

不規則波・変動風下の係岸船舶の動揺解析

——ハイブリッド型シミュレーション法による解析——

小田 一 紀*・秋 山 齊**・石 上 昌 男***

1. 緒 言

岸壁に係留されている船舶には防舷材と係留索による非線形な係留力が作用する。このような状況下での船体動揺の問題については、これまでに多くの研究がなされており、なかでも上田ら¹⁾は数値シミュレーション、模型実験および現場での実証観測を行って荒天時の係岸避泊に関する数多くの貴重な知見を得た。また、Cummins²⁾によって提案されたように、周波数に依存しない流体力係数を用いて運動方程式を数値積分することによる船体動揺解析も盛んに行われ、有益な結果を得ている^{3),4)}。しかしながらこれらの研究においては、非線形力学特性を持つ係留索や防舷材などから成り立つ係留系を多項式や直線近似等の単純化した形で表現しているものが多く、実際の工学的な観点からは、まだ工夫の余地が残されているように思われる。

筆者らは、特にこのような防舷材の複雑な非線形挙動を数値モデルだけによって解析することには無理があると考え、防舷材の模型を用いた実験からの情報と船体動揺に関する数値シミュレーションの結果をリアルタイムで組合わせたハイブリッド型シミュレーション法（以下、ハイブリッド型と称する）を開発した⁵⁾。同時に、このハイブリッド型を用いて、規則波ならびに定常風の条件下における船体動揺を解析し、それを数値モデルのみによる従来型シミュレーション法（以下、従来型と称する）の結果と比較することにより、従来型では見られないいくつかの現象や、あるいはそれらが生ずる条件等について重要な知見を得ることができた。

本研究は、さらに、より現実に近い不規則波ならびに変動風の条件の下で、このハイブリッド型を適用し、防舷材の挙動が船体動揺にどのような影響をおよぼすかの点について、従来型と比較検討したのでここに報告する。

2. ハイブリッド型シミュレーション法の概要

ハイブリッド型の詳細については、文献⁵⁾に詳しいの

で、ここではその概要のみを再記する。

装置は、sway, heave, roll の 3 成分に変位可能な動的載荷試験機と船体運動方程式を解くコンピュータとから構成されており、動的載荷試験機はこのコンピュータからの信号を受けて作動する。風と波による時系列外力および流体力係数等は前もって算定しておき、コンピュータのメモリに蓄えておく。シミュレーションを実施する際には、メモリに蓄えられたこれら諸量を運動方程式に逐次代入しながら数値積分を実行して船体の動きを求める。この際、防舷材模型の反力は実スケールに拡大して代入されていく。得られた船体の変位量は動的載荷試験機を通じてアナログ変位量として出力される。

このようにして、動的載荷試験機上の防舷材模型は実際の防舷材と同じような変形を受けることになる。その際、面板の重量、スライド部の摩擦等が誤差要因として考えられるが、自由浮体の運動、圧縮方向のみの線形バネ等の単純化されたシミュレーションを行ない、それらの影響は少ないことを確認した。

模型の防舷材は、実物と同一材料を用いて作製し、またその応力とひずみの関係が実物と相似となる様にした。即ち、幾何学的な縮尺を λ 倍とするとき、力は λ^2 倍、エネルギーおよびモーメントは λ^3 倍の縮尺となる。

3. 2次元矩形断面浮体の運動方程式

ハイブリッド型の数値シミュレーションにおいては、一般に、次式のように表わされる2次元係留浮体の運動方程式を用いる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + N_L(u) + N_F(u) = F_E(t) + F_W(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 M : 質量マトリックス、 C : 造波減衰係数マトリックス、 K : 復元力マトリックス、 u : 変位ベクトル、 $N_L(u)$: 係留力ベクトル、 $N_F(u)$: 防舷材反力ベクトル、 $F_E(t)$: 波強制力ベクトル、および $F_W(t)$: 風圧力ベクトル、である。本研究では、式中の流体力は、井島による領域分割法（ポテンシャル接続法⁶⁾）を適用し、鉛直壁前面に置かれた2次元矩形断面浮体に対して求められた値を用いた。また、付加質量係数、造波減衰係数については、不規則波の有波周期に相当するときの値を全

