平成30年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「「高安全性・高信頼性」「小型化・軽量化」「高速化」を実現した 波動歯車減速機を用いた革新的自律制御電動バルブ開発」

研究開発成果等報告書

令和元年5月

担当局 九州経済産業局 補助事業者 公益財団法人飯塚研究開発機構

目次

第	1	章	研究	2.開発の概要	1
	1	- 1	研3	究開発の背景・研究目的及び目標	1
	1	- 2		究体制	
	1	- 3	成身	果概要	9
		- 4		該プロジェクト連絡窓口	
第	2	章	自律	:制御の実現(IoT 対応)	11
				定的な圧力検出可能なバルブ構造の開発	
		- 1 -		開発目的	
		- 1 -		課題と目標	
		- 1 -		研究内容及び成果	
	2	- 2	電動	動バルブ用サーボドライバの開発	14
	2	- 2 -	1	開発目的	14
	2	- 2 -	2	課題と目標	14
	2	- 2 -	3	研究内容及び成果	14
	2	- 3			
	2	- 3 -		開発目的	
	2	- 3 -	2	課題と目標	18
	2	- 3 -	3	研究内容及び成果	18
	2	- 4		報ネットワーク及び自律制御プログラムの開発	
		- 4 -		開発目的	
				課題と目標	
	2	- 4 -	3	研究内容及び成果	20
第				バルブ用アクチュエータの構造・機構の革新	
	3	- 1	高村	幾能・小型軽量の電動バルブ用アクチュエータの開発	25
	3	-1-	1	開発目的	25
				課題と目標	
	3	-1-	3	研究内容及び成果	25
第				· · 統括	
				な成果	
	4	- 2	研习	究開発後の課題	30
	4	- 3	事章	業化展開について	30

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

【本事業の概要】

省人化の進む高機能船舶に搭載する電動バルブには、配管破損事故などの緊急時に自動 閉鎖する等、安全確保のための自律制御機能が求められている。また、顧客からは小型軽 量化、動作の高速化も望まれており、現行の電動バルブではニーズに対応出来ない。本研 究開発では、波動歯車減速機を有する新たな動力機構と制御技術を用い、自律制御による 高安全性、小型軽量、動作の高速化を実現した革新的電動バルブを開発する。

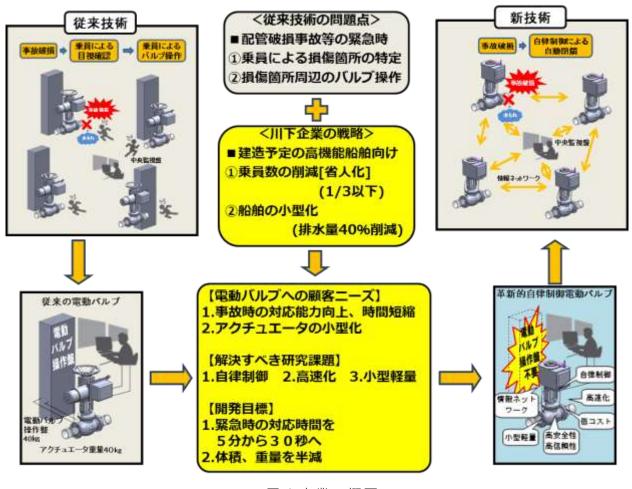


図 1.事業の概要

【研究開発の背景】

・市場の状況

産業用バルブの国内市場は、平成 16 年度以降約 4,000 億円で推移している。船舶で使用している電動バルブは、空調配管系統、消火配管系統、燃料配管系統等の中で主に省力化の目的で遠隔操作弁として使用されている。

電動バルブの構造は、バルブにアクチュエータ(電動駆動部)を組み合わせたもの

で、アクチュエータ部には手動レバーを取り付け、手動操作も出来るようになっている。本方式は他バルブメーカも同様な構造を有しているのが現状である。このような 高機能船舶向け電動バルブは、アクチュエータ部には耐衝撃性が求められることから 大きく、重量が重いという課題がある。

国内では「日本再興戦略」改訂 2015 (平成 27 年 6 月閣議決定)が IoT・ビッグデータ等に関する政府方針として示されたところで、インターネットを通じてあらゆるモノやサービスが連携することで、新しい価値やビジネスモデルの創出を目指した取り組みとなっている。

一般商船では、ビッグデータを活用した先進安全運行システムの開発が船舶業界全体で進められている※。船舶航行データや気象データ等から最適運航や船体メンテナンス、緊急時の安全確保につなげることを目的としている。開発ロードマップでは、障害・故障早期発見システム、運転状態監視技術の開発が 2020 年完成を目標に進められている。※出展:日本船舶技術研究協会「船舶ビッグデータを活用した海事産業の将来イメージ」、2015 年 6 月

このことを電動バルブに目を向けると、先に述べた中央監視盤と電動バルブの1対 1の個別対応から、中央監視盤と船舶内系統の全電動バルブとの1対nの全体対応が 必要とされている。そこで、個別対応から全体対応が可能となる、自律制御が可能な 革新的な電動バルブの開発が要求されている。

・鷹取製作所の3D積層造形技術の開発経緯

鷹取製作所は、平成 25 年度戦略的基盤技術高度化支援事業にて、「木型・金型を用いない高精度砂型鋳造法による、船舶用銅合金大型鋳物製品の低コスト・短納期・無欠陥を目指した生産技術の開発」を実施。



図 2.3D 積層造形砂型設計品



図 3.3D 積層造形砂型

3D 積層造形砂型鋳造法に独自の「砂型用粉体技術」「砂型の大型化技術」「凝固の最適化技術」を組み合わせた高精度で大型の 3D 積層造形砂型鋳造法を確立した。

本研究開発では、バルブ構造の試作段階で多種類の鋳物部品が必要となるが、3D積層造型技術(特許第5867938号)により鋳型を造型することで木型が不要となり、革新的自律制御電動バルブを短期間で開発する。

・鷹取製作所の電動バルブ用アクチュエータ開発の技術

鷹取製作所は、高機能船舶向け電動バルブを昭和 48 年度建造分から現在まで約4400 台を納入してきた。アクチュエータは、国内メーカから購入しているが、その修

理・メンテナンス、性能評価は平成 13 年より自社工場で行っており、アクチュエータ機構に関するノウハウの蓄積がある。

また、九州工業大学坂本教授の持つサーボモータ制御技術と鷹取製作所の技術を組み合わせることで、情報ネットワークや自律制御を実現する革新的な制御回路の共同開発が可能である。

【研究課題及びニーズ】

・新技術を実現するために解決すべき研究課題

国内の造船所 (川下企業 三菱重工業(株)防衛・宇宙ドメイン 艦艇事業部) は、数年後に建造予定の高機能船舶向けに、次の要求事項について検討している。

・乗員数の削減[省人化](1/3以下)

