

浮体式洋上送電塔の連結曳航安定性に関する研究

岩木, 聡汰
九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/4372173>

出版情報 : 九州大学, 2020, 修士, 修士
バージョン :
権利関係 :

令和2年度

九州大学大学院総合理工学府

大気海洋環境システム学専攻修士論文

浮体式洋上送電塔の

連結曳航安定性に関する研究

氏名： 岩木 聡汰

指導教員名： 胡 長洪 教授

目次

1章 洋上風力発電の送電システム	1
1.1 従来の送電システム	1
1.2 新コンセプトの洋上送電システム	3
1.2.1 TLP型洋上タワー	3
1.2.2 タワー概要	4
1.2.3 アンカー概要	5
1.2.4 TLP型洋上タワーの設置案	6
1.3 研究目的	8
2章 模型実験	9
2.1 模型概要	9
2.2 実験設備概要	11
2.3 実験内容	13
2.3.1 アンカーとタワーの振れまわり運動の計測実験	13
2.3.2 フィンによるアンカーの針路安定性の改善実験	13
2.4 実験結果	15
2.4.1 アンカーとタワーの振れまわり運動の計測実験結果	15
2.4.2 フィンによるアンカーの針路安定性の改善実験結果	31
3章 針路安定性解析	36
3.1 基礎仮定と座標系	36
3.2 被曳船の運動方程式	36
3.2.1 被曳船の運動方程式とその線形化	36
3.2.2 曳船・被曳船系の運動方程式とその線形化	38
3.2.3 被曳船の針路安定性	39
3.2.4 曳船・被曳船系の針路安定性	40
3.3 解析に使用するパラメータ	41
3.4 針路安定性解析結果	45
3.4.1 アンカーの針路安定性	45
3.4.1 曳船とアンカーの針路安定性	47
4章 総括	49
4.1 結言	49
4.2 今後の展望	50
参考文献	54
謝辞	55

1章 洋上風力発電の送電システム

1.1 従来の送電システム

現在の浮体式洋上発電では発電装置から陸上に送電するために、浮体から送電線を海底に降ろし、海底送電ケーブルを利用した方式が採用されている。図 1-1 に海底送電ケーブル敷設の様子を示す。この送電方法は、浮体から海底までの柔軟性のある特殊なケーブル（ライザーケーブル）が必要であり、海底から陸上までは敷設船を用いて海底送電ケーブルを運搬・設置をしていく。また、ライザーケーブルの強度は浮体の大きな動揺に影響されてしまう。ライザーケーブルを浮体から直接海底に設置する図 1-2 に示すフリーハンギング方式では、浮体動揺が海底送電ケーブルに及ぼす影響を緩和する上で限界がある。そのため、石油開発などで用いられるフローラインの敷設方式に倣って、ライザーケーブルの中間にブイを有した図 1-2 に示すレイジーウェーブ方式で実施することとなる。しかし、この方式にも

- 浮体の係留ケーブル、チェーン等との干渉
- 浮体動揺による海水中でのライザーケーブルの疲労および曲げ応力の吸収
- 海底接触面でのライザーケーブルの座屈

等の問題があり、これらを解決するための設置コストは非常に大きくなっている。

この高コストな送電方法が洋上風力発電の導入を遅らせる一つの理由となっており、従来の海底敷設方式では以上の問題がある限り、コストの削減には限界がある。そこで、設置コストを含めた全体の送電コストを大幅に改善するために新たな形式の送電システムの開発が求められている。



図 1-1 洋上風力発電用海底送電ケーブル敷設^[1]

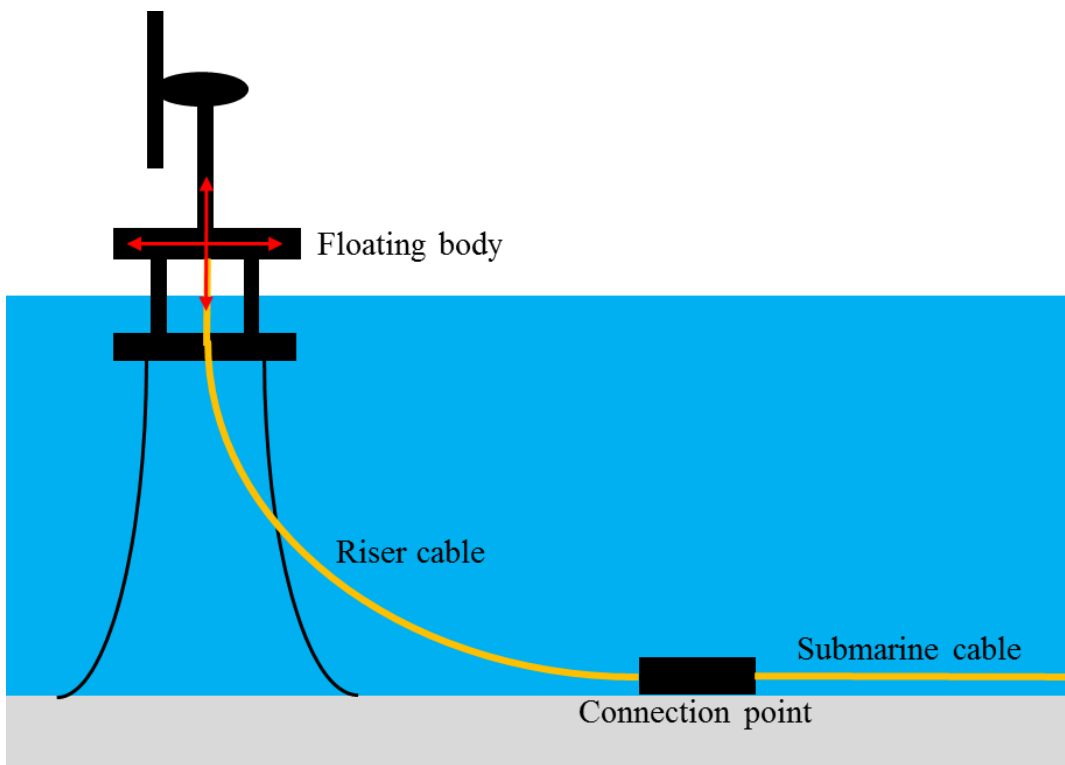


図 1-2 フリーハンギング方式による送電

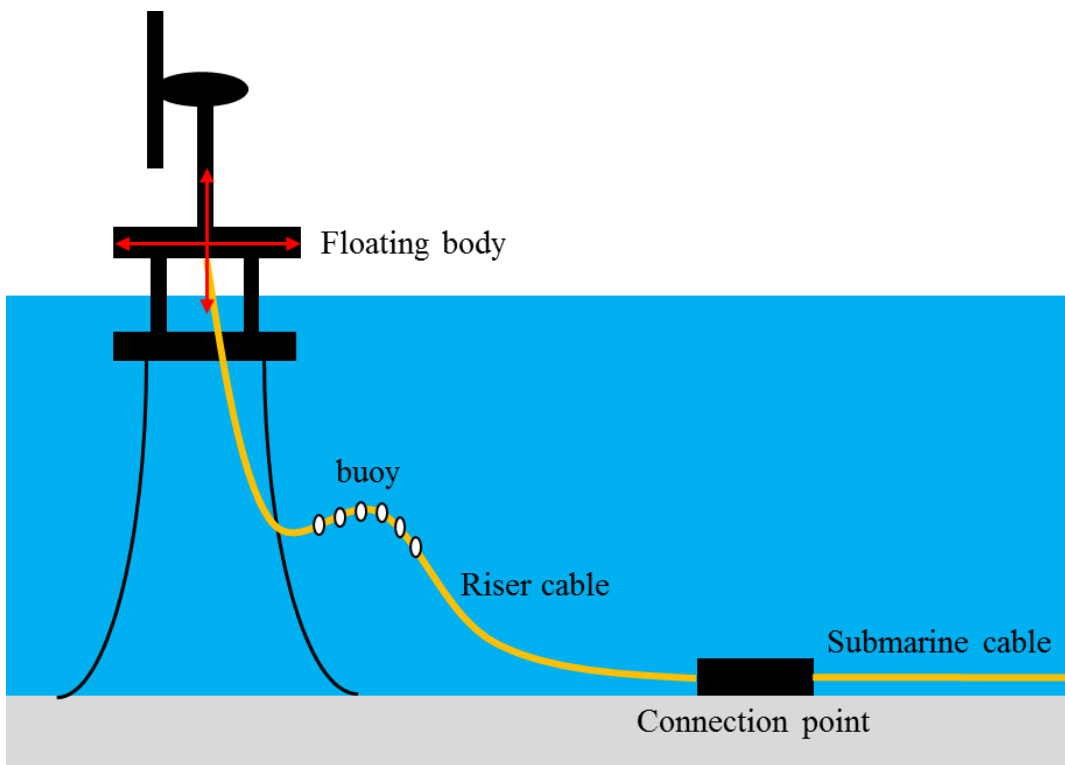


図 1-3 レイジーウェイブ方式による導電

1.2 新コンセプトの洋上送電システム

1.2.1 TLP 型洋上タワー

本研究室では、洋上風力発電の送電コストを根本的に削減する目的で TLP 型洋上タワーによる洋上空中送電システムを提案している^{[2][3][4]}。この送電システムは TLP 型の浮体に設置する洋上タワーにより、空中送電線を利用する新しい送電システムである。TLP 型洋上タワーは以下のような特徴を有するため、従来の海底送電ケーブルを用いた送電システムに比べて大幅にコストの削減が見込まれる。また、洋上風力発電用の送電システムのみならず、離島間の送電、洋上セキュリティシステムなどへの応用も期待できる。図 1-4 に TLP 型洋上タワーによる洋上空中送電システムの様子を示す。

- 積載物は鉄塔タワーだけなので浮体は非常に小型のものになり、設置方法が簡単で設置コストも安価になる。
- 水面貫通部分が細い部材であるので、波浪による変動外力が小さく、係留索の安全性確保が容易である。
- 陸上送電ケーブルの豊富な実績があるので、海中設置の送電ケーブルと比べて空中送電ケーブルは軽く、価格も安価である。
- 浮体動揺によるケーブルへの応力緩和システムは、海中に比べて容易な方法が考えられる。
- 長距離送電の場合、漁業権や航路等に対応するために、部分的に海底送電ケーブルを用いるが、TLP 型の浮体なので、中間ブイを要しない簡易な方法で対応可能。
- 洋上タワーの撤去・交換が容易である。

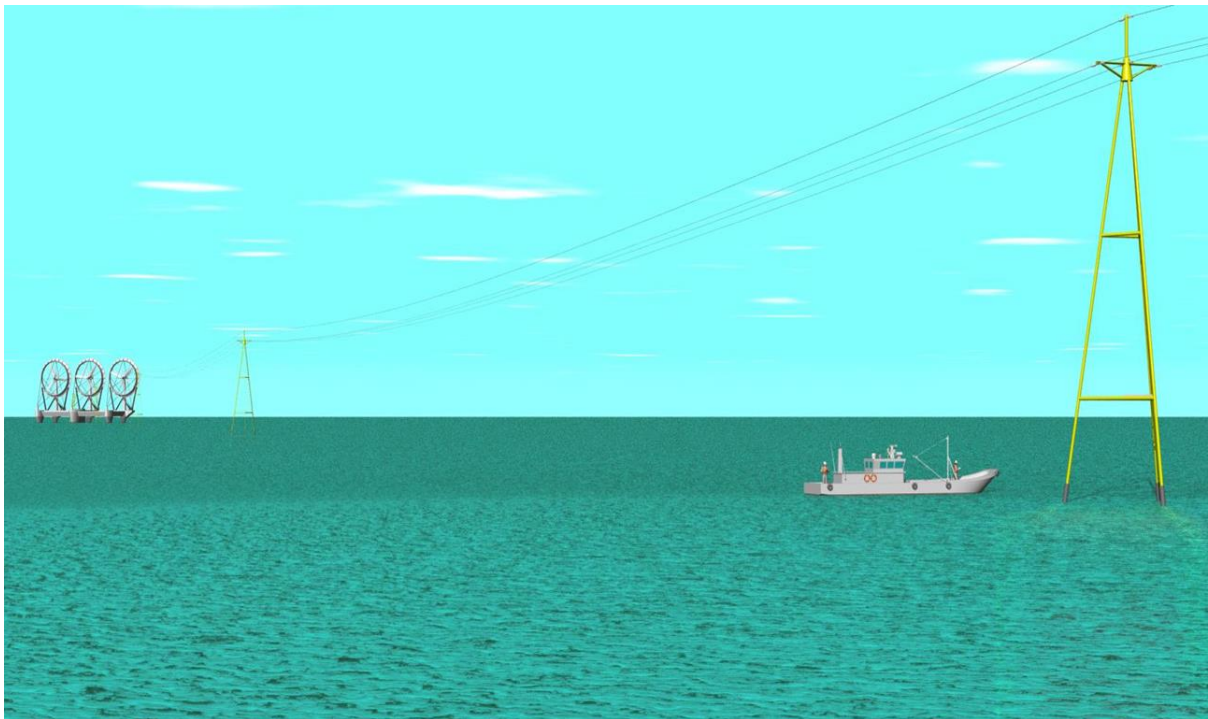


図 1-4 TLP 型洋上タワーによる洋上空中送電システム

1.2.2 タワー概要

タワーを積載するプラットフォームは 3 つの浮力体からなる構造をしており、タワーは必要最小限の 3 本脚の三脚型のトラスとし、座屈防止のため中間に水平材や筋交で結合する構造とする。タワーの高さは 36 m で、構成材料は鋼鉄製の円筒部材とし、直径は 0.02m である。浮力体も同様に鋼鉄製とし、外径 2.7 m となっている。タワーの設計諸元を表 1-1 に、各寸法を図 1-5 に示す。

表 1-1 タワー設計諸元

タワートラス部直径[m]	0.2
タワートラス部板厚[m]	0.01
タワートラス部高さ[m]	36
浮力体幅[m]	16.65
浮力体直径[m]	2.7
曳航時の排水量[kg]	3306.1
沈下後の排水量[kg]	18949.3
タワー重量[kg]	26100
喫水[m]	0.5

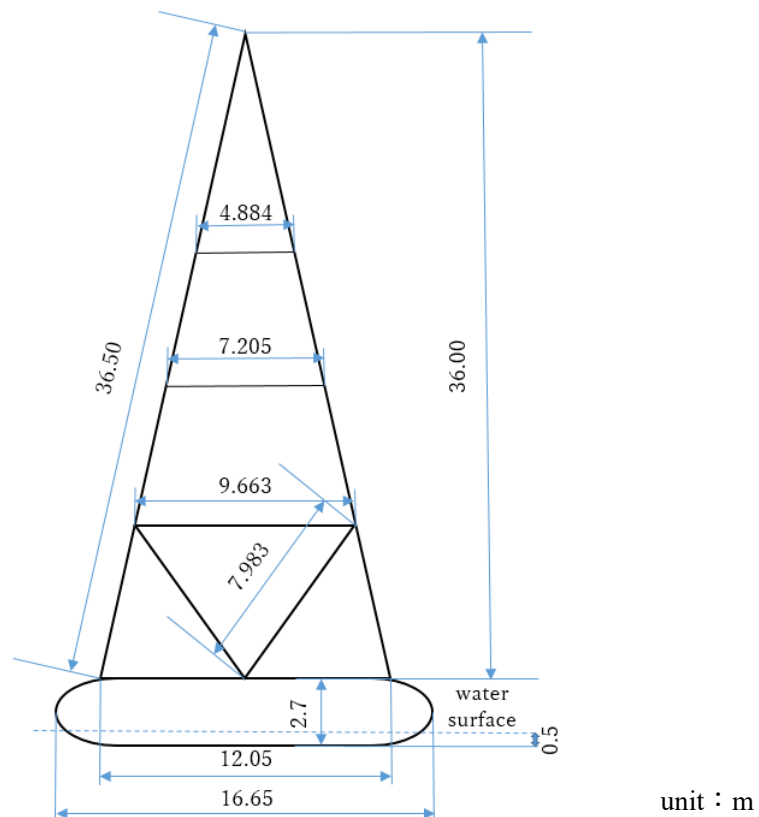


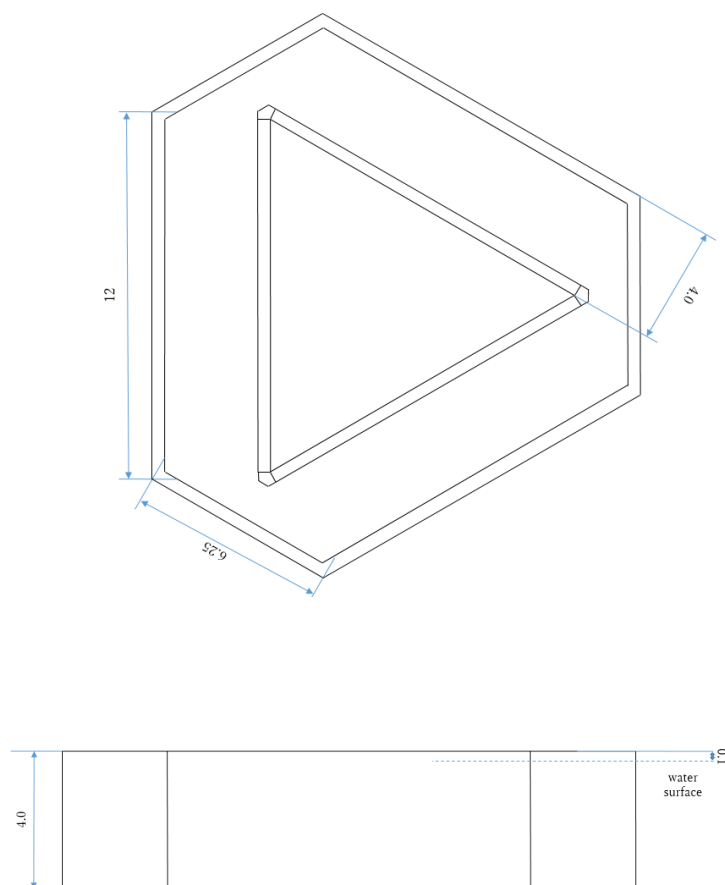
図 1-5 タワー寸法

1.2.3 アンカー概要

重力式アンカーは運搬・設置の際の利便性向上のため、上部に鋼鉄製の浮沈用タンクを3つ備え、コンクリートブロックを主要な重りとして使用する一体型とし、中央部に沈下時のグライディングを防止して安定した設置を行うために空間を設けた中抜構造とする。重力式アンカーの設計諸元を表 1-2 に、アンカーの寸法を図 1-6 に示す。

表 1-2 重力式アンカー体積と重量

アンカー重量(t)	608
余剰浮力(t)	75
アンカー水中重量(t)	279
タンク体積(t)	280
排水量(t)	354
全水中重量(t)	559



unit : m

図 1-6 アンカー寸法

1.2.4 TLP 型洋上タワーの設置案

TLP 型洋上タワーでは、係留を固定する基礎杭の代わりに浮沈機能を持たせた一体型の重力式アンカーを用いるため、主にタワーを積載する TLP 型の浮体本体と重力式アンカーの 2 つからなる構造を想定している。浮体本体の所定の設置位置までの運搬時は余剰浮力で浮いた状態とし、喫水面積が増大することで復原性が確保される。また重力式アンカーも浮力タンクに空気が満たされている場合、浮上して復原性を持った状態で曳航できる状態とする。設置手順の詳細な案は以下の通りである。

- ① 造船所などクレーンが使える岸壁で組立てを行う。
- ② 浮体本体、重力式アンカーを進水させる。このとき、浮体本体と重力式アンカーの浮力タンク内には水は入っておらず余剰浮力で浮いた状態となっている。
- ③ タグボートで設置位置まで曳航。(図 1-7 参照)
- ④ 重力式アンカーからテンドンを展開し、テンドンをブイに取り付ける。
- ⑤ 重力式アンカーの浮力タンクに注水し、アンカーを沈下させる。(図 1-8 参照)
- ⑥ 浮体本体とテンドンを接続し、浮体本体を水中に引き込み、テンドンに張力をかけて設置が完了。
(図 1-9 参照)



