

ガイドタワープラットフォームの近似的波浪中応答解析 Approximate Response Analysis of Guyed Tower Platform in Waves

片山正敏*・宇ノ木賢一**
Masatoshi Katayama and Ken-ichi Unoki

This paper presents an approximate response analysis method in waves for a guyed tower platform. Its accuracy in computation and applicability to practical problems are reviewed by comparing the results of the analysis with those of the field measurements on a large-scale model of the guyed tower platform previously performed off the coast along Gulf of Mexico. Subsequently to the above analysis, a simplified structural modeling technique to be used in the initial designing and planning of a guyed tower platform is also discussed.

Keywords : Response analysis, Guyed tower platform, Field measurements, In waves

1. はじめに

近年、大水深向け石油掘削・生産設備として、従来の固定／着底式プラットフォームのほかに、ガイドタワー方式やテンションレグ方式の、いわゆる、揺動形構造物 (Compliant Structures, 図-1 参照) も欧米では設計・建造されるようになってきた。これら揺動形プラットフォームの特徴は、従来の固定／着底式プラットフォームと比べて、波浪中運動を許容する代わりに波浪荷重を軽減させ、大水深化にともなうコスト (鋼材重量など) の急上昇をおさえた点にある。

本論文では、ガイドタワープラットフォームの計画設計のための近似的な波浪中応答解析法を中心に、その理論的考察や以前に米国メキシコ湾において実施された海上大形模型実験結果の解析による解析法の実際問題への適用性について検討した。さらに、この種構造物の初期計画設計段階において有用となる近似的手法、とくに構造モデルの単純化手法などに関しても検討した。

2. プラットフォームの構造概要および特徴

ガイドタワープラットフォームは、従来の固定／着底式プラットフォームとは異なり、海底てい (碇) 着部とデッキを支持するタワー (立体骨組構造) およびガイド (係留) ラインにより構成される (図-1 の左図参照)。海底てい (碇) 着部はパイル構造となっているが、構造モデルとしてはむしろ回転支点 (ヒンジ) に近い。

従来の固定／着底式プラットフォームでは、波・風・潮流などの水平方向の外力によって、タワーの海底部付近での曲げモーメントやせん断力が大きくなり、水深が大きくなるにつれてこの傾向は著しくなる。これに比べて、ガイドタワープラットフォームは次のような特徴をもっている。

a) 水平方向の支点が、海底てい (碇) 着部とタワー上部のガイド (係留) ライン取付点にあるため、発生する曲げモーメントやせん断力が分散され、タワーの全体構造の軽量化が図れる。

b) ガイドタワーは、波浪などによってある程度の水平運動を生じるが、一般的に、タワーの水平運動の固有周期を設計波周期より十分大きく設定することにより、波浪荷重を軽減させることができる。

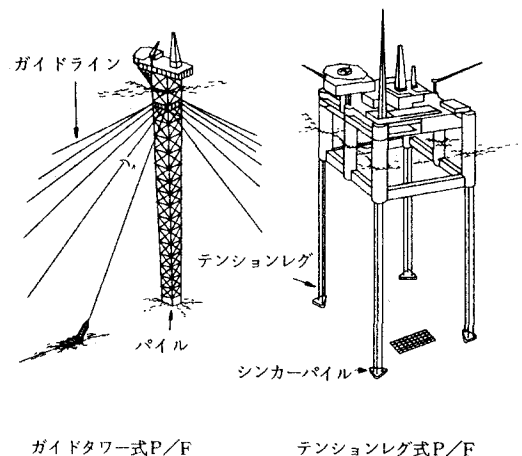


図-1 揺動形大水深向プラットフォーム

* 正会員 九州共立大学工学部開発学科 (807 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)

** 三菱重工業株式会社

- c) 暴風時などでタワーの水平運動が大きくなった場合には、ガイド（係留）ラインの途中に配置した中間ウエイトなどが持ち上がるため、ガイドラインにそれほど大きな張力は発生しない。
- d) 海底てい（碇）着部のパイルなどは、水平移動を防ぐとともに鉛直荷重を支持する目的であり、大規模な海中工事が比較的少ない。

3. 近似的波浪中応答解析法

(1) 基本的仮定および解析法

ガイドタワーブラットフォームの波浪中応答解析にあたっては、まず、ガイドタワーの全体構造を剛体とみなして波浪中の運動応答を解析し、その結果を用いて弾性体としての構造応答を解析することとする。

