船体運動と人体の応答に関する基礎研究—I.

木村 暢夫*・川島 利兵衛*

Fundamental Study for Human Dynamic Responses to the Motion of Fishing Vessels in Ocean Waves

Nobuo KIMURA and Rihei KAWASHIMA

Abstract

Intending to clarify the mechanisms of a man overboard accident, the authors have been studying human dynamic responses to the motion of fishing vessels in ocean waves.

For this problem, the acceleration of the fishing vessel is one of the most important factors.

Then, the experiment measuring the acceleration of the ship and human body was performed in an actual ship.

The results of the experiment were analyzed statistically and human response properties to the ship's motions were discussed.

1. ま え が き

第一管区海上保安本部の要救助件数資料によると、表1に示すように昭和53～56年における人身事故に関しては、海中転落、負傷、病気が発生原因全体の93%を占め、海中転落自体は病気と同じ全体の24%に達している。しかし、死亡・行方不明者数では、海中転落事故の方が病気の約5倍の人数にのぼっており、全体の死亡・行方不明者数の60%に達していて事故発生率の高さ、さらには発生時の死亡率の高さがうかがえる。

表1 昭和53年～56年の過去4カ年間ににおける要救助海難発生数 第一管区海上保安本部資料

年度	人身事故 発生					死亡・行方不明者 (再掲)				
	計	海中転落	負傷	病気	その他	計	海中転落	負傷	病気	その他
計	710人 (590) -42-	171人 (152) -30-	321人 (270) -12-	171人 (148) -12-	47人 (20) -12-	250人 (193) -34-	151人 (137) -25-	34人 (23) -9-	32人 (24) -9-	33人 (9) -9-
53	147 (130) -15-	44 (40) -12-	58 (53) -3-	39 (35) -3-	6 (2) -3-	54 (47) -14-	42 (39) -11-	5 (4) -3-	4 (3) -3-	3 (1) -3-
54	186 (153) -8-	39 (36) -5-	86 (71) -3-	47 (40) -3-	14 (6) -3-	61 (45) -7-	35 (32) -5-	6 (5) -2-	10 (6) -2-	10 (2) -2-
55	211 (172) -11-	45 (40) -8-	107 (83) -3-	49 (44) -3-	10 (5) -3-	69 (56) -7-	36 (34) -6-	14 (8) -1-	12 (11) -1-	7 (3) -1-
56	166 (135) -8-	43 (36) -5-	70 (63) -3-	36 (29) -3-	17 (7) -3-	66 (45) -6-	38 (32) -3-	9 (6) -3-	6 (4) -3-	13 (3) -3-

() は漁船

- - は一人乗り漁船

* 正会員 北海道大学水産学部 (函館市港町3-1-1)

海中転落事故を起こす原因は多様であり、その過程も複雑であるが、基本的要因としては、船体運動という物理現象に求めることが出来る。川島らは、海中転落事故の問題となる物理量として船体加速度をとりあげ、船体運動学的な考究を行っている⁽¹⁾。今回、著者等は、さらに船体加速度と人体の応答という視点に立って、この問題を考究した。

2. 実 船 実 験

漁船の波浪中での船体運動に対して、実際に甲板上に存在する人間がどのように応答するかについて計測実験を行った。

1982年12月1日、北海道噴火湾沿岸白尻港沖において、北大調査船うしお丸(109.57トン)を使用して、波浪中を head sea, 左右の bow, beam, quartering 及び following sea の8航走を行い、それぞれの航走において生じた船体加速度と甲板上に立っていた被験者の人体の応答加速度を同時計測記録した。

当時、海況は3~4、低気圧が通過した翌日にあたり、うねりがかなり残っており、船体運動から求めた波高は1.56m、風力3の海上を、平均8.4knot ($F_n=0.28$)で航走実験を行った。

