# 台車自動追尾による自由航走模型船の 波浪中6自由度船体運動計測手法の研究

上野 道雄\*, 二村 正\*, 塚田 吉昭\*, 大坪 和久\*

# A Study on Measuring Method of 6-DOF Ship motion in Waves of a Free Running Model Ship using a Tracking System by a Moving Carriage

by

## Michio UENO, Tadashi NIMURA, Yoshiaki TSUKADA and Kazuhisa OHTSUBO

## Abstract

Six-degree of freedom motion of a free-running model ship in waves was measured. The experiment was carried out using an auto-tracking system of the moving carriage in the Ocean Engineering Basin, National Maritime Research Institute. The auto-tracking system consists of a CCD camera placed on the center of the carriage, target markers on a model ship, an image analysis system and a feed-back controller of the carriage. Horizontal position within the basin and direction of the turntable equipped on the carriage are controlled to track the model ship position and heading direction. The feed-back system is based on a so-called PID controller with additional some parameters. The characteristics of the model ship motion in waves are discussed. Effects of these parameters on measured data properties were investigated and suitable parameters for the measurement are discussed. The step response test is applied to the auto-tracking system for investigating the inherent control properties of the carriage. Using analyzed properties, simulation program for the tracking system is developed and its usage for investigating effect of control parameters is confirmed. An optical motion measurement system is also put to the test to see its applicability to this sort of tank tests.

*	流体部門	
	原稿受付	平成19年 3月28日
	審 査 済	平成19年11月 6日

## 目 次

1. 緒言・・・・・24
<ol> <li>海洋構造物試験水槽の概要・・・・・・・・25</li> </ol>
3. 模型船と計測項目・実験方法・・・・・26
3.1 模型船の状態・・・・・・・・・・・・・・26
3.2 計測項目と実験方法・・・・・・・・・27
4.6自由度船体運動計測結果とその評価・・・・・29
4.1 6自由度船体運動の計測データ・・・・・29
4.2 計測データの信頼性・・・・・・・・・32
4.3 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・33
5. 自動追尾性能に対する制御係数の影響・・・・・33
5.1 自動追尾システムの構成の概要・・・・・33
5.2 自動追尾システム制御アルゴリズム・・・・33
5.3 追尾性能に関する実験状態・・・・・35
<ol> <li>4 追尾性能試験結果・・・・・・・・・</li></ol>
5.5 自動追尾制御係数に関する考察・・・・・38
5.6 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・39
6. 台車自動追尾システムの単独応答性能試験・・・39
6.1 ステップ応答試験の目的・・・・・・39
<ol> <li>6.2 試験法の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・40</li> </ol>
6.3 試験結果と数値計算の比較・・・・・・41
6.4 台車追尾不安定化現象の数値再現・・・・・41
6.5 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・42
7. 光学式6自由度運動計測・・・・・・43
7.1 光学式計測の目的・・・・・・・・・・・・43
7.2 光学式計測方法の概要・・・・・・・・・43
7.3 ジャイロ計測方式との比較・・・・・・44
7.4 光学式計測の課題・・・・・・・・・・・44
7.5 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・45
8. 自由航走模型実験技術の課題と解決策・・・・・45
<ol> <li>8.1 課題1-模型船の位置・速度計測法・・・・45</li> </ol>
8.2 課題2-模型船大きさ・・・・・・・・・47
<ol> <li>8.3 課題3-模型船加減速方法の概念・・・・・47</li> </ol>
8.4 課題4-その他・・・・・・・・・・・48
8.5 実験技術の課題と解決策まとめ・・・・・48
9. 結言・・・・・48
参考文献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

## 1. 緒言

近年、実海域における船の性能評価の重要性が認 識されつつある。これは、推進性能や耐航性能、操 縦性能など様々な船の性能を、波・風・潮流といっ た実海域の要因を考慮して総合的に評価しようとす るものである。海上技術安全研究所では実海域性能 評価プロジェクトチームを中心として理論計算手法 や実験計測手法の開発を通じてこの課題に取り組ん でいる。

理論計算手法の開発の一つとしては 2006 年度か

ら重点研究の中で6自由度船体運動計算プログラ ムの開発をおこなっている。このプログラムは同 所に整備中のモーションプラットフォーム付き操 船シミュレータに組み込まれて6自由度の船体運 動を模擬する操船シミュレータとしての今後の活 用が期待されている。信頼できる計算プログラム の開発のためには十分な検証が必要である。本研 究の目的の一つは開発中の6自由度船体運動計算 プログラム検証用のデータを自由航走模型実験に よって得ることである。

一方、実海域性能評価に係る実験計測手法の開 発に関しては 2006 年度から実海域再現水槽の建 設が始まったことが上げられる。全周造波機と任 意の平面運動を与えることが可能な台車を備えた この水槽は80m角水槽を改修する形で2010年度 に完成予定である。自由航走模型実験を考えた場 合、屋外の80m角水槽で用いられていた実時間キ ネマティック GPS による位置計測システム[1]は 屋内の実海域再現水槽では使えない。このため、 実海域再現水槽では台車の自動追尾による模型船 の位置計測システムを整備する予定である。台車 の自動追尾システムは 1996 年に改修された海洋 構造物試験水槽[2]の台車に備えられており、実海 域再現水槽のシステムも基本は同じものになると 考えられる。海洋構造物試験水槽の台車自動追尾 システムはこれまでに漂流物体の波浪中漂流運動 の計測等に利用されて実績[3]を上げてきたが、あ る程度の速度で波浪中を航行する模型船を十分自 動追尾できるかどうか十分に確認されているとは 必ずしも言えない。船の実海域性能評価の方法を 実験計測手法の面から確立するためには、信頼で きる台車自動追尾システムを新しい実海域再現水 槽に整備する必要がある。そのためには海洋構造 物試験水槽の台車自動追尾システムの特性を十分 把握した上で最新の技術を駆使して新しい台車自 動追尾システムを設計する必要がある。本研究の もう一つの目的は海洋構造物試験水槽の台車自動 追尾システムを実際に使って波浪中の船体運動を 計測することによって同システムの特性と課題を 明らかにし、実海域再現水槽の台車自動追尾シス テムの設計に必要な実績と技能ならびに実際に即 した知見・情報を得ることである。

本報告では、まず、海洋構造物試験水槽の概要 を台車自動追尾システムも含めて述べる。次に、 同システムを用いて計測した自由航走模型船の波 浪中6自由度船体運動計測実験と計測結果、なら びにそのデータの信頼性について述べる。続いて、 海洋構造物試験水槽の台車自動追尾システムの特 性を制御係数の影響を調べた実験と台車単独応答 特性計測試験をとおして明らかにする。さらに、



図 2.1 海洋構造物試験水槽

水槽寸法	主要設備	仕様
	造波装置	フラップ式、規則波および不規則波 周期:0.4~3.0sec.、最大波高:0.3m
長さ 40m 幅 27.1m 水深 0.3m-2.0m	台車	主台車:X方向最大速度 2.0m/s 走行副台車:Y方向最大速度 1.5m/s 主・走行副台車で X-Y走行、追尾駆動可能 固定副台車:重量のある試験器機を搭載して任意の 位置に移動可能 両副台車とも回転台付・計測台の上下移動可能
	消波装置	昇降装置付(有効最小水深は0.5m)、ビーチ式
	側面消波装置	昇降装置付(有効最小水深は1.0m)
	潮流発生装置	横型固定ピッチ可逆式軸流ポンプ 最大流量824m <sup>3</sup> /min.、駆動動力300KW

表 2.1 海沣蒨宣物試験水槽寸	法	寺
------------------	---	---

台車追尾と6自由度運動を同時に計測しうる可能性 のある光学式計測装置の機能試験結果について述べ る。おしまいに、一連の実験で得られた知見をまと めるとともに実海域再現水槽の台車自動追尾システ ムを設計するにあたって今後留意・検討すべき事項 をとりまとめる。

### 2. 海洋構造物試験水槽の概要

海洋構造物試験水槽の概観を図 2.1 に、水槽の寸 法と主要設備を表 2.1 に示す。水槽の一方の短辺(北 側)には造波装置が、対する短辺(南側)には消波板が 備えられている。南北方向の潮流を発生させること も可能である。

水槽には台車が備えられている。水面広さ 40m× 27.1m の水槽の長辺(南北方向)のレール上を主台車 が動く(X 方向)。主台車上には固定副台車と走行副 台車が備えられている。固定副台車はおもに海洋構 造物に関する実験用で固定して使用される。走行副 台車は主台車上を走行する(東西/Y 方向)。走行副台 車は回転盤を備えており水平面内で回転運動する (Ψ方向)。これら XYΨの運動を制御することによ って水平面内の任意の運動に対応することが可能 である。なお、固定副台車が主台車上西側にある ことと安全上必要な停止距離を確保しているため 走行副台車の可動範囲は 27.2m×16.4m である。

走行副台車の運動は主台車上の計測室に備え られた計算機のプログラムモードで管理される。 直進運動や斜航運動、旋回運動、周期的強制動揺、 任意運動など様々な運動モードが用意されている。 以上は拘束された模型船に任意の平面運動を与え る際の運動モードである。

さらに、走行副台車には水槽内を自由航走する 模型船を自動追尾する機能が備えられている。こ れは走行副台車回転盤上に設置されたカメラ画像 の中に模型船上の指定された追尾用マーカーが常 に入るように XY Ψ 方向の運動を自動制御するこ とによって走行副台車が模型船を自動追尾する機 能である。自動追尾中の走行副台車の位置である XY Ψ の値とカメラ画像中の追尾用マーカーの位 置情報から模型船の時々刻々の位置を得ることが できる。

今回の実験ではこの水槽の造波装置と走行副

台車の自動追尾機能を用いる。自動追尾機能の詳細 については後述する。

表 3.1	模型船およびプロペラの主要目

Item	Dimension
Scale ratio	1/107.74
(Model ship)	
Length(m)	2.97
Breadth(m)	0.539
Draft(m)	0.18
Displacement(m <sup>3</sup> )	0.232
(Propeller)	
Diameter(m)	0.0872
Pitch ratio (0.7R)	0.662
Expanded area ratio	0.455
Blade number	5



