

DGPS を使用した沿岸海域の船載型 ADCP 観測

朱 小華*・橋本英資**・高杉由夫***

1. はじめに

船載型走行 ADCP による流速の計測においては、対地流速を得るために船速を求める必要がある。外洋では、船速はほとんど GPS の測位データが利用されている (Kaneko ら, 1993; Hanawa ら, 1996; 金子ら, 1998)。しかし、GPS には測位誤差があり、船速の精度を保持するには長い時間 (約 20 分) の平均操作が必要である (金子ら, 1994)。このため、短時間の変動が激しい沿岸海域に適用することはできない。沿岸海域における走行 ADCP 計測のほとんどは、ADCP の海底反射音波を利用して絶対流速を求める方法で行われている (高杉ら, 1987; 藤原ら, 1989)。しかし、この方法には、船体磁気が ADCP コンパスに及ぼす影響や海底地形の急激な変化から生じる船速の計測誤差が含まれており、特に、急峻な海底地形をもつ海域の計測には精度的に問題がある。さらに、ADCP の対地モードが取れない海域では、測定が不可能である。

一方、基準局の補正データを無線で受信して測位を行う DGPS は、従来の GPS より 10 倍以上の精度を持ち、現在、車と船舶のナビゲーションシステムなどに幅広く応用されている (JRC, 1997)。しかし、DGPS を用いて、直接に流速を計測する走行 ADCP 計測への応用についてはほとんど研究されていない。

本研究では、地上定点実験により精度を確認した DGPS を用いて船載型走行 ADCP の海上実験を行った。高精度 DGPS の使用により、DGPS で求めた船速と ADCP (対地モード) で求めた船速の比較から、沿岸域における船位データから絶対流速を求める新たな ADCP の計測方法について論じる。

2. 方法

2.1 地上定点実験

DGPS の性能を確認するため、地上定点実験を行った。DGPS (DGPS 200, 日本無線製) と GPS (Magellan 社

製) を研究所の屋上 (3 階) に設置して同時に、連続 12 時間受信した。

2.2 海上実験

DGPS を用いた走行 ADCP (RDI-Workhorse-1200 kHz) の海上実験は、1999 年 2 月 4 日に瀬戸内海安芸灘北部の猫瀬戸から倉橋島の間で行った (図-1)。観測船は、A → B → C → D → C という順番で走行した。図-1 中の右下には、測定時の潮位を示しており、A → B は上潮時、C → D は満潮時、D → C は下げ潮時である。

ADCP は、船体中央部の舷側に固定した。また、ADCP のトランスデューサーの深度は約 1 m とし、音波発射間隔を 2 秒、サンプリング間隔を 30 秒、層厚を 0.5 m、層数を 100 層で計測した。

DGPS による船位の計測は、RDI 社提供のプログラム Transect により 1 秒間隔で行われる。この船位データを用いた船速の算出は以下のように行った。ADCP 各サンプリング時間内の船位変化から各サンプリングの船速を計算しておき、次に、60 秒 (2 個平均)、90 秒 (3 個平均)、120 秒 (4 個平均) の時間幅でそれぞれ平均した。

