

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29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 深江丸の主機関始動	5
3. 1. 3 深江丸の暖機	8
3. 1. 4 まとめ	9
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	10
3. 2. 1 機関プラントシミュレータ	10
3. 2. 2 機関プラントシミュレータでの暖機 シミュレーションの検討	12
3. 2. 3 まとめ	14
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	15
3. 3. 1 検討係留地	15
3. 3. 2 検討対象船舶	15
3. 3. 3 津波の条件設定	15
3. 3. 4 次年度への課題	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	19
3. 4. 1 緊急出航の検討	19
3. 4. 2 実験方法	19
3. 4. 3 実験結果	19
3. 4. 4 まとめ	21
3. 4. 5 次年度への課題	21
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	22
3. 5. 1 はじめに	22
3. 5. 2 二次元非定常温度場解析による配管の熱応力評価	22
3. 5. 3 高温流体が流れる場合に発生する熱応力	23
3. 5. 4 低温流体が流れる場合に発生する熱応力	24
3. 5. 5 解析モデルの精度の検討	28
3. 5. 6 まとめ	28

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	30
3. 6. 1	はじめに	30
3. 6. 2	実験装置および方法	30
3. 6. 3	実験結果および考察	34
3. 6. 4	まとめ	38
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	39
3. 7. 1	はじめに	39
3. 7. 2	逆問題的手法で表面熱伝達率を求めるための二次元定常問題の 有限要素解析の定式化	39
3. 7. 3	簡単な形状の領域を対象とした逆問題の手法の定式化	40
3. 7. 4	逆問題として表面熱伝達率を求める手順	44
3. 7. 5	まとめ	45
4.	総括	46
4. 1	各研究テーマの進捗状況	46
4. 2	最終年度に向けた各研究テーマの課題	46

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）

浏真輝（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

斎藤威志（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

緊急出航時に機関プラントにかかる負担を危惧する事は、主機関起動に伴って運転を必要とする補機の駆動による船内の電力需要の増加に加えて、プラントに投入される熱量急増による機器構造部材の局部的な熱膨張に起因する望まない事象が誘引されることを、船舶機関士は経験的に理解している。電力需要の増加に対する発電機原動機の追従が良好であれば、過渡的な需要変動に対しても、応答はスムーズであると思われる。冷態から始動して間もない発電機原動機にあつては、燃焼状態が必ずしも安定しているとは、いいきれない。ディーゼル主機関も同様に考える。

このような背景から、本章では、本学附属練習船深江丸（以下、深江丸）の主機関起動前における機関プラント状態に着目し、緊急出航時の機関プラント状態の把握を目的として、計測データの分析を図る。

3. 1. 1 深江丸の機関プラント

深江丸の主機関は燃料油に A 重油を使用している。機関の冷却水システムは、海水を冷却源にした清水冷却器や潤滑油冷却器など海水の間接冷却による。主機関ならびに発電機原動機はいずれもトランクピストン型ディーゼル機関であるので、潤滑油はシステム油の一部がシリンダ油を兼ねるように配管が敷設される。以下、深江丸の機関プラント状態を把握する為に、機関室における冷却清水と軸受潤滑油の系統、及び構造の概要を記す。

(1) 冷却清水

深江丸の機関室において、主機冷却清水ポンプは、機関に直結して装備され、機関運転により駆動し、機関停止中は作動できない。そのため機関停止中に温態（暖機）保持することを目的として、主機関冷却清水系統に発電機原動機の冷却清水の一部が連絡管経路を介して、流れ入るようにしている。

発電機原動機からの冷却清水の連絡経路には、逆止め弁を配置して主機関運転時、若しくは電動機駆動のスタンバイ冷却水ポンプの運転中に、発電機電動機側へ主機関から冷却清水が逆流するのを防ぐ仕組みが施されている。出入港の機関スタンバイ状態にあつては、発電機原動機は 2 台並行運転の状態にて、電力供給の体制を構築する。通常、停泊中や航海中にあつては、2 台の発電機電動機のうち 1 台の運転により船内電力の需要を賄っている。主機関へ流れ込んだ冷却清水は、機関室上部に設置した冷却清水膨張タンクを介して、発電機原動機の機関直結駆動の冷却清水ポンプ入口へと戻る。

冷却清水膨張タンクでは、主機関と発電機原動機の 2 系統の冷却清水が混合する。主機関停止中は発電機原動機から温まった冷却清水が同タンクへ入り込む。

主機関へ供給される冷却清水は機関入口と各シリンダ出口にて温度検出され、データ収集される。深江丸データロガーでは機関入口温度 30 度以下、機関出口温度 85 度以上にて警報を発する。なお、冷却清水冷却器入口には温度調節用 3 方弁を設置して、機関出口冷却清水の温度が 75 度以下になるように冷却器へ通過させる冷却清水量を制御する。

(2) 軸受潤滑油

深江丸の主機関は機関による直結駆動の潤滑油ポンプの他に、機関停止時に電動機により駆動するスタンバイ潤滑油ポンプを機関室内に備えている。いずれの潤滑油ポンプも主機関下部の潤滑油サンプタンクより潤滑油を汲み上げ、潤滑油冷却器を介して主機関へ送る。発電機原動機もそれぞれに機関直結駆動の潤滑油ポンプを装備している。またそれらと別に潤滑油プライミングポンプが機関室内に備えられている。

主機関軸受系統へ供給される潤滑油は冷却器出口にて 55 度になるように、冷却器出口に設置した温度調節弁により制御される。主機関入口において油温 20 度以下、油温 65 度以上にて警報を発する。

なお、主機関軸受潤滑油圧力が 0.2MPa 以下の場合には、安全のために危急停止装置が発動し、燃料油の供給を遮断して、主機関を停止させる仕組みとなっている。潤滑油圧力はスタートインターロックに含まれているため、主機関の緊急始動時は潤滑油圧力の確立が急務となる。

3. 1. 2 深江丸の主機関始動

深江丸では、主機関ならびに 2 台の発電機原動機、そのほか補機器について、温度・圧力・タンク液面等、に設置されたセンサー群より 305 項目の計測データが抽出され、データロガーを介して 3 秒ごとに外部メモリへ記録される。機関制御コンソールとは別にデータ管理（データ保存用 PC へ記録）されるため、学内係留時など、機関制御システムが起動していない状態にあっても、記録データの抽出が可能である。次に、2016 年 10 月、11 月の機関運転データに基づき、主機関始動にかかる機関プラントの変動について考察する。

(1) 冷却清水温度

深江丸では主機関始動の 3 時間前から発電機原動機を起動し、電源の供給源を陸上電源から船内電源に切り替える。前述のように、発電機原動機の冷却清水の一部は分岐して主機関へ導かれ、シリンダ水衣部からシリンダヘッドへ流れ、暖機の熱源とする。発電機原動機の運転に伴って供給された冷却清水の熱量は、主機関冷却清水の温度上昇に現れる。発電機原動機の始動前の冷却清水温度は、ほぼ機関室温度と同じ温度になる。(24.2 度@2016.10.29) 一方で、前日に主機関を起動している場合には、一晩経過した状態で、余熱により冷却清水温度は高めに保たれる。また、主機関が停止していても、継続して船内給電状態にある場合には、発電機原動機から冷却清水が流入することにより、主機関の冷却清水は、温態状態が維持される。(51.4 度@2016.10.30) このように、発電機原動機による暖機状態が維持される場合は、低温時の警報設定値（機関入口温度 30 度）をクリアして、常時、起動が可能になる。また前日に主機関を起動している場合も、温態状態に準じた主機関状態にあり、警報点をクリアするまでに必要とする暖機時間は短くなる。

主機冷却清水温度は、前日に主機関を始動している場合には、暖機完了（温態状態）時の約 50 度に対する温度差は 20 度程度に抑えられるが、冬季冷態時に氷点下ともなれば、その差を 50 度にも広げ兼ねない。シリンダ冷却水が通水される機関内部の流路には金属部材の接合部に水密のためのラバーガスケットが挿入されていることから、部材同士の不同膨張による隙間増大により漏水することは少ないと考え

るが、緊急時は十分な時間を確保することが難しく、温度勾配は急にならざるを得ないと推察する。

(2) 軸受潤滑油温度

軸受潤滑油温度も冷態時には、冷却清水と同様に、周辺温度と同程度まで冷えている。潤滑油サンプタンクが船底に接して配置されることから、貯蔵している潤滑油は、機関室温度よりも海水温度(22.8度@2016.10.29)に近い温度へ移行する。大型船用機関プラントでは、潤滑油の加熱には潤滑油清浄機を主機関主潤滑油系統とは別の経路に設け、側流で清浄する形態にて加熱循環させる。さらに、加熱時間の短縮を図る際には、サンプタンク内に敷設したタンク加熱を目的とする蒸気配管へ通汽して、直接に温度を上昇させる。

深江丸においても、主機関軸受潤滑油の側流清浄を実施している。深江丸では機関室内に補助ボイラを装備していない為、蒸気を熱源とせず、潤滑油の加熱器には電気式が採用されている。

深江丸では冷態状態にある時、主機関入口潤滑油温度(24.5度@2016.10.29)は機関室温度(23.5度@2016.10.29)と同程度となる。前日に主機関を使用した場合であっても、機関入口潤滑油温度は機関室と同程度まで温度が低下している。(27.6度@2016.10.30) 機関入口温度の検出は配管に敷設した温度センサーによるものであり、配管内の潤滑油の油量が少ない事から、放熱が進む結果として、機関室温度と同等になったと推察する。

(3) 主機関始動時の燃料油消費量(季節による特徴)

深江丸は機関室に燃料油澄ましタンク(FO SETT TANK)と燃料油常用タンク(FO SERVICE TANK)を備え置き、澄ましタンクの燃料油は燃料油清浄機により遠心分離にて清浄されて、常用タンクへ置かれる。そして燃料油は、常用タンクから主機関ならびに発電機原動機へ導かれる。それぞれの経路途中には流量計を装備し、毎時流量の計測値がデータロガーへ送られる。深江丸の主機関ならびに発電機原動機はいずれもA重油を使用することから、燃料油経路に加熱器は設けられていない。

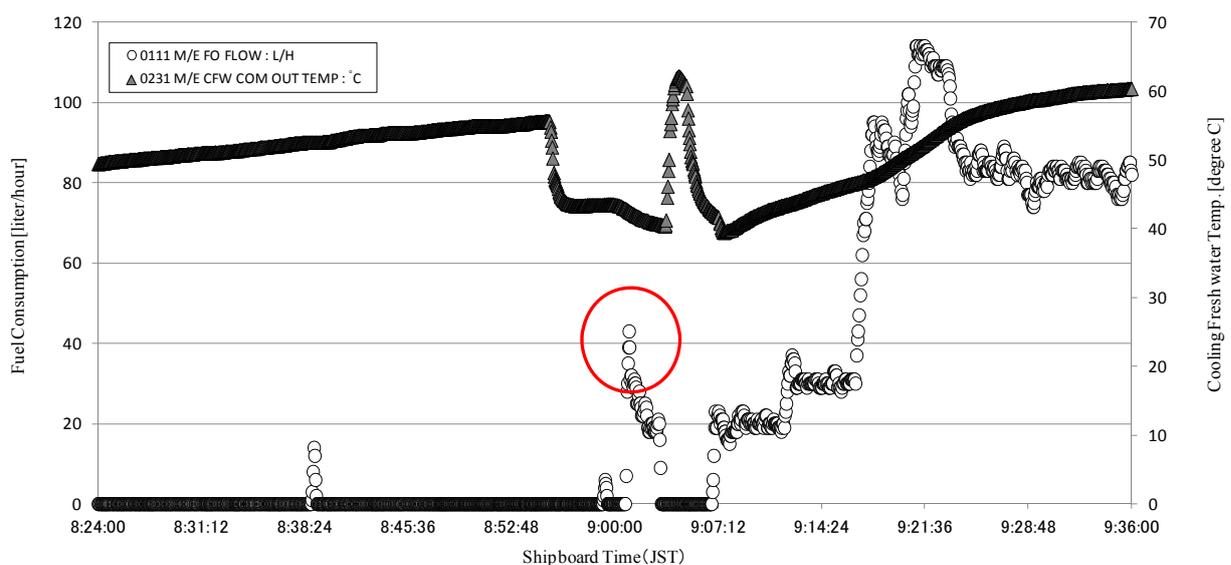


図1 冷態始動時の燃料消費 (2016.10.29)

通常負荷状態(@670rpm)において、主機関では毎時 170 リットル程度の燃料消費がある。運転中は调速機により設定された機関回転速度を維持するように、燃料油投入量が加減される。

ディーゼル機関ではシリンダ内に取り込まれた空気の圧縮熱により、噴射された燃料が着火することから、冷態時の着火性は必ずしも良いとは言えず、温態時である方が、着火性は良いとされる。调速機により主機関始動直後のアイドル状態の機関設定回転速度は 500rpm である。主機関起動時の燃料油消費量を比較すると次のようである。毎時 43-22 リットル(@2016. 10. 29)、毎時 19-15 リットル(@2016. 10. 30)、毎時 20-15 リットル(@2016. 11. 08)、毎時 23-18 リットル(@2016. 11. 09)、毎時 25-23 リットル(@2017. 02. 06)

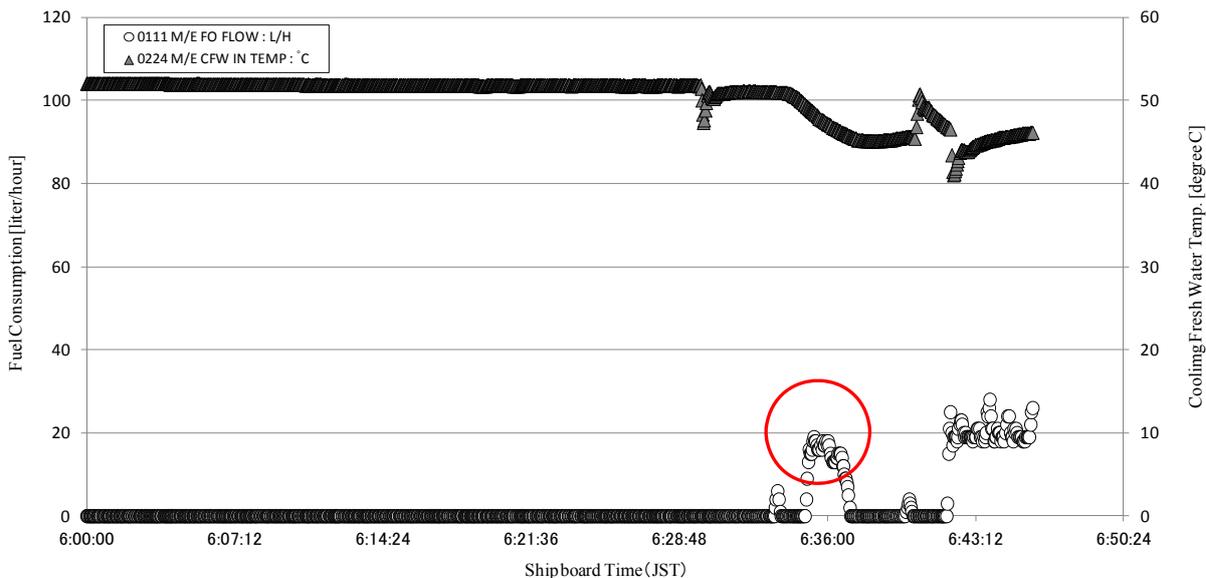


図2 温態始動時の燃料消費 (2016.10.30)

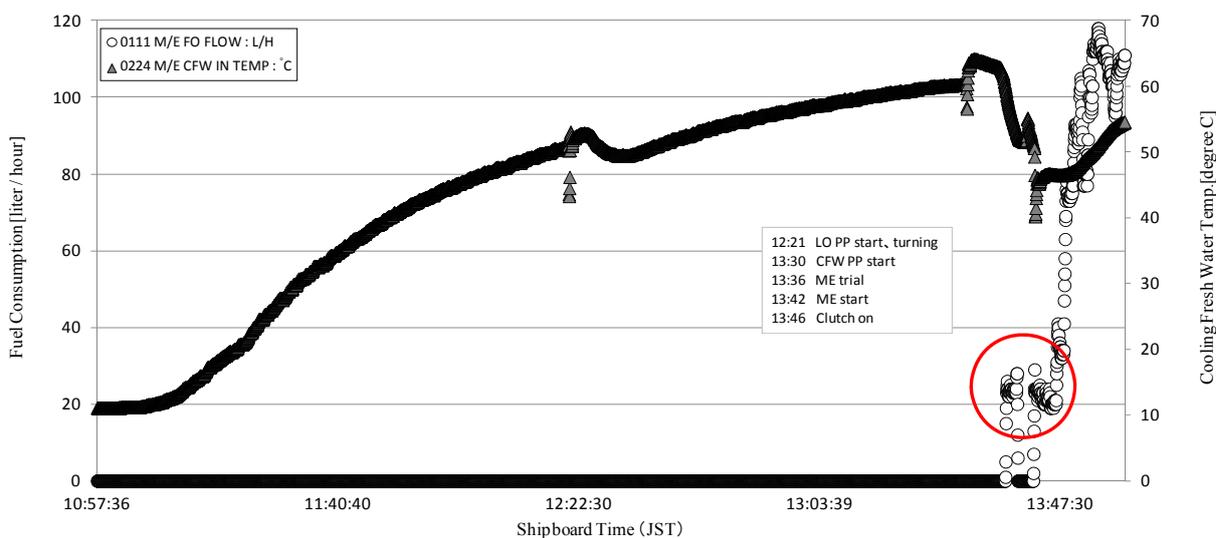


図3 冷態始動時の燃料消費 (2017.02.06)

2016. 10. 29 の毎時 43 リットルの燃料油消費量は瞬時値であるが、始動から 20 秒程度は毎時 30 リットルを越える消費量増加の過渡的な消費変動を確認する事ができる。2016. 10. 30 の記録は、前日より航海に

あることから、温態状態の機関始動の特徴といえる。また 2017.02.06 は安定して毎時 25 リットル程度の燃料消費があり、温態時と比較して、燃料消費量の増加する様子が伺える。

