

海洋観測用高速曳航体の実海域実験：海洋における 広域データの計測法に関する開発研究：第9報

小寺山， 亘
九州大学応用力学研究所：教授

大楠， 丹
九州大学応用力学研究所：教授

本地， 弘之
九州大学応用力学研究所：教授

経塚， 雄策
九州大学応用力学研究所：助教授

他

<https://doi.org/10.15017/4743889>

出版情報：応用力学研究所所報. 68, pp.141-154, 1989-10. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



海洋観測用高速曳航体の実海域実験

—海洋における広域データの計測法に関する開発研究（第9報）—

小寺山 亘* 大 楠 丹*
 本 地 弘 之* 経 塚 雄 策†
 柏 木 正† 中 村 昌 彦‡
 稲 田 勝§

概 要

黒潮の持つ流量と熱流量を計測する目的で開発した曳航式海中ロボットの实海域実験の結果について報告する。開発した曳航体は深度及び上下揺を制御するために主翼角を、横揺を制御する為に水平尾翼角を自動制御する。これにより曳航体の運動を小さくするとともに曳航体の運動安定性を向上させる。従来の曳航体は高速域では安定性を保持することが困難であり、このことが高速運転を妨げていた。今回開発された曳航体はこの点についても改良されたので高速運転が可能となった。

本報告はこの曳航体の運動性能と安定性についての実海域実験の結果について報告する。実験は種子島東岸、沖縄近海等で行われ、設計目標の性能が確認された。

Key words : Towed vehicle, Ocean measurement, Motion control

1. ま え が き

曳航体を利用した海洋観測システムは広い海域を高速で調査するためには極めて優れたシステムであり数多く利用されている¹⁾²⁾³⁾。本報告では黒潮の持つ流量と熱流量を計測する目的で開発した翼制御形高速曳航体の実海域実験の結果について報告する。

曳航体に搭載する計測センサーは超音波式流速計と水温計、塩分計である。流速計は超音波ドップラー式で曳航体から下方に向けて 150 KHz の超音波ビームを発射し、400 m の区間の流速 3 成分を最大 128 層に分解して、一度に計測できる⁴⁾。図 1 に観測の概念図を示す。この様なシステムで計測する場合に得られる流速データは曳航体に相対的なものであり、これを絶対流速に修正する必要がある。観測海域の

* 九州大学教授，応用力学研究所

† 九州大学助教授，応用力学研究所

‡ 九州大学助手，応用力学研究所

§ 文部技官，九州大学応用力学研究所

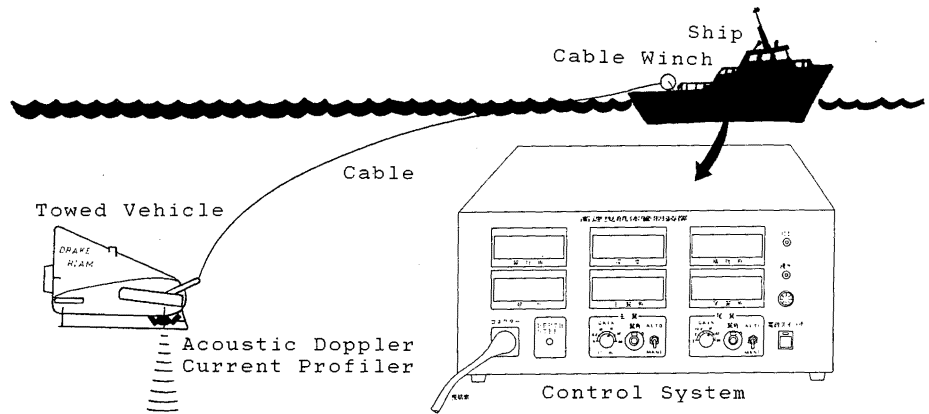


図1 曳航体による海流計測概念図

水深が浅く、流速計から海底までの距離が 400 m 以下の場合には流速計は対地速度を計測し、自動的に絶対流速に変換する。

水深が深く 400 m 以内に海底がない場合には船速を精密に測定してさらにその 10 分間平均を求めて、流速計のデータの 10 分間平均から差引くことで絶対流速に変換する。従って計測精度を向上させるにはまず船速を正確に求める事が極めて重要である。現在はロランを使って速度を求めているが、瞬時値はかなり信頼性が低く、問題がある。試行錯誤的検討により、10 分間平均をとればまず要求精度内に入ることが分かったので、それを使っている。将来は人工衛星を利用した計測システムを考えている。さらに流速計自身の計測精度を向上させるためには船体等から流出する気泡やノイズの影響を受けないことや動揺が極力小さいことが必要である。流速計を曳航体に搭載する場合には船体の影響を小さくすることは曳航索の長さや潜航深度を適当に選ぶことで容易に実現できる。曳航体の動揺を小さくするには従来は曳航索をできる限り長くすることで実現しようとしていたように思える。その場合に曳航体の深度維持や姿勢制御に問題があった。今回開発した曳航体は深度及び上下揺を制御するために主翼角を、横揺を制御する為に水平尾翼角を自動制御する。論文はこの曳航体の運動性能と安定性についての計測結果について報告する。