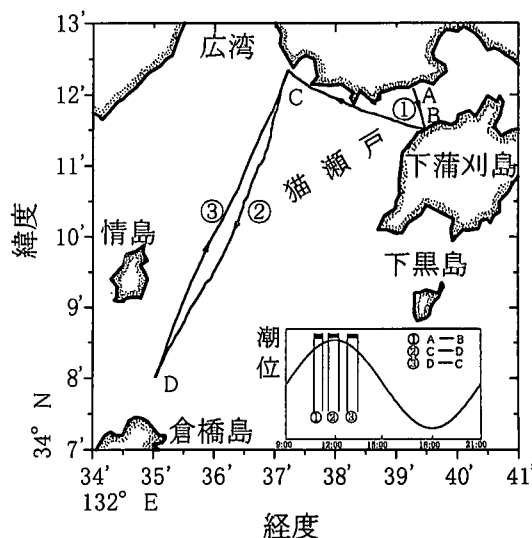


図-1 DGPS で求めた船跡図。矢印は船の進行方向を示す。右下の図は、2月4日9:00からの潮位変化を示す。

* 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
*** 農博 通産省中国工業技術研究所

3. 結果と考察

3.1 DGPS 精度の確認

図-2に、GPSとDGPSの12時間連続地上定点実験で得られた測位データの平均値からの差を示す。GPSのデータが非常にばらついているのに対して、DGPSのデータは非常に安定している。GPSの平均偏差値と最大偏差値は、それぞれ31mと107mで、DGPSの方は、わずか0.9mと3.3mであった。DGPSの測位精度が従来のGPSより10倍以上の精度を持っていることが確認された。

地上定点実験で得られたDGPSの測位データを前述の船速算出法を用いて計算し、その誤差を見積ってみる。この場合の真の“船速”は、ゼロであることから、計算結果の“船速”が誤差となる。平均時間幅に対する誤差内のデータが全データに占める割合を表-1に示す。平均時間幅が、60秒になると誤差はほとんど5cm/s以下となる。この結果からDGPSによる船速を用いた場合の走行ADCPの流速計測精度を5cm/s⁻¹とするには、船速

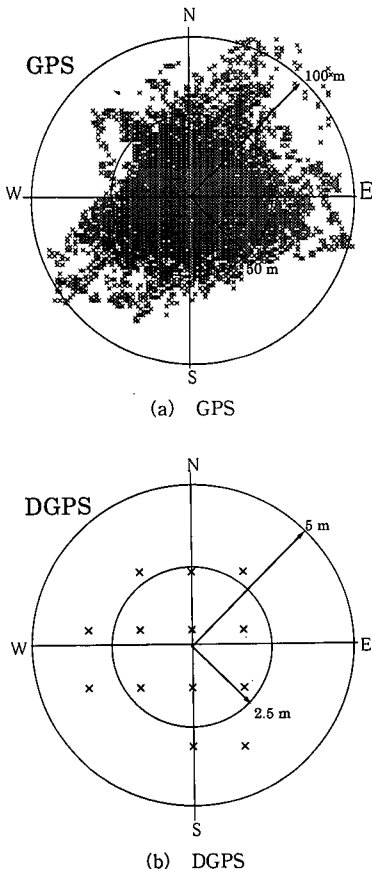


図-2 12時間連続地上定点実験で得られた測位データの平均値からの差。

表-1 平均時間幅と誤差幅のデータの割合 (%)

時間 (s) \ 誤差 (cm/s)	30	60	90
0.0~2.5	78.6	70.6	95.1
2.5~5.0	0.0	29.2	4.9
5.0~	21.4	0.2	0.0

計算時の平均時間幅は60秒が最適であることがわかる。

3.2 ADCP コンパスの補正

ADCPは独自のコンパスを持っているが、船のエンジンなどの鉄製部分がコンパスに影響を与えることが予想される。この影響を検討するために、水深変化のほとんどない点C、D間で、DGPSとADCPデータの比較を行った。C点とD点の位置はDGPSで正確に決まる。一方、ADCPの対地モード (bottom tracking mode) で求めた船速を出発点Cから時間積分することにより船の軌跡を求めることができる。D点到着時における対地モードによる計算位置はD点の位置とは約2.3km (距離ΔR) のずれがあった。点C、D間の走行時間は67分であるため、このΔRを平均船速誤差に換算すると、57cm/s⁻¹となる。本研究計測設定条件によるADCPのドップラー速度の計測精度は3cm/s⁻¹であることから、この船速誤差の原因はADCPのコンパスが船体磁気の影響を受けたためと考えられる (RDI, 1998)。そこで、ADCP対地モードによる船位の計算位置とDGPSの測位位置が最接近するように、ADCPのコンパス角度をΔθで与えて補正した (表-2)。

表-2 コンパス補正明細表

行程	走行時間 (分)	補正前 ΔR (m)	補正後 ΔR (m)	Δθ (度)	平均精度 (cm/s)
C→D	67	2250	75	-5.5	1.9
D→C	54	1440	26	-5.1	0.8

