

独立行政法人港湾空港技術研究所

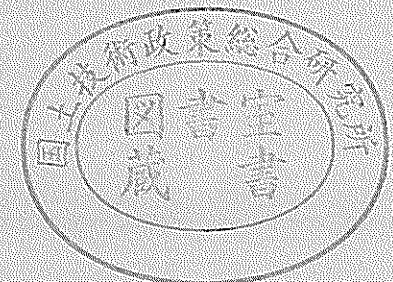
港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.42 NO.3 September 2003

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 42 巻 第 3 号 (Vol. 42, No. 3), 2003 年 9 月 (September 2003)

目 次 (CONTENTS)

1. コンクリートの局所的圧縮破壊現象とその評価手法
.....岩波 光保・渡辺 健・横田 弘・二羽 淳一郎 1
(Localized Compressive Failure of Concrete and Its Evaluation Methods
..... Mitsuyasu IWANAMI, Ken WATANABE, Hiroshi YOKOTA, Junichiro NIWA)
2. 触像を用いた油圧汎用施工機械の遠隔操作に関する研究
.....平林 丈嗣・山本 恭・酒井 浩・秋園 純一・内海 真 33
(Research on Tele-operation with Haptic Image for hydraulic powerd construction machine
..... Taketsugu HIRABAYASHI, Takashi YAMAMOTO, Hiroshi SAKAI, Junnichi AKIZONO, Makoto UTSUMI)
3. 強潮流海域における水中観測システムの研究
(第 1 報 ; システムの基本構成と基礎運動シミュレーション)
..... 酒井 浩・田中 敏成 57
(Study of the Underwater Observation System in Fast Water Current
(1st Report;The basic System and Results of the Motion Simulation)
..... Hiroshi SAKAI, Toshinari TANAKA)
4. 台風による内湾の波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築
..... 河合 弘泰・川口 浩二・橋本 典明 85
(Development of a Storm Surge Model Coupled with a Wave Model for Typhoon-caused Wave and Current in a Closed Bay
..... Hiroyasu KAWAI, Koji KAWAGUCHI, Noriaki HASHIMOTO)
5. 模型実験による臨海都市部の津波氾濫のリスク評価
..... 安田 誠宏・平石 哲也 111
(Experimental Risk Assessment of Tsunami Inundation in Coastal Urban Area
..... Tomohiro YASUDA, Tetsuya HIRAISHI)

強潮流海域における水中観測システムの研究

(第1報 ; システムの基本構成と基礎運動シミュレーション)

酒井 浩*・田中 敏成**

要 旨

港湾における各種調査や工事の施工管理において、視認による海中状況の観測、作業状況の監視や出来形管理は非常に重要な作業であるが、未だに潜水士の目視作業によって行われるのが一般的である。

このような中で、東京湾口航路整備事業において、第三海堡の撤去構造物によって構築された魚礁の効果の確認作業と開発保全航路の維持管理業務のため、海底状況の観察や水中映像の撮影が必要となった。しかしながら、当海域は大水深で強潮流が存在するため、効率的で安全な作業が行える新たな水中観測システムの開発が要請された。

そこで我々は研究の第一段階として、ミッションに適合した観測システムについて検討した。この結果、潮流の大きさに応じて、曳航、自航およびカイトモード(曳航船舶を係留して船上のウインチによる巻き取りのみで曳航体を微速前進させるモード)の三方式で活用できる曳航式の自律航行システムを提案し、あわせて水中観測システムとして備えるべき機能を設定した。

次に、基礎運動に関するシミュレーションによって本システムの安定性について検証した。この結果、必要な付加重量および翼面積が明らかになるとともに、前翼を可動とし、双動による Heave, Pitch 制御ならびに差動による Roll 制御を行う必要があることが明らかとなった。

キーワード : 水中観測, 強潮流, 自律型曳航体, 維持管理

* 施工・制御技術部制御技術研究室長

** 施工・制御技術部制御技術研究室

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話 : 046-844-5062 Fax : 046-844-0575 e-mail:sakai@pari.go.jp

Study of the Underwater Observation System in Fast Water Current (1st Report; The basic System and Results of the Motion Simulation)

Hiroshi SAKAI*
Toshinari TANAKA**

Synopsis

In the various investigations of the port area and the construction management of the port facilities, it is very important to observe underwater states, to monitor operations, and to confirm an execution by viewing. These work are carried out mainly by divers and partly by ROVs at present.

On the project of the improvement of Tokyo Bay Waterway, it is needed to observe and take a picture to confirm the effect of the artificial fish reeves constructed by the blocks of the ruined Third Fort of Tokyo Bay and to maintain the function of the waterway in the port area. However, in this sea area, the current is fast and the water depth is too deep for diver's work. Therefore, it is needed to research and develop a new underwater observation system in order to carry out viewing work safely and efficiently.

We studied the system suitable for this mission in the first step. Consequently, we proposed a new underwater observation system using "Autonomous Towed Vehicle" and decided the functions and specifications of the total system to perform the given mission. This system can be used as a towed mode, an autonomous mode, and a kite mode according to the current speed.

We investigated the stability of the vehicle by the basic motion simulation in the next step. As a result, it is clear that an additional weight and an enlargement of forewing's area are required. Moreover, the feedback control of heaving and pitching by parallel-motion of forewings and feedback control of rolling by differential-motion of forewings are needed, too.

Key Words: underwater observation system, fast water current, autonomous towed vehicle, maintenance

* Head, Control Systems Division, Construction and Control Systems Department
** Control Systems Division, Construction and Control Systems Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-8445062 Fax : +81-46-8440575 e-mail:sakai@pari.go.jp

目 次

要 旨	57
1. まえがき	61
2. 観測システムの検討	61
2.1 ミッションの概要	61
2.2 最大潮流の検討	61
2.3 透明度の検討	61
2.4 基本システムの設定	61
2.5 システムの拡張性の検討	64
2.6 システムが有すべき機能の検討	66
2.7 観測時間の検討	66
2.8 曳航体のベースマシンの検討	67
2.9 超音波ソナーの搭載について	67
2.10 曳航体の監督測量船への搭載について	68
3. 基礎運動シミュレーション（第1次）	70
3.1 実験機の開発手順	70
3.2 解析手法	70
3.3 基本的な入力条件の検討	71
3.4 静的安定性の検討	71
3.5 静的バランス	71
3.6 動的安定性の検討	72
3.7 超音波ソナーを取り付けた場合の検討	78
4. 結論	79
5. あとがき	79
参考文献	79
付録	80

1. まえがき

港湾における各種調査や工事の施工管理において、視認による海中状況の観測、作業状況の監視や出来形管理は非常に重要な作業である。これらの作業は、一部にはROV(Remotely Operated Vehicle)などの活用が試みられているものの、未だに潜水士の目視作業によって行われるのが一般的である。

このような中で、東京湾口航路整備事業において、第三海堡の撤去構造物によって構築された魚礁の効果を確認するため、海底状況の観察や水中映像の撮影が必要となった。しかしながら、当海域は潜水士が作業するには水深が深く、また強潮流が存在するため非常に困難な作業となり、効率的で安全な作業を行うためには、新たなシステムの導入が不可欠であった。また、今後、開発保全航路として維持管理していくためにも、同海域で効率的に利用できる水中観測システムの開発が望まれた。

そこで、我々は大水深、強潮流による外乱など悪条件下の海域においても、簡便で安全に海中状況の観測や映像撮影作業を効率的に行える自律型曳航体を用いた水中観測システムについて研究開発を行うこととした。

本研究によって開発される観測システムは、大きな外力の存在など、同様な条件下での水質調査作業などの環境モニタリングシステムとして、また、複雑な流れの存在する港湾域での各種調査にも利用が可能なシステムであると考えられる。

本論文では、発案したシステムの基本構成および基礎運動シミュレーションの結果について報告する。

2. 観測システムの検討

要求されるミッションに適合した合理的なシステムを開発するためには、開発の最初の段階で運用条件を明確にし、システムに要求される機能を十分に検討することが必要である。

2.1 ミッションの概要

本システムに与えられたミッションの概要は以下の通りである。

(1) 観測海域

第三海堡周辺海域 (図-1参照)

(2) 観測項目

第三海堡からの撤去構造物によって構築された魚礁の効果確認のための魚影撮影および東京湾口航路の維持管理のための海底状況の撮影

(3) 魚礁の形状

約100m×100mの範囲に1~6m角の撤去構造物を5~8mの高さに積んだもの (観測海域内の数カ所に点在、図-2参照)

(4) 最大観測水深

60m

2.2 最大潮流の検討

潮流は本システムの基本構成を検討する上で最も重要な条件の一つである。過去の東京湾内における潮流観測データ^{1)~3)}から読み取った最大潮流を表-1に示す。観測対象である海底の魚礁付近や航路の海底部では局所的に潮流が強まることも考えられるため、このデータから余裕を見て本システムの稼働時における最大潮流を3ktsとする。

表-1 観測データによる最大潮流 (単位；kts)

資料名	調査実施機関	最大潮流
東京湾潮流図	海上保安庁	2.0
東京湾口航路流況調査	関東地方整備局	1.9
東京湾の循環流と海況	理化学研究所	2.3

2.3 透明度の検討

観測海域における透明度については、東京湾口航路事務所が第三海堡の撤去工事中に工事周辺 (10点の測定データ) で水質調査を実施しており、その結果を以下の表に示す。このデータから平均的な値として、冬季10m、春季・秋季5m、夏季3mとする。

表-2 透明度調査結果一覧表

調査日	透明度(m)
平成13年 1月11日	8.7~11.7
平成13年 1月18日	8.5~12.3
平成13年 4月10日	6.8~ 8.0
平成13年 4月26日	3.7~ 6.6
平成13年 7月18日	3.3~ 3.7
平成13年 7月 6日	2.0~ 3.0
平成13年 10月 6日	6.8~ 8.0
平成13年 10月27日	3.4~ 3.9

2.4 基本システムの設定

観測システムとしては、海底に設置するタイプと海中を移動するタイプが考えられるが、観測範囲が広範囲にわたるため、海底に設置するタイプでは何カ所にも機材を設置する必要があること、また離れた複数の地点や航

路の維持管理業務を行うには機動力が必要であることから、観測機器を搭載した移動体によるシステムが適当であると考えた。

次に移動体の制御方法としては自律型と遠隔操作型が考えられる。与えられたミッションの主たるものが海底付近の映像撮影であることから、移動体には基本的には一定測線上の一定高度、一定深度の航行が求められる。

また、比較的広範囲の海域を観測することが必要であり、自律型による制御に適したミッションと考えられる。さらに複雑な海底地形に沿って移動体を遠隔操縦するためには熟練した操縦者が必要であり、これを自律化す

ば迅速で効率的な作業が可能と考えられる。したがって自律型水中移動体、すなわちAUV (Autonomous Underwater Vehicle) を基本としたシステムを採用することとした。

しかしながら、与えられたミッションは強潮流海域における海底映像の取得であり、変動する大きな外力に対して安定した航行が必要となる。これまで開発、実用化されたAUV^{4,6)}は図-3～図-5に示すように、いずれも大深度や湖水のような流れがそれほど大きくなく一様である海域でのミッションに用いられるものがほとんどである。

