

# 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28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  
(NKKK 総合研究所)

# 目 次

1. 目的	1
2. 事業計画の概要	2
3. 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	4
3. 1 はじめに	4
3. 2 アンケートの内容	4
3. 3 アンケートの結果	5
3. 4 考察	5
4. 緊急出航時に想定される問題解決に向けた研究	9
4. 1 緊急出航時の機関プラントの状態把握に関する研究	9
4. 1. 1 実験方法	9
4. 1. 2 実験結果	10
4. 1. 3 まとめ	13
4. 2 船舶運航シミュレータを用いた緊急出航操作の検討	14
4. 2. 1 はじめに	14
4. 2. 2 船種別の機関始動準備について	14
4. 2. 3 機関室シミュレータを用いた各種機関の始動方法の検証の検討	15
4. 2. 4 緊急出航操作のシミュレーションに関するまとめ	17
4. 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	18
4. 3. 1 検討係留地	18
4. 3. 2 検討対象船舶	18
4. 3. 3 津波の条件設定	18
4. 3. 4 次年度への課題	20
4. 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	21
4. 4. 1 緊急出航の検討	21
4. 4. 2 実験方法	21
4. 4. 3 実験結果	21
4. 4. 4 まとめ	22
4. 4. 5 次年度への課題	22
4. 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	23

4. 5. 1	はじめに	23
4. 5. 2	配管内の流体の流れと発生する熱応力	23
4. 5. 3	有限要素解析による配管のモデル化	24
4. 5. 4	熱応力の理論解との比較による数値解析の精度の検証	24
4. 5. 5	解析結果	25
4. 5. 6	まとめ	27
4. 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	28
4. 6. 1	はじめに	28
4. 6. 2	実験装置および方法	28
4. 6. 3	実験結果	30
4. 6. 4	まとめ	32
4. 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	33
4. 7. 1	はじめに	33
4. 7. 2	定常熱伝導問題の基礎式と境界条件	33
4. 7. 3	一次元定常熱伝導問題の解	34
4. 7. 4	簡単な例題による表面熱伝達率の推定方法の考察	34
4. 7. 5	まとめ	38
5.	まとめ	39

## 1. 目的

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、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。

神戸大学大学院海事科学研究科では練習船「深江丸」(449G/T)を所有している。東日本大地震・大津波発生直後、大阪湾や瀬戸内海に津波注意報が発令されたときは、平日の昼間であったことも幸いし、港外避泊の決定から1時間足らずで学内専用岸壁を離岸、大阪湾北部の安全な水域に移動し、錨泊して津波の到来に備えた。緊急であったために、その時の詳細な記録や資料は航海日誌以外に残っていないが、緊急用食料の常備や休日・夜間における保安態勢等の問題が顕在化した。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）

湊 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）

河合和弥（担当：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）



- ✓ 荷役中止の基準
- ✓ 陸上側の停電への考慮
- ✓ 環境条件（周囲の他の船舶の有無、昼夜、風向風速）
- ✓ 緊急離棧の方法（スタンバイ要員、操船方法、係留策扱い等）
- ✓ 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）
- ✓ 個別の港湾毎の取り決め

5. 各船毎に各船に応じた対応手順を検討させていますか？

6. 実船を用いた津波対応訓練を行ったことがありますか？

=====アンケート（おわり）=====

### 3. 3 アンケートの結果

アンケートは、外航船社4社、内航船社2社（1社はフェリー）、官公庁1組織に対して依頼し、すべて回答をいただいた。アンケート数は7と少ないが、外航、内航、官公庁をカバーしており、「津波発生時の緊急出航」に関して、有効な情報を提供できるものと考えられる。

以下にアンケート結果のポイントをまとめている。

質問1 地震発生時の初期対応についての規則等がありますか。

<外航船社>

規則で定めている場合とガイドラインレベルのケースがあるが、いずれ場合も「地震と津波の情報収集の方法」、「乗組員の安全の確保」、「上陸員の確認と連絡方法」、「会社等への連絡手段の確保、報告」のすべてをカバーしている。

上記に関連して、特筆すべき対応策を以下に列挙する。

- ・情報を収集する方法をガイドラインに記述している。
- ・地震に関する情報は以下のサイトから入手するように指示している。
  - 海上保安庁沿岸域情報提供システム（MICS）ミックス
  - 国土交通省ハザードマップポータルサイト
  - 気象庁大津波警報・津波警報・津波注意報
  - U.S. Geological Survey, WNI 津波情報ほか
- ・津波の発生が予想される場合、本船から代理店、配船担当者に遅滞なく連絡する。
- ・本船と配船担当者および代理店間の連絡方法について、固定電話が使えない場合を想定して、固定電話から災害緊急電話まで優先順位を決めている。
- ・乗組員不在により緊急出港できないケースがないように、運航に必要な最低の人員を常時確保している。
- ・配船担当者はバースの管理者から津波に対する対応措置を事前に入手することになっている。
- ・乗組員の個人向けの行動指針は記述していない。

・津波が発生した際、上陸中の乗組員はまず避難して、状況を関係先に連絡してその後の対応策を確認する。

・津波発生時は、想定される事態について配船担当者の指示にしたがって、本船が荷役関係者と事前協議する。

・種々の理由で緊急出港できない場合は、船長の判断で係留強化により対応することもある。

<内航船社>

回答の中の重要事項を以下に列挙する。

・「津波避難マニュアル」を作成している。

・質問1の第4項の「会社等への連絡手段の確保、報告」を除いて規則がある。

・「震度とマグニチュード」、「津波警報・注意報の種類」、「気象庁発表情報」、「津波情報の入手」、「船舶津波対応手順」の5章からなるマニュアルを作成している。

<官公庁>

4つの質問項目に対して、SMSマニュアルで規定している、あるいはBCP（事業継続計画）で規定している。

質問2 入港時または航行時の津波に対する緊急対応についての規則等がありますか。

<外航船社>

1社の除き、ガイドライン等を定めているという回答であった。

<内航船社>

いずれも「ある」という回答であったが、1社については「入港時のみ」という回答であった。

<官公庁>

入港時のみ「ある」という回答であった。

質問3 入港している港またはバースによって津波に対する対応についての規則等がありますか。

<外航船社>

規則等を定めているが1社、港・バースごとの指針は定めておらず、各港の手順に従うあるいはバースマスターに確認するが2社、規則を定めていないが1社であった。

<内航船社>

1社は「ない」という回答であったが、もう1社は港ごとに「津波・台風対策委員会」を設置して、そこで規則を決めている。

<官公庁>

個別の港やバースについては規定していないという回答であった。

質問4 津波に対する規則等において、緊急離棧または係留対応等の行動を決定するための基準や簡易決定表等がありますか。

<外航船社>

「津波の規模と到達までの時間」から「個別の港湾毎の取り決め」まで、全12項目の質問について、「津波の基準による安全推進の基準」と「個別の港湾ごとの取り決め」を除いて基準を定めているのが1

社、津波の高さと警報・注意報のレベルに応じて独自に本船の対応の基本方針を決めているのが1社、「津波の規模と到達までの時間」と「緊急離棧の方法」について基準があるが1社、すべて基準等があるという回答が1社であった。

<内航船社>

1社は、港ごとに規則は決めていないが社内マニュアルでは考慮しており、もう1社は、「船舶の状態」、「陸からの支援の可否」、「津波の大きさによる安全水深の基準」、「個別の港毎の取り決め」を除いて基準等があるという回答であった。

<官公庁>

とくに基準はないという回答であった。

質問5 各船毎に各船に応じた対応手順を検討させていますか？

<外航船社>

回答例は以下の通り。

- ・対応手順は作成していないが、今後作成予定である。
- ・タンカーなどバース毎に規定がある場合はそれに従う。
- ・船ごとの対応手順はないが、船長用のガイドラインは存在する。

<内航船社>

いずれも「検討している」という回答であった。

<官公庁>

船ごとに大きな違いはないので、とくに検討はしていない。SMS安全管理マニュアルをベースに、細部は船長が判断するという回答であった。

質問6 実船を用いた津波対応訓練を行ったことがありますか？

<外航船社>

実船を使った訓練を実施したことはないが、今後実施する予定であるという回答が2社。LNG船により実施したことがあるという回答が2社であった。

<内航船社>

いずれも訓練を実施したことがあるという回答であった。

<官公庁>

訓練を実施したことがあるという回答であった。

### 3. 4 考察

・質問1については、レベルの差はあるが外航船社、内航船社、官公庁のいずれも規則等があるという回答であった。

・質問2については、各社とも概ねガイドライン等を定めているようであるが、航行時に比べて危険度の高い「入港時」が中心となっている。

・質問3については、外航船社の中でも対応が分かれている。一方、内航船や官公庁船では、使用する港が固定しているなど、使用形態に応じた対応がなされているといえる。

- ・質問 3 については、外航船社の間だけでなく、内航船社、官公庁の中でも対応が分かれている。とくに旅客の運搬が大きな業務となっている船会社では、その特徴がよく現れている。
- ・質問 4 については、すべての項目について「基準あり」から「基準なし」まで、外航船社、内航船社、官公庁の中でもそれぞれ独自のレベルで対応していることがわかる。
- ・質問 5 については、船ごとに明確な対応手順を設定している例はないが、危険度の高い船種に対する意識が高く、今後検討する予定という回答が見受けられる。
- ・質問 5 については、訓練を実施したという回答が多く、近い将来にはほとんどの船会社で実施されるであろうことが予測される。

## 4. 緊急出航時に想定される問題解決に向けた研究

### 4. 1 緊急出航時の機関プラントの状態把握に関する研究

一般的に津波に対する避難行動は「高所への避難」となるが、船舶とりわけ大型船舶が津波による被災を回避する方法の一つとして、「沖出し」と呼ばれる手法がある。沖出しは、水深の深い港外へ出ることによって被害を最小限に抑える手法である。ただし、海上では横波による転覆を防ぐ為、波に対して船首を向け続ける高い操船技術が要求される。文献によると、東日本大地震発生時港湾に在泊していた 120 隻の大型船舶のうち、57%が港外退避、17%が港内待機、26%が港内漂流した。港外退避した船舶のうち被災のなかった船舶が 88%で、被災が軽かったものが 12%であった。港内待機した船舶のうち被災のなかった船舶が 55%、被災の程度が軽かったものが 45%であった。港内漂流した船舶はすべて被災したと報告されている。このことから、津波発生時に人命及び大型船舶を守る手法の一つとして「沖出し」は有効であると言える。ただし、実情では津波発生時においてすぐに沖出しという対応は取れない。船舶が海上で津波を切り抜ける為には「水深 50m 以上の安全海域に出ること」が目安とされている。つまり津波発生時に船舶が取るべき避難方法は、津波の到達時間や近隣海域の地理的条件、本船及び乗組員出港準備状態や荷役状況など、多岐にわたる要因に依存する。切迫した状態で最善な判断を導き出すには豊富な経験が必要となる。前述の東日本大震災において、本校附属練習船「深江丸」（以下、深江丸とする）は、主機関（以下、主機とする）を緊急始動している。このときは出航までに十分な時間が確保できず、暖機が不十分な状態で主機を始動したところ、異常音と大きな振動を伴った。この経験を踏まえ、「緊急始動」が主機に与える危険性を調査し、深江丸における緊急出航時の判断指標につなげていきたいと思う。またその結果より、他の船舶においても有効な判断指標にもなると考える。

#### 4. 1. 1 実験方法

深江丸の主機を用いて、緊急出航を想定した緊急暖機を実施し機関を始動する。通常暖機時と緊急暖機時において始動時における状態を比較することで、緊急暖機が主機に与える影響を調査する。前述の緊急始動時の経験から、暖機不足であれば着火性や機関振動、始動音に通常暖機時との違いが現れると考えられる。そこで、今回は以下の 2 項目をについて検証する。

- ・ 始動時の主機の様子
- ・ 始動時における機関振動

深江丸の運航においては、通常、2 台あるうち 1 台のディーゼル発電機の運転をもって冷却清水を温め主機の暖機とするが、緊急暖機では 2 台を並列運転として調査する。原則として主機に深刻な影響を与えるまでの負荷はかけられないため、外気温及び海水温度が比較的高い 8 月～10 月を実験対象とし、実験を積み重ねた上で可能であれば、緊急暖機条件をより厳しく設定するものとした。

[調査項目]

- ・ 機関室温度
- ・ 海水温度（主機冷却海水ポンプ入口温度）
- ・ 主機始動空気圧力
- ・ 主機冷却清水入口温度
- ・ 主機冷却清水出口温度

【振動の計測】

機関振動は主機上部において、振動計で計測する。(表1) 振動の三要素として、「速度」「加速度」「変位」の三項目が挙げられるが、機関振動と計測機器の相性、測定値の正確さを重視して、この度の実験では機関振動の変位に着目して計測を行う。振動方向は主機の船首尾方向、横方向、縦方向の成分に分けて考えられる。深江丸主機(表2)は4ストロークエンジンで、トランクピストン型に分類される。つまりピストン側圧の影響を受けやすく、緊急暖機時の影響も横振動が大きく現れるのではないかと考えられた。しかし、横方向の振動計測は計測点を正しく捉え続ける事が難しく、試験計測では計測誤差が大きく現れた。よって機関振動の大小を正當に評価する事が難しいと判断し、計測誤差が最も少ない縦振動を計測対象とする。変位は実効値表示で、mm 単位で計測する。計測点は、負荷側と反負荷側双方の振動を計測するため、6番シリンダカバ上面と空気冷却器上面の2点とした。

表1 振動計詳細

ディスプレイ表示	57m×37mm LCDディスプレイ(320×200ピクセル)	
測定	速度、加速度、変位	
測定内容		測定レンジ 周波数レンジ
	加速度	0.1-392m/s <sup>2</sup> 10-200Hz、10-500Hz 10-1kHz、10-10kHz
	速度	0.01-80cm/s 10-200Hz、10-500Hz 10-1kHz
	変位	0.001-10mm 10-200Hz、10-500Hz
精度	±5%	
ピーク値測定	ピーク値=1.414×実効値	
メモリー	25×62測定値記録、25スペクトルグラフ	
使用温度湿度	0°C-40°C 相対湿度で80%RH未満	