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
 ** 工修 (株)ブリヂストン 工業用品技術・生産本部
 *** 正会員 工修 (株)ブリヂストン 工業用品技術・生産本部

周波数領域に対して用いている。

不規則波の周波数スペクトルは、Bretschneider-光易型を用い、波力は、珠久ほか⁷⁾によるのと同様、各成分波に対する波力を位相を考慮して重ね合わせることで求めた。

変動風速のスペクトルとしては、Davenport のものを用い、風圧力についても、珠久ほか⁷⁾によるのと同様、sway 方向のみを考慮して、各成分波に対する風圧力を求め重ね合わせることで求めている。

4. 計算方法と計算条件

(1) 計算方法

数値積分法としては、従来型では Newmark- β 法を適用し、ハイブリッド型では Houbolt 法を用いた。計算時間間隔は $\Delta t=0.2$ sec, 計算時間は $t_e=900$ sec とし、計算はすべて実物値で行った。

(2) 計算条件

計算は、一応 10,000 D.W.T. 級の貨物船の軽荷状態を対象とした。その諸元は長さ (L) 120 m, 幅 (B) 20 m, 吃水 (d) 2.5 m, 側圧受圧面積 (A_w) 1225 m² と設定した。なお、水深は $h=10$ m, 船体重心の離岸距離は $s=12.0$ m とした (船側と岸壁の距離は 2 m)。

防舷材模型は定反力型と反力漸増型の 2 種を選んだ。定反力型防舷材としては、実物で高さ 2 m のゴム防舷材の縮尺 1/10 のもの (Type-A), 反力漸増型防舷材としては高さ 3.3 m のゴム防舷材の縮尺 1/15 のもの (Type-B) を、それぞれ実物と同一材料で作製した。それぞれの防舷材模型の単純圧縮試験から得られた性能曲線を実物値に換算したものを 図-1, 図-2 に示す。なお、幾何学的係留条件は 図-3 に示す通りである。

波浪の特性として、有義波高 $H_{1/3}=0.5$ m とし、有義波周期 $T_{1/3}$ は 7, 8, 9 および 10 sec とした。風は、無風時ならびに台風時を想定し、台風時は平均風速 $\bar{u}=30$ m/sec の変動風が、岸壁に直角方向に岸向きに吹くものと仮定した。なお、ガスト率は 1.29 とした。

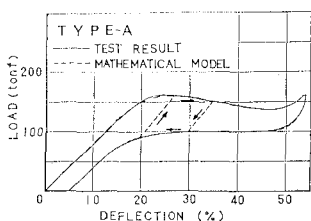


図-1 定反力型防舷材の性能曲線

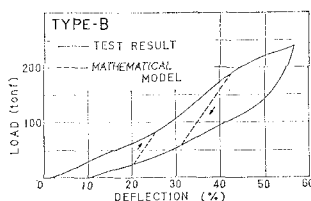


図-2 反力漸増型防舷材の性能曲線

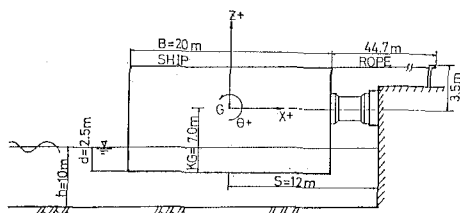


図-3 幾何学的係留条件

5. 両シミュレーション法による計算結果の比較

(1) 定反力型防舷材

a) 船体動揺

船体動揺の時系列波形から、ゼロアップクロス法より求めたその有義振幅と波の有義波周期との関係を、ハイブリッド型と従来型について比較したものが 図-4 である。なお、ハイブリッド型で $\bar{u}=0$ m/sec, $T_{1/3}=9$, 10 sec の場合は sway の動揺が大きくなり、動的荷荷試験機の許容範囲を越えるので、シミュレーションは行っていない。

図-4 によれば、sway において $\bar{u}=0$ m/sec の場合に、両者による値に大きな差が見られるが、 $\bar{u}=30$ m/sec の場合には差が小さい。heave では $\bar{u}=0$ m/sec, 30 m/sec の場合とも、両シミュレーション法による結果にはほとんど差はなく、したがって、この運動に与える防舷材の剪断反力・曲げモーメントの影響は小さいと考えられる。一方、roll においては、ハイブリッド型は従来型に比べて約 15~25% も小さな結果を与えている。またこの場合、不規則波によることの特徴として、規則波中においては波周期によって大きく変化していたのとは異なり、入射波の有義波周期の変化に対してあまり変動せず、ほぼ一定となる傾向がみられる。

