



# 帆装船舶の港内操船及び錨泊時の安全性向上に関する研究

高岡, 俊輔

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2000-03-31

(Date of Publication)

2012-07-20

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲0003

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3168276>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/DS100003>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸商船大学  
博士論文

帆装船舶の港内操船及び錨泊時の  
安全性向上に関する研究

2000年1月

神戸商船大学大学院商船学研究科  
博士後期課程 海上輸送システム科学 専攻

高岡俊輔

帆装船舶の港内操船及び錨泊時の  
安全性向上に関する研究

2000 年 1 月

高岡 俊輔

# 目 次

	ページ
第 1 章 序 論	1
1-1 本研究の背景	1
1-2 帆装船舶について	2
1-3 本研究の目的と概要	3
第 1 章の参考文献	6
第 2 章 帆装船舶の運航実体とその問題点	9
2-1 概 説	9
2-2 帆装船舶の実態調査	9
2-2-1 調査方法および調査内容	9
2-2-2 運航船会社についての結果	10
2-2-3 乗組員についての結果	17
2-3 帆装船舶の実状と今後の展望	28
第 2 章の参考文献	29
第 3 章 帆装船舶利用の有効性の検証	30
3-1 概 説	30
3-2 帆装船舶の日本海側航路適合性について	31
3-2-1 調査方法および調査内容	31
3-2-2 日本海側航路の概況	31
3-2-3 日本海側航路への適合面	36
3-2-4 日本海側航路への不適合面	43
3-3 結 語	45
第 3 章の参考文献	47

第4章 帆の開発と実験	48
4-1 概説	48
4-2 新型帆装装置の開発	49
4-2-1 基本設計	49
4-2-2 開発の概要	51
4-3 性能実験結果	55
4-3-1 帆走性能実験	55
4-3-2 帆を利用した操船性向上への試み	57
4-3-3 錨泊実験	58
4-4 結語	64
第4章の参考文献	66
第5章 帆の利用による操船能力の推定	68
5-1 概説	68
5-2 帆装船舶の操船シミュレータの開発	69
5-2-1 使用した運動方程式	69
5-2-2 計算に使用した帆装船舶のモデル	71
5-2-3 帆の空力特性	71
5-2-4 操船シミュレータの概要	78
5-2-5 シミュレータモデルの妥当性の検証	80
5-3 帆の積極的利用による操船面への効果	80
5-3-1 旋回径への影響	83
5-3-2 最短停止距離への影響	84
5-3-3 回頭への影響	86
5-3-4 ターニングベースン面積への影響	88
5-3-5 定位置保持の可能性	89
5-4 結語	92
第5章の参考文献	95

第6章	帆の自動制御による運動特性の検討	97
6-1	概説	97
6-2	使用した運動方程式	97
6-2-1	風圧影響を考慮した運動方程式	97
6-3	計算に使用したモデル船と帆について	99
6-4	帆の自動制御の方法	100
6-5	純帆走時の運動特性と評価	104
6-5-1	直進制御時の船体運動特性	104
6-5-2	回頭制御時の船体運動特性	109
6-5-3	停留制御時の船体運動特性	112
6-5-4	急停止制御時の船体運動特性	114
6-5-5	斜行制御時の船体運動特性	114
6-6	機帆走時の運動特性と評価	119
6-6-1	非定常風の導入とモデル化	119
6-6-2	機帆走時の評価項目	120
6-6-3	直進制御機帆走中の船体運動特性	120
6-6-4	回頭制御機帆走中の船体運動特性	126
6-6-5	機帆走時の制御法の問題点と今後の課題	131
6-7	操帆操船支援システムの概要と提案	133
6-8	結語	135
第6章の参考文献		137
第7章	帆を利用した錨泊法の検討	138
7-1	概説	138
7-2	帆装船舶の錨泊シミュレータの開発	139
7-2-1	座標系および運動方程式	139
7-2-2	計算に使用したモデル船と帆について	143
7-2-3	錨泊シミュレータの概要	143
7-3	帆の積極的利用による錨泊への効果	145

7-3-1	基準とした振れ回り運動について	145
7-3-2	振れ回りの抑制効果と錨鎖張力の緩和効果	147
7-3-3	帆の制御について	154
7-4	結語	162
第7章の参考文献		164
第8章	結論	166
謝辞		173

# 第1章 序 論

## 1-1 本研究の背景

近年、先進工業国の経済活動の高度化や人口の急増は、化石燃料の大量消費、有害物質の排出、森林の減少に伴う大規模な砂漠化の進行を誘発し、地球環境に多大な負荷を与え続けている。これにより地球は、独自で持つ浄化能力の超過を来たし、地球温暖化、酸性雨、海洋汚染という地球規模での環境問題を引き起こしている<sup>(1)</sup>。このような状況の中で、船舶分野においても地球温暖化や酸性雨をはじめとした多くの問題が指摘されはじめてきた。地球温暖化については、船舶の推進力は石油系燃料を燃焼して動力を得ているため、燃焼過程でCO<sub>2</sub>が必ず排出される。CO<sub>2</sub>の発生量はエネルギー使用量に比例するため、エネルギー関係の統計から推定すれば内航海運のCO<sub>2</sub>排出量は国内全体の2%程度、世界全体の船舶の占める割合は、液体燃料のおよそ5%程度<sup>(2)</sup>と考えられているため、無視できる範囲ではない。

酸性雨については、船舶で用いられているディーゼル機関は高温の燃焼過程があるため、NO<sub>x</sub>の排出濃度が極めて高い。さらに粗悪燃料油を使用していることから、これに含まれる硫黄成分の燃焼より生成されるSO<sub>x</sub>も同時に排出される。統計資料からの推定によれば全世界での液体燃料から出るNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>の総排出量中、2割程度が船舶によるものと考えられている<sup>(2)</sup>。この他にも船舶から排出されるビルジや船底防汚塗料等の船舶運航により生じるものなど、船舶が地球環境に負荷を与える影響は大きいため、地球環境保全に対応した船舶が現在求められている。このような背景から、自然エネルギーの利用開発が近年期待されはじめてきている。現在の国の推進するモーダルシフト<sup>(3)</sup><sup>(4)</sup>に関連し、二酸化炭素を排出しない自然エネルギーの有効利用が見直されているのはこの表れである。これまでに自然の持つエネルギー源の開発としては、波力、潮力、風力、地熱、太陽熱、太陽光などが行われてきたが、最近においては、この中でも最も期待されている自然エネルギーの一つは「風力エネルギー」であるといわれている<sup>(5)</sup><sup>(6)</sup><sup>(7)</sup>。風力エネルギーは、安全、クリーンで普遍性に富むなどの利点から有望なものと考えられている。

我が国においては、船舶へ風を近代的に利用した例として、1973年、1978年の2度のオイルショック時に燃料油の高騰に対抗するため建造された「帆装船舶（帆装商船）」<sup>(8)(9)</sup>の実績がある。この帆装船舶はオイルショック後の石油の安定供給、低価格化に伴い忘れ去られていたが、上述したようなことから、石油の消費を節約し、無限かつクリーンエネルギーの活用が行える「環境に優しい船舶」として再び注目を集めつつある。

## 1-2 帆装船舶について

風を動力源とした船、すなわち帆船の歴史は古く、紀元前3500年頃からといわれている。このような歴史のある帆船は19世紀に入り、蒸気機関が誕生するに至ってもなお着実な進歩を重ね、数々の栄光の記録と共に、華やかな時代を築いた。しかし19世紀の終わりになると、蒸気機関の発達、内燃機関の出現、さらには鋼鉄の使用による船体の大型化に伴い衰退の一途をたどり、20世紀初頭にはついに汽船にその地位を譲り、現在ではその姿を練習船やヨットのたぐいに残すのみとなった。その後、汽船隆盛の時代が続き、1960年代には、船舶の大型化、大出力化に拍車がかけられV L C C、U L C Cの建造という脅威的なスケールアップが実施された。しかし、膨張する石油の消費に対し化石燃料の枯渇が問題視され、石油に変わる動力源の研究が始められた。この時期に「サバンナ号」などの原子力船が建造されたが、経済性等に問題が残り、一般商船としての広範囲な利用には至らなかった。これに変わるものとして注目を集めたのが風力である。風力利用においては既述したように帆船の運航で十分な実績があるため、石油に変わるエネルギー源を求める産業界で注目されるようになった。

船舶での風力エネルギーの利用方法は、従来型式の帆のみならず、種々考えられていた<sup>(10)~(17)</sup>。帆の代わりに回転する円筒を立て、マグナス効果を利用するローター船や、風車の利用などがその代表である。ローター船については、風向、風速の変化によりローターの回転方向の変更や回転速度の増減を行う効率の悪さや縮帆ができないことに大きな欠陥が生じた。また、風車式は特殊な方式のものを除くと、理論的に逆風時には進行できず、さらに風車の高さが帆柱より高くなり、横風の時のバランスが悪いという欠点で実用化はできなかった。最終的に風力船設計の根底となったのは、西ドイツのウィルヘルム・フレルスによるDynamikschiff

である<sup>(18)</sup>。これは1万トン級の純帆装貨物船の計画の論文であり、近代的帆装船舶の研究の最初のものである。Dynamikschiffの研究に刺激を受け、各国で帆装船舶の研究が進められていた中、折しも第1次・第2次オイルショックが発生し、我が国においても近代的な帆装船舶（以下、帆装船と呼ぶ）の研究開発が開始され、日本船用機器開発協会（JAMDA）の指導のもと、帆の選定・設計・海上実験を行った結果<sup>(19)~(23)</sup>、世界初のコンピュータ制御による帆装船「新愛徳丸」（699 G/T ケミカル船）が誕生した。その後、新愛徳丸の実績から建造された帆装船は十数隻に達し、船種もタンカーを始め、貨物船、撒積船、フェリー、漁船など多種におよび<sup>(24) (25)</sup>、その経済性は在来船の燃料消費量の70~80%（航路によっては50%）となることも実証された。さらに帆装船は経済性の向上だけではなく、帆の影響で船体の動揺が少なくなるという、アンチローリング効果を示すことが挙げられている。これは、商船としては大きなメリットを持った船舶であり、荒天時の船舶の稼働率の向上がはかれる可能性を備えている。このように商船として非常に良い性能を持つ帆装船は、現在では少数となってしまったが、地道に走りつづけている。

### 1-3 本研究の目的と概要

前節までは、現在の時代背景から帆装船の現状と必要性について述べた。本研究は今後の海上輸送に帆装船をより有効に利用することを考え、現在の帆装船の持つ問題点の究明と解決法を検討した経緯を示す。また、これと同時に現在の帆装船にはない、操船者の立場に立った制御法の基礎研究を行い、21世紀の帆装船に必要と考えられる新しい制御システムである「操帆操船支援システム」の提案を行うことを目的としている。本論文は上記の研究目的のために、図1-1に示す構成で以下に示す事柄を行った。

第2章では、帆装船の船会社および乗組員に対し実態調査を行い、現在の帆装船の運航形態と抱えている問題点を指摘し、その問題解決の考え方を示す。これにより帆装船の全体像を明らかにすると共に今後の有効利用に対しての展望を説く。

第3章では、帆装船が持つ商船としての優れた性能の検証を行うため、一般的に過酷な航路といわれている、日本海側航路に帆装船を就航させた場合の有効性

について、通常船と比較し検討を行った結果を示す。

第4章では、帆装船の持つ重大な問題点である、帆装装置の縮帆時の形状や制御法の不具合による操船への悪影響、および錨泊時の走錨確率の増大の問題に対し、縮帆時には風圧面積がほとんど無くなる新しいタイプの帆装装置を開発し、9 mカッターによる実船実験の結果を示す。

第5章では、現在の帆装船は操船面や錨泊面で大きな問題を残したまま運航が続けられており、この問題に対する検討は未だほとんど行われていない。この問題に対し前章で開発した帆装装置の性能を組み込んだ操船シミュレータを開発し、操船面へ帆の積極的利用を行った場合の操船性能向上の可能性について考察する。

第6章では、前章で確認できた帆の積極的利用による操船性向上項目について、それを自動制御化し、この制御法を適用した場合の運動性能について検討を加える。また、ここで研究開発した自動制御法を適用した船体運動予測シミュレーションを「操帆操船支援システム」と名付け、実用化への提案を行う。

第7章では、帆装船の錨泊時の問題点に対し、帆装船錨泊シミュレータを開発し、錨泊中の振れ回り増大や錨鎖張力増大のメカニズムの解明と帆を利用した安全錨泊のための制御法を提案する。

第8章では、本研究で得られた主要な知見について述べ、研究結果の総括と今後に残された問題点を指摘する。本研究で得られた結果は船舶の操船者の立場から帆装船の性能向上を追求した基礎研究であるが、21世紀に蘇る可能性の高い帆装船のポテンシャルを高める上で大いに役立つ重要な研究であると確信する。

なお本論文は、学会誌や論文集に既に発表した帆装船に関する一連の研究<sup>(26)</sup>~<sup>(33)</sup>をとりまとめたものである。

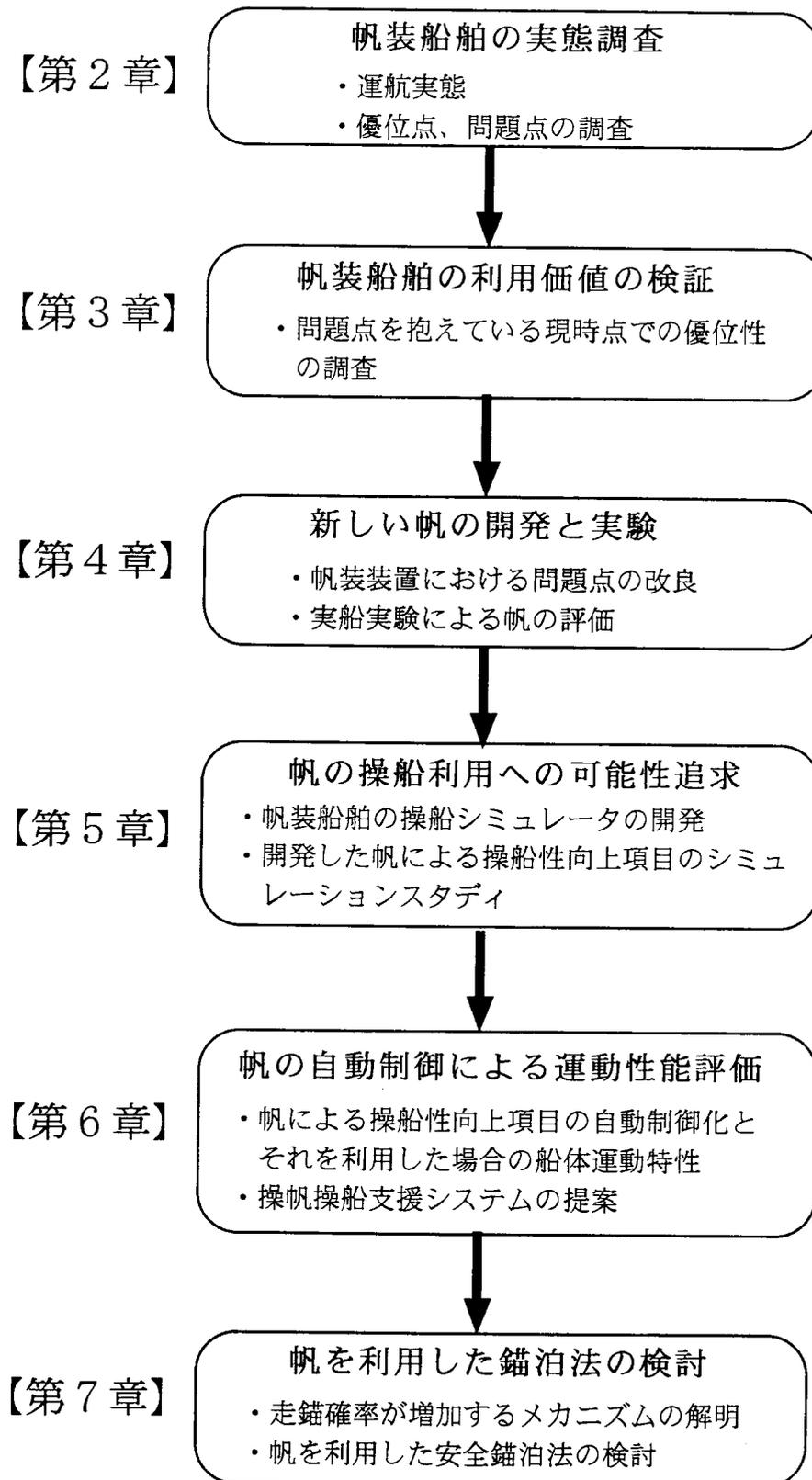


図 1 - 1 本論文の構成

## 第1章の参考文献

- (1) 土木学会海岸工学委員会地球環境問題小委員会：地球温暖化の沿岸影響、平成6年7月
- (2) 田中圭：船舶をとりまく地球環境問題、日本造船学会誌 第747号、平成3年9月、pp.27～29
- (3) 海事産業研究所：モーダルシフト推進のために、平成5年3月
- (4) 日本物流団体連合会：モーダルシフトに関する調査報告、平成5年3月
- (5) 本間拓也 編：風力エネルギー読本、オーム社、昭和54年
- (6) 牛山泉・三野正洋：小型風車ハンドブック、パワー社、昭和55年
- (7) 千住智信・高市潤也 他：ファジイ制御を用いた風力発電システムの最大電力点の探索、日本ファジイ学会誌Vol.7、pp.196～203
- (8) 名村秀樹：帆装商船の展望について、関西造船協会誌、第182号、昭和56年9月、pp.123～136
- (9) 日本鋼管船舶設計部：省エネ帆装貨物船 “扇蓉丸” および “日産丸”、船の科学Vol.36.1983-8、pp28～36
- (10) G.I.Fekete and B.G.Newman: Design and Testing of A Sail boat with Self-Trimming Wing Sail,Canadian Aeronautics and Space Journal,Vol.29,June 1983
- (11) Kenneth Abel: Practical Wind Assist System for Cargo and Service Vessels,Oxford Univ.Jan 81
- (12) Ake Williams,Hans Liljenberg: Revival of Rotor -Beneficial or Merchant Vessels,Fishing Boats,and Recreational Craft?,SNAME Transactions,Vol.91,1983,pp.125～148
- (13) A.FIORENTINO,L.LECCE: PROPOSAL OF A SAIL SYSTEM FOR THE PROPULSION OF A 25.000 TDW BULK-CARRIER,Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,19(1985) pp.115～137
- (14) John B.Woodward,er al: Feasibility of Sailing Ships for the American Merchant Marine,Report No.168 Michigan University, February 1975

- ( 1 5 ) Zygmunt Choren : Passenger sailing ship "Gwarek", HANSA-Schiffahrt  
-Schiffbau-Hafen-125.Jahrgang-1988-Nr.22
- ( 1 6 ) C.J.Satchwell : The Evaluation of Wind Power for Commercial  
Vessels, THE NAVAL ARCHITECT, FEBRUARY 1985. pp.101~106
- ( 1 7 ) 菊池正晃・村山雄二郎 : 海上輸送における風力エネルギー利用の研究、  
船舶技術研究所報告、第23巻、第6号、研究報告、昭和61年11月、  
pp.31~55
- ( 1 8 ) W.Prolss : "Das Dynamikschiff", Hamburg Feb.1957
- ( 1 9 ) 伊藤雅則 : 帆装商船の自動操帆システム、計測と制御、Vol.23、No.2、  
昭和59年2月、pp.12~19
- ( 2 0 ) 渡辺虎年 : 帆装商船における操帆および主機制御、計測と制御、Vol.30、  
No.10、pp.23~30
- ( 2 1 ) 遠藤洋一・名村秀樹 他 : 小型帆装タンカーの馬力利得、日本鋼管技報、  
No.92.1992、pp.89~100
- ( 2 2 ) 志賀竹磨 : 帆装の実態、船の科学、Vol.36.1983.8、pp.37~41
- ( 2 3 ) 日本船用機器開発協会 : 省エネルギー帆装商船の洋上実験成功裡に終わ  
る、夢48号、1979年8月、pp.1~4
- ( 2 4 ) 志賀竹磨 : 船舶整備公団共有船帆装特殊タンク船 "日徳丸"、造船技術、  
1983年8月、pp.49~56
- ( 2 5 ) 船の科学編集部 : D/W 26,000 T型近代帆装貨物船 "ウスキハ・イオニア"  
の第一次航海結果報告、船の科学、Vol.38、1985.7、pp.79~82
- ( 2 6 ) 久保雅義・高岡俊輔 : 帆装商船の運航実態とその問題点について、日本  
航海学会誌、第120号、平成6年6月、pp.69~77
- ( 2 7 ) 久保雅義・高岡俊輔 : 帆装商船の日本海航路適応性について、日本航海  
学会論文集、第92号、平成7年3月、pp.231~239
- ( 2 8 ) 久保雅義・高岡俊輔 : 新型帆装装置の開発、日本航海学会論文集、第9  
4号、平成8年3月、pp.1~8
- ( 2 9 ) 久保雅義・高岡俊輔 : 新型帆装装置の開発-II、日本航海学会論文集、第  
96号、平成9年3月、pp.203~211

- ( 3 0 ) 高岡俊輔、村山雄二郎、久保雅義：帆装型船舶の帆の利用による操船能力について、日本航海学会論文集、第98号、平成10年3月、pp.265～276
- ( 3 1 ) 高岡俊輔、村山雄二郎、久保雅義：帆装型船舶の帆を利用した錨泊法について、日本航海学会論文集、第99号、平成10年5月、pp.215～226
- ( 3 2 ) 高岡俊輔、村山雄二郎、久保雅義：帆装型船舶の制御とその評価、日本航海学会論文集、第100号、平成11年3月、pp.91～101
- ( 3 3 ) 高岡、村山、久保：帆装型船舶の機帆走時の船体運動特性、日本航海学会論文集、第101号、平成11年9月、pp.121～130

## 第2章 帆装船舶の運航実態とその問題点

### 2-1 概説

第1章で述べたように、時代は海運界において「環境に適応した船舶」の開発を求めている。これに対応する船舶として帆装船が挙げられている。しかし、帆装船については、その高経済性に関する範囲は多くの文献、資料<sup>(1)~(7)</sup>が提示されているが、上述したような時代の要求や、帆装船の得失、特に帆装船の持つ問題点などについては明らかにされていない。

本章では、帆装船の詳細な実態調査を行い、今後の帆装船の有効利用を考える上で基礎的な資料とするため、現状の把握や船の持つ優位性、問題点などを調査した。

ここでは、2-2節で、帆装船を船会社側からと乗組員側からとの2つの側面から調査し、現在の帆装船の運航形態や問題点の指摘を行うと共に、全体像について述べる。2-3節では、帆装船の全体像から考えられる、今後の有効利用についての研究の方向性を展望する。

### 2-2 帆装船舶の実態調査

#### 2-2-1 調査方法および調査内容

##### (1) 調査方法

現在も帆装船を運航している船会社及び過去に運航していた船会社13社にアンケートを行い、現在の実態を調査した。(回答率は69%)

調査方法としては、アンケートを2回に分けて行った。第一段は、帆装船の現在の運航状況等を調査するため船会社に対して回答を依頼した。第二段は、帆装船の運航者に実務的な内容の調査を行うという形態をとり、現実の運航上の問題点等を回答してもらった。

##### (2) 調査内容

第一段の船会社用のアンケートでは、表2-1に示した内容の調査を行った。調査の概要は、「所有船の項目」で、帆装船の運用方法を、「帆装船の実状につ

いての項目」で現在の稼働状況を述べてもらった。「帆装船にしたことによる現在の状況についての項目」では、実際に起こっている帆装船ならではの幾つかの問題点を挙げてもらい、そこから考えた上での率直な意見を「帆装船に関する船会社の考え方についての項目」で述べてもらった。

第2段の運航者用のアンケートでは、第1段で出て来た問題点を細かく分け、特に実務上の問題を浮き彫りに出来るように、表2-2に示した内容の調査を行った。調査の詳しい解析結果は後述するが、現在実際に走っている帆装船の操船上の問題や燃料消費の問題はもとより、メンテナンスから帆装装置の改良点に至るまでの詳しい意見を聞くことができた。

## 2-2-2 運航船会社についての結果

### (1) 帆装船の運航形態

アンケート調査の結果、帆装船の運航形態は図2-1(A)に示すように、定期航路が僅かに多い程度で、定期航路、不定期航路ともに同じ位に就航している。定期航路に就航させている船会社の殆どが、会社が扱っている積荷上、航路が限定されていることが理由となっている。しかし、中には過酷な航路といえる冬場の日本海の航路<sup>(8)</sup><sup>(9)</sup>に耐えられることから、わざわざ定期航路に就航させている船会社もあった。

不定期航路としている船会社は、外国航路に就航している会社と主に内航のケミカルタンカー所有の会社であり、荷主、積荷量が不規則なため、積揚地が変わることが多いという回答であった。

### (2) 帆装船の航路

帆装船の航路は、図2-1(B)に示すように、北海道北西部と九州南岸を除くほぼ日本全土であった。特徴としては、瀬戸内海のみを航行している帆装船は3隻で、他は太平洋側もしくは日本海側のいわゆる外洋に面した航路であった。この理由については、先にも述べたように、積荷により航路が定まってしまうということにもよるが、これよりは、むしろ帆装船としての利点を最大限に活用するため、このような航路に就航させているように思える。さらに考えるには、こういった航路に航行させることを予想して帆装船を建造した感もうかがえる回答も

表 2 - 1 船会社用アンケートの概要

質問の種類	質問の内容
所有船の項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 主要目（船種、積荷、トン数）</li> <li>・ 航路（定期航路か不定期航路かを含む）</li> <li>・ 定期航路か不定期航路かの別、その理由</li> </ul>
帆装船舶の実状についての項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 内航船、外航船のどちらに向いているか</li> <li>・ どの様な船種に帆装船舶は向いているか</li> <li>・ 海上輸送に帆装船舶は向いているか</li> </ul>
帆装船舶にした事による現在の状況についての項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 帆装船舶のメリットとその理由</li> <li>・ 帆装船舶のデメリットとその理由</li> <li>・ 現在の問題点とその具体的な内容</li> </ul>
帆装船舶に関する船会社の考えについての項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 代船を考える場合、次も帆装船舶にするか（する場合の理由及びしない場合の理由）</li> <li>・ 帆装船舶にする場合の条件</li> <li>・ 帆装船舶の採算（帆装装置等の維持費など）</li> <li>・ 帆装装置の問題点、改良点</li> </ul>

表 2 - 2 運航者用アンケートの概要

質問の種類	質問の内容
乗船船舶に関する項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 主要目（船名、船種、積荷、トン数）</li> <li>・ 乗組員の人員及び構成</li> <li>・ 航路、その他</li> </ul>
帆装船舶の運航の現状についての項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 航海日数、荷役日数、入渠日数</li> <li>・ 避泊日数及び運航中止日数とその理由</li> <li>・ 航行航路に対する帆走の割合及び燃費率</li> <li>・ 帆装船舶の安全性、定時制の状況</li> <li>・ 帆装船舶に適する航路、適さない航路</li> <li>・ 帆装船舶に適する船種（理由を含む）</li> </ul>
運航者から見た実務の問題点についての項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 気象状況による運航限界の基準値</li> <li>・ 帆装船舶の航行に有利な状態、不利な状態</li> <li>・ 帆装船舶ならではの欠点や問題点</li> <li>・ 乗組員から見た帆装船舶の感想</li> </ul>
帆装船舶の操船上の項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 帆装船舶の操縦性全般に関する状況</li> <li>・ 離岸、着岸、その他の操船における性能</li> <li>・ 帆装船舶の錨泊時の状況</li> </ul>
帆装装置についての項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 故障の有無及びその状況</li> <li>・ メンテナンスの間隔及び費用</li> <li>・ 帆装装置の取り扱いに関する感想</li> <li>・ 帆装装置に関する改良点</li> </ul>

得られた。これはアンケート中に「帆装船のメリットを最大限に活用するには、風力の影響を一定に長時間受けれる航路を走るのが得策である」ということや「帆装船は揺れが少なく、気象条件の悪い外洋に面した航路に向いている」ということがアンケート中随所に挙げられていたからである。

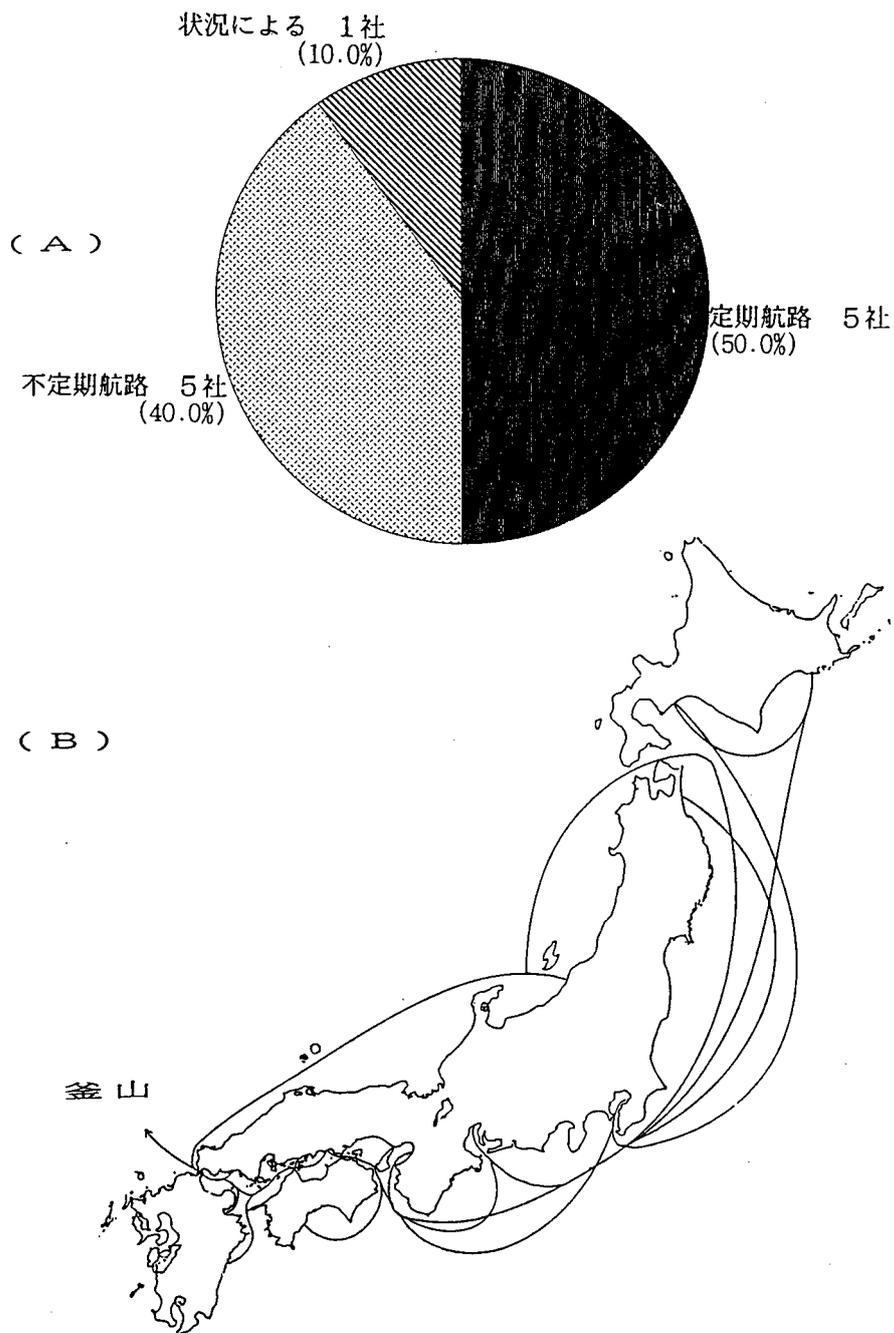


図 2 - 1 帆装船舶の運航形態と航路

### (3) 帆装船の実状についての結果

帆装船は内航船、外航船のどちらに向いているかという質問に対して、船会社の回答は図2-2に示すような結果となった。図から分かるように、殆どの船会社が外航船向きだと答えている。理由は、帆装船がその性能を最大限発揮する状況は「船の推進に利用できる風を一定方向から長時間受けて走れる航路」が良いからというものであった。また、内航船に向かない理由を以下のように具体的に回答している船会社もあった。

① 走る距離が短い。

② 内海のような囲われた海域では一定の風を長時間得にくい。

③ 針路変更が頻繁に行われるので、展帆率が低下する。

上記の回答結果から考えると、帆装船は内航船向きでは無く、航路が長く、定常季節風を利用できる外航船が適するということになる。しかし、僅かであるが内航船向きと答えた会社は、内航船でも風の状態が良い所で航路が長く、針路変更等の少ない航路ならば十分に使えると回答している。これから考えると内航、外航というよりも、むしろ帆を張って走れる長さに関する展帆率の善し悪しが大きく影響するものと考えられる。

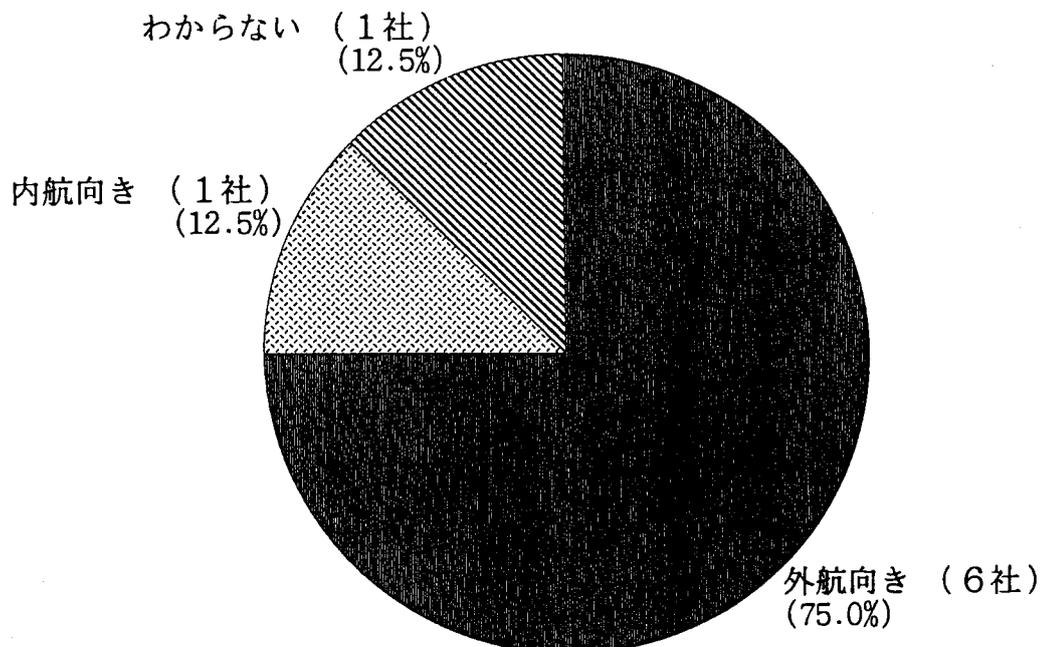


図2-2 内航船・外航船の適合割合

#### (4) 帆装船向きの船の種類

帆装船向きの船の種類については、図2-3に示した結果が得られた。回答からは、「タンカー」「貨物船」の順であったが、荷役に帆装装置が邪魔にならない船種ならば船の種類は問わないというものが多かった。また、わからないと答えた船会社の大部分は、帆装装置を付けた船のタイプの殆どがタンカーであるため、他に比べるものがないというものであった。

#### (5) 海上輸送における帆装船の期待状況

海上輸送に帆装船は期待できるか、という問の回答は図2-4に示す通りである。「期待できる」が一番多かったが、他の割合から見ると一概に期待できる船舶とはいえない。しかし、他の回答中「できない」または「わからない」と回答した船会社の理由として、以下の項目が挙がっていた。

- ① イニシャルコストが掛かりすぎ、採算が合わない。
- ② F O の価格による。

この内、②のF O の価格に関しては、限られた資源であることや今後の国際状況により価格が上昇することは大いに考えられることから、①のイニシャルコストの面について大きく改善されれば、帆装船は「期待できる」という意見が多くなるのではないかと考えられる。

#### (6) 帆装船のメリット、デメリット

帆装船所有の船会社に、そのメリット、デメリットを挙げてもらったところ、つぎの結果が得られた。

##### メリット

- ① 燃料効率がよい。
- ② 船の安定性が増す。
- ③ 船体の動揺が少なくなる。
- ④ 保針性が良くなる。

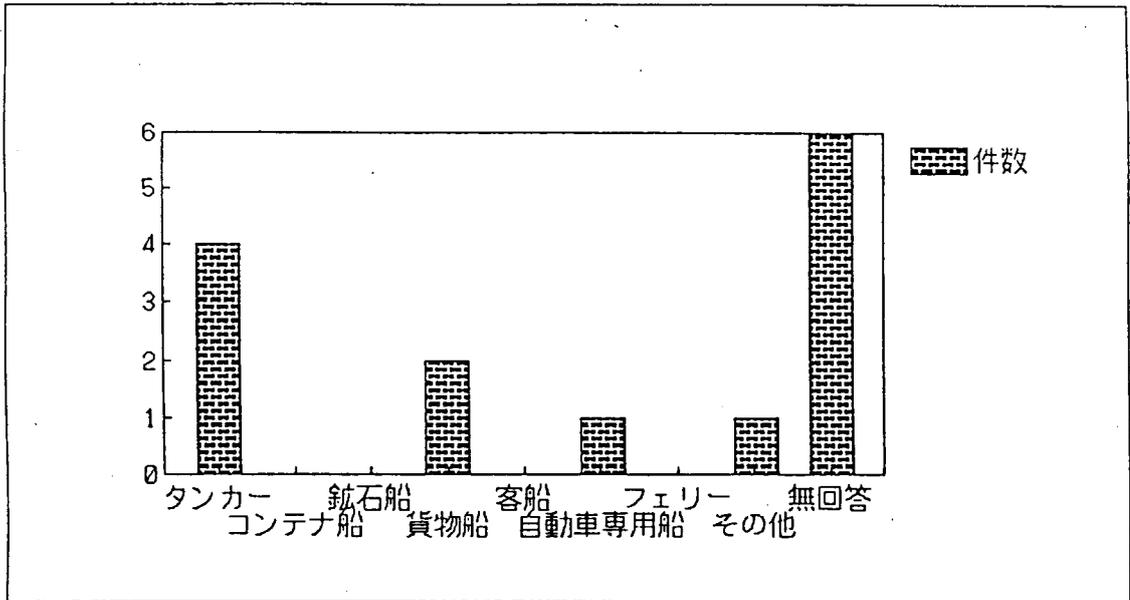


図 2 - 3 帆装船舶に適する船種

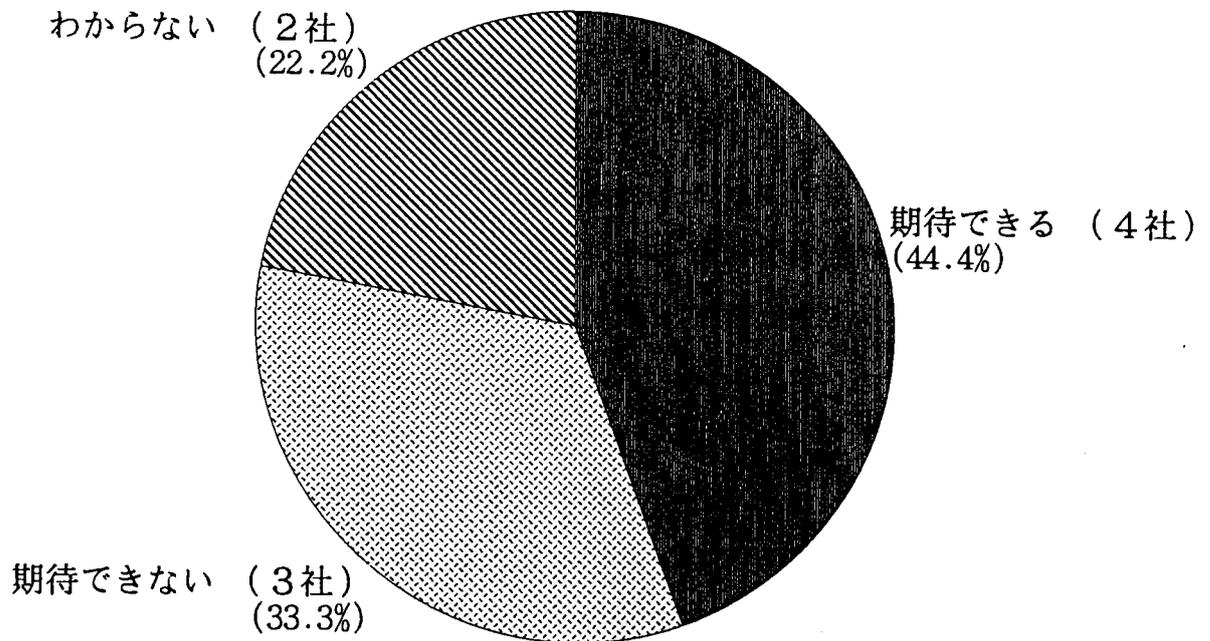


図 2 - 4 帆装船舶の期待状況

デメリット

- ① 風が強い場合、離岸・着岸の操船がやり難い。
- ② 荷役時に帆装装置が邪魔になる。
- ③ 錨泊時に風の影響を受ける度合いが大きく走錨の危険性が高い。

メリットについては、やはり燃費が良くなることが一番多く挙がっている。また、燃費の他に船体の動揺が少なくなるという回答が多く、帆装船の「商船」としての性能の良さが感じとられる。

デメリットは、帆装装置を付けたことによる操船・荷役の障害に関することが殆どであったため、現在の帆装装置の形状や制御法をかなり改良する必要があると考えられる。

#### (7) 帆装船の問題点

帆装船の問題点として挙がってきた項目を整理すると次の2点に集約できる。

- ① 帆装装置のメンテナンスの問題。
- ② 帆が操船時・錨泊時に障害となる問題。

①のメンテナンスの問題としては、つぎのような具体的な回答があった。「帆装装置を装着後、5年間くらいは費用が掛からないが、これを越えるとかんがりの出費を強いられる」である。

また、操船上の問題については、離・着岸時や錨泊時に縮帆していても、かなり風の影響を受けることが挙げられていた。

現在の帆装装置は燃費向上が最優先に考えられ、操船者の立場からの設計が余り取り入れられていなかったのではないかと推測される。

#### (8) 帆装船の代船問題について

現在、運航している帆装船の代船を考える場合、どうするかという間に関する回答は図2-5に示す結果となった。

「帆装船としない」という回答の代表的な理由は、以下の事項である。

- ① 新造時の船価が非常に高い
- ② メンテナンスに費用が掛かる

また、「状況によってはする」という回答の内容は、次のようなものである。

①積荷、航路が帆装船に適している場合。

②F Oの価格による。

③メンテナンス費用による。

回答の結果としては、「帆装船としない」という回答が一番多かったが、上述した「状況によってはする」という回答数を考慮すると今後の状況如何では一概に帆装船をやめてしまうとは考えられない。

### 2-2-3 乗組員についての結果

#### (1) 乗組員用アンケートの概要

帆装船運航者へのアンケートの概要は表2-2に示したが、回答してくれた帆装船が4隻(内1隻は帆装装置撤去の理由で無回答)という極めて少ない結果となった。このことにより以下に述べる解析結果は、現在運航している帆装船のサンプルデータとして考えた方が良いと考える。

また、以下、運航者より回答のあった帆装船をA丸、B丸、C丸と略称を付けて述べて行くことにする。

#### (2) 帆装船の要目及び航路

3隻の帆装船の要目等を表2-3に示したが、回答のあった3隻がトン数は異なるとはいえ、液体化学薬品ばら積船、貨物船、R O / R O 船と、都合の良いことに全て異なった船種であるため、それぞれの種類の船の代表例として扱える。

3隻とも航路は本州太平洋岸(A丸、B丸は瀬戸内も含む)を主たる航路としているが、帆装船として重要となってくる、航路の長さから考えると、A丸、B丸はほぼ同じで、C丸が一番長い航路を走っている。

#### (3) 乗組員構成

乗組員構成については、内航船の最も標準的な人員構成であったため、ここではこれのみに止めておく。

#### (4) 年間運航日数

年間の運航日数については表2-4に示した。この中に内航船の標準的な船舶を

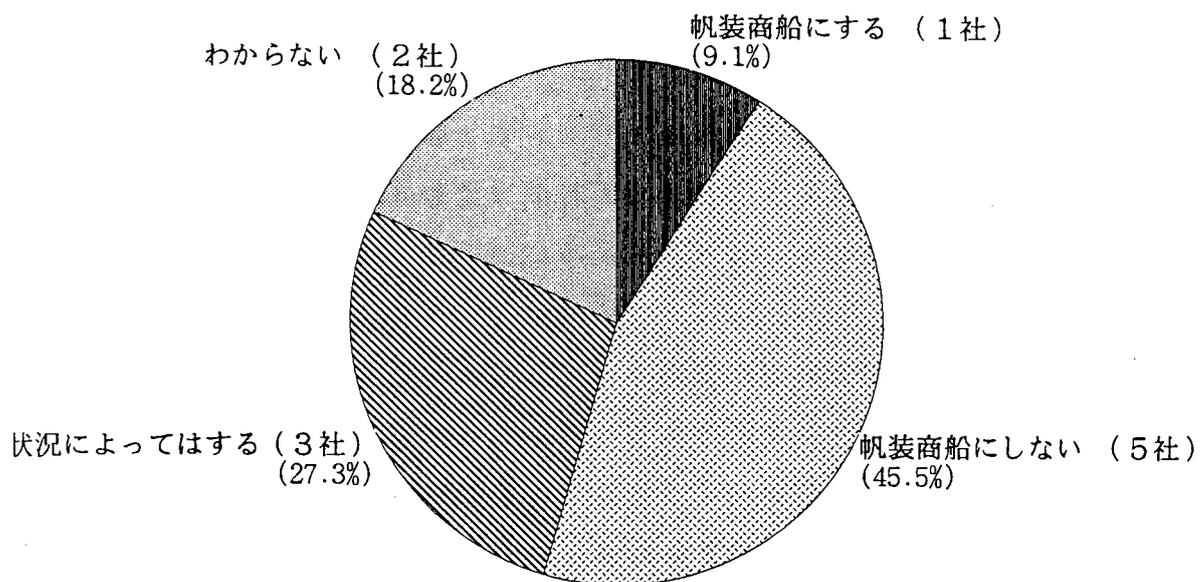


図 2-5 帆装船舶の代船問題

表 2-3 各帆装船舶の主要目

要目 \ 船	A 丸	B 丸	C 丸
船 種	薬品バラ積	貨物船	RO/RO
トン数 (G/T)	498	699	1,554
全 長 (m)	64.80	76.61	87.20
船 幅 (m)	10.20	12.60	15.50
満載喫水 (m)	3.71	4.77	未回答
就航航路	瀬戸内 関西～京浜 関西～中京	瀬戸内 福山～ 細島 高知 京浜	大阪～八戸

D丸（主に瀬戸内を航行）として参考までに入れておいたが、これからも分かるように、内航船の標準的な稼働日数の範疇に入ると言える。また、表2-4中の荒天避泊・待機日数が帆装船は年間13日～55日と出ているが、D丸と比べ多少多い帆装船も見られる。これについては、D丸は主に瀬戸内を航行していることから差が生じていると考えられる。

#### （5）天候不良による運航取り止め日数

表2-4の中にある荒天避泊・待機日数が年間に、13日から55日あるが、この内、運航を完全に取り止める日数は5～25日という回答であった。各船ごとの避泊・待機日数に対する運航取り止め日数の状況は、図2-6に示した通りである。また、運航を取り止める理由としては、強風、濃霧、台風、通常荒天の順に挙げられている。

年間の運航取り止め日数は同じクラスの商船に比べると幾分少ない日数といえるが、全く同じ航路を走っている従来船と比較したわけではないため、一概に帆装船が荒天に対して強いとはいえない。しかし、運航を取り止める基準として図2-7に示した結果が得られた。この内容から見ると、視界不良時を除いて、強風時や波高が高い場合の航行停止の基準は、通常同じクラスの船舶が示す、波高3.5m、風速15m/s<sup>(8)</sup>よりも高い数値を示している。これは明らかに帆装船が悪天候に強い船であることが感じ取れる一面である。

この他に航海中に天候の悪化により、通常航行を取り止め帰港、避泊をしたことがあるかという問に対しては表2-5に示した。3船とも「ある」と答えており、その年間の回数は5回～8回という回答であった。この回数は同規模の通常船に比べると極めて少ない数値である。即ち、多少の荒天でも航行できると判断して出航した場合、天候が悪化しても乗り切れる率が高い船であることを意味している。また、この季節、航路は表に示したように3船とも多少異なっているが、対処法としてはどの船も「避泊」を行っているのは同じであった。

#### （6）帆装船の優位性について

帆装船の性能<sup>(10)</sup>（動揺の減少等）は、あらゆる気象条件中を走る商船に取って有利だと考えられるかと言う問に対しては図2-8に示す結果がでた。B丸を除

く他の2船は「有利」「かなり有利」という答を出しており、その理由は、揺れが少ない、避泊等をする日数が減ったこと等を挙げている。B丸においても「一概に有利とはいえない」としているが、その理由が展帆効率の悪い正面からの風の場合の状況を挙げており、一部の効率の悪い状態での話を除き、全般的な有利性は否定していない。

表 2-4 年間の航行日数

項目 船名	航海日数	荷役による 停泊日数	仮泊日数	ドック日数	荒天避泊 待機日数
A 丸	210	40	53	7	55
B 丸	180	74	74	7	30
C 丸	238	113	回答なし	回答なし	13
D 丸	240	30	63	7	25

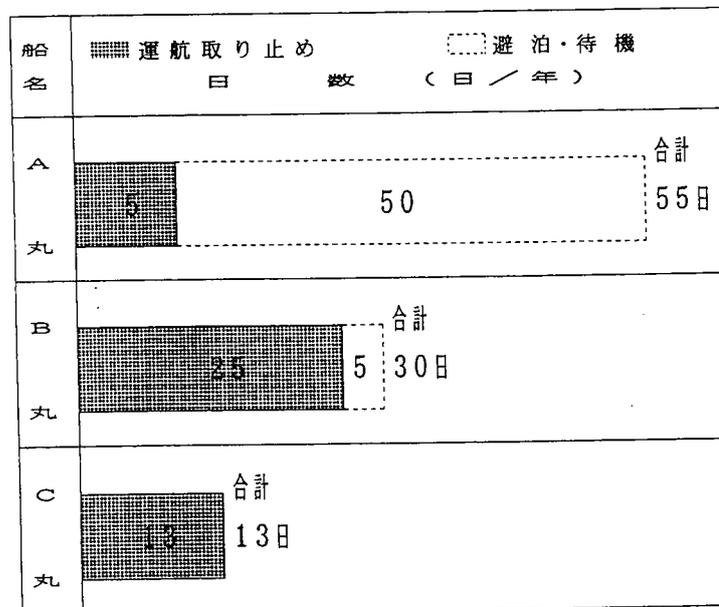


図 2-6 荒天避泊・待機日数に対しての運航取り止め日数

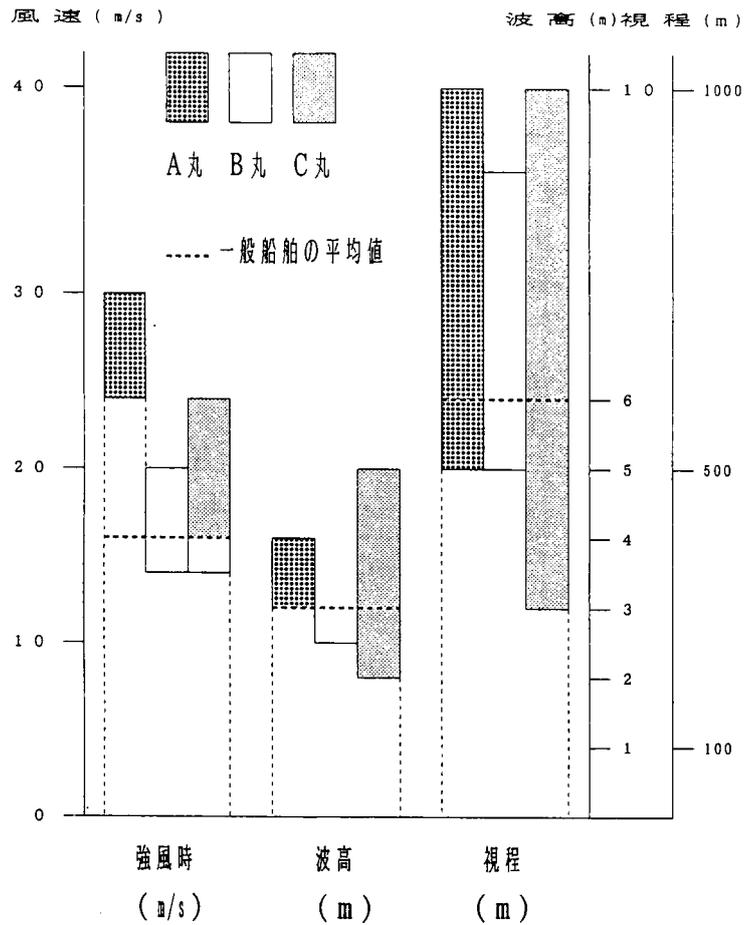


図 2 - 7 運航を取り止める基準

表 2 - 5 航行取り止め状況

	A 丸	B 丸	C 丸
回数	5 / 年	6 / 年	8 / 年
季節	夏・冬	春・秋・冬	夏
原因	強風・波浪	濃霧・強風	濃霧・波浪
措置	避泊	避泊	避泊
航路	京浜～阪神	福山～ 京浜 高知 細島	八戸～大阪

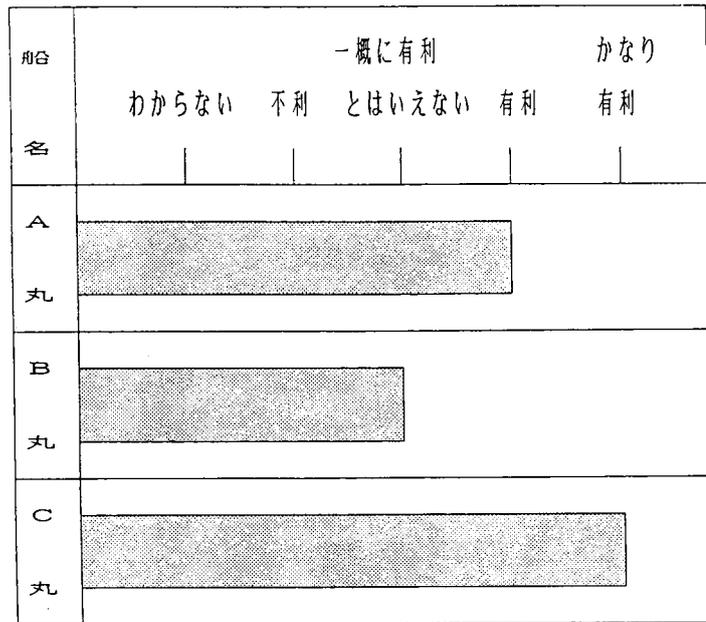


図 2 - 8 運航者から見た帆装船舶の優位性

( 7 ) 帆装装置の利用状況について

帆装装置を利用する上で、一番有利な状況と不利な状況についての回答は、つぎのものであった。不利な状況は、ほぼ正面に近い風を受ける場合で、逆に有利な状況は正横及び正横少し船尾にかけての風である。これは帆船の帆走性能<sup>(11)</sup>にほぼ一致している。

航海している全行程に対する帆走の割合については以下の回答であった。

- A丸・・・30%
- B丸・・・20%
- C丸・・・40%

全行程に対する帆走の割合は航路の長さに比例している。これは先に述べた航路の長さの所で、C丸が一番航路が長く、A丸、B丸がほぼ同じ航路の長さであることから推測される。

この他、機走時に対する帆走時の燃費の割合は、「航路が一定であっても風向・風力ともに常に変化しているため、はっきりとは算出できない」との理由で回答は得られなかった。しかし、割合としては実務に合うような消費率ではないかと考えられる。

#### (8) 帆装船の安全性、定時性について

現在の船舶が要求されている「安全性」「定時性」の要求に対して、帆装船はそれを満足しているかという問に対しては図2-9に示す結果となった。

安全性については、A丸を除く他の2船は安全であると答えている。「危険な部分がある」と答えたA丸は以下に示す理由であった。

①縮帆しても風を受ける面積がかなりあり、狭い海域では危険である。

②上述した理由で強風時に着棧作業が困難である。

特にA丸においては、コメントとして強風時の着棧作業で岸壁に接触事故を起こしたことがあると述べられている。

上述した内容から考えると、帆装船は通常の航海状態においては、十分な安全性があると考えられるが、出入港の離・着岸時に帆装装置の縮帆時の受風面積の問題で欠点があり、危険性を含んでいると推測される。

定時性については、A丸、C丸が「ある程度満たしている」と答えているのに対し、B丸のみが「まったく満たしていない」と正反対の回答をだしている。その理由を見ると、「瀬戸内の航行時には変針や狭水道が多いため、帆に受ける推力だけでは十分な速力が出ない」と述べられていた。この回答については、おそらく回答者は帆のみの力で航行した場合の定時制を答えているようであり、我々のいうところの機帆走での定時性とは少しニュアンスが異なった回答のように思える。帆装船の定時制の定義を正しく述べて質問していなかった不備な点がでてきたものとする。

#### (9) 帆装船に有効な航路について

今まで航海してきた航路で、帆装船に向く航路または向かない航路はあったかという問に対しては、B丸を除いてはA丸、C丸ともに「なかった」または「わからない」と回答している。同じ航路でも日々気象状況は変化するため、航路においては完全に適合しているという所はなかなか分かり辛いと思われるが、おそらくこの部分については燃料消費率の所と同じ様に、各船会社の企業秘密という感があり、余り表に出したく無い部分ではないかと考えている。僅かに回答のあったB丸は、帆装船に向く航路として、福山～京浜間の冬場の東行航路を挙げており、また、向かない航路としては、福山～下関間の冬場を除く東西の航路を挙

げていた。

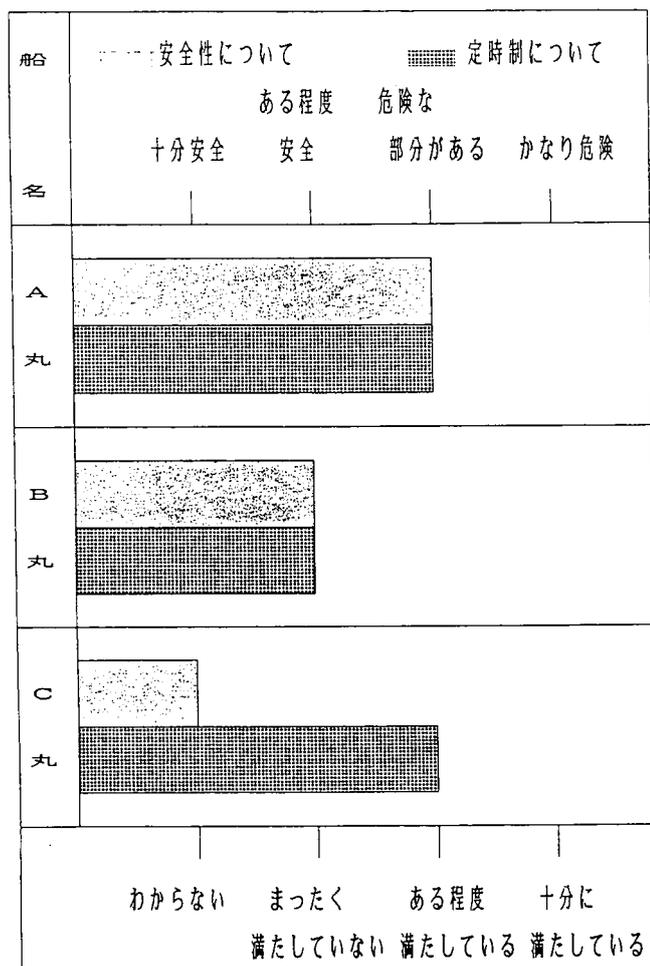


図 2-9 帆装船舶の安全性と定時制

(10) 帆装船の操船上の問題

帆走時は機走時に比べ、操船上どの様な変化がありますか。という問に対して、表 2-6 に示す結果が得られた。項目としては「舵効き」「旋回性」「保針性」「動揺」の 4 つの事項について回答をしてもらったが、この結果から総合していえることは、良くなる面は、保針性が向上し、船の動揺が小さくなるということである。また、悪くなる面においては、A丸のみの回答となるが、舵効き、旋回性が悪くなるとでている。これらの回答から見ると、船の操縦性（舵効き、保針性、旋回性）に関する事で、帆走時に顕著に変化するものは殆ど無く、揺れが軽減されることが大きな変化だと考えられる。

表 2 - 6 操船性項目の比較表

	A 丸	B 丸	C 丸
舵効き	悪くなる	変わらない	変わらない
旋回性	悪くなる	変わらない	無回答
保針性	良くなる	良くなる	わからない
動 揺	小さくなる	小さくなる	小さくなる

