

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

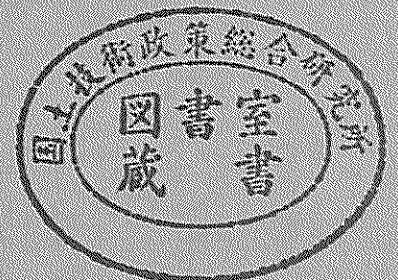
No.1014 December 2001

ナローマルチビーム測定の現況と課題

田 渕 郁 男

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. ナローマルチビーム測量の概要	4
2.1 測深の概要	4
2.2 音波の水中伝搬特性	4
2.3 音響測深機の基本	5
2.4 ナローマルチビーム測深機	5
2.5 浅海用ナローマルチビーム測深機	7
3. 水路測量のための国際基準第4版について	7
3.1 経緯と影響	7
3.2 第4版序文の内容（抜粋）	7
3.3 海上保安庁水路部の対応	10
4. 現地調査結果	10
4.1 東京都港湾局	10
4.2 関西国際空港第2期造成工事	10
5. ナローマルチビーム測量システムの選定	16
5.1 市販されている型式と仕様等	16
5.2 測位技術の変遷	18
5.3 動揺補正装置と方位センサーの変遷	19
5.4 機種選定と測量方法について	20
6. 結論	20
7. おわりに	20
謝 辞	21
参考文献	21

The Present Situation and The Subject of Narrow Multibeam Surveying

Ikuo TABUCHI*

Synopsis

In recent years, Hydrographic surveying is undergoing fundamental change in measurement technology. Especially, Narrow multibeam surveying system is developing rapidly. So, IHO(International Hydrographic Organization) standards for hydrographic surveys:4th Edition, 1998. Then the authorities concerned are required for this new standard. In a field of Port and Airport construction, Narrow multibeam surveying systems are active part for manegement in construction in the second phase project for the Kansai International Airport and the government body and port management bodies are beginning to use this systems positively in Japan. So, I have made literature investigating, hearing for persons concerned and field working for underwater measurement.

The following results were obtained by this study.

1. IHO standards for hydrographic survey :4th Edition,1988,then Harbours ,berthing areas ,and associated critical channels with minimum underkeel clearances have to be explicitly designated by the agency responsible for survey quality. It must be ensured that cubic features greater then 1m can be discerned by the sounding equipment. So, the need of Narrow multibeam surveying systems are increased.
2. In the second phase project for Kansai International Airport, the Narrow multibeam surveying systems are adopted (In the first phase,this systems are not used) after accuracy confirmation investigation were executed, especially ,the edge side accuracy confirmation investigation are examined closely. So, accuracy of beam edge side were made clear. And this systems are used on the basis of this investigation.
3. At Present, Narrow multibeam Sonars which are made practical for survey seabed,and judged we can use port and harbor surveying in Japan by trader hearing ,are made by 3makers,6kinds.
4. By trader hearing, The definition and test method of sounding accuracy are different by makers. A conscientious maker open good accuracy result as official result when there are two result by depth. The greatest subject of this system is collecting survey accuracy results rapidly.
5. The most suitable ship speed for underwater measurement at a depth of 15m is 6kt or less almost all.

Key Words: Narrow multubeam Sounder, Nautical chart survey, Sounding accuracy, SEABAT

*Head of Measurement Technology Division , Construction and Control systems Department

3-1-1 Nagase,Yokosuka,239-0826 Japan

Phone:+81-468-445063

Fax:+81-468-440575

e-mail:tabuchi@pari.go.jp

ナローマルチビーム測量の現況と課題

田 淵 郁 男*

要 旨

近年、浅海の海底地形の測量については、ナローマルチビーム測量をはじめ、測量関連技術の飛躍的な発展が見られた。このため1998年にIHO（国際水路会議）は、水路測量の国際精度基準第4版をまとめ、関係部局はこれへの対応が求められている。我が国でも港湾・空港の工事において関空の2期工事の施工管理を始め、直轄・補助工事においても、ナローマルチビーム測量が積極的に採用されつつある。本調査はこれらの状況を踏まえ、ナローマルチビーム測量の現況と課題を文献調査、関係者に対するヒアリング、測深の現地調査などにより取りまとめたものである。

調査の結果、得られた成果は以下の通りである。

- ①1998年に水路測量のための国際基準が改定され、維持浚渫航路、計画水深で整備された港湾、泊地等では、すべてのエラーソースを最小限にするため、1m³の物体を識別できるべきものであるとされナローマルチビーム測量の必要性が拡大した。
- ②関空2期では1期と異なり、ナローマルチビーム測量を採用するに当たり精度確認調査、とりわけ端部精度確認調査を精密に行い、ビーム端部の精度を明らかにし、それを元に運用している。
- ③現在海底の測量用に実用化され、我が国の港湾測量に使用可能と思われるナローマルチビーム測深機を業者ヒアリングの結果まとめた。3メーカー6型式であった。
- ④その結果、測深精度の定義・試験方法が統一されていないこと、良心的なメーカーでも水深により精度が異なる場合、良い方を公称値としていることがわかった。今後、測深精度について迅速にデータを収集することが最大の課題である。
- ⑤水深15mの最適測深船速は、6kt以下が多いことがわかった。

キーワード: ナローマルチビーム測量, 海図測量, 測深精度, SEABAT

* 施工・制御技術部計測技術研究室長
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
Tel:(0468)44-5063 Fax (0468) 44-0575 E-mail:tabuchi@pari.go.jp

1. はじめに

従来、港湾工事用の深浅測量作業は直下型の音響測深機により実施していたが、本方式は測量幅が狭く、広い海域を測量する面測量等は効率があまりよくない。この作業効率を改善するため、多素子の測深機の採用、GPSによる位置測定の導入、測量時の速度増を実施してきた。しかしながら、6素子の測深機を導入しても1度に測定できる測深幅は20m程度が限度である。

そこで、近年深浅測量の効率を向上させるため、GPS、動揺補正装置の技術レベルの向上を受けて、国際的にナローマルチビーム（従来深海の海底測深に用いられていたものの浅海用）が採用されつつある。本装置は5kt程度の速度で測量でき、しかも測量できる角度（スワス角）は最大で150°と広く、直下型測深機に比し数倍効率の向上が図れるとともに、最浅地の表示及び各種の土量計算が迅速かつ正確であり、開空2期の施工管理で採用された。また、国際的にも航路泊地の水深管理にシングルビーム測深に代えて活用される方向にあり、海上保安庁水路部においても全管区に導入されたところである。

東京都港湾局においてはナローマルチビーム測深による深浅測量システムが稼動し始めたほか、直轄においても大型のドラッグサクシオン船に数台導入され、また、監督測量船にも導入されようとしている。また、測量の外注工事にも採用された。しかし、港湾調査指針は昭和62年以降改定されず、参考となる図書も市販されていないため、本方式による測深システムの概要が一般に理解されておらず、精度確認方法等、港湾局として統一されていない状況である。また、スワス角が広がった分、誤差要因も多くなり、使用方法によっては、従来の方式に比較し精度が大幅に悪くなる。

本調査では、これらの状況を踏まえ、文献調査、関係者に対するヒアリング、測深の現地調査などにより、本システムの概要、精度確認方法等を取りまとめ、日本の港湾測量にナローマルチビームを導入しやすくし、高度な活用が展開されることを期待して取りまとめたものである。

2. ナローマルチビーム測量の概要

2.1 測深の概要

測深とは、海の深さを測ることで、測深機の真下の海底起伏のプロファイルを得るものである。前述の音波による測深は、放射した音波が目標から反射してくるのを受信し、その往復時間を測り、伝搬速度を乗じて距

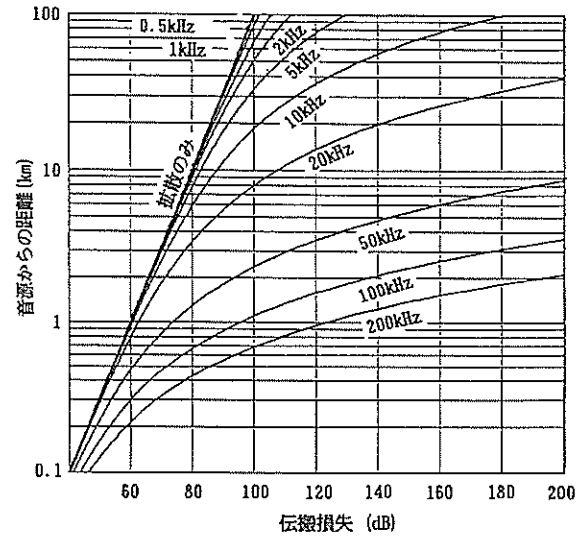


図-1 音波の距離対強度曲線（古沢昌彦，1996）

離を求める。波動（音波）の伝搬特性である定速・直進を基本とすることは、電波測位と同様であるが、直進させるには、高周波数が望ましく、音波エネルギーを集中する効果もある。したがって、測深目的からは超音波（16kHz以上）領域を使用する。しかも、音波の伝搬減衰量は図-1のとおりであり、光や電波より少ないから、音波は海中の情報伝送分野では唯一の媒体である。しかし、下記のようないくつかの短所がある。

- 音波の海中伝搬速度は1,500m/secと光波と比べ極めて遅いので、測定に時間がかかる。
- 海洋の自然雑音（波浪、生物、降雨など）と人工雑音（船内雑音、航行による送受波器付近の雑音と気泡）の影響を受ける。
- 温度変化・海水の密度変化および障害物によって、反射・屈折が起こり、測定精度の低下がある。

なお、航路・泊地の水深管理などに用いるナローマルチビームでは超音波（100kHz以上）が使用される。

2.2 音波の水中伝搬特性

音波の水中伝搬特性として考慮すべきは、i) 伝搬減衰と、ii) 伝搬速度 v の変化である。ことに速度が変化すれば、音波の進路は屈折して目標を探知できなくなることも多い。波動は周波数が高いほど減衰が大きい。また、波浪の屈折などを勘案すると、150m以浅の海底の起伏を正確に測ることが重要である。そのためには、音波の直進性を高め、しかも放射ビーム幅を狭くする必要があるから、高周波数を用いるほうが都合がよい。また、音波の伝搬速度は、図-2に示すとおり主として水温・塩分・水深により変化し、これらが増加するとともに音速は速くな