図-5 は、 $\bar{u}=0$ m/sec, $T_{1/3}=7$ sec の場合の両シミュレーション法による sway の時系列波形とその周波数応答スペクトルの計算結果を示す。

この図によると、両者の時系列には大きな差が生じており、ハイブリッド型で観察される subharmonic-motion が従来型ではみられない。その結果、これはスペクトル密度図の 0.07 Hz 以下の低周波領域における両者の違いとなって表われている。

図-6 は、同じく、 $\bar{u}=30$ m/sec, $T_{1/3}=9$ sec の場合を示すが、時系列波形は両シミュレーション結果ともよく一致している。スペクトル図についても波のピーク周波数付近 ($f_p \approx 0.11$ Hz) や heave の固有周波数付近 ($f_h \approx 0.16$ Hz) にピークが存在し、逆に roll の固有周波数付近 ($f_r \approx 0.13$ Hz) では、密度が小さくなっていることなどよく一致している。

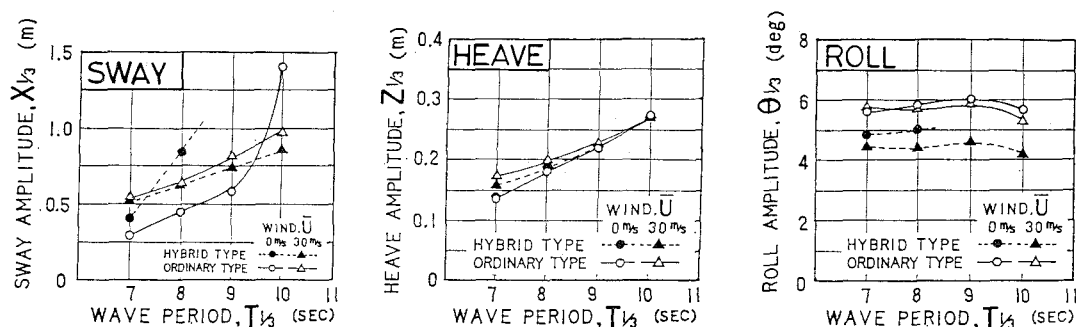


図-4 両シミュレーション結果の比較——動揺有義振幅——(定反力型防舷材)

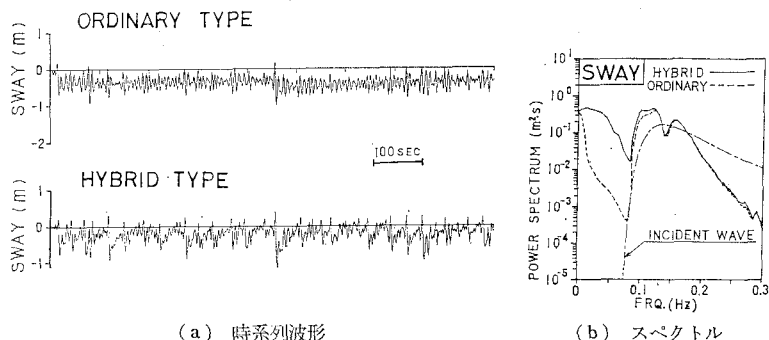
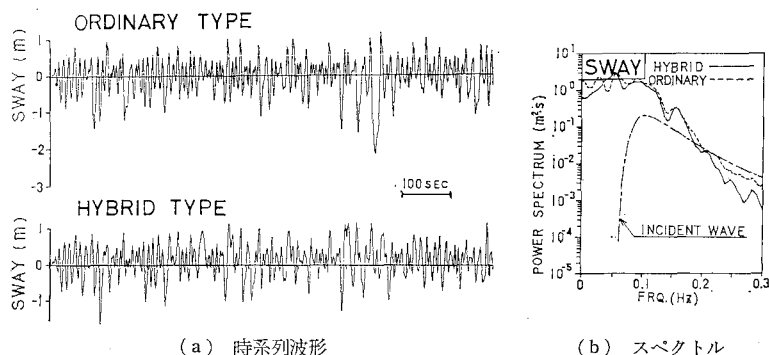
b) 防舷材の挙動