( 1 1 ) 帆装船の錨泊上の問題

今まで錨泊した場合で何か支障が起きたことがあるかという問に対しては、3船とも「ある」と答えている。その理由は以下のことが挙げられている。

- ① 風の影響を受け易く、走錨したことがある。
- ② 強風時、帆に当たる風がかなりあり、船体の揺れが大きくなる。
- ③ 船体の振れ回りが大きくなる。

回答中のコメントとして、帆装船は自動車専用船に似た錨泊状況となり、常に不安を感じると述べられている。

上記事項を考えると、帆装船にとっては錨泊時の問題が深刻なものであることがわかる。

( 1 2 ) 帆装装置全般について

帆装装置の故障については、次の3つの項目に分けた中で答えてもらった。

- ① 重大な故障が起きたことがある。
- ② 軽微な故障は起きたことがある。
- ③ 故障は起きたことはない。

結果は、3船とも「軽微な故障は起きたことがある」と回答している。

その故障内容については、以下に挙げた内容のものである。

- ①縮帆途中で作動不能。
- ②展帆、縮帆が不能。
- ③風に対して適帆制御不能。

この状態が起きた時点ですぐに復旧できたかどうかや、その対処法については、調査していないためわからないが、軽微な故障ということから乗組員で対処できる内容のものではないかと思われる。また、帆装装置の故障については、かなり頻繁に起きることが挙げられている。

次に帆装装置のメンテナンスについて、その間隔とそれに掛かる費用について回答してもらった。結果は以下の通りである。

- A丸・・・1年毎で、費用は15万円位。
- B丸・・・2年毎で、費用は無回答。
- C丸・・・4年毎で、費用は100万円位。

帆装装置のメンテナンスの間隔は、1年から4年毎に行っている様で、その費用は15万円～100万円内の出費であった。この調査では費用の内訳については行っていないため、掛かった費用が保守・点検にのみ掛かった金額なのか、故障に対する修理の金額も含めてのものなのかはわからないが、もし、前者ならば、一つの装置に掛かる費用としては少し高い。後者だとすれば、それほど掛からないことになる。

### (13) 帆装船の総合的評価

運航者から見た帆装船の総合的な評価を得るため、質問を12の項目に分けて回答してもらったところ、表2-7に示す結果を得た。

項目中、「乗組員の評判」の部分が、C丸を除いて他の2船が、「悪い」と答えている。乗組員によるこのような回答には、帆による操船上の障害となる問題や錨泊時の問題が大きく影響しているものと考ええる。

### (14) 運航者から見た帆装船の改良点

実際に帆装船を運航してみて、もし、つぎに新しく帆装船を建造するとしたら、どのような点を改良する必要があるかと思うかという質問について、以下に示す回答が挙がってきた。

- ① 帆装装置の縮帆時の風圧面積を少なくする。
- ② 帆装装置を今より軽いものにする。
- ③ 帆装装置の骨組を丈夫なものとする。
- ④ 帆装装置の故障の少ないものにする。

上記の4つの改良点が挙げられたが、この中で①の帆装装置の縮帆時の風圧面積の問題については、3船とも筆頭に挙げていた。また、③の帆装装置の骨組の問題では、「帆装装置の構造物（骨組）をステンレス又はそれと同等の物で作成する必要がある。現在の物では10年が限度」というような具体的な提案も挙げられており、実務上の貴重な情報を得ることができた。このような回答は帆装船の代船を考える場合等に重要な情報となると思われる。

表2-7 帆装船舶の総合的な感想

	A 丸	B 丸	C 丸
燃料効率	変わらない	無回答	良い
安定性	良い	変わらない	良い
離・着岸操船	困難	困難	困難
前方の視界	悪い	悪い	悪い
荷役時の障害	なる	ならない	ならない
錨泊時の振回り	大きくなる	大きくなる	大きくなる
船の乗り心地	良い	変わらない	良い
帆装時の傾き	気にならない	気にならない	気にならない
帆装装置の故障	多い	多い	少ない
シーマージン	悪い	悪い	良い
帆装装置の取扱い	易しい	易しい	易しい
乗組員の評判	悪い	悪い	普通

## 2-3 帆装船舶の実状と今後の展望

今回行った帆装船の実態調査の狙いは、現在運航している帆装船はどのような得失があるのかを浮き彫りにし、帆装船の持つ性能がどのように海上輸送に反映されているかということをも明らかにすることである。

著者が考えている海上輸送における環境問題の軽減、及び輸送の経済性と安全性についてどの程度の期待性があるかということについて今回の調査から帆装船の利用価値を考えてみると、現在のところ次のようなことがいえるのではないかと考えられる。

### 商船としての利用価値

物資を輸送する「商船」として帆装船を捉えてみると、当初の予想通り燃費向上による経済性、船の安定性向上による安全性が従来の船舶よりも優れた面を示しており、また、今後問題となって来る輸送機関の出す排ガスによる環境問題から考えても風力利用時、機関出力を落としても定時性を満たしていることから、より有効な輸送手段となることがわかる。ただし、安全性においては、帆装装置の改良（縮帆時の風圧影響の軽減）が必要であり、経済性についてはメンテナンス費の軽減が必要であるということも付け加えておかなければならない。これにより、上述したような幾つかの装置自体の改良を施せば、帆装船はこれからの時代に十分活躍が期待できる船舶ではないかと考えられる。

## 第 2 章の参考文献

- ( 1 ) ㈱愛徳、船舶技術開発㈱：船の科学「改造船機主帆従 ” 愛徳丸 ” の省エネルギー実績」1983.5、pp.52～57
- ( 2 ) 船舶技術開発（株）：” 新愛徳丸 ” の追跡調査とその成果、船の科学、Vol.34 1981.10、pp.35～41
- ( 3 ) 船の科学編集部：近代帆装貨物船 ” ウスキパイオニア ” の第 1 次航海結果報告、1985.7、pp.79～82
- ( 4 ) 遠藤洋一・名村秀樹他：小型帆装タンカーの馬力利得、日本鋼管技報、No.92(1982)、pp.89～100
- ( 5 ) (株)愛徳・志賀竹麿：帆装の実態、船の科学、Vol.36.1983.8、pp.37～41
- ( 6 ) 船舶整備公団：高経済性内航船に関する調査研究、昭和 6 1 年 6 月
- ( 7 ) 桜井邦夫：軟帆式帆装商船 ” TOROPICAL MARINA ” 船の科学、1984.7、pp.52～58
- ( 8 ) 久保雅義他：外洋に面した離島航路に及ぼす気象・海象条件の影響について、日本航海学会論文集第 9 0 号、平成 5 年 1 0 月、pp.～
- ( 9 ) 高岡俊輔：日本海側航路の現状について、弓削商船高等専門学校紀要、平成 7 年、pp.13～17
- ( 1 0 ) 横山晃：6 9 0 T 型の帆装客船、船の科学 Vol.40 1 9 8 7 年 9 月
- ( 1 1 ) 芳村康男他：大型練習帆船の帆装性能の推定、日本航海学会論文集第 8 4 号、平成 3 年 3 月、pp.19～27

## 第3章 帆装船舶利用の有効性の検証

### 3-1 概説

第2章では、帆装船の現状を調査し、運航形態を含む全体像を示すと共に、その優位性や抱えている諸問題を提起した<sup>(1)</sup>。この調査で出てきた帆装船のメリットデメリットは、要約すると以下の項目となる。

#### メリット

- ① 風力利用により、燃費率が良くなる。
- ② 帆の影響で動揺が少なくなり、荒天時の稼働率が高い。
- ③ 風力利用により機関出力を落とせるため、環境負荷が小さい。

#### デメリット

- ① 帆装装置の風圧影響で、離岸・着岸の操船に支障をおよぼす。
- ② 帆装装置の風圧影響で、錨泊時に走錨の危険性が大きくなる。
- ③ イニシャルコストおよびメンテナンス費がかかる。

本章では、帆装船利用の有効性について検証を行うため、国内の航路中、一般的に過酷な航路といわれている日本海側の航路<sup>(2)(3)</sup>に帆装船を用いた場合の有用性の検討を行った。ここで検討された帆装船の適合性は、現在日本海側で一大プロジェクトとなっている環日本海経済圏<sup>(4)(5)</sup>の活性化を考える上でも、また、国の方針として行われているモーダルシフト推進<sup>(6)(7)</sup>においても、テクノスパーライナーと共に投入を一考できる船舶としての資料提示につながる。また、上記問題点については、第4章以降で問題点のメカニズムの解明と解決策について検討を行う。

本章は、3-2節で日本海側航路の状況を述べ、そこへ商船として価値の高い帆装船を用いた場合の適合面と不適合面について、風向・風速・波高などの自然条件や就航航路、荷動きの面から、一般船と比較する形で考察する。

3-3節では、現在の帆装船が問題点を抱えたままの状態では運航されているにもかかわらず、一般船よりもかなりの優位性があることを説き、今後の帆装船の有効利用を考える場合、上記した問題点の早期解決の重要性を示す。

### 3-2 帆装船舶の日本海側航路適合性について

#### 3-2-1 調査方法および調査内容

まず最初に、日本海側の航路の現状と、そこを航行する船舶が要求される性能等を調査するために、日本海側に航路を持つ内航船の船会社119社に表3-1に示すような内容のアンケートを行った。また、帆装船に関しては、日本海側航路に対する帆装船の状況及び諸問題等について表3-2に示すアンケートを行った。

今回行ったアンケートの回答率は、日本海側航路保有の船会社が55%、帆装船保有の船会社は40%であった。

#### 3-2-2 日本海側航路の概況

帆装船の適合性を検討すべく、一般的に過酷な航路といわれている日本海側航路の現状を内航船を対象として調査した。ここでは日本海側航路の現状の調査が主目的ではなく、帆装船への適用を目的としているため、概略を述べることにする。

表3-1 日本海側に航路を持つ船会社に対するアンケート

質問の種類	質問の内容
所有船の項目	<ul style="list-style-type: none"><li>・主要目（船種、積荷、トン数）</li><li>・航路</li><li>・日本海での航海日数</li></ul>
日本海の実状についての項目	<ul style="list-style-type: none"><li>・日本海についてイメージ</li><li>・厳しい状況（季節、風向、風速、波高、航路）</li><li>・日本海を航行する上での特別な方策</li><li>・運航中止、避泊の日数、原因、基準</li><li>・日本海を航行する為に必要な要件</li></ul>
帆装船舶の認識度についての項目	<ul style="list-style-type: none"><li>・帆装船舶を知っているか</li><li>・帆装船舶は動揺が少ない等の利点があることを知っているか</li><li>・帆装船舶を日本海側航路に運航させることは有効か</li></ul>
環境問題についての項目	<ul style="list-style-type: none"><li>・環境問題の対応策を考えているか</li><li>・帆装船舶は環境問題に対し有効な船舶か</li></ul>

(1) 日本海側航路のイメージ

日本海側の航路を航行している船舶は日本海側航路について図3-1に示すようなイメージを持っている。「風波ともに厳しい航路」ということが筆頭に挙げられており、「波浪の大きな厳しい航路」「風の強い厳しい航路」というものを含めると実に81.2%が過酷な航路という認識を持っている。この厳しいと感じる季節については90%以上が冬場と答えている。回答中、「航行しやすい航路」という相反した回答が挙がっているが、これは夏期に限るという限定付きであった。また、「その他」として挙がっていた内容は、「避難港が少ない航路」「気象変化の激しい航路」などであった。

表3-2 帆装船舶保有の船会社に対するアンケート

質問の種類	質問の内容
所有船の項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主要目（船種、積荷、トン数）</li> <li>・航路</li> <li>・日本海での航海日数</li> </ul>
日本海の実状についての項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・日本海についてイメージ</li> <li>・厳しい状況（季節、風向、風速、波高、航路）</li> <li>・日本海を航行する上での特別な方策</li> <li>・運航中止、避泊の日数、原因、基準</li> <li>・日本海を航行する為に必要な要件</li> </ul>
環境問題についての項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・環境問題の対応策を考えているか</li> <li>・帆装船舶は環境問題に対し有効な船舶か</li> </ul>
帆装船舶の実状についての項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・帆装船舶は日本海に適した性能を持っているか</li> <li>・帆装船舶を日本海側航路に運航させることは有効か</li> <li>・日本海を航行運航した中での有利な状況（季節、風向、風速、航路）</li> <li>・帆装装置の概要</li> <li>・帆装装置の使用方法（操船時、錨泊時、強風時）</li> <li>・帆装装置の問題点、改良点</li> </ul>

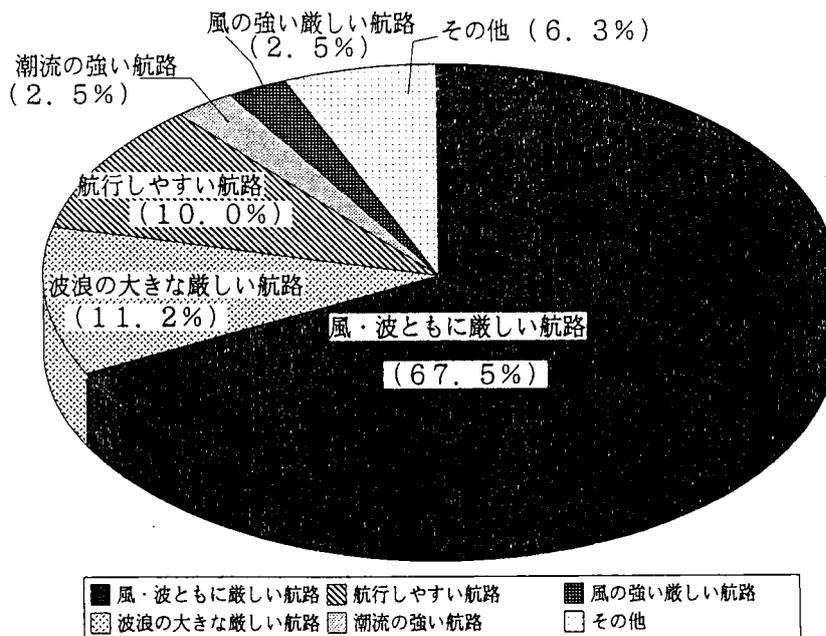


図 3-1 日本海側航路の持つイメージ

## (2) 日本海の厳しい状況

日本海側における松江、輪島、秋田で観測された年間の平均風向・風速<sup>(8)</sup>を四季に分けて総合して表したものが図 3-2 である。これから分かるように、日本海は夏場は S W からの風が多く風速は強い時で 12 m/s の風が吹くときがあるが、全体的にどの方位からの風も 8 m/s 内の風である。これに対し冬場は、N W ~ W という風向が多く、風速も W 近くからの風が平均で 13 m/s という全体的に強い風が吹いていることがわかる。また、波高については図 3-3 に示すようなものとなっている。これは「全国港湾海洋波浪観測資料」<sup>(9)</sup>の日本海の輪島のデータを使用し、それを整理したものである。波高においては、やはり冬場が高く、平均で 1.5 ~ 2.0 m、最大値では 4.9 ~ 5.8 m の波が立っている。

日本海において一般船及び帆装船が航行を取りやめ、避泊等の措置をとる原因については図 3-4 に、その基準については図 3-5 に示す結果が今回の調査により判明した。主な避泊等の原因は、波浪と強風によるもので、それに踏み切る基準は一般船が風速で 10 m/s 以上、波高で 2 m 以上、帆装船が 15 m/s 以上、波高 4 m となっていることがわかる。ここで示したこれらの値は船舶の大きさにより多少の差は出ると思われるが、日本海を航行している標準的な一般船、帆装船の航行可能限界に近い値だと考えられる。

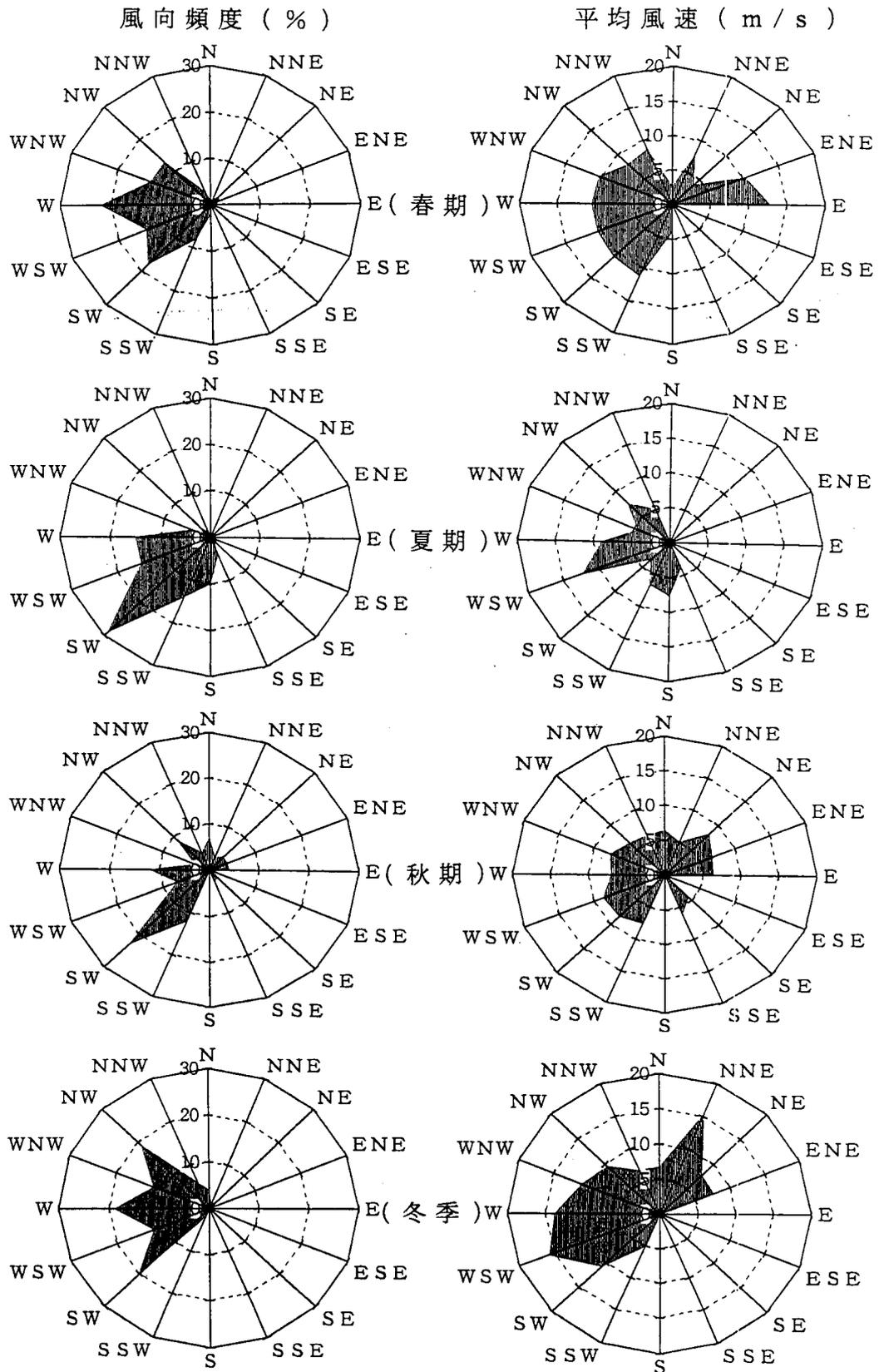


図 3-2 日本海側における四季別の平均風向・風速

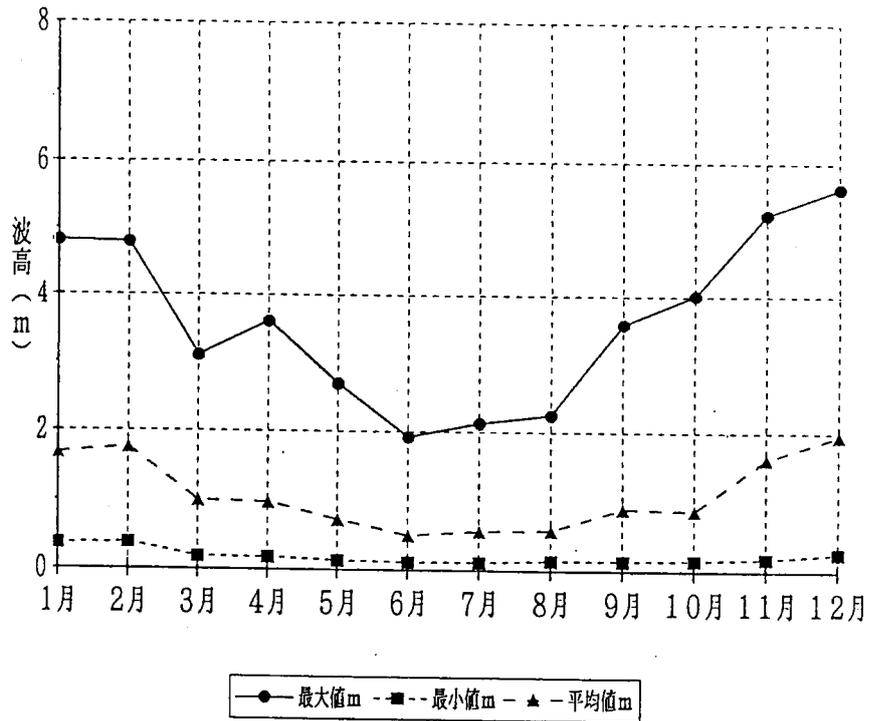


図 3-3 日本海側の年間の波高

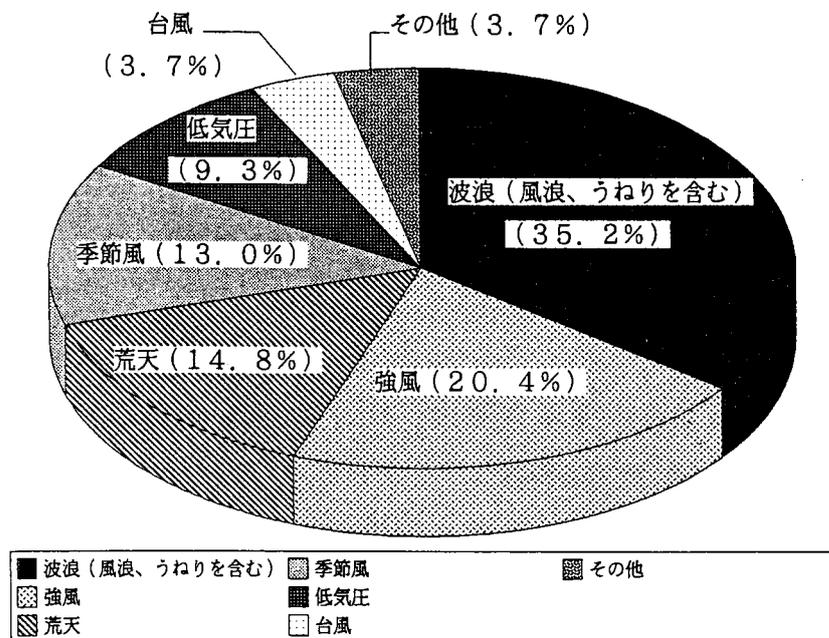


図 3-4 日本海で起きる運航取り止め・避泊の原因

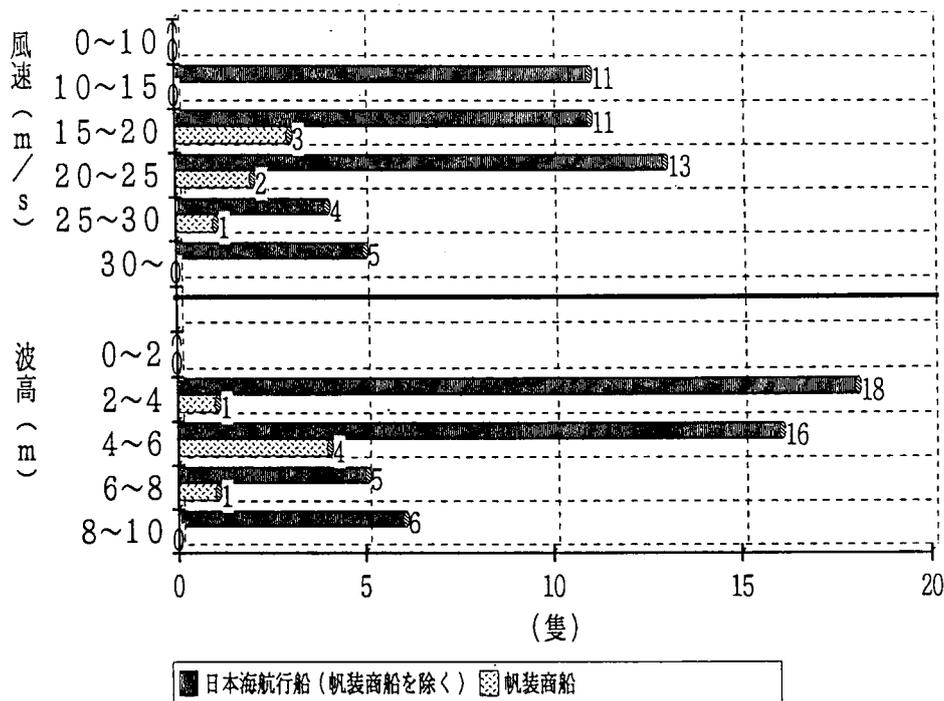


図 3-5 日本海側で運航取り止め等を決定する基準

(3) 日本海側の船貨の流動状況について

日本海側の船貨の状況を「貨物地域流動調査」<sup>(10)</sup>により調査したところ、図 3-6 のような流動状況であった。化学工業品が半数以上を占め、鉱産品がこれに続く形となっており、この 2 つで日本海側の荷物の 90% を越えている。これより日本海側の船貨は化学工業品に代表される、重油、ソーダ、ガソリン等の液体貨物が多い。

3-2-3 日本海側航路への適合面

(1) 風向、風速に対する適合性

日本海航行の一般商船からの「日本海航行時、航行の限界を感じる風向・風速」のアンケート結果は図 3-7 に示すものとなった。これは明らかに日本海の冬場の厳しい状況に近いことがいえる。これに対し帆装船の「日本海航行時の有利な状況」についてのアンケート結果は図 3-8 に示すものとなっている。これについて両者を重ね合わせてみると非常に興味深い結果となっていることがわかる。即ち、

一般商船で航行が厳しいと感じる風向、NからWの間で風速が20 m/sの航行限界値付近までの不利な状況が帆装船の有利な状況にほぼ一致する形となる。これは帆装船の優位性を示しているものと考えられる。更に、この方向からの風は日本海を北航、南航の両方に利用できる優位な風となっている。また、帆装船の優位な風向から外れている、NE及びSWの風については、帆装船はNEの風向は北航については不利な風となるが南航については有利な風といえ、これと同じように、SWの風は南航には不利であるが、北航には有利となり、一般船の全ての不利な状況が片側航路の不利な状況だけに置き換えられてしまうという極めて有利なものとなる。

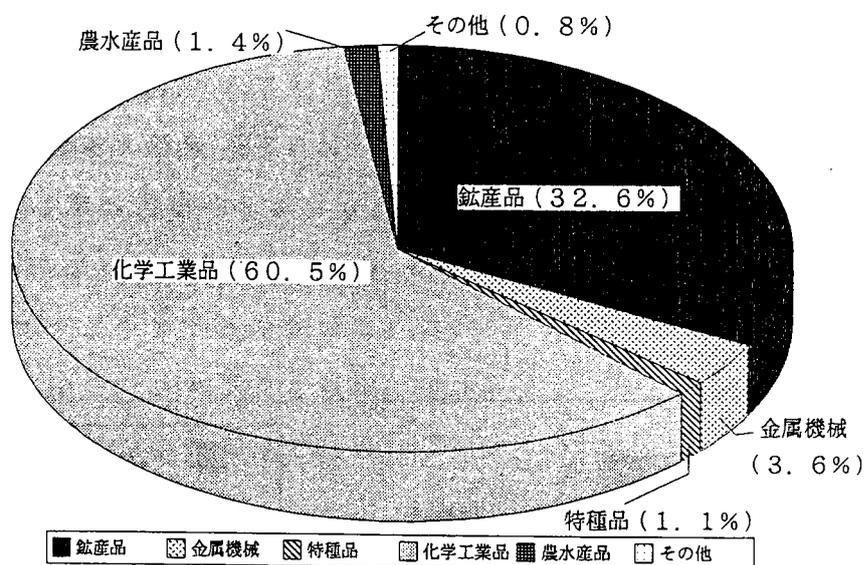


図 3-6 日本海側の船貨の状況

## (2) 波高についての適合性

日本海航行の一般商船と帆装船とに行った「航行する上で最も厳しい波高」についてのアンケート結果は図3-9となった。日本海航行の一般商船は、ほぼ2m以上の波高が立つとかなりの船舶が厳しいと感じるようで、先に述べた冬場の波高の平均値から見ても、やはり冬季の航海が厳しいものであることが感じとられる。これに対し帆装船は一般商船とほぼ同じ程度の大きさであるにも関わらず、一般船より少し高い値である4m以上を示している。これは冬場の最も厳しい条件以外は殆ど乗りきれることになる。

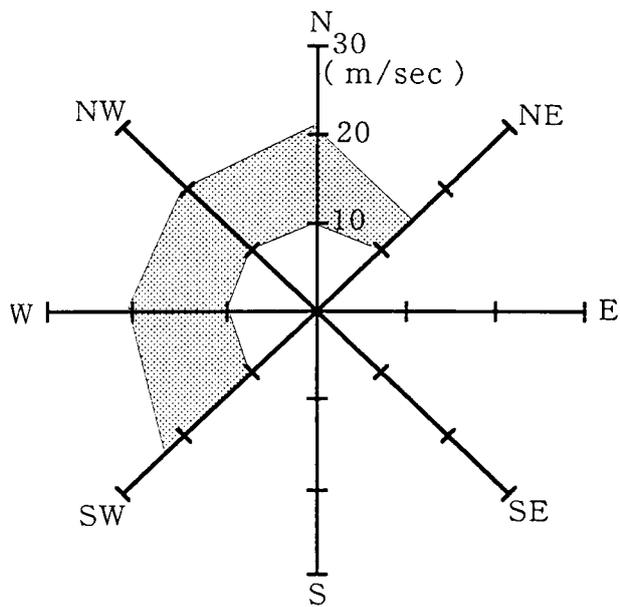


図 3 - 7 一般商船が日本海航行に  
限界を感じる風向・風速

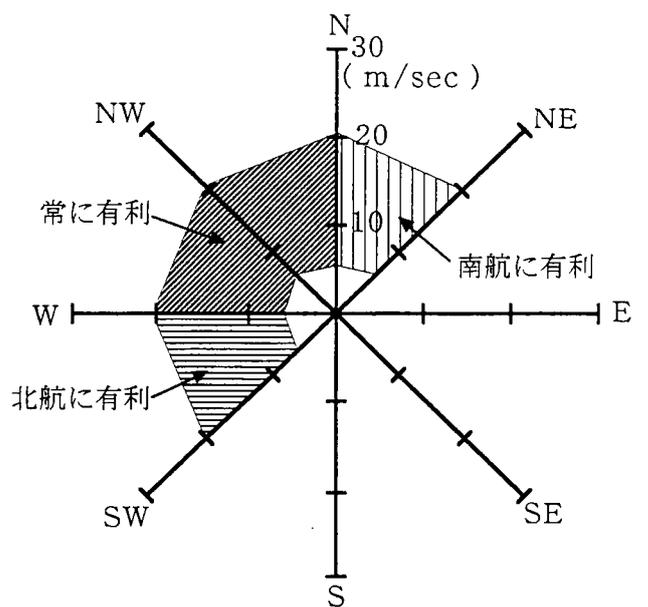


図 3 - 8 帆装船舶が日本海航行に  
有利と感じる風向・風速

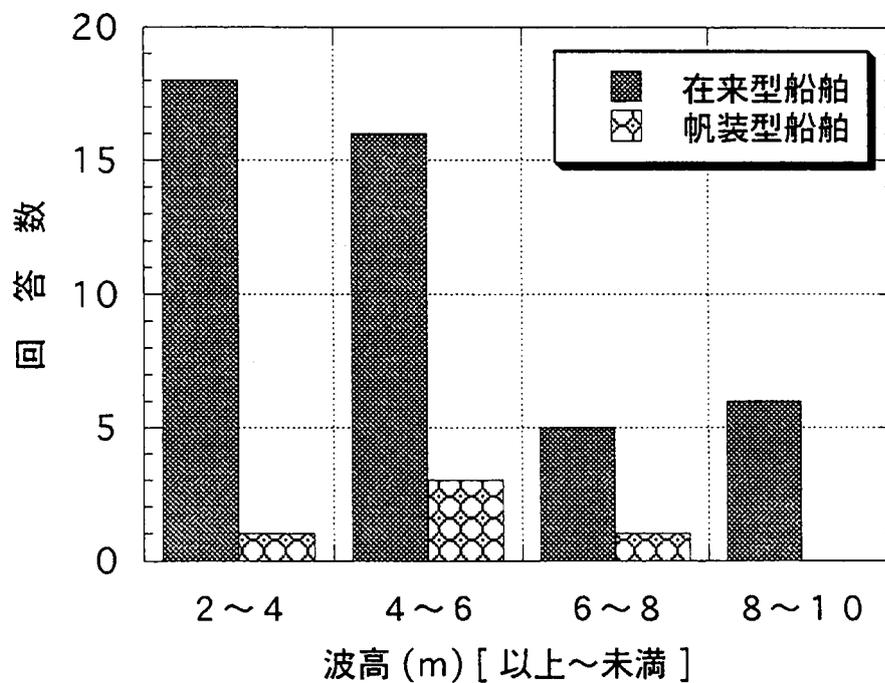


図 3 - 9 日本海航行において厳しいと感じる波高

### (3) 日本海航行に必要な船の性能面の適合性

「日本海を安全に航行できる船舶としては、どのような性能を備えている必要があるか」というアンケートの結果は図3-10となった。先に述べた日本海の気象状況からも推測がつくように、波浪に対する動揺の軽減、波浪中の航行に対する船の安定性がやはり第一条件として挙げられているのがわかる。これについて、帆装船は、新愛徳丸の実験結果の報告<sup>(11)~(14)</sup>や著者らの行った調査<sup>(1)</sup>からも報告されているように、動揺の軽減、荒天下の船の安定性が良くなるのは実証済みであるため、一般船が日本海航行時に必要とされる性能を既に具備している船舶だといえる。また、上述したものの他に「強風を利用できる性能」というものが挙げられているが、これについては、前項で述べた通り十分に利用できることがわかる。よって、ここで挙げた3項目で帆装船は、日本海を航行する船舶として必要な性能の51.5%を占めていることになる。また、「日本海航行に対して船舶に何か特別な装置・方策を施しているか」という質問に対する回答は図3-11に示す。80%を超える船舶が何も施しておらず、施していると答えた19.3%の船舶は以下のような装置であった。

- ① フィンスタビライザーを付けている。
- ② アンチローリングタンクを設けている。
- ③ ビルジキールの幅を広げている。
- ④ 乾舷を高くしている。
- ⑤ バラストの増量。

これらの装置を装備している船舶は主にフェリー等の旅客船であり、一般貨物船などの船舶には殆ど設けられていなかった。また、列挙したものの大部分は動揺の軽減に使われるものであることがわかる。

日本海側航路に帆装船を考えた場合、動揺だけを軽減させるフィンスタビライザーやアンチローリングタンクよりも総合的にメリットのある帆装装置を設けた帆装船は有効な船舶の一つだと考えられる。

### (4) 荷動きから見る船種の適合性

日本海側を航行している船舶の「船種」「積荷」の状況は図3-12、図3-13に示す結果となっている。

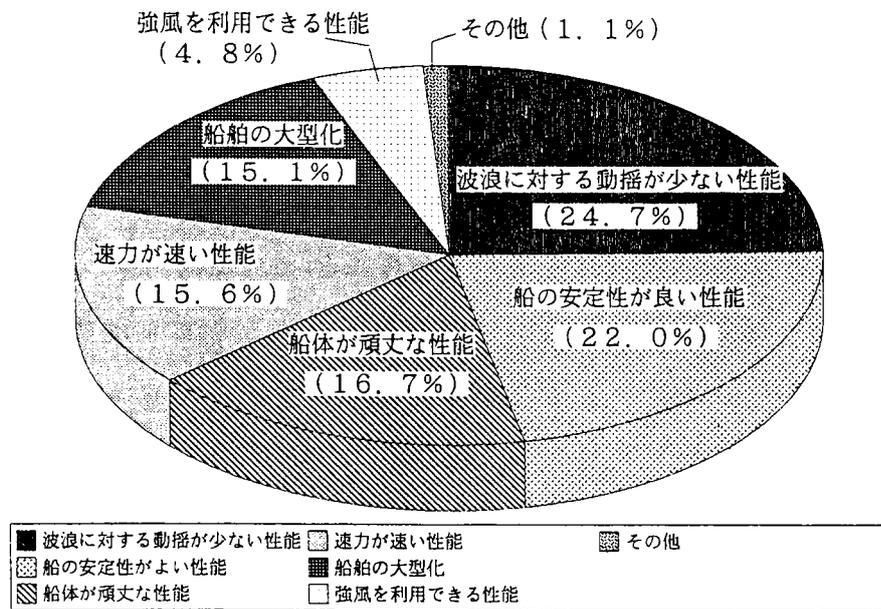


図 3-10 日本海の安全航行に必要と思われる船の性能

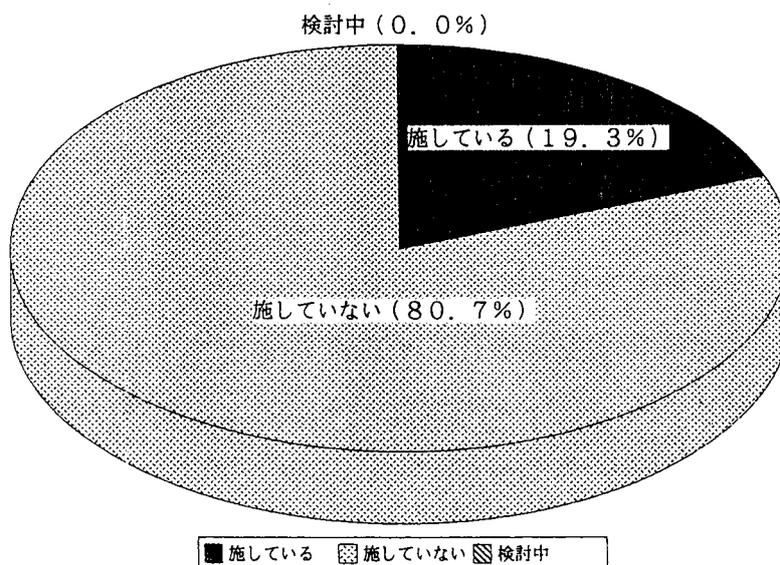


図 3-11 日本海航行に対しての特別な方策の有無

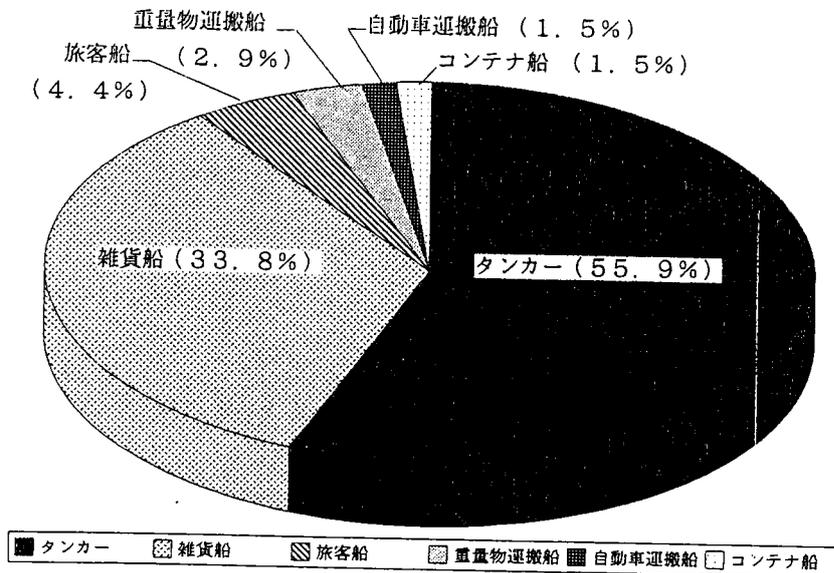


図 3-1 2 日本海航行船の船種

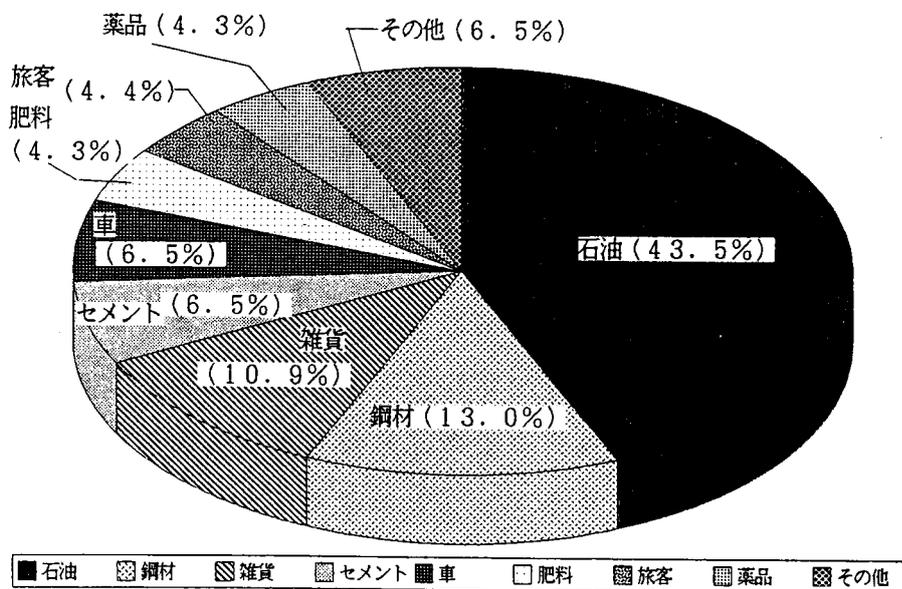


図 3-1 3 日本海航行船の積荷

日本海を航行している船舶の半数以上はタンカーであることがわかるが、これは日本海側の船荷が既に示した図3-6の結果からわかるように、液体貨物の多い化学工業品ということからも推測がつく。また、積荷についても石油が43.5%と多く、タンカーの中でも石油タンカーが多いことがわかる。

現在、帆装船の船種としては、帆装装置が荷役上の障害にならないということからタンカーが殆どであり、これ以外の船種としてはR O / R O 船、一般貨物船が極僅か建造されたのみである。こらから見ても帆装船は、日本海への投入船舶としてはメリットのあるものと思われる。

#### (5) 環境問題に対する適合性

現在、輸送機関等の排出する排気ガスの影響で環境の破壊が問題となっているが、この定量化においては、各輸送機関の出す排出ガスのトンキロ当たりの排出量をベースに計算されている<sup>(7)</sup>ため、陸上のトラック輸送がその規制の的になっている。モーダルシフトは、この問題の軽減も一つの要素として上記の計算上、環境負荷が小さくなっている船舶・鉄道への移行ということで推進されているが、年間もしくはそれより長いスパンでの総排出量から考えると、一概に船舶・鉄道の環境負荷が本当に小さいと言えるのかということが問題になって来ている。これについては、いずれまた新たな手法で定量化が行われると思われるが、今後、船舶・鉄道へも環境負荷軽減の規制が来ることは大いに予想される。

上述したことを踏まえ、アンケート中に「海上輸送の分野に環境問題に対する規制が来た場合の具体的対応策を考えているか」という項目を設けたところ、図3-14に示すような回答が得られた。「考えている」と答えたのは24.6%と少なく、その他は「考えていない」または「わからない」と答えている。考えていると答えた船会社の対応策を、多い順に挙げると以下のものであった。

- ① C重油からA重油に切り替える等、良質のFOを使用する。
- ② 環境負荷軽減に対応できるエンジンの開発を考える。
- ③ 機関出力を落とし、減速航行する。

上記項目中、①は燃料費のコストアップを意味することとなり、帆装船にとっては、まさにその誕生のルーツということが言え、かなりのメリットが期待できる。また、③においては、帆装船は風力を推進に利用できる分、機関出力を落と

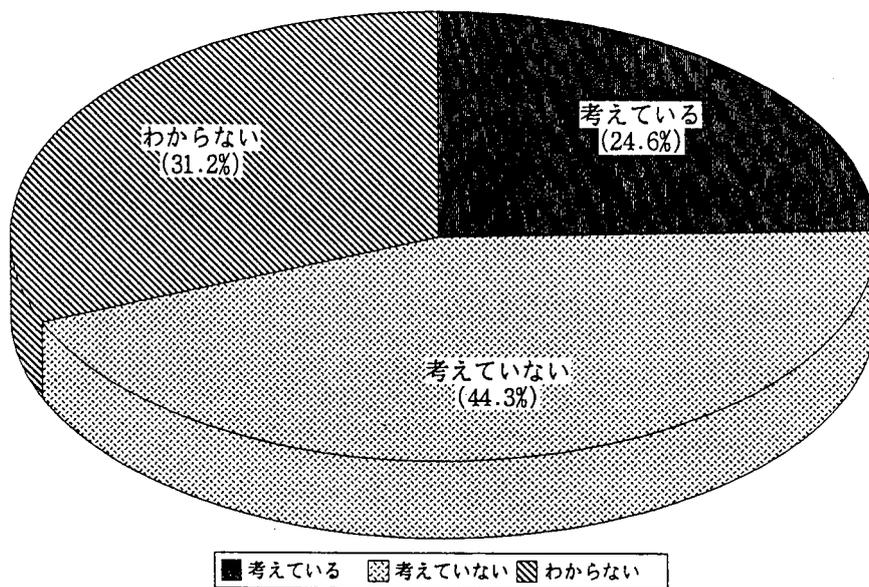


図 3 - 1 4 環境問題への対応策

しても速力が低下せず航行できる<sup>(15)</sup>ため、通常航行時と同じ定時制が確保できる。この面においても帆装船は期待が持てるといえる。

### 3-2-4 日本海側航路への不適合面

#### (1) 航路の長さ等による不適合面

今回調査した日本海側に航路を持つ船会社の就航航路を図3-15に示す。これより、日本海側を航行している船舶は日本海を縦断するような比較的長い距離を走る船舶が多いことがわかるが、図から読みとれるように、離島との通船、日本海側の港に数カ所立ち寄って縦断する船舶もかなりあることがわかる。このような航行距離が短い船舶では、著者らが前章で既に報告<sup>(1)</sup>したように、展帆率の問題より帆装船のメリットは少ないものとなる。また、帆装船の操船面の問題点より、港湾事情の余り良くない離島や頻繁な出入港を強いられる船舶にとっても帆装船の評判は良くない。

## (2) 船会社の帆装船に対する考え

「帆装船は日本海側航路に対して有効か」というアンケートの結果は図3-16となった。「有効である」と答えた船会社の理由は、本章中に述べた適合性の内容にほぼ一致していた。「有効だとは思わない」と答えた船会社の理由は以下のものである。

- ① 港内操船、錨泊等の操船に不安がある。
- ② 建造時の費用が高くなる。
- ③ 帆が荷役作業の支障になるため船種が限定されてしまう。
- ④ 予想しにくい突風、凍結に対し装置の信頼性に不安がある。

また、「わからない」と答えた理由の多くは「帆装船自体よく知らない」という回答や、「帆装装置のメンテナンス費がわからないため不安を持っている」というものであった。



図3-15 調査した船会社の航路概要

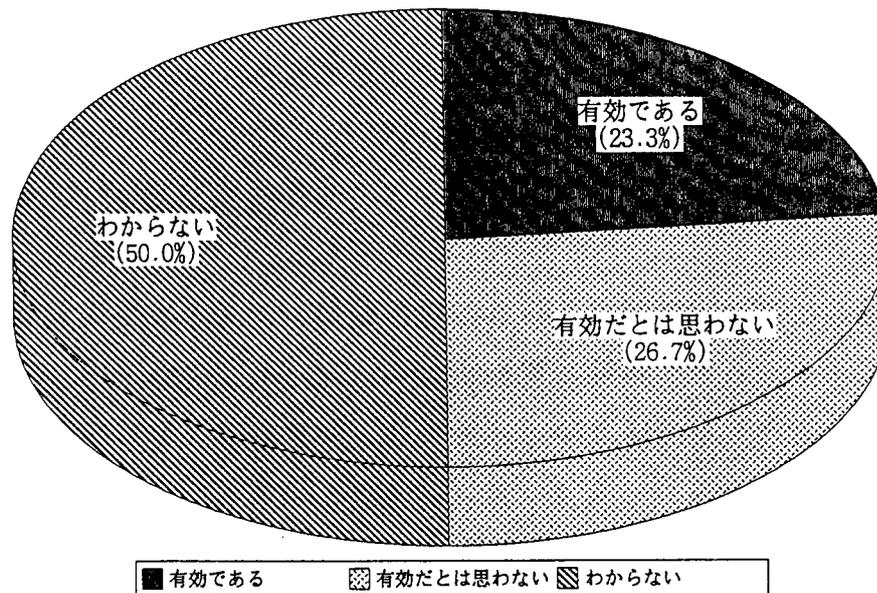


図 3 - 1 6 帆装船舶の日本海航路への有効性

このような回答を見ると、有効と思わない回答の殆どが日本海側航路の状況云々というよりは、むしろ帆装装置の問題点を懸念しての否定であるため、帆装船の問題点が直接有効性を損なうことになっているのが感じ取れる。

### 3-3 結語

本研究では、幾つかの深刻な問題点を抱えてはいるが、反面、商船として非常に良い性能を持つ帆装船を、過酷な航路である日本海に就航させた場合の優位性を調査考究した。これにより得られた結論を要約すると下記となる。

#### 適合面

- (1) 日本海航行の一般船舶にとって、厳しい状況と感じる風速 10 m/s 以上、波高 2 m 以上の天候に対して帆装船はその基準値が高く、特に風速に関しては 20 m/s 位まではむしろ有利に働く。
- (2) 帆装船ならば、日本海での一般船の航行限界値の殆どが、有効に航行できる範囲に代えられる。
- (3) 日本海側の荷動き状況から見ても、タンカーが多いことから、帆装船の最適船種と一致するため、投入するメリットは大きい。

- (4) 日本海を安全に航行できるための船舶に要求される性能の半分以上を持ち合わせている。
- (5) モーダルシフト推進に関連する「環境負荷軽減」「エネルギー保全」の問題から見ても有利な船舶である。

#### 不適合面

- (1) 離島航路航行及び短区間航路航行船にとっては、帆装装置の展帆率が低下するため有効利用は望めない。
- (2) 寄港地の多い航路を持つ船舶では、帆装装置の形状の問題から、操船に負担が掛かる。
- (3) 避泊等で錨泊した場合に帆装装置の影響より、走錨の危険性が増大する。
- (4) 帆装装置の設置場所の関係上、船種が限定される。

本調査で上記のような事が得られたが、総合的に考えると帆装船は間違いなく日本海に於いて、その優位性を発揮できるものと思われるが、不適合面については、帆装船について著者らが前章で報告した帆装装置の形状から来る操船・錨泊の問題点<sup>(16)</sup>がここでもほぼ同じような形で現れているため、帆装船の今後の運用においては、この問題点を解決することが最重要だと思われる。

### 第3章の参考文献

- (1) 久保雅義、高岡俊輔：帆装商船の運航実態とその問題点について、日本航海学会誌 第120号、平成6年6月、pp.69～77
- (2) 高岡俊輔：日本海側航路の現状について、弓削商船高等専門学校紀要、平成7年、pp.13～17
- (3) 久保雅義他：外洋に面した離島航路に及ぼす気象・海象条件の影響について、日本航海学会論文集、第90号、平成6年3月
- (4) 本多健吉他：環日本海経済交流、新評社、1995年
- (5) 富山大学日本海経済研究所：北陸の企業と法制度、1995年
- (6) 海事産業研究所：モーダルシフト推進のために（平成5年3月）
- (7) 日本物流団体連合会：モーダルシフトに関する調査報告、平成5年3月
- (8) 気象庁：天気図（昭和53年）1月～12月
- (9) (財)沿岸開発技術研究センター：全国港湾海洋波浪観測資料（NOWPHAS 1992）、平成5年8月
- (10) 運輸省政策局情報管理部：貨物地域流動調査（平成5年3月）
- (11) (株)愛徳、船舶技術開発(株)：改造船 機主帆従 “愛徳丸” の省エネルギー実績, 船の科学 Vol.36.1983.5、pp.52～57
- (12) 船舶技術開発(株)：“新愛徳丸”の追跡調査とその成果、船の科学、Vol.34.1981.10、pp.35～41
- (13) 船舶整備公団：高経済性内航船に関する調査研究、日本科学技術センター、昭和61年6月
- (14) 渡辺虎年：帆装商船における操帆および主機制御、計量管理、Vol.30、No.10、pp.23～30
- (15) 志賀竹麿：帆装の実態、船の科学 Vol.36 1983年8月、Vol.36.1983.8、pp.37～41
- (16) 井上欣三、臼井英夫：帆装商船の錨泊安全性の分析、日本航海学会論文集 第86号、平成3年10月、pp.289～296

## 第4章 帆の開発と実験

### 4-1 概説

前章までの調査で、帆装船は商船として非常に良い性能を持つ反面、帆装装置の不備な点で、大きなデメリットを抱えている船舶であることも判明した<sup>(1)(2)</sup>。今後の帆装船の発展的な有効利用を考えて行く上で、まず必要なのは帆装装置の改良であると考えられる。

これまでの調査で挙がってきた帆装装置の問題点は以下に示す項目である。

- ① 縮帆時の残留帆面積が大きいいため、港内操船への支障や錨泊時の振れ回り増大による走錨の危険性が増加する。
- ② 展帆時、前方の視界が悪くなる。
- ③ 装置が大型なため、荷役の障害となる場合がある。
- ④ 建造費、維持費が高く、故障が多い。

問題点の大部分は、帆装装置を省エネルギー化最優先で開発したことに起因しており、船舶の操船者の立場を取り入れた研究開発が十分ではなかったことを物語っている。

本章では、上記の不備な点をできる限り解消する、新しい帆装装置の開発に取り組んだ。開発は主に縮帆時に風圧影響を殆ど受けない、新タイプの帆装装置を目標にした。ここで開発した帆装装置の性能の確認試験は、9mカッターを使用した実船実験で行った。実験による結果は、第5章以降のシミュレーションでの検討に反映させる目的を持っている。ここでは、新型帆開発の経緯とこれを使った実験の結果を述べる。

4-2節では、新しい帆の開発を進める上で、帆装船の持つ帆の縮帆時の残留帆面積縮小化を最も重点的に考え、9mカッターに帆装装置を装備する計画で帆の形状や材質について検討した結果を示す。

4-3節では、燧灘沖において、開発した帆装装置の帆走性能の測定結果や、帆を操船へ積極的に利用した場合の有効性について述べる。また、弓削商船高専、練習船棧橋で、帆装装置を使って、錨泊時の振れ回りの実験を行い、これにより、錨泊時の振れ回り増大のメカニズムの究明や解決策について考察を試みた。

## 4-2 新型帆装装置の開発

### 4-2-1 基本設計

装置は実船に装備できることを前提としているため、9mカッターに帆装装置を装着することで設計を行った。まず、装置の材質は、軽量化を考慮し、ヨット等のマストやブームに使用されているアルミが候補に挙がったが、溶接を含めた加工上の問題が障壁となり、今回は木材を使用した。

帆の形状や空力特性については、現在までに多くの実験<sup>(3)~(17)</sup>が行われているが、新愛徳丸以来、空力学的見地より採用された、緩やかなキャンバーを持つ矩形帆に十分な実績があることから、近似層流型の矩形硬帆<sup>(18)</sup>とした。

新しい帆装装置の開発に際し、前節の諸問題の内、最重要課題は、縮帆時の残留帆面積の縮小化をどのようにするかであった。これについては、実船に搭載する装置として実用性の観点より検討を進めたところ、図4-1に示すような2つのタイプが提案された。

「タイプ1」はガレージ等に利用されているシャッターの形状を利用する方式である。また「タイプ2」は部屋の間仕切りに利用されているアコーディオンカーテンの形状を利用する方式である。どちらのタイプも帆に用いた場合、縮帆時の残留帆面積はかなり縮小されることは明らかである。この選定に当たっては、耐久性の面においてはタイプ1が有効であるが、第2章の調査の中で、帆装装置の重量から来るシーマージンの低下という問題を考慮し、装置重量の軽減化が計れるという観点を優先し、タイプ2のアコーディオンカーテン形状（以下カーテンと略す）を採用することにした。

展帆時の前方の視界確保の問題については、ヨットの帆に透明な覗き窓が付けられていることから、カーテンの下部に透明なビニール状の幕を部分的に取り付ける案が出たが、カーテン全体を透明な物にすることが技術的に可能ということが判明したため、帆については上述した帆全面が透明なカーテンを採用することで問題を解決した。

荷役に障害とならないための方策としては、帆装装置のマスト部分を倒せるようにする方式が挙げたが、今回はカッターを実験艇としていることから、案のみに止め、今後の開発課題に回すことにした。

建造費、維持費については、既存技術で既に使用されているカーテンを帆とし

て採用していることから、安価に製造できることが予想される。

上述したような設計概念に基づき、新型の帆装装置を制作した。

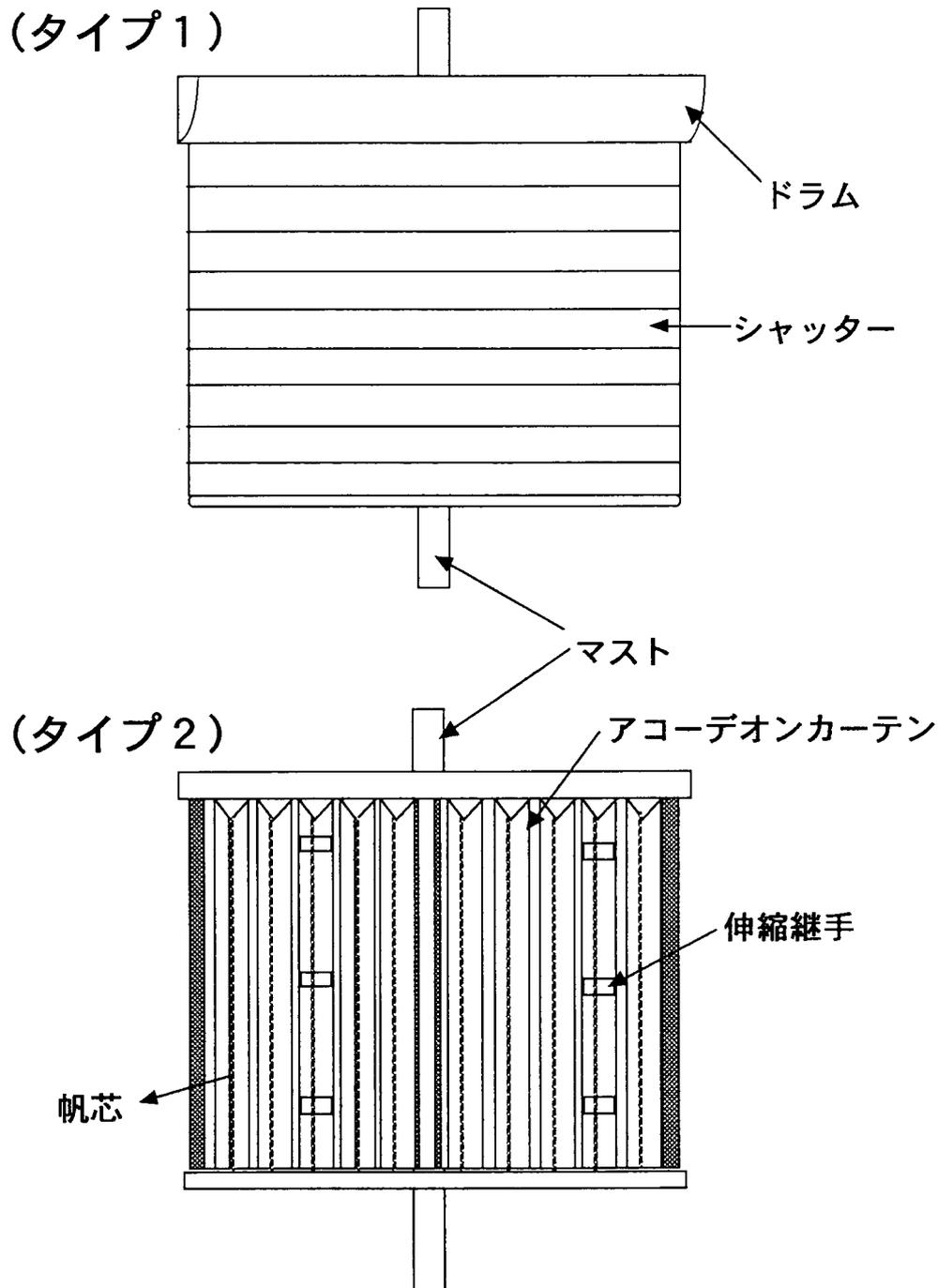


図 4 - 1 縮帆時の帆面積減少を可能にする帆形状

#### 4-2-2 開発の概要

新型帆装装置の装備実験艇は9mカッターを使用したため、艇のマスト・クランプ、マスト・トランク、マスト・ステップ部分<sup>(19)</sup>に帆装装置のマスト下部が正しく装着できるように、テープを付けたマストを制作し、これにカーテン状の帆が開く上下の天板をマストに装着した。また、帆枠となる天板にねじれが生じないように、天板の両サイドに支柱を付け強度を持たせた。帆枠が完成した状態で、上下の天板に実際の帆装船の持つ帆のカーブになるように、加工したカーテンレールを取り付けた（この時点でカーテン状の帆も同時に取り付けている）。この状況は写真4-1～写真4-3に示す通りである。

