

## 経年構造の検査・診断技術の開発 に関する研究

丹羽 敏男\*、平方 勝\*\*、島田 道男\*、田中 義久\*  
安藤 孝弘\*\*、小島 隆志\*\*\*、高田 篤志\*\*\*\*、岡 正義\*\*  
藤本 修平\*、林原 仁志\*、穴井 陽祐\*\*、高見 朋希\*  
田中 義照\*\*\*\*\*

### Development of survey and diagnosis technologies for deteriorating structures

by

Toshio NIWA, Masaru HIRAKATA, Michio SHIMADA  
Yoshihisa TANAKA, Takahiro ANDO, Ryuji KOJIMA  
Atsushi TAKADA, Masahiro OKA, Shuhei FUJIMOTO  
Hitoshi HAYASHIBARA, Yosuke ANAI, Tomoki TAKAMI  
and Yoshiteru TANAKA

### Abstract

In this paper, diagnostic support system, which is expected for feedback lessons to be learnt hull damage and is applied for only oil tanker, for hull survey and repair action by using experience knowledge in addition to survey information is constructed. Ultrasonic monitoring system, which is applied for through thickness fatigue crack initiated and propagated at specified defective location by diagnostic support system, is developed. Based on the above knowledge regarding survey and diagnosis technologies for deteriorating structures, deterioration diagnosis monitoring technologies and deterioration diagnosis manuals, which is applied for sea marks (resilient lighted beacons and reinforced concrete lighted beacons etc.), are developed.

---

\* 構造基盤技術系、\*\* 構造安全評価系、\*\*\* 環境・動力系、

\*\*\*\* 企画部、\*\*\*\*\* 研究統括主幹

原稿受付 平成26年10月30日

審査日 平成27年1月7日

## 目 次

1. まえがき	24
2. 船体構造の検査支援システムの構築	25
2.1 船体損傷	25
2.1.1 典型的な損傷事例とその修繕	25
2.1.2 最近の損傷	26
2.1.3 損傷に対する修繕の基本的考え方	26
2.1.4 検査要注意箇所	27
2.2 知識処理システムの開発	27
2.2.1 システム上の知識表現技術の歴史	27
2.2.2 本システムへの オントロジーの利用	27
2.2.3 システムの構成	30
2.2.4 システムの機能	30
3. 疲労損傷モニタリング技術の開発	34
3.1 圧電素子単体によるモニタリング	34
3.2 探触子を用いたモニタリングの検証	35
3.2.1 隅肉試験片を用いた検証	36
3.2.2 疲労き裂に作用する応力の影響	37
3.2.3 塗膜の影響	39
3.3 モニタリング手法の適用性	39
4. 航路標識の腐食劣化診断 モニタリング技術の開発	40
4.1 浮体式灯標の概要	40
4.1.1 航路標識としての種別	40
4.1.2 灯標としての機能	40
4.1.3 浮体式灯標の構造、 設置基数と設置年度	40
4.2 浮体式灯標の現地調査	41
4.2.1 現地調査箇所の選定要件	41
4.2.2 調査対象標識	41
4.2.3 現地調査項目	41
4.2.4 現地調査結果	41
4.3 腐食劣化診断モニタリング 技術の開発	44
4.3.1 浮体式灯標の環境に適した 手法の抽出	44
4.3.2 計測法の開発等	44
4.4 劣化診断マニュアルの作成	51
5. あとがき	53
謝辞	53
参考文献	53

## 記 号

$t$ : 供試材の板厚 [mm]  
 $\theta$ : 受信探触子の方向 [deg]  
 $L$ : 送受信探触子間隔 [mm]

$s$ : 送受信ラインから  
    き裂先端までの距離 [mm]  
 $a$ : き裂長さ [mm]  
 $c$ : 音速 [m/s]  
 $i$ : 入射角 [deg]  
 $\theta_i$ : 屈折角 [deg]  
 $TOFi$ : 伝搬時間増加量 [ $\mu$ s]  
 $C$ : 塗膜のコンデンサ容量 [F]  
 $R$ : 塗膜の抵抗 [ $\Omega$ ]  
 $Z$ : 塗膜のインピーダンス [ $\Omega$ ]  
 $f$ : 周波数 [Hz]  
 $Z_f$ : 膜厚補正後のインピーダンス [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]  
 $d$ : 膜厚 [cm]  
 $S$ : 電極面積 [ $\text{cm}^2$ ]

## 1. まえがき

船体構造の検査および診断を行うにあたって、損傷箇所の見落としや損傷が再発するような不適切な修繕を避けるためには、自船の検査・修繕履歴、同型船の類似損傷・修繕情報、さらには損傷を数多く見てきた専門家の経験的知識が大変有益な情報である。

本研究では、先に作成した診断支援システムのプロトタイプ<sup>1)</sup>を基に、油タンカー等を対象に、船体損傷、その修繕に関する情報ならびに経験的知識と最近の船体損傷情報を共有利用し、個別の腐食衰耗・損傷状態に応じた、より細かな修繕方法および修繕範囲についての計画立案を支援するシステムの開発を行った。