ハイブリッド型では、防舷材に関して従来型では得ることの出来ない様々な情報を得ることができる。

図-7 は定反力型防舷材の圧縮反力、剪断反力、および曲げモーメントの時系列の例である。この図によれば、剪断反力の値は圧縮反力の 10~20% 程度である。この剪断反力特性には、防舷材先端と船体との間の摩擦力も含まれており、摩擦係数を推定する上で有益である。また、剪断反力が比較的大きいときに曲げモーメントが大きくなる傾向が見られるので、曲げモーメントは、防舷材の曲げ変形よりも、むしろ剪断変形により発生するモーメントが支配的であると思われる。

図-8 は縦軸に防舷材の圧縮反力を、横軸に sway の変位をとって表わしたものであり、ハイブリッド型と従来型によるものを併記してある。

この図によれば、従来型では圧縮量 1.2 m で、412 ton 程度の反力を発生しているのに対し、ハイブリッド型でのそれは 1.3 m で 170 ton 程度であり、その差は大きい。この理由は、圧縮力の作用を受けた際、ハイブリッド型の防舷材模型は剪断方向に身をかわして過大な反力を自ら避けてしまうからである。従来型では、このような現象は再現できないために実際よりもはるかに過大な反力の見積りをしてしまう危険があり注意を要する。それゆえ、数値シミュレーションのみで船体運動の予測を行なおうとする場合には、この点を考慮して防舷

図-5 両シミュレーション法による sway の比較
($\bar{u}=0$ m/sec, $T_{1/3}=7$ sec, 定反力型防舷材)図-6 両シミュレーション法による sway の比較
($\bar{u}=30$ cm/sec, $T_{1/3}=9$ sec, 定反力型防舷材)

材性能の定式化を行なう必要があろう。

(2) 反力漸増型防舷材

a) 船体動揺

船体動揺の時系列波形から求めた各モードの有義振幅と波の有義波周期の関係を従来型とハイブリッド型について比較したものを図-9 に示した。両シミュレーション法を比較すると次のようなことがいえる。すなわち、 $\bar{u}=0$ m/sec の場合の sway では大きな差が生じているが、 $\bar{u}=30$ m/sec においてはその差は非常に小さい。また、heave の場合は $\bar{u}=0$ m/sec, 30 m/sec の場合とも差はほとんどみられないが、roll の場合には、風速にかか

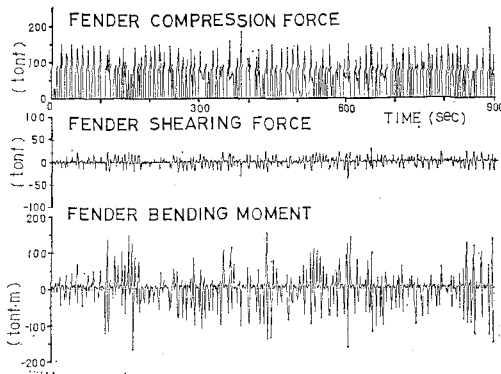


図-7 ハイブリッド型による防舷材反力の時系列
($\bar{u}=30$ m/sec, $T_{1/3}=9$ sec, 定反力型防舷材)

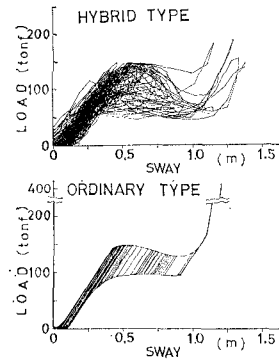


図-8 両シミュレーションによる防舷材圧縮挙動
($\bar{u}=30$ m/sec, $T_{1/3}=9$ sec, 定反力型防舷材)