図 1-7 曳航運搬時の余剰浮力で浮いた状態

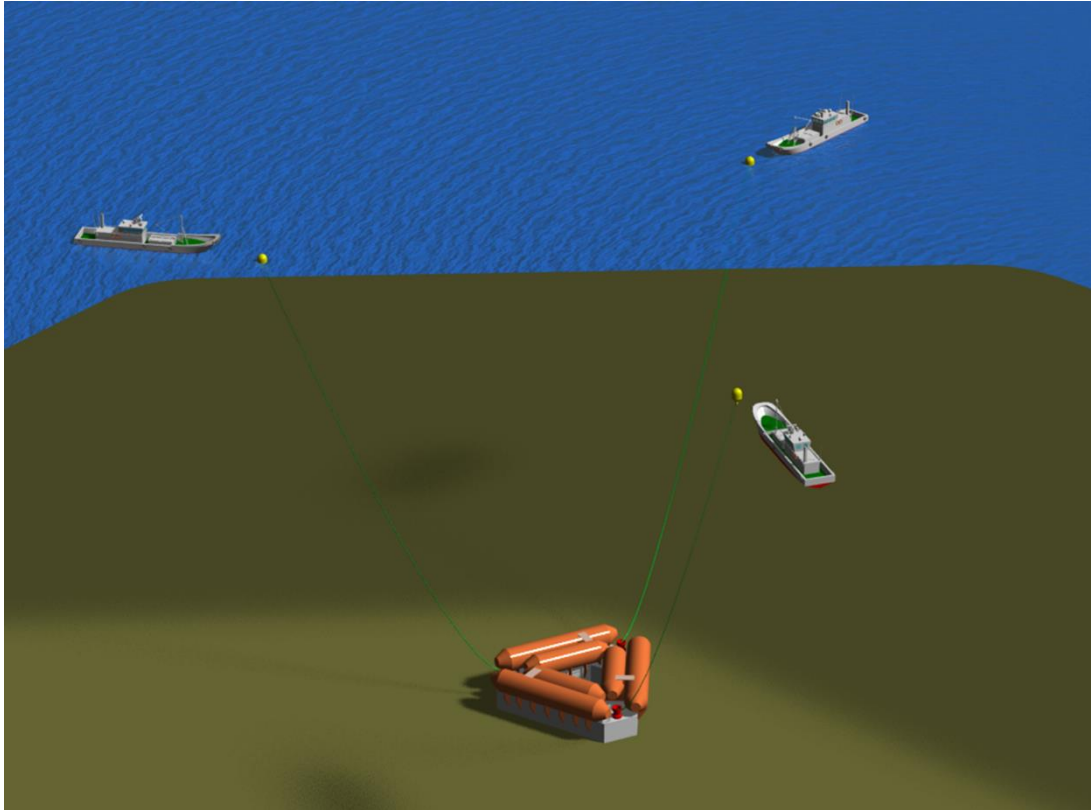


図 1-8 重力式アンカー設置

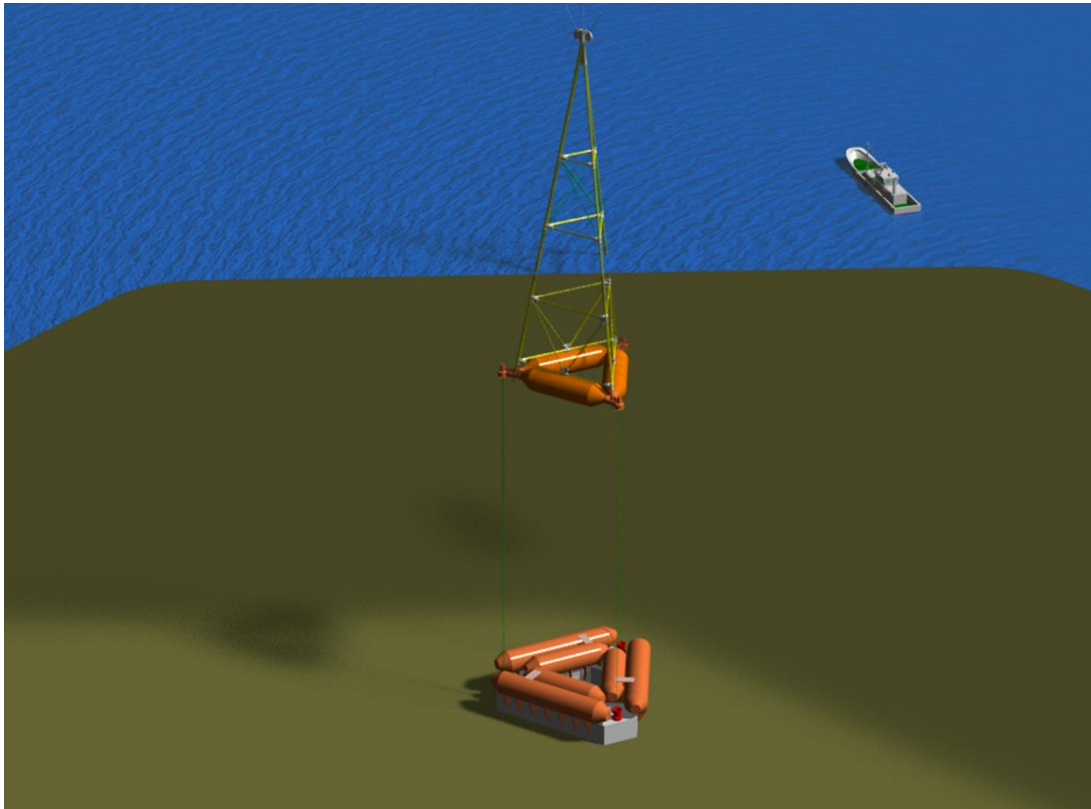


図 1-9 TLP 型洋上タワーの設置イメージ

1.3 研究目的

本研究室が提案する浮体式洋上タワーは、従来の海底送電ケーブルによる送電方式より設置コストを含めた低コスト洋上送電方式の実現を目指している。従来の TLP 型海洋構造物は設置時にクレーン船を含める大型作業船が必要とするため、設置コストが非常に高くなる。従って、提案している TLP 型洋上タワーでは洋上設置時に大型クレーン船を必要としない浮沈機能を持たせた重力式アンカーを採用する。

建造場所から設置海域までタワーとアンカーを連結して曳航することになり、浮体の針路安定性が求められる。曳航中は潮流や風などの外力を受け、左右の周期的運動である振れまわり運動が発生することがある。針路安定な場合にはこの振れまわり運動は徐々に減衰して消滅するが不安定な場合にはこの振れまわり運動は減衰せずにある。振れまわり運動が発生すると、曳船の操船が困難になるうえ、曳航索に過大な張力が発生することがあり、安全な曳航作業が出来なくなる。

そこで本研究では、曳航中の針路安定性に重点を置き、以下の項目に対して研究を行う。

- アンカーとタワーの 1/30 模型を使用して回流水槽で実験を行い、針路安定性を評価する。
- 振れまわり運動の計測結果からアンカーの操縦流体力微係数の算出を行う。算出した操縦流体力微係数を用いて針路安定性解析を行う。
- 針路安定性解析の結果と実験結果を比較して、振れまわり運動計測実験の結果から流体力微係数の算出する手法の精度の確認を行う
- アンカーの針路安定性の改善のためフィンを取り付けて実験を行い評価する。
- アンカーと曳船の運動連成を考慮した針路安定性の解析を行う。

2章 模型実験

九州大学応用力学研究所所有の回流水槽を使用し、実物の 1/30 スケールのタワー浮体部分とアンカーの模型を用いて曳航実験を行う。回流水槽の流速と模型と接続する係留長さを変更して実験を行い、振れまわり運動を計測する。計測した振れまわり運動の時系列結果から針路安定性の評価と最小二乗法により操縦流体力微係数を算出した。

2.1 模型概要

回流水槽で実験を行うため、1/30 スケールの模型を使用した。アンカーは板厚 4mm のアクリル板により作成し、タワーの浮体部分は先行研究により作成された模型を使用した¹⁾。作成に使用したアクリル板は図 2-1 に示す寸法であり、アクリル樹脂用接着剤により接着した。タワーの模型を図 2-2 にアンカーの模型を図 2-3 に示す。アンカーの喫水はコンクリートブロックと鉛玉を模型内部に設置し調整した。タワー浮体部分の喫水は鉛玉により調整した。

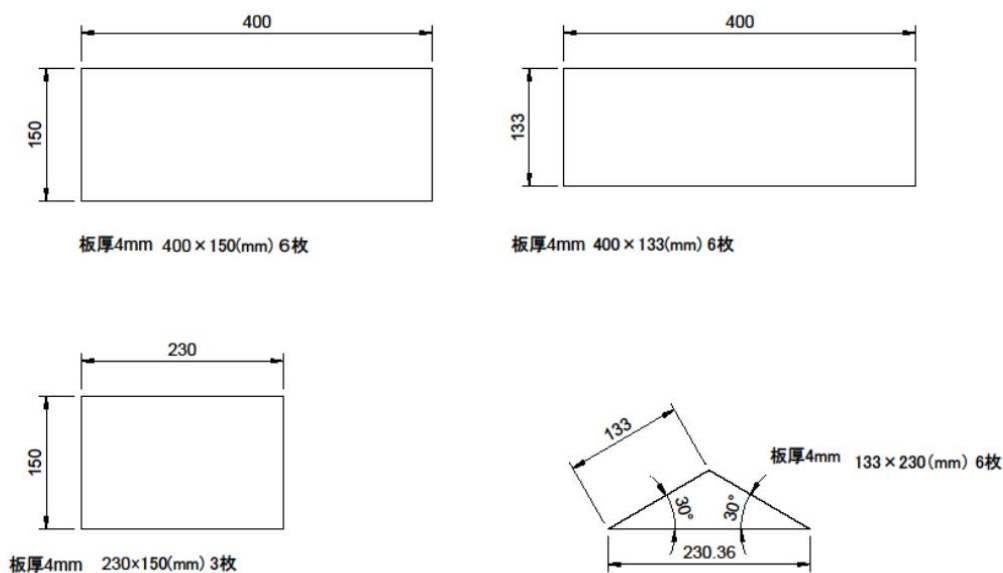


図 2-1 アクリル板寸法



図 2-2 1/30 スケールアンカー



図 2-3 1/30 スケールタワー

2.2 実験設備概要

実験では九州大学応用力学研究所所有の図 2-4 に示す回流水槽を使用した。以下に回流水槽の諸元を示す

- 型式 : 2 インペラ方式
- 本体寸法 : 長さ 9.5m×幅 2.0m×高さ 3.5m
- 観測部寸法 : 長さ 4.4m×幅 1.5m×高さ 1.6m
- 最高流速 : 1.3m/s

本研究で流速は 0.35,0.45,0.55m/s の 3 通りで実験を行った。回流水槽の流速の測定には図 2-5,2-6 に示す電磁流速計を使用した。表 2-1 に各流速のインペラの回転数示す。アンカーとタワーの実験の様子を撮影するため天井にビデオカメラを設置した。



図 2-4 回流水槽

表 2-1 流速と回転数

流速	インペラ回転数
0.35m/s	118rpm
0.45m/s	152rpm
0.55m/s	186rpm



图 2-5 流速計



图 2-6 電磁流速計

2.3 実験内容

2.3.1 アンカーとタワーの振れまわり運動の計測実験

アンカーとタワーの模型を用いて回流水槽で実験を行った。係留で繋いだ模型を回流水槽の流れの中に設置し、初期位置を平衡位置から離すことで水面上での左右の周期的運動である振れまわり運動を計測した。計測にはビデオカメラを使用し、模型に装着したマーカーの位置を動画解析ソフト「Tracker」を使用して係留の角度 θ_1 と模型の方位角 θ_2 を算出した。1/30 スケールの模型を使用し、流速は0.35,0.45,0.55m/sの3種類で変化させた。3種の方法は実スケールでの約2m/s~3m/sに相当する。係留長さ l_1 と模型の重心から曳航点までの距離 l_2 を変化させて実験を行い、各条件での針路安定性を評価する。係留にはステンレスワイヤーを使用した。タワーの実験では $l_2=0.66$ とし、 l_1 と流速 U を変化させて実験を行った。またアンカーの実験では、 l_1 と l_2 、流速 U を変化させて実験を行った。 l_2 を変化させる時、図2-7に示すブライドルワイヤーを使用し模型の重心から曳航点までの距離を変化させた。ここで l_1, l_2 は模型の船長 L で無次元化したものである。先行研究により l_1, l_2 を大きくすることで針路が安定しやすいことが明らかになっている^[5]。そこで実験ではアンカーとタワーの l_1, l_2, U の変化による針路安定性の評価を行った

2.3.2 フィンによるアンカーの針路安定性の改善実験

l_1, l_2 を大きくすることで針路安定性は改善されるが狭い水路や港を出入する際には逆に危険を伴う場合がある。そこで l_1, l_2 を変化させずアンカーの針路安定性を改善するため、フィンを取り付けた実験を行った。フィンの取り付け方は図2-8に示すフィンをアンカー後方に取り付けた case1 と図2-9に示すアンカーの斜め後方にフィンを取り付けた case2 である。実験条件は $U=0.35\text{m/s}, l_2=0.55$ とし、 $l_1 = 1, 1.2, 1.5, 1.8, 2, 2.2, 2.5$ と変化させた。



図 2-7 ブライドルワイヤー

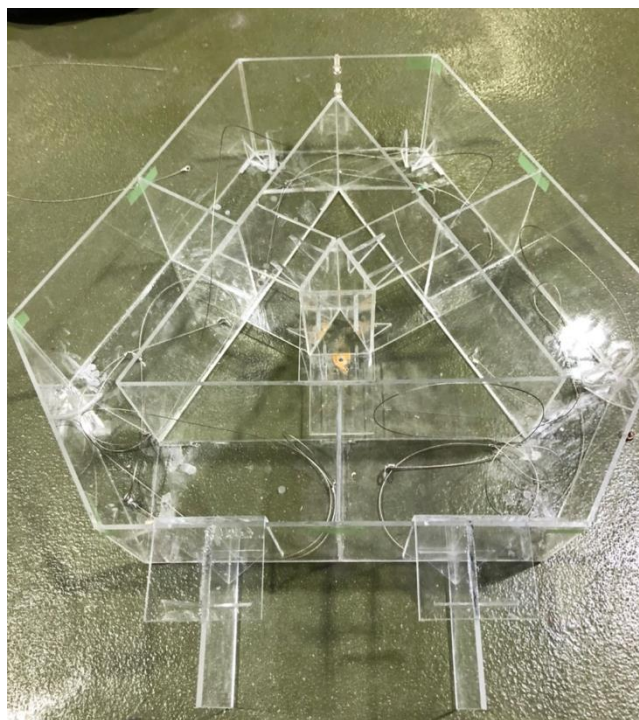


图 2-8 case1

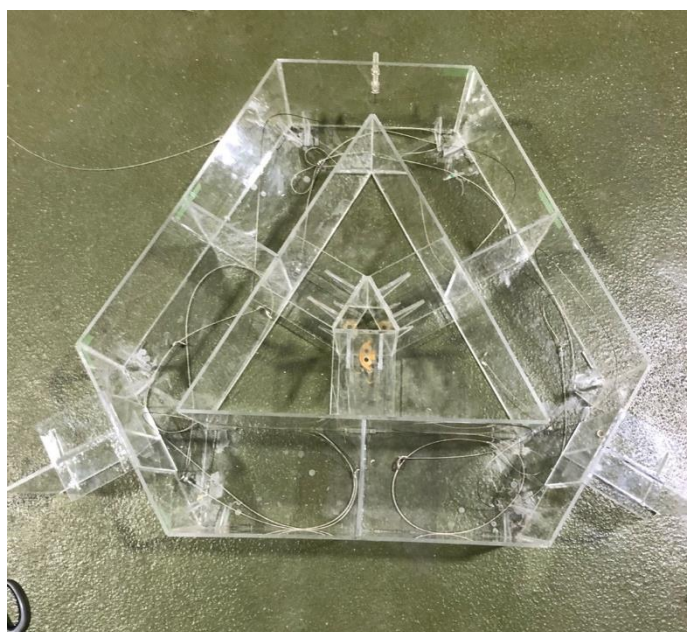


图 2-9 case2

2.4 実験結果

2.4.1 アンカーとタワーの振れまわり運動の計測実験結果

タワー、アンカーの各条件の実験結果を以下の表 2-2~5 に示す。振れまわり運動の収束し模型の方位角 θ_2 が 3° 以内に収まったものを安定とし、それ以外を不安定とした。

タワー浮体部はすべてのケースで安定していた。喫水が小さい三角形でありタワーが受ける流体力の影響が小さいため針路安定であったと考える。すべての条件において $\zeta > 1$ の挙動をしており表中には整定時間のみを示す。

アンカーは流速 $U=0.35\text{m/s}$ の場合、すべての条件において不安定であり、流速が速いほど安定する傾向がみられた。アンカーの実験結果が安定の条件では、表中に対数減衰率から算出した減衰比 ζ と整定時間 T_s を示す。各条件の係留の角度 θ_1 と模型の方位角 θ_2 の時系列の実験結果を図 2-10~63 に示す。

表 2-2 タワー実験結果 整定時間 T_s [s]

	U=0.35m/s	U=0.45m/s	U=0.55m/s
$l'_1 = 1$	3.2s	2.8	1.6
$l'_1 = 1.2$	3.2s	4.3	4.9
$l'_1 = 1.5$	6.2s	4.7	3.9
$l'_1 = 1.8$	3.6s	4.5	6.7
$l'_1 = 2.0$	6.4s	5.1	4.4
$l'_1 = 2.2$	7.1s	5.2	7.3
$l'_1 = 2.5$	7.6s	6.3	6.7

表 2-3 $U=0.35\text{m/s}$ アンカー実験結果 減衰比 ζ 整定時間 T_s

	$l'_2 = 0.55$	$l'_2 = 0.7$	$l'_2 = 0.8$	$l'_2 = 0.9$
$l'_1 = 1$	不安定	—	—	—
$l'_1 = 1.2$	不安定	—	—	—
$l'_1 = 1.5$	不安定	—	不安定	不安定
$l'_1 = 1.8$	不安定	不安定	不安定	$\zeta = 0.1899$ $T_s = 27.5\text{s}$
$l'_1 = 2.0$	不安定	不安定	$\zeta = 0.0682$ $T_s = 71.6\text{s}$	$\zeta = 0.1148$ $T_s = 36.5\text{s}$
$l'_1 = 2.2$	不安定	$\zeta = 0.0691$ $T_s = 77.3\text{s}$	$\zeta = 0.1637$ $T_s = 25.7\text{s}$	—
$l'_1 = 2.5$	不安定	$\zeta = 0.032$ $T_s = 83.5\text{s}$	—	—

表 2-4 $U=0.45\text{m/s}$ アンカー実験結果 減衰比 ζ 整定時間 T_s

	$l'_2 = 0.55$	$l'_2 = 0.7$	$l'_2 = 0.8$	$l'_2 = 0.9$
$l'_1 = 0.5$	—	—	不安定	不安定
$l'_1 = 0.8$	—	—	$\zeta = 0.0681$ $T_s = 34.7\text{s}$	$\zeta = 0.1456$ $T_s = 27.5\text{s}$
$l'_1 = 1$	不安定	不安定	$\zeta = 0.1166$ $T_s = 22.1\text{s}$	$\zeta = 0.0867$ $T_s = 36.5\text{s}$
$l'_1 = 1.2$	不安定	$\zeta = 0.161$ $T_s = 17.35\text{s}$	$\zeta = 0.1347$ $T_s = 16.68\text{s}$	—
$l'_1 = 1.5$	不安定	$\zeta = 0.2078$ $T_s = 13.01\text{s}$	—	—
$l'_1 = 1.8$	$\zeta = 0.0509$ $T_s = 46\text{s}$	—	—	—
$l'_1 = 2.0$	$\zeta = 0.0376$ $T_s = 119\text{s}$	—	—	—
$l'_1 = 2.2$	$\zeta = 0.0691$ $T_s = 51\text{s}$	—	—	—
$l'_1 = 2.5$	$\zeta = 0.0942$ $T_s = 57.9\text{s}$	—	—	—

表 2-5 $U=0.55\text{m/s}$ アンカー実験結果 減衰比 ζ 整定時間 T_s

	$l'_2 = 0.55$	$l'_2 = 0.7$	$l'_2 = 0.8$	$l'_2 = 0.9$
$l'_1 = 0.3$	—	—	不安定	不安定
$l'_1 = 0.5$	—	不安定	$\zeta = 0.1288$ $T_s = 11.34\text{s}$	$\zeta = 0.2683$ $T_s = 7.1\text{s}$
$l'_1 = 0.8$	—	$\zeta = 0.3360$ $T_s = 4.8\text{s}$	$\zeta = 0.3699$ $T_s = 4.67\text{s}$	$\zeta = 0.3114$ $T_s = 5.33\text{s}$
$l'_1 = 1$	不安定	$\zeta = 0.3217$ $T_s = 5.33\text{s}$	$\zeta = 0.3401$ $T_s = 5.67\text{s}$	—
$l'_1 = 1.2$	$\zeta = 0.0469$ $T_s = 42\text{s}$	—	—	—
$l'_1 = 1.5$	$\zeta = 0.0711$ $T_s = 41.9\text{s}$	—	—	—
$l'_1 = 1.8$	$\zeta = 0.144$ $T_s = 27.02\text{s}$	—	—	—
$l'_1 = 2.0$	$\zeta = 0.156$ $T_s = 15.2\text{s}$	—	—	—
$l'_1 = 2.2$	$\zeta = 0.146$ $T_s = 20.3\text{s}$	—	—	—
$l'_1 = 2.5$	$\zeta = 0.223$ $T_s = 23.5\text{s}$	—	—	—

