

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1190**

March 2009

清水港を対象とした数値計算による係留船舶への津波影響の評価

米山 治男

大垣 圭一

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
2. 研究の内容 .....	4
3. 対象港湾と想定地震 .....	5
4. 数値計算手法 .....	5
4.1 津波数値計算 .....	5
4.2 船体動揺計算 .....	5
5. 津波外力の算定 .....	6
5.1 津波数値計算結果 .....	6
5.2 津波外力の設定 .....	7
6. 船型に対する津波影響の評価 .....	9
6.1 係留施設の設定 .....	9
6.2 係留船舶の動揺時系列 .....	11
6.3 係留船舶の最大動揺量と係留施設への最大力 .....	13
6.4 各船型における津波影響の比較検討 .....	16
7. 係留方法に対する津波影響の評価 .....	17
7.1 係留方法の選定 .....	17
7.2 係留船舶の動揺時系列 .....	20
7.3 係留船舶の最大動揺量と係留施設への最大力 .....	23
7.4 各係留方法における津波影響の比較検討 .....	27
8. 結論 .....	30
9. あとがき .....	30
謝辞 .....	30
参考文献 .....	31

# Numerical Evaluation of Tsunami Impact to Moored Ships in the Port of Shimizu

Haruo YONEYAMA\*  
Keiichi OHGAKI\*\*

## Synopsis

In the near future, tsunamis caused by the Tokai, Tonankai and Nankai Earthquakes are anticipated to arrive at wide areas of the Pacific coast of Japan. Although many important infrastructures are located in the port areas, any countermeasures against the tsunamis have not been undertaken for moored ships in the ports. Therefore, the authors estimated the tsunami impacts to various-type moored ships and mooring facilities in the Port of Shimizu by using the tsunami and ship motion simulations for the scenario Tokai Earthquake Tsunami in this study.

The results derived in this study are summarized as follows:

- 1) When the Tokai Earthquake Tsunami arrives in the Port of Shimizu, the tsunami flow becomes parallel to the quay lines and strongly induces the surging of the moored ships at the target four berths.
- 2) The motion of a large size ship generally becomes larger because its natural period for surging is close to the dominant period of the tsunami. Therefore, the large ship moored at the quay gives strong impacts on the mooring facilities.
- 3) When the ship is moored in the ordinary method, the tsunami-induced tensions of the shorter mooring ropes such as the breast and spring lines tend to be larger than those of the longer mooring ropes such as the head and stern lines.
- 4) When each mooring rope is two to four times longer than that in the ordinary method, the horizontal motions of the moored ship are large, but the tensions of each mooring rope become uniform.
- 5) The mooring method using long ropes in all positions is considered to be the most effective way against the tsunami.

**Key Words:** tsunami, moored ship, mooring rope, fender, numerical simulation

---

\* Research Director, Marine Environment and Engineering Department  
\*\* Trainee of Coastal and Ocean Development Research Group, Coastal and Ocean Engineering Research Division,  
Marine Environment and Engineering Department (TOA Corporation)  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5061 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:yoneyama@pari.go.jp

# 清水港を対象とした 数値計算による係留船舶への津波影響の評価

米山 治男\*  
大垣 圭一\*\*

## 要 旨

近い将来、東海・東南海・南海地震によって津波が発生すると予測されており、この津波は太平洋沿岸の広範囲に到達すると推定されている。港湾内には多くのインフラが集約されており、重要な場所であるにも関わらず、港湾内に係留された船舶は津波に対して対策がなされていないというのが現状である。そこで、本研究では、中央防災会議で検討された想定東海地震津波に対して、清水港を対象として津波数値計算と船体動揺計算を行うことにより、津波が係留船舶や係留施設へ与える影響を船型や係留方法に対して評価した。

その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 東海地震による津波に対して清水港の4箇所のバースを対象とした場合、津波は主にバースに沿って流れ、津波の影響は係留船舶のサージに対して大きくなる。
- 2) 一般に係留船舶の船型が大きいほどその固有周期は長くなるため、津波周期と一致しやすくなり、船舶の動揺も大きくなる。このため、船型の大きい船舶が係留施設へ与える影響は大きくなる。
- 3) 通常用いられている標準的な係留方法で船舶を係留した場合、津波によって、ヘッドラインやスターンラインに比べてプレストラインやスプリングラインといった短い係留索の張力が大きくなる傾向がある。
- 4) 全ての係留索を通常よりもそれぞれ2~4倍程度長く取った場合、係留船舶の水平面内動揺は大きくなるが、全ての係留索にある程度均等に張力がかかるようになる。
- 5) 本研究で検討した5種類の係留方法の中では、係留索を長く取る方法が津波に対して効果的な係留方法であると考えられる。

キーワード：津波，係留船舶，係留索，防舷材，数値計算

---

\* 海洋・水工部 上席研究官

\*\* 海洋・水工部 海洋研究領域 海洋研究チーム 依頼研修生（東亜建設工業株式会社）  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5061 Fax：046-844-0255 e-mail:yoneyama@pari.go.jp

## 1. はじめに

近い将来、東海・東南海・南海地震に伴って津波が発生すると言われている。中央防災会議（2003）ではこの地震のメカニズムなどを研究し、関東から九州の広域に到達する津波高を推算している。これによると、太平洋沿岸の広い範囲に1m以上の津波が押し寄せ、名古屋港、四日市港、大阪港などの特定重要港湾でも被害が発生する可能性があると考えられている。これらの港湾には、多数のインフラが集約しており、その重要性は極めて大きい。また、港湾が一旦被害を受けてしまうと、復旧までに長い時間を要し、国民の生活にも影響を及ぼすため、その損害は非常に大きなものとなる。港湾内に津波が到達すると、まず、係留船舶などの海域にあるものが津波外力の影響を受けることになる。津波が港湾内に到達すると予測された場合、一般に、船舶は港外へ避難することが被害を受けにくくするための最良の方法である。しかし、津波の到達時間、航路の混雑状況、船舶の係留状況、船員の配置、曳船の配船などの制約によっては必ずしも時間内に船舶が港外へ避難することが可能とは限らない。このような場合、港湾内に残された係留船舶は津波の外力を受けて大きく動揺し、係留索に大きな張力が作用したり、防舷材に大きな反力が発生したりする。このときに係留索が破断してしまうと、船舶が漂流して他の港湾施設へも被害を及ぼす可能性もある。しかしながら、船舶の係留施設は津波に対して十分に対策がなされていないのが現状である。港湾内で大型船舶が漂流すると、港湾施設や他の船舶に被害を及ぼす可能性が高く、東海・東南海・南海地震津波では大型船舶が係留している港湾にも津波の影響が及ぶことが予想されるため、その被害を低減することは、防災上非常に重要な課題である。

これまでの日本国内の津波による船舶の被災事例としては、小型船舶の被災が大半であるが、1983年に発生した日本海中部地震津波で能代港において多数の漁船が陸上に乗り上げたこと（谷本ら、1983）や、1993年に発生した北海道南西沖地震津波で瀬棚港において1,000トンのバージ船が岸壁に乗り上げたりしたこと（高山ら、1994）がある。また、2004年に発生したスマトラ沖地震津波では、バンダアチェにおいて、長さ約60m×幅約20mの発電バージが3km内陸まで流されたという被害も報告されている（富田ら、2005）。

近年、津波の変形や浸水域の推定など津波の伝播特性に関する研究は比較的多く行われている（例えば、富田ら、2004）が、係留船舶に与える影響を検討した研究は少ない。例えば、池谷ら（2005）は津波が浮体に作用す

る波力について模型実験を行い、モリソン式を浮体に適用して津波の波力を評価している。また、津田ら（2006a）は模型実験で係留船舶に津波が作用したときの動揺量や船舶の衝突力などを測定して、船舶の挙動を分析している。一方、河田ら（2004）は堺泉北港を対象に東海・東南海・南海地震による津波外力を求め、係留船舶の安全性を評価している。しかしながら、ここでは動揺シミュレーションは行わず、簡易的な方法で船舶の座礁・乗り上げや係留索の破断を評価している。このように、津波外力や船舶の係留状況を詳細に考慮した、船舶の動揺に関する数値計算の事例はほとんどない。

そこで、本研究では、実際の港湾を対象にして津波数値計算と船体動揺計算を行うことにより、津波が係留船舶や係留施設へ与える影響を船型や係留方法に対して評価することとした。対象とする津波と港湾は、予想される港湾内の津波高さが5m以上のように極端に大きくないこと、津波来襲前に船舶が港外へ避難する時間が短く困難であることの2つの条件から、中央防災会議（2003）で検討された想定東海地震津波と清水港とした。

## 2. 研究の内容

本研究の検討項目とその流れを図-1に示す。まず、3. では対象港湾と想定地震について述べる。次に、4. では数値計算法（津波数値計算と船体動揺計算）による検討方法を説明する。5. では、津波数値計算を行って対象港湾の対象パースにおける津波水位時系列を求め、6. と7. の船体動揺計算に用いる津波外力を算定する。6. では、通常係留方法による船型の異なった係留船舶に対して、津波による船体動揺計算を行い、津波に対する船舶や係留施設の安全性における船型の影響を評価する。また、7. では、6. と同様な検討を、通常とは異なった係留方法を用いた係留船舶に対して行い、津波に対する船舶や係留施設の安全性における係留方法の影響を評価する。

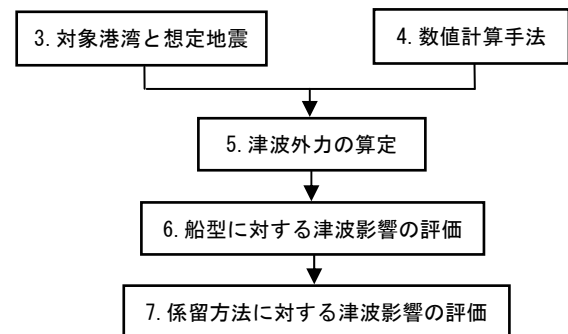


図-1 研究のフロー

### 3. 対象港湾と想定地震

中央防災会議（2003）で検討された想定東海地震によって発生する津波を外力とし、図-2に示す清水港を検討対象とした。図-3には清水港内で対象とする4箇所のバースと湾口の防波堤の位置を示している。清水港は東海地震の震源域付近に位置し、断層運動の影響で地震時には地形が隆起する。このため、地震発生直後に水位変動が始まる場所であり、津波来襲前に船舶が港外避難する時間はほとんどないと予想される。また、津波来襲時には船舶は2つの防波堤の間を通過して港外へ避難することになるが、清水港は特定重要港湾にも指定されており、船舶の数も多いことから、航路が混雑し避難が遅くなることも考えられる。中央防災会議（2003）の想定では、東海地震により清水港周辺へ来襲する津波は約2mと比較的大きいため、係留船舶が大きな津波外力を受けやすい港湾でもあると予想される。

実際の清水港では、船種の異なった船舶が各バースに着岸しているが、ここでは検討を容易にするために、対象船舶を全て貨物船で統一した。また、船型に対する津波の影響を比較するため、清水港の岸壁水深に対応して、A地点に60,000DWT、B地点に10,000DWT、C地点に30,000DWT、そしてD地点に5,000DWTの貨物船をそれぞれ配置した。

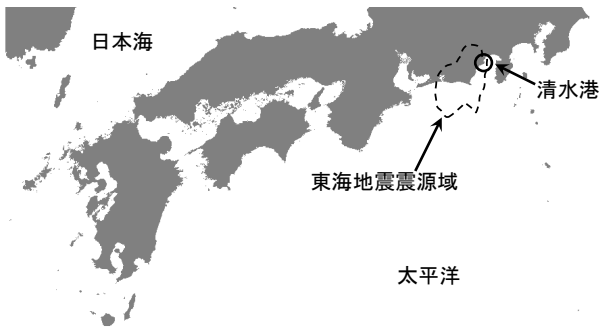


図-2 清水港と東海地震震源域

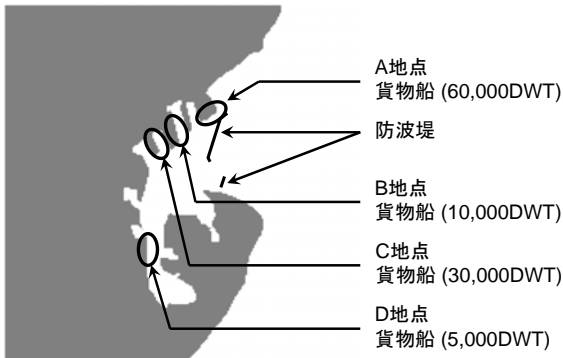


図-3 対象バースの位置

### 4. 数値計算手法

#### 4.1 津波数値計算

津波数値計算には非線形長波理論を用いて、式(1)、(2)、(3)に示す支配方程式をstaggered leap-frog法で差分化（後藤ら、1993；大垣ら、2004）して数値計算を行った。それぞれ、式(1)は連続式、式(2)はx方向の運動方程式、式(3)はy方向の運動方程式である。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $t$  は時間、 $x$  と  $y$  は平面座標、 $\eta$  は水位変動、 $M$  と  $N$  は流量フラックス、 $D$  は全水深、 $g$  は重力加速度、 $n$  はマニングの粗度係数（=0.025）である。数値計算に用いた地形データは1,350m、450m、150m、50m、16.6mの5種類のグリッドサイズのデータであり、津波波源から対象バースまでを領域接続しながら合計3時間の津波数値計算を行った。ここで、岸壁は重力式岸壁とし、陸域と海域の水位の境界条件は完全反射とした。

#### 4.2 船体動揺計算

船体動揺計算では、まず、喫水面下の船体表面をパネルに分割し、3次元特異点分布法を用いて事前に各パネルについて流体力と波力の計算（津田ら、2006b）を行った。そして、遅延関数型の運動方程式（久保ら、1988）を用いて船体動揺の時系列計算を行った。船体動揺計算に用いた遅延関数型の運動方程式の支配方程式を式(4)、(5)、(6)に示す。

$$\sum_{i=1}^6 (M_{ij} + m_{ij}(\infty)) \ddot{x}_i(t) + \sum_{i=1}^6 \left\{ \int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{x}_i(\tau) d\tau + D_{ij} \dot{x}_i \right\} + \sum_{i=1}^6 (C_{ij} + G_{ij}) x_i(t) = F_j(t) \quad (j=1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

$$L_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B_{ij}(\sigma) \cos \sigma t d\sigma \quad (5)$$

$$m_{ij}(\infty) = A_{ij}(\sigma_0) + \frac{1}{\sigma_0} \int_0^{\infty} L_{ij}(t) \sin \sigma t dt \quad (6)$$

ここで、 $t$  は時間、 $x$  は変位、 $M_{ij}$  は質量または慣性モーメント、 $m_{ij}$  は付加質量または付加慣性モーメント、 $L_{ij}$  は遅延関数、 $D_{ij}$  は粘性減衰係数、 $C_{ij}$  は静水圧の係留力係数、 $G_{ij}$  は係留力係数、 $F_j$  は津波外力、 $B_{ij}(\sigma)$  は周波数

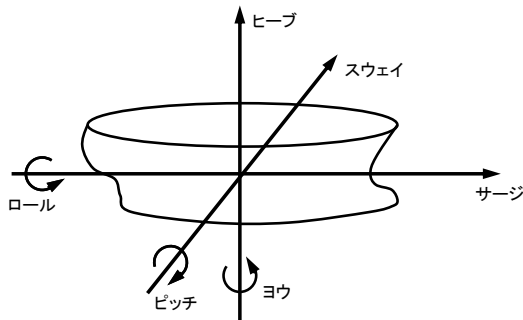


図-4 船舶の動揺6成分

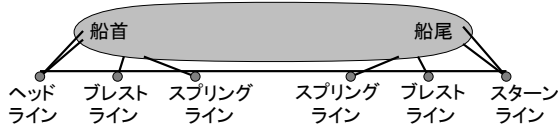


図-5 船舶の係留索の名称

$\sigma$ に対する造波減衰係数,  $A_{ij}(\sigma)$  は周波数 $\sigma$ に対する付加質量または付加慣性モーメントである. 波力と流体力は周期1~4,500sに対して計算を行い, 粘性減衰係数は藤畑ら(1999)が用いた値を参考にサージに0.2, スウェイに0.8を設定した. なお, 船体動揺計算では, 船舶が海底面に着底したり, 岸壁を越えて陸上に乗り上げたりする現象を直接考慮できない. しかしながら, 得られた船体動揺の時系列波形を検討することにより, これらの危険性を評価することは可能である.

船体の動揺は, 図-4に示すようにサージ, スウェイ, ヒープ, ロール, ピッチ, ヨウの6成分で構成される. 各

動揺成分の正の方向は図中の矢印の方向である. また, 図-5は船舶の係留索の名称を示している. これは, 左舷接岸の船舶の係留状況であり, 各係留索はその位置によって図中に示すように呼称される.

## 5. 津波外力の算定

### 5.1 津波数値計算結果

津波数値計算より得られた4地点の津波水位時系列の結果を図-6に示す. 中央防災会議(2003)で想定された東海地震による断層運動が起こった場合, 数値計算上では清水港は地震により地形が隆起する場所にあるため, 計算開始時の水位は1.8mになる. このとき, 岸壁位置でも地形が隆起しているため, 清水港内での岸壁に対する相対的な水位変化はほぼ0である. 津波数値計算の開始直後の水位変動は大きい, その1時間後には, どの地点においても津波水位の振幅は数値計算の開始当初の約1/2になっており, 時間経過とともに津波水位の振幅が大きく減衰していることが分かる. また, 湾口に近いA地点やB地点の津波水位時系列には, 600s以下の短周期成分が顕著であることが分かる. 一方, 湾奥に位置するD地点では, このような短周期成分はほとんど含まれていない. これは, 港湾形状や海底地形の影響による津波の共振周期の差異によるものと考えられる.

