

移動体における GPS による高さの利用について

打田明雄：海洋研究室

Application of Vertical GPS Positioning on Shipboard

Akio Uchida : Ocean Research Laboratory

1. はじめに

2000年5月2日(04:07, UTC)は、GPSでの単独測位の利用者にとって、S/A (Selective Availability)が突然解除されたことにより、新しい時代の幕開けとなった。これは、米国政府により、1993年12月8日のIOC (Initial Operational Capability)宣言以来、正式に運用されてきたGPSの運用政策に変更がなされたもので、当初2006年の解除予定が、予定より6年も繰り上げ解除された。元来GPSは、軍事目的のシステムであるため、米国政府のコントロール下にあり、一般の利用者は、S/Aと呼ばれる測位精度の意図的な劣化により、利用できる測位精度の制限を受けてきた。このため、一般的には、測位精度が100m以下と言われていたものがS/Aの解除により格段に改善された。

実際に2000年7月21日から23日までの3日間、東京都内に仮設した固定点において、GPS受信機MX9112により、仰角5度以上の衛星を利用し観測した結果、その平均位置からの偏差は、10.7m (2 drms, 95%) が得られた。

この結果、水路部が実施している外洋域での大陸棚調査、海洋観測等の移動体測位においても、中波ビーコンを利用したDGPS (Differential GPS)の基準局から200kmと言われている利用範囲外で、後処理をすることなく、また、基準局からの距離に影響されることなしに、単独測位で約10m程度の測位精度が得られることとなった。移動体での位置決定については、ブロックII衛星の打ち上げに伴ない、1989年から運用が開始されたGPSのS/Aに対抗して、また、GPSを利用した測位精度の改善をめざして開

発されたDGPS、K-GPS (Kinematic GPS)及びRTK-GPS (Real Time Kinematic GPS)により得られる測位精度を超えないものの、これらに加えて新たな段階を迎えたと言える。

このように、水平方向の測位精度が高まる状況下で、S/Aの運用により、使用することがほとんどなかったGPSの単独測位で得られる高さ及びDGPSによる高さ、また、利用範囲の制限があるものの高精度に決定できるK-GPS及びRTK-GPSによる高さについて、移動体にとって、どのような利用方法があるのか、具体的な例について報告する。

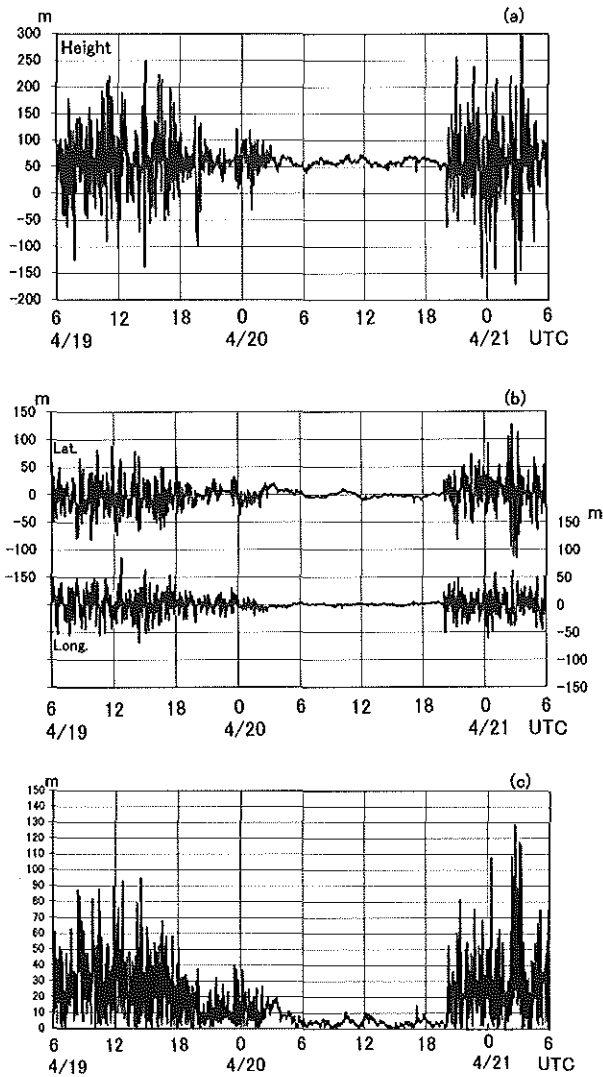
2. GPSで得られる高さ

GPS受信機を利用して、単独測位を行うと、WGS84楕円体を準拠楕円体とする緯度・経度・高さとして表示される。このため、高さは、楕円体からの高さとなる。また、平均海面とほぼ一致する等重力ポテンシャル面がジオイドと呼ばれていることから、海面高を高精度に測定すれば、ほぼジオイド高を測定していることとなる。