縮展帆システムについては、カーテンの広がっていく先端の部分にシートを取り付け、このシートが上部天板にある滑車を介して中央部でアウトホール、インホールに分かれるようになっている。展帆時にはアウトホールを、縮帆時にはインホールを引くことにより帆の縮展帆ができる。この縮展帆の状況を写真4-4、写真4-5に示す。

風に対する帆の適帆制御方法については、写真4-2に示すように、マスト下部に制御棒を設け、マスト自体をこの制御棒で回転させて行う「マスト回転方式」とした。この制御棒による適帆制御法は完成後、帆走実験を行ったところ、強風時には人力では支えきれないということが判明したため、写真4-6に示す「帆枠回転方式」に変更した。帆枠回転方式とは、マストに帆枠を受ける座台（鉄製）を設置し、これに帆枠の両端クリュー部分にシートを取り付けた帆枠をマストに差し込む形で乗せ、シートの伸縮により座台に乗った帆枠がマストを中心に回転するという制御方式である。この方式の採用により強風時での制御も可能となった。このような改良を施し、完成した装置を写真4-7に、またその主要目を表4-1に示す。

表4-1 帆装装置の主要目

マスト高さ	4.6 m
帆形式	アコーディオン式矩形硬帆
帆寸法	3.0m（幅）×2.85m（高さ）×1基
帆面積	8.55 m <sup>2</sup>
帆断面形状	近似層流型
駆動方式	シート伸縮による人力駆動
縮展帆時間	展帆時 約7秒 縮帆時 約5秒

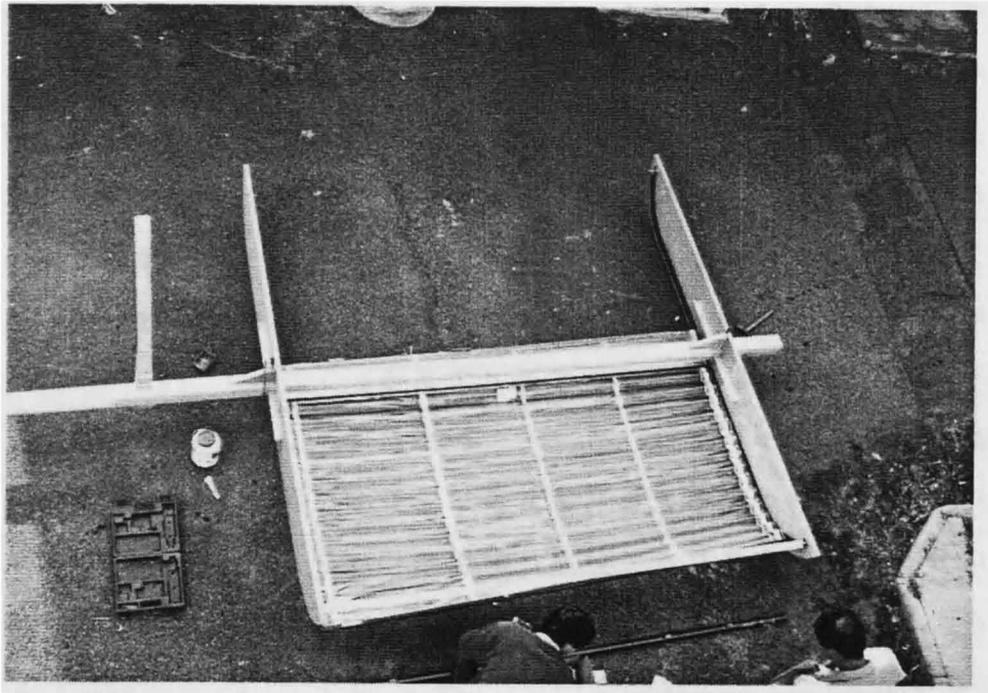


写真4-1 マスト及び帆枠の製作過程



写真4-2 カーテン帆の取り付け状況

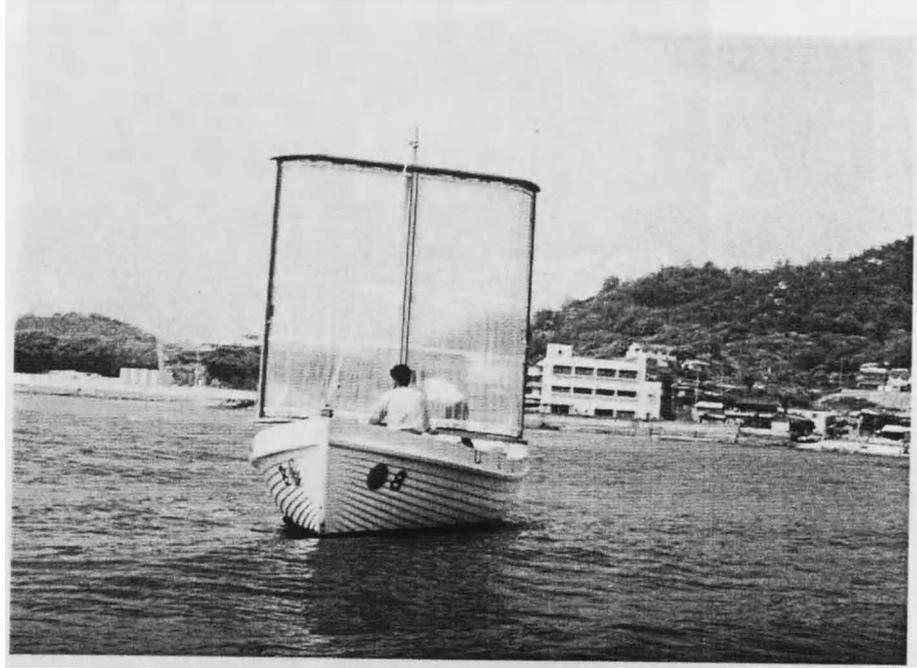


写真4-3 カーテン帆を設置し全開にした状態

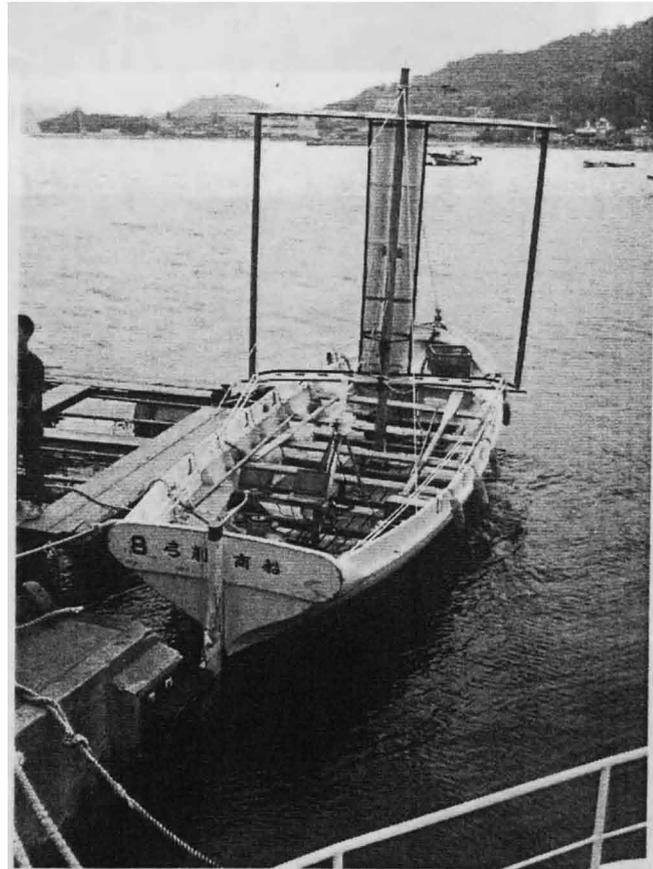


写真4-4 カーテン帆が縮帆されている状態

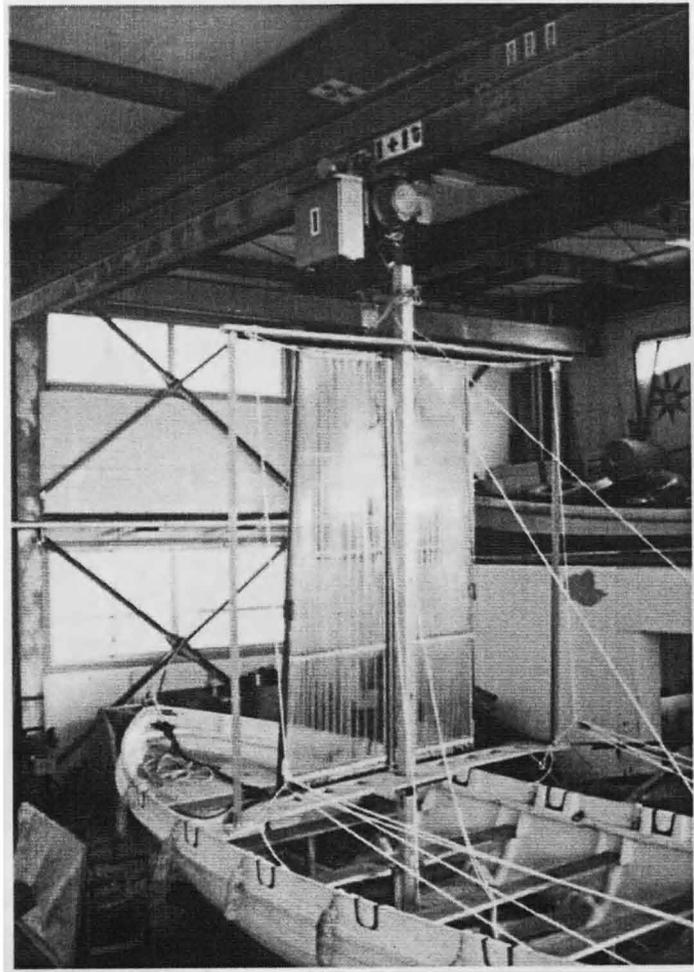


写真4-5 展帆途中のカーテン帆



写真4-6 帆柱回転方式への改良

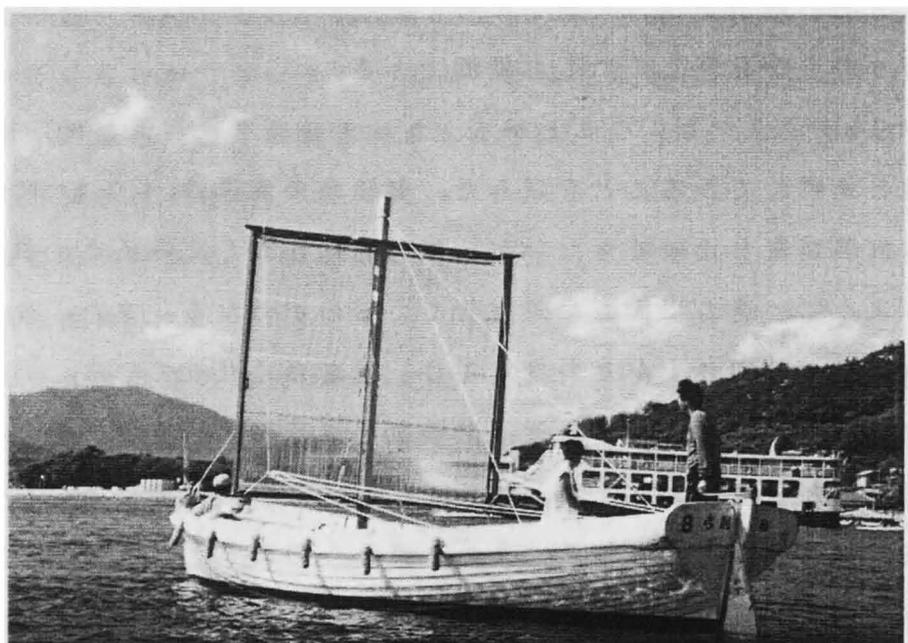


写真 4 - 7 帆装装置の全容

### 4 - 3 性能実験結果

#### 4 - 3 - 1 帆走性能実験

開発した帆装装置の帆走性能を測定するため、燧灘沖において海上実験を行った。性能測定の評価には、帆船やヨットの帆走性能を表すときに多く用いられている帆走性能曲線の作成を行った<sup>(20)</sup>。帆走性能曲線とは、船に対する各相対方位からの風による船速を測定し、それをプロットしたものである。実験データの取れた風速は 2.5 m/s、3.4 m/s、5.0 m/s の 3 回のデータを得ることができ、帆走性能曲線は図 4 - 2 に示す曲線となった。

この曲線より、風上への最大切り上がり角度は  $50^{\circ}$  で、最も船速を出す方位は両舷正横後  $30^{\circ}$  付近（船首より  $120^{\circ}$ 、 $220^{\circ}$  が最大）である。また、同じ風速でも左舷側の方が速力が出るという結果となった。速力が両舷非対称の理由については、一般的に、船体構造の左右非対称性や計測時の風の強弱の変化が考えられるが、実験中の天候状態から後者の影響が強いと思われる。

一般的にカッターは構造上重い艇となっているため、速力が出にくいといわれている。このような艇を風力階級で「軟風」の領域に入る風速 5 m/s で 1.82 m/s (3.53 Kt) の速力が出せたということは、十分な性能を発揮できているの

ではないかと考えている。これを裏付ける一つの例として、カッター競技で、訓練された12名の選手が全力で漕いだ時の船速が5 Kt程度ということから、推力的にもかなりの力を発揮していると推測できる。

実験艇が9mカッターということから、カッターに本来装備される帆走機装を施し、本装置と比較してみることを試みた。実験時の風速は4.0 m/sであったため、直接的に本帆装装置と比較できないが、相対的に比較してみると、帆走性能曲線からわかるように、速力に大きな差が出ているのがわかる。また、カッターの帆走具の方が風上への切り上がり角度も10°程度良くなっている。

まず速力の違いについては、新型帆装装置の帆面積が約9 m<sup>2</sup>に対しカッターの帆走具は27 m<sup>2</sup>と3倍も大きくなっている<sup>(19)</sup>。この帆面積の違いが大きく速力に差異を表していると考えられる。また、風上への切り上がり角度の違いについては、新型の帆装装置の帆が「矩形帆」であるのに対し、カッターのそれは「三角帆」であるための差であると思われる。

この実験より、カッターの帆走具が純然たる帆走のためのものとして作られたのに対し、本装置は機関の補助的効果の目的として開発されたものである相違を如実に表している。

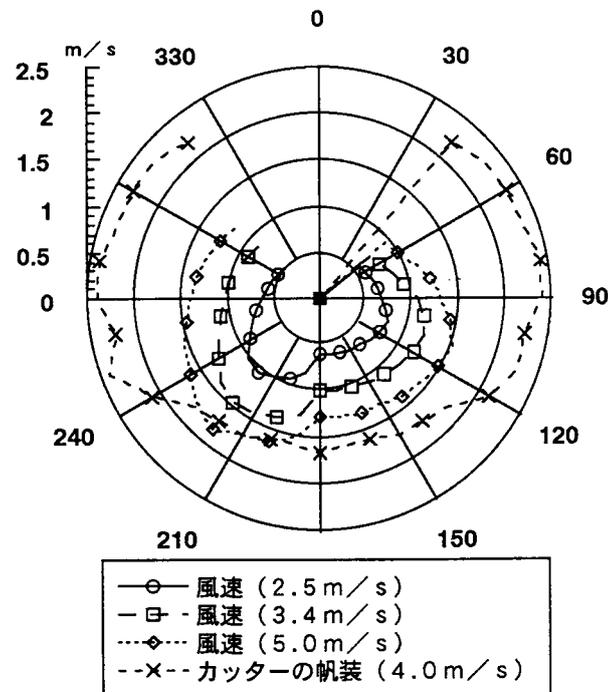


図4-2 帆走性能曲線

#### 4-3-2 帆を利用した操船性向上への試み

弓削商船舟艇棧橋付近および燧灘沖において、正確な測定を行うなどの定量的実験は行っていないが、カッターに装備した帆を使用し、以下に示す効果が得られるかどうかの簡単な操船試験を行った。

- ① サイドスラスト効果。
- ② 船の姿勢保持制御。
- ③ 定位置保持。

サイドスラスト効果の確認については、図4-3(a)にその一例を示した。離着岸時、船に対し横方向の推力成分が出るように、帆の角度を調整する操船を行った。この結果、船首の左右への振り出しが帆のみによって行え、オールおよびポートフックの操作を必要としない程までの結果が得られた。ここで得られたサイドスラスト効果については、あらゆる方向の風について行ったわけではないため、どのような場面においても効力を発せられるかという点においては疑問が残るが、横方向への推力を得にくい風の状態以外は確実に効果が得られると思われる。

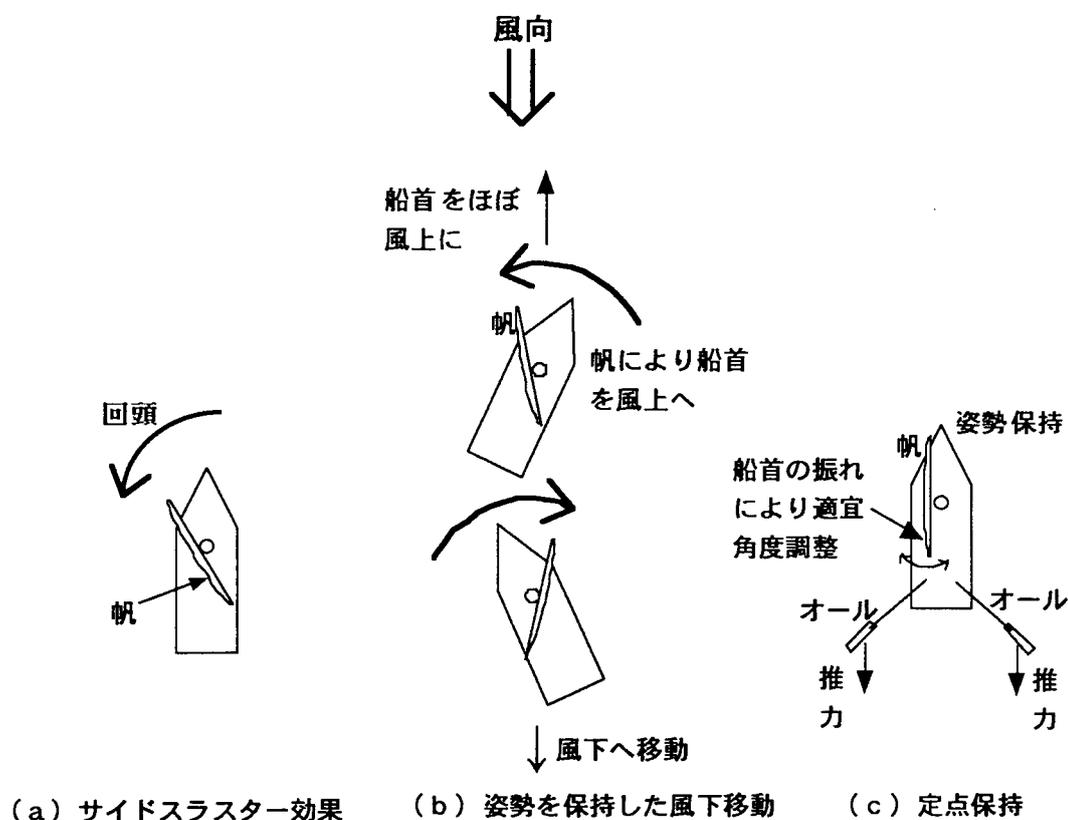


図4-3 帆の利用による操船性向上の一例

船の姿勢保持制御は、洋上において船を停留させ、他船との会合および船外に物を搬出し作業を行う場合などに利用される操船である。一般的に風のある海上において船を停留させた場合、船は風に対し横になる状態で風下に圧流される現象を示すため、船首方位を一定に保つためには頻りに機関と舵との併用が必要となる。これに対し本装置を図4-3(b)のように使用すると、船首を風に立てた状態を維持して風下に移動することが確認された。この方法は機関や舵の併用を行う必要がなくなるため、有効な方法の一つと考えられる。

定点保持については、先に述べた帆角度微調整による姿勢保持の状態を図4-3(c)のように風潮流に対抗できるだけ、オールで推力を与えるという実験を行った。この結果、定点を概ね保持できることが判明した。これについても定点の保持性等の測定実験は行っていないため、確実な定点保持の方法というまでには至らないが、その可能性は十分に持っていると考えられる。

#### 4-3-3 錨泊実験

##### (1) 実験方法

実際の帆装船では、帆装装置の影響で錨泊時の振れ回りが増大し、走錨の危険性の増加が深刻な問題となっていることは既に述べた。これについて、今回開発した縮帆時に風圧面積を殆ど残さない新しいタイプの帆装装置がどのような有効性を示すのか、錨泊実験を行った。

実験の方法は、錨泊時の振れ回りを測定するため、カッターに張力のかからない細いメジャーを取り付け、その位置にフラグを立て、コンパスにより、そのフラグの方位と距離を20sec毎に計測し、以下に示すような4つのコンディションでの艇の振れ回りを測定した。

(a) 艇に帆を装備していない状態での振れ回り計測。

(b) 艇に帆装装置を取り付け、帆を完全に閉じた状態での振れ回り計測。

(c) 帆を全開にし、開き角 $90^{\circ}$ （艇の船首尾線に対し、帆が直角の状態を $90^{\circ}$ とする）とした風圧抵抗最大の状態での振れ回り計測。

(d) 帆を全開にし、開き角は風の抵抗とならないように適宜調整した状態での振れ回り計測。

上記コンディション中の帆の開き角についての定義は、図4-4に示す。また、実験値のプロット結果より、最大振れ回り幅を出し、20 sec毎に計測した時系列結果を元に振れ回り周期も算出した。これについては、表4-2に各状態での結果を示す。上述した「最大ふれ回り幅」の定義は、錨方向に対し風で振れ回った左右方向の移動距離で最大となった幅をいうことにする。

また、実験時の風速は3.2 m/sという軽風であったが、全ての実験に対し同じ条件のもとで行うことができた。

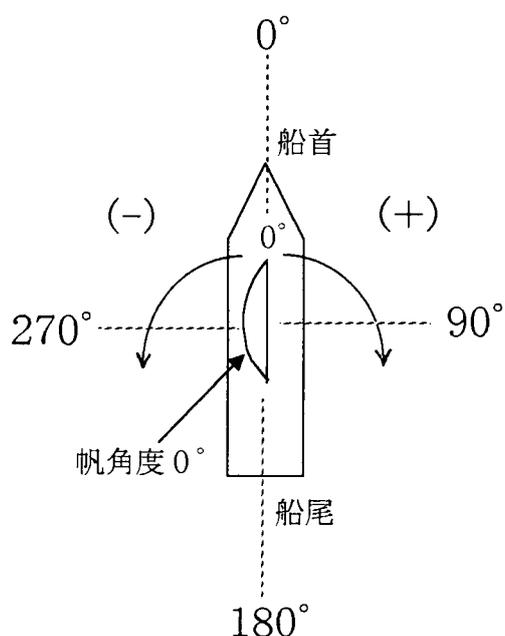


図4-4 帆の開き角度の定義

表4-2 錨泊時の振れ回り周期と振れ回り幅

帆の状態	計測要素	振れ回り周期 (min)	最大振れ回り幅 (m)
カッター帆なし		16	13.2
帆完全縮帆		16	15.0
帆全開 (開き角 0°)		24	12.0
帆全開 (適宜調整)		17	16.0

## (2) 縮帆時の効果

本装置の縮帆時の効果を見るために、帆を全開にし風圧抵抗が最大となるように、帆の開き角を $90^\circ$ とした時の状態と帆を完全に閉じた状態との比較を最初に行った(上記(b)と(c)の状態の比較)。このとき、錨鎖にかかる張力も重要な要素となるが、今回は振れ回りのみで張力についての測定は行っていない。

実験での振れ回りの状況は図4-5で、振れ回り周期、最大振れ回り幅は表4-2に示した。開き角 $90^\circ$ の場合、周期は完全縮帆の場合よりも8分長くなっているが、振れ回り幅は逆に3m小さくなっている。この理由は、開き角 $90^\circ$ の時は、帆が受ける風圧力が大きいため、船体に後進推力が強く生じ、振れ回りを起こさせる横方向に働く力の成分よりも錨を引っ張る成分が大きくなったことが原因と考えられる。このため振れ回り周期が大幅に遅くなり、振れ回りの幅も減少したものと考えられる。過去に行われた数値シュミレーションの結果では、帆装装置が重心位置より前方にある場合は振れ回り幅が大きくなるという報告がある<sup>(21)</sup>。しかし、今回の場合は、重心から帆装装置の位置までの距離が僅かにしか前方でなかったことと、艇の喫水が非常に浅く流体力が余りかからない状態であったことから、上述したように艇に後進をかける成分の力が大きく勝り、振れ回り幅を小さくしたものと考えている。

この実験より風に直接抵抗となるような残留帆面積の影響は、振れ回りを減少させる向きにあるということがわかったが、今回は測定を行わなかった錨鎖にかかる張力については、一番大きな影響を及ぼしていると思われるため、縮帆面積の縮小化は重要であると考えている。

つぎに、艇に帆装装置を全く付けていない状態と付けて帆を完全に閉じた状態とを比較した(上記(a)と(b)の状態の比較)。

この状況は図4-6及び表4-2に示す。両者の違いを見ると、振れ回り周期は変わらないため、最大振れ回り幅が1.8m帆を閉じた状態の方が僅かに大きくなっている程度である。微少ではあるが、1.8mという振れ回りの増大を起こした原因は、先に述べた数値シュミレーションの報告にある、帆装装置が艇の重心位置よりも僅かであるが前方にあることが原因と考えられる。本装置のように、縮帆時の残留帆面積がほとんど無くなる形状では、マスト部分に僅かに残った残留帆面積にかかる後進推力は微少になっていることから、シュミレーション結果に

ある、重心位置からの距離の影響力が現れて来た結果と考えている。この問題については、現実の帆装船の大部分は、帆装効果を増すため、重心位置より前方に装置を設けているものがほとんどであるため、本装置のように帆面積を極力縮小できるタイプの装置が総合的に走錨防止上、有効なものになると考えられる。

### (3) 振れ回り幅増大の原因について

残留帆面積の影響が振れ回り幅増大に対して大きく影響を及ぼさないということが前項の実験で明らかとなったが、それでは帆装船の実態調査で実務者が最重要項目として挙げていた「錨泊時の振れ回り増大」の要因は何であろうかという問題に直面する。これについて、第2章の調査で得た帆装船の錨泊時の状況項目を洗いなおして、これに近い実験を行ってみた。

実際の帆装船では錨泊時、つぎのように帆装装置を使用しているという回答が記入されている。

- ① 帆は縮帆し風の抵抗にならない方向に向けている。
- ② 縮帆し自動向風制御にしている。
- ③ 縮帆し船尾方向に向けている。

上記、回答が示すように、帆装船は錨泊時には、縮帆し風の抵抗とならない方向に向けて止めているか、自動制御でそれを行わせている。この状況に近い状態を再現するため、本装置の帆を全開として、風に対し抵抗とならないように、適宜調整して錨泊する実験を行った。帆を全開にして行った理由については、本装置で縮帆してしまうと、風に対して調整する程まで帆面積を持たなくなるためである。

この振れ回りの軌跡を帆を装備していない状態と比較して表したものが図4-7である(上記、(a)と(d)の比較)。

図から明らかなように、振れ回り幅は帆を調整した方が大幅に大きくなっており、更には、その振れ回り状態までも変則な動きとなっている。表4-2からその数値的差異を比較すると、振れ回り周期は1分の差であるが、振れ回り幅は2.8mの広がりを見せている。これは振れ回りの速度が速くなっていることを意味する。このような運動となった理由は、風は息をしており、また、微妙に振れているため、風に対し適帆調整を行う場合に、追従遅れが起き、帆に揚力が生じて、船体

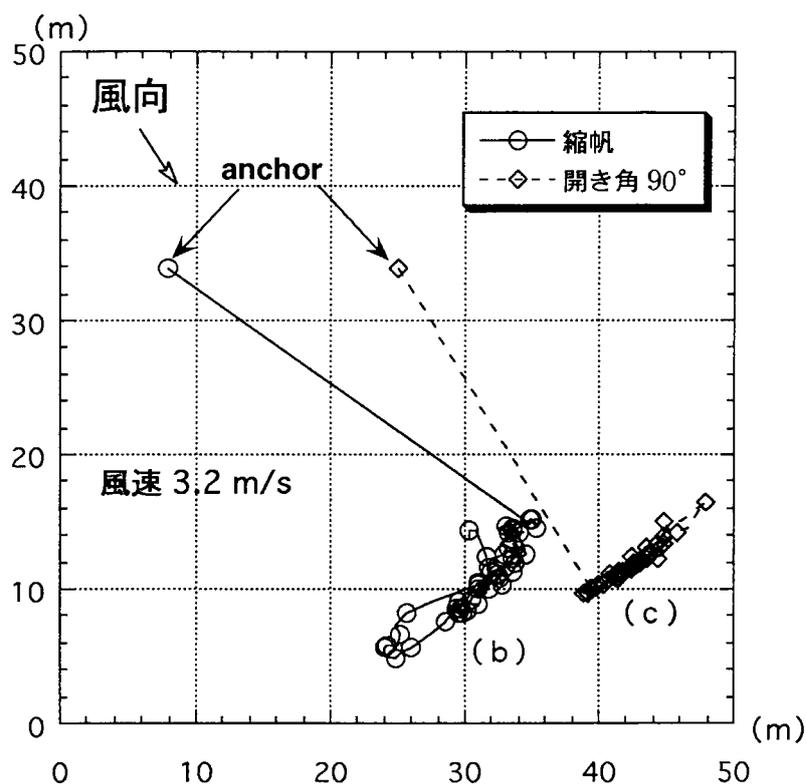


図 4-5 縮帆時と帆全開（開き角  $90^\circ$ ）の振れ回り比較

の振れ回りを増大させたものと考えている。

現在使用されている帆装装置の風に対しての追従は、3分間の風向・風速計測の平均により適帆制御を行っていることから、恐らく上述したような状況が実際に起こっているのではないかと考えられる。

#### （４）実船装備上の留意点

本章で開発した帆装装置の有効性は既に述べたが、これを実船に装備する場合にどのような留意点が必要か、制作過程及び海上での帆装実験を基にまとめてみると、次の事項が挙げられる。

- ①展帆時、カーテン状の帆を帆枠に固定する装置が別に必要である。
- ②カーテン帆の伸縮金具及び枠心の補強が必要である。
- ③適帆制御は、帆枠回転式よりもマスト回転式の方がよい。
- ④帆枠は折り畳めるようにし、マスト部分からデッキ上に倒せるようにする。

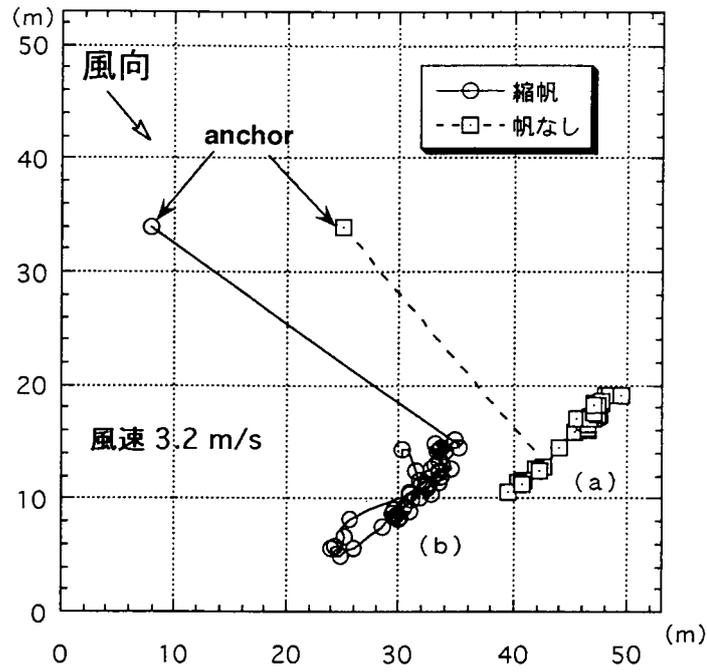


図 4 - 6 縮帆時と帆無装備時との振れ回り比較

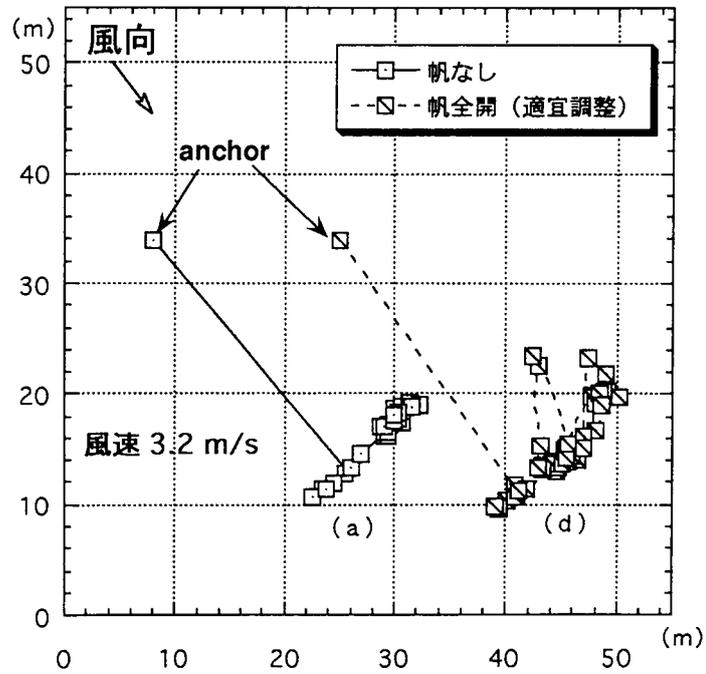


図 4 - 7 帆を適宜調整した時と帆無装備時の振れ回り比較

本装置での帆と帆枠との固定は、カーテンレールを帆枠に頑丈に装着することにより、その中を通る帆の上下の固定を行い、左右の固定には、帆が開いた状態で帆枠の両端支柱に帆側面を固定するという、四隅固定方式にして強度を保たせている。この方式でカッター程度の船では十分な強度と考えられる。しかし、実船に装備する上では、帆自体が大型化することや、20 m/s近くの風速に対しても展帆できる強度が必要となってくることから、上記①に挙げたような帆と帆枠の固定の補強装置や②の帆自体の補強が必要となってくると考えている。③については今回行ったような帆枠回転方式では、帆枠を動かすシート類の策具が必要となり、また、デッキ上にスペースをとってしまうということからも実用的ではない。よってこれについては、従来のマスト回転式がよいと思われる。④については、先に述べた理由により、案としてのみ挙げておくことにする。

#### 4-4 結語

従来の帆装装置の欠点を改善すべく、操船性向上及び錨泊時の振れ回り減少が期待できる帆装装置の開発を行った。今回、縮帆時の風圧面積を大幅に縮小できる帆の形状として硬帆タイプの近似層流型（キャンバーを持つ矩形帆）にした理由は、帆装船の建造思想が燃料節約と計画運航を重点的に考えられていたため、軟風や和風領域でのシャープな相対風向時にハタメキやすい軟帆に見切りをつけ、強風を利用できる矩形上の硬帆が最適<sup>(22)</sup>であるとされたことを継承したかったからである。しかし、この他に軟帆タイプの三角帆や硬帆タイプでも翼型のものなど以下に示すような特色があることから、今後に十分な研究の余地を残していると考えられる。

軟帆タイプの三角帆：巻取式にすると縮帆効果としては最小となる。また、矩形帆に比べ風上への切り上がりがよく帆走性能の向上が期待できる。軟帆タイプは帆装装置を軽量化できると同時に製作費の軽減ができる。

硬帆タイプの翼型帆：軟帆よりも迎角が小さい時には空力的に性能は良くなる。しかし、縮帆ができないため強風時等に常に風向の変化に帆角を追従させ抵抗を少なくする制御が必要なことや船の安定性に難が生じることが懸念されている。

本章で開発した新型帆装装置について、新たに得られた知見及び問題点を列挙すると以下の事項にまとめられる。

#### 有効な点

- (1) カーテン状の帆装装置ならば、縮帆時の風圧影響が大幅に軽減される。
- (2) 上記により、港内操船時、操船者の負担が軽減される。  
また、錨泊時においても走錨の危険性が軽減できる。
- (3) 透明な帆のため、展帆時においても前方の視界が十分に確保できる。
- (4) カーテン状の帆装装置にしても、帆走性能の低下は殆どない。
- (5) 帆の開閉に大きな力がいらないため、動力システムが小型にできる。
- (6) 帆の開閉システムがシンプルなため、故障が少なくなる。
- (7) 建造費及び維持費が軽減できる。

#### 問題点

- (1) カーテン状の帆のため、強度上、1枚の帆を極度に大型化できない。
- (2) 帆そのものは安価になるが、寿命が短くなる。
- (3) 帆に強度上の補強を行うと、帆自体の重量が重くなる。

以上のまとめで述べた事項が今回得られた成果であるが、特に上記の問題点を解決するためには、今後さらに系統的な実験を積み重ねる必要がある。

#### 第4章の参考文献

- (1) 久保雅義・高岡俊輔：帆装商船の運航実態とその問題点について、日本航海学会誌、第120号、平成6年6月、pp.69～77
- (2) 久保雅義・高岡俊輔：帆装商船の日本海航路適応性について、日本航海学会論文集、第92号、平成7年3月、pp.231～239
- (3) 濱田昇：近代帆装商船の性能実証研究、大阪大学学位論文、昭和60年12月
- (4) 橋本淳・内田誠：揚力面渦格子法によるスループリグセールの特性予測、日本航海学会論文集、第75号、昭和61年9月、pp.95～103
- (5) 橋本淳：渦格子法によるセールおよびプロペラの特定課題計算例、神戸商船大学付属船貨輸送研究施設研究報告第3号、1987.2、pp.151～158
- (6) 増山豊外：帆走の船舶流体力学的研究（第4報）帆の風洞実験について、関西造船協会誌、第185号、pp.107～115
- (7) 多田納久義・大杉勇他：ある横帆模型の空力特性と帆のまわりの流れについて、日本航海学会論文集、第84号、pp.11～17
- (8) 雨宮伊作・大杉勇他：練習船日本丸の帆の空力特性について、日本航海学会論文集、第84号、pp.1～9
- (9) 田中一朗他：一様流中の乱れが舵の特性に及ぼす影響について、関西造船協会誌、第209号、pp.47～55
- (10) 芳村康男：大型練習帆船の帆走性能の推定、日本航海学会論文集、第84号、pp.19～27
- (11) J.H.Milgram, The Analytical Design of Yacht Sails, SNSME, Vol.76, 1968
- (12) C.A.Marchaj: Aero-Hydrodynamics of Sailing, p444, published by Adlard Coles Limited, (1979)
- (13) Robaert D.Blevins: Applied Fluid Dynamics Handbook, p335, Copyright 1984 by Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- (14) Marchaj, C.A.: "Sailing Theory and Practice" Publ. Adlard Coles. 1962 England; Dodd, Mead & Co. 1962 USA

- ( 1 5 ) F.Handley-Page:"The Handley-Page Wing"The Aeronautical Journal,  
June.1921
- ( 1 6 ) Gentry,A.E:"How Sails Work" Sail Magazine(April~November 1973)
- ( 1 7 ) L.Bergeson,et al:Sail-Assost Alternatives for Auxiliary  
Proppulsion,The 5th International Marine Propulsion Conference,  
Cafe Royal London, March(1983)
- ( 1 8 ) 渡辺 虎年：帆装商船における操帆および主機制御、計量管理 Vol.30,  
No.10、pp.23~30
- ( 1 9 ) 杉浦昭典：カッターとライフボート、海文堂出版
- ( 2 0 ) G.I.Fekete and B.G.Newman:DESIGN AND TESTING OF A SAILBOAT WITH  
SELF-TRIMMING WING SAIL,Canadian Aeronautics and Space Journal,  
Vol.29,No.2,June 1983
- ( 2 1 ) 井上欣三・臼井英夫：帆装商船の錨泊安全性の分析、日本航海学会論文  
集、第86号、平成4年3月、pp.289~296
- ( 2 2 ) 横山晃：690T型の帆装客船、船の科学 Vol.40 1987.9、pp.47~51

## 第5章 帆の利用による操船能力の推定

### 5-1 概説

前章で、帆装船の問題点をできる限り解消する帆を開発し、これを使っての実船実験で縮帆時の残留帆面積の縮小化は操船への負担の軽減と錨泊時の走錨確率の減少につながる基礎的な確認を行うことができた<sup>(1)(2)</sup>。また、帆の操船への利用が有効なものとなる簡単な確認実験も行えた。

本章では、帆装船の船体運動を評価できる操船シミュレータを開発し、帆の利用による操船性向上の検討や操船不良の起きるメカニズムをシミュレーションにより解明する。ここでの帆装船の操船シミュレータは、帆のみの作用が船の操船に対しどのように影響するか推測することを主眼としたため、船体上部構造物の影響を無視した簡易なものとして開発した。船体上部構造物の影響を加味した、より詳細なシミュレータは、本章での結果を踏まえたあと、第6章で開発を行っている。

5-2節では、帆装船の運動シミュレーションは船の設計の段階で幾つかの検討がなされているが<sup>(3)(4)</sup>、その根本が燃料節約を第一に考えていたため、帆の制御等は前進推力を最大限得るための検討がほとんどである。これにより、帆の影響のため、操船面や錨泊面で障害となっていることが、第2章、第3章の調査からまぎれもなく明らかとなっている。しかし、この問題に対処するための操船性への影響を推測できるような帆装船のシミュレータといったものの開発は未だなされていないのが現状である。そこで、前章で開発した帆装装置を採用した、鳥瞰図表示操船シミュレータをパソコン用に開発した概要と、実船との比較において、シミュレータとしての妥当性を確認した経緯をここで述べる。

5-3節では、開発した操船シミュレータを使用し、今後の帆装船のポテンシャル向上のため、帆の制御を燃料節約だけでなく、操船への利用や安全性の向上に貢献できるように拡張することを目指し、帆を操船に積極的に利用する新しい制御法の可能性について考察した。

## 5-2 帆装船舶の操船シミュレータの開発

### 5-2-1 使用した運動方程式

平水中において一様な風の中を機帆走する船の運動は、一般に剛体の平面運動としてオイラーの動座標系で記述すると図5-1となり、式(5.1)で示す運動方程式で表わされる。

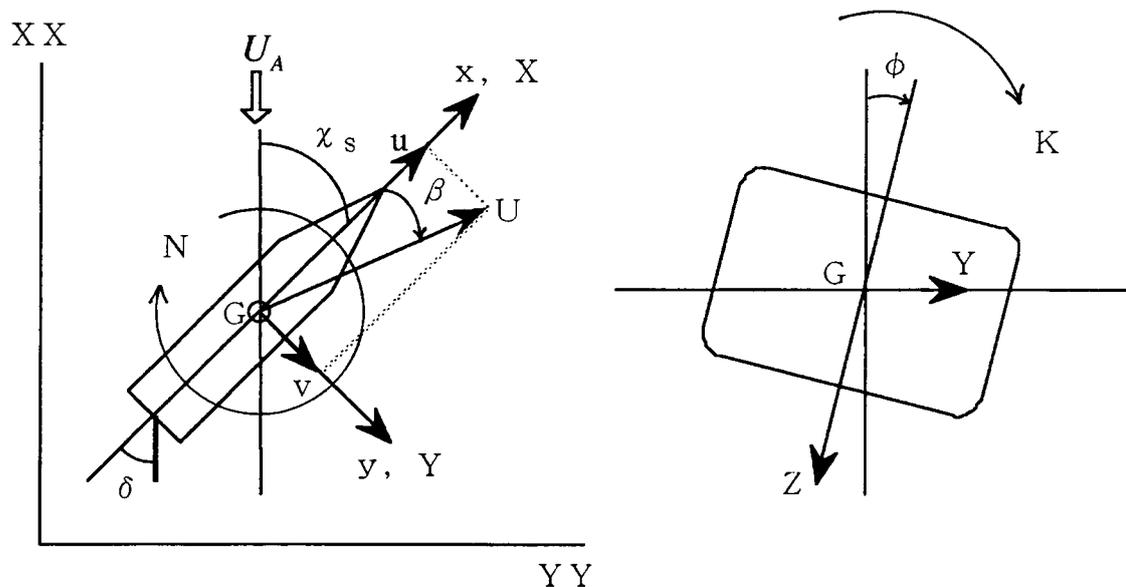


図5-1 運動の座標系

$$\left. \begin{aligned}
 m(\dot{u} - vr) &= X \\
 m(\dot{v} + ur) &= Y \\
 I_{zz}\dot{r} &= N \\
 I_{xx}\ddot{\phi} &= K - GM \cdot g \cdot m \cdot \sin \phi
 \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

$m$ : 船の質量  
 $u$ : 前後方向の船速  
 $v$ : 横方向の船速  
 $r$ : 回頭角速度  
 $\beta$ : 斜行角  
 $\phi$ : 傾斜角  
 $\delta$ : 舵角  
 $m_x$ : X軸方向付加質量  
 $m_y$ : Y軸方向付加質量

$X$ : 前後方向に働く力  
 $Y$ : 正横方向に働く力  
 $N$ : 回頭モーメント  
 $K$ : 傾斜モーメント  
 $U$ : 船速  
 $U_A$ : 絶対風速  $\chi_s$ : 絶対風向  
 $I_{xx}$ : Rolling 慣性モーメント  
 $I_{zz}$ : Yawing 慣性モーメント  
 $J_{zz}$ : Yawing 付加慣性モーメント

また、水面下の船体に働く力、水面上の構造物に働く風圧力および帆に発生する力は、式(5.2)で表される。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_R + X_P + X_{AH} + X_{AS} \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_{YR} + Y_P + Y_{AH} + Y_{AS} \\ N &= N_H + N_R + N_P + N_{AH} + N_{AS} \\ K &= K_H + K_R + K_P + K_{AH} + K_{AS} \end{aligned} \right\} (5.2)$$

式(5.2)中の添字H、R、P、AH、ASについては、それぞれ次のような意味を持つ。

- |    |                   |    |           |
|----|-------------------|----|-----------|
| H  | : 水面下の船体に働く力      | R  | : 舵の誘起する力 |
| P  | : プロペラの力          | AS | : 帆の力     |
| AH | : 水線面上の船体・構造物に働く力 |    |           |

ここで船の横傾斜を無視し平面運動だけに着目すれば、式(5-1)は各方向に付加質量がかかった形で式(5.3)のように表現される。

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x)\ddot{u} - (m + m_y)vr &= X \\ (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur &= Y \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} &= N \end{aligned} \right\} (5.3)$$

本シミュレーションでは水線面上の船体及び構造物にかかる力は無視したので、右辺の前後、正横、回頭方向に働く力は、式(5.4)で示される。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_R + X_P + X_{AS} \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_P + Y_{AS} \\ N &= N_H + N_R + N_P + N_{AS} \end{aligned} \right\} (5.4)$$

また、帆により誘起される力<sup>(3)</sup>については式(5.5)のように表される。

$$\left. \begin{aligned} X_{AS} &= \frac{\rho_a}{2} \left( \sum A_{si} U_{ai}^2 X'_{AS}(\varphi_{ai}, \varepsilon_i) \right) \\ Y_{AS} &= \frac{\rho_a}{2} \left( \sum A_{si} U_{ai}^2 Y'_{AS}(\varphi_{ai}, \varepsilon_i) \right) \\ N_{AS} &= \frac{\rho_a}{2} \left( \sum A_{si} U_{ai}^2 N'_{AS}(\varphi_{ai}, \varepsilon_i) X'_{si} \right) \end{aligned} \right\} (5.5)$$

ここで  $U_{ai}$ 、 $\varphi_{ai}$  は各帆の設置位置での相対風向、風速である。また、上式中  $X'_{AS}$  と  $Y'_{AS}$  は式 (5.6) となっている。

$$\left. \begin{aligned} X'_{AS} &= C_L(\varphi_{ai} - \varepsilon_i) \cos(\varphi_{ai}) - C_D(\varphi_{ai} - \varepsilon_i) \sin(\varphi_{ai}) \\ Y'_{AS} &= C_L(\varphi_{ai} - \varepsilon_i) \sin(\varphi_{ai}) - C_D(\varphi_{ai} - \varepsilon_i) \cos(\varphi_{ai}) \\ N'_{AS} &= Y'_{AS} \end{aligned} \right\} (5.6)$$

機帆走中の船の運動は、上記の如く船体や帆に働く流体力が求まれば、これらを式 (5.3) の連立微分方程式に代入することにより求まることになる。上記の式 (5.1) から式 (5.6) は MMG モデル<sup>(5)</sup> の表記に基づいている。

### 5-2-2 計算に使用した帆装船舶のモデル

計算に使用した船は、船体運動等の試験結果が明らかになっている練習船 Y 丸である。この主要目を表 5-1 に示す。帆については、前章で報告した縮展帆が容易にでき、特に縮帆時の受風面積がほとんど無くなる新型の硬帆を用いている<sup>(1)</sup>。船体に帆を設置した場合の概観は図 5-2 に示す。帆は Y 丸の船体中央より前後 13 m の位置に各 1 本設置している。また、帆の面積は縦 10 m、横 7 m の 70 m<sup>2</sup> である。

### 5-2-3 帆の空力特性

帆の空力特性は帆装船の試験船「だいおう」の層流型硬帆をモデルとしているため、図 5-3 の実線部分の空力特性曲線を折線で近似して計算させている<sup>(3)</sup>。しかし、今回のシミュレータの最大の特徴としている、帆の操船面への利用を模擬するためには、図 5-3 に示した帆の後ろの面（以下凹面と呼ぶ）からの空力特

表 5 - 1 Y 丸の主要目表

全 長	40.00 m
垂線間長	35.00 m
幅 (型)	8.00 m
深さ (型)	3.30 m
満載喫水 (型)	2.80 m
総トン数	240 t
主機関	1,300 ps × 750 rpm × 1
最大速力	13.75 Knot
上部風圧面積	62 × 188 m <sup>2</sup>
帆装置	層流型硬帆 × 2
帆面積	10.0 m × 7.0 m × 2基

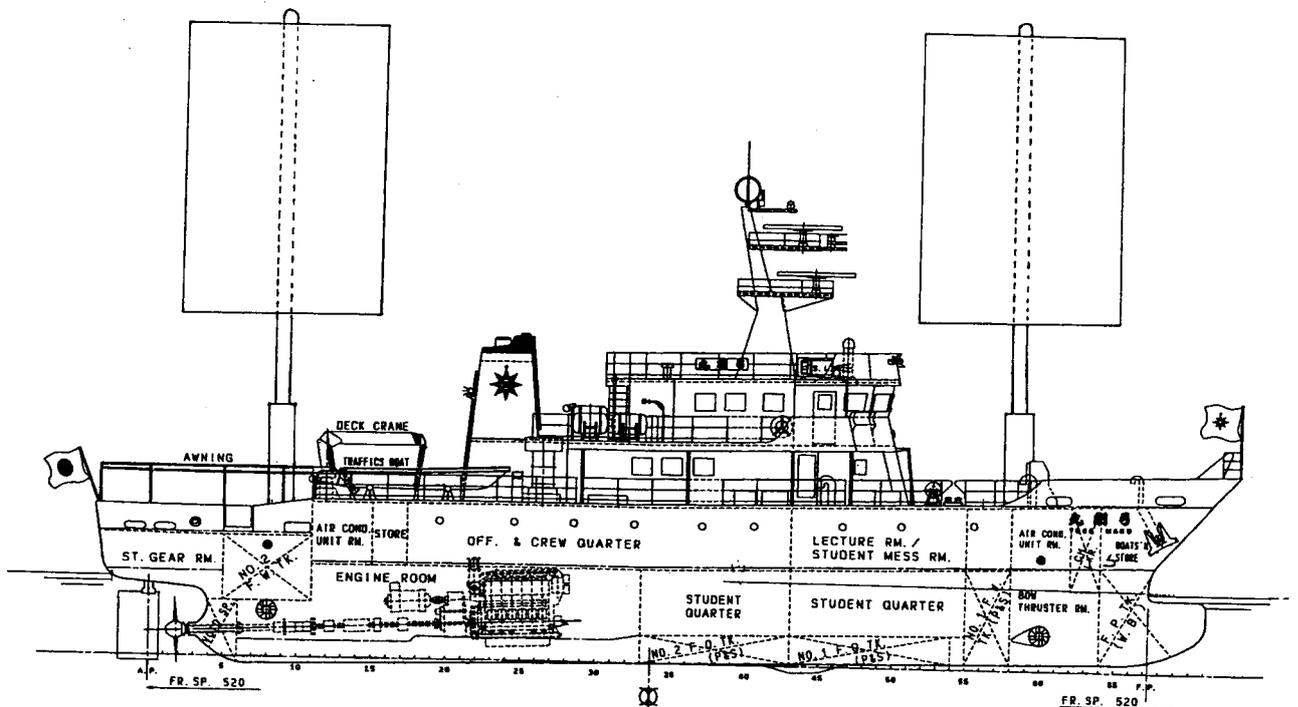


図 5 - 2 Y 丸に帆が設置された場合の概観

性だけでは不十分で、帆の前の面（以下凸面と呼ぶ）から風を受けた時のデータが必要となった。これについては、試験船「だいおう」を含め、現在の帆装船における空力特性は前進成分を最大限に得る設計を行っているため、帆の凹面からの特性のみしか実験されておらず、計算に取り込むための凸面データが無かった。そのため、帆の凸面からの空力特性はつぎのような実験を行い推定した。

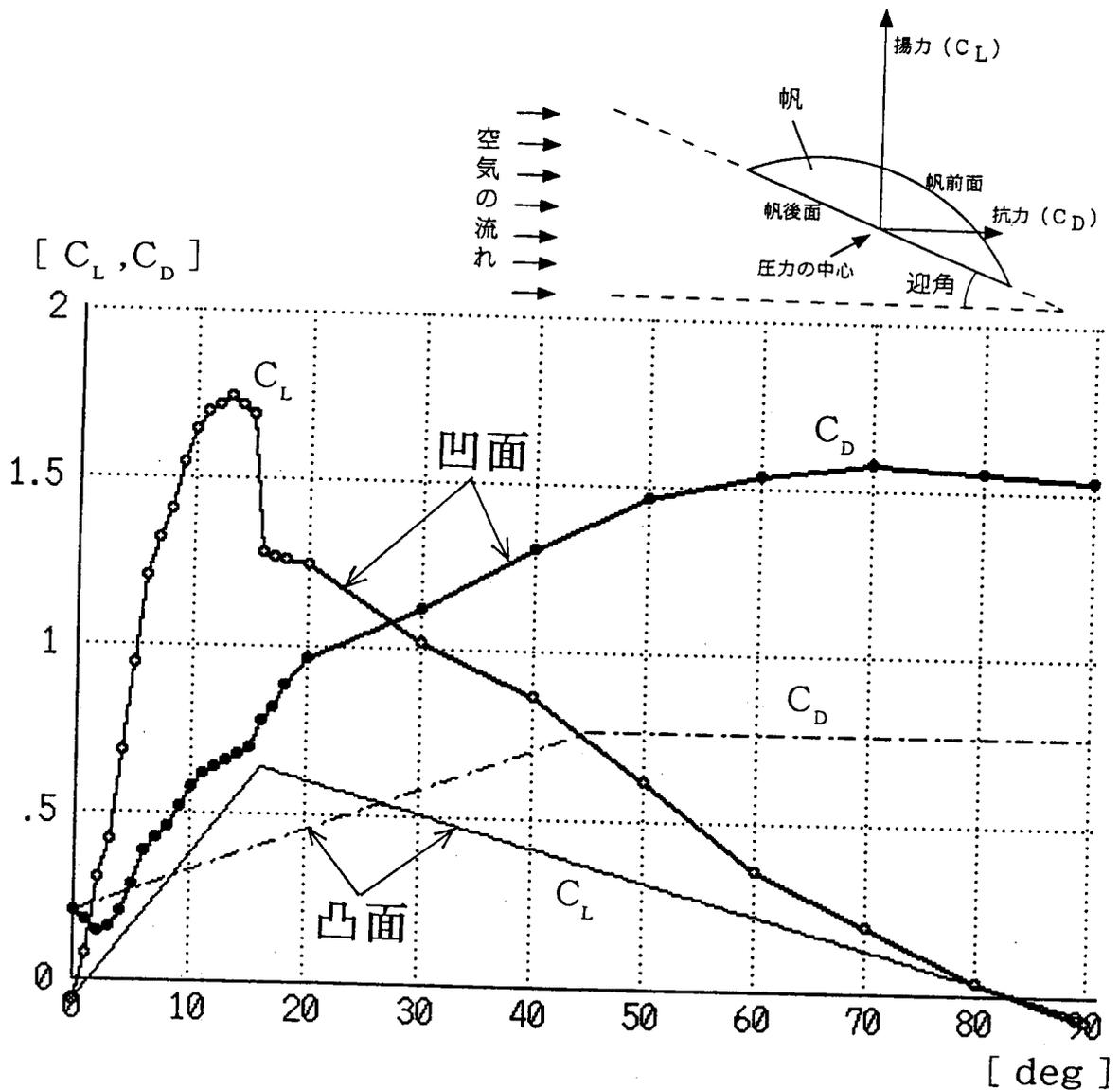


図 5-3 迎角に対する帆の空力特性

### 帆の凸面の空力特性実験

実験装置の概要は写真5-1と写真5-2に示す。帆に発生する揚力、抗力は精度には問題が残るが写真でわかるように、帆が台座の四隅に設置されたばねばかりで支えられているため、発生した力を測定できるようになっている。実験については、通常の風洞試験の手順に従って行った。しかしこの場合、自然風での測定のため以下に説明する1/7則<sup>(6)</sup>を適用して実験の解析を行った。

下部に境界層を持つものに対しての風速の分布は、図5-4に示すように上方に行くに従い指数関数的に大きくなる。そのため任意の高さ  $h$  に対する風速  $u$  は風速計の高さを  $h_0$ 、その位置での風速を  $u_1$  とすると式(5.7)のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{u}{u_1} &= \left( \frac{h}{h_0} \right)^{\frac{1}{7}} \\ u &= u_1 \left( \frac{h}{h_0} \right)^{\frac{1}{7}} \end{aligned} \right\} (5.7)$$

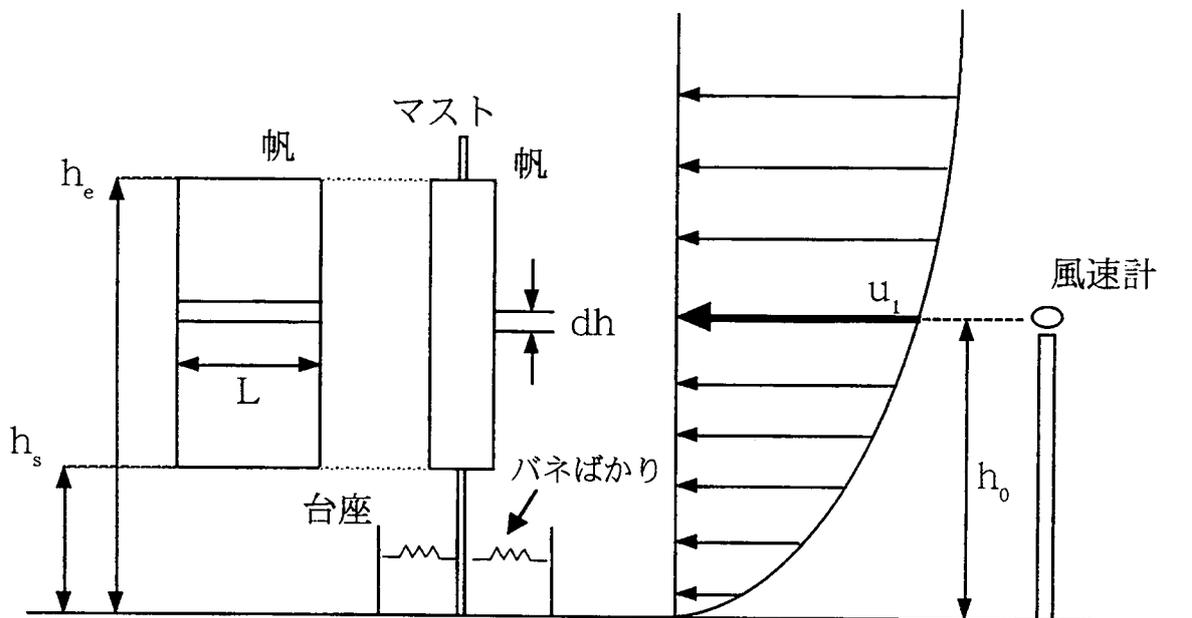


図5-4 帆の前面での  $C_L$ 、 $C_D$  測定実験

また、任意の高さでの力Pは揚力、抗力の係数をCとすると式(5.8)のようになる。

$$p = \frac{1}{2} \rho_a c (L \cdot dh) u^2 \quad (5.8)$$

この力Pが帆の全面にかかることになるため、帆にかかる総合的な力Fは式(5.9)のように計算される。

$$\begin{aligned} F &= \int_{h_s}^{h_e} p \cdot dh = \frac{1}{2} \rho_a c L \cdot u_1^2 \left( \frac{1}{h_0} \right)^{\frac{2}{7}} \int_{h_s}^{h_e} h^{\frac{2}{7}} dh \\ &= \frac{1}{2} \rho_a c L \cdot u_1^2 \left( \frac{1}{h_0} \right)^{\frac{2}{7}} \left[ \frac{h^{\frac{9}{7}}}{\frac{2}{7} + 1} \right]_{h_s}^{h_e} = \frac{1}{2} \rho_a c L \cdot u_1^2 \frac{7}{9} \left( \frac{1}{h_0} \right)^{\frac{2}{7}} \left( h_e^{\frac{9}{7}} - h_s^{\frac{9}{7}} \right) \\ &= \frac{1}{2} \rho_a c L \cdot u_1^2 \frac{7}{9} h_e \left\{ \left( \frac{h_e}{h_0} \right)^{\frac{2}{7}} - \left( \frac{h_s}{h_0} \right)^{\frac{2}{7}} \cdot \frac{h_s}{h_e} \right\} \quad (5.9) \end{aligned}$$

