肥えに船舶の船首部波崩れ現象について

三菱重工業株式会社長崎研究所

武隈克義，加用芳男，是成晴知^o

Breaking Bow Waves on Full-Bodied Hull Forms

K. Takekuma^{*}, Y. Kayo^{*}, H. Korenari^{*}

In order to get a better understanding of the so called bow-wave-breaking phenomenon occurring on full-bodied hull forms, attempts were made to observe the flow fields around the bow of ship models. By use of dye particles injected into the fluid, it was verified that there exists a shear layer beneath the free surface in front of the moving body. Then it was found that the shear layer leads to the formation of necklace vortices spiraling around the bow of the full form even at extremely slow speeds without any visible breaking waves. At higher speeds there appears a visible wave breaking accompanied by intensive vortical motion beneath the free surface. The intensity of the shear layer and the necklace vortices around bluff bows thus seems to have a significant effect on the formation of breaking bow waves.

1. はじめに

タンカーやばら積み船などの肥えに船舶の船首周りに、白い気泡を含む波崩れが生じているのは良く見られる現象であるが、船に働く抵抗の1つの成分として明らかにされたのは比較的新しいことである。この波崩れを軽減することが、これら肥えに船型の改善、即ち船体抵抗の減少につながる事が指摘されて以来、現象の解明のために種々検討が行われているが、どのような機構で波崩れが生ずるかは必ずしも明らかではない。波崩れ現象の発生機構の検討のためには、波崩れ部分の流れを詳細に調査することが大切であると考えられるが、その第一段階として流場を可視化し観察することは重要な手段であろう。回流水槽を用いた船首波崩れ部分の可視化例はこれまでも報告されており、船首首飾り渦の発見に代表される有効な情報を提供している。

本報告は、船首波崩れ現象を更に良く理解することを目的として、一連の流れの可視化実験を行ったものであり、回流水槽でなく通常の曳航水槽で大型の模型船等を用いて流場を詳しく観察したものである。

* Nagasaki Technical Institute, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

2. 流場観察実験

2-1 可視化装置，供試模型船

実験は三菱重工業（株）長崎研究所船型試験場の曳航水槽で行った。回流水槽と異なり通常の曳航水槽での可視化実験には、トレーサ、照明、観察方法のいずれも曳航水槽固有の制約があった。以下に今回実施した方法について述べる。

トレーサ： 顔料，プラスチックペレット，金属屑等の水質に悪影響を及ぼさない材料を選び試用した結果、金属屑と水に混ぜミキサーで所望の大きさに粉碎したものが、光の反射効率、水の運動に対する追従性の点で良好な特性であった。

観察装置： 自由表面近傍の状況と水中から観察するには防水カメラ等による攪乱が少ないことが望ましい。そこでカメラを水中に入れる代わりに鏡を入れ、これによる反射像を水上から撮影する方法を採用した。波により自由表面が変形し像が歪むのを抑えるため、鏡の上方水面にアクリライト製の透明平板を置き、これを通して観察した。

照明： 今回の観察には、水中の所定断面での流れの様子を調査する必要がある。回流水槽等では、スライド映写機を利用してスリット光を与える方法も行なわれているが、大型模型船を使用した本試験では十分な光量の照明範囲の広いスリット光を簡単に入手できなかった。従って、ここでは1 kWのハロゲン灯を水中で点灯して全体を照明し、トレーサと所定の断面にのみ供給して流れの可視化を行なった。

トレーサ放出装置： 管径4 mmの細いパイプを櫛型に並べ、流線型の整流カバーをつけたものを模型船の前方に置き、トレーサを供給した。

以上の観察装置，模型船等の試験配置図とFig. 1に示す。なお使用した模型船の主要目は次のとおりである。

長さ 5.00 m
幅 1.00 m
喫水 200.0 mm

Fig.1 Arrangement of flow visualization apparatus

2-2 流場観察結果

Fig. 1 の構成により観察した船首前方縦中心断面上の流れの様子の一例を Fig. 2 に示す。自由表面は船首近くで大きく隆起し、波崩れが生ずるがその直下に複数個の渦を伴う運動が認められる。その領域の厚さはせいぜい波高程度であり、深さ方向にはあまり広がっていない。船首に近い部分の良く目立つ渦は、いわゆる船首首飾り渦⁽¹⁾と呼ばれているものであるが、いずれにしても船首の波崩れ現象は、このような複雑な渦運動を伴っていることが分かる。

