

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 35 NO. 2 June 1996

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第35巻 第2号 (VOL.35, No.2) 1996年6月 (June 1996)

目次 (CONTENTS)

1. 護岸の吸い出しに関する水理模型実験
.....高橋重雄・鈴木高二朗・徳淵克正・岡村知光・
下迫健一郎・善 功企・山崎浩之 3
(Hydraulic Model Experiments on the Settlement Failure of Caisson-Type
Seawalls
.....Shigeo TAKAHASHI, Kojiro SUZUKI, Katsumasa TOKUBUCHI,
Tomomitsu OKAMURA, Kenichiro SHIMOSAKO, Koki ZEN, and
Hiroyuki YAMAZAKI)
2. 壁式深層混合処理地盤の滑動破壊挙動について
.....北詰昌樹65
(Sliding stability of wall type improved ground by Deep Mixing Method
.....Masaki KITAZUME)
3. 未充填部を有するサンドイッチ部材の曲げ及びせん断特性
.....清宮 理・木村秀雄・小島朗史105
(Mechanical Properties of Incompletely Filled Composite Sandwich Members
.....Osamu KIYOMIYA, Hideo KIMURA, and Roushi OJIMA)
4. ファジィ制御によるドラグサクシオン浚渫船の自動化
.....加藤英夫・福本裕哉・佐藤勇二・谷本祐史・岡山義邦147
(Automatic Operation System with Fuzzy Control for Trailing Suction
Hopper Dredger
.....Hideo KATO, Hiroya FUKUMOTO, Yuji SATO,
Hirofumi TANIMOTO, and Yoshikuni OKAYAMA)

4. ファジィ制御によるドラグサクシヨン浚渫船の自動化

加藤 英夫*
福本 裕哉**
佐藤 勇二**
谷本 裕史**
岡山 義邦***

要 旨

ドラグサクシヨン浚渫船の自動化については主に省力化という見地から開発が進められて来た。しかし従来の自動化は、設定値を境界としたON/OFF制御、あるいはあらかじめ定められた手順にしたがって制御を行うシーケンス制御であり、ベテラン乗船員の手動操作に比較すると制御が不十分で滑らかさに欠けるところがあり、結果として省力化は図られたが生産性（浚渫土量）は必ずしも高くなってはいない。そこでこの問題を解決するため第五港湾建設局の「清龍丸」を対象として、ベテラン乗船員の操作上のノウハウをコンピュータに組み込めるファジィ制御を用いた自動化装置を開発し、それを実船に装備して実船実験を行った。実船実験ではファジィ理論を用いて以下の制御を行い、効果を検討した。

- ① 船速制御
- ② 浚渫ポンプ回転数制御
- ③ ジェット水制御
- ④ スェルコン圧力制御

その結果浚渫土量は従来の自動運転に対し約7%～10%向上した。また船速については手動操作に近い滑らかな制御が実現し、ジェット水についても適切な頻度で発停させ浚渫ポンプの閉塞を防止することができ、ベテラン乗船員並の浚渫能率確保と自動化、省力化が実現された。

キーワード：ドラグサクシヨン浚渫船、浚渫自動化、知能化浚渫、ファジィ制御

* 機械技術部 浚渫埋立研究室長
** 機械技術部 浚渫埋立研究室研究員
*** 機械技術部長

4. Automatic Operation System with Fuzzy Control for Trailing Suction Hopper Dredger

Hideo KATO *
Hiroya FUKUMOTO **
Yuji SATO **
Hirofumi TANIMOTO **
Yoshikuni OKAYAMA ***

Synopsis

An automation of dredging operation has been highlighted in the dredging field for a longtime from the viewpoint of labor saving, improvement of efficiency and accuracy. After the various kinds of attempts have been conducted, the automation for operation of drag-arm and drag-head has been achieved, and it has been performed very good so far. The control parameter, however, which is based upon the dredging environment such as the condition of sea bed, is being relied on the operator's decision at present.

Under these circumstances, the study on the more advanced automatic dredging system using fuzzy control has been carried out for 1700m³ trailing suction hopper dredger named "SEIRYU MARU" which belongs to the 5th District Port Construction Bureau.

This paper introduces the newly developed concept of an advanced automatic dredging system and presents the details of the application of fuzzy control to the dredger and the results of dredging trial. This automation system based on fuzzy control is more advanced and quite different from the existing automation system which gives only sequential control conducted by "ON-OFF" control within the given range and cannot totally and automatically perform the optimum control on whole dredging works according to various working conditions. Through this experimental dredging trial, the production improvement by about 7%~10% in comparison with existing automatic control system was confirmed.

Key Words : Trailing Suction Hopper Dredger, Automation of Dredging Operation, Fuzzy Control, Artificial Intelligence Dredging System

-
- * Chief of Dredging and Reclamation Laboratory, Machinery Division
 - ** Member of Dredging and Reclamation Laboratory, Machinery Division
 - *** Director of Machinery Division

目 次

要 旨	147
1. まえがき	151
2. 浚渫自動化システム	151
2.1 システム構成	151
2.2 制御機能	152
2.3 モニター機能	153
2.4 浚渫自動化システムの運用	155
3. ファジィ浚渫自動化システム	156
3.1 目標と前提条件	156
3.2 システムの概要	157
3.3 ファジィ浚渫制御システム	160
4. 実船実験の概要	167
4.1 実船実験内容	167
4.2 供試浚渫船	170
4.3 浚渫条件	170
5. 実船実験データ解析結果	170
5.1 積載土量向上効果	170
5.2 浚渫ポンプ回転数制御	174
5.3 船速一定制御	183
5.4 ジェットポンプ発停制御	183
5.5 スエルコン圧力制御および浚渫目標設定	183
5.6 各種制御用センサーの検討	184
6. 結 論	189
7. あとがき	190

1. まえがき

近年、浚渫船の自動化については省力化、効率向上、精度向上等の見地から世界的に関心の的であり、日本でも種々の試みがなされてきたが、ドラグサクシオン浚渫船についてはいまだ部分的な自動化の域にとどまっていた。

こうした中で1986年以来、第五港湾建設局所属の1700㎡ドラグサクシオン浚渫船「清龍丸」等を対象として、本格的な自動化の開発が行われてきた。この自動化システムはドラグアームの昇降、浚渫中のドラグアームの姿勢、浚渫ポンプの動作等をシーケンス的に自動制御するもので、1989年に「清龍丸」に搭載され今日まで良好な実績をあげている。

しかしながら、これらの自動化制御は、あくまである一定値を境界としたON/OFF制御、あるいはあらかじめ定められた手順にしたがって制御を行うシーケンス制御である。このためベテラン乗船員の手動操作に比較すると制御が不十分で、結果として省力化は図られたが生産性（浚渫土量）は必ずしも高くなってはいない。また海底の状態に応じた浚渫パラメータ（目標船速、目標浚渫ポンプ流量等）の設定は自動化が難しく、乗船員の経験による設定が行われているのが現状である。このため各種作業条件に対し、浚渫作業全体として自動的に適正な制御をするまでには至っていない。

浚渫船の高度な自動化については、1983年～1988年にファジィ制御を用いたポンプ浚渫船の自動化の開発が行われている¹⁾。これは1987年に実船に自動化システムを装備して現地実験を行い、ベテラン乗船員に匹敵する浚渫土量の確保という成果を得ている。そこで、このポンプ浚渫船の高度な自動化の成果を引継ぎ、1990年から「清龍丸」を対象として第五港湾建設局と共同で、ファジィ制御を用いて知能化したより高度な自動化システムの開発を行っている^{2)～5)}。ドラグサクシオン浚渫船自動化の開発経緯を簡単に以下に示す。

(1) 浚渫自動化システムの開発 (1986年～1989年)

ドラグアームの昇降、浚渫ポンプの発停、弁切替え等の自動化を行った。1989年以降、実用に供され良好な運転実績をあげている。この自動化はON/OFF制御およびシーケンス制御をベースとしている。

(2) ファジィ浚渫自動化システムの開発 (1990年～現在)

① 第一期 (1990年～1993年 ファジィ浚渫制御システムの開発期)

本船にファジィ推論パソコンを装備し、ファジィ浚渫制御システムを構築した。既存の自動化制御において、一定値制御または上下限値のスイッチング制御であった制御要素（浚渫ポンプ回転数、推進翼角等）を浚渫中の海底の状態変化を入力としてファジィ推論を行い、適応制御するものである。ファジィ制御のルールについては乗船員の経験および運転データの解析結果にもとづいて作成した。1992、1993の両年にわたり実船実験を行い、自動運転に対し約7～10%の積載土量向上効果が確認された。

② 第二期 (1994年～現在 知能化浚渫システムの開発期)

一浚渫ごとに浚渫データを統計解析し、現区域の土質等の海底状態を判断してファジィ浚渫制御システムの浚渫パラメータを最適化する知能化浚渫システム等の開発を行う。ファジィ浚渫制御システムのみでは、ある特定の浚渫区域の海底土質にあわせて浚渫パラメータを設定するため、他の浚渫区域で土質に変化があった場合には最適なファジィ制御を行うことができない。知能化浚渫システムは、適切な浚渫パラメータの調整作業を自動的に行い、海底の状態に即した最適な浚渫制御を行うものである。

本報告では、まず前記「(1)浚渫自動化システムの開発」に示した「清龍丸」の既存の浚渫自動化システムについて述べ、次に「(2)ファジィ浚渫自動化システムの開発」の第一期に開発したファジィ浚渫制御システムの概要を述べる。続いて1992年、1993年における実船実験の結果を報告する。

2. 浚渫自動化システム

2.1 システム構成

浚渫自動化システムは浚渫操作部、推進操作部、制御部、情報入力部、駆動出力部、浚渫監視表示部、推進監視表示部、浚渫監視表示部、推進監視表示部から構成される。図-1に示す。

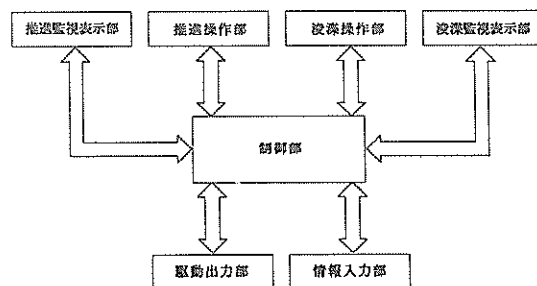


図-1 システム構成図

(1) 浚渫操作部

浚渫操作部には手動操作部と自動操作部がある。手動操作部はドラグアームウインチ操作、浚渫ポンプ等の各種ポンプ操作、および浚渫弁等各種弁操作をそれぞれ個別に手動で行うものである。一方、自動操作部はドラグアームの昇降、浚渫ポンプの発停、捨土、泥倉排水作業等一連の浚渫サイクル作業すべてを簡単な押しボタン操作により自動で行うものである。

(2) 推進操作部

推進操作部にも手動操作部と自動操作部がある。手動操作部は推進機の推進翼角操作、バウスラスターの推進翼角操作等を個別に手動で行うものである。自動操作部は、船速設定および開始・終了の操作により浚渫中の船速一定制御を自動で行うものである。

(3) 制御部

制御部にも手動制御と自動制御がある。手動制御は各浚渫機器を手動操作によって個別に制御するものである。自動制御は以下に示した7項目の制御を自動で行うものである。

- ① ドラグアーム昇降動作の制御
- ② 浚渫中のドラグアーム姿勢の制御
- ③ 浚渫ポンプの制御
- ④ 泥倉への土砂の積込動作の制御
- ⑤ 捨土動作の制御
- ⑥ 泥倉残水の排水動作の制御
- ⑦ 浚渫船速一定の制御

(4) 情報入力部

情報入力部はドラグアームの各移動位置検出器、ドラグアーム各ウインチのワイヤー長検出器、スエルコンストローク検出器、スエルコン圧力検出器、各種弁の開閉検出器、コニカルドアの開閉検出器、喫水検出器、船速検出器、泥倉水位検出器等の浚渫状態を検出する各センサの入力、および各駆動機の運転状態を検出するセンサからの入力を処理するものである。

(5) 駆動出力部

ドラグアーム各ウインチへの指令、浚渫ポンプへの指令、ジェットポンプへの指令、各種バルブおよびコニカルドアへの開閉指令、推進翼角指令等の運転動作指令の各駆動機への出力を処理するものである。

(6) 浚渫監視表示部

浚渫監視は手動操作監視、自動操作監視、アラームモニタがある。手動操作監視は浚渫作業の手動操作の状況を各種メーターにより監視する。自動操作監視ではモニタ上にドラグアームの形状、位置および各種浚渫データがグラフィック表示される。またアラームモニタでは浚渫関連の異常の監視を行う。

(7) 推進監視表示部

推進監視にも手動操作監視と自動操作監視がある。手動操作監視は推進の手動操作の状況を各種メータにより監視する。自動操作監視ではモニタ上に推進関連の各種データがグラフィック表示される。

2.2 制御機能

(1) ドラグアーム昇降動作の自動制御

ドラグアーム昇降動作の自動制御の機能は、ドラグアームの格納位置からドラグヘッドの海底接地位置までの行き先位置(図一2)を6種に設定し、どの位置からでも指示した位置に自動で安全かつ連続的に移動させる。また指示位置へ移動中に任意の位置で停止させることも可能である。図一2中のドラグアームの各位置における状態を以下に示す。

格納位置：ドラグアームが上甲板上の格納台に乗った状態。

振出位置：ドラグアームが舷外に振り出された状態。

着水位置：ドラグヘッドが海面に着水した状態。

嵌合位置：トラニオンが嵌合した状態。

用意位置：ドラグヘッドが海底に接地直前で浚渫待機の状態。

接地位置：ドラグヘッドが海底に接地した状態。

ドラグアームの昇降動作は3台のウインチ(ドラグヘッドウインチ、中間ジョイントウインチ、トラニオンウインチ)で制御している。ドラグアームの制御は原則的に片舷ずつの独立制御としている。ドラグアームの位置は常時フィードバックされていて、それぞれの位置に適合した指令信号(浚渫弁の開閉、浚渫ポンプの発停および増減速等)を他の制御ルーチンに出力している。またトラニオン嵌合前にドラグアーム内の空気を抜く制御、ドラグアームが海面上に上がった時点でドラグアーム内の海水を抜く制御、両舷動作の場合同時にドラグヘッドが接地するように両舷同期する制御等、乗船員のノウハウ的な制御要素を付加して制御機能の向上を図っている。

(2) 浚渫中のドラグアーム姿勢の自動制御

ドラグアームの姿勢の自動制御は、ドラグヘッドが接

ファジィ制御によるドラグサクシオン浚渫船の自動化

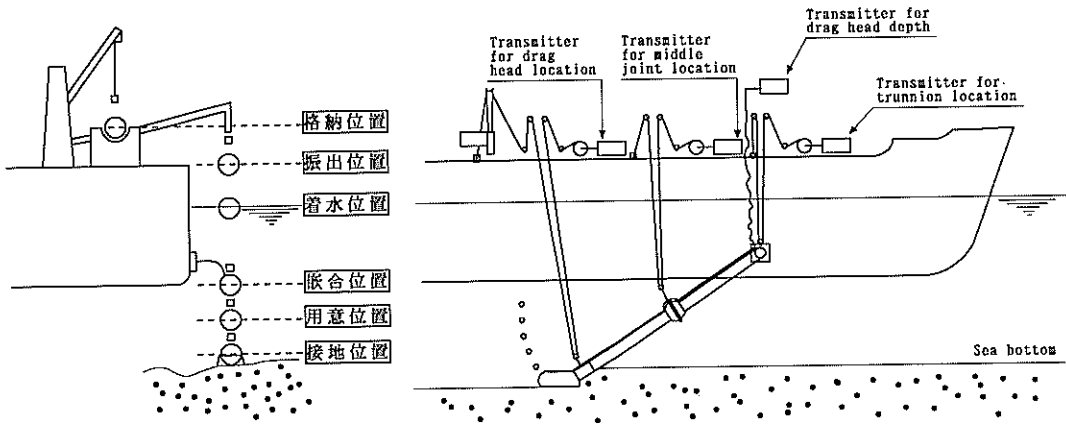


図-2 ドラグアーム位置

地した時点から機能を開始し地切りした時点で終了する。制御機能は以下に記す通りである。

- ① 通常の浚渫は、スエルコンのストローク中央付近で行うようにドラグヘッドをアップ・ダウンさせて、スエルコンの有効ストロークを保持する。
- ② 余掘が生じないようにするために、浚渫下限深度の設定値よりドラグヘッドが下がらないように制御する。
- ③ ドラグアームの上下の屈曲を検出し、中間ジョイントウインチのアップ・ダウンによりドラグアームがまっすぐになるように補正して、アームの損傷を防止する。
- ④ ドラグヘッドの吊ワイヤーの角度を検出して左右の屈曲の大きさを演算し、許容限界を超えたならば、ドラグアームの船体との接触または舷外への振出し過ぎによる損傷を防止するため、ドラグヘッドウインチのアップにより（ドラグヘッドの接地圧を軽くして）許容限界内に補正する。

(3) 浚渫ポンプの自動制御

浚渫ポンプの回転数をあらかじめ設定しておき、ドラグアーム位置の浚渫ポンプ起動条件成立（例：用意位置）で浚渫ポンプを起動し、増速条件の成立で設定回転数まで徐々に増速し浚渫を行う。浚渫ポンプ運転中は常時吸入負圧を監視し、上限値に近づいたらドラグヘッドの巻き上げ、浚渫ポンプ回転数の減速等の制御を状況に応じて行い、キャビテーションの防止を図る。さらにドラグアーム位置の浚渫ポンプ回転数減速条件、停止条件成立で浚渫ポンプ回転数を減速し、停止させる等の一連の制御を行う。

(4) 泥倉への土砂積込動作の自動制御

泥倉への浚渫土砂の積込動作はパターン化されており、選択されたパターンにしたがってドラグアームの昇降動作、浚渫ポンプの発停動作等関連制御の条件成立によって浚渫弁の開閉制御を行う。

(5) 捨土動作の自動制御

捨土作業は浚渫作業が終了して土捨場に回航後、船底弁（コニカル弁）を開閉して行う。したがって浚渫作業終了からかなりの時間が経過しており、各浚渫機器すべてが停止状態となっているので、各浚渫機器の準備（シーリングポンプ運転、弁開閉油圧ポンプ運転、ジェットポンプ運転等）から始まり、船底弁の開閉動作、泥倉内および船底弁の洗浄動作等の制御を行う。

(6) 泥倉残水の排水動作の自動制御

捨土作業終了後、泥倉内には喫水線まで水が残っており、この残水を次の浚渫開始までに排水する制御である。一連の排水動作はパターン化されており、選択されたパターンにしたがって排水ラインの弁開閉動作、浚渫ポンプの運転動作等の制御を行う。

(7) 浚渫船速一定の自動制御

浚渫船速をあらかじめ手入力力で設定しておき、浚渫開始時点から設定船速にて制御する。浚渫船速一定制御は対地船速によってフィードバック制御される。

2.3 モニタ機能

モニタ機能は2台のパソコンを使い、次の機能を分担している。

(1) モニタ1の機能

モニタ1には常時ドラッグアーム形状、位置、浚渫データを表示する。また異常が発生したときには、アラームモニタ機能によりアラームメッセージを表示する。

a) ドラッグアーム形状表示 (図-3)

ドラッグアームの形状は側面から見た形で左舷、右舷は前後にずらし、色分けして表示している。表示は喫水、潮位、アーム形状をリアルタイムでグラフィック表示するとともに数値表示も同時に行い、感覚的監視と数値監視の両方を可能としている。

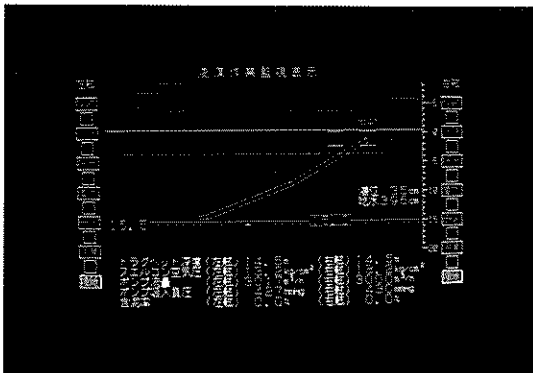


図-3 ドラッグアーム形状表示

b) ドラッグアーム位置表示

ドラッグアーム昇降動作の自動制御はドラッグアームの位置ごとのパターン制御であり、この制御の結果ドラッグアームが現在どの位置にあるかを表示している。これは、形状表示だけではドラッグアーム全体の動きは監視できるものの、ドラッグアームの位置がどこであるか明確に把握できないため表示しているものである。

c) 浚渫データ表示

浚渫データは浚渫作業の状態を監視するのに必要な情報のことであり、情報はリアルタイムに数値表示している。表示しているデータはドラッグヘッド深度、スェルコン空気圧、浚渫ポンプ流量、浚渫ポンプ吸入負圧、含泥率等である。

d) アラームモニタ

浚渫自動化システム実行中の電源喪失、コンピュータ異常、バルブ動作異常、ドラッグアームの動作異常、位置センサ検出異常、アナログデータ異常等約140点の異常監視をしている。異常状態が発生した場合には、警報を発生して異常のメッセージを具体的に(例:右舷スェルコン下限検出が不作動です)表示するとともに、それぞれの異常に対応して定められた処理を行う。処理の基本的