補正後のΔRを平均船速に換算すると、CからDは1.9cm/s⁻¹、DからCは0.8cm/s⁻¹となり、補正後のADCPの精度は、2cm/s⁻¹以内であることがわかった。

3.3 DGPS による流速の測定精度

対地流速 (V_r) は、船で相対的に計測されたドップラー流速 (V_d) から船速 (V_s) を差引くことによって求められる。本計測条件におけるV_dの測定精度は、約3cm/s⁻¹である。V_rの精度は、主に船速の精度に制御される。ここで、流速の測定精度を検討するために、船速の精度を議論する。

図-3に、DGPSにより30秒間の位置変化から求めた船速とコンパス補正前と後とのADCPで求めた船速べ

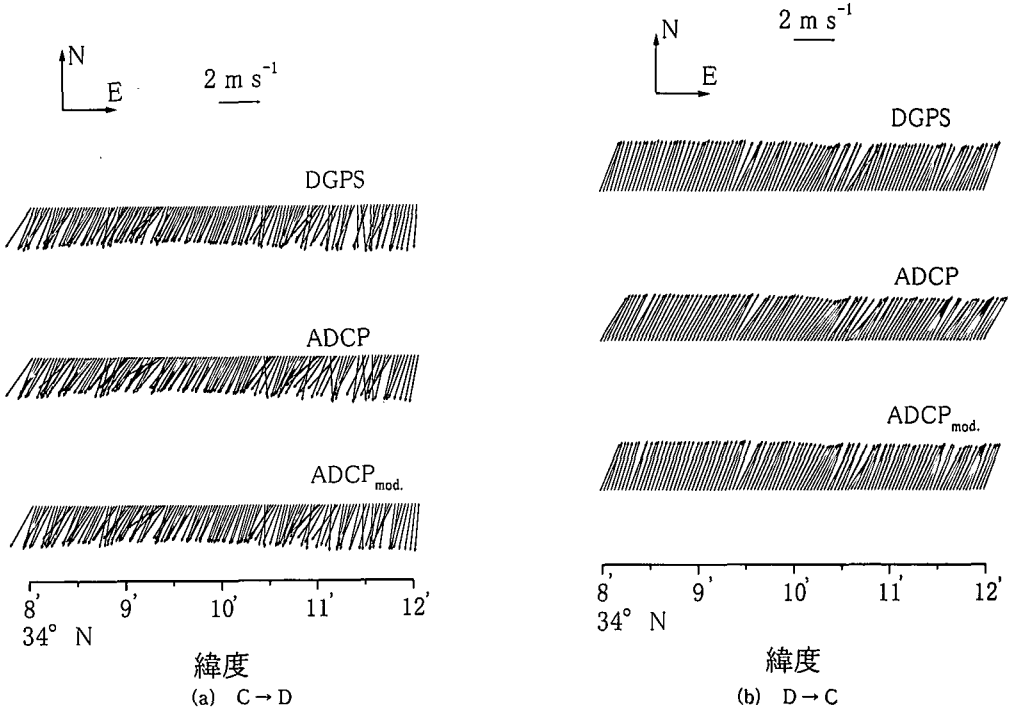


図-3 DGPSの30秒間の位置変動で求めた船速(上段)とコンパス補正前(中段),補正後(下段)のADCPで求めた船速ベクトル図。

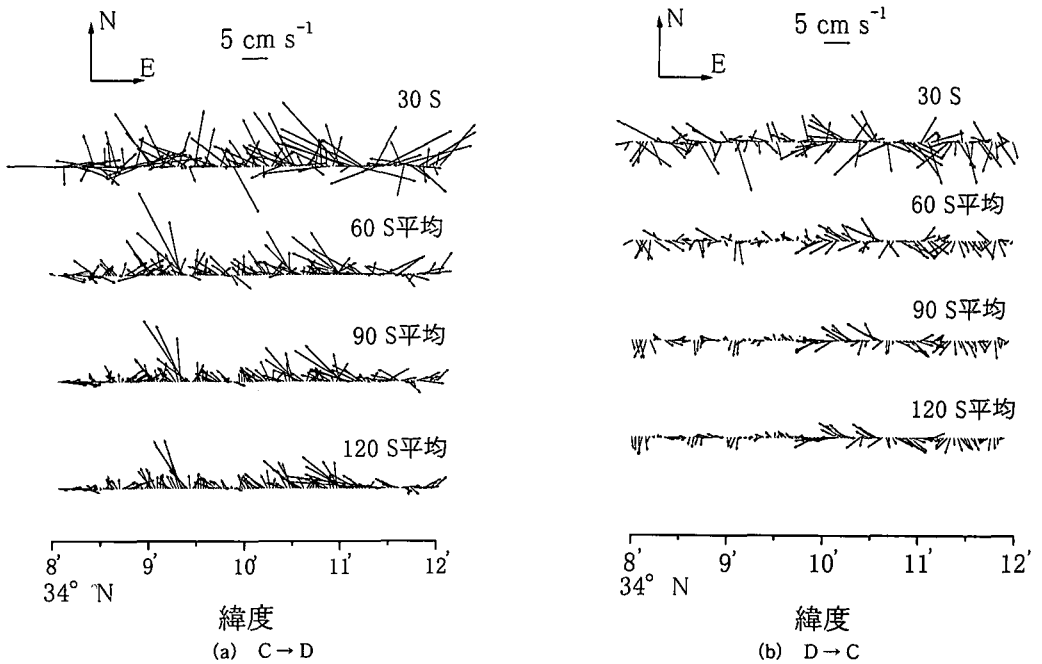


図-4 DGPSとADCPで求めた船速差のベクトル図。

クトル図を示す。C→Dの測線では、船速はかなり変動しているが、D→Cの測線では、船がほぼ一定の速さと方向で走っている。DGPSとコンパス補正後のADCPで求めた船速ベクトル(ADCP_{mod.})は、よく一致している。