緊急事態が発生した場合でも、少人数の乗員でこれに対応できる機能(システム) が求められている。

・船舶の小型化(排水量 40%減)

船舶の小型化に伴い、機器や配管設備等の小型化、軽量化が求められている。

本研究開発において解決する課題及びニーズの概要は以下の通りである。

イ、小型化・軽量化

高機能船舶は、5,000トンから3,000トンに 小型化され※、一段と艤装密度が高くなること から、単に機器の小型軽量化に留まらず、大きく 重い電動バルブ操作盤の機能統合を含めて体積重量 半減といった、革新的な小型軽量化が求められている。

※出展:Deffence World



ウ. 高精度化・高速化

図 4. 従来の電動バルブ

火災発生や配管破損等の緊急対応能力向上のため、素早い初動と 機器の高速化が要求されている。

オ、高安全性・高信頼性

高機能船舶は乗員数が 1/3 以下に削減されるとされているが、現状のシステムで省人化された場合、損傷箇所の特定作業に時間を要し、被害の拡大(機器の水没損傷、走行性能及び復元性能の低下)が予想される。従って、緊急事態が発生した場合でも、少人数でこれに対応できる高安全性・高信頼性のシステムが求められている。 仮に配管破損箇所の特定からバルブ操作完了まで 5 分かかった場合、水漏れは約 10 トンになる。

以上より、本研究開発の「革新的自律制御電動バルブ」には次のような機能が求められている。

・情報ネットワーク

電動バルブ内部の状態(開度、圧力等)を中央監視盤及び同一管系統バルブとネットワーク通信し、異常発生時には中央監視盤からの指令で動作する。

・自律制御

異常にもかかわらず中央監視盤との通信エラーが発生した場合は、バルブ間ネットワーク情報を元に該当する電動バルブが動作する。全ての通信エラーが発生した場合は個々の電動バルブが自己判断で自律動作する。

・小型軽量

現状の電動バルブ操作盤が廃止できるよう、その機能を電動バルブに集約する。 電動バルブには制御機能と操作盤機能が付加されることになるが、動力伝達効率 の改善、小型軽量部品の採用等により、現状と同等以下の小型軽量化を図る。

・高速化

被害極限の観点から、電動バルブは最大限高速で動作するが、これに伴う配管内部の衝撃波(ウォーターハンマー)の発生を考慮した制御機能を備える。

・高安全性・高信頼性

高機能船舶向けに要求されている耐衝撃性及び低温(-10°C)環境での動作保証を満足する。電動バルブ納入後、電子部品を含む部品供給等のアフターサービスを永続的に提供する。

・低コスト

電動バルブ操作盤の廃止に伴いそのコストは不要となる。一方、電動バルブは制御機能、操作盤機能の付加に伴いコストアップが予想されるが、動力伝達効率の改善、低コスト部品の採用等によりコストアップを抑え全体的なコストダウンを図る。



図 5. 革新的自律制御電動バルブ

このうち高信頼性は、高機能船舶向け製品において必須条件である。特に、電子回路については社外品を用いると演算回路部がブラックボックス化し、製造メーカが製造中止した場合に供給が途絶えるリスクがあり、演算回路を自社開発するなど、永続的な部品供給体制が必須である。

その他については、一般商船も同様のニーズがあるが、特に省人化は進んでおり IoT を活用した総合制御と効率化が進行中であり、総合制御に適合する情報ネットワーク対

応に加え、消火配管系統を中心に自律的なバルブ制御のニーズが高い。(三菱重工船舶海 洋㈱機装設計課)

海洋資源開発、石油化学プラントなど民生用途では、情報ネットワーク対応、自律的制御ニーズが高い。

表1に市場別の優先ニーズをまとめた。本開発において応えるべき技術的ニーズとして、**自律制御、高速化、小型軽量**とし、事業化において重要となる**低コスト化**に対応することを、本事業の解決すべき研究課題とした。

顧客	川下市場	ニーズの優先順位			市場の特徴			
順位		第1優先	第2優先	第3優先				
第 1	高機能船舶	自律制御	高速化	小型軽量	耐衝撃など特殊仕様			
第 2	一般商船	自律制御	小型軽量	低コスト化	I o T 対応			
第 3	海洋資源開発	自律制御	高速化	小型軽量	⇒情報ネットワーク対			
					応が必要			

表1. 川下市場の電動バルブへのニーズ

上記のニーズを満たす本事業で開発する「波動歯車減速機を用いた革新的自律制御電動バルブ」の技術課題と対策は次の通りである。

【技術課題】

- 1.安定的な圧力検出可能なバルブ構造の開発
- 2.電動バルブ用サーボドライバの開発
- 3.低温対応のレゾルバ用演算回路の開発
- 4.情報ネットワーク及び自律制御プログラムの開発
- 5.高信頼性、小型軽量の電動バルブ用アクチュエータの開発

【対策】

1.バルブ内部流れ解析と3D積層造型技術による試作、開発 2.専用小型サーボドライバの開発

- 3.レゾルバ用演算回路の最適設計試作
- 4.配管異常判定機能とネットワーク連携機能の開発
- 5.波動歯車減速機+サーボモータによる機構設計の検討

図 6. 技術課題と対策

【研究開発の高度化目標及び技術的目標値】

- ・高度化目標
 - イ. 小型化・軽量化のための技術の向上
 - ・動力機構の動力伝達効率向上による小型軽量化、すり合わせ設計技術による小型化を実現する。
 - ・衝撃吸収構造を持つハウジング構造の考案により、ハウジング及び部品の軽量 化を実現する。
 - ウ. 高速化・高精度化のための技術の向上
 - サーボモータ採用等による動力機構革新により、バルブ開閉動作の高速化と、 高速化によるウォーターハンマー防止などの高精度制御を実現する。
 - オ、高安全性・高信頼性のための技術の向上
 - ・サーボモータの位置検出方法として、エンコーダでは対応できない-10℃環境で

の動作や衝撃に強いレゾルバ用演算回路を独自開発する。

- ・電動バルブ内部の状態(開度、圧力等)を中央監視盤及び同一管系統バルブとネットワーク通信し、異常発生時には中央監視盤からの指令で動作する。
- ・異常にもかかわらず中央監視盤との通信エラーが発生した場合は、バルブ間ネットワーク情報を元に該当する電動バルブが動作する。全ての通信エラーが発生した場合は個々の電動バルブが自己判断で自律動作する。

・具体的な高度化目標

本研究開発では、電動バルブの自律制御を行うためには、バルブの開度コントロール、流体の圧力変化等におけるセンサーの選定、さらに耐衝撃性の減衰を実現する新たなハウジング構造、中央監視盤と他電動バルブとの連携から情報ネットワークを実現しなければならない。しかし、従来型の電動バルブの構造ではそれは不可能である。