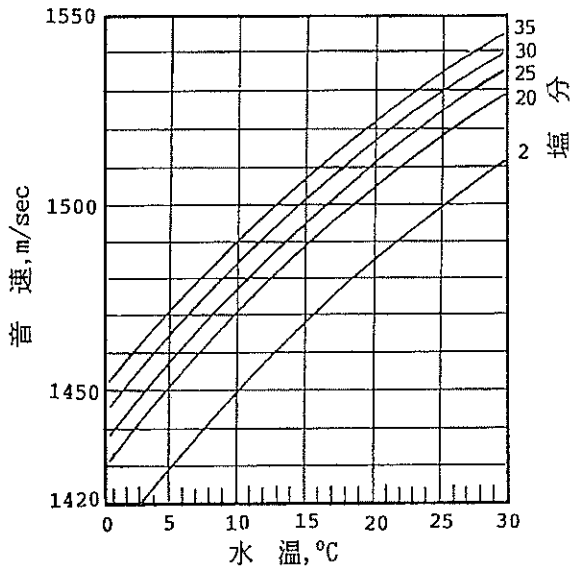


図-2 海中の音波伝搬速度、周波数と物理特性

る。Urlick によるとそれぞれの変化係数は大略次のようである。

温度	2.7m/sec [°] C
塩分	1.2m/sec/psu
圧力	0.017m/sec/m

図-3 において、音速とそれぞれのパラメーターとの関係を要約する。海の表面近くでは水温が最も変化しやすいから、音速傾度も主として水温の鉛直分布で決まる。

河川港における塩分の急変が極端に大きい場合のみ、水温による効果に多少影響が及ぶ程度である。

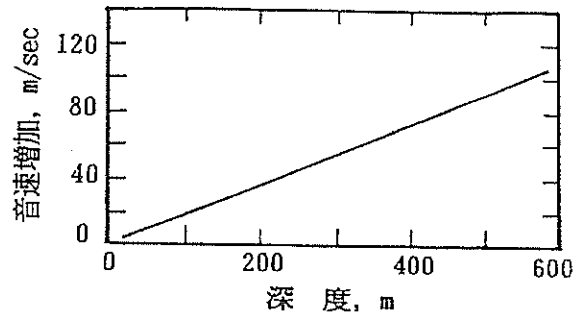
水温の急変は沖合いにおける寒暖流の遭遇海面（潮目）、または内湾などでは河川の流入水と海水との境で見られる。

なお、海洋中の中層以下では、水温・塩分の変化は緩やかである。しかし、水圧が増加してくるので、ここでは水圧が音速変化を決める有力なパラメーターになる。

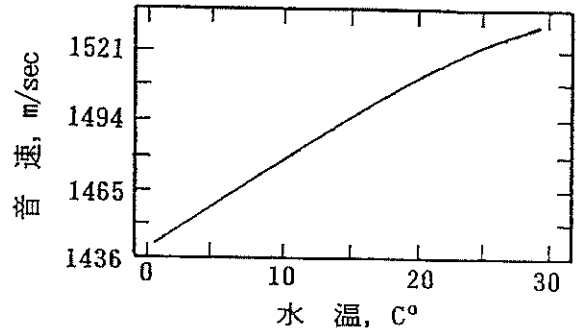
2.3 音響測深機の基本

音響測深機 (echo sounder) の測深原理は、既述のように船と海底間の距離を、音波の伝搬時間に変えて測ることである。時間計測の基準は時計であったが、最近では電子発信機のパルスを使う。また、海図作成の基本として、十分な精度を確保できる機能を備えた測量用測深機には次の要件が求められる。

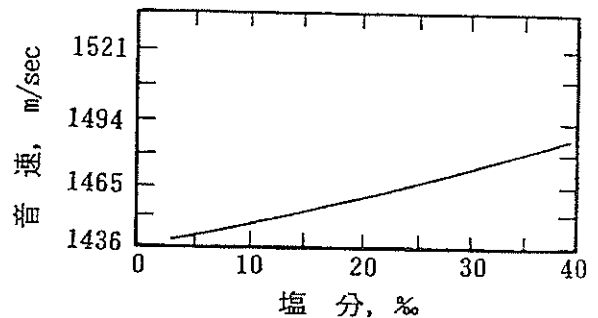
- a) 深度分解能に優れた：高い周波数で、パルス幅の狭いこと
- b) ビーム幅を狭くする：高い周波数と広い振動子となり、浅海測深のみに適応できる。



(a) 深度変化、水温 10°C、塩分 35



(b) 水温効果、大気圧、塩分 35



(c) 塩分効果、大気圧、水温 10°C

図-3 水中音速と関連パラメータ

- c) システム全体を制御する安定した時間軸：例えば水晶発信機
- d) 正確な音速：その都度、測定するか、または現場の海洋データからの算出による。

2.4 ナローマルチビーム測深機

測深精度を向上させるには、ビームを細くするのが一般的発想である。ビームの形状は振動子の形から決まるが、浅海で船の動揺によりビームが目標から外れることを考慮すれば、むしろ広いビームで目標を捕まえておくほうが好ましい。それには、レーダのアンテナと同一原理で、棒状の振動子を用い、扇状のビーム (fan beam) を作ればよい。そこでクロス・ファンビーム方式が考案された。

まず、船縦方向に長い送波器列を設置して図-4 (a) のように、船横方向に広いファンビームを作る。受波ではこの配置を 90° 変えて、受波器アレーを船横方向に置き、キール方向のビームを作る。これらの両ビームをそれぞれ送波と受波に用いて両者の交わった面 (クロス) 図-4 (b) をクロス・ファンビームと呼ぶが、非常に狭いので、受信では一種のペンシルビームとして使える。従って、船の動揺 (主として横揺れ) には送波ファンビームの広いほうが対応するので目標を逃さない。しかし、実際に使うのは、両ビームのほんの一部、すなわちクロスした面積である。だが、受波ビームを図-5 のように左右に振って、計 16 本の受波ビームで送波ビームの照射範囲を走査すれば、探査面積を拡大できる。こうした走査方式は、当初機構式であったが、現代の電子式では受波器アレーの各

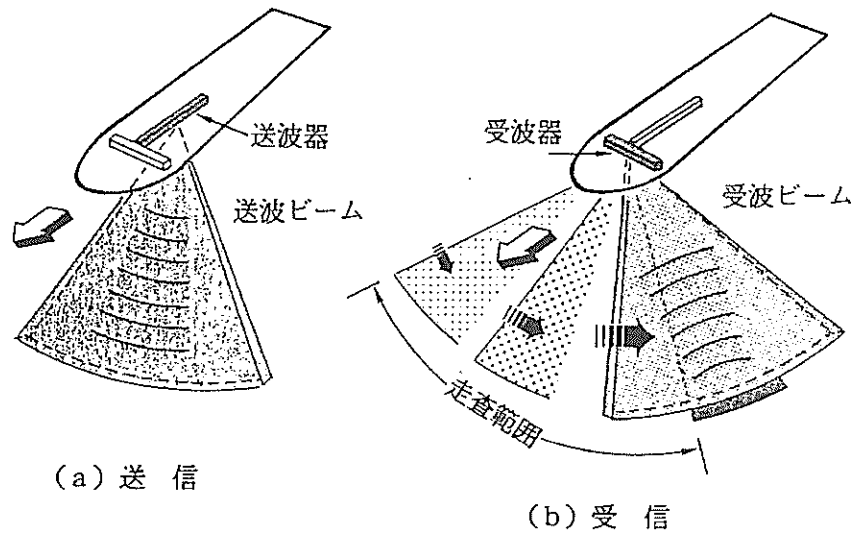


図-4 クロス・ファン・ビームの送受信モード

素子からの信号の位相を制御してビームを形成する、フェーズド・アレー回路で行っている。さらに、送波ビームの方向を制御する、すなわち機械的に振動子の向きを振らなくても、同じように電子制御して送信ビームを走査できる。この技術は電算機の性能向上と、価格の低減が加わり開発

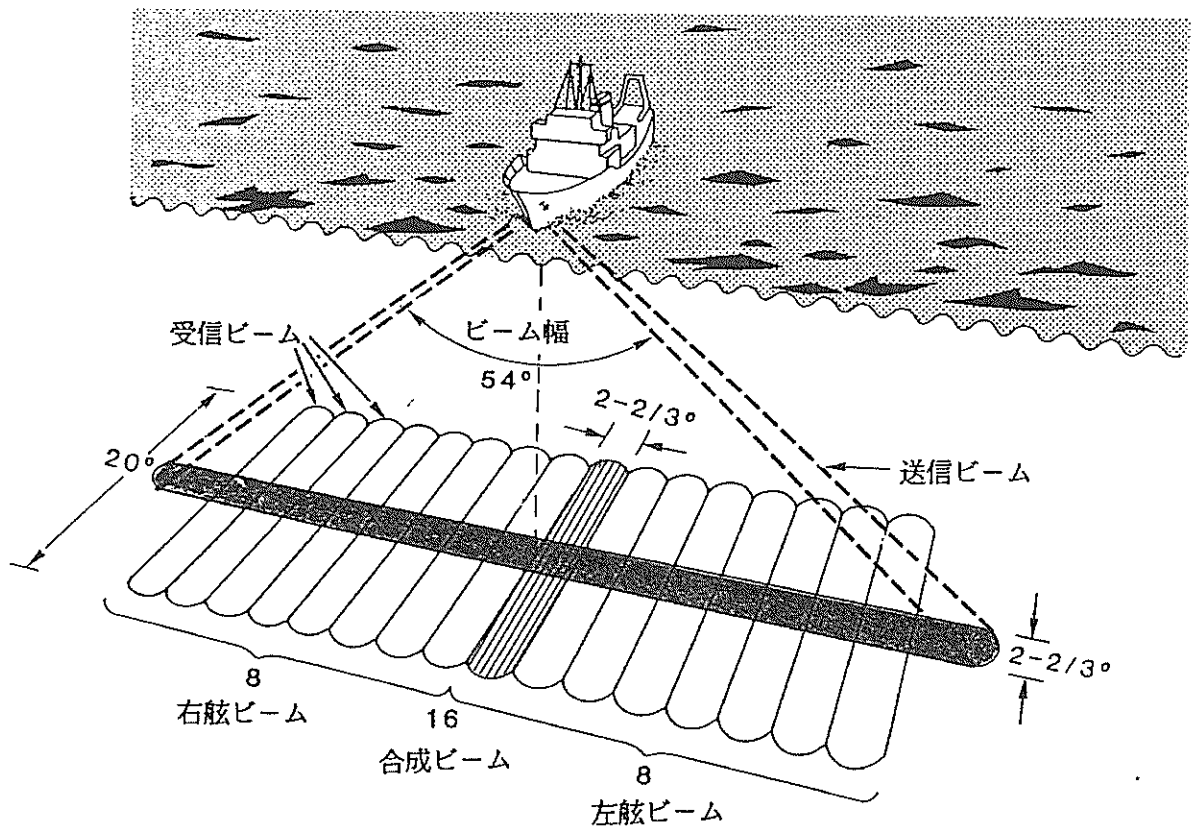


図-5 クロス・ファン・ビームの送受波合成モード

できた。

2.5 浅海用ナローマルチビーム測深機

浅海の場合、ビーム幅の占有距離は狭くなるから、描画能力も向上するので、相当に精密な画像を期待できる。画質は水中 TV に劣るものの、監視範囲の広さおよび、水中透明度が低下した海域での対応性では、本測深機のほうが優れている。

