海上航走時における DGPS の効果について

柿原利治*・武田誠一*・峰 雄二*・佐藤 要*

Effects of Differential GPS in Moving Condition at Sea

Toshiharu KAKIHARA, Seiichi TAKEDA,
Yuji MINE and Kaname SATOH

Abstract

An evaluation experiment on the differential GPS (DGPS) was conducted when the manoeuvrability of a small fishing boat was tested at Tateyama Bay in 1993. The pseudo range correction values for the DGPS were measured at a reference station where is in Yokohama during the sea experiment. The DGPS correction and the positioning accuracy were analyzed through a method of post processing.

The correction effects of ship position by using DGPS in moving condition are discussed in this paper. It was concluded from the results of experiment that the definite correction effects of DGPS were recognized and high absolute/relative accuracy was verified.

1. はじめに

Differential GPS (DGPS) は、位置のわかった基準局で測定された擬似距離の補正値を移動局の擬似距離に補正することで、基準局と移動局に共通する要因による誤差が取り除かれ、移動局の C/A コードのみを受信する GPS 受信機の測位精度を向上させる補正法として注目を集めている。主たる共通誤差要因として、SA (Selective Availability)、電離層遅延、対流圏遅延、衛星軌道の誤差、時計誤差などがあるが、FRP (Federal Radionavigation Plan)⁽¹⁾によれば、SA において 2drms で 100m (確率 95%) もの精度劣化が発表されており、これに対処する方法としての DGPS への船舶、航空、陸上分野における民間利用者の期待は大きい。

漁業分野においても海上における生産活動と密接に関連する高精度の位置については関心の高い問題である。従来から漁船においては、再現性精度の良さからロラン C が多用されている。ロラン C の場合、電波の陸上伝搬遅延による局地的な定誤差を含むので、漁場図作成のために海図へ位置を記入する時などに絶対位置とのずれが生じ、操業にとって非常に大切とされる正確な水深情報などが得られない事になる。また、僚船との漁場位置情報の交換等においても絶対位置精度が重要であるし、洋上での僚船との接近、接舷の際には相対的な位置精度も問題となってくる。

本論文では、小型船の操縦性能試験が実施された機会に同時に観測された DGPS データを解析した結果について報告する。DGPS の操縦性能試験への適用性も含めて、漁業方面への利用を意識しながら DGPS の絶対精度およびその安定性について検討を行い、海上航走時の DGPS 補正効果についての基礎的資料を得ている。

2. 実験方法

図 1 に実験海域および局配置を示す。図 2 に DGPS 用計測装置のブロック図を示す。図中の破線で書か

* 正会員 東京水産大学 (〒108 東京都港区港南 4-5-7)

れた矢印はオフライン処理であることを示している。平成5年4月9日の午前9時30分頃から午後3時30分の間に房総半島先端に位置する館山湾において、実験船である東京水産大学漁業実習船ひよどり（総トン数19トン、全長19.7m）の操縦性能試験が実施された。試験項目は、速力試験、旋回試験、惰力試験等である。この時に、船のジャイロコンパス針路、ドップラーログ速力、舵角、CPP翼角、プロペラ及び主機回転数、マイクロ波測位装置（システム3000、セナー社製）による位置、GPS(MX4200、6チャンネル、Magna vox 社製）データなどの他、実験時の環境として風向、風速、潮流も測定された。この中で DGPS 精度の評価に使用されたのはマイクロ波測位データと GPS データである。データ計測中は海況1程度の穏やかな海面状態であった。

図1 実験海域および局配置図

図2 DGPS 用計測装置ブロック図

マイクロ波による測位は、実験船に一つの主局、館山湾内の位置が明確にわかっている陸上固定点に二つの従局を設置することにより行われた。幾何学的精度を考慮して主局と従局間の交角がほぼ90度になるように湾内の試験海域が設定された。主従局間の距離は3~4kmであった。位置測定間隔は1秒である。GPS及びDGPSの誤差解析にはこのマイクロ波による位置が基本位置とされた。本論文は、マイクロ波による基本位置に対するGPS及びDGPSの位置との差をGPS及びDGPSの測位誤差と呼び、これらについて水平方向の二次元誤差を中心として解析、評価がなされた。

海上移動局用のGPS受信機はC/Aコードのみを受信するDGPS仕様の機種で、RTCM-SC104(Radio Technical Commission for Marine Services-Special Committee 104, 海上無線技術委員会第104特別委員会)の標準フォーマット²⁾に対応した擬似距離補正值データの入力があればDGPS測位が可能となっている。実験時には捕捉中である衛星の番号、高度、方位、SN比、HDOP値、測位された位置、その他軌道情報等がサンプリング2秒間隔で記録された。アンテナは試験船の最上甲板上に垂直に立てられたポール先端にGPSアンテナが設置され、マイクロ波用アンテナは、パルス信号発信時のGPS信号受信への影響を避けるため3m離れた下方に取付けられた。

