

長大弾性浮体の空気圧式姿勢制御 (第1報)

—簡易数値シミュレーションによる基礎的検討—

正員 平山次清* 正員 馬 寧*
 学生員 齋藤靖浩**

Attitude Control of a Large Floating Structure by Pneumatic Actuator
 —1st report: Basic Examination by Simplified Numerical Simulation—

by Tsugukiyo Hirayama, *Member* Ning Ma, *Member*
 Yasuhiro Saito, *Student Member*

Summary

In order to meet with the requirement of the limitation of attitude fluctuation of semi submersible type floating airport, enhancement of bending rigidity will be a practical answer. But as another way, we studied on the possibility of attitude control by active control. Here, we considered the introduction of pneumatic actuator and carried out some numerical simulations for simplified elastic model as the first report.

1. 緒 言

著者らは浮体式空港を考慮した長大弾性浮体の波浪中応答特性について実験的、理論的研究を実施してきた¹⁾²⁾³⁾。浮体式空港の場合弾性変形を含めた姿勢変化を基準以内に納めるためには剛性を強くすれば対応できるが、逆に柔軟にしてアクチュエーターによる能動的制御による方向も考えられる。本論文は浮体式空港だけでなく、より一般的な長大浮体の変形の空気圧式制御方式による能動的な制御を、数値シミュレーションにより検討し規則波中実験とも比較し制御の有効性を検証し、更により効果的な制御方法について検討するものである。今回、そのための第一歩として一様弾性梁をベースに空気の圧縮性、空気バルブの応答特性などを無視した簡易シミュレーションにより基礎的な検討をした結果について報告する。なお本報告で採用したモード制御に関してはライザー管の弾性変形の制御に適用されている例¹⁾があり参考になる。

2. 数値シミュレーション

2.1 使用モデル

本研究で使用するモデルは Fig. 1 に示すようなセミサブ型海上空港用超大型浮体であるが、このコラムフーティングの下部に空気式アクチュエーターを取り付け空気圧により上下力が加わるようになっている。この装置は図の AI から LII までの 12ヶ所に備わっている。今回はこのモデルに規則波が長手方向に入射するとし、浮体は xz 平面を横からみた 1次元の一樣梁として、また波力、流体力、制御力等の外力はコラムのあるポイントに点荷重で加わるものと考えた。実験に使用したモデルの主要目とその固有周期を Table. 1 に示す。想定実機は約 1,800 m の中規模空港である。

2.2 弾性浮体の運動方程式 (一樣梁近似)

姿勢制御を行う為には、応答特性を考慮して制御係数を予め検討する必要があるため数値シミュレーションを行った。運動方程式はモード解析法を用い、減衰項による各モード間の連成や係留の影響もないとして解くといった簡便な方法で行った。座標系を Fig. 2 に示す。

梁の曲げ振動の場合、曲げによる変形だけを考え剪断による変形及び回転慣性の影響を無視したときの減衰力を含めた梁の微小要素についての平衡方程式は次式のように表

* 横浜国立大学

** 横浜国立大学大学院

原稿受理 平成9年7月10日

秋季講演会において講演 平成9年11月14, 15日

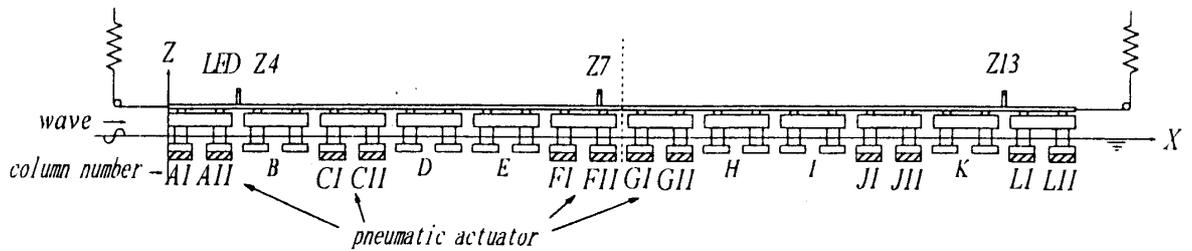


Fig. 1 Semi submersible type floating airport model with pneumatic actuator

Table 1 Principal dimensions

	1/256model	Prototype
Length(L)	7.1m	1818m
Breadth(B)	1.7m	435m
Depth(D)	0.36m	92m
Draft(d)	0.115m	29m
Displacement	267.4kg	4.49×10 ⁶ ton
EI	607.41kgfm ²	6.7×10 ¹⁴ kgfm ²
Rigidity(EI/B)	357.3kgfm	1.5×10 ¹² kgfm
Natural Period(sec)		
heave	1.63	26.1
pitch	1.62	25.9
1 st bending	1.14	18.2
2 nd bending	0.57	9.1
3 rd bending	0.31	4.96

