

ドラグサクション浚渫船に適用するファジイ 制御システムの開発と実用化

加藤英夫¹・岡山義邦²・浜田賢二³・藤井 敦⁴・新谷義昭⁵・中川浩二⁶

¹正会員 独立行政法人 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²海上DGPS利用推進協議会 (〒103-0022 東京都中央区日本橋室町1-9-4)

³正会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 関西国際空港株式会社 工務部資材調査課長 (〒549-0001 泉佐野市泉州空港北一番地)

(前国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所長)

⁵MECエンジニアリングサービス株式会社 制御システム事業部 (〒730-0401 広島市中区江波沖町5-1)

⁶フェローメンバー 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

ドラグサクション浚渫船の自動化は、従来設定値に基づく一定値制御、あるいはあらかじめ定められた手順に従うシーケンス制御等が試みられてきたが、ベテラン乗組員の手動操作に比較すると制御が不十分で、省力化は図られたが浚渫能率(浚渫土量)は必ずしも高くなつてはいないとされてきた。そこでこの問題を解決するためファジイ制御を用いた自動化システムを研究・開発した。浚渫基本要素(浚渫ポンプ流量、船速等)を対象としてファジイ制御を行った結果、積載土量を4.5%～9.7%向上させることができた。また浚渫土量向上の一環として、泥水リサイクルシステムを装備しこれも併せてファジイ制御を行つた結果、積載土量を36.9%と大きく向上させることができた。

Key Words: trailing suction hopper dredger, automation of dredging operation, fuzzy control, artificial intelligence dredging system

1. まえがき

ドラグサクション浚渫船は日本では主に国土交通省地方整備局が所有しているが、欧米では民間の浚渫会社が大型のものを含め多数所有している。本タイプは自航式であり機動性に富むために、供用中の航路や通行船舶の輻輳するエリアの浚渫に有効に利用されている。欧米の大規模港湾の維持浚渫においては、本タイプが主役と言つても過言ではない。

この中で従来ドラグサクション浚渫船の自動化といえば、世界的には浚渫状況のモニタリングやあらかじめ定められた手順に従うシーケンス制御程度であったが、我が国ではこれ以外にも省力化、効率向上等のためいくつかの自動化の試みがなされてきた。しかしながら、本タイプはグラブ浚渫船等の固体を掘削する浚渫方式と異なり、うず巻きポンプで土砂水を吸引する流体浚渫方式であり、従来効率の高い自動化は困難

であった。すなわち浚渫における流れは土砂と水の固液二相流となり、浚渫ヘッド接地圧、浚渫ポンプ回転数、土質等の要因が相互に関連して作用し、流れの状況は複雑に変化する。そのため、海底状態、土質等の変化に対応して最適な制御を行うことは非常に難しいとされ、従来はプロペラ推力、浚渫ポンプ回転数等を一定に保つ簡易な自動制御程度までしか実現できなかつた¹⁾。その結果、浚渫能率(浚渫土量)は乗組員による手動操作に比べ一般に劣るものとなつていた。

また、今後は社会情勢の変化等により、ベテラン乗組員の数が減少することが予想される。ベテラン乗組員の数が少なくなった場合、彼らの機器操作上のノウハウが浚渫オペレーション上で生かせなくなるという問題が出てくる。

これらの問題を解決するため、乗組員の機器操作上のノウハウを直接制御プログラムに組み込むことができるファジイ制御の手法を用いて、浚渫の最適化(浚

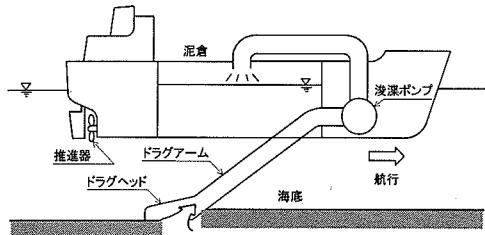


図-1 ドラグサクション浚渫船概念図

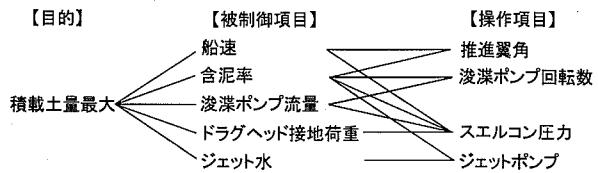


図-2 目的、被制御項目と操作項目の関係
(浚渫基本要素について)

浚一サイクル当たりの浚渫土量を最大にする)が可能な自動制御システムの開発を行った。

2. 制御システム開発プロセス

(1) ドラグサクション浚渫船

ドラグサクション浚渫船は自航しながらうず巻きポンプで海底の土砂を水とともに吸引する流体浚渫方式の浚渫船である。ドラグサクション浚渫船の概念図を図-1に示す。船体の前部に浚渫ポンプがあり、この浚渫ポンプから海底に浚渫管(ドラグアーム)が伸びており、この先に浚渫ヘッド(ドラグヘッド)が付いている。浚渫時にはこのドラグヘッドを海底上に引きずりながら土砂を船内の浚渫ポンプで吸い込み、吸引した土砂水を船体中央部の泥倉に排出する。この浚渫作業を続け、泥倉が土砂水で一杯になったら浚渫を終了して、別途設けられた土捨場まで航行し、土捨場にて浚渫土砂を排出する。以上のサイクルを繰り返し、浚渫を行うものである。

(2) 浚渫制御システム開発プロセス

上記のようにドラグサクション浚渫船は浚渫ポンプを用いる流体浚渫方式である。浚渫における流れは土砂と水の固液二相流となり、ドラグヘッド接地圧、浚渫ポンプ回転数、土質等の要因が相互に関連して作用し、流れの状況(浚渫泥水の濃度等)は複雑に変化する。複雑なシステムを自動で最適に制御するには、まず操作要素と目的(積載土量増大)との関係を調査し、目的値を最大にするような操作方法を検討し、それに従った制御システムを構築する必要がある。このため浚渫制御システムの開発は以下に示すプロセスを行った。

- ・目的、被制御項目と操作項目の関係の整理
- ・浚渫システムに関する入力・出力及び目的の関係の整理
- ・制御システムの基本構成の決定
- ・実船の浚渫特性、機器操作上のノウハウの分析

- ・浚渫制御モデル、ファジィルールの作成
- ・実船実験による検証

a) 目的、被制御項目と操作項目

ドラグサクション浚渫船の操作機器、制御される項目は数多くあるが、直接に機器を操作するものを操作項目、それにより状態が変化するものを被制御項目とする。最終目的(積載土量最大)とこれらとの関係を整理すると図-2のようになる。図中各用語の意味は以下のとおりである。

含泥率：浚渫管中の泥水の濃度。一般に泥水が含む底泥(海底における湿潤状態)の容積割合をパーセントで表す。

ドラグヘッド接地荷重：ドラグヘッドが海底に接している荷重。

ジェット水：ドラグヘッド内に設置されたジェットノズルから吐出される高圧力の吐出水。海底泥の掘削搅拌効果をねらったもの。

推進翼角：一般に大型のドラグサクション浚渫船は、船速を変化させるのに推進器の回転数を変えるのではなく推進器の翼角を変える。この推進器の翼角のこと。

スエルコン：スエル(起伏)コンペンセータの略。ドラグヘッドは吊りワイヤで支えられているが、この吊りワイヤを滑車を介して油圧シリンダにより上方向に支えているもの。この油圧シリンダの設定圧力により、見かけのドラグヘッド重量、すなわちドラグヘッド接地荷重の上限を設定できる(後出図-4参照)。

