超大型船のドルフィン係留模型実験 (第1報)

強 風 中 の 実 験

鞠谷 宏士*・岩井 聡*

Model Experiments on the Mooring of Large
Tanker to Offshore Dolphin—I
— in case of strong wind, without waves —

H. Kikutani and A. Iwai

Abstract

This model experiment was carried out by means of the experimental water tank with windtunnel at Tokyo University of Mercantile Marine.

Objects of this study are to get some basic knowledges for developing more suitable mooring methods.

Cases and conditions of experiments are as follows : —

model ship : 2.00 m model of Japan Margaret (D. W. 242,000 t) scale 1/150

ship's condition : Normal ballast and half load condition even keel

wind velocity : 25 m/sec and 35 m/sec in actual ship, but without wave.

wind direction : every 30° in all round, 0° is head wind.

mooring arrangement : A type conventional type, made up with fore and aft lines and spring lines

B type New type, made up with breast lines and spring lines

water depth : 21 m in actual ship

Some results of this experiment are as follows.

- 1) Without waves, it may be possible to moor large tanker to offshore dolphin in strong wind less than 35 m/sec.
- 2) We can not recognize necessarily that the conventional mooring method is the most-suitable method. In this experiment, the new method is more suitable than the conventional one.
- 3) In concern with tensions on mooring lines and loads on dolphins, measured values in experiments are nearly correspond to theoretically calculated values in statical analysis.

1. ま え が き

船舶の係留については理論的にも実験的にも研究がおこなわれている。平常時の係留方法について

* 東京商船大学 (東京都江東区越中島 2-1-6)

表1 実験状態の要目

Item	実 船	模 型 船	備 考
L. O. A.	315.00m	2.100mm	縮尺 1/150
L. p. p.	300.00	2.000	
B	50.00	333	
D	27.00	180	
Full load d	19.00	127	
▽	241,745tons	69.880kg	(清 水)
Cond I. Normal Ballast Cond.			
模 型 空 船		16.547kg	排水量比 0.420
Cond I ▽	103,000tons	29.774	
搭 載 重 量		13.227	
d _f	6.70m	58.0mm	
d _a	10.70	58.0	
d _m	8.70	58.0	Even Keel 喫水比 0.458
KG		91.8	
GM		69.6	
横 揺 周 期	13.8 s ←	1.09sec	(空 中)
縦 慣 動 半 径		0.24L	
Cond II Half Load Cond.			
Cond II ▽	175,000tons	50.587kg	排水量比 0.714
搭 載 重 量		34.040	
d _f			Even Keel 喫水比 0.742
d _a			
d _m	14.10m	94.0mm	
KG		102.4	
GM		38.7	
横 揺 周 期	14.49 s ←	1.17sec	(空 中)
縦 慣 動 半 径		0.20L	
風 速 換 算 率		12.22	$V/V_1 = \sqrt{L/L_1}$
横動揺周期 —"—		12.25	$\sqrt{L/L_1}$
索 張 力 —"—		3.375×10^6	L^3/L_1^3
索 弾 性 —"—		2.25×10^4	$k/k_1 = (L/L_1)^2$
運動速度 —"—		12.25	$U/U_1 = V/V_1 = (L/L_1)^{\frac{1}{2}}$
運動周期 —"—		12.25	$L/L_1^0 \quad V_1/V = (L/L_1)^{\frac{1}{2}}$

は、従来の経験的な方法が踏襲されているが、これが最適の方法であるかどうかについてはなお検討の余地があると考えられる。超大型船の出現により、本船の持つ係船設備の性能、容量は限界に近付きつつあり、陸上の設備や配置にも問題が多い。技術革新にともなう人員の削減がこれに拍車をかけている。

一方荒天時においても、船舶数の飛躍的な増大は避泊錨地の余積を少なくし、今や係留のまま荒天を凌ぐには如何にすべきかを考えつつ、抜本的対策を立てなければならない時機に来ている。