3. 1. 3 深江丸の暖機

実際の運航場面において、深江丸では、主に火曜日から金曜日の間で、学内の授業や、学外からの利用要請に応じている。その都合から、主機関の始動準備に取り掛かるタイミングは、午前の出航であれば、前日より発電機原動機を起動して、主機関へ発電機原動機の冷却清水を循環させて、温度上昇を図る。午後の出航であれば、当日の午前より発電機原動機を起動して、出航準備を進める。いずれの出航時刻の場合にも、主機関は冷態状態から暖機を開始することになる。

航海の途中に寄港した等の場合には、岸壁係留中も、継続して船内電源による電力供給体制となる事から、主機関は停止後も、継続して、発電機原動機から冷却清水が循環される。この場合には、主機関は温態を維持し、機関始動のために、主機関冷却水の温度上昇などを待たず、機関始動に取り掛かる。

なお、基地港である大学内の係留池では、機関始動準備の際、冷態時からの暖機となるため、発電機原動機を 2 台並行運転にて、使用する。航海途中の寄港先では、発電機原動機は 1 台のみ運転にて使用する。基本的に出入港時の”機関用意(Stand-by Engine)”には、発電機原動機を 2 台並行運転とし、それ以外では、1 台のみの運転による。

(1) 始動準備における冷却水温度の変化

深江丸の主機関にて発電機原動機から接続する冷却清水配管は、本来の冷却水入口管とは異なる箇所に接続する。それは、シリンダからの冷却水出口に近く、機関入口からは遠い。また主機関冷却水の予備の電動ポンプについても、主機関への入口配管は異なる。これらの配管の敷設事情により、後述する温度変化の現象を理解する事ができる。

深江丸では、暖機作業は冷態状態にある主機関に発電機原動機から温かい冷却清水が入り込む事から始まる。主機関が停止し、主機関の冷却清水系統の圧力よりも発電機原動機の冷却清水圧力が勝っていれば、発電機原動機側から冷却清水が流れ込み、主機関の暖機が始まる。前述の通り、影響は主機関冷却清水入口温度の他に、シリンダ毎の冷却清水出口温度、過給機冷却清水出口温度の上昇に見る事ができる。深江丸の暖機の特徴として、発電機原動機を 2 台並行に運転する際には、主機関冷却水出口温度は 70℃ 近くまで上昇する。しかし、発電機原動機 1 台の単独運転では、主機関冷却水出口温度は、60℃ 付近で停滞している。発電機原動機の運転台数は、深江丸の運航状況により左右される。

(2) 主機関冷却水の供給圧力の変化

深江丸の主機関の冷却水供給の形態は、主機関停止中における発電機原動機運転に伴う暖機状態、また主機関停止中の電動機駆動による予備冷却清水ポンプによる外部からの供給状態、そして、主機関運転中に主軸に連結する伝達ギアを介した回転力駆動による直結冷却清水ポンプからの供給状態の 3 パターンによる。①主機関直結ポンプによる供給圧力は高く、経路が短いことから、配管内における圧力損失も小さいと推察される。次いで、②電動機駆動による予備冷却清水ポンプによる供給圧力が高く、③発電機原動機の直結ポンプからの供給圧力は、経路の管路抵抗も加わり、主機関に付属するポンプ類に比較して、低くなる。

(3) 暖機操作における冷却清水条件の変化（温度、圧力）

主機関冷却水入口温度ならびに各シリンダ出口温度は、それぞれ冷態時（11℃）から時間経過とともに上昇する。開始時、各清水温度は、その時の機関室温度、海水温度に従った温度から上昇を始めるが、上昇速度は異なり、時間経過とともに両者の温度差が広がる。暖機開始から、徐々に温度差に広がりを見せた両者は、配管経路上、繋がっているものの、実質の流れは、未だ、連続しないため、暖まりやすい部分とそうでない部分とで、差異を大きくしている。主機関始動により、冷却清水の機関入口と出口は連続した流れを形成し、それらの温度差は小さくなる。主機関停止中であっても、ターニングによるクランクの移動や潤滑油の通油、電動駆動の予備冷却水ポンプの始動、また圧縮空気挿入によるエアランニングによる極短時間の直結ポンプの運転等により、機関内部の冷却清水に乱れを生じさせ、センサー周辺の清水温度に変化を生じさせる。暖機時間を十分に確保できれば、例えば、発電機原動機から供給される温かい冷却清水により、機関各部の部材へ次第に熱が伝播し、温態状態に近づくかと推察する。直結ポンプや予備冷却水ポンプ等に接続する配管経路に停滞して温度が十分に上昇していない冷却水も、温められた部材に接触して熱を帯び、比較的短時間のうちに温度が上昇すると考える。

図中の赤枠部分は、主機関ターニングやスタンバイ冷却水ポンプの始動、機関始動による、機関内部の冷却清水の乱れによる清水温度の変化部分を示している。機関始動後は、系統内の冷却清水が機関へ順次流れ込み、センサーでの検出温度は短時間に低下する。

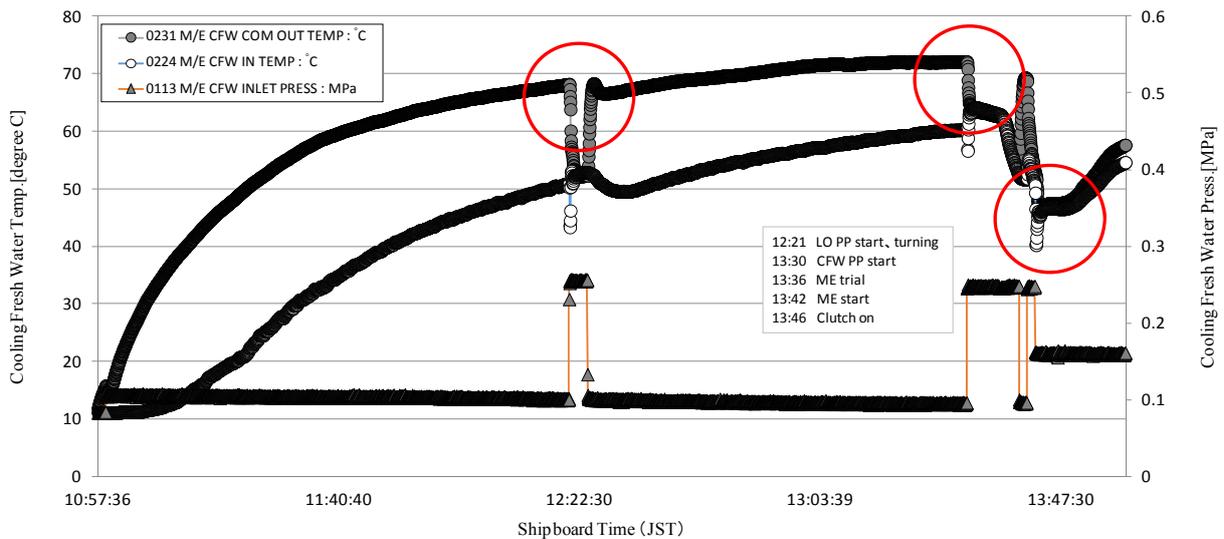


図4 暖機時の冷却清水(2017.02.06)

3. 1. 4 まとめ

深江丸主機関について、冷態始動時、温態始動時の状態を把握するため、考察を進めてきた。機関プラントの異なる状態の実測データに基づき、データ中の変動と主機関の始動に向けた機関部作業とを紐付け、変動理由や影響を考察した。主機関冷却清水系統や潤滑油系統は、直接に暖機操作に係る部分であるため、主機関へ与える影響も大きいと推察する。冷態状態からの機関プラント始動にあつては、通常の高江丸機関部の定める暖機時間を確保しても、機関を均一に十分に温める事は難しいことが分かった。

津波発生時の緊急出航を迫られる状態にあつては、主機関は起動直後に、速やかに、津波回避が可能な海域へ移動しなければならず、アイドル運転も十分になく、負荷運転を強いられる。引き続き、実船データの分析を進め、緊急出航時の機関プラント状態の把握に努めたいと考える。

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

本学に導入されている船舶運航シミュレータは、全長 300m、主機関出力 43,000kW の実在する大型コンテナ船をモデルとしている。システムは操船シミュレータと船用機関プラントシミュレータ（以降、機関プラントシミュレータ）から構成される。2010 年 3 月に導入され、演習授業や卒業研究など、授業や研究室単位で活用が進んでいる。

3. 2. 1 機関プラントシミュレータ

緊急暖機時の機関室状態シミュレーションの実現に向けて、昨年度の取り組みでは、以下に記す現状シミュレータの活用における課題を挙げた。

-課題①マウスクリックによる機器運転操作

ポンプの発停操作について、画面に表示されたボタン操作にて実施する事から、実際の運転操作に伴う現実感との間に差異を生じる。同様に、諸弁の開閉操作も開閉ボタンのマウスクリックによる事から、所要時間の再現がなされない。これらは緊急時の切迫した状況の構築を困難にするばかりでなく、現実感から逸脱した、いわゆるゲーム感覚での機械操作を誘引しかねない。時短操作を求めるような誤った理解を想起させて、知覚的な負担を喪失させる危険がある。

-課題②機関プラントの違い

本学の機関プラントシミュレータの機関室が大型コンテナ船の機関室を表現した物である事から、例えば、中型の内航貨物船やタグボートのような小型船等とは、主機関の出力規模や機関プラントの形式などが異なり、個々の船舶に対する状態にこれを用いて詳細に表現するには、システムプログラムの改修などに大きな経済的負担を伴う。

現在、多くの機関室シミュレータでは、フルミッションのエンジンコンソールに、2~3 枚の大型液晶画面を用いて表現した機関室イメージイラストを組み合わせ、機関室シミュレータ（Engine Room Simulator: ERS）を構成している。一部の ERS では、実際にバルブ模型を諸弁の開閉による操作信号の入力デバイスとしてシミュレータと連結させ、課題①の解決を図る工夫をしている。また大型 2 サイクル機関や中速 4 サイクル機関、電気推進機関など、複数種類の主機関プログラムを搭載し、それに応じた機関プラントのプログラムを 1 つの ERS に搭載する装置も、ある ERS メーカーはリリースしている。残念ながら、いずれも、既存の ERS への追加搭載には、経済的な負担が大きいことからハードルが高い。

(1) 機関プラントシミュレータのデータベース

機関プラントシミュレータでは、5 台の PC を LAN ケーブルで接続し、情報の送受信を繰り返している。インストラクター PC にて、機関運転状態を反映した運転データを算出し、機関制御コンソール PC、3 台の機関室 PC へデータを送る。各種 PC へは温度や圧力、タンク液面レベルなどのアナログ値が送られる。また、機関制御コンソール PC、3 台の機関室 PC からは機関制御コンソール上のスイッチやレバー、機関室ディスプレイでのボタンなどを操作した際、発停ならびに開閉操作により状態を示すバイナリー値が

インストラクターPCへ送信される。なお、インストラクターPCにおいても、コントロール画面にて、機関室同様の機器操作が行え、その際には、機関室PCへ操作に応じたバイナリー信号が送信される。機関プラントシミュレータの機関室機器には、ポンプ類72件、タンク類26件、熱交換器13件、補機類が装備されている。それらの運転-停止のバイナリー値などがインストラクターPCへ送られる。PCでは保存データとして、アナログ値224件、バイナリー値432件が1秒毎に記録される。なお、機関室PCにて表現している配管装置に装備しているバルブは589個あり、これらのバルブ開閉状態もバイナリー値にて、インストラクターPCへ送られる。インストラクターPCからも、シミュレータ装置へデータ反映が可能であり、インストラクターPCにて、機関室機器の始動停止、バルブの開閉操作が可能であり、それらのデータは機関室PCとの間で送受信される。

(2) 機関室における設置センサー

本学附属練習船「深江丸」の機関室には、主機関を始め、2台のディーゼル発電機原動機、軸発電機原動機、油清浄機、ポンプ類、そして、軸系装置には可変ピッチプロペラ駆動油圧装置など、装備されている。それらには、温度や圧力、タンク類には液面検出のセンサー類が設置される。検出された各種データは、機関制御コンソールに装備されたエンジンモニターへ送られる。現在、エンジンコンソールに収集された検出情報は、情報処理室にてデータ記録されている。データは約2~3秒のサンプリング周期にて記録される。現時点では304件の運転データが記録されている。

(3) 機関プラントシミュレータの記録機能

本学の機関プラントシミュレータでは、教育や研究利用を目的として、シミュレーション状態を記録する機能が搭載されている。以下の記録再生機能がある。

-Playback 機能

機関プラントシミュレータにて送受信されるデータについて、インストラクターPCでは1秒ごとに、機関プラント状態のそれらが記録される。PC画面を1秒ごとに snapshot しているかのようである。機関室機器の状態の瞬時値に記録し、データベース保存される。

-Replay 機能

Replay 機能は前述の Playback 機能と同様に、PC画面の snap-shot 記録が連続するような記録機能である。1秒毎に機関室機器の状態をインストラクターPCへ連続記録していく。記録されたデータベースファイルは、連続再生できるようにになっている。記録データは実時間で再生されるため、10秒間のデータの再生には10秒間を要する。再生設定の項目には、再生ステップの選択があり、1~999秒

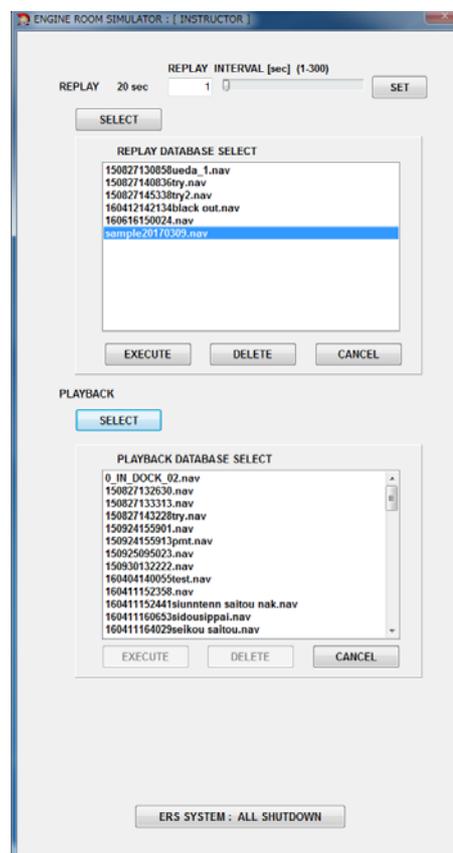


図 3.2-1 コントロールウインドウ画面

あるため、そのままシミュレーションシステムへ取り込む事ができない。従って、一旦ファイルを開き、該当箇所をコピーし、データベースファイルの相当箇所へ移した。本検証のために、上書き用として、別途、30分間に相当するシミュレーション記録を準備した。データベースには、主機冷却清水入口温度のほかは、既存のコンテナ船プラントの状態が記録されており、上書きデータが既存のシステムへ反映されるか否か、また既存のデータへの影響の有無について、確認を試みる。

(3) 実船データファイルの取り込み結果

機関プラントシミュレータでは、出力負荷に応じた基準値があらかじめ設定されており、それらの値を基にして、各機器の運転データが算出される。Replay機能による保存データはシミュレーション結果を構成しており、本検証にて対象とするデータ項目が他項目へ影響を及ぼすか否かは、メーカーのシミュレーション思想（プログラム）に依存しており、その開示要求への対応は容易でない。従って、本検証では、既存の機関プラントシミュレータに対して、作成したデータベースファイルへ読み込ませ、シミュレータにおける当該データの表示状況と他項目への影響度合い、その他に作成データベースファイルに起因する不具合の有無を調査した。

(4) 暖機データのシミュレータへの反映

機関プラントシミュレータにて、初期設定シナリオを”in dock”とし、Replay機能により作成したデータベースファイル（Sample data）を選択して、シミュレーションを再生した。制御室エンジンコンソールに搭載されているエンジンモニターのミミック画面、ならびにデータリスト画面にて、”Maine engine jacket cooling fresh water inlet temp.”の検出値に上書きデータが順次表示される事を確認した。また、機関室側の大型画面にて、主機関イラストイメージ内の温度表示に、当該データの数値が順次表示されるのを確認した。

(5) 作成データベースファイルの取り込みによる他項目への影響

元より深江丸の機関室プラントと機関プラントシミュレータの機関室との違いは、搭載機関の種類や規模だけでは無い。機関プラントシミュレータでは冷却清水システムにセントラルクーリング方式を採用するのに対し、深江丸は主機関ジャケット冷却水以外は海水による直接冷却としている。また燃料油システムについても、A重油とC重油の2種類の燃料油を使用する機関プラントシミュレータに対し、深江丸ではA重油の1種類を使用し、機関使用時に燃料油の加熱を必要としない。また燃料油加熱が不要であるほかに、居住区域も狭いことから、空調装置による暖房もガスヒートポンプにより対応される。補助ボイラが無いことに加え、造水装置、排ガスエコノマイザ、ターボ発電機など、機関プラントの違いは多く挙げられる。

本検証において、機関プラントシミュレータは機関プラントにて冷却清水システムにセントラルクーリング方式（低温冷却水と高温冷却水、2段階の冷却水システム）を採用することから、主機関へ供給される高温冷却水は低温冷却水の混合により、温度制御（設置温度を維持）が行われる。深江丸から抽出した実船データでは、主機関冷却清水入口温度が暖機開始時に11度から始まり、21度に到達するまでの上昇変化を含めたものとなっている。一方で、機関プラントシミュレータでは、通常36度に維持された低温冷却清水を用いている。（ただし、機関プラントの停止時は機関室温度相当の温度になる）したがって、

深江丸の冷態からの暖機実船データを高温冷却清水に相当するとしてデータ挿入すると、低温冷却水との温度順位に逆転を生じる。特に、両冷却水が混合する部分では、その温度順位の逆転や温度差の想定外を生じ、ユーザーだけでなく、ERS メーカーも想像し得ない不都合が生じ兼ねない。熱の出入りが無く、主機関単体で温度上昇するような事象の表現となるため、機関プラント全体の熱量計算への影響不具合が危惧される。

