

# 沿岸海域における上向設置型 ADCP による海上風の計測

朱 小 華\* ・橋本英資\*\*・長尾正之\*\*\*  
吉田みゆき\*\*\*\*・高杉由夫\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

1980 年代から RDI 社製 ADCP の急速な普及により, ADCP が外洋だけでなく沿岸海域の測流にも広く使われはじめた(高杉ら, 1987; Kaneko ら, 1990, 1993; 金子ら, 1994; 朱ら, 1999). 上向設置型 ADCP 計測で得られた海面付近のデータは, ADCP のサイドローブにより海面からの強い反射の影響を受けるため, これまでほとんど捨てられていた. しかし, 海面そのものにおけるデータは, 音波のサイドローブの影響を受けないため, 利用可能である. これは, 走行中の船載型 ADCP が海底の反射を利用して, 船速を計測するのと同じ理由である(RDI, 1998).

このことを利用すれば, 海面流速並びに海上風速の計測も可能である. 最初の上向設置型 ADCP による海上風速の計測は, 1987 年に西部地中海の水深 2000 m の海域で行われた(Schott, 1989). 75 kHz と 150 kHz の 2 台の ADCP が約 40 日間にわたり係留され, ADCP の海面の反射強度と風速の絶対値, および海面流速と風速との間に, ある程度の相関があることが発見された. しかし, ADCP の係留系の傾斜による不安定, 風の観測点と ADCP の係留系との距離が 100-200 km と離れていたことなどのため, 風と ADCP との相関が非常にばらつき, 12 時間の平滑が必要とされた.

その後, いくつかの同様な研究がなされ, 1988-1989 年にメキシコ湾流域で得られた 300 kHz の係留 ADCP の海面反射データと風との比較では, ADCP の海面反射強度と風速の絶対値に相関はあるが, 風向と海面流速には相関が無いことが報告されている(Brown ら, 1992). 1990 年には, 同様な観測が北太平洋, 西部熱帯太平洋で行われ, ADCP の反射強度と風速の絶対値について, 多少の改善がみられ, 1 時間の平均値を使って, 両者の相関性は確認された. しかし, 風向と流向には依然 12 時間の平均が必要であった(Nakajima ら, 1995; 中嶋ら,

1995; Zedel ら, 1996). これらの研究は, まだ風と ADCP データとの相関性の段階にとどまり, 海洋・気象現象のモニタリングへの応用には至っていない. また, 上記のような研究はすべて外洋を対象とした研究であり, 沿岸海域においては, これまで全く行われていない. 沿岸海域では, 大きな潮位差と複雑な音響ノイズが存在するため, 外洋に比べ, さらに複雑となる.

本報では, 閉鎖性の強い内湾で得られた上向設置型 ADCP の海面反射データと海上風データとの比較により, 沿岸海域での ADCP による海上風の計測を試みるものであり, ADCP の新たな活用法について報告する.

## 2. 方 法

### 2.1 観測方法

上向設置型 ADCP (RDI-Workhorse-1200 kHz) 観測は, 瀬戸内海の広島湾の枝湾である海田湾(平均水深 8.5 m)で行われた. 中国工業技術研究所では, 1999 年 2 月から海田湾に海上浮体実験室(マリンラボ)を設置して, 海域の物理的環境モニタリング観測を行っている(橋本ら, 1999). 本観測は, 1999 年 8, 9 月の約 2 ヶ月にわたって, マリンラボを基点として行われた. 設置した ADCP とマリンラボの位置関係の概要を図-1 に示す. マリンラボの影響を避けるため, ADCP とマリンラボの水平距離を約 20 m に取った. ADCP のサンプリング間隔を 10 分(60 Ping の平均), 層厚 0.5 m, 層数 128 層で設定し, 流速と反射強度を計測した.

マリンラボの屋上に, 気象観測装置(AWS 2700, AANDERAA 社製)を設置し, 風向・風速・気温・気圧などを 10 分間隔で計測した. また, 潮位変化は, マリンラボ近傍の海底に設置した DO 計(ADO-8 M, アレック電子製)の圧力センサーのデータを利用した.

### 2.2 音響伝搬損失の補正

ADCP で得られた反射強度(Received Signal Strength Indicator: RSSI)は, まず, 音響の拡散損失と吸収損失の補正を施すことにより,  $S_0$  (Scatter Volume) に変換した. この補正は, RDI 社が提供した次式の経験式に従った.

