

# 係留船舶に対する 着脱式Roll減衰装置に関する研究

## DETACHABLE ROLL DAMPING DEVICE FOR MOORED SHIP

久保雅義<sup>1</sup>・斎藤勝彦<sup>2</sup>・榊原繁樹<sup>2</sup>・若林 正<sup>3</sup>

Masayoshi KUBO, Katsuhiko SAITO, Shigeki SAKAKIBARA and Masashi WAKABAYASHI

<sup>1</sup>正会員 工博 神戸商船大学教授 船貨輸送研究施設 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 神戸商船大学助教授 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 横浜ゴム株式会社 工業資材技術部 (〒254-8601 平塚市追分2-1)

Recently, many studies on long-period waves induced by group of short-period waves through non-linear wave-wave interactions and free long waves have been done around the world. Also the problems on excessive motions of moored ships in harbor basins have been revealed in many harbors. It is wellknown that the problems are caused by a resonance of both the natural period of surge and the long waves. However we found a different type problem where the long-period motions were induced by a resonant large roll motion during long waves where the waves from the outside harbor acted on the moored ship as almost beam seas. In this paper, we propose a convenient detachable roll damping device for moored ship which is kept at the berth and investigate the effect by water tank tests, field observation results and a numerical simulation of moored ship motions.

*Key Words : roll damping device, resonance, numerical simulation, moored ship motion*

### 1. 緒言

係留索の切断などの長周期船体動揺に伴う係留問題は、Rollなどの短周期動揺でなくSurgeなどの長周期船体運動モードと長周期波との共振によるものとするのが通例となってきた。しかし、港内係留船舶が港口からほぼ正横より波を受けてRollに共振を生じ、その大きなRollに伴い防舷材に過圧縮を生じて、続いてSwayにサブハーモニックモーション、さらに係留索を介してSurgeおよびYawに大きな長周期動揺を誘発し、その上港内においては長周期波の増幅現象もみられ、従来の主に長周期波のみにより生じる係留問題とは異なり大きな短周期動揺を伴った複雑な長周期動揺が生じる事例がみられた<sup>1)2)</sup>。SwayやSurge固有周期は、係留索や防舷材などにより変化させることができるが、Rollの固有周期は船体自身の復原力によるため、共振の防止は困難である。一方、ビルジキールなどの船体固定のRoll減衰装置は船体建造時に事前の検討を要し、また既存の船舶に追加することは多大なコストを必要とする。

そこで本研究では当該状況下における係留船舶に対し、簡易でかつ港湾に据え置く形式の着脱式Roll減衰装置を提案する。そして現地実験や水槽実験結

果および数値シミュレーションを用いて当該減衰装置の船体動揺低減効果について検討する。

### 2. 模型船の自由振動実験によるRoll減衰装置の効果の確認

#### (1) 模型船の自由振動実験

約1/60スケールの模型船(船長 $L_{pp}=3\text{m}$ , 船幅 $B=0.465\text{m}$ , 喫水 $d=0.149\text{m}$ )を用いて浅水槽(幅 $6\text{m}\times$ 長さ $60\text{m}\times$ 水深 $0.233\text{m}$ )においてRoll自由振動実験を行った。図-1に模型船を用いた自由振動実験の配置図、図-2に今回提案する減衰装置を示す。図-2に示すように、減衰装置はみぞ型鋼状のフレームを船側に沿わせて吊り上げたものである。ただし船舶が傾斜しても水没したままになるような位置に吊り下げた。船体動揺の計測は3Dトラッカーを用いて行った<sup>3)</sup>。表-1及び表-2に模型船の諸元及び実験ケースを示す。

#### (2) 減減係数の算出

当該Roll減衰装置の効果を確認するため、自由振動実験結果から減衰角曲線及び減減曲線を作成して、減減係数を算出した<sup>4)</sup>。減減曲線及び船体に作用す