解析にあたっては、次のような基本的仮定が設けられている。

- a) ガイドタワーの全体応答解析にあたっては、立体骨組構造として取り扱うことができる。
- b) 流体は非圧縮、非粘性、非回転の理想流体とする。
- c) 構成部材の断面寸法は、波長に比較して十分小さく、その流体力学的な相互干渉は無視できる。
- d) ガイド（係留）ラインなどの外部力学系に作用する流体力学的な力は無視できる。
- e) 波は微小振幅または有限振幅の深海進行波とし、流体力は波による水粒子の変位、速度、加速度で線形表示できる。ただし、変位、速度に関しては、一部非線形項を考慮する。
- f) 構造変形は微小弾性で、運動応答解析においては無視でき、運動は重心まわりの調和振動とする。
- g) 風圧力、潮流力などはタワーの運動変位にかかわらず一定とし、静的外力として取り扱える。

各構成部材に作用する力は、慣性力、圧力による力、相対変位による力、相対速度による力、相対加速度による力の5種類と仮定し、部材要素重心を節点とする立体骨組構造の節点外力（節点集中荷重および分布荷重）とみなす。慣性力以外の4種類の力のうち、部材要素の変位、速度、加速度に依存する項は、復原力、Radiation Force や外部力学系による係留力ならびに Froude-Kriloff Force、Diffraction Force の波強制力などである。

以上から、各波周波数に対するみかけ慣性力、減衰力、復原力（外部力学系を含む）および波強制力からなる運動方程式が組み立てられる。この運動方程式を解析することにより、6成分の運動振幅・位相が求められ、したがって、各構成部材の分担すべき部材力も決定される。

(2) 波浪中全体応答解析法

ガイドタワーブラットフォーム全体構造系の周波数応答関数は、部材要素 i に関する式 (1) ~ (3) を解くことにより求められる。¹⁾

$$\sum_i F_i^W + \sum_j F_j^B + \sum_j F_j^T = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\sum_i F_i^{WI} + \sum_i F_i^C + \sum_i F_i^{DR} + \left\{ \sum_j (T_j^t \cdot C_j^I \cdot T_j) + \sum_k (T_k^t \cdot C_k^I \cdot T_k) \right\} \cdot \eta_{static} = 0 \quad \dots (2)$$

$$\begin{aligned} & \sum_i (T_i^t \cdot A_i \cdot T_i) \cdot \ddot{\eta} + \sum_i (T_i^t \cdot B_i^I \cdot T_i) \cdot \dot{\eta} \\ & + \sum_i (T_i^t \cdot B_i^{II}) \cdot (T_i \cdot \dot{\eta} - \dot{\xi}_i) \cdot |T_i \cdot \dot{\eta} - \dot{\xi}_i| \\ & + \sum_j (T_j^t \cdot C_j^I \cdot T_j) \cdot \eta + \sum_k (T_k^t \cdot C_k^I) \cdot (T_k \cdot \eta - \xi_k) \\ & = \sum_i (T_i^t \cdot G_i) \cdot \ddot{\xi}_i + \sum_i (T_i^t \cdot H_i) \cdot \dot{\xi}_i + \sum_k (T_k^t \cdot G_k) \cdot \xi_k \quad \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

ただし、

- F_i^W : 重量ベクトル（積載荷重、自重など）
- F_i^B : 浮力ベクトル
- F_j^T : 外部力学系（ガイドラインなど、以下同様）の初期張力ベクトル
- F_i^{WI} : 風荷重ベクトル
- F_i^C : 潮流力ベクトル
- F_i^{DR} : 波漂流力ベクトル
- T_j : タワー構造への外部力学系の着点 j の変位変換マトリックス
- T_j^t : T_j の転置行列
- T_k : 水面を切る部材要素 k の変位変換マトリックス
- T_k^t : T_k の転置行列

T_i : 部材要素 i の変位変換マトリックス

T_i^t : T_i の転置行列

C_j^I : タワー構造への外部力学系の着点 j における非線形ばね定数マトリックス

C_k^I : 水面を切る部材要素 k に関する復原力係数マトリックス

η_{static} : 静的変位ベクトル (風、潮流、波漂流力に対応する)