なお自由表面の白い軌跡は、水面の視覚化のため水面上に流した気泡である。

Fig. 2 Flow field in front of the bow

($V_m = 1.284 \text{ m/s}$, $Fn = 0.168$)

3. 船首波崩れ発生のモデル

波崩れの生じている部分に渦が見られることについては、波が崩れることにより、剥離流を生じ、この結果渦が形成されるとする説明^{(1),(2)}がされる場合もある。事実著者らの行った5孔ピトー管による流場計測結果⁽³⁾においても、波崩れ部分では主流方向流速が低下しており、これより下方の流体との間に大きな速度差一剪断流が生じていることが確認されている。しかしながらまた同時に、波崩れの発生している部分より前方の自由表面に剪断流が存在することが分かってきた⁽⁴⁾。従って波が崩れるから剪断流が発生し、船首首飾り渦にまで至るのではなく、剪断流が存在するから渦が形成され、波崩れが発生すると考えることもできると思われる。

すなわち著者らは「船体前方の自由表面に何らかの機構で剪断流が生じ、この剪断流が船体により横方向に変形させられることにより2次流れとして渦一船首首飾り渦一に発達する。この渦は船体の速力とともに強さを増し、ついにはいわゆる波崩れとして認められる現象が発現する」というモデルを考え、検討を進めることにした。

この2次流れとしての渦が生ずる過程については、自由表面を剛体平板で置き替えた場合のモデルを適用した。例えば平板上の境界層中に置かれた円柱まわりの Horse shoe vortex (Fig. 3) は、平板の境界層が円柱まわりで横方向に変形させ

られるため生ずる2次流れであると解釈⁽⁵⁾することができ。従って自由表面に剪断流があれば、以降は自由表面の有無によらず、同一の機構で渦が発生すると考えた。

一方、自由表面での剪断流—境界層—の発生機構については、粘性流体中の剛体表面での境界層の発生と類似の機構で説明し得る可能性があるが、これについては例えば文献(6)などの記述に譲る

以下では、上記モデルに従って行った流れの可視化実験結果を示す。

4. 自由表面剪断流と首飾り渦

3章に提案した波崩れに関するモデルのキーポイントである自由表面剪断流と首飾り渦⁽⁵⁾の可視化を行った。

2次流れモデルによれば、物体の前端が肥大化すればするほど、強い渦が生ずることになる。従って上述の模型船より更に前端部が肥大である円柱を用いて、現象を顕著なものとし可視化の便をはかるとともに、

Fig. 3に示した平板上の円柱まわりの流れとの直接的な対比を行うことを計画した。水彩絵具の水溶液をトレーサとして首飾り渦を可視化した結果をFig. 4に示す。曳航速力が極めて低く、いわゆる波崩れが認められない状態においても首飾り渦が存在することが分かる。次に円柱前方の垂直断面での流れの様子を可視化した例⁽⁷⁾を示す(Fig. 5)。互いに逆方向に回転する2~3個の首飾り渦とともに、その前方の自由表面下に剪断流が存在することを明瞭に示しており、Fig. 3の円柱まわりの馬蹄形渦と良く似た流れであることが注目

Fig. 3 Horseshoe vortex⁽⁸⁾

Fig. 4 Necklace vortex around a circular cylinder ($V_m = 0.10 \text{ m/s}$, $Fn = 0.05$)

Fig. 5 Flow pattern in front of a circular cylinder ($V_m = 0.05 \text{ m/s}$, $Fn = 0.025$)

される。以上の可視化により、いわゆる目に見える波崩れ発生の以前にも、船首前方自由表面には剪断流が存在し、船首を取巻く首飾り渦に発達するということが、実験的にも示されたものと考えられる。