な考え方は、警報を出し制御をそのまま継続させる、異常が発生した状態を保持(停止)する、制御システムを自動操作から手動操作に移行させ、手動操作により対応を可能にさせるの3通りがある。

e) ドラッグアーム形状および含泥率の演算

ドラッグアームの形状(動き)は、各ウインチワイヤー長検出器およびワイヤー角度検出器からの入力値により、ドラッグアーム形状を立体的(X、Y、Z座標)に把握できるように演算し、その結果から側面投影図、ドラッグヘッド深度を表示している。

含泥率計測は差圧方式を採用しており、浚渫ポンプ吐出側浚渫管の立ち上がり部における一定距離間の差圧と浚渫ポンプ流量をリアルタイムに演算し、含泥率を表示している(図-4)。含泥率の計算は以下のように行う。

基本となる理論式は

$$\Delta P = l(\gamma_m - \gamma_s) + \frac{\lambda \cdot l \cdot V^2 \cdot \gamma_m}{2D \cdot g} \quad (1)$$

ここで、

- ΔP : 差圧 (kg f / cm²) ……(差圧計より入力)
- l : 差圧検出位置間距離 (cm) ……(設定値)
- γ_m : スラリ比重量 (kg f / cm³)
- γ_s : 差圧検出器内封入液比重量 (kg f / cm³) ……(設定値)
- D : 配管内径 (cm) ……(設定値)
- V : 配管内流速 (cm / s) ……(流量計より入力)
- g : 重力加速度 (980 cm / s²)
- λ : 管摩擦係数 ……(手入力)

(1) 式で γ_m を求めて、みかけ含泥率を(2)式で計算する。

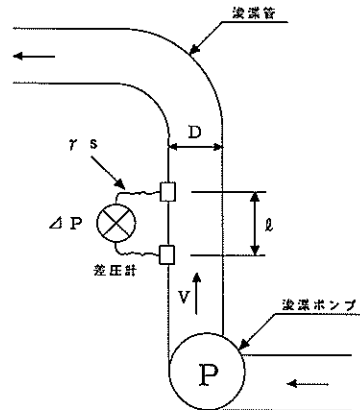


図-4 含泥率測定原理

$$C_a = \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_b - \gamma_w} \dots\dots\dots(2)$$

ここで

- C_a : みかけ含泥率
- γ_w : 海水比重量 (kg f / cm³) ……………(手入力)
- γ_b : 底泥の比重量 (kg f / cm³) ……………(手入力)

(2) モニタ 2 の機能

モニタ 2 には、推進関係データトレンド表示と、積載土量トレンド表示とがあり、画面切替で監視する。両画面に関連する情報および常時監視する必要のある情報(推進および船体データ)は常時数値表示している。

a) 推進関係データトレンド表示 (図-5)

トレンド表示は縦軸に船速、推進電力、推進翼角を取り横軸を時間で表示している。横軸の時間スケールはあらかじめ設定しておく(トレンド表示の開始は浚渫開始より始まる)。時間経過とともに前回値を消去しながら進んでいくので、前回値との比較ができる。また横軸の設定を距離表示に変更することも可能としている。

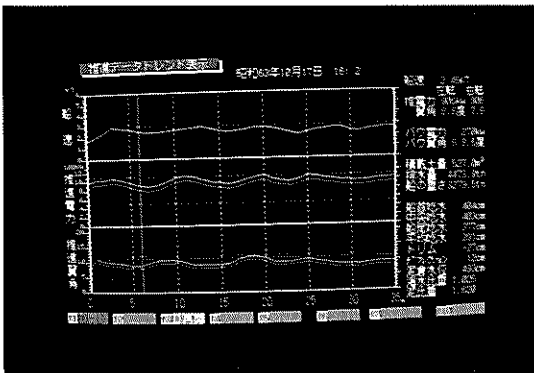


図-5 推進関係データトレンド表示

b) 積載土量トレンド表示 (図-6)

縦軸に積載土量、喫水、泥倉水位を取り、横軸を時間で表示している。横軸の時間スケールはあらかじめ設定しておく(トレンド表示の開始は浚渫開始より始まる)。積載土量は船首、中央、船尾の3カ所の喫水と、前部、中央、後部の3カ所の泥倉水位により、リアルタイムに演算し表示している。積載土量は以下の式によって演算されている。

$$V_m = \frac{W_a - W_b - V_h \cdot \gamma_w}{\gamma_b - \gamma_w} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

- V_m : 積載土量 (m³)
- W_a : 現在の排水量 (ton)
……………(喫水と排水量曲線にて自動計算)
- W_b : 浚渫前の船の重量 (ton)
……………(喫水と排水量曲線にて自動計算)
- V_h : 泥水体積 (m³)
……………(泥倉水位と泥倉容量曲線にて自動計算)
- γ_w : 海水比重量 (ton / m³) ……………(手入力)
- γ_b : 底泥の比重量 (ton / m³) ……………(手入力)

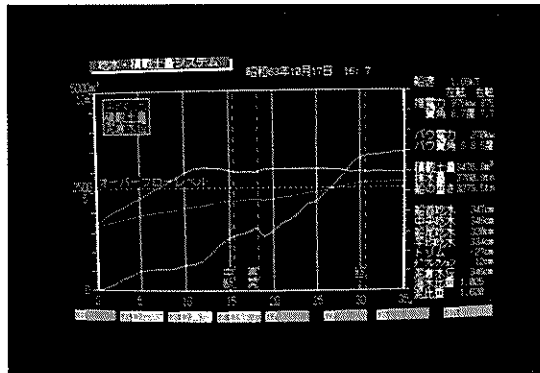


図-6 積載土量トレンド表示

(3) 式において海水比重量 (γ_w) および底泥の比重量 (γ_b) は浚渫区域によって異なるので、サンプリングによって値を確認し、コンピュータに手入力する。泥水体積 (V_h) は泥倉水位-容量曲線で求める。泥倉水位については、船のローリング、ピッチングにより泥倉内の泥水面が動いているため、泥倉内の3点をリアルタイムに計測し、3点から泥水面を平面近似して泥倉中央の水位を計算している。この水位の計測には光波式レベル計を用いている。排水量 (W_a) および浚渫前の船の重量 (W_b) は、喫水-排水量曲線で計算した値にトリム、船体のたわみおよび海水比重による値を補正して求める。

c) 推進および船体データの数値表示

浚渫作業監視のために推進および船体関係のデータとして船速、推進電動機電力、推進翼角、バウスラスタ電動機電力、バウスラスタ推進翼角、積載土量、排水量、船体重量、海水比重、泥みかけ比重等のリアルタイム数値表示を行っている。

2.4 浚渫自動化システムの運用

改造後の運転実績から浚渫自動化システムの総合評価をすれば、初期の目的である省力化は十分達成されたと

言える。自動化システムの構造や特性についての理解が乗船員に浸透していくにつれて、安定した運航が確保された。以下に現在までに運用した結果を示す。

(1) 自動化導入前と導入後を比べてみると、荒掘浚渫では浚渫土量にほとんど変化はない。しかし仕上掘浚渫では、海底の凹凸に対して手動運転の場合は浚渫ポンプ回転数等を微妙に調整できたが、自動運転の場合は設定した回転数による一定値制御で浚渫しているため、場合によっては含泥率の低い泥水を積み込む結果となり、浚渫効率がダウンしている。浚渫効率アップは今後の課題である。

(2) 自動化導入前には浚渫機器等の手動操作ミスによるトラブルが発生することがあったが、導入後はこのようなトラブルがなくなり安定した浚渫が行われている。

(3) ドラグアーム操作（振出→浚渫→格納）、捨土、排水の操作等が自動化されたので大きな省力化となった。またドラグアーム操作は手動操作に比較して非常にスムーズな運転が実現されている。

(4) 浚渫船速一定制御は、設定値を境界としたON/OFF制御となっており、海底面が均一な場合以外は変動が大きく安定した制御ができない。安定した船速制御は今後の課題である。

3. ファジィ浚渫自動化システム

3.1 目標と前提条件

従来のドラグサクシオン浚渫船「清龍丸」の浚渫自動化システムはドラグアーム自動制御、浚渫ポンプ回転数制御、浚渫船速自動制御を中心として行われている。しかしながら、これらの自動制御はいずれもドラグアーム位置、浚渫ポンプ吸入負圧、浚渫ポンプ回転数あるいは浚渫速度について設定されたある値を到達値、もしくは限界値とするような個別的シーケンス制御となっている。このため、浚渫関連部分の浚渫中の挙動は設定値を境界としたON/OFF制御となり、ベテラン乗船員の手動操作に比較して制御が不十分であり効率向上に限界があった。このような問題を解決するため新しい浚渫自動化システムの開発を行った。

現在の「清龍丸」の浚渫作業には以下のような特徴がある。

① 環境保護のためオーバーフロー水の船外排出はできない。

一般にドラグサクシオン浚渫船は、泥倉にたまった泥水の上水（含泥率が低い）を泥倉からオーバーフローさせて泥倉内の積載土量を上げているが、「清龍丸」は環

境保護のため現在このオーバーフローはできない。

② 自船のみで最終計画浚渫断面形状に仕上げる必要がある。

ドラグサクシオン浚渫船は掘った跡が溝状になり、深掘りを行って深い溝を作ると仕上げ掘りに多大な時間がかかる。このため「清龍丸」では、一回のドラグヘッド深度下げ幅を30cmとする薄層浚渫を実施している。またドラグヘッドが左右方向にある程度自由に動き海底の低い部分に落ちやすいので、浚渫後には掘り残しの山ができることがある。

このような前提条件をふまえて次のような目標を設定した。

① 積載土量最大

オーバーフローによって積載土量を上げることができないため、一回の浚渫あたりの積載土量を最大化することが重要な課題となる。また薄層浚渫では深度一定で浚渫するため、浚渫土厚は海底面の起伏状態に左右され、含泥率を落とさないためには適切な制御が必要である。

② 平坦浚渫

現在の「清龍丸」では海底の深浅の状態の握把が必ずしも十分でなく、掘り残しあるいは浅くなった箇所をねらって浚渫するという作業が効率良くできない。これを浚渫前あるいは浚渫中必要なときはいつでも海底の深浅の状態を精度良く把握できるようにし、平坦浚渫を効率良く行う。

上記の「積載土量最大」の目標を実現するためにファジィ制御を選択したがその理由は以下の通りである。

① 従来の浚渫自動化制御は手動によるON/OFF制御を自動化したものであり、ポンプ回転数等は一定値制御またはスイッチング制御となっている。これをファジィ制御に置き換えることによってフィードフォワード、フィードバック機能を付加し制御をなめらかにして無駄を省き効率を上げる。

② ドラグヘッド深度一定の薄層浚渫を実施しているので、土質、土厚等の変化が外乱要素として働き、浚渫特性が時々刻々と変化するため、線形制御は困難視されてきた。これに対しファジィ制御は非線形制御に柔軟に適應でき、また船長、乗船員の操作知見を容易に組み込むことができる。

さらに実際の開発にあたっては、次のような範囲及び条件を設定した。

① まれにしか発生しない特殊浚渫作業（航路横断浚渫等）のケースは除いて考える。

② 操船におけるコース保持や舵角操作の自動制御までは考えないものとする。ただし操船コース表示、操船支

援までは考慮する。

③ ファジィ制御を用いた自動化はすべて項目ごとにモジュール化して開発し、各モジュールごとに選択運転が可能ないようにシステム構成を考える。また既存の自動化システム（シーケンス制御）との整合性を十分に考慮する。

3.2 システムの概要

ファジィ浚渫自動化システム概念図を図-7に、ファジィ浚渫自動化制御の系統図を図-8に示す。ファジィ制御の項目別の制御方法およびシステムを以下に示す。

(1) 積載土量最大をねらった制御

a) 薄泥水吸入防止制御

積載土量低下の最大の原因は浚渫開始時等の薄泥水（含泥率の極端に低い泥水）を泥倉内に積み込んでいることに起因している。よってファジィ理論を用い、泥倉内に薄泥水を積み込まないよう制御する。浚渫ポンプ吐出口からドラッグヘッドへの循環ラインを設けておき、吸泥管で含泥率を監視し、薄泥水が入ってきた場合はドラッグヘッドに循環させ泥倉に積み込まないようにする。

b) 泥水リサイクル制御

リサイクル運転とは泥倉内に浚渫で積み込まれた泥水の上水（含泥率が低い）をドラッグヘッド部に還流させて泥倉内の水位上昇を最小にし、積載土量の増大を図り高能率浚渫を行うものである⁶⁾。泥倉に隣接させて上水を落とし込みリサイクルトランクを設置し、トランク内の泥水の含泥率を監視しリサイクルの制御を行う。

c) ジェット水の最適制御

ジェット水の最適な発射タイミング、時間等は浚渫海域の土質、土厚、接地圧力、浚渫ポンプ回転数等の浚渫条件によって常に刻々と変化している。また各々の浚渫条件における最適状態も把握されていない。しかしジェット水の有効活用は含泥率増大の大きな要因である。よって各浚渫条件における最適状態を把握し、ファジィ理論を用いてジェット水の最適制御を行う。

d) 浚渫ポンプ吸入負圧および回転数の最適制御

浚渫ポンプの回転数と吸入負圧は正比例的相関があり、吸入負圧と含泥率も正比例的相関があるが、回転数と含泥率の関係は土質により異なる。一般に吸入負圧はできるだけ大きい点で浚渫すれば含泥率が大きくなるといわれているが、浚渫ポンプのキャビテーション保護等から、かなり安全サイドでの運転を行っているのが現状である。したがって浚渫ポンプ回転数および吸入負圧の最適状態を把握し最適制御を行えば、浚渫効率向上になることは

明らかである。よってファジィ理論を用い浚渫ポンプの回転数および吸入負圧の最適制御を行う。浚渫ポンプ回転数を変化させることにより流量を制御し、吸入負圧限界内および閉塞限界内で含泥率が最大となるような制御とする。

e) 接地圧最適制御

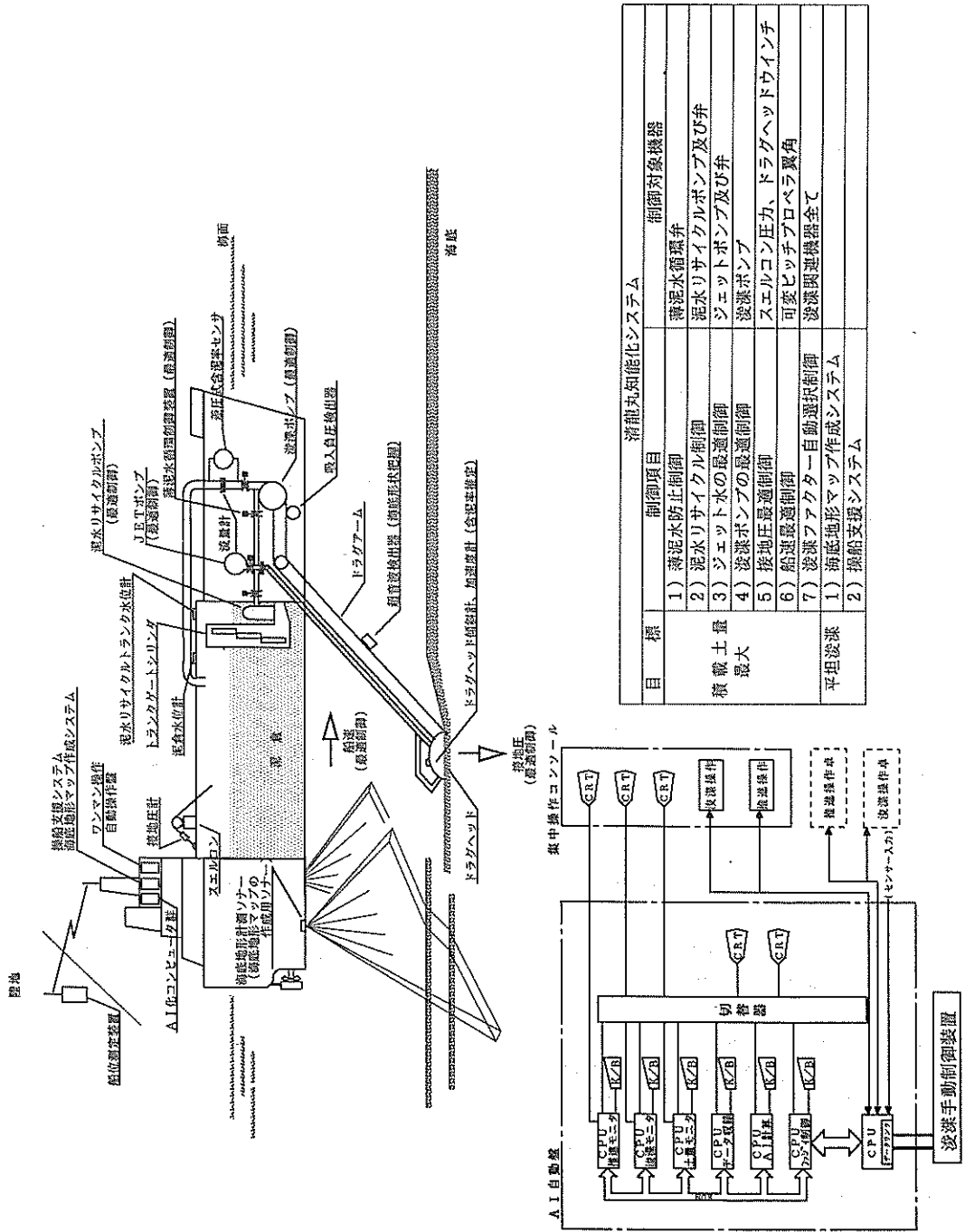
ドラッグヘッド接地圧の変化範囲はスエルコン圧力によって設定されるが、最適接地圧は浚渫区域の土質、土厚、船速、浚渫ポンプ吸入負圧および回転数等の浚渫条件によって常に刻々と変化している。また各々の浚渫条件における最適状態も把握されていない。現状ではスエルコン圧力は船長の経験により決められ、浚渫作業中は固定された状態にある。また、スエルコン圧力を頻繁に変更することは機構上困難である。しかしながら接地圧が浚渫効率（含泥率）に与える影響は大きい。よって各浚渫条件における最適状態を把握し、ファジィ理論を用いてスエルコン圧力の最適制御を行う。

f) 船速最適制御

浚渫中の最適船速は浚渫海域の土質、土厚、接地圧、浚渫ポンプ吸入負圧および回転数等の浚渫条件によって常に刻々と変化している。また各々の浚渫条件における最適状態も把握されていない。現状では船速は船長の経験により決められ、浚渫作業中はほとんど固定である。浚渫中の船速は土質、土厚等の変化のため曳引抵抗が変化することにより変化する。また、船速制御のための推進翼角操作に対して、実際の船速は制御系としての遅れが数分間あり、現状では船速一定制御が無難な制御とされている。よって各浚渫条件における最適状態を把握し、ファジィ理論を用い船速の一定制御を基本とした最適制御を行う。

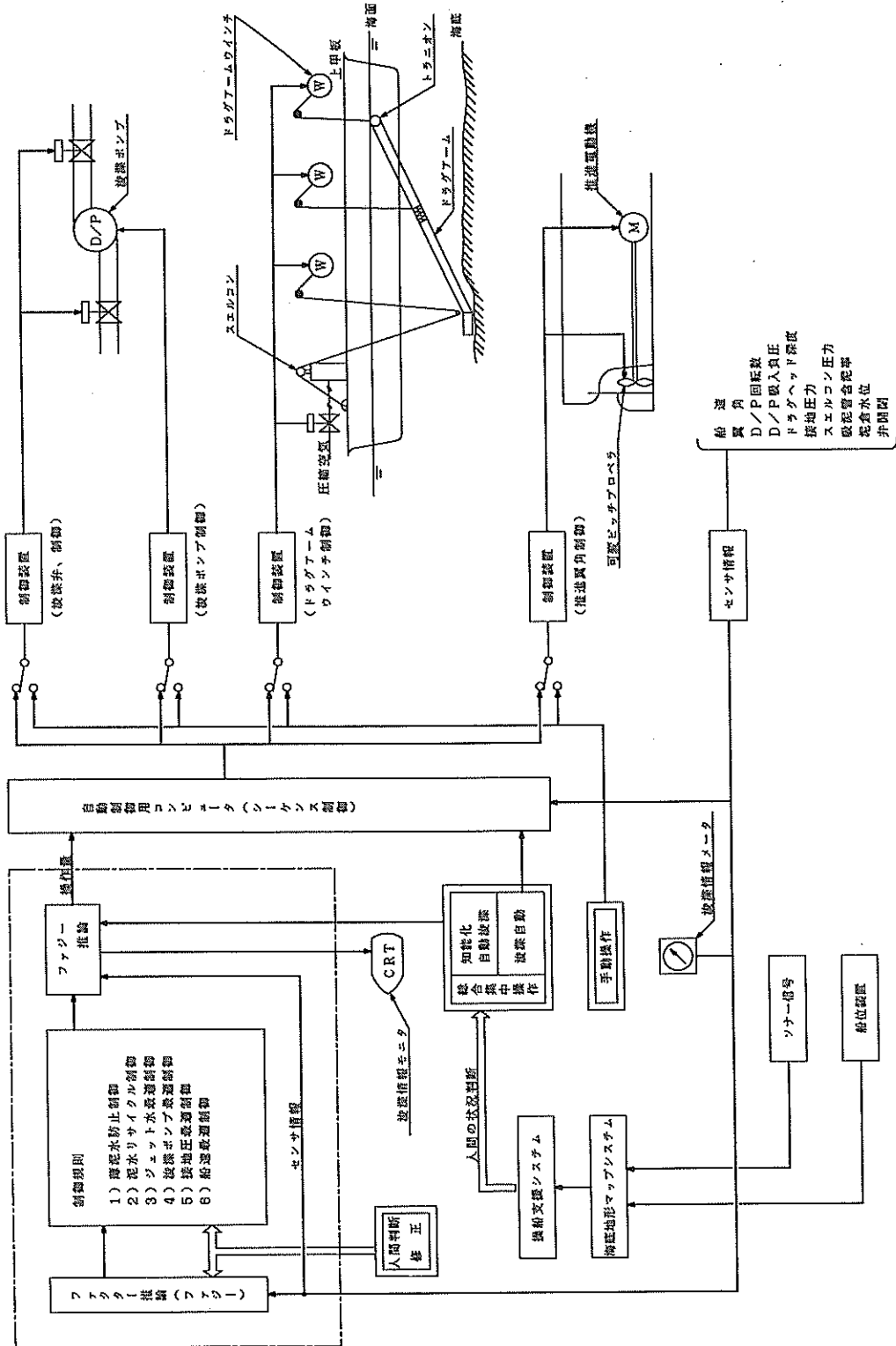
g) 浚渫ファクター自動選択制御

浚渫作業全体の最適化は、浚渫サイクルごとに収集したデータをもとに作業条件を学習し、浚渫ファクター（制御目標、制御幅等の浚渫パラメータおよび制御ルール）を限りなく最適に近づけていくことが重要なポイントとなる。浚渫サイクルごとの収録データおよび解析結果を基にして総合的に積載土量最大になる浚渫ファクターを学習するシステムを確立する。



