二段滑台を用いた自由落下式救命艇の進水について

正員 荒井 誠* 学生員 岡崎 一成**
正員 上村 伸一***

Double-skid Method for Launching Free-fall Lifeboats

by Makoto Arai, *Member* Kazushige Okazaki, *Student Member*
Shinichi Kamimura, *Member*

Summary

This paper describes a new concept for launching free-fall lifeboats proposed by Yokohama National University. Using the conventional single-skid free-fall system, as the fall height of the lifeboat increases, the potential for increasing incidence of dangerous lifeboat motions, in which the lifeboat moves backward or stumbles on the surface after entering the water, has been pointed out. One of the principal causes of this undesirable motion is rotation of the lifeboat during its restricted fall at the edge of the launching skid. Thus a new "double-skid" launching concept is proposed to effectively eliminate the rotation of the lifeboat at the skid end and to enable the lifeboat to move smoothly after entering the water. In order to confirm the performance of the proposed method a series of numerical simulations and model experiments are carried out in which two lifeboat models with overall lengths of 1 meter and 6 meters are used. The effects of design parameters such as skid angle, skid height, etc., are investigated and an example of the implementation of this new system at the stern of a large merchant ship is illustrated.

1. 緒 言

自由落下式救命艇を従来の方で進水させる場合、滑台端部を通過する救命艇にはその重心に作用する重力と滑台からの反力によって形成される偶力が作用する。この結果、救命艇には縦方向の回転運動が生ずる。回転運動は救命艇が滑台を離れ空中を自由落下する間も持続するため、落下高さが大きい場合には着水時の救命艇の姿勢が水面に対し鉛直に近くなる傾向がある。このような着水を行うと、浮上後の救命艇が母船方向に後進したり、水面上で後方に回転するなどの極めて危険な状態が引き起こされる可能性がある¹⁾²⁾。

著者らはこの問題点を解決するための新しい進水方法として二段滑台方式を提案した³⁾。二段滑台方式では、Fig.

1に示すように重心を挟んで救命艇側部の前後2カ所、両舷で計4カ所に支持部材（短いガイドレールないしはローラー）を取り付ける。また滑台のレールを二段にして、上記4ヶの支持部材がそれぞれ等しい距離を滑降し滑台下端部を同時に離れるように設定する。この方式によると滑台端部における救命艇の回転運動が全く発生しないため、救命艇は滑台レールの傾斜角に等しい角度を保ったまま無回転で空中を落下し着水する。したがって、従来の方で進水した救命艇が着水時にもつ船首下げ方向の回転モーメントを除去することが可能となり、また、救命艇に対し適切な着水角を与えることができる。この結果、着水後の救命艇の運動の大幅な安定化が期待できる。

この方式の基本概念および全長0.2mの小型模型を用いた可能性確認実験の結果はすでに報告済み³⁾であるが、本論文では日本造船研究協会第232研究部会（SR232）の共同研究で実施された全長1mおよび6mの模型艇を用いた模型実験とその解析結果を示し、二段滑台による進水の特徴と従来の進水方法との性能比較について検討した結果を報告する。また、大型商船の船尾に二段滑台を設置する場合を想定して、滑台の設置角度、設置位置等を検討

* 横浜国立大学工学部

** 横浜国立大学大学院

*** (株)コマツ

Fig. 1 Double-skid launching system

Fig. 2 Test facilities for $L=1$ m model

した結果と設計例も示す。

2. 模型実験および数値シミュレーションによる二段滑台方式の性能確認

2.1 実験模型

本論文では日本造船研究協会第232研究部会(SR 232)で試設計された肥大船型を用いて模型実験を行った結果を示す。同共同研究では、二段滑台方式による救命艇の進水性能を調べるために、屋内の実験水槽における小型模型実験と、造船工場の岸壁を利用した大型模型実験を行った。実験に用いた2隻の模型艇と想定実艇の主要目をTable 1に示す。小型模型実験では艇長 $L=1$ mの木製の剛体模型を用いて、救命艇の着水時の運動と衝撃加速度を計測した。大型模型実験では実艇の艇体構造を模擬した $L=6$ mのGFRP製模型艇を用いて、艇体構造の強度関連の計測や、滑降装置や切り離し装置などの滑台関連諸装置の機能確認を行った。

