

津波災害時の緊急避難出航 に関する調査・研究

報 告 書

平成30年3月31日

神戸大学海事科学研究科
一般社団法人日本海事検定協会

目 次

1. 目的	1
2. 事業計画の概要	2
3. 緊急出航時に想定される問題解決に向けた研究	4
3. 1 緊急出航時の機関プラントの状態把握に関する研究	4
3. 1. 1 深江丸の機関プラント	4
3. 1. 2 深江丸主機関の冷却水の流れ	5
3. 1. 3 深江丸の暖機作業	5
3. 1. 4 機関状態の評価	6
3. 1. 5 まとめ	8
3. 2 船舶運航シミュレータを用いた緊急出航操作の検討	9
3. 2. 1 機関シミュレータ	9
3. 2. 2 実船暖機データの機関室シミュレータへの活用	10
3. 2. 3 まとめ	15
3. 3 津波を想定した急な潮流状況における操船上の計画・判断・行動に関する研究	16
3. 3. 1 検討係留場所と検討すべき船舶について	16
3. 3. 2 検討対象船舶	16
3. 3. 3 実験の条件設定	16
3. 3. 4 津波による潮位変化及び到達時間について	18
3. 4 船舶運航シミュレータを用いた緊急出港操作の検討	20
3. 4. 1 実験方法	20
3. 4. 2 実験結果	20
3. 4. 4 まとめ	24
3. 5 緊急暖機時に発生する機関プラントの過渡的熱応力に関する研究	27
3. 5. 1 はじめに	27
3. 5. 2 液体窒素による管フランジの冷却実験	27
3. 5. 3 三次元有限要素解析による管フランジの熱・力学挙動の評価	29
3. 5. 4 低温流体の移送／終了時の熱・力学挙動の評価	30
3. 5. 5 ボルトの温度変化と軸応力残留率の解析結果	31
3. 5. 6 まとめ	34
3. 6 エンジン始動時の過渡的に変化する特性に関する研究	35
3. 6. 1 はじめに	35

3. 6. 2	実験装置および方法	36
3. 6. 3	実験結果および考察	38
3. 6. 4	まとめ	41
3. 7	配管系における非破壊検査による熱現象の推定に関する研究	43
3. 7. 1	はじめに	43
3. 7. 2	表面熱伝達率の推定方法の妥当性の検証	43
3. 7. 3	メッシュパターンと加熱／放熱条件の影響	43
3. 7. 4	段付き形状の構造物による検証	46
3. 7. 5	まとめ	48
4.	総括	49
4. 1	本事業計画における研究成果の概要	49
4. 2	まとめ	51

1. 目的

本事業は、地震の発生によって巨大な津波が発生した場合、船舶が安全に港外に避難するための具体的な手法の提案を目的として、神戸大学と日本海事検定協会が共同で研究を実施し、その成果を報告書としてまとめ、公表するものである。

津波発生時の船舶の避難対策については、日本航海学会から小冊子の形式で提言が出されているが、その内容は甲板部の観点に立った対応策が中心であり、現時点では他学協会を含めて機関部の観点に立った提言は見あたらない。また提言は、津波発生時における船全体としての対応策の指針を示したものであり、船内作業の詳細まで解説したものではない。

津波の発生に伴い緊急に出航する必要が生じた場合、通常と比べて極めて短時間で出航しなければならない。そのために、主機をはじめとする機関室を構成する機械・機器類は厳しい条件で使用されることになる。とくに各部の温度が室温近くまで下がっていると、急速な熱変形や高い熱応力が発生する。また、各部の潤滑油等の温度が十分に上昇していない状態では、回転軸や軸受など摺動部に重大な損傷が発生する可能性がある。以上の点を考慮すると、津波発生時における機関室としての対応は、津波が到達するまでの時間によって異なるといえる。例えば「1時間」をひとつの目安として、それよりも短時間、あるいはやや余裕がある場合などさまざまなケースを想定して、緊急出航に伴って生じる問題を工学的な観点から十分に検証しておく必要がある。また、甲板部の観点に立った津波対策については、学会からの提言を参考にしつつ、より具体的な手順の検討が望まれる。さらに、機関部との連携が必要な問題についても検証しておく必要がある。

以上、東日本大震災という未曾有の津波災害を経験したわが国にとって、将来同規模の津波が発生した場合に備えて、船舶を安全に港外に避難させる手順を体系的に研究し、具体的な手法を確立しておくことは急務である。本事業は、将来高い確率で発生が予測される巨大津波が発生した場合、船舶に関連する被害を最小限に抑えることに貢献できるものである。

2. 事業計画の概要

(1) 津波発生時の緊急出航手順に関する調査と具体的な手法の提案に関する研究

東日本大震災の発生以降、外航・内航の船会社をはじめとして、官公庁の船舶においても独自の津波対策が講じられていると推察される。しかしながら、それらの内容は一般には公表されておらず、現状では巨大な津波が発生した場合、船舶を所有する各組織、あるいは各船舶が個別に対応することになる。津波による船舶の被害を低減するためには、それらのデータを収集・分析することにより、体系的な緊急出航手順を提案するための基礎資料とする必要がある。

神戸大学海事科学研究科は練習船「深江丸」を所有している。東日本大震災が発生した際は1時間足らずで離岸して安全な海域に避難している。緊急であったために、その時の詳細な記録や資料は残っていない。そこで練習船「深江丸」については、通常の出航手順を詳細に検討し、続いてどのような考え方に基づいて津波発生時に出航時間の短縮が可能か検討する。具体的には、津波発生の情報を受けて45分で出航、1時間で出航、1.5時間で出航など、出航までの時間の違いによる問題点を整理する。

以上の調査研究と、次項で紹介する緊急出航に対応するための関連研究の成果を組み合わせることにより、具体的な緊急出航手順を提案する。

(2) 緊急出航時に想定される問題解決に向けた研究

研究に参加するメンバーは、緊急出航手順の提案に対して各自の専門分野と関連の深い研究を実施する。具体的な研究テーマは以下の通りである。

- 1) 緊急出航時の機関プラントの状態把握に関する研究
- 2) 船舶運航シミュレータを用いた緊急出航操作の検討
- 3) 津波を想定した急な潮流状況における操船上の計画・判断・行動に関する研究
- 4) 緊急出航に関する操船上の計画・判断・行動に関する研究
- 5) 緊急暖機時に発生する機関プラントの過渡的熱応力に関する研究
- 6) エンジン始動時の過渡的に変化する特性に関する研究
- 7) 配管系における非破壊検査による熱現象の推定に関する研究

(3) 調査研究メンバー

神戸大学海事科学科

福岡俊道（研究代表者、担当：総括、熱現象）

段 智久（担当：エンジンの過渡特性）

野村昌孝（担当：過渡的熱応力）

藤本昌志（担当：急な潮流での操船）

淵真輝（担当：緊急出航時の操船）

三輪 誠（担当：機関プラントの過渡特性，緊急暖機手法）

矢野吉治（担当：実船による検証試験）

一般社団法人 日本海事検定協会

栗原義浩（担当：研究の総括とコーディネート）

3. 緊急出航時に想定される問題解決に向けた研究

3. 1 緊急出航時の機関プラントの状態把握に関する研究

ディーゼル機関において、シリンダヘッドとシリンダ、ピストン頂面で構成される燃焼空間の温かい雰囲気の実現は、機関の着火始動性を向上させる観点において望ましい。シリンダ周辺温度の温度上昇が暖機の目的の1つといえる。暖機作業にて機関へ供給されるシリンダ冷却清水は、従来の冷却目的ではなく、前述の着火始動性の向上のため、シリンダ周辺の温度上昇のために加熱して供給される。暖機開始から機関は徐々に温められ、シリンダ冷却清水の機関出口と機関入口の温度差は小さくなる。

一方、これとは別に、機関運転において、クランク軸系可動部の円滑な作動は、燃料油の燃焼によりシリンダで発生した動力をプロペラへ円滑に伝達するため、必須の要素といえる。暖機作業では、システム油として、軸受け等への潤滑油供給が行われ、フライホイールに歯車等を組み込み、それを電動機を用いて機関主軸がゆっくりと回転するようにする。機関内部の軸受け部分に潤滑油が供給されつつ、クランク位置を変えることから、内部のクランク軸系の部材は、均質に温められ、膨張する。暖機作業のもう1つの目的がこれにあたる。ピストン・シリンダの往復運動からクランク軸系の回転運動への変換において、摺動が円滑であって摩擦による損失の少ないことが望ましい。ジャケット冷却水やシステム潤滑油は暖機のために加熱されて機関へ供給される。暖機の良否は機関始動から始動直後の運転の安定に大きな影響を与える。

本章では、機関プラント状態を把握するため、暖機作業の開始から主機関始動に至るまで、主機関の暖機状態について、数値評価する手法を検討する。季節や前日運転の有無など、さまざまに変化する環境下で行われる暖機作業に対し、機関の暖機進捗状態を容易に把握できることを目指す。

3. 1. 1 深江丸の機関プラント

深江丸の機関室プラントは、中型中速ディーゼル機関を主機関として機関室中央に置き、2基のディーゼル発電機をその両端に並列に配置した構造となっている。主機関の軸端にはクラッチ付き減速装置が設置され、これを介して軸発電機を接続できるようにしている。軸発電機にて発生する電力は、出入港時に使用するサイドスラストを駆動する電動機の専用動力源として利用する。したがって、出入港時にはスタンバイ（機関用意）状態にて、軸発電機を駆動するため、主機関の発生動力はプロペラ駆動と軸発電機駆動に分配されて消費される。

深江丸主機関のジャケット冷却水の加熱はプレート式ジャケット冷却水予熱器を配置している。しかしながら、2台のディーゼル発電機原動機のジャケット冷却水配管において、ジャケット冷却水の一部が主機関のジャケット冷却水の流路へ接続し、機関室上部のジャケット冷却清水膨張タンクへ接続するように配管が敷設されていて、この経路を通過する発電機原動機からのジャケット冷却清水により加熱されている。発電機原動機のジャケット冷却水は機関直結駆動の冷却水ポンプにより供給される。主機関のジャケット冷却水システムには、機関直結の冷却水ポンプのほかに、予備ポンプとして、独立電動ポンプが配置されている。主機関の両ポンプは発電機原動機用冷却水ポンプよりも吐出圧力が高く設定されている。そのため、主機関駆動時には、発電機原動機からの冷却水よりも圧力が高いため、発電機原動機側から冷却水が供給されることは無い。また発電機原動機から主機関のジャケット冷却水の配管途中には、逆止め弁

が配置されており、主機関から発電機原動機への冷却水の逆流を防ぎ、主機関への冷却水流量を確保している。

3. 1. 2 深江丸主機関の冷却水の流れ

前述に記したように、暖機作業の間、発電機原動機からの連絡配管を介して、発電機冷却水が主機関の冷却清水経路へ流入し、主機関ジャケット部を中心に熱を伝える。また、主機関の起動ならびに停止時は、独立した電動冷却清水ポンプにより冷却水が供給される。さらに、主機関の始動後は、主機関に直結した主機冷却水ポンプから供給される流路となる。主機関の冷却水経路は、発電機冷却水の流入、電動ポンプの運転、主機関の運転、3種類の時間にそれぞれに異なる経路を経て、冷却清水が供給されることになる。

3. 1. 3 深江丸の暖機作業

主機関の暖機は発電機原動機の起動により開始される。基地港における係留中、船は陸上電源としており、少なくとも出航の2時間以上よりも前から、船内発電による給電へ切り替える。電力需要の関係から起動する発電機は1台となっている。船舶職員および小型船舶操縦者法の規定により出入港時には、2台の発電機を運転して給電状態としている。2台のいずれの発電機冷却水系統も主機関冷却水系統に接続して、暖機が行われるように配管されている。主機関の冷却清水とシステム潤滑油にはそれぞれに冷却器が設置されており、始動操作時に電動機駆動のポンプを起動する。システム潤滑油は主機関下に設置されたサンプタンクに貯め置かれており、潤滑油清浄機を通して加熱される。暖機作業では、清浄機により加熱された潤滑油も、主機関供給用の電動機駆動ポンプにより供給される。主機関への潤滑油供給の配管途中に冷却器は設置されている。なお、冷却器は主機関起動の直前まで、冷却源となる海水の供給は行われない。したがって、清浄機にて加熱された潤滑油温度を上限に機関内部を流れる潤滑の温度は上昇を続ける。

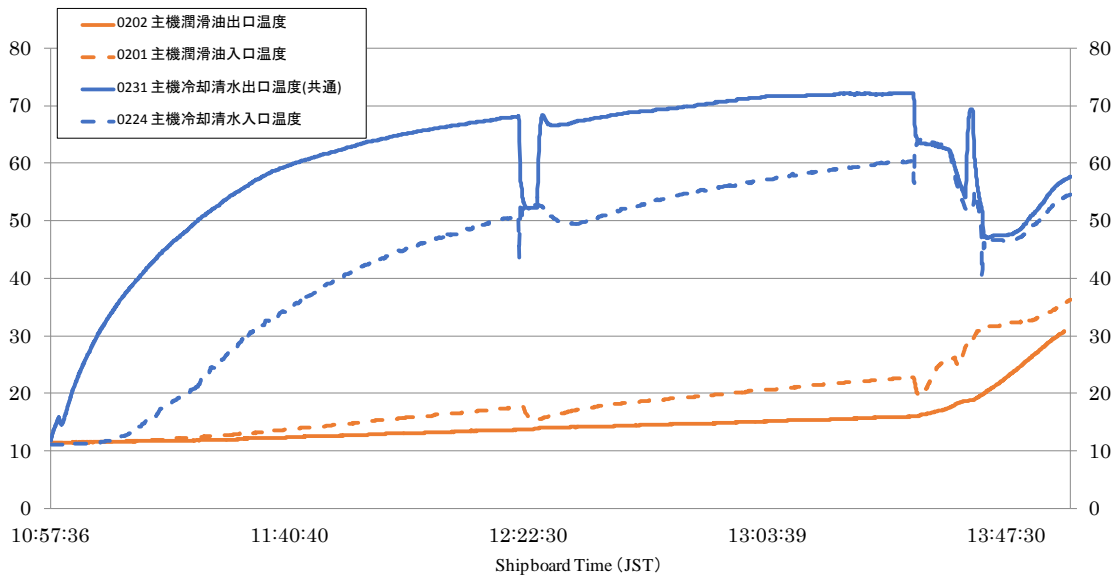


図1 暖機時の主機冷却清水の入口・出口温度と主機潤滑油の入口・出口温度 (2017.02.06)

冷態状態にある主機関が十分に温態状態になっていることは、機関入口と出口の冷却水温度差により確認できる。機関始動後は、冷却水は機関内部(特にシリンダジャケット部)にて熱を帯びるため、出口温度の方が高くなる。暖機完了の目安は、機関の入口と出口の温度差が無くなった時と考える。

発電機冷却水の出口温度は温度調節により 80 度前後に保たれるため、配管経路にて温度低下があったとして、70 度程度で供給されていることが推察される。

図の暖機作業では、10:57 頃より発電機冷却清水が主機冷却清水経路へ流入し、それを起点として清水温度が時間と共に上昇する様子が確認できる。次に 12:21 頃、独立電動潤滑油ポンプが起動され、主機関のターニングが開始される。図中の当該時刻では短時間に主機冷却清水出口温度の低下が見られる。そして、温度低下は短時間に上昇へ転じている。同時刻では潤滑油入口温度も一時的に低下して見える。これらは、主機ターニングに伴う直結駆動ポンプの配管内の比較的冷たい冷却清水や潤滑油の混合によるものと推察する。

出港操作として、13:30 頃、独立電動冷却水ポンプが起動し、13:36 頃、主機関の試運転が行われる。図にて 13:30 頃に冷却清水出口温度の急低下する部分あり、この時間に相当する。電動冷却水ポンプの起動以降、発電機原動機の冷却水流入は止まる。実際の主機関暖機は電動冷却水ポンプ起動までとなる。13:42 主機関始動、13:46 クラッチ嵌合、主機関によりプロペラが駆動されて負荷運転となる。

3. 1. 4 機関状態の評価

(1) 暖機完了時の状態

出港時刻の一定時間前から始まる暖機作業は、主機関の試運転にて完了する。試運転において、着火始動することが目的であるため、機関始動ができる温度まで熱を加えるものとする。深江丸のように、主機関冷却水経路に発電機原動機からの連絡管や電動ポンプ（直結ポンプに対する独立予備ポンプ）等の経路が有する場合、センサーによる流体温度の監視だけでは、十分に状態を把握することは難しい。

例えば、深江丸の主機冷却水温度の推移は常に冷却清水出口温度が入口温度を上回る状態にある。これは、発電機からの冷却水の流入部分が主機冷却清水入口温度の検出用センサーの下流にあることを意味している。主機関が十分に温まった状態にて、主機関冷却水入口温度と出口温度の温度差は極めて小さくなると推察するが、このような温度検出状態では、その温度差を目安に暖機状態がどの程度であるか、把握することは難しい。

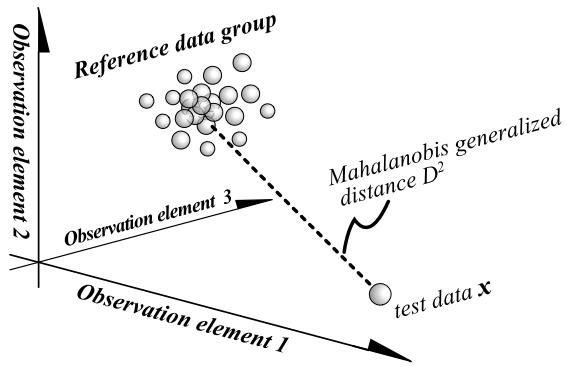
(2) 暖機状態にある機関の影響項目

それまでの暖機過程における機関運転状態を暖機完了目安と比較して評価する。統計的解析手法の判別分析により、暖機完了時の主機冷却清水と主機潤滑油を学習データとして、暖機過程のそれぞれの時間の機関データを評価する。学習データ群が暖機完了の目安とすれば、学習データ群との類似度が暖機進捗状況として表現できると考える。

本章では、主機冷却清水の入口温度ならびに出口温度、主機供給潤滑油の入口温度ならびに出口温度、これら 4 項目を用いて、暖機作業における機関状態を評価する。

(3) 判別分析による機関状態の評価

ある条件下で観測されたデータ群を学習データ群とし、ある試験データがこのグループに属すると見なすことができるか判別する。データは 2 つ以上の観測変数により構成し、データ群は観測変数を軸とする 2 次元以上の空間にプロットできる。同空間にプロットした試験データについて、学習データ群の重心位置から試験データまでの空間距離（マハラノビスの汎距離）を算出する。その距離を χ （カイ）二乗分布の確率密度に照らし合わせ、マハラノビスの汎距離 D^2 と確率密度を得る。試験データの確率密度に対して、有意水準 5%を閾値として判別を行う。マハラノビスの汎距離 D^2 を以下に記す。



$$D^2 = (\mathbf{x}_{11} - \mu_1, \mathbf{x}_{12} - \mu_2, \dots, \mathbf{x}_{ij} - \mu_j) \Sigma^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_{11} - \mu_1 \\ \mathbf{x}_{12} - \mu_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{ij} - \mu_j \end{pmatrix}$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} S_{v_1 v_1} & S_{v_1 v_2} & \dots & S_{v_1 v_j} \\ S_{v_2 v_1} & S_{v_2 v_2} & \dots & S_{v_2 v_j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{v_j v_1} & S_{v_j v_2} & \dots & S_{v_j v_j} \end{bmatrix}$$

x : test data
 μ : average of data group
 i : number of test data
 j : number of variables

図2 マハラノビスの汎距離イメージ

暖機時の主機関の状態を評価するため、前述の4項目（主機冷却清水ならびに主機潤滑油の出口/入口温度）を観測変数とする。

図中の計測データ（4267行）のうち、主機関の試運転前にて冷却清水温度が65度以上かつ潤滑油温度が13度以上となっている時点について、「主機関は十分に暖機状態にある」と仮定する。

判別分析では、その条件に合致する2142行の間のデータを学習データとする。判別分析（マハラノビスの汎距離の算出）を行った。

(4) 判別分析の結果

主機冷却清水出口温度ならびに主機潤滑油出口温度は、機関の温度状態を直接に表していると考えられる。このことから、先ず2つの観測変数にて、判別分析を試みた。下図の第2軸にはマハラノビスの汎距離に基づく確率密度を示している。図中に薄い灰色で塗りつぶし表現した曲線が確率密度を示している。曲線が斜めステップ状に見える部分は、2変量のうち一方にのみ変化がある場合などである。