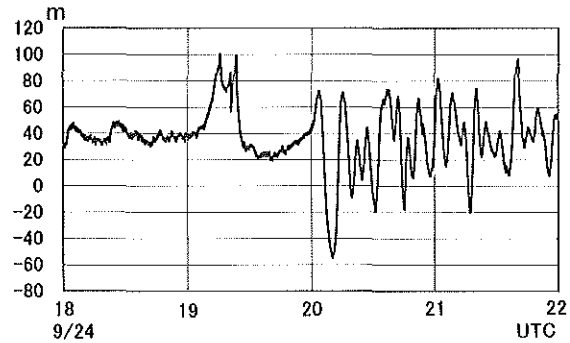
3. 高さの利用

(1) 単独測位で得られる高さの利用

S/Aが解除されるまでは、GPSの予測測位精度(2 drms, 95%)は、米国が公開しているFRP (Federal Radionavigation Plan, 1999)によると、水平方向100m以下、垂直方向で156m以下とされてきた。このため、移動体にとっての高さは、唯一SAの解除または運用の指標となった。例として、第1図は、水路部が測量船の測位精度改善のために、後処理によるDGPS用に運用していた基準局で、GPS



第1図 SAが解除された状況下での高さ(a), 緯度・経度(b), 平均位置から水平方向の偏差(c) (1997/4/20)
 Fig. 1 Example of S/A OFF positioning obtained from JHD's DGPS reference station. (a) height, (b) Lat., Long., (c) Horizontal deviation, (1997/4/20).

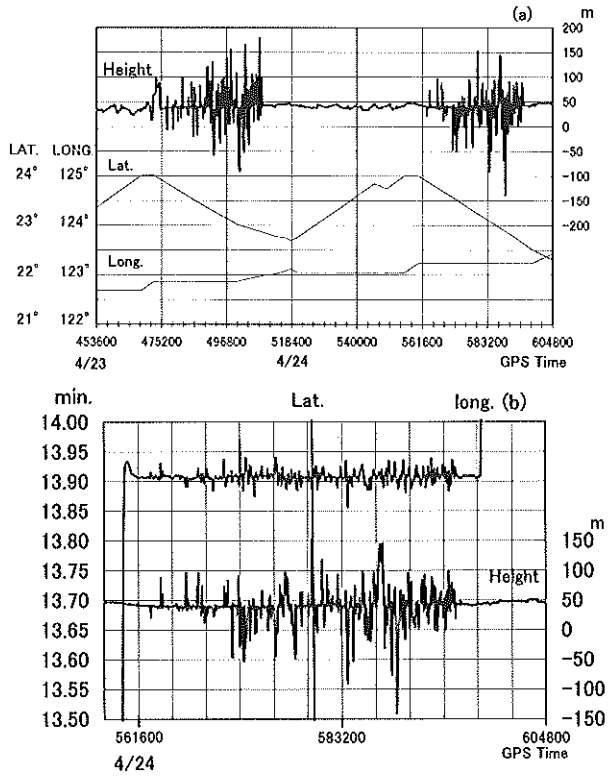


第2図 測量船「海洋」で観測したS/Aの解除から運用への高さの変化 (1994/9/24)
 Fig. 2 Example of S/A OFF to ON obtained by the survey vessel KAIYO (1994/9/24).

