



2022年度

内航貨物船向けハッチカバーの電動化による船員負荷低減・

環境汚染防止システムの技術開発

成果報告書

2023年3月

一般社団法人 日本舶用工業会

はしがき

本報告書は、BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて、2022年度の1年計画で、一般社団法人日本船用工業会が山中造船株式会社に委託して実施した、「内航貨物船向けハッチカバーの電動化による船員負荷低減・環境汚染防止システムの技術開発」の成果をとりまとめたものである。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

2023年3月
(一社) 日本船用工業会

目 次

1. 事業の目的	1
2. 事業の目標	2
3. 2022年度の実施内容	3
3.1 電動モーターを用いた駆動機の開発	3
3.1.1 力量・電力の計算と制御の検討	3
3.1.2 駆動機的设计・製作	3
3.1.3 搭載前試運転	6
3.2 省力化による船員不足への対応	8
3.2.1 アクチュエーターの選定と発注	8
3.2.2 制御プログラムの設計と制御装置	11
3.2.3 搭載前試運転	16
3.2.4 ブリッジからの遠隔操作への対応	18
3.3 デジタルセンサーとの連携機能の開発	20
3.3.1 デジタルセンサーの選定と制御プログラム設計	20
3.3.2 搭載前試運転	21
3.4 駆動機と電動アクチュエーター、デジタルセンサーの搭載	23
3.4.1 電動駆動機の搭載と試運転	23
3.4.2 電動アクチュエーターの搭載と試運転	25
3.4.3 デジタルセンサー動作検証と不具合の確認及びその修正	29
3.5 モニタリング	29
4. 目標の達成状況	30
4.1 電動モーターを用いた駆動機の開発	30
4.2 省力化による船員不足への対応	31
4.3 デジタルセンサーとの連携機能の開発	31
5. 2022年度の実施内容の概要	31
6. 今後の予定	32
7. まとめ	32

1. 事業の目的

内航貨物船の299～749GTは船種として国内で最も隻数が多く、携わる船員数も多い。しかし、コロナ禍の影響でここ近年は老齢船のリプレースが進んでいない。又、新造船建造に於いてもコストを最優先した仕様となることから、技術的進化が進んでいない。そのため、問題点が発覚していたとしても昔ながらの仕様・機器を船員は使い続けることを強いられている。

近年、内航船の様々な船種では電動化・デジタル化等の進化が少なからず前進しており、主に船員への負荷低減が図られている。実施者は499～749GTの内航貨物船の建造を主軸としている。本船種に搭載する機器で、近年、進化が止まっているハッチカバーについて技術革新により環境汚染防止・内航貨物船全体の船員の負担低減・安全性向上・メンテナンス性向上を目的とする。

本事業の目的は以上の通りであるが、個別の事項について補足すると以下の通りである。

(1) 意義

ハッチカバーは巻取タイプ(エルマンスハッチカバー)と1枚毎に折りたたまれるタイプ(シングルプルハッチカバー)があり、どちらも油圧の駆動機で開閉されている。又、航海中にハッチカバーのズレを防止するため、油圧シリンダーを用いたロック機構を備えている。どちらのタイプも甲板機械(ウインチ)の油圧ポンプユニットを駆動源としているが、近年、ウインチの電動化が進められていることから油圧から電動に置き換わる日が近いと予測している。又、新造船の引き合いの際には、甲板上の油圧配管を無くしたい(配管や油圧機器等からの漏油事故による海上汚染の防止)、メンテナンス作業の負担低減・故障箇所の特定等の対応、改善等が求められている。

(2) 必要性

駆動源に用いられる油圧は経年劣化により作動油の漏油事故が発生しやすい。日頃から油圧機器と配管はメンテナンスを頻繁に行い、発錆や故障を防ぐ必要がある。しかし、近年の船員不足や高齢化によりメンテナンスをする時間を捻出することが出来ず、現状は機器の故障や油漏れが起きるその時まで放置されていることが多い。油圧機器、特にロック機構に組み込まれている油圧シリンダーは故障の予測がしにくい。漏油であれば見ただけで判断可能であるが、漏油が起きる前に判断が必要である。油圧シリンダーは通常、船首・船尾部にそれぞれ3～5本が組み込まれているが、どこから故障するかも予測ができない。故障箇所の特定に時間が掛かることや、全国的に油圧技師も減ることから、メンテナンス性向上と故障箇所の特定が容易に行える、電動シリンダー及び、駆動源の電動化による油圧レスが現状の内航船に必要と考える。

(3) 課題

船舶は常に漏油による海洋汚染のリスクがある。青森県の重油流出事故は記憶に新しい。一度漏油が発生すると環境への影響は計り知れない。燃料だけではなく油圧に用いる作動油

は暴露部の油圧機器・配管を通過していることから、同様にリスクが大きい。又、内航海運業界における船員の高齢化・船員不足は深刻であり、日頃の運航と荷役で勤務時間を超過するため、メンテナンスを行う時間が無い。故障が少なく、故障時に対応しやすい機器が求められている。

(4) 効果・新規性

電動化により環境問題に対応できる。最適設計・最適制御で必要電力の低減も可能となる。制御面ではデジタル化により操作位置の自由度が上がる。例えば船内ネットワークを経由したタブレット等を用いて操作することも可能となる。

本件では内航船向けとし、499GT又は749GTのシングルプルハッチカバーに焦点を置いて開発を進める。シンプルな構造で電動化をしやすく又、近年の発注が最も多いためである。将来的には299GTやエルマンスハッチカバーに向けても応用を検討したい。電動化・デジタル化により遠隔操作や自動化も将来的に実現が可能であり検討を進めていきたい。最終的には日本財団殿が取り組んでいるFuture2040の実現に必要な自動化技術に応用できるデジタル化システムの1つとなると考える。

2. 事業の目標

(1) 電動モーターを用いた駆動機の開発

漏油リスクの無い電動モーターを用いたハッチカバー開閉用の駆動機の開発を行う。(油圧駆動機に比べ電動駆動機は電力消費量を15%削減することが可能)。

(2) 省力化による船員不足への対応

駆動機の電動化により電動モーターのインバーター制御とロック機構の電動アクチュエーター化が可能となる。開閉時、ロック機構の締緩の数値化、見える化、デジタル化ができることで、遠隔操作が可能となり甲板上の操作が不要となる。本システムにより、荷役におけるハッチカバー開閉作業に係る人員数を2人から1人に省力化可能とする。

(3) デジタルセンサーとの連携機能の開発

ハッチカバー開閉時、船員が危険エリアに入るとデジタルセンサーが反応し、警報を発令するとともに、警報を発した後に5秒以内に走行を自動停止する。

3. 2022年度の実施内容

3.1 電動モーターを用いた駆動機の開発

3.1.1 力量・電力の計算と制御の検討

ハッチカバーの電動駆動機の開発を進めるため、従来型の油圧モーター駆動の力量・計算を基に電動モーター駆動の力量・電力を計算し、効率化と最大突入電流の軽減を目指すインバーター制御の検討が必要となる。

従来型の油圧駆動では30kW－6Pの電動機で油圧ポンプを駆動させ揚錨機(メーカー指定力量6t)とハッチカバー(メーカー指定力量1.2t)の油圧モーターを同一の系統で駆動しているため、ハッチカバーを駆動する場合でも揚錨機を駆動させる電力を消費していることが判明した。そこでハッチカバーのみを駆動させることで効率化が望めることから電力量の計算を行った。

電動モーターの電力量の計算：

・電動機容量算出公式

$$\text{kW} = \text{力量}(\text{kgf}) \times \text{速度}(\text{m}/\text{min}) \div \text{定数}(6120 \times 0.95)$$

・ハッチカバー定格力量

$$\text{力量} = 1200\text{kgf} \quad \text{速度} 75\text{m}/\text{min}$$

・ハッチカバーメーカー指定の余力

1.4倍

・ハッチカバー必要電動機容量

$$1200 \times 75 \div (6120 \times 0.95) = 15.52\text{kW}$$

$$15.52 \times 1.4 = 21.725\text{kW} \approx 22\text{kW}$$

22kW－4P＝電動ハッチカバー駆動機

上述の計算結果より、ハッチカバーを駆動させるだけであれば22kWの電動機で良いことがわかった。

これは、今回開発する電動駆動機(22kW)は、従来型(30kW)と比べると約30%の省電力が望め電力消費量の効率化が想定できる。また、従来型の油圧駆動機の始動器はスターデルタ駆動と呼ばれ、その場合、最大突入電流は電動機容量の3倍(30kW×3＝90kW)であるが、今回開発する電動駆動機をインバーター駆動とすれば、最大突入電流は通常時最大でも1.5倍(22kW×1.5＝33kW)であるため1/3ほどの電力消費量の低減が望めることがわかった。

電動ハッチカバー駆動機のモーターはPLC(Programmable Logic Controller)を使用したプログラム制御で動作し、始動時の加速度やトルクを監視しながら回転を徐々に下げていきトライアルアンドエラーで電力消費量の低減に最適な数値(想定1.5倍以下)に調整することで計画時は決定した。

3.1.2 駆動機的设计・製作

力量・電力を計算して選定した電動モーターは油圧モーターに比べ寸法が大きい
ため、船体取付方法及び設置寸法について干渉や問題がでないよう設計する必要がある

ある。配置図上で検討すると船体側コーミング、図1に示す電動駆動機配置検討図の赤線部分が油圧モーターから電動モーターに変更した場合に全長が800mmほど長くなり、駆動機本体がデッキよりも低くなるため、以前の設計では、コーミングと干渉する懸念が生じた。そのため、電動駆動機的设计時に電動モーターを高い位置に取り付けるかコーミング高さを変更する等の検討が必要となった。

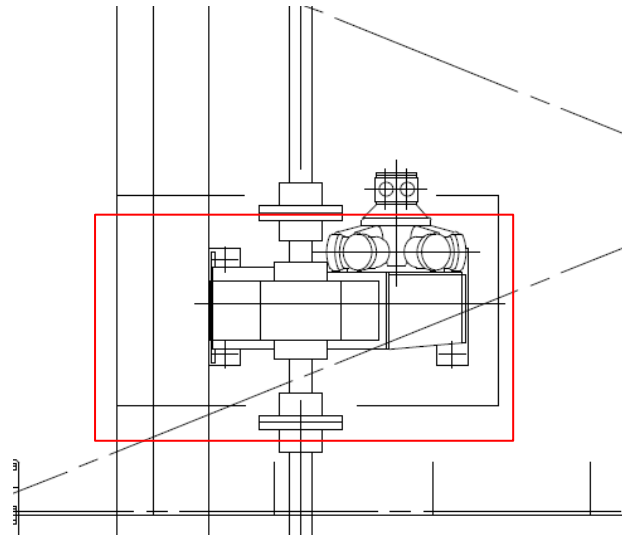


図1. 電動駆動機配置検討図

事前検討を基に駆動機本体にモーターを取り付ける位置を高くした図面を作図した。高さの他、電動モーターを取り付けると横方向に大きく飛び出すため、強度面で不安があることからギヤケース側の取付フランジを強化し対応した。