コンパス補正後のADCPで求めた船速は2 cm s⁻¹以内の精度を持つことから、これを基準船速として、DGPSで求めた船速と比較する。ADCPの各サンプリング時間におけるDGPSとADCPで求めた船速の差を取って、

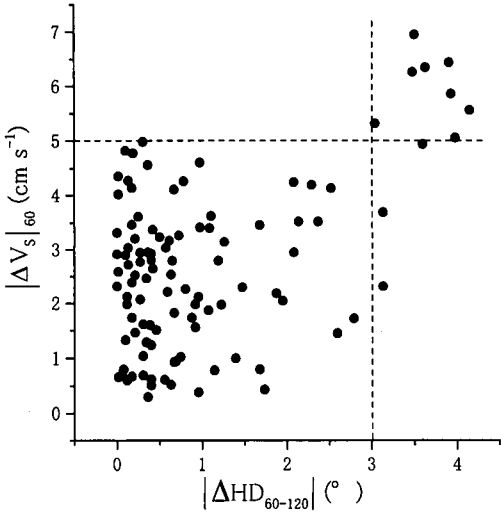


図-5 測線 DC 間の船首角差 $|\Delta HD_{60-120}|$ と船速差 $|\Delta V_s|_{60}$ の関係。

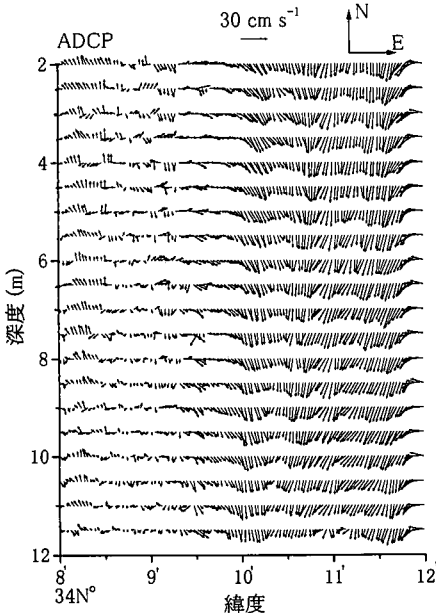
それぞれの時間幅で平均した。図-4 に DGPS と ADCP で求めた船速ベクトル差 (ΔV_s) を示す。船速が非常に安定している D → C の測線では、60 秒平均以上になると、 ΔV_s の絶対値はほぼ 5 cm s^{-1} 以内となる。一方、船速の変化が激しい C → D の測線では、60 秒平均しても ΔV_s の絶対値の約 30% のデータが 5 cm s^{-1} を超えていた。図-4 と図-3 を比べると、船速ベクトル差は船速が安定した D → C の測線では小さく、大きな船速ベクトル差は