η : 全体構造系 (外部力学系を含む) の重心の運動変位ベクトル

$\cdot$: 時間に対する微分記号 ($\dot{x} = dx/dt$)

A_i : 部材要素 i に関するみかけ慣性力係数マトリックス (波面と運動を考慮した没水部について)

B_i^I : 部材要素 i に関する造波減衰力係数マトリックス (波面と運動を考慮した没水部について)

B_i^{II} : 部材要素 i に関する抗力係数マトリックス (波面と運動を考慮した没水部について)

ζ_i : 入射波の水粒子の部材要素 i における変位ベクトル

ζ_k : 入射波の水粒子の水面を切る部材要素 k における変位ベクトル

G_i : 部材要素 i に作用する波強制力の慣性力係数マトリックス (波面と運動を考慮した没水部について)

G_k : 水面を切る部材要素 k に作用する波強制力の変動浮力係数マトリックス

H_i : 部材要素 i に作用する波強制力の減衰力係数マトリックス (波面と運動を考慮した没水部について)

全体構造の重心まわりの運動を近似的に調和振動と仮定すると式 (4) が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \eta_0 \cos(\omega t + \varepsilon) \\ \dot{\eta} &= -\omega \eta_0 \sin(\omega t + \varepsilon) \\ \ddot{\eta} &= -\omega^2 \eta_0 \cos(\omega t + \varepsilon) = -\omega^2 \eta \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

式 (4) を式 (3) に代入し $\ddot{\eta}$ について整理した後、時刻歴応答解析することもできるが、かなりの計算時間を要することとなるので、計算を簡単にするため、次のような近似的解析法をとることとする。すなわち、入射波の周期を適当に等分 (註: 一般的には偶数に等分するのがよい) した各位相ごとに、初期値として式 (3) を線形化した運動方程式の解析による線形解を使用し、必要な精度まで繰り返し計算を行って解を求め、その解を用いてフーリエ級数に展開することにより最終的に周波数応答関数を求める。

具体的には、まず入射波の周期を N 等分して、各位相ごとに式 (3) を線形化した運動方程式を解く。つづいて入射波の波面と線形解による運動 (動揺) を考慮して、運動方程式の右辺の波強制力項と左辺の減衰力項を確定する。

すると、式 (3) は $\ddot{\eta}$ と η に関する代数方程式となるが式 (4) の関係より、最終的にガイドタワープラットフォーム全体構造系の重心の運動変位 $\eta = \{x, y, z, \phi, \theta, \psi\}$ にて表され、比較的簡単な繰り返し計算により解が求まる。

N 個 (偶数) の位相ごとの η に関する解 $\overline{\eta}(t)$ が求まれば、式 (5) ~ (7) に示すようなフーリエ級数に展開することにより、非線形運動方程式である式 (3) の解が最終的に求められる。

$$\overline{\eta}(t) = (a_0/2) + \sum_{n=1}^{N/2-1} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) + (a_{N/2}/2) \cos(N\omega t/2) \dots \dots \dots (5)$$

ただし、

$$a_n = (2/T) \int_{-T/2}^{T/2} \overline{\eta}(t) \cos n\omega t dt \quad (n=0, 1, 2, \dots, N/2) \dots \dots \dots (6)$$

$$b_n = (2/T) \int_{-T/2}^{T/2} \overline{\eta}(t) \sin n\omega t dt \quad (n=1, 2, 3, \dots, N/2-1) \dots \dots \dots (7)$$

このように、周波数応答解析と時刻歴応答解析を組み合わせ、いわゆる、ハイブリッド型の解析法を適用することにより、近似的ではあるが比較的簡単に非線形運動方程式を解くことができる。

周波数応答関数が求まれば、不規則波浪の中での運動変位、部材力や外部力学系 (ガイドライン) に作用する張力などのパワースペクトル密度関数や分散なども計算されるので、不規則波中の応答も簡単に求まる。

(3) 外部力学系 (ガイドライン) の解析

ガイドタワープラットフォームのガイド (係留) ラインのようにラインの特性が一様ではなく、途中にウェイト (シンカー) などがある場合には、カテナリー理論による解析的方法ではなく、数値的解析法をとらざるを得ない。数値的方法にも解法によっていくつかの方法があるが、ここでは汎用性のある有限要素法²⁾によることとする。すなわち、図-2 に示すように、係留ラインを次のとおり有限個の直線要素からなる等価な力学系に置き換える。