この報告はそれ等をふまえて、超大型船がドルフィン係留を行なう場合について、係留索配

置, 設備, 係留方法について最適な方法を見出すための基礎資料を得ることを目的として行なつた横型実験の結果である。今回は第1報として実験方法・装置の概要と, 定風圧のみを受ける場合の実験結果について報告し, 第2報では波をともなう場合の実験結果について報告する予定である。

2. 実験の方法

実験は東京商船大学の風洞実験水槽において行なつた。

供試模型船は最新の大型タンカーであるジャパン・マーガレットの線図等を船主および造船所の御好意により提供していただいて, その 1/150 の模型を作製し使用した。船の実験 condition としては Normal Ballast Cond. および Half Load Cond. の2種とし, トリムはいずれも Even Keel とした。また船の横揺周期, 縦慣動半径をできるだけ実船に近くなるように設定した。供試船の要目, 実験 Cond. の内容等を表1に示す。

係留索は全部 40 mm 鋼索を使用しているものとし, 索配置は図1に示すような A, B 2方式について実験した。A方式は索長は実状に比較すると長い, Fore and Aft line と Spring line を用いた在来方式を単純化したものである。索配置は後の理論解析との関連もあり前後対象としてある。B方式は新たに案出した方法で, 長い Breast line と在来型と反対方向にその延長線がほぼ船の中心を通るように取つた Spring line で構成している。Breast line を強化して最も風圧力が大きくなる横風圧を支えさせるとともに, 船の旋回を支えさせ, Spring line には主として船の前後移動を支えさせるようにしたものである。

ドルフィン解析での計算を容易にするため2基とし, 間隔は 120m (0.4L) とした。

実験風速は 25, 35 m/sec の2種とした。風向は正船首を 0° とし, 全周について 30° 毎に実験した。水深は 21m で一定とした。

図 1

3. 実験の相似則

実験風速, 実験に用いる索の伸び率, ドルフィンのバネ常数を決定し, また実験によつて得られた索張力, ドルフィン荷重等を実船値に換算するため, 相似則を立てることが必要である。

本実験では次の五つの仮定のもとに相似則を求めた。

- (1) 索の伸びはフックの法則に従う。

$$K\Delta l = T \quad K = ES/l \quad \dots\dots\dots(1)$$

K は索伸び率, T は索張力, E, S はそれぞれ索の弾性係数および有効断面積, l は索の長さ, Δl は掌の伸びである。

- (2) 実船と模型船の運動が相似であるためには, 索の伸びは船の長さに比例する。

$$\Delta l \propto L \quad \dots\dots\dots(2)$$

- (3) 索張力は風圧力に比例する。

$$T \propto P \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$P \propto AV^2 \propto L^2 V^2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\therefore T \propto L^2 V^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに A は受風面積, V は風速, P は風圧。

(4) 船の運動にはフルードの相似則が適用される。

$$U/\sqrt{gL} = \text{constant} \dots\dots\dots (6)$$

U は運動速度, g は重力加速度。

風圧力 P による船の移動量は索の伸び Δl に比例するから, 船の運動エネルギーと風圧力の仕事量を等しいとおいて次式が成立する。

$$\frac{MU^2/2}{M_1U_1^2/2} = \frac{\int P \cdot \Delta l}{\int P_1 \cdot \Delta l}$$

M は船の質量, 各文字でサフィックスのないものは実船, あるものは模型船とする。

$M \propto L^3$ であり, (2), (4)式を用いると

$$\frac{L^3U^2}{L_1^3U_1^2} = \frac{L^2V^2 \cdot L}{L_1^2V_1^2 \cdot L_1}$$

この式と(6)式より

$$U/U_1 = V/V_1 = \sqrt{L}/\sqrt{L_1} \dots\dots\dots (7)$$

また運動周期 t は(7)式より

$$\frac{U}{U_1} = \frac{L/t}{L_1/t_1} = \frac{V}{V_1} \quad \therefore \quad \frac{t}{t_1} = \frac{L}{L_1} \cdot \frac{V_1}{V} = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{L_1}} \dots\dots\dots (8)$$

索のバネ常数 K については, (1), (2), (5)式より

$$\frac{K\Delta l}{K_1\Delta l_1} = \frac{T}{T_1} \quad \therefore \quad \frac{K}{K_1} = \frac{LV^2}{L_1V_1^2} = \frac{L^2}{L_1^2} \dots\dots\dots (9)$$