図2は従来型の油圧駆動機(比較用)を、図3に電動駆動機検討図をそれぞれ示す。図2と図3を比較すると、電動モーターが飛び出ていることがわかる。

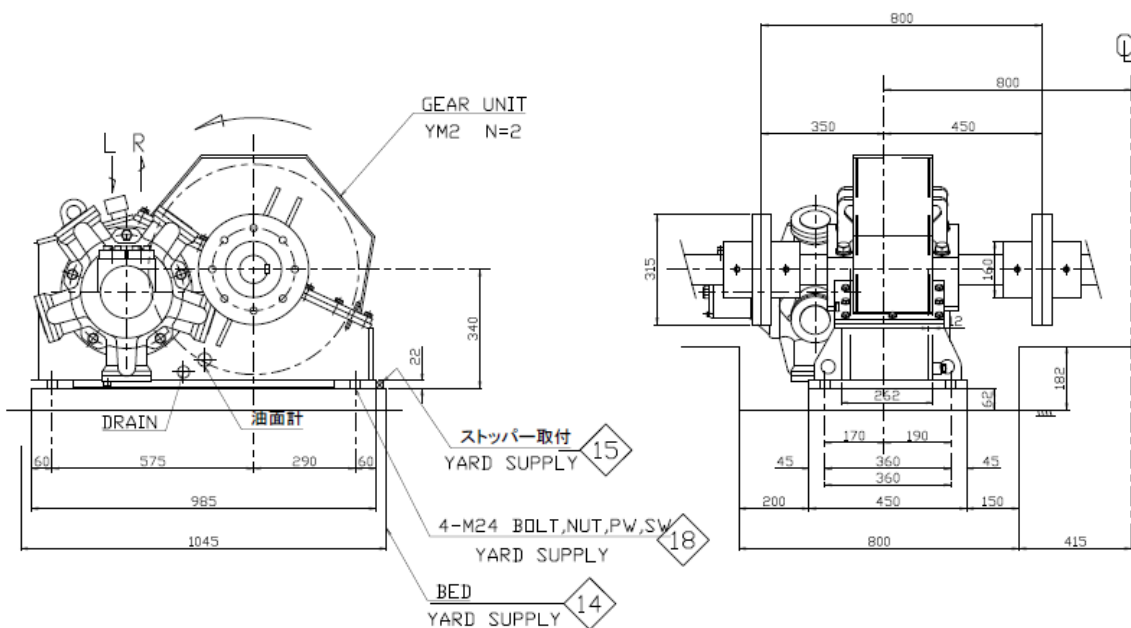


図2. 油圧駆動機(比較用)

3. 1. 3 搭載前試運転

船舶搭載前に動作試験内容を作成し、組みあがった駆動機が正常に動作するかどうかを確認する搭載前試運転を実施した。

電動駆動機の電動モーターはインバーターからの指令を受け取ってから瞬時に回転を始める。油圧モーターの駆動機と比べて、回転をし始めて30秒ほどはゆっくりと回る制御(電動モーターは周波数で回転制御を行う、停止時0Hz、最大速度90Hz)としている。油圧は細かな制御ができないため、操作者が雑に操作をすると最高速度で回転してしまうが、電動モーターであればどのような操作をしてもプログラムによる制御が可能であることを確認できた。作成した制御プログラムのフローチャートを図5(電動駆動機動作フローチャート)に示す。この、図5のフローチャートに沿って試運転を実施した。

試運転内容

- 電源の確認(図5の①)
制御盤内の部品(インバーター・PLC)に通電しエラーが出ていないか
結果:漏電やエラー等無く正常
- 動作のインターロック解除動作の確認(図5の②)
ロック機構の模擬信号を出力し、回転制御可能な状態にする
結果:模擬信号をPLCが受け取り正常
- 電動モーターのブレーキ動作(図5の③)
駆動機の開閉回転指示後、ブレーキ解除、開閉終了時ブレーキ動作の確認
結果:操作レバーを正転及び逆転方向に倒して、瞬時にブレーキが解除され電動モーターが回転、操作レバーを中立位置に戻すと瞬時にブレーキが動作し正常
- 操作レバーにて制御可能か確認(正転・逆転)(図5の④)
0Hzから90Hzになるまで28.53秒
結果:制御通り、約30秒はゆっくり回り正常
90Hz時の5回転速度:巻取方向15.22秒・繰出方向15.19秒
結果:巻取及び繰出方向の回転速度の数値がほぼ同じであり正常
- 緊急停止の確認(図5の⑤)
緊急停止押釦を押した直後に停止すること
結果:押し釦を押すと瞬時に電動モーターが停止し正常
- 非常時応急操作回路の動作確認(図5に記載無し)
インバーター故障時を想定し、電動モーターに電源を直接入れる直入回路を設けている
結果:直入回路に組み直し、回転を確認し正常

加速度やトルクの指令や監視も可能であることが確認できたため、本船搭載後、実際にハッチカバーを開閉させながら調整するが、現時点において、従来に比べ電力消費量の効率化と最大突入電流を軽減するためインバーター制御の最適化ができていることを確認した。また、ブリッジ等からの遠隔操作に対応する方法については3.2省力化による船員不足への対応の項、電力消費量と最大突入電流の実測値については3.4の本船搭載の項にて説明する。

本試運転にて電動駆動機は搭載準備が整った。

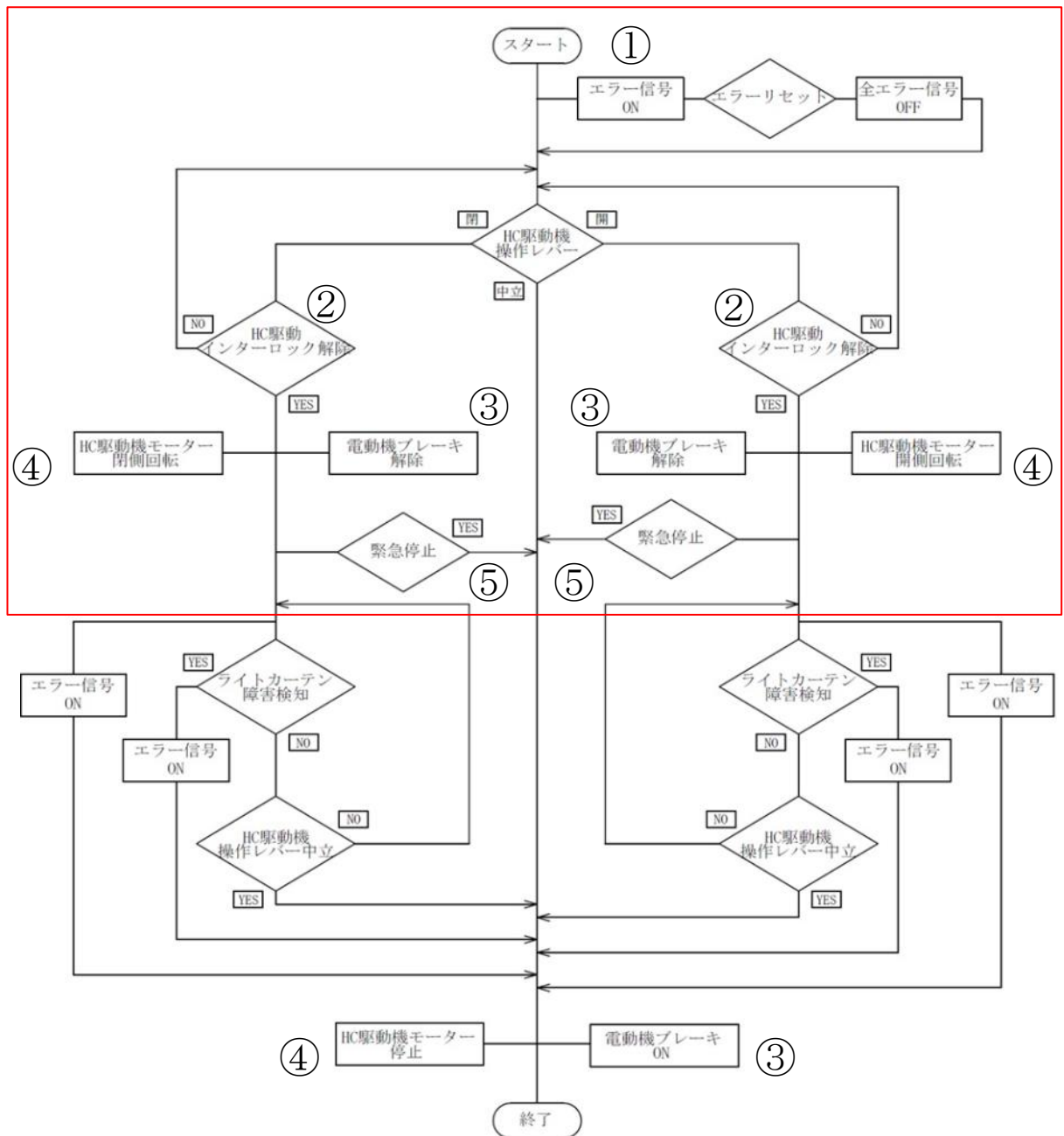


図5. 電動駆動機動作フローチャート
(本項では赤枠内を説明)

3. 2 省力化による船員不足への対応

3. 2. 1 アクチュエーターの選定と発注

アクチュエーターは電動化と全体の制御を両立するため、電動シリンダーとすることを決定した。船舶ではあまり利用されていないこと、塩害・防水対策の必要があること、油圧シリンダーに比べ外寸が大きくなることから船体側の図面変更を行った。

塩害・防水対策として、外部のボルトやブラケットはSUS304を使用すること、合わせ面は全てシリコンコーキングを施すこと、保護等級はIP54がメーカーの標準であるとのことであった。また、電動シリンダーは油圧シリンダーと同等の力量ストローク長であることをメーカーに要求しメーカーから図6の油圧シリンダーと同等のスペックの電動シリンダーの図面と、図7の電動シリンダーのスペックを入手した。これを基に、船体側の干渉について検討を行った。

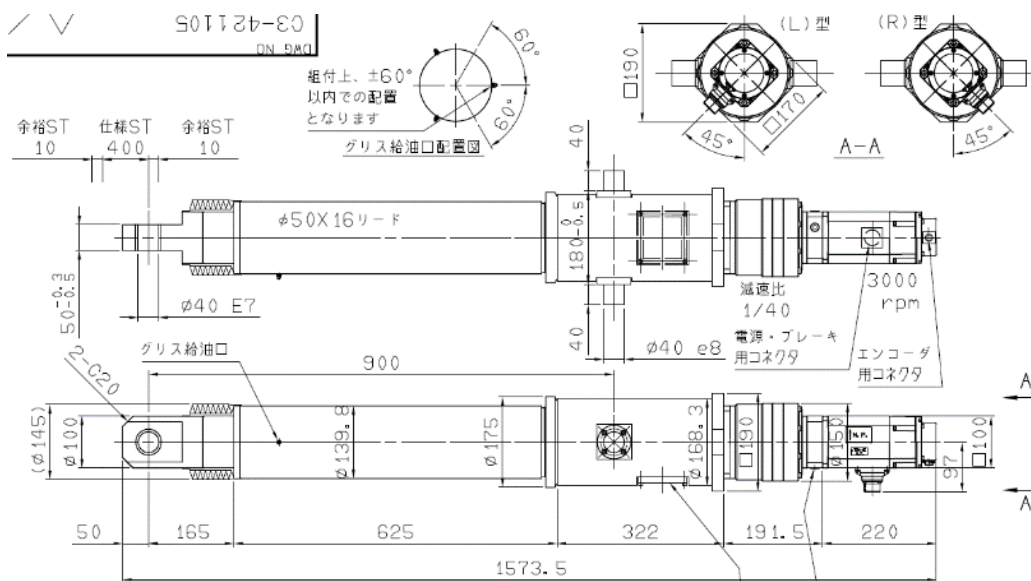


図6. 油圧シリンダーと同等のスペックの電動シリンダー

主要仕様

1. 瞬時最大加圧力 85.0 kN
連続加圧保持力 70.0 kN
2. 定格速度 20.0 mm/s
*モーター定格回転数での速度です
最大速度 26.6 mm/s
*減速機の許容回転数4000rpmより
3. ストローク 400 mm
4. サーボモーター 2.0kW 3000rpm
(最高6000rpm) ブレーキ付
R1AA10200FCR00M(山洋)
5. サーボアンプ RS3A07A0AA0(山洋)
6. 電源 三相 AC200V
7. シリンダ質量 約135kg
8. 納入範囲(1台当たり)
(1) シリンダ 本体(支持フランジON。3"φ)ラ付き
エンコーダケーブル(高屈曲ケーブル20M)
電源・ブレーキ用コネクタ、ケーブルクランプ
(2) サーボアンプ (RS3A07A0AA0)
*サーボアンプ 以外の制御回路・部品は不含
9. 塗装色 グレー: N-6.0(メーカー標準色)
下塗り(1回)(エポキシイソシアナート)
上塗り(1回)(CRマリンエポキシ)