こうした機種の一例が図-6であり、送受波器（水中ヘッド）は一体となっているが、図のように非常に小さく水中重量 5kg であるから取り扱いやすい。ヘッドは船底固定型、あるいは本図のように舷側からの保持棒の先端に装備する吊り下げ型である。振動子は海底を向いている。円筒型が送波器で、小判型の湾曲部が受波器である。455 kHz を送波するからビーム幅は $90^\circ \times 1.5^\circ$ となり、これを受波ビームの 60 本、 1.5° 幅で走査する。従って、1 セグメントは $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ になり、分解能は著しく高まる。なお、この装置は写真のように送受波器が小さいので、ROV に装着できるので透明度の悪い水中においてパイプラインの精密検査などに使用されている。

3. 水路測量のための国際基準第 4 版について

3.1 経緯と影響

1962 年の第 8 回国際水路会議において国際的な水路測量のための作業規定の設定に関する問題が取り上げられ、加盟国のうち、ブラジル、フィンランド、スウェーデン、米国および日本の代表によって構成された作業部会を設置して、その精度基準を作成することについての決議が行われた。この作業部会は国際水路局の要請によって、それまでの国際的基準を取りまとめるために行ってきた原案の作成や加盟国への意見の調整等の活動を行い、1968 年に水路測量の国際精度基準第一版が作成された。以降、水路測量の国際精度基準の改定が幾度か行われ、1998 年に第 4 版の基準が定められた。その結果測深技術の進歩を踏まえ、維持浚渫航路、計画水深で整備された港湾、泊地等ではすべてのエラーソースを最小限にするため、 1 m^3 の物体を識別できるものであるとされ、ナローマルチビーム測量の必要性が拡大した。

3.2 第 4 版序文の内容（抜粋）

水路測量は、測定技術の急激な変化を遂げつつある。マルチビーム測深、航空レーザー測深では、線プロファイルデータで収集されたものとは比較にならないほど面的に広域な測深が実施できるようになっている。正確に

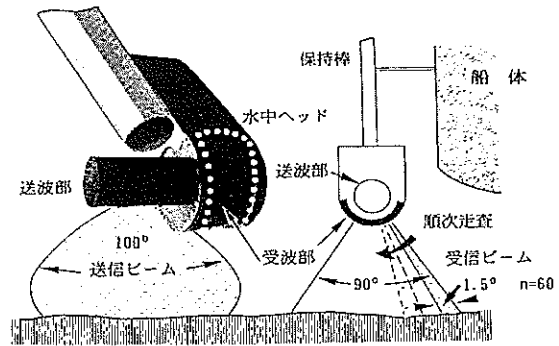


図-6 ナローマルチビーム測深機の一例

水平位置を測深する技術も、GPS 測位システム、ことにデファレンシャル技術により飛躍的に向上している。

このような技術の進歩は、いまや航海者（利用者）が海図のベースとなっているデータの精度より高い精度で船位を決定できるようになったという点において特に重要である。水路測量計画機関にとっては、特別、第 1 級測深の規制で実施されるこれからの測量において、利用者の要求精度より高いか、同等の位置精度を得られる GPS 測位装置を使用するよう求められている。

これまでの測量基準で要求された位置精度は、所定の縮尺における製図者の技能の実用上の限界にかなりの程度基づいていた。自動データ管理では、任意の縮尺で示される。従って、位置精度の限界の規定は、測位システムおよびそのデータの使用に起因する誤差の関数でなくてはならない。測深機の技術基準は作業部会によって次のように評価されている。

a) シングルビーム測深機は浅海では $1/10\text{m}$ の精度に達しており、底質をも判別する性能を有している。機器メーカーは周波数の異なる多種多機能の測深機を供給しており、それらは測量技術者のニーズを満たすことが可能である。

b) サイドスキャンソナー技術も海底障害物の検出や判別が可能な高水準に発達している。現在は 5~6 ノットの低速力での測定に限られているが、設定した側線間の海底障害物の検出を監視しながら、測深機との共用により、港湾・航路測量に広く利用されている。

c) マルチビーム測深技術は、急速に発達しており、適切な手法で使用されるなら精度や面的測深の発展に大きな可能性を秘めている。一般に水深モデル（メッシュデータ処理）において測深データ密度が高ければ高いほど水深精度が向上する。

d) 航空レーザー技術測深は、浅海で透明度の高い水深 50m 程度までの海域において驚異的な測深効率を発揮する新技術である。

ほとんどの水路測量において、海底地形を調査するには、単素子音響測深機が今後も引き続き使用されることになる。上述したような海底を全域に渡って音波で探査する方法は重要な水域でのみ使用されることになる。このような想定は、測量縮尺によって、測深間隔が定められることがそう長くは続かないとしても、これまでの測深間隔の概念を変えにくい状況にあるからである。

それでもやはり、海底の音波探査を正しく行うためには、次の2つの方法のいずれかを実施するように勧告されている。

- a) 測量階級に対応した最大測深線間隔
- b) 未測深幅があるために予想される補間エラーの度合いを評価する収録データの統計分(Called bathymetric model accuracy)

今回の改訂版では、水深精度の規定を航海安全に与える影響の大きさに応じて、水域ごとに別々に定めており、この点において、旧版と異なっている。最も厳しい規定の場合、旧版で定められた規定より高い精度が求められているが、航海に及ぼす影響の少ない水域については規定を緩和している。また、測量技術者は全ての新しいデータについて、確立誤差の統計評価を示すように努力するむねの要求が加えられている。さらに、当該基準を満たすために使用される測量機器や測量手法は、測量品質を担当する機関に任されている。

測量の分類 (区分)

測量される海域に対し異なった精度要求を統計手法の中に適用するため、測量対象を4段階に分けてある。これらの基準は全体を包括して表-1に要約してある。また、測深精度基準は図-7に示すとおりである。なお、第2級と第3級は本図上では重なっている。

a) 特別級測深

船舶が最小喫水制限で航行しなければならない海域や底質が船舶にとって危険とみなされる海域で、責任機関が測量品質に関して、明確な責任をもてるように指定した海域のみに適用する。例としては、維持浚渫航路、計画水深で整備された港湾、泊地および詳細な海底表層地質構造調査を必要とする海域である。全てのエラーソースは最小限にすべきである。特別級測深には、100%未測深をなくすためにサイドスキャンソナー、多素子音響測深機または、マルチビーム測深機に密接に関連した測深線間隔の設定を要求される。これらに使用される測深機は1m³の物体を識別できるものであるべきである。

b) 第1級測深

第1級水路測量は、港湾、アプローチ航路、沿岸や内海航路である程度可航水深が確保できる海域、または、海底地形特性が特に航行障害にならない海域を対象としている。例としては、海底が軟泥質や砂の海域。第1級測深は100m以浅の海域に限定されるべきである。

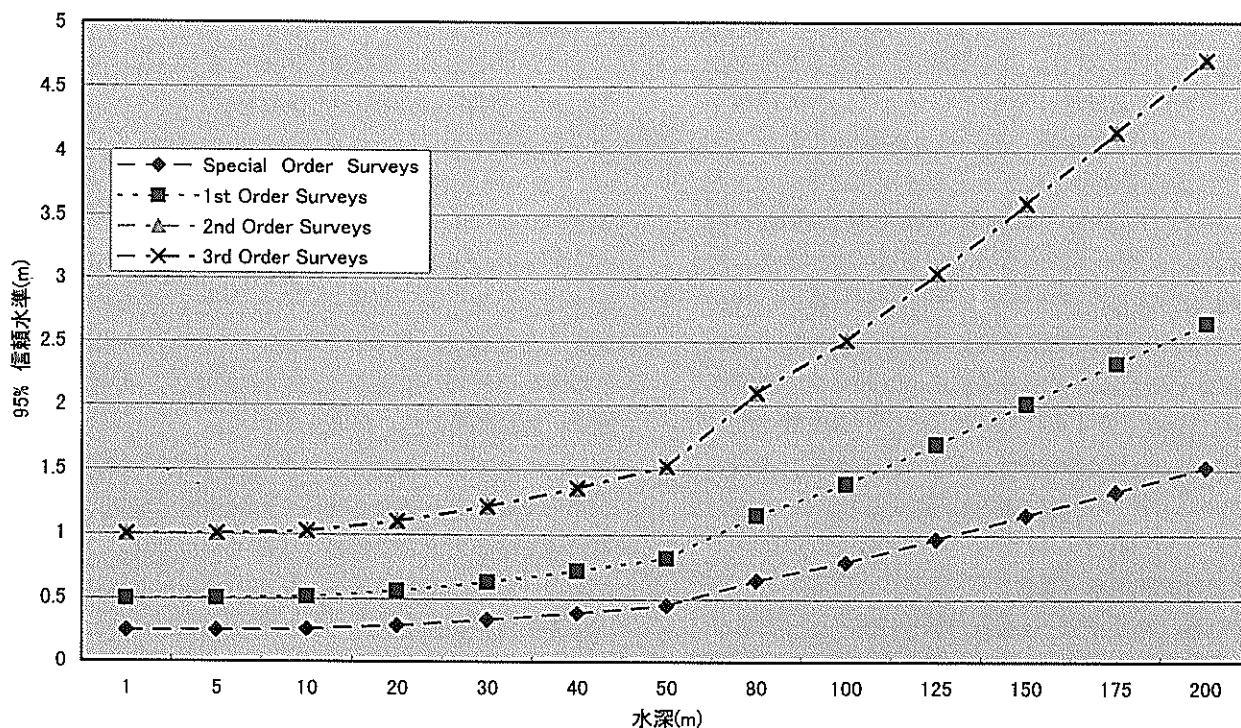


図-7 IHO 水路測量測深精度基準

表-1

Summary of Minimum Standards for Hydrographic Surveys

ORDER	Special	1	2	3
Examples of Typical Areas	Harbours, berthing areas, and associated critical channels with minimum underkeel clearances	Harbours, harbour approach channels, recommended tracks and some coastal areas with depths up to 100 m	Areas not described in Special Order and Order 1, or areas up to 200 m water depth	Offshore areas not described in Special Order, and Orders 1 and 2
Horizontal Accuracy (95% Confidence Level)	2 m	5 m + 5% of depth	20 m + 5% of depth	150 m + 5% of depth
Depth Accuracy for Reduced Depths (95% Confidence Level) (1)	a = 0.25 m b = 0.0075	a = 0.5 m b = 0.013	a = 1.0 m b = 0.023	Same as Order 2
100% Bottom Search	Compulsory (2)	Required in selected areas (2)	May be required in selected areas	Not applicable
System Detection Capability	Cubic features > 1 m	Cubic features > 2 m in depths up to 40 m; 10% of depth beyond 40 m (3)	Same as Order 1	Not applicable
Maximum Line Spacing (4)	Not applicable, as 100% search compulsory	3 x average depth or 25 m, whichever is greater	3-4 x average depth or 200 m, whichever is greater	4 x average depth

(1) To calculate the error limits for depth accuracy the corresponding values of a and b listed in Table 1 have to be introduced into the formula

$$\pm \sqrt{[a^2 + (b \cdot d)^2]}$$

with

- a constant depth error, i.e. the sum of all constant errors
- b*d depth dependent error, i.e. the sum of all depth dependent errors
- b factor of depth dependent error
- d depth

(2) For safety of navigation purposes, the use of an accurately specified mechanical sweep to guarantee a minimum safe clearance depth throughout an area may be considered sufficient for Special Order and Order 1 surveys.