また、上記検査支援システムで指示される重要点検箇所において、実船の経年劣化状態を適切に把握するための要素技術として、疲労き裂等の損傷発生を早期に検知し、その成長をリアルタイムに監視する疲労損傷モニタリング技術の開発を目指した。これまで、疲労損傷モニタリング技術は種々提案されている<sup>2),3),4)</sup>が、その精度や効率等、解決すべき問題点が多く、実用化に至っていない。そこで、超音波の指向性を利用した圧電素子による疲労損傷モニタリングへの適用を検討した。

上述したように、船体構造の検査支援システムの構築をメインテーマとし、疲労損傷モニタリング技術の開発を要素技術の開発と位置づけて研究を行っていた平成24年度12月2日に、笹子トンネルの天井板の崩落事故が発生した。そこで、交通インフラの維持管理・更新のあり方についての見直しが急務となり、その一環として国土交通省総合政策局より航路標識の腐食劣化診断モニタリング技術の開発に関する研究を受託した。こ

の研究では、上記の船体構造を対象とした研究で得た腐食衰耗、損傷状態に関する情報や経験的知識、腐食・防食技術の知見を基に、直接に気象・海象といった自然現象等の影響を大きく受ける厳しい環境に曝される航路標識を対象に、腐食劣化の進捗度合いに応じて点検、保守手法の最適化を図る腐食劣化診断モニタリング技術を確立し、劣化診断マニュアルを作成した。

本稿では、これらの研究の総合報告として、経年構造の検査・診断技術の開発に関する研究成果を解説する。

## 2. 船体構造の検査支援システムの構築

造船学は経験工学といわれる。なかでも、船体構造に関わる設計や規則要件は、荷重や強度に内在する不確定な要因を相手にせざるを得ないため、これまでも、検査で確認された諸々の問題を解決しながら、それらの経験と知識が、設計や規則の改良に反映されてきた。

また、これまでの報告では、損傷の発見には、タンク内の環境<sup>5)</sup>さらには経験と知識のような個人的要素<sup>6),7)</sup>に左右される傾向があると述べられている。おそらく、これらの経験と知識は、いわゆる暗黙知として個人の記憶として残されているものの、形式知として共有できる仕組みに至っていないものと思慮される。

そして、最近では、集合知といった用語をはじめ、知識伝承、知識基盤技術整備等にIT技術を活用する仕組みが提案されている。そこで、上記背景を踏まえ、「損傷に学ぶ」知識基盤の整備に、これらIT技術を活用し、船体構造の検査支援(検査・修繕計画作成)にあたって、関連する情報と知識を活用できるネットワークシステムの構築を行った。

### 2.1 船体損傷

#### 2.1.1 典型的損傷事例とその修繕

ここでは、衝突、接触、座礁といった海難による損傷、操作ミスによる損傷ではなく、設計および工作上の問題によって発生した損傷ならびに設計時の想定を超える運航条件下におかれたために発生したと判断される損傷を示す。

(1) 図-2.1 上図は、縦通肋骨が横桁あるいは横隔壁を交差する箇所において、横桁付防撓材に発生するき裂損傷であり、昔から多くみられる典型的な損傷である。縦通肋骨に作用した荷重を横桁あるいは横隔壁のような主要支持部材に伝達する際に、当該横桁付防撓材基部に曲げモーメントが発生するため、この

曲げモーメントによって、構造の不連続な溶接固着部に応力集中部となる当該箇所でき裂が発生する。修繕は、横桁付防撓材先端部を図-2.1 下左図のような形状にし、バックブラケットを設けるか、図-2.1 下右図のように倒れ防止ブラケットを設け、さらにバックブラケットを設ける。

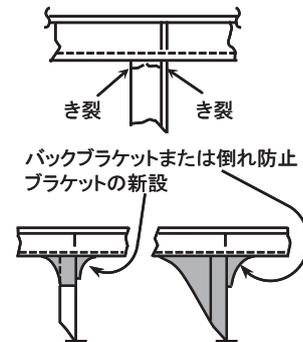


図-2.1 横桁付防撓材の疲労き裂損傷と修繕

(2) 図-2.2 上図に示す損傷は、発生箇所は(1)と同じであるが、損傷部材が(1)と異なる。これは、縦通肋骨の強度不足あるいは上記(1)の場合と同様に、溶接固着部横桁付防撓材との取り合い構造の不連続に起因して発生する損傷である。そのため、修繕としては、(1)と同様、横桁付防撓材先端部を図-2.2 下図のような形状にするのが一般的である。第二世代VLCCの船側縦通肋骨に多く発生した損傷はこのタイプである。最近では、アフラマックスタンカー等の縦通隔壁付縦通肋骨に発生している。

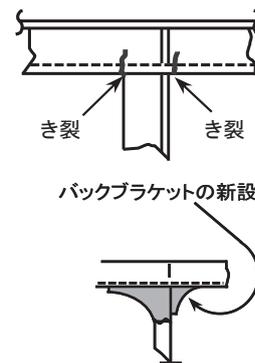


図-2.2 縦通肋骨の疲労き裂損傷と修繕

(3) 図-2.3 上図に示す損傷は、主に横桁に生じたせん断力によって、スロットの応力集中部にき裂が生じるもので、修繕としては、図-2.3 下図に示すように、開口部を塞ぐのが最も効果的である。その際に、き裂の進展方向から、せん断力の方向を正しく見極める必要

