

大深度石油掘削船の自動位置保持装置に関する研究

(位置保持制御系の高性能化の研究)

村山雄二郎*・菊地 正晃*・矢後 清和**

Study on the Dynamic Positioning System of Deep Sea Oil Drilling Vessel

(Improvement of Control System for the Dynamic Positioning
System of the Deep Sea Oil Drilling Vessel)

By

Yujiro MURAYAMA, Masaaki KIKUCHI and Kiyokazu YAGO

Abstract

With ocean development projects extending to the areas of deep seas, a automatic control system called as DPS which keeps vessel at a position on the sea without mooring system has recently gained much attention of those concerned.

Though as the control mode of the system the linear control mode known as PID is universally adopted, other methods also should be examined in order to give DPS more capability.

In this paper, as a step towards the cause, a control mode combined of linear control mode and non-linear control mode is proposed and its basic characteristics obtained from the experiment using scaled model of vessel in a tank is presented.

Some of the aspects of the result obtained from the experiment with the optimum on-off control method which is the main part of the proposed control mode are as follows ;

- ① For the still water, the optimum on-off control method gave better performance with regard to control energy, settling time and stability than PID mode.
- ② For the waving water, with too long sampling period in regard to the wave period, the optimum on-off control method brought about gross fluctuation of out-put signal, but general performance was still considered better.
- ③ For the flowing water, the force acting on the model by the current was canceled by means of feed-forward compensation leading to the performance similar to the one of the still water.
- ④ With the noise coming to the measured values of the vessel's position, the overshoot of the response as well as the fluctuation of out-put signal tended to be greater, which was seen improved by adopting a filter.

* 機関性能部 制御研究室

** 海洋開発工学部 運動性研究室
原稿受付 昭和56年7月2日

1. 緒 言

大深度の海洋において、石油掘削船の位置を、厳し

い気象海象条件下に、係留することなく定位置に保つ自動位置保持装置 (Dynamic Positioning System 以下略してDPSという) の開発は、大深度の海洋開発が進むにつれて、重要になってきた。大深度におけるDPSは、その使用される目的から、制御性、信頼性、経済性に優れたものが要求されている。それらDPSの特性は、DPSを構成している船位計測装置、推進器やスラスト群等の性能、および掘削船自体の特性によって左右されるが、また制御方式に負うところも大きい。在来から、プロセス制御や位置制御には、線形制御方式である比例+積分+微分制御 (PID制御という) 方式が広く使われて、歴史も永く、その制御特性や調整法も多く研究されている。海外において開発されているDPSや、現在、国内で開発を進められているDPSも、制御方式には、基本的にPID方式が採用されており、今までに蓄積されている同方式に対するノウハウも多く、DPSの制御方式としては、信頼性のある方式といえよう。

しかし、大深度における船位計測値は、海底におかれた超音波源と掘削船ととりつけられた受信器の間を、超音波が通る間にうける種々の外乱のために、大きな雑音成分を持っており、これを取り除くために、時定数の大きなフィルターが必要になってくる。このフィルターによる船位信号の時間遅れ、大型スラストにおける推力発生に要する伝達遅れ等は、大深度における測定された船位信号の分散の大きさとともに、大きな慣性体である掘削船の位置を、線形制御であるPID制御方式で安定に制御することを難しくしている。そこで、大深度の石油掘削船のDPSの性能向上をはかるためには、PID方式に代る新しい制御方式の開発が必要になってくる。

ここでは、DPSの制御方式として、非線形最適制御方式のうち、位相面上の切換曲線による最適オン・オフ制御方式を採用して、その制御特性を実験的に調べた。非線形制御方式は、線形制御には見られぬ多くの特徴を持ち、その使用目的に応じたものが選ばれる。ここで採用した最適オン・オフ制御方式は、慣性項の大きな物体の位置制御等において、制御性の良さや経済性を満足する方法として知られ、理論的には、完全に調整されれば、有限の出力のもとで、最短時間で目標値に物体を移動させ、静止させることができることが、証明されている。

この方法は、従来の制御装置のように、アナログ計器で構成して実現させることは難しく、ごく限られ

た分野でしか用いられていなかった。しかし、今日では、制御装置のデジタル化が容易になり、DPS制御装置に組入れることが可能になった。一般に、非線形制御は、その優れた特性とはうらはらに、調整の難しさがある。特に船舶のように、水力抵抗に比べて慣性の大きな物体の位置制御は、微分項の大きな制御系になり、そのために、外乱雑音等に過剰に反応する傾向がある。それゆえに、非線形制御方式をDPSに採用するためには、実験的な解析と、現場のノウハウの積みかさねが、その信頼性の向上に欠かせないものと考ええる。ここでの実験も、その点を考慮して、DPSの制御性に及ぼす各パラメータの影響や、雑音に対する特性とその対策に重点をおいている。

2. 制御方式

DPSの新制御方式として実験に用いた最適オン・オフ制御方式の構成法と、実際に同方式を用いる際の問題点とその対策について述べる。

2.1 最適オン・オフ制御

この制御方式は、有限の制御出力の有限回の切換えによって、最短時間で制御対象の状態を位相空間の原点 (偏差及びその高次の導関数が0) へ、もっていくというものである。必要な切換回数は、理論的には制御対象の系の次数から1を減じたものである。故に、スラストによる推力発生の時間遅れを無視すれば、一般に、船体が水面を移動する運動は、2階の微分方程式で表わされるから、理想的にゆけば1回の出力の切換で、船体は目標値へ到達し、静止するはずである。

スラスト等による時間遅れを考慮して、船体運動を3階の微分方程式で表わした場合には、出力の切換えは1回増すだけであるが、出力切換え条件の境界が、位相空間の曲面と曲線で表わされ、次数を増したために起きる制御計算の複雑さは大きい。そこで、この実験では、船体運動を2階の微分方程式で表わし、スラスト等による時間遅れの影響は、他の方法で補正する事とした。

2.2 最適オン・オフ制御系の構成

2階の微分方程式で表わせる制御対象を持つ最適オン・オフ制御系は、Fig. 2-1のような構成でできている。位置偏差 e の位相平面は、原点近傍にある後述のPID領域を除けば、最適切換曲線によって二つの領域に分けられていて、船体の状態 (e, \dot{e}) の現在値が位相平面上のどの領域にいるかによって、制御出力

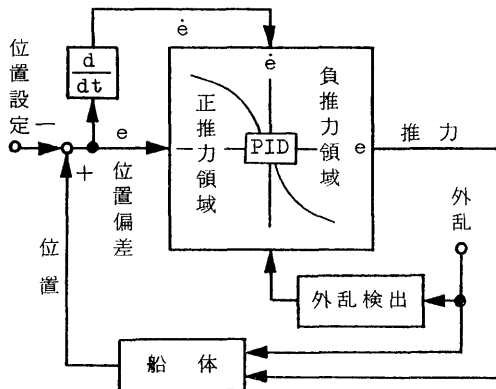


Fig. 2-1 最適オンオフ制御系

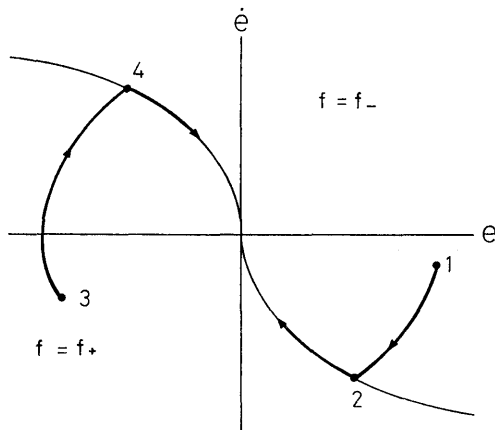


Fig. 2-2 最適オンオフ制御 (位相面図)

