

測量船における VRS 方式を用いた RTK 測位による高さ方向の精度評価

戸澤実, 松本良浩: 海洋調査課

矢吹哲一郎: 海洋研究室

中條拓也・雨宮由美・植木俊明: 株式会社海洋先端技術研究所

Evaluation of Vertical Positioning Accuracy by VRS-RTK system on S/V

Minoru TOZAWA, Yoshihiro MATSUMOTO: Hydrographic Surveys Division

Tetsuichirou YABUKI: Ocean Research Laboratory

Takuya CHUJO, Yumi AMEMIYA, Toshiaki UEKI: Ocean High Technology Institute Inc.

1 はじめに

沿岸域では, 中波無線標識(ラジオビーコン)を利用した補正情報を利用する D-GPS 測位手法が多くの船舶で採用されている。その測位誤差は, 1m 程度, もしくはそれより小さいと見られる。これに対し, Kinematic-GPS(K-GPS)測位は, 既知点と測位地点で同時に同じ衛星から受信した搬送波情報を解析し, 数 cm の精度での測位が可能である。

平成 14 年度, 仮想基準点(Virtual Reference Station: VRS)によるリアルタイムの K-GPS 測位(以下, VRS-RTK)が可能となった。この方式では, 後処理方式の K-GPS 測位(以下 K-GPS)よりも簡便に且つ同等の精度の測位結果が得られる可能性がある。

そこで, VRS-RTK 測位の可能性を明らかにするため, K-GPS 測位結果と VRS-RTK 測位結果について, 実際の測定結果を比較し, VRS-RTK 測位手法の精度や性能に関する検証を実施した。このため, K-GPS 測位結果と VRS-RTK 測位結果の較差の平均値と標準偏差を算出し精度を検討した。さらに, VRS-RTK 方式による測量船の高さ測位データより算出した潮高値と, 潮高実測値の比較を試みた。

2 GPS 測位実験

GPS 測位は, 電離層や対流圏の影響による電波の遅延量を除去する必要がある。従来の K-GPS 測位は, 移動点と, その近傍の位置が精密に決定

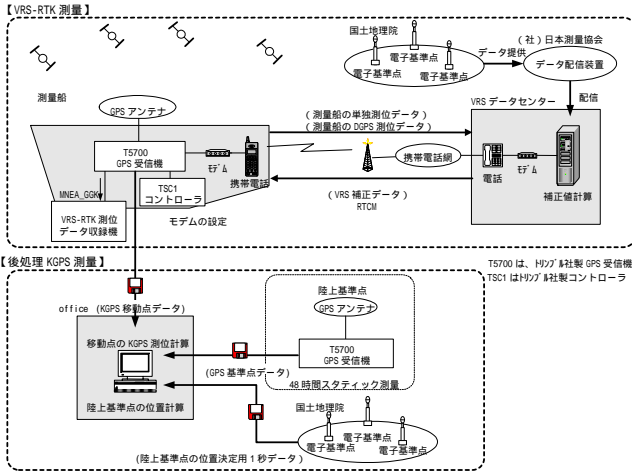
されている固定の陸上基準点とで同時に GPS の搬送波位相観測を行い, それを利用して誤差量を補正する。

この仕組みは, 基本的には VRS 方式でも同じである。VRS 方式では, 測位地点の近傍に仮想の基準点を考え, その仮想点での測定データを周りの固定点の実データから創りだし, 移動点の補正量を導く。実際には, 国土地理院の電子基準点など 50km 程度以内の間隔で配置された 3 個以上の基準局からの実際の GPS 観測データを VRS データセンターで収集し, 移動局近傍 VRS での補正值を移動局に携帯電話で伝送する。これにより, 移動点側で, 陸上に特別な基準点を設置することなく確実かつ効率的に RTK 測位を実現する。