図7. 電動シリンダーのスペック

船体側の干渉については、図8に示す電動シリンダー配置検討図のとおり干渉しないか細かく検討し、図面を確定した。以上により、電動シリンダーの発注が可能となったため、1隻分である14台を発注した。

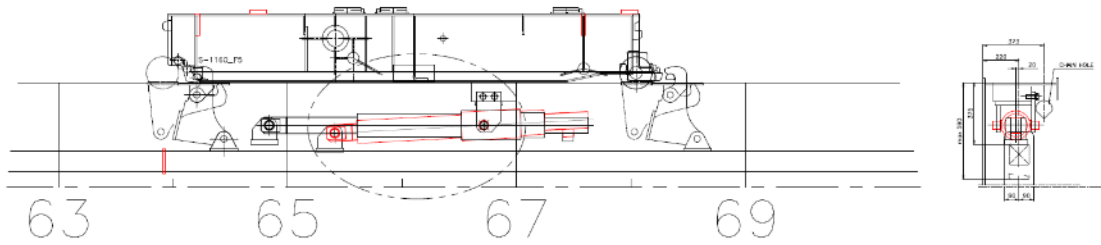


図8. 電動シリンダー配置検討図

制御盤についても半導体不足により早期の発注が必要なため、電動駆動機のインバーター制御と電動シリンダーの制御を両立できる系統図の作成をメーカーに指示し、図9の全体系統図を作成した。また、図10の船首・船尾 左舷側制御盤、図11の船首・船尾 右舷側制御盤、図12の電動駆動機制御盤のとおり、制御盤を設計し、発注した。

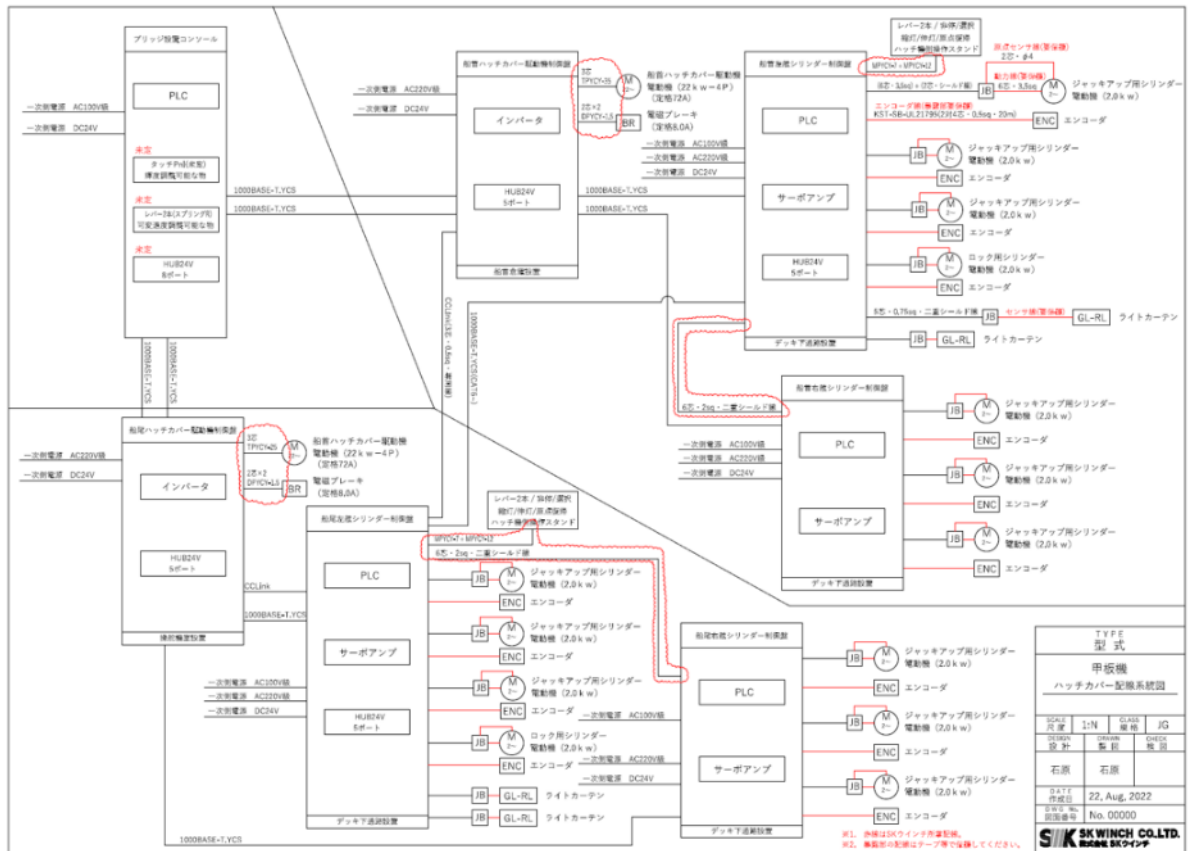


図9. 全体系統図

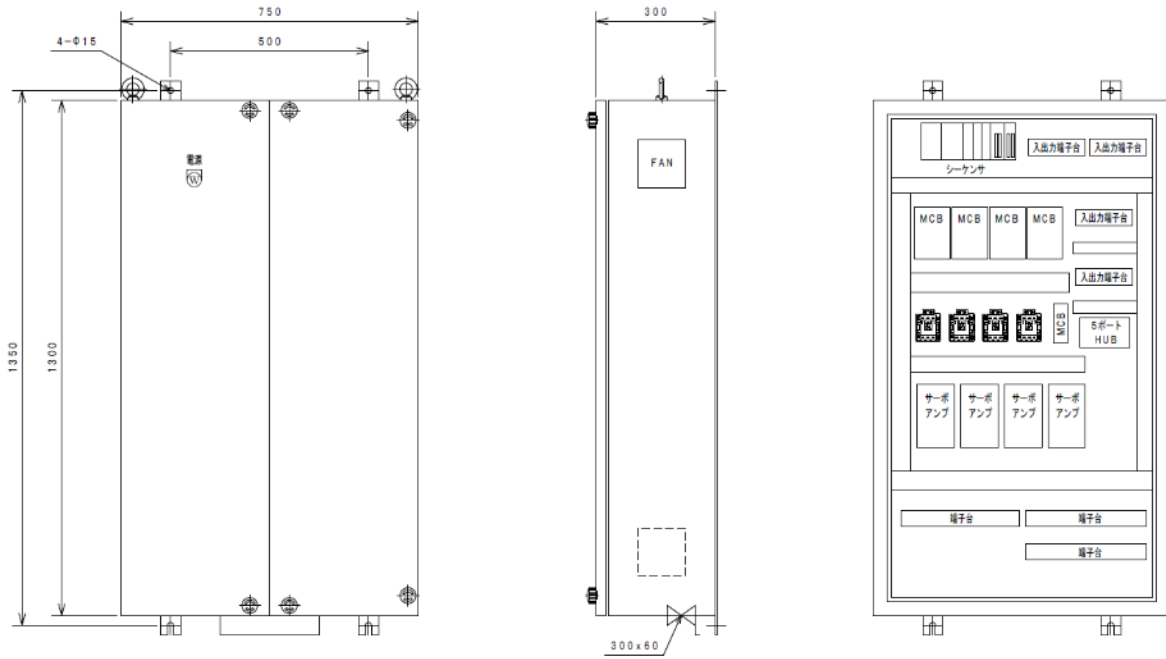


図10. 船首・船尾 左舷側制御盤
(船首1台・船尾1台)

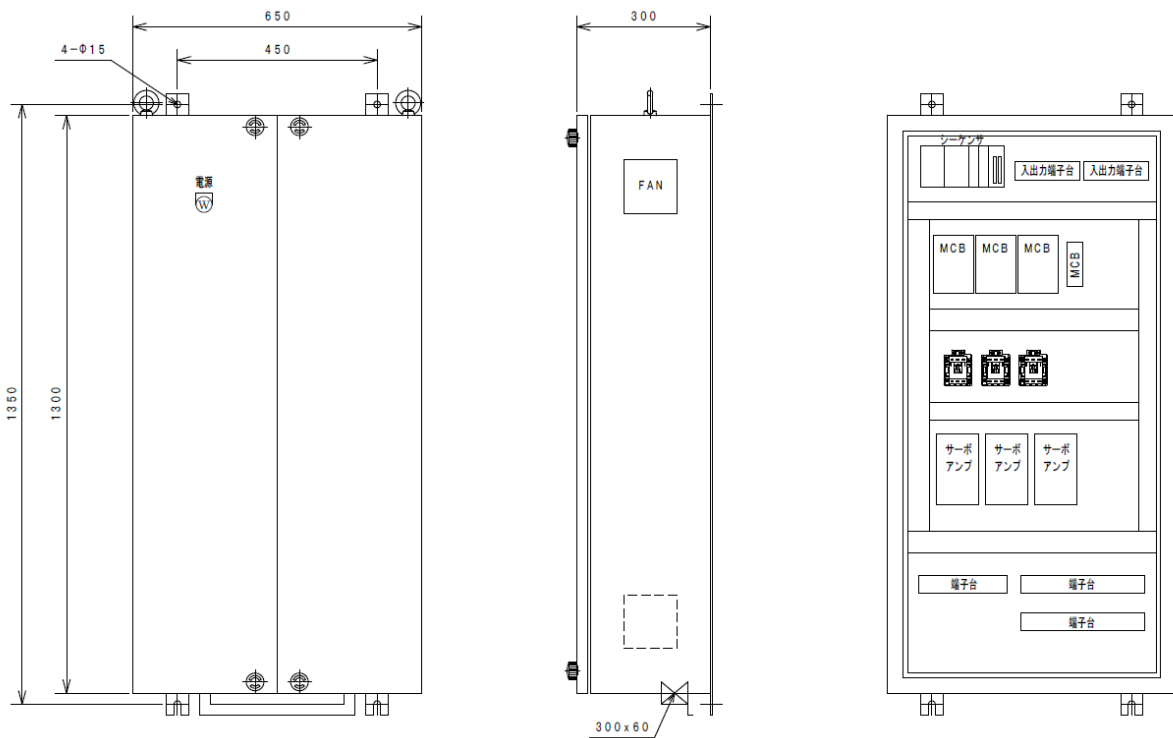


図11. 船首・船尾 右舷側制御盤
(船首1台・船尾1台)