(3) The value of 40 m has been chosen considering the maximum expected draught of vessels.

(4) The line spacing can be expanded if procedures for ensuring an adequate sounding density are used (see 3.4.2)

海底の測深密度は特別級測深よりも厳しくないものの底質が船舶に障害を及ぼす恐れのある海域では 100%の範囲にわたる測深が要求される。これらに使用される測深機は 2m³の物体を識別できるものであるべきである。

c) 第2級測深

特別、第1級測深の対象海域を除く 200m 以浅の海域で、当該水域を航行する船舶の危険になるような海底に航路障害物のないことが一般的に海底地形状況から検証できる海域を対象とする。

d) 第3級測深

200m 以浅の海域で、第1、第2、第3級測深対象外の海域を対象とする。

3.3 海上保安庁水路部の対応

前記の基準改訂に対し、海上保安庁はナローマルチビーム音響測深機を用いて水深測量を行うために解決すべき多様な問題に対し、さまざまな検討を行い、水深を採用するための具体的な測量方法やデータ処理方法の確立を図ってきている。

その概要が、浅田(1998)と森(2000)に発行された水路部技報にまとめられているが、当港湾局では保有しないナローマルチビームによる水路測量のための技術であり、当局に特段の依頼をし、海上保安庁水路部のホームページに該当2編をPDFファイルで掲載していただいているので、ダウンロードして一読されたい。

前者は本測量が、測量船に乗せて行われるため船のロール、ピッチ、ヨーなどの動揺、GPS、コンパスなどのセンサーの時間遅れによる測深誤差を最小にするための研究報告である。

また、後者は水路測量として水深を採用するための測深方法やデータ処理方法を確立するため、港湾測量や補正測量を始め魚礁等の海底障害物調査などを積極的にを行い、測深方法やデータ処理方法をほぼ確立したとする研究報告である。

いずれもナローマルチビーム測量を正確に行うために、同測量の担当者、責任者としては熟読して、正確に理解することが肝要と思われるのでまずはご一読願いたい。

この後、GPS、動揺制御装置の精度の向上なども踏まえ、平成11年7月海図補正測量にナローマルチビーム測深機が使えるべく、通達の変更が行われ、事業者は申請し、審査をパスすれば、使える時代となった。しかし、先ほどの両論文や後述するように、正確な測深には、経験を要する測量法なのである。

4. 現地調査結果

4.1 東京都港湾局

東京都港湾局のナローマルチビームシステムを用いた新しい深浅測量システムについては、東京都東京港建設事務所の報告(2001)に詳述されているので、5月31日に調査した結果を紹介する。

a) 測定精度等を勘案して、スワス角 150° を 140° に押さえて測深している。

b) 幅員の広いレインボーブリッジの下では、GPSが働かなくなり、既知となった位置を結ぶ形で補完されている。

c) 測深機は、レポートに図示されているように舷側にするのではなく、船体に写真-1に示すとおりソナーを通す精密な穴を作り、ソナーの動揺を最小限にしている。

d) 測深担当者が3年間で異動することから、マニュアルさえ見れば操作できるほどのマニュアルを整備かつバージョンアップを継続し、さらに、ハード及びソフトのメーカーから毎年講師を招いて講習会を開く予算を確保し実行している。



写真-1 改造して作ったソナーを通す穴

4.2 関西国際空港第2期造成工事

本工事は第1期を上回る大水深での急速施工工事であり、測深においても1期のシングルビーム(単素子)測深に変わりナローマルチビーム測深が採用された。その成果等については、(増田, 2000年; 折橋, 2000年; 岸本, 2001年; 吉野, 2001年; 草野, 2001年)らが、多数報告しているところである。当工事ではナローマル

チは、施工業者の施工管理に、深浅測量データを用いた層厚管理システムの開発など幅広く活用されており、筆者が平成13年7月24から25日に行った現地ヒアリング及び現地調査をもとに、ナローマルチビーム測量の精度に関連する部分を紹介する。なお、護岸の出来高管理は沈下板と単素子のビームで行っている。

(1) 精度確認調査

第2期の護岸工事は、6工区にわかれて実施されたが、各工区の深浅測量システムが表2に示すとおり違いがあること、測量船の形状、重量も様々であることなどから、その違いによる深浅値のばらつきの程度をあらかじめ把握するため行った調査である。

図-8のとおり誤差の出やすい空港島の法部を用いて平成11年6月行なわれた。

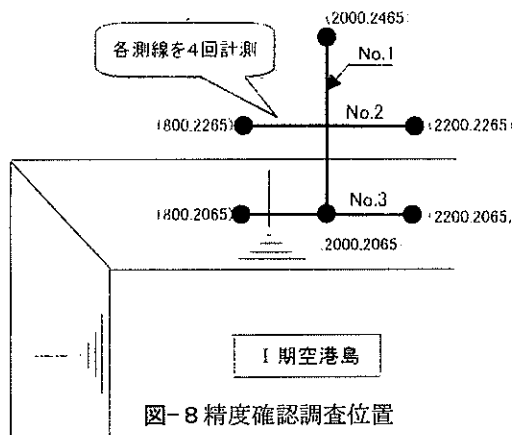


図-8 精度確認調査位置

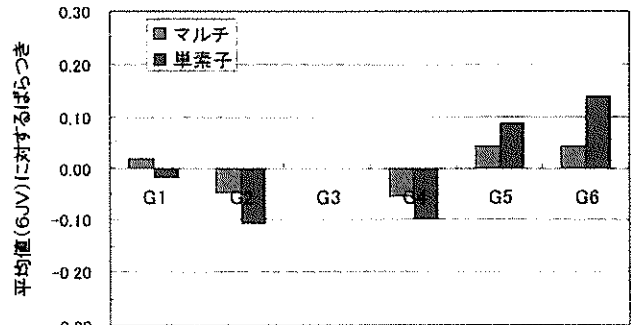
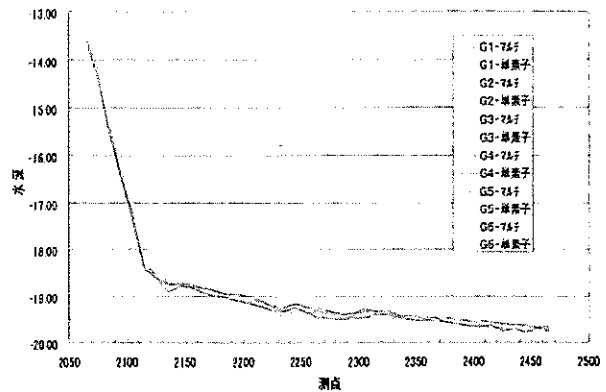


図-9 測線1の精度確認調査結果

表-2に示すとおり、単素子ではピッチング、ローリングに対する動揺補正機能がない。ここでは、単素子とナローマルチでばらつきが一番大きかった測線1の結果のみ示したが、平均値に対するばらつきは、ナローマルチでは5cm以内であり、単素子では10cm程度が多いことがわかる。この結果からはナローマルチの方が精度が良いといえる。なお、測量時の船速は3~4,4~5ノットが2隻ずつ、4ノット以下、4~6ノットが1隻ずつであった。

表-2 各工区の深浅測量システム

		G1工区	G2工区	G3工区	G4工区	G5工区	G6工区	
測位装置	機種名	トリプル 7400MSi	トリプル 4000SSi	トリプル MS-750	トリプル 4000SSE	トリプル 4000SSi	Ashtech Z-Sensor	
データ伝送		携帯電話	MO	携帯電話	携帯電話	MO	携帯電話	
単素子	測深機	機種名	千本電気機 130型	千本電気機 130型	千本電気機 130型	千本電気機 130型	千本電気機 1200型	
		周波数	200 kHz	200 kHz	200 kHz	200 kHz	200 kHz	
		指向角	6°	6°	6°	6°	6°	
	解析ソフト		自社開発ソフト	ハイバック	ハイバック	ハイバック	ハイバック	ペルーガシステム
	動揺補正	ピッチング	×	×	×	×	×	×
ローリング		×	×	×	×	×	×	
ヒービング		○	○	○	○	○	○	
マルチ	測深機	機種名	シーバット 9001S型	シーバット 9001S型	シーバット 8101S型	シーバット 9001S型	シーバット 9001S型	シーバット 9001S型
		周波数	455 kHz	455 kHz	240 kHz	455 kHz	455 kHz	455 kHz
		指向角	90° (=1.5×60本)	90° (=1.5×60本)	150° (=1.5×100本)	90° (=1.5×60本)	90° (=1.5×60本)	90° (=1.5×60本)
	解析ソフト		ハイバック	ハイバック	ハイバック	ハイバック(測位) R6042(測深)	ハイバック(測位) R6042(測深)	ペルーガシステム
	動揺補正	ピッチング	○	○	○	○	○	○
ローリング		○	○	○	○	○	○	
ヒービング		○	○	○	○	○	○	

(2) ナローマルチの端部精度確認調査

a) 本調査の目的

当工事の施工管理測量では、従来の単素子に加え面的に地盤性状を把握することを目的としてナローマルチ方式を活用することとしている。そのためには、ナローマルチビームの測深精度をよく把握し、各施工管理測量の目的に応じた使用方法を行う必要がある。

しかし、ビーム端部はビーム幅が直下に比べ長く、船の動揺による測深精度への影響が大きいと考えられる。また、地盤の凹凸・斜面が測深精度にどの程度影響を及ぼすか確認する必要がある。以上の観点から1期空港島の盛り砂地盤を利用しビーム直下及び端部の精度確認を行うものである。

b) 本調査の位置・条件

盛り砂法部位置・中央の水深・コンター：(図-10)

実施日：平成11年10月18日(月) 8:00~15:00

海象条件：H1/3 = 40~50 cm

風速：約3~8 m/s

c) 調査方法

ビームを図-11のように4つのエリアに区分してそれぞれのエリアの測深精度を求める。手順を図-12に示す。

始めに、エリア①に対し、比較的精度の良い直下ビーム24本(法面に直角方向9本, 平行方向15本)を使用して、測量したものを真値とする。(手順1)

次に真値を求めた範囲をビーム60本を使用して、法面に直角と平行に測深し真値と比較する。(手順2)

なお、真値と単素子との比較も行う。(手順3)

d) 調査結果

真値との誤差を5 cmごとの範囲に区分し、それぞれのデータを集計した。その中で誤差範囲±10 cm及び±20 cm以内のデータ数を集計し、全データに対する割合を求めた。法面に直角及び平行ともに誤差範囲±20 cm以内の比率は98%以上と高い比率になっているのに対して、誤差範囲±10 cm以内の比率は最も低い値で70%、平均値でも85%弱と低い値になっている。

