

バウスタトンネル部により発生する 気泡の挙動観察

佐野 正*¹ 中西俊之*¹ 高川真一*¹
大山正俊*² 川尻勝己*²

船舶で使用する測深機など音響機器の送受波器は船底に装備されるので、そこを流れる気泡により、音波透過上悪影響を受ける場合がある。

6,500 m 潜水調査船支援母船には、マルチナロービーム音響測深装置を搭載することとしているが、10,000 mの測深を可能にするためには、送受波部が船底を流れる気泡の影響を受けないように配慮する必要がある。

船体周囲の気泡の発生原因の1つに、バウスタトンネル部が船体の動揺や波浪のために海面を上下することにより発生するものが考えられる。

そこで、新母船を建造するに当り、バウスタトンネル部で発生する気泡の挙動の系統的な観察を、模型船実験により行った。

その結果、新母船ではバウスタトンネル部での気泡発生を防止する必要があり、ここに扉を設けることとした。

Observation of Bubble Behavior Generated by a Bow Thruster Tunnel

Tadashi SANO*³, Toshiyuki NAKANISHI*³, Shinichi TAKAGAWA*³
Masatoshi OHYAMA*⁴, Katsumi KAWAJIRI*⁴

Underwater acoustic transducers such as precise depth recorders used on ships are usually installed on the bottom of the ship, and their transmission capabilities may sometimes be adversely affected by the flow of air bubbles.

The JAMSTEC support vessel for 6,500 m deep research submersible is designed to have a multi narrow beam echo sounder under her bottom. To enable depth measurement down to 10,000 m by the echo sounder requires the installation of the transducers to avoid the effects of bubbles flowing around the ship bottom.

Bubbles around ships are thought to be generated when a bow thruster tunnel moves up and down through the water surface due to ship motions or waves.

*1 深海開発技術部

*2 川崎重工業(株)

*3 Deep Sea Technology Department

*4 Kawasaki Heavy Industries

Therefore, a systematic observation of bubble behavior generated in a bow thruster tunnel using a scale model ship has been carried out to gather information for the construction of the new support vessel.

Results of the test indicated that the new support vessel should be equipped with tunnel gates on the bow thruster.

1. まえがき

船舶で使用する測深機など音響機器の送受波器は船底に装備されるので、そこを流れる気泡により音波透過上悪影響を受ける場合がある。

6,500m潜水調査船支援母船（以下「新母船」という。）には、マルチナロービーム音響測深装置〔以下「MNBES」(Multi Narrow Beam Echo Sounder) といふ。〕を搭載することとしているが、10,000mの測深を可能にするためには送受波器部が船底を流れる気泡の影響を受けないように配慮する必要がある。

船体周囲に発生する気泡は、船体に沿った流場と気泡の浮力により、複雑な挙動をするが、船底に取付ける送受波器への影響はそれを取付ける位置及び船底からの突出量によりある程度抑制することができる。

一方、MNBES送受波器は、船首尾方向に長い送波器（ $L \times B = \text{約 } 4,500 \times \text{約 } 1,000 \text{ mm}$ ）と、左右舷方向に長い受波器（ $L \times B = \text{約 } 1,000 \times \text{約 } 4,500 \text{ mm}$ ）に分かれており、その大きさ故に取付けられる位置が限られてくる上に、船底から

突出させて、船体周囲の気泡層の外にもってくるのが困難である。

船体周囲の気泡の発生原因の1つにバウスラスタトンネル開口部が船体の動揺や波浪により海面を上下するときに取込んだ空気に起因して発生するものが考えられる。

過去に建造されたMNBESを搭載する海洋調査船を調査したところ、表1に示すようにバウスラスタトンネル部に扉や蓋を設けている船があることがわかった。これは、バウスラスタトンネル部での気泡の発生を防止し、船底の音響機器特にMNBESに対する気泡対策が主要な目的と考えられる。（バウスラスタトンネルに扉を設けることは、推進性能向上にもつながる。）

そこで新母船を建造するにあたり、バウスラスタトンネル部での気泡の発生機構、バウスラスタトンネルから放出される気泡の挙動とMNBES送受波器との関係を調査するために、縮尺模型を用いて回流水槽で系統的な実験を実施したのでその概要を報告する。

表1 マルチナロービーム音響測深装置を装備する主な海洋調査船
Table 1 The principal oceanographic research vessel installed multi narrow beam echo sounder

国名	所 属	船 名	主 要 目、 船 型 ($L_{pp} \times B_m \times D_m \times d$)	バウスラスタ (トンネル部の状況)	マルチナロー
フランス	IFREMER	JEAN CHARCOT	74.5×14.1×7.45×5.05 単胴船 (全長)	通常型（建造後トンネル部に蓋を取付）	GI/SEA BEAM
アメリカ	Woods Hool Oceanographic Institution (WHOI)	ATLANTIS II	64×13.4×6.6×5.2 単胴船 (全長)	オムニスラスタ (トンネルなし)	GI/SEA BEAM
西ドイツ	The Federal Ministry for Research and Technology (FMRT)	METEOR	90×16.5×7.7×5.3 単胴船	オムニスラスタ (トンネルなし)	Krupp Atlas Hydrosweep
日 本	海上保安庁	拓 洋	90×14.2×7.3×4.57 単胴船	通常型（トンネル部に扉設置）	GI/SEA BEAM
日 本	海洋科学技術センター	かいよう	53×28×10.6×6.3 * SSC	通常型ただし バウスラスタ ; 4基 スタンスラスタ ; 4基 (扉なし)	GI/SEA BEAM