ただし、図-2は操作項目として浚渫基本要素のみを示している。含泥率、浚渫ポンプ流量等は関係する操作項目が複数ある複雑なものとなっている。また、この図は主に操作項目と被制御項目の関係を明らかにしたものであり、このままでは被制御項目相互間の関係は明らかではない。

b) 浚渫システムに関する入力・出力及び目的

図-2における被制御項目は「ドラグサクション浚渫船」という浚渫システムに関して、入力(船速、ド

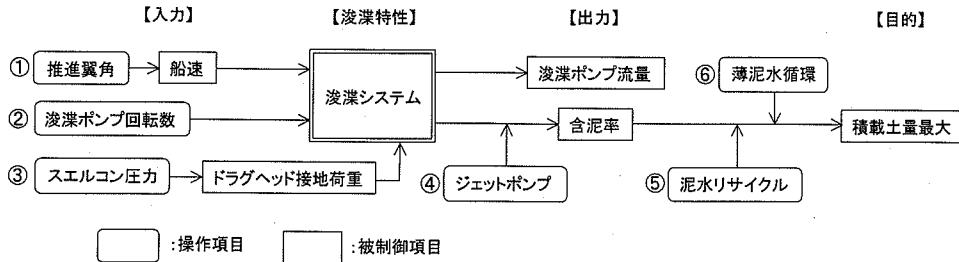


図-3 浚渫システムに関する入力・出力及び目的の関係

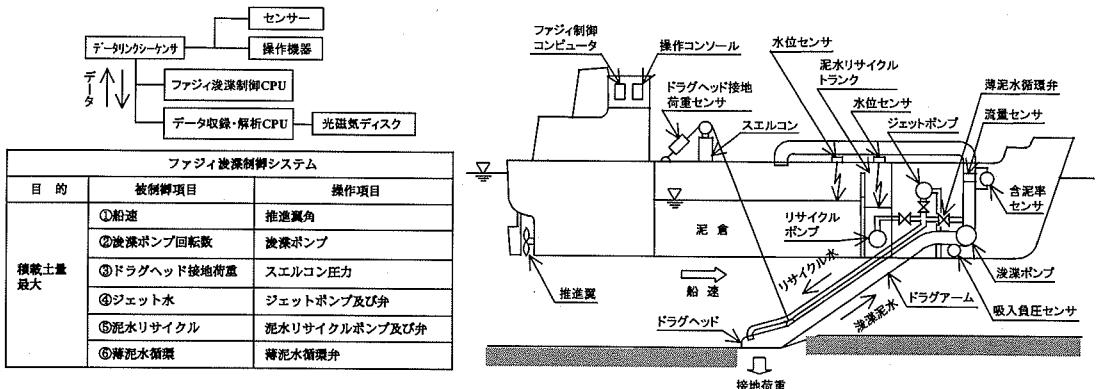


図-4 ファジイ浚渫制御システム概念図

ラグヘッド接地荷重等)と出力(含泥率、浚渫ポンプ流量等)が混在しているので、これらを入力と出力に分け、さらに操作項目と被制御項目の関係も考慮して整理すると図-3のようになる。図に示すように浚渫における流れの状況を左右するのは基本的に①推進翼角②浚渫ポンプ回転数③スエルコン圧力(④ジェットポンプ)の3~4要素と考えられ、これらが相互に関連して作用し、浚渫システムの出力である含泥率と浚渫ポンプ流量が変化する。

現状ではドラグサクション浚渫船の場合は図に示す「浚渫システム」の動特性が複雑で正確に捕らえられず数式化することが難しい。こ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の判断にまかせた方が良い結果が得られることが多い。このようなベテランオペレータのノウハウを制御に取り入れ、システムを効率的に制御するのがファジイ制御であり、現在日本では地下鉄²⁾、浄水場³⁾、シールド掘進機⁴⁾等の自動制御に応用され成果をあげている。

本制御対象となるドラグサクション浚渫船の場合は、従来のものと比較すると、図-3に示す入力項目が相互に関連して作用し出力を変化させるため、これらの関連を考慮し総合的にファジイ理論を用いて制御した点が特長となっている。

なお図-3には積載土量向上方策の一環として装備

した泥水リサイクルシステム及び薄泥水循環システムも示し、今回のファジイ制御の対象全体を示してある。泥水リサイクルとは、泥倉内に積み込まれた泥水の上部水(含泥率が低い)をドラグヘッドに還流させ、泥倉内の土砂の濃度を上げて、積載土量の増大を図るものである。また、薄泥水循環システムとは、浚渫開始時等に吸入した薄泥水(含泥率が低い)を泥倉内に積み込みます、ドラグヘッドに還流させ、積載土量低下を防止するものである。

3. 浚渫制御システムの構築

(1) 制御システムの基本構成

浚渫制御システムの構築に当たっては、図-3をもとに各操作項目ごとに以下のように制御のサブシステムを設定した。制御システムの概念図を図-4に示す。

① 推進翼角の最適制御

浚渫中の最適船速(含泥率が最大となる船速)は浚渫海域の土質、浚渫土厚等の浚渫条件により異なる。各浚渫条件における最適船速を把握し、それに基づき推進翼角を操作し船速の制御を行う。

② 浚渫ポンプ回転数の最適制御

一般に浚渫ポンプ回転数を高め、できるだけ吸入負圧が高い点で浚渫すれば含泥率が高くなるといわれ

ている。しかしながら、現状ではキャビテーション防止等から、かなり安全サイドでの運転を行っている。これを吸入負圧限界内および浚渫ポンプ閉塞限界内で含泥率が最大となるような制御を行う。

③スエルコン圧力の最適制御

スエルコン圧力により設定されるドラグヘッド接地荷重の最適値（含泥率が最大となる値）は浚渫海域の土質等の浚渫条件により異なる。各浚渫条件における最適値を把握し、それに基づきスエルコン圧力の制御を行う。

④ジェットポンプの最適制御

ジェット水の最適な噴射タイミング、噴射時間等は浚渫海域の土質、浚渫土厚等の浚渫条件により異なる。各浚渫条件における最適状態（含泥率が最大となる状態）を把握し、それに基づきジェットポンプの制御を行う。

⑤泥水リサイクル制御

泥水リサイクルシステムについて泥倉内上部水の含泥率を判定し、含泥率が低い場合はドラグヘッドに還流させる制御を行う。

⑥薄泥水循環制御

薄泥水循環システムについて吸入泥水の含泥率を判定し、含泥率が低い場合はドラグヘッドに還流させる制御を行う。

(2) 浚渫基本要素に関するファジィ制御

a) 実船の浚渫特性・機器操作上のノウハウ

上記各操作項目の最適状態（主に①～③について）及び機器操作上のノウハウを把握するため、乗組員アンケート・ヒアリング、実船調査等を行った。調査結果をもとに実船の浚渫特性を分析し、含泥率・積載土量を増大させる知見を得た。これらのうち主要なものを以下に示す（軟泥の場合）。なお、自動化の対象船舶は国土交通省中部地方整備局所属のドラグサクション浚渫船「清龍丸」とした。

[実船調査結果]

A1. 船速が低いとドラグヘッドに入る泥の量が少なくなり含泥率が低くなるが、高くしてもドラグヘッドの吸泥限界があり、ある値で頭打ちになる。本船の場合は3kt付近が最も含泥率が高かった。

A2. 浚渫ポンプ回転数を上げれば含泥率は高くなるが、ある程度以上の接地荷重が必要であり、接地荷重が低い場合は回転数を上げると水を多く吸入し含泥率は低下する。ドラグヘッド接地荷重が高い場合(4~7ton)、浚渫ポンプ回転数190rpm付近で含泥率のピークが見られ、この場合の浚渫ポンプ流量は約3,750m³/hであった。

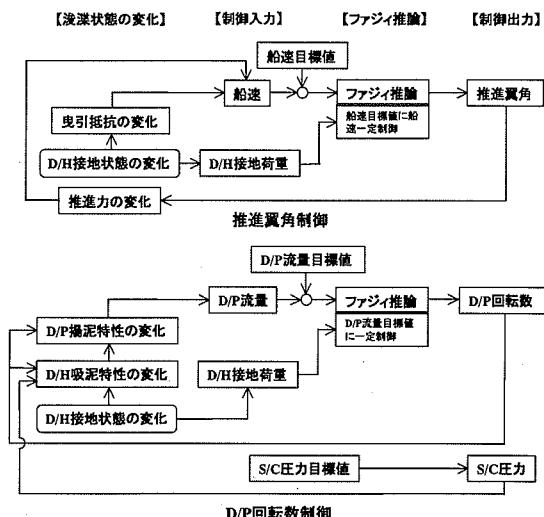


図-5 ファジィ浚渫制御モデルの例
(推進翼角、浚渫ポンプ回転数)

A3. 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⁵⁾（浚渫ポンプ回転数一定の場合）。

$$Q_m / Q_0 = 1 - 4.59 C_v^{1.3} \quad (1)$$

Q_0 ：清水時浚渫ポンプ流量(m³/h)

Q_m ：泥水時浚渫ポンプ流量(m³/h)

C_v ：含泥率（%）

[アンケート・ヒアリング結果]

B1. 浚渫土厚が厚い（浚渫土厚は浚渫目標水深と海底の起伏状況により決まる。浚渫土厚が厚くなれば、それに従いドラグヘッド接地荷重は大きくなる。）時は、浚渫ポンプ回転数を高めにすることが望ましい。

