高速ビデオと透明模型を用いた 船底衝撃現象の観測

正員 渡 辺 巖* 正員 谷 澤 克 治*
正員 沢 田 博 史*

An Observation of Bottom Impact Phenomena by means of High
Speed Video and Transparent Model

by Iwao Watanabe, *Member* Katsuji Tanizawa, *Member*
Hiroshi Sawada, *Member*

Summary

An observation of bottom impact phenomena on a flat bottomed ship has been made by means of a high speed video recording system and the transparent model of a tanker. The model was towed in regular waves while making pitching and heaving motions freely. Two video cameras were used in the experiments. One camera was set to take a picture of bottom impact through the transparent hull and the other camera was used to record the impact pressure in an oscilloscope. Both pictures were superimposed for synchronism between pressure fluctuation and the sequence of events. Three kinds of impact phenomena were observed during the experiments. One was oblique impact, another was trapped air impact and the other one was normal impact. The video shows that the high peaked pressure in the wide area appears in the case of trapped air impact while the pressure gauge is in the trapped air and the so called vibration of compressed air follows. The normal impact which is characterized by earlier touching of the forepart of the bottom were examined to show that its high pressure are related to the rapid expansion of the wetted area. Discussion are also made on the possibility of coexistence of trapped air and the normal impacts, based on the experimental results. The correspondence of the events to the pressure fluctuation were examined to show that the oblique impact could be explained by the estimation by one of authors. In every cases it is seen that the three-dimensionality plays important role in the bottom impact phenomena.

1 緒 言

平坦な船首船底形状を持つ船体に働く波浪衝撃は大別して空気巻き込みを伴う場合と伴わない場合に分類できる。これらの波浪衝撃荷重の推定には、船体の横断面形状をモデル化した2次元的なモデルが提案されてきた。しかし、実際には平坦な船底に発生する衝撃は横断面内での現象ではなく、船体方向の船底と水面との位相関係や相対速度などが衝撃の発生に深く関与していると思われるので、このような波浪衝撃荷重の推定には流れの3次元性を正しく考慮した現実に即したモデルの組立が必要と思われる。これまで著者等は傾斜衝撃について三

次元性についての考察¹⁾を行い、水圧波形の計算式を示した。しかしより激しいスラミング衝撃についてはそのモデルでは十分な推定を行うまで至っておらず、更にモデルの改良が必要と思われる。ところが、船底に発生する衝撃現象は非常に高速であるため観察が難しく、実際の流体現象を正しく理解する妨げとなっている。Beukelman は水中からの写真撮影で船底衝撃の可視化を試みているが²⁾、静止画像であるため流体現象の実際を理解するには手がかりに乏しいように思われる。

このような状況を踏まえ、高速ビデオを用いた船底衝撃の可視化実験を計画した。透明な合成樹脂で作られた平坦な船底を持つ模型を用い、波浪中航走時の船底衝撃の実際を船体内部から観察することとした。その結果、空気巻き込みを伴う場合および伴わない場合の双方で興

* 船舶技術研究所 運動性能部

Fig. 1 Body Plan of Model Ship in the Fore part

Table 1 Model Dimensions

L pp	2. 0	m
B	0. 3 3 3	m
d	0. 0 8 5	m
Δ	4 4. 0	K g f
k yy	0. 2 1 9	• L pp

味深い映像が得られた。これらの映像は、3次元衝撃の本質を理解するための有効な手がかりになるものと思われるので、衝撃の形態及び発生条件に関する若干の考察と併せて報告する。

2 実験状態

2.1 供試船

実験には平坦な船底をもつタンカー船型の垂線間長(L) 2mの合成樹脂(エポキシ樹脂)製透明模型を使用した。船型はSR 159の研究³⁾に用いられたもので、その船体前半部の線図および主要目をFig. 1とTable 1に示す。模型船は船底露出が発生しやすいように喫水を浅く(0.085m), even keelの状態にセットした。またビデオ撮影の都合上、船首甲板が取り付けられないので、水の打ち込み防止用遮波板を船首まわりに取り付けた。圧力計測に用いた水圧計は歪ゲージ式の2気圧タイプの水圧計(共和電業製 PS-2 KB)で、S.S. 8.8のセンターラインより3cm左舷側の船底に取り付けた。Fig. 1に黒丸で概略位置を示す。