* SSC ; Semi Submerged Catamaran

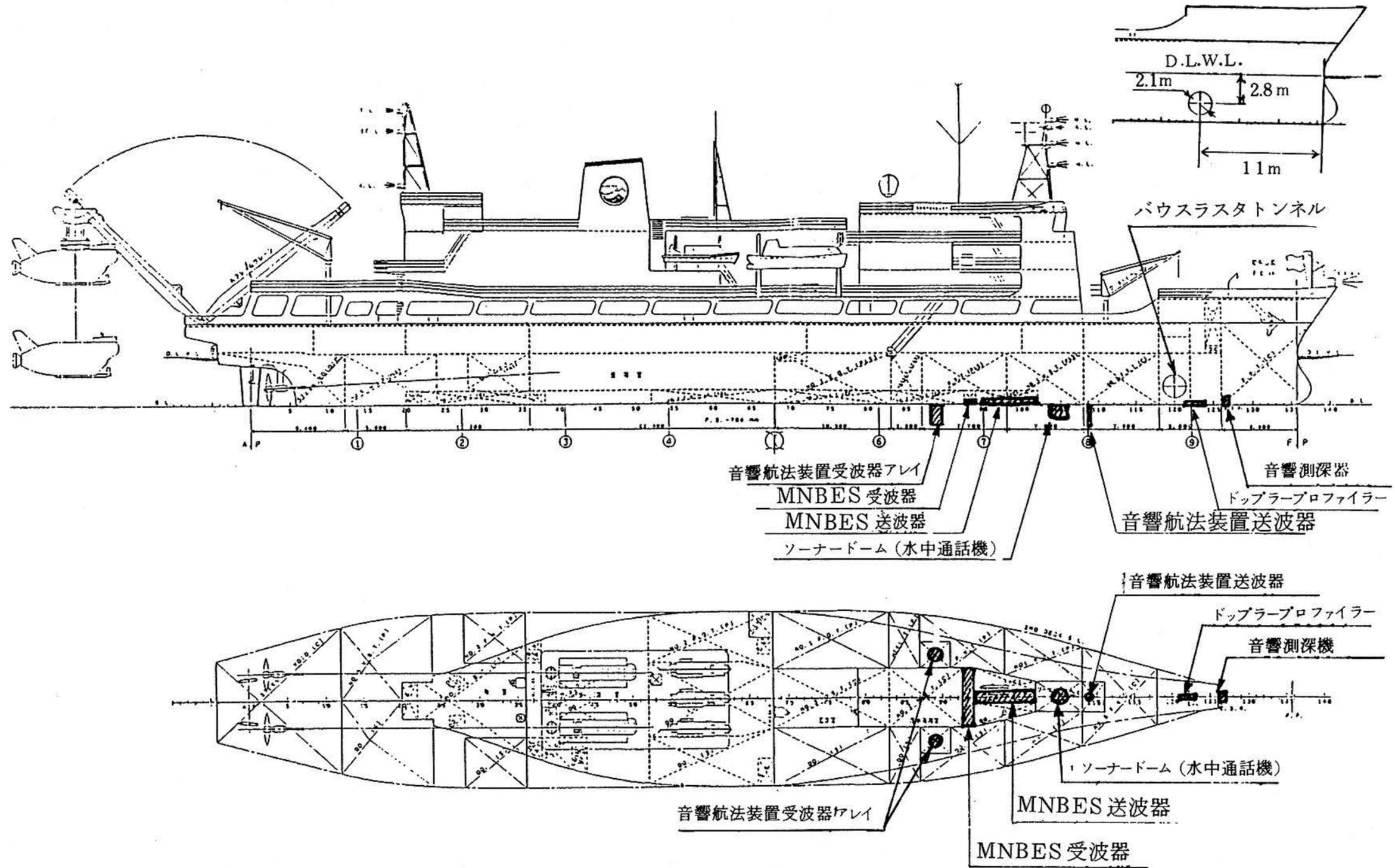


図1 新母船の音響機器送受波器の船底配置

Fig.1 Bottem arrangement of acoustic transducers on the new support vessel

2. 実験の概要

2.1 新母船の概要

新母船は、種々の設計条件（配置、航海速力、載荷重量、センター岸壁事情等）から幅広浅喫水型船型（ $B/d = \text{約} 3.6$ ）を採用しているおり、航海速力16ノットを確保するため、船首尾では喫水下の船幅を比較的狭く絞り込んでいるのが船型的な特徴である。新母船の主要目を表2に示す。

また本船は、潜水船の潜航海域を効率よく調査するためのMNBESの他に、本船の主要機能である6,500m潜水調査船の潜航支援を行うための音響航法装置、水中通話機及び広汎な海洋の調査観測機器としてのドップラープロファイラー等多数の音響機器を搭載する。これら音響機器の送受波器の船底配置を図1に示す。

2.2 供試模型船及び実験装置

供試模型船には、縮尺比1/31.3（ $L_{pp} = 3.035\text{m}$ ）の木型模型船を使用した。写真1に供

表2 新母船の主要目

Table 2 The principal particular of the new support vessel

項目	要目
垂線間長	95m
型幅	16m
型深	7.3m
型喫水	4.5m
総トン数	約4,500トン
航海速力	16ノット
航続距離	約9,000マイル
乗員数	57名
(内 研究者)	(12名)
主推進機関	3000PS×2基 (ディーゼル機関)
主推進方式	2軸, CPP

試模型船を示す。

また、実験装置は川崎重工業（株）の回流水槽を用い、ここに供試模型船を所定の喫水に設置して実験を行った。回流水槽への供試模型船設置状況を写真2に示す。

2.3 実験ケース

実験は表3に示すそれぞれの目的毎に分けて実施した。

なお今回の実験の主目的は、バウスラストトンネル部での気泡発生メカニズム及びトンネル部から放出された気泡の挙動を定性的にとらえることであり、流速（船速）や動揺周期の設定において、相似則としてフルード数を実船と合わせることにより実施した。