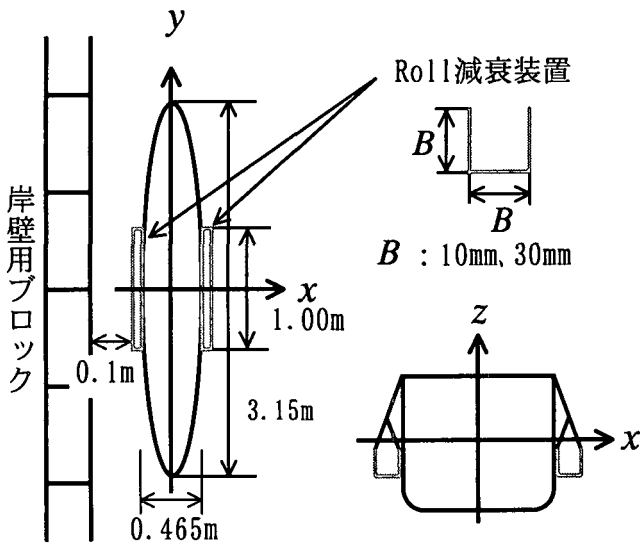


図-1 模型船の自由振動実験

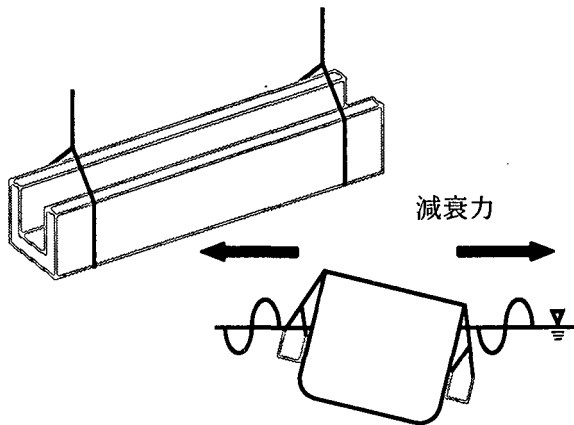


図-2 減衰装置

表-1 模型船と実船の諸元

	模型船	現地実験対象船舶	
		諸元	縮尺
載貨条件	半載	半載	
Lpp (m)	3.0	180.0	1/60
B (m)	0.465	31.0	1/67
d (m)	0.149	8.915	1/60
Cb	0.74	0.81	1/1
KG (m)	0.12	7.229	1/70
GM <sub>R</sub> (m)	0.103	6.154	1/68
GM <sub>L</sub> (m)	3.32	199.22	1/60
DT (kg, ton)	160.8	41,092	1/60
h (m)	0.233	14	1/61

表-2 自由振動実験ケース

減衰装置 (長さ1m)	岸壁なし		岸壁あり	
	両側取付	両側取付	両側取付	片側取付
B = 30mm幅	両側取付	両側取付	両側取付	片側取付
B = 10mm幅	両側取付	両側取付	両側取付	片側取付
減衰装置なし				

る減衰力が式(1), (2)のように表され, また減衰係数と減減係数は式(3)の関係式で結ばれる.

$$\Delta\phi = \alpha \cdot \phi_m + \beta \cdot \phi_m^2, \quad \phi_m = (\phi_n + \phi_{n+1})/2 \quad (1)$$

$$F = a \cdot \dot{\phi} + b \cdot |\dot{\phi}| \dot{\phi} \quad (2)$$

$$a = \frac{4.0 \cdot \alpha}{T_R} (I + I(\infty)), \quad b = \frac{3.0 \cdot \beta}{4.0} (I + I(\infty)) \quad (3)$$

ここに  $\phi$ : Roll (deg),  $\alpha$  及び  $\beta$ : 減減係数, F: 減衰力, a 及び b: 減衰係数,  $T_R$ : Roll 固有周期, I: Roll 慣性モーメント及び  $I(\infty)$ : Roll 不変付加慣性モーメントである.

今回の自由振動実験では, 初期角度が小さかったことなどから減減係数は一次近似として求めた. すなわち  $\beta$  を 0 とし,  $\alpha$  だけを算出した. 図-3 に減衰曲線, 減衰角曲線及び減減曲線の一例を示す.

