

RTK-GPS を利用した洋上測位システムの開発

Development of Marine Surveying System using Real-Time-Kinematic GPS

古川 敦* 新田 良典** 戸上 郁英***

Atsushi Furukawa, Yoshinori Nitta, Ikuhide Tokami

Abstract

RTK-GPS was applied to positioning of marine construction and the system which enables highly precise and efficient construction management was developed. Although only specific coordinates of 1 point can be obtained at one GPS, in this system the inclination situation of thing can be grasped and made into real time by using three GPSs. By applying this principle to surveying by vessels, highly precise submarine geographical-feature measurement is attained, and highly precise-ization was also checked the accuracy verification by experiment in the real water area.

keywords: Survey, GPS(Global Positioning System), SONAR(Sound Navigation and Range)

1.はじめに

橋梁基礎・防波堤のケーソンや沈埋トンネルの設置時の測位作業には光波測距儀がよく用いられていたが、設置位置が陸上から遠距離の場合には大がかりな付帯設備が必要となり、雨や濃霧時では測位不可能なため設置作業ができない等の問題があった。

また、海洋工事に関する事前調査、海底掘削や捨石工等の出来形管理において海底地形測量を実施する場合、音の往復時間から水深を求める精密音響測深機を用いるのが一般的となっているが、この水深値と水平位置との整合を図るため、従来は陸上からトランシット等で測量船の航行方向を誘導する方法が採られていた。この方法では水深と水平位置との正確な整合は困難であり、また海底地形を図示するためには煩雑な後処理作業を伴うといった問題があった。

筆者らは、これらの海洋工事における構造物の位置誘導や海底地形の測量に RTK-GPS(Real-Time-Kinematic Global Positioning System)を利用し、高精度かつその作業を大幅に省力化・効率化できる洋上測位システムの開発を行ってきた。RTK-GPS を利用した測位システムは従来より種々開発されているが、海洋における地形測量では測量船が波浪により動揺するため、その測位精度に問題があった。本研究では GPS 3 基を用い、測位対象物の傾斜・動揺が考慮できる高精度かつ簡易なシステムを開発した。開発したシステムは現場適用実験の結果、高精度な測位性能や実施工への適用性が確認されたため、ここに報告する。

システムは、ケーソンや沈埋トンネルなどの構造物や作業船の位置誘導を行う「海洋構造物位置誘導システム」と海底地形を高精度に測量する「海底地形測量システム」とで構成するが、本論では「海底地形測量システム」について、その原理および精度について述べることにする。

2.システムの原理

2.1 傾斜補正

RTK-GPS は高精度かつリアルタイムに計測が可能な測量技術である。ただし、GPS 1 基では特定の 1 点の座標しか得ることができず、測位対象の構造物や船舶等の傾斜状況を把握することはできない。音響測深機を用いた海底地形測量では、測量船の動揺・傾斜により音響測深センサーが常時鉛直方向を向かず、船位と異なった位置の水深を計測している(図 2.1.1)。このように GPS1 基により船位を計測した場合、船位と水深の正確な整合ができないため、測量船の動揺量による測量精度の低下が懸念される。

測位対象物の傾斜(Rolling・Pitching・Yawing)を把握するため、ジャイロや加速度計等を併用したシステムも種々開発されているが、その取り扱いや機器の応用性等に限定が多い。そこで本研究では、これらの動揺を RTK-GPS 3 基によって特定することとした。

* 正会員 ㈱熊谷組 技術研究所

** 正会員 ㈱熊谷組 技術研究所

*** ㈱熊谷組 技術研究所

いま、測位対象物上の点 p の測地座標系での座標値を x_p, y_p, z_p 、測位対象物のワールド座標系での座標値を x'_p, y'_p, z'_p とすると、これらの座標間の関係は式(1)に示すとおりである。

$$(x_p, y_p, z_p) = (x'_p, y'_p, z'_p) \begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \\ x_0 & y_0 & z_0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$l_1, m_1, n_1; l_2, m_2, n_2; l_3, m_3, n_3$ はそれぞれ x, y, z 軸に関する x', y', z' 軸の方向余弦であり、上述の測位対象物の傾斜(Rolling・Pitching・Yawing)に相当する。傾斜状況を考慮した測位を行うためには、式(1)右項のマトリックスを得る必要がある。