一方、館山湾から約70km離れた横浜(日本測地系で北緯35度34.7213分、東経139度32.2752分、標高116.8m)には陸上基準局用に開発されたDGPS専用受信機(MX4818, 12チャンネル, Magna vox 社製)³⁾が設置され、衛星の各種情報の他に、ディファレンシャル補正用に衛星ごとの擬似距離補正值と擬似距離変化率の補正值データが海上実験に合わせて連続して収録された。今回のDGPS処理はリアルタイムではなくてポストプロセッシングによる方法で行われた。図2にも処理作業の流れが示されているように、基準局で得られた(DGPS用)補正值データと実験船で得られたGPSデータから、実験船のDGPS位置計算が行われる。この計算は基準局にあるDGPS処理用計算機によりMagna vox 社製のポストプロセッシング用プログラムを用いて行った。更に、WGS-84測地系の緯度、経度で表されたDGPS位置は、誤差解析用計算機により館山湾内に設定された局地的なXY座標系に変換され、マイクロ波による位置と比較された。

3. 結果と考察

3.1 陸上基準局

横浜の陸上基準局における GPS アンテナは、測量によって正確に位置（基準位置）が計測されているセナー社の屋上に設置された。ここは郊外の住宅地域に位置し、アンテナ付近に GPS 電波受信の障害となるような建物や樹木は無かった。DGPS 用データは、海上での実験時間帯を完全にカバーできるように海上より多少長時間にわたって、午前 8 時位から午後 4 時位までの約 8 時間にサンプリング間隔 2 秒毎に連続して測定された。また、海上で測位に使用される衛星全てを基準局で捕捉するために、マスクエレベーション値、HDOP 値、SN 比には特に制限値は設けなかった。

図 3 に基準局で捕捉された衛星の時間変化と海上における操縦性能試験実施の時間帯が示されている。観測期間中に捕捉された衛星は PRN 番号で、3, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 20, 21, 23, 25, 26, 28 番の合計 13 個であった。観測データ全体の 0.5% 程度の非常に稀なケースではあるが、受信信号レベルの低下のためか一時的に数秒間捕捉衛星数が 3 個になり、二次元測位になることもあったが、これ以外は常時 4 個から 7 個の衛星が捕捉されており三次元測位が可能な状態にあった。捕捉中であった衛星の数秒程度の欠測によって HDOP 値が 4.0 から 8.0 付近まで一時的にジャンプすることがあったが、これを除けば HDOP 値は概ね 2.0 以下の小さな値であった。

図 4 に基準局での南北方向（上図）と東西方向（下図）の GPS 測位誤差の時系列図を示し、図 5 にその時の誤差の散布図を示す。両図における誤差は前出の基準位置を原点としてプロットしている。誤差算出用に使用された衛星の組み合わせは海上での測位に使用されたものと同一である。観測時は SA が実施されており、時系列図からわかるように誤差は不規則に変動していて、時として 100m を越える誤差が出現するような場合もあった。SA 実施時の誤差の特徴として片山が報告⁴⁾しているように、今回も 1 時間以上の長周期で変動する誤差成分に、これよりも変動量大きい 10 分前後の短周期成分が上乗せするような形で時間変化していく様子が観察された。測定された位置の平均は基準位置に対して北に 3.0m、東に 5.8m 偏位しており、原点からの水平放射状誤差の標準偏差は 43.7m であった。誤差の分散は SA がかけられていたもので必然的に大きな差となるが、その動きは基準位置を中心として変動しているように見える。このことから、SA 実施時における GPS の単独測位であっても長期の定点観測を実施しその平均位置を求めることにより、極めて高い精度でその点の絶対位置を決定できる可能性があるのではないかと考えられる。

図 3 基準局で捕捉された衛星の時間変化

図 4 基準局における GPS 単独測位誤差の時間変化

3.2 海上航走時

3.2.1 誤差の全般的傾向

本論文では、前述したがマイクロ波測位装置によって計測された位置を基準にして、そこからの相対的偏位量を海上実験における GPS 及び DGPS 測位誤差としている。この誤差は絶対誤差とはいえないが、マイクロ波測位装置の公称精度 $\pm 1\text{m}$ から判断して、絶対誤差に近い値を示していると考えられる。GPS データは連続して収集されたが、各種操縦性能試験の実施項目ごとに実験の開始から終了までの間のみマイクロ波測位が行われたので、GPS と DGPS の誤差データは陸上基準局で得られたような長時間連続したものではなくて、数分間あるいは 20 数分間単位の断続的なものである。マスクエレベーションは 5 度に設定し、HDOP や SN 比に制限値は設けなかった。位置変化の連続性から判断して明らかに位置がずれているマイクロ波測位データがあった場合、これらは誤差解析から除いている。