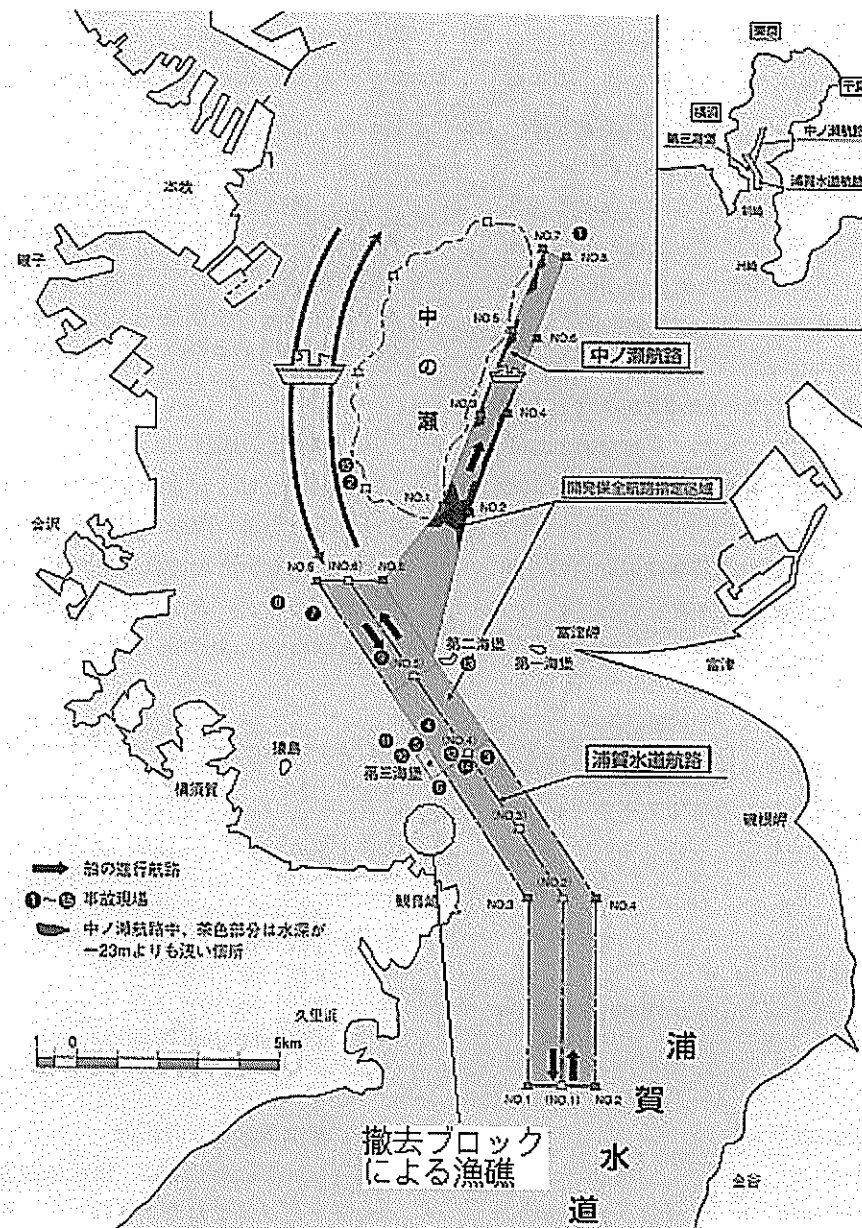


図-1 観測海域

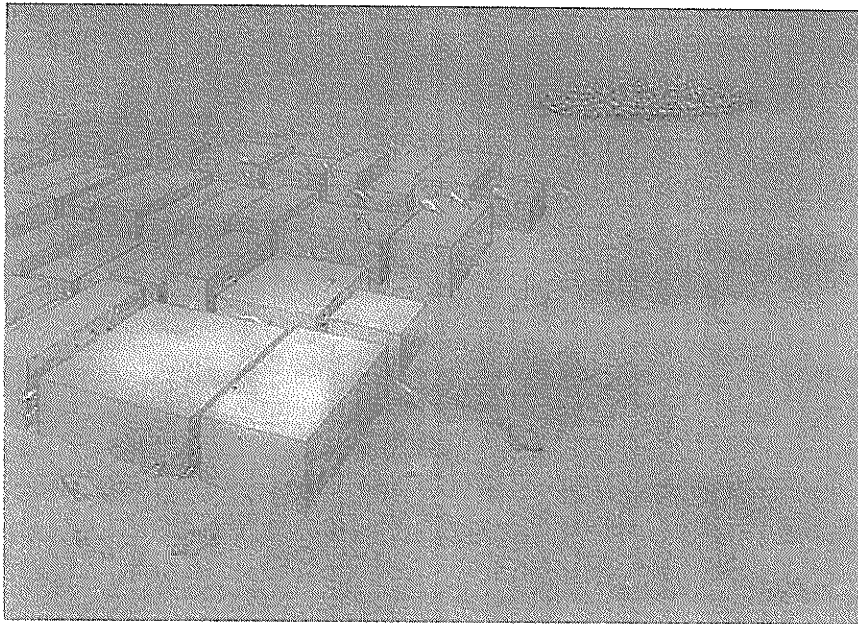


図-2 魚礁の形状

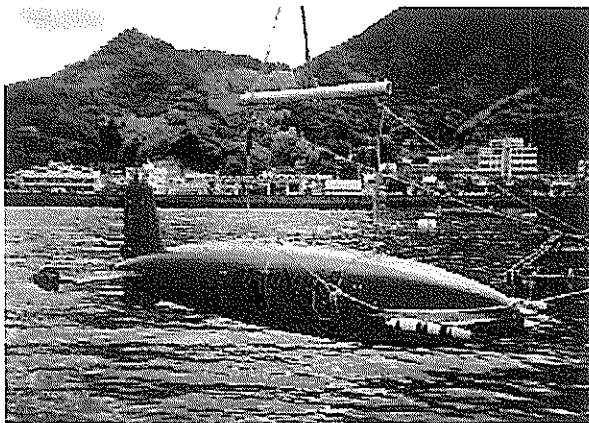


図-3 AE-2 (海底ケーブル調査用)

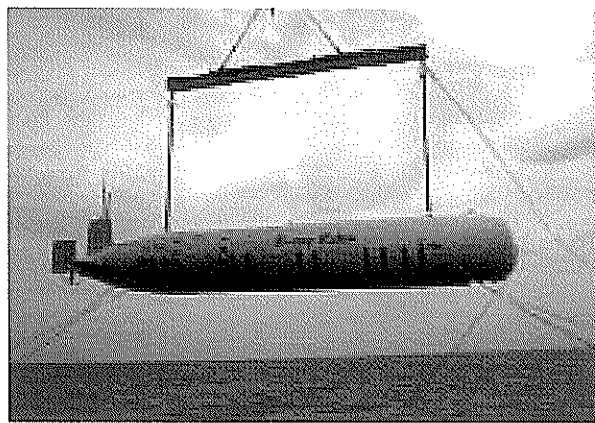


図-4 R-1 (海洋調査用)

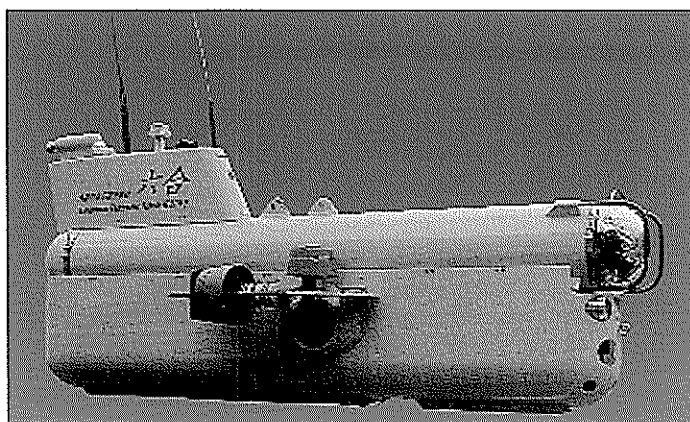


図-5 六合 (ダム湖調査用)

最大潮流3ktsに対して自らの推力のみで安定した航行を行うことは高出力のスラストを装備するなど技術的に不可能ではないが、その結果として大きな電池容量を必要とするなど、大掛かりなシステムとなり現実的ではないと考えられる。

一方、本システムのミッションの一つは、魚礁の効果を確認することであり、鮮明な画像によるリアルタイムでの観測が望まれる。このためには水中移動体で撮影した映像を同時に船上に伝達することが必要である。現状の技術レベルでは、海中を無索で映像情報を伝達するには超音波リンクを利用するしかないが、情報量から考えて高品質な映像を連続的に伝送することは非常に難しい。

これらのことから、強潮流に対する機体の保持と映像信号の伝送機能を兼ねたケーブルを装備することが妥当と考えられる。したがって、基本的なシステムとしては、船舶から移動体を曳航するシステム、すなわち、曳航船舶と自律型曳航体を曳航索で結んだシステムとした。

2.5 システムの拡張性の検討

運用に当たっては、設定した潮流以下での使用機会もかなり多いと考えられる。この場合、無索で自航できれば移動の自由度が増し、さらに効率的な観測が可能となる。一方、このために付加すべき機能はさほど多くなく、技術的に困難ではない。このため、一定の潮流以下では無索でも使用できるシステムとすることが合理的である。

また、ミッションの関係から対地速度を一定以下にすることが必要となるが、潮流が大きくなった場合には、対水速度が大きくなり、曳航体を最適な状態で制御できる範囲を超えることも想定される。この場合、最低限でも曳航速度が0の状態、すなわち曳航船舶に係留して船上のウィンチによる巻き取りのみで曳航体を微速前進させるモードも有効と考えられる（以下、本報告では、カイトモードと呼ぶ）。

以上のことから、本研究では、図-6～図-8に示すように潮流条件によって曳航モード、自航モードおよびカイトモードの3モードで運用可能なシステムを開発することとした。

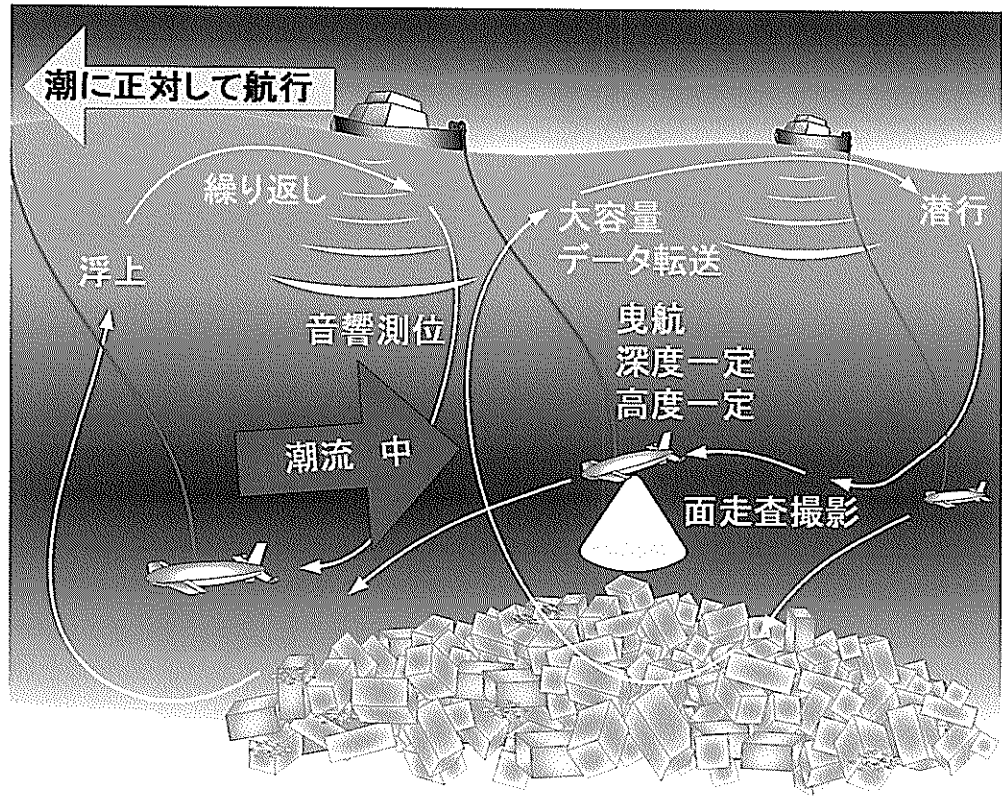


図-6 曳航モード

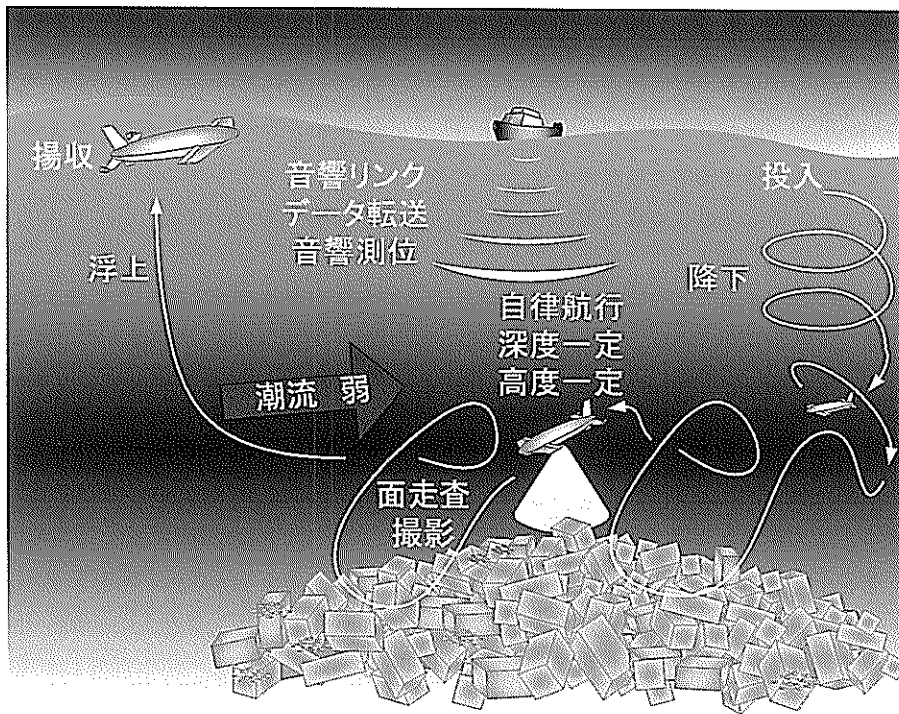


図-7 自航モード

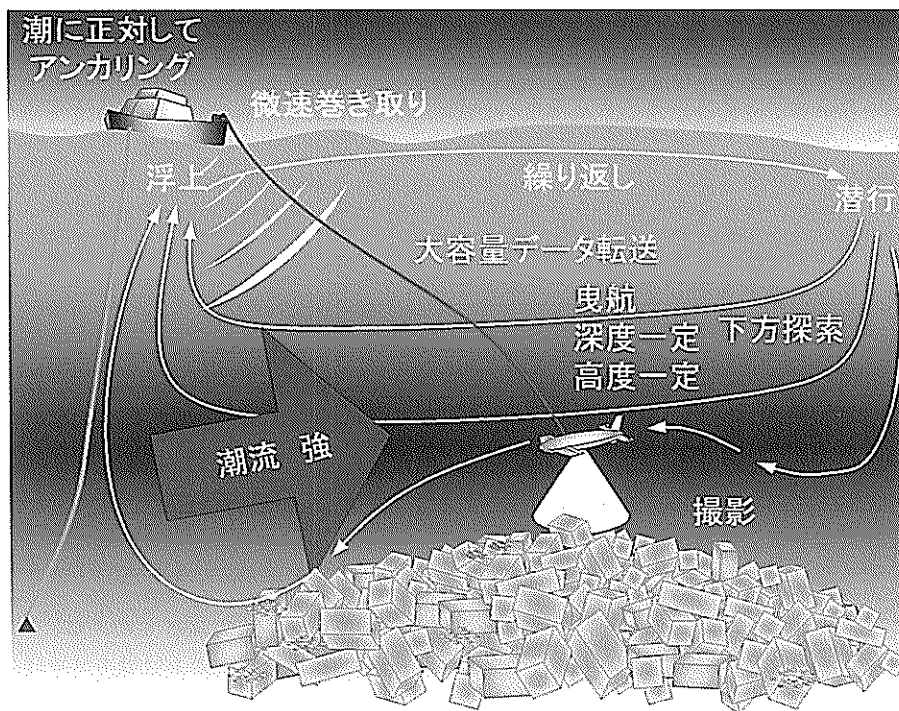


図-8 カイトモード

2.6 システムが有すべき機能の検討

(1) システム構成

本システムは、自律型曳航体、曳航索および曳航船舶で構成する。

(2) 曳航体寸法、重量および装備

曳航体の大きさは人間が容易に扱える範囲内とする。また、空中重量は曳航船舶後部の揚収装置で扱える範囲内とする。すなわち、全長3m程度、空中重量300kg以下とする。海水中では中性浮力としバラストで調整する。また、曳航体には航行装置として水平翼、尾翼およびスラスタを装備する。