がある。

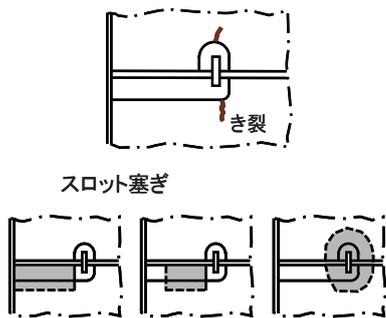


図-2.3 横桁の疲労き裂損傷と修繕

(4) 図-2.4 上図は、主要支持部材に接続するブラケットトウ部付近に発生するき裂である。これは、ブラケット部が高応力箇所であるのに加えて、構造上どうしても不連続となるため応力集中が発生するためである。この場合、先端部を図-2.4 下図に示すような形状に修繕することが多い。また、先端部の一部切替え補強の際にテーパを付ける対策をとることが必要である。この部分は応力的に厳しいところであるため、切替え位置を高応力部の範囲から外れた位置に設けるよう留意しなければならない。

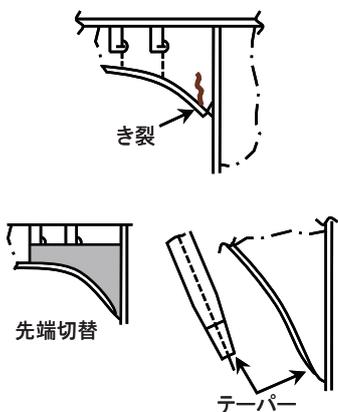


図-2.4 主要支持部材ブラケット端部の疲労き裂損傷と修繕

2.1.2 最近の損傷

図-2.5 は、ホースハンドリングクレーン下部の甲板縦通梁に発生した損傷であり、油タンカー等にみられる。ホースハンドクレーンは、通常、船体中央部に設置されており、その下部縦通部材は補強が施されていることが多い。そして、縦通部材の縦曲げ剛性が変化する（小さくなる）箇所において、損傷が発生するケースがある。これは、縦曲げによる前後方向応力がブラケット端部で縦

通肋骨を引き下げる力に変わり、これが繰り返し曲げ応力となることによって疲労き裂損傷が発生するといわれる。この箇所は、PMA(Permanent Means Of Access：いわゆる足場)がデッキ裏に設置されていない船舶では、ボート検査（タンクに張水し、ボートから検査する）によらなければならない。検査でのアクセスが困難な場所であるので、検査要注意箇所の一つである。ブラケット端部に発生する疲労き裂損傷を修繕する場合には、通常、ブラケット端部を滑らかに縦通肋骨に接合することで対処できるが、このような原因によって発生する疲労き裂損傷では、ブラケット端部を滑らかに縦通肋骨に接合しても応力を下げる効果は限定的だとされる。そこで、ブラケットを設けない方法が考えられる。

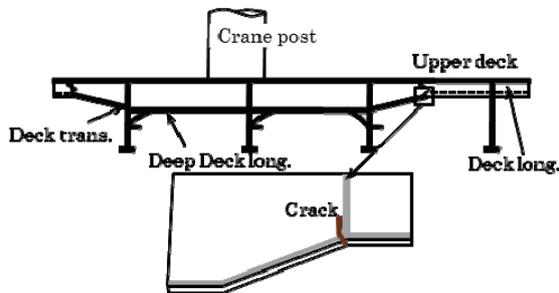


図-2.5 ホースハンドリングクレーン下の甲板縦通梁の損傷事例

2.1.3 損傷に対する修繕の基本的考え方

検査において損傷とみなされるのは、大別してき裂と変形である。すなわち、腐食単独では損傷とみなされない。き裂は、延性き裂、脆性き裂、疲労き裂に分類されるが、これらの種類によって修繕方法も異なってくる。延性き裂は、衝突、接触、座礁、爆発等の過大な荷重を受けた場合に発生するほか、船首部などに大きな波浪衝撃荷重を受けて船体が局部的に大きく変形したときなどに、疲労き裂を起点に内部材に派生的に生ずることもある。この場合の修繕としては、現状復旧が基本的なやり方と考えられているが、船首部への過大な波浪衝撃荷重による場合、その発生状況によっては補強の必要性が出てくるため、検査現場での判断に委ねられる。疲労き裂は、繰り返し応力によって、微小なき裂から徐々に進展していく損傷である。修繕方法としては、就航実績（船齢）と今後の運航計画に照らし合わせて、修繕計画が策定されることになる。最近では、脆性き裂による損傷報告がみられないため、本章では取り扱わない。

変形に対する修繕方法としては、変形した板や

骨の切替が一般的である。その場合、衰耗がそれほど進行していないにもかかわらず、波浪衝撃や船体の曲げ、せん断を引き起こす波浪外力、あるいは積荷荷重によって変形が生じたと判断される場合には、現状復旧の修繕では、その後も損傷が再発する可能性が大きい。防撓材新設あるいは板の増厚切替による座屈強度の補強が必要である。しかし一般的には板の増厚よりは防撓材の新設によって、ひとつの防撓板が受け持つ面積を小さくするのが効果的である。