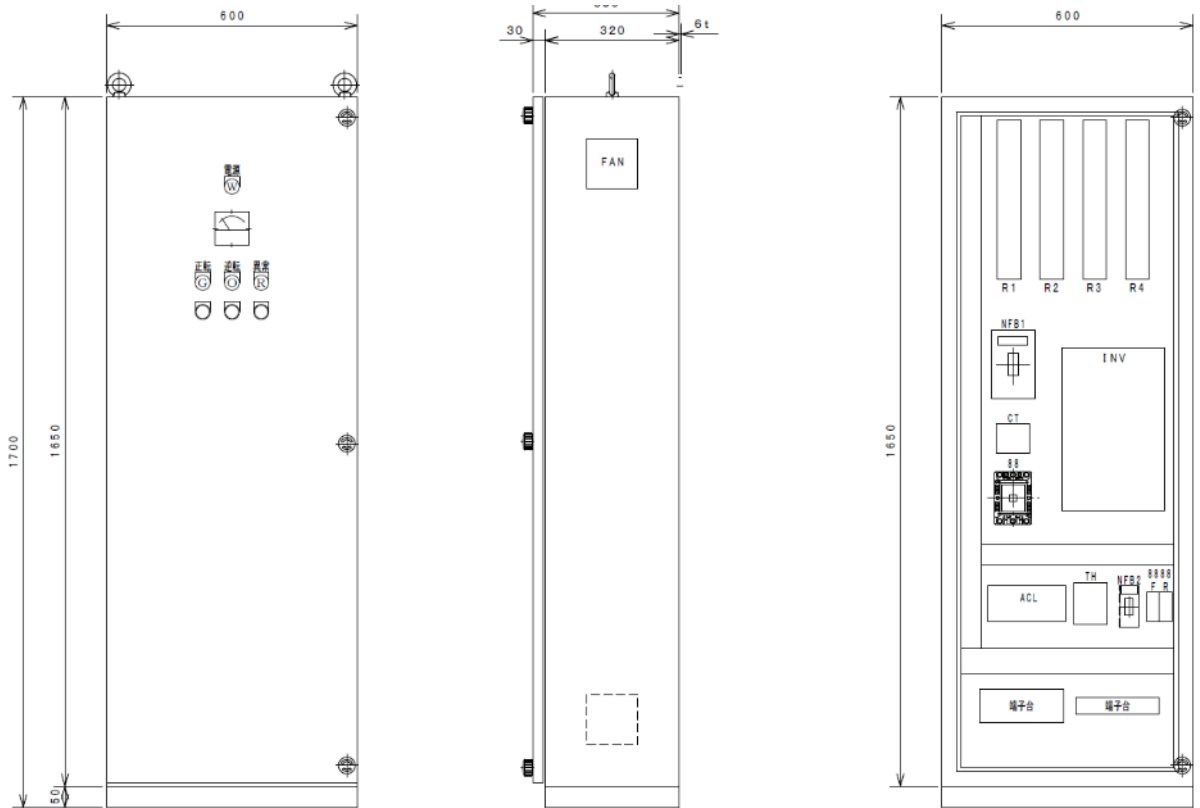


図12. 電動駆動機制御盤
(船首1台・船尾1台)

3. 2. 2 制御プログラムの設計と制御装置

制御プログラムの設計を行うため、電動シリンダーの動作フローチャートを図13の電動シリンダー動作フローチャートのとおり作成し、プログラム作成前に課題点を洗い出した。油圧では制御が単純なためフローチャートの段数が大変少ないが、電動となると制御が複雑となるため、動作に行き着くまでに多くの制御が必要となることがわかった。同時に図5の電動駆動機フローチャートも課題の洗い出し資料とし、誰がどのように操作をしても一定の動作となるよう想定した表1のプログラム仕様一覧表と図の14データ入出力一覧図を作成した。

プログラム仕様書と電動シリンダー動作フローチャート、電動駆動機フローチャートに基づきプログラムの作成を実施した。なお、後述の3. 3デジタルセンサーとの連携機能の開発のエリアセンサーについても本項の表に入れている。

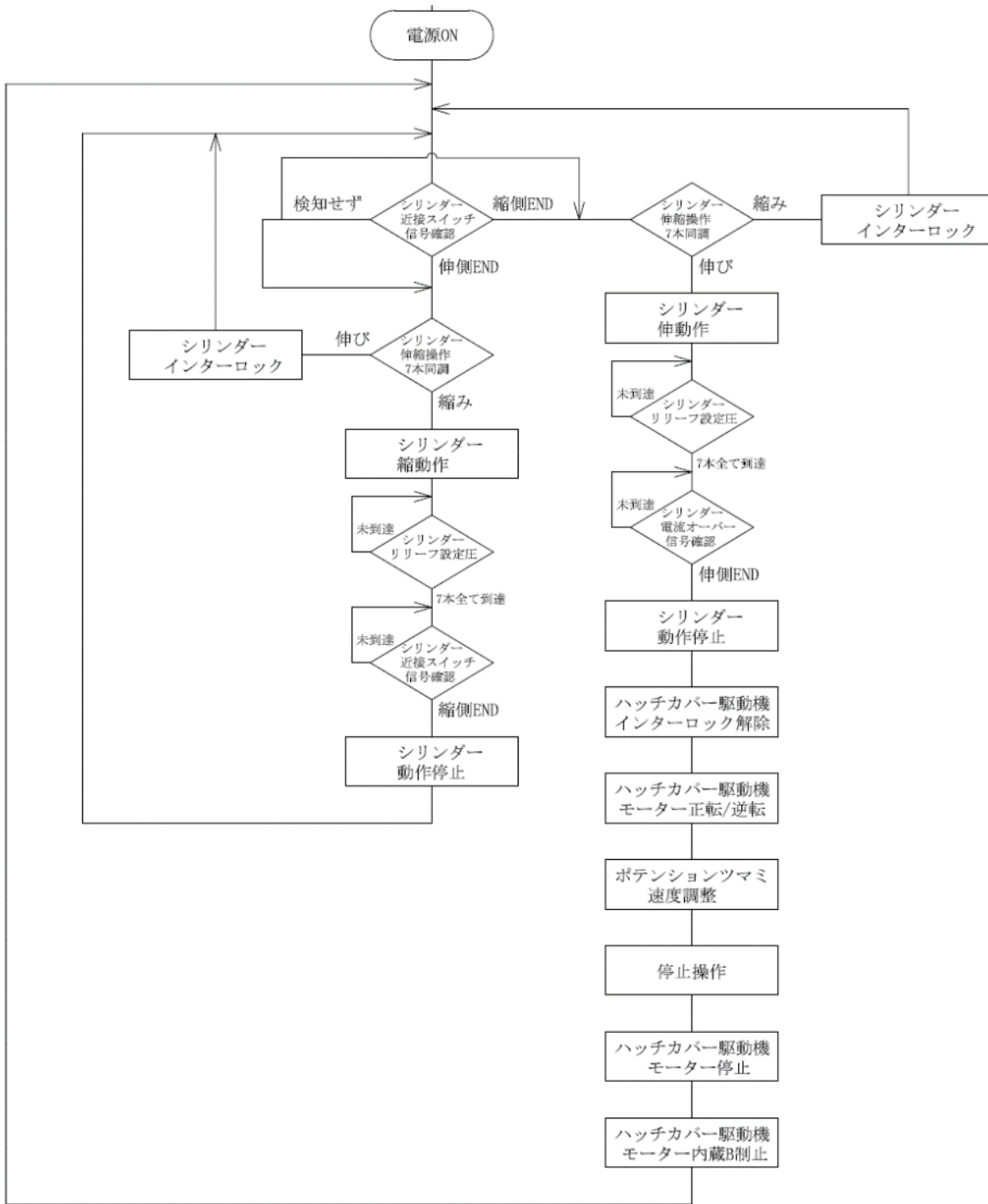


図13. 電動シリンダー動作フローチャート

表1. プログラム仕様一覧表

操作	機器	動作	内容	エラー時 (実際の動作により、最終入力を行う)
ジャッキ操作	電動シリンダー	ジャッキアップ	<p>スタートの際、原点センサーの動作確認を行う。</p> <p>操作レバーをジャッキアップ方向に倒すと、ジャッキダウンのライトが消える。</p> <p>各7本ずつのシリンダーが同調し、伸びる。</p> <p>7本の電動シリンダーが設定したエンド側まで伸びることにより、ジャッキアップ完了となる。</p> <p>ジャッキアップ完了時、ジャッキアップのランプが点灯する。</p> <p>電動シリンダーがエンド側まで動作完了後、ハッチカバー駆動インターロックが解除となる。</p> <p>ハッチカバー本体のロックが解除となる。</p> <p>ハッチカバー動作中、ジャッキアップ中を保持する。</p>	<p>スタートの際、動作不能なシリンダーがわかる。</p> <p>ジャッキアップ時にシリンダー停止のエラーがでることにより、停止しているシリンダーの特定ができる。</p> <p>ジャッキアップ中の電流値異常のシリンダーの特定ができる。</p> <p>ジャッキアップ中の経過時間により、遅延しているシリンダーの特定ができる。</p> <p>断線時の異常表示がだせる。</p> <p>トルク値からエンド側未到達の電動シリンダーが特定できる。</p>
		ジャッキダウン	<p>スタートの際、原点センサーの動作確認を行う。</p> <p>ハッチカバー駆動機インターロックがかかる。</p> <p>操作レバーをジャッキダウン方向に倒すと、ジャッキアップのライトが消える。</p> <p>各7本ずつの電動シリンダーが同調し、縮む。</p> <p>7本のシリンダーが設定した原点まで縮むことにより、ジャッキダウン完了となる。</p>	<p>スタートの際、動作不能なシリンダーがわかる。</p> <p>ジャッキダウン時にシリンダー停止のエラーがでることにより、停止しているシリンダーの特定ができる。</p> <p>ジャッキダウン中の電流値異常のシリンダーの特定ができる。</p> <p>ジャッキダウン中の経過時間により、遅延しているシリンダーの特定ができる。</p> <p>断線時の異常表示がだせる。</p>

		<p>ジャッキダウン完了時、ジャッキダウンのランプが点灯する。</p> <p>ハッチカバー本体にロックがかかり、そのまま保持する。</p>	<p>近接スイッチ信号の未達を確認する。</p>
ハッチカバー駆動操作	ハッチカバー開	<p>ジャッキアップ後、ハッチカバー正転・逆転インターロック解除となる。</p> <p>操作レバーを開方向に倒すと、電動機のブレーキが解除およびハッチカバー駆動機モーターが開側へ回転を行う。</p> <p>ハッチカバーが開ききった状態は目視で確認し、操作レバーを中立にする。</p> <p>操作レバーを中立にすると、ハッチカバー駆動機モーターが停止および電動機のブレーキがかかる。</p> <p>ハッチカバー動作中、非常停止ボタンを押すと止まり、ハッチカバー駆動機モーターが停止および電動機のブレーキがかかる。</p>	<p>ハッチカバー動作中の際、開回転の停止となる。</p> <p>断線時の異常表示がだせる。</p>
	ハッチカバー閉	<p>ジャッキアップ完了の場合、ハッチカバーインターロック解除となる。</p> <p>操作レバーを閉方向に倒すと、電動機のブレーキが解除およびハッチカバー駆動機モーターが閉側へ回転を行う。</p> <p>ハッチカバーの閉まりきった状態は目視で確認し、操作レバーを中立にする。</p> <p>操作レバーを中立にすると、ハッチカバー駆動機モーターが停止および電動機のブレーキがかかる。</p>	<p>ハッチカバー動作中の際、閉回転の停止となる。</p> <p>断線時の異常表示がだせる。</p>