図 3.1 タンカー模型船船体形状

#### 3. 模型船と計測項目・実験方法

実験に用いた模型船はタンカー船型である。この 模型船については、台車のプログラム制御を用いて 模型船に旋回・斜航等任意の平面運動を与えて実験 をおこなう CMT(Circular Motion Test)による流体 力の計測値[3]や船尾流場の計測値[4]が公表されて いる。

模型船の主要目および使用したプロペラの要目 を表 3.1 に、船体形状図を図 3.1 に示す。

#### 3.1 模型船の状態

模型船の状態調整は、各種計測機器および動力装 置等を全て模型船に積み込んだ最終状態で実施した。

模型船縦慣動半径は一般的な標準値として 23~ 25%Lppを目標に調整した。計測の結果、縦慣動半 径は 24.4%Lppとなった。

模型船の重心-メタセンタ距離 GM の目標値を 0.0596m(実船換算 6.42m)と設定した。トリミング タンクにおいて模型船傾斜試験をおこないその傾斜 角度を測定して GM を求めた。GM 測定の結果は 0.0595m となった。

自由横揺れ試験では模型船に初期の横揺れを与 え模型船搭載の光ファイバージャイロの横揺れ角度 の出力を計測した。この時、模型船の横揺れの初期 振幅の大きさを大小の2状態変化させ、それぞれに つき2回計測した。得られた横揺れ試験データの 一例を図3.2に示す。図には減減係数の解析範囲 を矢印で示している。この横揺れの時系列データ からフルードのa,bの減減係数[5]、ベルタンのN 減減係数[5]を求めた。



図 3.2 自由横揺れ試験データ

(上:T.No.103 初期振幅大,下:T.No.105 初期振幅小)

表 3.2 減滅係数解析結果

(a)フルードの ab 係数

		減衰a	b係数
T.No.	振幅	а	b
103	大	0.015	0.00213
104	大	0.012	0.00269
105	小	0.019	0.00129
106	小	0.02	0.00131
平均	大	0.014	0.00241
平均	小	0.02	0.0013
平均	全 データ	0.017	0.00186

(b)ベルタンの N 係数

		減衰N係数			
T. No.	振幅	N5	N10	N15	N20
103	大	0.00519	0.00366	0.00315	0.00289
104	大	0.00506	0.00387	0.00348	0.00328
105	小	0.0051	0.0032	0.00256	0.00223
106	小	0.00522	0.00326	0.00261	0.00229
平均	大	0.00513	0.00377	0.00332	0.00309
平均	小	0.00516	0.00323	0.00259	0.00226
平均	全 データ	0.00514	0.0035	0.00295	0.00267

フルードの a,b の減滅係数、ベルタンの N 減滅 係数はそれぞれ次式で定義される。

$$\Delta \phi = a \phi'_n + b \phi'_n^2 \tag{3.1}$$

$$\Delta \phi = N \phi'_n^2 \tag{3.2}$$

ここで、

$$\begin{cases} \Delta \phi = |\phi_n| - |\phi_{n-1}| \\ \phi'_n = \frac{|\phi_n| + |\phi_{n+1}|}{2} \end{cases}$$
(3.3)

であり、 φ n は横揺れ減衰曲線の n 番目の極値を表 す。

得られた各係数とその平均値を表 3.2 に示す。減 減係数のデータとして良いまとまりを示していると 考えられる。

## 3.2 計測項目と実験方法

自由航走模型実験における船体運動のうち横揺 れ角や縦揺れ角はジャイロ等で計測可能であるが、 時々刻々の模型船の位置、速度については何らかの 方法で求める必要がある。海洋構造物試験水槽の走 行副台車には模型船を自動追尾する機能があり、こ の機能を用いて模型船の平面運動を計測することが できる。図 3.3 に自由航走実験計測中の写真を示す。



## 図 3.3 自由航走模型船とこれを 自動追尾する走行副台車

走行副台車回転盤中心位置に模型追尾用のカメ ラを真下を見るように設置する。模型船には追尾用 のマーカーを2箇所船体中心線上に設置する。この 2 点の中点は船体重心位置とする。カメラの映像が 追尾用マーカーを捉えるように模型船位置を調整し て追尾システムにカメラ画像上のマーカー位置を認 識させる。追尾システムはこのマーカーが視野から 外れないように走行副台車の XY 座標を調整して模 型船を追尾する。この際、2 つのマーカーを結ぶ線 が画像上の所定の向きを向くように回転盤を回転さ せる。すなわち XYΨの3軸を調整しながら模型 船を追尾する。追尾する際の台車の制御パラメー タは別途設定する必要があるが、この点について は次章で詳述する。



図 3.4 座標系



図 3.5 計測項目と計測機器等

図 3.4 に座標系を示す。船速 Uは船体前後方向 成分 u と左右方向成分 v からなる。偏角(斜航角) はβ、旋回角速度は r、舵角はδ、船首方位角はχ、 舵直圧力は FRyで表す。XY 座標は水槽固定の座 標系で、XY はそれぞれ主台車と走行副台車の移 動方向に一致する。波はXの負の方向に進行する。

図 3.5 に実験および計測システムの概要図を示 す。模型船と台車間には信号線や動力用ケーブル 等はなく、自由航走模型船の制御には当所 80m 角水 槽で用いられていた自由航走模型試験システムを用 いた。旋回試験や Z 試験等の操舵およびプロペラ回 転の制御信号は、地上の操船制御用 PC から無線で 実時間に模型船に送られ、同時に得られる模型船の 運動計測データはテレメータを経て地上の計測用 PC に記録される。模型船の位置・速度データは台 車の追尾機能から得られるため、模型船の計測デー タと台車走行データと同期を取るため台車同期信号 を追加した。

表 3.3 に計測項目と計測機器等を示す。表 3.3 中の画像座標系 XcYc は模型船追尾用カメラ固定の座標系である。これについては 5 章中の図 5.2 でも説明する。 I は台車による模型船自動追尾の走行データで、II は走行副台車上に設置された模型船自動追尾カメラの画像から算出される。I、II のデータとも台車上の PC に記録される。III は模型船搭載の各計 測機器で計測される。以下の模型船平面運動は、表 3.3 の I と II のデータから実験後に算出して求める。

- ・水槽座標系船体重心位置 X(m)
- ・水槽座標系船体重心位置 Y(m)
- ・船体方位角 $\chi$ (deg)
- ・水槽座標系重心 X 方向速度 dX/dt(m/s)
- ・水槽座標系重心 Y 方向速度 dX/dt (m/s)
- ・船体回頭角速度 r(deg/s)
- ・船速 U(m/s)
- ・偏角 β (deg)
- ・船体座標系前後方向速度 u(m/s)
- 船体座標系橫方向速度 v(m/s)

表 3.3 計測項目と計測機器等

	計測項目	計測機器等
	水槽座標系 台車位置X	
	水槽座標系 台車位置Y	
Ι	水槽座標系 台車X方向速度dX/dt	台車実績値
	水槽座標系 台車X方向速度dY/dt	データ
	台車回転盤回転角	
	台車回転盤回転角速度	
	画像座標系 Xc方向偏差	画像偏差
П	画像座標系 Yc方向偏差	データ
	画像座標系 回転角偏差	
	プロペラ回転数	スラスト計
	スラスト	
	舵角	操舵装置
	舵接線力	舵力計
	舵直圧力	
	ロール角	
Ш	ピッチ角	光ファイバー
	方位角	ジャイロ
	回頭角速度	
	船体上下加速度	
	船首相対波高	容量式水位計



表 3.4 実験状態

実験目的	6自由度船体運動 計算プログラムの 検証データ取得	自動追尾性能の 検証	光学式運 動計測手 法の調査	
波高	Ocm(平水中), 3cm, 4cm	0cm (平水中), 4cm		
波長船長 比	0.2, 1.0	1.0		
波との出 会角	斜め向波,斜め追波(助走時)			
プロペラ 回転数	11.75rps (平水中船速0.5m/s	s相当)		
試験内容	・直進, ・旋回(舵角±35 度), ・Z(舵角+20度), ・新針路(舵角+15 度,針路+30度で 切り返し)	<ul> <li>・旋回(舵角±35 度,不感帯, フィルタ,制御 係数,船体動揺 影響の調査( 本) ・台車追尾性能 調査(ステップ入 力および等加速 入力)</li> </ul>	・旋回(舵 角-35度)	

海洋構造物試験水槽における自由航走模型実 験の実験方法として、図 3.6 に実験手順のフロー チャートを示す。台車自動追尾開始と終了指令が ある。模型船は、加速から操船マニュアル切り替 えによる運動計測終了まで操船制御用 PC で制御 される。本台車の自動追尾機能を使用する際の留 意点として、自動追尾開始時に追尾用カメラ画像 の中心近くに模型船追尾用マーカーが写るように 台車の位置を調整することが必要である。また、 自動追尾終了時には模型船の速度を小さくして追 尾を終了する必要がある。前者は台車の急起動を 引き起こしたり起動時に模型船が追尾範囲から外 れる原因となったりすることから必要とされる。 後者は台車の急停止を防ぐために必要である。そ のほかの本実験上の留意点としては、①模型船の加 速を極力大きくすること、②実験時の模型船航走範 囲の事前の予測、③無線の通信状態の常時把握、な どが必要である。これらはいずれも屋内の水面範囲 が制限された水槽で安全に自由航走模型実験を実施 するために必要とされる項目である。

表 3.4 に実験状態をその目的とともに示す。波高 3cm と 4cm は実船寸法でそれぞれ 3.23m および 4.31m に相当する。船速は実船で約 10.1kt 相当であ る。

#### 4. 6自由度船体運動計測結果とその評価

#### 4.1 6自由度船体運動の計測データ

船体運動の計測結果のうちの代表的な例を取り 上げて示す。取り上げる状態は波浪中での直進状態 と旋回状態、Z試験状態、新針路試験状態の4種類 である。波長船長比 λ/L はいずれも船体運動が大き くなる 1.0 の状態とした。自動追尾の PID ゲインは いずれも比例が 1.5、微分が 0.1、積分が 0.05、2乗 項が 0.0 の状態である。フィルタの周波数特性も含 めて自動追尾の制御については5章で詳述する。

