船首船橋船の打ち込み海水挙動に関する模型実験

定兼 廣行*・金 喆承**

Model Experiment on Flow Behavior of Shipped Water for a Fore Bridge Ship

Hiroyuki SADAKANE and Chol-Seong KIM

Abstract

The wheelhouse front glass of a fore-bridge-ship had been destroyed by the shipping of water in rough sea, and the ship had fallen into uncontrollable conditions for ship handling. The above destruction was an unbelievable fact for us because the front glass was in a very high position (about 20m) above the water surface.

In this study, we carried out the water tank experiment using a model ship and regular waves, and observed the appearance of the shipping of water and the behavior of the shipped water flow by using video-cameras. And also the speed of the flow destroyed the front glass was tried to analyze from video-pictures. The obtained results are as follows:

- (1) The water shipped from the fore end and both sides of the bow was concentrated on the center-line of the deck and flew toward the bridge like a rushing stream with ample quantity.
- (2) After collided with the bridge, the rushing stream ran up forcefully on the front face of the bridge. In this case, this flow did not flow along the vertical slope of the bridge wall but ran up with a rather lower angle than the above slope. And finally the stream crashed directly into the front glass part.
- (3) Such rushing flow clearly occurred in the condition to be the wave steepness H/λ over about 1/10 and the wave length/ship length ratio λ/L over about 1.0.
- (4) According to simple analyzing method, the flow speed at the front glass height was 3~3.5 times as fast as the velocity of the surface wave elevation.

1. はじめに

船首船橋船(Ro-Ro船)が荒天向波中を微速航行中、操舵室前面窓ガラスに達する打ち込み海水によって前面ガラスが破損し、この海水の操舵室への打ち込みによって室内の電気系統にマヒが生じ、船が操縦不能になるという事故が発生した。浮遊状態に入った船体は激しく横揺れし、操舵室内の打ち込み海水の流動、積み荷の転倒などの二次的な被害をもたらした。この船の船首ブルワーク上面の高さは水面上約15mであり、また窓ガラスは約20mの高さにあるので、この操舵室への大量の海水打ち込みはやや想像しがたい。そこで、本研究では窓ガラスに破損を引き起こした海水打ち込みがどのような経過を経て発生したのかを調べるために模型実験を行い、海水打ち込みの様子、甲板上打ち込み海水の流動模様及び操舵室窓ガラスに達する高速水流の性質などについて調査した。

2. 水槽実験

* 正 会 員 神戸商船大学 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

**学生会員 神戸商船大学大学院 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

表 1 船体主要目

縮率 (1/118.5)			
要目		実船	模型船
L_{PP}	(m)	142.20	1.200
B	(m)	24.00	0.203
D(上甲板)	(m)	15.15	0.128
d_f	(m)	4.55	0.038
d_a	(m)	6.70	0.057
Δ	(tonf)	10,700.0	0.0064
KG	(m)	9.40	0.079

実験は神戸商船大学浅長水槽(60×6×1.5m)の水深1.0mにおいて行った。使用した模型船(縮率: 1/118.5)の主要目を表1に示す。実験状態はほぼ満載状態であった。事故当時の船首喫水は4.55mであり、また図1に示すように船首ブルワーク上面までの乾舷は14.65m、そこから操舵室窓ガラス枠の下端までの高さは約5mであるから窓ガラスは海面上約20mの高さにあったことになる。

水槽実験は模型船を無線操縦により正面向波中で自由航走させ、船首部上方及び側面よりビデオカメラにより甲板上海水打ち込み及び打ち込み海水の挙動を撮影した。船速は荒天中の船速低下を考慮に入れ、実船で約5.0knots($Fn=0.075$)に相当する船速を中心に必要に応じて1knot増減させた。波は規則波で、波長船長比 $\lambda/L=0.8\sim1.5$ 、また波高波長比 $H/\lambda=1/30\sim1/8$ を実験範囲とした。

3. 実験観察

3.1 甲板上打ち込み水の挙動

打ち込み水の様子及び甲板上打ち込み水の流動模様はビデオカメラ(30コマ/秒, シャッター速度: 1/500秒)で撮影し、これの録画を再生した静止画像から観察を行った。

