

災害時緊急水上輸送システムの技術開発

その 1：緊急時輸送航路内のリアルタイム測量システム

環境エネルギー研究領域 *樋富 和夫、桐谷 伸夫、山之内 博、篠野 雅彦
東亜建設工業 増田 稔、島村 明

1. はじめに

災害時に緊急物資を水上輸送する災害時緊急輸送システムが稼動する前に、河川の水深を調査し輸送船が安全に航行できることを確認する必要があるため、航路内海底障害物の探査システムとしてマルチビームソナー測深機の緊急時の要件について実船実験等で検証した。本報ではマルチビームソナー測深システムの概要、実船実験による検証例について示す。

2. 測深システム

航路内水中障害物の探査法として、海底地形の測量や海中工事の施工確認等に導入・使用され性能も著しく進展しているマルチビーム測深システムがある。緊急時における航路内障害物をマルチビームソナーにより測深する場合は、平時の測量と異なりリアルタイム測量が重要な要件となる。その要件は、精度をある程度抑え、かつ専門家でなくても使えるような汎用性を踏まえた上で、必要不可欠な機能を有することである。

測深システムは、マルチビーム測深機、測位システム（GPS）、動揺補正装置、測量ソフトウェアで構成される。今回はマルチビーム測深機と測量ソフトウェアの概要について述べる。

2. 1 マルチビーム測深機の概要

マルチビームソナーの測量方式はクロスファンビーム方式が採用されている。クロスファンビーム方式の原理はソナーヘッドに送波器と受波器が直交するように配置され、送波器から海底面に向かって扇型に広がるビーム（ファンビーム）を発信し、直行する受波器も扇型のビーム形状で反射

を待ち受けることにより、交点それぞれの測定値が得られる。

測量は、ビームの受信角度と送受信時間から水深とその位置、航行によるスキャンングで海底の3次元形状を得る方式である。測深の概要を図1に示す。

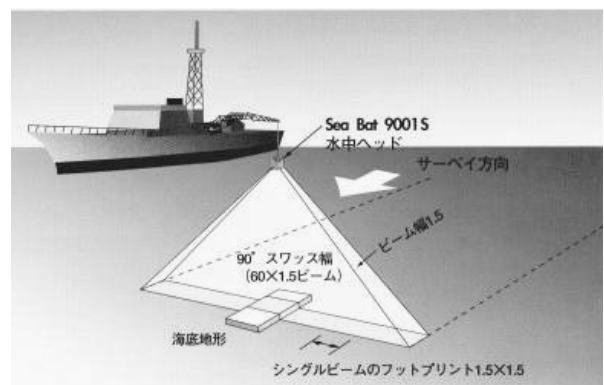


図1 測深概要図

ソナーヘッドの取り付け方によって測量方式が異なり、その方式には、下方、サイド、前方があり、以下のとおり測量の目的と範囲が異なる。

- ・下方探査：海底（河床）に向かってビームを発射し地形情報を得る方式
- ・サイド探査：岸壁や橋脚等に向かってビームを発射し地形情報を得る方式
- ・前方探査方式：前方に向かってビームを発射し障害物情報を得る方式

マルチビーム測深機の測量性能を表1に示す。

緊急時は測量スピードを優先し広域をカバーでき、往復路の測量で輸送航路内海底地形情報を得る必要がある。従って、スワップ角を大きくするほど広域測量が可能となる。測量はソナーが扇型のビームを送受信し船が進行することにより行わ

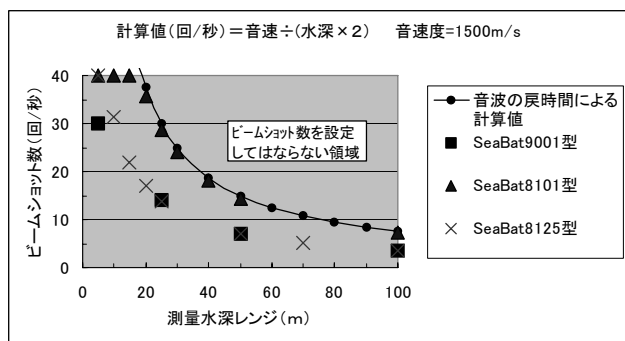
れる。

表 1 マルチビーム測深機

機 種	扇形ビーム の構成数	スワッス角 (水深比)	ビーム角 (横×前後)
Seabat8101	100 本	150° (7.4 倍)	1.5° × 1.5°
Seabat8125	240 本	120° (3.5 倍)	0.5° × 1.0°
Seabat9001	60 本	90° (2 倍)	1.5° × 1.5°