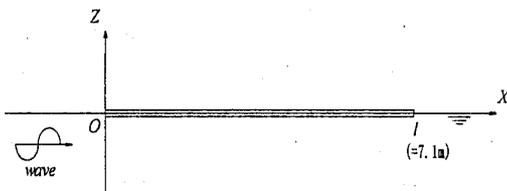


Fig. 2 Coordinate system

される。

$$\rho A \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2} + \eta \frac{EI}{\omega} \frac{\partial^4}{\partial x^4} \frac{\partial}{\partial t} z(x,t) + EI \frac{\partial^4 z(x,t)}{\partial x^4} = q(x,t) \quad (1)$$

[ρ : 単位長さ当たり断面の質量, A : 断面積, η : 構造減衰係数, EI : 曲げ剛性, $q(x,t)$: 外力]

これを弾性変形 $z(x,t)$ を変数分離形として

$$z(x,t) = Z(x) \cdot T(t)$$

右辺=0の自由振動とすると, (1)式より

$$\frac{EI}{\rho A} \left(\frac{1}{Z(x)} \frac{\partial^4 Z(x)}{\partial x^4} \right) = - \frac{1}{\left\{ T(t) + \frac{\eta}{\omega} \frac{\partial T(t)}{\partial t} \right\}} \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2}$$

分離定数を ω^2 とおくと,

$$\frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} + \eta \omega \frac{\partial T(t)}{\partial t} + \omega^2 T(t) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^4 Z(x)}{\partial x^4} - K^4 Z(x) = 0 \quad (3)$$

$$\left[K^4 = \frac{\rho A \omega^2}{EI} \right] \quad (4)$$

(3)式を両端自由の境界条件で解くと, i 次の固有振動数に対する弾性モード ($i \geq 3$) の固有振動モードは,

$$Z_i(x) = \alpha \left\{ \cos K_i x + \cosh K_i x - \frac{\cosh K_i l - \cos K_i l}{\sinh K_i l - \sin K_i l} (\sin K_i x + \sinh K_i x) \right\} \quad (5)$$

となり, α は $x=0$ の端部で1となるよう $\alpha=1/2$ とした。3次モードが2節運動, 4次が3節, 5次が4節運動となっている。このとき剛体モード (1次: heave, 2次: pitch) のモード形は

$$Z_1(x) = 1$$

$$Z_2(x) = -\frac{2}{l} \left(x - \frac{l}{2} \right)$$

となる。この数値シミュレーションでは5次のモードまで考慮することとした。

外力が作用する場合, $z(x,t)$ を固有振動モード $Z_n(x)$ とモード主座標 $T_n(t)$ を用いて

$$z(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} Z_n(x) \cdot T_n(t)$$

と表すと, 固有振動モードに関して, (1)式は

$$\rho A \sum_{n=1}^{\infty} \left[Z_n(x) \frac{\partial^2 T_n(t)}{\partial t^2} \right] + \eta EI \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\omega_n} \frac{\partial^4 Z_n(x)}{\partial x^4} \frac{\partial T_n(t)}{\partial t} \right] + EI \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\partial^4 Z_n(x)}{\partial x^4} T_n(t) \right] = q(x,t)$$

(3)(4)式を代入して

$$\rho A \sum_{n=1}^{\infty} \left[Z_n(x) \frac{\partial^2 T_n(t)}{\partial t^2} \right] + \eta \rho A \sum_{n=1}^{\infty} \left[\omega_n Z_n(x) \frac{\partial T_n(t)}{\partial t} \right] + \rho A \sum_{n=1}^{\infty} \left[\omega_n^2 Z_n(x) T_n(t) \right] = q(x,t)$$