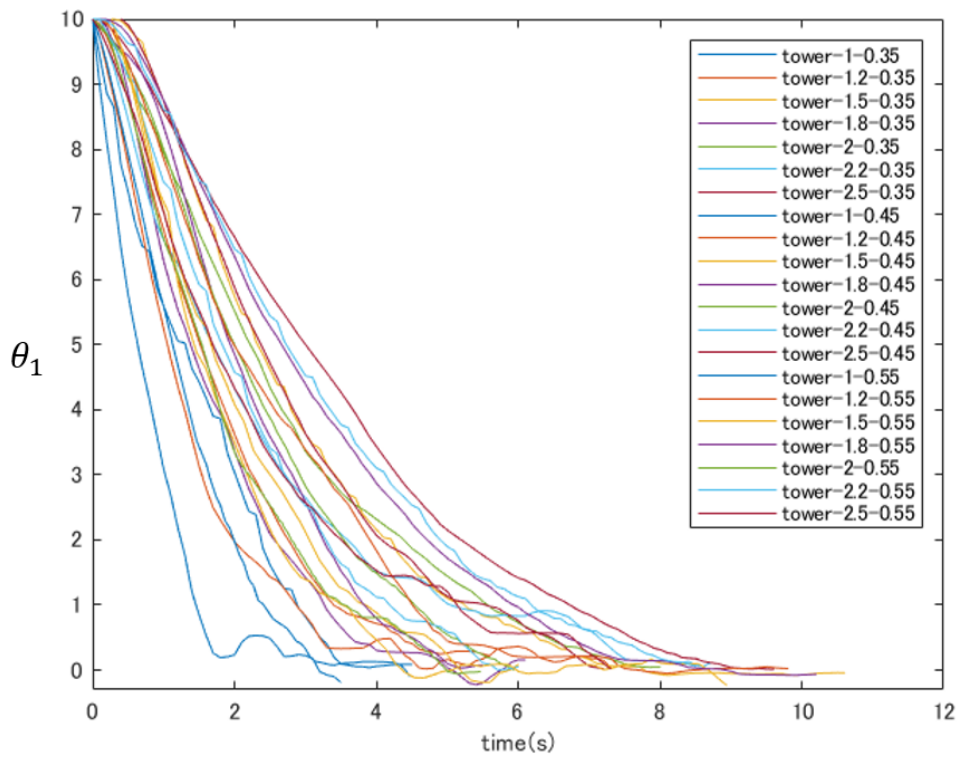


図 2-10 タワー実験結果

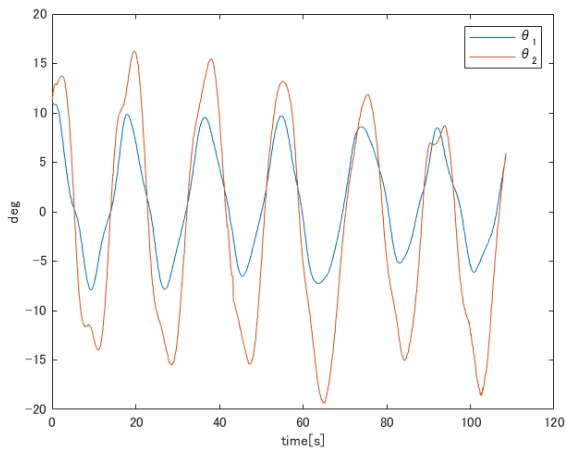


図 2-11 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 1$ $l_2 = 0.55$

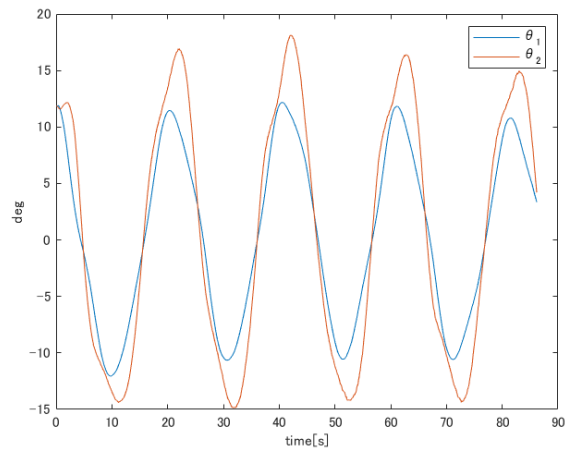


図 2-12 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.2$ $l_2 = 0.55$

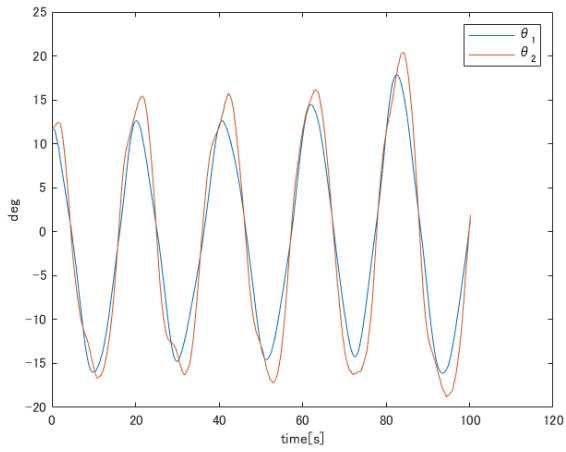


図 2-13 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.5$ $l_2 = 0.55$

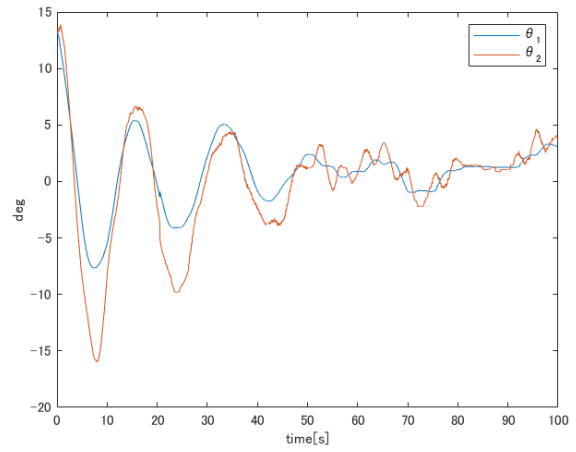


図 2-14 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.5$ $l_2 = 0.8$

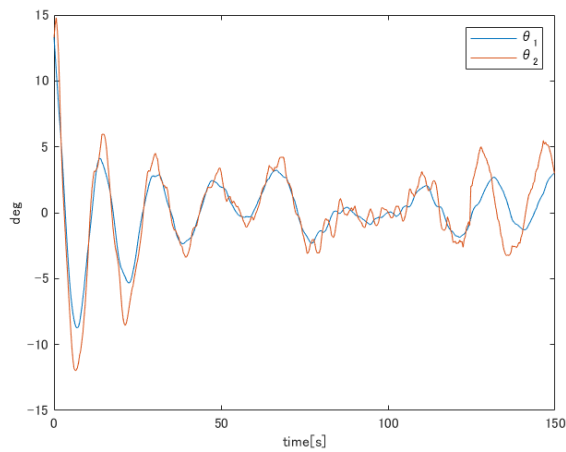


図 2-15 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.5$ $l_2 = 0.9$

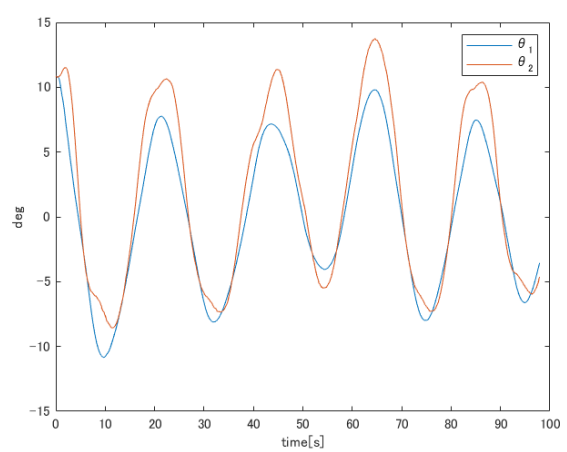


図 2-16 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.8$ $l_2 = 0.55$

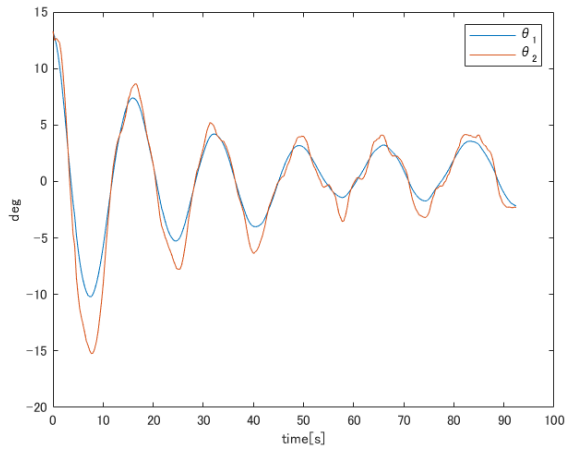


図 2-17 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.8$ $l_2 = 0.7$

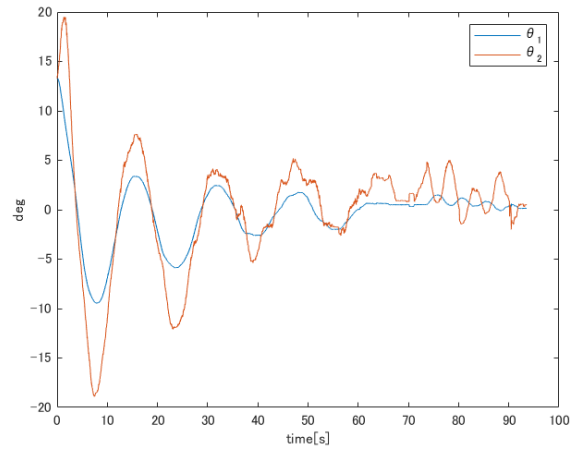


図 2-18 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.8$ $l_2 = 0.8$

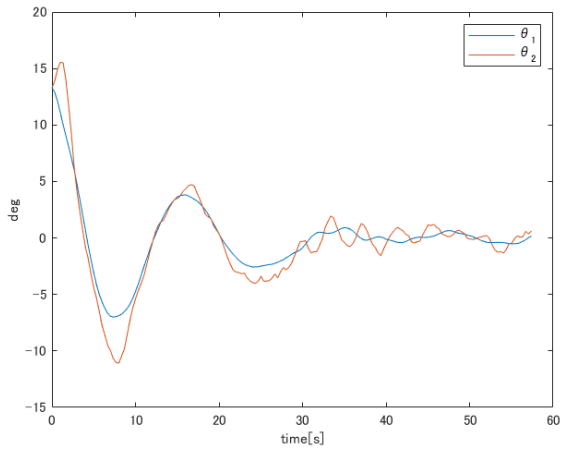


図 2-19 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.8$ $l_2 = 0.9$

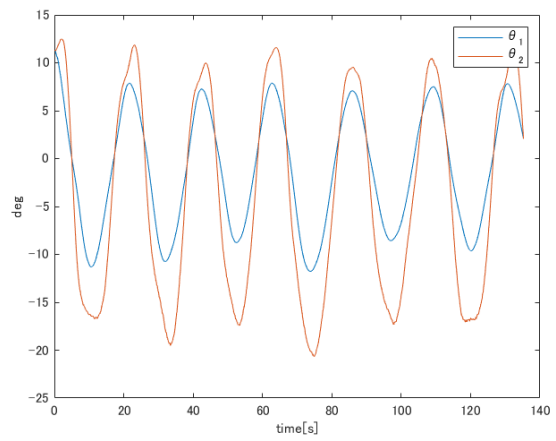


図 2-20 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 2$ $l_2 = 0.55$

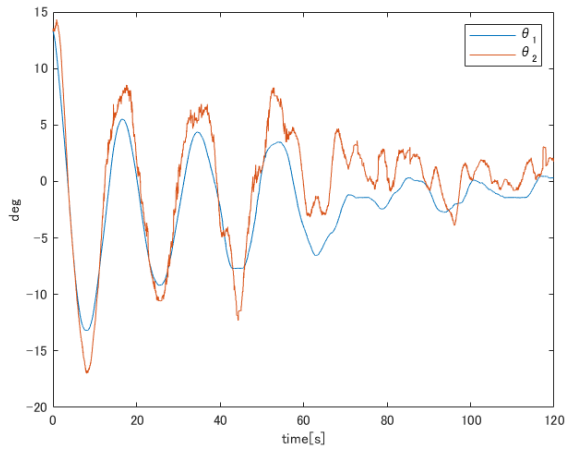


図 2-21 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 2$ $l_2 = 0.7$

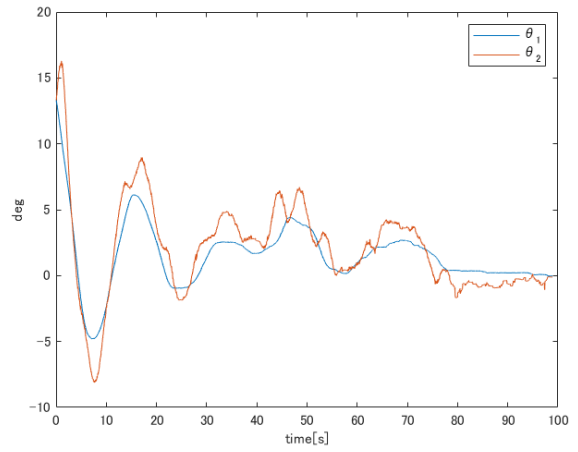


図 2-22 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 2$ $l_2 = 0.8$

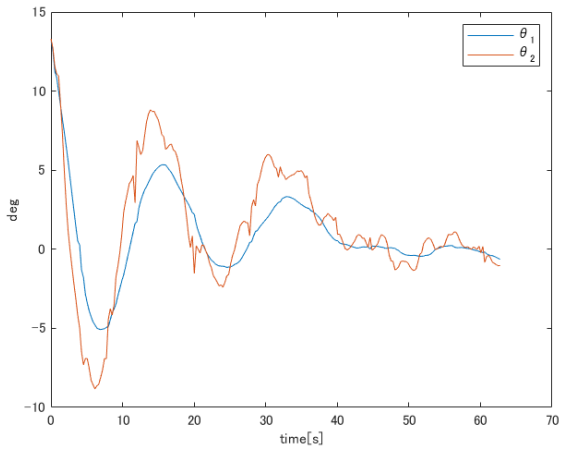


図 2-23 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 2$ $l_2 = 0.9$

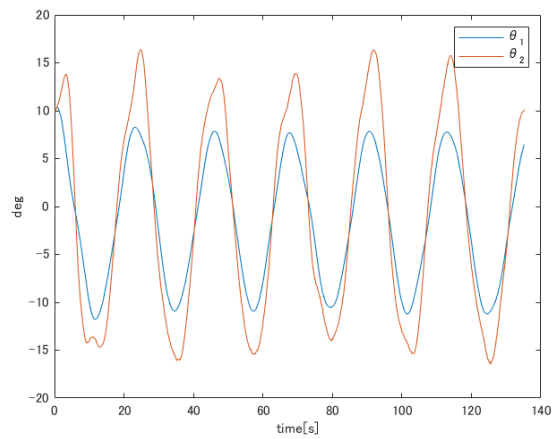


図 2-24 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 2.2$ $l_2 = 0.55$

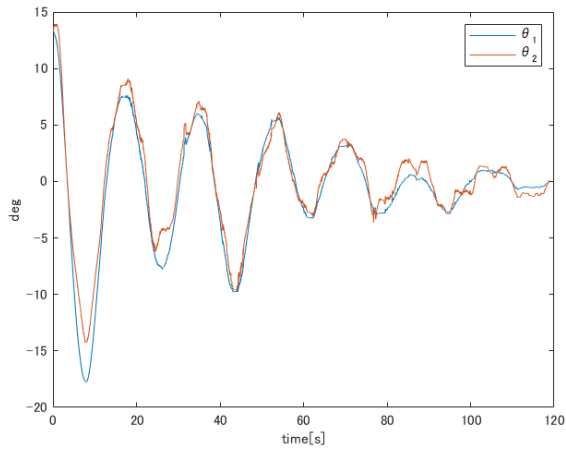


図 2-25 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 2.2$ $l_2 = 0.7$

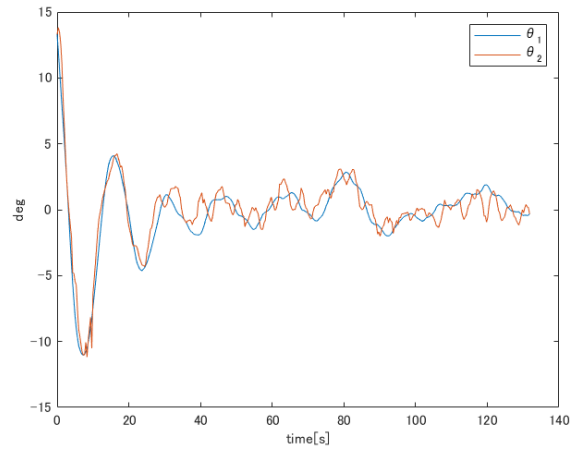


図 2-26 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 2.2$ $l_2 = 0.8$

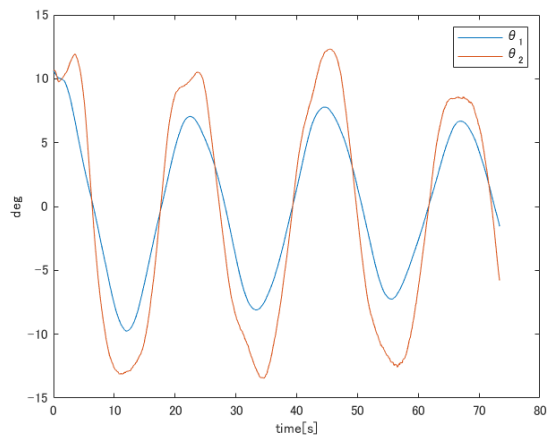


図 2-27 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 2.5$ $l_2 = 0.55$

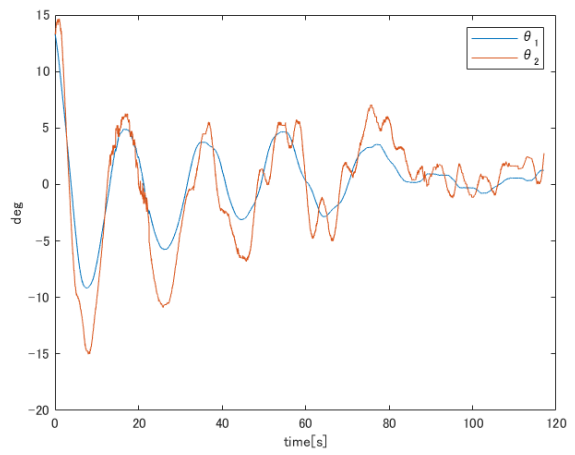


図 2-28 アンカー実験結果
 $U=0.35 \text{ m/s}$ $l_1 = 2.5$ $l_2 = 0.7$

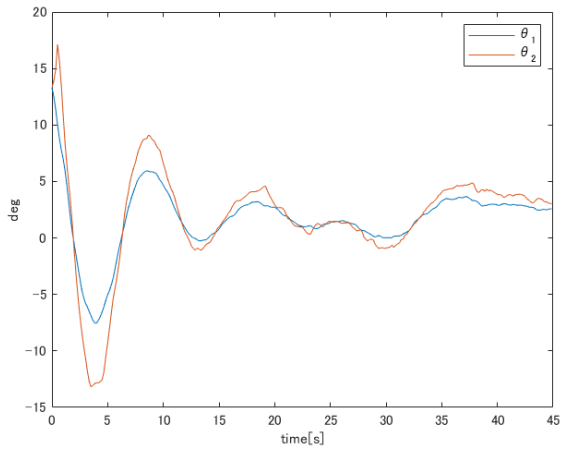


図 2-29 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 0.5$ $l_2 = 0.8$

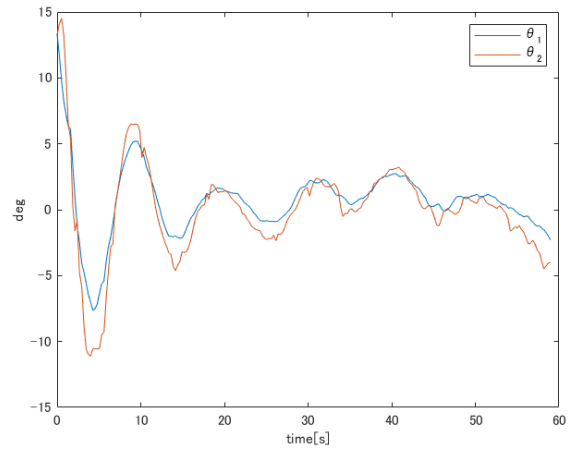


図 2-30 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 0.5$ $l_2 = 0.9$

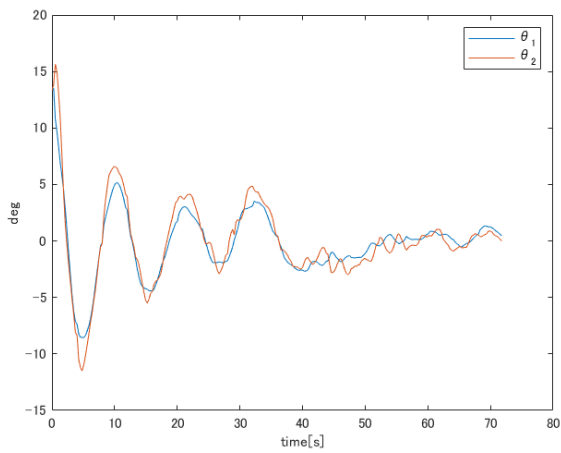


図 2-31 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 0.8$ $l_2 = 0.8$

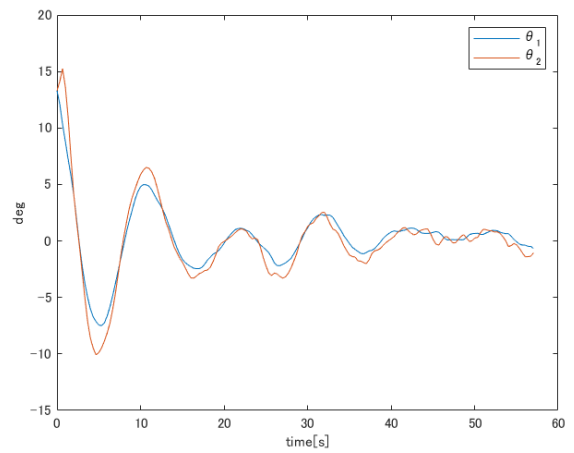


図 2-32 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 0.8$ $l_2 = 0.9$

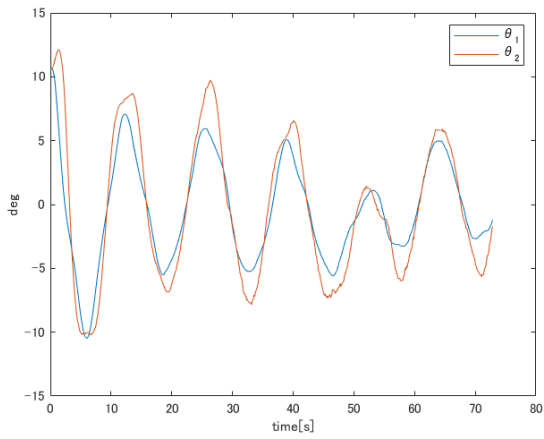


図 2-33 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l'_1 = 1$ $l'_2 = 0.55$