扇型ビームはビーム角とビームの本数で決まり、その積がスワッス角(9001 型 90 度=1.5 度×ビーム数 60 本、8101 型 150 度=1.5 度×100、8125 型 120 度=0.5 度×240)となり、扇形状を成す連続的なビーム(図 1 参照)となっている。図 2 に示すようにビームショット数は機種で定められた測量水深レンジとの関係で決まる。

図 2 測量水深レンジとビームショット回数の関係



測量水深レンジは、測量河川における大潮干潮時の最大水深、満潮時の増加分、増水分を考慮した水深を算出し、下方測量方式ではその水深値とスワッス角より求めた斜距離(最大広がり距離)の値を用いる。サイド測量方式では、算出した水深値はサイド方向の最長距離値のどちらか大きい方の値を用いる。船速とビームショット数の関係を次式に示す。

$$\text{船速(m/s)} = \frac{\text{測量対象物の長さ(m)}}{\text{測量対象物に当てるビームショット数に要する時間(秒)}} \\ = \frac{\text{測量対象物の長さ(m)} \times \text{ビームショット数(回/秒)}}{\text{測量対象物に当てるビームショット数(回)}} \quad (1)$$

但し、船速(knot)=船速(m/s)×1.9444(knotへの換算値)

ここで、{測量対象物の長さ(m)÷測量対象物に当てるビームショット数(回)}は測量対象物の分解能であり、船速と毎秒のビームショット数の関係を表す勾配である。

従って、

$$\text{船速(m/s)} = \text{分解能(m)} \times \text{ビームショット数(回/秒)} \quad (2)$$

と表すことができる。

2. 2 障害物大きさの想定と測量分解能

想定した障害物の大きさは、実際の護岸調査で測量された軽自動車(長さ 4m×幅 1.5m×高さ 1.5m)の短い寸法を用い 1.5m 角、高さ 1.5m、その障害物が震災時に橋から転落し水没していると仮定した。

1.5m 角、高さ 1.5m の障害物の測量に必要な分解能を把握するため、0.5m メッシュで 7×5 ピクセルの河床をベースとして、高さ 1.5m の 3×3 ピクセルの障害物を図 3 のように配置した。

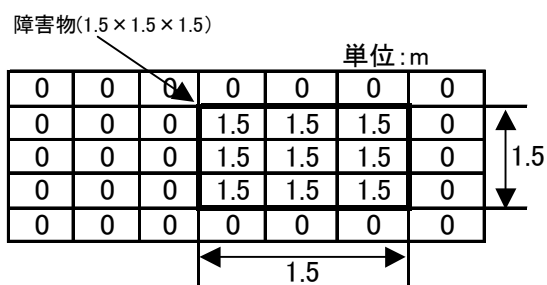


図 3 0.5m メッシュの河床に配置した障害物

図 4 (a)~(d)に分解能 1.5m、1.0m、0.75m の測量における障害物の認識状態を示す。分解能は測量間隔であるため、その間隔でビームをショットした場合の認識状態を求めた。1.5m 分解能では、扇形の連続ビームによる 1 ラインの測量が成される。

1.0m 分解能では、1 ライン若しくは 2 ラインの面として測量される。

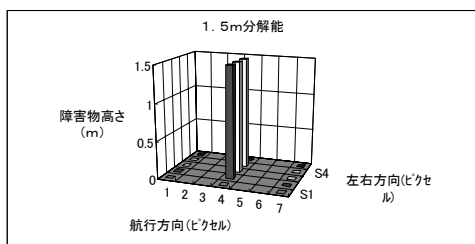
0.75m 分解能では、2 ラインの面として測量される。

1.5m 以上の分解能であれば、1 ラインか測量不能となり、1.5m、即ち想定する障害物の寸法が限界値となる。1 ラインをノイズと見誤ることを防ぐには 0.75m、即ち、障害物寸法の 2 分の 1 以下の分解能が望ましい。