(6) 検証結果

別途作成した Replay データについて、深江丸の暖機状態から主機関冷却清水入口温度のデータを抽出して上書きし、USB メモリを介して、検証用サンプルデータとして機関プラントシミュレータへ取り込んだ。検証用のサンプルデータでは、設定シナリオとして、機関室には電源、熱源がない状態 (Dead ship situation) にしており、上書きデータのみに変化がある。シミュレーション再生直後より、機関室電源喪失にかかる警報が頻発するが、その中で、当該データの表示は、11 度から 1 度ずつ上昇して、最終的に 21 度まで到達した。エンジンモニターの画面では、その様子が実時間にて、再現された。

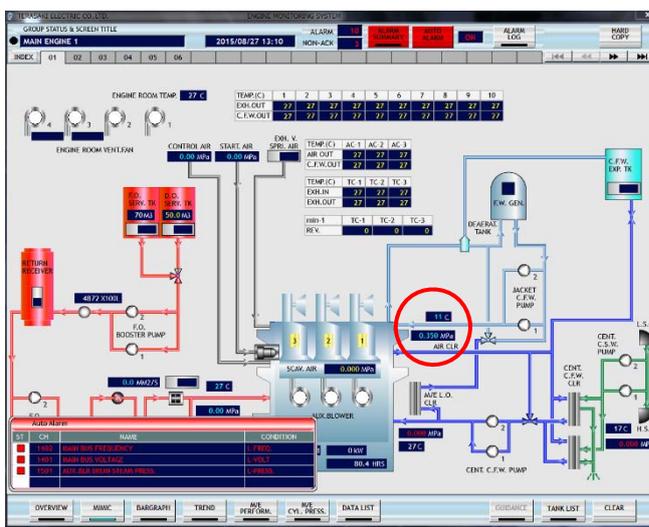


図 3.2-3 シミュレータへの反映 (赤枠内)

3. 2. 3 まとめ

機関プラントシミュレータにて、緊急暖機を再現する方法として、実船での暖機状態を記録から、シミュレータ環境下での再現を試みた。検証の対象項目にした主機関冷却清水入口温度は、シミュレータのプログラムにて、機関始動操作の際に、温度が 60 度以上ないと始動できない、シミュレーション上のインターロックを組み込んでいる。現実の機関では、そのようなインターロックは存在しないが、シミュレータ環境における機関操作の習熟のため、取扱いの目安に取り入れたインターロックになっている。本報告では、暖機時のシミュレーションとして、主機冷却清水の温度変化の表現を試みたに過ぎないが、同様にして、システム油の油温変化なども、同時進行にて再現する事をこの先に計画している。これらの時系列変化に加えて、機関プラントを構成する配管装置の諸弁開閉の状態など、より実船に近い状態をシミュレータ環境下に作り込み、実船データを適切に融合させて、現実的な暖機シミュレーションの実現を検討したいと考える。

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

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った。

3. 3. 1 検討係留地

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、580TEU 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とした。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。

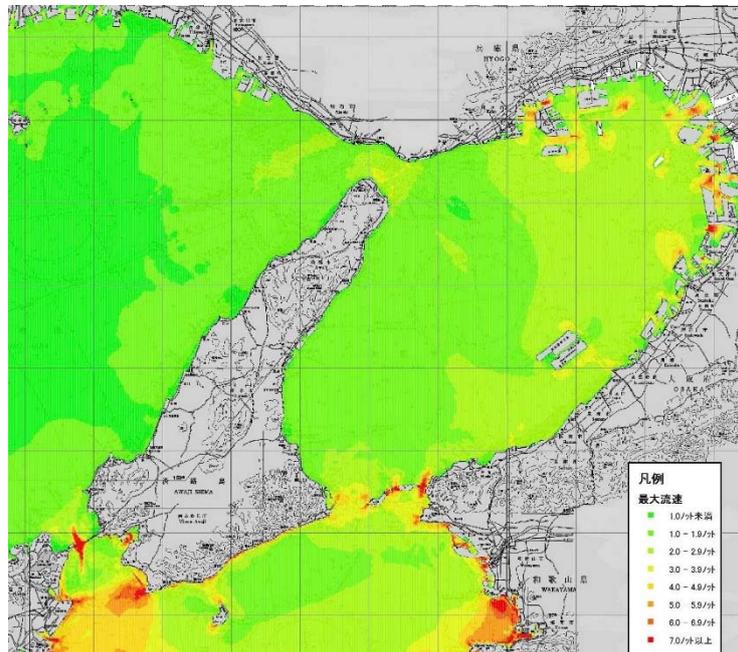


図1 大阪湾の津波流速分布 (出典：第五管区海上保安本部海洋情報部)

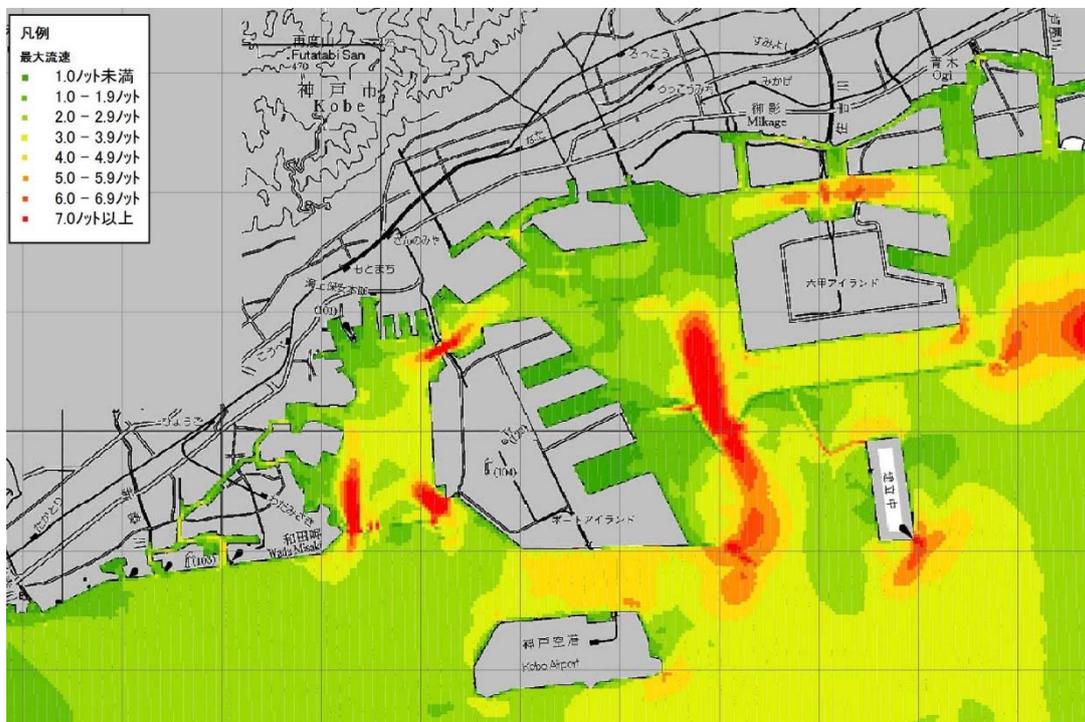


図2 阪神港神戸区の津波流速分布 (出典：第五管区海上保安本部海洋情報部)

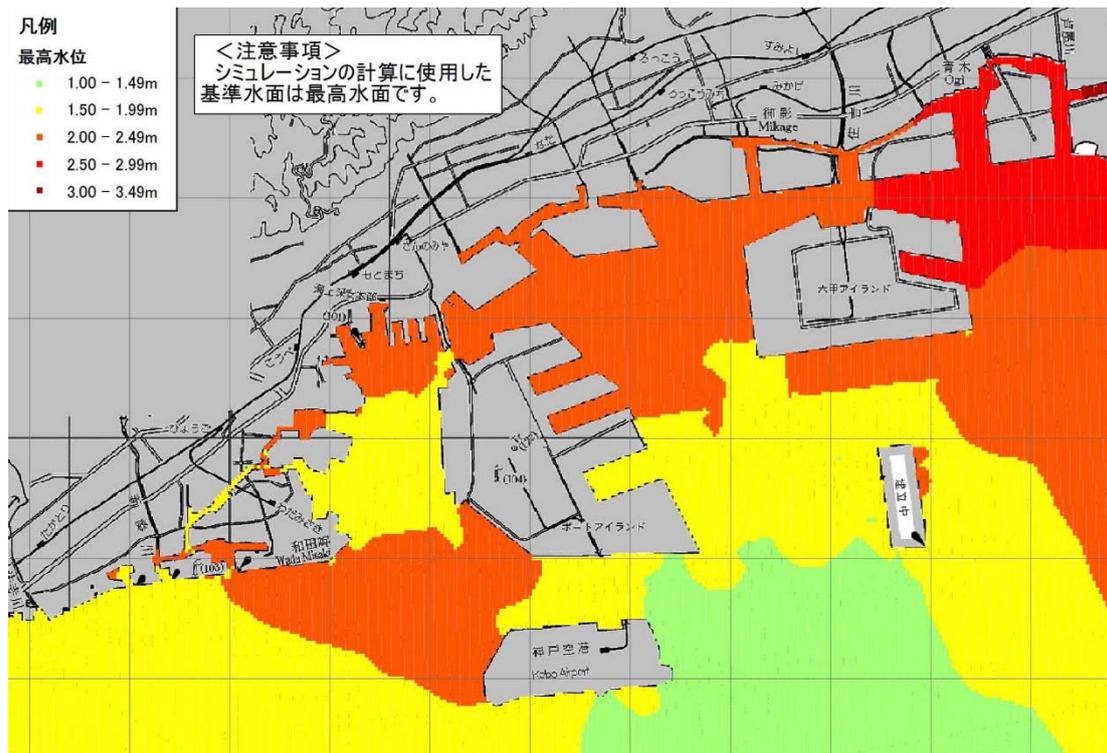


図3 最高水位（出典：第五管区海上保安本部海洋情報部）

また、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。

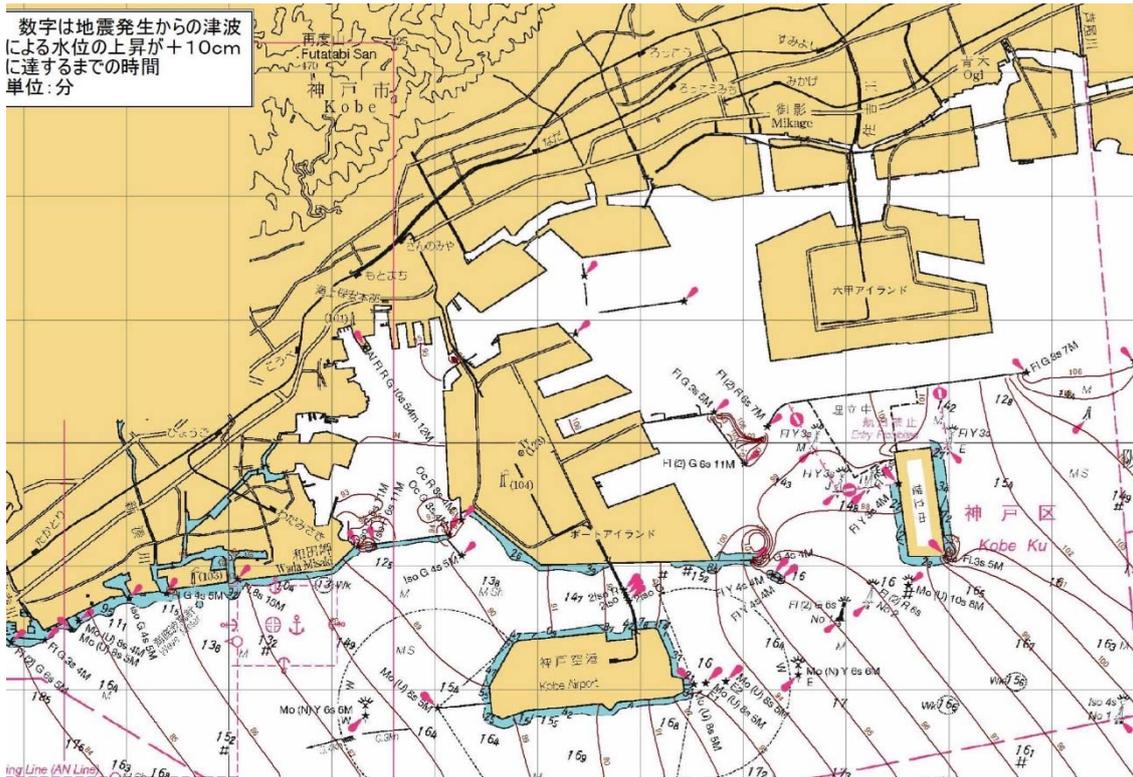


図3 津波到達までの時間（出典：第五管区海上保安本部海洋情報部）

3. 3. 4 次年度への課題

船舶が港湾で停泊中、推進用原動機は停止状態にあることが多いが、緊急出航では原動機を早急に始動することが必要になる。緊急始動かかる時間、使用方法等について、操船シミュレータで実施した使用が可能かどうか他部門との協議し、標準操船方法を確立する。また、操船シミュレータでの津波による流れと風の影響（風向）を複合した実験を実施し、離岸できる限界点を検討する。

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 緊急出航の検討

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。

3. 4. 2 実験方法

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、バウスラスタ一装備（推力 6.2 トン）。

このクラスの外航船舶の離棧操船は、通常、船尾に 1 隻のタグ支援で行われており、主機、バウスラスタ一、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用いた。以下、手順を示す。

- ① 係留索はすべて放す。
- ② 舵を左一杯、バウスラスタ一適宜使用（右回頭）、主機 Dead Slow Ahead または Slow Ahead
- ③ できるだけ岸壁と平行を維持
- ④ 船幅の 2 倍まで離れるまで

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。

3. 4. 3 実験結果

実験開始から船幅の 2 倍まで岸壁から離れるまでの時間および進出距離逃について、

表 1 離岸所用時間(風向別)

	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	-	-	-	-	-	-	-
5m/s	3分	3分	3.5分	3.5分	3.5分	2.75分	2.5分	2.5分
8m/s	2.5分	3.5分	5分	4分	3分	2.5分	2.25分	2.25分
10m/s	2.5分	4分	6.5分	5分	3分	2.25分	2分	2分

表2 前方進出距離（風向別）

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

表1 離岸所用時間（流向別）

	1 knot	2 knots	3 knots	4 knots	5 knots
East<080>	4分	5分	5分	6分	-
West<260>	3分	3分	3分	3分	3分

表2 前方進出距離

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

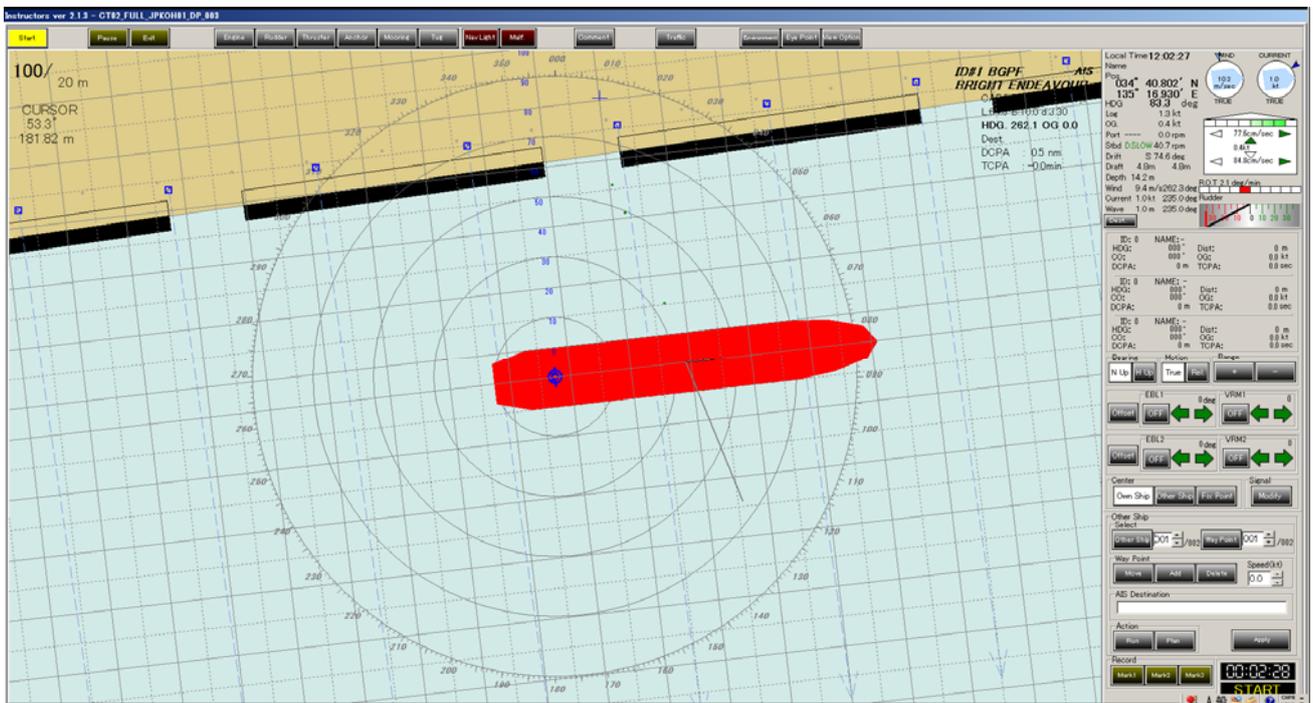


図1 スクリーンキャプチャー（例）

3. 4. 4 まとめ

風による影響では、予想とおり離岸風で時間、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。

津波の流向による影響では、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、5 ノットでもほぼ船体位置を岸壁に平行に保ったまま離岸することが分かった。一方、船尾方向から流れ（流向 080 度）では、1、2 ノットであれば、船体位置を岸壁に平行に保って離岸できたが、3 ノット付近が限界とみられ、4 ノットでは左舷船尾を岸壁に擦りながらなんとか離岸できる状態で、5 ノットでは、左舷船尾が岸壁と衝突して、離岸できない状態となった。

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上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明らかであったが、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横方向力が減少するという現象の中で、船舶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、結局船体が岸壁へ向かうことであった。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、主機の総合力を操船者が思っている以上に作用することが考えられる。