Fが帆の風圧中心にかかることにより実験の値が出ているため、風圧中心の高さをhgとすると、これは式(5.10)のように求まる。

$$\begin{aligned} h_g &= \frac{\int_{h_s}^{h_e} \left( \frac{h}{h_0} \right)^{\frac{2}{7}} \cdot h \cdot dh}{\int_{h_s}^{h_e} \left( \frac{h}{h_0} \right)^{\frac{2}{7}} dh} = \frac{\int_{h_s}^{h_e} h^{\frac{9}{7}} dh}{\int_{h_s}^{h_e} h^{\frac{2}{7}} dh} \\ &= \frac{\frac{1}{\left( \frac{16}{7} \right)} \left[ h^{\frac{16}{7}} \right]_{h_s}^{h_e}}{\frac{1}{\left( \frac{9}{7} \right)} \left[ h^{\frac{9}{7}} \right]_{h_s}^{h_e}} = \frac{\frac{7}{16} \left( h_e^{\frac{16}{7}} - h_s^{\frac{16}{7}} \right)}{\frac{7}{9} \left( h_e^{\frac{9}{7}} - h_s^{\frac{9}{7}} \right)} = \frac{9 \left( h_e^{\frac{16}{7}} - h_s^{\frac{16}{7}} \right)}{16 \left( h_e^{\frac{9}{7}} - h_s^{\frac{9}{7}} \right)} \quad (5.10) \end{aligned}$$

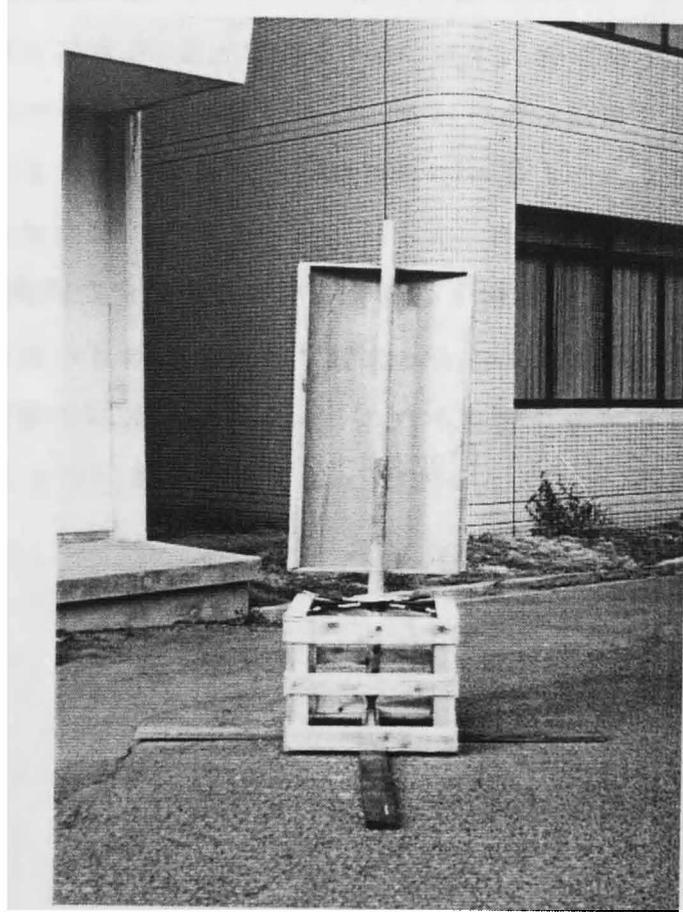


写真5-1 空力特性実験装置全景

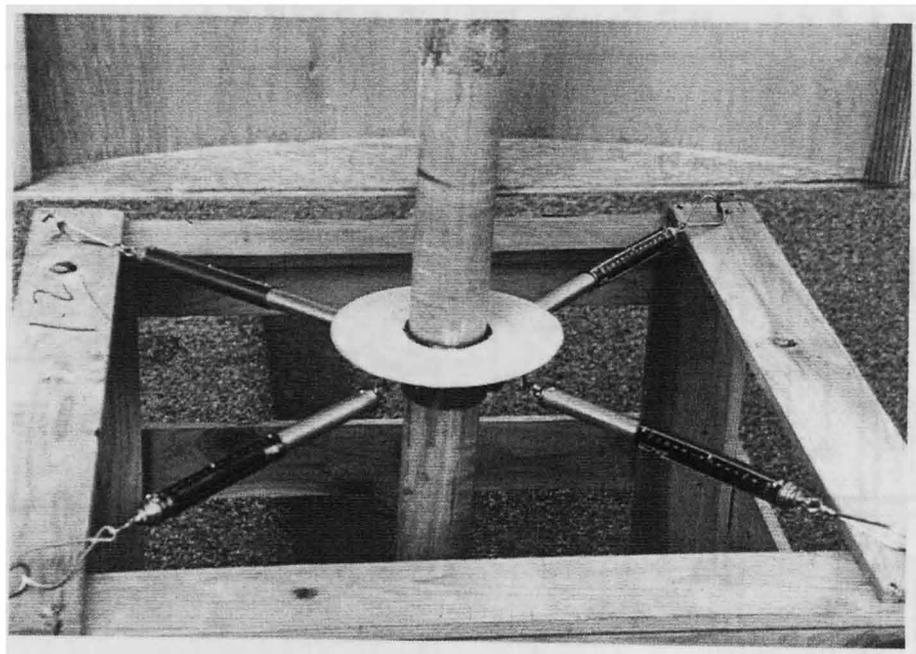


写真5-2 帆に発生した力の測定部分

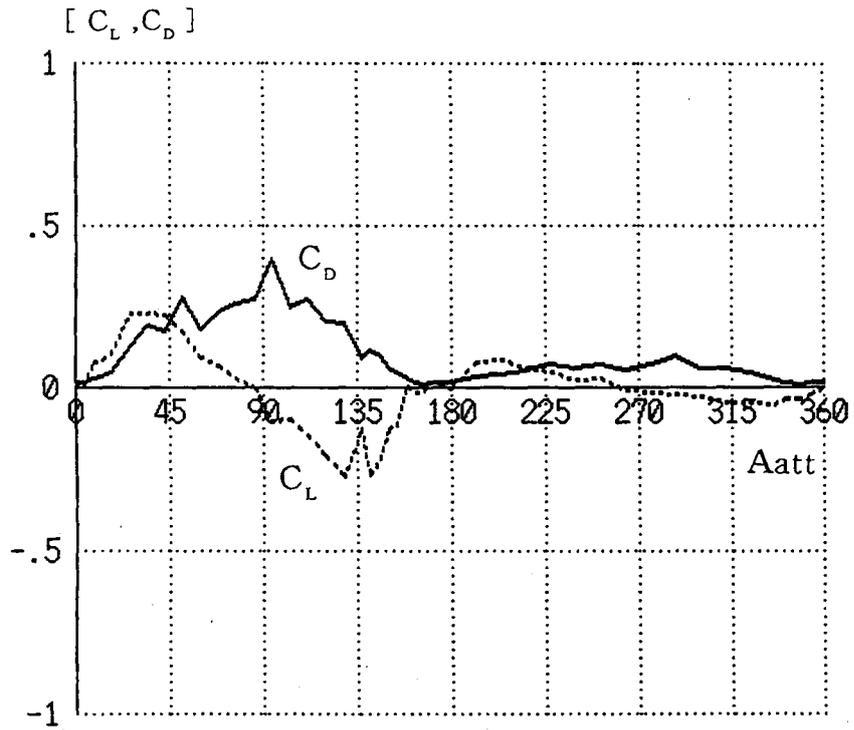


図 5-5 帆の前面の  $C_L$ 、 $C_D$  実験結果

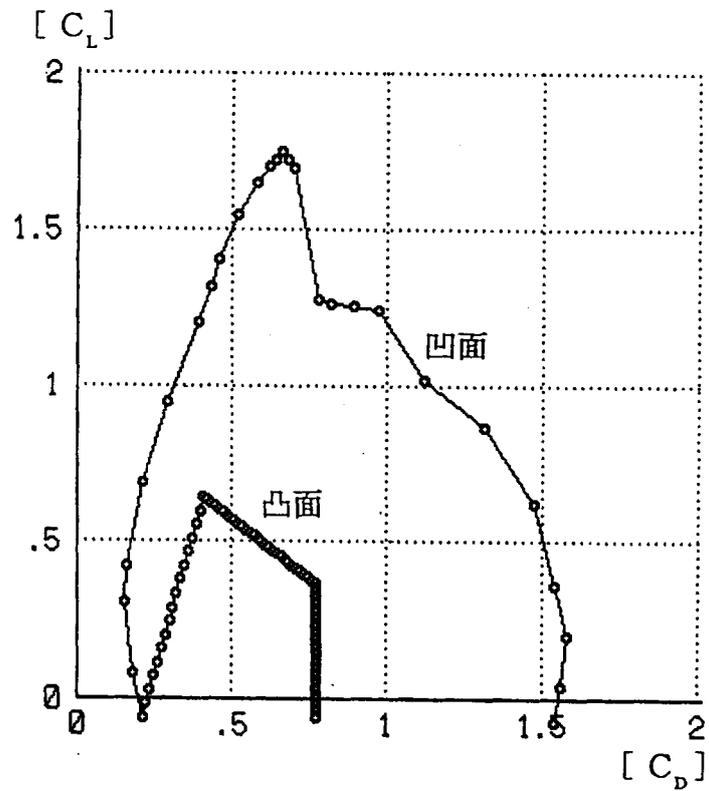


図 5-6 帆の前面・後面での  $C_L - C_D$  曲線

Fがhgの高さに加わるとして実験データを整理し、 $C_L$ と $C_D$ をグラフに表すと図5-5となった。風速が2~4 m/s程しかなく実験状態が悪かったため、値としては全体的に過小な値として出てきたが、グラフの比率より概略の傾向が判明した。この結果を踏まえて推定し、凸面からの空力特性 $C_L$ 、 $C_D$ を図5-3の中の点線で記載している特性とした。本シミュレーションで計算に使用した凸凹面での $C_L$ - $C_D$ 曲線を示すと図5-6となる。

このような空力特性のもと、次項に述べるようなシミュレータの開発を行った。しかし、本章での帆装船の操船シミュレータは、下記の3項目について今後開発の余地を残しており、また、取り扱いに注意を要する項目も含んでいるため、ここに明記しておく。

- ① 船体にかかる流体力については、低速時の流体力を考慮していない。
- ② 船体と帆との干渉、および2枚備えている帆の相互の流体力学的干渉については考慮していない。
- ③ 帆単体の旋回による過渡的圧力特性については考慮していない。

#### 5-2-4 操船シミュレータの概要

操船シミュレータについては、高性能な計算機によるCGI方式のものが主流であるが<sup>(7)~(11)</sup>、本シミュレータは帆装船の運動を総合的かつ多面的に評価できることを主眼としたため、2次元鳥瞰図表示のものとした。以下にシミュレータの機能等を述べる。

本シミュレータは、帆の設置位置及び帆面積は任意に設定可能で風力については0~25 m/sまで、潮流においては0~8 Ktまで変化させることができる。この範囲の条件であらゆる方向からの風、潮流下で帆を積極的に制御した場合の船体運動をビジュアル表示できるシステムとしている。また、前後のスラスタを備えており、多目的な操船ツールとして使用できるようにもなっている。このシミュレータの表示画面を図5-7に示す。パソコン用に開発したため、機関操作やスラスタ、帆の設定はキー入力で行っている。特徴としては、機関操作やスラスタ操作の状況及び相対風向、帆の制御状況やその時の帆の推力と方向等の全ての状態が操作部右下のアイコン上に表示されるようになっている。このシミュレータのフローチャートを図5-8に示す。

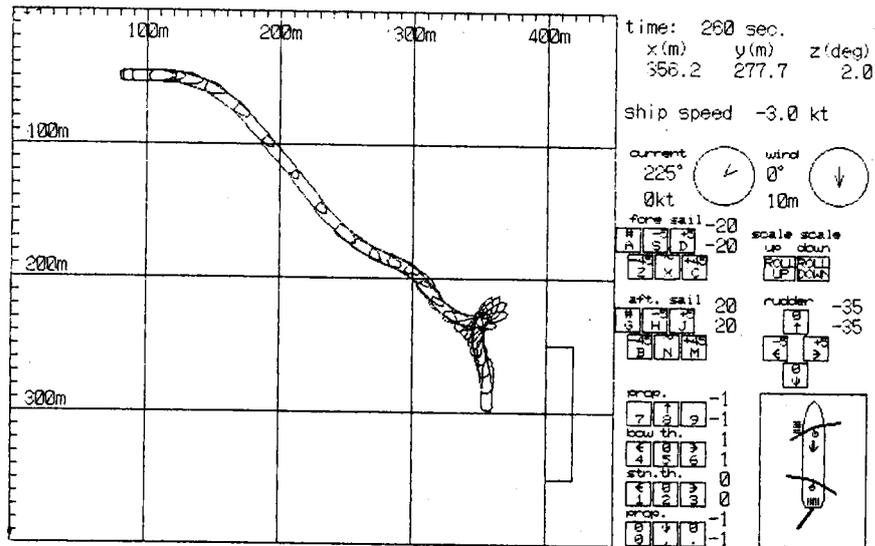


図 5-7 シミュレータの表示画面

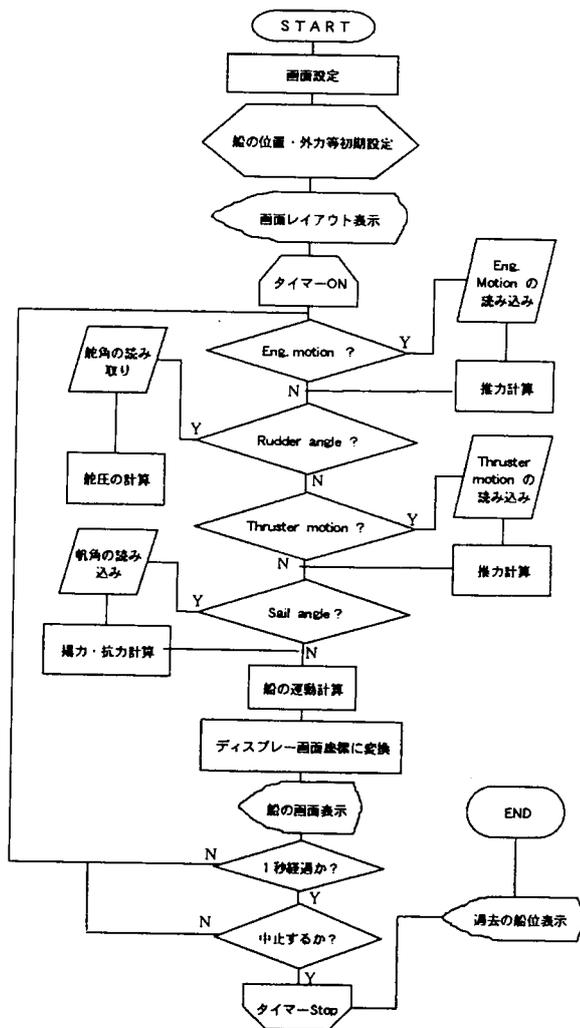


図 5-8 シミュレータの計算フローチャート

### 5-2-5 シミュレータモデルの妥当性の検証

シミュレータスタディを行う上でのモデル船の計算プログラムの妥当性を検証するため、モデル船の試運転時の試験結果との比較を行った。比較検討を行った項目は旋回性能、停止惰力、発動惰力、反転惰力、スラストの各試験である。ここでは旋回性能及び停止惰力試験についての結果を示す。

#### (a) 旋回性能試験との比較

Y丸の実際の旋回結果<sup>(12)</sup>は図5-9である。本シミュレータによる旋回結果である図5-10と比較すると、旋回径、縦距、横距のいずれについても実物の動きを精度よく模擬していることを示している。

#### (b) 停止惰力試験との比較

シミュレータで船が13.2 Ktの航海速力の状態から機関を停止し、5.2 Ktになるまでの状況を図5-11に示す。実船の試験結果<sup>(12)</sup>である図5-12と比較しても、5.2 Ktまでの時間は3 secの違い、その間の進出距離は20 mの違いとなった。操船面等の動特性を推測する上では問題の無い範囲の誤差と思われる。この他に、ここで示さなかった他の試験についても実用上問題のない範囲で一致しており、プログラムが実物と良く合っていることが確認された。

### 5-3 帆の積極的利用による操船面への効果

第2章での帆装船舶に関する実態調査の結果<sup>(13)</sup>では、出入港を含め、操船面に帆を利用するという行為はほとんど行われておらず、風の抵抗を受けないように縮帆しているという回答が大多数であった。この理由としては、乗組員は帆を推進の補助としてのみ捉えている感が強く、巧みな操船が要求される場面に対しては、確実であり、かつ、すばやく効果が出る機関や舵、スラストの利用の方が安心感を持てるからとのことであった。これは不確実な風を前提とした場合の帆利用による危険性を考えると当然のことである。しかし船の姿勢と風向に応じて自動的に操帆されて、積極的に帆を操船に利用する技術が確立されるならば、より小さな回転半径や停止距離が生み出す距離の余裕が狭い水域での操船の安全性を増加することも考えられる。このように操船は安全に行うという大前提の基で、風を利用した時の方がより安全で効率的に操船できる場面があると考えている。ここではこの方法を提示し、帆によって操船性を向上する制御系の可能性を示し

たい。この制御系を実現するためにも、帆装船の運動を理解するためのシミュレータの開発を行ったわけである。

(1) Rudder angle : 35 deg.

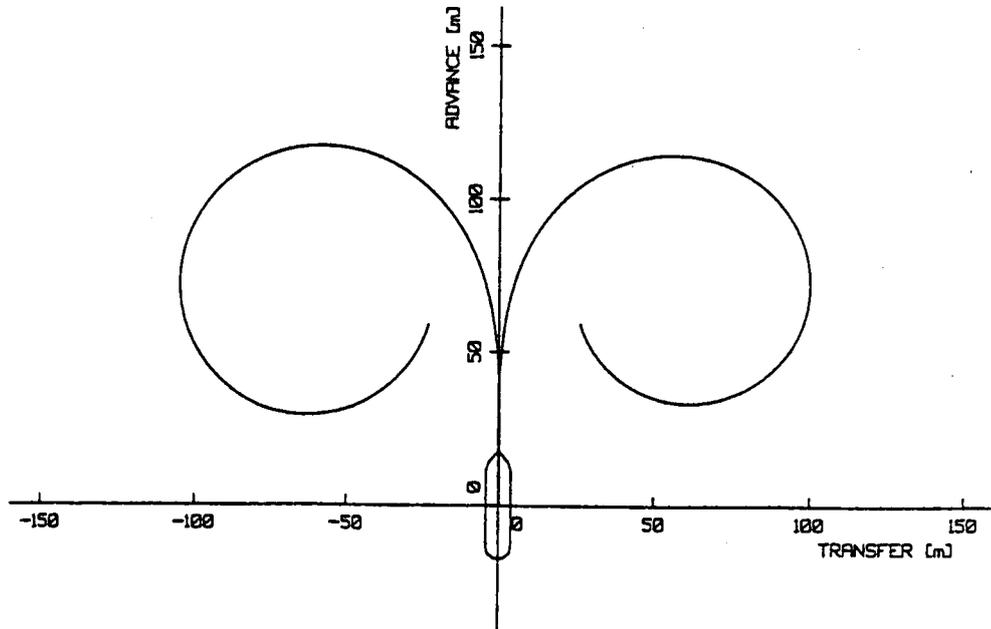


図 5 - 9 Y 丸の旋回試験結果<sup>(12)</sup>

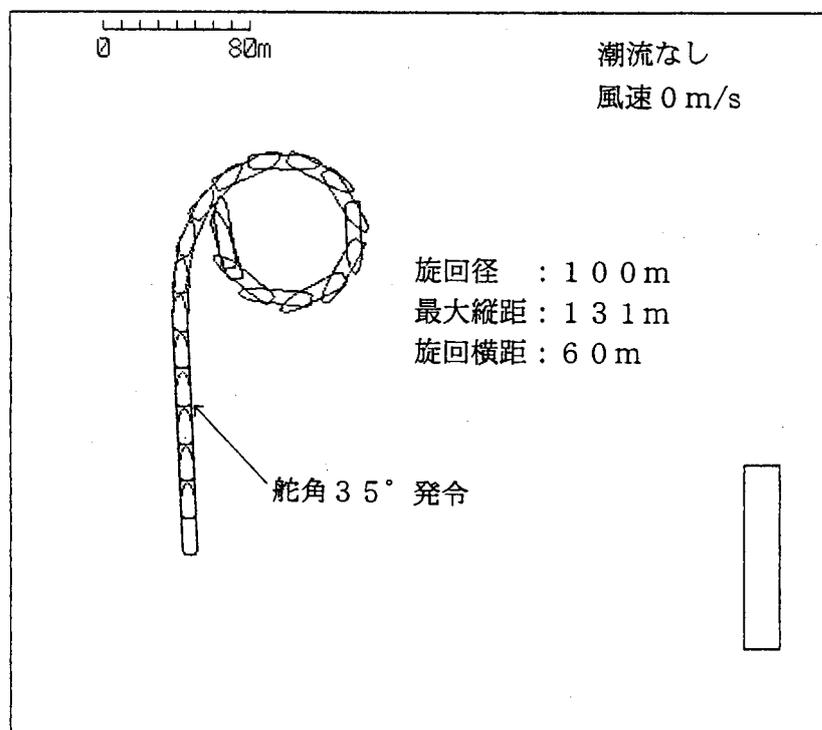


図 5 - 10 シミュレータの旋回試験結果

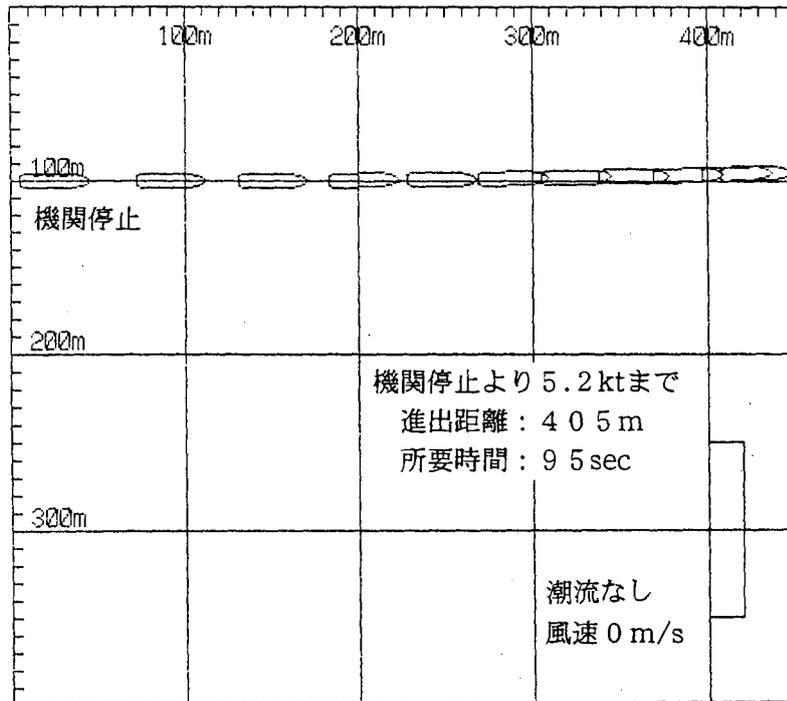


図 5-11 シミュレータの停止惰力試験結果

Engine mode : To Stop ( To zero blade angle )

loading condition : Full load

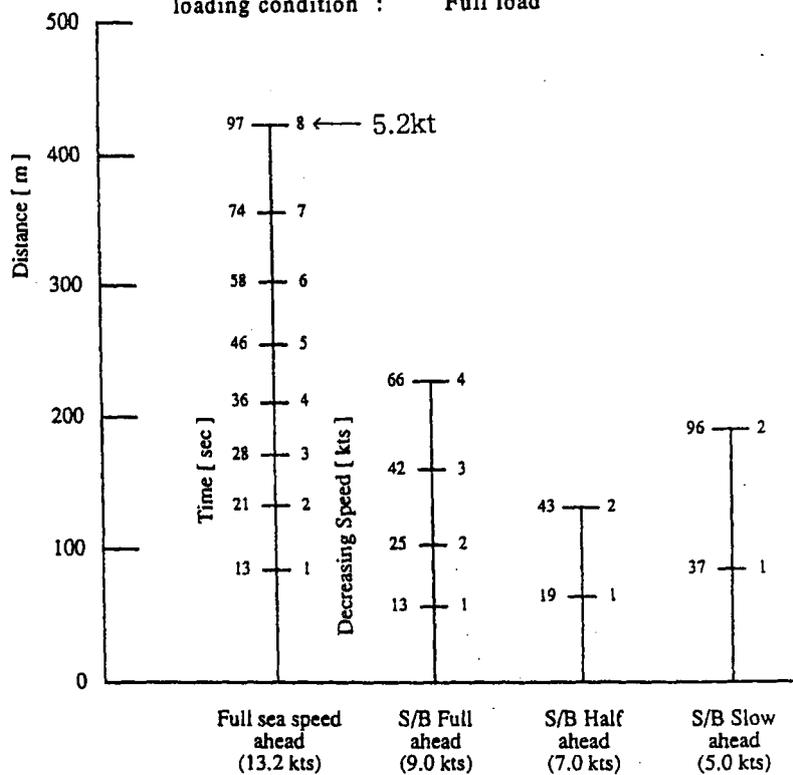


図 5-12 Y丸の停止惰力試験結果

以下に本シミュレータを使用した場合の操船上の船体運動で特徴的であったものを取り上げて帆の利用の有効性を述べる。

### 5-3-1 旋回径への影響

操船への帆の利用の効果としては、旋回径の短縮が挙げられる。実験は定常速力で航行中に右転舵 $10^{\circ}$ 、 $20^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ をそれぞれ発令した場合、帆を利用した時としなかった時との旋回径の違いを「向かい風」「横風（左正横）」「追い風」の3つの状態に分けて行った。

この実験で行った操帆法は、前後の帆を船を旋回させる方向に常に最大のモーメントを発生させるように帆の角度を制御した。また帆の角度の最大変化率は $5\text{deg/sec}$ としている。

全てのパターンについての結果のまとめを表5-2に示す（負符号は短縮を表す）。追い風で舵角 $35^{\circ}$ の状態を除き、他は縮小の影響が見られる。特に向かい風で舵角 $10^{\circ}$ の状態では $18\%$ （ $32\text{m}$ ）もの短縮効果が得られる。全体的な傾向としては、向かい風から横風の範囲で、旋回角速度が遅くなる小さな舵角で短縮効果が大きく表れている。この一例として、図5-13に横風 $10\text{m/s}$ の状態での舵角 $10^{\circ}$ と $35^{\circ}$ のシミュレーションの実験例を示す。図からわかるように、舵角 $10^{\circ}$ の場合も $35^{\circ}$ の場合も帆を利用した時の方が、利用しない時よりも舵効きの影響が早く現れ回頭が始まっている。これは船首部の帆の推力を旋回方向側へ利用した効果である。また、原針路から $90^{\circ}$ ほど回頭した状態から先は、船尾部の帆を舵の補助として利用できるため、より旋回径が短縮されたものと考えられる。原針路から $90^{\circ}$ 回頭したあとは、舵角 $35^{\circ}$ で旋回した場合は船の回頭の角速度に帆の角度の変化が追従できなくなり、帆の推力の効果が十分に得られない内に旋回を終了してしまう。そのために旋回径を短縮できなかったと考える。

旋回における帆の主な効果としては、港内操船で速力が落ち舵効きが悪くなった状態での岸壁アプローチ時の舵の補助や、スラスト使用の限界速力（通常 $3\text{Kt}$ ）を越えている場合のスラストに替わる回頭効果が得られることが挙げられる。

表5-2 帆の利用による旋回径縮小効果

風向 舵角	正面風	横風	追風
10°	-18%	-17%	-6%
20°	-14%	-9%	-9%
35°	-7%	-5%	0%

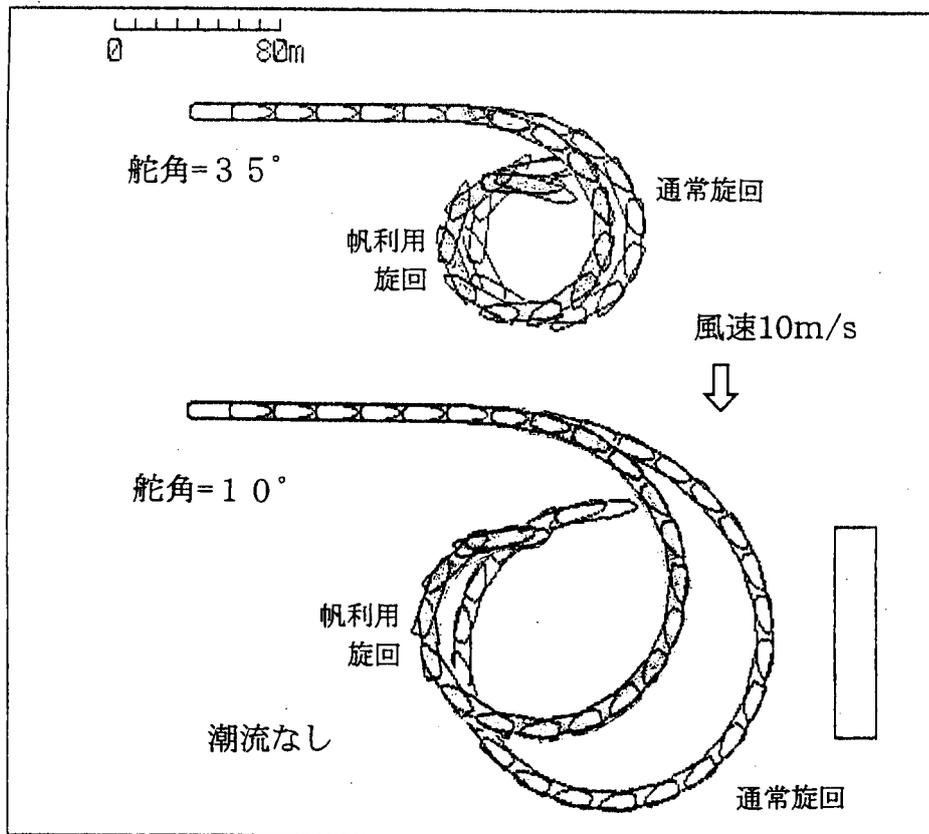


図5-13 帆の利用による旋回径短縮効果

### 5-3-2 最短停止距離への影響

船舶の操船者としては自船の停止距離の把握をしておくことは当然のことであり、特に最短停止距離については衝突防止等で最も重要となる事項である。この実験方法は、10 m/sの風の中を定常速力で航行中に機関の緊急後進を発令した時点から船が停止するまでを「向かい風」「横風（左正横）」「追い風」の状況下で帆を利用した場合としなかった場合で模擬した。操帆法としては、船の進行方

向に対して減速効果を生むように制御する方法と回頭効果を持たせる方法との2パターンを試みた。図5-14に横風においての結果を示す。また、全パターンについての結果を表5-3に示す（負符号は短縮を表す）。これより進出距離を最も短くするには、帆による推力を減速させる形に使うよりも回頭させる向きに使い、船にかかる旋回抵抗を利用することが有効となっていることがわかる。この方法はどの方向からの風に対しても効果があるが、風下側へ回頭させた場合、回頭方向へ船の長さの3倍程度（120m）の横進出距離が生じることを念頭に置いておく必要がある（風上側回頭では船の長さの2倍（80m）程度の横進出量であった）。この実験中、追い風の状態の場合、帆による減速効果法が「できない」となった理由については、帆の揚力の効果が真追手では減速成分としてほとんど表れないため、場合によっては進出距離が伸びてしまう結果となることもあったからである。この場合においては帆を縮帆または畳帆することが得策と考えられる。

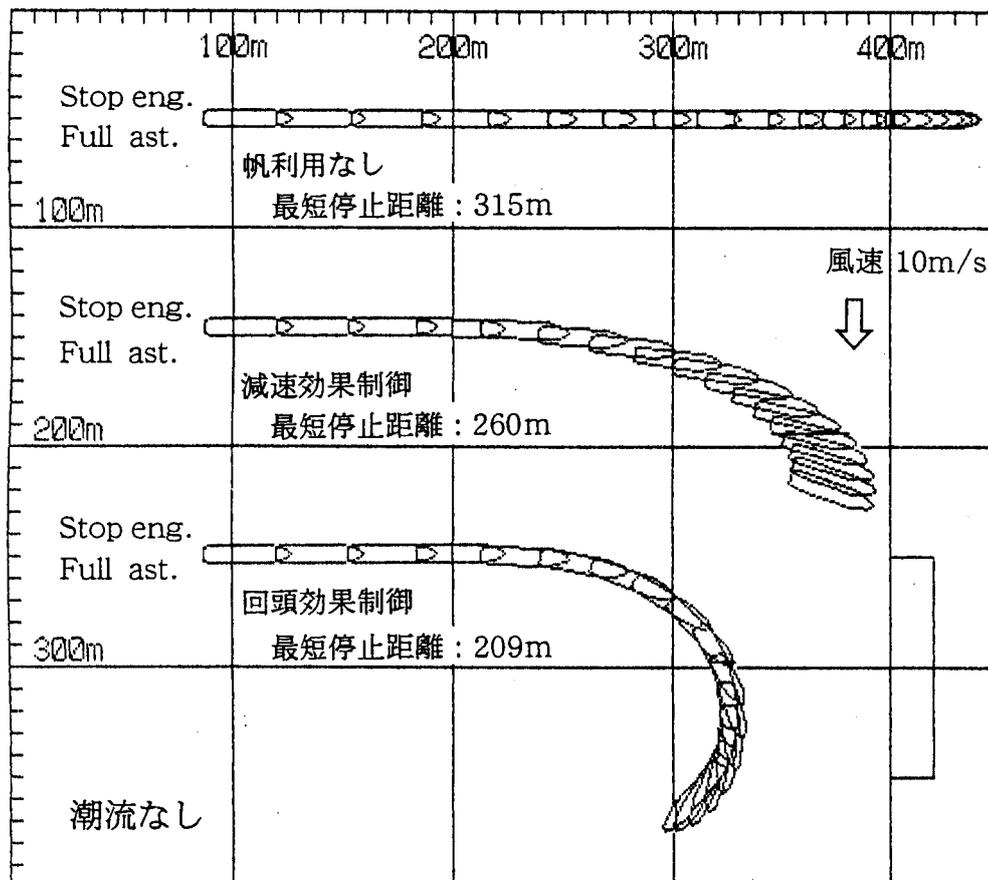


図5-14 帆の利用による最短停止距離短縮効果

表 5-3 帆利用での最短停止距離縮小効果

風向 帆制御	正面風	横 風	追 風
減速効果法	-24%	-17%	できない
回頭効果法	-30%	-34%	-5%

### 5-3-3 回頭への影響

帆の設置位置が船の重心より偏している場合、帆により推力が生じた時、船に回頭効果を起こさせることは明らかである。これを利用することにより回頭効果がどの程度得られるのか実験を行った。シミュレータでの風の状態を左舷正横10 m/sとし、船首が100°回頭するまでの状況を模擬した結果を図5-15に示す。この実験での操帆法は、船首部と船尾部に位置する帆の推力が同じ方向の回転モーメントを生じるように制御させた。

図中の船の表示は15 sec毎の表示をさせたものであるが、バウスタのみを使用した場合の回頭に要した時間は65 sec、帆だけを利用した場合（前後の帆を利用）は73 secであった。回頭角速度で表すと1.54 deg/secと1.37 deg/secとなる。スタスタ推力は1 tonであるので、帆の推力を計算すると889.6 kgとなり、真横で10 m/sの風が吹くとスタスタ推力の約0.9 ton推力を帆によって得られることになる。図5-16は、風向と風速をパラメータとし、左舷側へ船首から45°間隔で、風速は5 m/sおきに20 m/sまで変化させた場合の帆による回頭効果のシミュレーション結果である。図より8 m/s以上の風が吹くと、どの方向からの風に対しても装備されているスタスタ推力1 ton のほぼ60%の推力が得られる。また、15 m/s以上になると装備スタスタ以上の効果を上げることができる。無風の状態を除き通常吹いている、ある程度の風がある場合はスタスタとしての効果が出ることから帆の価値は大きい。この他、一般的にスタスタの効果は、船が3 Kt以上の速力を持つ場合、効果が無いとされているが、帆の利用における回頭効果は前項5-3-1で述べたように、スタスタと異なり航海速力においても有効に得られるため、この点でも帆の利用は有用であると考えられる。

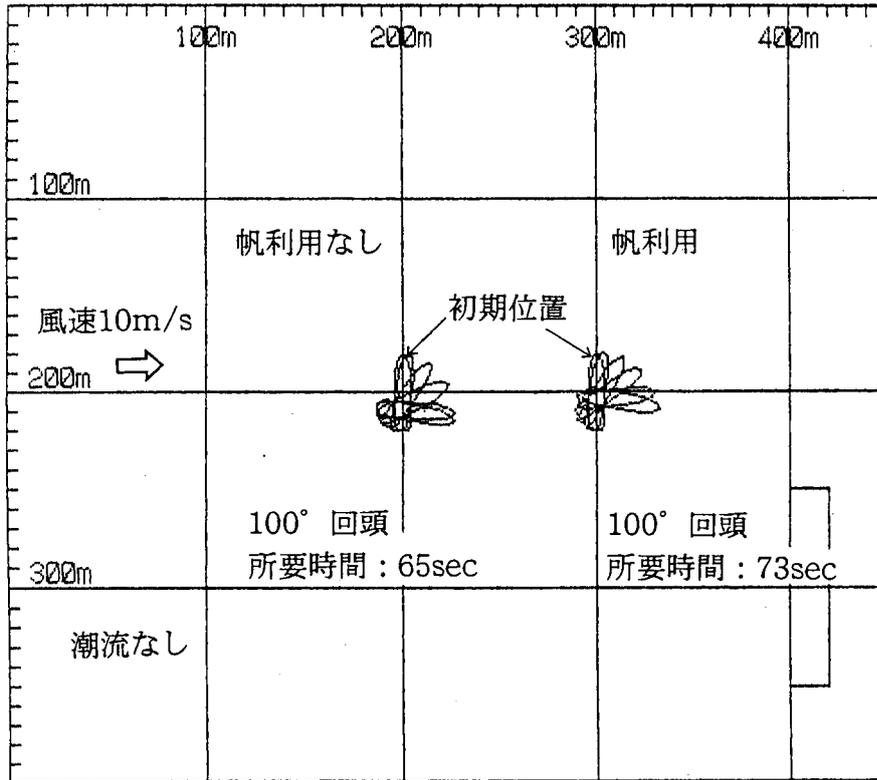


図 5 - 1 5 帆による回頭効果

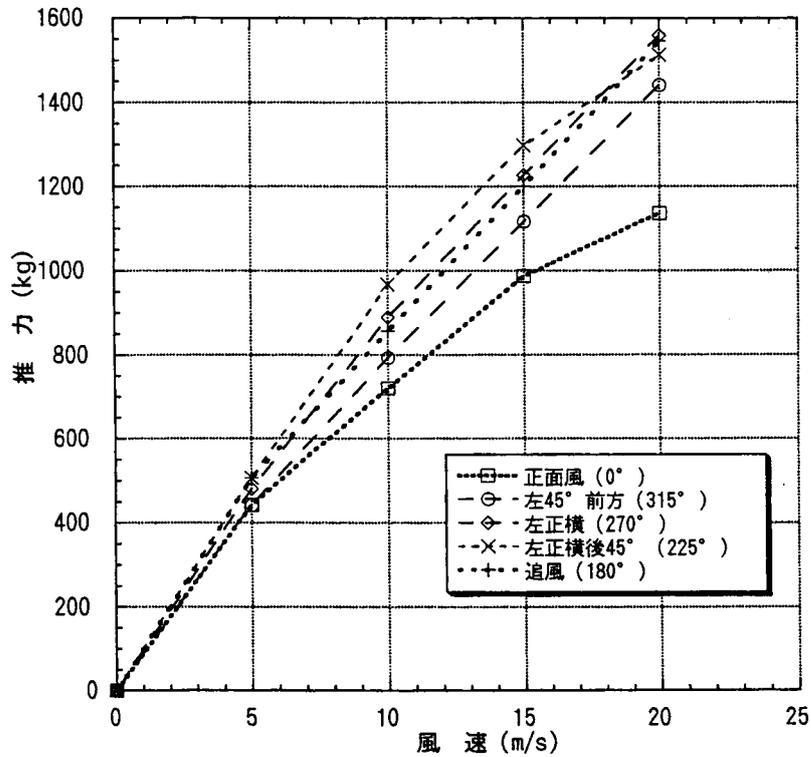


図 5 - 1 6 帆による回頭効果の推力

#### 5-3-4 ターニングベースン面積への影響

港内などの狭い水面で船をその場回頭させるために必要な水面のことをターニングベースンという。船の大きさ、風潮の影響、操船法等によってターニングベースンの広さは異なってくる。スラストを持つ船や2軸船などの回頭しやすい性能の船を除くと、一般的な1軸右回り船では、舵と機関だけの利用では船の長さの2.3倍（円形水域の直径）のターニングベースンが必要<sup>(14)</sup>といわれている。本シミュレータで船の左正横から10m/sの風を受けている条件で右その場回頭を行ってみると図5-17となる。操帆法等は機関を前進微速、舵は右舵最大の状態として、船首部の帆推力を右回頭方向最大となるように、船尾部の帆の推力を船首とは逆方向に働くようにし、反方位10°手前で舵中央、帆は縮帆となるように制御した。

帆を使用しなかった場合のターニングベースンは91m（2.3L：Lは船の長さ）、帆を併用した時は68m（1.7L）と23m（0.6L）の短縮となり帆の有効性がわかる。

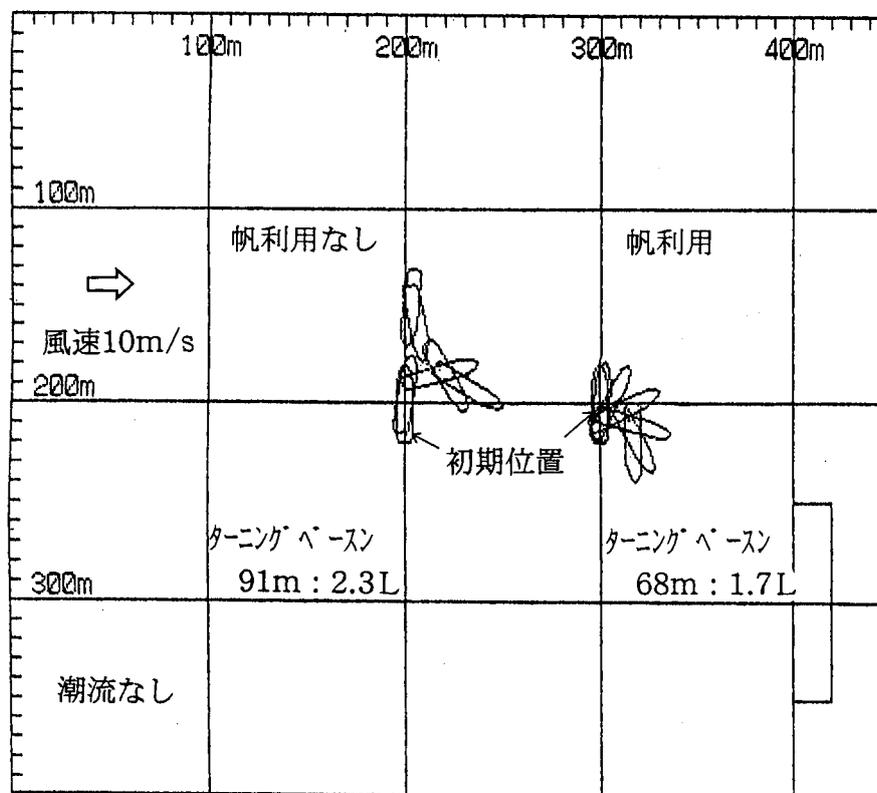


図5-17 帆によるターニングベースン縮小効果

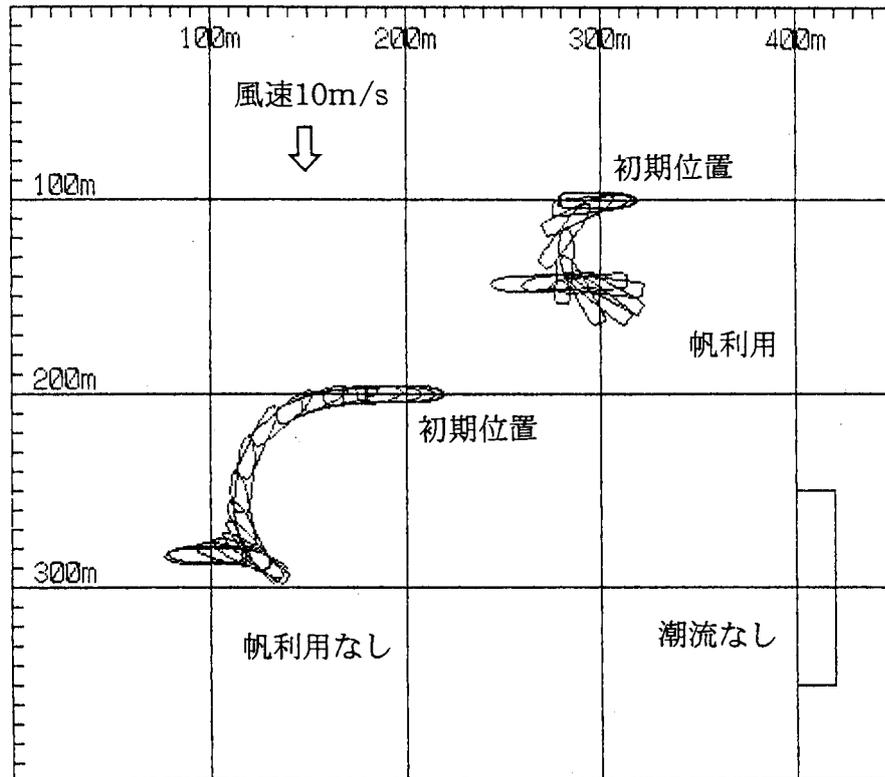


図 5 - 1 8 反方位左回頭への帆利用の影響

この他に必要水域の面積を大きく取ってしまう、後進による左反方位回頭の場合を上記の条件で模擬すると図 5 - 1 8 となる。実験は機関を後進微速から始め、操機操帆は左その場回頭となる制御を行った。

図からわかるように、帆を利用すると後進推力による後ろ進出距離は 13 m となり、帆を利用しない場合の 70 m に対し約 1 / 5、縦進出距離は約 3 / 5 となり、ターニングベースンとして考えると縮小率は 33% の減少効果となる。狭い港での後進離岸の際には有効な方法といえる。

#### 5 - 3 - 5 定位置保持の可能性

海上作業船や調査船等においては、洋上で船を定位置に保つ必要を迫られることが多い。これを実現するためには、機関操作や舵、スラストの力を組み合わせて行うのが通例である。しかし船体位置を海底との間の超音波の往復時間で測定している場合には、スラストやプロペラが発するノイズや気泡のため支障を来すことが多い。このような状況を解消するため、スラストやプロペラを使わずに帆

のみによる定位置保持の可能性をシミュレーションにおいて調べた。図5-19は潮流が無い状態で10 m/sの風を左舷正横から受けた場合、船首をほぼ保持した状態で移動できるシミュレーションを行い表示させたものである。点線で示した包絡線の範囲（風下側に約138°の広がりを持つ）を前後の帆を適宜操作することにより、最大図に示した速度で移動することが可能である。洋上において静止するためには、海潮流が船の進む方向から同一速度で来た場合、船は対地座標に静止することになる。従って本シミュレーションで、船が定位置を保持できる条件は風下側に約138°の広がりを持つ範囲内の方向からの海潮流が船の速力に釣り合う速力で来た場合が条件となる。よって海潮流が138°を超えた方向から来る場合や船の速力よりも速いとき及び遅いときには定位置の保持はできない。上記の条件に合う潮流を入れた場合のシミュレーションを図5-20に示す。

設定条件は200°の方向から1.5 Ktの潮流がある中を、左舷正横より10 m/sの風を受けた場合で5分間の実験を行った。当然ながら機関、舵、スラスト等の操作は一切行っていない。図中右側に示した船の軌跡は、帆を畳帆した状態で何も操作しない時である。風の圧流よりも潮流の影響が強いため、潮流に流される形となる。一方、左側の軌跡が2本の帆を使い潮流に対抗する方向に推力を持たせた場合である。初期の状態では潮流に流されているのは、帆が設定角度になり推力の発生が得られるまでの間、潮流により圧流されたためである。帆で推力が出始めると、船が速力を持ち潮流と釣り合う状態までどちらかの力が強い方向に微少量移動するが、釣り合った時点で停留する。この例で示したように理論上は条件の範囲内で定位置保持は可能である。しかし、現実の問題としては、洋上において、潮流の方向と強さがはっきりわからないことや波浪等の影響が入るため、船を完全に洋上に停止させることは難しいと考えられる。この問題については、濱田等が行った帆装船の定位置保持についての研究<sup>(15)</sup>で述べていたように、ある程度の漂流の誤差を許容して取り扱うのが賢明と思える。

上述の如く潮流が無い場合については、船を定位置に保持することは出来ないが、風下側への圧流は仕方ないとしても、帆によって船首方位を保持することは可能である。そのシミュレーション例として、図5-21に潮流が無い状態で10 m/sの風を船首（0°）から受ける場合に、帆を以下に示す3つのパターンで使用した4分間の表示結果を示す。

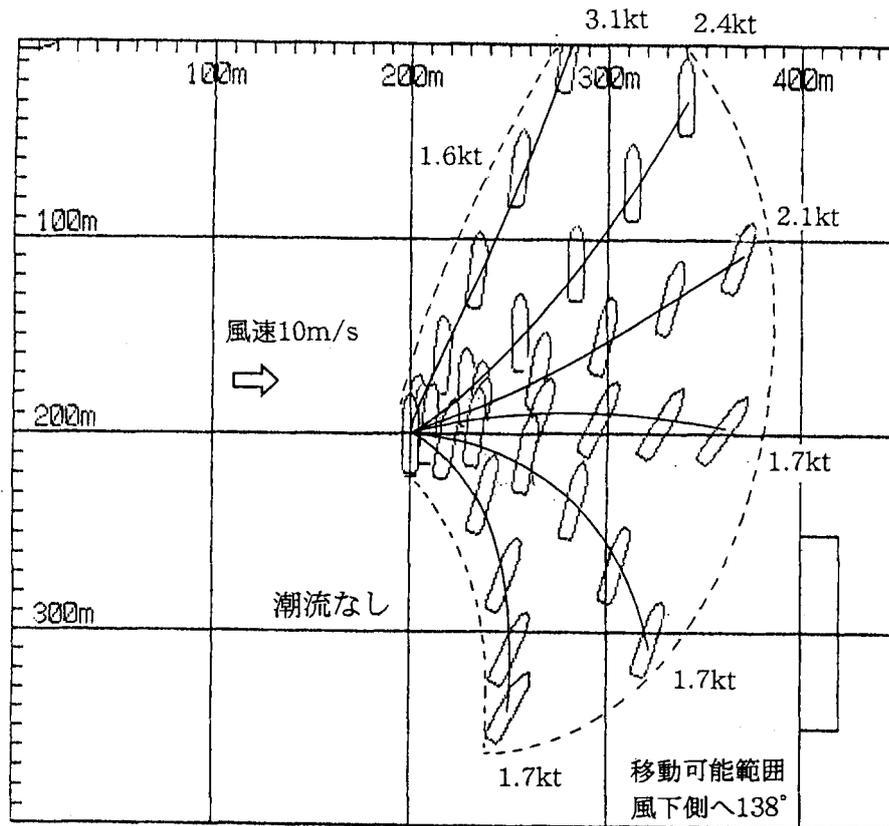


図5-19 帆の利用による船の移動性能

- (a) 2本の帆を風に対して直角にした場合
- (b) 船首側の帆を畳帆し船尾側の帆を風に対し直角にした場合
- (c) 船首側の帆を畳帆し船尾側の帆を適宜操作した場合

結果として(a)は図から分かるように船首が風に立った状態で船首方位を維持し風下に圧流される。風下への圧流速度は1.8Ktである。この時の船首方位の振れは、波浪などの外乱を入れていないため0°を保ったままである。(b)は船尾側の帆だけのため漂流速度は1.1Ktと少し落ちる程度で、その他は(a)と変わっていない。(c)は船尾側の帆を風に対して平行として、出来る限り抵抗にならないようにした状態で船首方位の振れが起きた場合にそれを修正するように帆を制御したものである。風下への圧流速度は0.4Kt、船首方位の振れは最大で4°であった。この結果からいえることは、作業等で船首方位を真に正しく保つ必要がある場合は(a)か(b)となるが、風下への圧流速度が遅い方が有利と考えると(b)の操帆が有効である。また、多少の船首方位の振れが許容される作業であれば、風下への圧流速度の面から絶対的に(c)の操帆が有利といえ

る。一般的に海上で作業や調査を行う場合、1 Kt以下であれば殆ど支障は来さないといわれているため、この操帆が船首保持効果としては最適な方法と考えられる。

#### 5-4 結語

帆装船は効率の良い帆装装置の開発とそれを設置した場合の馬力利得の検証が主に行われ、その高経済性は高く評価されている。しかし帆の装備による船の操縦性等への影響面については建造段階において、帆の位置による保針性の検討や傾斜に対する安定性の問題など、言わば、船のバランスを検討した静特性のシミュレーションが行われた程度である。このため、動特性といえる船体運動の面についてはほとんど行われていない。特に操船面においての不備な点へのアプローチは本章の概説でも述べたように現在に至っても行われておらず、操船者の負担となっている。本報告は帆装船の動特性部分でも、帆を積極的に利用した場合の操船性のシミュレーションを行ったが、シミュレータの開発も含めその結果は総合的につぎのようなものとなった。

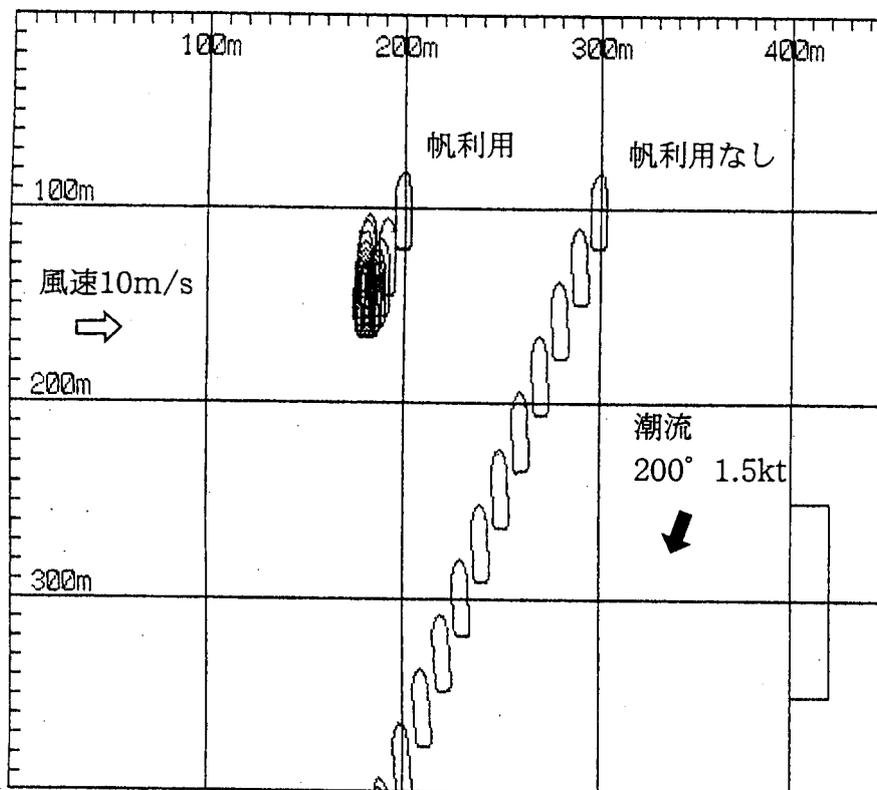


図 5-20 帆を利用した定位置保持

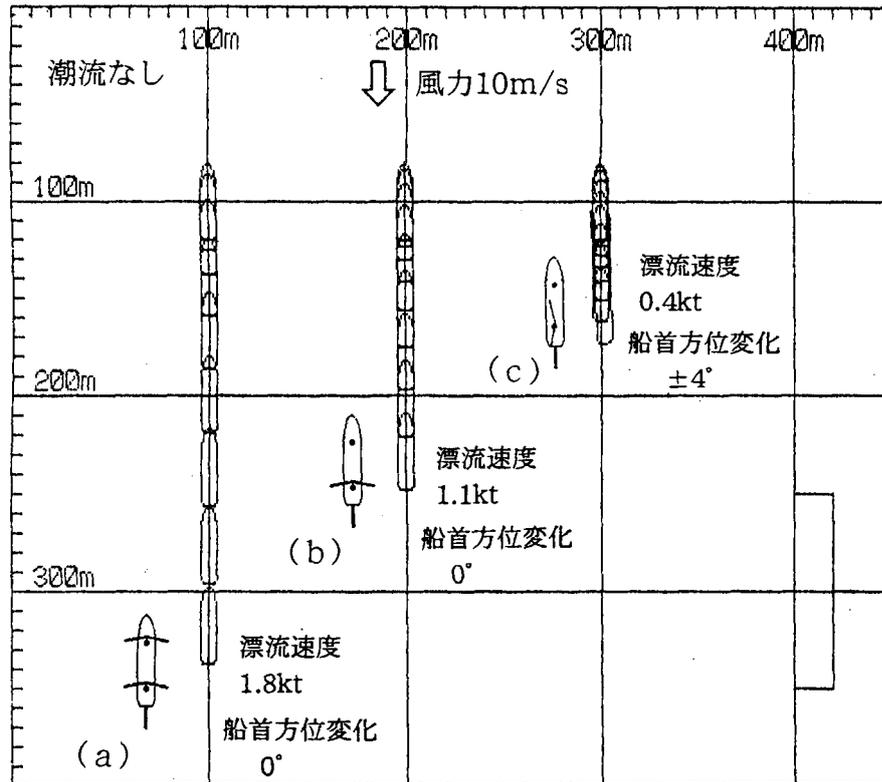


図 5-2 1 帆を利用した船首方位保持

シミュレータに関して

- (1) 帆装船の船体運動をリアルタイムに把握でき、また検討できるツールとして使えるものとなった。
- (2) 帆の空力特性が凸面からの特性までを含めた360°の風向に対する特性をデータとして入れられるため、あらゆる操帆に対応できる形まで拡張されたものとなった。
- (3) パソコン上での開発のため出来る限り簡単なモデルとして開発したが、ある程度実船の動きに忠実に運動を表現できるものとなった。

シミュレータの今後の課題として以下のことを検討する必要がある。

- (1) 船体にかかる流体力を通常航行時にかかる力で一本化しているため、低速時の模擬状況に違いが生じる<sup>(16)~(19)</sup>。これについては、通常航行時と低速時の流体力が切り替わる方式にする必要がある。

帆の積極的利用に関して

- ( 1 ) 帆の利用は旋回径短縮の効果を生む。
- ( 2 ) 帆の利用は最短停止距離の短縮効果を生み緊急停止の際の安全性向上に寄与する。
- ( 3 ) 帆の利用はターニングベースンの縮小効果を生むため狭い港内での操船性が向上する。
- ( 4 ) 帆の利用により通常吹きうる風の範囲 ( 3 ~ 1 0 m/s ) でも、スラストと同程度の回頭効果が得られる。
- ( 5 ) 帆の利用により条件付きではあるが定位置保持が可能となる。
- ( 6 ) 帆の利用により船首保持が可能となる。

本章では、帆装船舶のシミュレータの開発とそれを使った操船性向上の可能性の概要を述べることに主たる目的であった。今後はここで取り扱った向上項目の更なる詳細なシミュレータスタディを行う必要がある。