受信機 MX9112 を使用してデータ収録した1997年4月20日 (02:51~20:00, UTC) の例を示したものである。第1図(a)は、高さの変化, 第1図(b)は、緯度・経度の変化, 第1図(c)は、平均位置から水平方向の偏差を示している。これらから、S/Aの解除及び運用の操作が1日以内の短時間に実施された状況を良く表わしている。公式な発表がないので、特定はできないが、前日の19日 (20時前後, UTC) には、一部操作が開始されている様子も読み取れる。この操作は、2000年5月2日以前でのS/Aの最後の解除及び運用切り替えとなった。第2図は、1994年9月24日、測量船「海洋」の行動中に、6chのGPS受信機 MX4200で得られたSA解除から運用への切り替え状況である。S/Aの解除の間は、高さは約30m~40m付近で変動しているが、08:00 (UTC) からS/Aの再運用により、約-50m~100mの範囲で大きく変動している。解除されている時間内で一部高さに約80~100m付近への変動が見られるが、同時刻に得た陸上の基準局データからは、12chのGPS受信機 MX9112を使用し、周囲に受信障害等ない状況であったため、このような現象は見られなかった。原因として、測量船が進路変更中で、受信衛星が4~5個に減少した時 (衛星の切り替えを含む) に発生している状況があった。なお、1994年9月24日の基準局での切り替え日を含む前後3日間の観測記録は、打田 (1996) に掲載している。これらの例で示されるように、海上での移動体でも高さの変動の変化は、容易に確認できる。第1表には、S/Aの解除

第1表 S/A解除の期間
 Table 1 Periods of S/A OFF.

1	1990年8月10日(---) ~ 1991年7月1日(04:00) 1991年11月15日(SAの全面的再開)
2	「1992年9月6日~1992年9月22日」 (解除について未確認)
3	1994年9月17日(---) ~ 1994年9月24日(20:00)
4	1997年4月20日(02:51) ~ 1997年4月20日(20:00)
5	2000年5月2日(04:07) SAの全面的解除



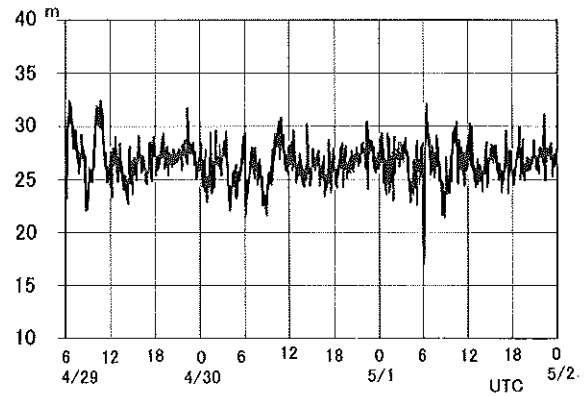
第3図 (a)測量船「昭洋」で観測した DGPS による高さの変化 (1999/4/23~24)
 (b)高さ及び緯度・経度の変化を一部拡大し示す
 Fig. 3 (a) Example of DGPS height obtained by the survey vessel SHOYO (1999/4/23~24).
 Lat. and Long. coordinates also plotted.
 (b) Expansion of Fig.3-(a), GPS Time : 558000~604800sec.

が実施された期間を表している。時間は、UTC により記載した。一般に SA の解除及び運用については、公表されていないので、第1表の2から3は、測位結果から推定したものである。また、表中で（解除について未確認）及び（--：--）としているのは、GPS 測位データを使用している期間及び時間の未確認なものである。

S/A が全面的に解除されたことにより、移動体での高さの利用は、GPS の水平方向の測位精度が劣化するれば、垂直方向の高さについて、より大きく変動することから、従来の S/A の解除の監視からシステムの異常等の監視に応用できると期待される。

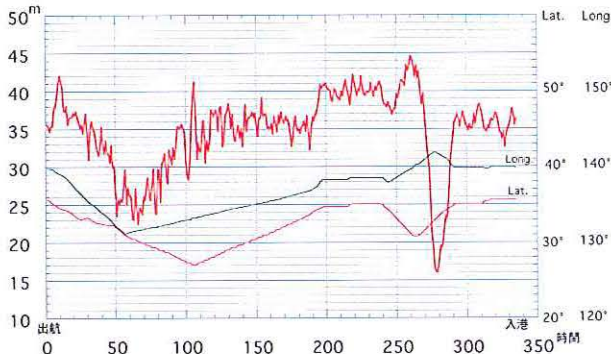
(2) DGPS 測位で得られる高さの利用

1999年4月1日から正式運用されている中波ビー



第4図 測量船「昭洋」で観測した石垣港での DGPS による海面高 (1999/4/29~5/2)
 Fig. 4 Observed DGPS height at port of Ishigaki (1999/4/29~5/2).