\* 工博 通産省中国工業技術研究所(科学技術特別研究員)  
\*\* 正会員 通産省中国工業技術研究所  
\*\*\* 正会員 工博 通産省中国工業技術研究所  
\*\*\*\* 広島大学大学院生物圏科学研究科  
\*\*\*\*\* 農博 通産省中国工業技術研究所

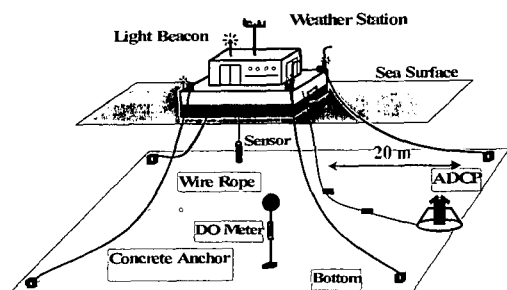


図-1 マリンラボと上向設置型 ADCP の位置関係図。

$$S_v = C + 10 \log_{10}((T_x + 273.16)R^2)$$

$$-L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha R + K_c(E - E_r)$$

ここで、 $C$ は定数、 $T_x$ は ADCP のトランスデューサの温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $R$ はトランスデューサからの距離 (m)、 $\alpha$ は音の吸収係数 (dB/m)、 $L_{DBM} = 10 \log_{10}$  (transmit pulse length, meters)、 $P_{DBW} = 10 \log_{10}$  (transmit power, Watts)、である。 $K_c$ はデジタル信号と音響強度の変換係数で、 $E$ と  $E_r$ は、それぞれ反射強度と環境ノイズ強度である ( $E_r$ は第 128 層の RSSI 値を使用した)。以上の各係数は、すべて RDI 社が提供した値を使用した (Deines, 1999)。

### 2.3 海面反射の検出

海田湾の ADCP 設置点における潮位の変動は、最大約 3 m である。海面反射データを取り出すには、この海面変動を考える必要がある。例として、9 月 11 日 (大潮) の高潮時・中間潮時・低潮時の RSSI のプロファイルを図-2 に示す。RSSI のプロファイルは、2 つのピークがあることがわかる。それぞれのピークの位置から ADCP

までの距離を計算でき、この距離と水深を比較すると、第一ピークは、海面からの強い反射であり、第二ピークは、海面→海底→海面からの反射による二次反射であることが判明した。このように、RSSI の第一ピークと第二ピークの深度から ADCP の海面反射強度 (SSv)、海面流速 (SCV)・海面流向 (SCD) と第二ピークの反射強度 (SPSv) データを取り出すことができる。良好データ (Percent Good) のプロファイルを見ると、ADCP の海面データは、有効であることがわかる。また、RSSI のプロファイルを見ると、48 層目以降になると、RSSI は一定になる。つまり、これ以降の RSSI はノイズ値を示す。

### 3. 結 果

図-3 に、気象観測装置で得られた 10 分間隔の風速 (W)、風向 (WD)、気温、気圧と ADCP で得られた 10 分間隔の SSv、SPSv、SCD および SCV を示す。ADCP データは、9 月 16、17 日に突然表層ピークが検出できなくなった。深度データ (DO 計) は、観測途中の電池交換と後半の電池消耗により欠測があった。風速データを見ると、8 月上旬の低気圧の通過による強風 (平均風速約 10 m/s)、9 月下旬の台風 9918 号による強風 (最大瞬間風速 36 m/s) 以外、風速はほぼ 5 m/s 以下である。太横線で示した時間帯では風速はきれいな一日周期の変動を示し、典型的な海陸風のパターンになっている (長尾ら, 2000)。一方、ADCP データについては、低気圧と台風の通過時に、SSv は顕著なピークが、SPSv は谷が対応している。海陸風時には SSv と SPSv 両方とも一日周期の顕著な変動を示している。また、SCV も風速と対応している。しかし、これらの風と表層 ADCP のデータは、変動

