

Title	小型内航船の出入港操船計画の自動化に関する研究
Author(s)	遠藤, 真
Citation	大阪大学, 2003, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/1330">https://hdl.handle.net/11094/1330</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

# 小型内航船の出入港操船計画の 自動化に関する研究

平成14年11月

遠藤 真

小型内航船の出入港操船計画の  
自動化に関する研究

平成 14 年 11 月

遠 藤 真

## 目 次

1 序論 .....	1
2 ルート計画法 .....	7
2.1 小型内航船舶におけるルート計画の実態 .....	7
2.2 ルート計画の指針 .....	8
2.3 合理的なルート計画法 .....	9
2.4 まとめ .....	13
3 出入港操船における操縦実態調査 .....	14
3.1 出入港操船計画におけるセーフティ・ファースト .....	14
3.2 熟練操船者による出入港操船 .....	16
3.2.1 減速操船内容の調査と解析 .....	16
3.2.2 変針操船内容の調査と解析 .....	18
3.2.3 逆転停止操船の内容 .....	20
3.3 まとめ .....	21
4 出入港操船における標準操縦計画法 .....	23
4.1 標準的な変針操船の操縦計画法の開発 .....	23
4.2 標準的な減速操船の操縦計画法の開発 .....	24
4.3 標準的な逆転停止操船の操縦計画法の開発 .....	25
4.4 まとめ .....	26
5 操船計画自動化システムの構築 .....	28
5.1 対象船舶の主要目と操縦特性 .....	28
5.2 始点条件と終点条件 .....	28
5.3 ルート計画 .....	29
5.3.1 海域の拘束データベース .....	29
5.3.2 可航水深水域における最短経路探索 .....	30
5.3.3 No-Go Area 拘束下の最短経路探索 .....	30
5.3.4 経路に沿った可航水域系の探索 .....	30
5.3.5 要素航路系への展開とコース選定 .....	30
5.4 操縦計画 .....	31
5.4.1 変針点の速度の設定 .....	31
5.4.2 変針操船の操縦計画 .....	31

5.4.3	変針と変速の操作の重なり除去.....	31
5.4.4	変速操船の操縦計画 .....	32
5.5	操船計画の出力例 .....	32
6	操船支援システムの構築.....	33
6.1	操船支援システムの機能.....	33
6.1.1	操船計画の事前検証・表示機能.....	33
6.1.2	実時間対応支援機能 .....	33
6.2	操船支援システムの表示例.....	33
7	操船計画自動化システムと操船支援システムの評価.....	35
7.1	操船計画自動化システムの評価.....	35
7.1.1	ルート計画の比較検証と評価.....	35
7.1.2	操縦計画の比較検証と評価.....	37
7.2	操船支援システムの評価.....	38
7.2.1	経験の浅い操船者における操船支援システムの有用性 .....	38
7.2.2	熟練操船者による操船支援システムの評価.....	39
7.2.3	操船支援システム提示の操船計画の風外乱下における適用範囲.....	41
7.3	まとめ.....	41
8	結論.....	43
	参考文献.....	45
	本研究に関連する発表論文.....	47
	謝辞.....	48
	LIST OF TABLES .....	49
	LIST OF FIGURES .....	49
	図表.....	50
	LIST OF APPENDICES.....	93
	付録.....	94

## 1 序 論

船舶の出入港は船舶運航において最も困難な操船局面のひとつであり、安全な出入港操船の計画と実行は熟練した船長あるいは水先人の卓越した知識と経験により実現されている。ほとんどすべての大型外航船の出入港は、各港に所属する水先案内人によってのみ実施されている。水先案内人は長い年月の知識と経験の蓄積により、対象船舶の操船特性を推定し、船首目標、正横目標等の地形的特性を把握し、風、潮等の水域固有の特性も深く把握している<sup>1)2)3)</sup>。日本沿岸における海上輸送を担う船舶の半分を占める GT499 型等の内航小型船は多い時には日に 2、3 回の出入港を繰り返しており、その出入港操船の安全性は、長い年月にわたり船舶を運航する中で培った知識と経験を身に付けた熟練船長により確保されている。大型船、小型船を問わず、多くの知識と経験に基づいてのみ実現可能となるのが出入港操船であり、毎日繰り返されている船舶の出入港の安全性は、熟練操船者の技能によってのみ支えられているのが実情である。

近年は、日本船舶の競争力低下を起因として、内航及び外航海運において、日本人船員の需要、供給バランスが大きく崩れ、特に、内航海運においては、若年船員の極端な不足を生じている。長い海上経験に基づいて伝承されてきた海技を受け継ぐ担い手がいない状況となっている。このことは出入港操船技術を支えてきた熟練操船者の枯渇と長い海上経験を介して行われてきた従来型の技能育成ができないことを意味する。出入港操船の安全性が脅かされ始めている。

この大きな問題に対し幾つかの対応策が試みられた。離着棧の完全自動化を目指した高知能化船プロジェクト<sup>4)5)6)7)</sup>もそのひとつであり、航路計画と着棧操船における船体運動制御の自動化に関する多くの提案と技術開発がなされ、着棧操船における船体運動制御に最適制御<sup>8)9)</sup>を適用することも試みられている。また、船員不足が深刻な内航船運航への新たな技術的な対応策として、船橋における情報の収集、提示、通信と操作等の機能を集約した統合化船橋(Integrated Bridge System)<sup>10)11)</sup>、離着棧等における主機関、舵とスラスト等のアクチュエータ操作を集約したジョイスティック・コントローラ<sup>12)13)14)15)</sup>などが内航船近代化プロジェクトとして開発され、実用化されている。さらに、ここ数年においては海上交通管制(Vessel Traffic Information System)の適用、自動船舶識別装置(Automatic Identification System)の装備、ISM(International Safety Management)コードの適用なども、海上の安全確保のための施策として実施されている。しかし、内航船向けに開発された技術を含む新しい装備導入には船主の大きな経済的負担が必要であり、完全自動化を目指して開発された技術の多くが実務に供し得る完成度には至っていない。このような実情からみると、前述の施策及び対策の、現に運航されている船舶の出入港の安全性を高めること、並びに、熟練操船者の不足を補うことへの効果について、疑問が残る。

GT499 型内航船舶を例に挙げれば、統合化船橋とジョイスティック・コントローラを装備した船は数隻にとどまっており、VTS の利用と AIS の装備は、総トン数 500 トン未満の

内航船舶には法的に適用されていない。日本近海を航行している船舶の多数を占める総トン数 500 トン未満の船舶は、これらの新しい技術の恩恵を受けられず、従来手段と手法で運航されているのが実情である。

高知能化船プロジェクトは技術的な目標を一気に完全無人化に置いたものであり、その操船計画は操船者による操船を前提にしておらず、当然の如く、操船者が実施している操船計画及び操縦法と大きく異なり、操船者が運航している現在の船舶に導入することは、操船者の理解が得られず、不可能と考えられる。また、自動着岸制御手法及び着岸操船局面への最適制御の適用において、操船者が制御ループのどこに位置し、何を担うのかなどが不明確で、操船者の機能と最適制御機能との整合性がとられていない。さらに、最適制御の適用条件のひとつに、対象船舶に関する数十種類を越える微係数からなる詳細な船舶操縦性モデルの必要性がある。現在の運航船舶において、この詳細な操縦性能モデルを持たない船舶が大多数を占めることなどを考えると、適用上の大きな課題を抱えていると言える。

熟練操船者不足を補い、船舶の出入港等の安全性を担保するためには、船舶運航の実情に適合する新たな研究が必要であり、特に、GT499 型に代表される内航船舶の運航においては急務の課題と考える。

現実の船舶運航において、操船者は、自船の操縦性能を微係数としては捉えてはおらず、操船局面に対応した変針性能、減速性能等の操船性能<sup>16)</sup>として把握しており、操船計画においても、減速操船、変針操船及び逆転停止操船などの出入港等の操船局面ごとに把握している操船パターンに基づいて立案していると考えられる。熟練操船者の長い経験から抽出された操船パターンに基づいた操船計画は、熟練操船者が常に実施している操船計画であり、標準的な操船計画と捉えることが妥当である。不確実な要素を残す自船操縦性の知識と確定できない航行環境の元でも安全性を確保しながら実行できる、熟練操船者が長い経験の中で見出した、操船計画である。この標準的な操船計画を取得し、経験の少ない操船者に提供できれば、熟練操船者の支援、あるいは、大型船における水先案内支援を受けると同等の効果が期待できる。この標準的な操船計画の提供による操船支援は、熟練操船者の不足を補い、船舶の出入港操船局面等の安全性を担保するための、船舶運航の実情に適合した新たな方法であり、大きな意義があると考えられる。

以上より、本研究では、日本近海を航行する最大多数で一人当直となっている GT499 型内航船舶の、最も高い技能が要求される操船局面である出入港操船を対象とした、ルート計画法と操縦計画法からなる標準的操船計画法を確立し、標準的操船計画を自動生成するシステムとその標準的操船計画を運航状態にある操船者にリアルタイムに提供する操船支援システムを開発することを目指すものである。

本研究は、以下の項目に着目して検討を進める。

1. 合理的なルート計画法の考案
2. 熟練操船者による出入港操船の操縦実態の調査と操船パターンの抽出
3. 熟練操船者の操船パターンに基づく標準的操縦計画法の考案
4. 標準的操船計画を自動生成する出入港操船計画システムの開発
5. 運航状態にある操船者に標準的操船計画をリアルタイムで提供する操船支援システムの開発
6. 出入港操船計画自動化システムと操船支援システムの評価

第2章では、操船計画の自動化に向けての合理的なルート計画法を提案する。小型内航船舶のルート計画の実態について解析し、内航小型船舶におけるルート計画の問題点とルート計画提示の必要性について述べる。次に、大型船の操船計画の指針<sup>19)20)21)</sup>からルート計画に必要な要素項目を抽出し、これらの要素項目を満たす合理的なルート計画法について検討し、提案する。

第3章では、標準的な操縦計画の基盤となるセーフティ・ファーストの概念<sup>4)</sup>と出入港操船の標準的な操船パターンを抽出する。内航小型船舶の出入港操船の実態を解析し、セーフティ・ファーストの概念について検討し、続いて、熟練操船者のアンケート調査、操船計画立案と操船シミュレータ実験などから、標準的な操縦計画の元となる内航小型船舶の出入港操船に共通する操船パターンを、操作量も含め、具体的に明らかにする。

第4章では、出入港操船における標準操縦計画法を提案する。前章で得られた標準的な操船パターンを実現するための操縦計画法、即ち、対象船舶の操縦性能と船速応答モデルから、針路、速力制御からなる一連の操船内容を決定する方法について検討し、提案する。

第5章では、前章までに得られたルート計画法と操縦計画法に基づいて、操船計画を自動的に生成する操船計画自動化システムについて述べる。操船計画自動化システムを構成するデータベースの種類と内容、ルート計画と操縦計画の手順と処理の内容、出力結果について記述する。

第6章では、操船計画をリアルタイムで提示する操船支援システムについて述べる。操船計画自動化システムの出力である標準的操船計画を、現に運航状態にある操船者に、リアルタイムで提供する操船支援システムの支援内容と方法について記述する。

最後の第7章は、本研究で開発した操船計画自動化システム及び操船支援システムの評価を行う。操船計画自動化システムの生成する操船計画と熟練操船者の操船計画との比較を行い、妥当性を検証する。操船支援システムを導入した操船シミュレータ実験を行い、経験の浅い操船者と熟練操船者への支援効果、生成した操船計画の風圧下の適用限界についての検証内容について記述する。

本研究の特色は、



- ・ 現在の操船支援システム開発の主流が、高度な自動化技術を利用して、操船者の役割を極力少なくする形で進められているのに対し、操船者に標準的操船計画を提供する操船支援を行うことで、操船者の操船能力を向上させる現実的な操船支援システムを開発したこと

であり、また、意義としては、

- ・ 合理的なルート計画法と操縦計画法を考案し、それに基づき構築した操船計画自動化システムは、操船計画を自動化した初めてのシステムであり、操船計画法自体を初めて体系化したことを意味する。
- ・ 標準的操船計画法を考案したことは、船種と対象港湾の多さ、操船者の個人差の存在などから不可能とされてきた、出入港操船の標準化への道を開くものとなる。
- ・ 現状において最良と考えられる熟練操船者による操船パターンを解析して求めた標準的操縦計画は、操船支援を受ける操船者にとって、その理解と利用が容易なものとなり、新しい操船支援のあり方を提示した。
- ・ 操船計画自動化システムの生成する標準的な操船計画は、水先案内人による水先支援情報と等価の意味があり、陸上からの海上航行船舶の操船支援<sup>17)18)</sup>への新たな道を開くものとなる。

等をあげることができる。

## 本論文で利用している船舶運用上の語句

本論文では操船計画等の船舶運用者が一般的に使用する語句を利用した記述が多い。これらの語句は、語句自体が複数の意味を持って利用されることが多く、誤解を招く恐れがある。そこで、本論文で利用している語句及びその定義を下記する。

- **操船計画**

船舶が指定された船速、針路と位置から、別の指定された船速、針路と位置に到達するための通行すべき一連のルートとこれを実現するための一連の操船内容を総合的に計画することを操船計画と定義し、操船計画はルート計画と操縦計画の二つの計画から構成される。

- **ルート計画**

ルートとは、船舶がある地点から別のある地点に到達するまでに通行すべき一連の針路 (Course) と変針点 (Way point) を指し、そのルートを計画することをルート計画と定義する。

- **操縦計画**

ルート計画に沿った航行を実現するための針路、速力制御からなる一連の操船内容を計画することを操縦計画と定義する。

- **No-Go Area**

船舶のルート計画において、物理的に通行不可能な浅い水域などの、船舶が進入してはならない水域、即ち、ルートを計画してはならない水域を No-Go Area と定義する。また、この No-Go Area 以外の船舶が航行可能な水域は、本文中では可航水域と表記し、図中の英文表記では Safe Water とする。

- **操船パターン**

船舶運航では、変針点で針路を変更する変針操船、速力を徐々に減ずる減速操船、低速航行から最終的に停止させる逆転停止操船などが良く実行される操船であり、これらの操船を実現するための針路、速力制御からなる一連の操船内容が、船舶と操船者の別を越えて、共通の方式、手順で実行されることが多い。この共通の方式、手順に従って実行される一連の操船内容を、操船パターンと定義する。

- **エンジンテレグラフ操作位置**

船舶の速力制御における操作量はプロペラ回転数であるが、船舶運用者が速力制御

のためにプロペラ回転数を直接操作及び指示することは無く、小型内航船では、主機関の4/4出力(Full)、3/4出力(Half)、1/2出力(Slow)、1/4出力(Dead Slow)と0出力(Stop)の5段階の出力と、前進(Ahead)と後進(Astern)の2種類の進行方向を組合せた9種類のエンジンテレグラフ操作位置のみを用いて操作及び指示を行っている。船舶の船速とプロペラ回転数もエンジンテレグラフ操作位置に対応した船速とプロペラ回転数のみが存在する。したがって、本論において、船舶の船速とプロペラ回転数を“Slow Aheadの船速”、“Slow Ahead 対応船速”や“Slow Asternのプロペラ回転数”などと表記することがある。

- 入船着棧と出船着棧

船舶運用者は、船舶を棧橋あるいは岸壁に着棧する場合、港口から港の奥への進行方向に沿った方位で着棧することを入船着棧、大きく旋回して港口に戻るような方位で着棧することを出船着棧と呼んで区別している。本論において、入船着棧と出船着棧の表記がある。

## 2 ルート計画法

船舶運航における操船計画は、船舶が通るべきルートを作成するルート計画とその計画ルートに沿って航行するための針路、速力制御からなる一連の操船内容を作成する操縦計画とからなる。ルート計画は針路 (Course) と変針点 (Way point) の連なりとして定義され、操縦計画は計画ルートの針路の保針、次針路への変針、目標船速を実現する減速と加速等の操縦指令位置と操作量で定義されるものである。

本章では操船計画の自動化に向けての合理的なルート計画法<sup>22)23)24)25)26)</sup>について検討し、提案する。まず、小型内航船におけるルート計画の実態について整理し、内航船におけるルート計画の問題点とルート計画提示の必要性について述べる。次に、熟練操船者の知識と経験を集約化している大型船の操船計画の指針<sup>19)20)21)</sup>を参考にして、ルート計画における必要な要素を抽出し、最後に、考案した合理的なルート計画法について詳細に記述する。

### 2.1 小型内航船舶におけるルート計画の実態

ルート計画は、本来、航海ごとに設定指針に基づいて実施されるべきものであり、立案されたルート計画を含む操船計画は海図上に記載され、船長からの注意事項として船長オーダーブックにも記載され、船舶内のすべての操船者に周知徹底され、確実な共通理解を得ておくべきものである。しかし、著者の乗船調査ならびに聞き取り調査からは、GT499型内航船舶におけるルート計画の実態は、本来のあるべき姿のルート計画とは大きく異なり、ほとんどの船舶において、航海ごとの個別のルート計画を実施していない。内航小型船舶のルート計画において、その元となる設定指針が存在せず、熟練操船者の描くルート、航行するルートそのものが指針とされ、経験を積む以外にルート計画技術を身に付ける手段が存在しないのである。さらに、ほとんどの内航小型船舶において、ルート計画は周防灘、来島海峡等の主要な輻輳海域についてのみ計画されており、海図もしくはGPSプロッター等にルート表示され、船長以外の一般の操船者には目的港と目的バースのみが知らされている状況である。離棧出港から主要な輻輳海域まで、あるいはその逆の主要な輻輳海域から入港着棧までのルート計画は海図等に記載されることは無く、過去に対象海域における十分な操船経験を有する船長等の熟練操船者の経験として蓄積されているだけで、熟練操船者以外の者に周知されることは無い。ルートが示されていない離棧出港から主要な輻輳海域まで、また、主要な輻輳海域から入港着棧までの操船は、船長または熟練操船者のみが担当し、実行されているのが実情である。

序論にも記したが、熟練操船者の枯渇と若年船員の不足は進んでおり、内航船においては熟練操船者の経験と知識を伝承する相手が皆無に近い状況となっている。若年船員が急増することも、また、現在、平均年齢 55 歳程度の熟練船長が、これからの 20 年間、船長として海上勤務することも期待できない。モーダルシフト等の社会的ニーズから、内航海運の輸送効率の向上はさらに望まれているにもかかわらず、海上輸送の担い手である操船

者には何らの運航上、操船上の支援も無く、高い技能を有する熟練操船者が枯渇していくを待っている状況である。

このような状況を打開するひとつの対策として、熟練者が経験としてのみ蓄積していたルート計画を、熟練操船者に代わって、海上を航行する船舶の操船者に提供、提示することは、経験の少ない操船者に運航上及び操船上の有用な支援となり、その効果も期待される。そこで、熟練操船者が実施しているルート計画法を調査し、ルート計画法の再構築を目指した検討を進める。

## 2.2 ルート計画の指針

前述の通り、内航船舶のルート計画指針は存在しないが、大型船の操船計画指針<sup>19)20)21)</sup>は幾つか存在する。この操船計画指針を解析し、記載されているルート計画に関する項目を抽出する。

付録1は操船シミュレータ研究会が作成した操船計画指針<sup>19)</sup>である。定量的な記述が少なく、操船計画をする手順と行為が文語的表現で定義されているが、ルート計画の目的、及び、ルート計画に不可欠な要素項目を抽出することができる。この操船計画に関する記述及び他の操船計画指針<sup>20)21)</sup>などを参考にして、ルート計画の目的と重要な要素となるものを抽出し、整理する。

ルート計画の目的とは、適切な操縦により航行することができる安全で経済的なルートを設定することである。安全なルートとは陸岸や浅瀬等の障害物から十分に離れた可航水域内を航行するルートを意味し、経済的なルートとは余分な変針や航行距離の増が無い、必要不可欠な航行距離と変針により構成されているルートを意味する。適切な操縦により航行できるルートとは、適切な操縦計画が立案できるルートであることを意味し、具体的には、大きな変針角度が無いことや、操船者によるルート航行に必要な操縦を確実に実現するための操船目標が存在することなどを指すものである。

これらの目的を達成するためのルート計画に必要な不可欠な要素項目を操船計画指針から抽出し、大別すると以下のNo-Go Area、変針角度と操船目標となる。

### (1) No-Go Area

船舶は通行可能な水域である可航水域内にルートを設定しなければならない。この可航水域は、船舶が物理的に通行不可能な浅い水域や障害物やその近傍の船舶が進入してはならない水域であるNo-Go Area以外の水域として定義される。このルートを設定してはならない水域をNo-Go Areaと呼び、ルート計画の最も重要な要素となっている。このNo-Go Areaを定義するために必要な情報が、船底下余裕水深(UKC: Under Keel Clearance)や、陸岸や浅瀬等から離隔すべき距離を意味する離岸距離や、航路航行義務による航行禁止区域、漁場などである。

このNo-Go Area外の可航水域を航行することが安全なルートであることを保証し、航行

ルートに沿った可航水域幅が避険線となり、安全な航行を確実なものとする。

## (2) 変針角度と操船目標

ルートを計画することはルートが安全な水域を通過しているだけでなく、操船者による適切な操縦により確実に航行できるルートでなくてはならない。適切な操縦によるルートの航行を実現するためには、大きな変針角度が無いことや、操船目標を設定することなどが必要である。操船者により視認できることを考慮すれば、ルート航行時に必要な操船目標とは、導標や灯台等の顕著な物標による船首目標と変針点確認目標、狭水道通過時の見通し線などである。

以上から、本ルート計画法の設定指針となる、ルート計画要素を、ルート計画の目的別にまとめると以下のとおりとなる。

### ルートの安全性の確保に必要なルート計画要素

陸岸線、等水深線、障害物、船底下余裕水深、離岸距離、航路航行義務による航行禁止区域、漁業水域

### 適切な操縦により航行可能なルートの実現に必要なルート計画要素

変針角度、灯台・山頂等の顕著な物標、導標の目標針路、船首目標、変針点確認目標、狭水道通過時の見通し線

## 2.3 合理的なルート計画法

次に、前節のルート計画の設定指針を満足し得る合理的なルート計画法を検討する。

前述のルート計画の指針では No-Go Area 外の可航水域のどこを通行すべきか、あるいは、離岸距離外の可航水域のどこを通行すべきか等の指示はない。この問題の答となるものは No-Go Area により形作られる可航水域の中央付近をルートとすることである。可航水域の中央付近を通行するルートとは、両側に存在する No-Go Area からの離隔距離を最大にすること、即ち、両側の No-Go Area から最も安全なルートであることを意味する。

操船者は、最終的に、針路と変針点の連なりとして定義されるルートを求めるが、それ以前に、一連の可航水域を求めていると考えられる。一連の可航水域を求め、その中央付近を通過するルートを求めることは合理的なルート計画法と考える。本研究ではこの考えに基づくルート計画法を提案する。

提案するルート計画法の概要を Fig. 2-1 に示し、図に基づいて解説する。図からも明らかであるがあるが、本ルート計画法は 4 段階の処理を経て、ルート計画を生成するものとしている。まず、(1)ルート計画要素である No-Go Area を設定し、次に、(2) No-Go Area

外の可航水域を通る最短経路を求め、続いて、(3)最短経路に沿って可航幅を探索し、一連の可航水域系を求め、最後に、(4)得られた可航水域系を連続な一連の要素航路系に展開し、中央を通るルートを求めるものである。

以下に考案したルート計画法について、順を追って、その処理内容等について具体的に記述する。

### (1) ルート計画に必要な要素の拘束データベース化と No-Go Area の設定

熟練操船者は、ルート計画の指針に従い、海図、水路誌等からルート計画に必要な情報を収集し、新たな海域情報を加え、最終的なルートを計画していると考えられる。本ルート計画法では、ルート計画に必要な要素の情報を対象海域航行上の拘束データベースとして表現している。この拘束データベースとは浅い水域や、岬周りの離岸距離内水域などの No-Go Area、規定航路と推奨航路による通行義務拘束、導標による針路拘束などである。この拘束データベースによる多くの拘束下で航行可能な水域が計画すべきルートの基となるとしたのである。

本ルート計画法で拘束データベース化した海域におけるルート計画要素を Table 2-1 に示す。海図に記載された岸線、水深、灯浮標や山頂等の操船目標のみならず、規定航路と推奨航路、漁業水域や、岬周りの離岸距離内水域などの拘束海域なども拘束データベース化した。拘束データベースについて、幾つかの例をあげて解説する。

#### ● 岸線、水深、操船目標等の海図に記載された拘束データベース

Fig. 2-2 は海図における岸線、灯浮標、航路及び導標等を示す。海図情報において、ルート計画上の最も大きな拘束要素となる等水深線データベースの例として、-5m の等水深線を Fig. 2-3 に示す。図中の実線が-5m の等水深線であり、-5m を通行可能な最小水深とする船にとってはこの実線の内側領域が物理的な No-Go Area となるのである。このように、対象船舶が物理的に通行可能か否かの判断は、喫水と UKC (Under Keel Clearance) から選択された最小可航水深の拘束データベースにより判断される。

#### ● 離岸距離、航路などの拘束データベース

Fig. 2-4 は岬周りの離岸距離内水域、規定航路と推奨航路による通行義務拘束等を拘束データベース化した例を示したもので、物理的な判断では可航でも、ルート計画指針などからルートとしての通行は不可能な水域を意味している。図において、-5m 等水深線に重ねられた濃い灰色の領域が離岸距離内水域、通行義務拘束のある航路等の新たに加えられた拘束データベースを示している。この拘束データベースの一部を拡大したものが Fig. 2-5 と Fig. 2-6 である。

Fig. 2-5 は、図中に North Bay と表記された海域への出入の有無により、拘束データベースが変化することを示している。North Bay に出入しない場合が左図で、出入り

する場合は右図であり、右図において、新たに加えられた拘束水域は濃い灰色で示されている。右図に加えられた拘束水域は、この North Bay への出入り時の見通しへの配慮、図中に South Island と North Island と表記された二つの島を廻る時の離岸距離、変針角度や変針目標への配慮などの、ルート計画指針に記載された項目を具体的に拘束水域として表現したものである。

Fig. 2-6 は対面航路の通行義務拘束を拘束データベース化したもので、1 は通行を禁止されている航路水域外の拘束を示し、2 は北航時を、3 は南航時の拘束を示している。図中の濃い灰色で示されている領域が、北航/南航の通行方向別に加えられる拘束データベースである。

## (2) 拘束データベース下の可航水域における最短経路探索

ルート計画の第1歩は、対象船舶の可航水深を含む拘束データベース下において、始点から終点までの可航水域を通る経路探索を行うことであり、求めた複数の経路から最短経路を選択するものとした。この可航水域内の最短経路を選択することは、ルート計画の目的のひとつである、経済的なルートを確認することに繋がっている。

最短経路探索結果の例を Fig.2-7 に示す。図中の濃い灰色で示された領域が No-Go Area であり、この No-Go Area 以外の可航水域内を通過する最短経路が太い実線で示されている。

次に、本ルート計画法で用いている経路探索法の概要について解説する。本ルート計画法の経路探索法は障害物と始点及び終点からなる対象空間を、障害物の輪郭を表す端点と始点及び終点を節点 (Node)、節点間を結ぶ直線を枝 (Arc) とするグラフ空間に変換し、障害物を回避する枝を求め、始点から終点までの枝で節点を繋いだ経路を求めるものである。この経路探索法はロボットの Motion Planning で使われている可視グラフ法 (Visibility Graph Method) <sup>27)28)29)</sup> と大略同じ手法であり、可視グラフ法については付録2の“移動ロボットの経路探索における可視グラフ法とボロノイ図法”で解説している。Fig.2-8 には障害物がひとつの場合の経路探索を図解している。図から明らかであるが、本手法により障害物を回避する複数の経路が求まる。求めた複数の経路の経路長比較を行い、最短経路を求め、最終的に得られた経路としている。Fig.2-8 の下図は二つの障害物の例であり、二つ以上の障害物においても、全く同じ手法により最短経路が求まることを示している。

等水深線で囲まれた領域や、航路の通行義務拘束領域等の拘束データベースを障害物として設定することで、本手法をルート計画の対象水域に適用することが可能である。尚、No-Go Area を構成する拘束データベースの輪郭は全て右回りの点列で統一されており、障害物回避に際して発生することがある Deadlock (行き詰まり) を防止している。

## (3) 一連の可航水域系の探索

ルート計画の元となる可航水域内の最短経路が得られたので、次に、この経路に沿った直線経路毎に航行可能な長方形の可航水域を求める。経路に沿った可航水域の探索法の



解説図を Fig.2-9 に示す。上図は経路が長方形水域の一边である場合、下図は対角線である場合の可航水域及びその最大幅の求め方を示し、図中の太い実線で示される経路に基づいて、灰色で示される最大幅の長方形可航水域を求めている。但し、沿岸航行において10海里、20海里にもなる極端に広い可航水域幅を求めることは現実的ではなく、避けなければならないので、対象船舶に適した可航水域の限界最大幅を、可航水深と同様に、対象船舶ごとに設定する必要があり、操船計画条件の船舶特性のひとつとして入力するものとした。

本研究では、GT499型内航船舶の可航水域の限界最大幅について、沿岸航行時の陸岸からの離岸距離の実態や2.2節で利用した操船計画指針に記載された大型船の最小離岸距離などから、1海里を設定するものとした。

本ルート計画法で求めた経路に沿った一連の可航水域系の例を Fig.2-10 に示す。図中の長方形が可航水域を示している。

#### (4) 一連の要素航路系への展開とルート決定

経路に沿った一連の可航水域系は Fig.2-10 の例からも明らかであるが、長方形の可航水域ごとに幅が大きく異なり、航行すべき水域としての連続性が無い。そこで、航行すべき水域としての連続性を確保することで、各可航水域を航行すべきひとつの航路、即ち、要素航路とすることとした。

不連続な一連の可航水域系を連続な要素航路に展開する方法の解説図を Fig.2-11 に示す。Fig.2-11 の上図に示すように、可航水域系間の出口幅と入口幅を比較して、狭い幅に統一することで連続性を確保している。但し、下図の×印が示すように、狭い幅に統一するだけでは Long way (遠回り) が発生する場合があります、この場合には Long way (遠回り) を除去するために、狭い幅の航路と同じルートとなる要素航路を設定するものとした。

最後に、連続な要素航路系の中央を通過する連続な線分が航行すべき一連のルートとして求まるのである。

一連の要素航路系の中央を通過する連続な線分をルートとすることは、2.3節でも記したように、可航水域内における合理的なルート決定法であり、ロボットの Motion Planning においても同様の手法が用いられている。二つの障害物から等距離の点列を求め、その点列間を結ぶことでルートを求めるポロノイ図 (Voronoi Diagram) 法<sup>27)28)</sup>である。ポロノイ図法についても付録2の“移動ロボットの経路探索における可視グラフ法とポロノイ図法”で解説している。

要素航路展開して、最終的に求めたルート計画の例を Fig.2-12 に示す。図中の台形が要素航路を、その中央を通過する線分がルートを示している。

尚、このルートを求める時に、導標や船首目標による針路拘束が存在する場合はルートの針路を指定された針路とすると共に、要素航路間の変針角度が3度以内などと極端に小さい場合にも狭い幅の要素航路のルート針路に統一するなどの処理を行っている。

Fig.2-13 は導標による針路拘束の適用例で、各ルートの針路は黒丸印で示される導標へ

の針路となっている。図中の濃い灰色領域が要素航路で、太い矢印がルートを示し、各ルートの方角は導標に向かっている。

Fig.2-14 は要素航路間の変針角度が極端に小さい場合の適用例で、図中の矢印で示される3要素航路は、要素航路間の変針角度が小さいので、ひとつのルートに統一されていることを示している。

## 2.4 まとめ

以上より、次記するルート計画の要素を全て満たした合理的なルート計画法を開発した。開発したルート計画法の手順は以下のとおりである。

- ルート計画の要素

以下のルート計画要素を、ルート計画における拘束条件としてデータベース化した。

ルートの安全性の確保に必要なルート計画要素

陸岸線、等水深線、障害物、船底下余裕水深、離岸距離、航路航行義務による航行禁止区域、漁業水域・作業水域

適切な操縦により航行可能なルートの実現に必要なルート計画要素

変針角度、灯台・山頂等の顕著な物標、導標の目標針路、船首目標、変針点確認目標、狭水道通過時の見通し線

- ルート計画の手順

本研究で開発したルート計画法は、次記する4段階の手順を経てルート計画を生成するものである。

- 1) ルート計画に必要な要素の拘束データベース化と No-Go Area の設定
- 2) 拘束データベース下の可航水域における最短経路探索
- 3) 一連の可航水域系の探索
- 4) 一連の要素航路系への展開とルート決定

### 3 出入港操船における操縦実態調査

本章では出入港操船の実態を調査、解析し、操縦計画立案の基盤となる操船におけるセーフティ・ファーストの概念について検討すると共に、出入港操船に共通する操船内容に関する解析<sup>24) 25) 26)</sup>をおこなった。

#### 3.1 出入港操船計画におけるセーフティ・ファースト

操船上のミスが直接大きな事故に繋がる出入港操船において、操船者の最も重要な使命は安全確保である。セーフティ・ファーストの操船計画とそれを実現し得る技能が、船体と水域の安全を確保しているのである。異なる港で、毎日、多くの船が出入港を繰り返しており、そのひとつひとつの出入港操船は船体、操船者、地形と気象海象等の自然条件がすべて異なり、ひとつとして全く同じ条件で繰り返される出入港操船は無い。このように異なった条件においても安全を確保できる出入港操船とはなにか、即ち、セーフティ・ファーストを操船計画上で具体的に展開する必要がある。

小瀬等<sup>4)</sup>は、パイロットの操船行動の分析から、大型船の着岸操船におけるセーフティ・ファーストを操船計画上で具体化することを試み、二つの概念を提案した。ひとつは着岸操船の目標となるゴールは、最終目標である岸橋への接舷ではなく、余裕としての離隔距離を持って岸橋前に設定された仮のゴールであるとする概念である。他のひとつは、操船時によく発生する操作タイミング遅れや風速増等に対応できるように、制御余裕を持たせた操作量に基づいた操縦計画を立案しているとする概念である。これらの概念は離着岸操船の実態に即したものであり、操船者の操船内容と概略一致していると考えられる。小型内航船舶の操船計画においてもこのふたつの概念は実施されていると考えるのが妥当である。一方、船橋内に操船者と操舵員等の複数の人的配置がなされている大型船と異なり、小型内航船舶では、一人の船橋当直者により離着岸操船に関わる全ての操作が実施されていることを、この二つの概念に加えて、考慮する必要があると考える。小型内航船舶の一人当直者にとって、異なった操作手段である舵角と主機関回転数を同時に操作することは物理的にも煩雑で、情報処理の面からも実行上困難な作業である。複数の操作を同時に行うことは、緊張する離着岸操船局面では、操船者自らによる操作エラーを発生することにも繋がる恐れがある。そこで、小型内航船舶において、舵操作と主機操作等の異なった操作指令が重なることを避けることは、もうひとつの重要なセーフティ・ファーストの具体化と考えられる。

次に、前述の操縦計画において考慮しなければならないセーフティ・ファーストの三項目が実際の小型内航船舶の出入港操船においてどのように実施されているのかを、小型船舶の出入港操船の実例を参考に検討し、セーフティ・ファーストの三項目の内容について、定量的に整理した。

小型内航船舶の着岸操船の実例として、著者が2隻のGT499型内航船舶に乗船した際に

撮影した一連の写真を Fig.3-1 と Fig.3-2 に、各船舶の船橋を Fig.3-3 に示す。

Fig.3-1 は矢印で示した左舷側の岸壁への入船着棧を行った際の、入港から、岸壁に斜めにアプローチして着棧に至るまでの一連の操船状況を示している。1 と 2 は岸壁を目指した入港、3 は岸壁への斜めからのアプローチ、4 は岸壁に舳った最初のロープが張って行足を抑えた状況である。

Fig.3-2 は矢印で示した棧橋への出船着棧を行った時の、入港から大きく旋回して着棧するまでの一連の操船状況を示している。1 から 3 は出船着棧のための旋回状況、4 は最初のロープを岸壁に舳った状況である。

- 仮のゴールの設定

2 隻の操船状況から明らかであるが、最初のロープを棧橋等に舳った時が出入港操船のゴールであり、最終的な目標である平行着棧は船首尾部からのロープの引き込み操作等により実施されている。内航小型船の出入港操船における船体運動制御上のゴール、即ち、仮のゴールは、棧橋からロープを渡せる程度離れた位置の、岸壁に対して一定範囲内の角度をなす方位での停止である。

2 隻の船長からはロープの渡せる距離とは  $0.5 \sim 1 \times$  船長程度、岸壁となす角度は  $0 \sim 45^\circ$  程度が一般的であるとの聞き取り結果であった。

- 操作量の余裕

操作量の余裕とは、操作量の操作限界までに残された余裕量を意味し、舵角  $20^\circ$  を使用する操作における操作量の余裕とは  $15^\circ$  であり、操作限界までに十分な制御上の余裕を残した操作量に基づく操縦計画の立案が一般的である。

船長からの聞き取り結果と乗船時の観測から、主機関回転数（エンジン・テレグラフ操作位置）に対応した常用舵角、主機逆転による停止のための回転数指令位置と主機回転数に常用値が存在し、それらは操作量の余裕を持っていることが明らかとなった。常用舵角と逆転停止操船の常用主機回転数の定量的な把握には検討が必要であるが、この操作量の余裕が、風向と風速の変化および操船上の操作タイミングの遅れなどに起因する予測に反した船体運動を修正するために存在していることは明らかである。

- 操作指令の重畳防止

Fig.3-3 の船橋設備と操船状況から明らかであるが、GT499 型内航船舶の出入港操船に関わる操作は一人の操船者が担当しており、船体運動制御上の操作のみならず、陸上と船首尾への連絡、指示と関連の機器操作もすべて一人で処理している。舵と主機関などの異なった操作手段を同時に操作することは物理的にも煩雑で、困難な作業であり、小さな操作ミスが大きな事故に直接結びつく事が多い離着棧操船では、操船者自身も緊張しており、操作エラーを発生する恐れが高くなることが予測される。操作

エラーの発生防止と操船者の操作上の負担を減少させることから、舵操作と主機操作は基本的に重ならないようにすることが妥当な安全確保の方法であると考えられる。

### 3.2 熟練操船者による出入港操船

前節のセーフティ・ファースト概念の具体化により、小型内航船舶の出入港操船に共通する幾つかの操船の特徴は明らかとなったが、操縦計画に必要な、どのように減速をしているのか、舵角は何度で変針操船するのか等の答えを得るには至っていない。操縦計画を含む操船計画を立案するには、妥当な操船計画を作成し得る、より具体的な操船内容が必要である。現在、未解決な技術的な問題により、操船の妥当性を安全面、効率面から定量的に評価することはできない。しかし、安全であり、妥当であるとされる操船は実施されており、熟練操船者が多くの知識と長い経験に基づき実施している操船が妥当な操船のひとつと考えることはできる。

本研究では、熟練操船者の操船が最良な操船であるとの視点から、小型内航船舶の熟練操船者の操船法を調査、解析することで、小型内航船舶の出入港操船における最良な、即ち、標準的と捉えられる操船内容を求めることとした。

具体的には、何人かの熟練操船者に対する操船計画に関するアンケート調査と操船計画立案、操船シミュレータ実験等を実施した。

アンケート調査と操船計画立案において、操船対象となる船舶はGT499型内航船舶とした。特に、操船計画では対象船舶の操縦性能が必要となるので、事前に、対象船舶の操船資料 (Maneuvering Booklet) を被験者に渡すものとした。操船資料は付録3の“GT499型内航船舶の操船ブックレット”に示す。付録4に“操船計画に関するアンケート”の内容を示す。アンケート調査は十分な操船経験を有するGT499内航船舶の船長2名と垂線間長60mの練習船操船者3名に対して実施した。

被験者が5名と少ないようであるが、アンケート等から得られたデータをそのまま操船モデルとするのではなく、操船上及び船体運動上の検討を加えて操船パターンとするものなので、5名でも十分に有用なデータは得られるものと考えた。

#### 3.2.1 減速操船内容の調査と解析

離着岸操船、投錨操船などで目標位置での停止を目指して徐々に減速することは減速操船と呼ばれ、良く行われる重要な操船であるが、どのように減速していくのかなどの具体的な減速操船の内容が示された例はない。そこで、出入港操船に不可欠な操船である減速操船における減速の目標値などの減速パターンを抽出することを目指した調査と解析を行った。

##### (1) 減速操船パターンの抽出

熟練操船者に対して実施した減速操船における停止地点までの残距離とエンジンテレグ

ラフ操作位置の関係についてのアンケート結果を Fig.3-4 に示す。停止する目標位置に向かって、徐々にエンジンテレグラフ操作位置を低速対応に下げていることは共通の傾向として捉えられるが、船速を制御量とする操作指令が距離に対応する根拠を直接見出すことはできなかった。そこで、停止位置までの残距離に対応して、エンジンテレグラフ操作位置を段階的に低速対応に下げる共通の傾向について、その合理的な根拠と解釈を求めて、船体運動制御上及び操船者の特性の視点からの解析を行った。

## (2) 時間対応の船速制御法のモデル化と検証

船体の船速応答はプロペラ回転数変化に対する時間応答であることから、操船者も時間対応の船速制御をしていると考え、時間対応の船速制御法のモデル化により、距離対応の減速操船パターン・モデルを推定することを検討した。