は、あらかじめ決められた大きさの正負いずれかの値をとる。DPSの場合は、制御出力は推力の形になる。

Fig. 2-2に示すように、船体の初期値が、位相平面の負推力領域の点1にいたと仮定しよう。船体は負の方向の力に推されて、点1から点2へと移動し、最適切換曲線に至り、正推力領域に入る。ここで推力は正方向に切換えられ、理想的に切換曲線が設定されていれば、船体の状態を表わす点は、切換曲線に沿って原点に至り、静止する。初期値が正推力領域の点3にあった場合も同様に、点4で推力を負に切換えて、原点に至る。

2.3 最適切換曲線

前項のことから、位相平面上の最適切換曲線は、正または負の定推力を受けた船体の運動が位相平面に画く軌跡群の中から、原点を通過するものを、それも、

原点を通過する以前の部分を、原点でつなぎ合せれば良いことが判る。

船体の運動を(1)式で表わせるとする。

$$m\ddot{x} + k|\dot{x}| \dot{x} = f \tag{1}$$

ここでmは船体の質量[kg], kは抵抗係数[kg/m], fは推力[kg・m/sec²], xは船位[m]である。

(1)式を解いて、x=0の時に $\dot{x}=0$ の条件のもとに時間tを消去すると、最適切換曲線は(2), (3)式のように求められる。

f < 0, $\dot{x} > 0$ の時、

$$x = \frac{-m}{2k} \ln \left| 1 - \frac{k}{f_-} \dot{x}^2 \right| \tag{2}$$

f > 0, $\dot{x} < 0$ の時、

$$x = \frac{m}{2k} \ln \left| 1 + \frac{k}{f_+} \dot{x}^2 \right| \tag{3}$$

ここでf₊, f₋は、それぞれ正及び負方向の推力である。

正、負方向の定推力f₊, f₋は、あらかじめ、任意の値に決めることができる。

|f|が大きいときは、応答は早くなるが、大きな推進動力が必要である。逆に|f|が小さいときは、少ない推進動力で制御できるかわりに、応答が遅くなる。

|f|は、経済性、必要な応答速度、潮流等の外力の大きさに見合った値を選ぶ。

最適オンオフ制御は、このようにして選ばれたf₊, f₋の推力の条件の下で、最短の時間で目標値に達するように制御をする。

これらの式は、 $\frac{k}{f} \dot{x}^2$ の項が1に比べて小さいことを考えると、(2), (3)式は、それぞれ、(4), (5)式で近似することもできる。

f < 0, $\dot{x} > 0$ の時、

$$x \doteq \frac{m}{2f_-} \dot{x}^2 + \frac{mk}{4f_-^2} \dot{x}^4 \tag{4}$$

f > 0, $\dot{x} < 0$ の時、

$$x \doteq \frac{m}{2f_+} \dot{x}^2 - \frac{mk}{4f_+^2} \dot{x}^4 \tag{5}$$

これらの式の第1項は、船体の慣性による項であり、第2項は流体抵抗による項である。

2ローハル型や、フーティング型の石油掘削船は、その慣性の項に比べて流体抵抗の項が極めて小さいため、抵抗の項を省略して、船体を慣性体としてのみあつかっても、この方式では、大差がない。

2.4 切換曲線の修正

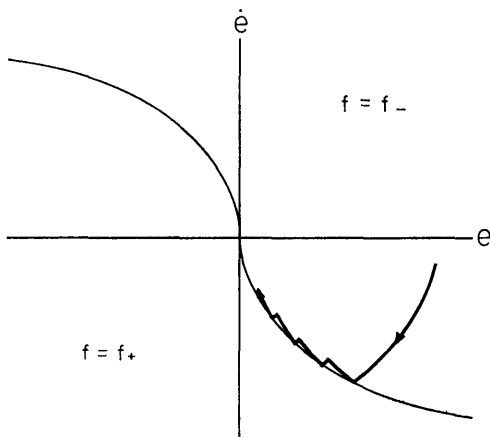


Fig. 2-3 正しくない切換曲線によるオンオフ制御

最適切換曲線を算出するための諸量が正しく与えられた場合には、Fig. 2-2のように、理想的に、船体を目標値をもってゆき、静止させることができるが、実際には、船体質量、流体抵抗係数、スラスト推力の正しい値を求めることは困難である場合が多い。また、スラストにおける推力発生の時間遅れや、潮流等の船体に与える力、船体速度の計測誤差も、最適切換動作に影響を与える。

切換曲線が最適の値よりも e 軸に近く、寝ている合には、Fig. 2-3のように、船の位置は切換曲線に沿いながら、正推力領域と負推力領域を往復し、原点に至る。この場合は、船は目標値を通り過ぎることはなく、比較的早く目標値に達することができるが、数多くの推力の切換えが行なわれ、動力の消費も多くなる。

それと反対に、切換曲線が最適の値よりも起きていて \dot{e} 軸に近い場合には、Fig. 2-4のように、原点を大きくずれて廻り込み、位相平面上で渦をまきながら原点に至る。この場合は、船は目標値を通り過ぎ、振動しながら目標値に達する。整定までの所要時間は長くなる。

このような、事態を招かないために、切換曲線を、次の手段で修正する。

切換曲線は、位相平面の原点を通る放物線に近いから、これを最適なものに修正するために、切換曲線

$$e=f(\dot{e})$$

に、係数 A を乗じて、調節すれば良い。

$$e=A \cdot f(\dot{e}) \tag{6}$$

スラストによる時間遅れや、サンプリング時間によ

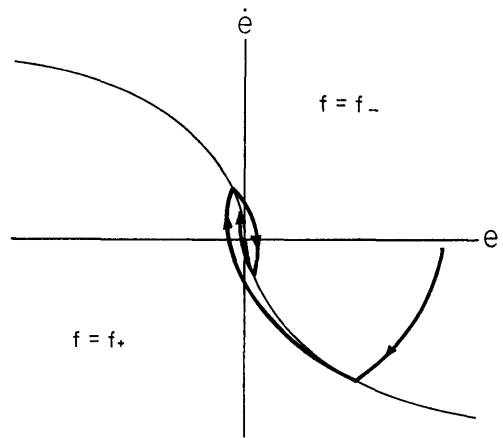


Fig. 2-4 正しくない切換曲線によるオンオフ制御

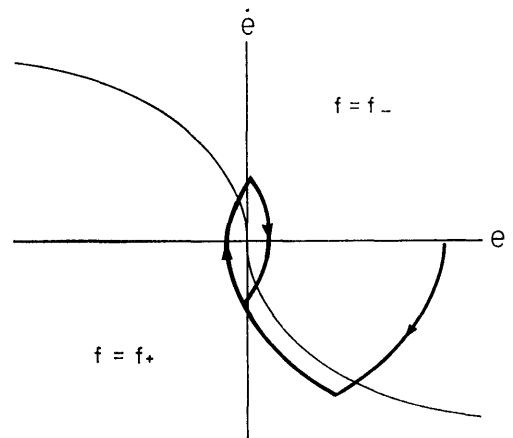


Fig. 2-5 切換えに遅れがある場合のオンオフ制御

る遅れのために、位相平面上で、船の軌跡が切換曲線を横切っても、実際の推力に直ちに应答しないので、ある時間遅れてから切換る場合が往々あるが、その場合には、Fig. 2-5のように、原点の回りでリミットサイクルを描き、原点に至らない。