## 第5章の参考文献

- (1) 久保雅義・高岡俊輔：新型帆装装置の開発、日本航海学会論文集、第94号、平成8年3月、pp.1~8
- (2) 久保雅義・高岡俊輔：新型帆装装置の開発Ⅱ、日本航海学会論文集、第96号、平成9年3月、pp.203~211
- (3) 濱田昇：近代帆装商船の性能実証研究、大阪大学学位論文、昭和60年12月
- (4) 村山雄二郎、北村文俊、他：海上輸送における風力エネルギー利用の研究、船舶技術研究所報告 第23巻 第6号、昭和61年11月、pp.31~55
- (5) 小川陽弘、小山健夫、貴島勝郎：操縦運動の数学モデルについて、日本造船学会誌 第575号、昭和52年5月
- (6) 塩谷正雄：強風の性質、開発社、1981年、4月
- (7) 小瀬他：出入港操船シミュレータ、日本航海学会論文集、第79号、昭和63年5月
- (8) 金湖他：船舶航行システムの安全評価用シミュレータの開発、日本航海学会論文集、第85号、平成3年5月、pp.17~24
- (9) 中村他：操船シミュレータの開発と安全評価研究（訓練）への適用に関する考察、平成3年10月、pp.261~269
- (10) 田中他：船舶航行システムの安全評価用シミュレーター。、日本航海学会論文集、第88号、平成4年10月、pp.129~136
- (11) 操船シミュレータを用いた総合操船システムの開発手法、日本航海学会論文集、第91号、平成6年5月、pp.61~69
- (12) 三井造船：弓削丸操船資料、弓削丸完成図書S.N0.1408、平成6年3月
- (13) 久保雅義、高岡俊輔：帆装商船の運航実態とその問題点について、日本航海学会誌、第120号、平成6年6月、pp.69~77
- (14) 本田啓之輔著：基本運用術 海文堂、昭和59年9月
- (15) 濱田昇：帆による定位置保持の可能性、日本航海学会論文集、昭和61年9月、pp.105~116

- ( 1 6 ) 池田良穂他：静止から運動を開始する肥大物体に働く粘性流体力の性質について、関西造船協会誌第210号、pp55～60 1988
- ( 1 7 ) 定兼廣行他：静止から横移動を開始する船体に働く過渡的流体力（模型実験による検討）、日本航海学会論文集第90号、平成6年3月、pp.273～279 1993
- ( 1 8 ) 定兼廣行他：静止から横移動を開始する船体の横力係数に関する検討、日本航海学会論文集第95号、平成8年9月、pp.193～200
- ( 1 9 ) 小久保方準他：主要目が大幅に異なる船体の付加質量について 一定加速度試験（CAT）による付加質量の計測、関西造船協会誌第201号、1986、pp.1～6

## 第6章 帆の自動制御による運動特性の検討

### 6-1 概説

従来の帆装船の制御法は、主たる目的を燃料節約で考えており、帆の制御は前進推力を最大限に得る制御のみである。従って航行中に風の推力を前進方向に利用できる場合以外には、縮帆するシステム<sup>(1)</sup>となっているため、コンピューター制御による近代的な帆装システムとしては利用の用途が余りにも乏しい。これはオイルショック時の帆装船の建造思想<sup>(2)</sup>から考えると最もな話であるが、今後、時代の要求している「省エネルギー」、「環境保護」などを考慮に入れると、クリーンエネルギーである風の利用を船舶に取り入れる場合、帆を最大限に有効利用できるシステムが必要である。そこで、第5章では、帆装船の操船シミュレータを開発し、帆装船の大きな問題点の一つである操船性の低下を解消するため、帆を操船に積極的に使用した場合のシミュレーションを検討した。この結果、幾つかの操船性向上の項目を得ることができ、帆の操船への利用は十分に期待できることが判った。

そこで本章では、前章のシミュレーションで確認できた操船性向上の項目<sup>(3)</sup>の自動制御化を行った。そして、この自動制御法を利用した場合の運動性能の検討とその評価を純帆走時と機帆走時に分けて考察した。

### 6-2 使用した運動方程式

#### 6-2-1 風圧影響を考慮した運動方程式

風の中で機帆走する船の運動方程式は、第5章で既に示したが、右辺の外力項の部分を加わる各力に分けて表すと式(6.1)で示される<sup>(4)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} (m+m_X)\dot{u} - (m+m_Y)vr &= X_H + X_R + X_P + X_{AH} + X_{AS} \\ (m+m_Y)\dot{v} + (m+m_X)ur &= Y_H + Y_R + Y_P + Y_{AH} + Y_{AS} \\ (I_{ZZ} + J_{ZZ})\dot{r} &= N_H + N_R + N_P + N_{AH} + N_{AS} \end{aligned} \right\} (6.1)$$

前章のシミュレーションでは、帆が操船に有効に利用できるか否かの検証を目的としたため、外力項を簡略化して、水線面上の船体・構造物に働く力の $X_{AH}$ 、 $Y_{AH}$ 、 $N_{AH}$ を無視していた。本章では操船に有効な帆の制御法の検討を行うため、シミュレーションのより詳細化を考え、水線面上の船体・構造物に働く力をつぎのように組み込んだ。

水線面上の船体・構造物に働く力は式(6.2)で表される<sup>(5)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} X_{AH} &= \frac{\rho_a}{2} A_H U_a^2 X'_{AH}(\varphi_a) \\ Y_{AH} &= \frac{\rho_a}{2} A_H U_a^2 Y'_{AH}(\varphi_a) \\ N_{AH} &= \frac{\rho_a}{2} A_H L_H U_a^2 N'_{AH}(\varphi_a) \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

ここで、 $L_H$ は水面下の船体運動の中心点と風力の作用点との距離であり、図6-1より、式(6.3)となる。

$$\begin{aligned} L_H &= l_G - a \\ &= \frac{L_{PP}}{2} - a \end{aligned} \quad (6.3)$$

- $a$  : 船首から風圧中心までの距離       $l_G$  : 船首から重心までの距離  
 $L_{PP}$  : 船の垂線間長       $N_a$  : 風圧モーメント

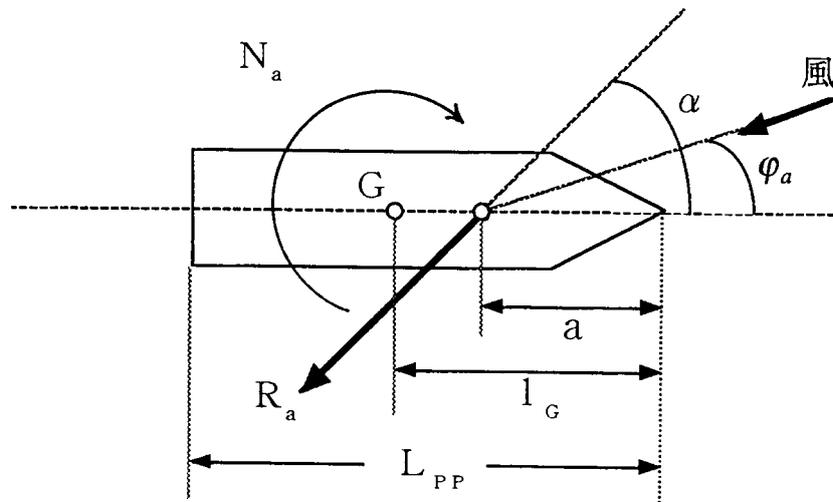


図6-1 船に働く風圧合力とその作用方向

また、 $X'_{AH}$ 、 $Y'_{AH}$ 、 $N'_{AH}$ は式(6.4)による。

$$\left. \begin{aligned} X'_{AH} &= C_a \cos \alpha \left( \frac{A_X}{A_H} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \right) \\ Y'_{AH} &= C_a \sin \alpha \left( \frac{A_X}{A_H} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \right) \\ N'_{AH} &= Y'_{AH} \end{aligned} \right\} (6.4)$$

上式中の $C_a$ は風圧係数、 $\alpha$ は風圧力の作用方向であり、式(6.5)による<sup>(6)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} C_a &= 1.142 - 0.142 \cos 2\varphi_a - 0.367 \cos 4\varphi_a - 0.133 \cos 6\varphi_a \\ \alpha &= \left\{ 1 - 0.15 \left( 1 - \frac{\varphi_a}{90} \right) - 0.85 \left( 1 - \frac{\varphi_a}{90} \right)^3 \right\} \times 90 \end{aligned} \right\} (6.5)$$

具体的には式(6.2)の風圧力は、図6-1に示すように、船首から $a$ の距離に作用中心を持ち、船首尾線と $\alpha$ の角度方向に働くことになる。

船首からの距離 $a$ は式(6.6)による。

$$a = (0.291 + 0.0023\varphi_a)L_{pp} \quad (6.6)$$

### 6-3 計算に使用したモデル船と帆について

シミュレーションに使用したモデル船は前章と同じ練習船Y丸である。帆についても同じ物を使用<sup>(7)</sup>しているが、今回は帆の効果を顕著にするために、帆の面積を前回の $70\text{ m}^2$ から $100\text{ m}^2$ へと大きくした。帆の寸法は、縦 $12.5\text{ m}$ 、横 $8\text{ m}$ であり、設置位置は船体中央より前後 $13\text{ m}$ の位置に1本ずつ設置している。なお、帆単体での渦の影響及び前後2枚の帆による相互の流体力学的な干渉効果は、ヨット等の帆の間隔が狭いものについては幾つか検討<sup>(8)(9)</sup>されているが、本シミュレーションでは微少なものと仮定し無視した。Y丸における実際の運動とシミュレーションとの比較検討はY丸の過去の類似の模型実験結果<sup>(10)</sup>と比較して確認を行った。

#### 6-4 帆の自動制御の方法

シミュレーションに組み込んだ帆の制御系については図6-2に示す。図中の「帆制御モード」の選択は表6-1に記した。各モードは、航走時、操船時のいずれの場合にも使用できるようになっており、「直進モード」「急停止モード」「斜行モード」「回頭モード」「停留モード」の5モードに分かれている。また、各モードにおける船に対する帆の推力の発生状況は、図6-3に示すように制御させている。

この5モード中、「直進モード」「回頭モード」「急停止モード」での風に対する帆角度の設定は、あらかじめ相対風向に対して希望する方向（船首、船尾、正横方向）の帆推力が最大になる角度を帆特性<sup>(11)</sup>から求めたものを用意している。図6-4から図6-7にそれらを示す。

斜行モードについては、希望方向に帆による推力を発生させる制御としているが、斜行移動中、船の姿勢が崩れた場合には、それを修正する制御も取り入れている。これは、図6-3の斜行モードの(b)に示すように、2本の帆の内、前後いずれか立て直しの推力が出せる帆が姿勢の立て直しを行い、もう片方の帆は希望方向への推力を出すという制御法となっている。また、付加した姿勢保持の制御は設定船首方位から±5°は不感帯を設けているため、姿勢の崩れに対して帆が頻繁に動くことが少なくなるように対処している。

船の帆による推力を利用した針路の保持については、手操作キー入力による手動航行とオートパイロットによる自動航行の2つを取り入れている。ここでのオートパイロットについては、式(6.6)の制御式に基づくPDI制御<sup>(12)</sup>を組み込んでいる。

$$\mu = -(N\theta + R\frac{d\theta}{dt} + I\int\theta dt) \quad (6.6)$$

$\mu$  : 命令舵角       $\theta$  : 偏角      N : 比例ゲイン  
R : 微分ゲイン      I : 積分ゲイン

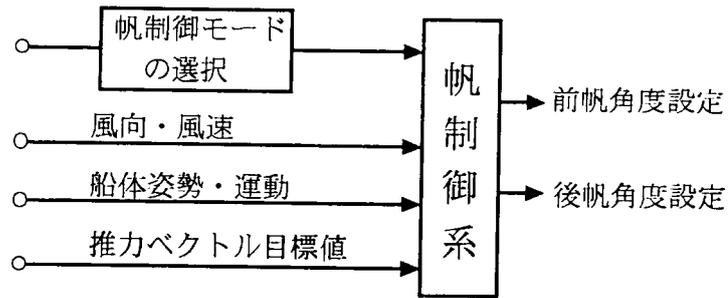


図 6 - 2 帆の制御系

表 6 - 1 帆制御モードの概要

操作名	制御方式	概要
直進モード	直進制御	船首方向推力最大
急停止モード	急停止制御	船尾方向推力最大
回頭モード	回頭制御	旋回モーメント最大
停留モード	停留制御	前後進推力キャンセル
斜行モード	斜行制御	希望方向推力発生

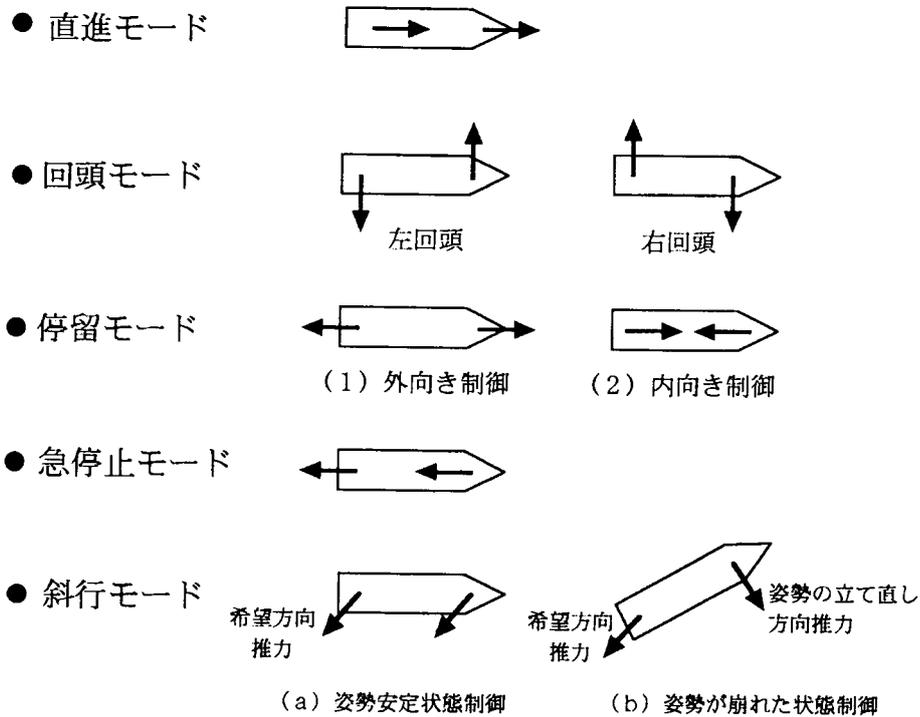


図 6 - 3 各モードにおける帆の制御法

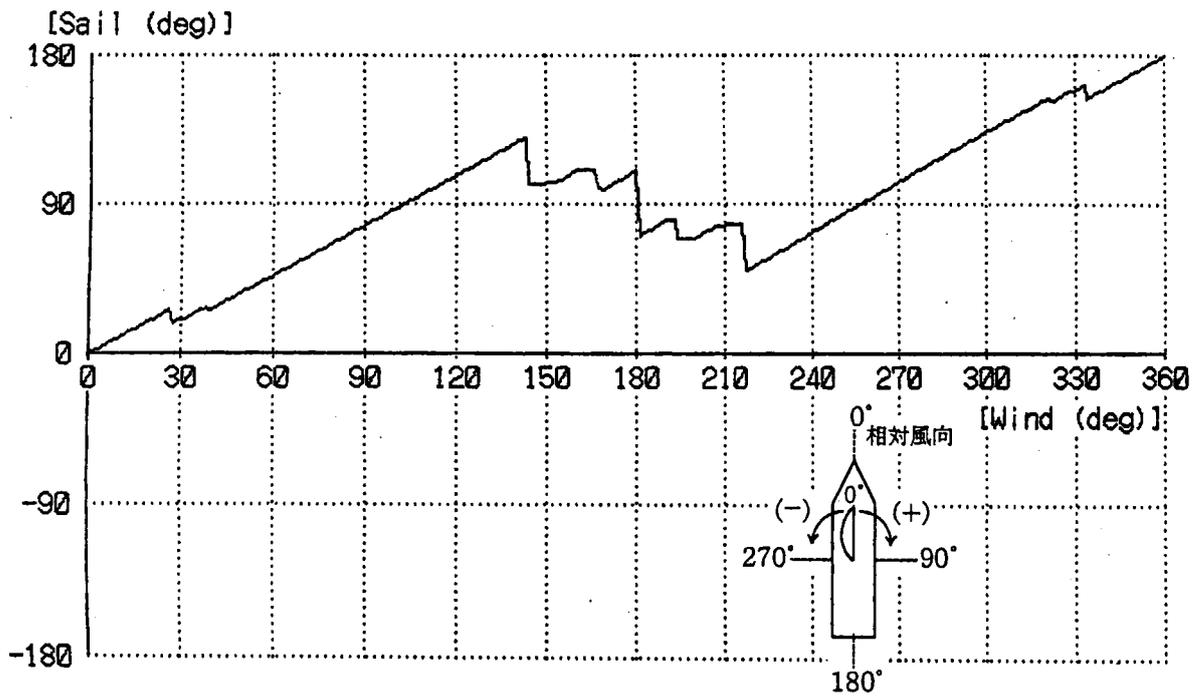


図 6 - 4 直進制御での帆角度の設定

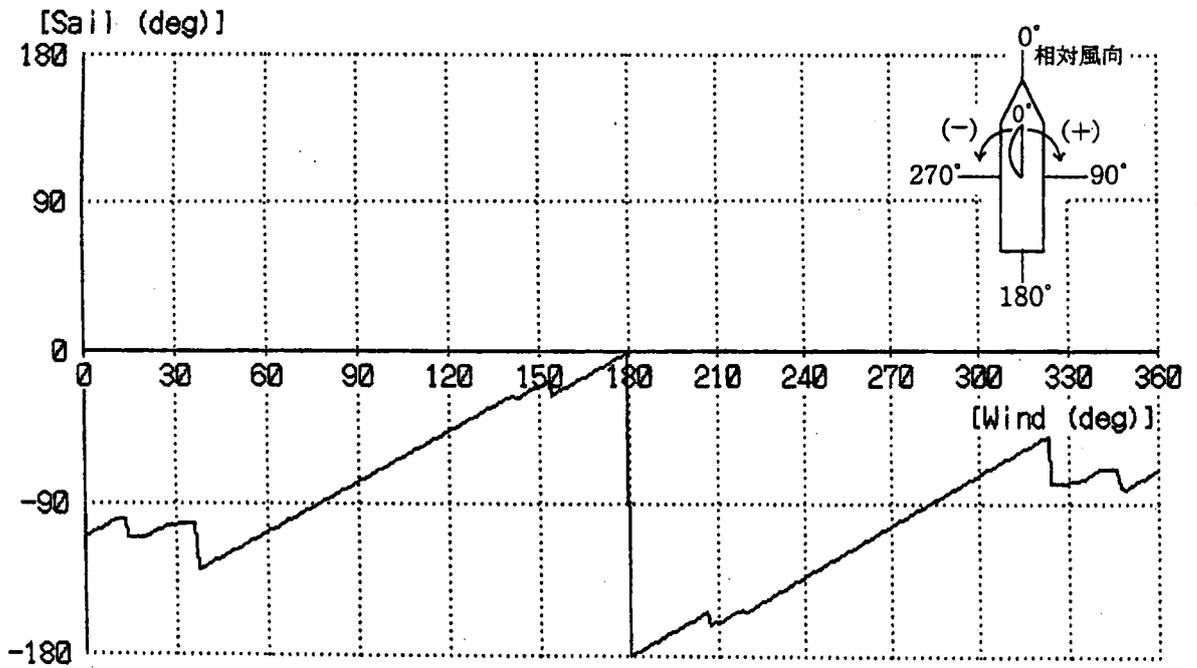


図 6 - 5 急停止制御での帆角度の設定

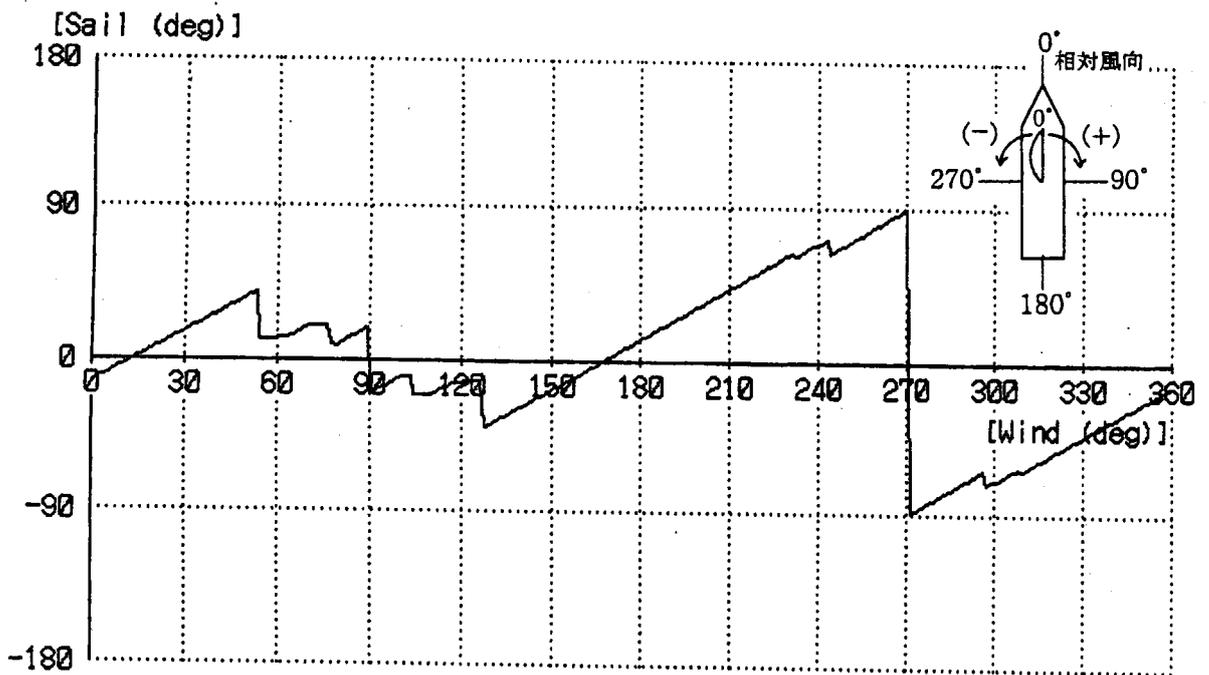


図 6 - 6 回頭制御（左回頭）での帆角度の設定

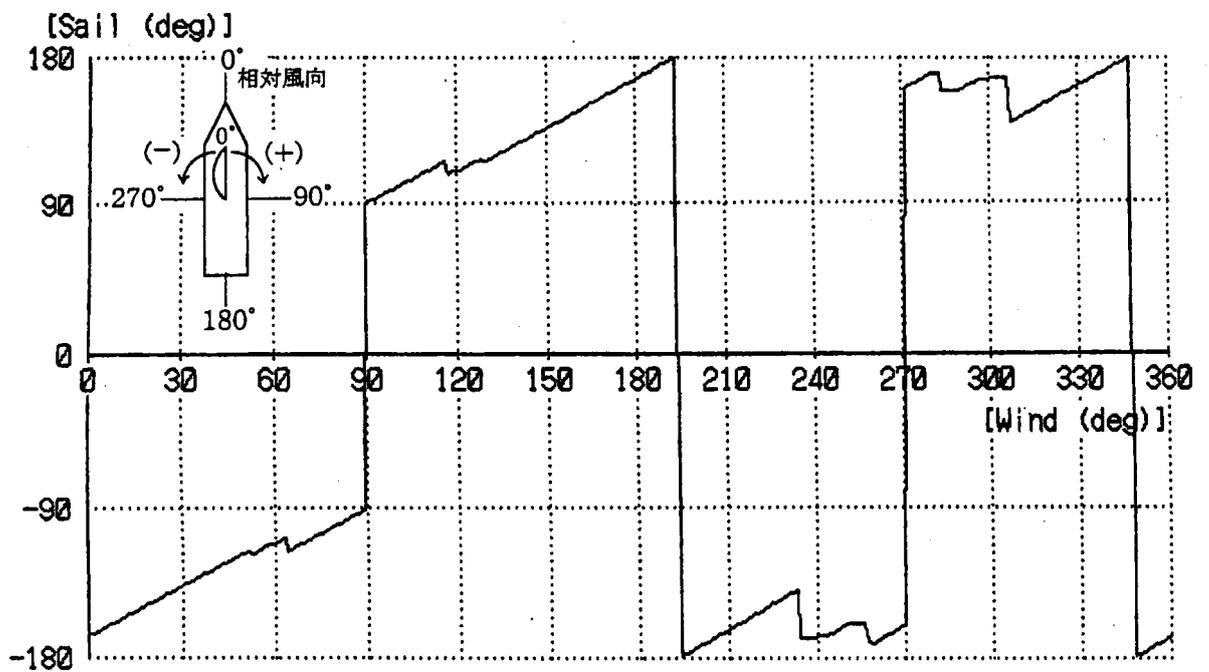
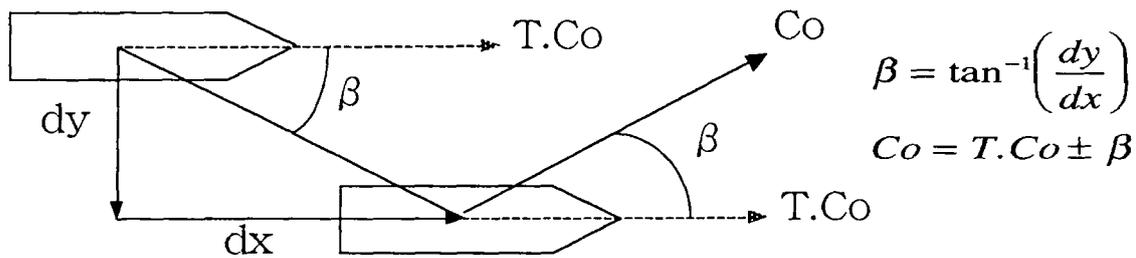


図 6 - 7 回頭制御（右回頭）での帆角度の設定



T.Co : 真針路    Co : 設定針路  
 dx : 横変位置量    dy : 縦変位置量  
 β : 斜行角

図 6-8 ルートトラッキング方式

オートパイロット航行においては、船首方位を保持する従来の制御法と希望針路を保持するルートトラッキング方式の2つの制御法が選択できるようになっている。ルートトラッキングを採用した理由は、帆装船であるため、リーウエーが大きくなることが予想されたからである。ルートトラッキングについては図 6-8 に示すように、風下へ落とされて斜行する斜行角  $\beta$  を現針路に対し風上側へ修正することにより希望進路を維持させる方式である。

このように幾つかの制御方式を採用しているため、帆装船の運動があらゆる状況でシミュレーションができるようになっている。

## 6-5 純帆走時の運動特性と評価

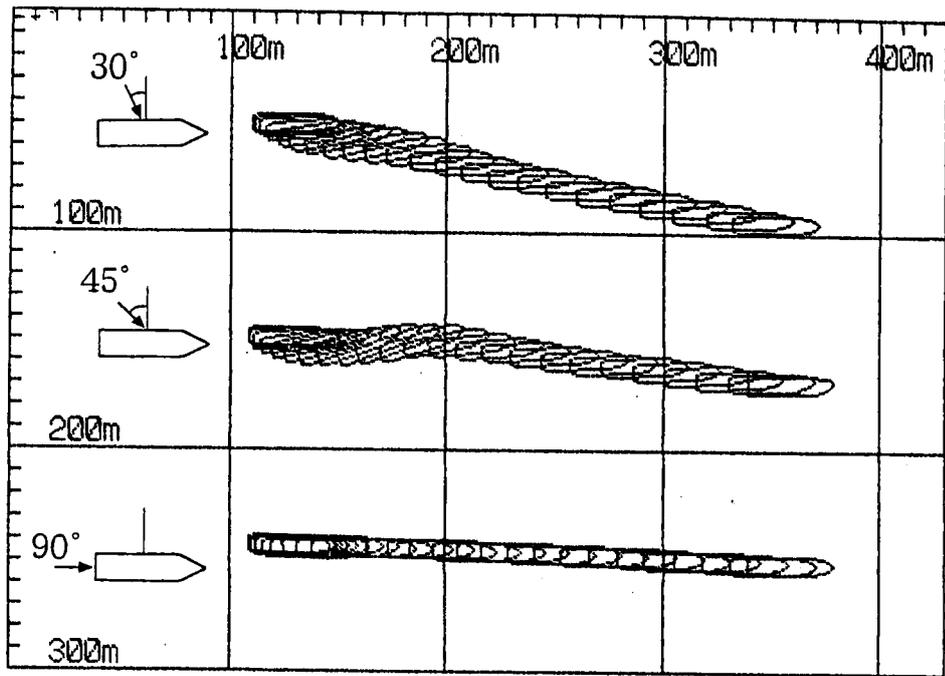
### 6-5-1 直進制御時の船体運動特性

シミュレーションは停止している状態から直進制御をかけ、帆の推力のみでどのように航走するかをオートパイロット使用時とルートトラッキング使用時とに分け、その運動やリーウエーの違い等を比較した。また、風速は 10 m/s の定常風で、風向をパラメーターとして正船首方向から正船尾方向まで変化させてシミュレーションを行った。この他、純帆走時ということで、機走時に比べ船の運動がそれほど激しく変化しないと考え、帆の旋回速度は 5 deg/sec とした。

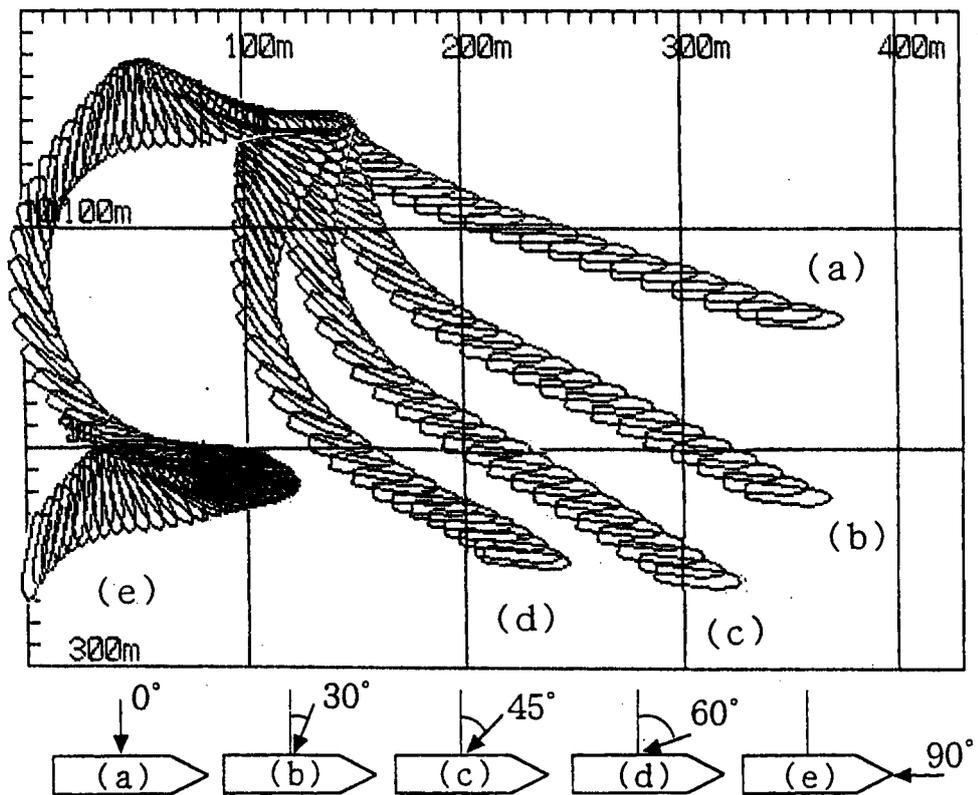
図 6-9 上段に後方からの風の場合で針路を  $90^\circ$  としてオートパイロットを使用した状態での運動を示す。真後ろ及び正横後  $45^\circ$  の風の際にはリーウエーはほとんど無く、正しく針路を保って走っていることがわかる。正横後  $30^\circ$  では、

針路は正しく保っているが、リーウェーが $45^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ の状態よりも多少大きくなっている。これに対し同じ条件で風向を前方向からとしてシミュレーションを行った結果が図6-9下段である。後ろ方向からの風の状態とは異なり、初期状態から速力を持つまでの風下落ちがめだつ。また、針路を保って航走する場合の速力も大きく落ちる傾向となっている。中でも正横前 $60^{\circ}$ の状態は初期の段階で風下落ちが激しく、船速も $2.7\text{Kt}$ と針路を保つ最低限の速力しか得られていないため、この方位からの風がほぼオートパイロット使用時での直進制御の限界と考えられる。また、正面からの風においては、帆による前進方向の推力が得られないため、風下へ落ちる間に得られる速力だけでは風に相対した場合に、すぐに速力が無くなるため針路が保てなくなり、再度、風下へ落ちて行く現象を繰り返してしまい制御不能となる。

ルートトラッキング方式は、帆装船の純帆走を考える場合、極めて有用である。オートパイロットに比べ速力の損失は起きるが、リーウェーがかなり押さえられる。ルートトラッキングに直進制御をかけた場合のシミュレーションを図6-10に示す。まず、後ろ方向からの風において $90^{\circ}$ のルートトラッキングをかけた時の状況を見ると、極僅かな風上への切り上がりが見られるが、どの方向からの風に対しても正しく希望進路を保っている。このほか正横後 $30^{\circ}$ の状態がオートパイロットのみの場合よりも風下落ちが無くなっている分、良好な結果となっている。これに対し、前側からの風でのシミュレーションの結果は図6-10下段である。正横前 $45^{\circ}$ の状態ですでに希望進路を保持して走ることができなくなっており、 $60^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ では制御不能となる。これより、設定した $90^{\circ}$ の希望進路を維持できる状態が正横前 $30^{\circ}$ までということになるが、この状態での速力が $2.6\text{kt}$ であることから、船の舵効を考えるとほぼこの風向がルートトラッキング時における本制御の限界と考えられる。ルートトラッキングにおいて前方向からの風に対しこのような現象が起きるのは、風下落ちを防ぐため船の針路を風上に向けて走るため、進行方向と風との相対角度が少なくなり、帆による前進推力が得にくくなるためである。ルートトラッキングについては、後方からの風では利用範囲が広がるが、前方からの風に対しては利用範囲が狭まることを念頭に入れておく必要がある。

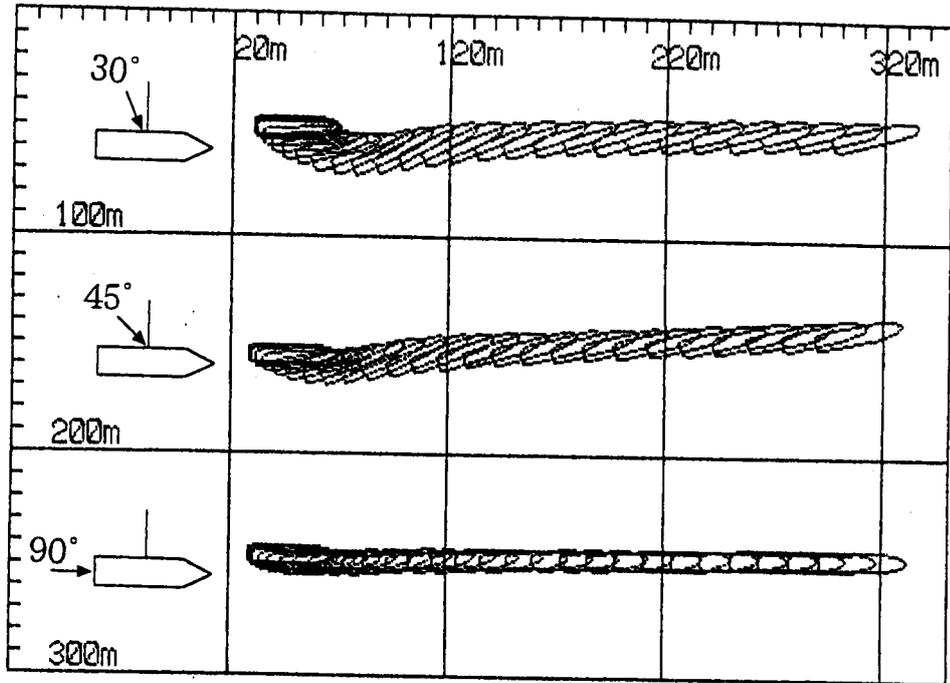


(後方からの風の場合)

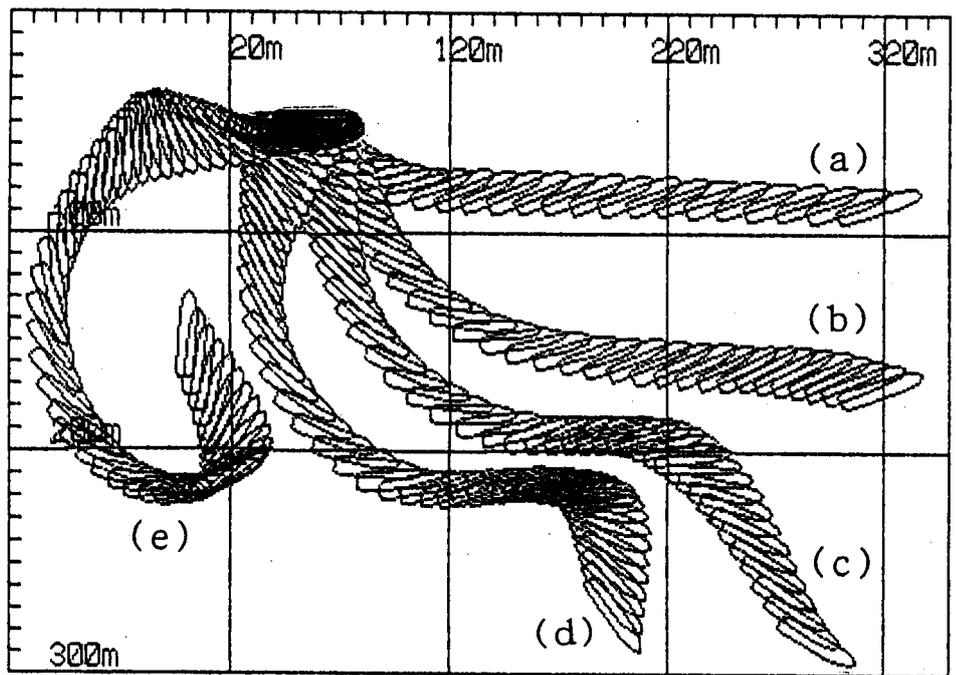


(前方からの風の場合)

図 6-9 オートパイロットで直進制御中の船体運動



(後方からの風の場合)



(前方からの風の場合)

図 6-10 ルートトラッキングで直進制御中の船体運動

以上より、直進制御の評価を総括的にまとめると、図6-11に示すように表される。本制御において、利用できる範囲とできない範囲が明確に示されたが、利用できない範囲に対し極微速の機関を併用した場合、どのように改善されるかということについての一例を図6-12に示す。これは上述した制御不能の中でもオートパイロットを使用時、正面からの風で完全に制御不能となる状態を例にとったものである。この状況下において、機関の最低出力である前進極微速を併用すると、図から明らかなように制御不能の状態からの脱出が可能となる。本制御は舵の効く最低限の速力が機関等で得られるならば、最悪の状態でも利用できることから、どの方向からの風に対しても制御可能となることが、この例よりわかる。

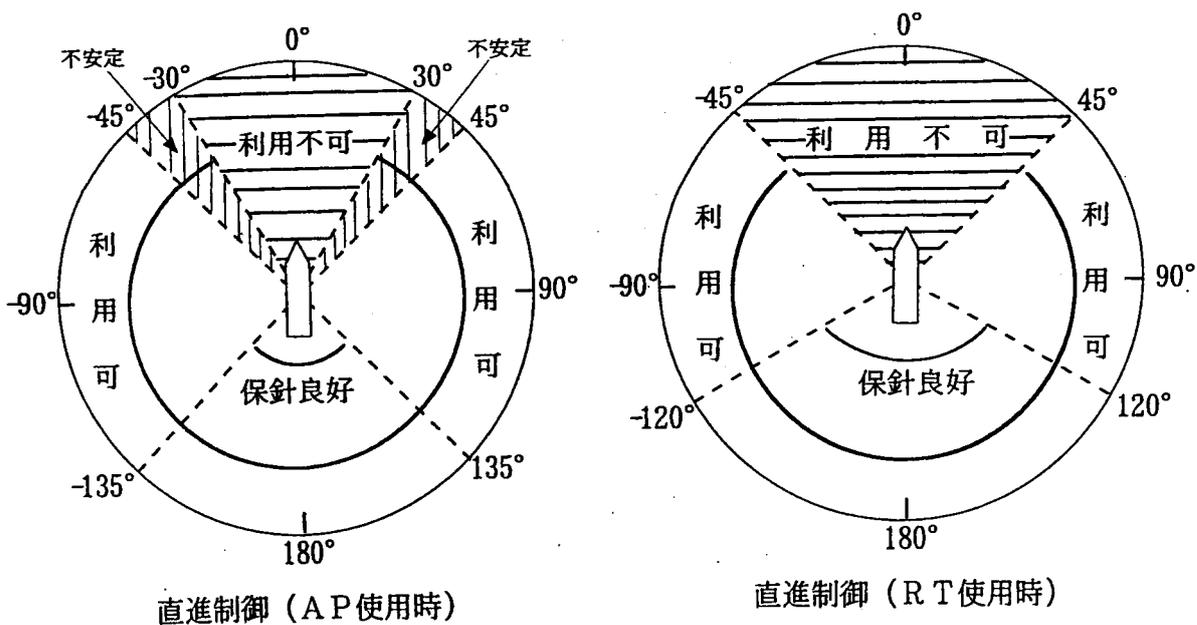


図6-11 直進制御の利用限界

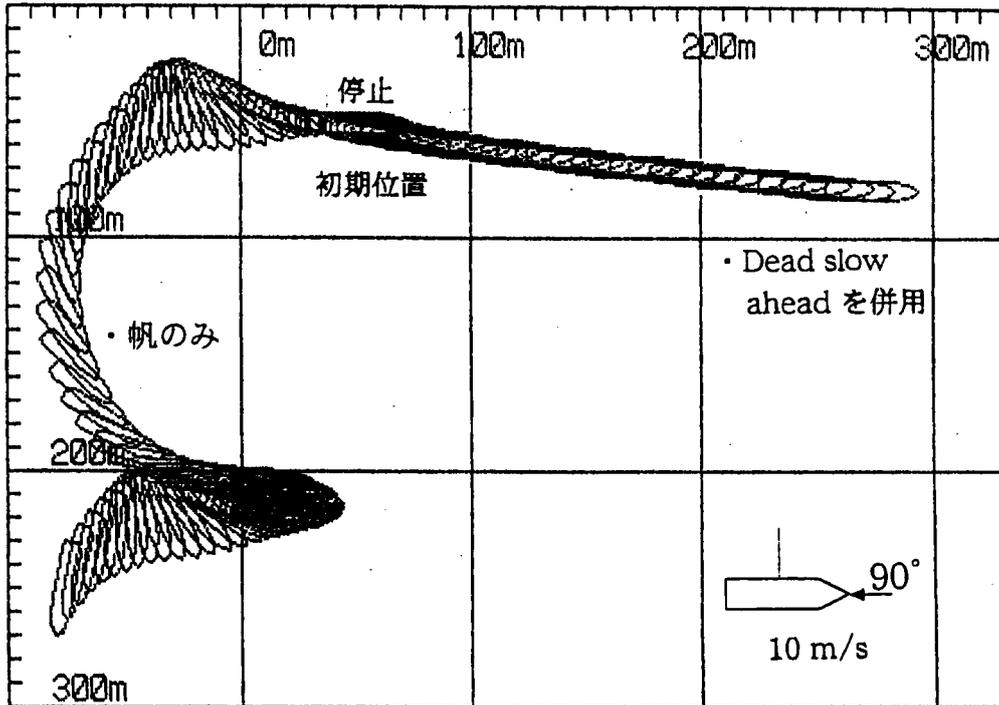


図 6 - 1 2 機関の併用による制御不能の改善例

#### 6 - 5 - 2 回頭制御時の船体運動特性

回頭制御においては、帆の力だけで船を回頭させる場合、風向によりどのような運動を起こすのか、また、どのような風向に対して制御可能なのかを明らかにする目的でつぎのようなシミュレーションを行った。

船は船首方位を  $90^\circ$  に向けた状態で停止、風向をパラメータとして風上側、風下側へそれぞれ回頭制御をかけ、反方位を向くまでのシミュレーションを行った。風速は  $10 \text{ m/s}$  であり、左舷側から吹くことに限定した。

風上側へ回頭制御（この場合左回頭）をかけた場合の運動を図 6 - 1 3 に示す。正船首方向からの風では、後進する形で船首を左に回頭させ風下へ落とされながら回頭する。この時の回頭角速度は  $1.4 \text{ deg/sec}$  であり、反方位回頭し終わった時点で  $1 \text{ kt}$  の前進速力を持つ。また、風下への変位は  $110 \text{ m}$ 、横変位量は  $120 \text{ m}$  である。これに対し正船尾方向からの風では前進しながら左回頭を起こし回頭し終わった時点では後進  $0.1 \text{ kt}$  とほとんど速力を持たない。回頭角速度は  $1.9 \text{ deg/sec}$  で、正面の時よりも多少速く回頭する。回頭終了した時点での風下への変位量は  $90 \text{ m}$ 、横変位量は  $110 \text{ m}$  であるため、船尾方向からと比べると変位量は僅

かであるが少ない。これは、回頭角速度が多少なりとも速いことが理由と考えられる。

正横及び正横前 $45^{\circ}$ の風では、共に風下へ落とされながら回頭する動きを見せるが、正横からの方が回頭角速度は $0.2 \text{ deg/sec}$ 速い。また、回頭し終わった時点では風下への変位量は正横前 $45^{\circ}$ の方が $50 \text{ m}$ 程大きく、本シミュレーション中最大の風下落ちを示した。このほか、回頭終了時は共に後進速力を持ち、それぞれ $1.3 \text{ Kt}$ 、 $1.7 \text{ Kt}$ となる。

風上への回頭では正横後 $45^{\circ}$ の風の場合が風下落ちが一番少ない。回頭初期の段階では風下落ちよりもむしろ風上に切り上がる形で回頭している。回頭角速度は $1.8 \text{ deg/sec}$ で、ほぼその場回頭を行った場合に近い結果となっている。ただし、回頭終了時点で後進 $1.2 \text{ Kt}$ の速力を持つ。

風下側へ回頭制御（この場合右回頭）をかけた場合の運動を図6-14に示す。正船首方向及び正船尾方向からの風においては風上側への回頭と左右対称となる動きを示す。また、回頭角速度もほとんど同じ速度となっている。

正横、正横後 $45^{\circ}$ 、正横前 $45^{\circ}$ の風下側回頭運動も風上回頭と逆の特徴を示す。即ち風上側回頭で風下落ちが一番少なかった正横後 $45^{\circ}$ の運動が風下側回頭では一番大きくなり、風下落ちが最も少なかった正横後 $45^{\circ}$ が最も大きくなる動きを示す。また、回頭角速度については、何れも風下側回頭の方が速くなっている。このほか特徴的な部分は、反方位回頭終了時の速力がどの場合も前進速力を持つ。中でも正横からの場合は $2.4 \text{ Kt}$ の前進速力となる（正横後 $45^{\circ}$ は $1.9 \text{ Kt}$ 、正横前 $45^{\circ}$ は $1.7 \text{ Kt}$ ）。

回頭制御利用については、前進または後進する形で回頭したり、大きく風下落ちする場合があるなど、その運動を把握しておく必要がある。この中でも大きく風下に落とされて回頭してしまう対策については機関と併用して利用すれば大きく改善される。図6-15にその一例を示す。図は風上への回頭で風下落ちが非常に大きくなった正横後 $45^{\circ}$ の風においての状況である。機関の前進極微速と回頭制御を併用した場合の運動の差異を見ると、図から明らかのように、極微速の機関を併用しただけで風下落ちは約 $1/3$ に減少することがわかる。

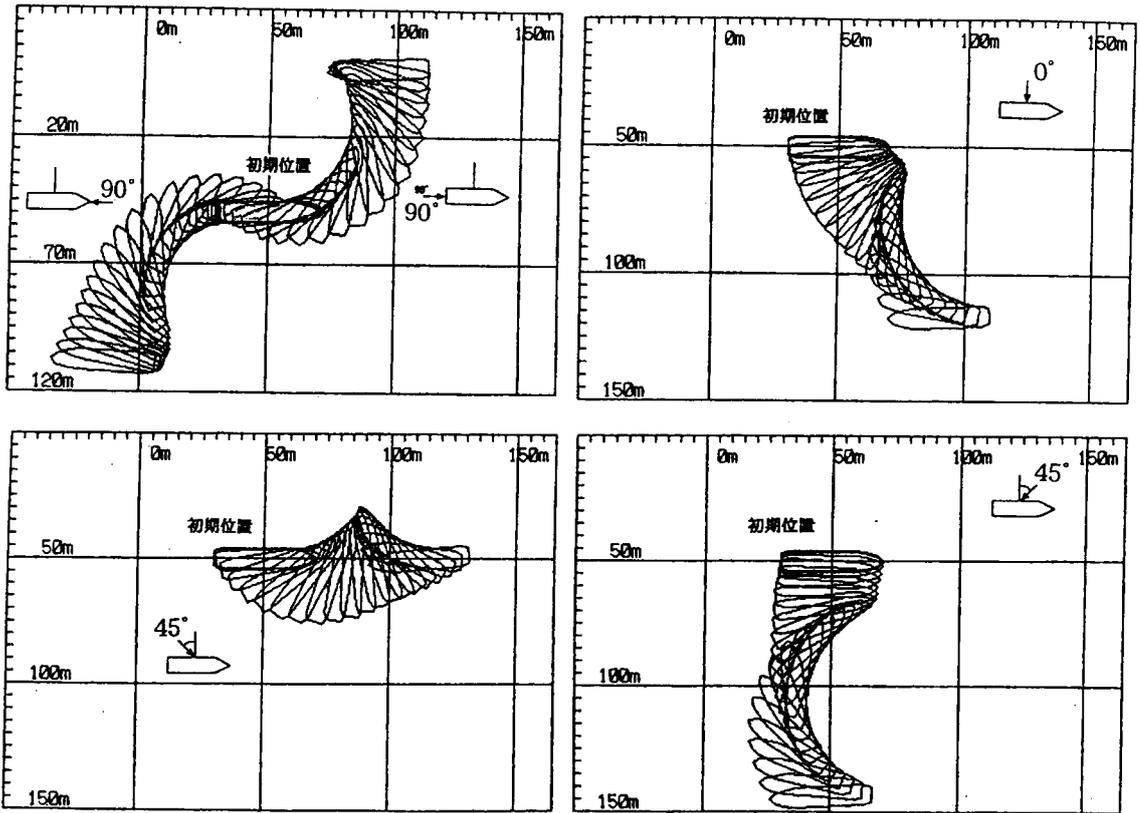


図 6 - 1 3 風上側へ回頭制御を使用した場合の運動

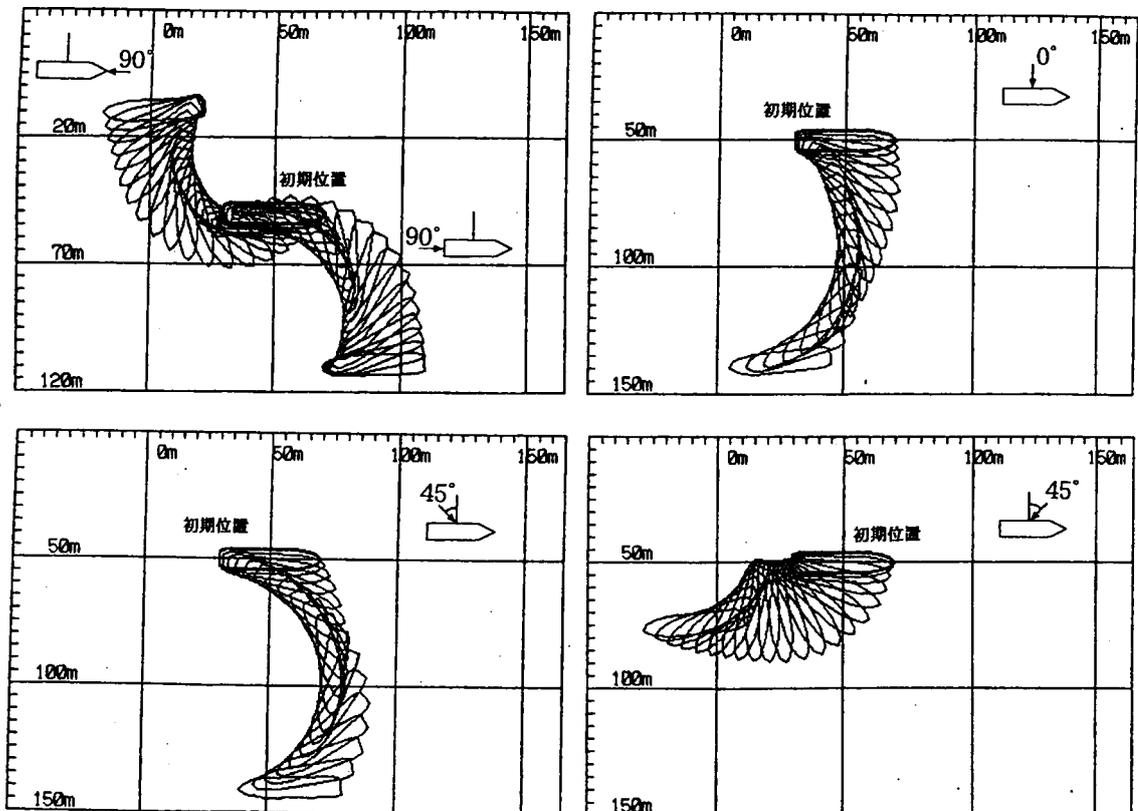


図 6 - 1 4 風下側へ回頭制御を使用した場合の運動

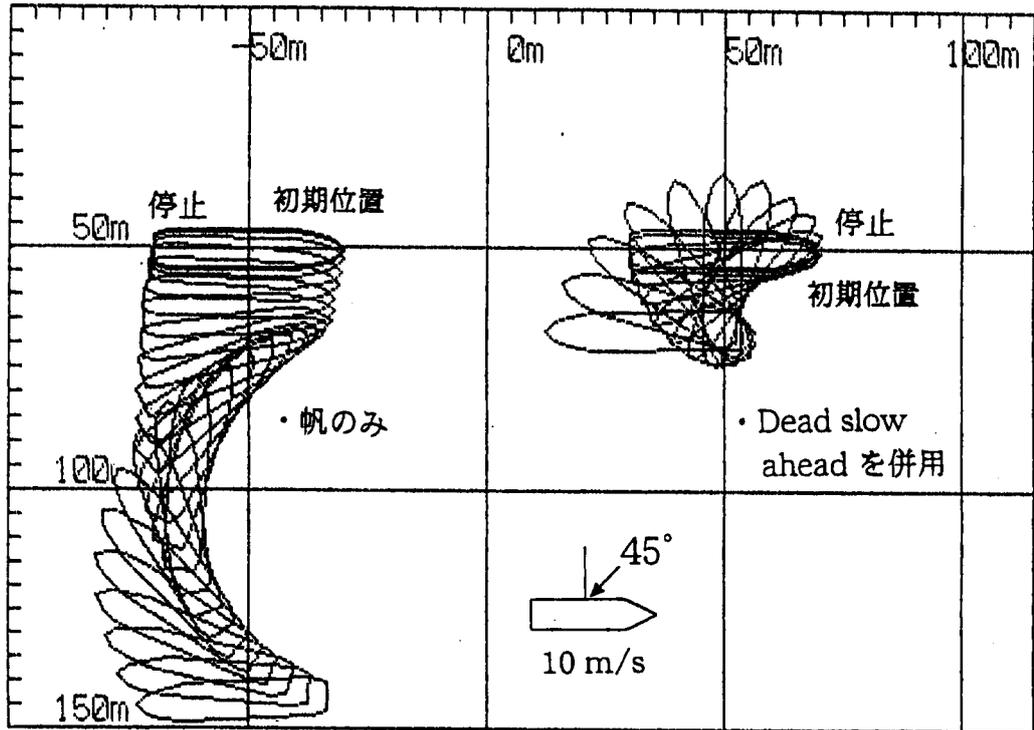


図 6-15 機関併用による風下落ち回頭の改善例

### 6-5-3 停留制御時の船体運動特性

停留制御については図 6-3 に示したように、帆の推力を互いにキャンセルするように外向きに制御する方法と内向きに制御する方法の 2 つの制御法を試みた。この違いによる船体運動を図 6-16 に示す。この場合、風向を左舷正横、風速は 10 m/s とした。

外向き制御は、常に船首尾線方向外側に推力を出すように制御しているため、帆は頻繁に向きを変える。このため、船の姿勢によっては、推力のアンバランスが船にかかる。このため船首方位を振りながら風に対して横向きとなり、船首方向に移動し、風下に圧流される。この時の漂流速度は 1.4 kt である。これに対し、内向き制御は初期の段階こそ船首が風下に落ちるが、風に対し真横になった状態からは、帆による内向きの推力の保持はほとんど帆の角度を動かさなくてよい状態となる。このため、外向き制御に比べ船首振れを起こすことなく船首方向に移動する形で風下に圧流され、漂流速度も 1.4 Kt である。両制御法を比べると漂流速度、漂流方向はほとんど同じであるが、船首振れの少ない内向き制御が安定していて良いといえる。

停留の状況を通常の船舶の状態と比較することを考え、帆の無い状態での停留を同じ条件でシミュレーションし図6-16に併記した。帆が無い状態の方が漂流速度は1.1 Ktと緩やかであり、漂流状態も風に横たわった状態で安定して風下に圧流される。この結果より、帆装船を停留させる場合、帆を広げたままで短時間停留させる場合以外は、本制御をかけるよりも帆を畳んだ方が得策であるといえる。

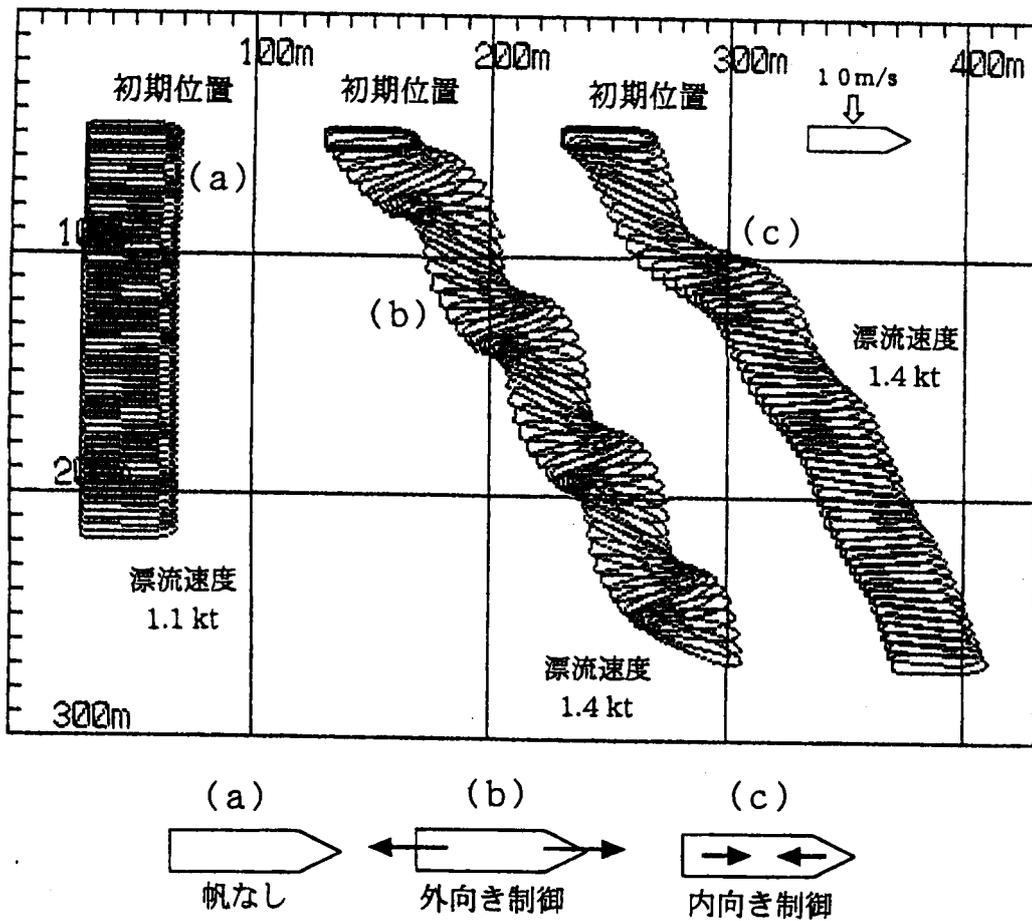


図6-16 停留制御での船体運動

#### 6-5-4 急停止制御時の船体運動特性

船速6.2Kt、針路は90°の方向にオートパイロットまたはルートトラッキングで航行中、急停止制御をかけ、船が完全に停止するまでのシミュレーションを行った。風速は10m/sで一定とし、風向を正船首方向から正船尾方向までの間で変化させた。この状況を図6-17、図6-18に示す。

オートパイロットで前方向からの風の場合、停止距離が一番長かったのが正横からの風であり、発令から130m(3.3L:Lは船の長さ)の進出距離であった。正横前45°、90°は、ほぼ同じで90m(2.3L)である。機関を使用して停止した場合の進出距離から見ると、ほぼ後進極微速を発令したに等しい距離である。前方向からの風での本制御の効果は、後進極微速をかけて比較的緩やかに停止させる制御とほぼ等しい。これに対し、正横から後ろの風では、前方向からの風よりも進出距離が大幅に伸びた。これは、後ろ方向からの風では、帆で後ろ向き大きな推力を発生できないからである。その最たるものが正船尾からの場合で、帆による後進推力がほとんど作り出せないことから制御不能となる。真後ろ以外の後方からの風での進出距離は、機関の後進極微速で止まる進出距離よりも長いことから、帆の推力は後進微速以下となる。同じ条件のルートトラッキング時の状態を図6-18に示す。この場合もオートパイロット時と同様の運動を示した。

