

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

津田宗男¹・青野利夫²・栗原明夫³

中屋行雄⁴・大木泰憲⁵・高山知司⁶

巨大津波の特性や浸水予測, 人的被害については多くの研究が進められてきたが (たとえば, 中央防災会議), 係留されている大型船舶の動揺特性や衝突による港湾施設の被害とその対策は, いまだ明確には示されていない. 本研究では, 既往の船体動揺シミュレーション手法の津波に対する適用性の検討を行い, これらの解析手法を適用して津波作用時の大型係留船舶の動揺特性を明らかにした. また, 船体動揺にともなう係留索の切断や船体の衝突によって生じる係留設備への影響についての検討を行った. この結果, 既往の船体動揺解析手法は津波の作用においても適用可能であり, 津波の作用によって係留索が切断されたり, 船体の衝突によって防舷材や係留設備が被害を受けたりする可能性があることが明らかになった.

1. はじめに

東海・東南海・南海地震津波や三陸沖地震津波など, 巨大津波が近い将来来襲するとの報告を受け, 津波の特性や浸水予測, 人的被害などについては, 中央防災会議など多くの研究が進められている. 例えば南海地震津波が発生した場合, 地震発生後 50 分から 90 分後に 2~3 m の津波が大阪湾に來襲すると予測されている. 津波により大型係留船舶が大きく動揺すれば, 船舶の漂流, 衝突などにより港湾施設の被害が発生する可能性があり, 海上輸送にも困難をきたすため災害復旧を遅滞させることになる. また, 危険物を積載したタンカーが衝突すれば甚大な災害が発生する可能性もある (例えば, 高橋, 2004). 船舶の動揺による港湾施設の被害に関する研究は, 津波による係留船舶の動揺解析を行った中屋ら (2005) の研究などがあるが, 現段階ではスタートラインに着いたに過ぎず研究事例は少ない.

津田ら (2006) は, 津波による係留船舶の動揺特性について模型実験を行い, 津波高が 50 cm 程度でも係留索が切断するほどの動揺が生じ, 設計で適用する接岸速度を大きく超える衝突速度となる場合があることを示した. 本研究では, 津田ら (2006) の模型実験について, 風波やうねりに対する船体動揺解析で一般的に用いられているストリップ法および三次元特異点分布法を用いた数値モデルによる再現計算を行い, これらの動揺解析手法の津波に対する適用性の検討を行った. 数値解析では, 係留方法, 係留施設などの多様な条件に対して, 船舶の動揺特性や防舷材への衝突速度などの検討を行った.

2. 実験概要

実験は, 図-1 に示すように, 水路長 50 m × 幅 1 m の二次元造波水路にて縮尺 1/50 で行われている (津田ら, 2006). この実験で用いられたピストン型造波装置の造波ストロークは ±1.0 m と比較的長いものである. 長い周期の造波を行うため, 造波開始前に造波板を可動範囲の最端部に移動し, 有効ストロークを最大限使用して造波を行っている.

対象船舶はパナマックス 7 万 DWT 級を想定し, ドルフインなどの港湾施設に係留された状態で津波を作用させている. 船体模型は, 実験の縮尺を極力大きくするため, 船体中央部の断面形状で船軸方向に一樣な二次元模型としている. このため, この実験で対象となる船体の挙動は, Sway, Heave, Roll の 3 成分である. 防舷材は定反力型を, 係留索は索径 65 mm のナイロンロープが想定されている. 図-2 に実験に用いた防舷材反力の設定値と検定値の比較を示す.