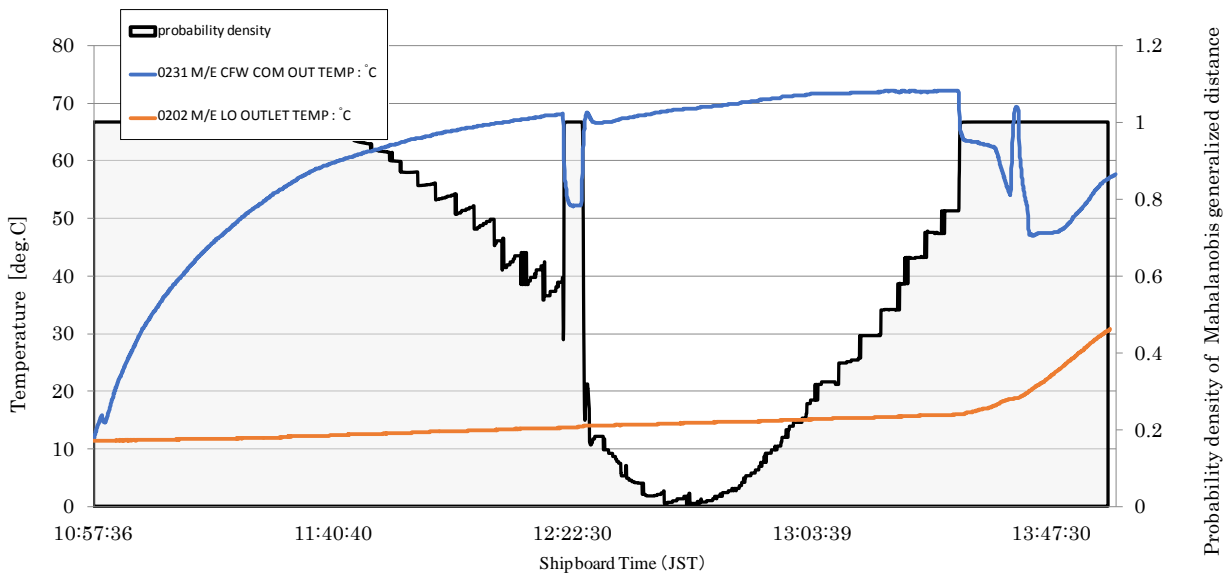


図3 暖機時の主機冷却清水温度とマハラノビス汎距離(2要素)

観測変数の特徴も手伝って確率密度の変化が段階的になっていると推察する。主機ターニングの時間（12:20-12:24）を除けば、暖機状態の進捗状況は直線的に進んでいるように見える。

確率密度について、5%（有意水準）以下となるのは12:34頃であることがわかる。

次に、主機冷却清水入口温度はセンサーが直接に発電機原動機からの冷却清水を検出している訳でないため、同温度の変化は冷却清水中を熱が伝播したものと推察する。先の直接的な検出温度の変化によるものに、間接的な温度変化の情報を加えて、判別分析を行う。学習データの時間帯は前述と同じ2142行の間のデータを用いる。

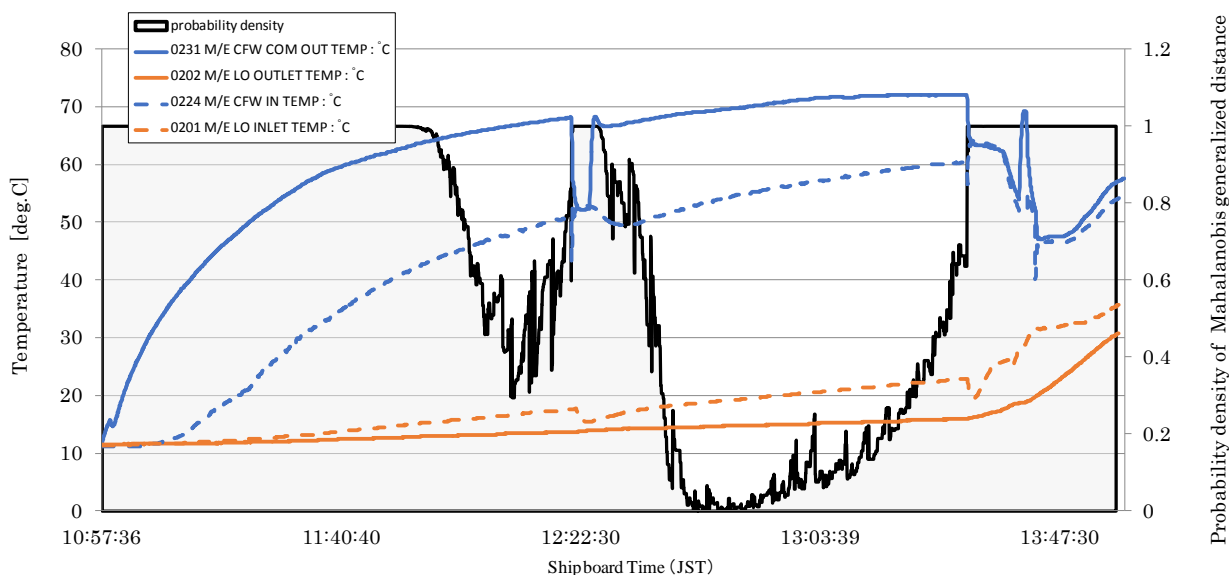


図4 暖機時の主機冷却清水温度とマハラノビス汎距離(4要素)

4要素による確率密度の変動は2要素のそれに比較して、細かく、4要素にてステップ状の変化は見当たらない。特に、独立潤滑油ポンプを起動し主機関のターニングを行っている時間(12:20-12:24)において、2要素の分析結果は直線的に上下していたが、4要素では、その時間を中心に細かく変動を繰り返している。これは4要素のそれぞれの変動が同じ傾向でないことから、複雑な結果となっていると推察する。4要素の分析結果にて、マハラノビスの汎距離の確率密度が5%（有意水準）以下となるのは、12:40頃であった。なお、2要素の結果にて5%以下となる12:34の時点では、確率密度は70%を越えている。しかしながら、それは急激な低下傾向にある。

学習データの観測変数を増すと、分析結果は複数要素を考慮した細かなものとなることがわかる。また、判別分析の特徴により、学習データの設定がある温度帯に限定したことから、その温度帯を越える状態は、学習データ群から離れる（距離が増す）ように表現される。12:50頃より先に確率密度が上昇して見えるのは、この為であり、実際には、学習データ群よりも温度が高い状態にある。

3. 1. 5 まとめ

暖機作業の開始から、時系列にて変化する主機冷却清水温度と主機潤滑油温度に着目し、それらを用いた機関の暖機状態の評価を試みた。評価に用いる項目の特徴により、評価結果は変動する。また暖機完了の目安として設定した学習データ群についても、設定温度帯が異なれば、判別の目安とする有意水準5%に到達する時間も変化する。本章で求めた暖機完了の目安時間について、分析結果の精度を知るには主機関の始動が可能であるか否か、始動可否のデータが必要である。機関が起動できる最低温度を考慮して、それらを適切に設定することで、より高精度の判別が可能になると推察する。

3. 2 船舶運航シミュレータを用いた緊急出航操作の検討

本学の船舶運航シミュレータは、ナビゲーションシミュレータと船用機関プラントシミュレータから構成される複合シミュレータとして 2010 年に導入された。2 つのシミュレータは船速や機関回転数など互いに影響のあるデータ群を相互に計算して受け渡し、それぞれのシミュレータへ反映させている。

本章では、機関室シミュレータを独立して運用して実船データの取り込み活用の可否と将来活用を検討する。そのため、実際の機関プラントの挙動を機関室シミュレータ上で再現し、機関プラントの時系列変化に対する操作検討を可能とする環境の構築を試みる。

本研究で使用する機関室シミュレータは 2 サイクル低速ディーゼル機関を主機関(43,000kW, 89rpm)のとするコンテナ船の機関プラントをモデルとしている。発電装置としてディーゼル発電機 2 基、ターボ発電機 1 基、軸発電機 1 基が配置される。停泊中はディーゼル発電機により、航海中はターボ発電機と軸発電機の並行運転により船内の電力需要に対応する。また実船データは海事科学部附属練習船「深江丸」の暖機時の運転データを用いる。深江丸機関室は 4 サイクル中速ディーゼル機関を主機関(1,500kW, 674rpm)より減速機を介してプロペラを駆動する、1 基 1 軸の推進機関プラントである。発電装置として、ディーゼル発電機 2 基、軸発電機 1 基が配置される。

これまでの検討過程において、Replay ファイルより 1 項目のデータ(主機関冷却清水温度)について、短時間内の取り込み、そしてシミュレーション実行を行った。本シミュレータにおいて、一部のアナログデータは他の要素の変動予測シミュレーションにて素材要素となっている。当該取り込みデータに関して、シミュレータシステムの他の要素への影響は確認できなかった。当該データの影響は小さい、もしくは、当該データが最終値として扱われると推察する。

本年度は、複数の実船データをシミュレータへ取り込む手法を確立し、深江丸の出港に伴う暖機作業における機関データを活用して、機関室シミュレータの機関制御コンソールへ再現する。

3. 2. 1 機関室シミュレータ

本学部の機関室シミュレータは、船用機関プラントシミュレータとして、実在のコンテナ船の推進機関プラントをモデルにして構築されている。2 サイクル低速ディーゼル機関を主機関として、プロペラ軸へ直接に動力を伝える。減速機やクラッチ等を介さないため、主機関の回転速度がプロペラ軸の回転速度となる。機関室シミュレータは機関室と機関制御室の 2 部屋から構成され、機関室には大型液晶ディスプレイを設置して、機関室の機器類を

イラストイメージにて表示する。機関制御室には機関制御コンソールを配置し、主機関の起動・出力調節などを行う。コンソール上には、主機関回転計や過給機回転計、主機燃料ポンプのポンプマーク計、主機潤滑油圧力計などが配置されている。また 17 インチの PC ディスプレイがエンジンモニターとして配備され、機関室機器

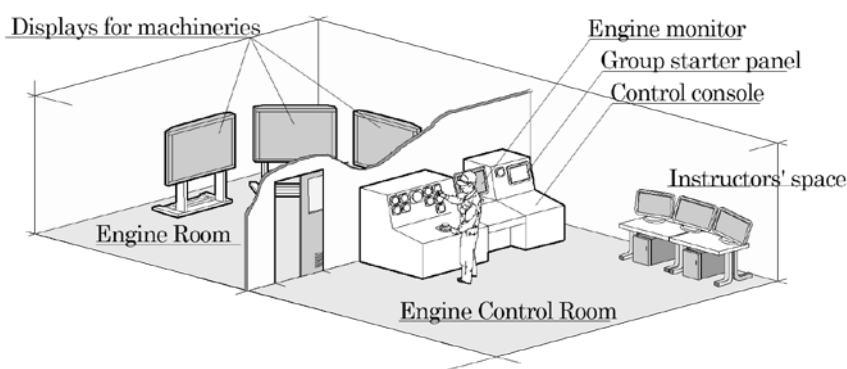


図 1 機関室シミュレータレイアウト

に関する圧力や温度、液面レベルなどのセンサー検出値を画面に表示する。

3. 2. 2 実船暖機データの機関室シミュレータへの活用

本学の機関室シミュレータでは、シミュレーション結果を記録し再生利用する機能として、”Replay”機能が搭載されている。システム内の専用データフォルダにおいて、シミュレーション結果は記録データとして保存される。保存データは、Replay ファイルとして選択して再生利用できる。実船データのシミュレータでの利用には、このReplay 機能を活用する。

実船データとして深江丸機関運転データより複数項目のデータ群を抽出し、新たなReplay ファイル(.nav 拡張子: ACCESS ファイル[.mdb])を作成する。

(1) 取り込み用実船データの抽出

深江丸の運転データについて、機関室シミュレータの機関制御コンソール盤面ならびにエンジンモニターへ反映させるように試みる。本年度の検討では、以下の実船データについて、機関室シミュレータへデータ取り込みを行う。

- 主機関軸回転数(M/E RPM):0-674 rpm
- 主機関燃料ポンプマーク(M/E PUMP MARK):0-25 mm
- 主機関用過給機回転数(M/E T/C REVOLUTION):0-16300 rpm
- 主機関潤滑油圧力(M/E LO INLET PRESS):0-0.5 MPa
- 主機関始動用圧縮空気圧力(M/E STARTING AIR PRESS)0-2.6 MPa
- 主機関掃気圧力(M/E BOOST AIR PRESS):0-0.067 MPa

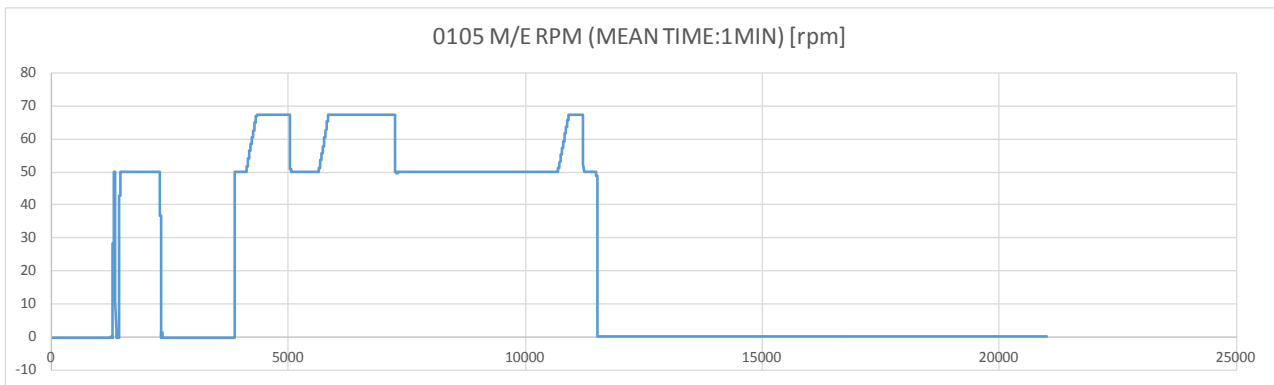


図 2 主機関回転数

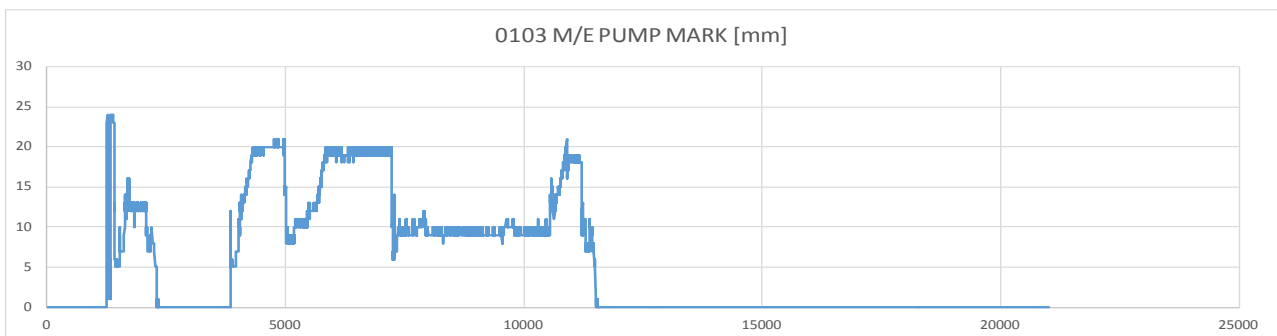


図 3 主機関燃料ポンプマーク

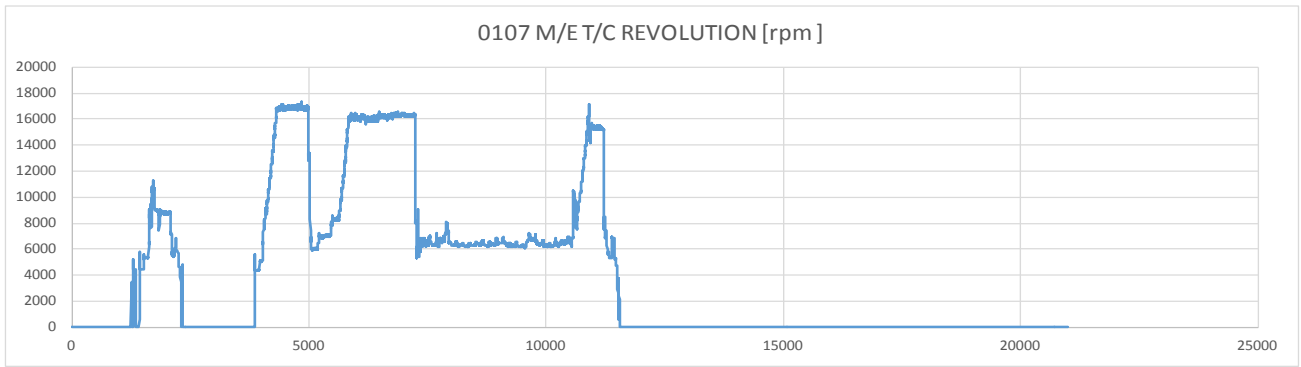


图 4 主機開過給機回轉数

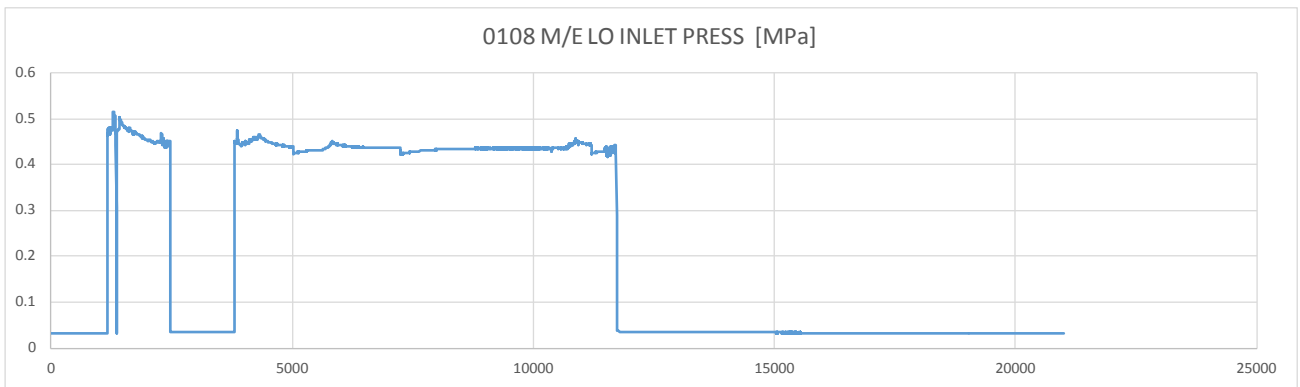


图 5 主機潤滑油压力

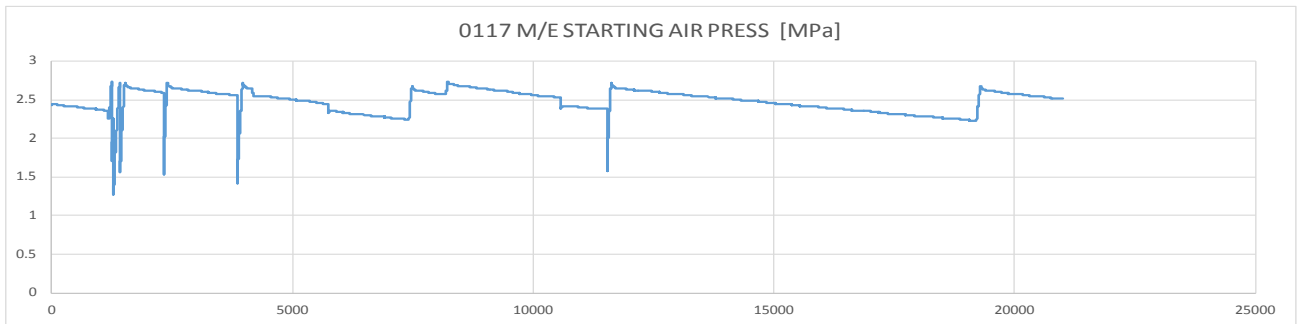


图 6 主機開始動空气压力

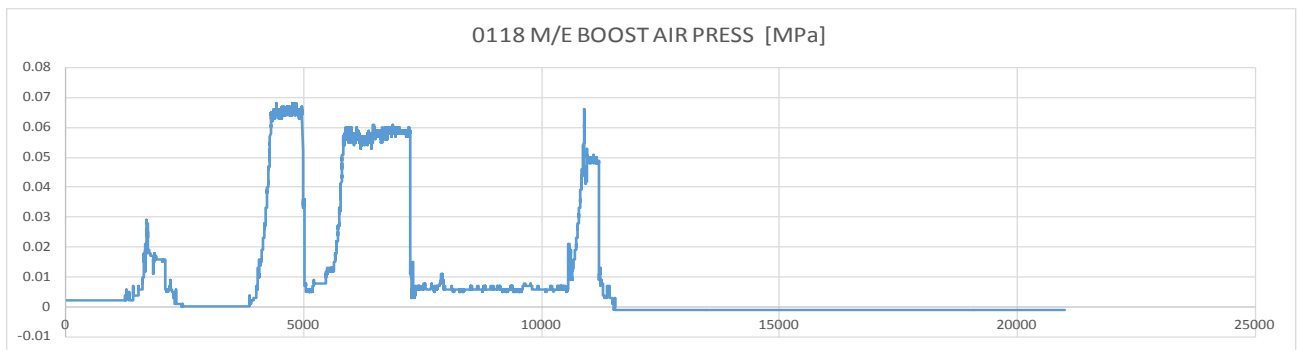


图 7 主機掃氣压力

機関室での暖機作業ならびに機関制御コンソールでの出港準備作業における、機関プラントの挙動をコンソール盤面の計器ならびにエンジンモニターに表現するため、上述のデータ群を深江丸機関運転データファイルより抽出する。抽出したデータ群を Replay ファイルの形式へ変換する。



