— 論 文 —

GPS キネマティック測量に基づく海水位の計測 *

木津 昭一[†]・花輪 公雄[‡]

要 旨

東京-父島間および仙台-苫小牧間の定期運航船に搬送波位相の積算処理機能を持つGPS受信機を搭載して陸上の固定点に対するキネマティック測量を行い、船の停泊中および航走中における海水位変動を計測する実験を行った。東京-父島航路では合わせて5往復10航海分の測位を試み、この間、延べ5日間にわたって東京港および父島二見港停泊中の潮位変化を捉えることに成功した。航走中は、航路全体でジオイドの空間分布(振幅数10 m)におおむね沿う海水位変動を捉えたほか、基線の短い東京湾内では定性的に海洋潮汐(振幅数m)と符合する信号を検出することができた。仙台-苫小牧航路では良好な受信環境の下、船体の運動のほか、ほぼ航路全体にわたって海洋潮汐による海水位変動を捉えることに成功し、これは既存の全球潮汐モデルや付近の沿岸潮位の変動と定量的にも良く一致した。また、両航路のそれぞれ一部について、既存のジオイドモデルの誤差を指摘した。

キーワード：海水位計測, GPS測量

1. はじめに

GPSは、予め軌道が分かっている複数のGPS衛星の電波を受信して各衛星と受信点の間の距離を計測することにより所定の準拠楕円体(WGS-84)に基づいて受信点の位置を求める技術である。被測位点の受信機単独で電波を受信してその場所を知る方法を“単独(一点)測位”と呼び、これに対して何らかの基準点(既知点; 予め位置が分かっている点)と被測位点(未知点)の両方で電波を同時受信して既知点に相対的な未知点の位置を求める方法を“相対測位”もしくは広義に“ディファレンシャルGPS(DGPS)”と呼ぶ。相対測位では電波の伝搬経路上の遅延の補正誤差

や衛星の軌道情報の誤差などの影響が二つの受信点である程度相殺されるので、一般に単独測位よりも相対測位の方が精度が高い。

DGPSでは、各GPS衛星と二つの受信点の間の距離の差が計算される。このとき、大きく分けて、おおむねコード情報のみを利用する方法(コードDGPS)と搬送波の位相を主に用いる方法(搬送波位相DGPS)の2種類がある。これまで日本では、しばしば前者を“トランスローション法”、後者を“干渉測位”などと呼んで区別していたが、最近はこの名称はあまり用いられなくなった。ちなみに英語では以前から両者ともDGPSと総称され、必要に応じてcodeやcarrier phase(搬送波位相)などの修飾語を冠して両者を区別する。また、最近の技術の進歩に伴って両者の境目が以前ほど明確ではないと言われているほか、航法の分野で単にDGPSと言うと前者を指すことが多く、若干、分野によっても用語法にばらつきがある。

* 2000年8月9日受領; 2000年11月11日受理。

著作権: 日本海洋学会, 2000

[†] 東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻 地球環境物理学講座; 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉,

e-mail address: kizu@pol.geophys.tohoku.ac.jp

[‡] 東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻

搬送波位相 DGPS は、従来の主要な航法技術(ロラン C, デッカなどや、GPS の中でも前述の単独測位やコード DGPS 法) よりはるかに高精度なので、m 級の精度で十分な航法分野のみならず、cm 級以下の精度を必要とする測地・測量分野でも急速に普及している。海上でも、従来のように経緯度を知る目的にとどまらず、これを用いて船の姿勢(船首方位など; King and Cooper, 1993; Griffiths, 1994) を測ったり、より精密な水平・鉛直位置を求めることが現実的になってきた(移動体の姿勢を測るための GPS 装置は既に市販されている)。以下では、このような搬送波位相測定に基づく精密な DGPS 法を“GPS 測量”と呼ぶことにする。

喫水の変化や船体の動揺に伴う上下動を無視すれば、船の高さを近似的にその場所の海水位と見なすことができるので、これを航行中の船舶に搭載して船体の鉛直測位を行えば航路上の海水位分布を知ることができる。もし海水位が精度良く計測できれば、ジオイドを考慮することによって海洋潮汐や力学的海面高度を算出したり、さらには地衡流の仮定の下で流速場を推定することが可能となるので、海洋監視に大きく貢献できると期待される。このような目的で GPS 測量による外洋での海水位計測を試みた例は、世界的にもいまだ報告されていない。

一方で、我々東北大学の研究グループでは東京-父島間の定期航路に沿って水温場や表層流速場のモニタリングを行っている(Hanawa *et al.*, 1996) ので、これに新たに高度場の観測を加えることができれば、より総合的な海況監視が可能となる。現在、海面高度は TOPEX/POSEIDON(T/P) などの衛星海面高度計で精度良く計られるようになったが、残念ながら前述の定期航路は T/P 衛星軌道のちょうど中間に位置するため、これらの海面高度計の利用は簡単ではない。以上のような背景から、第二著者は GPS 測量が可能な受信機設備を船舶に搭載して航路上の海水位を計測することを発案し、これを第一著者が具体化することとなった。

本研究の開始時点では、海上の移動体上で GPS 測量を行うという試み自体にほとんど前例がなく、実際に前述のことがどの程度可能であるかも明らかではなかった。そこで我々は東京-父島間の定期運航船に三度、仙台-苫小牧間のカーフェリーに一度、それぞれ測量用の GPS 受信機設備を搭載して、船首方位や海水位を測る実験を行っ

た。その結果、GPS 測量が移動体上でも大変高い能力を持つ一方で、その成否がアンテナの設置環境に大変敏感であることなどが明らかとなった。初期の成果の一部は既に木津、花輪(1995)で紹介されている。

本論文では、我々が行った過去4回の実験を前述のような海水位計測目的に絞って総括し、海上の移動体におけるその実現可能性を考察する。以下、第2節では GPS 測量の原理を簡単に説明する。第3節では、我々が行った実験の内容と成果を報告し、測位結果の信頼性と受信・測位条件との関係について議論する。第4節では、まとめと結論を述べ、今後を展望する。また、GPS 独特の専門用語については、本文の末尾に簡単な説明を付した。

2. GPS 測量の原理

GPS によるすべての測位では、前述の通り、GPS 衛星と受信点の間の距離を計測する。この時、単独測位やコード DGPS では衛星からの信号に乗っているコード情報(民生用の C/A コードと軍事用の P(Y) コードがある; 注1) を用いて電波の伝播時間全体を計測するが、GPS 測量では衛星が発する搬送波(現在は、L1 帯 1575.42 MHz と L2 帯 1227.6 Hz の2周波)を物差し代わりにして、その位相角を精密に(およそ数 mm 相当の分解能で)計測する。GPS 測量が高精度であるゆえんは、このように電波の伝播経路を衛星と受信機の間に含まれる搬送波の波数に置き換えた上で、そのうちのまず1波長以下の小数波数部分を精密に測定することにある(GPS 全般の測位原理については、土屋、辻(1995)らが詳しい)。

GPS 測量では、基準点(固定点)と被測位点(移動体)において最低でも4個以上の共通衛星の電波を同時受信することが必要である。これは、2点間の相対的な位置関係を表す3次元ベクトル(基線ベクトル)を独立な3対の衛星の組み合わせを用いて算出するためである。GPS 測量ではコード DGPS に比べて長基線でも精度の低下が小さく、よく管理されたスタティック(静的)測量(固定点同士の間での相対測位)であれば数百 km の基線でも cm オーダー以下の測位精度を達成できると言われている。さらに、GPS 測量は単独測位などに比べてコード情報への依存度が低いことから、SA(注2)の影響も受けにくいとされている。