そこで、まず、減速操船パターン・モデルの元となる船体の船速応答モデルを求めた。操舵及び横流れの無い直進時のプロペラ操作に対する船速応答の近似式として(3.1)式が一般的に用いられている。減速操船におけるプロペラ回転数変化が段階的に行われていることなどから、プロペラ回転数の変動範囲は大きくなく、その変動範囲においては抵抗力と推力の項を準線形近似で取り扱うことができると考えられる。そこで、(3.1) 式の抵抗力と推力の項を線形近似すると (3.2) 式となる。さらに、(3.2) 式を変形すると時定数  $T_p(\text{sec}) = m/C_v$  とゲイン  $K_p = k_n/C_v$  とする一時遅れ制御系の (3.3) 式を得ることができる。船舶固有の船速応答特性である  $m$ 、 $C_v$ 、 $k_n$  の各係数は、GT499 型内航船舶の一般的な方形係数値： $C_b \approx 0.700 \sim 0.800$ 、0.5 程度とした推進係数： $\eta_{pc} = \text{EHP}/\text{BHP} \approx 0.5$  と主要目から推定近似することが可能である。

$$m \frac{dv(t)}{dt} + C_v v(t)^2 = k_n n(t)^2 \quad (3.1)$$

$v(t)$ : 船速[m/s]  $n(t)$ : プロペラ回転数[rps]

$$m \frac{dv(t)}{dt} + C_v v(t) = k_n n(t) \quad (3.2)$$

$$T_p \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = K_p n(t) \quad (3.3)$$

$$T_p = m/C_v, \quad K_p = k_n/C_v$$

Fig.3-4 から明らかであるが、操船者による減速操船は、操舵による針路制御への配慮などから、エンジンテレグラフ操作位置対応のプロペラ回転数を段階的に徐々に減じながら、船速を落としている。そこで、各減速が同じ時間間隔に基づき行われているとして、(3.3) 式を使った減速のシミュレーションを行なった。Fig.3-5 は前式の時定数  $T_p[\text{sec}]$  の 2 倍、即ち、 $2T_p[\text{sec}]$  毎にエンジンテレグラフ操作位置に対応した減速プロペラ回転数指令を行なう

としたシミュレーション結果である。2Tp[sec]という時間は、減速して整定する次の船速の87%に達する時間を意味し、ほぼ整定したとする目標になると考えたものである。Fig.3-5の上図が時間対応の指令と船速変動を、下図は残距離対応の指令と船速変動を、破線表示のアンケート結果と共に示している。2Tp[sec]毎に減速するシミュレーション結果はアンケート結果と良く一致している。そこで、次に、この2Tp[sec]毎の減速操船パターン・モデルと操船者による減速操船結果との比較によるモデルの検証を目的とした操船シミュレータ実験を実施した。被験者はアンケートを行った熟練操船者の内の2名であり、実験シナリオは2回の変針を伴う投錨操船である。Fig. 3-6はこの操船シミュレータ実験の結果であり、減速操船パターン・モデルと操船者による減速操船結果とを比較している。図中に太い実線で示される減速操船パターン・モデルと細い実線の操船者による減速操船結果は良く一致しており、2Tp[sec]毎に段階的にエンジンテレグラフ操作位置対応船速に減速するとした減速パターン・モデルは、熟練操船者による減速操船パターンを良く表現していると言える。したがって、入港・着棧等の減速を伴う標準的な操縦計画として本減速パターン・モデルを適用することが可能であり、妥当と考えた。

### (3) 減速操船モデルの解釈

前節で得られた2Tp[sec]毎の減速操船パターン・モデルが熟練操船者の減速操船結果と良く一致している根拠として、操船者による減速操船の特性である以下の項目が挙げられる。

- ① 船速に対しプロペラ回転数を短時間のうちに大きく減少させることは舵効きを著しく減少させることになるために、減速は十分な時間をかけて行われている。
- ② 変針及び保針する能力を確保するために、減速はエンジンテレグラフ操作位置対応のプロペラ回転数指令に対応して段階的に行われる。
- ③ 減速指令後、操船者は定常状態に近い減速された船速を確認している。
- ④ 操船者は、時間的に同じ応答を示す操作・制御方法による減速操船を行っている。

減速指令後、2Tp[sec]経過することは、定常状態の87%に達した船速を確認できることを意味し、前述の第3項の根拠を良く満足している。

#### 3.2.2 変針操船内容の調査と解析

航海速力時の変針であるならば応答も速く、操船上の大きな問題とならないが、出入港では航海速力から停止までの大きな速力変化を伴い、速力変化により実時間の操縦応答が大きく変動する。どのように操舵量を船速低下に対応させているかなどの標準的な変針操船の内容を明らかにすることを目指して、アンケート調査も含め、検討をおこなった。

### (1) 各船速における変針操船常用舵角

熟練操船者の操船法から、常用舵角をエンジンテレグラフ操作位置対応船速に基づいて変化させていることが予測された。そこで、変針操船における常用舵角とエンジンテレグラフ操作位置に関するアンケート調査を行った。操船シミュレータ実験の変針操船において使用した舵角のエンジンテレグラフ操作位置対応船速の分布とアンケート調査結果の平均値を Fig.3-7 に示す。変針操船において、エンジンテレグラフ操作位置に対応した常用舵角は、Full Ahead と Half Ahead のエンジンテレグラフ操作位置の時は  $10^{\circ}$ 、Slow Ahead 時は略  $20^{\circ}$ 、Dead Slow Ahead 時は  $20\sim 30^{\circ}$  に整理され、変針操船がエンジンテレグラフ操作位置のプロペラ回転数に対応した常用舵角を操作量として計画、実施されていることが明らかとなった。

### (2) 変針操船常用舵角の合理的な解釈

同じ舵角ならば旋回経等の軌跡は船速によって大きく変化しないことが知られている。軌跡が変化しないのにも拘らず、Slow Ahead 時は略  $20^{\circ}$ 、Dead Slow Ahead 時は  $20\sim 30^{\circ}$  のように、船速に対応させて舵角を変える理由には以下の 4 項目が考えられる。

#### ① 狭い可航水域における変針

港内等の狭く閉塞した可航水域を航行する船舶の船速は低いのが一般的である。狭く閉塞した可航域では、周りに余裕水域が無く、変針と言えどもやり直しが効かないことが多く、失敗が大きな事故に繋がる恐れが高い。そこで、狭く閉塞した可航域における変針では可能な限り早く次の針路に向けることが安全上不可欠とされている。このことが結果として低速になるにしたがい大きな舵角を利用することとなって表れていると捉えることができる。

#### ② 過渡運動状態を短く

船舶の操縦においては、舵及び回転数操作に対する船体運動の時間遅れの過大さから、できる限り定常な運動状態に置くことが重要であり、過渡状態を短くすることが安全な操船のひとつのテクニックとも言われている。低速時において、短い時間による変針を目指すために使用舵角が大きくなることは妥当なことと言える。

#### ③ 追従性の劣化補償

Fig.3-8 は各船速における舵角  $10^{\circ}$  の旋回運動応答と、Slow 時に舵角  $20^{\circ}$ 、Dead Slow 時に舵角  $30^{\circ}$  を使用した旋回運動応答を示したものである。Slow Ahead 時の舵角  $20^{\circ}$  変針の旋回角速度応答は、Half Ahead 時の舵角  $10^{\circ}$  変針の過渡応答部分と同じ時間応答を示している。同様に、D. Slow Ahead 時の舵角  $30^{\circ}$  変針の旋回角速度応答は、Slow Ahead 時の舵角  $10^{\circ}$  変針の過渡応答部分と大略同じ時間応答を示してい



る。

操船者は、船速低下に伴ない劣化した時間遅れを、図中に矢印で示すように、大きな舵角を使用することで改善する補償操作を行っていると考えられる。変針操船において、操船者は極端な時間遅れを避けると思われる。使用舵角増によって、過渡応答時の追従性能の改善をしている。

#### ④ 外乱影響の減少

Fig.3-9は20knotの横風を受ける状況における40°変針を舵角10°と20°で実施した時の軌跡である。図からも明らかであるが、風外乱は舵角20°に小さく、舵角10°に大きく影響している。船速低下に対応して変針常用舵角を大きくすることは、外乱影響を減少させるための補償操作と考えられる。

### (3) 変針操船における操作量の余裕と適用限界

エンジンテレグラフ操作位置に対応した各船速における旋回運動上の操作手段、常用操作量と操作量の余裕を示したものがTable 3-1である。操作量の余裕は(限界操作量-常用操作量)/限界操作量\*100と定義して求めたものである。船速低下と共に、操作量の余裕が少なくなっていることが判る。

次に、求めた変針操船パターンの風速上の適用限界について、風外乱下の保針限界と変針限界の視点から解析した。まず、常用舵角における変針限界風速と保針限界風速を、付録3の"GT499型内航船舶の操船ブックレット"の5. Coursekeeping Ability Under Strong Windに示されたデータに基づいて求めた。保針限界風速はエンジンテレグラフ操作位置対応船速における常用舵角の保針限界風速船速比から求め、その保針限界風速の75%程度を常用舵角における変針限界風速と推定した。この考え方に基づいて求めた常用舵角における変針限界風速をTable 3-2に示す。保針を含む変針操船を行う最低プロペラ回転数のエンジンテレグラフ操作位置がDead Slow Aheadであり、Dead Slow Ahead対応船速時の常用舵角における変針限界風速がTable 3-2から19.8knotとなることから、本節で求めた変針操船パターンは操作量の余裕を加味しても風速20knots程度までが適用範囲と捉えることができる。と考える。

#### 3.2.3 逆転停止操船の内容

着棧操船では棧橋の近傍で棧橋に平行に近い方位で停止することが求められる。停止するためにはプロペラ停止のみならず、逆転することで船速を零にしなくてはならない。しかし、プロペラを停止及び逆転することは操舵による針路制御が不可能なことを意味する。最も困難な操船のひとつが着棧時における船体姿勢の制御を含めた逆転停止操船である。この逆転停止操船がどのように実施されているかを調査、解析し、標準的な逆転停止操船パターンの抽出を目指した検討を行った。

### (1) 出入港操船法に関するアンケート調査例

月刊公団船に掲載された GT499 型内航船舶の出入港操船パターンを Fig.3-10 に示す。サンプル数は少ないが、示されたパターンと、3.1 節に記した GT499 型内航船舶に乗船した際の経験等から判断すると、入船着棧がほとんどであり、大きく回りこむ出船着棧も良く行われていることが推測される。入船着棧と出船着棧は、ともに、棧橋又は岸壁前に設定した仮のゴールに向かって、棧橋又は岸壁に対して一定範囲内の角度で斜めにアプローチする操船法となっていることが推測される。

### (2) 逆転停止操船の内容

前述の出入港操船パターンにおいても、棧橋前に設定した仮のゴールで船体を停止しなければならない。着棧に必要な逆転停止操船をするための減速指令について、熟練操船者に実施したアンケート調査結果から次記するパターンが得られた。

プロペラを停止した惰力航行で停止位置に接近し、1~2×船長の距離を残した手前で Slow Astern のエンジンテレグラフ操作位置のプロペラ回転数を使用して停止している。

この逆転停止操船パターンは乗船した GT499 型内航船舶の出入港時の停止操船と全く同じ、妥当な逆転停止操船の内容と考えられる。

### (3) 逆転停止操船時の保針

逆転停止操船の内容から明らかであるが、プロペラ回転を停止した惰力航行で接近し、Slow Astern のエンジンテレグラフ操作位置のプロペラ逆転で停止するとなれば、基本的には操舵による針路制御は不可能であり、停止操船は直線ルート上で実施されていることが明らかになった。

## 3.3 まとめ

以上より、出入港操船のセーフティファーストの概念を具体化し、減速操船、変針操船と逆転停止操船に関する標準的な操船パターンを抽出した。まとめると以下のとおりとなる。

- 出入港操船のセーフティファースト概念の具体化

内航小型船舶の出入港操船においては、1)仮のゴールの設定、2)操作量の余裕の設定と 3)操作指令の重畳防止は、熟練操船者も実施している、安全確保に不可欠な手法であることが明らかとなった。

- 標準的な減速操船パターン

熟練操船者による減速操船は、(3.3) 式に示す船速応答モデルの時定数 $T_P[s]$ の 2 倍を目

標に実施されていることが明らかとなった。

$$T_P \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = K_P n(t) \quad (3.3)$$

- 標準的な変針操船パターン

熟練操船者による変針操船では、エンジンテレグラフ操作位置に対応した常用舵角が存在することが明らかとなった。各エンジンテレグラフ操作位置に対応した常用舵角は以下のとおりである。

Full Ahead and Half Ahead	: 10°
Slow Ahead	: 20°
Dead Slow Ahead	: 20~30°

- 標準的な逆転停止操船パターン

熟練操船者による逆転停止操船は以下のような操船法で実施されていることが明らかとなった。

- 1) プロペラ停止の惰力航行で停止位置に直線コースで接近
- 2) 停止位置の1~2×船長の距離を残した手前で **Slow Astern** を指令して停止

## 4 出入港操船における標準操縦計画法

前章の出入港操船の実態調査により、熟練操船者により実施されている標準的な操船パターンを得ることが出来た。本章では、得られた標準的操船パターンを実現するための変速及び変針等の操作量と指令位置、即ち、操縦計画を決定する方法<sup>24)25)26)</sup>について記述する。

### 4.1 標準的な変針操船の操縦計画法の開発

標準的な変針操船パターンとは、エンジンテレグラフ操作位置対応の標準的な常用舵角が存在することであり、標準的な変針操船とはこの標準的な常用舵角を使用した変針を実現することである。即ち、自船の現在のエンジンテレグラフ操作位置（プロペラ回転数： $n^*$ [rps]）と変針点における変針角度： $\phi^*$ [rad]が与えられれば、エンジンテレグラフ操作位置から変針に使用される常用舵角量： $\delta^*$ [rad]が決定する。この変針角度： $\phi^*$ [rad]、常用舵角量： $\delta^*$ [rad]と既知の自船操縦性能から変針操船の操縦計画を立案することになる。

本研究では自船の操縦性能として多くの操船者が理解している、(4.1)式に示す野本の操縦運動方程式を用いている。

$$T \left( \frac{L}{v(t)} \right) \frac{dr(t)}{dt} + r(t) = K \left( \frac{v(t)}{L} \right) \delta(t) \quad (4.1)$$

$L$  : 対象船舶の船長[m]

操舵機遅れが無いと仮定してこの式を応用すれば、最短時間変針の当舵タイミング、即ち、当舵の開始及び終了時期が求まることが知られている。最短時間変針については付録5の“最短時間変針法”に詳細に記述してある。

次に、得られた当舵タイミングから操舵開始位置、当舵開始位置及び変針終了位置等の操縦計画を求める手法について述べる。

Fig. 4-1 は変針操船における舵制御則、舵角  $\delta(t)$ 、回頭角速度  $r(t)$  と回頭角  $\phi(t)$  の時系列と航跡を表示したものである。Fig. 4-1 の下図において、灰色で示したものが、操舵機遅れが無いと仮定して得られた、最短時間変針の舵制御則である。舵角： $\delta^*$ の変針時の旋回が定常状態に近いと仮定すると、当舵を終了する条件は、変針操船による角速度： $K\delta^*$ と当舵操舵成分： $-2\delta^*$ による角速度が相殺して零となる条件(4.2)式である。当舵を取っている時間： $T_{cr}$ [s]はその解であり、(4.3)式として求まる。

$$0 = K\delta^* - 2\delta^* \left( 1 - e^{-\frac{T_{cr}}{T}} \right) \quad (4.2)$$

$$T_{cr} = -T \log_e \frac{1}{2} = 0.69T \quad (4.3)$$

操舵機遅れ： $T_D$  [s]を加えた真の当舵を取っている時間は、 $T_{cr}$  に操舵機遅れの半分  $T_D/2$  を加えた (4.4) 式として求まる。

$$T_{cr} + T_D / 2 = 0.69T + T_D / 2 \quad (4.4)$$

当舵を取っている時間： $T_{cr}$  [s]から、Fig. 4-1 の上図における、当舵を取っている間に前進する距離： $D_{cr}$  [m]が求まる。同様に、操舵開始直後の直進距離： $D_{ap}$  [m]は直進している時間： $(T+T_D/2)$  [s]から求まる。操舵開始直後の直進距離： $D_{ap}$  [m]に定常旋回中の進出距離： $D_{st}$  [m]を加えることで、操舵開始位置から変針点までの新針路距離： $D_{nc}$  [m]が求まり、同様に、変針点から変針操舵終了位置までの距離： $D_{rr}$  [m]も求まり、(4.5)式と(4.6)式に示すものとなる。

$$D_{NC} = D_{ap} + D_{st} = v\left(T + \frac{T_D}{2}\right) + R \tan \frac{\psi^*}{2} = \frac{T_D}{2} v + TL + \frac{L}{K' \delta_{rad}^*} \tan \frac{\psi^*}{2} \quad (4.5)$$

$$D_{RR} = D_{st} + D_{cr} = R \tan \frac{\psi^*}{2} + v\left(0.69T + \frac{T_D}{2}\right) = \frac{T_D}{2} v + 0.69TL + \frac{L}{K' \delta_{rad}^*} \tan \frac{\psi^*}{2} \quad (4.6)$$

但し、 $T_D = \delta^* / 2.32$

自船の主要目、操縦性指数  $T'$  と  $K'$ 、変針角  $\phi^*$  と常用舵角  $\delta^*$  が与えられれば、変針操舵の開始と終了の位置が求まり、変針操船における操縦計画が立案可能となる。ここで操舵機遅れ  $T_D$  は船舶設備規定に定める最低舵速度  $2.32^\circ / s$  で常用舵角  $\delta^*$  を割って求めるものとした。

この手法では、操縦性指数  $T'$  と  $K'$  を Dead Slow Ahead のエンジンレグラフ操作位置に対応する低速まで適用していること、変針操船の旋回が定常状態に近いとする仮定も採用していることなどによる誤差が存在することは事実である。しかし、本研究で対象としているシステムは完全自動化のシステムではなく、操船者による制御行動が存在するものであり、その制御対象には変針における針路誤差等も含まれ、前述の誤差が存在しても操船者により補償されるものと考えている。

#### 4.2 標準的な減速操船の操縦計画法の開発

減速操船に代表される変速操船の操縦計画法について検討し、減速に必要な距離を求め、減速開始位置を指定できる手法を以下に示す。

3.2 節において、(3.3)式で表現される自船の船速応答モデルを求め、さらに、熟練操船者

の減速操船が、船速応答モデルの時定数の二倍： $2T_P$ [s]を主機回転数切り替え時期とする制御則でモデル化できることを示した。

$$T_P \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = K_P n(t) \quad (3.3)$$

自船の船速応答モデルとその時定数の二倍： $2T_P$ [s]を主機回転数切り替え時期とする制御モデルから、減速操船に必要な距離を求める方法は以下のとおりである。

プロペラ回転数が  $n_F$ [rps]、船速が  $v_F$ [m/s]の時、プロペラ回転数を  $n_H$ [rps]に減じた際の  $2T_P$ [s]時間に進出する距離  $D_{F-H}$ [m]を求める。

Fig. 4-2 はプロペラ回転数： $n(t)$  [rps]を減じた時の速度： $v(t)$  [m/s]と進出距離： $D(t)$  [m]の応答を示したものである。減速操船による速度応答は、(4.7)式に示す自船の船速応答モデルの解として求まり、整定時間： $2T_P$ [s]までに進出する距離： $D_{F-H}$ [m]は速度： $v(t)$  [m/s]を積分することで(4.9)式のように求まる。

$$v(t) = v_F + k_p (n_H - n_F) (1 - e^{-\frac{t}{T_P}}) \quad (4.7)$$

$$v_F = k_p n_F \quad (4.8)$$

$$D_{F-H} = \int_0^{2T_P} v(t) dt = T_P k_p (0.865 n_F + 1.135 n_H) \quad (4.9)$$

進出距離： $D_{F-H}$ [m]は、減速操船において、熟練操船者がひとつの減速指令を指令した後、対応した船速に大略整定したと判断し、次の減速指令を指令する時期までに必要な進出距離を意味する。即ち、減速操船の開始位置から終了位置までの距離である。この方法により、減速操船の開始及び終了位置を設定する操縦計画が簡便に立案できるものとなった。

#### 4.3 標準的な逆転停止操船の操縦計画法の開発

3.2.3 節で記述した逆転停止操船パターンに基づいて、逆転停止操船の操縦計画法を検討し、逆転停止操船に必要な距離と開始位置を決定する手法を求める。

標準的な逆転停止操船パターンは主機関を停止した惰力航行で接近し、停止点の手前  $1 \sim 2 \times$  船長から Slow Astern のエンジンテレグラフ操作位置を指令して停止するものである。プロペラの停止と逆転の操作により、操舵による針路制御は期待できないので、停止点へのルートは直線のルートとなっている。そこで、Slow Astern のテレグラフ操作指令により停止するのに必要な平均距離： $D_{SA}$ [m]を、本研究では平均値である  $1.5 \times$  船長とし、Dead Slow Ahead のエンジンテレグラフ操作位置に対応するプロペラ回転数： $n_p$ [rps]からプロペ

ラ停止指令をした減速操船に必要な距離： $D_{D-O}$ [m]を、前節と同様の手法により求め、両者を加えると、(4.13)の示す逆転停止操船に必要な距離： $D_{STOP}$ [m]が求まる。

$$v(t) = v_D - k_p n_D (1 - e^{-\frac{t}{T_p}}) \quad (4.10)$$

$$v_D = k_p n_D \quad (4.11)$$

$$D_{D-O} = \int_0^{2T_p} v(t) dt = 0.865 T_p k_p n_D \quad (4.12)$$

$$D_{STOP} = D_{SA} + D_{D-O} = 1.5L + 0.865 T_p k_p n_D \quad (4.13)$$

着岸操船の時は、逆転停止操船に必要な距離だけではなく、3.1節の記述にあるように、ルートの新橋/岸壁との角度も、0~45°程度と設定されることになる。

#### 4.4 まとめ

以上より、出入港操船における減速、変針及び逆転停止の標準的な操船パターンに基づく操縦計画の作成法を開発した。まとめると以下のとおりとなる。

- 変針操船

操舵角： $\delta^*$ [rad]、変針角度： $\phi^*$ [rad]の変針操船における変針開始位置から変針点までの距離（新針路距離）： $D_{NC}$ [m]と、変針点から変針終了点までの距離： $D_{RR}$ [m]は、船体の操縦性能： $(T', K')$ と操舵機遅れ： $T_D$ [s]から、次式として求まる。

$$D_{NC} = \frac{T_D}{2} v + T' L + \frac{L}{K' \delta_{rad}^*} \tan \frac{\psi^*}{2} \quad (4.5)$$

$$D_{RR} = \frac{T_D}{2} v + 0.69 T' L + \frac{L}{K' \delta_{rad}^*} \tan \frac{\psi^*}{2} \quad (4.6)$$

- 減速操船

エンジンテレグラフ操作位置対応のプロペラ回転数： $n_F$ [rps]から $n_H$ [rps]への減速操船に必要な距離： $D_{F-H}$ [m]は、船体の船速応答モデルから、(4.9)式として求まる。

$$D_{F-H} = T_p k_p (0.865 n_F + 1.135 n_H) \quad (4.9)$$

この(4.9)式に基づき、Full Ahead から Stop Engine までの段階的な減速操船を行う時の進出距離： $D_{F-O}$ [m]は、各減速操船に必要な距離： $D_{F-H}$ [m]、 $D_{H-S}$ [m]、 $D_{S-D}$ [m]、 $D_{D-O}$ [m]の総和により、(4.14)式として求めることができる。

$$D_{F-O} = D_{F-H} + D_{H-S} + D_{S-D} + D_{D-O} = T_p k_p (0.865n_F + 2n_H + 2n_S + 2n_D) \quad (4.14)$$

- 逆転停止操船

逆転停止操船に必要な距離： $D_{STOP}[m]$ は Dead Slow Ahead のエンジンテレグラフ操作位置のプロペラ回転数： $n_D[rps]$ と船速応答モデルから、(4.13)式として求まる。

$$D_{STOP} = 1.5L + 0.865T_p k_p n_D \quad (4.13)$$

(4.13)式の逆転停止操船に必要な距離： $D_{STOP}[m]$ と(4.14)式の Full Ahead から Stop Engine までの段階的な減速操船を行う時の進出距離： $D_{F-O}[m]$ の和により、Full Ahead 航行時に Half Ahead を指令した位置から、Slow Astern の指令により逆転停止する位置までの距離が求まることになる。このように、任意の減速操船における進出距離が簡単に求めることができるものとなった。



## 5 操船計画自動化システムの構築

前章までの検討結果に基づき操船計画を自動的に生成する操船計画自動化システム<sup>24)25)26)</sup>を構築した。本操船計画自動化システムは Fig. 5-1 に示すように、操船計画条件の入力、ルート計画 (Route Planning)、操縦計画 (Maneuver Planning) の手順に従って、操船計画 (Passage Planning) を自動的に生成するものである。

設定・入力する項目である操船計画条件は下記3項目であり、

- (1) 対象海域の海図、水深等のデータベース
- (2) 対象船舶の主要目と操縦特性
- (3) 初期位置等の始点条件と目的地の位置等の終点条件

これらの入力された3項目の設定条件に基づいて、先ず、航行すべきルートを求めるルート計画を行い、続いて、得られた計画ルートの航行を実現する操縦計画を自動的に生成する。構築した本操船計画自動化の内容について、以下に、記述する。

### 5.1 対象船舶の主要目と操縦特性

操船計画は対象船舶の性能を反映して生成されるものであり、対象船舶の諸特性は操船計画の重要な条件となる。本操船自動化システムでは操船計画条件として、対象船舶の主要目、操縦特性と船速応答モデルなどを入力するものとした。

本研究で対象とした船舶である GT499 型内航船舶の主要目を Table 5-1 に示す。

主要目の喫水と船底下余裕に基づいて、データベース化されている等水深線の中から最小可航水深が選択される。GT499 型内航船舶の最小可航水深は 5m であり、主要目と共に、操船計画条件として入力した。

次に、付録 3 の“GT499 型内航船舶の操船ブックレット”から無次元化操縦特性  $T'$  と  $K'$  を操縦特性として採用し、主要目のプロペラ回転数と速力の関係から減速操船モデルの  $T_P$  と  $K_P$  を求めた。得られた対象船舶の諸特性を操船計画条件として入力した。入力した対象船舶の無次元化操縦特性と減速操船モデルの係数は下記の通りである。

対象船舶の無次元化操縦特性  $T' = 2.214$  、  $K' = 1.202$

対象船舶の減速操船モデルの定数  $T_P = 138.7[s]$ 、  $K_P = 1.597[m/s \cdot rps]$

### 5.2 始点条件と終点条件

操船計画条件のひとつである始点条件と終点条件とは、操船計画を開始する始点と終了する終点の位置、方位及び速力で定義される。この条件における速力として、対象船舶のエンジンテレグラフ操作位置に対応する定常速力を入力するものとしている。始点及び終

点位置が棧橋及び岸壁近傍である場合、始点及び終点の方位は入船着棧か、出船着棧かの判断条件ともなっている

### 5.3 ルート計画

前述の入力された対象船舶、始点及び終点の条件に基づき、ルート計画は進められる。ルートは2.3節で記した考え方により生成され、その具体的な手順は、前掲の Fig.5-1 のルート計画の枠内に示されている。

本操船計画自動化システムのルート計画の特徴は、通常コースと呼ばれる一本の線で表現されるルートのみを求め、出力するのではなく、始点から終点までの航行可能な水域を求め、その始点から終点までの連続性の確保により求められた一連の要素航路系とともに要素航路の中央を通る線としてルートが求まることである。可航水域を示した要素航路が生成、表示され、その可航水域の中央を通る、即ち、両側の危険水域から最も遠い線がルートとして選択されているのである。

2.3節にも述べたが、このルート計画法は熟練操船者が実施しているルート計画の処理に倣い、再構築したものである。

#### 5.3.1 海域の拘束データベース

熟練操船者がルートを計画することは、2.2節で述べたようにルート計画の指針に従い、海図、水路誌等から情報を収集し、新たな海域情報を加え、最終的なルートを求めることである。海図、水路誌を含むルート計画上の情報をどのように表現し、どのように処理するかはシステム構築上の大きな課題であり、システムの骨格となる重要なものである。

本操船計画自動化システムでは、ルート計画において必要な海域の情報を対象海域航行上の拘束データベースとして表現している。この拘束データベースとは浅い水域や、岬周りの離岸距離内水域などの No-Go Area、規程航路と推奨航路による通行義務拘束、導標によるコース拘束などである。この拘束データベースによる多くの拘束下で航行可能な水域が計画すべきルートの基となるのである。

本操船計画自動化システムで拘束データベース化した海域に関する情報の種類は2.3節で示すとおりである。ここでは始点と終点の条件のために新たに加えた仮想の拘束データベースについて記述する。

#### 始点と終点の条件

4.3節の標準的な逆転停止操船で記述したが、着棧操船において、棧橋前に設定した仮のゴールへの停止を目的としたルートは棧橋と0~45°の角度をなす直線ルートであり、入船/出船着棧のどちらでもこの直線ルートは確保されなければならない。そこで、終点条件の方位に向かって、棧橋と45°の角度以上となる水域を仮想の No-Go Area として拘束データベースに加えた。Fig. 5-2 は着棧操船となる終点条件時の入船着棧と出船着棧のために設

定される仮想の拘束データベースを示し、逆転停止操船のための直線ルートへの変針が大きな角度となる水域も仮想の No-Go Area として拘束に加えたものである。図中の太い実線で囲まれた点描域が仮想の No-Go Area としての拘束データベースであり、この水域外の可航水域でルートを探査し、細線で示されるルートが選択される。この着棧操船のための拘束データベースの形状を Fig.5-3 に示す。4.3 節で求めた逆転停止操船のための直線ルート長さと変針当舵距離等を加えて求めたものである

本操船計画自動化システムでは、始点の方位指定や、終点で投錨する場合などの始点と終点の条件毎に、前述の着棧操船と同様な方法で仮想の拘束データベースを作成している。

### 5.3.2 可航水深水域における最短経路探索

ルート計画として、先ず、対象船舶の喫水に対応した対象海域の拘束データベース、即ち、対象船舶が物理的に通行可能な最小可航水深の拘束条件の元で、始点から終点までの可航経路を探査し、通常、複数の経路が求まる。複数の経路における最短経路を、ルート計画を始めるための最初の経路として選択する。

対象船舶の最小可航水深は操船計画条件として入力されるものであり、GT499 型内航船舶の最小可航水深は 5m である。この水深 5m の可航水深の拘束条件下で求めた最短経路探索結果の例を Fig.5-4 に示す。図中の O の表記が始点を、D の表記が終点を示し、始点と終点間を実線のポリゴンで結んでいるのが最短経路である。

### 5.3.3 No-Go Area 拘束下の最短経路探索

可航水深水域における最短経路が求まったことは、航路による通行義務拘束や、離岸距離内の No-Go Area による拘束などの可航水深以外に適用すべき拘束が選択可能となる。海域の拘束データベースから、航路による通行義務拘束、離岸距離内の No-Go Area などの可航水深以外に適用すべき拘束を選択し、再度、最短経路探索を行う。可航水深以外の適用すべき No-Go Area 拘束も加えた条件下で得られた最短経路を Fig.5-5 に示す。最短経路は図中に実線のポリゴンで示されている。ここで得られた最短経路はルート計画の元となる可航水域内で最も経路長が短い経路を意味する。

### 5.3.4 経路に沿った可航水域系の探索

ルート計画の元となる可航水域内で最も経路長が短い経路が得られたので、次に、この経路に沿った直線経路ごとに航行可能な長方形の可航水域を求める。

本操船計画自動化システムが求めた最短経路に沿った可航水域の例を Fig.5-6 に示す。図中の複数の長方形と三角形が経路に沿って求められた可航水域を示している。

### 5.3.5 要素航路系への展開とコース選定

経路に沿った一連の可航水域系は Fig.5-6 の例からも明らかであるが、長方形の可航水域

ごとに幅が大きく異なり、航行すべき水域としての連続性が無い。そこで、航行すべき水域としての連続性を確保することで、各可航水域を航行すべきひとつの航路、即ち、要素航路とすることにした。得られた連続な要素航路系の中央を通過する連続な線分が航行すべき一連のルートとして求まるのである。要素航路系に展開して、最終的に求めたルート計画の例を Fig.5-7 に示す。図中の台形と三角形で示されている水域が各要素航路であり、その中央を通過する線分がルートである。

## 5.4 操縦計画

本操船計画自動化システムの最後の処理として、前節までに得られた計画ルートに沿った航行を実現するための操縦計画を立案する。操縦計画は4章で述べた標準操縦計画法を適用して、Fig. 5-1 の操縦計画の枠内に示す手順に従い立案している。各手順で実施されている処理の内容を以下に記す。

### 5.4.1 変針点の速度の設定

着岸操船等の終点条件から、標準的操縦計画法の逆転停止及び減速操船に必要な距離に基づいて、逆転停止、減速等の開始位置を計画ルート上に順次設定する。設定された変速指令位置から各変針点におけるエンジンレグラフ操作位置対応のプロペラ回転数を求める。

### 5.4.2 変針操船の操縦計画

変針点毎に設定されたプロペラ回転数から、各変針操船の常用舵角量が求まる。変針角度、常用舵角量と操縦特性から、各変針点の変針操船の操縦計画を行い、計画ルート上の変針操船の指令位置と終了位置を求める。

### 5.4.3 変針と変速の操作の重なり除去

操縦計画された変針操船の指令から終了までの間に、変速操船指令位置が含まれているか否かを調査する。

変針操船の指令から終了までの間に変速操船指令位置が含まれている場合は、3.1 節で記した操作指令の重畳防止に反することになる。そこで、重なった変速指令位置を事前に変速する方向に移動し、関連する変速指令も含め、変針操船中に変速指令が存在しないように新たな変速指令位置を設定する。設定した新たな変速指令位置に基づき、変針点の速度を再設定し、前節の変針操船の操縦計画に戻り、前節と本節の処理を繰り返す。

変針操船の指令から終了までの間に変速操船指令位置が含まれないことが確認できれば、次の変速操船の操縦計画に進む。

#### 5.4.4 変速操船の操縦計画

設定された変速操船指令位置に基づいて、減速操船モデルなどから求まる変速操船に必要な距離が確保された変針操船の操縦計画を行う。

以上により立案された操縦計画は、計画されたルート上に針路、変針及び変速の指令位置が操作量と共に表記され、変針操船については旋回を含む変針終了位置までの予測経路を表示した操船計画として操船者に提供される。Fig.5-8に、最終的に得られた操縦計画を含む操船計画例を示す。Fig.5-9はFig.5-8の一部である着棧操船までの操船計画を拡大表示したものである。図中のF、H、S、D、O及びAの表記が変速指令の位置と内容を、S10、S20及びP20の表記が操舵指令の位置と内容を、co090やco122の表記が各ルートの針路を指示している。

#### 5.5 操船計画の出力例

ルート計画と操縦計画からなる本操船計画自動化システムの操船計画出力例をFig.5-10とFig.5-11に示す。Fig.5-10は航路上の始点から内水面の岸壁に着棧するまでの操船計画を生成したものであり、Fig.5-11は外海の始点から狭い川を通過して、湖の岸壁に着棧するまでの操船計画である。図中のOの表記が始点を、Dの表記が終点を示し、操船計画における各処理手順ごとの出力を連続的に示しており、図中の番号は操船計画の各手順を意味し、番号5として表記されているものが最終的な操船計画出力である。両図に示される各処理手順の出力例について、その概要を以下に述べる。

番号1の図はルート計画の最初の処理出力を示し、GT499型内航船舶の物理的に通行可能な最小可航水深である5mの等水深で囲まれた水域の拘束条件の元で、設定した始点から終点までの可航経路を探索し、最短経路を求めたものである。

番号2は、番号1で得られた最短経路に基づいて海域の拘束データベースから選択された、可航水深以外に適用すべき拘束である航路による通行義務拘束、離岸距離内のNo-Go Area、始点と終点の仮想No-Go Areaなどの新たな拘束を加えた条件下で、再度、最短経路を求めたものである。

番号3は、番号2で得られた最短経路に沿った直線経路ごとに航行可能な長方形の可航水域を求めたもので、図中の複数の長方形と三角形が可航水域を示している。

番号4は、番号3で得られた可航幅が異なる可航水域系に基づき、可航幅の連続性をも確保された一連の要素航路系を求め、各要素航路の中央を通過する連続な線分を航行すべき一連のルートとし、船首目標や導標等による針路拘束などを適用して、最終的に得られたルート計画出力を示している。

番号5は、番号4のルート計画に沿った航行を実現する操縦計画を求め、計画ルート上に針路、変針及び変速の指令位置や操作量などの操縦計画を重ねて表記した最終的な操船計画の出力図である。

## 6 操船支援システムの構築

現に船舶を運航している操船者に、ルート計画と操縦計画を自船位置等の運動状態と共に重畳表示して情報提供することは、従来、操船者が実施してきた海図上での計画ルート  
の把握と操縦計画の立案処理、自船位置の測位などを、操船者に代わり高い精度で自動  
的に実行し、これらの重要な情報を操船者に把握し易い形で提供することを意味し、操船  
上の大きな支援効果があることが予測される。本章では、操船計画自動化システムが生成  
した操船計画を、現に船舶の運航状態にある操船者にリアルタイムに提供することで、操  
船上の大きな支援効果が期待される操船支援システムを構築した。

### 6.1 操船支援システムの機能

操船上の支援を目的として、操船計画を提供するシステムを構築するために、支援効果  
が期待される機能を抽出し、内容を以下に示す。

#### 6.1.1 操船計画の事前検証・表示機能

操船計画はこれから航行する海域におけるルート計画と計画ルートに沿った航行を実現  
するための操縦計画からなる。操船計画を操船者に提供するには、計画ルートを操縦計  
画に従って航行することが無理なく実現可能であることを事前に示すことが必要であり、  
効果的である。この考えに基づき、本操船支援システムでは計画ルートを操縦計画に従  
って航行した場合の1分毎の軌跡を表示する機能を具備するものとした。

#### 6.1.2 実時間対応支援機能

現に運航状態にある操船者に、操船計画の提示による操船支援を行うためには、自船  
の運動状態に加え、現在航行しているルート、次の変針点とルート、次の変速指令の内  
容と位置、次の変針指令の内容と位置等の操船計画を、海図情報と共に重畳して集約  
表示することが効果的と考えられる。ここで提案した操船支援システムとして具備す  
べき機能は、操船上必要な情報を過不足なく、一瞥で把握できるように提供する  
ことを意味している。本操船支援システムでは、1秒毎に得られるDGPS自船位置  
情報と共に、操船計画自動化システムの生成したルート計画と操縦計画を、海図情  
報に重畳表示するものとした。本研究では操船シミュレータを操船対象船舶の自船  
としてシステムを構築した。

### 6.2 操船支援システムの表示例

前節で提案した操船支援システムとして具備すべき機能を満たした、操船計画情報  
を自船の運動状態と共に電子海図上に重畳表示する、操船支援システムを構築した。

実時間対応の操船支援機能を実現している操船支援システムの画面表示例を Fig.6-1  
に、操船シミュレータの船橋内における操船支援システムの利用状況を Fig.6-2  
に示す。

操船支援システムの画面表示は、Fig.6-1 に示すように、大小二つのウィンドウから構成され、大きな主たるウィンドウがルート計画及び操縦計画の詳細を海図情報に重畳して集約表示し、小さなサブウィンドウはルート計画及び操縦計画の全体をリスト表示している。海図情報に重畳されるルート計画並びに操縦計画は5章で述べたと同じ表記法で表示され、自船位置は1秒毎の黒丸と1分毎の船形マークで、航跡は1分毎の船形マークにより示されている。操船者は計画ルートと自船位置から横偏位量を、台形や長方形で表示されている要素航路の幅から横偏位限界を捉え、co090 や co122 で表記された次の針路、H や S と示された次の変速指令と S10 や S20 で表記された次の変針指令の内容と指令位置までの時間と距離なども把握できるものとなっている。

## 7 操船計画自動化システムと操船支援システムの評価

本章では、本研究で開発した GT499 型内航船舶のための操船計画自動化システムと操船支援システムについて、操船計画の妥当性と支援システムとしての有用性に関する評価を行う。

7.1 節では、操船計画自動化システムの生成する操船計画の妥当性の評価を目的として、熟練操船者の操船計画と操船計画自動化システムの操船計画とを比較・検証し、操船計画自動化システムの生成する操船計画の妥当性について考察する。

次に、操船計画を運航状態の操船者に実時間で提供する操船支援システムの有用性を評価するために、操船支援システムを用いた操船シミュレータ実験を行った。7.2 節では、この操船シミュレータ実験の内容と結果、操船支援システムの有用性について考察する。

### 7.1 操船計画自動化システムの評価

本操船計画自動化システムは、熟練操船者の作成する操船計画が現時点における最良の操船計画であるとの視点に立ち、熟練操船者のルート計画法の分析と操縦計画法のモデル化に基づき、合理的にルート計画法と操縦計画法を再構築したものである。操船計画自動化システムの出力である操船計画のルート計画と操縦計画の妥当性について評価するには、本操船自動化システムの生成するルート計画と操縦計画を、熟練操船者の作成するルート計画及び操縦計画と単に比較するだけでなく、ルート計画と操縦計画における合理性の視点から検証する必要がある。

#### 7.1.1 ルート計画の比較検証と評価

3 人の熟練操船者と操船計画自動化システムが同じ海域、初期位置及び着岸条件に基づいて作成した操船計画を重ねて表示したものが Fig.7-1 である。図中に O で表記された初期位置から、D で示される岸壁に入船着岸する操船計画を作成したものであり、System と表記された太い実線が操船計画自動化システムの生成したルートであり、M、Y 及び F と表記された細い実線が個々の熟練操船者が作成したルートを示す。

本図において、熟練操船者 M を除けば、操船計画自動化システムと 2 名の熟練操船者が作成したルート計画は大略同じルートを描いており、操船計画自動化システムは熟練操船者の操船計画を再現していると定性的には判断できる。

次に、ルート計画自体の合理性を調べるために、ルート計画の特性を表す 6 種類の指標を求め、定量的な解析を行った。ルート計画の特性を表す指標としたものは①全航程距離、②平均離岸距離、③変針回数、④船首目標設定航程数、⑤最大変針角度と⑥平均変針角度である。熟練操船者と操船計画自動化システムの各指標値を Fig.7-2 の 1 から 6 に示し、各指標について比較し、考察する。



- 全航程距離と平均離岸距離

全航程距離はルート全体の航程距離の総和であり、全航程距離が極端に多いことは遠回りのルートとなる。平均離岸距離は各航程の最小離岸距離×航程を求め、全航程にわたる総和から平均値を求めたものであり、ルートに沿った可航水域の平均的な幅を示す。これら二つの指標は、平均離岸距離が安全性を意味し、全航程距離がコストを意味する。同型船で同海域を同目的地に向かって航行するとすれば、違うルートを通るとしてもこれらの二つの指標はそれぞれ特定の数値に落ち着くことが予測され、その特定の数値を有するルートが二次元空間上における適当な安全性とコストを備えた妥当なルートと考えられる。

Fig.7.2 の 1 が全航程距離を、2 が平均離岸距離を示す。両図において、熟練操船者”M”のルートのみが大きな値を示しており、大きな遠回りをするルートを計画したことが明らかである。他の 2 名の熟練操船者と操船計画自動化システムの数値は大略同値であり、操船計画自動化システムの生成したルート計画は、安全性とコストの面から、適切なものと考えられる。