2.1 データ取得方法

GPS 観測データは, VRS-RTK 測位と後処理 K-GPS 測位との測位結果を比較するため, 同じ GPS アンテナ及び受信機の 0.5 秒(燧灘)もしくは 1.0 秒(仙台湾)のデータを使用し, 船体の動揺等の外的要因による誤差の発生を極力無くすように配慮した。データの取得方法を第 1 図に示す。

比較に用いる後処理 K-GPS 測位は, そのための臨時的陸上基準点を, 電子基準点とは別に, 各実験に際して 1 ヲ所設け, その位置は, 国土地理院の電子基準点データを使用しスタティック基線解析を行って決めた。後処理のキネマティック解析は, Trimble GPSurvey 2.35 ソフトウェアのキネマティック解析モードで実施した。この解析では, VRS と異なり, 陸上基準点 1 ヲ所のデータと



第1図 データ取得方法

Fig.1 Overview of the VRS-RTK System.

の直接解析で測位を行う。したがって、VRSとK-GPSでは、用いる基準点が変わることになり、結果には、基準点のデータの質も影響するので必ずしも、測位方法の違いだけが差を生むのではないので注意が必要である。

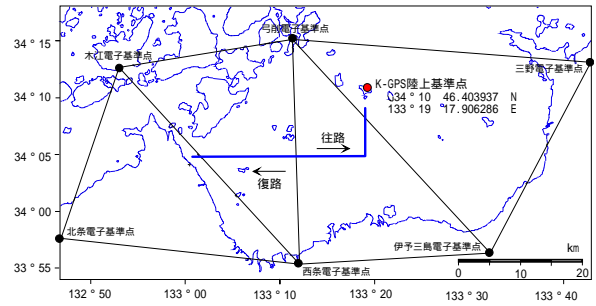
なお、仙台湾実験では、K-GPS解析結果は、クロスポイントでの較差の標準偏差は、2~3cm程度となり、測定精度もその程度あるものと見られる(寺井, 2003)。

2.2 測量船におけるデータ取得と解析

VRS-RTK測位の精度を評価するために、測量船による以下の2海域でVRS-RTKデータ及びK-GPSデータを取得した。

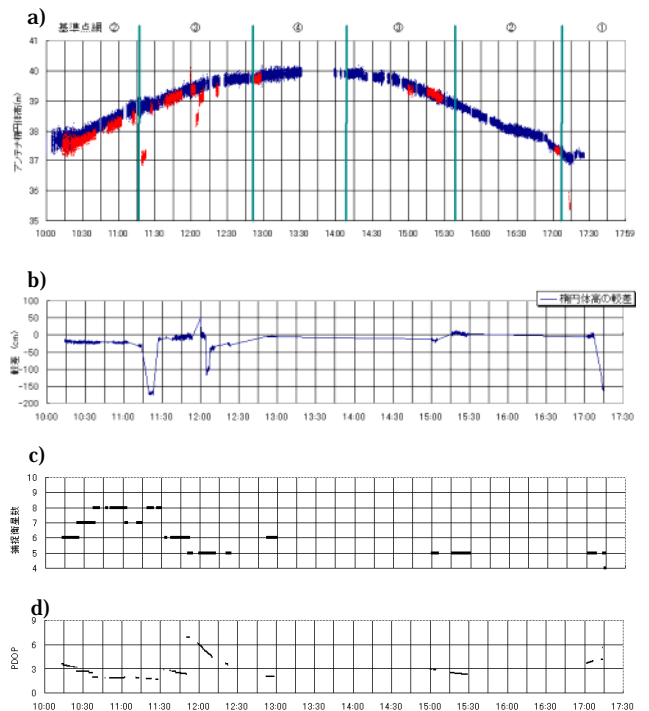
データの取得海域、取得時期及び実施した測量船は以下のとおりである。

- (1) 燧灘(今治東方 東経133度10分, 北緯34度5分を中心とした海域)
測線は、西から東へ
1測線 約8km
平成14年10月10日
測量船「くるしま」
- (2) 仙台湾(仙台空港沖 東経140度59分, 北緯38度12分を中心とした海域)



第2図 VRS基準点網と測線及びK-GPS陸上基準局の関係(燧灘)

Fig.2 VRS control nets, K-GPS control points and survey line on Hiuchi-nada.