このGPS測量における大きな技術的課題の一つが、衛星-受信点間の経路の大部分を占める搬送波の整数波数部分の決定にある。前述のように、原理上、小数波数部分の計測精度は極めて高いのだが、瞬間的な搬送波位相の測定のみでは波長の整数倍(厳密には少し異なる)離れた場所と真の場所を区別することができない(詳細は土屋・辻(1995)などを参照)。実際には、これが3次元空間で起こるので、わずか1 m³の空間にさえ約100個の“解の候補”が存在することになる。いわば真の解の周りに無限に解の候補の“格子”が広がっている訳である。したがって、このように多くの解の候補の中からいかにして精度良く、かつ効率的に真の解を決定するかが大変重要な手続きとなる。

この整数波数部分(一般には“波数不確定”, “整数バイアス”, “波数バイアス”のように様々に呼ばれているが, 本文では原則として“波数不確定”に統一する)は, 一般にはコード情報の併用により決定される。具体的には, 単独測位やコードDGPS等により初期推定値を与え, その周囲の解の候補の中から何らかのアルゴリズムと基準で真の解を見つけ出すようである。単独測位の測位精度は, 最も普及しているC/Aコード利用の場合で数十~百m程度(ただし, SA解除前), 近距離のコードDGPSならば数m程度(ただし, 基線長に依存)であるので, 先ずそのくらいまで範囲を絞ってから解を探索すれば, やみくもに解を探すよりも効率的な処理ができる。

いったん粗い推定値が求まると, その周囲の期待される誤差の範囲内で波数不確定を解いておびたしい解の候補の中から真の解を見つけ出す。この段階で採られるアプローチは, 用途や利用できる情報によって異なる。静的測位では, 衛星の移動に伴い解の3次元格子が時間的に移動することを利用するのが最も基本的な方法である。すなわち, 各瞬間の測定値に含まれる非常に多くの波数不確定性を, 時間がたつと偽の解が次々に移動するのに対して真の解だけは動かないということを前提に解くのである。しかし, この方式が機能するためには, 基本的には解が絞り込まれるまでの間, 被測位点が静止していなければならない。今は, ある時間後に同じ場所に復帰することによってこれを実現するもっと効率的な方法が実用化され, 必ずしもずっとその場に止まらなくとも良くなったが, これも前述の方法の発展形に過ぎない。

また最近, より短い時間で真の解を求めるために, 多くの衛星の組み合わせを併用することも一般的になった。独立な複数の組み合わせを利用して“解の格子”の一致点を探せば, 一組(4衛星)のみの解の移動を追うよりもはるかに高速に解を選び分けることが可能となる。これが実現された背景には, 技術の進歩によって受信機の多チャンネル化が進み, 多くのGPS衛星の電波を同時に受信できるようになったことがある。さらに, 当初は短基線(電離層の伝搬遅延を補正する必要のない距離)ではあまり用いられていなかったL2帯の情報が波数不確定を解くために用いられる場合もある。移動体の測量では解の決定が移動体の運動について行けなければ無意味なので, とにかく使える情報は何でも使って系をover-determinedにしながら波数不確定を高速に除去するのである。

以上は一般論であるが, 実際の波数不確定の解き方には用途やソフトウェア メーカーによって様々な方式があって, その全容を把握することは容易でない。そればかりか, 特に後述のようなOTF技術を取り入れた商用ソフトウェアには十分な情報開示すらないものが多いため, 筆者のような一般ユーザーがアルゴリズムについて詳細を知ることはまず不可能である。

連続キネマティック測位(連続的に移動する被測位点の, 固定点に対する相対位置を決定する測位)の場合も, もとものの波数不確定を解くための思想は静的測量と同じであった。すなわち, 計測中のどこかで移動体のアンテナを静止させて整数波数を確定し, 移動経路のその他の部分では専ら小数波数(位相)の連続測定に頼っていたのである。しかしながらこの方法は, 同一地点に正確にとどまることができない海上の計測では大変な困難を伴う。また, 仮にいったんは波数不確定が解けたとしても, 移動中にサイクルスリップ(注3)が起こるとそこで新たな波数不確定を生じ, これを再度確定するためには再び静止したり既知点に戻って計測をやり直さなければならない。このように, 完全な静止や, 場合によっては既知点への復帰をも必要とする従来のキネマティック測位法では, 海上の移動体の精密測量は非常に難しかった。

ところが最近, 移動中でも波数不確定を解くための“On-the-Fly”(OTF)と呼ばれる技術が開発され, すでに複数の基線解析ソフトウェアに実装されている。筆者が知るものは全て商用ソフトウェアであるため, そのアルゴリ

Fig. 1. Routes of the ships. (a) Tokyo-Chichijima and (b) Sendai-Tomakomai. Thin and thick lines in (b) show routes of Experiment IV-a and IV-b, respectively. Stars and closed circles show respectively the GPS reference sites and tidal observatories.

ズムについては全く不明だが、基本的にはカルマン フィルタなどを利用して解の予測を行いながら多衛星同時捕捉などによって波数の不確定性を高速に排除する仕組みらしい。移動体の測量では測位計算の高速性が求められるので、解を収束させるまでのスピードは非常に重要である。また、もう一つ大事なことは、OTFを用いると仮に移動計測中にサイクル スリップが起こっても静止や既知点への復帰なしに波数を確定し直せる可能性が高まる点にある。比較的易しい近距離の測量であれば、だいたい数分以内に解が収束すると言われている。そして、いったんこうして波数不確定が解けてしまえば、あとは再びサイクル スリップが起こらない限り、位相(小数波数)の積算のみで受信点の移動を追跡することができる。本研究で目的としたような海上の移動体の精密測位を可能とするためには、事実上、このようなOTFに基づく波数確定技術が不可欠であった。GPS測量ならびにOTFのこれ以上の詳細については、Teunissen and Kleusberg(1999)や土屋, 辻(1995)などをご参照頂きたい。

3. 実験結果と議論

我々は前述のように、過去4回にわたってGPS測量による海水位計測実験を行った。このうち1994年11月(以下、実験I), 1996年5月(実験II), 1999年9月(実験III)の3回は東京-父島間の定期運航船「おがさわ丸」(小笠原海運(株))を利用して、1995年6月の実験(実験IV)は仙台-苫小牧間のカーフェリー「いしかり」(太平洋フェリー(株))を利用して行われた(Fig. 1)。ただし「おがさわ丸」は1997年3月に代船・大型化されたので、実験は都合3隻の船で行われたことになる。各々の船の諸元をTable 1に、また各実験の期間や固定点の設置場所などをTable 2にまとめた。

3.1. 東京-父島航路での実験(実験I, II, III)

実験Iと実験IIでは東京(実験Iでは東京大学海洋研究所構内, 実験IIでは東京商船大学構内; Fig. 2(a))に、そして実験IIIでは東京(実験IIと同じ)と父島(小笠原ビジターセンター内草地; Fig. 2(b))の2箇所に固定点を設置した(うち、父島の受信点は父島停泊中のみの設置)。以下では、これらを各々、「東京局」、「父島局」と呼び、船

Table 1. Specifications of the ships used in the experiments.