図一七 ファジィ浚渫自動化システム概念図

ファジィ制御によるドラッグサクシオン浚渫船の自動化



図一8 ファジィ浚渫自動化制御系統図

(2) 平坦浚渫をねらったシステム

a) 海底地形マップ作成システム

従来の浚渫目標表示装置は測量船で計測した深淺データを手入力して海底マップを作成し、そのマップ上でドラッグヘッドが通過した場所をドラッグヘッド深度に書き換えるというものである。しかし深淺図のデータ密度が従来のものでは粗く、またドラッグヘッドの通過したところが必ずしもすべて浚渫できたとは限らない等の点が不十分である。これらの点を改善し、施工精度を向上させ、平坦浚渫の支援を行うために、「清龍丸」に海底地形計測ソナーを装備し、浚渫作業を行いながら自分自身で精度のよい地形マップ(深淺図)を作成するシステムを構築する。

b) 操船支援システム

平坦浚渫作業を行うために浚渫区域のどの位置からどのコースを浚渫すればよいかを風、潮流等を考慮して指示し、本船の操船を支援するシステムを構築する。浚渫目標地点(複数)を入力することにより、その目標に対して操船コースが表示される。

第一期(1990年~1993年)ではファジィ浚渫制御システムを開発し、これは上記の「積載土量最大をねらった制御」のc)~f)の項目に該当する。今回開発した部分は浚渫の手足となる機器制御部を形成するものであり、今後第二期の開発として機器制御部の上位に人工知能的要素を付加した知能化浚渫システムを開発していく予定である。また「平坦浚渫をねらったシステム」のa)はすでに実施済である。

3.3 ファジィ浚渫制御システム

ファジィ制御システムはベテランオペレーターのノウハウを制御に十分に取り入れることができる。これまでのコンピュータ制御は1か0かという正確な二値情報によりすべてを処理していた。しかし、浚渫船のように制御対象の動特性が正確に捕らえられない場合には、通常の計算機制御やアナログ制御は適さず、ベテランオペレーターの判断に任せられた方が良い結果が得られることが多い¹⁾。これは、「もし~が~であれば~を~にする」という専門家としてのノウハウを持っているからである。このようなベテランオペレーターのノウハウを制御に取り入れるのがファジィ制御である。つまり、ファジィ制御は人間の持つ定性的な思考方法をコンピュータに取り入れ、ベテランオペレーターのノウハウであるあいまいな表現(やや大きい、少し左等)をそのまま制御規則として取り扱うことができるという特長を持っている。このファジィ理論は1965年、L.A.Zadeh(U.S.A)により発表され、

現在日本では地下鉄、浄水場等の自動制御に応用され大きな成果をあげている。

(1) システム構成

ファジィ浚渫制御システムは図-9のようなシステムで構成される。図-9でファジィ制御を行うのはCPU4のファジィ浚渫制御パソコンである。ファジィ浚渫制御プログラムはC言語を用いて開発を行った。データ入出力はデータリンクシーケンサとの通信によって行う。実際の制御はシーケンサが行うが、ファジィ運転の場合はファジィ演算された結果(推進翼角出力、浚渫ポンプ回転数出力、ジェットポンプ発停出力等)がシーケンサに出力される。CPU5のデータロギング、データ再生、シミュレーションパソコンは、浚渫データの光磁気ディスクへの収録、収録データの再生およびシミュレーションを行う。CPU1~CPU3のモニタパソコンは既設のものであり、運転中の状況をモニタするためのものである。

(2) 簡略型ファジィ推論の概略

以下にファジィ推論の処理手順を簡単に述べる^{7), 8)}。説明図を図-10に示す。

a) 浚渫関係の各入力データは、後述のように2秒ごとにサンプリングされ、これを上下限値でリミットした範囲内の数値に変換する。必要に応じて2秒ごとの変化率(差分)も数値変換する。

b) 上記の数値が小さい、普通、大きい等のグループのどこにどの割合で該当するかを調べる。これには確率分布のように、各グループの適合度が0~1.0の間で変化するような関数を用いる。この関数は乗船員のノウハウ、実船の特性等をもとにあらかじめ作成しておく。これをメンバシップ関数と呼ぶ(MF:図-10の上部に示す)。後述のように、今回使用した入力メンバシップ関数はNL・NS・ZR・PS・PLの5個で構成され、それぞれの意味は以下に示す通りである。

- NL : とても小 Negative Large
- NS : やや小 Negative Small
- ZR : ふつう approximately ZeRo
- PS : やや大 Positive Small
- PL : とても大 Positive Large

またすべての入力メンバシップ関数の形状は等分割になっている。横軸は表記の数値(図-10中ほどの図、船速の例では2kt~4kt)が入力範囲である。

c) 同様にファジィ推論後の出力データも範囲、メンバ

ファジィ制御によるドラグサクシオン浚渫船の自動化

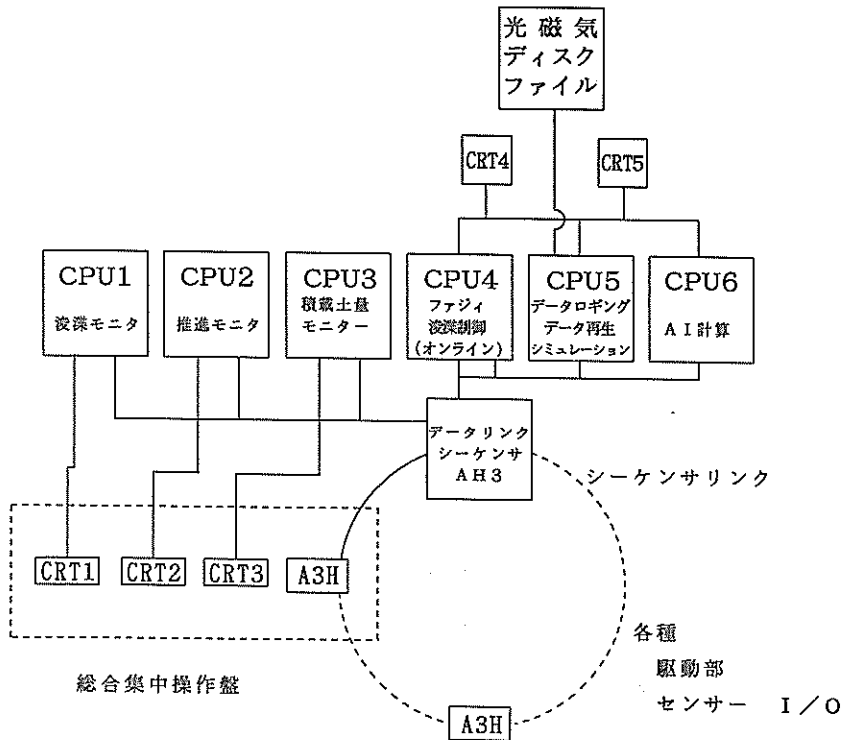


図-9 システム構成図

シップ関数を設定する。今回使用した出力メンバシップ関数はシングルトンであり、図-10の上部に示すように表記している。

d) 次に入力データと出力データを結びつけるファジィルールを用いファジィ推論を行う。このルールも乗船員のノウハウ、実船の特性等をもとにあらかじめ作成しておく。ファジィルールは複数設定できる。入出力は1入出力項目に1つのラベル（船速ならSVD）が割り当てられる。その入出力ラベル1つについて最大5つの前記のメンバシップ関数のラベルがまた割り当てられる。以下にファジィルールの設定の例を示す。

If SVD is NS and SVC is PS then YMO is PS

SVD : 船速入力

SVC : 船速差分入力

YMO : 推進翼角 (右) 出力

e) ファジィ推論は以下のように行う。

① まず入力データ値が、どのグループ（メンバシップ関数のラベル）に該当するかを決める。該当したメンバシップ関数に関するファジィルールがあれば、②項のよ

うにして出力データの適合度を求める。

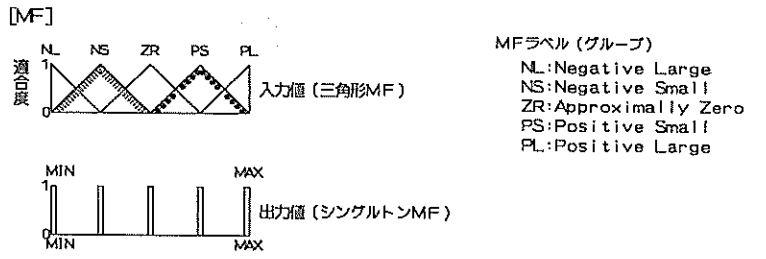
② ファジィルールの入力関係の項（“If・・・and・・・”）で、各々の入力ラベルの適合度を求める。“and”で結ばれているところは両方の適合度の最小値をとる（ミニマム演算）。これによって入力関係の適合度が求められる（結果は0.52のような数値）。続いてファジィルールの出力関係の項（“then・・・”）で入力適合度を出力の該当するラベルの適合度とする。同一の出力ラベルに対してファジィルールが複数該当した場合は最大値をとる（マックス演算）。

③ 求められた複数のラベルとそれらの適合度を用い重心計算を行う。この計算によって出力データ範囲内の出力値を求める（重心法）。

(3) 「清龍丸」の浚渫特性

1991年の乗船員アンケート・ヒアリングおよび実船調査により収集した各浚渫データの解析結果等から得られた「清龍丸」の浚渫特性を以下に示す。なお実船調査時の土質はシルト質の軟泥であった。

① 浚渫データ解析および船長アンケートによって、船速3kt付近が最も含泥率が良いことがわかった。これは



[ルールと推論]

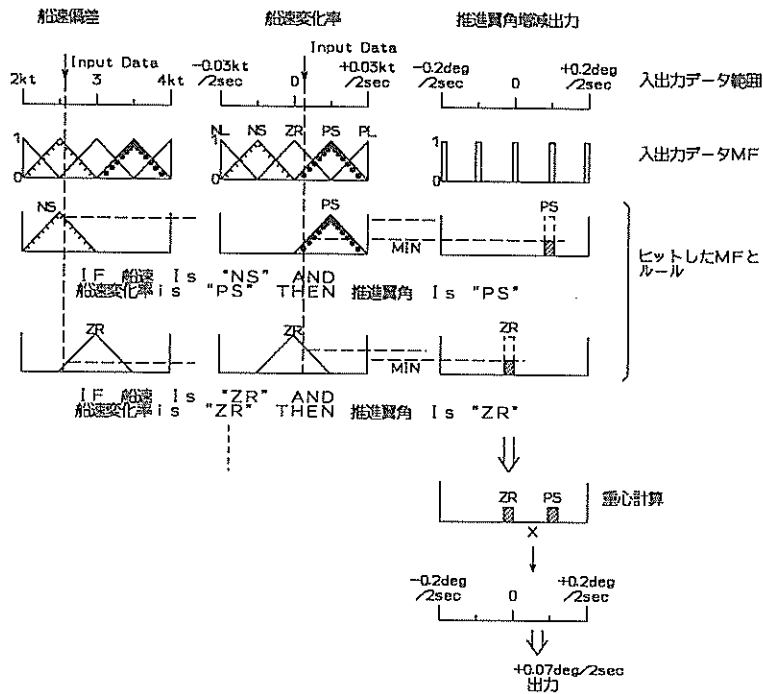


図-10 ファジィ推論の処理手順

船速 3 kt 付近までは、ドラグヘッドの掘削土量は船速および土厚（船速 × 土厚 × ドラグヘッド幅 = ドラグヘッドの通過容積）に比例して増加するが、3 kt を越えるとドラグヘッドのはねあがり等により土量が減少するためと考えられる。

② 浚渫ポンプ回転数は 193rpm 付近で含泥率のピークが見られた。これは約 190rpm 以下では、含泥率は浚渫ポンプ回転数に比例するが、約 190rpm 以上では、ドラグヘッドの吸泥性能限界によって含泥率が減少するためと考えられる。またこの時の浚渫ポンプ流量は 3750 m³/h 程度であることがわかった。

③ 含泥率と浚渫ポンプ流量との関係は、ほぼ次式が成立することが確認された。

$$Q_m/Q_o = 1 - 4.59 C_v^{1.3} \quad (4)$$

Q_m : 浚渫時の浚渫ポンプ流量 (m³/h)

Q_o : 清水時の浚渫ポンプ流量 (m³/h)

C_v : 真容積含泥率

④ 浚渫ポンプ回転数 170rpm 付近では、含泥率が急激に下がり数%程度になる。これはポンプの揚泥能力の低

下によって泥が上がらなくなるためと考えられる。

⑤ スェルコン圧力は 12kg f/cm^2 程度の設定が望ましい。スェルコン圧力をこれより高くすると若干含泥率が向上する傾向があるが、一方でスェルコンストロークが急激に大きくなり掘残が生じやすくなる。またスェルコン圧力が 9kg f/cm^2 以下では、含泥率は急激に低下する。これはドラグヘッドが海底土中に埋もれて開口部がふさがれることにより、海水吸入が急激に減少するためと推定される。

⑥ 乗船員アンケートによって、土質、潮流等の変化に対応する運転調整の方法についての知見が得られた。

(4) ファジィルール、メンバシップ関数作成時の基本方針

ここではまず、ファジィ浚渫制御システムを用いて実船実験を行う場合の実験方法の特徴を以下に示す。

a) 実船実験における実験方法の特徴

① 一浚渫ごとに海底の状態がたえず変化するので、同一条件での実験ができない。よって実験パラメータ変更の都度数十浚渫のデータを取り、統計的に解析するという手法をとらざるを得ない。

② ファジィ浚渫制御はファジィルール、メンバシップ関数、入出力の中央値と幅、サンプリング間隔等調整項目が多い。よって各調整項目を細かく操作しても他要素の影響が大きく効果の判定が難しい。

③ 一方でファジィ浚渫制御は、従来の運転方法を参考にだまかにファジィルール、パラメータ等を設定すれば、それなりの傾向の制御出力が得られる。またファジィルールについては実船の運転操作の考え方を分かりやすく表現でき、数値計算等不要であり、変更も簡単にできる。

前記の浚渫特性、上記の実験方法の特徴からファジィルール、メンバシップ関数の作成は以下のような基本方針で行った。

b) 作成時の基本方針

① 最も制御効果の大きい、推進翼角制御、浚渫ポンプ回転数制御の調整を主眼とした。

② スェルコン圧力は、通常運転（自動・手動）と同じ固定値とした。

③ メンバシップ関数は1入力当たり、調整のしやすい範囲である5つとした。またメンバシップ関数形状は、入力については等分割の三角型、また出力についてはシングルトンとした。

④ 入出力データの幅の設定は制御特性を把握するためやや広めにとった。

⑤ サンプリング間隔は、現在の設定の最小間隔である

2秒とした。

⑥ 安全性を考慮し出力部に上下限リミッターを設けた。

⑦ 一浚渫中の目標値は数値を直接入力して設定した。目標値は通常運転との比較がしやすいように通常運転と同一の値とした。

(5) 浚渫特性モデル

図-11にファジィ浚渫制御の浚渫特性モデルを示す。モデル化の基本的考え方は以下の通りである。

a) 推進翼角制御

① 1991年の実船調査から船速 3kt 付近で含泥率が大きいことが明らかになった。また船速は推進翼角を操作してから1～2分の時間遅れの後に変化するため、浚渫中に頻繁に目標船速を変化させることが困難である。このことから、基本的に船速は 3kt 付近を目標とした船速および船速変化率に対するフィードバック制御による船速一定制御とした。

② またスェルコン荷重計で検出したスェルコン接地荷重はドラグヘッドの接地圧を表しており、スェルコン接地荷重によってドラグヘッドの曳引抵抗が推定可能である。これを利用し、推進翼角ファジィルールにスェルコン接地荷重を入力としてフィードフォワード制御ルールを付加し、推進翼角を早めに制御するようにした。

③ 推進翼角は、通常の浚渫作業において使用している範囲（ $5\sim 11\text{deg}$ ）で制御するように上下限リミッターを設けた。これは、 5deg 以下では船向を維持する操舵が困難となり、また 11deg 以上では曳引抵抗が大きくなって船体が振動し好ましくないからである。

b) 浚渫ポンプ回転数制御

① 1991年の実船調査から浚渫ポンプ回転数は 193rpm 付近の含泥率が大きく、その時の浚渫ポンプ流量は $3750\text{m}^3/\text{h}$ であることが明らかになっている。このため浚渫ポンプ流量目標値を $3750\text{m}^3/\text{h}$ とし、流量および流量変化率に対するフィードバック制御による浚渫ポンプ回転数制御を基本とした。ドラグヘッドの接地が強い時は浚渫ポンプ回転数が 193rpm 付近で最も含泥率が高くなる。そしてドラグヘッド接地が弱い時には(4)式にしたがって浚渫ポンプ流量が増加し含泥率は低下するが、このときに浚渫ポンプ回転数を下げて浚渫ポンプ流量が一定になるようにするので、周囲の海水の流入を防止する制御になる。

② また浚渫ポンプ流量計は、ドラグヘッド吸入口での流量変化に対して約20秒おくらせて検出されるため、ドラグヘッド付近での流量変化を早く検知するスェルコン接地荷重を入力としてポンプ回転数をフィードフォワード

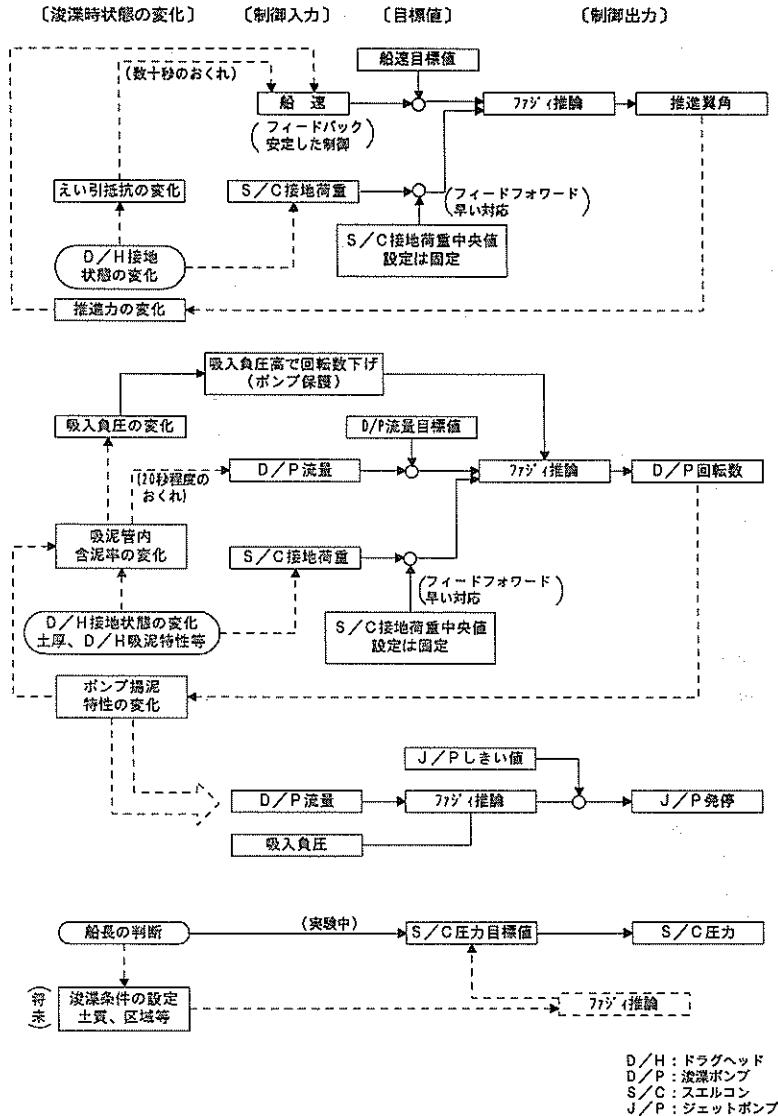


図-11 ファジィ浸漉制御の浸漉特性モデル

制御するルールを付加した。

③ 後述のように1992年の実験結果から、回転数を下げると含泥率が極端に低くなる領域があることがわかった(182rpm以下)。また回転数を上げて含泥率が上がらず流量のみが増加する領域があることも明らかになった(193rpm以上)。これは回転数を下げると浸漉ポンプの吸泥性能の低下によって含泥率が下がり、一方で回転数を上げてドラグヘッドの揚泥性能の限界によって含泥率が上がらなくなったものと推定される。この結果をふまえて1993年の実験では、浸漉ポンプ回転数の上下リミッ