第3図 燧灘VRS-RTKと後処理KGPS測位結果の比較と衛星状況

Fig.3 a) GPS antenna height by VRS-RTK (red) and K-GPS (blue), b) height difference of VRS-RTK and K-GPS results, c) Number of GPS satellites, d) PDOP on Hiuchi-nada.

測線は、約2km四方の井桁状
測線間隔約20m
平成14年8月26日
測量船「天洋」搭載艇

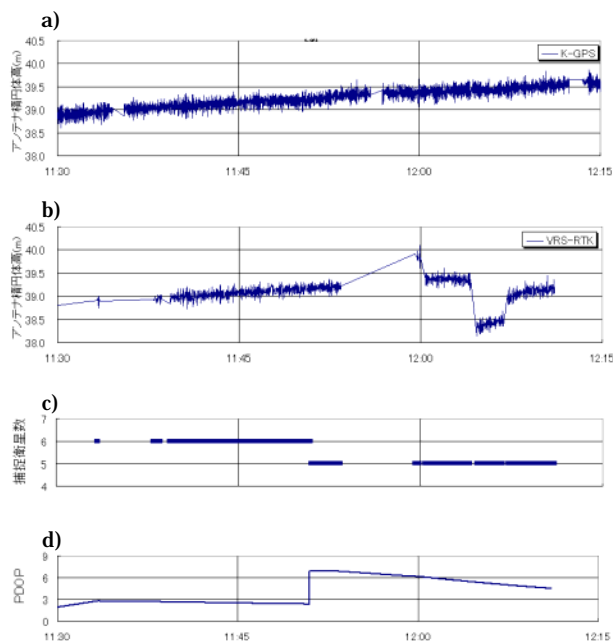
2.3 燧灘実験

燧灘における実験海域と VRS 基準点網及び K-GPS 陸上基準点の関係を第 2 図に示す。また、VRS-RTK と K-GPS 測位結果の比較及び衛星状況を第 3 図に示す。測量船の GPS アンテナ高は、潮汐の変化による変動も表している。

燧灘実験では、VRS-RTK Fix 解の継続した出力が得られなかった。原因として、測位海域が広範囲であるため、VRS 基準点網を超えたことによる捕捉衛星の変更及び電波が届きにくいエリアであった可能性等が考えられる。

そこで燧灘実験における VRS-RTK 測位データの精度の検証は、11 時 30 分から 12 時 15 分のデータにより実施した。この時間帯の測位結果と捕捉衛星数及び PDOP (Position Dilution of Precision) を第 4 図に示す。

次に、K-GPS 測位結果を基準とした VRS-RTK 測位結果の較差を算出した。東西、南北、鉛直方向の較差の最大値、最小値、平均値、標準偏差を第 1 表に示す。符号はそれぞれ東、北、上方向



第 4 図 11 時 30 分から 12 時 15 分の VRS-RTK と K-GPS 測位結果と衛星状況 (燧灘)

Fig.4 a) GPS antenna height by K-GPS, b) GPS antenna height by VRS-RTK, c) Number of GPS satellites, d) PDOP from 11:30 to 12:15.

