

船舶におけるキネマティック GPS 観測による 高さ方向の精度評価と船体運動把握の試み

寺井 孝二：海洋研究室

The Accuracy Estimation of Vertical Kinematic GPS Positioning on Shipboard and an Attempt to Grasp of Top and Bottom Exercise of Ship by Kinematic GPS Observation.

Kouji TERAJ : Ocean Research Laboratory

1 はじめに

いまや GPS 観測による位置決定の技術は多くの分野で使われている。測量の分野では勿論のこと、今後、VRS-GPS (仮想基準点方式による) の技術と GIS が結びついたりアルタイムの高精度位置情報は、災害対策, ITS, カーナビ, デジタル地図など我々の生活に密着した形でさらに入ってくるのが予想される。

GPS による位置情報は、我々のニーズによりその精度が求められるが、現在では数多くの GPS 衛星が常時安定的に配置されるようになり、キネマティック方式による GPS 観測 (K-GPS) で 1 ~ 2 cm の測位が可能である。

そのため地震予知など地殻変動の監視に GPS 観測技術は必要不可欠な道具となった。しかし、これは水平方向の位置精度で、高さ方向では場合によってはその数倍精度が落ちるとというのが現実である。

さらに常時揺れ動く船舶などの移動体において高さデータは、動揺以外のいくつかの要素を含んだ形で得られるため、精度を検証する場合、これらの要素を個々に比較するか、分離して検証する必要がある。

いずれにしても、最善の GPS 観測データと海上特有の高さに影響を与える要素を丁寧に比較することで、陸上と同等な精度を得ることが十分に期待できる。

最近では GPS 観測から得られる高さデータを利用して水路測量を行う研究や実水深を表示する研究もなされている。ここでは基準面として WGS-84 の

準拠楕円体から測った海底面、最低水面及び平均海面が用いられ、これらのモデル化が必要になってくる。いずれにしても海上で得られる GPS 観測による高さデータを基に構築してゆくことになる。

本稿では、沿岸域において、比較的安定した測位解が得られる 10 ~ 20 km 以内の短距離基線を対象に、測量船を用いて K-GPS 観測から得られる高さ方向のデータを用いて、潮汐及びジオイド高との関係を見るためにこれらと比較し、精度を評価した。

また、K-GPS 高さデータの精度を評価したうえで、船舶に特有の速力に応じた船体の上下変化がどの程度 K-GPS 高さデータで把握できるか考察するとともに船舶で得られる K-GPS 高さデータを使用する場合の問題点を探ってみた。

2 測量船における K-GPS データの取得と解析

K-GPS 高さデータの精度を評価するために、測量船を用いて以下の 5 海域で K-GPS データを取得した。それぞれ 0.4 ~ 3 km 四方の海域において、ほぼ直交する格子状の測線上を 4 ~ 8 ノットの速力で可能なぎりぎり定速走航しデータを取得した。

データの取得海域、取得時期及び使用した測量船は以下のとおりである。

(1) 安芸灘 (安居島南東 3 km)

2000年10月12日

第六管区海上保安本部測量船「くるしま」

(2) 周防灘 (宇部沖 20 km)

2000年11月27日

第七管区海上保安本部測量船「はやしお」

(3) 東京湾千葉港 (市原沖 10 km)

2001年10月12日

第三管区海上保安本部測量船「はましお」

(4)安芸灘 (柱島南方)

2001年10月25日

第六管区海上保安本部測量船「くるしま」

(5)仙台湾 (塩釜南東沖12km)

2002年 8 月26日

海上保安庁測量船「天洋搭載艇」

これらのうち、安芸灘 (柱島南方海域) と仙台湾では、K-GPS データと同時に慣性GPS ジャイロ (POS-MV) により測量船の動揺補正データを取得した。

各海域ごとに船上の K-GPS 観測は、最寄りの臨時陸上基準点と同時観測を行い、それぞれ0.5秒間隔でデータを取得し、これらの基準点から各エポックで解析した。陸上の基準点と測量船の距離は、数kmから20kmで解析ソフトは Trimble 社の GPSurvey2.35である。

また、潮汐データは、各海域付近の既設の験潮所あるいは臨時に設置した験潮器による観測から取得したデータを使用した。

なお、(1)安芸灘 (安居島付近)、(2)周防灘及び(4)安芸灘 (柱島南方) 海域の測量船におけるデータ、験潮データ及び陸上基準点 GPS データは、海洋情報部と (財) 日本水路協会の共同研究「K-GPS を用いた水路測量の効率化の研究」で得られたデータを使用した。

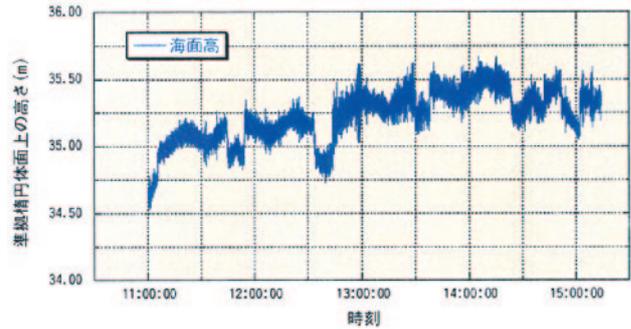
また、仙台湾の験潮データは、塩竈市の仙台北港験潮所データを使用した。

3 K-GPS 観測で得られる高さデータに影響を与える要因

第1図は、東京湾で実施した K-GPS 観測により得られた高さデータの解析結果で、WGS-84準拠楕円体上の海面高である。

海上で得られる K-GPS 観測による高さ方向のデータは、一見脈絡のないデータに見えるが注意深く見ると多くの情報を含んでいることがわかる。

それは、移動体の動揺、潮汐・海潮流の変化、移動体の速力変化等の影響による情報である。これら



第1図 K-GPS 観測による海面高の測定 (東京湾).
Fig. 1 Observed Sea surface height by Kinematic GPS Observation in Tokyo Bay.