タ間隔を狭めた。

c) ジェットポンプ発停制御

① 一般にジェットポンプは泥を薄める効果があるとされるので(硬砂質土では土量向上効果があるが)浸漉中は基本的に停とした。浸漉中に浸漉ポンプ流量が小さく、吸入負圧が高い時は浸漉ポンプが閉塞する危険が生じるため、ジェットポンプを発することとした。

② ファジィ制御におけるジェットポンプ発停は以下のような方法による。

(i) 他のファジィ推論のように浸漉ポンプ流量および

ファジィ制御によるドラグサクシオン浚渫船の自動化

吸入負圧入力からファジィ推論しジェットポンプ発必要度を計算する。

- (ii) ジェットポンプ発必要度に対して発しきい値を設ける。そしてジェットポンプ発必要度がしきい値を越えた時に、ジェットポンプ発指令を出し、下がったときにジェットポンプ停指令を出す。
- (iii) 頻繁にポンプを発停させることが機器能力的に難しいため、1分程度の最小インターバルで発停するように、入力値に移動平均フィルターをかけた。

③ 1992年のデータから、ドラグヘッドの接地が弱いときにジェットポンプを発させたほうが含泥率が良い傾向が見られたので、1993年ではスエルコン接地荷重が小さいときにジェットポンプを発させるルールを付加した。

d) スエルコン圧力制御

① スエルコン圧力の設定は、機構上浚渫中に変化させることができない。このため一浚渫の間は圧力一定とした。浚渫開始時に圧力目標値を決定し、目標値に制御するようにした。

② 実験データ解析から、スエルコン圧力が大きいほど含泥率が向上する傾向が若干であるが認められた。しかし一方でスエルコンストロークも急激に増加する傾向も認められた。このため起伏を作らない薄層浚渫の観点か

ら、スエルコン圧力目標はやや大きめに設定することとした（運用上の制御幅9～13kg/cm²に対して12kg/cm²）。

③ ファジィ浚渫制御におけるスエルコン圧力目標値は本来自動的に決定されることが望ましい。しかし効率の良い浚渫を目指すには、海底の土質等との関係を解析する必要がある。このため自動目標設定は開発第二期の課題とした。1992年、1993年の実験においては、スエルコン圧力目標の設定は乗船員の判断による手入力とした。

(6) ファジィ浚渫制御システムのファジィルール、メンバシップ関数の概要

本システムのファジィルール、メンバシップ関数の概要を図-12～図-14に示す。図-12～図-14では2入力1出力のルールをクロスマトリックス表で表記している。またメンバシップ関数の表記はわかりやすいように「小」「やや小」「ふつう」「やや大」「大」という表現を用いた。出力合成の所の「重み」とは、ファジィ推論の合成を行う前に各ルールの適合度に0～1.0の重みをかけるもので、各ルールの重要度に応じて設定するものである。

推進翼角制御ファジィルールは船速一定制御が目標であるので、主に船速偏差、差分入力に対する推進翼角差分出力制御とした（図-12）。偏差とは一般に入力値の

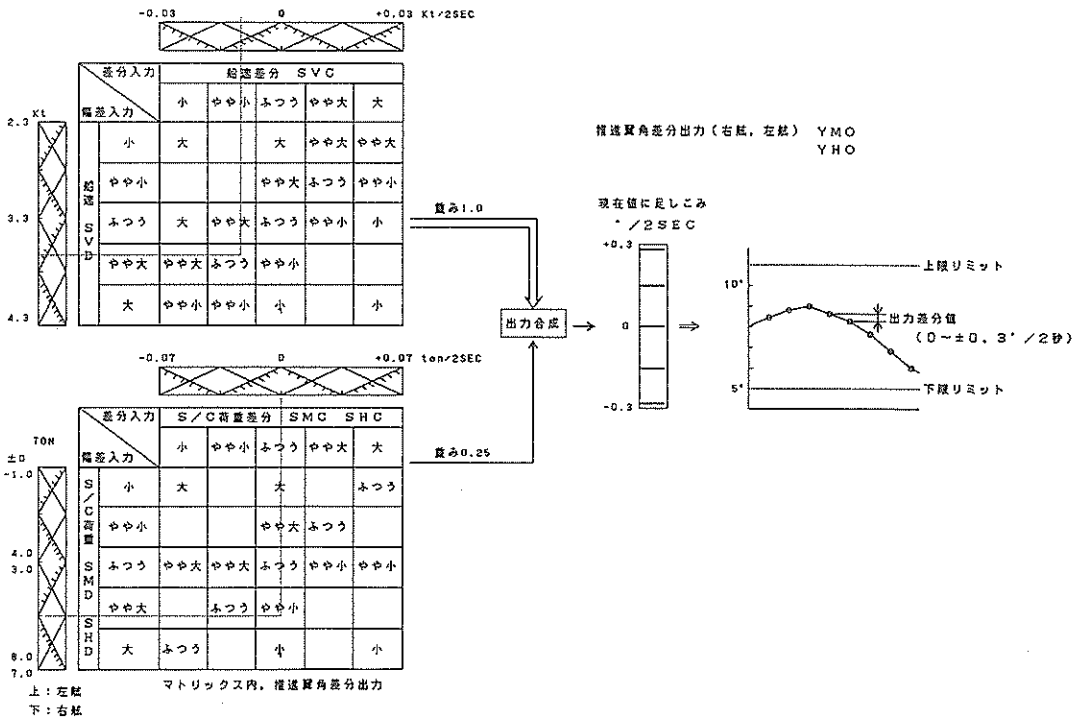


図-12 推進翼角制御ファジィルール

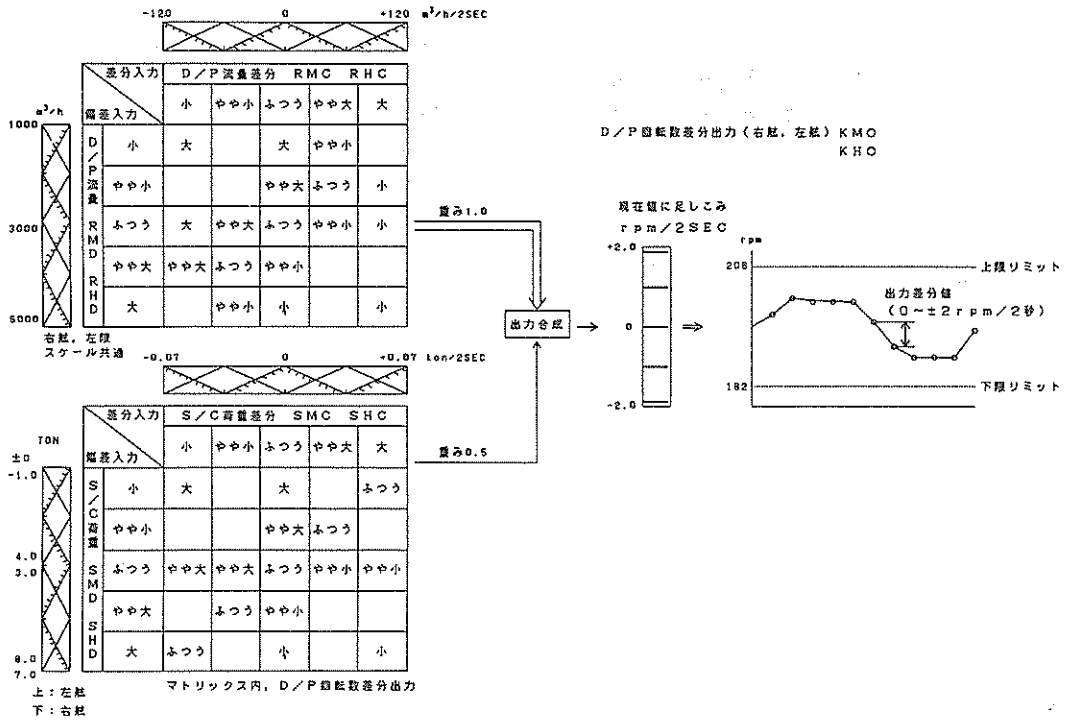


図-13 浚渫ポンプ回転数制御ファジイルール

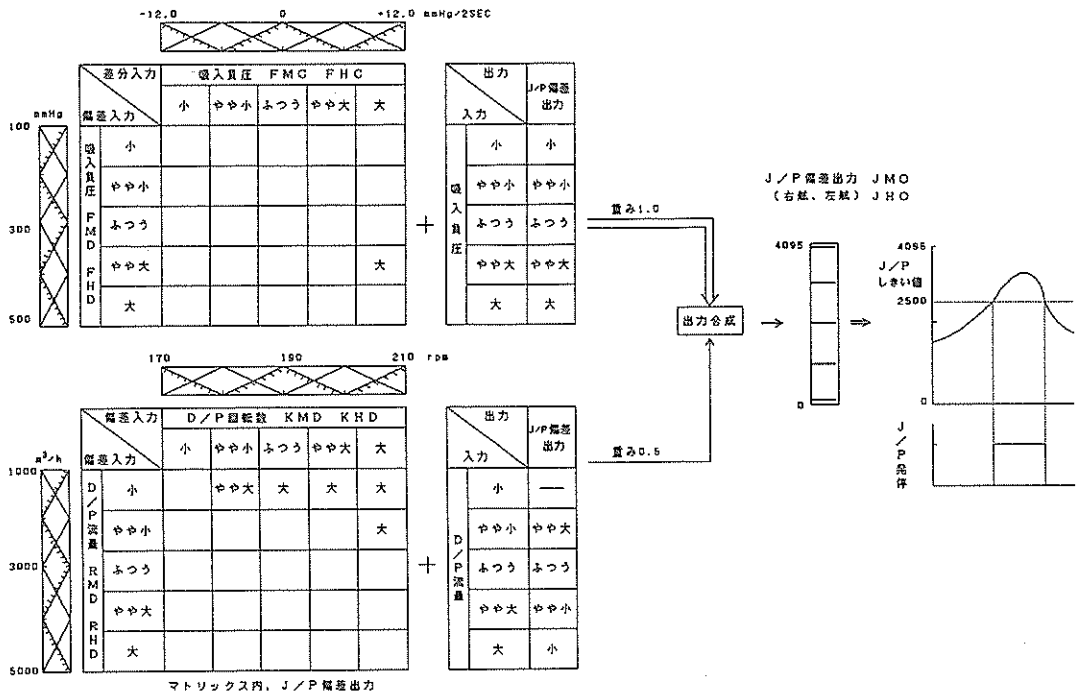


図-14 ジェットポンプ発停ファジイルール

目標値に対する差のことであるが、ここでは入力値そのままとしている。また差分とは入力のサンプリング間隔ごとの差であり、船速の例では船速差分値=船速入力今回値-船速入力前回値となる。出力を差分形式にすると、入力値異常の時でも出力は少しづつしか変化しないため、安全サイドでの制御が可能となる。さらに推進翼角ファジィルールにはスエルコン荷重偏差、差分入力のルールも付加した。これは前述のように船速入力の変化は応答が遅くなるため、応答の早いスエルコン荷重入力を加えて制御を早くするためである。

浚渫ポンプ回転数制御ファジィルールは、主に浚渫ポンプ流量偏差、差分入力に対する浚渫ポンプ回転数差分出力制御とした(図-13)。さらに推進翼角制御ファジィルールと同様にスエルコン荷重偏差、差分入力のルールを付加し制御を早くした。

ジェットポンプ発停ファジィルールは、主に吸入負圧、浚渫ポンプ流量偏差入力に対するジェットポンプ発必要度出力(0~4095)制御とした(図-14)。あらかじめ発しきい値(2500)を設けておき、ジェットポンプ発必要度がしきい値を越えたときにジェットポンプ発指令を出し、ふたたびしきい値より下がったときにジェットポンプ停指令を出す。

(7) ファジィ浚渫制御システムのデータフロー

ファジィ浚渫制御システムのデータフローを図-15に、ファジィ演算の計算例を図-16に示す。データフローはデータ入力数値処理部、ファジィ推論部、データ出力数値処理部の3つのルーチンに大別される。各々の概要を以下に示す。

a) データ入力数値処理部

シーケンサからのデータ入力およびファジィ推論用の数値への変換を行う。数値の変換はパラメータで設定されたフィルター値、浚渫目標値、中央値と幅等によって行う。フィルターはセンサ入力の動揺を抑えることを目的としている。またデータ処理には偏差値と差分値がある。

b) ファジィ推論部

ファジィ推論部はデータ入力数値処理部から引渡された入力データおよびあらかじめ作成したファジィルール、メンバシップ関数のデータファイルを用いてファジィ推論を行う。ファジィ推論の内容については「3.3 ファジィ浚渫制御システム」の(2)~(6)参照。

c) データ出力数値処理部

ファジィ推論部からの出力を数値変換の処理を行い、シーケンサへデータ出力する。数値の変換はパラメータ

で設定されたフィルター値、中央値と幅等によって行う。偏差出力は、ファジィ推論出力を中央値と幅で数値変換し出力する。差分出力は、ファジィ推論出力を幅パラメータで数値変換したあとで前回の出力値に足し込みを行ったものを出力する。出力リミッターは安全のために設けられたもので、通常の制御範囲の上下限で出力を制限するものである。

4. 実船実験の概要

4.1 実船実験内容

(1) ファジィ浚渫制御システム実船実験

前章「3. ファジィ浚渫自動化システム」に示した考え方をもとにしてファジィ浚渫制御プログラムを作成し、1992年、1993年の2回にわたって以下の項目に関し実船実験を行った^{4), 5)}。

- ① 推進翼角制御
- ② 浚渫ポンプ回転数制御
- ③ ジェットポンプ発停制御
- ④ スエルコン圧力制御

実船実験においては通常運転(手動・自動運転)とファジィ運転の浚渫を交互に繰り返しデータを収録した。収録されたデータからファジィ運転と通常運転の比較解析を行い、積載土量向上効果や各制御の特性を把握した。

通常運転、ファジィ運転はそれぞれ50浚渫以上実施し、データ収録は約15分の浚渫作業中2秒のサンプリング間隔で行った。収録はパソコンにより行い、光磁気ディスクに保存した。後述の平均値は収録データをもとに浚渫作業中の浚渫ポンプが発している時間のデータの平均値を使用している。データ収録項目を表-1に示す。表中含泥率、積載土量は前述「2. 浚渫自動化システム」中の方式により演算した値を用いている。スエルコン接地荷重は、ドラッグヘッドウインチに荷重計を取付け、その値から演算したものをを用いている。その他の項目は本船に既設のセンサからのデータを用いている。表は項目のみを示しているが、左舷・右舷に装備されているものについては、それぞれについて収録を行っている。

(2) 各種制御用センサ可能性調査実験

さらに1993年には、今後の自動化開発を行うに当たって必要とされるセンサを実船に取付けて可能性の調査を行った⁵⁾。1992年の実験では浚渫ポンプ流量計、スエルコン荷重計等からの情報を入力として船速、浚渫ポンプ回転数等を制御し、良好な成績をあげた。しかし今後泥水リサイクル制御、薄泥水吸入防止制御、浚渫ファクター

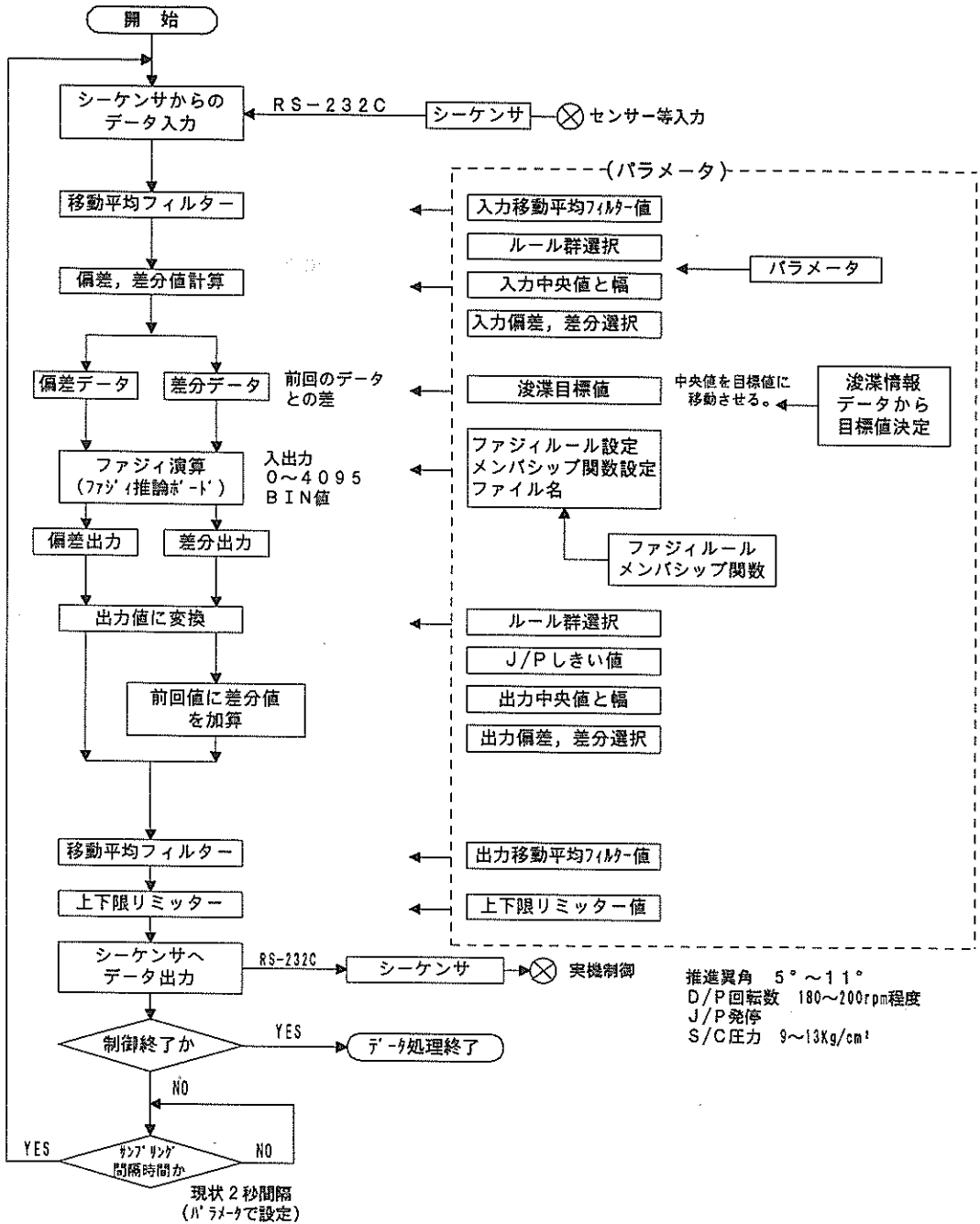


図-15 ファジィ浚渫制御システムにおけるデータフロー

自動選択制御等の開発を行うに当たっては、さらに広い範囲の情報を必要とする。このため以下のセンサについて可能性調査を行った。

- ① ドラグヘッド傾斜計
浚渫中のドラグヘッドの傾斜を計測し、ドラグヘッドの海底面への接地状況を詳細に把握する。

ファジィ制御によるドラグサクシオン浚渫船の自動化

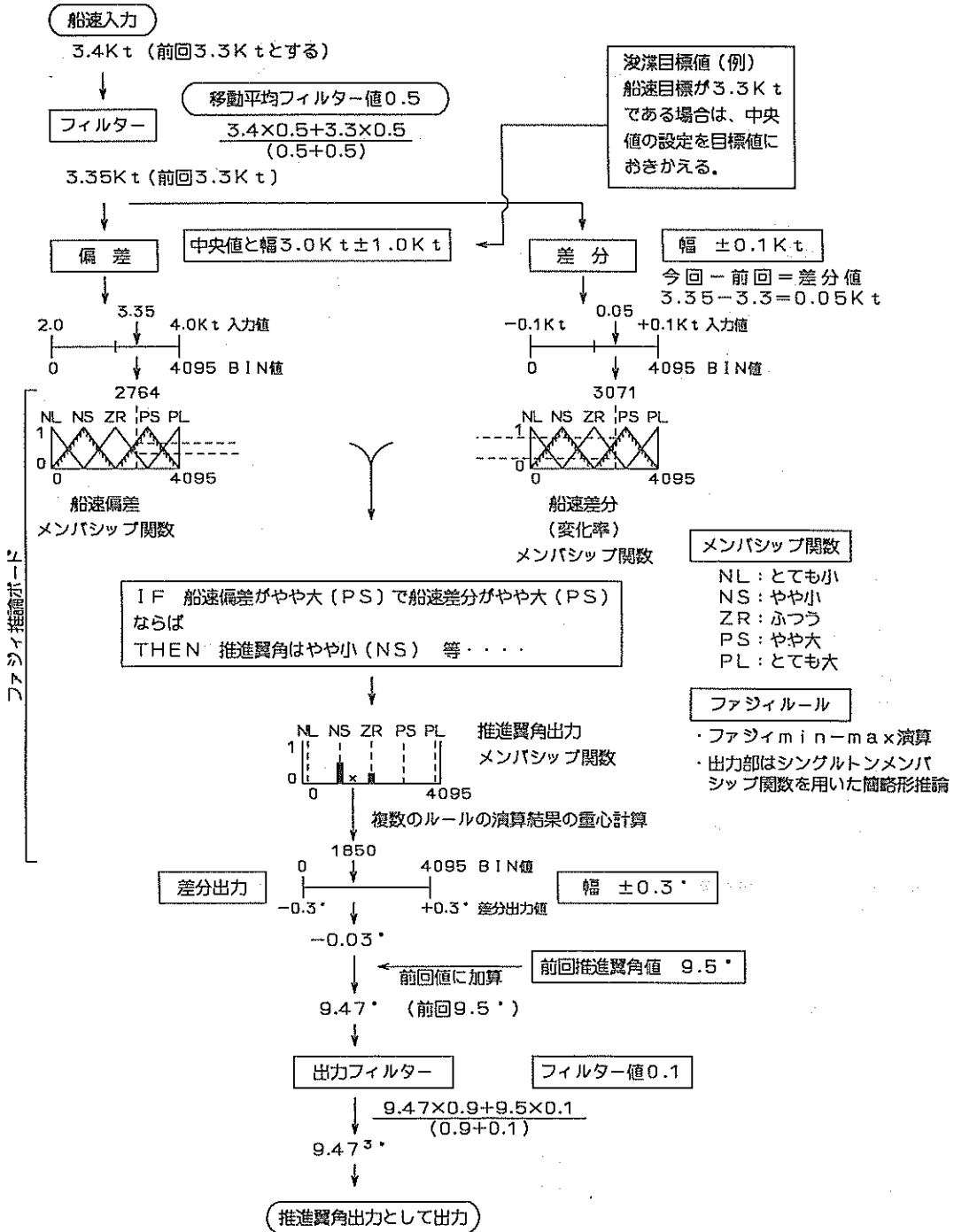


図-16 ファジィ浚渫制御システムのファジィ演算の計算例

② ドラグヘッド加速度計

浚渫中のドラグヘッドの振動を加速度として計測し、ドラグヘッドの海底面への接地状況を詳細に把握する。

③ 超音波距離計

中間ジョイント付近のドラグアームに、アームに対して垂直に海底面を計測するように設置し、浚渫中のドラグヘッドの十数m前方の海底面の高さを計測し、浚渫ポンプ回転数等の事前予測制御を行えるようにする。