これを防ぐために、(7)式のように時間遅れの補正項つけ、係数 B で調節することにする。

$$e=A \cdot f(\dot{e})-B \cdot \Delta T \cdot \ddot{e} \tag{7}$$

ここで、 ΔT はサンプリング周期である。

2.5 外乱の影響の補正

前項までの最適切換曲線の算出は、外乱のない平水に船体があると仮定している。すなわち、船体に働らく力は、スラスト等の推力 f だけを考慮していた。DP Sとして船体に加わる外乱は、潮流力、波力、風力がある。これらの船体に及ぼす力を d とし、それが既知

であるならば、上述の式の推力 f を、 $f+d$ とおきかえることによって、計算できる。潮流の流速、風速、波長、波高を測定し、それらが船体に及ぼす力 d を計算して、切換曲線を自動的に修正するならば、これは一種のフィード・フォワード制御となる。また、後述のように、原点でのバランスをPID制御で行なうならば、平衡した時のスラスト等の推力の和の符号を代えたものが外乱力に等しいことを利用して、この値を d とするのが、実用的である。

この場合には、正負方向の推力 f_+ 、 f_- を、次のような形に補正することで、最適切換曲線の計算に外乱力の影響を及ぼさなくすることができるから、外乱力のある時でも、平水中と同じ切換曲線を使用して、制御することができる。

$$f_{+補正} = f_+ - d \quad (8)$$

$$f_{-補正} = f_- + d \quad (9)$$

2.6 原点近傍の制御

最適オン・オフ制御系は、船体が位相平面の原点に到達した時に推力を0とすれば良いのであるが、現実には切換曲線が理想的に最適化されていないために、船体は原点の近傍には達するが、正確に原点上に達することは期待できない。この場合は、許容できる程に原点に近づく時時点で出力を0にしても、平水上でならば、実用上は差しつかえがない。潮流等の外乱がある場合には、原点近傍のある範囲に入ったならば、PID制御方式に切換えて、船位を保持するのが良い。オンオフ制御方式のままでは、原点近傍を保持することは、いたずらに、正負の大きな推力を切換えて、動力を浪費することになるが、良く調整されたPID方式ならば、外乱に見合った出力で、原点に保持することは容易であり、前述の外乱力の推定値を求めるのにも役立つ。

水槽実験では、目標値からの偏差の絶対値と、船速の絶対値が、共に限界値以下になる条件で、PID制御方式へと切換えている（以下、PID領域Iという）。目標値が変るなどして、偏差が大きくなり、PID方式から、最適オン・オフ制御方式へ切換わるためには、PID領域Iより大きな限界値を、偏差の絶対値か、または、速度の絶対値が超えることを条件としている（以下、PID領域IIという）。

2.7 フィルタ

測定された船位信号には、種々の雑音成分や、制御に不必要な高周波成分が含まれている。

船位信号に含まれる雑音成分を軽減するために、ロ

ーパス・フィルタを一般に使用する。しかし、フィルタ効果を求めるために、カット・オフ周波数を下げると、位相遅れが大きくなり、制御系を不安定側へ導いていく。この両者を妥協させるために、ウィナーの最適フィルタや、カルマン・フィルタの考え方が用いられることがある。

抵抗項に比べて、慣性項の大きな物体の位置制御は、PID制御方式にすると前述のように微分制御の強い制御になり、雑音の影響を受けやすい。最適切換方式においても、位相平面を用いる限り、位置の微分をとらざるを得ず、雑音に対する影響は受けやすい。しかし、実船において船体の速度を直接に測定して利用することができれば、雑音に対する対策は、軽減することができるであろう。

本実験においては、船位の測定を、ポテンシオメータで直接に測ったため、雑音分が少なく、一般にはフィルタを使用していないが、雑音を含んだ実験等では、次のような一次遅れのフィルタを使用している。

$$\bar{x}_k = (1-\omega) \cdot x_k + \omega \cdot \bar{x}_{k-1} \quad (10)$$

ここで、 x は船体位置、 k はサンプリング番号、 \bar{x} はフィルタ出力、 ω はフィルタの重みで、連続系の一次遅れの時定数 T と、次式の関係がある。

$$\omega = e^{-\frac{\Delta T}{T}} \quad (11)$$

ΔT : サンプリング周期

この他に、フィルタ特性の改良を試みて、過去のサンプリング時の速度の方向によって、フィルタの重みを変える(12式)のようなフィルタを用いた実験を行なった。

$$\bar{x}_k = \begin{cases} x_k, & (x_k - \bar{x}_{k-1}) \cdot (\bar{x}_{k-1} - \bar{x}_{k-n}) \geq 0 \text{ の時} \\ (1-\omega) \cdot x_k + \omega \cdot \bar{x}_{k-1}, & (x_k - \bar{x}_{k-1}) \cdot (\bar{x}_{k-1} - \bar{x}_{k-n}) > 0 \text{ の時} \end{cases} \quad (12)$$

このフィルタは、過去 n 点の平均速度と同じ方向に進む時は、フィルタをかけずに、即応性を増して時間遅れを防ぎ、反対方向に進む時には、フィルタを入れて、雑音成分の軽減をはかっている。

実験の章での説明の便利のために、(10)式のフィルタをフィルタIと、(12)式のフィルタをフィルタIIと呼ぶ。

なお、実験に用いた(12)式の n は、すべて2にしてある。

3. 制御実験

本制御方式の模型実験は、船舶技術研究所の海洋構

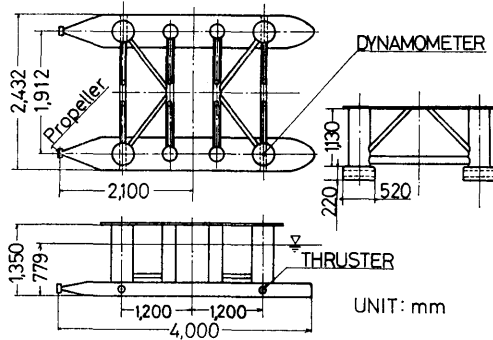


Fig. 3-1 制御対象模型

Table 3-1 制御対象模型要目

項目	模型	実機
スケール	1/28.25	1
長さ	4.000 m	113.000 m
幅	2.432 m	69.600 m
高さ	1.350 m	36.000 m
排水量	1.155 m ³	24295 m ³