		<p>ハッチカバー動作中、非常停止ボタンを押すと止まり、ハッチカバー駆動機モーターが停止および電動機のブレーキがかかる。</p>		
操作なし	エリアセンサー	シリンダー動作中	<p>スタートの際、電源が入る。</p> <p>シリンダー動作中に障害物を検知すると、シリンダーの動作停止。</p> <p>障害物を検知なくなると、シリンダーの操作が可能となる。</p>	<p>障害物を検知しない場合の対応</p> <p>センサーがずれた際、エラーがでることにより場所を特定できる。</p>
		ハッチカバー動作中	<p>スタートの際、電源が入る。</p> <p>ハッチカバー動作中に障害物を検知すると、ハッチカバー駆動機モーターが停止および電動機のブレーキがかかり、ハッチカバー停止となる。</p> <p>障害物を検知なくなると、ハッチカバーの操作が可能となる。</p>	

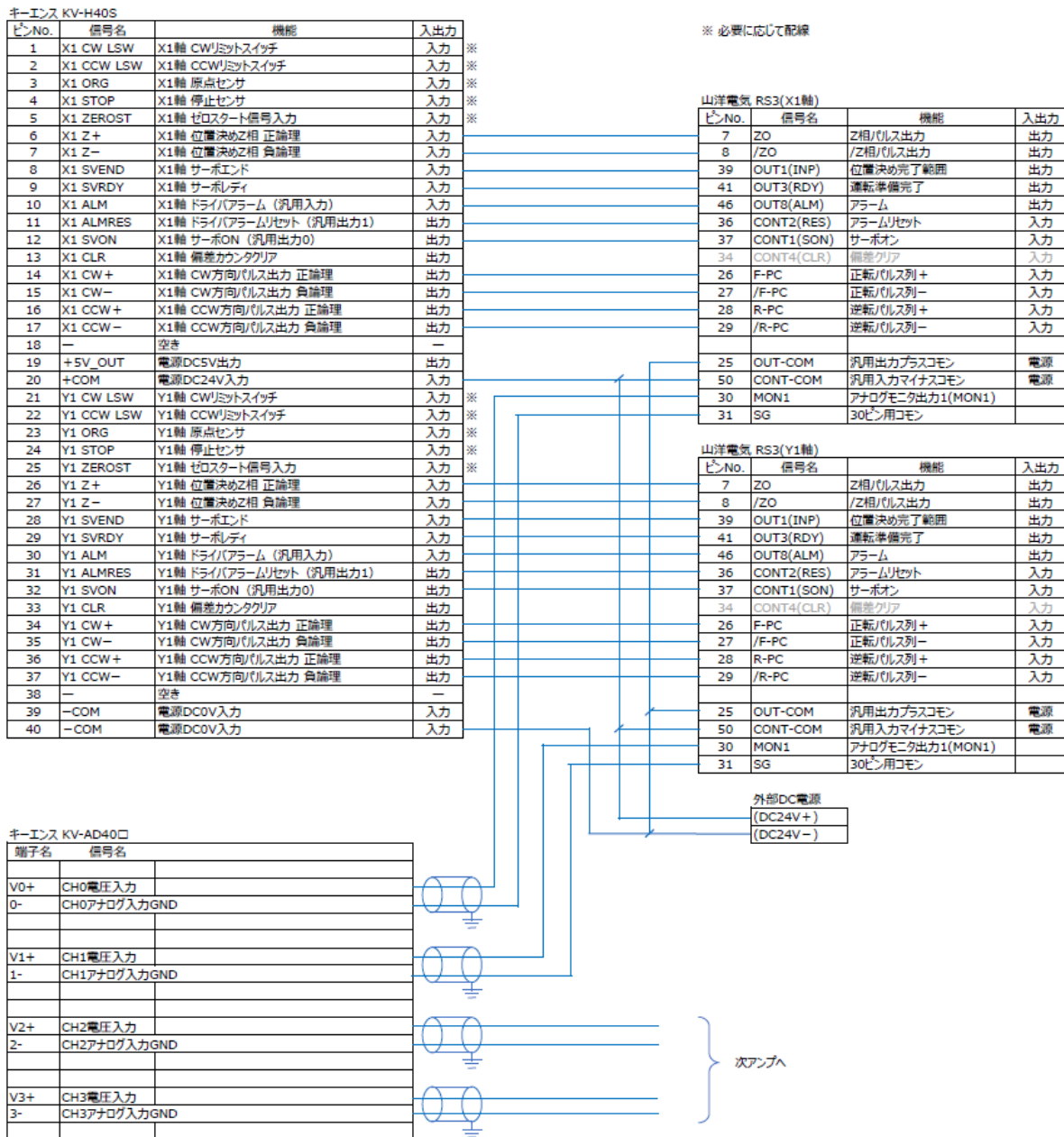


図14. データ入出力一覧図

3. 2. 3 搭載前試運転

製作を指示していた3台の制御盤が完成し、系統図通りであることを確認した。また、電動シリンダーについても納入が完了した。図15の制御盤仮配線と図16の電動シリンダー仮配線のとおりに制御盤と電動シリンダーを搭載前試運転のため仮配線を行った。



図15. 制御盤仮配線



図16. 電動シリンダー仮配線

搭載前運転は、電動シリンダー、各制御盤、制御プログラムがそれぞれ正常に動作するかを確認するため、図17に示す電動シリンダー動作フローチャートに沿って実施した。

プログラム通りに動作するか、制御盤に組み込んだ機器類の異常が無いか、トライアルアンドエラーを繰り返しプログラムの修正とエラーの絞り込みや、ケーブル損傷とコネクタ脱落などの想定外ではあるが考えられる不具合を発生させエラーが発生した場合のプログラムの対応などを数日掛けて実施し、プログラムの不具合であるバグを概ね修正し、エラーや想定される不具合が判明した。

試運転内容

- 電動シリンダー原点位置センサーの動作確認(図17の①)
ロック機構のロック位置する原点位置センサーの検知
結果:検知信号を確認し正常
- 操作レバーにて伸び側・縮み側の制御(図17の②)
7本同時に原点位置を0mmとして330mm伸ばす、330mmから0mmへ縮む
結果:伸動作→26.03秒、縮動作→25.71秒
単体での動作確認(縮→伸・伸→縮)も実施し正常
- 動作のインターロック解除動作の確認(図17の③)
7本中1本に異常があり伸び側が足りない模擬信号を出力し、同調制御が完了していない状況を作り出した
結果:シリンダーの動作エラーが出た。インターロックとしては正常

搭載後、改めて船上で試運転を行い再度プログラムの検証を実施することとした。本試運転にて電動シリンダーと制御盤は搭載準備が整った。

3. 2. 4 ブリッジからの遠隔操作への対応

ブリッジから一人でハッチカバーの開閉を可能とするためには、電動駆動機と電動シリンダーの動作時に数値の見える化が必要である。そこで、図5の電動駆動機動作フローチャートで示した、電動モーター駆動時の数値情報と、図13の電動シリンダー動作フローチャートで示した、電動シリンダージャッキアップ動作およびジャッキダウン動作時の数値情報を、図14のデータ入力一覧図で整理し、ブリッジ操作パネルに表示させる情報を決定した。その情報は、「電動アクチュエーターロック及びロック解除」、「電動シリンダートルク」、「電動シリンダーエラー」、「駆動機モーターインバーター周波数」、「駆動機モータートルク」、「駆動機モーターエラー」である。

見える化により開閉・ロック時の情報を数値化しブリッジ等からの遠隔操作時もハッチカバーの動作が明確になり一人でも開閉が行えるプログラムとした。更に、故障している電動シリンダーの特定にも役立てることが可能になるため、メンテナンス性の向上にもなった。

なお、情報や警報等の表示モニタのプログラム作成は本船搭載後に行うこととした。

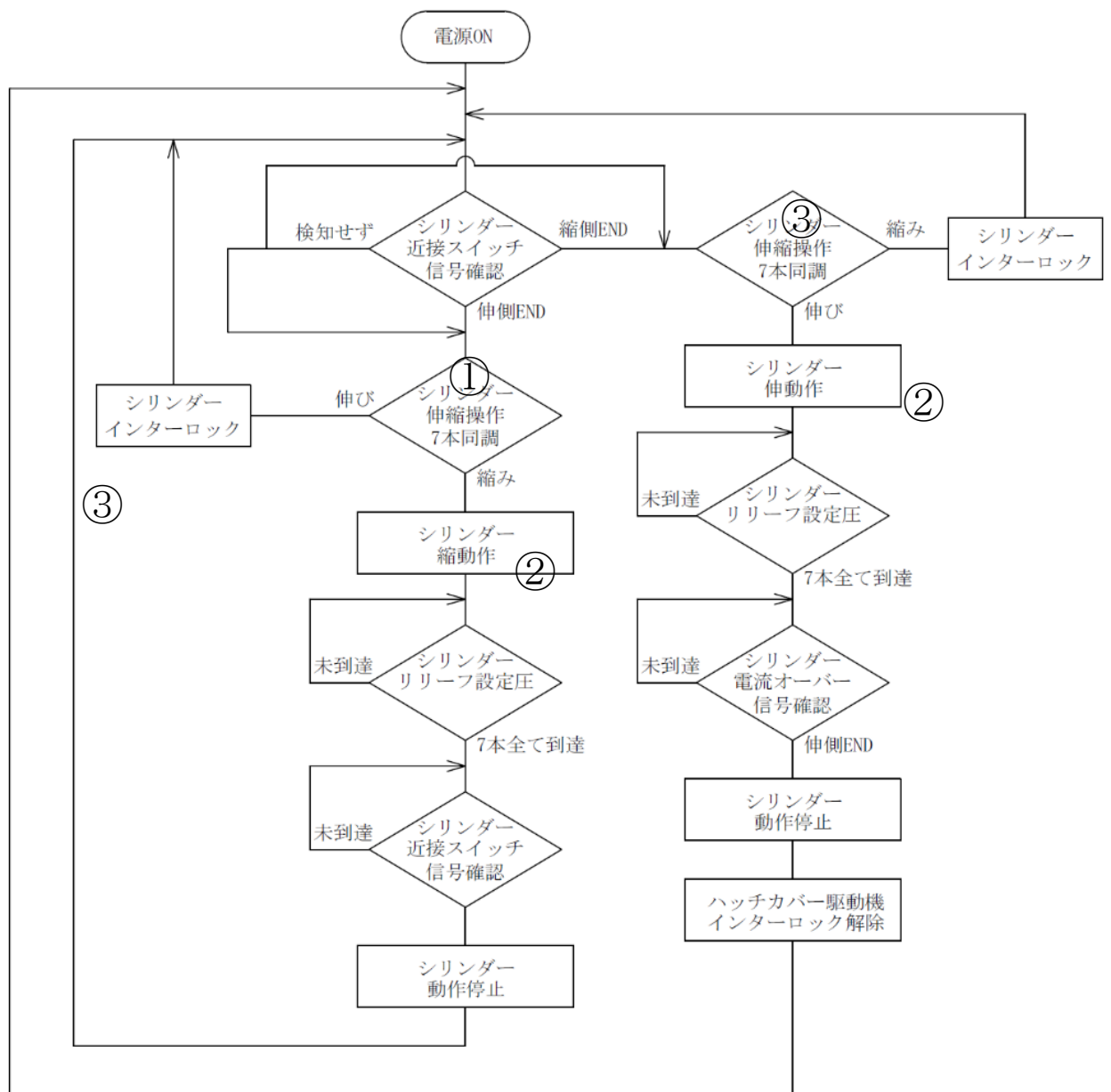


図17. 電動シリンダー動作フローチャート
試運転説明用

3.3 デジタルセンサーとの連携機能の開発

3.3.1 デジタルセンサーの選定と制御プログラム設計

デジタルセンサーはエアロセンサーと呼ばれる危険エリア内に人が立ち入ると停止指令を出すことができる物を選定した。また、警報はハッチカバー開閉時に警報音を鳴らす機器が船体に取り付けられているため、接続出来るリレー回路を設けることにした。エアロセンサーは陸上で実績の高いキーエンス製とし、操作レバーを設置する反対舷(船首尾、どちらも右舷に操作レバーを設置するため左舷側が反対舷となる)に設置した。設置方法は、図18のエアロセンサー設置金物のとおり金物をハッチカバー走行部に取り付ける方法とした。

