

海技研におけるメガフロート研究の現状と展望

海洋開発研究領域 大松重雄

1. まえがき

超大型浮体式海洋構造物に関しては、海技研は船研時代からの長い歴史を有している。その発端は関西国際空港第一期工事にさかのぼる。初めに行われた研究は、当時の運輸省航空局の依頼により、航空審議会の技術部会が海上空港の建設工法を比較検討するために必要な技術資料を提供するために、浮体工法による海上空港建設の技術的な調査研究を実施したものである。本研究は1977,1978年の2カ年にわたり、当時の造船界の総力を挙げて取り組み、浮体式海上空港（浮体形式はセミサブ式）の建設の可能性、安全性及び経済性等について総合的な技術のとりまとめが行われた。関西国際空港の建設工法は、最終的には埋立工法が採用されることになったが、本研究により、造船工業界としては浮体工法の礎を築いたといえる。また、当所はこの中で、特に自然環境条件の設定、浮体に働く外力の推定法並びに係留浮体の挙動及び係留力の予測法を担当し、超大型浮体の水槽実験法等の研究ポテンシャルを獲得することができた¹⁾。



図—1 浮体式海上空港の模型実験（1978年）
（長さ20.2m、幅3.3mのセミサブ模型）

ついで、上記の工法選定において浮体工法が採用されなかったのは実海域における実績が無かったことも一因であるとの認識のもと、超大型浮体の一部

を模擬した実験構造物「POSEIDON号」による実海域実験が実施された。本実験は1986年から1990年までの5年間にわたって、山形県由良沖で行われ、冬場の日本海の荒波中での浮体運動、構造歪、係留力、不均一温度分布による応力、腐食などの膨大なデータが取得された²⁻⁴⁾。本研究は当所が中心となって、民間企業8社、気象庁、海洋科学技術センター、日本海事協会との共同で取り組まれたものである。本研究により、当所は実海域実験の技術を取得し、後で述べるITメガフロートの実海域実験に活用されることとなった。



図—2 POSEIDON号の実海域実験（1987年）
（長さ30m、幅20m、高さ13.5m）

引き続き、超大型浮体による海洋空間利用の機運の高まりにより、1995年にメガフロート技術研究組合が発足し、300m浮体を用いた実証実験（フェーズ1995年～1997年）、1000m浮体を用いた実証実験（フェーズ21998年～2000年）が実施された。本研究により、ポンツーン型メガフロートの建設技術の確立、海上空港としての機能保証の確認が実証浮体実験を通して明示され、次世代の海洋空間利用の扉を開く技術として「メガフロート」が社会的に認知されるようになった。



図—3 長さ1000mの実証浮体（2000年）
（航空機離着陸実験）

当所は、国立研究機関としてメガフロート技術研究組合との共同研究に取り組み、特に設計・建造時及び点検・補修時の安全性評価法の研究を行った。また、その後、運輸施設整備事業団の公募型研究による「新形式メガフロート」の研究にも参加し、係留消波浮体式メガフロート及びセミサブとポンツーンのハイブリッド型メガフロートの開発研究に取り組んだ。

本稿では、当所が実施したこれらのメガフロートに関する研究の成果を概括するとともに、メガフロートの新たな活用法に関する研究の展望、確立されたメガフロート技術の国際標準化の方針等を紹介することにする。

2．メガフロートに関する研究成果

本節では、上記のメガフロート技術研究組合との共同研究で当所が実施した設計・建造時及び点検・補修時の安全性評価法の研究、運輸施設整備事業団の公募型研究による「新形式メガフロート」の研究で当所が担当した係留消波浮体式メガフロート及びセミサブ型メガフロートの開発研究について概要を紹介する。