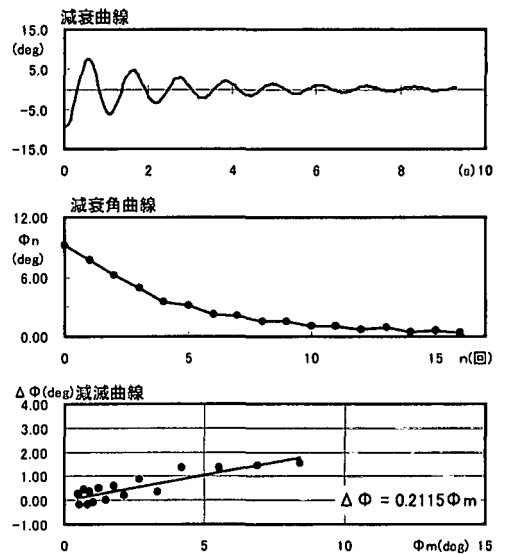


図-3 減衰曲線, 減衰角曲線及び減減曲線の実験結果 (岸壁なし, 減衰装置両側取付)

減減係数  $\alpha$  は, 減衰装置の幅が大きくなるにつれて大きくなるのがわかった. また減衰装置がない場合にも減減係数を算出できるが, これは造波減衰力と渦等による粘性減衰力によるものである. したがって減衰装置のみによる減衰力を評価する場合, この分を修正する必要がある. 表-3 に減減係数の実測値と減衰装置のみによる減減係数をまとめる.

表-3 減減係数の実験結果

岸壁	減衰装置	実測値 ( $\alpha$ )	減衰装置のみによる ( $\alpha_{VT}$ )
なし	なし	0.1429	0
	10mm幅両側取付	0.1660	0.0231
	30mm幅両側取付	0.2496	0.1067
あり	なし	0.1891	0
	10mm幅片側取付	0.1863	0
	10mm幅両側取付	0.2295	0.0404
	30mm幅片側取付	0.2419	0.0528
	30mm幅両側取付	0.3413	0.1522

### 3. 数値シミュレーションによる自由振動実験の再現

#### (1) 船体動揺シミュレーション

使用した船体動揺シミュレーションは時間領域での浮体の運動方程式を扱う時系列解析である<sup>5)</sup>。式(4)に運動方程式を示す。添字*i, j*は運動モードを表し、1:Sway, 2:Surge, 3:Heave, 4:Pitch, 5:Roll及び6:Yawである。

$$\sum_{j=1}^6 \{M_{ij} + m_{ij}(\infty)\} \ddot{X}_j(t) + \sum_{j=1}^6 \int_{-\infty}^t \dot{X}_j(\tau) L_{ij}(\tau) d\tau + \sum_{j=1}^6 (C_{ij} + G_{ij}) X_j(t) = F_i(t) \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (4)$$

ここに  $M_{ij}$ : 船体の質量または慣性モーメント,  $m_{ij}(\infty)$ : 不変付加質量,  $X_j$ : 船体の動揺量,  $L_{ij}$ : メモリー影響関数,  $C_{ij}$ : 船体の復元力係数,  $G_{ij}$ : 船体の係留力係数,  $F_i$ : 外力和(波、風、潮流),  $t$ : 時刻である。

#### (2) 再現シミュレーション及び実験結果との比較

実験結果と数値シミュレーションによる自由振動実験の再現計算結果を比較した。減衰角曲線、減衰曲線及び減衰係数については実験値とシミュレーション結果はよく一致していたが、減衰曲線やスペクトル解析結果から周期特性の再現がうまくできないことがわかった。そこで船体の慣性モーメントに関して詳細に調べた結果、減衰装置による付加慣性モーメントを考慮してシミュレーションを行った。図-4に再現計算と実験結果の比較の一例を示す。また表-4に減衰装置による付加慣性モーメントをまとめるが、不変付加慣性モーメント  $I(\infty)$  に対する割合も参考のために示す。このように減衰装置による付加慣性モーメントを考慮することにより精度よく再現できることがわかった。