船速の変化が激しい時に生じることがわかる。

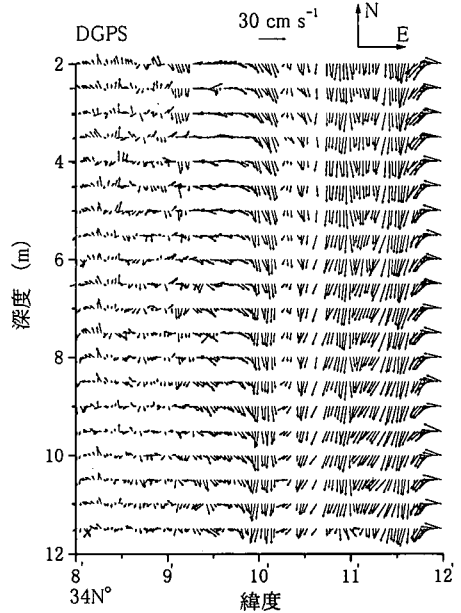
船位データから求めた船速の精度を保つためには、船速変化が大きい時のデータを除去することが必要である (Kaneko ら, 1990)。金子ら (1994, 1998) は、絶対船速値と船首角 (heading angle) の標準偏差をある条件を課すことにより、船速誤差の大きいデータを除去する方法を提案したが、この方法は長い平均時間幅を必要とするため沿岸海域には適用できない。ここでは別の方法を検討する。船速誤差を生じる原因としては、船首方向の変動と船速絶対値の変動の 2 つがあるが、前者による影響の方が、後者に比べて大きいことが言われている (金子ら, 1994)。このことは図-3 と図-4 において、C → D の船速絶対値の変動は非常に小さいのに、船首角の急変時には大きな船速差が発生していることからわかる。そこで、本研究では、船首方向の短期変動だけに注目する。ここで、船首角変動の指標として、対地モードで得られた 60 秒平均と 120 秒平均の船首角の差 (ΔHD_{60-120}) を導入する。図-5 に船首角が比較的安定していた点 D、C 間の船首角差と船速差との関係を示す。縦軸の $|\Delta V_s|_{60}$ は 60 秒平均した船速ベクトルの絶対値である。 $|\Delta HD_{60-120}|$ が 3.0° 以下では、 $|\Delta V_s|_{60}$ は 5 cm s^{-1} 以下の値を示しており、 $|\Delta HD_{60-120}| \leq 3.0^\circ$ という条件を課すと、船速差が 5 cm s^{-1} 以上のデータをすべて除去することができる。

3.4 DGPS による対地流速の計測

これまでの議論から、DGPS により対地流速 V_f を求める手順は、以下のようになる。



(a) ADCP



(b) DGPS

図-6 測線 DC 間の ADCP の対地モードと DGPS で求めた流速のベクトル図。
 $|\Delta HD_{60-120}| > 3.0^\circ$ のデータは除去されている。

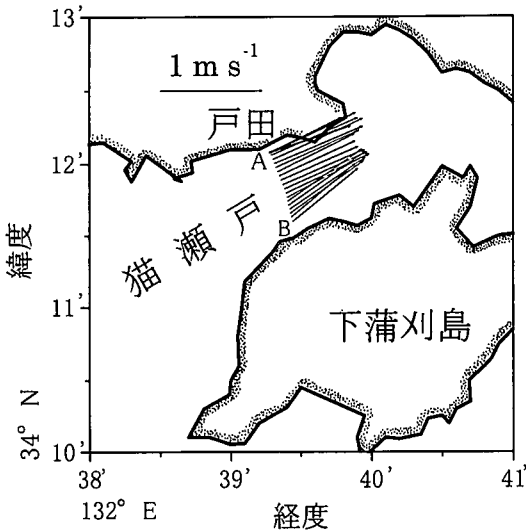


図-7 DGPS で求めた測線 AB 間の対地流速 (水深 10 m)。

- 60 秒の DGPS の位置変動により船速 V_s を求める。
- コンパス補正を施した 60 秒の平均ドップラー流速 V_a を求める。 V_a から V_s を差引くことによって V_f を計算する。
- $|\Delta HD_{60-120}|$ が 3.0° 以上のデータを V_f から除去する。