2.1 メガフロートの弾性応答

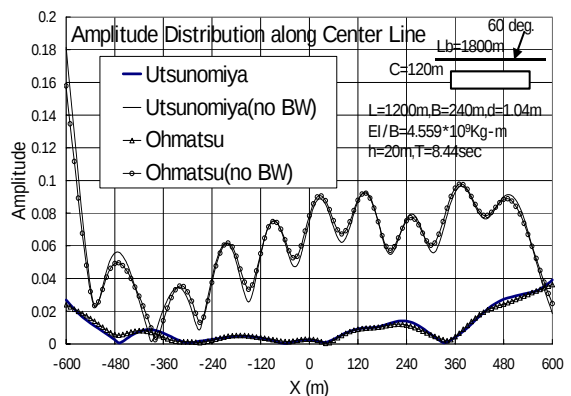
メガフロート研究におけるキーワードの一つは「弾性応答」である。メガフロートは水平方向の長さがKmのオーダーであるのに対して、高さ方向の寸法は高々数mであり、弾性応答が浮体に要求される安全性及び機能保証の面から無視できないからである。この弾性応答は計算機の記憶容量や計算速度さえ十分であるならば、原理的には通常の浮体の応答解析理論で解くことができる。しかしながら、浮体

の水平方向の長さに比べると実海域の波長は非常に短く、例えば周期5秒（波長 $\lambda=40\text{m}$ ）の波が長さ $L=5000\text{m}$ の浮体に入射する場合、 $L/\lambda=125$ となり、通常の特異点分布法等では膨大なメッシュ数と計算時間が必要となる。この難点を克服すべく多くの研究者がさまざまな工夫をこらした計算法の開発に取り組んだが、当所においても以下のような各種のプログラム開発を行った。また、そのプログラムの妥当性検証のために実施した超大型浮体の水槽実験でも海技研独自の模型製作法、計測法を考案した。

1) 3次元領域分割法及びモード展開法による弾性応答計算プログラム⁵⁻⁹⁾

本プログラムは、radiation及びdiffraction流体力の計算には3次元領域分割法を用い、弾性挙動の表現にはモード展開法を用いているが、流体力係数の計算において、「長方形区域におけるHelmholtz方程式のDirichlet問題の解の表現」を導出し、解析的手法を用いることにより計算時間の大幅な短縮を図っている点に特長がある。この計算法で世界で初めて5000m級浮体の厳密な弾性応答計算が可能となり、メガフロート技術研究組合等でも活用された。

また本プログラムは浮体近傍に防波堤が存在する場合にも、その影響を厳密に取り入れることが可能のように拡張された。

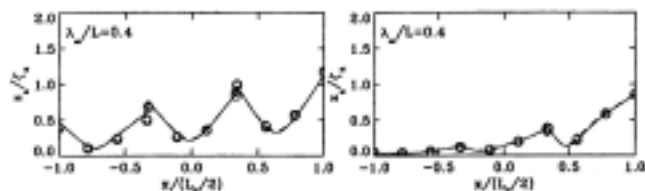


図—4 防波堤が有る場合の弾性応答計算

2) 任意形状浮体の弾性応答計算プログラム¹⁰⁻¹³⁾

上記のプログラムは5000m級まで対応可能であるが、浮体形状は長方形に限られる。本プログラムは流体力計算には圧力分布法を用い、弾性応答計算には直接法（離散化法）を用いることで、任意の平面形状の浮体の弾性応答計算が可能である。ただし、計算容量の点から浮体寸法は1000m程度までである。

本プログラムは複数浮体にも対応でき、メガフロートのユニット接合時の相対運動、接合荷重の推定も可能であり、メガフロート技術研究組合でも活用された。



図—5 3ユニット結合無し（左）有り（右）の場合の弾性応答（計算と実験）

3) 弾性応答の時刻歴解析プログラム¹⁴⁻¹⁵⁾

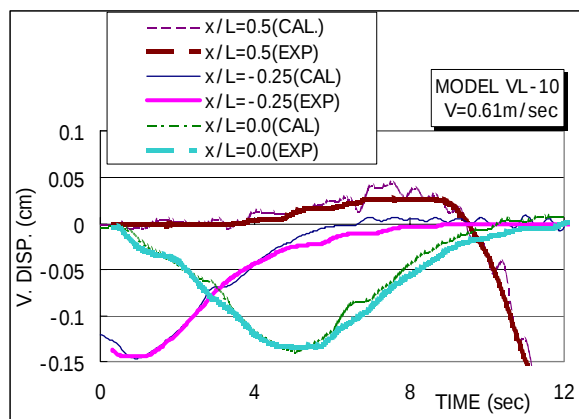
今まで述べたプログラムは規則波中の応答などの、いわゆる周波数領域の計算を行うものであるが、不規則波中の応答や、飛行機の離着陸等の荷重に対する応答を計算するには時間領域での取り扱いが必要である。