実験ケースは, 表-1 に示すように, 直立壁の岸壁係留

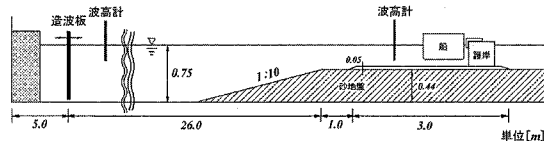


図-1 実験水路の概略図

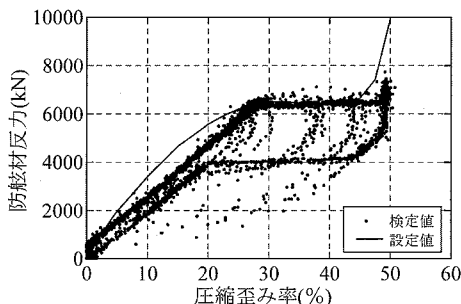


図-2 防舷材模型の特性

- | | | |
|---------|------|--------------------------|
| 1 正 会 員 | 博(工) | 東亜建設工業(株)土木本部設計部西日本設計室課長 |
| 2 正 会 員 | 工博 | 東亜建設工業(株)土木本部設計部課長 |
| 3 正 会 員 | 修(工) | 東亜建設工業(株)土木本部設計部 |
| 4 正 会 員 | | 東亜建設工業(株)土木本部設計部 |
| 5 | 修(工) | 東亜建設工業(株)土木本部設計部西日本設計室 |
| 6 フェロー | 工博 | 京都大学防災研究所教授 |

表-1 実験ケース（現地スケール）

縮 尺	1/50
係留施設	岸壁(直立壁), ドルフィン
周 期	1, 3, 5, 15 min
津 波 高(岸壁)	0.50, 1.00, 1.50 m
津 波 高(ドルフィン)	0.25, 0.50 m
水 深	13.0 m
潮 位	H.W.L+1.70 m, L.W.L±0.0 m
喫 水(載荷状態)	8.0 m(空載), 12.0 m(満載)
係留状態(係留索本数)	ヘッドライン, スターンライン(2本), プレストライン増し取り(4本)
津波の始まり	引波初動, 押波初動

とドルフィン係留, 周期, 津波高, 潮位, 船舶の満載時と空載時, ヘッドラインおよびスターンラインの係留形式と, それにプレストラインを増し取りした係留形式など, 適宜組み合わせている. また, 引波で始まる津波(引波初動)と押波で始まる津波(押波初動)についても実施している.

3. 船体動揺解析手法

津波による船体動揺実験の再現計算は, 二次元流体力を二次元特異点分布法によって求めるストリップ法および三次元特異点分布法の2通りの手法で行った. 今回用いた数値モデルは, 両手法ともに3次元の動揺を再現するモデルであるが, 入射波条件をSway方向のみの一方波とすることで模型実験のSway, Heave, Rollの動揺を再現した. また, Surge, Pitch, Yaw方向に対しては, 粘性減衰係数を大きく設定することでこれらの方向に生じる動揺を抑えた. 三次元特異点分布法では, 波向きをSway方向ではなく斜め入射とした場合にその優位性が発揮され, 今回の条件ではストリップ法との大きな差異は生じないものと考えられる. しかしながら, 津波への適用事例が少ないこともあり, 将来的に様々な条件で検討を行う上での基礎資料とするため, 両手法について適用性の検討を行った.

表-2に船舶の諸元を示す. 入射波条件には, 周期3, 5

表-2 船舶諸元

項 目	模 型	実 船
船体寸法(m)	全長	49.5
	船幅	32.0
	型深	19.5
空 載	重心高(m)	6.7
	喫水(m)	8.4
	排水量(m ³)	13.226
満 載	重心高(m)	9.2
	喫水(m)	11.9
	排水量(m ³)	18.770

minの規則波を用い, 図-1に示す波高計のうち沖側波高計の波高を用いた. 引波初動, 押波初動の設定については, 規則波の位相を半周期ずらして計算を行うことで表現した. また, 動揺解析ではSwayおよびRollの粘性減衰係数は, 通常波浪レベルの周期8sおよび12sの実験結果を用いた感度分析により, 粘性減衰係数の値を設定した.

動揺解析では, 実験船形状をそのままモデル化し, 係留索はヘッドライン, スターンラインを想定した2本の係留索で係留された場合と, プレストラインによる増し取り効果を確認する目的で, 4本の係留索で係留された場合についてそれぞれモデル化した. なお係留索は65mmのナイロン製ロープを, 防舷材は図-2に示した定反力型の特性をモデル化した. 模型実験における係留索特性は, 実船で配置される係留索長の場合の伸び量に等しくなるように, 係留索模型の索特性を補正している. 今回の動揺解析でも同様に伸び量が一致するように索特性を補正して計算を行った.