2.2 小型模型実験

(1) 実験装置および模型艇

小型模型実験は三井造船昭島研究所の潮流水槽で実施した。水槽内に設置した進水装置をFig. 2に示す。滑台は従来型滑台と二段滑台の両者を用意しておき、実験水槽の

作業台車の架台の上に滑台を設置して両進水方式に対する実験を行った。本研究における落下高さの定義としては、救命艇の船尾端の支持部材が滑台から離れる点を基準点として、基準点と静水面との距離を用いることにした。すなわち、Fig. 2の黒丸印で示されているように、従来型では滑台レールの先端、二段滑台の場合には後ろ側の滑台レールの先端を落下高さの基準点とした。実験状態は、落下高さ1.5 m, 2.0 m, 2.5 m, 滑台傾斜角 30° , 40° , 50° , 滑降距離0.5 mから1.3 mとした。なお、本論文における滑降距離の定義は船体中央が滑台上を滑降する距離とする。すなわち、艇の先端が滑台の先端に一致した状態から滑降を開始した場合、両進水方式ともに滑降距離は0.5艇身($L=1$ m模型艇の場合滑降距離0.5 m)ということになる。

Fig. 3に示すように、模型艇には船首から船尾に達する

Table 1 Principal dimensions of the lifeboat models

	$L=1$ m model	$L=6$ m model	Full scale
Length (m)	1.000	6.000	8.000
Breadth (m)	0.325	1.950	2.600
Depth at midship (m)	0.294	1.763	2.350
Draught (m)	abt. 0.074	0.345	0.460
KG (m)	0.167	0.776	1.052
Midship G (m) : aft +	0.039	0.075	0.232
Radius of gyration	0.277	1.450	-
Displacement (Kg)	15.77	2,320	5,500
Capacity No. of persons	-	-	30
	1/8	3/4	1

Fig. 3 $L=1$ m lifeboat model

従来方式用の支持部材（ガイドレール）を取り付け、更にその上方の船体中央直前に短いガイドレールを設置して、同一の艇で従来方式、二段方式の両進水方式に対応できるようにした。また、同図に示すように、模型艇内には船首（記号 [B]）、船体中央（記号 [M]）、船尾（記号 [S]）に加速度計を取り付け、前後方向（axial direction, 記号 [a]）、上下方向（normal direction, 記号 [n]）の加速度を計測した。さらに、船体中央のアップパーハル上には運動計測用のターゲットを取り付けるためのマストを設置した。運動計測はビデオカメラを用いた非接触運動解析装置により、マストに取り付けた2ヶのターゲットの位置から、時々刻々の艇の位置と姿勢を求めた。なお、水面突入時には着水衝撃によって船体を包み込むような水膜が発生するため、ターゲットの設置位置には工夫を要した。すなわち、マストの形状をT字型にして2ヶのターゲットを艇の前後方向に離して取り付けると、片方のターゲットが水膜の中に隠れてしまい運動計測装置によるターゲットの追跡が中断される状態が発生しやすかった。試行錯誤の結果、Fig. 3に示されているように2ヶのターゲットを船体中央に上下方向に並べる方法を採用した。なお、小型模型艇の船体は軽量化を図るため比重の小さい桐材（比重0.28）で製作したが、剛体模型としての強度を確保するために若干重量オーバーとなり、喫水、KG等は実艇との相似則を満足していない（Table 1 参照）。

(2) 実験結果とシミュレーション結果の比較

落下高さ1.5 m、滑降距離0.5 m、滑台傾斜角 40° の条件で従来型滑台から進水させた場合の、救命艇の着水運動と衝撃加速度の計測結果を数値シミュレーション結果と比較してFig. 4およびFig. 5に示す。Fig. 5の図中の記号は加速度計の取り付け位置と加速度の方向を示している（Fig. 3参照）。次に同じ条件で二段滑台から進水させた場合の結果をFig. 6, Fig. 7に示す。Fig. 4とFig. 6の比較より明らかなように、この進水条件では従来型滑台を使うと、浮上後に救命艇が母船方向に後進するという危険な運

