SES 用ライドコントロールシステムの設計 及び実艇への適用例について

正員 山 北 和 之*

Design and Application of Ride Control System for 30 ton SES Test Craft

by Kazuyuki Yamakita, *Member*

Summary

It seems that ride control is an important technology in order to develop a high performance SES. This paper describes a basic design method of ride control system (RCS) based on classic control theory (PID) and optimal control theory (OR), and then the RCS tests results in waves for 30 ton SES test craft.

The PID gains were determined by the root locus method using experimentally obtained frequency response characteristics of each component of the closed loop system. The OR gains were obtained based on an optimal regulator algorithm employing a mathematical model of longitudinal motions and experimentally determined hydrodynamic coefficients.

The test results showed that the RCS can reduce SES motions in waves effectively, and the RCS proved to be applicable to this type of ship.

1. 緒 言

荒れた海域も高速で航走できる船舶に対する期待が我が国ばかりでなく、世界的にも高まってきているように思われる^{1),2)}。SES (Surface Effect Ship) はそのような船舶の一つとして考え出されたもので、剛なサイドウォールと船首尾部のフレキシブルシールで囲まれたクッション室にファンで空気を送り込み、その空気圧力で艇体重量の大部分を支持することを特徴としている。ライドコントロールシステム (以下 RCS と略す) は、この艇体支持法上の特徴を積極的に利用し、空気圧力を制御して艇体の動揺を減少させる効果を狙った運動制御装置であって、SES の主要技術の一つとも考えられるものである。

このような観点から、SES 実艇を保有している国は必ずと言って良い程 RCS の研究を実施していると見られるが、設計方法から適用例まで一貫して公表されている資料は思いのほか少ない。この中で Adams らによる XR-1D 及び SES200 に最適制御を適用した例に関する報告³⁾は、後発のものにとって参考となることの多い文献の一つである。同文献で Adams らは、SES 空気系及び剛体運動のパラ

メーター等を状態変数とする 18 次の数学モデルを作成し、ゲインを設計する手法を示すとともに、海象が厳しくなると RCS の上下加速度減少効果が小さくなることなどを示して、波によるクッション容積変動である wave pumping を補償するに足るだけ風量が十分でなかった点を示唆した。このようなことも含め、RCS には実際にやってみなければわからないことがいくつかあると思われ、Adams らのような複雑な数学モデルを用いなくとも、種々の実艇について RCS の設計と適用例に関する資料の公表が望まれる。

以上に述べたようなことから本論文では、SES の総合的な性能を試験評価する目的で 1989 年に我が国で初めて建造された 30 トン型の SES 実験艇「めぐろ」を対象として実施された RCS に関する試験の概要について述べるものである。制御の方法としては、物理的直感に訴え易く、現象の理解に最適との判断から、伝達関数を使った古典制御理論 (以下 PID と略す) を主として採用するとともに、Adams らの用いた数学モデルを簡略化した 5 次のモデルによる最適制御 (以下 OR と略す) についても検討を行っている。また、SES には在来型排水量船舶に比べると復原力が小さいという性質があるのでフィンにより縦揺れ及び横揺れを制御することも可能であり、著者の知る限りでは

* 防衛庁技術研究本部第 1 研究所

従来 SES について適用されたことのなかったフィン制御についても、適用例を述べるものである。

このため本論文ではまず 30 トン型 SES 実験艇についてその概要を述べ、次いで PID 及び OR の各手法に関し本研究で採用したゲイン設計法を示す。このようにして得られたゲインの候補を用い、海上で RCS の試験を行った結果から、RCS の特性や限界あるいは可能性について考察することとする。

2. 30 トン型 SES 実験艇「めぐる」の概要

研究の対象とした SES は、Fig. 1 に示すような全長 18.5 m、クッション長さ/幅比約 2.8 の、比較的高いフルード数でのオペレーションを狙ったものである。主要要目を Table 1 に示す。この実験艇の公称クッション圧力は 330 kgf/cm² であるが、これは平水中を最高速力で航走する場合の値であり、高い波浪中での試験を主とした本論文の場合クッション圧力 p_c は大体 260~280 kgf/cm² 位を目標とした。