一般の船舶等の不規則中応答は規則波中応答の線形重ね合わせ理論が適用できる。超大型浮体の弾性応答についても線形重ね合わせ理論が適用できるかどうかを確認するため、先に述べた周波数領域の弾性応答計算プログラムを利用して応答関数を求め、Fourier変換、逆変換によって不規則波中応答を計算するプログラムを作成した。不規則波中の弾性応答の模型実験結果と比較し、その有効性が確かめられた。

一方、航空機離着陸時等の動荷重に対する応答を計算するためには時間領域の運動方程式を直接解くプログラムが開発された。ここでは、弾性の取り扱いにFEMを用い、時刻歴計算の解法はウイルソンの θ 法基本ソルバーとしている。これについても、浮体模型上をウェイトを走行させた水槽実験と比較し良好な一致が得られた。

4) 超大型浮体の水槽実験¹⁰⁾

これらの弾性応答計算プログラムの妥当性を確認するために、超大型浮体模型を用いた水槽実験が実施された。弾性応答実験のためには、浮体の剛性を実機と相似になるように製作する必要がある。また、弾性応答を計測するには非常に多くの点での変位計測が求められる。当所ではこれらの難点を克服する



図—6 移動荷重に対する弾性変形（計算と実験の比較）

水槽実験法を開発し、当所で行った実験の結果は他機関で開発された計算プログラムの検証に繁用されることとなった。また、その後の他機関での水槽実験の手本として当所の手法が採用されている。



図—7 メガフロート弾性応答の水槽実験（長さ15mのバックボーン模型使用例）

2.2 多点係留系の安全性評価法¹⁶⁻²¹⁾

メガフロートは海上空港等の公共性の高い施設として利用されるため、社会的に認知されるためにはその安全性評価を厳密に行う必要がある。係留系の安全性は、係留装置の破壊による浮体の漂流等の大事故を未然に防止する観点から最も重要な評価項目の一つである。

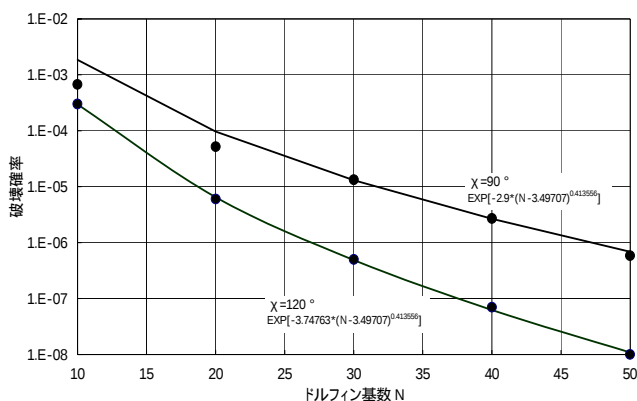
構造物の安全性とは、いかなる人的・物的損害をも生じさせない状態を保つ能力とすることができる。しかしこれでは定性的すぎて安全性を評価するのは困難である。安全性と同様の言葉に信頼性がある。信頼性とは、所定の期間に供用期間中に構造物が破壊しない確率と定義できる。安全性は信頼性よりも

広い意味を持っているが、通常の場合、信頼性を安全性と同じものとして考えることが多い。どのような構造物でも破壊すれば、人的・物的被害を伴うからである。本研究では、終局限界状態を想定した状況での係留系の非破壊確率を係留系の安全性と定義し、非破壊確率の推定法としての信頼性解析手法を開発した。

そのために、多点係留された超大型浮体の変動風中、不規則波中の挙動を時間領域シミュレーションによって求める手法を開発した。その場合、変動波漂流力を推定する必要があるが、前記の弾性応答を考慮した漂流力推定法も開発した。