3. 4. 5 次年度への課題

船舶が港湾で停泊中、推進用原動機は停止状態にあることが多いが、緊急出航では原動機を早急に始動することが必要になる。緊急始動かかる時間、使用方法等について、操船シミュレータで実施した使用が可能かどうか他部門との協議し、標準操船方法を確立する。また、操船シミュレータでの津波による流れと風の影響（風向）を複合した実験を実施し、離岸できる限界点を検討する。

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

昨年度は、緊急出航時を想定して、配管内を高温流体の流動が開始した直後、流量が急に多くなる状態において発生する熱応力、温度の問題を二次元定常状態の問題として有限要素法により解析した。解析モデルは、配管の断面を中空円筒に模擬して、水面の変化に伴って発生する熱応力と最高温度の変化を中心に考察した。

本年度は、より実際の配管に近い状態を再現するために、同じ解析モデルを用いて流量が刻々と変化する非定常問題として解析する。また昨年度の解析結果によると、船内で起こりうるような状況に対して、高温流体が流れる配管では直ちに問題となるレベルの熱応力は発生しなかった。一方、LNGのような極低温流体が流れる配管では、周囲温度との差が非常に大きいため、発生する熱応力も高い値となることが予測される。そこで内部流体を LNG のような極低温流体としたときの解析も実施して、LNG 船の荷役中に津波が発生した場合の挙動を予測するためのデータを提供する。

3. 5. 2 二次元非定常温度場解析による配管の熱応力評価

図 1(a),(b)に配管の解析モデルを示す。配管が紙面直角方向に非常に長いことを考慮して、力学的には「平面ひずみ」を仮定している。内半径が 50mm、外半径が 60mm、管厚は 10mm である。図 1(a)では半径方向 5 分割、円周方向 90 分割、図 1(b)は半径方向のみ 10 分割に変更している。以後、前者を粗分割モデル、後者を再分割モデルと呼び、解析は基本的に粗分割モデルで実施する。

(1) 高温流体が流れる場合 内部流体の温度を 100℃、雰囲気温度を 20℃とする。また、内外表面の熱伝達率は、それぞれ 100W/m²K、10W/m²K と仮定する。配管の材料は炭素鋼を想定して、以下の材料定数を用いて解析する。

線膨張係数：11.8×10⁻⁶[1/K] 熱伝導率：51.5[W/mK] 密度：7800[kg/m³]

比熱：466[J/kgK] ヤング率：206[GPa] ポアソン比：0.3

液面上昇速度は、「25 秒で配管全体が流体で満たされる場合を基準」とする。その場合の液面上昇速度を 1 とし、1/2 倍、2 倍、4 倍と変化させる。

(2) 低温流体が流れる場合 計画している実験による検証と対応させるために、内部流体は LNG（マイナス 160℃）ではなく液体窒素（マイナス 196℃）を対象とする。また、外表面の熱伝達率は高温流体の場合と同じく 10W/m²K と仮定するが、内表面側については沸騰時から強制対流熱伝達の状態までカバーするために、8000W/m²K、5000W/m²K、2000W/m²K と変化させる。配管の材料はステンレス鋼を想定して、以下の材料定数を用いて解析する。

線膨張係数：17.3×10⁻⁶[1/K] 熱伝導率：16[W/mK] 密度：7920[kg/m³]

比熱：499[J/kg・K] ヤング率：200[GPa] ポアソン比：0.3

液面上昇速度は、高温流体の場合と同じく 1/2 倍、基準上昇速度、2 倍、4 倍と変化させる。

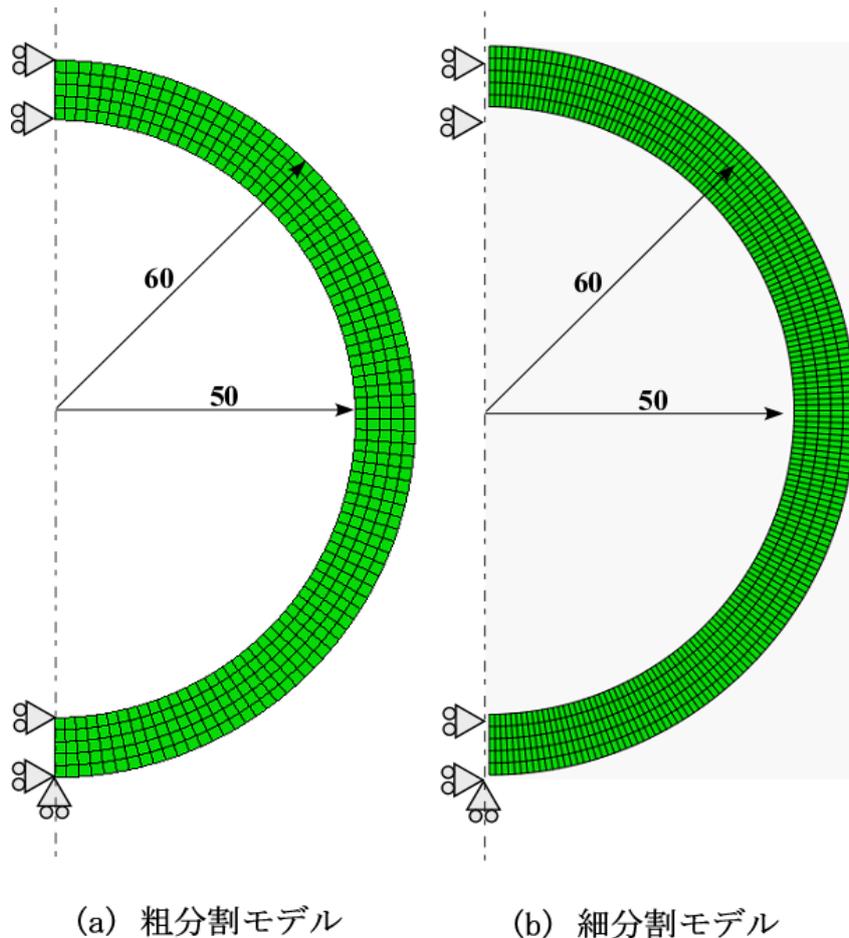


図1 配管の有限要素モデル

3. 5. 3 高温流体が流れる場合に発生する熱応力

図2は液面が1/2倍、基準上昇速度、2倍、4倍と変化させた場合に、最大応力が発生したときのミーゼス応力の分布を示している。解析には粗分割モデルを用いている。最大応力の値は3MPa程度で強度上問題となる値ではないが、上昇速度が遅いほど高くなっている。当然のことながら、最大応力が発生する時間は上昇速度が速いほど短くなっている。図中に赤丸で最大応力の位置を示している。上昇速度に関係なく、ほぼ同じ位置で発生していることがわかる。図3は最大応力が発生したときの温度分布を示している。いずれの場合も、最高温度は管内表面の最下部で発生しており、上昇速度が遅いほど高くなっている。図4は、横軸に液面の上昇速度を取り、縦軸にミーゼス応力の最大値とその時の最高温度をプロットしたものである。発生する応力の絶対値は小さいが、液面の上昇速度の影響が顕著に表れていることがわかる。

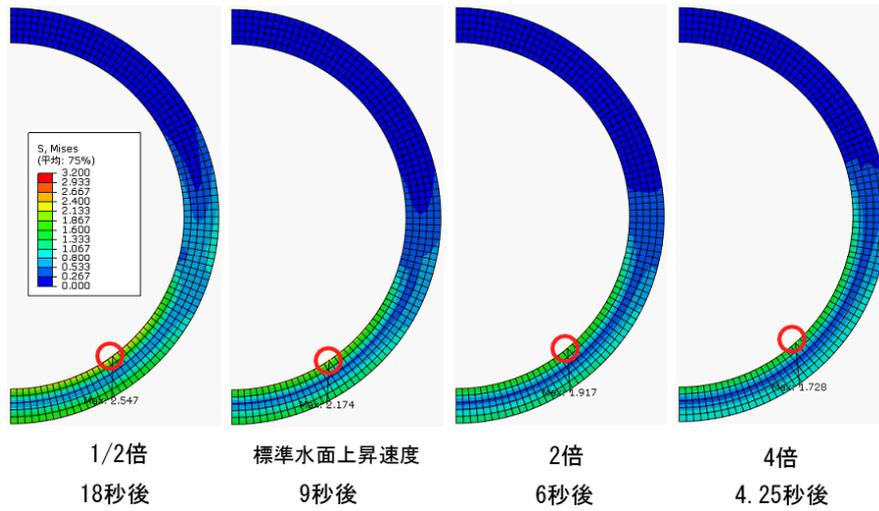


図2 ミーゼス応力分布に対する液面上昇速度の影響

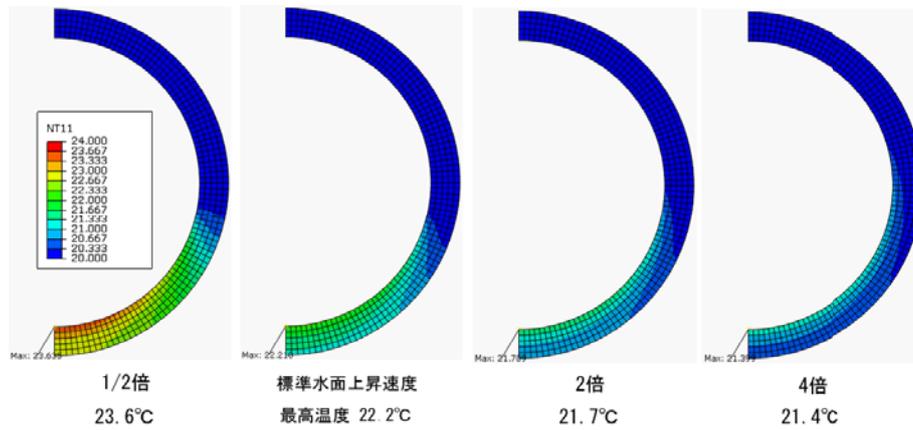


図3 温度分布に対する液面上昇速度の影響

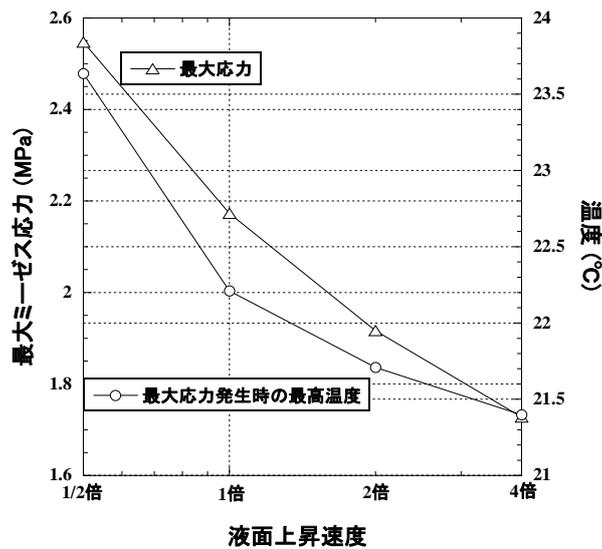


図4 最大ミーゼス応力と最高温度に対する液面上昇速度の影響 (高温流体)

3. 5. 4 低温流体が流れる場合に発生する熱応力

LNG 運搬船における荷役は極低温流体用の大型ポンプを用いて実施される。その場合、流体温度がマ

マイナス 160℃と非常に低いために、配管に大きな収縮が発生する。その結果、配管の半径方向に非常に大きな温度勾配が生じて、最悪の場合は流体の一部が漏洩するというトラブルが発生することがある。本節では、3.5.2 節の(2)で定義した条件に従って実施した解析結果を示す。解析には粗分割モデルを用いる。内表面の熱伝達率は 8000W/m²K とする。

図 5 は、図 2 と同じ表示方法で、液面が 1/2 倍、基準上昇速度、2 倍、4 倍と変化させた場合に、最大応力が発生したときのミーゼス応力の分布を示している。最大応力は、それぞれ注入開始後 4 秒、3 秒、3.5 秒及び 3 秒後と、3～4 秒の間に発生している。それに対応するミーゼス応力の最大値は 429MPa、402MPa、385MPa、370MPa と非常に高い値となっている。このレベルの応力が発生すると配管材料は降伏するが、その原因は表面熱伝達率を沸騰現象に対応したレベルに設定したためであり、実際はこれよりかなり低くなると推定される。解析結果によると、最大ミーゼス応力は液面がゆっくり上昇するほど高くなっている。また発生位置は、上昇速度が大きくなるにしたがって、管の底面から次第に上部側に移動している。いずれにしても、低温流体が流れる配管では、100℃程度の高温流体が流れる配管に比べてはるかに高い熱応力が発生することがわかる。一方、液面上昇速度の変化に対する定性的傾向は同じように現れている。図 6 は最大応力が発生したときの温度分布を示している。いずれの場合も最高温度は管の底面で発生しているが、その絶対値は上昇速度の変化に対して、マイナス 126℃から 134℃の範囲で変化している。

つぎに表面熱伝達率が 5000W/m²K、2000W/m²K と変化した場合の結果を示す。図 7 と図 8 は表面熱伝達率が 5000W/m²K の場合で、図 5、図 6 と同じ表示方法で応力分布と温度分布を表示している。同じく図 9 と図 10 は表面熱伝達率が 2000W/m²K の場合の結果である。表面熱伝達率が 5000W/m²K の場合、ミーゼス応力の最大値は 346MPa、336MPa、322MPa、306MPa となっており、注入開始後 4～6 秒で発生している。この値は熱伝達率が 8000W/m²K の場合のおよそ 81%～84%である。最大応力の発生位置が、上昇速度の増加に伴って管の底面から上部側に移動している点は同じである。最低温度についてはマイナス 108℃から 118℃と、熱伝達率が 8000W/m²K の場合に比べて高くなっている。つぎに表面熱伝達率が 2000W/m²K の場合について考察する。

ミーゼス応力の最大値は 219MPa、208MPa、196MPa、185MPa となっており、注入開始後 5.5～8 秒で発生しており、熱伝達率が小さくなるにしたがって時間が長くなっている。この値は熱伝達率が 8000W/m²K の場合のおよそ 50%～52%と半分程度である。最大応力の発生位置が、上昇速度の増加に伴って管の底面から上部側に移動している点は同じであるが、上昇速度が 1/2 倍のケースでも、管表面の底部から離れた位置で発生している。最低温度についてはマイナス 108℃から 118℃と、熱伝達率が 8000W/m²K の場合に比べて高くなっている。

図 5、図 7、図 9 の結果より、表面熱伝達率と最大応力の関係を考察する。図 11 はミーゼス応力の最大値に対する液面上昇速度の影響を、管内表面の熱伝達率をパラメータとして示したものである。図から明らかなように、表面熱伝達率の値は配管に発生する熱応力に大きく影響することがわかる。ここで 2000W/m²K という値は強制熱伝達で起こりうる値である。

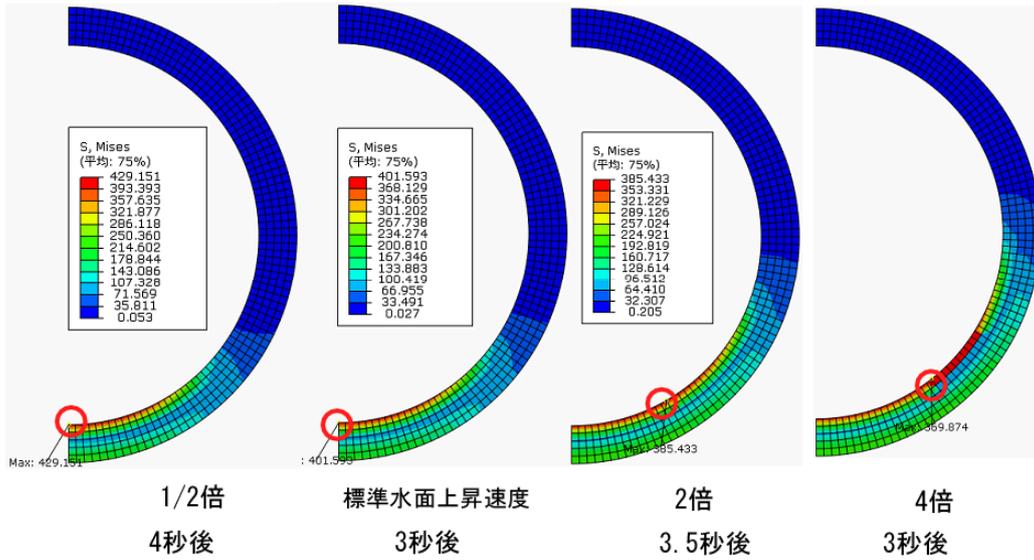


図5 ミーゼス応力分布に対する液面上昇速度の影響 ($h = 8000\text{W/m}^2\text{K}$)

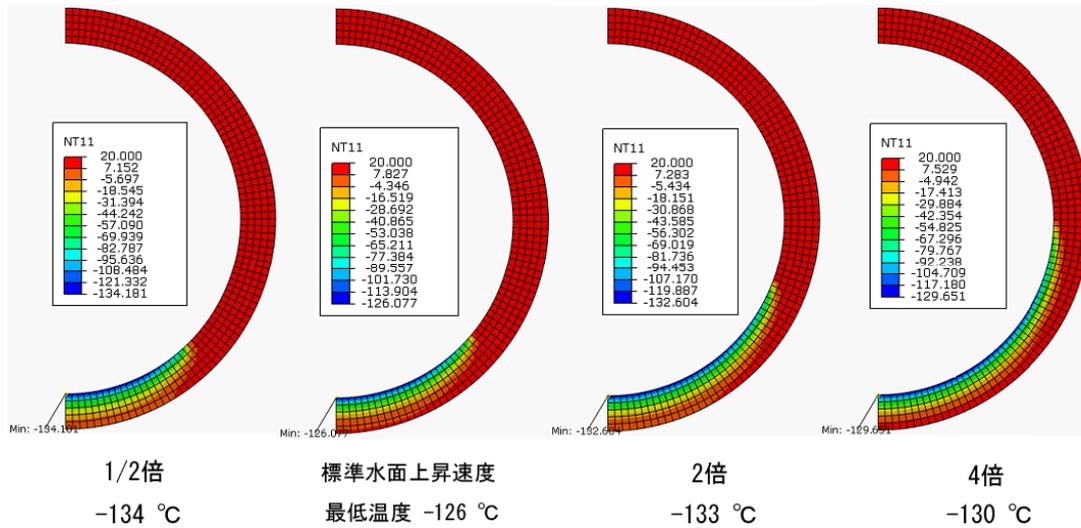


図6 温度分布に対する液面上昇速度の影響 ($h = 8000\text{W/m}^2\text{K}$)