表2 深江丸主機要目

型式	6DLM-26S
種類	立型水冷直接噴射式 4サイクルディーゼル機関
シリンダ数	6気筒
シリンダ径	260mm
行程	360mm
定格回転数	720rpm
定格軸出力	1100kW
回転方向	フライホイール側から見て時計方向
過給方式	排気ガスタービン過給
始動方式	圧縮空気始動
着火順序	1-4-2-5-3-6
L.O.クーラ	多管式
CFWクーラ	多管式
F.O.フィルタ	ノッチワイヤ式
L.O.フィルタ	ノッチワイヤ式

4. 1. 2 実験結果

[通常暖機]

- ① 8月25日 暖機時間 284分  
0824：1号発電機始動、 1300：2号発電機始動、 1308：主機始動
- ② 10月8日 暖機時間 164分  
1100：1号発電機始動、 1332：2号発電機始動、 1344：主機始動

[緊急暖機]

- ③ 9月16日 暖機時間 62分  
0814：1号発電機始動、 0816：2号発電機始動、 0916：主機始動
- ④ 9月28日 暖機時間 23分  
1429：1号発電機始動、 1431：2号発電機始動、 1452：主機始動
- ⑤ 10月5日 暖機時間 20分  
0759：1号発電機始動、 0802：2号発電機始動、 0819：主機始動

表3 機関始動時における状態

DATE	E/R	SW	Starting Air	CFW Temp.	
	Temp. (°C)	Temp. (°C)	Press. (MPa)	M/E In (°C)	Com Out (°C)
①(25.Aug.)	34.6	26.4	1.95	50	51
②(8.Oct.)	31.9	24.1	1.89	47.5	48.2
③(16.Sep.)	31.6	25.2	1.72	43.5	49.7
④(28.Sep.)	28.8	24.8	1.41	36.5	36.7
⑤(5.Oct.)	23.8	22.8	1.57	31.8	31.9

表4 6番シリンダ上面振動計測結果

No.	Main Param.	Measured Value	/Avg.	Time
①	Displacement	0.63116	1.0277	13:08
②	Displacement	0.59714	0.9723	13:44
Avg.	Displacement	0.61415	1	
③	Displacement	0.50236	0.8180	9:16
④	Displacement	0.71626	1.1663	14:52
⑤	Displacement	0.53405	0.8696	8:19

表5 空気冷却器上面振動計測結果

No.	Main Param.	Measured Value	/Avg.	Time
①	Displacement	0.65626	1.0107	13:08
②	Displacement	0.6424	0.9893	13:44
Avg.	Displacement	0.64933	1	
③	Displacement	0.54178	0.8344	9:16
④	Displacement	0.77301	1.1905	14:52
⑤	Displacement	0.60092	0.9254	8:19

深江丸では、発電機冷却清水を主機に循環させることにより暖機している。つまり、発電機運転が暖機の開始となる。通常停泊中においても発電機は運転されているが、深江係留中は陸上からの給電に切り替えているため発電機は運転されていない。暖機時間に規定を設けているわけではなく、主機冷却清水出入口温度が40°C以上あれば暖機は終了と判断している。通常暖機においては、100分以上の時間をかけて暖機しており、冷却清水温度は40°Cをしっかりと超えている。振動値については通常暖機の2回の平均値を求めて、それと比較した値も表に載せている。

実験③は初めての緊急暖機実験という理由で、緊急暖機としては条件が比較的優しい暖機時間約60分と設定し実施した。結果的に主機冷却清水温度は通常暖機時と同程度まで上昇していた。始動時、始動空気の入りは通常暖機時よりスムーズな印象を持った。異音、異常な振動無し。暖機時間を短縮したのに反して振動、騒音が小さいと感じた。総じて機関部職員は運転状態良好と評価した。振動計測結果を見ると、計測値は通常暖機時平均値と比べ、6番シリンダで18.2%減、空気冷却器で16.6%減の振動値が

得られた。緊急暖機によって振動が大きくなる、という仮説とは相反する結果であった。一方、現場での実感が数値として現れている結果とも言える。振動計の計測誤差、さらに測定者による計測誤差を考慮しても、通常暖機より振動が少なくなったと言える。主機の様子及び機関振動の観点だけでみると実験③の暖機時間では主機縦振動に悪影響を及ぼさず、むしろ今までより機関に易しいということが分かった。振動がどのように変化したかわかりやすいようグラフにして以下に示す。

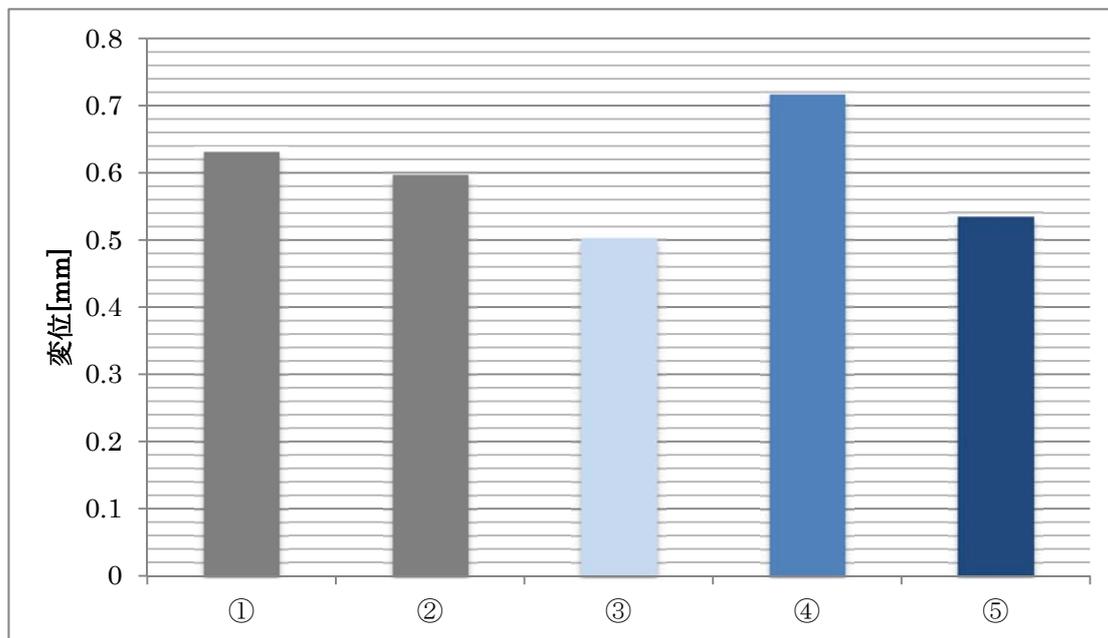


図1 6番シリンダ振動比較

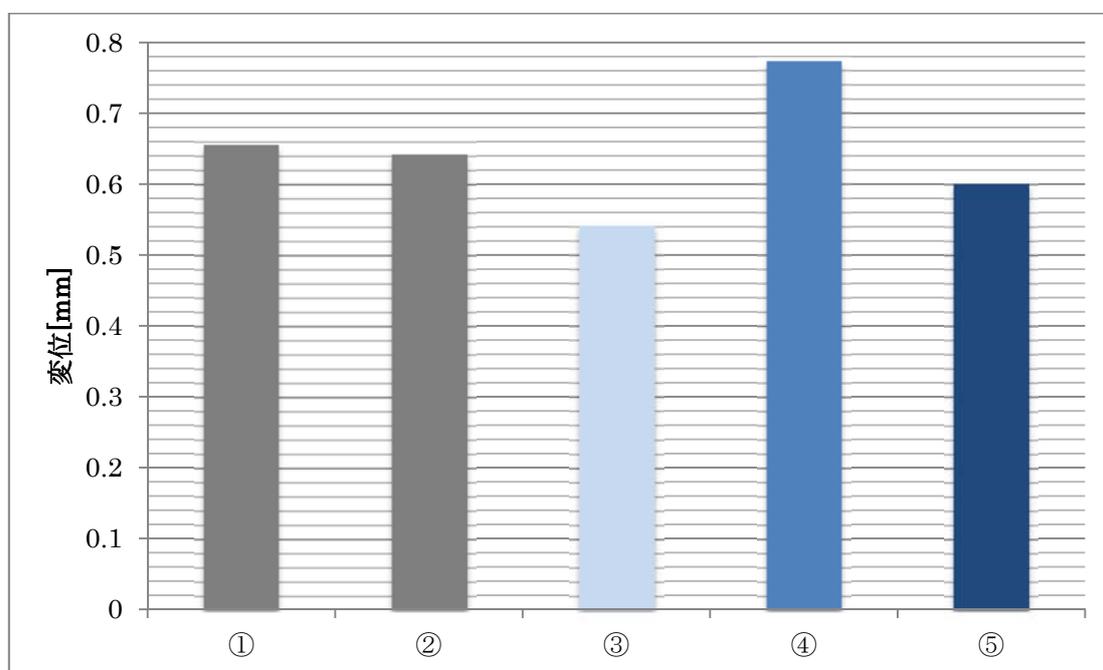


図2 6番シリンダ振動比較

実験③の結果を受け、実験④では前回より35分短くし暖機時間約25分と設定し実験を実施した。主

機冷却清水温度は暖機終了判断の 40℃には達していない。始動前のエアランニングでは大きな異常は確認できなかったものの、始動空気の入りが通常時と比べ若干鈍い印象を受けた。また始動時において始動空気の入りが遅く、回転数 500rpm で安定するまで通常時に比べ時間がかかった。異音は感じとれなかったが、振動は通常より大きく感じた。振動計測結果では 6 番シリンダで平均値比 16.6%増、空気冷却器で 19.1%増となった。実験③の結果とは反面、増加傾向を示した。暖機時間短縮が機関振動増大に影響を及ぼす結果だと言える。

3 回目の緊急暖機実験となった実験⑤は、実験④で機関振動が増大したが、主機始動に障害をきたすほどの影響ではなかったとの判断から、更に暖機時間を 5 分短縮した。目安として 30 分以内の緊急出航を想定した状態と言える。実際は時間として 3 分であるが、機関室温度及び海水温度が低下した為、冷却清水温度は 31.8℃、31.9℃で、判断基準の 40℃から約 8℃も低い状態での運転となった。実験④に比べさらに厳しい状態であると言える。始動時、実験④よりもさらに始動空気の入りが鈍く、回転数上昇に時間を要した。通常暖機時及び今までの緊急暖機時と明確に異なり、始動音が大きかった。また、振動においても大きく感じ取れた。回転数安定後は、異音も無くなり振動は徐々に落ち着いていった。計測値の増大を予想したが、予想に反して計測値は小さくなった。平均値比で 6 番シリンダ 12.5%減、空気冷却器 6.4%減であった。ただし現場の機関部職員からは、始動音及び振動が通常時より明らかに大きいとの意見があった。機関振動自体は大きくなったと考えられるが、横振動成分が大きくなり、今回計測を実施した縦振動では振動の増大を捉えられなかったと考えられる。保守の観点から、これ以上の緊急暖機実験はできないと判断し、本実験⑤をもって暖機実験を終えた。

#### 4. 1. 3 まとめ

今回の実験は、暖機時間を短縮することにより振動が大きくなるという予想の元で実施したものであり、主機の様子については通常より異音、振動が大きくなったと主機に対して悪影響を及ぼしているとの結果を得ることができたと言える。しかしながら、その評価の定量化という意味で計測した振動が正確に計測できていない結果となり残念であった。試験計測において横方向の計測誤差が大きく、機関振動の状態を正しく評価するには難しいと判断したからではあるが、やはり横方向についても計測が必要であると痛感させられた。次年度は今回の得た結果を参考にし、さらに正確な振動に向けて取り組みたいと思う。測定箇所については機関上部および下部についても計測が望ましい。ほぼすべての船舶において主機は、底面が船体に固定されている。そのため高さ方向の位置によって振動に大きな差が出てくる。機関への影響を定量化しよう考えると、燃焼室のある上部は振動が激しく出ると思われ、振動がどれだけ抑えられているか判断することが大切である。そのため一点の計測では判断ができない恐れがある。2 点以上の計測を実施したいと思う。また、可能な限りではあるが、縦振動と横振動（上部および下部）の 3 点同時計測が望ましいと考える。

今回の結果から、深江丸においては暖機時間を 20 分としても主機を始動ができることが確認された。この結果より、今回は深刻な影響を考慮し、外気温及び海水温度が比較的高い 8 月～10 月を対象としたが、外気温及び海水温度が低い冬場の時期においても実験を実施できると考える。様々な条件のもとで主機の影響を掴み取ることで、より正確な分析ができると考える。ただし、あくまで主機を安全に運転する目的のために実施している研究であるので、故障が発生しないようしっかりと判断して行きたい。そして、その経験も含めて多くの船舶の緊急出航の判断指標につながるよう取り組んでいきたいと思う。

## 4. 2 船舶運航シミュレータを用いた緊急出航操作の検討

船の大きさや積み荷の種類、就航航路や入港頻度、加えて機関で使用する燃料油の種類など、運航形態と許容されるコスト等に応じて、船舶に搭載される機関プラントの構成は定まる。それぞれの機関プラントにおける緊急時の出航操作について検討する準備を進めていく。

### 4. 2. 1 はじめに

小型船には小径プロペラが搭載されて、高速機関が主機関として搭載される。主機関とプロペラの間には変速装置（逆転装置なども）が設置されていて、機関で発生した動力はそれらギアを介してプロペラへ伝達される。機関主軸の回転が高いほど、燃料油を燃焼させるのに確保できる時間が短くなることから、使用燃料油には良質な燃料油が採用される。一方、大型船では大直径のプロペラが搭載されることから、低速機関が主機関として採用される。機関が低速回転である場合には、低質な燃料油であっても十分に時間をかけて燃焼させることができるメリットがある。使用する燃料油が低質である場合には、加熱器と清浄機など燃料油の前処理装置を通して十分に燃料油を清浄する必要がある。