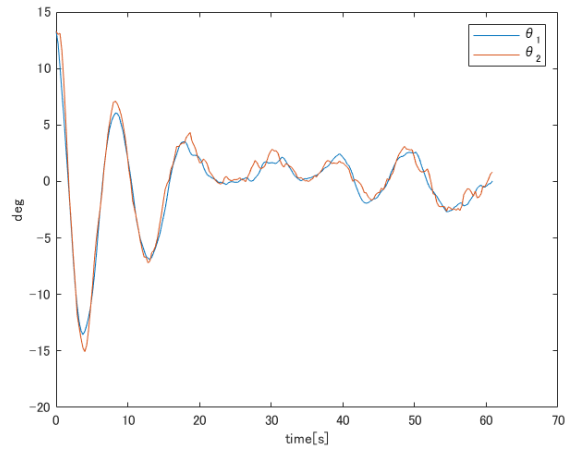


図 2-34 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l'_1 = 1$ $l'_2 = 0.7$

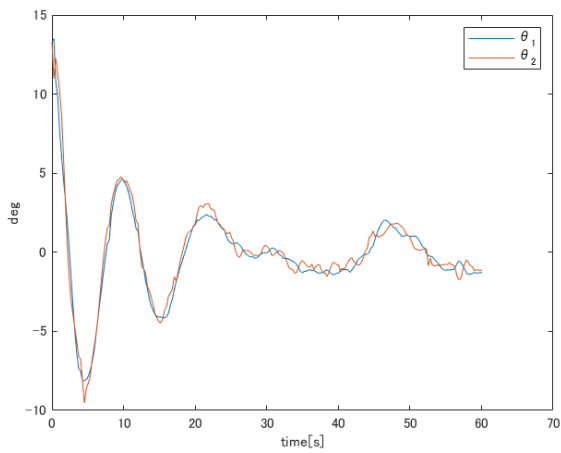


図 2-35 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l'_1 = 1$ $l'_2 = 0.8$

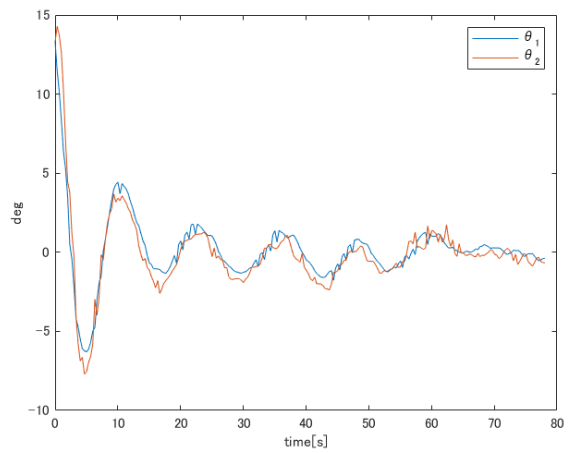


図 36 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l'_1 = 1$ $l'_2 = 0.9$

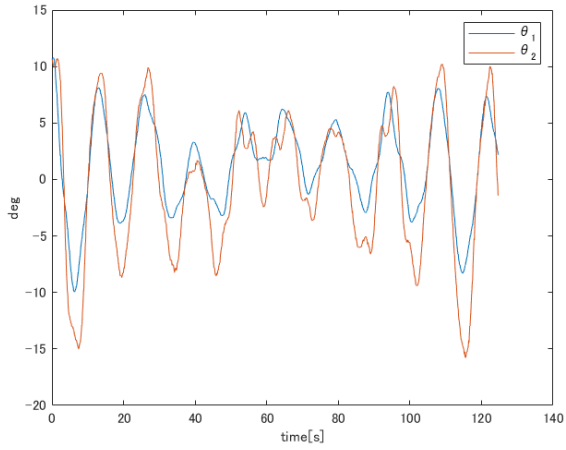


図 2-37 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.2$ $l_2 = 0.55$

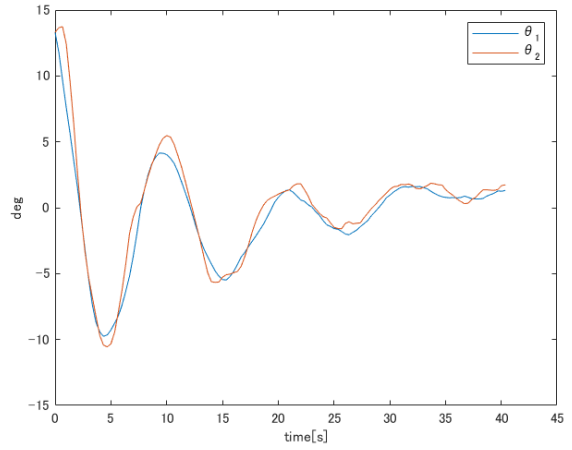


図 2-38 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.2$ $l_2 = 0.7$

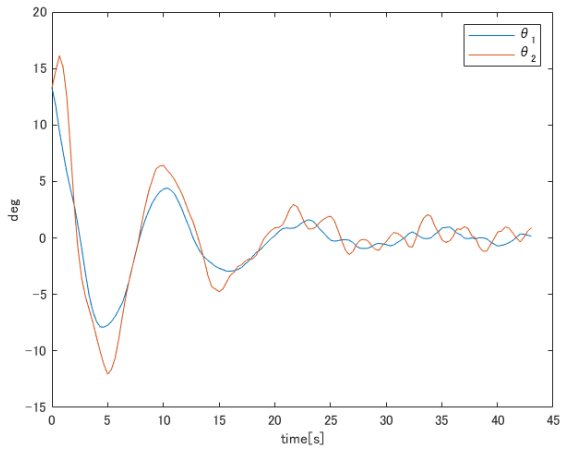


図 2-39 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.2$ $l_2 = 0.8$

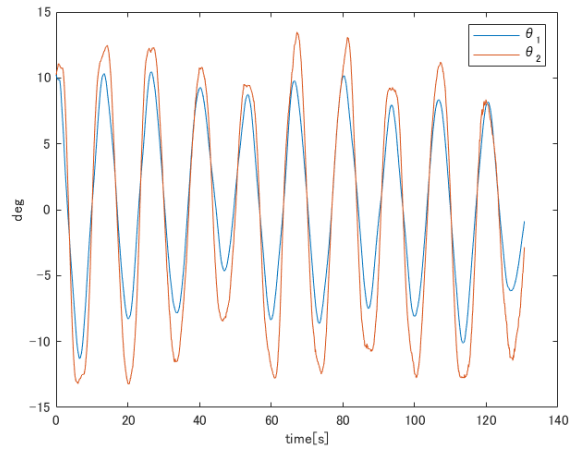


図 2-40 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.5$ $l_2 = 0.55$

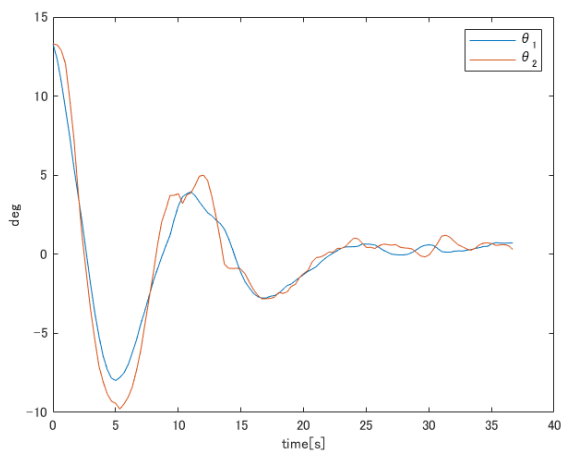


図 2-41 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.5$ $l_2 = 0.7$

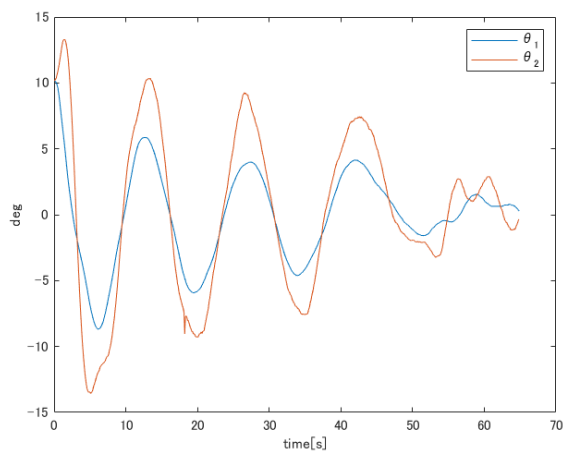


図 2-42 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.8$ $l_2 = 0.55$

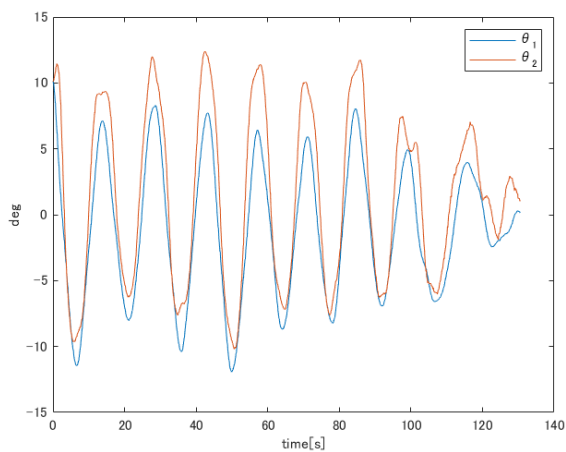


図 2-43 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 2$ $l_2 = 0.55$

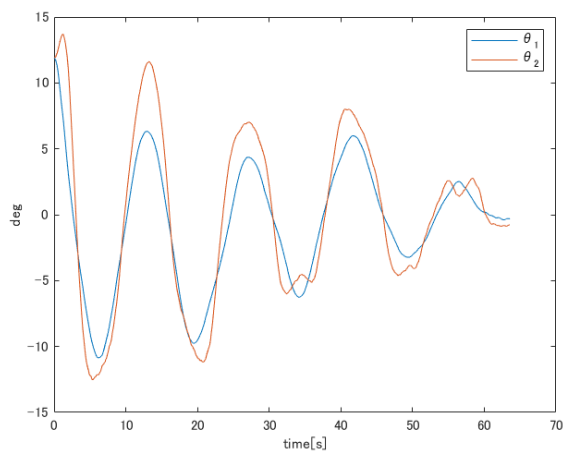


図 2-44 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 2.2$ $l_2 = 0.55$

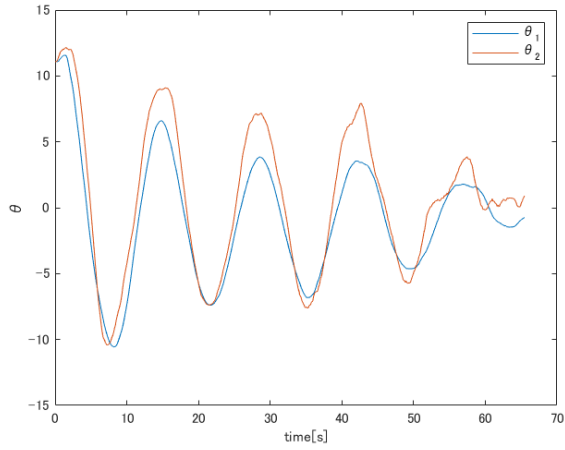


図 2-45 アンカー実験結果
 $U=0.45 \text{ m/s}$ $l_1 = 2.5$ $l_2 = 0.55$

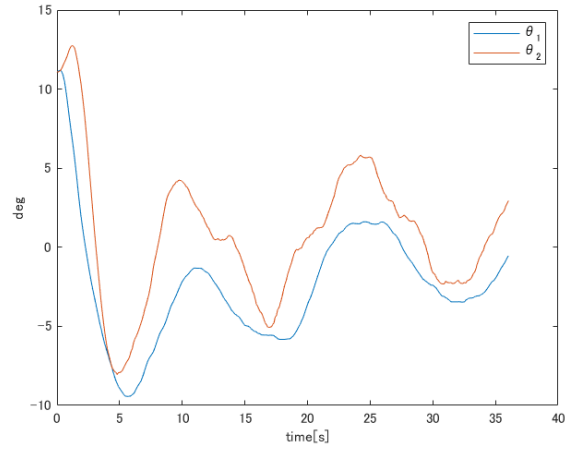


図 2-46 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 0.3$ $l_2 = 0.8$

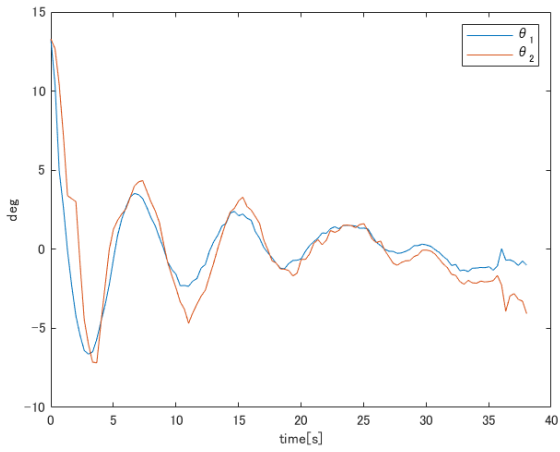


図 2-47 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 0.3$ $l_2 = 0.9$

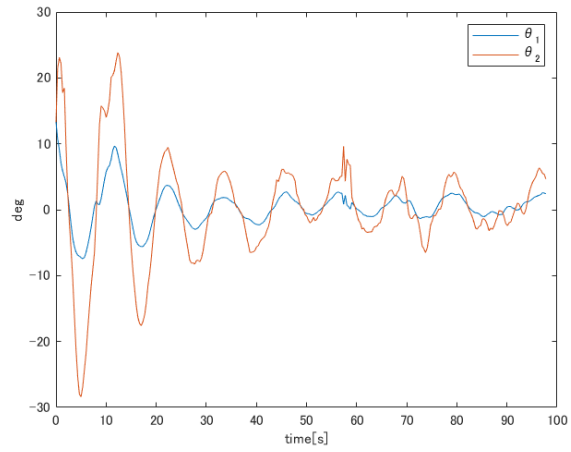


図 2-48 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 0.5$ $l_2 = 0.7$

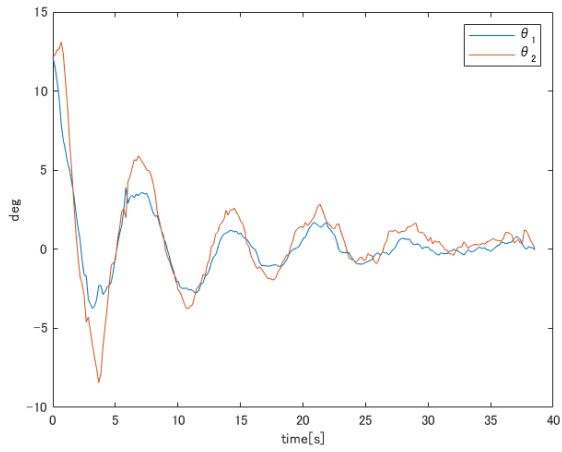


図 2-49 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 0.5$ $l_2 = 0.8$

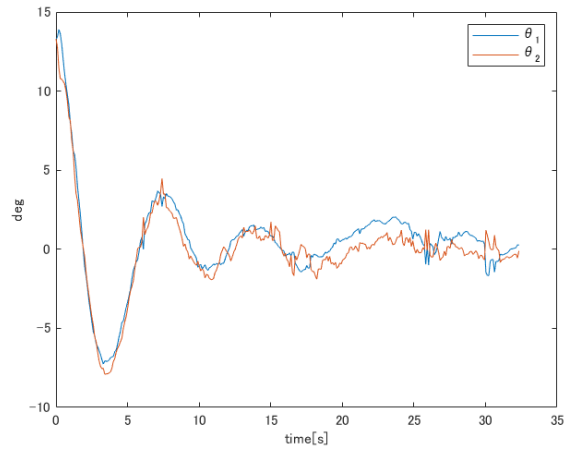


図 2-50 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 0.5$ $l_2 = 0.9$

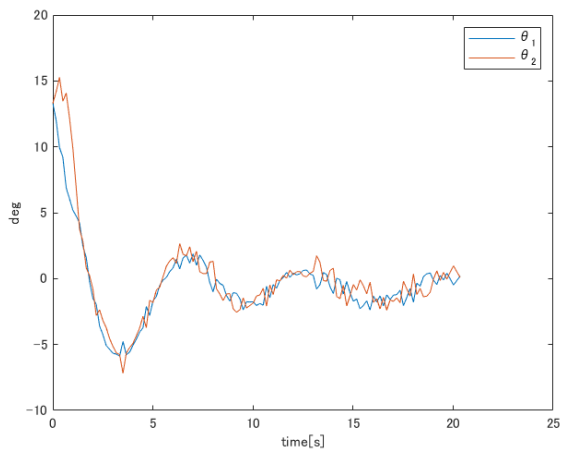


図 2-51 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 0.8$ $l_2 = 0.7$

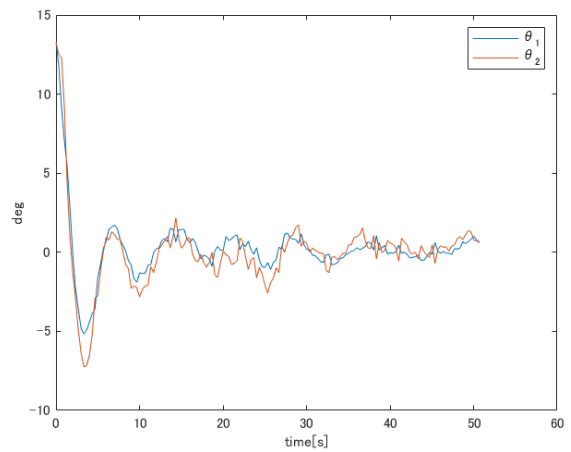


図 2-52 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 0.8$ $l_2 = 0.8$

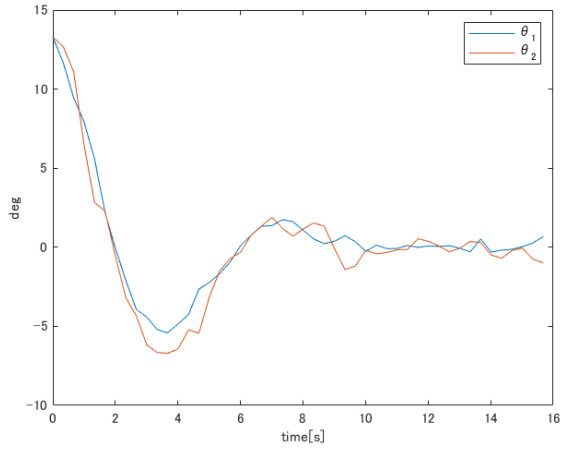


図 2-53 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l'_1 = 0.8$ $l'_2 = 0.9$

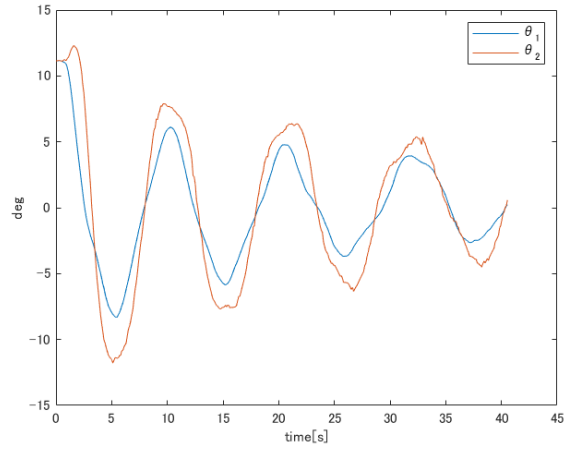


図 2-54 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l'_1 = 1$ $l'_2 = 0.55$

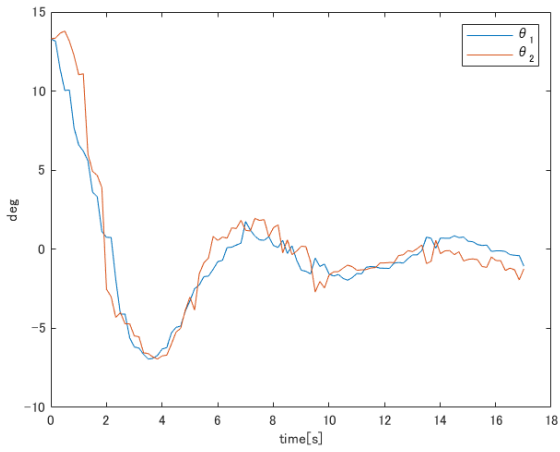


図 2-55 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l'_1 = 1$ $l'_2 = 0.7$