2.1.4 検査要注意箇所

船ごとに構造部材寸法や配置が異なるため、損傷が発生する箇所を特定することは困難であるが、一般的に構造上の弱点とされる箇所は、ある程度分類できる。構造上の弱点箇所を分類し、船体構造断面図に検査要注意箇所を示した教育研修用教材を独自に用意している検査関係機関もある。

検査員は、一般的な検査要注意箇所に対する知識に加えて、当該船舶の検査履歴、同型船の損傷事例等の情報を調べた上で検査に臨むことが多い。船体構造断面図に示された検査要注意箇所に示された箇所に加えて、疲労き裂であれば、構造上の不連続箇所、応力集中部、変形の大きい箇所、主要支持部材と局部支持部材の接合部（荷重を伝達する箇所）などの損傷に対する一般的知識を、各検査員が経験を踏まえて記憶しているものと思われる。主要支持部材に接合しているトリッピングブラケットは、まわりの箇所よりも荷重を伝達する機能を担っている関係で、損傷が発生しやすい箇所といわれている。同型船に損傷が発生した場合、損傷が発生する確率が経験的に高いといわれている。また、ある片側で発見された損傷は、工作上的問題でなければ、反対側の同じ部材に損傷が発生している可能性が高いといわれている。いずれも検査要注意箇所である。

疲労き裂損傷の場合、当該部材を修繕したものの、その周辺の応力レベルの同じような箇所では、同様の損傷を引き起こす可能性がある。したがって、修繕した箇所とその周辺（反対舷も含む）を経過観察する意味において検査要注意箇所である。また、修繕後まもなく再発する損傷については、修繕方法に何らかの問題があったと思われるため、そのような情報を一般化して、再発防止に努めることはもちろん、その原因を知識として処理できるようにする必要がある。

2.2 知識処理システムの開発

2.2.1 システム上の知識表現技術の歴史

最近、知識表現にあたって、オントロジーという概念が人工知能の分野で利用されるようになった。

オントロジーは、従来の知識表現や知識利用に欠けていた共有可能性や再利用性の視点を実現するために登場したといわれている<sup>8)</sup>。共有可能性と再利用性を高めるために、オントロジーを記述するには、XML (eXtensible Markup Language) を利用する。オントロジーとは、本来、哲学用語としては存在論を意味するが、人工知能の分野では「概念の明示的規約」と定義され、計算機が理解可能な「概念辞書」ととらえられることが多い。オントロジーは意味ネットワークやフレーム等知識表現技術のもっていた形式性と推論可能性、すなわち、概念や概念間の関係を表現、概念の属性をスロットにて表現する等の点を継承している。

このような人工知能の分野におけるオントロジー技術の整備と並行して、W3C (World Wide Web Consortium) を中心に、図-2.6 に示す階層構成からなるセマンティックウェブ技術が整備されつつある。これは、Web2.0 が誕生して以来、通信技術の中に XML を多用した Web の構造化が進んでいることに関連する。セマンティックウェブの構成要素の一つであるメタデータ、すなわち図-2.6 の RDF model & Syntax 層は、画像データのようなコンテンツの検索で活用される。これはメタデータが画像データ等のコンテンツに内在する意味情報を明示的に記述し、外部からの処理を容易にすることを図っているためである。図-2.6 の RDF Schema 層、および Ontology 層は、対象領域の意味・論理構造を記述する。したがって、オントロジー (Ontology 層) は構造化されたデータベーススキーマと見ることもできる。オントロジーは、ウェブページ (リソース) とリソース間の関係に対して計算機的意思を与え、推論を可能にすることに用いられる RDF Schema の上位階層に位置づけられた利用方法も提案されている。また、それを適用した事例も紹介されている<sup>9),10)</sup>。

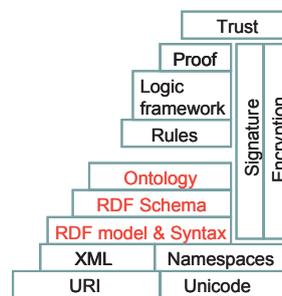


図-2.6 セマンティックウェブ階層

2.2.2 本システムへのオントロジーの利用

冒頭から述べているように、検査、修繕計画においては経験的知識が求められる。和田<sup>9)</sup>は、「経

験のない人は、足元に松茸が生えていても気がつかないし、松茸が生えていそうにないところを一生懸命さがしている。」と松茸狩りを例に、船体構造の点検、検査における経験と知識の関与について説明している。また、岡田<sup>11)</sup>や Okumoto ら<sup>12)</sup>は、船殻設計者がこれまでに多くの損傷を教訓に対策をとってきたことの紹介とともに、過去の損傷を決して風化させることなく、それらの事例等を教材に、基準・ルールをしっかりと伝えていくことの大切さを述べている。経験的知識について、いかにオントロジーを利用して表現し、検査で得られるデータ（情報）と組み合わせて、それらをいかに活用していくかを検討しながら、知識処理システムを構築しなければならない。

船体構造の検査・修繕計画のシステム構築にむけて、オントロジーの利用法について考える。はじめに、システムの目的（機能）に応じた知識処理に必要な語彙を定義する。それら語彙は、主に、船体構造、検査・修繕に関連する語彙にあたる。船体構造部材の呼び方については、日本語、英語の別に加えて様々な呼び方があるのが現状である。ここでは、油タンカーおよびばら積み貨物船の検査強化プログラム(IMO 総会決議 A.744(18)<sup>13)</sup>)の中で使用されている語彙を使用した。検査関連用語についても IMO 総会決議 A.744(18)の中で使用されている語彙を使用した。これらの語彙はオン