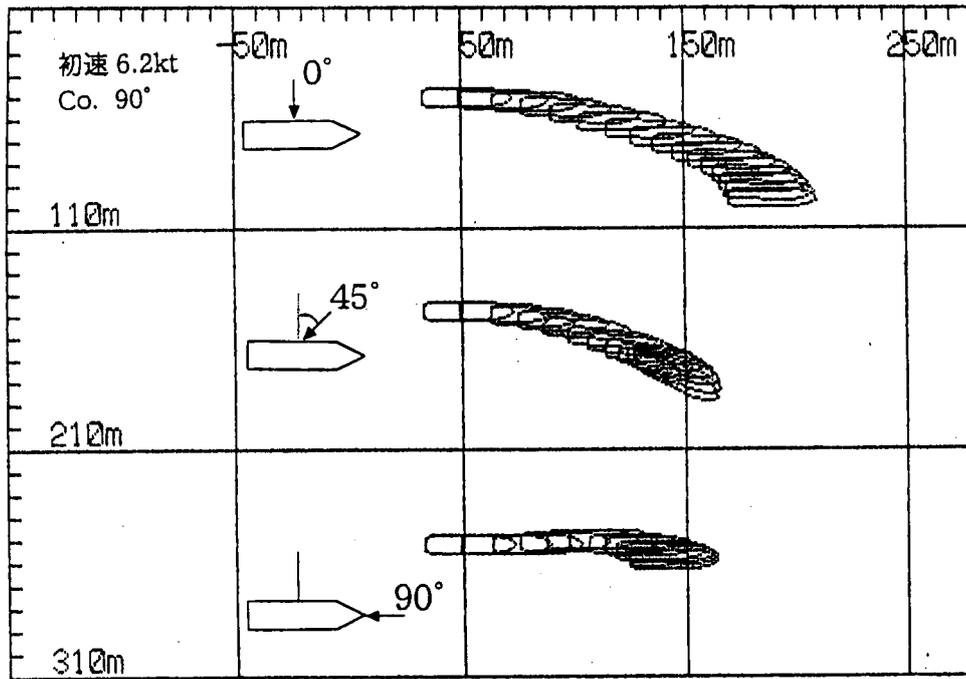
急停止制御の特徴を総括的にまとめると図6-19となる。

この制御では、帆の後進推力が船に対し一定方向にかかるため、オートパイロット時は、比較的船首方位を保持し、ルートトラッキング時は、ほぼ希望進路を保った姿勢で停止できることである。通常の船舶で機関を逆転し停止させる場合を考えると、一軸右回り船では船体に非対称にかかる横圧力のため大きく回頭してしまうことを考えると、帆による制御は操船に有効である。

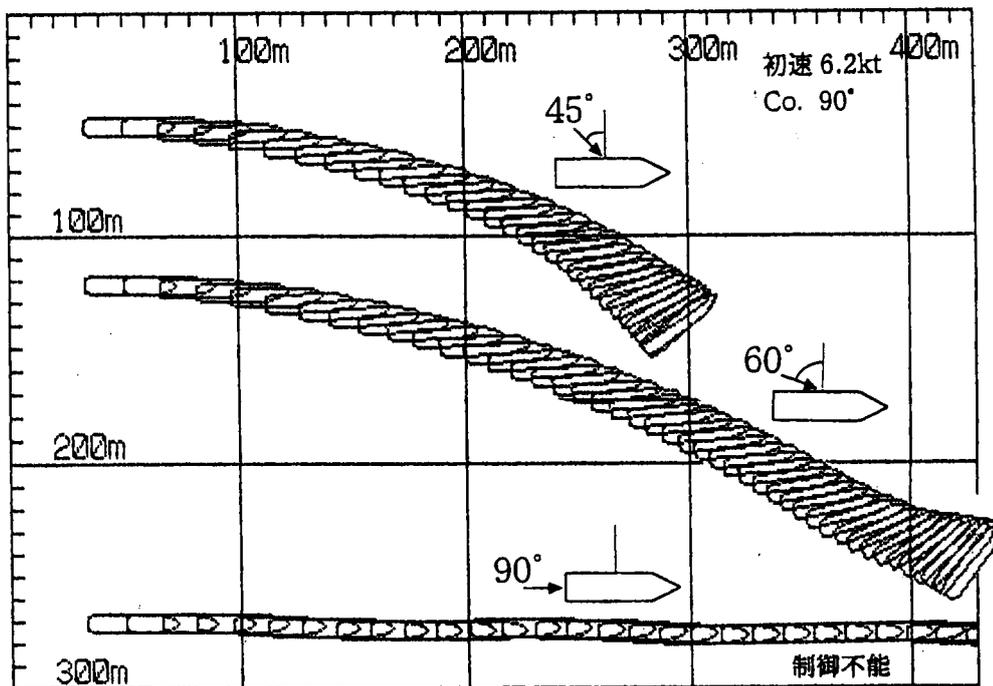
#### 6-5-5 斜行制御時の船体運動特性

斜行制御については、装備している帆の空力特性から考えて風上へは斜行できないため、風下側への斜行をシミュレートした。

設定は左舷正横から10m/sの風を受け、90°の方位を向いて停止している状態から、風下の方向に15°間隔で斜行するシミュレーションを行った。その中

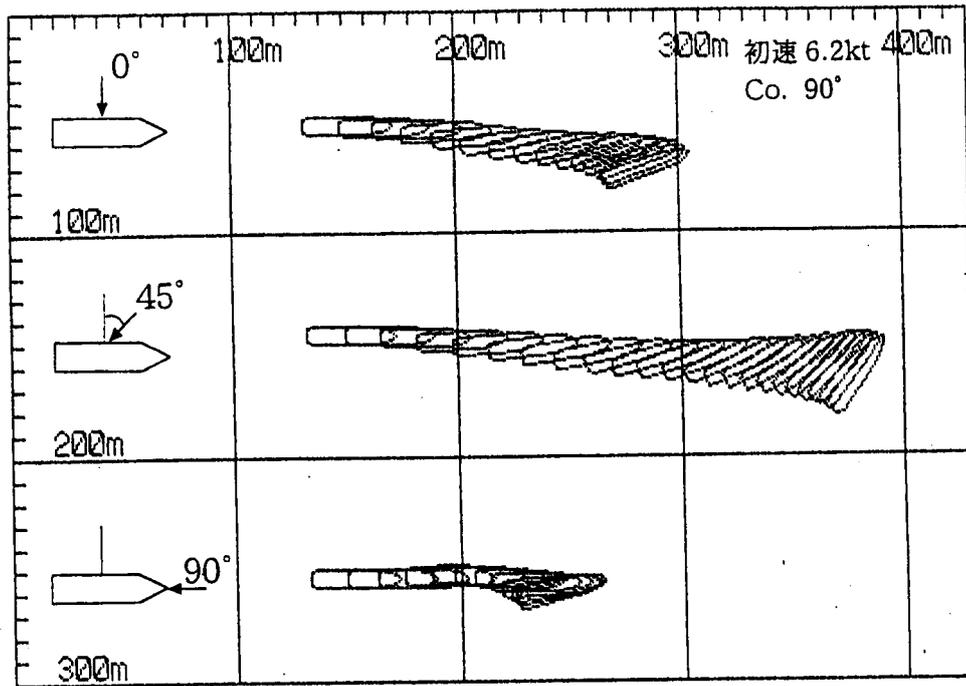


(前方からの風の場合)

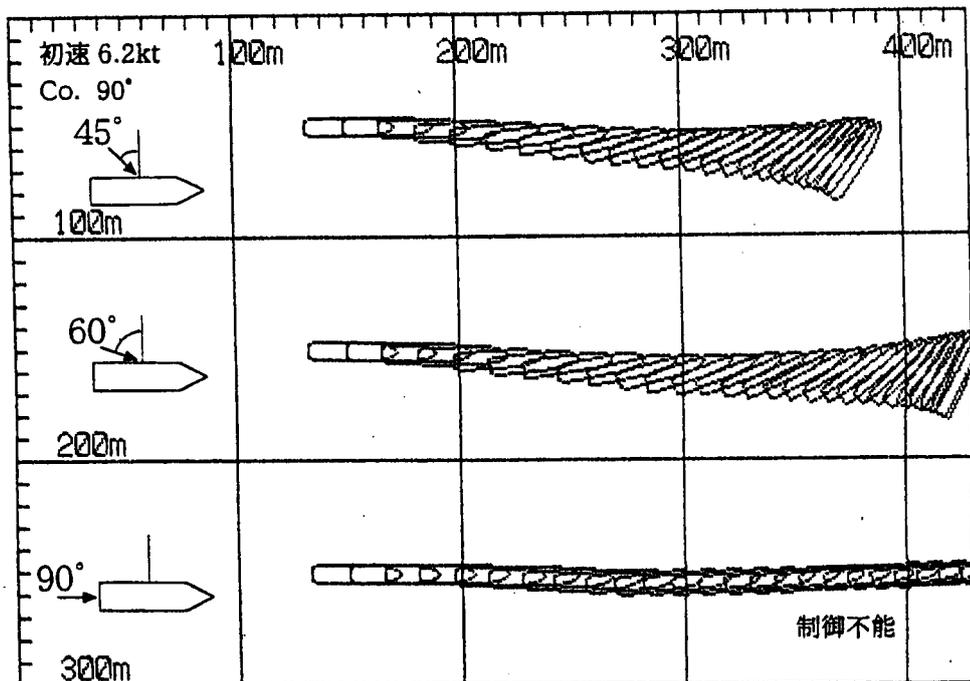


(後方からの風の場合)

図 6-17 オートパイロット使用中で急停止制御時の船体運動



(前方からの風の場合)



(後方からの風の場合)

図 6-18 ルートトラッキング航行中で急停止制御時の船体運動

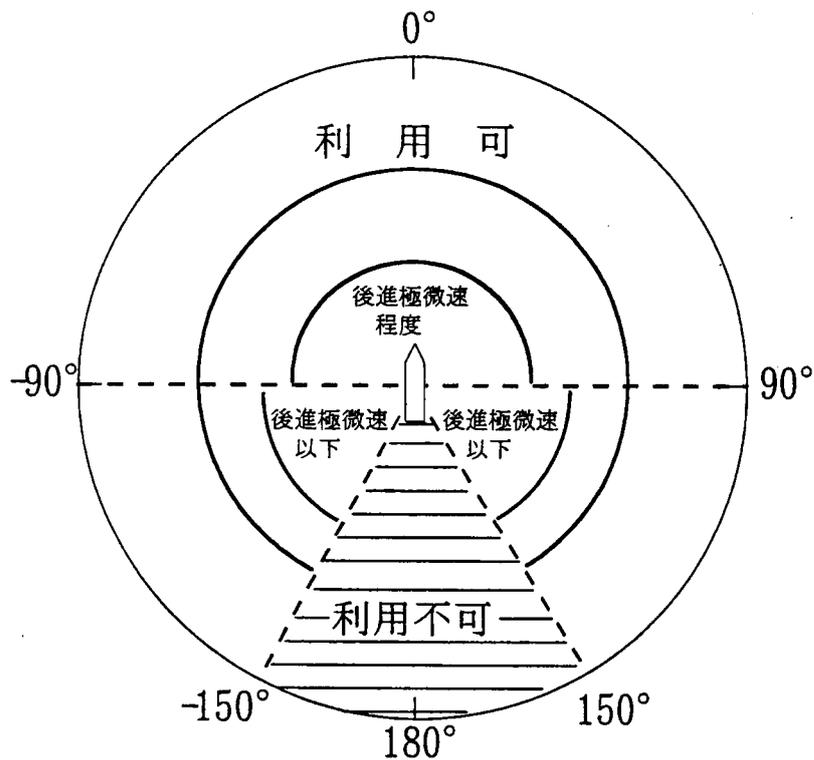


図 6-19 急停止制御の利用状況

の  $120^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $240^\circ$  の方向への斜行結果を図 6-20 に示す。 $120^\circ$  方向への斜行は船の姿勢も安定した状態で斜行角は  $5^\circ$  ほど浅い針路 ( $25^\circ$  方向) となっているが、ほぼ希望の方向へ斜行できていることがわかる。また、 $180^\circ$  方向については船の姿勢は安定しているが、帆をセットする間に  $0.9\text{Kt}$  という僅かな前進速力がつくため、正しく  $180^\circ$  方向へは斜行せず、 $20^\circ$  程度角度がついて斜行する。斜め後方へ進むことになる  $240^\circ$  の斜行は、初期の状態では風下へ落とされるが、後方への速力がつくに従い  $240^\circ$  方向に斜行しだす。何れの斜行状態を見ても船首方位は保持されており、この制御に付加した姿勢保持制御が効いているためと考えられる。

$90^\circ$  から  $120^\circ$  の間及び  $240^\circ$  から  $270^\circ$  方向への移動は、帆の推力が非常に少ないため、風下へ落とされ制御不能となる。

これより、本制御における斜行は斜行姿勢が安定していることが特徴であり、ほぼ希望の方向に移動できる。ただし、速力を持つまでに圧流されるための誤差に注意が必要である。

斜行制御の状況をまとめると図6-21に示したものとなる。通常の船舶では、1舵、1プロペラの構成で斜行のような並進運動を実現することは力学的に不可能である。そのためバウ及びスターンスラスト等の補助操船装置が必要となるが、ここで示したように風の力でこれが実現できる本制御を組み込んだ帆装装置は魅力的な一面を持っているといえよう。

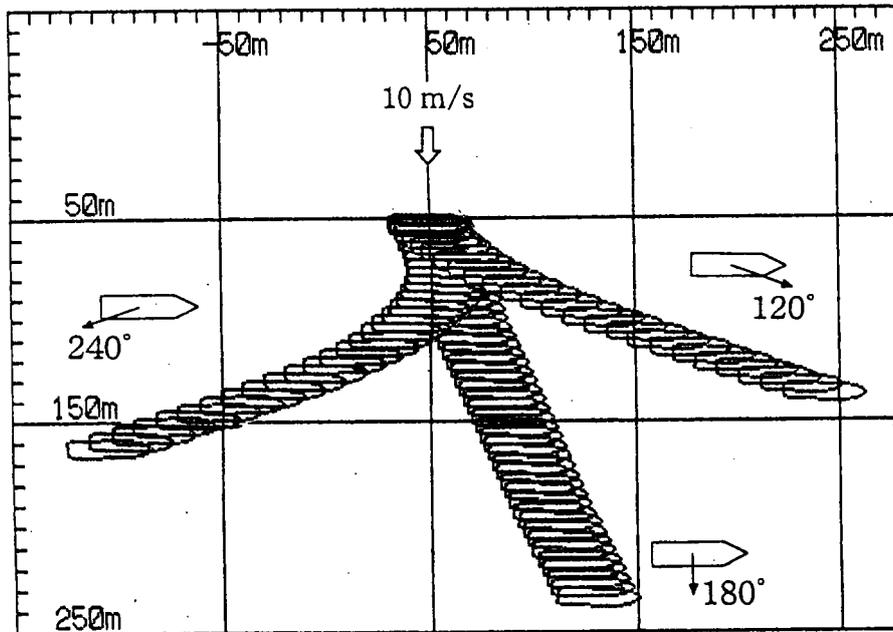


図6-20 斜行制御の船体運動

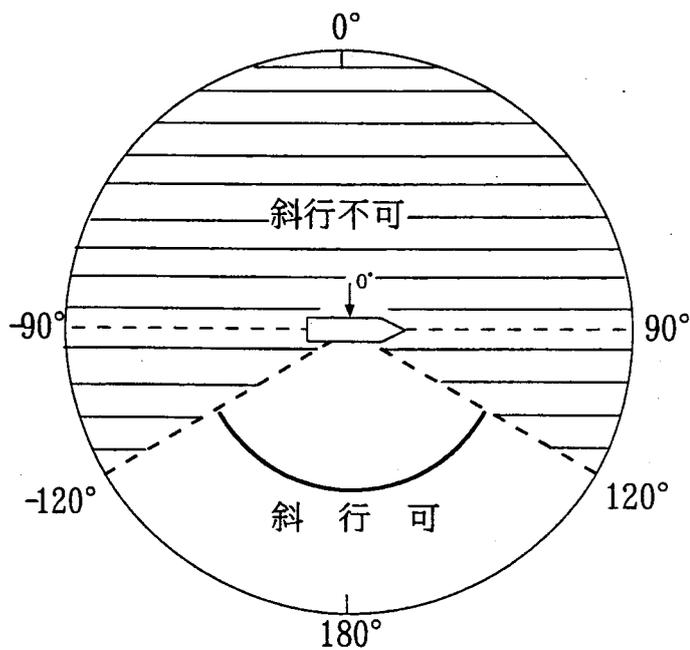


図6-21 斜行制御の利用状況

## 6-6 機帆走時の運動特性と評価

### 6-6-1 非定常風の導入とモデル化

帆の自動制御の効果がある程度厳しい条件で評価することを考え、風による外乱を非定常風としてつぎのようにモデル化した。

燈灘に面する弓削島の浜都湾より水平距離200m、高さ18mに位置する弓削商船高専の気象観測装置から、台風接近時の2時間の風向の変化の計測を行い、このデータを高速フーリエ変換（FFT）し<sup>(13)</sup>、図6-22に示すスペクトルを得た。帆角度の制御系は、風向の早い変化への追従性を持つことが必要である。しかし、得られたスペクトルにおいて、最も早い変化を示す顕著なピークは、周期8分に相当するものであった。本章の機帆走で取り扱う操船局面では、この周期では殆ど問題としないと考えて、風による外乱の変動周期を1分、風向変化を $\pm 15^\circ$ とする多少変動の激しいモデルとした。風速の変化はDavenportのパワースペクトル<sup>(14)</sup>による推定も考えられたが、風速変化は帆角度の制御に影響を与えず、また、機関出力の制御で十分に吸収できると考えて一定とした。

自動制御する上で重要な制御量となる、舵角、機関出力、前帆角度、後帆角度の4つの項目の時系列は、グラフ表示されるようになっており、それぞれ、つぎのように表示されている。

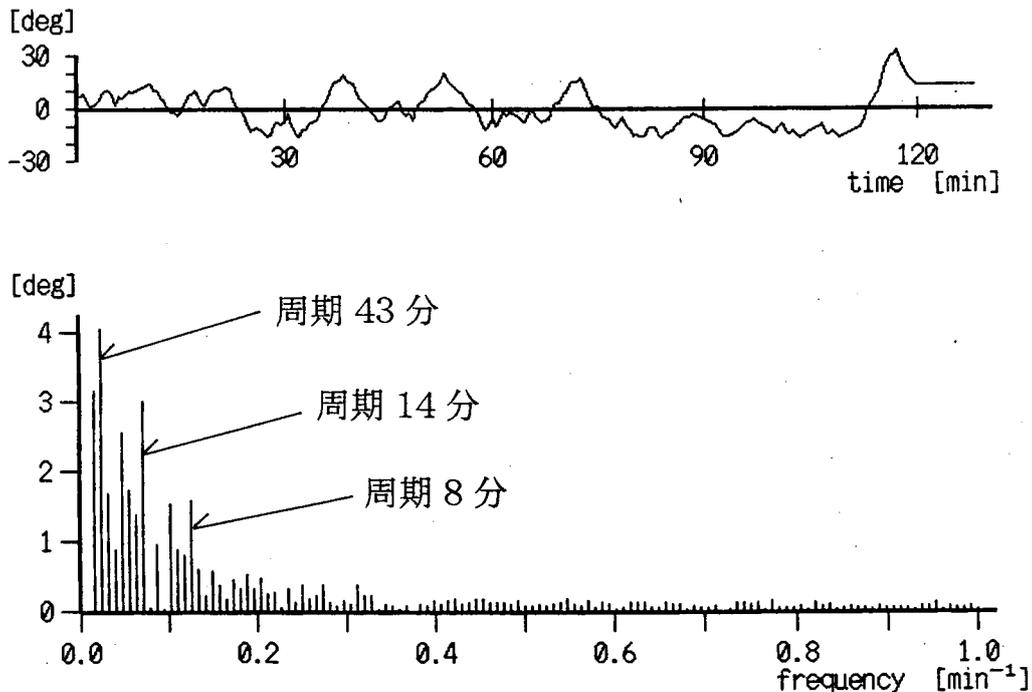


図6-22 風向変化のスペクトル

舵 角 : 右舵  $35^\circ$  が +100%として表示

機関出力 : 全速前進が +100%として表示

前・後帆角度 : 帆が船首方向を  $0^\circ$  とし、右回りで  $180^\circ$  を 100%として表示

機関出力の制御は、帆による推力を考慮し、船速が設定した速力になるように機関の出力を自動制御している。

#### 6-6-2 機帆走時の評価項目

機帆走時の各制御法の評価は、機関を併用した場合の船体運動の状況の他、帆装装置の帆の旋回速度の違いによる運動の特性を主な評価項目とした。これは変動風の中、風の変化に対する帆の追従性の善し悪しが船体運動に大きく影響することが予想されたからである。現在、多くの帆装船の帆の旋回速度は 1 deg/sec であることから、1 deg/sec、5 deg/sec、10 deg/sec の旋回速度でのシミュレーションを行った。

また、帆の旋回による過渡的圧力特性については、これに関する資料が得られていないため考慮していない。

#### 6-6-3 直進制御機帆走中の船体運動特性

機帆走時（針路： $90^\circ$ ）の直進制御をシミュレーションする際の条件は以下の通りである。

風 速 : 10 m/s    風 向 : 正横前  $30^\circ$

速 力 : 8 Kt        航行状態 : 自動操舵航行

図 6-23 にオートパイロット航行時の状況を示す。機走時に比べ機帆走はリーウエーが大きくなるが、どの帆旋回速度においても安定して航走している。これは  $15^\circ$  の風向変化が起きても、そのために新たにセットされる帆角度の変化は小さいため、帆旋回速度の大小がそれほど影響してこないからである。帆旋回速度の違いによるリーウエーの変化は、見かけ上、帆旋回速度が小さい方がリーウエーは減少しているが、これは帆角度が整定するまでの過渡状態の時に帆旋回速度が小さい方が風による推力を十分に得られないため、機関で推力を補っているからである。

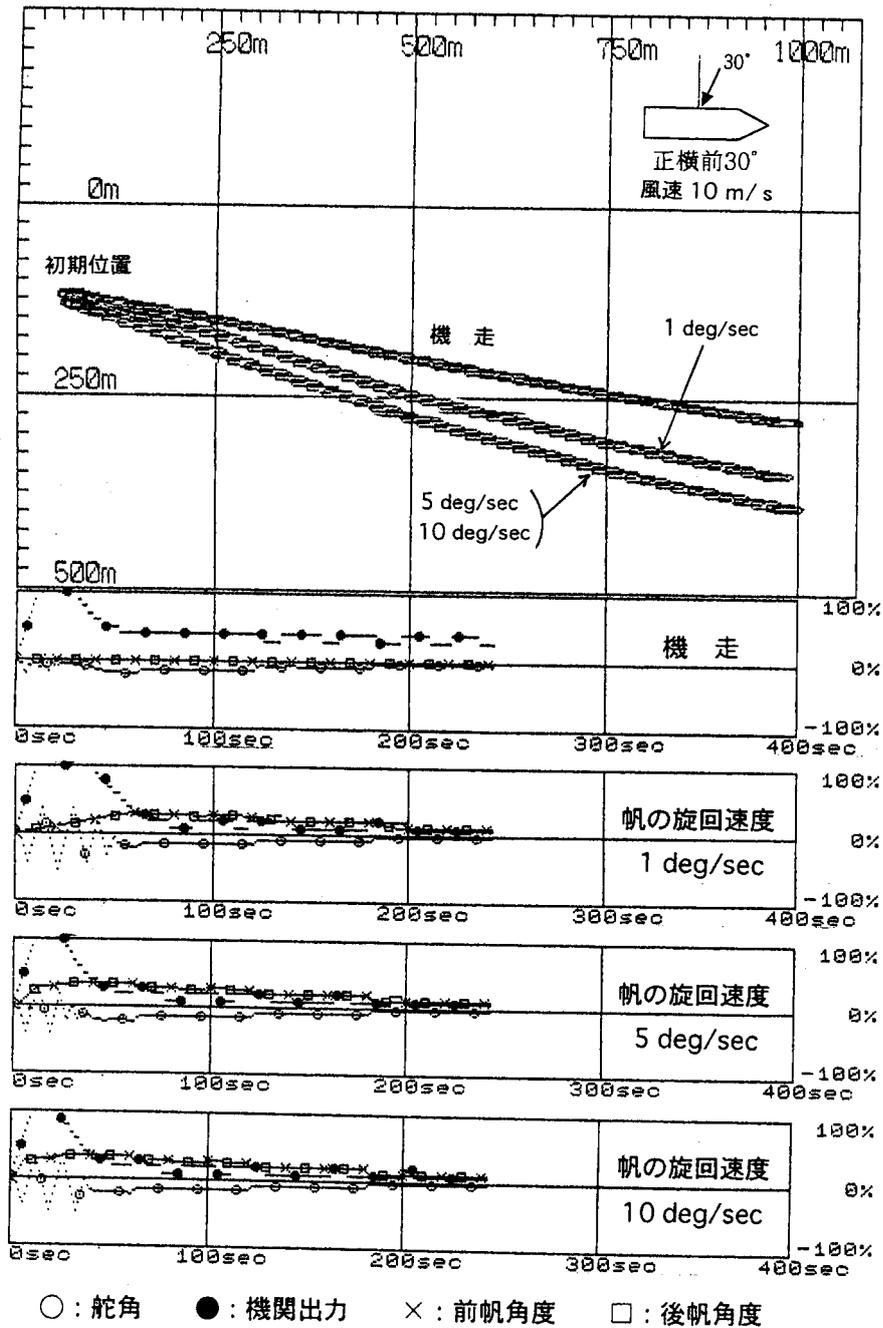


図 6-23 オートパイロットで機帆走中の直進制御での船体運動

図 6-24 にルートトラッキング時の状況を示す。オートパイロット使用時に比べ、リーウェーを補償するルートトラッキング航行は、風上に切り上がって走ることになるため、前進推力が通常より必要となる。よって帆旋回速度が大きい方が帆による推力が出るまでの時間が短くなるためリーウェーが少なくなっている。機帆走時、通常起こりうる避航等による変針動作に、帆の旋回速度の影響がど

のように影響するかを示したものが図6-25、図6-26である。帆の旋回速度は1 deg/secと5 deg/secの2つとした。また、設定船速は6 Ktである。図6-25は100m毎に直線上に設置した浮標の避航を想定したものであり、図6-26はあらゆる風向での制御状況がわかるように、浮標間が100mの周回コースとしたものである。1 deg/sec、5 deg/sec何れの状況を見ても、操船には問題なく安定して航行していることがわかる。直進制御では、障害物の避航や緩やかな小角度旋回の操船には、帆の旋回速度による影響は余り大きな問題とはならない結果となっている。

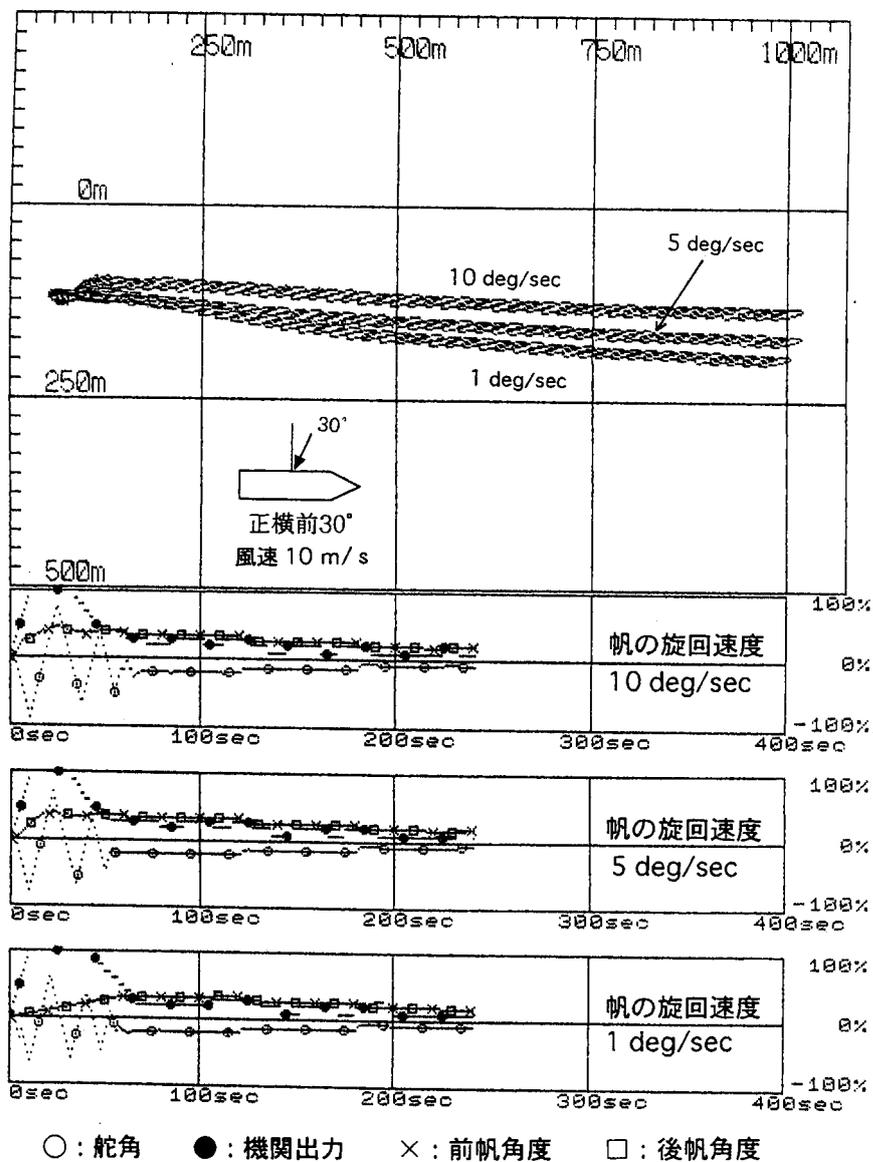


図6-24 ルートトラッキングで機帆走中の直進制御での船体運動

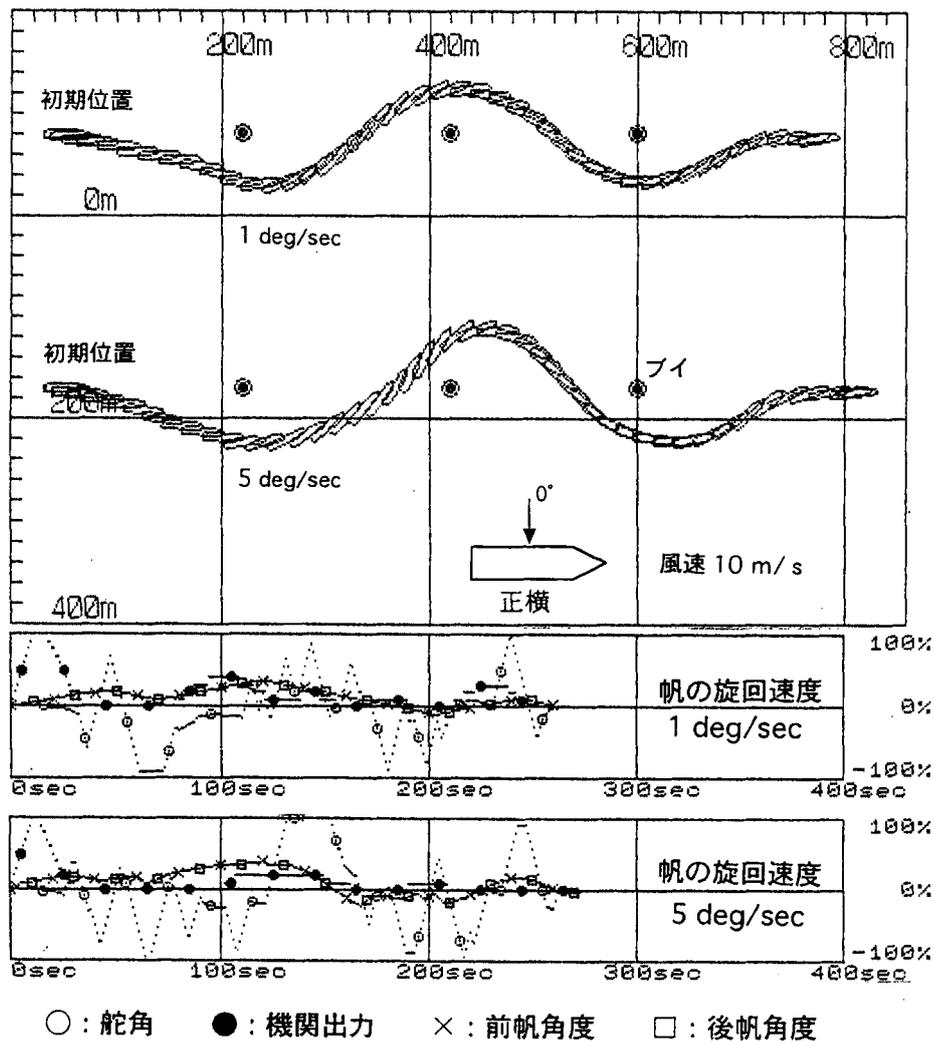
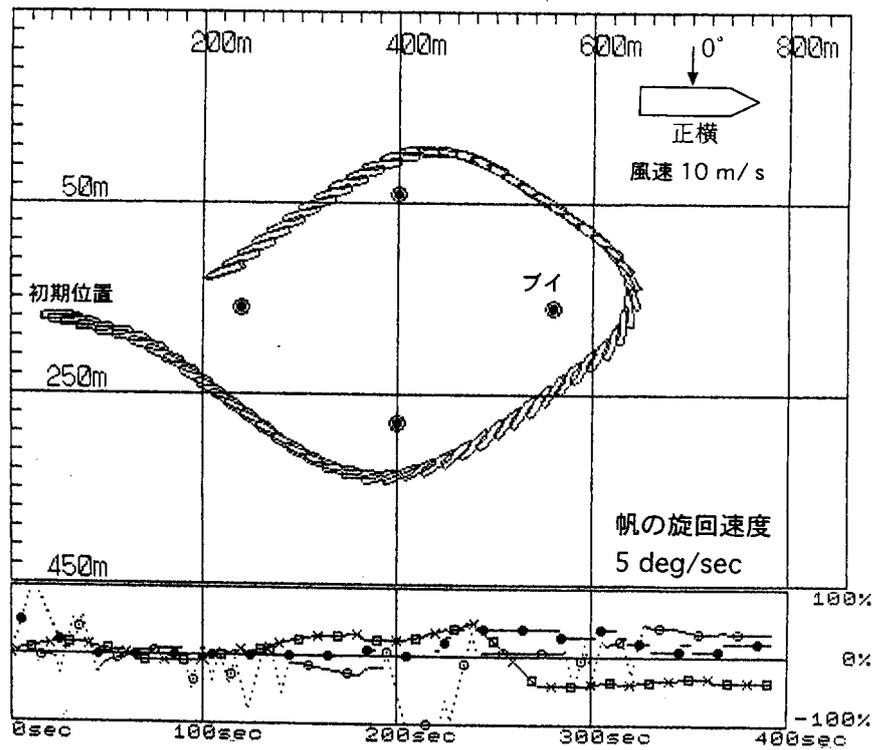
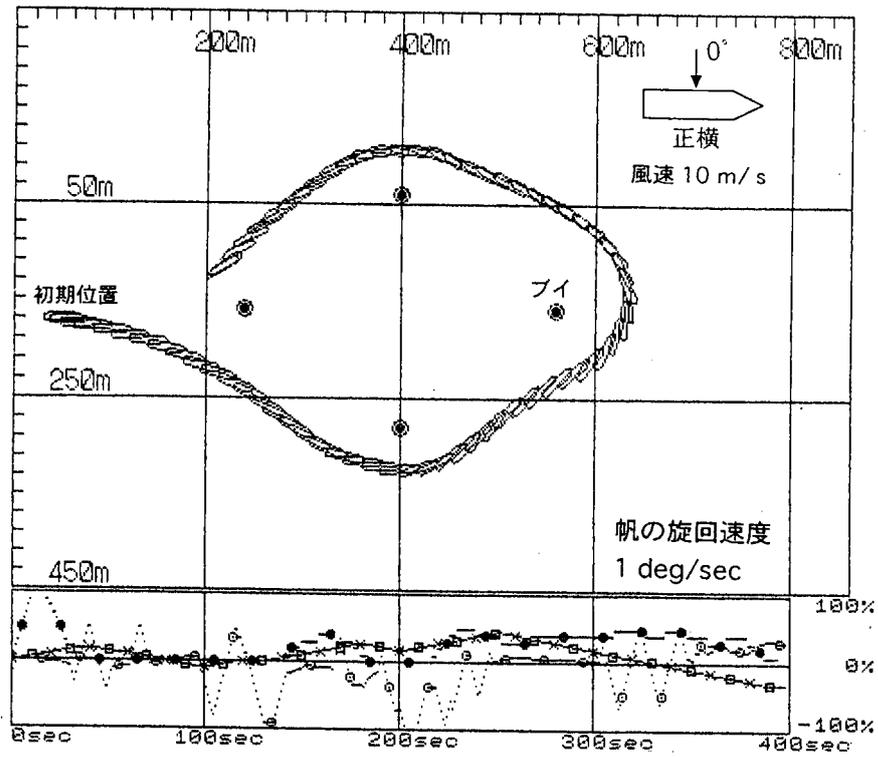


図 6 - 2 5 直進制御下の避航動作に対する船体運動

直進制御時の操縦性能を見るため、帆に直進制御をかけたまま Z 試験を行った。図 6 - 2 7 に 6 Kt での結果を示す。船体運動軌跡を見る限り、帆の旋回速度の影響は殆どない状態である。ジグザクに運動した 1 周期の船の長さ  $L$  に対する航走距離は、1 deg/sec の帆旋回速度で  $9.9L$ 、5 deg/sec で  $9.8L$  と僅かに帆の旋回速度が大きい方が良い結果となっている。6 Kt での機走時の Z 試験結果は  $9.3L$  であるため、直進制御時においては、帆旋回速度の大小が操縦性に及ぼす影響は少ないことがいえる。

これらの結果から、直進制御において十分な操船ができる適切な帆の旋回速度は 5 deg/sec あればよいことになる。



○ : 舵角   ● : 機関出力   × : 前帆角度   □ : 後帆角度

図 6-26 直進制御下の旋回動作に対する船体運動

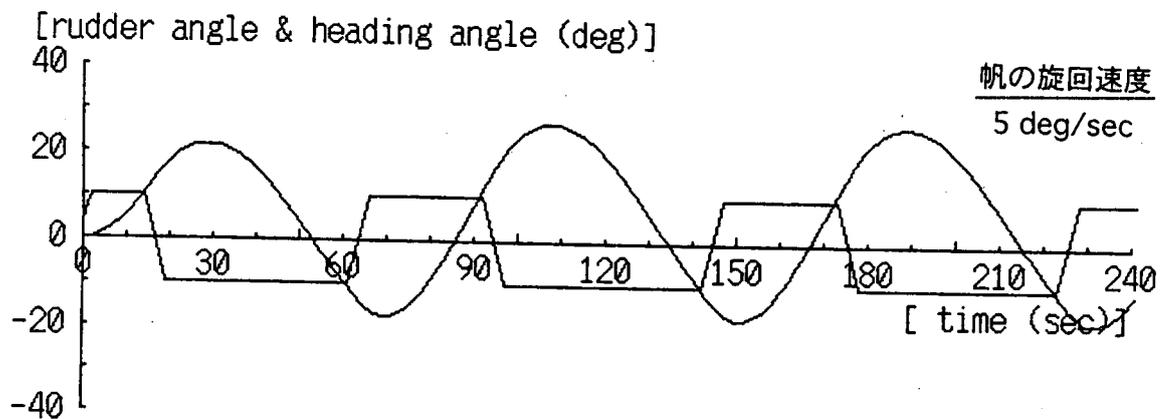
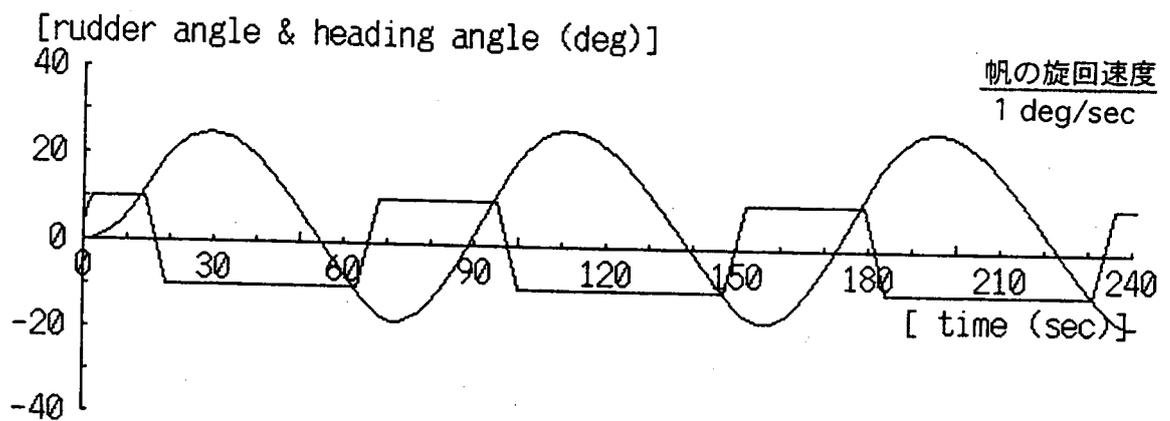
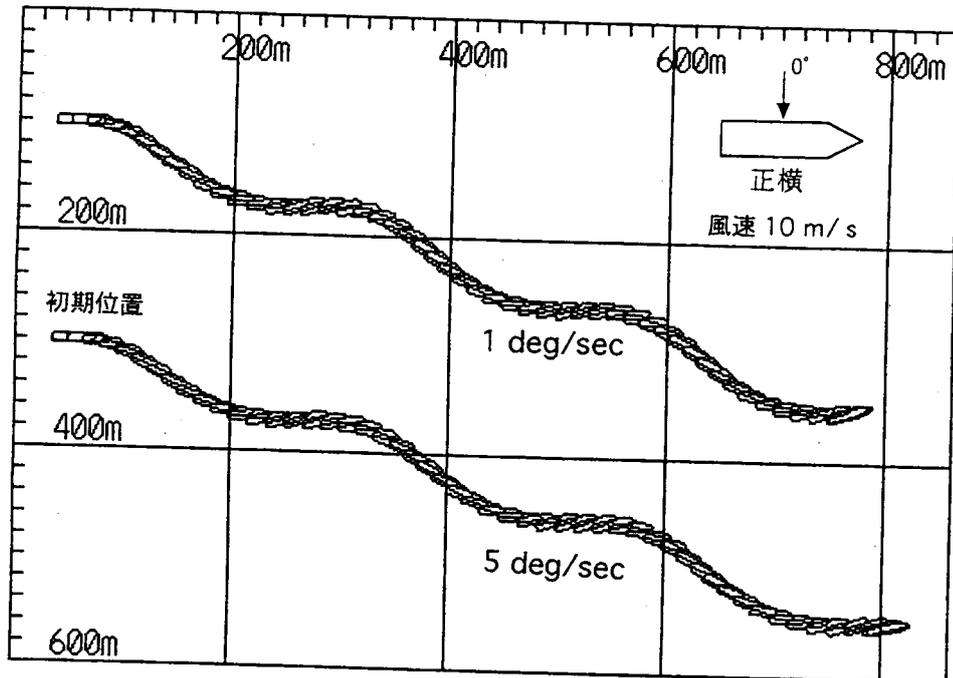


図 6-27 直進制御下での Z 試験結果

#### 6-6-4 回頭制御機帆走中の船体運動特性

機帆走時の回頭制御をシミュレーションする際の条件は以下の通りである。

風速 : 10 m/s      風向 : 正横

設定速力 : 6 Kt      航行状態 : 自動操舵航行

風下側へ回頭制御を行った場合の船体運動を図6-28に示す。帆の旋回速度の違いによる船体運動の軌跡は通常の旋回運動と変わらず特徴的な運動は示していない。また、機関を使用した回頭と比較しても、進出距離、旋回径ともに大幅な減少を示すような制御効果は得られなかった。しかし、各帆旋回速度の場合を比較すると回頭制御を発令してからの進出距離や旋回径の大小には少なからず差がある。帆の旋回速度が小さい場合は、大きな時に比べ進出距離、旋回径ともに増加を示す。これは、機関を併用した状態での回頭では、推進器により強い水流が得られるため舵効きが良く、回頭速度が速くなり、船体の旋回による相対風向の変化に帆角度の変化が十分に追従できなくなるために、前後の帆で得られる回頭モーメントの発生が遅れることが原因と考えられる。そのため、このように船体回頭速度が大きくなる場面においては、帆の旋回速度をできる限り大きくすることが必要である。

風上へ回頭制御を行った場合の船体運動を図6-29に示す。全体的には風下回頭と同様、帆の旋回速度が大きいほど旋回径の短縮効果が上がっている。旋回径の短縮は風下回頭よりも30%以上の短縮を示し、機関のみの回頭より格段に優れている。風上回頭では、帆旋回速度が船体運動に及ぼす影響は大きい。帆の旋回速度が1 deg/sec時には、5 deg/secや10 deg/sec時のような綺麗な円弧を描く旋回とはならず歪んだ円弧を描き、進出距離、旋回径ともに大幅に増大している。これは前後の帆に生じる力で船体に回頭のモーメントをかける際に、帆の旋回速度が遅いため、最適な帆角度に帆がセットされるまでに長い時間を要し、その間に船を回頭させたい方向と逆方向のモーメントが帆の推力によって生じるという過渡現象が長く起きるため、舵による回頭モーメントを相殺するからである。

回頭制御においては、風向の変動よりも船体の回頭による相対風向の変化の影響の方が大きい。

表6-2に純機走時に得られる値を基準として、帆旋回速度が5 deg/sec時の風向の変化に対する進出距離、旋回径の短縮状況を示す。

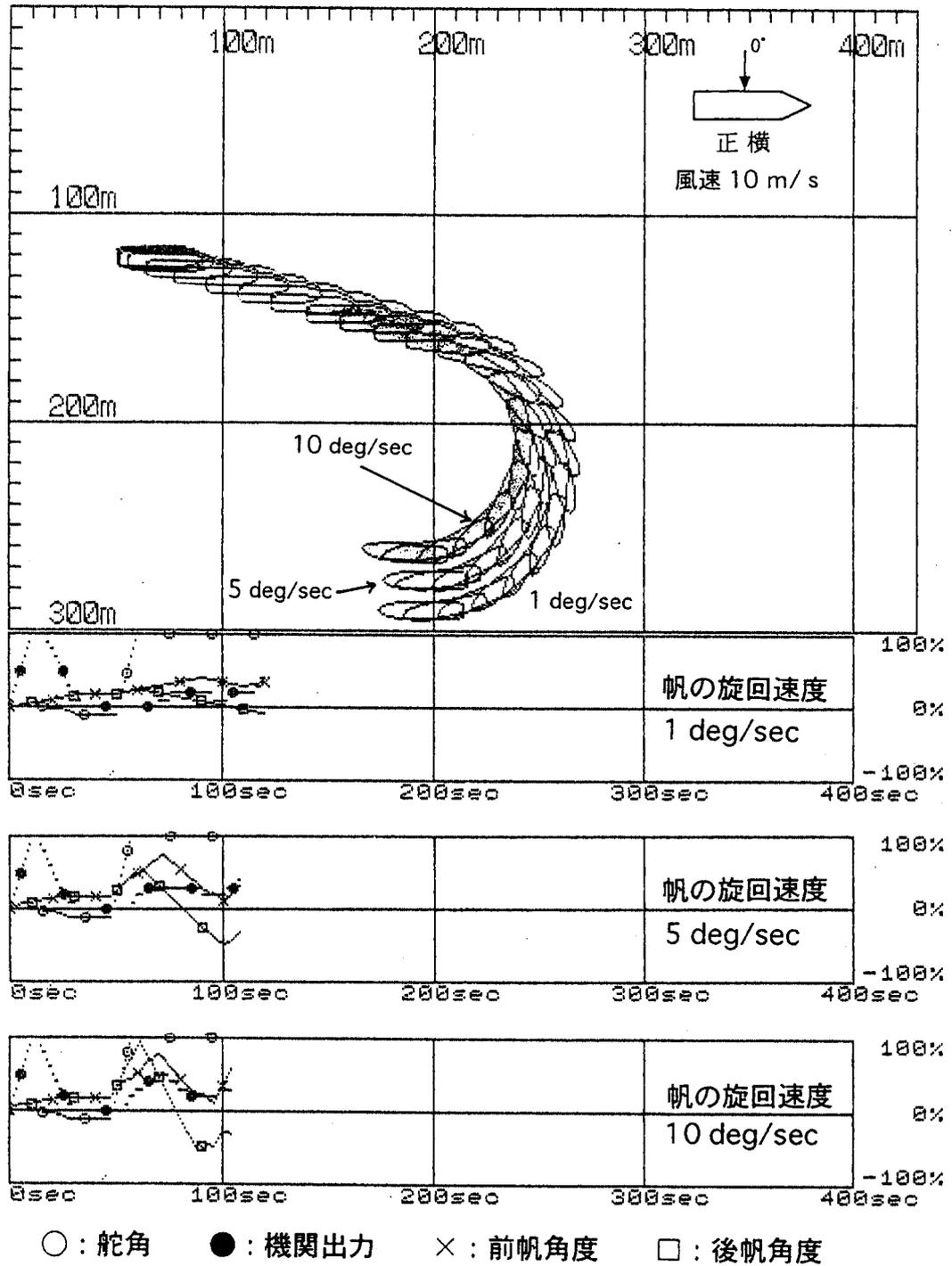


図 6-28 回頭制御による風下側回頭時の船体運動

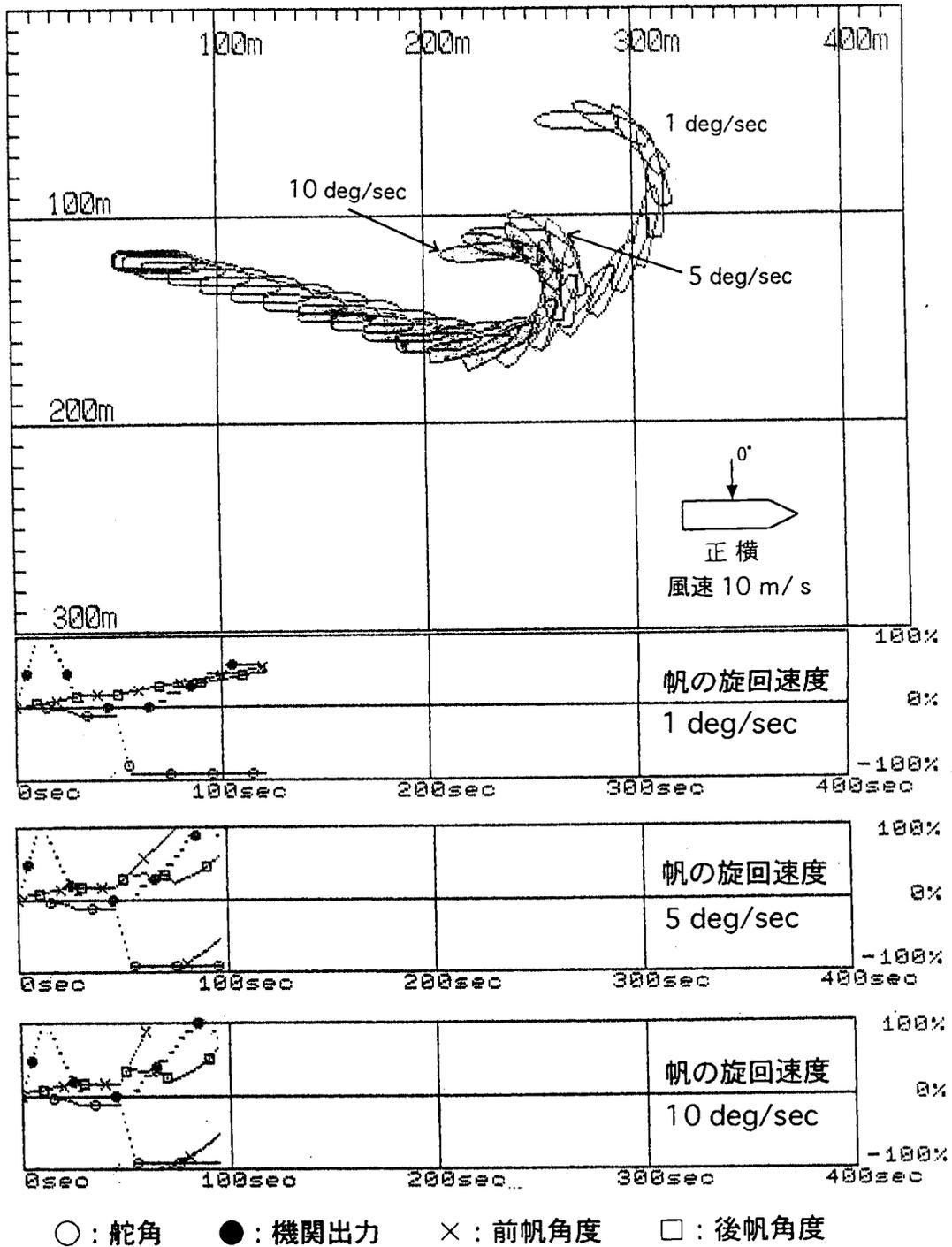


図 6-29 回頭制御による風上側回頭時の船体運動

表 6-2 風向きの違いによる回頭制御の効果

回頭方向・要素		相對風向				
		90° 真後ろ	45° 正横後45°	0° 正横	45° 正横前45°	90° 正面
風上回頭	進出距離	100%	101.7%	104.5%	91.1%	82.2%
	旋回径	87.6%	88.0%	66.2%	63.9%	118.7%
風下回頭	進出距離	100%	100%	83.3%	62.5%	82.2%
	旋回径	87.6%	97.3%	98.3%	79.1%	118.7%

※純機走時の値を基準 帆旋回速度 5 deg/sec

帆による回頭制御の効果が顕著に現れるのは、正面45°に風を受ける状態である。この場合、風下回頭、風上回頭どちらにおいても進出距離、旋回径は大幅に短縮される。正面からの風は進出距離が最短となるが、旋回径は逆に最長となる。これらの結果より、機帆走時の回頭制御は通常の機関を使用し舵のみによる回頭よりも進出距離短縮、旋回径縮小の効果が出る場合が多いことがわかる。

回頭制御時の船の操縦性能を見るため、帆に回頭制御をかけたままZ試験を行った。本回頭制御は、回頭させる方向にモーメントが最大にかかるように帆の角度を設定し、舵は回頭方向側へ最大舵角(35°)がとられるようになっている。しかし、ここでは回頭制御でとられる舵角を10°となるようにしてZ試験を行った。図6-30にその結果を示す。船体運動においては、1 deg/secの場合に、風上回頭に相当する左回頭のところ、定常な左旋回を歪ませる現象を起こしている。これは、帆の旋回が遅いため、旋回モーメントを発生させる帆角度になるまでに時間がかかり、この間に旋回を妨げる方向に力が生じてしまうためである。この現象は先の風上側へ回頭制御をかけた場合の悪影響と同じといえる。また、ジグザク運動の1周期に進出する船の長さLに対する航走距離は、5 deg/secで10.0L、1 deg/secで14.3Lであった。10° Z試験では5~11Lの範囲に入る船は操縦性が満足され、特に8L以下は操縦性の良い船といわれている<sup>(15)</sup>。

これより、5 deg/secの帆旋回速度があれば操縦性が満足される範疇に入るが、1 deg/secでは操縦性が悪い船となる。

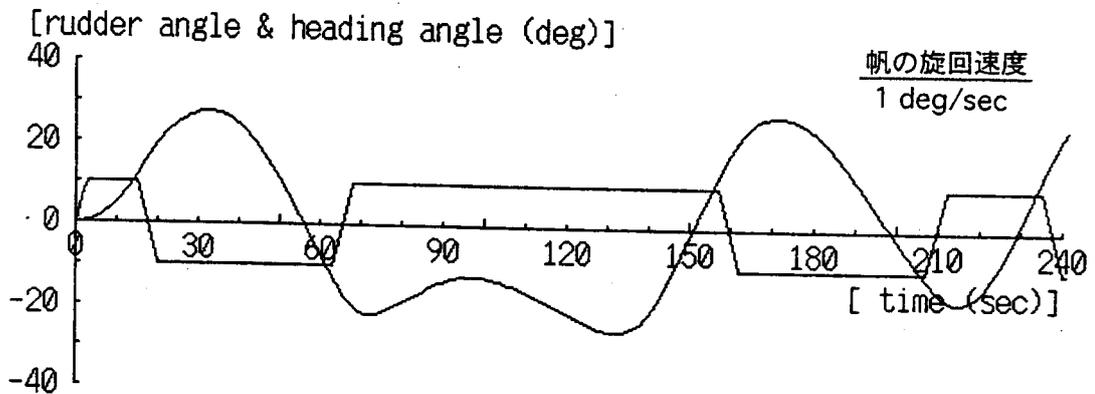
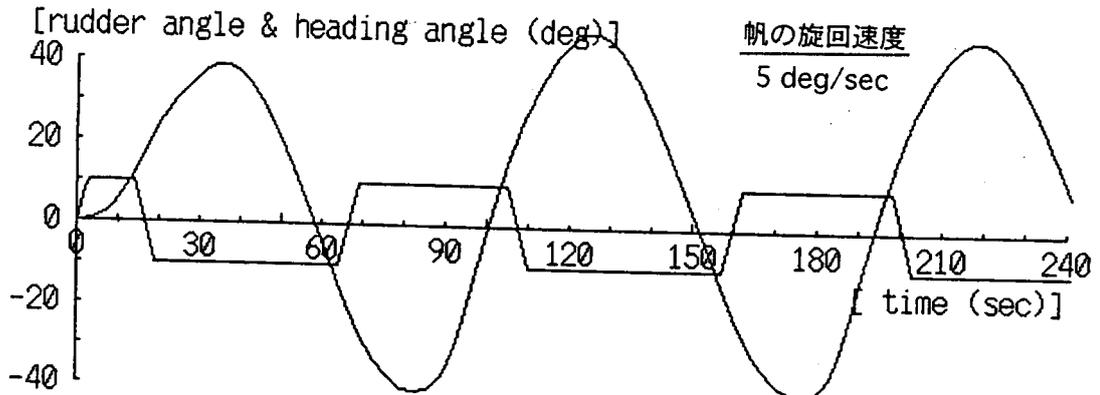
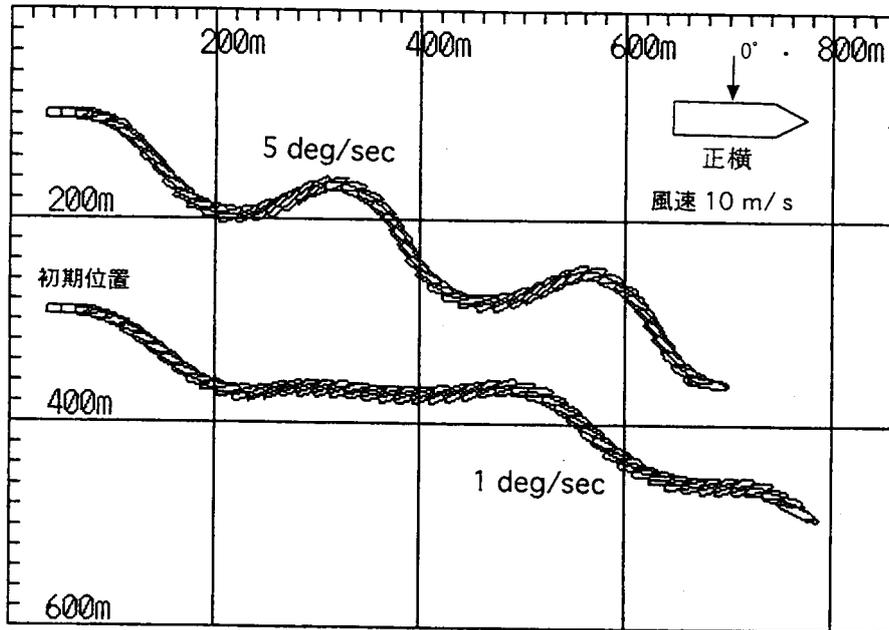


図 6 - 3 0 回頭制御（舵角 $\pm 10^\circ$ 固定）でのZ試験結果

つぎに帆装船用のZ試験として、舵を使わずに回頭制御をかけた帆だけを使用したZ試験を行った。設定速力は6Ktで一定とし舵角は $0^\circ$ とした。この結果を図6-31に示す。帆旋回速度1deg/secでは風上側回頭時に旋回してしまいZ試験が行えない結果となってしまう。これに対し、5deg/secでは船の長さに対する1周期の航走距離は $9.5L$ となり、舵を使わなくとも操縦性能を満たす範囲に入る結果となった。このZ試験の時の船体の旋回速度は3deg/secであった。回頭制御における帆の旋回速度は、少なくとも船体の旋回速度を上回る必要がある。シミュレーション結果は、帆の旋回速度が、船体の旋回速度の1.5倍程度あれば有効に制御することを示している。このことは、船体旋回速度の異なる帆装船の帆を計画する際に、一つの方法として、ここで行ったような舵を使わず帆のみによるZ試験法が有用と考える。