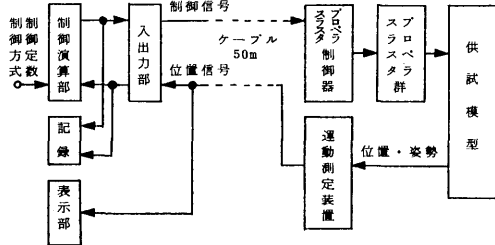


Fig. 3-2 制御装置の構成

造物試験水槽において行なった。

3.1 制御対象

制御の対象とした模型は、運輸省の大深度石油掘削船自動位置保持装置研究開発委員会において、概念設計を行なった、2ローハル型半潜水式石油掘削船の1/28.25縮尺の、アルミニウム製の模型で、Fig. 3-1とTable 3-1に、その概要を示す。出力100Wのモーター駆動のプロペラ2基と、出力50Wのモーター駆動のトンネル型スラスタ4基を装備している。

3.2 制御装置

制御装置の構成をFig. 3-2に、その要目をTable 3-2に示す。模型の位置と船首方位は、模型を計測架台に結びつけている運動測定装置のポテンショメータ

Table 3-2 制御装置要目

制御演算部

項目	要目
形式	Y.H.P. 9835A
R/W記憶容量	128KB
演算速度	四則演算：0.29~3.1ms (BASIC)
テープ記憶容量	217KB
CRTディスプレイ	80字×25行
プログラム言語	BASIC及びアセンブラ語

入出力部

項目	要目
形式	Y.H.P. 6940B
D/A変換部	8台
出力範囲	-10.24V~+10.22V
精度	20mV/1 digit
負荷電流	5mA
変換所要時間	30μs
A/D変換部	4台
入力範囲	±10V
デジタル出力	12ビット
変換速度	33,000/sec

によって電気信号に変換され、入出力部を経て、制御演算部に送られる。模型の位置、姿勢に応じた制御演算の結果は、入出力部を経て、プロペラ・スラスタ制御器に送られ、プロペラ・スラスタ群を介して、模型を駆動する。

制御演算部は、船位測定値の整値、目標値の設定、地上座標/船上座標の変換、制御演算、制御出力信号のプロペラ・スラスタ群への推力配分計算を、毎秒1回行う。

入出力部は、船位測定値読み込み用のA-D変換器4台(内1台は予備)と、各プロペラ・スラスタへの信号出力用のD-A変換器8台(内2台は予備)から成っている。

制御ラインとは別途に、模型の位置と姿勢を、CRT上に図示できる表示部を備えている。制御装置の入出力信号及び制御結果は、実験中逐次メモリに記憶された後、データ・テープ・カートリッジに移されて、保存される。

3.3 制御演算

石油掘削船は、重心まわりの角速度が小さいため、船長方向、横方向、船首方位の運動方程式は、連成項を無視することができるため、各方向の制御演算は、第2章で述べた計算を、それぞれ独立に行なっている。

船位の測定は、地上座標系で行なうため、船上座標

系に変換してから、制御演算を行なっている。目標値の設定は、地上座標系で行なっている。

地上座標系で表わした船位の目標からの偏差 e の、船上座標系 x への変換は、(13)式で行なっている。

$$x = T \cdot e \quad (13)$$

ここで x 、 e は、船長方向位置、横方向位置、船首方位の3要素からなる列ベクトル、 T は(14)式で表わされる変換マトリクスである。

$$T = \begin{pmatrix} -\cos \varphi, & -\sin \varphi, & 0 \\ \sin \varphi, & -\cos \varphi, & 0 \\ 0, & 0, & -1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

ここで φ は、地上座標系でみた船首方位である。

プロペラ・スラスタの推力は、その回転数の2乗に比例するため、制御演算出力の符号×(絶対値の平方根)を、プロペラ・スラスタ制御器に送り出している。

プロペラ・スラスタ制御器は、符号を含めて指令電圧に比例した回転数になるように、駆動モータの入力電力を調節する。

開平をした制御出力信号 c を、各プロペラ・スラスタへの配分信号 z への変換は、(15)式で行なう。

$$z = U \cdot c \quad (15)$$

ここで z は、前左スラスタ、前右スラスタ、後左スラスタ、後右スラスタ、左プロペラ、右プロペラへの配分信号を要素とする列ベクトル、 c は、船長方向、横方向、船首方位の制御出力を要素とする列ベクトル、 U は、(16)式で表される変換マトリクスである。

$$U = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

制御演算部の信号の流れを、Fig. 3-3 に示す。

4. 実験及び考察

最適オンオフ制御方式によるDPSは、第2章で述

べたように、目標値近傍に整定している時はPID方式で位置保持をし、目標値から大きく離れた過渡状態の時は最適オンオフ方式で制御を行ない、再び目標値近傍に達した時に、PID方式にもどる。PID方式から最適オンオフ制御方式に移る条件は、第2章で述べた位相面上のPID領域II外へ、船位の偏差、またはその速度が出ることであり、最適オンオフ制御方式からPID方式に移行する条件は、PID領域I内に、船位の偏差及びその速度が入ることである。

実験では、各領域を次のように設定した。以下の実験では、特にことわらない限り、この値をとっている。

$$\text{PID領域I} \quad \begin{cases} |e| \leq 5\text{cm} \\ |\dot{e}| \leq 0.2\text{cm/sec} \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{PID領域II} \quad \begin{cases} |e| \leq 10\text{cm} \\ |\dot{e}| \leq 0.2\text{cm/sec} \end{cases} \quad (18)$$

PID領域の大きさは、制御応答に影響を与える。領域を大きくとれば、容易にPID領域に切換るが、切換後に船体の状態を位相平面の原点に収束させることがPID制御に重荷になり、全体として良い制御にならない。

PID領域が小さいと、PID制御は原点近傍の保持だけであるから、PID制御にとっては容易である。しかし、オンオフ制御にとっては、正確に原点をねらってゆかねばならず、サンプリング周期が長いときには、切換までのハンチングが多くなる。

適当なPID領域Iの大きさは、 $|e|$ は位置許容誤差の数倍、 $|\dot{e}|$ は(位置の許容誤差/サンプリング周期)の数十分の1であった。

水槽実験では、PID制御によって定位置に保持された船体の目標位置を、新しい値に突変させて、PID領域IIからはずし、最適オンオフ制御方式によって新しい目標値へ到達し、再びPID制御にもどる一連の過渡応答を、平水、波浪及び潮流中で求めることによって、最適オンオフ制御方式の特性を調べた。

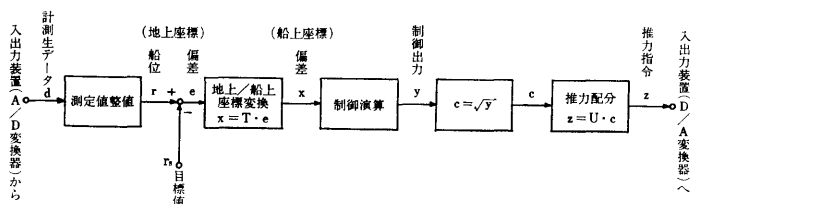


Fig. 3-3 制御演算信号図

Table 4-1 PID制御定数

設 定 値		
前後動	ゲイン	$K_p = -1.0$
	積分時間	$T_i = 100$ 秒
	微分時間	$T_d = 7$ 秒
左右動	ゲイン	$K_p = -1.0$
	積分時間	$T_i = 100$ 秒
	微分時間	$T_d = 5$ 秒
回頭	ゲイン	$K_p = -1.5$
	積分時間	$T_i = 100$ 秒
	微分時間	$T_d = 10$ 秒