最終的にマイクロ波測位と比較が可能であった GPS と DGPS の誤差データが得られた合計時間は約 2 時間 10 分となった。2 秒毎のサンプリング間隔であるので、総数で各々約 3900 個のデータが得られたことになる。データ測定中に実験船側の受信機では衛星が常に 5~6 個捕捉されており、三次元測位の状態にあった。この間に HDOP は 1.0~3.2 の値を示し、平均は 1.3 で GPS の完全運用が間近であることを感じさせる小さな値であった。MX4818 (基準局側) と MX4200 (実験船側) 受信機は、現在捕捉中である衛星の番号は出力されるが、その中のどの衛星が位置算出に使用されたのかは明らかにされていないので、残念ながら測位時の衛星の組み合わせを知ることができない。従って、測位用衛星の切り換え時における誤差の変化についての解析はできなかった。

図 6(a) に海上実験時に得られたディファレンシャル補正を施していない GPS 単独測位誤差の全データの散布図を示す。図中においてディファレンシャル補正無しの単独測位の場合を単に GPS と表し、補正済みの場合を DGPS として示してある。図 6(b) にディファレンシャル補正後の全データの誤差散布図を示す。図 6(a) において、平均位置は原点から 0.7m 東に、3.0m 南に位置している。平均位置に対する水平放射状誤差の標準偏差は 13.4m であった。原点に対する標準偏差は 23.0m であり、横浜基準局における標準偏差が 43.7m でこの約 2 倍の値を示していることから、データが測定された海上実験時間帯はたまたま GPS 単独測位による誤差が比較的小さかった時に該当していたといえる。一方、図 6(b) において平均位置は原点から 2.4m 西に、3.7m 南に位置し、平均位置に対する水平放射状誤差の標準偏差は 4.3m、原点に対する標準偏差は 8.6m であった。両図の比較から明らかなように、GPS 単独測位に比べて DGPS の誤差は原点付近に集中しており、DGPS による顕著な位置補正効果が認められる。

図 7 に海上実験で得られた GPS 単独測位 (上図) と DGPS (下図) 全データの階級区分で表した水平放射状誤差の分布、及びその累積頻度を示す。累積頻度が 50% および 95% である水平放射状誤差は、GPS が 18.4m と 45.0m であるのに対して DGPS は 7.5m と 15.1m であった。DGPS の精度についてはいくつかの文献⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾で述べられているが、これらによると 2drms で 10m 以内の精度が可能であるとされている。これに比べて今回の結果の 15.1m は若干誤差量が大ききようである。実験に使用した DGPS 専用受信機自身のもつ精度も関係していると考えられる。受信機の問題については十分なデータが得られないので何とも言えないが、今回のその他の主たる原因として、マイクロ波測位装置のもつ測位精度誤差、マイクロ波用従局設置位置の誤差、GPS とマイクロ波測位装置の時刻同期誤差、船体傾斜に伴う GPS とマイクロ波アンテナ位置の水平方向のずれ、マルチパスによる誤差等が掲げられ、これらが複合した形で累積された結果ではないかと推測される。これらの誤差はいずれも今回の観測方法に起因するものであるから、この点を差し引けば DGPS による 10m の絶対精度は可能であると考えられる。我が国の沿岸海域

図 5 基準局における GPS 単独測位誤差の散布図

図 6 海上実験時における測位誤差の散布図

(a) GPS 単独測位, (b) DGPS 測位

図 7 海上実験時の測位誤差の階級区分図

で漁業に従事する漁船の長さは 10m 前後であることが多く、船の長さ内での精度で位置が決まることは、漁業生産上極めて重要な意味をもつといえる。

3.2.2 安定性

船舶の操縦性能試験において船の航跡が必要とされるとき、その位置は必ずしも絶対精度で求める必要はなく、誤差を含みながらも相対的に位置関係が正しく示されればそれで要件を満たすことになる。特に小型漁船の操縦性能試験の場合は、大型船に比べて各操縦試験項目ごとの実施時間が短くなるので位置計