なお、上下揺れに関しては光ファイバージャイロ 内の加速度計で問題なく計測されているが本報告で 取り上げるデータでは省略した。

図 4.1 に船首方位角 χ が-30 度の状態における波 浪中直進時の計測例を示す。この船首方位角は船首 右舷側 30 度の方向から波を受ける状態である。一 番上は航跡を表す。図 4.1 から図 4.4 まですべて航 跡は右下から左上に向けて進行する。航跡図右上の XcYc 図は自動追尾用のカメラから見た模型船重心 位置の軌跡である。この例は直進試験のデータであ るため画像上の左右方向の偏差の値は小さく、前後 方向には最大で約 20cm 程度偏差していることがわ かる。波はX軸負の方向に伝播している。時系列デ ータは助走時から示している。短時間で所定の船速 にするために助走時にはプロペラ回転数を設定値よ りも高くなるようにしている。斜め向波中の特徴と して出会周期での左右揺れと船首揺れ、横揺れ、縦 揺れに伴う偏角と回等角速度、横揺れ角、縦揺れ角 の変動が表れている。前後揺れも船速の変動として 表れているが他の応答ほど顕著ではない。自動操舵 で船首方位角を制御しているが、舵角には船首揺れ に応答した高周波成分と加速時の過渡応答にともな う低周波数成分が表れている。この過渡応答は加速 中に平水中から波の中に進入していくことに伴う現 象と考えられる。図に示した範囲では十分に設定の 方位角に収束していない状況が見られる。限られた 水槽水面内で長時間の造波による反射波の影響を避 けながら実施する必要のある自由航走模型実験の 制約がこれらの応答に表れていると見られる。

図 4.2 に波浪中 35 度旋回の計測結果を示す。 旋回時の波との出会角の変化に応じた縦・横・左 右・船首揺れの各成分の応答が明確に計測されて いることがわかる。特に横揺れ振幅は最大で20 度程度にもおよぶ。船速にも大きな変動が表れて いるが、これは自動追尾用マーカーの中点の平面 上の移動速度を計算したため大きな横揺れ成分の 影響が出たためと考えられる。実際、追尾用カメ ラから見た XcYc 座標系での重心軌跡は左右に大 きく変動していることが確認される。図 4.1 の直 進状態とは異なり高周波の変動成分が支配的とな る旋回運動では助走時の過渡応答は大きな影響は およぼさないと考えられる。船体運動の高周波数 成分は2旋回中でほぼ同じような応答が再現され ているが、これ以上の長時間の計測には反射波の 影響などが現れる恐れが考えられる。低周波数の 応答は航跡に最も顕著に見ることができる。旋回 の中心は徐々に左斜め波下側に移動する様子が見 られる。低周波数成分は船速や偏角の変動にも見 られる。

図 4.3 に波浪中 20 度 Z 試験の結果を示す。第 一操舵で船首を波上側に向けるため船体横運動は この間小さくなる方向にあるが第二操舵から第三 操舵の間は横波状態に次第に近付くため偏角と横 揺れ角、回頭角速度の出会波周期の振幅は大きく なる方向にある。逆に縦揺れの出会波周期の振幅 は小さくなる方向にある。水面が限られているた め第三操舵直後に計測を終了しており船首揺れの 第2行き過ぎ角までは計測できていない。舵力の 出会波周期の振幅も変動している。これを他のデ ータと比較してみると回頭角速度のそれと対応し ているように見えることから船首揺れが舵力に影 響をおよぼしていると考えられる。Z 試験中の船 速の低下も計測できており、妥当な計測結果とな っていると考えられる。

図 4.4 に波浪中の新針路試験の結果を示す。この 新針路試験ではまず 15 度舵をとって次に船首方 位角が初期方位角より 30 度右に振れた時点で-15 度舵角を取り、さらに回頭角速度が 0 になった 時点で舵を中央に戻す操船をおこなった。操舵舵 角は 15 度と異なるが、図 4.3 の 20 度 Z 試験の途 中までと定性的には同じような応答となっている が、計測終了近くでは向波状態になるためこの部 分で 20 度 Z 試験の場合よりもロール角が小さく ピッチ角が大きい傾向になっているほか、舵角が 15 度と小さいため画像上の偏差が小さいことが わかる。この新針路試験でも 6 自由度の船体運動 を良く計測できていることがわかる。 30

偏角β(deg)

回転数 n (rps)

舵角 ð(deg)

舵力FRy(kgf)

ロール角(deg)

ピッチ角(deg)

方位角 X (deg)



図 4.1 波浪中直進試験計測例 λ/L=1.0、χ=-30°直進試験、t64 (フィルタ 7Hz, 次数 1、PID ゲイン:比例=1.5, 微分=0.1, 積分=0.05, 2 乗項=0)



航跡(水槽座標系)

画像偏差 (画像座標系)

図 4.2 波浪中旋回試験計測例 λ/L=1.0、δ=35°旋回試験、t67 (フィルタ 0.5Hz, 次数 1、PID ゲイン:比例=1.5, 微分=0.1, 積分=0.05, 2 乗項=0)





航跡(水槽座標系)

Y(m)

40

......

Time(sec) 60

Time(sec)

40 Time(sec) 60

Time(sec)

Time(sec)

Time(sec)

Time(sec)

40 Time(sec)

Mr.

(m)X

20

20

0.5 0.4 0.3 0.2 0.1 0

20

0

-20

20

15 回転数 n

10

5 0

30

-20 -30

0.4

0.2

0

4

2

0 -2

> -1 2

0 -1

0

-20 -40

-60

-80

4

-0.2

舵力FRy(kgf)

ロール角(deg)

ピッチ角(deg)

方位角 X (deg)

回頭角速度 r'(deg/s) + 0

船速 U (m/s)

偏角 ß (deg)

(rps)

画像偏差 (画像座標系)

Xc(m)

0.2

0.2

PER Yc(m) 0

80

80

WWW

MMM Bern

www.hum

100

100



λ/L=1.0、δ=15°,+30°切り返し新進路試験、t73 (フィルタ 0.5Hz, 次数 1、PID ゲイン:比例=1.5, 微分=0.1, 積分=0.05, 2 乗項=0)

### 4.2 計測データの信頼性

自由航走模型運動計測結果の良否については、同 一実験の再現性により評価することが出来る。本実 験では後述の自動追尾機能に用いる制御係数検討の ため同一実験状態で複数回の計測をおこなっている ため、これらの計測結果の比較により再現性と制御 係数の違いによる平面運動計測精度を評価できる。

図 4.5 に波高・波長等が同一の実験状態(波長船長 比 λ /L=1.0, 波高 40mm, 舵角 δ =-35° 旋回試験) で自動追尾の制御係数だけが異なる2点の航跡計測 結果を示す。図 4.6 に船体運動の一例として光ファ イバージャイロにより計測した横揺れ運動の時系列 を、図 4.7 に台車自動追尾データから求めた模型船 速度と台車 X 方向速度の時系列を示す。これらの図 は操舵開始時を座標(0,0)或いは時間 0 としている。 これらの図に示す実験番号 98(T98)は模型船を問題 なく追尾するものの台車の振動が多少大きい制御係 数を用いている状態、実験番号 110(T110)は台車振 動が最も小さい制御係数を用いている状態である。 図 4.5 のように制御係数を変えてもその航跡に大き な差はなく、航跡だけで見れば位置計測精度は十分 であり、また図 4.6 の出会波周波数の横揺れ振幅お よびその時間的振幅増減傾向も差はなく、海洋構造 物試験水槽における自由航走模型実験の再現性は高 いと言える。しかし、図 4.7 の台車自動追尾データ から求めた模型船速度の時系列では、丸で示す付近 において T98 の振幅が大きくなっているように見 える。船速のこの部分の時間軸を引き延ばした時系 列を図 4.8 に示す。図のように、出会波周波数成分 の速度振幅に大きな差は無いが、台車振動が大きな 状態(T98)には出会波周波数よりも高周波の振動が 重なっていることがわかる。この原因は、図 4.7 の 台車 X 方向速度に示すように、制御係数が適切では ないために台車が波周波数の運動をおこない、その 加減速度により台車固有振動数が計測値に重なった ためであると考えられる。



果(λ/L=1.0、δ=-35°旋回試験)

以上まとめると次のように言える。海洋構造物 試験水槽における自由航走模型実験の再現性は高 いと言えるものの、台車自動追尾の制御係数に適 切な値を用いないと追尾データから求めた船速等 の運動計測結果に台車の固有振動が大きく付加さ れてしまう。





図 4.7 同一状態を異なる制御係数で計測した船速 及び台車 X 方向速度の時系列 (λ/L=1.0、δ=-35°旋回試験)



図 4.8 同一状態を異なる制御係数で計測した船速 拡大図(λ/L=1.0、δ=-35°旋回試験)

## 4.3 6自由度船体運動計測結果のまとめ

海洋構造物試験水槽における台車自動追尾機能 を用いて平水中および波浪中で自由航走模型船の 6 自由度運動計測をおこなった。代表的な計測例を示 したが、このほかの実験状態においても満足できる 計測結果が得られた。水槽の大きさが原因となる計 測時間あるいは船速の制約が実際の例として把握で きた。また、自動追尾の制御係数によっては大波高 中の船体運動に十分追尾できない状態があったが適 当な制御係数を選択すれば6自由度で大きく動揺す る自由航走模型船を追尾して運動の計測が可能であ ることがわかった。そのほか、計測データの信頼性 について再現実験による検討をおこない本計測手法 が基本的に有効であることが確認できた。

#### 5. 自動追尾性能に対する制御係数の影響

前章で述べたように、台車自動追尾の制御係数に 適切な値を用いないと、船速等の運動計測結果に台 車の固有振動が大きく付加されてしまう。また、台 車上の計測機器環境や、レール・車輪等の維持管理 の観点からも台車はなるべく波周波数の運動をおこ なわずに模型船を追尾することが好ましいと言える。 そこで、現在の海洋水槽の自動追尾システムにおい て不感帯の有無やフィルタの遮断周波数、PID ゲイ ンを変更し、試行錯誤手法により適切なこれら制御 係数を求める実験をおこなった。本章では、不感帯 とフィルタ、PID ゲイン(以下、総称して制御係数と 呼ぶ)の制御系に与える影響を述べると共に得られ た知見を基に自動追尾に適した制御係数について考 察した内容を述べる。なお、台車の自動追尾性能と しては以下の2項目を満足する制御法が良好な制御 法とした。

