回流水槽における小型模型船の造波による波紋の可視化

正員 鈴木 和 夫* 大 越 茂 宏** 正員 大 野 敬 介***
平 井 基 樹**** 秋 林 秀 聡** 山 本 聖 子***

Experimental Visualization of Wave Making Phenomena around Small-scale Ship Models in Circulating Water Channel

by Kazuo Suzuki, *Member* Shigehiro Ohkoshi Keisuke Ohno, *Member*
Motoki Hirai Hideaki Akibayashi Seiko Yamamoto

Summary

In this paper, a visualization technique of wave making phenomena around small-scale ship models in circulating water channel is suggested. Wave patterns around the small model can be visualized by using a flat plate with longitudinal white and black stripes fixed on the bottom of the observing section in the circulating water channel lightened by a few electric lamps over the free surface. In front of a small model, however, ripples (capillary waves) are caused by the surface tension effect, which disturb the observation of clear Kelvin wave patterns around the model. In order to eliminate ripples, an effective experimental way to weaken the surface tension effect is adopted. Kelvin wave patterns in various conditions can be observed clearly by using the present experimental technique.

1. 結 言

本論文では、回流水槽における小型模型船の造波による波紋の実験的可視化手法について提案し、波紋(Kelvin 波)に対するフルードの相似則の確認、トランサム船尾船型まわりの波紋、多胴船型の胴間造波干渉の波紋、浅水状態試験装置の提案と浅水波の波紋、について報告する。大型の曳航水槽(長水槽)における実験とは異なり、回流水槽では比較的小型の模型船を用いざるを得ないが、その場合には表面張力に基づく毛細波あるいは表面張力波と呼ばれる波長の短い波が模型船の周囲に生じるため、重力波である Kelvin 波系の観察が難しくなる。このため表面張力の影響をできる限り排除することが望ましい。以下では、回流水槽における造波波紋の可視化手法および界面活性剤を利用して表面張力波を弱める方法について紹介した後、先に述べた各ケースの造波現象の可視化例について報告する。本研究の実験的可視化手法によれば、小型の模型船の場合でも明瞭な造波波紋を得ること

ができるので、大型水槽より小回りが効く回流水槽における実験という利点を活かして、各種ケースの造波現象を観察、検討、および理解することが可能になる。

2. 模型船造波波紋の可視化手法

2.1 回流水槽における波紋の可視化

曳航水槽または回流水槽で実施される一定速度で航行する船舶の模型実験は、流体抵抗を計測し実船の馬力を推定することがその主たる目的であるが、流場測定、波紋観察、波形計測等の実験もよく実施されている。模型船の造波波紋の可視化についても実施例があるが、曳航水槽で波紋可視化の実験をするのには難しい点がある。模型船は通常台車下部の曳航装置を介して取り付けられているので、台車が邪魔になり波紋全体を観察することが不可能になるからである。また、波面の起伏を可視化するために水面にアルミ等の微細粉が散布されるが、散布される粉粒状物質によっては波紋が変化する可能性があること、および実験後に除去する必要があることを考慮しなければならない。

以上の点を考慮すると、回流水槽の方が波紋の可視化実験を実施しやすい。模型船を水槽の両側壁からの細い支持具で固定することにより波紋観察のための水面を確保することが可能であり、波面の起伏を水底に何らかの模様を配し水面の屈折を利用して波紋を可視化できるからである。本論文で提案する可視化手法そのものは以前に紹介した手法¹⁾と基

* 横浜国立大学大学院工学研究院
** 三井造船昭島研究所(研究当時同上工学部学生)
*** 国土交通省(研究当時同上工学部学生)
**** 日本航空(研究当時同上工学部学生)

本的には変わらないが、具体的には Fig. 1 のような実験方法により波紋の可視化を行う。回流水槽(横浜国立大学)の観測部(長さ 2500mm×幅 1200mm×水深 600mm)の水面に小型の模型船を支持具で固定して、水槽底に流れの方向に対して縦縞の白黒模様を配した板(白黒ストライプ板)を設置し、さらに上方からライトをあてて縞の屈折光を撮影することにより、模型船による造波波紋を可視化するという手法である。なお、使用した回流水槽の仕様性能は最大流速 1.0 m/s であり、最大流速において流速分布は $\pm 2.31\%$ 、平均定在波は ± 1.75 mm、水面傾斜は 1/3300 である。

Fig. 1 Experimental setup in circulating water channel

Fig. 2 Surface tension force of water solution of Woolite

2.2 表面張力影響の除去

回流水槽底面に白黒ストライプ板を設置した上記の手法により波紋を簡便に観察および撮影することが可能になるが、模型船が小型の場合には表面張力の影響により模型船のまわりに毛細波あるいは表面張力波と呼ばれる波長の短い波が生じるため、重力波である Kelvin 波系の観察が難しくなり、フルードの相似則が成立せず、実船の造波波紋とは全く異なってくる。従って、実験条件から表面張力の影響を除去する必要があるが、本研究では界面活性剤を用いる。実際には界面活性剤を含有する洗剤を希釈し、その水溶液を模型船の船首前方水面に噴霧するという手法を採用する。