Experiment	Ship	Total length(m)	Gross tonnage(t)	Speed(knot)
I, II	former <i>Ogasawara-maru</i>	110	3,553	19
III	new <i>Ogasawara-maru</i>	131	6,679	22.5
IV	<i>Ishikari</i>	192.5	15,000	20

Table 2. Durations of the experiments and locations of the reference points. Note that the measurement was continued during the ship anchored at Tokyo and Chichijima Ports in Experiments II and III. Chichijima Site in Experiment III was only available when the ship was in Chichijima.

Experiment	Duration	Location	Reference point(see Fig. 1)
I-a	November 15-16,1994	Tokyo → Chichijima	Tokyo
I-b	November 18-19,1994	Chichijima → Tokyo	Tokyo
II-1a	May 14-15,1996	Tokyo → Chichijima	Tokyo
II-1b	May 17-18,1996	Chichijima → Tokyo	Tokyo
II-2a	May 19-20,1996	Tokyo → Chichijima	Tokyo
II-2b	May 23-24,1996	Chichijima → Tokyo	Tokyo
II-3a	May 25-26,1996	Tokyo → Chichijima	Tokyo
II-3b	May 29-30,1996	Chichijima → Tokyo	Tokyo
III-a	September 5- 6,1999	Tokyo → Chichijima	Tokyo, Chichijima
III-b	September 9-10,1999	Chichijima → Tokyo	Tokyo, Chichijima
IV-a	June 21-22,1995	Sendai → Tomakomai	Sendai, Hashikami
IV-b	June 22-23,1995	Tomakomai → Sendai	Sendai, Hashikami

上に設置した受信点を“船上局”と呼ぶことにする。実験 II では3往復連続で、他の実験では各々1往復分(全部で5往復10航海分)の受信を試み、結果として合計8航海分の受信データを取得することができた。以下では必要に応じ、各航海の往路を“a”、復路を“b”で表すことにする(例：実験IIの1往復目の往路は“II-1a”)。

旧「おがさわら丸」(以下、旧船)の場合、往路(東京→父島)は午前10時(ただし定刻の場合。以下も同様)に東京港(竹芝桟橋)を出て、翌日の午後3時半に父島二見港に入港し、復路(父島→東京)は正午に二見港を出て、翌日の午後5時半に東京港に入った。新「おがさわら丸」(以下、新船; Fig. 3(a))の場合は、往路は午前10時に東京港(同)を出て翌日の午前11時半に二見港に入り、復路は午後2時に二見港を出て東京港には翌日の午後3時半に入港するというスケジュールであった。また、旧船も新船

も、東京港では芝浦埠頭で1晩、父島港では発着桟橋にて2～3晩の間、それぞれ停泊した。実験時の航海では、いずれも両港の出航時刻は定刻通りであったが、目的地への到着時刻には途中の気象条件等により数時間のばらつきがあった。

船上局のアンテナは、旧船では船橋の真上に当たるコンパスデッキの最前部に、新船では上部甲板のメインマストと後部煙突の中間(Fig. 3)に設置した。船体構造や民間商船であるが故の制約により、水面からアンテナの設置位置までの高さは実験ごとに異なった。また、船内各デッキの高さ、運航/停泊中の喫水の変化、そして船体の動揺についても、正確なデータを得ることはできなかった。停泊時における船の喫水の変化は大部分の時間帯ではおおむね10～20 cm以内と見込まれるが、注水時や燃料補給時には短時間にもっと大きく変動していた可

Fig. 2. Antenna circumstances at (a) Tokyo Site and (b) Chichijima Site.

能性がある。

船の構造上、アンテナの周辺には様々な構造物があった。旧船では、とりわけアンテナの真後ろに立っていたメインマストが受信の大きな妨げになった。また、港での停泊中は、荷の積み下ろしのために大型のクレーンが

Fig. 3. (a) The new "Ogasawara-Maru" and (b) antenna of the Ship Site in Experiment III. The antenna (not visible) is placed between the main mast (on the top of the bridge) and the funnel shown in Figure 3(a).

アンテナの斜め上方を行き来した。このように、旧船ではGPS測量用としては極めて悪い受信環境の下で測位実験を行わざるを得なかった。新船では旧船に比べて環境は相当改善されたが、やはりアンテナの前後方に各々マストと煙突があつて、受信に影響を及ぼした。

実験I~IIIを通して、使用した受信機はAshtech社製のZ-XII, もしくは、これと実質的に同じTOPCON社製GP-R1DYである。データは、受信機に接続したパーソナルコンピュータの内蔵ディスクに記録した。移動体の測量ではデータの記録間隔(“エポック”と呼ばれる)が短いほど有利だが、本研究では長時間の連続測定を行うため、記録媒体の容量を考慮してこれを5秒とした。データの回収後、Ashtech社製のPNAV-PP(Precise Differential GPS Navigation and Surveying Software – Post Processing) Ver.2.1 (Ashtech, 1994)を用いて基線解析を行った。衛星の軌道情報としては放送暦を用い、また所定のモデルに基づいて電離層や大気による電波の伝搬遅延を補正した。

移動体GPS測量の成否は、一般に、固定点から被測位点(移動体)までの距離(基線長)と移動体の運動形態(どのくらい速くて激しい、あるいは複雑な運動をするか)に依存する。よって以下では、船の停泊時と航走時に分けて結果を整理する。

3.1.1. 停泊中の結果

実験IIIの父島停泊中は、東京局と父島局の二つの固定局を運営し、これら各々に対して船上局の相対測位を試みた。また、実験IIでは3往復の間に二度、東京港停泊中のデータが得られたので、この場合は東京局に対する船上局の相対測位を試みた。

実験IIIにおける父島局の位置は、単独測位に基づいて与えた東京局の座標を基準とする静的測位に従って定めた。実験I, IIと同様、高さの絶対値にはデッキ高の不確かさや喫水変化分の誤差が含まれるため、後で示す検潮所の潮位データとの比較においてはグラフごとに縦軸をずらして表示する。父島停泊中の喫水の変化は、定期的に目視で確認した限りではおおむね10 cm以内であった。

Fig. 4に、実験IIIの二見港停泊中における船の高さの時間変化を示す。●印が父島の検潮所(港と同じ二見湾内にある)における1時間ごとの潮位観測値(気象庁海洋課提供)を表し、それにほとんど沿うように分布している点が父島局基準の船上局の高さを表す。一方、潮位変化と交差するように縦長に分布している×印は、東京局基準の船上局の高さの変化である。

Fig. 4. Variation of ellipsoidal height of the Ship Site when the ship was at Chichijima Port (Experiment III, September 6–9, 1999; ambiguity-fixed solution). Dots and crosses show Chichijima-based and Tokyo-based ellipsoidal height, respectively. Closed circles show hourly tidal observations at Chichijima.

