

【研究論文】

水上オートバイを用いた測深システムの開発

和田 雅 昭*1・宮 川 健 三*2・山 岡 誠*2
天下井 清*1・木 村 暢 夫*1・岩 森 利 弘*3

Development of Inshore Sounding System by Using Personal Water Craft

Masaaki WADA, Kenzo MIYAGAWA, Makoto YAMAOKA
Kiyoshi AMAGAI, Nobuo KIMURA and Toshihiro IWAMORI

Abstract

The detailed topographical changes of the inshore area caused by the sea waves have yet to be elucidated. One of the reasons is the difficulty of inspection of shallow areas by usual vessel due to danger of the stand or overturn. However, the demand to catch correctly the inshore topography is of great importance for the coastline preservation.

Recently, the miniaturization of the measurement devices made a rapid progress due to technological innovations. This has stimulated the intensive use of the Real Time Kinematic GPS (RTK-GPS) technology featuring an extremely high accuracy about the vertical axis for maritime measurements. The accuracy characteristics of the RTK-GPS allow the detection of the vessel heaving.

In this paper, a system for safety sounding is proposed, and the testing results are discussed. The system equipment includes the RTK-GPS, echo sounder, motion sensor, magnetic compass, indicator and cellular phone, which are mounted in personal water craft. An original short-range echo sounder was newly designed to meet the demands of limited working space. The transducer of the echo sounder was fixed to the inside of the bottom to prevent possible damages in the case of stand.

It has been found experimentally that the proposed sounding system with use of personal water craft is accurate to better than 0.1m.

1. はじめに

一年を通して高波浪の影響を受けている汀線域の地形変化は詳細に確認されておらず、成果として公表されている地形図の殆どは正しく地形を表現しているとは言い難い。その理由としては、通常の測量船では座礁の危険があり進入が難しく、また人的測量では安全性確保の上で作業に制約のあることが挙げられる。しかしながら、汀線域の地形を正確に捉えることは海岸線保全を考える上で重要な要件であり、その需要は極めて大きい。

ところで、近年におけるRTK-GPSの普及に伴い、

RTK-GPSは海洋における測量調査で利用される機会が増えてきている。これは、RTK-GPSの鉛直方向の精度が非常に高いことによる。一般にRTK-GPSの鉛直方向の精度は約0.05mとされている。従来の測量調査では、音響測深機による測深データに対して潮汐による潮位の補正を行うことにより地形図を描いていた。しかしながらRTK-GPSを用いた測量調査では正確なアンテナの標高が取得できることから潮位の補正が不要となり、波浪による測深データの誤差をリアルタイムに補正することで地形図の精度が向上する。

座礁の危険性のある汀線域を測量調査するシステム

2003年7月24日受付, 2003年11月18日受理

キーワード: 測深, 汀線域, 水上オートバイ, RTK-GPS, 音響測深機

Key words: Sounding, Inshore, Personal Water Craft, RTK-GPS, Sounder

*1 Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 3-1-1, Minato, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan (北海道大学大学院水産科学研究科 〒041-8611 北海道函館市港町3-1-1)

*2 Sanyo Techno Marine Incorporated, 1-3-17 Horidome, Nihonbashi, Tokyo 103-0012, Japan (三洋テクノマリン株式会社 〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町1-3-17)

*3 Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University, 3-1-1, Minato, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan (北海道大学北方生物圏フィールド科学センター 〒041-8611 北海道函館市港町3-1-1)

としては、自律航行型無人双胴船を用いた自動ペルギー¹⁾と呼ばれるシステムが実用化されている。しかしながら、このシステムは湖沼や港湾での利用を前提としたものであり、海況条件の悪い環境での利用には適していない。そこで、汀線域における測量調査を安全かつ効率的に行うことを目的としてRTK-GPSと水上オートバイを用いた測深システムINSURVE (Inshore Survey Vehicle)を開発し評価を行った。

2. システムの概要

1) 水上オートバイの優位性

本報では汀線域を水深から水深15mまでの範囲と定義している。汀線域における測量調査には小型船の利用も考えられるものの、以下の理由により実現されていない。

- ・推進器が露出しているため、座礁の際に推進器を損傷する危険性が高い。
- ・音響測深機の振動子が露出しているため、座礁の際に損傷する危険性が高い。
- ・転覆の危険性が高い。

一方、水上オートバイは小型船と比較して以下の点で優位であると考えられる。

- ・推進器が露出していないため、座礁の際でも推進器を損傷する危険性がない。
- ・音響測深機の振動子が露出していないため、座礁の際でも損傷する危険性がない。
- ・船体の構造上、横転の可能性はあるものの、沈没の危険性がない。
- ・喫水が0.1m程度と非常に浅い。
- ・小型でより細かな操船が可能である。

従来、測量調査に用いる計測装置はサイズ、重量ともに大きく、水上オートバイに搭載可能なものではなかった。しかしながら、RTK-GPSをはじめとする計測装置の技術革新により、急速に小型化が進み水上オートバイへの搭載が可能となった。

2) システムの概要

システムは大きく分けて、移動局としての水上オートバイ、並びに陸上局としてのホストコンピュータから構成される。図-1はシステムのイメージ図である。水上オートバイには計測装置としてのRTK-GPS、音響測深機、モーションセンサ、マグネチックコンパス、通信装置としての携帯電話、表示装置としての誘導表示器、並びに制御装置としてのマイクロコンピュータを搭載している。計測装置、通信装置および制御装置は防水性を有した一つの制御ボックスに収納し、マイクロコンピュータにより集中制御を行う。なお、誘導表示器はオペレータを計画測線に誘導するためのものであり、ハンドル部に取り付けを行った。図-2は水上オートバイへの装置の配置を示している。

水上オートバイに搭載するコンピュータには耐環境性を考慮してマイクロコンピュータを採用した。マイクロコンピュータを用いることにより耐環境性が向上すると共に、小型化、低消費電力化が可能となり、ペイロードに制限のある水上オートバイには適している。反面、処理能力が低下するため水上オートバイに搭載したマイクロコンピュータでは計測装置や表示装置、通信装置とのデータ通信に関する一次処理のみを行い、通信装置を介して陸上部のホストコンピュータで計測データの収集、予め設定した計画測線への誘導に関する演算や計測データのロギングを行うリモートアシスト方式を採用する。図-3はシステムのブロック図である。

3) システムの要件

本システムの目的は、汀線域における詳細な地形の把握であり、10mの水深において0.1m以下の精度で測深することを目標としている。測深の精度はRTK-GPS、モーションセンサ、音響測深機の各単体精度の和で表現することができることから、各計測装置における単体精度は0.1mに比べ十分小さい必要がある。そこで、各計測装置の目標精度を0.03mとした。なお、振動子は座礁や砂浜への乗り上げにより損傷しないよう船底の内側に取り付けを行うものとする。また、本システムにおける地形図の最大の分解能は0.5mとする。水上オートバイの最低航行速度が約4knotであることから、各計測装置からのデータ出力周波数は4.1Hz以上が必要となり、ここでは一律5Hzとした。なお、計測データはRTK-GPSに同期させている。

通信装置に関しては、移動局における制御装置からのデータ量は最大150byteであり、陸上局における計画測線への誘導に関するデータ量は最大100byteとなることから、計測データや計画測線への誘導情報を高速に伝送可能な全二重回線を選択する必要がある。さらに、RTK-GPSの補正情報を伝送する通信回線の確保も必要である。

4) 装置の選定

(1) RTK-GPSの選定

一般に、RTK-GPSの鉛直方向の精度は平面方向の精度の2倍程度とされている³⁾。RTK-GPSにおける精度の目標値は0.03mであることから、平面方向の精度で0.02m以下のものを選定する必要がある。そこで、自律航行型無人双胴船によるナローマルチビーム測深¹⁾²⁾やラジコンヘリコプターによる写真測量⁴⁾において実績のあるカナダNovAtel社製のOEM4を選定した。OEM4は2周波12チャンネルのRTK-GPSであり、公称精度は0.01mである。また、組み込みに適した低消費電力のボードタイプRTK-GPSである。

