

最適制御理論に基づく複数連結浮体の動揺制御

大山 巧*・長谷部雅伸**・古川忠稔***・古田 均****

1. はじめに

現在, 2008 年の大阪オリンピック開催に向けて活動を進めている海上施設研究特別委員会において, 複数の浮体で構成される海上構造物の建造に関する技術的検討が進められている。各浮体の規模は大型客船程度であり, その中には宿泊施設等を対象としたグレードの高い居住性が要求される浮体も想定されている。また, オリンピック開催後についても, 防災拠点やレクリエーション施設など種々の利用形態が考えられており, 通常の浮体に比べて動揺量を大幅に減らすことが実現できれば, 浮体の特性を活かした形でその利用範囲をかなり拡張できるものと期待されている。

本委員会では, このような高い居住性が要求される浮体を対象に, その動揺量を低減させる手段として, 能動型制御の可能性が検討されている。浮体の動揺量を低減させるための従来の方策が主に係留位置や係留系などを対象とした, いわゆる受動的な考え方に基づいているのに対し, ここでは, 浮体を複数に分割し, 各浮体の連結部で制御力を加えることにより浮体の動揺量を低減させることを念頭に置いている。本論では, その一環として, 最適制御理論に基づく能動型の状態フィードバックシステムによる浮体動揺制御に関して基本的な検討を行う。

2. 最適制御理論を導入した浮体動揺解析法

(1) 複数連結浮体の運動方程式

ここでは, 図-1 に示すような古川 (1998) と同様な複数連結浮体を対象に, 断面 2 次元場でのモデル化を行った。各浮体間には逆 T 字型の連結ユニットが設けられており, 浮体と連結ユニットはユニット下部でピン結合されるとともに, 上部は線形ばねで繋がれている。なお, 連結ユニットの奥行き方向の長さは, 浮体に比べて十分に小さい。また, 動揺制御力は浮体と連結ユニット間のばねの部分 4 箇所 (図中, C1~C4 で表示) で水平方向に与えた。

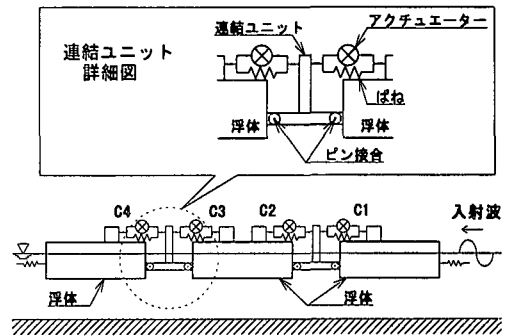


図-1 複数連結浮体

各浮体と連結ユニットはそれぞれ Sway, Heave, Roll の 3 自由度で運動するものとし, n 番目の浮体あるいは連結ユニットの各方向の複素動揺振幅を $\xi_{n1}, \xi_{n2}, \xi_{n3}$ と表しておく。浮体と連結ユニットの総数および制御力の数を一般的に N, I とすれば (図-1 の場合は $N=5, I=4$), 各運動モードに対する周波数領域の運動方程式は以下のように表される。

$$(m + M(\omega))\dot{X}(\omega) + N(\omega)\dot{X}(\omega) + (K + C)X(\omega) + \Pi(\omega) = F_H(\omega) + UF_0(\omega) \dots \dots \dots (1)$$

$$X^T = e^{-i\omega t} \{ \xi_{11}, \xi_{21}, \dots, \xi_{N1}; \xi_{12}, \dots, \xi_{N2}; \xi_{13}, \dots, \xi_{N3} \} \dots \dots \dots (2)$$

ここで, ω : 入射波の角振動数, m, M : 浮体の質量および付加質量マトリックス [$3N \times 3N$], N : 造波減衰係数マトリックス [$3N \times 3N$], K, C : 係留系および静水圧による復元力マトリックス [$3N \times 3N$], Π : 構造摩擦および流体の剝離などに伴う減衰力ベクトル [$3N \times 1$], F_H : 波強制力ベクトル [$3N \times 1$], U : 制御位置マトリックス [$3N \times I$]; F_0 , 制御力ベクトル [$I \times 1$] である。なお, 浮体と連結ユニット間のピン結合部分はばね係数が十分に大きな連結部として考え, 上部のばね結合部分とともに, その効果は K の中で表現されている。また, ここでは簡単のため, 減衰力ベクトル Π を等価線形減衰係数マトリックス E を用いて以下のように与えた。

$$\Pi(\omega) = EX(\omega) \dots \dots \dots (3)$$

複数浮体を対象とした流体力解析法に関しては, これまでに数多くの検討例があるが (例えば, 久保ら, 1991;