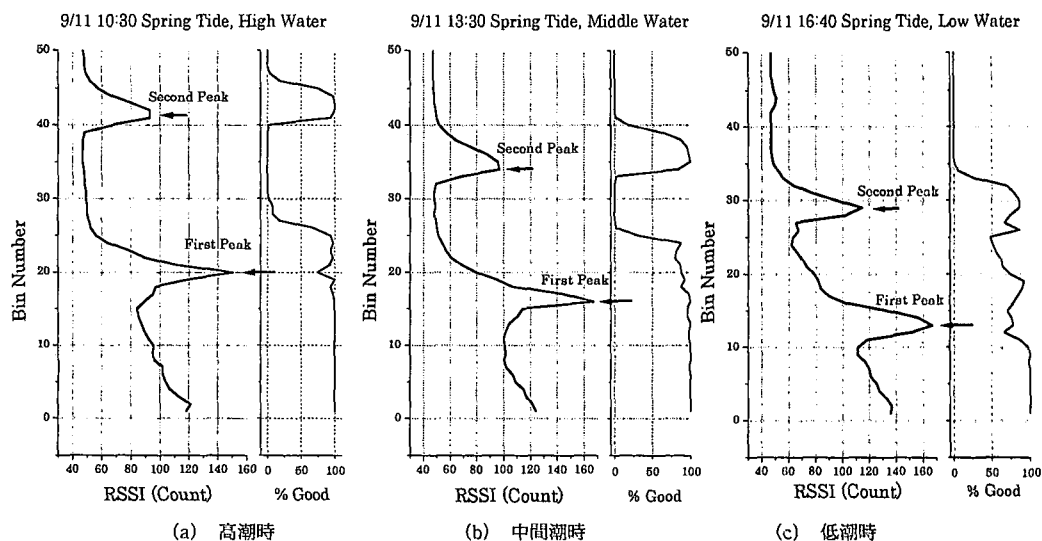


図-2 RSSI と Percent Good (%) のプロファイル図。

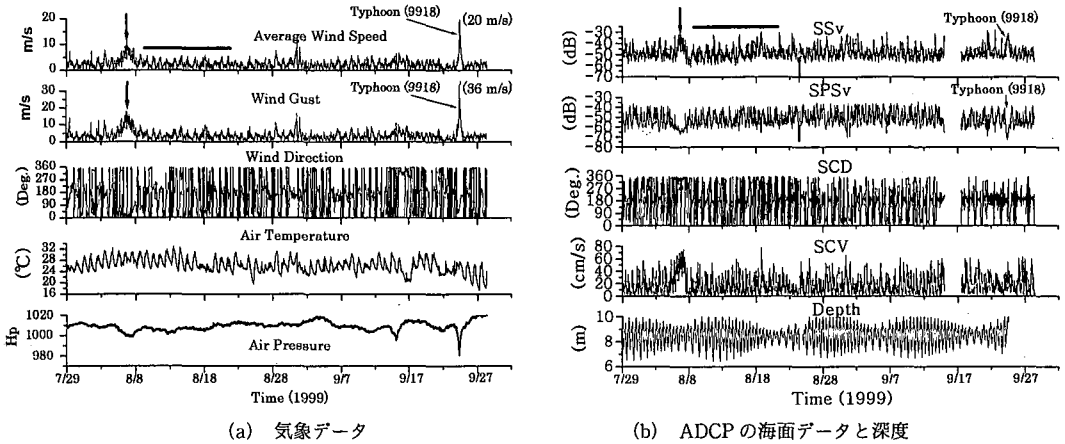


図-3 気象データと ADCP の海面データの時系列図。(SSv, SPSv, SCD, SCV は、それぞれ ADCP の海面 Sv, 第二ピークの Sv, 海面流向, 海面流速である。)