本実験に先立って、PID制御定数を調整するための実験を行なって、Table 4-1 に示すような制御定数を得た。以下、特にことわらぬ限り、PID領域での制御は、この制御定数を用いている。

なお、制御演算中の位相面の計算や、PID方式の微分項のための \dot{e} は、(19)式のような一次式で近似的に得ている。また、サンプリング時間間隔 ΔT も、すべ

て1秒である。

$$\dot{e} = (e_k - e_{k-1}) / \Delta T \quad (19)$$

ここで e_k ：偏差の現在値、 e_{k-1} ：1サンプリング前の偏差値。

4.1 平水中での応答実験

平水中での、船長方向の目標値変化に対する応答の例を示す。Fig. 4-1(a)は、時間軸について表わしたものであり、Fig. 4-1(b)は、位相面上に表わしたものである。

この例で使用した出力切換曲線は、(2)、(3)式をそのまま用いているが、最短時間応答をしていない。これは、制御対象の特性（船体の相当質量、船体の抵抗係数、プロペラ・スラスタの推力）が正確に把握されていないためと、位置サンプリング時間間隔及び制御演算時間による出力切換の遅れ、スラスタの応答の遅れが切換曲線の算定に考慮されなかった為と、考えられる。

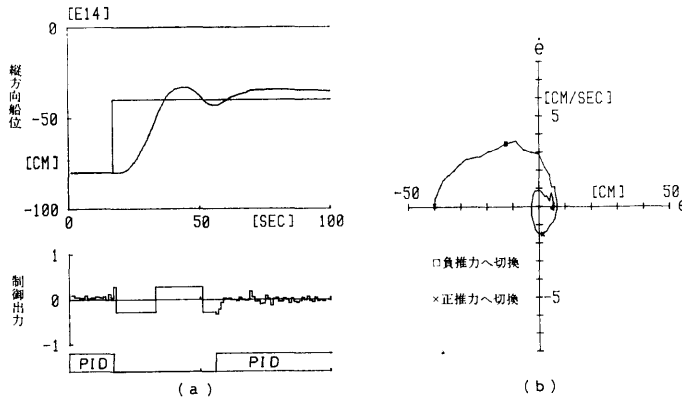


Fig. 4-1 オンオフ制御（無調整）

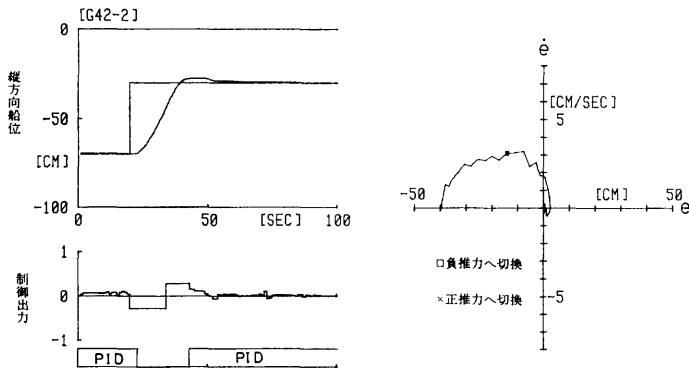


Fig. 4-2 オンオフ制御（調整後）

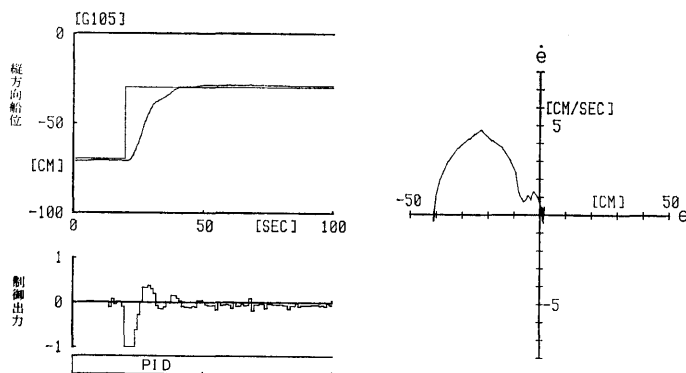


Fig. 4-3 P I D制御 (出力100%)

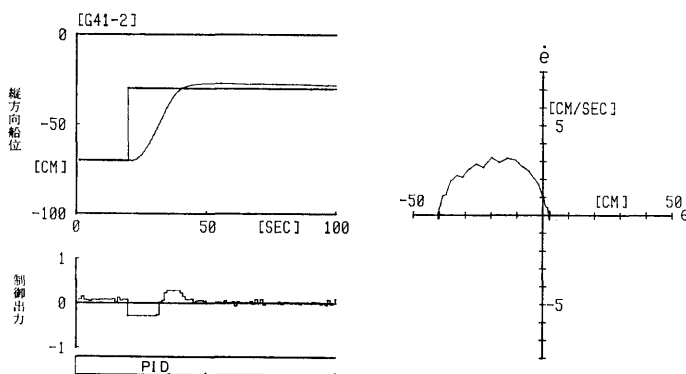


Fig. 4-4 P I D制御 (出力28%)

これらの影響を小さくするために、修正された切換曲線(7)式を用い、係数A、Bを調節した結果を、Fig. 4-2に示す。切換曲線は最適化され、ほぼ最短時間応答をしている。この場合のAの値は1.5、Bは1である。

なお、オンオフ制御の出力としては、正負方向とも、全推力の28%出力を、定推力としている。以下の実験においても、ことわりのない限り、定推力は±28%出力になっている。この値は大きい程、応答時間は短くすることができるが、船速が大きくなると、系を不安定に陥らさないためにサンプリング時間を短くする必要があり、また、経済性向上のためにも大きな定推力は望ましくない。一般には、十分な応答時間が得られるならば、小さな定推力が良い。

比較のために、P I D制御による応答を示す。Fig. 4-3は、100%出力で推力が頭打ちになったため、極端な振動はまねがれているが、使用したエネルギーに比

して、応答時間は短くない。

Fig. 4-4の例は、最適オンオフ制御と同様に、28%出力に推力のリミットをおいた場合である。出力がすぐにリミットにかかるため、出力波形も応答もオンオフ制御に近くなっていくが、安定性を保つために積分項を大きくすることができず、そのために、目標値をゆき過ぎたまま、所定の時間内に整定することができない。

4.2 雑音のある場合の応答実験

船位の測定値に、雑音を加えた場合の、目標値変化に対する応答の例を、Fig. 4-5に示す。船位のプロット値は、雑音を加えた値である。加えられている雑音は、±1 cmの間に一様に分布する乱数を使用した。実船の船位測定値に入る雑音の分布は、正規分布に近いと考えられるが、乱数発生所要時間短縮のために、よりきびしい一様分布を使用している。

比較のために、同条件のP I D制御の応答を Fig.