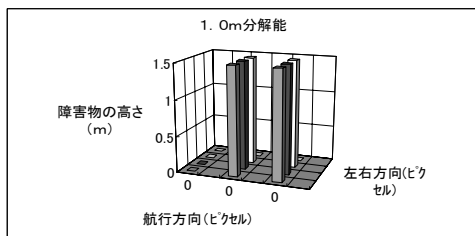
分解能は (2)式を変形して次式から計算できる。

$$\text{分解能(m)} = \text{船速(m/s)} \div \text{ビームショット数(回/秒)} \quad (3)$$

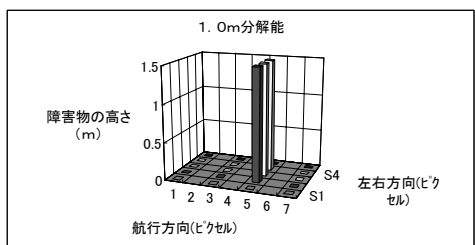
(3)式を用いた SeaBat8125 型の計算例を表 2 に示す。これは 1.5m 角障害物の測量限界を示すものである。



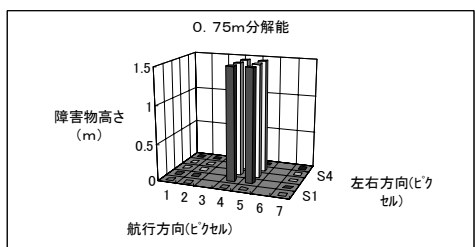
(a) 1.5m 分解能による障害物の認識



(b) 1.0m 分解能による障害物の認識



(c) 1.0m 分解能による障害物の認識



(d) 0.75m 分解能による障害物の認識

図4 測量分解能の検討結果

表中では分解能 $>1.5\text{m}$ を白抜き、 $1.5\text{m}\geq$ 分解能 $>0.75\text{m}$ を網掛けで示した。測量手順として、まず測量水深レンジが決定され、次に図2よりビームショット数が決まり、(3)式により、そのビームショット数と船速により分解能が計算されるため、表の横軸にはレンジとその数値に対応するビームショット数を付した。

レンジ30mにおいて、2ライン以上の面で探査する場合は14ノット以下での測量が望ましい。想定する障害物を認識できる分解能（寸法の2分の1以下）と測量水深（ビームショット数）から船速が決定できる。また、逆に測量船の最大船速から測量時の分解能を知ることでもある。

表2 1.5m 角・障害物の測量限界(8125 型)

	測量レンジ(m)	30	50	70	100
	ショット数(回/秒)	10.01	7.11	5.03	3.61
船速(knot)	1	0.051	0.072	0.102	0.142
	2	0.103	0.145	0.204	0.285
	3	0.154	0.217	0.307	0.427
	4	0.206	0.289	0.409	0.57
	5	0.257	0.362	0.511	0.712
	6	0.308	0.434	0.613	0.855
	7	0.36	0.506	0.716	0.997
	8	0.411	0.579	0.818	1.14
	9	0.462	0.651	0.92	1.282
	10	0.514	0.723	1.022	1.425
	11	0.565	0.796	1.125	1.567
	12	0.617	0.868	1.227	1.71
	13	0.668	0.94	1.329	1.852
	14	0.719	1.013	1.431	1.995
	15	0.771	1.085	1.534	2.137

2. 3 測量ソフトウェア

SEABAT シリーズのマルチビーム測深機には、海洋測量、港湾工事の全てのニーズに対応した多機能・統合型処理ソフトウェア（HYPACK Survey）が付属している。このソフトウェアは、測量後にデータ処理を行う方式であるため、測量データの取得時間は測量時間とほぼ同等となり、平時の精密測量に適している。

一方、Beluga Surveyor はリアルタイムに測量、演算、記録、データ送信を実現している。また、測量をしながら等深線図をリアルタイムに表示できる機能を有し、設定項目も補正に関するパネル画面を使用するため、1日程度の訓練で使用が可能なものであり、緊急時の測量ソフトウェアとして適している。

3. 実船実験による検証

荒川で実施したマルチビーム測深機の性能検証実験の例を以下に示す。

3. 1 測量量

荒川河口～戸田リバーステーション約28km、船速5ノットで測量時間は3時間であった。往復で測量時間6時間、測量川幅40m～80mが1日における測量量となる。単位時間当たりの測量長さは、