この両辺に $Z_m(x)$ を掛けて, x について0から l まで積分

すると、固有振動モードの直交性により次式のようなになる (m を n に書き換える)。

$$M_n \frac{\partial^2 T_n(t)}{\partial t^2} + C_n \frac{\partial T_n(t)}{\partial t} + K_n T_n(t) = Q_n(t) \quad (6)$$

$$\left[\begin{array}{l} Q_n(t) = \int_0^l q(x, t) Z_n(x) dx \\ M_n = \rho A \int_0^l Z_n(x)^2 dx \quad (\text{モード質量}) \\ K_n = \omega_n^2 M_n \quad (\text{モード剛性}) \\ C_n = \eta \omega_n M_n \quad (\text{モード減衰}) \end{array} \right]$$

数値シミュレーションにおいては構造減衰 η と固有振動数 ω_n は実験で得られた値を用いている。

次に外力 $q(x, t)$ と $Q_n(t)$ について考える。

外力 $q(x, t)$ は波強制力, 流体力, 制御力であるが, これらの外力のうち波強制力と制御力は各コラムに働くものとしてコラムの中心位置への集中荷重であるとした。このとき外力はデルタ関数を用いて,

$$q(x, t) = F_A(t) \cdot \delta(x - x_A) + F_B(t) \cdot \delta(x - x_B) + \dots + F_L(t) \cdot \delta(x - x_L)$$

($x_A \sim x_L$ は外力が働く点 x の座標, $F_A \sim F_L$ はその点に働く外力とする)。

このときデルタ関数の積分公式より

$$\begin{aligned} Q_n(t) &= \int_0^l q(x, t) \cdot Z_n(x) dx \\ &= \int_0^l F_A(t) \cdot \delta(x - x_A) Z_n(x) dx + \dots \\ &\quad + \int_0^l F_L(t) \cdot \delta(x - x_L) Z_n(x) dx \\ &= F_A(t) \cdot Z_n(x_A) + \dots + F_L(t) \cdot Z_n(x_L) \end{aligned} \quad (7)$$

となる。

外力のうち波強制力はフルードクリロフ力のみを考慮している。また制御力については空気バルブの時間遅れ, 空気の圧縮性等の応答特性は今回は考慮していない。

流体力は, 流体力係数 (付加質量 m , 造波減衰 c , 復原力 k) については前報²⁴⁾ までの研究で計算したものをを用いて

$$-(m(\omega_0) \ddot{T}_n + c(\omega_0) \dot{T}_n + k(\omega_0) T_n) \quad (8)$$

とし, これを一様分布力として(6)式の左辺に加えた。

よって(6)(7)(8)式より運動方程式は

$$\begin{aligned} (M_n + m(\omega_0)) \ddot{T}_n(t) + (C_n + c(\omega_0)) \dot{T}_n(t) \\ + (K_n + k(\omega_0)) T_n(t) \\ = F_A(t) \cdot Z_n(x_A) + \dots + F_L(t) \cdot Z_n(x_L) \end{aligned} \quad (9)$$

となり, これを Newmark- β 法を用いて数値積分を行った⁸⁾。

3. PD 制御と最適レギュレータ

姿勢制御は, フィードバック制御系の PD 制御と最適レギュレータを用いた。PD 制御は, 各制御点で計測した Z 方向変位と速度に対して行い, フィードバックゲインは試行錯誤的に繰り返し計算を行い決定した。

最適レギュレータは, 次の状態方程式と出力方程式

Table 2 Feed back gains for control

		入力変数					
		AI	AII	CI	CII	FI	FII
PD control	\dot{Z}	-50	-50	-50	-50	-50	-50
	Z	-500	-500	-500	-500	-500	-500
Optimal control	\dot{T}_j	-85.9	-68.0	-15.5	0.4	52.6	55.5
	T_j	-107.1	-84.6	-19.3	0.5	65.5	69.2

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (10)$$

$$y = Cx$$

において状態変数 x をモード主座標とその一階微分値とし, 入力変数 u をアクチュエーターによる制御力, 出力変数 y を x と同じとした。このとき(9)式より

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{T}_n(t) \\ T_n(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{C_n + c}{M_n + m} & -\frac{K_n + k}{M_n + m} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_n(t) \\ T_n(t) \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} \frac{Z_n(x_A)}{M_n + m} & \dots & \frac{Z_n(x_L)}{M_n + m} \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_A \\ \vdots \\ F_L \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_n(t) \\ T_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_n(t) \\ T_n(t) \end{bmatrix}$$

と書け, 行列 A, B, C が求められる。これはある1つのモードに対する状態方程式と観測方程式であるが, いくつかのモードについて行うときはそのモードに対応する状態変数と出力変数を増やせばよい。