- 変針回数、平均変針角度と最大変針角度

2.2 節で述べたが、操船計画の指針に大角度の変針を避けるべきことが記されている。また、船舶の操縦において、可能な限り定常状態におくことが重要であることを 3.2 節で述べた。これらの船舶を操縦する上で守らなければならない重要な項目が、ルート計画に反映されているかを判断する指標が変針回数、平均変針角度と最大変針角度であると言える。これらの指標において、変針回数は極端に多くなく、変針角度が 90° を越えることは無く、平均変針角度は 60° 以内とすることが望まれる。ここに示した具体的な数値は、GT499 型内航船舶の変針操船に関するアンケート結果から推定したものである。Fig.7.2 の 3、5 と 6 の変針回数、最大変針角度と平均変針角度について考察する。

熟練操船者”M”の最大変針角度は 90° であり、”M”と”F”の平均変針角度は 60° 程度であり、二つのルート計画は、ともに、変針回数を増やして変針角度を小さくすべきであることが明らかである。”Y”と操船計画自動化システムにおけるこれら 3 種類の数値は適切な値を示している。操船計画自動化システムの生成したルート計画は適切な変針角度の変針点で構成されていると考えられる。

- 船首目標設定航程数

船首目標設定航程数は船首目標が設定されている航程の数であり、ルートに船首目標が設定されていることは、操船者による計画ルートに沿った航行の実現性の向上と操船上のヒューマンエラー防止に繋がり、可能な限り船首目標を設定することが望まれる。Fig.7.2 の 4 に示されている船首目標設定航程数からは、操船計画自動化システ

ムの生成したルート計画には 5 航程中の 2 航程に船首目標が設定されており、適切な船首目標設定がなされたルート計画と考えられる。

以上より、操船計画自動化システムは合理的なルート計画を生成し得るものであることは明らかである。また、操船計画自動化システムのルート計画は、熟練操船者の作成するルート計画を再現し得るだけでなく、高い合理性に基づく妥当性を有するものであることも明らかとなった。

### 7.1.2 操縦計画の比較検証と評価

熟練操船者”F”が作成した操縦計画を Fig.7-3 に示し、操船計画自動化システムの生成した操縦計画を Fig.7-4 に示す。熟練操船者の操縦計画と操船自動化システムが生成した操縦計画を比較すると、前節で記した経由するルートの差こそ存在するが、Half Down、Slow Down、Dead Slow Down 等の減速操船指令位置、Starboard10°、Port20° 等の変針操船の操舵量とその指令位置、および、減速操船指令位置と変針操船指令位置との相互関係などの操縦計画は大略同じものとなっていると判断できる。

他の熟練操船者を含めた比較を行うために、目的地までの残距離と減速指令位置の関係、及び、エンジンテレグラフ操作位置と平均変針操舵角の関係について解析した結果を Fig. 7-5 と Fig. 7-6 に示す。

目的地までの残距離と減速指令位置の関係を示す Fig.7.5 は、熟練操船者”F”と操船計画自動化システムが大略同じ操縦計画であるのに対し、“M”と”Y”がより少ない残距離の減速指令からなる計画であることを示している。3.2 節で実施した減速操船における目的地までの残距離と減速指令位置についての熟練操船者へのアンケート結果を示す Fig. 3-4 と比較すると、操船計画自動化システムの操縦計画はアンケート結果と同じ減速操船を計画しているが、熟練操船者”M”と”Y”は自身が記したアンケート結果の残距離よりも少ない残距離で減速指令を計画していることが明らかである。熟練操船者への聞き取り調査において、「変針にともなう速力逡減もあるので減速指令位置の残距離は短めにした。」との意見も得たが、二人の熟練操船者がアンケート結果よりも少ない残距離で減速指令を計画した明確な理由を見出すことはできなかった。しかし、着棧などを目的とした減速操船の計画において、より少ない残距離での減速指令を計画することは、着棧地点に近い閉塞した海域において、変針指令と減速指令の連続や重畳などの操船関連作業の煩雑さをより一層進めることに繋がる。余裕を持った減速操船の計画が望まれることは事実であり、操船計画自動化システムの減速操船計画は、熟練操船者の減速操船パターンに忠実に対応した、余裕のある適切な操縦計画であると考えられる。

次に、Fig. 7-6 に示されるエンジンテレグラフ操作位置と平均変針操舵角の関係について考察する。変針操船の計画においても、熟練操船者”F”と操船計画自動化システムは大略同じ操縦計画であり、過大な舵角による変針なども計画されていない。一方、“Y”は D. Slow

Ahead 対応船速において舵角 35° を使用する変針を、“M”は Full Ahead 対応船速において 20° を超える平均舵角による変針を計画している。舵角 35° の変針を計画することは 3.1 節で記した操作量の余裕を持たず、セーフティファーストの原則に反するものであり、Full Ahead 対応の速い船速時に 20° を大きく越える舵角の使用は、船体横傾斜などから勧められていない。変針操船の計画においても、操船計画自動化システムの操縦計画は適切なものであると考える。

以上より、操船計画自動化システムは減速操船及び変針操船において適切な操縦計画を生成し得るものであることは明らかである。

## 7.2 操船支援システムの評価

6 章で記したように、操船計画自動化システムの生成した操船計画を運航状態にある操船者にリアルタイムで提供することにより操船支援を実現する支援システムを構築した。この操船支援システムの操船上の支援効果、並びに、支援システムとしての有用性について評価を行い、考察を加える。

操船支援システムの支援効果の調査とその有用性を評価するために、本操船支援システムを装備した操船シミュレータを用いた操船実験を行った。操船実験の計画、実験結果の解析と評価は、①経験の浅い操船者における支援効果、②熟練操船者における支援効果、③操船計画自動化システムが生成した操船計画の外乱適用範囲の 3 種項目に着目して実施した。

本操船支援システムの実時間対応機能の表示例と操船シミュレータ実験の実施状況は 6.4 節で紹介されている。また、実験に使用した富山商船高等専門学校の操船シミュレータの概要は、付録 6 “富山商船高等専門学校・操船シミュレータ” に記されている。

### 7.2.1 経験の浅い操船者における操船支援システムの有用性

操船支援システムの経験の浅い操船者における支援効果を調査するために、操船支援システムを利用して、経験の極めて浅い操船者が出入港操船を行う操船シミュレータ実験を実施した。被験者は富山商船高等専門学校の学生 4 名であり、2 名が操船支援システムを利用した入港操船を行い、他の 2 名が操船支援システムを利用せずに入港操船を行う、2 種類の実験を行った。操船支援システムを利用するにあたっては、支援システムの活用法に慣れることを目的とした港外への錨泊訓練を事前に行い、その後、入港着棧実験を 1 回実施した。操船支援システムを利用せずに行う入港着棧操船は、同じ条件の操船実験を 3 回繰り返して行った。経験の極めて浅い操船者が一人で入港着棧操船では、港に入港することさえもできないことが推測された。そこで、同じ条件の操船実験を 3 回繰り返すことで、入港着棧操船が完遂するようにした。

操船支援システムを利用した入港着棧操船実験の軌跡及び主機回転数と舵角の時系列を

Fig. 7-7 と Fig. 7-8 に示す。支援を受けずに実施した 3 回目の入港操船実験の軌跡、主機回転数と舵角の時系列を Fig. 7-9 と Fig. 7-10 に示す。尚、図中の O の表記が初期位置を、D の表記が目的地を示している。

軌跡について、支援無の 3 回目と支援有を比較すると、支援有のコースからの横偏位が少なく、変針もスムーズであることが明らかである。舵角について、支援無の 3 回目と支援有を比較すると、支援有において、ルートに沿うための小さな舵角の使用回数は多いが、変針時の使用舵角は  $20^{\circ}$  以内である。一方、支援無では保針操舵回数は少ないが、 $30^{\circ}$  を越す大きな舵角による変針が行われている。支援有における保針操舵回数増は、操船支援システムの画面上に計画ルート、操縦計画と GPS 位置が表示されることにより、船橋内における作業上の余裕を生じ、コースからの横偏位修正を高頻度を実施し得た結果と考える。この支援有で可能となった小舵角操作によるルート保持が、結果として、ルート計画に沿った横偏位の少ない軌跡を生じていると考える。

次に、操舵量の時間平均と  $25^{\circ}$  を超える操舵量の総和を求め、支援の有無の影響を調査した。Fig. 7-11 に、操舵量の時間平均と  $25^{\circ}$  を超える操舵量の総和の比較を示す。上図の操舵量の時間平均は支援の有無で大きく変化しないが、下図の  $25^{\circ}$  を超える操舵量は支援無と有では大きく異なり、支援が無い場合の変針に大きな舵角が利用されていることが明らかである。操船支援システムの支援を受けることにより、経験の浅い操船者でも、大きな舵角を使用せずに計画ルートを操縦計画どおりに航行できることが明らかとなった。

実験終了後に得た被験者からの意見では、「操船支援システムに頼りがちになり、操船支援システムを良く見ることになるが、ルート計画と操縦計画の提示は非常に便利である。」との意見を得た。

以上より、操船支援システムを利用した 1 回の入港着岸操船結果が、操船支援システムを利用せず繰り返し行われた 3 回目の入港着岸操船結果より、計画ルートからの横偏位、変針操船における操舵余裕、主機操作回数等において、良好な結果が得られたことは明らかである。操船計画自動化システムが生成した操船計画を位置等の運航状態と共にリアルタイムで提供する操船支援システムは、経験の浅い操船者にとって極めて有効な操船上の情報支援を行っていると考えられる。

実験終了後の意見として、操船支援システムへの過度な注視が指摘されたが、操船支援システムの機能である操船計画情報の提供方法において、例えば、音声を使用するなどの人間工学的な配慮を行うことで充分に対応することが可能と考える。

### 7.2.2 熟練操船者による操船支援システムの評価

次に、熟練操船者の視点からの操船支援システムの支援効果について評価することを計画した。熟練操船者による操船支援システムの評価により、熟練操船者の操船作業と操船支援システムの整合性、必要な操船支援機能の提案などが期待される。さらに、熟練操船

者にとっての操船支援システムの持つ意味についても、調査を行った。熟練操船者2名による操船支援システムを利用した入港着岸操船の操船シミュレータ実験を実施し、実験終了後、アンケート調査も行った。

熟練操船者による操船支援システムを利用した入港着岸操船実験の軌跡及び主機回転数と舵角の時系列を Fig.7-12 と Fig.7-13 に示す。図から明らかであるが、二人の熟練操船者の軌跡はルート計画通りであり、主機回転数操作も操縦計画通りに実施され、計画ルートに沿うための小舵角の操作回数が多いことは、経験の浅い操船者と同じである。しかし、変針に使用する舵角量等が操縦計画とは異なり、操船者自身の判断で変針操船を行っていることが判る。

実験終了後、下記3項目のアンケート調査を行い、以下の結果を得た。

(1) 支援システムに表示され、実施したルート計画は妥当であると考えますか？ (Yes/No)

Yes : コース、変針点共に無理はなかった。

Yes : 航路の中央線があったので本線位置の左右偏位が理解できた。

(2) 支援システムに表示され、実施した操縦計画は妥当であると考えますか？ (Yes/No)

Yes : 大体、計画位置の点での減速、転舵角でコースに乗ったから。

No : 何を見て操舵するのか、(目標) がわかりにくい。転舵する時、ブイを見て行ったが、見る方向がつかみづらく、転舵時期がはっきりしなかった。

(3) このような操船支援システムは必要と考えますか？ (Yes/No)

No : ルートのみ必要、減速位置、転舵角は風、潮流に影響されるのでこれらが加味されたものなら参考になるが、現実的では無く、不必要。

No : 舵角指令や、速力指令が位置の点で定められるのは信頼するに足るものでないと思われる。その時の風向、風速、喫水、つかみ難い潮汐によって時々刻々変化するから。

熟練操船者のアンケート結果からはルート計画と操縦計画は妥当とする意見が得られた。操縦計画の意見として記されているが、操作指令位置等の操船支援システム表示上の問題が指摘された。

ルート計画の表示は必要であるが、操縦計画を操船支援システムに提示することは不必要との意見であった。この操船支援システム上への操縦計画の提示についての熟練操船者の意見は、前節の経験の浅い操船者の意見と全く反対である。熟練操船者は操縦計画の提示を、操船者への強制的な指示と捉えたようであるが、本操船支援システムは経験の浅い操船者の支援が大きな目的であり、標準的な操縦計画がマニュアル的になることは致し方の無いことである。しかし、操船支援システムを活用することは出入港操船の標準化、並

びに、熟練操船者間の大きな個人差の減少等にも繋がることであり、操縦計画を提示することの有効性は、熟練操船者にとっても高いものと考えられる。

### 7.2.3 操船支援システム提示の操船計画の風外乱下における適用範囲

操船計画自動化システムの生成する操船計画は、余裕のある操作量に基づいた船体運動を基本として立案されている。このことは、操船者が風外乱等への補償操作にこの操作量の余裕を利用できることを意味している。3.2.2 節の(3)で記述したように、操作量の余裕に基づく風外乱の補償見積りから、操船計画自動化システムの生成する操船計画は風速約 20 knots まで適用可能であると推定している。この操作量の余裕を操船者が利用して操船上の補償操作をし得るか否か、即ち、風速 20knots までとした操船計画の適用範囲の妥当性について検証した。

被験者を経験の浅い操船者である学生として、無風と風速 20knots 下の 2 種類の操船支援システムを利用した入港着岸操船の操船シミュレータ実験を実施した。

無風条件下の入港操船実験の軌跡及び主機回転数と舵角の時系列を Fig.7-14 に、風速 20knots 下の結果を Fig.7-15 に示す。

舵角の時系列を比較すると、風速 20knots 下の舵角は使用頻度、舵角量ともに大きく、操舵限界の 35° を多用しながら、即ち、操船計画時に見積もった操作量の余裕を利用して、風外乱への補償操作を実施していることが判る。また、軌跡を比較すると両者に大きな差異は無く、風速 20knots までとした操船計画の適用範囲は妥当であると考えられる。

## 7.3 まとめ

以上、操船計画自動化システムと操船支援システムの評価により、以下の結論を得た。

- ルート計画と操縦計画の自動化出力

操船計画自動化システムは、熟練操船者の作成するルート計画及び操縦計画と同じ特性を示す、同等のルート計画と操縦計画を生成できることが明らかとなった。

- 経験の浅い操船者における操船支援システムの有用性

操船シミュレータによる検証実験から、操船支援システムを利用した入港着岸操船は、操船支援システムの支援を受けない入港着岸操船に比べ、変針操船及び減速操船ともにスムーズに実行され、位置精度も高いことから、操船支援システムは経験の浅い操船者に極めて有用であることが明らかとなった。

- 熟練操船者による操船支援システムの評価

熟練操船者による操船支援システムを利用した操船シミュレータ実験を実施した。熟練操船者はルート計画と操縦計画の妥当性を認め、ルート計画の利便性を高く評価し、操縦

計画の提示方法の改善点を指摘した。

- 操船計画の風外乱下における適用範囲

操船計画自動化システムの生成する操船計画の風外乱下の適用範囲について検証実験を行い、3章で予測した通りの風速 20knots までは適用可能であることを確認した。

## 8 結 論

本研究を通して得られた成果の要約は以下のとおりである。

- (1) 操船計画の自動化を目指した、小型内航船舶の出入港操船に適用できる合理的なルート計画法を開発し、その機能が充分であることを確認した。
- (2) 小型内航船舶の操船計画における安全確保の手法として、1)仮のゴールの設定、2)操作量の余裕の設定と 3)操作指令の重畳防止が実施されていることを明らかにした。また、小型内航船舶の出入港操船における減速操船、変針操船と停止操船に関する標準的操船パターンを抽出した。
- (3) 操船計画の自動化を目指した、小型内航船舶の出入港操船における減速操船、変針操船と停止操船に関する標準的な操船パターンを実現する操縦計画法を開発した。対象船舶の特性を代表する操縦性指数  $T$ 、 $K$  と船体速度応答の線形近似モデルの係数  $T_P$ 、 $K_P$  から、減速、変針と停止の 3 種操船に関する開始位置、終了位置及び操作に必要な距離等の操縦計画を求める方法を開発した。
- (4) 開発したルート計画法と操縦計画法に基づき、操船計画を自動的に生成する操船計画自動化システムを構築した。
- (5) 操船計画自動化システムの生成した操船計画を、現に運航状態にある操船者にリアルタイムで提供する操船支援システムを構築した。
- (6) 操船計画自動化システムの評価を行い、操船計画自動化システムの生成する操船計画が熟練操船者の作成する操船計画と同じ完成度であることが明らかとなった。また、操船支援システムの評価実験を行い、操船支援システムの支援効果は高く、特に、経験の浅い操船者への支援に極めて有効であることが明らかとなった。
- (7) 新しく考案したルート計画法と操縦計画法に基づき構築した操船計画自動化システムは、操船計画を自動化した初めてのシステムであり、操船計画法自体を体系化したことを意味する。
- (8) 標準的操船計画法を考案したことは、船種と対象港湾の多さ、操船者の個人差の存在などから不可能とされてきた、出入港操船の標準化への道を開いた。



- (9) 現状において最良と考えられる熟練操船者による操船パターンを解析して求めた標準的操縦計画は、操船支援を受ける操船者にとって、その理解と利用が容易なものとなり、新しい操船支援のあり方を提示した。
- (10) 操船計画自動化システムの生成する標準的な操船計画は、水先案内人による水先支援情報と等価の意味があり、陸上からの海上航行船舶への操船支援の可能性を示した。

## 参考文献

- [1] Committee on Advances in Navigation and Piloting : Minding The Helm, National Academy Press, 1994
- [2] 大河原明 : 着・離着操船について, 日本船長協会, 第 94 回船長実務講座, 1992
- [3] Daniel H. Macelrevey : Shiphandling for The Mariner, Cornell Maritime Press, 1983
- [4] 小瀬邦治, 福戸淳司, 菅野賢治, 赤木茂, 原田美秀子 : 船の自動離着棧システムに関する研究, 日本造船学会論文集, 第 160 号, 1986, pp.103-110
- [5] 小瀬邦治, 日當博喜 : 出入港時の要素操船性能について-I 出入港操船と要素操船性能, 日本航海学会論文集, 第 74 号, pp.29-34
- [6] 小山健夫, 金雁 : 船の自動離着棧のシステムの考察, 日本造船学会, 第 162 号, 1987, pp.201-210
- [7] 大和裕幸, 小山健夫, 中川武彦 : エキスパートシステムによる自動着棧制御, 日本造船学会論文集, 第 174 号, 1993, pp.327-337
- [8] 正司公一, 大津皓平 : 最適制御理論による操船の最適化と自動化, 日本造船学会論文集, 第 174 号, 1993, pp.339-344
- [9] 岡崎忠胤, 大津皓平, 正司公一, 水野直樹 : 最短時間停止操船に関する一考察, 日本造船学会論文集, 第 180 号, 1996, pp.223-224
- [10] 小瀬邦治 : Integrated Bridge System について, 日本航海学会誌, 第 116 号, 1994, pp.3-16
- [11] 小林弘明 : IBS の設計と評価, 日本航海学会誌, 第 116 号, 1994, pp.17-25
- [12] 遠藤 真, 小林弘明 : ジョイスティック・コントローラ装備船の離着棧操船能力-I - ジョイスティック・コントローラの構成 -, 日本航海学会論文集, 第 89 号, 1993, pp.71-80
- [13] 遠藤 真, 小林弘明 : ジョイスティック・コントローラ装備船の離着棧操船能力-II - シミュレータ実験による評価 -, 日本航海学会論文集, 第 90 号, 1993, pp.281-288
- [14] 遠藤 真, 小林弘明 : ジョイスティック・コントローラによる離着棧操船, 日本機会学会, 第 3 回交通・物流部門大会論文集, 1994, pp.210-215
- [15] Makoto Endo, Hiroaki Kobayashi : Ability of Berthing Assisted by Joy Stick Controller, Proceedings of International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability, 1996, pp.349-355
- [16] 遠藤 真, 小林弘明 : 航行環境の安全性評価における船舶操縦特性, 日本航海学会誌, 第 120 号, 1994, pp.8-14
- [17] Makoto Endo, Syunji Niimura, Tetsuya Otani, Teruo Ugajin : Development of Remote Safety Management System for Small Vessels, International Symposium of

Information on Ships, 1998, pp.6.1-6.7

- [18] 遠藤 真, 新村俊二, 大谷哲也, 正角 豊 : 小型船遠隔安全管理システムの検討と試作, 日本航海学会論文集, 第 100 号, 1999, pp.153-160
- [19] 日本航海学会・操船シミュレータ研究会 : 操船ガイドライン - 計画技術 -, 1998
- [20] 萩原秀樹, 山本 勝 監修 : ブリッジ・チーム・マネージメント, 成山堂, 1999
- [21] 浅井栄資, 上坂太郎 : 地文航法, 天然社刊, 1968
- [22] Makoto Endo : Shore-based Information-oriented Pilotage System, Proceedings of 2nd International Congress on Maritime Technological Innovations and Research, 2000, pp.877-888
- [23] Makoto Endo : Shore-based Pilotage Information System - System Configuration and Pilotage Planning -, Proceedings of 5th IFAC Conference on Manoeuvring and Marine Craft, 2000, pp.293-298
- [24] Makoto Endo : Passage Planning System for Small Inland Vessels - Application of Standard Paradigm and Maneuvers -, 2nd WMSSR, Proceedings of 2nd Japan and Korea Workshop on Marine Simulator and Simulation Research, 2002, pp.119-126
- [25] Makoto Endo, Kazuhiko Hasegawa : Automatic Passage Planning for Vessels Based on Experts Knowledge, Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, 2002, pp.829-834
- [26] 遠藤 真 : 標準的操船計画とその応用, 日本航海学会論文集, 第 108 号, 2002 (掲載許可)
- [27] Jean-Claude Latombe : Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers, 1991
- [28] M. ドバーク 他 3 名 : コンピュータ・ジオメトリ 計算幾何学:アルゴリズムと応用, 近代科学社, 1997
- [29] 伊理正夫, 古林隆 : ネットワーク理論, 日科技連, 1976

## 本研究に関連する発表論文

1. Makoto Endo, Syunji Niimura, Tetsuya Otani, Teruo Ugajin : Development of Remote Safety Management System for Small Vessels, International Symposium of Information on Ships, 1998, pp.6.1-6.7
2. 遠藤 真, 新村俊二, 大谷哲也, 正角 豊 : 小型船遠隔安全管理システムの検討と試作, 日本航海学会論文集, 第 100 号, 1999, pp.153-160
3. Makoto Endo : Shore-based Pilotage Information System –System Configuration and Pilotage Planning, Proceedings of 5th IFAC Conference on Maneuvering and Marine Craft, 2000, pp.293-298
4. Makoto Endo : Passage Planning System for Small Inland Vessels – Application of Standard Paradigm and Maneuvers, Proceedings of 2nd Japan and Korea Workshop on Marine Simulator and Simulation Research, 2002, pp.119-126
5. Makoto Endo, Kazuhiko. Hasegawa : Automatic Passage Planning for Vessels Based on Experts Knowledge , Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, 2002, pp.829-834
6. 遠藤 真 : 標準的操船計画とその応用, 日本航海学会論文集, 第 108 号, 2002 (掲載許可)

## 謝 辞

本研究の遂行に当たり、懇切なご指導とご教示ならびに貴重な討論、種々のご援助をいただきました次の方に深く感謝の意を表明いたします。

大阪大学教授・長谷川和彦先生には、全体にわたるご討論、ご指導を賜り、主査としてご校閲の労もおとりいただきました。東京商船大学教授・小林弘明先生には、研究途上の内容について多くのご助言をいただきました。両先生に対しあらためて厚くお礼申し上げます。

研究当初、小型船舶遠隔運航支援システム等のアイデアを共に討議し、開発する機会を与えていただいた、当時、(株)日野マリパワーシステム研究所の新村俊二氏に感謝いたします。

富山商船高等専門学校・練習船「若潮丸」の藤重船長と横井一等航海士、並びに、松本助手には、操船計画実験及び操船シミュレータ実験の被験者として協力頂き、お礼申し上げます。

富山商船高等専門学校の正角 豊 技官と辻 泰行 学生には、操船シミュレータ実験の実施と解析の全般に渡りご協力頂きお礼申し上げます。

## LIST OF TABLES

Table 2-1	Database of topographical constraints on the sea area
Table 3-2	Standard rudder angles for the course alteration
Table 3-3	Wind limitation to keep the course and to alter it at standard rudder angles
Table 5-1	Principal particulars of GT499 type inland vessel

## LIST OF FIGURES

Fig. 2-1	Outline of the proposed route planning method
Fig. 2-2	Topographical constraints of the chart
Fig. 2-3	A topographical constraint based on the 5m water depth contour
Fig. 2-4	The No-Go Area based on the distance off areas around points and recommended/ruled passages
Fig. 2-5	The No-Go Area of a two-way passage
Fig. 2-6	The No-Go Area of a one-way passage with separation scheme
Fig. 2-7	The shortest path planned under the No-Go Area constraint which consists of the water depth contour, distance off areas and assumed No-Go Areas
Fig. 2-8	The path planning method for route planning
Fig. 2-9	Method to plan an elemental Safe Water along the shortest path
Fig. 2-10	A chain of elemental Safe Waters along the shortest path
Fig. 2-11	Transformation of a chain of elemental Safe Waters into a chain of elemental passages
Fig. 2-12	A chain of elemental passages and the route
Fig. 2-13	The course of the passage directed to the leading lights
Fig. 2-14	Unification of the courses of two or more passages
Fig. 3-1	Sequential photos of the GT499 type inland vessel during a handling alongside the pier without turning

- Fig. 3-2 Sequential photos of the GT499 type inland vessel during a handling alongside the pier with turning to make the head to the area entrance
- Fig. 3-3 Bridge layouts and associate equipments of typical GT499 type inland vessels
- Fig. 3-4 Results of a questionnaire to the experts on deceleration maneuvers
- Fig. 3-5 Model of deceleration maneuvers by the experts
- Fig. 3-6 Comparison of deceleration maneuver of the model and that of the experts in simulator experiments
- Fig. 3-7 Rudder angles used by the experts for course alterations in simulator experiments
- Fig. 3-8 Time series of yaw angles and yaw rates induced by rudder angle using normally at each ship's speed
- Fig. 3-9 Course alternations under 20 knots wind at low ship's speed
- Fig. 3-10 Docking and undocking maneuvers of GT499 type vessels ( In monthly magazine "Koudansen" )
- Fig. 4-1 Schematic definition of the standard steering to alter course and relation among trajectory, yaw rate, yaw angle and rudder angle
- Fig. 4-2 Schematic relation among the advance, current speed and object speed
- Fig. 5-1 Process of passage planning
- Fig. 5-2 Assumed No-Go Area constraints for landing at the pier with/without turning
- Fig. 5-3 Configuration of the assumed No-Go Area for landing at the pier
- Fig. 5-4 The shortest path under the UKC constraints
- Fig. 5-5 The shortest path under the No-Go Area constraints
- Fig. 5-6 A chain of the Safe Water along the shortest path
- Fig. 5-7 A chain of elemental passages and the route
- Fig. 5-8 A planned maneuver
- Fig. 5-9 An enlarged copy of a part of the planned maneuver shown in Fig. 5-8.
- Fig. 5-10 Output example at each phase of the automatic passage planning -1
- Fig. 5-11 Output example at each phase of the automatic passage planning -2

- Fig. 6-1            Display image of the support system for maneuvering
- Fig. 6-2            The support system for maneuvering in the shiphandling simulator
- 
- Fig. 7-1            Comparison of the routes of the experts and that of the automatic passage planning system
- Fig. 7-2            Six kinds of characteristic indices on the planned route
- Fig. 7-3            Maneuvering plan of the expert "F"
- Fig. 7-4            Maneuvering plan of the automatic passage planning system
- Fig. 7-5            Comparison of the deceleration maneuvers of the experts and that of the automatic passage planning system
- Fig. 7-6            Comparison of the course alteration of the experts and that of the automatic passage planning system
- Fig. 7-7            Result of the simulator experiment with the supporting system by the less experienced operator "A"
- Fig. 7-8            Result of the simulator experiment with the supporting system by the less experienced operator "B"
- Fig. 7-9            Result of the simulator experiment without the supporting system by the less experienced operator "C"
- Fig. 7-10           Result of the simulator experiment without the supporting system by the less experienced operator "D"
- Fig. 7-11           Effect of the support system on the course alteration
- Fig. 7-12           Result of the simulator experiment with the supporting system by the expert "F"
- Fig. 7-13           Result of the simulator experiment with the supporting system by the expert "M"
- Fig. 7-14           Result of the simulator experiment with the supporting system under no wind by the less experienced operator "E"
- Fig. 7-15           Result of the simulator experiment with the supporting system under 20 knots wind by the less experienced operator "E"



**Table 2-1 Database of topographical constraints on the sea area**

DATA IN THE CHART			DATA SYMBOL
Land	Coastline		LC00
Islands and etc.	Coastline		IC00
Soundings	5m Depth Contour		SC05
	10m Depth Contour		SC10
	15m Depth Contour		SC15
	20m Depth Contour		SC20
	Dredged Channel		SDCH
Dangers	Fishery	Stationary Net	DFSN
		Fishing Net	DFFN
		Oyster Bed	DFOB
		Peral Bed	DFPB
		Laver Bed	DFLB
		Fishing Spot	DFFS
	Area Under Construction		DCON
	Prohibited Area		DPRO
Sunken Wreck		DSWR	
Defined Routes	Two-way route	Passage	PSRR
	One-way route with separation scheme	Passage	PSRR
	Roundabouts	Passage	PSRR
	Ruled/Recommended Passages	Ristricted Area	RWAP
		Ruled/Recommended Passages	RWAP
Navigation Marks	Lights	Light House	MLLH
		Leading Lights	MLLL
		Light Beacon & Buoys	MLLB
	Stations	Signal Station	MSSS
		Pilot Station	MSPS
	Buildings	Chimney	MBCH
		Tower	MBTR
		Bridge	MBBR
		Tank	MBTK
		Silo	MBSL
		High Building	MBHB
	Mountains	Peak	MMPK
	Peninsula & Island	Capes & Points	MPCP

**Table 3-1 Standard rudder angles for the course alteration**

Position of Engine Telegraph	Speed (knot)	Steering Apparatus	Standard Manipulated Values		Margin of Control Forces (%)
			Rudder (deg)	Thruster (4/4)	
Full	12.42	Rudder	10	0	71%
Half	9.315	Rudder	10	0	71%
Slow	6.21	Rudder	15~20	0	57%~43%
D. Slow	3.105	Rudder + Thrusters	20~30	2/4	45%~27%
Stop	0	Thrusters		3/4	25%

**Table 3-2 Wind limitation to keep the course and to alter it at standard rudder angles**

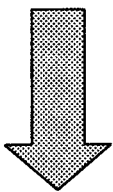
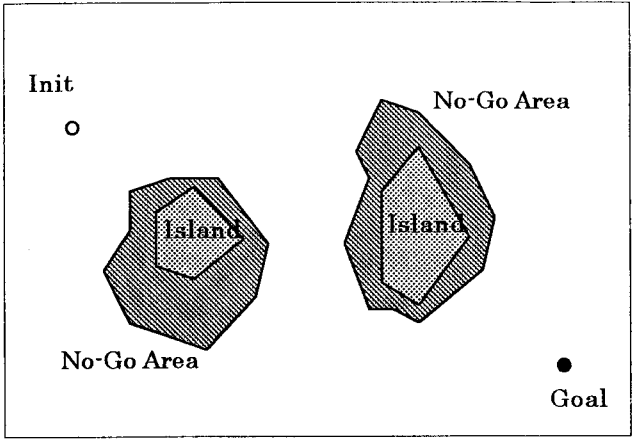
Position of Engine Telegraph	Speed (knot)	Under Standard Rudder Angles	
		Controllable Wind Limit (Knot) = 75% of Coursekeeping Wind Limit	Coursekeeping Wind Limit (Knot)
Full	12.42	37.3	49.7
Half	9.315	27.9	37.3
Slow	6.21	25.2	33.5
D. Slow	3.105	19.8	26.4

**Table 5-1 Principal particulars of GT499 type inland vessel**

Gross Tonnage	498 T	
Length p.p.	70.00 m	
Breadth	11.80 m	
Depth	7.20 m	
Draft	3.78 m	
MCR	2400 ps x 260 RPM	
NOR	2050 ps x 240 RPM	
Bow Thruster	203 ps x 2.03 t	
Stern Thruster	162 ps x 1.52 t	
RATING	RPM	SPEED(kt)
Navigation Full	240	12.4
Full Ahead	240	12.4
Half Ahead	180	9.3
Slow Ahead	120	6.2
Dead Slow Ahead	60	3.1

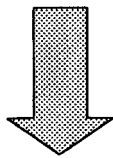
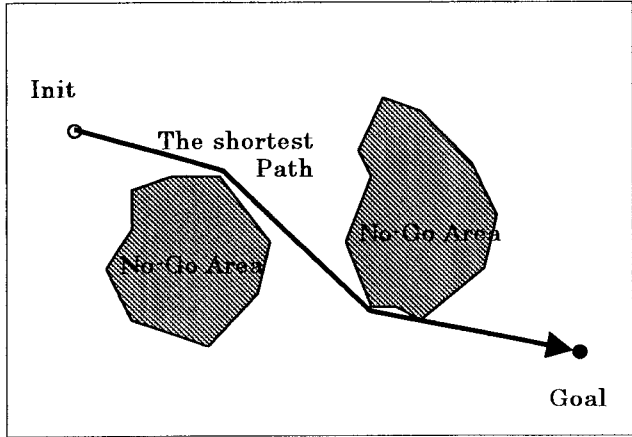
**Step 1 Definition of the topographical constraints, the init and the goal**

Defining the No-Go Area based on a database of topographical constraints on the sea area.



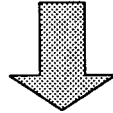
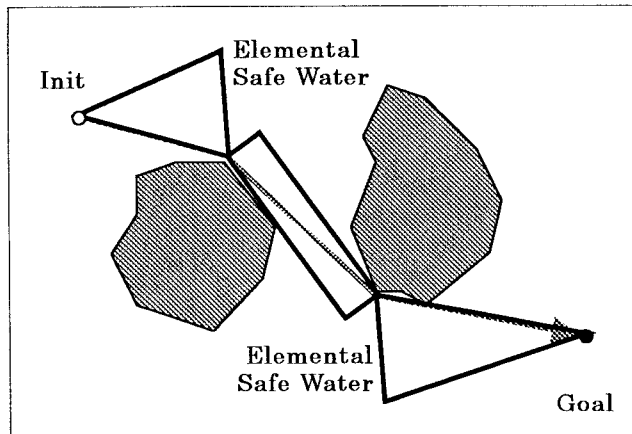
**Step 2 Planning the shortest path**

Finding a path from the init to the goal through the free area except the No-Go Area.



**Step 3 Planning a chain of elemental Safe Waters**

Planning elemental Safe Waters along the shortest path in order to maximize the clearance between the ship and the No-Go area.



**Step 4 Planning a chain of elemental passages and the route**

Transformation of elemental Safe Waters into elemental passages in order to keep the continuity of the passages. The route goes through the center of the passage to keep the enough clearance to the No-Go Area.

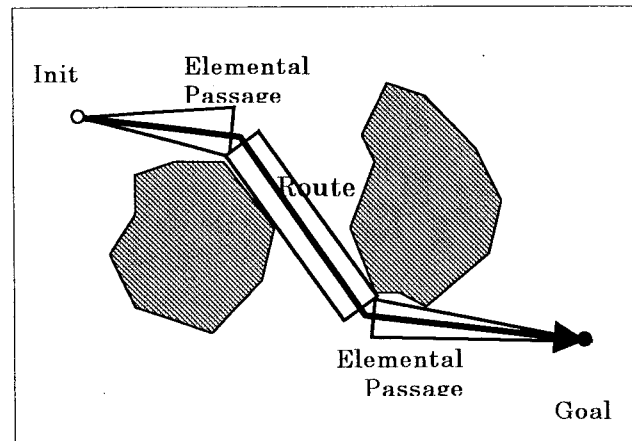
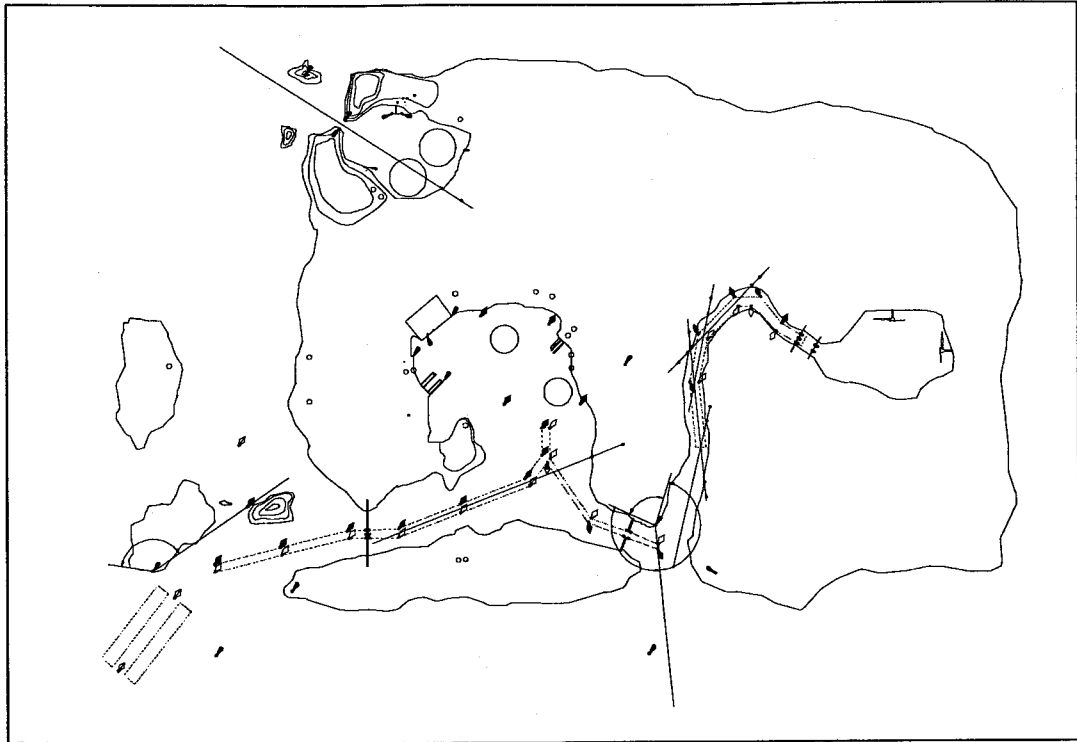
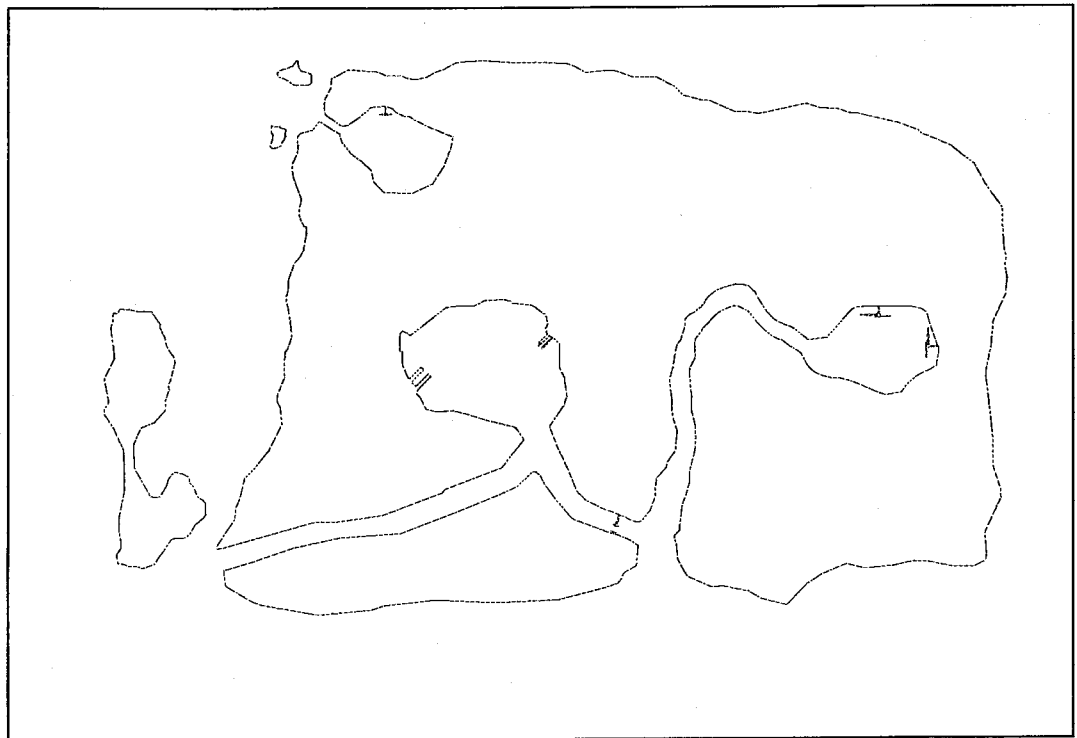