この際、船体・人体共にX(船首尾方向)、Y(左右舷方向)、Z(鉛直方向)の3軸方向から成る加速度計を設置し、人体へのとりつけ位置は腰のところとした。図1に船体及び人体に関する加速度計測位置と各軸方向を示す。また図2には、同時計測した加速度記録例を示す。実験は図1に示すように、被験者が船首方向を向いて足を肩幅の広さに開いて立った状態で行った。また、個人による応答のちがいをみるために、何航走か被験者を2人にして計測を行った。図2の計測記録例は、left beamで航走した時のものである。同じ船体運動に対して、X、Z軸方向では、被験者により振幅に多少差はあるが、周期的にはよく似ていることがわかる。

図1 船体および人体の加速度計測位置

図2 船体および人体の加速度測定記録例

3. 結果と考察

船体運動は、波浪によって起こされた不規則現象であり、甲板上に立っている人間にはこの運動が入力として作用している。作用した加速度に対し、人間は常時応答しながら転倒しないような状態を保持していて、この過程が維持できる限り転落事故は起こらないはずである。

従って、著者等は、甲板上の加速度を人体に作用する入力とし、その結果として人体に生ずる加速度を出力と

図3(a) 向波航走での船体と人体の加速度の位相図
— Z 軸方向, 被験者(M) —

図3(b) — Z 軸方向, 被験者(S) —

図3(c) —X軸方向, 被験者(M)—

図3(e) —Y軸方向, 被験者(S)—

図3(d) —X軸方向, 被験者(S)—

図3(f) —姿勢不安定, X軸方向, 被験者(M)—

図4(a) 横波航走での船体と人体の加速度の位相図
—Z軸方向, 被験者(M)—

図4(b) —Z軸方向, 被験者(S)—

図4(c) —X軸方向, 被験者(M)—

図4(d) —X軸方向, 被験者(S)—

図 4(e) —Y軸方向, 被験者(S)—

各軸方向の位相関係を見てみると、Z軸方向では、図 3(a), (b)からわかるように、ほぼ直線関係を示しており、船体加速度と人体の応答加速度の間に位相差がないことがわかる。X軸方向では、図 3(c), (d)に示されるように、船体加速度に対し、人体の加速度の位相はランダムである。Y軸方向では、図 3(e)に表わされたように、人体の加速度に小さな変動はあるものの直線形状をしており、Z軸方向同様位相差がない。このことは、対船波向のちがう left beam の図 4(a)~(e)の位相図においても同じ傾向をしており確認できる。

図 3(f)は、同じ beam の時の被験者(M)のX軸方向の位相図であるが、計測開始直後のもので、図 3の他の位相図より 5 分間時間が早い。図 3(c)と比べ、船体加速度は、ほぼ同じ状態であるのに、2 度大きくバランスをくずし、計測開始直後、非常に不安定な状態であったことがわかる。

3.2 船体と人体の加速度の有義値

各計測記録について航走毎に 200 秒間の記録を、読み取り時間間隔 $\Delta T=0.25$ 秒で A/D 変換し、その時系列データを統計計算して、各加速度の有義値を求めた。

各軸方向ごとに、船体と人体の加速度の有義値の関係を表わしたのが図 5(a)~(c)で、図中の番号は航走番号で

図 5(a) 船体と人体の加速度の有義値 —Z軸方向—

図 5(b) —X軸方向—

図 5(c) —Y軸方向—

考え、X、Y、Zの各軸方向ごとに、位相差や加速度スペクトル等から人体の応答特性を考えた。

3.1 船体と人体の加速度の位相図

同時計測記録されたデータは、図 2 からわかるように、比較的高い周波数のランダム成分を含んでいるので、船体・人体の加速度を共に 5 Hz の Low pass filter を通して位相図を求めた。

図 3, 図 4が、それぞれ head, left beam で航走した時の位相図である。同方向の位相図が 2 つあるのは、被験者を 2 人立てて行ったからで、(M), (S) で表わしている。

