

底面での微小酸素濃度分布を参照した摩擦速度の推定

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 井上徹教

1. はじめに

摩擦速度は底面近傍での乱流構造を特徴づける、底面境界層において最も重要なパラメーターの一つである。本研究では比較的静穏な海底での流速測定結果を元に、渦相関法 (EC 法)・乱流エネルギー法 (TKE 法)・慣性散逸法 (ID 法) により摩擦速度を推定した。また底面近傍での酸素濃度分布を独立した摩擦速度評価手段と捉え、これらの比較から最適な摩擦速度推定手法を検討した。

2. 方法

(1) 現場観測

観測はスコットランド西部に位置する Loch Etive において行われた。観測対象となった水域の底質はほぼ均質なシルト粒子で構成され、水深は 54~72 m でありほぼ平坦な地形であった。

流動観測は、高さ 0.9 m、幅 1.3 m の三脚の中心にプローブ部が下方になる状態で設置した ADV (Nortek AS 社製、ノルウェー) により行った (写真-1)。ADV は流速測定部が海底上 4.0~15.5 cm の位置となるように設置した。現場での酸素濃度分布は、Glud ら(2009)により導入された微小濃度分布測定装置を用いて観測された。微小酸素電極は鉛直方向に移動可能な電動シリンダーに取り付けられており、本観測では 100 μm 間隔での鉛直分布測定を行った (Inoue ら, 2011)。

(2) 摩擦速度の推定

EC 法および TKE 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



写真-1 ADV 観測機材の様子

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除外した。EC 法では、摩擦速度は次式により計算した。

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

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、 $'$ は平均値からの偏差、 $\bar{\quad}$ は時間平均を示す。

TKE 法では、以下のように表記される TKE と摩擦速度との関係式を用いる。

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

ここで、 C_1 は数値定数 (=0.19)、 v は横断方向流速である。

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、 κ はカルマン定数 (=0.408)、 ε は散逸率、 z は底面からの距離を表し、ADV からの出力値として直接得ることができる。本研究では、観測地点の水深が 54~72 m 程度と比較的深く、全ての周波数スペクトルにおいて表面波の影響は確認されなかったため、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。

(3) 酸素拡散モデルの概要

酸素濃度の鉛直分布は、界面近傍の拡散方程式と堆積物中での生化学的な反応項を含む鉛直一次元拡散方程式を用いて計算された (Inoue・Nakamura, 2009)。

$$\frac{dC_o(z)}{dt} = \frac{d}{dz} \left\{ (D_0 + D_t(z)) \frac{dC_o(z)}{dz} \right\} \quad (\text{水中}) \quad (4)$$

$$\phi(z) \frac{dC_o(z)}{dt} = \frac{d}{dz} \left\{ \phi(z) D_s(z) \frac{dC_o(z)}{dz} \right\} - r_s(z) \quad (\text{堆積物中}) \quad (5)$$

ここで、 C_o は酸素濃度、 t は時間、 D_0 は酸素の分子拡散係数、 D_t は乱流拡散係数、 ϕ は間隙率、 D_s は堆積物中での酸素の見かけの拡散係数、 r_s は単位体積当たりの堆積物による酸素消費速度を表す。Deissler (1955)によると、水中での拡散係数の鉛直分布は、以下の式で表される。

$$\frac{D_t(z_+)}{\nu} = n^2 z_+^2 \{ 1 - \exp(-n^2 z_+^2) \} \quad (6)$$

ここで、 ν は動粘性係数、 n は数値定数 (=0.124, Deissler, 1955)、 z_+ (= $z u_* / \nu$) は無次元化された底面からの距離を示す。式(6)に従うと、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。

3. 結果

(1) 観測結果

摩擦速度の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とっており、0.37~1.05 cm s⁻¹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、0.11~0.55 cm s⁻¹の範囲で変動していた。これらの値は海岸域で観測された値 (0.5~1.5 cm s⁻¹) 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 (0.41~0.48 cm s⁻¹) と同程度であった (図-1)。

(2) 酸素分布の計算

対応する時刻の流動観測データが有効である、拡散境界層内の酸素濃度測定データ (一例を図-2 に示す) は計 100 データ得られた。これら全てのデータセットに対し、酸素濃度の測定値と上記モデルによる計算値について直線回帰した場合の諸量を表-1 に示す。

TKE 法による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、拡散境界層厚さは小さくなり (0.2~0.6 mm)、他の 2 手法と比較して大きな酸素濃度の値を示した。これは特に低濃度で顕著であり、回帰直線の傾きは 0.51、切片は 89.70 と