高精度測位が可能な RTK-GPS を測位対象物(ケツ・測量船等)上に3基設置することにより測位対象物上の3点の測地座標が求まる。これらの3点の座標をもとに、式(2)に示す式により座標変換マトリックスが求まるため、傾斜を含めた位置管理が可能となる。

$$\begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \\ x_0 & y_0 & z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 & 1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 & 1 \\ x'_3 & y'_3 & z'_3 & 1 \\ A' & B' & C' & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ A & B & C \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

A, B, C および A', B', C' は $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$ の3点または $(x'_1, y'_1, z'_1), (x'_2, y'_2, z'_2), (x'_3, y'_3, z'_3)$ の3点で決まる平面の法線ベクトルを示す。

2.2 計測機器の同期

GPS と音響測深機等の計測機器を複数台用いるため、各機器間の同期が問題となる。GPS に関しては各衛星に搭載された原子時計を基準とした GPS 時間を測位データと共に出力するため、ソフトウェアで十分可能である。ただし、この GPS 時間に同期した音響測深データを得るためには音響測深データに GPS 時間と同精度の時計を搭載するか、GPS 受信機側から音響測深機に信号を送り、この信号と同期した測深結果を出力させる、等の工夫が必要となる。

これらの方法では、いずれも音響測深機や GPS 受信機に専用同期装置なるハードウェアが必要となる。今回は安価で簡易なシステムの開発を目標とし、これらの同期はソフトウェア上で処理することとした。

