

中水槽曳引車の更新概要

藤沢 純一*

Renewal of towing carriage of Mitaka No. 3 Ship Model Experiment Tank

by

FUJISAWA Junichi

Abstract

In 2022, the control system, operation system, and automatic measurement system of the main carriage of the Mitaka No. 3 Ship Model Experiment Tank were updated. The renewal of the main carriage system has resulted in a number of advantages. First, a matrix converter system is used for the motor control of the main carriage, which suppresses harmonic noise and reduces the initial and maintenance costs. The speed deviation of the main carriage has also been reduced, which improves speed stability. In addition, the forced braking force has increased, which improves safety in an emergency. Lastly, maintainability and operability have been improved by making the control system, operation system, and automatic measurement system identical to those of 400m towing tank.

* 流体設計系水槽試験技術グループ

原稿受付 令和4年10月17日

審査日 令和4年10月31日

目 次

1. まえがき	8
2. 中水槽本体および曳引車の概要	8
3. 曳引車の更新	12
3.1 操作性, 機器の互換性について	12
3.2 電動機と制御方法について	12
3.3 強制制動システムと速度検出方法について	13
3.4 安全性の確保について	13
3.5 自動計測に適した設計	14
4. 曳引車質量の計測	14
5. 速力試験	15
5.1 対地速度計測	15
5.2 速度偏差計測	15
6. 強制制動試験	16
7. その他	17
8. まとめ	17
References	17

1. まえがき

海上技術安全研究所では, 当所ビジョンの「水槽試験・理論解析による実海域性能を高度推定できる技術の確立」のため, 水槽試験での高度な品質管理に取り組んでいる¹⁾。このためには高度な計測技術が必要とされその一環として水槽施設の高度化が求められている。

三鷹第3船舶試験水槽²⁾(中水槽)は1971年に建造され50年が経過した。この間1996年に制御系および操作系が更新されたが駆動方式は変更せず, 交流電圧をサイリスタ整流方式により直流電圧に変換し直流電動機4台を用いた駆動となっていた。その後25年近く経過した昨今ではサイリスタ制御盤やそれに付随する制御盤の老朽化や保守部品の入手が難しくなり故障対応が困難となってきた。産業用電動機は近年のインバータなどの発展により, 三相交流を用いた電動機が信頼性の高さもあって主流となっている。

また制御方式も古く自動運転や自動計測を行うには, 使い勝手の悪いシステムであった。更に分電盤や配線ケーブルの多くは建造当時のままとなっており老朽化が著しく進んでいた。

今回2021年度に中水槽曳引車の制御系, 操作系, 自動運転システム, 自動計測システムを更新したのでここに報告する。

2. 中水槽本体および曳引車の概要

中水槽は三鷹第2船舶試験水槽³⁾(400m水槽)と平行に建設された曳航水槽で, 長さが150m, 幅が7.5m, 深さが3.9mを有している。形状, 主要目などを図1から図4および表1, 表2に示す。

中水槽の特徴として400m水槽ではできない水位を落とした浅水試験が実施できること, 400m水槽で実施するには非効率な試験や小型模型を使った試験を行えることにある。また400m水槽に比べ小規模なため使い勝手の良い水槽として用いられている。中水槽において小型模型で各種の基礎的研究を行った後, 400m水槽において大型模型を使った計測を実施することができる。昨今では400m水槽の使用頻度が高く, 400m水槽では実施できない大型模型を使った試験も実施されており, 400m水槽の補助水槽としても利用されるようになっている。