B2. 浚渫土厚が薄い（ドラグヘッド接地荷重が低い）時は、吸泥含泥率が大幅に低下しない範囲で浚渫ポンプ回転数を下げることが望ましい。

B3. スエルコン圧力は、前述のようにドラグヘッドを上方向に支えているシリンドラの圧力である。この圧力が大きくなると見かけのドラグヘッド重量が軽くなり、海底の起伏に沿ったドラグヘッドの上下動が大きくなる。ドラグヘッドの上下動を抑え、浚渫土厚を確保して含泥率を高くし、また掘跡の起伏を少なくするという観点から、スエルコン圧力は1.079~1.177MPa (11~12kgf/cm²) という中程度の設定が望ましい。なおスエルコン圧力の制御範囲は0.883~1.275MPa (9~13kgf/cm²) である。

b) ファジィ浚渫制御モデル

ドラグサクション浚渫の主たる対象土質は軟らかいシルト～細砂であること及び現在までの浚渫

実績を考慮して、浚渫対象土質を主に軟泥と想定した。よって、軟泥に対する上記の実船の浚渫特性及び機器操作上のノウハウを基にファジィ浚渫制御モデルを作成した⁶⁾。制御モデルの例を図-5に示す。なお以降の図表では略号を使用しているが、それらの意味は以下のとおりである。

D/H : ドラグヘッド

D/P : 浚渫ポンプ

J/P : ジェットポンプ

R/P : リサイクルポンプ

S/C : スエルコン

以下に各操作項目の制御の考え方を示す（ただし⑤泥水リサイクルと⑥薄泥水循環は後述）。

①推進翼角制御

前項A1. の「船速3kt付近が最も含泥率が高かった」という浚渫特性より、3kt付近を目標とした船速一定のフィードバック制御とした。船速制御については、推進翼角を操作してから船速が変化するまで時間遅れがある。このため浚渫中に頻繁に目標船速を変化させることは困難であり、浚渫中は目標船速は一定とした。

またドラグヘッド接地荷重によりドラグヘッドの曳引抵抗の推定が可能である。これをを利用して、ドラグヘッド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仕組みとした。

②浚渫ポンプ回転数制御

前項A2., B1., B2. から「接地荷重が低い場合は、浚渫ポンプ回転数を上げると水を多く吸入し含泥率は低下する」また「接地荷重が高い場合は、浚渫ポンプ回転数を上げれば含泥率は高くなり、流量もあまり減少しない」となり、浚渫ポンプ制御の考え方としては「流量概略一定」が望ましいと考えられる。このため浚渫ポンプ回転数制御は、浚渫ポンプ流量やや多め（含泥率を少しでも高くすることを考慮）の3,750m³/h～4,200m³/hを目標とし、流量一定のフィードバック制御とした。

また推進翼角制御の場合と同様、ドラグヘッド接地荷重を入力としてフィードフォワード制御するルールを付加し、浚渫ポンプ回転数を早めに制御する仕組みとした。

強制的な保護動作として、吸入負圧が高い時は浚渫ポンプの閉塞防止のため、浚渫ポンプ回転数を下げ、また浚渫ポンプ流量低下時はドラグヘッドワインチを上げるようにした（図-5では保護動作は省略）。

③スエルコン圧力制御

前項B3. より、浚渫土厚を確保して含泥率を高く

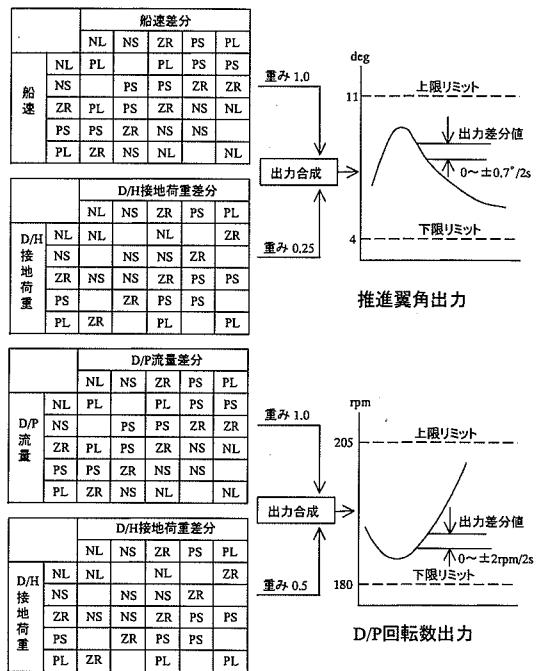


図-6 ファジィ浚渫制御ルールの例
(推進翼角、浚渫ポンプ回転数)

し、また掘跡の起伏を少なくするため、スエルコン圧力目標は中程度に設定することとした。浚渫中は機構上スエルコン圧力を頻繁に変化させることが困難なため、この設定値は一定とした。

④ジェットポンプ運転／停止制御

ジェット水は海底泥の掘削及び搅拌効果があるが、軟泥の場合は含泥率を低下させる作用も大きいので、浚渫中は基本的に停止とした。浚渫中に浚渫ポンプ流量が小さく、吸入負圧が高い時は浚渫ポンプが閉塞する危険が生じるため、ジェットポンプを運転することとした（図-5では省略）。

c) ファジィ浚渫制御ルール

前項のファジィ浚渫制御モデルをもとにファジィ浚渫制御のルールを作成し、これによって各操作項目を制御した^{6),7)}。浚渫制御ルールの例を図-6に示す。図-6は推進翼角と浚渫ポンプ回転数を制御するルールをクロスマトリックス表で表したものである。推進翼角の場合は船速とドラグヘッド接地荷重を入力項目とした2入力の、浚渫ポンプ回転数の場合は浚渫ポンプ流量とドラグヘッド接地荷重を入力項目とした2入力の制御ルールとなっている。表中に示す値がそれぞれの出力である。表中の入・出力ラベルNL・NS・ZR・PS・PLの意味は以下に示すとおりである。

N L : とても小 N e g a t i v e L a r g e

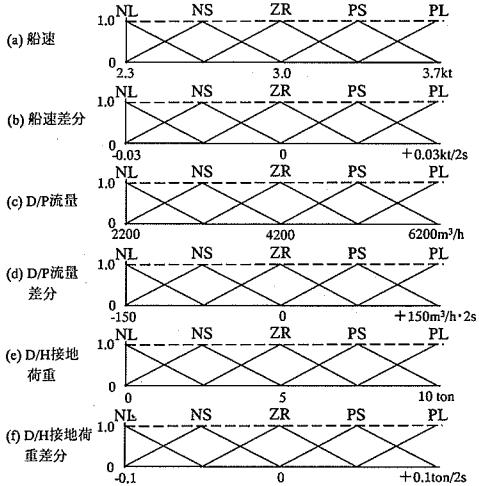


図-7 入力メンバーシップ関数の例

- | | |
|------------|--------------------|
| NS : やや小 | Negative Small |
| Z R : ふつう | approximately ZeRo |
| P S : やや大 | Positive Small |
| P L : とても大 | Positive Large |

図-7に入力項目に関するメンバーシップ関数（各入力項目の入力値の各ラベルに対する所属度）の形状例を示す⁸⁾。各々のメンバーシップ関数の幅は実船調査結果等をもとに設定し、数回現地で浚渫を行い値を調整した。

図-6における推進翼角制御ファジィルールは、前項①のように船速一定制御が目標であるので、船速及び船速差分（時間変化）入力に対する推進翼角差分出力制御とし、船速を目標値に近づけるようなファジィルールを作成した。さらに、船速入力だけでは応答が遅くなるので、応答の速いドラグヘッド接地荷重のルールを付加し制御を速くした。

浚渫ポンプ回転数制御ファジィルールは流量一定制御が目標であるので、浚渫ポンプ流量及び浚渫ポンプ流量差分入力に対する浚渫ポンプ回転数差分出力制御とし、流量を目標値に近づけるようなファジィルールを作成した。さらにドラグヘッド接地荷重のルールを付加し制御を速くした。

出力合成における「重み」とは、ファジィ推論出力の合成を行う際に各ルールの重要度に応じて適合度に0~1.0の重みをかけるものである。推進翼角、浚渫ポンプ回転数とともに、それぞれ船速、浚渫ポンプ流量一定を目標としているので、これらの入力をメインと考え重みを1.0とした。ドラグヘッド接地荷重は上記のように付加的なものなので1.0より小さくし、実船調査結果よりこれらの船速、浚渫ポンプ流量への影響度を考慮して値を設定し、その後現地での値の調整を通じ最