索張力 T は

$$\frac{T}{T_1} = \frac{L^2V^2}{L_1^2V_1^2} = \frac{L^3}{L_1^3} \dots\dots\dots (10)$$

(5)ドルフィンのバネ常数を k , 撓み量を δ とすると, 運動が相似であるためには $\delta \propto L$ でなければならない。ドルフィン荷重は $k\delta$ でこれは風圧力 P に比例するから

$$\begin{aligned} \frac{P}{P_1} &= \frac{k\delta}{k_1\delta_1} \\ \therefore \quad \frac{k}{k_1} &= \frac{L^2}{L_1^2} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

となる。(7)~(11)式が本実験の相似則である。

4. 実験装置

索は各配置毎に1本のピアノ線を用い, 索の伸びを持たせるために途中にスプリングをはさんだ(図2)。スプリングの伸び率を(9)式により求め, これと各索配置毎の索数を考慮して, それに見合うスプリングを作製した。

索張力の計測には抵抗線歪計利用のUTゲージを用い, 各索配置毎の張力を取出し, 歪測定器で増幅し, 電磁オツシログラフに自記させた。

ドルフィンは板バネをもつて代用し, 板バネの長さおよび寸法を(11)式により予定したドルフィンのバネ常数に見合うよう計算し設定した。しかし残念ながら適当な板バネが入手できず, 500 ton/m の予定が 1,365 ton/m に見合うものとなつた。

ドルフィン荷重の計測は板バネの撓み量を変位計を用いて変位として取出し, 歪測定器を通し

図 2

て索張力とともに電磁オツシロに自記させた。変位から荷重への換算は事前のキャリブレーションによつた。

これ等の計器配置の状態を写真1に示す。

Cond I, B, 180°, 35 m/s. 全体配置.

Cond II, A, 90°, 35 m/s 波 2-4.6
ドルフィン, 索張力計測装置

写 真 1

風向をかえるため、計測器全体を一体の底板に固定し、船を係留したまま底板を回転させる方法を取つた。そのため水槽全面の仮底板と計器台である底板に段がつき、後の波浪実験の波にやや影響を及ぼしたものと考えられる。

なお本実験に先立ち、模型船の各実験 Condition に対する風圧および風圧モーメントを風洞水槽において三分力試験器を用いて計測した。

その結果の1例を横圧力、船首尾方向圧力、モーメントに分けて図3に示す。実験に対応する理論計算にはこの測定値を用いた。

5. 実 験 結 果

Normal Ballast Cond. で風速 25 m/sec, 35 m/sec の場合の A, B 両索配置に対する実験結果を図4・1~4・4に示す。この図の縦軸は索1本に対する張力を示している。各索配置毎の全張力は(図1参照)、索番号1, 2が各3本で構成されるから表値を3倍し、索番号3, 4は各2本であるから表値を2倍することによつて求められる。索1本あたりの張力で示したのは、索として予定した40mm鋼索の破断力が約80 tonで、これと対比する方がわかりやすいと考えたからである。

5, 6番はそれぞれ前部および後部のドルフィン荷重であつて、その大きさの目盛は図の右の縦軸に示している。

横軸は風向を示し、0°, 180° がそれぞれ正船首、正船尾からの風で、0°~180° はドルフィン側から風が吹く場合であり、180°~360° は沖側から風が吹く場合である。

実験での索の初期張力は1本当たり10 tonにできるだけ近くなるように設定した。

これ等の図から次のようなことが言える。

- (1) 風がドルフィン側から吹くときは、船はドルフィンから離れるので索張力が大きくなり、ドルフィンには殆ど荷重はかからない。逆に風が沖側から吹くときは船はドルフィンに押しつけ