ビームエリア区分

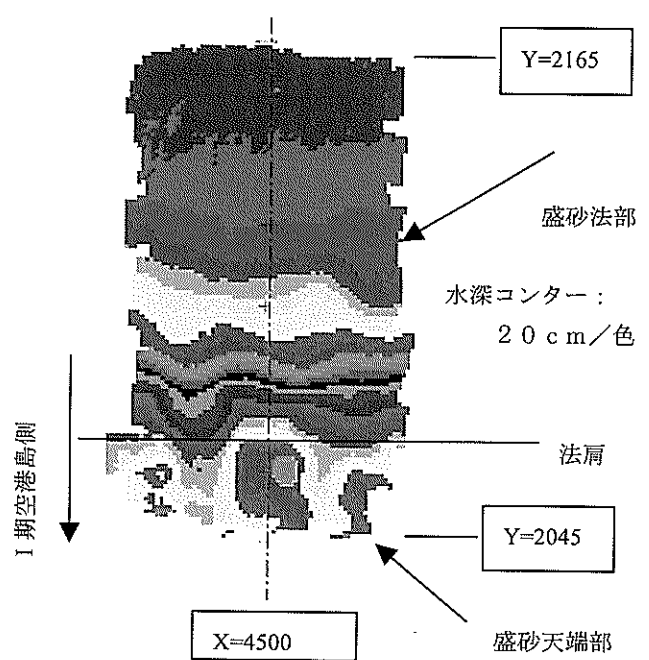
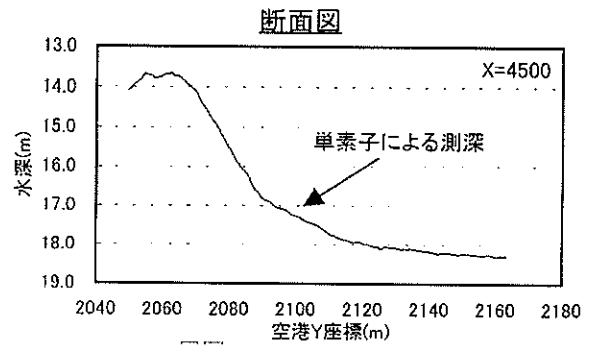
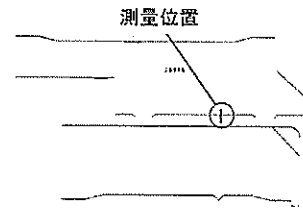
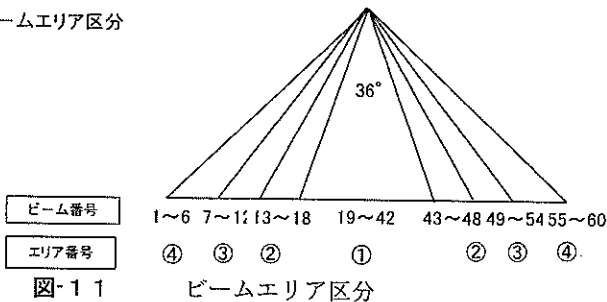


図-10 端部精度確認調査の位置、中央の水深、水深コンター

0 cm以内の比率は98%以上と高い比率になっているのに対して、誤差範囲±10 cm以内の比率は最も低い値で70%、平均値でも85%弱と低い値になっている。

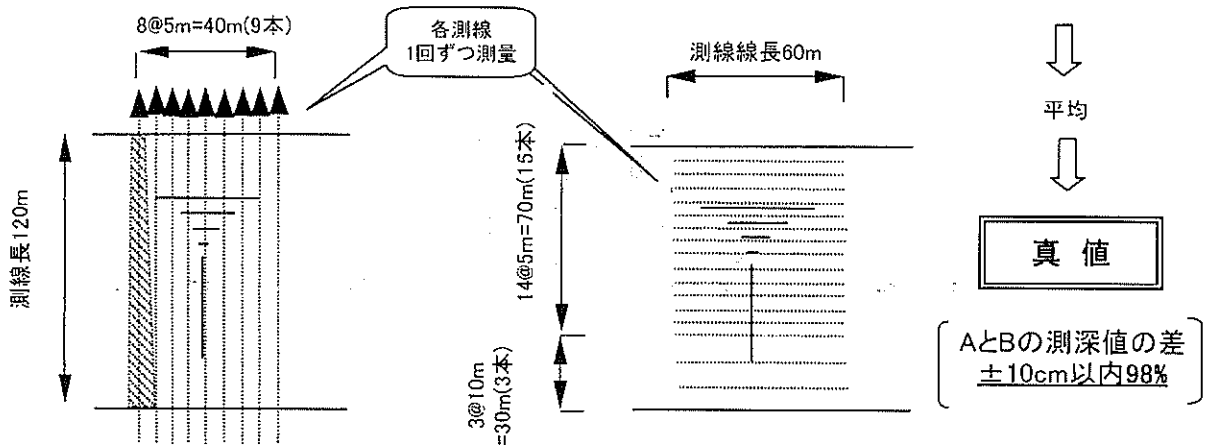
e) まとめ

①ビーム端部は、直下に比べやや精度が悪いが、±10 cm以内の誤差率が70%以上、±20 cm以内の誤差率は97%以上であった。土運船による直投の1投当たりの堆積形状が、厚さ1 m以上、拡散幅40~60 mである

手順1：直下ビーム24本による測量

A. 測深方向：法面に直角

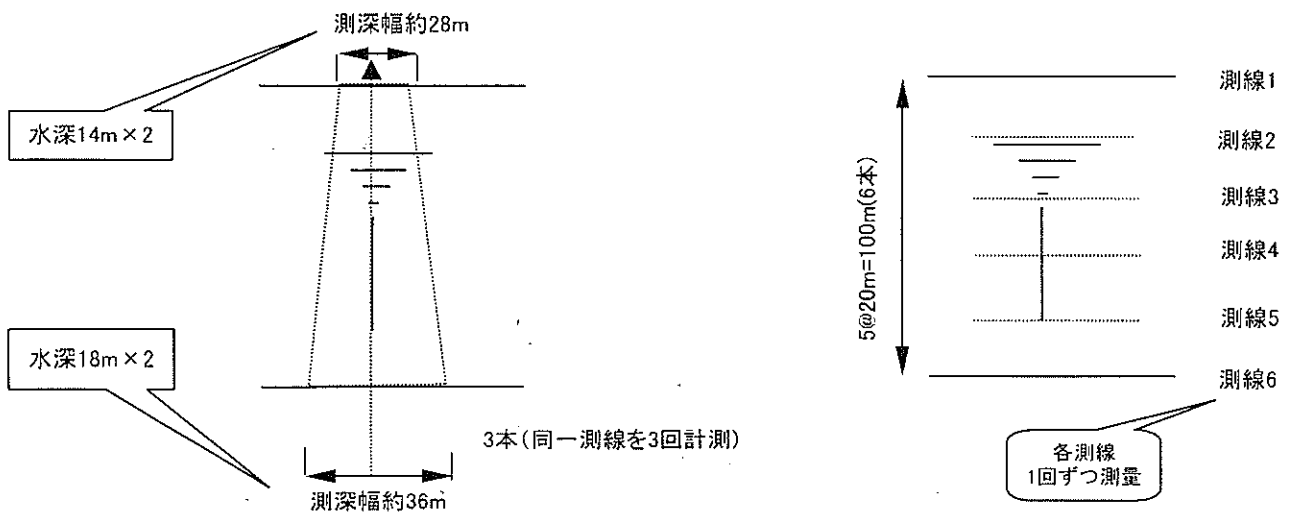
B. 測深方向：法面に平行



手順2：全ビーム60本(90°)による測量

A. 測深方向：法面に直角

B. 測深方向：法面に平行



手順3：単素子による測量

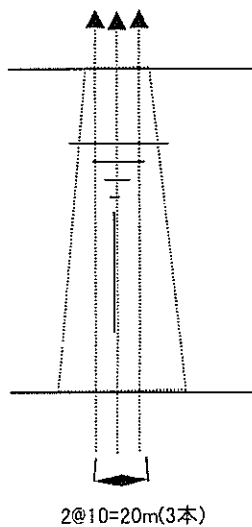


図-12 端部精度確認の手順

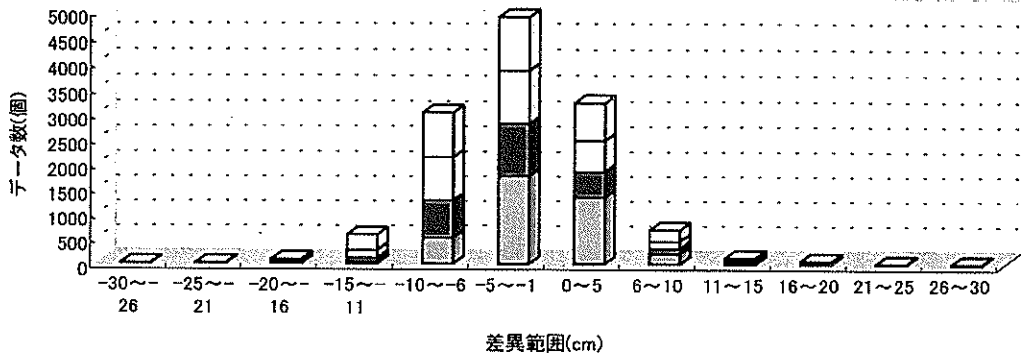
ことを考慮すると、測深誤差が20cm以内であれば、地盤の形状を十分に把握でき、また、投入計画を作成する際のコンター図の水深間隔が20~30cm程度であることを考慮すると十分な精度と思われる。

②法面に対して直角方向及び平行方向でそれぞれ測深し真値との比較を行ったが、測量方向に対する測深誤差の大きな違いは見られなかった。

③単素子との比較を行ったが、法勾配が急になると若干差が大きくなるが、±10cm以内の誤差が90.5%であり大きな差はない。

法面に直角に測深

エリア別測深誤差集計
(法面に直角に測深)