また油膜法による船体表面の流れの可視化や、近年では水槽水が汚濁しても交換できることからトレーサ粒子を散布したPIV計測が行われている。

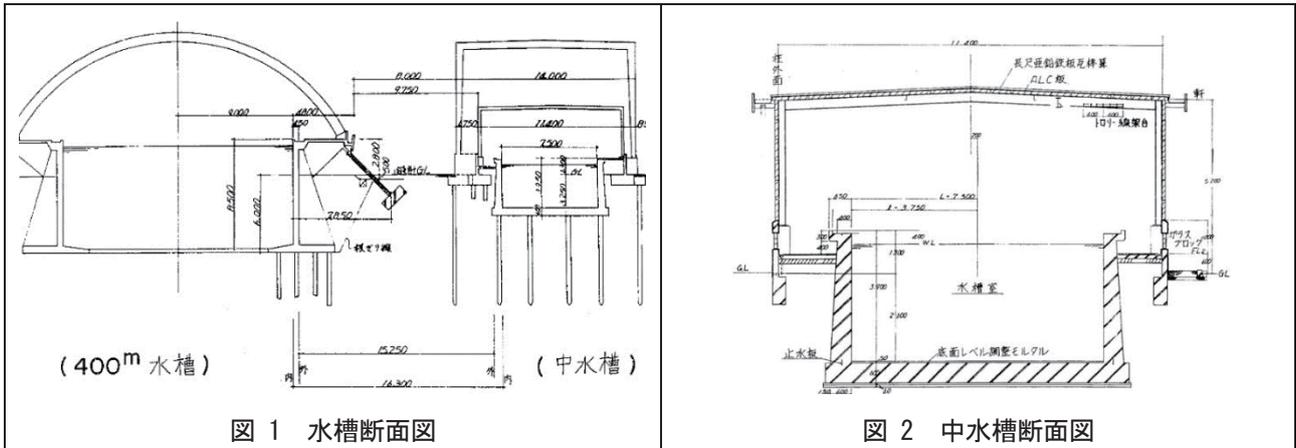


図1 水槽断面図

図2 中水槽断面図

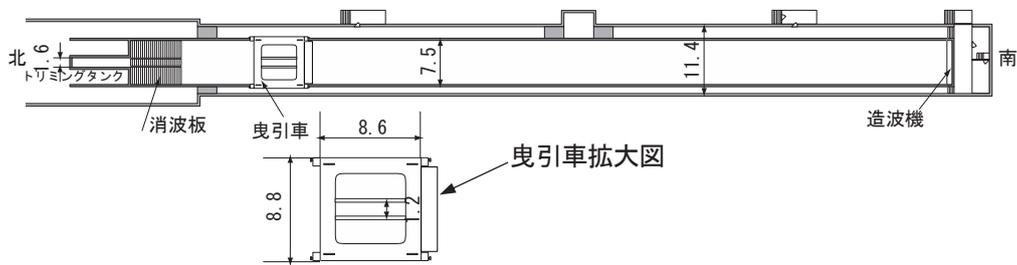


図3 中水槽平面図

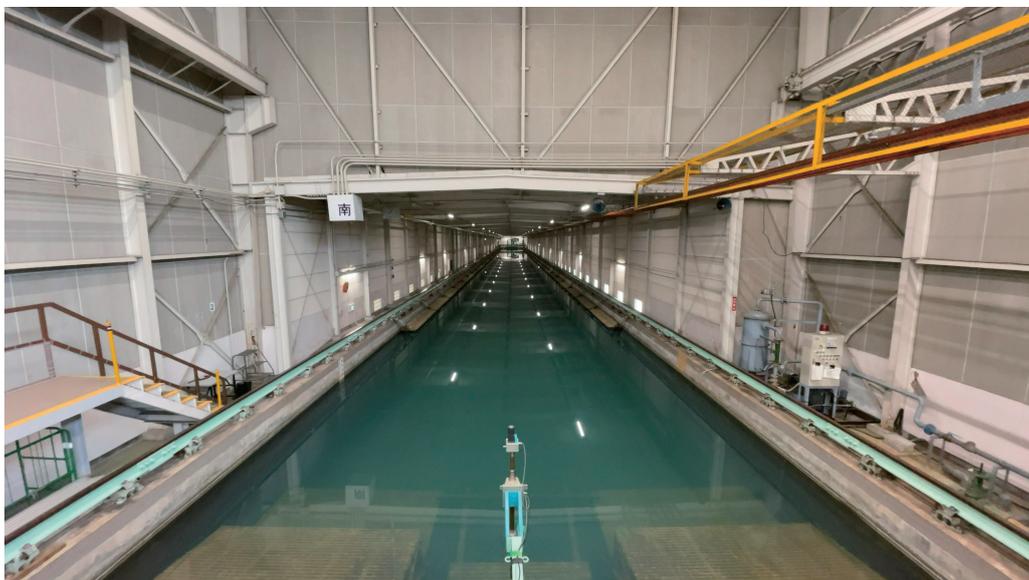


図4 曳引車上からの中水槽全景

表1 中水槽の主要寸法

	長さ[m]	幅[m]	高さ(G.L.より)[m]	深さ[m]	標準水位[m]
水槽部	140.0	7.5	1.3	3.9	3.5
トリーミングタンク	10.0	1.6		1.7	

表 2 曳引車の主要寸法

		更新前	更新後	
長さ	[m]	8.6		
幅	[m]	8.8		
曳引車速度	[m/s]	0.100 - 6.000		
駆動電動機	電圧	[V]	DC110	AC400
	出力	[kW]	30	37
	台数		4	
質量	[t]	23.65	20.04	