(3) 観測機器

本システムのミッションの一つである海底状況の観測と映像撮影を行うため、観測機器として水中ビデオカメラを搭載する。さらに水深60mにおいて撮影するためには太陽光による光量だけでは不十分であるため、照明機器を装備する。また、将来的には光学映像データを補完するために、音響映像データを取得できる超音波ソナーを搭載することを想定した機器配置とし、これを搭載した場合も観測システムとしての航行能力を有するものとする。

(4) 撮影速度

連続した安定的な映像を撮影するため、曳航体は低速で航行する必要がある。このため、原則として曳航体の対地速度を1ktとする。

(5) 映像データの記録方法

映像データは、自航モードの場合は曳航体内蔵のハードディスクに記録し、曳航モードおよびカイトモードの場合は船上のVTRおよび曳航体内蔵のハードディスクに記録するシステムとする。

(6) 位置測定システム

曳航船舶のGPSと船底に取り付けたSSBLによる曳航体の位置情報を曳航船舶からの音響通信により取得するシステムとする。

(7) 自律能力と位置制御手法

自航モードでは、曳航体は設定した測線上を対地速度一定、深度あるいは高度一定で航行し、魚礁の撮影を行う自律性を有するものとする。平面的な位置制御は曳航体の推力によって行うものとする。また、水深方向の制御は曳航体の水平翼と推力によって行う。曳航モードでは、潮流に正対して航行する曳航船舶からウィンチで繰り出された曳航体が対地速度一定、深度あるいは高度一定で航行し、魚礁の撮影を行うものとする。この場合、水深方向の制御は曳航力、水平翼および推力によって行う。カイトモードでは、潮流に正対して係留された曳航

船舶からウィンチで繰り出された曳航体が深度あるいは高度一定で移動し、魚礁の撮影を行うものとする。この場合、水深方向の制御はウィンチの巻き取り力、水平翼および推力によって行う。また、海底の魚礁および前方の障害物との衝突を自律的に回避する能力を備えるものとする。

(8) 航行モードの考え方

安定したミッションを遂行するため、表-3に示すように潮流が2ktsまでは自航モード、2~3ktsでは曳航モード、3ktsを超える場合はカイトモードで航行することとする。曳航体は潮流に正対させることを基本とする。また、表で+は船上のウィンチの巻き取りによる微速前進を示す。このことから、曳航体は対水速度が1~4ktsの範囲で制御可能なものとする。

表-3 航行区分 (単位 ; kts)

潮流	モード	曳航体			曳航船舶		
		推力	速度		推力	速度	
			対水	対地		対水	対地
0~2	自航	1~3	1~3	1	-	-	-
2~3	曳航	0	3~4	1	3~4	3~4	1
3~	カイト		3+~	0+	-	-	0

(9) 曳航体の航行能力

航行モードの考え方から、曳航体には3ktsの自航能力が必要となる。また、航行可能時間は自航モード(1kt航行時)で8時間とする。

(10) 曳航船舶

曳航船舶としては監督測量船を想定する。航行モードの考え方から、曳航船舶の能力としては3~4kts(対水速度)の低速航行が必要となる。また、曳航体の支援システムを搭載する必要がある。

(11) 船上支援システム

船上支援システムとして、曳航索、曳航体の着水・揚収クレーン、曳航索の巻き取り・繰り出し装置、制御室(位置計測システム、制御システム、映像記録装置など)、GPS、SSBL、外部電源が必要である。また、曳航索の巻き取り・繰り出し装置はカイトモードでの運用が可能な曳航索長を制御できる性能を有するものとする。

2.7 観測時間の検討

1測線の観測に要する時間は、観測区間を100m、助走区間を20m、曳航体の対地速度を1ktとすれば約4分となる。夏季には透明度が3mであることから、魚礁に3m程度まで接近するものとし、画角を45°と仮定すれば撮影幅は2.5mとなるため、40回の航行繰り返しが必要となる。従って、撮影面を重複させないものとして、全面を撮影す

るためには5時間程度必要となる。同じく春季, 秋季では透明度が5mであり, 同様な検討から3時間程度, 冬季では, 透明度が10mであるため, 1.5時間程度が必要となる。

2.8 曳航体のベースマシンの検討

本研究で開発を目指している曳航体の基本的な動作のためには, ハードウェア的にはAUVの機能を有している必要がある。表-4に示すように, これまで国内外でAUVに関して研究が進められ, 自律的な航行機能については確実に信頼性の高い機体が開発されている。従って, ハードウェアについては, 開発を目指している曳航体と仕様や基本的な機器構成が概ね一致する既存のAUVをベースマシンとし, シミュレーションや模型実験による検討を通じて得られる結果に基づき, 曳航体として機能するように改造, カスタマイズすることが経済的に最も合理的である。一方, 当然ながら制御系(ソフトウェア)については全く新たに開発する必要がある。

ベースマシンに求められる要件は, 潮流に対する流体抵抗が小さく, 水平翼の制御が可能な艇体であること, また搭載機器の関係から一定のペイロードを有すること, さらに監督測量船への搭載を想定することから, 小型, 軽量であることがあげられる。表-4のうち, この要件を満たす量産型AUVはAQUA EXPLORER 2 (以下, AE-2) とAQUA EXPLORER 2000だけである。このため, 本研究では, より小型軽量であるAE-2をベースマシンとする。

2.9 超音波ソナーの搭載について

(1) 検討の目的

本システムでは水中観測機器としてテレビカメラを採用することとしている。ところで, 最近, コンピュータのデータ処理速度の飛躍的な向上に伴い, リアルタイムで対象物の高分解能な動画を取得できる超音波ソナー

が登場してきた(図-9参照)。このため, 曳航体への超音波ソナーの搭載可能性についても検討する。

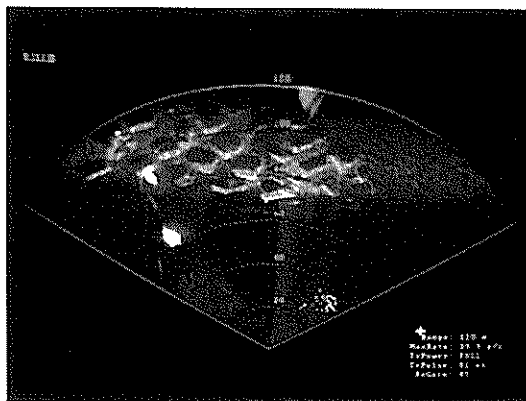


図-9 超音波ソナーの画像例

(2) 搭載を検討する機器

本システムのミッションである魚影の確認や魚礁全体の形状をリアルタイムの映像として認識できるほど高分解能で, 広い探索範囲を有し, AUVに搭載できるほどコンパクトな超音波ソナーは「フォーキャストマルチビーム前方監視ソナー⁷⁾」(図-10)しかない。このため, 以下の検討は本装置について行う。

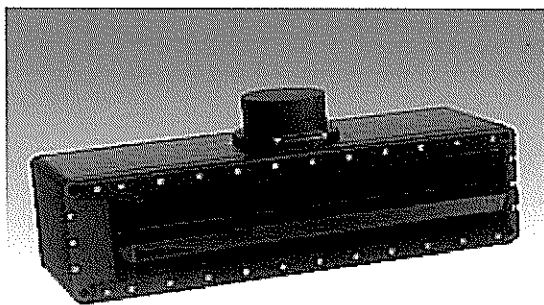


図-10 超音波ソナー

表-4 国内外の主要な AUV

名称	寸法	空中重量	潜水能力	形式	主なミッション
AE2	3mL×1.3mW×0.9mH	280kgf	500m	可変水平翼自航型	海底ケーブル調査
AE2000	3mL×1.3mW×0.9mH	300kgf	2000m	可変水平翼自航型	海底ケーブル調査, 海洋調査
淡探	2mL×0.8mW×0.75mH	180kgf	110m	無翼自航型	ダム湖調査
R1	8.2mL×φ1.15m	4800kgf	400m	左右可変水平翼自航型	海洋調査
うらしま	9.7mL×1.3mW×1.5mH	7500kgf	3500m	左右可変水平翼自航型	海洋調査
マリンバード	6.7mL×1.8mW×1.1mH	1300kgf	—	無翼自航型	実験機
THESEUS	10.7mL×φ1.27m	8600kgf	1000m	可変翼自航型	ケーブル敷設
REMUS	1.6mL×φ0.19m	37kgf	100m	可変翼自航型	海洋調査

(3) 重量と寸法の検討

トランスデューサーの寸法は197×499×192mmで、空中重量19kg、水中重量は7kgである。一方、プロセッサは177×483×417mmで、重量は20kgである。前章で検討したようにAE-2がベースマシンであるから、トランスデューサーは図-11に示すように機体の外部に取り付けばスペース的には他の機器に支障がでない範囲での取り付けは可能であり、また重量的には曳航体が有する調整浮力の範囲内にあるため搭載が可能である。

しかしながら、本装置はROVに搭載することを前提に設計されており、プロセッサは防水構造になっておらず、また寸法的にも重量的にも曳航体に搭載できる範囲を大きく超えている。このため、プロセッサは船上に置き、データ伝送のためにケーブルで接続する必要がある。

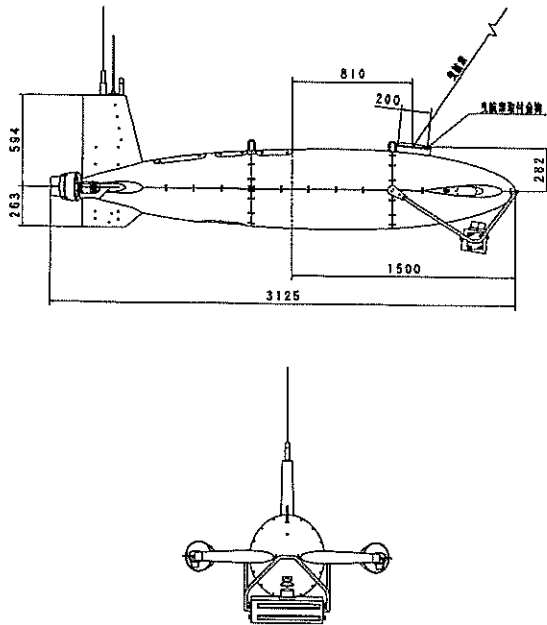


図-11 超音波ソナー取付図

またトランスデューサーとプロセッサ間を超音波リンクによってデータ伝送する方法もあるが、伝送速度や確実性に問題があるため、船上でリアルタイムの動画を得るためには曳航体と船上をケーブルで接続する方法が適当である。

(4) 電源容量の検討

トランスデューサーの消費電流は電源電圧20~30VDCで最大2Aであり、仮にスラスタを同時に稼働させたとしても、現在の電池容量で約4時間程度は稼働可能と考え

られる。従って、曳航体内の電池だけで稼働させることとする。

(5) 実現可能なシステム

以上の検討から、トランスデューサーとプロセッサの接続が必要なため、これに曳航索を利用することとすれば、曳航モードおよびカイトモード時のみ超音波ソナーによる探査が可能なシステムとすることができる。また、曳航索には超音波ソナー（制御信号、データの伝送）に必要な機能を付加することが必要となる。

(6) 期待される機能

自航モードではテレビカメラによる映像を曳航体内のハードディスクに記録でき、曳航モードおよびカイトモードではテレビカメラによる映像と超音波ソナーによる映像をリアルタイムで取得できるシステムとなる。

ただし、本超音波ソナーは前方監視ソナーであり、斜め前方下部の広範囲で深い奥行きのある2次元空間内で、対象物からの反射強度のイメージを一面に表示するものであり、魚影や魚礁の全体イメージを視認するには適しているが、航路や海底地形の精密な測深値を測定し、これを3次元表示することができる装置ではない。このようなミッションには機能が異なる超音波装置を装備する必要がある。

(7) 本研究における取り扱い

このように超音波ソナーの搭載は物理的に可能であり有用であるが、経済的な面の制約もあるため、本研究では将来、搭載することを前提に、超音波ソナーの搭載スペースを確保しておくとともに、搭載した場合でも安定した曳航が可能であることを確認するにとどめる。

2.10 曳航体の監督測量船への搭載について

(1) 検討の目的

本システムは曳航船舶として監督測量船を用いることを想定している。このため、以下では本システムを運用する場合に監督測量船に要求される事項を検討する。

(2) 曳航船舶に必要な機能と装備

航行モードの考え方から、曳航船舶の能力としては3~4ktsの低速航行が必要となる。このため、推進装置としては可変ピッチプロペラあるいはウォータージェット方式が適当と考えられる。また、曳航モードおよびカイトモードでの航行時には、曳航船舶の動揺が曳航索を通じて曳航体の運動性能に大きな影響を与えるため、減揺装置の設置が望まれる。さらに、曳航体を舷側から着水・揚収が可能なデッキクレーンまたはダビット（吊り上げ能力約1t程度、舷側から2~3mのリーチ）を装備する必要がある。

(3) 甲板スペースの確保

甲板上に曳航体(長さ約3m, 幅約1.5m, 空中重量300kg程度)および曳航シーブ付き曳航ウィンチ(設置スペース約1m×約0.5m, 重量約3kg)が搭載可能なスペースを確保する必要がある。

また, 制御装置類の設置のため, 事務机(1100mm×700mm)2個分程度(机上と下部の2段で使用)のスペースを船内に確保する必要がある。舷側には音響送受波器取付ポール, 高所に無線LAN, GPSなどのアンテナ

を取付, 固定する必要がある。

(4) 電源とペイロードの確保

制御用電源(AC100V, 約2kW)とウィンチ動力電源(約0.75kW)への給電が可能な電源容量が必要である。また, 曳航体とウィンチのほか, 表-5の装備品のためのペイロードを確保する必要がある。