を正とした。

第 4 図を見ると、PDOP3 以上になる時間帯の VRS-RTK のアンテナ楕円体高測位結果は、K-GPS の結果と比較して乱れが大きい。

そこで、衛星状況が良好な時間帯の精度を確認するため、PDOP3 以下の測位結果のみを対象とした較差を第 2 表に示す。

2.4 仙台湾実験

2.4.1 測位結果

仙台湾における実験海域及び K-GPS 陸上基準点と仮想基準点の関係を第 5 図に示す。

VRS-RTK による水平方向の測位結果より、測量

第 1 表 11 時 30 分から 12 時 15 分の較差 (燧灘)

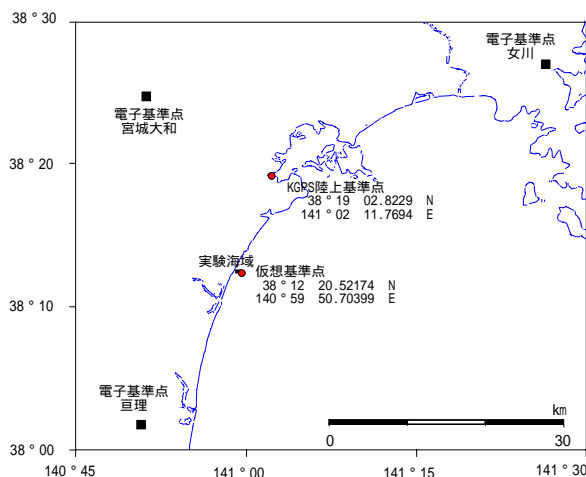
Table 1 The coordinate difference from 11:30 to 12:15 on Hiuchi-nada.

	東西方向(cm)	南北方向(cm)	鉛直方向(cm)
最大値	62.3	53.5	55.1
最小値	-84.6	-62.3	-118.1
平均値	6.1	-8.3	-20.2
標準偏差(2)	67.8	60.5	55.9

第 2 表 衛星配置が良好な時間帯の較差 (燧灘)

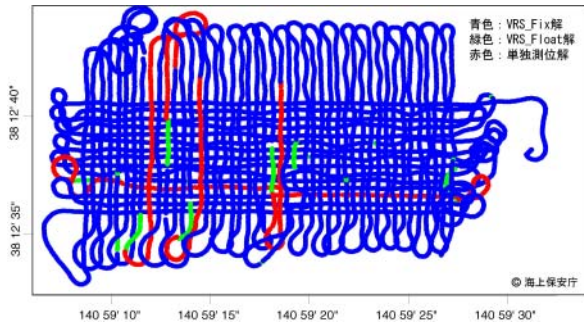
Table 2 The coordinate difference when PDOP is less than 3 on Hiuchi-nada.

	東西方向(cm)	南北方向(cm)	鉛直方向(cm)
最大値	6.5	1.8	6.2
最小値	1.8	-4.0	-16.7
平均値	3.8	-1.1	-7.6
標準偏差(2)	1.7	2.0	7.2



第 5 図 実験海域及び K-GPS 陸上基準局と仮想基準点の関係

Fig.5 Test area, a K-GPS control point and a virtual reference point.



第 6 図 水平方向の軌跡と解の種類

Fig.6 Horizontal track for Fix solutions (blue lines), Float solutions (green lines) and Point positioning solutions (red lines).