写真1(a)~(c)は $\lambda/L=1.2$, $H/\lambda=1/15$, $Fn=0.075$ の実験状態であり、船首部上方から撮って再生した連続写真の一例である。連続写真から観察される打ち込み水の様子及び流動模様は以下の通りである。まず、船体運動によって船首の前方及び側面で発生した水の壁が縦揺れの船首下げが最大になった直後に船首の最も先端付近から破れ、写真1(a)のように船長方向の速度を持つ水が一気に甲板上に打ち込む。一方、その直後写真1(b)のように船首の両舷からも甲板上中心線上に向かう横方向成分の速度をもつ打ち込み水が流れ込んでくる。結局、これらを合成し

図1 水面上船首部の形状

(a)

(b)

(c)

写真1 甲板上打ち込み水の収束流動の模様
($\lambda/L=1.2$, $H/\lambda=1/15$, $Fn=0.075$)

た流れは写真1(c)のように甲板上船体中心線付近で収束現象を生じ、高い水位と速い速度になった水塊は甲板上中心線に沿って船尾方向に流れ、船橋前端面の下部に衝突することが観察される。

次に波呿度のみを $H/\lambda=1/10$ に変化させた場合も打ち込み水の流入過程は全般的に写真1(a)、(b)の様子とほぼ同じようである。しかし波呿度が大きくなるにしたがって、船首先端付近から甲板上に流れ込む打ち込み水の量が多くなると共に船首両舷からの打ち込みも一層激しくなって、写真2のように船体中心線付近で水の収束がもっと明瞭となる。

3.2 高速上昇水流

ここでは操舵室前面窓ガラスに破損を引き起こした直接原因である高速上昇水流の発生過程について調べる。

写真3は、 $\lambda/L=1.3$, $H/\lambda=1/10$, $Fn=0.075$ の場合における船体側面から撮った連続写真の一つであり、操舵室前面窓ガラスを直撃する高速水流の典型的な例である。この場合、前の写真2のように甲板上船体中心線付近で収束した水が高い水位になって船橋前端面の下部に衝突し、次いで船橋楼前端面に沿って上層甲板の凹みを飛び越えて駆け上がる。この水流はちょうど図1中に破線で示す経路で駆け上がっている。このようにごく勢よく、超多量の水が上昇する場合は、この水流は窓ガラスを直撃する衝撃水流となる。

しかし、操舵室前面ガラスに達する水流は発生するが、写真4($\lambda/L=0.8$, $H/\lambda=1/10$, $Fn=0.075$)のように上昇水流の量が少なく、また速度が小さいため船橋最前端の壁面に沿う上昇流が主流となり、窓ガラスに当たる水量は少ない場合もある。

以上の実験観察を要約すると、高速水流の上昇仰角は必ずしも船橋最前端面の勾配に一致せず、むしろ多量で高速の水流が船橋楼前端面を駆け昇る時には図1に示した破線のように船橋楼甲板等の前端部を結んだ角度で上昇し、窓ガラスに直撃するようである。

4. 窓ガラス高さにおける上昇流速の解析とその結果

操舵室前面窓ガラスに破損を起こした水流の衝撃圧力は水流の衝突直前の速度が重要な因子の一つである。そこで前章に示したような記録映像を基に操舵室付近高さにおける水流の上昇速度の解析を試みる。

4.1 解析方法

写真2 斜め上方から見た甲板上打ち込み水の収束流動模様
($\lambda/L=1.2$, $H/\lambda=1/10$, $Fn=0.075$)

写真3 窓ガラスに衝撃を与える高速上昇水流
($\lambda/L=1.3$, $H/\lambda=1/10$, $Fn=0.075$)

写真4 衝撃が少ない場合の上昇水流
($\lambda/L=0.8$, $H/\lambda=1/10$, $Fn=0.075$)