図 3

図 4 実 験 値

られ、ドルフィン荷重は大きい、索張力は小さくなる。

(2) 風速が大きくなれば、索張力、ドルフィン荷重ともに大きくなる。ちなみに風速 25m/sec と 35m/sec の風圧力の比はほぼ 1:2 である。

(3) A方式では、Fore and Aft line (索番号 1, 2) よりも Spring line (索番号 3, 4) に索 1 本当りでは大きな張力がかかる。これは Fore and Aft line に比して Spring line の長さが短いこと、本数が少ないことおよび角度が異なるためである。各索張力が風向により変化するので、このような配置でのバランスの取れた索配置のあり方については今後さらに検討すべきである。

この実験での A 方式では風速 25m/sec では耐え得るが、35m/sec では Spring の切断がまず起ると考えられる。

(4) B方式では索番号 1, 2 が Breast line で、3, 4 が Spring line である。船首尾に近い風では Spring line にのみ力がかかり、正横に近い風では Breast line にのみ力がかかることを示している。船首尾風圧に対して横風圧がずっと大きい、Breast line を 3 本で構成し強化しているため、索 1 本当りの張力は小さくなり、全体的にみて各索に風向に応じて平均した張力が作用しているとみられる。また索 1 本当りの張力の絶対値は A 方式に比較して、同じ索数でありながら小さくなっている。

これ等のことから定風圧のみの場合は B 方式の方が A 方式に比較して索が有効に利用されているとみることができ、B 方式では風速 35m/sec でも一応は耐え得ると考えられる。

(5) しかし全般的に係留の安全という面より見れば、索 1 本当りの張力が索破断力の 1/2 を超えているから、この索数では絶対量として不足していると考えなければならない。

(6) ドルフィン荷重は沖側正横からの風付近で最大となるが、風速 25 m/sec で 200 ton, 35 m/sec で 400 ton を超えないから、この程度の風までは安全であるといえる。

船首尾方向の風および 150° の風でドルフィン荷重が生ずるのは、索配置との関連で索張力により船が回頭するためである。しかしこの量は小さい。

(7) 図 5・1~2 では Half load Cond. で風速 35m/sec の A, B 両方式の実験結果を示しているが、図 4 の場合と比較して Half load Cond. の方が Ballast Cond. より索張力、ドルフィン荷重とも小さいことを示している。これは風圧面積が小さいので当然の結果である。それ以外風向に対する索張力、ドルフィン荷重の変化の傾向は、各索配置についてすでに述べたのと同様のことがいえる。

(図5・1)

(図5・2)

図5 理論値と実験値の比較

実験値と理論値の比較

索の伸びは張力の変化に比例する。またドルフィンの撓み量はドルフィン荷重に比例すると仮定すると、風圧および風圧モーメント、索張力、ドルフィン荷重およびそれ等が船に与える回頭モーメントの静的釣合条件を求めることができる。

また船の前後および横方向の移動量および船の回頭量と、各索の伸び量およびドルフィンの撓み量の幾何学的な関係が求められる。この関係を前述の仮定に基づいて力の釣合条件の式に入れると、風圧による船の前後・横方向の移動量および回頭角度が計算できる。

これ等が決まると、幾何学的関係から各索配置毎の索の伸びおよびドルフィンの変位量が求まり、各索張力、ドルフィン荷重に換算できる。

本実験の場合は索配置が前後対象であるから比較的簡単に計算できるが、理論式は次の3つの場合についてそれぞれ立てておく必要がある。

- a 船が全くドルフィンから離れている場合
- b 船が両方のドルフィンに接触している場合
- c 船がいずれか片方のドルフィンのみ接触している場合

本報告では上記により求めた理論式は示さないが、索初期張力を各索1本当り 10 ton として実験条件に合わせて計算した理論値と実験値の比較を図 5・1~2 に示す。

この図に見られるように理論値と実験値は各風向に対する変化の傾向としては良い一致を示し、絶対値も実験の実情を勘案するとかなりよく一致していると見られる。

これよりみて、定風圧の場合は、索配置等の最適化についての今後の検討は理論計算により十分行ない得るのではないかと考えられる。

6. む す び

以上のべた実験結果より、次のことが本報告の結論としていえる。

- (1) 風のみの場合は風速 35 m/sec でも安全に凌ぎ得る可能性がある。
- (2) 在来型の係留方式が必ずしも最良であるとはいえない。風のみの場合は在来型よりもB方式の方がすぐれているといえる。
- (3) 風をみの静的な場合については理論計算によつて索配置等を検討することが可能である。