図8 データ抽出用マクロ

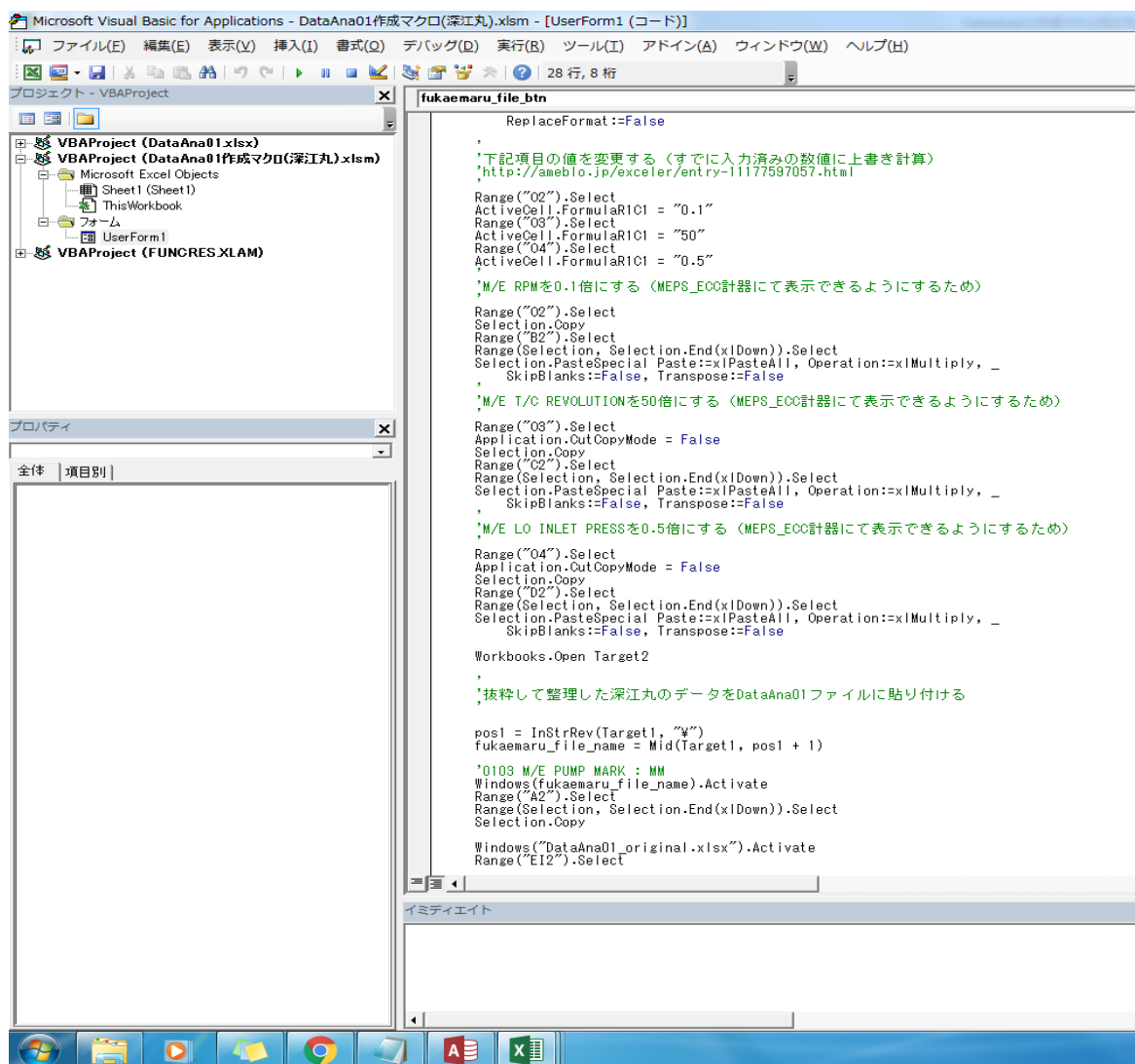


図9 マクロの設定 (表計算ソフトのマクロ設定による)

(2) Replay ファイルの作成

新たに作成する Replay ファイルは、実船の運転記録データより該当する項目列データ群を抽出して、機関室シミュレータの常用出力時の Replay ファイルに上書きする。再現可能な実船データ数の最大は、Replay ファイルの上限都合により 17,347 点までのデータとなる。Replay 機能では、1 秒ごとにデータを採取することから、最大 4 時間 50 分程度のデータ再現になる。本年度は、複数データ行のデータ取り込みを容易にするため、表計算ソフトのマクロ機能を活用し、取り込み作業の省力化を図るようにした。

	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL	EM
1	Ana0123	Ana0124	Ana0125	Ana0126	Ana0127	Ana0128	Ana0129	Ana0130	Ana0131	Ana0132	Ana0133	Ana0134	Ana0135	Ana0136	Ana0137	Ana0138	Ana0139	Ana0140
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84155	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84157	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84158	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84160	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84161	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84163	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84164	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84166	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84167	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84169	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84170	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84172	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84173	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84175	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84176	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84178	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84179	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84181	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84182	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84184	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84185	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84187	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84188	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84190	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84191	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84193	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84194	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84196	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84197	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84199	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	84200	0	0	36442	3900	0.7338	145.1723

図 10 実船データ群を挿入したファイル（表計算ソフトによる）

	Ana0130	Ana0131	Ana0132	Ana0133	Ana0134	Ana0135	Ana0136	Ana0137	Ana0138	Ana0139
DataAna01	0	0	0	-0.1	84176	0	0	36442	3900	0.7338
DataAna02	0	0	0	-0.1	84182	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin01	0	0	0	-0.1	84184	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin02	0	0	0	-0.1	84185	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin03	0	0	0	-0.1	84187	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin04	0	0	0	-0.1	84188	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin05	0	0	0	-0.1	84190	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin06	0	0	0	-0.1	84191	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin07	0	0	0	-0.1	84181	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin08	0	0	0	-0.1	84193	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin09	0	0	0	-0.1	84194	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin10	0	0	0	-0.1	84196	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin11	0	0	0	-0.1	84197	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin12	0	0	0	-0.1	84199	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin13	0	0	0	-0.1	84200	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin14	0	0	0	-0.1	84203	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin15	0	0	0	-0.1	84205	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin16	0	0	0	-0.1	84206	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin17	0	0	0	-0.1	84208	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin18	0	0	0	-0.1	84209	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin19	0	0	0	-0.1	84211	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin20	0	0	0	-0.1	84212	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin21	0	0	0	-0.1	84214	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin22	0	0	0	-0.1	84215	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin23	0	0	0	-0.1	84217	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin24	0	0	0	-0.1	84220	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin25	0	0	0	-0.1	84221	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin26	0	0	0	-0.1	84223	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin27	0	0	0	-0.1	84224	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin28	0	0	0	-0.1	84226	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin29	0	0	0	-0.1	84227	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin30	0	0	0	-0.1	84229	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin31	0	0	0	-0.1	84230	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin32	0	0	0	-0.1	84232	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin33	0	0	0	-0.1	84233	0	0	36442	3900	0.7338
DataBin34	0	0	0	-0.1	84235	0	0	36442	3900	0.7338

図 11 Replay ファイル（データベースソフトによる）

マクロ操作では、実船データファイルと作成した Replay ファイルの保存先等を設定する。マクロを実行した結果、実船データより上述の該当データが抽出され、Replay ファイルが作成される。

データアナログファイル(DataAna01～)から Replay ファイル(170804082554_NaviFULL.mdb)へ変換した結果は、先に示したファイルのようになる。いずれのファイルも設定項目毎にデータ列を構成する。機関室シミュレータでは、1秒毎にこれらのアナログデータを読み込み、これを基に熱量計算する。シミュレーション結果が1秒毎に計器類やエンジンモニター画面へ表示される。

(3)Replay 設定

Replay 機能によるシミュレーションシナリオの起動画面では、Replay ファイルの選択/削除、再生速度（再生間隔）が設定できる。シミュレーション再生速度の設定は、データ列における取得データ行を定める。1-300 までの整数で設定を行い、例えば、設定を「20」にすれば、データ群は 20 行毎に読み取られることになる。深江丸機関運転データのサンプリング時間は毎秒1データである。作成した Replay ファイルを1列/秒にて再生すれば、深江丸の時間と同じ速度にて、シミュレーションされる。

仮に、実船データのサンプリング時間が毎秒1データを越えるようであれば、前述の再生速度の設定にて、シミュレータのデータ取り込み速度を設定して1秒毎のデータ取り込みへ調整できる。なお、シミュレータの基本設定では、演算結果の表示速度が調整できるため、当該サンプリング時間の違いによる表示時間への影響調整は Replay 設定画面でなくとも、調整可能である。

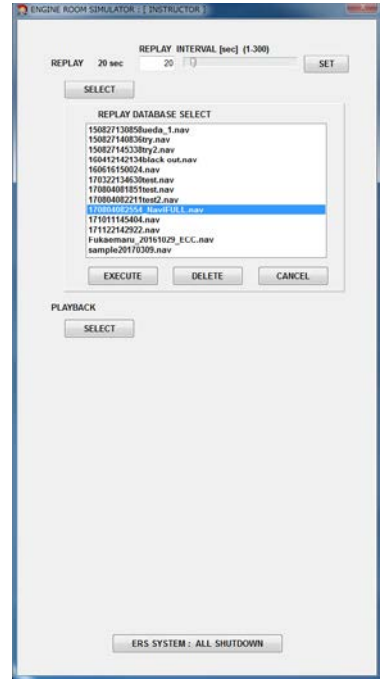


図 12 Replay 設定画面

(4)シミュレーション (Replay) 結果

Replay ファイルは、抽出した深江丸実船データについて、該当するシミュレータの機関データ列へ割り当てて作成している。この Replay ファイルの作成時では、データ群への割り当てと共に、データの数値範囲の変更を行っている。



図 13 コンソール盤内計器への反映

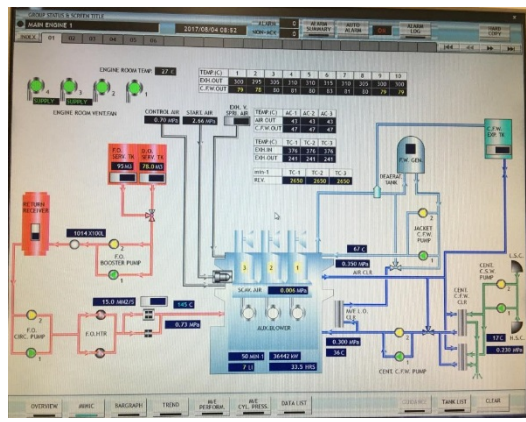


図 14 エンジンモニターへの反映

例えば、実船データの主機関回転数は674rpmである。一方、機関室シミュレータの主機関は89rpmである。したがって、機関制御コンソールの回転計では、674rpmを表示することはできない。回転計の表示範囲に収まるように実船データの取り込み時に変更する必要が生じる。しかしながら、機関制御コンソールの盤面において、向かって左端に配置された船速、舵角の2つの計器以外には、本章で検討した実船データ（6項目）の値が反映され、表示できていることが確認できた。

エンジンモニターの画面においても、アナログの指示針の変化と同様に、6項目の数値の変化が確認できた。またそれ以外の要素への影響がある様子は確認できなかった。（影響は小さいと判断する。）

3. 2. 3 まとめ

実船データの機関室シミュレータへの取り込み、暖機時の機関状態をシミュレーション（実行）することを検討した結果、主機関の状態を表現する代表的な項目について、少なくとも、機関制御コンソールにて部分的な再現（シミュレーション）が可能となり、将来に適用する項目を増やす手法が確立された。

深江丸機関プラントと機関室シミュレータの機関プラントは、主機関形式や使用燃料油、そのほか補機において、大きく異なる構成であるが、基本的には共通する部分がある。共通項目については、計器類の目盛盤のレンジ等を変更して、容易に導入できることが確認できた。また実船データを用いたシミュレーション結果より、本章にて試験的に採用した主機関回転数ほか5項目について、システム内での他要素への影響が少ないことが確認できた。ただし、間接的な影響部分の詳細は更に確認する必要がある。

暖機作業における実船の機関状態について、機関室シミュレータを用いてシミュレーションする手法が確立できたことは、それぞれの時間における機関状態を再現し、変化傾向を分析する際の貢献も期待できる。また実船データにより事象の再現が容易となり、類似事象に対処する手法の確認や訓練へ応用できる可能性も高まる。将来の海事者育成の分野においても、機関室シミュレータの活用が広がることを希望する。

終わりに、本学の船舶運航シミュレータは、機関室シミュレータとナビゲーションシミュレータとが連携して運用できるシステムが構築されている。船橋と機関室とが連携状態にある時に、実船データを活用して緊急対応における機器操作や機器状態のシミュレーションが必要になると考える。暖機緊急時の対応は機関室だけでなく、船全体にて最適化を図る必要があり、より実践場面に高く貢献できることが期待できると考える。

3. 3 津波を想定した急な潮流状況における操船上の計画・判断・行動に関する研究対象の選定

研究は、風と津波を想定し、操船シミュレータ実験を主に行うこととした。初期係留場所、船舶の種類、実験条件について次のように決定した。

3. 3. 1 検討係留場所と検討すべき船舶について

緊急出航をする場合、関係先への連絡（港長、代理店等）、荷役の中止、綱放し・タグ・水先人等の手配、他船の緊急出航との競合等、様々な対応が必要とされる。しかし、災害の発生に伴う混乱した状態から、出航作業に必要な支援を得ることができない場合、本船のみによる自力で出航することとなる。

緊急時の自力離棧操船に関して、大型船舶（LNG 船、8600TEU コンテナ船、6300 台 PCC、9 万 DWT バルカー）の操船シミュレータ実験が行われているが、実海域における中小型船舶の自力離棧操船方法と問題点について、系統的に検討した例はない。そこで、580TEU コンテナ船を試供船として、操船シミュレータを用いた系統的な実験を行い、自力離棧の可能性について検討した。検討対象地は阪神港神戸区の六甲アイランド南側とした。

3. 3. 2 検討対象船舶

検討対象船舶は、560TEU コンテナ船とした。以下に主要目を示す。

表 1 対象船舶の概要

船舶の種類	コンテナ船 580TEU Full Load
全 長	127.51m
全 幅	20.01m
主機関	Diesel 3340Kw
推進器	FPP プロペラ 1 軸
喫 水	4.84m even keel
重 量	6000GT (8000DWT)
バウスラスター	6.2 tons

通常、上記コンテナ船が離岸する場合、1 隻のタグ支援がなされるが、主機、バウスラスター、舵の併用による自力での離棧操船について検討するものとした。

3. 3. 3 実験の条件設定

まず、風のみがある場合での自力離棧の実験を実施した。条件は、無風状態、5m/s、8m/s、10m/s とし、向岸風、離岸風、右前、正面、左前、真後、右後方、左後方からとした（潮流は無し）。

次に津波のみがある場合での自力離棧の実験を実施した。津波の外力は、海上保安庁が実施した南海トラフを震源とする巨大地震に伴う地震津波についてのシミュレーション結果を用いて設定することにした。同シミュレーション結果から検討対象地における津波の流速は、図 1 に大阪湾、図 2 に阪神港神戸区六甲アイランド南側の状況を示す。

上記、津波シミュレーション結果から検討対象地における津波の流速は、1ノットから5ノット未満とすることにした。操船シミュレータの性能上、潮流については、一定方向の流速のみの対応となるため、津波の潮流方向については、東西方向とすることにした。

最後に、風、津波ともある場合での自力離棧の実験を実施した。風、津波ともある複合条件は、5m/s、8m/s、10m/sとし、向岸風、右前、右後方からとし、津波の条件は、津波のみの場合と同じにした。上記の組み合わせで実施した。

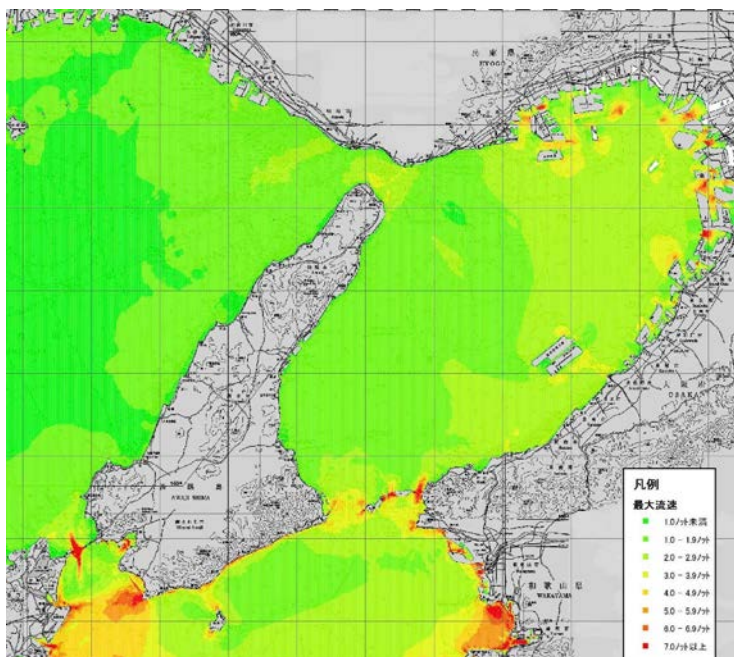


図1 大阪湾の津波流速分布 (出典：第五管区海上保安本部海洋情報部)

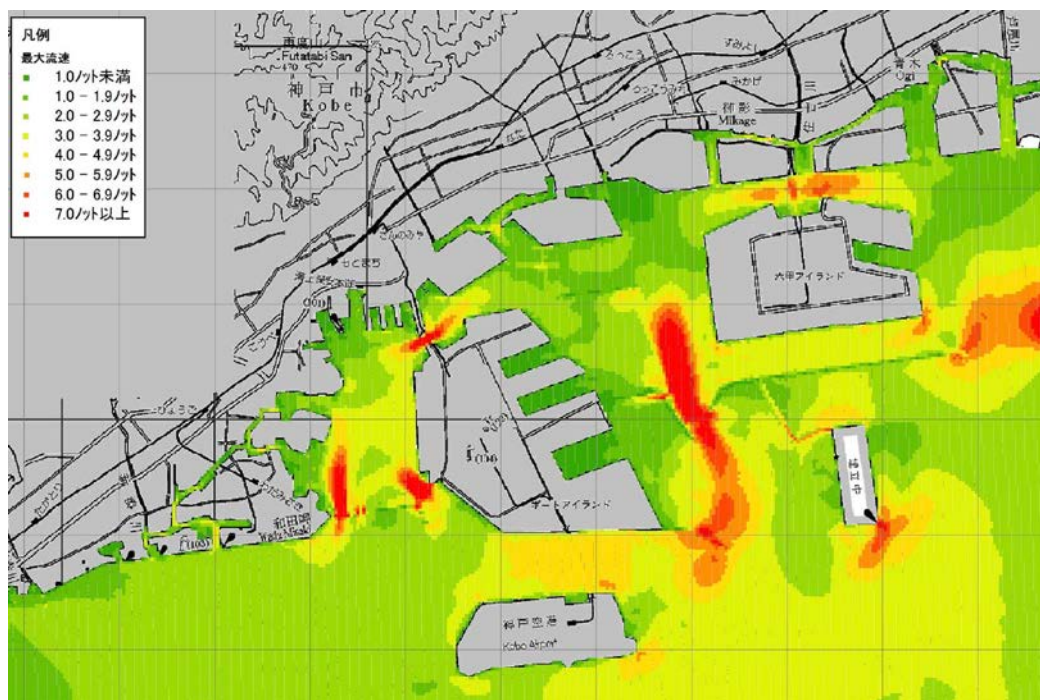


図2 阪神港神戸区の津波流速分布 (出典：第五管区海上保安本部海洋情報部)

3. 3. 4 津波による潮位変化及び到達時間について

津波による潮位の変化について、図3に示す。図3から検討対象地は2mから2.5mの潮位変化が現れるが、操船シミュレータの性能上、潮位変化は再現できないので、シミュレータ実験では潮位変化における諸現象については検討しないこととした。ただし、津波の大きさによる安全水深については、対象船舶の喫水が約5mであり、検討対象地の水深は15mあるので、潮位変化による座礁の可能性は低いと思われる。

津波の到達時間について図4に示す。検討対象地における津波の到達時間は概ね100分後となっている。このことより、安全な海域に避難するまでの時間、出港準備手順（主機関、スラスタ等が使用できるまでの時間）、緊急離棧の方法（スタンバイ要員、操船方法、係留策扱い等）等について対応する時間がある程度確保できるものと思われる。