この状態方程式に評価関数(12)式を導入し, 状態変数に対する重み Q , 制御力に対する重み R に適当な重み付けをしてリッカチ方程式を解けば, 評価関数を最小とするフィードバックゲインマトリックス K と最適制御入力 u が(13)式より得られる⁹⁾。フィードバックのための重み関数を応答関数の根軌跡と関連づけて選ぶ方法も提案されているが, この場合も最終的には若干の試行錯誤を経て決定している。ここでは Q, R を変化させた時のシミュレーション結果をみながら良好な場合を選んだ。

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (12)$$

$$u = Kx \quad (13)$$

なお最適ゲインを求める部分は文献⁹⁾ で使用したものをそのまま使用した。

4. シミュレーション結果及び実験との比較

Fig. 3 に使用モデルの上下動の応答関数を示す。これは文献²⁴⁾ で流体力を3次元特異点分布法で求めモード合成法を用い計算されたものである。本浮体の場合, 2節 ($\omega = 5.5$ rad/s) と3節 ($\omega = 11$ rad/s) 振動固有周波数での応答及び低周波 ($\omega < 4$ rad/s) での応答が顕著であることが判り, 本シミュレーションはこれらの周波数を考慮して実施した。

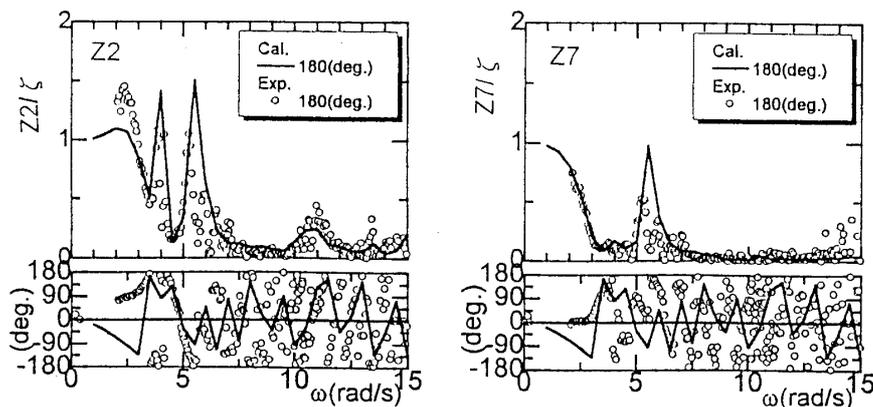


Fig. 3 Transfer functions of deflections in head seas

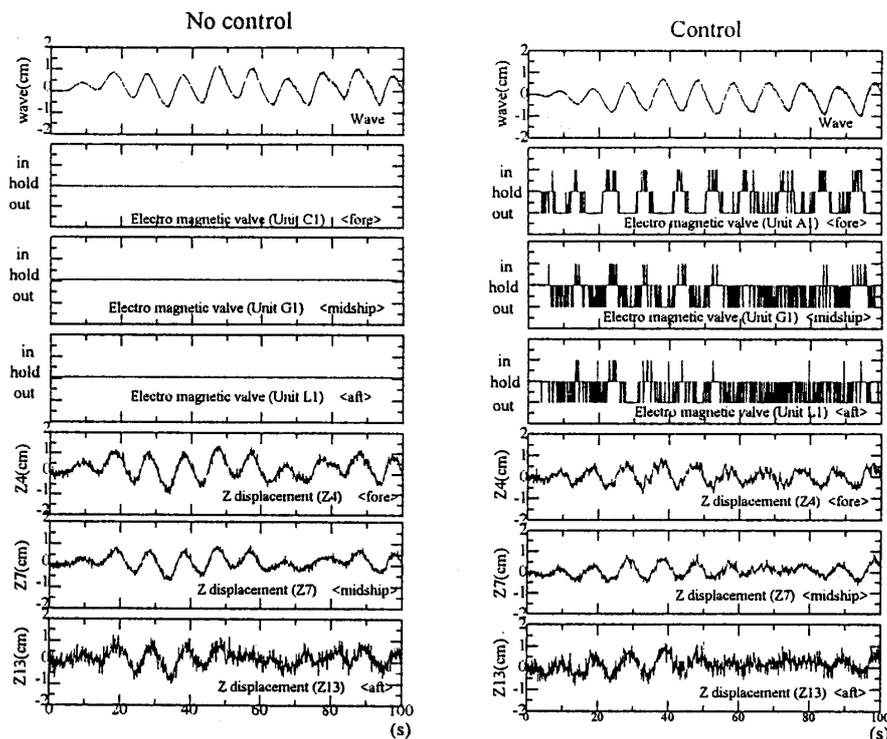


Fig. 4 Response by experiment data in regular waves with and without control (wave period 10.0 sec)