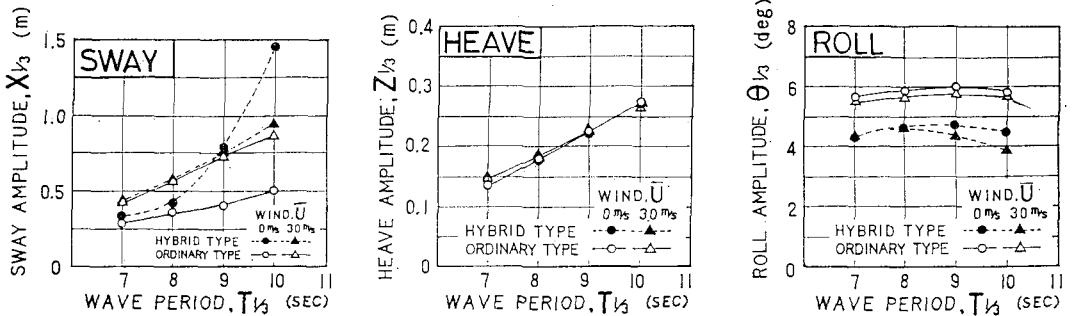


図-9 両シミュレーション結果の比較——動揺有義振幅——(反力漸増型防舷材)

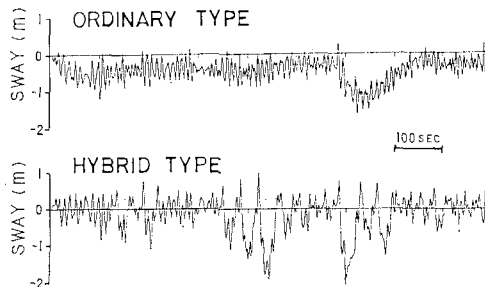
ならず、ハイブリッド型は従来型に比べて約 15~30% も小さくなっている。以上のように、両シミュレーション法による船体動揺の相違は反力漸増型防舷材でも定反力型防舷材でもよく似た傾向を示している。

図-10 は、 $\bar{u}=0$ m/sec, $T_{1/3}=9$ sec の場合の両シミュレーション法による sway の比較である。図-5 に示した定反力型の場合と同様に反力漸増型の場合にもハイブリッド型では大きな subharmonic-motion が生じており、従来型とは大きな違いがある。また、その影響はスペクトル図の低周波数域の密度の違いとして表われている。

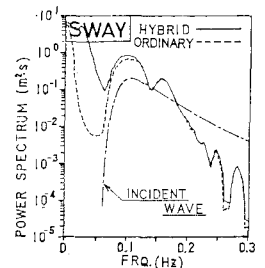
図-11 は、同じく $\bar{u}=30$ m/sec, $T_{1/3}=9$ sec の場合である。この図によれば、sway の中心位置は常に初期位置よりも岸壁側にあるが、これは反力漸増型防舷材の一つの特徴であるといえる。

b) 防舷材の挙動

図-12 は反力漸増型防舷材の圧縮反力、剪断反力お



(a) 時系列波形



(b) スペクトル

図-10 両シミュレーション法による sway の比較
($\bar{u}=0$ m/sec, $T_{1/3}=9$ sec, 反力漸増型防舷材)

よび曲げモーメントの時系列を示す。

さらに、図-13 は縦軸に防舷材の圧縮反力、横軸に sway の変位をとって表わしたものである。

最大発生反力はハイブリッド型が約 185 ton, 従来型が約 190 ton であり両者の結果に大きな差異はない。これは、今回使用した反力漸増型防舷材の模型では、圧縮反力が剪断変形の影響を受けにくい模型であったため、それだけ数値的な定式化がしやすく、したがって両者の間で差が生じなかったと考えられる。

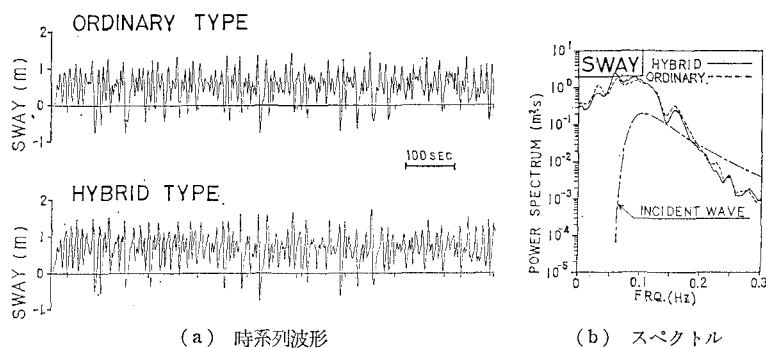


図-11 両シミュレーション法による sway の比較
($\bar{u}=30$ m/sec, $T_{1/3}=9$ sec, 反力漸増型防舷材)