この時間領域シミュレーションを繰り返し行うことにより初めて安全性の定量的評価が可能となり、本法は国土交通省の「メガフロート安全性評価指針」に採り入れられた。

近い将来、メガフロートの実プロジェクトが計画された場合には、当所はこれらの成果及び総合水槽実験により安全性に関する総合確認を行いたいと考えている。

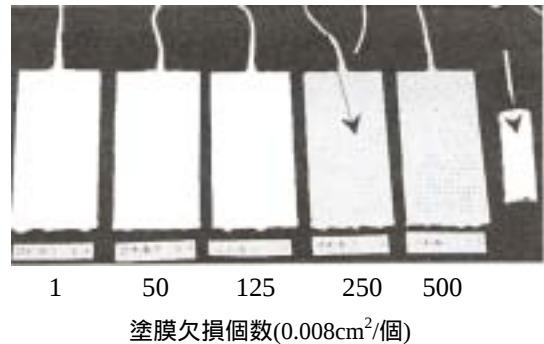


図—8 係留基数に対する破壊確率の変化
(5000m級浮体、防波堤無しの場合)

2.3 電気防食²²⁻²⁴⁾

メガフロートは長期間にわたって安全かつ良好な状態で維持することが求められる。水面下にある鋼構造物の防食には塗装と電気防食が併用されるが、当所ではアルミニウム流電陽極について種々の環境因子（海水の流れ、温度、導電率、塗膜欠損形態等）のもとで電気防食を行った場合に電位分布がどのように変化するか、適正な陽極間隔等について浸漬試験によって調査した。また、メガフロートの飛沫帯には耐食チタンを貼ることが想定される場合がある

が、耐食チタンと電気防食が併用された場合、チタン表面に発生する水素がチタンに及ぼす影響についても浸漬試験によって調査中である。これらの試験は長期間を要するため、平成17年度まで調査を続行する予定である。

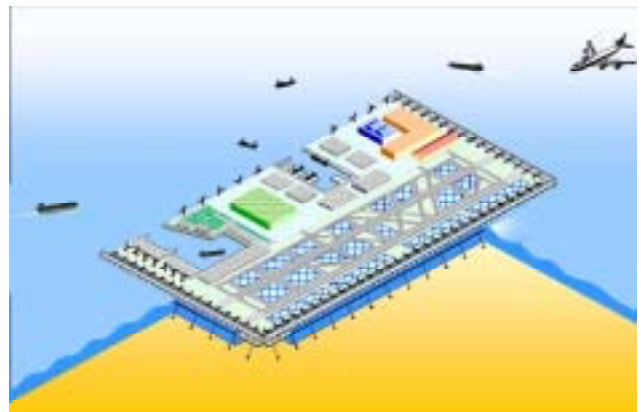


図—9 分散型の塗膜欠損部を模擬した試験片

2.4 新形式メガフロート²⁵⁻²⁷⁾

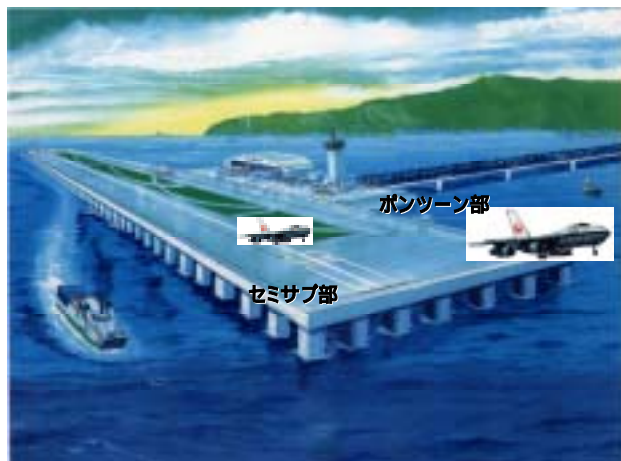
平成11年度末から平成12年度にかけて運輸施設整備事業団の公募型研究として、当所では2種類の新形式メガフロートの開発研究に参加した。ここで新形式メガフロートとは、メガフロートの適用範囲を拡大すべく、外海に面した大水深で、かつ厳しい海象条件下でも耐えられるような新しいコンセプトにもとづくメガフロートのことである。