一方、発生する気泡の大きさは実船との相似則が成り立っていない。

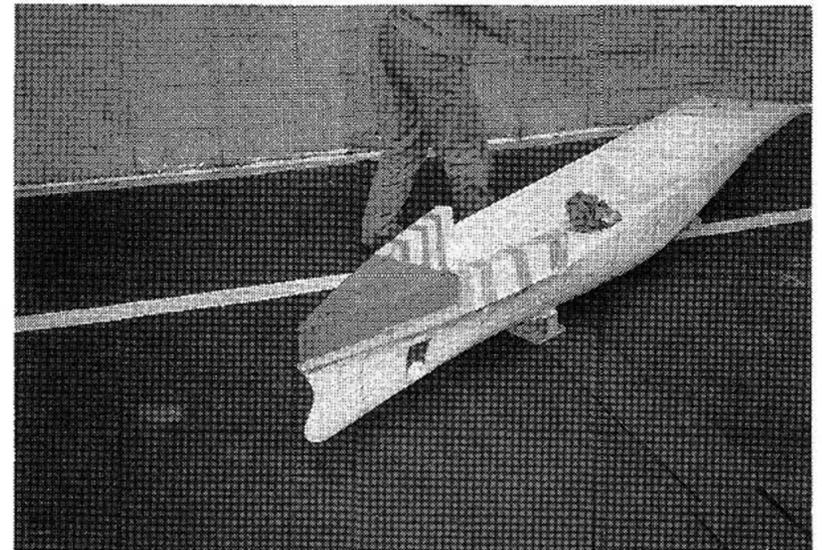


写真1 供試模型船
Photo 1 Model ship

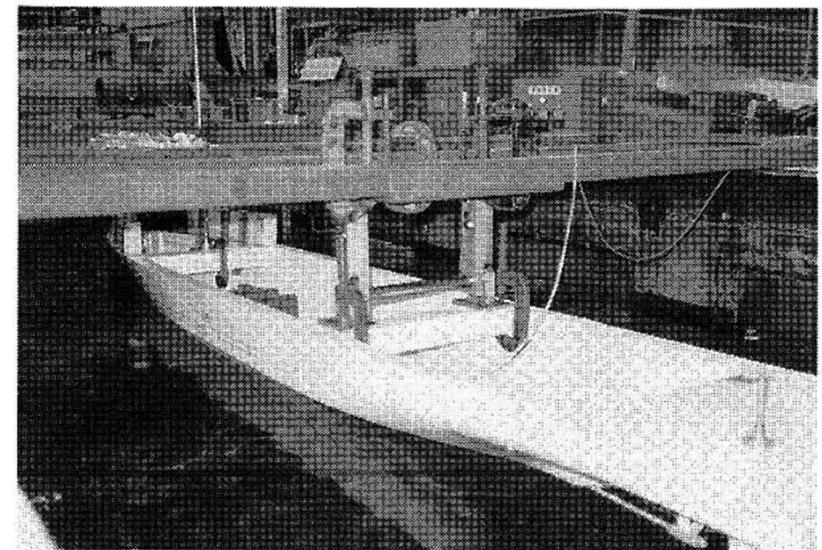
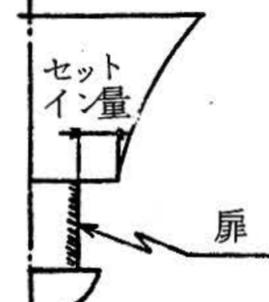
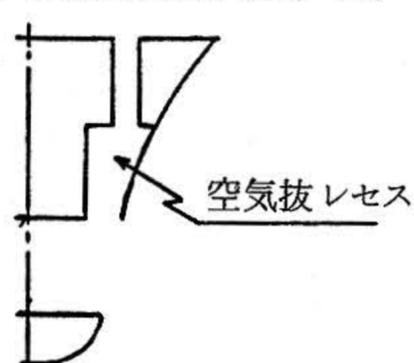


写真2 供試模型船の回流水槽への設置状況
Photo 2 Model ship fitted on the circulating water tunnel

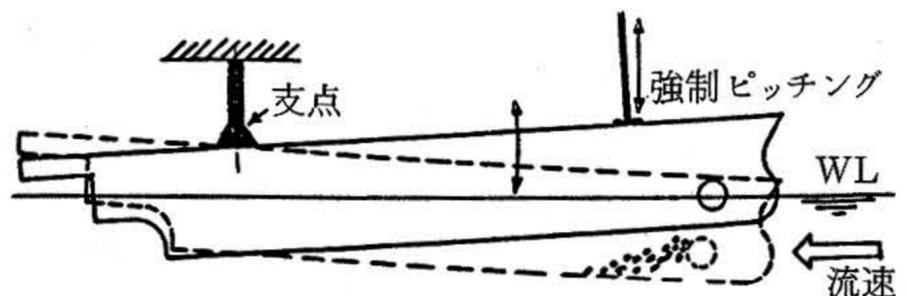
表3 計測ケース
Table3 Cases of experiments

実験番号	目的	実験状況	
		流速	実験方法
1.	バウスタトンネル部の気泡発生の有無及び発生の機構を観察する。	(注1) 1.1m/s (実船12ノット相当)	強制動揺(注2)を与えて気泡の発生の有無及びその発生機構を観察する。 動揺の種類;ピッチング " 周期;約1sec(実船約6sec) " 角度;約2°~約5°
2.	バウスタトンネル部で発生した気泡の流れ(挙動)を観察する。	1.1, 0.7m/s (実船12.8ノット相当)	(1)バウスタトンネル部に気泡発生器で気泡を発生させ船体に沿ってどのように挙動するかを観察する。 (2)気泡のかわりにインク及び糸をバウスタトンネル部から流し船体に沿う流れを観察する。
3.	バウスタトンネル部の気泡の発生及び放出を抑制する方法を検討する。	1.1m/s (実船12ノット相当)	バウスタトンネル部に下記の処置を行い実験番号1と同じ強制動揺を与えて気泡の発生又は気泡の放出を観察する。 (1)下記のセット位置を変化させる。  (2)バウスタトンネル部に下記のような空気抜を設ける。 

(注1)

流速 1.1m/s(実船12ノット相当)は新母船でマルチナローを使用する最大船速に相当する。

(注2)



3. 実験結果及び考察

3.1 バウスラスタトンネル部の 気泡発生の有無及び発生機 構の観察

〔実験番号1〕

流速 1.1 m/s (実船12ノット相当) でピッチングを与えた場合、動揺角度が小さくバウスラスタトンネル部が水面上に露出しない状態では、バウスラスタトンネル部には気泡は発生しない。一方、同一の条件で動揺角度が大きくなり、トンネル部が一部水面上に露出するようになると、この時捕捉した空気が、トンネル部が水没した時に、直径 1~3 mm の気泡となってトンネル部から放出されるのが観察される。気泡の発生状況及び発生後の挙動は表 4 及び写真 3 に示す通りである。

3.2 バウスラスタトンネル部で発生 した気泡の流れの観察

〔実験番号2〕

次に、平水中航走状態で直径約 1 mm の気泡をバウスラスタトンネル部から連続的に放出させ、気泡の挙動を観察した。また、気泡のかわりにインク及び糸をトンネル部から流して流線の可視化を行いこれを観察した。これらの結果を表 5 及び写真 4, 5 に示す。