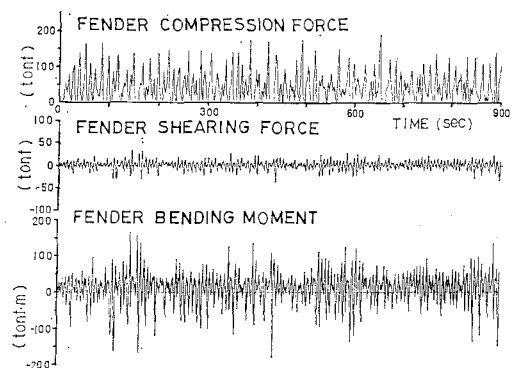


図-12 ハイブリッド型による防舷材反力の時系列
($\bar{u}=30$ m/sec, $T_{1/3}=9$ sec, 反力漸増型防舷材)

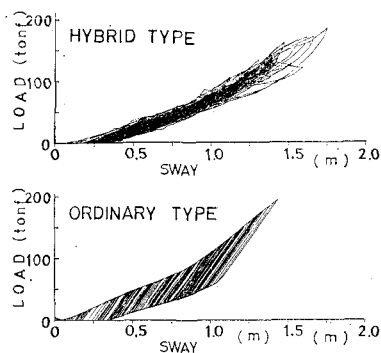


図-14 両シミュレーション法における防舷材圧縮挙動
($\bar{u}=30$ m/sec, $T_{1/3}=9$ sec, 反力漸増型防舷材)

6. 結 論

本研究は、不規則波ならびに変動風の条件下で防舷材の挙動が船体動揺にどのような影響をおよぼすかを、ハイブリッド型シミュレーション法と従来型シミュレーション法とで比較検討したもので、その結果、以下のこと

が明らかになり、ハイブリッド型シミュレーション法の有用性が確認された。

1) sway において、 $\bar{u}=0$ m/sec の場合、ハイブリッド型では従来型に比べ、著しい sub-harmonic-motion が発生するため、船体動揺の有義振幅は従来型のそれに比べ非常に大きくなる傾向がある。しかし、 $\bar{u}=30$ m/sec の場合は、両シミュレーション結果に大きな差はみられない。

2) heave の有義振幅については $\bar{u}=0$ m/sec, 30 m/sec の場合とも、両シミュレーション結果の差は殆どなく、防舷材の剪断反力・曲げモーメントの影響は小さいと考えられる。

3) roll の有義振幅は、 $\bar{u}=0$ m/sec, 30 m/sec に拘らず、ハイブリッド型の計算結果は従来型に比べて約 15~30% も小さくなる。

4) 剪断反力、すなわち船体と防舷材との間に働く摩擦力は圧縮反力の高々 10~20% 程度である。

5) 従来型では防舷材によっては、実際より反力を過大に見積りしてしまう場合がある。

最後に、本論文作成に当たり協力して頂いた大阪市立大学大学院志村友行君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 上田 茂: 係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技術研究所資料 No. 504, 1984, 372 p.
- 2) Cummins, W. E.: The Impulse Response Function and Ship Motions, D.T.M.B. Report 1661, Washington D.C., 1962.
- 3) Oortmerssen, G. Van: The motions of a moored ship in waves, N.S.M.B. Publication No. 510, Netherlands, 1976.
- 4) 榎木 亨・青木伸一: 不規則波中での港内係留船の運動予測手法に関する一考察——流体力特性からみた検討——第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 667~671, 1985.
- 5) 小田一紀・石上昌男・秋山 斉: ハイブリッド型シミュレーション法による荒天時船体動揺解析, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 662~666, 1985.
- 6) 井島武士・田淵幹修・湯村やす: 有限水深の波による矩形断面体の運動と波の変形, 土木学会論文報告集, No. 202, pp. 33~48, 1972, 6.
- 7) 珠久正憲・島田博之・藤井 斉・豊田昭三・池上国広・安藤裕昭: 浅海浮上式備蓄タンクの係留に関する研究, 日本造船学会論文集, No. 146, pp. 257~266, 1979, 11.