2. 曳航体と曳航システム

開発した曳航体と曳航システムの主要寸法を表 1 に示す。曳航体の愛称は DRAKE (Depth and Roll Adjustable Kite for Energy flux measurement of Kuroshio) と名づけられた。曳航体はできるだけ軽量、小型であることが望ましいが、同時に荒天中での設置、揚収と曳航に耐えるためには十分な強度が必要であり、目標の深度に潜航するためには一定の主翼面積が必要である。これらのことを満足するように曳航体と曳航システムを設計した結果、表 1 のような大きさになった。図 2 に曳航体の写真を示す。さらに曳航体の内部の透視図を図 3 に示す。図中のプロペラは推進用ではなく、流体のエネルギーを得て回転し内部の油圧ポンプを駆動するためのものである⁵⁾。油圧回路としてはポンプからオイルフィル

表 1 DRAKE 及び曳航システムの
主要寸法

曳航体 (DRAKE), FRP 製 (機体部分) ステンレス製 (内部機構)		
全	長	2 m
全	幅	2 m
空 中	重 量	360 kg
水 中	重 量	180 kg
曳航ケーブル (外装二重の鋼製)		
全	長	800 m
直	径	12.9 mm
破 断	張 力	9 ton
信 号	線	10 芯
電 力	線	一対
ケーブルウインチ (鋼製, スリッリング付)		
重	量	2060 kg
全	幅	1.8 m
全	高	2.0 m
巻 上	げ 力	1.5 ton
ブ レ ー	キ 力	2.25 ton



図 2 DRAKE の全体写真

ターを経て、リザーバ内におかれたサーボ弁で制御されて主翼駆動用シリンダーまたは尾翼駆動用シリンダーへ導かれ、主翼または尾翼を駆動する。翼を駆動しない場合にはバイパス弁を通りリザーバ内に噴出し油圧ポンプへ戻る。リザーバの上部カバーはゴム製でリザーバ内の圧力と外部の水圧は常にバラ

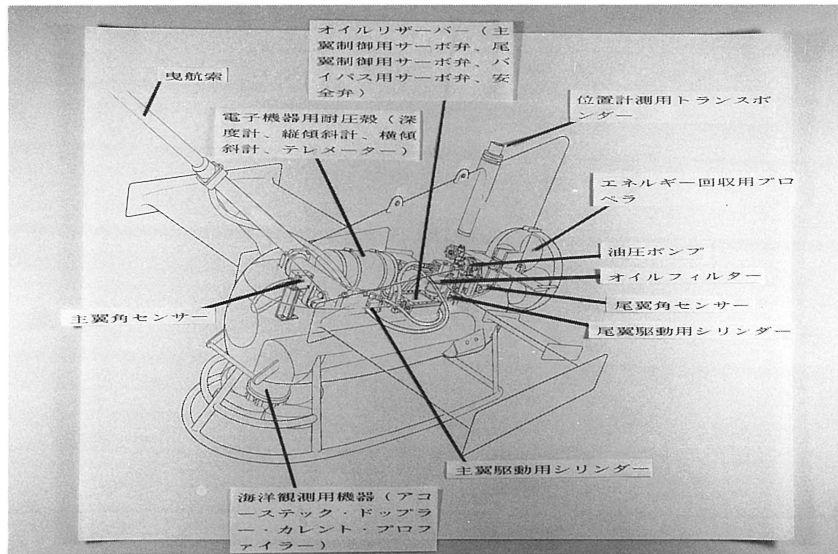


図3 DRAKEの内部機構図

ンスする。従って油圧機械についてはとくに耐圧、水密についての配慮が必要でなく設計が容易である。このことが主翼、尾翼の駆動源として油圧システムを選んだ理由であり、重量、制御、保守、管理等の点での不利を補って余りあるものがある。電子機器用耐圧殻の中に深度計、横傾斜計、縦傾斜計等が納められている。これらのデータは機体内の前部と後部に設置された主翼角計と尾翼角計のデータと共に電子機器用耐圧殻内に配置されたテレメーターで曳航索内の通信線を使って観測船へ送られる。制御は設定深度と主翼角、横傾斜角と尾翼角の間でフィードバック制御を行う。

制御の殆どは観測母船上の管制装置で行い、曳航体内では各量の計測と深度誤差の検出のみを行う。本システムの設定深度の指令はマニュアルで行っているが将来的にはプレプログラムによる完全自動化⁶⁾も考えており、制御はできるだけ簡単な方式を選んでいる。従って機体形状は流体力学的な安定を優先して設計した。

3. 曳航体及び曳航索の運動の数値シミュレーション

曳航体及び曳航システムの設計を行う為に運動の数値シミュレーションを行った。曳航索の運動はランブドマス法、曳航体は6自由度の連成運動方程式を使って求めた。計算の詳細は文献7)、8)に述べているので、ここではその結果の一例を示す。図4は有義波高2m、平均波周期7.6秒の不規則波中に出会角60°、船速6ノットで観測船が航走し、曳航体は深度200mを維持するように指令されている場合の曳航体の運動である。ただし、 X は前後揺、 Y は左右揺、 Z は上下揺、 ϕ は横揺角、 θ は縦揺角、 ψ は船首揺、 T はウインチ側での曳航索張力である。図から見られるように曳航体の運動を制御する効果は制御定数を大きく選ばない時には波周波数範囲の運動を減少させることには殆ど期待できないが、左右揺、

