

# GPS精密測位漂流ブイによるサンゴ礁海域の流れの計測

工藤 君明\*<sup>1</sup> 寺尾 裕\*<sup>2</sup>  
中村 仁\*<sup>1</sup>

当センターでは、沿岸海域生態系の再生産過程と海水流動の関連を明らかにするため、海水流動の精密計測手法の研究開発を進めている。陸域起源の栄養塩やセジメントの輸送交換、さらに浮遊性の魚卵・仔稚魚の分散分布など、特定の「もの」の移動・分散を調査したり、特定水塊の変質を把握するためには、水塊とともに移動する漂流系が有効な手法である。著者らは、沿岸域の複雑な流れを計測調査するため、GPS受信機を搭載した漂流ブイシステムを開発した。

GPS測位データは数百メートルの誤差を含んでおり、基準点における誤差解析から、漂流ブイの測位誤差を除去するディファレンシャルGPSを開発した。他方、単独測位データの平滑化アルゴリズムを開発し、ディファレンシャルGPSと比較検討した。平滑化アルゴリズムは漂流ブイの軌跡および移動速度の推定に十分利用できることが明らかになった。

GPS漂流ブイをサンゴ礁海域である中城湾において、潮流と吹送流による海水交換の調査に応用した。漂流ブイの軌跡は風向風速と潮流の組み合わせによって変化するが、湾中央部では、等深度線に直交あるいは沿って移動する傾向がある。またリーフの間にある水道では、風や潮汐にかかわらず流出するという特性が見られた。

キーワード：漂流ブイ, GPS, 利用者選択, ディファレンシャルGPS, サンゴ礁,  
海水交換, 潮流, 吹送流

## Precision Current Measurements in Lagoonal Waters Using GPS Drifting Buoy.

Kimiaki KUDO\*<sup>3</sup> Yutaka TERAO\*<sup>4</sup>  
Hitoshi NAKAMURA\*<sup>3</sup>

JAMSTEC is developing precision current measurement technologies for clarifying the relationships between current characteristics and reproduction processes

- 
- \* 1 海域開発研究部
  - \* 2 東海大学海洋学部
  - \* 3 Marine Development Research Department
  - \* 4 Tokai University

in coastal ecosystems. Measurement using drifters is appropriate for investigating the transportation and dispersion of specific substances, such as nutrients and sediments, and the alteration of the specified water mass. Developed was a GPS drifting buoy system to precisely measure complex currents in lagoonal seawater.

GPS point positioning includes a few hundred meters of position errors. A differential GPS eliminating these errors, based on an error analysis at a fiduciary station was developed along with a smoothing algorithm on point positioning data, which has proved practical to calculate both the path and velocities of a drifting buoy.

The GPS drifting buoy system was applied to investigate the water exchange process in the lagoonal Nakagusuku Bay. The paths change in wind direction, wind speed and tidal current. However, in the center of the Bay characteristic paths along or across the isobath were revealed. Another characteristic path was found in the reef channel, through which the drifting buoy moves out against both wind and tidal currents.

**Key words:** Drifting bouy, GPS, SA(Selective Availability), Differential GPS, Coral reef, Water exchange, Tidal current, Wind-driven current

## 1 はじめに

沿岸海域は陸域からの開発利用と外洋からのエネルギー供給の境界域であり、さまざまな物質が物理的、化学的、そして生物学的なプロセスを経て循環しつつ、外洋へと流出していく場所である<sup>1)</sup>。これらの物質循環を基本的に支配しているのは海水流動である。海水流動は陸域起源の栄養塩やセジメントの輸送交換ばかりでなく、浮遊性の魚卵・仔稚魚等の分散分布を通して、沿岸海域生態系の再生産過程に影響を及ぼしている。

沿岸海域の海水流動パターンや特性を把握することは、海域環境の動態を評価し、さらに海域制御手法などの開発を進めるための条件である。このためには海水流動を直接測定したり、数値シミュレーション解析により評価することが必要になる。海水流動の測定には、海域の特性や調査目的に応じて様々な手法が開発されている<sup>2)</sup>。魚卵・仔稚魚など、特定の「もの」の移動・分散を調査したり、特定水塊の変質を把握するためには、水塊とともに移動する漂流系が有効な手法である。沿岸海域の海水交換では、潮流による鉛直混合が強く、平面的なパターンの調査に適している。これに対して、吹送流や密度流が卓越して、流動に鉛直構造

が形成されるような海域では、定点における時間変化を連続的にモニターする係留系が有効である。このほかに、海面水温の水平的な分布をみることが出来る人工衛星リモートセンシングや、調査船による水温・塩分・卵稚仔の分布と流れの三次元的調査法がある。実際の海域調査では、それぞれの特性を活かし、うまく組み合わせて実施することが必要になる。

当センターでは、沿岸海域生態系の再生産過程と海水流動の関連を明らかにするため、海水流動の精密計測手法として漂流系の研究開発を進めている。外洋を対象とした海洋学研究では、漂流系としてアルゴスブイやロランCブイが実用されている<sup>3)</sup>。しかし、沿岸においては、これまで主として簡易な漂流ブイや海流ビン等が用いられてきたが、測位精度が低く、解析処理に手間がかかるなどの問題があった。最近では、測位にGPSが利用できるようになってきており、漂流ブイにGPS受信機を搭載し、沿岸域の複雑な流れを計測調査することを目的として、GPS精密測位漂流ブイシステムを開発した。本システムの開発にともなう運用試験およびサンゴ礁海域である中城湾における調査結果については別途報告してあるの

で<sup>4)</sup>, システムに関しては概略を紹介するにとどめる。本論文ではGPS測位の測位誤差消去の解析処理法と, 中城湾において平成4年の6月と9月に実施した調査結果について検討する。

## 2 GPS精密測位漂流ブイシステム

このシステムはGPS受信機を内蔵して精密測位可能な漂流ブイ, 測位精度や安定性を評価するためのGPS陸上基準局, さらに漂流ブイの位置追跡のためのテレメータシステムから成っている。GPS精密測位漂流ブイシステムの構成と仕様を表1に示す。

### 2.1 漂流ブイ

漂流ブイ本体は高さ1mのほぼ円筒形である(図1)。ブイの素材は耐食アルミ合金製である。バッテリーを含めた搭載機器の重量は49kg, 本体重量91kgである。ブイから計測器類を最大20kgまで直接吊下げることができる予備浮力をもっている。

GPSアンテナをブイ本体上部に配置し, マイクロ波の通過を妨げないGRP製アンテナカバーで保護している。テレメータ用ホイップアンテナ

はGPSアンテナの直上に配置した。

ドロークは測流深度の流れを受ける抵抗体である。ここでは抵抗係数が大きく扱いの簡単な短冊シートを採用した<sup>5)</sup>。シートの上下端にそれぞれ海中重量20kgの鉄棒を入れて, ドロークが吹き上げられないようにした。ドロークを吊下げるため専用の浮子を準備し, 漂流ブイ本体から分離した。この理由は, 漂流ブイが波浪に対して自由に上下して常に海面上にすることができるようにし, かつ海上での展開と回収を容易にすることを目的としたからである。ドロークの面積は漂流ブイの喫水投影面積の約18倍である。なお, 中城湾における調査では, ドローク深度は上端5mであり, 測流深度は約7mとしている。

### 2.2 GPS測位システム

漂流ブイの測位装置としてMagnavox社製GPS受信機MX4200を搭載している。この受信機は小型計量であるが, 表示部や入力操作部はいっさい無く, RS-422シリアルポートを通してパソコンにより制御コマンドの入力とデータのロギングを行う必要がある。このためのパソコンとして東芝J-3100 DynaBookモデルSS002にハードRAM 8

表1 GPS漂流ブイシステムの仕様  
Table 1 Specifications of GPS drifting buoy system.

Buoy:	Approx. cylindrical Diameter 97cm(max.) Height 98cm Draft 51cm Weight 140kg
Drogue:	Wind shade type Length 3.87m Width 1.5m Weight 40kg
Drogue area ratio:	18:1
GPS receiver:	MX4200(Magnavox) L1, 6channels
Data logger:	J-3100 DynaBook HardRAM 8MB
Radio Transmission:	Output power 0.5W Frequency 169.25MHz
Power:	DC12.6V, 130AH

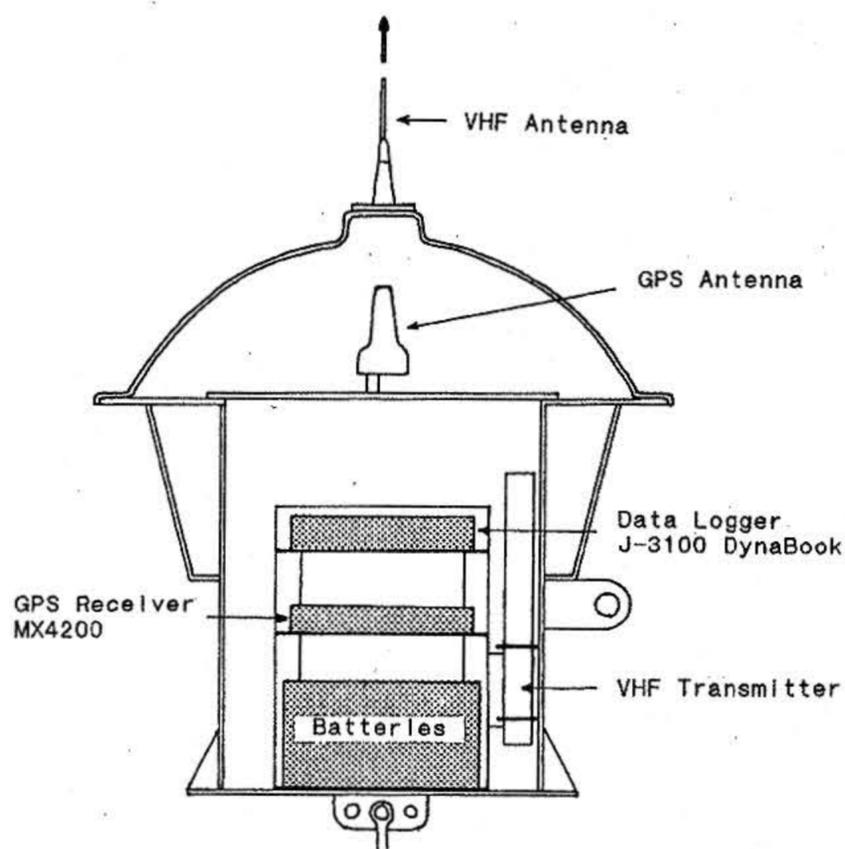


図1 GPS漂流ブイの断面図  
Fig.1 Section diagram of the GPS drifting buoy.