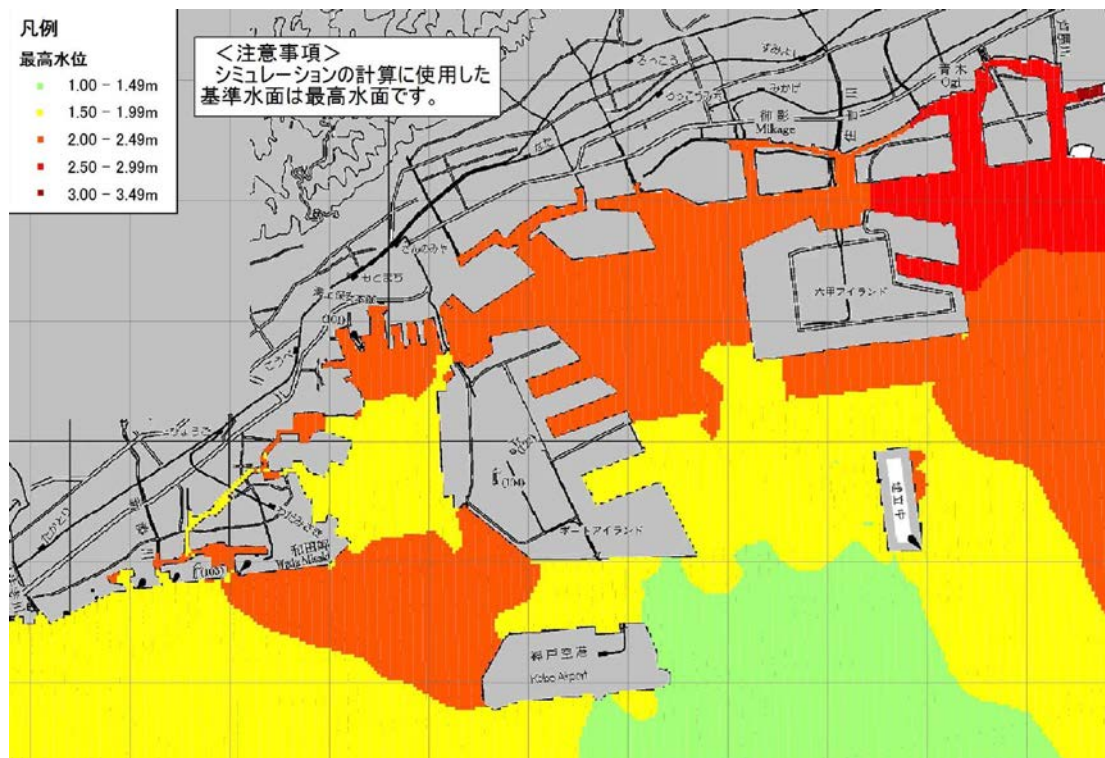


図3 最高水位（出典：第五管区海上保安本部海洋情報部）

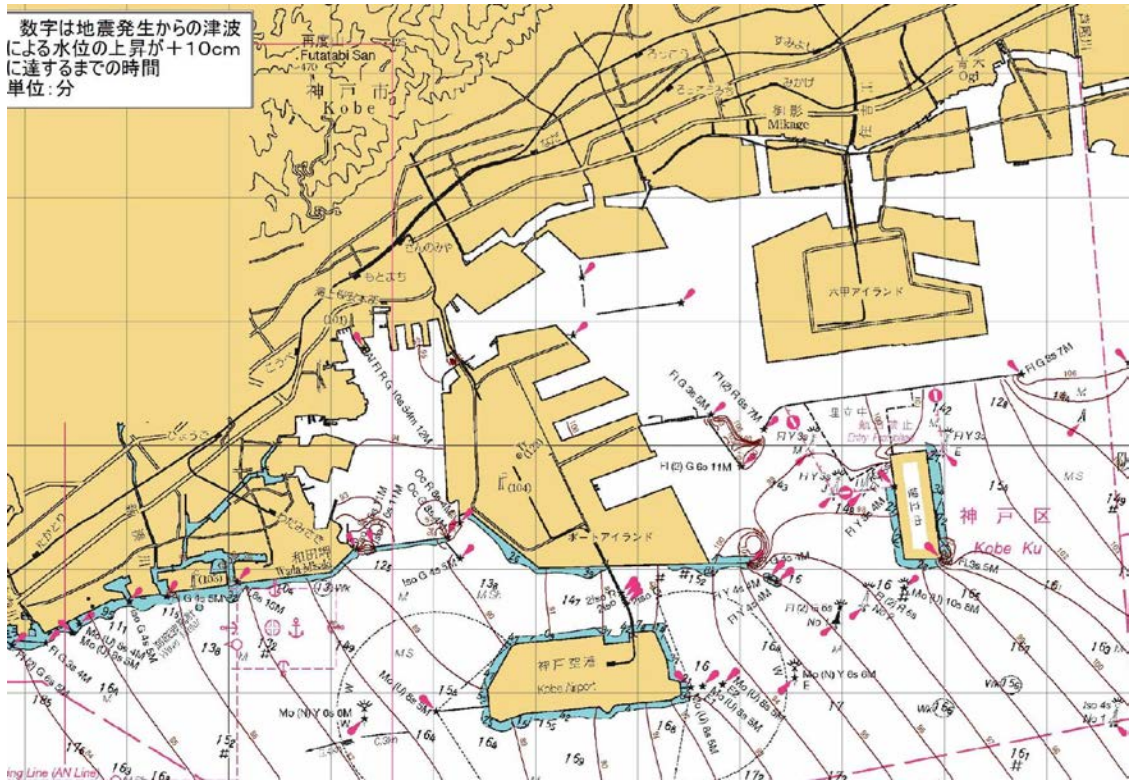


図4 津波到達までの時間 (出典: 第五管区海上保安本部海洋情報部)

3. 4 船舶運航シミュレータを用いた緊急出航操作の検討

3. 4. 1 実験方法

3. 3. 1 に記述したように、実験の対象とした船舶は、580TEU コンテナ船（全長 127.5m、幅 20m）、右回り 1 軸 1 舵、バウスラスター装備（推力 6.2 トン）であった。

このクラスの外航船舶の離棧操船は、通常、船尾に 1 隻のタグによる支援で行われており、主機、バウスラスター、舵の併用による自力での離棧操船について検討したものはない。本実験では、右回り 1 軸 1 舵、左舷係留から前進しながらの離棧操船を検討した。以下、標準手順を示す。

- ① 係留索はすべて放す。
- ② 舵を左に一杯、バウスラスター適宜使用（右回頭）、主機 Dead Slow Ahead または Slow Ahead
- ③ 船体姿勢を、できる限り岸壁と平行を維持
- ④ 岸壁から船幅の 2 倍の距離離れるまでを対象

本実験は、風と津波をそれぞれ分けて実験を実施した。3. 3. 3 で設定したとおり、風の条件は、無風状態、5m/s、8m/s、10m/s とし、向岸風、離岸風、右前、正面、左前、真後、右後方、左後方からとした（潮流は無し）。津波の条件は、流速 1 ノットから 5 ノット未満とした。操船シミュレータの性能上、潮流については、一定方向の流速のみの対応となるため、津波の潮流方向については、東西方向とした。風、津波ともある複合条件は、5m/s、8m/s、10m/s とし、向岸風、右前、右後方からとし、津波の条件は、津波のみの場合と同じにした。

3. 4. 2 実験結果

岸壁から船幅の 2 倍の距離まで離れるために必要な時間および進出距離について、表 1 に風のみの場合を、表 2 に津波のみの場合を、表 3 から表 7 に風と津波の複合条件の場合の結果を示す。また図 1 にキャプチャー画面の一例を示す。

<風のみ>

表 1 風向別 離岸所用時間および前方進出距離

	正面 <075>	右前方 <120>	向岸風 <165>	右後方 <210>	真後 <255>	左後方 <300>	離岸風 <345>	左前方 <030>
無風	3分	-	-	-	-	-	-	-
	60m	-	-	-	-	-	-	-
5m/s	3分	3分	3.5分	3.5分	3.5分	2.75分	2.5分	2.5分
	50m	55m	90m	120m	70m	45m	40m	45m
8m/s	2.5分	3.5分	5分	4分	3分	2.5分	2.25分	2.25分
	45m	65m	140m	160m	85m	40m	25m	30m
10m/s	2.5分	4分	6.5分	5分	3分	2.25分	2分	2分
	40m	60m	200m	200m	100m	30m	15m	25m

<津波のみ>

表 2 流向別 離岸所用時間および前方進出距離

	1 knot	2 knots	3 knots	4 knots	5 knots
East<080>	4分	5分	5分	6分	-
	160m	220m	300m	370m	-
West<260>	3分	3分	3分	3分	3分
	60m	20m	-10m	-20m	-15m

<複合条件>

表 3 離岸所用時間および前方進出距離（流速 1 knot）

風速	津波流向	右前方	向岸風	右後方
		<120>	<165>	<210>
5m/s	East<080>	4分	5分	5分
		180m	260m	260m
	West<260>	3分	4分	3分
		60m	80m	100m
8m/s	East<080>	5分	-	8分
		280m	-	620m
	West<260>	4分	7分	7分
		60m	220m	280m
10m/s	East<080>	8分	-	-
		480m	-	-
	West<260>	7分	-	8分
		120m	-	480m

表4 離岸所用時間および前方進出距離（流速 2 knots）

風速	津波流向	右前方	向岸風	右後方
		< 1 2 0 >	< 1 6 5 >	< 2 1 0 >
5m/s	East<080>	5 分	6 分	5 分
		320m	440m	400m
	West<260>	3 分	4 分	3 分
		20m	30m	40m
8m/s	East<080>	7 分	-	-
		450m	-	-
	West<260>	5 分	6 分	5 分
		10m	70m	130m
10m/s	East<080>	10 分	-	-
		620m	-	-
	West<260>	8 分	-	7 分
		-20m	-	280m

表5 離岸所用時間および前方進出距離（流速 3 knots）

風速	津波流向	右前方	向岸風	右後方
		< 1 2 0 >	< 1 6 5 >	< 2 1 0 >
5m/s	East<080>	6 分	7 分	6 分
		380m	520m	580m
	West<260>	3 分	4 分	4 分
		-20m	-20m	10m
8m/s	East<080>	8 分	-	-
		580m	-	-
	West<260>	5 分	6 分	5 分
		-10m	-10m	60m
10m/s	East<080>	-	-	-
		-	-	-
	West<260>	8 分	-	6 分
		-10m	-	120m

表 6 離岸所用時間および前方進出距離（流速 4 knots）

風速	津波流向	右前方	向岸風	右後方
		< 1 2 0 >	< 1 6 5 >	< 2 1 0 >
5m/s	East<080>	7 分	-	-
		570m	-	-
	West<260>	3 分	4 分	4 分
		-30m	-30m	10m
8m/s	East<080>	-	-	-
		-	-	-
	West<260>	5 分	4 分	5 分
		10m	-20m	-10m
10m/s	East<080>	-	-	-
		-	-	-
	West<260>	9 分	-	6 分
		-20m	-	60m

表 7 離岸所用時間および前方進出距離（流速 5 knots）

風速	津波流向	右前方	向岸風	右後方
		< 1 2 0 >	< 1 6 5 >	< 2 1 0 >
5m/s	East<080>	8 分	-	-
		680m	-	-
	West<260>	3 分	4 分	4 分
		-20m	-20m	10m
8m/s	East<080>	-	-	-
		-	-	-
	West<260>	6 分	5 分	5 分
		60m	-10m	20m
10m/s	East<080>	-	-	-
		-	-	-
	West<260>	7 分	-	5 分
		-40m	-	-10m

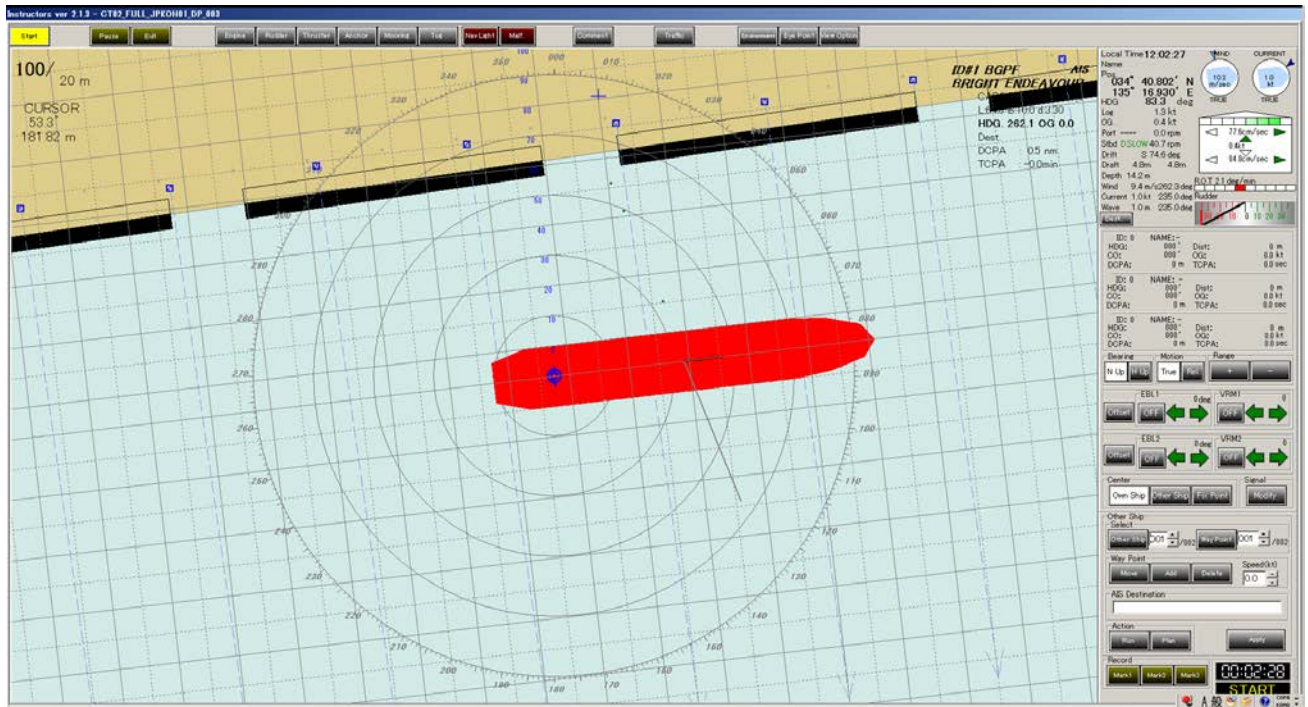


図1 スクリーンキャプチャー (例)

3. 4. 3 まとめ

風による影響は、離岸風で時間、進出距離ともに短く、向岸風で時間、進出距離ともに長くなる傾向が見られた。

津波による水の流れによる影響は、船首方向からの流れ（流向 260 度）であれば、当初より左舷一杯の舵効が作用し、船尾がスムーズに離れ、流速 5 ノットでもほぼ船体姿勢を岸壁に平行に保ったまま離岸可能であることが示された。一方、船尾方向からの流れ（流向 080 度）では、2 ノット以下であれば、船体姿勢を岸壁に平行に保ちながら離岸できたが、3 ノット付近に限界値があるとみられる。4 ノットでは左舷船尾を岸壁に擦りながら離岸できる状態で、5 ノットでは、左舷船尾が岸壁から離れず、離岸できない状態となった。

風と津波による水の流れの複合条件では、船尾方向からの流れ（流向 080 度）が 1 ノットであっても、風速 5m/s の真横または右後方からの向岸風の場合、260m も前方へ進出した。風速が増すにつれ岸壁から離れることが難しくなり、津波による流れにより前方への進出距離が増すこととなった。船尾方向からの流れがあり、岸壁へ押される向岸風の場合、限界は流速 3 ノット風速 5m/s 程度とみられる。次に船首方向からの流れ（流向 260 度）では、流速が速まるにつれ舵効きが作用することで船尾を岸壁から離す力は強くなる。船尾を岸壁から離す横方向の力は船首スラスタ能力を上回り、後方へ船体が流されることを舵角を減じることで調節しながら操船が可能であった。水の流れは操船上好ましい方向に働くため流速限界は無く、風速は 8m/s が限界とみられる。

次に操船シミュレータによる検証操船を行ったうえでの操船者としての視点について述べる。タグ支援なしで自力離岸操船を考える際、船首と船尾を船首スラスタ力および前進を用いた舵による力を手くバランスさせ離岸させることが必要となる。操船シミュレータによる検証操船を通じて、向岸風によ

り離岸が難しくなることは容易に推測できたが、風または津波の流れの影響のうち、船首方向へ作用する力の影響が予想以上に操船を難しくさせることが明らかになった。風の影響については船首スラスタ力と舵力が、前進速力の増加につれて特に船首スラスタ横方向力が減少するという現象の中で、船体姿勢を岸壁に沿うように操船する他に手段は無い。前進速力が増加するにつれて減少する横方向力が岸壁側へ働く外力に負けた時点で自力離岸操船は不可能となる。

一方、船首方向へ流れる津波の流れの影響は風と異なり、最初から舵の力を減少させる影響がある。このため平行に離岸させるには船首スラスタ力を最大で用いることができない。この影響は2ノットで感じられ、3ノットでは顕著であった。船体姿勢を岸壁と平行な状態から僅かに船首を岸壁に寄せ、岸壁と船体の間に入る津波の流れが船を離岸させる方向に働くよう操船を行うよう努めたが、このデメリットとしては船速の加速が早くなり、船体を岸壁から離れさせたいにも関わらず、船体が岸壁へ接近することであった。現実の場面では、流れがシミュレーションのように一様ではないために、自然外力は、操船者が操ることのできる船首スラスタ、舵、主機の総合力を上回り、操船者が思っている以上に作用することが考えられる。

風と流れが複合すると、特に向岸方向の風、船体後方から前方への流れで岸壁から離れることが難しい。後方から前方への流れが舵力を減じさせるために風の影響が相対的に大きく、離岸操船は非常に困難である。シミュレーションにおいて船体姿勢を岸壁に平行に保ち、前方へ進出しながら離岸したケースでも、実際にはフェンダーに接触し損害を与えることも十分考えられる。反対に前方から後方への流れでは、舵力が大きくなり、流れが速くなるにつれ舵力がスラスタ力に勝り始める。スラスタ力が舵力より小さくなれば舵角を減じることで調整可能である。この時舵角を減じると前進力が大きくなるが、この前進力は船体が後方へ流されることに抗するために、離岸操船は容易であった。

風と流れのある複合条件において、向岸方向の風であり船体後方から前方への流れの場合が最も自力離岸操船が難しいことが示された。実験条件は、舵を左一杯に、バウスラスタを適宜使用（右回頭方向）、主機をDead Slow Ahead またはSlow Ahead としてできる限り船体姿勢を岸壁と平行に保ち離岸することであった。しかし離岸方法はこの方法だけではない。津波による流れに抗するように後進で離岸する方法も考えられる。手順としては、舵を左舷一杯にとり前進をかけることで船尾と岸壁の間を空け、この間に水の流れが入ることで船体を離岸させる方向の力を得る。但し船体は前方へ進むので主機を後進にかける。この後進のプロペラ放出流により船尾には岸壁方向への力が働くことから、流れによる離岸方向の力とプロペラ放出流による岸壁方向への力とのバランスを考慮する必要がある。また船首フレア部分およびバルバスバウの岸壁接触も考慮する必要がある。津波の流れにより船首も岸壁から離れ始めれば適宜船首スラスタを左にかけ（左回頭方向）、後進しながら左回頭し離岸する。シミュレーションでは、追加実験としてこの方法による自力離岸操船を行った。結果を図2に示す。シミュレーションでは図2に示すように自力で離岸することができたが、上述したように船首部分の損傷および船首部分による岸壁損傷の程度が計り知れず、このことについては今後の課題である。