* 正会員 工博 清水建設(株)技術研究所
 ** 正会員 工修 清水建設(株)技術研究所
 *** 正会員 工修 大阪大学助手 大学院工学研究科 地球総合工学専攻
 **** 正会員 工博 関西大学教授 総合情報学部 総合情報学科

永田ら, 1992; 森田ら, 1994; 高村ら, 1996), ここでは最も計算効率の高い拡張緩勾配方程式モデル (大山・土田, 1995; 土田・大山, 1996) を用いて付加質量マトリックス M , 造波減衰係数マトリックス N および波強制力ベクトル F_h を算定し, Radiation 流体力 (M, N) における浮体間の相互干渉効果も考慮した。ただし, 連結ユニット部の没水部分は浮体に比べて十分に小さいと考え, この部分に作用する流体力は無視した。

(2) 最適制御理論の導入

本検討では最適制御理論として, 以下に示す 2 次形式の評価関数 J を用いた最も一般的な理論 (例えば, 小堀, 1993) を適用した。

$$J = \int \{ \dot{x}^T Q \dot{x} + F_0^T R F_0 \} dt \dots\dots\dots (4)$$

$$\dot{x}^T = \{ \dot{X}^T, \dot{X}^T \} \dots\dots\dots (5)$$

ここで, Q と R は重み行列であり, それぞれ $[6N \times 6N]$, $[I \times I]$ の次元を持つ正方対称行列である。式 (4) 右辺の各項はそれぞれ応答減減の度合と制御力の規模を表しており, 入力値である重み行列 Q と R を変化させることにより, 制御効果と制御システム規模のバランスや各運動モードに関する制御効果の重みが任意に設定できる。

状態フィードバック制御則に基づく制御力 F_0 は, ゲイン行列 $G [I \times 6N]$ により次のように表される。

$$F_0 = -Gx \dots\dots\dots (6)$$

式 (4) で定義した評価関数 J に対して最小原理を適用すると, ゲイン行列 G は次のように与えられる (小堀, 1993)。

$$G = -R^{-1} B^T A \dots\dots\dots (7)$$

ここで, A はリカッティ方程式

$$Q - ABR^{-1}B^T A + \Lambda A + A^T \Lambda = O \dots\dots\dots (8)$$

の解であり, A, B は以下のマトリックスである。

$$A = \begin{bmatrix} -(m+M)^{-1}(N+E) & -(m+M)^{-1}(K+C) \\ I & O \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} -(m+M)^{-1}U \\ O \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

したがって, Radiation 問題を解くことにより M, N を求めておくとともに減衰係数マトリックス E を設定しておけば, 所与の重み関数 Q, R に対するゲイン行列 G が式 (7)~(10) により決定できる。式 (6) を式 (1) に代入して運動方程式を解けば, 制御力を与えた場合の浮体および連結ユニットの動揺量が求められる。

3. 連結浮体に関する模型実験との比較

(1) 模型実験の概要

解析モデルを検証するために, 図-1 に示した 3 連結

浮体の模型を用いて動揺実験を行った。ただし制御力は加えず, 浮体と連結ユニットをピン (下部) およびスプリング (上部) を用いて結合した。スプリングはばね定数 $k=0.191 \text{ kN/m}$ の線形復元特性を持つものであり, スプリングが無くピン結合のみの状態についても実験を行った。模型浮体の主な諸元を表-1 に示す。なお, 連結ユニットの奥行き方向の長さは 3 cm である。

実験には, 鉛直振動流方式の無反射型造波装置を備えた幅 40 cm, 長さ 18.7 m の水路 (大山・土田, 1995) を用い, 水深 h は 30 cm とした。浮体の動揺量については, 図-2 に示されるように, 各浮体の上面において 2 点づつ, 合計 6 点 (St.1~St.6) での鉛直変位をレーザー変位計で測定した。入射波周期は 0.66 秒から 2.29 秒の間で変化させ, 入射波高は約 2 cm とした。

(2) 動揺量の比較

図-3, 4 には, 浮体と連結ユニットがピンのみにより結合されているケース (ばね無) およびスプリングを取り付けたケース (ばね有) について, 各測定位置での鉛直動揺振幅 $|D_k|$ の比較を示す。図中, 横軸の k は波数である。