Fig. 2-1 Outline of the proposed route planning method



**Fig. 2-2 Topographical constraints of the chart**



**Fig. 2-3 A topographical constraint based on the 5m water depth contour**

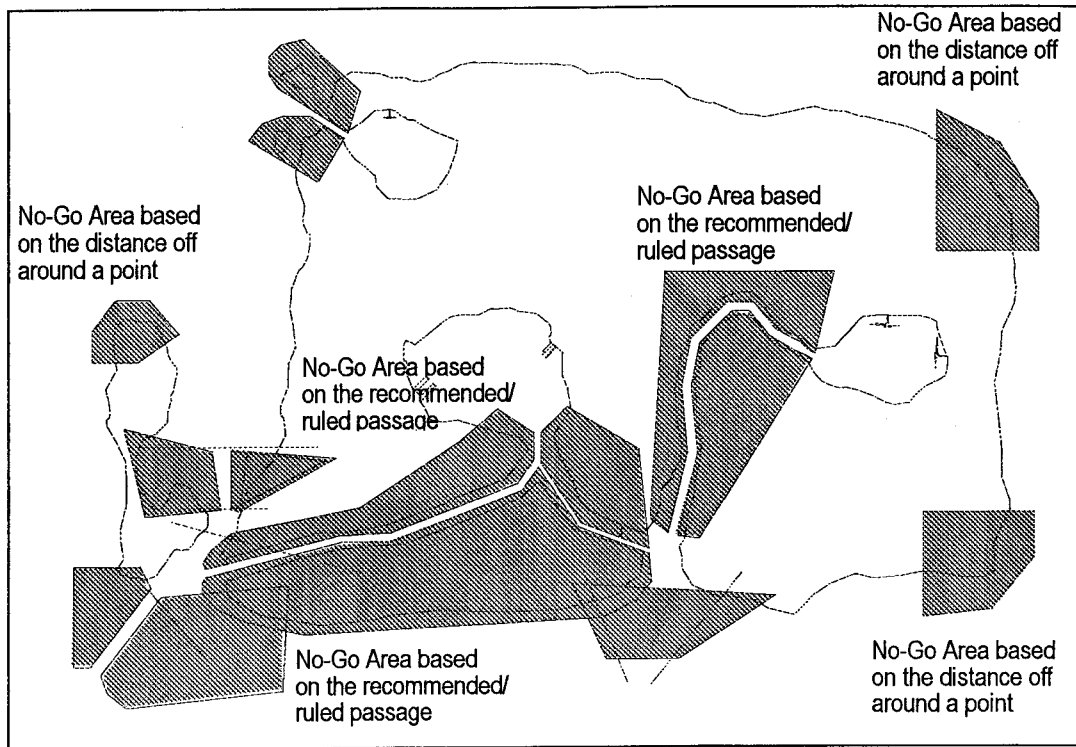


Fig. 2-4 The No-Go Area based on the distance off areas around points and recommended/ruled passages

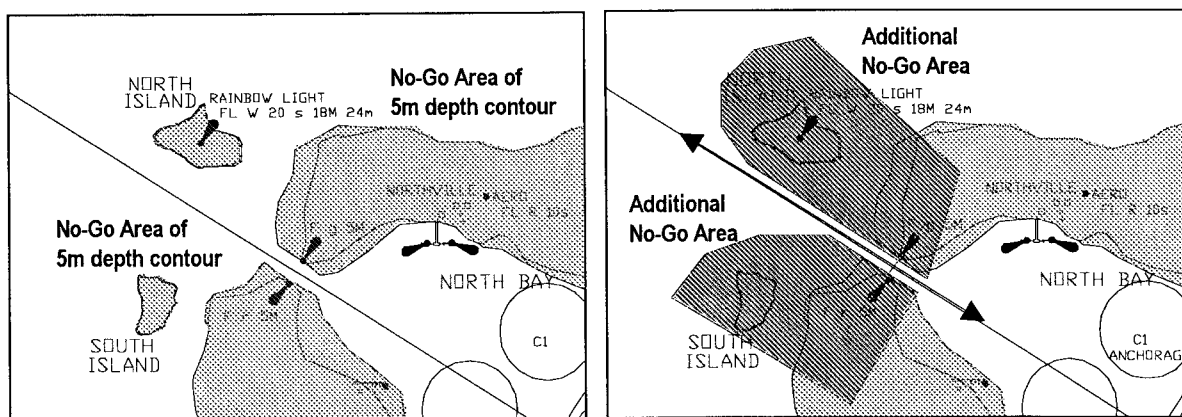
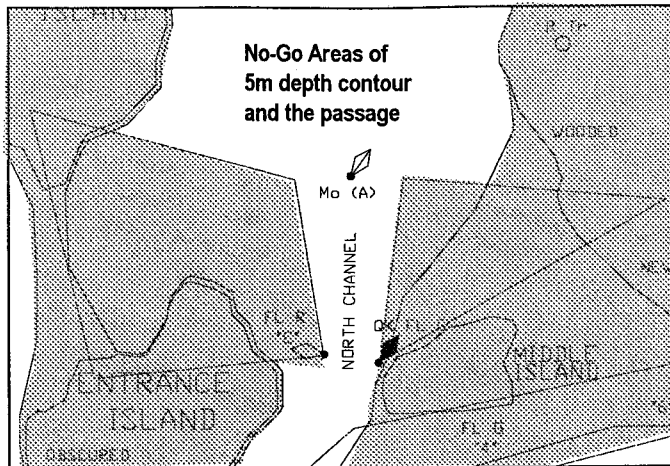
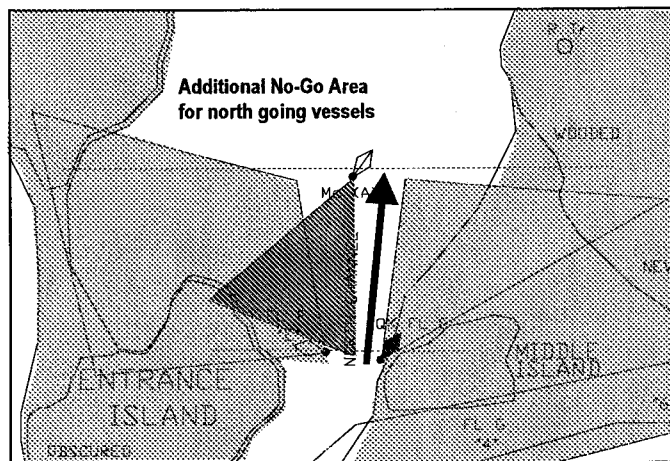


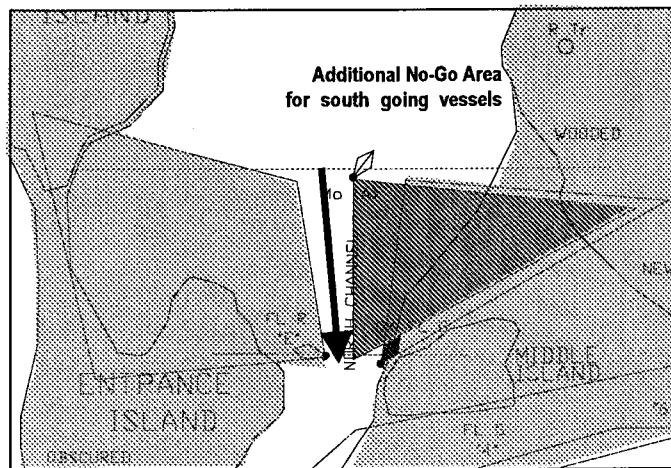
Fig. 2-5 The No-Go Area of a two-way passage



1. No-Go Areas of the 5m water depth contour and the passage



2. The No-Go Area for north going vessels



3. The No-Go Area for south going vessels

Fig. 2-6 The No-Go Area of a one-way passage with separation scheme

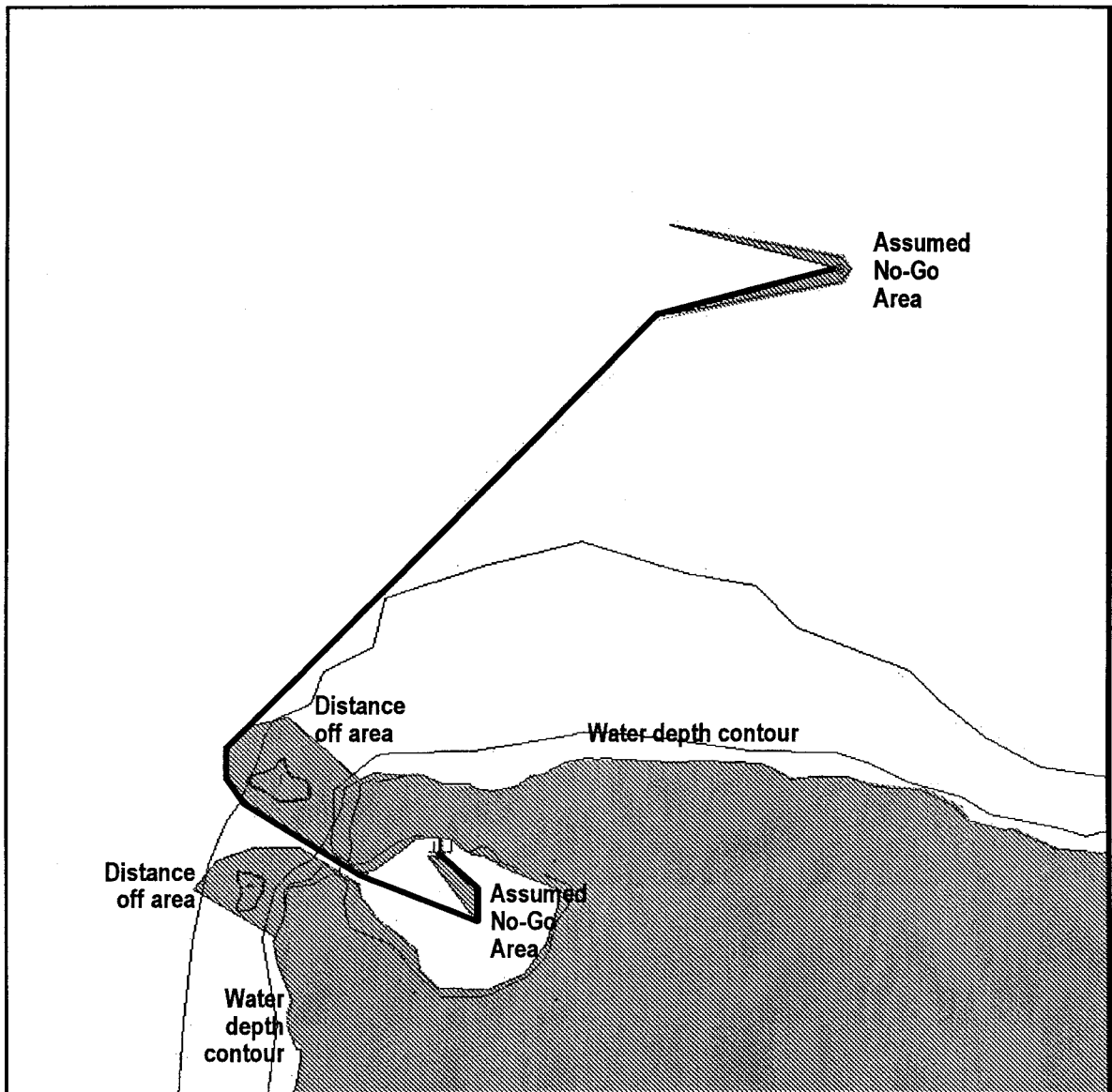
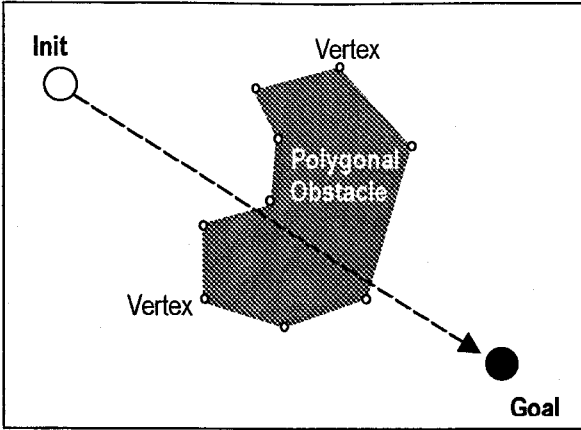
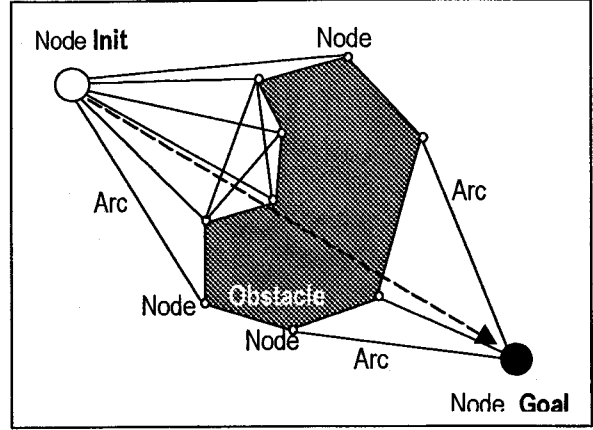


Fig. 2-7 The shortest path planned under the No-Go Area constraint which consists of the water depth contour, distance off areas and assumed No-Go Areas

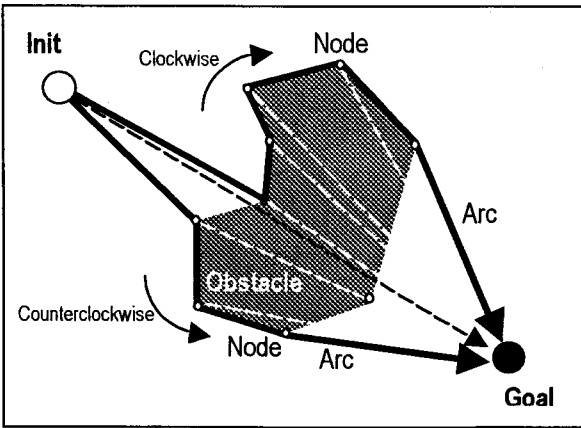




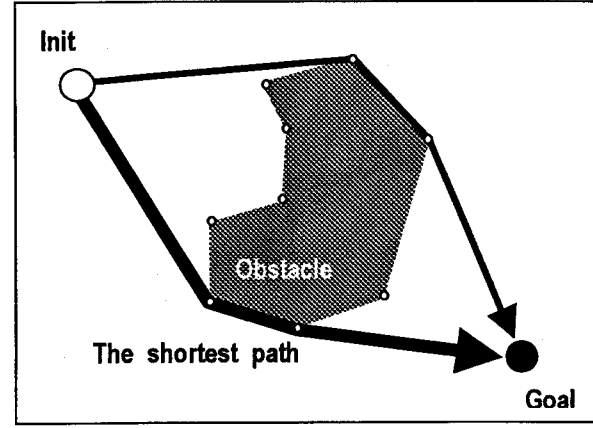
Step 1 Two dimensional polygonal obstacle region as the topographical constraints, the initial and the goal positions are defined.



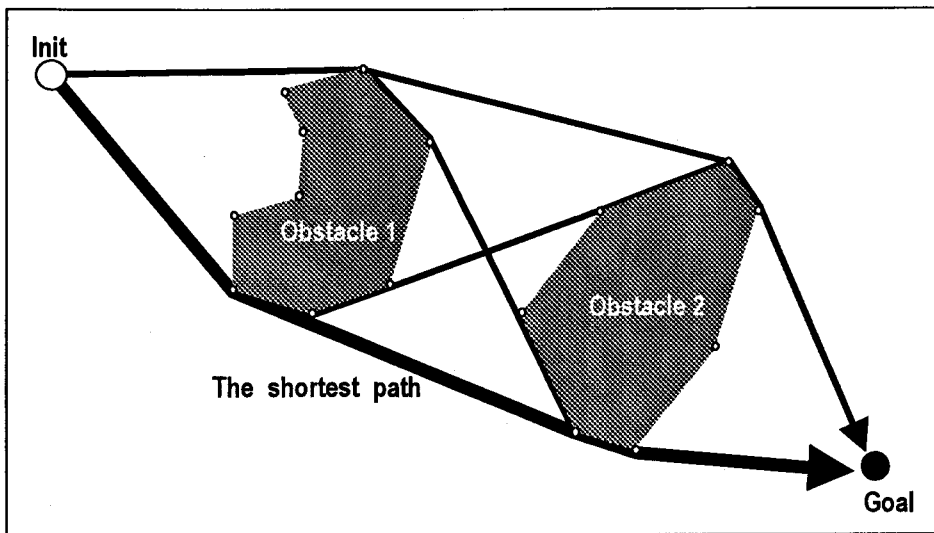
Step 2 The non-directed graph, whose nodes are the init, the goal and the obstacles' vertices, is defined. An arc/link between two nodes is a straight line segment which does not intersect the obstacle's interior.



Step 3 The paths from the init to the goal are founded by searching the nodes, which are connected to the goal, of the obstacle in clockwise/counterclockwise directions.

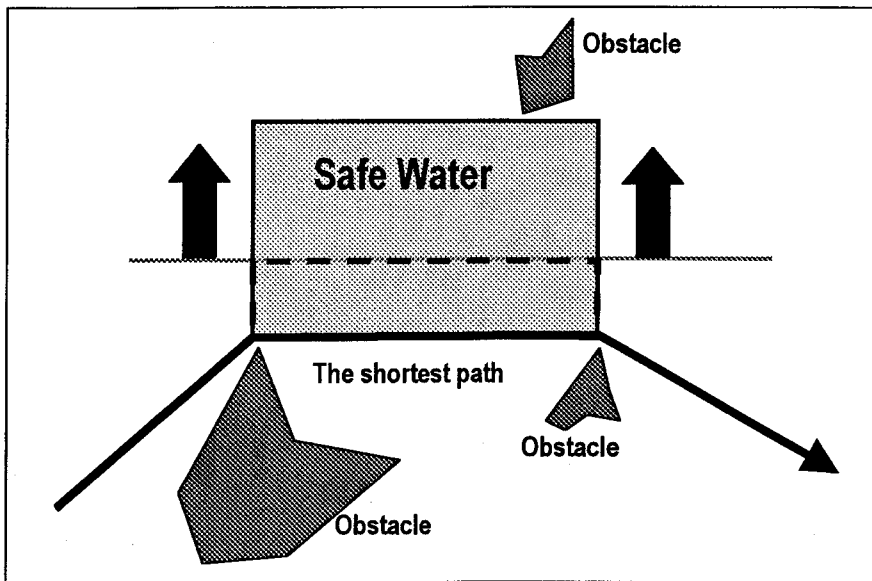


Step 4 Comparing the costs of paths, the shortest path from the init to the goal is founded.

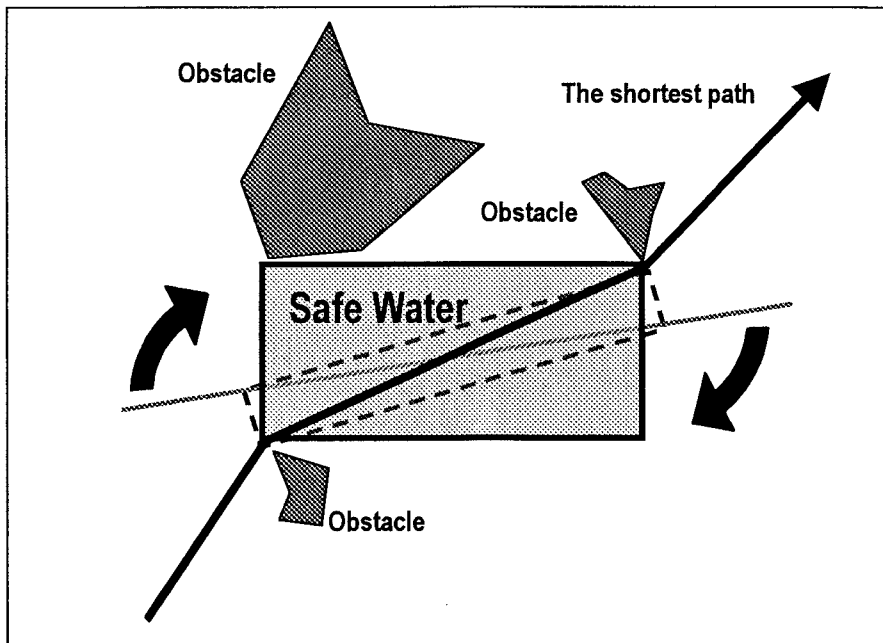


An example of path planning on two obstacles

Fig. 2-8 The path planning method for route planning



1. In the case where the shortest path is a side of the rectangular Safe Water



2. In the case where the shortest path is a diagonal of the rectangular Safe Water

Fig. 2-9 Method to plan an elemental Safe Water along the shortest path

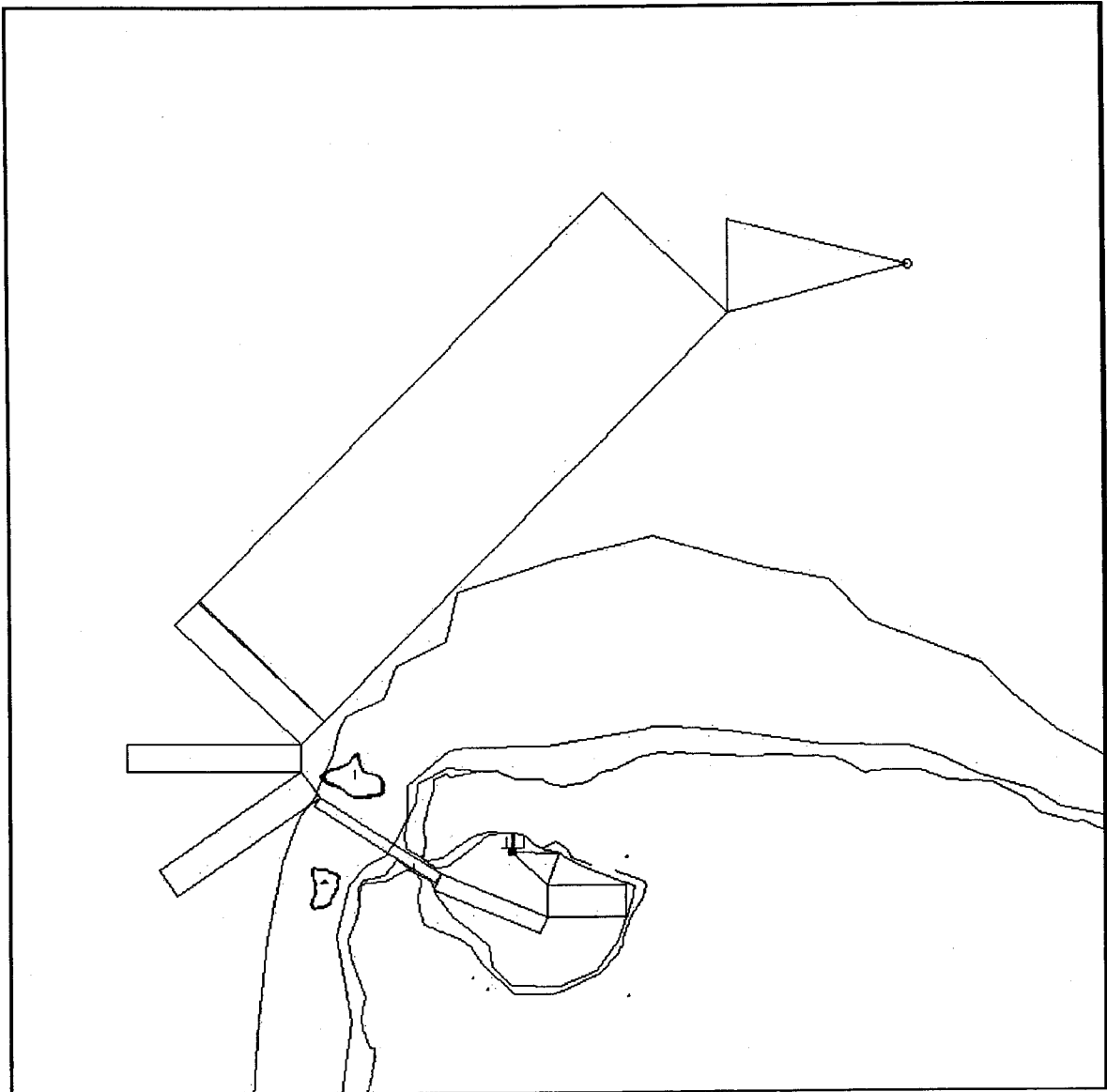
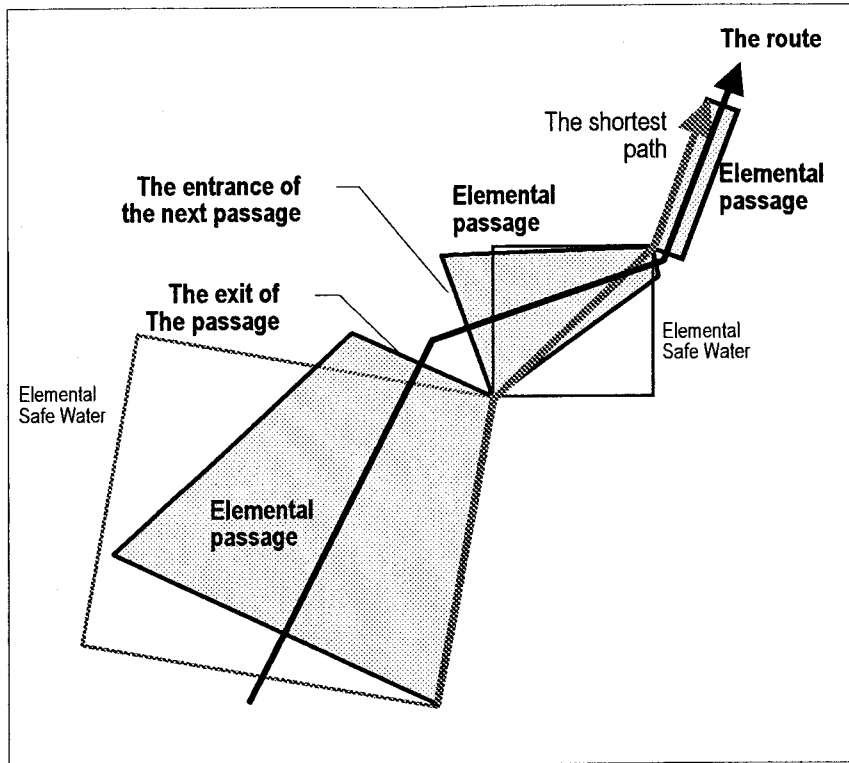
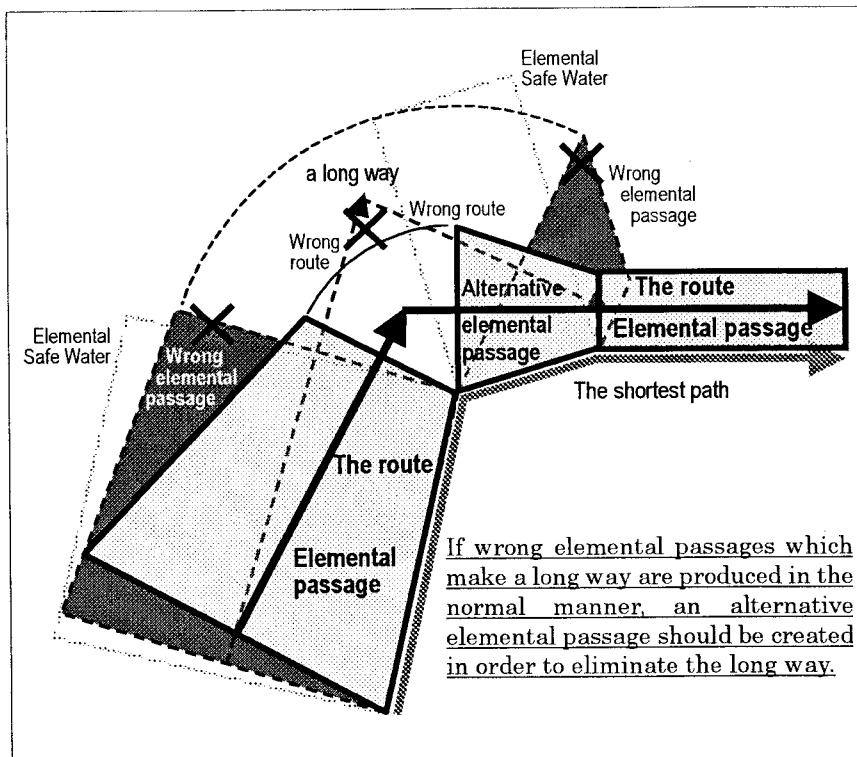


Fig. 2-10 A chain of elemental Safe Waters along the shortest path

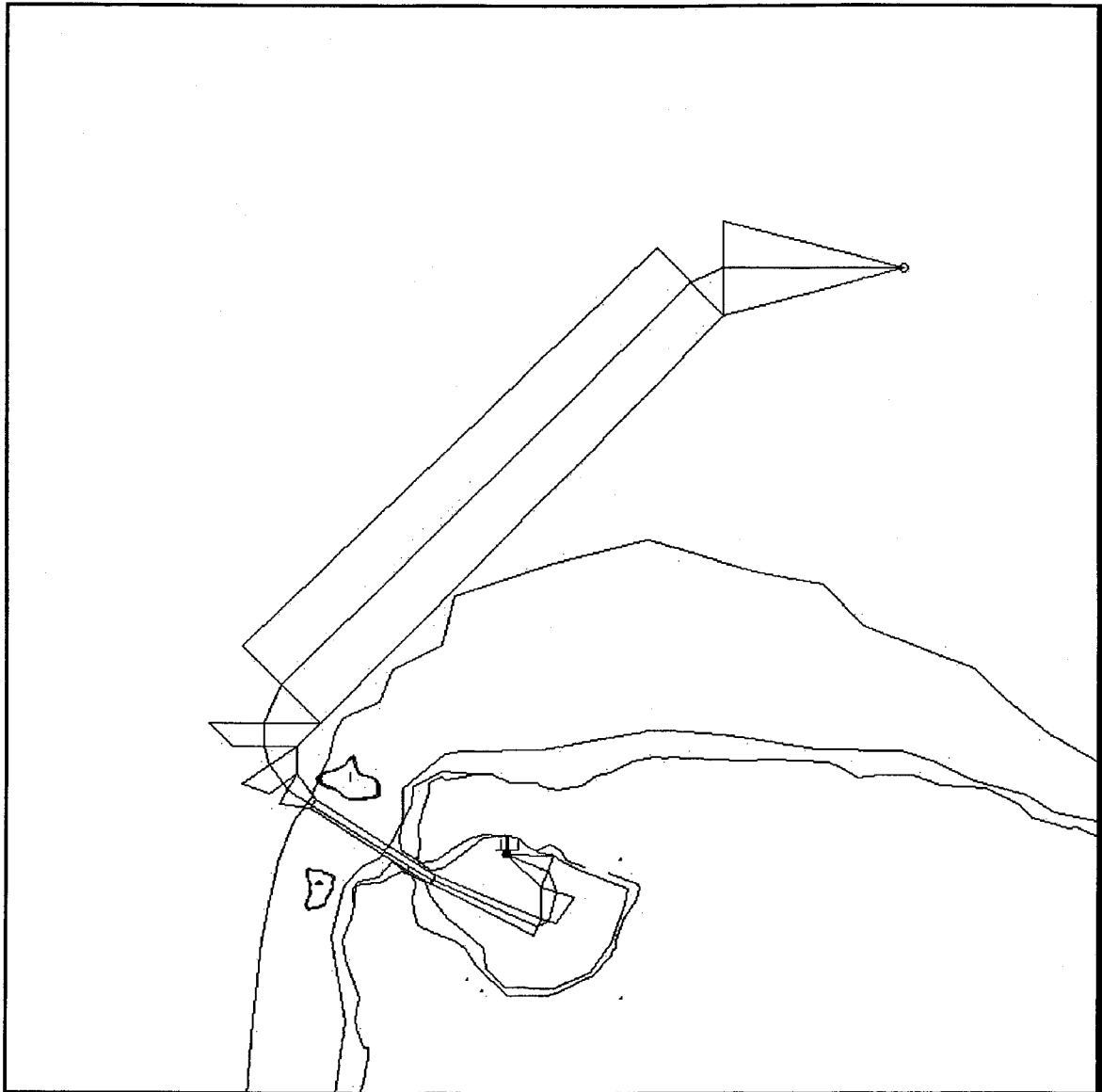


1. In the normal case



2. In the case which a long way between two passages is produced.

Fig. 2-11 Transformation of a chain of elemental Safe Waters into a chain of elemental passages



**Fig. 2-12 A chain of elemental passages and the route**

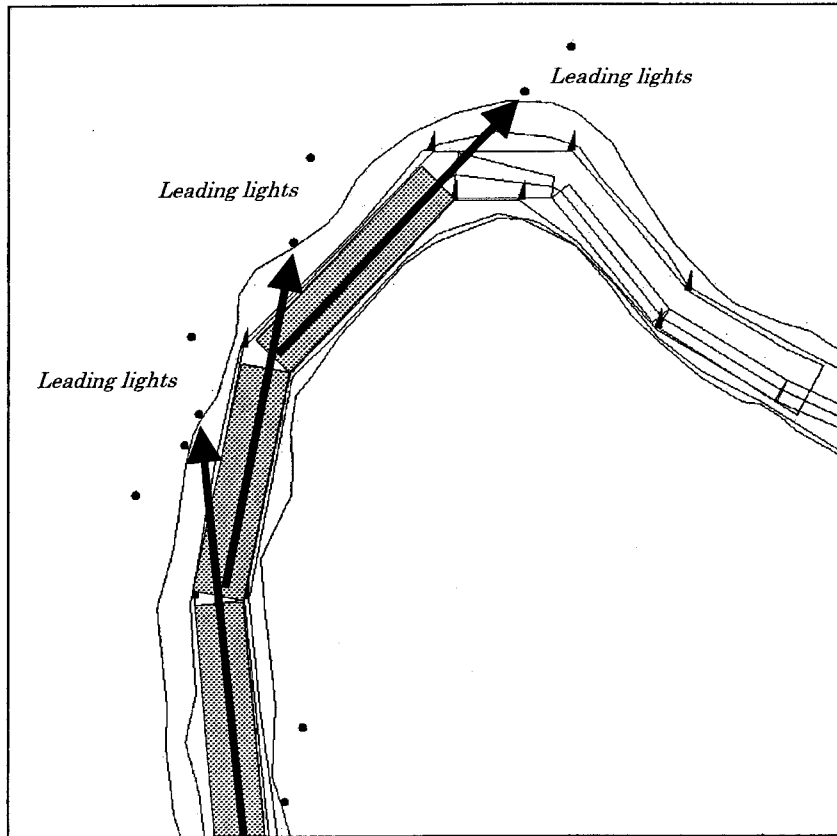


Fig. 2-13 The course of the passage directed to the leading lights

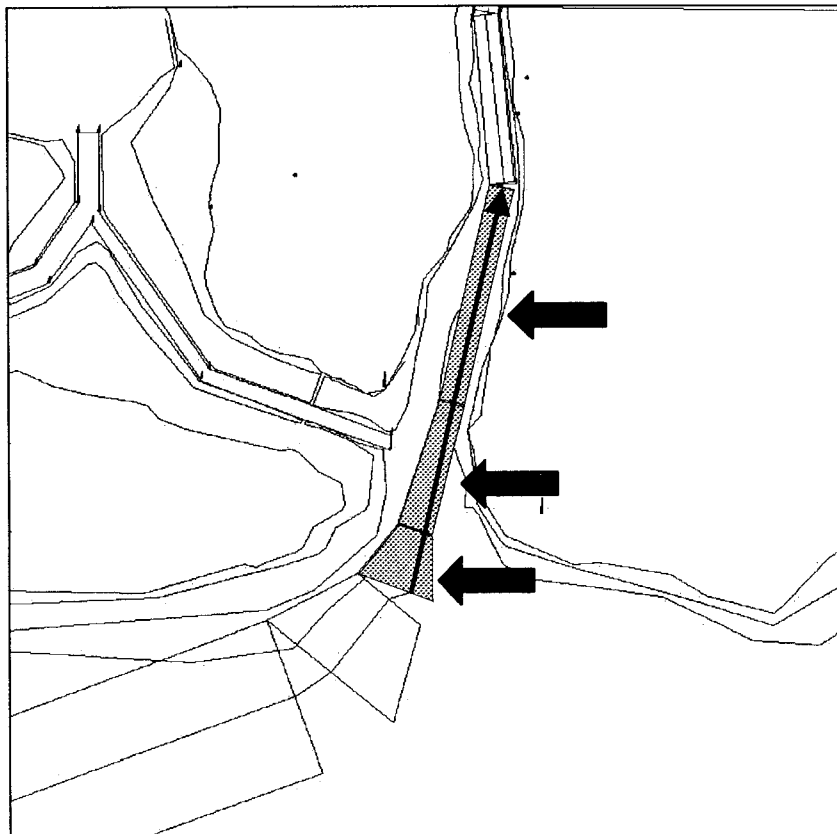
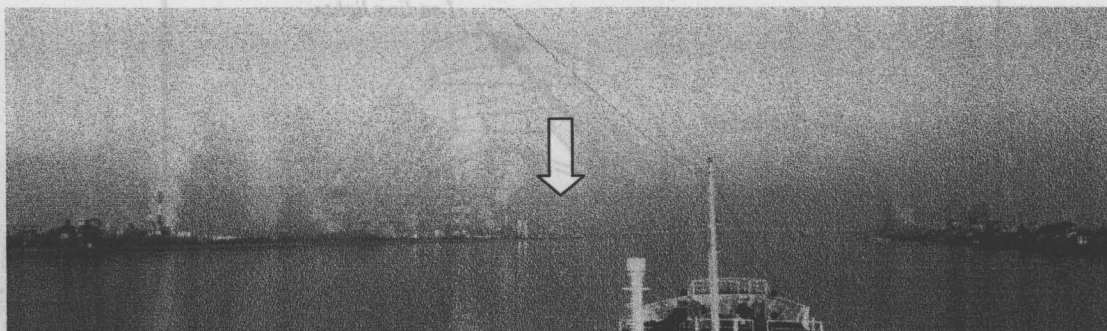
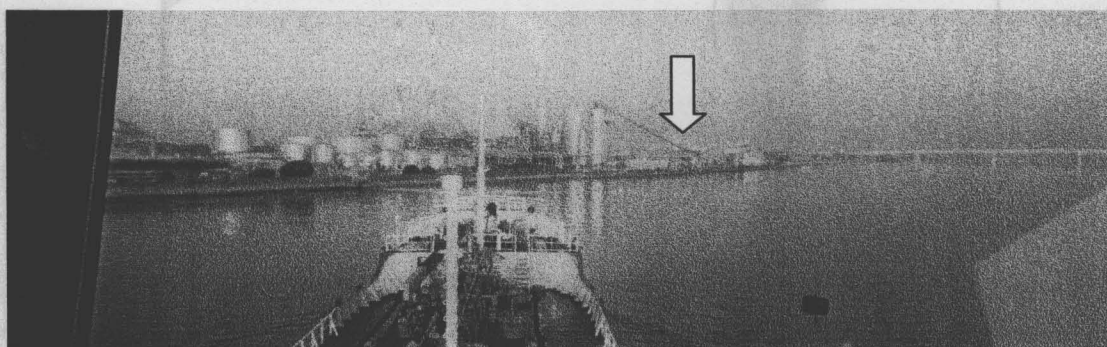


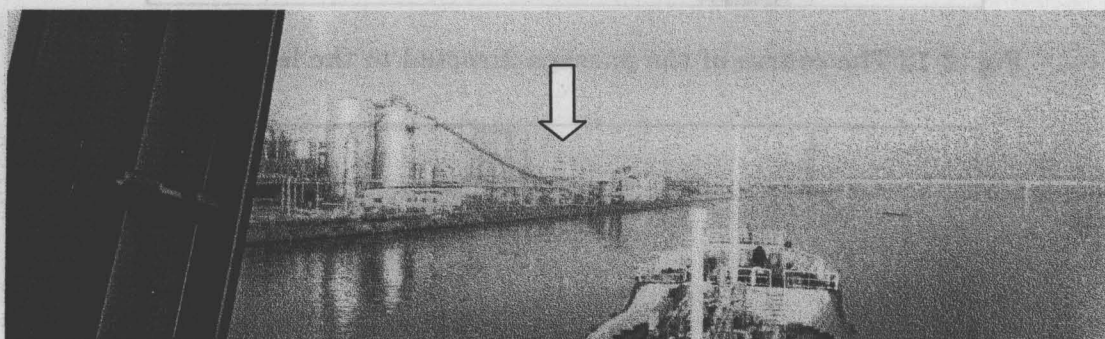
Fig. 2-14 Unification of the courses of two or more passages



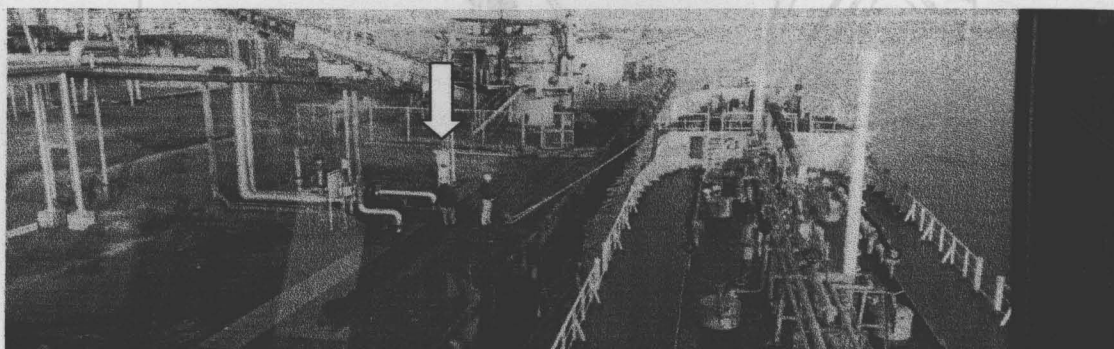
1



2



3



4

**Fig. 3-1 Sequential photos of the GT499 type inland vessel during a handling alongside the pier without turning**

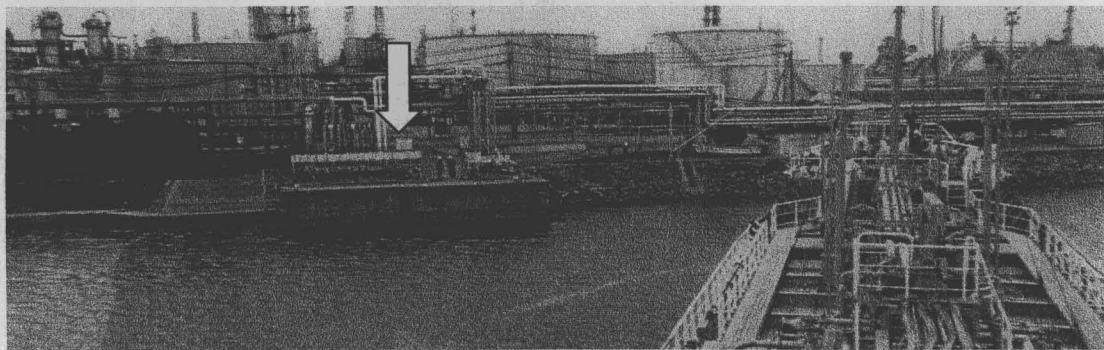
Fig. 3-14 Unification of the courses of two or more passages