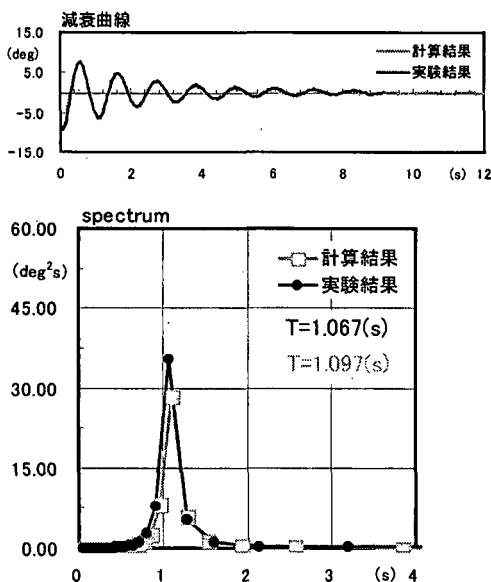


図-4 自由振動実験の再現シミュレーション (岸壁なし, 30mm幅減衰装置両側取付)

表-4 減衰装置による付加慣性モーメント

岸壁	減衰装置	$I_r$ (tm <sup>2</sup> )	$I_r/I(\infty) \times 100\%$
なし	なし	0	0
	10mm幅両側取付	$0.0068 \times 10^{-2}$	3.89
	30mm幅両側取付	$0.0307 \times 10^{-2}$	17.55
あり	なし	0	0
	10mm幅片側取付	0	0
	10mm幅両側取付	0	0
	30mm幅片側取付	$0.0214 \times 10^{-2}$	12.69
	30mm幅両側取付	$0.0214 \times 10^{-2}$	12.69

### 4. 数値シミュレーションを用いた波浪中の船体動揺低減効果の確認

#### (1) 無係留模型船について

自由振動実験を数値シミュレーションにより精度よく再現できることを確認した。そこで当該減衰装置が波浪中の船舶に対して動揺低減効果があるかシミュレーションを用いて調べた。

まず表-1に示す模型船について無係留状態で検討した。外力条件は模型船のRoll固有周期が1.1秒であることから、周期1.1秒、波高0.834cmの規則波を真横から作用させて共振状態でシミュレーションを行った。図-5に岸壁なしと岸壁ありの場合それぞれについて、減衰装置がない場合と30mm幅減衰装置を両側に取り付けた場合の比較結果を示す。

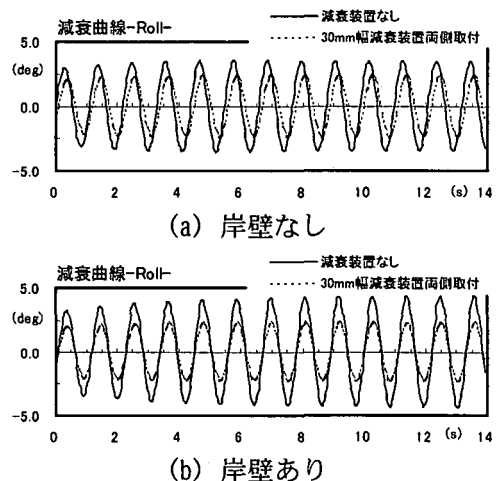


図-5 無係留模型船に対する波浪中の減衰効果の確認

シミュレーション内で発生したRollの最大値(片振幅)でみると、岸壁がない場合は約30%, 岸壁がある場合は約45%の減衰効果を確認できた。

#### (2) 実スケールの係留船舶について

次に実スケールでの係留船舶に対する減衰効果を調べた。表-1に実船の諸元を示す。外力条件は実験時の条件をそのまま外力として与えた(港内波高0.73m, 周期10.28s, 風速約3m/s)。また図-6に係

留条件を示す。防舷材には空気式が用いられ、その間に簡易型タイヤ防舷材が取り付けられていた。また係留索は約φ60mmのロープが14本使用されていたが、大きなRollに対して各索の初期張力はほぼゼロまたは一部緩んだ状態であった<sup>1)</sup>。