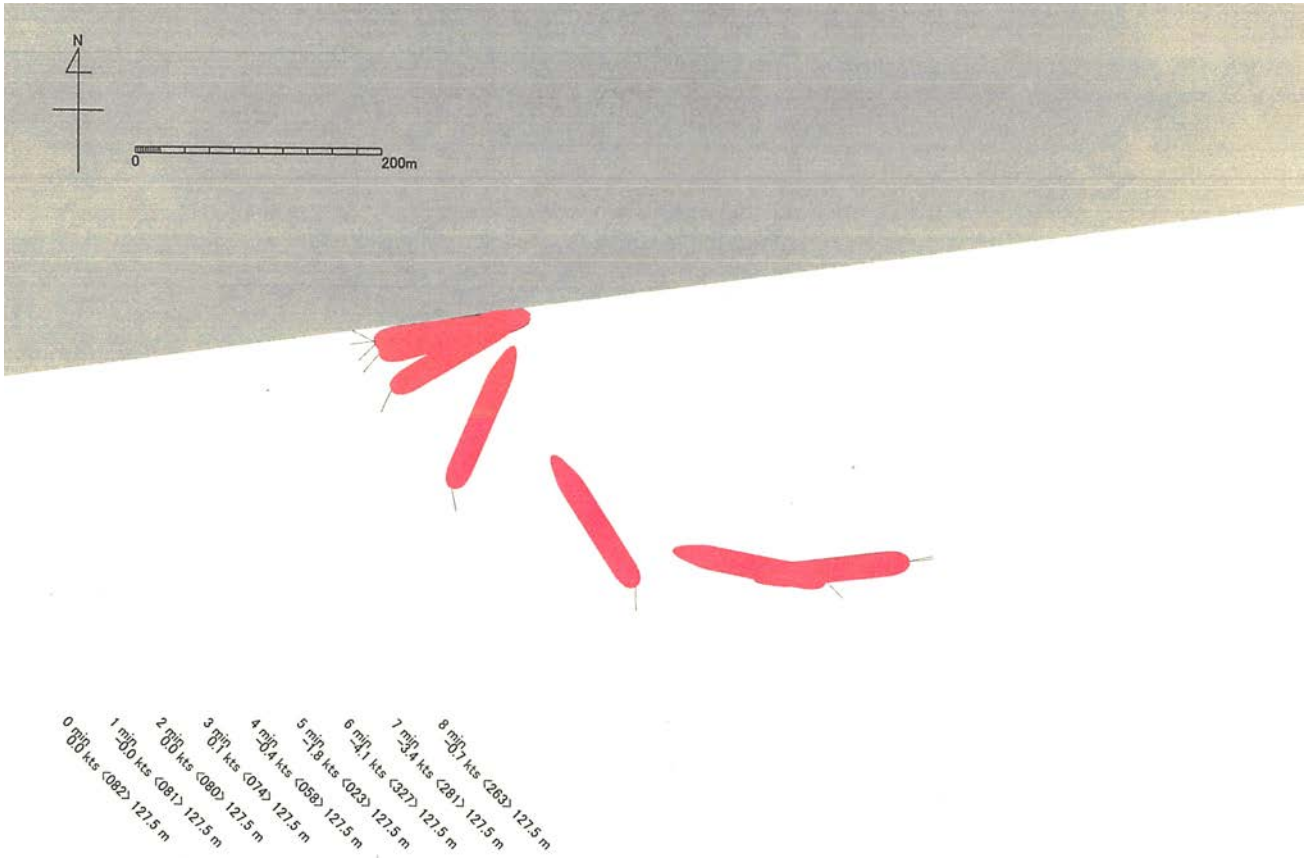


図2 追加実験として行った後進による自力離岸操船結果

3. 5 緊急暖機時に発生する機関プラントの過渡的熱応力に関する研究

3. 5. 1 はじめに

配管におけるトラブルのほとんどは接合部である管フランジ部分で発生する。とくに配管内部を流れる流体が高温の場合、各部に熱膨張差が発生するために、管フランジを締結しているボルトの軸力が低下して漏洩事故が発生することがある。これまで関連分野の研究者により、高温の内部流体を対象とした研究は相当数報告されているが、低温流体を扱った研究はほとんど見あたらない。一方、昨今 LNG に代表される低温流体の需要が急激に増加している。以上の点から、津波の発生により低温流体を運ぶ船舶が緊急出航を余儀なくされる事態を想定して、その対策を講じておくことは急務である。また従来事例から、低温流体の配管から漏れが発生する事故は、船舶と陸上間で流体を移送する時に発生しやすいといわれている。このことから、配管内部の温度が刻々と変化する状態がもっとも危険であるといえる。

そこで本年度は、プロジェクトの最終年度として、低温流体の移送時に配管のシール性能を保証するための指針となる「管フランジの締め付けボルトの軸力と温度の変化」を定量的に評価できる手法を提案する。その手法を用いて、低温流体を運ぶ船舶の緊急出航時の安全を確保するための指針作成に対して、基礎的なデータを提供することを目的としている。具体的には、最初に液体窒素を用いた管フランジの冷却実験を実施することにより、低温配管の接合部まわりの熱・力学挙動の基本的な特性を明らかにする。つぎに、その実験結果を三次元有限要素解析と比較することにより、提案する数値解析手法の妥当性を検証する。最後に、実際の配管における低温流体の流動状態を想定した数値解析を実施することにより、低温流体を移送する場合の配管のシール性能に対する流量、すなわち水面変化の大きさの影響を明らかにする。

3. 5. 2 液体窒素による管フランジの冷却実験

(1) 実験装置の概要と実験方法

LNG が流れ始めると配管の温度が低下する。やがて定常状態となり、その後 LNG の移送が完了すると配管温度は室温に戻る。その間、各部の収縮の影響により、管フランジを締結するボルト軸力が変化する。以上の過程を実験で測定することは、センサの設置方法や安全性の観点からかなり困難である。

そこで本研究では、比較的取り扱いやすい液体窒素 LN2 を使用する。液体窒素の温度はマイナス 196℃ であり、マイナス 163℃ の LNG よりもさらに低い。したがって、LN2 を用いて実施した実験結果を、緊急出航時の作業指針として使用すると安全側になるといえる。また、低温流体が流動する配管系を実験装置で再現することは難しいため、底付きの管フランジに液体窒素を注ぐ実験により代用する。実験に使用した管フランジは、JIS 規格の呼び圧力 20K、呼び径 65 に合わせて製作している。管フランジは 8 組の M16 のボルト・ナットによって締結されており、管フランジとボルトの材質はいずれも SUS304 である。図 1 に実験装置の構成を示す。下側のフランジは液体窒素を注ぐために蓋付きとなっている。2 枚のフランジの間には低温用のフッ素樹脂ガスケットを挿入する。ガスケットの寸法は内径と外径がそれぞれ 65mm と 116mm、厚さは 3mm である。

実験に使用したボルトには、図 2 に示すように熱電対とひずみゲージを装着している。熱電対は JIS の K タイプ（クロメル-アルメル）である。ボルトの軸応力は、軸部に 2 本の低温用ひずみゲージを 180° 離して貼り付けて、3 線式 2 アクティブゲージ法により測定する。ボルトの初期軸応力は 100MPa とする。

この軸応力に対するガスケット平均面圧は約 22MPa である。液体窒素を管フランジに注ぐと沸騰して気化する。そこで管フランジの液面を一定に保つために、液体窒素は継続的に注入する。実験開始から 18000 秒後に注入を止め、その後ボルト温度が室温に戻るまで軸部温度と軸ひずみの計測を続ける。

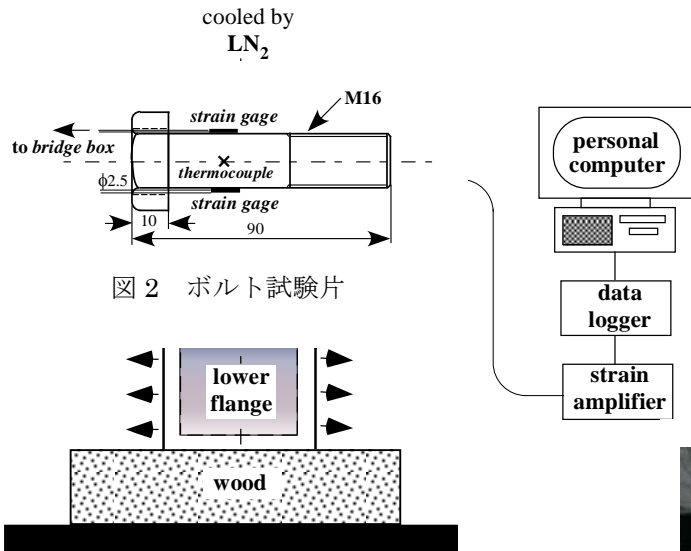


図 2 ボルト試験片

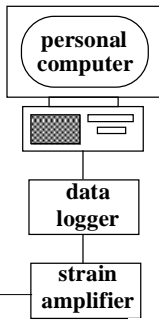


図 1 液体窒素を用いた冷却実験装置

(2) 実験結果

図 3 は、温度場がほぼ定常状態となったときの管フランジ締結体の外観を示している。フランジのまわりにかんりの量の霜が付着している。図 4 はボルト軸部温度と軸応力の測定結果である。縦軸は各時間におけるボルト軸応力 σ_b を初期軸応力 σ_i で除した値とボルト軸部温度、横軸は時間である。ここで、 σ_b と σ_i の比を“軸応力残留率”と呼ぶこととする。実験は 4 回実施した。図中の 4 種類のレジェンドは、熱電対と低温用ひずみゲージを装着した No.1 から No.4 の各ボルトにおける 4 回の実験の平均値である。冷却開始後十分時間が経過すると、ボルト軸部温度はマイナス 155°C 程度まで低下している。一方、ボルト軸応力は初期状態の約 65%まで低下している。この結果は管フランジのシール性能に対して無視できない値といえる。実際の配管では、流動状態が異なるために軸応力残留率の値も変化すると考えられるが、いずれにしても管フランジを締結するボルトの軸応力は、低温熱負荷を受けてかなり低下することがわかる。液体窒素の注入を止めると、軸部温度、軸応力ともしだいに初期状態に戻る。十分時間が経過すると、軸部温度は室温に戻っているが、軸応力は初期状態の 93%程度までしか回復していない。その原因は、ガスケットの圧縮特性のヒステリシス現象によると考えられる。



図 3 冷却実験中の管フランジ締結体

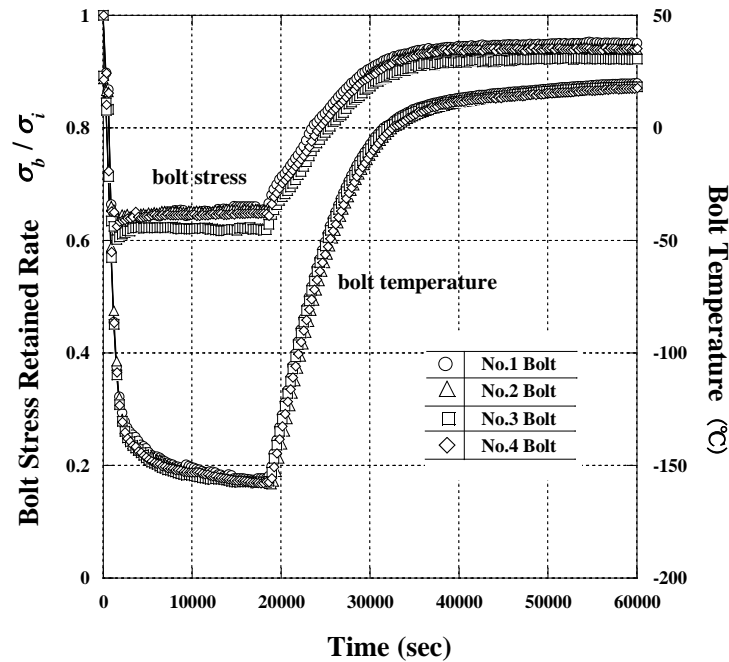


図4 ボルト軸部温度と軸応力残留率の時間変化

3. 5. 3 三次元有限要素解析による管フランジの熱・力学挙動の評価

(1) 解析モデルと解析条件の設定

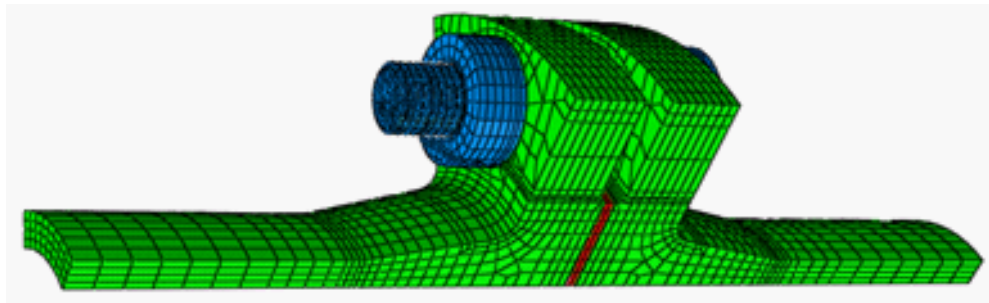


図5 管フランジの1/8モデル

本節では、管フランジの冷却実験で測定したボルト軸部温度と軸応力を有限要素解析により求める。図5は解析に使用した有限要素モデルの全体図であり、蓋の部分を除いて実験で使用した管フランジと寸法、形状を合わせている。管フランジ、ボルト・ナットは線形弾性体とし、ヤング率は200GPa、ポアソン比は0.3とする。接触面の摩擦係数は0.15、雰囲気温度と管フランジの初期温度は20°Cとする。温度場の境界条件として、管フランジの内表面はマイナス196°Cの液体窒素が流れる熱伝達境界、同じく外表面も熱伝達境界とする。

冷却実験において、液体窒素を管フランジ内に注入すると沸騰して蒸発するため、表面熱伝達率を正確に推定することは困難である。そこで、管フランジ内表面は沸騰熱伝達あるいはそれに近い状態にあり、かなり高い値になると考えて表面熱伝達率を5000 W/m²Kから15000 W/m²Kの範囲で変化させ、実験

結果と近い値が得られる $8000 \text{ W/m}^2\text{K}$ と仮定した。管フランジの上下端面は断熱境界，その他の管フランジ表面，ボルト・ナット表面の熱伝達率は $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ とする。管フランジとボルト・ナットの材料は実験に合わせて SUS304 とする。また解析では，実験に使用したフッ素樹脂ガスケットの圧縮応力と圧縮ひずみの非線形・ヒステリシス特性を考慮している。

(2) 解析結果と実験結果の比較

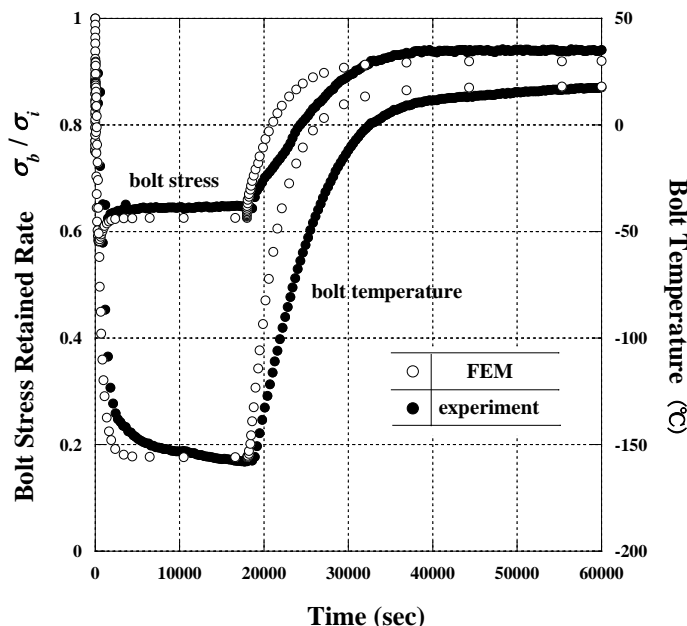


図 6 解析結果と実験結果の比較

図 6 では，軸部温度と軸応力残留率の時間変化について，図 4 と同じ表示方法により解析値と実験値を比較している。図中の実験値は 4 本のボルトの平均値である。定常状態ではボルト軸部温度，軸応力残留率のいずれについても，両者の値はかなりよく一致しているといえる。一方，液体窒素の供給を止めた後の常温に戻る過程では，両者の差がやや大きくなっている。実際の冷却実験では，液体窒素の供給を止めると液面が徐々に低下し，やがて完全に消滅する。その間，かなりの時間にわたって管フランジ内に液体窒素が存在する。これに対して有限要素解析では，供給を止めると配管内部の温度はただちに室温となり，内表面の熱伝達率は外表面の値に等しいと仮定している。その結果，解析では実験に比べて短時間でボルト軸部温度が上昇したと考えられる。以上の点を考慮しても，ここで提案した解析手法は低温流体の配管の熱・力学挙動を評価する目的に対して，実用状十分な精度を有していると考えられる。

3. 5. 4 低温流体の移送／終了時の熱・力学挙動の評価

(1) 解析モデルの設定

前節では，提案している有限要素解析の有効性を検証するために，1/8 の管フランジモデルを用いて冷却実験に対応した解析を実施し，両者の結果を比較した。しかしながら実際の配管では，漏洩事故は低温流体の移送開始時，あるいは移送終了近くになって発生するといわれている。すなわちこの現象は，温度場と応力場の連成を考慮した非定常問題として解析しなければならない。言い換えれば，配管内の流量が刻々と変化するときのボルト軸力の大きさが問題となる。

配管は、ほとんどのケースにおいて垂直あるいは水平に配置される。そのうち、内部流体の漏れは主に水平に配置された配管から発生するケースが多い。図7は、漏洩現象の主要な原因と推察される“流量の変化”の影響を評価するために作成した管フランジの1/2モデルである。管フランジの寸法、ボルトの締め付け条件、使用した材料定数、および表面熱伝達率などの熱的条件は、すべて図5のモデルを用いた解析と同じとする。図7において、配管内の流量変化に対応して、底部から徐々に低温流体を満たしていく過程を解析する。ここで、図7中の4本のボルトは、底部からボルト1、ボルト2、ボルト3、ボルト4と呼ぶこととする。

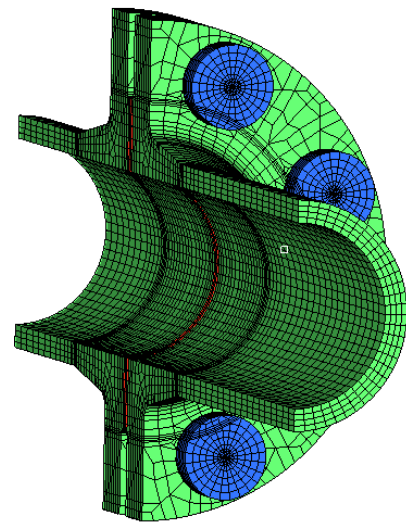


図7 管フランジの1/2モデル

(2) 流量変化の扱い方

配管内の流量は、流量ゼロの移送開始から、配管の断面全体を流体が満たすまでに要した時間により変化させる。具体的には、以下の4通りの条件に対して解析を実施した。

移送開始から断面全体を流れる状態までの所要時間：20秒、80秒、320秒、1280秒

上記の最初の2つの条件は、明らかに実際の流動状態と比較して短いですが、流量の変化に伴うシール性能の変化を体系的に解明するために設定した数値である。

3. 5. 5 ボルトの温度変化と軸応力残留率の解析結果

(1) 移送開始時の締結用ボルトの温度変化と軸力変化

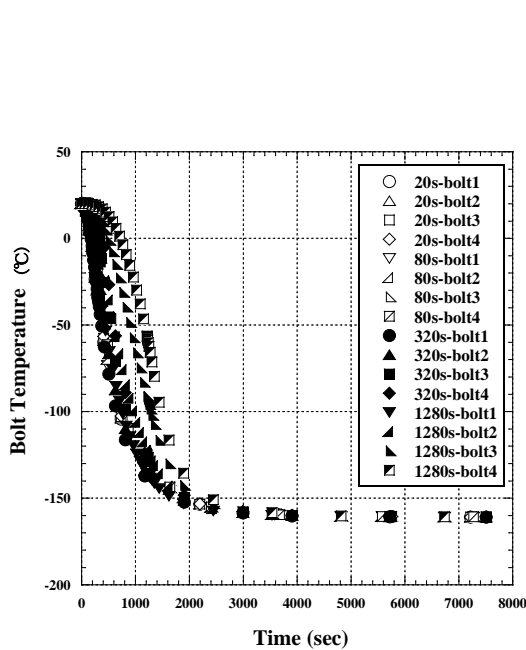


図8 ボルト軸部の温度変化

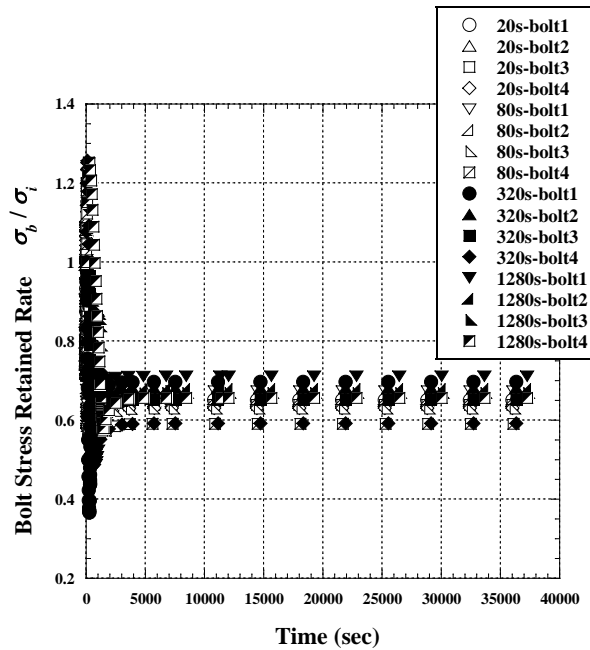


図9 ボルト軸応力残留率

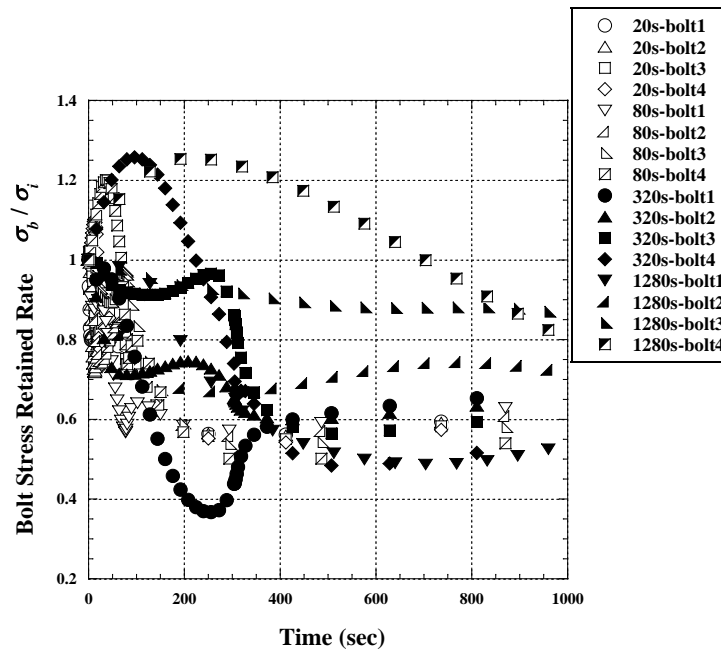


図 10 移送開始直後のボルト軸応力残留率

図 8 は、流量が増加していく過程における各ボルトの温度変化を示している。パラメータは、断面全体を低温流体が流れる状態になるまでに要した時間である。当然のことながら、満水になるまでの時間が長いほど緩やかに温度が低下しているが、いずれの場合も十分時間が経過した後の各ボルトの温度はおよそマイナス 160℃である。