一つは係留消波浮体式メガフロートと称するもので、通常の防波堤の代わりに浮消波堤をポンツーン型メガフロート本体の周囲に配置し、それを本体の係留装置としても利用するものである。係留方式は図のような多点チェーン係留とし、当所ではこの係留消波浮体による波浪低減効果、係留の成立性について新たに開発した多浮体多点係留の挙動シミュレーション及び水槽実験によって確認した。



図—10 係留消波浮体式メガフロート

もう一つはセミサブ型とポンツーン型を併用したハイブリッド型のメガフロートである。セミサブ部を外洋に面して波浪低減を図り、その背後にポンツーンを配置するものである。この場合も理論計算と水槽実験によりその成立性を確認した。



図—11 ハイブリッド型メガフロート
(沿岸空港の例)

3. メガフロートの活用法に関する研究

以上が、当所で最近実施したメガフロートに関する研究の概要である。本節では、メガフロートの新たな活用法として、現在取り組んでいる研究及び今後の研究計画について紹介する。

1) 情報基地 (ITメガフロート)²⁸⁾

平成13年度より国土交通省の委託研究「メガフロート情報基地機能実証実験」を実施している。これはメガフロートを大都市近海に設置し、地震に強いというメガフロートの特性を生かして情報バックアップセンターとして活用する構想である。本研究で当所はメガフロート本体の機能を向上させるための技術開発(波エネルギー吸収装置、メガフロート長期健全性予測診断システム)を担当している。また、NTT等との共同研究により、メガフロートが情報基地として活用できることを実証した。詳しくは別稿で報告する。

2) 浮体式洋上風力発電システム

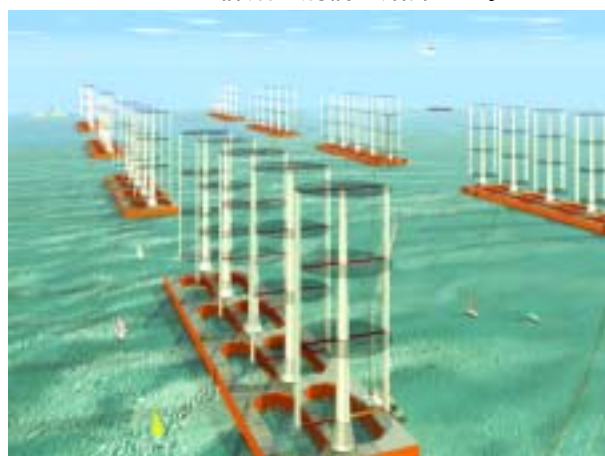
地球温暖化防止のため再生可能な自然エネルギーの利用が要望されている。風力、太陽光、波力、バイオマス等の自然エネルギーの中で特に風力はヨーロッパ、米国等で大規模発電に成功しており、期待が高まっている。特にヨーロッパでは風力発電の洋上への展開が開始されている。洋上は陸上より風況

が良く、また大型風車建設のための用地確保が容易等の理由による。

一方我が国の風力発電は山間部の設置例が多いが、建設コストが高く、普及を阻害する要因の一つとなっており、今後は洋上展開を図るべきである。その場合、日本沿岸は岸近くから水深が深くなることが多く、浮体式の基盤を開発する必要がある。幸い我が国は浮体建設に関しては高い技術を有しており、メガフロートの建設技術が活用される。

当所ではそのためのフィージビリティスタディーを開始しており、風車に及ぼす動揺影響の予備実験、コスト試算等を行っている。その際、風車の形式としては動揺の影響の小さい、垂直軸風車を想定している。今後、公募型研究に応募し、風車搭載に最適な浮体の開発、最適な風車配置等のプロジェクトに取り組む予定である。