中水槽における制御関連の主な更新履歴を図 5 に示す。1996 年に制御系、操作盤の更新が行われ制御系がデジタル化された。2007 年に造波機を更新し曳引車上からも操作できるようになった。2014 年にシーケンサ盤を更新し自動運転が可能となった。今回 2021 年に駆動電動機、制御系、制動システムなど大規模な更新を行った。

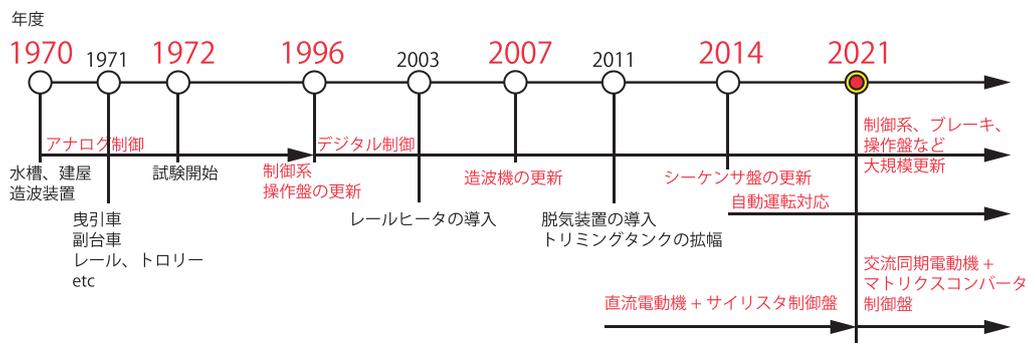


図 5 主な更新年表

海上技術安全研究所の曳航水槽は 400m 水槽と中水槽の 2 施設があるが、制御方法、制御機メーカーや運転操作性が大きく異なっていることからハードウェア、ソフトウェア、運転手法、安全性の確保などにおいて互換性が無かった。このため 400m 水槽、中水槽における曳引車操作方法の教育、訓練、保守などに大きなコストが発生することもあり、更新に当たっては両方の互換性を高めることは重要事項であった。このため曳引車の操作性や制御方法などは 400m 水槽曳引車にならない同様なシステムとした。

更新前における曳引車上の配置を図 6 に、更新後の配置を図 7 に示す。今回の更新でほぼ全ての機器が更新された。なお車輪、車軸、ギア、走行レール、トロリ線などの機械系は更新の対象外である。