を注意深く取り除くと、我々は、K-GPS 観測でジオイドの傾きそのものを測定していることがわかる。

しかし、それでも説明できない「高さの飛び」が時々見られるが、これらの原因として観測時の GPS 衛星の配置、衛星数、太陽の黒点活動、データ取得における衛星電波の受信障害等の問題が考えられる。

これらを理解して改めて第1図を見ると良いデータか悪いデータかが見えてくる。

4 K-GPS 観測データと潮汐の比較

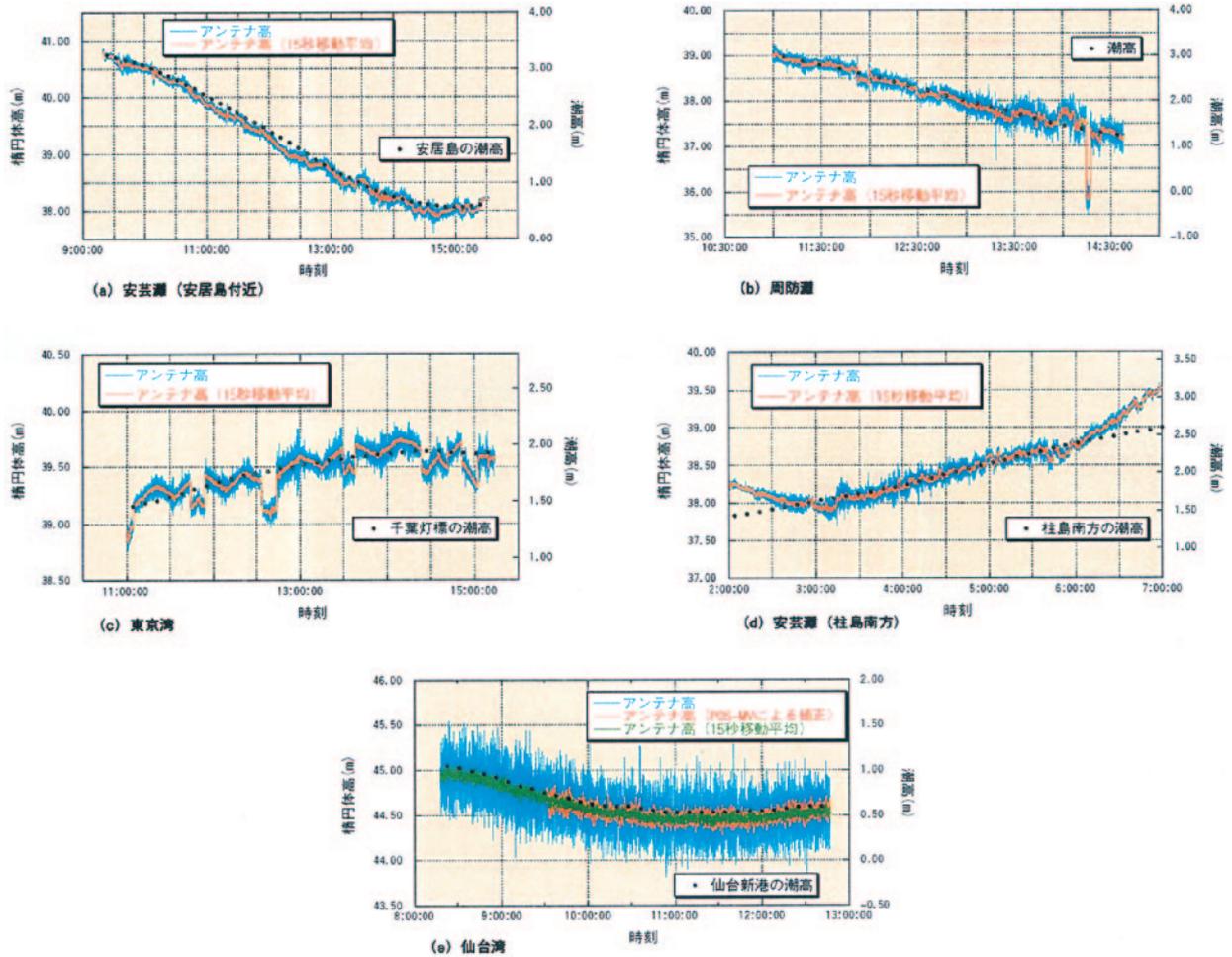
K-GPS 観測で得られる高さ方向のデータには、潮汐変化による高さの変化が含まれている。実は、潮汐以外に流れによる高さの変化も含まれているはずである。

しかし、流れの影響と言っても単純な流れから渦状の流れ等、その影響による高さの変化を推算する事は複雑であるため、ここでは単純な潮汐変化による高さの変化と比較することにした。

第2図は、第2節で示した海域付近の既設の験潮所あるいは臨時に設置した験潮器で得られた潮位データと K-GPS 観測による高さデータの比較である。これらは、他の影響を取り除かない K-GPS 観測による高さ方向のデータと潮位の単純な比較であるが、これだけからも良い相関関係が見られる。