傾斜計および加速度計はドラグヘッドに、超音波距離計はドラグアームに取り付けた。各センサは右舷のみに設置し、データ収録は27浚渫について行った。収録方法は前記の「ファジィ浚渫制御システム実船実験」と同様である。データ収録は通常の収録項目に加えて以下のデータを計測した。

- ① ドラグヘッド傾斜(トリム、ヒール方向)
- ② ドラグヘッド加速度(垂直方向)
- ③ 超音波距離計データより計算した海底面高さ(ドラグヘッドの十数m前方)
- ④ ドラグヘッド深度(超音波距離計データと比較用) 設置センサーの仕様概要を表-2に示す。

4.2 供試浚渫船

供試浚渫船は第五港湾建設局所属の「清籠丸」である。本船の主要目を表-3に、一般配置図を図-17に示す。

4.3 浚渫条件

実験条件を表-4に、浚渫区域を図-18に示す。表-5にファジィ運転、通常運転の浚渫条件一覧を示す。

5. 実船実験データ解析結果

ファジィ浚渫制御システム実船実験で収録した実験ケース全体のデータを表-6、表-7に示す。ファジィ運転と通常運転の比較解析は、スエルコン接地荷重と他のデータとの相関をもとに行った。スエルコン接地荷重はドラグヘッドウインチに取付けられた荷重計でドラグヘッドの荷重を測定し、ドラグヘッドの自重からその値を引いたものである。すなわち、ドラグヘッドが海底に接地する荷重となる。このスエルコン接地荷重の一浚渫中の平均値を0.2tonごとに区分し、各区分ごとの主要浚渫データの平均を求めた。このデータをもとに作成した関係図を図-19～図-38に示す。

5.1 積載土量向上効果

図-19から1992年のファジィ運転では、スエルコン接

地荷重が2.8～4.0tonの範囲で平均的に浚渫を行っているのに対して、通常運転では3.5ton付近での浚渫が多い。図-39、図-40に1992年、1993年のスエルコン接地荷重ごとの積載土量の分布を示す。1992年については図-39よりスエルコン接地荷重と積載土量に比例関係が見られ、スエルコン接地荷重1ton当たり、約300m³積載土量が増加している。よって、実質の土量向上効果を見るにはスエルコン接地荷重をそろえる必要があり、スエルコン接地荷重を同じにして積載土量を検討した。

1992年では表-6から積載土量の平均はファジィ運転407.6m³、通常運転401.8m³であった。スエルコン接地荷重の平均はファジィ運転3.38ton、通常運転3.49tonであった。スエルコン接地荷重の差は3.49-3.38=0.11tonであったことがわかる。スエルコン接地荷重については図-39より1ton当たり、約300m³の土量の差が出るのがわかっているため、スエルコン接地荷重0.11tonの差は33m³の積載土量の差となる。このスエルコン接地荷重の差を補正し、スエルコン接地荷重が同じであった(ドラグヘッド接地状態が同じ)としたときの積載土量を比較すると、ファジィ運転407.6+33=440.6m³、通常運転401.8m³となる。すなわちファジィ運転は平均で約9.7%の積載土量向上効果があったことがわかる。

同様に1993年は、図-40よりファジィ運転ではスエルコン接地荷重1ton当たり約82m³の積載土量の向上が見られる。一方通常運転ではスエルコン接地荷重1ton当たり約15m³の積載土量の減少が見られる。表-7から積載土量の平均はファジィ運転411.9m³、通常運転381.7m³であった。またスエルコン接地荷重の平均はファジィ運転3.84ton、通常運転3.75tonであった。

ファジィ運転が通常運転のスエルコン接地荷重であったとすると、スエルコン接地荷重は3.84-3.75=0.09ton減少する。ファジィ運転では1ton当たり約82m³の積載土量の向上であったから、スエルコン接地荷重0.09tonの減少は82×0.09=7.4m³の積載土量の減少となる。このとき補正積載土量はファジィ運転411.9-7.4=404.5m³、通常運転は381.7m³であり、ファジィ運転の積載土量向上効果は5.9%となる。

一方通常運転がファジィ運転のスエルコン接地荷重であったとすると、前と同様に補正積載土量はファジィ運転411.9m³、通常運転381.7+(15)×0.09=380.4m³となり、ファジィ運転の積載土量向上効果は8.3%となる。1993年のスエルコン接地荷重と積載土量の関係はファジィ運転と通常運転で異なっていたので、補正積載土量の向上効果は前記の2つの平均をとることとした。よって1993年のファジィ運転の積載土量の向上効果は(5.9+8.3)

ファジィ制御によるドラグサクシオン浚渫船の自動化

表-1 データ収録項目

番号	収録項目	番号	収録項目
1	船速	23	中間
2	船位	24	ウニ
3	推進	25	オン
4	推進電	26	チウ
5	翼角	27	ンチ
6	水量	28	発イ
7	土量	29	ンチ
8	水重量	30	停発
9	泥重量	31	位置
10	泥重量	32	発停
11	潮位	33	発停
12	潮位	34	発停
13	潮位	35	発停
14	潮位	36	発停
15	潮位	37	発停
16	潮位	38	発停
17	潮位	39	発停
18	潮位	40	発停
19	潮位	41	発停
20	潮位	42	発停
21	潮位	43	発停
22	潮位	44	発停

表-2 各種制御用センサ仕様

項目	傾斜計	加速度計	超音波距離計
型式	サーボ式	サーボ式	超音波式
出力範囲	±10°	±5G(重力は垂直方向に1Gかかる)	0~30m
分解能	10秒	5×10 ⁻⁵ G	1cm
計測方向	トリム、ヒール方向の2方向	垂直方向	ドラグアームに垂直下向きに海底面を計測する

表-3 清龍丸主要目

全長	94.9m	試運転時最大速力	13.3kt
垂線間長さ	88.0m	浚渫時速力	3~4kt
幅(型)	16.0m	主機関	3,000ps×400rpm×2台
深さ(型)	7.2m	浚渫ポンプ	4,100m ³ /h×17m×450kw×2台
満載喫水	5.6m	ドラグアーム	内径620mm, 両舷タイプドラグ式
総トン数	3,256GT	スウェルコンパネータ	蓄勢油圧式ソリタタイプ
積載重量	3,202t	ハウスラスタ	可変ビッチタイプDベラ型×300kw×1台
泥倉容積	1,754m ³	油回収装置	渦流式×2台, 傾斜板式×2台
最大浚渫深度	22m	回収油水槽	1,472m ³

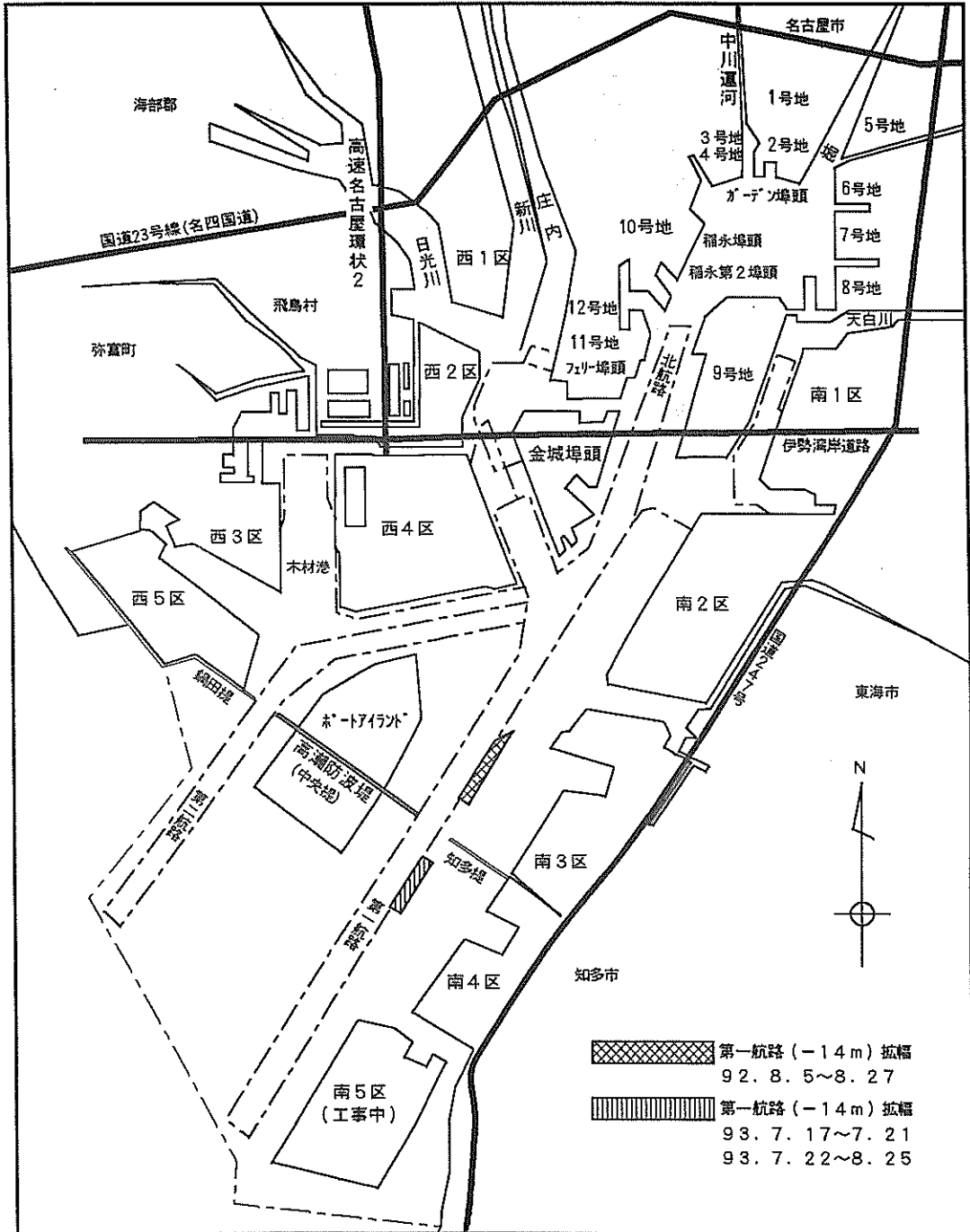


図-18 淀川区域

表-4 実験条件一覧

項目	ファジィ浚渫制御システム 実船実験			各種制御用センサ可能性 調査実験
実験期間	1992年8月5日～8月27日 1993年7月22日～8月25日			1993年7月17日～7月21日
実験区域	名古屋港第一航路-14m拡幅区域			
データ収録	種別	1992年	1993年	27ケース
	ファジィ運転	63ケース	98ケース	
	通常運転	58ケース	92ケース	
実験区域土質	1992年	1993年		粘土質軟泥
	シルト質軟泥	粘土質軟泥		

表-5 浚渫条件一覧

項目	ファジィ運転	通常運転
浚渫深度	-14.0m付近	
スエルコン圧力	約12kgf/cm ² で一定	
船速目標	3.3kt(1992)、3.0kt(1993)	
推進翼角制御	船速入力、スエルコン荷重入力からファジィ演算を行って船速一定制御	船速メータを見ながら乗船員が手動で制御
浚渫ポンプ回転数制御	浚渫ポンプ流量、スエルコン荷重入力から、ファジィ演算を行って可変制御 (1992:180~210rpm, 1993:188~195rpm)	自動運転にて、約200rpmで一定制御
ジェットポンプ発停制御	吸入負圧大、浚渫ポンプ流量小状態時、浚渫ポンプの閉塞を防止するためにジェットポンプ発	自動運転にて、浚渫中発(1992)、停(1993)
ドラッグヘッド窓	全閉	全閉(1992)、一個開(1993)

／2=7.1% あったと言える。

1992年はシルト質の軟泥の区域の浚渫であったが、1993年は粘土質の軟泥の区域であり、低い船速のわりに推進翼角が高く、ドラッグヘッドの接地荷重も高めであった。また粘土質であるため浚渫ポンプ吸入負圧が大きくなり、後述のように浚渫ポンプの保護動作（ドラッグヘッドウインチ上げ、浚渫ポンプ回転数下げ）が多く働き、連続した浚渫作業を行うことは困難であった。それにもかかわらず、このような土質の異なった区域においても土量向上効果は維持できた。

5.2 浚渫ポンプ回転数制御

(1) 全般

図-21、図-22に積載土量を、図-23、図-24に含泥率の関係を示す。積載土量は「清龍丸」の喫水、泥倉水位から求めたものである。また含泥率は浚渫管に設置された差圧式含泥率計による測定値である。積載土量は1992年のものについては、スエルコン接地荷重の低い範囲(3.0ton以下)でファジィ運転が通常運転がより低くなっており、高い範囲(3.0~4.0ton)ではファジィ運転が通常運転より高くなっていて、最も高い範囲(4.0ton以上)ではファジィ運転が通常運転より低くなっている。1993年のものについても、最も高い範囲を除いてほぼ同

表-6 ファジィ運転・通常運転の実験データの比較 (1992)

収録データ項目	単位	ファジィ運転				通常運転			
		平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大
船速	kt	3.29	0.12	2.86	3.58	3.36	0.14	2.98	3.81
推進翼角	deg	8.22	0.63	6.55	9.76	8.41	0.62	6.88	9.67
浚渫ポンプ回転数	rpm	191.27	4.11	181.49	205.21	197.68	1.55	194.62	200.37
積載土量	m ³	407.61	166.83	109.89	727.94	401.78	175.95	114.71	780.26
浚渫ポンプ流量	m ³ /h	3630.49	173.36	3231.60	4062.66	3987.71	334.96	3319.61	4588.66
含泥率	%	24.72	11.91	3.36	45.25	24.49	12.62	4.51	49.77
吸入負圧	mmHg	226.05	54.30	102.04	339.66	237.49	51.92	133.87	334.36
スェルコン接地荷重	ton	3.38	0.42	2.25	4.31	3.49	0.46	2.22	4.53
スェルコン動作時間	min	1.76	1.51	0	6.20	1.85	1.74	0	7.20
スェルコンストローク	m	0.08	0.04	0	0.24	0.07	0.05	0	0.20
浚渫時間	min	13.55	0.81	11.67	15.85	12.38	1.16	10.07	15.00
浚渫距離	m	1375.55	99.47	1140.00	1610.17	1281.51	113.23	1017.08	1533.06
ドラグヘッド深度	m	14.18	0.25	13.68	14.64	14.18	0.23	13.64	14.66

(注1) 平均は、浚渫ケース全体の平均値。両舷あるものは、左舷・右舷の平均値。

(注2) ファジィ運転の浚渫回数は63回、通常運転の浚渫回数は58回。

表-7 ファジィ運転・通常運転の実験データの比較 (1993)

収録データ項目	単位	ファジィ運転				通常運転			
		平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大
船速	kt	2.82	0.19	2.07	3.15	2.25	0.30	1.27	3.10
推進翼角	deg	9.37	0.82	7.28	10.84	9.17	1.01	6.44	11.36
浚渫ポンプ回転数	rpm	192.40	2.11	187.87	198.00	197.10	1.75	192.60	200.42
積載土量	m ³	411.85	87.14	160.15	603.15	381.67	74.82	205.51	538.70
浚渫ポンプ流量	m ³ /h	3584.43	187.32	3157.52	4060.21	3800.38	233.10	3179.91	4231.84
含泥率	%	25.36	4.89	11.10	36.65	19.94	4.55	8.66	33.34
吸入負圧	mmHg	417.59	32.04	321.62	470.57	447.41	19.96	383.45	494.76
スェルコン接地荷重	ton	3.84	0.52	2.65	5.17	3.75	0.74	2.36	5.88
スェルコン動作時間	min	4.41	2.06	0.13	9.47	4.48	2.72	0	14.10
スェルコンストローク	m	0.18	0.07	0.05	0.45	0.18	0.09	0	0.51
浚渫時間	min	14.00	0.93	9.52	16.35	13.47	0.93	11.47	15.87
浚渫距離	m	1216.69	114.14	873.87	1486.37	933.03	119.42	568.04	1229.18
ドラグヘッド深度	m	13.83	0.45	13.02	14.73	13.86	0.44	12.92	14.74

(注1) 平均は、浚渫ケース全体の平均値。両舷あるものは、左舷・右舷の平均値。

(注2) ファジィ運転の浚渫回数は98回、通常運転の浚渫回数は92回。

様な傾向を示している。また含泥率も積載土量とほぼ同様の傾向を示している。

図-25、図-26に浚渫ポンプ回転数の関係を示す。1992年、1993年ともに通常運転は目標回転数200rpmで一定値制御を行った。ファジィ運転は前述の浚渫特性モデルにしたがって可変制御を行った。

図-27、図-28に浚渫ポンプ流量の関係を示す。浚渫ポンプ流量は、ファジィ運転において回転数制御により、流量目標値の3750m³/hにはほぼ近い範囲で変化している。1993年の接地が弱い範囲で流量が増加しているのは、

後述するように回転数制御下限を上げたのが主な原因である。一浚渫中の浚渫ポンプ回転数制御の例を図-41に示す。

(2) 浚渫ポンプ回転数制御の効果

浚渫ポンプ回転数制御の結果として積載土量と含泥率について、まず1992年の図について見ることにする。ここではスェルコン接地荷重の範囲について、最も高い範囲(4.0ton以上)、高い範囲(3.0~4.0ton)と低い範囲(3.0ton以下)に分けて考える。

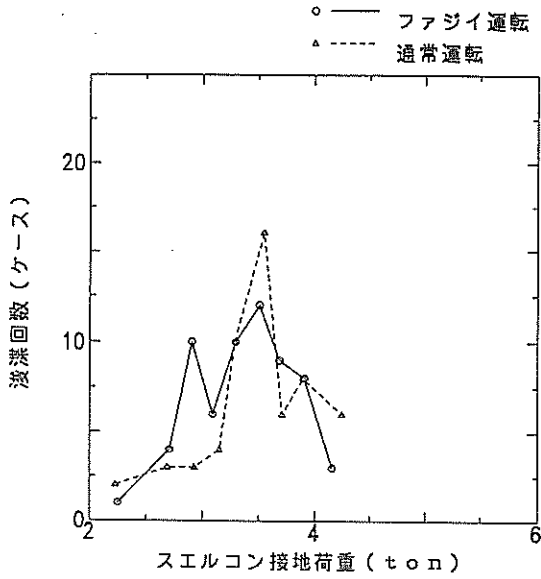


図-19 スエルコン接地荷重と浚渫回数の関係 (1992)

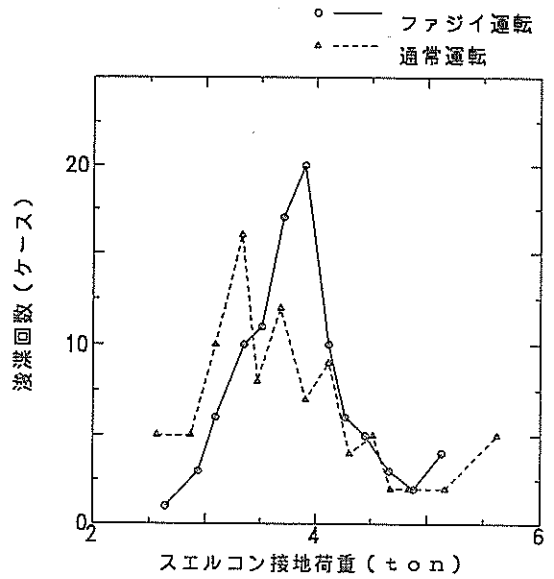


図-20 スエルコン接地荷重と浚渫回数の関係 (1993)