図-7には4地点の津波流速ベクトルの時系列変化を示す. A地点では流速ベクトルの向きは北東~南西, D地点

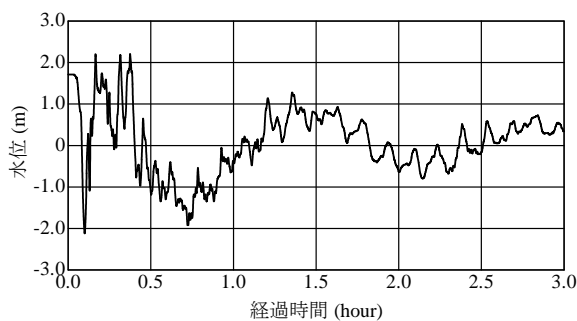


図-6(1) A地点の津波水位時系列

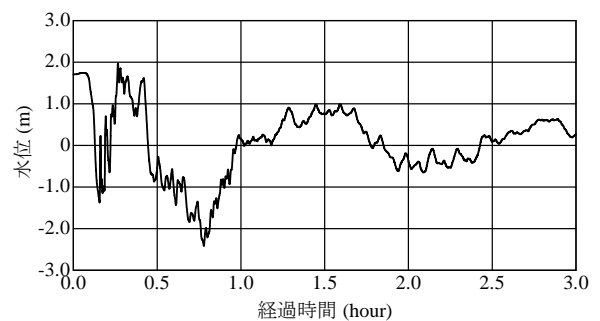


図-6(3) C地点の津波水位時系列

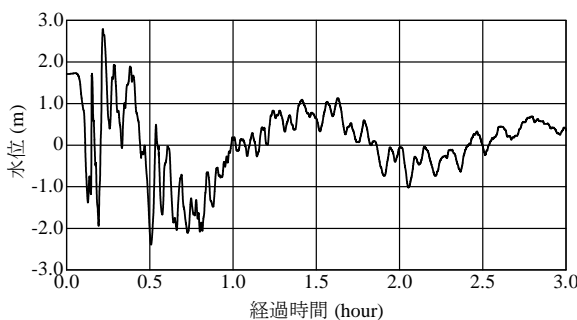


図-6(2) B地点の津波水位時系列

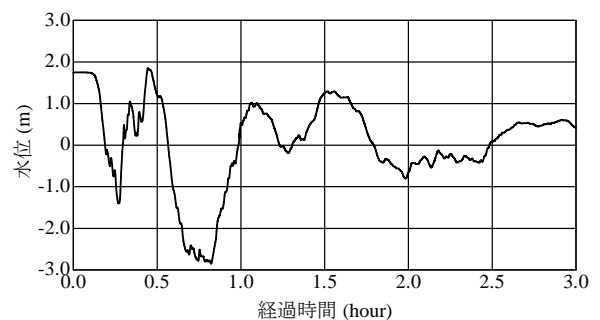


図-6(4) D地点の津波水位時系列

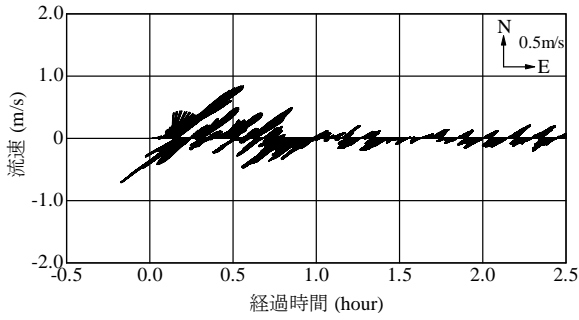


図-7(1) A地点の津波流速時系列

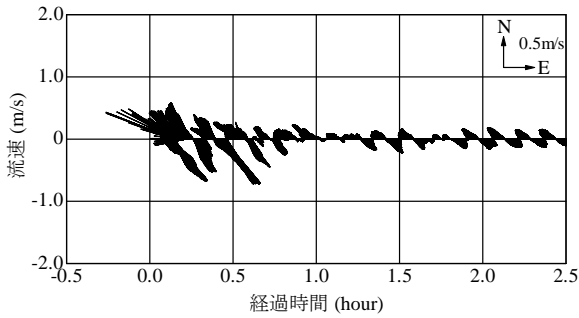


図-7(2) B地点の津波流速時系列

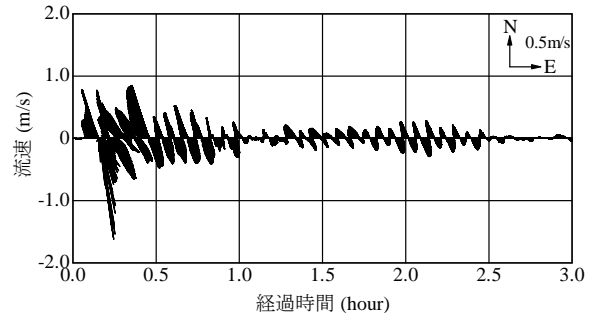


図-7(3) C地点の津波流速時系列

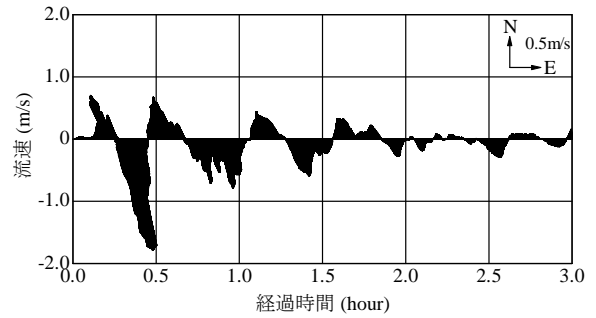


図-7(4) D地点の津波流速時系列

表-1 各地点の津波の最高水位と最大流速

計算地点	最高水位 (m)	最大流速 (m/s)
A地点	2.2	1.4
B地点	2.8	1.2
C地点	2.0	1.6
D地点	1.9	1.8

では北北西～南南東となっていることから分かるように、全ての地点で流速ベクトルの向きは岸壁法線とほぼ平行になっている。つまり、津波はバースに沿って流れるため、バースに係留された船舶には船首-船尾方向に津波外力が作用することになる。また、D地点の流速ベクトルの反転する周期は長いが、A、B、C地点ではその周期は短いことが分かる。これは、A、B、C地点では津波水位時系列に600s以下の短周期成分が顕著であるため、短周期成分の周期に合わせて流速ベクトルの向きが反転しているからである。一方、D地点では津波水位時系列にこのような短周期成分があまり含まれていないため、流速ベクトルの向きは長周期成分の周期にしたがって変化している。

4地点の津波数値計算結果の最高水位と最大流速について表-1に示す。この表から、4地点は全て清水港の中にあるが、周辺地形などの影響があるため、位置によって津波の実態は少しずつ異なることが分かる。D地点は湾奥にあるために防波堤や岸壁の遮蔽効果によって波高が減衰するため、4地点の中で津波の最高水位が最も小さくな

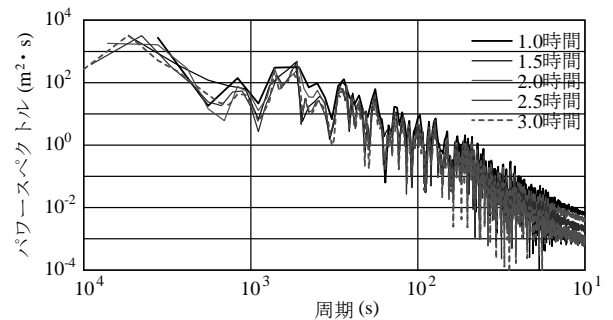


図-8 スペクトルの解析区間の検討

ったと考えられる。一方で、D地点は水深が最も浅く流路が狭くなっていることから、津波の最大流速は最も大きくなったと考えられる。

## 5.2 津波外力の設定

本研究では、5.1で求めた4地点の津波水位時系列をスペクトルに変換し、そのスペクトルから船体動揺計算の津波外力を算定する。船体動揺計算では、船体に与える津波の影響が最も大きくなるような津波水位時系列の区間を求めて津波外力を与える必要がある。ここで、津波数値計算の結果より、時間の経過とともに津波の振幅は減衰することが分かったため、数値計算開始直後の津波水位時系列の影響が船舶にとっては大きいと考えた。そこで、数値計算開始から1.0、1.5、2.0、2.5、3.0時間分の津波水位時系列をスペクトル解析し、解析区間によるスペクトルの大きさの相違について検討した。A地点におい



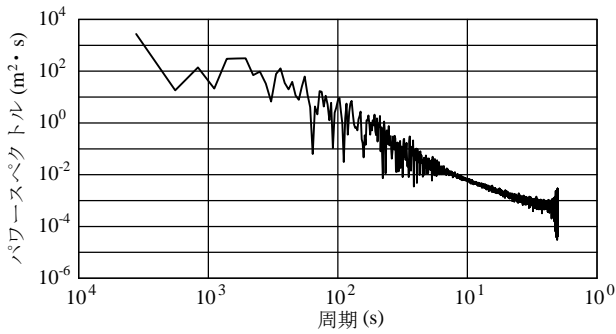


図-9(1) A地点の津波水位スペクトル

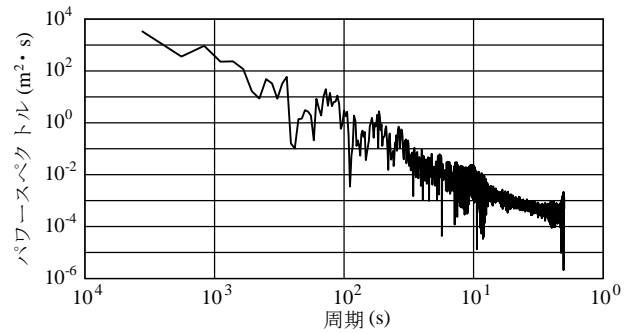


図-9(3) C地点の津波水位スペクトル

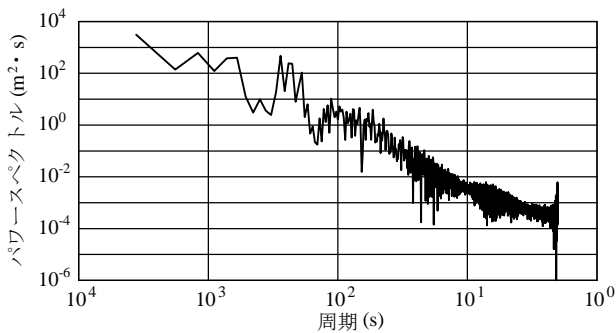


図-9(2) B地点の津波水位スペクトル

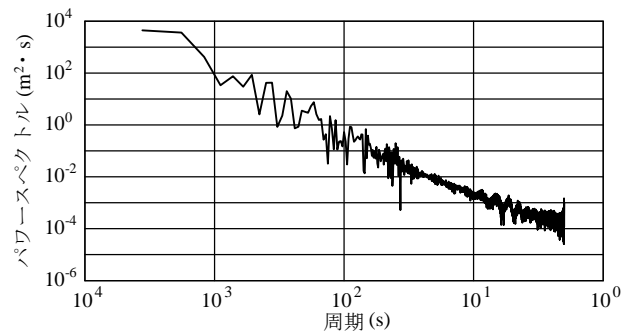


図-9(4) D地点の津波水位スペクトル

てスペクトルの解析区間の検討を行った結果を図-8に示す。この図より、解析区間が異なってもスペクトルがピークを取る周期は3,600sや570s付近で共通しており、解析区間によってピークを取る周期はほぼ変わらないことが分かる。しかし、スペクトルの大きさは解析区間によって変化し、解析区間を1.0時間としたときに最も大きくなることも分かる。清水港の津波の水位時系列は、数値計算開始から1.0時間で最も振幅が大きくなっているため、その影響が大きく、解析区間を長くすることでスペクトルが小さくなったものと考えられる。よって、船舶にとって津波の影響が最も大きくなるように、津波数値計算開始から1時間分の津波水位時系列をスペクトル解析して、船体動揺計算への津波外力として用いることにした。

各地点で津波数値計算開始から1時間分の水位時系列をスペクトル解析した結果を図-9に整理する。この図より、全ての地点において3,600sのスペクトル密度が最も大きいことが分かる。D地点では津波水位時系列の中に短周期成分があまり含まれていなかったため、1,000s以下のスペクトルは他の地点と比較して小さい。一方、例えばA地点の570sやB地点の280sのスペクトル密度のように、短周期領域でもスペクトルが大きくなっている箇所がある。これは、A地点やB地点では津波水位時系列の中に数～10min程度の短周期成分が顕著に含まれていることが原因である。ここで、一般貨物船のサージの固有周期は2～

3minであり（沿岸技術研究センター，2004）、係留船舶は固有周期の波に対して動揺が大きくなりやすいことから、3,600sの長周期成分よりも、数～10min程度の短周期成分がスペクトルの大きさによっては係留船舶にとって危険になると考えられる。したがって、船体動揺計算に用いる津波のスペクトルは、数～10min程度の短周期成分を特に精度良く表現できるように設定した。また、津波の入射方向については、津波数値計算の結果より、津波は主にバースに沿って流れることが分かったため、各地点において船首方向あるいは船尾方向とした。

なお、津波は長い周期成分を含むため、流速の2乗に比例する流圧力の影響が大きくなる可能性がある。船首方向からの潮流による定常的な流圧力は、式(7)により計算することができる（日本港湾協会，1999a）。

$$F_D = 0.0014SV^2 \quad (7)$$

ここで、 $F_D$  は流圧力、 $S$  は浸水面積、 $V$  は流速である。例えば、係留船舶の諸元を全幅30.0m、喫水10.0mと仮定し、表-1から津波の最大流速を2.0m/sとすると、流圧力は約1.7kNと試算できる。この結果から、船舶は船首-船尾方向に流線形状をしているため、この方向からの津波による定常的な流圧力は非常に小さくなるものと考えられる。したがって、本研究のように船首-船尾方向から津波が入射する場合には、津波による流圧力は考慮しなくてもよいと考えられる。

## 6. 船型に対する津波影響の評価

係留船舶に津波外力が作用したときの係留船舶の挙動と係留施設へ及ぼす影響について検討する。ここでは、通常の係留方法を用いた船型の異なる4隻の係留船舶について船体動揺計算を行い、津波に対する船舶や係留施設の安全性における船型の影響を評価する。

### 6.1 係留施設の設定

船型の異なる4隻の貨物船の諸元を表-2に示す。この表には、図-3に示したA～Dの4地点の対象バースも示している。貨物船の積載量は空載とし、波力と流体力を簡易的に計算できるように船体を矩形浮体としてモデル化した。このとき、矩形浮体の排水量ともの貨物船の排水量を一致させるために矩形浮体の垂線間長を調整した。

係留索は全てナイロンエイトロープとし、対象船舶の艀装数より係留索の諸元を選定した（上田，1984；浜田ら，1991）。表-3、図-10には選定した係留索の諸元とその張力特性を示す。船舶が大きいかほど艀装数は大きくなるため、係留索の径も大きくなる。係留索は全て同じ種類であるが、その径が異なるため、張力特性の傾きが異なることになる。ここで、係留索の限界荷重とは、係留索の破断張力を意味している。船体動揺計算開始時の初期張力としては、それぞれの限界荷重の7%を設定した。

表-2 船舶の諸元

バース	貨物船	排水量 (m <sup>3</sup> )	垂線間長 (m)	船幅 (m)	喫水 (m)
A地点	60,000DWT	32,414	212.0	32.3	7.2
B地点	10,000DWT	6,824	127.0	19.9	4.1
C地点	30,000DWT	18,326	174.0	27.5	5.9
D地点	5,000DWT	3,535	103.0	16.8	3.2

表-3 係留索の諸元

貨物船	係留索	限界荷重 (kN)	初期張力 (kN)
60,000DWT	ナイロンエイト65mm	693	49
10,000DWT	ナイロンエイト55mm	510	36
30,000DWT	ナイロンエイト55mm	510	36
5,000DWT	ナイロンエイト40mm	276	19

表-4 防舷材の諸元

貨物船	防舷材	限界荷重 (kN)
60,000DWT	セル型-1	1,038
10,000DWT	V型-1	891
30,000DWT	セル型-2	697
5,000DWT	V型-2	595

防舷材については、一般的な接岸速度である0.10m/sから船舶の接岸エネルギーを計算し、その値に対応した防舷材を選定した（日本港湾協会，1999b）。表-4、図-11には選定した防舷材の諸元とその反力特性を示す。岸壁上の係船柱は曲柱を配置したが、一般に係船柱の強度は係留索の限界荷重よりも大きいため、船体動揺計算では係船柱が破損する前に係留索が破断すると仮定し、係船柱の破損は考慮していない。また、係船柱と防舷材の配置については、船舶の大きさと水深に応じて適切な間隔を設定した（北島ら，1967；日本港湾協会，1999c）。

図-12には、各バースにおいて、船型の異なる4隻の貨物船を左舷接岸で係留した状況を示す。これらの係留方法は、各港湾における貨物船の係留の実態をもとにした標準的なものであり、通常の係留方法と呼ぶこととする。津波の入射方向は、津波数値計算の流速ベクトルの時系列の結果より、A地点とD地点では船首方向、B地点とC地点では船尾方向とした。また、津波は長周期の波であるため係留船舶の動揺も長周期になり、船舶と海水との間に発生する摩擦が大きくなっていくので、粘性の影響が無視できなくなる。粘性の影響は、船舶の動揺6成分のうちサージとスウェイに対して大きいと考えられるので、その2成分のみに粘性抵抗を考慮することにした。