システムの使用機器構成を図 2.2.1 および写真 2.2.1,2 に示す。

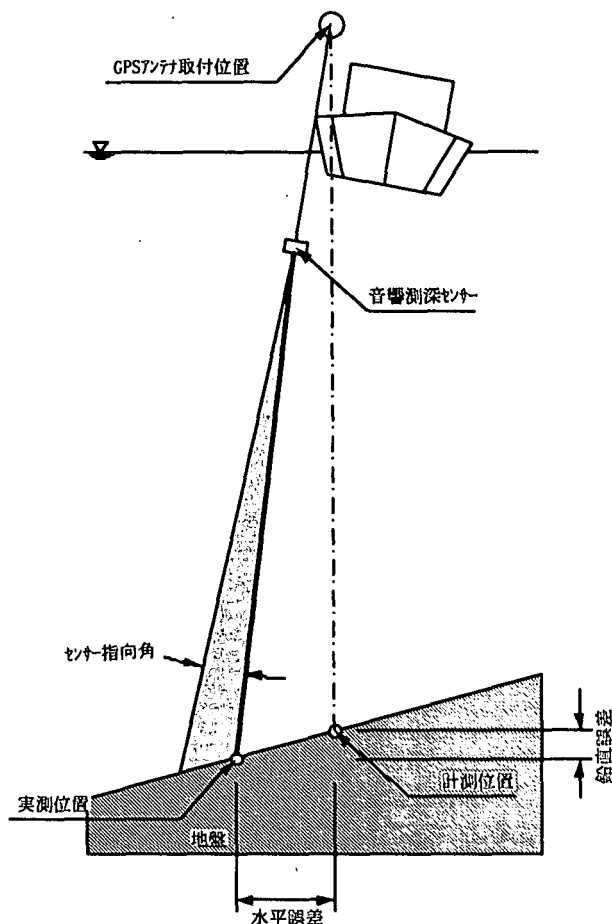


図 2.1.1 船舶の傾斜による計測誤差

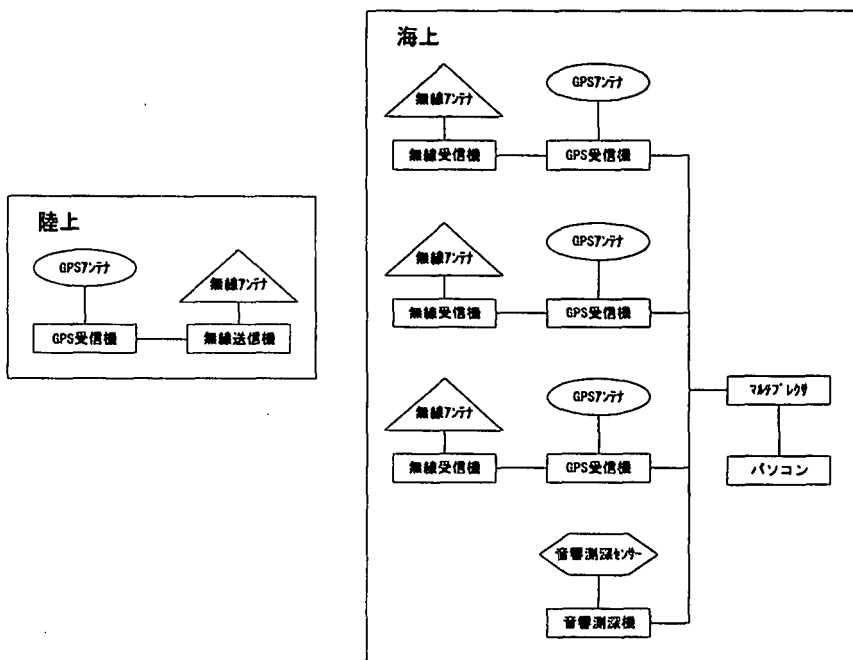


図 2.2.1 システム構成

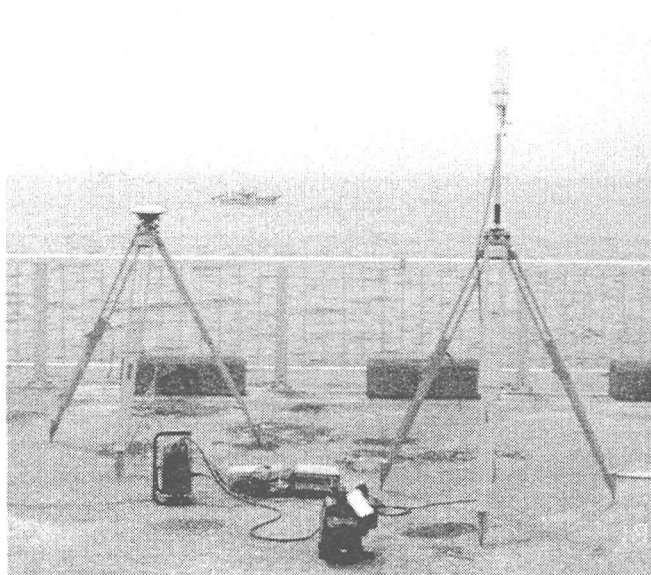


写真 2.2.1 陸上基準局



写真 2.2.2 海上使用機器

3.精度検証実験

本研究では開発したシステムの性能評価を行うため、以下に示す方法により実水域検証実験を行った。

3.1 実験概要

GPS 3基による船舶の動揺・傾斜を考慮することによる精度向上を確認するため、GPS 1基による場合との測量精度を比較することとした。実験は香川県府中湖において 30m×30m の地形起伏の大きい水域を対象とし、動揺考慮・非考慮の2通りの方法による測量を各々5回行い、測量結果の再現性(ばらつき)を比較することとした。図 3.1.1 に GPS アンテナおよび音響測深センサーの配置、写真 3.1.1 にその測量状況を示す。

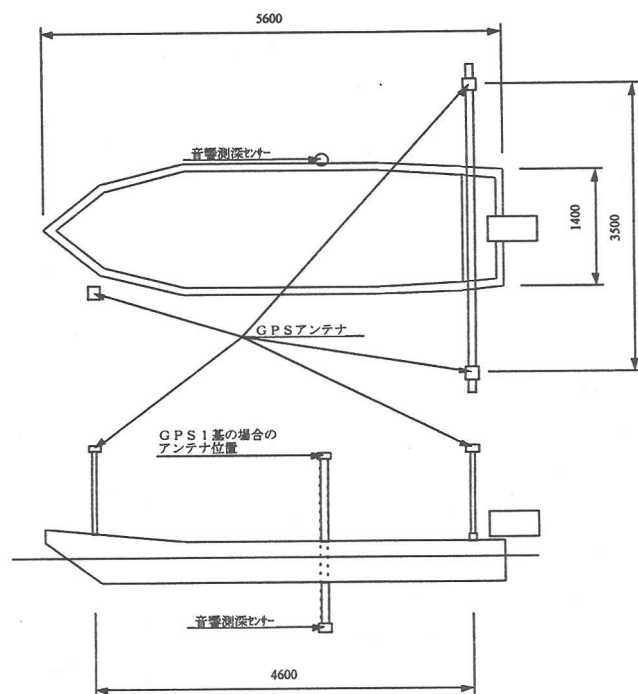


図 3.1.1 GPS アンテナ配置図

3.2 解析方法

RTK-GPS を用いることにより毎秒1回の測量値が計測できる。本実験では船舶を約 2.5m/sec で航行させることにより、30m×30m の水域を 10 分程度の短時間で、十分な測量成果を得ることができた。図 3.2.1 に測量中のパソコンモニターを示す。今回は得られた測量点の精度を検証するのであるが、図からも分かるように測量データは航跡に依存し、同一のポイントを再計測するためには同一の航跡をたどる必要があり、これは事実上不可能である。そこで、計測結果の同一水平位置での標高値のばらつきを評価するため、同一メッシュ上に補間を行い、メッシュ各点毎の標高値のばらつきを算出した。以下にその手順を示す。