コンを使用した DGPS は、1999年9月2日、下里水路観測所内の下里海洋測地本土基準点を基準とし決定された各 DGPS 基準局の GPS アンテナ位置が、各基準局位置として適用された。このため、日本周辺海域での DGPS 利用者にとって、得られる位置の基準が統一されたものとなった。第3図(a)は、測量船「昭洋」による1999年4月19日から5月14日に実施した平成11年度第1次大陸棚調査（石垣島南方海域）時における DGPS による高さの記録の一部を緯度・経度と併せて示した。第3図(b)は、DGPS の補正が正常に行われなかった期間の一部を拡大し示した。通常測量船が作業を行う場合は、予定の測線上に合わせて航走しているため、緯度・経度では、実際に DGPS の補正が正常に行われた場合と行われなかった場合との確認が容易にできないが、このように、高さを表示することにより、その変化の大きさから調査作業における DGPS の利用状況が把握できる。また、第4図には、測量船「昭洋」が石垣港停泊中の海面高を示している。4月30日00:00から5月2日00:00 (UTC) までの48時間の平均海面高を求めると26.4mであり、石垣港での測量船「昭洋」接岸場所のジオイド高は、25.95mであるので、喫水の変化を考慮すれば、よく合致している。第5図は、1995年11月9日から11月23日の間の測量船「昭洋」で得られた後処理方式による DGPS の結果で、東京港出港から入港までの海面高を緯度、経度と併せて示している。伊豆・小笠原海溝を横断したとき



第5図 測量船「昭洋」で観測した後処理 DGPS による海面高 (1995/11/9~23)

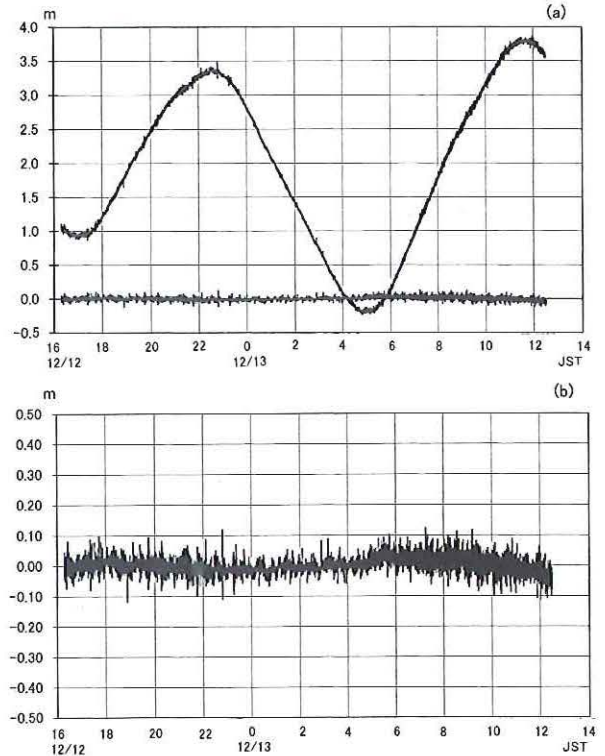
Fig. 5 Example of postprocessing DGPS height obtained by the survey vessel SHOYO (1995/11/9~23).

の海面高の変化がよく現れている。これらのことから、潮位の変化を確実に捉えられる精度にはないものの DGPS 測位において、ジオイド高の変化が読み取れる。

(3) K-GPS, RTK-GPS 測位で得られる高さの利用

海上での移動体における GPS 及び DGPS 測位で得られる高さは、現状の精度から、得られた数値をそのまま使用することは、接岸中もしくは錨を使用している停泊中以外では困難であり、利用目的が限定されるが、K-GPS, RTK-GPS 測位で得られる高さは、基準局からの距離による制約を受けるものの、 $2 \sim 3 \text{ cm} + 2 \text{ ppm}$ とされているその垂直精度から、海面高の変動が詳細に得られる。