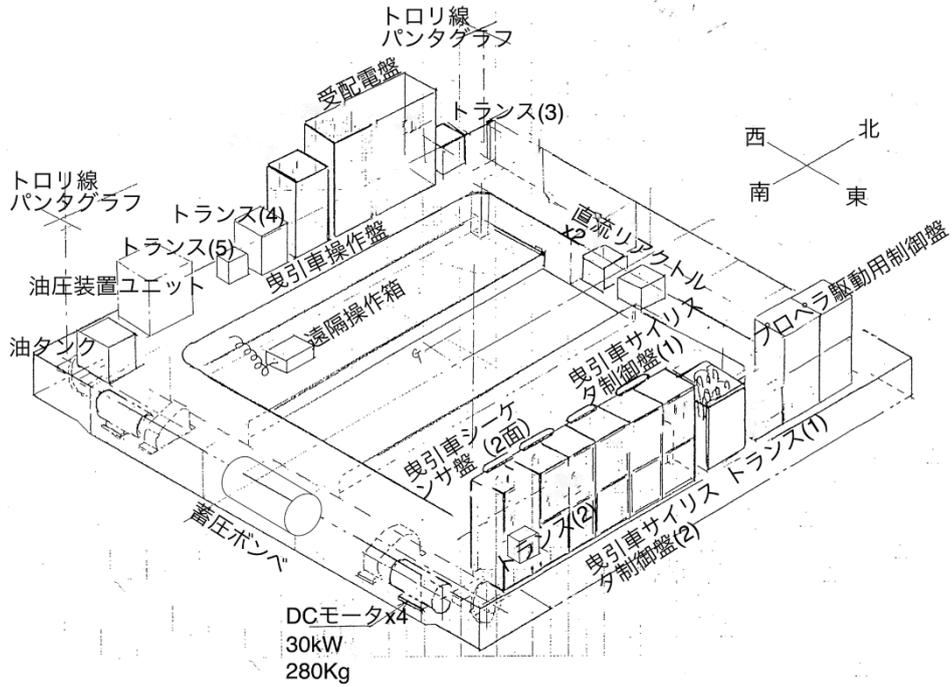


図6 更新前における曳引車上の配置

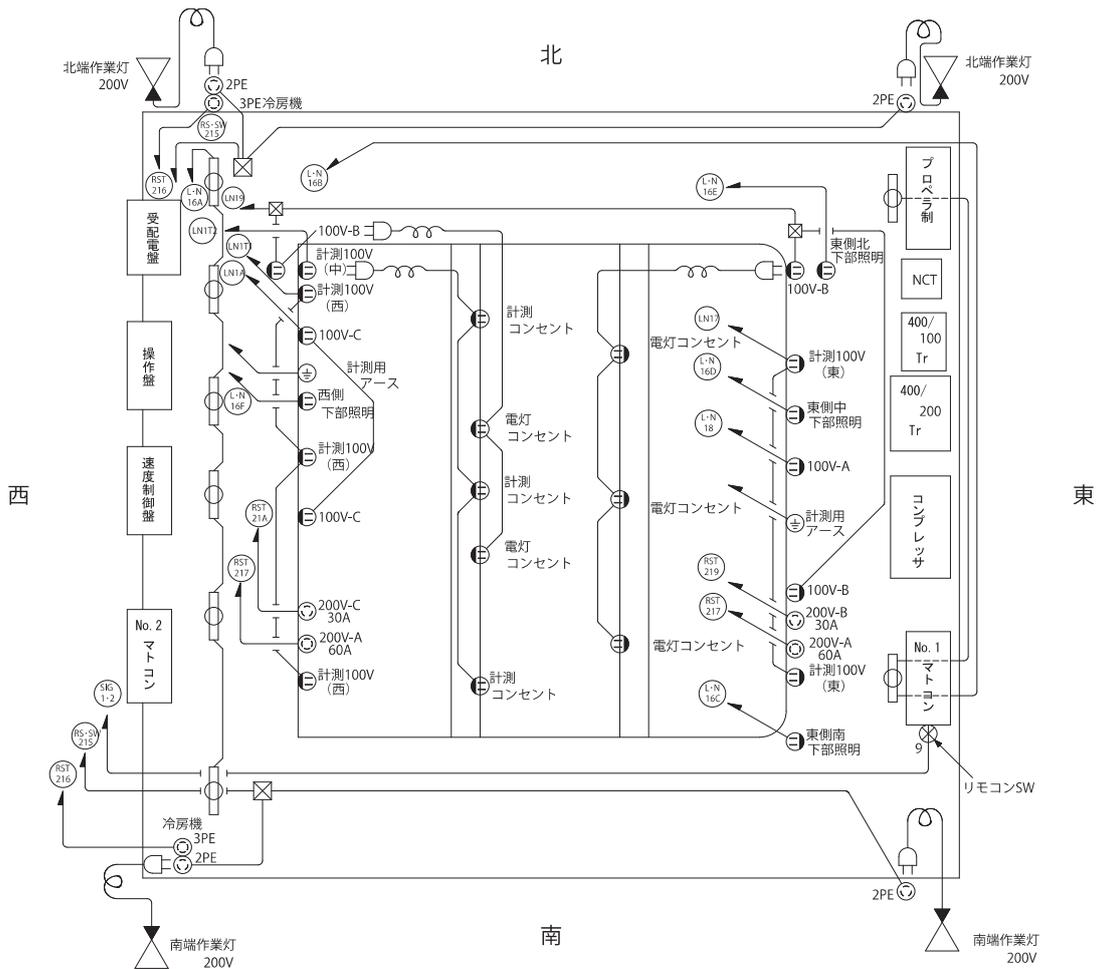


図7 更新後における曳引車上の配置

3. 曳引車の更新

機器の更新は、サイリスタ盤2面、シーケンサ盤2面、直流リアクトル2台に替わりマトリクスコンバータ盤2台、速度制御盤1台が設置された。また強制制動システムの更新にともない油圧装置ユニット、油タンク、蓄圧ポンベが不要となり、代わりにコンプレッサ1台が設置された。

曳引車の更新に当たって400m水槽と互換性を高めることや、使い勝手や操作性を向上させるため主に以下のことを行った。

1. 操作性，機器類の互換性を向上。
2. 直流電動機から交流同期電動機への変更およびマトリクスコンバータ制御の採用。
3. 強制制動システムおよび速度検出方法の変更。
4. 安全性の確保。
5. 自動計測に適した設計。