SES に特有の艀装品の内、RCS アクチュエーターであるルーバー (vent valve と呼ばれる) は、開口面積が 0.49 m² のもの 2 台、1.2 m² のもの 2 台合計 3.38 m² のものを取付けた。フィン は艇体船尾部両舷にフラップタイプで翼面積 0.3 m² のものを各 1 台ずつ取付けた。翼断面形状は NACA 0012-34 である。これらのアクチュエーターはルー

Fig. 1 30 ton SES test craft "MEGURO"

Table 1 Principal Characteristics

DIMENSIONS		
Displacement	:	31.4ton
Length Overall (Loa):	:	18.5m
Beam Overall (Boa):	:	7.5m
Deck Height (D):	:	3.4m
Wet Deck Height (Hc):	:	2.0m
Cushion Length (Lc):	:	15.4m
Cushion Beam (Bc):	:	5.5m
Cushion Length/Beam Ratio	:	2.79
Nominal Cushion Pressure(p_c):	:	330kgf/cm ²
SYSTEMS		
Propulsion Engines	:	Two Gas Turbines(1000ps, each)
Propulsors	:	Two Waterjets(26.3m ³ /min, 5655rpm, each)
Lift Engines	:	Two Diesels(250ps, each)
Lift Fans	:	Four Centrifugal(12.5m ³ /s, 500kgf/m ² each)
Electrical	:	32kW 60Hz
Vent Valves	:	Four Hydraulic Vent Valves(0.49m ² × 2, 1.2m ² × 2)
Rudders	:	Twin Rudder(0.5m ² each)
Fins	:	Two Flap Type(0.3m ² each)
CONSTRUCTION		
Structure	:	Welded 5083-Aluminum Alloy
Bow Seal	:	Type A:Polyester Elastomer Planings(10 Total) Type B:Polyester Elastomer Fingers (10 Total)
Stern Seal	:	Three-lobe Polyester Elastomer Bag

バーで 3 Hz 以上、フィンで 1.5 Hz 以上のカットオフ周波数を持つよう計画し、最適使用圧力 170 kgf/cm²、入力 12.4 kW の油圧ポンプ 2 台で駆動した。

前部シールには、シールの動特性を検討する目的でプレーニング方式のタイプ A と、フィンガー方式のタイプ B の 2 種類が用意され、1989 年 9 月から 1990 年 6 月にかけての試験はタイプ A のシールで、また 1990 年 7 月から同年 11 月にかけての試験はタイプ B のシールで行なわれた。このため本論文で示す実験内容も、実施した試験の前半と後半とは前部シールの構造様式が異なっているという問題があるが、どちらのタイプでも計画噴水でのクッション面積が同じであるので、クッション圧力とかファンの風量とかいったパラメーターに比べればシールのタイプの差がこの実験艇の波浪中の性能に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3. ライドコントロールの設計

3.1 PID

まず、伝達関数を用いて RCS を設計した手順について記述することにしよう。SES の空気系について、制御のブロック図を書き表わしたものが Fig. 2 である。縦揺れ及び横揺れについても同様のブロック図を書き表わすことができるが、ここでは省略する。RCS が効果を発揮するよう設計するためには、Fig. 2 に示した個々の構成要素の伝達関数を求める必要があるので、それらは周波数応答法によって実験的に求めた。Fig. 2 に示した dead time τ は、制御部本体にミニコン (MELCOM 70/MX/1600) を用い、センサーからのフィードバック信号の入力及びアクチュエーターサーボアンプへの指令信号出力に A/D, D/A 変換器を使用したために生じる時間遅れで、この特性もまた周波数応答法によって求めた。試験により得られた特性を伝達関数の形に近似して次に示す。

$$\text{ルーバー: } G_{LV}(s) = 1/(1+0.0189s) \quad (1)$$

$$\text{フィン: } G_s(s) = 1/(1+0.0115s) \quad (2)$$

$$\text{dead time: } \tau = 17.4 \text{ msec} \quad (3)$$

$G_c(s)$ としては、当初はファン、ダクト、シール及びクッション室により構成される SES 空気系のルーバー開度に対する圧力応答をクッションの伝達関数として RCS の計画を進めた。このため進水前の艇体を陸上のベニヤ製架台