係留船舶の動揺特性を示す指標として固有周期がよく

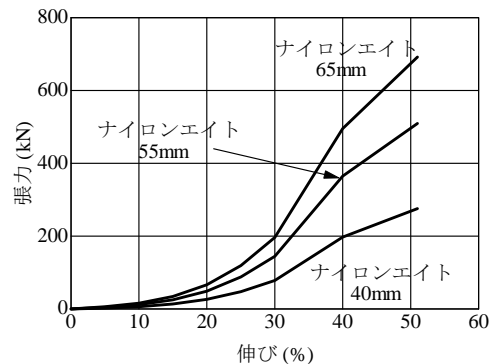


図-10 係留索の張力特性

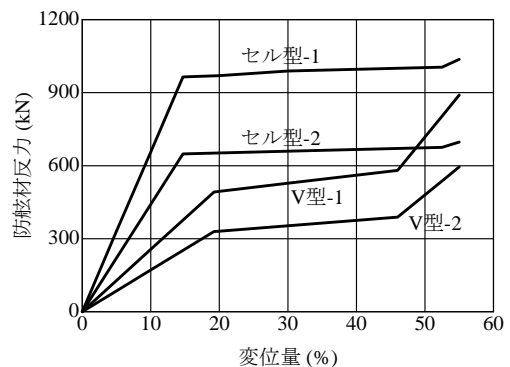


図-11 防舷材の反力特性

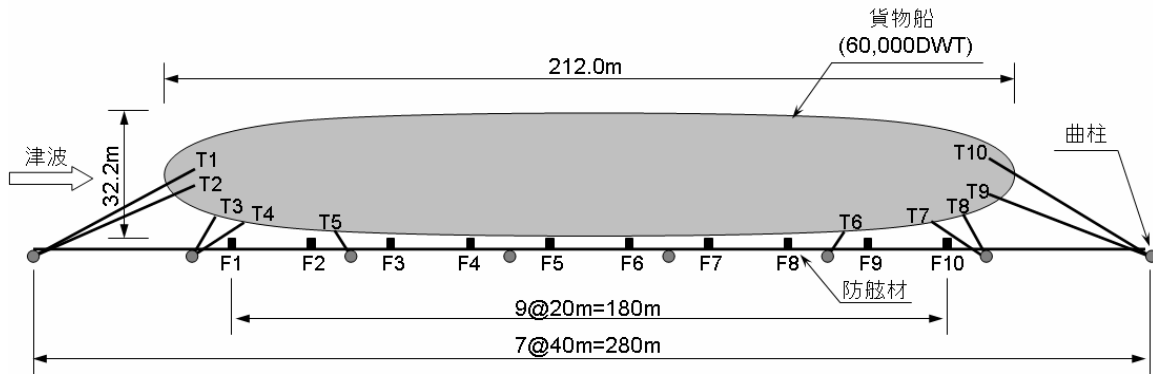


図-12(1) 60,000DWT船舶の係留状況

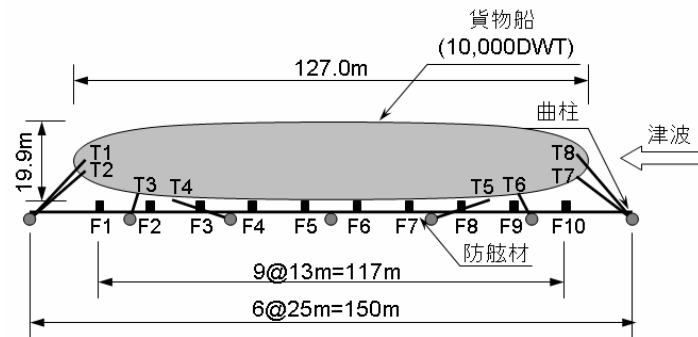


図-12(2) 10,000DWT船舶の係留状況

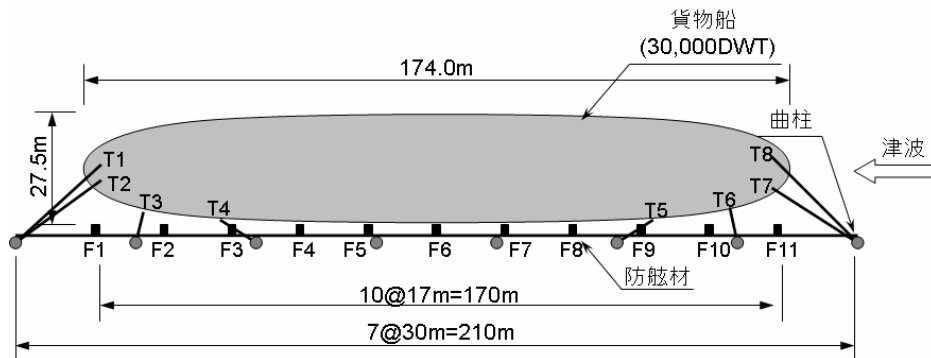


図-12(3) 30,000DWT船舶の係留状況

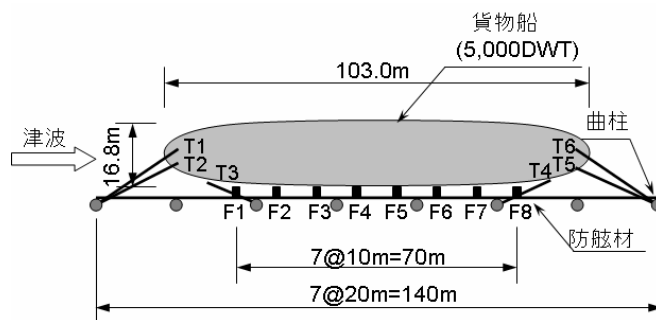


図-12(4) 5,000DWT船舶の係留状況

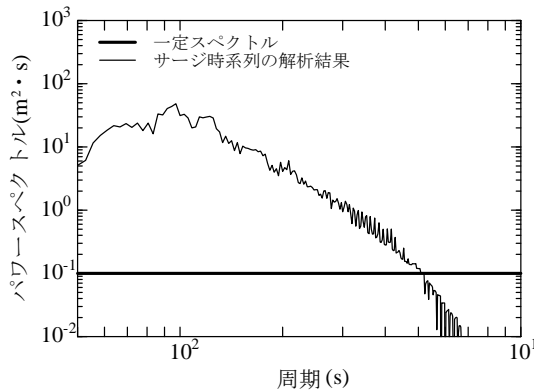


図-13 入射波スペクトルとサージスペクトル

用いられており、一般貨物船のサージの固有周期は2～3min（沿岸技術研究センター，2004）とされている．そこで、津波に対する船体動揺計算を行う前に、4隻の貨物船の固有周期を求めた．まず、図-13に示すような周期15～200sの範囲で一定のスペクトルを、船首方向もしくは船側方向から入射波として与えて船体動揺計算を行い、その動揺時系列をスペクトル解析した．同じ図-13に、60,000DWT船舶のサージ時系列のスペクトル解析結果を示す．この図より、動揺時系列のスペクトルが卓越している周期が分かるので、そこから固有周期を求めた．

図-14には係留船舶のサージとスウェイの固有周期の計算結果を示す．この図より、スウェイよりサージの固有周期の方が大きいことが分かる．係留力は係留索のばね定数とその変位で求めることができる．通常の係留索配置において、ヘッドライン、スターンライン、スプリングラインは岸壁法線方向に近い角度で配置されているが、索が長いために岸壁法線方向のばね定数は小さくなり、サージ方向の固有周期は長くなる．一方、プレストラインは岸壁に対して垂直に近い角度で配置されているが、索が短いために岸壁方向のばね定数は大きくなり、スウェイ方向の固有周期は短くなる．このため、サージの固有周期はスウェイの固有周期よりも大きくなったと考えられる．また、船型による固有周期の相違を見ると、船舶が大きいほど固有周期が長くなることが分かる．船舶が大きいほど係留索の径も大きくなるのでばね定数は大きくなるが、その一方で索は長くなるのでばね定数はその分小さくなる．加えて、船舶が大きいほど排水量が大きくなるので、結果的に船舶が大きいほど固有周期が長くなるものと考えられる．

## 6.2 係留船舶の動揺時系列

4隻の船舶について1時間分の船体動揺計算を行った結果を図-15～18に示す．ここでは、動揺6成分のうち、水

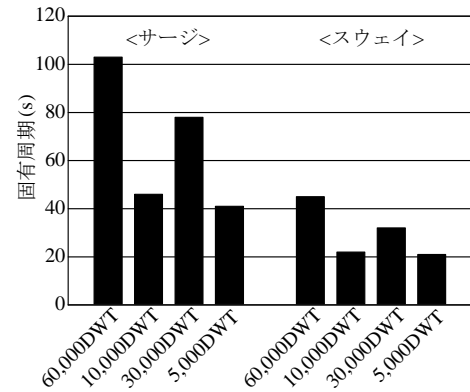


図-14 係留船舶の固有周期

平面内の動揺成分であるサージ、スウェイ、ヨウの3成分のみを図に示している．船体動揺計算の結果によると、ロール、ピッチの動揺量はどの船型についても小さいことが分かった．ロールの動揺量が小さいのは、津波の入射方向が船首-船尾方向であったことが原因である．また、津波は波長が極めて長いためにその波形勾配が非常に小さく、ピッチの動揺量も小さくなった．ヒープについては、津波の波長が極めて長いために、津波水位の変動に追従して動揺することになる．また、各図では、係留索張力と防舷材反力の時系列は、最も荷重が大きくなった箇所の結果を示している．なお、船体動揺計算では、限界荷重に達した係留索や防舷材は破断したり、破損したりせずに一定係留力を保つものとしている．

### (1) 60,000DWT船舶

60,000DWT船舶の動揺時系列について、サージとスウェイの動揺量を比較すると、サージの動揺量が片振幅で10m程度と非常に大きいことが分かる．これは、船首方向からの津波が、係留船舶の前後方向に往復流となって流れることが原因と考えられる．サージの最大動揺量は動揺計算開始から0.90時間後の時刻で約15mである．一方、スウェイの最大動揺量は動揺計算開始から0.65時間後で約0.6mである．スウェイは動揺周期が短く、最大動揺量が発生したときはパルス的に動揺が大きくなっている．ヨウの動揺量は常に±1.5°以下であり、動揺量としては小さいことが分かる．また、ヨウの動揺量が最大となったのは動揺計算開始から0.65時間後であり、スウェイの動揺量が最大となった時刻と一致している．また、それ以外でもこの2成分が大きくなるタイミングは一致しており、スウェイとヨウの連成関係は強いと考えられる．

係留索T5の張力は何回も限界荷重に達している．限界荷重に達した時刻の動揺成分の時系列を見ると、サージが大きくなったときに張力が大きくなっていることが分かる．係留索T5は船首側のスプリングラインであり、長

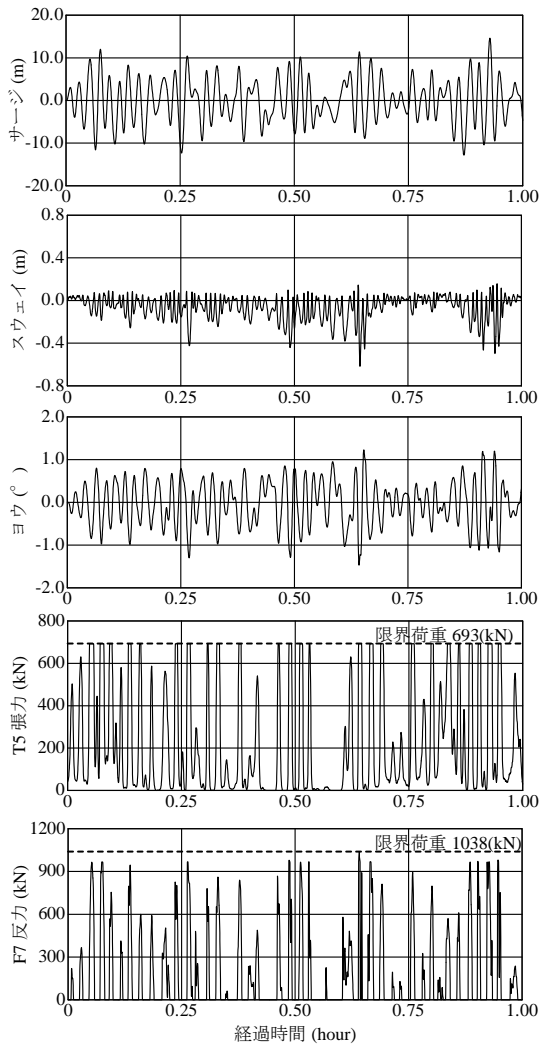


図-15 60,000DWT船舶の動揺時系列

さが短い係留索である。よって、船舶がサージ方向に大きく動揺したときに他の係留索と比較して張力が大きくなりやすく、限界荷重に達したものと考えられる。防舷材F7は反力が大きくなることが何回もあり、そのうち一回だけ限界荷重に達している。この時刻は動揺計算開始から0.65時間後であり、スウェイやヨウの動揺量が最も大きくなった時刻と一致している。防舷材F7は船舶の平行サイドに位置しており、また船舶の中央部に配置された防舷材F6に隣接する防舷材である。このため、岸壁から離れる方向のスウェイの動揺量と時計回りのヨウの動揺量が防舷材F7の反力に影響していると考えられる。

#### (2) 10,000DWT船舶

10,000DWT船舶の動揺時系列について、サージとスウェイの動揺量を比較すると、サージの動揺量の方が大きく、最大で4m程度となっていることが分かる。また、スウェイの動揺量は正であることが多く、動揺が小さいことが分かる。これは、津波がスウェイの動揺量にほとんど

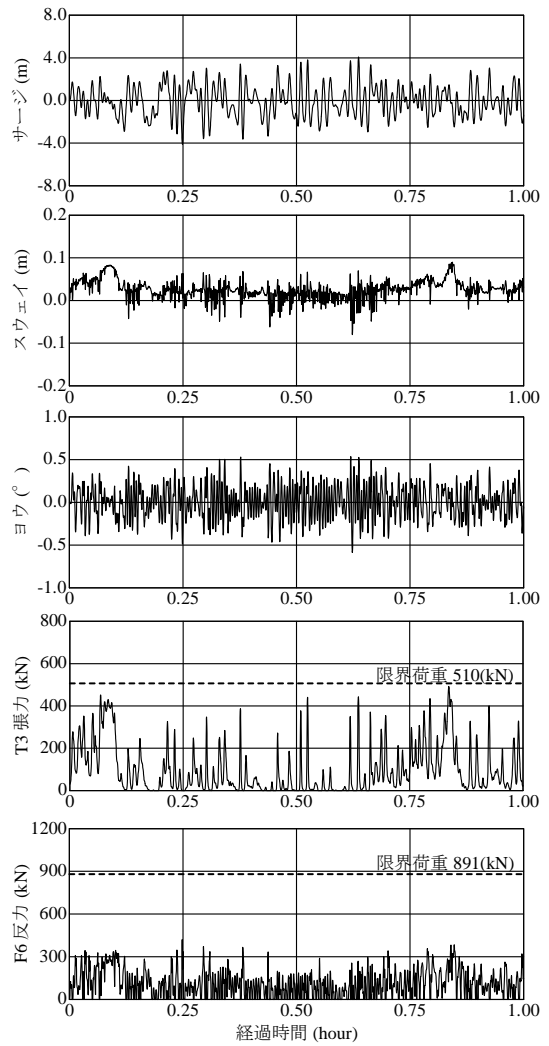


図-16 10,000DWT船舶の動揺時系列

ど影響せず、係留索の初期張力によって船舶が防舷材に押し付けられた状態の場合が多かったからである。ヨウについては、動揺量は約 $\pm 0.5^\circ$ 以内であり、動揺量としては小さい。

係留索T3の張力は限界荷重まで大きくはならなかった。張力が大きくなった時刻は、サージ、スウェイ、ヨウのいずれか、もしくはそれらの複数が大きく動揺している時刻である。係留索T3はプレストラインであり、索の長さが短い。そのため、船舶の水平面内成分のいずれかの動揺が大きくなったときに、その影響で張力が大きくなったと考えられる。一方、防舷材F6の最大反力はその限界荷重の1/2以下であった。これは、スウェイの動揺量が小さく、ほぼ常に船舶が防舷材に押し付けられており、船舶が防舷材に激しく衝突しなかったことが原因と考えられる。

#### (3) 30,000DWT船舶

30,000DWT船舶の動揺時系列については、サージの動

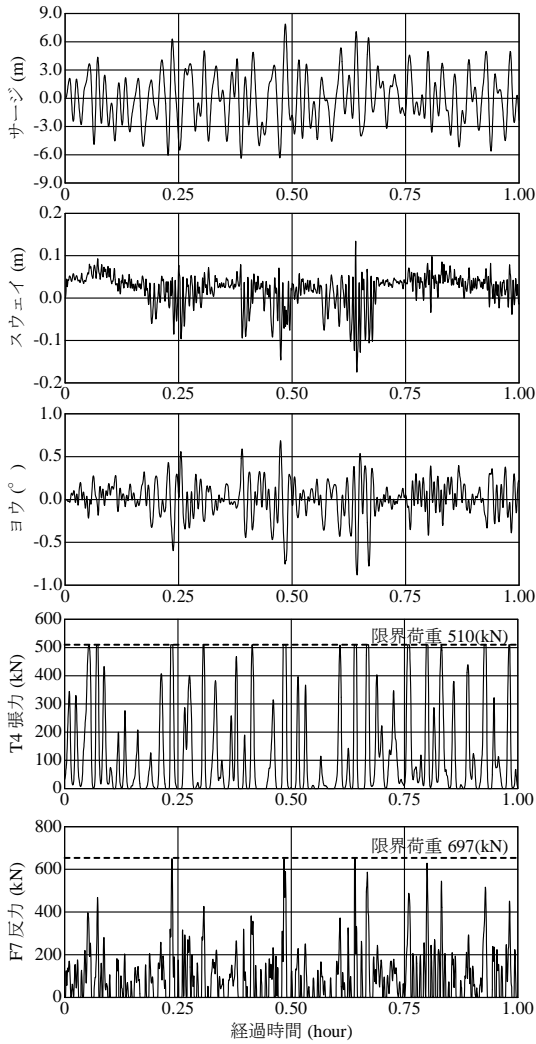


図-17 30,000DWT船舶の動揺時系列

揺量がスウェイの動揺量よりも非常に大きいことが分かる。ヨウは合計8回、片振幅が $0.5^\circ$ 以上になっている。これらのうち、7回はサージの片振幅が6.0m以上になったときであり、サージが大きくなった影響により、ヨウが発生したものと考えられる。

係留索T4の張力は何回も限界荷重に達していることが分かる。これらの時刻では全てサージの動揺量が4.0m以上になっている。係留索T4はスプリングラインであり、船舶のサージの影響を受けて張力が大きくなったと考えられる。防舷材F7の反力についても3回限界荷重に達している。これらの時刻ではサージの動揺量が6.0m以上になり、また、同時にヨウの振幅が $0.5^\circ$ よりも大きくなったときである。防舷材F7は、船舶の中央に配置された防舷材F6に隣接しており、スウェイだけでなく、ヨウの影響もあって防舷材反力が大きくなったと考えられる。