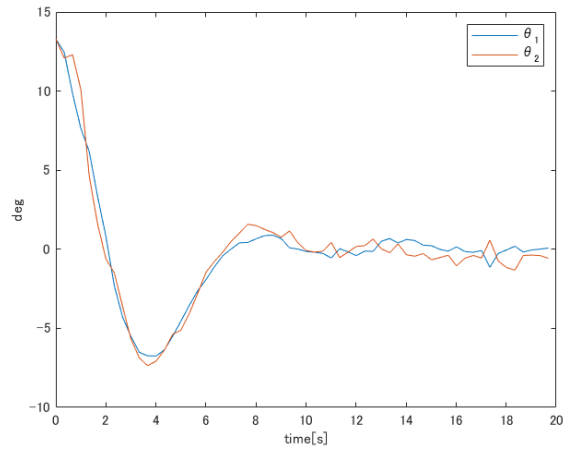


図 2-56 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l'_1 = 1$ $l'_2 = 0.8$

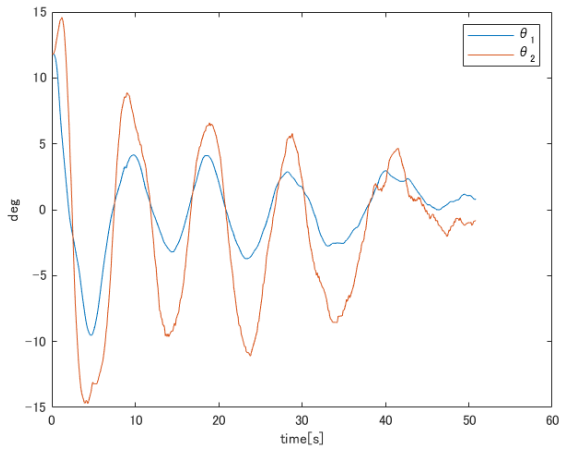


図 2-58 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.2$ $l_2 = 0.55$

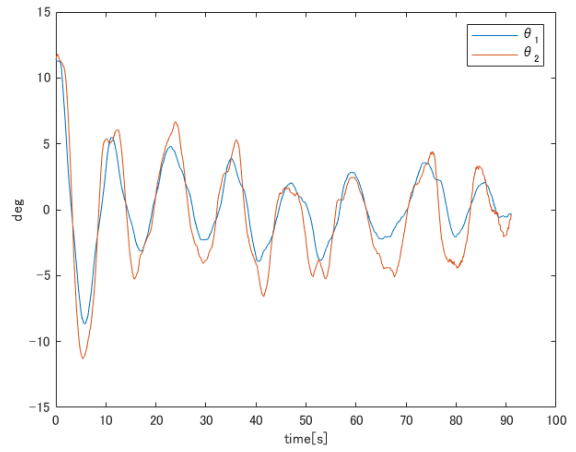


図 2-59 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.5$ $l_2 = 0.55$

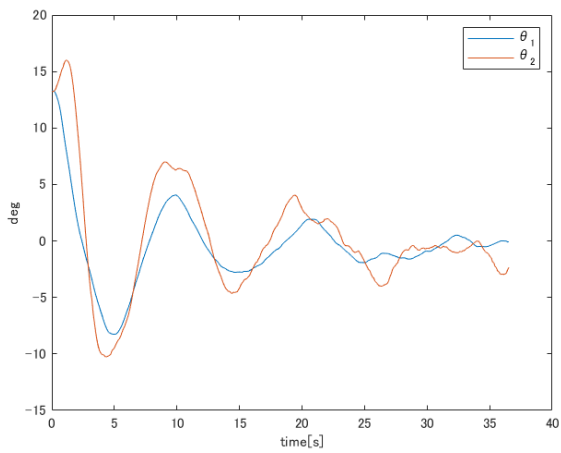


図 2-60 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 1.8$ $l_2 = 0.55$

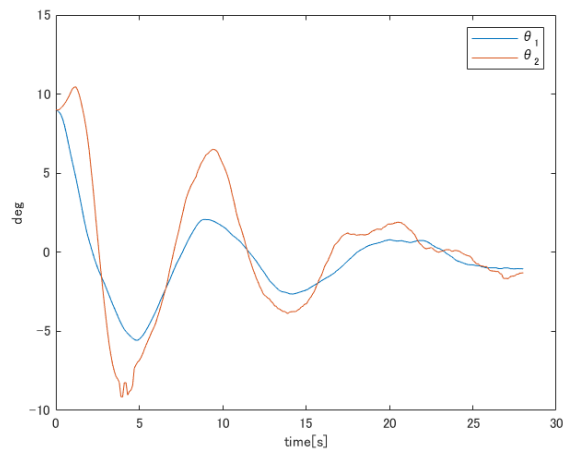


図 2-61 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 2$ $l_2 = 0.55$

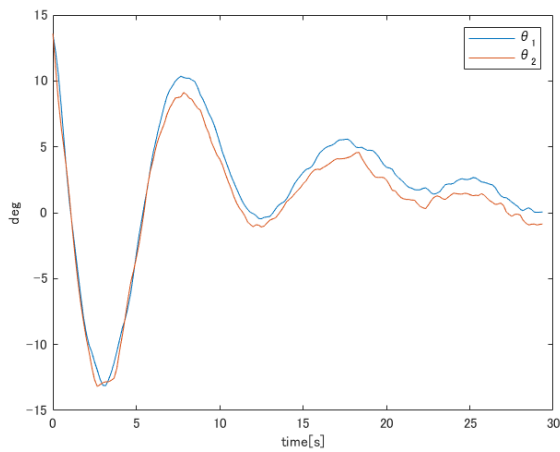


図 2-62 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 2.2$ $l_2 = 0.55$

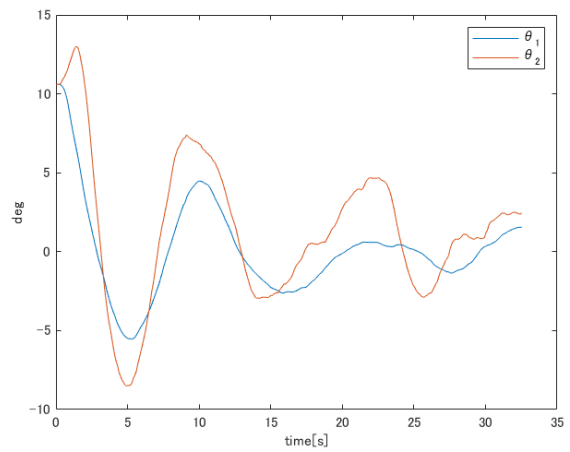


図 2-63 アンカー実験結果
 $U=0.55 \text{ m/s}$ $l_1 = 2.5$ $l_2 = 0.55$

表 2-6 case1,case2 実験結果 減衰比 ζ 整定時間 T_s

	Case1	Case2
$l_1 = 1$	不安定	$\zeta = 0.4438$ $T_s=6.9s$
$l_1 = 1.2$	不安定	$\zeta = 0.3153$ $T_s=4.3$
$l_1 = 1.5$	不安定	$\zeta = 0.3523$ $T_s=7.84s$
$l_1 = 1.8$	不安定	$\zeta = 0.4291$ $T_s=5.33s$
$l_1 = 2$	不安定	$\zeta = 0.3536$ $T_s=8.01s$
$l_1 = 2.2$	$\zeta = 0.1557$ $T_s=39.7s$	$\zeta = 0.4618$ $T_s=9s$
$l_1 = 2.5$	$\zeta = 0.0753$ $T_s=76s$	$\zeta = 0.4395$ $T_s=9.84s$

2.4.2 フィンによるアンカーの針路安定性の改善実験結果

アンカーにフィンを取り付けた case1、case2 の各条件の実験結果を以下の表 2-6 に示す。振れまわり運動の収束し模型の方位角 θ_2 が 3° 以内に収まったものを安定とし、それ以外を不安定としている。実験結果で安定している場合は表中に減衰比と整定時間を示す。各条件の係留の角度 θ_1 と模型の方位角 θ_2 の時系列結果を図 2-64~78 に示す。case1,case2 とともにフィンの無い場合に比べ、針路安定性は改善されている。フィンをつけることで索の角度 θ_1 は安定している。case1 では模型の方位角 θ_2 の振動が収束し

ない挙動がみられた。これはフィンを後方に着けたことで前後方向の抗力が小さくなったことが原因だと考える。case2 は整定時間 T_s が短く θ_1, θ_2 共に収束しており最も安定している。針路安定性の改善されたのはフィンにより着力点が後方にずれ、case2 はさらに前後方向の抗力が大きくなったことが理由であると考える。

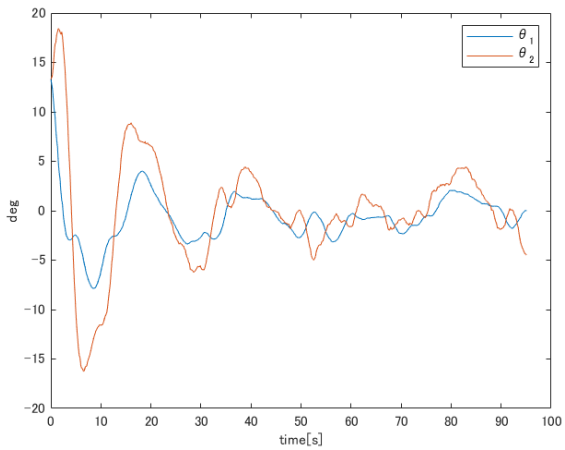


図 2-64 アンカー実験結果
case1 $l'_1 = 1 \quad l'_2 = 0.55$

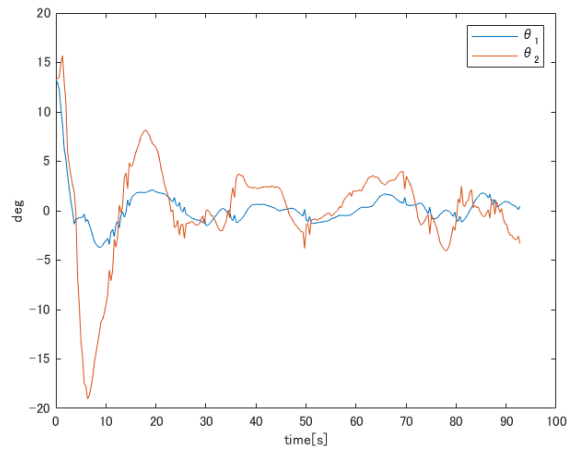


図 2-65 アンカー実験結果
case1 $l'_1 = 1.2 \quad l'_2 = 0.55$

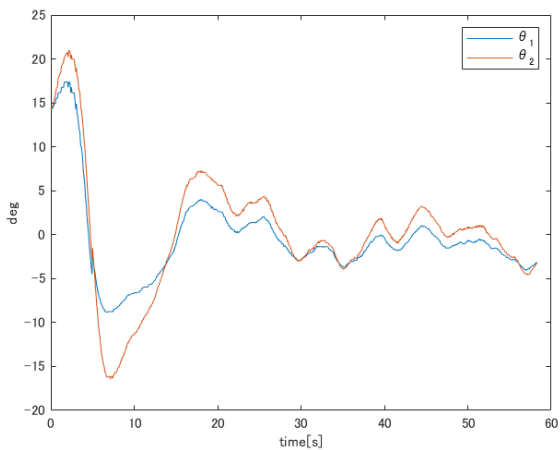


図 2-66 アンカー実験結果
case1 $l'_1 = 1.5 \quad l'_2 = 0.55$

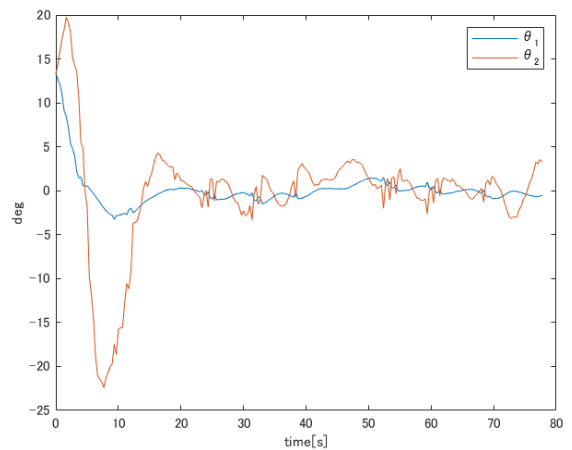


図 2-67 アンカー実験結果
case1 $l'_1 = 1.8 \quad l'_2 = 0.55$

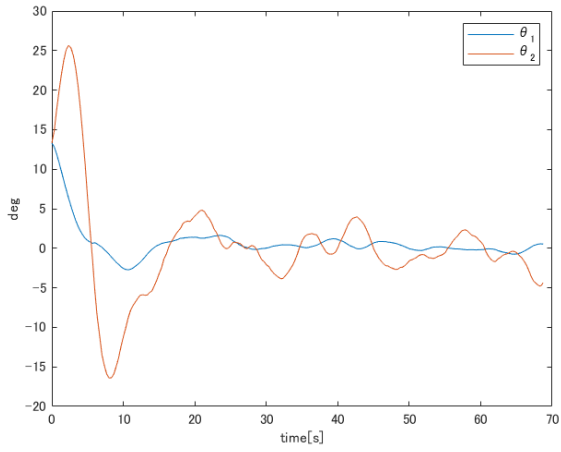


図 2-68 アンカー実験結果
case1 $l'_1 = 2$ $l'_2 = 0.55$

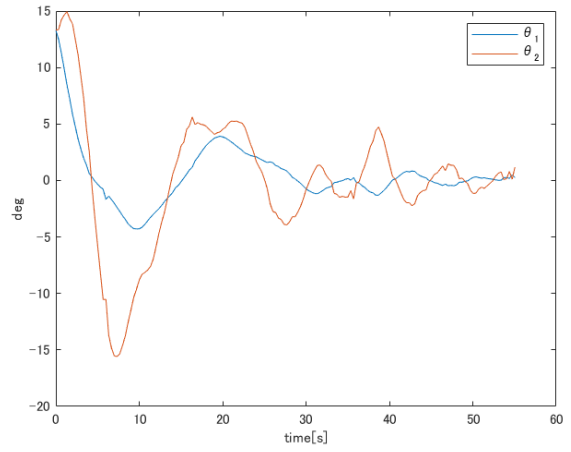


図 2-69 アンカー実験結果
case1 $l'_1 = 2.2$ $l'_2 = 0.55$

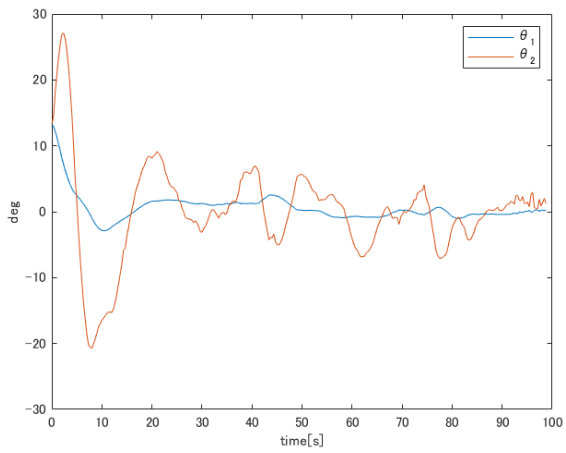


図 2-70 アンカー実験結果
case1 $l'_1 = 2.5$ $l'_2 = 0.55$

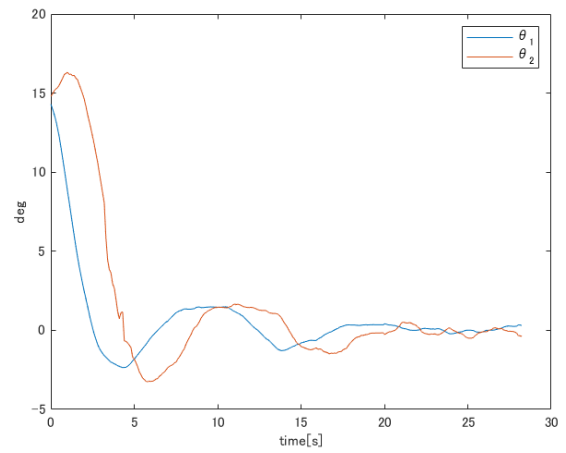


図 2-72 アンカー実験結果
case2 $l'_1 = 1$ $l'_2 = 0.55$

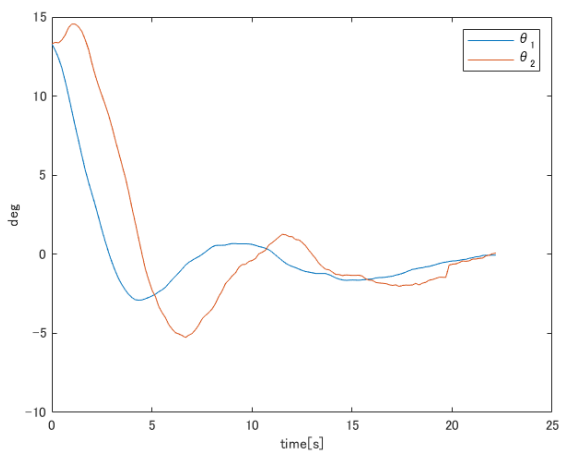


図 2-73 アンカー実験結果
case2 $l_1 = 1.2$ $l_2 = 0.55$

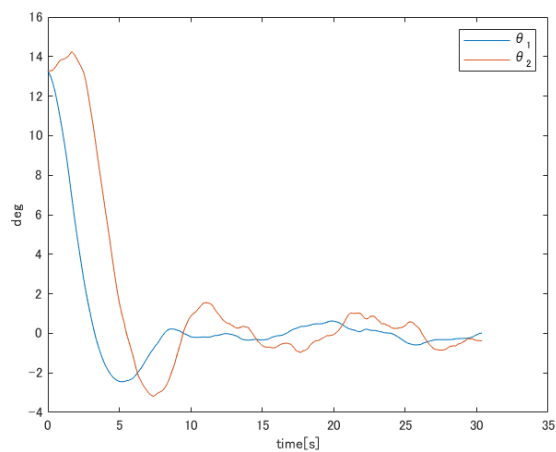


図 2-74 アンカー実験結果
case2 $l_1 = 1.5$ $l_2 = 0.55$

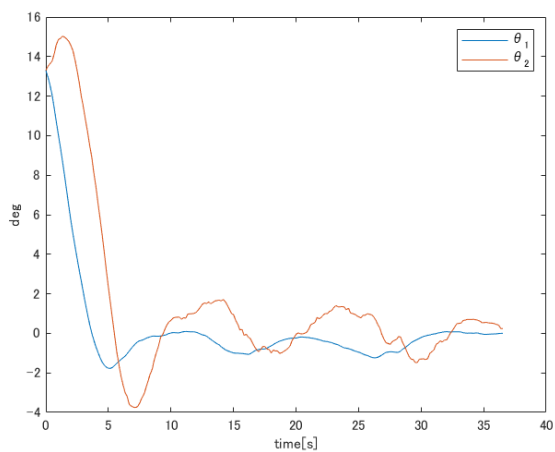


図 2-75 アンカー実験結果
Case2 $l_1 = 1.8$ $l_2 = 0.55$

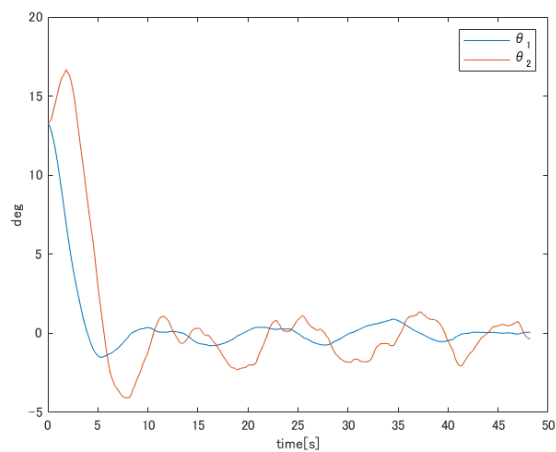


図 2-76 アンカー実験結果
case2 $l_1 = 2$ $l_2 = 0.55$

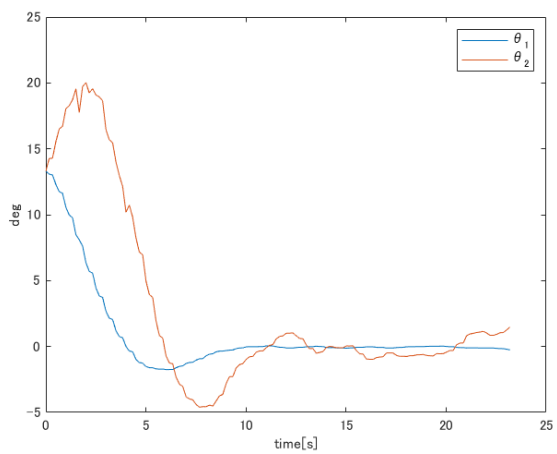


図 2-77 アンカー実験結果
Case2 $l_1 = 2.2$ $l_2 = 0.55$

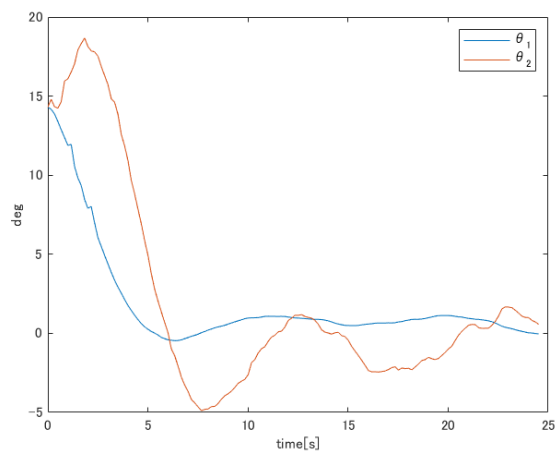


図 2-78 アンカー実験結果
case2 $l_1 = 2.5$ $l_2 = 0.55$

3章 針路安定性解析

本研究では針路安定性を Peters^[6]や重廣ら^[7]によって提案された解析手法により解析した。以下にその解析手法を説明する。

3.1 基礎仮定と座標系

運動方程式を立てるにあたって以下の仮定を設ける。

- ・ 曳船と被曳船は剛体として扱うことができる。
- ・ 水面上の二次元平面的な動きのみを考える。
- ・ 曳航索は1本のトラス要素として取り扱われる

図 3-1 に曳船とアンカーの座標系を示す。空間に固定された座標系 $O - XY$ と曳船ならびにアンカーに固定された船体固定座標系 $G_1 - x_1y_1, G_2 - x_2y_2$ を考える。 $O - XY$ 系における曳航索の始点を (X_0, Y_0) 、曳船に固定された座標系における索の始点とする。索は2船間をつなぐ1本のトラス要素で表され、船とはピン結合により連結されているものとする。アンカーにおける索の結合点は、被曳船に固定された座標系で $(l_2, 0)$ とする。 X 軸と索がなす角度を θ_1 、その長さを l_1 とする。曳船の方位は φ_1 、アンカーの方位角は θ_2 とする。また $\gamma = \theta_1 - \theta_2, \sigma = \varphi_1 - \theta_1$ とおく。

