波浪と風の同時作用下における係留船舶の動揺と 係留索の張力に関する水理模型実験

A Model Experiment on Motions and Mooring Rope Tensions of a Moored Ship under Waves and Winds

小野貴也¹・西井康浩²・松原千恵³・松尾雄太⁴・山城 賢⁵
吉田明德⁶・北出徹也⁷・井芹絵里奈⁸

Takaya ONO, Yasuhiro NISHII, Chie MATSUBARA, Yuta MATSUO, Masaru YAMASHIRO
Akinori YOSHIDA, Tetsuya KITADE and Erina ISERI

An evacuation port facility for a ferry connecting remote islands is under consideration in Sendai Port. The facility is a rectangular shaped small basin, which consists of wave dissipating vertical walls. The ferry is housed and tightly moored with a number of ropes during severe waves and winds caused by typhoons. To understand the effects of waves and winds on the ship motions and the mooring rope tensions, hydraulic model experiments were conducted. The ship motions were recorded by video cameras and analyzed with motion capture devices. The tension loads exerted on the mooring ropes were measured by load meters connected in rope. It was found that for each mooring rope the maximum tension loads are all less than the rupture load if the rope is new, but when the ropes are deteriorated, the rupture of the ropes might occur.

1. はじめに

国内離島航路を運航する船舶は、台風等による気象擾乱時に、安全に避泊・係留できる港湾施設の確保が難しいため、遠方の静穏な海域に移動して錨泊により凌いでいる場合が多い。国土交通省九州地方整備局は、串木野と甌島を結ぶ高速艇の避難施設について、写真-1に示す鹿児島県川内港をモデルケースとして検討を行っている。当該施設は、入港のしやすさや安定係留に配慮した“コ”の字型の係留施設であり、高速艇は初期張力を大きくかけた緊張状態で係留される。このような係留方法に対して、避難施設の安全性を確保するためには、台風来襲時の船舶の動揺特性および係留索の張力特性を把握する必要がある。平石ら（1991）は、ブイ泊および錨泊を対象として、避泊フェリーの振れ回り運動および係留張力の特性を模型実験と数値計算で検討している。しかしながら、係留施設に係留された船舶を対象に、水槽実験において波浪と風を同時に作用させ、船舶の動揺量と係留索の張力を検討した事例は少ない。

本研究は、水槽内に係留施設と船舶の模型を設置し、造波機と送風機を使って台風来襲時の波浪と風を再現した実験を行い、荷重計を用いた張力測定により係留索の破断の可能性を検討するとともに、非接触型の動揺測定により避難施設との接触の可能性を検討し、船舶の安全係留を確認したものである。

2. 避難施設の概要

避難施設は、国土交通省九州地方整備局（2009）により検討が行われており、川内港の湾奥部に整備が計画されている。当該施設は、直立消波ブロックを用いた係船岸であり、2つの開口幅で検討を行っている。船舶の係留は8本の係留索を用いており、係船柱の位置や係留方法については、対象船舶関係者からのヒアリング結果を基に決定されている。図-1に船舶の係留状況を示す。なお、台風時の避難であるため、船舶の荷重条件は空倉出

写真-1 川内港の検討箇所

1 正会員	修(工)	(株)三洋コンサルタント	調査部
2 正会員	博(工)	(株)三洋コンサルタント	調査部 部長
3	修(水)	(株)三洋コンサルタント	調査部
4 学生会員		九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻	
5 正会員	博(工)	九州大学大学院助教	工学研究院環境都市部門
6 正会員	工博	九州大学大学院准教授	工学研究院環境都市部門
7 正会員	修(工)	国土交通省九州地方整備局鹿児島港湾・空港整備事務所	所長
8	修(工)	国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所