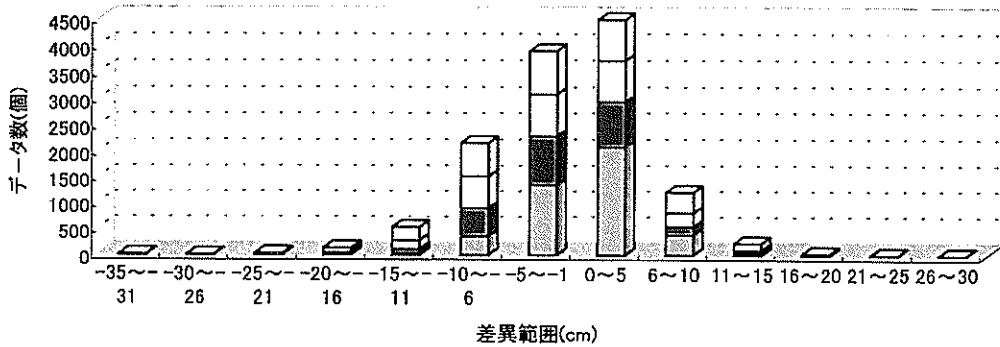


エリア番号	①	測量回数						エリア別平均		総データ数
		1回目		2回目		3回目				
①	99.0	100.0	99.4	100.0	98.3	100.0	98.9	100.0	3,885	
②	93.3	100.0	98.4	100.0	95.6	100.0	95.8	100.0	2,535	
③	87.1	99.7	95.1	100.0	95.3	100.0	92.5	99.9	2,906	
④	77.1	98.0	90.8	99.9	87.8	99.4	85.2	99.1	3,419	

赤数字は±10cm以内の誤差率
青数字は±20cm以内の誤差率

法面に平行に測深

エリア別測深差異
(法面に平行に測深)



エリア番号	①	測線番号												エリア別平均		総データ数
		1	2	3	4	5	6									
①	97.0	99.6	95.6	100.0	97.8	100.0	99.0	100.0	100.0	100.0	99.6	100.0	98.3	100.0	4,231	
②	95.4	99.7	92.2	100.0	95.4	100.0	98.4	100.0	99.6	100.0	98.9	100.0	96.6	100.0	2,590	
③	88.6	98.5	86.9	99.8	84.8	99.8	93.1	100.0	97.3	100.0	92.4	100.0	90.5	99.7	2,722	
④	87.6	98.7	82.6	99.5	70.0	97.6	83.3	99.8	93.9	100.0	84.2	98.9	83.3	99.1	3,167	

※測線1が1期空港島側

赤数字は±10cm以内の誤差率
青数字は±20cm以内の誤差率

図-13 端部精度確認調査結果一覧

(3) ナローマルチの運用方法

以上の調査結果を踏まえて、以下の通り運用されている。

- a) 日常管理 (パーチェック板を用いた精度確認)
単素子と同様にパーチェックで測深精度を確認する。

すなわち、測量対象地盤付近の水深1カ所で、計測データは10点以上取得し、管理目標値は±10cm。

- b) 月毎管理
測量槽Nに設けた固定点を各測量船が月1回定期的に

シングルとの比較

1mピッチのシングル・マルチの測深値を比較

±10cm以内 90.5%
±20cm以内 100%
データ数 349個

シングルマルチ比較

プラスはシングルが浅い

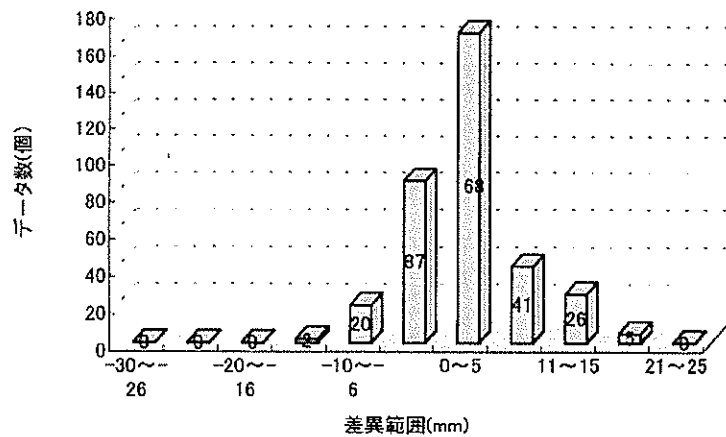


図-14 シングルマルチ比較結果

測量し、単素子とマルチの測深値を比較する。固定点は縦横4mの板を海底面（水深20m）から1.5mの高さに固定している。

c) ナローマルチの有効ビーム角

ナローマルチの端部精度確認調査結果を基に、測量目的に合わせて、有効ビーム角を変える。深浅測量には地盤の不陸を面的に捉えることが重要で、絶対的な精度は要求されない投入管理用のものと、定期的に同一測線を計測して沈下量を計測するために精度が要求されるものがある。そこで、投入管理を目的とした測量ではすべてのビームを有効ビーム角として、また、沈下管理を目的とした測量では端部のビームを除いた72°の範囲を有効ビーム角とする。

(4) 現地調査

当日は、写真2に示すとおり、波が小さい日であった。始めに20t級の測量船に次に約80tの大型の測量船であった。始めに、高低差のある法面の測量を写真3に示すとおり準備段階から見た。少し、重複するように測線を引いてあったため、端部の誤差があるか画面で確認できたが、(重複部は2回の測量値の平均値が示される)重なっている部分とその周囲に全く異常を見つけることができなかった。

次に大型船でG6工区の法部測量を見た。この工区では投入管理の際も90°ではなく72°で測深しているとのことで、重複している部分とその周囲を集中して観察していたが、同様に全く異常を見つけることはできなかった。

ただ、急速施工を行う関空2期工事では、冬季海象条件

が厳しいとのことであり、波高80cm程度まで施工するというのであれば、その時期にも端部精度確認調査を行う必要があると考えた。



写真-2 試乗調査当日の関空2期工事現場



写真-3 水中音速度計降下状況

5. ナローマルチビーム測量システムの選定

(日本での販売会社) ヒアリングの結果, 表3に示すとおりであり, 販売開始時期, 仕様, 使用実績, 精度計測データの有無も同表に示した.

5. 1 市販されている型式と仕様等

現在, 海底の測量用に実用化され, 我が国の港湾測量に使用可能と思われるナローマルチビームは, 製造業者

表-3 マルチビームソナー比較表

番号	SEABAT	SEABAT	SEABAT	SEABAT	FURUNO	SIMRAD
1 型式	9001(S)型	8101型	8124型タイプN	8125型	HS-600型	EM3000
2 開発会社名	Reson社	Reson社	Reson社	Reson社	古野電気(株)	Kongsberg社
3 開発会社国	アメリカ	アメリカ	アメリカ	アメリカ	日本	ノルウェー
4 国内代理店	東陽テクニカ	東陽テクニカ	東陽テクニカ	東陽テクニカ	古野電気(株)	住友海洋開発
5 販売開始時期/海外	1992年4月	1996年12月	1998年7月	1999年7月	未定	1995年
6 販売開始時期/国内	1993年7月	1997年4月	1998年11月	2000年10月	2000年2月	1998年6月
7 測深方式	クロスファンビーム	同左	同左	同左	同左	同左
8 測深周波数	455KHz	240KHz	240KHz	455KHz	320KHz	300KHz
9 測深範囲(深)	1~140m	1~400m	1~300m	0.5~120m	0.5~200m	0.5~200m
10 測深全角	90°	150°	120°	120°	150°, 90°	130°
11 水深15mの測深幅	30m	112m	52m	52m	112m	64m
12 ビーム角 (横×前後)	1.5° × 1.5°	1.5° × 1.5°	1.5° × 1.5°	0.5° × 1.0°	1.5° × 1.5°	1.5° × 1.5°
13 測深分解能	5cm	1.25cm	0.7cm	0.6cm	0.9cm	1cm
14 測深精度	4-9cm	4-9cm	4-9cm	4-9cm	4-9cm	4-8cm
15 受波アレタイプ 送受波器形状	カーブドアレ 馬蹄形(前後) 船底より15cm出	カーブドアレ 円筒型(前後) 船底より30cm出	フラットアレ T字型(上下) 突き出し無し	フラットアレ T字型(上下) 船底より20cm出	カーブドアレ 円筒型(前後) 船底より40cm出	フラットアレ 円筒型(上下) 船底より10cm出
16 " 寸法 単位(mm)	190(W)×504(H) 全長265	直径320 全長510	320(W)×430(L) 厚み65	500(W)×383(L) 厚み190	直径250 全長530	直径332 厚さ115
17 ソナーセンサー(空中) 重量(水中)	18kg 5kg	27kg 11kg	8kg 4.5kg	24kg 9kg	37kg 9kg	15kg 5kg
18 動揺補正装置	TSS社 POS/MV型	同左	同左	同左	TSS社製又は JME社製	SEATEX社製
19 水深15mの最適 測深船速	6kt以下	6kt以下	6kt以下	5kt以下	調査中	6kt程度
20 データ収録装置 (船上)	DOS/VJパソコン (IBMPc-AT互換機)	同左	同左	同左	DOS/VJパソコン (WindowsNT)	ワーク ステーション
21 データ出力装置 (海上)	パソコン/ 光磁気ディスク	同左	同左	同左	パソコン	ワーク ステーション
22 データ出力装置 (陸上)	パソコン/ 汎用プロッタ	同左	同左	同左	パソコン/ 汎用プロッタ	パソコン/ 汎用プロッタ
23 使用実績 (国内)	21台	15台	1台	4台	3台	1台
24 使用実績 (全世界)	300台以上	100台以上	30台以上	30台以上	3台	62台
25 精度計測データ	アメリカ海洋大気 局による評価レポ ート	カナダニューブラン ズウィック大学によ る評価レポート	調査中	オランダVan Oord ACZ社による評 価レポート	調査中	社内取得データ
26 使用用途	水路測量,ダム湖 沼調査,浚渫・埋 め立て作業管理, 沈船探査,その他	同左	同左	同左	水路測量,浚渫, 埋め立て作業管 理沈船調査,その 他	水路測量,ダム湖 沼調査,浚渫・埋 め立て作業管理, 沈船探査,その他

前述の水路測量のための国際水路基準の改訂版で、特別級、第1級の測深に、面的な測量が必要とされたこともあり、SEABAT シリーズに 8124 型と 8125 型が追加されるとともに、日本の古野電気も参入し、選択の幅は広がっている。また、8125 型については、山下(2001)により最先端ぶりが紹介されている。

まず、測深周波数に着目すると、455 KHz が 2 型式、240 KHz が 2 型式、320、300 KHz が 1 型式で採用され、その結果、測深範囲（深い方）は 120 m ~ 400 m まで様々である。

測深全角も 90 度から 150 度までの範囲にあり、水深 15 m の測深幅は、30 m ~ 112 m まで様々である。

ビーム角は、 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ が 5 型で、 $0.5^\circ \times 1.0^\circ$ が 1 型採用されている。

測深分解能と測深精度もメーカーの公称値である。しかし、前述してきた海上保安庁水路部と関空 2 期のデータと大きな差異がある。そこで、再度メーカーヒアリングを行った結果は、これらの試験方法は統一されておらず、測深精度については、

SEABAT は測量船に乗せ、GPS、動揺補正装置等を駆使して得られた最良の結果を示し、A 社はまだ実施しておらず、会社としての期待値を示し、B 社は船に載せず、固定して得られた結果を示したとのことであった。

図-15 は、性能評価書から取った図で、10 m 級の測量船に取り付け、取得された結果である。TSS 社製 DMS-05 型動揺センサーと KVH 社のマグネティックコンパスとトリンプル社のディファレンシャル GPS も使用された。データはサンタバーバラ沖の水深 12 m と 31 m の 2 箇所データ収録に先立ち、ロール、ピッチ、ヨー、レイテンシーの校正を含む、全システムの校正を行い、取得された。水中音速条件