MBを搭載して使用している。

漂流ブイの機器が正常に作動しているかどうかを監視し、また陸上ないし警戒船上で位置を確認できるようにするため、GPS単独測位データをVHF電波によりテレメトリする方式とした。テレメータの電波到達距離は8km程度であるが、湾内であれば十分にモニターでき、また回収時の発見が容易となっている。

### 3 GPS測位データの誤差消去と平滑化

#### 3.1 GPS測位データの誤差

GPSの単独測位では、GPS衛星から送信される電波に乗っている航法メッセージを解読し、各衛星の放送軌道情報から4つの可視衛星の位置と受信点から各衛星までの距離を推定して、受信点の位置を計算する<sup>6)</sup>。4つの衛星が必要となるのは、受信点の3次元位置と受信機時計の遅れの4つが未知数となっているからである。ある時刻に各衛星から信号が送信され、これを受信した時刻から、信号の到達時間が計算でき、これに光速を乗じると衛星と受信点との距離が推定できる。GPS衛星には高度に安定化した原子時計が搭載されているが、これに比べれば受信機時計の精度はかなり低く、衛星と受信点の距離は大きな誤差を含むことになるので、擬似距離 (pseudorange) と呼ばれる。しかし、受信機時計の遅れは全ての衛星に対して共通であるため、4衛星の擬似距離に関する方程式を解けば受信点の位置と受信時刻を精密に求めることができる。

このようにして得られたGPS単独測位結果には原因の異なる誤差がいくつか含まれている。放送軌道情報から計算された各衛星の位置の誤差、電波が電離層と対流圏を通過する際に生じる伝播速度の遅れによる誤差、さらに4衛星の幾何学的配置にともなう解析誤差などである。これらによる測位誤差は総合して約20m程度と期待されている。しかし、GPS測位システムは本来軍事目的で開発されてきた経緯もあり、一般利用者の精度を低下されるSA (利用者選択) 政策がとられることになっている。SAの方法は各衛星時計に2次マルコフ過程の雑音を重ね合わせて震動させ、各衛星と受信機の距離に誤差を入れるというものである。雑音発生の際をもつものだけがこの雑

音を除去できるというものである<sup>7)</sup>。これによって、GPS単独測位の精度は200m程度まで劣化すると考えられている。現在はSAの試験期間中でもあり、誤差の程度も変化していることが観測されている。図2に、沖縄本島にある海洋科学技術センター知念実験本部において、平成4年9月22日0:00~8:00まで観測した例を示す。2時頃までは4衛星による単独測位精度は10m程度であったものが、3衛星になったため誤差が大きくなった。衛星の信号が一旦途絶えて、まもなく4衛星が可視となったときには、SAが発動されており、周期12分程度、測位精度100m程度のノズルが乗っている。

以下では、海洋科学技術センター (横須賀市)、東海大学海洋学部 (清水市)、静岡大学教養学部 (静岡市) の固定基準点 (図3) で同時観測した

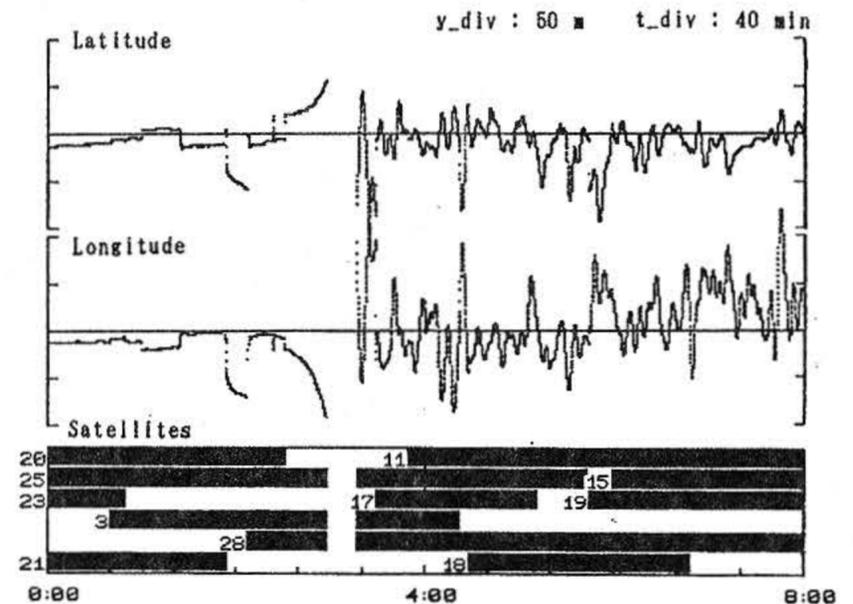
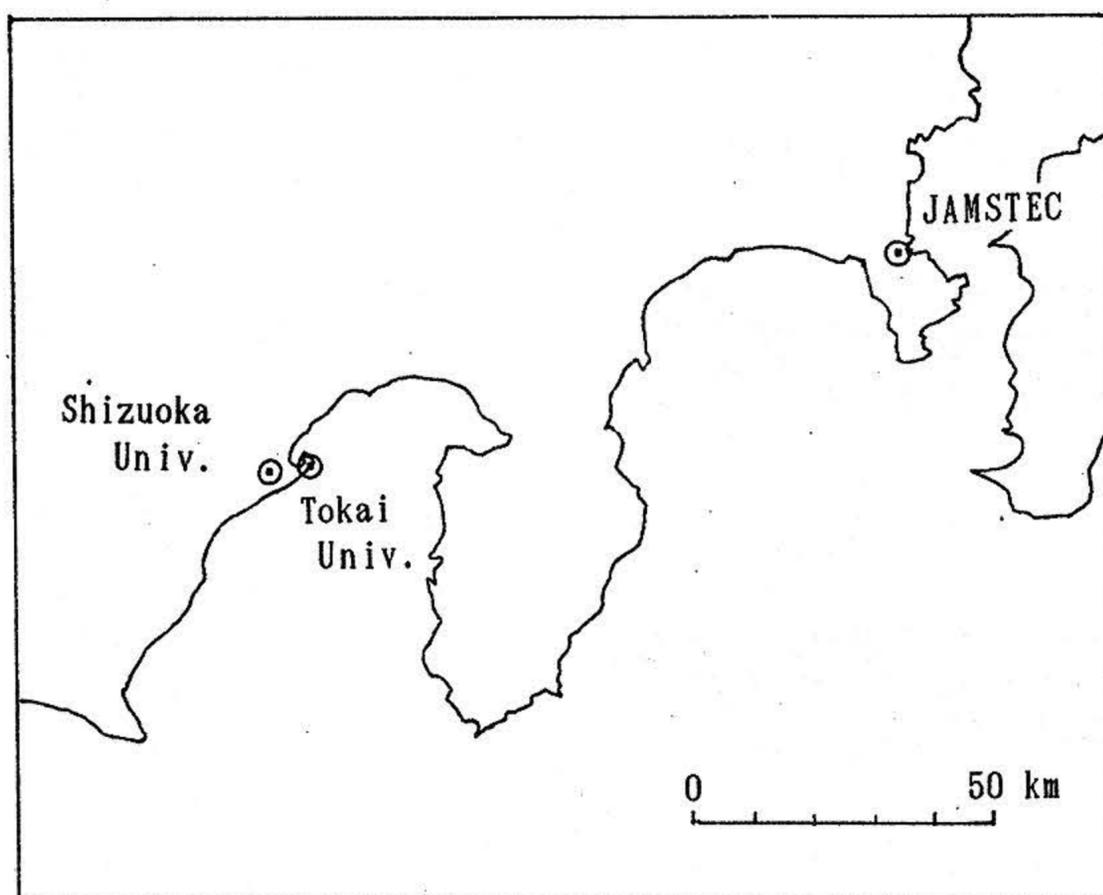


図2 SAによるGPS単独測位精度の劣化

Fig.2 GPS point positioning errors augmented due to Selective Availability.

Latitude, longitude and visible satellites.

測位データにより、誤差消去法の精度を検討する。誤差消去は東海大学をベースに他の2点の相対測位を行う。東海大学-静岡大学は約8km、東海大学-海洋科学技術センターは約130km離れており、相対測位精度が距離によってどの程度影響を受けるかを調べるのが期待できる。なお、測位精度の議論をするためには、各点の位置が精密に分かっている必要がある。海洋科学技術センターの基準



WGS-84	JAMSTEC	Tokai Univ.	Shizuoka Univ.
Latitude	35° 19' 13".998	34° 59' 16".838	34° 57' 59".061
Longitude	139° 38' 58".796	138° 30' 41".743	138° 25' 50".314
Height	50.69 m	64.27 m	107.96 m

図3 海洋科学技術センター，東海大学，静岡大学の基準点位置

Fig.3 Fiducial points at JAMSTEC, Tokai University and Shizuoka University.