問題解決のためには、従来の構造に捉われない新規機構、構造を開発する必要がある。川下企業のニーズを踏まえた技術を確立する必要があり、次のような目標値を設定した。

この目標値は、川下企業におけるニーズから算出したものであり、この目標値を達成できれば、高機能船舶用電動バルブ分野において十二分に競争力を確保でき、事業化が可能である。

従来技術					
ニーズ	項目	現状値			
高安全	緊急時対応時間	約 5 分			
性 •					
高信頼性					
高速化・	バルブ全開⇒	40 秒			
高精度化	全閉時間				
小型軽量化	体積	100%			
※ 1	重量	80 k g			

	新技術				
	目標	研究開発内容			
 	30 秒以内	自律制御の実現			
	15 秒以内	ウォーターハンマ			
	(40~15 秒	一防止など高精度			
	可変)	制御			
	半減※2	制御/動力機構・			
	半減(40 k g)	ハウジング構造の			
	※ 2	革新			

※1 アクチュエータ(動力機構部含む)40kg + 電動バルブ操作盤 40kg の合計

※2 アクチュエータに電動バルブ操作盤の制御機能、操作機能を持つことで、電動バルブ操作盤が不要となる。

・研究開発の技術的目標値

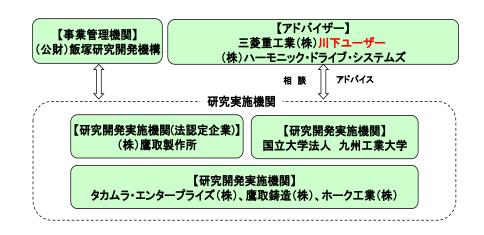
本研究開発の技術的目標値は、以下の内容の通りである。

			目標値			
テーマ名	サブテーマ名	従来値	H 2 8 年	H 2 9 年	H 3 0 年	目標値の根拠
			度	度	度	
[1.	【1-1】安定的	センサ	バルブ構え	告決定		
自律制	な圧力検出可能	設置なし	安定的な』	王力 計 測 実	: 現	 安定的な圧力検出可能なバル
御の実	なバルブ構造の		圧力変動	圧力変動	圧力変動	ブ構造は、自律制御の実現に必
現(I	開発		瞬時±	瞬時±	压力复勤 瞬時±5%	
o T対			10%	8%	連続士	次。
応)】			連続±	連続±	0.5%	
			1.0%	0.7%	0.5 /0	
	【1-2】電動バ	専用小型	サーボド	ライバ開発	5	専用ドライバを開発し、アクチ
	ルブ用サーボ	ドライバ	基本設	試作動作完		ュエータ内に納める大きさと
	ドライバの開	なし	計	了	-	する。
	発	バルブ開閉	配管保護。	と開閉時間	15 秒以	ACサーボモータと波動歯車
		時間 40	内を実現			減速機の組合せで実現可能と
		秒			15 秒以	判断した
			-	-	内	開閉時間
	【1-3】低温対	現存せず	レゾルバ月	演算回路	開発完了	- 顧客要求の低温環境 (-10°C) での安
	応のレゾルバ用		設計完	開発完		顧各安界の低温環境 (-10 0) での女 定動作実現
	演算回路の開発		了	了	-	定期 下天祝
	【1-4】情報ネ	異常検知	異常検知力	法の確立		他社のキャッチアップが困難
	ットワーク及	方法なし	センサ選	アルゴリ	明≫点フ	な異常検知方法を確立するた
	び自律制御プ		定	ズム構築	開発完了	め
	ログラムの開	プログ	最適処理	プログラム	開発	
	発	ラムなし		データ連携	開発完了	最新の IoT技術に対応した 処理プログラムとするため
			-	機能完成	用光元」	処理プログプムとするため
		緊急時対	緊急時対点	5時間 30	秒以内	乗員による損傷箇所の特定作
		応時間			30 秒以	業が不要であり、情報ネット
		約5分間	-	-		ワークと自律制御で実現可能
					内	と判断した目標値
【 2. 電	1 - 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	動力伝達	動力伝達效	办率 7 0 %		
動 バ ル	能・小型軽量の	効率 4	効率	効率	効率	AC115Vサーボモータが選定可能
ブ用アクチ	電動バルブ用ア	0 %	50%	60%	70%	となる動力伝達効率の目標値
ュエータの	クチュエータの		3070	0070	1070	
構造・機	開発	アクチュエ	アクチュコ	ニータ体積	30%減	
構の革	טל נולון	ー タ				ACサーボモータと波動歯車減速機
新】		体積 0.01	15%減	30%減	-	の組合せで実現可能と判断
		m ³				
		電動バル	電動バルフ	ブ操作盤	不要	
		ブ操作盤				アクチュエータに制御・操作機能を
		体積 0.07	0 m ³	-	-	付ける事で操作盤不要を実現
		m ³				
			アクチュコ	ニータ重量	30%減	

アクチュエ ータ重量 40kg	15%減	30%減	-	A Cサーボモータと波動歯車減速機 の組合せで実現可能と判断した重量
電動バル	電動バルフ	ブ操作盤	不要	
ブ操作盤				アクチュエータに制御・操作機能を
重量 40 k	0 k g	-	-	付ける事で操作盤不要を実現
g				

1-2 研究組織及び管理体制

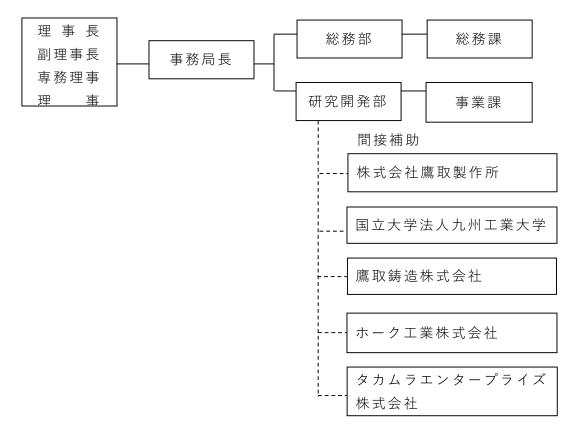
1) 研究組織



2) 管理体制

① 事業管理機関

[公益財団法人 飯塚研究開発機構]



1-3 成果概要

サブテーマ	目標値	達成度	達成根拠	達成に係るコメント
【1-1】 安定的に圧力検出可能 なバルブ構造の開発	・圧力変動 瞬時±5%、 連続±0.5%以内	80%	瞬時±8% 連続±10%	目標値未達だが、緊急時対 応時間内であり影響ない。
【1-2】 電動バルブ用サーボ ドライバの開発	・バルブ開閉時間 15秒以内	100%	10K-32電動/ひレブで 開閉時間15秒以内	
【1-3】 低温対応のレゾルバ用 演算回路の開発	・レゾルバ用演算回路 開発完了 設計完了	100%	レゾルバ用演算回路の試 作完了	
【1-4】 情報ネットワーク及び 自律制御ブログラムの 開発	·緊急時対応時間 30秒以内	100%	漏れによる圧力変動を検 知して、30秒以内に動作 完了した。	
【2-1】高機能・小型軽量の電動バルブ用アクチュエータの開発	·動力伝達効率 70%	100%	アクチュエータの 製作完了した。	