ある。

図 5(a)の Z 軸方向のグラフによると、(M), (S) どちらの被験者に対しても、船体の加速度の有義値に対する人体の加速度の有義値の比が 1 より小さくなっており、船体加速度に比べて、かなり小さな振幅で応答していたことがわかる。X 軸方向においては、Z 軸方向に比べてかなり船体加速度の有義値自体は小さいが、この場合も、被験者(M), (S)に対する人体加速度の有義値が船体加速度の有義値より小さいことがわかる。最後に Y 軸方向は、船体加速度の有義値に対す

る人体加速度の有義値の比が1付近にある点が多く、船体と人体との加速度の有義値に差がないことがわかる。

3.3 周波数特性

船体加速度に対する人体の応答加速度の関係を周波数帯の上で比較してみるために、スペクトル計算を行った。

図6(a)~(e)の船体スペクトラは $\omega=1.2$ と $\omega=1.8$ の周波数範囲において、パワーのピークを持っている。 $\omega=1.2$ は Rolling のパワーのピークがあり、 $\omega=1.8$ は Pitching のパワーのピークがあることから、この周波数帯での船体のパワーが、Rolling, Pitching によるものだということがわかる。

そこで、船体加速度のスペクトラと人体の応答加速度のスペクトラを比較してみる。Z軸方向では、船体加速度は、Pitching の影響が大きい。人体のスペクトラは、船体と同じ帯域でピークを持っていて、周波数帯から見ると一致しているが、パワー自体は、航走により差がある。船体運動にパワーが見られる $\omega=6.28$ のような高周波数において、人体のパワーが見られず、人体において吸収されていることがわかる。X軸方向では、人体のスペクトラは、長周期の周波数帯で一番パワーを持っている。しかし、 $\omega=1.2$ や $\omega=1.8$ において船体運動のパワーがピークを持っている周波数帯では、きわだったピークがなく、人体が船体加速度にあまり対応せずに長周期で運動していたことがうかがえる。Y軸方向では、船体と人体の加速度のパワーが、ほぼ同じ周波数帯でピークを持ち、スペクトラの形もよく近似している。パワー自体の大きさも、船体とほぼ同じか少し小さい程度である。この方向では、人体が船体とほぼ同じ運動をしていると考えられる。

さらに、ゲイン、コヒーレンスそれにフェーズを見てみると、Z軸方向では、船体・人体両方のパワーのピークがある周波数帯付近で、ゲイン、コヒーレンスとも高い値を持っている。 $\omega=1.5\sim 2.5$ 位の範囲で、共に0.5以上の値をとり、この周波数帯において、船体加速度に対する人体の応答加速度の線型性が高いことがわかる。フェーズから、この帯域では、入力船体加速度に、人体がほとんど位相差なく応答していたことがわかる。X軸方向では、パワーからもある程度判断できるように、船体と人体の加速度スペクトラの周波数帯もずれており、ゲイン、コヒーレンスの値は低く、フェーズの変動が激しい。ただ、 $\omega=2\sim 3$ の範囲で、フェーズにむだ時間系においてみられるような変動があるが、今回の実験からは、明確な判断はつけられなかった。Y軸方向は、X、

図6(a) 横波航走での船体と人体の加速度のパワースペクトラ、応答特性、コヒーレンス
—Z軸方向、被験者(M)—

図6(b) —Z軸方向、被験者(S)—

図 6(c) —X軸方向, 被験者(S)—

図 6(d) —X軸方向, 被験者(M)—

図 6(e) —Y軸方向, 被験者(S)—

ほとんど変わらないことがわかった。

(3) 周波数帯から見た船体と人体の加速度の関係は、Z、Y軸方向で Rolling, Pitching といった船体運動によく応答しており、こういった周波数帯では、位相差はなかった。X軸方向では船体運動に応答するよりも、長周期の周波数帯で運動していると考えられる。

Z軸方向に比べ一番ゲイン、コヒーレンスが高く、 $\omega=0$ 付近から $\omega=3 \sim 4$ にわたる広い周波数帯で $0.8 \sim 1.0$ 近くの値を示し、位相差もほとんどないことがわかった。図 7(a)~(d) に left quartering の時の結果を示している。この結果から航走を変えた時でも以上の特性が変わらないことがわかる。また、位相関係については、位相図で求めた結果とほぼ一致しており、そのことが周波数帯の面からも確認できた。