動モードが発生する。一方、二段滑台によれば安全に前方に離脱できることが分かる。この条件以外にも、落下高さ、滑台傾斜角、滑降距離の組み合わせを種々変えて実験と数値シミュレーションを実施した結果、今回行ったほとんど全ての実験ケースにおいてFig. 4, Fig. 6と同様の運動モードが発生した。すなわち、従来型の滑台からの進水では、浮上後の救命艇は、後進または浮上カ所で停止、二段滑台からの進水では浮上後スムーズに前進するという結果であった。このような運動が起こる原因としては、従来型滑台を用いる場合、着水時の艇は船首下げの回転運動をしており、また着水角も大きいために、水中突入後に前進速度を失いやすく、水中で一旦停止後、後方に反発浮上するためである。特に本艇は船首が極端に肥えた船型をしているためにこの傾向が強い。一方、二段滑台からの進水では浅い角度で着水するために水面で船首がはね上げられ、水中への突入はほとんどせずに引き続いて発生する船尾底スラミングにより救命艇は前方に押し出される。勿論、従来方式であっても優れた船型の艇を適切な条件で進水させれば浮上後に前進運動を与えることは可能であるが、本実験の結果から自由落下式救命艇に安全な着水運動を与える汎用的な手段として二段滑台方式が有効であることは明らかである。なお、Fig. 5とFig. 7の比較より分かるように、二段滑台を用いる方が艇の上向き（normal direction）加速度が大となる傾向があるので注意する必要がある。また、両方式では着水時の運動が異なるために、加速度時系列のパターンが相違しており、二段滑台を用いた場合に船尾の上向き加速度（ S_n ）が大となる特徴がある。着水運動や着水加速度は、救命艇の船型や重量分布等にも影響されるため、実用艇の開発時にはさらに詳細な検討が必要と考えられる。なお、Fig. 4～Fig. 7に示されているように本論文の数値シミュレーションに使用した計算法⁴⁾は従来方式、二段滑台方式を問わず自由落下式救命艇の着水挙動の評価に有効であることが分かった。

Fig. 4 Measured and computed lifeboat motion (conventional single-skid method)

Fig. 5 Measured and computed acceleration histories
(conventional single-skid method)

Fig. 6 Measured and computed lifeboat motion
(double-skid method)

(3) 滑台レールの工作精度等の影響

滑台レールの製作誤差や、救命艇ガイドレールの損傷等により、救命艇の支持部材が滑台レールから左右同時に外れない場合に、救命艇が滑台上で横転してしまうなどの状態が起きてしまつては非常に危険である。特に母船が横方向に傾斜（ヒール）した状態からの脱出時にこの問題が危惧される。そこで、二段滑台のレールのうち左舷側前方のレール長さを標準状態から 20 mm 短くし、救命艇の左側前方の支持部材が他の支持部材よりも先に外れるような状態での進水実験を行った。二段滑台システムでは滑降の終了間際には艇の重量のほとんどが前方 2 ヶの支持部材にか

かるため、前方の支持部材の一方が外れる状態が特に危険と予想された。また、もう一つの人為的な実験条件として、前方および後方の左右の滑台レールの間隔を標準状態（左右のレール間隔を艇の全幅 + 3 mm とした状態）よりも更に 5 mm 広げた状態での模型実験も行い、レール間隔が広がることによる影響を調べた。先に述べたようにこの二つの条件は横傾斜した母船からの脱出時に特に厳しい条件になると考えられるため、標準的な滑台状態からの脱出に加え、SOLAS⁵⁾ で要求される自由落下システムの要件（母船の横傾斜 20° 時でも安全に離脱できること）に対応して滑台を救命艇の右舷側に 20° 横傾斜させた状態

Fig. 7 Measured and computed acceleration histories
(double-skid method)

Fig. 8 Test tower for $L=6$ m lifeboat model experiments

Fig. 9 Launching rails of $L=6$ m model experiments

での実験も実施した。実験時に計測した艇体運動の解析の結果、滑台レール4本中の1本（左舷前方）を短くした場合および左右のレール間隔を広くした場合ともに、標準状態の実験結果と有意な差が生じなかった。今回行った実験における人為的な状態変化を実機換算すると、滑台レール長さで160 mm、滑台間隔で40 mmに相当し、滑台レールの製作誤差や、救命艇の支持部材の損傷としては過大なものである。従って、二段滑台方式は通常の製作誤差等に対しては十分安定なシステムであることが確認された。

2.3 大型模型実験

(1) 艇体の運動

大型模型実験は日立造船因島工場の艀装岸壁を利用して実施された。Fig. 8に大型模型実験用の落下塔の概要を示す。またFig. 9は二段滑台のレール部分を示す。滑台レールは摩擦を極力抑えるためにポリアミド樹脂製とした。また母船のヒールに対応した横傾斜実験を行う際に模型艇が横方向に変位することを防ぐためのローラーを滑台レールの側方に設置した。Fig. 10に、模型実験における典型的な進水状況を示す。滑台端部通過時および自由落下中の艇の角度が一定という二段滑台による進水の特徴が示されている。

