

底面境界層における流動観測手法の開発

○ 井上徹教・中村由行

(独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 沿岸環境研究領域

横須賀市長瀬 3-1-1, E-mail: inoue-t@pari.go.jp

1. はじめに

堆積物の巻き上げや底面からの栄養塩溶出などを考える上で底面境界層の流れを知る事は非常に重要である。底面境界層における流れの測定は風洞や水路を用いた室内実験により精力的に行われており、様々な理論はこれらの室内実験の結果から導かれたものが多く、この分野での進展に寄与している。一方、現地においてもこれまで多くの観測がなされており、前述の理論を適用した考察がなされている⁽¹⁾。しかし、一般的に室内実験と現地観測では空間スケールが異なるため、それらの直接的な比較には注意を要する。

現地での流動観測において最も頻繁に用いられるものは電磁流速計である。例えば、Le Couturier et al. (2000)⁽²⁾は堆積物直上 0.35 m, 0.78 m, 1.20 m において水平方向の流速観測を行ない、底面境界層での流れ構造の解析を行っている。電磁流速計を用いる場合、空間分解能はセンサ一部の大きさに依存し通常は 10cm 程度となるため⁽³⁾、より小さな空間スケールでの詳細な観測は困難である⁽⁴⁾。

これに対して、近年では ADCP を用いた観測例が多く見られるようになった。Cheng et al. (1997)⁽⁵⁾は Broad-Band ADCP を用いて底面直上 175cm までの範囲で 5cm 毎の測定を行っている。ADCP による観測では、乱流計測に対して時間分解能は十分であるものの、空間分解能はやや粗い場合が多い。

より詳細な時空間スケールでの観測としては、PIV や LDV を用いた観測例が挙げられる。Doron et al. (2001)⁽⁶⁾は現場型 PIV システムを用いた観測を行っている。PIV による観測は時空間的な分解能は十分であるが、stereo photography を用いない限りは 2 成分の流速データしか得られない。LDV を用いた観測例として最も詳細なものは Trowbridge and Agrawal (1995)⁽⁷⁾及び Trowbridge (1998)⁽⁸⁾であるが、LDV は透明度の影響を受けやすいという欠点がある。

近年では、その正確さと使い勝手の良さから Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) を用いた観測例が増えてきている。これまでなされてきた底面境界層内での ADV 観測は、底面に固定されたフレームに ADV を取り付け、測定高さを固定した例が多かった⁽⁹⁾。これに対して、Nikora et al. (2002)⁽¹⁰⁾は ADV を鉛直方向に移動させることで、底面直上 2, 6, 12, 29, 61 cm における流動観測を行っている。しかし、鉛直方向の測定間隔がやや粗いため roughness sublayer と logarithmic layer の境界を特定できなかった。さらに、彼らは測定点の少なさによる摩擦速度推定の不正確さについて言及している。

そこで本研究では、ADV を用いた現地における海底面近傍の流動観測法を開発したので報告する。さらに、広島湾で行った観測データを元に幾つかの乱流緒量についても計算を試みたので以下に記す。

2. 観測装置および内容

流速測定には Nortek 社製の ADV-Field を使用した。コンパス/傾斜センサを併用する事で、東西方向、南北方向および鉛直方向の座標系で流速データを収集する事ができる。ADV-Field はプローブ中央にあるトランスミッタから 10cm 離れた体積 0.03cm³ の領域の流速 3 成分を最大 25Hz のサンプリング周波数で測定できる。また、反射波を検知する事により境界からサンプリングボリュームまでの距離を 0.1mm の分解能で測定できる。この ADV-Field をアレック電子製の水中昇降装置に取り付けて観測を行った (Fig.

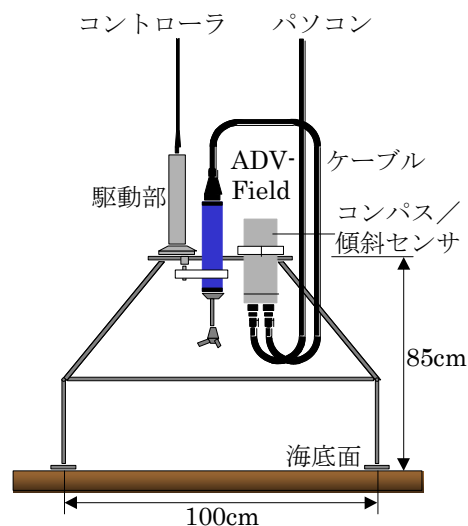


Fig. 1 A schematic view of the flow measurement system

1). 昇降装置はコントローラ、ケーブル、駆動部設置台から構成されており、水中で ADV-Field を 1mm 間隔で鉛直方向に移動させる事ができる。

この装置を用いて、広島湾奥部の太田川河口部前面の平均水深約 26m の位置において観測を行った。海底からの高さが 0.5cm ~ 20cm の範囲で、一測点につき 1 分あるいは 5 分間、周波数 25Hz で流速を測定した。底面上 0.5cm ~ 1.0cm においては 1mm 間隔で、底面上 1.0cm ~ 3.0cm においては 5mm ~ 10mm 間隔で、底面上 3.0cm ~ 20.0cm においては 20mm ~ 50mm 間隔で測定した。なお、鉛直方向を一通り測定するのに、一測点あたりの測定時間が 1 分の場合約 20 分、5 分の場合約 1.5 時間を要し、各測点の測定値は同時刻のものではない。