単体浮体の動揺解析では, Roll 運動に対する減衰を考慮する場合が一般的であるが (例えば, 元良, 1982), 本連結浮体の運動はこのほかにピン結合部での機械的な回転摩擦の影響を受ける。本解析では, 式 (3) に示されるように等価線形という表現ではあるが, これらの減衰効果を近似的に考慮している。本連結浮体は, 単体浮体とは異なり, 複雑な固有モードを有しており (古川, 1998), 図-3, 4 の解析結果において, $1.9 < kh < 2.2$ には高次モードの共振ピークが現れているが, 減衰項を付

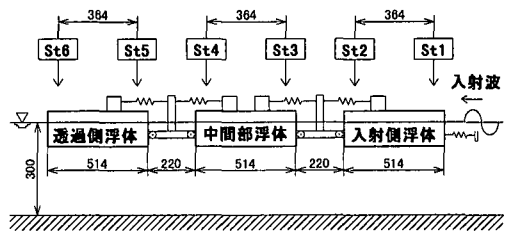


図-2 実験における動揺量の計測位置

表-1 模型浮体の主な諸元

幅 (B)	0.514 m
奥行き	0.39 m
高さ	0.16 m
喫水	0.0775 m
排水量	0.0155 t
慣性モーメント	0.000434 tm ²
重心高さ (静水面を基準)	-0.0465 m
Roll メタセンター高さ	0.2918 m
連結部ばね定数 (κ)	0.191 kN/m
係留ばね定数	0.042 kN/m

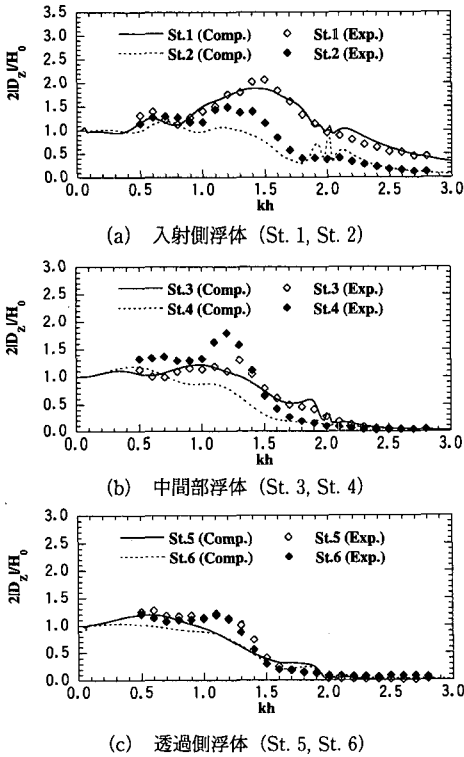


図-3 鉛直動揺振幅に関する比較 (ばね無)

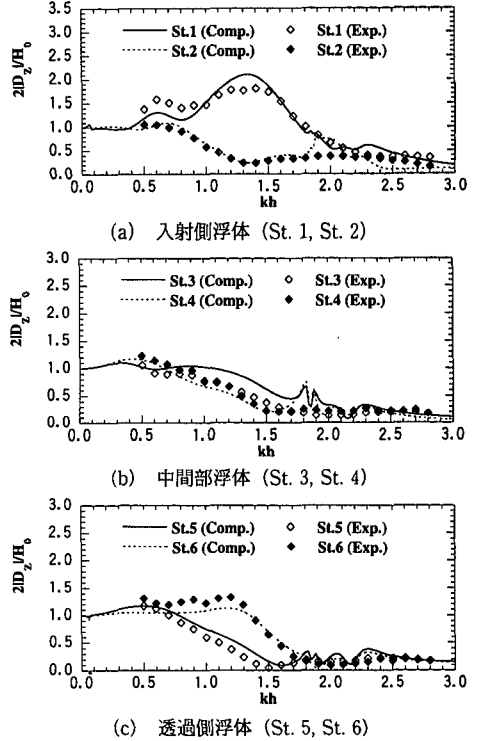


図-4 鉛直動揺振幅に関する比較 (ばね有: $k=0.191 \text{ kN/m}$)

加しているためこれらのピーク値は低く抑えられている。

実験結果において、連結ばねの有無による動揺特性の特徴的な差異は、 kh が0.8から1.6程度の周波数帯域で明確に現れている。ばね無のケース(図-3)では、入射側浮体の端部(St. 1)が大きく動揺するものの、その影響は透過側浮体にはほとんど伝わっていない。これに対してばね有のケース(図-4)では、各浮体間の連成効果がより顕著になり、入射側浮体の端部とともに透過側浮体の端部の動揺量も大きくなっている。上述のように、本解析法では、非線形性や周波数依存性の強い減衰効果についても線形近似を用いているため、解析結果と実験結果の一致は必ずしも完全なものではないが、解析結果は各ケースにおける動揺特性の差異を良好に再現している。