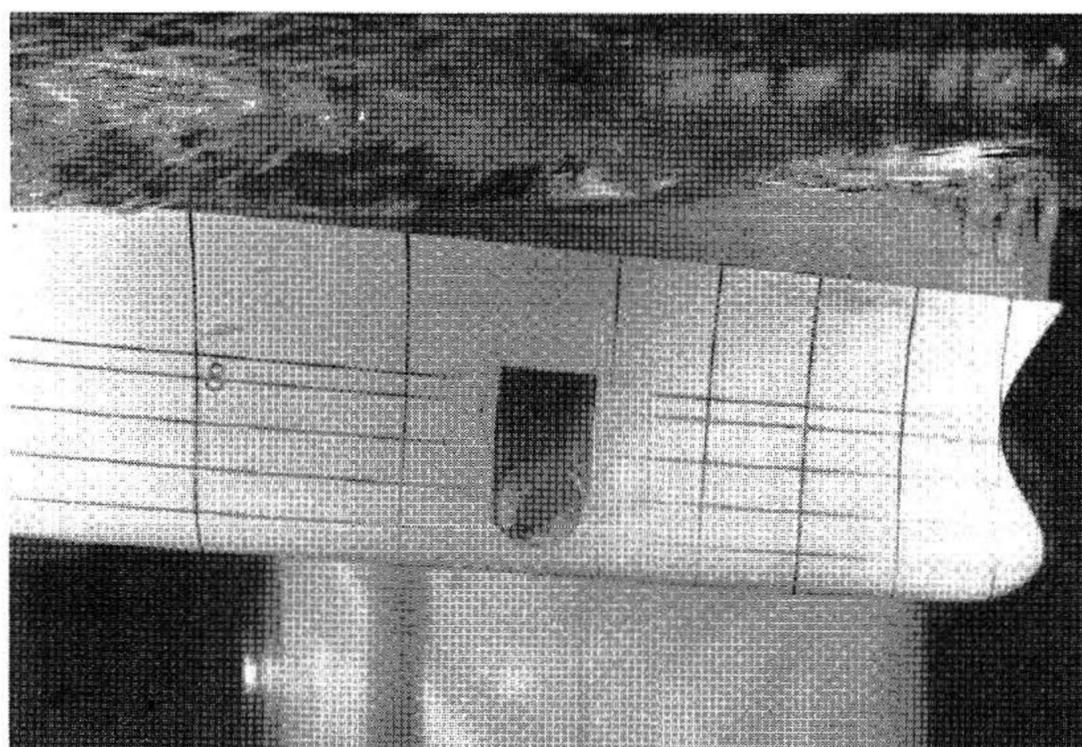
さらに、理論計算により船体周囲のポテンシャル流線を求め、気泡の流れと船体周囲の流れとを比較して図 2 に示す。

これらによりわかる事は、バウスラスタトンネル部から放出された気泡が、船底に潜り込むかどうかは、流速と気泡の大きさ(すなわち浮力の大小)

表 4 実験番号1 ; バウスラスタトンネル部における気泡発生機構観察結果

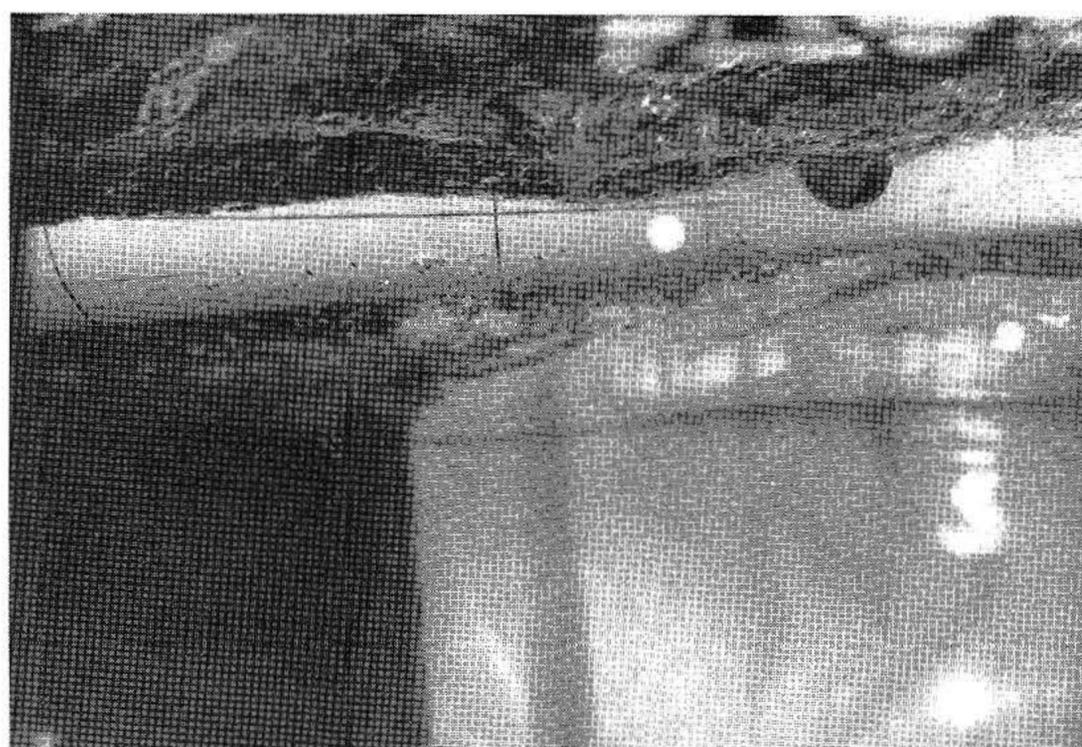
Table 4 Observation results of bubbles generating mechanism in bow thruster tunnel (Exp. No. 1)

	観 察 結 果
トンネル内	トンネル部が上昇して水面上に露出した時に巻き込んだ空気が、下降してトンネル部が水没した状態で気泡となって渦巻状に動く。
トンネル上縁	船首下降時に比較的大きな気泡が上縁から流出する。大部分の気泡はその浮力で海面方向に流れるが、一部は船底方向に流れる。
トンネル下縁	船首上昇時に小さな気泡が船体に沿った流れに吸い出されるようにトンネル下縁から流出し、船底に向かって流れ出す。



(船首下降時)

実験番号	;	1
流速	;	1.1m/s
強制動揺	;	ピッチング 〔 周期 ; 約1sec 角度 ; 約5° 〕
バウスラスト扉	;	なし



(船首上昇時)