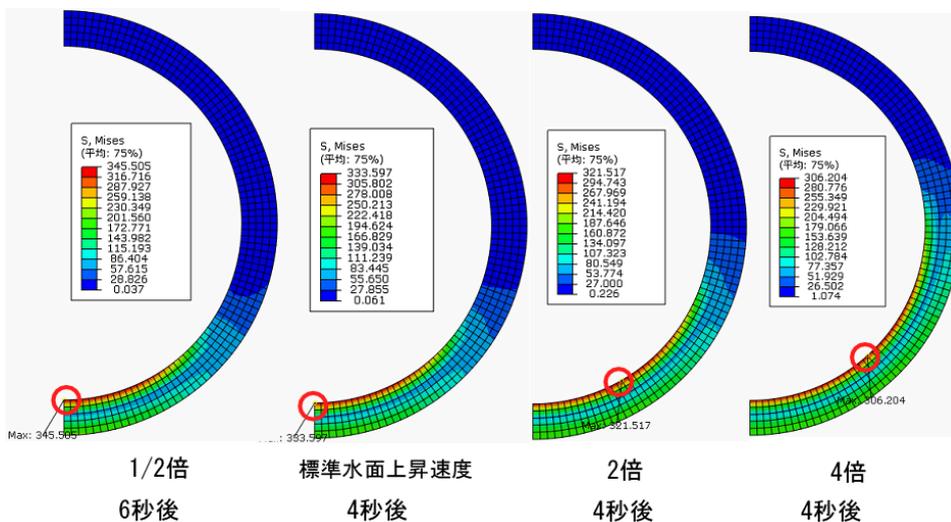


図7 ミーゼス応力分布に対する液面上昇速度の影響 ($h = 5000\text{W/m}^2\text{K}$)

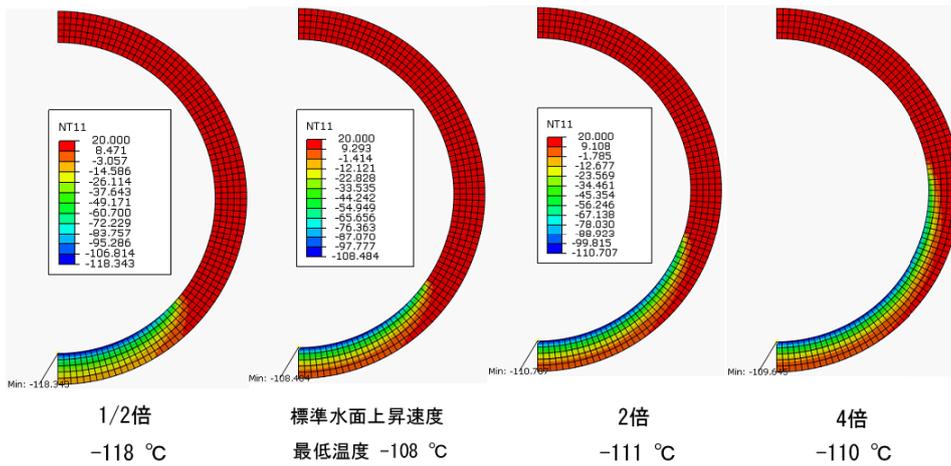


図8 温度分布に対する液面上昇速度の影響 ($h = 5000\text{W/m}^2\text{K}$)

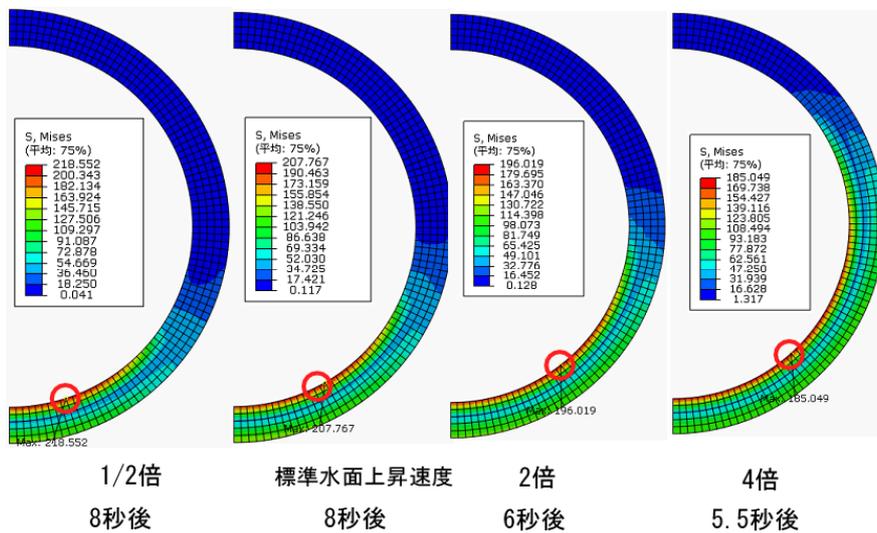


図9 ミーゼス応力分布に対する液面上昇速度の影響 ($h = 2000\text{W/m}^2\text{K}$)

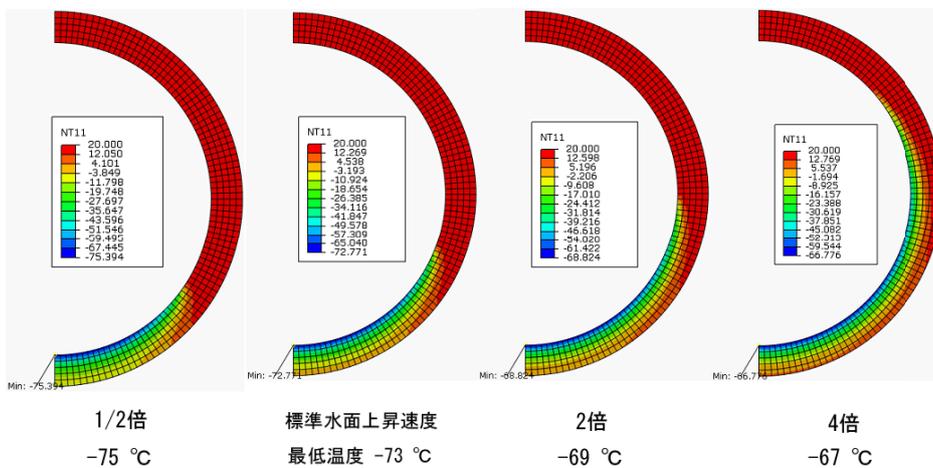


図10 温度分布に対する液面上昇速度の影響 ($h = 2000\text{W/m}^2\text{K}$)

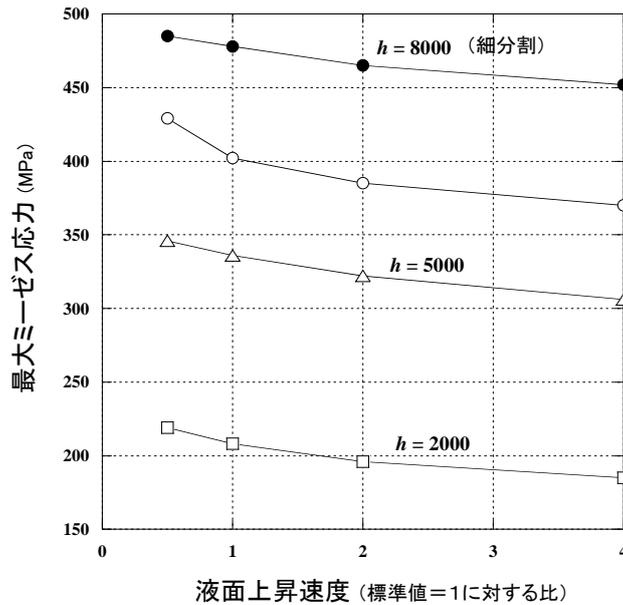


図 11 最大ミーゼス応力に対する表面熱伝達率と液面上昇速度の影響（低温流体）

3. 5. 5 解析モデルの精度の検討

前節までの解析はすべて図 1(a)の粗分割モデルで実施した。しかしながら、内部流体が液体窒素や LNG という極低温流体の場合、半径方向の温度勾配が非常に大きくなるために、解析精度を検討する必要がある。そこで、図 1(b)に示したモデルを用いて、表面熱伝達率が $8000\text{W/m}^2\text{K}$ の場合について、発生した最大ミーゼス応力と液面上昇速度の関係を比較した。解析結果は図 11 中に示している。粗分割モデルによる解析結果は、細分割に比べて 10 数%低めとなっている。しかしながら、液面上昇速度の影響は適切に再現できているといえる。次年度、実際の管フランジをモデル化した解析では、上記の結果を参照してモデリングする予定である。

3. 5. 6 まとめ

船舶の配管で想定される熱負荷により発生する熱応力について、簡単な二次元モデルを用いて非定常温度場の問題として解析したところ、以下に示す結論を得た。

(1) 一般的な高温流体が流れる配管では、液面上昇速度に関わらず、発生する熱応力は配管の強度に大きく影響するレベルではないと考えられる。

(2) LNG 船の配管における問題を検討するために、実験がより容易な液体窒素が流れる配管を想定して解析を実施したところ、高温流体が流れる配管に比べてはるかに高い熱応力が発生する可能性があることを示した。

(3) 低温流体が流れる配管では、液体が沸騰するケースも考えられるが、その場合は熱伝達率が非常に高くなるために、強度上問題となるような熱応力が発生する可能性がある。

図 12 は実験用に作成したステンレス鋼製の管フランジである。配管の一方をふさいでいるため、液体窒素の注入が可能な構造となっている。この実験装置に液体窒素を注入したところ、管フランジの温度が低温の定常状態に近づくまで、液体窒素は沸騰して連続的に蒸発した。その場合の表面熱伝達率を推定す

ることは困難であるが，簡単な数値解析と照合すると例えば $5000\sim 8000\text{W/m}^2\text{K}$ 程度の値になることがわかった．次年度は，この管フランジをモデル化して，さらに実機に近い状態で解析することにより，LNG の作業中に津波が発生するという最悪のシナリオに利用できるデータを提供したいと考えている．



図 12 管フランジモデルへの液体窒素の注入試験

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

ディーゼル機関は、1893年にRudolf Dieselが発明した往復動式ピストンエンジンである。その動作原理は、空気をシリンダ内に吸い込み、その温度が燃料の着火温度より高くなるまで圧縮することで駆動するものである。機関機構の発明当初は、燃焼室内部に直接高圧液体燃料を噴射する技術が十分に確立していなかったため、高圧空気の噴射に微量の燃料を混入させる方式をとっていた。そのような機構を空気噴射方式と呼称し、現在主流の高圧燃料噴射方式（無気噴射方式）とは区別されていた。また、いずれの燃料供給方式であっても、高温高圧にした空気中で燃料を自己着火させるという原理は共通であり、ディーゼル機関は圧縮着火式機関 Compression Ignition Engine とも呼ばれる。

ディーゼル機関は、ガソリン機関に比べて熱効率が高いために燃費性能がよく、二酸化炭素 CO₂ の排出量がより少なくなる。そのため、自動車から大型船舶まで広範囲で原動機として利用されている。その反面、窒素酸化物 NO_x や黒煙をはじめとする粒子状物質 PM が発生しやすく、環境に悪影響を与える。船舶ディーゼル機関では、排出ガス中の大気環境汚染物質として NO_x、PM に加えて硫黄酸化物 SO_x を排出するため、環境保護のためにそれらの物質の低減・除去が必要となっている。

船舶は、人の生活圏から離れた場所だけではなく、港や川など人の生活圏に近い場所も航行する。そのため、大気汚染物質の低減は不可欠である。特に、港などにおけるディーゼル機関始動時の排ガス特性は、人の生活圏環境に及ぼす影響を把握する上で必要である。また、津波来襲などの自然災害時にはエンジンを始動して緊急出航する必要があるため、機関始動時の特性把握は重要である。

そこで本研究は、船舶用のディーゼル機関始動時の特性を明らかにすることを目的とする。本年度は、大型単気筒ディーゼル機関の燃焼特性を調査した結果について報告する。特に供試エンジンとして、4ストローク機関と2ストローク機関の異なる二種類の形式のものを使用し、エンジン始動時条件（冷間状態から始動する場合と暖機を行ってから始動する場合）を変化させて機関性能の時間変化を計測した結果について詳述する。

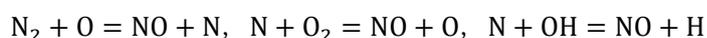
3. 6. 2 実験装置および方法

(1) 排気エミッション

内燃機関（エンジン）は燃料燃焼によって熱エネルギーを機械的エネルギーに変換している。燃料には原油を精製した石油系のものが多く使用されている。それらは炭素と水素からなる炭化水素化合物であり、完全燃焼した場合には二酸化炭素 CO₂ と水蒸気 H₂O のみが生成する。実際にはそれら以外の成分が燃焼ガスの中に含まれ、排気エミッションとしてエンジンから排出される。以下に本実験で計測対象とした代表的なものについて概説する。

窒素酸化物 NO_x

内燃機関で生成される窒素酸化物 NO_x は、空気中の窒素分子 N₂ が反応して生成される一酸化窒素 NO が多くの割合を占めており、下記に示す三つの式が主たる反応である。



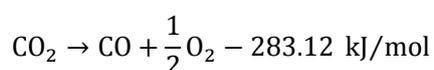
NO 生成は吸熱的反応で行われるため、高温度場で生成量が多くなる。そのため、熱的窒素酸化物 Thermal

NO とも呼ばれる。また、燃焼温度が高いだけでなく、燃焼ガス中での滞留時間が長い場合、酸素濃度が高い場合にも生成量は多くなる⁽¹⁾。

外航船舶の大型ディーゼルエンジン（出力 130 kW 以上）が排出する NOx については、国際海事機関 IMO（International Maritime Organization）の専門委員会において議論して制定した条約によって、排出量を段階的に低減することが必要となった。NOx 排出量は 2005 年の 1 次規制（Tier 1）、2011 年の 2 次規制（Tier 2）は全海域に、2016 年から有効となった 3 次規制（Tier 3）は指定海域 ECA（Emission Control Area）で適用され、1 次規制（Tier 1）値より 80% の削減が必要である⁽²⁾。

一酸化炭素 CO

燃料噴霧において、燃料蒸気が過濃で局所的に酸素 O₂ 不足となったところでは、不完全燃焼を起こして一酸化炭素 CO が生成される。また、逆に燃料蒸気濃度が希薄なところでは、燃焼反応が持続せず火花が消えてしまうことによっても生じる。さらに、完全反応で生成した CO₂ が 1700 K 以上の高温状態にさらされると、一度生成した CO₂ は以下の反応式で熱解離して CO を生成する⁽³⁾。



二酸化炭素 CO₂

二酸化炭素 CO₂ は、地球温暖化に大きな影響を及ぼす温室効果ガスであることは良く知られた事実である。船舶から排出される CO₂ は、世界経済の成長を背景に今後も増加する傾向にあり、国際海運において CO₂ 排出量削減は必要な課題になっている。CO₂ 排出量（g/kWh）は燃料消費率 SFC（Specific Fuel Consumption；g/kWh）に比例するので、燃費を改善することが地球温暖化防止の対策にもつながる。

IMO の専門委員会で日本等が主導して提案をし、2013 年 1 月に発効した MARPOL 条約附属書 VI の一部改正規則によって、排他的経済水域を越えて航行する総トン数 400 トン以上の船舶に対して船舶エネルギー効率管理計画 SEEMP（Ship Energy Efficiency Management Plan）の策定が義務付けられるとともに、一定サイズ以上の新造船に対してはエネルギー効率設計指標 EEDI（Energy Efficiency Design Index）に適合することが求められる。EEDI は、1 トンの貨物を 1 マイル輸送する際の CO₂ 排出量として定義される指標である⁽⁴⁾。

（2）供試機関および燃料と計測系統

本報の実験では、試験用に製造された単気筒ディーゼル機関を用いて燃料燃焼運転を行った。供試機関は、4 ストロークディーゼル機関（以下、4STDE と表記する）と 2 ストロークディーゼル機関（以下、2STDE と表記する）の異なるサイクルの二種類であり、表 1 に機関の主要諸元を示す。

実験で使用した装置や計測機器の系統は、4STDE と 2STDE ではほぼ同様の構成となっている。図 1 に 4STDE の実験装置・計測系統の概略を示す。2STDE の場合、給気は外部動力で駆動するルーツブローアによって強制的に空気を送り込んでいる。

本研究で使用した燃料は LSA 重油（JIS 重油 1 種 1 号⁽⁵⁾）である。これは環境負荷低減のために含有する硫黄成分を低減したもので、低硫黄 A 重油とも呼ばれる。JIS では硫黄含有量を重量割合で 0.5% 以下になるように精製したものを LSA 重油として規定している。表 2 に供試燃料の主な物性値を示す。

表 1 供試機関の主要諸元

(a) 4 ストローク機関

Item	Description
Product	Hansin S1F
Type	4 Stoke diesel engine
Cylinder number	Single cylinder
Bore x Stroke	220mm x 350mm
Displacement volume	0.0133m ³ (=13.3Liter)
Compression ratio	12.78
Rated power	18.4kW(=25PS)@380min ⁻¹
Combustion type	Direct injection type
Nozzle	Hole type (φ0.35mm x 4)
Injection pump	Spill valve type
Injection pressure	29.4MPa (=300kgf/cm ²)

(b) 2 ストローク機関

Item	Description
Product	Hansin RL1CA
Type	2 Stoke diesel engine
Cylinder number	Single cylinder
Bore x Stroke	210mm x 330mm
Displacement volume	0.0114m ³ (=11.4Liter)
Compression ratio	13.5
Maximum power	40.5kW (=55PS)@465min ⁻¹
Rated power	36.8kW (=50PS)@450min ⁻¹
Fuel injection type	Solid injection type
Scavenging type	Loop scavenging type
Scavenging air supply	Roots blower