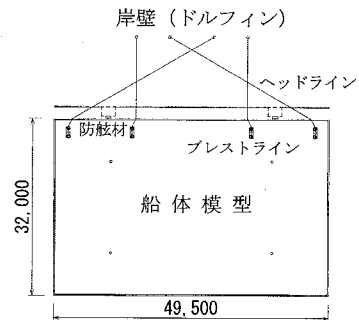


図-3 解析モデル平面図

4. 計算結果

(1) 動揺量, 防舷材反力の経時変化特性

図-4にSway動揺量, 防舷材反力の経時変化特性の一例として, 岸壁係留時の周期3minの場合の実験結果とストリップ法による計算結果の比較を示す. 図中のSwayの負値は沖側を示し, 水位波形には岸壁からの反射波も含まれている. 実験, 計算ともにSway動揺量が

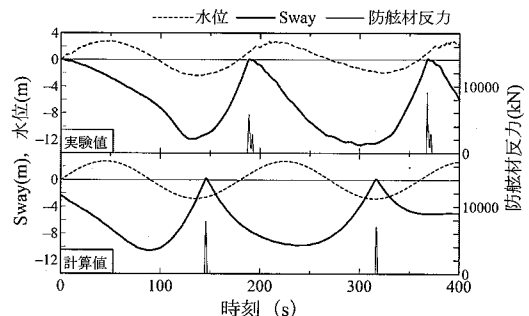


図-4 Sway動揺量, 防舷材反力の経時変化（岸壁, 周期3min）

マイナスから0に戻った時点で船体が防舷材に衝突し、衝撃的に防舷材反力が上昇していることがわかる。また、実験と計算では水面変動と Sway 動揺量の位相関係に違いが見られる。実験では水面が上昇して静水面を超えた付近で岸壁に衝突しているが、計算では最低水位から上昇に転じた直後に衝突している。

(2) 岸壁係留時の計算結果

a) 船体動揺量の再現性

図-5 に、引波初動の場合の Sway 動揺量の最大値について、実験値と計算値の比較を示す。実験、計算ともに周期 3min、係留索 2 本のケースで Sway 動揺量が大きい値を示している。三次元特異点分布法とストリップ法のどちらの手法においても、概ね Sway 動揺量を再現している。図-6 に、Heave 動揺量最大値の実験値と計算値の比較を示す。両手法とも実験値を良好に再現していることがわかる。

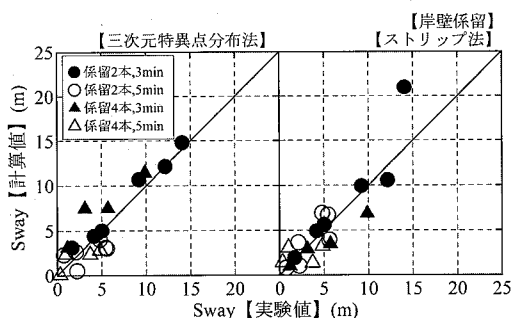


図-5 Sway 動揺量の実験値と計算値の比較

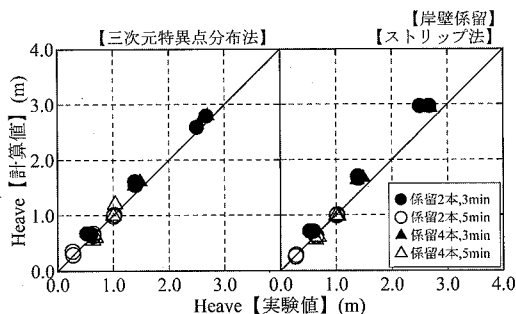


図-6 Heave 動揺量の実験値と計算値の比較

b) 係留施設への影響評価

図-7 は、津波が作用した場合における防舷材反力について、実験値と計算値を比較したものである。今回用いた防舷材では、図-2 に示したように設計限界歪み 50% で反力が約 10,000 kN となる特性となっている。計算では歪みが 50% を超える場合では、防舷材反力が急増する特性を設定したため、異常に大きな反力が計算されるケースもあった。ここでは設計限界値以下の 10,000 kN までの結果を示す。防舷材反力は、三次元特異点分布法、ストリップ法ともに、ほとんどすべてのケースで実験値よりも計算値が