【1-1】安定的な圧力検出可能なバルブ構造の開発

従来のニードルバルブは、バルブ開度に対し、流量がリニアに変化しないため、バルブ 出口で乱流となり、安定的な圧力検出は出来ない。このため、ニードル弁の弁体形状を改 良することで、バルブ開度に対し流量がリニアに変動する弁体形状を決定することが出来 た。これにより、バルブ開度とバルブ出入口差圧の数値から流量が把握できるバルブ構造 を開発することが出来た。

【1-2】電動バルブ用サーボドライバの開発

AC440V 三相の電源に対応できるサーボドライバを独自開発し、永続的アフターサービスを実現し、高機能船舶で求められる電動バルブの高速化を実現するため、小型サーボドライバの開発に取り組んだ。その結果 14 秒でバルブ開閉が可能な電動バルブ用サーボドライバを開発した。

【1-3】低温対応のレゾルバ用演算回路の開発

高機能船舶において、あらゆる環境下でバルブを正確に開閉するには、低温(-10℃)環境下でサーボモータの回転角を検出できるレゾルバ用演算回路が必要であるため、開発に取り組んだ。その結果低温環境(-20℃)で、外部からの開閉動作の信号で問題なく動作する低温対応レゾルバ用演算回路を開発した。

【1-4】情報ネットワーク及び自律制御プログラムの開発

高機能船舶において、配管破損事故が生じた場合には、必要に応じてバルブの開閉を短時間で行う必要がある。このため、配管の圧力変動を検知すると、必要に応じたバルブを30秒以内で閉鎖する自律制御プログラムを開発した。

【2-1】高機能・小型軽量の電動バルブ用アクチュエータの開発

従来の電動バルブ用アクチュエータは、アクチュエータ 40 kgと操作盤 40 kgという構成である。開発した電動バルブは、アクチュエータ内部に制御機能と操作盤機能を付加して15 kgの高機能で小型軽量化に成功した。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

【事業管理機関】

公益財団法人飯塚研究開発機構 研究開発部 谷川 義博

TEL: 0948-21-1156 FAX: 0948-21-2150

E-mail: tanigawa-y@cird.or.jp

【研究実施機関(法認定企業)】

株式会社 鷹取製作所 業務部 矢野 孝文

TEL: 0943-75-2191 FAX: 0943-75-4475

E-mail:yano@taka-tori.co.jp

第2章 自律制御の実現(IoT対応)

本研究開発では、従来の三相交流電動機に代え、小型軽量で自動制御に最適なサーボモータを採用し以下の開発を実施。省人化及び小型化のニーズに答える革新的自律制御電動バルブを開発する。

- 2-1 安定的な圧力検出可能なバルブ構造の開発
- 2-1-1 開発目的

自律制御のための安定的な入力値(バルブの出入口圧力)を獲得する。

2-1-2 課題と目標

【解決すべき課題】

電動バルブの出入口圧力が制御系の基本情報となるが、一般的なバルブ構造は乱流状態であり、安定的な圧力検出は困難である。従って、安定的な圧力検出が可能となるバルブ構造の開発が必要である。

【目標】

■圧力変動 瞬時: ±5%以内、連続±0.5%以内

2-1-3 研究内容及び成果

【バルブ形式の性能確認及びバルブ形式の決定】

滋賀県東北部工業技術センター所有のバルブ性能試験装置を使用して、バルブ形式で 異なる性能(Cv値、容量係数、圧力損失係数)の確認を行った。その結果より電動バル ブに採用するバルブ形式を選定する。

安定的な圧力検出可能なバルブ構造の条件として、以下の3項目とする。

- ①乱流が少ない
- ②Cv 値が大きい(流れやすい)
- ③圧力損失係数が大きい(バルブ出入口圧力差が大きい)

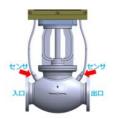


図 7. 安定的な圧力検出可能なバルブ

使用試験装置:滋賀県東北部工業技術センター バルブ性能試験装置

試験対象品:玉形弁・ニードル弁・ボール弁

性能確認で使用した設備を図8、測定結果を表2に示す。



図 8.バルブ性能試験装置

表 2.性能試験測定結果

	ニードル弁	玉形弁	ボール弁
Cv値	23	23	85
圧力損失係数	4.44	4.14	0.31

その結果、ボール弁はニードル弁・玉形弁に比べて Cv 値(注 1)で約 3.7 倍大きく、圧力損失係数(注 1)で約 1/14 小さいことを確認した。ニードル弁と玉形弁は、Cv 値が小さく、圧力損失係数が大きく、逆にボール弁は、Cv 値が大きく、圧力損失係数が小さく、バルブ出入口の圧力差が小さいため、瞬間的な圧力検出が難しくなる。

この結果より、安定的な圧力検出するバルブの形式はニードル弁と玉形弁を選択した。 < 理由 >

- ① ボール弁はニードル弁・玉形弁に比べ、出入口の圧力差が約1/4と少ない。
- ②アドバイザーの三菱重工業(株)殿より、高機能船舶は止水性の高いニードル弁、 玉形弁を使用すると H29 年度推進委員会でアドバイスを頂く。
- ③ニードル弁は、出入口の圧力差を検出可能と確認した。

【バルブ開度と流量値の確認】

前項の【バルブ形式の性能確認及びバルブ形式の決定】から、ニードル弁と玉形弁は 安定的な圧力検出が可能と確認した。しかし、自律制御の電動バルブは開度全開だけで なく、開度調整して圧力や流量を制御する必要がある。よって、従来のバルブ構造を見 直し、バルブ開度と流量値がリニアに変化する新たなバルブ構造を求める。

使用試験装置:情報ネットワーク及び自律制御プログラム試験装置

滋賀県東北部工業技術センター所有のバルブ性能試験装置を

参考に、社内に試験装置を製作し設置した。

試験対象品:ニードル弁・改良型弁(名称:TMCV)

試験装置で、従来型のニードル弁と弁開度に対する流量測定を行った。その結果を基に、弁体形状を改良することで、従来ニードル弁に対し流量が約20%低下するが概ねリニアに変化するバルブ構造を求めた。