トロジーの中で、概念として定義される。たとえば、「Survey Report」という概念をまず定義し、その詳細定義については、図-2.7 に示すように、part-of（部分-全体関係）又は attribute-of（属性）といったスロットを作成し、また、「Survey Report」概念を継承する「TM Report」、「Damage Report」、「Repair Report」、「Photo Report」概念を定義し、それらとの間の関係を is-a 階層（上位、下位概念の設定）で定義した。さらに、どのような箇所などの部材が損傷するかを予めパターン化した上で、図-2.8 に示す損傷パターン概念や概念間の関係を定義し、典型的な損傷パターンと紐付け、その典型的な損傷パターンに対する修繕方法との紐付けにあたる経験的知識の記述をオントロジーの中で行った。また、検査データベースデータ（インスタンス）に対するクラス定義をオントロジーの中で記述、すなわち、データスキーマとして利用した。

図-2.9 は 2.2.1 項で述べたように、縦通肋骨が横桁を交差する箇所において発生する典型的な疲労き裂損傷を発見したときの判断の一例を示したものである。そして、これを一連の流れとして示したものが、図-2.10 である。ここに示したように判断にいたる必要な知識（思考パターン）、原因究明のための推論に必要な因果関係について、オントロジーを利用した知識表現で整備した。

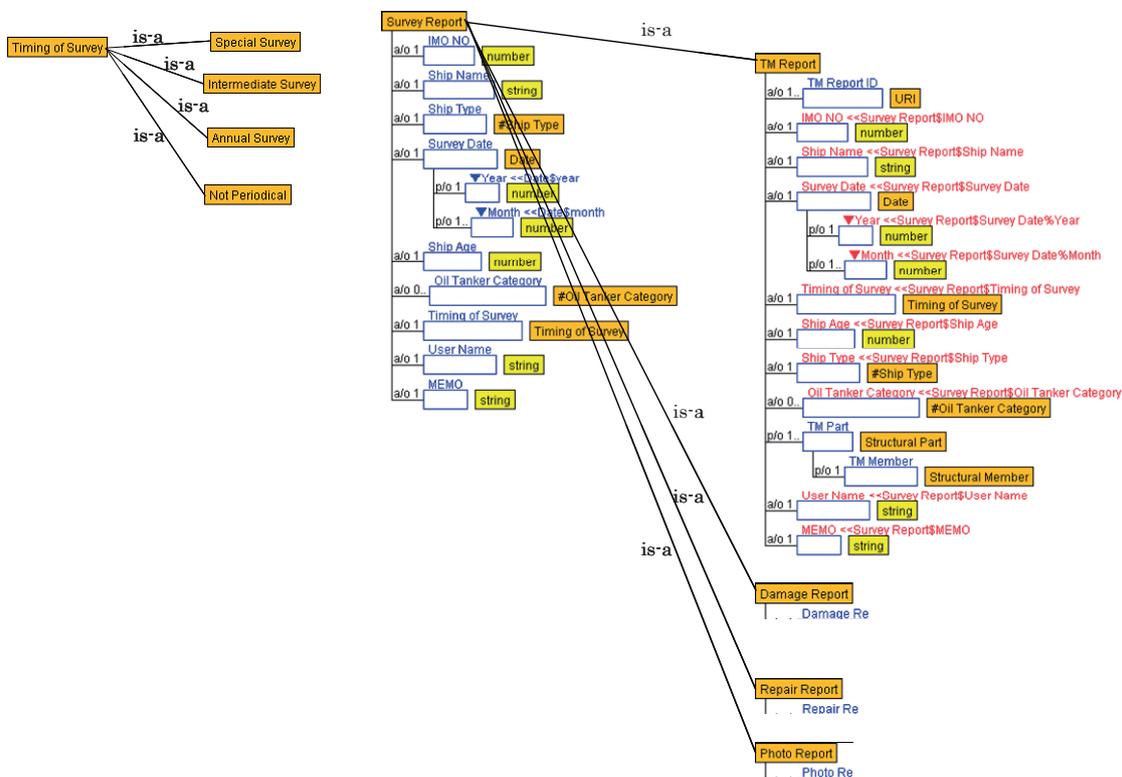


図-2.7 検査・修繕分野の概念の一例

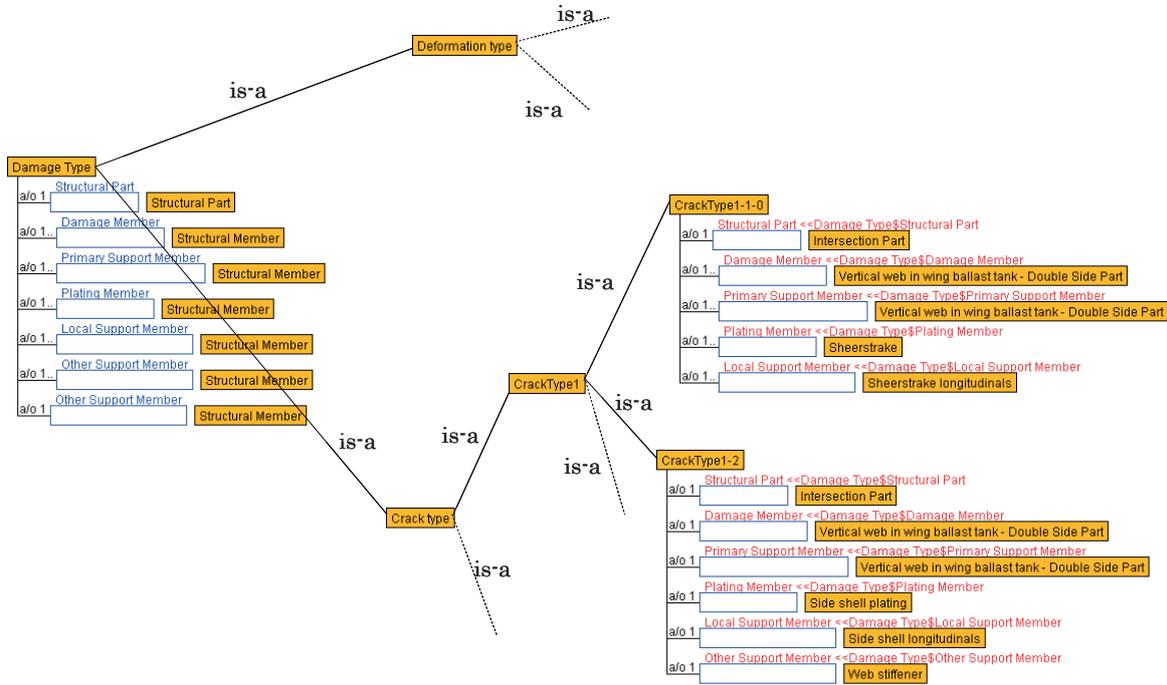