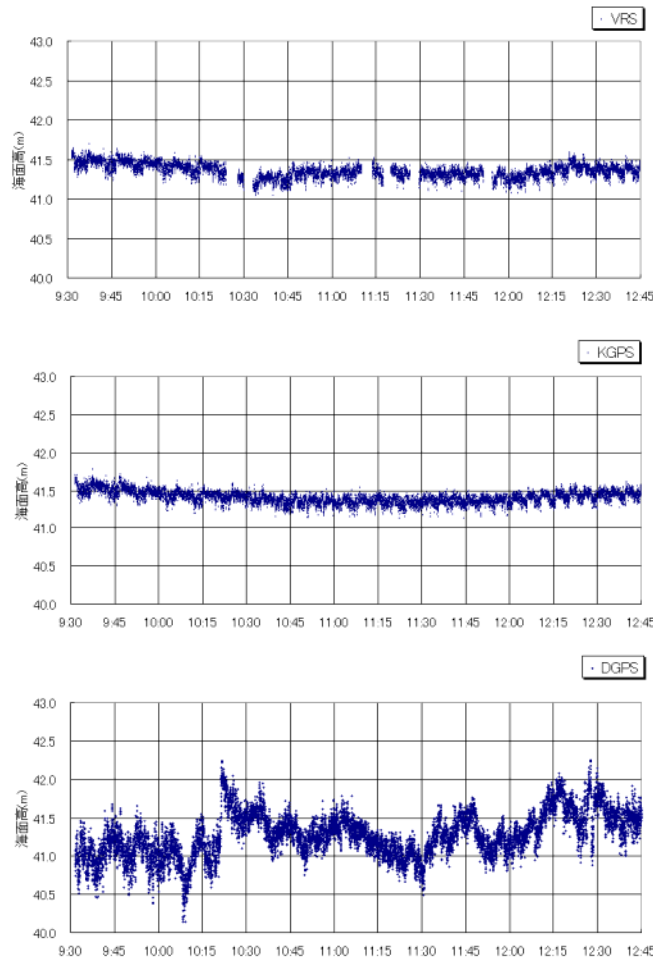
船の航跡と測位解の種類を第 6 図に示す。

第 6 図の線色は、測位解の種類を表し、青色が VRS-RTK 測位の Fix 解、緑色は同じく VRS-RTK の FLOAT 解、赤色は単独測位解を示す。FLOAT 解は、測定ノイズ等の理由で、精密な K-GPS 測位ができず、誤差が Fix 解に比べ大きいと見られる。単独測位解は、VRS-RTK 補正データが何らかの理由により受信できなかった場合に、T5700 受信機が出力する解である。解の種類は、NMEA_GGK データに記録される GPS Quality indicator の値を参照した。

鉛直方向の測位は、アンテナ高への測量船の動揺の影響を取り除くため Heave, Roll, Pitch 補正を行い、海面の高さを算出した。VRS-RTK 測位結果ならびに同時に測位した DGPS 及び後処理 K-GPS による結果を第 7 図に示す。グラフは上から VRS-RTK, K-GPS, DGPS による測位結果である。なお VRS-RTK 測位データは、Fix 解のみを示した。

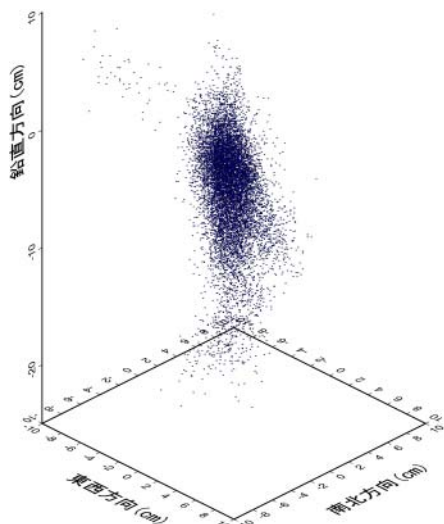
2.4.2 較差の平均と標準偏差

K-GPS 測位結果を基準とした VRS-RTK 測位結果の較差の分布図と最大値、最小値、平均値、標準偏差を第 8 図に示す。符号はそれぞれ東、北、上方向を正とした。



第 7 図 VRS-RTK, 後処理 K-GPS, DGPS による海面高測定結果

Fig.7 Heights of the surface of the sea by VRS-RTK (top), K-GPS (middle) and DGPS processing (bottom).



	東西方向 (cm)	南北方向 (cm)	鉛直方向 (cm)
最大値	3.5	6.1	9.8
最小値	-6.4	-10.5	-23.7
平均値	-0.5	0.0	-5.1
標準偏差(2)	2.2	3.2	7.3

第 8 図 VRS-RTKと後処理 K-GPS 測位結果の較差
 Fig.8 The difference between VRS-RTK and K-GPS solutions.