点は国土地理院の基準点との間（約100km）で相対測位によって求めたものである<sup>8)</sup>。また，東海大学の基準点は静岡大学教養学部の基準点<sup>9)</sup>から相対測位したものである。

### 3.2 単独測位の単純差

図4は各基準点において同時観測した平成4年（1992）5月21日12:00～16:00の測位データである。ここでは各基準点における緯度誤差の時刻歴と各受信機がトラッキングしている衛星を表示してある。受信機はともにMX4200であるが，場所により可視衛星の状況は異なり，また受信機が測位計算に使う衛星の組み合わせは必ずしも同一になるとは限らないので，測位結果には差がでてくることになる。

図5は東海大学を基準にした測位結果の単純差による緯度誤差である。東海大学の基準点において単独測位の誤差を計算し，相手側の単独測位結果から誤差分を単純に差し引いて位置を推定し，

基準位置からの差を示したものである。この単純差方式では測位精度が非常に高い部分と誤差が残る部分とが不均一になっている。誤差が大きいままの部分では，衛星が新しく可視になったり，逆に見えなくなって，測位に使われる衛星の組み合わせが変化する時間に対応している。誤差の入るタイミングは東海大学-静岡大学，東海大学-海洋科学技術センターともほぼ同じであるが，期間や誤差の大きさは異なっている。この点は，主として受信機特性（ソフトウェアにあるパラメータ設定）の差によるものであり，二点間の距離の影響は明確ではない。むしろ，距離が非常に大きくなっても，単独測位の衛星組み合わせが同一となるように制限すれば，高精度の相対測位が期待できるように思われる。

### 3.3 ディファレンシャルGPS

GPS測位では，利用目的に応じて精度を高めるための工夫がなされてきた。これらはいずれも

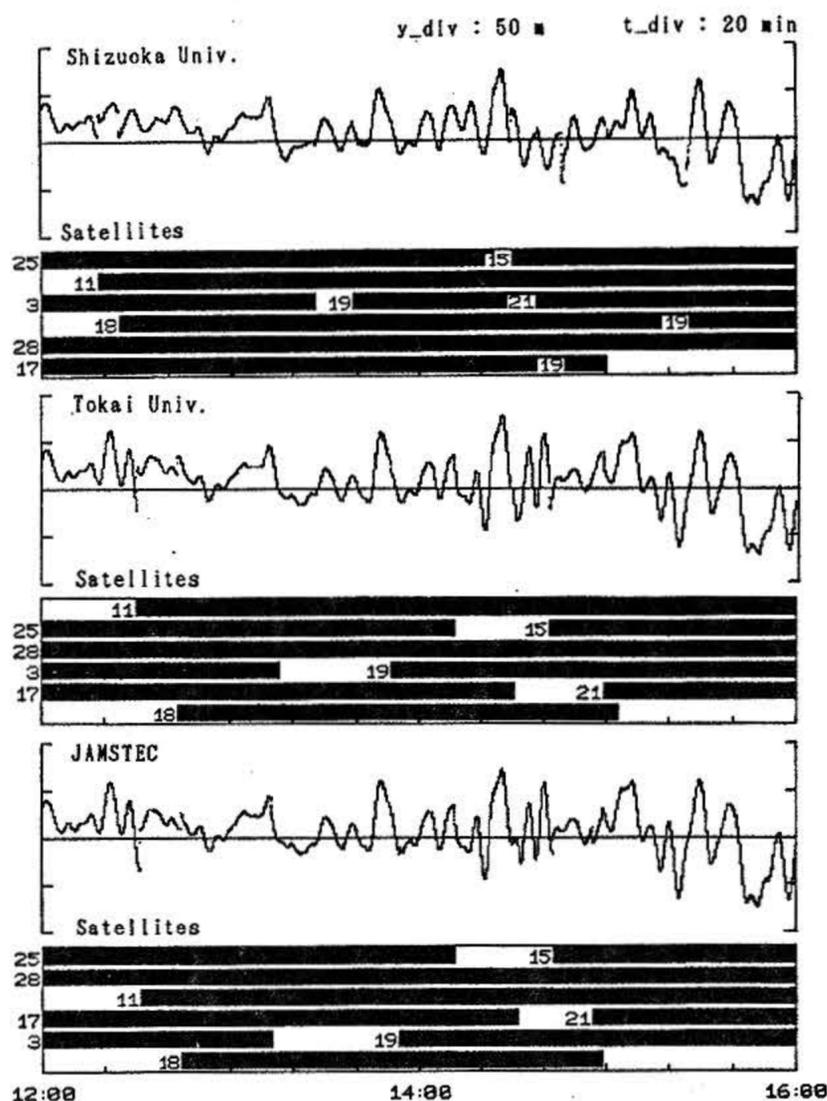


図4 基準点における緯度観測誤差  
(平成4年5月21日)

Fig.4 Latitudinal errors observed  
simultaneously at three fiducial  
points (21 May 92)

相対測位を基本にしている。相対測位には、観測量に搬送波位相を測定する干渉測位と単独測位と同様に擬似距離を用いるディファレンシャルGPSがある。干渉測位は2点間の相対測位誤差が0.1ppm程度、すなわち10kmで1cm程度の精度が期待でき、地殻変動やジオナイドなどの科学研究や測量調査に利用されている。搬送波位相測定のため、特別な受信機と解析システムを必要としている。また固定点における一定時間の観測が必要であるため、動的なシステムへの利用は困難である。

これに対してディファレンシャルGPSは単独測位の受信機を基本としている。位置が精密に分っている基準点において観測すると、放送暦を用いて衛星と基準局の距離Cが計算でき、単独測位による擬似距離Oとの差O-Cが求められる。移動局でも同様の観測をする。この場合には位置は分

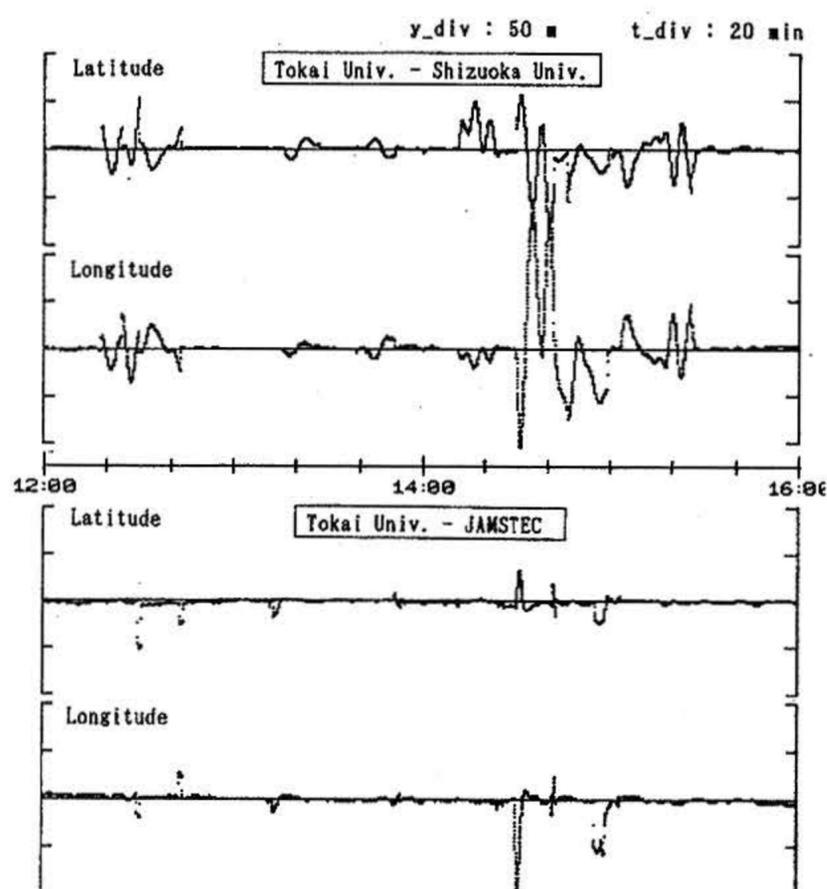


図5 単独測位の単純差 (平成4年5月21日)  
Fig.5 Simple differences of point  
positionings (21 May 92)

らないので単独測位によって擬似距離が得られる。移動局-衛星と基準局-衛星の誤差特性があまり変化しない場合には、移動局の擬似距離は基準局の擬似距離誤差O-Cによって補正でき、移動局と衛星の真距離を推定することができる。この真距離によって移動局の測位を行うことができる。

基準局における各衛星の擬似距離誤差を無線送信し、これを近くの船舶等が受信することにより、各船舶のGPS測位精度をリアルタイムで向上させる手法がディファレンシャルGPSといわれるものである。したがって通常は、移動するもののリアルタイム測位が基本になっている。

この研究では、GPS漂流ブイの測位精度の向上を目的としており、GPS観測後のポストプロセッシングが主体であるが、誤差消去の基本的な考え方は全く同一であるため、ディファレンシャルGPSと呼んでいる。前節に紹介した、海洋科学技術センター、東海大学、静岡大学の観測データにディファレンシャルGPS処理した結果を図6と図7に示す。ただし、解析期間は12:00~14:00の2時間分である。

図6は東海大学を基準にした静岡大学の、また図7は東海大学を基準にした海洋科学技術センター

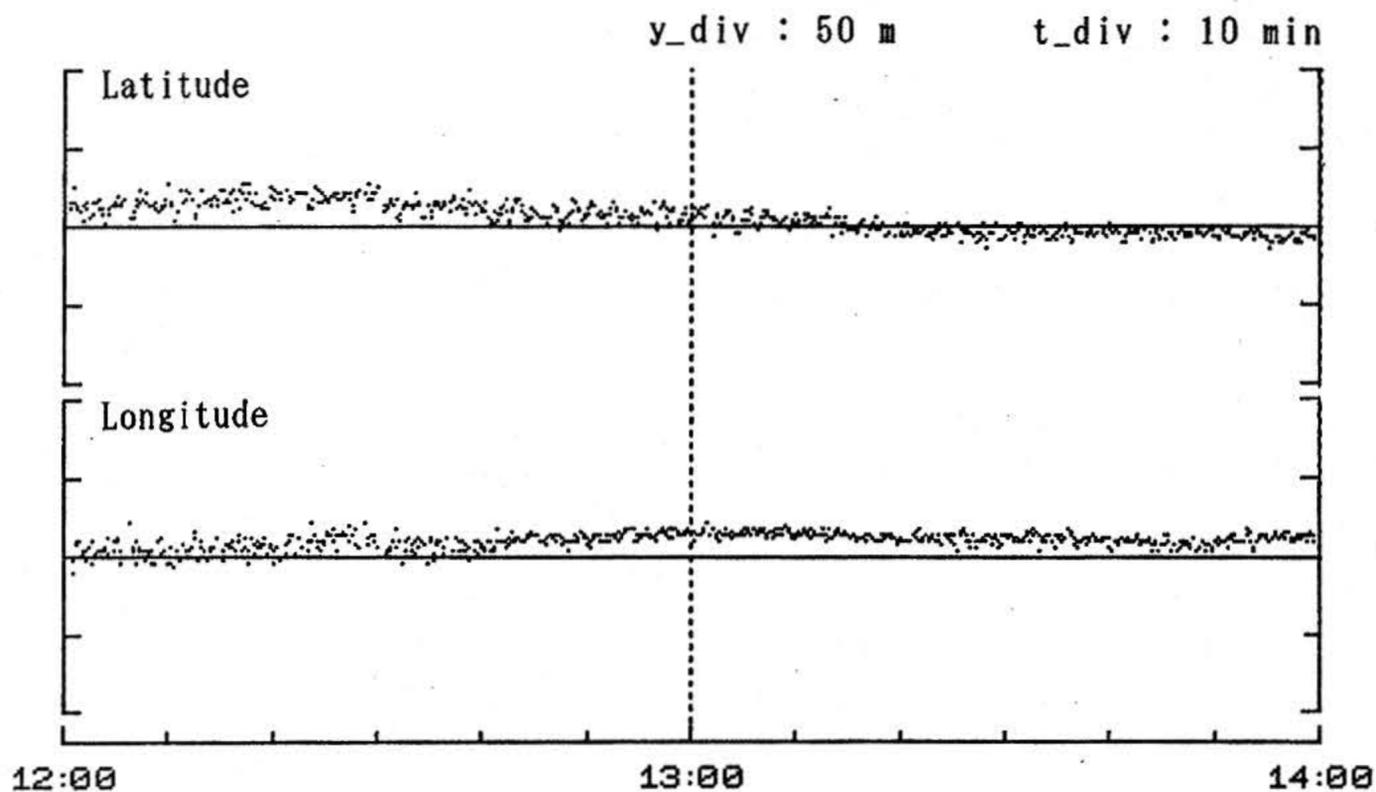


図6 ディファレンシャルGPS [静岡大学-東海大学] (平成4年5月21日)  
 Fig.6 Differential GPS [Shizuoka Univ.-Tokai Univ.] (21 May 92).