(5) 揚収方法について

図-12に示すような要領で曳航船舶から曳航体を着水および揚収することを想定する。

表-5 船上装備一覧表

設置場所	装置	寸法	重量
船内	①操作用ノートパソコン	30cm x 25cm x 5cm	4kg
	②航跡用ノートパソコン	同上	4kg
	③作業用ノートパソコン	同上	4kg
	④音響測位装置	40cm x 25cm x 60cm	30kg
	④-①電源トランス	15cm x 10cm x 20cm	5kg
	⑤船上通信装置	40cm x 15cm x 30cm	10kg
	⑥DGPS 受信機	20cm x 8cm x 4cm	0.5kg
	⑦DGPS ビーコン受信機	15cm x 5cm x 20cm	0.5kg
	⑧コンパス	15cmΦ x 10cm	円柱体
	⑨ラジオビーコン受信機	30cm x 20cm x 30cm	10kg
	⑨-①電源トランス	15cm x 10cm x 20cm	5kg
	⑨-②トランペットスピーカー	15cmΦ x 20cm	1kg(略円柱体)
	⑩無線 LAN (屋内用)	10cm x 5cm x 2cm	0.2kg
	⑪液晶ディスプレイ	35cm x 30cm x 4cm	5kg
⑫LAN ケーブル (ドラム巻)		20kg	
	計		約 100kg
屋外	①ラジオビーコンアンテナ	φ 600 球状ループアンテナ	10kg
	②DGPS アンテナ	15cm	1kg
	③トランスジューサ用ポール		40kg
	④無線 LAN (屋外用)	30cm x 20cm x 5cm	1kg
	⑤音響測位 (VRU)	30cm x 40cm x 10cm	5kg
	計		約 70kg

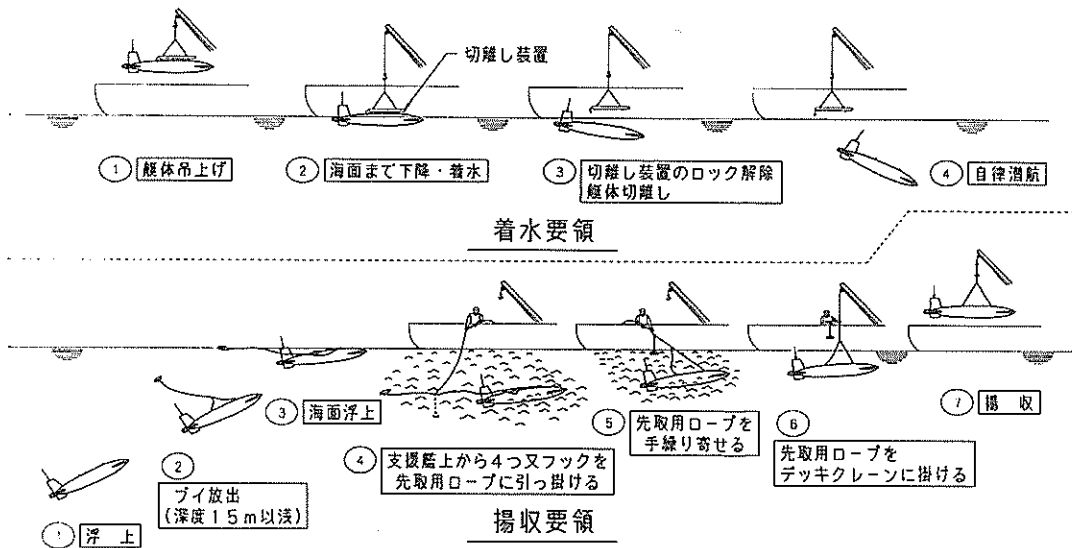


図-12 着水および揚収方法

3. 基礎運動シミュレーション (第1次)

本システムが安定して航行可能であることを確認するとともに、実験機の諸元など設計に必要なデータを取得するため、曳航体の運動について数値シミュレーションを実施した。本システムは異なる三つのモードで稼働するものであり、そのうち、特に本システムの特徴である曳航モードにおける曳航索による影響を確認することが重要である。

3.1 実験機の開発手順

実験機の開発は図-13に示すように、以下のような手順で行うこととした。

(1) 第1次シミュレーション

まず、曳航体の諸元などについて想定値を用いてシミュレーションを実施し、静的および動的な特性を把握することによって本システムが安定して航行することを確認する。

(2) 船型模型試験

シミュレーションによって得られた結果によって設定した曳航体の諸元に基づき、模型を製作し船型模型試験を行い、曳航体に関する正確なデータを取得する。

(3) 第2次シミュレーション

船型模型試験で得たデータを用いて、再度シミュレーションを実施し、静的および動的な特性を把握し、これに基づき、実験機的设计、製作を行う。

(4) 総合調整

実験機を製作後、重量・重心や曳航索の取付点などの微調整を行い、最終的に総合運転試験によって制御定数などを調整し、実験機を完成する。

本論文では、このうち(1)の第1次シミュレーション結果について報告する。

3.2 解析手法

本シミュレーションで用いるモデルは曳航索を含めたシステムを再現できるものでなければならない。このため、九州大学応用力学研究所が開発した論理解析ならびに数値解析ソフトウェア⁸⁾を基本として改良されたものを用いた。使用したソフトウェアは、機体の運動を3次元6自由度としてモデル化し、曳航索上端部にHeavingを加えることができるものである。また、直線と円弧を組み合わせた航跡による曳航が可能で、深度をパラメータとした潮流分布が設定できる。機体の運動の数値計算手法としてはRunge Kutta Gill法を用いている。

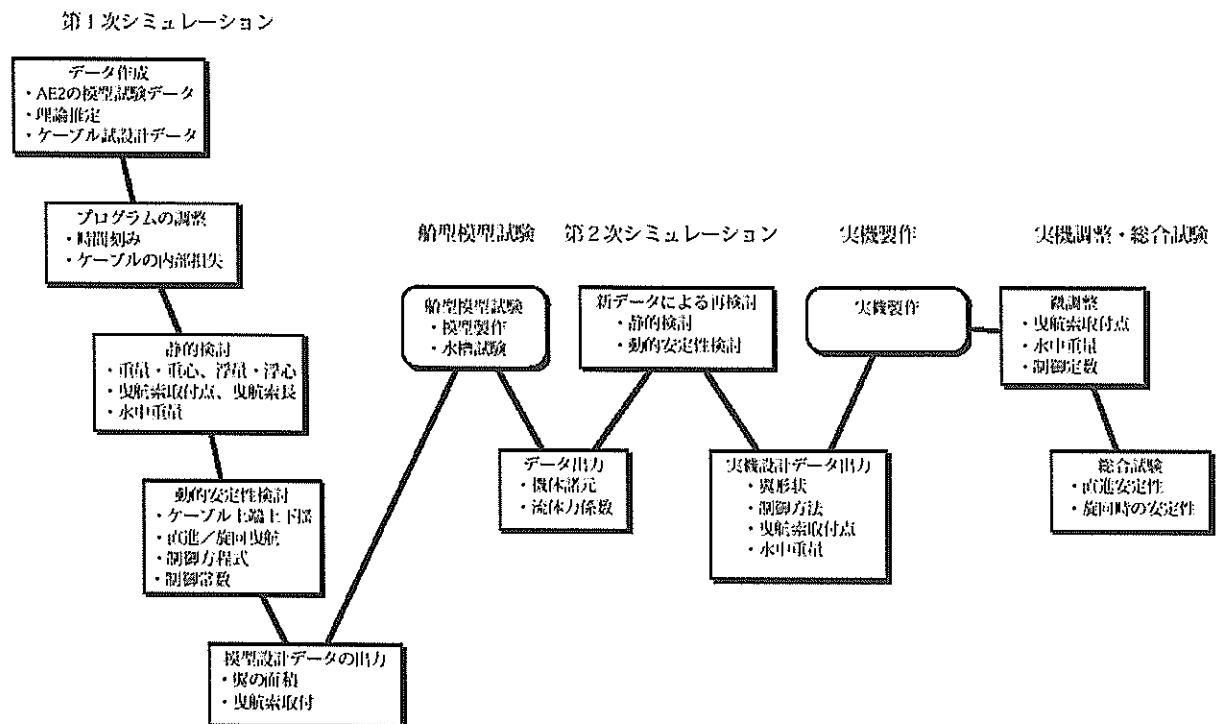


図-13 実験機開発の手順

また、曳航索の運動は3次元ランプドマス法 (Lumped Mass Method), 数値計算手法としてはRunge Kutta Gill法および予測子修正子法 (Predictor Corrector Method) を用いている。さらに、曳航索上端条件としてヒープコンペンセータモデル, 船舶の動揺に関する実時間データ入力ならびにケーブルウインチのシミュレーション機能を有し, 水平尾翼, 垂直尾翼によるPitching, Rolling, Yawingの制御が可能なるものである。なお, この解析で用いた座標系を図-14に示すとともに, 運動方程式の定式化手法を付録に添付する。

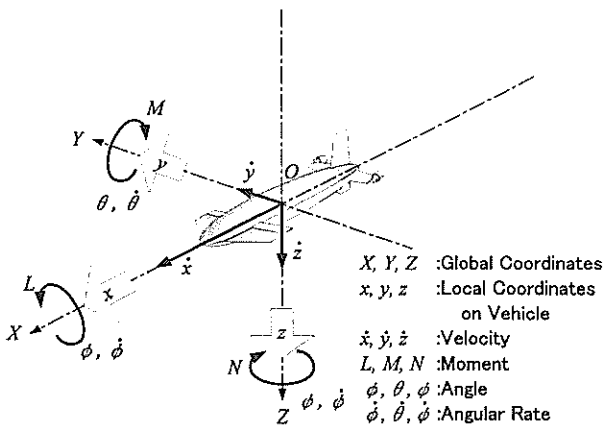


図-14 座標系

3.3 基本的な入力条件の検討

基本的なデータはベースモデルとした既存 AUV の設計資料などを用いた。ところで, 一般に AUV では Roll, Surge に関する外乱が極めて少ないため, 既存 AUV の模型試験では強制 Roll, 強制 Surge の試験が行われていない。しかし, 曳航体では曳航索による外力が大きいためこれらに関するデータが必要となり, 第1次シミュレーションでは理論推定⁸⁻¹³⁾で補った。

以下に曳航索のデータを示す。

- ・ 曳航索分割数 21
- ・ 時間刻み 0.00020 (s)
- ・ 曳航索要素長さ 2.5, 5.0×19, 2.5(m)
- ・ 曳航索要素水中重量 0.0028 (kgf/m)
- ・ 曳航索要素質量 0.000745 (kgfs²/m²)
- ・ 法線方向付加質量係数 1.0
- ・ 接線方向付加質量係数 0.0
- ・ 法線方向抗力係数 2.1
- ・ 接線方向抗力係数 0.01
- ・ 曳航索直径 0.0024 (m)
- ・ 曳航索断面積 0.452E-05 (m²)
- ・ ヤング率 0.800E+09 (kgf/m²)
- ・ 曳航索内部減衰率 20 (%)

3.4 静的安定性の検討

曳航体は水中重量が0であるため, 曳航時には強制的に潜航させる必要がある。まず, 前翼によって下向きの揚力を発生させる方法について検討した。なお, 本システムの運用条件から, 検討条件は曳航索長を100m, 曳航速度を1.5m/sと設定した。通常, 翼角によって水中移動体の運動を制御する場合, 安定性の理由から最大でも15°程度とする場合が一般的であり, 定常的にはその1/2程度とするのが適当である。前翼角度を-8°とした場合のカテナリを図-15に示す。ただし, 曳航索取付点は次のとおりとした。

- x座標 0.60m (中心より前方)
- z座標 0.15m (中心より上方)

この時, 曳航深度は38m (機体Pitch角は-0.7868度)であり, 設定した前翼角度では十分な潜航深度が得られない。しかしながら, 前翼角度をこれ以上大きく設定することで深度を大きくすることは, 定常状態としては適当ではなく, また曳航索を長くする方法も考えられるが, 曳航体位置が曳航船舶から遠くなるためデメリットが多い。このため, 付加重量によって水中重量を重くする方法について検討した。人力で取り扱える範囲として付加重量を20kg (水中)に設定した結果を同じく図-15に示す。図から, 曳航深度がほぼ60m (この時の機体Pitch角は0.00489度)となり, 付加重量によって必要な深度が得られることが確認された。ただし, 曳航索取付点は

- x座標 0.66m (中心より前方)
- z座標 0.15m (中心より上方)

に調整している。以上から, 以後の検討では, 水中付加重量20kg, 曳航索長を100mとすることを基本とした。

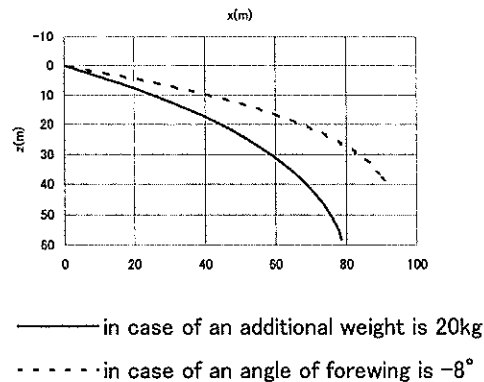


図-15 カテナリ

3.5 静的バランス

曳航体の静的バランスをとるため, 曳航索の取付位置, 重心, 浮心などは表-6の通りとする。

表-6 曳航体の静的バランス

項目	記号	無次元化式	単位	数値
Length	L		m	3.000
Width	D		m	0.525
Mass	mas	$mas = m / \frac{1}{2} \rho L^2 d$		0.1220E+00
Displacement Volume	dsp	$dsp = vol / \frac{1}{2} L^2 d$		0.1130E+00
Center of buoyancy				
x-component	xb	xb/L		0.2900E-01
z-component	zb	zb/L		-0.3000E-02
Center of gravity				
x-component	xg	xg/L		0.5500E-01
z-component	zg	Zg/L		0.5000E-02
Cable towing point				
x-component	xt	Xt/L		0.2200E+00
z-component	zt	Zt/L		-0.5000E-01