Fig. 2 Block Diagram of RCS (cushion system)

上に固縛し、所定の周波数応答試験を行って水面変動と艇体のダイナミクスを含まない、次に示す伝達関数を得た。

$$G_c(s) = 178 / (1 + 0.117s + 0.00158s^2) \quad (4)$$

この伝達関数に基づき、

$$G_{rc}(s) = \left(K_{PC} + \frac{K_{IC}}{s} \right) \cdot \frac{1 + aT_{CP} \cdot s}{1 + T_{CP} \cdot s} \quad (5)$$

(ただし K_{PC} : 比例ゲイン, K_{IC} : 積分ゲイン, T_{CP} : 位相補償の時定数, $a > 1$)

の形の制御アルゴリズムを与えて、いわゆる根軌跡法により Fig. 3 に示すようなクッション系のルートローカスを得た。この図で、実軸上の軌跡は便宜上実軸の下にずらして描いてある。この制御系閉ループの s 平面上における位置関係から、望ましい応答を与えるゲインとして $K_{PC} = 1 \sim 2$, $K_{IC} = 0$ の候補を選び、試験を続けていたが、その後水面変動と艇体のダイナミクスが無視し得ない要素であることが判明したので、これらの影響を含んだクッション系の伝達関数を海上で周波数応答試験により改ためて求め直した。試験結果を Fig. 4 に示す。図中の伝達関数は、漸近特性が既知の 1 次系あるいは 2 次系の伝達関数を試験結果に

あてはめて近似的に求めたもので、同式の 2 次系の部分が (4) 式と似た形をしていることは興味深い。近似式と試験結果の一致度が若干良くない部分もあるが、近似式として Fig. 4 の形をとる限り、伝達関数の pole や zero の位置を少し変える位しか手を加える余地はないから、後で述べる根軌跡法によるゲインの設計という目的には、この伝達関数で実用上十分であろうと考えられる。また Fig. 4 の結果は船速 $V=0$ として得られたものであるが、この特性の速度に対する依存度は少ないとされている¹⁾ことも付け加えておこう。

本論文では、フィンによる縦揺れ及び横揺れの制御も計画しているので、フィン操舵に対する縦揺れ及び横揺れ応答についても試験結果を近似曲線とともに Fig. 5 及び 6 に示す。これらの結果から、所要の伝達関数はいずれも、減衰比 0.3 の 2 次系で表わされることが分かった。

次に得られた特性を用いて、海上での RCS 試験に供するゲインの候補を根軌跡法により求めた。この際、設計計算を行う目的はゲインの目安をつけることであって、安定限界を与えるゲインを厳密に求めることではないので、

$$G_M(s) = 1 \quad (6)$$

として所要の計算を行った。ローパスフィルターについては、

$$G_F(s) = 1 / (1 + 0.0199s) \quad (7)$$

と仮定した。

クッション系に関する計算結果を Fig. 7 に示す。この図は、(5) 式の比例ゲインのみを変化させ、他のゲインはゼロとした時のものであるが、原点近傍は pole と zero が密

Fig. 3 Root locus of cushion system without water surface elevation and craft dynamics ($T_{cp}=0$)

Fig. 4 Measured and approximated cushion pressure response to vent valve commamd ($V=0$)

Fig. 5 Measured and approximated pitching response to fin commamd ($V=30$ kt)

Fig. 6 Measured and approximated rolling response to fin commamd ($V=30$ kt)