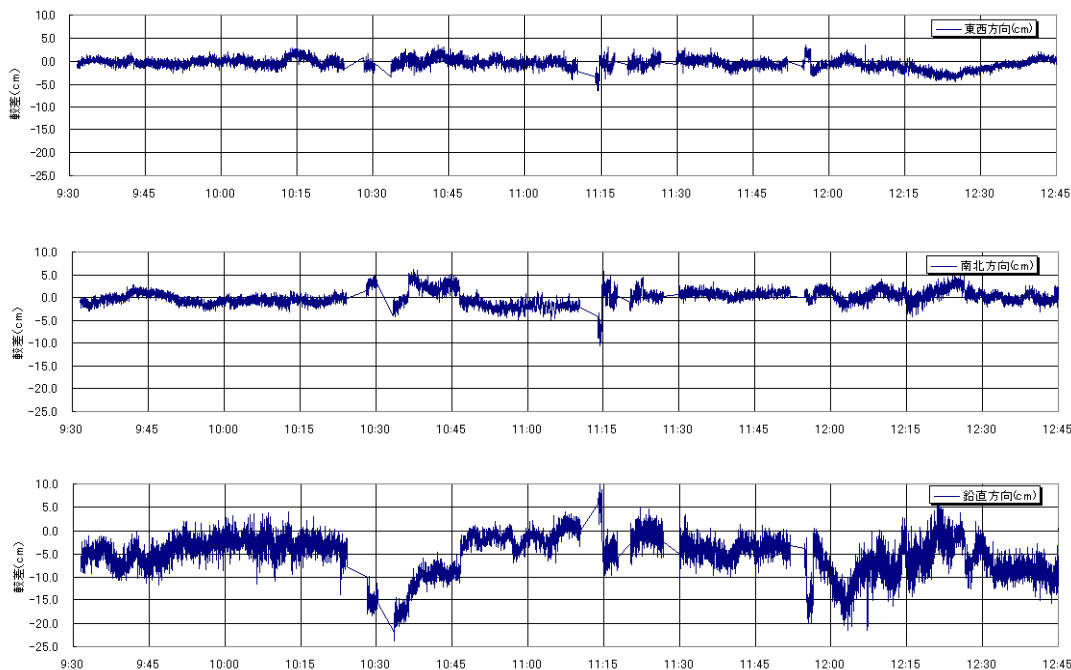
2.4.3 較差と衛星状況

東西，南北，鉛直方向の較差の時系列変化を第 9 図に示す．また，捕捉衛星数と PDOP の時系列

変化を第 10 図に示す．

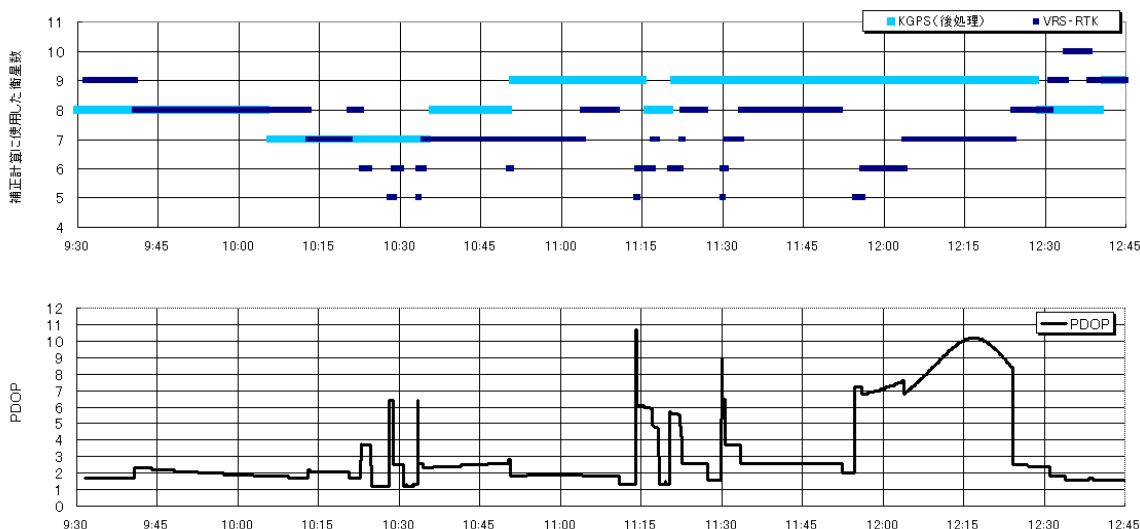
第 10 図には，VRS-RTK と K-GPS 測位計算に使用した衛星数を重ねて表示した．VRS-RTK の衛星数は，Fix 解出力計算に使用した衛星数で，NMEA_GGK データを参照した．KGPS の衛星数は，GPSurvey によるキネマティック処理計算結果より出力された記録を参照した．PDOP は，VRS-RTK の Fix 解の NMEA_GGK 出力結果を参照した．