(2) モーションセンサの選定

モーションセンサは、測深データに対する水上オート

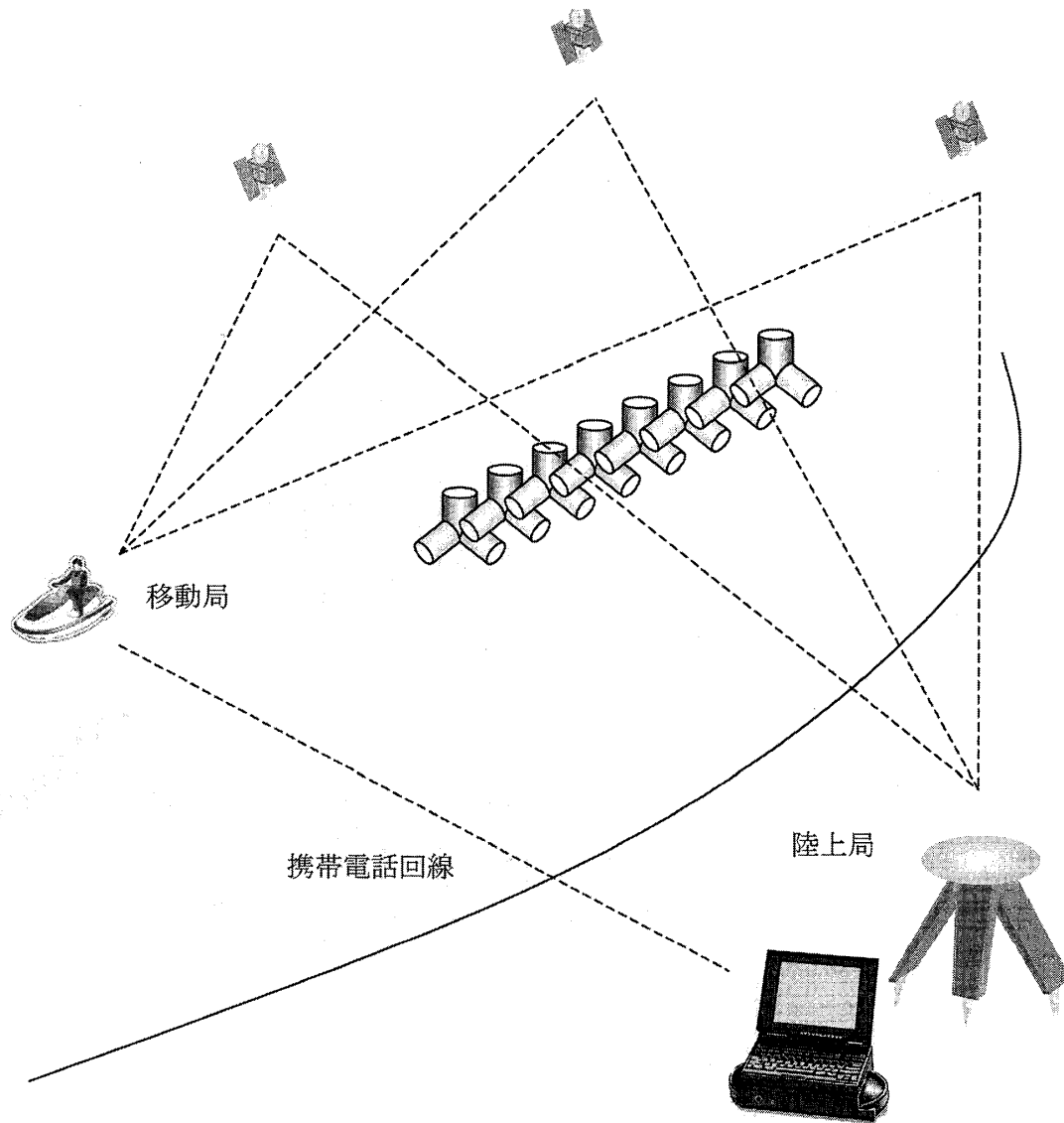


図-1 システムイメージ図

バイの傾斜を補正するために用いる。水深10mの条件では1°の傾斜誤差に相当する水深の誤差は傾斜角が0°の際には $10\text{m} \times (\cos(0^\circ) - \cos(1^\circ)) < 0.01\text{m}$ 未満であり、傾斜角が10°の際には約0.03mの誤差に相当する。本システ

ムでは米国Crossbow Technology社製の静電容量型三軸加速度センサであるCXL02LF3を選定した。CXL02LF3はアナログ出力であり、これを制御装置のマイクロコンピュータでA/D変換する。CXL02LF3の感度は 1V/G ($1\text{G}=9.81\text{m/s}^2$)でマイクロコンピュータのA/Dコンバータの分解能は $10\text{bit}/5\text{V}$ であることから、検出の最小単位は $4.88 \times 10^{-3}\text{G}$ となり、これは水平時における 0.28° の傾斜角に相当する。

(3) マグネチックコンパスの選定

マグネチックコンパスは船首方位の検出に利用する。船首方位は水上オートバイの誘導と測深データの傾斜補正に用いる。傾斜補正に関しては、鉛直方向の精度には影響を及ぼさないものの、平面方向の精度に影響を与える。水深10m、傾斜角10°の条件では、音響測深機のビーム中心が海底と交差する点は、振動子の直下から $10\text{m} \times \tan(10^\circ) = 1.76\text{m}$ シフトしていることになる。ここで、平面方向の精度を0.1m以下とするためには、方位の精度 $\Delta\theta$ は $1.76\text{m} \times \tan(\Delta\theta) \leq 0.1\text{m}$ を満たす必要