回頭制御の結果をまとめると、帆による回頭制御は十分な速力を持つ場面で用いるのは効果が少ないといえる。回頭制御は操船の補助として利用する上では、低速時に限定する方が有効である。また、このときの帆の旋回速度は、5deg/secあれば十分な制御ができると考える。

本章において、今回は通常航行の機帆走の場合を取り扱ったが、港内操船時のように、速力が極度に制約され、機関の発停や回頭などの操作が頻繁に行われるような操船では、風による作用はかなり大きな影響を及ぼすことが予想される。しかも、このような場合は、舵や推進機の作用による回頭力はあまり望めないことから、風の作用を有効に利用し、希望する回頭や変位運動を与えるような帆による制御は有効なものになろう。

#### 6-6-5 機帆走時の制御法の問題点と今後の課題

機帆走時の各制御法の効果は、帆の旋回速度の大小が大きく影響してくることは既に述べた。当然ながら、帆旋回速度が大きいほど制御の効果が得られるため、現在の帆装船の帆旋回速度1deg/secよりも大きくする必要がある。今回の帆旋回速度をパラメータとしたシミュレーションの結果からは、最低5deg/secの帆旋回速度が必要と考えられる。上述したような制御を今後の帆装装置に付加する場合、帆旋回速度を大きくする場合の帆旋回にかかるエネルギー計算が必要である。すなわち、帆を速く旋回させることに費やすエネルギーと、それによって帆から得

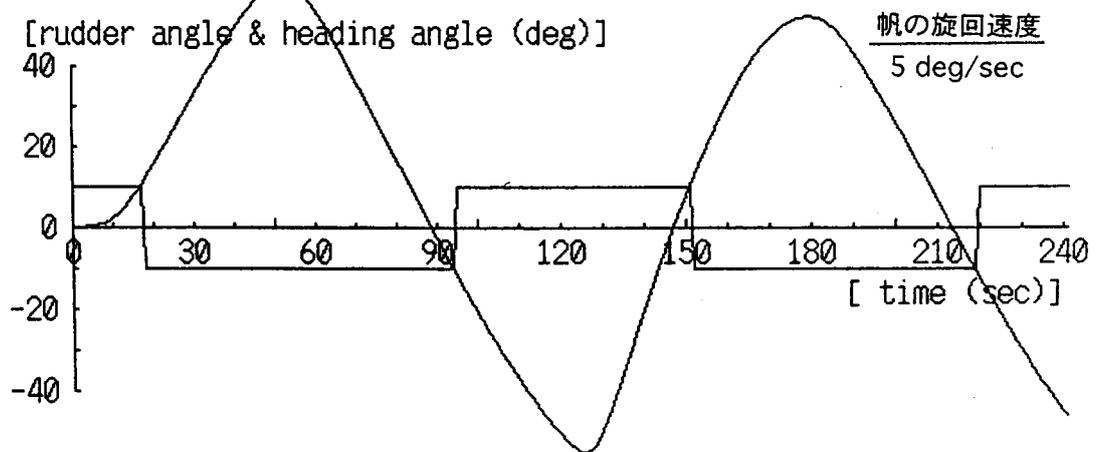
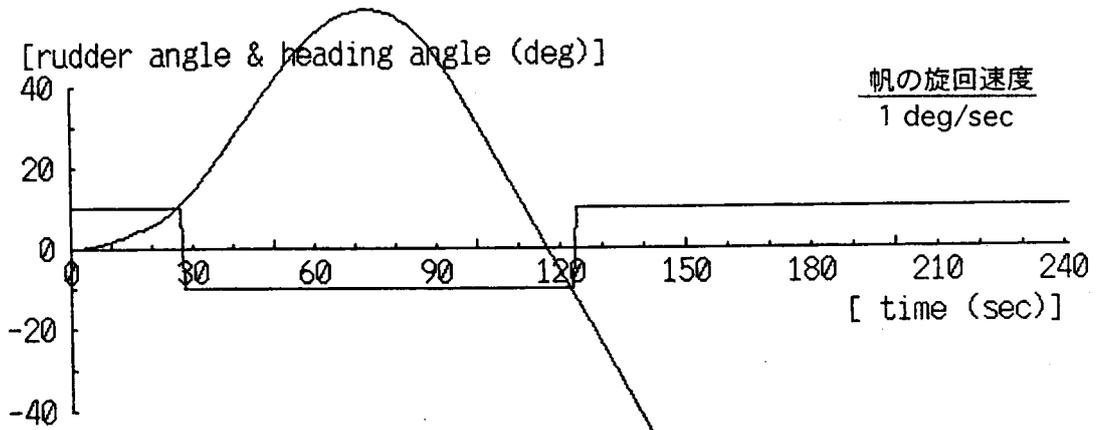
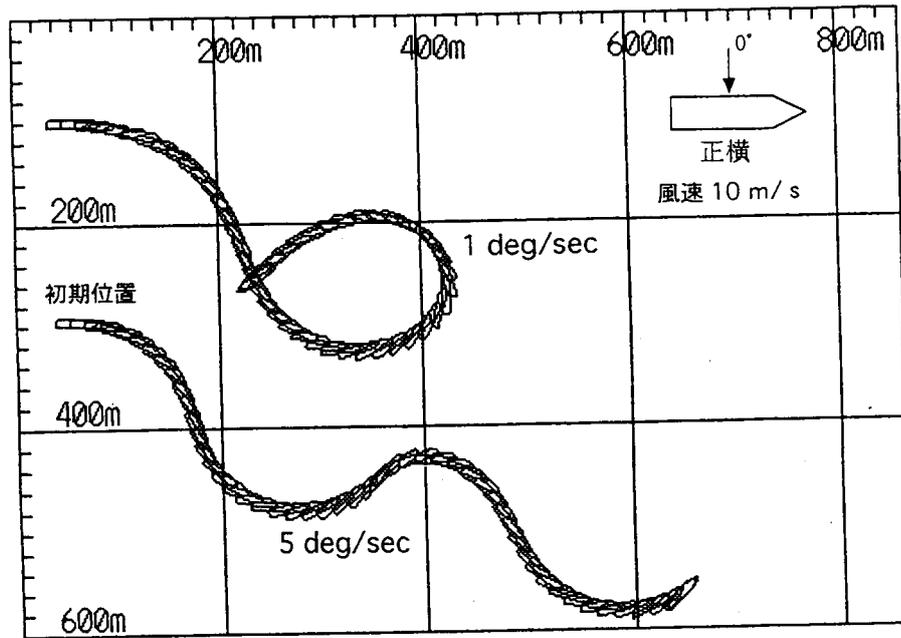


図 6-3 1 回頭制御 (帆のみ) での Z 試験結果

られるエネルギーの関係が問題となる。この関係を図6-32に示す。図中、帆の旋回に要するエネルギーが帆から得られるエネルギーよりも少ない部分では、帆の旋回速度を大きくしてもよい。逆に、設定しようとする帆旋回速度に要するエネルギーが、帆から得られるエネルギーよりも大きい場合は、帆の旋回速度を上げることを見合わせるべきである。今回はこの計算を行っていないが、帆装装置を設計する上で重要な項目である。

### 6-7 操帆操船支援システムの概要と提案

従来は帆装装置を省エネルギーの観点からだけで論じてきたが、操船上にも帆が有効であることが判ったため、積極的にこれを取り入れることを考え、図6-33に示すようなシステム（操帆操船支援システム：Support System for Ship Handling by Sail Control）を提案したい。本システムは、著者等が開発してきた帆装シミュレーターによる船体運動の予測結果を電子海図上や、レーダー画面に重畳表示させ、帆装船の操船上の安全性を向上させるものである。このようなシステムの実現によって、現在の省エネルギー制御のみの制御法から脱却し、操船にも利用可能な操帆制御システムが付加された新しい帆装装置の誕生が期待できる。

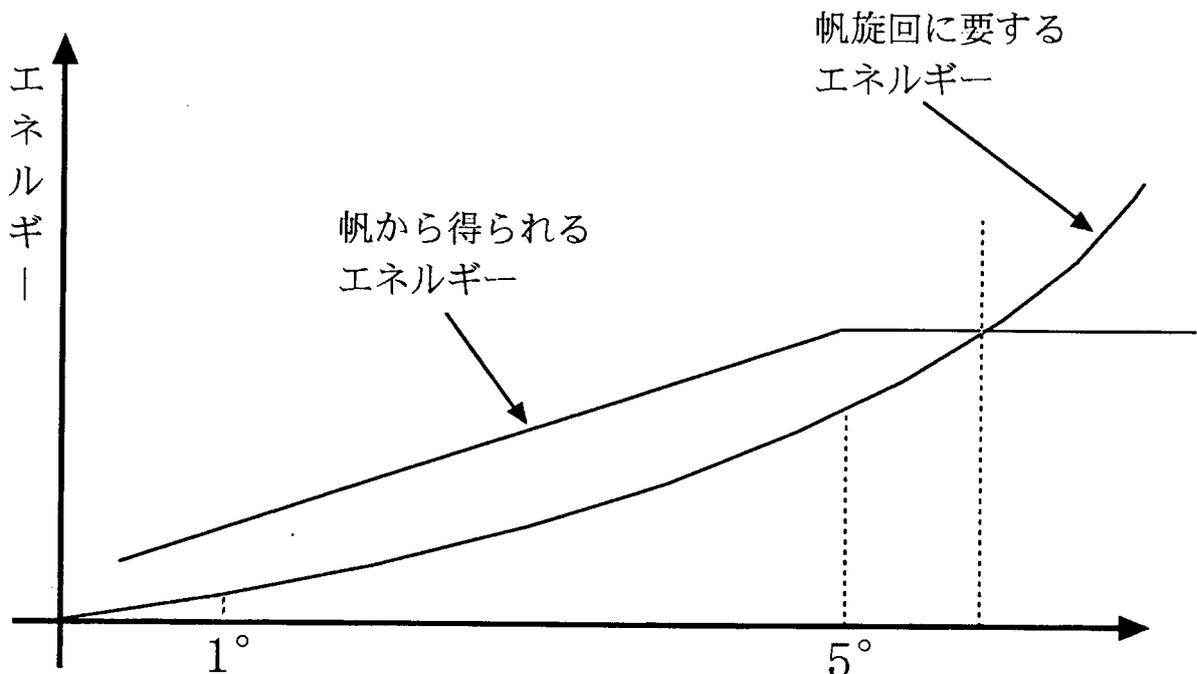


図6-32 帆操作のエネルギー収支概念図

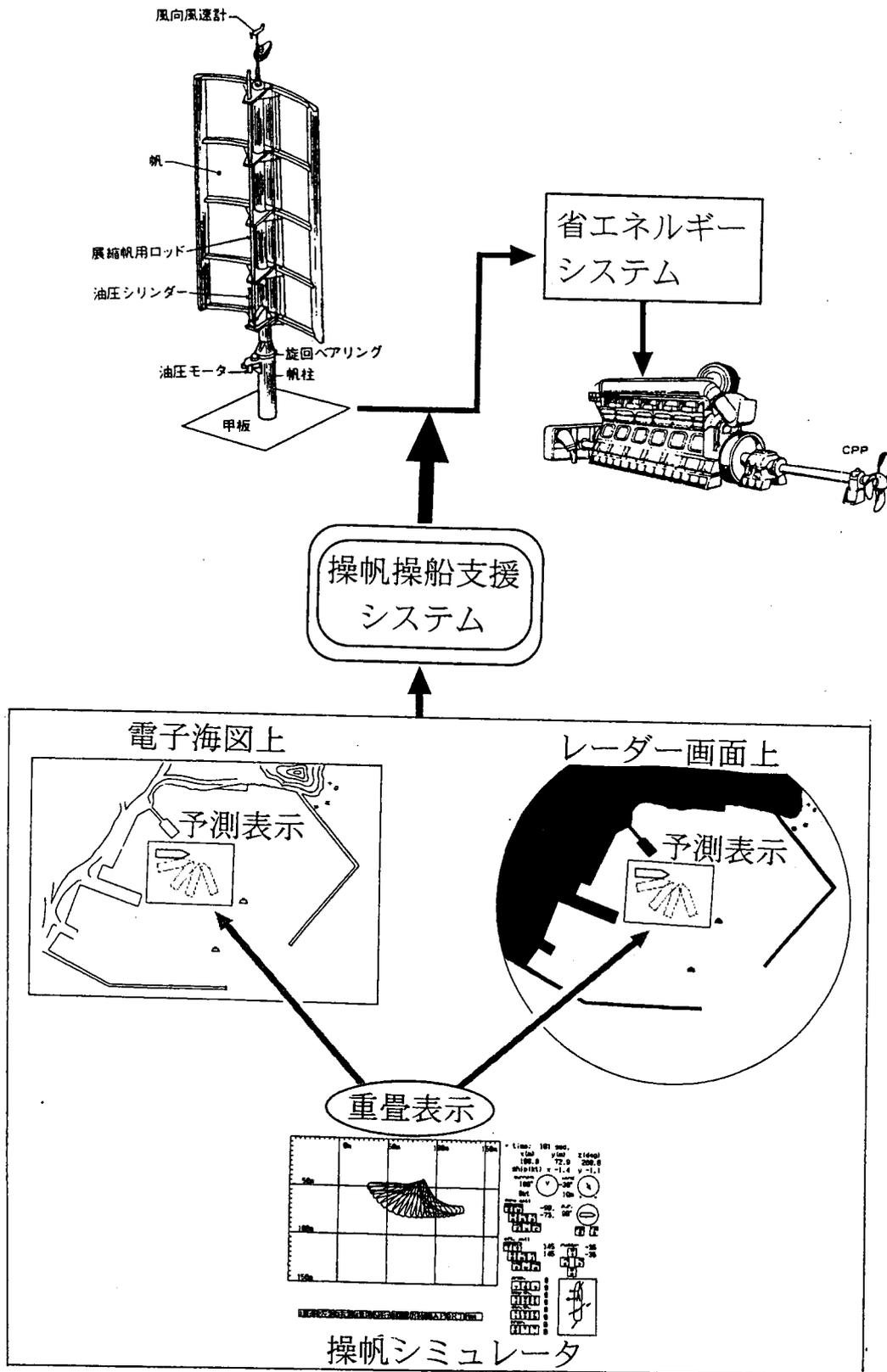


図 6-33 操帆操船支援システムの概要

## 6-8 結語

本章では100m<sup>2</sup>の2枚の帆を持つ、240tonの船に、操船上必要と思われる5つの制御法をかけた場合の船の運動の検討を純帆走時と機帆走時とに分けて行った。その結果、各制御の有効性を示すことができたと同時に、その利用可能範囲及び限界を明確にすることができた。また、帆装船の制御を考える場合、帆の旋回速度が大きく影響することを述べ、在来の帆装船で多く見られる1deg/secの帆旋回速度では急旋回の時に支障を来すことを今回指摘した。

帆の旋回速度の問題は、船の運動の速さに大きく関係してくることから、本制御は純帆走時のような比較的緩やかな運動をする場合に有効性を発揮すると考えられる。これは帆装船の問題点であった港内操船不良という欠点を大幅に改善できるものである。

本章で得られた帆装船の指針とも言うべき結論を要約するとつぎの通りである。  
純帆走時の結論

- (1) 純帆走での直進制御では、図6-11に示すような利用可能範囲及び限界が明確となった。
- (2) 純帆走ではルートトラッキングの機能は風下落ちを抑えるため有効なものとなる。
- (3) 純帆走での直進制御で制御不能となった風向に対しても、極微速の機関を併用することによりそれが解消される。
- (4) 回頭制御は、どの方向からの風についても可能であるが、風下落ちが激しい回頭となる場合があるため注意が必要となる。また、これに対しても極微速の機関を併用すると風下落ちを極力抑えて回頭できる。
- (5) 停留制御については内向き制御が有効である。しかし長時間の停留については内向き制御をかけるよりは、むしろ帆を畳んだ方が漂流速度が落ち有効となる。
- (6) 純帆走での急停止制御は図6-19に示すような利用範囲及び限界が明らかになった。
- (7) 純帆走での斜行制御は図6-21に示すような利用可能範囲及び限界が明確となった。
- (8) 斜行制御に付加した姿勢安定制御は斜行移動中の船の安定を向上させる

上で有効な制御となる。

#### 機帆走時の結論

- (1) 直進制御中に起こる風向の変化に対して、帆角度の変更は比較的小量ですむため、帆の旋回速度は帆装船の運動特性に大きく影響はしない。在来の帆装船で見られる 1 deg/sec の帆旋回速度で問題はない。
- (2) 直進制御中、急激な避航動作等を除けば、通常の進路変更や旋回動作に対して、1 deg/sec の帆旋回速度で帆は問題なく追従できる。
- (3) 直進制御中、ごく希に起こる急激な風向変化や急変針に対して、帆から十分な推力を得ようとするならば、5 deg/sec の帆旋回速度が必要である。
- (4) 回頭制御においては、帆の旋回速度が帆装船の運動特性に大きく影響する。帆制御の効果を十分に得るためには、最低でも 5 deg/sec の帆旋回速度が必要である。
- (5) 回頭制御で大きく帆角度を変更することになる風上側の回頭では、在来の帆装船でみられる 1 deg/sec の帆旋回速度では旋回に支障を来す。
- (6) 回頭制御での必要な帆の旋回速度は、船体の旋回速度の 1.5 倍程度である。

以上のように帆制御を考える場合、帆の旋回速度の大小が操船性に大きく影響する。本シミュレーション結果では、各制御法とも操船性を向上させるためには最低限 5 deg/sec の帆旋回速度が必要とでてきたが、この最低値である 5 deg/sec の帆旋回速度が装置として実現できるかというところが今後の帆装船の運動性能の向上を考える上で問題点となる。

## 第6章の参考文献

- (1) 伊藤雅則：帆装商船の自動操帆システム、計測と制御、Vol.23.No2、昭和59年2月、pp.12~19
- (2) 名村秀樹：帆装商船の展望について、関西造船協会誌、第182号、昭和56年9月、pp.123~136
- (3) 高岡俊輔、村山雄二郎、久保雅義：帆装型船舶の制御とその評価、日本航海学会論文集、第100号、平成11年3月、pp.91~101
- (4) 小川陽弘、小山健夫、貴島勝郎：操縦運動の数学モデルについて、日本造船学会誌、第575号、昭和52年5月
- (5) 濱田昇：近代帆装商船の性能実証研究（大阪大学学位論文）昭和60年12月
- (6) 岩井 聰 著：操船論、海文堂、昭和53年3月
- (7) 久保雅義、高岡俊輔：新型帆装装置の開発、日本航海学会論文集、第94号、平成8年3月、pp.1~8
- (8) T.Nakaoka,Y.Toda：Laminar Flow Computation of Fish-Like Motion Wing, April.10-15. 1994.ISOPE
- (9) 李永雨他：セーリングヨットの二翼干渉のCFDシミュレーション、日本造船学会論文集、平成9年
- (10) 井上欣三：単錨泊船の振れ回り運動中に生じる錨鎖張力の緩和に関する研究-I、日本航海学会論文集、第65号、昭和56年10月、pp.1~12
- (11) 高岡俊輔、村山雄二郎、久保雅義：帆装型船舶の帆の利用による操船能力について、日本航海学会論文集、第98号、平成10年3月、pp.265~276
- (12) 前畑幸弥 著：ジ・イロソハスとオートハ・イロト、成山堂、昭和62年2月新訂増補版
- (13) 安居院、中嶋 著：FFTの使い方、秋葉出版、1987年7月
- (14) Davenport：The spectrum of horizontal gustiness in high winds, Quart.J.Roy.Meteor.Soc.,87,194-211.AG.1961
- (15) 本田啓之輔著：操船通論、成山堂、昭和61年5月

## 第7章 帆を利用した錨泊法の検討

### 7-1 概説

第6章では、帆装船の抱えている2つの深刻な問題点の内の一つである操船性の低下に関する問題について、帆を操船に積極的に使用した場合の有効性を明確にした<sup>(1)</sup>。帆の利用が操船性の向上に十分期待できることから、操船性の向上が得られる帆の制御法を示し、帆の制御を従来燃料節約のみの制御から脱却させ、操船の向上に寄与することのできる操帆操船支援システムの提案<sup>(2)</sup>を行った。

そこで、本章では帆装船の持つ深刻な問題の二つ目である錨泊時に走錨の危険性が高くなる問題への検討を行う。帆装船の錨泊時の問題点は具体的にはつぎのようなことが挙げられている。

- ① 振れ回りが増大し走錨の危険性が高い。
- ② 振れ回りに不規則な運動を起こすことがあり、周期も速い。

この問題については、操船性不良と同様、その問題解決のアプローチは未だ行われていないのが現状である。

上述したような問題点の解決を行うため、7-2節では、帆装船の安全錨泊の可能性を分析できる錨泊シミュレータを開発した経緯を述べる。

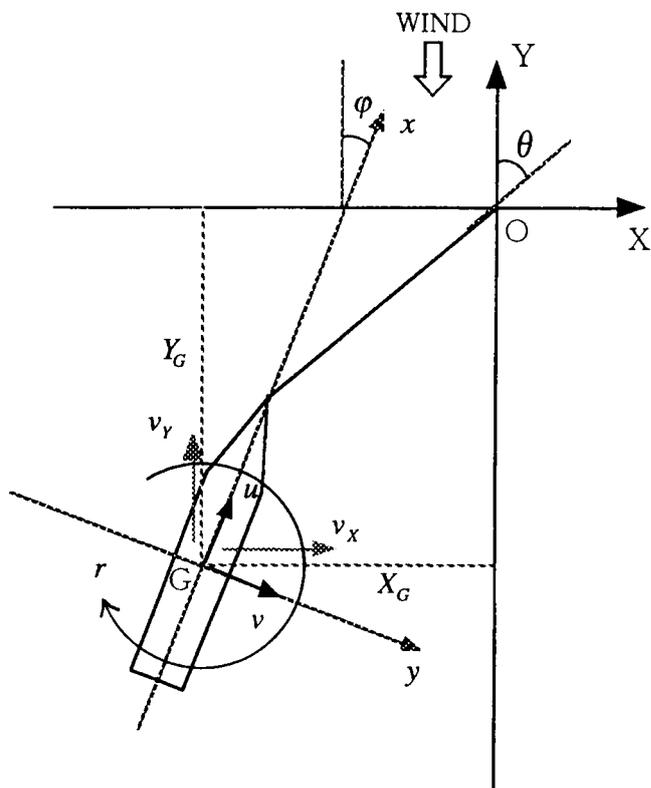
船舶の錨泊問題で重要となる振れ回りや錨鎖張力の研究は、実船での計測<sup>(3)~(6)</sup>のほか、模型船による風洞実験<sup>(7)~(13)</sup>、シミュレーションでの計算によるもの<sup>(14)~(17)</sup>など種々行われているが、帆装船について検討されたものは井上等<sup>(18)</sup>による報告だけである。また、リアルタイムで振れ回りが模擬できるシミュレータは非常に少なく<sup>(19)</sup>帆装船に関するものは皆無である。このため、今後が開発が予想される帆装船の錨泊問題を検討する上で、一つのツールとなる帆装船錨泊シミュレータの開発意義は大きいと考える。

7-3節では、この錨泊シミュレータを使い、帆装船の問題発生メカニズムの解明と安全錨泊のための帆の制御法の分析を行った。

## 7-2 帆装船舶の錨泊シミュレータの開発

### 7-2-1 座標系および運動方程式

風の中で単錨泊する船の振れ回り運動の解析は、図7-1に示す座標系を用いた。座標系に示す各要素は以下である。



X - O - Y : 錨位置を原点とする  
静止空間座標

x - G - y : 船体重心を原点とする  
船体に固定した座標

$\phi$  : 船首角 (船首尾線と  
Y軸のなす角)

$\theta$  : 錨鎖角 (錨鎖とY軸  
のなす角)

船体固定座標系で、x方向、y方向、回転方向の速度成分、加速度成分を各々u、v、r、 $\dot{u}$ 、 $\dot{v}$ 、 $\dot{r}$ とすれば、運動方程式はつぎのようになる。

図7-1 運動の座標系

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= X_w + X_c + X_H + X_s \\ m(\dot{v} + ur) &= Y_w + Y_c + Y_H + Y_s \\ I_{zz}\dot{r} &= N_w + N_c + N_H + N_s \end{aligned} \right\} (7.1)$$

m : 船の質量

u : 船体前後方向の船速

v : 船体横方向の船速

r : 旋回角速度

X : 船体前後方向に働く力

Y : 船体横方向に働く力

N : 慣性モーメント

$I_{zz}$  : Z軸回りの慣性モーメント

上式中、X、Y、Nの添字w、c、H、sは風、錨鎖、船体に働く流体力、帆による船体への力またはモーメントを示す。

計算においての帆の特性は前章と同じ値を用い、上記の運動方程式を1sec毎にオイラー法による数値積分で解いた。1sec毎にした理由は、カッターの振れ

回り周期から考え、1周期の  $1/960$  となる 1 sec 毎で十分と考えたからである。

船体に働く錨鎖反力の計算については、カテナリー理論<sup>(20)</sup>を以下に示すように採用している。

図7-2のような単錨による錨泊状態において、錨孔部分のP点と錨鎖が海底に接する部分のQ点で支持される錨鎖を考える。

ここでP点における水平張力  $T_0$  を錨鎖の単位長さあたりの水中重量  $w_c$  で除した値を  $t$  とする。この  $t$  は水平張力  $T_0$  と同じ重量の鎖の長さに相当する。

$$t = \frac{T_0}{w_c} \quad (7.2)$$

また、PとQとの間はカテナリー曲線を形成し、その懸垂部分の長さ  $s$  は錨孔から海底までの長さを  $y$  とすると、つぎのように表される。

$$s = \sqrt{y \left( y + \frac{2T_0}{w_c} \right)} \quad (7.3)$$

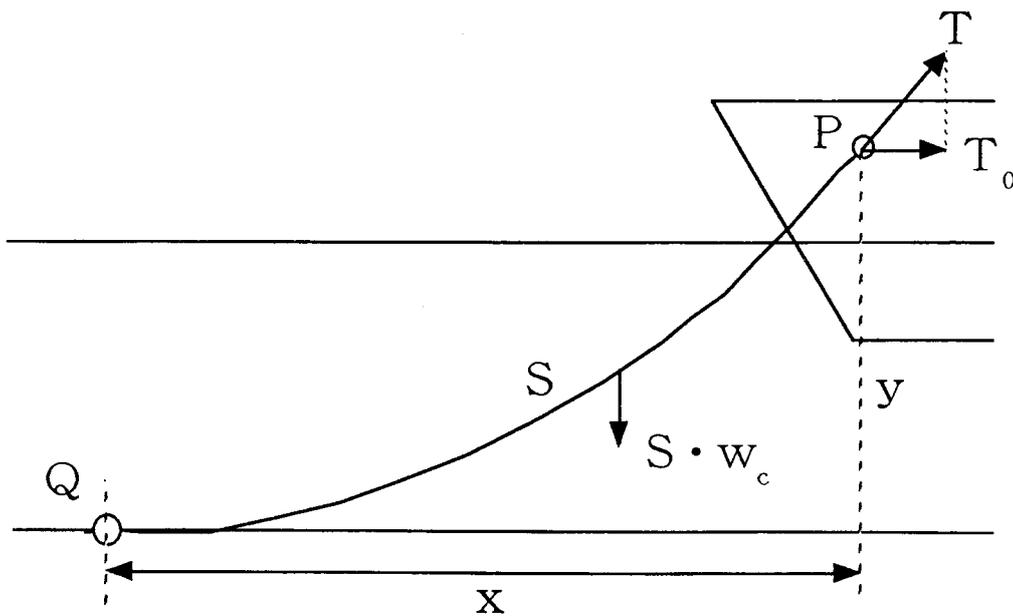


図7-2 単錨泊時の係駐状態

この懸垂部分の水平距離  $x$  は次式で求められる。

$$x = t \cdot \ln \left\{ \frac{1}{t} \left( s + \sqrt{s^2 + t^2} \right) \right\} \quad (7.4)$$

ここで、 $t$  がカテナリー長さ  $s$  よりも十分大きいならば式 (7.4) はつぎのように近似できる。

$$x = t \cdot \ln \left( \frac{s}{t} + 1 \right) \quad (7.5)$$

式 (7.5) に対し、以下に示す自然対数の展開式を 2 次の項まで当てはめると、式 (7.6) となる。

$$\ln(1 + \delta) = 1 - \frac{\delta^2}{2} + \frac{\delta^3}{3} - \dots$$

$$x = t \left\{ \frac{s}{t} - \frac{1}{2} \left( \frac{s}{t} \right)^2 \right\} = s - \frac{s^2}{2t} = s \left( 1 - \frac{s}{2t} \right) \quad (7.6)$$

また、式 (7.6) はつぎのように展開される。

$$\frac{x}{s} = 1 - \frac{s}{2t}$$

$$\frac{s}{2t} = 1 - \frac{x}{s} = \frac{s-x}{s}$$

$$2t = \frac{s^2}{s-x} \quad (7.7)$$

これより、式 (7.7) は式 (7.2) よりつぎのように表される。

$$\therefore T_o = \frac{w_c \cdot s^2}{2(s-x)} \quad (7.8)$$

この近似式により、カテナリー部分の横距離  $x$  に対する錨鎖の水平張力  $T_0$  が計算でき、船が錨鎖を引っ張ることによる錨鎖反力が求められる。近似式から計算される  $x$  と  $T_0$  の関係を上記、式 (7.2) から直接的に得られる関係と比較してみると、錨鎖長を 135 m としての計算では、図 7-3 に表す結果となる。これから見ると張力としては多少大きめの値が出ることになるが、カテナリー部分が少なく錨鎖張力が小さくなる部分での違いはほとんど問題のないことがわかる。また、シミュレーション実施に当たっては、つぎのような基礎条件を設けた。

- ① 振れ回りの船体運動は平面運動のみとし、一般に使用されている操縦運動方程式<sup>(21)</sup>を用いた。
- ② 風速、風向は一定とし、潮流、波浪についての船体影響は本計算に算入しない。
- ③ 錨は海底の一点で動かないものとし、錨鎖と海底の摩擦や錨鎖に働く流体力は船体のそれに比較し小さいので無視した。
- ④ 錨鎖進出位置は船首端とし、常に同一鉛直面上にあるものとする。
- ⑤ 船体に掛かる錨鎖反力は錨位置と船首端との幾何学的関係を用いてカテナリー理論に基づいて計算した。
- ⑥ モデル船は操舵、機関の使用は行わないものとした。

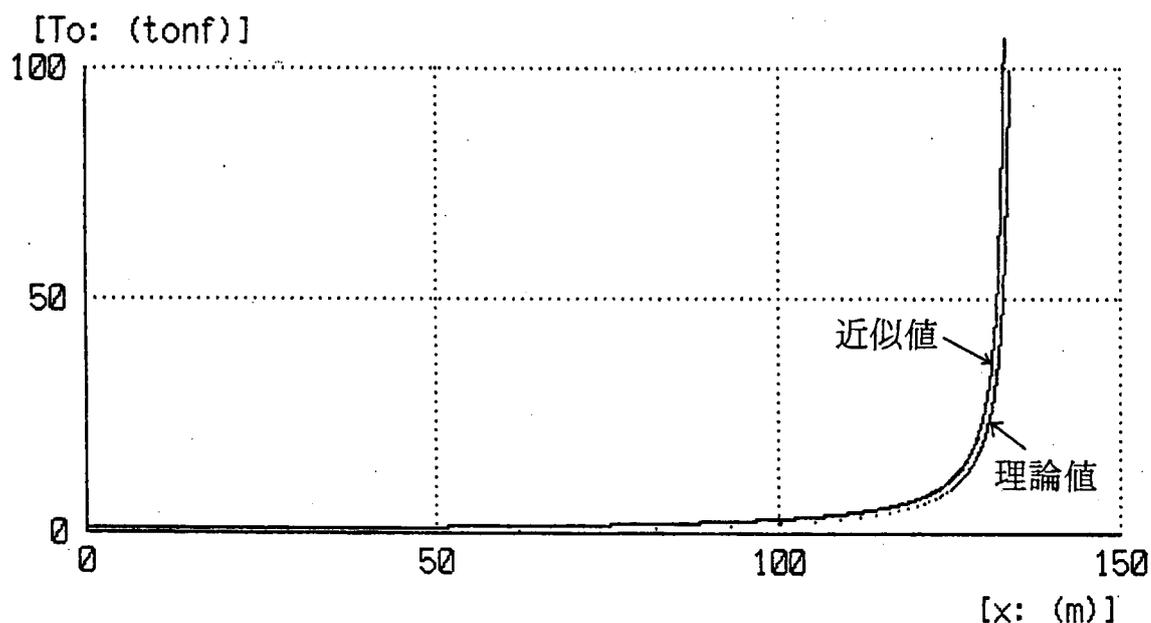


図 7-3 カテナリー理論からの錨鎖の水平張力

### 7-2-2 計算に使用したモデル船と帆について

計算に用いた船は練習船Y丸であり、本論文通して同じ船としている。錨泊を模擬する上で重要となる船体形状及び上部構造物の状況<sup>(22)</sup>は図7-4に示す。また、錨、錨鎖に関する要目は表7-1である。帆の面積は、縦7m、横10mの70m<sup>2</sup>とした。帆の設置位置は前章と変わらず、船体中央より前後13mの位置に各1本設置している。

### 7-2-3 錨泊シミュレータの概要

帆装船舶の錨泊時の運動を調べるため開発した本章のシミュレータは、次のような特質を持っている。

- ① 1秒毎の船体姿勢を描画できるシステムとなっている。
- ② 帆の設置位置および帆面積は任意に設定可能となっている。
- ③ 風力においては、0～25m/sまで変化させることができる。
- ④ 風向については、風の振れが再現できるように実時間で手入力で任意に変更が可能となっている。
- ⑤ 帆の操作は手動でリアルタイムに行えるようになっている。
- ⑥ 機関及び舵の操作、並びに船首、船尾に備えられているスラスターの操作が可能となっている。
- ⑦ 帆の空力特性を容易に取り込めるシステムとなっているため、任意の帆の特性をシミュレートできる。
- ⑧ 操作した全ての状況が操作部に表示されるため、的確に現状が把握できる。

表7-1 錨および錨鎖の要目

項目	規格
錨の重量	430 kg
錨鎖の径	24 mm
錨鎖の単位重量 (1ss)	259 kg
錨鎖の耐力試験荷重	22.3 tons
錨鎖の破断試験荷重	34.1 tons

本シミュレータの表示画面の一例を図7-5に示す。シミュレータ開始時の船体初期位置は船体に働く外力と錨鎖による係留力のつりあいが成立する少し手前の位置とし、振れ回り運動が定常運動となる時間を短縮した。また、船体の開始位置の姿勢は風の方角に対して10°の偏角を持たせ、振れ回り運動に対する初速度が生じるような姿勢とした。シミュレーションの描画については定常の振れ回り状態を表示させる目的で、シミュレ

ーション開始後800sec間の空計算を行った後、指定した時間の記録を表示するようになっている。

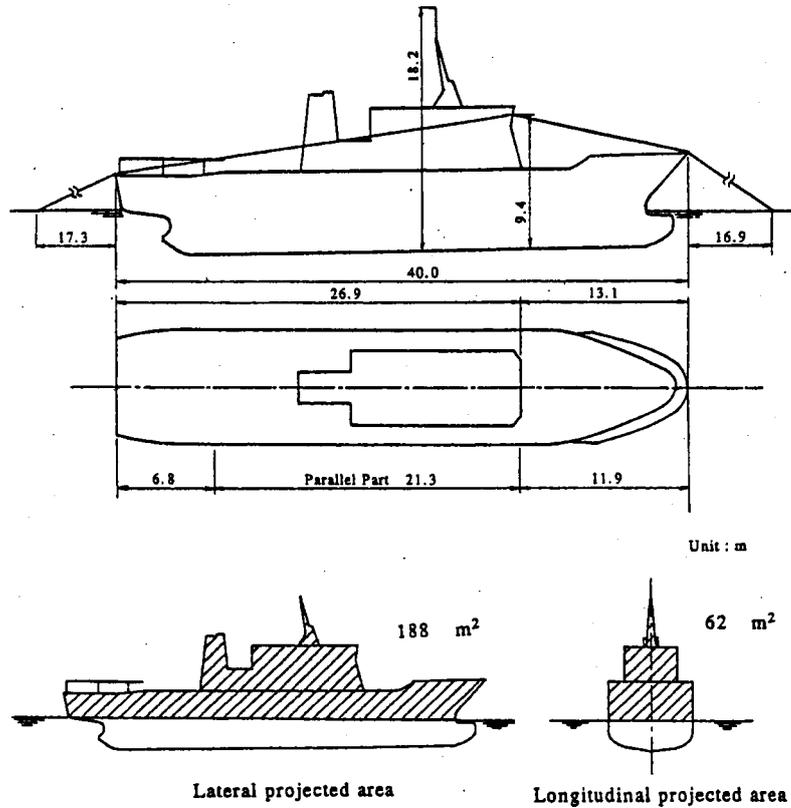


図7-4 船体形状及び上部構造物の状況

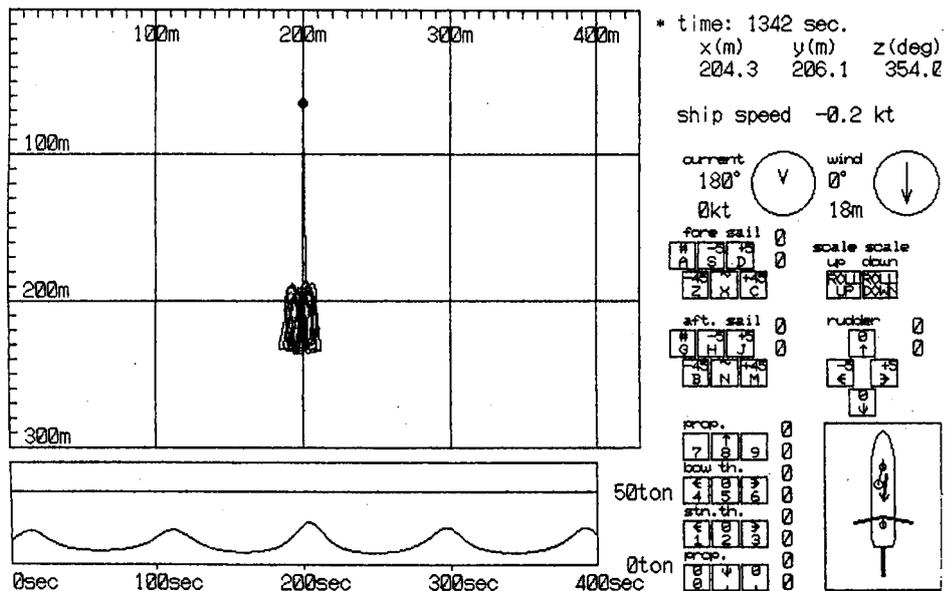


図7-5 錨泊シミュレータの表示画面

### 7-3 帆の積極的利用による錨泊への効果

#### 7-3-1 基準とした振れ回り運動について

実験はすべて18 m/sの定常風下で行い、風向は真上（表示平面の船首方向）から水深は15 m、錨鎖の伸出量は135 m（5.4節）とした。

基準とするシミュレーションは、前後の帆は無い状態として振れ回りを行わせた。このシミュレーション結果を図7-6に示す。図中の振れ回り状況の表示は25 sec毎の船体姿勢を描いており、これと同時に振れ回り中の要素として錨鎖にかかる張力を時間変化と共に下部に表示している。振れ回り軌跡については図7-6からわかるように、8の字を描きながら周期的に振れ回っており、風の中で単錨泊する船舶の運動を忠実に表している。また、錨鎖張力についても衝撃力は、船体が風位に向いたあと、風下に落とされて急激な船首回頭の後、錨鎖と船首尾線がほぼ一線になった直後に発生していることから、錨泊の状況を模擬する上での定性的な部分はほぼ満足できる程度に再現されている。しかし、定量的な面で、振れ回りの周期や錨鎖張力に関する部分の値が大きめの値として出てくるところに多少の危惧が残る。

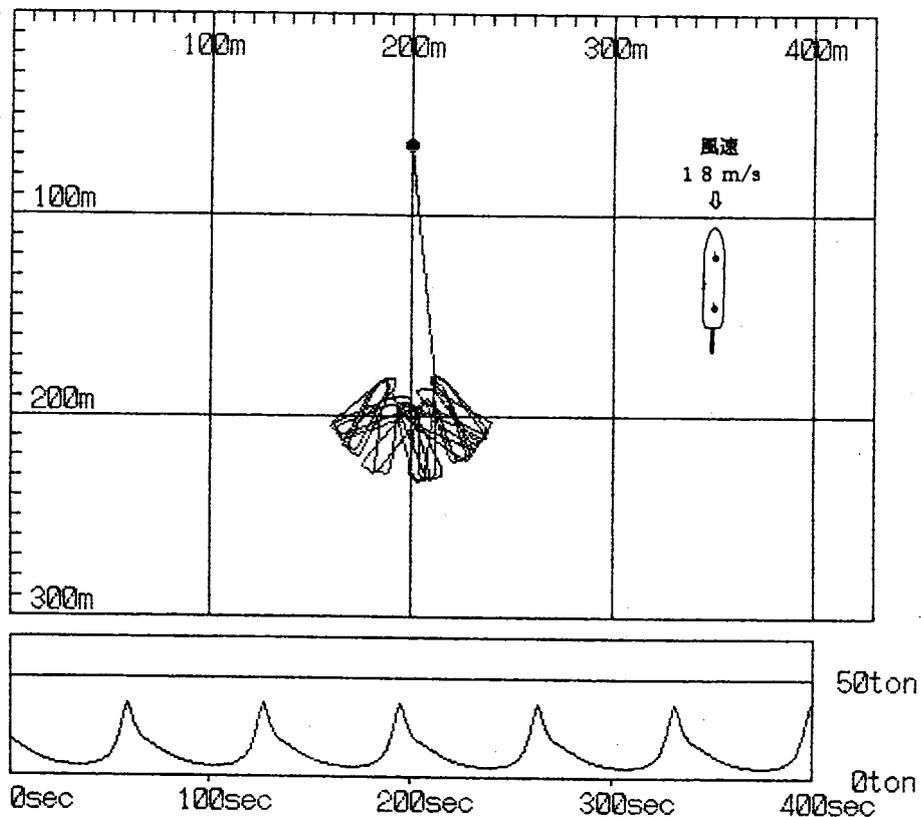
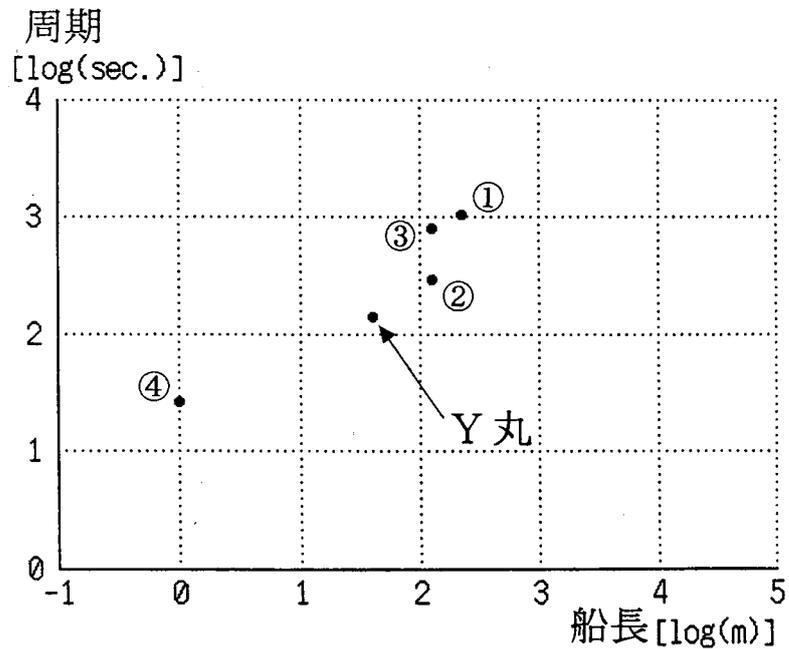


図7-6 帆がない状態での振れ回り運動

ここでは、Y丸の振れ回り周期に関してある程度の妥当性の確認を行った結果を述べる。過去に行われた類似の錨泊実験の結果<sup>(3)(7)(12)</sup>から、船の長さとの関係を表したものが図7-7である。同図上にプロットしたY丸の振れ回り周期は他の船に比べやや短めに出ている。これは、使用した運動モデルが、錨泊時の横移動の多い運動を十分に表現できていないことと、船体上部構造物にかかる風圧力の影響を客船タイプの類似船型で推定しているためと考えられる。しかし、その差は大きなものではなく、本シミュレーションの目的が帆を利用したときの効果を比較するものであるため、このシミュレーション結果を、今後、帆を利用した効果を評価するための基準値として用いる。

振れ回り幅（船尾の振れの横移動距離）：80 m  
 衝撃張力：34 ton  
 衝撃張力の周期：140 sec  
 定常張力（振れ回り中の一定の張力）：5 ton  
 船首方向の最大振れ角：72°



①船長：224.98 m	振れ回り周期：1050 sec
②船長：128.0 m	振れ回り周期：293.8 sec
③船長：124.84 m	振れ回り周期：804 sec
④船長：1.0 m	振れ回り周期：26 sec

図7-7 Y丸振れ回り周期の妥当性の確認

### 7-3-2 振れ回りの抑制効果と錨鎖張力の緩和効果

帆を利用することにより振れ回りを抑制させ、帆装船の安全な錨泊の制御を探り出すことを考え、風に対し帆に角度を持たせて固定した状態でのシミュレーションを最初に行った。結果を図7-8～図7-12に示す。また、基準値と比較した場合の各要素の状況は表7-2に示す。

帆の開き角は $90^\circ$ （この状態をスクエアと呼ぶ）を開始点として、ここから $45^\circ$ 間隔で、 $135^\circ$ まで時計回りに変化させたものである。 $135^\circ$ 以上を行わなかった理由は、 $18\text{ m/s}$ 吹いている正面からの風に対し帆の推力が錨を引っ張る向きに非常に大きく出てしまうため、実用的でないことから実験を行わなかった。

#### (a) 船首部の帆だけの利用結果

図7-8からわかるように、帆をスクエアの状態にした結果が振れ回りを最も少なくしている。錨鎖張力については、定常張力の値は基準値とほぼ同じであったが、衝撃張力は定常張力に緩やかに張力がかかる形で現れ、基準値より小さくなっている。また、衝撃張力のかかる周期は約 $200\text{ sec}$ で、基準値の $1.4$ 倍長くなっている。振れ回りの特徴は通常の8の字とはなっておらず、多少の横振れは見られるが、ほとんど船首が風に立った状態で僅かな前後運動を繰り返している。このような運動となる要因は風圧抵抗が船首部に錨を引っ張る方向に大きく働くため、風下側への圧流が強くなり通常の振れ回りの横移動成分を減少させたためと考える。

この他の実験では、 $225^\circ$ の状態にしたものが振れ回り運動の縮小を見せているが、錨鎖にかかる張力の観点から考えると過大張力となるため実用的とはいえない。また、 $135^\circ$ の状態においては振れ回り姿勢も帆を開いた側に偏って生じ、船首を拘束された形で振れ回りが不規則な運動となっている。また、錨鎖張力も大きくなってしまいう悪い結果を起こしている。この原因としては、船が振れ回っている最中に、帆に角度がついていることから揚力が生じ、それが振れ回る側へ生じた場合、錨鎖張力を増長したのと考えられる。

表 7-2 帆の状態別の基準値との比較

要素										
張力間周期	69sec	150%	159.1%	195.5%	295.4%	145.5%	113.6%	204.5%	90.1%	100%
振れ回り幅	80 m	4.8%	66.7%	147.6%	57.1%	33.3%	190.9%	0%	38.1%	52.4%
定常張力	5 ton	200%	333.3%	233.3%	466.7%	133.3%	200%	166.7%	400%	266.7%
衝撃張力	34 ton	54.5%	154.5%	345.5%	345.5%	109.1%	136.4%	31.8%	345.5%	345.5%
船首変角	72 deg	13.9%	34.7%	101.4%	23.6%	1.4%	58.3%	0%	65.3%	50%

要素										
張力間周期	75%	136.4%	118.2%	77.3%	154.5%	50%	409.1%	127.3%	68.2%	90.1%
振れ回り幅	28.6%	52.4%	52.4%	28.6%	100%	28.6%	100%	104.8%	47.6%	4.8%
定常張力	333.3%	66.6%	466.7%	333.3%	266.7%	266.7%	333.3%	200%	200%	466.7%
衝撃張力	136.4%	336.4%	354.5%	81.8%	354.5%	350%	331.4%	327.3%	345.5%	77.3%
船首変角	38.2%	0%	77.8%	19.4%	55.4%	194.4%	66.7%	104.2%	55.6%	29.2%

(b) 船尾部の帆だけの利用結果

図 7-9 に示すように、船尾部の帆の利用では、船首部の帆の利用に比較しどの条件のシミュレーションも振れ回りについては安定しており、良い結果となっている。船尾帆 225° の設定の場合のみ錨鎖張力が大きくなっている。これは船尾部に帆による力が後進推力として強くかかるためである。

一番良い結果となったのは帆を 180° にした場合で、振れ回り幅、錨鎖張力ともに減少を示した。この状態は風に対して帆の揚力がほとんど発生しない形になっていることから、船首が風に立った時には船尾部を安定させる抵抗として働き、船首方向と風の方向がずれた場合には、船の姿勢を風の方向に向ける揚力が発生する。このことが振れ回りを小さくする理由である。また、この帆の状態にしていると錨鎖張力は衝撃張力がかかることなく、ほぼ一定の定常張力を示しており、基準値のそれとほとんど変わらない値となっている。振れ回り姿勢については、船首部帆をスクエアにした状態と同じように風に船首を立てた形で前後動を繰り返す。この帆の状態が帆の角度を固定して錨泊する上で最も有利な方策と

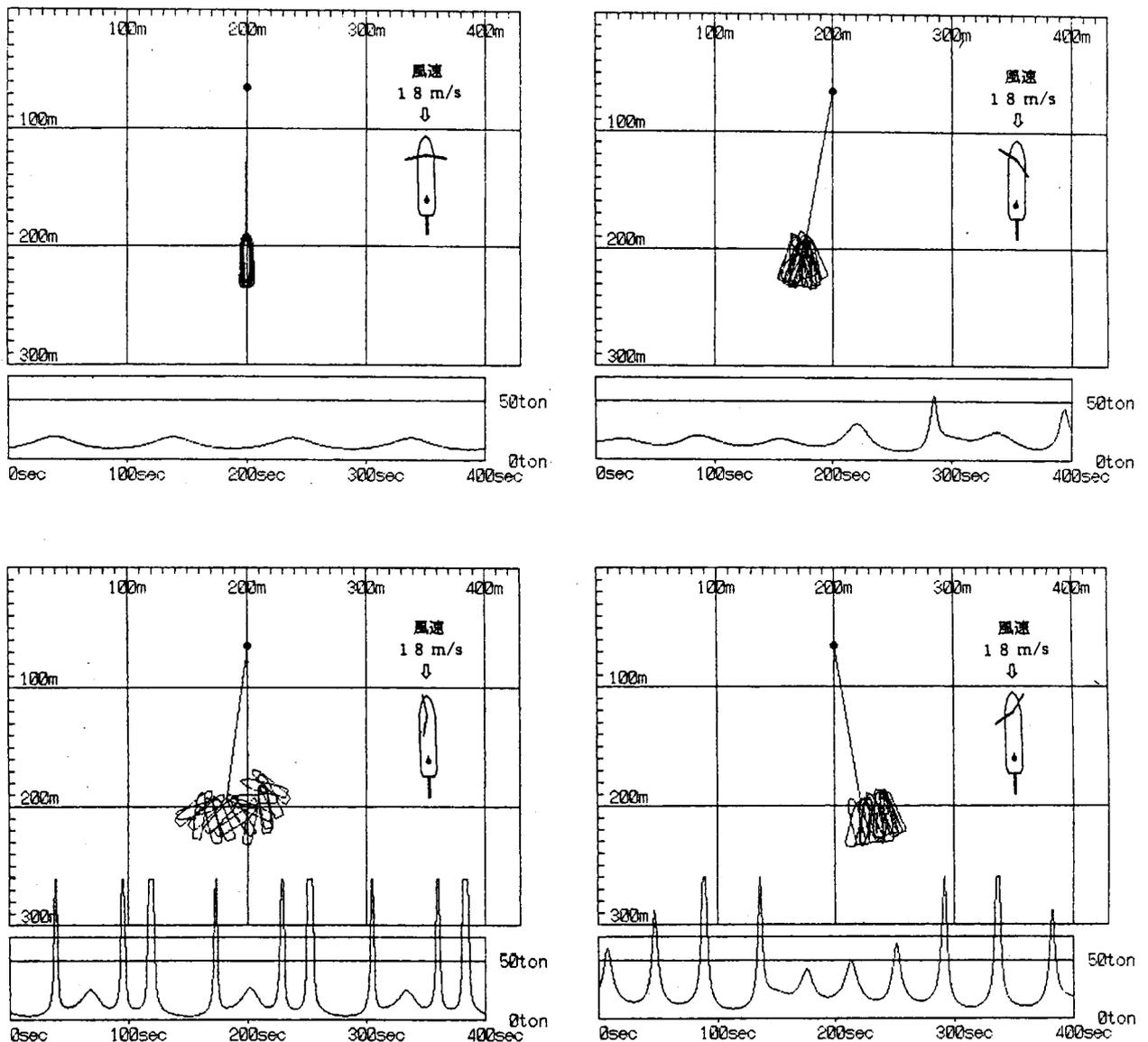


図 7-8 船首帆利用時の振れ回り運動

考えられる。180°の状態の他に、135°の状態も良好な結果を示しているが、船首振れが多少ある分、衝撃張力が約100sec周期で起きているため有用とはいえない。

(c) 船首、船尾両帆の利用結果 (船尾部の帆はスクエアで固定)

図 7-10 が示すように、このシミュレーションの結果を見る限り、どの状態も安全性を高める効果にはなっていない。錨鎖にかかる衝撃張力が過大すぎるのが一番の原因であるが、2本の帆の風圧面積が大きいいため風下への力が強くかかり張力が大きくなる。特に船首、船尾の帆をスクエアにした場合は、錨鎖張力は大きくなり、その張力も周期的とならず、不安定な運動となる。

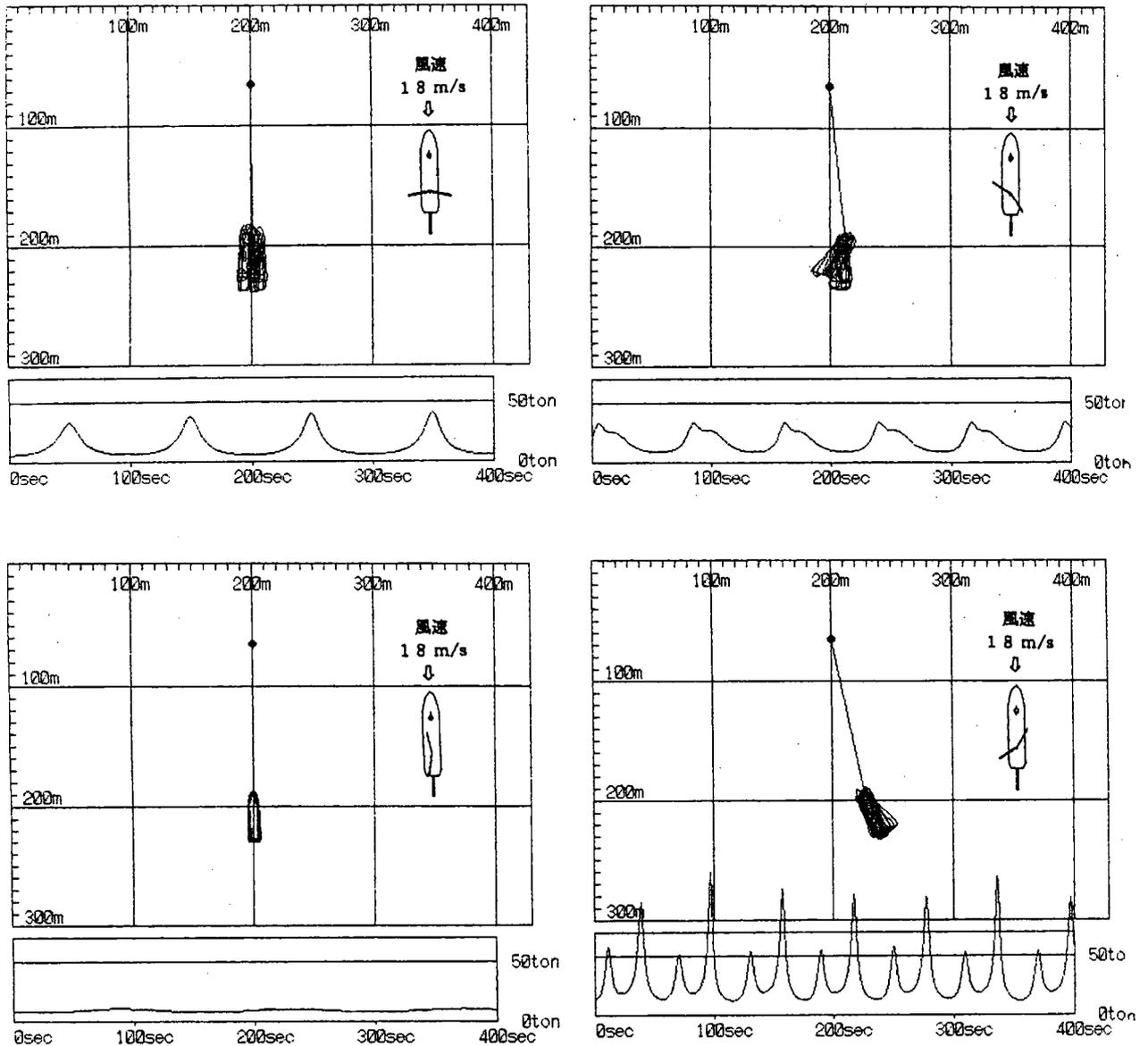


図 7-9 船尾帆利用時の振れ回り運動

(d) 船首、船尾両帆の利用結果 (船首部の帆はスクエアで固定)

図 7-11 が示すように、(c) の結果と同様、安全性を高める効果にはどの状態もなり得ていない。比較的船首の帆をスクエア、船尾帆を  $135^\circ$  の状態が安定な振れ回りを示しているが、船首帆の影響が強すぎるため、船尾帆の効果が十分に得られず、大きめな衝撃張力が生じる結果となっている。また、船首帆をスクエア、船尾帆を  $225^\circ$  にした状態では横方向へかなり偏して振れ回る。これは船尾帆に生じる揚力の影響で船尾を右方向に振る推力がかかり、これにより船首帆に船首を左方向に振るモーメントが生まれることが原因である。

( e ) 船首部と船尾部の帆をともに利用した結果

図 7-1 2 に表示結果を示す。振れ回りについては船首帆を  $135^\circ$ 、船尾帆を  $135^\circ$  にした状態が、通常の 8 の字運動で振れ回る現象を示している。しかし、錨鎖にかかる衝撃張力は過大となる傾向を示す。これは、風に対する船体姿勢により、船首、船尾の帆に生じる揚力が互いに同方向となり錨鎖張力を増長させてしまうからである。