なお Fig. 4, Fig. 5 に使用した円柱の直径はそれぞれ、 420^{mm} , 457^{mm} であり噴水は直径の $\frac{1}{4}$ である。このうち Fig. 5 は西独ハンブルグ大学の曳航水槽を使用した可視化実験の結果である、可視化のためのトレーサは自由表面上から注射器で滴下した水彩絵具の水溶液を用い、照明はスタジオ用スポットライトによりスリット光を作り、円柱前方の水中断面を可視化した。同水槽は幅 2.1^{m} 水深 1.1^{m} であり、タンクの両側の壁の自由表面近く、水中観察用の窓が設けられており、流れの可視化には好都合であった。

5. 自由表面剪断流の船首波崩れに及ぼす影響

3章において、目に見える形でのいわゆる波崩れは、首飾り渦の強さが強くなった場合に生ずると考えた。これは曳航速力が低く、波崩れが見られない場合にも首飾り渦が存在し、速力の増加とともに渦運動が激しくなり、崩れが発生するという観察に基づいている。しかしながら更に直接的に「渦が強くなると波崩れが発生することを」示すことができれば、著者らの提案するモデルの妥当性が増すものと思われる。

剪断流が2次流れとして首飾り渦に発達するというモデルによれば、剪断流が強いほど、また物体形状が前端で肥大であればあるほど、渦は強くなるということになる。従って、剪断流を何らかの方法で強くすれば、渦運動は激しくなり、この結果波が崩れる、もしくは一層激しい波崩れが生ずることが予想される。

この検討を行うため人為的に剪断流を強めて船首部分の流れを観察した。剪断流を強化する方法として、船体前方の自由表面上に薄いビニールシートを浮かべ船体とともに曳航した。ビニールシート自身は大きな波も立てず滑らかに水面上を進んだが、これによって作り出された剪断流の波崩れに及ぼす影響は極めて大なるものがあつた。

自由表面上から観察した波崩れの様相を Fig. 6 に示す。上段がビニールシートの無い場合で、下段がビニールシートをつけて曳航した状態である。曳航速力が低く、目に見える波崩れが無い場合も、剪断流を強化すれば波崩れが発生し(左側写真)、ビニールシートが無くても崩れている状態では一層強い波崩れを引起すことが認められ(右側写真)、著者らのモデルの予測と良く合致する結果であると考えられる。なお、Fig. 6 の写真から、ビニールシートにより剪断流を強化した場合、船首に最も近い首飾り渦が顕著になっていることが分かる。

Without vinyl sheet
($V_m = 0.700 \text{ m/s}$, $F_n = 0.091$)

Without vinyl sheet
($V_m = 1.089 \text{ m/s}$, $F_n = 0.142$)

With vinyl sheet
($V_m = 0.700 \text{ m/s}$, $F_n = 0.091$)

With vinyl sheet
($V_m = 1.089 \text{ m/s}$, $F_n = 0.142$)

Fig.6 Breaking waves around the bow of the ship model

6. まとめ

肥えに船舶の船首部波崩れ現象について流れの可視化により考察し、波崩れの発生機構に関する新しいモデルを提案した。このモデルに基づき更に可視化実験を行い、波崩れの発生には自由表面の剪断流の存在が重要な役割をもつことを確認した。

文献

- 1) Taneda, S., *Jour. Phy. Soc. Japan*, vol. 36, 1974
- 2) 鈴木勝雄, 日本造船学会論文集 第137号, 1975
- 3) Takekuma, K., 日本造船学会論文集 第132号, 1972
- 4) Kayo, Y. and Takekuma, K., 日本造船学会論文集 第149号, 1981
- 5) Hawthorne, W. R., *Jour. Aeronautical Sciences*, vol. 21, 1954
- 6) Light hill, M. J., *Waves in Fluid*, Cambridge University Press, 1978
- 7) Kayo, Y. et al. *Institut für Schiffbau - Bericht Nr.* 420, 1982
- 8) Thwaites, B., Oxford Press, 1960