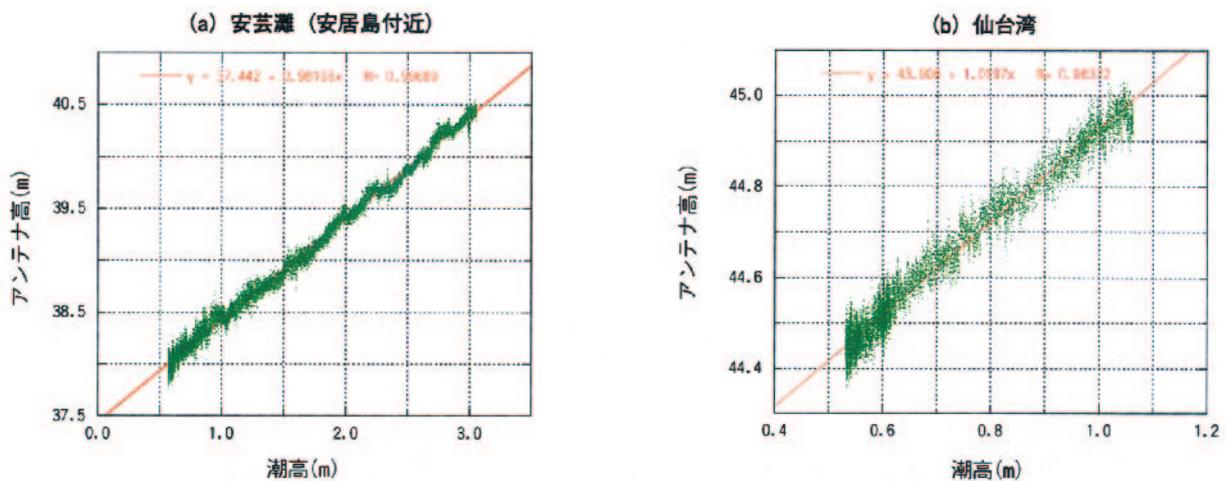
なお、第2図(c), (d)で潮位変化と大きく乖離している部分が見られる。これらは次節以降で考察するがジオイド高の変化と測量船の速力変化によるものである。

また、第3図は、第2節の5海域のうち安芸灘 (安



第 2 図 (a)安芸灘(安居島付近), (b)周防灘, (c)東京湾, (d)安芸灘(柱島南方)及び(e)仙台湾における K-GPS 観測高と潮位の比較。

Fig. 2 Comparison between observed K-GPS height and tidal observation data obtained at (a) Sea area of Ai-jima in Aki-nada, (b) Suo-nada, (c) Tokyo Bay, (d) South area of Hashira-jima in Aki-nada and (e) Sendai Bay.



第 3 図 K-GPS 観測による高さとの潮高の相関。(a)安芸灘 (安居島付近) 及び(b)仙台湾。

Fig. 3 Relation between observed K-GPS height and tidal observation data. (a) Sea area of Ai-jima in Aki-nada and (b) Sendai Bay.

居島付近) 及び仙台湾で取得した K-GPS データで、いずれもジオイド高の変化と測量船の速力変化が少ないため、K-GPS 高さデータと潮高との良い相関関係が見られる。

5 K-GPS 観測データとジオイドモデルとの比較

次に、K-GPS 観測による高さデータとジオイド高の関係を見た。

ここでは、国土地理院発行の日本周辺のジオイドモデル「日本のジオイド2000」“GEOID2000” (安藤ほか, 2002) (第4図) と K-GPS 高さデータを比較した。両者の関係を見るにあたって GEOID2000 のメッシュデータを用いて任意の位置で補間計算したジオイド高と第2節の東京湾及び安芸灘(柱島南方)で取得した K-GPS 高さデータに潮高補正を行い平均海面の楕円体高とした値を比較した (第5図)。

ここで注意しておきたいことは、重力の等ポテンシャル面で定義されるジオイド面と平均海面は正確

には一致しないということである。

国土地理院のジオイドモデルは、全国の水準点における GPS 観測によるジオイド測量データと日本周辺の重力ジオイドデータを統合して構築されたもので、水準測量の基準面は東京湾平均海面である。

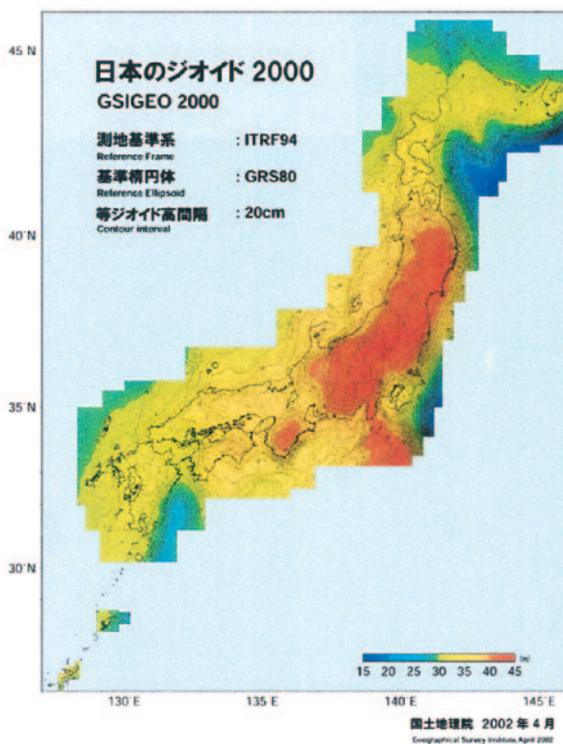
また、本稿で比較するため潮高補正した平均海面は海域毎に定義された平均海面あるいは臨時に設置・観測した験潮データから決定した平均海面を用いた。

ここで使用した地域の平均海面と東京湾平均海面の差は最大10cm程度と考えられる。

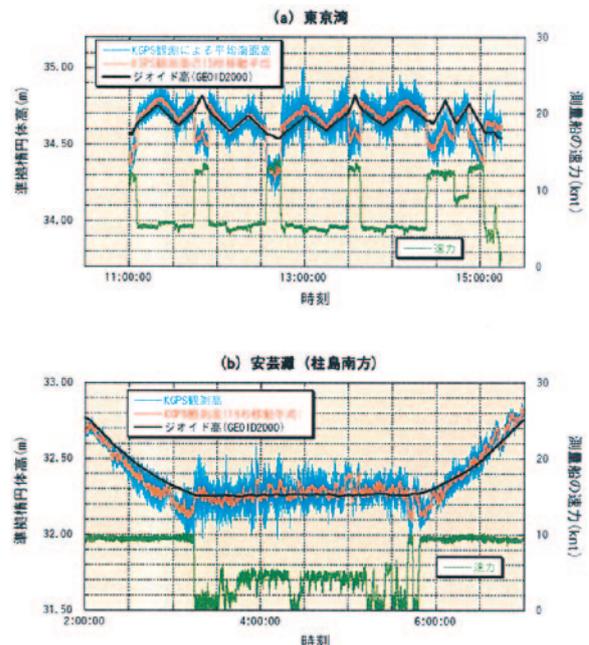
従って、海面上で得た K-GPS 観測による高さデータに潮汐・流れによる高さの補正を正確に行えばジオイド高とかなり良く一致すると考えられる。