1996年12月12日から12月13日にかけて、基準局を広島港湾合同庁舎屋上に設置し、移動体として、浮き桟橋に係留された測量船「くるしま」を使用して、RTK-GPS による約20時間の海面高変動の観測を実施した。使用機器は、GPS 受信機 GPR-1及びデータ伝送にデジタル無線データ伝送装置 Air-Link を使用した。第6図(a)は、近接する水路部所管の広島験潮所の潮位データと比較するために、それぞれに観測時間での平均を算出し、その差を補正した測量船「くるしま」による海面高の変動データと、広島験潮所の潮位との偏差を求め、併せて示している。第6図(b)は、その偏差を拡大し示した。RTK-GPS 測位の三次元測位精度の高さから、垂直方向も精度良く求められ、潮高及び海面の細かな変動状況も得



第6図 (a)広島港での RTK-OTF による潮位観測 (1996/12/12~13)

(b)広島験潮所潮位データとの偏差
Fig. 6 (a) Observed tide by RTK-OTF at port of Hiroshima (1996/12/12~13).
(b) Deviation from observed tide.

られていることがわかる。

また、1997年10月13日13:05から16:12まで、測量船「くるしま」により、広島港から呉港の間で、デジタル無線データ伝送装置 Air-Link を使用した RTK-GPS 測位の利用範囲の調査のための往復観測を実施した。Air-Link の性能仕様から電波の到達距離は、13km以上と記載されている。このため、基準局から約16km付近までの受信状況を RTK-GPS 測位での高さの変化と広島験潮所での同時刻の潮位データを使用して、その高さの変化を利用することにより、電波の到達距離と RTK-GPS の利用範囲の特定を試みた。

第7図(a)は、その往復観測で得られた高さとして、広島験潮所の潮位に調査開始時の高さを定数として加えた結果を併せて示している。第7図(b)は、RTK-GPS 測位で得られた高さから、潮位の変化と広島港

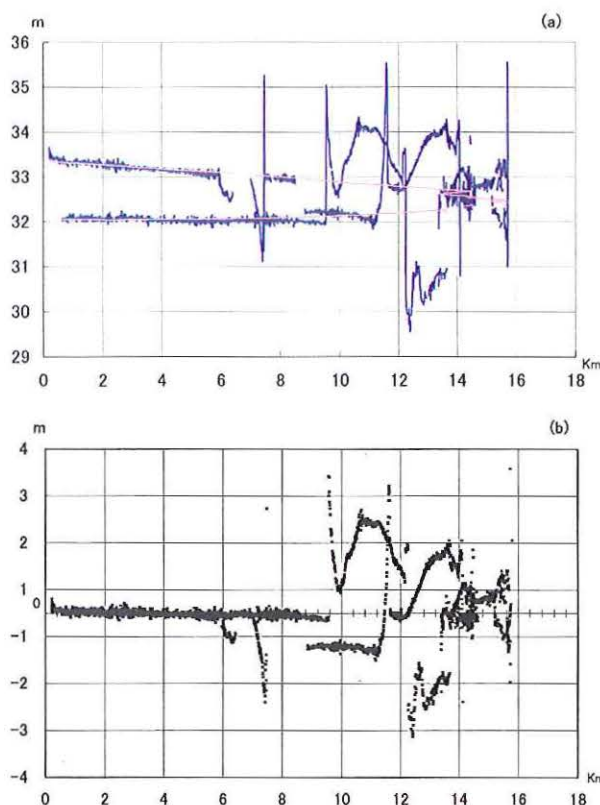
の高さを減じて、その変化を示している。

これらから、RTK-GPS 測位で得られた高さが、潮位変化と海面状況による測量船の上下運動を考慮した以上に変動した高さを示す個所がある。また、10km付近では、高さの連続性が潮位変化と同期していても約0.6m異なった高さを示している個所が見られる。これらのことは、RTK-OTF (on the fly) が正常に動作していない状況であり、RTK-OTF による初期整数値バイアスの計算の誤りもしくはサイクルスリップが発生したものと考えられる。また、約6km付近までに数回発生した通行船舶による瞬間的な補正データ伝送電波の遮断による影響は見られなかった。これらのことから、データ伝送用電波の遮断があっても、遮断が解除された後、基準局から約6km付近までは、RTK-GPS 測位が確実に回復し、使用できる。約14km付近では、測量船を停船させること及び基準局方向に航走することによりRTK-GPS 測位が正常に動作した状況もあったが、安定的な動作状況には至らなかった。受信状況の監視が必要であるものの約9.5km付近までは、使用可能と考えられる。