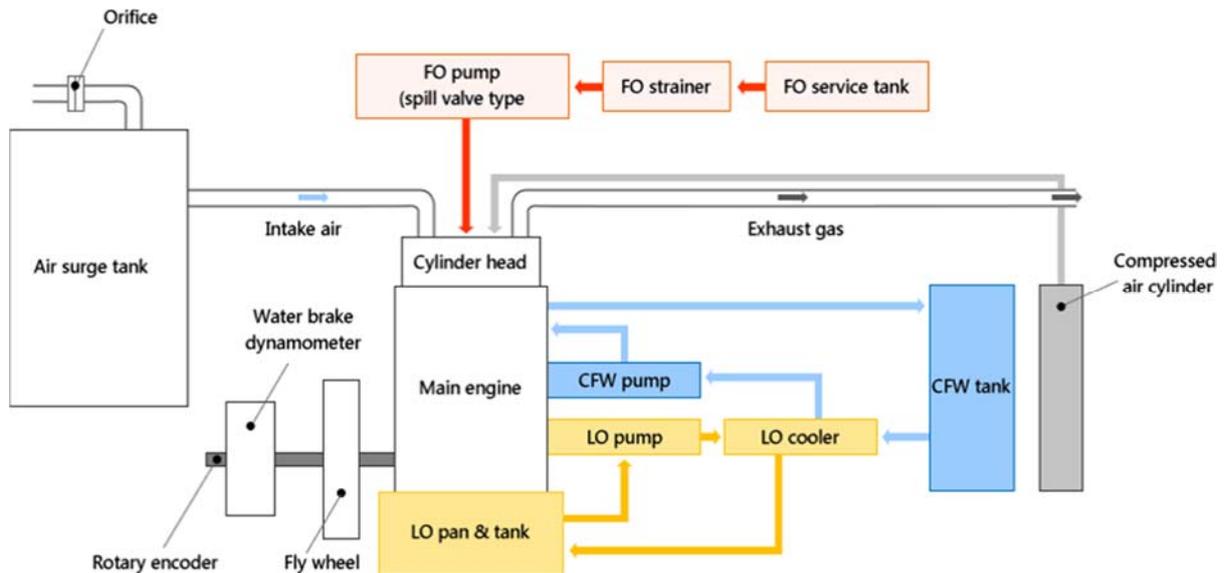


図 1 機関運転試験の計測系統図 (4 ストローク機関の場合)

表 2 供試燃料の代表的性状

Item	Unit	Description
Product		Tonen General FOA01
Type		Low sulfur A fuel oil
Density @15°C	[kg/m ³]	845.2
Viscosity @50°C	[mm ² /s]	2.543
Flash point	[°C]	82
Pour point	[°C]	-20
Cetane index		52 (JIS K 2280) 54 (JIS K 2204-92)
Sulfur content	[wt.%]	0.079
Carbon residue	[wt.%]	0.44
Nitrogen content	[wt.%]	0.01
Lower calorific value	[MJ/kg]	42.8

表 3 エンジン運転試験の実験条件

Engine Type	Engine start condition		Load [%]	Output Power [kW]	Engine Speed [min ⁻¹]	Dynamometer Load [kg]
	Description	Temp. [°C]				
4 Stroke diesel engine	cold start	22 ~ 28	50	9.2	302	34.4
	warm start	38 ~ 41	↑	↑	↑	↑
	cold start	22 ~ 28	75	13.8	345	45.2
	warm start	38 ~ 41	↑	↑	↑	↑
2 Stroke diesel engine	cold start	22 ~ 28	50	18.4	400	50.0
	warm start	38 ~ 41	↑	↑	↑	↑
	cold start	22 ~ 28	75	27.6	↑	75.0
	warm start	38 ~ 41	↑	↑	↑	↑

本報の実験では、エンジン始動時の状態、特に温度条件を変えた場合の影響を調査する試験を行った。設定したエンジン状態は二種類であり、一つは暖機なしの状態（冷態始動）、もう一つは暖機ありの状態（温態始動）である。本実験では「冷態始動(cold start)」は、室温状態（22～28°C）で放置したディーゼル機関を予め暖めることなしに、そのまま始動する場合を示す。「温態始動(warm start)」は一定時間以上エンジン運転を行ない、各部の温度が十分に上昇した後、エンジンを一旦止めて再始動することで実現し、始動時のエンジン温度は 38～41°C（冷却水出口温度）である。

また、それぞれの始動開始時条件に対して、始動後のエンジン負荷（以下、Load と表記する）を 50%および 75%の二種類の負荷条件に設定して運転を行った。ただし、4STDE の場合は船用特性で負荷条件を設定し、2STDE の場合は発電機特性での負荷条件である。それらのエンジン回転速度と動力計荷重の値を表 3 に示す。

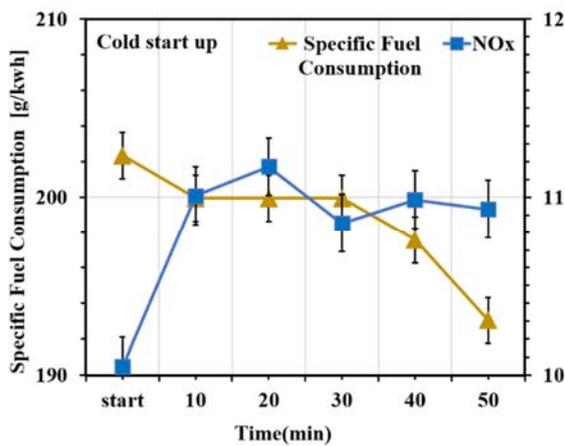
以上の合計四種類の実験パラメータに対して、エンジン始動後にエンジン回転速度の変動がなくなり、ある程度安定した運転状態となった後の時間について、排ガス濃度等の機関性能計測を行った。その計測開始時を本報では「エンジン始動時 (engine start)」の時期とした。排気エミッション濃度はガス成分濃度計測器（テストー社製：TESTO 350）を用いて、10 分経過毎に 1 分間の自動計測を行った。測定対象とした排ガス中の成分は窒素酸化物 NO_x、一酸化炭素 CO、二酸化炭素 CO₂ および残留酸素 O₂ である。

3. 6. 3 実験結果および考察

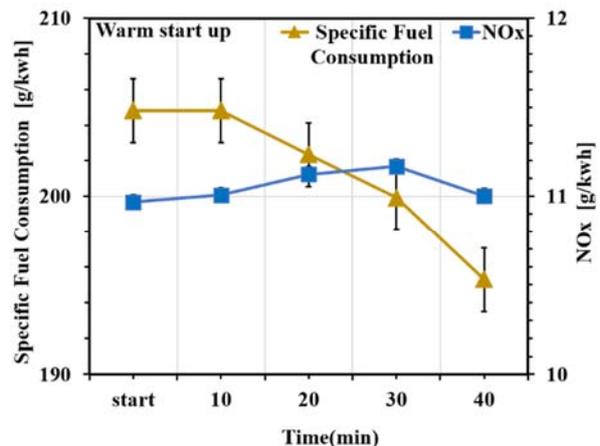
(1) 燃料消費率と窒素酸化物の変化

図2に燃料消費率SFC (Specific Fuel Consumption) と窒素酸化物NOx 排出量の時間変化の測定結果一例を示す. 図2の(a)は4STDE, 図2の(b)は2STDEの測定結果で, ともにLoad75%の場合であり, (1)は冷態始動の場合, (2)は温態始動の場合を示している.

いずれのエンジンタイプでも, SFCはエンジンの運転時間の経過とともに小さくなる傾向にあることがわかる. その減少量はエンジンタイプで異なっており, 始動直後のSFCと比較すると, 十分に時間が経過した時(始動後約30分経過時)には4STDEでは冷態始動時も温態始動時も約2.0%の低減率であるが, 2STDE(始動後約30分経過時)では冷態始動時は約4.0%, 温態始動時は約1.5%の低減率である. SFCの減少は, 燃料の燃焼効率改善を意味しており, いずれのエンジンタイプでも始動後から時間の経過とともに燃焼状況が徐々に良くなっていくことがうかがえる. その要因として, 機関燃焼室からの熱損失が時間とともに低減していくためと推測される. すなわち, エンジン始動後に燃焼室からピストンやシリンダ, シリンダヘッドを通して燃料燃焼による熱エネルギーが放出されるが, エンジン運転によってそれらの要素部品が暖まることで放出量が時間の経過とともに減少し, 結果として燃焼改善につながるといえる. これは時間経過に伴うSFCの減少量が, 温態始動時のほうが小さくなっていることでも裏付けられる.

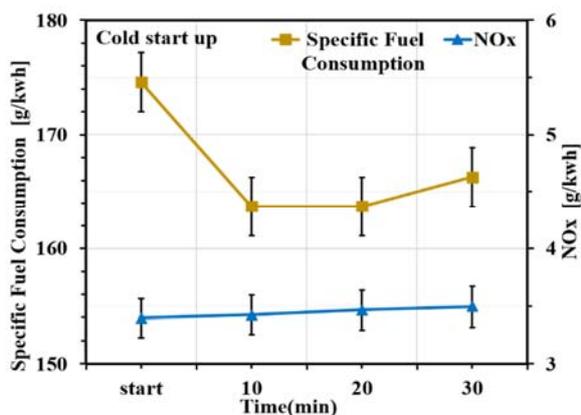


(1) 冷態始動の場合

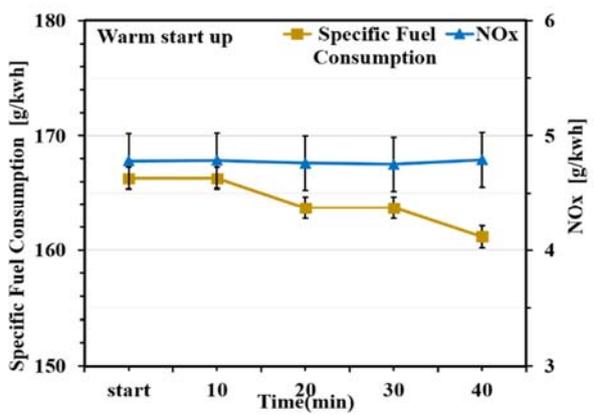


(2) 温態始動の場合

(a) 4ストローク機関 (エンジン負荷 75%)



(1) 冷態始動の場合



(2) 温態始動の場合

(b) 2ストローク機関 (エンジン負荷 75%)

図2 エンジン始動後の燃料消費率と窒素酸化物排出量の時間変化

これに対して、NO_x 排出量の時間変化はエンジンタイプで大きく異なっている。4STDE の場合は始動時の条件で変化傾向が異なり、冷態始動の場合には始動直後は排出量が少なく、時間経過とともに排出量が増加し、その同一時刻における計測値の変動幅も大きい。温態始動時には時間経過とともに排出量はわずかに増加する傾向にあるが、その変化量は非常に小さい。これに対して 2STDE の場合は、冷態始動も温態始動も NO_x 排出量は時間経過に対する変化はほとんどない。ただし排出量の絶対値は始動時条件によって異なり、本実験の時間範囲内では冷態始動時は平均約 3.4 g/kWh、温態始動時は平均約 4.8 g/kWh であり、暖機せずにエンジンを始動した場合のほうが低い NO_x 排出量となった。

燃焼場における NO 生成は、第 2 章第 1 節に示したように 1) 燃焼温度が高い場合、2) 高温燃焼ガス中での滞留時間が長い場合、3) 酸素濃度が高い場合、などに生成量は多くなることが知られている。エンジン始動後に時間の経過とともに NO 排出量が増加する理由は、燃料燃焼の状況が徐々に良好となり、燃焼場の高温領域が増加するためであると推測される。上述の燃料消費率が時間経過とともに減少することを燃焼改善によるものと類推したが、NO 排出量の時間変化傾向もそれを支持するものである。また 2STDE の場合に NO 排出量の増加傾向が顕著にみられないのは、サイクルの原理上、4STDE の倍の燃焼サイクルがあるため、より早期にエンジン要素部品が加熱されて熱損失が少なくなり、燃焼状況が良好になるためであると考えられる。

(2) 一酸化炭素の排出変化

前項に示した結果から、エンジンタイプおよびエンジン始動時条件によって燃焼室内部での燃料燃焼の状況が異なることが推論された。そこで、燃焼性を示す排気エミッション成分として一酸化炭素 CO について解析した。

図 3 は CO 排出濃度の測定結果一例であり、両エンジンタイプについて冷態始動時の場合の時間変化を示した。図において太実線は Load 75%の結果であり、図 2 の 1) の結果と同時に測定したものである。細実線は Load 50%の結果であり、負荷の違いによる傾向変化を確認するために示した。

CO 排出濃度の時間変化は、4STDE の場合にはエンジン負荷条件で大きく異なっている。Load 50%の場合、エンジン運転時間の経過とともに排出濃度は低くなっていく傾向にある。逆に Load 75%の場合、運転時間経過とともに排出濃度は高くなり、時間経過に対する変動幅も大きいことがわかる。一方、2STDE の場合、CO 排出濃度の時間変化はエンジン負荷による傾向の違いがなく、Load 50%および Load 75%のいずれの条件でも、運転時間の経過とともに排出濃度は小さくなっていく傾向にある。本実験の条件範囲では、エンジン始動後 30 分 (1800 秒) には CO 排出濃度は両エンジン負荷でほぼ同じ値 (約 75ppm) となった。

第 3 章第 6 節第 2 項で述べたように、燃焼場における CO 生成量が多くなるのは、1) 酸素濃度不足あるいは燃料濃度希薄で燃焼反応が不完全となる場合 (不完全燃焼) と、2) 活発な燃料燃焼で場が高温になり完全燃焼で生成した二酸化炭素 CO₂ が熱解離して一酸化炭素 CO と酸素 O₂ になる場合 (活性化した燃焼) の二通りがある。2STDE の両エンジン負荷 (Load 50%, Load 75%) 条件と 4STDE の Load 50%条件でエンジン始動直後に CO 排出濃度が高くなっているが、その理由は、上記の 1) と考えられる。すなわち、冷態始動であるために燃焼室内部の雰囲気温度が低くなり、燃料の微粒化・蒸発が不十分となって燃料濃度が局部的に高い領域が多くなり、燃料燃焼が不完全になったと考えられる (酸素不足の不完全燃焼)。

一方、4STDE の Load 75%条件で CO 排出濃度が運転時間経過とともに高くなっていくのは、上記の 2) が

要因であると推測される。NO_x 排出量の時間変化において、この条件のみでエンジン始動後に排出量が大きな増加傾向を示した（図 2 の(a)の(1)を参照）。SFC の変化傾向と合わせて、この条件では時間経過とともに燃焼室内での燃料燃焼が活性化していくと推測したが、その状況で高温となる領域が増大して、生成した CO₂ の熱解離が促進されたために CO 排出濃度が時間経過とともに高くなったと思われる。

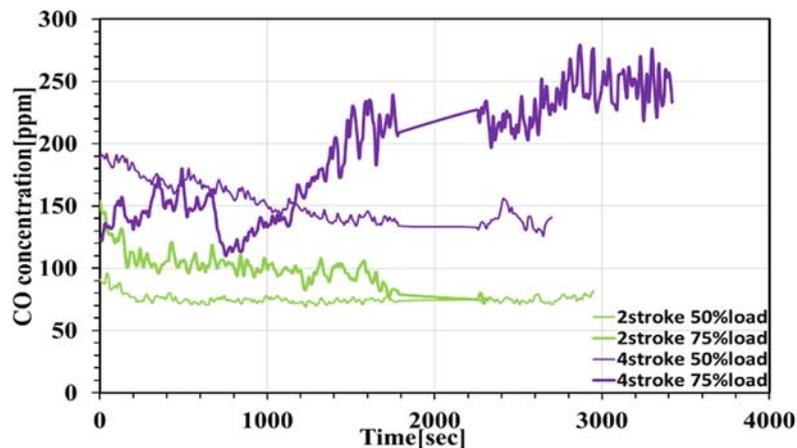


図 3 エンジン形式による一酸化炭素排出量の時間変化の違い（冷態始動の場合）

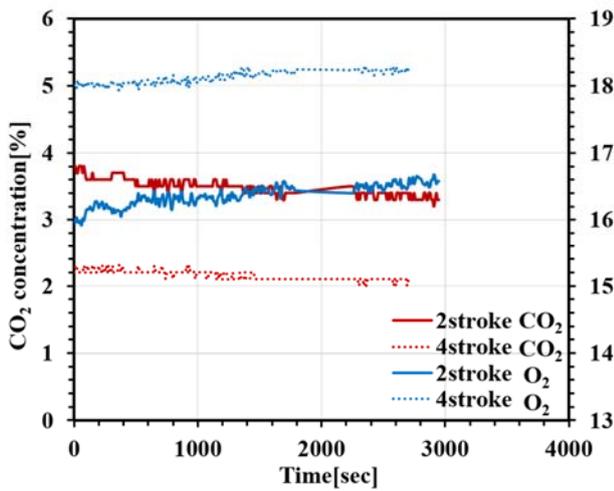
(3) 二酸化炭素と残留酸素および熱効率の変化

次に、燃料の完全燃焼性を推し量る排気エミッションとして、二酸化炭素 CO₂ と残留酸素 O₂ に着目し、それらの排出濃度の時間変化を測定した。図 4 にその結果を示す。図の 1) は Load 50%，2) は Load 75% の場合で、赤色は CO₂，青色は O₂，細い破線は 4STDE，太い実線は 2STDE の結果を示している。