本論文では 22.5%の界面活性剤を含有する商品名ウーライト(Woolite)という洗剤を利用する。毛管現象を利用して計測したウーライト水溶液と清水の表面張力を比較すると Fig. 2 のようになるので、実験にはウーライトの 2%水溶液を利用し、噴霧機を用いて回流水槽上部より模型船船首前方の水面に噴霧している。この場合、Fig.2 のように表面張力は清水の約 1/3 まで減少していると期待される。なお、界面活性剤を水溶させるためには親和剤等が含まれている洗剤を使用する必要がある。

実際に以上の手法により可視化した、船長 0.5m の模型船まわりの造波波紋比較例を Fig.3 に示す。界面活性剤を利用しない場合には左のように無数に近い細かい表面張力波を生じているが、界面活性剤水溶液を噴霧して実験すると右のように表面張力波をほぼ全て除去することができ、重力波である明瞭な Kelvin 波系のみを観察することが可能になる。なお、噴霧手法はこのような表面波の問題の場合にのみ有効であり、自由表面が大変形するスプラッシュのような場合の小型模型による実験に際しては、流体全てを界面活性剤の水溶液にする必要がある²⁾。

Fig. 3 Examples of visualized wave pattern

3. Kelvin 波の可視化

3.1 フルードの相似則の確認

小型模型船まわりの自由表面流は表面張力の影響を除去しない限り、重力と表面張力、すなわちフルードの相似則とウェーバーの相似則の支配を受けている。従って、本実験手法により表面張力の影響が除去されているとすれば、幾何学的相似な 2 つの小型模型船まわりの自由表面流はフルードの相似則のみによって決まり、波紋も幾何学的相似に見えるはずである。

幾何学的相似模型として船長 0.5 m と 1.0 m の 2 つの小型模型船を採用し、フルード数

$$F_n = U / \sqrt{gL} \quad (1)$$

を一定にして造波波紋を可視化した例を Fig. 4 に示す。なお、 U は一様流速(船速)、 L は船長である。この例では白黒のストライプ幅も模型船長の比率に合わせて 2 cm と 4 cm としている。Fig. 4 によれば波紋も幾何学的相似に見えると判断できるので、重力波である Kelvin 波をこのような小型の模型船の場合にも再現できていると考えてよい。

Fig. 4 Froude's law of similarity for Kelvin waves at $F_n=0.25$

3.2 トランサム船尾船型まわりの波紋

トランサム船尾を持つ高速船は一般の商船とは異なった流体力学的特性を持ち³⁾、造波波紋についてはトランサムの角からの波が顕著になる。ここでは通常の商船より扁平なトランサム船尾船型である‘Athena’と呼ばれる高速船型⁴⁾まわりの波紋可視化の検討例について紹介する。本研究の供試模型である高速船‘Athena’の主要目および模型形状を Table 1 および Fig. 5 に示す。なお、これらの供試模型まわりの波紋については既に Fig. 3 および Fig. 4 にも示されている。

Table 1 のうち 0.5 m 模型船について、白黒ストライプ幅を 1~4 cm まで変化させたときに波紋がどのように見えるか検討した例を Fig. 6 に示す。この例ではフルード数 0.25 の波紋が示されているが、トランサム船尾からの波も含め波紋の細かい構造を確認するためにはストライプ幅の狭い方がよい。なお、縞模様の屈折の大きいところが波の山

谷の顕著な部分に対応している。一方、ストライプ幅が太い場合には、一種のフィルタがかかったような状態になり、顕著な波のみが可視化されることになるので、目的に沿ってストライプ幅を変化させれば適切な波紋を観察することができる。

ストライプ幅 4 cm としてフルード数 0.5 という高速な場合の波紋を可視化した例を Fig. 7 に示す。回流水槽の最大流速を多少上まわって利用しているため水面に乱れが認められるが、本手法によればトランサム船尾後方の波紋を可視化することが可能になる。しかし、曳航水槽でアルミ等の粉粒状物質を散布して可視化する場合には伴流内で粉粒状物質が途切れてしまい、波紋を可視化することは不可能である。

Table 1 Particulars of model ‘Athena’ with transom stern

Model ‘Athena’			
Length	L	0.500 m	1.000 m
Breadth of midship	B	0.067 m	0.133 m
Maximum breadth	B_{max}	0.074 m	0.147 m
Draft	T	0.016 m	0.032 m
Block coefficient	C_b	0.477	
Wetted surface area	S	0.022 m ²	0.088 m ²