第5図から K-GPS 観測による平均海面の楕円体高と GEOID2000はおおよそ一致している。

詳しく見ると、第5図(a)の東京湾のデータでは、K-GPS データと測量船の速力の関係から速力が大



第4図 国土地理院による日本周辺のジオイドモデル (GEOID2000).
Fig.4 Height of Geoid around the Japan, GEOID2000 produced by Geographic Survey Institute (GSI).



第5図 潮位補正した K-GPS 観測による高さジオイドモデル (GEOID2000) の比較. (a) 東京湾及び (b) 安芸灘 (柱島南方).
Fig.5 Comparison between observed K-GPS height corrected by tidal observation data and height of Geoid (GEOID2000) produced by Geographic Survey Institute (GSI). (a) Tokyo Bay and (b) South area of Hashira-jima in Aki-nada.

大きく変化している部分を除き、K-GPS データとジオイド高の良好一致が見られる。

また、第5図(b)の安芸灘のデータでも10ノットから数ノットに速力が変化している部分を除き、東京湾のデータ同様、良好一致が見られる。

なお、観測時間前後の10ノットで約1時間移動している部分は、潮高補正が正確にできていないため、K-GPS 高さデータの変化とジオイド高の変化が一致していないものと思われる。

ここで、GEOID2000の精度が10~20cmということ を考慮すると傾向としてK-GPS 高さデータと GEOID2000の良好相関関係が示されている。

6 K-GPS 観測による高さデータの精度評価

K-GPS 観測による高さデータの精度検証のために第2節で取得した5海域のK-GPS データを用いた。ここでは、0.4~3 km四方の海域において東西・南北方向に交差する測線を格子状に設定して、これらの交差点のK-GPS 観測による高さデータを比較するという方法で精度の評価を行った。

第6図は、第2節の仙台湾で取得したK-GPS 観測による航跡図で約10m間隔で格子状に走航してデータを取得した。

データの取得間隔は0.5秒で測線上の測量船の速力変化による高さへの影響をなくすため速力変化を1~2ノット以下とするよう定速に保った。

各交差点での測点間距離は1~2 mで、これはGPS の観測間隔である0.5秒間に測量船が移動する距離に等しい。

交差点の間隔は海域により異なるが約10m~400 mである。また、交差する時間間隔も交差点によって異なるが数分から長いものは1~2時間の時間差がある。

従って同一交差点でのK-GPS 観測から得られた高さデータは、潮汐の変化分を持つことになる。ここでジオイドの傾きは同一交差点では同じと考えられ、また、測線上ではほぼ一定速力で走航しているため速力変化による影響も無視できると考えられる。

そこで潮位変化を現場海域で測定し、GPS 観測の

各エポックで補間計算した潮高値を補正することでK-GPS 高さデータを最低水面の楕円体高として各交差点で比較した。

以下に各海域で得られたK-GPS 観測による高さデータの各交差点での差(絶対値)の平均値と偏差を示す。

(1)安芸灘(安居島付近) :

交差63点での比較
平均値6.2cm (標準偏差4.2cm)

(2)周防灘(宇部沖) :

交差62点での比較
平均値10.3cm (標準偏差9.0cm)

(3)東京湾(千葉港) :

交差36点での比較
平均値2.4cm (標準偏差1.7cm)

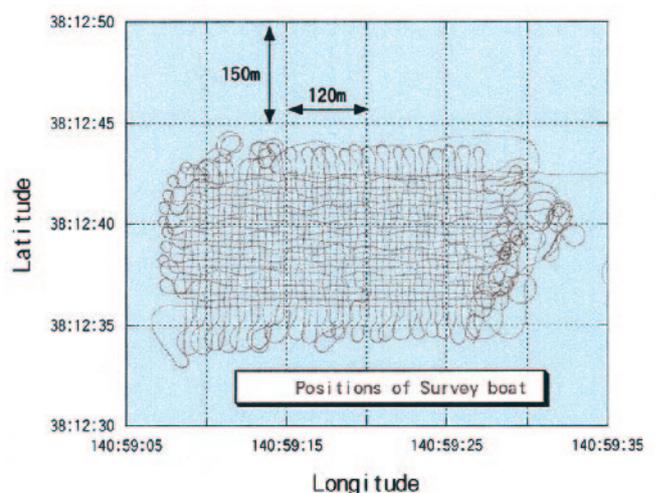
(4)安芸灘(柱島南方) :

交差38点での比較
平均値3.3cm (標準偏差2.6cm)

(5)仙台湾 :

交差573点での比較
平均値3.2cm (標準偏差2.3cm)

各交差点において、潮位変化、船舶の速力変化による高さの差等、高さ方向に影響を及ぼす要因をすべて取り除くことができれば、各交差点でのGPS 観測による高さの差は“ゼロ”になるはずである。



第6図 測量船「天洋搭載艇」の航跡図。
Fig. 6 Track lines of a boat of Survey vessel, Tenyo. The difference of height by K-GPS observation measured it in each point to intersect on a figure.