このような平坦な船底に発生する波浪衝撃の場合、波浪と船底のなす角度が一般的に小さいため、特に空気巻き込みを伴う場合は船底の凹凸が計測結果に影響を与える可能性があるため、模型船船底の凹凸状態をダイヤルゲージで計測した。その結果をFig. 2に示す。凹凸の差は全幅で最大で約1mmである。この凹凸がどの程度影響するのかは現在検討中であるが、波面の局所的な凹凸と比較して無視できる程度であろうと思われる。

Fig. 2 Bottom Undulation of the model

Table 2 Natural Frequencies on the Model

模型船船体の固有振動数(2節振動)	8 6. 7	H z
船首船底パネルの固有振動数	3 1 8	H z
水圧計の固有振動数	2 0	K H z

つぎに、波浪衝撃を計測する際模型は衝撃荷重により弾性振動を励起されがちのため、模型船の水中での各種の固有振動数を把握しておく必要がある。そこで船体縦曲げの二節振動を加振試験を行って求めた。その結果と水圧計が取り付けられた船底パネル及び水圧計自身の固有振動数をTable 2に示す。

2.2 高速ビデオ

撮影に用いた高速ビデオはコダック社製(SP 2000 C)で、毎秒60コマから2,000コマまでの撮影能力を持つ。実験は照明とレンズの明るさの制限で、主に毎秒500コマと1,000コマで撮影した。カメラの分解能は縦192画素、横240画素、明度は64階調、白黒である。このビデオは2台のカメラで同時撮影が可能で、実験では映像と水圧波形の同期をとるため第1カメラで模型船を撮影し、第2カメラでオシロスコープ上の水圧信号を画像として撮影した。後で示す映像の左端の黒い帯状部分に写っている白点は水圧の信号を表す。

2.3 実験条件

実験は運動性能部の動揺水槽で実施した。模型はサージのみを拘束して波浪中を曳航した。実験は正面規則波で行ったが、用いた波は、波長(λ)が、 $\lambda/L=1.0, 1.2$, 波高(hw)が10, 15, 20cm ($L/20, L/13.3, L/10$)である。前進速度はフルード数(Fn)で $Fn=0.05 \sim 0.25$ の範囲で適宜選択した。計測項目をTable 3に示す。

実験で計測された船体運動の内、PitchingとHeavingについてストリップ法の計算と比較したものをFig. 3に示す。波高の異なるものを各種記号で区別して示す。実験結果から分かる通り、今回の実験は船底衝撃

Table 3 Measured Items

ヒープ , ピッチ
 上下加速度 (S.S.7.5)
 船底圧力 (S.S.8.8)
 船首相対水位 (F.P.)
 出会い波

Fig. 3 Ship Responses in Experiments

を観察するのが目的なので、激しい船体運動を起こすような航走条件となっている。

3 船底衝撃の発生

実験で計測された衝撃圧のピーク値をフルード数でプロットすると Fig. 4 のようになる。船速が遅い時の船底衝撃は衝撃圧も低いが、船速が速くなると急激に衝撃圧は上昇する。衝撃のタイプとの関係を見てみると、低速域では船底の着水部分が船尾側から船首方向に向かって進む傾斜衝撃 (Oblique Impact) が殆どであるが、船速が高速になると着水部の動き方は複雑になる。すなわち着水部が複数個存在するようになり、船尾から船首方向だけでなく、船首から船尾方向に進む動き方も現れる。その結果いわゆる正面衝撃 (Normal Impact)⁴⁾ あるいは