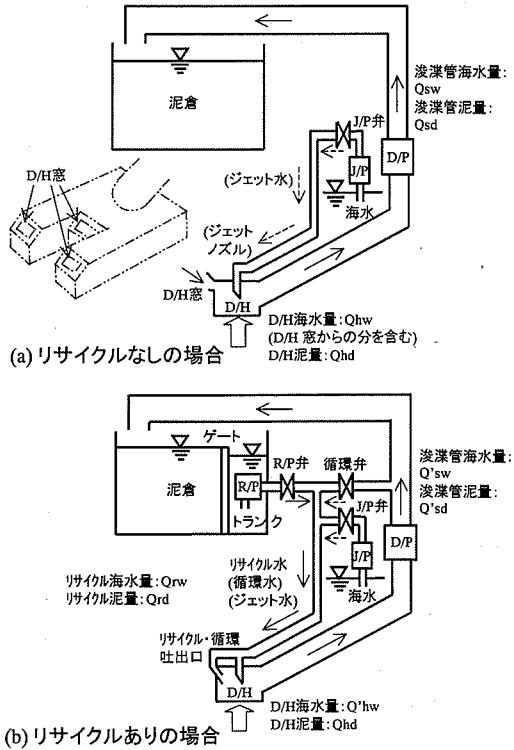


図-8 泥水リサイクル運転概念図

終的にそれぞれ0.25, 0.5とした。

前述したように流体浚渫における流れは複雑であるが、被制御項目と操作項目、入力と出力の関係等を整理すると、流れの状況を左右する操作項目は3~4項目程度となった（浚渫基本要素に関するもの）。実船の浚渫特性・機器操作上のノウハウを分析し、その結果をもとにこれらの操作項目に関するファジィ制御ルールを検討することにより、浚渫ポンプ回転数と推進翼角を中心とした比較的簡略化され制御の容易なシステムを構築することができた。

(3) 泥水リサイクル等に関するファジィ制御

a) 泥水リサイクル運転の概要

泥水リサイクルシステムは前述のように泥倉内の上部水（含泥率が低い）をドラグヘッドに還流させ積載土量の増大を図るものである。この泥水リサイクルシステムは以前にも他のドラグサクション浚渫船で使用した例⁹⁾があったが、今回積載土量向上策の一環として本船に装備し、ファジィ制御を行って土量向上効果を検討した。泥水リサイクル運転の概念図を図-8に、ドラグヘッドを図-9に示す。以下に泥水リサイクル運転について簡単に説明す

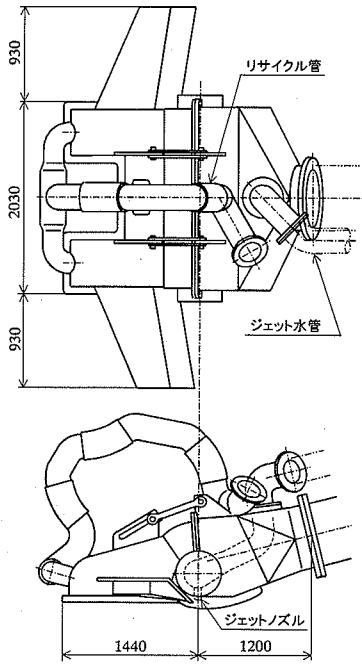


図-9 ドラグヘッド

る。

a) 泥水リサイクルなしの場合（従来浚渫）

ドラグヘッドには図-8(a)に示すように3箇所ほど小さな窓がある。浚渫時には通常これらの窓を2~3箇所開けて海水を取り入れ、ドラグヘッド底から吸引した土砂の搬送水及び浚渫ポンプ閉塞防止のための取水等として利用している。

b) 泥水リサイクルありの場合

リサイクルポンプはリサイクルトランク内に流入した泥倉の上部水をリサイクルラインを通してドラグヘッドに送水する。これにより、上記の小窓から取り入れる海水の代わりに泥倉内の上部水を土砂の搬送水として再利用することができ、積載土量を向上させることができる。

c) ファジイ制御ルール

本船ではこの他に浚渫開始時等の薄泥水をドラグヘッドに還流させる薄泥水循環制御も行っている。これら薄泥水循環、泥水リサイクルの切替及び運転をファジイ制御を用いて行った^{6),7)}。

基本的な考え方としては、積載土量向上効果の大きい泥水リサイクル運転を中心とし、薄泥水を吸入した場合は循環運転を行うものとした。切替及び運転条件を表-1に示す。

表-1において、たとえば薄泥水循環運転については、各浚渫データが第1レベルの判定の列の上欄（浚渫ポンプ流量：大、吸入負圧：小等）に該当し

表-1 薄泥水循環、泥水リサイクルの切替及び運転条件

運転状態	切替及び運転条件	
	第1レベルの判定	第2レベルの判定
薄泥水循環	D/P流量：大 吸入負圧：小 D/H荷重：小	なし
泥水リサイクル運転	上欄以外	下欄以外
泥水リサイクル停止		リサイクルトランク内含泥率： 大 D/H荷重：大

表-2 清龍丸主要目

項目	要目
全長	96.7m
幅	16.0m
深さ	7.2m
満載吃水	5.6m
総トン数	3532GT
載荷重量	3202t
泥倉	1700m ³
最大浚渫深度	22m
試運転時最大速力	13.3kt
浚渫時速力	3~4kt
主機関	3000ps×400rpm×2台
浚渫ポンプ	4100m ³ /h×17m×450kW×2台

た場合、ラインを循環ラインに切替えて薄泥水循環運転を行う。これは薄泥水であることを判定する基準である。また第1レベルの判定が上欄に該当しない場合は泥水リサイクル運転を行うが、第2レベルの判定の列の最下欄（リサイクルトランク内含泥率：大等）に該当した時だけ泥水リサイクルポンプを停止する。これはリサイクルトランク内含泥率が高い場合（現在までの実績より約15%以上）は、リサイクルしても積載土量向上効果が期待できないので、リサイクルポンプを停止させるものである。

なおこれらの切替及び運転のファジイ制御ルールは、表-1に示すように、薄泥水循環については3入力（浚渫ポンプ流量、吸入負圧、ドラグヘッド接地荷重）1出力（薄泥水循環ライン切替）、泥水リサイクルについては、2入力（リサイクルトランク内含泥率、ドラグヘッド接地荷重）1出力（泥水リサイクル運転）となる。これらの制御ルールについても図-6に示したものと同様なマトリックス表を作成し、合成した出力により制御している。

4. 実船実験方法

(1)概要

浚渫ポンプ、推進翼角等の浚渫の基本となる機器

表-3 実船実験時の浚渫条件

実験名	F1浚渫	F2浚渫	F3浚渫	R浚渫
浚渫区域 (名古屋港)	第一航路 (北)	第一航路 (南)	第二航路	西4区泊地
浚渫深度	-14.0m	-14.0m	-12.0m	-14.0m
土 質	シルト質軟泥	粘質土	シルト質軟泥	シルト質軟泥(一部粘質土)
泥水リサイクル装置	未装備	未装備	装 備	装 備
泥水リサイクル運転	・なし	・なし	・あり	・あり ・なし
浚渫モード	・通常 ・ファジィ	・通常 ・ファジィ	・通常 ・ファジィ	・通常
実験の主目的	ファジィ制御の効果を検証	ファジィ制御の効果を検証	ファジィ制御の効果を検証	リサイクル・循環の効果を検証

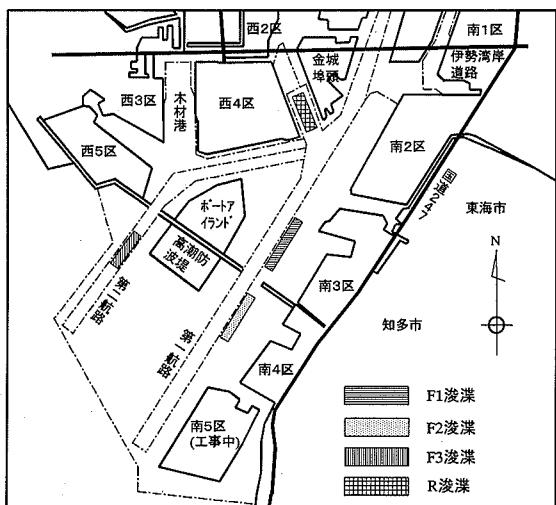


図-10 浚渫区域（名古屋港）

のファジィ制御について、積載土量向上効果及び各制御の特性を把握するため、また積載土量向上方策の一環としての泥水リサイクルシステム及び薄泥水循環システムの効果を把握するため実船実験を行った。