本学に設置されている機関室シミュレータは実際のコンテナ船の機関プラントにおける熱エネルギーフローをシミュレーションしている。機器操作に応じて作動流体となる清水や潤滑油、燃料油などの流れから熱エネルギーの移動や伝達をリアルタイムに表現することができる。これを活用して各種機関プラントの始動操作のシミュレーションを検討する。

### 4. 2. 2 船種別の機関始動準備について

#### (1)内航貨物船

本学附属練習船「深江丸」やそれよりもやや大きい内航を主とする中型貨物船では、主機関を1基に対して1軸のプロペラを搭載している。主機関として採用される機関種類は中速ディーゼル機関であり、燃料油には軽油やA重油など、比較的良質な油が採用される。

中速ディーゼル機関では、独立した電動の潤滑油ポンプや清水ポンプ、燃料油供給ポンプを主機関への流体供給用として搭載していることは少なく、ほとんどが主軸から動力を得る機関直結ポンプが採用される。また機関始動前のターニングの際には、前述の直結ポンプによる流体の供給が困難であることから、システム油などの潤滑油は手動操作のウイングポンプによることや、清水は独立電動による予備ポンプを搭載していることが多い。それらは、機関始動前および停止後において、暖機や冷機操作にて流体供給が必要であることから、機関発停止に応じて適時に運転される。これらとは別に冷却海水には、独立電動の主機冷却海水ポンプを設置していたり、海水サービスポンプや糧食用冷凍機の冷却海水ポンプなどより海水を流用して、主機関用の各冷却器の冷却を賄っていたりする。

深江丸は通常、大学敷地内の係留池にて陸上電源を接続して停泊している。普通、商船では基地港であっても、船内居住の必要性が無ければ、設備費用の投入は控えられると考える。停泊中は船内電源を活かしているか、完全にデッドシップ状態にするか、いずれかの状態にあると推察する。内航貨物船等において、船内電源による給電状態にある船舶の場合には、主機関の始動準備は暖機作業から開始される。そして、ディーゼル発電機原動機と主機関との間で冷却清水の循環が行える場合には、ジャケット冷却水の加熱および循環供給に要する操作時間と暖機完了温度に至るに要する投入熱量が低減できる。

## (2) 漁船

小型漁船では、ガソリン機関が搭載され、(1)で記したように流体の多くは機関主軸により駆動される直結ポンプによる。燃料タンクからの燃料の供給も高低差を利用して機関へ供給されるため、直結ポンプ以外の供給ポンプは必要としない。

中型漁船では、中速ディーゼル機関を主機関として搭載するほかに、冷蔵および冷凍庫の運転に必要なディーゼル発電機を搭載する。このような船種では、通常、基地港に係留している時、船内の機関プラントは完全停止しており、出港準備は船内発電機の始動作業から始まる。

実際のマグロ漁業船では出港間近にはイワシなど小魚の冷凍餌を積込み、これを冷凍貯蔵するために冷凍装置の運転が必要であり、陸上電源による運転が困難であることから船内電源に切り替えて、停泊している。またカツオ漁業船の場合には、イワシなどの生餌を補充するため、船は15~20日毎に寄港するが、この間の停泊中は主発電機とは別の、ポータブル発電機により最小限の船内需要にて給電している。そのため、カツオ漁船の出港準備作業は給電元をポータブル発電機から船内発電機による給電へ切り替える事から始まる。

これら漁船では、陸上電源から給電を受けている場合に比較して、給電ケーブル等の手じまいが無い、そのため緊急出航に向けた機関プラントの始動に要する時間は短くなっていると推察する。

## (3) 大型船

大型船舶では、低速ディーゼル機関の搭載が主になっており、燃料油にはA重油とC重油が使用される。機関始動時にはA重油による始動となるため、C重油の使用のための加熱や前処理は出航後に準備を始めても遅くない。(1)(2)の小型、中型機関に比較して、機関室に設置される装置の規模は大型になっているが、操作作業の手順は基本的に同じである。

一般に停泊中の大型船では、船内電源による給電を行っており、主機関を除く機関プラントの機器は稼働中にある。また荷役が1日以内に終了することもあって停泊時間は比較的短い。そのため、主機関の停止以降の作業は、停泊時間を見据えて、完全な冷態にするのではなく、ある程度の保温状態を維持する状態に調節される。主機関の整備等による特別の場合は除くものとして、次の出航時間から遡って、停止状態が決定される。その為、船内電源による給電状態が日常的に継続されるため、主機関の始動操作は純粋に主機関の暖機作業から始まる。

### 4. 2. 3 機関室シミュレータを用いた各種機関の始動方法の検証の検討

機関士は自船の機関プラントについて通常操作方法を熟知しており、機器の始動順位を定めて、最小で最適な始動手順にて主機関を運転させている。離岸後は、出力の増加や運転継続を目的とした補機操作を行い、機関プラントの安定を図る。一連の機関始動に係る操作について、本学に設置されている船用機関室シミュレータを用いて、それぞれの機関における始動操作シミュレーションの方法を検討する。

#### (1) 機関室シミュレータの概要

本学に設置されている機関室シミュレータは、実在の全長300m、機関出力43,000kWのコンテナ船をモデルに構築されている。主機関はMAN B&W MCシリーズの2サイクル低速ディーゼル機関であり、クロスヘッドタイプを搭載している。主機関の燃料油はA重油とC重油を使用し、それらはいずれかを選択す

る運用方法になっている。また冷却清水システムには、セントラルクーリングシステムが採用されており、主機関の冷却は 36℃の低温冷却水を主機ジャケットに混合させて行い、主機関出口冷水温度を制御している。暖機用に清水予熱器があり、そのほか造水装置が接続されていて、主機ジャケット冷却水を熱源として活用し造水装置の運転が可能である。潤滑油システムは一方、電源供給システムは 2 台のディーゼル発電機と軸発電機、ターボ発電機がそれぞれ 1 台ずつ搭載され、合計 4 台の発電装置から構成される。ターボ発電機は補助ボイラにて発生する蒸気のほかに、主機関排気ガスを利用した排ガスエコノマイザによる蒸気にて運転が可能である。

船内給電状態にあるときには、暖機作業は冷却清水の加熱およびシステム潤滑油の加熱から開始することになる。

以前（例えば、1990 年代ごろ）の機関室シミュレータでは、機関室側には大型パネルボードを置き、盤上に機関プラント構成機器がイラストイメージで描かれ、それらの機器を流体の特徴に応じて配色したラインで結び、機関室全体のプラント構成を表現していた。また配管に付属するバルブはトグルスイッチや押ボタンスイッチの操作でバルブ開閉操作を模擬し、機器の運転は緑色ランプの点灯などで表現していた。機関制御コンソールについては、実機同様に操縦レバーや押釦、表示ランプやメーター計器が設置され、同じ操作が再現されるようになっている。

近年は、それらのうち機関室を表現した大型パネルボードが 1 枚もしくは複数枚の大型液晶ディスプレイに代わり、スイッチ類の操作はディスプレイ画面のパネルタッチ操作に変わった。機関室におけるポンプやモーターの始動停止のスイッチ操作に関しては、指先の接触感覚こそ異なるが、液晶パネルにおいても、類似した操作過程が再現されているため、実物同様に労力や時間を要する。一方で、バルブの開閉操作に関しては、従来からも同様に、開閉作業が画面のワンタッチで完了するため、労力や時間は実際とは大きく異なる。本学の機関室シミュレータが熱フローを主にシミュレーションすることから、実践操作の表現をシミュレーション対象としていないこれらの部分に対して、緊急出航のための機器操作を再現するうえで、検討すべき事項であるといえる。

## (2) 内航貨物船、漁船の機関プラントへの適用

中速ディーゼル機関を主機関として搭載する船舶では、燃料として比較的良質な燃料油を使用していることから、本学の機関シミュレータでこの機関を想定した始動操作のシミュレーションは発電機原動機のディーゼル機関にて検証を試みることにする。機関シミュレータにおいて、ディーゼル発電機は、電動独立の予備潤滑油ポンプが隣接して設置されている。また、冷却水システムはジャケット冷却水とセントラル冷却水が混合して温度調節を行う仕組みとなっている。主機始動操作は、大型機関のように清水加熱や潤滑油の側流清浄などを要しないため、漁船やタグボートの機関に類似している。

## (3) 大型船の機関プラントへの適用

大型機関プラントの始動操作の検証には、本学の機関シミュレータをそのまま適用できる。荷役中を想定して、温態状態を維持するとすれば、主機サンプタンクの潤滑油の側流清浄は継続し、ジャケット冷却清水を主機関に循環させて、冷却水温度を維持するために適宜に清水予熱器を始動させて、清水加熱を行う。荷役中は船橋からの要請により、冷却海水及び燃料油の 2 系統を確立し、機関始動に備えることになる。ジャケット冷却水とシステム油を供給している間、適宜に主機関のターニングを行う。

#### 4. 2. 4 緊急出航操作のシミュレーションに関するまとめ

2015年11月19-20日に、トルコ・イスタンブールにおいて開催された船用機関室シミュレータの国際講演会 12<sup>th</sup> International Conference on Engine room Simulator (ICERS12)では、世界各国の機関室シミュレータ製造会社による最新の機関室シミュレータに関するプレゼンテーションが行われた。3Dアニメーションを駆使した機関室映像を52インチ液晶ディスプレイに表示するものや、ヘッドマウントタイプのゴーグルを装着して、360度の機関室映像をゴーグル内に表現するものなど、機関室の表現方法は多岐に渡っていた。しかしながら、前述したように、機関室内での機器操作には、依然として、液晶ディスプレイ上でのタッチパネル操作に留まっており、機関室シミュレータでの機器操作時間のシミュレーションまでは対応できていない様子である。

緊急出航時の機関操作をシミュレーションするにあたり、それぞれの船種を想定した機関の始動は、本学の機関シミュレータにて対応は可能である推察する。しかしながら、バルブ開閉操作における所要時間を如何にシミュレーションするかは今後の課題であり、この研究を継続して、問題解決に努めたいと考える。これまでの研究調査にて、図1に示す本学機関室シミュレータの発電機原動機部分を含めた、機関室側シミュレーション画面をPC画面上に再現し、発電機原動機のみを取り扱う専用画面の開発までを完了している。これを継続して緊急出航時の機関始動操作の検証を行う予定である。

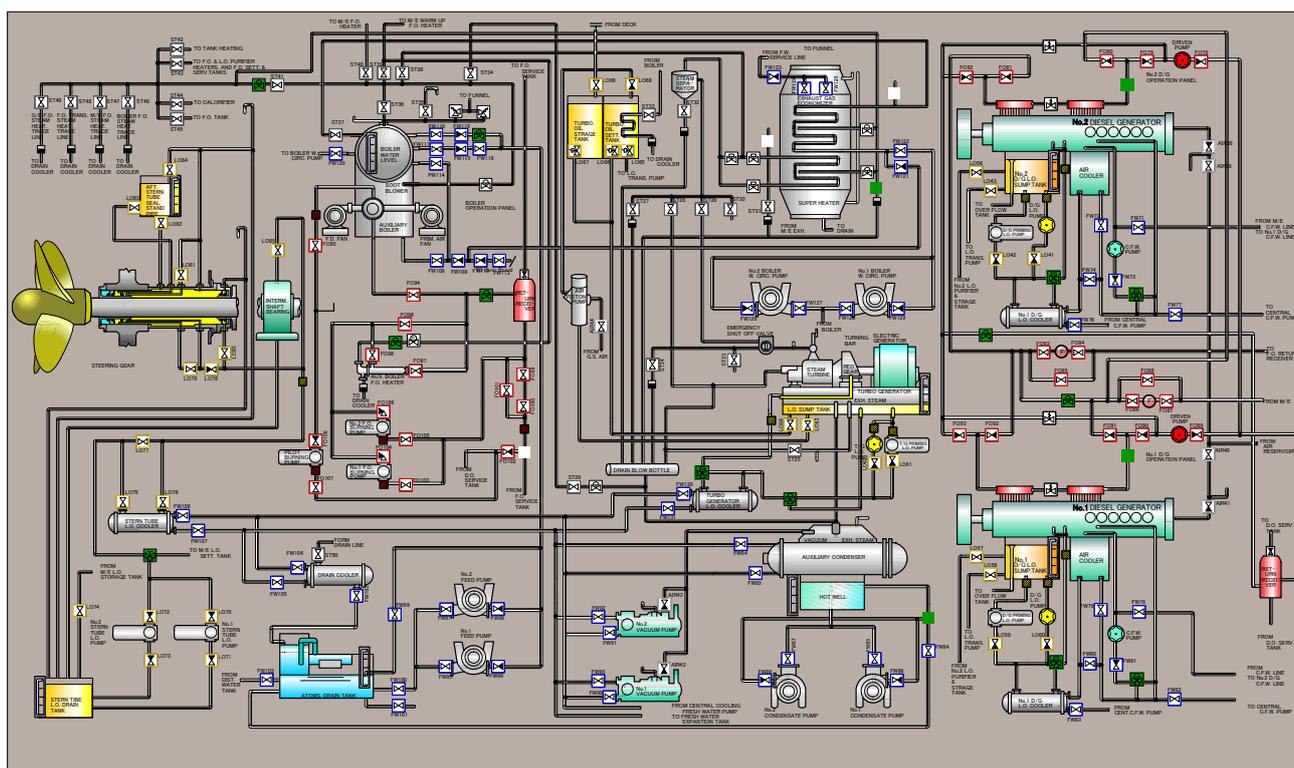


図1 発電機原動機を含む機関シミュレータのメイン画面（機関室）

#### 謝辞

漁船や内航貨物船、タグボートにおける船用機関プラントの構成や取扱い概要は、一般社団法人グローバル人材育成機構帆船「みらいへ」の濱口機関長様との情報交換（インタビュー）により構成した、深く感謝致します。