測装置の短期の安定性が重要である。ここでは、GPS および DGPS の安定性をみる尺度として短期間の位置誤差の分散をとりあげ、GPS と DGPS の小型漁船の操縦性能試験への適用性について検討したのでその結果を述べる。

短期安定度の評価の一例として旋回試験の結果を図 8 の (a), (b), (c), (d) に示す。図 8 の左図は航跡図を示し、右図はその時の誤差の散布図である。今回の旋回試験においては、風や海潮流等の外力の影響を補正するため各設定ごとに 3 回転の旋回が実施された。航跡図からわかるように、外力の影響により 1 回転ごとに航跡がシフトしていく様子がうかがえる。図 8(a), (b) は、舵角 35 度、平均速力 7.5 ノットで 3 回左旋回したときの 2 分 40 秒間のもので、(a) がマイクロ波による位置と GPS 単独測位による位置を比較したもの、(b) がマイクロ波位置と DGPS 位置を比較したものである。航跡は 2 秒間隔でプロットしてある。図 8(c), (d) は舵角 5 度、平均速力 10.0 ノットで 3 回左旋回したときの 20 分 40 秒間のもので、(c) がマイクロ波による位置と GPS 単独測位による位置を比較したもの、(d) がマイクロ波位置と DGPS 位置を比較したものである。航跡は 6 秒間隔でプロットしてある。舵角 35 度と舵角 5 度の航跡図において双方の距離スケールが異なっているので図を比較する場合には注意を要する。この試験の実施期間中は 6 個の衛星が常時捕捉されており、HDOP が 1.0~1.1 の小さな値で推移する三次元測位の状態であった。試験時間が短かった (a), (b) 図の航跡図において、GPS と DGPS 位置の双方ともマイクロ波位置とのずれはあるが、相対的位置関係は一定に保たれているし、位置変化の連続性もみられる。誤差散布図において、GPS が南東方向に、DGPS が南西方向に原点からのオフセットがあるが、平均位置に対する水平放射状誤差の標準偏差は GPS が 4.6m、DGPS が 3.0m の小さな値であった。この結果だけでみると GPS 単独測位も短期間では安定しているようである。この点に関しては後述する。約 20 分間という比較的長い試験時間であった (c) および (d) 図の誤差散布図において、平均位置に対する水平放射状誤差の標準偏差は GPS が 19.1m、DGPS が 6.8m であり、舵角 35 度のケースと比較して所要時間の長期化により安定度が劣化する傾向にあるのがわかる。

試験所要時間と位置安定度の関係をより明確にするために、図 9 に各性能試験ごとの所要時間に対する水平放射状誤差の標準偏差の分布を示す。上図が平均誤差位置 (平均オフセット位置) を中心とする標準偏差で、下図が原点 (マイクロ波による位置) を中心とする標準偏差である。一つの性能試験に要する時間は一番短いもので 40 秒、一番長いもので 20 分あまりである。大抵の試験は 4 分以内で終了する。両図から平均位置周りおよび原点周りの誤差の分散は、当然ではあるが全般的に DGPS の方が GPS よりも小さくて安定しているのがわかる。特に、4 分以内の場合 DGPS の平均位置に対する分散度合は非常に小さくて、標準偏差で 0.6~3.8m であった。これにはマイクロ波測位の誤差も含んでいることを加味すれば、この相対精度の短期安定度の良さは忠実に船の航跡を描くことになり、このことは DGPS が小型漁船の操縦性能試験用測位装置として充分使用できる可能性のあることを示すものでもある。4 分を越える場合でも、安定度はやや落ちるが 7m 付近の値で横這い状態で推移している。一方、絶対精度の安定度ともいべき原点周りの分散度は、DGPS が所要時間に関わらず 8m 前後の略一定値を示しているのに対して、GPS の方は変動が大きく 1 分から 4 分あたりまでの時間でその傾向が顕著である。横浜基準局の結果のところでも触れたが、これは SA の短期成分の影響によるものではないかと思われる。

小型船の操縦性能試験のうちでも特に惰力試験では短期間の中で急激な増速や減速が行われる。この点を考慮して性能試験への DGPS 採用に当たっては、船の速度変化に対する動的追従性ともいえる DGPS の誤差特性も検討しておく必要がある。図 10 に停止惰力、反転惰力、発動惰力等の各試験時のデータから求めた試験船の速度変化率 (knot/sec) に対する DGPS 水平放射状誤差の変化率 (m/sec) の関係を示す。横軸、縦軸とも絶対値で示してある。速度変化率のゼロ付近が等速航行中のデータである。この図において速度変化率の増加に伴い誤差変化率も僅かながら増加しているようでもあるが、明らかな相関は見られない。仮に、反転惰力試験時に得られたデータで、図中の速度が 0.9 ノット変化するときに最大を示す誤差変化率をみてもせいぜい 1 秒間に 1.1m である。このことからしても、今回程度の加速度に伴う時の DGPS 誤差の変動幅はさほど大きくないと判断してもよいと考えられる。