#### (4) 5,000DWT船舶

5,000DWT船舶の動揺時系列については、スウェイやヨウ

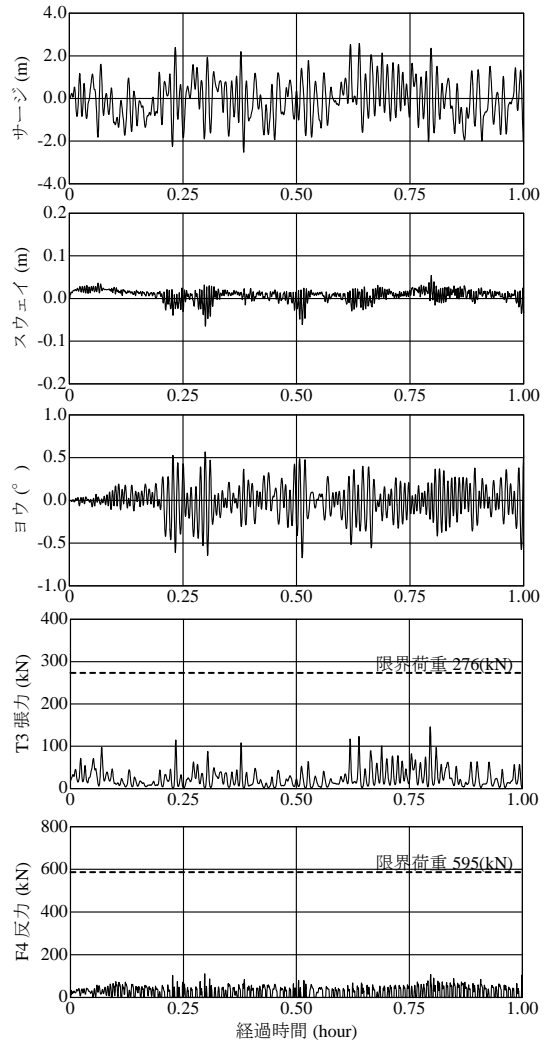


図-18 5,000DWT船舶の動揺時系列

ウが小さく、水平面内動揺3成分の中では、サージが主要な動揺となっている。他の船舶と比較して、5,000DWT船舶の動揺はサージの動揺周期が短いことが分かる。

係留索T3の張力は限界荷重を超えることはなかったが、何回か100kN以上になっている。このときの時刻は全てサージが大きくなった時刻と一致するため、この張力はサージの影響によるものであることが分かる。また、防舷材F4の反力も限界荷重を超えることはなく、常に小さいことが分かる。防舷材F4は船舶の中央部に配置されているため、スウェイの動揺が大きいときに影響を受ける。しかしながら、スウェイは片振幅が常に0.1m以下であり、船舶が防舷材に激しく衝突することがなかったために防舷材反力が小さかったと考えられる。

### 6.3 係留船舶の最大動揺量と係留施設への最大力

津波が船舶や係留施設へ及ぼす影響を船型ごとに検討するため、船舶の動揺6成分の最大動揺量、個々の係留索

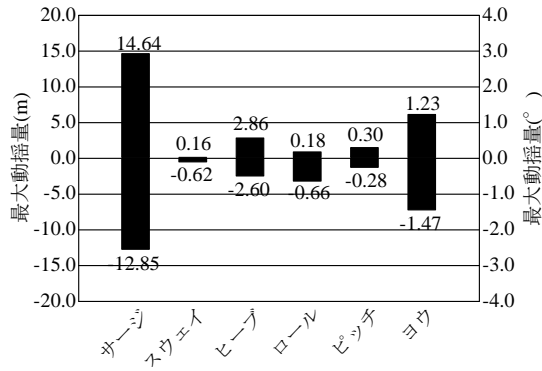


図-19(1) 60,000DWT船舶の最大動揺量

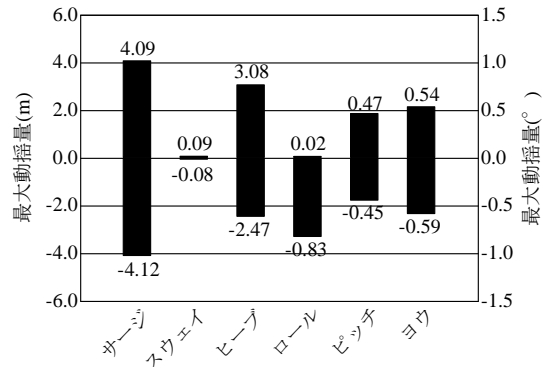


図-20(1) 10,000DWT船舶の最大動揺量

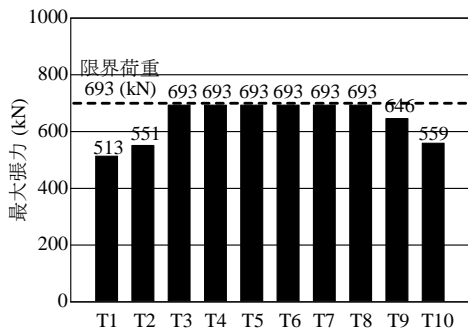


図-19(2) 60,000DWT船舶の係留索の最大張力

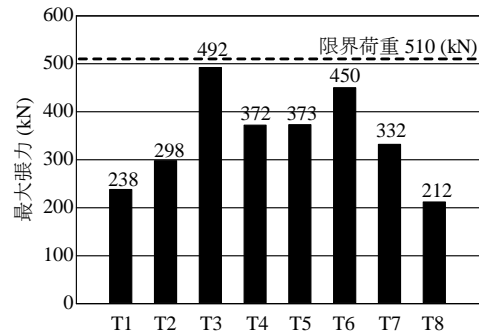


図-20(2) 10,000DWT船舶の係留索の最大張力

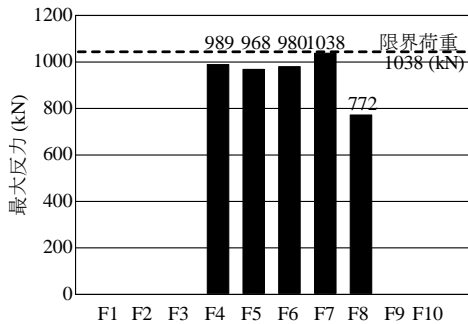


図-19(3) 60,000DWT船舶の防舷材の最大反力

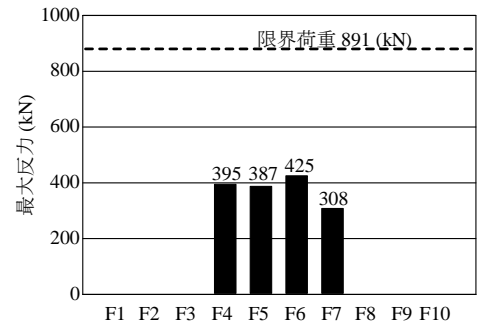


図-20(3) 10,000DWT船舶の防舷材の最大反力

の最大張力、個々の防舷材の最大反力について比較した結果を図-19～22に示す。

(1) 60,000DWT船舶

60,000DWT船舶については、スウェイやヒューブに比べて、サージの動揺量が非常に大きいことが分かる。これは、船首-船尾方向に津波が作用しているためと考えられる。また、ヨウは片振幅で±1.0°以上になっており、ロールやピッチと比較すると動揺量が大きいことが分かる。係留索張力はヘッドライン(T1, T2)とスターンライン(T9, T10)を除く6本が限界荷重に達している。これは、ヘッドラインとスターンラインはスプリングラインやブレストラインと比べて索が長いために張力が大きくなりやすいからである。防舷材反力については、防舷材F4～F8の5基のみに反力が出ており、このうち、防舷材F7で反力が限界荷重に達している。防舷材F7は船舶の中央部に接触

する防舷材F5, F6の船尾側に位置しており、また防舷材F8にも反力が発生していることから、時計回りのヨウが大きくなったことで反力が大きくなったものと考えられる。

(2) 10,000DWT船舶

10,000DWT船舶については、動揺6成分のうちサージとヒューブが大きくなっている。また、スウェイは片振幅0.1m以下の小さい動揺量となっている。ロールは正の方向の動揺量が負の方向の動揺量に比べて非常に小さいことが分かる。係留索は船舶の上部に取り付けられており、係留索の初期張力によって船舶の上部が岸壁側へ傾いたためと考えられる。係留索張力はブレストライン(T3, T6)の張力が大きく、係留索T3は限界荷重に近い張力となった。これは、10,000DWT船舶の係留索の配置では、ブレストラインの長さが最も短いことが原因である。一方、

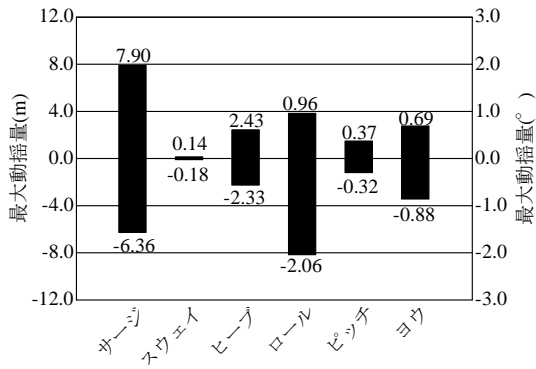


図-21 (1) 30,000DWT船舶の最大動揺量

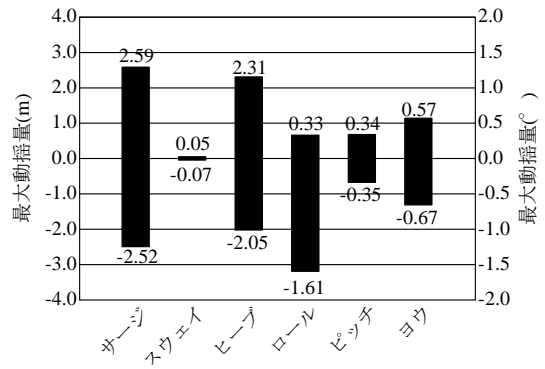


図-22 (1) 5,000DWT船舶の最大動揺量

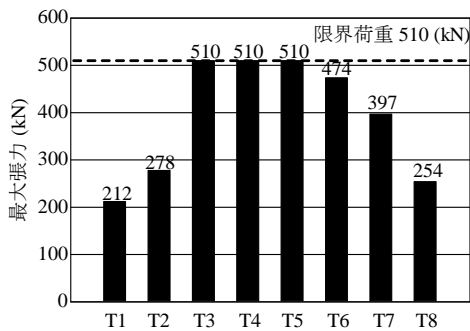


図-21 (2) 30,000DWT船舶の係留索の最大張力

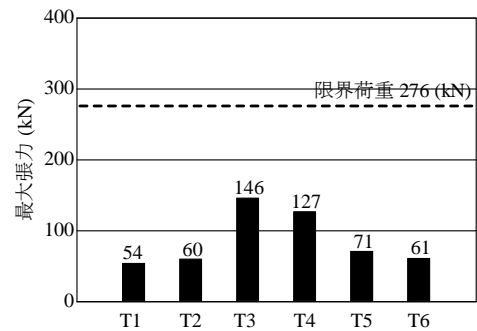


図-22 (2) 5,000DWT船舶の係留索の最大張力

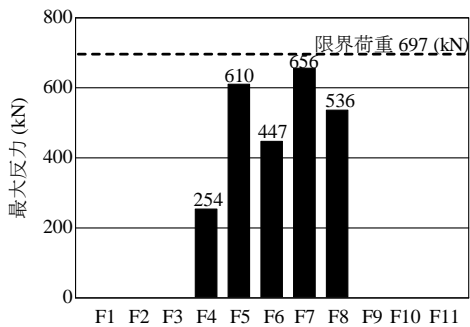


図-21 (3) 30,000DWT船舶の防舷材の最大反力

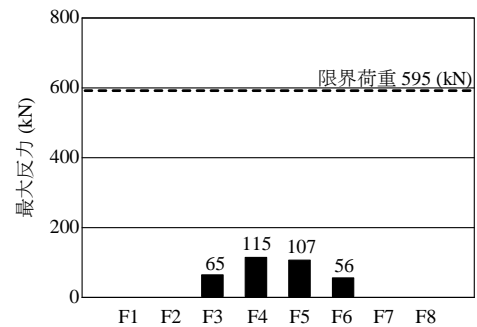


図-22 (3) 5,000DWT船舶の防舷材の最大反力

ヘッドライン (T1, T2) とスターンライン (T7, T8) の張力はプレストラインの張力ほど大きくはなく、全て限界荷重の3/4以下であった。防舷材反力については、防舷材F4～F7の4基に反力が発生し、最大反力は限界荷重の1/2以下となっている。これは、スウェーやヨウの動揺が小さく、船舶の平行サイドに配置された防舷材に船舶が強く衝突しなかったことが原因と考えられる。

### (3) 30,000DWT船舶

30,000DWT船舶についても、スウェーが最も小さくサージが最も大きいことが分かる。また、ピッチやヨウに比べてロールが大きいことが分かる。係留索張力はスプリングライン (T4, T5) とプレストライン (T3) の張力が限界荷重に達している。30,000DWT船舶の係留索の配置では、スプリングラインとプレストラインが短いため、これらの張力が大きくなったものと考えられる。また、

防舷材F4～F8に反力が発生しているが、この中でも防舷材F5, F7の反力が大きく、限界荷重の8割以上の反力となっている。防舷材F5, F7は船舶の中央に配置された防舷材F6に隣接しており、ヨウの影響で反力が大きくなったものと考えられる。

### (4) 5,000DWT船舶

5,000DWT船舶については、スウェーが非常に小さく、サージとヒープが同程度の動揺量であった。ロールは負の方向への動揺量が正の方向への動揺量より大きい。係留索の最大張力はスプリングライン (T3, T4) で限界荷重の約1/2、ヘッドライン (T1, T2) やスターンライン (T5, T6) で限界荷重の約1/5～1/4であり、全ての係留索張力は限界荷重よりも小さかった。防舷材反力は防舷材F3～F6に発生しているが、最大でも限界荷重の1/5程度であり、津波による影響が小さいことが分かる。



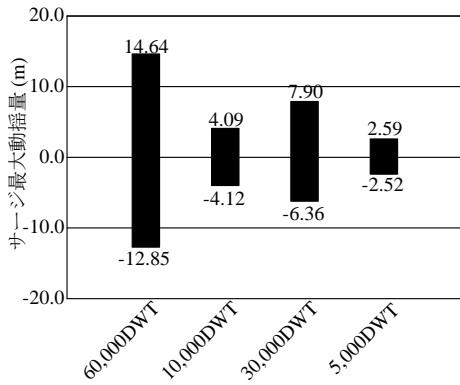


図-23(1) サージの最大動揺量の比較

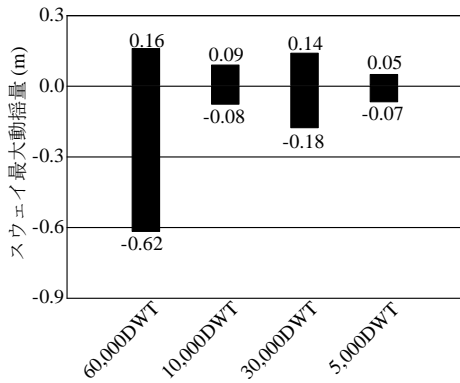


図-23(2) スウェイの最大動揺量の比較

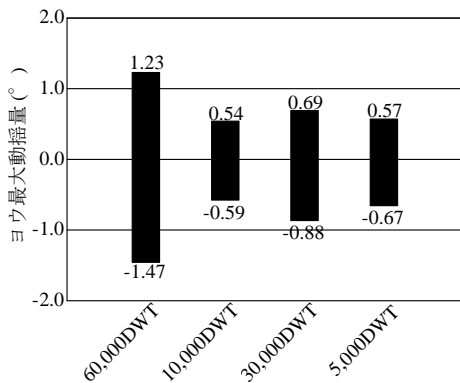


図-23(3) ヨウの最大動揺量の比較

## 6.4 各船型における津波影響の比較検討

### (1) 水平面内動揺量

各船型における船舶の水平面内動揺のサージ、スウェイ、ヨウの最大動揺量について比較した結果を図-23(1)～(3)に示す。サージについては、船型が大きいほど動揺量も大きくなっている。スウェイについては、60,000DWT船舶の動揺はやや大きく、10,000DWT船舶や5,000DWT船舶は0.1m以下であり、船型が大きいほどスウェイも大きくなる傾向がある。津波の入射方向は船首-船尾方向ではあるが、サージが大きくなったときに係留索張力が大きくなり、その反動でスウェイも大きくなったものと考え

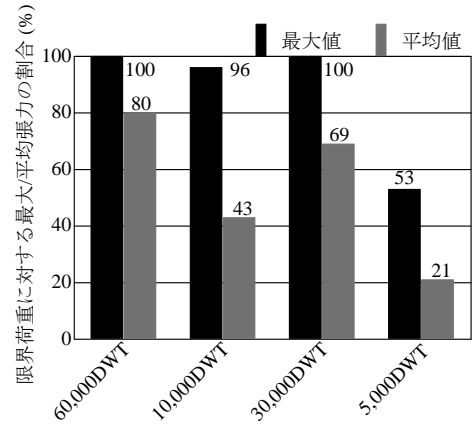


図-23(4) 係留索の最大張力・平均張力の比較

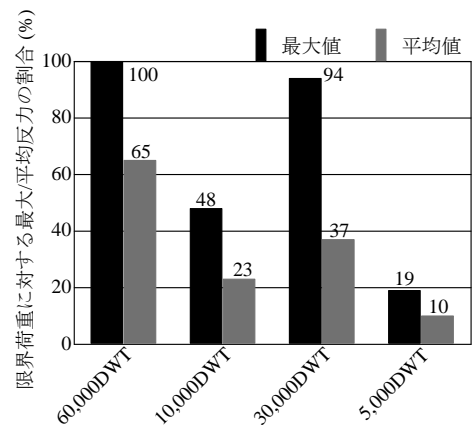


図-23(5) 防舷材の最大反力・平均反力の比較

られる。ヨウについては、60,000DWT船舶の動揺が最も大きく、他の3船舶については大きな差異はない。

これらの結果から、船型が大きいほど、津波が係留船舶の動揺に与える影響は大きくなると考えられる。

### (2) 係留索張力・防舷材反力

各船型における係留索の最大張力と防舷材の最大反力の限界荷重に対する割合について比較した結果を図-23(4)、(5)に示す。これらの図には、係留索の平均張力と防舷材の平均反力の限界荷重に対する割合も示している。60,000DWT船舶と30,000DWT船舶では係留索張力が限界荷重に達し、10,000DWT船舶も限界荷重に近い張力であった。また、5,000DWT船舶では最大張力が限界荷重の53%であることから、船型が大きいほど係留索張力も大きくなるのが分かる。この傾向は、係留索の平均張力についても同様であり、大きな船型の船舶ほどサージの動揺が大きくなるのが原因と考えられる。防舷材反力についても、船型が大きいほど限界荷重に対する最大反力の割合と平均反力の割合が大きくなる傾向がある。

これらの結果から、船型が大きいほど、津波が係留施設に与える影響は大きくなると考えられる。

## 7. 係留方法に対する津波影響の評価

係留船舶に津波外力が作用したときの係留船舶の挙動と係留施設へ及ぼす影響について検討する。ここでは、通常とは異なった4種類の係留方法を用いた係留船舶について船体動揺計算を行い、津波に対する船舶や係留施設の安全性における係留方法の影響を評価する。

### 7.1 係留方法の選定

表-5は採用した係留方法の検討ケースを示す。CASE1は6.で説明した通常の係留方法であり、CASE2～CASE5は通常とは異なった係留方法である。表には、それらの係留方法の内容と係留索の本数を示している。ここでは、6.で検討した4隻の貨物船の中で、船型が最も大きく津波の影響が最も大きい60,000DWT船舶と標準的な大きさの船型として10,000DWT船舶を対象船舶とした。なお、係留索の径はCASE1～CASE5で全て同じとしている。