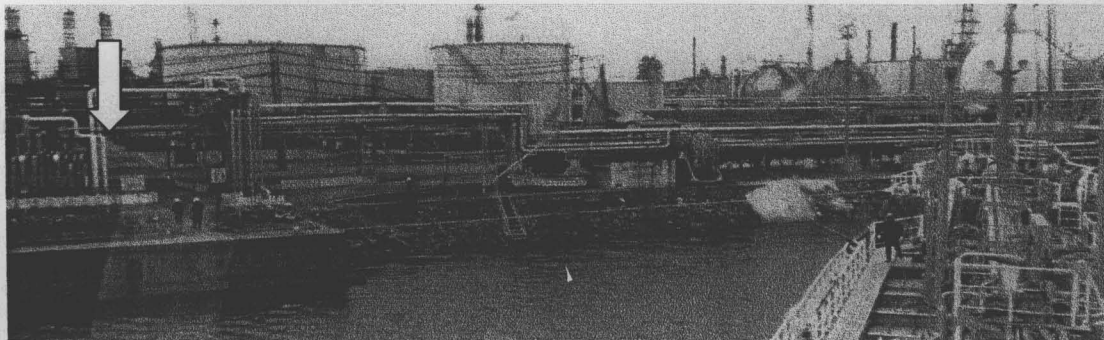
1



2



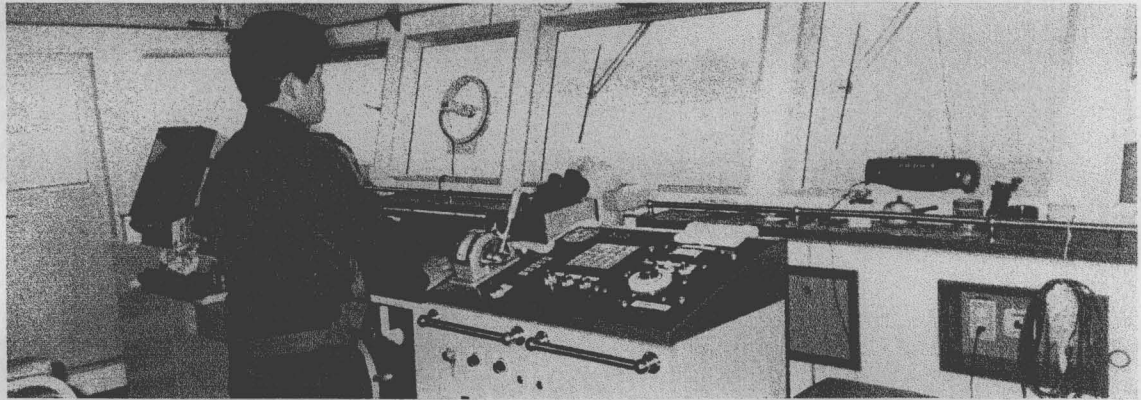
3



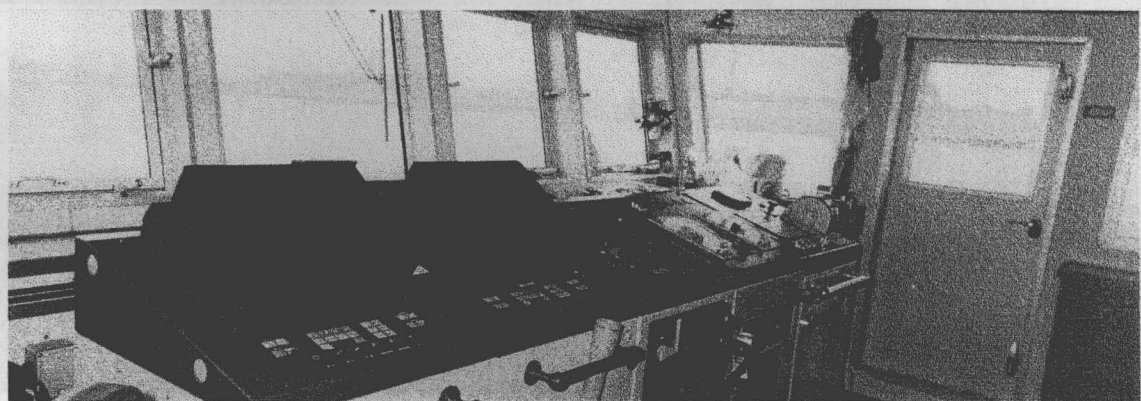
4

**Fig. 3-2 Sequential photos of the GT499 type inland vessel during a handling alongside the pier with turning to make the head to the area entrance**





Ship "N"



Ship "S"

**Fig. 3-3 Bridge layouts and associate equipments of typical GT499 type inland vessels**

Fig. 3-3 Sequential photos of the GT499 type inland vessel during a handling alongside the pier with turning to make the head to the area entrance

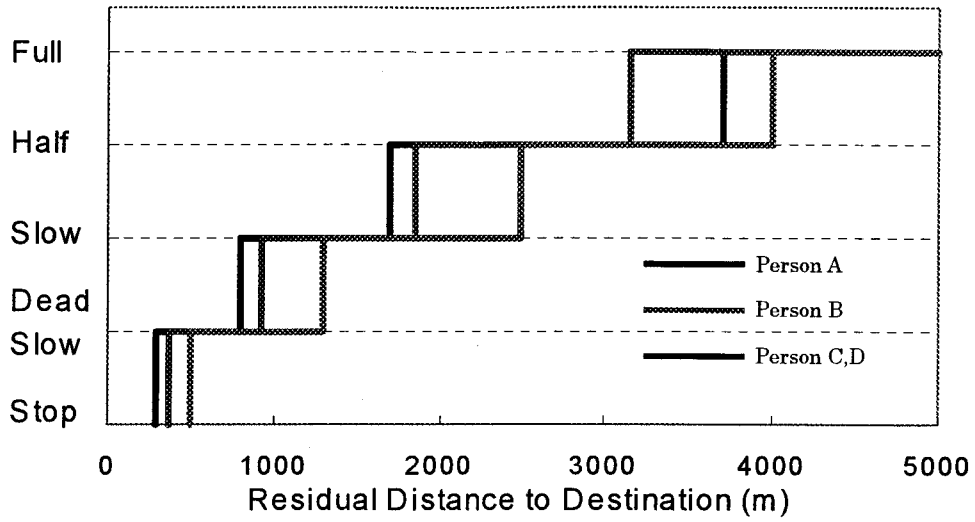


Fig. 3-4 Results of a questionnaire to the experts on deceleration maneuvers

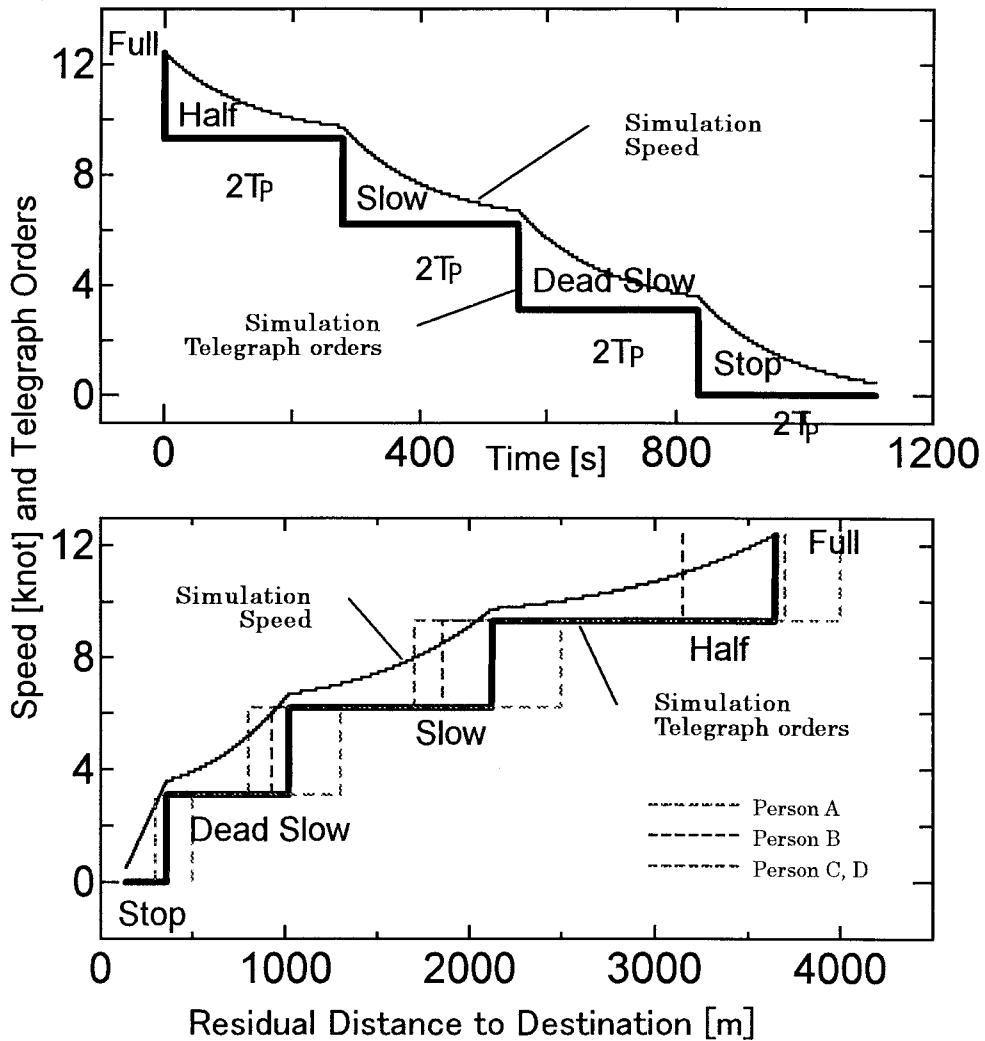


Fig. 3-5 Model of deceleration maneuvers by the experts

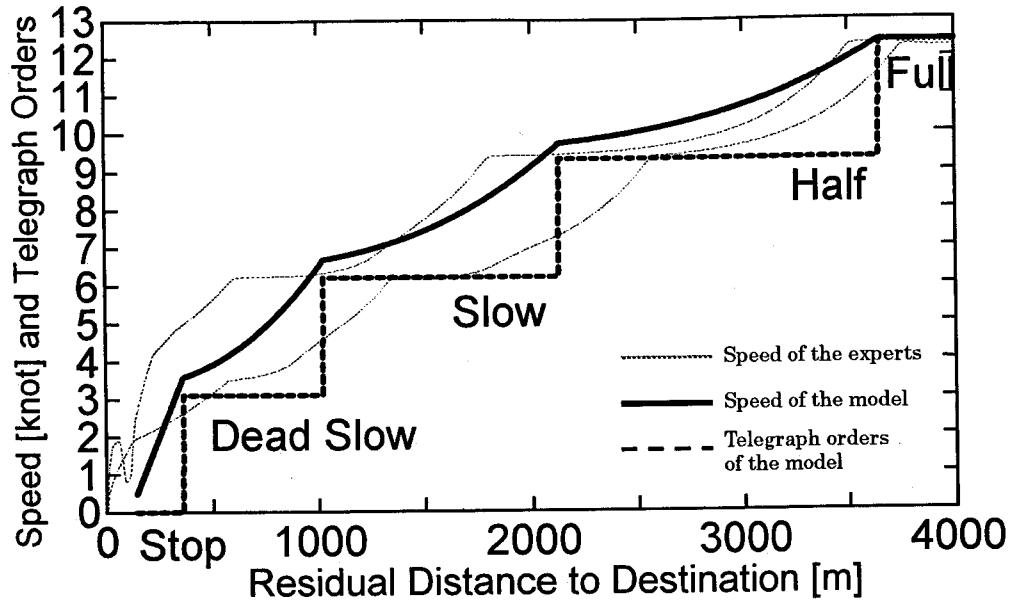


Fig. 3-6 Comparison of deceleration maneuver of the model and that of the experts in simulator experiments

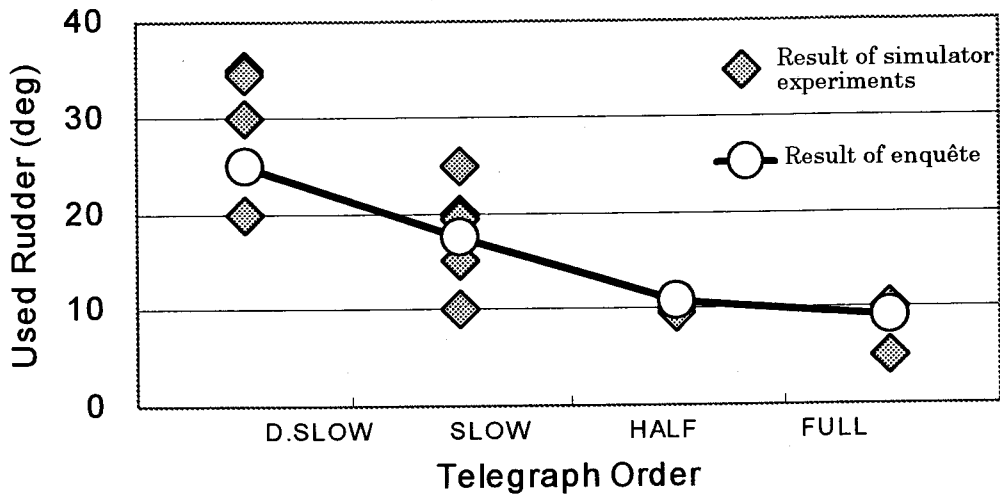


Fig. 3-7 Rudder angles used by the experts for course alterations in simulator experiments

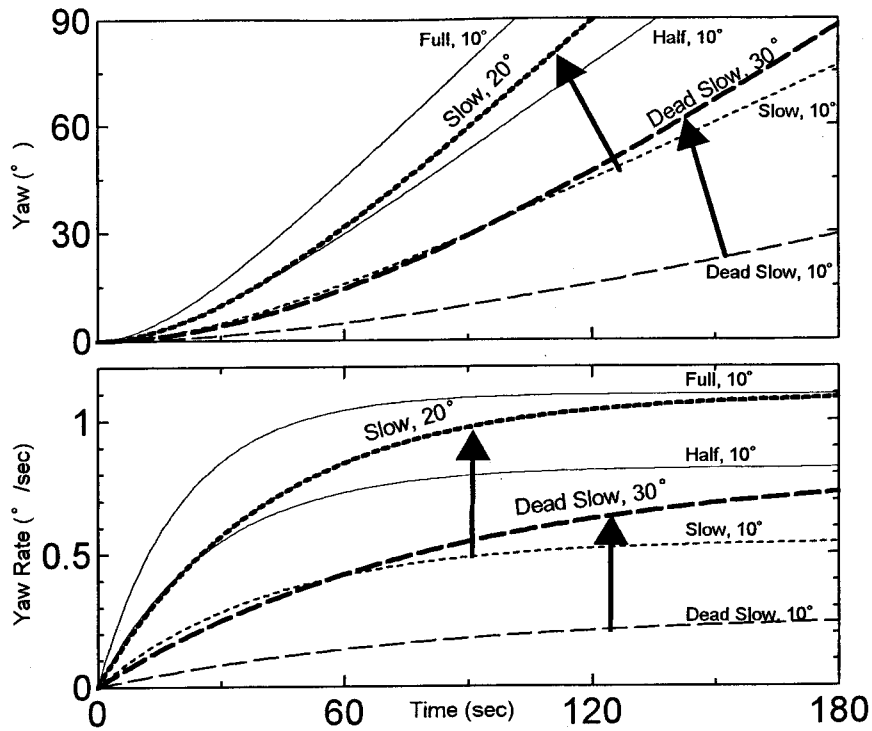


Fig. 3-8 Time series of yaw angles and yaw rates induced by rudder angle using normally at each ship's speed

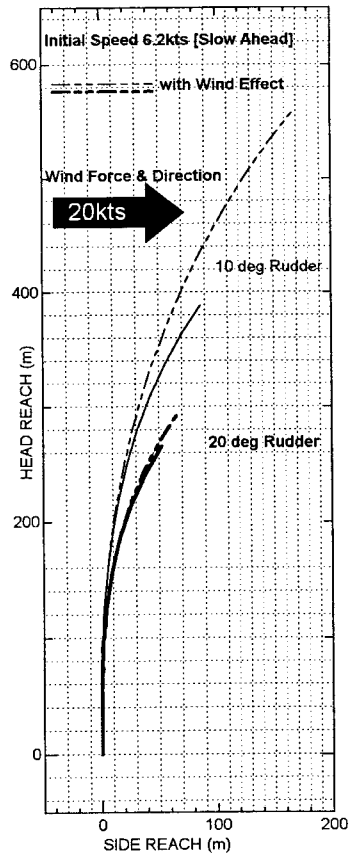


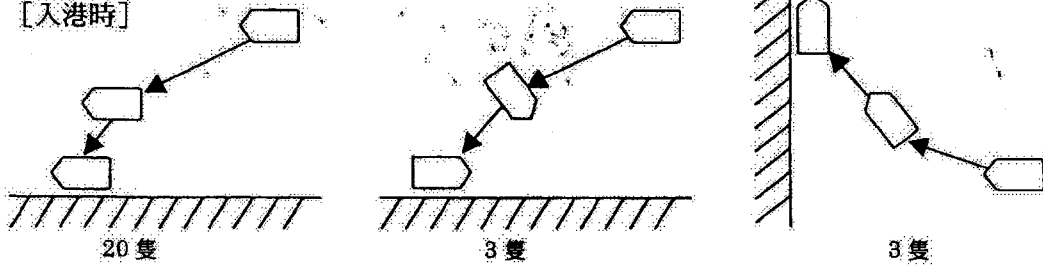
Fig. 3-9 Course alternations under 20 knots wind at low ship's speed

〈解説：接岸及び離岸方法〉

内航船の一般的な離着棧操船方法（月刊公団船より）  
尚、図中の隻数は実態調査した対象船の数を示す。

(1)499GT 型

〔入港時〕



〔出港時〕

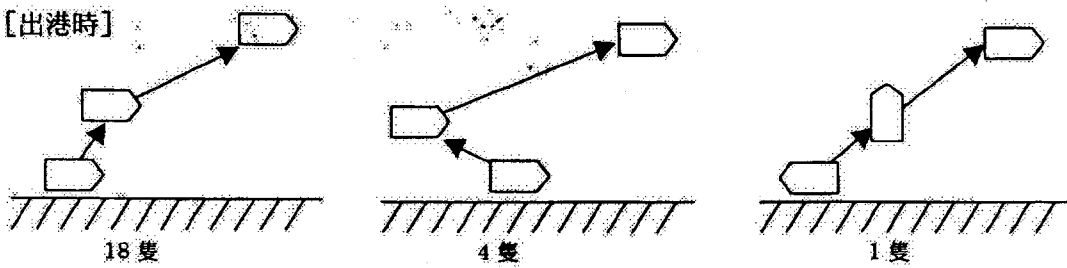


Fig. 3-10 Docking and undocking maneuvers of GT499 type vessels  
(In monthly magazine "Koudansen")

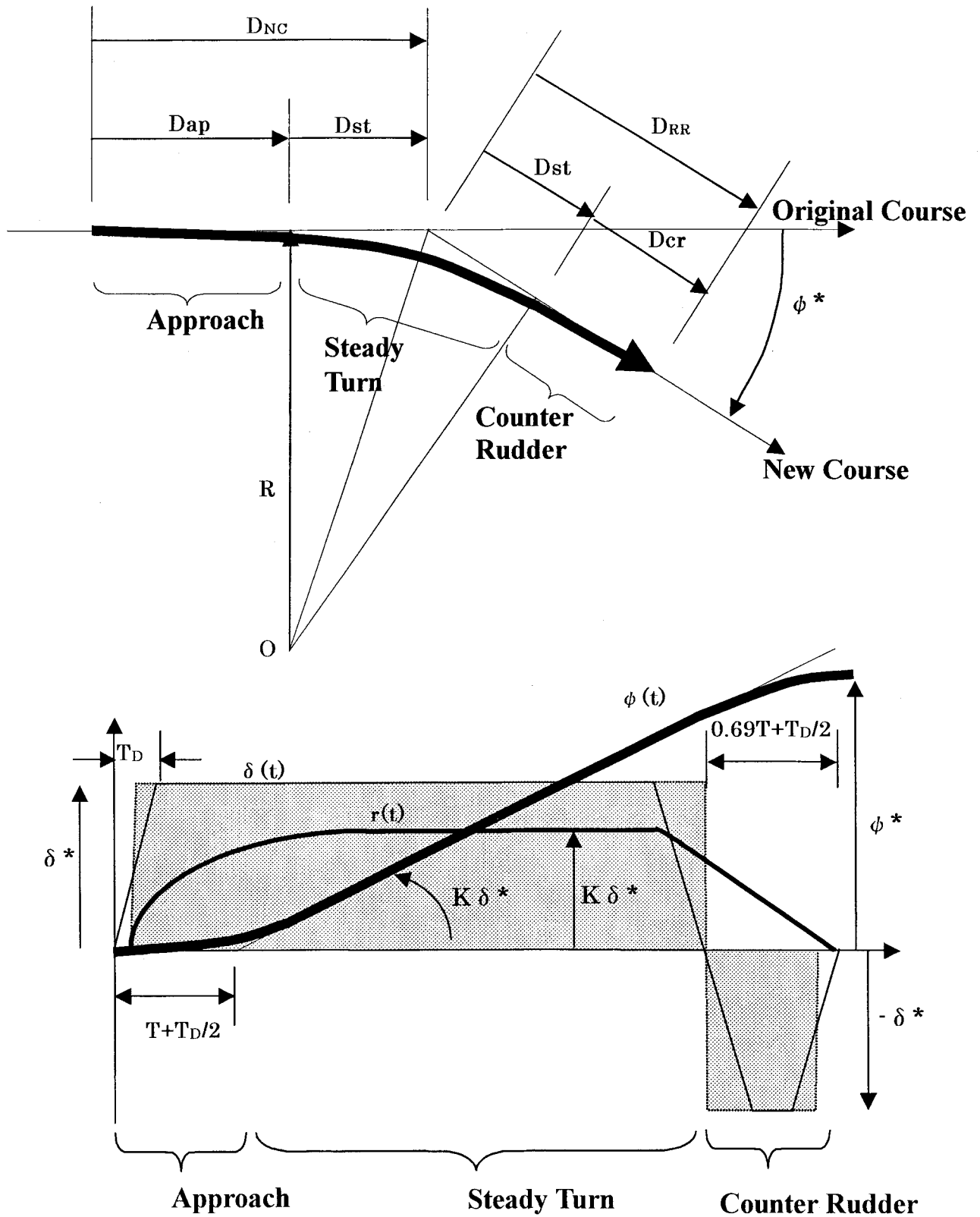


Fig. 4-1 Schematic definition of the standard steering to alter course and relation among trajectory, yaw rate, yaw angle and rudder angle

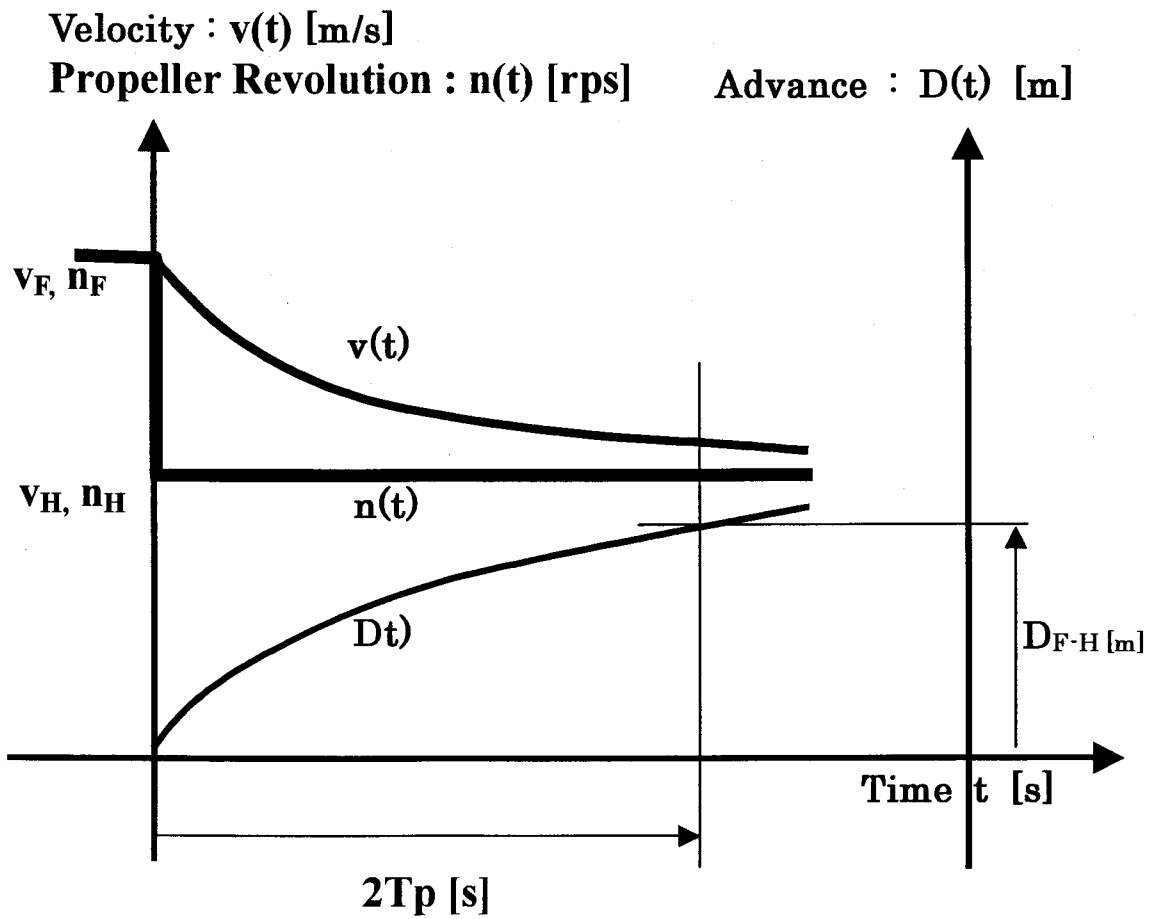


Fig. 4-2 Schematic relation among the advance, current speed and object speed

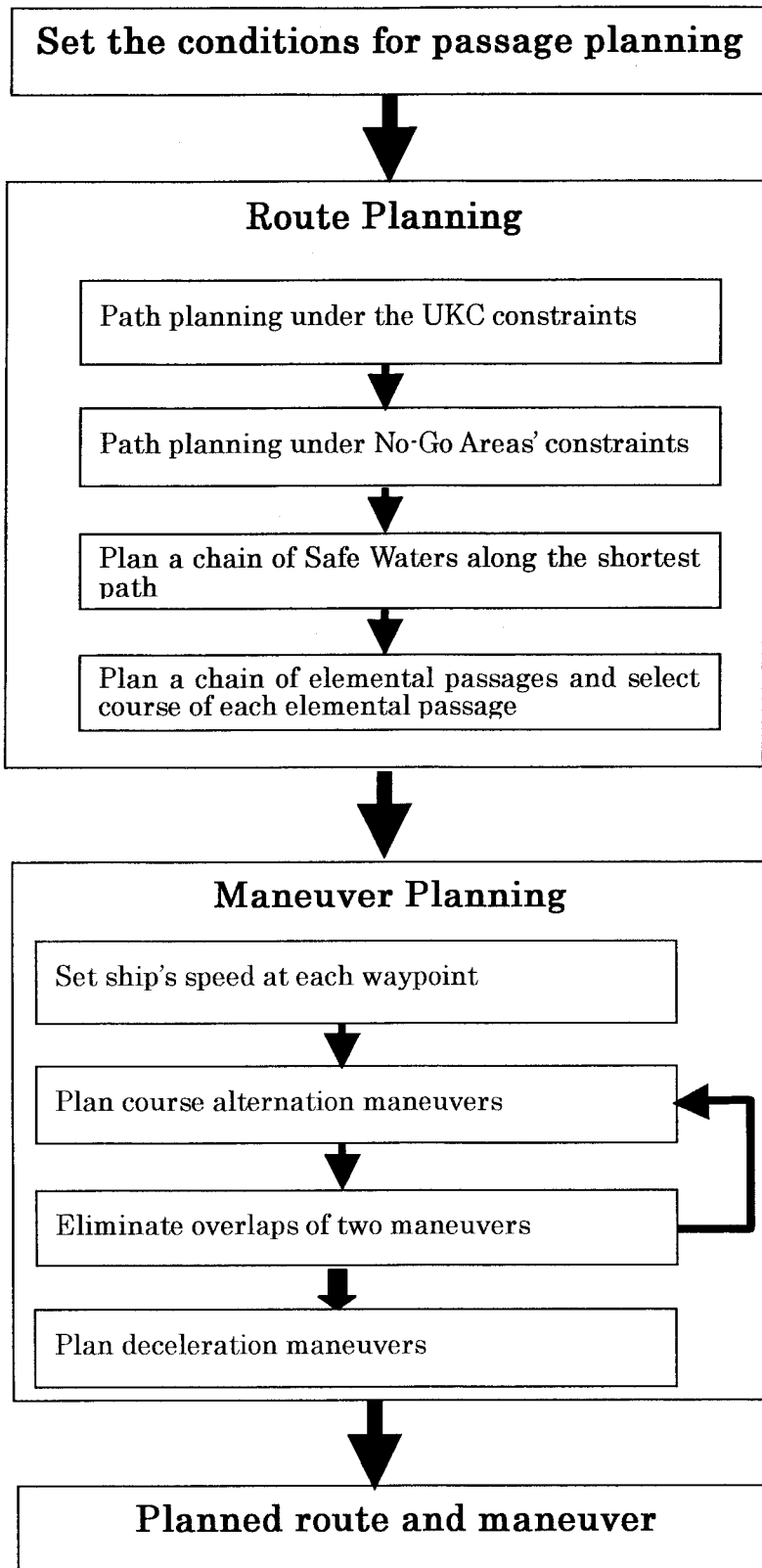


Fig. 5-1 Process of passage planning



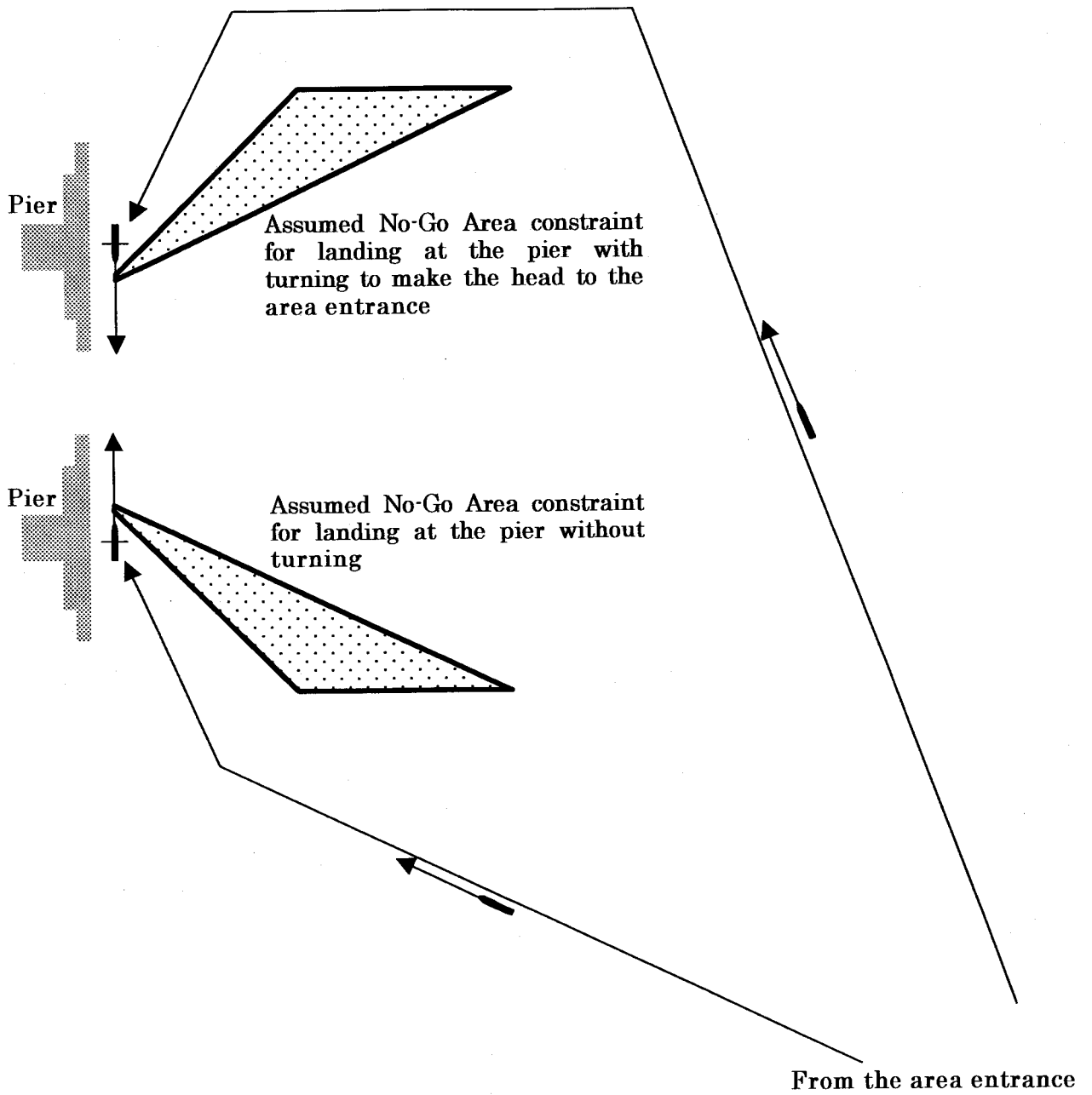


Fig. 5-2 Assumed No-Go Area constraints for landing at the pier with/without turning

**Dap**: Advance of the approach part in course alternations  
**Dcr**: Advance of the counter rudder part in course alternations  
 Above parameters were defined in Fig.4-1.

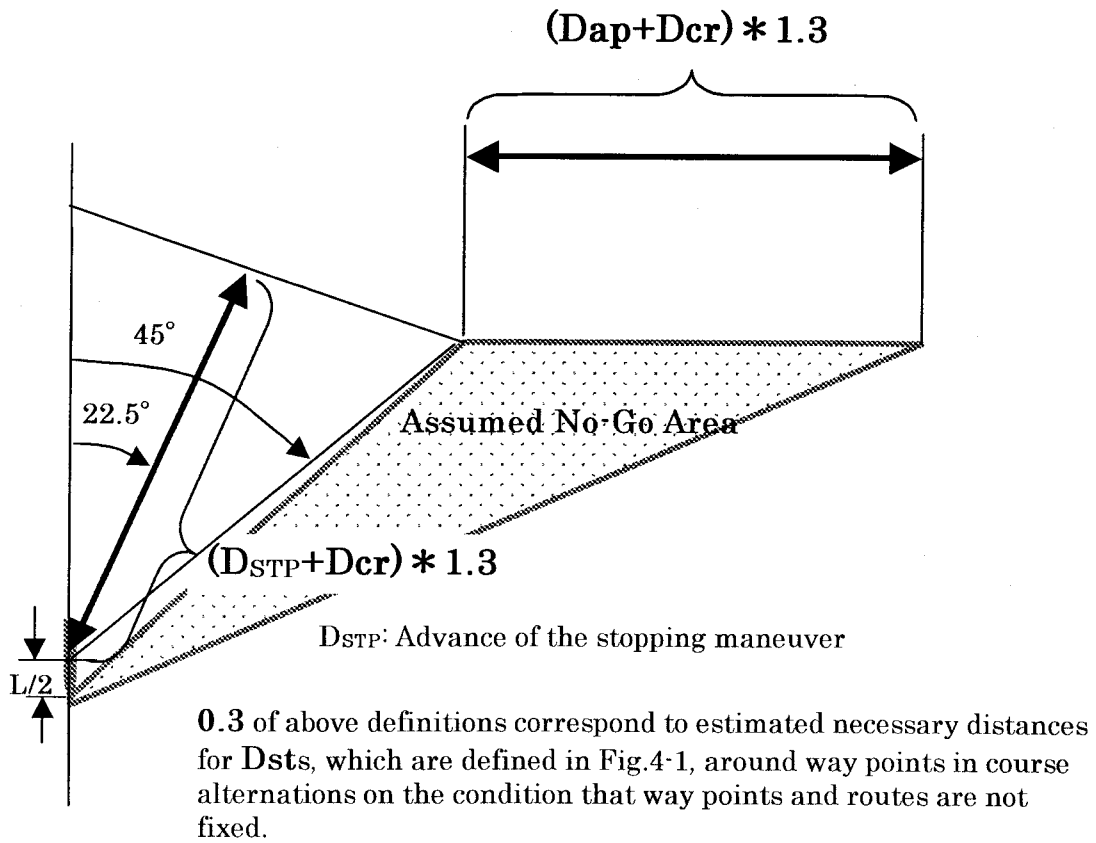


Fig. 5-3 Configuration of the assumed No-Go Area for landing at the pier

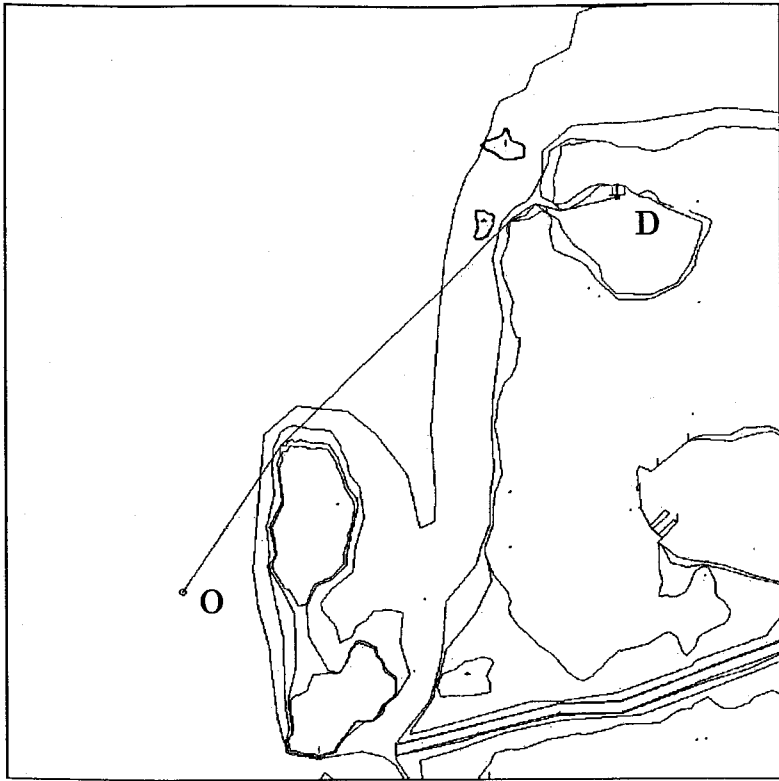


Fig. 5-4 The shortest path under the UKC constraints



Fig. 5-5 The shortest path under the No-Go Area constraints

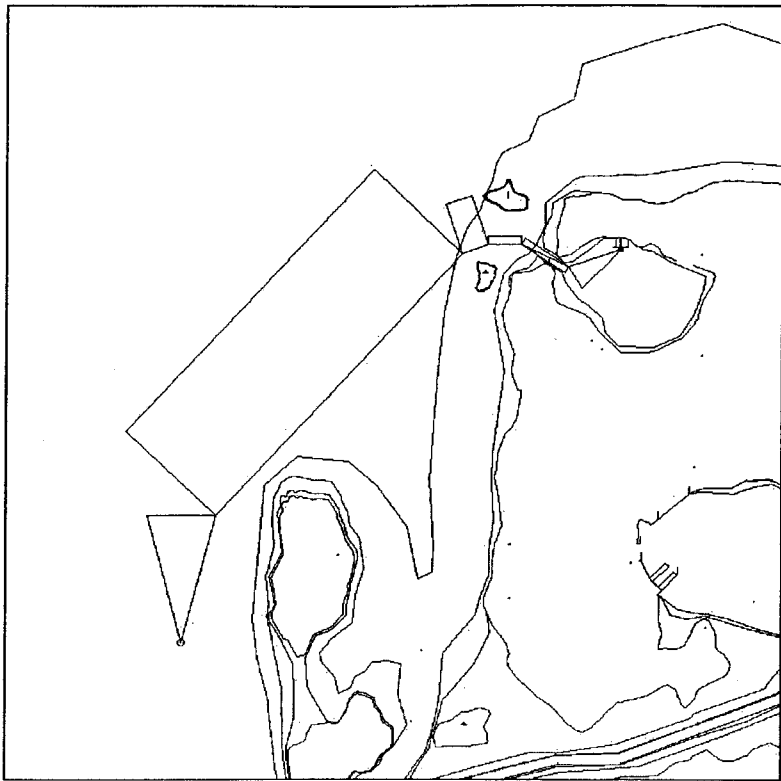


Fig. 5-6A chain of the Safe Water along the shortest path

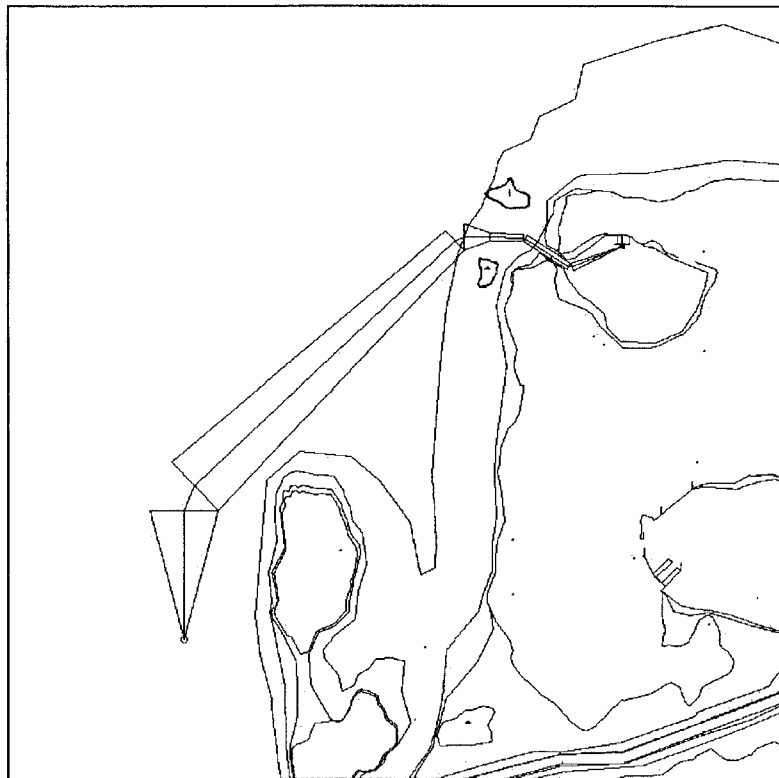


Fig. 5-7A chain of elemental passages and the route

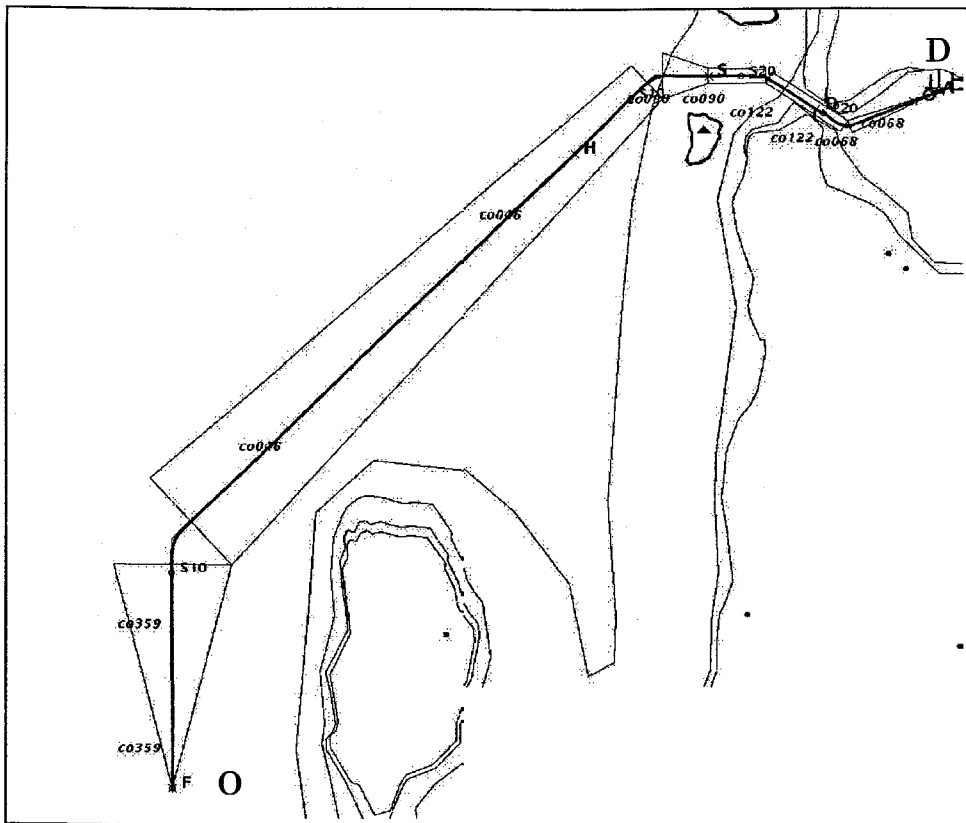


Fig. 5-8A planned maneuver

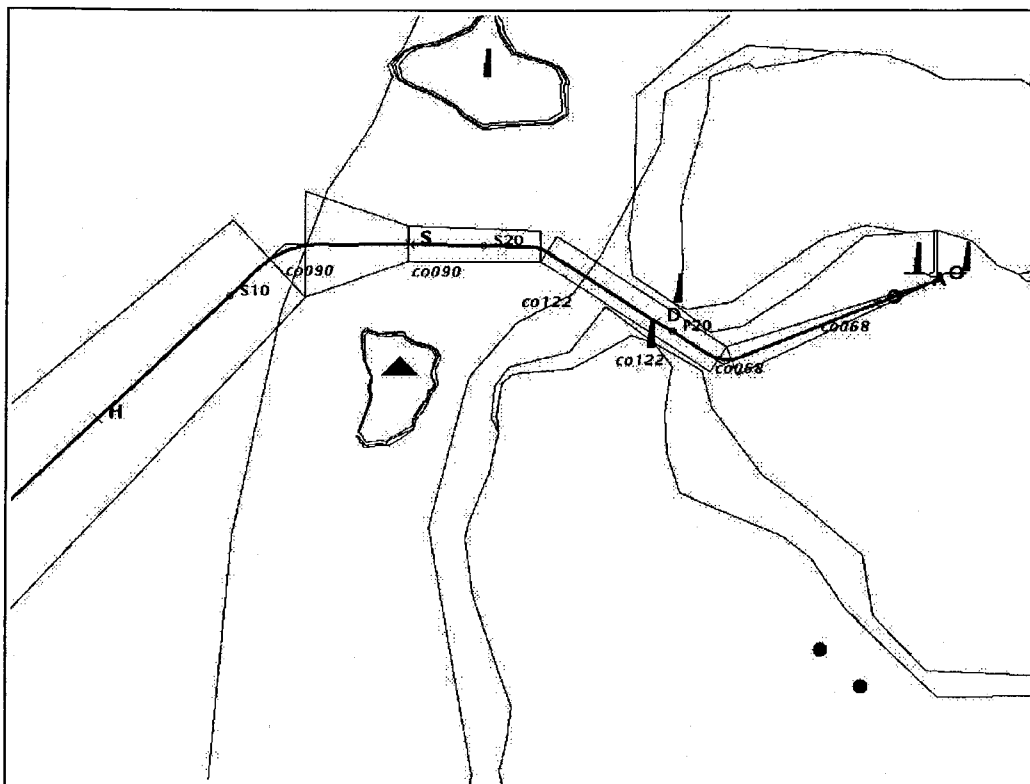


Fig. 5-9 An enlarged copy of a part of the planned maneuver shown in Fig. 5-8.