父島局基準(基線長1 km以内)の場合、GPSによる測定楕円体高の変動は潮位観測のそれと極めて良く一致した。しかしながら、東京局基準(基線長約900 km)の場合は信頼に足る測位結果がまったく得られなかった。双方の固定局基準の場合の受信状況を比較したところ、相対的には父島局と船上局の組み合わせよりも東京局と船上局の組み合わせの方が衛星数、DOP(注4)とも良好な値を保っていて、受信環境としてはむしろ後者の方が前者よりも良かったことが分かった。したがって、父島局基準より東京局基準の方が解の収束も安定度もはるかに悪いという結果は、両固定局の受信環境の善し悪しでは説明できない。

一連の基線解析で用いたPNAV-PPでは、波数バイアスを整数値化する(PNAV-PPのマニュアルによる)「フィックス解」(恐らくは「波数不確定を解いた解」と同等)とこれを整数値化しない「フロート解」(恐らくは「はじめから波数不確定を解かない解」と同等)のいずれかを事前に選択して測位計算を行う仕組みになっている。原理的にはフィックス解の方がフロート解よりも信頼性が高いと期待されるが、すぐ後で述べるように、両者の厳密な

差異に関しては疑問な点があり、また長基線では多くの場合、フロート解しか求まらない。

波数不確定が解けた(厳密には、フィックス解が求まった)割合を二つの固定局基準の場合で比べてみると、圧倒的に父島局基準の方が東京局基準よりも高かった。これは、相対的に幾分悪い受信条件であったにもかかわらず、基線がずっと短い父島局基準の方がはるかに波数不確定が解けやすかったことを示している。また、わずかながら Fig. 4 上に残った東京局基準の測位結果は、期待された海洋潮汐の変動とはまるで異なる分布をしている。これは、ソフトウェア上では『波数不確定が解けた』と判断されていても解が妥当でない場合があることを示している。東京と父島では大気の状態(具体的には水蒸気量や気圧、電離層の状態)が異なり、これを適当に補正できていない可能性があることも指摘できるが、仮にそれが原因であるとする、それでも波数不確定が解けることは不自然である。基線解析で用いた PNAV-PP 内部における波数確定の仕組みやその成否判断基準が明らかでない、この例は長基線のキネマティック測量において PNAV-PP が出力する「フィックス解」が必ずしも妥当な解ではない場合があることを示していると言える。

次に、実験 II における東京港停泊中(5月13日の夕方から翌朝にかけて)の船の高さ(東京局基準)の変化を Fig. 5 に示す(ただし、フィックス解のみ表示)。図には、東京(晴海)における観測潮位の変化を重ねてプロットしてある。時系列のはじめの数時間は潮位との差が比較的大きいが、この時間は船荷の積み下ろしや給油、注排水等が行われていたので、それらに伴う喫水の変化が含まれている可能性が高い。これ以外でフィックス解が求まった部分については、父島停泊中の場合と同じく、潮位変化と良く一致している。

また、図としては示さないが、同じく船が東京港に停泊していた5月24日から翌日にかけても同様に潮位変化と良く一致する結果が得られた。また、前述の二見港停泊中における東京基準の測位結果に現れたような「フィックス解であるにもかかわらず地球物理学的にあり得ない解」は、この場合には認められなかった。このことから、前述のようにキネマティック測位における PNAV-PP のフィックス解の妥当性が基線長に依存することは間違

Fig. 5. Variation of ellipsoidal height (solid line) when the ship was at Tokyo Port (Experiment II, May 13–14, 1996; ambiguity-fixed solution). Closed circles show hourly tidal measurement at Harumi.

いなさそうである。

以上のように、東京港と二見港のいずれにおいても基線長が数 km 程度の場合は大変良好な測位結果が得られ、対照的に基線長が 900 km の場合には有効な測位結果がまったく得られなかった。どちらの港でも停泊中の船体の運動は非常にゆっくり且つ数 m 以内の範囲に収まっていたので、移動体としては極めて“おとなしい”運動をしていたと言える。それにもかかわらず基線長によって結果が大きく異なった事実は、実験時の「おがさわら丸」における受信環境の悪さだけでは説明できず、むしろ実験当時の GPS 測量の技術では長基線の連続キネマティック測位自体が大変困難であったことを示唆する。

3.1.2. 航走中の結果

I~III の各実験とも、航走中については唯一の固定局である東京局に対して船上局の相対測位を行い、航路上の海水位を推定した。したがって、基線長は数 km (実験 II~III; 船が東京港内にある時) ないし十数 km (実験 I; 同) から、900 km 近く (実験 I~III; 船が父島周辺にある時) まで連続的に変化した。東京局の座標は、半日ほどの単独

Fig. 6. (a) Ellipsoidal height of the Ship Site (Tokyo-based) and (b) corresponding RMS by PNAV-PP when the ship was cruising (Experiment III-b; floating ambiguity solution). Hatched parts show solutions obtained under at least one of the three following conditions: visible satellites are less than 6, RMS is greater than a given value (specified as a linear function of latitude which takes 0.1 m at 36°N and 1.5 m at 26°N), and DOP exceeds 3.

測位の平均値をもって与えた。停泊中と同様、海面からアンテナまでの高さに含まれる不確定性のために船上局の座標自体はそれほど正確ではなく、以下で示すグラフや議論において“高さ”の数値そのものはあまり絶対的な意味を持たない。よって、後ほど示すジオイドなどの

比較においては、グラフの縦軸を任意にずらして表示する一方で、高さの絶対値にかかわる議論をせず、その空間(含時間)分布についてのみ解釈する。

まず、航路全体として最も良好な測位結果が得られた実験III-bにおける測定楕円体高をFig. 6(a)に、またソフトウェアが算出したRMSをFig. 6(b)に示す(いずれもフロート解)。図には、福田(1995)によるジオイド(FOA; 緯度経度5分格子)を航路上に内挿して示してある。測定結果は、この航路に沿って海面に数十mの起伏が存在することを示しており、定性的にはFOAのジオイド分布とも一致している。また、高さの値の振動が東京湾内では小さくて、湾外(おおむね北緯35度以南)では急速に大きくなっているが、これは湾内外での船体動揺の振幅の違いによるもので、実験時の目視波高や体感的な鉛直揺動の変化とも符合する。

実験III-bの時はべた風に近い海況で、船体の動揺も小さく、航路上のほとんどの区間では六つ以上の衛星が捕捉できていた。ところどころでサイクルスリップに伴い解が不安定になった部分が認められるが、その回数は比較的少なく、測位結果はかなり連続的であった。横線で影を付けたのは捕捉衛星数が不足したりその配置が悪かったと考えられる部分で、いわばあらかじめ「信頼性が低い」と注意して臨むことができる解を表す。事実、測位結果に見られる多くの不連続はそれらの部分で起こっているのだが、影を付けたところ以外にも部分的に疑わしい分布が認められる。このことから、フロート解の場合、測位計算の経過のみから解の信頼性を判断することが容易ではないことが分かる。ちなみに、フィックス解を指定した計算も行ったが、結果的には条件の良かった時間帯、悪かった時間帯を問わず、東京湾に近い領域以外ではほとんど解が求まらなかった。

次に、同じ新船で行った実験III-aの結果をFig. 7(a)に、RMSをFig. 7(b)に示す。この時も海は穏やかであったが、実験III-bの時と比べると幾分波があった。このことを反映して、実験III-aでは高さの振れが相対的に大きくなっている。また、北緯30度～31度付近で捕捉衛星数が最低限度の四つにまで頻繁に落ち込むなど、実験III-bよりも受信条件が悪かった。この区間で測位結果が大きくぶれているのは、そのためである。GPS衛星の軌道面の関係で衛星配置は天空の南側に比較的偏るので、このように同

Fig. 7. Same as Figure 6 except for Experiment III-a. (a) Ellipsoidal height and (b) RMS.

じ船でも進行方向(すなわち天空における障害物の位置)によって受信条件が変わることは不自然ではない。実験 III-b と同じく、この場合も測定楕円体高に含まれる多くの不連続の原因は衛星数の低下やサイクルスリップによる RMS の増大に帰着することができた。また、フィックス解を求めることも試みたが、受信条件の善し悪しにかかわらず大部分の領域では得られなかった。この点も、実験 III-b と同様である。

さらに、旧船で行った実験 I-a, II-1a, II-2b, II-3a, II-3b における測定楕円体高を Fig. 8(a)~(e) に示す。各々の図には、衛星数や RMS に基づき実験 III と同じ条件で影を付けてある。旧船は新船に比べて船体が小さかった

Fig. 8. (a), (b), (c). Same as Figure 6(a) except for (a) Experiment I-a, (b) II-1a and (c) II-2b.