①模型船を自動追尾すること②波周波数成分の速度変動が小さいこと

#### 5.1 自動追尾システムの構成の概要

海洋構造物試験水槽の台車自動追尾システムの 説明図を図 5.1~5.3 に示す。図 5.1 は模型船および ビデオカメラの設置概念図で、図中の寸法は今回の 実験での値である。図 5.2 は座標系、図 5.3 は自動 追尾システムの制御アルゴリズムである。

海洋構造物試験水槽の台車自動追尾システムは図 5.1 に示すように、走行副台車上(回転盤上)に設置し たビデオカメラにより、図 5.2 のように船体上に貼 り付けた黒点 2 点間の中心位置(船体重心上の位置 に対応)の画像上の前後位置偏差X、左右位置偏差Y、 方位角偏差Ψを求める。この位置偏差X,Y,Ψを入 力値として図 5.3 に示すように計測値に数値フィ ルタをかけ、不感帯処理およびフィードバック制 御により台車制御盤のシーケンサに速度指令信号 を送っている。なお、送られる速度指令信号は画 像座標系の速度指令値であるためシーケンサ内で 水槽座標系に変換し台車速度指令信号(Xc,Yc,Ψc) を与えている。画像処理系および台車駆動系の制 御・処理周波数はいずれも 50Hz である。

## 5.2 自動追尾システム制御アルゴリズム

まず図 5.3 に示す制御アルゴリズムの詳細及び 実験に使用した値等について説明する。制御係数 は、位置偏差 X,Y,Ψ方向それぞれに対し別々のタ イプと値を選択できる構成となっているが、本実 験では不感帯以外は全て同一のタイプ、値を用い た。



図 5.1 模型船及びビデオカメラの設置概念



図 5.2 座標系



図 5.3 自動追尾システム制御アルゴリズム

1) フィルタ

本システムの数値フィルタとしては表 5.1 に示す ようにフィルタタイプの選択、フィルタ次数(遮断 周波数からの減衰度)の入力、遮断周波数の入力が できる。数値フィルタタイプは全ての実験でバタワ ースフィルタを使用した。フィルタ次数については 実験のほとんどを1でおこない、3~4点のみ2で実 施した。遮断周波数については7Hz~0.1Hzの数条 件について実施した。リップルについてはバタワー スフィルタのため使用していない。

入力項目	選択項目、実験状態	
	バタワース(リップル指定不可)	
フィルタタイプ	チェビシェフ(リップル指定可)	
	フィルタ無し	
フィルタ次数	(ほぼ1で行い、一部2で実施)	
(減衰度)		
遮断周波数(Hz)	(7Hz~0.1Hz の数条件で実施)	
リップル(dB)	(使用していない)	

表 5.1 フィルタの入力項目等

2) PID ゲイン

本システムは数値フィルタ処理後の位置偏差デー タに対して不感帯処理及びフィードバック制御がお こなわれる。フィードバック制御は各速度指令値  $V(X,Y,\Psi)$ に対して(5.1)式に示すように各位置偏差  $e(X,Y,\Psi)$ についての比例、微分、積分、2 乗項で 構成されている。

実験をおこなった PID ゲインの範囲を表 5.2 に示 す。これらの値は過去の平水中自由航走実験と波浪 中漂流運動計測実験等の実績値を元に検討をおこ なって選定した。今回の実験では表のように比例 項と微分項、積分項だけでおこない、2乗項につ いては使用していない。

$$V = K_{P} \cdot e + K_{D} \cdot de / dt + K_{I} \cdot \int e dt + K_{P2} \cdot e |e|$$
(5.1)

V:速度指令値(X,Y,Ψ)
 e:位置偏差(X,Y,Ψ)
 K<sub>P</sub>:比例定数
 K<sub>D</sub>:微分定数
 K<sub>I</sub>:積分定数
 K<sub>P2</sub>: 2乗項定数

表 5.2 PID ゲイン

		実験をおこなった定数
比例	$K_P$	0.5 , 1.0 , 1.5
微分	$K_D$	0.1 , 1.0
積分	$K_I$	0.05 , 0.5
2 乗	$K_{P2}$	0

3) 不感帯

不感帯を設定した場合の PID ゲインの寄与(効 き)を表 5.3 及び図 5.4 に示す。図表に示すように 不感帯内では微分及び積分項だけが有効でかつそ の計算された速度が 50mm/s 以上(Ψ軸について は不明)でなければ有効ではない。また、不感帯外 及び 50mm/s 以上では図のようにステップ的な速 度が指令される構成となっている。

不感帯影響に関する実験では表 5.4 に示すよう に不感帯を有効とした場合と無効とした場合の2 状態についてのみ実施した。

表 5.3 不感帯の内外の定数寄与

不感带内 不感带外 比例  $K_P$ 0 有効 50mm/s 以上は有効 微分 有効  $K_D$ 積分  $K_I$ 50mm/s 以上は有効 有効 有効 2 乗  $K_{P2}$ 0 指令速度 指令速度 比例 2乗項  $\pm 50$  mm/s 位置偏差 位置微分偏差 or 位置積分偏差 不感帯範囲 不感帯範囲 比例·2乗項 微分·積分項 図 5.4 不感帯設定時の各 PID ゲインの寄与状態

	F		
不感帯	X (mm)	Y (mm)	Ψ(deg)
有効	20	20	5
無効	0	0	0

表 5.4 不感带状態

## 5.3 追尾性能に関する実験状態

追尾性能に関する検討は、主に波浪中(波長船長比 λ/L= 1.0、波高 40mm、舵角δ=-35°)の旋回試 験でおこなった(一部平水中等でも実施)。この旋回 試験の計測例は前章の図 4.1、4.2、4.3 に示した通 りである。今回のタンカー模型による実験は水槽面 積が限られるため船速およびその加速度は小さいが、 模型の大きさに比べて波高が高いため波周波数成分 の船体運動は大きい。例えば図 4.2 の横揺れ運動の 時系列で見ると旋回中横波状態では片振幅 20°程 度横揺れしている。このような運動状態の模型に対 して、なるべく波周波数の運動をおこなわずに模型 船を確実に自動追尾する台車の制御係数を試行錯誤 手法により求めた。

#### 5. 4 追尾性能試験結果

追尾性能について検討した波浪等の試験状態お よび制御係数、追尾結果の良否の一覧を表 5.5 に示 す。試験状態については本表に示す以外の状態の試 験もおこなっているが、ここでは本章で触れる試験 状態だけを掲載した。

以下では、表 5.5 の順に従って、1)追尾性能に対 する船体動揺影響、2)追尾性能に対する不感帯影響、 3)追尾性能に対するフィルタ影響、4)追尾性能に対 する制御係数影響について述べる。

1) 追尾性能に対する船体動揺影響

船体動揺の影響に関しては表 5.5 に示すように 平水中と波浪中 λ/L=1.0 と波浪条件が異なる 2 点 で検討する。この 2 点の制御係数は全て同じであ るがフィルタの遮断周波数が 7Hz とかなり高い 周波数となっている。

図 5.5 に平水中の台車速度の計測結果を、図 5.6 に波浪中  $\lambda/L=1.0$  の計測結果を示す。本章で示す 時系列の横軸は模型船停止状態で台車追尾を開始 した時間を 0 としている。図 5.5 の船体動揺が無 い(非常に小さい)平水中の追尾状態では台車速度 に高周波の大きな変動は見られない。しかし、図 5.6 の船体動揺の大きな $\lambda/L=1.0$  では X,Y, $\Psi$ の3 方向とも大きな速度変動が生じており適切な制御 係数を選択する必要があることがわかる。また、 フィルタの遮断周波数が 7Hz と高いため、台車重 量の重い X 方向速度だけでなく台車重量の軽い Y 方向速度にも波周波数に追従できないことにより 起こったと思われる運動の変形が見られる。

2) 追尾性能に対する不感帯影響

不感帯の影響に関しては表 5.5 に示す平水中δ =+35°旋回試験の2点で検討する。この2点の制 御係数の違いは不感帯の有無だけである。

図 5.7 に不感帯がある場合の台車速度の計測結 果を示す。不感帯の無い場合の計測結果は前述の 図 5.5 である。不感帯の無い図 5.5 の場合には高 周波の速度変動は無いが、図 5.7 の不感帯がある 場合には平水中であるにもかかわらず高周波の速 度変動がかなり発生している。特にΨ方向につい ては、船体運動とは全く異なる周期の速度変動と、 さらに短周期のスパイク状の速度変動が見られる。 このような台車運動が不感帯を有効としたために

		制御係数			
試験	模型試験	PID ゲイン	フィルタ	不感带	追尾結果(有意
		比例、微分、積分、2乗項	周波数、次数	X, Y(mm),	な高周波速度変
				Ψ (deg)	動の有無または
					発散の有無等)
船体動摇	平水中				
影響(旋回		1.5 , $0.1$ , $0.05$ , $0$	7Hz , 1 次	0,0,0	無
$\delta = +35^{\circ}$ )	$\lambda / I = 1 0$				有
不成世	亚水山旋回	1 5 0 1 0 05 0	7日7 1 次	0 0 0	毎
日本朝国	十小十爬回	1.5, 0.1, 0.05, 0	们2,1次	0,0,0	·····································
<b></b>	0 =+35			20, 20, 5	有
フィルタ	旋回δ=+35°		7Hz , 1 次		有
影響		1.5 , 0.1 , 0.05 , 0	0.5Hz, 1 次	0,0,0	有
$(\lambda / L=1.0)$	旋回δ=-35°		0.1Hz, 1 次		無
			0.1Hz, 2 次		発散(追尾不能)
		1.5 , 0.1 , 0.05 , 0			無
制御係数		1.0 , 0.1 , 0.05 , 0			無
影響	旋回δ=-35°	0.5, 0.1, 0.05, 0	0.1Hz, 1 次	0,0,0	発散(追尾不能)
$(\lambda / L=1.0)$		1.5, 1.0, 0.05, 0			有
		1.5, 0.1, 0.5, 0			発散(追尾不能)