今回の5海域で得られたK-GPS観測データから船舶において約5cmの精度で高さ方向の観測が可能なのが示された。

従って、船舶等の移動体において注意深くデータを取得し、潮位と速力変化の影響を補正できれば陸上でのGPS観測にかなり近い精度で高さ方向の情報得られる事が考えられる。

7 測量船の速力変化がK-GPS観測データにあたる影響

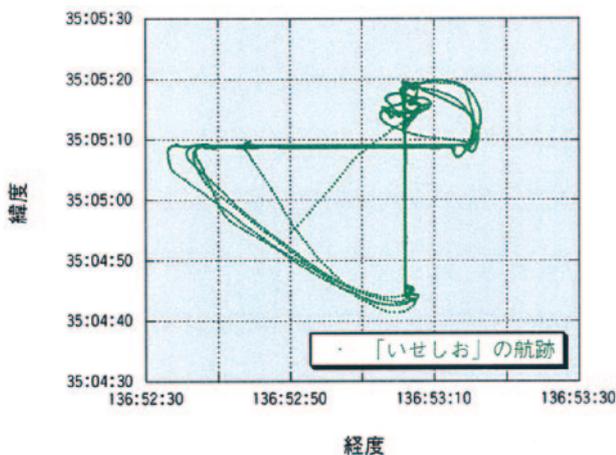
第6節で、船舶においてもK-GPS観測により5cm前後の精度で高さが決まることが示された。

そこで船舶の速力変化によりどの程度船体が上下動するか、K-GPS観測により定量的に把握するため測量船を用いてデータを取得した。

7.1 データの取得方法及び解析

2002年1月30日、名古屋港内にて第四管区海上保安本部の測量船「いせしお」でK-GPSデータ及び船体動揺データを取得した。動揺データは、3軸方向の加速度、角速度及びヘディングを計測できるGPS慣性ジャイロ(POS-MV)を用いた。また、動揺データの精度比較を目的としてTSS-DNS10による動揺データも併せて取得した。

GPSアンテナを「いせしお」の船首甲板上、船体中央付近の操舵室上部甲板上及び船尾甲板上の3カ所に設置して0.5秒間隔のK-GPSデータにより船体の上下方向の動きを解析した。



第7図 測量船「いせしお」の航跡図。
Fig. 7 Track lines of the Survey vessel, Iseshio.

「いせしお」のK-GPSデータは、最高で約1km離れた名古屋港に陸上臨時基準点を固定してGPSurvey2.35で解析した。

なお、潮位の補正は名古屋港験潮所のデータ(名古屋市)を使用した。

データを取得する測線は、東西・南北にそれぞれ約700mの交差する2測線を設定した。南北測線を北から入線し次に東西測線を西から入線してデータを取得するパターンをそれぞれ2, 4, 6, 8, 10ノットの速力で実施した。また、各測線の入線前及び出線後の数分間は停船してデータを得た。

7.2 K-GPS観測による高さ・速力変化の比較

第7図は、K-GPS測位データをプロットした測量船「いせしお」の航跡図である。

また、第8図(a)~(c)は、測量船「いせしお」の3カ所に設置したGPSアンテナで取得したK-GPS観測による高さ成分の解析結果で、第8図(d)は、「いせしお」の速力変化を示した。

第8図(c), (d)から測線変更時の約13ノットの速力で約30cmの測量船船尾の沈み込みが見られる。また、2, 4ノットでははっきりしないが6~10ノットで速力に応じた沈み込みが顕著に見られる。

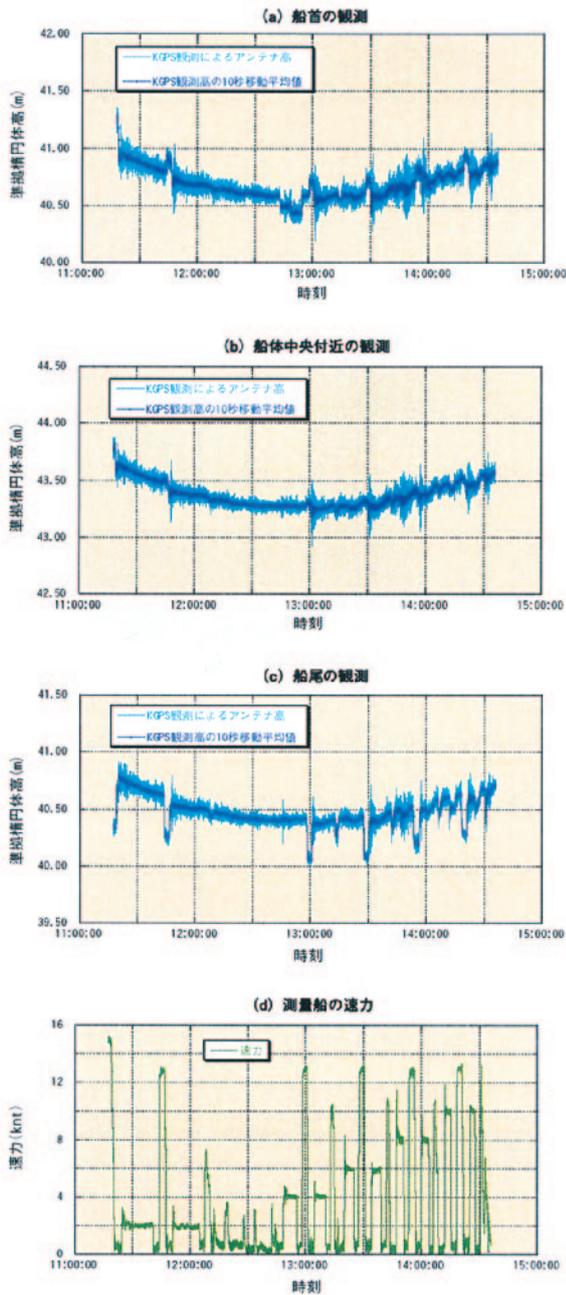
第8図(a)~(c)を比較すると測線変更時の10数ノットの速力で船首は浮き上がり、船尾は大きく沈み込むことがわかった。しかし10ノット以下の速力では量の違いはあるが船首・船尾とも船体全体が沈み込んでいる。

7.3 測量船「いせしお」のスクワット量

第8図で測量船「いせしお」の速力に応じた上下変動の概略がつかめたので、その大きさを定量的に測定してみた。

前出のジオイドモデルGEOID2000のメッシュデータから任意位置のジオイド高が計算できる。これによると南北測線上のジオイド変化量はほとんど見られず、東西測線上では5~6cm東側が高い傾きをもっている。

第8図(c)から2, 4ノット測線では潮位変化の傾きがジオイドの傾きを打ち消してわからないが、6~10ノットの測線では潮位変化の傾きとジオイドの傾きが同じ方向のため高さ変化の傾きが増幅され東



第 8 図 測量船の3カ所で取得した K-GPS 観測による高さ。(a)船首, (b)船体中央付近, (c)船尾及び(d)測量船の速力。

Fig. 8 Observed K-GPS height obtained by three places of Survey vessel. (a) The bow, (b) The hull center, (c) The stern and (d) A speed of Survey vessel.