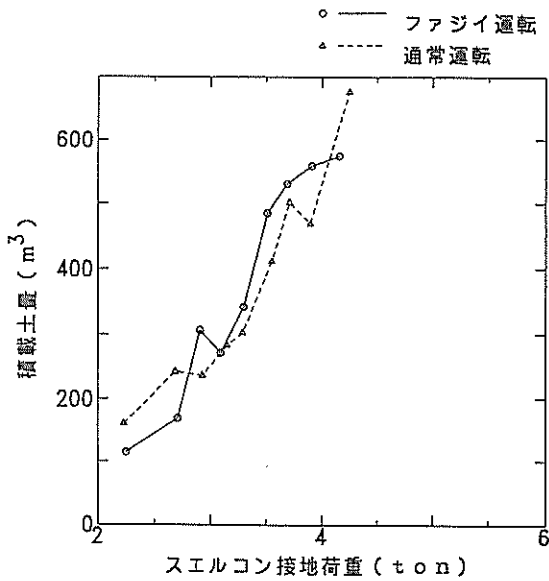


図-21 スエルコン接地荷重と積載土量の関係 (1992)

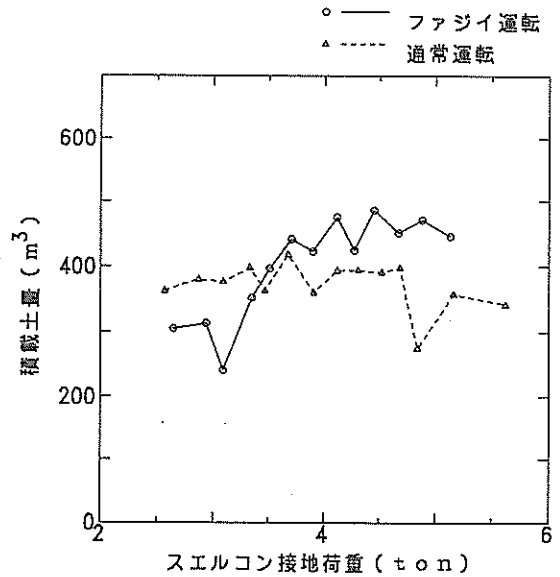


図-22 スエルコン接地荷重と積載土量の関係 (1993)

ファジィ制御によるドラッグサクシヨン浚渫船の自動化

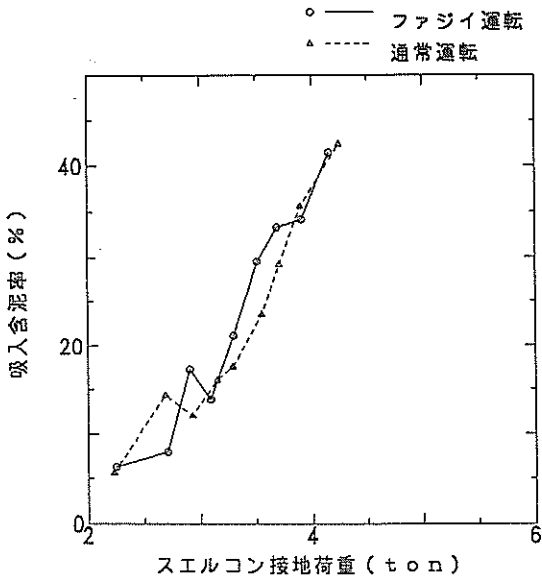


図-23 スエルコン接地荷重と含泥率の関係 (1992)

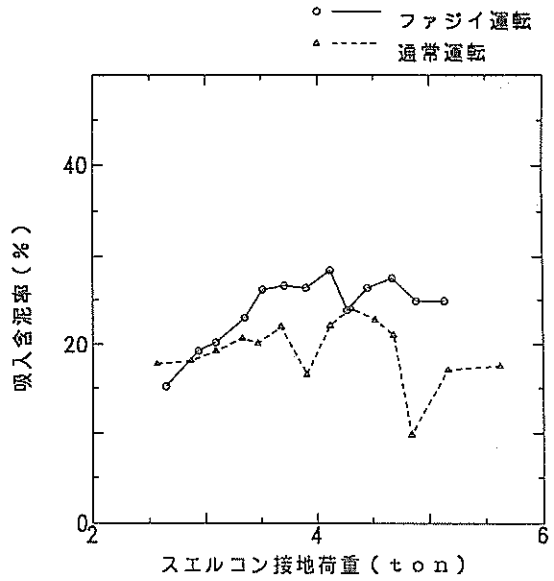


図-24 スエルコン接地荷重と含泥率の関係 (1993)

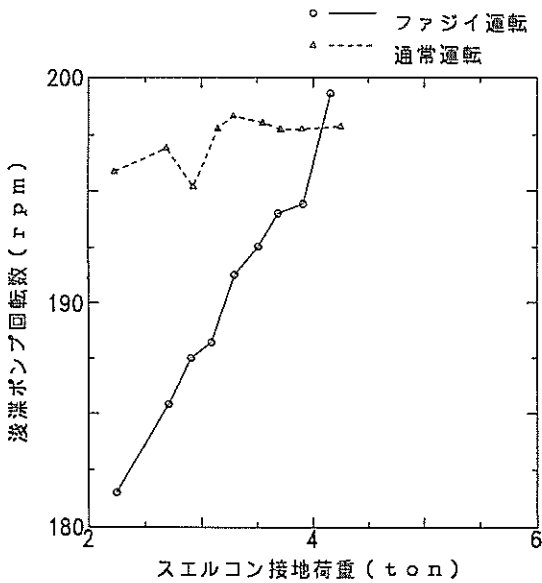


図-25 スエルコン接地荷重と浚渫ポンプ回転数の関係 (1992)

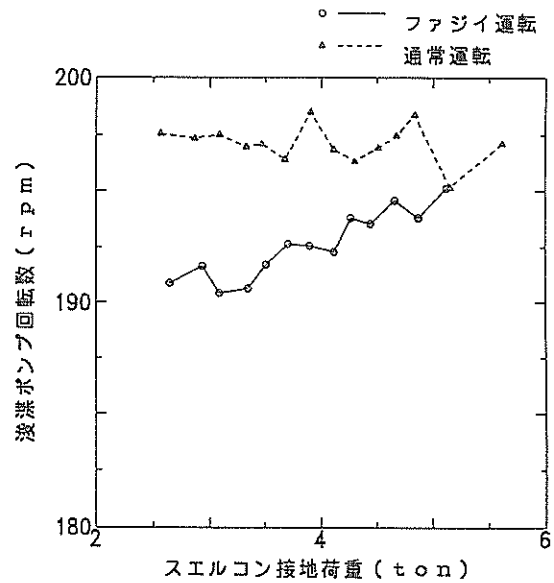
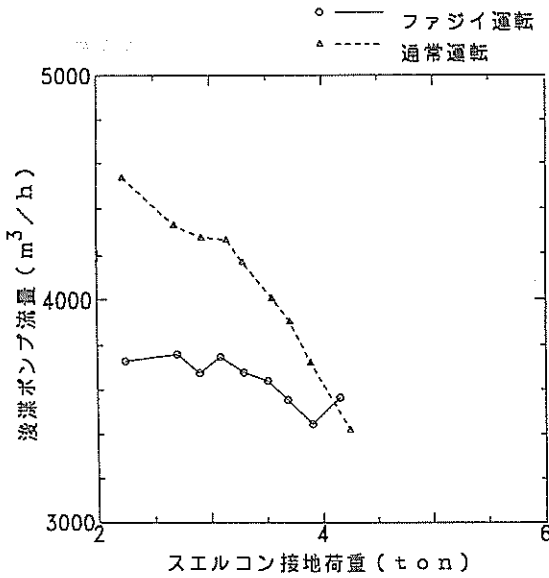
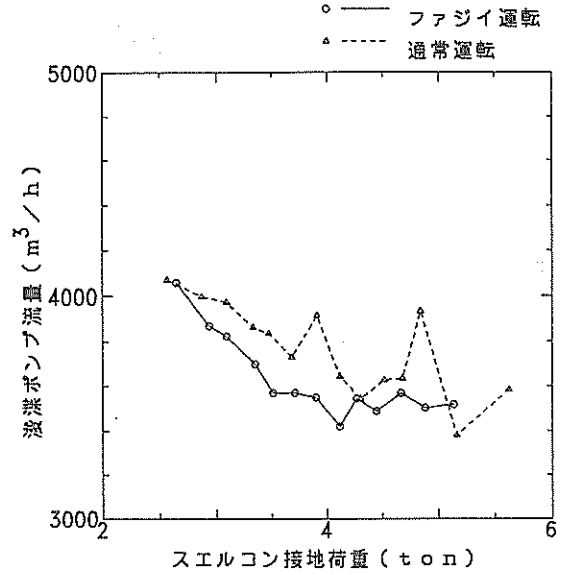


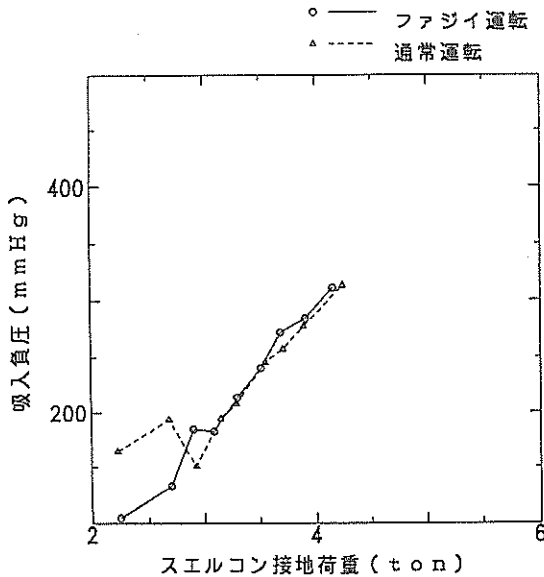
図-26 スエルコン接地荷重と浚渫ポンプ回転数の関係 (1993)



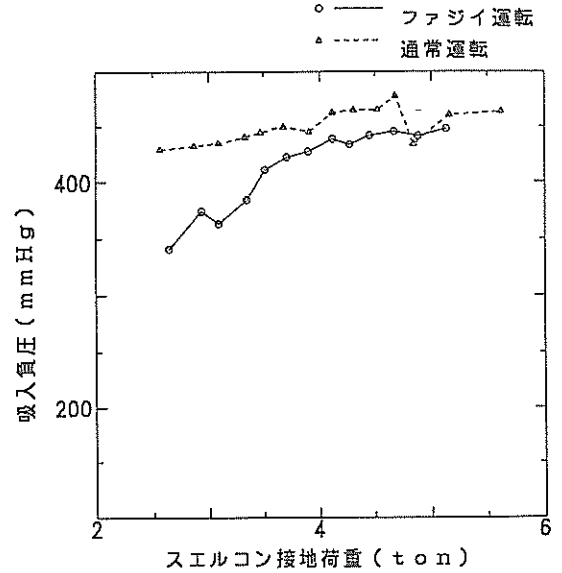
図一27 スエルコン接地荷重と浸漉ポンプ流量の関係 (1992)



図一28 スエルコン接地荷重と浸漉ポンプ流量の関係 (1993)



図一29 スエルコン接地荷重と吸入負圧の関係 (1992)



図一30 スエルコン接地荷重と吸入負圧の関係 (1993)

ファジィ制御によるドラグサクシヨン浚渫船の自動化

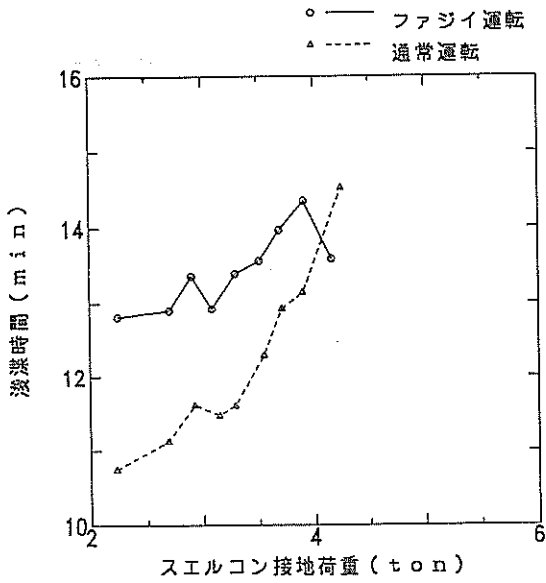


図-31 スエルコン接地荷重と浚渫時間の関係 (1992)

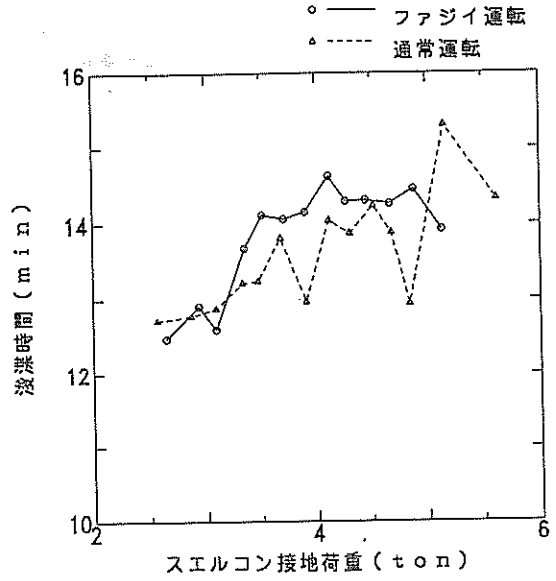


図-32 スエルコン接地荷重と浚渫時間の関係 (1993)

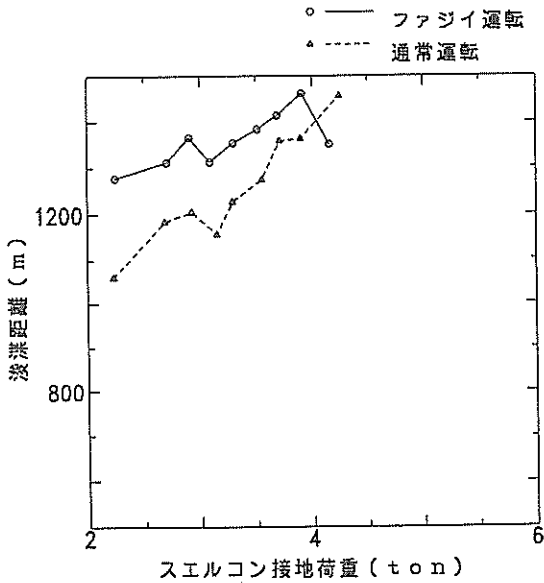


図-33 スエルコン接地荷重と浚渫距離の関係 (1992)

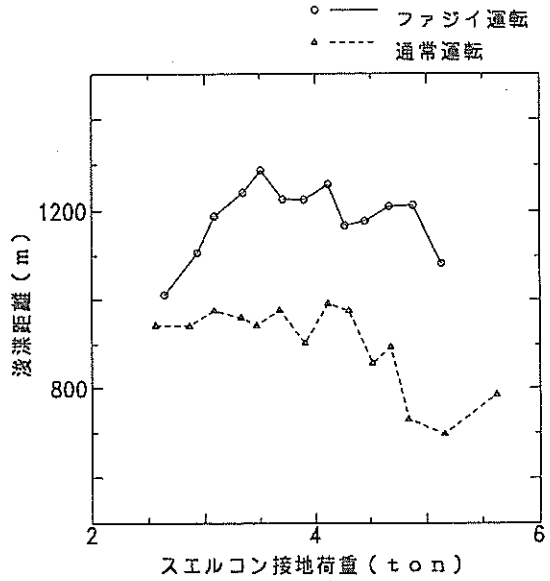


図-34 スエルコン接地荷重と浚渫距離の関係 (1993)

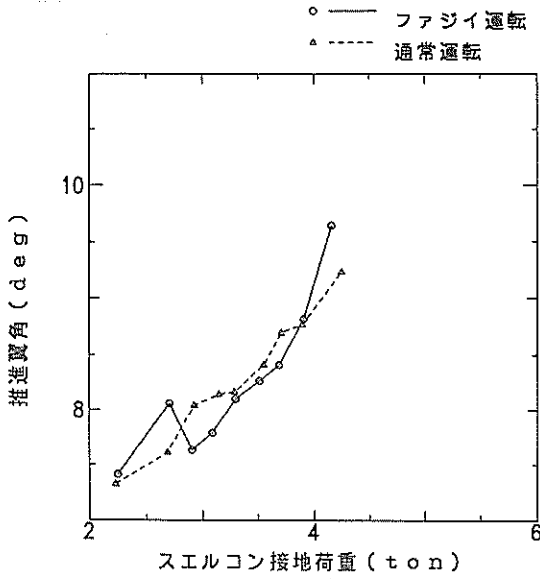


図-35 スエルコン接地荷重と推進翼角の関係 (1992)

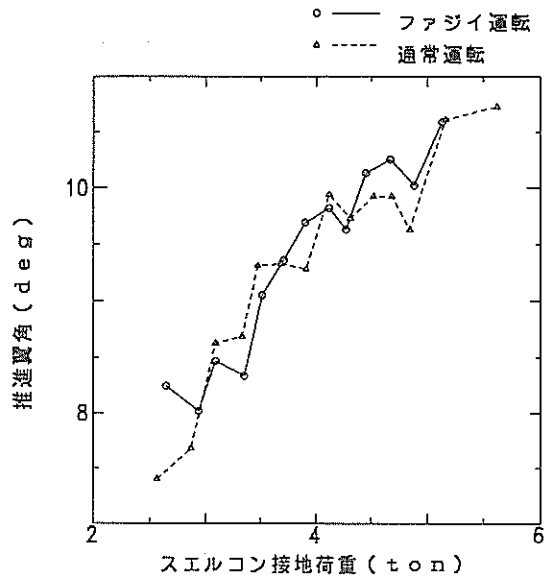


図-36 スエルコン接地荷重と推進翼角の関係 (1993)

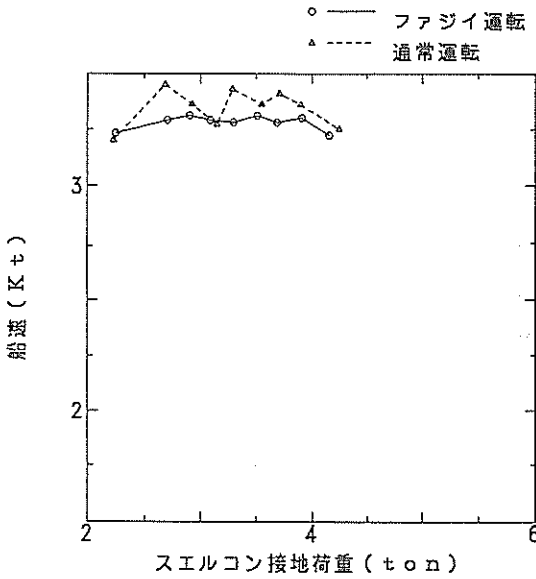


図-37 スエルコン接地荷重と船速の関係 (1992)

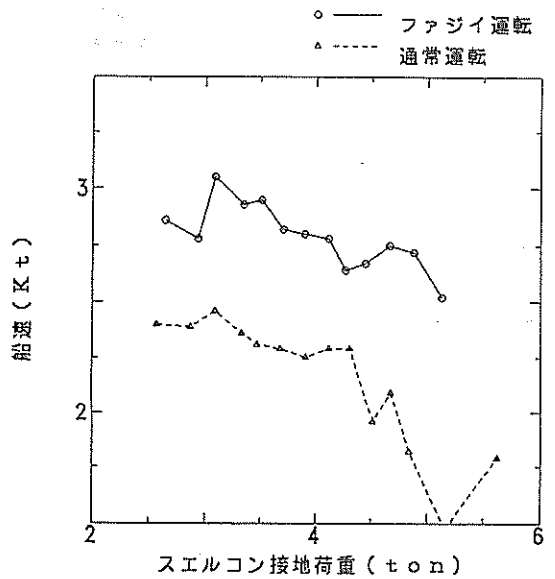


図-38 スエルコン接地荷重と船速の関係 (1993)

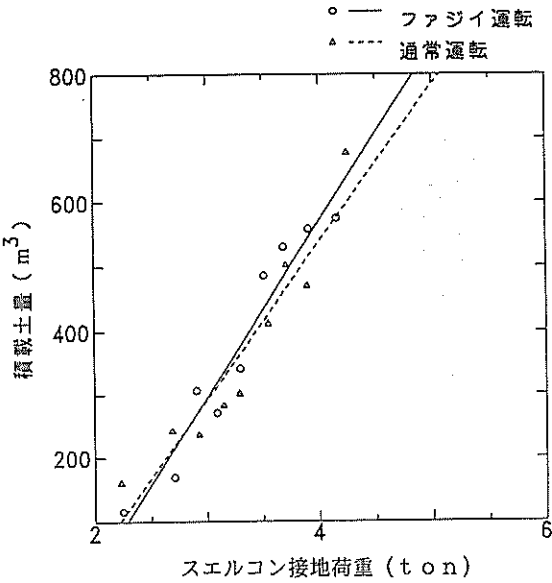


図-39 スェルコン接地荷重区分ごとの積載土量 (1992)