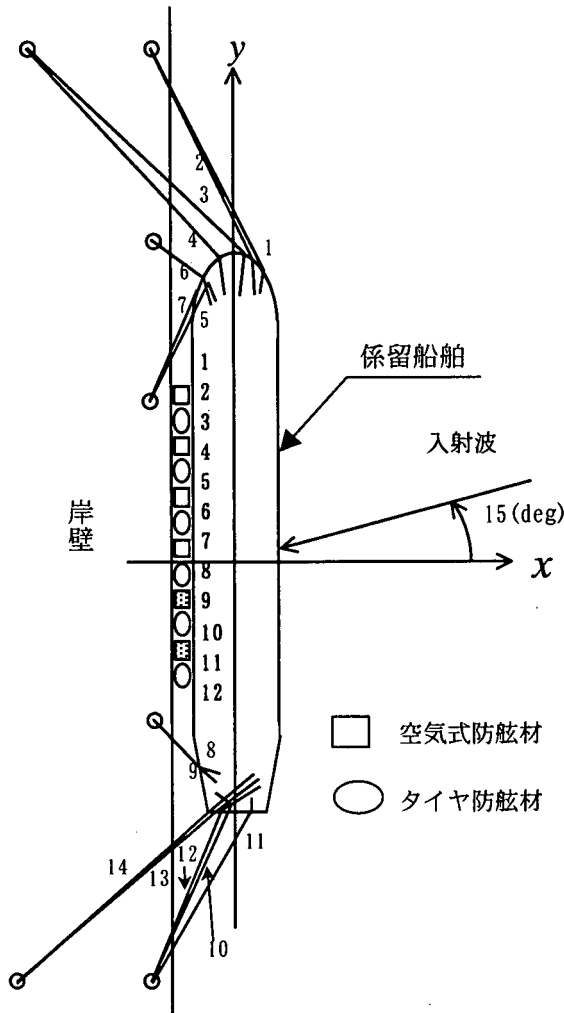


図-6 現地実験での係留条件

模型船における減衰装置の大きさは、長さ1m、幅10mmまたは30mmであった。すると実スケールでの減衰装置は全長60m、幅0.6mまたは1.8mの大きさとなる。当該パースは重力式岸壁であるため、岸壁がある場合の1.8m幅減衰装置を両側に取り付けた場合の減減係数を使用した。図-7及び図-8に減衰装置がない場合と減衰装置がある場合の船体動揺の時系列計算結果を示す。また表-5に有義値での比較をまとめる。

表-5 船体動揺の計算結果の比較

有義値	減衰装置なし	減衰装置あり	減衰割合(%)
Sway (m)	1.14	1.24	108
Surge (m)	3.90	3.86	99
Heave (m)	0.43	0.42	98
Pitch (deg)	0.27	0.27	100
Roll (deg)	4.01	2.66	66
Yaw (deg)	1.60	1.74	109

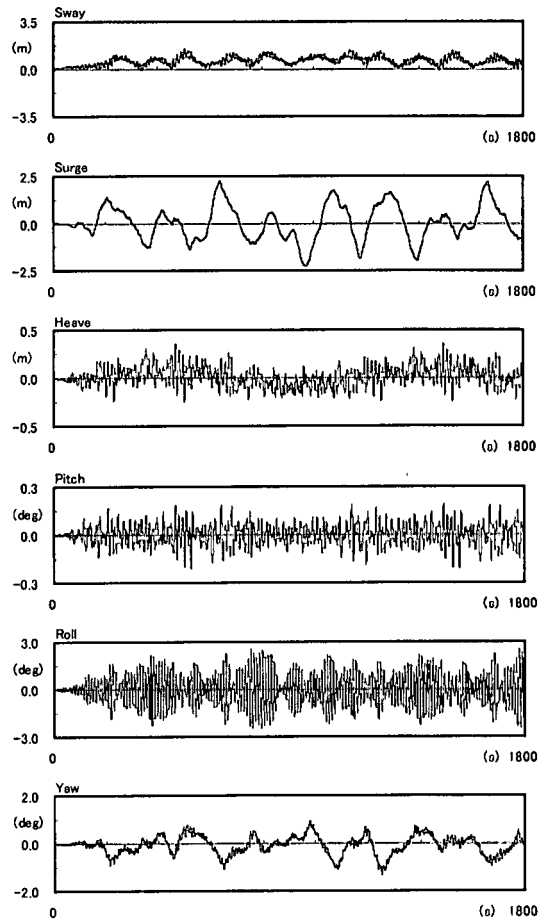


図-7 船体動揺の計算結果 (減衰装置なし)