西測線でその大きさ変化が顕著に見られる。

そこで潮位変化がないとした時の潮位補正を行い、さらにジオイドの傾きもないと仮定したときの K-GPS 高さデータを作成し、各速力毎に停船時との高さの差を測定し速力に応じた変化量を求めた (第 9 図(a)~(e))。

また、測量船の速力に応じた上下変化量を船首、船体中央付近及び船尾の 3 カ所で取得した K-GPS 高さデータで求め、プロットしたものが第10図である。

第10図を見ると、7.2で記述したように測量船「いせしお」の速力に応じた船体の上下の動きが顕著に見られる。即ち、10ノットまでは船体全体が速力に応じて徐々に沈み込み、10ノットを越えると船尾の沈み込みが大きくなり船首は逆に浮き上がる動きをする。

その沈み込み量は、4ノットで1~2cm、6ノットで2~3cm、8ノットで3~5cm、10ノットで5~10cmである。13ノットでは船尾で32cmの沈み込み、船首で14cmの浮き上がりが測定された。

ここで特筆したいことは、動揺データ (POS-MV) で補正した結果である。

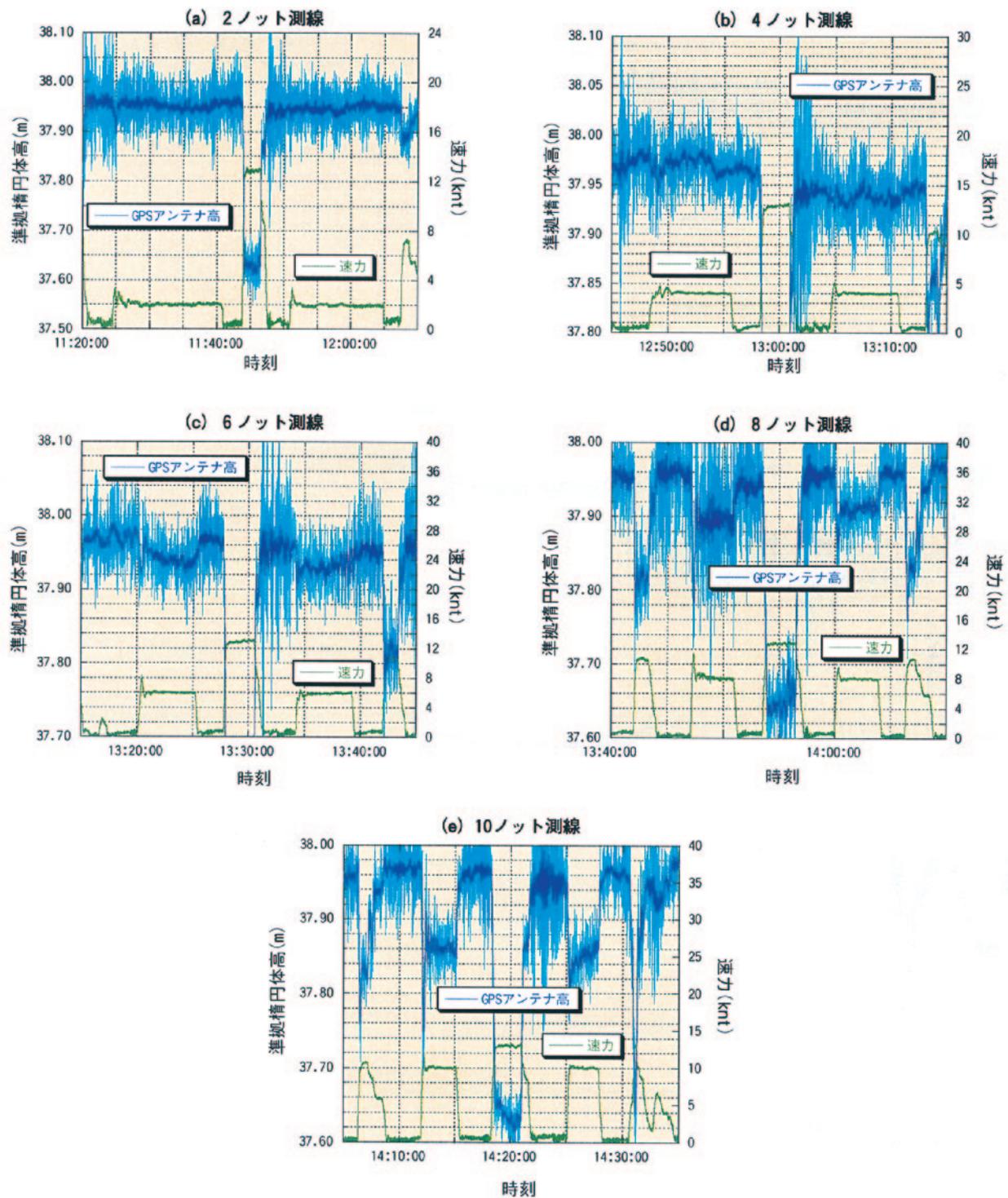
3カ所に設置した GPS アンテナで得られる高さデータは、それぞれアンテナ高の違いによりバラバラの値を持つが、アンテナ高及び動揺データの補正により同じ高さにそろえられ、その結果をプロットしたものが第10図の「POS-MV の補正による曲線」である。ここで見られるように POS-MV で高さ補正されても船の速力に応じて船体全体が実際に沈み込んでいる。10ノットでは船体が7~8cm沈み込む結果が得られた。