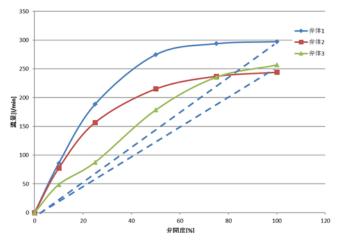


図 9.バルブ開度と流量値

この求めたバルブ構造で試験装置を用いて、図に示すバルブ開度におけるバルブ出入口 差圧と流量の関係を求めた。これにより、バルブ開度とバルブ出入口差圧の数値から流量 が把握できる計測結果が得られたことで、自律制御に必要な入力値(出入口圧力及び流量) を獲得することが出来た。

また、圧力変動については、計測した圧力データを図 10 に示す。0.2 秒周期のデータより、瞬間の最大値(変動量):8%、連続は±10%であることを確認した。目標値には達していないが、緊急時対応時間内でバルブの動作することを「2-4 情報ネットワーク及び自律制御プログラムの開発」で確認しており、影響ないと判断した。

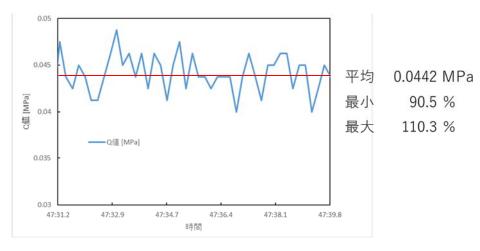


図 10.圧力変動

2-2 電動バルブ用サーボドライバの開発

2-2-1 開発目的

AC115V 三相及び AC100V 単相の電源に対応できるサーボドライバを独自開発し、 永続的アフターサービスを実現する。

(三菱重工業(株)殿の要求で、事業2年目に電源仕様 AC440V 三相へ変更)

2-2-2 課題と目標

【解決すべき課題】

高機能船舶用電源(AC440V 三相)及び一般的な電源仕様(AC100V 単相)のサーボモータを考慮し、双方が制御できるサーボドライバを開発し、永続的アフターサービスを実現する。

サーボドライバの小型化を図り、電動バルブ用アクチュエータの小型化に寄与すると 共に高機能船舶で求められる電動バルブの高速化を実現する。

【目標】

■バルブ開閉時間 15 秒以内に動作完了

2-2-3 研究内容及び成果

現在市販されているサーボドライバは多機能の為、形状が大きい。そのまま電動バルブ用アクチュエータ内に納めることはアクチュエータ自体を大型化する必要があるため、小型化を目指す目標に相反している。そのため、電動バルブアクチュエータに使用するサーボモータの動作制御に特化した小型の専用サーボドライバ回路を開発した。専用サーボドライバは、バルブ開閉時間 15 秒以内の目標を達成するため、サーボモータの高回転数でバルブの高速開閉を目指した。また、サーボモータは高機能船舶用電源(AC440V 三相)対応の設計とした。



図 11.開発するサーボドライバのイメージ

【サーボドライバの開発】

・1年目の開発品

表 3. 1年目の開発品仕様

サーボドライバ	開発品
	電源仕様:AC115V 三相
サーボモータ	ハーモニックドライブシステム製(モータ減速機一体型)
	型式 SHA25A160CG、最大トルク 229Nm、減速比 1/160

使用するサーボモータの制御に必要な各種信号(位置・角度測定、角度指令 等)の調査を行い、電動バルブに必要な専用サーボドライバ回路を製作した。製作したドライバーを図 12 に示す。製作したサーボドライバの性能試験を実施した。

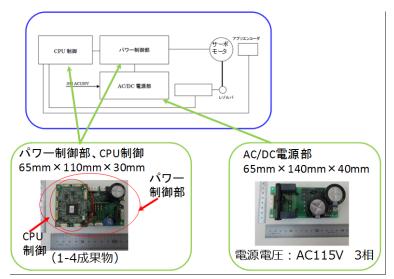


図 12.サーボドライバとその周辺機器 (1年目)

その性能試験結果を図 13 に示す。開発したサーボドライバを用いたサーボモータのトルク値は、約 50~60N・m(500~2000rpm)であり、比較した HDS 社の純正に対して 1/4 であった。動作状況から発生トルクは低いが回転を続けており、ベクトル制御が機能していることを確認できた。この低トルクの原因は、エンコーダの信号にノイズが混入していることにより、電機子電流を適切に流せないためと考えられる。

対策として、多摩川精機製サーボモータを選定して開発を進めた。



サーボドライバ	出カトルク[N·m]	回転数[rpm]
HDS社製	約220~240	500~3,000
開発品	約50~60	500~2,000

図 13.性能試験の結果

・2年目の開発品

表4.2年目の開発品仕様

サーボドライバ	開発品			
	電源仕様:AC440V 三相			
サーボモータ	多摩川精機製			
	型式 TSM3202N3307E200、最大トルク 2.24Nm、減速比 1/100			

1年目の性能試験結果及び検討結果より、多摩川精機サーボモータを用いることになった。制御に必要な各種信号(位置・角度測定、角度指令 等)の調査を行い、電動バルブに必要な専用サーボドライバ回路を製作し、性能試験を実施した。製作したサーボドライバを図 14 に示す。

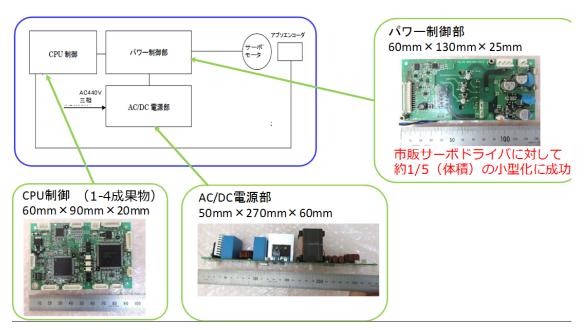


図 14.サーボドライバとその周辺機器(2年目)

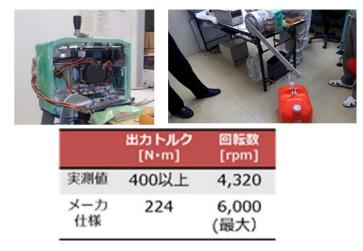


図 15.性能試験の結果

その性能試験結果を図 15 に示す。ポリタンクに水を入れ、持ち上げることが可能であるか、水の質量からトルクを計測した。開発したサーボドライバとサーボモータを使

用したアクチュエータのトルク値は、約 400N・m(4,320rpm)であることを確認した。

【トルク計測条件 ポリタンク重量:20 kg f、中心からの距離:50 cm】

開発したサーボドライバとサーボモータ等を内蔵した電動バルブで 30 分間の連続開閉運転時のサーボモータの温度上昇を計測した結果を図 16 に示す。

計測結果: バルブの連続開閉運転を行い、約50°Cまで温度上昇してその後安定状態となった。サーボモータ絶縁の種類: F種155°C(周辺温度40°C)の上限に対して、今回の計測より、規格値内であることを確認した。規格値(155°C-40°C=115°C)>実測値(49°C-30°C=19°C)