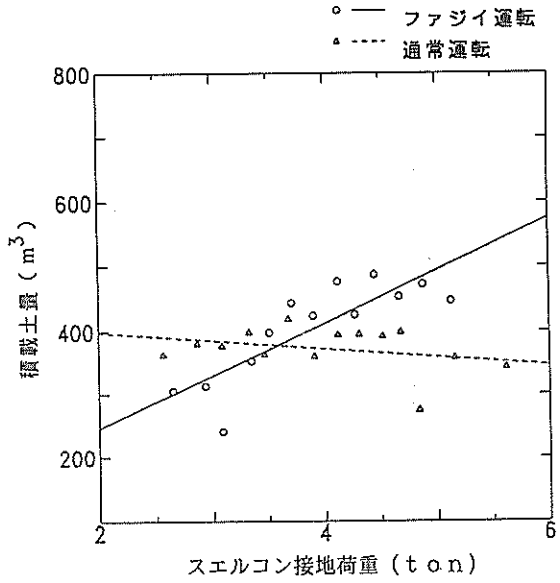


図-40 スェルコン接地荷重区分ごとの積載土量 (1993)

まずスェルコン接地荷重が高い時(ドラグヘッドの接地が強い時)は含泥率、積載土量ともにファジィ運転で通常運転より高くなっている。これは図-25に示すようにファジィ運転において、浚渫ポンプ回転数を可変制御としたためと考えられる。通常運転では浚渫ポンプ回転数は198rpm付近で一定であるが、ファジィ運転ではスェルコン接地荷重に比例して、浚渫ポンプ回転数が182~200rpmの範囲で変化している。スェルコン接地荷重が高い範囲で浚渫ポンプ回転数を比較すると、通常運転の浚渫ポンプ回転数約198rpmに対し、ファジィ運転の浚渫ポンプ回転数は193rpm付近と最も含泥率が高くなる回転数になっている。このようにスェルコン接地荷重が高い範囲で含泥率が高くなっているのは、ファジィ制御効果によるものである。

またスェルコン接地荷重の最も高い範囲では、積載土量はファジィ運転の方が通常運転より低くなっている。これはこの範囲では、浚渫ポンプ回転数を上げてても含泥率が上がらなくなるドラグヘッドの吸泥能力の限界が存在するためと考えられる。図-27から、スェルコン接地荷重が高い範囲で、ファジィ運転の浚渫ポンプ流量は約3700m³/hから約3400m³/hへと徐々に減少している(この時の浚渫ポンプ回転数は、約193rpmである)。しかしこれよりも接地荷重が高くなると(4.0ton以上)、再び浚渫ポンプ流量が増加している。このときにファジィ

運転の浚渫ポンプ回転数は通常運転の回転数198rpmより高くなっている。このことからスェルコン接地荷重の高い範囲では、含泥率は浚渫ポンプ回転数193rpm付近がピークであり、これより浚渫ポンプ回転数を上げてても流量が増加するだけで、含泥率があまり上がらなくなることがわかる。

さらに図-21、図-23から、スェルコン接地荷重が低い時は、ファジィ運転で積載土量、含泥率が通常運転より低くなっているのが見られる。この範囲では積載土量で約50m³、含泥率で約5%通常運転に比べ低下している。これは浚渫ポンプの吸泥能力の限界に達しているためだと考えられる。通常運転のように回転数一定制御のときは含泥率と浚渫ポンプ流量の関係は、ほぼ(4)式に沿って変化する。このため図-27の通常運転の浚渫ポンプ流量を見ると、接地が弱く含泥率が低い範囲では流量が急激に増加している。ファジィ運転では、接地が弱い範囲では回転数を下げ(最低で約182rpm)、周囲の海水の流入をおさえるので通常運転ほどは流量が増加していない。しかし積載土量、含泥率が通常運転より低くなっていることを考えると、接地が弱い範囲では浚渫ポンプ回転数を約182rpmまで下げると、浚渫ポンプの揚泥能力が急激に低下することがわかる。このようにファジィ運転では、ドラグヘッドの接地が弱い範囲で周囲の海水を吸わないように浚渫ポンプ回転数を下げたが、下げ過ぎ

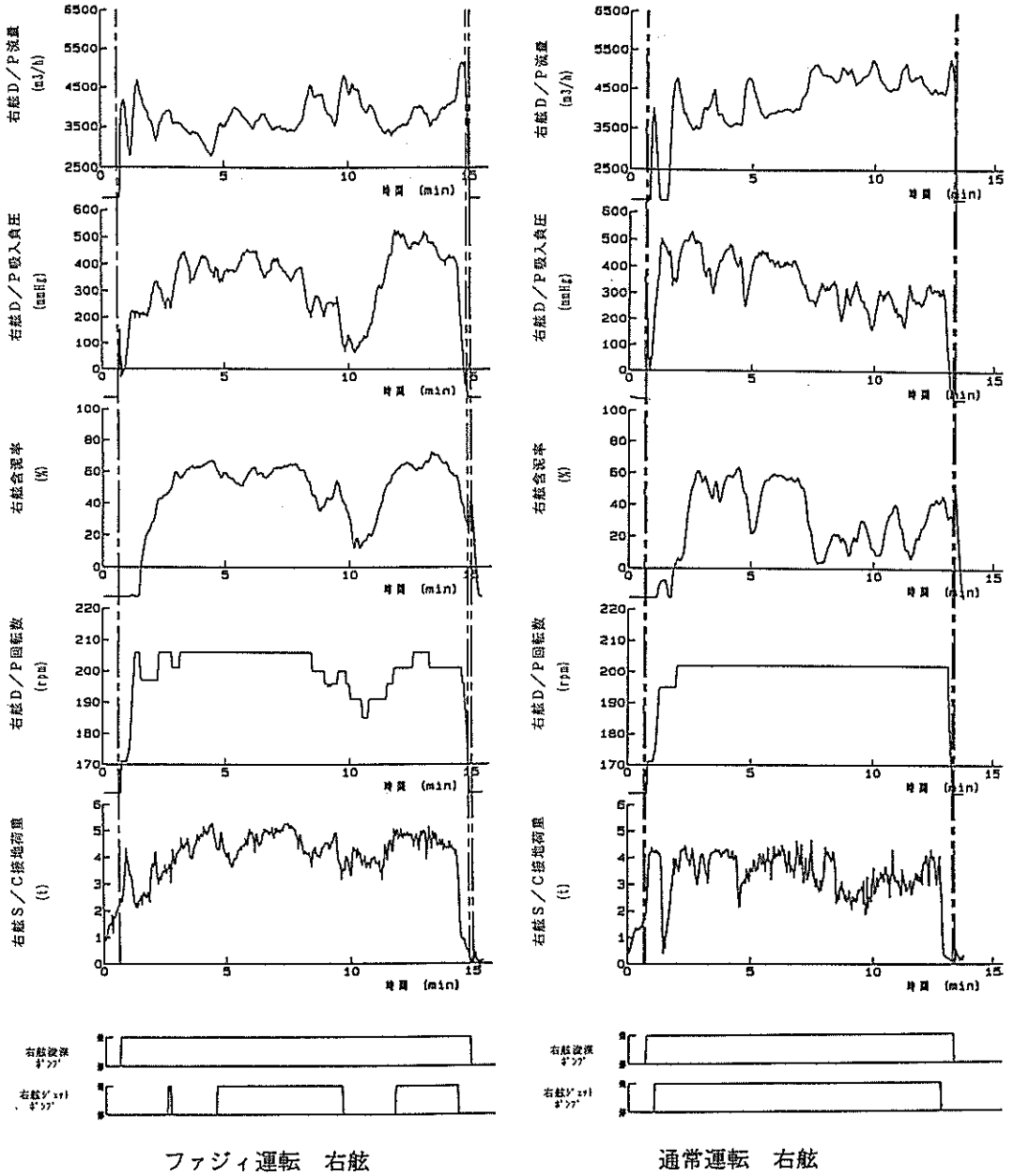


図-41 浚渫ポンプ回転数制御の例

たため効率良く土量が上がらなくなったと考えられる。
 1992年は最初の実験であり、特性を把握するため浚渫ポンプ回転数の制御幅を大きく取った (180~210rpm)。1993年には、上記のように約193rpm以上に上げるとドラグヘッド吸泥能力の限界によって含泥率が頭打ちとな

り、また約182rpm以下に下げると浚渫ポンプの揚泥能力限界によって含泥率が低下することから、積載土量、含泥率が減少しない範囲に制御幅を狭めた (188~195rpm)。それでも1993年は粘土質の区域であり土質が1992年と異なっていたので、スエルコン接地荷重が最も高い

範囲での積載土量、含泥率の低下はなくなったが、スエルクン接地荷重が低い範囲での積載土量、含泥率の低下が浚渫ポンプ回転数約190rpm付近で見られた(図-22、図-24、図-26)。今後は土質の違いによって浚渫ポンプ回転数の制御幅を変えられるようにすることにより、一層の積載土量の向上が期待される。

(3) その他の浚渫ポンプ関連データ

図-29、図-30に吸入負圧の関係を示す。1992年においては、ほぼスエルクン接地荷重に比例して変化している。1993年は粘土質のため接地のいかんにかかわらず吸入負圧が高かったことがわかる。このため浚渫ポンプキャビテーションが発生する危険性があり、接地の強い範囲(接地荷重3.5ton以上)では浚渫自動化制御に組み込んだ保護動作が頻繁に働いた。保護動作とは浚渫ポンプ回転数を下げ、流速を落として吸入負圧を下げる、またはドラグヘッドを巻き上げ、海水を吸入させ泥つまりを解消するという動作であり、いずれも積載土量を低下させる要因である。図-22において接地が強い範囲で積載土量が上がっていないのはこの保護動作によるものである。

図-31、図-32に浚渫時間の関係を、図-33、図-34に浚渫距離の関係を示す。ファジィ運転においては、浚渫ポンプ回転数を可変制御し周囲の海水の流入を抑えたため、浚渫時間が伸び浚渫距離が増加した。一般に[積載土量 = 浚渫ポンプ流量 × 含泥率 × 浚渫時間]の関係がある。ここで[浚渫ポンプ流量 × 浚渫時間]は浚渫泥水体積となり、泥倉容量は一定であるので、浚渫ポンプ流量と浚渫時間は反比例の関係になる。1992年では、通常運転に比べて約10%の浚渫ポンプ流量の減少、それに伴う約10%の浚渫時間、浚渫距離の増加が見られた。自船のみで工区の浚渫を行うときに問題となるのは、掘残しによる海底の山をなくす仕上げ掘り作業である。浚渫距離の増加は仕上げ掘りの浚渫回数を減らすことに貢献するものと考えられる。

5.3 船速一定制御

図-35、図-36に推進翼角の関係を、図-37、図-38に船速の関係を示す。ファジィ運転、通常運転ともにスエルクン接地荷重に比例して推進翼角を制御していることがわかる。またファジィ運転では1992年は船速目標値3.3kt、1993年は3.0ktにてほぼ制御されている。ここで通常運転は乗船員による手動制御である。図-38において通常運転で船速が低かったのは、浚渫ポンプ保護動作が頻繁に発生するために、船速を上げられなかったためである。

図-42にファジィ運転、図-43に自動運転、図-44に手動運転の船速制御の例を示す。ファジィ運転での船速一定制御は、ほぼ目標通りの制御結果が得られた。従来の自動運転では図-43に示すように船速の変動が激しかったが、これは船速が上下限に達すると推進翼角を目標値に上げ下げするスイッチング制御であるためである。図-42と図-43を比較すると、ファジィ運転では自動運転に比べ、はるかに安定した船速一定制御が実現できたと言える。また手動運転と比較しても、ファジィ運転は一浚渫中の船速の変動がやや大きいのが全体として同程度の運転を実現できたと言える。

5.4 ジェットポンプ発停制御

ジェットポンプ発停制御は、通常運転においては1992年は浚渫中常時ジェットポンプ発である。ファジィ運転では、浚渫ポンプ流量が小さく吸入負圧が高いときに、浚渫ポンプの閉塞保護のためジェットポンプ発としている。実験結果は、吸入負圧400mmHg以上、浚渫ポンプ流量2000m³/h以下の範囲でジェットポンプが発しており、良好な制御結果であった。ジェットポンプ発停の例は図-41を参照されたい。

また1992年の実験において、スエルクン接地荷重が低いときに積載土量、含泥率が通常運転で良かったのは(図-21、図-23等)、ジェットポンプを常時発していた効果も関与していると考えられる。つまりジェットポンプを発させることで海底土の攪拌効果が出て積載土量が向上した可能性が考えられる。このため1993年の実験では、ファジィ運転に接地が弱い範囲でジェットポンプ発となるルールを付加したが、粘土質の区域であったためこの範囲でも吸入負圧が高く、ルール付加の効果が判定できなかった。

5.5 スエルクン圧力制御および浚渫目標設定

(1) スエルクン圧力制御

スエルクン圧力制御は、今回は他の重要な制御要素の特性を把握するために一定値固定とした。スエルクン圧力制御は、一浚渫中に変化させても反応が遅く土量の向上にはつながらないと考えられる。よって後述の目標設定において一浚渫中の目標値を算出して設定する方法が望ましいと言える。

本実船実験においてファジィ運転ではスエルクンストロークの数cmの増加が見られた。図-45に1992年のスエルクンストロークのデータを示す。図-45からスエルクンストロークは、スエルクン接地荷重3.6ton以下でファジィ運転が約3cm多いことがわかる。このことから、ファ

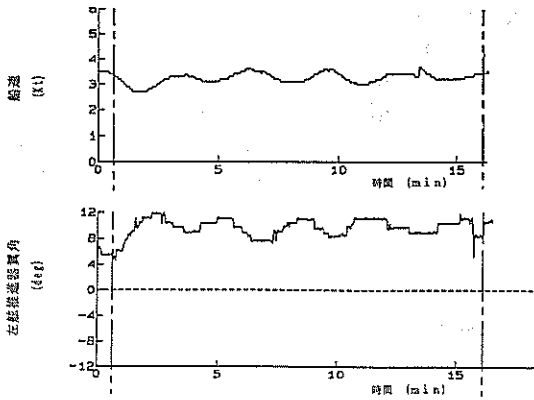


図-42 船速ファジィ運転時の船速、推進翼角の変動

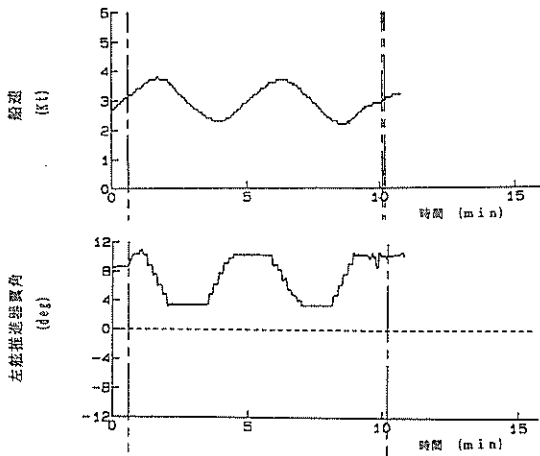


図-43 船速自動運転時の船速、推進翼角の変動

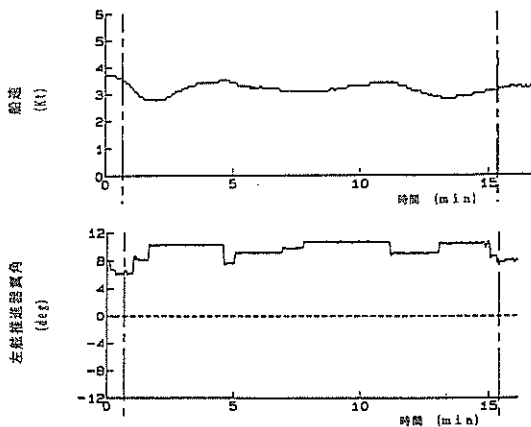


図-44 船速手動運転時の船速、推進翼角の変動

ジィ運転のスェルコン圧力目標値は通常運転の目標値より低めに設定し、スェルコンストロークを抑えるようにすることが望ましいと考えられる。

(2) 浚渫目標の設定

各浚渫データについて浚渫回数(1回目、2回目・・・)ごとの変化を見てみると、ドラグヘッド深度を1段(約30cm)下げてから規則的な傾向が見られた。ファジィ運転についてのデータを図-46~図-48に示す。図-46~図-48からドラグヘッド深度変更後、浚渫回数に応じてスェルコン接地荷重、積載土量等の値がある傾向をもって変化していることがわかる。

今回の実験では、ファジィ運転における船速目標値、浚渫ポンプ流量目標値、ジェットポンプしきい値等は手入力力で直接入力し、目標値を一定として実験を行ったが、このトレンドを使用して今後は、自動的に浚渫目標を設定できるシステムにしてゆくことが課題としてあげられる。このような浚渫トレンドは土質等の違いによって変化すると考えられるので、いろいろな条件の変化に対応したシステムとするにはデータ収録の積み重ねと人工知能的なソフトの開発が必要になる。

5.6 各種制御用センサの検討

ドラグヘッド傾斜計、加速度計および超音波距離計の可能性調査実験で収録を行ったデータの平均値を表-8に示す。表中の数値から実験中はファジィ浚渫制御シ

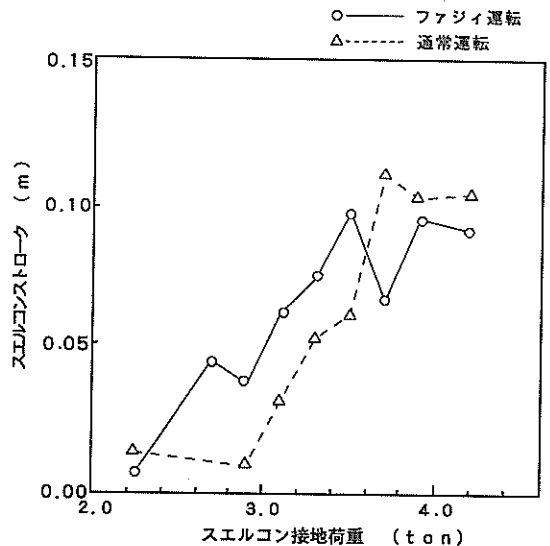


図-45 スェルコン接地荷重とスェルコンストロークの関係

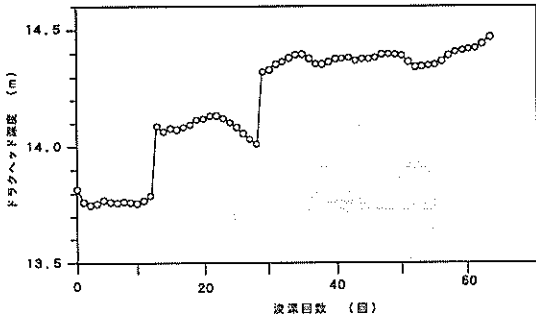


図-46 ファジィ運転の浚渫回数ごとのドラグヘッド深度の変化

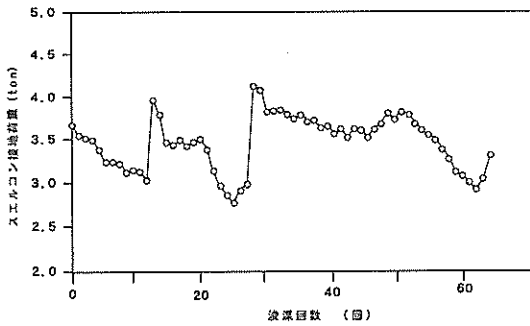


図-47 ファジィ運転の浚渫回数ごとのスエルコン接地荷重の変化

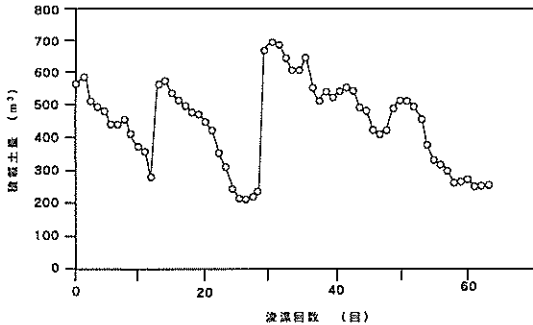


図-48 ファジィ運転の浚渫回数ごとの積載土量の変化

テム実船実験時とはほぼ同じ状態であったことがわかる。

(1) ドラグヘッド傾斜計

図-49に傾斜計の取付位置を示す。傾斜計はサーボ型のものを用い、右舷側のドラグヘッドの底面に水平に取り付け、トリム、ヒール方向の傾斜を水平から±10°の範囲で計測できるようにセットした。

図-50にトリムとスエルコン接地荷重の関係を示す。

表-8 各種制御用センサ可能性調査実験浚渫データ
平均値

データ名	平均値
船速	2.38Kt
浚渫ポンプ回転数	196.46rpm
積載土量	424.72m ³
浚渫ポンプ流量	3739.31m ³ /h
含泥率	27.29%
吸入負圧	447.86mmHg
推進翼角	9.02deg
スエルコン動作時間	4.31min
スエルコンストローク	0.22m
浚渫時間	13.33min
スエルコン接地荷重	3.11ton
ドラグヘッド深度	12.86m

図からトリムはスエルコン接地荷重、すなわち接地の強さと比例していることがわかる。トリムの範囲は全浚渫で-11°から-5.5°の範囲で変化していた。全浚渫の平均は-8.76°であった。このことは、ドラグヘッドは可動点を軸として平均で約-9°傾いて浚渫していたということである。

図-51にヒールとスエルコン接地荷重の関係を示す。図からヒールはスエルコン接地荷重、すなわち接地の強さの変化に応じて-1°から-6°の範囲で変化していることがわかる。すなわち図-52のように浚渫中のドラグヘッドは接地抵抗を受けて船体側に寄っているということが言える。