(2)供試浚渫船

供試浚渫船「清龍丸」の主要目を表-2に示す。

(3)浚渫条件

実験時の浚渫条件を表-3に、浚渫区域を図-10に示す。表中、実験名の”F”はファジィ浚渫の、”R”は泥水リサイクル運転の意である。実船実験においては通常浚渫（乗組員の手動ならびに一定値制御）とファジィ浚渫を交互に繰り返しデータを収録し

表-4 ファジィ浚渫、通常浚渫の運転条件

浚渫モード	ファジィ浚渫	通常浚渫
船速目標	3.3kt(F1浚渫) 3.0kt(F2,F3浚渫) 2.0~3.0kt(R浚渫)	
D/P運転目標	D/P流量:3750m ³ /h (F1,F2浚渫) D/P流量:4200m ³ /h (F3浚渫)	D/P回転数:200rpm
S/C圧力	1.177MPa(12kgf/cm ²)(F1,F2浚渫) 1.079 MPa(11kgf/cm ²)(F3浚渫) 1.079~1.177 MPa(11~12kgf/cm ²)(R浚渫)	
推進翼角制御	船速目標へファジィ制御	乗組員の手動制御
D/P回転数制御	D/P流量目標へファジィ制御	自動制御(浚渫中D/P回転数一定)
J/P運転／停止制御	ファジィ制御により運転／停止(F1, F3, R浚渫)，浚渫中常時運転(F2浚渫)	自動制御(浚渫中常時停止:F1,F3, R浚渫，浚渫中常時運転:F2浚渫)

た。収録されたデータからファジィ浚渫と通常浚渫の比較を行い、積載土量向上効果及び各制御の特性を解析した(F1, F2, F3浚渫)。また泥水リサイクルシステム及び薄泥水循環システムについては、通常浚渫においてこれらのシステムを使った場合と使わない場合の比較を行い効果を解析した(R浚渫)。

表-4にファジィ浚渫、通常浚渫の運転条件一覧を示す。表中F3浚渫はF1,F2,R浚渫より後の時期に行なったものであり、F1,F2,R浚渫における経験をもとに各目標値を若干修正してある。J/P運転／停止制御における通常浚渫では、F2浚渫でジェットポンプを浚渫中常時運転、F1,F3,R浚渫で常時停止としているが、これはこの浚渫区域を従来自動で浚渫する場合、土質の違いによりジェットポンプをそれぞれ常時運転、常時停止としているためこれに従つたものである。

なお、表-3に示すように、F1~F3浚渫では泥水リサイクルを併用している場合があるので、以下においては、まず泥水リサイクルによる積載土量向上効果について述べ、次に浚渫基本要素のファジィ制御による積載土量向上効果について述べる。

5. 実船実験結果

(1)泥水リサイクルによる積載土量向上効果

a)泥水リサイクルによる積載土量向上効果の計算

実験結果の解析に当たっては、泥水リサイクルの

表-5 泥水リサイクル運転の積載土量向上効果
(計算値)

項目	リサイクルなし	リサイクルあり	向上効果
浚渫時間(分)	7.93	10.14	27.9%
積載土量(m ³)	241.2	315.3	30.7%

表-6 泥水リサイクル及び薄泥水循環の積載土量
向上効果(実験値及び計算値)

浚渫種別	リサイクルなし		リサイクルあり		向上効果	
	浚渫回数 (回)	積載土量 (m ³)	浚渫回数 (回)	積載土量 (m ³)	実験値 (%)	計算値 (%)
通常浚渫	53	237.6	66	325.3	36.9	31.3

向上効果計算値31.3%は泥水リサイクル分30.7%に薄泥水循環分0.6%を加えた値

積載土量向上効果について計算により求めたものと、実験データとを比較した。

まず図-8(b)に示すようなリサイクル運転を行った場合の積載土量を計算した。リサイクル運転は、基本的に従来ドラグヘッドの小窓から取り入れていた周囲の海水をリサイクル水で置き換えたものと考えられる。これをもとに計算に際しては以下の仮定と計算式を用いた¹⁰⁾ (記号の意味は図-8参照)。

- ・リサイクルあり／なしでドラグヘッド底面から吸引する泥の流量は変わらない。

$$Q_{hd} = \text{一定} = 1004 \text{ m}^3/\text{h} \quad (2)$$

- ・ドラグヘッド海水量は、リサイクルありの場合はなしの場合に比べてリサイクル流量分だけ減少する(すなわちドラグヘッド内を流れる海水の一部がリサイクル水に置き換わる)。

$$Q'_{hw} = Q_{hw} - (Q_{rw} + Q_{rd}) \quad (3)$$

- ・しかし、リサイクルあり／なしで浚渫管流量(浚渫ポンプ流量)は変わらない。

$$Q_{sw} + Q_{sd} = 3802 \text{ m}^3/\text{h} \quad (4)$$

$$Q'_{sw} + Q'_{sd} = 3802 \text{ m}^3/\text{h} \quad (5)$$

リサイクルなしの場合の各箇所における海水量、泥量は、実船調査時の実測データを使用した。解析の結果をまとめると表-5のようになる。表中の積載土量向上効果は以下の式で定義される。

$$\alpha = (W_r - W_0) / W_0 \times 100 \quad (6)$$

W_r: 積載土量(m³) (泥水リサイクルあり)

W₀: 積載土量(m³) (泥水リサイクルなし)

α: 積載土量向上効果 (%)

泥水リサイクルは前述のように泥倉内の上部水(含泥率が低い)をドラグヘッドに還流させるものである。上部水をドラグヘッドに還流させることにより、浚渫時間(泥倉が一杯になるまでの時間)を

表-7 積載土量向上効果に関する計算値と
実験値の比較

データ名	計算値	実験値
積載土量向上効率(%)	31.3	36.9
D/P流量 (m ³ /h)	リサイクルなし	3802
	リサイクルあり	3802
吸泥含泥率 (%)	リサイクルなし	26.4
	リサイクルあり	26.4
リサイクル流量(m ³ /h)	900	919

増加させることができる(この場合含泥率は一定)。それにほぼ比例して一回の浚渫サイクル(泥倉が一杯になるまで浚渫を行い、その後土捨場まで航行し捨土して、再び浚渫区域までもどってくる)当たりの積載土量を増加させることができる。このように一回の浚渫サイクル当たりの積載土量を増大させることができが本開発の目的である。表-5によると、リサイクルを行うことにより浚渫時間が27.9%伸び、それに伴い泥倉内に排出される土量が30.7%増加したことがわかる。

なお、リサイクルを行うと浚渫時間が伸び、一回の浚渫サイクルにかかる時間も増加するが、浚渫サイクルの時間増加は、積載土量の向上率に比べるとわずかである。

b) 計算値と実験値との土量向上効果の比較

実船実験(R浚渫)における積載土量は、泥倉内に設置された水位センサにより泥倉内の泥水の体積を求め、船体の前後に設置された喫水計のデータから泥水の重量を求め、これらのデータと海底における泥の単位体積重量等を用いて算出した。

泥水リサイクル及び薄泥水循環の積載土量向上効果をまとめた結果を計算値とともに表-6に示す。実船実験における泥水リサイクル及び薄泥水循環の土量向上効果が36.9%となり、向上効果計算値31.3%に比べ若干大きくなっている。

次に、上で検討した向上効果の計算値と実験値を各項目ごとに比較してみる。比較結果を表-7に示す。リサイクル流量は計算値の900m³/h(経験より浚渫ポンプ流量の約20%に設定)に対し実験値は919m³/hとほぼ計画通りであった。実験値におけるリサイクルあり／なしによる浚渫ポンプ流量、吸泥含泥率の値の違いは、2~4%と少ないものであった。すなわち、計算において最も重要な前提条件として、リサイクルあり／なしで浚渫ポンプ流量、吸泥含泥率は変わらないとした仮定は、妥当であったと言える。このことから、実船実験におけるリサイクル運転の積載土量の向上は、大部分が計算において仮定したメカニズムによるものであると考えられる。