#### 4. 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

今年度の研究は、次年度での操船シミュレータ実験に向けての基礎データの調査を主に行った。

##### 4. 3. 1 検討係留地

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。

##### 4. 3. 2 検討対象船舶

検討対象船舶は、560TEU コンテナ船（全長 127.5m、幅 20m、バウスラスター付）とした。

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。

##### 4. 3. 3 津波の条件設定

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。

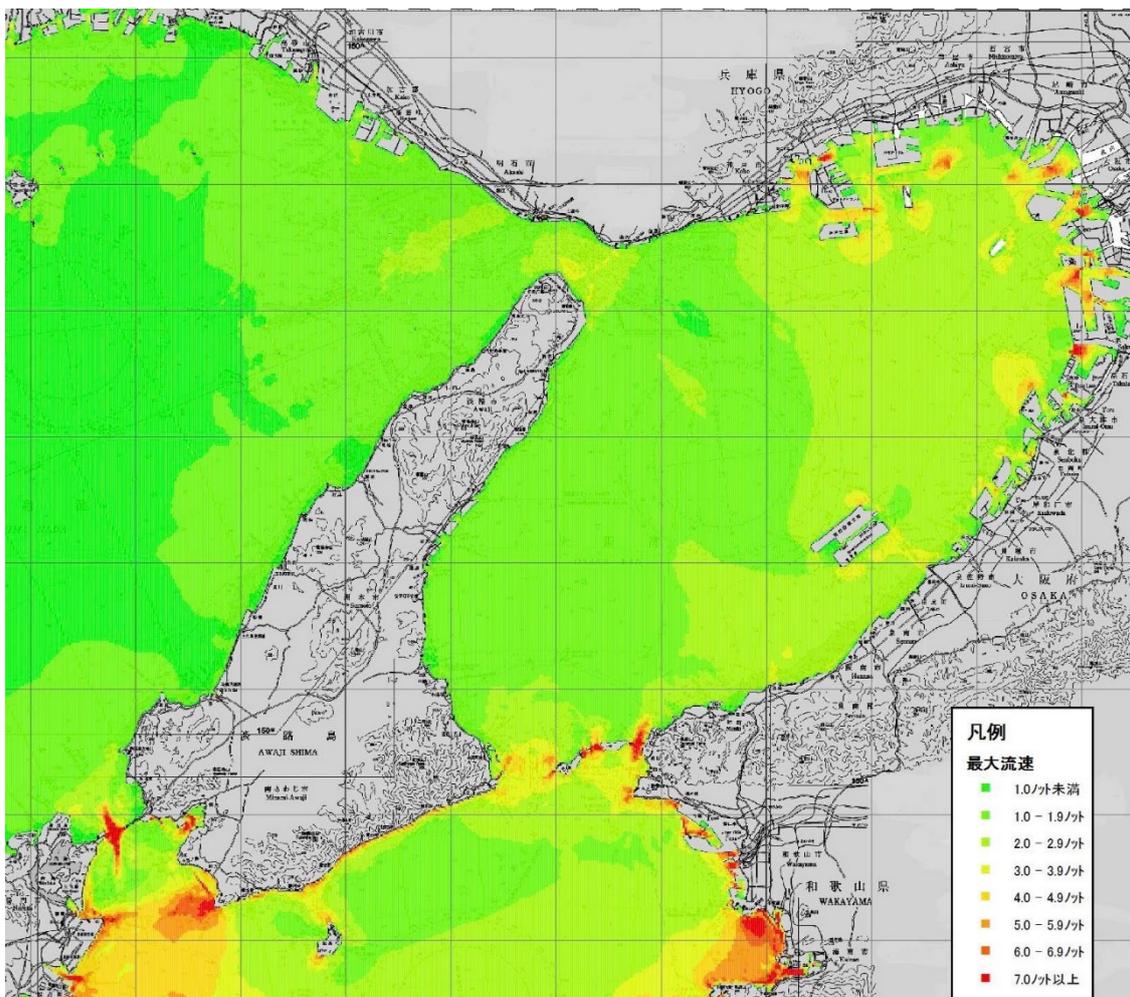


図 1 大阪湾の津波流速分布（出典：第五管区海上保安本部海洋情報部）

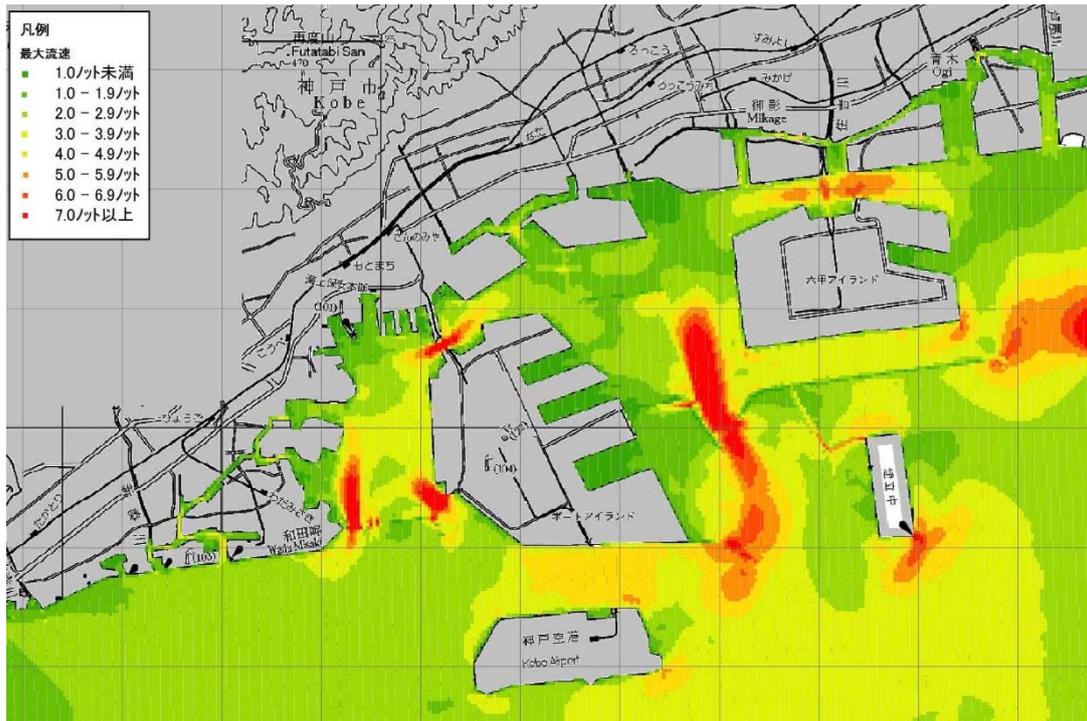


図2 阪神港神戸区の津波流速分布（出典：第五管区海上保安本部海洋情報部）

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。

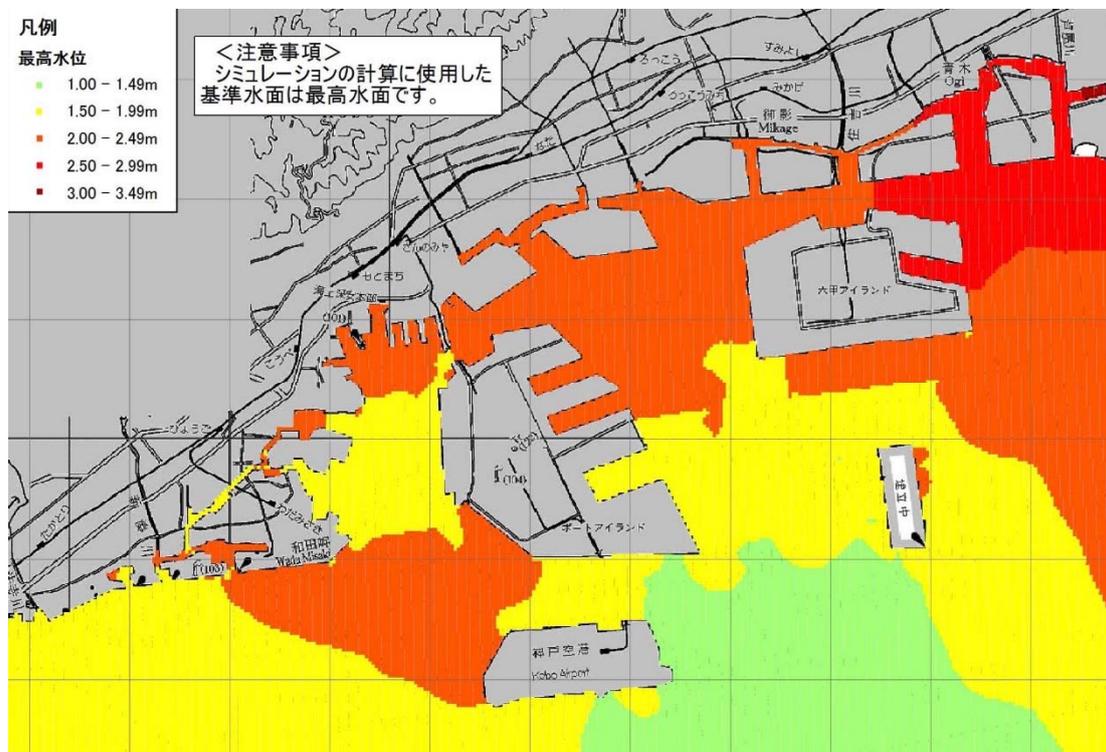


図3 最高水位（出典：第五管区海上保安本部海洋情報部）



#### 4. 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

##### 4. 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。

##### 4. 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 3 倍まで離れるまで

本実験での自然条件は、風のみとし、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。なお、潮流については、無しとした。

##### 4. 4. 3 実験結果

実験開始から船幅の 3 倍まで岸壁から離れるまでの時間を表 1、前方への進出距離について、表 2 に示す。また、図 1 に解析に用いたスクリーンキャプチャーの例を示す

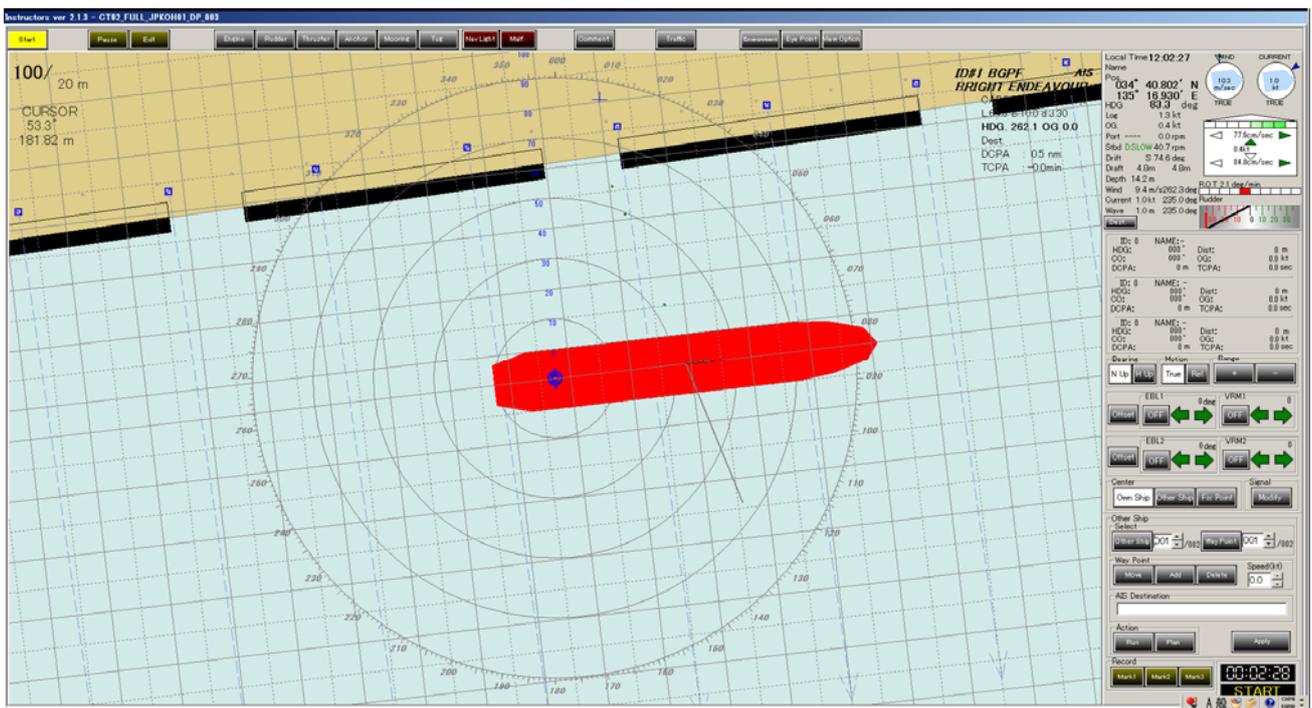
表 1 離岸所用時間

	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	3分	-	-	-	-	-	-	-
5m/s	3分	3分	4分	4分	3分	2分	2分	2分
8m/s	3分	4分	5分	5分	3分	2分	2分	2分
10m/s	3分	6分	7分	6分	4分	2分	2分	2分

表2 前方進出距離

	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	80m	-	-	-	-	-	-	-
5 m/ s	50m	80m	110m	130m	90m	60m	60m	60m
8 m/ s	50m	90m	160m	210m	110m	50m	40m	40m
10 m/ s	50m	110m	250m	260m	130m	40m	20m	30m

図1 スクリーンキャプチャー (例)



#### 4. 4. 4 まとめ

離岸所要時間は、右前、向岸（右横）、右後方において風速が上がるにつれて所要時間が延びている傾向にある。無風時と比較して岸壁に抑える方向の風向きの場合、10m/s では大よそ2倍の時間を要することが示された。特に右前か右後ろについては大きく差がないように見える。