- a) 各要素は直線状セグメントおよび節点より構成される。
- b) 直線状セグメントは曲げとねじりに対しては剛で、引張に対しては弾性的であり、自重はなく直線状である。
- c) 各要素に作用する重力、流体力などは節点に集中化させる。
- d) 各要素間はユニバーサル・ジョイント結合とする。

仮想反力法により、静的な平衡方程式を繰り返し計算することにより、図-2に示す点Aでの反力と変位の関係が求まる。すなわち、非線形ばね定数が簡単に求まる。詳細については、たとえば、参考文献²⁾³⁾を参照願いたい。

この方法によれば、分割する要素数を適当に選ぶことにより、必要な精度で解が求まる。一例として単一特性を有する係留ラインの「要素数と計算精度」の関係について、計算例を表-1に示す。係留ラインの垂下と全長の比(H/S)が約1/3とした。

図-2 等価な力学系への係留ラインの置換

表-1 係留ラインの要素数と計算精度の関係

要素数 座標	3	5	8	100	カテナ りー解
X_B (m)	100.201	100.081	100.032	100.000	100.0
Z_B (m)	-101.714	-100.583	-100.224	-100.002	-100.0

註) X_B 、 Z_B ：着地点の座標

4. 海上大形模型実験についての解析

(1) 海上大形模型実験

3. で述べた近似的波浪中応答解析法の実問題への適用性を検証するため、以前、米国 E. P. R. (Exxon Production Research Co.) 社を中心にメキシコ湾において実施された海上大形模型実験結果について解析することとした。したがって、海上大形模型実験の詳細については、参考文献^{4) - 8)}を参照願いたい。

海上実験では、実機で水深約450mを想定して試設計されたガイドタワープラットフォームの縮尺約1/5の模型が使用された。図-3に縮尺模型の概略寸法を示す。

主係留ラインは8本のφ19.0mmワイヤロープで構成され、タワーへの取付点は海面下6.1mであった。ワイヤラインの海底着地点付近(註：海象・気象条件の穏やかな時)には、長さ15.2mにわたって1ラインあたり合計約4.7ton(註：水中重量)の中間ウェイト(クランプ)が取り付けられた。

計測項目は、ガイドタワーの運動(デッキ部での水平運動)、係留ラインの張力、コンダクタパイプでの応力、海象・気象条件などで、それぞれのデータが収録された。

計測時の海象・気象条件は、概略次のとおりであった。

- o 有義波高 $H_{1/3}$: 1.2~4.2m
- o 平均波周期 T_w : 4.9~9.7sec
- o 平均風速 V_w : 3.1~12.6m/sec
- o 潮流速 V_c : 0.05~0.65m/sec

(2) 解析モデル

タワーは、183節点からなる立体骨組構造にモデル化し、重量、浮力などを計算して、節点荷重として入力

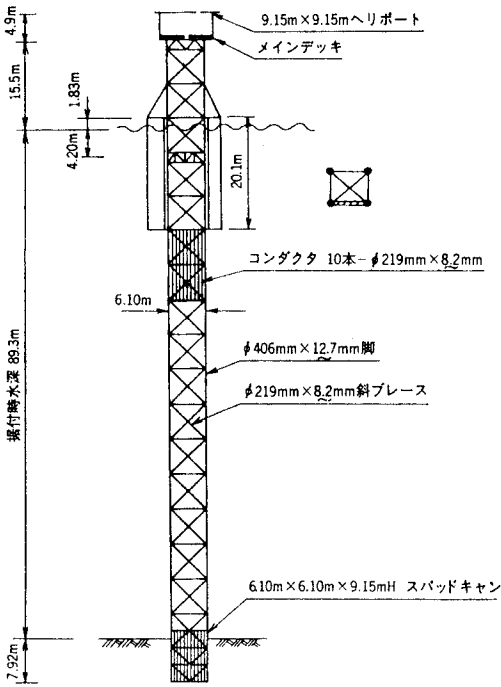


図-3 1/5縮尺模型の概略寸法⁶⁾

した。係留ラインについては、図-4に示すように1ラインあたり50要素の分割モデルとした。また、海底での支持条件は、上下・水平・回転方向の線形ばね支持構造にモデル化した。