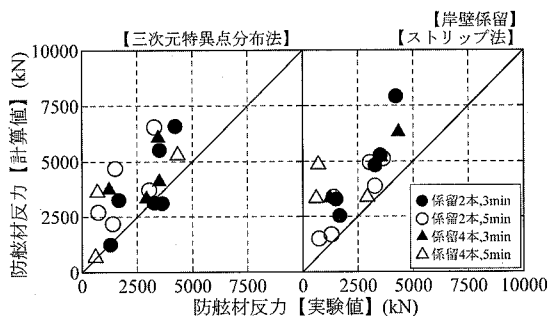


図-7 防舷材反力の実験値と計算値の比較

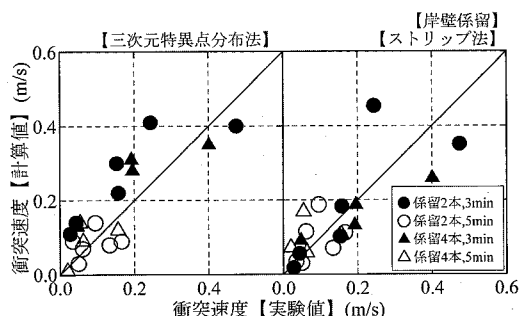


図-8 衝突速度の実験値と計算値の比較

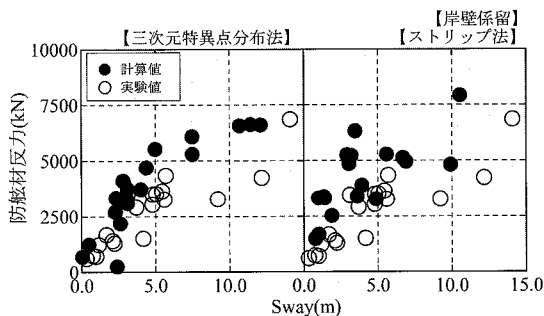


図-9 防舷材反力と Sway 動揺量

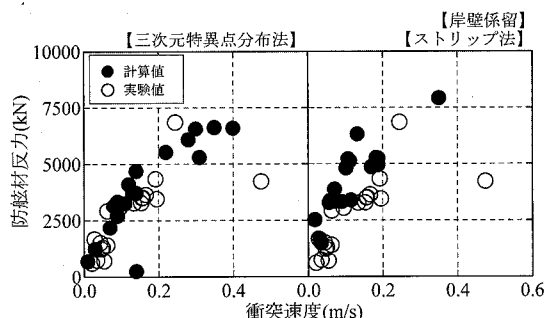


図-10 防舷材反力と衝突速度

大きい結果となった。図-8 に、防舷材への衝突速度の実験値と計算値の比較を示す。衝突速度は、Sway 動揺量の時間微分により船体の速度を算出し、防舷材反力が最大と

なる直前の最大値としている。衝突速度の計算値は概ね実験値を再現できているが、三次元特異点分布法による周期3minのケースでは計算値が若干大きい傾向がある。実験と計算での防舷材特性の相違の影響も考えられるが、実験値は船体衝突直前の岸壁と船体に挟まれた水による衝突速度の緩和や、側壁と船体の摩擦の影響を受けているため、計算では衝突速度や防舷材反力を大きく評価しているものと考えられる。

図-9, 10は、防舷材反力が最大となるとき Sway 動揺量最大値および衝突速度の関係を示したものであり、比較のため実験による両者の関係も併せて示している。Sway 動揺量および衝突速度に対する防舷材反力は、実験値、計算値ともにばらつきは大きいものの、概ね同様の傾向を示していることがわかる。

(3) ドルフィン係留時の計算結果

a) 船体動揺量の再現性

図-11に、ドルフィン係留時の Sway 動揺量最大値の実験値と計算値の比較を示す。ドルフィン係留時の Sway 動揺量は、図-5で示した岸壁係留時よりも津波高が小さいにもかかわらず、実験値、計算値ともに岸壁係留時よりも大きい。Sway 動揺量の計算値は実験値より若干小さい傾向があるが、両計算手法による再現性は概ね良好である。

図-12に、ドルフィン係留時の Heave 動揺量最大値の実験値と計算値の比較を示す。Heave 動揺量の計算値は概ね再現性が良いが、図-6に示した岸壁係留時の

結果よりもばらつきが大きい。今回の動揺解析では、ドルフィン係留の計算条件として反射壁のない条件で計算を行っている。しかし実験では水槽岸端からの反射波の影響があり、再現性のばらつきの一因となっているも