Fig. 5 Side and bottom views of model ‘Athena’

Fig. 6 Comparison of wave pattern for various stripe breadths at $F_n=0.25$

Fig. 7 Wave pattern at $F_n=0.50$ by stripe breadth 4 cm

3.3 多胴船型の胴間造波干渉の波紋

多胴船型の胴間造波干渉は非常に複雑であるため、可視化により波紋を観察することが現象の理解のためにも重要である。ここでは胴間造波干渉の可視化に関する基礎的な検討を行うため、供試模型には次のような数式船型を採用している。座標系として船長方向に x 軸を、幅方向に y 軸を、鉛直方向に z 軸をとるとき、主船体は

$$y = \pm B/2 \cos(\pi x/L) \{1 - (z/T)^4\} \quad (2)$$

のように表現でき、Table 2 にその要目を示す。三胴船や五胴船のアウトリガーあるいはスポンソンと呼ばれる側方に配置される小船体は、主船体の 1/3 の主要目を持つ相似船型とする。小船体の位置を Fig. 8 に示すが、これは(1)式のフルード数を 0.4 および 0.5 として、薄い船の理論 (Michell の理論) に基づき三胴船型の造波抵抗を最小化した際に得られた最適位置⁹⁾に一致している。1A, 1F がフルード数 0.4 による最適位置、2A, 2F がフルード数 0.5 による最適位置である。本論文では多胴船の模型名を小船体の位置により区別するものとし、Table 2 のように模型名を定義している。Fig. 9 に回流水槽実験で使用する五胴船模型の例を示す。

Fig. 8 Positions of outriggers or sponsons in multi-hull form

胴船型を想定することができるが、ここでは各 1 例について、本実験に基づく可視化波紋と数値計算に基づく波紋を比較して Fig. 10 および 11 に示す。数値計算にはアウトリガーあるいはスポンソンの揚力体効果を考慮することができる PAFS (Panel method Applied to Free Surface flow)⁹⁾ を用いている。フルード数が高いために縞模様が多少明瞭ではなくなり、かつ胴間干渉により波紋が複雑になってはいるが、干渉波紋の反射位置などは実験と数値計算とでよく一致している。本実験手法は多胴船型の胴間造波干渉の現象を理解するための手段として簡単に利用でき、実際に実験現場でこのような手法により波紋を観察すると、さらに効果的であることがわかる。

Table 2 Particulars of main hull and model names

Main hull		
Length	L	0.600 m
Breadth	B	0.047 m
Draft	T	0.030 m
Displacement volume	∇	0.000432 m ³
Displacement length ratio	∇ / L^3	0.002
Wetted surface area	S	0.0469 m ²
Midship area	A_m	0.00113 m ²
Midship coefficient	C_m	0.800
Block coefficient	C_b	0.509
Prismatic coefficient	C_p	0.637

Trimarans and pentamarans

Model name		Positions	
Trimaran	TR-1F	1F	-
	TR-2F	2F	-
	TR-1A	-	1A
	TR-2A	-	2A
Pentamaran	PNT-1F1A	1F	1A
	PNT-1F2A	1F	2A
	PNT-2F1A	2F	1A
	PNT-2F2A	2F	2A
	PNT-1F2F	1F, 2F	-
	PNT-1A2A	-	1A, 2A

Fig. 9 Tested multi hull model (Example of pentamaran)

Table 2 に見られるように様々な形態の三胴船型および五

Fig. 10 Numerical and experimental visualizations of wave pattern around a trimaran hull form at $F_n=0.40$

Fig. 11 Numerical and experimental visualizations of wave pattern around a pentamaran hull form at $F_n=0.40$

4. 浅水域における造波現象

4.1 浅水状態試験装置

Fig. 12 Experimental system for shallow water condition

浅水域を航行する船舶に働く流体抵抗や造波現象は、深水域を航行する場合とは一致しないことがよく知られているので、本研究では浅水域における造波波紋を回流水槽実験により可視化する手法について検討する。本研究で使用する浅水試験装置は、水深 600 mm の回流水槽観測部に仮底を設置することにより浅水状態を再現する装置であり、透明な底面(仮底面)の亚克力板と側面の亚克力板は鋼の軽量アングルによってボルトで固定され、前後部に水深調整アングルが取り付けられている。この水深調整アングルを回流水槽レール部に L クランプを用いて固定することにより、装置を設置する。装置の内寸は長さ 2200mm×幅 800mm×水深 100mm で板厚は 10mm である。水深は水深調整アングルと回流水槽レール部の間に挿入したスペーサーを利用して変更することができ、変更可能な水深は 50、60、70、80、90、100mm である。回流水槽に設置された浅水試験装置と断面の概要を Fig. 12 に示す。