4. ま と め

実験結果に基づいて、位相差、加速度の有義値それに周波数帯といった側面から船体運動と人体の応答を考察してきたが、本研究をまとめてみると次のとおりである。

(1) 船体加速度に対し人体の応答加速度はZ、Y軸方向で位相差がなく、X軸方向ではランダムであった。

(2) 船体と人体の加速度の大きさでは、加速度の有義値によれば、X、Z軸方向では船体加速度の有義値に比べ人体の方が小さく、Y軸方向では船体との間で

図7(a) 斜め向い波航走での船体と人体の加速度のパワースペクトラ, 応答特性, コヒーレンス
—Z軸方向, 被験者(M)—

図7(b) —Z軸方向, 被験者(S)—

図7(c) —X軸方向, 被験者(M)—

図7(d) —Y軸方向, 被験者(S)—

これらの結果をふまえ、さらに個人による応答のちがいや姿勢を変えた時の応答のちがいを明らかにするとともに、人体応答のモデルを考えて行くことを今後の課題としたい。

5. 謝 辞

実験に際し御協力頂いた北大水産学部漁船運用学講座及びうしお丸乗組員諸氏に深謝する。特に、被験者になってもらった同大森田技官とうしお丸乗組員沢田氏に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 川島利兵衛他；漁船における海中転落のメカニズムについて，日本航海学会論文集第61号，137～149 pp (1979)
- (2) 神田 寛他；高速艇における繰返し衝撃，振動の人間工学的評価法—I，日本航海学会論文集，第63号，1～10pp (1980)
- (3) 神田 寛他；高速艇における繰返し衝撃，振動の人間工学的評価法—II，日本航海学会論文集，第66号，163～171pp (1982)
- (4) 神田 寛他；高速艇における繰返し衝撃，振動の人間工学的評価法（最終報告），日本航海学会論文集，第67号 35～41pp (1982)
- (5) 北海道海難防止センター；昭和57年度海難防止の調査研究事業報告書（1983）

質 疑 応 答

鞠谷 宏士：

1. 被験者は例えば縦揺れに対して足を踏み出して姿勢を保つというような応答をしてもよいという条件だったのでしょうか。

2. 船体と人体の応答周波数のピークの位置がY軸では同一であるのに，X軸ではずれて人体の場合はピークが長周期の所にあらわれる理由は何でしょうか。Y軸に対しては人間が肩幅程度に足を開いているが，X軸では足裏の長さだけが姿勢をささえる幅だということが影響しているのではないのでしょうか。

木村 暢夫：

1. できるだけ肩幅に足を広げた状態を保持してもらいましたが，船体加速度が大きくなった場合，状態を保持できないこともあり，そういった場合は，足を踏み出してもよいことにしていました。

2. 指摘された影響が各軸方向での応答に含まれているかもしれませんが，我々はそれぞれの方向に動く関節の数，つまり自由度のちがいではないかと考えています。しかし，はっきりとしたことは，今までの研究から判明しておらず，今後，こういった課題も含め研究して行きたいと思います。

神田 寛：海中転落のメカニズムを明らかにすることが最終的な目的と考えられますが，興味深い研究であり期待しております。一つのヒントとして，立位の姿勢での身体の重心のある範囲をこえる移動に注目すれば，目的が果せるのではないかと思います。検討して下さい。

木村 暢夫：御意見ありがとうございます。私達も，人体が姿勢を維持できる範囲がありその範囲から人体の重心が出たときバランスをくずすのではないかと考えており，今後，その方向で研究をして行きたいと考えております。

小川 陽弘：人体の前屈などによる加速度計の傾斜に伴って重力成分が，X，Y方向に入ってくると思いますが，その処理はどうされていますか。

木村 暢夫：加速度と同時記録していたビデオによると，人体はそれほど前屈をしていませんでした。従って，今回は，そういった影響を考えずに処理しました。