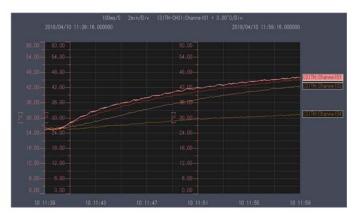


図 16.電動バルブ連続開閉におけるサーボモータの温度上昇

・3年目の開発品

表 5.3 年目の開発品仕様

サーボドライバ	開発品
	電源仕様:AC440V 三相
サーボモータ	多摩川精機製
	型式:TSM3202N3307E200、最大トルク:2.24Nm、
	減速比:1/100

3年目は、電動バルブ用アクチュエータの更なる小型化を目指し、内蔵するサーボドライバ等の基板再設計を行い、コンパクト化させると共に、最終目標である開閉時間15秒以内に動作完了を目指す。

また、電動バルブが全閉直前にサーボモータの回転速度を高速から低速へ変速して、 ゆっくり全閉することで、ウォータハンマの発生を防止するウォータハンマ防止のプロ グラムを作成し、その後、情報ネットワーク及び自律制御プログラム試験装置に取付 け、その効果を確かめる。

3年目に開発したサーボドライバとアクチュエータ操作用ソフト画面を図17に示す。

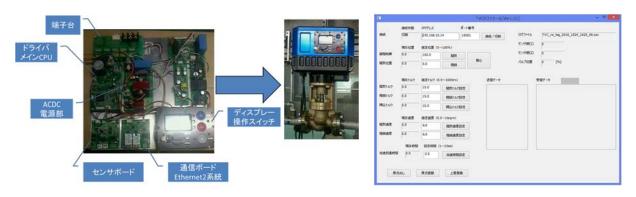


図 17. サーボドライバとその周辺機器 (3年目)及びソフト画面

このソフトは、高速回転数に至るまでの加減速時間を設定できるようにした。これにより、ウォータハンマ防止と全開時の弁体の衝突を防止する。

その開閉時間は14秒であり、目標値である15秒以内を達成した。

詳細は、2-4 情報ネットワーク及び自律制御プログラムの開発で示す。

ウォータハンマーの確認は、この試験装置ではウォータハンマ発生自体が起きず、確認 する事は出来なかった。

2-3 低温対応のレゾルバ用演算回路の開発

2-3-1 開発目的

低温(-10°C)対応でサーボモータ用回転角検出器のレゾルバが必要である。レゾルバ用 演算回路を独自開発することで部品供給の永続性を確保する。

2-3-2 課題と目標

【解決すべき課題】

高機能船舶向けに要求されている低温 (-10°C) 環境でサーボモータを正確に動作させるためには、回転角検出器のレゾルバ(図 18)が必要である。ロータリエンコーダは低温環境では、光源部が結露するため使用できない。

市販のレゾルバ用演算回路は、製造メーカの部品供給が途絶える恐れがあり、永続的に提供出来るようこの演算回路の開発を行う。

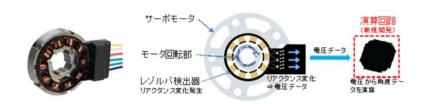


図 18. レゾルバとレゾルバ演算回路

【目標】

■レゾルバ用演算回路開発:開発完了

2-3-3 研究内容及び成果

【レゾルバ用演算回路の開発】

・1年目の開発品

表 6.1 年目の開発品仕様

サーボモータ	ハーモニックドライブシステム製(モータ減速機一体型)
	型式 SHA25A160CG、
	回転角検出方式:光学式エンコーダ
回転角検出器	多摩川精機製ブラシレスレゾルバ
	型式:TS2620N271E14
	回転角検出方式:磁気式エンコーダ

使用するサーボモータに取り付ける回転角検出方式は、光学式エンコーダである。低温環境で正確に動作させるため、レゾルバに交換して開発した演算回路でサーボモータを制御できるか確認した。

その結果、前出の「2-2 電動バルブ用サーボドライバの開発」より、1年目の開発品は、ノイズの影響により発生トルクは低いが回転を続けている状態であった。サーボモータの内部回路を把握することでトルクおよび回転不足は解消するが、開示を要望したが不可能であった。開発したレゾルバ用演算回路とサーボモータに組込んだレゾルバを図 19 に示す。





図 19.レゾルバ演算回路とサーボモータに組込んだレゾルバ(1年目)

・2年目の開発品

表 7.2 年目の開発品仕様

サーボドライバ	開発品
	電源仕様:AC440V 三相
サーボモータ	多摩川精機製
	型式:TSM3202N3307E200、最大トルク:2.24Nm、
	減速比:1/100
	回転角検出方式:磁気式エンコーダ

1 年目の性能試験結果及び性能向上を検討した結果より、多摩川精機製サーボモータ

を用いる。このサーボモータに合わせた、演算回路を設計製作した。図 20 に示す。その後、低温環境(開発目標:-10℃ 今回:-20℃)において、サーボモータ及びレゾルバ演算回路をアクチュエータに取付け、-20℃に到達したのち、外部から開閉動作の信号を送り、問題なく動作することを確認し、目標を達成した。図 21 に示す。

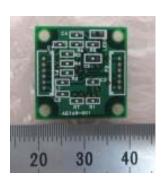


図 20.開発した演算回路基板



図 21.演算回路の低温環境での確認

- 2-4 情報ネットワーク及び自律制御プログラムの開発
- 2-4-1 開発目的

中央監視盤及び同一系統バルブとのネットワーク 通信により異常発生箇所の特定と必要なバルブ開閉 動作を自動化する。

2-4-2 課題と目標

【解決すべき課題】

少人数での緊急事態発生時の対応を可能とするため、バルブ内部の状態をリアルタイムで監視し、中央 監視盤及び同一管系統バルブとのネットワーク通信 により異常発生箇所の特定と必要なバルブ開閉動作 を自動化する。

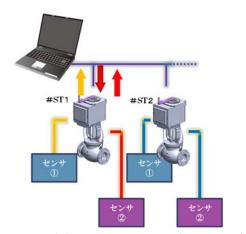


図 22.情報ネットワーク(イメージ)

【目標】

■緊急時対応時間:30秒以内

2-4-3 研究内容及び成果

配管破損事故の状況を疑似的に作り出せるようにバルブ・配管・ポンプ・タンク等で構成した情報ネットワーク及び自律制御プログラム試験装置(以下、試験装置)を製作し、開発した電動バルブ 4 台を取付た。また、バルブ動作に必要な制御プログラムを作成し、ハードとソフトの開発品が揃ったのち、試験装置で配管破損の疑似操作による圧力変化を発生させて、圧力センサで変化を検知後、必要なバルブが 30 秒以内で自動的に閉まることを確認した。