3.1 操作性，機器の互換性について

400m水槽と同様な操作ボタンを配置した運転操作盤を設置し、制御盤の電源投入や曳引車の走行方法、タッチパネルのメニューをほぼ同一とすることで操作の統一性を高めた。制御機メーカを統一することで機器の互換性を高めた。これにより故障対応や制御ソフトの修正などが以前より簡単となった。

今までは400m水槽と中水槽で電源投入方法やタッチパネルの操作に互換性が無く、両方の操作方法を熟知しておく必要があったが、これにより片方の操作を熟知していればもう片方も違和感なく操作できるようになった。

3.2 電動機と制御方法について

今回における更新の大きな特徴として400m水槽曳引車同様に走行用の電動機を交流同期電動機とマトリクスコンバータ方式の制御方法を採用したことにある。交流同期電動機は力率調整が可能で負荷が変動しても一定の回転速度を保つ、誘導電動機より効率が高いという特徴がある。一般的なインバータ制御は三相交流電圧を直流電圧に変換した後三相交流電圧に変換しているが、マトリクスコンバータは電源の三相交流を直接、異なる電圧や周波数を持った三相交流に変換できる。これにより制御盤の小型化やインバータ特有のノイズが低減される。なお曳引車へのマトリクスコンバータの搭載は400m水槽のほか、民間造船所が所有している曳航水槽の曳引車にも採用されている。インバータ方式とマトリクスコンバータ方式の比較を表3に示す。このようにマトリクスコンバータ方式はインバータ方式より有利な点が多い。

表3 インバータ方式とマトリクスコンバータ方式の比較

項目	インバータ方式	マトリクスコンバータ方式	マトリクスコンバータの有利性
ノイズ	高調波ノイズが発生する。	高調波が抑制されている(K5=0)。	◎
ノイズ対策	ノイズフィルタ，零相リアクトル，ACリアクトル等様々なノイズ対策機器が必要である。	動力ケーブルに零相リアクトルを設置するのみの対策で良い。	◎
電源回生	回生抵抗器を付けて消費する必要がある。	電源回生を供給電源側に戻すことができる(発電)。	◎
指令に対する追従性	速度変動が大きい動きでも追従性が良い。	速度変動が大きいとき追従性が悪いが問題ないレベル。	△
力率	フィルタ等を使用するため力率が低下する。	外部へ設置するフィルタが無いため力率が高い。	◎
設置スペース	インバータ盤，コンバータ盤，フィルタ，回生抵抗器等周辺機器が必要とするため大きなスペースが必要。	マトリクスコンバータ盤の設置スペースがあれば良い。	◎
初期コスト	本体は安いですが，ノイズ対策回路が必要のためそのコストが必要となる。	本体は高いが，ノイズ対策回路が不要のためトータルではコストが抑えられる。	◎

工事期間	ノイズ対策回路が必要となるためマトリクスコンバータ方式より長めとなる。	ノイズ対策回路が不要となるためインバータ方式より短めとなる。	◎
メンテナンス（手間、コスト）	コンデンサの更新が定期的に必要な。	コンデンサの更新は不要。	◎

3.3 強制制動システムと速度検出方法について

曳引車の制動には電動機による電力再生制動を利用した電気制動システムのほか、より大きな制動力を持った強制制動システムを搭載している。強制制動システムは曳引車が走行するレールの両側面をブレーキパッドで機械的に挟む構造となっている。

曳引車に取り付けられている強制制動システムは油圧を使ったばね制動システムで、大きな油圧ユニット、込み入った油圧配管、バルブで組み立てられた大型のアクチュエータで駆動する複雑なシステムとなっており、近年では保守に窮していた。これを400m水槽曳引車で用いられている空気圧と油圧を用いたコンパクトなシステムとすることで、簡易な構造で旧来と同等以上の制動力が得られると共に曳引車の質量が軽量化された。