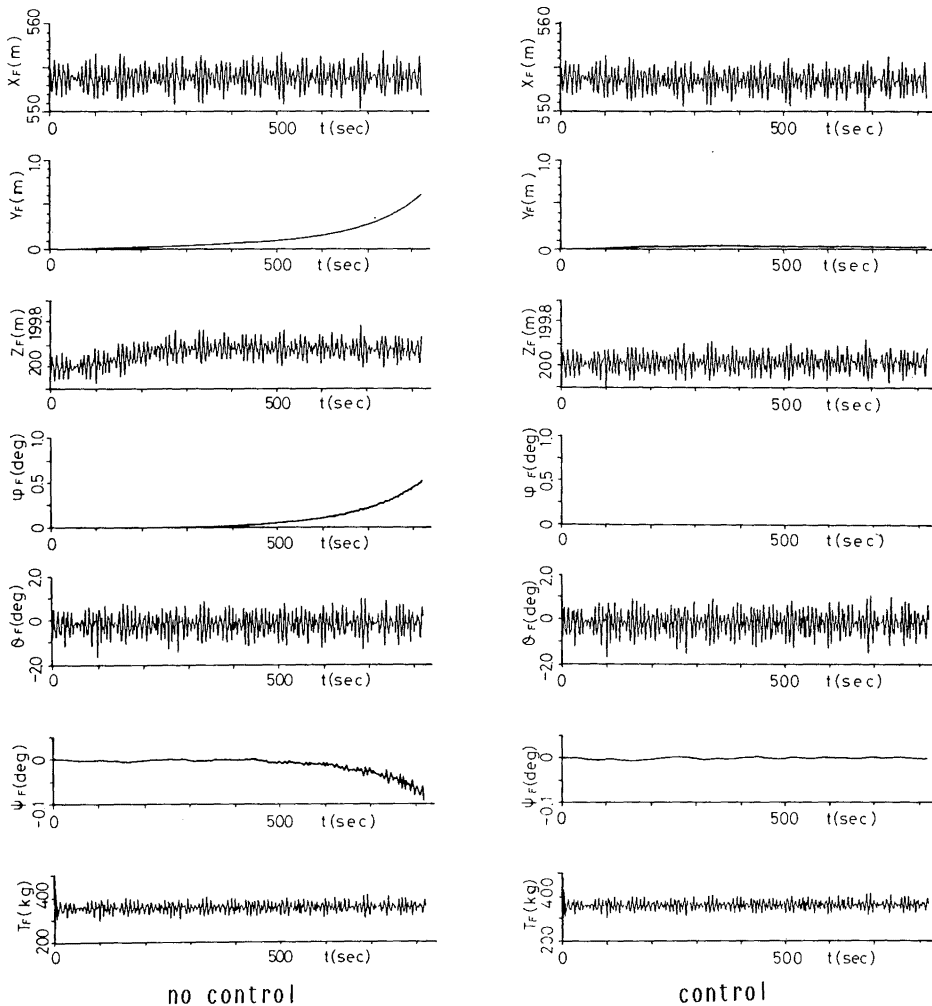


図4 運動及びケーブル張力の数値シミュレーション

上下揺、横揺角、船首揺などのドリフトを防止することにあることが分る。このことは次の図5に示すスペクトル解析の結果を見るとさらにはっきりする。曳航体の運動は制御の有無にかかわらず波周波数領域の左右揺、上下揺、横揺角、船首揺等は見られない。ドリフトがこれらの運動に見られるが制御をすることでこれを防止できる。

曳航体の場合にはこれらの運動に対する復元力が小さく、僅かな外乱に対してもドリフトを起こすのでこれを制御力で積極的に防ぐ必要がある。また前後揺、縦揺は低周波数領域では観測母船と殆ど同程度の運動をするが、高周波数領域ではかなり小さい。これらの運動モードにたいしては制御は殆ど効果