図-1 船舶の係留状況

図-2 実験施設の配置

写真-2 模型と測定機器の設置状況

港状態を想定している。

3. 実験概要

(1) 実験施設

実験は、図-2に示す九州大学沿岸海洋工学研究室所有の平面水槽（長さ20.29m、幅8.28m、高さ0.65m）に、係留施設と船舶の模型を設置して行った。水槽底面を現地の海底（泊地）とし、一定水深-0.18m（現地：D.L.-4.5m）とした。造波は、ピストン式の造波機を使用し、波の進行方向に沿うように導波板を設置した。また、入射した波の多重反射を防ぐため、水槽内に消波装置を設置した。送風機は、一方向に風を送り出すタイプ（送風口：幅4.0m、高さ0.3m）を使用し、設置位置は、事前に行った予備実験の結果を基に、船舶模型の中心と送風口の間隔が2.0mになるようにした。また、風が船舶模型に対して水平方向から作用するように、水槽底面からの高さを決定した。

表-1 船舶の諸元

項目	現地	模型
全船長(m)	48.50	1.94
垂線間長(m)	45.00	1.80
船幅(m)	8.20	0.328
船首高さ(m)	4.60	0.184
満載喫水(m)	1.45	0.058

表-2 気象および海象条件

項目	現地	模型
波高(m)	0.52	0.021
周期(s)	16.4	3.28
風速(m/s)	15.0, 22.6, 36.6	3.00, 4.52, 7.32
風向(deg)	0, 90	0, 90
潮位(m)	0, 3.60	0, 0.144

(2) 実験模型

実験に使用する模型の縮尺は、再現範囲、水槽規模および波浪条件等を考慮して、1/25のフルード相似則とした。模型および測定機器の設置状況を写真-2に示す。船舶模型は、風を作用させたときの影響を考慮するため、実際に運航している高速艇を詳細に再現した。船舶の諸元を表-1に示す。なお、船体はFRP、上部構造物はバルサ材で製作し、模型の製作後は調整用ブランコや水槽を用いて重心、喫水、環動半径の調整を行った。堤体模型は、直立消波ブロックで製作し、係留索を再現したワイヤー（径：1.5mm、重量：8.9g/m）を用いて船舶模型を係留した。

(3) 実験諸元

実験で再現する波浪および風は、国土交通省九州地方整備局（2010）より、近年の台風の中で当該海域に最も影響を及ぼしたと考えられるT0418号の諸元を基に設定した。気象および海象条件を表-2に示す。実験波は不規則波を用いることとし、現地の地形条件から波向きは、堤体模型の開口部に対して直角に入射する一方向波とした。実験風は、風速一定の定常風としT0418号の風速4.52m/s（現地：22.6m/s）を基準に3つの風速を設定した。実験風向については、事前に行った予備実験の結果より船舶の側面（風向90度）および船尾（風向0度）の2方向からそれぞれ作用させた。実験潮位は、H.H.W.L.とL.W.L.の2ケースとした。H.H.W.L.は、潮位が最も高く海象条件が厳しくなる状態である。L.W.L.は、H.H.W.L.に比べ係留索の俯角が大きく延長が長くなる状態である。

4. 測定方法

(1) 張力の測定

係留索（ワイヤー）に作用する張力は、ひずみゲージ

を用いた引張型荷重計を係留索の中間に取付けて測定を行った。荷重計は係留索および船体の動揺に対する影響を出来るだけ小さくすることが必要で小型軽量であることが求められる。模型の縮尺サイズなどから既往の製品で条件に合う物を見つけることが困難であったため特注で対応することにした。荷重計のサイズと重量は測定する荷重の大きさと測定レンジに大きく依存することから、対象船舶の係留索について緊張係留状態での現地荷重計測を行うとともに、船体に作用する風圧力等の検討例(山野ら, 1997)を参考に、本実験での風速範囲について想定される風圧力の推定を行い、これらの値を参考に荷重計の測定レンジを決定した。これにより、船体模型の複雑な動揺に大きな影響を与えることなく係留張力を詳細に測定することができた。

実験開始前には、ワイヤーの長さを調整することで、船舶に作用する初期張力(静穏時の張力)を調整した。このとき、初期張力の目安は現地実験で測定した張力の平均値を用いて0.89N(現地: 13.84kN)とした。