メッシュへの補間方法には様々なものが考えられるが、今回の実験では計測点1点毎の精度評価を目的としているため、計測点1点毎の値を高く反映できる TIN(Triangulated Irregular Network: 不定形三角網)モデルにより行うこととした。図 3.2.2 に計測結果を元



写真 3.1.1 測量状況

に生成した TIN を示す。図中の三角形の各頂点は全て得られた計測点を用いている。この TIN を使い、各々の三角形の傾斜角から格子間隔 5m のメッシュへの補間を行った。図 3.2.3 に TIN 補間による格子メッシュデータを用いた等高線図を示す。

3.3 実験結果

GPS 1 基および 3 基による計測を各々 5 回行い、前述の補間を行うことにより各々のメッシュデータが得られる。解析ではこれら 5 回分のメッシュデータを各メッシュ交点毎に統計処理し、 3σ を求めた。表 3.3.1 に得られたメッシュ標高値、表 3.3.2, 3 に GPS 1 基および 3 基の 3σ を示す。図 3.3.1 には表 3.3.2, 3 を図化処理した精度分布図を示す。

GPS 1 基での 3σ の最大値は 0.43m であるのに対し、GPS 3 基では 0.31m となり、ばらつきが小さくなり精度が向上している(表 3.3.2, 3)。また図 3.3.1 の等高線と誤差分布の対比から分かるように、地形勾配が大きい箇所において誤差が顕著に現れている。この傾向を、計測結果のばらつきと地形勾配との関係とし、図 3.3.2 にまとめた。地形勾配が 10° 以上になると GPS 1 基の精度は低下し、GPS 3 基による精度改善率は最大で 30% 以上であった。

今回の実験は波浪の小さな湖であり、測量船の動揺が少なかったにもかかわらず、GPS 3 基の方が GPS 1 基に比べ測量精度が良いことが確認された。測量船の動揺の他に、音響測深機の取り付け状態(傾斜)によっても測量精度が影響を受けるが、音響測深センサーの取付治具は、浮遊状態の船舶へ正確に鉛直方向に取り付けることが困難であり、本実験においても約 3° ほど傾斜していることが確認された。GPS 3 基を用いた場合はこの治具の傾斜状況も考慮できるが、GPS 1 基では常に GPS アンテナ直下にセンサーが取り付けられていると仮定し、計測される。水深 5m、地形勾配 15° 、治具取付誤差 3° の条件で GPS 1 基で計測した場合、予測される計測誤差は約 165mm である(図 3.3.3)。この誤差は図 3.3.2 の実測精度差ともほぼ一致していることから、治具の傾斜状態も考慮できる本方式の有効性が実証された。(なお、図中にも示したが音響測深センサーには指向特性があり、指向角範囲内の最も音波反射率の高い箇所の距離を計測する。)

波浪の大きい海洋においては船舶の動揺も発生しないため、GPS 1 基では上述の治具取

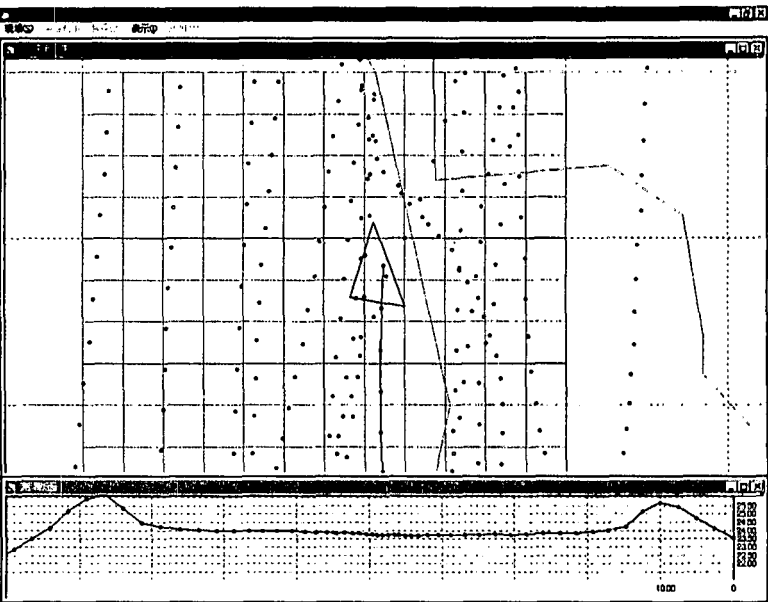


図 3.2.1 測量時モニター(測量点平面図)