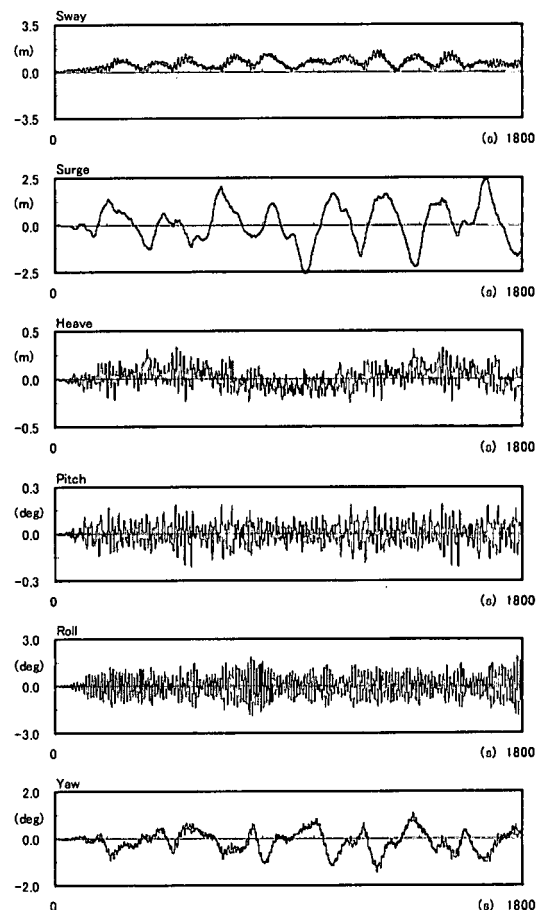


図-8 船体動揺の計算結果 (減衰装置あり)

図-7, 図-8 及び表-5 よりRollについては有義値で約34%の動揺低減効果がみられた。しかしSway, Yawでは若干増加している。また係留システムへの負荷を調べてみると, 図-9 に示すように係留索張力, 防舷材変形量及び反力共に減衰装置を取り付けた方が若干増加している。ここに係留索張力, 防舷材変形量及び反力はシミュレーション内で発生した最大値を示している。また図の横軸は係留索については係留索番号, 防舷材については図-6 での防舷材の取付けy座標を示している。図-9(d)には空気式防舷材の反力のみをまとめて示している。