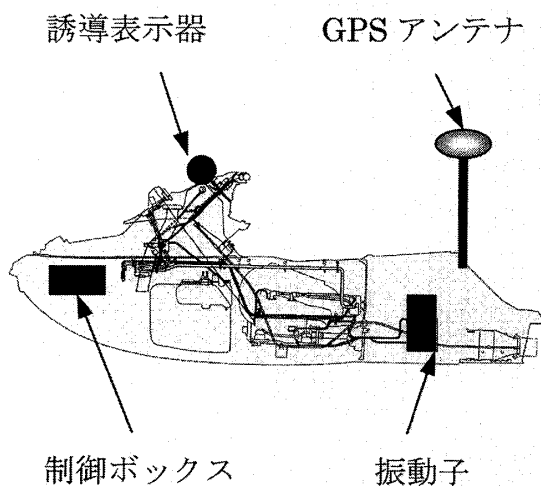


図-2 装置配置図

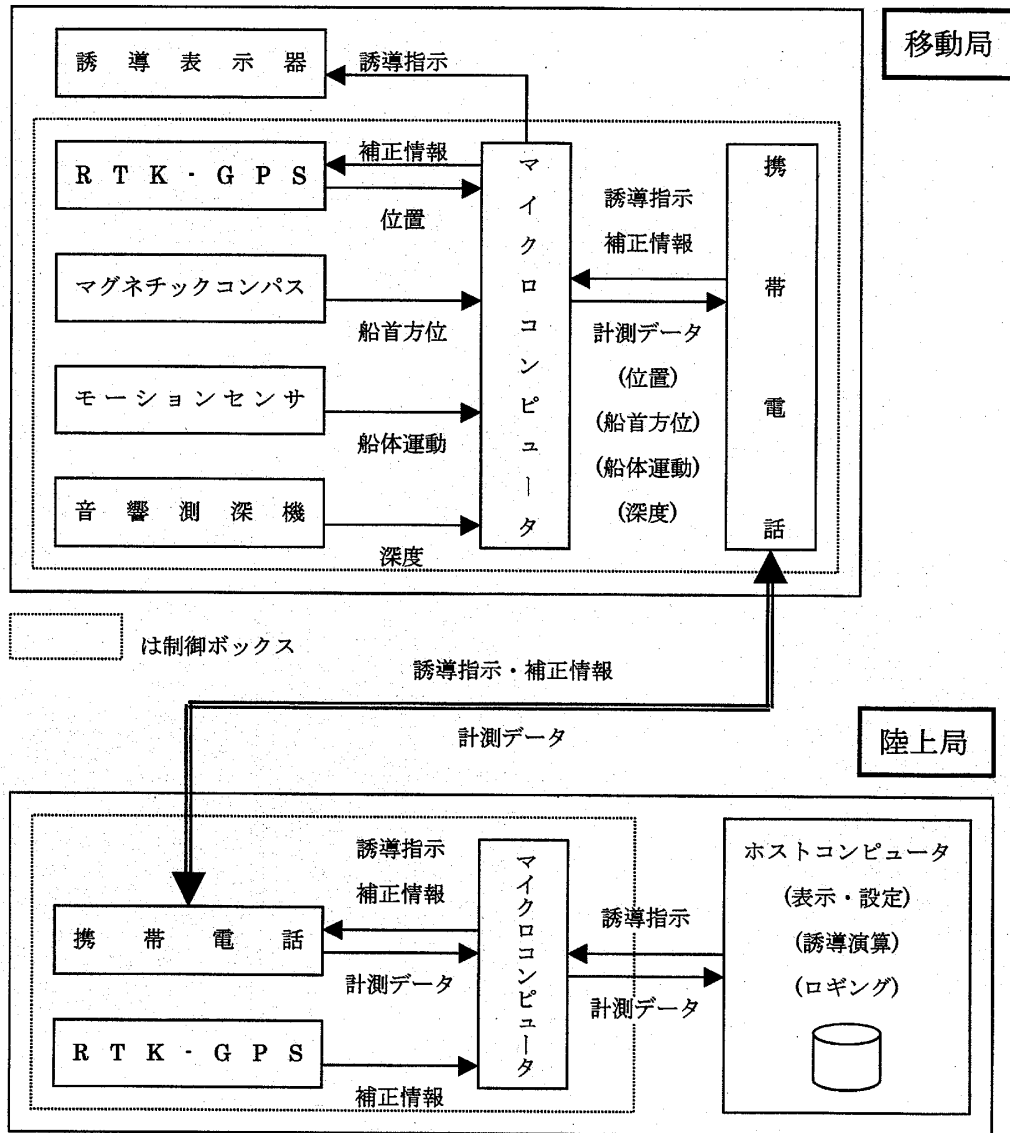


図-3 システムブロック図

があり、このとき $\Delta\theta$ は約 3° に相当する。そのため、サケの自動追跡ロボット船⁵⁾にて採用実績のある米国Honeywell社製のHMR3000を選定した。HMR3000における公称精度は 0.5° であり、分解能は 0.1° である。

(4) 音響測深機の開発

音響測深機に関しては、一般に入手可能なものは最大120m程度の水深を計測範囲としていることから出力が大きく、装置も大型となり水上オートパイへの搭載には向いていない。そのため、計測範囲を15mに限定した小型音響測深機を新たに開発した。なお、振動子は船底の内側に取り付けを行うため、船底のFRPにおける減衰を考慮する必要がある。振動子には米国HUMMINGBIRD社製のXHS-6-24を選定した。XHS-6-24は高利得の振動子であり、半減半角は 6° 、周波数は200kHzである。

図-4は開発した音響測深機のブロック図である。送波回路では0.2秒毎に7波長に相当するパルスを送波している。この時、振動子の両端に加わる電圧は800Vから

1,000Vである。そして、パルスを送波してから、反射波を受波するまでの時間を計測することにより水深を算出している。受波回路では最初に信号を増幅し(AMP)、次にバンドパスフィルタ(B.P.F.)によるフィルタリングを行い、最後に二乗平均(R.M.S.)とすることで交流信号を直流信号に変換し、マイクロコンピュータでA/D変換することでデジタルデータとして取り込んでいる。ここで、増幅率は20dBから80dBまでの可変率であり(A.G.C.)、反射波の強度により自動調整を行っている。また、バンドパスフィルタは中心周波数を200kHz、通過域帯域幅を40kHz、通過域端減衰量を3dBとして設計した。なお、受波回路は魚類の追跡⁴⁾で実績のあるピンガーの受波装置をベースに改良を行った。

反射波の検出は、受波強度が一定時間以上続けてスレシユールド電圧を超えた時点で行っている。そのため、水深の演算は時間を計測するだけのデジタル処理で行うことができる。なお、ピンガーの受波装置で使用されて

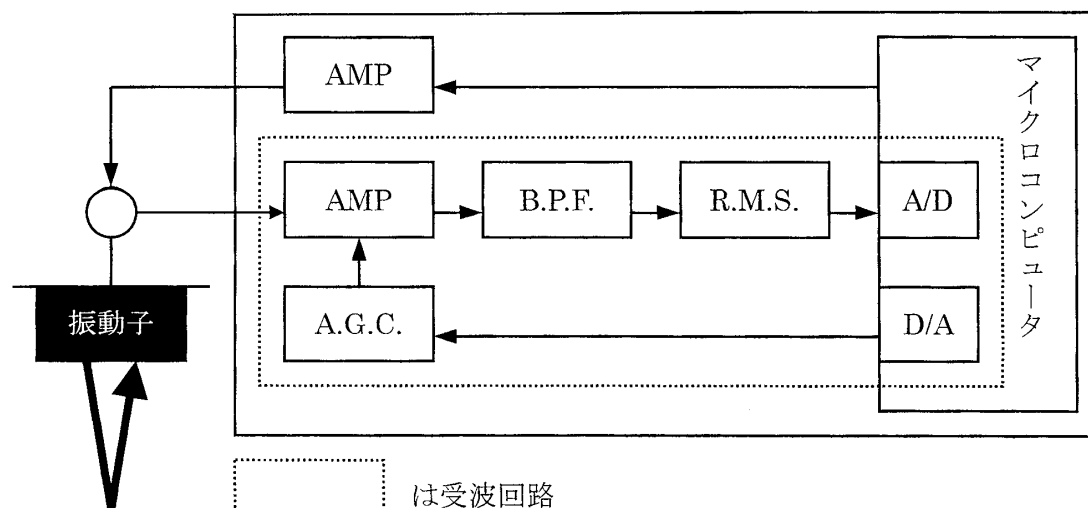


図-4 音響測深機のブロック図

いるパラメータ設定に基づき、スレッシュホールド電圧は0.5V、一定時間は100 μ secに設定している。

最初に、振動子を水上オートバイの船底厚に等しい10mm厚、0.3m四方のFRPにシリコンを用いて密着固定し、1m水深の水槽において評価を行った。その結果、測深データの繰り返し精度は0.01m以下であった。

次に、振動子を水上オートバイの船底にシリコンを用いて密着固定し、港湾において受波波形を確認した。図-5は水深約3.5mの地点における受波波形である。受波強度がスレッシュホールド電圧に比べ十分に大きく、ノイズはスレッシュホールド電圧に比べ十分に小さいことから、受波回路における増幅とフィルタリングが十分に機能していると言える。なお、測深データは最大18mまで計測できることを確認した。

(5) 通信手段の選定

移動局から陸上局への通信では、150byte \times 8bit \times 5Hz=6,000bpsの伝送速度が必要となる。ここでは、免許不要の通信手段を前提としていることから、9,600bpsで双方向通信の行える携帯電話のデータ通信を選定した。携帯電話のデータ通信はサケの自動追跡ロボット船⁵⁾や洞爺湖全面測量⁶⁾において十分な実績があり、特定小電力無線機を用いる場合と比較して、見通しを確保する必要がない、距離制限がないといった利点がある。

一方、陸上局から移動局への通信では、100byte \times 8bit \times 5Hz=4,000bpsとなり、回線の利用率は約42%となる。そこで、RTK-GPSの補正情報を多重化することを考案した⁷⁾。補正情報はRTCMフォーマットとしている。RTCMフォーマットでは4,800bpsの伝送速度が必要とされることから4,000bps+4,800bps=8,800bps<9,600bpsとなり多重化が可能である。一般に、補正情報の伝送には専用の無線機を用いることが多い。しかしながら、本システムではデータ通信回線に補正情報を多重化することで、装置の削減を行うことに成功した。

5) 測深データの傾斜補正

船体の傾斜が測深データに影響を及ぼすことから、ピッチング、ローリングに対する測深データの補正を行っている。図-6(a)に示すように、振動子からみたビーム中心が海底と交差する点までの船首方向の成分を a 、船首と直交する方向の成分を b 、鉛直方向の成分を c 、ピッチング角を θ_P 、ローリング角を θ_R 、測深値を D とすると

$$a = c \tan \theta_P$$

$$b = c \tan \theta_R$$

$$D^2 = a^2 + b^2 + c^2$$

が成り立つことから

$$c = \frac{D}{\sqrt{\tan^2 \theta_P + \tan^2 \theta_R + 1}} \quad \dots\dots(1)$$

$$a = \frac{D \tan \theta_P}{\sqrt{\tan^2 \theta_P + \tan^2 \theta_R + 1}} \quad \dots\dots(2)$$

$$b = \frac{D \tan \theta_R}{\sqrt{\tan^2 \theta_P + \tan^2 \theta_R + 1}} \quad \dots\dots(3)$$