Fig. 7 Root locus of cushion system using dockside test results

集していて、比例ゲインの値を変化させても dominant pole の位置は原点付近からあまり移動しないことが分かる。積分ゲインを加えたり、単純な位相補償を施しただけではこの傾向は変わらないと考えられるので、簡単な制御だけではそれ程良い過渡応答特性は期待できないことが予想される。Fig. 3 の軌跡と同程度の応答特性を持つシステムを実現するためには、原点付近の pole と zero を完全にキャンセルできるような補償を加える必要があると思われる。以上より、海上での RCS 試験に供するゲインの候補は、比例ゲイン K_{PC} を、システムが不安定となる限界の 5 以下とする範囲のものを採用した。

縦揺れ及び横揺れの根軌跡については、計算結果を Fig. 8 及び 9 に示す。ただし制御アルゴリズムの伝達関数としては当初

$$G_{R0,\phi}(s) = K_{P0,\phi} + K_{D0,\phi} \cdot s + K_{I0,\phi}/s \quad (8)$$

の形のを計画したが、 $K_{I0,\phi} \neq 0$ とすると開ループの pole からすぐ虚軸に達する根軌跡しか実現できず、良い応答特性が期待できなかったので、 $K_{I0,\phi} = 0$ とした。これらの図から、ゲインの候補は、 $K_{P0} = 40 \sim 80$, $K_{D0} = 12 \sim 16$, $K_{P\phi} = 40 \sim 80$, $K_{D\phi} = 8 \sim 12$ とした。

3.2 OR

3.1 節の空気系の制御方法は、SES のクッション圧力を制御するという立場からのものであるが、本節では SES の運動を制御するという立場から縦運動に関する RCS の設計を試みたので、その概要について記述することとする。このため、SES の縦運動方程式⁹⁾を次に示すように状態変数で記述する。

$$\dot{x} = Ax + Bu + v \quad (9)$$

ここに、

Fig. 8 Root locus of pitching

Fig. 9 Root locus of rolling

$x = (\dot{h}, h, \dot{\theta}, \theta, \mu)^T$: 状態ベクトル

$u = (\Delta A_{IV}, \alpha)^T$: コントロールベクトル

v : 外乱

h : ヒーピング, θ : ピッチング, $\mu = p/p_c$,

p : クッション圧力変動, p_c : クッション圧力

ΔA_{IV} : ルーバー操作量, α : フィン操作量

であり、システムマトリックス A 及びコントロールマトリックス B は、運動方程式の係数を変換した要素により構成される 5×5 及び 5×2 の行列である。

システムをこのように表現した時、次式により定義される評価関数

$$J = \int_0^{\infty} \{x^T Q x + u^T R u\} dt \quad (10)$$

を最小にするという意味における最適制御 u は、

$$u = -F x \quad (11)$$

$$F = R^{-1} B^T P \quad (12)$$

により与えられる。ただし P は、次に示す Riccati 方程式の解である。

$$A^T P + P A + Q - P B R^{-1} B^T P = 0 \quad (13)$$

この場合、(10)式中の重み行列 Q 及び R の選び方には任意性があり、その選定方法について確立された手法は今のところ無い模様である。このことから最適フィードバックゲイン F を設計するに、「めぐる」の 1/10 縮尺模型船を用いた PMM 試験を中心とする水槽試験の結果からシステムマトリックス A 及びコントロールマトリックス B を決め、あらかじめ設定した Q と R から得られるゲイン行列 F を、運動シミュレーションを繰り返して試行錯誤的に選定することにした。シミュレーションの基礎となる SES の縦運動方程式は、文献(1)でも述べられているように、評価の定まった、確立されたものではないが、ゲインの優劣を定性的に判断するにはさしつかえなかろうと思われる。ゲイン設計に用いたシステムマトリックス A 及びコントロールマトリックス B は次のとおりである。

$$A = \begin{bmatrix} -2.03 & -6.25 & -12.2 & -31.9 & -7.64 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.00118 & 0.148 & -2.24 & -8.59 & 0.0373 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 30.5 & 0 & -2.74 & 0 & -10.7 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -3.30 \\ 0 & 0 \\ 0 & -0.856 \\ 0 & 0 \\ -16.6 & 0 \end{bmatrix}$$