図-2.8 典型的な損傷タイプ概念の一例

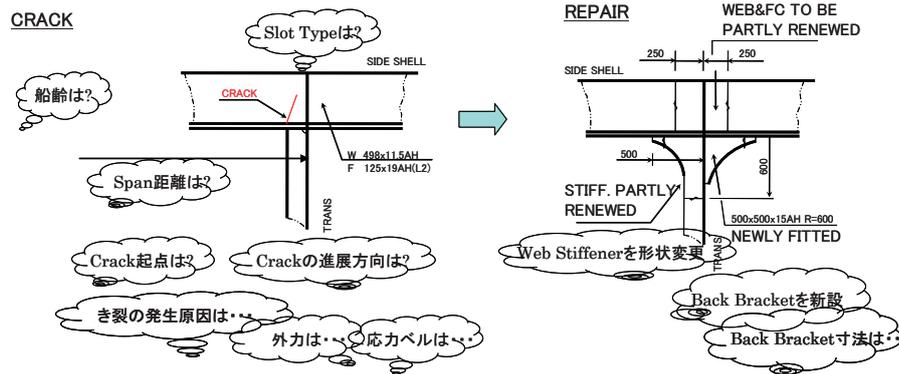


図-2.9 損傷発見時の判断の一例

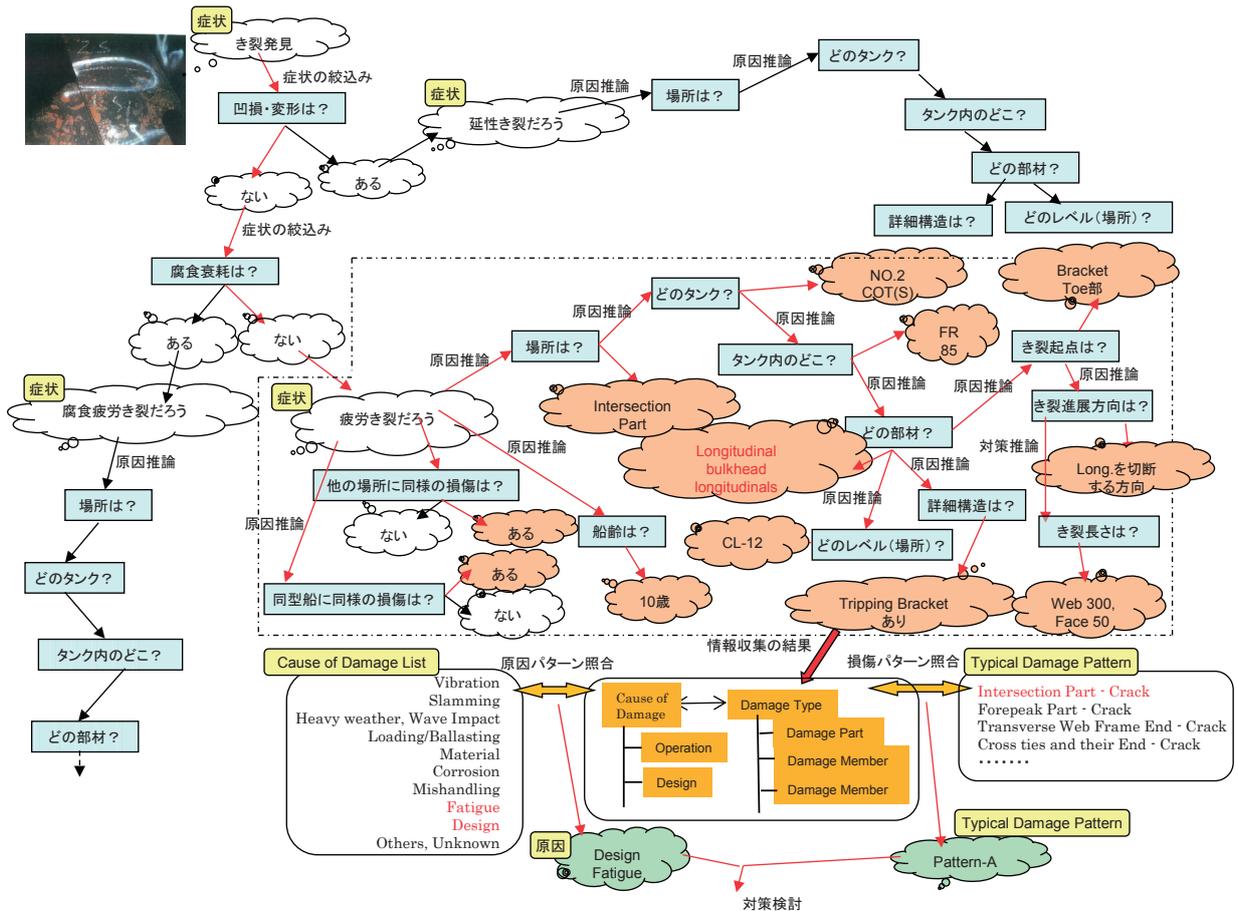


図-2.10 思考表現の一例

2.2.3 システムの構成

図-2.11 に示すように、本システムは、ユーザーがサーバーにアクセスして処理を行う Web アプリケーションの形態をとる。サーバーには、検査・修繕分野固有の意味を踏まえた、問題解決機能（情報と知識（記憶）の処理）を持たせるようにし、従来のデータベース処理に加えて、知識処理を加えたサーバー側の処理を可能にしている。知識管理では、計算機が処理可能な知識表現を行うために、オントロジーを用いた知識管理を行っている。情報管理では、検査データの管理、登録

船データの管理を行う。

開発にあたり、Eclipse (Ver.3.5) と Apache Tomcat (Ver.6.0)を用いてシステムを作成した。知識表現、すなわちオントロジーの作成にあたり、大阪大学で開発された法造オントロジーエディタを使用した。現在、本章の研究に記述されているオントロジーの内容は、典型的な損傷図と修繕計画図のメタデータ、データベースの意味構造を規定したデータスキーマ、船体構造、検査関連用語彙の定義となっている。データベースの管理には、汎用的なデータベースアプリケーション (MySQL)を使用した。サーブレット機能、オントロジーの読み込み、オントロジーを利用した知識処理には、Javaを使用した。