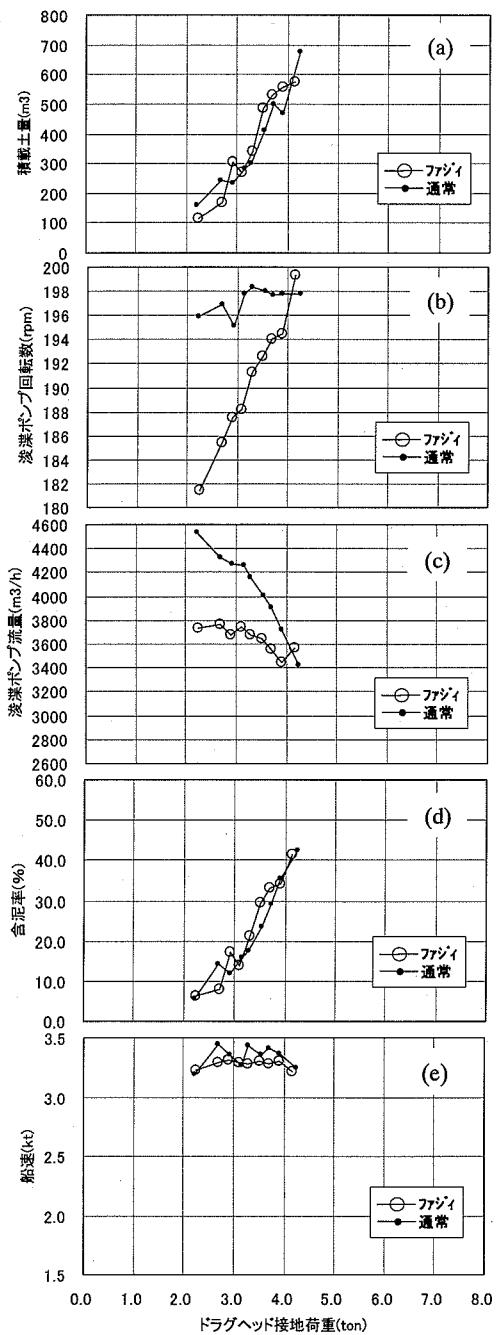


図-11 実船実験結果 (F1浚渫：シルト質軟泥、リサイクルなし)

(2) 浚渫基本要素のファジィ制御による積載土量向上効果

a) ドラグヘッド接地荷重区分ごとの実験結果

F1～F3浚渫における通常浚渫（乗組員の手動ならびに一定制御）とファジィ浚渫の比較は、ドラグヘッド接地荷重と各浚渫データの相関をもとに行った。デ

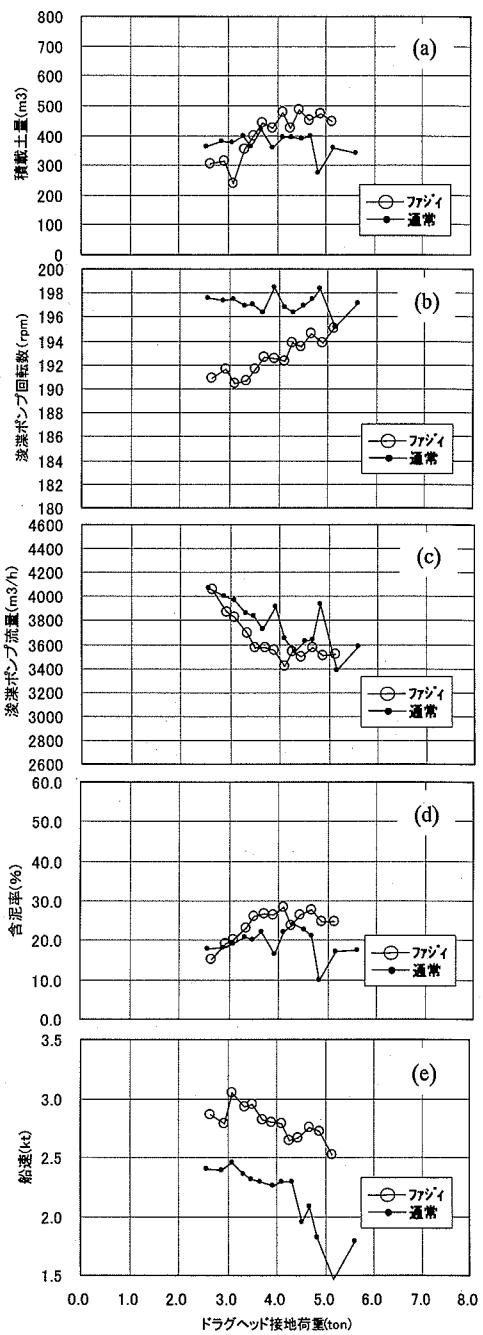


図-12 実船実験結果 (F2浚渫：粘質土、リサイクルなし)

ータの処理方法は、まず各浚渫運転中の各浚渫データごとに時間平均値を求めた。次に、ドラグヘッド接地荷重を0.2tonごとに区分し、同一区分内の各浚渫データ時間平均値の平均を取った。この結果を各項目ごとにプロットした図を図-11～図-13に示す。

まずF1浚渫における通常浚渫とファジィ浚渫の

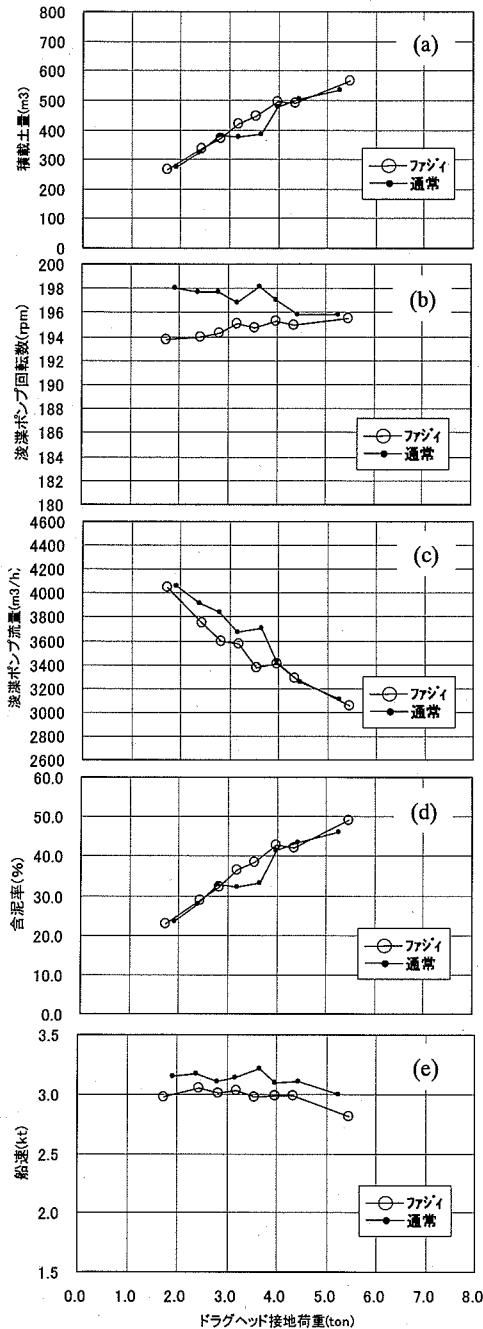


図-13 実船実験結果 (F3浚渫：シルト質軟泥、リサイクルあり)

比較を行う。図-11(a)から、積載土量は概ねファジイ浚渫が通常浚渫を上回っており、ファジイ制御による積載土量向上効果が表わされている。図-11(b)から、通常浚渫では一定値制御であった浚渫ポンプ回転数が、ファジイ浚渫では、通常浚渫より16rpm程度低い範囲 (F1浚渫は初期の浚渫であり、制御特

性を見るため浚渫ポンプ回転数の制御範囲を広くとった)までの可変制御であったことがわかる。図-11(c)を見ると、ファジイ浚渫はほぼ流量一定となり、ドラグヘッド接地荷重の高い領域を除くほとんどの範囲で通常浚渫より流量が低くなっている。すなわち浚渫ポンプ回転数可変制御の結果余分な水を吸わないようにし、これにより図-11(d)のように含泥率が高くなり (ただしドラグヘッド接地荷重の低い領域を除く)、その結果図-11(a)に示すように積載土量を向上させたものと考えられる。

船速については、図-11(e)に示すように、ファジイ浚渫は通常浚渫 (船速に関しては乗組員の手動)に比べ目標値 (3.3kt) に近く、また安定して制御されている。

図-12、図-13にそれぞれF2,F3浚渫における通常浚渫とファジイ浚渫の比較を示す。F2浚渫、F3浚渫とともにF1浚渫とは浚渫条件 (土質、泥水リサイクルのあり/なし等) が違い、各浚渫データの変化傾向も異なるが、上記の浚渫ポンプ回転数を可変にし、その結果積載土量を向上させたというメカニズムは以下に説明するように同じものと考えられる。