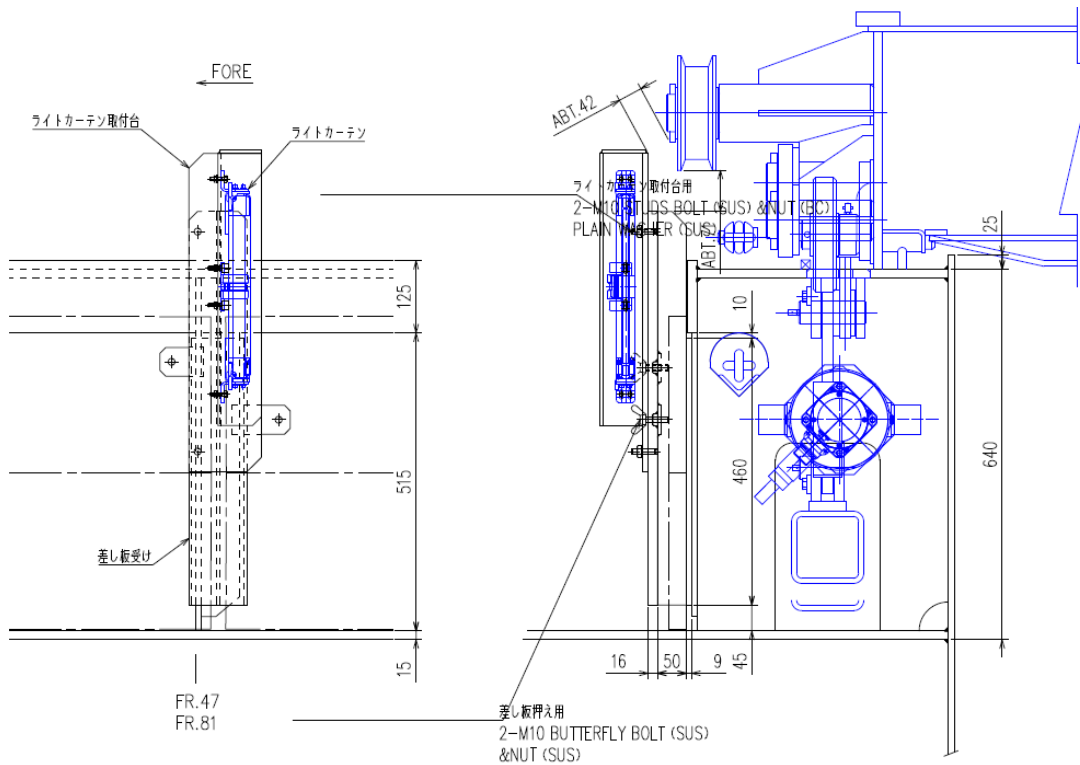


図18. エアロセンサー設置金物

センサーの制御プログラムは、危険区域に人がいる場合には、エアロセンサーが感知して機器の動作を停止させる制御プログラムにするため、電動駆動機の制御プログラムに、センサーの制御プログラムを組み込んだ。その電動駆動機動作フローチャートを図19に示す。

またエアロセンサーは、危険区域に人などを感知した場合、5秒以内に機器が停止するように、瞬時に検知信号を出せる性能を有するものを選定した。さらに、ハッチカバー開閉時には音声による注意喚起を行うため、制御プログラムおよび制御盤にスピーカーを接続するための動作回路を追加した。

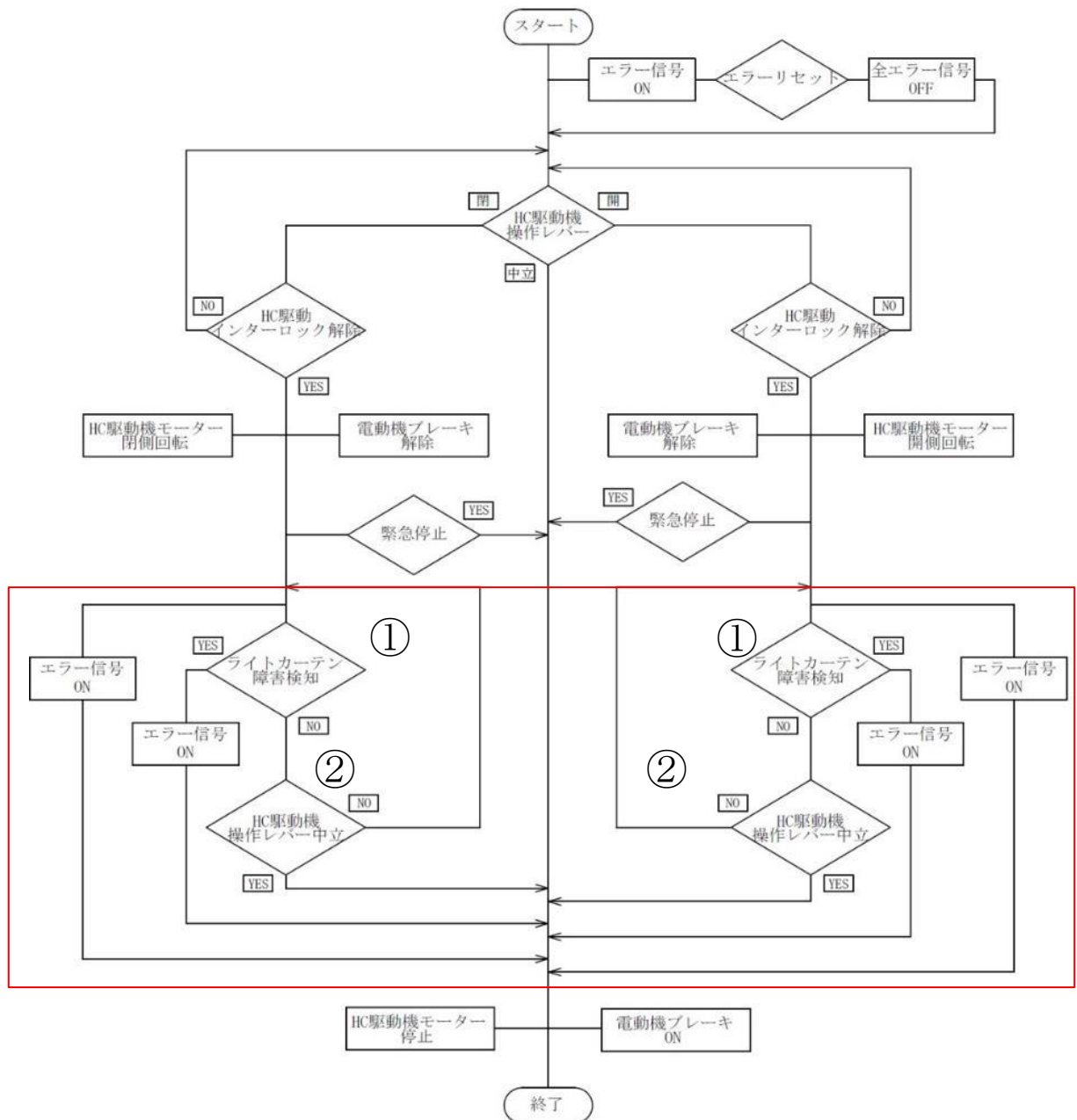


図19. 電動駆動機動作フローチャート

3. 3. 2 搭載前試運転

図19示す、電動駆動機動作フローチャート内に組み込んだエアロセンサーの動作フローに沿って搭載前運転を実施した。図15、図16の搭載前試運転時と同時に実施し、仮配線もその際に行っている。また動作仕様については表1のプログラム仕様書のとおりである。

搭載前試運転内容はエアロセンサーが人を感知したとき(図19の①および図21)電動シリンダーおよび駆動機が停止、エアロセンサーが人を感知なくなると(図19の②および図21)動作再開することが確認できた。

試運転では船上で想定される約10mという距離を確保出来なかったが、瞬時に動作することがわかったため、船上でさらなる検証を行うこととした。



図20. エリアセンサー 感知有り



図21. エリアセンサー感知無し

3. 4 駆動機と電動アクチュエーター、デジタルセンサーの搭載

3. 4. 1 電動駆動機の搭載と試運転

機器を搭載する船舶は当社建造の1160番船総トン数499トンの貨物船とした。本船はシングルプルハッチカバーを採用していることから、本開発の電動駆動機と電動シリンダーが利用できる。船主の承諾を得たため搭載を行った。

駆動機搭載後、ハッチカバーを動作させたところ、開放・閉鎖の終端で金物に当たってしまうと瞬間的に電流値が上がってしまい、インバーターがエラーを出すことが判明した。そこで、ハッチカバーの突入電流測定を行ったところ、瞬間的な電流値は119A以内であり機器に支障のない範囲であるため本事象はエラーとして取り扱わないプログラムとして解消した。インバーターの電流と周波数のグラフを図22に、突入電流の測定の様子を図23にそれぞれ示す。

また、今回の瞬間的な電流値の上昇について考察を行ったところ、従来型スターデルタ駆動であれば、最大突入電流は定格30kWの3倍である90kW・295Aとなるが、本電動駆動機の最大突入電流は定格30kWの1.64倍である36.1kW・119Aとなり、電力消費量の低減が確認できた。また、電動機は22kW電動機の定格出力72A、30kW電動機の定格出力105Aであり、28%の省エネになったため、15%削減目標を大きく上回ることができた。

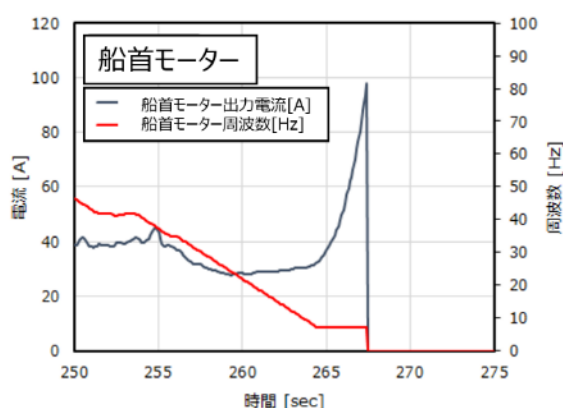


図22. インバーターの電流と周波数のグラフ(詳細)