ここではごく簡単に次のような考え方に従って解析する。つまり、ある基準高さの上昇水流が有する運動エネルギーは、水流の上昇と共に運動エネルギーを消費してやがて勢いを失って静止し、次いで落下に転じる。これは運動エネルギーが位置エネルギーに置き換わった瞬間である。今実験の場合も上記の様子が比較的明瞭に現れており、船橋前面を駆け昇る上昇水流は、写真5に示すように、左右に分かれてやがて上方への勢いを失う。

従って、基準高さを操舵室前面窓ガラス枠の下部において、そこから水流が達した高さを h とすると、基準高さにおける水流速度 V_w は次式によって解析される。

$$V_w = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

ただし、 g は重力加速度で、 h は水流最上部の高さであり、そこから飛び散った飛沫は対象としない。この h の高さは記録映像中に写っているレーダマストの高さ(既知)を基に比例計算により算出した。この V_w は垂直方向の流速であるので図1の破線で示す方向の流速より小さくなるが、上昇流速を代表すると仮に考えることができるであろう。

4.2 解析結果

先ず $\lambda/L=1.2$ に固定して波幅度を変化させて(1)式の水路上昇速度を解析したものを図2に示す。縦軸は上昇速度を入射波の最大上昇速度で除して無次元化した。 $H/\lambda=1/30$ では船首の乾舷が比較的高いため甲板上に打ち込みが発生しなかった。また $H/\lambda=1/15$ の場合は甲板上に打ち込んだ水が船体中心線である程度収束され、船橋楼前端面の下部に衝突するが、窓ガラスに達する衝撃水流にならなかった。しかし、 $H/\lambda=1/10$ 程度になると、突然衝撃水流になると共に水流上昇速度も一挙に大きくなった。これ以上の波幅度では上昇速度の無次元値は少しずつ減少する傾向が現れたが、水流上昇速度は入射波の最大上昇速度に比べて約3.0~3.5倍になった。

次に $H/\lambda=1/10$ に固定して船速及び波高船長比を変化させて(1)式の水路上昇速度を見たものを図3に示す。縦軸は図2と同様に無次元値である。波長の短い $\lambda/L=0.8$ の場合は水流上昇速度が小さく、特に $Fn=0.060$ の場合は船橋窓ガラスの高さまで至る水流は発生しなかった。しかし波長と船長が等しい $\lambda/L=1.0$ では衝撃水流が発生し、その上昇速度は波面上昇速度の3.0~3.5倍となった。 $\lambda/L=1.0\sim1.5$ の間で無次元上昇速度の差は少なく、やはり3.0~3.5倍になった。

写真5 高速上昇水流の分岐の様相

$V_w/\xi\omega$

図2 波幅度による窓ガラス高さで無次元水流上昇速度の変化
($\lambda/L=1.2$, $Fn=0.075$)

$V_w/\xi\omega$

図3 波長船長比による窓ガラス高さでの無次元水流上昇速度の変化
($H/\lambda=1/10$)

5. 議 論

本実験のように波呿度が高い正面向波中では船首部分から打ち込んだ水が甲板上船体中心線上で収束現象を生じ、この収束流が高速で船橋前端面に衝突した後に方向を変えて上方に駆け昇る現象が観察された。これらの現象は、中央及び船尾船橋船には生じないので従来余り重要視されていないが、本論で対象とした船首船橋船にとっては安全操船・安全設計上から調査研究が必要であると考え、ただし今研究では現象の抽出と指摘を主としたので実用及び設計への具体的考慮は以後の課題として、ここでは船首甲板上打ち込み水の流動の収束性と船橋前端面を駆け昇った水流の流速について若干議論する。

5.1 打ち込み水の流動の収束性

今回の実験では船首側部から打ち込んだ横方向成分の流れが収束流を引き起こしている。Buchner⁽¹⁾はFPSO(Floating Production Storage and Offloading)船型の模型実験により船体中心線上での流れの収束性を指摘している。また船首水面上形状や甲板面積等の差異によって打ち込み水の様子と流動模様が違ふことが指摘されているので⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾、条件によっては流れの収束が起こることは了解できる。今回の実験で、この流れの収束が顕著に現れた場合、これは船首船橋船にとって危険な事態になり得ることが判ったので今後流れの収束性に及ぼす種々の影響について検討する必要がある。