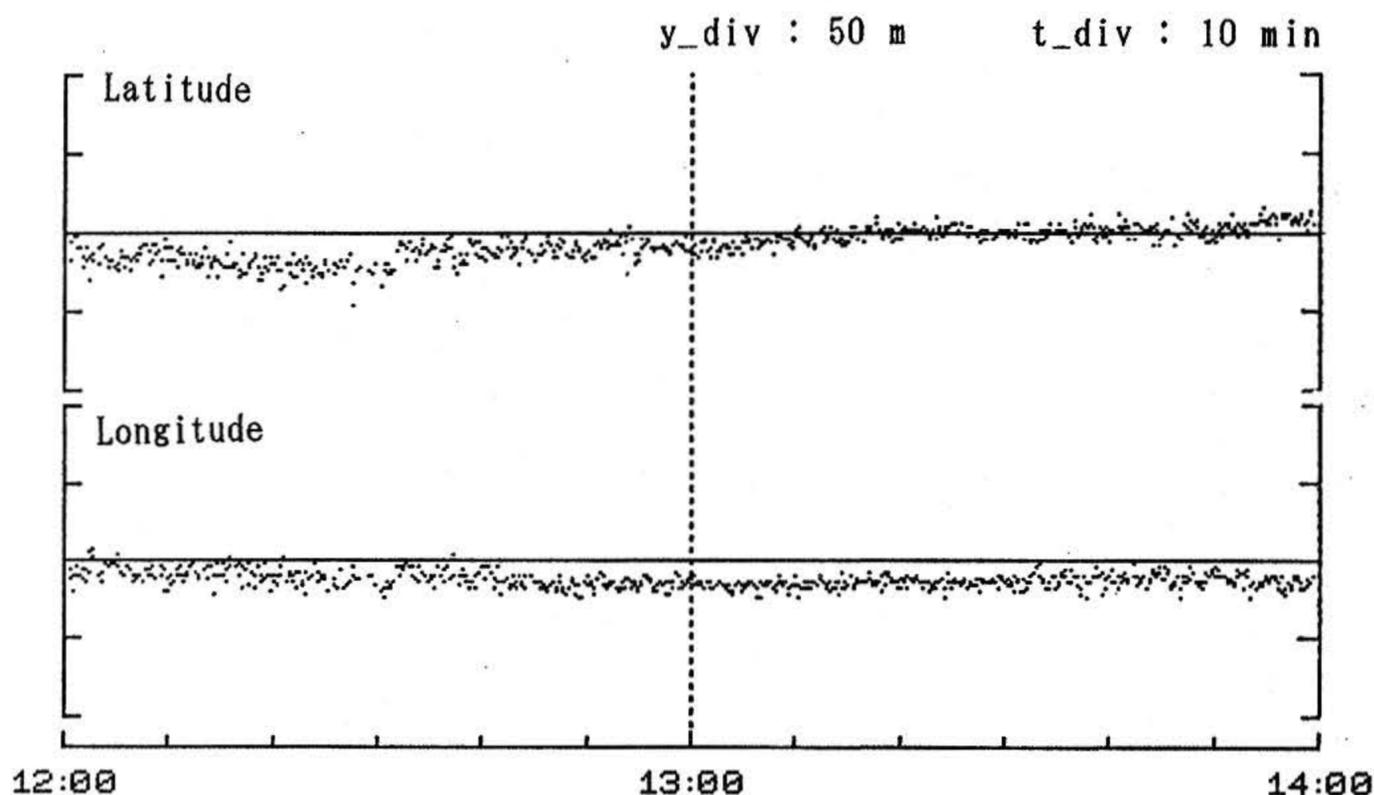


図7 ディファレンシャルGPS [海洋科学技術センター-東海大学] (平成4年5月21日)  
 Fig.7 Differential GPS [JAMSTEC -Tokai Univ.] (21 May 92).

のディファレンシャルGPS測位誤差である。いずれの場合も測位誤差は約10m程度となっており、SAの特徴である大きなゆらぎは除去されている。また、単純差とは異なり、衛星の組み合わせ変化による顕著な精度劣化もみられない。なおこの測位データにはフィルタ処理を行っていないので、細かなノイズが重なっている。

以上、単純差とディファレンシャルGPSという二つの相対測位法を紹介したが、漂流ブイの測位という利用目的からすれば、単純差はデータ処理が簡単であるが、衛星切り換え時に突然精度劣化が生じるという不安があること、またディファレンシャルGPSは精度は十分であるが、解析に手間がかかるという難点がある。(ただし、シス

テムとして完成してしまえばたいした問題ではない)。しかし、漂流ブイの軌跡および速度変化を測定する目的からみた場合には、単独測位の平滑化でも十分の精度が得られるならば、基準点での観測が不要となり、この点でも実用的と考えられる。次節ではワンパス法による平滑化を検討し、ディファレンシャルGPSと比較する。

### 3.4 ワンパス法2による平滑化

GPS単独測位データにはランダムな観測誤差とともに、SAによる長周期で振幅の大きな変動が含まれている。これに比べれば漂流ブイの移動は緩慢であり、変動も小さいと考えられるので、平滑化によって、観測誤差ばかりでなくSAによる変動も取り除けることが期待できる。SAによる変動の周期は12分前後であるから、この成分を除去するためには1時間程度の区間に対して平滑化する必要がある。ここでは各区間に三次関数をあてはめ、各区間毎に滑らかに接続するワンパス法を用いた。

ワンパス法には、接続点において1次導関数まで連続なワンパス法1と二次導関数まで連続なワンパス法2がある。本研究では漂流ブイの軌跡と速度を滑らかに推定できるようにするため、ワン

パス法2が適している。ワンパス法2では、区間  $I = [t_0, t_1]$  における誤差を含むデータに対して、三次関数をあてはめる(図8)。

$$S(\tau) = y_0 + m_0 \tau + \frac{1}{2} M_0 \tau^2 + a \tau^3 \quad (1)$$

$$\tau = t - t_0$$

ここで、 $y_0 = S(0)$ ,  $m_0 = S'(0)$ ,  $M_0 = S''(0)$  は区間  $I$  の始点  $t_0$  における値である。未定係数  $a$  は、区間上の接点で2次導関数まで連続という条件のもとで、残差が最小となるように決定する。終点  $t_1 = t_0 + h$  における連続条件は、

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= y_0 + m_0 h + \frac{1}{2} M_0 h^2 + a h^3 \\ m_1 &= m_0 + M_0 h + 3a h^2 \\ M_1 &= M_0 + 6a h \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。最小自乗法を適用する区間は、未来の区間  $\Delta I$  も考慮に入れて、平滑化が安定に進むようにする必要がある。残差は次式で表わされる。

$$Q = \sum_{I + \Delta I} [S(\tau) - F_k]^2 \quad (3)$$

ただし、 $F_k$  は時刻  $t_k$  における観測値である。この残差は次式の積分で近似することができる。

$$Q = \int_0^h [S(\tau) - F(\tau)]^2 d\tau \quad (4)$$

$$r = 1 + \alpha$$

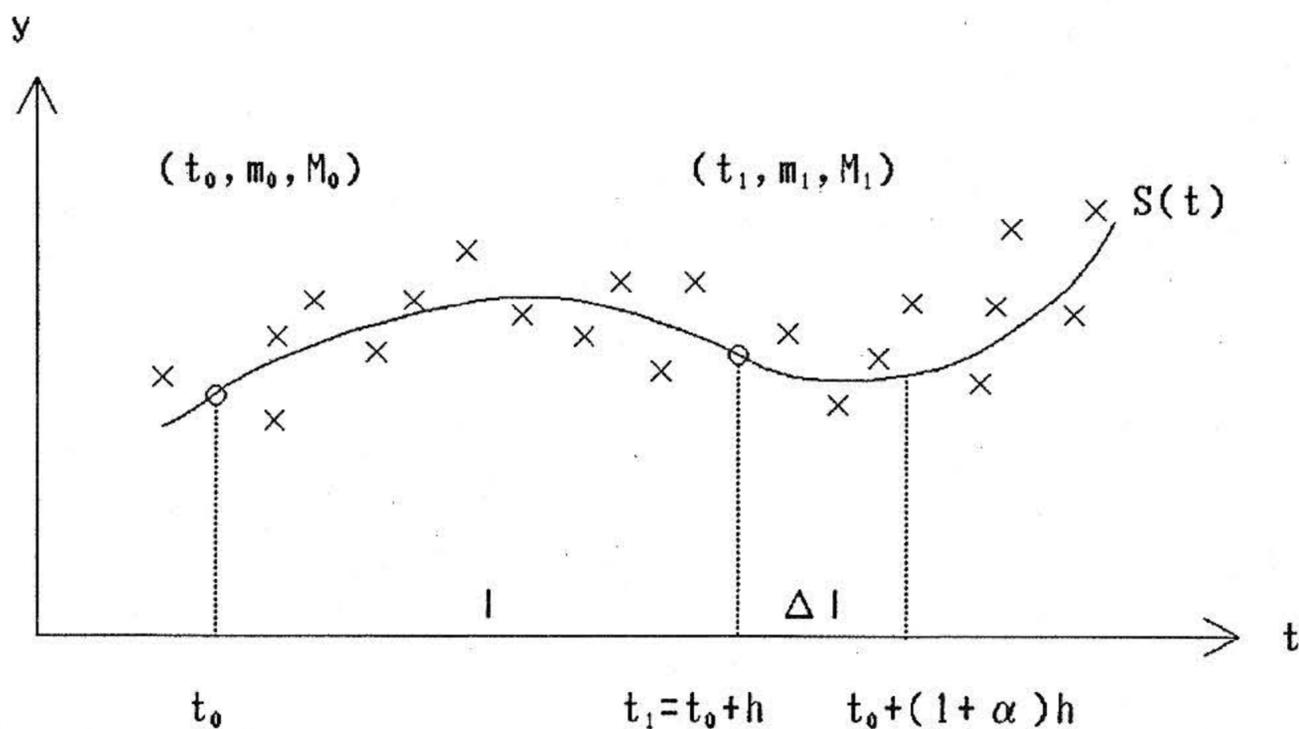


図8 ワンパス法2による平滑化  
Fig.8 Smoothing by Onepath 2.