3.2 被曳船の運動方程式

3.2.1 被曳船の運動方程式とその線形化

水面上における船の操縦運動方程式は前後、左右、回転に関する3つの運動方程式として表される。曳航問題では、索による平面運動の自由度が1つ制限されるため、運動方程式の数は最終的に2つになる。

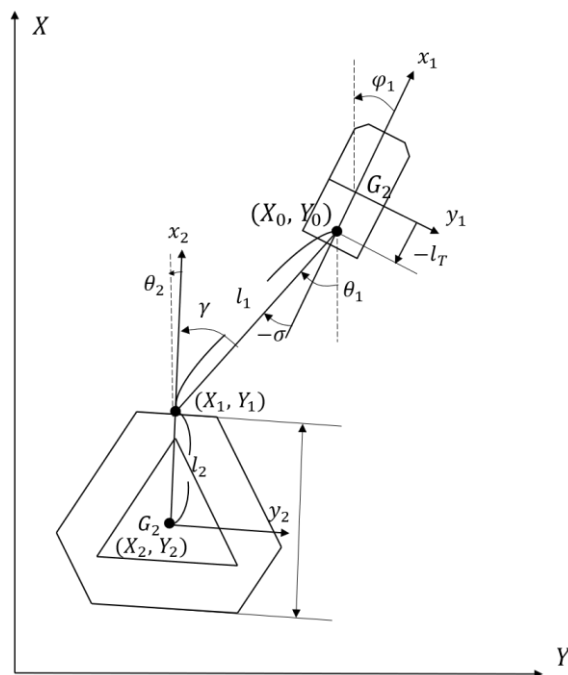


図 3-1 曳船・アンカーの座標系

被曳船の索の連結点ならびに重心の座標 $X_i, Y_i (i = 1, 2)$ は、 θ_i と l_i を介して次のように表される。

$$X_i = X_0 - \sum_{j=1}^i l_j \cos \theta_j, \quad Y_i = Y_0 - \sum_{j=1}^i l_j \sin \theta_j \quad (3.1)$$

船体固定座標系における船の操縦運動方程式は、次のように書かれる。

$$(m_2 + m_{x2})\dot{u}_2 - (m_2 + m_{y2})v_2\dot{\theta}_2 = F_{x2} + F_{Tx} \quad (3.2)$$

$$(m_2 + m_{y2})\dot{v}_2 - (m_2 + m_{x2})u_2\dot{\theta}_2 = F_{y2} + F_{Ty} \quad (3.3)$$

$$(I_{z2} + J_{z2})\ddot{\theta}_2 = M_{z2} + M_{Tz} \quad (3.4)$$

ただし、 m_2 はアンカーの質量、 I_{z2} は慣性モーメントである。 m_{x2}, m_{y2}, J_{z2} は付加質量ならびに付加慣性モーメントである。ここでプロペラや舵等はないと仮定すれば、 F_{x2}, F_{y2}, M_{z2} は運動の減衰力となる。 F_{Tx}, F_{Ty}, M_{Tz} は曳航索張力による外力成分である。それらは索と船体との間に作用する張力を P とすれば

$$\left. \begin{aligned} F_{Tx} &= P \cos \gamma \\ F_{Ty} &= P \sin \gamma \\ M_{Tz} &= Pl_2 \sin \gamma \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

と表される。ここで

$$\left. \begin{aligned} M_x &= m_2 + m_{x2}, & M_y &= m_2 + m_{y2} \\ \hat{F}_x &= F_{x2} + M_y v_2 \dot{\theta}_2, & \hat{F}_y &= F_{y2} + M_x u_2 \dot{\theta}_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

とおき、運動方程式(3.2)(3.3)から P を消去すると

$$M_x \dot{u}_2 \sin \gamma - M_y \dot{v}_2 \cos \gamma = \hat{F}_x \sin \gamma - \hat{F}_y \cos \gamma \quad (3.7)$$

が得られる。(3.7)において、

$$u_2 = \dot{X}_2 \cos \theta_2 + \dot{Y}_2 \sin \theta_2, \quad v_2 = -\dot{X}_2 \sin \theta_2 + \dot{Y}_2 \cos \theta_2 \quad (3.8)$$

の関係式を用いて \dot{u}_2, \dot{v}_2 を消去すると基礎となる運動方程式が得られる。

$$\begin{aligned} & - \sum_{j=1}^2 l_j (M_{x1} \sin \theta_j - M_{y1} \cos \theta_j) \ddot{\theta}_j \\ & = \sum_{j=1}^2 l_j \dot{\theta}_j^2 (M_{x1} \cos \theta_j + M_{y1} \sin \theta_j) + F_1 + F_2 + M_{x1} \ddot{X}_0 + M_{y1} \ddot{Y}_0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

なお、

$$\left. \begin{aligned} M_{x1} &= M_x \sin \gamma \cos \theta_2 + M_y \cos \gamma \sin \theta_2 \\ M_{y1} &= M_x \sin \gamma \cos \theta_2 - M_y \cos \gamma \sin \theta_2 \\ F_1 &= -\hat{F}_x \sin \gamma + \hat{F}_y \cos \gamma \\ F_2 &= M_x \dot{\theta}_2 v \sin \gamma + M_y \dot{\theta}_2 u \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

である。

同様に(3.4)を書き換えると、

$$\begin{aligned}
& (I_{z2} + J_{z2})\ddot{\theta}_2 + \sum_{j=1}^2 l_j (I_{y1} \cos \theta_j - I_{x1} \sin \theta_j) \ddot{\theta}_j \\
& = \sum_{j=1}^2 l_j \dot{\theta}_j^2 (I_{y1} \sin \theta_j + I_{x1} \cos \theta_j) + M_1 + M_2 + I_{x1} \ddot{X}_0 + I_{y1} \ddot{Y}_0
\end{aligned} \tag{3.11}$$

となる。これもまた基礎となる運動方程式の一つであり

$$\left. \begin{aligned}
I_{x1} &= l_2 \sin \gamma (M_x \cos \gamma \cos \theta_2 - M_y \sin \gamma \sin \theta_2) \\
I_{y1} &= l_2 \sin \gamma (M_x \cos \gamma \sin \theta_2 + M_y \sin \gamma \cos \theta_2) \\
M_1 &= -l_2 \sin \gamma (\hat{F}_x \cos \gamma + \hat{F}_y \sin \gamma) + M_z \\
M_2 &= l_2 \sin \gamma (M_x \dot{\theta}_2 v \cos \gamma - M_y \dot{\theta}_2 u \sin \gamma)
\end{aligned} \right\} \tag{3.12}$$

である。

基礎となる運動方程式は(3.9)(3.11)の2つであり、未知数は θ_1, θ_2 である。運動方程式を解いて未知数が既知となると、張力 P は計算でき、 P は次のように表される。

$$P = M_x \dot{u}_2 \cos \gamma + M_y \dot{v}_2 \sin \gamma - \hat{F}_x \cos \gamma - \hat{F}_y \sin \gamma \tag{3.13}$$

さらに θ_1 と θ_2 は微小であると仮定して、線形化された運動方程式を求める。船に作用する流体力は

$$\left. \begin{aligned}
F_x &= X_{uu2} u_2^2 \\
F_y &= Y_{v2} v_2 + Y_{r2} \dot{\theta}_2 \\
M_z &= N_{v2} v_2^2 + N_{r2} \dot{\theta}_2
\end{aligned} \right\} \tag{3.14}$$

と表す。式中の X_{uu2} は船の前後方向の抵抗係数であり、 Y_{v2} , Y_{r2} , N_{v2} , N_{r2} は線形の操縦流体力微係数と呼ばれる。

これらを用いると、最終的には運動方程式(9)(11)は次のように線形化される。

$$\begin{aligned}
& l_1(m_2 + m_{y2})\ddot{\theta}_1 + l_2(m_2 + m_{x2})\ddot{\theta}_2 = Y_{v2} l_1 \dot{\theta}_1 + [Y_{v2} l_2 - Y_{r2} - \dot{X}_0(m_{y2} - m_{x2})] \dot{\theta}_2 \\
& - [\ddot{X}_0(m_2 + m_{y2}) - \dot{X}_0^2 X_{uu2}] \theta_1 - [\ddot{X}_0^2 X_{uu2} - \dot{X}_0 Y_{v2} + \ddot{X}_0(m_{y2} - m_{x2})] \theta_2 - \dot{Y}_0 Y_{v2} + \ddot{Y}_0(m_2 + m_{y2})
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
(I_{z2} + J_{z2})\ddot{\theta}_2 &= -N_{v2} l_1 \dot{\theta}_1 + (-N_{v2} l_2 + N_{r2}) \dot{\theta}_2 - l_2 [\ddot{X}_0^2 X_{uu2} - \ddot{X}_0(m_2 + m_{x2})] \theta_1 \\
& + [l_2 \ddot{X}_0^2 X_{uu2} - \dot{X}_0 N_{v2} - l_2 \ddot{X}_0(m_2 + m_{x2})] \theta_2 + \dot{Y}_0 N_{v2}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

3.2.2 曳船・被曳船系の運動方程式とその線形化

まず、被曳船に関する線形化された運動方程式を考える。曳船は X 軸方向に前進するものとし、その船速は一定の U とする。そのとき、曳船の横流れ速度成分を v_1 、前進速度成分を u_1 とする。 $\varphi_1, \theta_1, \theta_2, v_1$ は微小 $O(\varepsilon)$ とする。そのとき、(3.15)(3.16)中における X_0, Y_0 に関する項は、曳船の運動や曳航点に関するパラメータを用いて次のように線形表示される。

$$\dot{X}_0 = U, \quad \ddot{X}_0 = 0 \tag{3.17}$$

$$\dot{Y}_0 = U \varphi_1 + v_1 + l_T \dot{\varphi}_1, \quad \ddot{Y}_0 = U \dot{\varphi}_1 + \dot{v}_1 + l_T \ddot{\varphi}_1 \tag{3.18}$$

(3.15)(3.16)における X_0, Y_0 に関する項を消去すると、運動方程式は次のように書き換えられる。

$$\begin{aligned}
(m_2 + m_{y2})(-l_1 \ddot{\theta}_1 - l_2 \ddot{\theta}_2 + l_T \ddot{\varphi}_1 + \dot{v}_1) &= -Y_{v2} l_1 \dot{\theta}_1 + [-Y_{v2} l_2 + Y_{r2} + (m_{y2} - m_{x2})U] \dot{\theta}_2 \\
& + [Y_{v2} l_T - (m_2 - m_{y2})U] \dot{\varphi}_1 - X_{uu2} U^2 (\theta_1 - \theta_2) + Y_{v2} [v_1 + U(\varphi_1 - \theta_2)]
\end{aligned} \tag{3.19}$$

$$(I_{z2} + J_{z2})\ddot{\theta}_2 = -N_{v2}l_1\dot{\theta}_1 + (N_{r2} - N_{v2}l_2)\dot{\theta}_2 - N_{v2}l_T\dot{\phi}_1 - l_2X_{uu2}U^2(\theta_1 - \theta_2) + N_{v2}[v_1 + U(\phi_1 - \theta_2)] \quad (3.20)$$

次に、曳船の運動方程式を考える。曳船はプロペラと舵を備えた船と仮定する。曳船の横流れ速度 v_1 と各頭角速度は $\dot{\phi}_1$ に関する線形化された運動方程式は次のように書かれる。

$$(m_1 + m_{y1})\dot{v}_1 + (m_1 + m_{x1})U\dot{\phi}_1 = Y_{v1}v_1 + Y_{r1}\dot{\phi}_1 + Y_\delta\delta + F_{Ty} \quad (3.21)$$

$$(I_{z1} + J_z)\dot{\phi}_1 = N_{v1}v_1 + N_{r1}\dot{\phi}_1 + N_\delta + F_{Ty}l_T \quad (3.22)$$

ただし、 m_1 は曳船の質量、 I_{z1} は慣性モーメント、 m_{x1} , m_{y1} , J_{z1} は付加質量ならびに付加慣性モーメントである。 Y_{v1} , Y_{r1} , N_{v1} , N_{r1} は線形の操縦流体力微係数である。 Y_δ , N_δ はそれぞれ操舵によって発生する横力ならびに回頭モーメントであり δ は舵角である。 F_{Ty} は索張力により曳船に作用する横力成分であり、次のように表される。

$$F_{Ty} = -P(\theta_1 - \phi_1) + O(\varepsilon^2) \quad (3.23)$$

索に作用する線形化された張力は P は $P = -X_{uu2}U^2$ と表されるので、 F_{Ty} は

$$F_{Ty} = X_{uu2}U^2(\theta_1 - \phi_1) + O(\varepsilon^2) \quad (3.24)$$

となる。上式を用いて、(3.21)(3.22)における F_{Ty} を消去すると、次式が得られる。

$$(m_1 + m_{y1})\dot{v}_1 = Y_{v1}v_1 + [Y_{r1} - (m_1 + m_{x1})U]\dot{\phi}_1 + X_{uu2}U^2(\theta_1 - \phi_1) + Y_\delta\delta \quad (3.25)$$

$$(I_{z1} + J_{z1})\dot{\phi}_1 = N_{v1}v_1 + N_{r1}\dot{\phi}_1 + X_{uu2}U^2(\theta_1 - \phi_1)l_T + N_\delta\delta \quad (3.26)$$

3.2.3 被曳船の針路安定性

(3.15)は $(1/2)\rho L d U^2$ で、(3.16)は $(1/2)\rho L_2 d_2 U^2$ で割って無次元化する。なお $U \equiv \dot{X}_0$ であり、 L , d はそれぞれ被曳船の船長、喫水である。すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} l'_1(m'_2 + m'_{y2})\ddot{\theta}'_1 + l'_2(m'_2 + m'_{y2})\ddot{\theta}'_2 &= Y'_{v2}l'_1\dot{\theta}'_1 \\ &+ (Y'_{v2}l'_2 - Y'_{r2} + m'_{x2} - m'_{y2})\dot{\theta}'_2 + [X'_{uu2} - (m'_2 + m'_{x2})\dot{X}'_0]\theta_1 \\ &- [X'_{uu2} - Y'_{v2} + (m'_{y2} - m'_{x2})\dot{X}'_0]\theta_2 - Y'_{v2}\dot{Y}'_0 + (m'_2 + m'_{y2})\ddot{Y}'_0 \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} (I'_{z2} + J'_{z2})\ddot{\theta}'_2 &= -N'_{v2}l'_1\dot{\theta}'_1 + (-N'_{v2}l'_2 + N'_{r2})\dot{\theta}'_2 - l'_2[X'_{uu2} - \dot{X}'_0(m'_2 + m'_{x2})]\theta_1 \\ &+ [l'_2X'_{uu2} - N'_{v2} - l'_2\dot{X}'_0(m'_2 + m'_{x2})]\theta_2 + N'_{v2}\dot{Y}'_0 \end{aligned} \quad (3.28)$$

\dot{X}'_0 が関わる項は広義の復元力として、 \dot{Y}'_0 と \ddot{Y}'_0 に関わる項は強制力として作用していることがわかる。なお(3.17)(3.18)において次に示したものによって無次元化している。

$$\left. \begin{aligned} m'_2, m'_{x2}, m'_{y2} &= \frac{m_2, m_{x2}, m_{y2}}{(1/2)\rho L_2^2 d_2}, & I'_{z2}, J'_{z2} &= \frac{I_{z2}, J_{z2}}{(1/2)\rho L_2^4 d_2} \\ Y'_v &= \frac{Y_{v2}}{(1/2)\rho L_2 d_2 U}, & N'_v &= \frac{N_v}{(1/2)\rho L_2^2 d_2 U} \\ Y'_r &= \frac{Y_r}{(1/2)\rho L_2^2 d_2 U}, & N'_r &= \frac{N_r}{(1/2)\rho L_2^2 d_2 U} \\ X'_{uu} &= \frac{X_{uu}}{(1/2)\rho L_2 d_2} \end{aligned} \right\}$$

(3.23)(3.24)において同次項を0 ($\dot{Y}'_0 = \ddot{Y}'_0 = 0$)とおく。得られた式は θ_1 と θ_2 の連成を考慮した振動の式となっていることがわかる。ここで、

$$\theta_1 = C_1 e^{\lambda t}, \theta_2 = C_2 e^{\lambda t} \quad (3.29)$$

とおくと、(17)(18)より、次の特性方程式が得られる。

$$D_4 \lambda^4 + D_3 \lambda^3 + D_2 \lambda^2 D_1 \lambda + D_0 = 0 \quad (3.30)$$

ただし

$$D_4 = l'_1(m'_2 + m'_{y2})(l'_{z2} + J'_{z2}) \quad (3.31)$$

$$D_3 = -l'_1[(m'_2 + m'_{y2})N'_{r2} + (l'_{z2} + J'_{z2})Y'_{v2}] \quad (3.32)$$

$$D_2 = l'_1[(m'_2 + m'_{x2} - Y'_{r2})N'_{v2} + Y'_{v2}N'_{r2}] - X'_{uu2}[l'_2(m'_2 + m'_{y2})(l'_1 + l'_2) + l'_{z2} + J'_{z2}] \quad (3.33)$$

$$D_1 = X'_{uu2}[N'_{r2} + (l'_1 + l'_2)l'_2 Y'_{v2} - l'_2(Y'_{r2} - m'_{x2} + m'_{y2} + N'_{v2})] - X'_{uu2}l'_1 N'_{v2} \quad (3.34)$$

$$D_0 = [X'_{uu2} - (m'_2 + m'_{x2})\ddot{X}'_0][l'_2 Y'_{v2} - N'_{v2} - l'_2 \ddot{X}'_0(m'_2 + m'_y)] \quad (3.35)$$

であり(3.30)がフルビッツの安定条件

$$D_0, D_1, D_2, D_3, D_4 > 0 \quad (3.36)$$

$$D_5 \equiv D_3 D_2 D_1 - D_3^2 D_0 - D_4 D_1^2 > 0 \quad (3.37)$$

を満たせば、微小攪乱は減衰し、定常状態へと収束する。

曳船の前後方向加速度が0 ($\ddot{X}'_0 = 0$)の場合、 D_2, D_1, D_0 は次式が得られる

$$D_2 = l'_1[(m' + m'_x - Y'_r)N'_v + Y'_v N'_r] - X'_{uu}[l'_2(m' + m'_y)(l'_1 + l'_2) + I' + J'_z] \quad (3.38)$$

$$D_1 = X'_{uu}[N'_r + (l'_1 + l'_2)(l'_2 Y'_v - N'_v) - l'_2(Y'_r - m'_x + m'_y)] \quad (3.39)$$

$$D_0 = X'_{uu}(l'_2 Y'_v - N'_v) \quad (3.40)$$

3.2.4 曳船・被曳船系の針路安定性

次に、曳船と被曳船の運動連成を考慮して、針路安定性を考える。この場合には、運動方程式の特性方程式の次数が高く、問題を解析的に取り扱うことは困難になる。問題を解くには、数値的な取り扱いを必要とする。曳船と被曳船の運動方程式(3.19)(3.20)(3.25)(3.26)を状態方程式として表すと次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \dot{v}_1 \\ \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & 0 & 0 & a_3 & a_4 & 0 \\ a_5 & a_6 & 0 & 0 & a_7 & a_8 & 0 \\ a_9 & a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{16} & a_{17} & a_{18} & a_{19} & a_{20} & a_{21} & a_{22} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \phi_1 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} a_{23} \\ a_{24} \\ a_{25} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \delta \quad (3.41)$$