CASE2では、係留索の種類をナイロンエイトロープより硬い特性のキョーレックスエイトロープに変更した。

表-5 係留方法の検討ケース

ケース	係留方法	係留索本数	
		60,000 DWT	10,000 DWT
CASE1	通常の係留方法	10	8
CASE2	高強度係留索の使用	10	8
CASE3	係留索の増し取り	14	12
CASE4	係留索の延長	10	8
CASE5	岸壁から離れた直柱の利用	12	10

表-6 係留索の諸元

貨物船	係留索	限界荷重 (kN)	初期張力 (kN)
60,000DWT	ナイロンエイト65mm	693	49
	キョーレックスエイト65mm	581	41
10,000DWT	ナイロンエイト55mm	510	36
	キョーレックスエイト55mm	421	29

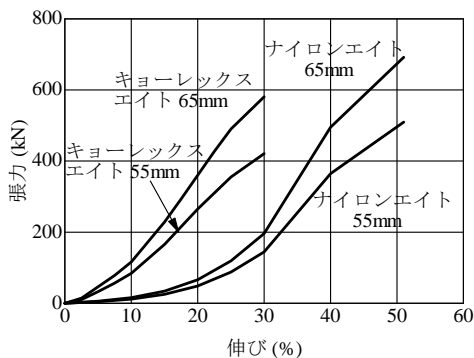


図-24 係留索の張力特性

これは、一般に係留船舶の長周期波対策として、伸び率の小さい硬い特性の係留索を使用することを津波に対して応用したものである。表-6、図-24に係留索の諸元とその張力特性を示す。CASE3では、ヘッドラインとスターンラインを各2本ずつ増し取りした。CASE4では、岸壁上の係留位置を変更して係留索をそれぞれ2～4倍程度長く取った配置にした。CASE5では、岸壁から離れた直柱にプレストラインを2本追加した。これらの5種類の係留方法において、CASE2、CASE3はCASE1と係留位置が完全に一致し、CASE5も直柱への係留索以外はCASE1と同じであり、CASE4のみ係留位置が異なる。図-25、図-26には、60,000DWT船舶と10,000DWT船舶についてCASE2～CASE5の方法による係留状況を示す。なお、CASE1の方法による船舶の係留状況は既に図-12に示している。

CASE1～CASE5の係留方法による60,000DWT船舶と10,000DWT船舶のサージとスウェイの固有周期を求めた結果を図-27、図-28に示す。これら2隻の船舶で係留方法を変更したときの固有周期の変化は同じ傾向を示している。CASE2ではCASE1より硬い特性の係留索を用いたため、サージとスウェイの固有周期がともに短くなった。CASE3ではサージ方向、CASE5ではスウェイ方向に係留索を増し取りしたため、それぞれの方向の固有周期が短

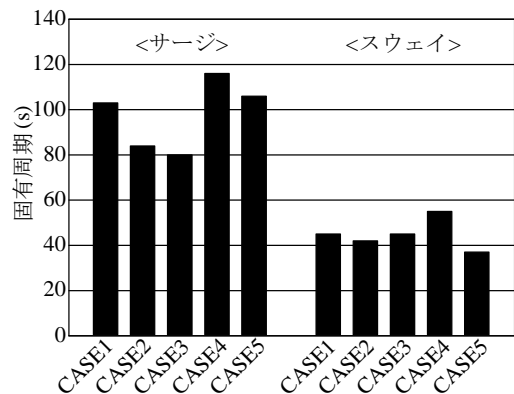


図-27 60,000DWT船舶の固有周期の比較

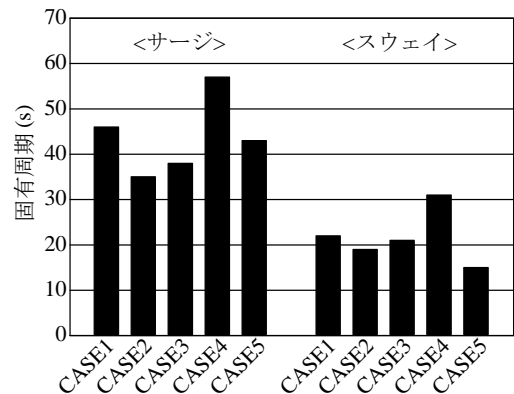


図-28 10,000DWT船舶の固有周期の比較

T1~T10の全ての索を  
キョーレックスエイトに  
変更

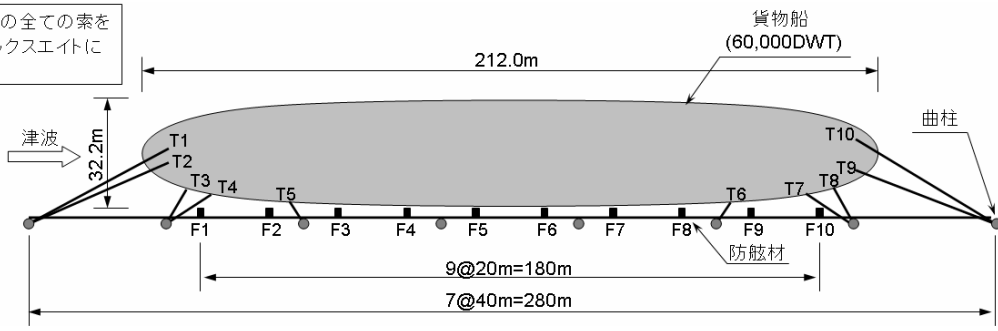


図-25 (1) 60,000DWT 船舶の係留状況 (CASE2)

船首・船尾索  
(T11, T12, T13, T14)  
を増取り

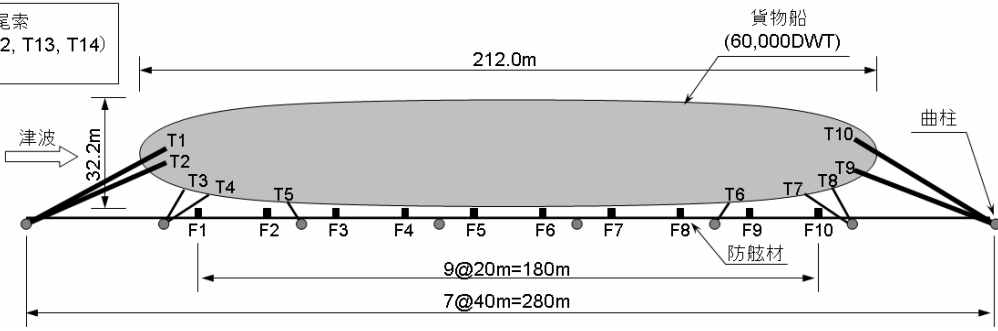


図-25 (2) 60,000DWT 船舶の係留状況 (CASE3)

T1~T10の全ての索が  
長くなるように係留箇所  
を変更

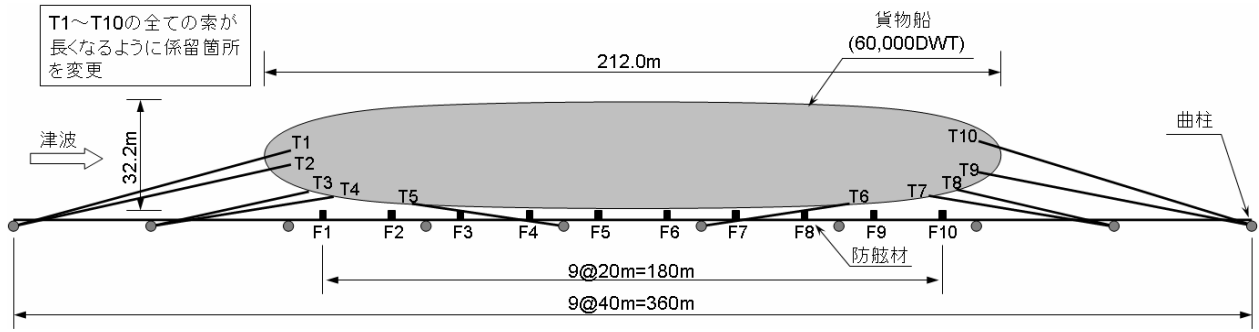


図-25 (3) 60,000DWT 船舶の係留状況 (CASE4)

岸壁から離れた直柱に  
プレストラインを追加  
(T11, T12)

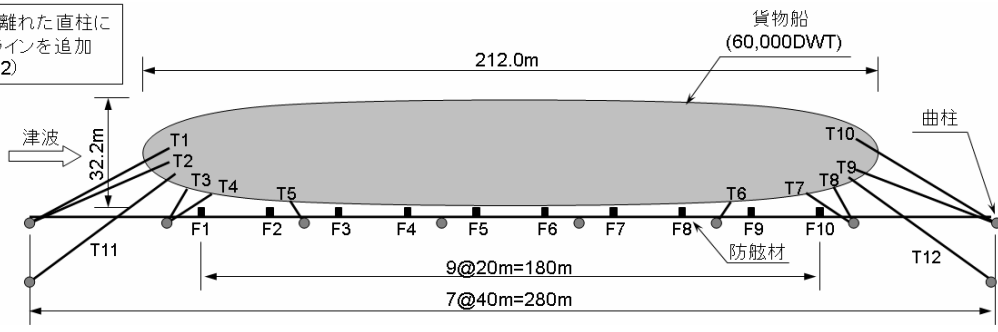


図-25 (4) 60,000DWT 船舶の係留状況 (CASE5)

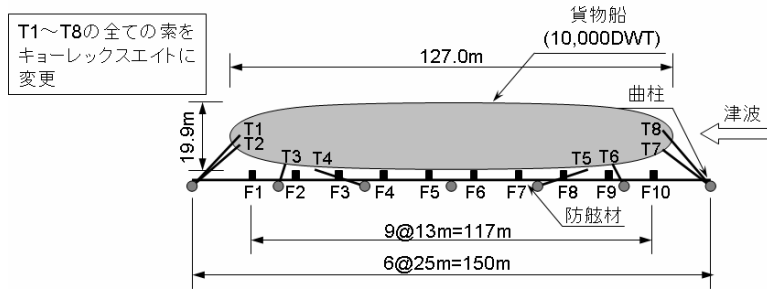


図-26 (1) 10,000DWT 船舶の係留状況 (CASE2)

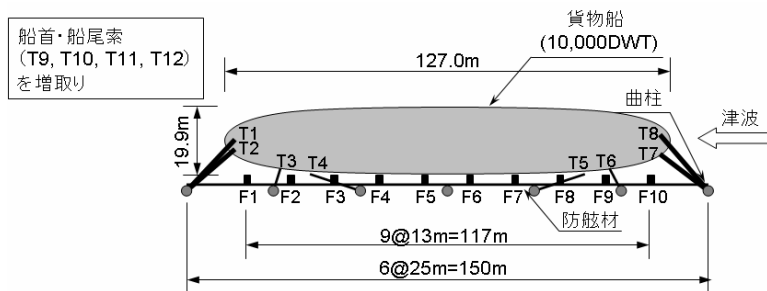


図-26 (2) 10,000DWT 船舶の係留状況 (CASE3)

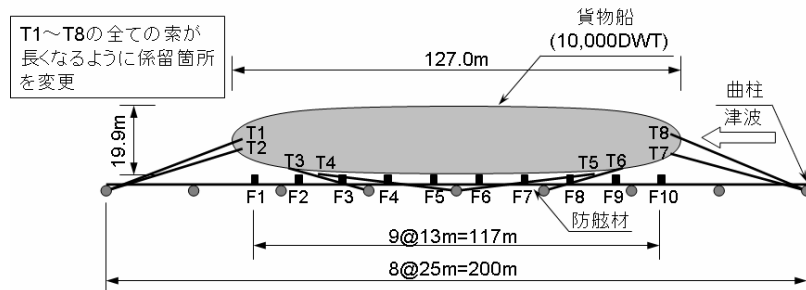


図-26 (3) 10,000DWT 船舶の係留状況 (CASE4)

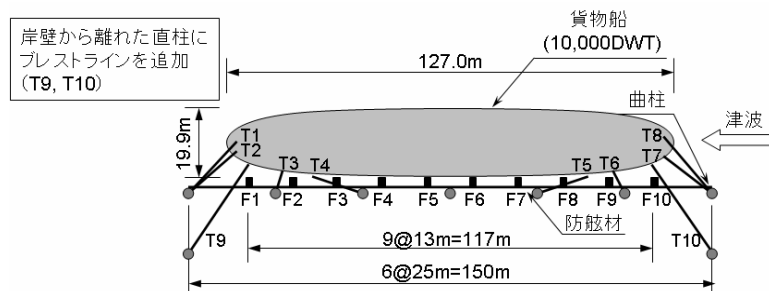


図-26 (4) 10,000DWT 船舶の係留状況 (CASE5)

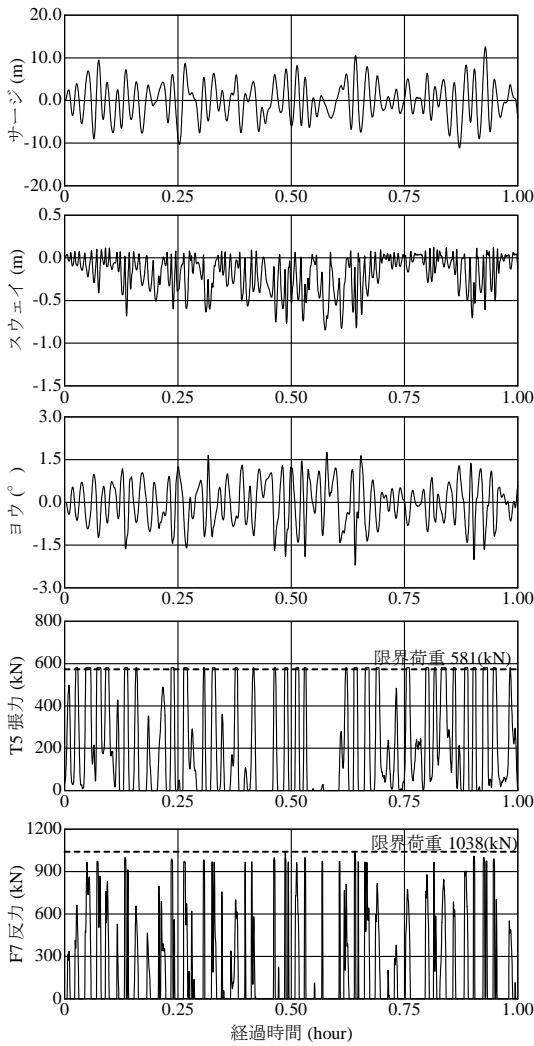


図-29 60,000DWT船舶の動揺時系列 (CASE2)

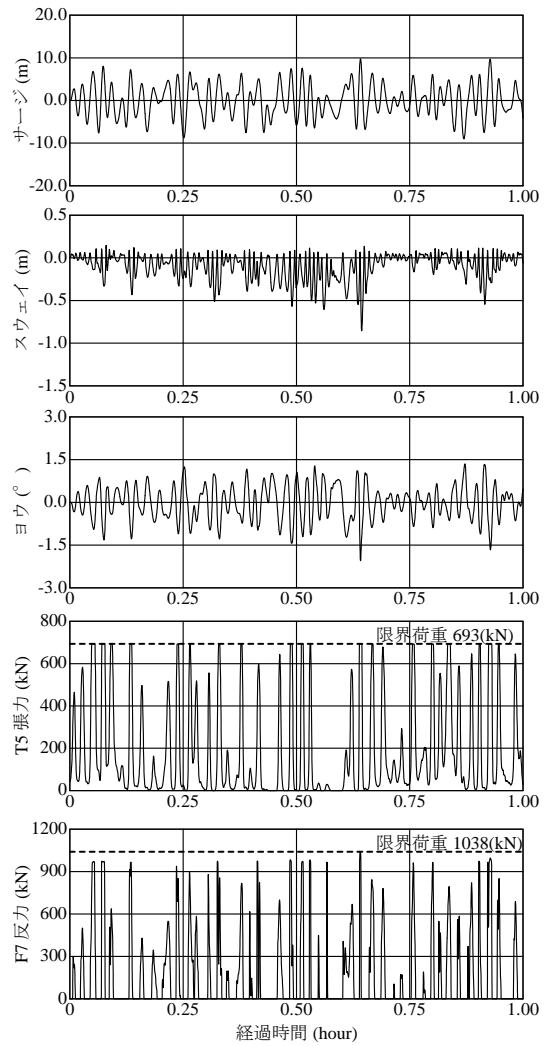


図-30 60,000DWT船舶の動揺時系列 (CASE3)

なくなった。一方、CASE4では係留索を長く取った配置にしたことで、スプリングラインやプレストラインも長くなったため、サージとスウェイの固有周期がともに長くなっている。

## 7.2 係留船舶の動揺時系列

### (1) 60,000DWT船舶 (CASE2~CASE5)

CASE2~CASE5の係留方法による60,000DWT船舶について1時間分の船体動揺計算を行った結果を図-29~32に示す。図では水平面内動揺のサージ、スウェイ、ヨウの3成分と、CASE1で係留索張力と防舷材反力が最大となった係留索T5と防舷材F7の結果を示す。

CASE2では硬い特性の係留索に変更したことにより、サージはCASE1とほとんど同じ位相のままであったが、その動揺量は小さくなった。逆に、スウェイやヨウはCASE1よりも動揺量が大きくなった。係留索を変更することでばね定数が大きくなっているため、サージの動揺

量は小さくなったが、サージの動揺が抑制されたため、逆にスウェイやヨウなどの他の動揺成分が大きくなったと考えられる。スウェイとヨウの動揺量は0.45~0.65時間でともに大きくなっており、2成分は連成していると言える。係留索T5については、サージの動揺量が5~6mより大きくなった時刻に張力が限界荷重に達しており、サージの影響が大きいと考えられる。CASE1とCASE2では張力の時系列の位相は同じであるが、CASE2では係留索の種類を変えたことで、限界荷重が小さくなっている。そのため、CASE1より係留索張力が限界荷重を超える回数が多くなった。防舷材F7についても、CASE1と同じようにサージの動揺量が大きくなった時刻の前後で反力が大きくなっている。ここで、CASE1より防舷材反力が大きくなっているのは、スウェイやヨウが大きくなったことが原因と考えられる。