(2) 艇体に作用する着水衝撃加速度

Fig. 11に、滑台傾斜角40度、横傾斜なし、滑降距離 $0.5L$ 、落下高さ（後部滑台先端と水面の距離）8.58 mの条件で行った実験で計測した加速度の時系列を示す。本実験艇のような弾性体構造物に衝撃的な力が作用した場合の加速度応答は、構造物の剛体運動の成分と弾性変形による成分から構成される。大型模型実験艇の加速度計測は、艇内の比較的強固な部材に取り付けた加速度計によって行ったが、加速度時系列には上述の局所的な艇体構造の弾性応答の影響が含まれている。一方、本論文の数値シミュレーションでは艇体は剛体と仮定して計算を行う。従って、計測結果と数値シミュレーション結果を直接比較することはできないが、参考までに上記の実験の進水条件を用いて行った数値シミュレーションの結果をFig. 12に示す。数値シ

Fig. 10 Motion of $L=6$ m model launched from the double-skid

ミュレーションが剛体計算であることを考慮すれば、Fig. 11とFig. 12は傾向的によく対応していると考えられる。

3. 進水システムの試設計

3.1 従来方式との相違点及び二段滑台固有の注意点

従来方式の自由落下救命艇用の滑台は、滑台レール長さ1.0～1.5艇長程度、滑台傾斜角（ θ ） $30^\circ \sim 35^\circ$ で設計されている。二段滑台方式を採用する場合も、搭載スペースの制約から滑台の寸法は従来方式と同程度とする必要が

Fig. 11 Measured acceleration histories
($L=6$ m GFRP model)

Fig. 12 Computed acceleration histories
($L=6$ m model, rigid body computation)

あろう。一方、滑台傾斜角は進水方式の違いにより両方式で異なってくる。二段滑台方式は、着水後の救命艇に前進運動を与えられるという点では滑台傾斜角の有効範囲が広く設計自由度が大きい³⁾が、傾斜角が大き過ぎると乗艇が困難になり、また、傾斜角が小さ過ぎると着水時に腹打ち状態になって過大な衝撃加速度が作用する。これらを考慮すると、滑台傾斜角の実用的な設計範囲も自ずと定まってくる。着水後の運動と衝撃加速度の点からは、従来型の自由落下式救命艇の着水角として最適となる 45° 前後の着水角⁶⁾を二段滑台式の場合にも与えるように設計するのが妥当と考えられる。すなわち、二段滑台方式では着水角は

滑台傾斜角に等しいので、乗艇の利便性も考慮して滑台傾斜角 $40^\circ \sim 45^\circ$ 程度が良いであろう。次に、二段滑台方式固有の注意点として、二段滑台方式による進水では母船の甲板上で自由落下を始めるという問題がある。このため、落下する救命艇と母船甲板との干渉に注意しなければならない。この点の検討からも滑台傾斜角や滑台レール長さ等の必要条件が定まる。

本章では、以上を考慮して、艇長 $L=8$ m の救命艇に対する二段滑台装置の試設計を行う。なお、自由落下式救命艇は SOLAS⁹⁾ によって母船が 10 度まで縦傾斜した場合でも安全な脱出が可能な設計とすることが義務づけられて

Fig. 13 Definitions of design parameters

Fig. 14 Clearance vs. skid angle

いるので、母船の縦傾斜の影響についても考慮することとする。

3.2 検討結果

二段滑台装置の基本寸法の定義を Fig. 13 に示す。ここで、同図に示すように救命艇の最後尾の下端を点 P とし、母船の上甲板の端点を点 Q とする。二段滑台方式では救

Fig. 15 Clearance vs. friction coefficient

Fig. 16 Clearance vs. sliding distance

命艇は一定の角度を保ったまま落下するので、進水時に点 P の軌跡が点 Q より上方を通過するように滑台を設計すればよい。母船甲板上における前部滑台の先端の高さを H_c で表し、本論文ではこれを必要クリアランスと呼ぶこ