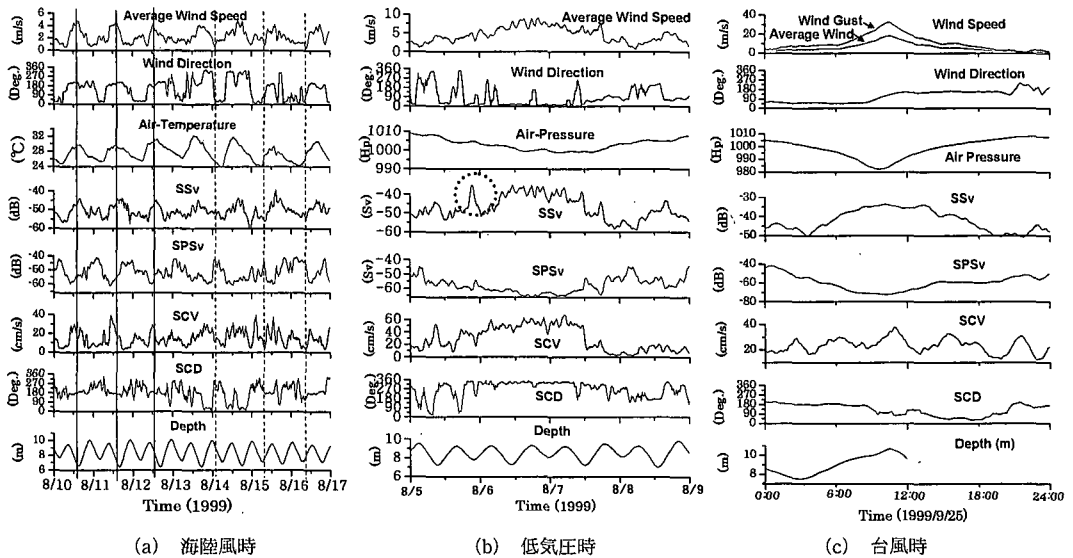


図-4 海陸風, 低気圧, 台風時の風速と ADCP の海面データの時系列の拡大図。(a)にある縦の実線と破線はそれぞれ海陸風が極大と極小風速時を示す。(b)にある点線の円は、風速と SSv が対応しない 1 例である。

パターンはよく一致するが、定量的には一致するとは言えない。例えば、台風時には最大瞬間風速は 36 m/s に達したが、SSv のピークはそれほど高くなっていない。

海陸風, 低気圧および台風時の 1 時間移動平均のデータを拡大したものを図-4 に示す。海陸風時を見ると、風速が極大の時(縦実線)と極小(縦破線)の時は、SSv もちょうど極大と極小とに対応する(図-4(a))。つまり、風速の絶対値と SSv が同位相である。SPSv については、風速と逆相関となっている。また、SCV も、風速とある程度相関があるが、SSv より不明瞭である。さらに、SSv, SCV, SVD は、潮位変化に無関係であることがわかる。台風時の風速と SSv を比較すると、風速がシャープな

ピークを持つ構造であるのに対して、SSv は 8 時から 13 時の間、ほぼ一定な値を保ち続けている。つまり、風速がある程度の強さを超えたら、風速が強くなっても、SSv は増加しない“飽和”現象が観測されている。また、図-4 (b) の SSv は、8 月 5 日夜に大きなピーク(点線で囲んだ部分)を示しているのに対して、風速は、それほど大きくない。つまり、明らかに風速と SSv が対応しない場合も極く少ない時間帯ではあるが見られる。

#### 4. 考 察

海田湾は、幅わずか 500 m の水路のような形状をしている。頻繁な船舶の航行やマリナボの近傍への停泊な

どは, ADCP による海面の観測に大きな影響を与えていることが予想される。例えば, 9月16, 17日に突然に表層反射ピークが消滅したのも ADCP の真上に船が停泊したものと考えられる。そして, 8月5日の深夜のような風速と SSv の不対応も風以外の原因として, 例えば波, 船による泡, ADCP 測点付近の短時間の船舶の停泊などによる影響が考えられる。そのため, 2ヶ月の観測期間中すべてのデータに対して風速と ADCP 測定値とが良好な相関を示しているとはかぎらない。しかし, 図-4 から判るように, 風速と ADCP のデータは, 短時間(数日の時間スケール)で見ると, 変動パターンが良く一致している。そこで, 風速と SSv の関係を図-4 で分けた時間帯について詳しく見る(図-5)。風速と SSv の相関係数は, 台風時が一番高く, 0.89に達している。しかし, 風速が 5 m/s 以下の海陸風時では, 両者の相関係数は低く, 0.67である。図-5 から判断すると SSv で, 風速を推定できる。ただし, 直接 SSv で風速を定量化すると精度は悪いが, 図-4(a) の SSv の時系列の変動から見ると, SSv で定性的な風速変動をモニターすることが可能である。