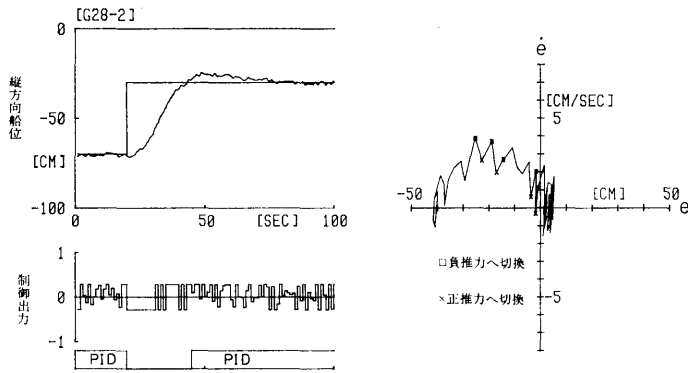


Fig. 4-5 オンオフ制御 (一様乱散)

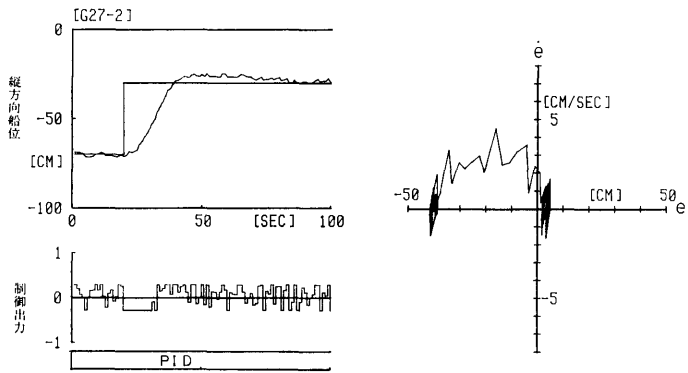


Fig. 4-6 P I D制御 (一様乱散)

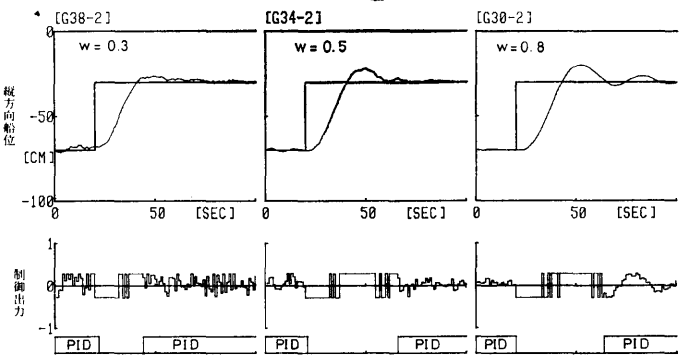


Fig. 4-7 フィルタ I を使用したオンオフ制御

4-6 に示す。但し、加えられた雑音の分布は同じものを使用しているが、同じ数列の乱数ではない。

いずれの方式の制御も、微分計算が雑音のために乱されて、オーバーシュートが大きくなり、また、制御出力も大きく変動して、無効なエネルギーを多く使用

している。

船位測定値に含まれる雑音の影響を少なくするために、2.7節で述べたフィルタ I 及び II を使用してみる。

Fig. 4-7, Fig. 4-8 に、線形のフィルタ I (10式)

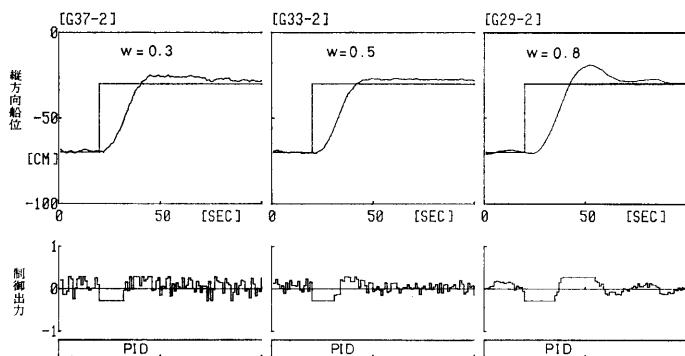


Fig. 4-8 フィルタ I を使用した P I D 制御

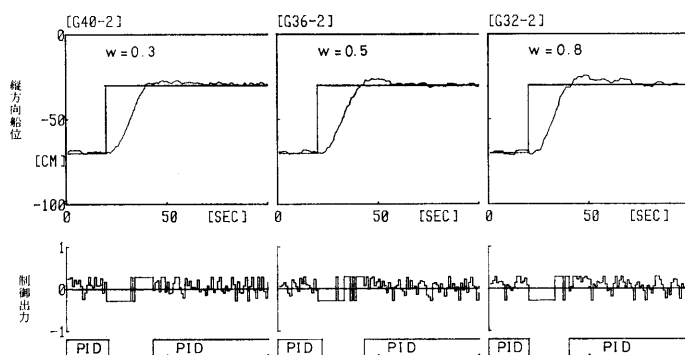


Fig. 4-9 フィルタ II を使用した オン オ フ 制御

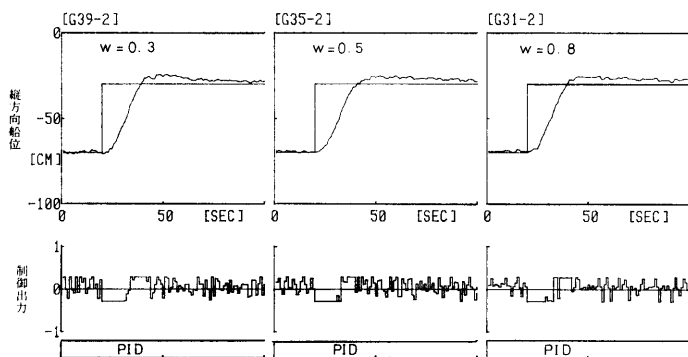


Fig. 4-10 フィルタ II を使用した P I D 制御

を使用した、両方式の応答を示す。船位のプロット値は、フィルタの出口の値である。パラメータとなったフィルタの重み w の 0.3, 0.5, 0.8 は、それぞれ連続系の 1 次遅れフィルタの時定数の 0.83 秒, 1.44 秒, 4.48 秒に相当する。

フィルタが重くなるにつれて、制御出力のこまかな

変動はおさまり、雑音分が軽減されてゆくが、フィルタの時間遅れが大きくなってゆくために、系が不安定側に進み、オーバーシュートの大きな、振動的な応答になってくる。制御出力の変動の大きさと、応答の早さ、安定度を勘案して、良い w を選ぶ必要がある。

Fig. 4-9, Fig. 4-10 は、非線形フィルタ II (12 式)