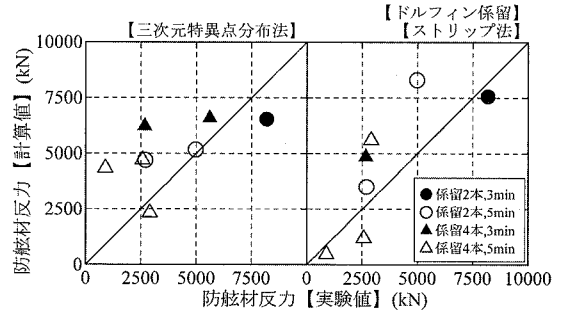


図-13 防舷材反力の実験値と計算値の比較

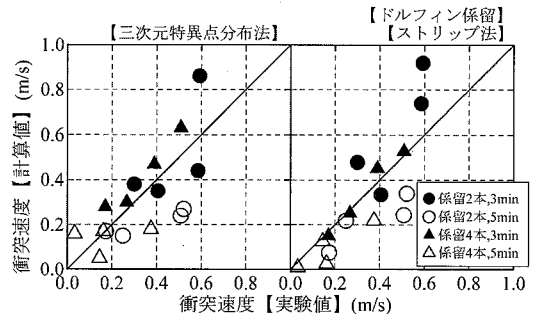


図-14 衝突速度の実験値と計算値の比較

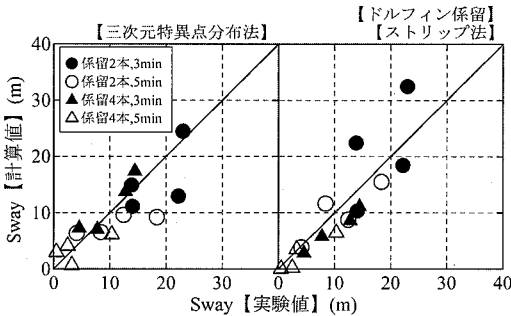


図-11 Sway 動揺量の実験値と計算値の比較

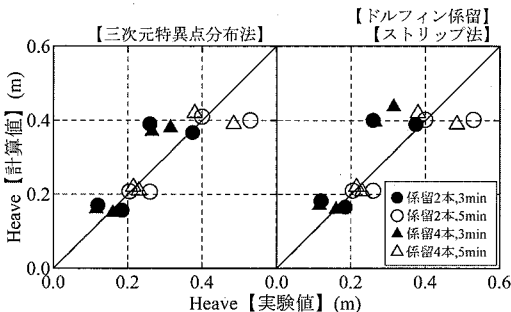


図-12 Heave 動揺量の実験値と計算値の比較

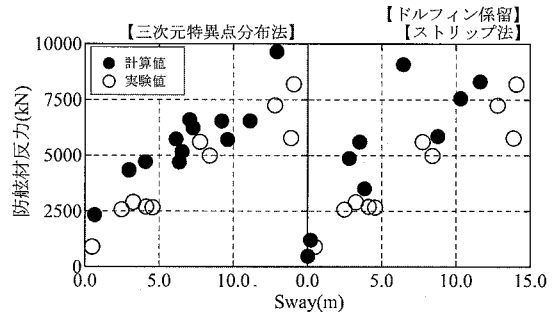


図-15 防舷材反力と Sway 動揺量

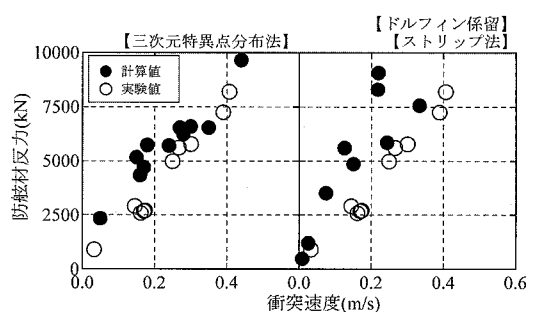


図-16 防舷材反力と衝突速度

のと考えられる。

b) 係留施設への影響評価

図-13に、ドルフィン係留時における防舷材反力の実験値と計算値の比較を示す。図-7で示した岸壁係留時と比較すると、ばらつきが大きい、すべてのケースで計算値が大きくなる傾向は認められない。図-14には衝突速度の実験値と計算値の比較を示す。両計算手法とも周期5minの場合に若干計算値のほうが小さくなる傾向が認められる。これらは、係留形式がドルフィン係留で透過構造であるため、実験における岸壁係留時のような衝突速度の緩和が生じないためと考えられる。

図-15, 16は、防舷材反力が最大となるときのSway動揺量最大値および衝突速度の関係を示したものである。Sway動揺量および衝突速度に対する防舷材反力の値は、図-9, 10で示した岸壁係留時と比較して若干ばらつきが大きい、概ね同様の傾向となっていることがわかる。