ここで $a_1 \sim a_{25}$ は以下の通りである。

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{Y_{v1}}{(m_1 + m_{x1})}, & a_2 &= \frac{[Y_{r1} - (m_1 + m_{x1})U]}{m_1 + m_{y1}}, & a_3 &= -\frac{X_{uu2}U^2}{m_1 + m_{y1}}, & a_4 &= -a_3 \\
a_5 &= \frac{N_{v1}}{(I_{z1} + J_{z1})}, & a_6 &= \frac{N_{r1}}{(I_{z1} + J_{z1})}, & a_7 &= -\frac{X_{uu2}U^2 l_T}{(I_{z1} + J_{z1})}, & a_8 &= -a_7 \\
a_{16} &= \frac{N_{v2}}{(I_{z2} + J_{z2})}, & a_{17} &= \frac{N_{v2} l_T}{(I_{z2} + J_{z2})}, & a_{18} &= -\frac{N_{v2} l_1}{(I_{z2} + J_{z2})}, & a_{19} &= \frac{N_{r2} - N_{v2} l_1}{(I_{z2} + J_{z2})} \\
a_{20} &= \frac{N_{v2} U}{(I_{z2} + J_{z2})}, & a_{21} &= -\frac{X_{uu2} U^2 l_2}{(I_{z2} + J_{z2})}, & a_{22} &= \frac{X_{uu2} U^2 l_2 - N_{v2} U}{(I_{z2} + J_{z2})} \\
a_9 &= \frac{\left[-l_2 a_{16} + l_T a_5 + a_1 - \frac{Y_{v2}}{(m_2 + m_{y2})} \right]}{l_1}, & a_{10} &= \frac{\left[-l_2 a_{17} + l_T a_6 + a_2 + U - \frac{Y_{v2} l_T}{(m_2 + m_{y2})} \right]}{l_1} \\
a_{11} &= \frac{\left[-l_2 a_{18} + \frac{Y_{v2} l_1}{(m_2 + m_{y2})} \right]}{l_1}, & a_{12} &= \frac{\left[-l_2 a_{19} + \frac{Y_{r2} - (m_{y2} - m_{x2}) - Y_{v2} l_T}{(m_2 + m_{y2})} \right]}{l_1} \\
a_{13} &= \frac{\left[-l_2 a_{20} + l_T a_7 + a_3 - \frac{Y_{v2} U}{(m_2 + m_{y2})} \right]}{l_1}, & a_{14} &= \frac{\left[-l_2 a_{21} + l_T a_8 + a_4 + \frac{X_{uu2} U^2}{(m_2 + m_{y2})} \right]}{l_1} \\
a_{15} &= \frac{\left[-l_2 a_{22} + \frac{Y_{v2} U - X_{uu2} U^2}{(m_2 + m_{y2})} \right]}{l_1}, & a_{23} &= \frac{Y_\delta}{(m_1 + m_{x1})}, & a_{24} &= \frac{N_\delta}{(I_{z1} + J_{z1})}, & a_{25} &= \frac{(l_T a_{24} + a_{23})}{l_1}
\end{aligned}$$

(3.41)右辺第1項の7×7の正方行列のすべての固有値(運動方程式の特性方程式の解)を数値的に求め、その実部がすべて負であれば運動は安定、1つでも正を示す場合には運動は不安定となる。

3.3 解析に使用するパラメータ

本解析ではアンカーの質量 m 、付加質量 m_x, m_y 、慣性モーメント I_z 、付加慣性モーメント J_z 、前後方向の抵抗係数 X_{uu} 、操縦流体力微係数 Y_v, Y_r, N_v, N_r を使用する。以下にそれぞれの導出について説明する。

- ・アンカーの質量 m 、慣性モーメント I_z

アンカーの基本設計から質量と慣性モーメントを算出した。

- ・付加質量 m_x, m_y 、慣性モーメント I_z

HydroStarによりアンカーに働く流体力係数(付加質量、慣性モーメント)を算出した。

- ・前後方向の抵抗係数 X_{uu}

回流水槽で六分力計(WEF-6A500-10-RCD-B)を用いて 5° ずつ回転させ計測した。流速は $U=0.35, 0.45, 0.55$ m/sの3種類で行った。図3-2に実験に使用した検力計を示す。図3-3に計測の様子を示す。図3-4,3-5に測定した無次元化した X_{uu}' と揚力Clを示す。



図 3-2 六分力計



図 3-3 計測の様子

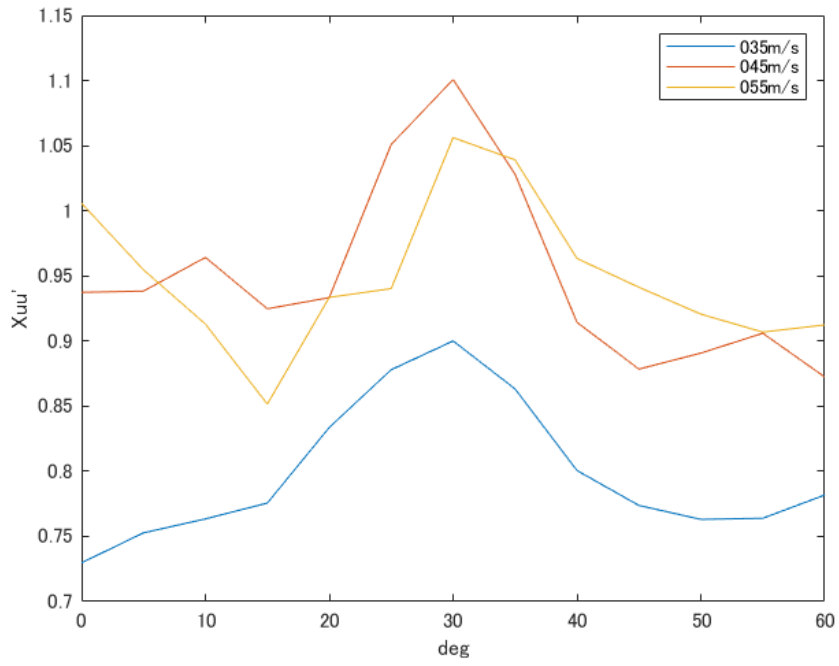


図 3-4 各角度の $X_{uu'}$

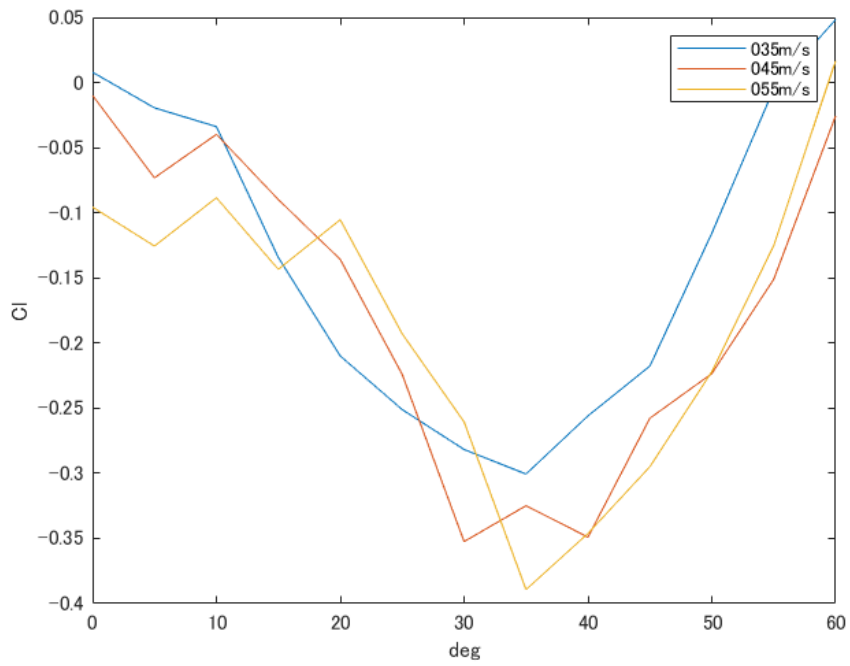


図 3-5 各角度の Cl

・操縦流体力微係数 Y_v, Y_r, N_v, N_r

一般的な船の形状の場合、経験則から船の主要目から流体力微係数が推定できる簡便な式が、井上らによって提案されている。^[8] しかしアンカーのような喫水が大きく三角形の形状の場合、この式の適用することが出来ない。そこで本研究では2章で行った実験の振れまわり運動の計測結果から以下に示す最小二乗法を用いて流体力微係数を推定した。(3.15)(3.16)において同次項を0($\dot{Y}'_0 = \dot{Y}'_0 = 0$)、曳船の前後方向加速度が0($\ddot{X}'_0 = 0$)とすると次式が得られる。

$$\begin{aligned} l'_1(m' + m'_y)\ddot{\theta}'_1 + l'_2(m' + m'_y)\ddot{\theta}'_2 - (m'_x - m'_y)\dot{\theta}'_2 - X'_{uu}(\theta_1 - \theta_2) \\ = Y'_v(l'_1\dot{\theta}'_1 + l'_2\dot{\theta}'_2 + \theta_2) - Y'_r\dot{\theta}'_2 \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$(I' + J'_z)\ddot{\theta}'_2 - X'_{uu}(-l'_2\theta_1 + l'_2)\theta_2 = N'_v(-l'_1\dot{\theta}'_1 - l'_2\dot{\theta}'_2 - \theta_2) + N'_r\theta_2 \quad (3.43)$$

ここで

$$\begin{aligned} A_{11} &= l'_1\dot{\theta}'_1 + l'_2\dot{\theta}'_2 + \theta_2 & A_{21} &= 0 \\ A_{12} &= -\dot{\theta}'_2 & A_{22} &= 0 \\ A_{13} &= 0 & A_{23} &= -l'_1\dot{\theta}'_1 - l'_2\dot{\theta}'_2 - \theta_2 \\ A_{14} &= 0 & A_{24} &= \theta_2 \end{aligned}$$

$$B_1 = l'_1(m' + m'_y)\ddot{\theta}'_1 + l'_2(m' + m'_y)\ddot{\theta}'_2 - (m'_x - m'_y)\dot{\theta}'_2 - X'_{uu}(\theta_1 - \theta_2)$$

$$B_2 = (I' + J'_z)\ddot{\theta}'_2 - X'_{uu}(-l'_2\theta_1 + l'_2)\theta_2$$

とし、実験により得られた θ_1, θ_2 の時系列の結果を用いることで以下の行列式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} A_{11}(0) & A_{12}(0) & A_{13}(0) & A_{14}(0) \\ A_{11}(1) & A_{12}(1) & A_{13}(1) & A_{14}(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{11}(t) & A_{12}(t) & A_{13}(t) & A_{14}(t) \\ A_{21}(0) & A_{22}(0) & A_{23}(0) & A_{24}(0) \\ A_{21}(1) & A_{22}(1) & A_{23}(1) & A_{24}(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{21}(t) & A_{22}(t) & A_{23}(t) & A_{24}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y'_v \\ Y'_r \\ N'_v \\ N'_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1(0) \\ \vdots \\ B_1(t) \\ B_2(0) \\ \vdots \\ B_2(t) \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

(31)の左辺第1項を M 、左辺第2項を x 、右辺を B とおき、(3.45)を計算することで流体力微係数を推定した。

$$x = (M^T M)^{-1} M^T B \quad (3.45)$$

3.4 針路安定性解析結果

3.4.1 アンカーの針路安定性

図 6~8 に 3.2.3 で述べた手法により行った針路安定性解析の結果を示す。解析結果と実験を比較するため、図中に実験結果も併せて示している。図中の黒色で示した領域が針路不安定領域であり、白色で示した領域が針路安定領域である。また図中の赤色の●で示した記号は、実験で安定したことを表し、赤色の×で示した記号は実験で不安定であったことを示している。横軸に係留長さの無次元値 l_1 、縦軸にアンカーにおける重心と曳航点の距離の無次元値 l_2 を取っている。流速が速くなるほど不安定領域が小さくなるのがわかる。図 3-4 の測定結果から、流速が速くなるにつれて前後方向の抗力係数 X_{uu}' が大きくなっていることがわかる。これにより安定領域が変化していると推定する。実験の結果と解析結果はほぼ一致しており、振れまわり運動から最小二乗法を用いた手法により操縦流体力微係数は適切に計算されていると考える。実験結果の中で、黒色の不安定領域内で安定であったケースがあるが回流水槽の壁面の影響や流体力により喫水が変化していることが原因であると考えられる。

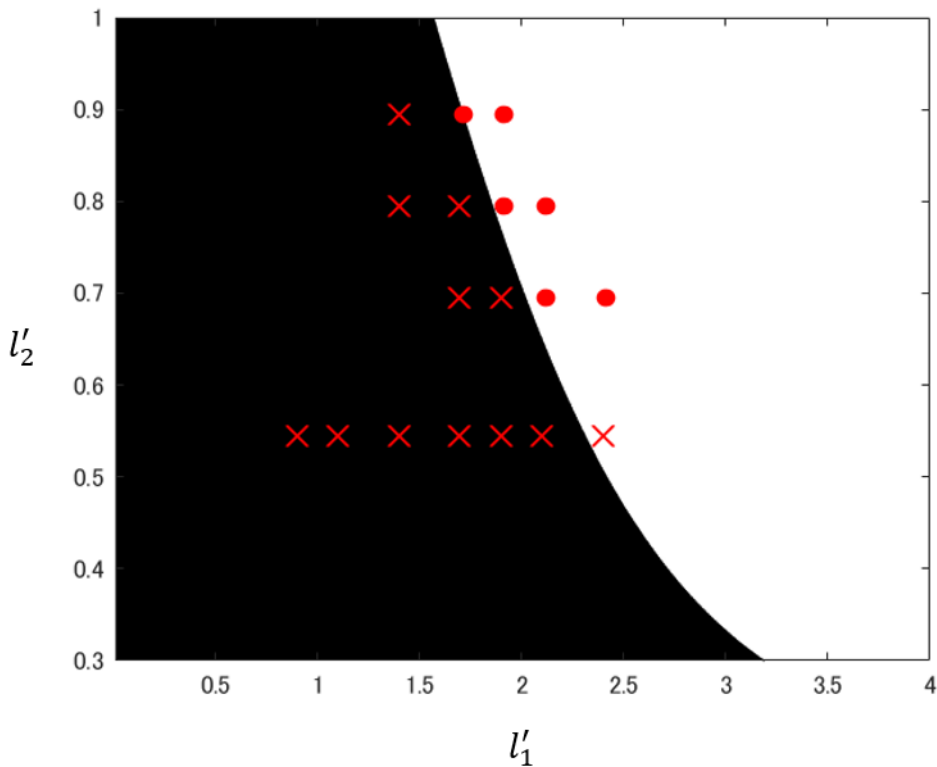


図 3-6 $U=0.35$ m/s 針路安定領域

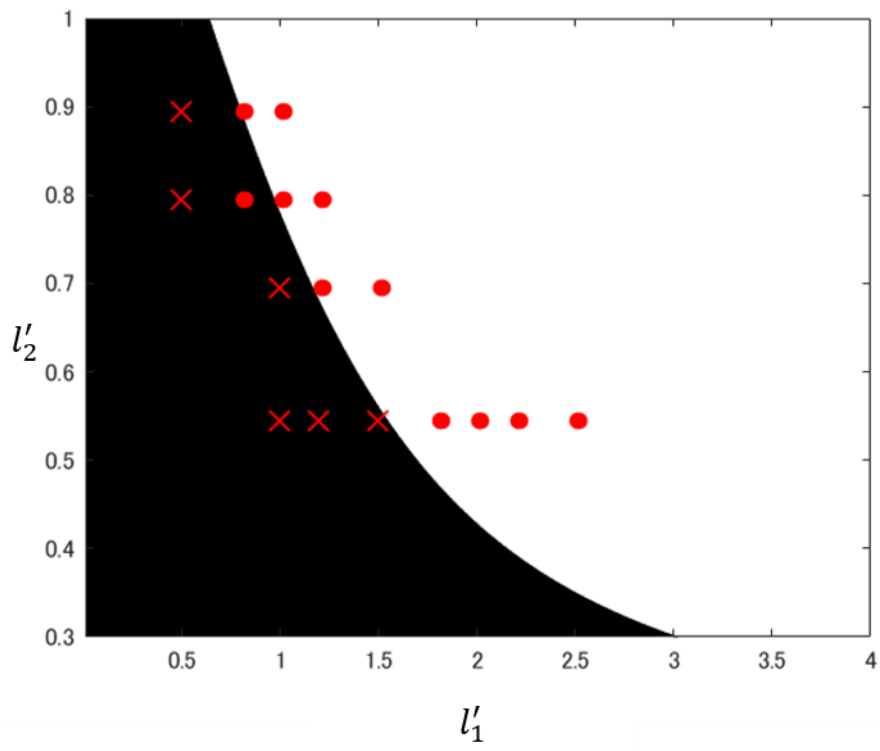


图 3-7 $U=0.45$ m/s 針路安定領域

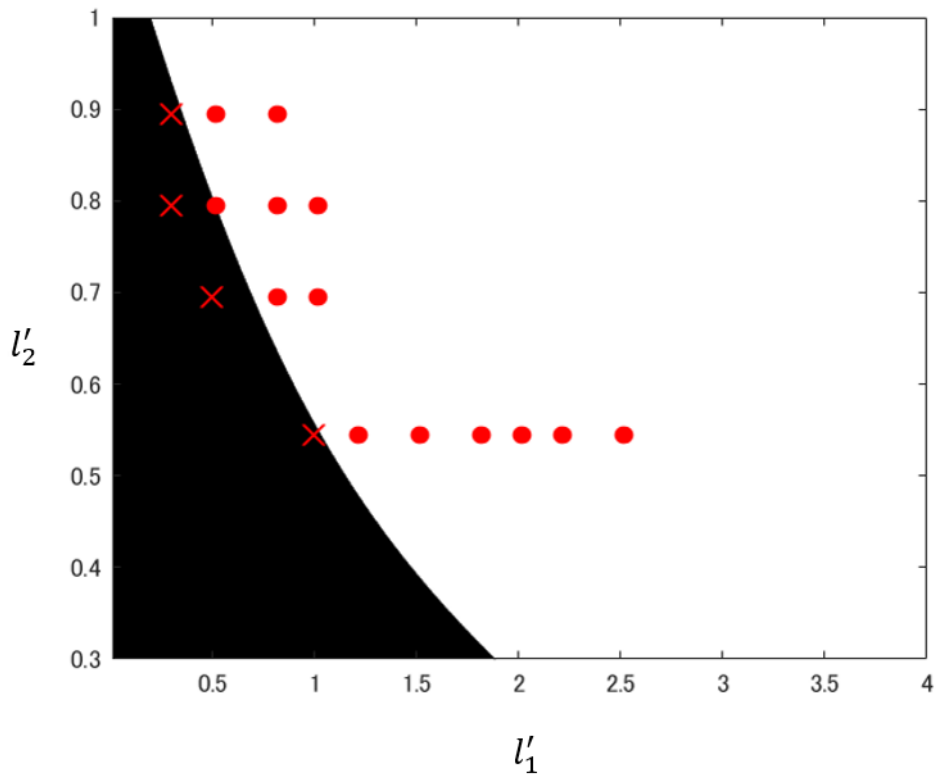


图 3-8 $U=0.55$ m/s 針路安定領域

3.4.1 曳船とアンカーの針路安定性

図 3-9~11 に 3.2.4 で述べた手法により、曳船との運動連成を考慮した場合の針路安定性解析の結果を示す。計算の対象としてアンカーと表 3-1 に示す主要目を持つ曳船を用いる^[9]。図中の黒色で示した領域が針路不安定領域であり、白色で示した領域が針路安定領域である。横軸に係留長さの無次元値 l'_1 、縦軸にアンカーにおける重心と曳航点の距離の無次元値 l'_2 を取っている。曳船との運動連成を考慮したことにより、アンカー単体の場合よりも黒い領域が増大し、不安定領域が増えていることがわかる。0.35m/s の場合、安定領域が完全に消失している。曳船との運動連成の影響により、本来安定して曳航できるはずの領域で、不安定性が生じたためである。