このように RTK-GPS を使用した移動体では、基準局からのデータ伝送の利用できる範囲で、高さの連続性を観測することにより、動作状況の把握ができるとともに、潮位の変化を含めた海面高の変化もリアルタイムに観測できる。また、観測後の処理となる K-GPS においては、リアルタイムに得られないものの、データ伝送の必要がないので、RTK-GPS での測位の利用範囲を越えて潮汐を含む海面高の観測に利用できる。

4. まとめ

GPS, DGPS 及び K-GPS, RTK-GPS による三次元測位での測位状況は、固定点での観測では容易に把握できることでも、移動体では困難である。しかし、三次元測位の要素の一項目である高さに注目すると、水平方向の測位精度に比較して、約1.6倍 (Standard Positioning Service) 悪いと言われていた垂直方向精度は、S/A 解除後においても同様な傾向にあるので、高さの変化を時系列で連続的に表



第7図 (a)広島港から呉港間での RTK-OTF と Air-link による利用範囲調査 (1997/10/13)
 (b) RTK-OTF の作動状況確認のための海面高と広島験潮所潮位データとの偏差
 Fig. 7 (a) Observed the ellipsoidal height with RTK-OTF and Air-link during a round trip cruise between port of Hiroshima to Kure.
 (b) Deviation from tide observed at port of Hiroshima.

示し、その連続性から得られる情報と K-GPS 及び RTK-GPS での高精度に求められる高さから、次のような利用方法が考えられる。

- (1) GPS の測位状況の監視。
 - (2) DGPS, RTK-GPS 測位に使用されている補正データの送信及び受信に関わる機器の利用可能範囲の調査。
 - (3) DGPS, K-GPS, RTK-GPS を用いた測位による利用精度の把握。
 - (4) K-GPS, RTK-GPS を用いた測位により、潮汐を含む海面高の変動データの取得。
 - (5) K-GPS, RTK-GPS を用いた測位により、岸線決定に伴う近傍の構造物の高さの測定。
- なお、精密な海上での移動体の高さの測定は、波

浪により船体の動揺（ピッチ・ロール・ヒーブ）が発生しているため、動揺センサーとの併用が必須である。また、測位精度及び利用可能範囲についても、GPS 受信機、中波ビーコン受信機及びそれらに使用するアンテナの特性により異なるので、機種ごとに観測して、把握する必要がある。

5. 今後の課題

GPS を利用した海上での移動体の 3 次元測位は、K-GPS 及び RTK-GPS の利用できる範囲において、革新的であり、将来要求が出ると予想される深海域における海底面の精密測量及び微地形の探査を実施するための AUV (Autonomous Underwater Vehicle), ROV (Remotely Operated Vehicle) の基準等としての 3 次元的に高精度な船位の確立をめざし、基準局から 100km を超す海域について、動揺センサー等もあわせて、海域での 3 次元位置決定の検証を実施し、その利用範囲を把握する必要がある。

6. おわりに

本報告の作成にあたり、GPS データの収録等に協力いただきました測量船「昭洋」、第六管区海上保安本部水路部 (1996/4-1998/3)、また、データの提供をしていただきました海洋調査課海洋測量担当の皆様へ感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 矢吹哲一朗, 打田明雄: 後処理ディファレンシャル GPS 手法を用いた測量船の測位, 水路部技報, 15, 94-103, (1997)
- 打田明雄: ディファレンシャル GPS 処理プログラムの評価(その 2), 水路部技報, 14, 159-165, (1996)
- 日本測地学会: 現代測地学, 日本測地学会創立 40 周年記念号, 88-92, (1994)
- 中根勝美: GPS 時代の最小 2 乗法測量データの 3 次元処理, 東洋書店, 92-108, (1994)
- 土屋 淳, 辻 宏道: GPS 測量の基礎, 社団法人日本測量協会, 57-80, (1995)
- 大河内豊秋: 「GPS and more」, <http://www.charming.net/index.xml>, (1997/6/9~)
- U. S. COAST GUARD: 「GPS Status Message」, <http://www.navcen.uscg.mil/gps/>