実際にモデルを用いた実験を長周期の規則波中でも行っている⁵⁾ので、周期10.0(s)の規則波中における浮体の応答を制御なしとありの場合について数値シミュレーションとの比較を行った。その結果をFig. 4, 5, 応答関数をFig. 6に示す。実験方法、空気式アクチュエーター装置などの詳細については文献¹³⁾¹⁰⁾に譲るが、制御はエアコンプレッサーから送られた空気をバルブの開け閉めにより行っている。システムの特性等により実験での制御結果は、波上側端部における上下変位が30%程度の抑制となっているのに対し、数値シミュレーションではPD制御において92%程度抑制されている。これはもちろん装置の時間遅れなどの周波数特性が組み込まれていないため理想的な場合で

あるが、理想的な装置で、制御する場所が浮体の全面にわたり平均的にある場合はPD制御で十分に目標を達成できることが解る。同じ条件で最適制御も行ったが効果は同程度で、これ以上の軽減度は得られなかった。これは周波数域全域 ($\omega=0.6\sim 11.0$ rad/s) において同様であった。

そのため、Fig. 1で示したようにAIからLIIの12ヶ所に配置しているアクチュエーターの数を減らしてみることも試みた。Fig. 7は周期1.2秒、波高4cmの規則波で、制御をAIからFIIまでの6ヶ所で行い、midshipからaftまでには装置はないとして計算した、3ヶ所でのZ方向変位である。このときのフィードバックゲインをTable 2に示す。これを見るとPD制御では装置の備わっているfore

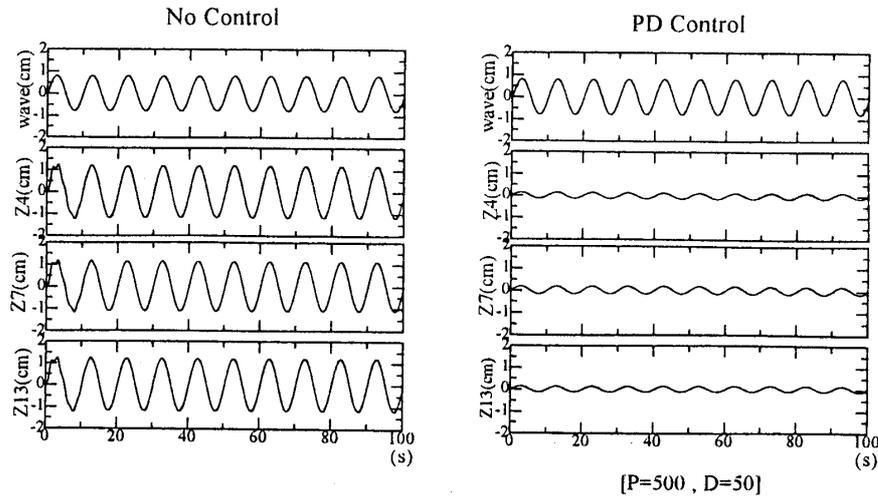


Fig. 5 Response by numerical simulation in head regular waves with and without control (PD control, wave period 10.0 sec)

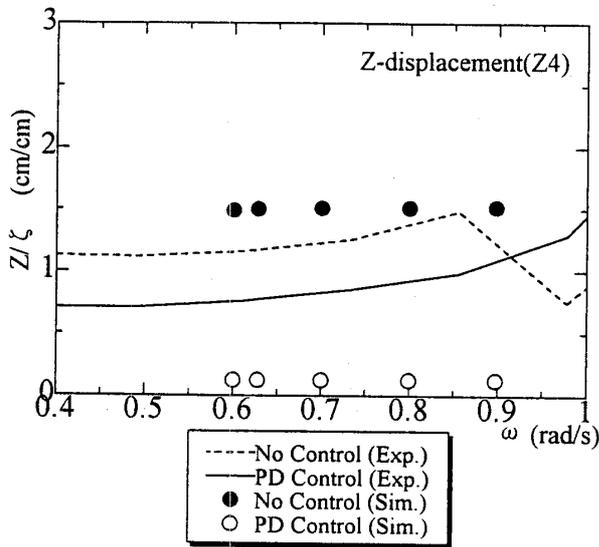


Fig. 6 Transfer function with and without control (Experiment & Simulation)