船首帆  $135^\circ$ 、船尾帆  $45^\circ$  の状態が振れ回りを小さくしているが、定常張力が大きくかかり過ぎるところに問題が残る。

上述した ( a ) ~ ( e ) までの結果を総合的にまとめると、帆の角度を固定し

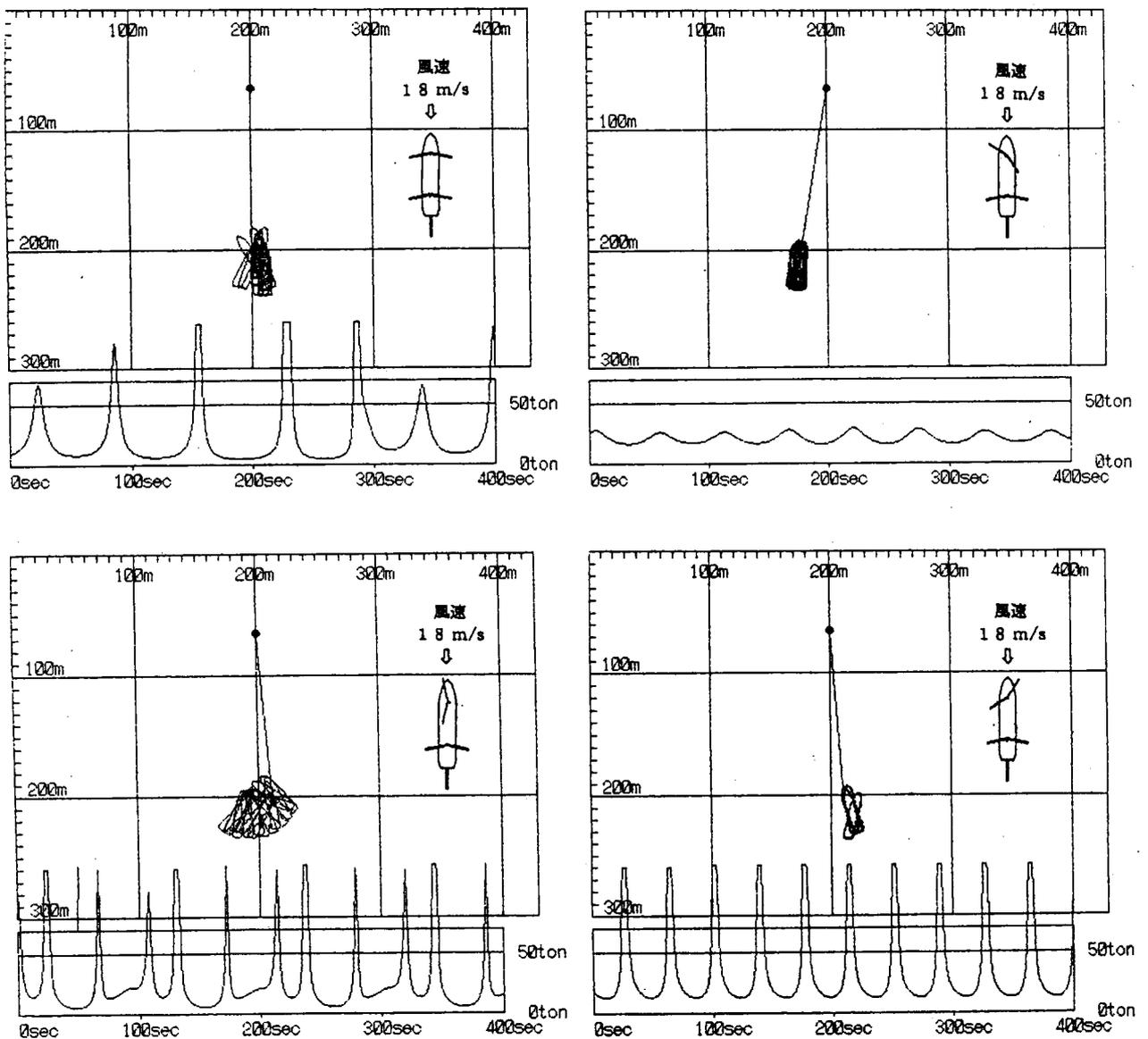


図 7-1 0 船尾帆をスクエアとし船首帆利用時の運動

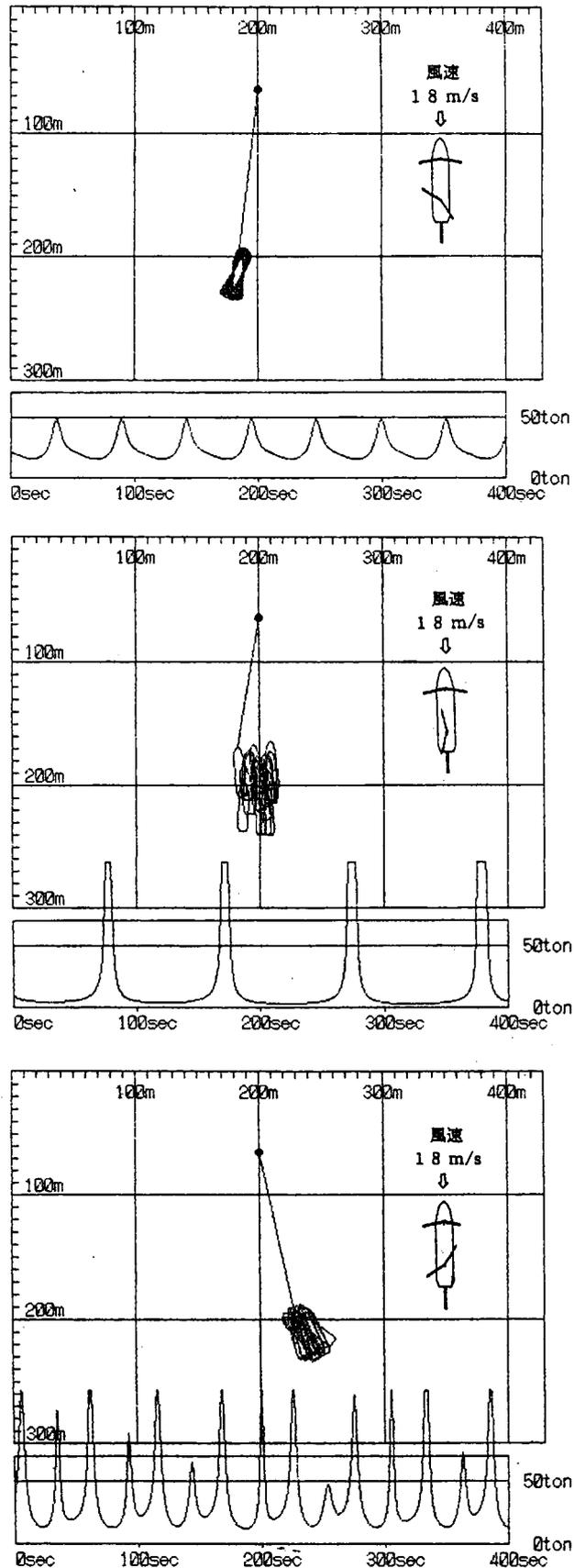


図 7-1 1 船首帆をスクエアとし船尾帆利用時の振れ回り運動

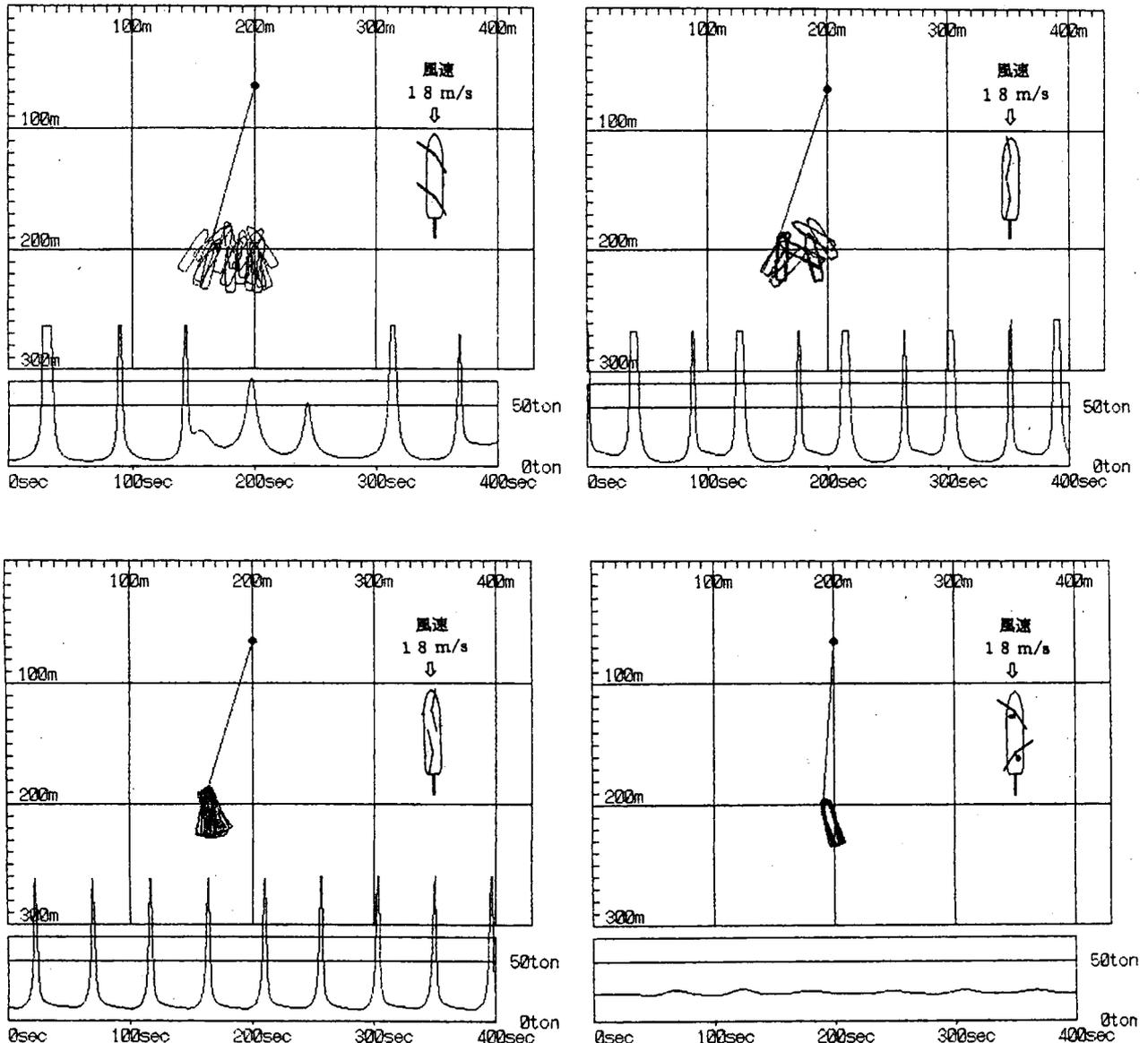


図 7-1 2 船首帆、船尾帆ともに利用した場合の振れ回り運動

て使用する場合は、船首側の帆よりも、船尾側の帆を利用する方が安定することがわかる。特に船尾の帆を $180^\circ$ の状態にすると、船体姿勢が崩れた場合、それを立て直すように力が働くことから、自然な制御が行われている形となり有効である。

帆を利用した錨泊法は、帆を利用しない時に起きる8の字運動があらわれず、風に船首を立てた状態で緩やかな前後動を描くところが特徴的である。また、帆の利用により不規則な運動を起こす時は、錨鎖張力が増大すると同時に衝撃力のピークが2~3回、一周期の中に現れる。

### 7-3-3 帆の制御について

帆の利用により、振れ回り運動の抑制、錨鎖張力の緩和ということを目標に行ったシミュレーションの結果では、船尾側の帆を揚力がさほどかからない状態となる $180^\circ$ に固定して錨泊すればよいことが判明した。ここでは上述した結果を踏まえて、帆に制御を付加したシミュレーションを行い、帆装船の錨泊の安全性を考えた「錨泊制御法」の可能性について検討する。

ここで、展帆に対し縮帆した帆はつぎに示す状態とした。

- ① 帆は2つ折りに折り畳むことができ、面積は展帆時の半分とする。
- ② 折り畳んだ帆の形状は展帆時の層流型形状が左右対称になる形とし、その空力特性も左右対象とする。

使用した縮帆時の帆の空力特性を図7-13に示す。また、本論文で使用している帆は既に述べたようにカーテン状の帆としているため、収納した場合は風圧抵抗はない。よって縮帆状態と収納状態とははっきりと区別する。

縮帆時の振れ回りの一例を図7-14に示す。これは船尾の帆を収納した状態で船首の帆を縮帆し船尾方向に向けて固定した時の振れ回り状況である。この状況は帆を1本船首側に備えている帆装船が錨泊時に行っている状態である。

このシミュレーションから見ると、左右対称に揚力が発生することから、振れ回りは錨位線に対し対象形となるが、帆に発生する推力の影響で、船首振れを増長させるため、振れ回りの周期が速くなり、錨鎖張力が過大なものとなっている。

帆の自動制御システムは、風向と船首方位の間にずれが生じたとき、そのずれを解消する方向に帆の推力を利用し、できる限り船首を風に立てる制御とした。制御の方法を図7-15に示す。風向に対してある迎角を持つ帆には、図に示すように揚力 $C_L$ と抗力 $C_D$ が発生し、その合力 $T$ を $\beta$ の方向に生み出す。この帆に働く合力とその方向 $\beta$ の状況は図7-16となっている。今回の制御はこの $T$ の成分を船首尾線に対し直角方向に最大な $T'$ となるように迎角 $A_{opt}$ をセットする制御法とした。また、この制御には船首偏角の時間微分に比例した微分制御を併用しており、帆の旋回に要する追従遅れの影響を少なくするシステムとした。

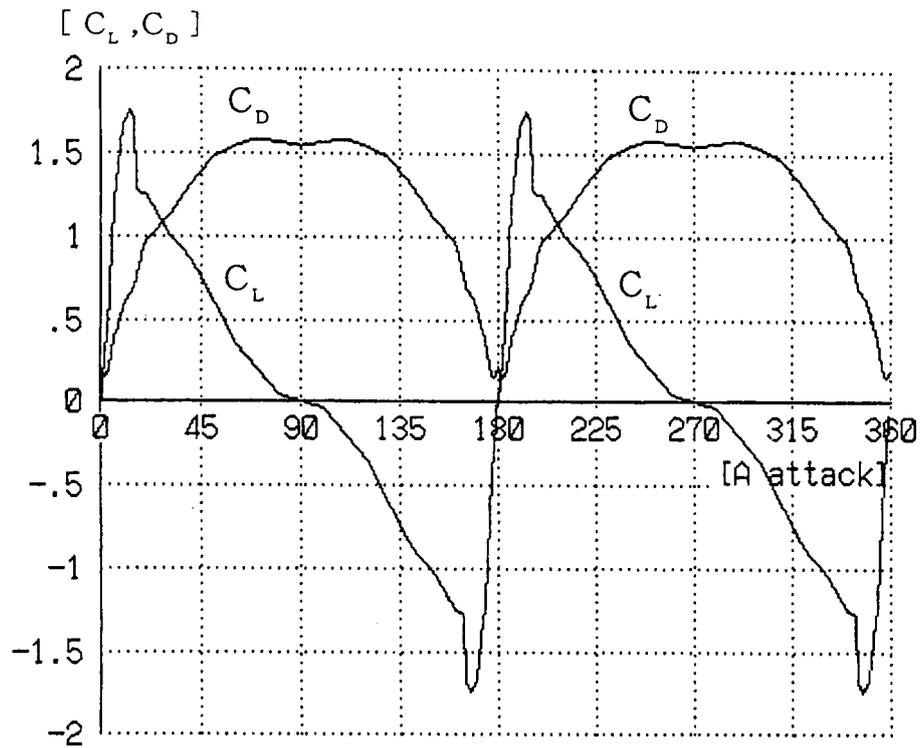


図 7 - 1 3 縮帆時の帆の空力特性

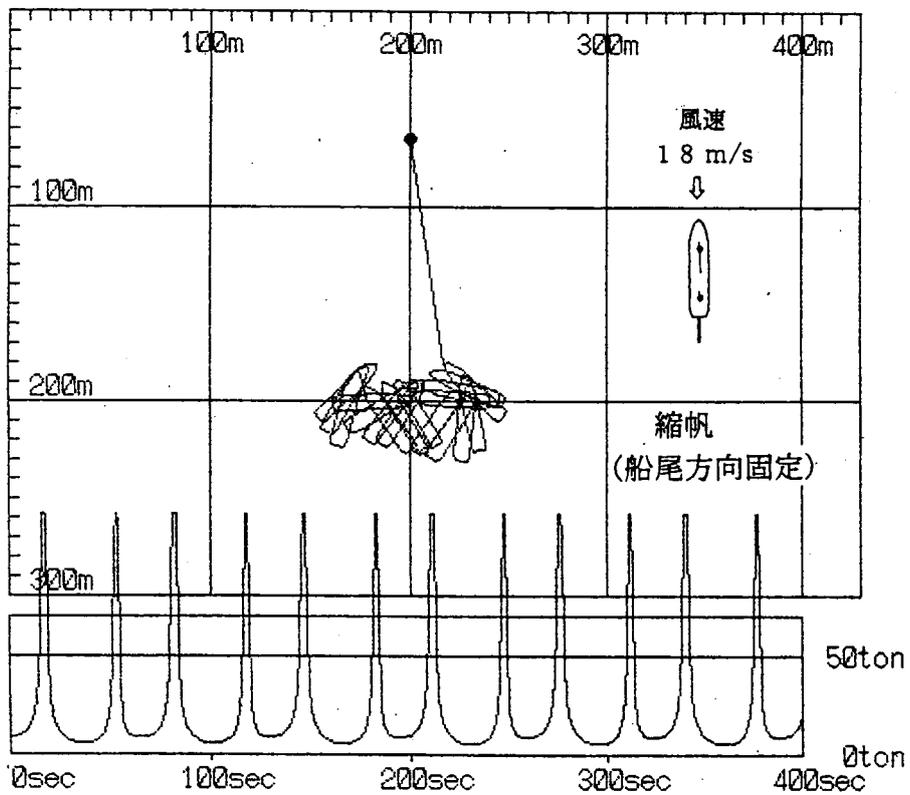


図 7 - 1 4 船首帆を縮帆し船尾方向に向け固定した場合の錨泊状態

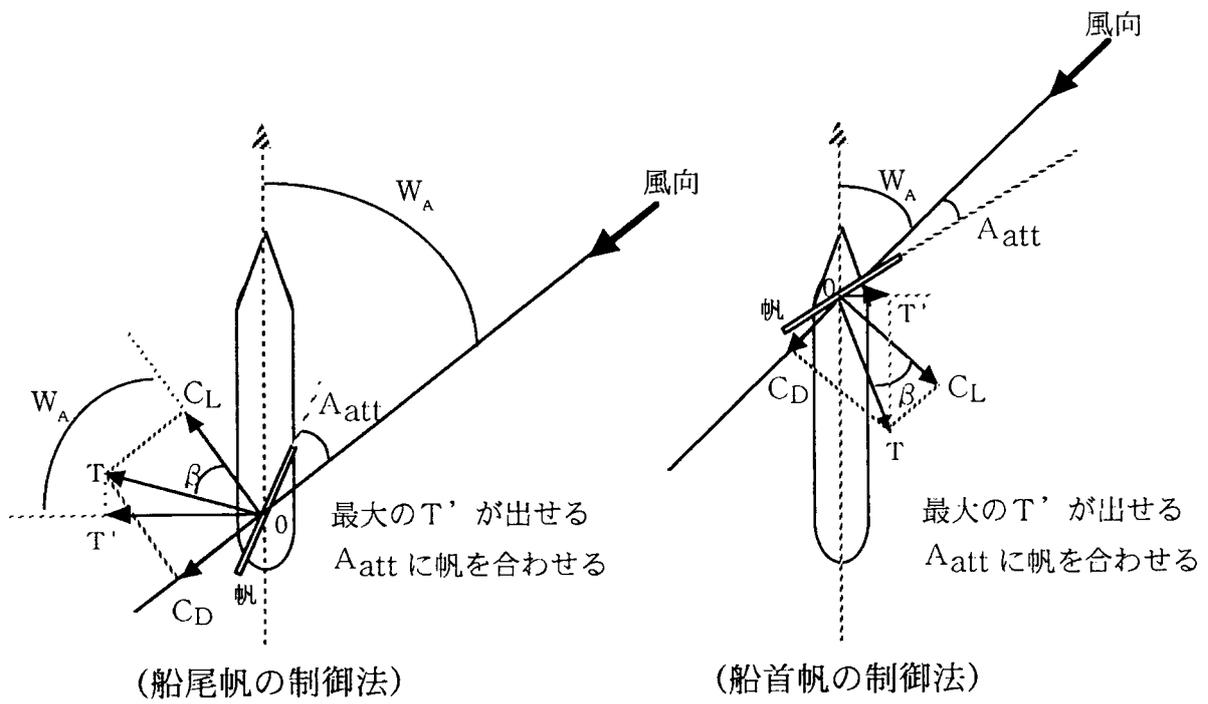


図 7-15 帆装装置の錨泊制御方式

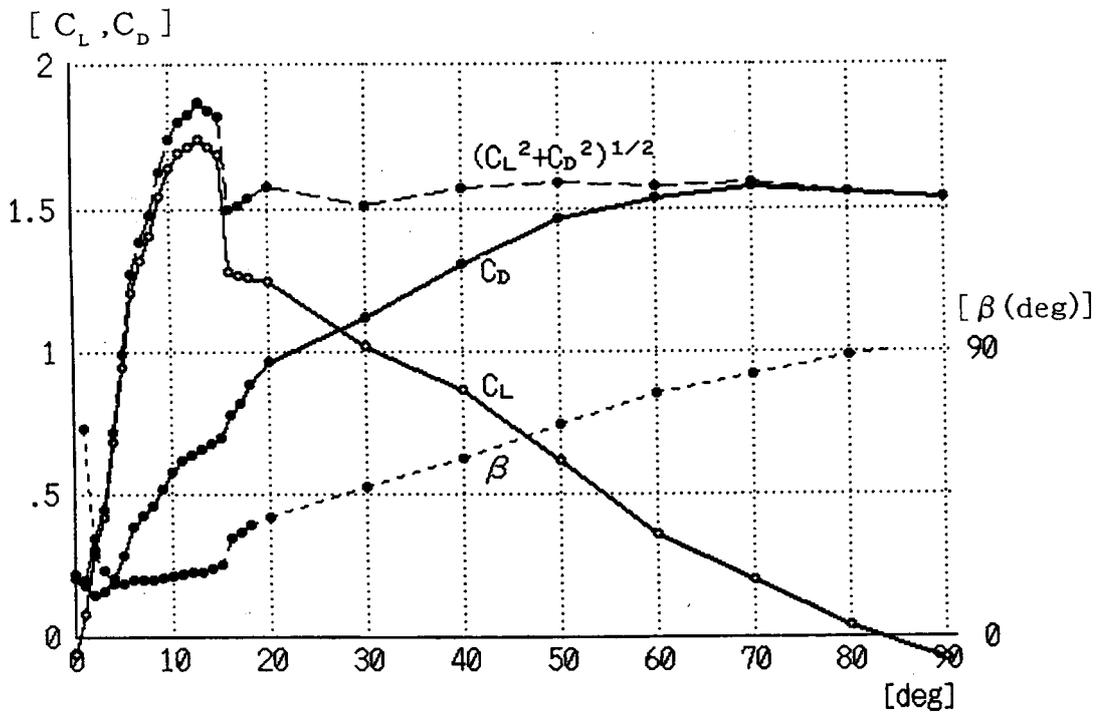


図 7-16 帆に働く力とその方向

( a ) 船尾の帆を自動制御した場合

錨泊には船尾の帆の利用が有効という結果から、船尾の帆を展帆した状態と縮帆した状態とで自動制御をかけたシミュレーションを試みた。この結果を図7-17、図7-18に示す。

展帆時、縮帆時ともに振れ回りがほとんど無い状態でほんの僅かな前後動を繰り返しているのがわかる。この運動は帆を張って錨泊した場合特有の動きである。錨鎖張力においては、ほぼ一定の弱い張力を維持する特徴を示している。このシミュレーション結果を見る限りにおいては、展帆、縮帆の2つの状態を比べて優劣はつけがたい。展帆、縮帆何れにしても、錨泊における本制御システムは非常に良い結果を示しているといえる。

( b ) 船首の帆を展帆して自動制御させた場合

図7-19にそのシミュレーション結果を示す。振れ回り状況から見ると、帆を張った場合特有の風に立って静止するという現象は起きておらず、通常の8の字運動を起こしている。また、振れ回り幅は船尾の帆を使うよりかなり大きくなっており、錨鎖張力も衝撃張力がかかり好ましい錨泊の状態とはなっていない。この理由としては、本制御理論では、図7-15から明らかなように、船尾の帆を利用する場合は、船の姿勢を立て直すには揚力のみならず、抗力の成分も利用できるが、船首の帆の場合は主として揚力のみで、抗力は船の姿勢の崩れを増長させる方向に働く。このため揚力が利用できる範囲でないと姿勢の立て直しができないことと、揚力の利用ができない姿勢となった場合は逆方向に働いてしまうことから船首振れを増長させてしまう結果となる。この増長された力が衝撃張力となって現れるものと考えられる。

( c ) 縮帆した船首尾両方の帆を自動制御させた場合。

船首、船尾両方の帆を自動制御させた結果を図7-20に示す。振れ回りは船尾だけの帆を利用した場合よりも横方向の振れが多少あり、船首振れも同時に起こっている。このため、張力においては、衝撃力とまでは行かないものの周期的に張力のかかる状態が起きる。船首振れが生じる原因は( b )で述べた理由によるものと思われる。

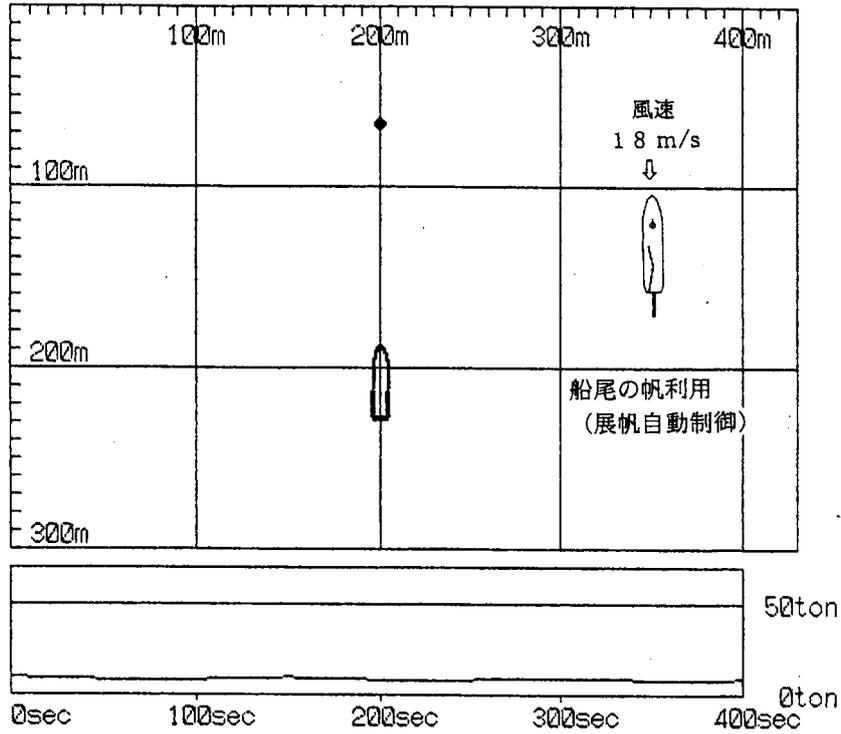


図 7 - 1 7 船尾帆を展帆自動制御した時の運動

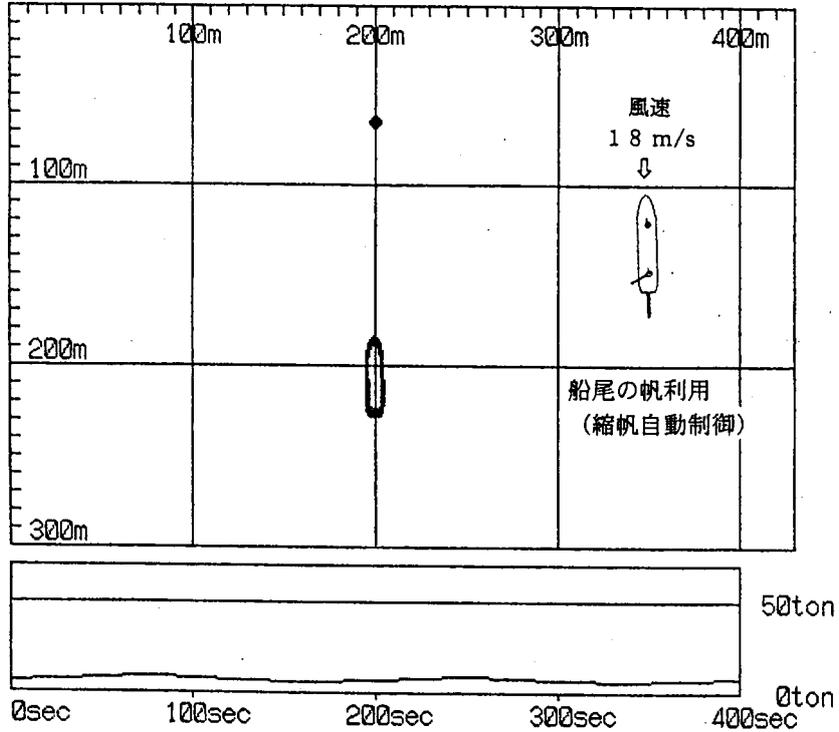


図 7 - 1 8 船尾帆を縮帆自動制御した時の運動

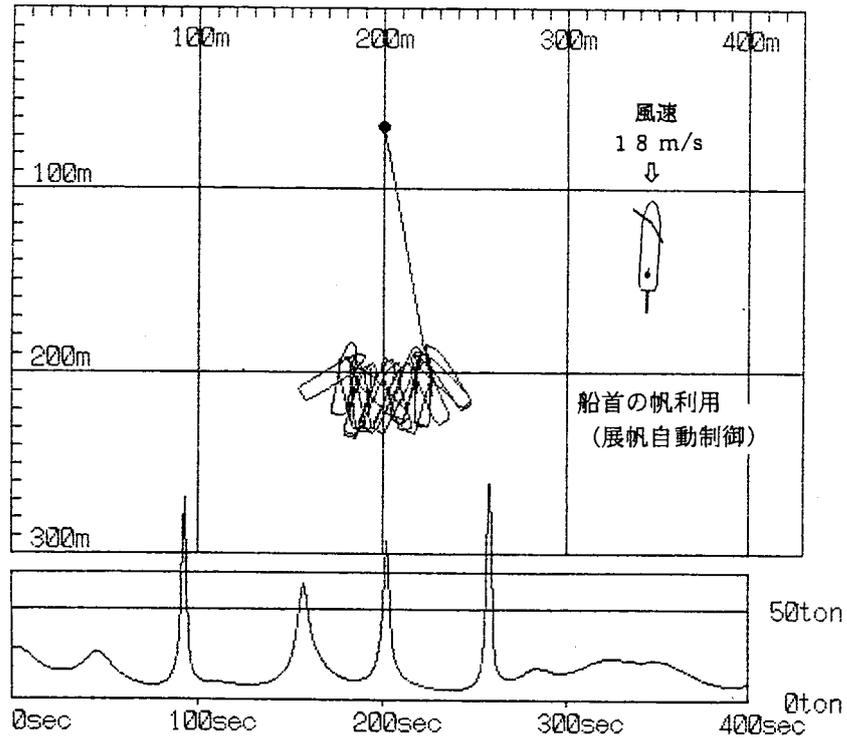


図 7 - 1 9 船首帆を展帆自動制御した時の運動

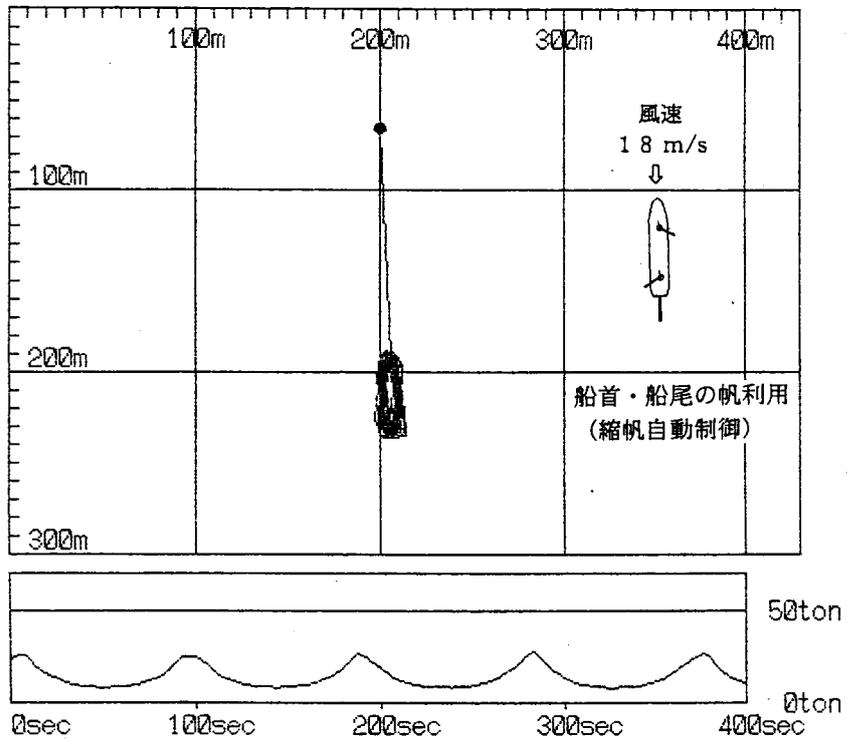


図 7 - 2 0 船首尾の帆を縮帆自動制御した時の運動

(d) 風向の変化が起きた場合の影響について。

実際の錨泊中では、風向は常に一定ではなく微妙に振れているが、時折大きく向きを変えることが考えられる。このような状況が起きた時、本制御方式ではどのような運動を起こすのかシミュレーションを試みた。シミュレーションは、定常となった振れ回りの状態から、風向が急激に30°振れた状態を想定した。この結果を図7-21～図7-23に示す。図7-21は、帆の装備されていない通常の船舶の場合である。風向が急変した初期の段階では、船の姿勢は崩れ、錨鎖に衝撃張力が起きる。その後、新しい風位に船体は比較的速く向うが、風に立つ状態となる近辺で船の姿勢が錨鎖反力の影響を受け、向かっている方向と反対方向に振れる形で乱れる。この運動の後、新しい風位に対し通常の8の字の振れ回り運動となる。

図7-22は船尾の帆を展帆した状態で自動制御をかけたものである。風向が変化した初期の段階では船の姿勢が崩れ、錨鎖張力に衝撃張力が生じる。この時点においては通常の船舶よりも錨鎖にかかる張力の回数は多い。しかし、この状態を過ぎると船の姿勢は新しい風位に立った形で非常に速く移動して行き、速やかに風に船首を立てた状態で静止する。風向の急変直後に起きる数度の錨鎖の衝撃張力を除いては、比較的安定な状態で定常振れ回りの状態に入るため風向の変化に対する追従性は良いと思われる。

図7-23は縮帆した状態である。これについても安定した状態を示している。初期の段階に起きる衝撃張力は通常の船舶と同じ1度だけである。また、注目すべき所は風向が変化した後、船首を風に立てた状態で緩やかに新しい風位に向かい、多少の行き過ぎはあるが、新しい風位に比較的速く安定する。これを見る限りにおいては、風向の変化に対して、追従性、安定性ともに良好な結果となることを示している。

以上のことより、本制御法は帆装船の錨泊制御法として採用するにたる結果を示していると思える。

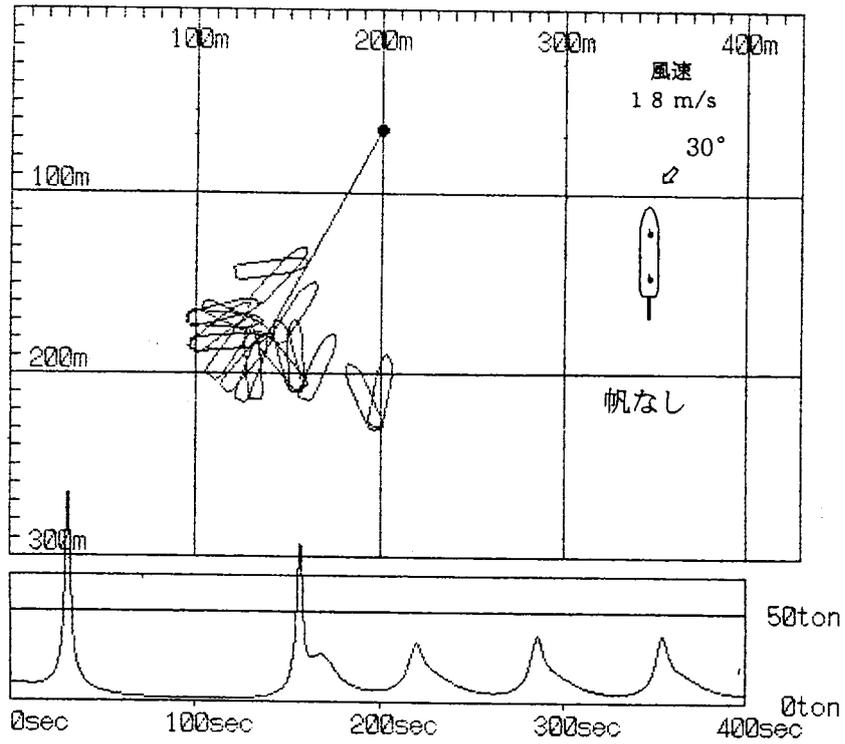


図 7 - 2 1 帆がない場合の風向変化時の振れ回り運動

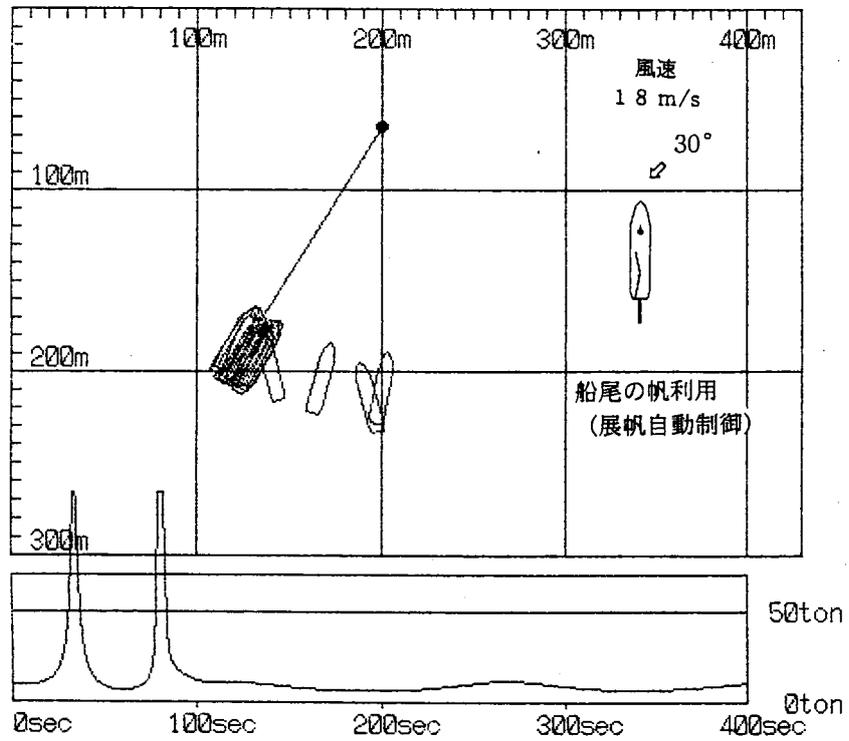


図 7 - 2 2 風向変化時の振れ回り運動 (船尾帆展帆自動制御)

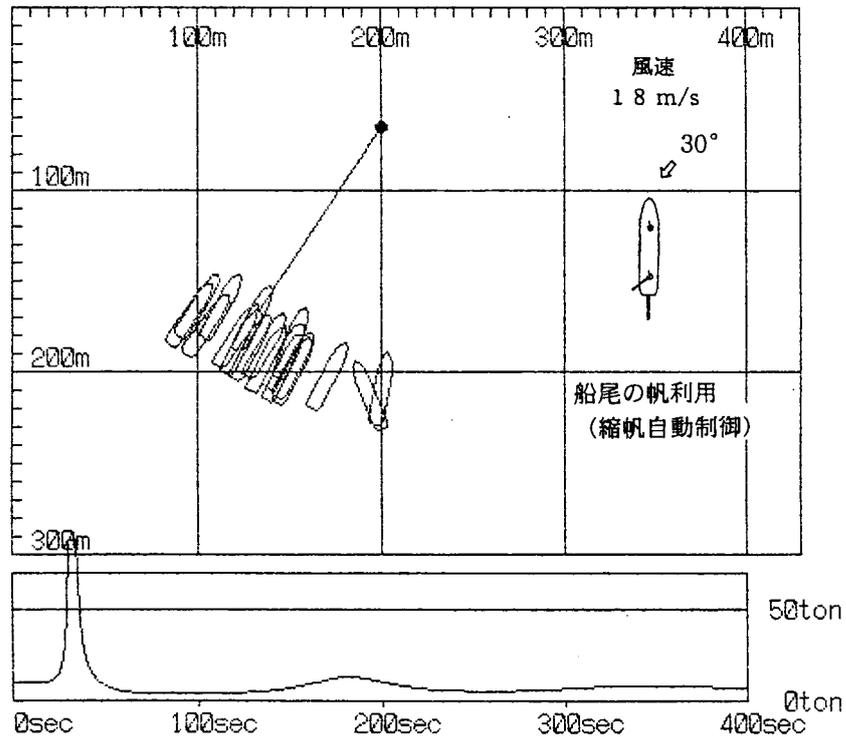


図 7-23 風向変化時の振れ回り運動（船尾帆縮帆自動制御）

#### 7-4 結語

本報告では、帆により発生する船首尾線方向に直角に働く力や回頭モーメントを利用して錨泊時の振れ回り運動の抑制や錨鎖張力の緩和を試み、帆装船の安全な錨泊法の分析を行った。その結果、以下に示すような知見を得た。

- (1) 船首側の帆よりも船尾側の帆を利用した方が振れ回りが小さくなる。特に船尾帆を $180^\circ$ に固定した状態が振れ回り縮小、錨鎖の衝撃張力緩和についてともに良好な結果をみせる。また、振れ回り運動は8の字運動とはならず、風に船首を立てた状態となり、緩やかな前後動を描く。
- (2) 船首側の帆に揚力を持たせると不規則な振れ回りや激しい船首振れを引き起こす可能性が高い。船首帆を利用する場合はスクエア状態以外は好ましい状態とならないので制御法を考える上では注意が必要となる。
- (3) 船首、船尾の帆を両方展帆して利用するのは錨鎖張力の増大につながり好ましくない。また、船首帆の使用を慎重に考えないと危険な状態となることが予想される。

- (4) 帆の利用により不規則な運動を起こすときは、錨鎖張力が大きくなると同時に衝撃力のピークが2～3回、一周期の中に現れる。
- (5) 帆を使った錨泊制御においては本シミュレーションで行ったような制御法で十分に良い結果が得られる。
- (6) 船尾帆に自動制御をかけた場合は、風向が急変してもそれに対する追従性が良い。

今後の課題としては、船首帆の利用について、現在のところ良いアルゴリズムが見つかっていないため、更に検討したい。船首帆に対する対策としては、船尾から錨を入れる方法は明らかに有効な方法ということが本シミュレーションから容易に推定されるが、実際上は採用するには問題が残る。

現在の帆装船の帆は前進航走時の推力を最大に得ることを目的に作られたシステムであるため、錨泊中の利用は考えられていない。本報告で述べたような帆を利用することによる、振れ回り運動の抑制や錨鎖張力の緩和は有効な方法と思われると同時に、ここで得られた方法は現状の帆装船に直ちに適用できる方法であると考えられる。

## 第7章の参考文献

- (1) 高岡俊輔、村山雄二郎、久保雅義：帆装型船舶の帆の利用による操船能力について、日本航海学会論文集、第98号、平成10年3月、pp.265～276
- (2) 高岡俊輔、村山雄二郎、久保雅義：帆装型船舶の機帆走時の船体運動特性、日本航海学会論文集、第101号、平成11年9月、pp.121～130
- (3) 藤井他6名：錨泊中の実船の振れ回り軌跡について、日本航海学会論文集、第62号、1980年1月、pp.145～151
- (4) 橋本他2名：荒天錨泊中の振れ回り運動の抑止策について、日本航海学会論文集、第69号、1983年9月、pp.9～15
- (5) 久保雅義、高岡俊輔：新型帆装装置の開発、日本航海学会論文集 第94号、平成8年3月、pp.1～8
- (6) 久保雅義、高岡俊輔：新型帆装装置の開発－II、日本航海学会論文集、第96号、平成9年3月、pp.203～211
- (7) 鮫島他8名：荒天錨泊法に関する実験研究（第1報）、日本航海学会論文集、第22号、1960年3月、pp.59～69
- (8) 米田他5名：荒天錨泊法に関する実験研究（第2報）、日本航海学会論文集、第23号、1960年12月、pp.55～68
- (9) 米田他7名：荒天錨泊法に関する実験研究、日本航海学会論文集、第36号、昭和42年1月、pp.91～96
- (10) 本田啓之輔、小須田敏：強風下の双錨泊船の振れ回りと錨鎖張力に関する模型実験、日本航海学会論文集、第66号、昭和57年2月、pp.145～152
- (11) 志波久光：船の振れ回りと錨鎖の張力、日本海事協会研究報告、Vol.1, 1970年12月
- (12) 井上欣三：単錨泊船の振れ回り運動中に生じる錨鎖張力の緩和に関する研究－1、日本航海学会論文集、第65号、昭和56年9月、pp.1～12
- (13) 井上欣三：荒天中錨泊の安全性向上に関する研究、日本航海学会誌、第84号、昭和60年6月、pp.28～37

- ( 1 4 ) ( 社 ) 日 本 造 船 研 究 協 会 : 一 点 係 留 振 れ 回 り に 関 す る 計 算 、 日 本 造 船 研 究 協 会 研 究 資 料 No.269、 第 1 5 5 研 究 部 会 、 係 船 シ ス テ ム の 研 究 報 告 書 、 昭 和 5 2 年 3 月 、 pp.177~187
- ( 1 5 ) 井 上 欣 三 : 単 錨 泊 船 の 振 れ 回 り 運 動 中 に 生 じ る 錨 鎖 張 力 の 緩 和 に 関 す る 研 究 - II、 日 本 航 海 学 会 論 文 集 、 第 6 6 号 、 昭 和 5 7 年 2 月 、 pp.153~161
- ( 1 6 ) 井 上 欣 三 : 単 錨 泊 船 の 振 れ 回 り 運 動 中 に 関 す る 模 型 実 験 研 究 、 富 山 商 船 高 等 専 門 学 校 研 究 集 録 、 第 1 4 号 、 1 9 8 1 年 1 0 月
- ( 1 7 ) 井 上 欣 三 、 白 井 英 夫 : 錨 泊 安 全 性 か ら み た ア ン カ ー 装 備 基 準 の あ り 方 に 関 す る 一 考 察 、 日 本 航 海 学 会 論 文 集 、 第 9 4 号 、 平 成 7 年 1 0 月 、 pp.63~71
- ( 1 8 ) 井 上 欣 三 、 白 井 英 夫 : 帆 装 商 船 の 錨 泊 安 全 性 の 分 析 、 日 本 航 海 学 会 論 文 集 、 第 8 6 号 、 平 成 4 年 3 月 、 pp.289~296
- ( 1 9 ) 高 岡 俊 輔 、 村 山 雄 二 郎 、 久 保 雅 義 : 帆 装 型 船 舶 の 帆 を 利 用 し た 錨 泊 法 に つ い て 、 日 本 航 海 学 会 論 文 集 、 第 9 9 号 、 平 成 1 0 年 5 月 、 pp.215~226
- ( 2 0 ) 岩 井 聰 著 : 操 船 論 、 成 山 堂 、 昭 和 5 0 年 6 月
- ( 2 1 ) 小 川 陽 弘 、 小 山 健 夫 、 貴 島 勝 郎 : 操 縦 運 動 の 数 学 モ デ ル に つ い て 、 日 本 造 船 学 会 誌 第 5 7 5 号 、 昭 和 5 2 年 5 月
- ( 2 2 ) 三 井 造 船 : 弓 削 丸 操 船 資 料 、 弓 削 丸 完 成 図 書 S.N0.1408、 平 成 6 年 3 月
- ( 2 3 ) 久 保 雅 義 、 高 岡 俊 輔 : 帆 装 商 船 の 運 航 実 態 と そ の 問 題 点 に つ い て 、 日 本 航 海 学 会 誌 第 1 2 0 号 、 平 成 6 年 6 月 、 pp.69~77

## 第8章 結論

本研究は、現在、あらゆる輸送機関で改善、開発が要求されている「環境問題」「エネルギー保全」への対応策の内、もっとも期待が持たれている自然エネルギーの利用に着目し、クリーンエネルギーである風力を利用する帆装船の再開発について基礎研究を行ったものである。研究の主眼は、帆装船が抱えている問題点の改善と操船者の視点に立った従来にない制御法の開発である。

本章では、これまでに述べてきた主要な結論をとりまとめるとともに、今後に残された課題を示す。

第1章では、地球規模で環境問題への対応が進められている時代背景から、海上輸送分野でも環境に対応した船舶が要求されていることを述べ、クリーンエネルギーである風力を利用する帆装船が今後の海上輸送へ大きく貢献する可能性があることを説いた。

第2章では、帆装船の再開発研究の重点項目を浮かび上がらせるために、現存の帆装船に対しアンケート調査を行い、次世代の帆装船開発には2つの大きな問題点があることと、運航者の視点に立った新たな帆の制御法の必要性を指摘した。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) 帆装船は帆装装置の影響で出入港時の操船不良と錨泊時の走錨確率の増大という2つの問題点を抱えたままのため、早期にこの問題を解決する必要性がある。
- (2) 現在の帆装装置の制御法は、省燃費だけを考えた制御であるため、風力の有効利用という面で操船等の利用に可能性を追求する余地がある。
- (3) 帆装装置は5年をめどに故障が多くなり、メンテナンス費が嵩んでくる。
- (4) 帆装船は建造された目的の通り、燃費向上による高経済性を示す船舶である。
- (5) 輸送機関の出す排ガスの環境問題から考えても、帆装船は低機関出力時にも風力を利用して定時性を満たすため、これからの時代に適合した輸送手段となり得る。

( 6 ) 帆装装置はアンチローリング効果があり、荒天時の稼働率の向上および乗り心地の良さが従来船より優れているため、商船として非常に良い性能を持つ。

( 7 ) 船会社は帆装船の代船問題を今後の情勢により見極める意志を持っている。

第3章では、第2章で挙げてきた現在の帆装船の持つ優位な性能が海上輸送にどの程度有効性を示すかを、モーダルシフト推進、環日本海経済圏の活性化で注目されている日本海側の航路での有効性や適合面について検討を行った。その結果、以下のような結論を得た。

( 1 ) 帆装船は、同規模の在来船よりも荒天時の稼働率が高く、特に風速に関しては在来船では航行の限界を超えている20 m/s位まではむしろ有利に働く。

( 2 ) 日本海の卓越した西風に対し、北航、南航のどちらの航路に対しても帆の展帆率は高くなる。

( 3 ) 日本海を安全に航行できる船舶として要求されている性能の半分以上をもち合わせている。

( 4 ) 日本海側の荷動き状況から見ると石油の輸送が多いことから、帆装船の最適船種であるタンカーとできなるため投入するメリットは大きい。

( 5 ) モーダルシフト推進に関連する「環境負荷軽減」「エネルギー保全」の問題から見ても影響力の大きい船舶である。

( 6 ) ただし、日本海側航路でも離島航路航行及び短区間航路の船舶として帆装船を考えた場合、帆装装置の展帆率が低下するためメリットは少ない。

( 7 ) 寄港地の多い航路を持つ船舶では、帆装装置の形状の問題から、操船に負担がかかる可能性が高い。

( 8 ) 避泊等で錨泊した場合に帆装装置の影響により、走錨の危険性が增大している。

第4章では、帆装船を今後、有効利用するためには、帆装装置の改良が必要であるため、現在の帆装装置の問題点を改良した、新しいタイプの帆装装置を開発

した。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) カーテン状の帆構造とすれば、縮帆時の帆面積を大幅に減少できるため、強風時の港内操船時や錨泊時に操船者の負担が軽減される。
- (2) 帆の操船への利用は操船性向上に十分有効となる可能性を持つ。
- (3) カーテン状の帆を透明なものにすると、展帆時においても前方の視界が十分に確保できる。
- (4) カーテン状の帆にしても、帆走性能の低下は殆どおきない。
- (5) 帆の開閉に大きな力がいらないため、動力システムが小型にできるとともに、そのシンプル性から故障が少なくなる可能性がある。
- (6) カーテン状の帆を持つ帆装装置ならば、建造費及び維持費が軽減できる。

また、今後の課題としてはつぎのことが挙げられる。

- (1) カーテン状の帆は、強度上、1枚の帆を極度に大型化できない。そのため大型船に搭載する場合は、帆を複数配置する必要が生じるため、各帆間に生じる流体力学的な問題を考えた帆の配置が問題となる。
- (2) 帆に強度上の補強を行うと、帆自体の重量が重くなる可能性がある。

第5章では、帆装船の大きな問題点の一つである、帆の影響による操船性不良の問題について検討するため、帆装船の操船シミュレータを開発した。これを使用し、操船不良の原因究明と帆を積極的に操船に利用した場合の有効性の推測を行った。この結果、以下のような結論を得た。

- (1) 帆装船の船体運動をある程度忠実に表現できるシミュレータを開発した。特に、帆の凸面からの空力特性が組み込まれているため、あらゆる操帆に対応できる拡張されたものとなった。
- (2) 帆の操船への利用は旋回径短縮の効果を生む。短縮率は5%~18%であり、正面に風を受ける時ほど大きい。
- (3) 帆の利用は最短停止距離の短縮効果を生み、緊急停止の際の安全性向上に寄与する。最短停止の方法として、減速効果法を行った場合の短縮率は、0%~24%、回頭効果法を行った場合は5%~34%の減少を示す。
- (4) 帆の利用はターニングベースンの縮小効果を生み、帆を利用しなかった場

合よりも25%~33%の縮小率を示すことから、狭い港内での操船性が向上する。

- (5) 帆の利用によりスラスト利用時と同じ回頭効果が得られる。8 m/s以上の風が吹くと、どの方向からの風においても、装備しているスラスト推力の60%の力が得られ、15 m/s以上では、スラストの持つ推力以上の力が得られる。
- (6) 帆の利用により条件付き（風下側に約138°の範囲）ではあるが定位置保持が可能となる。
- (7) 帆を利用することにより、船首方位の保持が可能となる。船尾部の帆を展開し、船首が風上に向くように帆を適宜操作する方法を行うと、船首の振れは最大で4°、風下への圧流速度は0.4 Ktとなり、海上での作業や調査に支障を来さない結果を示す。

今後の課題としては、以下のようなことが挙げられる。

- (1) シミュレーションにおいて、船体にかかる流体力を通常航行時の力で一本化しているため、低速時の模擬状況に違いが生じることが予想される。このため、低速時には流体力が切り替わる方式にする必要がある。

第6章では、第5章で開発した帆装船の操船シミュレータに組み込んだ流体力をより詳細なものとし、更に帆の利用で操船性向上に期待が持てた方法を自動制御化した。この自動制御をかけた場合の運動性能の評価を行った結果、以下のような結論を得た。

- (1) 純帆走での直進制御、急停止制御、斜行制御の利用範囲及び限界を明確にした。
- (2) 純帆走、機帆走ともに、ルートトラッキングの機能は風下落ちを抑えるため有効なものとなる。
- (3) 純帆走での直進制御で制御不能となった風向に対しても、極微速の機関を併用することによりそれが解消される。
- (4) 回頭制御は、どの方向からの風についても可能であるが、風下落ちが激しい回頭となる場合があるため注意が必要となる。また、これに対しても極

微速の機関を併用すると風下落ちを極力抑えて回頭できる。

- (5) 停留制御については内向き制御が有効である。しかし長時間の停留については内向き制御をかけるよりは、むしろ帆を畳んだ方が漂流速度が落ち有効となる。
- (6) 斜行制御に付加した姿勢安定制御は斜行移動中の船の安定を向上させる上で有効な制御となる。
- (7) 直進制御は変動風の中でも安定した制御となり、避航等による進路変更や変針にも十分追従できる。この場合、帆の旋回速度が制御の効果に影響を与えるが、5 deg/secあれば十分に効果が得られる。
- (8) 回頭制御においても帆の旋回速度は大きく影響し、制御の効果を得るためには最低でも5 deg/secの帆旋回速度が必要である。
- (9) 回頭制御で大きく帆角度を変更することになる風上側への回頭は、在来の帆装船でみられる1 deg/secの帆旋回速度では旋回に支障を来す。
- (10) 回頭制御での必要な帆の旋回速度は、船体の旋回速度の1.5倍程度である。
- (11) 操帆操船支援システムは操船者の立場を踏まえた有効なシステムとなる。

今後の課題としては、以下のことが挙げられる。

- (1) 機帆走時の各制御法の効果は、帆の旋回速度の大小が大きく影響してくるため、帆旋回速度を大きくする場合の帆旋回にかかるエネルギー計算が必要である。
- (2) 提案した操帆操船支援システムは、GPSからの位置情報、ログからの速力情報、ジャイロからの方位情報をコンピュータに取り入れ、瞬時に未来の船体運動を表示をさせねばならないため、できる限り簡易な運動モデルにする必要がある。

第7章では、帆装船の持つ深刻な問題点の二つ目である錨泊時に走錨の危険性が高くなる問題への検討を行った。この問題に対するアプローチは、帆装船の錨泊シミュレータを開発し、それを使用して安全錨泊のための帆の制御法の分析を行った。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) 帆装船の錨泊時の運動をある程度忠実に表現できる錨泊シミュレータを開発した。
- (2) 船首側の帆よりも船尾側の帆を利用した方が振れ回りが小さくなる。特に船尾帆を $180^{\circ}$ に固定した状態が振れ回り縮小、錨鎖の衝撃張力緩和についてともに良好な結果をみせる。また、この場合、振れ回り運動は8の字運動とはならず、風に船首を立てた状態となり、緩やかな前後動を描く。
- (3) 船首側の帆に揚力を持たせると不規則な振れ回りや激しい船首振れを引き起こす可能性が高い。船首帆を利用する場合はスクエア状態以外は好ましい状態とならないので制御法を考える上では注意が必要となる。
- (4) 船首、船尾の帆を両方展帆して利用するのは錨鎖張力の増大につながり好ましくない。また、船首帆の使用を慎重に考えないと危険な状態となることが予想される。
- (5) 帆の利用により不規則な運動を起こすときは、錨鎖張力が大きくなると同時に衝撃力のピークが2～3回、一周期中に現れる。
- (6) 船尾帆に自動制御をかけた場合は、風向が急変してもそれに対する追従性が良い。
- (7) 帆を使った錨泊制御においては、船尾の帆を利用し、帆による揚力で船首を風上に立てる制御法で十分に良い結果が得られる。

今後の課題としては、以下のようなことが挙げられる。

- (1) 在来の帆装船は船首側に1本の帆を備えたタイプが多いため、船首側の帆を利用した制御法について、現在のところ良いアルゴリズムが見つかっていないため、更に検討を進める必要がある。

以上、本研究では、21世紀に再び蘇る可能性の高い、帆装船を実態調査より研究を始め、そこで出てきた問題点の解決と新型の帆の開発、さらには、操船者の意向を反映した帆の制御法について研究を行ってきた。本論文の第1章でも述べたように、「環境問題」、「エネルギー保全」に対し、風力というクリーンエネルギーを利用する帆装船はこれらを顕著に軽減できることから、環境対応型船

船の1つとして、経済的かつ有用な船舶となり得るものと考えられる。

今後は、実際の帆装船のデータを基に、より性能の高い帆の開発と忠実度の高いシミュレーションを行うと同時に、帆装船の帆の制御による操船性を評価するための基準等の研究を進めたい。

最後に筆者は本論文で扱った帆装船のような、いわば未来の帆船を考える時に、過去の帆船の表面的な問題にこだわり、ついその長所を十分に理解しなくなりがちであることを示唆したい。今後、帆装船の利用を論議する場合、船を妥当なスケジュールで運航できるエネルギー源として風力に頼れるかという古典的な質問が必ず出てくると思われる。これに対しては、現在のGPSを代表とする正確な測位装置と衛星を利用した気象観測システムによる最適航法の利用をもってすれば十分に可能だと考える。一つの興味深い事例としてメキシコの探検筏「アカリ号」の航海を挙げたい。アカリ号はカナリア諸島からメキシコのコスメル島までの4,600マイルの航海を101日で成し遂げ、しかも予定の到着日と1週間と狂わない正確さで到着している。この航海は1枚のキャンバスセイルで成し得たものである。現在の海上輸送においては実質的に無理なスケジュールに乗せて船を運航することはない。そのため異なった速力の船がそれぞれ適した種々の航路に従事していることから、高速輸送を要さない貨物の輸送ならば、帆装船は最適なものとなると考えられる。

エネルギー源の枯渇することを知らず、公害をふりまく心配も少なく、経済的に極めて有利な帆装船の投入は海運界にとっては極めて有望な計画となることを確信してやまない。

## 謝 辞

本研究をまとめるにあたり、終始熱心なご指導を賜った神戸商船大学船貨輸送研究施設、久保雅義教授に深甚の謝意を表します。また、神戸商船大学海事システム科学講座、定兼廣行教授ならびに井上欣三教授には本論文の内容に関し貴重なご意見を賜りました。ここに感謝の意を表します。

元弓削商船高等専門学校情報工学科教授、村山雄二郎先生には、本研究のあらゆる段階で暖かい援助と激励に加え、公私ともに大変お世話になりました。ここに、あらためて深く感謝の意を表します。また、著者が本論文の研究に専念できる環境を作って下さり、終始激励下さった、元弓削商船高等専門学校長、黒沢昭先生に厚くお礼申し上げます。

神戸商船大学船貨輸送研究施設、齊藤勝彦助教授には、本研究を進めていく上で、研究の取り組み方などの面から終始貴重な御意見を賜ったことに対し謝意を表します。

このほか、本研究で使用した実験装置の製作に関しては弓削商船高等専門学校、航海実習係および機関実習係の技官の方々にひとかたならぬ御助力を頂いた。また、実験や計算のデータ処理に多大な時間を割いてくれた当時商船学科の卒業研究生諸君に深く感謝します。

最後に、調査、資料収集に際しては、多方面にわたり御協力と御援助を受けた。末尾ながらこれらの方々に厚くお礼申し上げます。