Fig. 13 Calibration curves

Fig. 14 Flow velocity distributions for $h=90\text{mm}$

以上の浅水試験装置について、浅水状態が再現され、かつ回流水槽実験が可能かを確認するために性能試験を実施する。性能試験では、流速 U と回流水槽のインペラ回転数 R の関係を検定して較正曲線を作成し、検定結果を元に断面内について流速の均一性を確認する必要がある。浅水試験装置を回流水槽に取り付け、水深の設定を 90mm、70mm、50mm と変化させて実験を実施する。得られた較正曲線を Fig. 13 に、

例として水深 90mm の半分の水深位置にて幅方向に計測した流速分布を Fig. 14 に示す。このような結果から、インペラ回転数と流速の線形性、流速の均一性が確認できるので、実際に浅水状態における模型船の造る波紋の可視化を試みる。なお、可視化手法は 2 章で述べた手法と同様であるが、浅水試験装置の場合には仮底を透明アクリルとして白黒ストライプ板を水槽底に設置している。

4.2 浅水波の波紋

小型模型船を用いて浅水域における造波波紋を可視化するが、供試模型には 3.3 節で用いた主船体と同じ数式船型を用いる。従って、形状は(2)式で主要目は Table 2 で与えられている。浅水域の問題では水深 h に基づくフルード数

$$F_h = U / \sqrt{gh} \quad (3)$$

が 1 となる臨界値をはさんで造波特性が大きく変わり、1 以下を sub critical、1 以上を super critical と呼んでいるが、sub critical の速度域では造波抵抗が急増すること、および本研究で用いている回流水槽の性能から、ここでは sub critical の速度域についてのみ可視化実験を実施する。

可視化した浅水波の波紋を Fig. 15 に示す。この図では船長に基づく(1)式によるフルード数を 0.25 とした波紋が示されているが、水深が異なるため(3)式によるフルード数は異なる。詳細に観察すると水深によって細部の波紋がかなり違うのを確認することができるが、このままでは判りにくいので、得られた波紋のデジタル写真から船首第 1 波の半波頂角を計測して比較したものを Fig. 16 に示す。重力波系であるからケルビン角に相当する角度を計測するのが理想であるが、本手法では十分後方までの波紋を得ることができないので半波頂角の比較としている。一般に波頂角は速度が上がってくるとシャープになってくるが、水深が 50mm の場合にはほとんど変化がなく、sub critical の速度域に近くなるにつれて特性が変化しているのを確認できる。

Fig. 15 Comparison of wave pattern in various water depths at $F_n=0.25$

Fig. 16 Comparison of measured crest angles of bow wave

4. 結 言

本論文では小型模型船が造る波紋を回流水槽で可視化する手法について報告し、本手法により可視化した波紋がフルードの相似則を満たすことを確認するとともに、トランサム船尾船型まわりの波紋、多胴船型の胴間造波干渉の波紋、さらに浅水試験装置を提案して浅水波の波紋についても可視

化を実施した。本実験手法は様々なケースの造波現象を簡便に観察、検討かつ理解する手段になると考えられる。

謝 辞

本研究についてご助言、ご討論いただきました横浜国立大学大学院工学研究院甲斐寿准教授、および実験にご協力いただきました岡田功技術専門員に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Suzuki, K., Ikehata, M., Ue, K. and Ogihara, H.: Experimental Study on the Free Surface Flow in front of 2-D Rectangular Floating Body with and without the Effect of Surface Tension, Proceedings of 2nd Japan-Korea Joint Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, Sakai, pp. 104-110, (1993).
 - 2) Abulbashar Alam, Kai, H. and Suzuki, K.: Two - Dimensional Numerical Simulation of Water Splash with and without Surface Tension, Journal of Marine Science and Technology, Vol.12, No.2, pp.59-71, (2007).
 - 3) Hirai, M. and Suzuki, K.: Experimental Studies on Characteristics of Resistance and Free Surface Flow of Transom Stern High-Speed Hull (Experiment in Circulating Water Channel), Proceedings of the 3rd Asia Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics, Shanghai (APHydro2006), pp.1-6, (2006).
 - 4) Reed, A.T. and Day, W.G. Jr.: Wake Scale Effects on a Twin-screw Displacement Ship, Proceedings of 12th Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, DTNSRDC, pp.225-247, (1978).
 - 5) 鈴木和夫、池畑光尚: アウトリガー付き三胴船型の胴配置に関する造波抵抗極小化の研究、日本造船学会論文集、第177号、pp.113-122, (1995)
 - 6) Suzuki, K. and Kai, H.: Numerical Estimation of Wave Making Characteristics of High Speed Ships Taking Sinkage and Trim Effects into Account, Proceedings of the 8th International Conference on Fast Sea Transportation (FAST2005), CD-ROM, St. Petersburg, (2005)
-