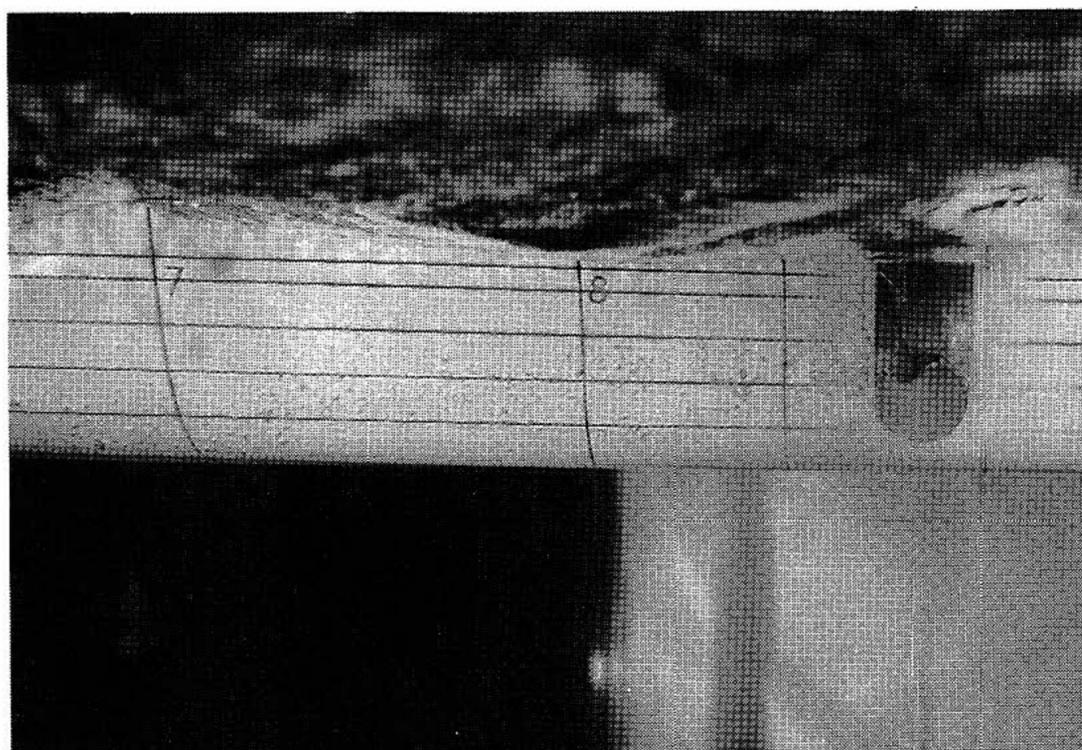
写真3 バウスラストトンネル部の気泡発生機構

Photo3 Observation result of bubbles generated in bow thruster tunnel

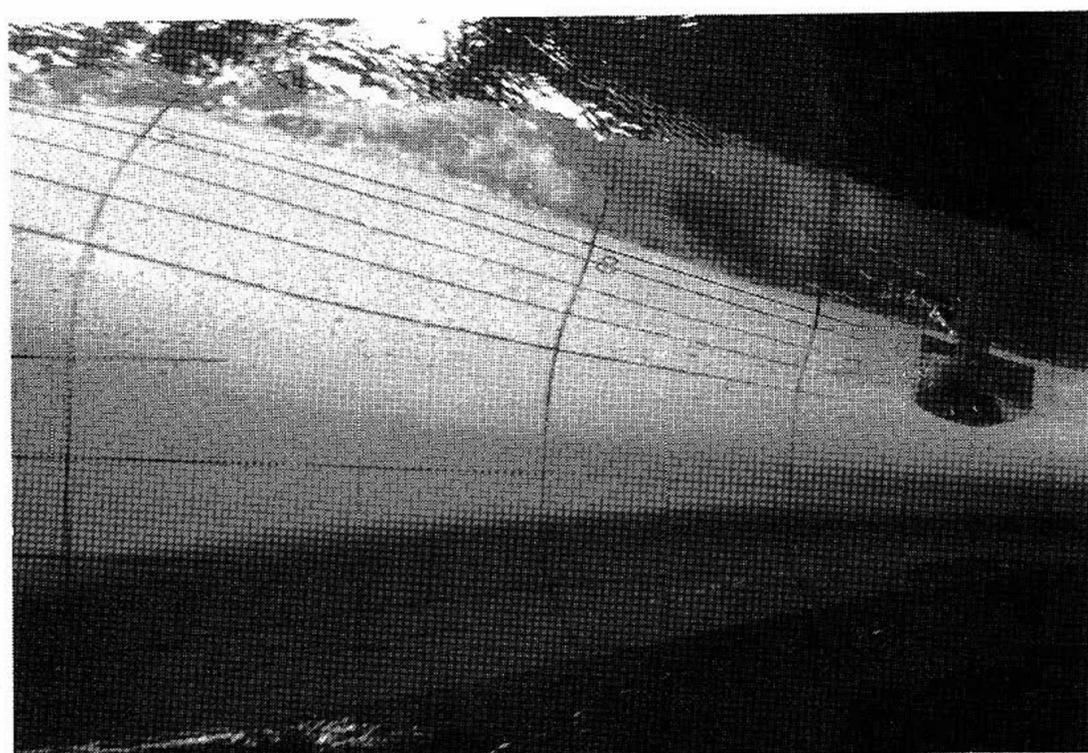
表5 実験番号2 ; パウスタトンネル部で発生した気泡の流れの観察結果

Table5 Observation results of bubbles flow
(Exp. No. 2)

	観 察 結 果	
	流速 1.1m/s (実船12ノット相当)	流速 0.7m/s 以下 (実船 8ノット相当以下)
船側からの観察	トンネルより放出された気泡は流線に沿って船底方向に流れS. S. 6 ~ 7 1/2付近で船底に <u>潜り込む</u> 。	トンネルより放出された気泡のほとんどがその浮力により水面上に上がってしまうため船底には <u>潜り込まない</u> 。
船底からの観察	S. S. 6 ~ 7 1/2で船底に潜り込んだ気泡は船体中心線より舷側寄りの約2 ~ 4 m (実船換算) の範囲に広がり船底に沿いながら船尾方向に流れる。	
インク及び糸による観察	上記気泡の流れとはほぼ同じ流線である。 またポテンシャル流線計算結果とも良く一致している。	インク及び糸で見た流れはポテンシャル流線計算結果とよく一致している。



(船 側)