【試験装置の設置】

情報ネットワーク及び自律制御プログラム試験装置の仕様

- ・タンク容量:2m³
- ・ポンプ性能:吐出流量 300I/min、全揚程 120m、流速 6.2m³/s(配管 32A の場合)
- ・電動バルブ設置個所: 4 台(32A)
- ·流量計:3台(50A2台、100A1台)

【アクチュエータの設定項目】

アクチュエータを動作させるに必要な設定項目(大区分:6項目、中区分:23項目)および内容を定め、プログラムを作成した。操作は、本体に備えた切換スイッチで「REMOTE」と「LOCAL」を選択できる。設定項目と本体表示例を図23に示す。



図 23.アクチュエータの本体表示例

【情報ネットワーク及び自律制御プログラム作成】

試験装置に 4 台の電動バルブ Takatori Multi Control Valve(以下、TMCV)を取付、通水するラインを LAN で接続した PC のソフトからモード選択する。各モードで、通水運転中の配管破損による漏えいが発生した際、自律制御で必要なバルブへ全閉の指示と動作したことを確認する。その後、目標である緊急時対応時間 30 秒以内を確認する。

①TMCV の構成

図 24 に 4 台の名称と各種計測を示す。

TMCV①と②間及び TMCV③と④間の漏れ発生箇所を A 漏れ、B 漏れとする。 TMCV②と④の出口側の漏れ発生箇所を C 漏れと定める。

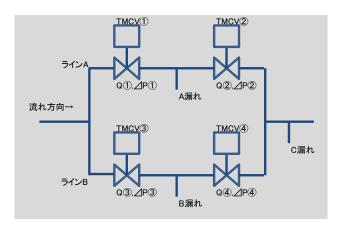


図 24.TMCV の構成

②漏れの条件

各部からの漏れは、実測値と基準値から、制御する。

③操作モードの構成

試験装置のバルブ選択で通水するラインを決定。ソフトで選択したラインからモードを設定する。

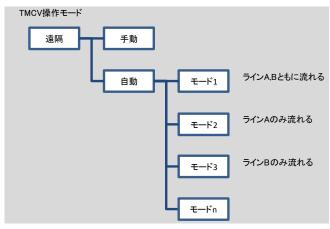


図 25.操作モード

④動作テスト結果

条件(TMCV 開度、流量、Q 値上限値と下限値、排水弁開度): 24 パターン 各条件項目を変化させて、表に示すテストを実施した。 以下に、テスト結果の抜粋を示す。

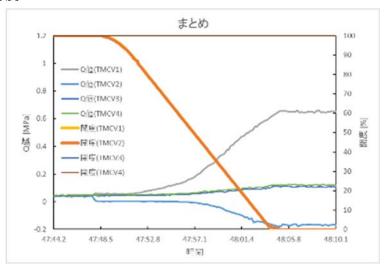
■ライン AB 共に流れるモード 1 において、A・B・C 漏れの動作を確認 <テスト条件>

・TMCV 開度:100%

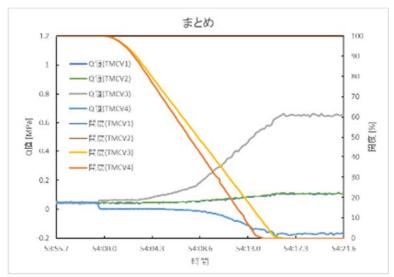
·流量:160L/min

·Q上限值Q下限值:135%,65%

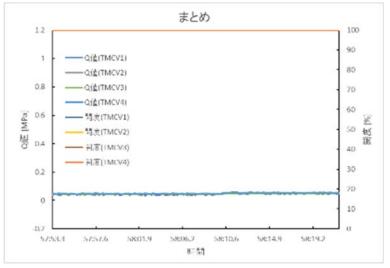
·排水弁開度:100%



試験 No.1-1 A漏れ



試験 No.1-3 B漏れ



試験 No.1-5 C漏れ

図 26.テスト結果

図 26 の結果より、A 及び B 漏れのテストでは、Q 値変化より漏えいの条件に一致して該当する弁(A 漏れ:TMCV①と②、B 漏れ:TMCV③と④)が動作したのを確認できた。しかし、C 漏れのテストでは、Q 値の変化が条件に一致せず該当する弁(TMCV②と④)が全閉に動作しなかった。

A及び B漏れテストでは、緊急時対応時間(圧力変動が生じた時のバルブ全閉時間) 30秒以内に対して、15秒以内であることが確認できた。

⑤アクチュエータの通信方式(EtherCAT-P)の調査

サポイン事業 2 年目の中間評価において、開発コストの低い通信方式を選択することをアドバイス頂いた。ベッコフオートメーション社の EtherCAT-P について、調査を実施した。

[各種展示会・学会での調査]

- ・IoT Technology 2018/IoT総合技術展 2018/11
- ・第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2018 年 12 月
- ・第3回 ロボデックス ロボット開発・活用展 2019年1月 この展示会で、ベッコフによるセミナーで船舶への展開について 言及はなかった。

・まとめ

EtherCAT P をはじめとする FA 領域で利用されている電源同軸通信方式を 船内 LAN システムへ導入することは、現状では困難である。

本件に関しては、セキュリティと併せて別途検討を進める必要があると考えられる。

第3章 電動バルブ用アクチュエータの機構・構造の革新

3-1 高機能・小型軽量の電動バルブ用アクチュエータの開発

3-1-1 開発目的

新規開発の電動バルブ用アクチュエータは、制御機能と操作盤機能の付加に伴う重量 増が発生する。その影響を解消し小型軽量化を図ると共に、耐衝撃性を満足するアクチ ュエータを開発する。

3-1-2 課題と目標

【解決すべき課題】

開発する電動バルブには制御機能と操作盤機能が付加される。そのため、各種の部品 は増加するが、現状と同等以下の小型軽量化を図る。

高機能船舶向けに要求されている耐衝撃性を満足するアクチュエータを開発する。 (川下企業の要求で、事業3年目に耐衝撃性不要の仕様変更となる)

【目標】

■動力伝達効率 70%

3-1-3 研究内容及び成果

【電動バルブ用アクチュエータの開発】

・1年目の開発品

表 8. 1年目のアクチュエータ開発品仕様

サーボドライバ	開発品
	電源仕様:AC115V 三相
サーボモータ	ハーモニックドライブシステム製(モータ減速機一体型)
	型式 SHA25A160CG、最大トルク 229Nm、減速比 1/160
質量	71.8 kg (年度目標:32kg)

電動バルブ 10K-150A の開閉操作に必要な締付トルク 200 k N を満たすため、電動バ ルブ用アクチュエータを構成する動力機構のサーボモータ、波動歯車減速装置、クラッ チの構造配置を検討してアクチュエータの開発を行った。