前方進出距離については右後方からの風の場合に風速が上がるにつれ進出距離が長くなり 10m/s 時に最大で2L（全長の2倍程度）に達することが示された。

タグ無しで自力で出港する場合には、特に岸壁に押し付けられる風向の場合に長時間を要するばかりでなく、前方水面の余裕を考える必要がある。

#### 4. 4. 5 次年度への課題

次年度については、異なる船型での実験と津波による流れを考慮した実験を実施する予定。

## 4. 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

### 4. 5. 1 はじめに

船舶が緊急出航する場合、主機関や各種補機の始動、発電機出力アップなど、さまざまな状態変化が発生する。それらの機械、機器の運転に関連して、配管に急に流体が流れ始める、あるいは急激に流量が増加することがある。その場合、配管中の流体が常温より高温であるケースが多いことから、配管の各部に熱膨張差が生じる。その結果、大きな熱応力の発生や配管の接合部であるフランジ部分からの漏れが問題となる可能性がある。

そこで本研究では、配管内を流れる流体の流量が増加する過程において発生する熱応力、および管フランジ部分からの漏れの原因となる締め付けボルトの軸力変化、ガスケット面圧の変化を定量的に明らかにすることを目的としている。本年度はその第一段階として、流体の流量と配管内表面の熱伝達率が円筒形の配管部分に発生する温度分布と熱応力に及ぼす影響について、定常温度場を仮定して二次元有限要素解析を用いて基本的なメカニズムを明らかにすることを目的としている。

### 4. 5. 2 配管内の流体の流れと発生する熱応力

種々の配管において、もっともトラブルが発生しやすい箇所はフランジ締結部である。図1は管フランジ締結部の形状を模式的に示したものである。1組のフランジの間にガスケットが挿入し、それらを多数のボルト（一般に4の倍数）で締めつけることにより、適正なガスケット面圧を発生させてシール性能を発揮している。管フランジ周辺の形状は非常に複雑であり、またガスケットの圧縮特性は複雑な非線形・ヒステリシス特性を示す。そ

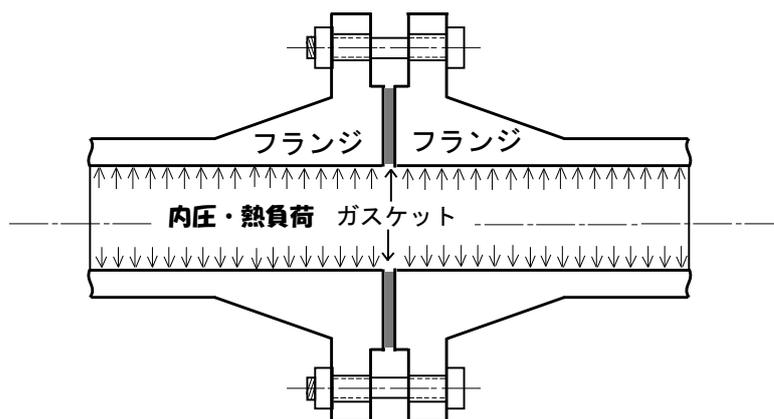


図1 管フランジ締結体

ここで第一段階として、円筒部分の温度と熱応力分布に対する配管内表面の熱伝達率と水面の高さの影響について検討する。

配管に流体が流れ始めて流量が増加し、水面が上昇する過程における円筒部分の温度と熱応力の時間変化を厳密に評価することはかなり困難である。そこで、まず温度場を定常状態と仮定して、配管内の水面高さや流体が接触する部分の熱伝達率を変化させることにより、基本的な熱および力学特性を明らかにする。円筒の端部には外力が作用しないと仮定すると、軸対称温度場状態の中空円筒に発生する熱応力は次式で計算できる。

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\alpha E}{1-\nu} \left\{ -\frac{1}{r^2} \int_a^r T r dr + \frac{r^2 - a^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \int_a^b T r dr \right\} \\ \sigma_\theta &= \frac{\alpha E}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{r^2} \int_a^r T r dr + \frac{r^2 + a^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \int_a^b T r dr - T \right\} \\ \sigma_z &= \frac{\alpha E}{1-\nu} \left( \frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b T r dr - T \right)\end{aligned} \quad (1)$$

上式において、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_z$ はそれぞれ半径方向応力、円周方向応力、軸方向応力、 $\alpha$ 、 $E$ 、 $\nu$ は線膨張係数、ヤング率、ポアソン比である。 $r$ は半径座標、 $a$ と $b$ は円筒の内半径と外半径、 $T$ は各部の温度である。

配管の中を満たして熱流体が一樣に流れ、温度場が円周方向に変化しない場合、 $\sigma_\theta$ と $\sigma_z$ の値は内外表面で等しく、内表面では圧縮応力、外表面では引張応力となる。応力の絶対値は内表面で最大となる。

#### 4. 5. 3 有限要素解析による配管のモデル化

図2では、水面の高さの影響を検証するために、円筒配管の1/2部分をモデル化しており、半径方向に5分割、円周方向に90分割している。総節点数、要素数は546と450である。ここで内半径 $a$ は50mm、外半径 $b$ は60mmとしている。解析条件は以下の通りである。

流体温度：100℃ 管外の雰囲気温度：20℃

配管内表面熱伝達率：

100, 200, 500, 1000 (2000, 5000, 10000) W/m<sup>2</sup>K

配管外表面熱伝達率：10 W/m<sup>2</sup>K

配管材料：炭素鋼系材料を想定

線膨張係数：11.8×10<sup>-6</sup> 熱伝導率：51.5 W/mK

密度：7800 kg/m<sup>3</sup> 比熱：466 J/kgK

ヤング率：200 GPa ポアソン比：0.3

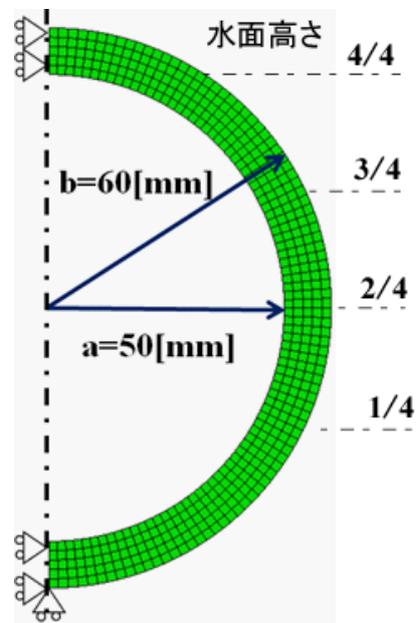


図2 円筒配管の有限要素モデル

#### 4. 5. 4 熱応力の理論解との比較による数値解析の精度の検証

図3は、内表面熱伝達率を100～10000 W/m<sup>2</sup>Kと変化させたときの内表面温度と外表面温度を示している。熱伝達率の大きさに関係なく、2つの表面の温度差は0.2℃程度である。その理由として、管厚が薄く、それに対して仮定した熱伝達率が十分に高いためと考えられる。

つぎに、設定した有限要素モデルの有効性を検証するために、内表面の熱伝達率を100 W/m<sup>2</sup>Kとして温度場を求め、その値を式(1)に代入して得られた各応力成分と、有限要素解析により得られた応力成分を比較する。ここでは、図3の結果より内外表面の温度差は0.2℃とする。図4に解析結果を示す。3つの応力成分のいずれについても、理論解と有限要素解析の結果はよく一致している。したがって、図2で設定した有限要素モデルは有効と判断できる。

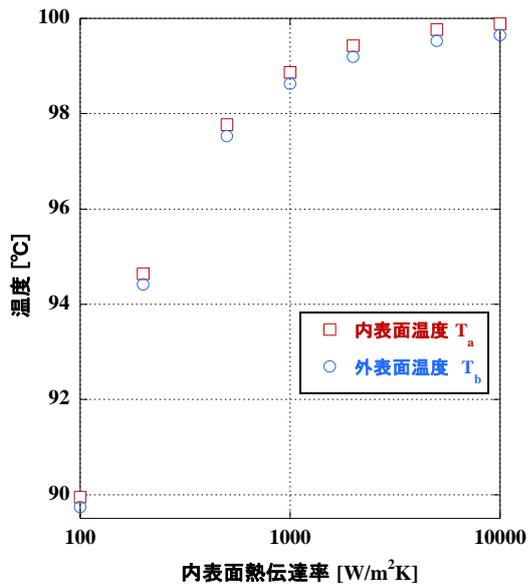


図3 内外表面温度と表面熱伝達率

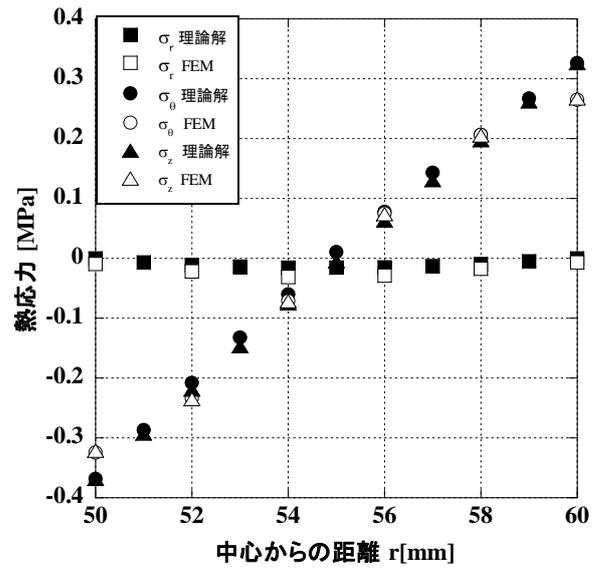


図4 理論解と有限要素解析との比較

#### 4. 5. 5 解析結果

(1) 温度分布 図5は解析結果の一例として、内表面熱伝達率を  $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$  とし、水面の高さを変化させた時の温度分布を示している。最高温度と最低温度の差は、水面が低いほど大きくなっている。図6は、水面高さをパラメータとして、内表面に発生する最高温度と熱伝達率の関係を示している。最高温度については水面高さの影響が支配的であり、水面高さが低い場合に熱伝達率の影響が現れることがわかる。

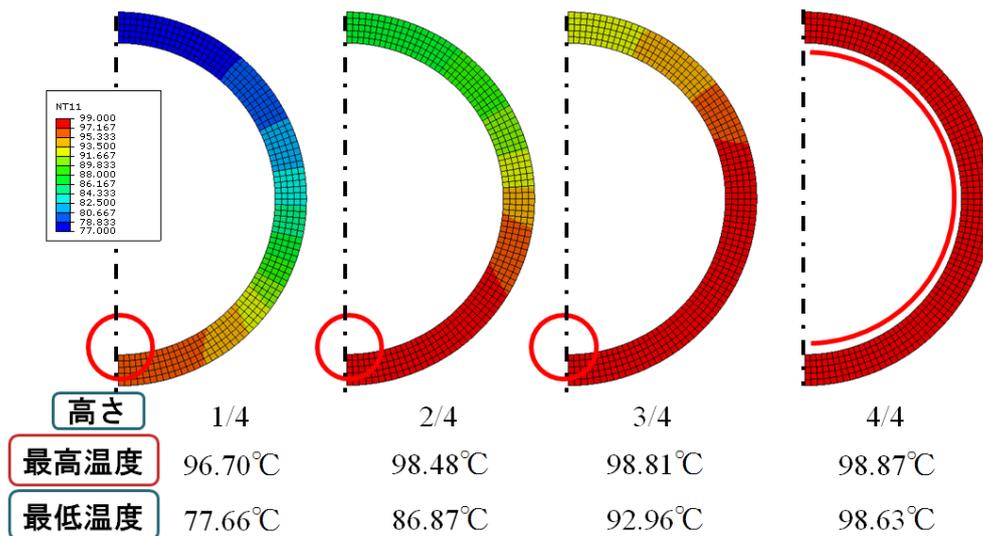


図5 水面高さと温度分布の関係

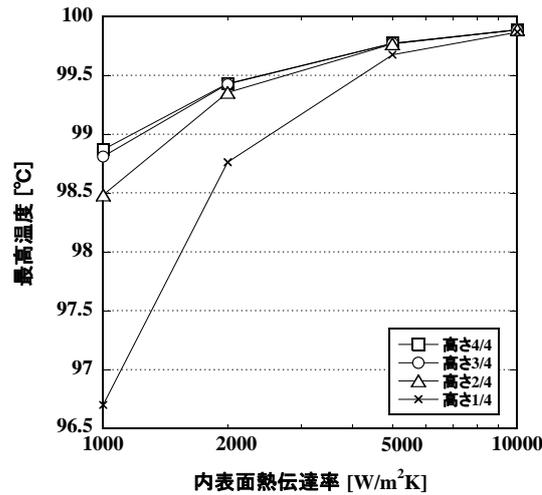


図6 最高温度と熱伝達率の関係

(2) 熱応力 図7は、内表面熱伝達率を1000 W/m<sup>2</sup>Kとして、水面の高さを変化させた場合のミーゼス応力分布を示している。水面が低いほど最大熱応力の値が高くなっている。図8は、水面高さをパラメータとして、最大熱応力と表面熱伝達率の関係を示している。最大熱応力については、表面熱伝達率に比べて水面高さの影響が支配的であることがわかる。このことは配管に流体が流れ始めて比較的短い時間の間に最大応力が発生する可能性が高いことを示している。