また, 台風のような非常に強い風速での SSv の飽和現象は, 過去の観測でも見られており(Nakajima ら,

1995), 原因は風波が強風で崩れることによる非線形効果によるものと考えられる(中嶋ら, 1995)。

SCV は, ADCP の一番表層のドップラー流速である。この SCV は, 表層の流れだけでなく, 波, 泡などの成分を含んでいる(Schott, 1989)。風速と SCV の関係を図-6 に示す。低気圧時では, 相関係数が一番高く, 0.78に達しているが, 台風時では, わずか 0.49である。なお, SCV には潮流成分が含まれているが, 観測点の潮流の振幅( $M_2$ )はわずか 2 cm/s 程度であるため(橋本ら, 1999), SCV と比べ非常に小さく, その影響は無視できる。

次に, SCD から風向を推定する可能性について検討する。ここで, 風向と SCD の差の時系列を図-7 に示す。風向は 180°回転させ, 通常の高流と同じ表示の方向に直してある。この図を図-4 と比べてみると, 風向の変化が激しい場合(海陸風の期間), 風向と SCD の差が変化する。この場合, SCD から風向を推定することはできない。風向が一定の場合(台風時), 差が一定になるが, 風向が変わるとこの差も変わる(9月25日10時)。以上のことにより, SCD から風向を推定することは困難である。非常に狭い海田湾では, 風によって誘起された波などは, 地形などの影響で, 変化しやすい。これが, 風向と SCD の不一致の原因と考えられる。

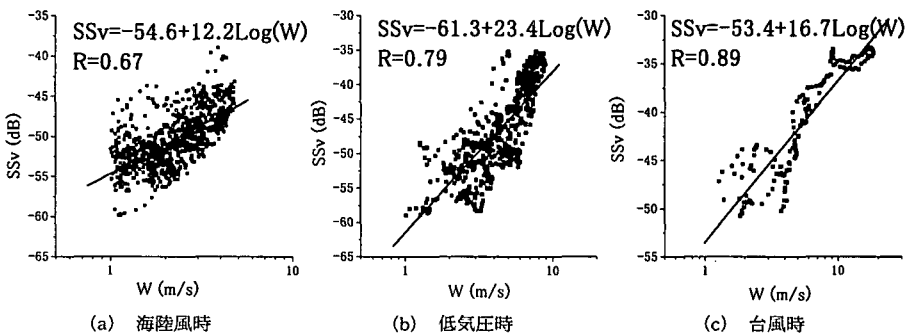


図-5 海陸風, 低気圧と台風時の風速 ( $W$ ) と SSv の関係図。

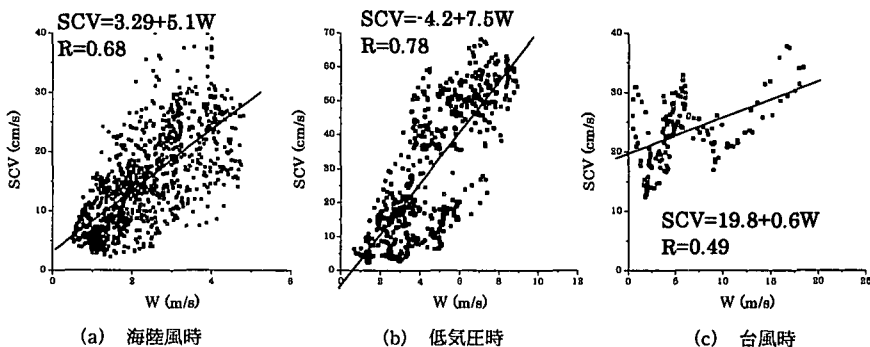


図-6 海陸風, 低気圧と台風時の風速と SCV の関係図。

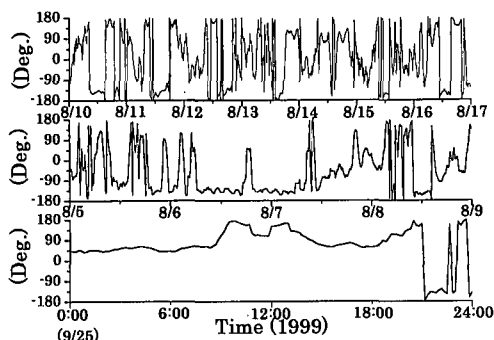


図-7 海陸風, 低気圧と台風時の風向とSCDの差の時系列図。(上) 海陸風時 (中) 低気圧時 (下) 台風時

## 5. おわりに

本研究では, 沿岸海域で初めて上向設置型 ADCP による海上風の計測を試みた。約 2 ヶ月の ADCP と海上風データの比較により得られた本研究の結論を以下にまとめる。