この残差が最小となるように  $\alpha$  を決定すると、連続条件は次の漸化式となる。

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ m_1 \\ M_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12}h & d_{13}h^2 \\ d_{21}/h & d_{22} & d_{23}h \\ d_{31}/h^2 & d_{32}/h & d_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ m_0 \\ M_0 \end{pmatrix} + u \quad (5)$$

ここで、 $d_{ij}$  は未来区間比率  $\alpha$  に依存するが、区間幅  $h$  には無関係である。また  $u$  は  $y_0, m_0, M_0$  には独立な定数である。この漸化式が安定であるためには、係数マトリックスの固有値の最大値が 1 より小さいということが条件になる。固有値  $\lambda$  は  $h$  に無関係であり、固有値の最大値  $|\lambda|_{\max}$  と  $\alpha$  との関係を図 9 に示す。

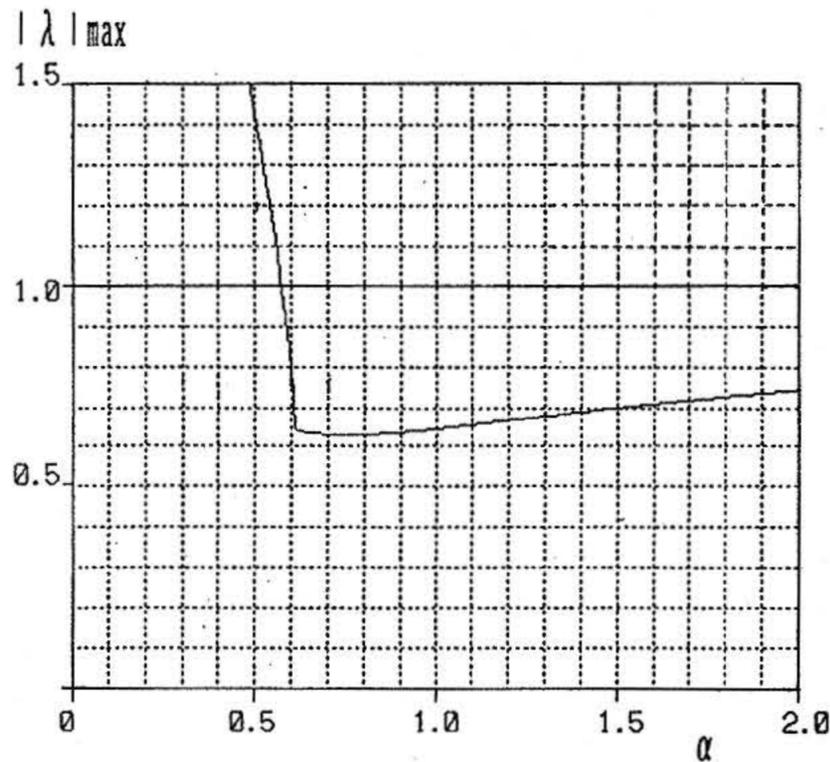


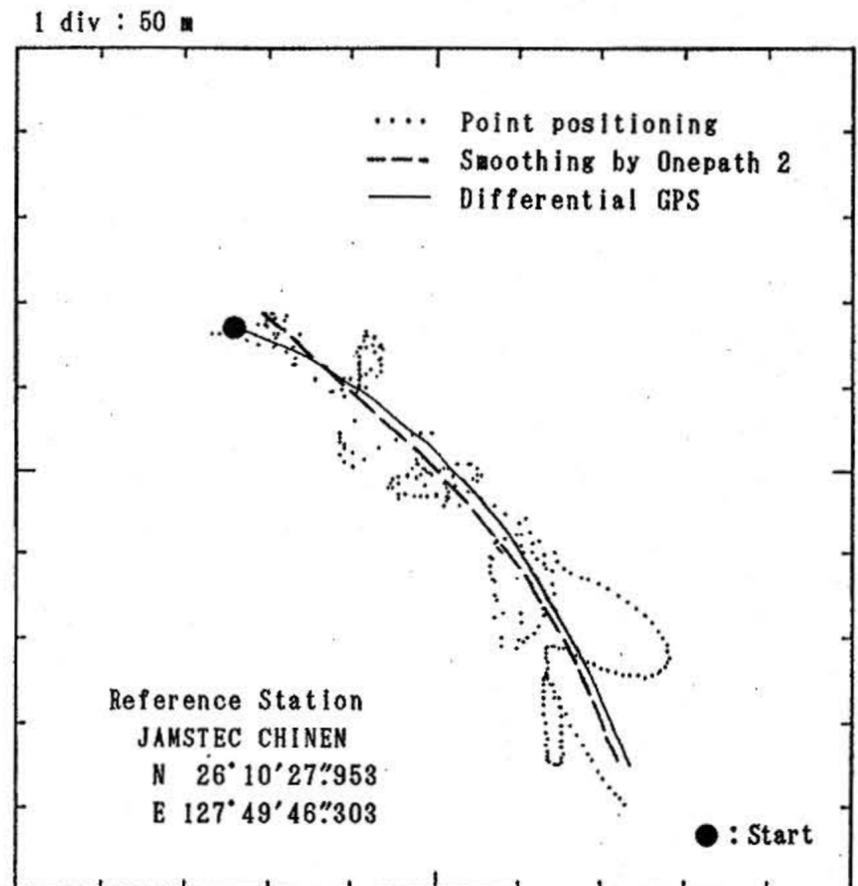
図 9 ワンパス法 2 の  $\alpha$  と  $|\lambda|_{\max}$

Fig.9 Relation between  $\alpha$  and maximal eigenvalue.

本研究では、ワンパス法 2 における区間の長さ  $h$  と、未来区間の比率  $\alpha$  について検討した。 $\alpha$  は安定性を考慮して 0.75 とした。区間長  $h$  が小さすぎると、SA による変動に追随してしまうので除去することができず、逆に大きくなりすぎると漂流ブイの運動までも抑制して、再現できなくなる可能性がある。固定点における観測データの平滑化テストによると、 $h=60\text{min}$  以上になると平滑度も高く、速度変動も小さくなることが分かったので、漂流ブイ測位データの平滑化では、区間長

60分、未来区間長 45分とした。

図 10 は漂流ブイの軌跡の生データ、ディファレンシャル GPS、ワンパス法 2 による平滑化を比較したものである。観測データは中城湾における漂流実験の一部であり、図 13 に示す漂流ブイの軌跡から約 50 分間分を切り出している。漂流ブイは基準点（海洋科学技術センター知念実験本部）から約 5 km の地点にいる。ディファレンシャル GPS に比べ、生データによる漂流ブイの位置は大きく動き回っているが、これは SA に起因する測位誤差によるものである。ワンパス法 2 では、緯度と経度に関してそれぞれ平滑化を行い、平面上に軌跡として再構成したものであるが、ディファレンシャル GPS とともに良く一致していることが分る。



Start 92.5.6/17:00:33 Stop 92.5.6/17:51:42  
 N 26° 10' 11.028 N 26° 10' 02.430  
 E 127° 52' 40.686 E 127° 52' 49.062

図 10 単独測位、ワンパス 2 平滑化、ディファレンシャル GPS による GPS 漂流ブイの軌跡  
 Fig.10 Paths of GPS drifting buoy calculated by point positioning, smothing by Onepath 2 ( $I=60\text{min}$ ,  $\alpha=0.75$ ) and differential GPS.

以上により、ワンパス法 2 による測位データの平滑化は、極めて簡易であるにもかかわらず、漂

流ブイの軌跡や速度の解析に利用できることが明らかになった。

#### 4 中城湾における流れの計測

GPS精密測位漂流ブイシステムをサンゴ礁海域の海水流動調査に応用した。調査対象海域は沖縄本島南部の太平洋に面した中城湾である(図11)。

この湾は、勝連半島、津堅島、久高島、知念半島に囲まれ、また半島や島の間は卓礁タイプのサンゴ礁が堡礁を形成しており、礁湖状の内湾となっている。中城湾内の潮流は、1日2回潮の潮位変化にともない、久高島の北東にあるサンゴ礁と津堅島間の湾口から湾内に向けて扇型に広がる流況パターンを示すとされている。また、恒流は季節風などの連吹による吹送流として理解されている。

この海域の南側、知念半島の先端に海洋科学技術センターの知念実験本部がある。地先海域においてサンゴの移植実験やサンゴの生育に関する環境条件の調査研究を進めている。またこれに関して、サンゴ礁の光合成と石灰化、サンゴ礁海域の海水流動に関する数値シミュレーション研究<sup>10)</sup>、さらに海水流動の精密計測の一環として本研究を進めている。