となる。

次に、ピッチングとローリングの影響による平面座標の補正を考える。図-6(b)に示すように北に x 軸、東に y 軸をとる座標系において、船首方位を H 、ピッチングとローリングの合成ベクトルと船首方位のなす角を θ とすると

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta_R}{\tan \theta_P} \right) \quad \dots\dots(4)$$

となる。

ここで、振動子の三次元座標を (X, Y, Z) 、ビーム中心が海底と交差する点の三次元座標を (X_i, Y_i, Z_i) とすると

$$X_i = X + \sqrt{a^2 + b^2} \cos(H + \theta)$$

$$Y_i = Y + \sqrt{a^2 + b^2} \sin(H + \theta)$$

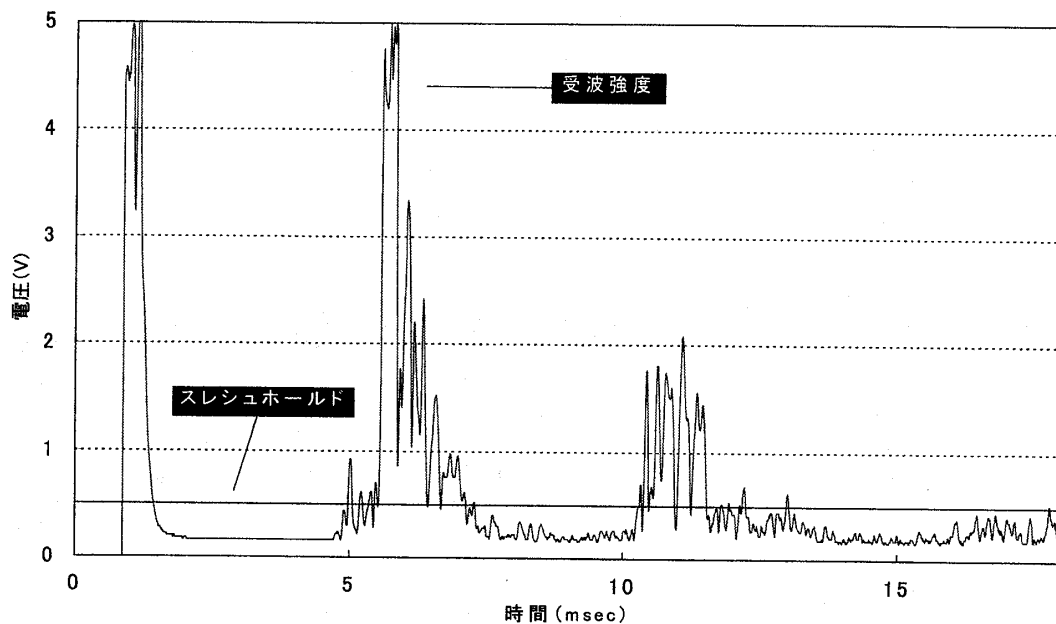


図-5 音響測深機の受波波形データ

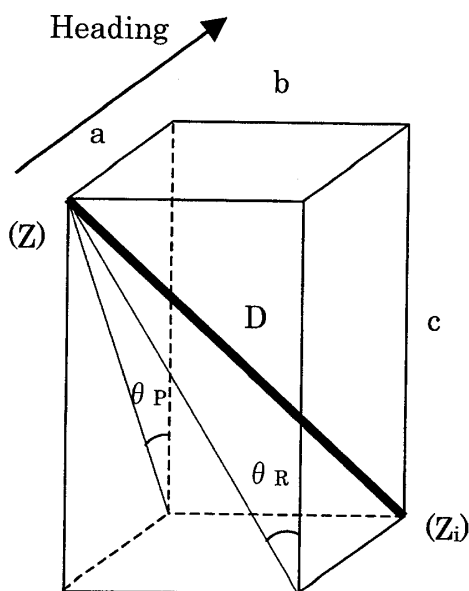


図-6(a) 傾斜補正

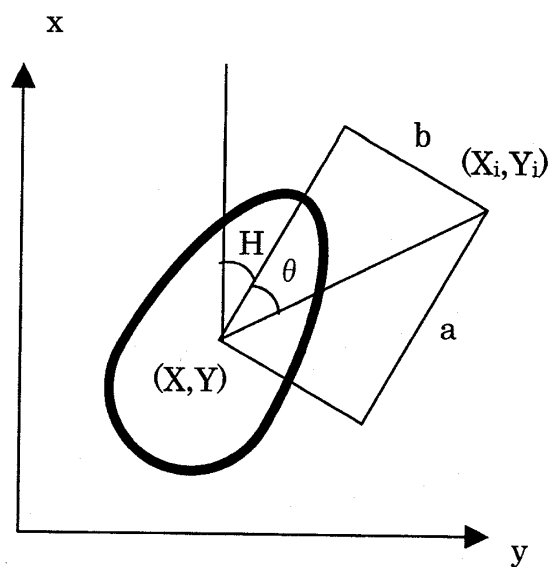


図-6(b) 平面座標補正

$$Z_i = Z + c$$

となることから、式(1)-(4)を代入して

$$X_i = X + \frac{D \sqrt{\tan^2 \theta_P + \tan^2 \theta_R}}{\sqrt{\tan^2 \theta_P + \tan^2 \theta_R + 1}} \cos \left[H + \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta_R}{\tan \theta_P} \right) \right] \quad \dots(5)$$

$$Y_i = Y + \frac{D \sqrt{\tan^2 \theta_P + \tan^2 \theta_R}}{\sqrt{\tan^2 \theta_P + \tan^2 \theta_R + 1}} \sin \left[H + \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta_R}{\tan \theta_P} \right) \right] \quad \dots(6)$$

$$Z_i = Z + \frac{D}{\sqrt{\tan^2 \theta_P + \tan^2 \theta_R + 1}} \quad \dots(7)$$

となり、 X_i , Y_i , Z_i は計測装置から出力される値である

X , Y , Z , θ_P , θ_R , H , D のみで表すことができる。

なお、音速に関しては、0.8m/sの誤差が水深10mでは約0.01mの誤差に相当するため音速を計測し、測深データを補正する必要がある。音響測深機では音速を1,500m/sとして演算していることから、音速を S (m/s)とすると、音速補正後の測深値 D' は

$$D' = \frac{S}{1500} D$$

となり、式(5)-(7)の D は D' で置き換える必要がある。

3. 実験

1) RTK-GPSの精度検証

RTK-GPSの検証は、移動時における鉛直方向の精度検証を主な目的としていることから、陸上において実験

を行っている。移動体には水上オートバイに代わりバギーを用いた。実験は公立はこだて未来大学内にある直線距離約600mのスロープで行った。同時に光波によりスロープを測量している。バギーは水上オートバイにおける測量調査時の航行速度に合わせて、4knotから5knotの速度で運転した。写真-1は実験に用いたバギーである。また、図-7は計測したスロープの断面を表している。光波による測量結果と比較して、OEM4は実地形を正確に再現している。鉛直成分の誤差は最大で0.03mであったことから、OEM4は本システムに必要とする精度を有していることが確認できた。

2) モーションセンサの精度検証

モーションセンサの精度検証は、高精度モーションセンサであるノルウェーKONGSBERG社のSeatex MRU5の出力結果と比較することで行った。MRU5は傾斜角を 0.03° の精度で検出可能なセンサであり、マルチビーム音響測深機との組み合わせによる高精度測量調査¹⁾²⁾で利用されている高精度センサである。実験は0.3m四方の板にMRU5を設置し、さらにMRU5の上にCXL02LF3を取り付けることにより、板に与えた運動が双方に一律に伝わる状態として、ピッチング、ローリングに対して行った。図-8はローリングの出力結果を比較したものである。横軸は時間軸で60秒間の連続データとなっている。なお、モーションセンサの出力には高周波のノイズが含まれていることから、デジタルフィルタによる演算処理を行っている。ここでは、船体運動の計測³⁾⁸⁾⁹⁾で効果的に機能することが確認されているFIRデジタルフィルタを設計した。デジタルフィルタはハミング窓を用いた11個のフィルタ係数からなるローパスフィルタであり、カットオフ周波数は1.34Hzとした。なお、水上オートバイの固有横揺周波数は0.58Hzである。