図-53に各浚渫データの時間変化の例を示す。図からトリムは、海底面の変動をスエルコン接地荷重と同程度にとらえていることがわかる。今回の実験においては同一浚渫区域で浚渫が行われ、土質はほぼ同じであった。しかし土質が違う場所での浚渫では、土質によってドラグヘッドの食い込み方、すなわちトリムが変化してくると推定されるので、スエルコン接地荷重とトリムを組み合わせ計測することにより、将来の浚渫ファクター自動選択制御において有用な土質の硬軟の把握が可能になるのではないかと考えられる。

(2) ドラグヘッド加速度計

加速度計もサーボ型のものを用い、傾斜計と同様にドラグヘッドの底面に水平に設置し、底面に垂直な方向の加速度を±5Gの範囲で計測できるようにした。図-53からわかるように、加速度の変動分は0.01G程度以下であり、ドラグヘッドの海底面への接地による振動は非常

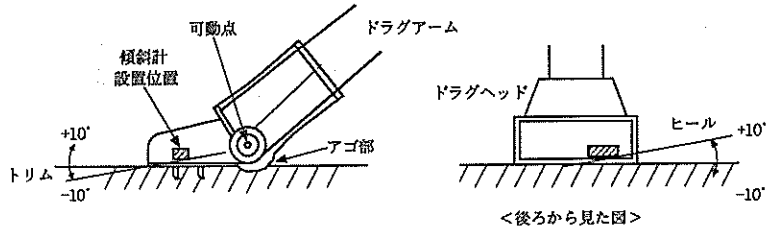


図-49 傾斜計取付位置

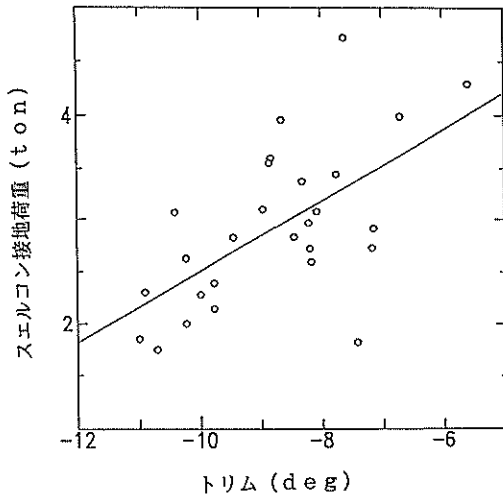


図-50 トリムとスエルクコン接地荷重の関係

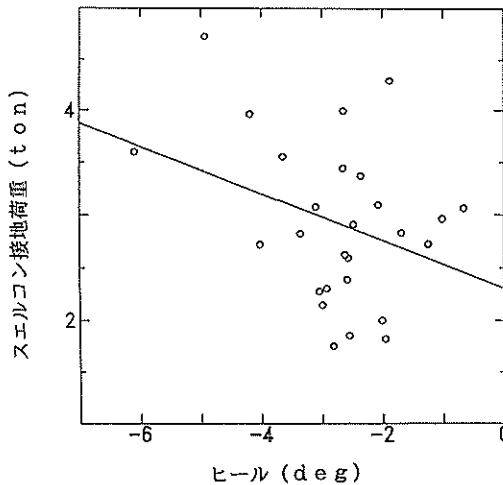


図-51 ヒールとスエルクコン接地荷重の関係

に少なかったことがわかる。当初、起伏の激しい海底面でのドラグヘッドへの衝撃はかなりあると予想されたため検出範囲 ± 5 Gのセンサを設置したが、実際の加速度ははるかに小さいものであった。分解能の良いセンサを使用すれば加速度の検出は可能であろうが、このような微小な変化を制御に使用することは難しいと考えられる。

(3) 超音波距離計

図-54に超音波距離計の取付位置を示す。超音波距離計は右舷側のドラグアームの中間ジョイント付近に取り付けられ、ドラグアームに垂直方向の海底面までの距離を測定するようにセットされた。またデータ収録では超音波距離計測定点E/S (X, Y, Z)とドラグヘッド可動点D/H (X, Y, Z)の位置を収録し、ドラグヘッドと測定点の高さ比較ができるようにした。

a) 測定データ全般

船の進行方向のE/S (Y)とD/H (Y)の距離差 Y_0 は浸滞データから求めると平均で11.85mであった。これを船速で除した船の進行方向の時間差は10.23秒であった。すなわち超音波距離計のデータは、ドラグヘッドの前方11.85m、時間にして10.23秒前の海底面高さを計測したことになる。超音波距離計測定点の深度E/S (Z)と、ドラグヘッド可動点の深度D/H (Z)の深度差 Z_0 は、平均で-0.403mであった。ここで Z_0 は、超音波距離計測定点深度がドラグヘッド可動点より浅いときプラスとなるように計算している。すなわち深度差プラスのとき、超音波距離計はドラグヘッド可動点より高い海底の「山」を計測していることになる。深度差 Z_0 が-0.403mとマイナスであったのは後述のように、ドラグヘッド可動点と実際に接地しているドラグヘッド先端までの鉛直距離が最大で0.8m程度あるためである。

b) ドラグヘッドの接地状態の説明

図-55にドラグヘッド可動部の状態を示す。ドラグヘッ

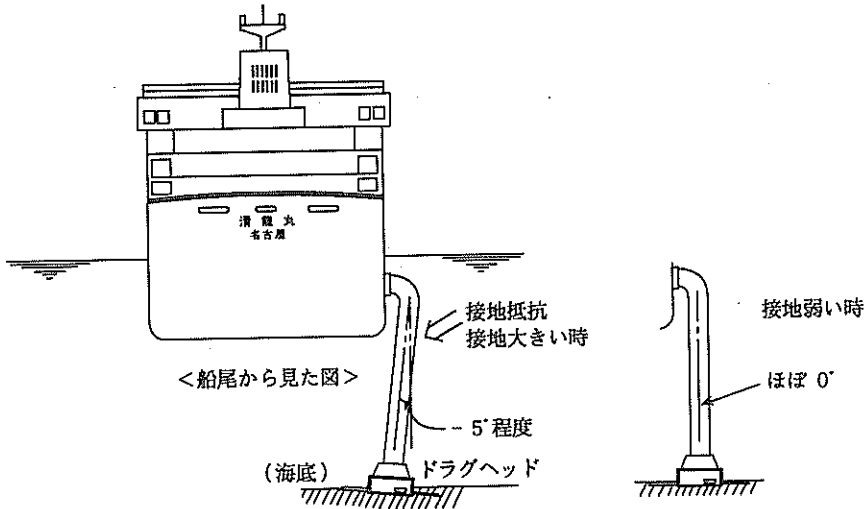


図-52 ヒールの様子

ド先端部 a 点は可動点を中心に動くようになっている。接地していないときは、図の右側のようにアーム軸に対して 14° 傾いた位置でストッパーによって止まるようになっている。接地すると左図のように海底面に押し上げられてヘッド底面が海底面に密着するようになっている。図-55の右図のように宙吊りになっている時、ドラグヘッド可動点から点 a のドラグヘッド先端までの鉛直距離 h はドラグヘッドの深度が $-11\text{m} \sim -16\text{m}$ の場合 $0.6\text{m} \sim 0.8\text{m}$ となっている。

c) 実験結果

図-56に超音波距離計測定点とドラグヘッド可動点との深度差 Z_b とスエルコン接地荷重の関係を示す。図-57に深度差 Z_b と含泥率の関係を示す。これは浚渫中の深度差 Z_b 、スエルコン接地荷重、含泥率のデータを一浚渫ごとに平均したものをを用いており、超音波距離計とスエルコン接地荷重、含泥率の間の時間遅れを考慮してプロットしているものではない。しかし深度差 Z_b 、スエルコン接地荷重、含泥率の間の概略の傾向を把握することができる。図から深度差 Z_b はスエルコン接地荷重、含泥率ともに比例関係にあることがわかる。この関係を利用すると、超音波距離計は平均でドラグヘッドの約 12m 前方を見ているので、スエルコン接地荷重の変化で制御するよりも早くて同程度の信頼性をもって浚渫ポンプ回転数、推進進角等の制御が可能となると考えられる。

図-58に深度差 Z_b 、スエルコン接地荷重、含泥率等の時間変化の様子を示す。深度差 Z_b は、海底面の変動をスエルコン接地荷重とほぼ同程度にとらえていることがわかる。

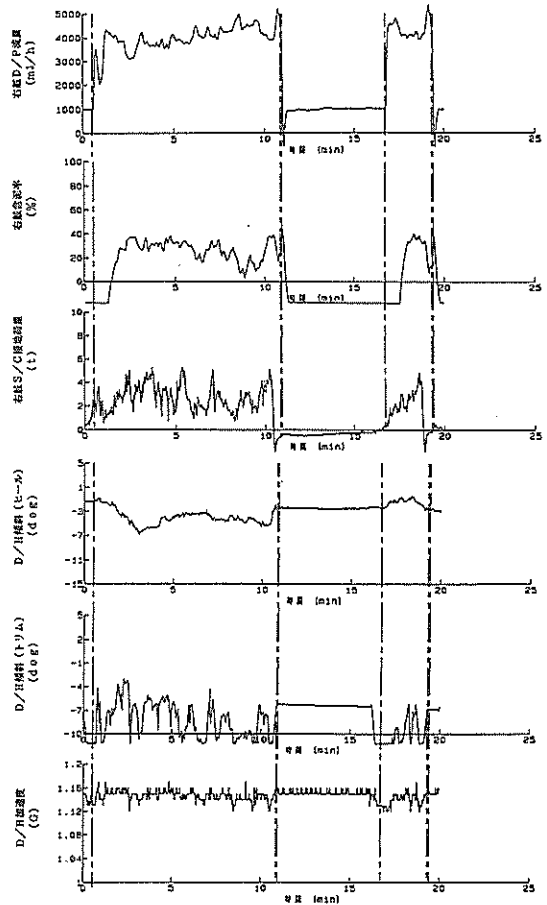


図-53 浚渫データ時間変化の例

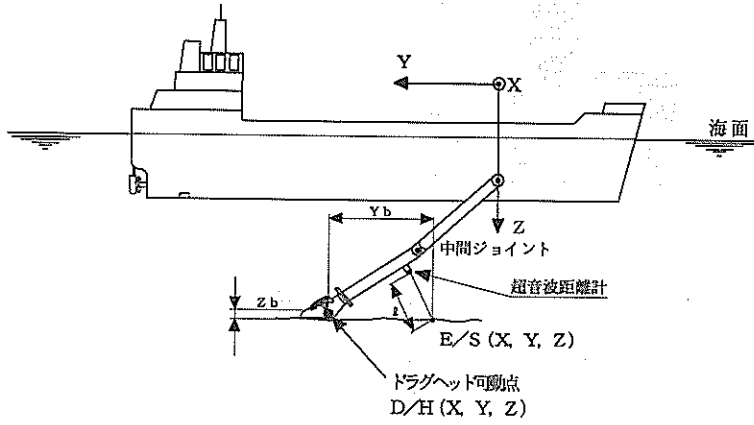


図-54 超音波距離計設置状況

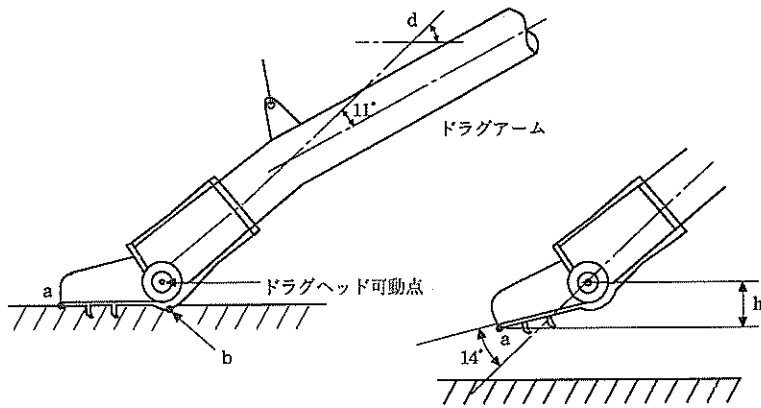


図-55 ドラッグヘッドの状態説明図

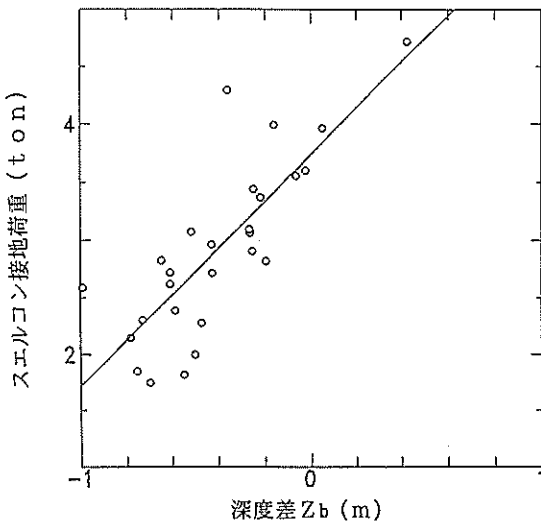


図-56 深度差 Z_b とスエールコン接地荷重の関係

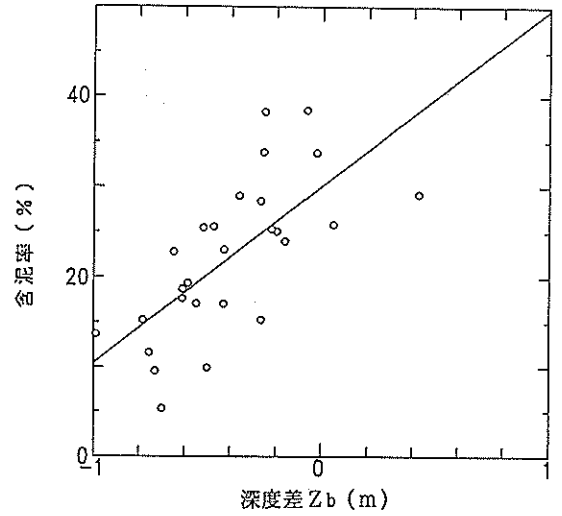


図-57 深度差 Z_b と含泥率の関係

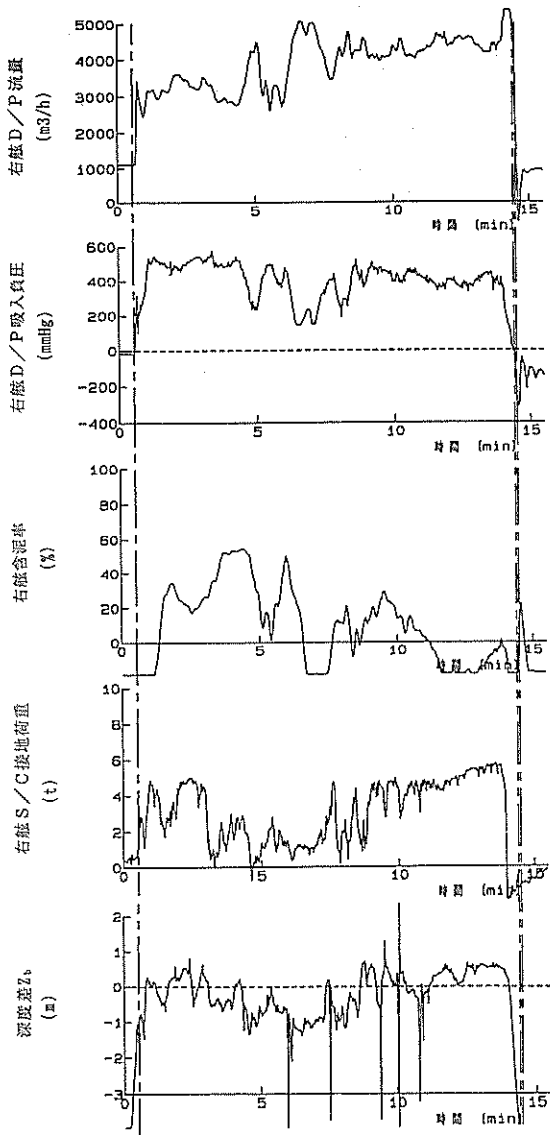


図-58 深度差 Z_b と他のデータの時間変化の例

6. 結 論

本研究では、既存の浚渫自動化システムの成果をふまえて新しくファジィ制御を導入した浚渫自動化システムの基本的考え方を策定した。さらに、この考え方にもとづきファジィ浚渫制御プログラムを開発し実船に装備して実船実験を行った。実船実験では主に船速制御、浚渫ポンプ回転数制御、ジェット水制御、スエルコン圧力制

御の4点について制御が最適に行われているか検討し、種々の知見を得ることができた。これを取りまとめると以下ようになる。

(1) ファジィ制御を用いた浚渫制御システムにより、ベテラン乗船員並の浚渫制御を実現することができた。本システムをもとにして無人運転を行うことが十分可能と思われる。

(2) 積載土量については、浚渫ポンプ回転数のファジィ制御の結果、自動運転に対し約7%~10%土量が増加した。浚渫ポンプ回転数を上げても含泥率が増加しなくなるドラッグヘッドの吸泥能力の限界が認められた。また、浚渫ポンプ回転数を下げると含泥率が急激に低下する浚渫ポンプの揚泥能力の限界も認められた。

(3) 1992年はシルト質の軟泥の区域の浚渫であったが、1993年は粘土質の軟泥の区域であった。このため浚渫ポンプ吸入負圧が大きく浚渫ポンプ保護動作が頻繁に働き、連続した浚渫作業を行うことは困難であった。それにもかかわらず、このような土質の異なった区域においても土量向上効果は維持出来た。

(4) 船速ファジィ制御の結果1992年は3.3kt目標で3.29kt、1993年は3.0kt目標で2.82ktとはほぼ目標通りの船速一定制御がなされた。船速の変動も少なく乗船員の手動操作並の安定した制御が実現できた。

(5) ジェット水のファジィ制御の結果、浚渫ポンプの閉塞保護のためジェットポンプを最適な頻度で発停させることができ、なめらかな浚渫ポンプ流量維持に寄与した。

(6) ファジィ運転では自動運転に比べ、スエルコンのストロークが若干増加し掘り残しが生じやすくなったので、スエルコン圧力は自動運転の場合より低めに設定することが望ましい。

(7) サーボ傾斜計は、ドラッグヘッドの海底面への接地によるドラッグヘッドの傾斜を良くとらえることができた。ドラッグヘッドの接地荷重と組み合わせることにより、土質の硬軟の判定が可能となると考えられる。

(8) サーボ加速度計によって、現在の浚渫ではドラッグヘッドに垂直な方向の加速度はほとんど発生していないことがわかり、加速度データを制御に使用することは難しいことが判明した。

(9) 超音波距離計によってドラッグヘッドの約12m前方の海底面高さを計測することができた。また海底面高さと同ドラッグヘッドの接地荷重との相関が認められた。超音波距離計の使用によって、浚渫ポンプ回転数、推進翼角の事前予測制御を行うことが可能となると考えられる。

7. あとがき

1992年、1993年の実船実験においては、ファジィ制御を用いた浚渫自動化システム開発のうちで基本的な制御構成要素となるファジィ浚渫制御システムについて良好な結果が得られた。オーバーフローできない条件のもとで7%~10%の積載土量向上は大きな意義があった。また手動運転並みの船速制御が実現できたことは、今後の運用において乗船員の作業軽減につながるものであろう。

現在は、知能化浚渫システム等の開発を進めている。これは、浚渫ポンプ流量目標値等の浚渫パラメータを過去の浚渫データの統計解析、学習により自動的に設定するものである。これにより海底の状態等に応じてファジィ浚渫制御のパラメータを最適化することができ、各種作業条件の下で浚渫作業全体が最適に制御され、より効率的な浚渫船が誕生するものと期待される。

最後に本開発を実施するに当たって格別の御協力を頂いた第五港湾建設局に厚く感謝する次第である。

参考文献

- 1) Miyake, A. et al. 1989. "Development of Automatic Operation System Incorporating Fuzzy Control for Cutter Suction Dredge", Proceedings, 11th World Dredging Congress, WODCON
- 2) 運輸省第五港湾建設局：「清龍丸」知能化浚渫システム技術開発基本調査研究総合検討書，1991
- 3) 運輸省第五港湾建設局：「清龍丸」知能化浚渫システム技術開発実態調査研究報告書，1992
- 4) 運輸省第五港湾建設局：「清龍丸」知能化浚渫システム技術開発実船実験調査報告書，1993
- 5) 運輸省第五港湾建設局：「清龍丸」知能化浚渫システム技術開発実船実験調査報告書，1994
- 6) 運輸省第四港湾建設局：ドラッグサクシオン高濃度浚渫現地実験報告書，1990
- 7) 山川 他：ファジィ応用ハンドブック，1991
- 8) 田中一男：応用をめざす人のためのファジィ理論入門，1991

主要記号一覧

C_s	: 見かけ含泥率
C_v	: 真容積含泥率
D	: 配管内径
l	: 差圧検出位置間距離

P	: 圧力
Q_0	: 清水時の浚渫ポンプ流量
Q_m	: 浚渫時の浚渫ポンプ流量
V	: 配管内流速
V_h	: 泥水体積
V_m	: 積載土量
W_s	: 現在の排水量
W_b	: 浚渫前の船の重量
γ_b	: 底泥の比重
γ_m	: スラリ比重
γ_s	: 差圧検出器内封入液比重
γ_w	: 海水比重
λ	: 管摩擦係数