3.6 動的安定性の検討

通常、曳航体の航行パターンは潮流に対する直進とそれを繰り返すための旋回から構成されるため、本研究ではそれぞれの航行パターンでの安定性について検討した。

(1) 直進曳航

動的安定性を検討するため、曳航索の上端に外乱として正弦波（周期6s、片振幅1m）のHeavingを加えて曳航した場合のシミュレーション結果を図-16に示す。

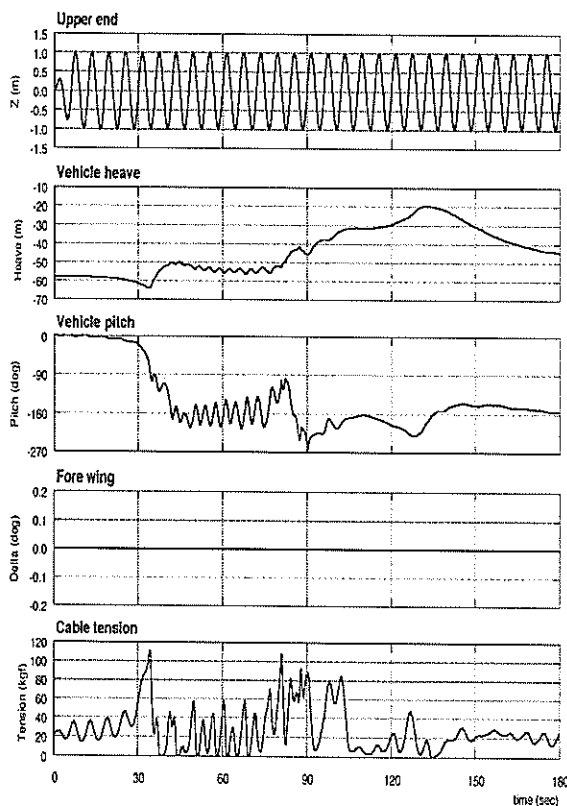


図-16 無制御直進曳航

上から曳航索に作用させた正弦波、曳航体のHeave、Pitch角度、前翼の操舵角度、曳航索に作用する張力を示す。約35s後に、Heave、Pitch角度および張力はともに大きく変動し、不安定になっている。すなわち、曳航体は自己安定性を有していないと考えられる。

この結果から、曳航船舶の動揺や波浪によって曳航索に作用する外乱から発生する曳航体のHeavingやPitchingを能動的に制御しなければ、本システムの安定性を確保できないことが判明した。このため、前翼の双動(左右の翼の舵角を同方向に制御)によってHeaveおよびPitch制御を行う方法を検討した。補償器としては文献⁹⁾から以下を用いた。

$$\delta = k_1(z_0 - z) + k_2 \dot{z} + k_3 \theta + k_4 \dot{\theta} \quad (1)$$

ここで、

δ 前翼の操舵角度(Pitch角と同方向を正とする)

$k_1 \sim k_4$ 制御利得

z_0 目標深度

z 機体の深度

\dot{z} 機体の上下方向速度

θ 機体のPitch角度

$\dot{\theta}$ 機体のPitch角速度

なお、制御利得値は $k_1=-100$ 、 $k_2=200$ 、 $k_3=-200$ 、 $k_4=-200$ とした。この場合のシミュレーション結果を図-17に示す。本図から、前翼の双動によるHeaveおよびPitch制御によって曳航体の安定性が確保できることが確認された。

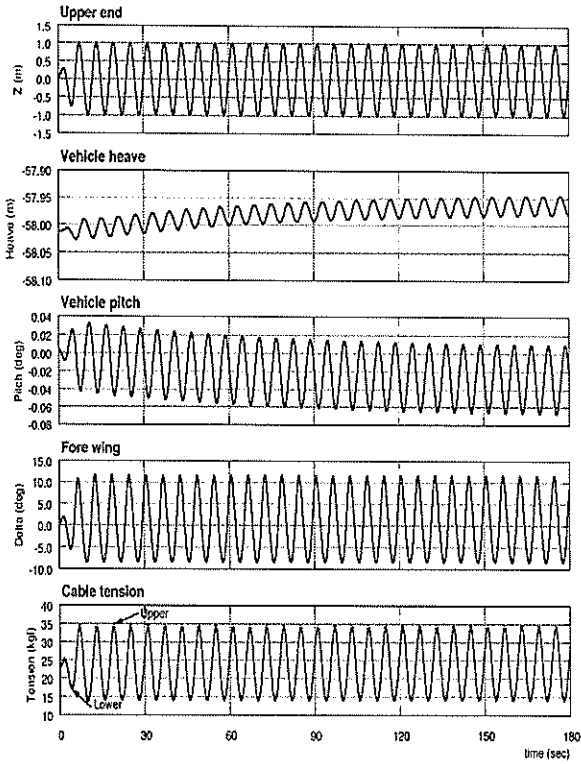


図-17 前翼双動制御結果

(2) 旋回曳航

次に旋回曳航時の安定性を検討した。直進曳航と同様な条件で、半径100mで旋回曳航した場合の曳航体と曳航船舶の航跡を図-18、曳航体の挙動を図-19に示す。なお、図-18において-×-は曳航船舶の航跡、-・-は曳航体の航跡を表す。図-19において、上から曳航索に作用させた正弦波、曳航体のHeave、Pitch角度、Roll角度、前翼の双動角度、曳航索に作用する張力を示している。図-18に示すように航跡は安定しているが、図-19ではRoll角は300s以降次第に大きくなり、発散する傾向を示している。

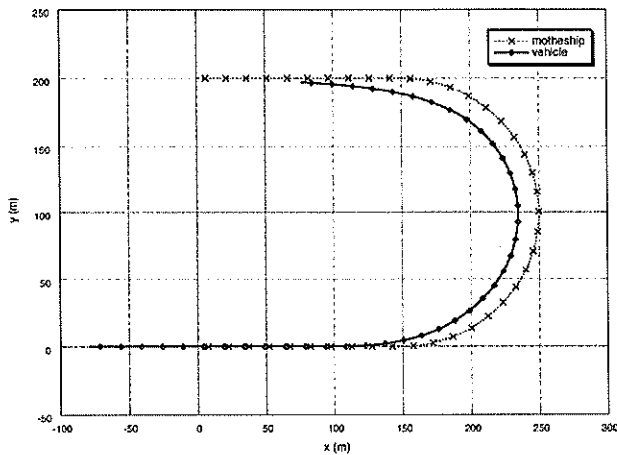


図-18 曳航体と曳航船舶の軌跡 (旋回半径100m)

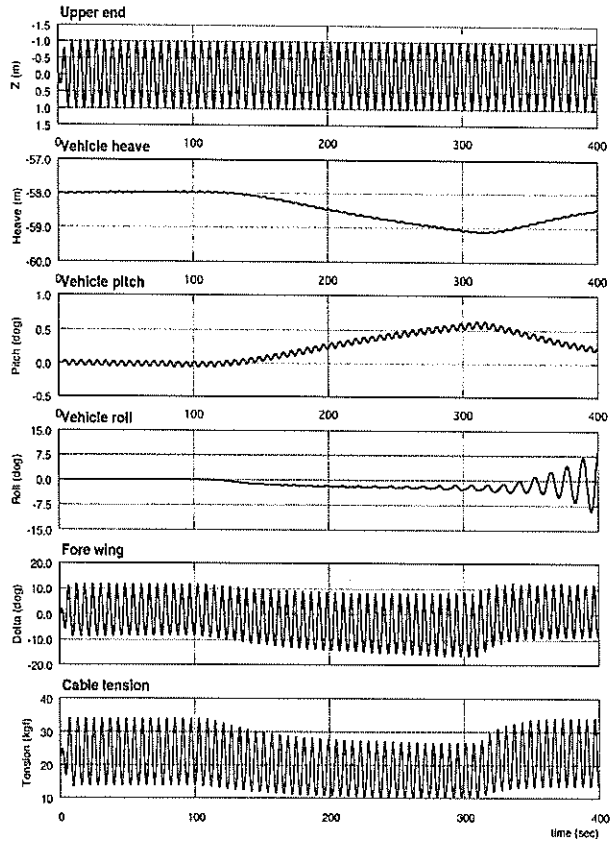


図-19 曳航体の挙動 (旋回半径100m)

さらに旋回半径を50mとした場合の結果を図-20、21に示す。これから150~200sで大きくバランスを崩していることが確認できる。すなわち、旋回時に曳航体に発生するRollが自己復原できる範囲を超えるためと考えられる。

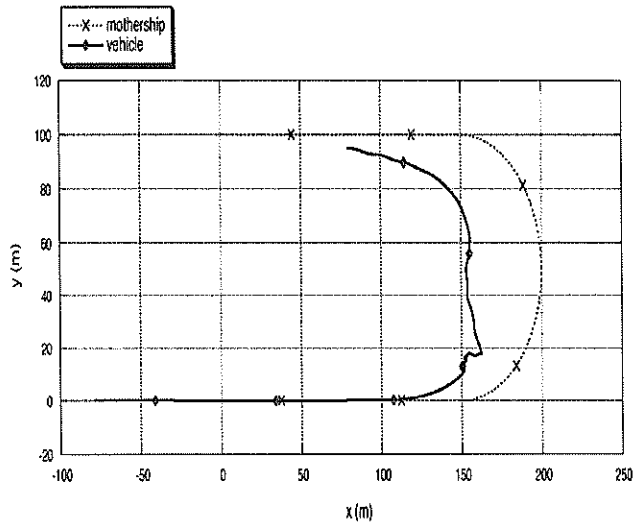


図-20 曳航体と曳航船舶の軌跡(旋回半径50m)

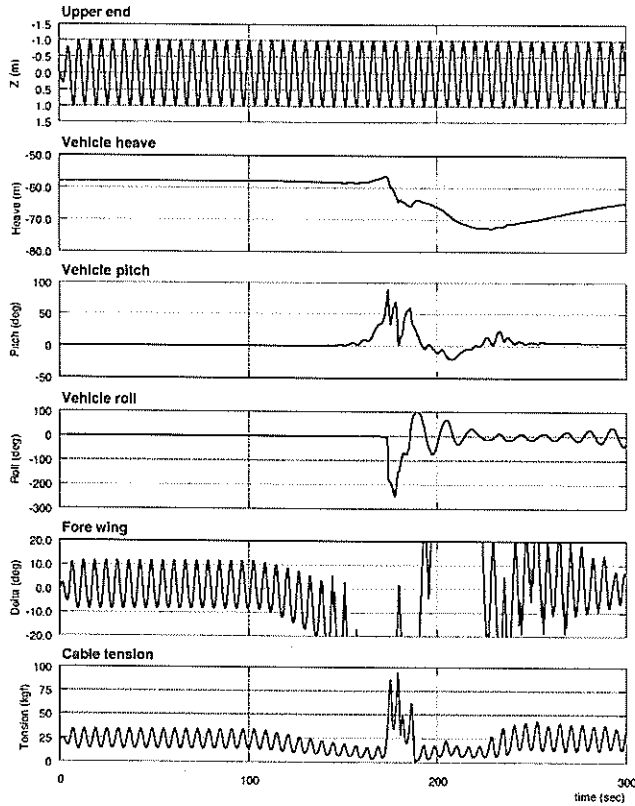


図-21 曳航体の挙動 (旋回半径50m)

このような状態を回避し、旋回時の安定性を確保するために、前翼の差動（左右の翼の舵角を逆方向に制御しRollモーメントを発生させる）によるRoll制御を行うことを検討した。補償器としては文献⁹⁾から以下を用いた。

$$\beta = AS\dot{\phi} \quad (2)$$

ここで、

β 前翼の差動操舵角度

(左翼に対する右翼角度で δ と同じ方向を正とする)

AS 制御利得

$\dot{\phi}$ Roll角速度

旋回半径を90m～60mに変化させて計算を実施した結果を図-22～図-29に示す。図-23において、上から曳航索に作用させた正弦波、曳航体のHeave、Pitch角度、Roll角度、前翼の双動角度、差動角度および曳航索に作用する張力を示している。なお、それぞれの制御利得値は、 $k_1=-100$, $k_2=200$, $k_3=-200$, $k_f=-200$, $AS=50$ とした。

この結果、前翼によるRoll制御によって安定した旋回が可能となることが確認された。しかしながら、旋回半径が小さくなりRoll外乱が多くなるほど翼の制御量は大きくなり、一定の旋回半径以下では制御不能となることも判明した。

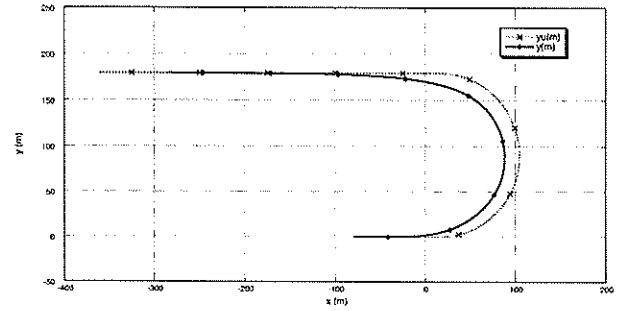


図-22 曳航体と曳航船舶の軌跡(旋回半径90m)

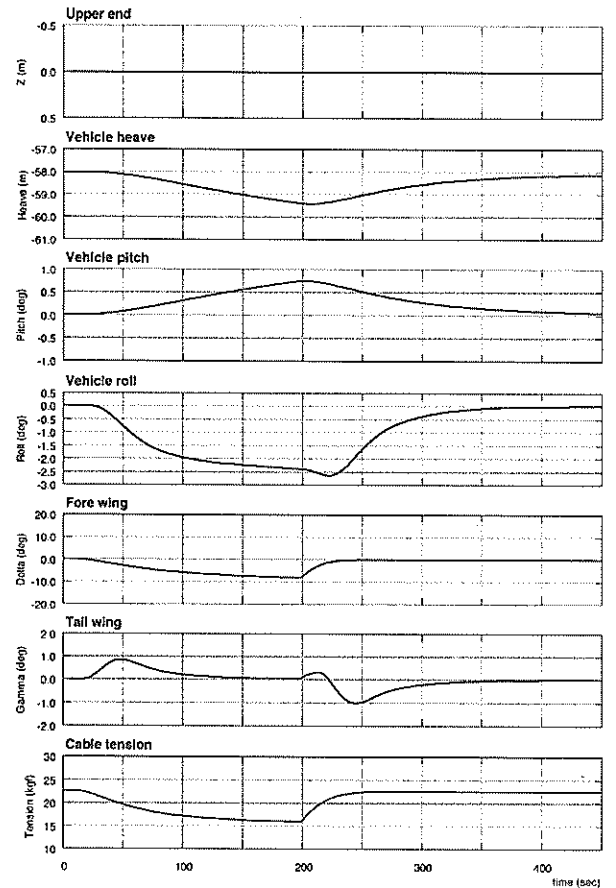


図-23 曳航体の挙動 (旋回半径90m)