表 5.5 自動追尾性能計測実験状態一覧

発生したことは明らかであるが、不感帯を制御系に 組み込むこと自体に問題があるわけではなく本追尾 システムの不感帯の設計が不適切であったと考えら れる。

本追尾システムの不感帯設計は図 5.4 に示したよう に模型船が不感帯範囲を超えると比例項、2乗項の 速度指令値が突然有効となり台車は急加速をおこな う。その一方で範囲内に入ると急減速をおこなうた めに今回の計測例のような速度変動を発生させてい るものと考えられる。このような状態を起こさない ためには急加減速指令を発生させない図 5.8 のよう な不感帯の設計とすることが有効と考えられる。積 分項、微分項についても同様な問題があり、不感帯 範囲内でどの項を有効にするのか等も含めて十分に 考慮する必要があると思われる。



図 5.5 台車速度変動 平水中, る=+35°旋回試験,t31 (フィルタ 7Hz,次数 1、PID ゲイン:比例=1.5, 微分=0.1, 積分=0.05,2 乗項=0)



図 5.6 台車速度変動 λ /L=1.0, δ=+35°旋回試験, t66 (フィルタ 7Hz,次数1、PID ゲイン:比例=1.5, 微分=0.1, 積分=0.05, 2 乗項=0)



図 5.7 台車速度変動, 不感帯有効 平水中、δ=+35°旋回試験、t25 (フィルタ 7Hz,次数1、PID ゲイン:比例=1.5, 微分=0.1, 積分=0.05, 2 乗項=0)



図 5.8 不感帯設定時の PID ゲイン寄与の変更案

3) 追尾性能に対するフィルタの影響

フィルタの影響に関しては表 5.5 に示す波浪中 λ/L=1.0の旋回試験4点で検討する。この4点の 制御係数の違いはフィルタの遮断周波数と次数だ けである。

遮断周波数 7Hz の計測結果はすでに図 5.6 に示 してある。遮断周波数 0.5Hz、次数 1 の結果を図 5.9 に、遮断周波数 0.1Hz、次数 1 の結果を図 5.10 に、遮断周波数 0.1Hz、次数 2 の結果として、図 5.11 に画像座標の重心移動を、図 5.12 に台車速 度の時系列を示す。

遮断周波数 7Hz の図 5.6 では波周波数成分の大 きな速度変動が見られるが、遮断周波数 0.5Hz の 図 5.9 では速度変動が減少していることがわかる。 さらに、遮断周波数 0.1Hz、次数 1 の図 5.10 では 波周波数成分の速度変動がほとんど無くなってお り、適切なフィルタを使用することにより追尾性 能を向上(速度変動を減少)させることができるこ とがわかる。しかし、遮断周波数 0.1Hz、次数 2 (次 数を増加させると遮断周波数を減少させる効果に 近い。後述の図 5.17 を参照)では図 5.11、図 5.12 に示すように追尾起動時に台車運動が発散してし まう。このように、良好な追尾性能の制御係数の 近くに追尾不可能な制御係数が存在することがわ かる。



図 5.9 台車速度変動 λ /L=1.0、δ=-35°旋回試験、t98 (フィルタ 0.5Hz,次数 1、PID ゲイン:比例=1.5, 微分=0.1,積分=0.05,2乗項=0)



図 5.10 台車速度変動 λ/L=1.0、δ=-35°旋回試験、t107 (フィルタ 0.1Hz,次数1、PID ゲイン:比例=1.5, 微分=0.1,積分=0.05,2乗項=0)



図 5.11 画像座標系内の重心移動 λ/L=1.0、δ=-35°旋回試験、t102 (フィルタ 0.1Hz, 次数2、PID ゲイン:比例=1.5, 微分=0.1, 積分=0.05, 2 乗項=0)



図 5.12 台車速度変動 λ/L=1.0、δ=-35<sup>°</sup>旋回試験、t102 (フィルタ 0.1Hz, 次数2、PID ゲイン:比例=1.5, 微分=0.1, 積分=0.05, 2 乗項=0)

ところで、図 5.12 の台車の X,Y,Ψ 3 方向の速 度を見るといずれも発散傾向にある。台車運動各 方向の慣性力やモータ特性は全く異なっているた めこの発散運動の主な原因はフィルタと PID ゲ インにあり、制御係数の組み合わせ自体が発散傾 向であると推察される。

4) 追尾性能に対する PID ゲイン影響

PID ゲインの影響に関しては表 5.5 に示す波浪 中 λ/L=1.0 の旋回試験 5 点で検討する。この 5 点 の制御係数の違いは PID ゲインの比例、微分、積 分項だけである。最初の試験状態を基本状態とし、 2 点目と 3 点目で比例項の影響を、4 点目で微分 項の影響を、5 点目で積分項の影響を述べる。

4.1) 比例項の影響

最初の試験状態(基本状態)は追尾性能が良好で あった(フィルタ 0.1Hz,次数1)比例=1.5, 微分 =0.1, 積分=0.05, 2 乗項=0 の図 5.10 である。こ の試験状態の比例項だけを比例=1.0 に変更した 結果を図 5.13 に、さらに比例=0.5 とした画像座 標の重心移動を図 5.14 に示す。

比例=1.0 の図 5.13 では追尾性能が良好であっ た比例=1.5 の図 5.10 よりも波周波数成分の速度 変動は小さく、今回の試験の中で最も良好な追尾 性能であった。しかし、さらに比例項を小さくし た比例=0.5 の図 5.14 では模型船が加速中に画像 範囲からマーカーがはずれ追尾不可能となった。 この原因は模型船速度に対して比例項が小さすぎ、 かつ積分項、微分項も小さいことによると思われ る。このように前述のフィルタ影響とは追尾不可 能の理由は異なるものの良好な追尾性能の制御係 数の近くに追尾不可能な制御係数が存在すること がわかる。



図 5.13 台車速度変動 λ/L=1.0、δ=-35°旋回試験、t110 (フィルタ 0.1Hz, 次数1、PID ゲイン:比例=1.0, 微分=0.1, 積分=0.05, 2 乗項=0)



図 5.14 画像座標系内の重心移動 λ/L=1.0、δ=-35°旋回試験、t109 (フィルタ 0.1Hz, 次数1、PID ゲイン:比例=0.5, 微分=0.1, 積分=0.05, 2 乗項=0)

4.2) 微分項の影響

基本状態の図 5.10 の微分=0.1 を微分=1.0 に変更 した結果を図 5.15 に示す。

微分項を大きくすれば当然フィルタにより消し きれなかったわずかな波周波数の速度変動を拡大す ることになるため、台車の速度変動が大きくなって いる事がわかる。

4.3) 積分項の影響

基本状態の図 5.10 の積分=0.05 を積分=0.5 に変 更した画像座標の重心移動状態を図 5.16 に示す。

制御系において積分項を大きくすると発散傾向 が増すと言われているが、本試験状態でも運動の収 束が悪く台車が走行範囲を越えて追尾不可能となっ た。



図 5.15 台車速度変動 λ/L=1.0、δ=-35°旋回試験、t111 (フィルタ 0.1Hz, 次数 1、PID ゲイン:比例=1.5, 微分=1.0, 積分=0.05, 2 乗項=0)



図 5.16 画像座標系内の重心移動 λ/L=1.0、δ=-35°旋回試験、t102 (フィルタ 0.1Hz, 次数 1、PID ゲイン:比例=1.5, 微分=0.1, 積分=0.5, 2 乗項=0)

#### 5.5 自動追尾制御係数に関する考察

今回おこなった追尾性能の実験では試行錯誤 手法により波周波数成分の速度変動が小さい制御 係数を探し出しながら実施した。最終的にはほぼ 満足できる制御係数を探し出す事ができたと考え ている。しかし、今回得られた制御係数が必ずし も常に最良であるとは言えない。模型船が変われ ばその船の加速性能や操舵に対する応答特性等が 異なるため改めて制御係数を探し出す必要が生じ る。そこで、ここでは本実験結果から得られた知 見を基に自動追尾に適した制御係数について考察 する。

台車による自由航走模型船の自動追尾性能に 求められることは、①模型船を見失わずに自動追 尾できることと、②波周波数成分の速度変動が小 さいことである。

まず、②の波周波数成分の運動除去に関してはお およその出会波周波数がわかるためこれを効率よく 除去する数値フィルタが最も必要である。図 5.17 にバタワースフィルタの次数と減衰度の関係を示す。 今回の実験では主に次数1についてしか実験をおこ なっていない。この際、出会波周波数が遮断周波数 より十分高くなかったために除去すべき信号が残る ことになったが、今回は PID ゲインを極力小さく押 さえることでその速度変動に対する影響を少なくし ていたと考えられる。すなわち、今回の実験で得ら れた制御係数のフィルタに比べ遮断周波数を高くし、 次数も高いフィルタを使用した方がより良好な結果 が得られる可能性が考えられる。次数の高いフィル タを用いて矩形波を入力した場合の出力は図 5.18 に示すようなリンギングが大きくなる傾向にあり制 御系として発散傾向が強まるためどの程度高い次数 を使用するかは検討が必要である。



図 5.17 バタワースフィルタの次数と減衰度の関係



図 5.18 矩形波入力した場合の出力(リンギング)

次に、①の「模型船を見失わずに自動追尾できる こと」は言い換えれば、「模型位置が追尾用ビデオカ メラの画像中心からずれていてもかまわないが、範 囲内にマーカーが必ず入っていること」である。す なわち、画像の端の方に模型船が寄った場合には強 いフィードバックを掛け、画像の中心付近に模型船 がある場合には速度変動を極力小さく押さえるため にフィードバック変動は小さい方が良い。このよう な制御を考えた場合、図 5.8 に示したような改良型 不感帯を用いて比例定数を大きくする方法もあるが、 もっと簡単には2乗項を使用することが有効と考 えられる。ただし、(5.1)式から解るように2乗項 だけを有効とした場合、画像中心よりある一定量 だけ移動した位置で波周波数運動をおこなうこと になるに伴いフィルタを通過したわずかな運動変 化がフィードバック速度指令値としては大きな変 化となってしまう。これを避けるためなるべく模 型船を画像中心に移動させておく小さな積分項が 必要である。また、積分項及びフィルタ影響によ る発散を押さえるため、小さな微分項も加えてお くことも必要と考えられる。