Fig. 4 Peak Impact Pressure to Forward Speed

は空気巻き込みを伴う衝撃 (Trapped-air Impact) の発生が見られるようになる。圧力も大きな値を示すようになる。これらの観察によれば正面衝撃と空気巻き込み衝撃はどちらか一方のタイプが生ずると言うよりも、船底の異なる場所で同時に発生しているとも出来る。船底のどの部分での衝撃水圧を問題にするかで区別が変わる可能性がある。ここでは圧力計の取り付け位置 (S.S. 8.8) での挙動で判定している。これらのタイプについて以下で詳しく調べることにする。

3.1 傾斜衝撃

最初に露出した船底が船尾方向から船首方向に着水する、いわゆる 3 次元的な傾斜衝撃の映像と概略図を Fig. 5 (1), (2) に示す。またこれに対応する船底水圧の計測値を Fig. 6 に示す。模型船のセンターラインに刻まれた目盛りは 2cm 間隔である。この映像は $\lambda/L=1.2$, $hw=20\text{cm}$, $Fn=0.05$ の場合で典型的な傾斜衝撃である。映像に付けた①から⑤の番号は圧力波形に付けた同じ番号の時点と対応する。この映像には船底着水部分が船尾方向から船首方向へ移動する様子がとらえられている。衝撃水圧のピークは着水部先端がほぼ水圧計の位置に達した時に現われており、傾斜衝撃の理論と一致している。この時、水圧計の取り付け位置での水面移動速度は船尾から船首方向へ約 2.3m/s で、計測された圧力は水頭で約 30cm である。この値は後の考察で示すように、衝撃の理論モデル¹⁾から推定される値と良く対応している。上に述べた傾斜衝撃は波傾斜が小さく船速が小さい場合によく観察され、衝撃荷重自体はあまり大きくないのが普通であるが、正面衝撃との境界的な現象の場合には例外的に大きな衝撃が起こる場合がある。

3.2 空気巻き込みを伴う船底衝撃

次に空気巻き込みを伴う船底衝撃の典型的な映像と概略図を、Fig. 7 (1), (2) に示す。この映像は $\lambda/L=$

1.2, $hw=15\text{cm}$, $Fn=0.2$ の場合で、露出した船底は船尾方向から船首方向に向けて着水が始めるが、途中で船首部が次の波の中腹に突っ込むため、両方の着水部に挟まれた部分の空気が巻き込まれる様子がよく観察でき

Fig. 5 Example of Oblique Impact taken by High Speed Video and Illustrative drawing

Fig. 6 Time History of Pressure during Oblique Impact

る。巻き込まれた空気は非線形空気パネと付加質量から成る従来の2次元的なモデル⁷⁾では船底と水面の間で上下方向に圧縮されるとして扱われてきたが、映像を注意深く観察すると船体の前後方向からも同時に圧縮されているように思われる。空気は船底で上下と前後から挟み込まれるが、横方向には開いているので、ビルジ部から空気が激しく吹き出している。空気流自体は横方向が卓越しているようである。この実験では船尾側の着水は船体中央部より船側で早くなっているため、より空気巻き込みが発生しやすくなっている。これは先に示した船底の凹凸の影響とも考えられるが、この原因については検討中である。

つぎに、船底圧力の計測値を Fig. 8 に示す。衝撃圧の立ち上がり形状は滑らかで空気巻き込み独特の形状を成している。また圧力のピークが水圧計の着水以前（映像番号②）に現われている点も空気巻き込みを伴う衝撃の特徴である。この時、水圧計はまだ水面に触れていない

Fig. 7 Example of Trapped-air Impact taken by High Speed Video and Illustrative drawing

Fig. 8 Time History of Pressure during Trapped air Impact

ため、計測された衝撃圧は空気によるものであることが分かる。ピーク値は水頭で約 1.5m に達する。3.1 の傾斜衝撃の場合に比べて、作用する面積が広いため衝撃荷重は遙かに大きいと考えられる。

空気巻き込みのある場合、空気が圧縮されることにより、圧力波形に振動を伴うことがいわれている⁹⁾。本観測によればその過程は①から⑤の間の約 15msec であり、非常に短時間である。その間で圧力は山、谷、山を繰り返している。周波数に換算すると約 100Hz である。この値は先に示した船底パネルあるいは船体縦振動の何れの周波数とも異なるもので、巻き込まれた空気の振動で発生したものと思われる。しかしそれほど顕著な振動とはなっていない。

これまでの空気巻き込みに対する考え方は、静水面に平坦な船底が同時に着水する時を中心と考えられてきたが、波浪中の船底での空気巻き込みはそうではなく、波面の変形と船底の間に挟まれた空気の圧縮の問題であることをこの映像は示している。そして、空気巻き込み、圧縮のメカニズムに着水部分の船体前後方向の動きが深く関わっていることもこの観察からわかる。

3.3 船底が瞬時に着水する船底衝撃（正面衝撃）

つぎに、傾斜角が非常に小さく非常に短い時間に船底のほぼ全面が着水し、かつ大規模な空気巻き込みが観察されなかったような船底衝撃の映像と概略図を Fig. 9 (1)、(2) に示す。これは $\lambda/L=1.2$, $hw=20\text{cm}$, $Fn=0.2$ の場合で、露出した船底は画面のほぼ中央部から着水を始め、非常に早い速度で全面に拡がってゆくようすが観察できる。船底の一部が着水してからほぼ全面が着水するまでにわずか 8msec の現象で水面の移動速度が速いため、Fig. 10 に示すように圧力のピークも水頭で約 1.7m に達しており、立ち上がりも速い。この場合の水面の移動速度は、船体の縦方向と横方向ではほぼ同じ程度であり、3.1 で述べた船尾から船首方向へ着水部分が走る傾斜衝撃とは少し異なる。しかし衝撃水圧のピークは着水部先端がほぼ水圧計の位置に達した時に現われてい

Fig. 9 Example of Normal Impact taken by High Speed-Video and Illustrative drawing

る点で同じであり、傾斜衝撃に属する船底衝撃であると考えられる。このような船底衝撃のパターンは、正面衝撃と名付けられた衝撃の範疇に極めて近いと考えられる。しかし平坦な船底であるにもかかわらず、着水部分が同心円的な広がり方をすることが見られることから、船体と波との相互作用による水面の局所的な盛り上がり現象といったものが介在すると考えられるが、流体力学的メカニズムの把握は今後の課題である。なおこの衝撃パターンでは水圧計よりも後方では空気の巻き込みが見られた。この時 3.2 で述べたような空気巻き込み衝撃の発生に結び付いている可能性もあるが、水圧計の位置の関係上、確認できなかった。

4 考 察

4.1 衝撃の形態と航走条件の関係

ここでは衝撃の形態と航走条件の関係を、船体運動計算の結果と対照させて考察を加える。Fig. 11 に船底露

Fig. 10 Time History of Pressure during Normal Impact

出の範囲とその時間的パターンが船速でどのように変わるかを示す。実験状態に合わせた正面向波, $\lambda/L=1.0$, 波高 15 cm の規則波中を一定速度で航行している時の計算である。計算は非線形船体運動シミュレーションプログラム (SRS LAM) によったが、通常の線形計算で推定しても大きな差はない。

船底露出は船速と共に増加することが示されている。また低速では船底の着水部分は船尾側から船首に向かって移動するだけだが、船速が増すと船底と水面が小さい接触角で当たるようになるためか、着水部の移動が極く短時間で起こる部分が現れる。さらに高速になると船首側でも別な着水が生じ、船底の着水部分は複数個になっていく。船首側での着水はこのように船底が波の山に乗り上げたようになってたり、着水部分が複数になって途中に空気層が残った時が、空気巻き込み、正面衝撃の発生と対応すると考えられる。このように船体運動計算でも高速になると空気巻き込み衝撃正面衝撃の発生にいたることを推定できる。しかしこの時どちらタイプが発生するか、あるいは発生する船体位置との関係等についての検討はこれだけでは不十分で、今後の検討課題の一つである。

4.1 傾斜衝撃の大きさについて

Fig. 11 Extent of Bottom Emergence

Fig. 12 Impact Pressure Coeff. to the Running Velocity of the Waterline

著者の一人が提唱している平坦な船底に発生する傾斜衝撃についての3次元衝撃計算法¹⁾によれば、船体縦方向の水面移動速度が衝撃の大きさに深く関与している。具体的には着水部分先端の局所的な移動速度を v 、圧力を p とすると

$$p = \rho v^2 / 2$$

で与えられる。Fig. 12 に傾斜衝撃の場合について上記理論モデルの妥当性を調べた結果を示す。この図は、実験で得られた着水部分の移動速度から求めた水圧推定値と圧力計測値の比を移動速度に対して示したものである。圧力の計測値と計算値が一致していれば1の近傍に値が集中する。図から明らかなように低速ではそのような傾向が顕著である。しかし高速では0.3程度に低下している。この差は今後の検討課題であるが、一つの原因として圧力計の受圧面の大きさによる丸め効果があると考えられる。全体的に見て、先に述べた3次元傾斜衝撃モデルが現実的に即していることを示している。

5 結 言

高速ビデオを用いて平坦な船首船底に発生する衝撃現象を観察し、その発生条件について考察した結果を要約すると以下の通りである。

1) 船速が遅い時には傾斜衝撃が、船速が増すと正面衝撃もしくは空気巻き込みを伴う衝撃が発生するようになる。応答計算は衝撃の違いと船速との関係を一応説明できるが、定量的には改良の余地がある。

2) 傾斜衝撃については船体前後方向の流れが衝撃の発生に深く関与していることが明らかである。著者の一人が提案している3次元傾斜衝撃の理論を裏付ける観察、計測結果が得られた。

3) 空気巻き込みを伴う船底衝撃については、空気を巻き込むメカニズムや空気が圧縮されるメカニズムが従来の2次元的なモデルとは異なり、着水部分の前後方向への移動の仕方が深く関わっている。

4) 今まで正確に観察できなかった、船底が瞬時に着

水し、かつ大規模な空気巻き込みを伴わない正面衝撃の様子を撮影出来た。この船底衝撃は船底の着水部が同心円的な広がり方をする傾斜衝撃の極端な場合であると考えられるが、流体力学的な発生のメカニズムは今後の検討課題である。

5) 空気巻き込みと正面衝撃とは船体発生位置が異なるだけで同一状態で発生する可能性が強い。

6) 以上に述べた3種類の船底衝撃は、いずれのパターンについても船体と波面の位相関係、相対速度ならびに相互干渉など3次元的な要素が関与しており、衝撃荷重を波浪中での船体運動と関連づけて取り扱う必要がある。

最後に実験に使用した合成樹脂製透明模型は当所推進性能部から拝借して使用したものである。御世話戴いた日夏宗彦技官に感謝する。

参考文献

- 1) 渡辺 巖：平坦な船底に作用する衝撃水圧について，日本造船学会論文集，第159号（1986）。
- 2) Beukelman, W.: Bottom Impact Pressures due to Forced Oscillation, ISP, Vol. 28, No. 309, (May 1980).
- 3) 日本造船研究協会 SR 159 部会：新経済船型開発のための船尾まわりの流場に関する研究，研究資料 No. 289 (1978. 3)。
- 4) 渡辺恵弘：船底衝撃の性質と Whipping について，西部造船会会報，第32号（1966）。
- 5) 宮本 武ほか：船首部に作用する衝撃荷重について（第2報），日本造船学会論文集，第158号（1985）。
- 6) 藤井 斉ほか：船体に働く波浪外力，第2回耐航性に関するシンポジウム，日本造船学会，昭和52年12月。