浚渫ポンプ回転数に関する図-12を図-11と比べると、通常浚渫ではF2浚渫はF1浚渫同様回転数は一定である。ファジイ浚渫については、F1浚渫は浚渫ポンプ回転数の制御範囲を広くとったため、回転数の変動範囲が広く傾きも大きい。しかしながらドラグヘッド接地荷重の低い領域では、浚渫ポンプ回転数をあまり下げる場合、含泥率が低下したため、F2浚渫では浚渫ポンプ回転数下限を上げた (F1: 180rpm, F2: 190rpm,)。これによりF2浚渫は浚渫ポンプ回転数の変動範囲が狭くなり傾きも緩やかになった。

浚渫ポンプ流量について見ると、通常浚渫ではF2浚渫はF1浚渫に比べ傾きは緩やかになった。この理由は土質の違い (F1浚渫はシルト質軟泥、F2浚渫は粘質土) によるものと考えられる。またファジイ浚渫については、F1浚渫は浚渫ポンプ回転数の範囲を広くとったため、流量ほぼ一定を実現しているが、F2浚渫は浚渫ポンプ回転数の範囲を狭くしたので、ドラグヘッド接地荷重の低い領域では流量が増加している。

一方船速については、F2浚渫は土質が粘質土であり粘性が高いため、船速を上げると吸入負圧が高くなり、閉塞防止の保護動作 (浚渫ポンプ回転数下げまたはドラグヘッド上げ) が頻繁に働いて船速を上げられなかつた。これは特に通常浚渫のドラグヘッド接地荷重の高い領域で顕著である。ファジイ浚渫では通常浚渫に比べ目標値 (3.0kt) に近く、安定して制御されている。

表-8 F1浚渫の積載土量

実験種別	通常浚渫		ファジィ浚渫	
	浚渫回数(回)	積載土量(m ³)	浚渫回数(回)	積載土量(m ³)
F1浚渫	58	401.8	63	407.6

表-9 F1浚渫のドラグヘッド接地荷重区分ごとの浚渫回数

D/H 接地荷重区分(ton)	~2.6	2.6-2.8	2.8-3.0	3.0-3.2	3.2-3.4	3.4-3.6
通常浚渫	2	3	3	4	10	16
ファジィ浚渫	1	4	10	6	10	12

D/H 接地荷重区分(ton)	3.6-3.8	3.8-4.0	4.0~
通常浚渫	8	6	6
ファジィ浚渫	9	8	3

このような浚渫ポンプ回転数と船速の制御の結果、含泥率はF1浚渫に比べると変化が少なく傾きは緩やかになっている。しかしファジィ浚渫は概ね通常浚渫を上回っており、その結果積載土量も概ねファジィ浚渫が通常浚渫を上回っている。

次に図-13と図-11の比較を行う。浚渫ポンプ回転数に関しては、通常浚渫ではF3浚渫はF1, F2浚渫同様回転数一定となっている。ファジィ浚渫については、浚渫ポンプ回転数下限をF2浚渫よりさらに上げた(F1: 180rpm, F3: 192rpm)ため、回転数の変動範囲がさらに狭くなり傾きも緩やかとなった。

浚渫ポンプ流量に関しては、F3浚渫は土質がシルト質軟泥であり、通常浚渫は浚渫ポンプ回転数一定なので、傾きは大きくなっている。ファジィ浚渫については、浚渫ポンプ回転数の範囲を狭くしたので、通常浚渫との差は小さくなっているが、通常浚渫より低い値となっている。

船速については、F3浚渫は上記のように土質がシルト質軟泥であり、ファジィ浚渫では通常浚渫と比べ目標値(3.0kt)に近く、安定して制御されている。

以上のような浚渫ポンプ回転数と船速の制御の結果、含泥率は図-13(d)に示すようになった。ファジィ浚渫は概ね通常浚渫を上回っているものの、ドラグヘッド接地荷重の高い領域と低い領域では同程度となっており、浚渫ポンプ回転数を可変にした割には通常浚渫との差があまり出でていない。この理由は、F3浚渫は泥水リサイクルを併用しており、泥水リサイクルでは強制的に一定流量のリサイクル水をドラグヘッドに注入しているが、これでは接地荷重の変化に応じてファジィ制御される適切な量の搬送水(従来ドラグヘッドの小窓から取り入れていた周囲の海水に対応する)とならないためと考えられる。このため後述する新船では、浚渫ポンプ回転数制御と連動させてリサイクルポンプ回転数を制御し、リサイクル流量も可変な構造とした。

表-10 ファジィ浚渫の通常浚渫に対する

積載土量向上効果(F1,F2,F3浚渫)

実験種別	通常浚渫		ファジィ浚渫		ファジィ/通常増加率(%)
	浚渫回数(回)	積載土量(m ³)	浚渫回数(回)	積載土量(m ³)	
F1浚渫	58	401.8	63	440.6	9.70
F2浚渫	92	381.1	98	408.2	7.10
F3浚渫	85	388.3	83	405.8	4.51

リサイクル水、すなわち土砂搬送用の水は、接地荷重が低く含泥率が低い場合は少なくて良い)。積載土量についても含泥率とほぼ同様な傾向である。

b) 積載土量向上効果

図-11～図-13における積載土量のデータからファジィ浚渫による積載土量向上効果を検討した。しかしながら、これらの浚渫データは、通常浚渫とファジィ浚渫でドラグヘッド接地荷重の範囲が異なっていたので補正を行った。

一例としてF1浚渫における積載土量のデータを表-8に示す。また表-9にドラグヘッド接地荷重区分ごとの浚渫回数を示す。ファジィ浚渫では2.8ton～4.0tonの範囲で平均的に浚渫を行っているのに対し、通常浚渫では3.5ton付近での浚渫の頻度が大きくなっている。図-11(a)に示すように、ドラグヘッド接地荷重と積載土量には比例関係が見られ、平均を取るとドラグヘッド接地荷重1.0ton当たり約300m³積載土量が増加している。したがって積載土量向上効果を検討するには、ドラグヘッド接地荷重を同じ条件にして比較する必要がある。

ドラグヘッド接地荷重の平均を表-9から求め、上記のドラグヘッド接地荷重と積載土量の比例関係を用いて、F1浚渫の積載土量を補正した結果を表-10に示す。表には同様にして求めたF2, F3浚渫の補正結果も併せて示す。

F1,F2浚渫は泥水リサイクルなしであり、積載土量向上効果はそれぞれ約9.7%, 7.1%と比較的高くなっている。これに対しF3浚渫は泥水リサイクルを併用しており、積載土量向上効果は約4.5%と比較的低くなっている。この理由は、前述のように泥水リサイクルでは強制的に一定流量のリサイクル水をドラグヘッドに注入しているが、これでは接地荷重の変化に応じてファジィ制御される適切な量の搬送水(従来ドラグヘッドの小窓から取り入れていた周囲の海水に対応する)とならないためと考えられる。このため後述する新船では、浚渫ポンプ回転数制御と連動させてリサイクルポンプ回転数を制御し、リサイクル流量も可変な構造とした。

また、今回のファジィ制御ルールは、軟泥の実船

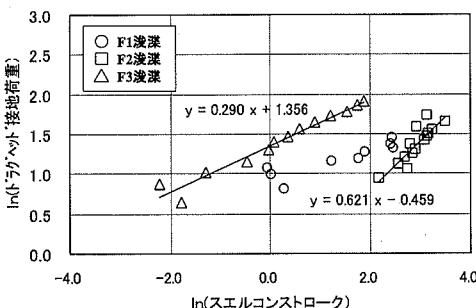


図-14 スエルコンストロークとドラグヘッド
接地荷重

調査の結果をもとに作成したが、F2浚渫における粘質土のような海底土質の場合も、高い積載土量向上効果が得られた。

c) 底泥の粘性（硬さ）について

前述のように浚渫の状況、特に含泥率の値は底泥の粘性（硬さ）に左右される。底泥の粘性は粒径分布だけでなく、海底における泥の含水比、しまり具合等にも関係してくるが、今回の現地実験における底泥の土質データは土質分類までで、粘性をあらわすデータは入手できなかった。そこで底泥の粘性をスエルコンストロークから推定した。