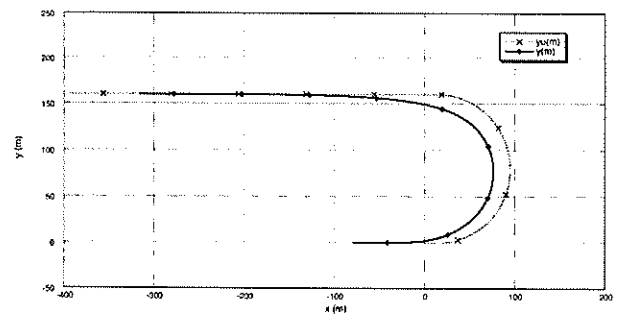


図-24 曳航体と曳航船舶の軌跡(旋回半径80m)

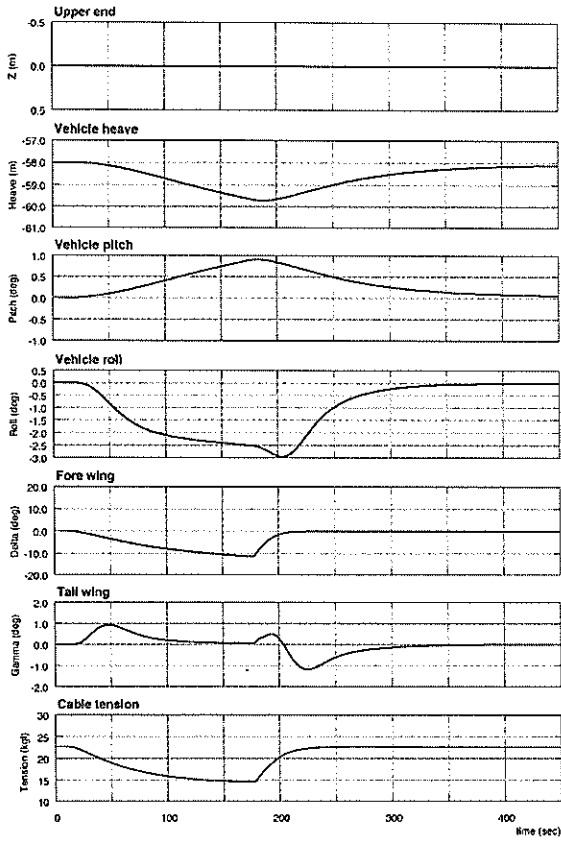


図-25 曳航体の挙動 (旋回半径80m)

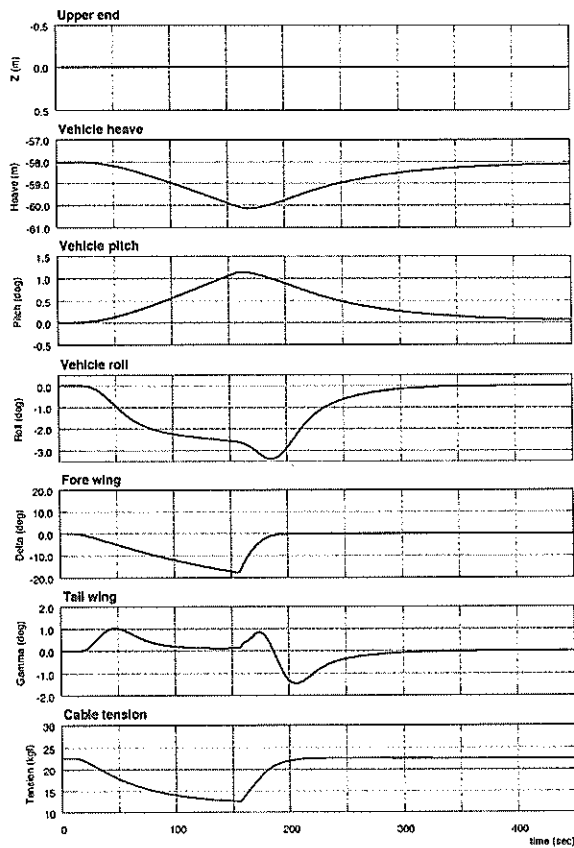


図-27 曳航体の挙動 (旋回半径70m)

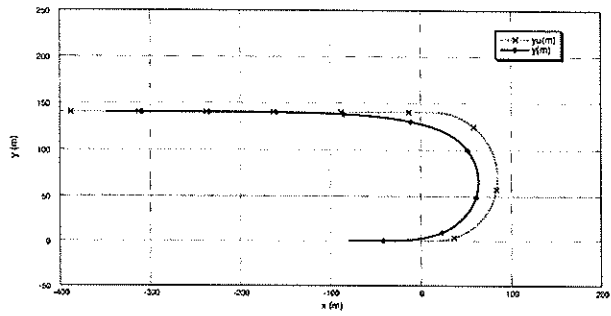


図-26 曳航体と曳航船舶の軌跡(旋回半径70m)

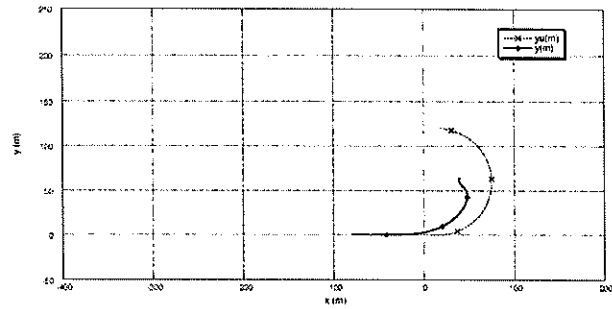


図-28 曳航体と曳航船舶の軌跡(旋回半径60m)

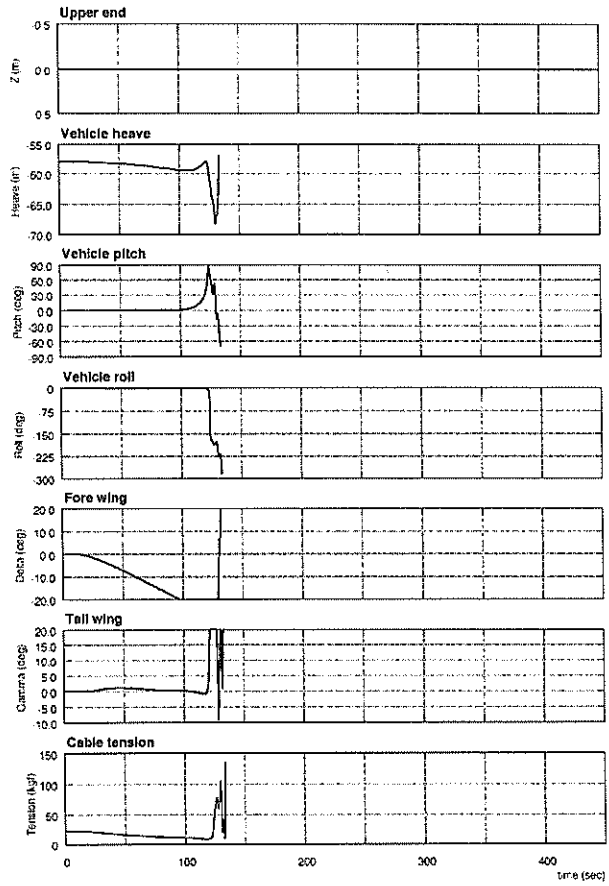


図-29 曳航体の挙動 (旋回半径60m)

さらに、曳航索上端部に正弦波のHeavingを加えて曳航した場合についても、旋回半径を100~70mに変化させてシミュレーションを実施した。その計算結果を図-30~図-37に示す。ただし、曳航索上端部に加えた正弦波はこれまでと同じものである。なお、それぞれの制御利得値は、 $k_1=100$, $k_2=200$, $k_3=200$, $k_4=200$, $AS=50$ である。

この結果、曳航索上端部にHeavingを加えた場合もRoll制御が有効であるが、やはり安定に旋回できる半径には限界があり、Heavingを加えたときは、加えないときと比べて、その半径が大きくなることを確認された。

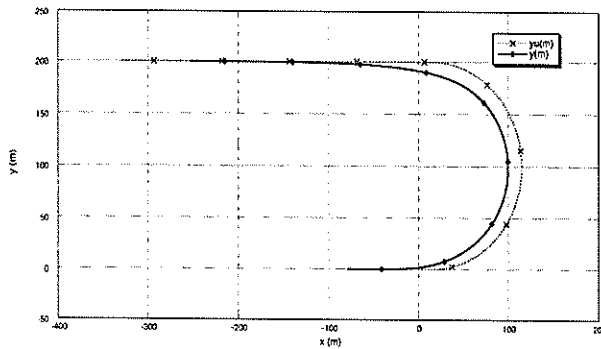


図-30 曳航体と曳航船舶の軌跡(旋回半径100m)

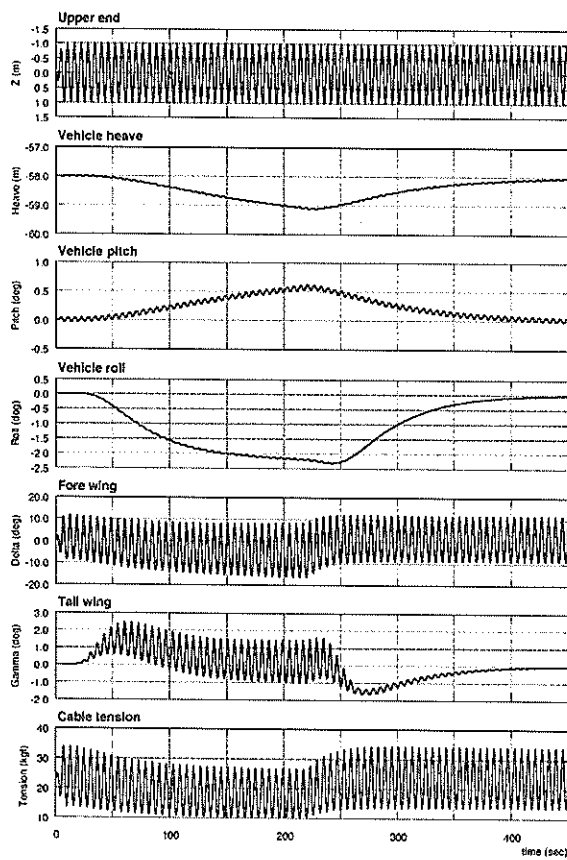


図-31 曳航体の挙動(旋回半径100m)

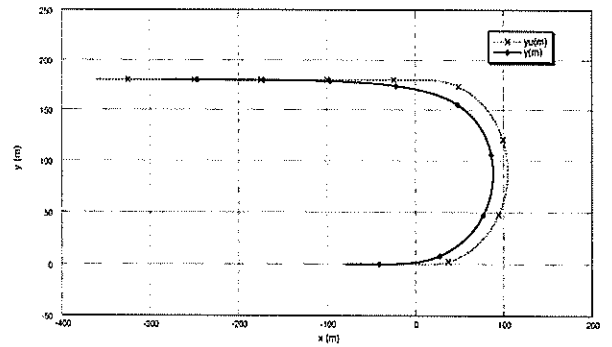


図-32 曳航体と曳航船舶の軌跡(旋回半径90m)

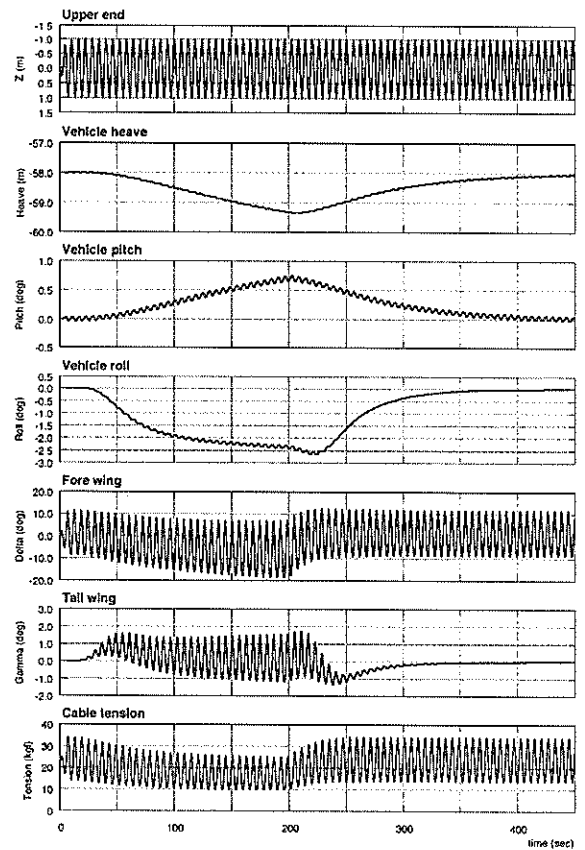


図-33 曳航体の挙動(旋回半径90m)

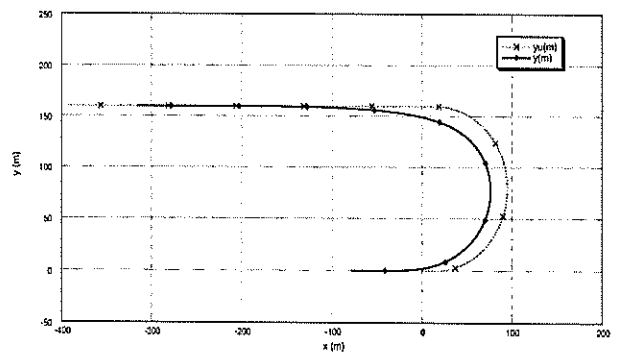


図-34 曳航体と曳航船舶の軌跡(旋回半径80m)

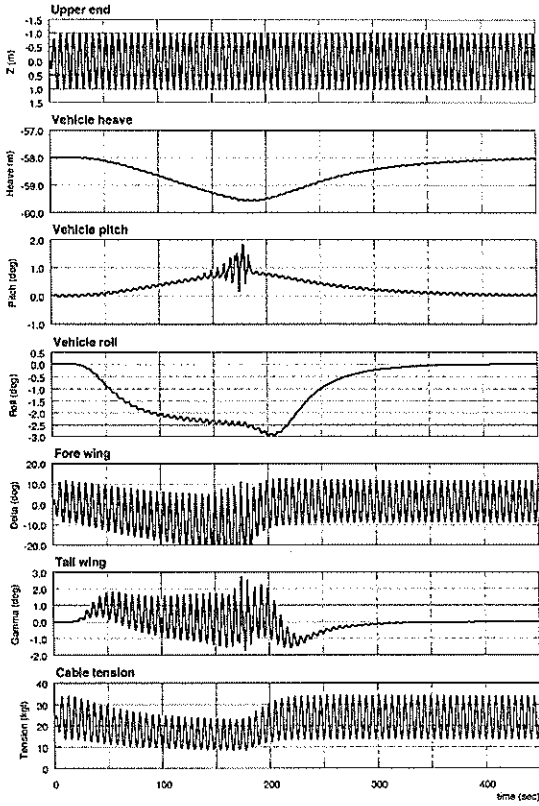


図-35 曳航体の挙動 (旋回半径80m)