図 9 は、同じくボルト軸応力残留率の時間変化を示している。この場合、定常状態におけるボルト軸応力残留率は、水面上昇速度の影響を受けるが、60～70%の範囲でばらついている。また、同じ水面上昇速度に対する 4 本のボルト間のばらつきも見られる。このことは、ガスケットの圧縮特性が非線形／ヒステリシスを有していることが主な原因と考えられる。

この図において注目する点は、流体の移送開始直後の挙動である。短い時間であるが、ボルト軸応力残留率が 40%以下まで低下している。図 10 はこの部分の拡大図である。温度場の時間変化やボルト軸力間の相互作用により、各ボルトの軸応力は複雑な変化を示しているが、「所要時間=320 秒」の場合のボルト 1 において“軸応力が 37%程度まで低下”していることがわかる。

(2) 移送終了時の締結用ボルトの温度変化と軸力変化

図 11 は横軸の 3600 秒をスタート点として、水面を下げた場合のボルト軸部の温度変化である。4 本のボルト温度はほぼ同じである。また、流量の大きさの影響もさほど顕著ではなく、時間の経過とともに常温まで滑らかに上昇していることがわかる。図 12 は、図 9 と同じくボルト軸応力残留率の時間変化を示している。全断面に流体が流れている定常状態から、水面を下げたときのボルト軸応力変化を示している。定常状態では、平均値として約 65%という軸応力残留率から、最も低いケースで 60%まで低下している。

(3) 考察

内部流体のシール性能にもっとも顕著に影響するのは、ボルト軸力である。その点から、本研究で扱った解析条件の範囲では、低温流体の移送を開始して比較的短い時間の間に、もっとも厳しい場合で

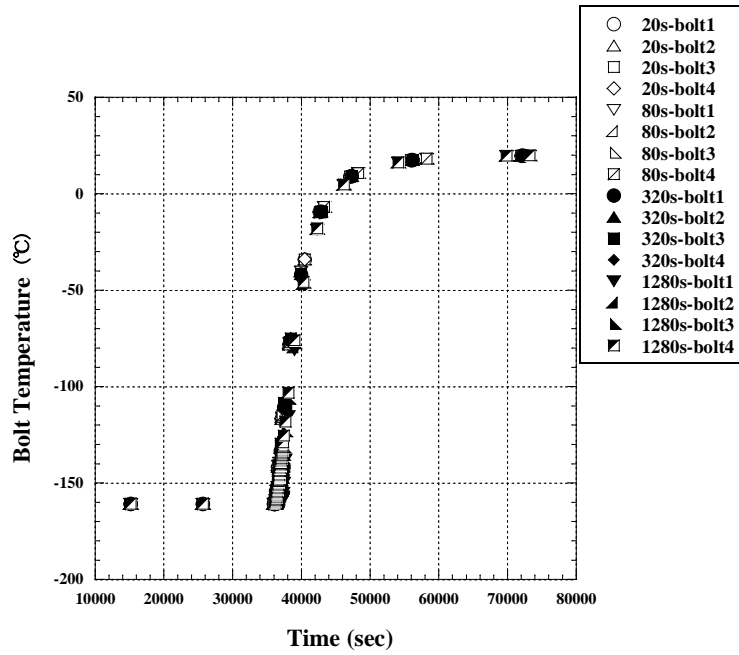


図 11 移送終了前後のボルト温度

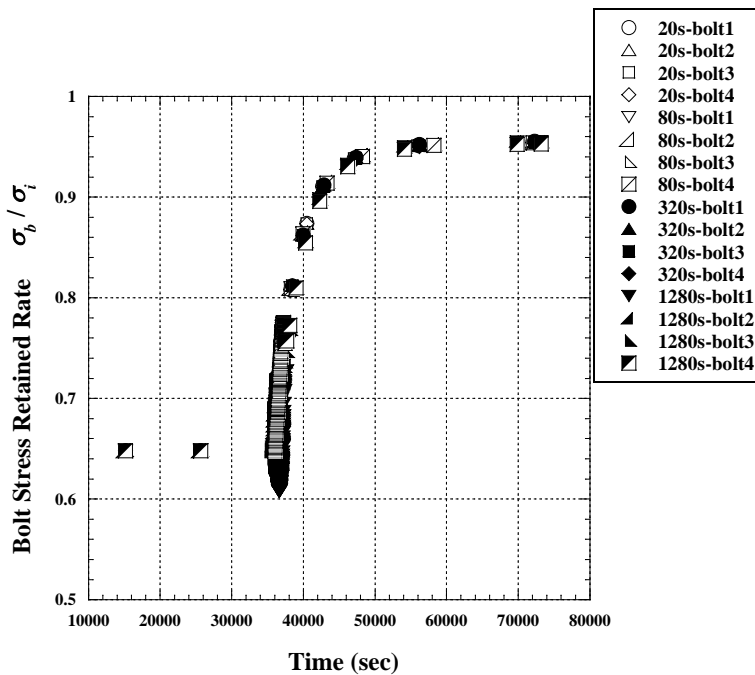


図 12 移送終了前後のボルト軸力残留率

ボルト軸力残留率が 37%程度まで低下したことは注目値する。実際の配管では、組み立て誤差、ガスケットの圧縮特性の温度依存性をはじめ、さまざまな因子が影響するためさらに軸力が低下する可能性がある。いずれにしても、移送開始後比較的短い時間の間に漏洩がもっとも起こりやすくなると推察される。一方、移送終了時にもボルト軸力が低下している。この場合の低下率は移送開始時ほどではないが、実際の配管では一旦低温負荷を受けているために、各部の変形やガスケットの特性が変化することにより、さらに軸力が下がる可能性があることに注意しなければならない。

3. 5. 6 まとめ

本年度は、3年間のプロジェクトの最終年度として、実際の配管を低温流体が急激に流れる場合を対象とした。得られた結論は以下の通りである。

(1) 液体窒素を管フランジに連続的に注ぐ実験により、シール性能の支配的な因子であるボルト軸力が初期値の60%近くまで低下することを示した。

(2) 上記の実験を三次元有限要素解析により再現し、実験値と解析値を比較することによって、低温流体が流れる配管の熱・力学挙動を数値解析によりシミュレーションできることを示した。

(3) 実際の配管で発生する漏洩事故のメカニズムを検討するために、横置きにした配管の三次元モデルを作成し、低温流体の移送開始時と移送終了時に発生するボルト軸力変化を定量的に評価した。

(4) 低温流体の移送開始後比較的短い時間の間に、本研究で設定した解析条件では、ボルト軸力が最大で初期値の37%程度まで低下することを示した。

(5) 解析により得られた移送終了時のボルト軸力低下量は、移送開始時に比べて小さいが、配管が一旦低温負荷を受けているため、各部の収縮／変形やガスケットの特性変化等の影響により、漏洩を引き起こす可能性がある点に留意しなければならない。

低温流体の移送中に津波が発生するという最悪の事態を想定して研究を進めてきたが、移送開始時にボルトの軸力低下が最大となる可能性が高いことから、もし津波が発生した場合は、配管接合部のシール状態に注意しながらできるだけ速やかに移送を中止することが望ましいといえる。

3. 6 エンジン始動時の過渡的に変化する特性に関する研究

3. 6. 1 はじめに

本分担研究は、「船舶用ディーゼル機関の始動時およびその後過渡的に変化するエンジン特性を明らかにすること」を目的としている。特に、エンジンを始動する際、冷間状態(冷態)もしくは暖機状態(温態)の違いで過渡的な変化傾向がどのように異なるかの知見を得る目的で実験解析を行なってきた。供試機関には、当研究室が所有する大型の単気筒ディーゼル機関を用いた。それらは製造年が古く、現在の大型船舶で使用されている主機関と比べ、燃料噴射ポンプの構造や各機械要素の詳細がかなり異なっているため、得られた結果をそのまま適用することはできない。しかしながら、定性的な傾向は古い型のエンジンであっても把握できると考えている。

研究プロジェクトの初年度である平成 27 年度には、大型 4 ストローク単気筒ディーゼル機関を用いて、始動時の基本的な燃焼特性を調査した。その結果、以下のような知見を得た。

- 1) エンジン始動直後の若干不安定な動作状況の後、冷間状態からの始動では約 72 分、暖機状態からの始動では約 56 分で定常運転状態(排気温度一定)に到達する。
- 2) 燃料消費量はエンジン始動後の時間経過とともに少なくなっていく。暖機状態からの始動の方が、同時刻における燃料消費量は少なく、一定消費量になるまでの時間は短くなる。
- 3) 計測を行った排気エミッション(CO₂, O₂, NO_x, CO)のうち、エンジン始動後に排出濃度が大きく変化したのは、本実験の範囲では一酸化炭素 CO のみであった。
- 4) 以上の結果は、エンジン始動開始後に、エンジン燃焼室やシリンダ壁から外部に逃げていく熱量(熱損失・冷却損失)の差異によると考えれば、妥当な結果である。

二年目の平成 28 年度には、大型 4 ストロークおよび大型 2 ストロークの単気筒ディーゼル機関を用いて、排気エミッションの着目した実験解析を行なった。その結果、以下のような知見を得た。

- 5) いずれのエンジンタイプでも、エンジン始動開始後の時間経過とともに燃料消費率は減少していく。その結果、正味熱効率は時間経過とともに高くなっていく。
- 6) 運転開始後の時間経過とともに、排ガス中の窒素酸化物濃度は増加する傾向にあり、二酸化炭素濃度はわずかに減少、残留酸素濃度はわずかに上昇していく傾向にある。
- 7) 上記 5) および 6) は、燃焼室内部の燃料燃焼が時間経過とともに活性化していく、すなわち、燃料の燃焼効率が時間経過とともに向上していくことが示唆される。
- 8) 排ガス中の一酸化炭素濃度は、総じて時間経過とともに減少する傾向にあるが、一部の条件(4 ストロークエンジンの冷態始動エンジン負荷 75%)では増加した。

最終年度である平成 29 年度は、大型 4 ストローク単気筒ディーゼル機関を使用し、エンジン始動時の振動現象等に着目して実験解析を行なった。停泊あるいは仮泊状態からエンジンを始動あるいは負荷を上げて緊急退避する場合、エンジンには熱的な負荷とともに振動による機械的な負荷がかかることが想像できる。そこで、過年度の実験解析で主な実験パラメータとしてきたエンジン始動時の条件(冷態始動、温態始動)の基で、シリンダ内圧力、エンジン騒音およびシリンダ部の振動について時間連続での計測を行なった。その結果について以下に詳報する。

3. 6. 2 実験装置および方法

本年度の実験研究では、過年度までに使用した機関と同一の大型 4 ストローク単気筒ディーゼル機関 (18.4[kW] @ 380[min^{-1}]) を供試機関とした。表 1 に機関の主要諸元を、また図 1 に機関運転試験の計測系統概略図を示す。実験ではエンジン始動時 (静止状態から起動状態に移行する過程) の燃焼室内圧力、エンジン発生音および振動の時間変化を計測した。特に、エンジン始動時にエンジン本体が冷えた状態である場合 (冷態始動) とある程度温まっている状態 (温態始動) の二つの条件で、各過渡特性がどのような相違があるのかを明らかにする。

ここで冷態始動は、エンジンが外気温度 (約 10[$^{\circ}\text{C}$]) と同じく、冷えた状態から始動することを言う。また、温態始動はエンジンジャケットの冷却水温度が 40[$^{\circ}\text{C}$]まで上昇した後、エンジンを一度止めて直に再始動させることを言う。これは、通常の船用機関で補機の排ガス排熱を利用して主機の暖機を行なうことを模擬している。

供試エンジンのシリンダヘッド部分にはニードルバルブを有する連絡孔が設置されており、計測器を取り付けることでシリンダ内の圧力を計測することが可能である (インジェクタコックあるいはインジェクタバルブと呼称される)。この部分に圧力センサ (日本キスラー株式会社, 701A, 最大圧力 25.5MPa (250 kg/cm^2)) を取り付け、複数サイクルの燃焼圧力履歴を計測した (図 2(1)参照)。またエンジン運転時に発せられる音 (騒音) の測定を行った。今回の計測では、シリンダヘッド近傍のシリンダジャケットに接するように騒音計 (リオン株式会社, 積分形普通騒音計, NL-14) を設置した (図 2(2)参照)。さらに供試エンジンに生じる振動を把握する目的で、シリンダヘッド上部と側部に加速度センサ (株式会社共和電業, ASV-A 型加速度変換器) を取り付けて計測を行った (図 2(3)参照)。計測時間の基準には、機関回転軸に設置したロータリーエンコーダ (IHI 株式会社, RS720-05) からの信号 (クランク角度) を用いた。

実験では、まず冷態始動をして計測を行う。その際、水制動力計によってエンジン側に適宜負荷をかけた。供試エンジンは、老朽化しており過度な負荷をかけることを避けるため、始動時のエンジン回転速度は低いものとした (280[min^{-1}])。始動後には 50%エンジン負荷 (船用特性, 9.2[kW] @ 302[min^{-1}]) になるように調節をした。温態始動時も同様のエンジン回転数と負荷変化で計測を行なった。サンプリングは各条件で繰り返し 5 回行い、1 回につき 200 サイクル分を測定した (サンプル数は合計 1000 サイクル)。

表 1 供試機関の主要諸元

Item	Description
Product	Hansin S1F
Type	4 Stoke diesel engine
Cylinder number	Single cylinder
Bore x Stroke	220mm x 350mm
Displacement volume	0.0133 m^3 (=13.3Liter)
Compression ratio	12.78
Rated power	18.4kW(=25PS)@380 min^{-1}
Combustion type	Direct injection type
Nozzle	Hole type (ϕ 0.35mm x 4)
Injection pump	Spill valve type
Injection pressure	29.4MPa (=300 kgf/cm^2)

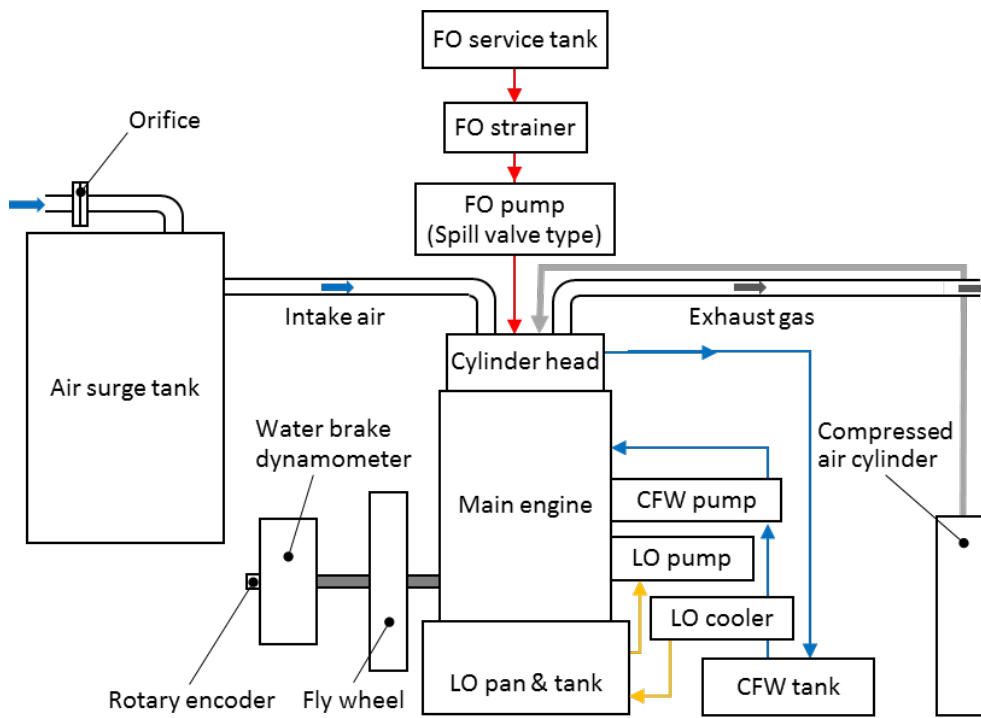


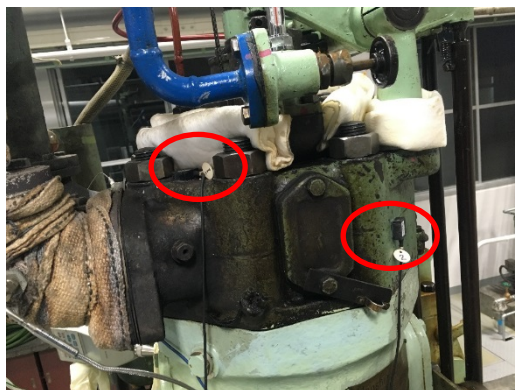
図1 機関運転試験の計測系統概略図



(1) 燃焼圧力の計測



(2) 燃焼騒音の計測



(3) 振動の計測

図2 機関始動時の基本特性の計測状況外観

3. 6. 3 実験結果および考察

(1) 最高燃焼圧力の過渡変化

図 3 にシリンダ内の最高燃焼圧力のエンジン始動後からの過渡変化を示す。縦軸には燃焼最高圧力 [MPa]，横軸にはエンジン始動後のサイクル数を示した。また，図において青色の線が冷態始動，橙色の線が温態始動の場合である（以降同様）。エンジン始動直後，いずれの始動条件においても負荷をあげていくにつれて燃焼最高圧力が上昇していることがわかる。おおよそ 100～150 サイクルまでに負荷の上昇を終えるため，その後の燃焼最高圧力はほぼ一定の値となり，サイクル変動も少ない安定した運転状況となっている。

始動開始時の条件で比較すると，始動後 150 サイクル以降で温態始動時には最高燃焼圧力の変動は小さく（振幅が小さく），約 4.8 [MPa] 前後の値となり，安定した運転が行なわれている。それと比較して，冷態始動時では 100～150 サイクル以降もサイクル変動が大きく（振幅が大きく），最高燃焼圧力も約 5.5 [MPa] 前後と高くなっている。その後徐々に最高燃焼圧力の値は小さくなり，800～900 サイクル経過後に温態始動時と同様の燃焼最高圧力に漸近している。