Table 1) ので、航走中の動揺は概して新船よりも大きかった。実験 I, II の測定楕円体高の振れが実験 III に比べて大きいのは、主にそのためである。また、実験 I の時は海がやや荒れていたため、測定楕円体高の振れは実験 II の時よりも大きくなっている。これらの実験の結果が実験 III に比べて多くの影の部分を含むのは、アンテナ周囲の障害物のためしばしば捕捉衛星数が少なくなったりサイクル スリップが起こったりしたためである。フィックス解は、やはり東京湾外の大半の領域では求まらなかった。

Fig. 8. (d), (e). Same as Figure 6(a) except for (d) Experiment II-3a and (e) II-3b.

旧船と新船で大きく異なるのは、受信条件、船速、船体揺動の大きさの3点である。新船と旧船の測位結果を比べると、おおむねどれもジオイドに沿った高度を観測できているものの、解の連続性やふらつき具合には大きな差がある。GPS 測量では、移動体の速度が多少大きい

程度の影響はエポックを短くするなどの対策によって解決できる。しかし、加速度が大きいと測位誤差が大きくなると言われているので、旧船における大きな船体揺動が測位精度を悪くする一因になっていた可能性は否定できない。しかしながら、捕捉衛星数などの傾向から、両船における実験結果の違いの大部分はアンテナの設置環境の違いに由来すると考えられ、連続的な高度計測を実現するためにまず良好な受信条件を確保することが重要であることは疑いない。

また、実験 III の結果、比較的良好な受信条件であっても固定局から中長距離にある移動体の測位では波数不確定がほとんど解けないことが分かった。海上の測位では正確に同じ場所に戻って計測の再現性を確かめることができないので、原理的には波数不確定が安定して解けることが測位精度に関する事実上唯一の保証となる。また、外洋の海洋潮汐や海流による海面高度変動の振幅はせいぜい 1 m 程度なので、それらの定量的評価を実現するためには cm オーダーの測位精度を維持することが望ましい。しかし、前述のように航路の大部分で波数不確定が解けず、また RMS の分布 (Fig. 6(b), Fig. 7(b)) が示すように大半の領域で解の安定度が数十 cm を下らないことを考慮すると、少なくとも 10 cm 程度以下の高度変化の信号を大規模スケールで議論する目的において「おがさわら丸」で“海水位計測が成立する”可能性があると思われる範囲は、東京基準ではせいぜい北緯 33 度以北、基線長に換算して数百 km 以内に限られる。しかも、決してこの範囲内なら高精度な測位結果が保証されるという訳ではなく、安定した結果が得られる範囲はもっと狭いと考えねばならないであろう。

次に、比較的信頼性が高いと考えられる北緯 33 度以北の測位結果を航海同士で比較した。そのために、まず FOA のジオイドを空間的に内挿して各航海の航路上のジオイドを求め、これを測定楕円体高(ただし、フィックス解のみ採用)から引き、さらに Tsuruoka *et al.* (1995) のモデルに基づいて固体潮汐の寄与を差し引いた。船体の鉛直揺動の周期はおおむね数秒～10 秒程度であったので、ここではデータ時系列に時間幅 300 秒の移動平均を施して、その影響をおおむね取り除いた。以上の処理を経て得られた結果を、実験 I-a と II-1a について各々 Fig. 9 に示す。もし以上のようなジオイドと固体潮汐の見積りに誤差が

Fig. 9. Difference of the measured ellipsoidal height and the sum of FOA geoid model (Fukuda, 1995) and the solid earth tide (Tsuruoka *et al.*, 1995). Experiment I-a (upper line) and II-1a (lower line). Only ambiguity-fixed solutions are used and the height variation is smoothed to remove effects of ship motion.

なくて、また前述のような高さの原点の不統一から来る固定バイアス、喫水の変化、および船体動揺の影響が無視できるならば、残りは海洋潮汐やその他の海水運動（たとえば、黒潮の流軸の移動や渦など）に伴う水位変化分と一致するはずである。

しかしながら海況図などとの比較の結果、測位結果と黒潮の流軸位置などとの間に対応関係は見出せなかった。その一方で、Fig. 9の分布には、北緯33度50分～34度20分と北緯34度50分～35度20分付近に二つの幅広い極大があり、その間の北緯34度40分に鋭い極小が存在する、という共通の特徴が認められる。この海域でのGPSによる測定楕円体高のRMSはおおむね20 cm未満なので（Fig. 6(b)およびFig. 7(b)）、この二山分布は有意と見なされる。さらに細かく見ると、いずれの航海でも北側の極大部の北緯35度5分付近にもう一つ、小さな谷が含まれている。これらの特徴は、実験II-2b、II-3a、III-bでも断片的に確認できた。このように決まった場所における大きく急峻な海水位変動は、海水の運動や固体潮汐の評価誤差では説明できない。

以上の分布を当該海域の水深図（海上保安庁発行）と照

Fig. 10. Same as Figure 9 except for solutions in the Tokyo Bay. The meaning of the symbols is given in the legend.

らし合わせると、前述の北緯34度40分付近がちょうど日本海溝から西北西に延びる海底谷（相模舟状海盆）に当たることが分かる。また、前述の北緯35度5分付近は、この相模舟状海盆から更に東京湾に向かって延びる東京海海底谷に当たっている。このような海底地形との対応および前述のような理由によって、上記のようなFig. 9に共通する分布の特徴が主としてジオイドモデルの誤差に由来することが推測される。

仮に測定結果からジオイドの誤差が取り除けないとしても、毎回同じ航路をとる、もしくは航路のばらつきからくるジオイドの誤差の違いが無視できるとするならば、すべての実験で同じジオイドの誤差を共有することになるので、航海毎の空間分布の違いは海洋の変動を反映するはずである。このような観点から、東京湾内における我々の測位結果（Fig. 10）を近傍の検潮所の潮位観測値と比べた。その結果、横須賀沖（北緯35度15分付近）～東京港（同35度40分付近）にかけての南北水位勾配が相対的に急峻に観測された航海（実験I-a、II-1a、III-a）においては、船が東京湾の湾口（横須賀沖；北緯35度20分付近）にあった時より湾奥（東京港；北緯35度40分付近）にあった時の方が潮位が30～40 cm低くなっており、逆に南北水位勾配が

緩く観測された航海(実験II-3a, III-b)では、船が湾口にあった時より湾奥にあった時の方が潮位が30~40 cmほど高くなっていたことが分かった。このことから、東京湾内の航路沿いに南から北に向かって下がるようなジオイド起源の誤差が存在すると仮定すれば、少なくとも定性的にはFig. 10に見られる南北水位勾配の航海ごとの違いが海洋潮汐を反映していると解釈することができる。