(2) 動揺量の測定

動揺量の測定は、船舶模型に取り付けた反射マーカの動きをビデオカメラで撮影する非接触型の方法で行った。この測定方法は、ジャイロ等の測定機器を船舶模型に積込む必要がなく、軽い反射マーカを船舶模型に取り付けるだけで済むため、測器の自重を考慮せず測定することが可能である。

撮影は、リング照明を取り付けたビデオカメラで3方向から行い、モーションキャプチャーを用いて船舶が係留施設に接触する可能性が最も高いと考えられる箇所(船首と船尾)の動揺量を測定した。この動揺量は、マーカの3軸方向の変位量(静止状態からの変位量でx-成分, y-成分, z-成分の3成分)を表しており、船舶の並進運動のみでなく回転運動の寄与も含めた結果となっている。

なお、船舶模型とビデオカメラの位置関係や長さの基準については、事前にキャリブレーションを行い設定した。また、水面に反射した照明がビデオカメラに写ると

正確なデータが得られないため、実験は外光を遮断し室内の照明を消してできるだけ暗い状態で行った。

(3) 測定機器の配置と測定方法

図-3に、張力および動揺量の測定に用いる機器の配置を示す。実験は、波と風を作用させた状態で張力と動揺量を同時に測定した。測定時間は、堤体模型等による反射の影響を考慮して設定した。全測定時間のうち、前半の120秒は、初期張力の確認および波浪や風の定常待ち時間としているため、解析は後半の120~540秒(約125波)のデータを用いて行った。

5. 実験結果

(1) 張力の測定結果

係留索の安全性を検討する際は、係留索に作用する張力と破断荷重の関係を把握する必要がある。対象船舶に使用しているロープの破断荷重は15.68N(現地: 245kN)であるが、この値は未使用のロープの場合であるため、使用状況に応じて安全率を考慮しなければならない。係留索の種類にもよるが、一般的な船舶では、安全率を20~30%としている。対象船舶の場合、係留索の管理を毎年行っていることから、日本タンカー協会(2002)を参考に本研究では安全率50%の張力7.84N(現地: 122.5kN)を基準値として検討を行った。

図-4に、風向0度のときに係留索(No.1)で測定した張力の時系列データを示す。係留索に作用する平均張力は2N程度であるが、波浪や風の影響を受けて瞬間的に10N以上の張力が作用することもある。

8本の係留索に作用する最大張力の測定結果を図-5に示す。図中の点線はロープの破断荷重(15.68N: 未使用のロープ, 7.84N: 使用したロープ)を表している。最大張力は、風向に関わらず船尾側(No.1,2,5,6)が大きくなる傾向がみられた。風向0度の場合、風速が増大しても最大張力の変化がみられなかったが、風向90度の場合、風速の増大と共に風上の左舷側で張力が大きくなり、風下の右舷側で張力が小さくなるのが分かった。このことから、船体の受圧部分が大きくなる風向90度の場合、風上側の係留索は引張状態の傾向があるのに対し、風下側の係留索は弛緩状態の傾向があることが確認できた。

今回測定したNo.1~No.8の最大張力と風速の関係を図-6に示す。図-5で示した結果と同様に、風速が大き

図-3 測定機器の配置

図-4 張力の時系列データ（風向0度）

図-5 風速と最大張力

なるほど張力が大きくなっており、特に船舶に対して横から風が作用する場合にこの傾向がみられた。また、係留施設による遮蔽が少なく風の被圧面積が大きくなるH.H.W.L.で、かつ狭い開口幅の場合に、最大張力が大きくなることが分かった。これは、潮位が高く開口幅が狭いときに係留索が短く張られるため、瞬間的に作用する張力に対する緩衝効果が小さくなったことによるものと考えられる。

最大張力とロープの破断荷重の比較より、未使用のロープに対しては、許容できる範囲内であることが確認できた。ただし、安全率50%の場合は最大張力が破断荷重を上回っているため、管理状況や劣化状態次第では破断の可能性があると考えられる。

(2) 波浪と張力の関係

波浪条件と張力の関係を把握するために、スペクトル

図-6 風速と最大張力の関係

図-7 入射波と張力のスペクトル (風向0度)