図8に取り外した古い強制制動システムの一部と、図9、図10に新しい強制制動システムの一部を示す。

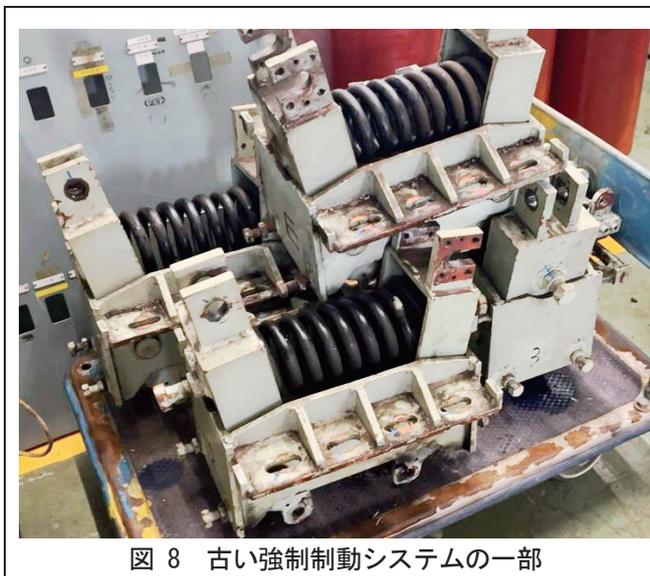


図8 古い強制制動システムの一部

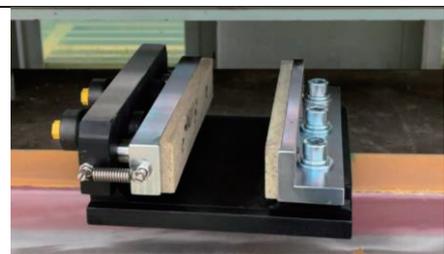


図9 新しい強制制動用ブレーキパッド



図10 曳引車への取り付け

速度検出は速度検出車輪（タッチローラ）を走行レールに押しつけそのエンコーダ出力を使った方式から、400m水槽同様に駆動電動機のエンコーダ出力を使った方式へと変更した。保守時にタッチローラの取り外し清掃などを行うが、取り付け時における走行レールとの押しつけ荷重やアライメントの調整に困難があった。これを駆動電動機のエンコーダ出力を用いることで、タッチローラを使用せず速度検出ができるようにした。

3.4 安全性の確保について

曳引車の位置をリアルタイムで把握することは、安全性を確保するため重要な事柄である。旧来は既知の地点に設置した原点を通過することで位置補正を行い、走行中はタッチローラの出力を見る事で現在位置を算出していた。今回400m水槽曳引車同様にレーザ距離計を設置し、曳引車が停止する毎にレーザ距離計による位置計測が行われ現在位置を求めている。走行中は駆動電動機のエンコーダ出力から距離を算出している。なおレーザ距離計の故障対応として、既知の地点を原点とした方式も用いることができる。

曳引車の走行中は水槽に設けられたターゲット板を通過することで自動停止させていた。旧来はターゲット板の数が多く、走行中に自動停止を解除させるボタンを数回押す必要があった。またハードウェア制御のため、ターゲット板の個数だけリレーも必要とし、ターゲット板を追加するとハードウェアの改造が必要であった。また多数有るリレーが1つでも故障すると安全の観点から曳引車は走行ができなくなる。今回、ハードウェアとしての

ターゲット板は設置せずソフトウェアで自動停止位置を設定した。なお水槽の南側、北側にはハードウェアのリミットスイッチを取り付け、ここを通過すると強制制動を行うようにした。

曳引車が水槽からトリミングタンクへ入る場合、水槽の端へ移動することや幅が狭くなることから運転に大きな注意を払う必要があり、運転者への心理的な負担が大きい。今回水槽からトリミングタンクに入る前には自動停止させる機能、トリミングタンク内での速度制限、水槽北端に付いている非常停止用ストッパーに曳引車が当たらないようにトリミングタンク端で自動停止する機能を取り付けた。これによりトリミングタンク内の移動における心理的負担を軽減させた。またトリミングタンク端で自動停止できることから毎回同じ位置で停止できるようになった。

このほか陸上に非常停止ボタンを2箇所に設けた。これを押すことでトロリ線に供給される電源が遮断され、曳引車に強制制動がかかる。なお非常停止ボタンが取り付けられている盤には外部端子を設け、非常停止ボタンがついたリモートペンダントを取り付けることで任意の位置まで延長できるようにした。

曳引車周囲の監視として図 11 に示すように曳引車の 5 箇所に監視カメラを設置しそれを図 12 のモニタに映すことにより、目視による安全確認が行われるようにした。



図 11 監視カメラ



図 12 モニタ

3.5 自動計測に適した設計

400m 水槽では FL-Net（日本電機工業会により開発されたオープンネットワーク）を用いた自動運転、自動計測システムとなっているが、中水槽では FL-Net が整備されていなかったため異なる制御方法が用いられていたが、今回の更新で 400m 水槽同様に FL-net を用いた制御方法となった。これにより 400m 水槽、中水槽でソフトウェアの互換性が高まりソフトの開発や修正が行いやすくなった。