図23. 突入電流の測定

さらに、船舶の前後方向の傾きにより船首及び船尾ハッチカバー開時の力量変化を計測した。図24の船首電動駆動機の運転情報と、図25の船尾電動駆動機の運転情報を比較すると、船首は動き出し時に船尾と比べ電流値が高くなっている。また、終端では船尾が船首と比べ電流が高い。これは、図26の船首ハッチカバー格納部が図27の船尾ハッチカバー格納部に比べローラー走行部に角度が付いていることが原因である。通常、船舶は水平ではなく船首シアーにより船首より船尾が高い位置となり斜めになっている。このことから、ハッチカバーが自重により走行することを防ぐため、船首側は格納部で自重による走行を防ぐための角度をつけており(図26の船首ハッチカバー格納部、赤線を参照)、船尾側は船首シアーにより自重で走行しにくいいため水平となっている。(図27の船尾ハッチカバー格納部、赤線を参照)試運転時はほぼ水平であったため、船首側の数値が目立つ。運航時は船首シアーにより逆の数値になると思われる。また、格納時は船首側操作時に周波数の値を見ると停止後にゆっくりと末端にまで走行させていることから電流値が低い。船尾は走行速度が船首と比べ速いことから末端部分に押し当てたことから電流値が高くなっている。

このことから、船首と船尾では船首シアーを想定した船体構造により若干の力量変化があることがわかった。

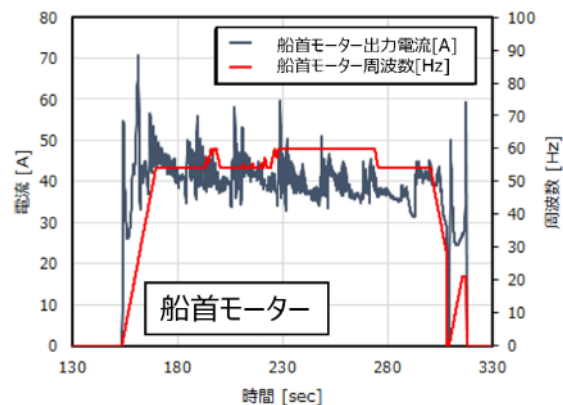


図24. 船首電動駆動機の運転情報

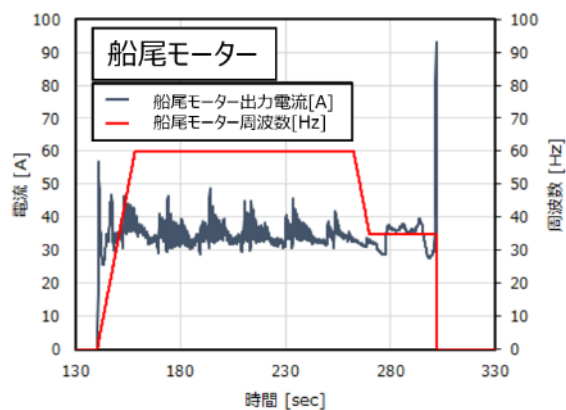


図25. 船尾電動駆動機の運転情報

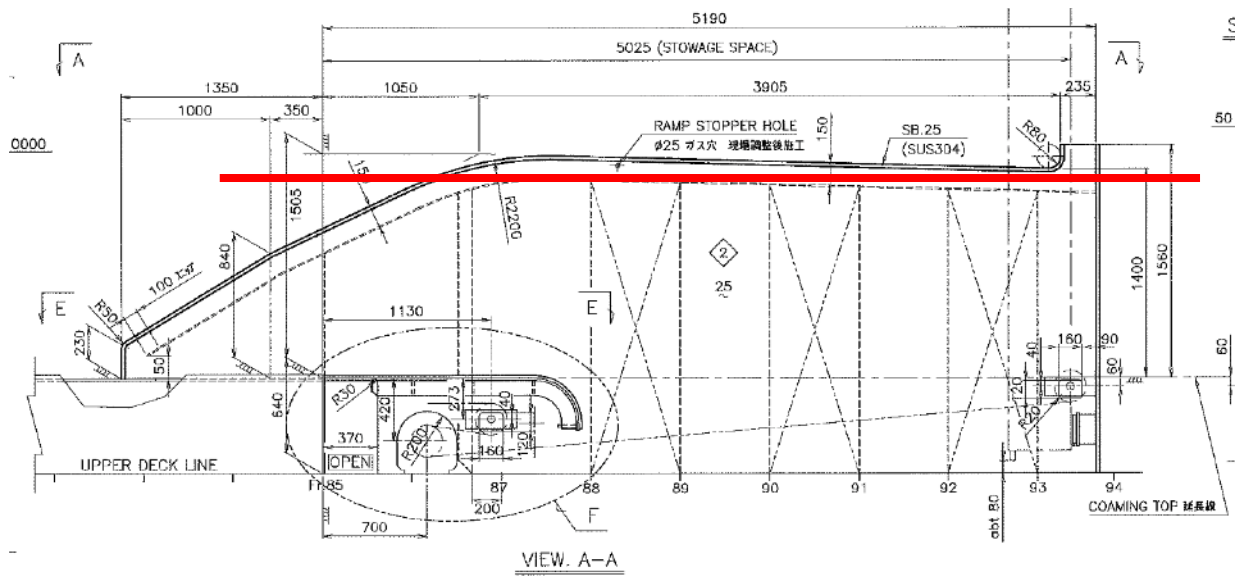


図26. 船首ハッチカバー格納部

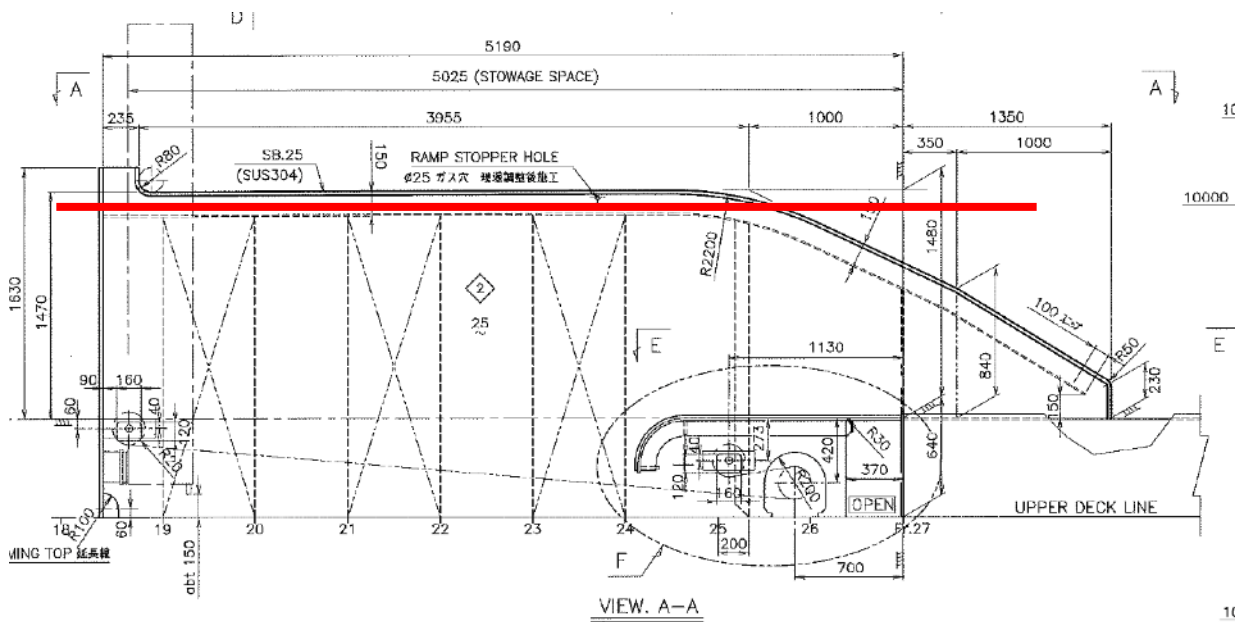


図27. 船尾ハッチカバー格納部

3. 4. 2 電動アクチュエーターの搭載と試運転

電動アクチュエーターは3. 1. 1. のとおり電動シリンダーを採用し搭載した。電動シリンダーの動作はジャッキアップ動作とジャッキダウン操作に分けられる。ジャッキアップ動作はハッチカバーをレールと同じ高さに持ち上げハッチカバーの開閉が可能となる。ジャッキダウン操作はハッチカバーをレールより下げ、同時にロック機構が働き、航行可能な水密構造となる。電動シリンダーを搭載後、ジャッキダウン動作を行ったところ動き出しとほぼ同時にエラー停止してしまう事が判明した。そこでエラーの原因を調査した結果、動き出し時に一瞬大きな荷重がかかるためにエラーが出ている可能性があることが分かり、速度を落としたところエラーは出なくなった。

また、ジャッキアップ動作・ジャッキダウン動作を繰り返し操作していたところ、数十回繰り返したところで船体と電動シリンダーを繋ぐボルトが伸びていたことが判明した。調査の結果、定格70kNのところ、瞬間最大荷重が220kN掛かっており、ジャッキアップ動作時にロック機構の金物と接触することにより最大荷重がボルトに掛かることからボルトにダメージを与えていたことがわかった。対策としてロック機構の金物の干渉部分を削り取り干渉を防いだ。また、プログラム上で電動シリンダーの最大荷重をスペック上の最大値である85kN制限としボルトを保護することとした。計測した結果を、表2の船首電動シリンダー調整前・調整後 最大荷重一覧表と、表3の船尾電動シリンダー調整前・調整後 最大荷重一覧表にまとめた。

本修正により、ジャッキアップ動作・ジャッキダウン動作が問題なく行えてボルトにもダメージが無いことと、仕様上の荷重内に数値が収まっているため問題がないことが確認できた。

表2. 船首電動シリンダーの調整前・調整後 最大荷重一覧表

船首電動シリンダー	右舷 No1	右舷 No2	右舷 No3	左舷 No1	左舷 No2	左舷 No3
調整前	56	81	64	73	70	57
調整後	55	80	59	70	68	59

表3. 船尾電動シリンダーの調整前・調整後 最大荷重一覧表

船尾電動シリンダー	右舷 No1	右舷 No2	右舷 No3	左舷 No1	左舷 No2	左舷 No3
調整前	220	54	50	72	68	47
調整後	77	73	51	86	54	50

図28の機側操作部とおりの機側操作に加え、図29のブリッジ操作部のおりブリッジよりトルクの見える化と遠隔操作ができるようになった。また図30のトルクの見える化画面のおり表示画面の作成・調整を行った。動作検証の結果、ブリッジ操作でも機側操作と変わらない動きと、動作中やロック時のトルクも確認することができた。本機能により、荷役におけるハッチカバー開閉作業に係る人員数を2人から1人に省力化可能となった。また、図31の警報発令画面のおり警報画面を作成し再ロックや故障箇所の特定を可能とした。動作中やロック時のトルクを測定し閾値を設定、閾値を超えたときに陸上へメールで通知するシステムを構築した。これにより不具合個所の特定が迅速に行えるだけでなく、船員が気付く前に不具合対応が可能となった。