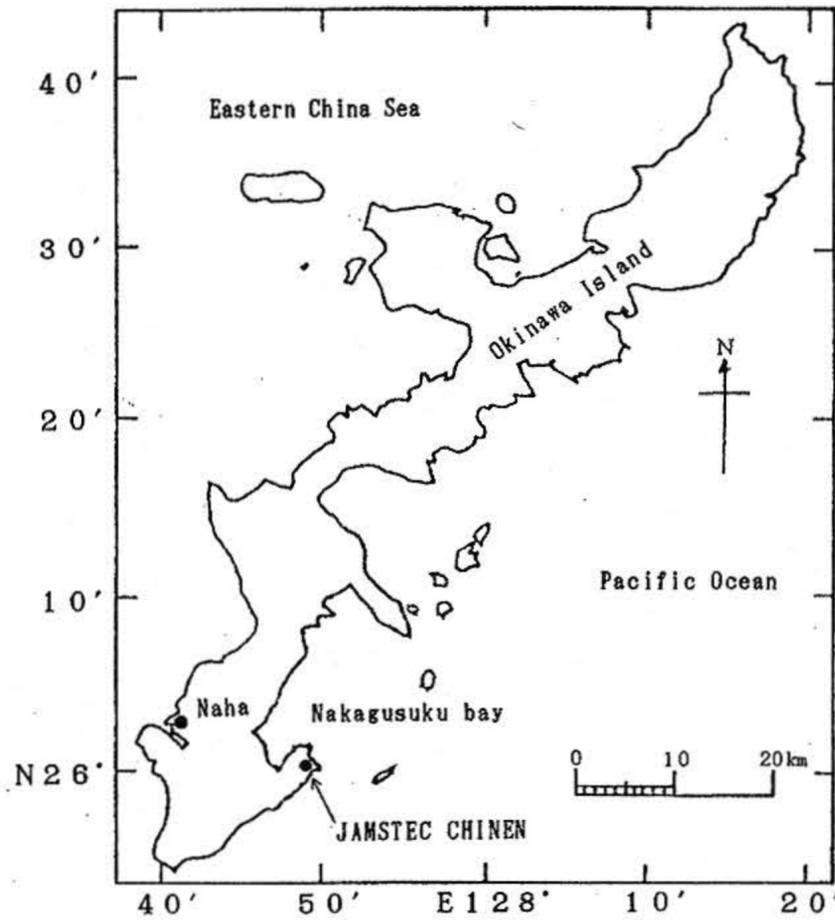


図11 中城湾の位置

Fig.11 Nakagusuku bay

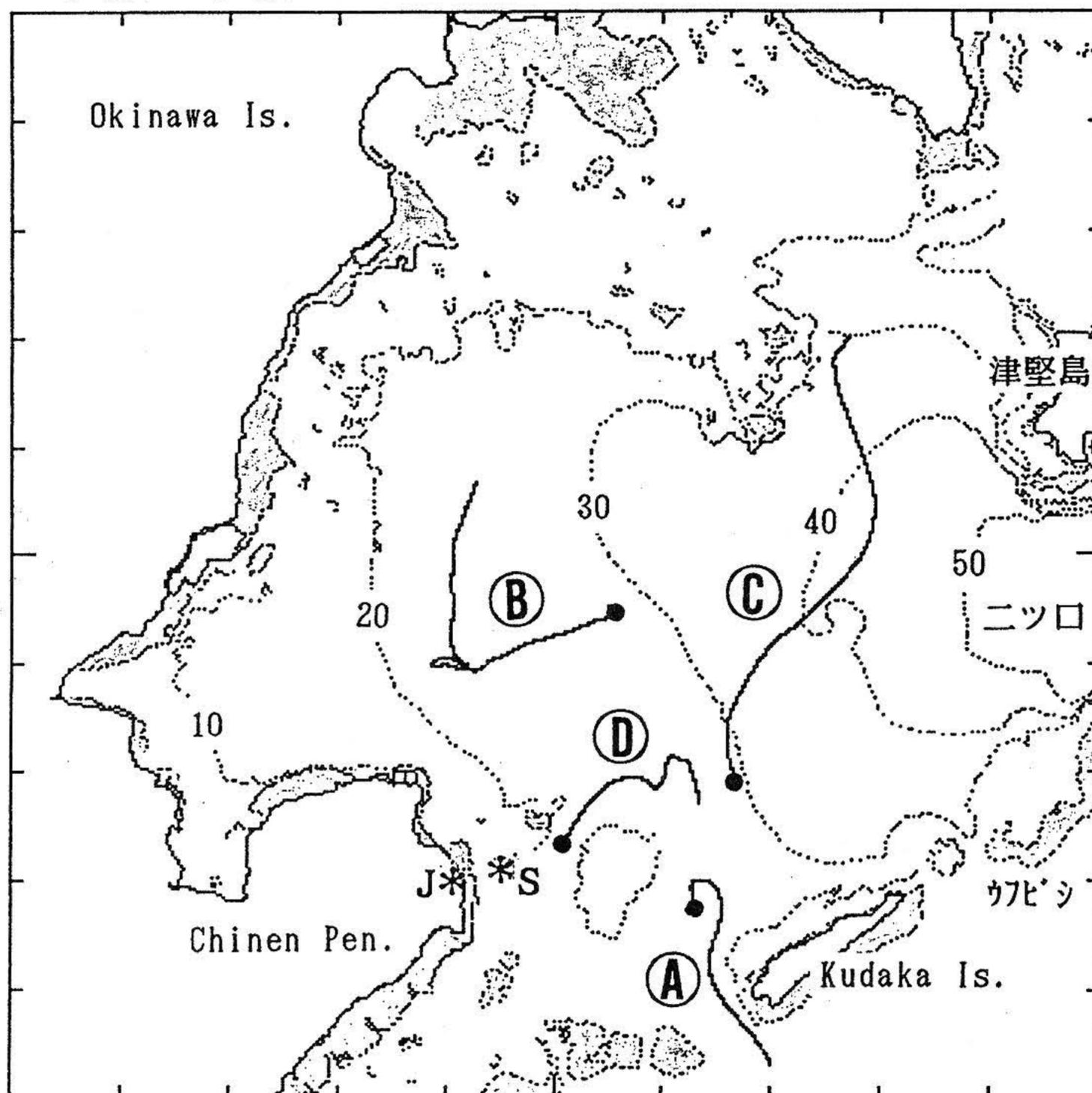
工藤ら(1992)<sup>4)</sup>は同じ中城湾において冬の季節風(北東の風が連吹する)下で漂流実験を行い、漂流ブイの性能や同湾の海水流動特性を検討した。この結果、漂流ブイの投影面積とドロッグの面積比が1/18と比較的に大きかったために、風及び海面吹送流によって押し流される分が増加して、測流深度の流速よりも約10%大きな速度で漂流していたことが判明した。また、この海域の流れのパターンは吹送流や潮汐流が組み合わされて複雑に見えるが、漂流ブイの軌跡は等深線に沿って流れたり、また横断したりを交互に繰り返して流れていることから、海水流動のパターンと海底地形は密接に関連し、現状で安定していることが推察された。現在の漂流ブイシステムではドロッグを大きくすることは運用上困難であるため、そのまま今回の海域実験に使用したが、将来は漂流ブイ本体を小さくして、この点を改善していく計画である。中城湾における漂流ブイ実験を平成4年度は2回実施した。6月の中潮から小潮にかけての期間と9月の中潮の期間である。漂流ブイの軌跡の総括図を図12に示す。

図13~16は各々の軌跡を拡大したものである。黒丸●は漂流ブイ投入位置、中ぬき丸○は毎正時におけるブイ位置であり、漂流ブイの軌跡を実線で示してある。干潮と満潮時刻および平均水面からの潮位もあわせて示してある。漂流ブイの軌跡はGPS単独測位データをワンパス法2で平滑化したものである。漂流ブイの速度と風向風速の変化をベクトル図で示してある。ブイの速度は平滑化された軌跡の微係数である。ワンパス法2では二次の微係数まで連続になるように区間接続しているので、速度の変化は滑らかである。風向風速は海上にある観測ステーション(図12のS)において1時間毎に測定した10分間平均値である。なお、風向風速計は平均海面から約12m上に設置してある。海面吹送流は風速の2%程度とされているので、ブイの速度図の寸法を風速図の寸法の2%にしてある。したがって風向風速のベクトル図を海面吹送流と見なせば、吹送流に対する漂流ブイの速度、すなわち測流深度の流速が直感的に理解できるようになっている。

#### (1) GPS漂流ブイの軌跡A

図13は平成4年6月6日14:30~23:21の軌跡で

1 div : 2 km



- Ⓐ 92.6.6/14:30~23:21
- Ⓑ 92.6.8/17:25~10/14:41
- Ⓒ 92.9.23/15:30~24/10:35
- Ⓓ 92.9.24/16:35~25/12:54

J: JAMSTEC CHINEN  
 S: Observation Station  
 ● : Start

図12 中城湾におけるGPS漂流ブイの軌跡 (総括)

Fig.12 Summary of paths of GPS drifting buoy at the Nakagusuku bay.

ある。測流期間中、南の風約  $6 \text{ m/s}$  が徐々に西寄りから東寄りに変わりながら連吹していた。久高島の北西約  $2 \text{ km}$  に放流した漂流ブイは投入当初は北向きに進行したが、時計回りに方向転換し、久高島とサンゴ礁のヒラビシとの間の水路（久高口）から太平洋に流出している。久高島を通過する時点の速度は約  $23 \text{ cm/s}$  ( $0.82 \text{ km/h}$ ) となっており、海面吹送流の推定値約  $12 \text{ cm/s}$  に抗して逆

向きに流れている。しかも、投入直後が干潮であり、真夜の満潮に向けて海水は中城湾に流入する上げ潮の時間帯である。以上のことから、この水路では潮汐や吹送流による流れよりも、常に流出する恒流成分が卓越していると考えられる。久高島北東のウフビシと津堅島の間にある中城湾の湾口であるニツロでは、干満とともに海水は流出流入していると考えられる。他方、ヒラビシから西