サーボモータ





図 27. 1年目のアクチュエータ開発品

前出の「2-2 電動バルブ用サーボドライバの開発」に記載したように、開発した専用サーボドライバを用いて、性能試験を行った。計測した結果、40Nm(2000rpm)を発生した。必要締付トルクとしては、不足していた原因を確認すると伝達ギアとクラッチが浮き上がっていることが判明した。

・2年目の開発品

表 9.2 年目のアクチュエータ開発品

サーボドライバ	開発品
	電源仕様:AC440V 三相
サーボモータ	多摩川精機製
	型式 TSM3202N3307E200、最大トルク 2.24Nm
質量	21kg (年度目標 28kg)

1年目の課題を克服するため、アクチュエータ開発有識者の意見を踏まえ、ブレーキ機能の役割を持つウォームギアを追加し、クラッチ機構を除いた構造とする。トルク仕様:1年目200Nm、2年目100Nmと設定。「2-4 情報ネットワーク及び自律制御プログラムの開発」で10K-32Aバルブを用いることや受注実績数を考慮して仕様変更した。

衝撃に対して、クロスローラベアリングを採用・配置することで対策を取った。また、サーボモータの再選定を行い、出力軸と同軸としたことでアクチュエータの高さを抑えた。その結果、1年目より小型軽量なアクチュエータとなった。AC440V 三相の電源で問題なく動作することを確認した。

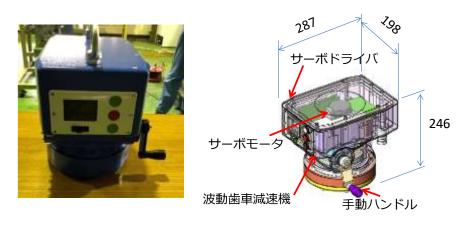
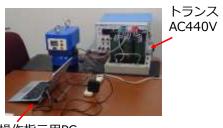


図 28.2 年目のアクチュエータ開発品



操作指示用PC

図 29.AC440V 三相での動作確認

・3年目の開発品

サーボドライバ	開発品
	電源仕様:AC440V 三相
サーボモータ	多摩川精機製
	型式:TSM3202N3307E200、最大トルク:2.24Nm、
質量	15 kg (年度目標 20kg)

3年目は、「1-4情報ネットワーク及び自律制御プログラム開発」には4台の電動バルブ用アクチュエータを用意して、開発を進める必要がある。よって、サーボモータとギアで構成した機能最小限の簡易型アクチュエータを3台製作した。あと1台は、2年目よりコンパクトな波動歯車減速機を使用したアクチュエータを開発した。





図 30.3 年目の開発品 (簡易型アクチュエータ)

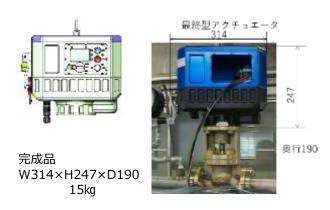


図 31.3 年目の開発品 (最終型アクチュエータ)

完成した最終型アクチュエータを電磁ノイズ試験(放射性放射試験及び伝導性放射)とトルク試験で、その性能を確認した。

電磁ノイズ試験

福岡県工業技術センター機械電子研究所 電磁ノイズ測定室において、アクチュエータの放射性放射試験及び伝導性放射を行った。

①放射性放射試験

試験室内に供試体から放射されるノイズを測定する。試験風景を図 32 に示す。船舶用機器の電磁ノイズ試験 IEC 60945 及び JISF0821 電磁ノイズに規定される限度値 $54dB\,\mu\,V/m$ 以下であるか確認する。



放射性放射試験室内 風景



放射性放射試験室内 配置



供試装置 配置

図 32.放射性放射試験

・試験内容

電動駆動装置の動作時及び無動作時における、電動駆動装置から放出される放射性ノイズの測定を行った。

(1)PEAK 值測定

アクチュエータの出力軸回転数:10・20・25rpm において、アクチュエータを載せたテーブルを回転させながら、周波数 30~1000[MHz]の範囲でのノイズを、アンテナの高さ 100、200mm でそれぞれ測定し、上記周波数範囲での最大ノイズを測定した。上記内容を、ノイズの水平及び垂直成分でそれぞれ測定した。

(2)QUASI PEAK 値測定

(1)でノイズが高く出ている周波数を数点とり、それぞれの周波数で約 10 秒間測定した。

• 試験結果

回転数における測定結果より $54dB\mu V/m$ 以上も見受けられるが、 QUASI PEAK(準尖頭値)で詳細にみると、 $30\sim50MHz$ と $350\sim400MHz$ 付近が $55dB\mu V/m$ 程度であった。

②伝導性放射

図 33 に示す室内で試験を行った。供試装置につないだ電源から伝わるノイズを計測する。限度値: $50 \, \mathrm{dB} \, \mu \, \mathrm{V/m} \, \mathrm{以下}$ であるか確認する。



伝導性放射試験室內 風景



伝導性放射試験 配置

図 33. 伝導性放射試験

・試験内容

電動駆動装置の動作時及び無動作時、アース有無における電源線からの伝導性ノイズの測定を行った。

(1)PEAK 值測定

周波数 0.15~30[MHz]の範囲での、最大ノイズを測定した。

(2) QUASI PEAK 値測定

放射性ノイズ測定時の QUASI PEAK 値測定方法と同様。

・試験結果

各測定結果共に限度値より上回っていた。正逆運転 10rpm での QuasiPeak (準 尖頭値) で詳細は以下に示す。

計測値 0.7MHz における測定値 100.4dBμV/m(限度値:50dBμV/m 以下) 18MHz における測定値 100.4dBμV/m(限度値:50dBμV/m 以下)

アクチュエータ内のインバータから発生するノイズが表れているかと思われる。 よって、ノイズ低減対策が必要と確認できた。

第4章 全体総括

4-1 研究開発の主な成果

本研究開発により得られた成果概要は、第2章と第3章で記載した各サブテーマに、 目標達成度は第1章1-3に掲載している。

4-2 研究開発後の課題

本研究開発により、安定的に圧力検出可能なバルブ構造と高機能・小型軽量な電動バルブ用アクチュエータの開発を達成した。しかしながら、事業化(量産化)に向けては、以下のような検討を進め、QCDを確保した技術確立が重要であると考えている。

- ①電磁ノイズ試験 伝導性放射の低減
- ②量産化への検討および試作

4-3 事業化展開について

本研究開発のアドバイザーでもある三菱重工業(株)殿とは、電動バルブについてアドバイスを頂くなど、良好な関係を築いている。研究開発で得たバルブ構造は、本年より三菱重工業(株)殿で建造される高機能船舶向けバルブに応用する予定である。今後、補完研究において、各課題の対策と改良を行い、電動バルブ用アクチュエータの事業化を進める。研究開発で得られた技術について、特許出願を行う。