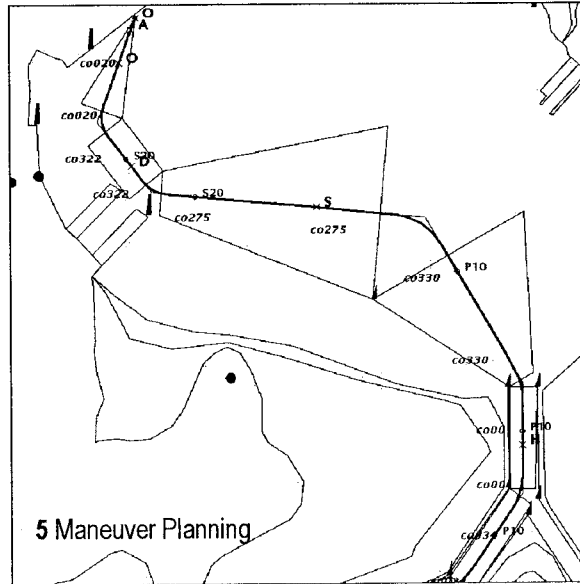
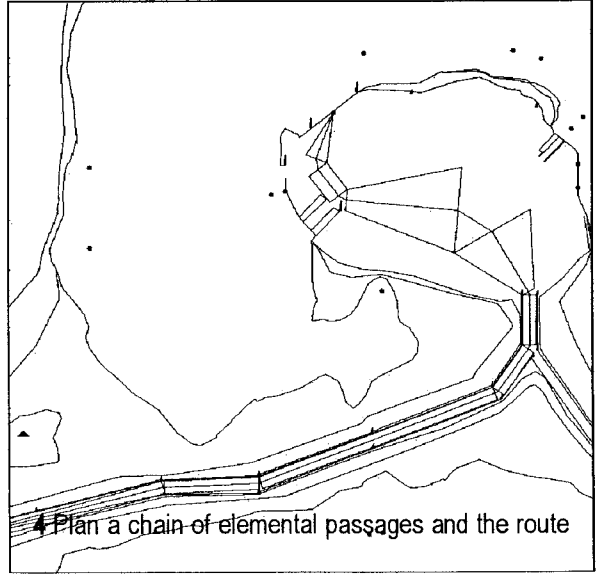
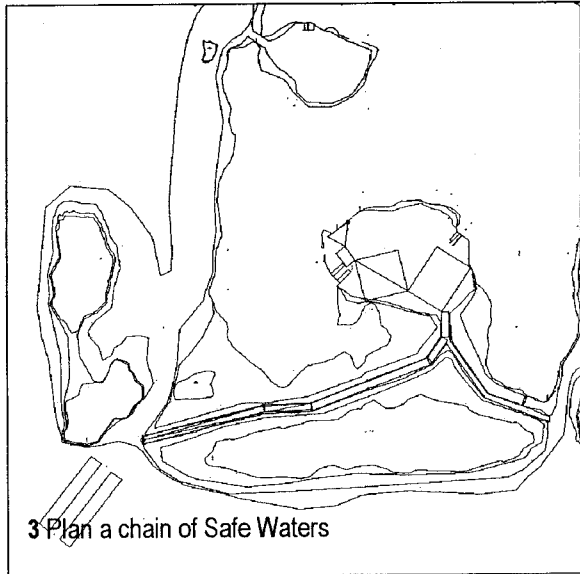
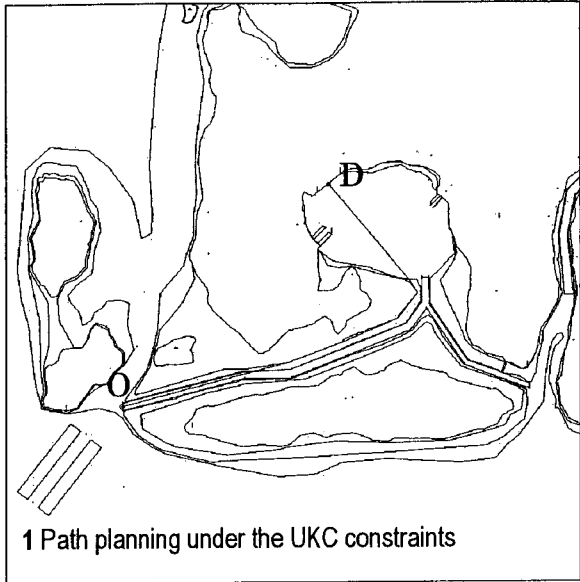


Fig. 5-10 Output example at each phase of the automatic passage planning -1

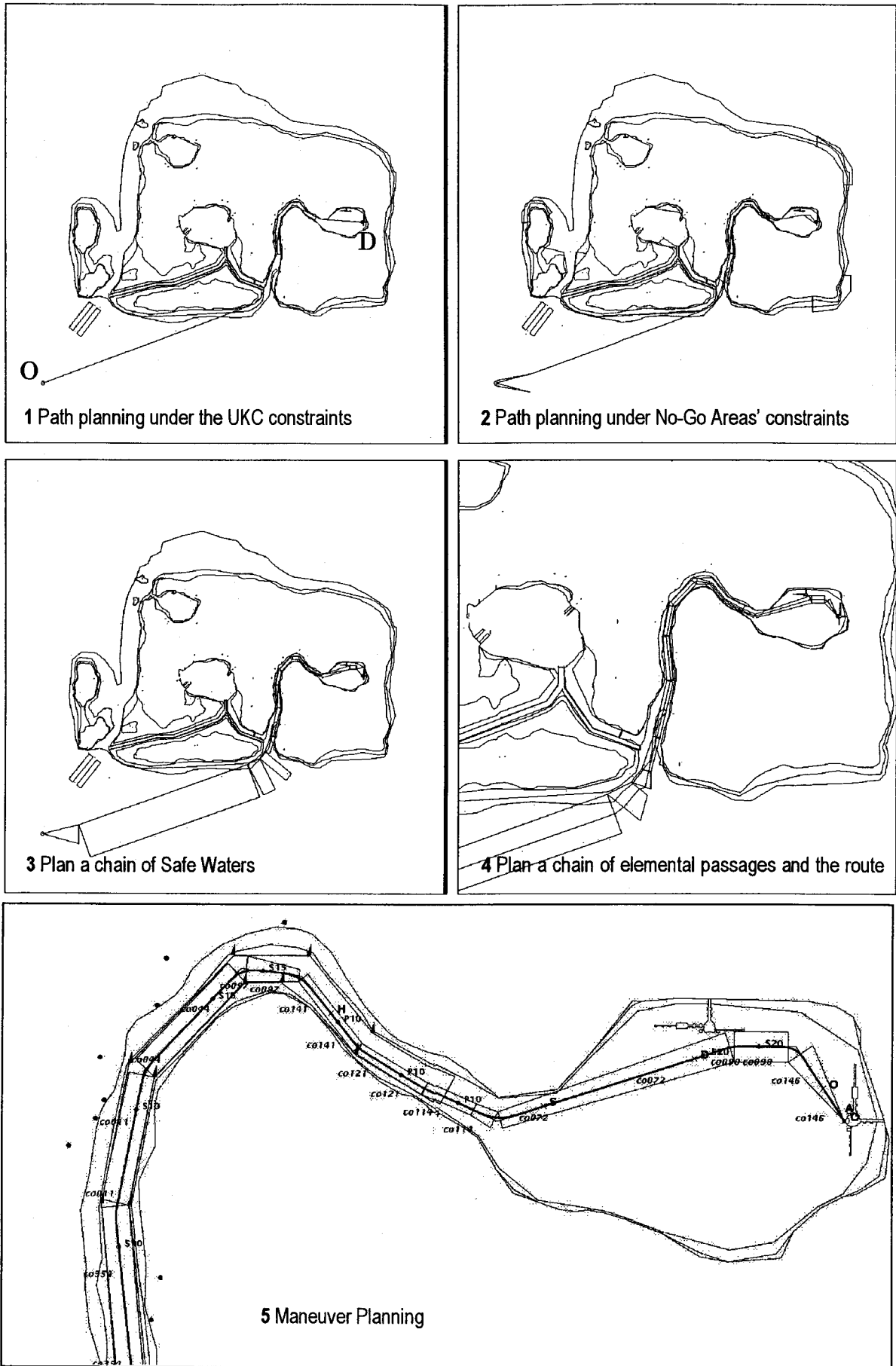


Fig. 5-11 Output example at each phase of the automatic passage planning -2

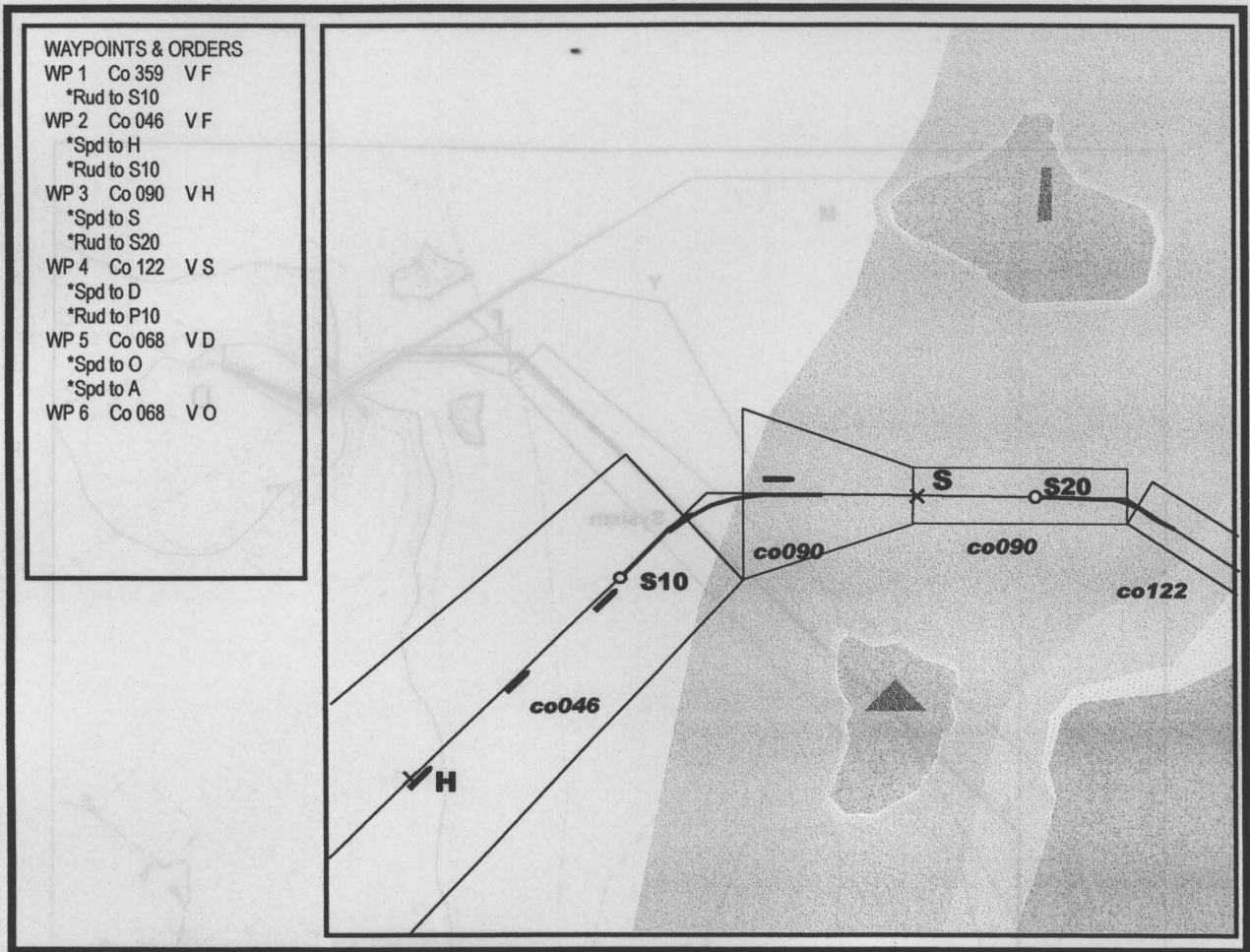


Fig. 6-1 Display image of the support system for maneuvering



Fig. 6-2 The support system for maneuvering in the shiphandling simulator



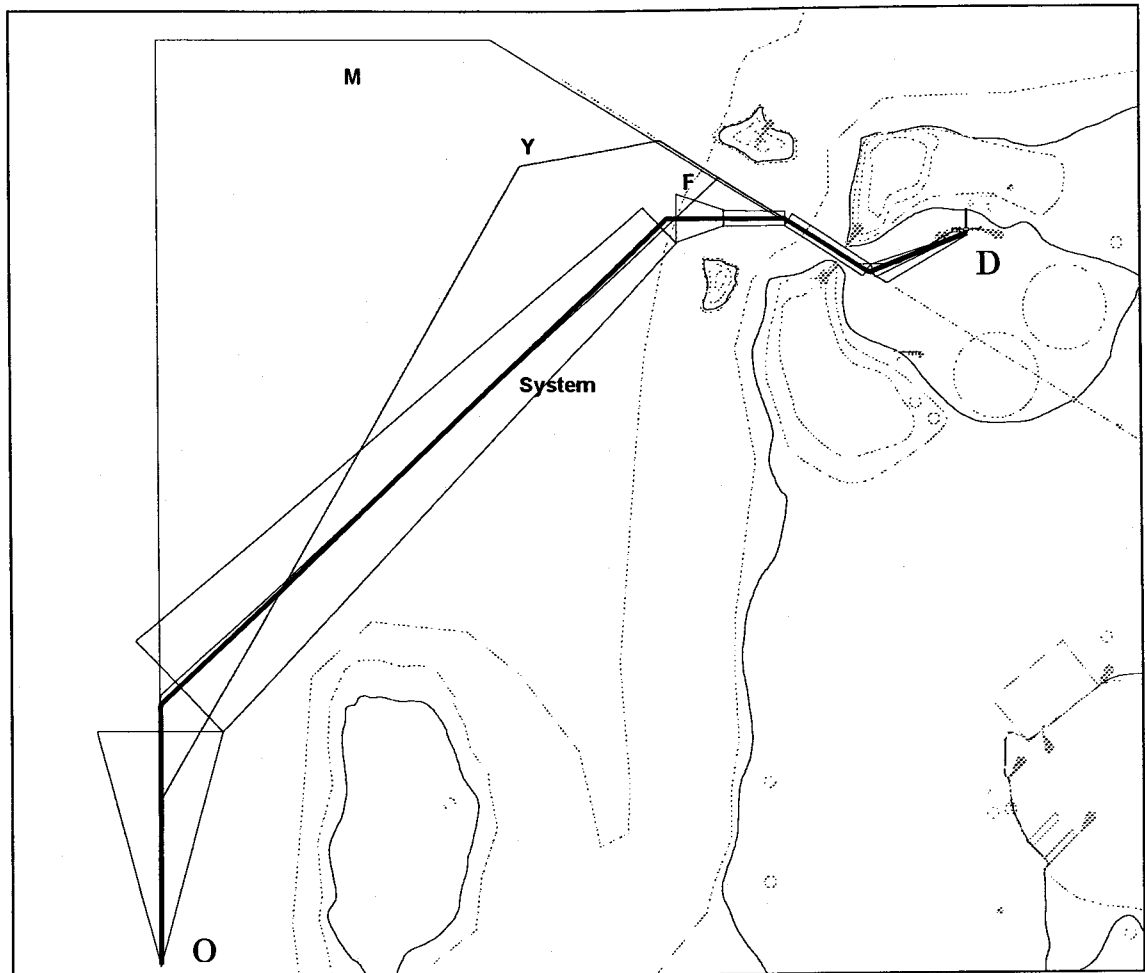


Fig. 7-1 Comparison of the routes of the experts and that of the automatic passage planning system

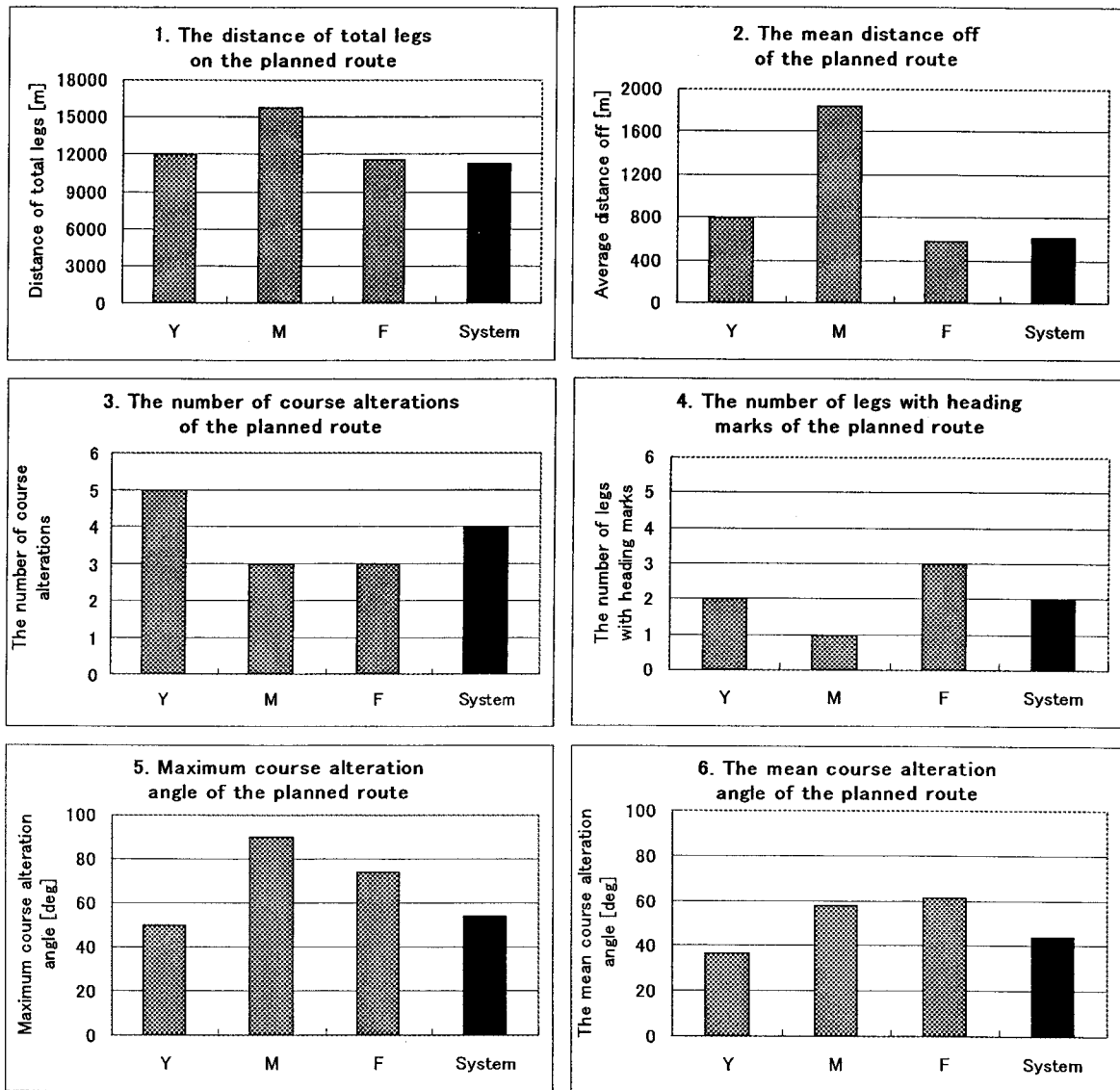


Fig. 7-2 Six kinds of characteristic indices on the planned route

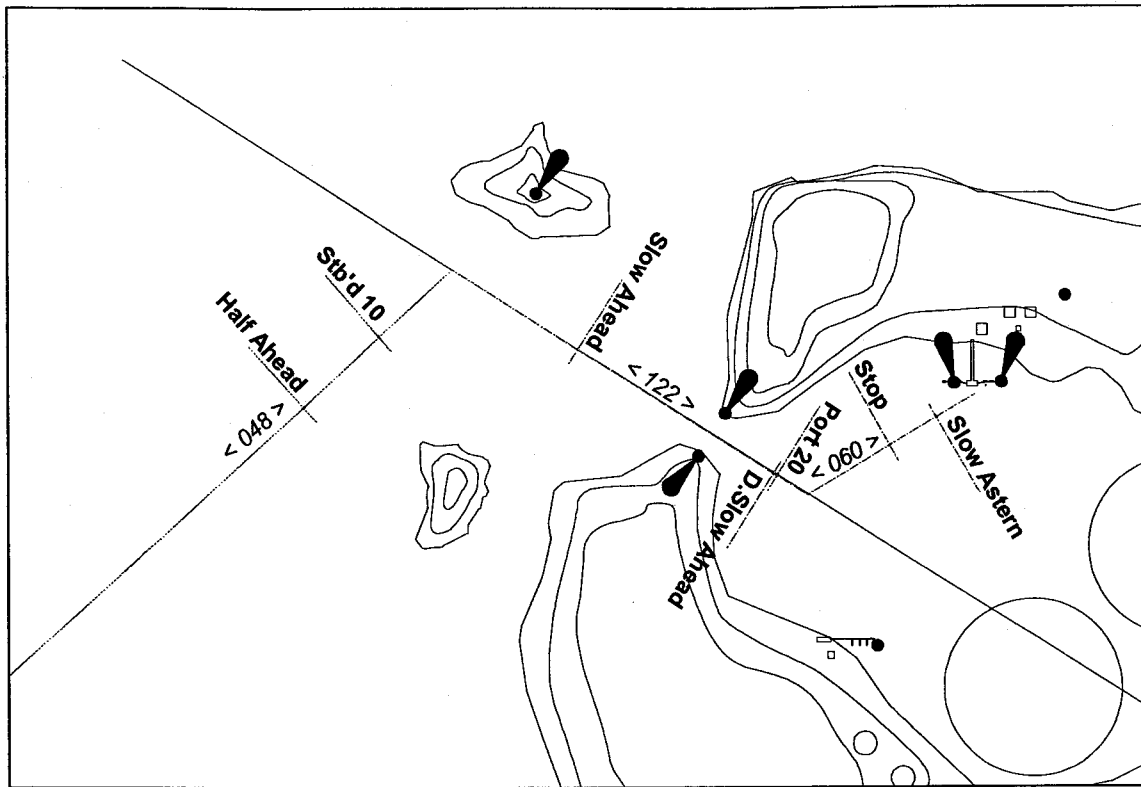


Fig. 7-3 Maneuvering plan of the expert "F"

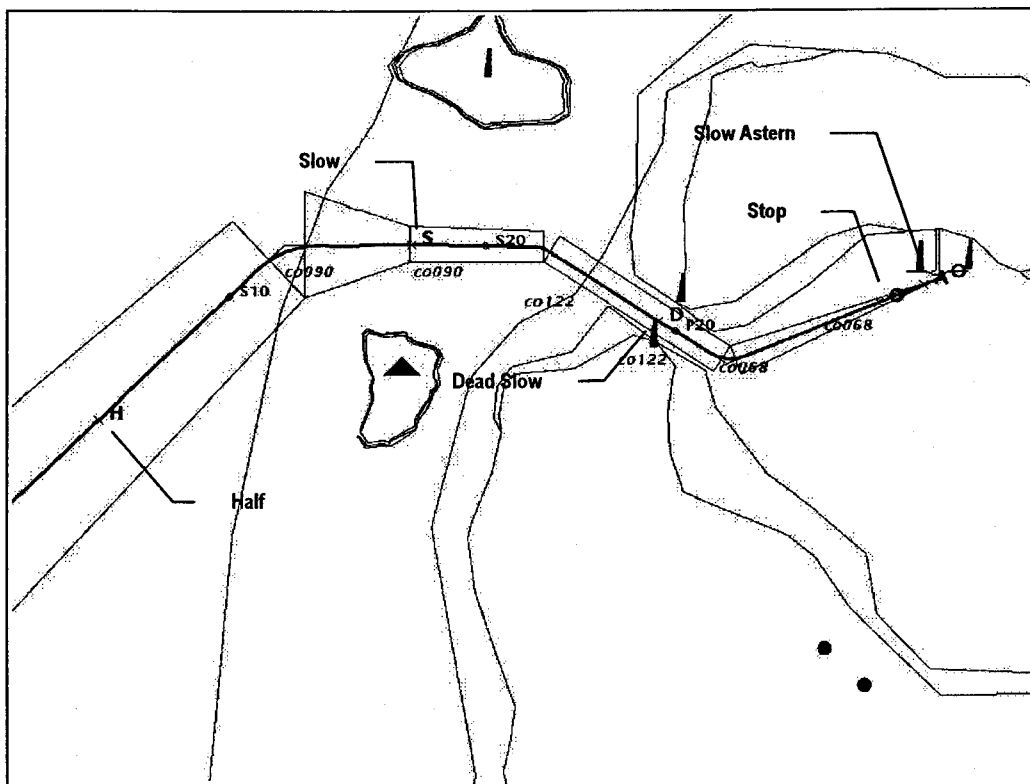


Fig. 7-4 Maneuvering plan of the automatic passage planning system

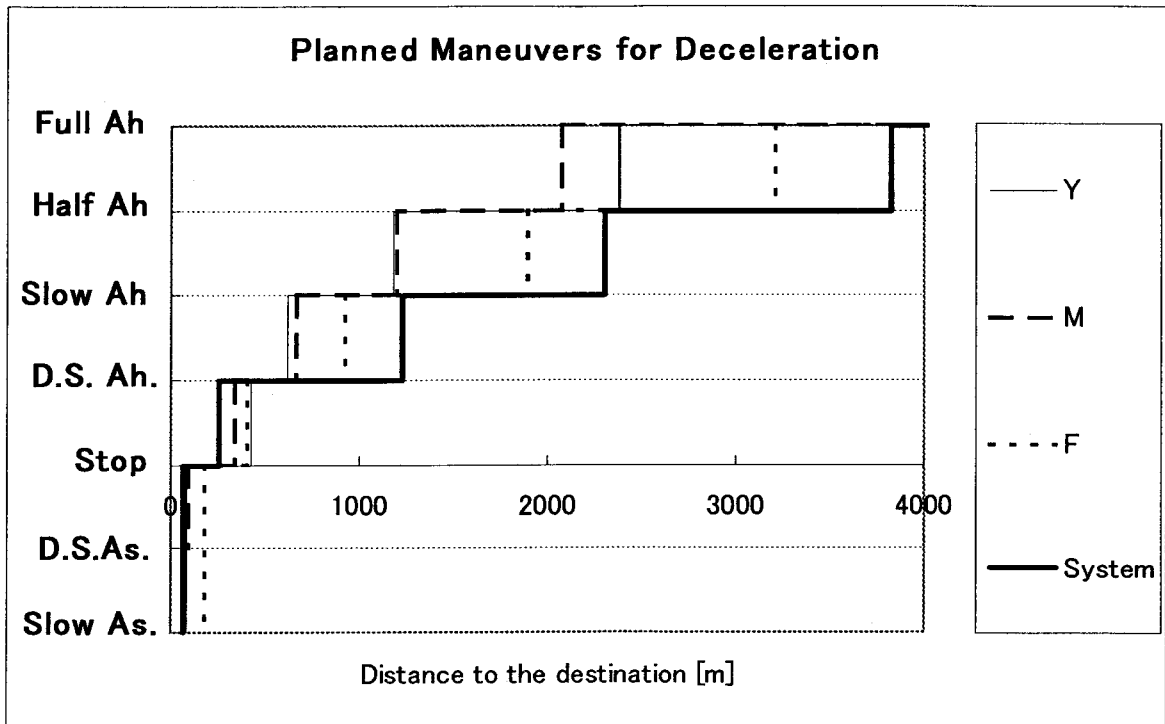


Fig. 7-5 Comparison of the deceleration maneuvers of the experts and that of the automatic passage planning system

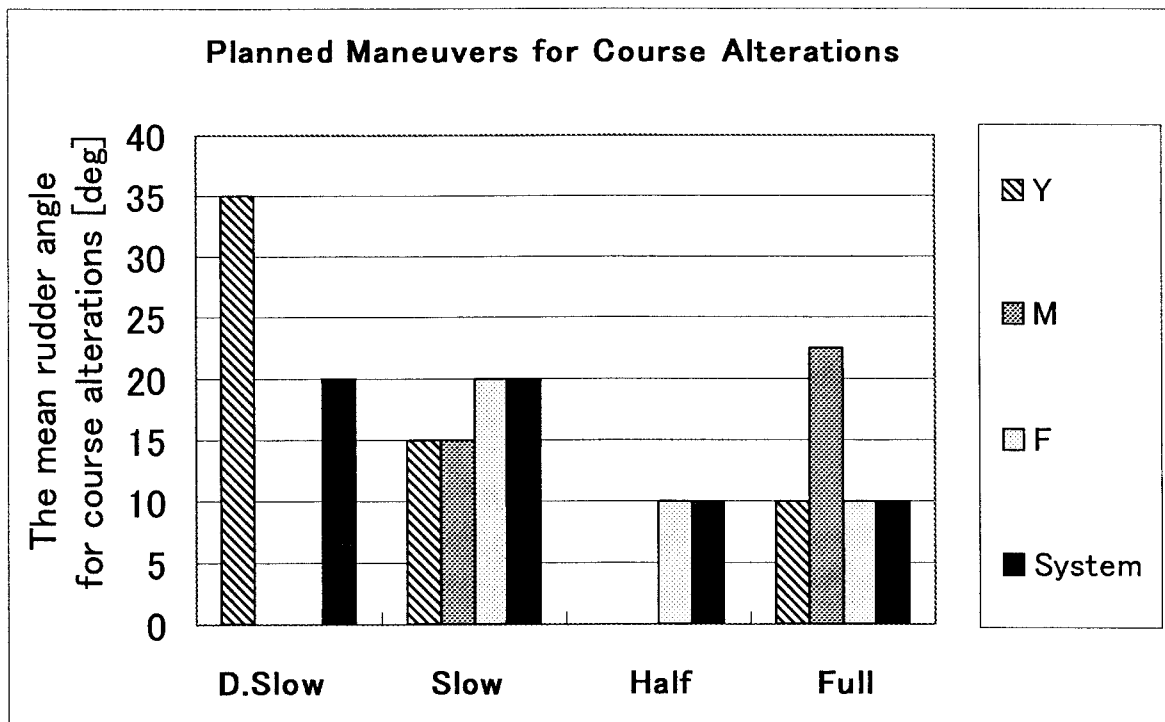


Fig. 7-6 Comparison of the course alteration of the experts and that of the automatic passage planning system

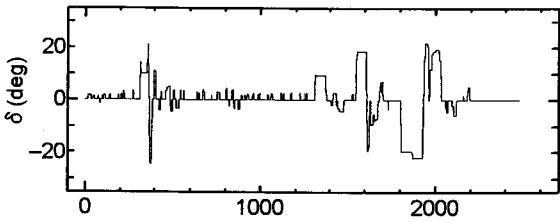
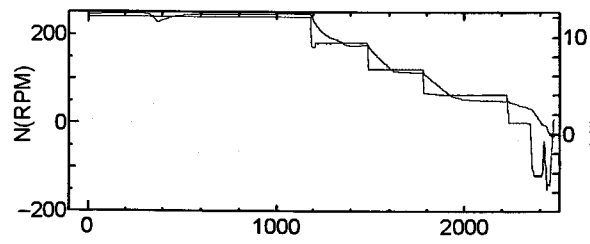
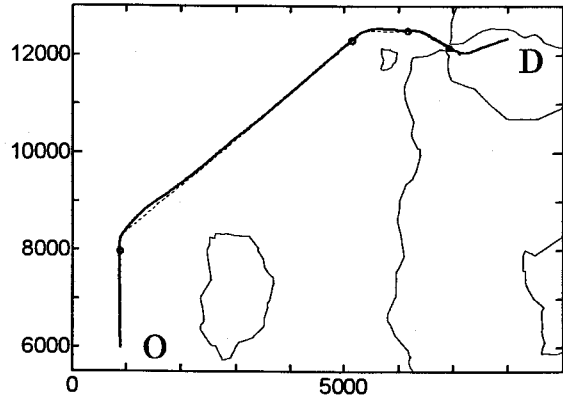


Fig. 7-7 Result of the simulator experiment with the supporting system by the less experienced operator "A"

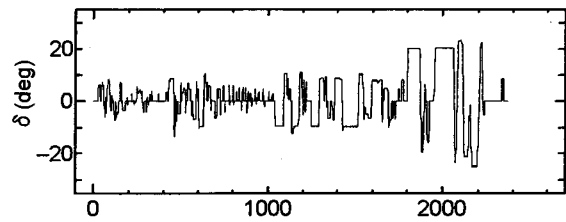
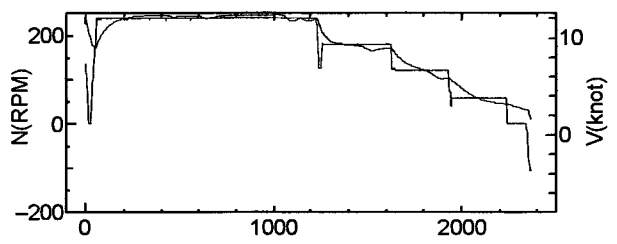
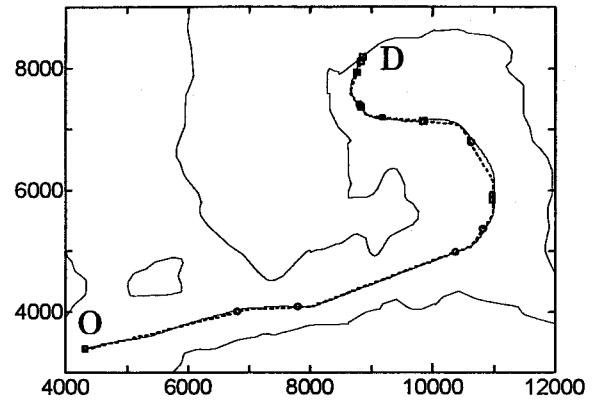


Fig. 7-8 Result of the simulator experiment with the supporting system by the less experienced operator "B"

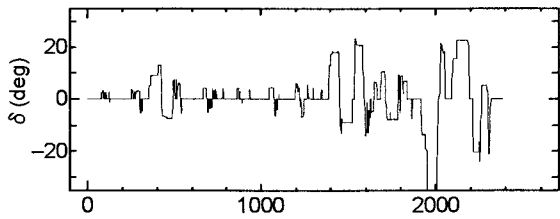
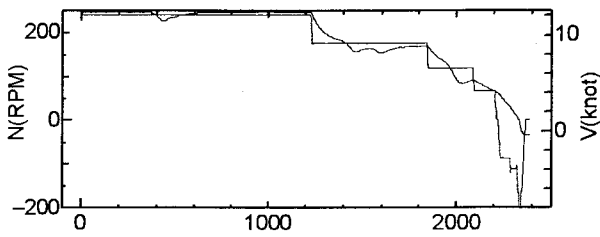
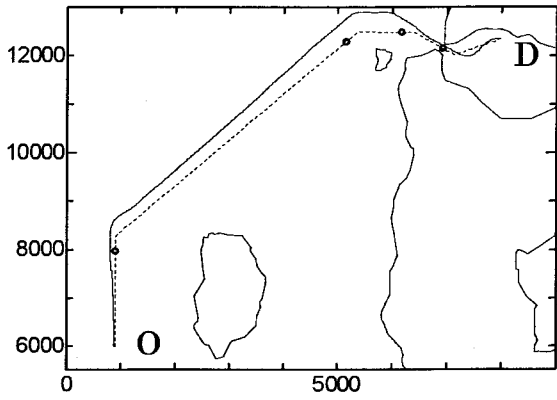


Fig. 7-9 Result of the simulator experiment without the supporting system by the less experienced operator "C"

