還元性物質との平衡によって生じる基準となる電位の差) が正の領域。

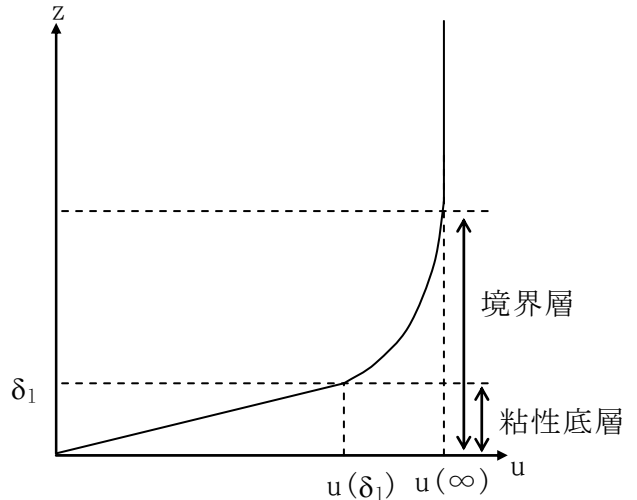


図-D.1 境界層および粘性底層の模式図

付録 D 用語解説

・ バルク領域

流速や溶存物質濃度において、界面付近の変化が著しい領域を除く、水塊の主要部分を指す。

・ 境界層

界面付近において、平均的な流速場に対してより小さな流速を持つ、流速勾配が顕著である領域。平均流速の99%以下の流速値を持つ領域を境界層と定義することが多い (図-D.1参照)。

・ 粘性底層

壁面の近傍における、流れがほぼ層流状態を保つ領域 (図-D.1参照)。

・ 拡散境界層

界面付近において、平均的な濃度場に対してより小さな濃度を持つ、濃度勾配が顕著である領域 (図-D.2参照)。

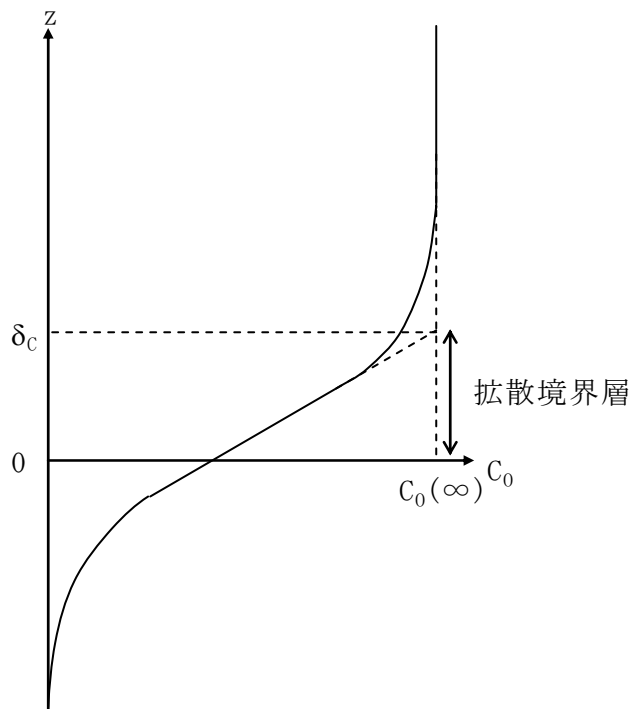


図-D.2 拡散境界層の模式図

## 付録 E 記号表

$C(z)$	; 溶質濃度
$C_f$	; 底面抵抗係数
$C_O(z=0)$	; 水・堆積物界面におけるDO濃度
$C_O(z=\infty)$	; バルク領域におけるDO濃度
$D_s$	; 堆積物中での見かけの拡散係数
$D_{zm}$	; 鉛直方向の分子拡散係数
$D_{zmax}$	; 境界層内における乱流拡散係数の最大値
$D_{zt}(z)$	; 乱流拡散係数
$R$	; 単位体積当たりの堆積物によるDO消費速度
$Sc$	; シュミット数
$Sc_t$	; 乱流シュミット数
$SOD$	; 水・堆積物界面におけるDOの拡散フラックス
$t$	; 時間
$u_*$	; 摩擦速度
$\bar{u}$	; バルク領域における主流方向の平均流速
$z$	; 鉛直方向の位置 (水・堆積物界面を0, 上向きを正とする)
$\delta$	; 境界層厚さ
$\delta_d$	; 拡散境界層厚さ
$\delta_s$	; 堆積物表層の酸化層厚さ
$\Delta C$	; semi-stagnant film内の溶質濃度とバルク領域の溶質濃度との差
$\kappa$	; カルマン定数
$\nu$	; 動粘性係数
$\nu_t(z)$	; 渦動粘性係数
$\phi$	; 間隙率

港湾空港技術研究所報告 第49巻第3号

2010.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大 應

Copyright © (2010) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

## CONTENTS

Assessment of shear velocity determinations referring DO microprofiles - Simultaneous field observation of turbulence and DO in the benthic boundary layer - ..... Tetsunori INOUE, Ronnie N. GLUD, Henrik STAHL, Andrew HUME .....	3
Seed dispersal supporting areal expansion of meadow in the seagrass, <i>Zostera marina</i> L. ..... Shinya HOSOKAWA, Masahiro NAKAOKA, Eiichi MIYOSHI, Tomohiro KUWAE .....	31
Block Removal Using Holding Device with a Chain Net and its Modeling ..... Hitoshi NOGUCHI .....	51
Study on Liquefaction Prediction Method Considering Wave Forms of Seismic Motions ..... Hiroyuki YAMAZAKI, Shouichi EMOTO .....	79
Rupture Process of Recent Crustal Earthquakes in Japan Estimated by Waveform Inversion ..... Atsushi NOZU .....	111
Evaluation of intertidal flat stratigraphy by MASW technology —Interpretation of shear wave velocity structure and safety assessment of artificial intertidal flats— ..... Yoichi WATABE, Shinji SASSA, Tomohiro KUWAE, SoonBo YANG, Masanori TANAKA .....	157