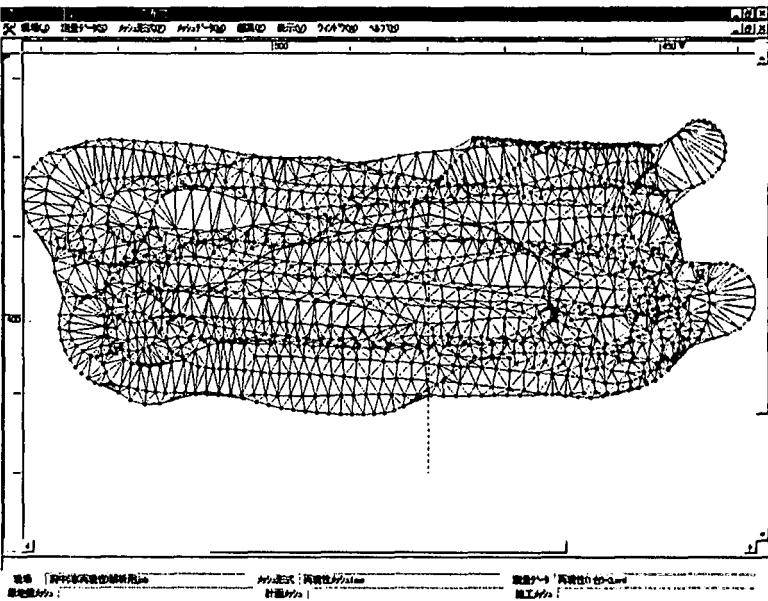


図 3.2.2 TIN 生成

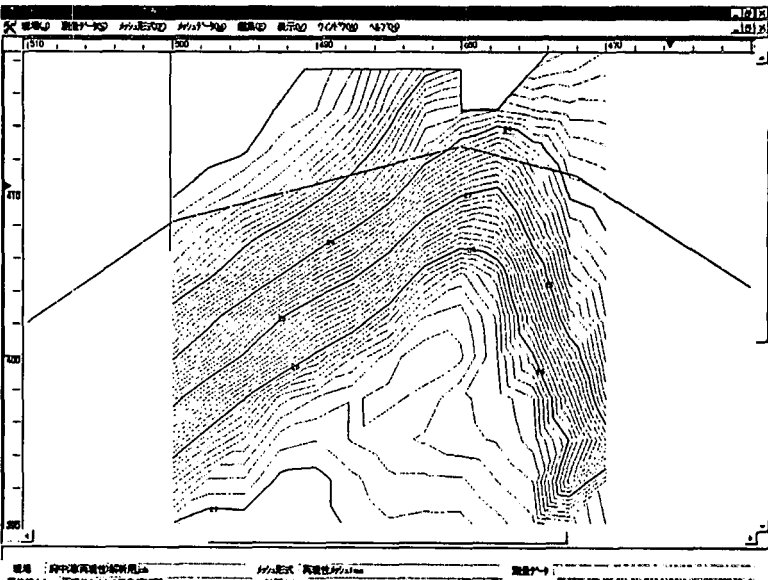


図 3.2.3 メッシュ等高線

表 3.3.1 メッシュ標高値 (イメージ)