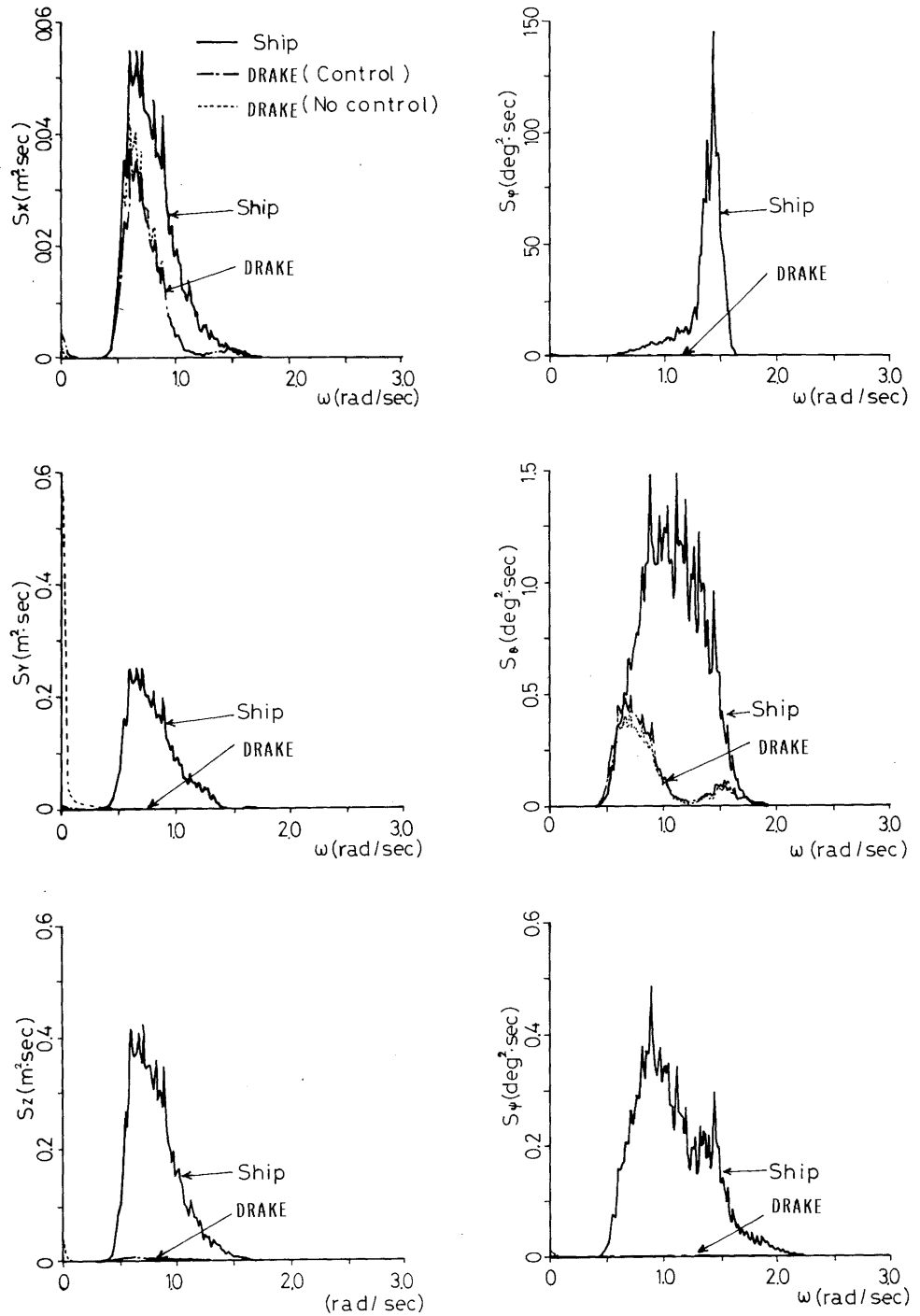


図5 運動のスペクトル

なく、後に述べるように悪影響がある場合すらある。数値シミュレーションはこの他旋回運動中、深度変更時等について行い、模型を使った水槽実験と合せて必要な翼面積や油圧機器の能力、制御方法や定数の決定、曳航索の破断張力、ウインチの巻上げ力、ブレーキ力等の設計の資料とした。

4. 実海域実験

実験を行った海域は図6に示すような九州南方の黒潮流域である。九州大学応用力学研究所ではこの海域で係留式流速計測システムによる黒潮観測⁹⁾を継続して行っており、これらのデータと曳航システムによる観測結果と比較する為にこの海域を選んだ。

図6に計測線と海域を示す。使用した船は図7に示す日本サルベージ(株)所有の若潮丸(500トン)である。今回の曳航体の作業の為に後甲板に特別にやぐらを組み(図8)電動クレーンを取付けて、設置、揚収時に曳航体が船体に指触することが無いように考えた。