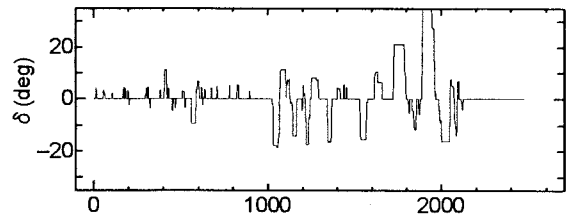
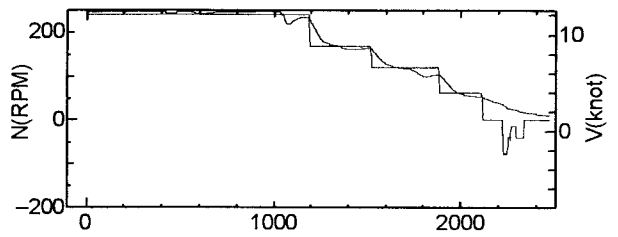
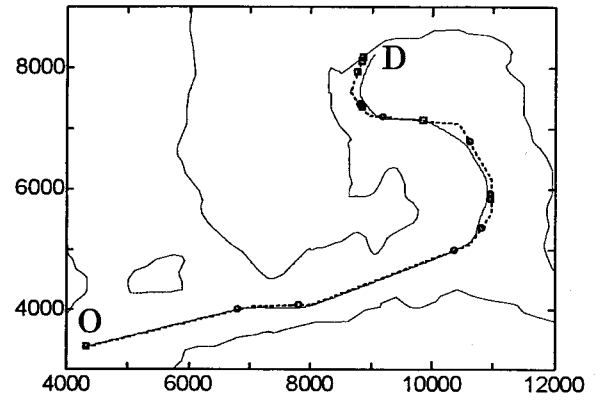


Fig. 7-10 Result of the simulator experiment without the supporting system by the less experienced operator "D"

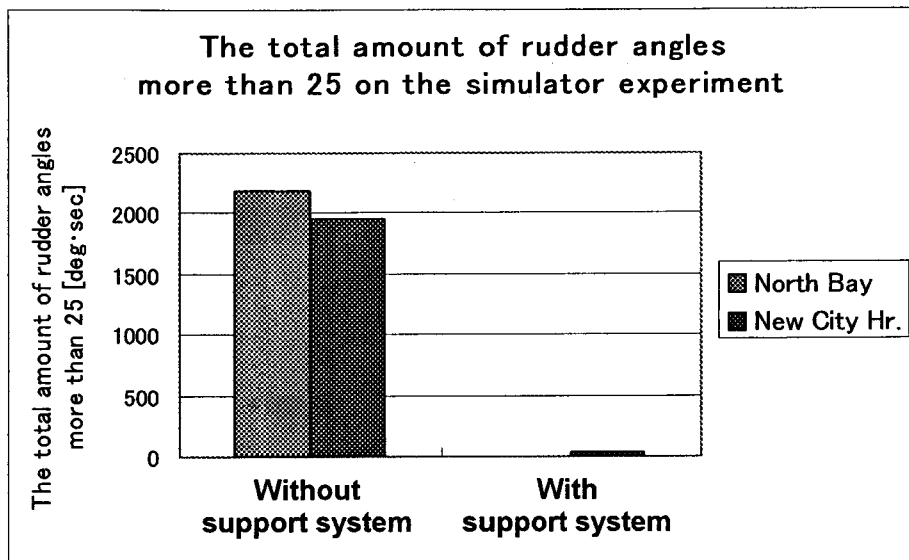
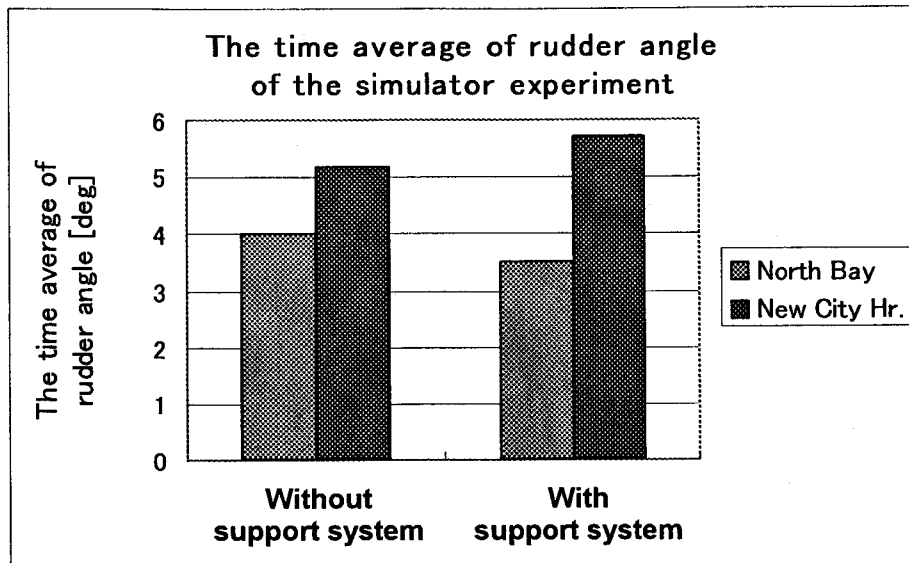


Fig. 7-11 Effect of the support system on the course alteration

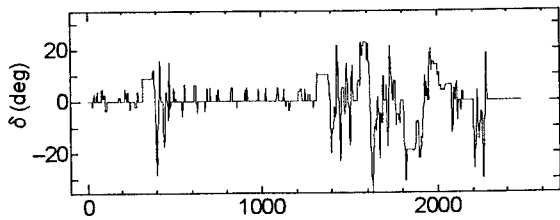
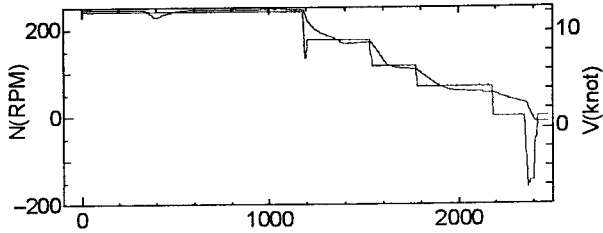
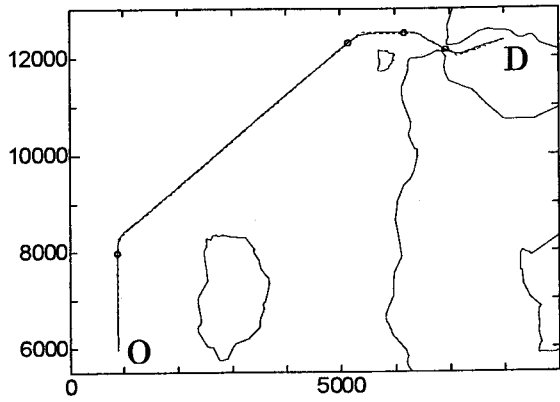


Fig. 7-12 Result of the simulator experiment with the supporting system by the expert "F"

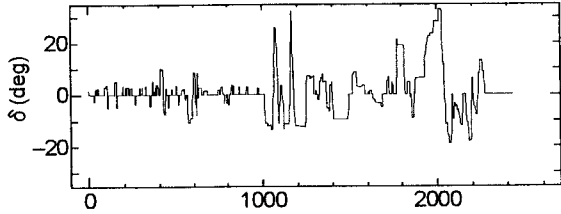
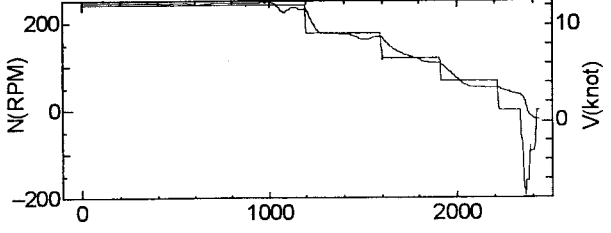
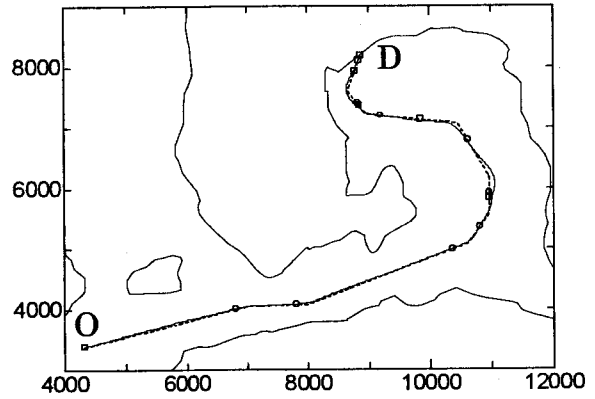


Fig. 7-13 Result of the simulator experiment with the supporting system by the expert "M"



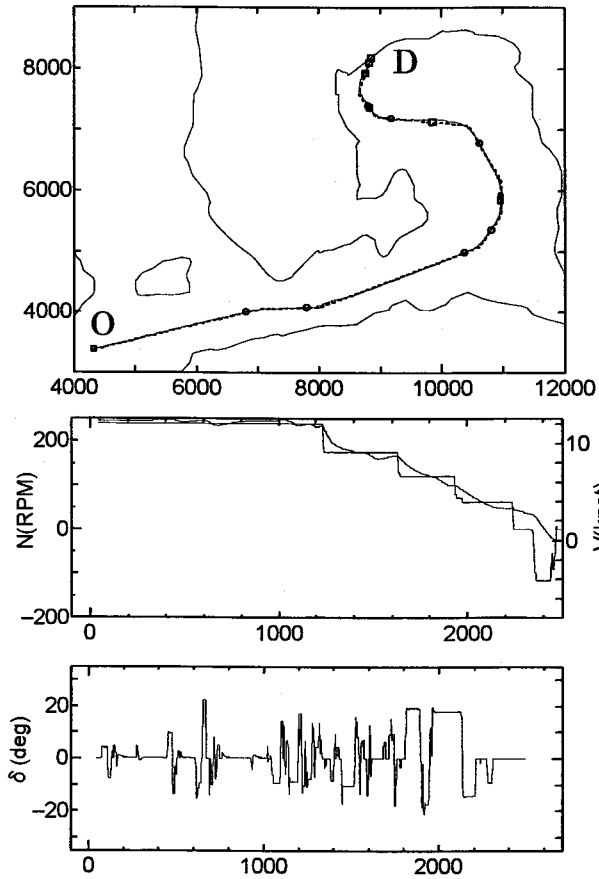


Fig. 7-14 Result of the simulator experiment with the supporting system under no wind by the less experienced operator "E"

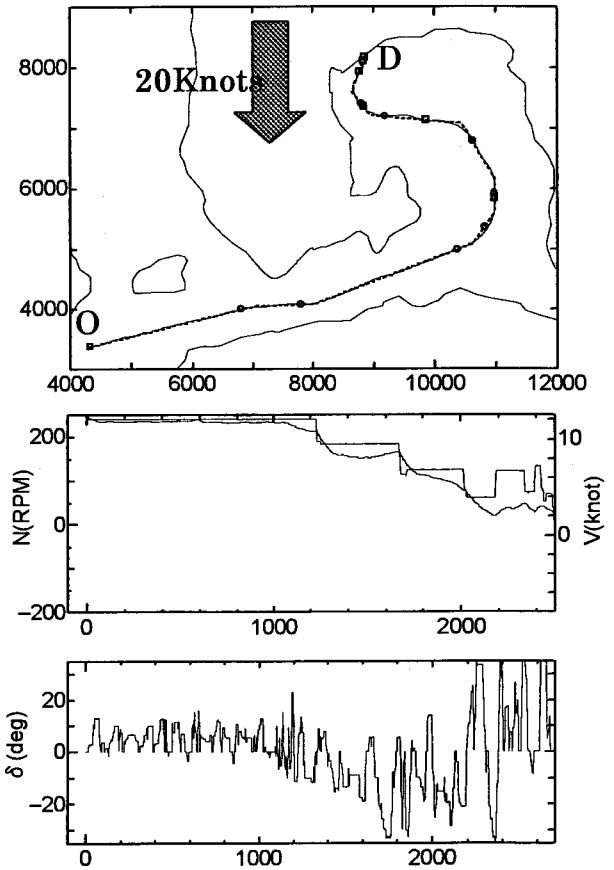


Fig. 7-15 Result of the simulator experiment with the supporting system under 20 knots wind by the less experienced operator "E"

## LIST OF APPENDICES

APPENDIX-1 “操船ガイドライン –計画技術–” の記述.....	94
APPENDIX-2 移動ロボットの経路探索における可視グラフ法とボロノイ図法.....	96
APPENDIX-3 GT499 型内航船舶の操船ブックレット.....	98
APPENDIX-4 操船計画に関するアンケート.....	110
APPENDIX-5 最短時間変針法.....	113
APPENDIX-6 富山商船高等専門学校・操船シミュレータ .....	115

## Appendix-1 “操船ガイドライン -計画技術-” の記述

(航海学会・操船シミュレータ研究会、1998)

### 操 船 指 針

#### 要素技術 計 画

- 1) 航海計画を立案し、海図に適切に記載する。計画の立案にあたっては以下の事項を考慮する。
  - ①針路上に浅瀬や障害物などが無いようにするとともに、これらの危険物及び陸岸からは少なくとも1マイル以上の距離を保って計画する。また、航路や航路の延長線からも0.5マイル以上離して計画を立てる。
  - ②航海の目的にあっており、経済的な航路を計画する。
  - ③変針目標は正横付近に設定し、顕著な物標であること。
  - ④航海速力を決定する。
  - ⑤変針目標通過時刻を5分以内の精度で予想する。
  - ⑥変針目標からの方位、距離を海図に記載しておく。
  - ⑦変針は大角度とならないようにし、やむを得ず大角度の変針となる場合は20～30度の変針を数回に分けて変針するように計画する。
  - ⑧可能ならば、船首目標や避険線なども設定しておく。
  - ⑨航路が設定されている場合は航路に沿った計画を立てる。
  - ⑩海図上の暗礁、沈船等の水中障害物、浅水域を確認し、容易に識別できる工夫を施す。
  - ⑪変針点、航過点、目標地点等への残航距離を海図に記載する。
- 2) 次の水路図誌の記載内容を理解し、適切に使用する。

海図、特殊図、海流・潮流図、航路誌、灯台表、潮汐表、天測歴
- 3) 使用海図の測量法、使用単位、基準面（高さ、深さ等）、改補の状況、海図図式を確認する。
- 4) 利用する航路標識(IALA 浮標式の識別、視達距離)、水路通報、航行警報、V T S、通報、信号等の情報を入手する。
- 5) 狭水道通過に当たってはなるべく遠くから（1マイル以上）水道内が見渡せ、他船、障害物の状況が確認できるような針路を計画する。
- 6) 狭水道では可能な限り右側端を航行する。
- 7) 舵効を有する最小速力を把握する。
- 8) 減速状況等を考慮し、関係機関に連絡すべきETAを5分以内の誤差で把握する。
- 9) 自船の状態、操縦性能の影響を考慮した航海計画の立案をする。
- 10) 外乱（風、潮流、視界、水深、航路幅、船舶の輻輳）の影響、特に風、潮流、視界の急激な変化を考慮する。
- 11) 他船の航行状況を勘案し、必要であれば他船と危険な見合い関係とならない航路を計画する。
- 12) 手動操舵、自動操舵の切り替え時期を計画する。
- 13) 錨地の選定に当たっては次の事項を考慮する。
  - ①周囲の地勢が天候異変の際も安全であること。
  - ②本船のコンディションに見合った水深であること。
  - ③底質がよく、錨かきのよいこと。

④航路筋から離れ、かつ広い場所であること。

⑤付近に障害物がないこと。

14) 錨鎖の伸出量は水深、底質、自船の風圧面積、気象・海象を考慮して決定する。経験的に次の目安がある。

通常の錨泊  $S [m] = 3D + 90 [m]$

荒天時の錨泊  $S [m] = 4D + 145 [m]$

D : 水深 [m]

15) 錨地付近での変針はなるべく避け、できるだけ長い直線航路 (0.5 マイル以上) で錨地に向かうように針路を計画するとともに、目標 (船首、変針、速力減速目標)、主機使用計画等を立案する。投錨時の船速は後進で適切なものとなるよう計画する。

速力減速計画例

(コンテナ船 : Lpp 280m)

(パロットステーション、水路入り口等で 5k't. まで減速)

4 マイル前 — 12k't (S/B Full )

3 マイル前 — 12k't (S/B Half)

2 マイル前 — 10k't (S/B Slow)

1 マイル前 — 8k't (S/B D. Slow)

0.5 マイル前 — 6k't (Stop)

パロットステーション等 — 5k't

(錨地、バース前)

5 マイル前 — 12k't (S/B Full )

4 マイル前 — 12k't (S/B Half)

3 マイル前 — 10k't (S/B Slow)

2 マイル前 — 8k't (S/B D. Slow)

1 マイル前 — 6k't (Stop)

錨地 — 0k't

## Appendix-2 移動ロボットの経路探索における可視グラフ法とボロノイ図法

### 移動ロボットの経路探索における可視グラフ法とボロノイ図法

ロボットの移動計画の経路探索法に可視グラフ法とボロノイ図法がある。

本論で開発したルート計画法で用いている経路探索法とこれら二つの経路探索法には概念及び手法で共通する部分があるので、可視グラフ法とボロノイ図法の概要を紹介する。

#### 1. 移動ロボットの動作計画問題の定義

移動ロボットの動作計画の達成目標は、

「Fig. A-2-1 に示すように、障害物の存在する環境内で、障害物に衝突しないで目的地に到達すること。」である。

この移動ロボットの動作計画問題は、入力を次記三項目として、

- 移動体や障害物の幾何モデル
- 移動体の運動学の基本式
- 初期及び最終状態の位置と姿勢

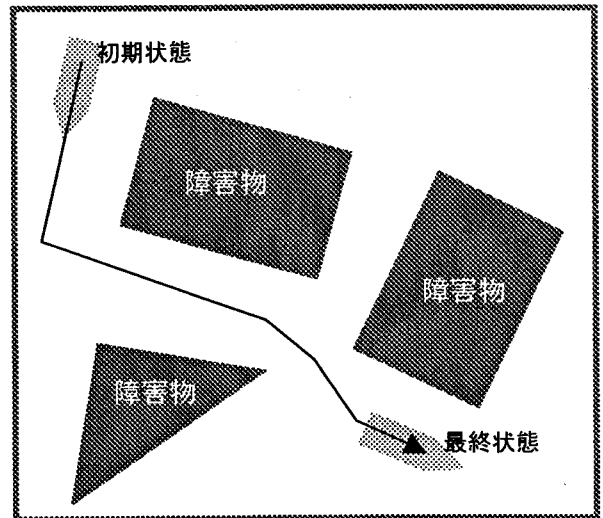


Fig.A-2-1 ロボットの移動計画問題の達成目標

目標を達成する為の動作計画として、下記項目を出力するものと定義されている。

- 初期及び最終状態を連結し、かつ、障害物に衝突しないような、移動体の位置と姿勢の連続的な時系列

#### 2. 動作計画における経路探索法

動作計画における経路探索法には次記する 3 種類の方法がある。

- ロードマップ法 (Roadmap method)  
ロボットや障害物の幾何モデルから地図 (Roadmap) を作成し、ロボットが移動できる障害物の無い空間である自由領域を連結することにより経路を求める。
- セル分解法 (Cell decomposition)  
ロボットが移動できる障害物の無い空間である自由領域を、セルと呼ばれる小領域に分解してから、セル間の隣接関係を表すグラフを生成し、このグラフに基づき経路を求める。
- ポテンシャルフィールド法 (Potential field method)  
ロボットと障害物の間に反発力、ゴールの間には吸引力を仮定することで、ロボットの位置におけるポテンシャル関数を設定し、最大傾斜の方向に進むことで経路を求める。

### 3. ロードマップ法 (Roadmap method)

動作計画における3種類の経路探索法のひとつがロードマップ法 (Roadmap method) である。移動体や障害物の幾何モデルからロードマップ (地図) を生成し、ロードマップに基づいて経路を選択する。

ロードマップは節点 (Node) と枝 (Arc) からなる、Fig.A-2-2のようなグラフ (Linear graph) により表現される。節点が枝で結ばれた構造で、節点は移動体の位置、枝はふたつの節点間の移動を表す。枝には距離、仕事量または時間などの変数が最適化するコストとして付与される。

ダイクストラ法などの探索アルゴリズムにより、最短経路などを選択する。

ロードマップ法には、後述する可視グラフ法とボロノイ図法の2種類の手法がある。

#### ① 可視グラフ (Visibility graph) 法

可視グラフとは初期位置、目的位置及び障害物の各頂点を節点とし、障害物の接線を枝とするグラフである。

この可視グラフに基づいて、初期節点から目的節点までの最短等の最適経路が選択されるものであり、得られた経路は障害物近傍となる。

Fig.A-2-3は可視グラフと経路の例である。節点を黒丸、枝を細線で示し、太い実線が得られた初期節点から目的節点までの最短経路を示す。

#### ② ボロノイ図 (Voronoi diagram) 法

ボロノイ図とは二つ以上の障害物や壁面から等距離の点列を枝とし、それらが交差する位置、初期位置と目的位置を節点とするグラフである。

このボロノイ図に基づいて、初期節点から目的節点までの経路が選択されるものであり、得られた経路は、可視グラフで選択された最短等の最適化とはならないが、どの障害物からも最も離れた位置を繋げた経路となる。

Fig.A-2-4はボロノイ図と経路の例である。節点を黒丸、枝を細線で示し、太い実線が得られた初期節点から目的節点までの経路を示す。図中の枝は障害物や壁面などから最も離れた位置を繋げた線分となっている。

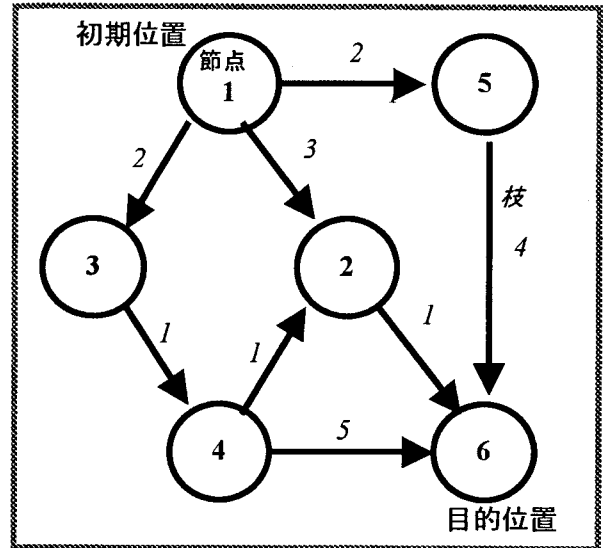


Fig.A-2-2 グラフ表記のロードマップ

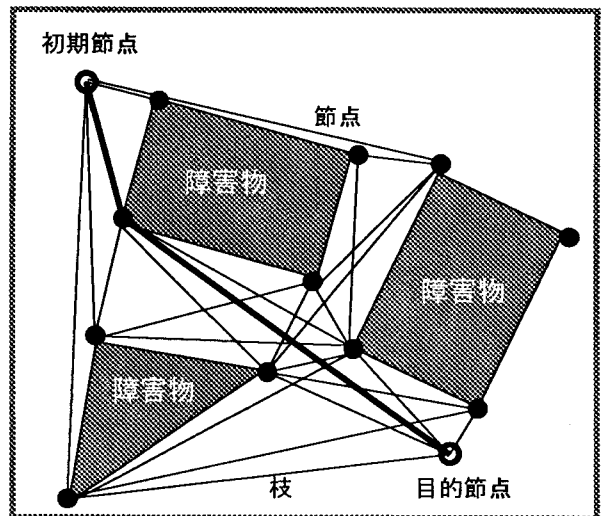


Fig.A-2-3 可視グラフと経路

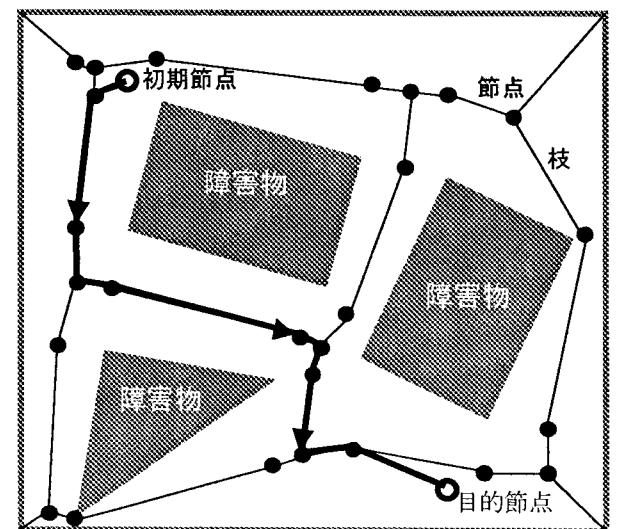


Fig.A-2-4 ボロノイ図と経路

# **Manoeuvring Booklet**

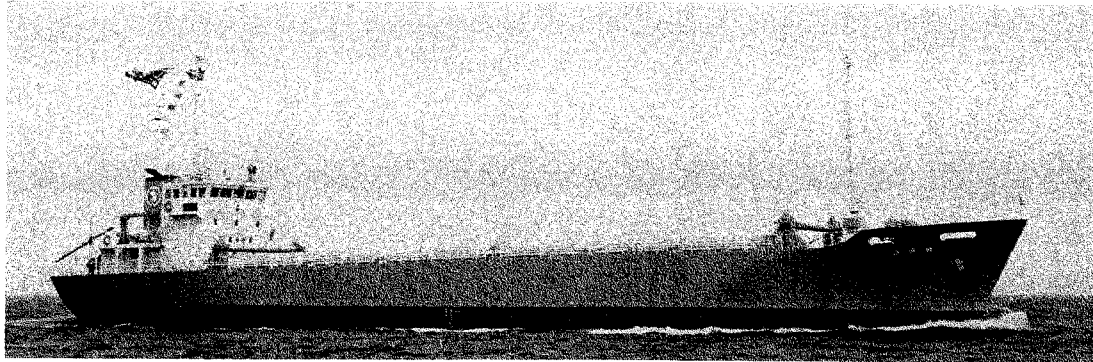
## **of**

### ***GT499 Wakai-maru***

#### **Table of Contents**

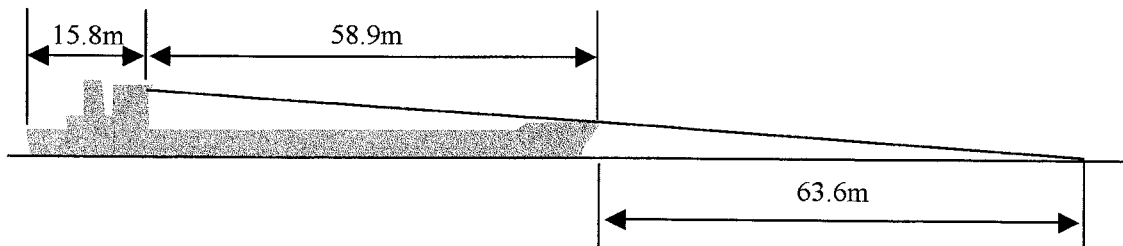
- 1. GENERAL DESCRIPTION**
  - (1) Ship's Particular**
  - (2) Ship's Speed**
  
- 2. TURNING CHARACTERISTICS AT 35 DEG. RUDDER ANGLE**
  - (1) Turning Circle in Deep Water**
  - (2) Accelerating and Coasting Turn in Deep Water**
  - (3) Turning Circle in Shallow Water**
  
- 3. STOPPING ABILITY**
  
- 4. COURSE CHANGING PERFORMANCE**
  
- 5. COURSEKEEPING ABILITY UNDER STRONG WIND**
  
- 6. SPEED DECELERATION**
  - (1) Coasting Performance**
  - (2) Decelerating Performance**

# 1. GENERAL DESCRIPTION



## (1) Ship's Particular

Ship's Name	Wakai-maru
Call Letters	JG5224
Gross Tonnage	498 T
Dead Weight	1291 MT
Length Over All	74.77 m
Length Bet. P.P.	70.00 m
Breadth, Mould	11.80 m
Depth, Mould	7.20 m
Draft	3.78 m
Main Engine, Type x No.	Diesel x 1
MCR	2400 ps x 260 RPM
NOR	2050 ps x 240 RPM
Minimum Revolution	60 RPM
Propeller, Type x No. x Dia.	Four Bladede FPP x 1 x 2.4 m
Bow Thruster, ps x Dia. x Thrust	203 ps x 1.0 m x 2.03 t
Stern Thruster, ps x Dia. x Thrust	162 ps x 0.8 m x 1.52 t
Bow Form	Bulbous Bow



Distance	from Bridge to Stem	58.9 m
	from Bridge to Stern	15.8 m
	Forward blind zone	63.6 m



## (2) Ship's Speed

### Maneuvering Speed :

<b>RATING</b>	<b>RPM</b>	<b>SPEED (Kt)</b>
Full Ahead	240	12.42
Half Ahead	180	9.315
Slow Ahead	120	6.210
Dead Slow Ahead	60	3.105
Dead Slow Astern	-60	
Slow Astern	-120	
Half Astern	-180	
Full Astern	-240	

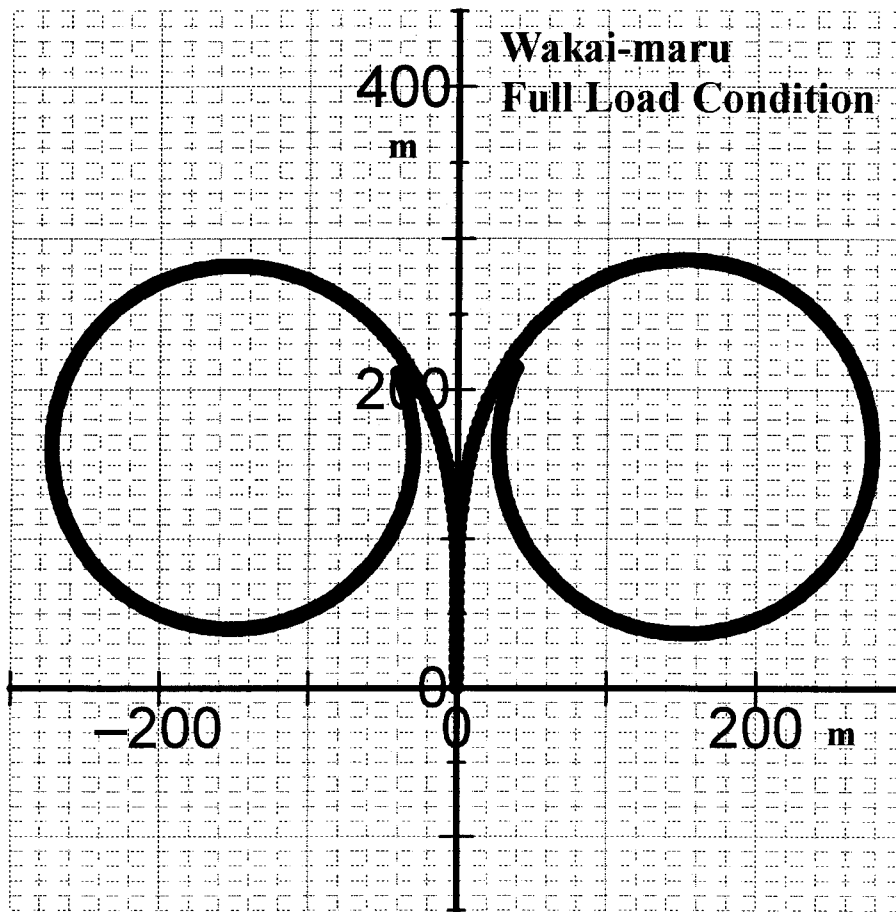
**Time to shaft stop after order for full astern with the ship under maneuvering full ahead speed 31 sec.**

### Sea Speed

<b>Rating</b>	<b>RPM</b>	<b>SPEED (Kt)</b>
Navigation Full	240	12.4

## 2. TURNING CHARACTERISTICS AT 35 DEG. RUDDER ANGLE

### (1) Turning Circle in Deep Water



Left 35° Turn

Initial RPM=240 RPM

Turning Angle (deg)	Time		Speed (Kt)
	(min)	(sec)	
0	0	0	12.4
90	0	59	7.82
180	1	52	6.22
270	2	50	6.06

Right 35° Turn

Initial RPM=240 RPM

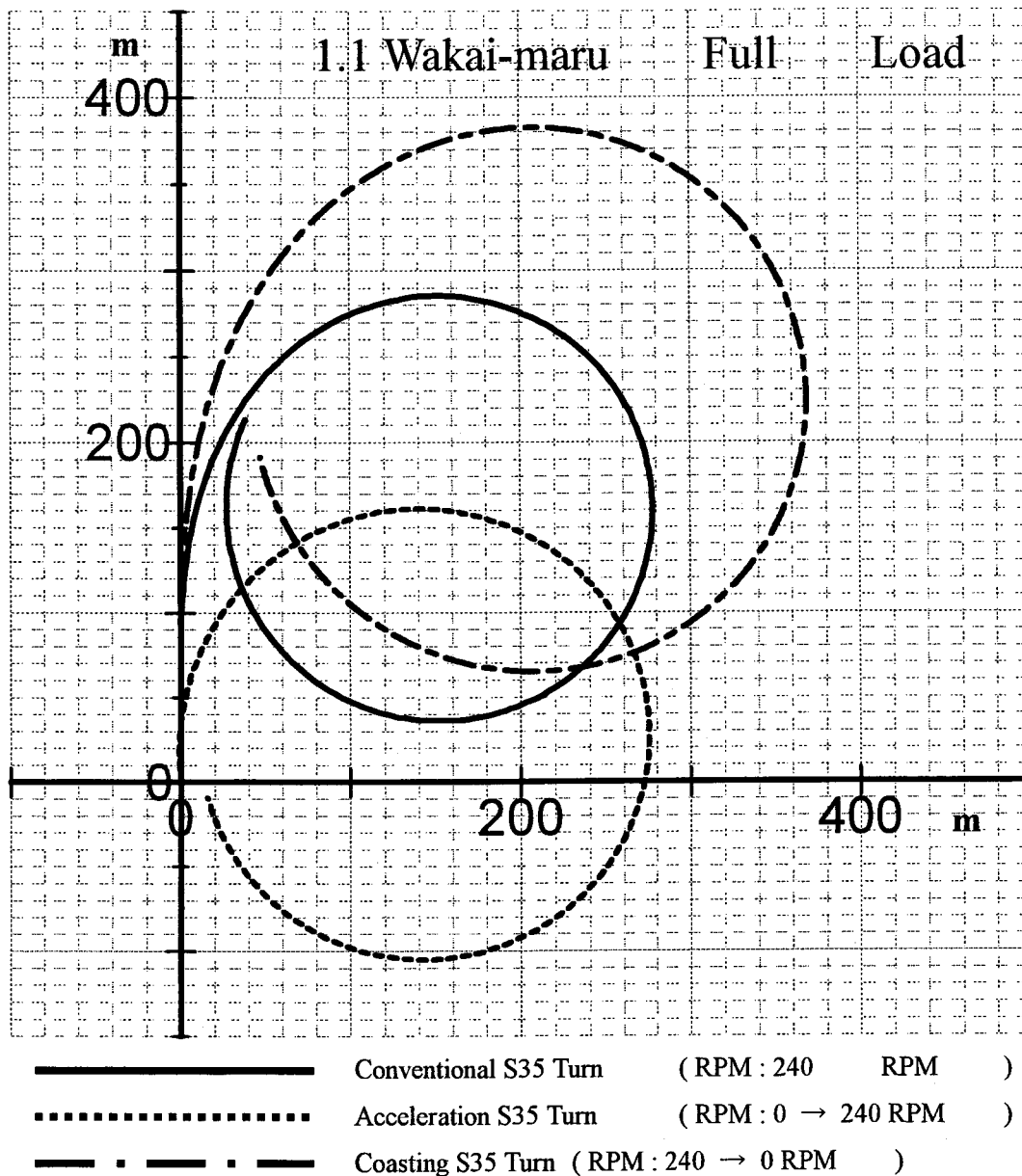
Turning Angle (deg)	Time		Speed (Kt)
	(min)	(sec)	
0	0	0	12.4
90	1	0	7.86
180	1	54	6.32
270	2	53	6.18

#### NOTE:

For the turning characteristics with a different approach speed from the above, it is well known that

- 1) turning track is almost the same as the above,
- 2) "TIME" varies in inversely proportional to the approach speed, and
- 3) "SPEED" varies in directly proportional to the approach speed.

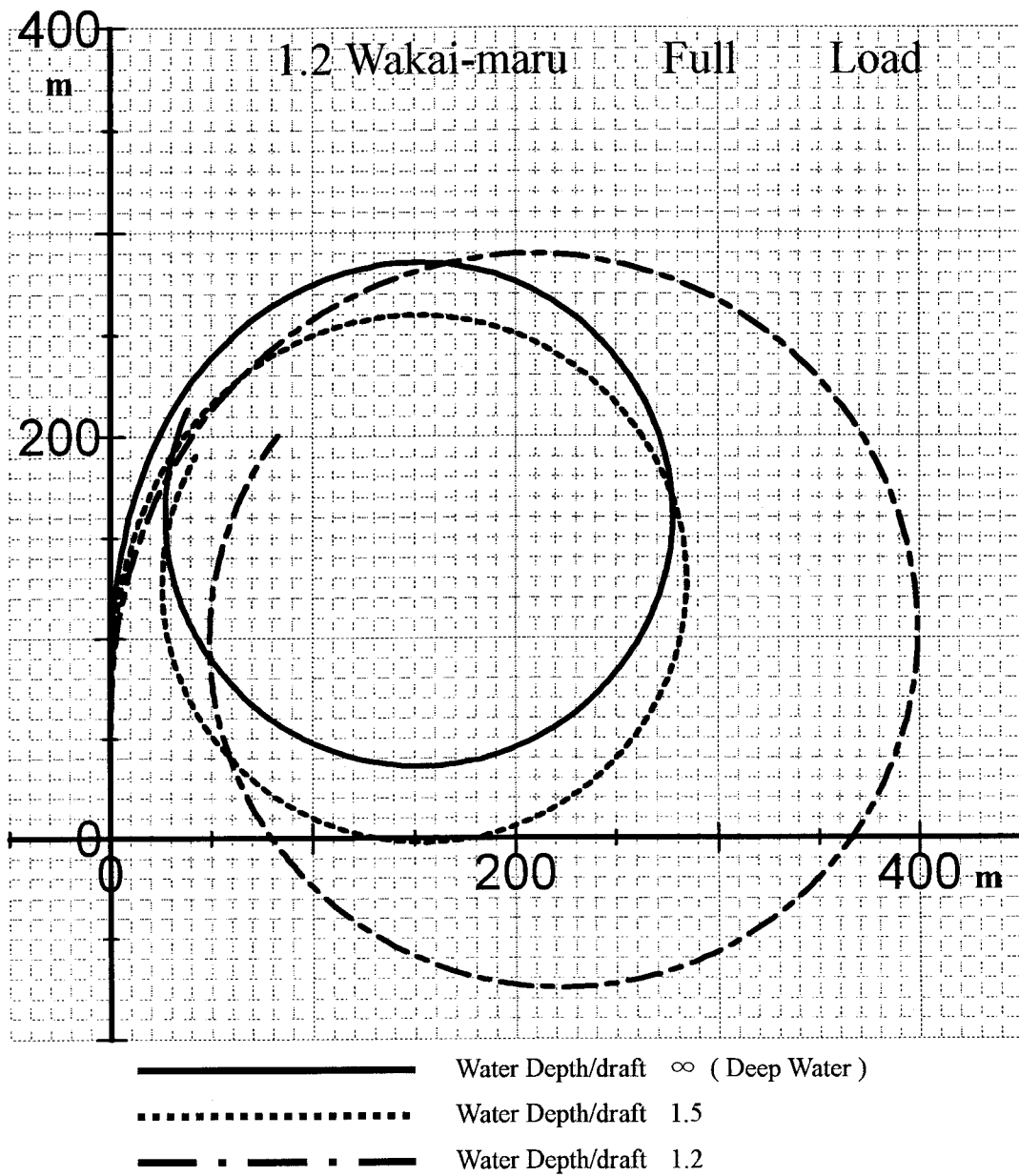
**(2) Accelerating and Coasting Turn in Deep Water**



**NOTE :**

It is generally known that turning track is not so much affected by the initial propeller RPM (the approach speed) for the conventional and coasting turns, and by the ordered RPM for the accelerating turn.

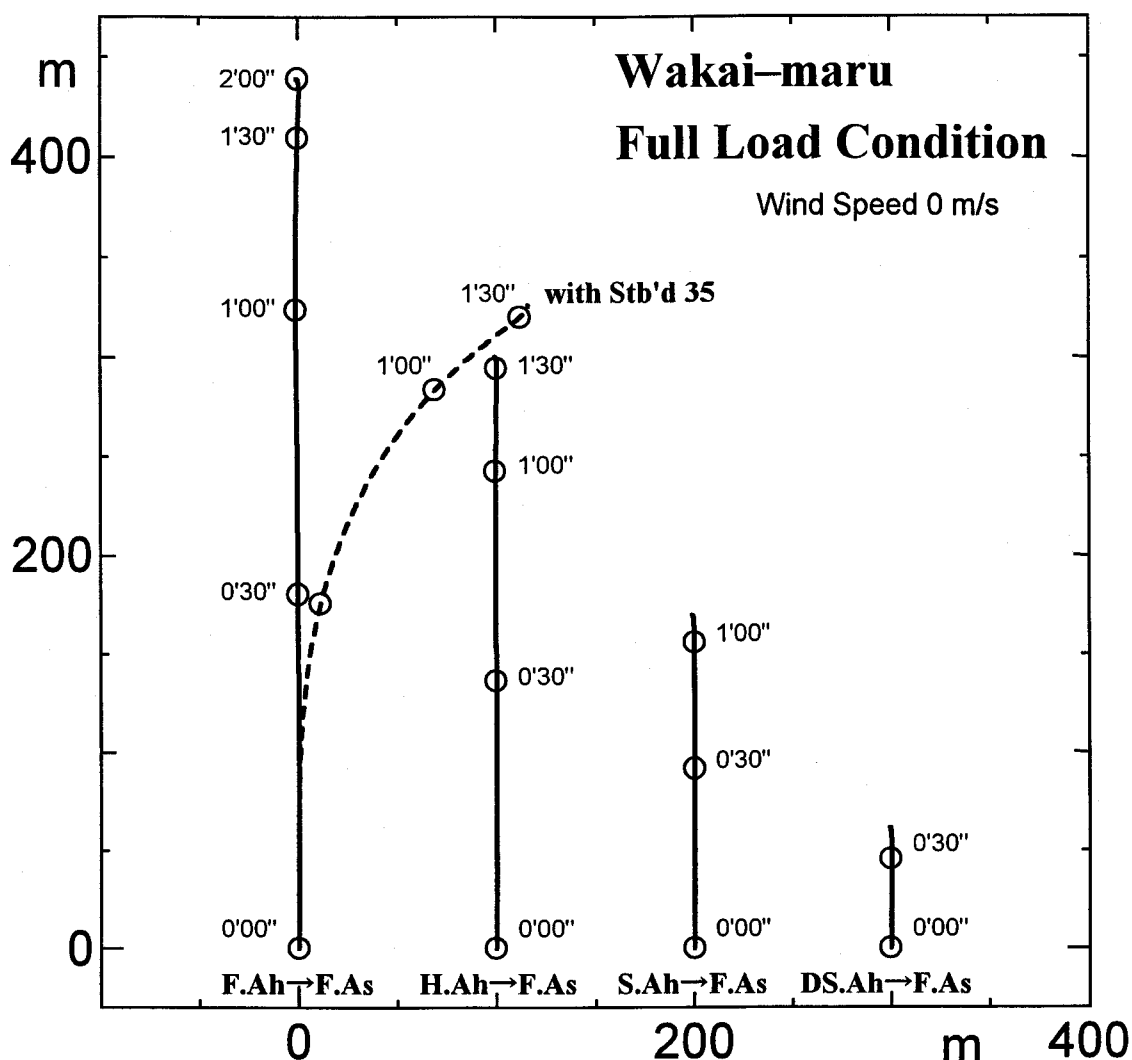
### (3) Turning Circle in Shallow Water



**NOTE :**

It is generally known that turning track is not so much affected by the approach speed.