3. 観測結果

平均流速分布の観測結果の一例を Fig. 2 に示す。観測点からみて湾口は南西側に位置するため、上げ潮時には北東向きの流れ、下げ潮時には南西向きの流れが基本となる。一方、観測期間中は北東よりの風が卓越しており、これを補償する形で底層では常時北東に向かう流れが見られた。これらの結果、上げ潮時には比較的強い北東向きの流れが、下げ潮時には比較的弱い南西向きの流れが見られることになった。この図を見ると、海底面から約 2cm 以上はほぼ一定流速となっている事がわかる。また、上げ潮時には底面直上においても 10cm s⁻¹ オーダーの流速が生じていることがわかった。

水平方向流速データから得られた、周波数スペクトルの一例を Fig. 3 に示す。Huntley (1988)⁽¹¹⁾によると慣性領域が発達するためにはレイノルズ数が 2500 以上でなければならないとされている。今回の観測では全ての測定点においてレイノルズ数が 500 以下と小さかったのにも拘らず、-3/5 乗則に合うようなスペクトルが得られている。このように比較的低いレイノルズ数においても -3/5 の傾きを持つ慣性領域が発達することは指摘されており、Voulgaris and Trowbridge (1998)⁽¹²⁾はレイノルズ数が 56 の場合にも慣性領域が確認されることを指摘している。

さらに、乱れエネルギー及びエネルギー散逸率の鉛直分布を求めたところ、流速勾配の大きい底面直上1~1.5cm付近においてそれぞれの極大値が見られた (Fig. 4)。これらは既存の文献値⁽²⁾と同様の傾向及び同程度の値を示した。

4. 結論

現場用超音波ドップラー流速計および1mm精度で測定位置を調整可能な昇降装置を用いる事で、海底境界層の乱流構造を詳細に測定する事が可能となった。本システムを用いて現場観測を行ったところ、底面境界層内での詳細な乱流構造の観測が可能であることが確認された。また、得られたデータは室内実験や既存の文献値と同様の傾向を示していた。今後は本手法から得られた流動場の解析結果を元に、水・堆積物界面近傍における物質循環過程について検討する予定である。なお、本稿において紹介した内容については、Inoue et al. (2008)⁽¹²⁾に詳述しているので参考にされたい。

参考文献

- (1) Grant, W. D., Williams, A. J. and Glenn, S. M., "Bottom stress estimates and their prediction on the northern California continental shelf during CODE-1: The importance of wave-current interaction,"