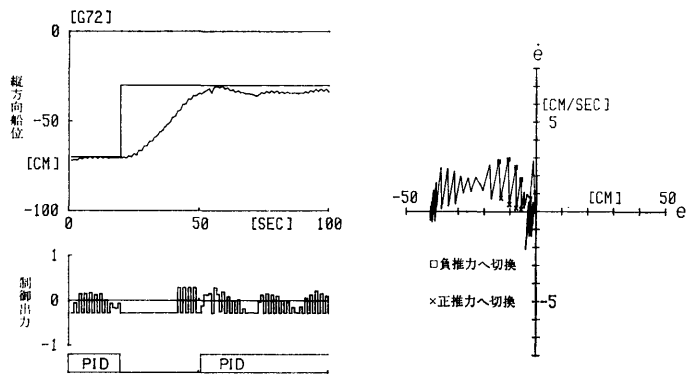


Fig. 4-11 オンオフ制御（波浪中）

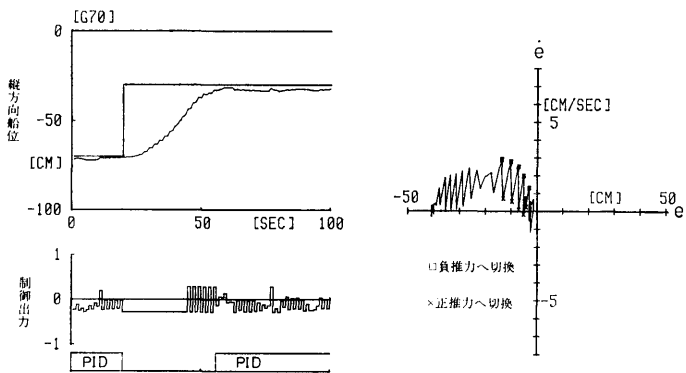


Fig. 4-12 フィルタⅡを使用したオンオフ制御（波浪中）

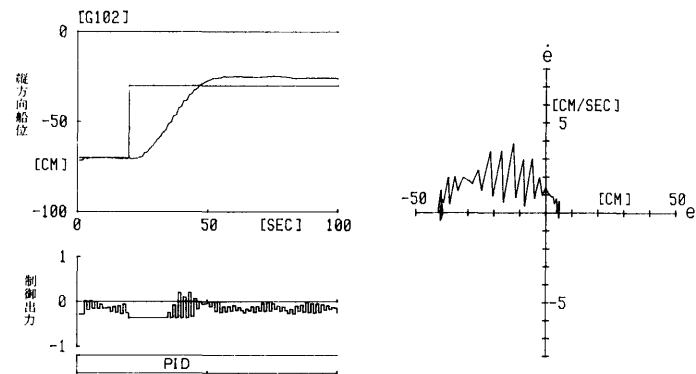


Fig. 4-13 フィルタⅡを使用したPID制御（波浪中）

を使用した例である。フィルタの重みを増しても、フィルタⅠの例ほどには、制御出力の変動は小さくはないが、時間遅れが少ないために、系は不安定になりやすく、オーバーシュートや、振動的な応答も少ない。特にオンオフ制御方式での改善が著しいが、P I

D方式と組んでも良い応答を示す。

非線形のフィルタは、種々なものが考えうる。この例が示すように、更に新しいフィルタの研究をすすめることは、D P Sの性能向上のために必要なことと考える。

[G89]

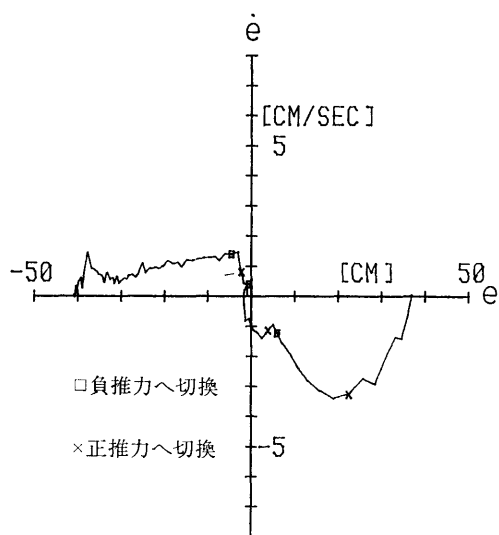


Fig. 4-14 オンオフ制御（潮流中）

4.3 波浪中での応答実験

波浪中での目標値変化に対する応答の実験結果の一例を、Fig. 4-11 に示す。波長、船長比 $\lambda/L=1.4$ 、波高 6 cm の波（波長 158m、波高 1.70m、周期 10 秒の実際の波に対応）が、船首方向から来ている。波の周期は約 2 秒と短かく、また制御系のサンプリング周期 1 秒と同期して制御系にとっては、きびしい条件である。実際の船舶における D P S では、波一山に数回以上のサンプリングができるから、これほどきびしい状態になることはない。

船体位置は、きびしい条件にもかかわらず、良好に応答している。しかし、波の強制力によって、船がゆすられ、速度の変動が大きく、かつ、サンプリング周期に同調しているために、位相面の切換曲線をはさんで、制御出力が毎回符号を変えて、船体の揺動を助長している。

制御出力の変動を少なくするために、 $\omega=0.5$ のフィルタ II を入れた例を、Fig. 4-12 に、同じ条件の P I D 制御の例を Fig. 4-13 に示す。いずれも、目標値近辺での制御出力の変動は、改善しているが、過渡状態時の出力変動を抑えることはできなかった。これはサンプリング間隔を、より短かくしない限り、難しいと考える。

4.4 潮流中での応答実験

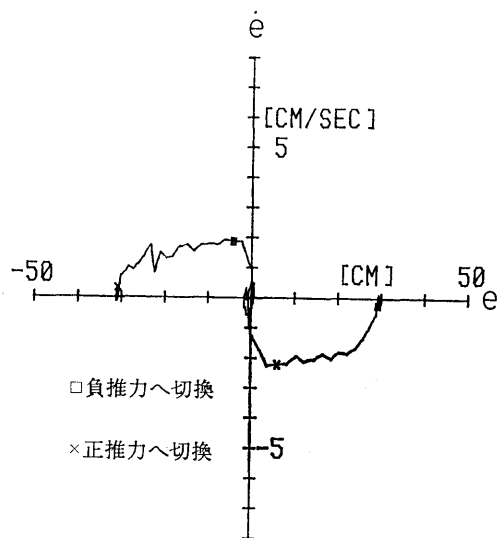


Fig. 4-15 補正されたオンオフ制御（潮流中）

7 cm/sec（実船で 0.7 ノット担当）の潮流が船首方向から来る中で、オンオフ制御で目標値を潮流に逆行と順行に変化させた例を Fig. 4-14 に示す。潮流の漂流力によって、順行と逆行で応答が異なってくる。

潮流の漂流力を定常的な外力として、フィードフォワード補正した時の例を、Fig. 4-15 に示す。応答がほぼ対称になっており、潮流力にみあう力で推力を補正することによって、平水中の切換曲線を利用することが可能になることがわかる。

4.5 制御出力の大きさの影響

上記の制御実験例では、制御出力である定推力 f を、全推力の 28% にしていたが、 f を全推力の 48%、64%、100% と大きくした例を、Fig. 4-16 に示す。これは、 $\lambda/L=1.4$ 、波高 6 cm の波浪中の目標値変化に対する応答である。

推力が大きくなるにつれて、サンプリング周期 1 秒に比べて船速が大きくなりすぎ、切換曲線を大きくオーバーしてから出力が切換わるために、応答が不安定になってゆく。

経済性を考慮するならば、制御出力は小さいことが望ましいが、応答速度を増すために、大きな制御出力を要するときには、船速 \dot{x} とサンプリング周期 ΔT の関係に注意すべきである。上記の不安定の理由から、次の式が一つの目安になろう。