4. 能動型制御による動揺低減効果

(1) 問題の設定

模型実験で用いた「ばね有」の3連結浮体(図-2, 表-1 参照)を対象として、連結ばねと同じ位置4個所で水平制御力を加えた場合の浮体の動揺を解析した。ここでは、重み関数 Q , R を対角行列とし、さらに式(4)の評価関数における各項の次元を整合させるために、これらを以下のように無次元化した(「*」は無次元量を表す)。

$$Q^* = \begin{pmatrix} T_{Q1} & & O \\ & \ddots & \\ O & & T_{Q6} \end{pmatrix} Q \dots\dots\dots (11)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{Q1} = T_{Q2} = H_0^2 I, \quad T_{Q3} = (H_0/B)^2 I \\ T_{Q4} = T_{Q5} = (H_0\omega)^2 I, \quad T_{Q6} = (H_0\omega/B)^2 I \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$$R^* = (\rho g H_0 B)^2 R \dots\dots\dots (13)$$

ただし、 H_0 : 入射波高、 ρ : 流体密度、 B : 浮体の幅であり、 $T_{Q1}, T_{Q2}, \dots, T_{Q6}$ の次元はいずれも $[N \times N]$ である。なお以下の計算では、中間部浮体の Roll 運動の制御に着目し、 Q^* としてはこの運動モードの重みを1000、他の運動モードに対する重みは1で一定とした。

(2) ゲイン行列による動揺特性と制御力の変化

式(7)~(10)に示されるように、付加質量マトリックス M および造波減衰マトリックス N の周波数依存性に対応して、最適制御理論から求められるゲイン行列 G も周波数により変化する。しかし、実際の不規則な波動場に対して周波数成分ごとにゲイン調整を行うことは極めて困難であり、現実的には単一の周波数に対するゲイン行列を不規則波に対しても用いることになると考えられる。

図-5は、 $kh=1.0, 1.5, 2.0$ に対するゲイン行列を全周波数帯域に適用した場合について、中間部浮体の Roll 動揺振幅の周波数応答関数を示したものであり、比較の

ため動揺制御を行わない場合についてもプロットしてある。ただし、制御力に関する重みは $R^*=10^4 I$ で一定とした。 $kh=1.0$ および 2.0 に対するゲイン行列を用いた場合、ゲインを設定した周波数のみならず広い周波数帯域で動揺振幅は大幅に小さくなることから、現実的な不規則波動場に対してもかなりの動揺低減効果を期待できることがわかる。これに対してゲイン設定周波数を $kh=1.5$ とした場合には、その周波数付近で動揺振幅が小さくなるものの、それよりも低周波数帯域では動揺低減効果が低く、特に kh が 0.5 以下の周波数帯域では制御を行わない場合よりも動揺量が増加してしまう。

図-6には、図-5に示したケースに対するC1での制御力を示す。なお、C2, C3, C4での制御力もC1のものと同程度のオーダーであるので結果は省略する。 $kh=$

1.0と2.0のゲインを用いた場合の動揺低減効果はほぼ同等レベルであるが(図-5)、制御に必要な力のオーダーには大幅な差が生じている。 $kh=2.0$ のゲイン行列の場合、制御力の周波数特性は図-5に示した動揺特性にほぼ対応しているのに対して、 $kh=1.0, 1.5$ のゲインでは低周波数側でかなり大きな制御力が必要となる。このように、ゲイン行列は周波数依存性を有し、動揺低減の性能や効率はゲイン設定周波数によりかなり変化する。

図-7には、参考のため、各浮体のRoll運動(Roll 1, Roll 2, Roll 3)による中間部浮体のRoll運動方向(Roll 2)の付加質量と造波減衰係数の周波数特性を示す。低周波数帯域では各Radiation流体力係数とも変化する、特に $kh=1.1$ 付近には急激な変動が現れている。ゲイン行列もこれらの流体力係数に対応して変化し、特に $kh=1.0$ のケースではゲイン行列要素の中に絶対値がかなり大きい負の値が含まれていることが確認された。図-5, 6に