5.2 船橋前面の上昇水流

高速水流の上昇仰角は甲板上に打ち込んだ水の量、船体中心線上での収束程度及び流速に関係があり、多量の水が高速で収束する場合に上の現象が明瞭となる。しかしこれら条件の定量的な検討は将来の課題として、ここでは観察から得られた知見を少し記す。

写真3に見られるような上昇水流は上記の条件を満たしている場合であり、水流は直線的に上昇するが、例えば $\lambda/L=1.5$ の場合は上昇水流の様子が少し異なり、船橋各層の甲板暴露部の凹凸にやや従った流れ模様となる。このような場合、窓ガラスへの水流の衝突角度は写真3のものと異なるかも知れない。

水流の上昇速度は元の甲板上の流動速度に依存しているので、この速度について他と比較して一般的な議論をするのが順序であるが、これについても今後の課題としたい。

6. おわりに

船首船橋船の模型実験を行って以下の結果を得た。

- (1) 荒天正面向波中、船首甲板上に打ち込んだ水は船体中心線上で収束現象を起こし、大量の水が高速で後方に流れることがわかった。
- (2) 多量の収束流が発生する場合には船橋前端面に衝突した後、この面を駆け昇って操舵室前面窓を越える高速水流が生じることがわかった。
- (3) 高速水流の上昇仰角は必ずしも船橋最前端面の勾配に一致せず、むしろ船橋楼甲板等の前端部を結んだ角度で上昇して船橋窓ガラスに直撃することがわかった。
- (4) 窓ガラスを越える高速上昇水流は波呿度1/15では発生せず、波呿度1/10程度になると顕著となり、この時波高船長比1.0以上で窓ガラス位置での上昇速度は波面の最大上昇速度の3.0～3.5倍になることがわかった。

今回の研究は、船橋窓ガラスにまで達する打ち込み海水の挙動について主に現象的な確認を目的に実施した。5.議論でも述べたような課題があるので、今後設計や操船を考慮した研究を進める予定である。

最後に、本研究の実施に当たって大阪大学戸田保幸助教授(研究当時神戸商船大学)に映像記録関係で積極的な支援をいただきました。また実験に当たっては当時の船舶工学研究室の大学院生と4年生から多大な協力を得ることができました。ここに記して謝意とします。

参 考 文 献

- (1) B. Buchner : On the Impact of Green Water Loading on Ship and Offshore Unit Design, PRADS'95, pp.1.430-1.443, 1995.
- (2) Lloyd, A. R. J. M., Salsich, J. O. and Zselezky, J. J. : The Effect of Bow Shape on deck Wet-

ness in Head Seas, Transaction R. I. N. A., Vol. 128, pp.9-25, 1986.

- (3) 高木健・内藤林：海水打ち込みと船首形状の影響について，関西造船協会誌第220号，pp.111-120，1993.
- (4) 溝口純敏：デッキ打ち込み水の挙動について，日本造船学会論文集163号，pp.150-159，1988.

質 疑 応 答

岩本才次(九州大学)：打ち込み水の挙動に関する貴重な実験結果をお示しいただき有り難うございます。次の2点をお伺いします。

- (1) 船首船橋をかけ昇る水流の上昇仰角は船橋前端的傾斜角ではなく、船橋楼各甲板の前端部を結んだ線に沿って上昇するということですが、そのしくみは流体力学的にどのように考えたらよいのでしょうか。
- (2) 操舵室前面窓ガラスに達した打ち込み水の実験結果の速度は、実船に換算すると実際の窓ガラスを破壊するような流速に達するものだったのでしょうか。

定兼廣行：御討論有り難うございます。

- (1) 流体力学的につめた考慮はまだ現在十分できていません。観察によりますと、収束する水の量と流速によって上昇水流の流動模様が変わり、水量、流速が大きいときにご質問の水流となるようです。
- (2) 今回大略の流速が解析できた段階です。窓ガラスの破壊については水流の衝突圧力の推定、ガラス強度等について検討する必要があり、今後研究を進めていく予定にしています。ただし概算では、破壊に至り得るとの感触を持っています。