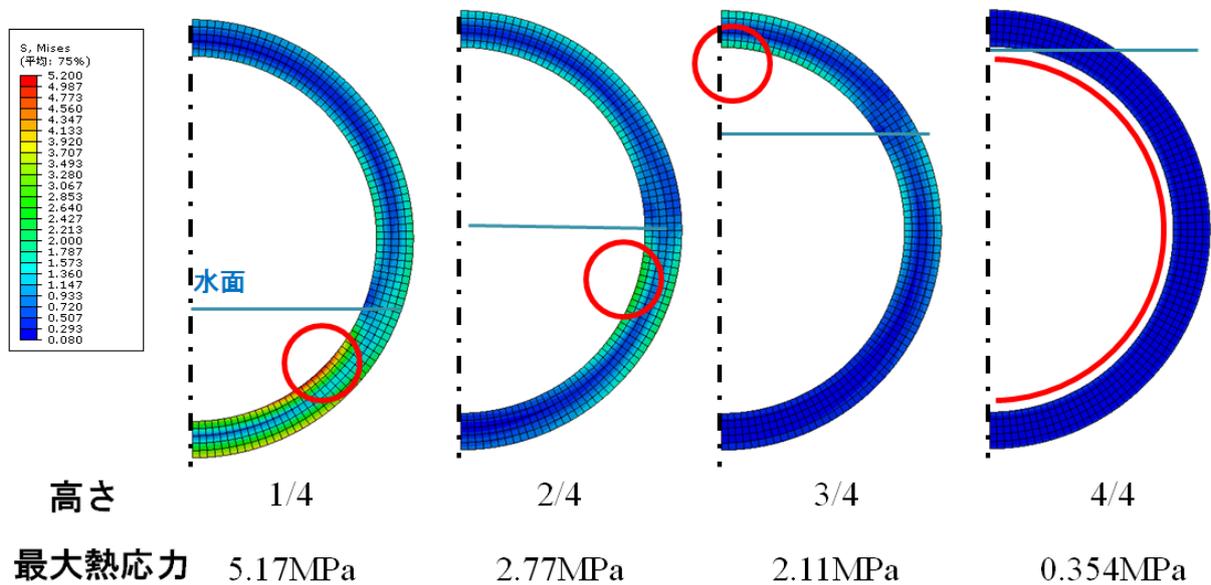


図7 応力分布に対する水面高さの影響

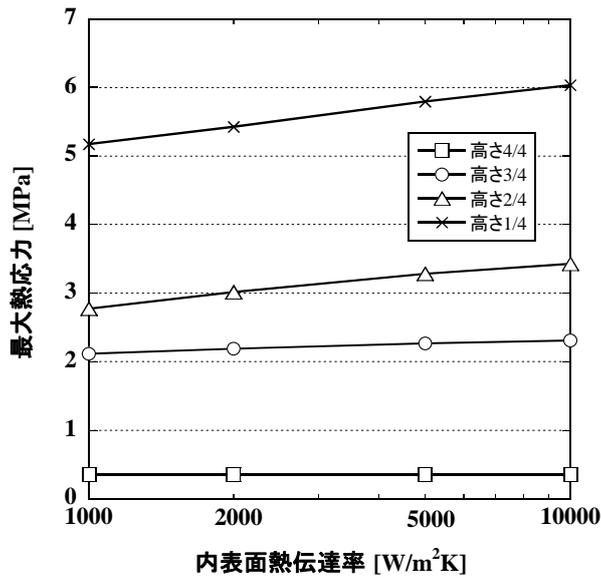


図 8 最大熱応力と表面熱伝達率の関係

#### 4. 5. 5 まとめ

本年度は円筒形の配管部分を対象として、定常温度場を仮定して二次元有限要素解析により、緊急出港時に配管内に発生する温度場と応力場の基本的な特性を明らかにした。得られた結果を以下にまとめている。

- 1) 配管内に発生する温度差については、表面熱伝達率に比べて水面高さの影響が支配的である。
- 2) 配管に発生する最大応力は、水面が低い場合に高くなる。また、最大応力の絶対値に対する影響は、表面熱伝達率に比べて、水面高さの影響の方がかなり顕著である。このことは、流体が流れ始めて比較的短い時間の間に最大応力が発生する可能性が高いことを示唆するものである。

最後に今後の課題を列挙しておく。

- 1) 流量変化、すなわち水面の変化に対応した非定常温度場、非定常応力場に対応した解析を実施する。
- 2) 配管内の空気と接触している面の熱伝達率は外表面と同じと仮定した。しかしながら、空気の温度の上昇に伴ってその値は変化すると考えられる。その影響を考慮した解析方法を考案する。
- 3) 内部流体の漏れが問題に管フランジ部分を有限要素解析によりモデル化することによって、各部の温度分布と応力分布の時間変化を求め、緊急出港時の配管部分のシール性能を評価する。

## 4. 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

### 4. 6. 1 はじめに

近年、海上における大型船舶の事故が頻繁にニュースで採り上げられている。例えば、荒天航海中のコンテナ船(MOL COMFORT)の船体中央部に突然亀裂が入って浸水し、自力航行不能になった後に沈没した事故例(平成 25(2013)年 6 月 17 日 インド洋, 死傷者なし), あるいは人為的な要因が大きいと思われるが、急旋回を行なった大型旅客貨物船(SEWOL)が復元力を保てずに沈没に至った事故例(平成 26(2014)年 4 月 16 日 韓国・観梅島沖, 死者 295 人, 行方不明者 9 人, 捜索関係死者 8 人), またクルーズ客船(COSTA CONCORDIA)が不十分な見張りの結果、離島付近の浅瀬の岩礁に乗り上げて浸水・転覆航行不能になった事故例(平成 24(2012)年 1 月 13 日 イタリア・ジリオ島付近)など、多くの人命を失うのみならず、周辺の海洋環境への油流出などの被害をもたらした事故となっている。

一方で、平成 23(2011)年 3 月 11 日、未曾有の被害をもたらした東日本大震災では、東北地方太平洋沖地震によって大規模な津波が発生し、沿岸域に甚大な被害をもたらしたことは記憶に新しい。押し寄せる津波と、それが陸上において留まることなく浸水して行く光景は、映像として配信されたこともあって、自然災害に対する備えの必要性を強く意識するものとなった。今後、南海トラフ域を震源とする東南海大地震の発生も予測されており、大型の津波発生時に対する対応を想定する必要がある。

本研究は、こういった災害発生時に、停泊中もしくは仮泊中の船舶が緊急に出航することが必要となった場合の対応策について検討することを目的としている。本報の研究では、エンジン始動時における特性変化について明らかにすることを目的とし、特に冷間状態(冷態)・暖機状態(温態)の違いで過渡的な変化傾向がどのようになるかの知見を得ることを目的に実験解析を行った。その概要について報告する。

### 4. 6. 2 実験装置および方法

本研究では、船用主機関を研究対象とするため、研究室所有のエンジンの中で比較的大型の 4 ストロークディーゼルエンジンを供試機関として使用した。表 1 に供試機関の主要な諸元を示す。このエンジンは、株式会社阪神鉄工所(現 阪神内燃機工業株式会社)によって昭和 9(1934)年に製造されたものである。そのため、現在の大型船舶で使用されている主機関とは、燃料噴射ポンプの構造や機構の詳細がかなり異なっているために、得られる結果をそのまま適用することはできないが、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。供試燃料には JIS 1 種 1 号重油(低硫黄分 A 重油)を使用した。使用燃料の主要物性値を表 2 に示す。

表 1 供試機関の主要諸元

Product	Hansin SF
Type	4 stroke water cooled diesel engine
Cylinder number	Single cylinder
Bore x Stroke [mm]	220 x 350
Displacement [m <sup>3</sup> ]	0.133 (=133 Liter)
Compression ratio	12.78
Rated power [kW]	18.4 (=25 PS) @ 380 rpm
Combustion type	Direct injection type
Nozzle	Bosch type nozzle (0.35mm x 4 holes)
Injection pump	Spill valve type
Injection pressure [MPa]	29.4 (=300 kgf/cm <sup>2</sup> )
Engine starting method	Compressed air, 2.9 MPa (=30 kgf/cm <sup>2</sup> )
Lubricating method	Forced lubrication

表 2 供試燃料の主要物性値

Product	Tonen General, FOA01
Type	Low sulfur A fuel oil MDO (Marine Diesel Oil)
Density @15°C [kg/m <sup>3</sup> ]	845.2
Viscosity @50°C [mm <sup>2</sup> /s]	2.543
Flash point [°C]	82.0 (=355.15 K)
Pour point [°C]	-20.0 (=253.15 K)
Cetane index JIS K 2280	52.0
JIS K 2204-92	54
Sulfur content [wt.%]	0.079
Carbon residue [wt.%]	0.44
Nitrogen content [wt.%]	0.01
Lower calorific value [MJ/kg]	42.8

供試機関を含む実験計測の系統概略を図 1 に示す。供試機関は、大型のフライホイールを挟んだ端側にユニカース型の水制動力計を装備しており、機関から伸びるクランク軸端面には水制動力計のケーシング内を攪拌するための水車が連結されている。水制動力計のケーシング内への流入・流出水量を適切に制御することで水位を変化させ、回転水車への荷重量、すなわちエンジンへの負荷量を変化させることができる。また、燃料の燃焼状況を把握するために、燃焼室内部の圧力履歴をシリンダヘッド部のインジケータコックに圧力センサ(キスラー社製: KISTLER 701A)を取り付け、その信号をチャージアンプ(キスラー社製: KISTLER 5041C)で増幅して測定を行なった。さらに、排気バルブ・排気管を通じてエンジン外に排出されるエミッションについて、各成分の排出濃度をポータブル燃焼ガス分析器(テストー社製: TESTO 350J)によって計測した。対象とした成分は残留酸素  $O_2$ 、二酸化炭素  $CO_2$ 、一酸化炭素  $CO$ 、窒素酸化物  $NO_x (=NO + NO_2)$  である。

本報の実験では、エンジン始動時の状況の違いを比較するために、室温状態で一昼夜以上放置した条件 (=冷間状態, 冷態) と、ある程度の時間運転を行って冷却水温度が十分に高くなった後に一度停止した条件 (=暖機状態, 温態) のそれぞれについてエンジン始動後の各種機関性能値を計測した。実験条件のパラメータ範囲を表 3 にまとめて示す。

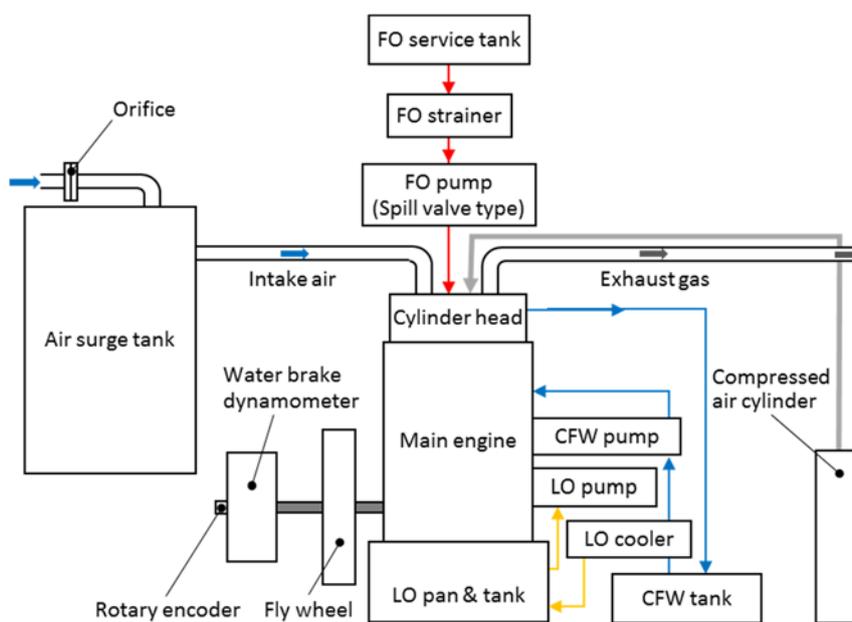


図 1 供試機関および計測系統の概略

表 3 本実験のパラメータ範囲 (船用特性による負荷・回転速度変化)

	Initial starting condition	Engine load [%]	Engine speed [ $min^{-1}$ ]	Dynamometer load [kgf]
Case 1-1	Cold start (27°C)	25	239	21.8
Case 1-2	↑	50	302	34.4
Case 1-3	↑	75	345	45.2
Case 1-4	↑	100	380	54.8
Case 2-1	Warm start (40°C)	25	239	21.8
Case 2-2	↑	50	302	34.4
Case 2-3	↑	75	345	45.2
Case 2-4	↑	100	380	54.8

#### 4. 6. 3 実験結果

本報の実験では、冷間状態(室温 27°C)と暖機状態(冷却水温度 40°C)のそれぞれについて、エンジン始動後の機関性能に与える影響を調べた。まずは基本的な特性を把握するために、エンジン始動直後の不安定な動作状況は今回の解析では対象外とし、エンジンの回転速度の変動がある程度収まってからの経過時間によって評価を行った。各機関性能は 12 分毎に測定を行い、1 回の測定で 4 サンプルを連続計測して平均値を求めた。

表 4 に計測結果の一例を示す。このときの実験条件は表 3 の Case 1-1 に相当し、冷間状態で始動した後、エンジン負荷 25%となるように運転を行った際のものである。排気温度に着目すると、最初の計測平均値(安定後 12 分経過)は 151°Cであり、二回目以降は排気温度が上昇していくことがわかる。しかしながら四回目(安定後 48 分経過)以降は 173°Cとほぼ一定の値に達して推移していることが分かる。

このときの排気エミッションの過渡変化を、エンジン負荷 25~75%の場合についてまとめたものが図 2 である。図の左上は O<sub>2</sub> 濃度、右上は CO<sub>2</sub> 濃度、左下は CO 濃度、右下は NO<sub>x</sub> 濃度であり、データは青色、赤色、緑色がそれぞれ 25%、50%、75%負荷の条件を示しており、いずれも冷間状態からの始動した際の結果である。エンジン負荷の変化に対して、25%と 50%の条件で値の傾向が逆になっているところがある。例えば、残留 O<sub>2</sub> 濃度の変化をみると、75%負荷時に最も小さい値となっており、燃料消費量の増大に伴う酸素消費の傾向を的確に表している。しかし、50%負荷時の残留 O<sub>2</sub> 濃度は、すべての時間帯において 25%負荷時の濃度よりも上回っており、より多くの酸素が残留していることを示している。実際には、燃料消費量はエンジン負荷に比例して多くなっているため、本来であれば 50%負荷時の残留酸素は 25%負荷時よりも小さくなるべきである。この要因は定かではないが、CO<sub>2</sub> 濃度および NO<sub>x</sub> 濃度は 50%負荷時に最も低い値となっており、残留 O<sub>2</sub> 濃度が高い(=燃焼が十分でない)傾向とは妥当な相関を示した結果であるといえる。なお、今回の実験範囲で顕著な違いが見られたのは、CO 濃度のみであった。