船速となり、5ノットであれば時速換算で約 9.25km/h となり、(3)式より求めることができる。

3. 2 測量スピードと分解能の検証

実船実験では、船掘橋～荒川大橋間に測量範囲(200m×40m)を設定し下方探査方式で測量した。その測量範囲を4回の測線で測量した。測量水深レンジは15m、ビームショット数毎秒21回(Max.Rate)を一定にして船速を2ノット～8ノットに変化させた。また、船速4ノットを一定にして、ビームショット数(回/秒)を15～5回/秒に変化させた。図5に測量結果を示す。測量スピードと分解能を検討するため、図中の白囲領域10m×4m内の隆起物(長さ5m×幅2m×高さ0.75m)をターゲットとした。

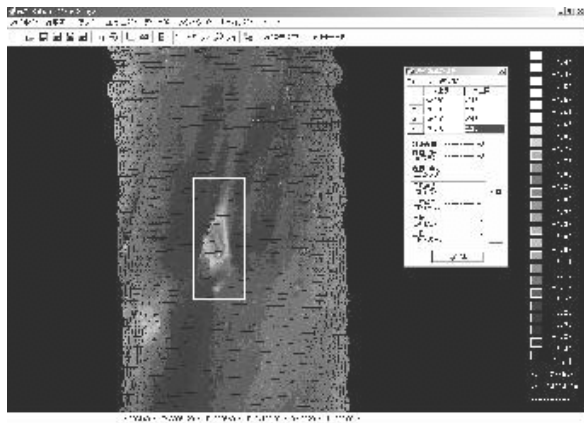


図5 測量結果

図6に白囲の測量結果例を示す。各測量結果のメッシュは0.1mである。図6(a)船速2ノット、ビームショット数21回/秒の場合、殆ど欠損間隔は見られない。(b)の速度を上げることや(c)のビームショット回数を減らすことは分解能が悪く(測量間隔が長く)なることを示しているが、いずれもターゲットが測量されている。

(a)2ノット測量例は分解能が0.046mで0.1mメッシュに2ショット(≒ $0.1 \div 0.046$)分が存在する。一方(b)の8ノットは分解能が0.196mで0.1mメッシュに0.5ショット、即ちこれは0.1mのメッシュのラインが1本おきに未測量箇所があることを意味している。8ノットの測量図で未測量箇所が2～5ラインあるのはピッチング(±1°)による影響であり、測量済みの箇所が多重に測量されている。ピッチングの影響については今後の課題であるが、測

量スピードや分解能を決める場合には考慮しなければならない。

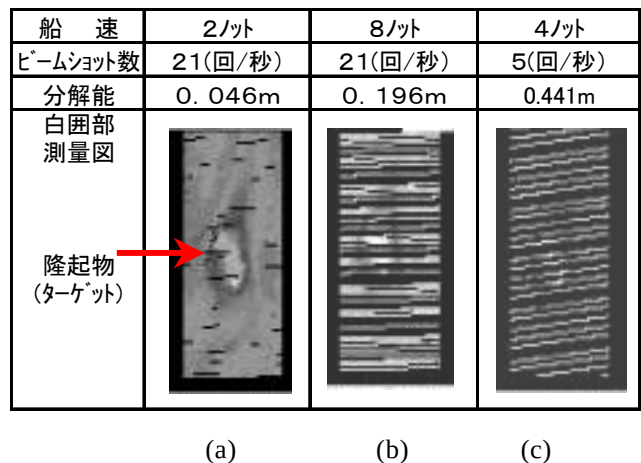


図6 測量スピードと分解能の検討

4. おわりに

本研究では、緊急時における航路内障害物のリアルタイム測量に重点をおき、測量スピードと障害物を認識できる分解能、かつ専門家でなくても使えるような汎用性を踏まえたスペックを検討した。また、測量データをリアルタイムに水上輸送最適化システムのネットワークや防災対策本部へ提供するための送配信システムについても検討し、測量データの送配信公開実験を実施した。その結果はほぼ満足のいくものであった。その時の防災対策本部への伝送画像例を図7に示す。詳細は国土交通省平成16年度「災害時緊急輸送システムの技術開発」報告書を参照頂きたい。



図7 地図ソフトに表示した伝送画像

謝 辞

本研究は国土交通省技術研究開発委託費(総合政策局)により実施しました。関係各位に深く感謝します。