はかなり均一で、最大偏差は 31 m で 5 m/s 未満であった。標準偏差の結果は、水深 12 m の地点では 4500 測深、水深 31 m の地点では 2800 測深のデータから求められた。

図-15 の上段の図、水深 12 m の図からは、5-9 cm（一の左側が直下、右側が端部の値）とも読みとれる。しかし、下段の図からは、10-20 cm と読める。

両方載せないのは、ユーザーに誤解を与える。この水深では、シングルビームの方が精度が高いのを隠していると思われるも仕方ない。この測深機は水深 400 m まで計れると称している機器である。さらに深い水深での精度が危惧される。

つぎに、図-16 は、SIMRAD の社内報で、船に乗せた場合の水深 30 m での結果を示した図である。（実測値ではなく理論解）これを、上記に倣って、読むと 16-27 cm であり、公称値 4-8 cm などを大きく上回る値である。

測深分解能についての SEABAT の説明は以下の通りで

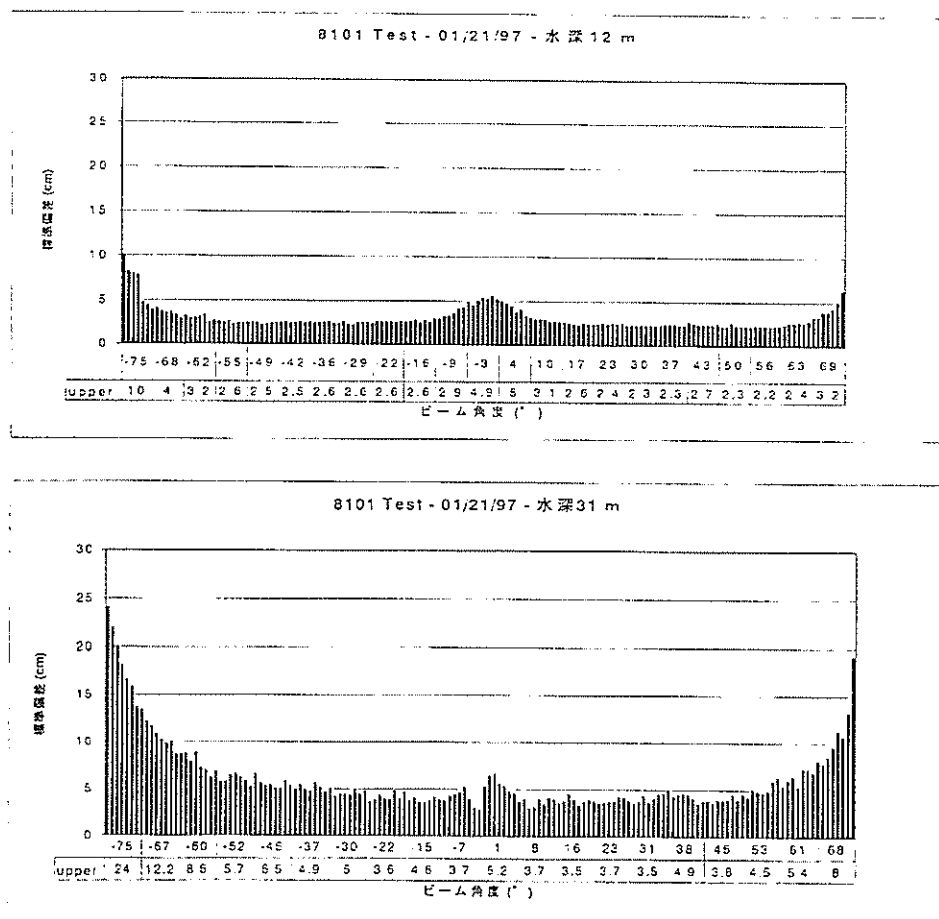


図-15 SEABAT8101 の実海域における測深精度

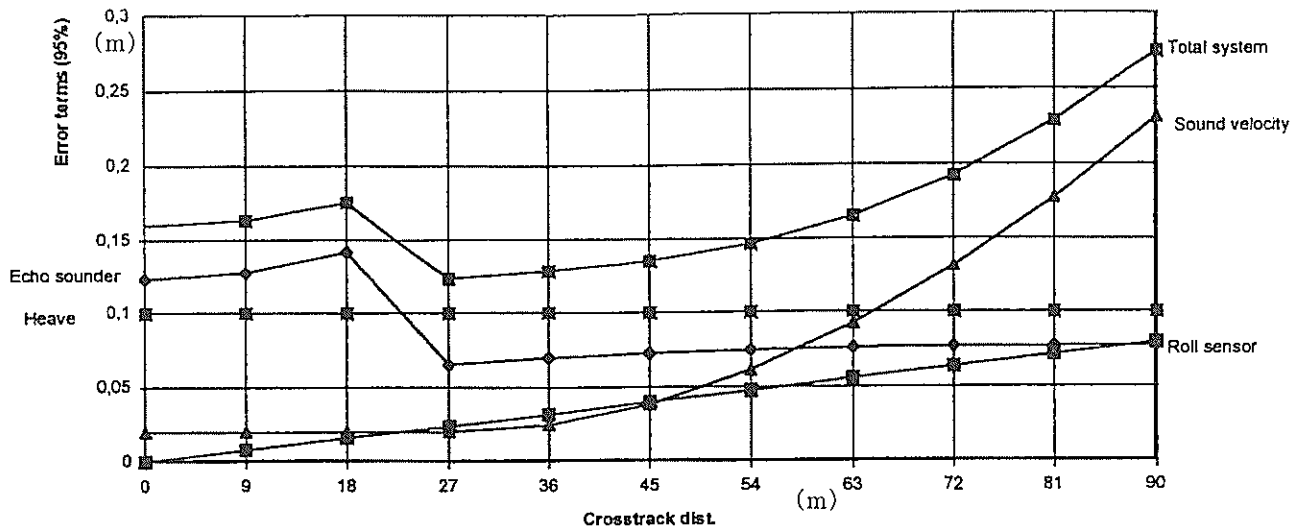


図-16 水深30mにおけるEM3000誤差モデル

ある。SEABAT8000シリーズのシステムは、1.25cmの測深レンジ分解能を有する。通常、レンジ分解能は送信パルスの長さにより、決定されるが、8000シリーズは送信パルス幅の調整機能を持ち、初期設定では5cm長相当のパルス幅となっている。しかし、レソソ社特許の処理技術を用いた海底検出アルゴリズムにより、レンジ分解能を1.25cmに向上させている。1.25cmのレンジ分解能は全ビームにわたって共通だが、精度はビーム及び水深により異なる。繰り返しになるが、精度がビーム及び水深により異なることがわかっていけば、それを表す表現を工夫すべきであろう。また、レンジ分解能は、ドックの水深3m程度の所で確認されるのが、普通と聞いており、水深400mの端部まで保証できるものか、図-17の水中音速度による誤差の大きさから疑問を持つものである。この場合、確認方法さえ明示されていない。

その他、この表で明らかとなった重要なことは、フラットアレイの方が船底に固定が容易で精度が高まるため、増えてきている。水深15mの最適測深船速は6kt程度が1型式、6kt以下が3型式、5kt以下が1型式と低速である。使用実績ではSEABATが高いシェアを誇っていることである。(本調査では、2001年7月1日契約済みの台数を実績とした。)

5.2 測位技術の変遷

海上における作業船の位置出し技術、即ち測位技術が電子技術の進歩と相まって手作業から自動化へと変わることとなったのは、昭和40年代前半である。それまでは主に六分儀とトランシットを用いて作業船の位置を出したり、測量船の測線誘導が行われ、例えば深淺測量をする

場合、測量船が測線の最初と最後を通過するときに巻き取り型の測深記録紙に作業員がカットマークを入れ、記録紙上の測線の最初と最後の間を按分して測線上の任意の位置を割り出すといった具合であった。測位精度は距離や潮位の有無等によって異なるが概ね数mから10m程度と見られる。

これに対し新しい技術として登場したのが作業船に設備した主局と陸局の従局等との送受信を行って作業船の位置を出す電波測距儀である。電波測距儀を用いて位置を出す方式としては、円弧方式と双曲線方式があり、国の測量船など一般的には円弧方式が採用された。双曲線方式は、円弧方式が通常陸上の2従局に対し、1隻の主局しか利用できないのに対し、隻数が無制限に利用できることから関西国際空港1期建設で昭和63年から始まった埋め立て工事の土運船に採用された。電波測距儀の精度は良くても1m程度であったため利用できる工種が限られ、精度を要するものは、海上橋とトランシットの組み合わせといった従来方式がとられた。

一方、陸上の測量に供されていた光波距離計が、光波への追尾性の向上により昭和60年頃から一部の大型作業船に採用されるようになり、GPSが本格的に使用されるようになるつい最近までは、地盤改良船などcmオーダーの精度を必要とする作業船の多くが、光波測距儀を利用していた。しかしながら光波測距儀は、高精度で測位できるものの1隻の作業船に対し陸上に2箇所の反射鏡の設置が必要となり、測量の距離も2km程度、しかも霧等が出ると距離が落ちる。また、陸上の反射鏡の管理が大変である。1セットの機器購入費は4,000万円程度と高額である等の問題があった。

GPSは米国において軍事用に開発された全世界的衛

星測位システムであり、平成3年の湾岸戦争では相当な利用がされたようである。平成5年に全世界で民生用に無償で解放されるようになってから我が国でも測量、カーナビ等幅広い分野において利用されるようになった。ただ初期の段階で用いられた測位システムは、単独測位方式と言われるもので、測位精度が10m~100m程度と悪く海上工事には使えないものであった。

海上工事ではcmオーダーの精度が必要とされ、移動しながらリアルタイムでこの精度を満足するのはリアルタイムキネマティックGPS(RTK-GPS)であって、この方式について我が国では平成元年度から第四港湾建設局により開発が進められ平成5年度頃に技術が完成した。こうした技術成果を活用してRTK-GPSは、平成6年度、関門航路の整備に本格導入された。現在では、浚渫船、地盤改良船、測量船等の主要作業船においては標準装備品となりつつあり、また、関空2期、神戸空港建設の用地造成工事、東京港の新海面処分場工事、直江津港のエネルギー関連施設工事等大規模な海上工事において広範に利用されている。

RTK-GPSは測位できる範囲が概ね基準局から15km内と限定されるが、利用できる作業船の隻数に制限がなく、3次元の高精度測位ができる。また、風や雨等の影響も受けずらく、機器の管理が楽である等の多くの特長を持っている。GPS機器関連の調達費は安価になる傾向にあり、移動局側の作業船の方であれば500万円以下になっている。技術的側面では、今までの測量方法にない楕円体高という絶対値を持って鉛直方向の位置出しがcmオーダーの精度でできる特長を持っており、ナローマルチビーム測量においても活用されている。