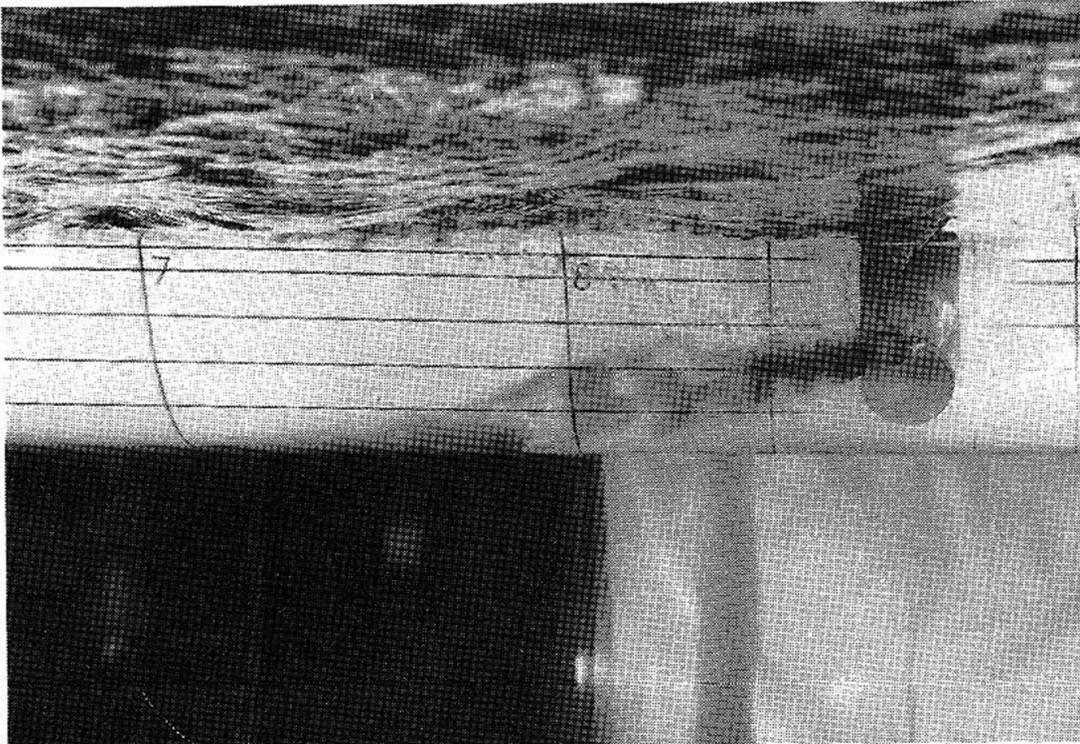


(船 底)

実験番号 ; 2
流 速 ; 1.1m/s
動 揺 ; なし (平水中)
直径約 1mm の気泡を強制放出

写真4 バウスラスタトンネルからの気泡の流れ (流速 1.1m/s)

Photo4 Observation result of bubbles flow from bow thruster tunnel ($V = 1.1\text{m/s}$)



(船 側)



(船 底)

実験番号	； 2
流 速	； 0.7m/s
動 揺	； なし (平水中)
直径約 1 mm の気泡とインクを 強制放出	

写真5 バウスタスタトンネルからの気泡の流れ (流速 0.7 m/s)

Photo5 Observation result of bubbles flow from bow thruster tunnel ($V=0.7\text{ m/s}$)

きさ) に関する。すなわち、直径約 1 mm 程度の気泡の挙動は、流速 1.1 m/s (実船 12 ノット相当) でポテンシャル流線や、インク、糸の流線にほぼ沿うか、気泡の浮力で船体周囲の流線によりわずかに上方を流れ、S.S. 7 1/2 で船底に潜り込む。また、潜り込んだ気泡は船体中心線から舷側寄りに約 2 ~ 4 m (実船換算値) の範囲に拡がって船底に沿いながら船尾方向へ流れていく。一方、流速が 0.7 m/s (実船 8 ノット相当) 以下の場合、直径 1 mm 程度の気泡は浮力により船体周囲の流線から離れて上昇しながら流れていき、船底には潜り込まない。しかし、気泡が直径 1 mm 結果は船体周囲の流れをよく表しており、気泡の挙動を予測する手段に用いることができる

わかった。

mm より更に小さくなると流速が 0.7 m/s 以下でも、流線に沿って船底に潜り込むであろうことは容易に想像できる。

実際には、流速と気泡の大きさだけでなく、流体の粘性や船体近くの水圧変動も気泡の挙動に影響し、今回の実験だけから実船での気泡の挙動を定量的に把握するのは困難であるが、モデルレベルで 1 mm 程度の気泡が船底に潜り込む事実から、実船においてはさらに大きな気泡でも船底に潜り込むものと考えられる。従って、本船の場合気泡発生防止対策が必要なことが明確となった。