7.4 船体動揺データの比較

海上で取得される位置データ及び測深データには船体の動揺によるノイズが含まれている。K-GPS 観測による高さデータにも観測時の海上模様にもよるが大きい場合は沿岸域で1mを越えるノイズが含まれることがある。このような状況で得られたデータをそのまま高さデータとして使うことはできない。

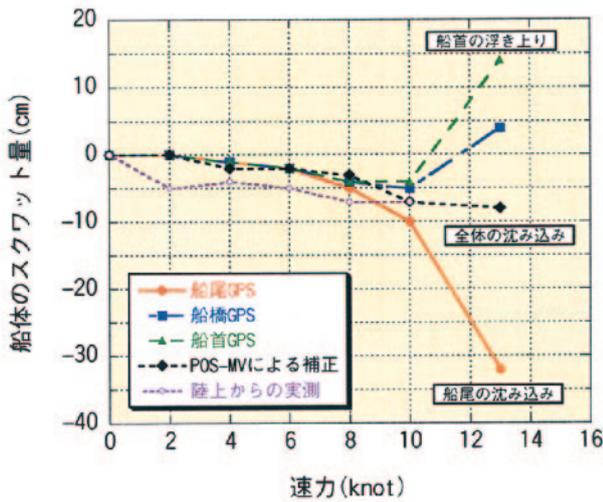
しかし、速力に応じた船体の上下変動を把握していれば1mにおよぶ上下変動を伴ったデータを移動平均して真値に近いデータとして使う事は可能である。どのように使用するかはニーズに応じて使い分ける必要がある。ともあれ測量で使うことを考えれば静かな海況で得られたデータでも船体の動揺補正を行うことは必要である。

そこで、今回得られた POS-MV 型での動揺デー



第9図 測量船の速さに応じた、K-GPS 観測による高さの測定。(a)2ノット、(b)4ノット、(c)6ノット、(d)8ノット、(e)10ノット。

Fig. 9 Observed K-GPS height in each speed of Survey vessel. (a) 2 knot, (b) 4 knot, (c) 6 knot, (d) 8 knot, (e) 10 knot.



第10図 測量船の速度変化による船体のスクワット量。
 Fig.10 A quantity of squat of the hull by a speed change of Survey vessel.

タと TSS 型での動揺データを比較するとともに、これらを名古屋港で得られた K-GPS 観測による高さデータに補正を加え比較してみた。

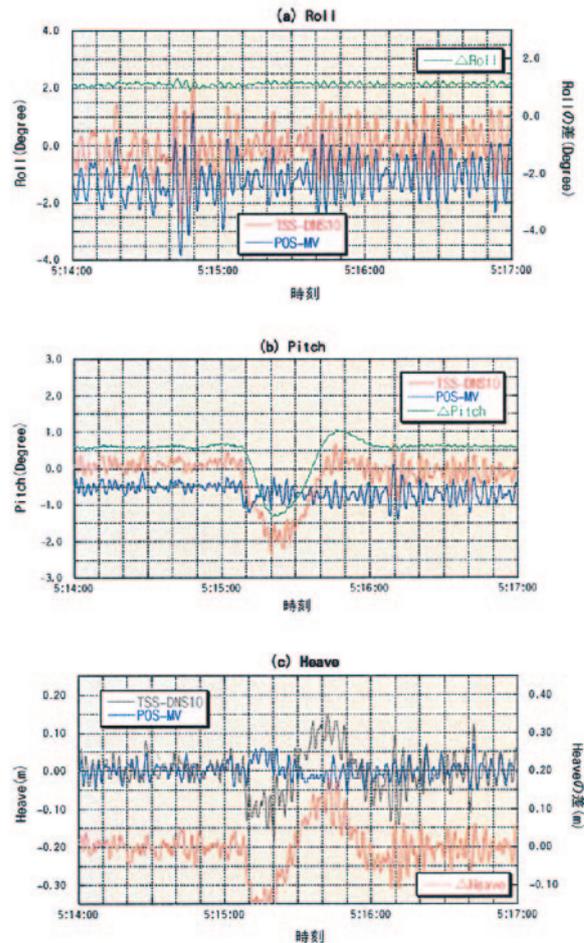
第11図(a)~(c)は、POS-MV 型と TSS 型で取得した動揺データの3成分の Roll, Pitch, Heave データをそれぞれ比較したものである。これらの動揺データは、7.1で取得した K-GPS データと同時に取得したデータで GPS 時計で UTC に同期したものである。比較した時間帯は、北から南方向の測線上で10ノットから停船に移った時間帯である。

Roll 及び Pitch データは、両者の比較で TSS 型も良いレスポンスを持っているが、Heave データに関しては POS-MV 型に比べ TSS 型はレスポンス性能が落ち両者に格段の差が見られる。

第12図(a)~(c)は、K-GPS 高さデータに両者それぞれ単独で補正したものと両者の組み合わせで補正したときの比較である。

即ち、第12図(a)は、K-GPS 観測による高さデータに POS-MV の3成分動揺データを補正したもの、第12図(b)は、TSS 型の3成分動揺データを補正したもの、第12図(c)は、TSS 型の Roll 及び Pitch データと POS-MV 型の Heave データを補正した結果である。