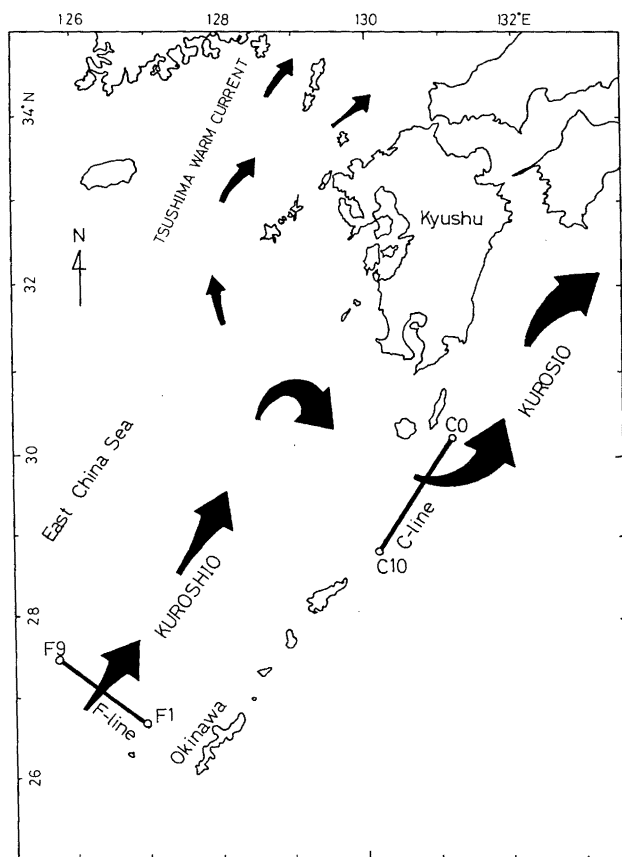


図6 実験の予定海域

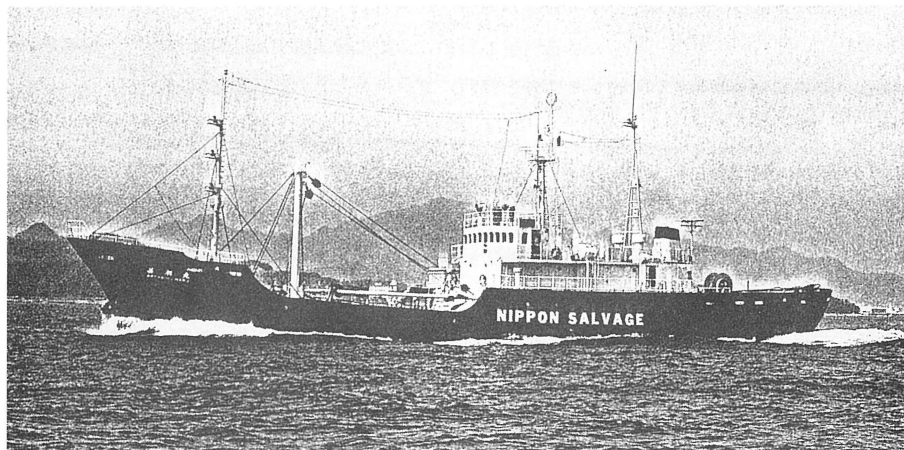


図7 観測母船（若潮丸）

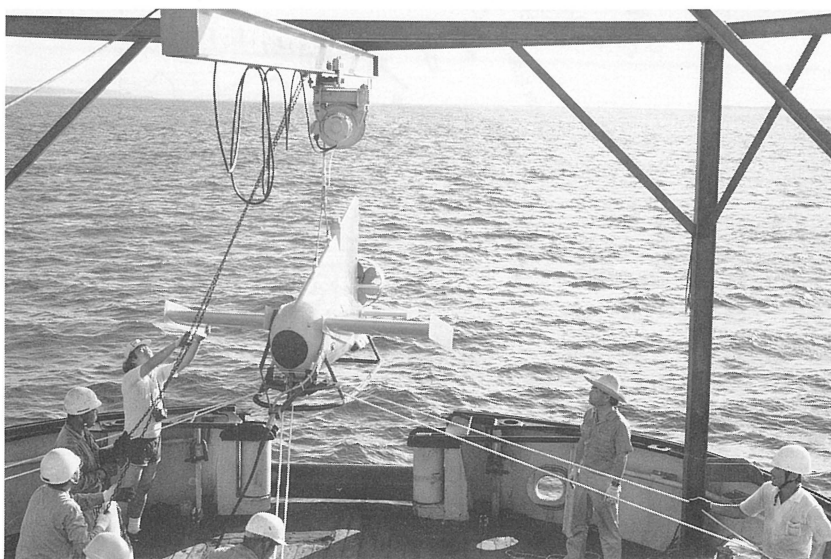


図8 DRAKEを曳航のため船上で吊上げた様子

図8は曳航体を船上で吊上げて海上に降ろそうとしている写真であり、図9は海上に降りたとき、図10は曳航を開始した直後である。作業はこの状態から曳航体の設定深度を順次大きくしていきながら、曳航索を800 mの長さまで延ばす。計測のコースに観測船が到達した後計測を開始する。

5. 計測結果

詳しいデータは現在解析中であるので、ここでは重要と思われる2, 3の結果を紹介する。

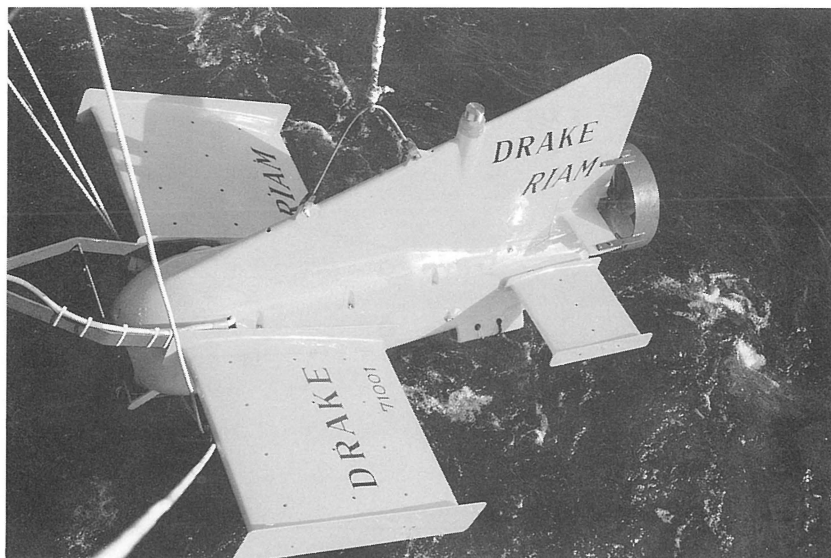


図9 DRAKE を曳航のため海上に降ろした様子



図10 DRAKE を実験海域へ曳航を開始

図11は曳航速度6ノットの場合の深度，主翼角，トリム角，曳航索張力の静的な関係である．図中の横軸は主翼角である．丸印は深度，三角印は張力，四角印はトリム角のそれぞれ計測結果である．計算結果はそれぞれ実線，破線，一点鎖線が対応している．実験の結果は計算と良く一致しており，計測精