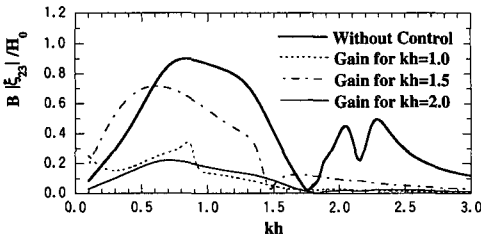


図-5 ゲイン行列 G による動揺低減効果の比較

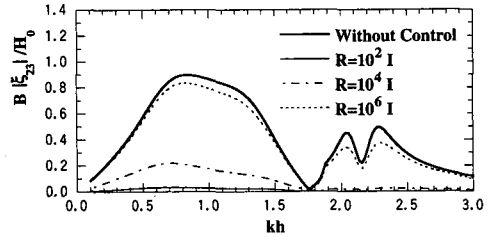


図-8 R による動揺低減効果の比較

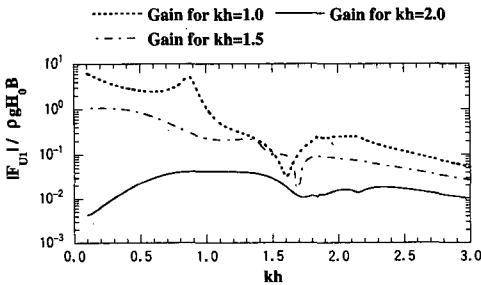


図-6 ゲイン行列 G による制御力特性の変化

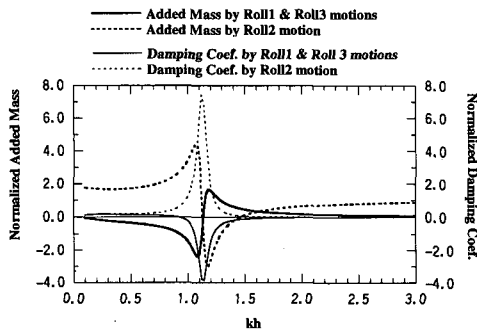


図-7 各浮体のRoll運動による中間部浮体のRoll運動方向の付加質量と造波減衰係数

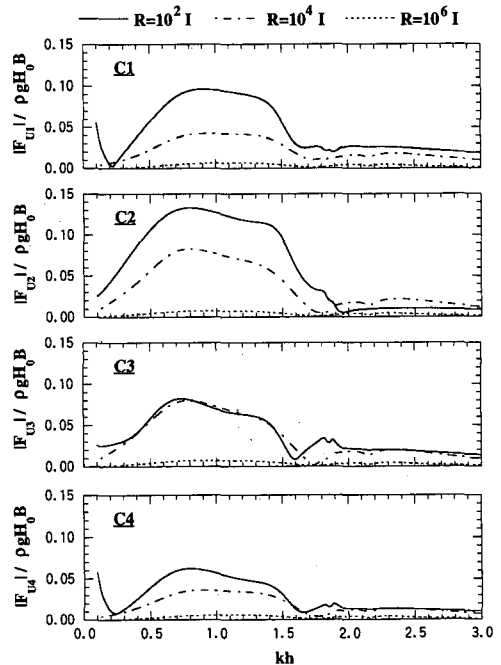
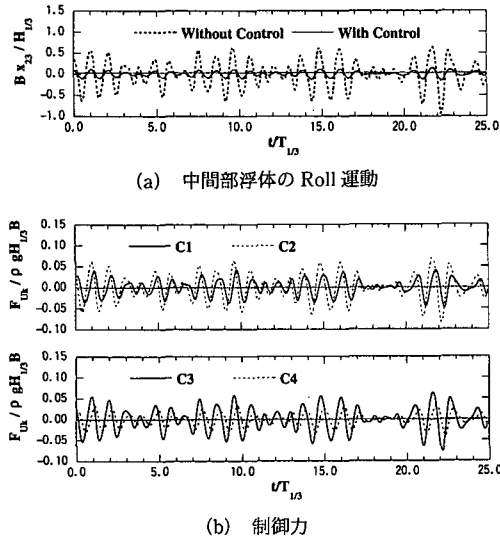


図-9 R による制御力特性の変化



図一〇 不規則波に対する動揺制御効果の計算例
(中間部浮体の Roll 運動; $T_{1/3}\sqrt{g/h}=5.39$)