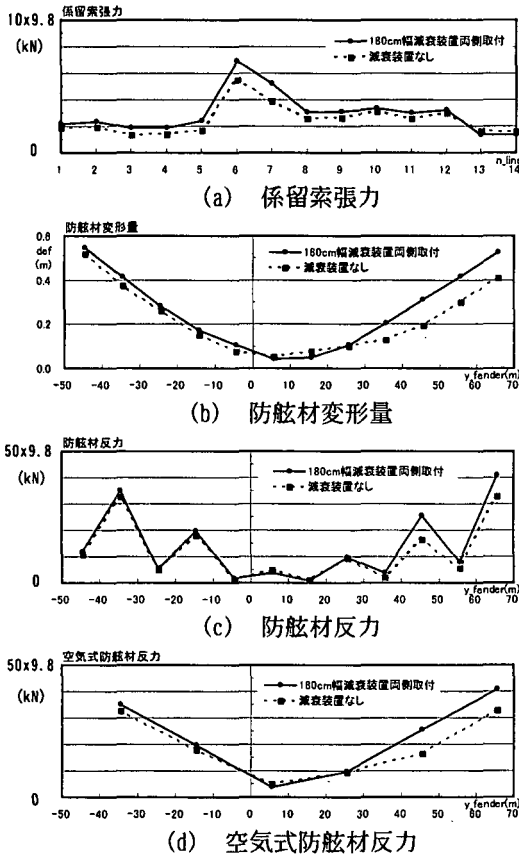


図-9 係留システムの負荷についての計算結果の比較

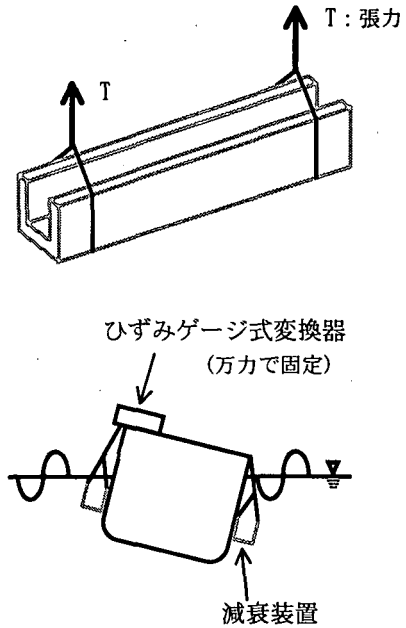
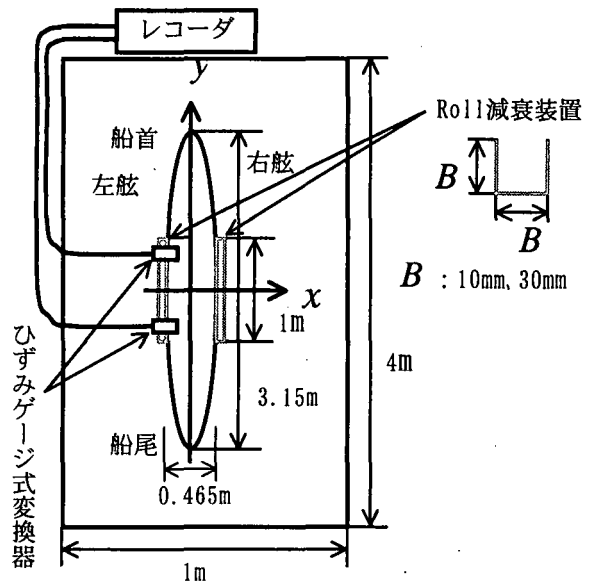


図-10 Roll減衰装置に作用する張力の測定

## 5. Roll減衰装置の試設計

### (1) 張力測定実験

本研究で提案するRoll減衰装置を船体に取り付けることにより, 船体動揺を低減できる可能性が確認できた。そこで減衰装置に作用する荷重を測定して実現性について検討した。

図-10に示すような浅水槽(幅1m×長さ4m×水深0.26m)を用いて, 模型船の自由振動実験を行って減衰装置に作用する張力を測定した。張力の測定は減衰装置を吊り下げているロープにひずみゲージ式変換器を取り付けて行った。表-6に実験ケースを示す。またひずみゲージ式変換器は2つ使用したため, それぞれで測定した張力をT1及びT2とした。張力のゼロ点は模型船に減衰装置を吊り下げ水没させた

表-6 張力測定の実験ケース

減衰装置		ひずみゲージ			
		左舷		右舷	
		船首	船尾	船首	船尾
10mm	片側	○	●	-	-
		○	●	×	×
	両側	○	×	●	×
		×	○	×	●
30mm	片側	○	●	-	-
		○	●	×	×
	両側	○	×	●	×
		×	○	×	●

(備考) ○: T1 ●: T2

-: 減衰装置なし ×: ひずみゲージなし

状態を張力0(N)とした(減衰装置の水中重量は引かれた状態)。そしてRoll初期角度約10度を与えて自由振動実験を開始した。測定される張力はT1及びT2の2つがあるが、1つの減衰装置に同時に2つのひずみゲージがある場合は $T=T1+T2$ として減衰装置1基当りの張力にまとめた。また減衰装置フレーム内の水の重量( $w_w$ )に対する割合を算出した。

図-11及び表-7に実験結果及び解析結果の一例を示す。図-11内に示す船体略図は張力の測定箇所を表している。張力測定結果より、減衰装置1基当りの張力Tは10mm幅及び30mm幅共に減衰装置内水塊重量の約1~3倍であることがわかった。また30mm幅の場合、張力Tは約20(N)程度作用することがわかった。

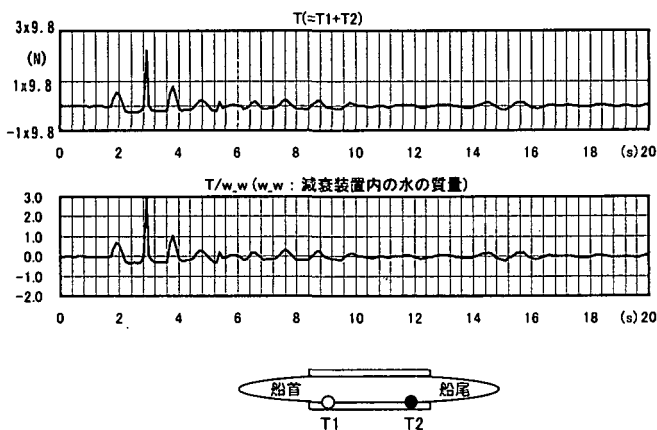


図-11 Roll減衰装置に作用する張力の時系列結果 (30mm幅両側取付)