謝 辞

本研究の模型実験は(社)日本造船研究協会第232研究部会における共同研究「新自由降下式救命艇システムの研究」の一部として実施した。有益な御討論を頂いた長田修部会長をはじめとする委員各位に感謝する。また、大型模型実験にご尽力頂いた運輸省船舶技術研究所の宮本武氏、日立造船の安孫子玲一郎氏および小型模型実験にご協力頂いた三井造船昭島研究所の松原直哉氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 小川陽弘, 田崎亮: 自由落下式救命艇の着水後の運動について, 日本造船学会誌, 第810号, pp. 14-18 (1996).
- 2) 荒井誠, Khondoker, M. R. H.: 自由落下式救命艇の着水後の運動様式と安全性について, 日本造船学会論文集, 第181号, pp. 181-189 (1997).
- 3) 荒井誠, 岡崎一成: 自由落下式救命艇の新しい離脱方式について, 関西造船協会誌, 第229号, pp. 189-195 (1998).
- 4) Arai, M., Khondoker, M. R. H., Inoue, Y.: Water Entry Simulation of Free-fall Lifeboat (1st report: Analysis of Motion and Acceleration), 日本造船学会論文集, 第178号, pp. 193-201 (1995).
- 5) Consolidated text of the Annex to the 1974 SOLAS Convention and the 1978 Protocol relating to the 1974 SOLAS Convention incorporating up to and including the 1991 Amendments, Chapter III, Regulation 44-6.
- 6) 廣田光男, 正林和倫: 自由落下式救命システムの研究, 横浜国立大学工学部建設学科卒業論文, (1995).

付録1 母船甲板上の必要クリアランス

(1) 母船の縦傾斜なしの場合

本文中の Fig. 13 の状態から滑降を開始した救命艇が滑降を終了したときの点 P の位置を座標系 (O-xz) の原点として考えると, 点 P の軌跡は

$$z = -\frac{x^2}{4l(\sin \theta - \mu \cos \theta) \cos^2 \theta} - x \tan \theta \quad (\text{A.1})$$

と表せる (Fig. A.1 参照)。ここで, μ はガイドレールと

滑台との摩擦係数である。点 O と点 Q の水平距離を a ($=L_f \cos \theta + h \sin \theta$) として, $x=a$ のときの z 座標を z_a とすると, 必要クリアランス H_c は

$$\begin{aligned} H_c &> |z_a| - (L_f \sin \theta - h \cos \theta) \\ &= \frac{a^2}{4l(\sin \theta - \mu \cos \theta) \cos^2 \theta} + a \tan \theta \\ &\quad - (L_f \sin \theta - h \cos \theta) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

となる。

(2) 母船の縦傾斜を考慮する場合

Fig. A.1 において母船が反時計方向 (船尾端 Q を上げる方向) に ϕ だけ回転した場合を考える。この場合は, (A.1) 式の θ が $(\theta - \phi)$ になったと考えればよいので, 点 P の軌跡を表す方程式は

$$\begin{aligned} z &= -\frac{x^2}{4l\{\sin(\theta - \phi) - \mu \cos(\theta - \phi)\} \cos^2(\theta - \phi)} \\ &\quad - x \tan(\theta - \phi) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

となる。

次に, 座標系 O-xz を ϕ だけ回転した座標系を O-x'z' として, (A.3) を x' , z' で表し, 母船船尾端の式

$$x' = a \quad (\text{A.4})$$

との連立方程式を解けば点 P が点 Q と交差する位置が定まる。 $x' = a$ となる位置の z' 座標を z'_a と記すことにすると, 必要クリアランスは

$$\begin{aligned} H_c &> |z'_a| - (L_f \sin \theta - h \cos \theta) \\ &= \frac{\cos \phi - 2aC_1 \cos \phi \sin \phi - C_2 \sin \phi}{2C_1 \sin^2 \phi} \\ &\quad - \frac{\sqrt{(\cos \phi - C_2 \sin \phi)^2 - 4aC_1 \sin \phi}}{2C_1 \sin^2 \phi} \\ &\quad - (L_f \sin \theta - h \cos \theta) \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

となる。ただし,

$$C_1 = \frac{1}{4l\{\sin(\theta - \phi) - \mu \cos(\theta - \phi)\} \cos^2(\theta - \phi)} \quad (\text{A.6})$$

$$C_2 = \tan(\theta - \phi) \quad (\text{A.7})$$

である。(A.5) 式は, ϕ の正負にかかわらず成立するが, 一般に $\phi > 0$ (母船が船首トリムした状態) が厳しい設計条件となる。