### 3. STOPPING ABILITY



Initial Engine Motion	Initial Speed (Kt)	Engine Motion	Stopping Distance (m)	Stopping Time (' ")	Head Reach (m)	Side Reach (m)	Stopping Heading (°)
Full Ahead	12.4	Full Astern	439	2' 03"	439	-1	Stb'd 17
Half Ahead	9.3	Full Astern	301	1' 45"	301	-0.7	Stb'd 14
Slow Ahead	6.2	Full Astern	170	1' 23"	170	-1	Stb'd 09
Dead Slow Ahead	3.1	Full Astern	62	0' 55"	62	-0.6	Stb'd 04

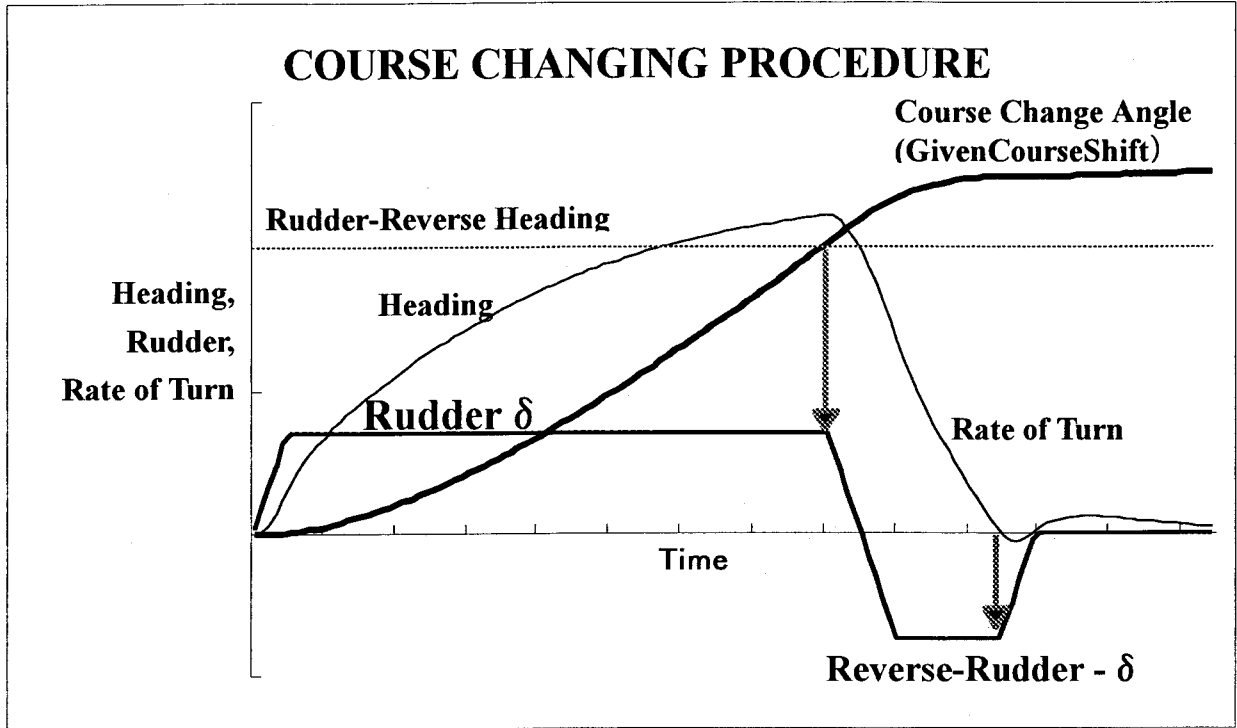
Initial speed to stop by one ship length:70m ( Engine Motion : Full Astern )	3.4 Kt
--	--------

In an emergency, when the ship need to be stopped and deviated to port or starboard, given an astern order at the same time as changing rudder angle to port or starboard.

The stopping distance and etc., when giving an astern order at the same time as changing rudder angle by 35° to starboard, are shown in the following table.

Initial Engine Motion	Initial Speed (Kt)	Engine Motion	Rudder Motion	Stopping Distance (m)	Stopping Time (' ")	Head Reach (m)	Side Reach (m)	Stopping Heading (°)
Full Ahead	12.4	Full Astern	Stb'd 35	365	1' 44"	326	117	Stb'd 88

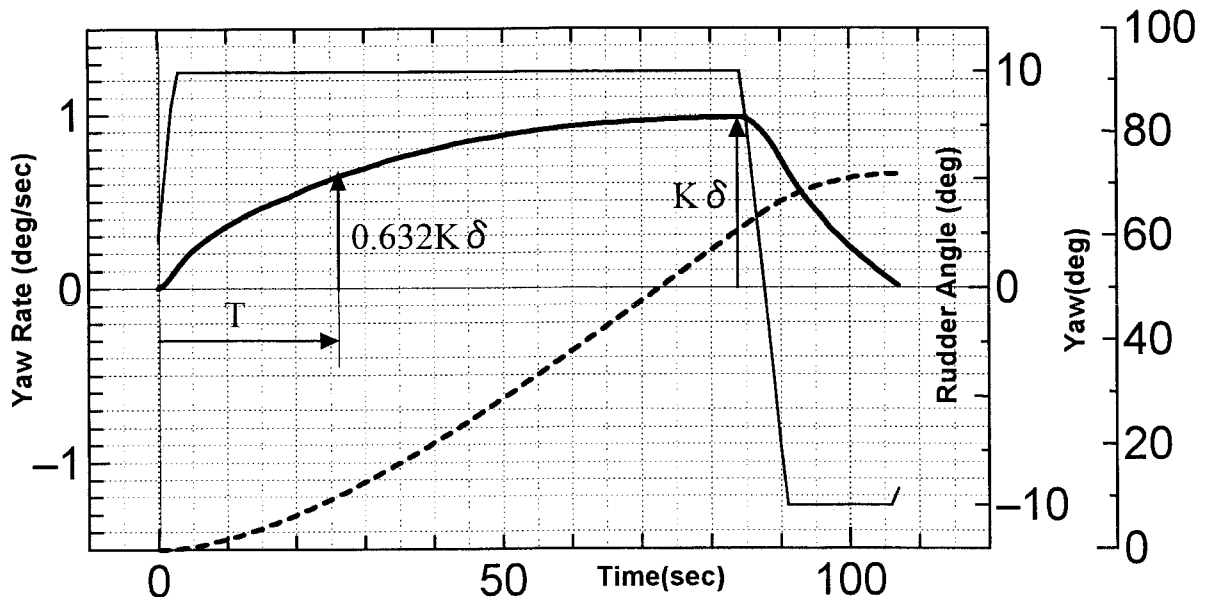
## 4. COURSE CHANGING PERFORMANCE



### NOTE:

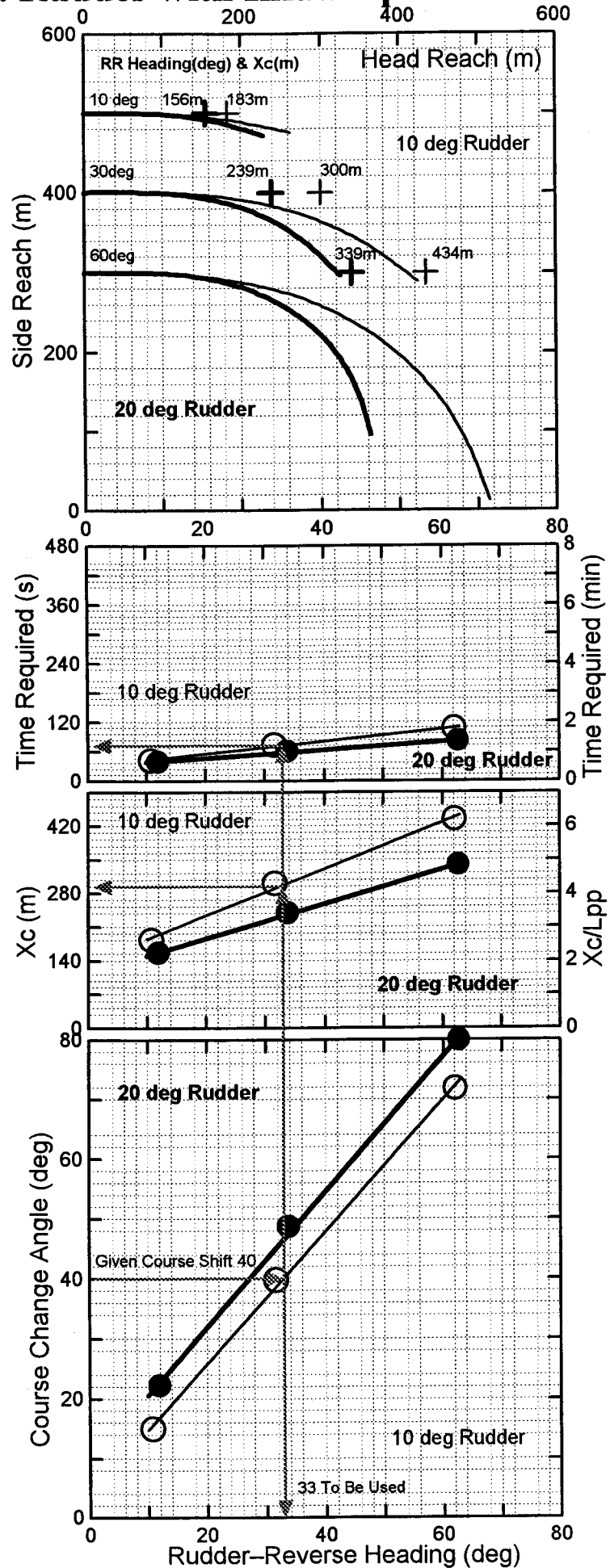
It is well known that the Course Change Angle and the Course Change Distance ( in non-dimensional unit:  $X_c/L$ ) are not so much affected by the difference of the ship's speed.

Estimated Non-dimensional T, K and Time Response  
Based on Course Changing Maneuver by 10 deg. Rudder



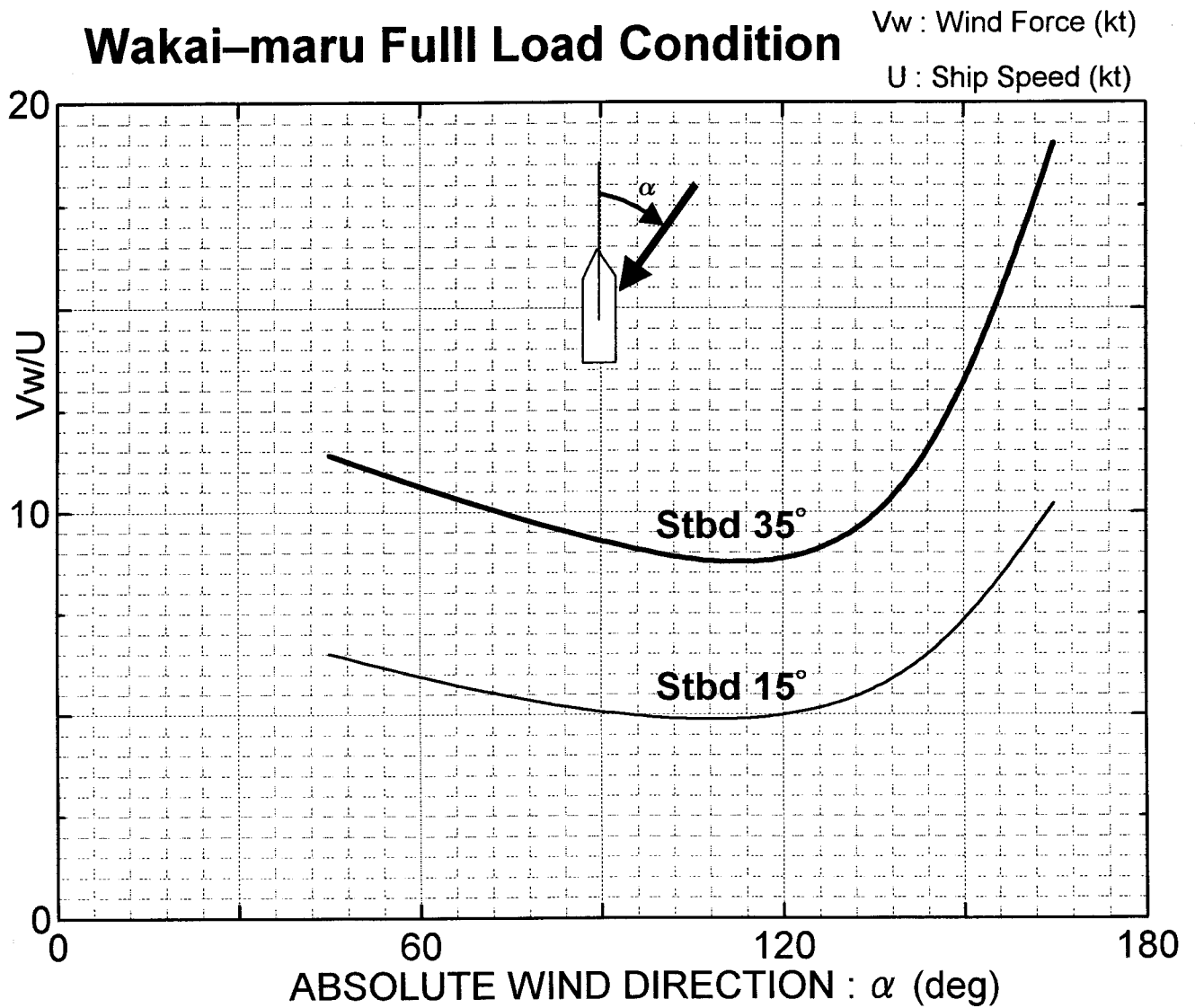
$$T' = T*(V/L) = 2.214 \quad K' = K*(L/V) = 1.202 \quad T = 25(s) \quad K = 0.0985(1/s)$$

# By 10/20 deg. Rudder with Initial Speed 12.3 kts [Full Ahead]



## 5. COURSEKEEPING ABILITY UNDER STRONG WIND

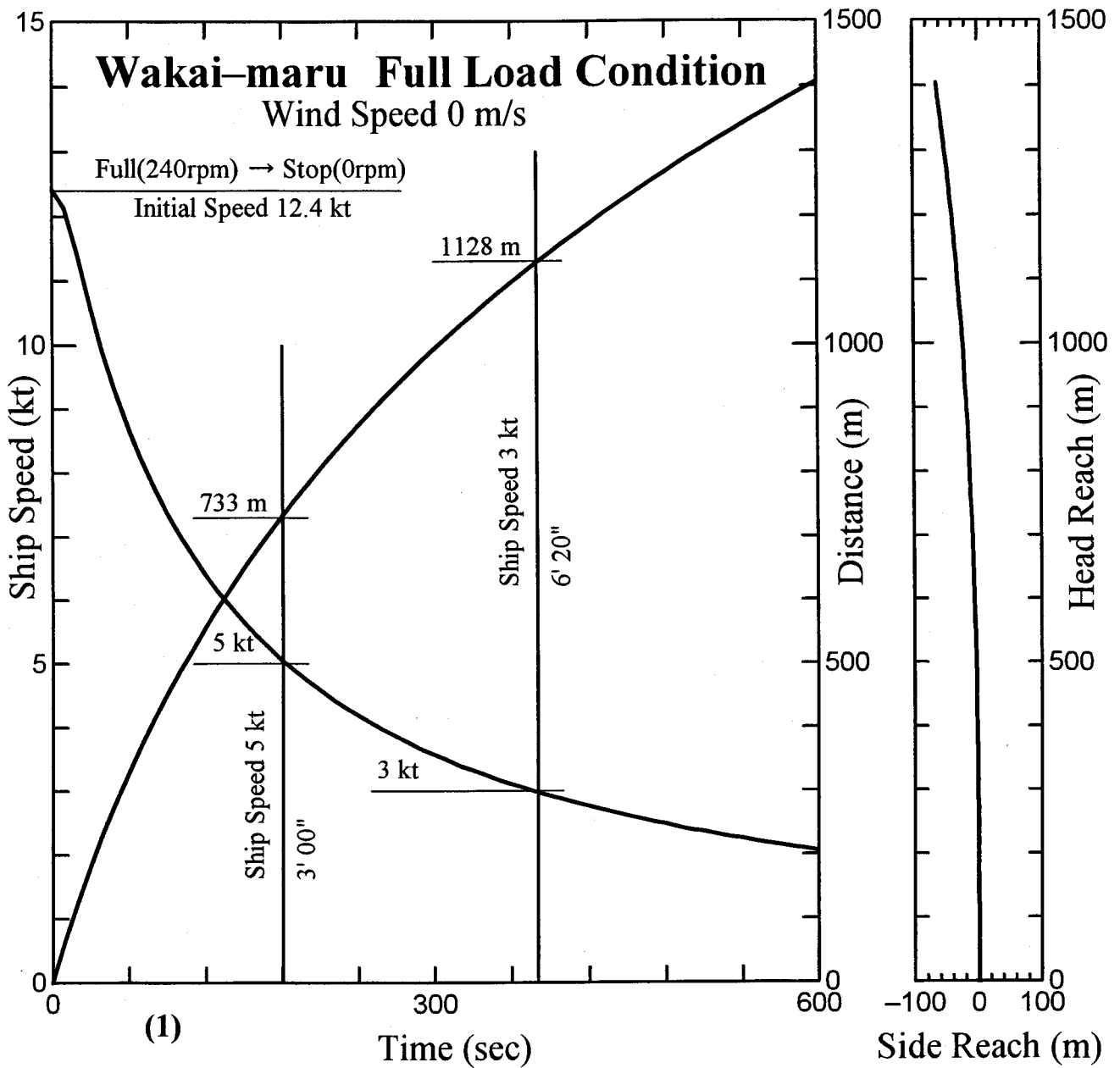
The following curves are calculated course-keeping limitations at 15 and 35 rudder angles.





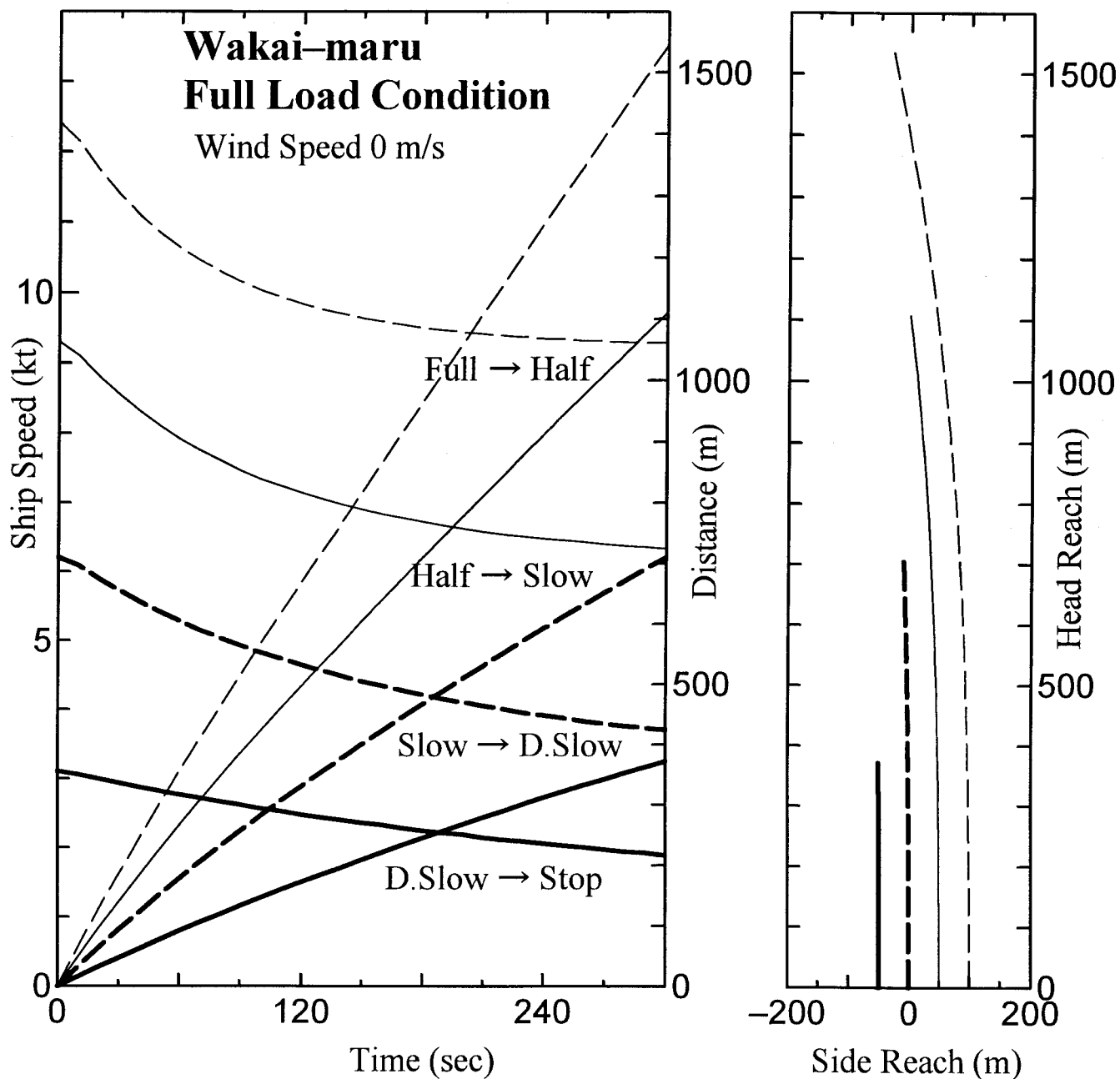
## 6. SPEED DECELERATION

### (1) Coasting Performance



Initial			Ordered		Decelerated Ship Speed			
					5 kt		3 kt	
Engine Motion	Speed (Kt)	Shaft RPM	Engine Motion	Shaft RPM	Distance (m)	Time (")	Distance (m)	Time (")
1.1.2 Full Ahead	12.4	240	Stop	0	733	3' 00"	1128	6' 20"

## (2) Decelerating Performance



Initial			Ordered		Deceleration Factor	
Engine Motion	Speed (kt)	Shaft RPM	Engine Motion	Shaft RPM	Distance/ kt (m) *	Time / kt ( ' '' ) **
Full Ahead	12.4	240	Half Ahead	180	442	1' 19"
Half Ahead	9.3	180	Slow Ahead	120	446	2' 52"
Slow Ahead	6.2	120	D.S. Ahead	60	453	3' 12"
D.S. Ahead	3.1	60	Stop	0	545	11' 21"

**NOTE:**

\* Average distance ship run per 1 knot deceleration, after main engine output is decreased. :  $S_d/(V_1 - V_2)$

\*\* Average time per 1 knot deceleration.

## 操船計画に関するアンケート

以下の各アンケート項目にお答えください。

1. ご自身の氏名と乗船履歴を記入してください。

氏名		
職位	乗船年数	主に乗船した船舶の長さ m×GT
3 <sup>rd</sup> Officer		
2 <sup>nd</sup> Officer		
Chief Officer		
Captain		

2. 本日、操船計画を行った GT499 型内航タンカーのキャプテンとして操船計画を行う際の指針としているもの（すべき）ものについて質問いたします。

2.1 泊地進入・アンカリングする際の減速パターン（Full Ahead→Stop）における各エンジンモーション実施タイミングの目安を記入してください。泊地以前に輻輳域、狭い海域は無く、無風の状況を想定致します。

エンジンモーション	目安(距離的)	備考
Full → Half Down		
Half → Slow Down		
Slow → Dead Slow Down		
Dead Slow → Stop		

2.2 入港・着棧する際の減速パターン（Full Ahead→Stop）における各エンジンモーション実行の目安を記入してください。港湾域内では 5~6kt 程度以下の航行が要求され、航路幅 300m 程度の入港航路はありますが、バース前までに通行船舶に出会うことは無く、風も無い状況を想定いたします。

エンジンモーション	目安(距離的、空間的)	備考
Full → Half Down		
Half → Slow Down		
Slow → Dead Slow Down		
Dead Slow → Stop		

着棧するには、棧橋直前で停止する必要があります。棧橋直前で停止するエンジンモーション内容と実行の目安を記入して下さい。

棧橋直前停止におけるエンジンモーションの内容	目安((距離的、空間的)	備考
Slow / Dead Slow → ( )		

入港コースと方位が逆となる出船着棧を要求される場合が多くあります。着棧前に港内域で 180 度の旋回を行うに必要な海域の広さとその際の速力（エンジンモーション）を記入して下さい。

操作手段	海域の広さ（直径等）	速力(エンジンモーション)	備考
操舵のみの旋回			
スラスト併用の旋回			

2.3 その他、泊地進入・アンカリング、入港・着棧等の減速に関する操船計画をする際に必要な注意事項等がありましたら記載してください。

--

2.4 操船計画の変針点設定において、許容可能な最大変針角度、並びに、30 度変針を行う際の各船速(エンジンモーション)において使用する舵角、変針操舵を開始する変針点手前の距離又は目安を記入して下さい。

許容可能な変針角度	根拠	備考
°		

船速(エンジンモーション)	30° 変針時に使用する舵角	30° 変針時における変針操舵を開始する変針点手前の距離又は目安
Full Ahead	°	
Half Ahead	°	
Slow Ahead	°	
Dead Slow Ahead	°	

3. 立案された操船計画どおりに実施するには、風等の環境条件変化に対応した操船を行う必要があります。本日、操船計画を行った GT499 型内航タンカーのキャプテンとして実施する、風等の環境条件への対応策を記入して下さい。

3.1 自力で操船できる限界風速は何 kts 程度と予測されますか。

限界風速	kts	根拠	
------	-----	----	--

3.2 微風状況から 10m/s~15m/s の風が吹き始めたとして、変針操船、減速操船における風速増への対応策を記入して下さい。

変針操船上の対応策	
減速操船上の対応策	

以上、ありがとうございました。

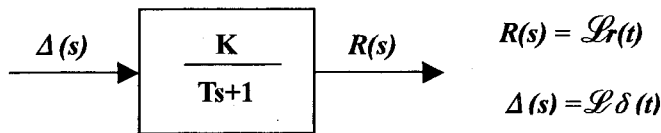
## Appendix-5 最短時間変針法

### 最短時間変針法について

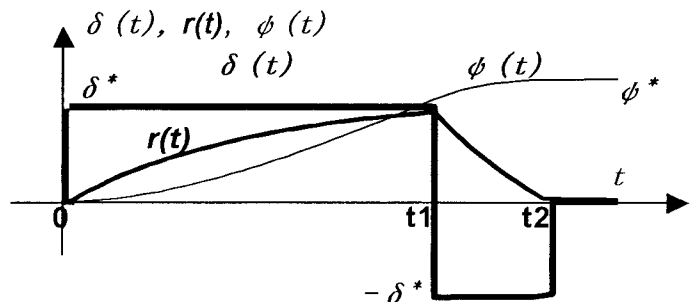
舵角入力： $\delta(t)$ に対する船体の旋回角速度応答： $r(t)$  は(A-5.1)式の旋回運動方程式で表現される。

$$T \frac{dr(t)}{dt} + r(t) = K\delta(t) \quad (\text{A-5.1})$$

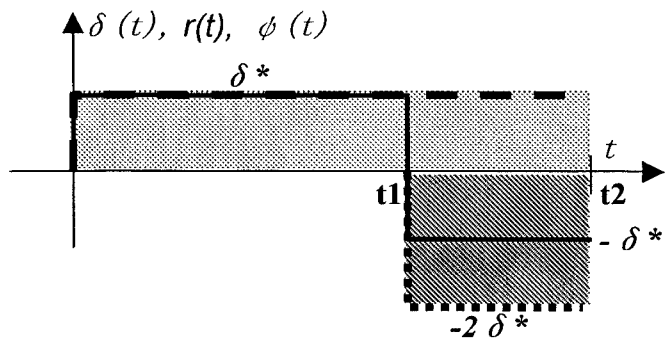
旋回運動制御系のブロック図は下図となる。



変針角を $\phi^*$ 、使用舵角を $\delta^*$ 、舵機遅れが無いとすると、最短時間変針法は、右図に示すようなバンバン制御となることが知られている。



上記バンバン制御の入力と応答を求める手法として、右図の如く、 $t=0$ からの舵角： $\delta^*$ のステップ入力(破線表示)と、舵角反転時期： $t1[s]$ から舵中央時期： $t2[s]$ までの舵角： $-2\delta^*$ のステップ入力(点線表示)を重ねることでバンバン制御の入力(実線表示)を再現し、応答を求めることができる。



$t=0$ からの舵角： $\delta^*$ のステップ入力の船体の旋回運動応答： $r_{\delta^*}(t)$ は(A-5.2)式となり、舵中央時期： $t2[s]$ からの舵角： $-2\delta^*$ のステップ入力を重ねた入力に対する船体の旋回運動応答： $r(t)$ は(A-5.3)式となる。

$$r_{\delta^*}(t) = K\delta^*(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad t \geq 0 \quad (\text{A-5.2})$$

$$r(t) = r_{\delta^*}(t) - 2K\delta^*(1 - e^{-\frac{t-t1}{T}}) \quad t \geq t1 \quad (\text{A-5.3})$$

舵中央時期の $t2[s]$ とすると、(A-5.4)式と(A-5.5)式で表現されるふたつの条件が成立する。

$$r(t2) = 0 \quad (\text{A-5.4})$$

$$\psi(t2) = \psi^* \quad (\text{A-5.5})$$

(A-5.2) 式と (A-5.3) 式を (A-5.4) 式と (A-5.5) 式に代入すると、(A-5.6) 式と (A-5.7) 式が求まる。

$$\tau = t - t1 \quad \tau2 = t2 - t1$$

$$r(t2) = K\delta^* (1 - e^{-\frac{t2}{T}}) - 2K\delta^* (1 - e^{-\frac{\tau2}{T}}) = 0 \quad (\text{A-5.6})$$

$$\psi(t2) = \int_0^{t2} r(t) dt = K\delta^* \int_0^{t2} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) dt - 2K\delta^* \int_0^{\tau2} (1 - e^{-\frac{\tau}{T}}) dt = \psi^* \quad (\text{A-5.7})$$

次に、(A-5.6) 式と (A-5.7) 式を展開して、(A-5.8) 式と (A-5.9) 式を得る。

$$(1 - e^{-\frac{t2}{T}}) = 2(1 - e^{-\frac{\tau2}{T}}) \quad (\text{A-5.8})$$

$$t2 - 2 \cdot \tau2 - T(1 - e^{-\frac{t2}{T}}) + 2T(1 - e^{-\frac{\tau2}{T}}) = \frac{\psi^*}{K\delta^*} \quad (\text{A-5.9})$$

(A-5.8) 式を (A-5.9) 式に代入して (A-5.10) 式を求め、

$$t2 - 2 \cdot \tau2 = \frac{\psi^*}{K\delta^*} \quad (\text{A-5.10})$$

(A-5.10) 式を (A-5.8) 式に代入すると (A-5.11) 式が成立する。

$$e^{-\frac{\psi^*}{TK\delta^*}} (e^{-\frac{\tau2}{T}})^2 - 2e^{-\frac{\tau2}{T}} + 1 = 0 \quad (\text{A-5.11})$$

この (A-5.11) 式を解くことで、解である舵中央時期:  $t2$  [s] と舵角反転時期:  $t1$  [s] は (A-5.12) 式と (A-5.13) 式のとおり求まる。

$0 < 1 - e^{-\frac{\psi^*}{TK\delta^*}} < 1$  であり、 $0 < e^{-\frac{\tau2}{T}} < 1$  であるので、

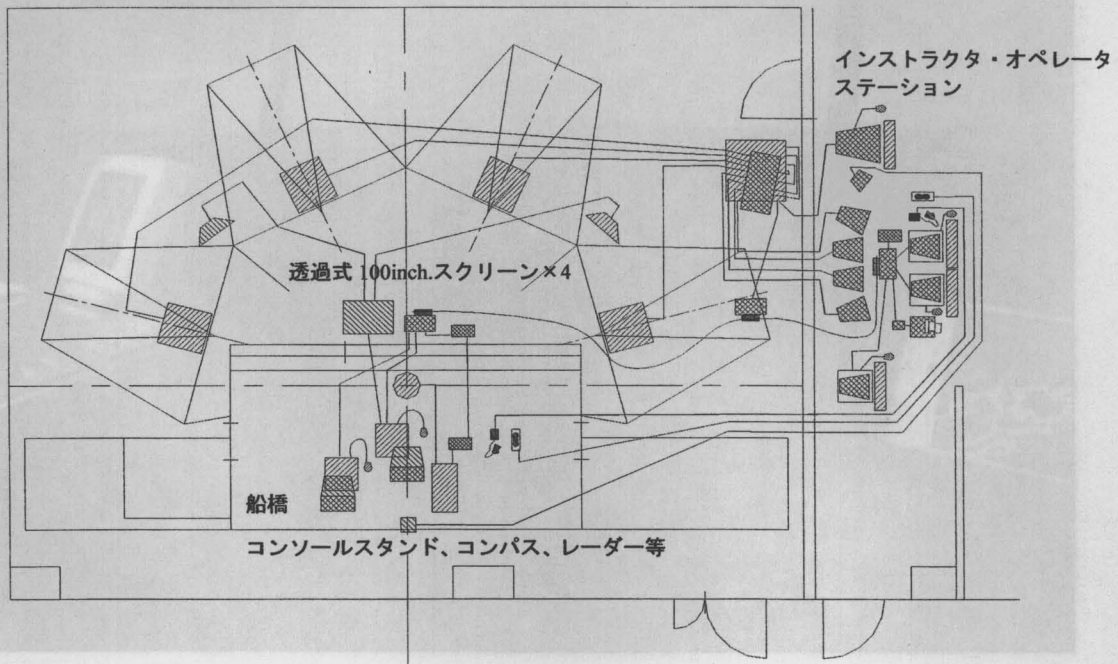
$$e^{-\frac{\tau2}{T}} = \frac{1 - \sqrt{1 - e^{-\frac{\psi^*}{TK\delta^*}}}}{e^{-\frac{\psi^*}{TK\delta^*}} + 1 + \sqrt{1 - e^{-\frac{\psi^*}{TK\delta^*}}}} \text{ となり、}$$

$$\tau2 = -T \cdot \log_e \left( \frac{1}{1 + \sqrt{1 - e^{-\frac{\psi^*}{TK\delta^*}}}} \right)$$

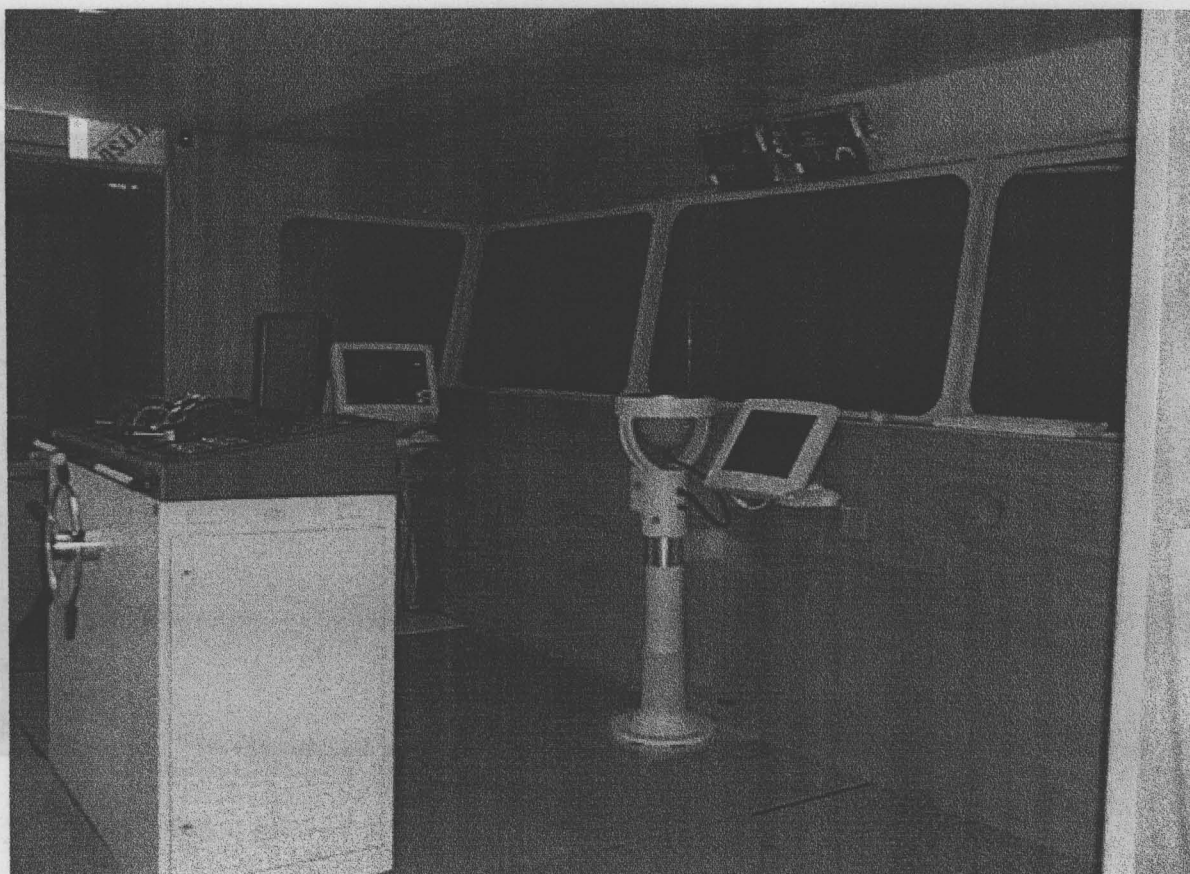
$$t2 = 2 \cdot \tau2 + \frac{\psi^*}{K\delta^*} \quad (\text{A-5.12})$$

$$t1 = \tau2 + \frac{\psi^*}{K\delta^*} \quad (\text{A-5.13})$$

Appendix-6 富山商船高等専門学校・操船シミュレータ

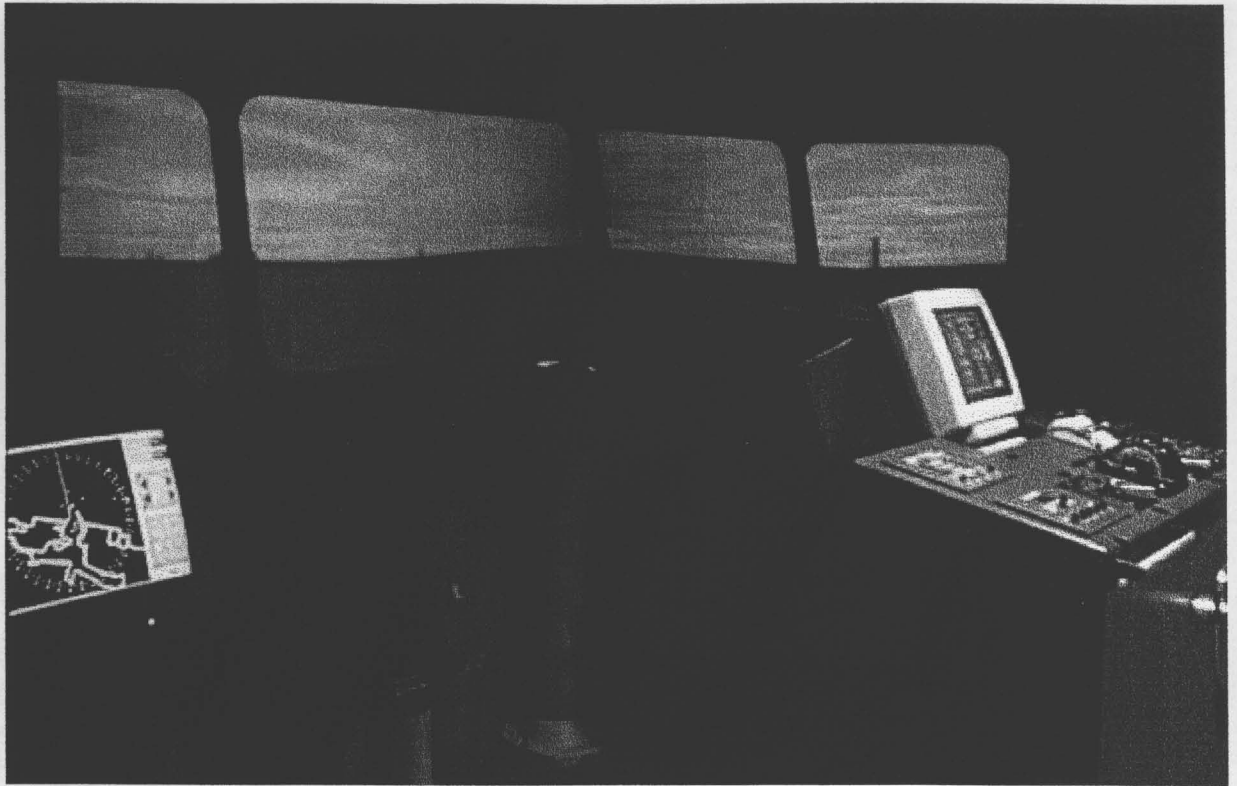


操船シミュレータ平面図



操船シミュレータ・船橋部





シミュレーション時の船橋部とスクリーン画像



操船シミュレータのインストラクタ・オペレータ・ステーションと表示画像例

船舶操縦・マニピュレーション