endとmidshipでは変位を抑えているが、aft endでは全く効いていない。それに対し最適制御では全体的にaft endも併せて制御していることが判る (この最適制御はMODE 3=2節運動モードのみを考慮したものである)。また Fig. 8はこの2種類の制御の制御力 AI, CII, FIIについて比較したものであるが、PD制御のほうが制御力が強く、エネルギーを多く消費している。尚この制御力は単位幅当たりの力ではなく、想定モデルの幅 1.7 m に加わる力である。この2種類の制御についてのZ方向変位を、モデル全体 (0-7.1 m) についてコントロールなしの変位で無次元化して表したものと、そのときの制御力をアクチュエーターの位置と共に示したのが Fig. 9である。

他にアクチュエーターの位置や規則波の周期を変えて解析したものを Fig. 10-Fig. 14 に示す。アクチュエーターの

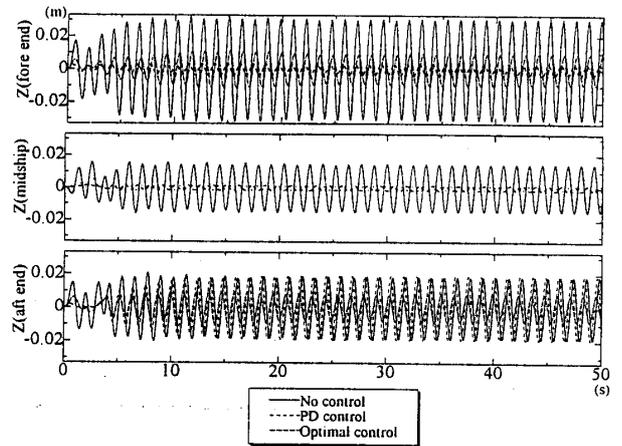


Fig. 7 Time history of Z displacement on fore end, midship and aft end (wave period 1.2 sec, fore part controlled)

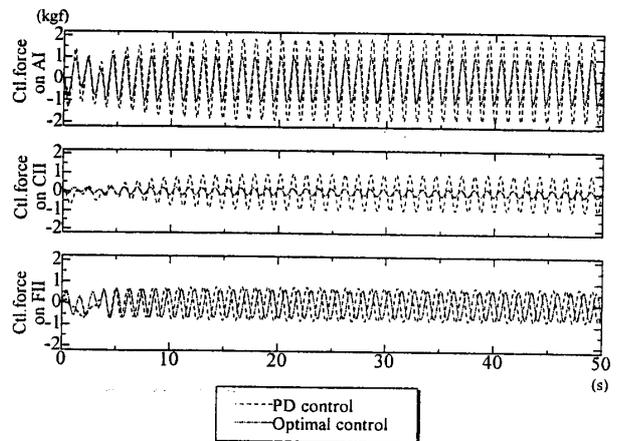


Fig. 8 Time history of control force on AI, CII & FII (2 control types, wave period 1.2 sec, fore part controlled)

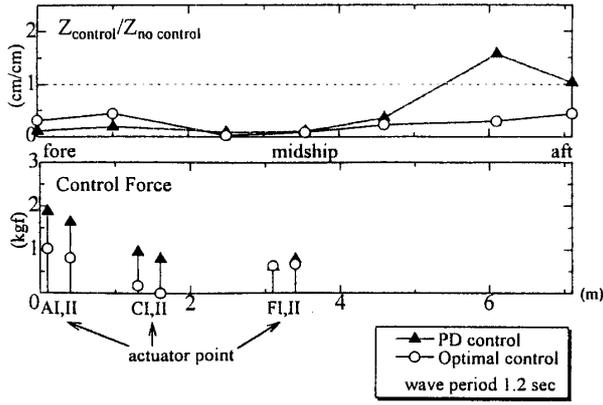


Fig. 9 Amplitude of Z displacement and control force of two types of control (fore part controlled)