写真-1 RTK-GPSの精度検証に用いたバギー

実験の結果、ピッチングとローリングに関しては $\pm 10^\circ$ の範囲ではMRU5の出力とCXL02LF3の出力がほぼ一致し、 1.2° 以下の精度で傾斜角を検出することができた。水深10m、傾斜角 10° の条件では 1.2° の計測誤差は $10\text{m} \times (\cos(10.0^\circ) - \cos(11.2^\circ)) = 0.04\text{m}$ となる。目標とする0.03mの精度は上回ったものの、システム全体としての精度である0.1mに比べ十分小さいことから、CXL02LF3は本システムにおけるモーションセンサとして十分に機能することが確認できた。

3) マグネチックコンパスの精度検証

マグネチックコンパスの利用に際しては、偏角と自差の影響を考慮する必要がある。そのため、マグネチックコンパスの精度検証はカナダCSI Wireless社製のGPSコンパスであるVector Sensorの出力結果と比較することで行った。Vector Sensorは真方位を 0.5° の精度で検出可能なセンサである。

最初に、HMR3000とVector Sensorを北に向けた状態

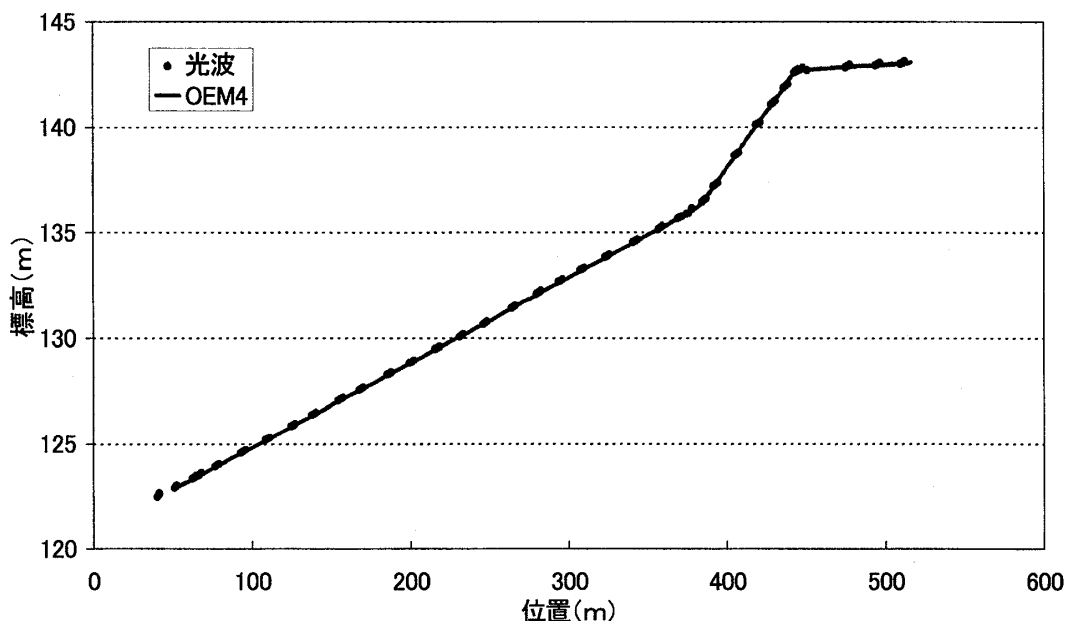


図-7 断面図によるRTK-GPSの精度検証結果

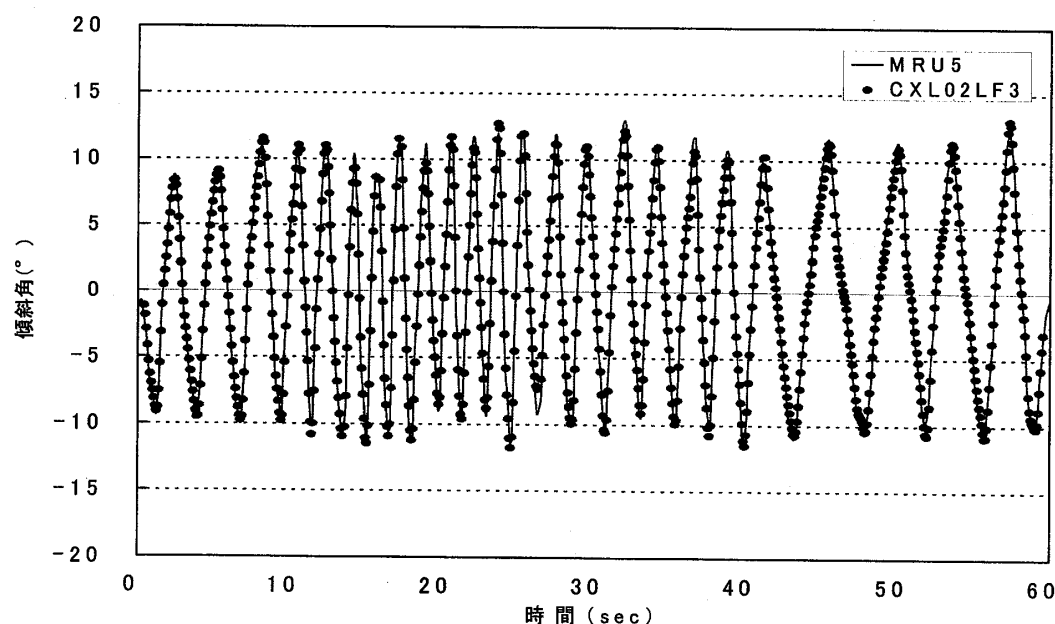


図-8 ローリングによるモーションセンサの精度検証結果

で1分間静止させ300個のデータの平均値を比較したところ、その差は 8.9° であり実験場所である函館における偏角である 8.8° とほぼ一致した。

次に、HMR3000を含む計測装置一式とVector Sensorを搭載した水上オートバイを陸上においてアルミ製トレーラーに載せた状態で実験を行った。まず、簡易型自差補正式を作成するため、東西南北の4方位に船首を向け静止させた状態でキャリブレーションを行った。マグネチックコンパスによる磁方位を M 、真方位を T とすると、簡易型自差補正式は、

$$T_{NE} = 1.033M + 19.7 \quad (0^\circ \leq M < 90^\circ)$$

$$T_{SE} = 1.050M + 17.8 \quad (90^\circ \leq M < 180^\circ)$$

$$T_{SW} = 1.020M + 23.0 \quad (180^\circ \leq M < 270^\circ)$$

$$T_{NW} = 0.996M + 31.6 \quad (270^\circ \leq M < 360^\circ)$$

となった。次に、水上オートバイをゆっくりと回転させ、Vector Sensorの値と補正後の値を比較した結果が図-9である。187個のデータにおける誤差の平均は 1.1° 、最大で 3.2° 、標準偏差は0.8であった。ここで、水深10m、傾斜角 10° の条件では、 3.2° の誤差に相当する平面方向の誤差は、 $10\text{m} \times \tan(10^\circ) \times \tan(3.2^\circ) < 0.1\text{m}$ となることから、HMR3000は本システムに用いる計測装置として十分な精度を有していると言える。

なお、ここでの簡易型自差補正式における切片の値には函館の偏角である 8.8° を含んでいるため、計測場所が異なる場合には、その場所における偏角を考慮した切片の値を用いる必要がある。