(4) 押波初動と引波初動によるSway動揺量

図-17は、津波の押波初動と引波初動におけるSway動揺量について、岸壁係留の実験値とストリップ法による計算値を比較したものである。引波初動では概ね計算値の再現性は良好であるが、押波初動では計算値のほうが小さくなるケースが多く、特にSway動揺量の実験値が5m以下のケースでは、計算のSway動揺はほとんど生じていない。このため押波初動の津波に対しては今回の計算手法では若干過小評価となる可能性がある。

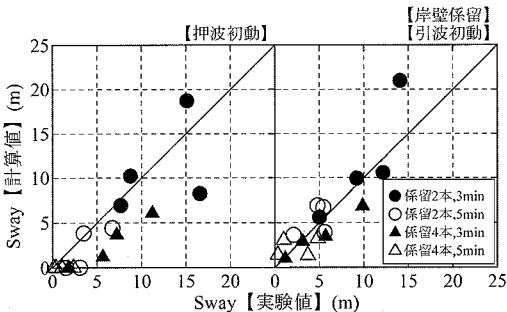


図-17 押波、引波初動におけるSway動揺量の比較

5. 係留施設への影響評価

模型実験あるいは数値解析の結果から、津波により係留船舶が係留施設へ与える影響は、次のことが考えられる。

(1) 係留索の破断

Swayの値が10mを超えるケースが多くみられ、伸び量から判断して係留索が破断する位置まで引き離されるケースも確認できる。津波作用時に係留索が破断した場合には、大型船舶が港内を漂流することになる。漂流した船舶の座礁や沈没によって航路が閉鎖される事態に至れば、災害復旧の大きな障害となることが予想される。

(2) 防舷材あるいは係留施設本体の損傷

防舷材への衝突速度が、設計で通常用いられる接岸速度10~15cm/sを大きく超えるケースが多く見られた。一般に、防舷材本体は船舶の接岸エネルギーに応じて選定されるため、接岸速度を上回る速度で船体が衝突した場合にはそのエネルギーを吸収できず、防舷材に想定以上の歪みが生じて損傷に至ることが予想される。また、衝突速度が接岸速度を大幅に上回る場合には、係留施設本体に影響を及ぼすことも考えられる。特にドルフィンの場合、接岸方向に作用する水平力は、地震時慣性力よりも接岸力の方が大きいケースが多く、衝突速度が接岸速度を上回った時点で、作用水平力が設計荷重を超えることになる。接岸方向水平力から決定されている基礎杭については応力や支持力の許容値を超える可能性が高く、ドルフィン本体が損傷することもあり得ることを認識しておく必要がある。

6. ま と め

- 1) 津波による船体動揺量は、三次元特異点分布法およびストリップ法ともにSway動揺量、防舷材反力、衝突速度については概ね再現性が高く、両手法の明確な違いは見られなかった。
- 2) Heave動揺量は、岸壁係留の場合の再現性が高いが、ドルフィン係留の場合は再現性に若干のばらつきが見られた。これは、計算では考慮していない実験における水槽岸側端からの反射波の影響であると考えられる。
- 3) 津波の押波初動と引波初動におけるSway動揺量について、岸壁係留の実験値と計算値を比較した結果、押波初動では計算値のほうが小さくなるケースがあった。今回の計算手法では押波初動の津波に対しては若干過小評価となる可能性がある。
- 4) 津波作用時の係留船舶の動揺によって、係留索の破断による船舶の漂流や係留施設本体の損傷などが起こり得る。地震、津波後の災害復旧に大きな障害となる可能性もあり、事前の対策を考慮しておく必要があるものと考えられる。

参 考 文 献

- 高橋勝(2004)：「津波が予想される場合の船舶安全確保に関する調査研究委員会」での検討概要，海と安全，No. 523，pp. 16-23。
 中央防災会議：東南海、南海地震等に関する専門調査会資料（オンライン），<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/>，参照 2006-05-19。
 津田宗男・大木泰憲・高山知司・東野洋司・林秀和(2006)：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。
 中屋行雄・津田宗男・青野利夫・杉浦秀之・本多将人(2005)：港湾内に進化する津波の推定と係留船舶への影響評価の試み，海洋開発論文集，第21巻，pp. 133-138。