これについても詳細は別稿で紹介する。



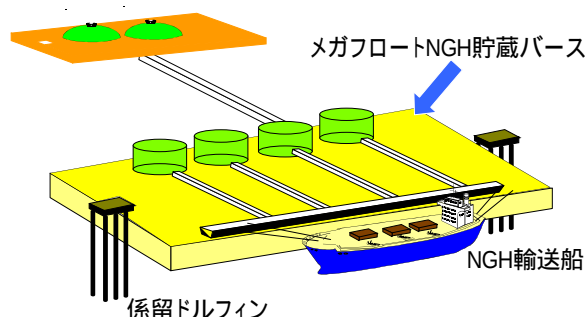
図—12 浮体式風力発電システム(垂直軸風車)

3) NGH貯蔵・再ガス化基地

ガスハイドレートにより天然ガスを輸送する技術の開発が始まっている。天然ガスハイドレート(Natural Gas hydrate 略してNGH)はLNGよりずっと室温に近い温度で製造・輸送されるのでトータルコストがLNG輸送より安く、かつ安全であると言われている。

このNGHを天然ガス受入港で貯蔵し、再ガス化するための基地としてメガフロートの活用が考えられる。メガフロートは膨大な内部空間を有し、NGH及び再ガス化に伴って発生する水(再利用する)の貯蔵に最適であり、また再ガス化プラントを上載でき

る上部面積も十分だからである。これについても今後、NGH輸送システムの一環としてプロジェクトを立ち上げることを計画中である。



図—13 NGH貯蔵バース用メガフロート

4．メガフロート技術の国際標準化

メガフロート技術は我が国が世界に先駆けて開発した技術である。この技術をISOの場で国際標準化するために、ISO/TC67/SC7に参加することになった。TC67は「石油及び天然ガス工業材料、装置及び海洋構造物」の標準化を行う技術委員会で、SC7はその内の「海洋構造物」に関する小委員会である。

そのための国内審議団体として（財）日本船舶標準協会が承認され、同協会に「海洋構造物部会」が設置された。同部会の目的は、「我が国が新規に開発したメガフロート技術、氷海域構造物に関する技術等を含め、我が国の海洋構造物分野における技術をISO規格に反映させ、もって我が国の国益に資する」ことである。当所はその部会のとりまとめ及び幹事を担当している。

現在、SC7においては、ISO/CD19904（浮体係留システム）等が検討されており、その中に我が国独自の石油備蓄船に関する技術を、弾性応答解析技術を含めて採り入れるよう活動中である。

また、IMOに対しても、メガフロートの国際ガイドラインを提案しようという動きがある。メガフロートは海外においても活用の構想が発表されている。シンガポールの都市圏海上都市の開発、モナコ沖の大型浮き栈橋計画、豪州シドニー沖等の浮体空港計画、韓国における超大型人工島設置構想等である。このように、メガフロートは空港、港湾施設としての利用が想定されるため、不特定多数の国の航空機や船舶が利用すること、これらの大型施設は大部分の国では国際共同プロジェクトとして建設される可

能性が高い等の理由により国際的に標準化されたガイドラインを定めておくことが望ましいからである。我が国がリーダーシップを発揮し、IMOに提案していくことは浮体技術の先進国としての責務である。当所としても、そのような動きに対しては積極的に貢献していきたいと考えている。

5．おわりに

以上、海技研における近年のメガフロート研究の成果、今後の動向を概括したが、最後に、現在当所では、国際的な研究交流の場として「海洋空間利用のための国際シンポジウム」（VLFS国際ワークショップを含む）を平成15年1月に開催する予定で準備中であることを報告し本稿を終わる。