5.3 動揺補正装置と方位センサーの変遷

海洋調査、海上土木の業務において、海上での波浪によってもたらされる動揺を検知し、補正をする技術は、当初は2つの流れがあった。ひとつはゆれそのものに対して反作用するような仕組みを作る方法と、ゆれそのものを検知し、そのゆれによる影響を最小限にする方法が考えられていた。

特にロールとピッチは振り子を用い、重力方向を計測し、その角度を読み取り、ゆれ成分として補正していた。この方法では、瞬時に作用する運動に対して既存の運動方向を変化させるために一定の時間遅れが生じた。そのため、船の微小でかつ速度変化をもたらす動きについては、加速度を計測することが基本となった。

この加速度計測は、高速で回転するジャイロによって計測する方法で実現された。このジャイロではX,Y,Zの

3方向の加速度成分が計測でき、上下動等の距離成分となる要素は2次積分で求めた。この装置は機械的な回転ゴマで計測されるために、軸の消耗や衝撃等について運用上の制限があった。

1980年代に入ると船舶の動揺補正装置は、ソリッドステートの3軸ジャイロと加速度センサーの組み合わせで組み立てられ、機械的に動く部分がなくなり、保守が不要となった。

海底面を計測する音響測深装置との関連で動揺要素を見た場合、まず、上下動(ヒープ)が注目されていた。シングルビーム音響測深記録については、現在でも記録面の中に含まれている波浪の影響を平滑化する方法で行われている。この間、ソフト的に波浪解析をし、リアルタイムでもしくは記録処理過程で波浪成分を除去する方法が試みられた。加速時計と組み合わせ、動揺補正する装置も幾つか製作され測量専用船に装備された。

動揺センサーに対する需要と関心が、マルチビーム音響測深機の導入とともに急速に高まった。百個以上のビームの測深点を正確に特定するには、そのビームが装備された船から離れているほど高い精度で、ロール、ピッチ、ヨーの値を測深間隔に同期させて取得することが必須となってきた。動揺センサーの精度は、スワ幅の広がりとともに、0.5度程度から0.05度(現在は0.03度)と精度の向上が図られ、浅海での水路測量においてマルチビーム測深装置で計測された成果が活用されるようになった。

船が進路を変更する場合とか、外力により船の方位が急激に変化する場合もしくは船の進行方向に対する水平加速度が継続的にある場合には、遠心力を含むそれらの加速度により、計測加速度方向が重心方向からわずかにずれる。これを補正するためにGPSによって計測される船の速度偏差成分をロール、ピッチ偏差成分に加味する方式が用いられるようになりつつある。

GPSを用いた動揺計測は、当初は、1980年代に大型の海洋調査船にGPSアンテナを3つ装備する方式で試みられていた。最近ではGPSアンテナを4個装備する方法が作られているが、動揺計測の長期安定性、精度等の問題があり、マルチビーム測深装置用としては、ほとんど使用されていない。

現在では、高性能慣性航法級の安定性と精度を有する加速度計と角加速度計からの、ロール、ピッチ、ヒープ、ヨー、ヘディングおよび位置情報を同時に出力できる動揺計測装置が使用されている。この方式の同様計測装置は、前述の波浪および測量船の偏針による測定誤差の増加を大幅に押さえており、波浪等の影響の避けられない

港湾・空港工事における水深測量には最適なものとなっている。

次に方位センサーの変遷にふれる。マルチビーム音響測深装置にとって、方位精度とそのデータの更新速度も重要である。ロール、ピッチの値はビームの送信方向、受信方向とタイミング調整に1970年代後半から利用されている。ジャイロを装備している船舶であればこの値を利用することが可能だが、船首方向の動揺間隔が早い場合には、ジャイロのデータ出力間隔が測深間隔に対応できない場合がある。また、ジャイロは静定時間の長さや保守等の問題から小型船での運用に制約があった。

ジャイロを装備していない場合には磁気コンパス、または電磁コンパス等が用いられている。前者の精度は不十分で、後者は補正機能があるとはいえ、鋼船の接近等での誤差等を除去しきれず、後処理での補正が必要となる。

GPSアンテナを2個装備し、この2つのアンテナで受信した信号値の偏差を計測し、船の方位変位を計測する方法が、マルチビーム音響測深装置に1990年代後半から採用され始めている。データ出力間隔100Hzで方位精度0.05度を実現できるようになっている。

5.4 機種選定と測量方法について

3で述べたとおり、水路測量の国際基準が改定され、特別級、第1級の海域では、IHOの水路測深精度基準を満たすとともに、100%の測深により、1³m、2³mの物体を識別できるものであるべきとされる。

水路測量に使用する機種としては、これを満足するものを選ぶと言うことが本筋である。しかし、海上保安庁水路部の水路測量として水深を採用するための測深方法やデータ処理方法は策定すべく取りまとめ中である。一方、水路部の内規が改定され、ナローマルチビーム測量が行えるようになったことも事実であり、各管区の水路部に相談されるのが望ましい。

施工管理など水路測量以外の業務に使用する場合は、使用目的、使用対象の水深、海象条件等から、稼働効率を検討し、合理的な選択を図るのが肝要である。

測量方法についても、海上保安庁の水路部での策定待ちという状況であり、水路測量については、各管区の水路部に相談されるのが望ましい。

施工管理など水路測量以外の業務に使用する場合は、関空2期のような大規模な端部精度確認調査が行えれば極力行うべきである。行えない場合は、前述の水路部技報記載の作業の流れに従って行うことが適切と考える。端部の精度は不明確であるから、オーバーラップして測量し、異常と判断すれば、再測するのが有効である。

6. 結論

本調査により明らかとなったナローマルチビーム測量の現況と課題は以下のとおりである。

- ①1998年に水路測量のための国際基準が改定され、維持浚渫航路、計画推進で整備された港湾、泊地等ではすべてのエラーソースを最小限にするため、1³mの物体を識別できるべきものとされ、ナローマルチビーム測量の必要性が拡大した。
 - ②海上保安庁水路部は、平成11年7月に内規を変更し、海図補正測量にナローマルチビームを使って良いとした。事業者も申請し、審査をパスすれば使える時代となった。
 - ③しかし、海上保安庁が、水路測量として水深を採用するための測深方法や、データ処理方法は、策定中の段階である。しかし、パッチテストを行うなど作業の流れは、適当と考える。また、スワ角全部が活用できない場合があること、即ち、端部の精度が悪いことも明確にしている。
 - ④関空2期では、1期と異なりナローマルチビーム測量を採用するに当たり、精度確認調査、とりわけ端部精度確認調査を精密に行い、ビーム端部の精度を明らかにし、それを元に運用している。
 - ⑤現在、海底の測量用に実用化され、我が国の港湾測量に使用可能と思われるナローマルチビームを業者ヒアリングの結果まとめた。3メーカー、6型式であった。
 - ⑥その結果、測深精度の定義・試験方法がメーカーによって異なるほか、水深により精度が異なる場合、良い方の結果を示していること、船に乗せない値を公称値としているメーカーの、船に乗せた場合の精度は2倍以上悪いことを明らかにした。本測量システムの最大の課題は、今後早急に測深精度に関するデータを収集することである。
 - ⑦水深15mの最適測深船速は、6kt以下が多いことが明らかとなった。
 - ⑧使用実績では、SEABATシリーズが高いシェアを誇っている。
- 以上、新規の成果も多数明らかにした。

7. おわりに

今後は、測位精度の向上、動揺補正装置と方位センサーの性能向上を踏まえるとともに、水深による精度の変化について、機会あるごとに、関係者の協力も得て調査し、データをまとめていきたい。また、マウンドのならば精度の調査をはじめ、各種工事に本測量システムがどのく

らい効率的であるか検討して参りたい。

(2001年8月30日受付)

謝辞

現地調査では、東京都港湾局東京港建設事務所、関西国際空港建設事務所の多数の皆様にご協力いただいた。お礼を申し上げます。とりわけ、関西国際建設事務所では、精度確認調査及び端部精度調査の貴重なデータを提供いただいたことに深く感謝する。

業者ヒアリング等では、東陽テクニカの大八木部長、藤島さん、住友海洋開発(株)の進藤専門部長、古野電気(株)の森松主幹技師にご苦勞をおかけした。深謝する。

G P Sの関係については、海上D G P S利用推進協議会の吉田専務理事のご協力を得た。深謝する。

最後に、論文の取りまとめに当たっては、筆者が長文の論文をワードで取りまとめるのが今回初めてであったため、多数の若手のご協力を得た。とりわけ、海洋・水工部沿岸生態研究室の小沼研究官には、マニュアルでは全くわからないテクニックを幾度も指導いただいた。深謝する。企画管理部の佐々木主任研、当部の佐藤研究員、田中研究員にも幾度もお世話になった。深謝する。

参考文献

- 浅田昭・穀田昇一・松本良浩・正岡久志(1988):SEABATを使ったデジタル水深測量におけるバイアス調整法,水路部技報 Vol. 16, pp. 103~107
- 折橋恒春(2000):港湾土木工事講座,埋め立て・造成工事(1)土砂運搬,作業船 第252号, pp. 42~45
- 岸本和重・相川秀一・中嶋道雄(2001):深浅測量データを活用した層厚管理システムの開発,土木学会第56回年次学術講演会講演概要集,第VI部門, pp. 266~267
- 草野博哉・相川秀一・古川好男・加藤直幸(2001):ナローマルチ等の新技術を活用した盛り砂の施工管理方法,土木学会第56回年次学術講演会講演概要集第VI部門, pp. 294~295
- 田口一雄・田畑雅洋(1997):海洋計測工学概論,成山堂,第4章海底調査
- 田淵郁男・佐々木芳寛・佐藤友紀・平石哲也(1997):水深DBを活用した港外波浪変形計算・港内静穏度計算システムの開発,港湾技研資料 No. 888
- 東京都東京港建設事務所浚渫工事課(2001):東京都港湾局の深浅測量システムの紹介,測量3月号, pp. 19~23
- 増田稔・島村明・水川達也(2000):リアルタイム・高密度水中施工管理システム及び堆積形状予測管理シス

テム, 第8回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 43~48

森弘和・山本正・手登根功(2000):SEABATによる水路測量,水路部技報 Vol. 18, pp. 1~4

山下俊博(2001):GPSを利用した超高分解能マルチビーム測深装置の導入,測量4月号, pp. 24~26

吉田由治(1999):GPSの特性と利用,作業船 第243号, pp. 52~57

吉野洋一・田中悟・阪井田茂・谷口君弘(2001):土運船による直投土砂の堆積形状調査,土木学会第56回年次学術講演会講演概要集第II部門, pp. 94~95

IHO(1998):IHO STANDARS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS, Special Publication No 44

港湾空港技術研究所資料 No.1014

2001.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.0468(44)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 あんざい

Copyright © (2001) by PARI

All rights reserved. No part this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。