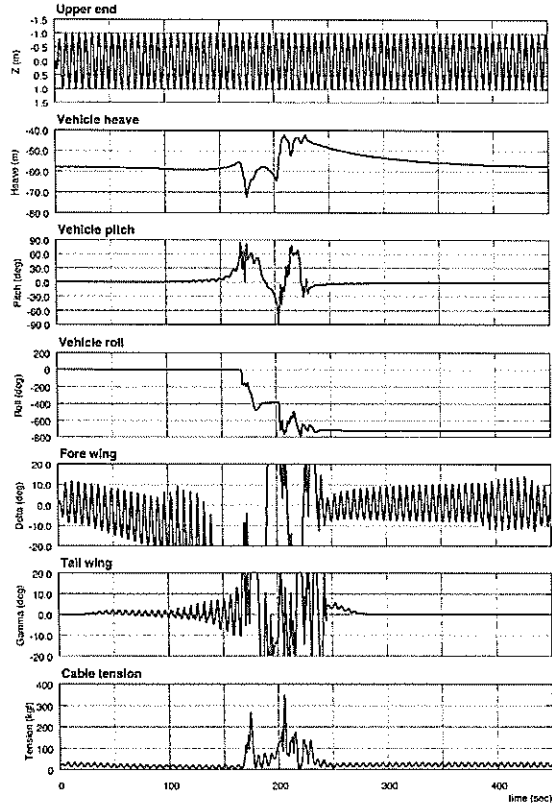


図-37 曳航体の挙動 (旋回半径70m)

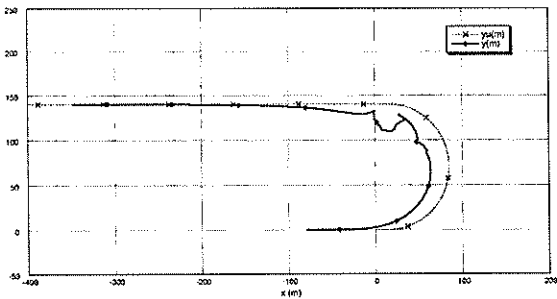


図-36 曳航体と曳航船舶の軌跡(旋回半径70m)

ここで、曳航体の運動が不安定になる場合の曳航体の速度を図-38に示す。図において実線は曳航体の曳航方向の速度、破線が深度方向の速度、細破線が曳航体の深度を表す。これから旋回時には曳航体の前進速度が0となり、曳航索の弛みによって曳航体は降下するため、翼による制御が有効でなくなり、曳航体が制御不能になると考えられる。このため、旋回曳航時には曳航索を巻き取るなど曳航体の前進速度を常に確保することによって、深度を一定に保つ航行方法とする必要があると考えられる。

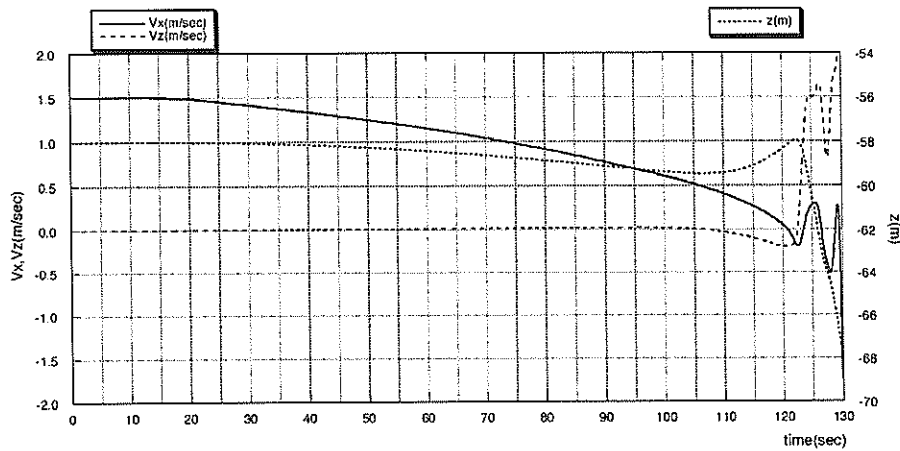


図-38 曳航体の速度

3.7 超音波ソナーを取り付けた場合の検討

次に超音波ソナーを取り付けた場合について検討した。超音波ソナーの水中重量は7kgであるので、これを装着した場合の重量増を潜航深度を確保するための重量とすれば、自航モードでは超音波ソナーを装備していないので中性浮力となり、そのままAUVとして成立することになるため、最も合理的である。ところで、これまでの検討では付加重量を20kgとしていたので、このままでは潜航深度が不足する。このため、前翼角度および翼面積を増加させることによって発生する下向き揚力によって潜航深度を得ることを検討した。まず、前翼角度は -8° とする。また、前翼を左右に76mmづつ伸ばし、翼面積を増加させることにする。これに伴う翼の揚力係数は比例配分で増加させるが、他の流体力は変更しない。また、付加重量は10kg（超音波ソナーの水中重量7kg + マージン3kg）とし、慣性モーメントは考慮するが、流体力は変更しないこととした。

静的な安定性の検討結果を図-39に示す。本図から、ほぼ水深60mまで潜航できることが確認できた。

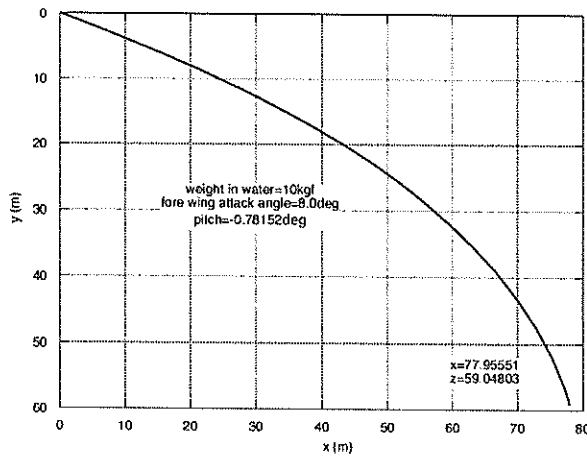


図-39 カテナリ

次に、曳航索にこれまでと同様な正弦波のHeavingを加えて半径70mで旋回曳航した場合の曳航船舶と曳航体の航跡を図-40に示す。ただし、これまでと同様に前翼制御を加えている。なお、制御利得値は $k_1=-10$, $k_2=20$, $k_3=-10$, $k_4=-20$, $AS=10$ とした。航跡は安定しており、曳航体は曳航船舶によく追従している。

また、曳航体の挙動を図-40に示す。この結果、Roll角度は最大 20° に達するものの、曳航体は安定していることが確認された。

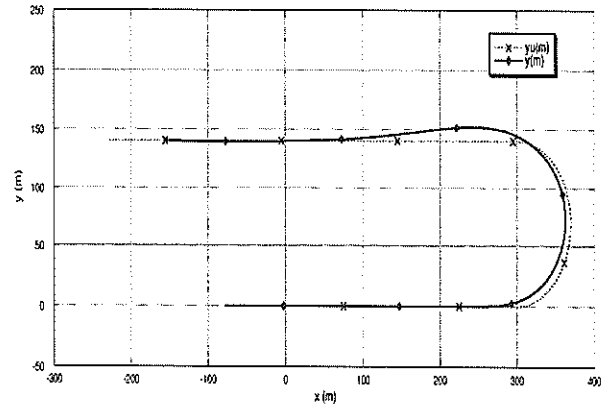


図-40 曳航体と曳航船舶の軌跡(旋回半径70m)

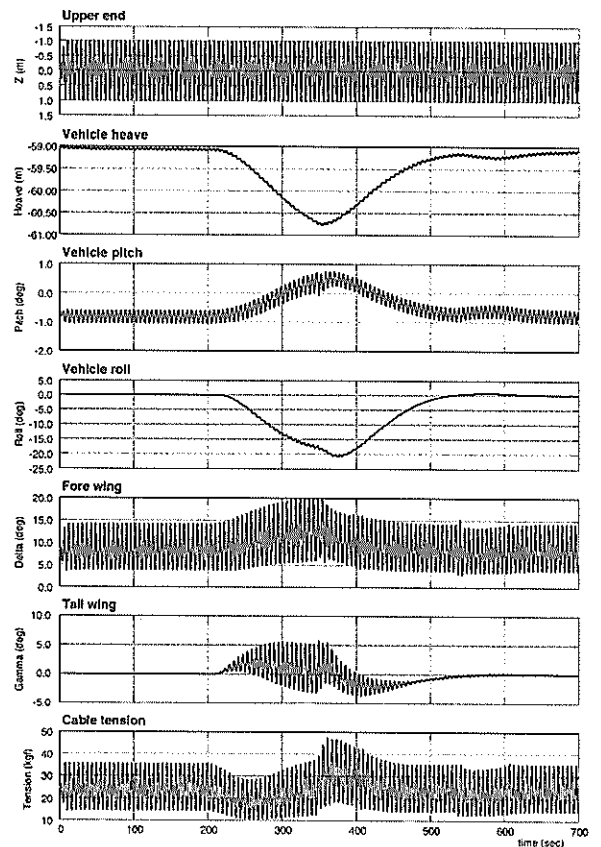


図-41 曳航体の挙動 (旋回半径70m)

ところで、カイトモードと曳航モードで超音波ソナーを取り付けない場合においては、超音波ソナー重量に相当する10kgの付加重量を装備する必要がある。

4. 結論

本研究では、第三海堡周辺海域をはじめとする強潮流海域における水中観測システムとして、外乱の程度に応じて、曳航、自航およびカイトモードの三方式で活用できる曳航式の自律航行システムを提案し、水中観測システムとして備えるべき機能について検討した。さらに、本システムが安定して航行が可能であるか、想定される物理値に基づいた基礎運動に関するシミュレーションによって検証した。

この結果、本システムは以下のように設定することによって安定した航行が可能であることが判明した。

- ・曳航索長は約100mとする。
- ・付加重量は10kgとする。
- ・前翼長は、ベースマシンとしたAE-2より約10cm延伸する。
- ・前翼初期角度を -8° に設定する。
- ・式(1)で表される前翼の双動によるHeave, Pitch制御ならびに式(2)で表される前翼の差動によるRoll制御によって曳航体の姿勢を制御するシステムとする。

5. あとがき

今後、本報告の結果に基づき、模型を製作し、船型模型試験を実施することによって曳航体の流体力などに関する諸データを取得し、その結果に基づき第2次シミュレーションを実施した上で、実験機的设计、開発を行う予定である。
(2003年5月12日受付)

参考文献

- 1)海上保安庁:東京湾潮流図,平成14年2月.
- 2)関東地方整備局:東京湾口航路流況調査,平成12年度.
- 3)東京湾の循環流と海況,理化学研究所,昭和54年度.
- 4)小島淳一,浅川賢一,松本重貴,加藤洋一,大垣健一,加藤直三:海底ケーブル調査用自律走行式水中ロボットの研究開発,日本造船学会論文集,第188号,2000年,pp. 351-358.
- 5) <http://underwater.iis.u-tokyo.ac.jp/>
- 6)関東地方整備局品木ダム水質管理所:自律型潜水ロボット水中探査装置パンフレット
- 7) <http://www.toyo.co.jp/kaiyo/Seabat&128.html>
- 8)大楠 丹,柏木 正,小寺山 亘:Towed Vehicleの動力学に関する基本的研究,日本造船学会論文集,第162号,1987年,pp. 105-115.
- 9)小寺山 亘,経塚 雄策,中村 昌彦,大楠 丹,柏

木 正: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年,pp. 130-140.

10)佐々木建,他:曳航体と曳航索の力学について,海洋科学技術センター試験研究報告,第1号,1977年,pp. 1-9.

11)石寺 博,他:遠隔操縦式無人潜水艇の運動シミュレーション,日本造船学会論文集,第158号,1985年,pp. 157-168.

12)加藤寛一郎,大屋昭男,柿沢研治:航空機力学入門,東京大学出版会,1982年

13)加藤 直三,小島 淳一,加藤 洋一,松本 重貴,浅川 賢一:海底ケーブル探査用自律型無人潜水機の機体形状の最適化,日本造船学会論文集,第182号,1997年,pp. 207-215.