(3) 単純化モデル

詳細モデルとは別に、構造および流体力学的にほぼ等価と思われる24節点の単純化モデルも作成した。単純化モデルは、詳細モデルの183節点から24節点へ、重量や排水量（浮力）分布を考慮しながら、幾何学的に構造全体にわたって縮約したものである。すなわち、24節点は構造全体にわたりほぼ均等に分布させてある。

波浪荷重の計算精度の観点からは、海面付近に節点数を多く分布させる方がよいが、構造応答（部材力など）の計算精度の観点からは、全体に均等的に分布させる方がよいと思われる。

また、単純化モデルの作成にあたっては、節点数を少なくしなければならないため、構造および流体力学的に必ずしも等価とはならない場合（註：例えば、水平ブレースなどの二次的部材のモデル化にあたって）もでてくる。このような場合には、式（3）中の非線形な抗力項を合わせ（すなわち、投影面積を合わせ）、線形である慣性力項については、等価に置き換えた”修正みかけ慣性力係数”を導入して計算精度の向上を図るのがよいと思われる。なお、外部力学系については、中間ウェイトなど質量の集中する部分についてのみ細かく要素数を分割すればよいが、もともと簡単な静平衡方程式を解くだけであり、計算時間も短いのでモデルの単純化を検討するまでもないと思われる。

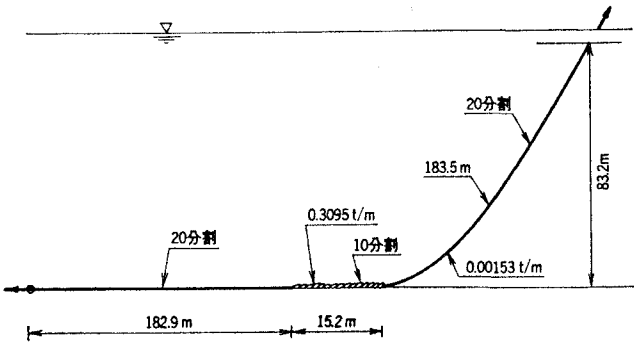


図-4 係留ラインのモデル

(4) 解析結果

a) 波スペクトル

波スペクトルの計測結果は、Pierson-Moskowitz 型スペクトルと比較的よく一致している。⁷⁾ したがって、不規則波中の応答解析においては、Pierson-Moskowitz 型スペクトルを使用することとした。

b) タワーの運動

デッキ部の水平運動応答のパワースペクトルと入射波のスペクトルの計測値から周波数応答を解析し、さらに、不規則波中の応答を計算した結果と計測値の比較を図-5に示す。なお、タワーの運動の計算には単純化モデル（24節点）を使用した。初期計画設計段階でのデータとしてはこの程度でも十分有用であると思われる。全体構造系の一次振動モードは、剛体運動モードで固有周期は9.0sec（註：計測値は9.2sec）、二次モードでは1.2secであり、3.（1）で述べた応答解析法の基本的仮定が十分成り立つといえる。

c) 部材力

ガイドタワープラットフォームが波浪中で運動するときの、部材力の計算結果の一例（註：詳細モデルを使用、計算条件：波高=2m、波周期=8.0sec）を表-2に示す。参考までに、海底で（碇）着部を固定とした場合（すなわち、固定式プラットフォームとした場合）の海底面での曲げモーメントは188tf・m、せん断力は2.28tfとなっている。

ガイドタワープラットフォームの特徴がよくでてい

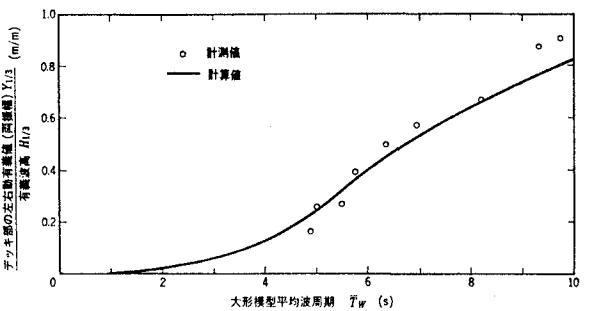


図-5 デッキ部の水平運動の周波数応答関数

表-2 曲げモーメントとせん断力

位置	曲げモーメント (tf・m)	せん断力 (tf)
デッキ	0.0	3.01
水面	58.2	4.20
係留点	80.6	2.62
1/2 水深	17.4	0.14
海底	50.2	1.21