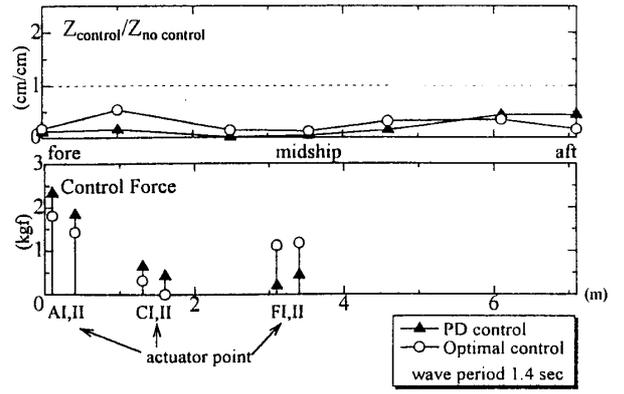


Fig. 12 Amplitude of Z displacement and control force of two types of control (fore part controlled)

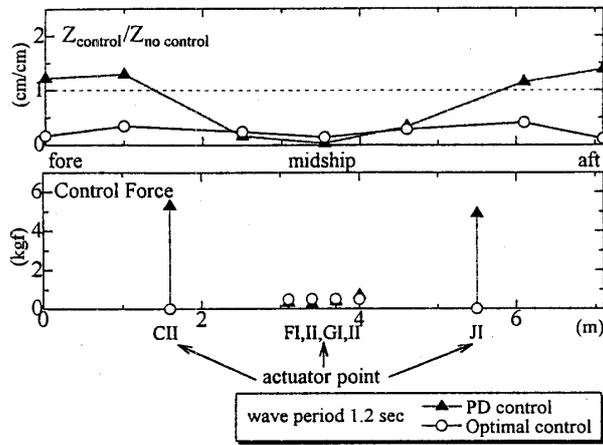


Fig. 10 Amplitude of Z displacement and control force of two types of control (middle part controlled)

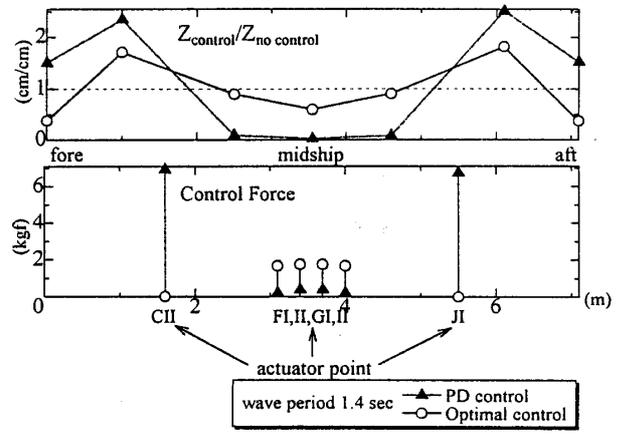


Fig. 13 Amplitude of Z displacement and control force of two types of control (middle part controlled)

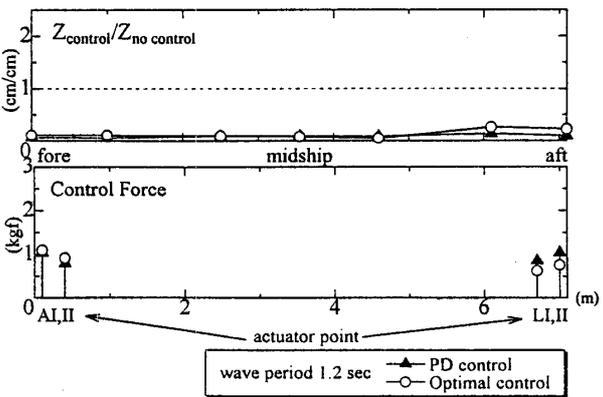


Fig. 11 Amplitude of Z displacement and control force of two types of control (fore and aft ends controlled)

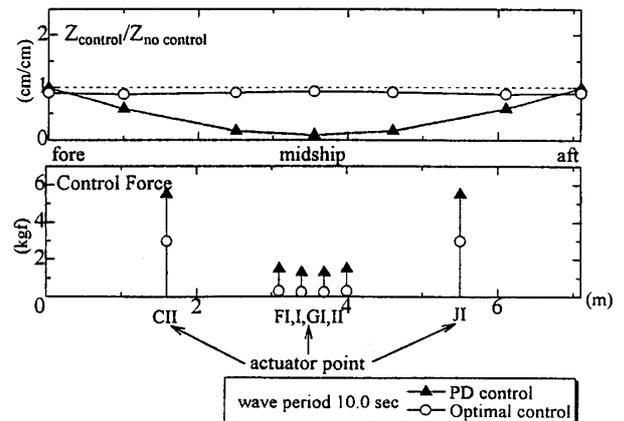


Fig. 14 Amplitude of Z displacement and control force of two types of control (middle part controlled)