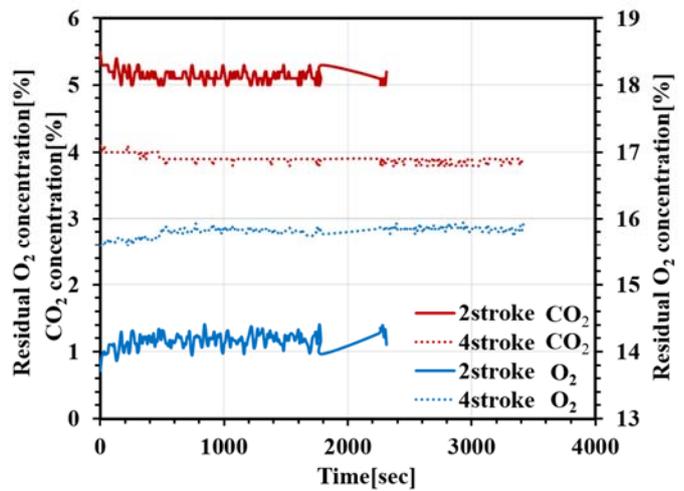
図 4 より、いずれのエンジンタイプの場合でも、エンジンの運転時間の経過とともにわずかにではあるが排出 CO₂ 濃度は減少し、残留 O₂ 濃度は増加していく傾向にある。また、いずれのエンジン負荷においても、2STDE の方が 4STDE よりも排出 CO₂ 濃度は高く、残留 O₂ 濃度は低くなっていることがわかる。それぞれの濃度の値をエンジン負荷で比較すると、いずれのエンジンタイプでもエンジン負荷が大きくなると残留 O₂ 濃度が低下し、排出 CO₂ 濃度は上昇している。

最後に正味熱効率 BTHE (Brake Thermal Efficiency) のエンジン条件による違いを比較する。図 5 に正味熱効率の算出結果を示す。図 5 の(a)は 4STDE の場合、(b)は 2STDE の場合であり、冷態始動時と温態始動時の双方を示している。また、各図で(1)は Load 50%，(2)は Load 75% の場合である。

図 5 より、いずれのエンジンタイプにおいても、始動時条件やエンジン負荷条件によらず、BTHE は運転開始後の時間経過とともに高くなっていくことが分かる。これは SFC の時間変化を示した図 2 (Load 75% の場合) から明らかなように、時間の経過とともに SFC は減少する傾向にあるため、BTHE は時間経過とともに高くなる。また、十分に時間が経過した際（各図における同始動条件の右端データ）の BTHE を比較すると、同じエンジンタイプではエンジン負荷が大きいくほど BTHE は高く、また総じて温態始動時の方が冷態始動時よりも高い BTHE を示している。例えば 4STDE の Load 50% の場合、始動後 10 分経過時の BTHE は冷態始動条件よりも温態始動条件の方が約 2.5% 高い値である。これらは、上述までの燃料燃焼の変化傾向と定性的に一致する結果である。

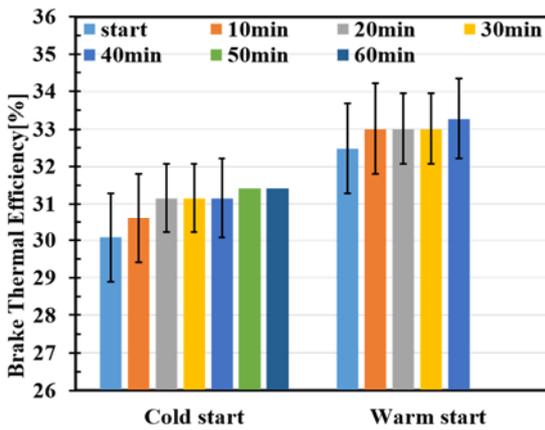


(1) エンジン負荷 50%の場合

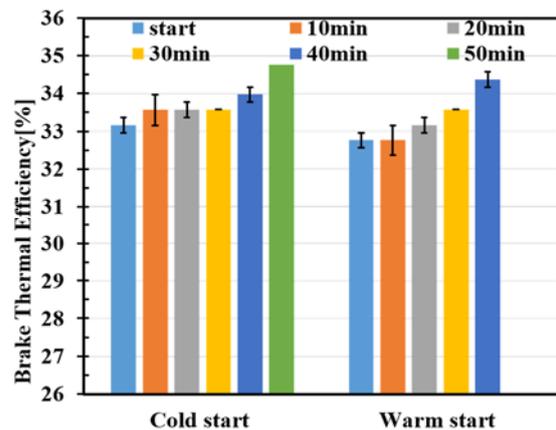


(2) エンジン負荷 75%の場合

図4 二酸化炭素排出量と残留酸素量の相関 (冷態始動の場合)

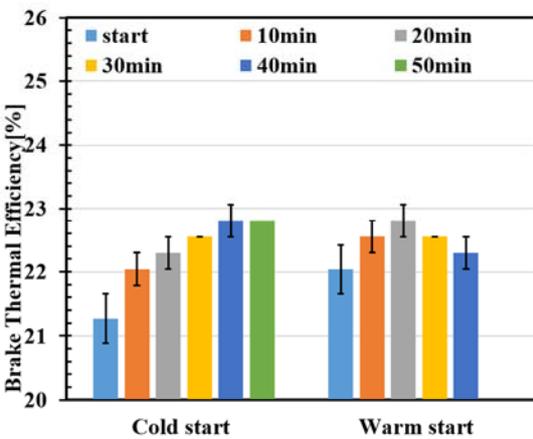


(1) エンジン負荷 50%の場合

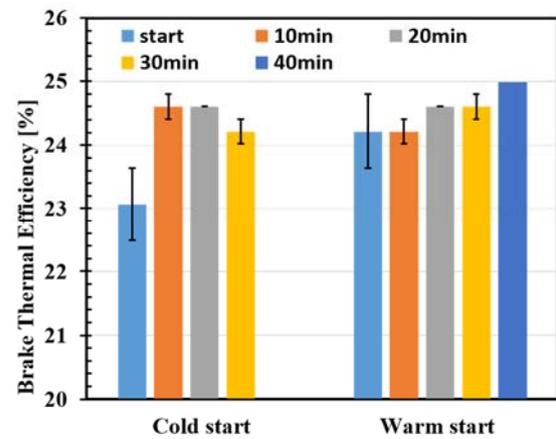


(2) エンジン負荷 75%の場合

(a) 4ストローク機関



(1) エンジン負荷 50%の場合



(2) エンジン負荷 75%の場合

(b) 2ストローク機関

図5 エンジン始動状態による正味熱効率の時間変化の違い

3. 6. 4 まとめ

本研究は、船舶用のディーゼル機関始動時の特性を明らかにすることを目的としている。本年度の研究では、機関始動時における燃焼および排気エミッション特性を明らかにするために、大型単気筒の4ストロークディーゼルエンジンおよび2ストロークディーゼルエンジンを用いて燃焼試験を実施した。特に、エンジン始動時の状態として、暖機をした場合と暖機をしない場合について、機関性能の時間変化を計測して解析を試みた。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 上記 1)および 2)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。
- 4) 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。

排ガス中的一酸化炭素の濃度が高くなる要因を、不完全燃焼によって生成される機構と、完全燃焼で生成した二酸化炭素の熱解離による機構で類推したが、さらなる検討が必要である。また、本年度の実験で、始動直後に高負荷条件に設定して運転を行った場合、当然ではあるが機関回転速度や制動負荷の安定により多くの時間を要した。今後、このような始動直後の燃焼状態についてもより詳細な解析を行っていく。そのような不安定状態でエンジン運転を継続することは損傷の原因にもなる。そこで緊急出航時などエンジンに与えるダメージをできるだけ小さくしながら運転できる条件についても明らかにしていきたい。

参考文献

- (1) 後藤 悟・三村敬久・木村浩明, 船舶ディーゼル機関のNOx低減, 日本機械学会第9回交通・物流部門大会講演論文集, No. 00-50, pp. 233-236, (2000. 12).
- (2) 国土交通省, 海事レポート 2015, 第I部海事行政の重要課題 第9章環境に優しい海上交通, pp. 99-100, http://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk1_000055.html, (2017. 2. 20 閲覧).
- (3) 廣安博之・寶諸幸男・大山宣茂, 改訂内燃機関(機械系大学講義シリーズ), コロナ社, p. 33, (1999. 5).
- (4) 文献(2)の pp. 96-97.
- (5) 日本工業規格, 重油(Fuel oil), JIS K 2205-1991.

謝 辞

本研究の実験遂行において、技術部の浅野一朗氏、内燃機関工学研究室の田中伶央也氏(現 国土交通省)、中口拓也氏(現 博士課程前期課程研究生)、ランショイー氏(現 海事科学部研究生)にご協力をいただきました。ここに記して深い謝意を表します。

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

表面熱伝達率は伝熱工学におけるもっとも重要な量のひとつであり、固体と液体、固体と気体の間の熱交換の割合を表す係数である。熱伝達率が大きい場合、熱が流入しやすく逃げやすい。例えば熱交換器の伝熱管表面では、できる限り多くの熱を伝達する必要があるため、熱伝達率は大きい方が望ましい。一方、さまざまな熱機関や高温／低温流体が流れる配管では、熱損失を小さくするために熱伝達率はできる限り小さい方がよい。本年度は、工学上極めて重要な量である表面熱伝達率を、測定の対象となる機械構造物や機器にセンサーを埋め込むことなく、逆問題的手法により非接触で求めるための基礎となる「有限要素解析の定式化を基盤とした解析手法」に必要な式を導出する。

3. 7. 2 逆問題的手法で表面熱伝達率を求めるため二次元定常問題の有限要素解析の定式化

本節では、逆問題的手法により表面熱伝達率を求める場合の基礎となる、二次元定常温度場における有限要素解析の離散化について解説する。二次元定常温度場の微分方程式を有限要素法により解く場合、離散化した方程式は、以下のマトリクス形式で表すことができる。

$$[k]\{T\} = \{f\} \quad (1)$$

ここで $[k]$ 、 $\{T\}$ 、 $\{f\}$ は、それぞれ要素の熱伝導マトリクス、節点温度ベクトル、熱流束ベクトルである。 $[k]$ は形状関数 $[N]$ 、熱伝導率 l 、表面熱伝達率 h を用いて以下のように表される。

$$[k] = \int_A \lambda \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dA + \int_s h [N]^T [N] ds \quad (2)$$

要素の熱流束ベクトル $\{f\}$ は、熱流束の大きさを q_0 、周囲温度を T_∞ とすると以下のようになる。

$$\{f\} = - \int_{s_2} q_0 [N]^T ds + \int_{s_3} h T_\infty [N]^T ds \quad (3)$$

つぎに、逆問題として表面熱伝達率を求めるために、要素の熱伝導マトリクスと熱流束ベクトルにおける熱伝達に関する成分を分離する。

(1) 熱伝導マトリクス中の熱伝達率に関する成分

熱伝達境界が存在する場合、式(2)、(3)から明らかなように、要素の剛性マトリクスの成分には第2項に示した表面熱伝達率 h を含む項が存在する。式(2)の第2項を書き換えると以下のようになる。

$$\begin{aligned} \int_s h [N]^T [N] ds &= \sum_{i=1}^{IGP} h \begin{bmatrix} N_1^i \\ N_2^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1^i & N_2^i \end{bmatrix} \left(\frac{H}{2} \right) w_i \\ &= h \cdot \frac{H}{2} \begin{bmatrix} N_1^1 N_1^1 w_1 + N_1^2 N_1^2 w_2 & N_1^1 N_2^1 w_1 + N_1^2 N_2^2 w_2 \\ N_2^1 N_1^1 w_1 + N_2^2 N_1^2 w_2 & N_2^1 N_2^1 w_1 + N_2^2 N_2^2 w_2 \end{bmatrix} = h \cdot \frac{H}{2} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$= h \begin{bmatrix} \frac{H}{3} & \frac{H}{6} \\ \frac{H}{6} & \frac{H}{3} \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad \text{where } c_{11} = c_{22} = \frac{H}{3}, c_{12} = c_{21} = \frac{H}{6} \quad (4)$$

上式の導出方法は以下の通りである。

数値積分には 2 点ガウス積分を用いており， H は熱伝達境界を構成する線要素の長さである。形状関数 N_1, N_2 ，ガウス点の座標 s_1, s_2 ，重み係数 w_1, w_2 は下記の通りである。

$$N_1(s) = \frac{1}{2}(1-s), \quad N_2(s) = \frac{1}{2}(1+s) \quad (5)$$

$$s_1 = -\frac{1}{\sqrt{3}}, \quad s_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad w_1 = w_2 = 1$$

これらの値を形状関数の各成分に代入すると

$$\begin{aligned} N_1^1 &= \frac{3+\sqrt{3}}{6}, & N_1^2 &= \frac{3-\sqrt{3}}{6} \\ N_2^1 &= \frac{3-\sqrt{3}}{6}, & N_2^2 &= \frac{3+\sqrt{3}}{6} \end{aligned} \quad (6)$$

となるので，結果的に 3 行目の式が得られる。ここで，形状関数の上付きの数字はガウス点 (1, 2) を表している。

(2) 熱流束ベクトル中の熱伝達率に関する成分

熱伝導マトリクスの場合と同様に，式(3)の第 2 項を書き換えると以下のようにになる。

$$\begin{aligned} \int_{s_3} hT_\infty [N]^T ds &= \sum_{i=1}^{IGP} hT_\infty \begin{bmatrix} N_1^i \\ N_2^i \end{bmatrix} \left(\frac{H}{2} \right) w_i = hT_\infty \cdot \frac{H}{2} \begin{bmatrix} N_1^1 w_1 + N_1^2 w_2 \\ N_2^1 w_1 + N_2^2 w_2 \end{bmatrix} = hT_\infty \cdot \frac{H}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= h \begin{bmatrix} \frac{H}{2} T_\infty \\ \frac{H}{2} T_\infty \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad \text{where } d_1 = d_2 = \frac{H}{2} T_\infty \end{aligned} \quad (7)$$

3. 7. 3 簡単な形状の領域を対象とした逆問題の手法の定式化

(1) 問題の設定

ここでは図 1 に示した矩形のモデルを対象として定式化の考え方を示す。

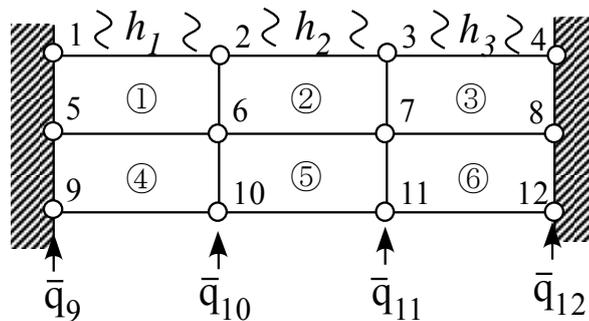


図 1 熱流束境界と熱伝達境界を持つ矩形領域

1. 数値計算を容易にするために、表面熱伝達率を求める節点の番号は1からスタートする。
2. 未知の熱伝達率は3つの線要素における h_1, h_2, h_3 であり、熱伝導方程式の節点1~4に関する成分に熱伝達率が含まれる。
3. サーモグラフィにより節点1~4の温度 ($\bar{T}_1 \sim \bar{T}_4$) を測定する。したがって、未知熱伝達率 (h_1, h_2, h_3) の数は既知温度よりひとつ少ない。その結果、漸化式のような手順で伝達率を求めることができる。
4. 下面の4節点における熱流束 ($\bar{q}_9 \sim \bar{q}_{12}$) は既知とする。
5. 側面の2節点 (節点5と節点8) は断熱境界とする。

(2) 全体熱伝導方程式

$$\begin{array}{cccccccccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\
 \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \left[\begin{array}{cccc|cccccccc}
 \bullet & \bullet & 0 & 0 & \times & \times & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \bullet & \bullet & \bullet & 0 & \times & \times & \times & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \bullet & \bullet & \bullet & 0 & \times & \times & \times & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \bullet & \bullet & 0 & 0 & \times & \times & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 \times & \times & 0 & 0 & \times & \times & 0 & 0 & \times & \times & 0 & 0 & 0 \\
 \times & \times & \times & 0 & \times & \times & \times & 0 & \times & \times & \times & 0 & 0 \\
 0 & \times & \times & \times & 0 & \times & \times & \times & 0 & \times & \times & \times & \times \\
 0 & 0 & \times & \times & 0 & 0 & \times & \times & 0 & 0 & \times & \times & \times \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \times & \times & \times & 0 & \times & \times & \times & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \times & \times & \times & 0 & \times & \times & \times & \times \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \times & \times & 0 & 0 & \times & \times & \times
 \end{array} \right] & \left\{ \begin{array}{l} \bar{T}_1 \\ \bar{T}_2 \\ \bar{T}_3 \\ \bar{T}_4 \\ \tilde{T}_5 \\ \tilde{T}_6 \\ \tilde{T}_7 \\ \tilde{T}_8 \\ \tilde{T}_9 \\ \tilde{T}_{10} \\ \tilde{T}_{11} \\ \tilde{T}_{12} \end{array} \right\} & = & \left\{ \begin{array}{l} \tilde{q}_1 \\ \tilde{q}_2 \\ \tilde{q}_3 \\ \tilde{q}_4 \\ \bar{q}_5 \\ \bar{q}_6 \\ \bar{q}_7 \\ \bar{q}_8 \\ \bar{q}_9 \\ \bar{q}_{10} \\ \bar{q}_{11} \\ \bar{q}_{12} \end{array} \right\} & (8)
 \end{array}$$

上式は、前出の例題に対して熱伝達境界を組み込んだ全体熱伝導方程式である。

ここで \bullet : 未知熱伝達率 h_i を含む成分, \times : 未知熱伝達率 h_i を含まない非零成分

$\bar{T}_1 \sim \bar{T}_4$: 既知温度 (サーモグラフィで測定), $\tilde{T}_5 \sim \tilde{T}_{12}$: 未知温度

$\tilde{q}_1 \sim \tilde{q}_4$: 未知熱伝達率 h_i を含む成分

$\bar{q}_5 \sim \bar{q}_{12}$: 既知熱流束成分 (ただし物体内部 $\bar{q}_5 \sim \bar{q}_8$ は零, $\bar{q}_9 \sim \bar{q}_{12}$ は非零成分)

1) 未知節点温度の計算

式(1)を既知成分と未知成分を含むマトリクスとベクトルに分けて表示する。

$$\left[\begin{array}{c|c} \tilde{K}_{11} & K_{12} \\ \hline K_{21} & K_{22} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \bar{T} \\ \tilde{T} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \tilde{q} \\ \bar{q} \end{array} \right\} \quad (9)$$

$[\tilde{K}_{11}]$: 未知熱伝達率 h_i を含むマトリクス

$[K_{12}], [K_{21}], [K_{22}]$: 成分が全て既知のマトリクスで $[K_{22}]$ のみ対称マトリクス

$\{\bar{T}\}$: 既知節点温度ベクトル (サーモグラフィで測定)