表 4 計測結果の一例 (表 3 の Case 1-1)

暖気条件		なし						
負荷		1/4						
回転数 [rpm]		239	239	239	239	239	239	
制動荷重 [kg]		21.8	21.8	21.8	21.8	21.8	21.8	
大気状態	室温 [°C]	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	
	気圧 [mmHg]	756	756	756	756	756	756	
	湿度 [%]	68	69	69.5	69	69.5	69	
吸気量 [mmHg]		7.2	7.2	6.975	6.975	6.975	6.975	
燃料消費量 [sec./100cc]		199	202	205	205	207	210	
圧力 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	潤滑油	1.3	1.2	1.1	1.1	1	1	
	冷却水	1	1	0.9	0.9	0.9	0.9	
温度 [°C]	潤滑油	機関入口	28	30	32	32	33	34
		機関出口	27	28	29	31	32	32
	吸気	機関入口	29	29	30	30	30	30
		サージタンク	27.1	27.1	27	27	27	26.9
	冷却水	LOクーラー入口	30.5	38	45	39	41	43
		LOクーラー出口	30.5	38	44	39	41	43
		機関出口	33	41	47	43	44	47
	排気		151	162	168	173	173	173
	冷却水量 [kg/20sec]		5.95	5.6	5.3	5.55	5.5	5.5
煙度 [%]		0	0	0	0	0	0	
燃料比重		0.873		温度		27°C		

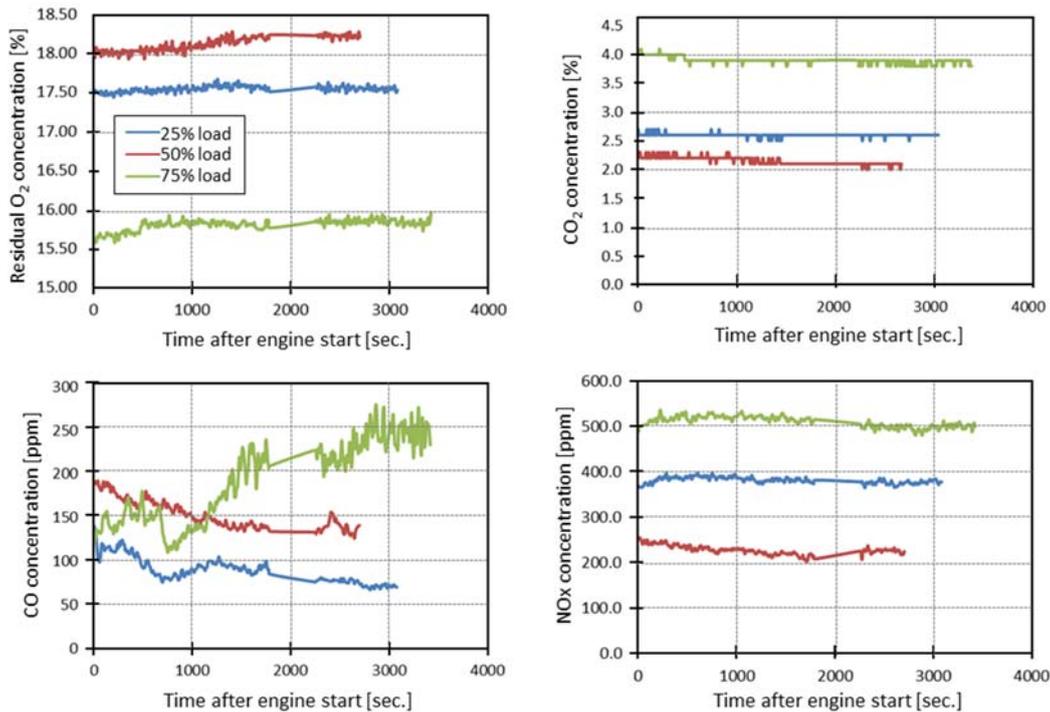
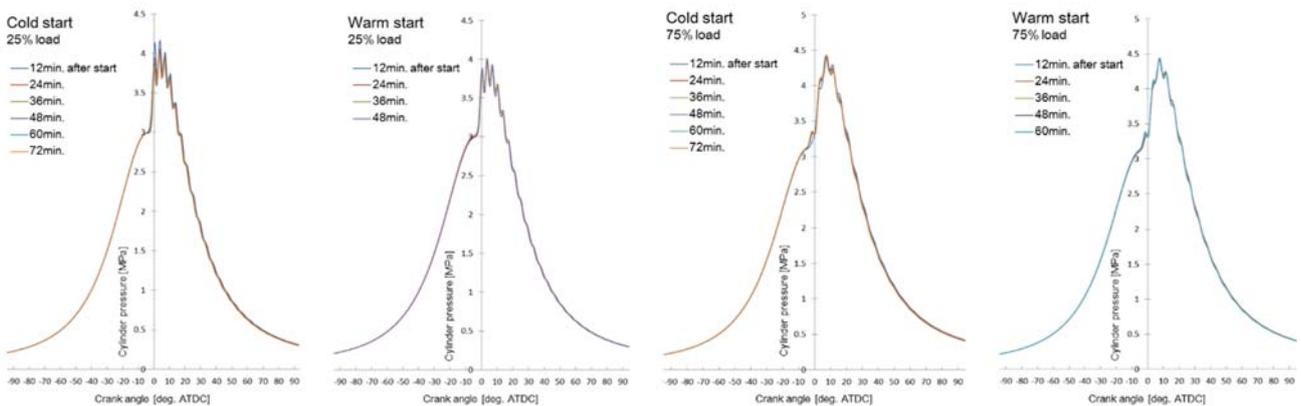


図2 エンジン始動後の排気エミッション濃度の過渡変化 (青線:Case 1-1, 赤線:Case 1-2, 緑線:Case 1-3)



(a) 25% 負荷時の燃焼室圧力変化  
(左:Case 1-1, 右:Case 2-1)

(b) 75% 負荷時の燃焼室圧力変化  
(左:Case 1-3, 右:Case 2-3)

図3 エンジン始動時の状態条件の違いによる燃焼室圧力の推移

図3は燃焼室圧力の時間履歴を比較したもので、図3(a)は25%負荷時、図3(b)は75%負荷時の結果である。エンジン負荷が小さい場合は、暖機状態からの始動時は冷間状態からの始動時に比較して燃焼最高圧力が小さくなった。一方、エンジン負荷が大きい場合には、両状態の始動時で顕著な違いは見られなかった。このことは、燃料消費量が少ない低負荷時には、燃料燃焼によって発生する熱量が周辺に損失として逃げる割合が大きく、冷間状態からの始動時にその傾向が顕著になったものと考えられる。

そこで燃料消費量について測定を行ない、この傾向の妥当性を確かめた。図4に測定結果をまとめて示す。図より、いずれの条件でも、エンジン始動後の時間経過とともに燃料消費量は徐々に少なくなっていく、やがて一定値に漸近する結果となった。その漸近値に達する時間は、暖機状態からの始動時が平均約56分であるのに対し、冷間状態からの始動時は平均約72分であった。

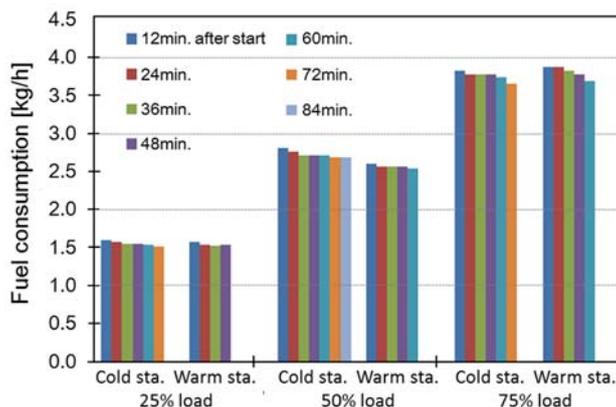


図4 エンジン始動時の状態条件の違いによる燃料消費量の推移

#### 4. 6. 4 まとめ

停泊や仮泊などで運転を停止している船舶の主機関は、通常始動時に十分な暖機を行ってから燃料運転を実施する。例えば、神戸大学の附属練習船深江丸の場合、まず発電機の前動機を起動し、その冷却水(高温冷却水)を利用して主機関の潤滑油やシリンダなどを暖める。冬場では約1時間程度、夏場では約0.5時間程度の暖機時間を設けることで、主機関始動時における熱負荷の集中などを軽減する。

一方、大津波来襲時に緊急出港を行なう際などは、そのような暖機時間はとれず、主機関を始動して離岸する必要が生じる。本研究では、始動時のエンジン状態と、始動後の燃焼特性や排気特性などの過渡的变化について知見を得ることを目的としている。初年度は、単気筒大型4ストロークディーゼルエンジンを用いて、冷間状態と暖気状態の2つの条件下始動した場合のエンジン性能推移を計測した。その結果、以下の知見を得た。

- 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56分、暖機状態からの始動では約72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(CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, 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。

次年度は、運転開始直後のエンジン性能変化を詳細に解析するとともに、型式の異なるエンジン(2ストロークディーゼルエンジン)について同様の実験解析を行なっていく予定である。

#### 謝 辞

本実験の遂行にあたり、田中伶央也氏(当時博士課程前期課程1年生)、中口拓也氏(学部4年生)、ラン・ショイー氏(学部研究生)の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

## 4. 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

### 4. 7. 1 はじめに

熱負荷を受ける機械構造物や機器に発生するトラブルの原因は、対象部分が高温となったことによる材料の劣化をはじめとして、熱膨張差に起因する締結部のボルト締め付け軸力の変化、大きな温度勾配によって生じる熱応力などがある。船舶が緊急出航した場合、各部の配管で急激に流量が増加するため、上記の問題が発生する可能性がある。その際、配管に生じる熱応力などを正確に評価するためには、配管が内部熱流体から受ける熱量とともに、配管表面からの放熱量が必要となる。伝熱工学における表面熱伝達率は、そのようなケースにおいて表面からの放熱量の大きさを表す指標である。一般に、物体表面の熱伝達率の測定はかなり困難であり、上記のような状況に対応できる「非破壊・非接触で表面熱伝達率を測定する手法」は、筆者の知る限り存在しないようである。以上のような状況の中で、表面熱伝達率を求める手法はいくつか提案されているが、一般的な方法では表面温度に加えて表面から厚さ方向の温度勾配が必要となるため、非破壊での測定はかない困難といえる。

そこで本研究では、近年さまざまな分野で使用されている赤外線式放射温度計“サーモグラフィ”を用いて、対象となる表面の温度分布を求めることにより、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。本手法の完成により、現場での温度測定データを用いて配管に発生している熱応力をリアルタイムで求めることができる手法の基盤を確立することができる。

### 4. 7. 2 定常熱伝導問題の基礎式と境界条件

緊急出港時における配管内の流れは非定常状態であり、それに対応して応力場も非定常となる。しかしながら、非定常温度場を対象として表面熱伝達率を求めることは極めて困難であるため、本研究では定常温度場を仮定する。緊急出港時における配管内の流量の時間増加が極端に大きい場合を除き、この仮定は一次近似として有効と考えられる。

一般的な非定常温度場の基礎式は以下の通りである。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad (1)$$

ここで  $T$  は温度、 $t$  は時間であり、その他の定数は次の通りである。 $\rho$  : 密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $c$  : 比熱 ( $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ )、 $\lambda$  : 熱伝導率 ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )、 $\dot{Q}$  : 熱発生率 ( $\text{W/m}^3$ )

物体内部における熱発生がない 2 次元定常温度場では、上式は以下のようなラプラス型の方程式となる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

上式は  $x$ - $y$  座標系における基礎式であるが、 $r$ - $z$  で表す円筒座標系では以下のようになる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

熱伝導問題における境界条件は、ふく射境界条件を除くと以下の 3 種類に分類される。

$$\text{温度規定境界} \quad T = \bar{T} \quad \text{on} \quad S_1 \quad (4)$$

$$\text{熱流束境界} \quad q = q_0 \quad \text{on} \quad S_2 \quad (5)$$

$$\text{熱伝達境界} \quad q = h(T - T_\infty) \quad \text{on} \quad S_3 \quad (6)$$

式(6)において  $q$  は熱流束,  $h$  が本研究の目的である表面熱伝達率,  $T_\infty$  は周囲温度である.

#### 4. 7. 3 一次元定常熱伝導問題の解

本節では, 表面熱伝達率を推定するために必要な一次元定常熱伝導の基本的な問題の解をまとめている.

##### (1) 平板の定常温度分布

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\delta} x \quad (7)$$

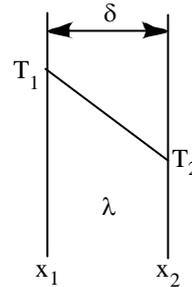
$T_1$ : 加熱側表面温度  $T_2$ : 放熱側表面温度

$\delta$ : 板厚  $x$ : 加熱面からの距離

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2) \quad (8)$$

$q$ : 熱流束 ( $\text{W/m}^2$ )  $\lambda$ : 熱伝導率 ( $\text{W/mK}$ )

註: 式(8)より, 両表面温度  $T_1, T_2$  がわかると熱流束  $q$  が求められる



##### (2) 円筒の定常温度分布

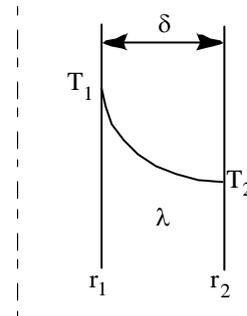
$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \quad (9)$$

$r_1$ : 内半径  $r_2$ : 外半径

$$Q = \frac{2\pi\lambda L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (T_1 - T_2) \quad (10)$$

$Q$ : 円筒に与えられた熱量 (W)  $L$ : 円筒の長さ

註: 式(10)より, 両表面温度  $T_1, T_2$  がわかると熱量  $Q$  が求められる



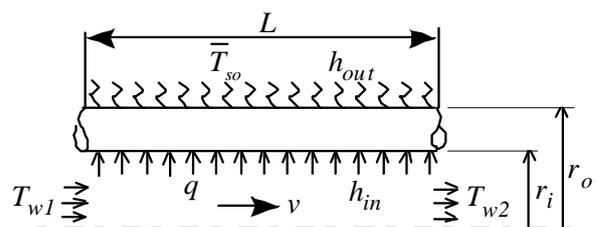
#### 4. 7. 4 簡単な例題による表面熱伝達率の推定方法の考察

本節ではいくつかの簡単な例題により, 表面温度から表面熱伝達率を求める手法について考察する.