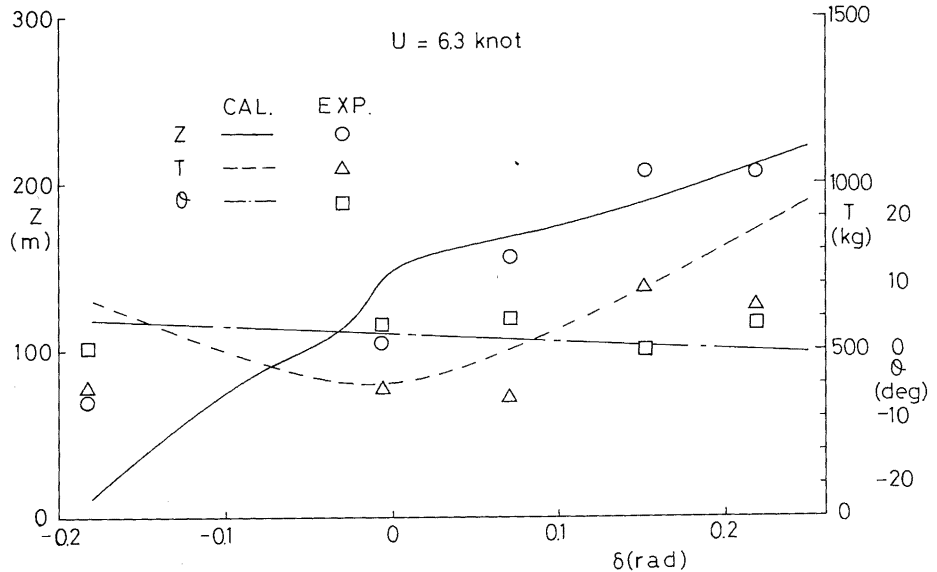


図 11 DRAKE の静的性能の実海域実験と理論計算の比較

度，計算精度はほぼ満足できるものである。

図 12 は 12 ノットで曳航している場合の曳航体の安定性を見るために行った実験結果である。

図中の δ は主翼角， γ は尾翼角である。計算はジャイロ式運動計測装置で観測した観測母船の運動を船尾での運動に換算して，それを入力して文献 7) の方法で行った。張力と潜航深度の実験結果は計算と余り良く一致していない。これは主翼角がほぼ 0 の場合の実験であり，相対主翼角の僅かな変化に対しても張力と潜航深度が大きく変化するので，計算と実験の一致が最も困難であると考えられるケースである。トリム角に計算誤差が含まれるのでこれを実験値で置換えれば計算と実験の一致はかなり良くなると考えられる。敢えてこの状態の結果を示すのは 12 ノットの高速曳航であっても曳航体の運動は極めて安定している事を示したい為である。この速度は今回使用した観測母船の航海速力であり，日本の大部分の観測船の航海速力に近い。性能的にはさらに曳航速度を増加させても転覆等の恐れは無く，構造強度的な検討を続けることで最大曳航速度は更新できると考えられる。

図 13 は図 12 の結果をスペクトル解析したものである。(a) は上下揺，横揺の結果であるが，曳航体はこれらの運動を殆ど行わないことがわかる。しかしながら (b) の縦揺の結果をみると実験結果は曳航体の縦揺はむしろ観測母船よりも大きく，しかも高周波数領域で大きい。この結果は理論計算の示す傾向と異なる。図 12 から明らかなようにこの縦揺は主翼角変化に伴って起こっている。主翼は深度保持の面からのみ制御しており，縦揺は制御の対象としていないのでこのようなことが起こるわけであるが，縦揺を制御の対象としても主翼角だけを制御量とする以上，深度誤差と縦揺を同時に最少とするような制御方法はない。今後は深度保持の精度をどの程度下げる（制御定数を下げる）ことが深度保持と縦揺

DRAKE (U = 12 knot)