2.2.4 システムの機能

検査強化プログラム（IMO 総会決議 A.744(18)<sup>13)</sup> に従った検査を行うことを前提にシステムの構築を行う。本システムでは、検査・修繕の計画(Planning)を支援することを目的としているが、損傷報告の大切さ、また、検査データの意味を踏まえた管理と円滑な処理を行えるようにするためには、報告様式の画一化が求められる。

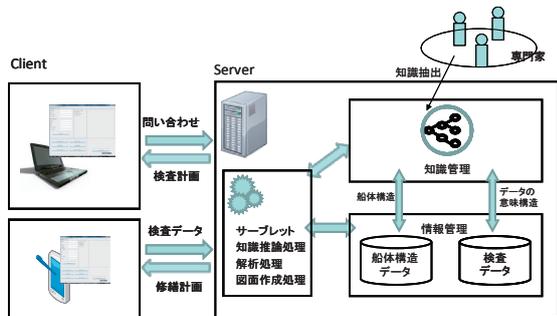


図-2.11 システムの構成

そこで、本システムでは、計画(Planning モード)と報告 (Report モード)の二つの場面を想定した。

当該船舶および同型船の検査・修繕計画にこれらの情報を活用し、検査要注意箇所を検査計画案として提示するようにした。

(1) Planning モード

Planning モードでは、図-2.12 のような一般配置図と船体横断面上に検査要注意箇所を表示するようにした。当該船舶の過去の損傷履歴から注意する箇所は赤丸で表示するようにした。また、トリッピングブラケット部は検査要注意箇所であることから、図面上に表示し、注意を促すようにした。

(2) Report モード

Report モードでは、データベース上の損傷データの管理とともに、典型的な損傷パターンの照合と、典型的な損傷パターンに対応する典型的な修繕計画図を提示することを目的とし、そのために必要なデータを図-2.13 に示す画面に従って入力していくこととする。したがって、ここで入力する項目は、報告内容であると同時に、パターン照合のためのメタデータとして取り扱われる。