##### <例題 1>

パイプ外表面の温度が与えられた時, パイプの外表面と内表面の表面熱伝達率を求める.

パイプの入口, 出口の流体温度を  $T_{w1}, T_{w2}$  とすると, 流体からパイプに与えられた熱  $Q_{in}$  ( $\text{J/s} \rightarrow \text{W}$ ) は, 単位時間あたり流れる流体の質量 (流体の密度  $\times$  流速  $\times$  パイプの断面積) に比熱と流体の温度変化を乗じて



求められる。

$$Q_{in} = \rho v \cdot \pi r_i^2 c_p (T_{w1} - T_{w2}) \quad (11)$$

$v$ : 流速 (m/s)     $r_i$ : パイプの内半径(m)     $c_p$ : 比熱 (J/kgK)

パイプ外表面の表面熱伝達率を  $h_{out}$ , 表面温度の測定値を  $\bar{T}_{so}$ , 周囲温度を  $T_{\infty}$ , パイプの長さとお外半径をそれぞれ  $L$ ,  $r_o$  とすると, 外表面からの放熱量  $Q_{out}$  は

$$Q_{out} = h_{out} \cdot 2\pi r_o L (\bar{T}_{so} - T_{\infty}) \quad (12)$$

と表されるので, 式(11)と(12)を等値 ( $Q_{in} = Q_{out}$ ) とすると  $h_{out}$  を求めることができる。ここで,  $L$  は熱伝達率を測定する対象とした部分のパイプの長さである。

$$h_{out} = \frac{\rho v c_p r_i^2}{2r_o L} \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\bar{T}_{so} - T_{\infty}} \quad \text{or} \quad h_{out} = \frac{Q_{in}}{2\pi r_o L (\bar{T}_{so} - T_{\infty})} \quad (13)$$

上式においてパイプの表面温度  $\bar{T}_{so}$  はサーモグラフィ等で計測する。

流体からパイプの内面に流入する熱量  $Q_{in}$  は, 円管を通過する熱量を表す式(10)より, パイプの内表面と外表面の温度  $T_{si}$ ,  $\bar{T}_{so}$  を用いて表すことができる。

$$Q_{in} = \frac{2\pi\lambda L}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} (T_{si} - \bar{T}_{so}) \quad (14)$$

上式の  $Q_{in}$  は式(11)で求められているので, 変形すると  $T_{si}$  (内表面平均温度) が得られる。

$$T_{si} = \frac{Q_{in}}{2\pi\lambda L} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \bar{T}_{so} \quad (15)$$

ここで, 内表面の表面熱伝達率を  $h_{in}$ , 流体温度を  $T_w$  とすると  $Q_{in}$  は式(12)と同じ形で

$$Q_{in} = h_{in} \cdot 2\pi r_i L (T_w - T_{si}) \quad (16)$$

と表すことができるので, 内表面の平均熱伝達率  $h_{in}$  は次式により求められる。

$$h_{in} = \frac{Q_{in}}{2\pi r_i L (T_w - T_{si})} \quad (17)$$

ここで  $T_w$  は  $T_{w1}$  と  $T_{w2}$  の平均値とする。

$$T_w = \frac{T_{w1} + T_{w2}}{2} \quad (18)$$

以上の手順をまとめると

測定項目:

パイプの入口, 出口の流体温度を  $T_{w1}$ ,  $T_{w2}$

パイプの周囲温度  $T_\infty$

パイプの外表面温度  $\bar{T}_{so}$  (サーモグラフィ)

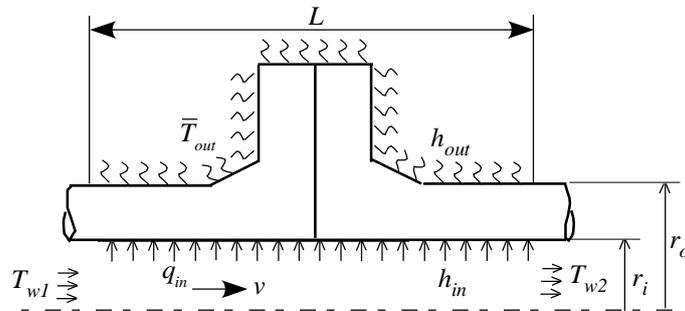
以下に計算手順をまとめている。

1. 流体からパイプに与えられた熱  $Q_{in}$ ・・・式(11)
2. パイプ外表面の表面熱伝達率を  $h_{out}$ ・・・式(13)
3. パイプの内表面温度  $T_{si}$ ・・・式(15)
4. パイプ内表面の熱伝達率  $h_{in}$ ・・・式(17)

上記例題では、パイプの表面温度、流体の入口、出口温度と周囲温度を測定すると、伝熱工学の基礎式を用いることにより、パイプ外表面と内表面の平均熱伝達率および内表面平均温度が求められる。

### <例題 2>

管フランジの外表面の温度が与えられた時、外表面と内表面の表面熱伝達率を求める。



この問題における表面熱伝達率を求めるためには有限要素解析が必要になるが、ここで示す手法はパイプ表面の温度、熱伝達率が軸方向に変化する場合にも適用可能である。まずフランジの管部分の入口、出口の流体温度を  $T_{w1}$ 、 $T_{w2}$  とすると、流体からフランジに与えられた熱  $Q_{in}$  は、単位時間あたり流れる流体の質量 (流体の密度×流速×パイプの断面積) に比熱と流体の温度変化を乗じて求められる。

$$Q_{in} = \rho v \cdot \pi r_i^2 c_p (T_{w1} - T_{w2}) \quad \text{式(11)を再掲}$$

$\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)     $v$  : 流速 (m/s)     $r_i$  : パイプの内半径(m)     $c_p$  : 比熱 (J/kgK)

流体から内表面に与えられる単位面積あたりの熱量  $q_{in}$  は以下の通り。

$$q_{in} = \frac{Q_{in}}{2\pi r_i L} \quad (19)$$

上式の  $q_{in}$  は一様である必要はなく、軸方向に変化しても良い。

有限要素法における離散化の手法については、詳細な説明を省略して以下に結果のみ示す。熱伝達境界を有する熱伝導問題を有限要素法で定式化すると、左辺の熱伝導マトリクスと右辺の熱流束ベクトルのいずれにも熱伝達率を含む項が現れる。ここでは物体の外表面の熱伝達率  $h_{out}$  が未知であるとする。その場合、有限要素解析の手順に従うと離散化方程式は以下のようなになる。

$$\begin{Bmatrix} [\tilde{a}_{11}] & [a_{12}] \\ [a_{21}] & [a_{22}] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{T}_{out}\} \\ \{\tilde{T}\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\tilde{q}_{out}\} \\ \{\bar{q}\} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

$[\tilde{a}_{11}]$  : 外表面の熱伝達率  $h_{out}$  を含む,  $\{\bar{T}_{out}\}$  : 既知節点温度 (測定値),

$\{\tilde{q}_{out}\}$  :  $h_{out}\bar{T}_{out}$  を含む項,  $\{\tilde{T}\}$  : 未知節点温度

$\bar{q}$  : 断熱境界も含めて単位面積あたり値の熱量が既知,  $q_{in}$  も含む

左辺の熱伝導マトリックスは外表面の熱伝達率  $h_{out}$  を含む項と含まない項に分けられ, それに対応して温度ベクトルは測定値として与えられる既知節点温度と未知節点温度に分けることができる. さらに熱流束ベクトルも熱伝達率を含む項と含まない項に分けられる. そこで式(20)の中で, 既知成分のみで構成される部分について連立一次方程式を解くとすべての節点温度が求められる. そこで得られた内表面の節点温度  $T_{si}$  を用いると, 内表面の熱伝達率  $h_{in}$  を求めることができる.

$$q_{in} = h_{in}(T_w - T_{si}) \quad (21)$$

上式において, 流体温度  $T_w$  が入り口と出口の間で線形に変化すると仮定すると

$$T_w = T_{w1} - \frac{T_{w1} - T_{w2}}{L} z \quad (22)$$

となる. 式(22)の  $T_w$  を式(21)を変形した以下の式に代入すると, 内表面の各位置における熱伝達率  $h_{in}$  が求められる.

$$h_{in} = \frac{q_{in}}{T_w - T_{si}} \quad (23)$$

以上の手順をまとめると

測定項目 :

パイプの入口, 出口の流体温度を  $T_{w1}$ ,  $T_{w2}$

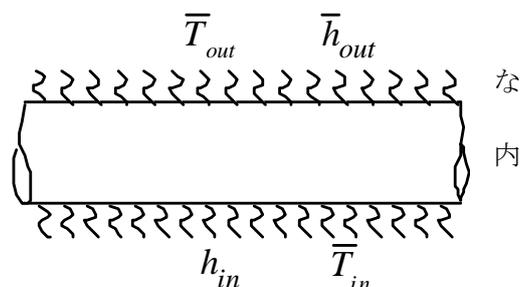
パイプの周囲温度  $T_{\infty}$

パイプの外表面温度分布  $\bar{T}_{out}$  (サーモグラフィ)

上記の例題では, パイプの表面温度分布, 流体の入口, 出口温度と周囲温度を測定すると, パイプ外表面と内表面の熱伝達率分布および内表面温度分布が求められる. 有限要素法により離散化された式(20)の解き方は, より形状が簡単なつぎの例題により解説する.

### <例題 3>

外表面温度  $\bar{T}_{out}$  が既知で表面熱伝達率  $\bar{h}_{out}$  の値が推定可能時 (およその値がわかる), 内表面の熱伝達率  $h_{in}$  を求める. 面側の流体温度  $\bar{T}_{in}$  は既知とする.



$$\begin{Bmatrix} [a_{11}] & [a_{12}] \\ [a_{21}] & [\tilde{a}_{22}] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{T}_{out}\} \\ \{\tilde{T}\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\bar{q}_{out}\} \\ \{\tilde{q}\} \end{Bmatrix} \quad (24)$$

第1式より

$$\begin{aligned} [a_{11}]\{\bar{T}_{out}\} + [a_{12}]\{\tilde{T}\} &= \{\bar{q}_{out}\} \\ \therefore \{\tilde{T}\} &= [a_{12}]^{-1} (\{\bar{q}_{out}\} - [a_{11}]\{\bar{T}_{out}\}) \end{aligned}$$

ここで $[a_{11}] \{\bar{q}_{out}\}$ には既知の外表面熱伝達率 $\bar{h}_{out}$ が含まれている。

第2式に既知となった未知節点温度 $\{\tilde{T}\}$ を代入する。

$$[a_{21}]\{\bar{T}_{out}\} + [\tilde{a}_{22}]\{\tilde{T}\} = \{\tilde{q}\} \quad \text{より}$$

$$[a_{21}]\{\bar{T}_{out}\} + [\tilde{a}_{22}][a_{12}]^{-1} (\{\bar{q}_{out}\} - [a_{11}]\{\bar{T}_{out}\}) = \{\tilde{q}\} \quad (25)$$

上式の $[\tilde{a}_{22}]$ と $\{\tilde{q}\}$ 中には $h_m$ が含まれており、後述する漸化式によって求めることができる。

上記の例題では内表面の熱伝達率 $h_m$ の推定が目的であり、その値が場所によって大きく変化し測定が困難である場合、あるいは外表面の熱伝達率の推定が比較的容易な場合に有効と考えられる。

#### 4. 7. 5 まとめ

本年度は、表面温度の温度分布が既知のとき、逆問題的手法により表面熱伝達率を求めるための基盤を確立することを目的として研究を進めた。具体的には、関連する熱伝導問題の基礎的な事項をまとめ、有限要素法の離散化手法を適用することなしに、既知の表面温度を使って表面熱伝達率が求められることができる問題を紹介した。つぎに、やや複雑な形状の構造物を対象として有限要素法の離散化手法を適用し、熱伝導方程式を構成する熱伝導マトリックス、温度ベクトル、熱流束ベクトルが、それぞれ未知の熱伝達率を含む成分と含まない成分に分けることができ、その特性を用いると表面熱伝達率が推定可能となることを示した。次年度は対象構造物を実際に有限要素法で離散化した場合を対象として、数値解析により物体表面に配置された節点における熱伝達率を求める手法を検討する。

## 5. まとめ

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。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する。本年度は 3 年計画の初年度ということで、前述の津波対策に関するアンケートを実施し、個別の研究テーマについては、それぞれの担当者が着実に成果を挙げている。以下に簡単に成果を紹介する。

津波対策のアンケートについては、外航船社、内航船社、官公庁を対象として実施した。対象船社数は 7 社と少ないが、各分野を代表する企業・組織であり、有効な結果が得られたものと考えられる。アンケートの分析結果より、レベルの差はあるが外航船社、内航船社、官公庁のいずれも津波対策に関する規則等があり、とくに危険度の高い「入港時」が中心となっている。また、使用する港が固定している、あるいは旅客の運搬が大きな業務であるケースなど、使用形態に応じた対応がなされてことが明らかとなった。

7 つの研究テーマに関する詳細な成果については本文を参照していただきたいが、最初の 2 テーマは機関室に関連の深いテーマであり、つぎの 2 テーマは船舶の操船に関するテーマであり、それぞれ機関士、航海士に対して有効な情報を提供できる内容となっている。またつぎの 3 テーマは、主機関と配管に関する要素技術の問題を工学的なアプローチで解決を目指す内容となっており、機関室設計の段階で参考となる内容といえる。以上の 7 つの研究テーマの成果が有機的に結びつくことにより、3 年間のプロジェクトを通じて、船舶の津波対策に関する有効な知見、指針を提供できるものと期待される。