仙台湾実験では，K-GPS の場合は測量船と塩釜陸上基準点で共通に捕捉した衛星を全て計算に使用した．第 10 図より VRS-RTK では，測位計算に使用した衛星数が K-GPS の利用衛星数よりも減少する傾向があることがわかる．特に Fix 解の出力が途切れた直後数分間の衛星数の減少が大きく，段階的に変化する傾向がある．その時の鉛直方向の較差の乱れが大きいことから，使用衛星数が減少すると鉛直方向の Fix 解の精度が劣化することがわかる．



第 9 図 較差の時系列変化

Fig.9 The difference in the east and west direction (top), in the north and south direction (middle) and in the height direction (bottom).



第 10 図 捕捉衛星数と PDOP

Fig.10 The number of the GPS satellites (top) and PDOP (bottom).

そこで、衛星状況が良好な時間帯の精度を確認するため、VRS-RTK の捕捉衛星数 7 個以上且つ PDOP3 以下の測位結果だけを対象とした K-GPS 測位との較差の最大値，最小値，平均値及び標準偏差を調べた。その結果を第 3 表に示す。

第 2 表及び第 3 表を見ると、衛星状況が良好な時間帯の較差は、燧灘実験，仙台湾実験ともにほぼ同じ値を示している。

第 3 表 衛星状況が良好な時間帯の較差（仙台湾）

Table 3 The coordinate difference when PDOP is less than 3 on Sendai Bay.

	東西方向(cm)	南北方向(cm)	鉛直方向(cm)
最大値	3.5	6.1	4.7
最小値	-4.5	-4.8	-19.8
平均値	-0.3	-0.1	-4.5
標準偏差(2)	2.0	3.0	7.3

2.4.4 潮高値の算出と実測値との比較

VRS-RTK 測位結果をもとに、仙台湾実験海域における潮高値を算出した。潮高値は、下記の式により算出した。

$$\begin{aligned} \text{潮高} &= \text{海面高} - \text{平均水面の楕円体高} \\ \text{海面高} &= (\text{測量船上の GPS アンテナ楕円体高}) \end{aligned}$$

- (海面からのアンテナ高)

但し、測量船上の GPS アンテナ楕円体高は VRS-RTK による測位結果、海面からのアンテナ高はアンテナ位相中心から海面までの高さを使用した。アンテナ高は、喫水および Roll, Pitch, Heave 補正をし、船体の動揺及び波浪による影響を極力取り除いた。