CASE3ではヘッドラインとスターンラインの増し取りによって、サージはCASE1とほとんど同じ位相のまま

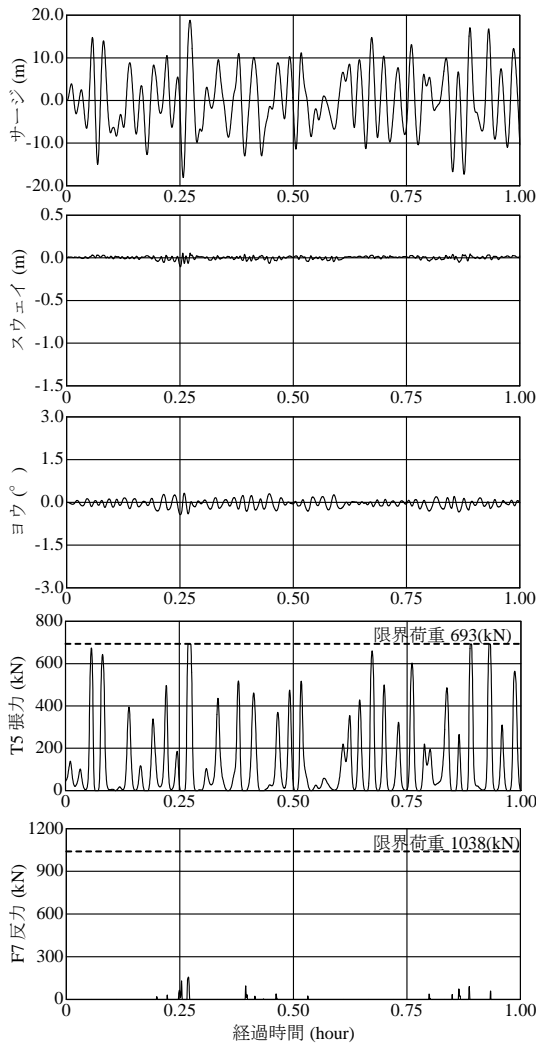


図-31 60,000DWT船舶の動揺時系列 (CASE4)

あったが、その動揺量は小さくなった。また、スウェイの動揺量はCASE1と同程度であるが、逆にヨウはCASE1よりも動揺量が大きくなった。この動揺3成分の傾向はCASE2とほとんど同じであり、ヘッドラインとスターンラインの増し取りによって岸壁法線方向のばね定数が大きくなったことが原因と考えられる。係留索T5については、CASE1とほとんど同じ位相で変化しているが、係留索張力が限界荷重に達する回数は減少している。係留索T5はスプリングラインであり、増し取りされた箇所ではないが、サージの動揺量が小さくなった影響であると考えられる。防舷材F7については、CASE1と時系列的な変化は多少異なるが、反力の大きさは同程度であり、増し取りによる効果はほとんどないと考えられる。

CASE4では係留索を長く取った配置に変更したことで、サージはCASE1よりも大きくなり、サージの動揺周期も長くなった。また、スウェイやヨウの動揺量はCASE1と比較して微小になった。これは係留索を長く取った配置

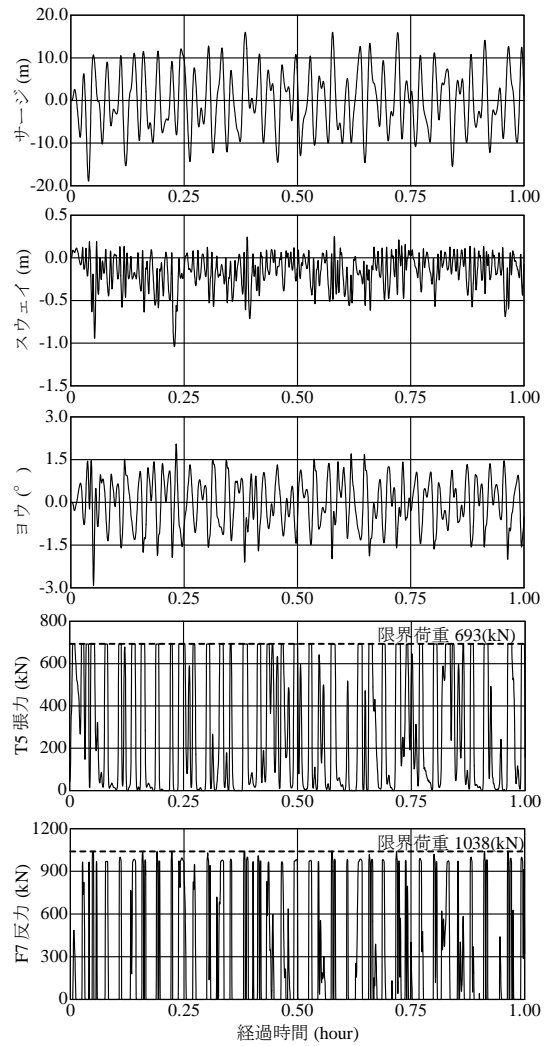


図-32 60,000DWT船舶の動揺時系列 (CASE5)

にしたときに、係留船舶のサージ方向の固有周期が長くなったことが原因と考えられる。係留索T5については、張力が3回限界荷重に達している。ただし、CASE1では係留索T5の張力が20回以上限界荷重に達しているの、CASE4の係留方法に変更することで、係留索張力に対して大きな効果があることが分かった。また、防舷材F7についても最大反力が大きく低減している。これは、係留索の配置を変更したことにより、スウェイやヨウが小さくなったことが原因と考えられる。

CASE5では岸壁から離れた直柱にプレストラインを追加しているが、CASE1と比べると、サージ、スウェイ、ヨウの動揺3成分、係留索T5の張力、防舷材F7の反力が大きくなった。動揺計算開始直後には、スウェイが約1.0m、ヨウも約3.0°と船舶の動揺が非常に大きくなっており、このときに係留索張力は限界荷重に達している。CASE5では岸壁から離れた直柱にプレストラインを増し取りすることで岸壁に対して斜め方向の係留力が大きくなるが、

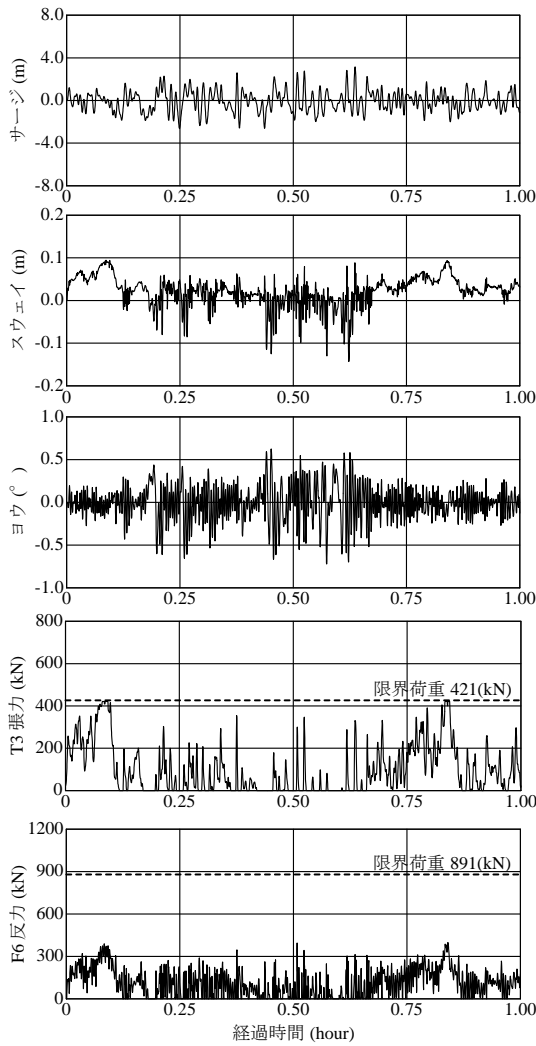


図-33 10,000DWT船舶の動揺時系列 (CASE2)

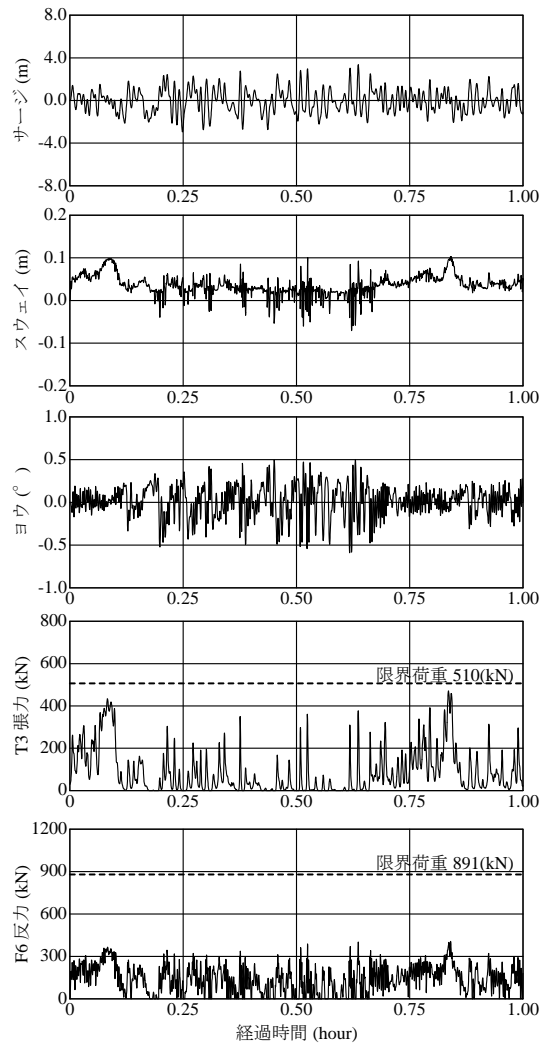


図-34 10,000DWT船舶の動揺時系列 (CASE3)

防舷材が大きく反発するためにスウェイやヨウが逆に大きくなり、その影響で係留索張力も大きくなったものと考えられる。

(2) 10,000DWT船舶 (CASE2~CASE5)

CASE2~CASE5の係留方法による10,000DWT船舶について1時間分の船体動揺計算を行った結果を図-33~36に示す。図では水平面内動揺のサージ、スウェイ、ヨウの動揺3成分と、CASE1で係留索張力と防舷材反力が最大となった係留索T3と防舷材F6の結果を示す。

CASE2では硬い特性の係留索に変更したことにより、サージの動揺量はCASE1よりも小さくなった。一方、スウェイやヨウの動揺量はサージよりは小さいが、CASE1よりもわずかに動揺量が大きくなった。これは、60,000DWT船舶のCASE2の結果と同じように、係留索のばね定数が変わったことにより、サージの動揺が抑制されたため、逆にスウェイやヨウなどの他の動揺成分が大きくなったからであると考えられる。係留索T3について

は、係留索の種類を変更したために限界荷重が小さくなり、張力が限界荷重に達している。しかし、全体的な係留索張力の時系列を見ると、CASE1の張力よりも低減している。これは、係留索の変更によって係留船舶の固有周期が短くなり、津波の卓越周期との差が大きくなったことが原因と考えられる。係留索T3は、スウェイの動揺が大きくなる動揺計算開始から0.10時間、0.85時間で張力が大きくなっており、スウェイが大きく影響していると考えられる。防舷材F6については、動揺計算開始から0.10時間、0.85時間でCASE1よりもスウェイが大きいため、CASE1よりも反力がやや大きくなった。

CASE3ではヘッドラインとスターンラインの増し取りによって岸壁法線方向の係留力が大きくなり、CASE1よりもサージの動揺量が小さくなった。一方、スウェイやヨウの動揺量はCASE1とほぼ同程度である。係留索T3については、CASE1とほとんど同じ位相ではあるが、張力は少し低減している。これは、ヘッドラインとスターン

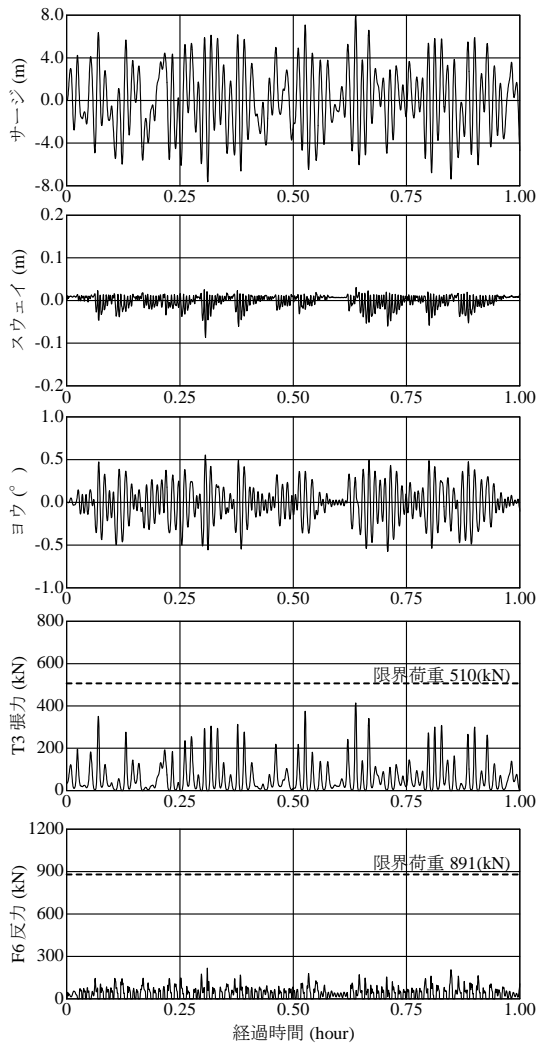


図-35 10,000DWT船舶の動揺時系列 (CASE4)

ラインの増し取りによってサージの動揺が小さくなった影響によるものと考えられる。防舷材F6については、スウェイの動揺量がCASE1よりもやや大きくなった影響により、防舷材反力も大きくなっている。

CASE4では係留索を長く取った配置に変更したことで、CASE1よりもサージの動揺量が大きくなった。スウェイについては、岸壁から離れる方向の動揺量はCASE1とあまり変わらないが、岸壁方向への動揺量はCASE1よりも小さくなった。これは、係留索を長くしたことにより、岸壁方向の係留力が小さくなったことが原因であると考えられる。ヨウの動揺量はCASE1と同程度であるが、その動揺周期は長くなっている。係留索T3はプレストラインではあるが、CASE4では岸壁法線方向に近い角度で係留索が張られているので、張力の時系列は船舶の主要な動揺であるサージの位相とほぼ一致している。CASE4では係留索を長く取ることによってある程度の水平面内動揺を許容させており、結果的にCASE1よりも係留索T3の

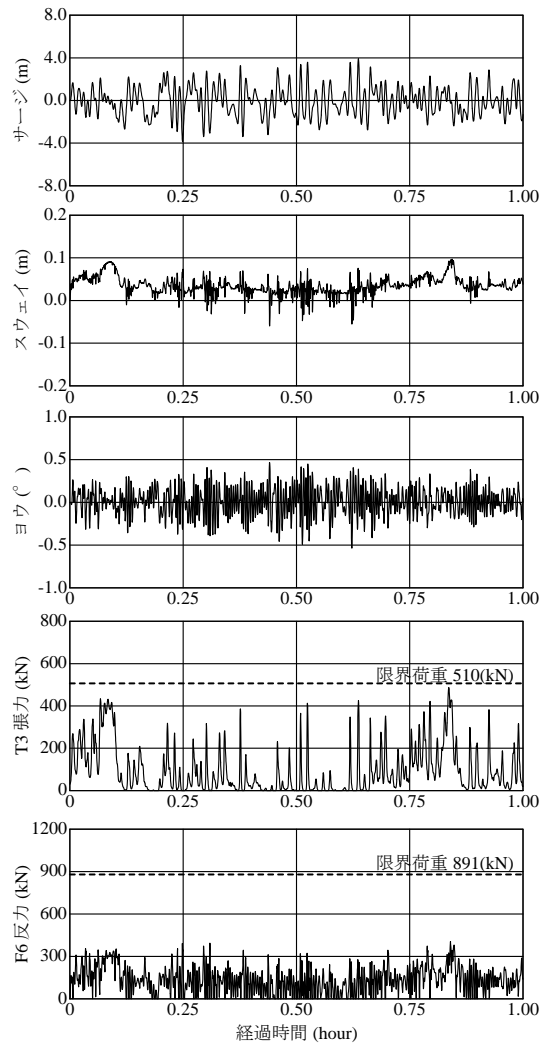


図-36 10,000DWT船舶の動揺時系列 (CASE5)

最大張力を低減できていると考えられる。防舷材F6の反力についても、CASE1より大幅に低減している。これは、岸壁方向の係留力がCASE1よりも小さくなったことによる影響と考えられる。

CASE5ではサージはCASE1とほとんど同じ動揺量である。スウェイについては、岸壁から離れた直柱にプレストラインを追加したことで岸壁に対して斜め方向の係留力が強くなったため、岸壁方向の動揺量はCASE1よりもやや大きくなったが、逆に岸壁から離れる方向の動揺量は小さくなった。一方、ヨウは、わずかではあるがCASE1よりも動揺量が小さくなった。CASE5とCASE1の動揺時系列はよく似ているため、係留索T3の張力や防舷材F6の反力の時系列もほとんど同じような傾向となっている。

### 7.3 係留船舶の最大動揺量と係留施設への最大力

#### (1) 60,000DWT船舶 (CASE2~CASE5)

津波が船舶や係留施設へ及ぼす影響を係留方法ごとに



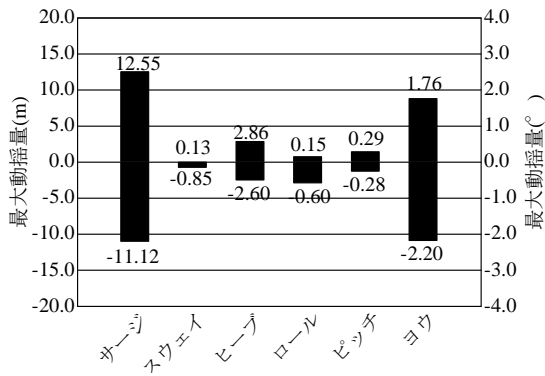


図-37(1) 60,000DWT船舶の最大動揺量 (CASE2)

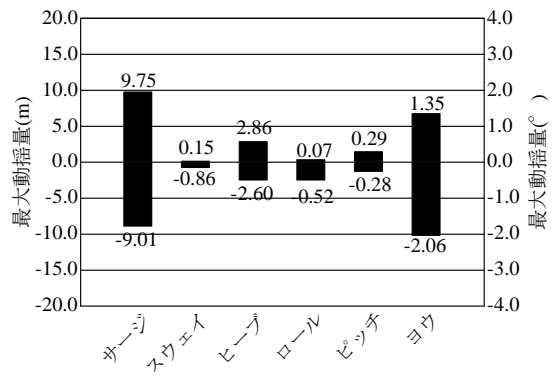


図-38(1) 60,000DWT船舶の最大動揺量 (CASE3)