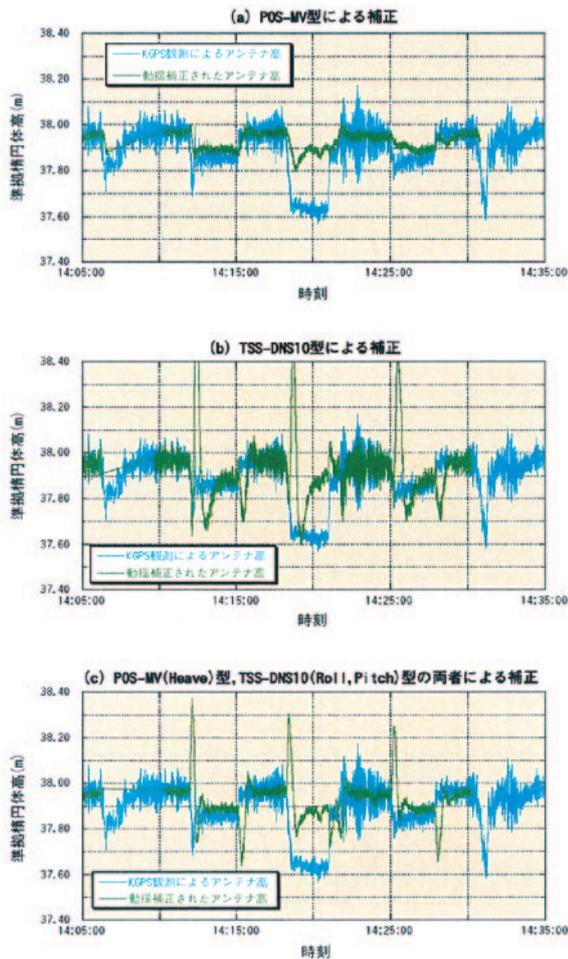
POS-MV 型の補正と比較して TSS 型のデータでの補正はあまり改善が見られない。特に、大きな



第11図 2機種 (POS-MV, TSS-DNS10) の動揺補正データの比較。
 Fig.11 Comparison between POS-MV and TSS-DNS10 data.

速度変化時のレスポンスの悪さが TSS 型に見られる。また、約10cm以下のノイズをもつ高さデータに対するの改善(補正)は見られない。しかし20cmを越えるノイズを持ったデータに対する補正の効果は多少みられた。これは Pitch 方向の動揺データによる補正の効果と示唆される。

これらのことは、第12図(c)から明らかで、TSS 型の動揺データのうち Roll 及び Pitch データによる補正の効果は十分あるが、Heave データを補正する場合は、補正されるデータのノイズの大きさによりその効果が期待できないことがあるため注意が必要である。



第12図 K-GPS 観測による高さデータに対する、POS-MV 動揺データ、TSS-DNS10動揺データ及び両者のデータによる補正。

Fig.12 Comparison among correction by POS-MV attitude data, correction by TSS-DNS10 attitude data and correction by data of both for observed K-GPS height.

8 K-GPS 高さデータを使用する場合の問題点

8.1 実験海域から離れた場所の験潮データによる補正の問題

第6節のように K-GPS 観測による高さに潮位を補正して格子点での高さの差からその精度を評価する場合、補正に用いる実測潮高が限りなく K-GPS データを取得した海域の潮高に近いことが望ましい。

安芸灘(柱島南方)での潮位データは、K-GPS データを取得したほぼ直上であること、東京湾の潮位データも K-GPS データ取得海域に近く流れがほとんどなかったことから、これらの海域での精度評価

は十分信憑性がある。

しかし、周防灘での精度評価は、潮位データを取得した場所から約15km離れた海域で K-GPS データを取得していることを考慮すると潮位補正の信頼性はかなり低いと言える。

8.2 移動体の速力変化の影響

第7節で詳しく述べたように、船舶のような移動体でデータを取得して高さ方向の測位精度を論じる場合、船体の上下の動揺が避けられず、その速力に応じて上下量が変わることから、あらかじめその変化量を補正することが必要である。

速力による船体の上下変化量をあらかじめ測定することはかなり難しいが、無視できない量である。

1~2ノットの速力差で上下動が大きく変化することはないが、低速での1~2ノットの速力差と10ノットを越える速力での1~2ノットの速力差は、高さ方向の影響量が格段に違って来る。

そこで速力による高さ補正を行うか、補正ができない場合は、できるだけ低速でかつ一定速力でデータを取得する必要がある。

8.3 衛星電波の受信障害等による影響

K-GPS 観測による高さデータは、潮位の補正、速力変化の影響による補正が可能であるが、衛星電波の受信障害による移動体での受信データの問題により、複数の基準点による解析等、最善の解析を試みても使用できない部分のデータが出てくる。

衛星データを取得する場合、アンテナの設置場所、設置方法、データ取得時の衛星配置、衛星数等、事前に十分な調査を行い良いデータが得られる状況で観測に望むことが必要である。

本稿のデータにも一部見られたが、原因が不明な「高さデータの飛び」が時々見られる。突き詰めれば、受信側の障害物による一時的な受信障害、衛星配置の変化、海況の変化等による影響の場合が多い。

従って、予期できないことも多いが最善のデータを取得するため十分な準備が必要である。

9 まとめ

K-GPS 観測による高さデータの精度評価を行ったが、注意深くデータを取得して潮位と移動体の速

力変化の影響を正確に補正できれば、海上においても K-GPS 観測により、3～5 cm の高さ変化は十分に検出できることが示された。

相対比較での精度評価のため、絶対精度としての評価はされていないが、陸上における観測精度に匹敵する高さの測位が可能なことを示している。

また、あらためて海上で高さの測位精度を評価する場合の問題点も見えてきた。

特に移動体の動揺を補正しても船の速力に応じて船体がさらに10cm近く沈み込む場合があることがわかった。これは測量船等で測深値を得る場合、有意な補正量である。

参 考 文 献

安藤ほか：「日本のジオイド2000」“GEOID2000”，
(2002)

名古屋市：名古屋港験潮所データ，(2002)

(財)日本水路協会：K-GPS を用いた水路測量の効率化の研究，(2001, 2002)

仙台市：仙台新港験潮所データ，(2002)