#### 5.6 まとめ

追尾性能実験により今回のタンカー模型の 追尾をおこなうための制御係数としてはほぼ満足 できるものを探し出す事ができ、それぞれの制御 係数の働きが把握できた。不感帯については急加 減速指令を発生させないものが必要であることが 明らかとなった。フィルタについては事前の学習 が不十分であったため適切なフィルタを選択でき てはいないが、遮断する周波数が明らかであり、 今後は減衰度の高いフィルタの問題点について検 討する必要があることが明らかとなった。PID ゲ インに関しては各項の働きや制御に与える影響 (例えば積分項は発散傾向が増加する)を再確認し た。また、良好な追尾性能の制御係数の近くに追 尾不可能な制御係数が存在することが確認できた。

本実験結果から得られた知見を基に模型船の 自動追尾に適した制御係数について考察し以下の 方法を提案した。

- i) 減衰度の高いフィルタを使用する。(ただしリンギングに注意)
- ii) 不感帯は使用しない。
- iii) PID ゲインとしては2乗項と小さな積分項、
   小さな微分項で構成する。

フィードバック制御系としては(5.1)式に示す ように指令信号は速度指令であるため、例えば位 置指令のシステムを考えた場合には別の制御方法 が適している場合も考えられる。多様な実験目的 に適合した自動追尾のための台車制御方法と最適 な制御系設計法の開発が望まれる。

## 6. 台車自動追尾システムの単独応答性能試験

#### 6.1 ステップ応答試験の目的

より良い追尾性能を実現するには、運動の数学 モデルをベースとして制御系を設計するモデルベ ース制御系設計が1つの有効な方法である。したが って、そのためには制御対象の数学モデルを予め把 握しておくことが必要不可欠である。しかしながら、 現在、対象としている台車自動追尾システムは複雑 なシステムであるため、物理的な視点から作り込む ことは不可能と考えられる。

非線形シミュレータを構築し、ステップ応答試験 結果との比較により数学モデルを決定することは、 産業分野においては昔からよく用いられるシステム 同定法である[6][7]。この試験法は、簡単な入力に対 する応答出力を観察することにより、パラメータの 調整をすることが比較的容易である。特に対象の数 学モデルが簡単な一次系と見なせるならば、その時 定数Tや定常ゲインKは容易に求めることができる。

#### 6.2 試験法の概要

台車自動追尾システムは図 6.1 のような二重ルー プで構成されている。内側は速度制御ループであり、 外側は位置制御ループである。作業者は速度制御ル ープを変更することはできず、本システムにおいて は位置制御ループの制御係数及びローパスフィルタ の諸変数のみを任意に変更することが許されている。 そこでここでは、速度制御ループをまとめて一つの 動的システムとして考え、この部分の数学モデルを 求めることとする。モデル化のためのシステム構成 を図 6.2 に示す。





試験を実施する際には、図 6.3 のように追尾用ビ デオカメラを配置して、模型船に本来取り付けられ ている追尾用マーカーを木板に貼り付け、カメラの 中心からこれを任意の位置に動かしておいた状態か ら追尾開始する。なお、その際の位置制御系の制御 係数は比例係数を1とする。実験結果の解析の際に は入力を位置偏差、出力を台車の速度値として解析 する。

実験は X 方向と Y 方向に対して計 11 ケース実施 した。図 6.4 と図 6.5 にはステップ応答試験の時系 列、図 6.6 にはデータから得られた時定数 T (応 答の起動時から最終値の 63.2%に到達する時間) を示す。時定数は入力値の大きさに応じて線形に 変化している。また、方向の影響がないことも確 認できる。時定数が変化するために、このシステ ムは非線形システムとして考える必要があるが、 ステップ応答の様子から、この影響は加速度制約 によるものだと考える方が妥当である。



図 6.3 台車自動追尾システムのステップ応答試験



図 6.4 ステップ応答試験結果(X方向)



図 6.6 台車自動追尾システムの時定数

## 6.3 試験結果と数値計算の比較

前節までの検討を基にここでは実験結果から加速 度制約を 0.357m/s と計測し、モデル化対象を 1 次 系と加速度制約の組合せとして考え、そのステップ 応答の数値計算をおこなった。結果を図 6.7 に示す。 1 次系の定常ゲイン K は K=1.0 として、時定数 T は実験の結果を選択し T=0.32, 0.84, 1.76 と選択し た。また、確認のために時定数 T=0.00 についても 調べた。

図 6.7 の結果から、時定数が大きくなるにつれて 応答の立ち上がりが緩やかになる様子が明らかに分 かる。また、実験結果の立ち上がりは緩やかな一方 で、計算結果の方は急激に立ち上がっていることが 確認できる。これは、対象とするシステムの非線形 特性、または複雑な加速度・速度制約が働いている とも考えられるが、この図から判断することはでき ない。しかし、ここでの目的は台車自動追尾システ ムの大まかな特性を把握することが目的であるこ とからして、時定数 T=0.32 の数値計算結果は十 分に自動追尾システムの運動を模擬できていると 考えられる。



#### 6.4 台車追尾不安定化現象の数値再現

前節までに得られた数学モデルに基づいて自由 航走模型船を用いた実験時の追尾不安定現象を再 現できるかどうか確認するために数値実験をおこ なった。その計算をおこなう際には、模型船の運 動には実験で得られた航跡データを使用すること にした。PID ゲインとフィルタの影響について表 6.1に示す4つの実験結果を取り上げて比較する。

表 6.1 使用した制御系の諸変数

	制御係数(P,I,D)	フィルタ次数	遮断周波数(Hz)
Exp.A	(1.00, 1.00, 0.05)	1	0.1
Exp.B	(1.50, 0.10, 0.05)	1	0.1
	制御係数(P,I,D)	フィルタ次数	遮断周波数(Hz)
Exp.C	(1.00, 0.10, 0.05)	2	0.3
Exp D	(1 50 0 10 0 05)	2	01

#### 6.4.1 制御係数影響比較

ここでは、ローパスフィルタ[8]を同等とするこ とにより制御係数の台車の運動に対する影響を観 察する[9]。その結果を図 6.8 と図 6.9 に示す。Exp. A は追尾が可能であった実験である。これは数値 計算においても同様に追尾を再現している。一方 で、Exp. B は実験においては追尾中に急激に不安 定化して追尾ができなくなり、途中で実験を中止 したものである。これは数値計算においても同様 の不安定化現象を再現している様子が分かる。

では、不安定化した原因についてモデルに基づい て検討する。閉ループ系の周波数特性を図 6.10 に示 す。まず、振幅特性について見ると、ローパスフィ ルタの遮断周波数の近傍周波数において共振ピーク が現れている。詳細に調べてみると、Exp. Aの振幅 は 0.114Hz の時に 2.2 程度であるが、Exp. B におい ては 0.141Hz の時に 35 程度(図 6.10 ではピーク部 分省略)となる。つまり共振ピーク比が18倍程度で ある。これは入力周波数によっては大きな同調現象 を誘起させることを意味する。位相特性について見 ると、Exp.Aは低周波数領域においては、同相、つ まり位相遅れが0度である一方で、Exp.Bは位相が 360 度程度遅れていることが確認できる。これは、 模型船のゆっくりとした動きに対しても常に遅れた 状態で台車が追尾することを意味する。以上のよう な点が周波数特性の視点から考える追尾不能の原因 であると考えられる。







#### 6.4.2 フィルタ影響比較

前述と同様にして、ここではフィルタの遮断周 波数の違いにより誘起された不安定化の原因を調 べるために、Exp. C と Exp. D の結果について比 較検討する。Exp. D は追尾中に不安定化して実験 を中止した例である。図 6.11 と図 6.12 に数値計 算と実験結果を比較して示す。Exp. D では数値計 算が実験結果と同様に不安定現象を再現している 様子が確認できる。

図 6.13 に周波数特性を示す。振幅特性を見ると、 安定して追尾できた Exp. Cの方は 0.21Hz 近傍に おいて非常に高い共振ピーク 13.7(図 6.13 ではピ ーク部分省略)となっている一方で、Exp. Dの方 は 0.11Hz 近傍において 2.32 となっている。これ は前述した Exp. A と Exp. Bの比較時とは逆の結 果である。しかし、位相特性の結果を見ると、や はり不安定化した Exp. Dの方は低周波数域にお いては 360 度の位相遅れが確認されるが Exp. C の方は同相である。この特性の違いが実験時にお いて不安定化をもたらした要因として考えられる。

## 6.5まとめ

実海域再現水槽においてより高度な水槽試験を おこなうためには、台車の自動追尾システムを正 確に把握し、より良い制御系設計をすることが重 要である。そこで本章では、モデルベース制御系 設計をおこなうための準備として、ステップ応答 試験による自動追尾システムのモデル構築をおこ なった。ステップ応答試験の結果得られた数学モ デルに基づく自動追尾の数値シミュレーションは 自由航走模型船を用いた実験時に発生した不安定 化現象を再現することができた。今後、この数学 モデルを基にして高度な水槽試験に適した自動追 尾システム制御系の設計が期待される。



図 6.13 閉ループ系の周波数特性

## 7. 光学式6自由度運動計測

#### 7.1. 光学式計測の目的

相似則に従って模型船速度を決めて実験をおこ なおうとするとき、水面範囲が制限される屋内水 槽では模型船の小型化が必要になる場合がある。 しかし、現状の模型船試験では、姿勢を計測する ジャイロ等の計測機器を搭載する必要があるため、 一定以上の排水量、つまり大きさが必要になる。 例えば、この問題を解決するために、近年、その 技術の発展が著しい光学式計測技術を応用するた め、模型船の姿勢を計測する計測カメラを台車上 に設置しておけば、模型船に計測機器を搭載する 必要は無くなり、模型船毎の運動計測も比較的容 易に実施することが可能となる。