4. 曳引車質量の計測

曳引車の更新にあたり曳引車の質量を計測した。計測は更新工事前と工事後に行い質量、重心位置を比較した。図 13 に示す通り曳引車の四隅にロードセルを取り付けたジャッキを設置し、ジャッキアップにより車輪を浮かせ質量の計測を行った。



図 13 計測の様子

計測結果を表4に示す。参考として建設時の結果も示す。計測の結果、質量は15%程軽量化し、重心位置は曳引車のほぼ中央のままであった。

表4 曳引車質量の計測結果

		単位	建設時	更新前	更新後
質量		[t]	23.6	23.65	20.04
重心位置（曳引車の中心より）	南北方向	[mm]	北へ31.5	南へ81	南へ54
	東西方向	[mm]	東へ168.0	西へ21	西へ28

5. 速力試験

5.1 対地速度計測

対地速度は曳引車を設定速度で走行させ、2点間を通過した時間より算出した平均速度とした。計測は南進、北進で行い2点間の距離は40mとした。計測した速度の時系列波形の一例を図14に、計測結果を表5に示す。対地速度と設定速度を比較すると、南進では最大0.5mm/s以下で、北進は最大0.8mm/s以下で良い一致を示している。この結果より設定速度を対地速度と見なしても問題ないことが分かる。

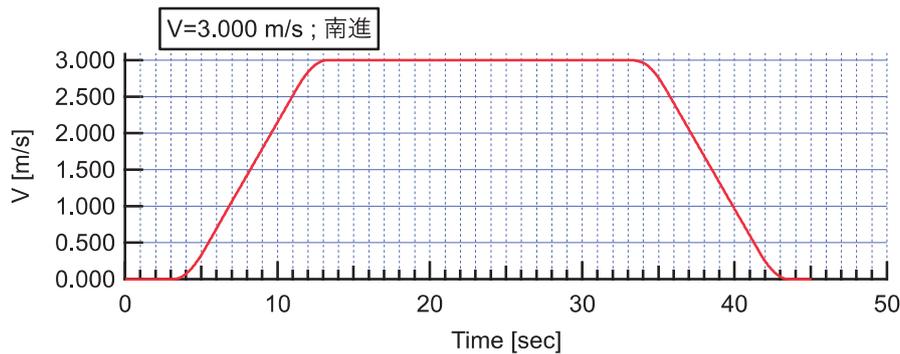


図14 速度時系列波形の一例

表5 対地速度の計測結果

設定速度 [m/s]	南進		北進	
	対地速度 [m/s]	差 [m/s]	対地速度 [m/s]	差 [m/s]
1.000	1.0002	0.0002	1.0003	0.0003
2.000	2.0002	0.0002	2.0003	0.0003
3.000	3.0004	0.0004	3.0005	0.0005
4.000	4.0004	0.0004	4.0006	0.0006
5.000	5.0005	0.0005	5.0008	0.0008
6.000	6.0005	0.0005		

5.2 速度偏差計測

曳引車を一定速度で走行させ、駆動電動機のエンコーダ出力による速度を計測し速度偏差を求めた。速度偏差は $\sqrt{\sum(V_{set} - V_i)^2 / n}$ (V_{set} : 設定速度, V_i : 計測された速度, n : 計測点数) で算出した。計測された時系列波形の

一例を図 15 に、計測結果を表 6 に示す。この結果、南進北進とも速度偏差は最大 0.6mm/s 以下であり、非常に安定していることが分かる。

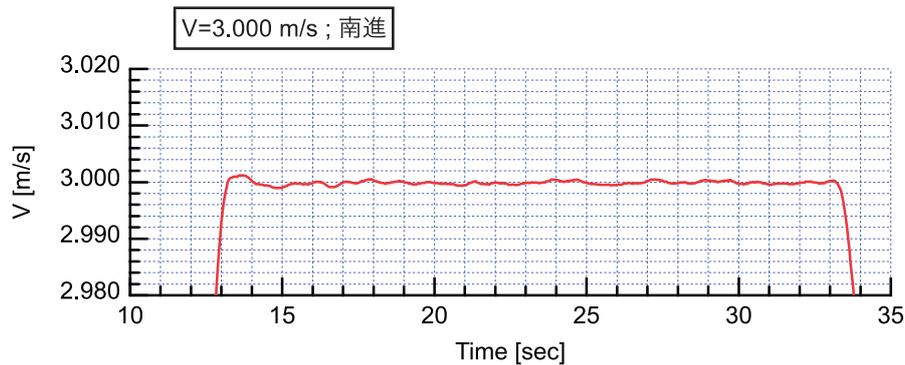


図 15 一定速度中における時系列波形

表 6 速度偏差の計測結果

設定速度 [m/s]	速度偏差 [m/s]	
	南進	北進
1.000	0.0004	0.0004
2.000	0.0003	0.0003
3.000	0.0003	0.0003
4.000	0.0003	0.0006
5.000	0.0004	0.0003
6.000	0.0006	0.0005