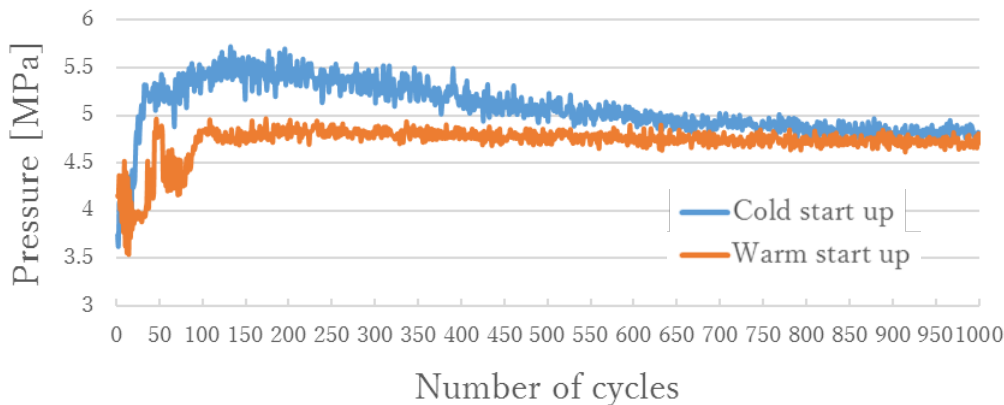
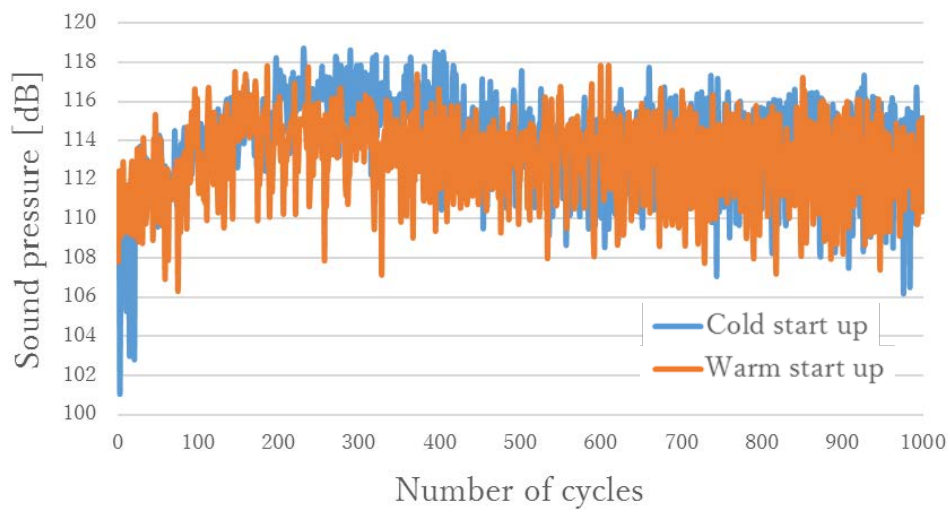


図 3 エンジン始動後の燃焼最高圧力の過渡変化

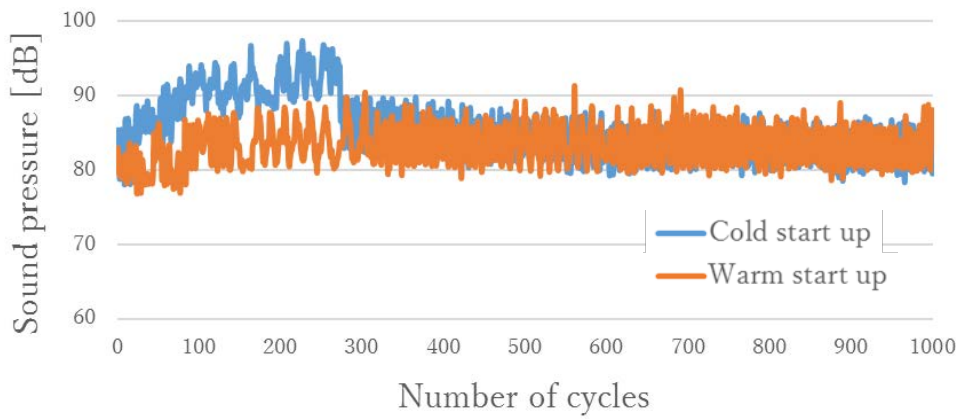
(2) 騒音の過渡変化

エンジン騒音のサイクルにおける最大値 [dB] の過渡変化を図 4(1) に，またサイクル内の平均値の過渡変化を図 4(2) に示す。燃焼最高圧力の過渡変化の結果から，温態始動時にはエンジン始動開始後 100～150 サイクルで運転が安定するとみなした。温態始動条件の図 4(1) の最大騒音レベル，図 4(2) の平均騒音レベルの過渡変化は，燃焼最高圧力の過渡変化と同様に，ともにエンジン始動後に騒音レベルが徐々に上昇し，100～150 サイクル経過後に一定の値に漸近する。冷態始動時には，その一定値の最大騒音レベルに到達するサイクル数は少し大きくなり，200～300 サイクル経過後に一定値に漸近している。なお，この最大騒音レベルは，冷態始動時，温態始動時ともに変動の幅は大きく，平均が約 114 [dB] に対して約 8 [dB]（約 7% 程度）程であった。

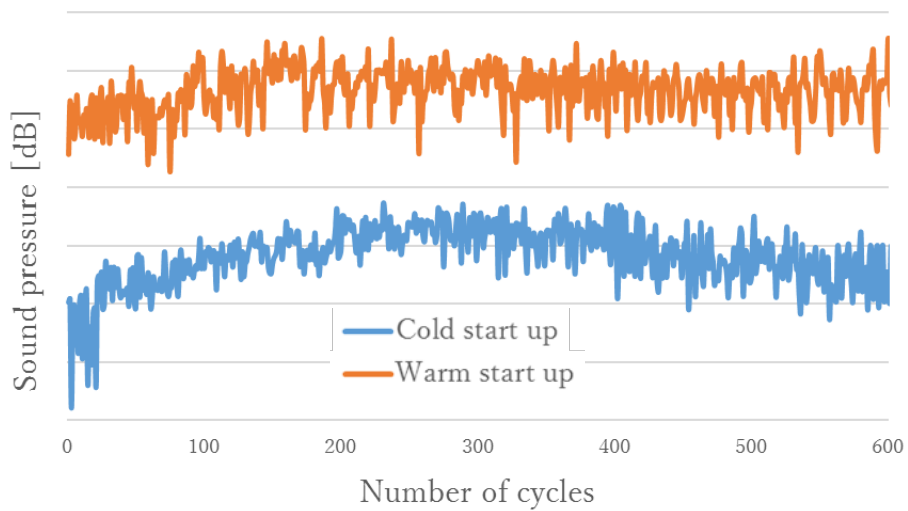
エンジン始動開始直後の様相を明確にするため，図 4(3) に初期 600 サイクルを拡大して表示したものを示す。この図において縦軸は絶対値ではなく，相対的な関係として示してある（騒音レベルの原点が異なる）。このグラフより，100 サイクルから 300 サイクルで冷態始動時の騒音レベルが温態始動時のそれと比べて，変動の幅（振幅）が小さいことがわかる。つまり，このサイクル区間では全体的に騒音レベルが高く，そのため図 3(2) に示した騒音レベルの平均値が高くなったと考えられる。



(1) サイクル内最大騒音レベル



(2) サイクル内平均騒音レベル



(3) エンジン始動開始後の最大騒音レベルの比較 (相対表示)

図4 エンジン始動後のエンジン騒音レベルの過渡変化

(3) 振動の過渡変化

図5～図7にエンジンシリンダヘッドに設置した加速度センサによる振動の計測結果を示す。

図5は、振動の連続計測データから1サイクル（排気・吸気・燃焼・膨張の4ストローク）のみを抽出したものである。図の横軸はデータ番号、縦軸は加速度[G]を示す。図中に示すように、吸気および排気ストロークでも大きな振動が見られる。これはシリンダヘッド部にある吸気および排気バルブの動作タイミングと一致しており、それらの動作によっても振動が発生していることがわかる。また燃焼ストロークでは顕著な振動が発生していることも見てとれる。燃焼ストロークのみを連続計測データから抽出して並べたものを図6に示す。

図7(1)はシリンダ側面、図7(2)はシリンダヘッド上面に設置したセンサによる測定結果で、各サイクルの振動波形のうち燃焼行程の部分だけを抽出して連結したグラフである。各図において横軸はデータ番号、縦軸は加速度を表す。縦方向（シリンダ内ピストンの運動方向＝垂直上下方向）の振動を表した図7(1)では、冷態始動時と温態始動時に特徴的な違いはなかった。これは、縦方向の振動はピストンの上下運動によって生じる振動の影響が大きく、燃焼性の不良による振動があまり顕著にでなかったためと考えられる。一方、横方向（水平方向）の振動を表した図7(2)では、エンジン負荷が大きくなるにつれて振動も大きくなり、冷態始動時の方が振動は大きくなっていることがわかる。エンジン始動の経過時間とともに、この振動の振幅は徐々に小さくなり、やがて温態始動時の振動振幅の値に近づくと予想される。

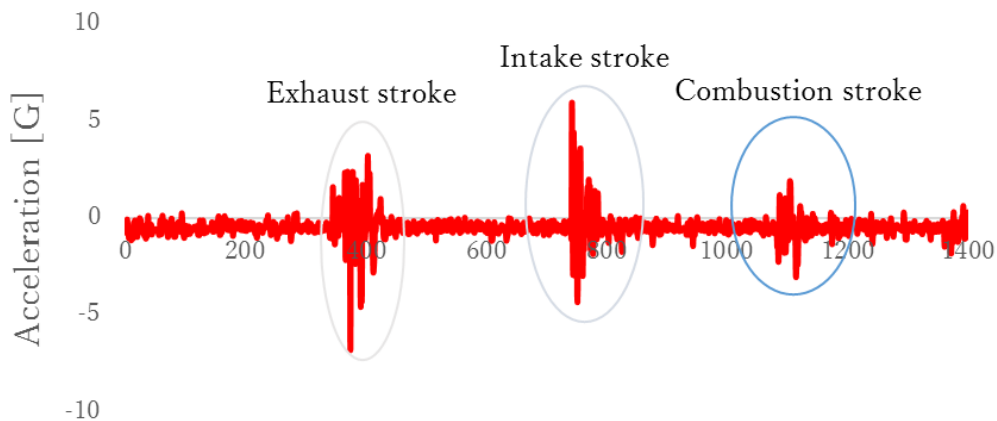


図5 1サイクル分の振動計測データ

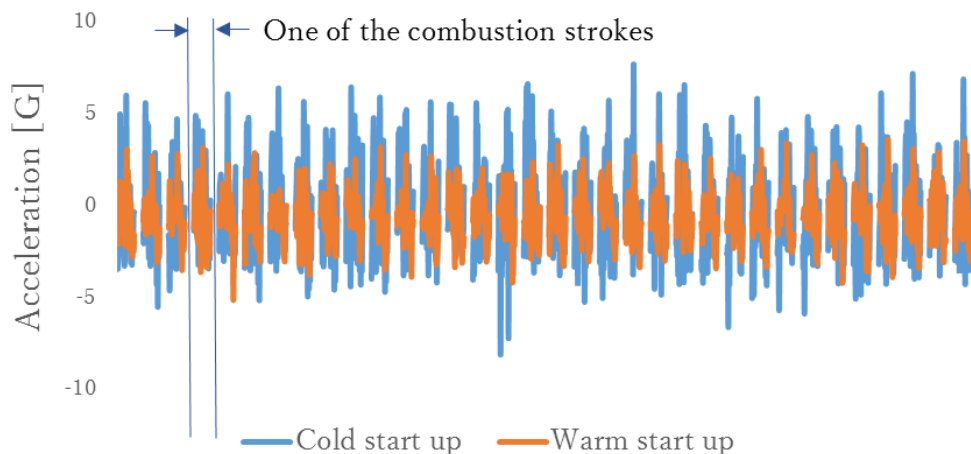
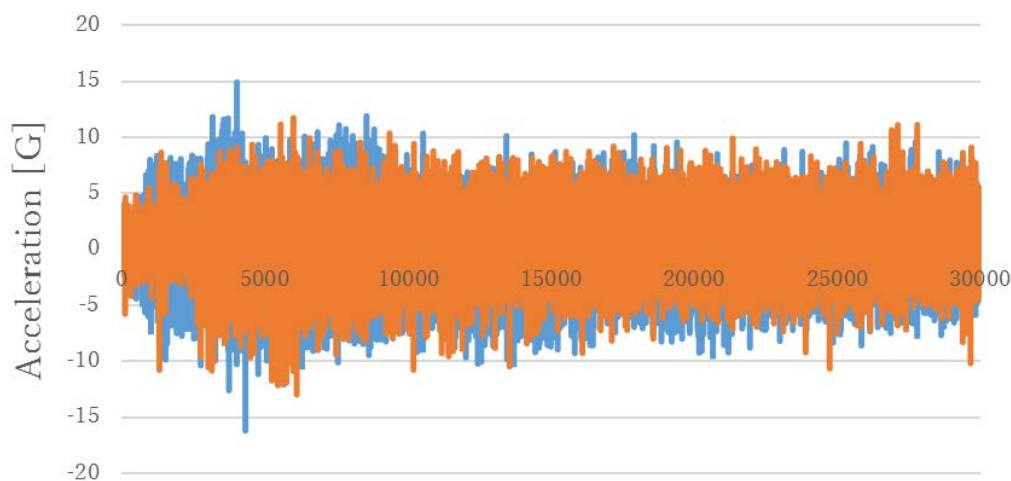
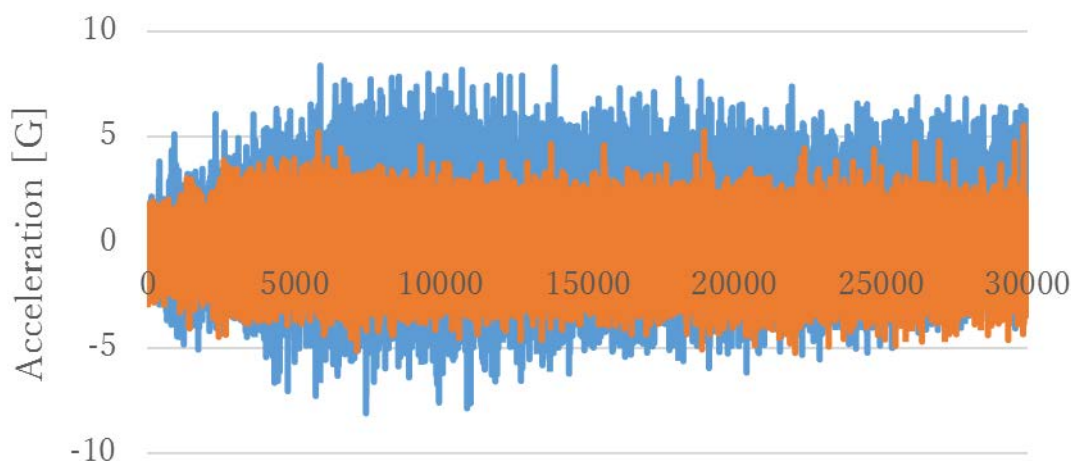


図6 燃焼ストロークを抽出した振動計測データ



(1) シリンダヘッド側面の振動（ピストン運動方向）



(2) シリンダヘッド上面の振動（ピストン運動方向と鉛直方向）

図7 エンジンシリンダヘッド部における振動の過渡的变化（燃焼サイクルのみ抽出・連結）

3. 6. 4 まとめ

本分担研究では、大型 4 ストロークディーゼル機関を使用し、エンジン始動時の振動現象等に注目して実験解析を行なった。停泊あるいは仮泊状態からエンジンを始動あるいは負荷を上げて緊急退避する場合、エンジンには熱的な負荷とともに振動による機械的な負荷がかかることが想像できる。そこで、過年度の実験解析で主な実験パラメータとしてきたエンジン始動時の条件（冷態始動、温態始動）の基で、シリンダ内圧力、エンジン騒音およびシリンダ部の振動について時間連続での計測を行なった。得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) エンジン始動後のエンジン負荷増大操作に伴って燃焼最高圧力は急激に上昇する。温態始動時、始動後 150 サイクル以降で安定した最高燃焼圧力になる。一方、冷態始動時は、温態始動時よりも大きな最高燃焼圧力となり、800~900 サイクル以降で温態始動時に漸近する。
- 2) 最大騒音レベルはエンジン始動後に徐々に上昇し、温態始動時は 100~150 サイクル経過後、冷態始動時は 200~300 サイクル経過後に一定の値に漸近し、その漸近値に始動条件の差異はない。一方、平均騒音レベルは初期サイクルの期間は冷態始動時の方が大きな値となる。

- 3) シリンダヘッド部で計測したエンジン振動は、ピストンの運動方向の振動はエンジン始動時条件の違いによる差異は顕著には見られなかった。これは、振動成分がピストン運動（回転速度）に主に起因しており、燃焼性の違いが反映されなかったためと考えられる。
- 4) ピストン運動方向に鉛直な方向（＝水平方向）の振動は、その振動の振幅（最大加速度）に始動時条件の差異があり、冷態始動時の方（約±10[G]）が温態始動時（約±5[G]）に比べて倍の最大加速度となる。

末筆ながら、本分担研究の実験実施に協力をいただいた浅野一朗氏（海事科学研究技術部）および実験・報告書草稿作成に協力をいただいた中口拓也氏（海事科学研究科博士課程前期課程大学院生）に深く感謝の意を表します。また、振動・音響の計測についてのご助言を三輪 誠博士より賜りました。ここに記して感謝いたします。

3. 7 配管系における非破壊検査による熱現象の推定に関する研究

3. 7. 1 はじめに

津波の来襲を避けるために緊急避難出航する場合、通常に手順に比べてはるかに短い時間で主機関の暖機を完了しなければならない。その場合、機関室内のさまざまな配管に通常では考えられない大きな熱応力が発生する可能性がある。それを検知するためのひとつの指針として、配管の外表面温度が挙げられる。また、内部流体の流れの状態を知るためのより高度な量として、配管の内外表面の熱伝達率がある。これらの中で、配管の外表面温度については、昨今さまざまな分野に応用されている赤外線放射式温度計“サーモグラフィ”を用いて簡単に計測できる。

そこで本研究では、非接触で測定した配管の表面温度を用いて、温度に比べて高度な指針である“表面熱伝達率”を推定できる手法の確立を目標としている。前年度までの研究では、逆問題的手法に基づいて、サーモグラフィで測定した表面温度を入力として、同じ面の表面熱伝達率を推定する方法を提案した。その場合、有限要素解析に基づく離散化手法を用いるため、実際の構造物に適用した場合の表面熱伝達率の推定精度を正しく評価しておく必要がある。以上の点から、本年度は対象構造物の形状、加熱／放熱条件と構造物をモデリングする離散化のレベル、すなわち有限要素モデルの要素の細かさが解析精度に及ぼす影響を明らかにする。

3. 7. 2 表面熱伝達率の推定方法の妥当性の検証

従来の研究で使用されてきた表面熱伝達率の測定方法では、対象となる物体の表面温度に加えて、表面から物体内部に向かう温度勾配が必要となる。そのために、実験によって表面熱伝達率を測定するためには、対象となる物体にセンサーを埋め込むなど、何らかの加工を施さなければならない。それを避けるために“非破壊”で表面熱伝達率の測定を可能にすることが本研究の目的である。

提案した手法の妥当性の検証には、有限要素解析を用いた“数値実験”を用いる。検証の手順を以下に示す。

Step-1 対象構造物の形状を決定して、適当なメッシュパターンに分割する

Step-2 加熱境界、熱伝達境界、その他の境界条件を決定する。

Step-3 加熱面は熱流束境界とし、規定の熱流束を与える。

Step-4 提案する手法では熱伝達境界における「表面熱伝達率」の推定が目的であるが、数値実験ではその値を与えることによって温度分布を求める「順解析」を実施する。

Step-5 順解析により得られた熱伝達境界の表面温度、および加熱境界に対して設定した条件を入力として、提案した“逆解析”の解析手法を実施して「表面熱伝達率」を推定する。

Step-6 推定した表面熱伝達率と順解析で設定した表面熱伝達率を比較することにより、解析精度を評価する。

3. 7. 3 メッシュパターンと加熱／放熱条件の影響

前節で示した手順に基づいて、提案した手法の解析精度を評価する。本節では、図 1 に示した短辺が 200mm、長辺が 300mm の矩形のモデルを対象として、要素分割の細かさ、加熱条件と放熱条件が解析精度にどのように影響するか検討する。両側面は断熱境界である。要素分割は、表 1 に示したように三

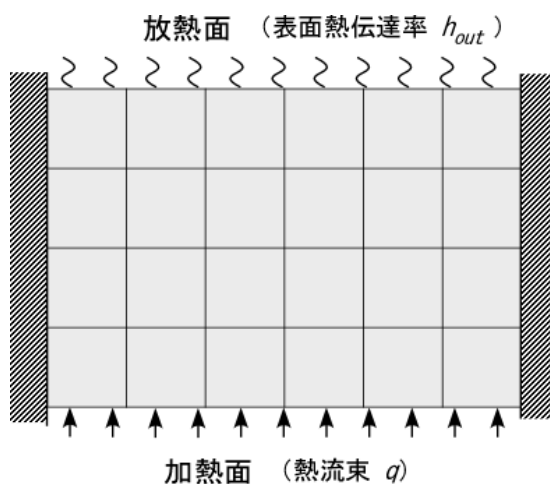


図1 矩形領域の解析モデル

表1 矩形モデルのメッシュパターン

モデル	要素数
4×6モデル	24
10×15モデル	150
20×30モデル	600

通りに変化させる．すなわち，図1はもっとも粗い4×6のメッシュパターンに対応している．熱に関する解析条件は以下の通りである．

初期温度：20℃，周囲温度：20℃，対象物の熱伝導率（ステンレス鋼に相当）：17.3 (W/mK)

内表面熱流束 q ：1～30 (W/m²)，外表面熱伝達率 h_{out} ：1～30 (W/m²K)

加熱面の熱流束は，表2に示したように等分布 ($q=20$ (W/m²)一定) と二種類の線形分布を設定する．同じく表面熱伝達率も，表3に示したように等分布 ($h_{out}=20$ (W/m²K)一定) と二種類の線形分布を設定する．