以上のようなことを踏まえ、ここでは光学式 6 自由度運動計測の有効性について検討する。

### 7.2. 光学式計測方式の概要

光学式6自由度運動計測装置には、(株)ディテ クト社のリアルタイム3次元トラッカー PRO-PTRACKERIを用いた。模型船の姿勢を光学式 6自由度運動計測装置計測するため、図7.1のよ うに片舷に3個、計6個の青色発光ダイオード (LED)を模型船の船側上部上に配置した。また、そ の際には横揺れ運動をした際にLEDが隠れ込まな いように、できるだけ高い位置になるようにした。 一方、光学式計測装置の高速度カメラは、LED が 精度良く計測できるように、図7.2のように走行 副台車端に計3台を配置した。

画像解析には市販の 2・3 次元運動解析ソフト Dipp-Motion Pro を使用し、図 7.3 に示すような 検定作業により座標系や計測に必要なカメラ情報 を事前に取得した上で計測をおこなった。



図 7.1 模型船に取り付けた計測用 LED



図 7.2 走行副台車に取り付けた画像解析用カメラ



図 7.3 光学式計測装置の検定作業

## 7.3 ジャイロ計測方式との比較

画像解析の後、各 LED の座標データが取得される ので、そのデータから重心座標を求め、簡単な三角 関数の操作により縦揺れ角と横揺れ角、船首揺れ角 を求めた。その値の有効性を示すために、波浪中に おける旋回試験(表 3.4 参照)データを例にジャイロ データと比較した。それを図 7.4~7.6 に示す。詳細 な比較を行うために、図 7.4 と図 7.5 に関しては時 刻 100~150 秒間のみを抽出してから比較している。 サンプリング周期等の違いから少しの差異があるよ うに思われるが、大半は十分有効な精度で光学式計 測は船体運動計測が実現されているように思われる。 しかし、図 7.5 を詳細に観察すると、横揺れ角は片 側が少し窪んでいるように確認できる。これは、船 側の片側に取り付けられた LED が横揺れした際に、 その反対側の船側でカメラ範囲から一瞬外れてしま うことによるものと考えられる。これは横揺れ角が 予想以上に大きくなったことによるが、カメラの取 り付け位置の工夫やカメラの数を増やすことで解決 できると思われる。





図 7.6 ジャイロ式と光学式計測の比較(船首揺れ角) (上図:ジャイロ,下図:光学式)

#### 7.4 光学式計測の課題

光学式計測方式による模型船運動計測は模型船 の小型化等を考えると、今後より重要な計測方式 になってくるものと考えられる。そのために、以 下のような課題について今後十分に検討する必要 があると考えられる。

1) 計測データの欠損

模型船試験においては、配置された LED が水面 近傍にあるために、反射の影響を強く受けること から、真のデータを見失うことが多い。 2)計測の実時間処理 近年の画像解析の処理速度が改善されているとは いえ、高周波数成分を含む運動をその特徴を逃さず に計測するには限界がある。また、上記のようなデ ータ欠損の問題から、今回の試験では計測後にデー タのソート作業及び、補間作業をおこなう必要があ り、計測の実時間処理において大きな問題となった。

#### 7.5 まとめ

画像解析を用いた模型船の運動計測は非接触式で あるために、今後の模型試験の方法論を大きく変え る可能性がある。それを探るために本章では、波浪 中の船体運動の光学式計測の有効性について検討し た。その結果、ジャイロによる船体運動計測と比較 し、十分有効な精度で計測可能であることを確認し た。一方、計測の実時間性やデータの欠損などの課 題が抽出された。今後は、それらの課題を個々に解 決しながら、計測のノウハウを蓄積させていく必要 がある。

## 8. 自由航走模型実験技術の課題と解決策

現在建設準備が進んでいる実海域再現水槽は長さ 78.6m、幅 40.0mで、全周に多分割式造波機が設置 され、XY 台車(最高速度 X:3.5m/s, Y:3.0m/s,  $\Psi$ :36deg/s)が装備される予定である。実海域再現水 槽でおこなわれる実験は模型船を台車で拘束或いは 半拘束で曳航する試験が多数を占めると考えられる が、自由航走模型実験の必要性も生じるものと考え ている。

一方、実海域再現水槽に比べれば水槽規模は小さ いものの海洋構造物試験水槽も自由航走模型試験を 想定し模型船を台車で自動追尾する機能を持ってい る。前章まででは、台車自動追尾機能を利用してタ ンカー船型の波浪中自由航走模型実験をおこなった 結果と用いた自動追尾機能の課題の抽出及び解決方 法について検討をおこなった。

本章では、海洋構造物試験水槽実験での検討結果 を踏まえながら屋内水槽における自由航走模型実験 をおこなうための課題を抽出すると共にその解決法 を提案する。

#### 8.1 課題1-模型船の位置・速度計測法

屋内水槽で自由航走模型実験をおこなう上での最 も大きな問題は模型船の位置・速度の計測である。 計測方法は模型の小型化と強い関係があるため、こ こでは模型船の位置・速度の計測方法による計測精 度などの課題と模型小型化への影響について述べる。 模型船の位置・速度の計測方法としては現在のと ころ以下のように大きく分けると2方式、細分化す ると6方式が考えられる。

(1)完全自由航走による位置・速度計測方式
①水中超音波方式
②光学式3次元画像処理方式
③室内 GPS 方式
(2)台車追尾による位置・速度計測方式
④光学式2次元画像処理追尾方式
⑤光学式3次元画像処理追尾方式
⑥室内 GPS 追尾方式





図 8.1 完全自由航走方式概念図



図 8.2 台車追尾方式概念図

1) 大分類の計測法とその得失

上記の大分類の計測方法の概念図を図 8.1、図 8.2 に示す。図 8.1 は完全自由航走による位置・ 速度計測方式で、水槽建家内(水中超音波の場合は 水槽内)に2箇所以上の模型船運動計測センサー を設置し、水槽全体を自由に航走する模型船の位 置・速度を計測するものである。この方法は80m 角水槽計測システムをそのまま移設する考え方で ある。実海域再現水槽は全周造波機であるため、 角水槽でおこなっていた波浪中直進試験をおこな うに当たって新たに克服しなければならない問題 は少ないと考えられるが、模型船に駆動装置・計測 機器を搭載しなければならないため、実験技術の大 きな革新は望めない。模型船運動計測センサーは水 槽全体をカバーしなければならないため、計測精度 或いは費用に問題がある可能性が高い。

図 8.2 は台車追尾による位置・速度計測方式で、 走行副台車上に1箇所以上の模型船運動計測センサ ーを設置し、その情報を基に X 台車及び Y 台車(さ らに回転盤)で模型を追尾し、台車の位置データと追 尾偏差から模型船の位置・速度を算出するものであ る。この方法の利点は、台車から模型船に電源供給 が可能であるためバッテリーの搭載の必要が無く、 操縦装置、計測機器を小型化せずに模型船を小型化 できる点である。また、台車に模型船加速機能を付 加することによりモータの小型化も可能であり、新 たな試験方法の開発の可能性が高い。さらに、運動 計測センサーが模型に近いためその計測精度はある 程度の分解能があれば十分であり、方法によっては 6自由度の運動を計測できる可能性が高い。しかし、 最も大きな問題は運動計測センサーによる模型運動 計測の実時間性であり、この問題を解決しない限り この方法は使用できない。

表 8.1 に、大分類の計測方法の得失について上記 で述べた以外も含め示す。

2) 小分類の計測法の得失

次に、小分類の位置・速度の計測方法による得失 について検討する。

①水中超音波方式は新たなシステム構築も考えら れるが、とりあえずは現在システム移設で考えると 移設費用があれば利用できる。ただし、突起物(超 音波発信子)の問題や計測精度、サンプリング周波 数、軽量化の問題などは以前と同様であり、水槽 が狭くなるために超音波の残響・反射の問題が新 たに増える可能性もある。

②光学式3次元画像処理方式については色々な 方式があるが、水槽全体をカバーし、かつ満足で きる計測精度を確保するためには費用が高くなる 可能性がある。また、運動計測のためのマーカー や発光体の海面反射等、克服すべき問題がある。

③室内 GPS 方式については以前に海洋水槽に おいてその計測精度が検討されている。それによ れば、送信機2台の最低機器構成で定点位置計測 精度1.7mm、移動状態の位置計測精度3.2mmと なっている。この計測精度は、平面運動の位置計 測精度としては十分であり、また、船体傾斜を考 えた場合、幅500mmの2点の角度計測誤差は 0.7°程度であるため模型の6自由度運動計測と してもほぼ満足できる計測精度と考えられる。し たがって、費用の問題を除けば有効な手段である と言える。また、送信機を増やすことによってさ らに精度を上げることが期待できる。

④光学式2次元画像処理追尾方式は、現在の海洋構造物試験水槽追尾システムと同じ方式である。 この方法は改良(台車による模型加速機能の追加 等)が必要ではあるが、平面運動の計測としては十 分な計測精度が得られ有効な方法と考えられる。 ただし、模型の6自由度運動の計測ができないため、模型船にジャイロの搭載が必要である。

大分類の計測方法	長所	短所
完全自由航走	台車性能に依存しない。(速度・加速	小型化対応が困難。(操縦性試験困
	度制限がない)	難、試験法の発展性が少ない)
	角水槽システムの移設で波浪中直進	模型自体の加減速能力が必要。
	試験は可能。	位置計測精度に難点あり。
台車追尾	電源供給可能で小型化の可能性高い。	運動計測の実時間性が必要。
	(試験法の発展性が高い)	台車性能に依存する。(速度・加速度
	計測法により6自由度運動計測可能。	制限がある)
	台車の加減速能力が利用可能。	

表 8.1 大分類の計測方法の得失

表 8.2 小分類の計測方法の得失

	No.	小分類	期待	技術的・費用的問題	導入
			精度		可否
自	1	水中超音波	$\triangle$	移設経費・軽量化、ジャイロ必要	$\triangle$
由	2	光学3次元	×	海面反射・分解能	×
	3	室内 GPS	0	軽量化・費用	0
追	4	光学2次元	0	海洋水槽で実績有り,ジャイロ必要	0
尾	5	光学3次元	0	実時間処理・費用、海面反射等技術的な精度	$\triangle$
	6	室内 GPS	0	実時間処理,費用	0