表 3-1 曳船の主要目

船長(m)	40.0
幅(m)	9.0
喫水(m)	2.2
排水容積(m ²)	494.7

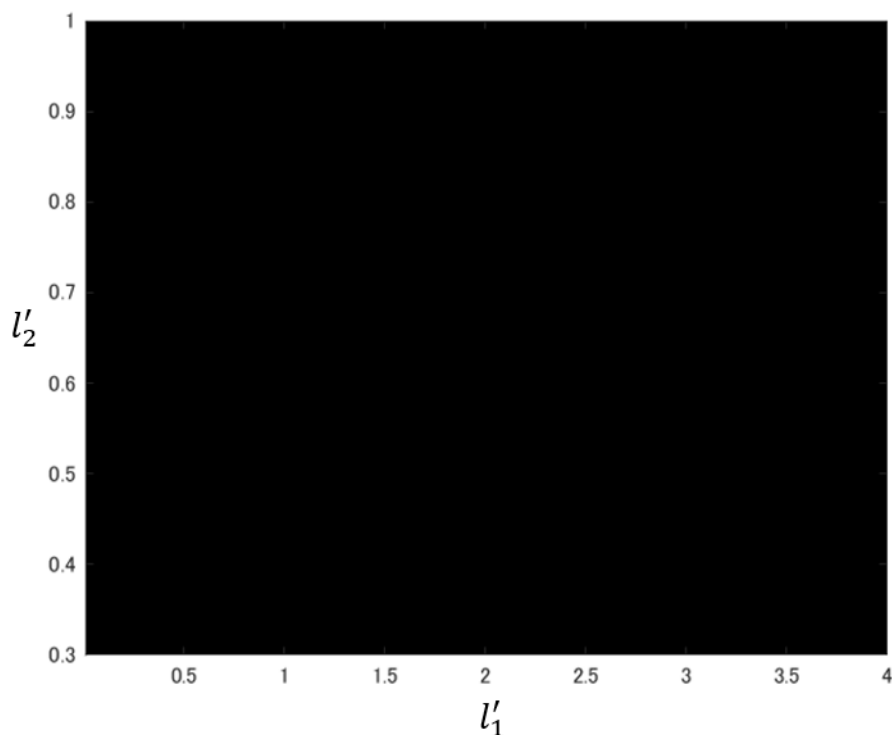


図 3-9 $U=0.35\text{m/s}$ 連結針路安定領域

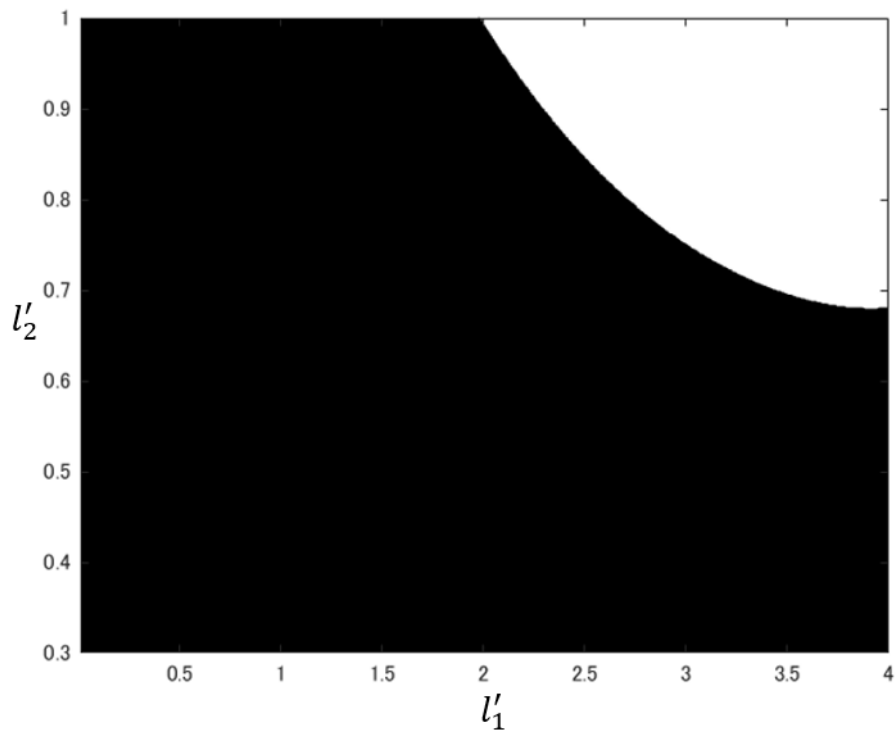


図 3-10 $U=0.45\text{m/s}$ 連結針路安定領域

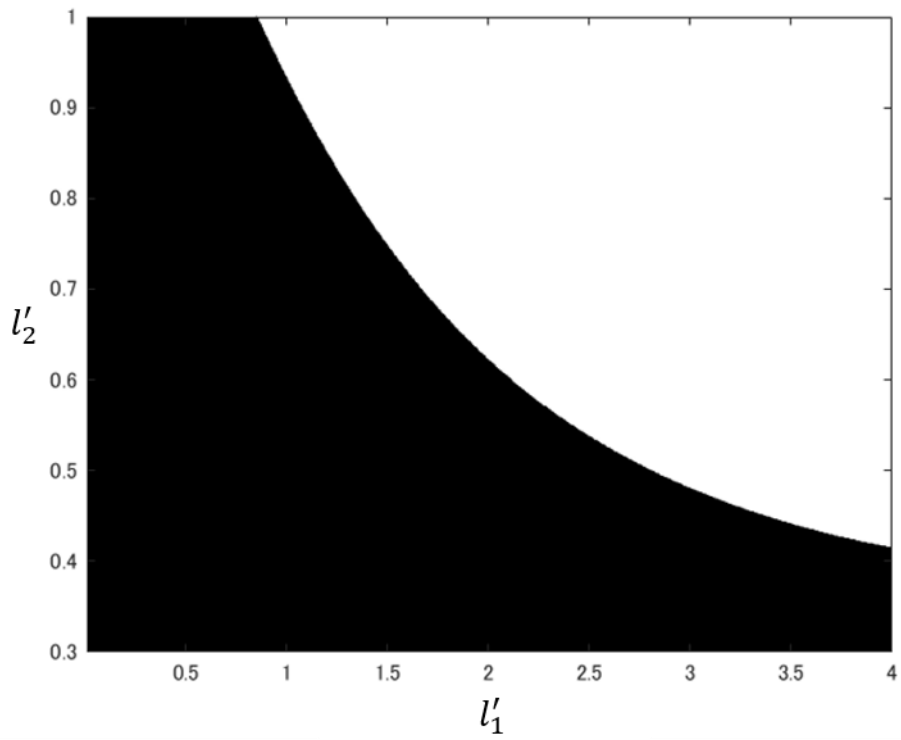


図 3-11 $U=0.55\text{m/s}$ アンカー針路安定領域

4章 総括

4.1 結言

本論文では浮体式洋上送電塔の曳航中の安定性について研究を行った。

実験では回流水槽でアンカーとタワーの振れまわり運動の計測し、針路安定性の評価を行った。この実験によりタワーは針路安定であることが確認できたため、特にアンカーの針路安定性に着目し研究を進めた。タワーの針路安定理由として、質量が小さく、受ける針路復元流体力が慣性力と比べて相対的に大きいことが考えられる。それに対してアンカーはタワーに比べ質量が大きく、振れまわり運動中において復元力が相対的に小さいので針路不安定になりやすいと考えられる。さらに、曳航針路安定性は曳航システムの固有周期に大きく左右されるので、実験では流速、索長さ、係留位置の影響を調べた。

振れまわり運動に関する実験結果を用いた最小二乗法でアンカーの操縦流体力微係数を推定する手法を提案した。最小二乗法により得られた操縦流体力微係数を用いて、針路安定性解析を行い、得られた結果と実験結果を比較することにより、提案した推定手法の精度を確認した。実験結果と数値解析結果はほぼ一致しており、振れまわり運動による操縦流体力微係数の推定は適切に行えていると考える。不安定領域について実験結果と解析結果が一致しない点はいくつもあった。これら不一致の点は回流水槽の壁面影響や、各実験ケースの喫水やトリムの変化による影響によるものと推測している。数値解析ではそれらの影響を反映できないため誤差が生じると考える。

アンカーの針路安定性を改善するためにアンカーにフィン装着して実験を行った。フィンをアンカーの後方に取り付けた case1 と斜め後方に取り付けた case2 の二種類の条件を用意し、その実験結果を比較した。case1、case2 ともに針路安定性は改善した。フィンを後方に取り付けることで流体力の着力点が後ろにずれたため安定しやすくなったと考える。特に case2 のほうが安定性の改良がより顕著で、フィンを斜めにつけたことでアンカーの受ける流体力がより大きくなったことが理由であると推測する。今後模型に取り付けたフィンの大きさと配置が構造の振動と強度、および全体コストへの影響についてさらに検討する必要がある。

曳船との運動連成を考慮したアンカーの針路安定性解析も行った。アンカー単体の場合よりも不安定の領域が増大し、小型船により曳航を実施する際針路安定性の改善が必要である。曳船との運動連成の解析から、アンカー単体の解析で安定した曳航領域に、不安定になることが示されている

。

4.2 今後の展望

本研究では、特にアンカーに注目して研究を進めた。今後はアンカーとタワー、曳船を連結させた場合の針路安定性についての検討が必要である。また図 4-1 に示す係留を 2 本にした追加実験を行った。実験結果を図 4-2 に示す。条件として $U=0.35 \text{ m/s}$, $l_1 = 1$, $l_2 = 0.55$ としており図 2-1 の条件と同じである。図 4-2 の結果からわかるように係留を 2 本にすると 1 本よりも安定する傾向があることが明らかになった。これにより今後は係留の数を 2 本にした場合の接続方法と針路安定性に関する研究も進めていきたい。

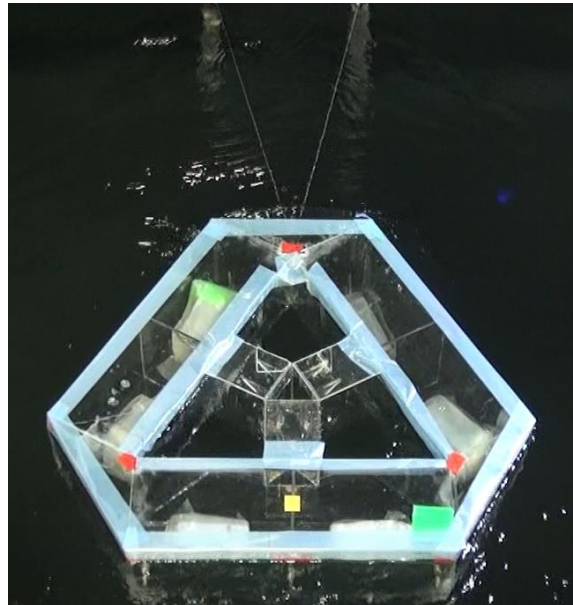


図 4-1 係留 2 本のアンカー

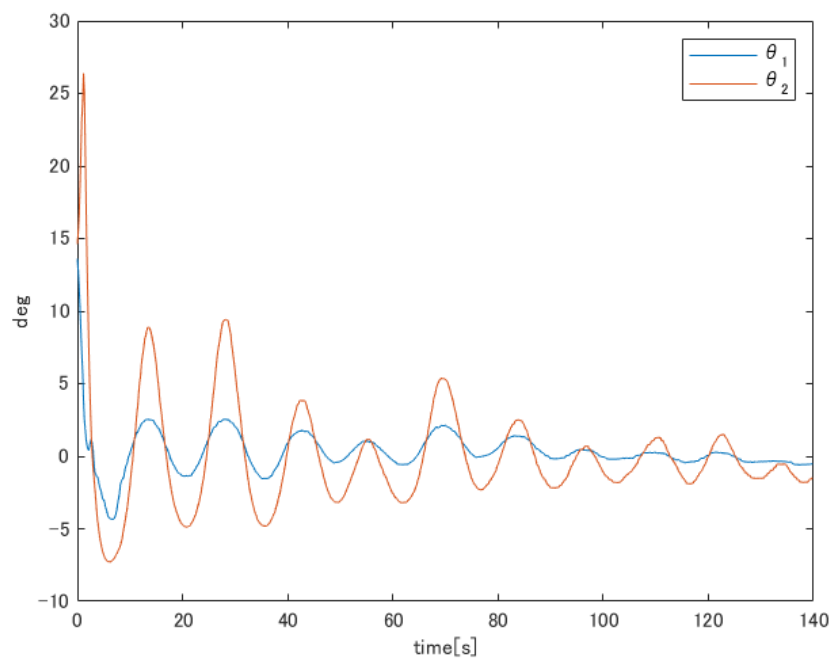


図 4-2 係留 2 本 アンカー結果

次にアンカーとタワーを連結させて実験を行った。アンカーとタワーの前後を入れ替えた2種類の条件を用意した。図4-3,4-4に実験の様子を示す。タワーが前の場合を case1、アンカーが前の場合を case2とする。

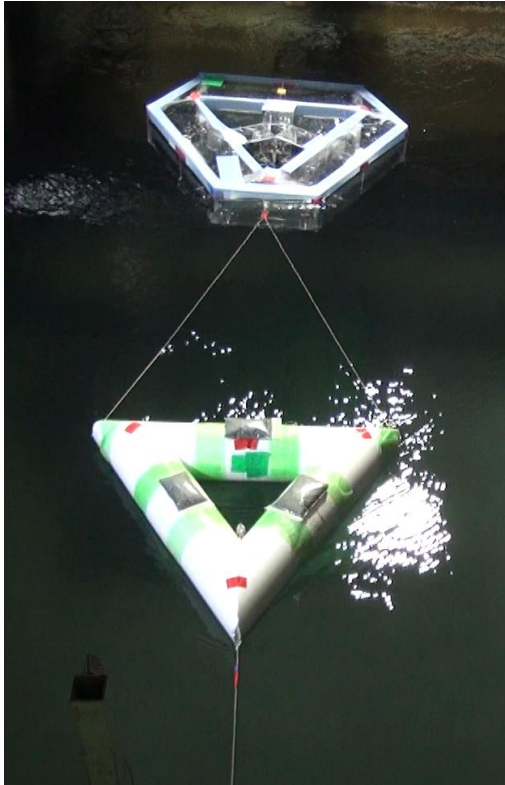


図 4-3 アンカー、タワー連結実験
case1

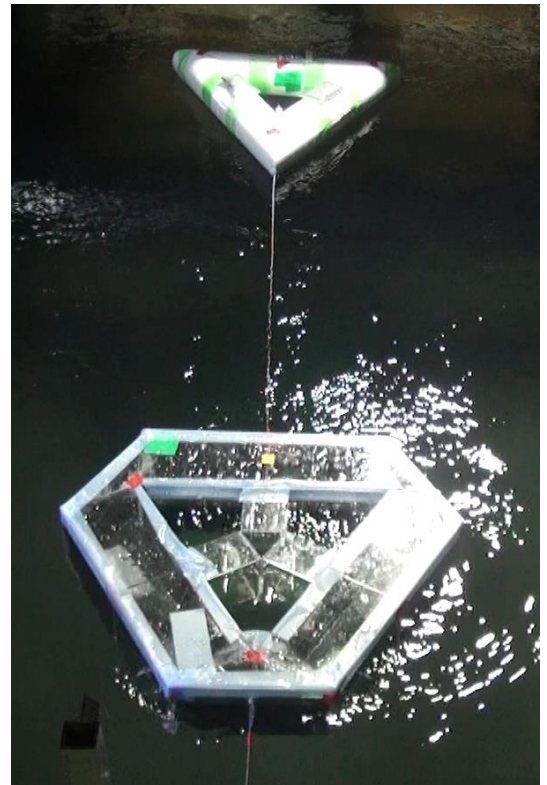


図 4-4 アンカー、タワー連結実験
case2

case1 のアンカーの振れまわり運動の結果を図4-5に示す。縦軸には振幅 y を初期の振幅 y_0 で無次元化したものを取っている。case1 は振れまわり運動が収束せず不安定であった。case2 では前のアンカーは振れまわり運動は発生せず、タワーの係留の角度が平衡点に戻らない状態を維持し続けた。図4-6にその様子を示す。アンカーが安定していたのはタワーを連結させたことにより前後方向の抗力が大きくなったことが理由であると考え。またタワーが平衡点に戻れなかったことは、アンカーから発生した渦が原因であると考え。タワーの浮体部分は喫水が浅く、質量もアンカーに比べ小さいため、渦による影響を大きく受けたと推定している。また一度タワーとアンカーを近づけるとアンカー後流の負圧によりタワーがアンカーに密着する現象もみられた(図4-7)。これらの結果や3章で示した連結曳航安定性解析からもわかるように、現時点でのアンカーの形状で連結曳航は針路不安定であることが明らかになった。今後はアンカーにフィンをつけての連結曳航実験や、係留の接続方法等を検討していく必要がある。また連結曳航においてアンカー後方の渦による影響を検討するべきである。また曳船、タワー、アンカーの連結についても研究を進めていく必要がある。

さらに今回はアンカーの振れまわり運動の計測実験から操縦流体力微係数を推定したが、それらの真値を求め比較を行っていききたい。

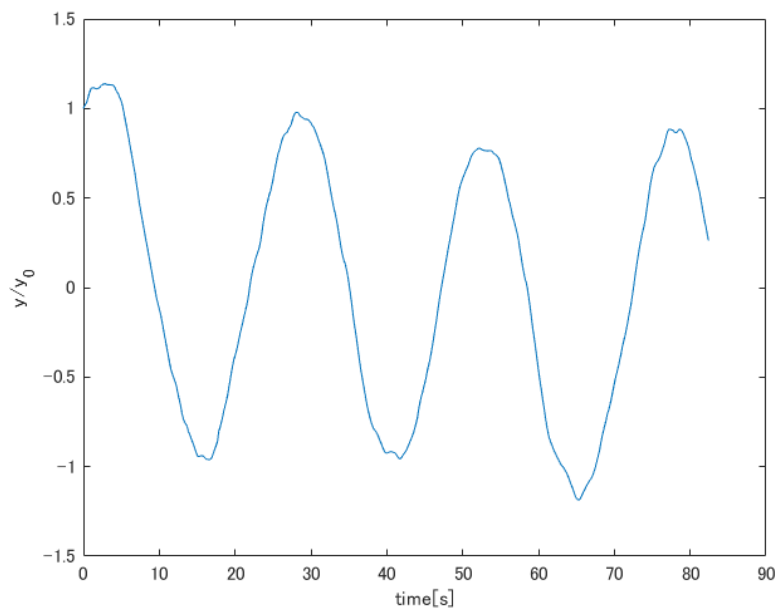


図 4-5 case1 結果

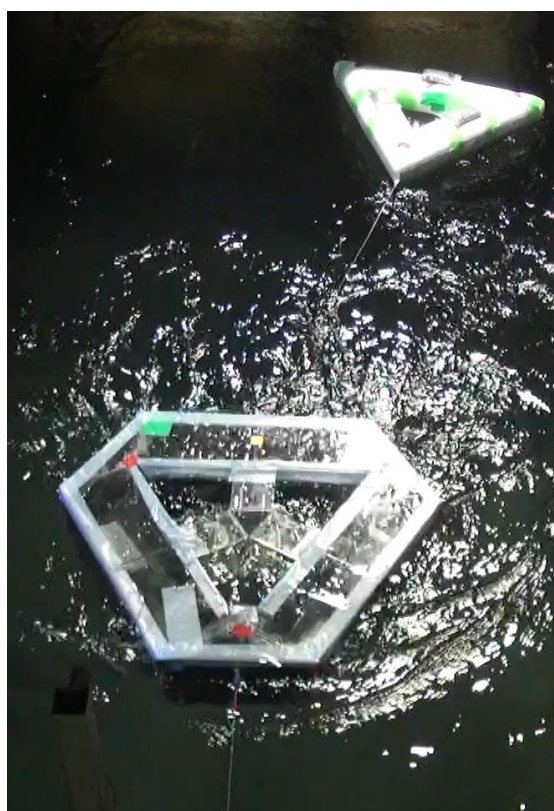


図 4-6 case2 平衡点からずれた状態を維持する様子

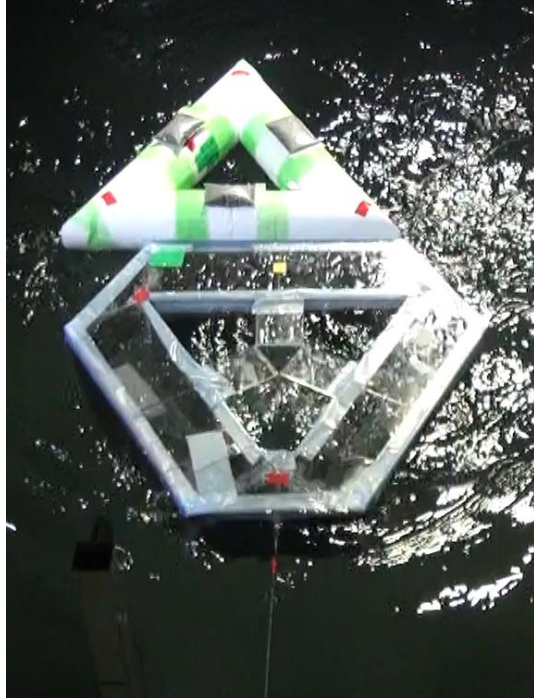


図 4-7 case2 渦の影響により密着する様子

参考文献

- [1] 福島洋上風力コンソーシアム
<http://www.fukushima-forward.jp/index.html>
- [2] 越智勇太,浮体式洋上送電塔の曳航に関する研究,九州大学修士論文,2020
- [3] 島内和夫, 浮体式洋上送電塔の設置に関する研究,九州大学修士論文,2020
- [4] 北島鯉久人,TLP 型洋上タワーのアンカー設置方法に関する研究,九州大学修士論文,2018
- [5] Hironori Yasukawa and Ahmad Fitriady, Course stability of a ship towing system, Ship Technology Research,58(1);4-23,2011
- [6] Peters, B.H, Discussion in the paper of strandhagen,SNAME,58;46-52,1950
- [7] 重廣律男,曳航・被曳航船系の操縦モデル, 関西造船誌 第 230 号;153-164,1998
- [8] Inoue, S., Hirano, M.and Kijima, K.: Hydrodynamic Derivatives on Ship Maneuvering, International Shipbuilding Progress,28(321);112-124,1981
- [9] Koh, K. K, Yasukawa, H., Hirata,N. and Kose, K.:Maneuvering Simulations of Pusher-Barge System,J.Marine Science and Tecnology,13(2);117-126,2008

謝辞

多くの方にお力添えいただいたおかげで、本論文を執筆することができました。お世話になった皆様方に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

特に本論文をまとめるにあたり、熱心なご指導を頂きました海洋システム力学研究室の胡長洪教授、朱洪忠助教、カムラ助教、渡辺勢也助教に深く感謝いたします。

九州大学応用力学研究所技術職員の野田穰士朗氏には実験の際に、お力添えを頂きました。無事に研究を終えることができたのも、皆様のおかげです。

さらに、研究室で共に生活してきた海洋システム力学研究室の同級生である、藤崎君、森塚君、福島君、そして後輩の後藤君、楼君、姜さん、山本君の皆さんも助言や実験のサポートをして頂き、何度も助けていただきました。そして本専攻の諸先生方、事務室の皆様、その他の方面に渡りお世話になりました関係者各位の方々に心から感謝いたします。

最後に、私の学生生活を親身に支え、常に健康に気づかせてくれた私の家族に心から感謝の意を表し、これを謝辞と変えさせていただきます。

2021年1月29日

九州大学大学院総合理工学府 大気海洋環境システム学専攻

海洋システム力学研究室

岩木 聡汰