	500.0	497.5	495.0	492.5	490.0	487.5	485.0	482.5	480.0	477.5	475.0	472.5	470.0
5回目													
4回目	500.0	497.5	495.0	492.5	490.0	487.5	485.0	482.5	480.0	477.5	475.0	472.5	470.0
3回目	500.0	497.5	495.0	492.5	490.0	487.5	485.0	482.5	480.0	477.5	475.0	472.5	470.0
2回目	500.0	497.5	495.0	492.5	490.0	487.5	485.0	482.5	480.0	477.5	475.0	472.5	470.0
1回目	500.0	497.5	495.0	492.5	490.0	487.5	485.0	482.5	480.0	477.5	475.0	472.5	470.0
メッシュNo.(m)	500.0	497.5	495.0	492.5	490.0	487.5	485.0	482.5	480.0	477.5	475.0	472.5	470.0
420.0	21.947	21.947	21.998	22.142	22.248	22.337	22.426	22.706	22.913	23.029	23.124	23.203	23.288
417.5	21.944	21.964	22.014	22.042	22.152	22.303	22.648	23.110	23.325	23.314	23.335	23.366	23.451
415.0	21.946	21.986	22.038	22.118	22.234	22.451	23.102	23.487	23.697	23.657	23.679	23.663	23.624
412.5	22.004	22.046	22.119	22.211	22.447	22.679	23.314	23.758	24.254	24.449	24.114	23.837	23.792
410.0	22.091	22.179	22.349	22.549	22.982	23.418	23.870	24.492	25.040	25.107	24.601	24.176	23.973
407.5	22.211	22.408	22.721	23.185	23.616	24.086	24.603	25.326	25.817	25.736	25.025	24.329	24.144
405.0	22.615	23.007	23.457	23.939	24.391	24.868	25.436	26.147	26.585	26.237	25.503	24.547	24.231
402.5	23.225	23.755	24.316	24.900	25.326	25.669	26.273	26.587	26.875	26.594	25.823	24.748	24.359
400.0	24.047	24.588	25.151	25.738	26.115	26.418	26.840	26.979	26.924	26.678	26.136	25.148	24.579
397.5	24.808	25.421	26.025	26.597	26.780	26.876	26.933	26.839	26.628	26.614	26.454	25.635	24.781
395.0	25.747	26.304	26.677	26.861	26.898	26.912	26.789	26.713	26.640	26.602	26.567	26.121	25.246
392.5	26.425	26.746	27.005	27.103	27.080	26.953	26.868	26.918	26.867	26.719	26.631	26.439	25.781
390.0	26.896	27.041	27.137	27.081	27.095	27.072	26.999	26.945	26.895	26.810	26.722	26.547	26.289

表 3.3.2 メッシュ各点での 3 σ (GPS 1 基)

メッシュNo.(m)	500.0	497.5	495.0	492.5	490.0	487.5	485.0	482.5	480.0	477.5	475.0	472.5	470.0
420.0								0.158	0.162	0.084	0.123	0.094	0.100
417.5	0.097	0.118	0.070	0.078	0.090	0.151	0.235	0.281	0.199	0.063	0.076	0.085	0.076
415.0	0.070	0.031	0.056	0.115	0.151	0.224	0.391	0.396	0.408	0.290	0.105	0.102	0.079
412.5	0.069	0.094	0.085	0.163	0.239	0.212	0.189	0.309	0.303	0.234	0.114	0.026	0.042
410.0	0.117	0.137	0.156	0.325	0.346	0.408	0.414	0.352	0.255	0.226	0.334	0.246	0.075
407.5	0.025	0.079	0.108	0.188	0.267	0.260	0.382	0.356	0.273	0.324	0.389	0.314	0.045
405.0	0.201	0.157	0.253	0.209	0.360	0.304	0.285	0.382	0.311	0.333	0.269	0.171	0.111
402.5	0.402	0.276	0.234	0.160	0.122	0.376	0.229	0.350	0.082	0.124	0.185	0.139	0.156
400.0	0.319	0.351	0.302	0.400	0.345	0.195	0.162	0.116	0.183	0.154	0.204	0.287	0.050
397.5	0.284	0.315	0.364	0.191	0.102	0.045	0.083	0.154	0.141	0.058	0.190	0.430	0.314
395.0	0.367	0.343	0.141	0.114	0.095	0.097	0.180	0.098	0.077	0.063	0.050	0.275	0.360
392.5	0.205	0.092	0.180	0.061	0.034	0.056	0.048	0.153	0.052	0.070	0.077	0.137	0.337
390.0	0.144	0.046	0.106	0.045	0.059	0.042	0.043	0.076	0.058	0.041	0.063	0.097	0.190
最大値	0.430												
平均値	0.185												

表 3.3.2 メッシュ各点での 3 σ (GPS 3 基)