以上の結果は次のようにまとめられる。当該海域においてジオイドの空間分布がいまだ十分正確に分かっているとは言えない現在、少数回のGPS計測では、仮に個々で有効な測位結果が得られたとしてもジオイドの誤差と海洋変動に伴う水位変化を正確に区別することはできない。もし船の航路が毎回同じであれば、反復観測を行うことにより、何らかのジオイドの誤差を残したままでも(基線が短い沿岸域では)航海ごとの海水位分布の違いから海洋変動に伴う水位変化を抽出することができるかも知れない。これは言わば、平均流の評価を捨てて海水位の時間変化分だけを抽出する衛星海面高度計の利用法と同じである。しかし「おがさわら丸」の航路のばらつきは経度方向に最大4分(5~6 km)ほどあって、これは例えばT/P衛星の軌道の反復誤差(約1 km以内; Fu *et al.*, 1994)と比べても相当大きい。この海域におけるジオイドの大きな空間勾配(FOAでは航路と直交する向きにおおむね最大10 m/100 km程度)を考慮すると、仮に航海ごとのGPSによる鉛直測位の確度をもっと高めることができたとしても、測位結果には航路のばらつきに伴い最大1 m程度のジオイドの分布が含まれる可能性がある。したがって、観測の反復性をもって高度変動に含まれる海洋起源の変動をジオイドの空間分布やその誤差と良い精度で分離することは、少なくとも短期的には大変困難であると判断せざるを得ない。

停泊中と航走中の結果に共通して見られたように、東京-父島航路では、基線長がある限界を超えると短基線では解けていた波数不確定が解けなかった。その原因を詳細に検討することは、基線解析ソフトウェアの不透明性故に、本研究のはんちゅうでは不可能である。しかしながら、波数不確定を解く際、まず何らかの手段(おそらくはコードGPSや単独測位)で初期推定値を与え、その周囲で解を探索すると推定されることと、大気の状態が一定と見なせる範囲を越えると一般にコードDGPSの測位

Fig. 11. (a) “Ishikari” and (b) antenna circumstances of the Ship Site in Experiment IV. The antennas are placed on the top deck (with the stairway on the left).

精度が低下することから、恐らく長基線では解の探索を行う際の初期推定値が的確でなくなるために、このような結果になるものと推測される。また、中長距離になると近距離で主に用いられるL1帯に加えて相対的にS/N比が低いL2帯の情報に対する依存度が高まるので、サイクルスリップが起こりやすくなる。このことも、長基線測量をより難しくする一因に数えられよう。

3.2. 仙台—苫小牧航路での実験(実験IV)

実験IVでは、受信環境が十分良い船でGPS測量を行い、測位結果が受信環境の改善によってどの程度向上するのかを主に調べた。仙台と苫小牧の間を往復するカーフェリー「いしかり」の上部甲板に実験I~IIIと同等の受信機設備を置き(Fig. 11), 仙台(東北大学理学部物理A棟

屋上)と青森県階上町(東北大学理学部付属地震・噴火予知研究観測センターの観測点)の2箇所に固定局を設置して、これら二つの固定点に対する船の相対測位を試みた。前小節にならって、以下では各々の固定局を“仙台局”と“階上局”、船上の受信局を“船上局”と呼ぶことにする。

船は、往きは午後8時に仙台港を出て翌日午前11時に苫小牧港に到着し、約8時間の停泊の後、その日の夕方6時半に苫小牧港を出て翌朝9時半に仙台港に入港した。実験では、すべての受信局で、この1往復分のデータを連続受信した。前小節に倣い、以下では往復路の実験を各々、実験IV-a、実験IV-bと呼ぶことにする。

三つの受信点には各々2系統の設備を並置した。そのうちの1系統はAshtech社製のZ-XII型(実験I~IIIと同じ)で、もう1系統がTrimble社製の4000 SSI(階上局のみ4000 SSE)である。記録容量の制約から、エポックをAshtech系では5秒、Trimble系では1秒とした。航海終了後、Ashtech系のデータについては前述のPNAV-PPを、Trimble系のデータについてはTrimble社製のGPSurvey Ver.2.0をそれぞれ用いて基線解析を行い、二つの固定局の各々に対する船上局の相対測位を試みた。衛星の軌道情報と電波の伝搬遅延の補正法については、前小節の東京-父島航路の場合と同様に取り扱った。

「いしかり」におけるアンテナの設置環境は、新・旧「おがさわら丸」に比べて遙かに良かった。上部甲板の前後部にはメインマストと煙突があったが、いずれもアンテナから遠く離れていたため受信にはほとんど影響を与えず、また、船体が大きかったため航走中の動揺も非常に穏やかであった。このように少なくとも受信に関しては、実験IVはおおよそ海上の移動体で望むことができる最高の受信環境で行われたと言える。

解析の結果、Trimble系の受信データでは航路の一部分で船の揺動(周期約10秒)をかなり正確に捉えることができた(木津、花輪、1995)ものの、航路全体を通して海水位変動を議論できるような解は得られなかった。原因は不明である。また、苫小牧港停泊中は注水などのために喫水が大きく変化したので、解析から除外した。したがって、以下では航走中のAshtech系の測位結果のみを示し、議論する。

常識的には、相対的に基線長を短く保つことのできる階上局基準の方が、航路の中で波数不確定の解ける範囲

が広いであろうと期待された。しかしながら、PNAV-PPによる解析の結果、波数不確定が解けたのは仙台局基準では航路全体の4割弱で、逆に階上局基準では全体の4分の1にも満たなかった。また、各固定局の近傍で波数不確定が解けやすいという傾向も認められなかった。実験IIIにおいて父島停泊中における東京局基準のフィックス解が到底妥当とは認められなかったことを考慮すると、数km程度の十分短い基線を除いては、移動体のGPS測量においてPNAV-PPが出力するフィックス解が必ず高い信頼性を持つとは言えそうにないので、以下では、より連続的な分布が得られたフロート解に基づいて議論を進めることにする。

往復路における測定楕円体高(階上局基準;フロート解)の変化を、緯度の関数としてFig. 12に示す。実線と破線は、それぞれ福田(1995)のジオイドモデルFOAとKuroishi(2000)のジオイドモデルJGEOID98から航路上に内挿したジオイドの分布を示している。実験I~IIIと同様、実験IVでも測定値にはアンテナ位置から海面までの高さが不定バイアスとして含まれるので、表示の都合上、往復路とも求めた楕円体高から一定値(28 m)を差し引いて示してある。

実験IV-a(Fig. 12(a)), IV-b(Fig. 12(b))とも、測定楕円体高の変化はジオイドの分布におおむね沿っている。実験IV-bの北緯42度付近に見られる楕円体高の不連続は、この地点でアンテナ高を故意に40 cm下げたことによるもので、これによりフロート解でも短時間に起こる“高度”変動は捉えられることが確かめられた。

次に実験IV-aについて、前小節と同様、両固定局基準で求めた楕円体高から航路上の2種類のジオイドと固体潮汐(Tsuruoka *et al.*, 1995)の寄与分、およびMa *et al.*(1994)の全球潮汐モデルによる潮位推算値を差し引いて、Fig. 13に示した。ただし、これ以降では、実験IV-bにおける前述の「アンテナ高を下げた」ことによる影響は補正済である。いずれの固定局基準の場合も、またいずれのジオイドを参照した場合も、図示した残差は航路全体で3 m内外の振幅を持つ分布をしている。これは固体潮汐や海洋潮汐の評価誤差としては大き過ぎ、主として測位誤差とジオイドの誤差に由来すると考えられる。

また、FOAを使った場合は、JGEOID98を用いた場合に比べて、いずれの固定局基準の場合も北緯39度~41度

Fig. 12. Variation of ellipsoidal height (dots) and geoid. (a) Experiments IV-a and (b) IV-b. Thin solid and thick dashed lines show geoid from FOA (Fukuda, 1995) and JGEOID98 (Kuroishi, 2000) models, respectively.