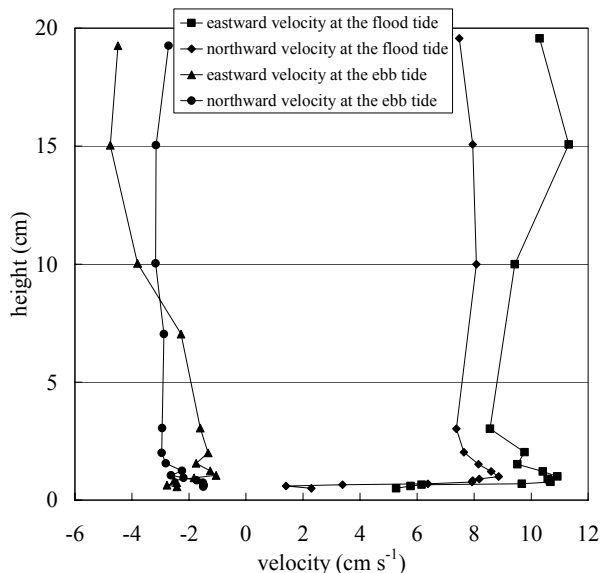


Fig. 2 Mean velocity profiles at the flood and ebb tide

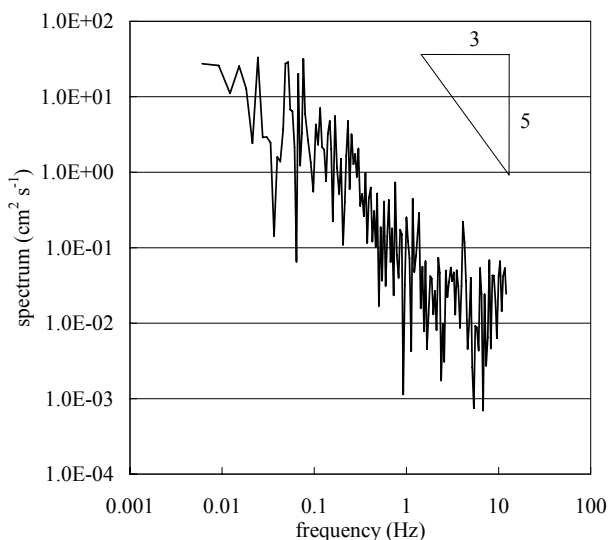


Fig. 3 An example of energy spectrum at the flood tide

Journal of Physical Oceanography, 14 (1984), pp.506-527.

- (2) Le Couturier, M. N., Grochowski, N. T., Heathershaw, A., Oikonomou, E. and Collins, M. B., "Turbulent and macro-turbulent structures developed in the benthic boundary layer downstream of topographic features," Estuarine, Coastal and Shelf Science, 50 (2000), pp.817-833.
- (3) Voulgaris, G. and Trowbridge, J. H., "Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for Turbulence Measurements," Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 15 (1998), pp.272-289.
- (4) Cacchione, D. A., Grant, W. D., Drake, D. E. and Glenn, S. M., "Storm-dominated bottom boundary layer dynamics on the northern California continental shelf: Measurements and predictions," Journal of Geophysical Research, 92 (1987), pp.1817-1827.
- (5) Cheng, R. T., Gartner, J. W. and Smith, R. E., "Bottom boundary layer in South San Francisco Bay," Journal of Coastal Research, 25 (1997), pp.49-62.
- (6) Doron, P., Bertuccioli, L., Katz, J. and Osborn, T. R., "Turbulence characteristics and dissipation estimates in the coastal ocean bottom boundary layer from PIV data," Journal of Physical Oceanography, 31 (2001), pp.2108-2134.
- (7) Trowbridge, J. H. and Agrawal, Y. C., "Glimpses of a wave boundary layer," Journal of Geophysical Research, 100 (1995), pp.20729-20743.
- (8) Trowbridge, J. H., "On a Technique for Measurement of Turbulent Shear Stress in the Presence of Surface Waves," Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 15 (1998), pp.290-298.
- (9) Howarth, M. J. and Souza, A. J., "Reynolds stress observations in continental shelf seas," Deep Sea Research Part II, 52 (2005), pp.1075-1086.
- (10) Nikora, V., Green, M. O., Thrush, S. F., Hume, T. M. and Goring, D., "Structure of the internal boundary layer over a patch of pinnid bivalves (*Atrina zelandica*) in an estuary," Journal of Marine Research, 60 (2002), pp.121-150.
- (11) Huntley, D. A., "A Modified Inertial Dissipation Method for Estimating Seabed Stresses at Low Reynolds Numbers, with Application to Wave/Current Boundary Layer Measurements," Journal of Physical Oceanography, 18 (1988), pp.339-346.
- (12) Inoue, T., Nakamura, Y., Sayama, M., "A New Method for Measuring Flow Structure in the Benthic Boundary Layer Using an Acoustic Doppler Velocimeter," Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 25 (2008), pp.822-830.

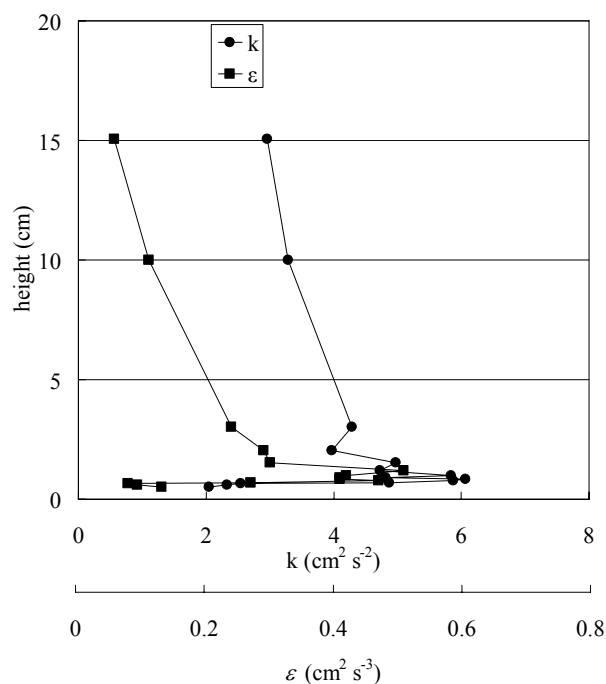


Fig. 4 An example of the vertical profile of k and ϵ