この方法で流速を求めた場合、船速差は 5 cm s^{-1} 以内に押さえられるため、流速精度も 5 cm s^{-1} 以上となる。なお、観測時の船速は約 5 Knot であったため、この手順で求めた流速の水平分解度 (平均幅) は、約 150 m である。また、観測船ができるだけ一定の方向と速さで走行することが要求される。例えば、C → D の測線では、半分ぐらいのデータがこの解析法により除去され、欠測になってしまう。しかし、D → C のような安定な速度で走行した場合には欠測は非常に少ない。

本方法による解析例として図-6 に、D → C 間における DGPS で求めた流速と ADCP の対地モードで求めた流速を示す。DGPS の方は、 $|\Delta HD|$ が 3.0° 以上のデータを除去している。両者を比べると非常によく一致している。下げ潮の時間帯で、北緯 $34^\circ 11'$ 付近に、約 20 cm s^{-1} の南向きの潮流が観測されている。

同様の解析法で、ADCP の対地モードが取れない測線 AB 間の対地流速を求めた (図-7)。上潮の時、猫瀬戸に、約 1 m s^{-1} の東向きの流れが観測されたが、B 点近くでは、船が急旋回するため、 $|\Delta HD_{60-120}|$ が 3.0° 以上になり、数点の欠測があった。

4. おわりに

本研究では、地上定点実験により測位精度を確認した DGPS を使用して船載型走行 ADCP の海上実験を行った。DGPS と ADCP の比較によって、観測船が ADCP のコンパスに与える影響を検討した。その結果、DGPS による船速を求める条件として、平均の船首角差 3.0° 以下、船速平均時間幅 60 秒以上を提案し、沿岸海域で測位データを使用した走行 ADCP の絶対流速を求めた。

DGPS を沿岸海域の走行 ADCP 計測に応用することにより、ADCP の計測精度の向上だけでなく、これまで沿岸用 ADCP で対地モードが取られないところにおいても観測が可能になる。

本研究の海上実験では、海底の変化が小さい海域で行われたため、急峻な海底地形に及ぼす ADCP の対地モードの影響まで踏み込むことができなかった。今後は、急峻な海底地形と平坦な海底地形を持つ海域の比較実験により、海底地形が及ぼす影響を明かにする予定である。

謝辞：DGPS の受信ソフトには、いろいろご協力下さった広島大学工学部江田憲彰博士、鄭紅博士に謝意を表します。

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.
- 金子 新・荒井正純・江田憲彰・杉本隆成・中嶋秀夫・袁 宙・鄭 紅・朱 小華・山根将司 (1998): 商船を利用した西太平洋の ADCP 観測, 海の研究, 第 7 巻, 第 6 号, pp. 357-368.
- 高杉由夫・肥後竹彦・埜口英昭 (1987): 瀬戸・海峽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, *La mer*, 25, pp. 167-174.
- 藤原建記・高杉由夫・肥後竹彦 (1989): 超音波ドップラー流速プロファイラーによる沿岸域の流れの可視化, 沿岸調査技術, 1, pp. 57-65.
- Hanawa, K., Y. Yoshikawa and T. Taneda (1996): TOLEX-ADCP monitoring, *Geophys. Res. Letters*, Vol. 23, No. 18, pp. 2429-2432.
- Japan Radio Co., Ltd. (1997): Instruction manual, DGPS Sensor DGPS200, Japan Radio Co., Ltd., Tokyo, 33 p.
- 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.
- 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.
- RD Instruments (1998): Workhorse Acoustic Doppler Current Profilers Technical Manual, RD Instruments, San Diego, California, 218 p.