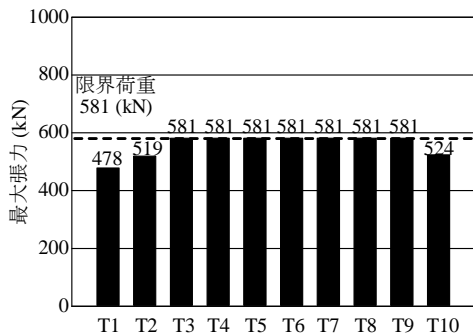


図-37(2) 60,000DWT船舶の係留索の最大張力 (CASE2)

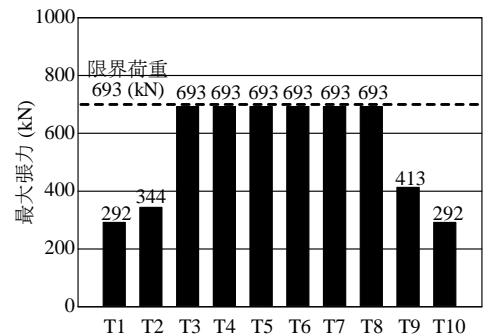


図-38(2) 60,000DWT船舶の係留索の最大張力 (CASE3)

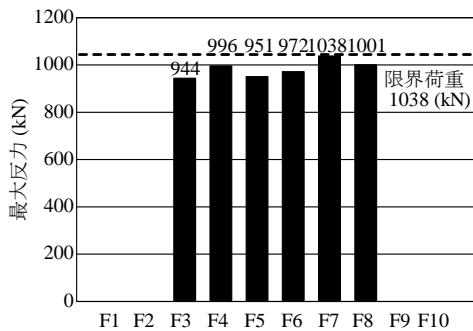


図-37(3) 60,000DWT船舶の防舷材の最大反力 (CASE2)

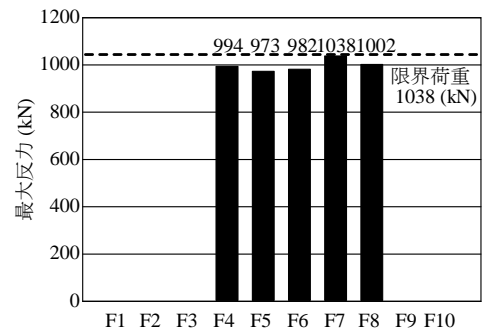


図-38(3) 60,000DWT船舶の防舷材の最大反力 (CASE3)

検討するため、60,000DWT船舶の動揺6成分の最大動揺量、個々の係留索の最大張力、個々の防舷材の最大反力について比較した結果を図-37~40に示す。

CASE2ではスウェイ、ロール、ピッチなどは動揺量が小さく、サージとヨウの動揺量が大きいことが分かる。また、図-19に示したCASE1と比較すると、サージは小さくなり、逆にヨウは大きくなっている。係留索は10本中7本の張力が限界荷重に達したが、限界荷重に達していないヘッドライン (T1, T2) とスターンライン (T9, T10) の3本はCASE1よりも張力が多少低減している。防舷材反力については、反力が限界荷重に達した防舷材の数はCASE1と同じであるが、CASE1よりもヨウの動揺が大きくなったため、反力が発生した防舷材の数はCASE1より

も1基多くなっている。

CASE3ではサージとヨウの動揺量が大きくなっており、CASE2と同じ傾向を示している。係留索張力については、増し取りしたヘッドライン (T1, T2) とスターンライン (T9, T10) の張力は低減しているが、他の係留索張力は限界荷重に達している。また、防舷材反力については、1基が限界荷重に達しており、CASE1と同じような結果となっている。

CASE4ではCASE1よりもヨウの動揺量が小さくなったため、サージが主要な動揺となっている。係留索は10本中5本の張力が限界荷重に達したが、限界荷重に達していない係留索の本数はCASE4が最も多かったため、CASE4の係留索の配置が最も効果的であると考えられる。防舷

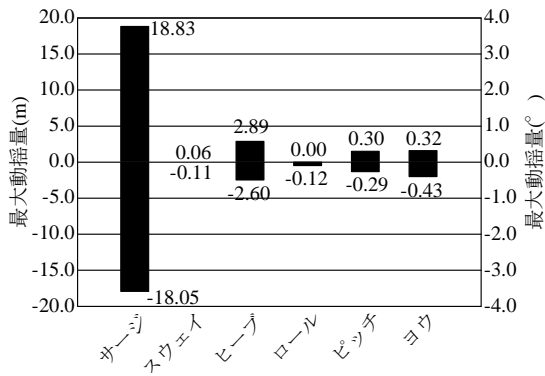


図-39(1) 60,000DWT船舶の最大動揺量 (CASE4)

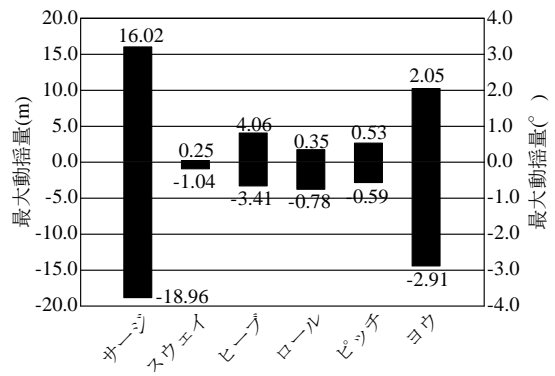


図-40(1) 60,000DWT船舶の最大動揺量 (CASE5)

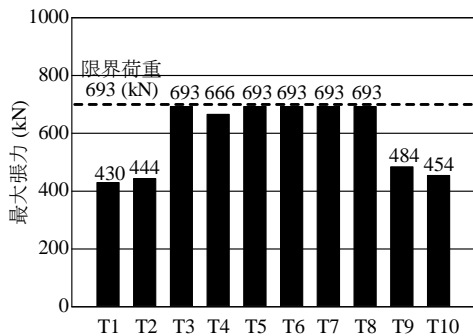


図-39(2) 60,000DWT船舶の係留索の最大張力 (CASE4)

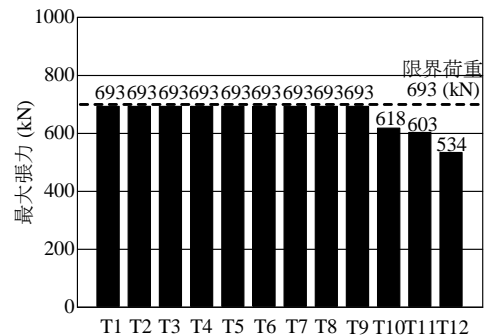


図-40(2) 60,000DWT船舶の係留索の最大張力 (CASE5)

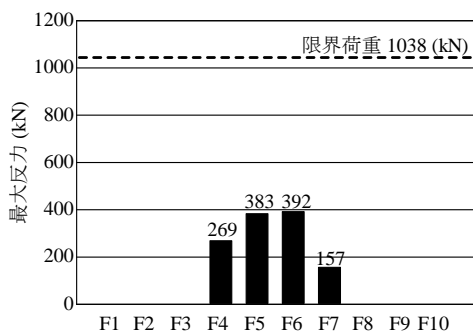


図-39(3) 60,000DWT船舶の防舷材の最大反力 (CASE4)

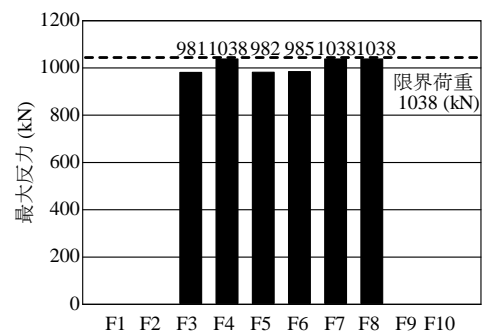


図-40(3) 60,000DWT船舶の防舷材の最大反力 (CASE5)

材反力についても、全ての反力が限界荷重に達していない唯一のケースであり、反力が発生した防舷材の数もCASE1より1基少なくなっている。

CASE5ではCASE1よりサージとヨウの動揺量が非常に大きくなった。また、CASE1では限界荷重に達していなかったヘッドライン (T1, T2) の張力が限界荷重に達している。防舷材反力も、CASE1～CASE5の中で最も多い3基が限界荷重に達している。

(2) 10,000DWT船舶 (CASE2～CASE5)

津波が船舶や係留施設へ及ぼす影響を係留方法ごとに検討するため、10,000DWT船舶の動揺6成分の最大動揺量、個々の係留索の最大張力、個々の防舷材の最大反力について比較した結果を図-41～44に示す。

CASE2ではサージとヒープの動揺量が大きいが、硬い特性の係留索に変更したことで、図-20に示したCASE1よりもサージは小さくなっている。一方、ヒープ、ロール、ピッチの動揺量はCASE1とほとんど同じであるが、スウェイやヨウは動揺量が大きくなっている。係留索張力については、2本のプレストライン (T3, T6) の張力が限界荷重に達している。これは、係留索の種類を変更したことにより限界荷重が小さくなったことと、プレストラインの長さが短いことが原因と考えられる。ただし、限界荷重に達していない係留索の6本のうち5本はCASE1よりも張力が低減している。また、防舷材反力についてはCASE1と大きな相違がないことが分かる。

CASE3ではサージとヒープの動揺量が大きいが、係留

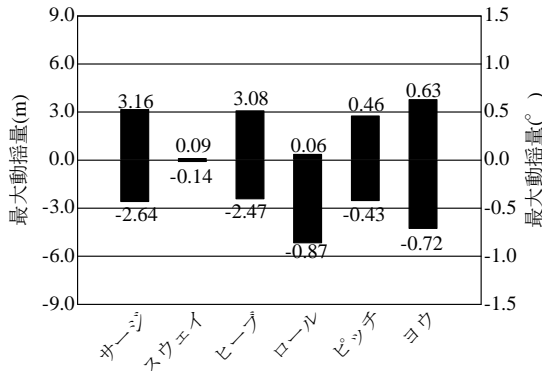


図-41 (1) 10,000DWT船舶の最大動揺量 (CASE2)

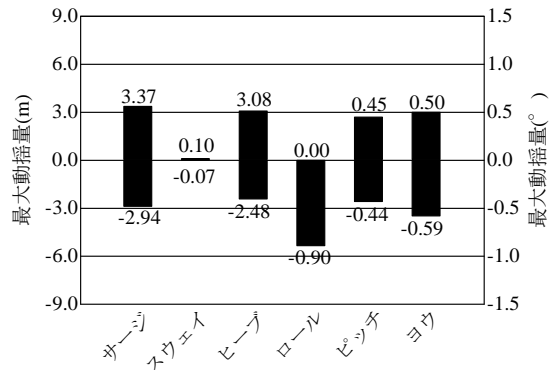


図-42 (1) 10,000DWT船舶の最大動揺量 (CASE3)

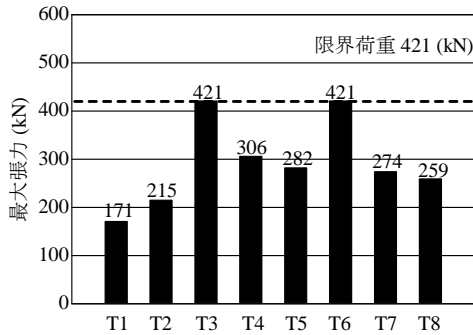


図-41 (2) 10,000DWT船舶の係留索の最大張力 (CASE2)

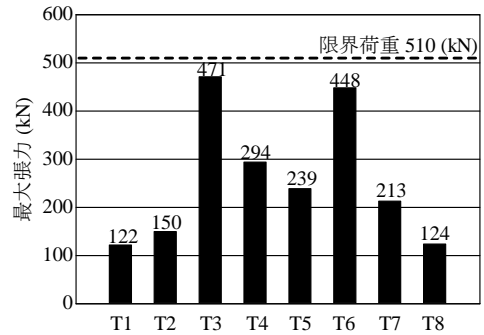


図-42 (2) 10,000DWT船舶の係留索の最大張力 (CASE3)

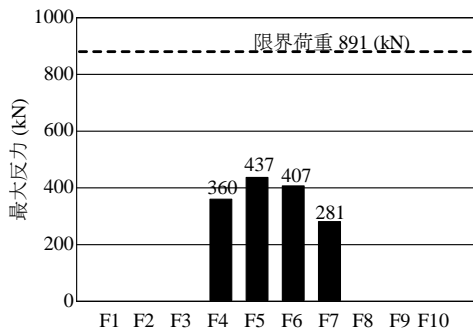


図-41 (3) 10,000DWT船舶の防舷材の最大反力 (CASE2)

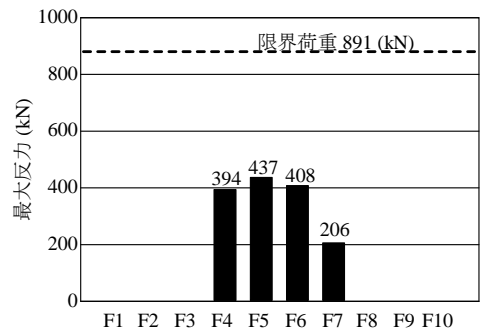


図-42 (3) 10,000DWT船舶の防舷材の最大反力 (CASE3)

索の増し取りによってCASE1よりもサージは小さくなっている。係留索張力については、増し取りしたヘッドライン (T1, T2) とスターンライン (T7, T8) の張力が大幅に低減していることが分かる。また、サージの動揺が小さくなった影響により、その他の係留索の張力もCASE1より小さくなっている。一方で、防舷材反力については、CASE1と大きな相違がないことが分かる。

CASE4ではサージとヒープの動揺量が大きい、CASE1と比較するとサージが非常に大きくなっている。一方、スウェイとロールはCASE1でも動揺量は小さかったが、CASE4ではさらに小さくなっている。係留索張力については、ヘッドライン (T1) とスターンライン (T8) の張力がCASE1よりも大きくなっているが、その他の係

留索では張力が低減している。これは、CASE4では短い係留索がないために、全ての係留索にある程度均等に張力が配分されることになり、張力の増加を抑制することができているからである。また、防舷材反力についても、その最大反力がCASE1の1/2程度に低減している。

CASE5では動揺6成分の全ての動揺量がCASE1とほとんど同じになっている。CASE5では岸壁から離れた直柱にプレストラインを追加しているが、サージの動揺量はあまり小さくなっていないため、全ての係留索張力が多少低減しているのみとなっている。また、防舷材反力についても、CASE1と大きな相違はないことが分かる。

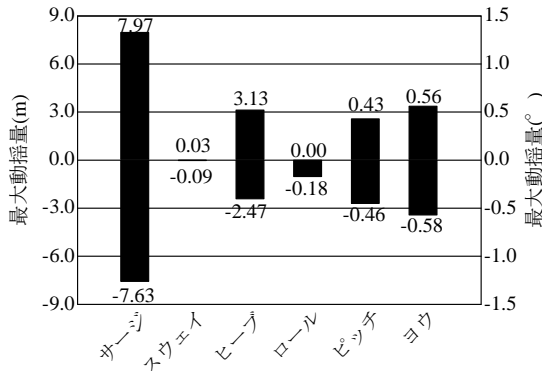


図-43 (1) 10,000DWT船舶の最大動揺量 (CASE4)

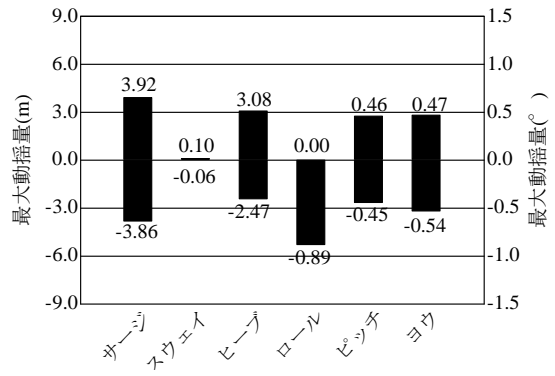


図-44 (1) 10,000DWT船舶の最大動揺量 (CASE5)

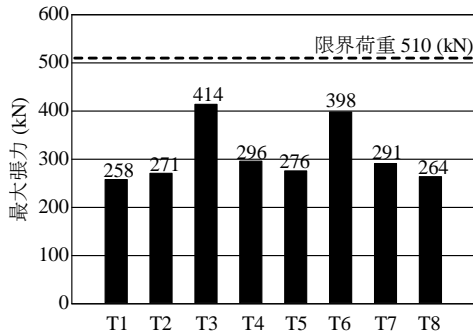


図-43 (2) 10,000DWT船舶の係留索の最大張力 (CASE4)

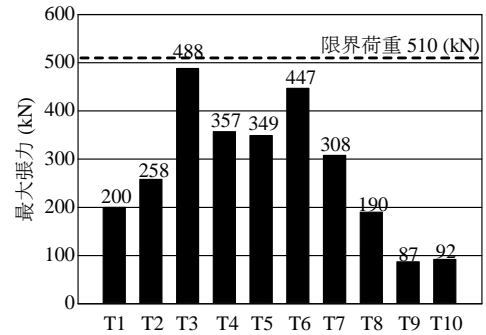


図-44 (2) 10,000DWT船舶の係留索の最大張力 (CASE5)

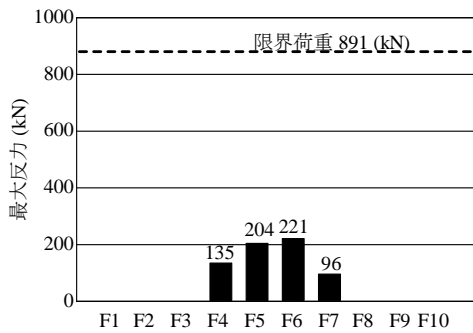


図-43 (3) 10,000DWT船舶の防舷材の最大反力 (CASE4)

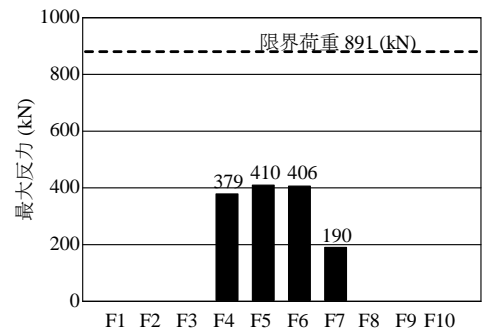


図-44 (3) 10,000DWT船舶の防舷材の最大反力 (CASE5)

## 7.4 各係留方法における津波影響の比較検討

### (1) 60,000DWT船舶 (CASE1~CASE5)

各係留方法における60,000DWT船舶の動揺量, 係留索張力, 防舷材反力について比較した結果を図-45に示す. ここでは, 船舶の水平面内動揺のサージ, スウェイ, ヨウの最大動揺量と, 係留索の最大張力・平均張力と防舷材の最大反力・平均反力の限界荷重に対する割合を示している.