4) 水槽実験による音響測深機の精度検証

水槽実験は、平成15年5月16日に北海道大学水産学部にある全長50mの大型水理実験水槽において実施した。水槽実験は、波浪による船体運動が測深データに及ぼす

影響の確認と、音響測深機の測深精度の検証を目的としている。この水槽は一定周期の規則波を発生することが可能なものである。実験は実海域を想定して波周期2.3sec、波高0.15m、および波周期1.8sec、波高0.20mの2種類の規則波に対して、ピッチングとローリングを計測することで行った。また、測量調査時における環境を再現するためオペレータも乗船している。写真-2は実験の様子、図-10は波周期2.3sec、波高0.15mの規則波におけるピッチング運動中の測深データである。測深データは規則波に同期して変化しており、最大値は0.98m、最小値は0.85mで、その差は波高にほぼ等しい0.13mであった。また、いずれの規則波における計測においても、測深データは波周期に同期して変化しており、その振幅は波高にほぼ等しくなっている。この結果、測深データには波高の成分が含まれることから、RTK-GPSによる高さ補正の必要性が確認できた。なお、大型水理実験水槽は屋内設備であることから、ここではRTK-GPSによる補正は行っていない。

また、静止状態における測深データは、手計測による0.94mに対し、音響測深機による計測データの平均値は0.96mであった。ここで、音響測深機による計測データは1分間(300個)の連続データであり、最小値は0.94m、最大値は0.98m、標準偏差は0.009であったことから、0.02mをオフセット値として設定した。音響測深機は信号の強弱をアナログ値として計測しているのではなく、音波を送波してから受波するまでの時間差によりデジタル値として計測している。そのため、深度の違いによる計測精度の差は生じないことから、音響測深機の計測精度は $\pm 0.02\text{m}$ であり、目標とする0.03m以下であることが確認できた。

5) 計測精度の評価

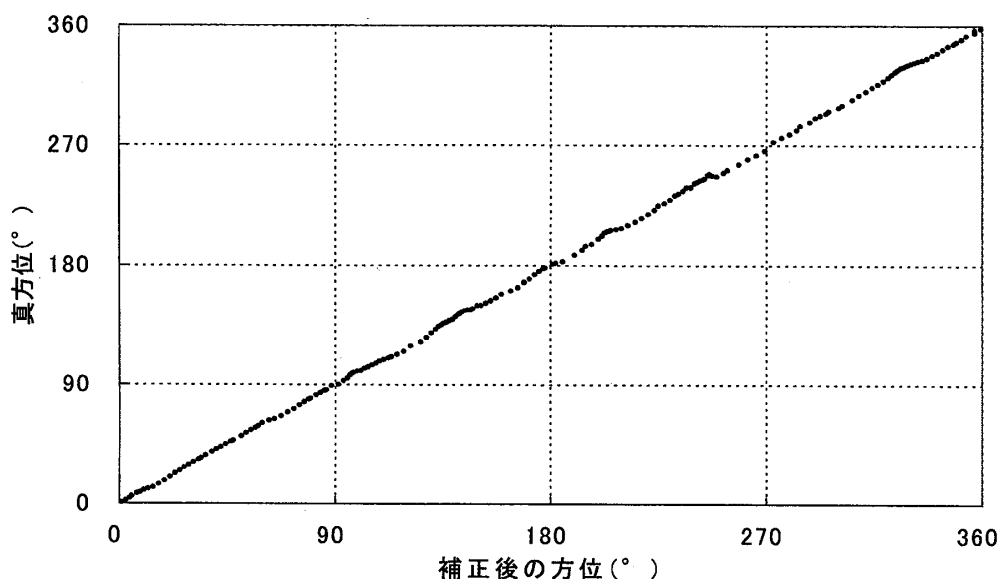


図-9 マグネチックコンパスの自差補正結果

計測精度の評価は、詳細な地形データを有するドックを計測することで行った。実験は平成15年5月28日に函館どつく株式会社の1号ドックにおいて行った。このドックは平成14年12月にレーザプロファイラLMS-Z210（オーストリアRIEGL社製）を用いて排水後に精密測量を行っている。1号ドックの幅は25mであり、全長180mのうち50m区間の詳細な地形データを所有している。

実験はドック内に2.5m間隔で、東西方向に伸びる計画測線を設定して行った。写真-3はドック実験の様子である。側壁から1m以内の計画測線では、可視衛星数の減少からRTK-GPSがFIXしない、側壁反射の影響で測深データが小さく計測されるという現象が生じた。しかしながら、水深10m、半減半角 6° 、ロール角 0° の条件ではビームの拡がり方を考慮すると側壁から1.05m以内の測深データは側壁反射の影響を受けることは予め想定していた。図-11は本システムにより作成した地形図を、図-12は図-11における点線部の断面をレーザプロファイラにより作成した地形図と比較したものである。この断面図により、実地形に対して0.05mの精度で計測できていることが確認できた。

なお、本システムによる地形図は、RTK-GPSによる三次元座標を基準に、測深データの傾斜補正処理を行って作成したものである。また、図-11における点線の南側にある東西に広がる浅帯域は階段を、点線の北側にある大きな浅帯域は船台を捉えたものである。

6) 実用性の評価

汀線域を実際に測量調査することで実用性の評価を行った。実験は平成15年5月14日に函館湾七重浜海水浴場前において実施している。ホストコンピュータ上には、海岸線に直行する21本の計画測線を設定した。測線の間隔は10mであり、測線の長さは200mである。誘導表示

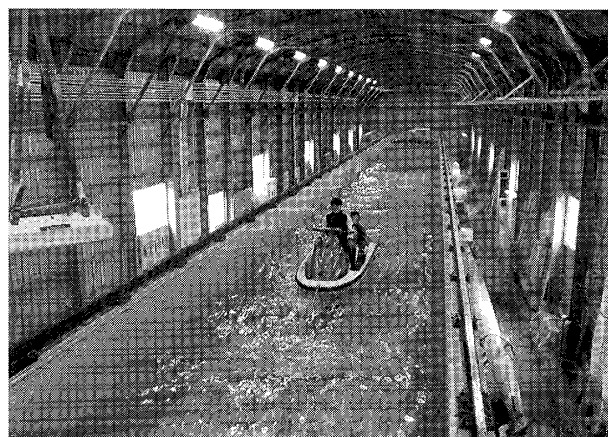


写真-2 大型水理実験水槽における規則波中の実験

器による水上オートバイの操船は初心者が半日程度で習得できるものであった。図-13は計画測線並びに水上オートバイの航跡を、図-14は計測データから作成した地形図を表している。地形図は幅40m、深さ約0.5mの海底の溝を捉えることができています。また、水上オートバイの航跡は計画測線に対して2mの範囲内に収まっていることから、操船性を含めた実用性は良好であると言える。

7) 実海域における測量調査

実海域における測量調査は、平成15年5月30日に石狩湾新港東防波堤沖にて実施した。また、平成15年6月9日に同エリアを従来手法により測量調査している。

従来手法では、船外機付き和船を用いて、千本電機社製の音響測深機であるPDR1300を機装した。PDR1300の振動子の周波数は200kHz、半減半角は 6° であり、本システムと同様の特性である。しかしながら、測深データは感熱記録紙にアナログ値として記録されるため、手作業による後処理により0.1m単位でデジタルデータに変換している。また、GPSはDGPSを用いていることから

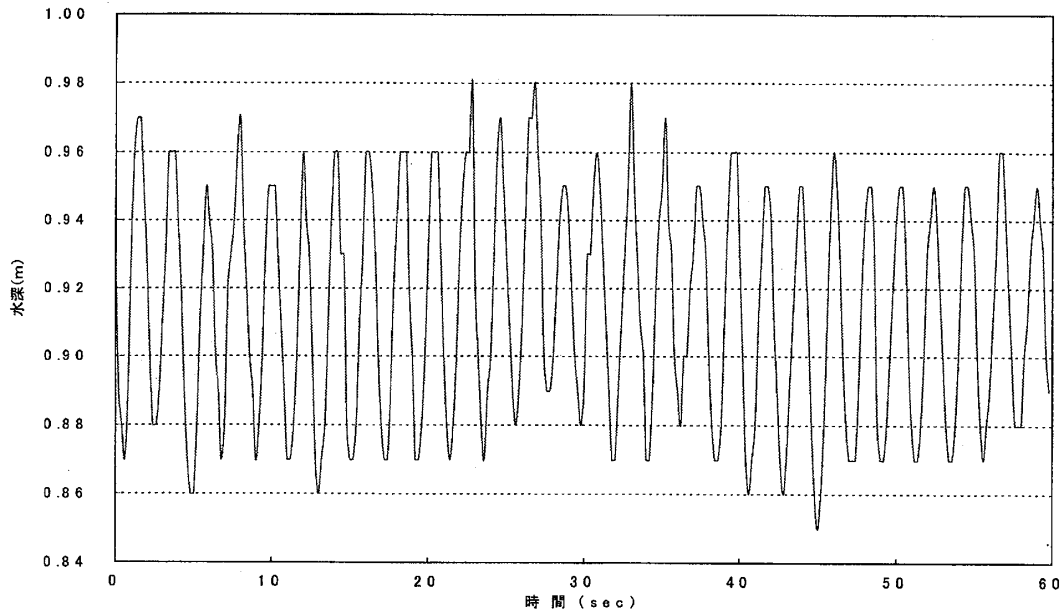


図-10 波周期2.3sec, 波高0.15mの規則波におけるピッチング運動中の測深データ

ら、測深データは潮位を基準に高さの補正を行っている。なお、傾斜補正は行っていない。

図-15(a)は本システムによる地形図を、図-15(b)は従来手法による地形図を表している。いずれの地形図もほぼ同様の地形を表現しているものの、本システムによる地形図では深部のより細かな地形までを捉えることができている。