示したように、ゲイン設定周波数をこのような周波数帯域に設定することは、制御効率上必ずしも有効ではない。一方、周波数が十分に高くなると、対角成分の付加質量 (Roll 2 運動による Roll 2 方向の付加質量) が一定値、造波減衰係数が 0 に漸近し、浮体間の相互干渉効果も小さくなる。 $kh=2.0$ のゲイン行列を用いた結果からわかるように、このような Radiation 流体力係数がほぼ一定となる周波数帯域でのゲインを適用すれば、不規則波動場に対しても効率の高い動揺制御が達成できると考えられる。

(3) 制御力の重みによる動揺特性と制御力特性の変化

制御力の大きさは、制御システム規模を決定する上で非常に重要である。上述のように、その中でもゲイン設定周波数は重要なファクターであるが、ここではさらに制御力に関する重み R^* の影響を検討する。図-8, 9 には、 $R^*=10^2 I, 10^4 I, 10^6 I$ の場合における動揺特性と制御力特性を示す。なお、ゲイン行列 G としては $kh=2.0$ に対して求められたものを用いた。

当初の設定通り、 R^* を小さくすることにより Roll 運動の動揺振幅が小さくなる反面、制御力が大きくなる傾向が現れている。ただし、部分的には $R^*=10^4 I$ に対する制御力が $R^*=10^2 I$ の場合をわずかに上回るケースも現れている (例えば、C2 の $kh>1.9$)。また、ここでは各制御力 (C1~C4) に関する重みの値は一定としているが、実際に必要な制御力は制御装置の位置によって若干異なっており、例えば $R^*=10^4 I$ の場合は中間部浮体の両側 (C2, C3) で相対的に大きな制御力が必要となる。

図-10 には、 $T_{1/3}\sqrt{g/h}=5.39$ の不規則波に対する動揺

低減効果と制御力を時系列波形で示す。なお、ゲイン設定周波数は $kh=2.0$ 、制御力の重みは $R^*=10^4 I$ である。図中、制御力 F_{Uk} ($k=1, \dots, 4$) の符号は、入射波の進行方向を正としている。C2 と C3 の制御力波形はほぼ類似しているが、これは例えば C2 での圧縮力と同じ大きさの伸長力を C3 で同時に発生させることにより Roll 運動が低減されていることを表す。浮体の動揺が大きくなるのに対応して、各装置位置での制御力も大きくなっており、効率的な制御が行われていることがわかる。

5. おわりに

最適制御理論を導入した複数連結浮体の動揺解析モデルを開発し、能動型動揺制御の可能性を具体的に検討した。本理論では、制御する浮体の運動モードおよび制御力に関する重みを任意に設定できるため、制御システムの規模とのバランスを考慮した最適制御力の推定が可能となっている。模型実験との比較により解析モデルを検証するとともに、ゲイン設定周波数を適切に選択すれば一定のゲイン行列を用いた場合でも広周波数帯域で動揺低減効果が期待できること、制御力に関する重み調節により制御デバイス規模とのバランスを考慮した制御が可能であることを示した。

謝辞: 本研究は日本鋼構造協会の大阪オリンピック支援海上施設研究特別委員会における研究の一環として行われたことを付記するとともに、ご協力頂いた制御 WG のメンバー各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 大山 巧・土田 充 (1995): 拡張緩勾配方程式による港内船舶の動揺解析, 土木学会論文集, No. 539/II-35, pp. 141-154.
- 大山 巧・土田 充 (1996): 非線形不規則波を対象とした自由波制御型の造波理論, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 11-15.
- 久保雅義・斎藤勝彦・大音宗昭・芳田利春 (1991): 近接して係留された 2 浮体の波浪動揺に関する研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 766-770.
- 小畑輝二 (1993): 制振構造一理論と実際一, 鹿島出版会, pp. 41-48.
- 高村浩彰・多田彰秀・増田光一 (1996): 横波が作用する弧状の浅喫水連結浮体構造物における応答特性, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 931-935.
- 土田 充・大山 巧 (1996): 拡張緩勾配方程式を用いた港内複数の浮体の動揺解析, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 936-940.
- 永田修一・藤田 孝・三宅成司郎・巻幡敏秋・小田一紀 (1992): 有限長の防波堤と複数係留浮体の波による干渉, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 811-815.
- 古川忠稔 (1998): 連結型浮体の振動制御に関する実験的研究—その 2 浮体のモデル化および振動制御シミュレーション—, 構造力学考究録, 第 27 号, 日本建築学会近畿支部構造力学部会, pp. 20-24.
- 元良誠三 (1982): 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, pp. 79-87.
- 森田修二・榎木 亨・出口一郎・冨木伸一 (1994): 隣接船の相対動揺から見た係留船の安全評価, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 926-930.