および北緯41度20分～42度30分の区間で残差が負の方向に大きくなっている。同様の傾向は実験IV-bでも確認された。波数不確定が解けていないため測位結果の正確な誤差は分からず、またこの航路の実験は一往復のみなので、図示された残差の分布の原因がジオイドにあると断定することはできない。しかし、前述の二つの海域のうち北側の区間での違いについては、FOAモデルの誤差に起因する(この海域のジオイドの凹みをモデルが過小評価している)可能性が福田(私信), 市川ら(1993)によって示唆されている。

Fig. 13. Difference of the ellipsoidal height and the sum of geoid, solid earth tide (Tsuruoka *et al.*, 1995) and oceanic tide (Ma *et al.*, 1994) for Experiment IV-a. Thin solid and thick dashed lines show respectively the results obtained using FOA and JGEOID98 models. (a) Hashikami-based and (b) Sendai-based.

最後に、往復の測定橢円体高(移動平均したもの)からそれぞれの航路上のジオイド(JGEOID98)と固体潮汐(Tsuruoka *et al.*, 1995)の寄与分を引き、緯度5分ごとに往復の差をとった結果をFig. 14に示す。往復の航路が経度方向に最大7～8分ほどずれているので、往復の差をとってもジオイドの誤差が完全には消えない可能性があるが、ここではその残留誤差が無いとし、さらに海洋潮汐以外の海洋変動、航走中の喫水の変化、固体潮汐の見積り

Fig. 14. Difference of the height residuals for each way obtained by subtraction of geoid and solid earth tide (Tsuruoka *et al.*, 1995) from the measured ellipsoidal height. Calculated every 5 minutes in latitude. The difference is defined positive when the height residual of Experiment IV-a is positively larger than that of Experiment IV-b. Thin solid and thick dashed lines show results obtained with FOA and JGEOD98 models, respectively. Open circles and thick vertical bars respectively show oceanic tidal variation estimated by Ma *et al.* (1994)'s global tide model and that measured at nearby tidal observatories.

誤差がすべて無視できると仮定した上で、往復の航路上における潮位推算値 (Ma *et al.*, 1994) の差、および近傍の検潮所の潮位差と比べた。実験IV当時、往復で潮位変化の位相はほぼちょうど逆転しており、航路の南半分では往路 (実験IV-a) の方が、北半分では復路 (同IV-b) の方が潮位が高かったことがモデルと沿岸観測潮位の双方から分かる。測定高度の往復における差も、北緯42度以北を除くとおおむねこれと一致している。したがって、実験IVでは航走中の海洋潮汐の変動もかなりの程度、検出することができたと考えられる。

以上のように、仙台-苫小牧航路の場合は、東京-父島航路と違って比較的長い基線長においても海洋物理学的に妥当な測位結果を得ることができた。その主な原因は、「おがさわら丸」に比べて「いしかり」の方がはるかにGPS測量に適した船であったことにある。しかしながら、いず

れの航路の場合も波数不確定が解けたのは航路全体のほんの一部、あるいは停泊中の短基線測量時に限られていて、残りのほとんどの海域では波数不確定が解けなかった。PNAV-PP が出力するRMSは誤差の指標にはなると思われるが、その定義が明らかでないこと、また位置を固定して計られた値ではないことから、解の精度をどのくらい正確に表しているのかは不明である。以上のことは、仮に十分良い受信環境の下でGPS測量が行えたとしても、(波数不確定が解けない) 中長基線のキネマティック測量の場合、反復観測以外の手段で誤差評価をすることが大変難しいことを意味する。これらの条件下で得られた解の信頼性が確かめられるまでには、基線解析に関する研究の更なる進展が必要であると考えられる。

4. 結 び

本研究では、搬送波位相の計測・積算処理能力を持つGPS受信機を東京-父島間の定期運航船「おがさわら丸」および仙台-苫小牧間のカーフェリー「いしかり」に搭載し、陸上の固定点に対する船体の相対測位を行うことを通じて船の停泊中および航走中における海水位の計測を試みた。その結果、停泊中／航走中ともに、基線長が短い範囲内では有効なデータが得られ、近傍の潮位観測値とも大変良い一致をみた。しかしながら基線長が長くなると船の運動状態にかかわらず波数不確定をほとんど解くことができず、東京-父島航路では外洋の海洋潮汐や海流の変動などに伴う大規模・長時間スケールの海水位変動を捉えることはできなかった。このように基線長によって明確に成否を分けた主要な原因として、基線が長くなると解の探索の出発点となる座標初期推定値の精度が悪くなることと、種々の誤差により波数不確定の絞り込み自体がうまくいかなることが挙げられる。

しかし、どちらの航路の実験においても波数バイアスを整数値化しない“フロート解”に船体動揺の振幅や周期がもっともらしく捉えられていたほか、実験IV-bでは故意にアンテナの高さを下げた効果も適正に捉えることができた。さらに実験IVでは航走中も航路のかかなりの部分で潮位変化と一致する高度変化を検出することに成功した。これらのことは、東京-父島航路での連続的海水位観測という本研究の主目的には直接貢献しないものの、長

基線におけるフロート解の一定の利用可能性を示すものである。

反対に、実験IIIの二見港停泊中における東京局基準の測位結果は、“フィックス解”であっても明らかに妥当でない場合があることを示していた。海上のGPS測量では計測を精確に反復して結果の再現性を確かめることができないので、このようなフィックス解の妥当性に関する疑問は移動体の長基線測量における大きな問題点になり得る。

船舶は上下左右に揺れながら高速(本研究で利用した3隻の場合、いずれも秒速約10 m)で航行する。「おがさわら丸」のように甲板上に構造物が多い船でGPS測量を実施する際には、もともと天空が開けている方向が狭いため、可視衛星の数が少なくなったり、受信の中断やマルチパスが起こりやすい。加えて、船体が揺れると障害物も天空に対して動くので、これらの障害物の影響は地上の固定局が同じ障害物に囲まれた場合よりも更に大きくなる。実験I~IIIにおいて我々が望むような良い測位結果が得られなかった第一の要因はこのような船上局の受信環境の悪さにあり、したがって海上の移動体上でGPS測量を実施する場合はできるだけ周囲に高い構造物がないプラットフォームや場所を選んでアンテナを設置することが重要であると言える。また、本研究では民間船を利用したために厳密に取り扱えなかったが、海水位を精度良く測るためにはもちろん、船体動揺や喫水の変化に対しても十分な注意を払う必要がある。

海上でDGPSを実施すると、固定点の配置が陸上に限られるため必然的に基線長が長くなりがちである。しかし、陸上よりも制約の多い海上の移動体において現在のGPS測量の能力で海洋物理学的に有効な海水位計測が行えると考えられる範囲は、どんなに緩く見積もっても岸(すなわち固定点)からせいぜい数百km以内に限られそうである。この基線長の限界は移動体の運動形態や受信条件にも依存すると考えられ、わずかに数回の測位実験からこれを判断することはできないが、実験当時、より安定した測位を実現するためには、おそらくはコードDGPSが十分有効に働く範囲、すなわち数十km以内に基線を保つことが必要であったと推測される。