4. 考 察

RTK-GPS, モーションセンサ並びに音響測深機の単体精度は0.02mから0.04mと、いずれも本システムに用いる計測精度として十分な結果であった。そして、システム全体としての精度は、実験の結果目標とする0.1m以下であることが確認できた。

精度の検証に際しては、傾斜角が 10° 以下であることを条件としていた。しかしながら、RTK-GPSと音響測深機の精度の和が0.05mであることから、モーションセンサによる鉛直方向の精度は0.05m以下と条件が緩和され、傾斜角に変換すると $\pm 13^\circ$ の範囲で精度を保てることになる。なお、傾斜角は平面方向の精度にも影響を及ぼす。水深10m、傾斜角 13° の条件では、ビーム中心が海底と交差する点は振動子の直下から $10\text{m} \times \tan(13^\circ) = 2.31\text{m}$ シフトする。そして、マグネチックコンパスの精度を 3.2° とすると、 $2.31\text{m} \times \tan(3.2^\circ) = 0.13\text{m}$ となり、0.1mより大きくなる。しかしながら、地形図の分解能を最大0.5mとしていることから、実際の地形図の作成に当たっては、問題のない範囲であると考えられる。なお、水上オートバイは滑走艇であることから低速時にはピッチング、ローリング共に生じ易く、 $\pm 13^\circ$ を超える傾斜となることが確認されている。そのため、0.1m以下の

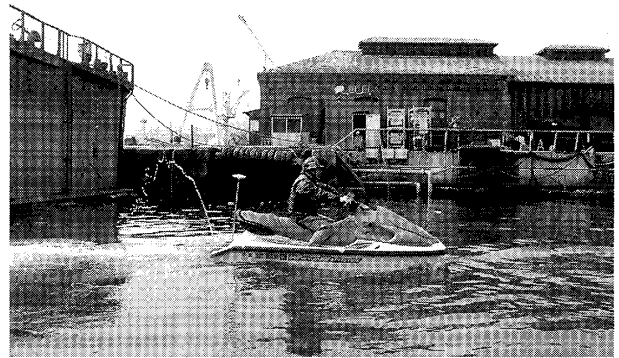


写真-3 ドック実験における測量調査

精度で地形図を作成する場合には、 $\pm 13^\circ$ 以上の傾斜時における測深データを利用しない処理が必要である。

また、ドック実験では測深データに側壁反射の影響が確認された。側壁反射への対応としては、半減半角の小さい高周波の振動子への切り替えが考えられるが、周波数が高くなることから減衰が大きくなり、音響測深機的设计を見直す必要が生じる。また、半減半角の小さい振動子を用いた場合でも側壁反射の影響は生じることから、運用面並びに計測データの処理により対応する必要があると言える。運用面に関しては、港湾や防波堤における側壁付近の測量調査に際しては、計画測線は水深によるビームの拡がりを考慮して設定することが挙げられる。そして、データ処理に関しては、水深とビームの拡がりおよび傾斜角から、計測データを処理する際に側壁反射の影響の有無を判定し、計測データを取捨選択することが必要である。

次に、測量調査における水上オートバイの航行速度に関しては、10knot以下が適切と考える。その理由とし

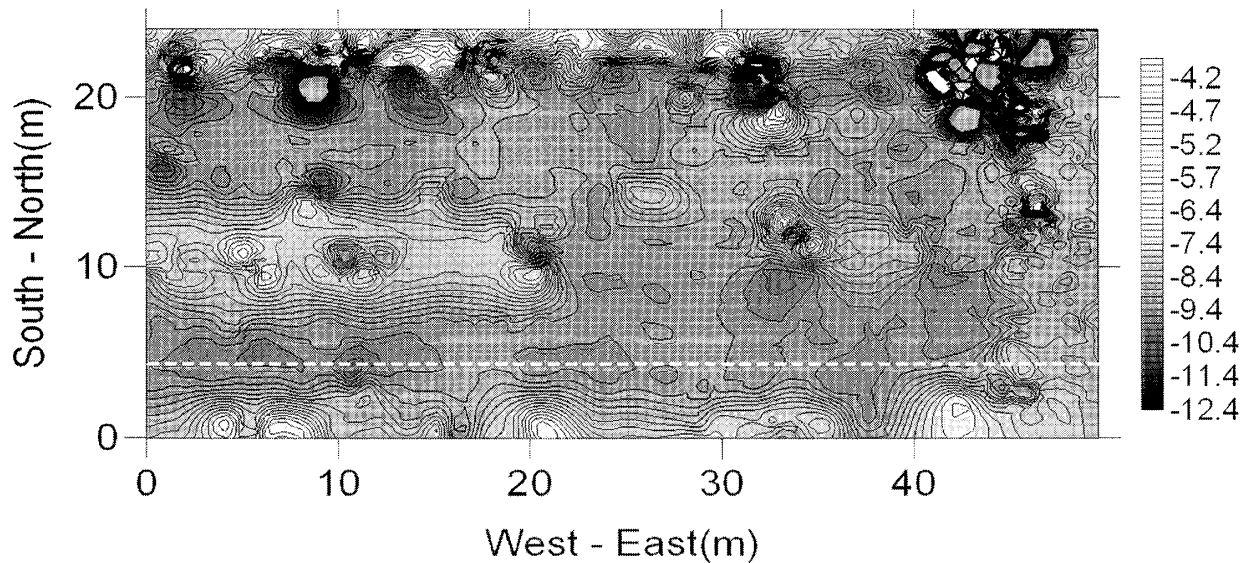


図-11 水上オートバイ測量による1号ドックの地形図

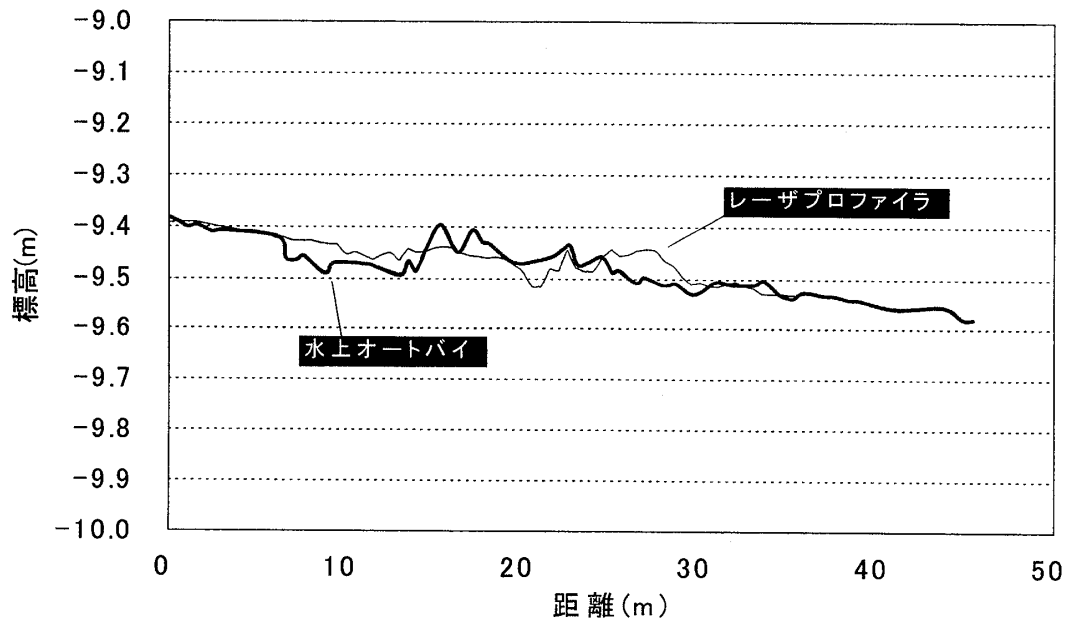


図-12 断面図による地形図の精度検証結果.