位置は、fore から midship までの 6ヶ所、CII から JI までの midship 付近の 6ヶ所、AI, AII, LI, LII の両端のみの 4ヶ所、といったものを試みた。規則波は周期が 1.2, 1.4, 10.0 秒で波高はすべて 4 cm, 制御力は同じくモデル幅 1.7 m に加わる力である。この結果より、2 節運動の固有周期に近い 1.2 秒の波ではアクチュエーターの場所の違いによる、最適制御の効果が表れており、制御力も小さくなっている。ただし両端だけで制御した場合は PD 制御でも十分抑制できている。また剛体モードが支配的になってくる長周期のほうでは、最適制御 (ここでは MODE 1=heave, MODE 3=2 節運動モードを考慮した) のほうが抑制の度合いが少なくなってくるという傾向が見られた。ただし最適制御で評価関数の重みを決定する部分を試行錯誤的に行っているため、若干改善の余地があると考えられる。

この結果から、浮体空港のリペアー時など制御するアクチュエーターの数を減らす必要がある場合や、多方向からの不規則波のように力の分布が様々になる場合は、最適制御のほうが適していると考えられる。

5. 結 言

今回は一様梁と空気の圧縮性、空気バルブの応答特性を無視した簡易シミュレーションにより能動制御の効果および限界について、一部実験と比較も行い基礎的な検討を実施した。その結果使用モデルのような浮体の全面に平均的にアクチュエーターが配されている場合は、周波数特性は考慮していないが、特に長周期の波は PD 制御で十分制御できることが解った。またアクチュエーターの数を減らした場合は、弾性運動である 2 節運動モードの固有周期付近では最適制御のほうが優れており、方向波のように力の分布が一樣でなく弾性振動をする場合も最適レギュレーターが効果的であると考えられる。ただし今回のシミュレーションでは各モードが検出可能であるとして制御した。次報では空気特性も考慮したより実際のシミュレーションを実施し、実用化時の問題点などについて報告する予定である。

謝 辞

本研究で比較に使用した空気圧式姿勢制御システムは本

学で開発したものであり、大部分を手作りで実現して頂いた本学の宮川清助手、高山武彦技官に感謝の意を表したい。また修士論文⁴⁾として特に数値計算において協力して頂いた佐藤直章君、卒業研究⁵⁾として実験に取り組んだ川本健君、中山満夫君、また研究室の他のメンバーにも実験その他に協力して頂き謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 平山次清, 馬寧, 西尾フラビオ治, 佐藤直章: 長寿型浮体式海上空港の波浪中応答特性-第3報 短波長域の応答及び姿勢制御の試み-, 日本造船学会論文集, 第179号, 1996年5月, pp. 153-164
- 2) 馬寧, 平山次清, 佐藤直章: 多柱式セミサブ型とポンツーン型超大型浮体の波浪中弾性応答の比較, 日本造船学会論文集, 第180号, 1996年12月, pp. 353-363
- 3) Hirayama, T., Ma, N.: Dynamic Responses of a Very Large Floating Structure with Active Pneumatic Control, The Proceedings of the Seventh International OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, Vol. 1, 1997, pp. 269-276
- 4) 佐藤直章: 超大型浮体の波浪中弾性応答と姿勢制御, 平成8年度横浜国立大学大学院修士論文, (1997)
- 5) 川本健, 中山満夫: 空気制御装置を備えた浮体空港の波浪中応答に関する実験的研究, 横浜国立大学卒業論文, (1997)
- 6) 土谷武士他: 現代制御工学, 産業図書, (1991)
- 7) 木村英紀他: PC-9801 制御系設計プログラミング, 日刊工業新聞社, (1985)
- 8) 小川繁夫: 振動学, 丸善株式会社, (1994)
- 9) 平山次清, 新原慶弘, 斎藤靖浩: 排水量型超高速船の横揺制止用アクティブ垂直フィンの導入と操縦性への応用 (第2報), 日本造船学会論文集, 第180号, 1996, pp. 251-262
- 10) 平山次清, 高山武彦, 宮川清, 馬寧: 浮体式海洋構造物の空気圧式姿勢制御システムの開発, 関西造船協会誌, 第226号, 1997, pp. 99-105
- 11) 鈴木英之, 吉田宏一郎他: アクティブ制御による大水深ライザーのリエントリーに関する研究, 日本造船学会論文集, 第174号, 1993, pp. 865-874