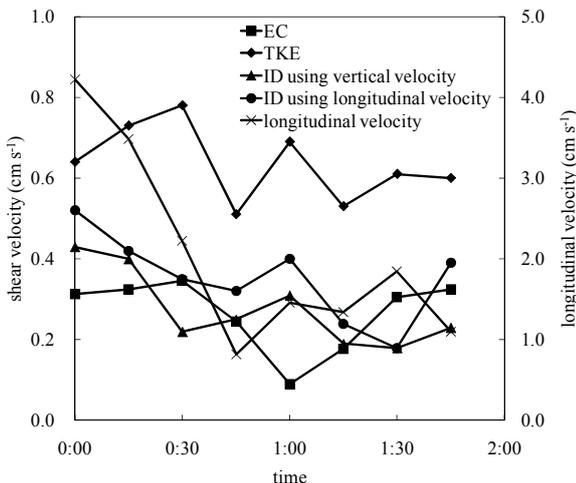


図-1 摩擦速度の計算結果の例

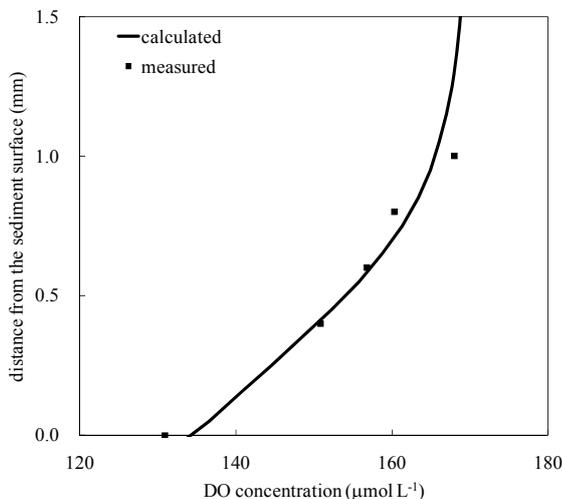


図-2 酸素濃度分布の測定結果および EC 法から推算された摩擦速度を用いた計算結果の例

表-1 酸素濃度の測定値を横軸、計算値を縦軸とした場合の回帰直線に関する諸量 (単位を μmol L⁻¹ とした場合、n=100)

推定法	傾き	切片	R ²
EC 法	0.92	12.35	0.76
TKE 法	0.51	89.70	0.67
ID 法 (鉛直方向流速)	0.84	26.05	0.68
ID 法 (主流方向流速)	0.74	46.77	0.68

なった。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では、拡散境界層厚さは 0.4~1.6 mm の範囲で変動しており、平均的には共に同程度の酸素濃度の値を示していた。回帰直線の傾きと切片はそれぞれ、EC 法で 0.92, 12.35、鉛直方向流速成分を用いた ID 法で 0.84, 26.05、主流方向流速成分を用いた ID 法で 0.74, 46.77 となった。測定された酸素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%、鉛直方向流速成分を用いた ID 法については 0.7%、主流方向流速成分を用いた ID 法については 4.6% 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 R² = 0.76、TKE 法については R² = 0.67、ID 法については鉛直、主流方向共に R² = 0.68 となった。

測定値と計算値との回帰直線は理想的には傾き 1、切片 0 であり、誤差や決定係数を考慮すると、本観測条件に対しては EC 法が最も適しており、鉛直方向流速を用いた ID 法が次善の方法であると考えられた。

4. 結論

本研究では、EC 法と鉛直方向流速を用いた 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 法と主流方向流速を用いた ID 法は避けるべきであることが示された。本研究における結論は、閉鎖的であり比較的穏やかな水域での底面境界層における酸素濃度分布の表現を目的としたものであり、多様な水域や異なる対象に対して広く適用されるものではないことに注意が必要である。

参考文献

Deissler, R. G. (1955): Analysis of turbulent heat transfer, mass transfer, and friction in smooth tubes at high Prandtl and Schmidt numbers. NACA Report. Cleveland, Lewis Flight Propulsion Lab.: pp. 69-82.

Glud, R. N., H. Stahl, P. Berg, F. Wenzhöfer, K. Oguri, and H. Kitazato (2009): In situ microscale variation in distribution and consumption of O₂: A case study from a deep ocean margin sediment (Sagami Bay, Japan), *Limnol. Oceanogr.*, Vol.54, pp. 1-12.

Inoue, T., R. N. Glud, H. Stahl, and A. Hume (2011): Comparison of three different methods for assessing in situ friction velocity: A case study from Loch Etive, Scotland., *Limnol. Oceanogr.: Methods*, Vol.9, pp. 275-287.

Inoue, T., and Y. Nakamura (2009): Effects of hydrodynamic conditions on sediment oxygen demand: Experimental study based on three methods, *J. Envir. Eng.*, Vol.135, pp. 1161-1170.