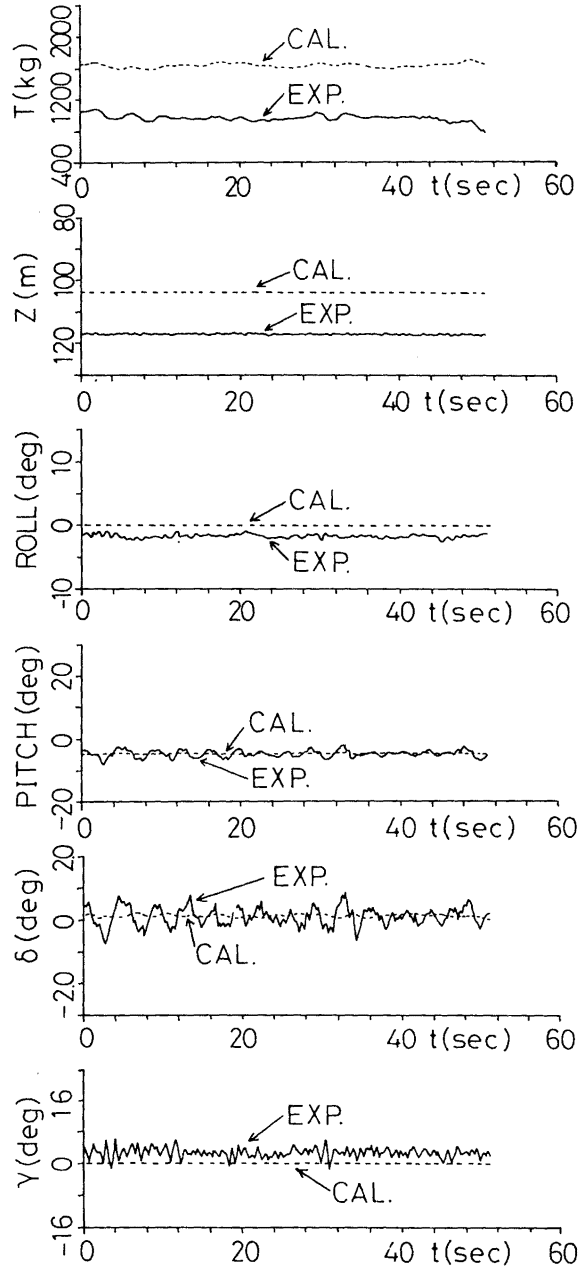


図 12 DRAKE の動的性能の実海域実験と理論計算の比較

$U = 12 \text{ knot}$

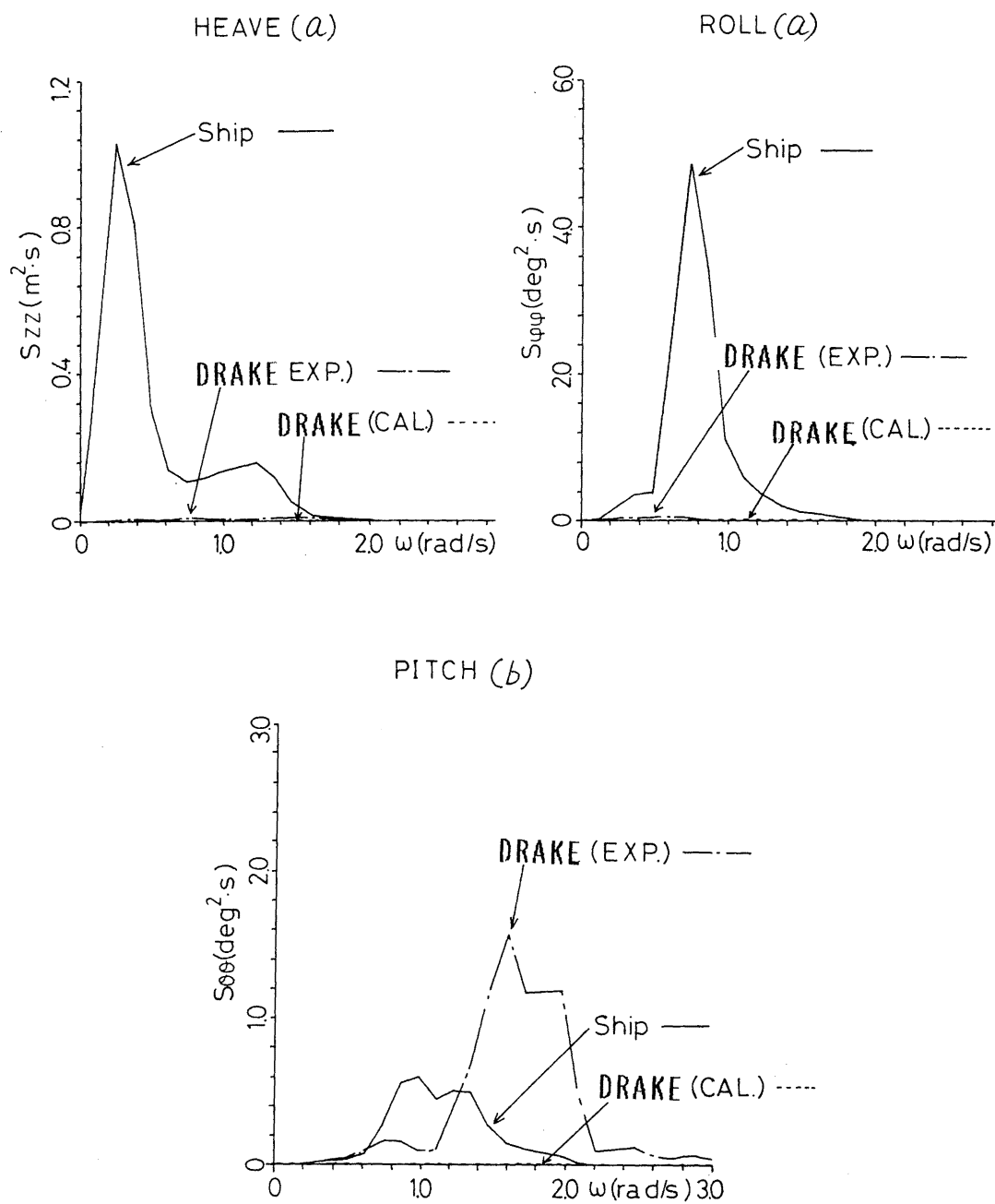


図 13 DRAKE の運動スペクトラムと観測母船の運動スペクトラムの比較

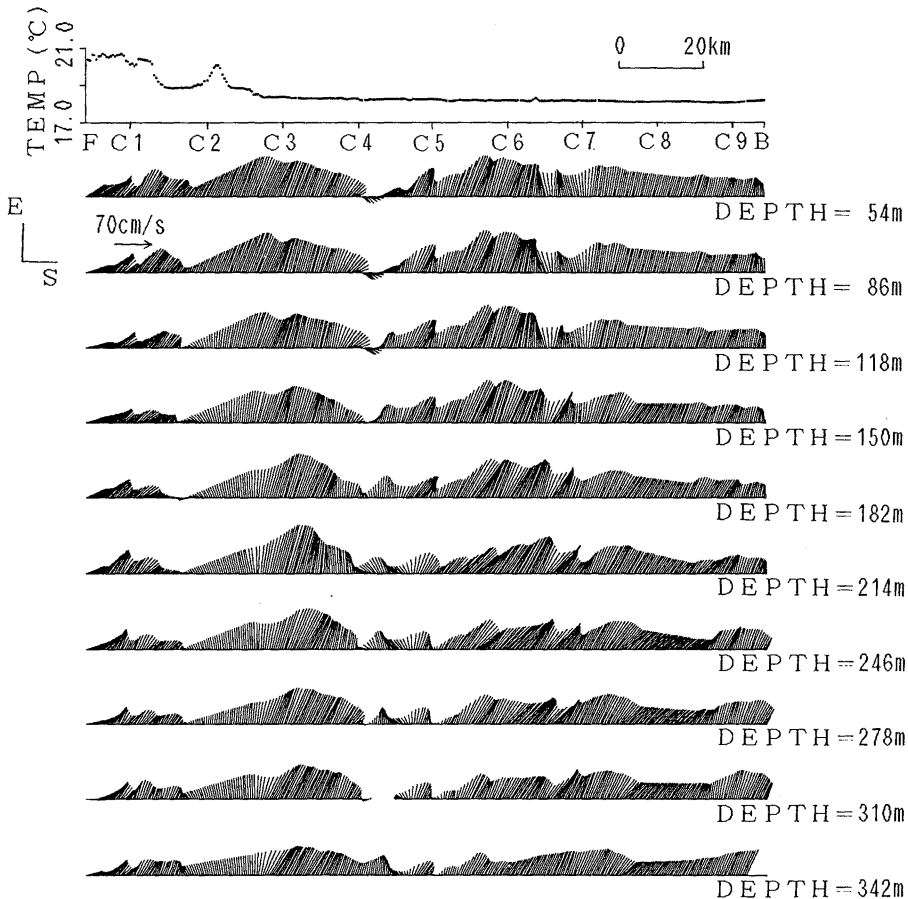


図 14 今回の観測で得られた黒潮の流速分布

の両面から考えて観測上最適かを検討して行きたい。

図 14 に今回の海上実験で得られた黒潮の断面内の流速分布を示す。本報告でこのデータについて海洋物理的な評価を与えることは趣旨ではないが、このような流速分布図が過去に得られたことは無く、今後この計測システムを使つての観測が盛んに行われることは疑いのないところである。

最後に曳航体と曳航システムの開発に当たって終始変わらぬ協力を惜しまれなかった三井海洋開発(株)石寺 博氏、伊藤 譲氏に深く感謝いたします。また本研究は応用力学研究所海洋共同研究の一環として行われたものであり、システムの開発と海上実験に共に努力された応用力学研究所海洋プロジェクトグループの方々に御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 佐々木建他：曳航体の運動に関する実験と解析，海洋科学技術センター研究報告，第 2 号，1978

- 2) Kato, N. et al. : Motions of Underwater Towed system, J. Soc. Naval Arch. Japan, Vol. 162, 1987
- 3) 山北和之：没水型曳航体の曳航特性に関する研究(第2報), 日本造船学会論文集, 第157号, 1985
- 4) Kaneko A. and Koterayama W. : ADCP Measurements from a Towed Vehicle. EOS Transaction, American Geophysical Union, Vol. 69, 1988
- 5) Dessureault, J. G. : "Batfish" A Depth Controllable Towed Body for Collecting Oceanographic Data. Ocean Engineering. Vol. 3, 1976
- 6) 石谷 久, 馬場康子：翼状航行型無人潜水艇の姿勢制御に関する考察, 日本造船学会論文集, 第162号, 1987
- 7) 小寺山亘他：海洋観測用曳航体の開発研究(第一報 曳航体の運動と制御について), 日本造船学会論文集, 第163号, 1988
- 8) 大楠 丹他：Towed Vehicle の動力学に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 第163号, 1987
- 9) Takematsu, M. et al. : Moored Instrument Observations in the Kuroshio South of Kyushu. J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 42, 1986.

(平成元年5月8日 受理)