Q と R とは、シミュレーション結果をフィードバックしながらおよそ 100 ケース以上変更してゲインの候補を求めた。(13)式の解法には、Kleinman の方法を用いた⁴⁾。得られたゲインの候補の一例を次に示す。

$$F = \begin{bmatrix} -0.459 & 1.36 & -3.44 & -3.99 & -4.82 \\ -0.187 & -1.70 & -11.2 & -35.2 & -0.537 \end{bmatrix}$$

この結果を検討してみると、前節の K_{D0} , K_{P0} に対応する F の要素 f_{23} , f_{24} は、前節で得られた値と大略同じであるが、 K_{Pc} に相当する f_{15} は、根軌跡の安定限界に近い大きな値である。これは SES 空気系を記述する数学モデルの精度が今一つ不十分のために生じた結果と考えられる。

4. 海上試験結果及び考察

4.1 計測項目及び試験方法

海上試験の計測項目及び試験方法は下記のとおりである。

波高 (h_w): 船首に設置したマイクロ波式波高計で計測
船速 (V): 電磁ログによるシンクロ出力をアナログ変換して計測

縦揺れ (θ), 横揺れ (ϕ): パーチカルジャイロにより計測
上下加速度 (G_f , G_m , G_a): センターライン上の船首 (㊦より 8.85 m 前方), 重心位置 (㊦より 1.2 m 後方) 及び船尾 (㊦より 8.45 m 後方) に設置したストレングージ式の加速度変換器により計測

クッション圧力 (p_c), バグ圧力 (p_{bf} , p_{ba}): ストレングージ式の圧力変換器により計測

ルーバ開度 (A_{Lv}), フィン操舵角 (α): 油圧ロッドに取付けたポテンシオメーターにより計測

記録: カセット式データレコーダー (14 ch) 1 台を使用
またフィードバック信号に使用する縦揺れ及び横揺れの角速度は、音さ型センサーを用いて計測した。さらに OR 制御を行う場合に必要なヒープ及びヒープ速度のフィードバック信号は、マイクロ波式波高計のヒープ及びヒープ速度出力と、縦揺れ信号出力とから換算して求めた。

データは 1 航走最低 4 分間記録し、得られた結果は FFT アナライザでスペクトル解析して有義値あるいは rms (root mean square) の形に整理した。

試験は主として、Fig. 10 に示す下関市の日本海側沖合い約 7 マイルの、水深 60~70 m の海域で実施した。波向きは目視で判断し、速力は約 30 ノットで試験を行った。

前節で検討した RCS ゲインの値は、ルーバー面積やフィンの操舵角には制限がないとして求められたものである。しかしフィンには、 $\pm 30^\circ$ の範囲でしか作動しないといった制約があるので、波浪中で予備的な試験航走を行って海上でのテストに適当と考えられるゲインに値を調整し直

Fig. 10 The sea of Japan test area

した。調整はポテンショメーターで倍率を変えて行ったが、その値はPIDの場合0.8~1, ORの場合で0.2である。

なお、ORで設計したゲインは縦運動に関するもののみであるから、横揺れ制御は終始PIDで行っていたことを付け加える。

4.2 試験結果及び考察

試験により得られた全てのデータを、上下加速度につい

Fig. 11 Relationship between vertical accelerations and significant wave height with and without RCS ($V=25\sim31$ kt)

Fig. 12 Relationship between pitching, rolling and significant wave height with and without RCS ($V=25\sim31$ kt)

ては Fig. 11 に、また縦揺れ及び横揺れについては Fig. 12 に示す。これらの図にはPIDゲインとORゲインによる試験データが混在しているが、両者にドラスティックな差はなかった。これらの図を見ると、縦揺れ及び横揺れに関してはRCSの効果は顕著であり、RCS ONの場合の応答はOFFの場合の応答の1/3~1/4である。縦揺れあるいは横揺れ制御の目的でフィンに船首に配置するアイデアも諸外国では検討されており³⁾、この場合のメリットはモーメントのレバーを大きくとれるということであるが、固有安定性という観点からはフィンは船尾に配置した方が好ましく、Fig. 12に示した程度の効果が期待できるのであれば船尾フィンの採用が望ましいと考えられる。