このことに関連して、2000年5月に実現されたSAの解除が長基線のキネマティック測位に対してどの程度の恩恵をもたらすかは、技術的な観点で大変興味深い問題で

ある。SA解除後、単独測位の精度が飛躍的に向上したことが知られているので、もし実験当時のキネマティック測位の成否が初期推定座標の精度に決定的に依存していたのならば、波数不確定を解くことのできる基線長の範囲が従来のコードDGPSの有効範囲を超えてもっと長くなる可能性もあると考えられる。しかし、もし波数確定の成否が初期値の誤差以外の要因によって左右されているのならば、SAが解除された現在でもあまり大きな精度の改善は見込めないであろう。この点については、是非今後の研究を待ちたい。

また逆に、近距離に基線を保ちつつ良好な受信条件下で測位を行い、かつジオイドの誤差の影響を受けにくいような用途に応用すれば、GPS測量は数cm程度の精度での鉛直測位を比較的容易に実現し得ると言える。岸から比較的近い定点で海水位のモニタリングを行う場合などは、その好例として挙げられよう。最近、南極の定着氷域でこのような海水位計測を試みた例がAoki *et al.*(2000)によって報告されている。

GPS測量用の受信機はまだ高価であり、また処理すべきデータ量も膨大(5秒サンプリングで1地点1日当たり10 MB程度)なので、システムを船舶などに実装して運用すること自体が簡単ではない。しかしながら、これまで海上では水平方向の航法技術としてのみ普及してきたGPSが、一定の条件内ではあるが移動体の精密測量を通じて海水位計測にも応用できることを示した本研究は、今後のGPSの新たな利用法へのヒントとなる可能性を持っている。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費補助金09440165の支援を受けて行われた。一連の実験は、小笠原海運(株)と太平洋フェリー(株)の両社、および「おがさわら丸」と「いしかり」両船の乗組員のご厚意の下に実施された。また、観測とデータ解析に当たっては、三浦 哲、日野 亮太の両氏(ともに東北大学理学部附属地震・噴火予知研究観測センター)、岩坂 直人氏(東京商船大学)をはじめ、倉本 千恵子氏(東京水産大学大学院)、川合 俊二氏(信州大学)ほか、東京商船大学ならびに東北大学の学生諸氏、および、トリンプルジャパン(株)、日立造船情報システム(株)の両社のご協力を賜った。比較で用いたジオイドのデータ

は、福田 洋一氏(京都大学大学院理学研究科)および黒石 裕樹氏(建設省国土地理院)より提供されたものである(所属などは実験当時)。さらに、検潮所の潮位データは気象庁海洋課と日本海洋データセンターから、水深データは日本海洋データセンターから入手した。これらの関係者各位に謹んで謝意を表したい。

用語の説明

注(1) GPSのコードについて: GPSの信号は、衛星の軌道データなど測位計算で必要となる様々な情報を含んだ“航法メッセージ”と、衛星ごとにあらかじめ定められたパターンで符号化された2種類の測位用デジタル符号(“コード”)からなる。このうち、L1帯の信号に載っている“C/Aコード”はパターンが公開されているので、一般的な民生用受信機で利用できる。L1帯とL2帯の両方に載っている“Pコード”は、元々軍事用でパターンが公開されていなかったが、現在は事実上公開されているらしい。しかし、これがA/S(Anti Spoofing; 対謀略)措置によって更に“Yコード”と呼ばれる符号に秘匿化されていて、これを利用するためにはYコード対応と呼ばれる受信機が必要である。

注(2) SA: Selective Availability の略で、日本語では「選択利用性」と訳される。運用上の都合により故意に衛星の軌道情報やコード情報の精度が低下させられることを指し、これまで特に単独測位では精度向上の大きな障害になっていたが、2000年5月に解除された。

注(3) サイクルスリップ: アンテナ周辺の障害物による受信中断などが原因で、位相測定の連続性が失われること。

注(4) DOP(Dilution Of Precision): 通常DOP(ドップ)と呼ばれるが、強いて日本語に訳せば「精度低下率」。衛星の幾何学的配置の“強さ”を表す数値的指標で、値が小さいほど正確な測位が期待できることを意味する。

References

- Aoki, S., T. Ozawa, K. Doi, and K. Shibuya (2000): GPS observation of the sea level variation in Lützow-Holm Bay, Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, **27**(15), 2285–2288.
- Ashtech, Inc. (1994): Precise Differential GPS Navigation and Surveying (PNAV-Prism) software user's guide, Document Number 600248, Revision A, 297pp.
- Fu, L. -L., E. J. Christensen, C. A. Yamarone Jr., M. Lefebvre, Y. Ménard, M. Dorrer, and P. Escudier (1994): TOPEX/POSEIDON mission overview. *J. Geophys. Res.*, **99**, 24,369–24,381.
- 福田 洋一(1995): 日本およびその周辺のジオイドの精密決定, 測地学会誌, **41**, 1–16.
- Griffiths, G. (1994): Using 3DF GPS heading for improving underway ADCP data. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **11**, 1135–1143.
- Hanawa, K., Y. Yoshikawa, and T. Taneda (1996): TOLEX-ADCP monitoring. *Geophys. Res. Lett.*, **23**(18), 2,429–2,432.
- 市川 香, 青木 茂, 今脇 資郎 (1993): 海面高度計データと現場海洋観測によるジオイド・モデルの改良. 月刊地球, 1994, 616–621.
- King, B. A. and E. B. Cooper (1993): Comparison of ship's heading determined from an array of GPS antennas with heading from conventional gyrocompass measurements. *Deep-Sea Res.*, **40**, 2,207–2,216.
- 木津 昭一, 花輪 公雄(1995): 搬送波位相測定に基づく差動GPS(干渉測位)とその海洋研究における利用について. 日本航海学会誌, 第126号, 21–28.
- Kuroishi, Y. (2000): An improved gravimetric geoid for Japan, JGEOID98, and relationships to marine gravity data. *J. Geodesy* (accepted).
- Ma, X. C., C. K. Shum, R. J. Eanes, and B. D. Tapley (1994): Determination of ocean tides from the first year of TOPEX/POSEIDON altimeter measurements. *J. Geophys. Res.*, **99**, 24,809–24,820.
- Teunissen, P. J. G. and A. Kleusberg (1999): GPS for geodesy. 2nd Ed., Springer, 650pp.
- 土屋 淳, 辻 宏道 (1995): GPS 測定の基礎. 日本測量協会, 274pp.
- Tsuruoka, H., M. Ohtake, and H. Sato (1995): Statistical test of the tidal triggering of earthquakes: contribution of the ocean tide loading effect. *Geophys. J. Inst.*, **122**, 183–194.

Measurement of Sea Surface Height by GPS Kinematic Survey

Shoichi Kizu * and Kimio Hanawa *

Abstract

A series of experiments was performed on three ships of opportunity on two routes to measure temporal and spatial variations of sea surface height by GPS kinematic survey technique. On the Tokyo–Ogasawara line, the GPS-measured ellipsoidal height agreed very well with nearby tidal observations when the ships were at port and the baseline was short (within several kilometers). When the ships were cruising, the measured sea surface height generally followed the spatial variation of geoid (order of decameters) throughout the route and qualitatively the oceanic tide variation (order of meters) in Tokyo Bay.

On the Sendai–Tomakomai line, the oceanic tide was detected with better reliability under good receiving conditions. The estimated tidal variation agreed quantitatively well with an available global tidal model and nearby coastal tidal observations for most part of the route.

Possible errors of available geoid models are suggested for parts of both the routes.

Key words : GPS kinematic survey, sea surface height

(Corresponding author's e-mail address : kizu@pol.geophys.tohoku.ac.jp)
(August 9, 2000 received; November 11, 2000 accepted)
(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2001)

*Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan