甲板上に自由水が存在する小型漁船の横揺れの特徴

上野 公彦*・天下井 清**
木村 暢夫**・岩森 利弘**

Characteristics of Roll Motion for Small Fishing Vessels with Water on Decks

Kimihiko UENO, Kiyoshi AMAGAI,
Nobuo KIMURA and Toshihiro IWAMORI

Abstract

This paper describes comparison between roll motion when small amount of deck water present and when no deck water.

In most of cases, it is said that a small amount of water on deck acts as a rather effective roll damper and a roll of vessel is less when a small amount of deck water present than no deck water⁽⁴⁾.

In our experiments, we recomfirmed the above effect of a small amount of water on deck. However, in our experiments there were some cases that a small amount of water on deck did not act roll damper but encouraged the roll motion. This paper describes those cases from a view point of resonance.

1. 緒 言

筆者らは先に小型漁船の横揺れ中の甲板上の滞留水の影響を調べるため、正弦波的横揺れを再現できる動揺発生装置の上に設置した透明タンク内の水の挙動を観察し、動揺振幅、動揺周期及びタンク内水深の変化に伴う挙動の変化を 5 つの型に大別した⁽¹⁾。本研究では、これらの挙動が実際の小型漁船の横揺れにどのような影響を及ぼすのかを実験的に調べると共に、自由水が存在する場合としない場合との横揺れの特徴の比較を行った。

また、筆者らは先に張り出し甲板やハードチェーン等の形状の特徴を有する小型漁船に対しては、自由横揺れ減衰が動揺振幅に大きく依存することを指摘した。即ち減衰係数が、大振幅時と小振幅時では大きく変化することを鮭鱒流し網漁船の模型船を用いた実験で検証し、横揺れ運動方程式中の減衰項を補正することにより同一の係数を用いて減衰曲線を再現した⁽²⁾。今回はこの問題に関し、同様な船体形状を有する他の漁船についても検討した。

2. 実 験

実験に使用した模型船は小型鮭鱒流し網漁船「北進丸」19.9GTの1/7.6縮尺模型と、「北進丸」と同様に甲板やハードチェーン等の形状の特徴を有するホタテ養殖船「丸東丸」17.7GTの1/11縮尺模型である。線図を図 1 に示す。表 1 に主要目と自由水が存在しない状態での載貨条件を示す。両船共に甲板上に自由水が存在する場合と存在しない場合について、静水中自由横揺れ減衰試験と規則波中動揺試験を行なった。

* 正会員 東京水産大学(〒108 東京都港区港南4-5-7)

**正会員 北海道大学水産学部(〒048 函館市港町3-1-1)

以上の実験は全て北海道大学水産学部
大型水理実験水槽で行った。

自由水の影響を調べるため、タンクを模

	Lpp[m]	B[m]	D[m]	排水量[kgw]	GM[cm]
北 漁 丸 (模 型 船)	2.00	0.500	0.195	137	6.7
丸 東 丸 (模 型 船)	1.29	0.356	0.181	65.6	3.1
	Lpp[m]	B[m]	D[m]	実 験 ト ン 数 (GT)	主 要 目 的
北 漁 丸 (実 船)	15.2	3.80	1.48	19.9	鯉 鰻 流 網 漁 船
丸 東 丸 (実 船)	14.2	3.92	2.00	17.7	ホ タ テ 養 殖 船

図3 タンクの設置位置

図 4 甲板上に自由水が存在する場合の自由横揺れ減衰曲線
(北進丸モデルに用いた結果)

型船の甲板部に設置し、自由横揺れ試験を行った。これによりタンク内水の固有周期と船体の動揺周期との関係を調べた。また甲板上に自由水が存在する場合、1自由度横揺れ運動方程式の右辺は0とならないが、見かけ上左辺の係数が変化するという仮定の基で、自由水が存在しない場合と同様な運動方程式(1)を用いて横揺れ減衰の現象が表現可能かを確かめた。減衰項は減衰曲線の特徴を考慮して補正したものである⁽²⁾。

$$\ddot{\phi} + b_2 |\dot{\phi}| - b_5 \phi^4 + c_1 \dot{\phi} + c_3 \phi^3 = 0 \quad (1)$$

図4に示されるように、初期の船体動揺周期とタンク内水の固有周期が近い水深3 cmの場合減揺効果が最も大きかった。

タンク内水の固有周期と船体動揺周期の関係では、タンク内水の固有周期が小振幅時の船体動揺周期よりも長い、タンク内水深が、1 cmと2 cmの場合、船体動揺周期は振幅が減少すると共に短くなる傾向を示し、(1)式の復原項は軟化スプリング型($c_3 < 0$)となった。これに対して、タンク内水の固有周期が小振幅時の船体動揺周期よりも短い、タンク内水深が4 cm、5 cmそして6 cmの場合については自由水が存在しない場合と同じく、船体の動揺周期は振幅が減少すると共に長くなる傾向を示し、(1)式の復原項は硬化スプリング型($c_3 > 0$)となった。(図中×が実験値、実線が推定値を示す)

4. 規則波中動揺試験

4.1 甲板上自由水と強制波の同調の影響

本節では「北進丸」モデルを用いた結果について論じる。図5は甲板上に自由水が存在する場合と存在しない場合の動揺振幅を比較したものである。横軸にはタンク内水深、縦軸にはタンク内水深が0 cmの場合の平均振幅で、各々のタンク内水深の場合の横揺れ角振幅を除した値を示してある。即ち図中の $\phi/\phi_0 = 1$ を表わす点線よりも下に値が示されたときは自由水による減揺効果が作用していることを示し、他方点線よりも上に値が示されたときは自由水の存在により動揺が助長されていることを示している。

従来報告されているように⁽⁴⁾、多くの場合において自由水による減揺効果が確認された。

しかし、強制波の周期が、タンク内水の固有周期の1/2(二次同調周期)よりも僅かに短いときに減揺効果が作用せずむしろ動揺が助長される場合があることが確認された。図5に示されるタンク内水深が1 cmの場合がその一例である。この場合に対応する、横揺れ角変位の時系列を位相を揃えた形で図6に示す。

以下このような二次同調周期近傍におけるタンク内水の挙動の特徴について述べる。

動揺するタンク内の浅水によって生じる波についての研究としては、吉岡らによる非線形理論が⁽⁵⁻⁸⁾が報告されている。この理論によると図

図5 甲板上に自由水が存在する場合としない場合の動揺振幅の比較
(北進丸モデルを用いた結果)

図6 図5で示したタンク内水深が1 cmと0 cmの場合の横揺れ角変位の時系列の比較

図7 座標系

7のように座標系および諸変数を設定すると、次の(5)式で与えられる s の値が -1 から 1 までの範囲をとる動揺角周波数帯で段波が生じることが示されている(図8)。

$$C_0 = \sqrt{gh} \quad (2)$$

$$\omega_0 = (\pi/B)\sqrt{gh} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \sqrt{(H\omega^2 + g)\theta_0 / (C_0\omega)} \quad (4)$$

$$s = \frac{\pi^2 C_0 (\omega - n\omega_0)}{3 B \varepsilon \omega_0 \omega} \cdot \sqrt{3B/8C_0} \quad (5)$$

図8 固有角周波数と限界角周波数
(ω_0 : 固有角周波数)

ω_0 : タンク内水固有角周波数、 g : 重力加速度、 h : タンク内水深、 θ_0 : 動揺角振幅、 ω : 動揺角周波数

(4)式より一次同調周期付近で定常波から段波に変わる限界周波数 ω_{-11} と二次同調周期付近で段波から再び定常波に変わる限界角周波数 ω_{+11} が求められる。

筆者らは先に、限界角周波数 ω_{+11} を境界としてタンク内水によって生じる波は変化するが、 $\omega_{+11} > 2\omega_0$ となる場合に定常波とはならない場合があることを確認した⁽¹⁾。即ち、段波から再び定常波に変わるのでなく、この定常波が再び生じるとされる周波数域で逆方向に進行する二つの遷移波が衝突する現象がみられた。(段波を含め進行方向に質量輸送を伴うものを以下総称して遷移波と記す)。

図9-a, bはこの一例を示すもので、先に図5及び図6に示したタンク内水深1 cmの場合に近い動揺状態を動揺発生装置で起こした結果と、それに対応する数値シミュレーション結果である。(今回の実験で用いたものと同じタンクに水を入れタンク内の水深を1 cmとし動揺台に設置し、周期1.3[sec]、角振幅5.0[deg]の動揺を与えた)数値シミュレーションは次式をMAC法⁽⁹⁻¹¹⁾とSOLA⁽¹²⁾の手法を基に次式を数値的に解くことにより行った⁽¹⁾。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{\partial \phi}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + F_x \quad (6)$$

図9-a 動揺状態(初期) 左: 動揺台を用いた結果、右: 数値シミュレーション結果

図 9-b 動揺状態(定常状態) 左：動揺台を用いた結果、右：数値シミュレーション結果

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = -\frac{\partial \phi}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$F_x = -g \sin \theta + x \ddot{\theta}^2 + y \ddot{\theta} + 2v \dot{\theta}$$

$$F_y = -g \cos \theta + y \ddot{\theta}^2 - x \ddot{\theta} - 2u \dot{\theta}$$

$\theta = \theta_0 \cos(\omega t + \varepsilon)$ 、 u 、 v ： x 、 y 方向の速度成分、 ν ：動粘性係数、

ϕ ：圧力を密度で除した値（座標系は図 7 参照）

図 9-a は動揺初期の過渡的な状態を示していて、このとき一方の段波が他方の段波を側壁側に押し返している様子がわかる。しかし図 9-b に示される定常状態に至ると、二つの段波の勢力は均衡し、側壁への押し返しは緩和されている。

先に図 5 及び図 6 に示したタンク内水深が 1 cm の場合のタンク内水の場合の挙動も上記と同様な現象で、逆方向に進行する二つの遷移波が衝突するという特徴を示すものであった。このため強制波の周期が一次同調周期付近の場合に生じるような激しいスロッシングは緩和され、減揺効果も抑制されたと考えられる。

また吉岡らによって示された限界周波数⁽⁵⁻⁸⁾は現象の変化を捉えるうえで重要な指標となることが再確認された。

4.2 甲板上自由水による船体動揺周期の変化の影響

本節で示す結果は「丸東丸」モデルによるものである。前節では甲板上の自由水の固有周期と強制波周期とに着目して論じたが、本節では甲板上自由水の存在による船体動揺周期の変化そしてそれに伴う強制波と船体動揺との同調について論じる。

筆者らは先に「北進丸」モデルを用いた静水中自由横揺れ試験で得られたデータに対して、角速度の 1 次式 + 2 次式及び角速度の 2 次式のみで表される型の減衰項の減衰係数を推定した結果、減衰係数が初期傾斜角により変化することを確認した。このため任意の初期傾斜角に対して同一の減衰係数を適用できないという問題が生じた。そこで減衰項を(1)のように補正し、運動方程式を解くことにより海水流入角に至るまでの任意の初期傾斜角に対して同一の減衰係数を適用できるようにした⁽²⁾。

本研究では、「北進丸」モデルと同様に甲板やハードチェーン等の形状的特徴を有するホタテ養殖船「丸

東丸」の模型船を用い同様な性質が自由横揺れ減衰において生じるかを調べた。

「丸東丸」モデルにおいても「北進丸」モデルの場合と同様な傾向が確認された。そして、補正した減衰項を用いることにより、大振幅時と小振幅時で係数を変化させることなく減衰曲線が再現できた(図10上段)。図10上段は甲板上に設置したタンク内に水が存在しない場合の横揺れ減衰曲線である。図10下段はタンク内に水が存在する場合(水深4cm)の横揺れ減衰曲線である。甲板上に自由水が存在する場合、1自由度横揺れ運動方程式の右辺は0とならないが、3章と同様な仮定の基で(1)式を推定値の計算に用いた。図10からも明らかのように自由水が存在することにより船体の動揺周期が長くなっている。即ち自由水の存在しない場合の固有周期は1.52[sec] (固有角周波数4.13[rad/sec])であり、自由水の存在する場合の固有周期は2.20[sec] (固有角周波数2.85rad/sec)である。

図11は強制波の角周波数に対する船体の応答横揺れ角変位を示している。●印が自由水の存在しない場合、■印が自由水の存在する場合に対応する。「丸東丸」モデルも先に述べた「北進丸」モデルと同様にハードチャイン等の船体形状を有しているため、海水流入角に至るまでの復原力曲線は線形とはならない。従って図10からもわかるように動揺周期は動揺振幅とは独立しておらず、動揺振幅が減少すると動揺周期が増加するという傾向、即ち硬化スプリング型の傾向を示している。よって図10の推定値の計算において、運動方程式(1)の復原項の三次の項の係数は正で近似した。このような動揺周期(動揺周波数)の動揺振幅依存性のため、応答曲線の共振域は、復原力関数が線形な場合に比べ高周波数側にシフトすることが示されている⁽¹²⁾。●印で示した自由水の存在しない場合については、固有角周波数4.13 [rad/sec] 付近で共振域に達してしているが、上記の復原力の非線形性に起因する振幅応答の傾向がみられる。

自由水の存在する場合の応答振幅の方が、自由水の存在しない場合より大きな値を示したのは図11に示した(a: $\omega=2.85\text{rad/sec}$)の場合と、(b: $\omega=5.86\text{rad/sec}$)の場合である。

まず(a)の場合について述べる。自由水が存在することにより船体の横揺れ固有角周波数が $\omega_n=2.85\text{[rad/sec]}$ に変化したため、共振域もこの角周波数近傍に移動している。この状態で船体の横揺れ固有角周波数に等しい角周波数($\omega/\omega_n=1.00$)の強制波を船体が受けたため、一次共振が生じたと考えられる。このため応答振幅は自由水が存在しない場合に比べて2倍近い値を示している。図12-aに(a)の場合の横揺れ角変位の時系列を比較したものを示す。

次に(b)の場合について述べる。外力の振動数が振動系の固有振動数の n 倍(n は2以上の整数)付近のとき、外力の振動数の $1/n$ 倍の振動数を有する振動が生じる場合があり、 n 次の分周波共振(subharmonic resonance)と呼ばれる⁽¹²⁾。この(b)の場合は2次の分周波共振に対応する($\omega/\omega_n=2.05$)。このため図11において■印で示された自由水が存在する場合の応答値は、強制波の角周波数 ω が一次同調角周波数を越えてから一度減少傾向を示しているが、2次の分周波共振角周波数付近で再び増加し、自由水の存在しない場合より大きな値を示している。図12-bに(b)の場合の横揺れ角変位の時系列を比較したものを示す。この図に示

図10 自由横揺れ減衰曲線の比較
(丸東丸モデルを用いた結果)

図11 規則波中応答横揺れ振幅
(丸東丸モデルを用いた結果、 κ :波数、 ξ :波高)

図12-a aの場合に対応する横揺れ角変位の時系列

図12-b bの場合に対応する横揺れ角変位の時系列

されているように、強制波の2倍の周期(1/2の周波数)を有する動揺がこの場合生じていることがわかる。

4.3 横揺れと船首揺れとの連成

以上の節では、甲板上に自由水が存在する場合の中で、減揺効果が作用しない場合について述べたが、本節では自由水による減揺効果が作用する場合における横揺れと船首揺れとの連成について論じる。

横運動の連成を考えるうえで、従来船首揺れの影響は、横揺れに対して非常に小さなものであるとされ、横揺れ・左右揺れの連成に比べ無視される場合が多い。しかし自由水による減揺効果が大きく作用する場合に船首揺れの影響が無視できない場合があることが確認された。以下「丸東丸」モデルによる典型的な例について述べる。

図13は波高22.3cm、周期1.53secの強制波を与えた時の横揺れ角変位と船首揺れ角変位の時系列で自由水が存在しない場合とする場合を比較したものである。また図14はこの場合の横揺れと船首揺れの相互相関係数を示して、タイムラグ τ が正であることは横揺れの変動が船首揺れの変動に先行していることを示す。

自由水が存在しない場合は、横揺れに対する船首揺れの影響は小さく、位相差も大きくはない。一方、自由水が存在する場合は横揺れは自由水による減揺効果により抑制されているが、横揺れに対する船首揺れの影響は無視できない。また横揺れと船首揺れの間に大きな位相のずれが生じ、横揺れに対して船首揺れは時間的な遅れを有している。この顕著な船首揺れの原因としては、甲板上に自由水が存在することによる船艀方向の重心位置の変化と横揺れ回転軸の船艀への傾斜⁽¹³⁾そしてタンク内で生じる激しいスロッシングの影響などが考えられる。またこの横揺れと船首揺れの間の位相差はタンク内水の動揺と船体の動揺の位相差等によるものだと考えられる。この横揺れに対して船首揺れは時間的な遅れを有する傾向は、本実験において自由水による減揺効果が大きく作用した全ての場合において確認された。

図13 自由水が存在する場合の横揺れ・船首揺れの連成

相互相関係数

図14 自由水が存在する場合の横揺れ・船首揺れの相互相関

5. 結 言

1. 「北進丸」モデルを用いた自由横揺れ減衰試験より次のような結果を得た。甲板上のタンク内自由水の固有周期が小振幅時の船体動揺周期よりも長い場合、船体動揺周期は動揺振幅が減少するとともに短くなる傾向を示し、他方甲板上のタンク内自由水の固有周期が小振幅時の船体動揺周期よりも短い場合、船体動揺周期は動揺振幅が減少するとともに長くなる傾向を示す場合があることが確認された。
2. 「北進丸」モデルを用いた規則波中動揺試験において強制波の周期が甲板上のタンク内自由水の固有周期の1/2(2次同調周期)付近の値のとき、甲板上の自由水の減揺効果はあまり生じず、自由水が存在しない場合と比較してむしろ動揺振幅が大きな値を示す場合があることが確認された。
3. 「丸東丸」モデルを用いた規則波中動揺試験において、甲板上の自由水の存在により動揺周期が変化し、共振域が移動する。このため強制波の周波数がこの状態の一次共振周波数付近及び、2次の分周波共振周波数付近に至ったとき自由水が存在しない場合と比較して動揺振幅が大きな値を示す場合があることが確認された。
4. 「丸東丸」モデルを用いた規則波中動揺試験において、自由水による減揺効果が大きく作用する場合に横揺れに対する船首揺れの影響が無視できない場合があることが確認された。

6. 謝 辞

本研究に協力してくれた、北海道大学水産学部4年生(研究当時)の長利孝志・深江宏司の両君に感謝します。

参 考 文 献

- (1) 上野公彦・天下井清・木村暢夫・甫喜本司：大角度動揺するタンク内浅水の挙動についての実験と数値解析 日本航海学会論文集，第90号，pp.201-213，1994.
- (2) 上野公彦・天下井清・木村暢夫・岩森利弘：小型漁船の横揺れ減衰の特徴と推定法について 日本航海学会論文集，第93号，pp.149-161，1995.
- (3) 上野公彦・天下井清・木村暢夫・岩森利弘・下川伸也：自由水を考慮した小型漁船の横揺れ減衰の特徴について 平成8年度日本水産工学会学術講演会論文集，pp.87-92，1996.
- (4) Jeff.Dillingham: Motion Studies of a Vessel with Water on Deck Marine Technology, Vol.18, No.1, pp.38-50, 1981.
- (5) 吉岡 勲・鈴木勝雄：動揺している水槽内の浅水に生ずる波について(その1 非線形理論) 日本造船学会論文集，第123号，pp.96-109，1968.
- (6) 吉岡 勲・鈴木勝雄・関 雅之：動揺している水槽内の浅水に生ずる波について(その2 非線形理論——補訂) 日本造船学会論文集，第128号，pp.167-177，1970.
- (7) 吉岡 勲・平山次清・山越康行：動揺している水槽内の浅水に生ずる波について(その3 実験) 日本造船学会論文集，第129号，pp.55-65，1971.
- (8) 森田知治・庄司邦昭：船体動揺による船内水の挙動について—I. 一段波発生に関する考察— 日本航海学会論文集，第78号，pp.121-127，1987.
- (9) J.E.Welch, F.H.Harlow, J.P.Shannon, B.J.Daly: "The MAC Method -A Computing Technique for Solving Viscous, Incompressible, Transient Fluid-Flow Problems Involving Free Surfaces" Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-3425, 1968.
- (10) A.A.Amsden, F.H.Harlow: "The SMAC Method: A Numerical Thecnique for Calculating Incompressible Fluid Flows" Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-4370, 1970.
- (11) C.W.Hirt, B.D.Nichols, N.C.Romeo: "SOLA - A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flow" Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-5852, 1975.
- (12) J.J.Stoker: "Nonlinear Vibrations", INTERSCIENCE 1966.
- (13) 質疑応答の欄を参照

質 疑 応 答

定兼廣行(神戸商船大学)：タンク水の存在によって艀揺れが発生したとのことですが、これは甲板上にタンクを置いたことによる回転(横揺れ)軸が艀艀に傾斜したのが原因でしょうか。

上野公彦：貴重な御意見を頂きまして有り難うございます。実験は自由水が存在しない状態のときもタンクは空のまま設置して行いましたのでタンクの重量による影響は小さいと思われますが、御指摘のように甲板上に水が存在することにより、回転(横揺れ)軸が艀艀に傾斜したことは十分に考えられます。この解釈は本文中においても引用させて頂きました。