て、速度の上昇に伴う船底下での気泡の発生やエンジンノイズの増加が、測深データの欠落や精度低下の原因となることが挙げられる。また、各計測装置の出力が5Hzであることから、10knotで航行した場合には約1m間隔で測深データが得られることになり、地形図描画の面からも適切な速度である。

最後に、石狩湾新港沖における測量調査では、本システムでは作業の開始から地形図の作成までに3名の作業員により約1日を要した。一方、従来手法では艀装から地形図の作成までに同人数で約4日を要していることから、大幅な効率化が遂げられたと言える。

5. おわりに

本システムの活用により、これまでデータの不足して

いた汀線域における測量調査が迅速かつ簡便に行えることから、特に海岸線保全のための開発計画や港湾堆砂による浚渫計画の策定に有意義なデータを提供することが可能である。また、座礁や転覆による危険の心配がないことから安全性も向上する。加えて、従来のように現地にて船舶並びにオペレータを手配する必要がなく、トレーラーにて水上オートバイを搬入し、艀装作業不要で測量調査を開始できることから、作業全般に渡り省力化と効率化を図ることが可能である。本研究の成果は、汀線域における測量調査の活性化に寄与することが期待できる。

今後は、測深だけではなく海況データの取得や潮流の計測など、水上オートバイの特徴を活かした複合的な海洋調査システムとしての実用化を目標としている。

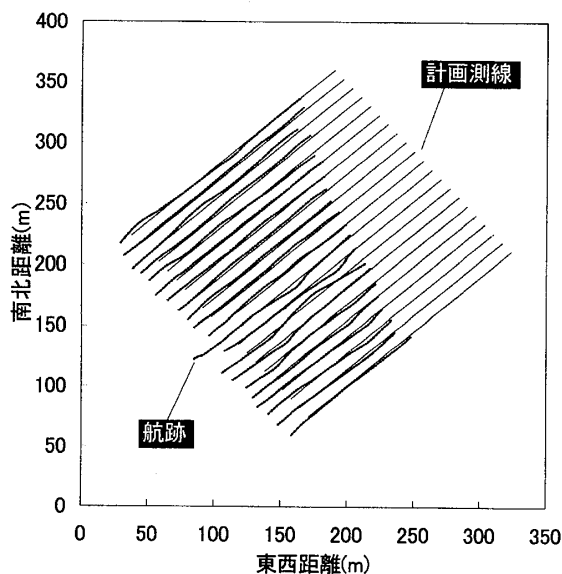


図-13 計画測線と水上オートバイの航跡

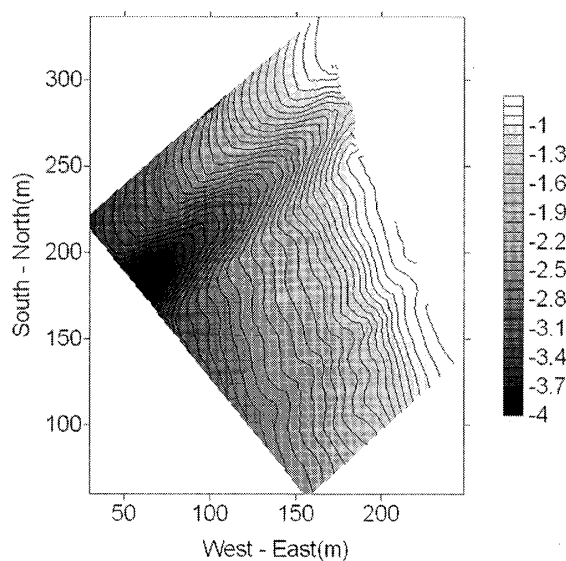


図-14 水上オートバイ測量による函館湾七重浜海水浴場前の地形図

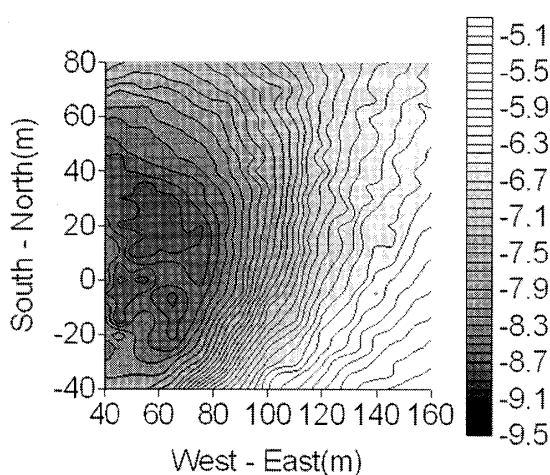


図-15(a) 水上オートバイ測量による石狩湾新港東防波堤沖の地形図

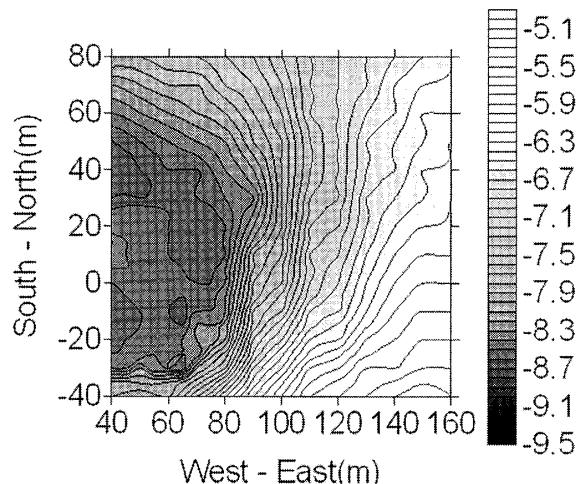


図-15(b) 従来手法測量による石狩湾新港東防波堤沖の地形図

謝 辞

実験の実施にあたり、施設の利用を快諾いただきました北海道立函館水産高校、音響測深機の開発を担当いただきました海洋電子株式会社、HOSTコンピュータのソフトウェア開発を担当いただきました有限会社キットコーポレーション、制御装置の開発を担当いただきました株式会社東和電機製作所の皆様に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 増田 稔：自律走行型測深システム「自動ベルーガ」の開発，マリンボイス21，225，pp.11-13，2002.
- 2) 増田 稔・今村一紀：湖沼等における自律航行型測深システム，建設の機械化，pp.20-25，2001.10.
- 3) 高岡俊輔・村田 航・久保雅義：船体運動測定装置の開発，弓削商船高等専門学校紀要，24，pp.9-15，2002.
- 4) 畑中勝守・上瀧 實・増田 稔・和田雅昭：ラジコンヘリ搭載型デジタルカメラを用いた測量技術の展望，産学官技術移転フォーラム講演概要集，pp.53-56，2001.
- 5) 鈴木正清・和田雅昭・烏野慶一・上田 宏：サケの母川回帰行動解明のためのサケ自動追跡ロボット船，デジタル信号処理シンポジウム講演論文集，17，CDROM，2002.
- 6) 和田雅昭：空間情報取得技術の紹介，北海道東海大学環境研究所所報，9，pp.81，2003.
- 7) 和田雅昭・秋田純一：リアルタイム計測処理のためのマルチプロセッサボード，電子情報通信学会ソサイエティ講演論文集，CDROM，2003.
- 8) 和田雅昭・三木智弘：イカ釣機の揺動補正制御，ロボティクス・メカトロニクス講演会，15，CDROM，2003.
- 9) 和田雅昭：イカ釣機の揺動補正制御，数理水産科学，1，pp.73-76，2003.