以上の境界条件を組み合わせると，表4に示した5通りの境界条件について解析を実施する．表面熱伝達率の解析精度は次式により評価する．

$$\text{解析精度 (\%)} = \frac{\text{表面熱伝達率の推定値} - \text{順解析における設定値}}{\text{順解析における設定値}}$$

表 2 熱流束の分布パターン

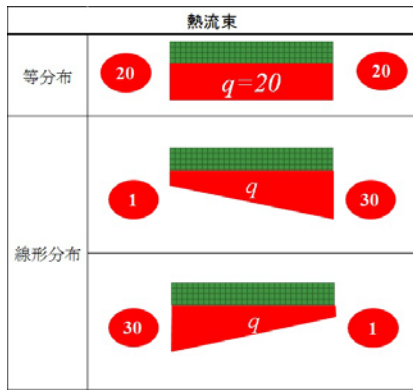


表 3 表面熱伝達率の分布パターン

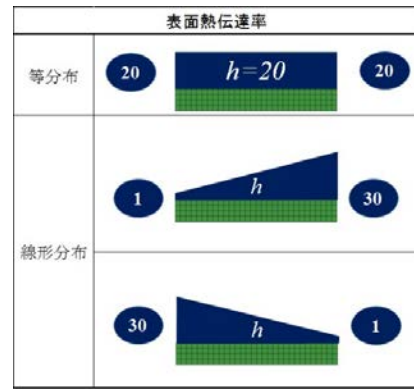


表 4 5通りの境界条件

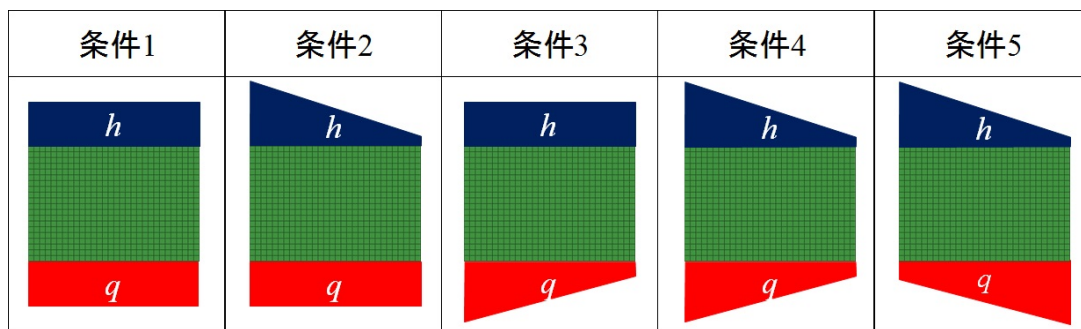


図 2(a),(b)は、条件 1 に対して 4×6 モデルと 20×30 モデルの結果を比較したものである。熱流束と表面熱伝達率が一樣の場合、粗いメッシュでも非常に高い精度が得られることがわかる。図 3(a),(b),(c)は、条件 5 の熱流束と表面熱伝達率が逆向きに線形分布の場合の結果である。この場合、もっとも粗いメッシュでやや誤差が大きいが、 10×15 モデルを使用すると誤差を 1%以内に抑えられることがわかる。

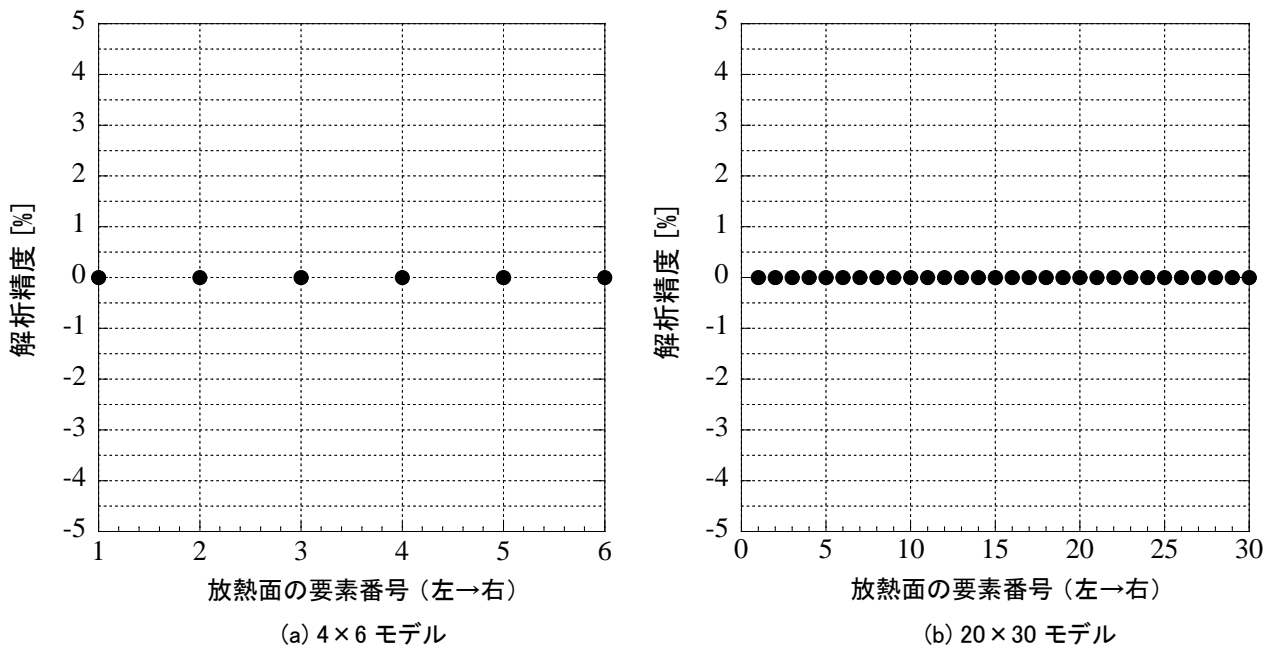


図 2 矩形モデルの解析精度 (条件 1)

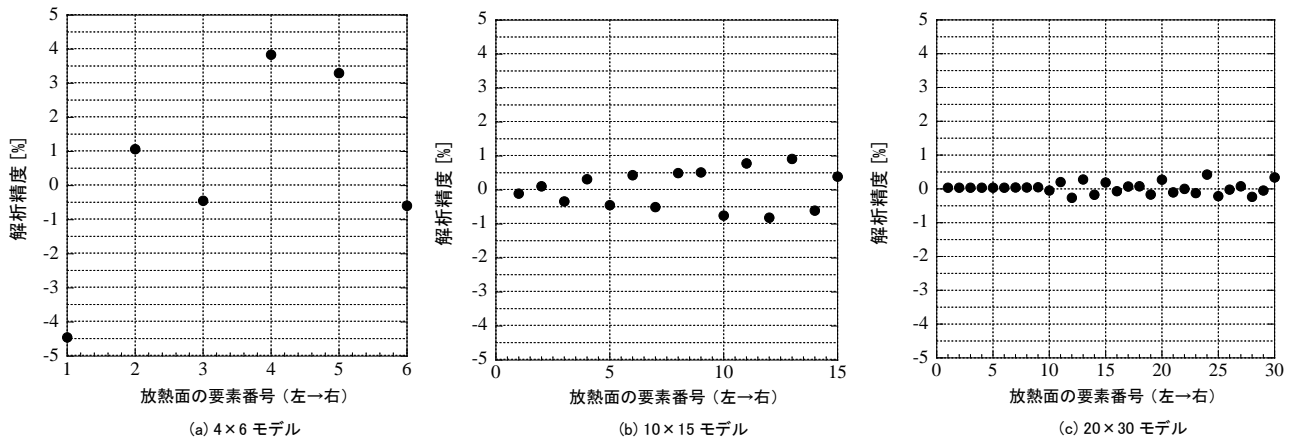


図3 矩形モデルの解析精度 (条件5)

表5は、すべてのメッシュパターンと境界条件を対象として、発生した最大誤差を比較したものである。セルに色を付けているのは誤差が1%を越えた場合である。この結果から、解析領域が矩形の場合、10×15モデル程度の分割を用いると、境界条件が大きく変化しても誤差が最大1.6%程度と実用的に十分な精度の解が得られることがわかる。

表5 5通りの境界条件に対する最大誤差の比較

最大誤差[%]					
	0.000	-0.827	-1.085	2.911	-4.450
	0.000	0.031	-0.280	1.619	0.918
	0.000	0.004	0.141	-0.600	0.272

3. 7. 4 段付き形状の構造物による検証

実際の構造物は必ずしも前節で扱ったような簡単な形状ではない。そこで本節では、とくに問題となる放熱面側の形状が解析精度に及ぼす影響を検討する。図4(a)は、図1に示した200mm×300mmのモデルに100mm×200mmの突起を付けたモデルであり、要素数、節点数はそれぞれ8と15である。上部の3つの面が熱伝達境界、下面が熱流束境界、側面は断熱境界である。図4(b)は、管フランジの基本的な形状を模擬して設定したL形モデルである。同じく上部の3つの面が熱伝達境界、下面が熱流束境

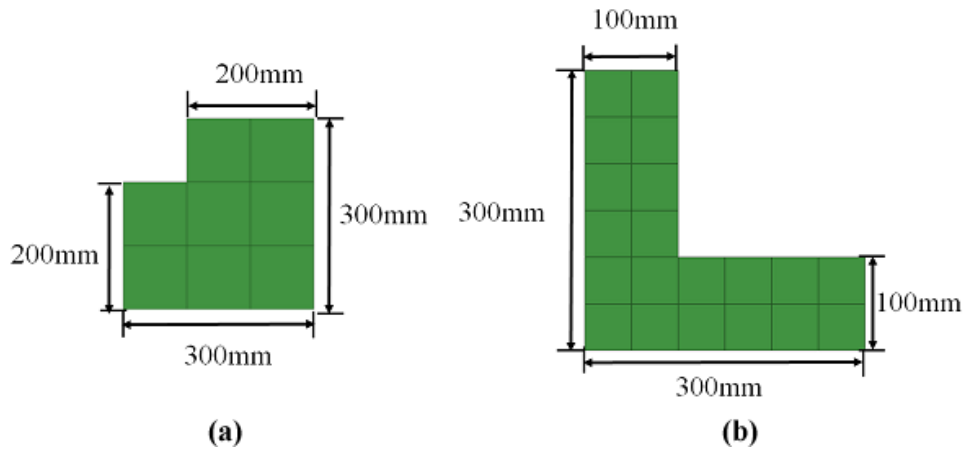


図4 段付きモデルとL型モデル

界，側面は断熱境界である。

解析では，表面熱流束 q を 1~30 (W/m²)，表面熱伝達率 h_{out} は 1~20 (W/m²K) の範囲で変化させる．具体的には，前節と同じく加熱面の熱流束，放熱面の表面熱伝達率は，等分布と線形分布を組み合わせる 5 通りを設定する．表 6 にそれぞれの解析において発生した最大誤差を示す．なお，表の上部に示した図は矩形モデルを用いて q と h_{out} の分布を示しているが，モデルの実際の形状は左端に示した通りである．

(1) 段付きモデルの場合

熱流束，表面熱伝達率がともに等分布の場合に誤差が最大となっている．このことは，解析精度は対象構造物の形状と熱に関する境界条件の組み合わせによって変化することを示している．

(2) L形モデルの場合

この場合も段付きモデルと同じく，熱流束と表面熱伝達率が等分布の場合に誤差が最大となっている．また，表 5 に示した矩形モデルで最大誤差が発生した条件 4 では，誤差は比較的小さくなっている．

表 6 段付きモデルとL型モデルに発生する最大誤差の比較

最大誤差[%]	条件1	条件2	条件3	条件4	条件5
	4.762	-1.513	-1.163	-0.57	0.596
	3.842	-1.088	-2.558	1.663	-2.5

3. 7. 5 まとめ

本年度は、前年度までに確立した解析手法を実行できるプログラムを作成した。そのプログラムを使用して、実構造物への応用を念頭に置いて、対象構造物の形状、加熱面の熱流束、放熱面における表面熱伝達率の分布を種々変化させて解析を実施し、有限要素法を用いた順解析による結果と比較することにより解析精度を評価した。以下に得られた結論をまとめている。

(1) 提案した手法の解析精度を評価するために、温度場の順解析で得られた対象部分の温度分布を入力として、その面に与えた表面熱伝達率の値と比較するという考え方を提案した。

(2) 矩形に代表される簡単な形状の構造物では、熱流束と表面熱伝達率の分布パターンによって精度が変化するものの、かなり粗いメッシュを使用しても実用的に十分な精度が得られることを確認した。

(3) 実構造物に近い段付き形状や L 形部分を持つ構造物では、表面熱伝達率の推定精度は対象物の形状だけでなく、熱的境界条件の組み合わせによっても変化することを示した。

以上の結果から、本研究で提案した非破壊・非接触による表面熱伝達率の推定方法は、実際に対象となる構造物の形状、ならびに熱的境界条件が変化する場合についても、実用的に十分な精度を有しているといえる。

本研究で提案した逆問題の解析手法の基盤となっている有限要素法は、現在モノづくりのさまざまな分野で使用されており、線形の解析であればエクセル上で実行可能なプログラムも発表されている。またサーモグラフィは、本来の目的である温度分布の測定だけでなく、構造物の欠陥の同定やアパレル分野でも広く使用されている。以上の状況から、サーモグラフィの出力をノートパソコンに取り込み、そのデータを入力として、本研究で提案した解析手法を適用することにより、対象となる構造物表面の表面熱伝達率を短時間で推定できるシステムの構築は可能と考えられる。

4. 総括

本事業は、大規模な地震により巨大な津波が発生した場合、船舶が安全に港外に避難するための具体的な手法の提案を目的としている。

第一点は、現時点において各船会社単位で実施されている対策について、アンケートにより情報を収集し、可能な範囲でその結果を公表することにより、巨大津波に対する高度な安全対策を構築するための一助となることを目的としている。本事業は3年計画で実施しており、アンケートは初年度にあたる一昨年に実施しているので、結果については2015年度の報告書をご覧ください。

第二点として、研究面からのアプローチにより本事業の目的の達成を目指している。具体的には7つの研究テーマを設定し、それぞれの分野を専門とする研究者が担当することにより、緊急出航に対する有効な知見、具体的な手段を提供することができたといえる。

以下に、本事業計画における研究成果として、7つのテーマの結果を短くまとめ、続いて3年間の成果を総括する。

4. 1 本事業計画における研究成果の概要

(1) 緊急出航時の機関プラントの状態把握に関する研究

本研究では津波による緊急出航を想定して、主機関に発生する可能性がある問題を暖機の観点から研究している。具体的には、機関プラントの状態について、暖機開始から主機関始動に至るまで、緊急出航時の状態を数値評価する手法を検討した。評価の対象は、手法に実用的な意味を持たせるために、本研究科が所有する練習船深江丸としている。代表的な評価指標は、機関プラントの状態をもっとも正確に把握できる「主機冷却清水温度」と「主機潤滑油温度」としており、確率的な手法を導入することにより、暖機完了の目安時間の推定方法について具体的な指針を与えている。

(2) 船舶運航シミュレータを用いた緊急出航操作の検討

近年、船舶を効率的かつ安全に運航するために、さまざまなシミュレータが使用されている。本研究では、研究科が所有する船舶運航シミュレータが持つ機能のうち、機関シミュレータの機能を独立して使用することにより、実際の機関プラントの挙動を再現し、津波の発生を想定して、プラントの時系列変化に対する操作の検討を可能にすることを目標としている。具体的には、2サイクル大型低速ディーゼル機関を主機関とするコンテナ船の機関プラントを対象としている。そこで、暖機時の機関状態のシミュレーションを検討した結果、主機関の状態を表現する代表的な項目に関して、機関制御コンソールにおいて部分的な再現が可能となった。以上のように、暖機作業における機関状態をシミュレーションする手法が確立できたことにより、各時間における機関状態を再現し、変化の傾向の分析に貢献することも期待できる。

(3) 津波を想定した急な潮流状況における操船上の計画・判断・行動に関する研究

本研究では、津波の発生を想定して、操船シミュレータを用いて初期係留位置、船舶の種類を決め、もっとも厳しい状況である「自力離棧」を対象として、緊急出航に伴うさまざまな操船上の問題を検討した。そこで、これまで研究例のない中小型船舶の自力離棧を検討するために、580TEUコンテナ船を試供船とし、自力離棧の可能性について、六甲アイランドを対象として操船シミュレータを用いた系統的な実験を行った。具体的には、風のみがある場合、続いて津波のみが問題となる場合、最後に風と津波の両方

が問題となる場合について検討している。とくに津波については、潮位の変化と到達時間について詳細に検討しており、上記の成果と合わせて、津波発生時の中小型船舶の自力離棧に対する指針を提供するための基礎を確立した。

(4) 船舶運航シミュレータを用いた緊急出航操作の検討

本研究では、船舶運航シミュレータを用いることにより、中小型船舶の自力出航における操船方法について検討している。対象とした船舶は、580TEU コンテナ船で1軸1舵、推力6.2トンのバウスラスターを装備している。具体的には、係留索の扱い、主機、バウスラスターおよび舵の設定を決め、岸壁から船幅の2倍の距離だけ離れるまでを対象として検討している。津波による潮流については1ノットから5ノットまで変化させ、風については風速および風向を種々変化させている。以上のシミュレータ実験の結果から、津波の影響、風の影響、津波と風の複合作用について詳細に検討した。さらにまとめとして、津波に遭遇したとき、操船者として理解しておくべき知識について、具体的な数値や例を挙げて解説しており、今後起こりうる津波発生時の中小型船舶の緊急出航において、操船者が取るべき行動について重要な指針を与えている。

(5) 緊急暖機時に発生する機関プラントの過渡的熱応力に関する研究

機関室をはじめとして、船舶には高温となる部分が多数存在する。一方、近年のLNGの使用量の増加に代表されるように、船舶における低温流体に関するトラブルが大きな問題となっている。具体的には、低温流体の移送時に配管から漏れが発生するというトラブルが報告されている。そこで、低温流体の移送時に津波が発生するという、最悪のケースに対する対処方法を検討しておく必要がある。本研究では、低温流体が流れる配管の管フランジの挙動を数値解析により体系的に解析している。具体的な成果として、配管中に流体が存在しない状態から、低温流体の移送を開始して間もない頃、管フランジのシール性能を支配するボルト軸力をもっとも低下することを明らかにしている。また、移送作業が完了に近づいた配管内の水面が低下する場合との比較も行っている。以上の研究成果より、低温流体移送時に津波が発生した場合の対策について一つの具体的な指針を提供している。

(6) エンジン始動時の過渡的に変化する特性に関する研究

本研究では、津波による緊急出航時にもっとも厳しい状態に置かれる、ディーゼル主機関の始動時とその後過渡的に変化するエンジン特性を明らかにすることを目的としている。とくに機関を始動する際に、冷間状態と暖機状態の違いで過渡的変化傾向がどのように異なるかの知見を得る目的で実験解析を行っている。具体的な成果として、機関の始動から排気温度一定の定常状態になるまでに要する時間、燃料消費量、排気エミッションの時間変化について有効な知見を提供している。実験は大型4ストローク機関と大型2ストローク機関を用いて実施されており、単気筒機関による実験であるが、得られた結果の実用的な意味は大きいと考えられる。さらに、緊急出航に対応した機関始動時に発生する振動の問題についても、実機を用いた実験により検討している。以上の結果は、緊急出航時にディーゼル主機関に起こりうる問題への対処方法を体系化する上で、有効な結果を提供したといえる。

(7) 配管系における非破壊検査による熱現象の推定に関する研究

津波発生時に緊急出航する場合、短い時間で主機関の暖機を完了しなければならない。その場合、機関室内のさまざまな配管に通常では考えられない大きな熱応力が発生する可能性がある。配管の内外表面の“表面熱伝達率”はそれを検知するために有効な量である。本研究では、サーモグラフィにより測定できる表面温度を入力として、表面熱伝達率を推定する方法を提案している。3年間の研究成果として、円

筒形状の配管部分だけでなく、強度上問題となることが多い管フランジ締結部分など、形状が複雑な構造物の表面熱伝達率の推定が可能な手法を確立している。本手法は、サーモグラフィによる測定温度をパソコンに取り込み、そのデータを入力として提案した解析手法をエクセル等を使って実行することにより、短時間で配管の状態を知ることができるツールを提供する点で、緊急出航時の熱応力問題に関する安全管理に対して、実用性が高い成果を提供している。

4. 2 まとめ

「緊急出航時に想定される問題解決に向けた研究」という主題のもとに実施した7つの研究テーマは、前節で紹介したように、各分野において十分な成果を上げたと考えられる。一方、初年度実施した船会社に対して実施したアンケート結果からわかるように、津波発生時の対処方法は複数の船会社で内容が共通しているもの、特定の船会社のみが指針を定めている項目など、対処方法はさまざまである。本研究成果が公開されることにより、船舶運航に関連する関連各社や関係機関が協力して、安全かつ実用性の高い「津波発生時の緊急避難出航」に対するマニュアルとしてまとめられることを期待したい。