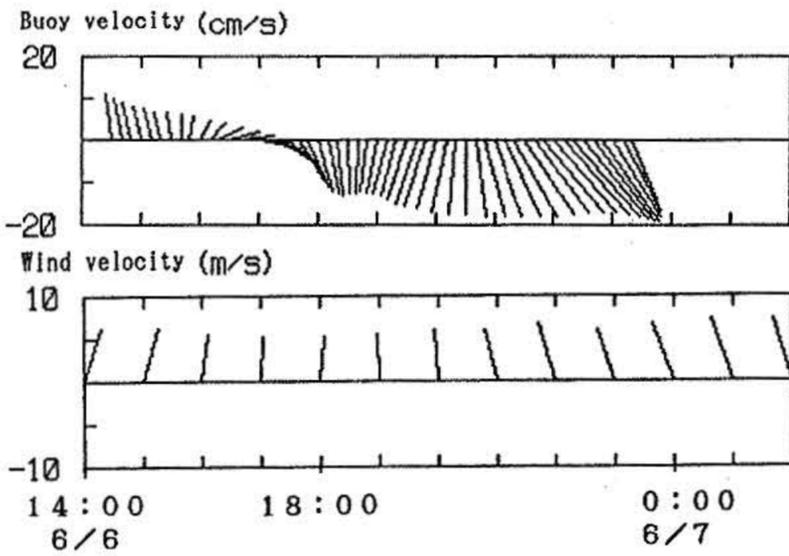
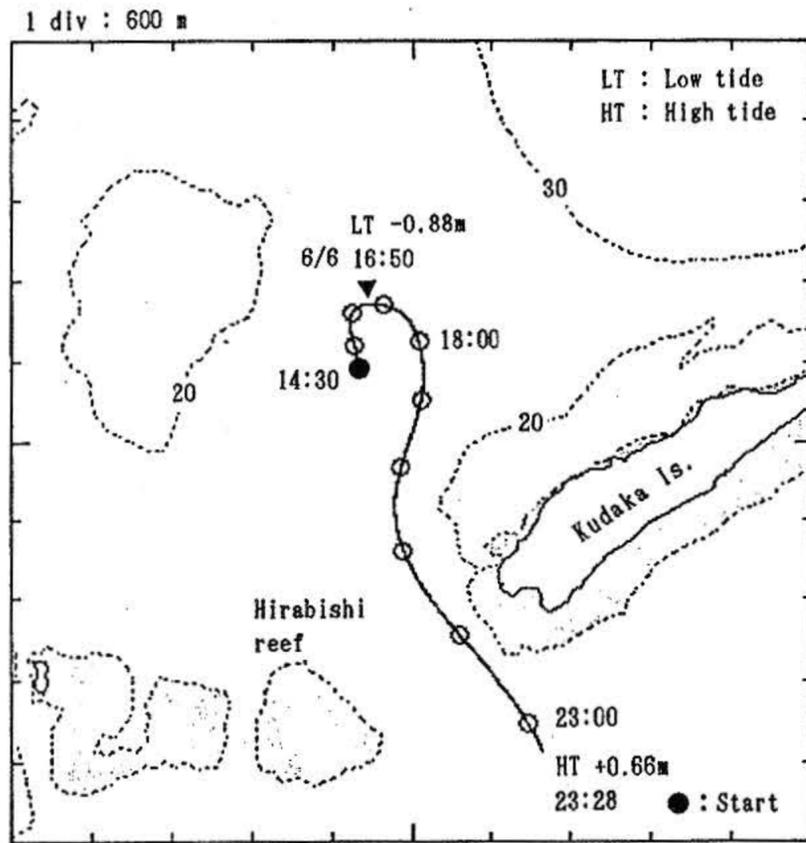


図13 GPS漂流ブイの軌跡A (中潮)  
Fig.13 Path of GPS drifting buoy A.  
(Medium tide)

側に連なるリーフ上では海水が湾内に常時流れ込んでいると考えられ、数値シミュレーションのリーフ条件としてモデル化されている<sup>10)</sup>。久高口は久高島とヒラビシに狭まれ、深く切れ込んでおり、しかも、外洋に向かう強い流れが常に存在することになると、久高島の周辺のサンゴ礁とヒラビシ以西のサンゴ礁との水理的な距離は非常に大きいということになる。久高島周辺サンゴ礁では豊富なサンゴ類が生育している。しかし、このサンゴ礁で産卵されたサンゴ幼生はヒラビシ以西のサンゴ礁にはなかなか到達できないということが考えられる。ヒラビシなどではサンゴ類は貧相であり、しかも一旦死滅するとサンゴの加入がなくなり、

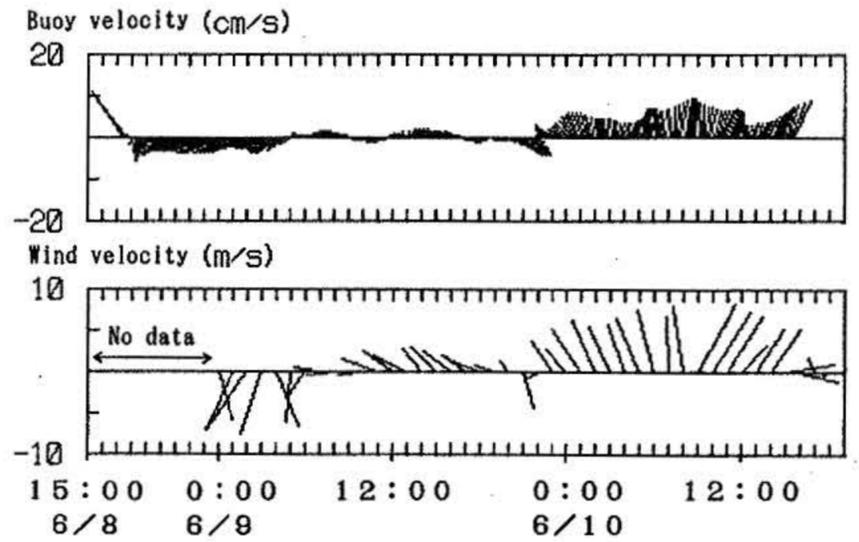
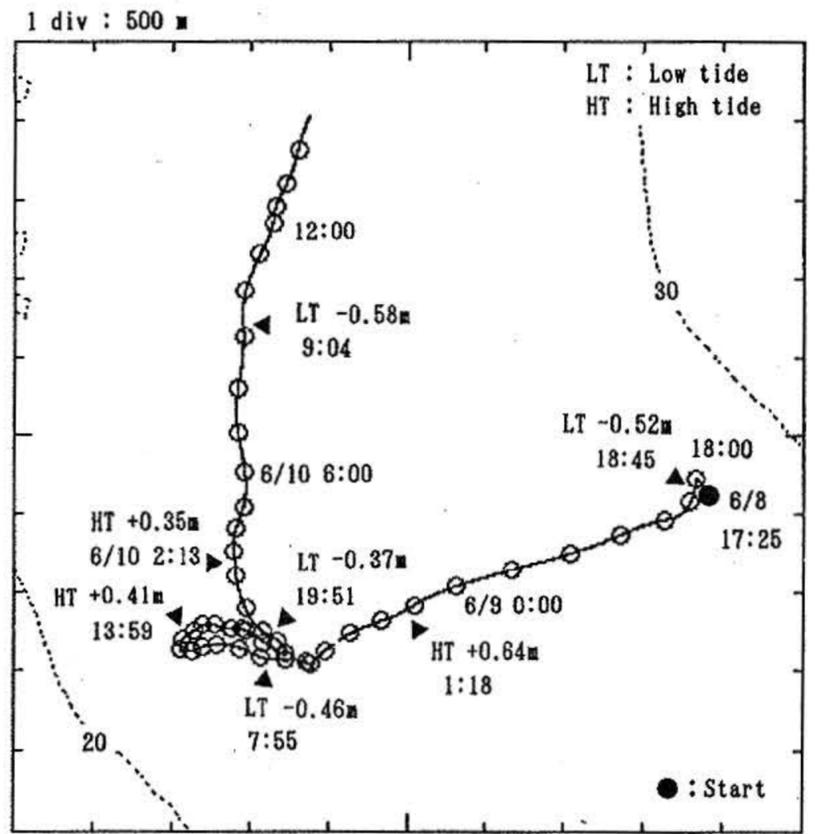


図14 GPS漂流ブイの軌跡B (小潮)  
Fig.14 Path of GPS drifting buoy B.  
(Neap tide)

回復できないということになる。死滅したサンゴ礁生態系の復元を考える場合には、サンゴ礁結合関係の上流側においてサンゴ移植を行うなど、海水流動を考慮した方策が不可欠であることが推察される。

## (2) GPS漂流ブイの軌跡B

図14は平成4年6月8日17:25～6月10日14:41の軌跡である。中城湾のほぼ中央に放流し、3周期以上の潮汐期間漂流させた。漂流開始後の9時間は風を計測できなかったが、8 m/s程度の風が1日で反転する速さで時計回りに方向を変えているため、吹送流は十分に発達していないことが考えられる。また、潮汐は干満差が約1 mの小潮

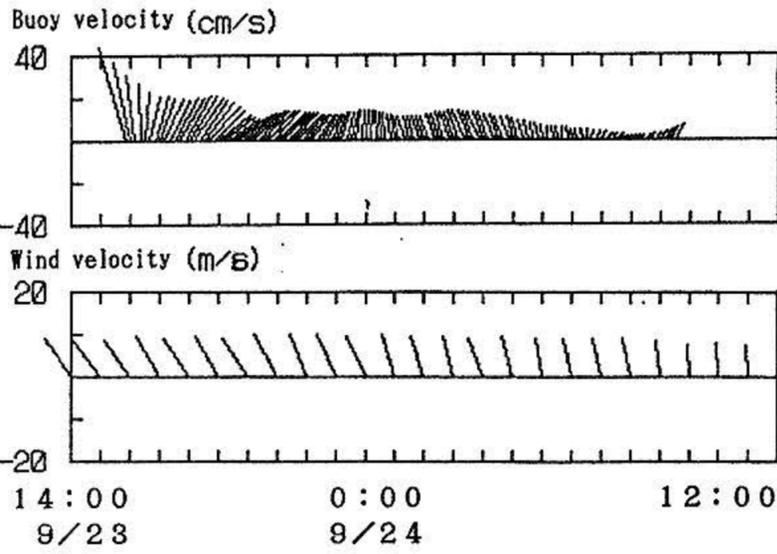
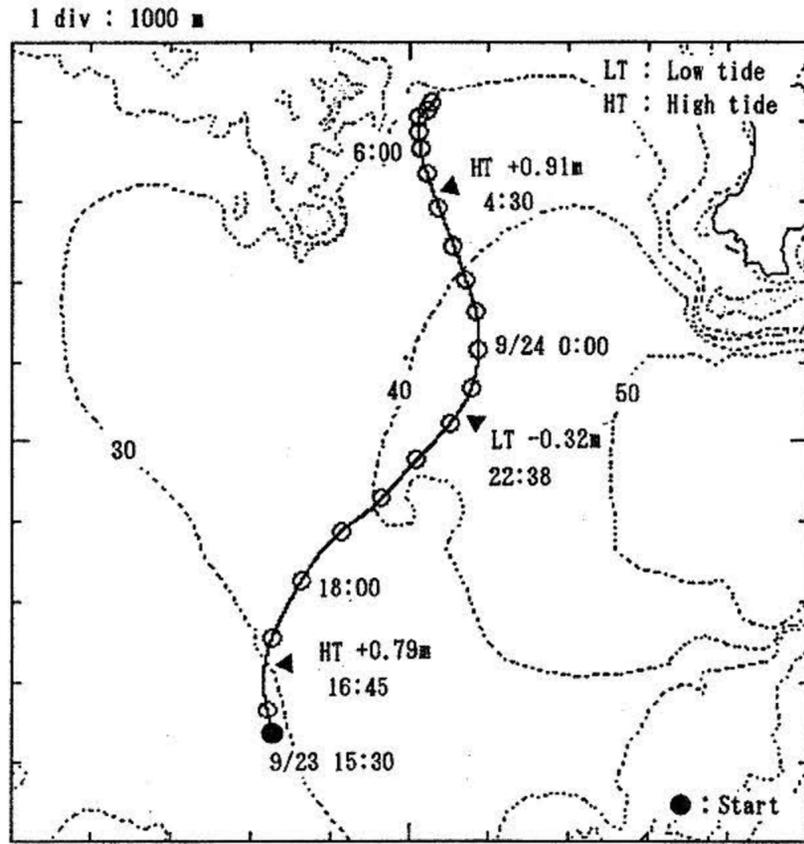