海底地盤の支持力が見かけのドラグヘッド重量（ドラグヘッド自重からスエルコン支持力を引いた値）を越えると、スエルコンの油圧シリンダーのピストンが動き始める。このピストンの動きをスエルコンストロークと呼んでおり、ドラグヘッドの上下動に連動している。スエルコンストロークのデータとドラグヘッド接地荷重のデータの対数をとってプロットしたものを図-14に示す（通常浚渫）。

これらのデータのうちF1,F3浚渫は土質がシルト質軟泥であり比較的軟らかく、F2浚渫は土質が粘質土であり比較的粘性が高い（硬い）ものである。図からF1,F3浚渫は同じドラグヘッド接地荷重においてF2浚渫に比べスエルコンストロークが小さく（すなわち海底の凹凸に対しドラグヘッドの上下動が少ない）底泥が軟らかいことを示している。F1浚渫は初期の浚渫であり、浚渫ポンプ閉塞防止のプログラム（浚渫ポンプ流量低下時にドラグヘッド上げ）の調整を行ったため、スエルコンストロークのバラツキが多くなったと考えられるが、F2,F3浚渫のデータはそれぞれ傾きが異なる一直線上に並んでいる。これは土質調査の分野で言う平板載荷試験における $\log P$ - $\log S$ 曲線（沈下量Sと荷重Pを両対数グラフにプロット）と良く似たものとなる¹¹⁾。この関係を式で表すと以下のようになる。

表-11 ファジィ浚渫の通常浚渫に対する
積載土量向上効果（海翔丸、白山）

船名及び浚渫区域	通常浚渫		ファジィ浚渫		ファジィ/通常 増加率(%)
	浚渫回数 (回)	積載土量 (m ³)	浚渫回数 (回)	積載土量 (m ³)	
海翔丸：宇部港 (実浚渫工事)	10	828.0	10	868.0	4.8
白山：新潟西港 (竣工試運転)	11	342.5	16	402.0	17.4

$$\text{Log } P = n \log St + K_1 \quad (7)$$

$$P = K_2 \cdot St^n \quad (8)$$

P : ドラグヘッド接地荷重(ton)

St : スエルコンストローク(cm)

K₁, K₂ : 定数

n : 指数

図-14から指數nを各直線の傾きとして求めると、F3浚渫（軟らかい）が0.29、F2浚渫（粘性が高い）が0.62となり、この指數は土質の粘性（硬さ）の違いを表すものと解釈される。

(3) 新船の浚渫データ

2000年9月に運輸省第四港湾建設局（現国土交通省九州地方整備局）のドラグサクション浚渫船の代替船「海翔丸」が、2002年8月に国土交通省北陸地方整備局のドラグサクション浚渫船の代替船「白山」がそれぞれ建造された。これらの新船には、本研究で開発された「ファジィ浚渫制御システム」が装備された。一例として竣工試運転時、実浚渫工事時等における浚渫データをもとに試算したファジィ浚渫制御システムの効果を表-11に示す。表中「白山」の積載土量は、現在オーバーフロー運転（泥倉内の上部水を船外に排出する）を行っているので、オーバーフロー後の積載土量で示してある。また両船とも泥水リサイクルを使用している。

乗組員の手動ならびに一定値制御を主体とした通常浚渫に対しファジィ浚渫の場合の積載土量向上効果は、データ数が少ないためバラツキが多いが、平均値としてそれぞれ4.8%及び17.4%となっている。

6. 結論

本研究では、ドラグサクション浚渫船を対象として、ファジィ推論を用い、浚渫状況の変化に対応して浚渫オペレーションを最適化し、浚渫土量の増大を図るシステムを開発した。またさらに浚渫土量を

向上させるため、環境に優しい泥水リサイクルシステムを設置し、実船実験を行った。これらをとりまとめると以下のようなになる。

- (1) 浚渫基本要素（浚渫ポンプ、推進翼角、ジェットポンプ）を対象としてファジイ浚渫制御システムを開発し、実船実験によってその能力を検証した。その結果、従来の自動浚渫に対し積載土量を4.5%～9.7%向上させることができた。
- (2) 泥水リサイクルシステムでは、関連する泥水リサイクル及び薄泥水循環システムの判定と切換をファジイ制御で行い、泥水リサイクルありの運転はなしの運転に対し、積載土量を36.9%と大きく向上させることができた。
- (3) 実船実験は軟泥と粘質土という異なった海底土質について行われたが、これらに対しそれぞれ9.7%，7.1%の積載土量向上（泥水リサイクルなしの場合）という結果が得られた。本ファジイ浚渫制御システムは、今回の現地底泥の範囲では、土質の差異に対しても有効に機能することが確認された。
- (4) 最近建造された新船「海翔丸」、「白山」に本ファジイ浚渫制御システムが装備された。一例として竣工試運転時等においてそれぞれ4.8%，17.4%の積載土量向上効果が得られた。

7. あとがき

従来の一定値制御の自動浚渫に比較して、本研究では浚渫状況の変化に対応して浚渫オペレーションを最適化する浚渫制御システムを開発した。泥水リサイクル等を含む浚渫システム全体をファジイ制御することにより、自動浚渫作業のより一層の効率化が図れ、積載土量向上という第一の目標も達成された。

最近建造された新船にも本研究の成果が最新の電子技術とともに取り入れられ、試運転の結果、積載土量向上効果等が確認された。これによりファジイ浚渫制御システムの基本部分の構築は達成されたと考えられる。しかしながら、ここで設定した浚渫ポンプ流量目標値等は、ある一定の浚渫海域における調査結果等をもとにしたものであり、現地における浚渫海域ごとのこれら目標値等の最適化はこ

れからである。今後実浚渫工事のデータを収集・蓄積し、それらをもとに海域・土質等の条件に応じて目標値等を変化させることにより、さらなる効率の向上が期待できる。

謝辞：最後に新船の浚渫データを御提供いただいた国土交通省九州地方整備局閑門航路整備事務所の関係各位、及び国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所の関係各位に厚く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 栗田岩男、岡山義邦、友井武人、中村 謙：ドラグサクション浚渫船の浚渫自動化、作業船, No.203, pp.40, 1992.
- 2) 安信誠二、宮本捷二、井原廣一：予見 Fuzzy 制御方式による列車自動運転、システムと制御, Vol.28, No.10, pp.605-613, 1984.
- 3) 柳下 修、伊藤 修、菅野道夫：ファジイ理論の浄水場薬品注入制御への応用、システムと制御, Vol.28, No.10, pp.597-604, 1984.
- 4) 桑原 洋、原田光男、背野康英、竹内幹雄：ファジイ理論のシールド掘削制御への適用、土木学会論文集, 第 391 号/VI-8, pp.169-178, 1988.
- 5) 岡山義邦、浜田賢二、村上幸敏：前面開口型ドラグヘッドによる軟泥浚渫現地実験、港湾技研資料, No.422, pp.14, 1982 年 6 月
- 6) 菅野道夫：ファジイ制御、日刊工業新聞社, pp.67-113, 1988.
- 7) 寺野寿郎、浅居喜代治、菅野道夫編：応用ファジイシステム入門、オーム社, pp.36-45, 1989.
- 8) 寺野寿郎、浅居喜代治、菅野道夫編：ファジイシステム入門、オーム社, pp.17-21, 1987.
- 9) 運輸省第四港湾建設局：ドラグサクション高濃度浚渫現地実験報告書、1990 年 3 月
- 10) 加藤英夫、谷本裕史、原田貴久：ファジイ制御および泥水リサイクルによるドラグサクション浚渫船の高効率化、港湾技術研究所報告、第 38 卷第 3 号, pp.224-227, 1999 年 9 月
- 11) 土質調査法改訂編集委員会：地盤調査法、地盤工学会, pp.349-350, 1995.

(2003.7.22 受付)

**DEVELOPMENT OF AUTOMATIC OPERATION SYSTEM WITH FUZZY CONTROL
APPLIED TO TRAILING SUCTION HOPPER DREDGER**

Hideo KATO, Yoshikuni OKAYAMA, Kenji HAMADA, Atsushi FUJII,
Yoshiaki SHINTANI and Koji NAKAGAWA

The existing automation system of dredging operation for trailing suction hopper dredger gives only sequential control or constant control and as a result the volume of dredged soil is not as much as what is achieved by manual operation. Therefore, the study on the more advanced automatic dredging system using fuzzy control has been carried out to improve dredging production. This paper describes the application of fuzzy control to the basic elements of dredging operation -- ship's speed, revolution of dredging pump etc. -- and installation of light soil-water mixture recycling system and its fuzzy control and the result of experimental dredging trial.