また、図 2 に示すようにポテンシャル流線計算結果は船体周囲の流れをよく表しており、気泡の挙動を予測する手段に用いることができることがわかった。

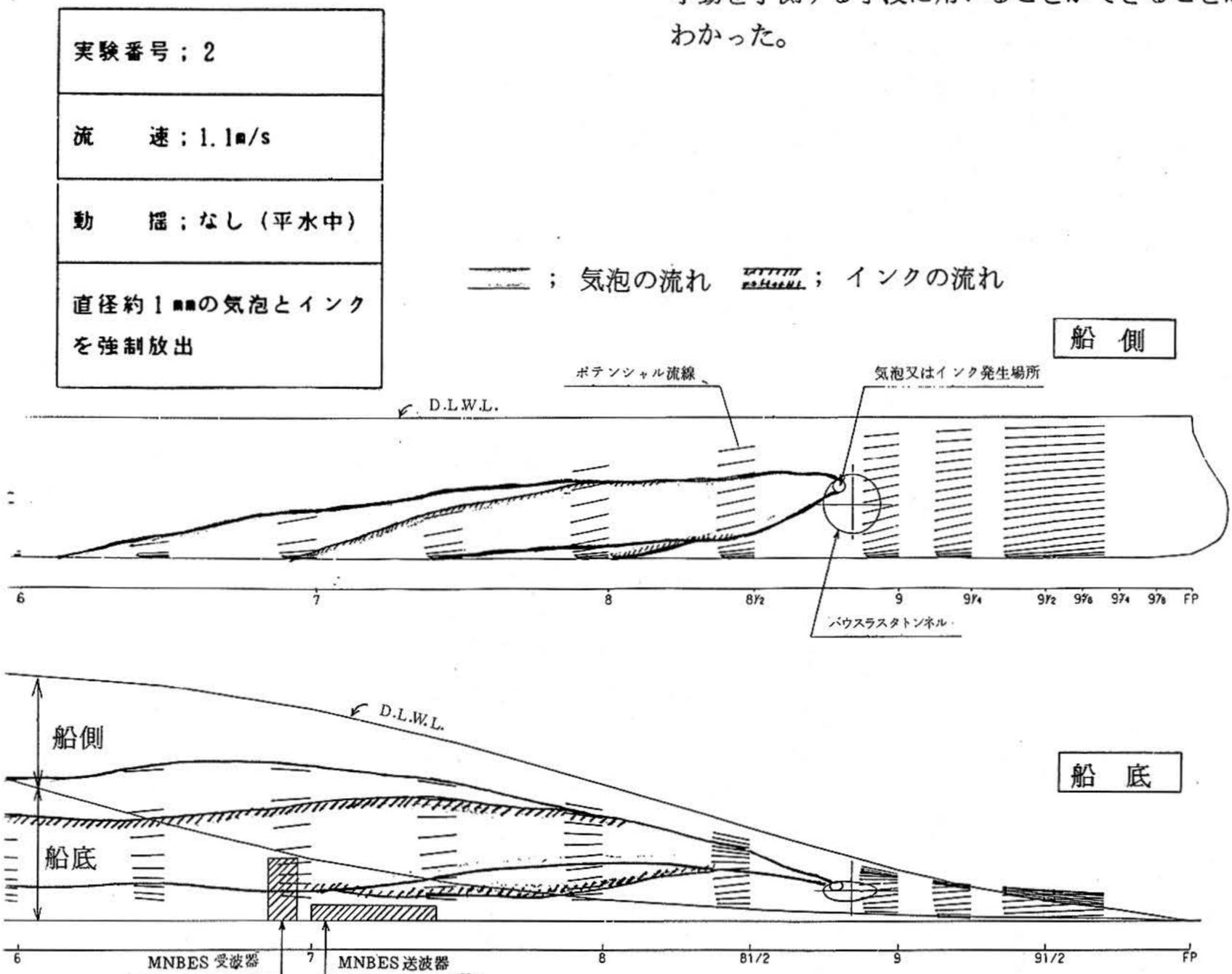


図 2 ポテンシャル流線と気泡の流れの比較
 Fig.2 Comparison between calculated potential flow and bubbles flow by experiments

3.3 バウスタトンネル部の気泡発生及び放出抑制方法の検討 〔実験番号3〕

実験番号1によりバウスタトンネル部で気泡が発生することがわかり、実験番号2によりトンネル部から放出された気泡が流線に沿って船底に潜り込むことがわかった。そこでこの気泡の発生を防止するか又は発生した気泡をトンネル外に放出しない方法について検討した。

気泡の発生を防ぐ方法として、トンネル部に扉をつける方法がある。一方、バウスタが取り付けられる船首部は通常非常にやせた形状をしており、外板面は非常に複雑な三次曲面をなしている。従って、トンネル部に外板に添った扉を設けることは、複雑な形状の扉と開閉機構を狭隘なスペースに設けねばならない。そこで、簡単な平板の扉（すなわち外板と面一でない）で気泡発生防止に有効かどうかを確認するため表3に示すセットイン量を種々かえて気泡の発生が防止できるかを観察した。

また、バウスタトンネル部に空気抜きを設けて、扉を設けなくても発生した気泡がトンネル部から放出するのを防止できるかを観察した。これらの実験結果を表6及び写真6に示す。

これらの結果、バウスタ扉は、外板面より内側に取付けた場合気泡発生防止に効果はなく、扉は外板に沿わずか、内側に取り付けざるを得ない場合でもそのへこみ量はわずか（模型船で約4mm）にして、トンネル部が海面上に露出した時に空気を捕捉しないようにすることが必要であることが分かった。

また、トンネル内の気泡抜レセスは、巻き込んだ空気が渦巻状の気泡となりトンネル中心部に集まるため、トンネル内では気泡の浮力でレセス内に抜けることはほとんどなく、その効果はまったく認められなかった。

4 まとめ

以上の実験により以下のことが分かった。

(1) バウスタトンネル部が船体動揺及び波浪の影響で海面上に露出した場合、次に船首が海面下に潜り込む時に開口部で空気を捕捉し、それが気泡となってトンネルから放出される。

(2) バウスタトンネル部から放出された気泡の挙動は船速、気泡の大きさ（浮力）、流体の粘性、船体近くの水圧変動等に左右されるが、今回の実験では、流速1.1 m/s（実船12ノット相当）、気泡の大きさ約1mm程度でほぼ船体周囲の流れに沿う挙動をし、船底に潜り込んで船尾方向へ流れる。

従って、発生した気泡が船底面に取付けた音響機器受波器の音響透過損失上悪影響を及ぼす可能性があることがわかった。

(3) 船首部の流れは理論計算によるポテンシャル流線にほぼ一致する。従って、バウスタトンネル部等船首部で発生する気泡がどの位置で船底面に潜り込むかはポテンシャル流線計算によって推定可能である。

(4) バウスタトンネル部での気泡発生を防止するには、トンネル部の扉が有効で、できる限り扉は外板面と面一にすることが望ましい。

これらの実験結果に基づき、新母船ではバウスタトンネル部に、外板にほぼ沿った扉を設置することとし、ここで空気を捕捉して気泡を放出しないよう配慮することとした。

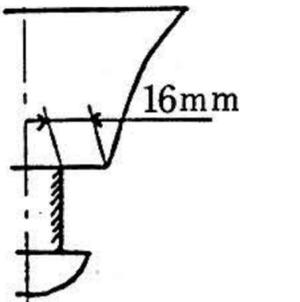
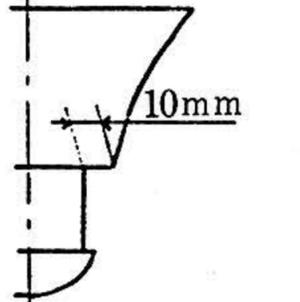
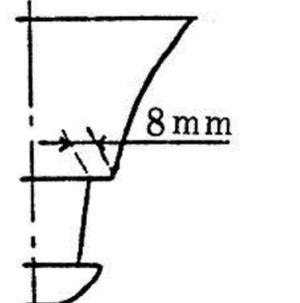
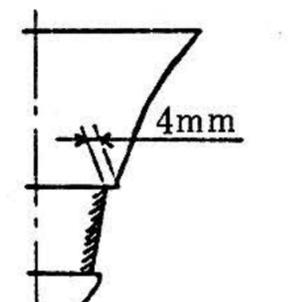
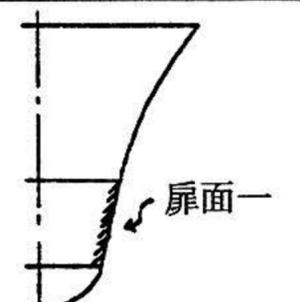
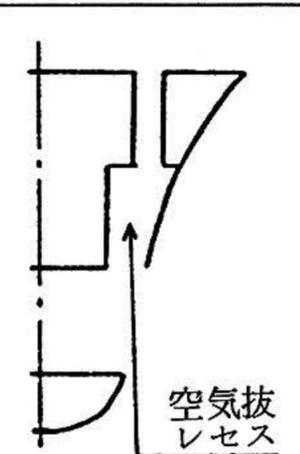
なお、当センターが所有する船舶で、MNBESを搭載するもう一隻の「かいよう」（海中作業実験船）はセミサブ型（半潜水型）の双胴船（SSC）であり、その船型の特異性から、バウスタが船体動揺、波浪等により海面上に露出することはなく、従って気泡によりMNBESが測深不良になるといったトラブルは生じていない。