メッシュNo.(m)	500.0	497.5	495.0	492.5	490.0	487.5	485.0	482.5	480.0	477.5	475.0	472.5	470.0
420.0	0.123	0.111	0.134	0.071	0.163	0.187	0.190	0.217	0.101	0.137	0.232	0.148	0.195
417.5	0.188	0.165	0.186	0.153	0.170	0.167	0.125	0.300	0.274	0.103	0.189	0.156	0.146
415.0	0.131	0.136	0.157	0.180	0.202	0.225	0.283	0.180	0.198	0.140	0.109	0.061	0.098
412.5	0.178	0.159	0.156	0.101	0.118	0.177	0.097	0.215	0.214	0.155	0.064	0.133	0.125
410.0	0.165	0.136	0.219	0.307	0.238	0.213	0.272	0.208	0.160	0.094	0.157	0.263	0.128
407.5	0.118	0.162	0.215	0.241	0.111	0.114	0.134	0.081	0.113	0.138	0.208	0.232	0.160
405.0	0.287	0.284	0.217	0.198	0.213	0.110	0.143	0.189	0.215	0.165	0.303	0.196	0.089
402.5	0.294	0.253	0.230	0.262	0.293	0.239	0.200	0.272	0.161	0.139	0.197	0.313	0.129
400.0	0.165	0.274	0.211	0.277	0.185	0.166	0.167	0.176	0.161	0.206	0.152	0.192	0.222
397.5	0.128	0.177	0.193	0.068	0.196	0.223	0.137	0.114	0.165	0.091	0.178	0.251	0.250
395.0	0.217	0.131	0.225	0.174	0.082	0.181	0.076	0.030	0.081	0.079	0.149	0.161	0.147
392.5	0.131	0.117	0.243	0.142	0.070	0.111	0.088	0.157	0.160	0.067	0.090	0.154	0.204
390.0	0.169	0.106	0.104	0.048	0.089	0.137	0.127	0.053	0.142	0.086	0.133	0.239	0.149
最大値	0.313												
平均値	0.167												

付誤差以上に動揺による測定誤差が発生すると予想されるが、GPS 3 基では傾斜・動揺による測定誤差は発生しないため、波浪が厳しい海洋においても高い精度が期待される。

4.まとめ

海洋工事における構造物の位置誘導や海底地形の測量を、高精度かつ大幅に省力化・効率化することを目指し、RTK-GPS 3 基を用いた測位対象物の傾斜・動揺を考慮できるシステムを開発した。開発したシステムは、その基本性能および現場適用性を検証するため、香川県府中湖浚渫工事において検証実験を行った。実験では GPS 1 基による測量と、傾斜・動揺を考慮できる GPS 3 基を用いた測量との精度比較を行い、本システムの高精度化を検証した。以下にその検証実験結果をまとめる。

- ① GPS 1 基に比べ、動揺を考慮できる GPS 3 基による方法では測量精度が 30%以上向上した。
- ② 特に海底地形の急峻部での精度が飛躍的に向上する。
- ③ 波浪の小さい湖においても上記性能が確認されたため、動揺が激しい海洋においては、さらに高い精度改善効果が期待できる。また、従来方法では波浪条件により精度低下が懸念されるため、高波浪状態では測量不