図15 GPS漂流ブイの軌跡 ③ (中潮)  
Fig.15 Path of GPS drifting buoy ③.  
(Medium tide)

であり、潮汐流も小さかった。漂流ブイは最初、干潮から満潮にかけて等深線を横断するように湾奥に向かっている。水深約22mの地点で約20時間停留した後、等深線に沿うように北上している。南の風約8 m/sにたいして漂流ブイの速度は約8 cm/sであり、風速の1%程度になっている。

### (3) GPS漂流ブイの軌跡C

図15は平成4年9月23日15:30~24日10:35の軌跡である。観測期間中、南南東の風10m/sが時計回りに方向を変えながら、徐々に弱まっていった。漂流ブイは吹送流によって北々東に移動していったが、潮汐流によって大きく蛇行している。漂流ブイの投入直後は満潮であり、干潮に向けて湾口に引き寄せられている。湾口に向かう速度は

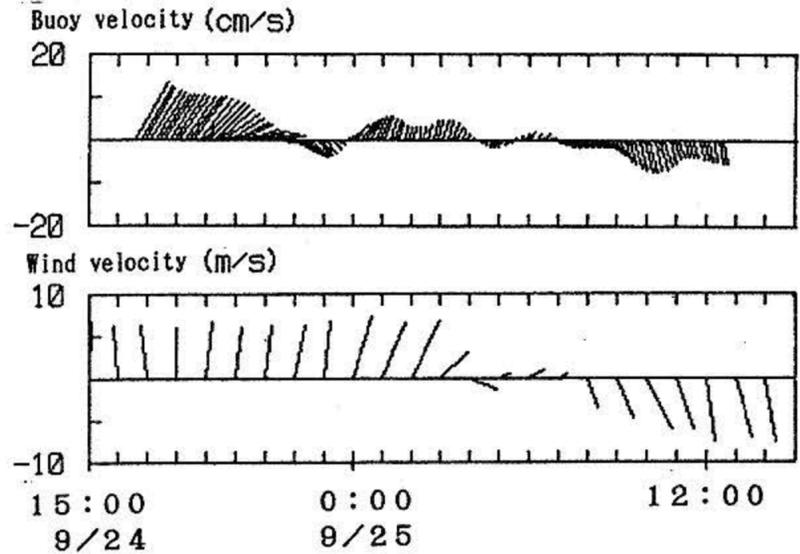
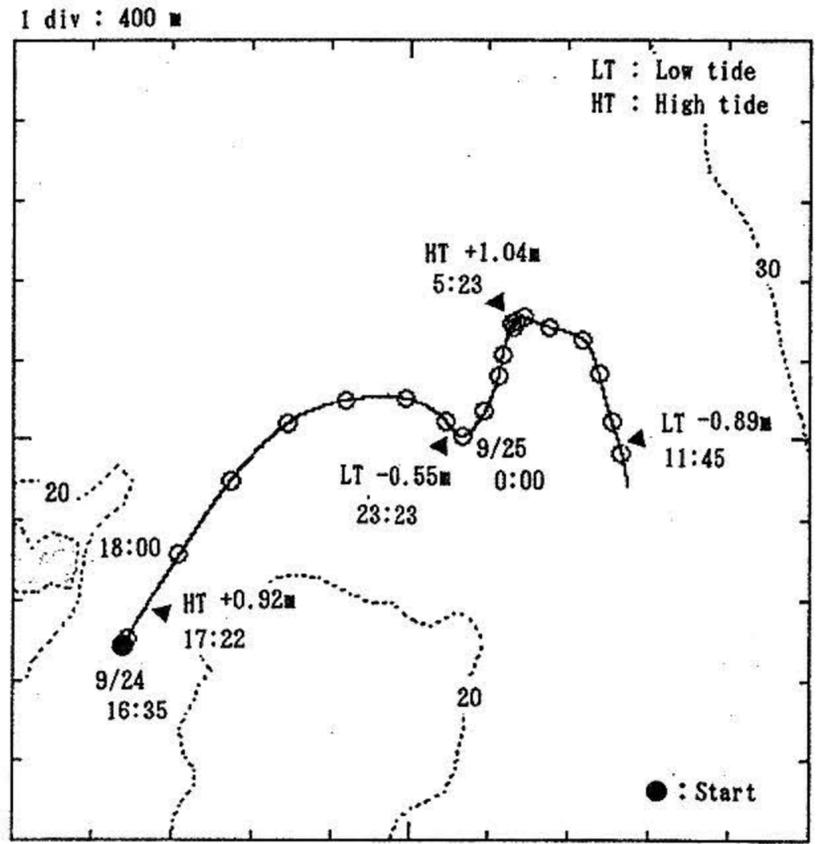


図16 GPS漂流ブイの軌跡 ④ (中潮)  
Fig.16 Path of GPS drifting buoy ④.  
(Medium tide)

最大で約16cm/s (0.6km/h) になっている。最干潮後も北上を続けているが、津堅島とリーフとの間に入っていきにつれて移動速度は減少している。この場所は潮汐の主流からは外れていることによるものと思われる。

### (4) GPS漂流ブイの軌跡D

図16は平成4年9月24日16:35~25日12:54の軌跡である。漂流ブイの投入場所は、サンゴ移植実験を行っている地点(図12のS)近くの、リーフとリーフの間水路である。潮流開始後10時間は南風約6 m/sが連吹しているが、水路の内側では水路に沿って湾奥に向かっている。移動速度の約15cm/sは風速の約2.5%であり、地形が狭くなっていること、また干潮から満潮に向かう時間

帯のために湾口に向かう流れによっても、流速が強められたように思われる。水路を出た後は、風向が時計回りに反転したこともあり、漂流ブイも移動方向を変えている。

## 5 おわりに

沿岸海域や湾域の複雑な海水流動パターンを漂流ブイによって計測調査することを目的に、GPS受信機を搭載した漂流ブイシステムを開発し、サンゴ礁海域の海水流動調査に応用した。GPSの単独測位はSAによる誤差が大きく、漂流ブイの移動速度を解析する場合には、本研究で提案した平滑化アルゴリズムのワンパス法2が実用的であり、ディファレンシャルGPSに比べても遜色はないように思われる。

サンゴ礁に囲まれた中城湾は吹送流と潮汐流によって海水交換が支配されている海域である。GPS漂流ブイによって、湾内の流れのパターンを全体として見えるようにすることができるようになった。サンゴ礁近くの複雑な流れを解明するためには、今後、漂流ブイシステムをより一層小型化し、さらに海水中の卵や幼生などの輸送過程を明らかにしていくことが必要である。

この研究におけるGPS精密測位漂流ブイシステムの開発費の一部は日本自動車振興会の平成2年度補助事業の資金を得て実行したものであることを付記して、関係各位にお礼申し上げます。またこの研究を進めるに当たり、東海大学海洋学部の卒業研究としてデータ解析などで協力していただいた三宮宏之君、椎名真也君に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 柳 哲雄：沿岸海洋学—海の中でのものはどう動くか—。恒星社厚生閣，154pp.(1989)
- 2) 杉本隆成・森永健司：“漂流系による調査法” p329-343./流れと生物と。川合英夫編，京都大学学術出版会。410pp.(1991)
- 3) Roberts, E., D. Last and G. Roberts: Precision current measurements using drifting buoys equipped with DECCA navigator and ARGOS. Proc. of the IEEE Fourth Working

Conference on Current Measurements, 7-13. (1990)

- 4) 工藤君明・寺尾 裕・中村 仁：GPS精密測位漂流ブイシステムによる海水流動の調査研究。海洋調査技術，3(1),21-31.(1992)
- 5) 平 啓介：衛星によるドリフティングブイの追跡と海流観測。海洋科学，9(6),85-90.(1977)
- 6) 日本測地学会：新訂版GPS—人工衛星による精密測位システム—。(社)日本測量協会，272 pp.(1989)
- 7) 工藤君明・北野義信：GPSによる浮体運動計測技術(第3報：ダイナミックディファレンシャルGPS)。海洋科学技術センター試験研究報告，24,57-78.(1990)
- 8) 工藤君明・北野義信：GPSによる浮体運動計測技術(第2報：擬似距離誤差の特性について)。海洋科学技術センター試験研究報告，23,99-124.(1990)
- 9) Satomura, M., F. Kimata, T. Kato, I. Murata, E. Ohba, K. Kudo, W. Usui and M. Masunaga: Crustal Deformation measurements with GPS around the Suruga Bay, central Japan. GPS研究会(GPSシンポジウム 1993)集録。17-22. (1993)
- 10) 中村 仁・工藤君明：サンゴ礁海域の海水流動数値シミュレーション。海洋科学技術センター試験研究報告，30,(1990)

(原稿受理：1993年6月23日)