表-7 張力測定結果

減衰装置		○T1 (N)	●T2 (N)	T (N)	T/w_w
10mm幅 両側取付	max	1.86	1.67	3.04	2.28
	min	-0.49	-0.49	-1.08	-0.80
30mm幅 両側取付	max	9.21	12.5	21.8	2.92
	min	-1.27	-1.37	-2.65	-0.36

## (2) 張力測定結果による減衰装置の付加慣性モーメントの検証

表-4に、Roll減衰装置には減衰力だけではなく付加慣性モーメントが添加されることを数値シミュレーションによる実験の再現計算から推定した。そこで張力の測定結果から簡易的ではあるが妥当性について確認した。

図-12のように減衰装置による付加慣性モーメント $I_f$ から張力 $T^*$ を換算すると次式のようになる。

$$I_f/2 = T^* / g \cdot l^2 \text{ より,}$$

$$\therefore T^* = \frac{I_f/2}{l^2} g = \frac{0.0107 \times 10^{-2} \times 9.8}{0.2479^2} = 0.0171(\text{kN}) \approx 17(\text{N})$$

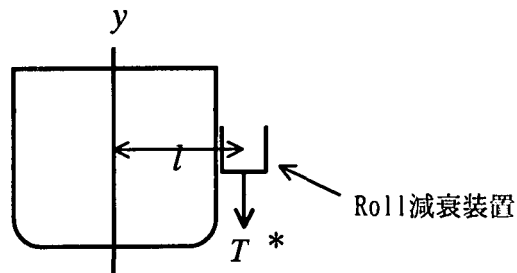


図-12 張力測定結果によるRoll減衰装置の付加慣性モーメントの検証

したがって減衰装置の付加慣性モーメントより算出した張力 $T^*$ が、測定した張力とほぼ同じ値を取ることが確認できた。

## 6. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下にまとめる。

- ①当該Roll減衰装置がフレームの大きさや岸壁の有無に影響する減衰力を発生できることを模型船の自由振動実験から確認できた。
- ②船体動揺シミュレーションにより模型船の自由振動を精度よく再現できることを確認した。この再現シミュレーション及び減衰装置に作用する張力測定実験より、当該減衰装置には減衰力だけでなく付加慣性モーメントが付与されることがわかった。
- ③波浪中の船舶に対する減衰効果をシミュレーションと現地観測結果を用いて確認できた。
- ④当該Roll減衰装置に作用する張力はフレーム内水塊の約1~3倍になることを模型船の自由振動実験から確認した。

本研究では、模型船の自由振動実験により減衰装置の減減係数算出や作用する張力の測定を行っている。今後、波浪中での当該減減係数の算出や張力測定を行いたいと考えている。

謝辞：本論文を作成するにあたり、神戸商船大学雄島健介君の助けの借りた。ここに記して深謝する。

## 参考文献

- 1) 榎原繁樹・斎藤勝彦・久保雅義・白石悟・永井紀彦・島ノ江哲：長周期波作用下でのRoll共振動揺により誘発される港内係留船舶の長周期特性について、日本航海学会，第104号，pp.187-196，2001。
- 2) 白石悟・永松宏一・海原敏明：外洋性港湾における波浪特性が船舶係留時の防舷材に及ぼす影響分析，海岸工学論文集，第45巻，pp.791-795，1998。
- 3) 斎藤勝彦・久保雅義：3Dトラッカーによる新しい係留船舶動揺監視システムの提案，日本航海学会，第98号，pp.349-357，1998。
- 4) 元良誠三・小山健夫・藤野正隆・前田久明：船体と海洋構造物の運動学，1982。
- 5) 久保雅義・斎藤勝彦・下田直克・岡本俊策：岸壁前面の係留浮体の不規則波による船体動揺の時系列解析について，海岸工学論文集，第35巻，pp.687-691，1988。