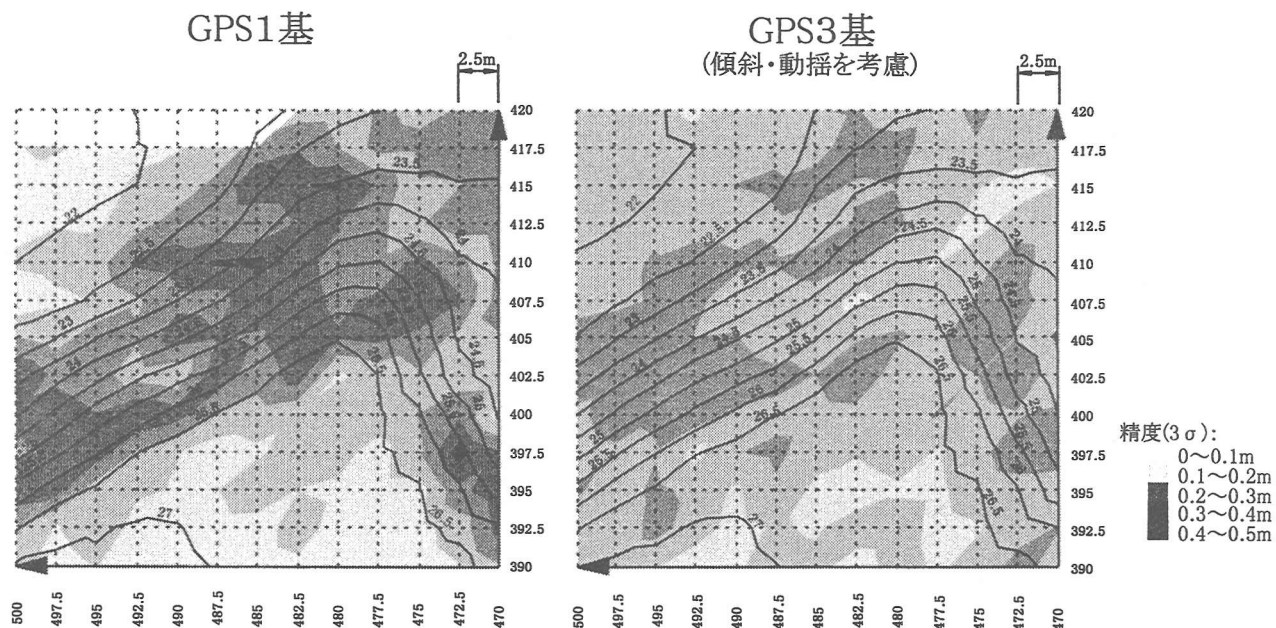


図 3.3.1 精度分布

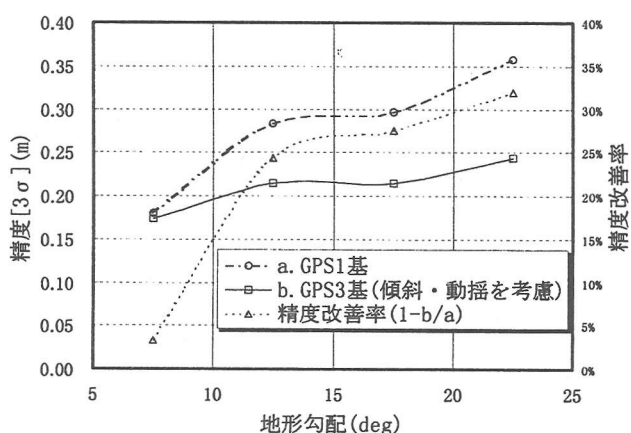


図 3.3.2 地形勾配による精度

可能であったが、本方式では波浪条件は特定できないが測量船が航行可能な限り測量も可能となり、施工管理の効率化ひいては工期短縮等に寄与できると思われる。

また本論では触れていないが、現場適用性についても以下の性能が確認されており、実施工への適用へも十分満足する性能があることが実証された。

④測量時の作業員は操船者およびシステムオペレータの2人で済み、省力化が確認できた。

⑤広域測量実験では、工事対象水域 3,000m² を2時間程度の短時間かつ高精度に測量ができた。

⑥等水深線図・断面図や土量計算等の煩雑な後処理が、解析システムにより迅速かつ容易に行うことが可能であった。

これにより現場適用性も実証され、今後は海洋工事の実施工へ積極的に適用し、施工管理の省力化・効率化・高精度化に寄与できるものと思われる。

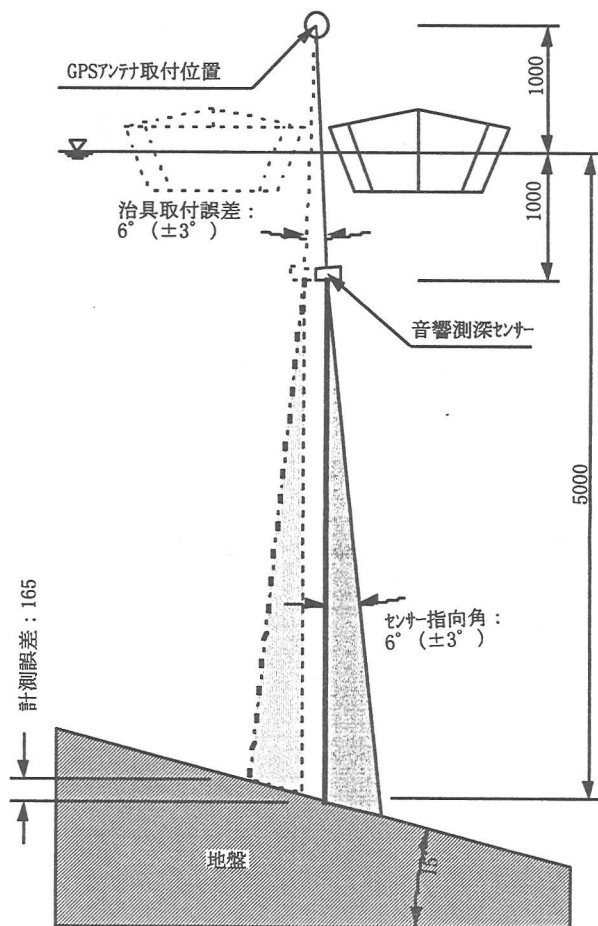


図 3.3.3 治具取付誤差による計測誤差