付録 運動方程式の定式化

【曳航体の運動方程式】

ここでは力とモーメントを無次元化して取り扱い、添字「'」で表す（後述）。

① 縦運動方程式：x-z平面に働く力とy軸周りに働くモーメントについて

$$\begin{bmatrix} \frac{L}{U^2} \dot{u} \\ \frac{L}{U^2} \dot{w} \\ \frac{L^2}{U^2} \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F'_x \\ F'_z \\ M'_y \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} a_{11} = (m' + A'^*_{33})(I'_{yy} + A'^*_{55})(1 - D_1)/D \\ a_{12} = -(m'x'_G + A'^*_{35})(m'z'_G + A'_{15})/D \\ a_{13} = -(m' + A'^*_{33})(m'z'_G + A'_{15})/D \\ a_{21} = -(m'x'_G + A'_{35})(m'z'_G + A'_{15})/D \\ a_{22} = (m' + A'_{11})(I'_{yy} + A'_{55})(1 - D_2)/D \\ a_{23} = (m' + A'_{11})(m'z'_G - A'_{35})/D \\ a_{31} = a_{13} \\ a_{32} = (m' + A'_{11})(m'x'_G - A'^*_{35})/D \\ a_{33} = (m' + A'_{11})(m' + A'^*_{33})/D \\ D = (m' + A'_{11})(m' + A'^*_{33})(I'_{yy} + A'_{55})(1 - D_1 - D_2) \\ D = \frac{(m'x'_G - A'_{35})(m'x'_G + A'^*_{35})}{(m' + A'^*_{33})(I'_{yy} + A'_{55})}, \quad D_2 = \frac{(m'z'_G + A'_{15})^2}{(m' + A'_{11})(I'_{yy} + A'_{55})} \end{array} \right.$$

逆行列を求めて、

$$\begin{aligned} F'_x &= -(m' + A'_{33})q'w'_a + (m' + C_m A'_{22})r'v'_a + (m'x'_G - A'_{35})q'^2 + (m'x'_G + A'_{26})r'^2 - (m'z'_G - A'_{22})p'r' \\ &\quad + (m' + A'_{11})(q'w'_c - r'v'_c) - (m' - \nabla') \frac{gL}{U^2} \sin \theta \\ &\quad + X'_{uu} u'_a |u'_a| + X'_{ww} w'^2_a + X'_{\delta\delta} \delta^2 + X'_{vv} v'^2_a + X'_T(\phi, \theta, \psi) + X'_\beta \beta^2 + X'_\gamma \gamma^2 \\ F'_z &= -(m' + A'_{22})p'v'_a + (m' + A'_{11})q'u'_a + (m'z'_G - A'_{24})p'^2 + (m'z'_G + A'_{15})q'^2 - (m'x'_G - A'_{26})p'r' \\ &\quad + (m' + A'^*_{33})(p'v'_c - q'u'_c) + (m' - \nabla') \frac{gL}{U^2} \sin \phi \cos \theta \\ &\quad + Z'_w w'_a + Z'_q q' + Z'_\delta \delta + Z'_\gamma(\phi, \theta, \psi) + Z'_\beta \beta + Z'_{ww} w'_a |w'_a| \\ M'_y &= -(m'z'_G + A'_{15})q'w'_a + (m'z'_G + A'_{24})r'v'_a + (m'x'_G - A'_{26})p'v'_a - (m'x'_G + A'_{35})q'u'_a \\ &\quad - (I'_{xx} + A'_{46})(r'^2 - p'^2) - \{(I'_{xx} + A'_{44}) - (I'_{zz} + A'_{66})\} p'r' \\ &\quad - (m'x'_G - A'^*_{35})(p'v'_c - q'u'_c) + (m'z'_G + A'_{15})(q'w'_c - r'v'_c) \\ &\quad - (m'z'_G - \nabla'z'_B) \frac{gL}{U^2} \sin \theta - (m'x'_G - \nabla'x'_B) \frac{gL}{U^2} \cos \phi \cos \theta \\ &\quad + M'_w w'_a + M'_q q' + M'_\delta \delta - x'_T Z'_T(\phi, \theta, \psi) + z'_T X'_T(\phi, \theta, \psi) + M'_\beta \beta + M'_\gamma \gamma \end{aligned}$$

ここで船の操縦性に関する式から、

$$C_m A'_{22} = A'_{22} + X'_{vr}, \quad A'^*_{33} = A'_{33} - Z'_{\dot{a}}, \quad A'^*_{35} = A'_{35} - M'_{\dot{a}}$$

船 舶: $C_m = 0.25$

曳航体: $C_m = 1.0$

X'_{vr} : 粘性による旋回遠心力抵抗成分

$Z'_{\dot{a}}, M'_{\dot{a}}$: 主翼の後流と尾翼による流体力（無視）

② 横運動方程式: y 軸方向の力と x 軸, z 軸周りに働くモーメントについて

$$\begin{bmatrix} \frac{L}{U^2} \dot{v} \\ \frac{L^2}{U^2} \dot{p} \\ \frac{L^2}{U^2} \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ & b_{22} & b_{23} \\ SYM & & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F'_x \\ F'_z \\ M'_y \end{bmatrix} \begin{cases} b_{11} = (I'_{xx} + A'_{44})(I'_{zz} + A'_{66})(1 - \Delta_1)/\Delta \\ b_{12} = [(I'_{zz} + A'_{66})(m'z'_G - A'_{24}) + (I'_{xz} + A'_{46})(m'x'_G + A'_{26})]/\Delta \\ b_{13} = -[(I'_{xx} + A'_{44})(m'x'_G - A'_{26}) + (I'_{xz} + A'_{46})(m'z'_G - A'_{24})]/\Delta \\ b_{22} = (m' + A'_{22})(I'_{zz} + A'_{66})(1 - \Delta_2)/\Delta \\ b_{23} = -[(m'_{xx} + A'_{22})(I'_{xz} + A'_{46}) + (m'x'_G + A'_{26})(m'z'_G - A'_{24})]/\Delta \\ b_{33} = (m' + A'_{22})(I'_{xx} + A'_{44})(1 - \Delta_3)/\Delta \\ \Delta = (m' + A'_{22})(I'_{xx} + A'_{44})(I'_{zz} + A'_{66})(1 - \Delta_1 - \Delta_2 - \Delta_3 - 2\Delta_4) \\ \Delta_1 = \frac{(I'_{xz} + A'_{46})^2}{(I'_{xx} + A'_{44})(I'_{zz} + A'_{66})}, \quad \Delta_2 = \frac{(m'x'_G + A'_{26})^2}{(m' + A'_{22})(I'_{zz} + A'_{66})} \end{cases}$$

逆行列を求めて,

$$\begin{aligned} F'_y = & -(m' + A'_{11})r'u'_a + (m' + A'_{33})p'w'_a - (m'x'_G - A'_{35})p'q' \\ & - (m'z'_G + A'_{15})q'r' - (m'z'_G - A'_{15})q'r' - (m' + A'_{22})(r'u'_c - p'w'_c) \\ & + (m' - \nabla') \frac{gL}{U^2} \sin \phi \cos \theta + Y'_v v'_a + Y'_r r' + Y'_{vw} v'_a |v'_a| + Y'_T(\phi, \theta, \psi) + Y'_r \gamma \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M'_x = & (m'z'_G + A'_{15})r'u'_a - (m'z'_G - A'_{24})p'w'_a - (I'_{xz} + A'_{46})p'q' \\ & - \{(I'_{zz} + A'_{66}) - (I'_{yy} + A'_{55})\}q'r' - (A'_{26} + A'_{35})(q'v'_a - r'w'_a) \\ & - (A'_{33} - A'_{22})v'_a w'_a - (m'z'_G - A'_{24})(r'u'_c - p'w'_c) \\ & - (m'z'_G - \nabla'z'_B) \frac{gL}{U^2} \sin \phi \cos \theta + L'_v v'_a + L'_p p' + L'_r \gamma - z'_T Y'_T(\phi, \theta, \psi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M'_z = & (m'x'_G + A'_{26})r'u'_a + (m'x'_G - A'_{35})p'w'_a - \{(I'_{yy} + A'_{55}) - (I'_{xx} + A'_{44})\}p'q' \\ & + (I'_{xz} + A'_{46})q'r' - (A'_{24} + A'_{15})(p'u'_a - q'v'_a) - (m'x'_G - A'_{26})(r'u'_c - p'w'_c) \\ & + (m'x'_G - \nabla'x'_B) \frac{gL}{U^2} \sin \phi \cos \theta + N'_v v'_a + N'_r r' + N'_{vw} v'_a |v'_a| + N'_r \gamma - x'_T Y'_T(\phi, \theta, \psi) \end{aligned}$$

- u_a, v_a, w_a : 相対速度
 u_c, v_c, w_c : 潮流速度
 U_c : 絶対流速
 ψ_c : 流向角
 L : 全長
 U : 相対流速の絶対値
 N_v, N_r, N_y, N_w : z軸周りの各モーメント成分
 X_T, Y_T, Z_T : 曳航索取り付け位置
 β : 水平尾翼迎え角
 $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xz}$: 慣性モーメント
 Y_r : r^2 に比例するy方向抵抗
 Y_r : r に比例するy方向抵抗
 u, v, w : x, y, z各軸方向の速度
 p, q, r : x, y, z各軸周りの角速度
 ϕ, θ, ψ : x, y, z各軸周りの傾斜 (ロール角, ピッチ角, ヨー角)
 T_x, T_y, T_z : 曳航索張力
 x_T, y_T, z_T : 曳航索着力点
 x_G, y_G, z_G : 重心座標
 x_B, y_B, z_B : 浮心座標
 m : 曳航体質量
 ρ : 海水密度
 ∇ : 曳航体体積
 g : 重力加速度
 δ : 主翼迎え角
 γ : 垂直尾翼迎え角
 X_{uu} : 機体のx軸方向抗力係数
 X_{ww} : 主翼, 尾翼の揚力係数
 $X_{\delta\delta}$: 主翼誘導抵抗係数
 X_{rr} : 尾翼誘導抵抗係数
 Z_w : 機体のz軸方向抗力係数
 Z_δ : 主翼揚力係数
 Z_γ : 尾翼揚力係数
 M_w : y軸周りモーメント係数
 M_δ : 主翼モーメント係数
 M_γ : 尾翼モーメント係数
 A_{11}, A_{22}, A_{33} : 付加質量のx, y, z軸方向の各成分
 A_{44}, A_{55}, A_{66} : 付加慣性モーメントのx, y, z軸周りの各成分
 $A_{15}, A_{35}, A_{51}, A_{53}$: 連成付加質量成分
 A_{24}, A_{26}, A_{46} : 連成付加慣性モーメント成分

【変数の無次元化】

$$U = \sqrt{u_a^2 + v_a^2 + w_a^2} \text{として,}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u' = u/U \quad v' = v/U \quad w' = w/U \\ p' = pL/U \quad q' = qL/U \quad r' = rL/U \\ x' = x/L \quad y' = y/L \quad z' = z/L \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} F'_x = F_x / \frac{1}{2} \rho U^2 L d \\ F'_z = F_z / \frac{1}{2} \rho U^2 L d \\ M'_y = M_y / \frac{1}{2} \rho U^2 L^2 d \\ F'_y = F_y / \frac{1}{2} \rho U^2 L d \\ M'_x = M_x / \frac{1}{2} \rho U^2 L^2 d \\ M'_z = M_z / \frac{1}{2} \rho U^2 L^2 d \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X'_{ww} = X_{ww} / \frac{1}{2} \rho L d \\ X'_{uw} = X_{uw} / \frac{1}{2} \rho L d \\ X'_{\delta\delta} = X_{\delta\delta} / \frac{1}{2} \rho U^2 L d \\ X'_{wv} = X_{wv} / \frac{1}{2} \rho L d \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} Z'_w = Z_w / \frac{1}{2} \rho U L d \\ Z'_q = Z_q / \frac{1}{2} \rho U L^2 d \\ Z'_\delta = Z_\delta / \frac{1}{2} \rho U^2 L d \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} M'_w = M_w / \frac{1}{2} \rho U L^2 d \\ M'_q = M_q / \frac{1}{2} \rho U L^3 d \\ M'_\delta = M_\delta / \frac{1}{2} \rho U^2 L^2 d \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y'_v = Y_v / \frac{1}{2} \rho U L d \\ Y'_r = Y_r / \frac{1}{2} \rho U L^2 d \\ Y'_{wv} = Y_{wv} / \frac{1}{2} \rho L d \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} L'_v = L_v / \frac{1}{2} \rho U L^2 d \\ L'_p = L_p / \frac{1}{2} \rho U L^3 d \\ L'_\gamma = L_\gamma / \frac{1}{2} \rho U^2 L^2 d \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} N'_v = N_v / \frac{1}{2} \rho U L^2 d \\ N'_r = N_r / \frac{1}{2} \rho U L^3 d \\ N'_{wv} = N_{wv} / \frac{1}{2} \rho L^2 d \\ N'_{r\delta\delta} = N_{r\delta\delta} / \frac{1}{2} \rho U L^3 d \end{array} \right.$$

【曳航体シミュレーションの初期値の求め方】

主翼角 δ とトリム角 θ がある状態の時に釣り合っていると考える。
 ここで、無次元化速度の x 成分と z 成分をそれぞれ

$$u_a = \cos \theta, \quad w_a = \sin \theta \quad (1)$$

で表す。

(2) 式で x 軸方向の力の釣り合い, (3)式で z 軸方向の力の釣り合いを示し, (4)式で y 軸周りのモーメントの釣り合いを表す。

$$\begin{cases} -\left(m' - \nabla'\right) \frac{gL}{U^2} \sin \theta + X'_{uu} \cos^2 \theta + X'_{ww} \sin^2 \theta + X'_{\delta\delta} \delta^2 + X'_T = 0 & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} -\left(m' - \nabla'\right) \frac{gL}{U^2} \cos \theta + Z'_w \sin \theta + Z'_{\delta} \delta + Z'_T = 0 & (3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} -\left(m' z'_G - \nabla' z'_B\right) \frac{gL}{U^2} \sin \theta - \left(m' x'_G - \nabla' x'_B\right) \frac{gL}{U^2} \cos \theta + M'_w \sin \theta + M'_{\delta} \delta - x'_T Z'_T + z'_T X'_T = 0 & (4) \end{cases}$$

ここで, (2) 式より X'_T , (3)式より Z'_T を求め, (4)式に代入すると, 主翼角, トリム角, 速度の関係は, (5)式で表すことができる。

$$\begin{aligned} & z'_T X'_{\delta\delta} \delta^2 - \left(M'_{\delta} + x'_T Z'_{\delta}\right) \delta + z'_T \left(X'_{uu} \cos^2 \theta + X'_{ww} \sin^2 \theta\right) \\ & - \left\{m' \left(x'_T - x'_G\right) - \nabla' \left(x'_T - x'_B\right)\right\} \frac{gL}{U^2} \cos \theta \\ & - \left[M'_w + x'_T Z'_w + \left\{m' \left(z'_T - z'_G\right) - \nabla' \left(z'_T - z'_B\right)\right\} \frac{gL}{U^2}\right] \sin \theta = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

このとき, 空間座標系における張力 T'_x, T'_z (曳航索の取り付け点にかかる力) は次の(6)式で得られる。

$$\begin{pmatrix} T'_x \\ T'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \left(m' - \nabla'\right) \frac{gL}{U^2} \sin \theta - X'_{ww} \sin^2 \theta - X'_{uu} \cos^2 \theta + X'_{\delta\delta} \delta^2 \\ -\left(m' - \nabla'\right) \frac{gL}{U^2} \cos \theta - Z'_w \sin \theta - Z'_{\delta} \delta \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$T_x = T'_x \frac{1}{2} \rho U^2 L d, \quad T_z = T'_z \frac{1}{2} \rho U^2 L d$$