ることがわかる。

d) 単純化モデルの適用性

タワー構造体に作用する波強制力について、詳細モデルと単純化モデル（24節点）を使用した場合の比較を図-6に示す。

垂直力については位相に、水平力については振幅に少し相違がみられるが、曲げモーメントについては比較的良好一致している。

これらの結果と、さきに述べたタワーの運動応答や振動固有周期などの計測値と単純化モデルによる計算値との相関性からみて、単純化モデルは、初期計画設計段階における、タワーの運動応答の概略算定にあたっては十分使えそうである。

すなわち、本研究で対象としたような比

較的単純な全体構造を有するガイドタワープラットフォームに限れば、詳細モデルに対して節点数を大幅に簡略化（縮約）した単純化モデルでも初期計画設計段階における運動応答などの概略検討にあたっては、十分使えそうである。

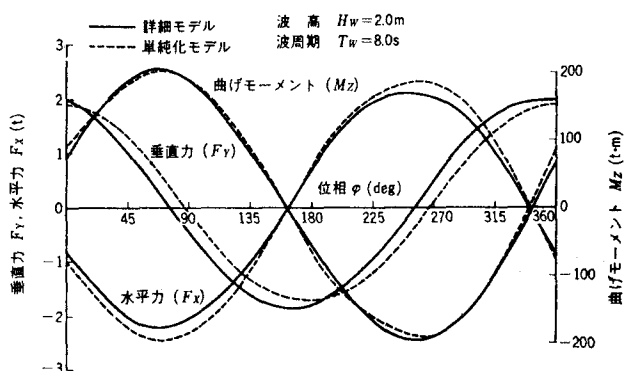


図-6 波強制力の比較

5. ま と め

ガイドタワープラットフォームの波浪中応答解析法に関して、近似的な解析手法やその実際問題への適用性を検証するための海上大形模型実験の解析結果、さらに、この種構造物の初期計画設計段階にて有用となる近似的手法とくに構造モデルの単純化手法などについて述べた。

主要な結論は次のとおりである。

- (1) ガイドタワープラットフォームの近似的な波浪中応答（運動および構造）解析法について述べるとともに、実際問題への適用性を検証できた。
- (2) この種構造物の初期計画設計段階において有用となる構造モデルの単純化手法についても述べた。
- (3) 波浪中応答解析にあたって、タワーの運動などを検討する場合、構造および流体力学的にある程度等価な単純化モデルを用いても、初期計画設計段階でのデータとしては有用なようである。

なお、単純化モデルでは、節点をできるだけタワー構造全体に均等的に分布させる方がよさそうである。

- (4) ガイドタワープラットフォームは、従来の固定／着底式に比べると、タワー構造体へ作用する波浪荷重が、低減されており、その特徴が確認できた。

参 考 文 献

- 1) 片山正敏：ガイドタワープラットフォームの近似的波浪中応答解析、九州共立大学研究報告、工学部、第16号、pp.161～166、1992。
- 2) 片山正敏・則松康文・三和英一：浮遊式海洋構造物の係留解析法、三菱重工技報、Vol.13、No.4、pp.133～141、1976。
- 3) 日本海事協会：係留システム設計指針、pp.211～217、1983。
- 4) Finn, L.D. and Young, K.E. : Field Test of a Guyed Tower, Proc. of 10th Offshore Technology Conference, Vol.2, OTC 3131, pp.681～688, 1978。
- 5) Finn, L.D. : A New Deepwater Offshore Platform - The Guyed Tower, Proc. of 8th Offshore Technology Conference, Vol.3, OTC 2688, pp.819～830, 1976。
- 6) Finn, L.D. : Test Guyed Tower - Final Report, Exxon Production Research Co., 1977。
- 7) Young, K.E., et al. : Test Guyed Tower - Final Report - Phase II, Exxon Production Research Co., 1978。
- 8) 片山正敏・宇ノ木賢一・是松雅雄・三和英一：大水深向揺動型プラットフォームの波浪中応答、日本造船学会主催、第5回海洋工学シンポジウムテキスト、pp.123～132、1981。