6. 強制制動試験

曳引車が一定速度で走行中に非常停止ボタンを押すことで強制制動を掛け、この時曳引車にかかる減速度 g を計測した。計測された時系列波形の一例を図 16 に、計測結果を表 7 に示す。強制制動時における減速度は建設時では最大 0.23g となっており、今回の更新ではそれ以上の減速度が得られた。これはブレーキパッドの性能向上のほか、曳引車の質量が低減したことによる。

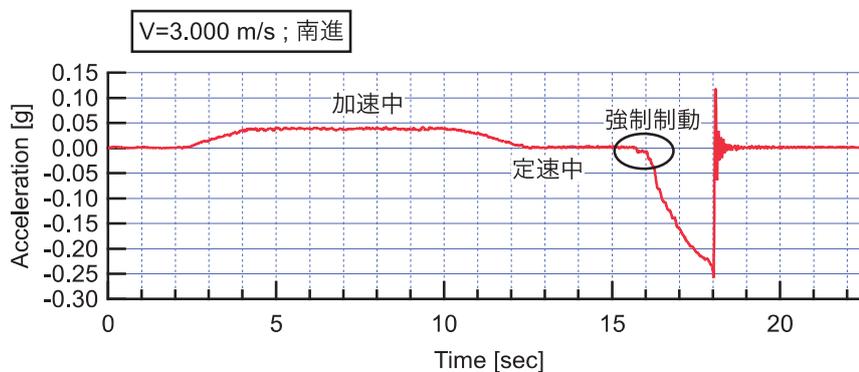


図 16 強制制動時における加速度の時系列波形

表 7 強制制動時における減速度

設定速度	減速度
[m/s]	[g]
1.000	0.175
2.000	0.225
3.000	0.248
4.000	0.266

7. その他

このほか、中水槽の使い勝手を上げるため以下のようなことも行った。

- 無線 LAN 接続されたタブレット PC を用い、運転操作盤以外でも曳引車の走行ができるようにした。
- 曳引車速度と位置表示を運転操作盤以外に無線 LAN 接続されたタブレット PC に表示させ、運転者以外も視認しやすいようにした。
- 今までは受配電盤など盤の扉にブレーカのスイッチなどがむき出しになっており、誤操作する可能性があったが、スイッチ類は全て制御盤内に納め安全性を高めた。
- 曳引車上の照明を蛍光灯から LED 化した。
- 曳引車照明のスイッチを集中させ出入口口に設置し、照明の入り切りを簡単にした。
- 計測レールが搭載されている計測桁の下面に LED 照明を設置し、模型船などを照らすことができるようにした。
- 水槽内における所内 LAN の無線 LAN 化や公共無線 LAN を設置し、水槽内のほとんどの場所でネットワーク接続できるようにした。
- 中水槽と 400m 水槽で用いている自動計測システムにおけるプログラムの互換性が高まった。

8. まとめ

当所ビジョンの「水槽試験・理論解析による実海域性能を高度推定できる技術の確立」のため、水槽試験での高度な品質管理に取り組んでいる。その一環として中水槽曳引車の更新概要について紹介した。

今回行った曳引車の更新により以下のことが実施された。

- 中水槽曳引車の運転制御を高度化した。
- 安全性、曳引車の速度安定性が向上した。
- 制御系、操作系、自動計測システムなどを 400m 水槽と同等とすることで保守性、操作性が向上した。

これらの結果は水槽試験での計測の効率化に寄与するとともに、今後においても中水槽における研究の発展に貢献することができる。

References

- 1) https://www.nmri.go.jp/about/pdf/vision_2019.pdf
- 2) 推進性能部：三鷹第 3 船舶試験水槽の建設について、船舶技術研究所報告，第 10 巻第 6 号（昭和 48 年，（1973 年））。
- 3) 推進性能部：三鷹第 2 船舶試験水槽の建設について、船舶技術研究所報告，第 6 巻第 4 号（昭和 44 年，（1969 年））。