一方重心位置上下加速度の減少は、Fig. 12の場合程顕著ではない。これは3.1節で示したように、閉ループ根の s 平面上における位置がゲインを変えても原点付近からあまり移動せず、良い過渡応答特性が実現できなかったためと推測される。船尾部上下加速度の大きさは重心位置のそれよりも小さく、またRCSのON/OFFにかかわらず値があまり変化しない。これは船体の見かけの回転中心が重心位置よりもかなり後方の、船尾部付近にあることを示しており、運動の様子が一般の高速艇に似かよっていることを表わしている。

著者の経験によれば、波の高さが同じでも阻度が異なっていれば艇が経験する上下加速度は全く異なる。Fig. 11及び12に示した試験データには、波の周波数という情報が全く盛り込まれていないので、この点をさらに検討するため、RCS OFFとONとで波スペクトルの形が良く似た試験データを抽出し、その時刻歴と各応答のパワースペクトル密度関数をFig. 13及び14に示す。

Fig. 14を見ると、クッション圧力と重心位置上下加速度応答のパワースペクトル密度は形がお互いに似かよっているということの他に、RCSの効果はこの船の場合約1 Hz以上の周波数で大きいということが分かる。このような傾向は、Adamsらの示した試験結果³⁾とも一致する。またFig. 11で、向波中の試験データ程RCSの効果が大きかったこととも符合する。0.6 Hzから1 HzにかけてもRCSの効果が大きいにみえるが、これはこの周波数域における波スペクトルの大きさが、RCS ONの時、OFFの場合よりも低かったためと考えられる。

OR制御の場合のパワースペクトル密度関数については、重心位置上下加速度に関する結果のみをFig. 15に示す。この試験を行った当日の波の阻度は小さく、Fig. 14から期待されるようなデータは得られなかった。しかし0.3から1 Hzにかけての波スペクトルの高さは、RCS ONの場合の方がOFFの場合よりも5割程度大きかったにもかかわらず、加速度減少の割合は期待以上に大きいため、OR制御には低周波域でも効果を有するような性質があるのかも知れない。

Fig. 13 A typical time histories of RCS action
($H_{1/3}=0.71$ m)

Fig. 14 Power spectral density functions of motion parameters with and without RCS (PID, beam sea)

Fig. 15 Power spectral density function of vertical accelerations with and without RCS (OR, $V=29$ kt, $H_{1/3}=0.54$ m, head sea)

なお RCS の試験ではないが、ファンの風量及びクッション圧力の DC 成分 $\bar{p}_c$ が SES の波浪中応答に及ぼす影響を調べるため、クッション圧力を一定にしてファン風量を変更する試験と、風量を一定にしてクッション圧力を変更する試験とを行なった。結果を Fig. 16 と 17 に示す。これらの図からは、風量を増せば加速度応答は減少し、クッション圧を増せば加速度応答は増加するという、物理的直感とも一致する結果が得られた。Fig. 16 の場合、ファンの風量は回転数に比例するという性質を持っているから、風量を 25% 増して、30% 以上の加速度応答の減少を実現したことになる。

さて、本実験艇の場合、約 1 Hz という周波数を境にしてそれよりも高周波側で RCS の効果が大きいことを Fig. 14 などを使って示した訳だが、それでは寸法の異なる船の場合その周波数はどうなるのであろうか。1 Hz 以上の周波数域は、Fig. 4 に示したルーバー開度に対する圧力応答伝達関数で言えば、ゲインが大きく、位相も進んでいる状態に対応しているので、このために RCS の効果が大きかったのであろう。そしてこの周波数は、次式により表わされるヒーピングの固有周波数⁶⁾