1. SSv と風速は正の相関, SPSv と風速は負の相関となる。SSv の変動から, 沿岸域の風速変動, 例えば, 海陸風の変動, 低気圧の通過および台風などの風速変動のモニタリングが可能である。
2. 風速と SSv には高い相関が認められる。SSv から, 風速の絶対値をある程度定量的に推定することができる。
3. 風速が 10 m/s 以下の場合, SCV と風速の間には相関がある程度が認められる (相関係数約 0.7)。ただし台風のような強い風速に対しては, 両者の相関は低い。

なお, 本研究にはいくつかの問題点が残されている。まず, ADCP データから風向を推定すること, 及び長時間にわたる SSv による風速の定量化は, 風以外の要素が影響するため, まだできていない。これらの問題点については, 風以外の影響が小さい海域で, 例えば, 広い湾の中央部で, 計測すれば改良できると予想される。また, 今回観測された SPSv と風速の逆位相についても, 理由が不明である。この点について, 今後, 他の海域での再確認と検討が必要である。

謝辞: 本研究は工業技術院重要技術の競争的研究開発

課題「閉鎖性海域の環境修復・創造技術の開発と効果検証に関する研究」の研究費による成果であり, 研究の機会を与えていただいた中国工業技術研究所海洋環境制御部上嶋英機部長に謝意を表します。

## 参考文献

- 金子 新・伊藤集通 (1994): ADCP の普及と海洋学の発展, 海の研究, 第 3 巻, 第 5 号, pp. 359-372.
- 朱 小華・橋本英資・高杉由夫 (1999): DGPS を使用した沿岸海域の船載型 ADCP 観測, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1306-1310.
- 高杉由夫・肥後竹彦・埜口英昭 (1987): 瀬戸・海峡部における流れの特性, ドップラープロファイラーによる流速測定, *Lamers*, 25, pp. 167-174.
- 中嶋秀夫・金子 新・川建和雄 (1995): 上方設置型 ADCP による海面速度の計測, 月刊海洋, 27, pp. 175-179.
- 長尾正之・朱 小華・橋本英資・吉田みゆき・高杉由夫 (2000): 閉鎖性海域での海陸風とクロロフィル a の応答関係, 水工学論文集, 第 44 巻, pp. 1173-1178.
- 橋本英資・朱 小華・長尾正之・高杉由夫・上嶋英機 (1999): 海洋環境修復に向けての新たな取り組み, 中国工業技術研究所報告, 第 53 号, pp. 15-21.
- Brown J., E. D. Rarton, A. Trasvina and H. S. Velez (1992): Estimation of surface winds from upward looking acoustic Doppler current profilers, *J. Geophys. Res.*, 97, pp. 17925-17930.
- Deines, K. L. (1999): Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers, Reports of RD Instruments. San Diego, California, pp. 1-5.
- Nakajima, H., A. Kaneko, N. Gohda and K. Kawatate (1995): Sea surface measurement by a self-contained upward-looking ADCP, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 73, pp. 639-643.
- Kaneko, A., W. Koterayama, H. Honji, S. Mizuno, K. Kawatate and R. L. Gordon (1990): Cross-stream survey of the upper 400 m of the Kuroshio by an ADCP on a towed fish, *Deep-Sea Res.*, Vol. 37, No. 5, pp. 875-889.
- Kaneko, A., N. Gohda, W. Koterayama, M. Nakamura, S. Mizuno and H. Furukawa (1993): Towed ADCP fish with depth and roll controllable wings and its application to the Kuroshio observation, *J. Oceanogr., Japan*, 49, pp. 383-395.
- RD Instruments (1998): Workhorse Acoustic Doppler Current Profilers Technical Manual, RD Instruments, San Diego, California, 218 p.
- Schott F. (1989): Measuring winds from underneath the ocean surface by upward looking acoustic Doppler current profilers, *J. Geophys. Res.*, 94, pp. 8313-8321.
- Zedel L., G. B. Crawford and L. Gordon (1996): On the determination of wind direction using an upward looking acoustic Doppler current profiler, *J. Geophys. Res.*, 101, pp. 12163-12176.