図28. 機側操作部



図29. ブリッジ操作部



図30. トルクの見える化画面

■ 船尾ハッチカバー警報発令

①	シリンダ原点復帰時アラーム	シリンダ原点復帰中、全荷重が 20 kN以下となった後、 いずれかの荷重が 40 kNを超えたとき	NORMAL
②	シリンダ上昇時アラーム	シリンダ上昇中、いずれかの荷重が 116 kNを超えたとき	NORMAL
③	シリンダ下降時アラーム	シリンダ下降中、全荷重が 20 kN以下となった後、 いずれかの荷重が 40 kNを超えたとき	NORMAL
④	シリンダ荷重ばらつきアラーム	シリンダ荷重のばらつきが大きいとき 準備中	NORMAL
⑤	モータ運転開始時アラーム	モータ運転開始後 2.0 sec内の最大電流が 150 Aを超えたとき	NORMAL
⑥	モータ平均電流アラーム	モータ運転開始から 10.0 sec以降の定速または増速運転時、 平均電流が 40 Aを超えたとき (押し当て動作時を除く)	NORMAL
⑦	モータ瞬時電流アラーム	⑥と同じ運転条件において 瞬時電流が 65 Aを超えたとき 押し当て動作判断 推定相度 -8 % ~ 3 %で閉 推定相度 95 % ~ 105 %で閉	NORMAL
⑧	モータ停止時アラーム	モータ停止前 (周波数 30 Hz以下)、電流 160 A以上 の条件が 1.0 sec以上続いたとき	NORMAL

図31. 警報発令画面

3. 4. 3 デジタルセンサー動作検証と不具合の確認及びその修正

デジタルセンサーは3. 3. 1のとおり、エリアセンサーを採用し、図32のエリアセンサー設置の様子赤丸部のとおり、搭載後に駆動機の運転と共に動作検証を行った。エリアセンサーに人や物が遮ると動作中の駆動機が1秒も経たず瞬時に一時停止、人や物が無くなると動作を再開することが確認できた。従って、ハッチカバー開閉時、船員が危険エリアに入るとデジタルセンサーが反応し、警報を発令するとともに、警報を発した後に5秒以内に走行を自動停止するという目標を達成できた。

続いて電動シリンダーの動作検証を行った。エリアセンサーを人や物が遮ると動作中の電動シリンダーが一時停止、人や物が無くなると動作を再開することが確認できた。エリアセンサーの設置により、ハッチカバー操作時に操作者が目視できない危険範囲に人が入るようなことがあっても自動的に動作が停止し、開閉時の事故・怪我を防ぐことが期待される。また、開閉時は音声で注意を促すスピーカーと連動させた。



図32. エリアセンサー設置の様子

3. 5 モニタリング

陸上から本システムにリモート接続し本システムの健全性を2023年1月より搭載した船舶で監視を実施している。船陸間通信に接続し、図33のリモート接続プログラムを開いている様子のとおり各種機器を遠隔モニタリングが実施できるため、プログラムの微修正が可能となった。また詳細データも図34のリモート接続で抜き出した運転状況データのとおりリモート接続で抜き出すことができるため異常時に事前検証が可能となった。今後も、正常な動作や異常を遠隔でモニタリングしていく。

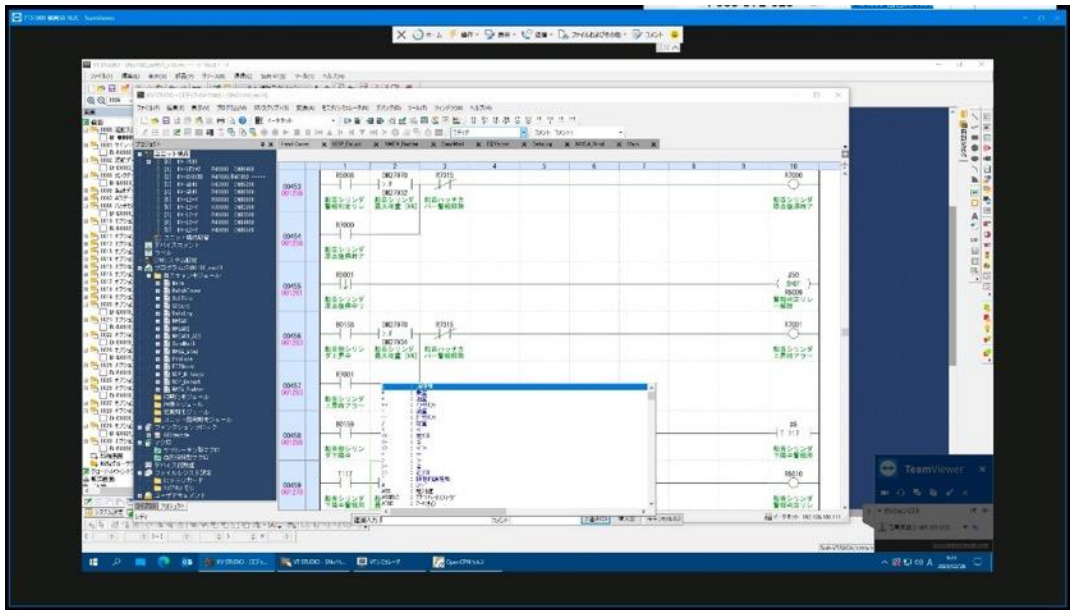


図33. リモート接続プログラムを開いている様子

X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	A
現在の設 定トルク 値	船尾左舷 シリンダ 1荷重 [kN]	船尾左舷 シリンダ 2荷重 [kN]	船尾左舷 シリンダ 3荷重 [kN]	船尾左舷 シリンダ 4荷重 [kN]	船尾右舷 シリンダ 1荷重 [kN]	船尾右舷 シリンダ 2荷重 [kN]	船尾右舷 シリンダ 3荷重 [kN]	船尾左舷 シリンダ 1現在速 度	船尾左舷 シリンダ 2現在速 度	船尾左舷 シリンダ 3現在速 度	船尾右 シリ 度
1	125	30	37	27	3	40	26	29	2	2	2
1	125	30	37	27	3	40	26	27	2	2	2
1	125	30	37	27	3	40	26	28	2	2	2
1	125	30	37	26	3	39	25	28	2	2	2
1	125	29	37	27	3	40	26	29	2	2	2
1	125	30	37	26	3	38	26	28	2	2	2
1	125	30	37	27	2	38	26	28	2	2	2
1	125	29	37	27	3	40	25	28	2	2	2
1	125	29	37	27	3	39	26	28	2	2	2
1	125	30	36	26	3	39	26	28	2	2	2
1	125	29	37	28	3	38	26	27	2	2	2
1	125	29	36	27	3	39	25	28	2	2	2
1	125	29	36	26	3	39	25	27	2	2	2

図34. リモート接続で抜き出した運転状況のデータ
(縦軸は時間を表す)

4. 目標の達成状況

4.1 電動モーターを用いた駆動機の開発

従来型の電動油圧タイプの電動機容量は30kWであり、これを、電動モーターを用いた駆動機に変更することにより電動機容量を22kWにサイズダウンする事ができた。実際の力量においても22kWでシングルプルのハッチカバーを問題なく開閉できる事を確認した。

これにより、電力消費量28%に削減することができ、目標値である15%削減を大きく上回る結果となり目標を達成することができた。

4.2 省力化による船員不足への対応

駆動機の電動化により、電動モーターのインバーター制御とロック機構の電動アクチュエーター化を可能にした。また、ハッチカバーの開閉に係る様々な動作を電動化すると共にデジタルセンサー等を活用して見える化することにより、ブリッジ等からの遠隔操作が可能となった。本システムにより機側操作が不要となることから、ハッチカバー開閉作業に掛かる人員は1人で可能となり、人員数を2人から1人に省力化可能とする目標を達成することができた。

4.3 デジタルセンサーとの連携機能の開発

ハッチカバーの走行時及び、電動シリンダーのジャッキアップやジャッキダウン動作時に、船員が危険エリアに入るとエリアセンサーが検知し、警報を発しつつ、即時にハッチカバーの走行又はジャッキシリンダーが停止することを確認した。目標停止時間は5秒以内と設定していたが、1秒にも満たない瞬時に停止が可能となったため、目標を達成することができた。

5. 2022年度の実施内容の概要

(1) 電動モーターを用いた駆動機の開発

油圧駆動機では甲板機械の駆動源を利用するため、アンカー巻上げ時の必要力量から油圧ポンプユニットの総電力量が導き出される。甲板機械とは駆動源が切り離されるため、ハッチカバーの駆動に必要な力量から電動モーターの電力を計算したところ、22 kWの電動機で良いことがわかった。従来に比べ電力消費量の効率化と最大突入電流を軽減するためインバーター制御の最適化を行った。

(2) 省力化による船員不足への対応

駆動部のインバーター制御とロック機構の電動アクチュエーターにより開閉・ロック時の情報を数値化できるようにした。見える化された情報と電動化により遠隔制御が可能となるため、ハッチカバーの近くにいる必要がなく、ブリッジ等からの遠隔操作が可能となり1人で開閉を行えるようにした。また、ロック時のトルクの見える化、緩んだ等の情報から再ロックが必要な場合は警報を発するようにした。見える化により故障箇所の特定制定が行えるため、メンテナンス性も向上した。

(3) デジタルセンサーとの連携機能の開発

前述の遠隔化によりハッチカバーの近くで操作することがなくなるため、開閉時の事故・怪我を防げるが、ハッチカバーの開閉中に船員が近づかないようエリアセンサーを用いて危険エリアを設定した。エリアセンサーは制御コンピューターに接続し、エリアに入ると警報を発令しつつ、電動モーターが自動停止するようにした。同時に開閉時は音声で注意を促すようにした。

(4) 駆動機と電動アクチュエーター、デジタルセンサーの搭載

通常ハッチカバーは船首尾に駆動機を設置しているが、船舶の前後方向の傾きにより開閉に微妙な力量の変化があるため、船首尾分の搭載を行い詳細なデータを取得する必要がある、実船舶に搭載し検証を行った。検証の結果、電動シリンダーのジャッキダウン時に不具合が発生したが、機器やプログラムの調整を行ったところ正常に動作するようになった。電動化した試作機は、499トンの新造の貨物船に搭載した。

6. 今後の予定

開発したシステムをリモート接続で遠隔モニタリングを続け、2024年に予定している補償ドックまで評価することとしている。評価期間中、異常通知があればリモート接続にて異常箇所を特定し必要であれば訪船し原因を探り復旧する。補償ドックでは、点検の他、使用感を船員にヒアリングし機能のアップデート等が必要であるか検討することとしている。

その結果を踏まえ、2024年末頃には内航貨物船499GTや749GT向けに商品化を目指す。

7. まとめ

今回の技術開発により、電動機容量をサイズダウンする事が電力消費量を28%削減できた。また、ブリッジからの遠隔操作を可能とし開閉作業の省力化を可能とし、エアセンサーによる安全性の向上も達成できている。

目標の達成により、遠隔化や事故防止が可能となり船員負荷低減と従来型の油圧から漏油の心配が無い電動駆動により環境汚染防止が可能な世界初の内航貨物船向け電動ハッチカバーシステムが構築できた。

最後に、本開発事業は公益財団法人日本財団の助成金を受けて実施しており、ここに記して厚く感謝申し上げます。

「この報告書はBOAT RACEの交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(一社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目13番3号 (虎ノ門東洋共同ビル)

電話：03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<https://www.jsmea.or.jp>