$$|\dot{x}| \cdot \Delta T < L_{im} \quad (20)$$

L_{im} は、目標値逸脱の制限値である。

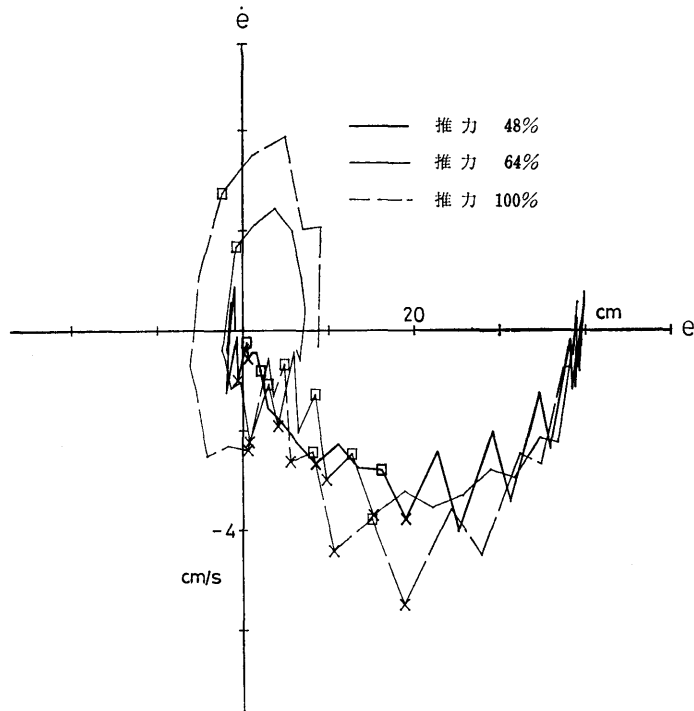


Fig. 4-16 オンオフ制御 (波浪中)

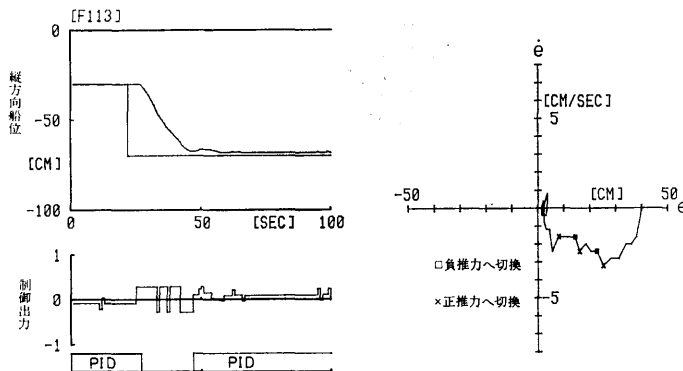


Fig. 4-17 船位測定粗さを4mmにした時のオンオフ制御 (平水中)

4.6 測定値の粗さの影響

本実験の位置測定の粗さは、約0.25mmであるが、実機の測定値粗さは約10cmと考えられる。これを本模型に換算すると約3.5mmになる。一般に、測定値を粗くした場合に予想される、量子化雑音の影響をみるために、模型位置の測定値を4mmで量子化して、実験を行なった。

Fig. 4-17 は平水中で、Fig. 4-18 は $\lambda/L=1.4$,

(240)

波高6cmの波浪中の、目標値変化に対する応答である。

いずれも大きな影響はないが、平水中の応答は多少、雑音的成分を感じさせる反面、波浪中の応答は、測定値の粗さが、微分値の細かな動きを通さないために、むしろ制御出力の変動が少なくなっている。

4.7 その他の実験

プロペラ・スラスタの故障に対する応答試験とし

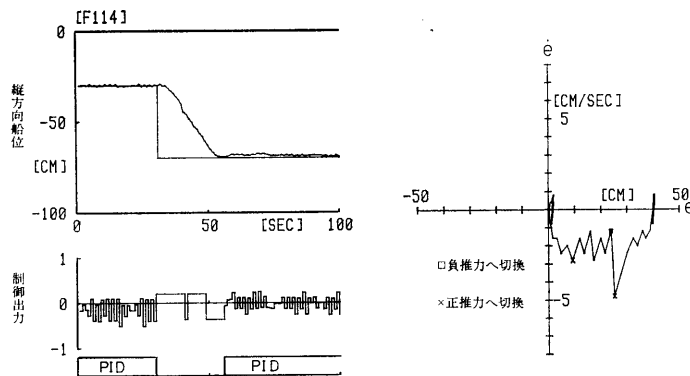


Fig. 4-18 船位測定粗さを4mmにした時のオンオフ制御(波浪中)

て、潮流中に位置保持している状態で、各プロペラ・スラスタを、一基ずつ停止させた時の応答をみたが、いずれもPID領域IIをはずれることなく、良好に位置保持することができた。

本論文では、船長方向の動きの実験を主としてとりあげたが、横方向、回頭の実験も同様に行ない、本質的に同様な結果を得た。横方向、回頭ともに抵抗項が大きくなるために、制御としてはむしろ容易になり、安定な応答が得られる。初めに船体運動の連成項が小さいことを理由に、縦方向、横方向、回頭の制御部分を3つの独立した部分に分離したが、そのための悪影響はいずれの実験においても見られなかった。

5. 結 言

大深度の石油掘削船のDPSの性能を向上させるために、従来のPID方式に代る、非線形の最適オンオフ制御方式の適用を提案し、その特性、問題点とその対策等を模型実験によって明らかにし、新制御方式によるDPSの実用化の可能性を、さぐった。

(1) 新制御方式

最適オン・オフ制御方式によるDPSの設計法を明らかにし、実際に適用する際の、切換曲線の修正法、外乱力の補正法、優れた特性を有する非線形フィルタの可能性を示した。

(2) 制御特性

① 平水中では、PID方式に比べて、少ないエネルギーで、短時間に、安定に目標値に達することがわかった。

② 船位測定値に雑音成分が加えられた場合は、オーバーシュートが大きくなり、制御出力の変動も大きくなるが、フィルタの使用で改善される。

③ 非線形のフィルタIIは、線形フィルタIにない特徴を持ち、PID方式と組合せても、良い応答を示した。

④ 波浪中の応答は、良好であるが、サンプリング周期が、波の周期に比べて長すぎたために、制御出力の変動が大きかった。

⑤ 潮流中の応答は良好である。潮流の漂流力で、制御出力を補正することによって、応答を改善することができる。

⑥ 制御出力が、サンプリング周期に比して大きくなると、オーバーシュートの大きい、不安定な制御になりやすい。

⑦ 船位測定値を、実機換算10cmまで粗くしても、影響は、ほとんどない。

⑧ 潮流中で位置保持中に、プロペラ、スラスタが一基停止しても、全体の推力が十分ならば、大きく位置が変動することなく、定位置に保持することができる。

(3) 今後の問題

位相面を制御で使用するため、位置の微分を時間遅れを少なく、正確に知ることが重要である。船速を直接測定して、過渡的な位置の微分値にかえ、絶対的な値は、長期にわたって修正する方法をとれば、より性能は安定向上しよう。

実機の場合は、模型実験とちがって多種多様な雑音に加わってくる。これらの影響を少なくするための、良いフィルタの設計が、実用化のために重要であろう。

参 考 文 献

- 1) J.E. Gibson, 堀井訳; 非線形自動制御, コロナ

- 社 (1968, 3)
- 2) 村山, 菊地; 海上浮遊体の位置制御に関する一考察, 船研講演集 (1977, 5)
 - 3) 安藤, 矢後, 高井; 自動位置保持装置付大深度石油掘削船の動的応答について, 船研講演集(1980, 12)
 - 4) 大深度石油掘削船自動位置保持装置の研究開発に関する調査報告書, 運輸省船舶局 (1981, 3)
 - 5) 村山, 菊地; 石油掘削船の位置制御系について, 日本船用機関学会第29回春季講演会 (1981, 5)