この実験は日本海難防止協会の研究事業の一環として行なつたもので、実験および結果の検討について御協力いただいた委員会の委員長であつた谷初蔵教授はじめ委員の諸氏ならびに日本海難防止協会の事務局の方々に感謝する。

また実験の実施および解析に御協力いただいた本学小山助手、亀田技術員および当時の学生であつた原田、木田、中条三君に感謝する。

〔質問〕

実験方法について。係留索模型を実際に2本乃至3本とつて、各索模型毎の方を計測されたのか。(久々宮久)

〔解答〕

各索配置毎に索の構成は3本または2本となつています。実験では同一場所の索は3本または2本を1本におきかえ、本数を総合した伸びをスプリングに持たせるようにしました。したがつて係留の予定索数は10本ですが、実験計測は4点です。

〔質問〕

定常な強風下で行なわれたこの実験結果を、風の息がある実際の場合に適用して、索の選択や、ドルフィンの設計荷重をきめることに利用できるかどうかお尋ねしたい。

(三木楯彦)

〔解答〕

この実験風洞では定常風しか送れませんし、風の息についてまで実験測定を行なうことは、現時点では何処の設備を使用しても困難だと思います。

風の息は風速、風向の変動をとまいませんが、その実態も現時点ではまだ正確につかめてはいません。

風の息の風速の変動のみを Sine curve の変動とみて、船がドルフィンに接していない場合の

Dynamical な簡単な理論計算は下記論文で行なっております。勿論十分ではありませんが御参照下さい。

「岸壁係留索の張力に関する考察」鞠谷宏士，東京商船大学研究報告（自然科学）19号，昭和43年10月

まだこの研究は緒についたばかりで十分な答ができないのを残念に思います。

〔質問〕

普通の係留索の取り方は，A方式にさらに Breast line を加えた形となつておりますが，B方式でもし，B前後部にもう一本ずつ加えるとしても，B方式が良いということでしょうか。

（本田啓之輔）

〔解答〕

実験は係留方式を模型化し，明瞭に区別するために実際とは異なつています。A方式に Breast line を加えた型式は Breast line が短かいために，横風では Breast line に大きな張力がかかる結果になるでしょう。

B方式の前後に1本ずつ取る方式も索の取る長さにより張力がかわると思いますので，一概には言えません。

各索の長さ，本数，角度に関して最適のバランスが取れた配置があるのだと思います。実験の状態についてBの方がAより良いといっているわけで，Bが最良といっているわけではありません。かといつてAが良いともいえません。

〔質問〕

- 1) 係留実験の目的は最適方法または最も経済的な方法のどちらを見出すためのものですか。
- 2) A方式にプレスト・ラインを付加したのが，最適方法ではないか。
- 3) 問題はウネリの侵入するときの係留方法と思われる。
- 4) アンカーの併用をお考えにならないか。

（田中銀造）

〔解答〕

1) 係留は平常時荷役能率を上げるための最適方法と荒天時の安全係留にわけて考えるべきであると思う。この実験では荒天係留を予想しているが，平常時の場合についても理論的検討を前記（三木氏の質問に対する答）の論文で行なっている。両方の場合について検討すべきだと考える。

2) この内容は前出本田氏の質問に対する答が答になると思います。

3) 御説の通り，荒天時ではウネリの侵入する場合は問題です。次回に報告したいと思っておりますが，解決の困難な問題です。

4) アンカーは非常の場合（火災，爆発時，隣接する他船の場合も含めて），船の離岸に時間を要するので，操船時に使用しても揚げてしまうのが原則という現場の声もあります。多点係留ではアンカーを併用している場合も多いのですが，係留索と錨鎖のカテナリーによる伸びが異なる点も検討すべき問題点の一つですし，ブイの把駐力とアンカーの把駐力にも問題があるようです。

ドルフィン係留で荒天時，沖側からの風浪に対して，船をドルフィンから離してドルフィンとの衝撃をさけるためアンカーの使用を考えることも今後の研究課題だと思います。