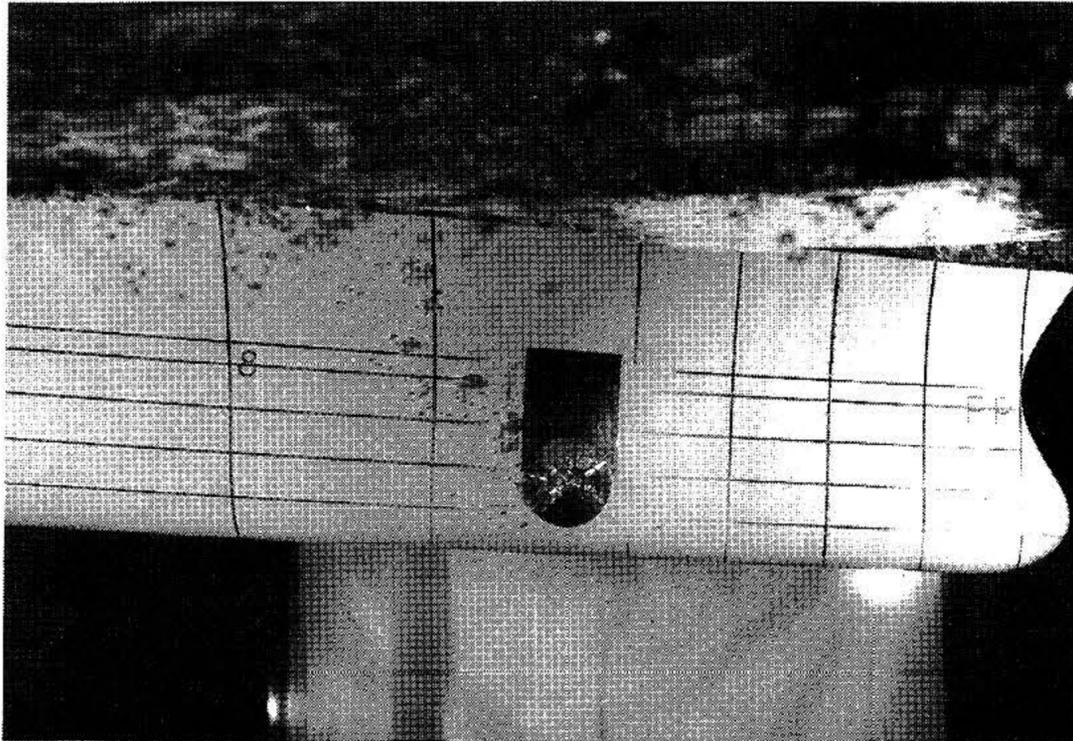
5 謝 辞

今回の実験を実施するに当たり、海上保安庁装備技術部萩原廣治上席船舶工務官並びに吉澤和彦船舶工務官から貴重な意見をいただいたことに謝辞を表す。

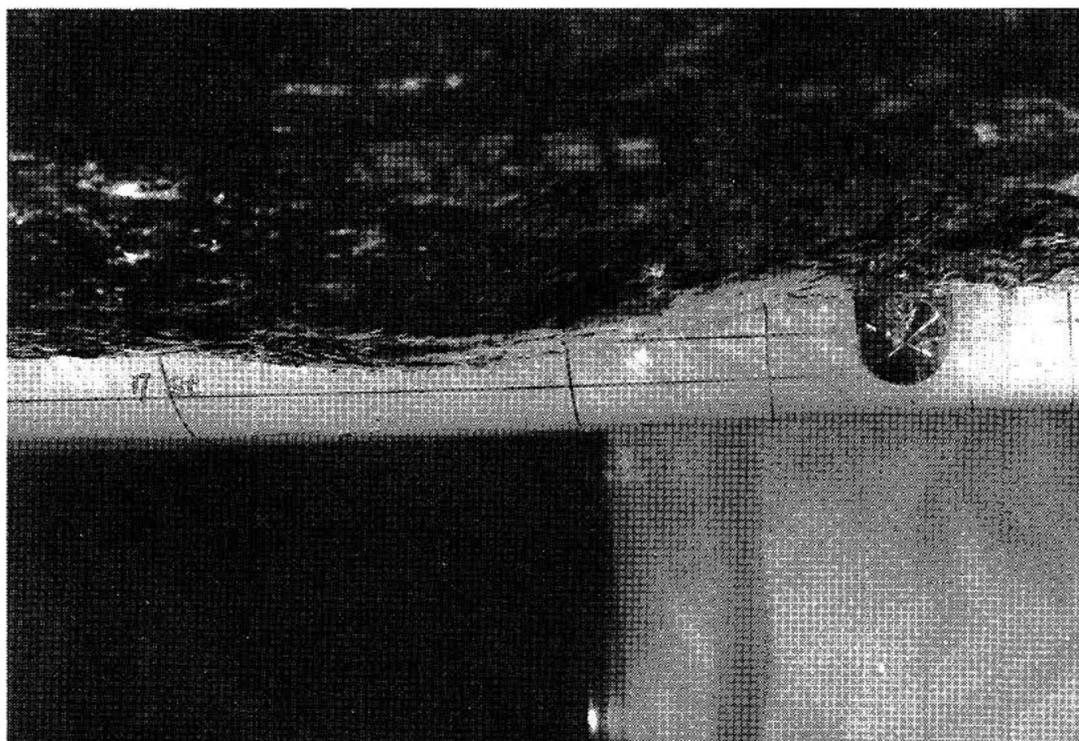
（原稿受理 1987年12月5日）

表6 実験番号3 ; 気泡の発生及び放出防止方法の検討結果
 Table6 Effect of a bow thruster gate and recess opper bow thruster

番号	トンネル部の条件	条 件		観 察 結 果	
		流 速	動 揺		
3 A		1.1 m/s (実 船) 12ノット (相 当)	ピッチング 周期 ; 約 1 sec 角度 ; 約 5°	扉の効果はほとんどなく、扉がない場合とほぼ同じように気泡が発生し、小さな気泡は船底に潜り込む。	
3 B				実験番号3-1とほぼ同じであるが気泡の密度が少なくなる。	
3 C				気泡の発生が前2ケースに比べはるかに少なくなり気泡の放出もほとんどなくなる。	
3 D				空気の巻き込みがなく気泡の放出もない。	
3 E				同	上
3 F					



(船首下降時)



(船首上昇時)

実験番号	； 3 A
流速	； 1.1m/s
動揺	； ピッチング { 周期；約1sec 角度；約5° }
バウスラスタ扉	； あり

写真6 バウスラスタ扉を内側に設置した場合の気泡発生 (セットイン量16mmの場合)

Photo6 Effect of bow thruster gate to pretention of bubble ganeration