参考文献

- 1) 安藤定雄他：浮体工法による海上空港建設に係わる評価のための技術調査研究、船研報告別冊4号(1983)
- 2) 海洋開発工学部：浮遊式海洋構造物の実海域実験 その1．実験の概要、船研報告別冊13号(1992)
- 3) 海洋開発工学部：浮遊式海洋構造物の実海域実験 その2．研究報告、船研報告別冊16号(1994)
- 4) 海洋開発工学部：浮遊式海洋構造物の実海域実験 その3．観測資料、船研報告別冊17号(1994)
- 5) 大松重雄：超大型ボンツーン型浮体の波浪中弾性応答計算、日本造船学会論文集第182号(1997)
- 6) 大松重雄他：ボンツーン型超大型浮体の波浪中弾性応答特性、日本造船学会論文集第183号(1998)
- 7) 大松重雄：防波堤が存在する場合のボンツーン型超大型浮体の波浪中弾性応答計算法 その1．近似計算法、日本造船学会論文集第185号(1999)
- 8) 大松重雄：防波堤が存在する場合のボンツーン型超大型浮体の波浪中弾性応答計算法 その2．厳密計算法、日本造船学会論文集第186号(1999)

- 9) S.Ohmatsu : Numerical Calculation Method for the Hydroelastic Response of a Pontoon-Type Very Large Floating Structure Close to a Breakwater, Journal of Marine Science and Technology, Vol.5, No.4 (2000)
- 10) 矢後清和他:浅喫水箱形浮体の波浪中弾性応答について、その1 .大型模型による水槽試験、日本造船学会論文集第180号(1996)
- 11) 矢後清和他:浅喫水箱形浮体の波浪中弾性応答について、その2 .5000m規模の浮体を想定した水槽試験、日本造船学会論文集第182号(1997)
- 12) 矢後清和他:浅喫水箱形浮体の波浪中弾性応答について、その3 .ユニット接合時の応答、日本造船学会論文集第183号(1998)
- 13) 矢後清和他:超大型浮体式構造物の弾性挙動における平面形状などの影響、第15回海洋工学シンポジウム(2000)
- 14) 大松重雄:超大型浮体の弾性応答時系列計算法、日本造船学会論文集第183号(1998)
- 15) 遠藤久芳他:動荷重を受ける大型浮体の時刻歴応答、日本造船学会論文集第186号(1999)
- 16) 齋藤昌勝他:多点係留系の波浪中漸次崩壊特性、日本造船学会論文集第182号(1997)
- 17) 齋藤昌勝他:防波堤が存在する場合の超大型浮体式海洋構造物の係留系破壊確率推定法、日本造船学会論文集第185号(1999)
- 18) 難波康広他:超大型浮体式構造物に働く変動漂流力の推定法、その1 .長波頂波中模型実験、日本造船学会論文集第186号(1999)
- 19) 難波康広他:超大型浮体式構造物に働く変動漂流力の推定法、その2 .短波頂波中模型実験、日本造船学会論文集第187号(2000)
- 20) 難波康広他:超大型浮体式構造物に働く変動漂流力の推定法、その3 .実海域実験、日本造船学会論文集第188号(2000)
- 21) 齋藤昌勝他:超大型浮体式海洋構造物の安全性評価に関する調査研究、船研報告第37巻第5号
- 22) 高井隆三他:アルミニウム流電陽極を用いた電気防食法の電位分布に及ぼす種々の環境因子の影響と陽極配置間隔について、第15回海洋工学シンポジウム(2000)
- 23) Y.Watanabe et al. : A Study on Optimum Arrangement of AL Galvanic Anodes for a Cathodic Protection on Offshore Structures, Offshore Mediterranean Conference(2001)
- 24) 高井隆三他:海水環境下における塗膜欠損形態と適正防食電流密度との関係について、第16回海洋工学シンポジウム(2001)
- 25) 吉田宏一郎他:セミサブメガフロート実用化のための基礎的研究、運輸施設整備事業団平成12年度終了課題研究成果報告書(2001)
- 26) 大松重雄他:エコフロート(波エネルギー吸収機構を備えた自然エネルギー利用型沖合メガフロート)に関する基礎研究、運輸施設整備事業団平成12年度終了課題研究成果報告書(2001)
- 27) S.Ohmatsu et al. : Study on Floating Breakwater for Eco-Float Mooring System, Proceedings of OMAE Rio de Janeiro(2001)
- 28) S.Ohmatsu:At-Sea Experiment on Functional Verification of Floating Information Technology Base using Mega-Float, 24th UJNR/MFP(2001)