⑤光学式3次元画像処理追尾方式については7章 で述べたとおりであり、理論的な計測精度としては 6自由度運動計測も十分可能であるが、実際の計測 では水面反射による異常データの混入、マーカーの 取得不良など満足できる計測結果は得られなかった。 また、現在の装置では実時間処理が不可能である。 水面反射問題を含めたこれらの問題全てを解決する ことは現段階ではと思われる。

⑥室内 GPS 追尾方式については走行副台車に送 信機を取り付けるため③で述べた計測精度よりも高 い精度が得られ、6自由度運動計測も十分可能で有 望な方法と考えられる。ただし、実時間処理の問題 および購入費用が大きくなる問題があり、現状での 導入に関しては更なる調査検討が必要と考えられる。

以上、小分類の6方法について検討した結果をま とめて表 8.2 に示す。最終列の導入の可否について は著者らの判断であるが現状で確実な方法は④の方 法であると考える。ただし、実海域再現水槽の台車 設計に当たっては④に変えて⑥の方法も導入できる ようにしておくことが新たな試験方法開発につなが る。また、室内 GPS は③の方法としても使用でき るため実時間処理を考慮した装置購入の方策を進め ることは有意義であると考えられる。

舵角	無次元回頭	船長 4m	船長 3m
δ	角速度	の場合	の場合
(deg)	r'	旋回径(m)	旋回径(m)
$+35^{\circ}$	0.81	9.8	7.4
$+10^{\circ}$	0.33	24.2	18.2
$+5^{\circ}$	0.23	34.8	26.0

表 8.3 タンカー船型満載状態の旋回径

衣 8.4 タノカー 加空 蛭 何 仏 悲 (33%) の 旋 凹	山径
-----------------------------------	----

舵角	無次元回頭	船長 4m	船長 3m
δ	角速度	の場合	の場合
(deg)	r'	旋回径(m)	旋回径(m)
$+35^{\circ}$	0.71	11.3	8.5
$+10^{\circ}$	0.22	36.4	27.3
$+5^{\circ}$	0.13	61.5	46.1

#### 8.2 課題2-模型船の大きさ

実海域再現水槽は幅 40m と屋内水槽としてはか なり広いが 80m 角水槽に比べれば 1/2 の幅となるた め操縦性試験では模型船の大きさに制限を受けるこ とが考えられる。

操縦性試験で水槽幅が大きく影響する試験は旋回 試験である。その他の停止試験、Z 試験は横方向に 2~4船長の距離を確保すれば十分であり、船長4 mとしても片側 16mの距離があれば十分と言える。 旋回径は船種により異なるが、ここでは本報告の実 験で用いたタンカー船型の満載状態と軽荷状態で検 討する。表 8.3 に満載状態の旋回径を、表 8.4 に 軽荷状態の旋回径を示す。無次元回頭角速度 r'は 回頭角速度を船速船長比で無次元化した値である。 船長 4m模型の満載状態では舵角 5°の旋回はほ ぼ不可能であるが船長が 3mならば旋回可能であ る。一方、軽荷状態では船長 3mでも舵角 5°の 旋回は不可能である。しかし、必要な旋回試験は 舵角 35°旋回であり、それ以下の舵角については 円弧の一部が計測できれば良いため船長 4mであ っても最低限必要な試験は実施可能と言える。ま た直進性の高いコンテナ船等であっても船長 3m であれば舵角 10°程度までは十分試験が可能で あると考えられる。ただし、台車による模型船加 減速機能は必要と考える。

#### 8.3 課題3-模型船加減速方法の概念

前述の通り、模型船の位置・速度の計測法とし ては台車による追尾方式が望ましく、また、台車 による模型船加速機能の必要性がある。ここでは ④光学式2次元画像処理追尾方式を念頭に模型船 加減速方法について検討する。

④光学式2次元画像処理追尾方式の場合、走行 副台車の回転盤上に運動計測センサー(ビデオカ メラ)を設置する必要があるため回転盤上に模型 クランプを搭載することは不可能である。したが って、模型の前後をワイヤーで固定する方式が良 いと考えられる。図 8.3 にワイヤー式クランプ装 置の概念図を示す。実海域再現水槽の走行副台車 回転盤の計測開口部は 1.2m×0.9m(計測レール 幅)以下の寸法しかないため小型化を実現する設 計が必要で、また、開口部上に設置した運動計測 センサーを遮らないよう考慮する必要がある。 図 8.4 に自由航走模型実験における作業手順と模 型速度、クランプ開閉の関係を示す。通常の自由 航走実験の作業手順としては0点計測をおこない、 加速、計測、減速をおこなえば良いわけであるが、 台車の加速機能を利用し、追尾により模型船の位 置・速度を計測するためには加速状態と追尾状態、 減速状態の台車制御方法を切り替えると共にクラ ンプ開閉動作をうまく連動させておこなう必要が ある。まず、台車は指定した進行方向に指定した 加速度(或いは加速時間)で加速する。指定速度に 達した状態でクランプを解放し、台車を模型船追 尾制御に切り替え計測をおこなう。計測終了と共 にクランプを閉鎖すると共に台車は指定した減速 度で減速(進行方向は実験終了状態保持)する必要 がある。

ここで加速から追尾状態への制御切り替え時 について考える。追尾システムについては海洋水 槽と同じ位置偏差に対する速度指令をおこなう制 御系で考えると、クランプ開放と共に追尾制御に切 り替えてしまうと位置偏差は0であるので台車は急 減速する。また、クランプ解放後少し時間を空けて 追尾制御に切り替えても、模型が早くなった場合は 加速、遅くなった場合は更に大きな急減速が発生す ることとなる。このような制御切り替え時の問題を 解決する方法はいろいろあると考えられる。例えば、 指定速度に相当する位置偏差をクランプ閉の状態で 発生させておく(模型船が中心より前方にある)こと でも解決できる。しかし、追尾システムの方法によ っても全く異なる対応を取る必要が生じる可能性が あるため、実海域再現水槽の追尾システムやクラン プ装置の設計に当たっては、制御法切り替え時に発 生する可能性のある不具合を洗い出し、対処法を盛 り込んだものとしておく必要がある。







図 8.4 自由航走模型実験の作業手順

### 8.4 課題3-その他

以下では海洋水槽でおこなった追尾試験で抽 出された前述以外の課題或いは対応策を列記する。 1)電気的ノイズを避ける観点から台車駆動モー タはできれば DC モータが望ましい。

2) 模型船プロペラ駆動モータインバータの電気 的ノイズ対策の必要性有り。

以上の他、5章の自動追尾性能に関する検討では 制御系に置けるフィルタや不感帯、PID ゲインに ついて多くの知見を得ている。

## 8.5 実験技術の課題と解決策まとめ

現在建設準備が進んでいる実海域再現水槽に おいて自由航走模型実験をおこなうための課題を 抽出すると共にその解決法を提案した。

1) 模型船の位置・速度計測法としては実績があ る光学式2次元画像処理追尾方式を採用し,将来 的には室内 GPS 追尾方式を導入できる対策を取 っておくことが必要である。

2) 模型船の大きさとしては船長3m程度の自由 航走模型実験は十分可能である(4mでも可能)。

ただし、台車による模型船加減速機能が必要である。

3) 模型船加減速機能についてはワイヤー式クラ ンプ方式を提案すると共にクランプおよび台車追 尾制御システムを設計するに当たっての注意点を 示した。

4) その他、実験で抽出された課題を示した。

#### 9. 結言

6 自由度船体運動計算プログラムの開発の際に 検証データとして必要となる波浪中での船体運動 の計測データを自由航走模型船を用いた水槽実験 によって取得した。実験は海洋構造物試験水槽の 台車自動追尾システムを用いて実施した。制御係 数と台車の振動影響や実験の再現性等を検討した 結果、自動追尾システムで十分信頼できる計測デ ータが得られることが確認された。しかし、自動 追尾のための制御係数の影響を詳細に調べた結果、 これらを適切に設定することが必要であることが 明らかとなった。また、自動追尾システムにおけ る台車の単独応答特性計測のための試験を実施し、 適正な制御係数を設定するための数値シミュレー ション手法を示した。さらに、これらの実際に即 した課題の抽出と解決策の検討をもとに現在建設 が進められている実海域再現水槽に備えられる台 車の機能要検討について考察をおこなった。

本研究で得られた新たな知見と新しい実験手

法の実績は将来の実海域再現水槽の機能の充実とその能力の十二分な活用につながることが期待される。

#### 参考文献

- 上野道雄、二村正、藤原敏文、野中晃二:自由 航走模型船を用いた操縦性能実験における GPS (RTK-OTF 測位システム)の有効性につ いて、関西造船協会誌、第 228 号(1997)、pp. 113-121.
- 2)星野邦弘,湯川和浩,原正一,山川賢次:折損 タンカーの波漂流力と漂流運動,西部造船会会 報,第103号(2001), pp. 263-272.
- 3) UENO, Michio; TSUKADA, Yoshiaki; MIYAZAKI, Hideki; NIMURA, Tadashi: Measurement of Flow Fields and Hydrodynamic Forces Acting on Ships in Manoeuvring Motion, Proceedings of Techno Ocean 2006/ 19th JASNAOE Ocean Engineering Symposium, (2006), pp. 1-7 in CD.

- 塚田吉昭,上野道雄,二村正,宮崎英樹,藤 原敏文:旋回運動する船体・プロペラ周りの 流場計測,可視化情報全国講演会講演論文集 Vol.25, Suppl. No.2 (2005), pp. 107-110.
- 5) 元良誠三監修:船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, (1982), pp. 79-83.
- 6) 梶原宏之著:線形システム制御入門, コロナ 社, (2000), pp. 25-27.
- 7) 杉江俊治,藤田政之:フィードバック制御入 門,コロナ社, (2003), pp.41.
- 8) 萩原朋道:ディジタル制御入門, コロナ社, (2001), pp. 8-14.
- 9) 須田信英他: PID 制御, 朝倉書店, (2004), pp. 16-32.