$$\omega_z = \left[\frac{\gamma A_c (p_a + p_c)}{m H_c} \right]^{1/2} \quad (14)$$

$$\approx \left[\frac{\gamma g \cdot (1 + p_a/p_c)}{H_c} \right]^{1/2}$$

により推定できると考えられる。ただし、 γ : 空気の比熱比、 p_a : 大気圧、 m : 艇の質量、 H_c : クッション高さ、 g : 重力加速度である。艇の波との出会い周波数が上述の ω_z と一致する近傍の周波数で RCS の効果が高いと推測されるから、本研究で試験に供した実験艇の寸法を 1 倍から 5 倍の範囲で変化させ、この船が Pierson-Moskowitz 型のスペクトルを持つ向波中を航走したとした時の $\bar{\omega}_e (= \omega_e \sqrt{L/g})$ と $\bar{\omega}_z = (\omega_z \sqrt{L/g})$ の関係を Fig. 18 に図示する。この図から、艇の大型化及び高速化に伴って、RCS の効果を期待できる海象が厳しいものとなることが分かるので、RCS は大型艇に適したシステムとも言えるのではないだろうか。

5. 結 言

30 トン型 SES 実験艇の RCS を、PID 及び OR の手法により設計し、海上で試験を行ってその効果を検証した。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) 船尾フィンによる縦揺れ及び横揺れ制御により、動揺は約 1/3~1/4 に減少可能であることが実証された。
- (2) クッション圧力制御の効果はヒーブの固有周波数近辺で大きかったが、それよりも低周波領域での効果が小さかったために、全体として縦揺れ及び横揺れの場合程顕著な効果はみられなかった。
- (3) 制御の手法による効果の差は、それ程見られなかった。

(4) RCS は艇の大型化あるいは高速化が促進される程重要な技術となるであろうという見通しを示した。

(5) 風量あるいはクッション圧力が艇の加速度応答に及ぼす影響を実験的に明らかにした。

今後は、PID による設計を進める際に必要な SES 空気系の応答特性を理論的に求める手法と、OR による設計に必要な縦運動数学モデルの確立が研究の課題として重要だと思われる。これらの研究が促進されれば、Vehicle の設計段階で、RCS のきめ細かい検討が可能になると考えられるからである。

Fig. 16 Relationship between vertical acceleration, cushion pressure variation and fan flowrate (head sea, $V=28$ kt, $\bar{p}_c=250 \sim 257$ kgf/m², $H_{1/3}=0.29 \sim 0.31$ m)

Fig. 17 Relationship between vertical acceleration, cushion pressure variation and cushion pressure (head sea, $V=26$ kt, 2500 LIFT RPM, $H_{1/3}=0.43 \sim 0.52$ m)

Fig. 18 Relationship between encounter frequency and heave-pressure natural frequency when craft scale was varied (head sea)

最後に、本研究は防衛庁技術研究本部第1研究所長村上俊一博士の熱心な御指導と御助言により進めることができた。また海上試験については、第1研究所第4部関係各位と、木原和之博士、浜田知聰主務を始めとする三菱重工業(株)下関造船所関係各位の協力を得て実施することができた。これらの方々に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 運動性能研究委員会第7回シンポジウム, “高速船型の耐航性推定法”, 日本造船学会, 1990
- 2) Lavis, D. R., et al.: “The Promise of Advanced Naval Vehicles for NATO”, Marine Technology, vol. 27, No. 2, 1990
- 3) Adams, J. D., et al.: “Surface Effect Ship Ride Control System”, Proceedings 7th Ship Control Systems Symposium, 1984
- 4) 木村英紀外: “PC-9801 制御系設計プログラミング”, 日刊工業新聞社, 1985
- 5) Knüpfer, K., Frambourg, J. C., Lewthwaite, J. C. and Adams, J. D.: “SES700”, The Federal Marine Vehicles Conference, Washington, D. C., The American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1989
- 6) Kaplan, P. et al.: “Dynamics and Hydrodynamics of Surface-Effect Ship”, SNAME Transactions, vol. 89, 1981