図8 旋回試験時の航跡と測位誤差散布図

(a) 舵角 35 度の時の GPS 単独測位, (b) 舵角 35 度の時の DGPS 測位, (c) 舵角 5 度の時の GPS 単独測位, (d) 舵角 5 度の時の DGPS 測位

4. おわりに

本報では、小型船舶の操縦性能試験と併せて行った GPS の観測から、海上航走時における GPS 単独測位の場合の精度及び擬似距離の補正值を利用した場合の DGPS による位置の補正効果について述べた。実験期間中は SA が実施されていたため、GPS 単独測位において誤差の分散が大きかったが、DGPS 処理によって SA による誤差の大部分が補正されることが確認できた。また、DGPS は短期の安定度が極めて高いので、相対精度が問題にされる場合、例えば比較的短時間内に一つの試験が終了するような小型漁船の操縦性能試験への利用などに適していることが解かった。

DGPS の評価に当たっては、基準点・観測海域間の距離 70km の DGPS に与える影響、測位衛星の配置や切り替わりによる誤差変動の過程、また、観測方法や測定機器に起因する誤差を含めて DGPS 処理後の誤差原因の究明等、もっときめの細かな解析が必要であるなどの反省点も残るが、今回の実験から、海上航走時における DGPS による位置の補正効果は検証できたのではないかと考えられる。

今後の課題として、漁場における DGPS の有効性の検証実験の実施は勿論のことであるが、その他 DGPS が有効利用できる可能範囲の問題あるいはリアルタイムでの DGPS 処理など漁業生産現場における DGPS とその利用面での問題についても検討していきたいと考えている。

おわりに、今回の実験に際して多大の協力と支援を頂いたセーナー株式会社の関係者の皆様、並びに実習船ひよどりの乗組員の方々に対しまして心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) David L. Olsen : The Federal Radionavigation Plan and Its Impact on International Radionavigation Planning, Journal of the Institute of Navigation, Vol.36, No.4, pp.323-329, 1989-1990
- (2) Rudolph M. Kalafus, et al. : Special Committee 104 Recommendation for Differential GPS Service, Journal of the Institute of Navigation, Vol.33, No.1, pp.26-41, 1986
- (3) Magnavox : Magnavox Differential GPS Beacon System Technical Description, pp.1.1-E.8, 1991
- (4) 片山 晋 : GPS の選択利用性 (SA) の観測, 航海, 第 113 号, pp.4-11, 平成 4 年 9 月
- (5) D. Pietraszewski, et al. : U.S. Coast Guard Differential GPS Navigation Field Test Findings, Journal of the Institute of Navigation, Vol.35, No.1, pp.55-72, 1988
- (6) Alison Brown : Extended Differential GPS, Journal of the Institute of Navigation, Vol.36, No.3, pp.265-285, 1989
- (7) Gregory T. Kremer, et al. : The Effect of Selective Availability on Differential GPS Corrections, Journal of the Institute of Navigation, Vol.37, No.1, pp.39-52, 1990
- (8) D.H. Alsip, et al. : The Coast Guard's Differential GPS Program, Journal of the Institute of Navigation, Vol.39, No.4, pp.345-361, 1992-1993

図 9 試験所要時間に対する測位誤差の標準偏差

図 10 速度変化率に対する測位誤差変化率

質 疑 応 答

新井康夫 (海技大学校) : (1) 基地局で使⽤した受信機はディファレンシャル基地局⽤の受信機でしょうか。

(2) データ収録時の HDOP はいくらでしたか。(3) 受信機ではカルマンフィルタが作動していましたか。

柿原利治 : マグナボックス社の DGPS 基準局⽤の専⽤受信機を使⽤しました。操縦性能試験が⾏われた時の HDOP は 1.0 から 3.2 の間の値を⽰し、平均は 1.3 でした。擬似距離補正処理の中で 2 状態のカルマンフィルタが使⽤されています。

田⼝一夫 (鹿児島大学) : (1) 測点と横浜の距離はどれくらいでしたか。(2) 測点とモニター点は測位に同じ衛星を使⽤していますか。

柿原利治 : 横浜基準局と観測海域の距離は約 70km でした。測位は測点、モニター点とも同じ衛星を使⽤しています。