図-8 応答関数 (風向0度)

解析を行った。図-7に、風向0度、風速4.52m/s、L.W.L.のときのスペクトルの解析結果を示す。係留索によってスペクトルの形状と大きさは異なるものの、入射波スペクトルのピーク周波数(0.26Hz)付近で、張力スペクトルもピークを示すことが分かった。なお、入射波スペクトルは、実験時に波高計2台を造波機の前面に設置して、入反射波分離解析により求めた結果である。

図-8に、風向0度、風速4.52m/s、L.W.L.のときの、入

射波スペクトルに対する張力スペクトルの比（応答関数）の解析結果を示す。この結果より、図-7で示した入射波スペクトルのピーク周波数（0.26Hz）付近で強く応答していることが分かった。このことから、係留索に作用する張力は波浪の影響度が大きいと考えられる。また、応答関数は0.49Hz付近でも高くなっており、波のピーク周波数と異なっていることから、船舶と係留索で決まる動揺の固有周期が影響していると推察できる。

(3) 動揺量の測定結果

図-9に、風向90度のときの船首における動揺量（Y方向およびZ方向）の時系列データを示す。この図より、波浪と風を作用させ始めた時間から、船舶模型が動揺している状況が確認できた。特にY方向については、風の影響を受けて初期位置から7mm程度移動した状態で動揺していると考えられる。

図-10は、風向90度のときの風速と最大動揺量（Y方向およびZ方向）の関係を示したものである。水平方向

図-9 動揺量の時系列データ（風向90度）

図-10 風速と最大動揺量の関係（風向90度）

（Y方向）の動揺量は、風速の増大と共に大きくなっており、張力特性と同じく、潮位が高く開口幅が狭いときに大きくなる傾向がみられた。今回の実験は、緊張係留状態でやっているため、動揺量は最大でも30mm（現地：0.75m）であり、船体動揺による係留施設との接触の可能性は小さいと考えられる。鉛直方向（Z方向）の動揺量は、風速が変化してもほぼ一定であるため、波による影響が大きいと推察される。このとき、最大動揺量は50mm（現地：1.25m）であり、水平方向の動揺量よりは格段に大きいですが、L.W.L.の水深-180mm（現地：-4.5m）よりは小さいことから、船底と海底面との接触の可能性は小さいと考えられる。ただし、海象条件や係留状況によっては海底との接触の可能性が考えられることに注意が必要である。

6. おわりに

荷重計による張力測定と非接触型の計測システムによる動揺量測定を行い、船舶の安全係留について検討を行った。係留索に作用する最大張力は、未使用のロープの破断荷重に対して許容できる範囲内にあることが確認できた。しかし、安全率を考慮した場合、条件によっては瞬間的に作用する最大張力が破断荷重を上回る場合があり、係留ロープの管理状況や劣化状態次第では、破断の可能性が考えられる。一方、船体動揺による係留施設との接触の可能性は、水平方向の動揺に関しては小さいことが確認できた。ただし、鉛直方向の動揺による船底と海底面との接触には、注意が必要である。

また、一旦特定の係留索の破断が生じると係留索のバランスが壊れ、さらなる係留索の破断、船体動揺量の増大、船体と施設との接触損壊へとつながることも考えられ、これらについてはさらなる検討が必要である。

謝辞：本研究に使用した船舶模型は、九州大学工学研究院海洋システム工学部門船舶海洋性能工学講座所有の実験施設を提供して頂き調整を行いました。また、九州大学古川芳孝教授、茨城洋助教には、船舶模型の調整について有益な御意見と御助力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 国土交通省九州地方整備局（2009）：離島航路避難安全施設調査報告書，144p.
- 国土交通省九州地方整備局（2010）：川内港気象海象現象調査報告書，160p.
- 日本タンカー協会（2002）：係留設備に関する指針，p. 78
- 平石哲也・本城 智（1991）：避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動に関する検討，港研報告，30巻，2号，pp. 59-153.
- 山野惟夫・斎藤泰夫（1997）：船体に働く風圧力の一推定法，関西造船協会誌，第228号，pp. 91-100.