$\{\tilde{T}\}$: 未知節点温度ベクトル

$\{\tilde{q}\}$: 未知熱伝達率 h_i を含むベクトル

$\{\bar{q}\}$: 既知節点熱流束ベクトル

式(9)を2つの式に分けて書くと

$$[\tilde{K}_{11}]\{\bar{T}\} + [K_{12}]\{\tilde{T}\} = \{\tilde{q}\} \quad (10)$$

$$[K_{21}]\{\bar{T}\} + [K_{22}]\{\tilde{T}\} = \{\bar{q}\} \quad (11)$$

式(11)を変形して未知節点温度 $\{\tilde{T}\}$ を求める.

$$\therefore \{\tilde{T}\} = [K_{22}]^{-1} (\{\bar{q}\} - [K_{21}]\{\bar{T}\}) \quad (12)$$

2) 内表面 (熱流束境界) の熱伝達率 h_{in} の算出

内表面の節点における温度と熱流束を T_{in} , q_{in} , その節点がカバーする表面積を A , 流体温度を T_w とすると,

$$q_{in} = h_{in} A (T_w - T_{in}) \quad \text{より}$$

$$\therefore h_{in} = \frac{q_{in}}{A(T_w - T_{in})} \quad (13)$$

3) 外表面 (温度既知境界) の熱伝達率 h_{out} の算出

式(12)を式(10)の $\{\tilde{T}\}$ に代入して, 未知熱伝達率 h_i を含む項を左辺に集める.

$$[\tilde{K}_{11}]\{\bar{T}\} - \{\tilde{q}\} = -[K_{12}]\{\tilde{T}\} \quad (= -[K_{12}][K_{22}]^{-1} (\{\bar{q}\} - [K_{21}]\{\bar{T}\})) \quad (14)$$

式(14)の右辺のマトリクス演算を実施すると, 既知ベクトル $\{\bar{b}\}$ の成分は $\bar{b}_1 \sim \bar{b}_4$ の4つとなる.

$$[\tilde{K}_{11}]\{\bar{T}\} - \{\tilde{q}\} = \{\bar{b}\} \quad (15)$$

$$\text{ここで } \{\bar{b}\} = -[K_{12}]\{\tilde{T}\} \quad (16)$$

式(8)の左辺の $[\tilde{K}_{11}]$ と $\{\tilde{q}\}$ に含まれている未知熱伝達率 (h_1, h_2, h_3) は, 漸化式を解く場合と類似の手順で求める. $[\tilde{K}_{11}]$ において熱伝導に関する成分を a_{ij} , 熱伝達境界によって追加された未知熱伝達率 h_i を含む成分を

$$h_i \begin{bmatrix} c_{11}^i & c_{12}^i \\ c_{21}^i & c_{22}^i \end{bmatrix} \quad (17)$$

とする。また同様に、未知熱伝達率 h_i を含むベクトル成分 $\{\tilde{q}\}$ は以下の形式で表すことができる。

$$h_i \begin{Bmatrix} d_1^i \\ d_2^i \end{Bmatrix} \quad (18)$$

式(17), (18)中に現れる添字 i は線要素の番号を表している。

以下に式(15)の具体的な成分を用いて表示する。

$$\begin{bmatrix} a_{11} + h_1 c_{11}^1 & a_{12} + h_1 c_{12}^1 & 0 & 0 \\ a_{21} + h_1 c_{21}^1 & a_{22} + h_1 c_{22}^1 + h_2 c_{11}^2 & a_{23} + h_2 c_{12}^2 & 0 \\ 0 & a_{32} + h_2 c_{21}^2 & a_{33} + h_2 c_{22}^2 + h_3 c_{11}^3 & a_{34} + h_3 c_{12}^3 \\ 0 & 0 & a_{43} + h_3 c_{21}^3 & a_{44} + h_3 c_{22}^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{T}_1 \\ \bar{T}_2 \\ \bar{T}_3 \\ \bar{T}_4 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} h_1 d_1^1 \\ h_1 d_2^1 + h_2 d_1^2 \\ h_2 d_2^2 + h_3 d_1^3 \\ h_3 d_2^3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{b}_1 \\ \bar{b}_2 \\ \bar{b}_3 \\ \bar{b}_4 \end{Bmatrix} \quad (19)$$

式(19)を行ごとに展開すると熱伝達率 h_1 , h_2 , h_3 が順次求められる。

< 1 行目 >

$$(a_{11} + h_1 c_{11}^1) \bar{T}_1 + (a_{12} + h_1 c_{12}^1) \bar{T}_2 - h_1 d_1^1 = \bar{b}_1 \quad \text{より}$$

$$\therefore h_1 (c_{11}^1 \bar{T}_1 + c_{12}^1 \bar{T}_2 - d_1^1) = \bar{b}_1 - (a_{11} \bar{T}_1 + a_{12} \bar{T}_2) \quad (20)$$

上式より h_1 が求められる。

< 2 行目 >

$$(a_{21} + h_1 c_{21}^1) \bar{T}_1 + (a_{22} + h_1 c_{22}^1 + h_2 c_{11}^2) \bar{T}_2 + (a_{23} + h_2 c_{12}^2) \bar{T}_3 - (h_1 d_2^1 + h_2 d_1^2) = \bar{b}_2 \quad \text{より}$$

$$\therefore h_2 (c_{11}^2 \bar{T}_2 + c_{12}^2 \bar{T}_3 - d_1^2) = \bar{b}_2 - (a_{21} + h_1 c_{21}^1) \bar{T}_1 - (a_{22} + h_1 c_{22}^1) \bar{T}_2 - a_{23} \bar{T}_3 + h_1 d_2^1 \quad (21)$$

上式より h_2 が求められる。

< 3 行目 >

$$(a_{32} + h_2 c_{21}^2) \bar{T}_2 + (a_{33} + h_2 c_{22}^2 + h_3 c_{11}^3) \bar{T}_3 + (a_{34} + h_3 c_{12}^3) \bar{T}_4 - (h_2 d_2^2 + h_3 d_1^3) = \bar{b}_3 \quad \text{より}$$

$$\therefore h_3 (c_{11}^3 \bar{T}_3 + c_{12}^3 \bar{T}_4 - d_1^3) = \bar{b}_3 - (a_{32} + h_2 c_{21}^2) \bar{T}_2 - (a_{33} + h_2 c_{22}^2) \bar{T}_3 - a_{34} \bar{T}_4 + h_2 d_2^2 \quad (22)$$

上式より h_3 が求められる。

< 4 行目 >

式(22)に続いて以下の式からも h_3 が求めることができる。

$$(a_{43} + h_3 c_{21}^3) \bar{T}_3 + (a_{44} + h_3 c_{22}^3) \bar{T}_4 - h_3 d_2^3 = \bar{b}_4 \quad \text{より}$$

$$\therefore h_3 (c_{21}^3 \bar{T}_3 + c_{22}^3 \bar{T}_4 - d_2^3) = \bar{b}_4 - (a_{43} \bar{T}_3 + a_{44} \bar{T}_4) \quad (23)$$

h_3 の値が 2 通り得られることは、既知節点温度よりも求めるべき未知熱伝達率の数がひとつ少ないことに起因している。したがって、3 行目と 4 行目の式から求められた h_3 の値を比較すること、及び熱伝

達率を求める順序を $h_3 \rightarrow h_2 \rightarrow h_1$ と変更した結果と比較することは重要である。

3. 7. 4 逆問題として表面熱伝達率を求める手順

(1) 表面温度から熱伝達率を求める問題の定義と解析条件

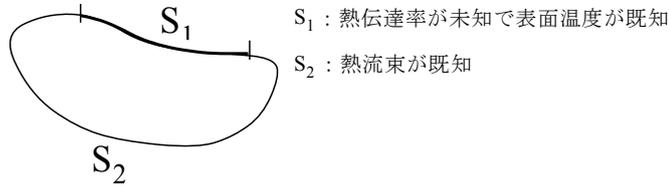


図 2 熱伝達境界と熱流束境界

$$\begin{bmatrix} \tilde{K}_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{T} \\ \tilde{T} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{q} \\ \bar{q} \end{Bmatrix} \quad (9) \text{ 再掲}$$

S_1 は熱伝達境界であり、サーモグラフィを用いた測定によって温度が既知である。

式 (9) 中の $\{\bar{T}\}$ に関連して、温度が既知の節点数は表面熱伝達率を含む熱伝導マトリクスの $[\tilde{K}_{11}]$ の行数と列数、および熱流束ベクトル $\{\tilde{q}\}$ の行数と等しくなければならない。

前節の手順をまとめると以下ようになる。

1. 未知節点温度 $\{\tilde{T}\}$ を求める。

$$[K_{21}]\{\bar{T}\} + [K_{22}]\{\tilde{T}\} = \{\bar{q}\} \quad (11) \text{ 再掲}$$

より、 $\{\tilde{T}\}$ を求める。

2. 既知となった節点温度のうち、内表面温度の値を用いて熱伝達率 h_{in} を求める。

$$h_{in} = \frac{q_{in}}{A(T_w - T_{in})} \quad (13) \text{ 再掲}$$

3. $[\tilde{K}_{11}]$ と $\{\tilde{q}\}$ を左辺に集めて、未知熱伝達率を含むそれらに含まれる未知熱伝達率 h_i を $h_1, h_2, h_3 \dots$ と順次求めていく

(2) 表面熱伝達率計測システムのイメージ

1. 測定対象部分周辺の有限要素モデルを作成

数値計算を容易にするために、熱伝達率が未知の表面の節点に対して節点番号を 1 から順番に通し番号で付ける。

2. 有限要素モデルの境界条件の決定

解析手法の基本が「既知の節点温度の数 = 未知の熱伝達率の数」であるために、断熱の場合も含めて、熱伝達境界以外の“熱流束境界”では熱流束の値は全て既知でなければならない。

3. サーモグラフィを用いて熱伝達率を推定したい表面の温度を計測する.
4. 測定結果から, 逆問題の入力データとして必要な既知節点温度 $\{\bar{T}\}$ を求める.
5. 既知節点温度 $\{\bar{T}\}$ を入力データとして未知熱伝達率 h_i を求める.

(3) 解析対象となる構造物の例

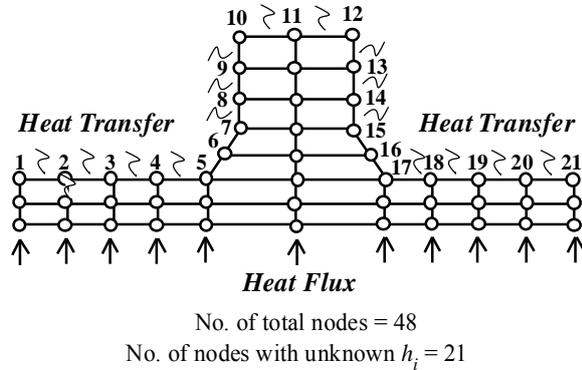


図 3 管フランジ形状の解析モデル

管フランジのような構造物では, 表面温度を計測して熱伝達率を求める境界 (節点 1~21) を除いて, 各節点における熱流束の値がすべて既知であるために, ここで提案している解析手法を適用することが可能である.

3. 7. 5 おわりに

本年度は有限要素解析の定式化手順を基盤として, 逆問題的手法により表面熱伝達率を求める具体的な手順を提案した. 一般に, 熱伝導問題における未知数は節点温度である. 一方, 表面熱伝達率は面で定義される量である. 二次元問題で考えると, 表面熱伝達率は表面の面要素上で定義されるため, その両端の節点温度に比べて数が少なくなる. すなわち, 未知数に対して方程式が多い問題を解くことになる. そこで本研究では, 表面熱伝達率を連立一次方程式の解としてではなく, 漸化式のような形式で求める手法を提案した. その場合, 解の精度は境界条件や要素の細かさ等によって変化することが予測される. 次年度は, 今回提示したような簡単な領域を対象とした解析により, 本研究で提案した解析手法の精度を検討し, その結果を踏まえて図 3 のような具体的な構造物の解析を実施する予定である.

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。まず第一点は、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て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である昨年に実施しているため、結果については昨年度の報告書をご覧ください。もう一点は、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つの研究テーマから構成されており、それぞれの分野を専門とする研究者が担当している。

本年度は3年計画の事業の2年目であり、7つの研究テーマの進捗状況の報告とともに、それぞれのテーマに対して残された課題を検証することにより、最終年度に向けた中間報告としたい。

4. 1 各研究テーマの進捗状況

最初の「緊急出航時の機関プラントの状態把握に関する研究」では、神戸大学海事科学部附属練習船“深江丸”で収録したデータを用いて、緊急出航時に想定される機関プラント問題点を実際の運航の観点から検討している。2番目のテーマ「船舶運航シミュレータを用いた緊急出航操作の検討」では、機関プラントシミュレータを用いて、津波が発生した際の緊急出航における暖機の状態を、実船での暖機状態を記録から、シミュレータ環境下で再現することを試みている。3番目のテーマ「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」では、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、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体系的な実験を行い、自力離棧の可能性について検討している。4番目のテーマ「船舶運航シミュレータを用いた緊急出航操作の検討」では、自力離棧に対する風速、風向、津波の流速の影響を検討しており、対象とした船舶では流速3ノット程度が限界であるという結論を得ている。5番目のテーマ「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」では、近年急激に運航隻数が増えているLNG船を対象として、配管中の低温流体の流量が急激に増加する場合の熱応力現象を解析し、通常の高温配管より危険性が高いことを明らかにしている。6番目のテーマ「エンジン始動時の過渡的に変化する特性に関する研究」では、4ストローク機関と2ストローク機関を使用して、冷間状態からと暖機実施後という2つの異なった始動条件に対して、機関性能の時間変化を比較している。7番目のテーマ「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」では、有限要素解析の定式化手法を基礎として、逆問題の手法を適用することにより、サーモグラフィで配管の表面温度を測定することにより、測定部分の熱伝達率の分布を求めることができる具体的な手法を提案している。

4. 2 最終年度に向けた各研究テーマの課題

(1) 機関プラントの克服すべき課題

本年度は機関プラントの状態を把握する為に、主機関の冷却水や潤滑油の時系列データに着目した。始動準備操作により、機関内部の冷却水や潤滑油など流体移動が生じる時に、外部から十分に温められてい

ない流体が機関へ流入している事が確認され、推進機関だけでなく、機関プラント全体の暖機必要性が示唆された。この先の課題として、プラント内の流体温度差の軽減を図る操作方法の確立が必要であると考えられる。

(2) 機関プラントシミュレーションの利用方法と克服すべき課題

本年度の成果として、本学設置の機関プラントシミュレータにて、実船データを活用した緊急暖機時のプラント状態の再現を試みた。継続する課題として、船種による機関プラントの違いから、シミュレータでの再現範囲を検討する必要がある。実船データのファイル形式やデータの取り込み位置等、継続して検討を進める。

(3) 操船シミュレータの利用方法と克服すべき課題

研究テーマの3と4は、実施にあたって同じ課題を抱えているため、以下にまとめて記述している。対象とした船舶の諸元、機関の種類、積載貨物の種類、風況については本文中に記述した通りである。対象とした港湾は六甲アイランド南側コンテナバースであり、仮に津波が発生した場合、東と西からの津波の流向が予想される。また流速については、本文中の予測図をもとに1ノットから5ノットとしている。

一方、船舶が港湾で停泊中、推進用原動機は停止状態にあることが多いが、緊急出航では原動機を早急に始動することが必要になる。今後の課題としては、緊急始動かかる時間、使用方法等について、操船シミュレータで実施した使用が可能かどうか他部門との協議し、標準操船方法を確立する。また、操船シミュレータでの津波による流れと風の影響（風向）を複合した実験を実施し、離岸できる限界点を検討する必要がある。

(4) 機関プラントの過渡的熱応力解析の利用方法と課題

初年度において、緊急出航時に機関の配管に発生する過渡的熱応力を評価したところ、清水、潤滑油、燃料油が流れる配管に発生する熱応力は、急激に流量が増加した場合でも、配管接合部のフランジのシール性能、強度に影響するレベルの熱応力は発生しないという結論を得ている。一方、流体が本年度対象としたLNGの場合、かなり大きな熱応力が発生することが明らかとなった。次年度は、実際に低温流体による熱応力が問題となると考えられる管フランジ締結部を対象とした解析を実施することにより、LNGを移送中のLNG船が緊急出港する場合、移送作業をどのように終了すればよいかについて力学的な観点から有効な知見を提供することを目的とする。

(5) 船舶用ディーゼル機関の過渡特性（暖機をした場合と暖機をしない場合）

船舶が港湾にて停泊・着岸する際、推進用原動機は停止状態にあることが多いが、緊急出航では原動機を早急に始動することが必要になる。しかしながら、船用機関の始動後の運転状態およびその過渡的な変化については不明な点が多い。そこで、本研究では試験用単気筒船用ディーゼル機関を用いて、機関始動後の運転性能の過渡的な変化を実験的に解析する。本年度は、動作原理（4ストローク、2ストローク）および始動時条件（冷態状態、温態状態）をパラメータにして実験的解析を行い、安定した運転状況に至るまでに要する時間は、冷態始動よりも温態始動、また4ストロークよりも2ストロークの方が短くなる傾向にある結果を得た。今後、始動直後の運転状況についても解析を行い、機関の緊急始動時における運転性能状況を明らかにしていく。

(6) 配管系の非破壊検査に熱現象の解析手法とその利用方法

本年度までに研究成果により、熱応力が問題となると考えられる配管表面の表面熱伝達率を推定する手法が確立したといえる。解析手法の信頼性については、簡単な円管形状の配管を対象としてほぼ確認を

終えている。一方、実際の配管において問題が発生するのは、配管のつなぎ目である管フランジ継手である。最終年度では、本解析手法を管フランジのような複雑な形状を有する対象物に拡張し、十分な精度が得られるように改善を加えることにより、非破壊検査による配管表面の熱伝達率の推定方法を確立することを目的とする。

以上のように、7つのテーマはいずれも順調に進行していると考えられる。次年度は、3年間の事業計画の最終報告に向けてさらに研究内容を深め、津波発生時の緊急出航に対して実用的かつ有効な知見、指針を提供できると期待される。