サージについては, CASE2, CASE3は係留力を強化してサージの動揺量を低減させる係留方法であり, その効果によりCASE1よりもサージが全振幅でそれぞれ約15%, 約30%低減している. 逆に, CASE4は船舶の動揺を許容する係留方法であるため, サージは約35%増加している. ま

た, CASE5では岸壁から離れた直柱にプレストラインを追加しているが, サージの低減効果はなく, 逆にCASE1よりもサージは大きくなっている.

スウェイは, 津波の入射方向が船首-船尾方向であったためにいずれの係留方法でもそれほど大きい動揺量ではない. ただし, 岸壁から離れる方向の動揺量は係留方法によって大きな差異がある. CASE2, CASE3では岸壁から離れる方向の動揺量がCASE1よりも約40%大きくなったが, CASE4では最も小さく, CASE1より約80%も低減している. CASE4では, CASE1と比べて岸壁方向の係留力が弱く防舷材の反発が小さいため, 動揺量が小さくなったものと考えられる. 一方, CASE5ではスウェイがCASE1よりも大きくなっている. これは, 岸壁から離れ

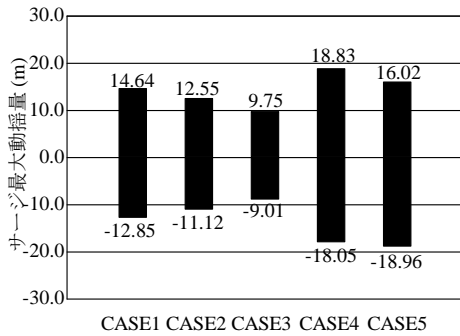


図-45 (1) 60,000DWT船舶のサージの最大動揺量の比較

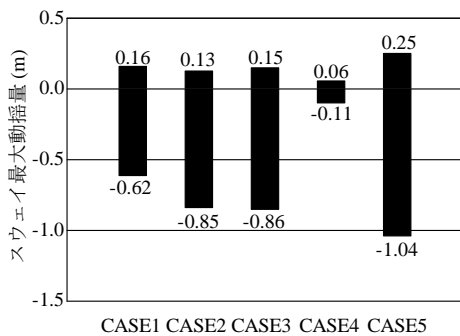


図-45 (2) 60,000DWT船舶のスウェイの最大動揺量の比較

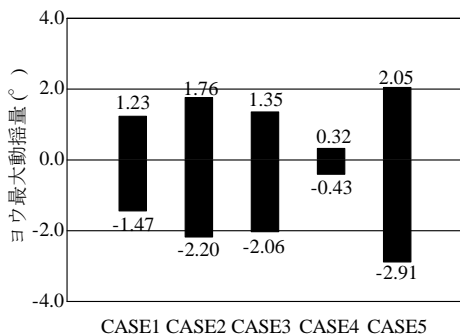


図-45 (3) 60,000DWT船舶のヨウの最大動揺量の比較

た直柱にプレストラインを追加したことによって岸壁に対して斜め方向への係留力が強くなり、防舷材からの反発が大きくなったことが原因と考えられる。

ヨウは、CASE2、CASE3ではCASE1より大きく、全振幅でそれぞれ約45%、約25%増加している。これはスウェイと同じ傾向であり、岸壁方向の係留力の影響によるものと考えられる。CASE4は最も動揺量が小さく、CASE1より約70%も低減している。CASE5では、スウェイと同様な理由により、ヨウが大きくなったものと考えられる。

係留索の最大張力については、全ての係留方法で張力が限界荷重に達しているために比較できない。一方、係留索の平均張力については、CASE2、CASE3、CASE5では係留方法の変更による効果はほとんど見られないが、CASE4では25%も低減しており、CASE4は津波に対する

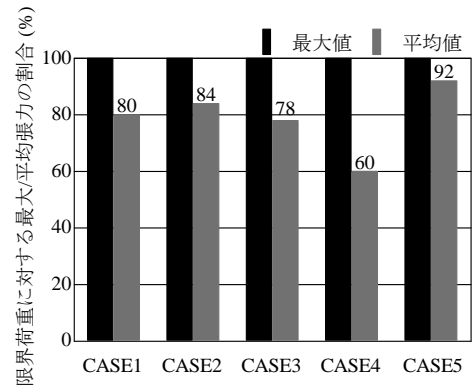


図-45 (4) 60,000DWT船舶の係留索の最大張力・平均張力の比較

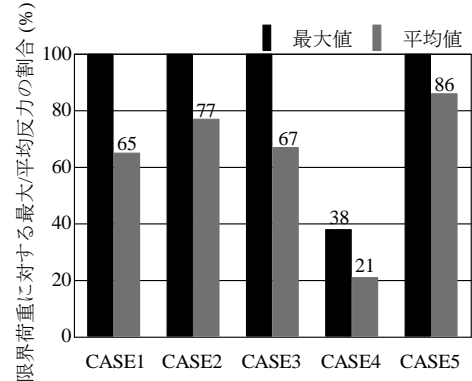


図-45 (5) 60,000DWT船舶の防舷材の最大反力・平均反力の比較

係留方法として最も効果的であると考えられる。係留船舶の係留索張力は、係留索の配置状況などで変化するため、船型ごと係留方法ごとに船体動揺計算を行う必要がある。本研究では、CASE4を採用しても係留索の最大張力を限界荷重以下にすることはできなかったが、CASE4では最大張力の発生回数や平均張力をCASE1に比べて顕著に低減できることから、津波対策として詳細に検討していく価値があると考えられる。

防舷材の最大反力については、CASE4以外は反力が限界荷重に達している。これは、CASE4では防舷材反力に影響の大きいスウェイやヨウの動揺量が最も小さいことが原因と考えられる。また、防舷材の平均反力については、CASE4以外はCASE1よりも大きい、CASE4では約65%も低減しており、CASE4は防舷材への影響が小さい係留方法と言える。

#### (2) 10,000DWT船舶 (CASE1~CASE5)

各係留方法における10,000DWT船舶の動揺量、係留索張力、防舷材反力について比較した結果を図-46に示す。ここでは、船舶の水平面内動揺のサージ、スウェイ、ヨウの最大動揺量と、係留索の最大張力・平均張力と防舷

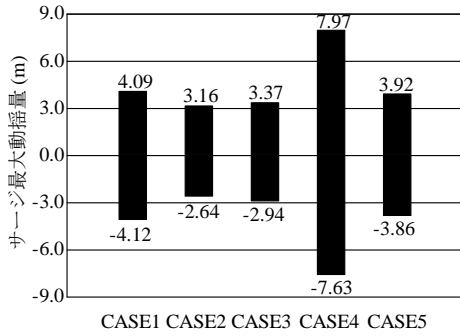


図-46 (1) 10,000DWT船舶のサージの最大動揺量の比較

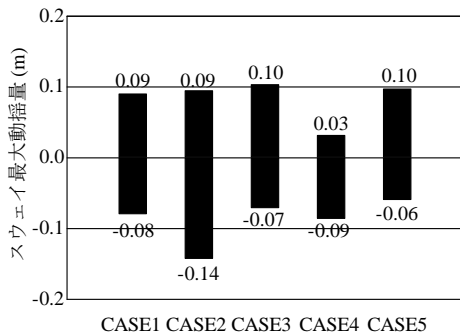


図-46 (2) 10,000DWT船舶のスウェイの最大動揺量の比較

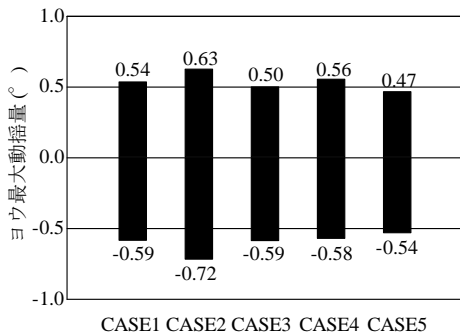


図-46 (3) 10,000DWT船舶のヨウの最大動揺量の比較

材の最大反力・平均反力の限界荷重に対する割合を示している。

サージは、CASE1と比較してCASE2、CASE3では全振幅でそれぞれ約30%、約25%低減しており、これらはサージに対して低減効果のある係留方法であることが分かる。逆に、CASE4は船舶の動揺を許容する係留方法であるため、サージは約90%も増加している。CASE5では岸壁から離れた直柱にプレストラインを追加しているが、サージの動揺量はCASE1とほとんど同じになっている。

スウェイは、全ての係留方法について動揺量が微小であり、各係留方法の相違は小さいと言える。しかしながら、CASE2では硬い特性の係留索を用いているため、CASE1よりも岸壁方向の係留力が強く、防舷材からの反発で岸壁から離れる方向の動揺量が少し大きくなっている。

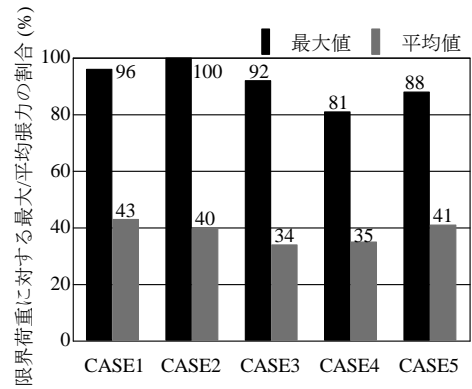


図-46 (4) 10,000DWT船舶の係留索の最大張力・平均張力の比較

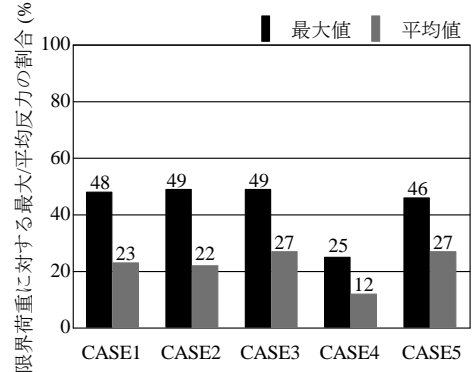


図-46 (5) 10,000DWT船舶の防舷材の最大反力・平均反力の比較

る。また、CASE4では岸壁方向の係留力が弱いことから、岸壁方向への動揺量が小さくなっている。

ヨウについても、係留方法による動揺量の差異は小さいが、CASE2のみ動揺量が少し大きくなっている。CASE2では、スウェイと同様な理由により、ヨウが少し大きくなったものと考えられる。

係留索の最大張力については、限界荷重が小さい係留索を用いているCASE2では、張力が限界荷重に達している。CASE3とCASE5では、CASE1より多少最大張力が小さくなっているが、係留方法の変更による効果はほとんどない。一方、係留索を長く取った係留方法であるCASE4では、係留索張力が約15%低減している。また、係留索の平均張力については、CASE2とCASE5は、CASE1とほとんど張力が変わらないが、CASE3とCASE4では、CASE1よりも張力が約20%低減している。これらのことから、CASE4が最も効果的な係留方法であると考えられる。

防舷材反力については、スウェイの動揺量が小さいために、限界荷重に対する防舷材の最大反力の割合は全体的に小さい。ただし、CASE2、CASE3、CASE5の防舷材の最大反力はCASE1とほとんど同じであるが、CASE4で

はスウェイの動揺量が最も小さくなったことにより、CASE1よりも最大反力が約1/2にまで低減している。また、防舷材の平均反力については、CASE3、CASE5ではCASE1よりも大きくなっているが、CASE4ではCASE1の1/2程度に低減している。したがって、CASE4の係留方法は防舷材への影響が最も小さいと考えられる。

### (3) まとめ

以上のことから、CASE1～CASE5の係留方法の中では、係留施設への影響が最も小さいことから、CASE4が最も効果的な係留方法であると考えられる。津波のような長周期の波に対して、CASE2やCASE3の係留方法のように係留船舶の固有周期を短くする方法は、係留船舶の動揺を抑制するためにはある程度効果的ではあるが、係留施設への影響を低減することは難しい。また、CASE5のように岸壁から離れた直柱にプレストラインを追加する係留方法は、船首-船尾方向に作用する津波に対する効果はとても低い。一方、CASE4は、他のケースと比べて係留方法が大きく異なっているのが特徴である。CASE4では、スプリングラインやプレストラインのように一般的に長く取る係留索を長く取った係留方法を採用しており、係留船舶の動揺を許容することにはなるが、全ての係留索にある程度均等に張力が配分されることになる。このため、津波に対する係留船舶のサージの動揺は大きくなるものの、逆に係留索張力や防舷材反力は小さくなり、係留施設への影響が最も低減できる係留方法であると考えられる。

## 8. 結論

本研究では、中央防災会議（2003）で検討された想定東海地震津波に対して、清水港を対象として津波数値計算と船体動揺計算を行うことにより、津波が係留船舶や係留施設へ与える影響を船型や係留方法に対して評価した。

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- ①東海地震による津波に対して清水港の4箇所のバースを対象とした場合、津波は主にバースに沿って流れ、津波の影響は係留船舶のサージに対して大きくなる。
- ②一般に係留船舶の船型が大きいほどその固有周期は長くなるため、津波周期と一致しやすくなり、船舶の動揺も大きくなる。このため、船型の大きい船舶が係留施設へ与える影響は大きくなる。
- ③通常用いられている標準的な係留方法で船舶を係留した場合、津波によって、ヘッドラインやスターンラインに比べてプレストラインやスプリングラインといっ

た短い係留索の張力が大きくなる傾向がある。

- ④全ての係留索を通常よりもそれぞれ2～4倍程度長く取った場合、係留船舶の水平面内動揺は大きくなるが、全ての係留索にある程度均等に張力がかかるようになる。
- ⑤本研究で検討した5種類の係留方法の中では、係留索を長く取る方法が津波に対して効果的な係留方法であると考えられる。

## 9. あとがき

本研究は、津波数値計算と船体動揺計算を用いて、港湾内の係留船舶や係留施設への津波の影響について評価を行ったものである。しかしながら、想定東海地震津波に対して清水港を対象としているように、ある特定の津波や港湾の条件のもとで検討した内容であることから、津波の規模や港湾の位置などが異なる場合については、本研究の成果をそのまま適用することは難しいと考えている。そのため、例えば、想定東南海地震津波あるいは想定南海地震津波に対してこれらの津波の影響を大きく受けると予想される港湾を対象とし、津波が係留船舶や係留施設へ与える影響について検討を進めていく予定である。今後、このようないくつかの港湾における検討結果を相互比較することにより、津波が港湾内の係留船舶や係留施設に与える影響についての一般的な評価を提示することができると考えている。

(2008年12月12日受付)

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、当所地盤・構造部地震防災研究領域耐震構造研究チームの鈴木貴志研究員には、海洋・水工部海洋研究領域海洋研究チームの前組織である地盤・構造部海洋構造研究室在席時に、船体動揺計算における船舶の諸元や係留方法等の条件設定に関して多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 池谷毅, 朝倉良介, 藤井直樹, 大森政則, 武田智吉, 柳沢賢 (2005) : 浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.761-765.
- 上田茂 (1984) : 係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技研資料, No.504, pp.337-342.
- 沿岸技術研究センター (2004) : 港内長周期波影響評価マニュアル, pp.17-19.
- 大垣圭一, 今村文彦 (2004) : 現地データを利用した2003年十勝沖地震津波の数値解析と特性の把握, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.271-275.
- 河田恵昭, 新名恭仁, 原田賢治, 鈴木進吾 (2004) : 津波による船舶被害の評価手法の提案, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.316-320.
- 北島昭一, 阪本浩, 岸正平, 中野拓治, 柿崎秀作 (1967) : 港湾構造物設計基準作成に当たっての諸問題について, 港湾技研資料, No.30, pp.53-64.
- 久保雅義, 斎藤勝彦, 下田直克, 岡本俊策 (1988) : 岸壁前面係留浮体の不規則波による船体運動の時系列解析について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.687-691.
- 後藤智明, 佐藤一央 (1993) : 三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発, 港湾技術研究所報告, Vol.32, No.2, pp.3-44.
- 高山知司, 鈴木康正, 鶴谷広一, 高橋重雄, 後藤智明, 永井紀彦, 橋本典明, 長尾毅, 細山田得三, 下迫健一郎, 遠藤仁彦, 浅井正 (1994) : 1993年北海道南西沖地震津波の特性と被害, 港湾技研資料, No.775, pp.91-98.
- 谷本勝利, 高山知司, 村上和男, 村田繁, 鶴谷広一, 高橋重雄, 森川雅行, 吉本靖俊, 中野晋, 平石哲也 (1983) : 1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾技研資料, No.470, pp.97-112.
- 中央防災会議 (2003) : 東南海, 南海地震等に関する専門調査会 (第16回) 資料, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/index.html>.
- 津田宗男, 大木泰憲, 高山知司, 東野洋司, 林秀和 (2006a) : 津波による係留船舶の動揺特性および係留施設への衝突力に関する模型実験, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.535-540.
- 津田宗男, 青野利夫, 栗原明夫, 中屋行雄, 大木泰憲, 高山知司 (2006b) : 津波による大型係留船舶の動揺特性と係留施設への影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.816-820.
- 富田孝史, 柿沼太郎, 島田昭男 (2004) : 3次元流動モデルによる津波防波堤の防護効果に関する数値計算, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.296-300.
- 富田孝史, 本多和彦, 菅野高弘, 有川太郎 (2005) : インド洋津波によるスリランカ, モルディブ, インドネシアの被害現地調査報告と数値解析, 港湾空港技術研究所資料, No.1110, pp.31-35.
- 日本港湾協会 (1999a) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.55-59.
- 日本港湾協会 (1999b) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.49-55, pp.827-832.
- 日本港湾協会 (1999c) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.826-828.
- 浜田賢二, 松本英雄, 黒田祐一, 早藤能伸 (1991) : 外力算定のための船舶諸元およびマスト高の解析, 港湾技研資料, No.714, 63p.
- 藤畑定生, 秦禎勝, 中山晋一, 森屋陽一, 岡本恒浩, 池野正明, 笹健児 (1999) : 船体動揺計算における港内副振動の考慮方法と粘性減衰係数の評価, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.856-860.



港湾空港技術研究所資料 No.1190

2009・3

編集兼発行人 独立行政法人 港湾空港技術研究所  
発行所 独立行政法人 港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬 3 丁目 1 番 1 号  
TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>  
印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Copyright© (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。