潮高実測値は、塩釜検潮所の 10 分ごとのデータを参照した。

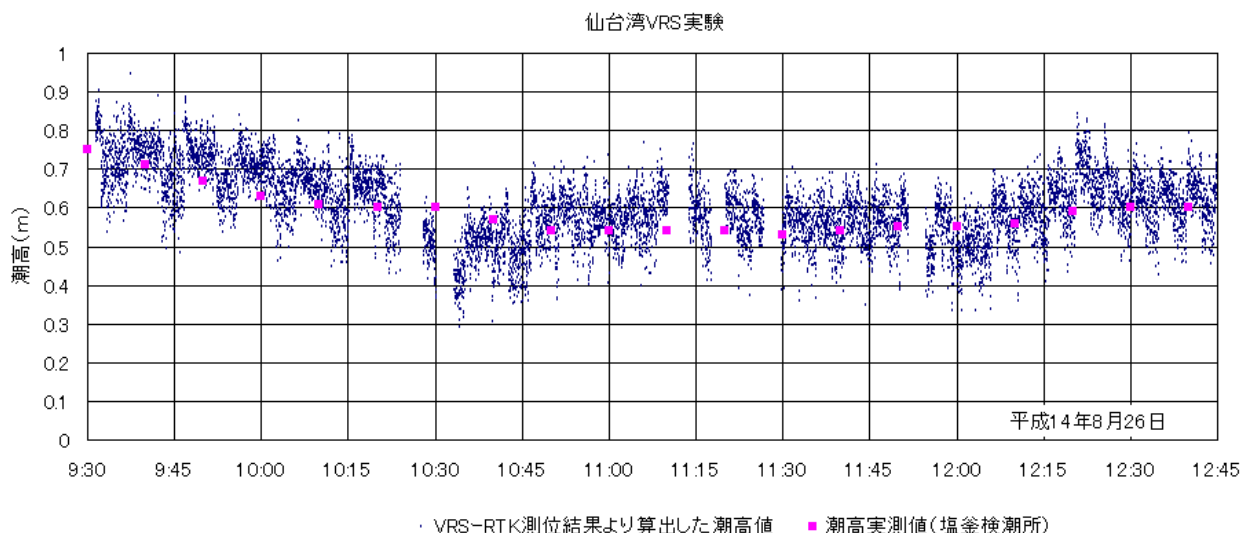
平均水面の楕円体高は、国土地理院ホームページよりダウンロードしたジオイド 2000 の値を使用した。

Z₀ 値は、海洋情報部ホームページに掲載の、平均水面等一覧に記載されている仙台の Z₀ 値 (0.93) を参照した。

VRS-RTK 測位結果より算出した潮高データと潮高実測値の比較を第 11 図に示す。

3 まとめ

- (1) VRS-RTK による測位精度は、衛星の減少または配置が良好ではない時間帯においては劣化する。



第 11 図 VRS-RTK 測位結果から算出した潮高データと潮高実測値の比較
 Fig.11 The comparison of VRS-RTK solution and actual measurement of tide

- (2) 衛星状況が良好な時間帯では、VRS-RTK による水平方向の測位精度は K-GPS と同等である。
- (3) 衛星状況が良好な時間帯では、VRS-RTK による鉛直方向の測位結果は、K-GPS との較差の平均値 - 4.5 ~ - 7.6cm、標準偏差(2)約 7.3cm であった。楕円体高値は一般に VRS-RTK の方が、K-GPS に比べ低くなった。

宏実, 黒石裕樹, 福田洋一:「日本のジオイド 2000」の構築, 国土地理院時報, **97**, (2002) .
 寺井孝二: 船舶におけるキネマティック GPS 測位観測による高さ方向の精度評価と船体動揺観測の試み, 海洋情報部技報, **21**, 51-61, (2003) .
 都筑三千夫, 西修二郎, 松村正一: 仮想基準点方式によるリアルタイム測位, 国土地理院時報, **96**, 39-44, (2001) .

4 今後の課題

- (1) 海面高の測位では、陸上に比べ急激な高度の凹凸は考えにくいことから、鉛直方向の欠損データ補間値の推定は可能と考える。今後の検討課題とする。
- (2) RTK 測位では、なんらかの障害によるデータの遮断などが起こる可能性がある。衛星の数や配置状況の予測はもちろんのこと、電子基準点データの欠損、通信障害等に起因するデータ欠損の補間手段を講じた上で測位計画をたてる必要があると考える。

参考文献

安藤久, 佐々木正博, 畑中雄樹, 田中和之, 重松