目的に応じた処理 (記憶されている典型的な損傷パターンの中からどのパターンに近いかを検索する) が行えるように、損傷実績をもとに、それら損傷データが網羅されるよう、典型的な損傷事例を整理し、Damage Part Group として、7通り (Inter Section Part、Forepeak Part、Transverse Web Frame End Bracket Part、Longitudinal Girders/BHD Part、Crossties and their End Connection Part、Joint Part、Transverse Bulkhead Stiffener/ Primary Web Intersection Part) に分類した。なお、損傷タイプ (Damage Type) は、2.1.3 項で述べたように、き裂 (Crack) と変形 (Deformation) のみを対象にし、衰耗は損傷 (Damage) の対象にしていない。なお、“Crack”、“Deformation”は、オントロジーの中で概念として語彙が定義されている。

画面 (図-2.13 参照) では、その他、損傷箇所 (タンクの種類、タンク No.、左右舷の選択、フレーム No.) 情報で、損傷データの管理、典型的な修繕計画図提示に必要な情報を入力する。入力後、典型的な損傷パターンを特定するために必要な、損傷箇所の構造部材と損傷部材を入力する画

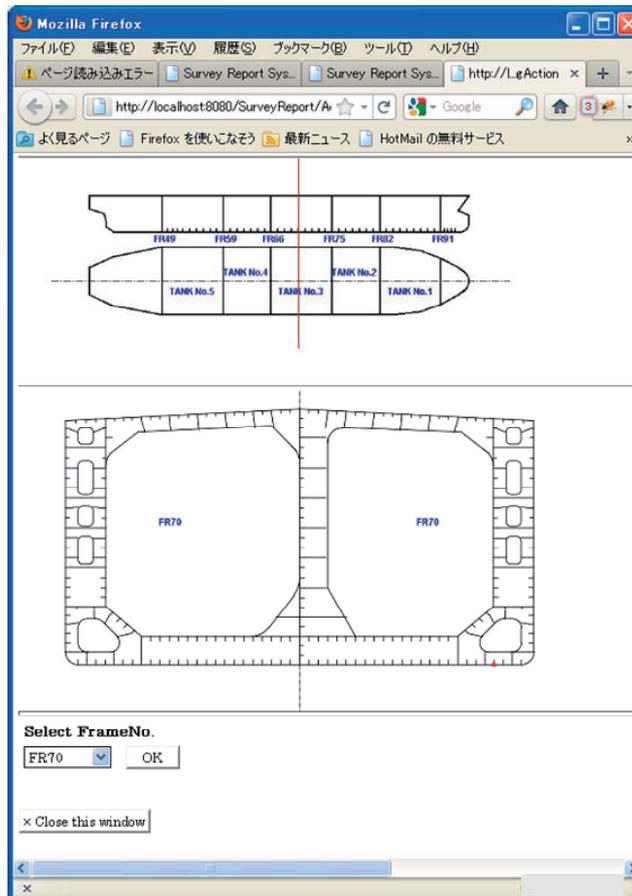


図-2.12 Planning 画面の一例

面（図-2.14 参照）に進む。構造部材は、設計や規則（CSR: Common Structural Rule）で使用される表現であり、これを”Primary Support Member”、”Plating Member”、”Local Support Member”、”Other Member”に分類する。それぞれの具体的な部材名は、A.744(18)<sup>13)</sup>で使用されて

いる部材名について予めオントロジーの中に語彙を定義しておき、それらを画面セレクトボックスの選択肢として表示させるようにした。さらにスロットタイプ等の詳細構造を選択する。これら詳細構造のタイプとしては、CSR で使用されるタイプを利用した。本入力により、典型的な損傷パタ

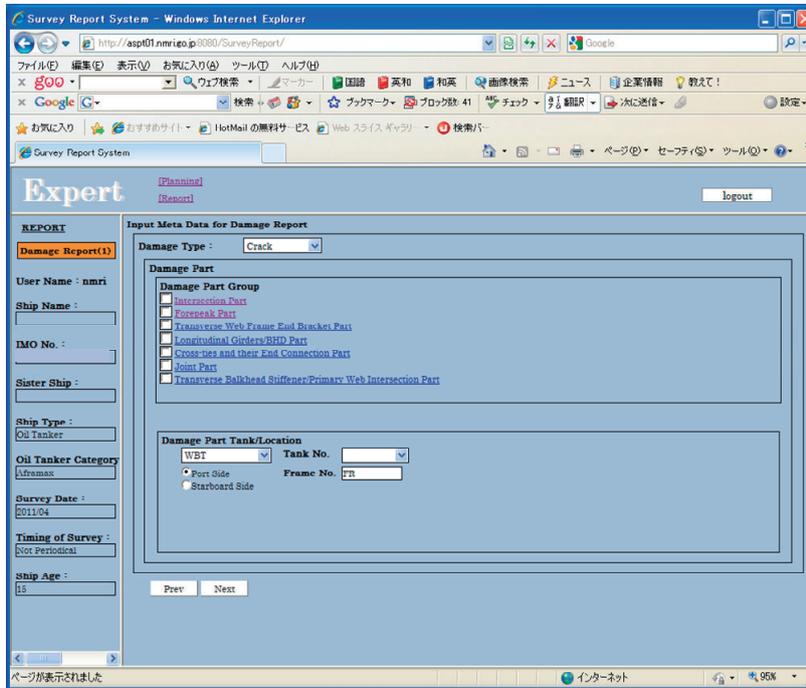


図-2.13 損傷タイプ、損傷箇所入力画面

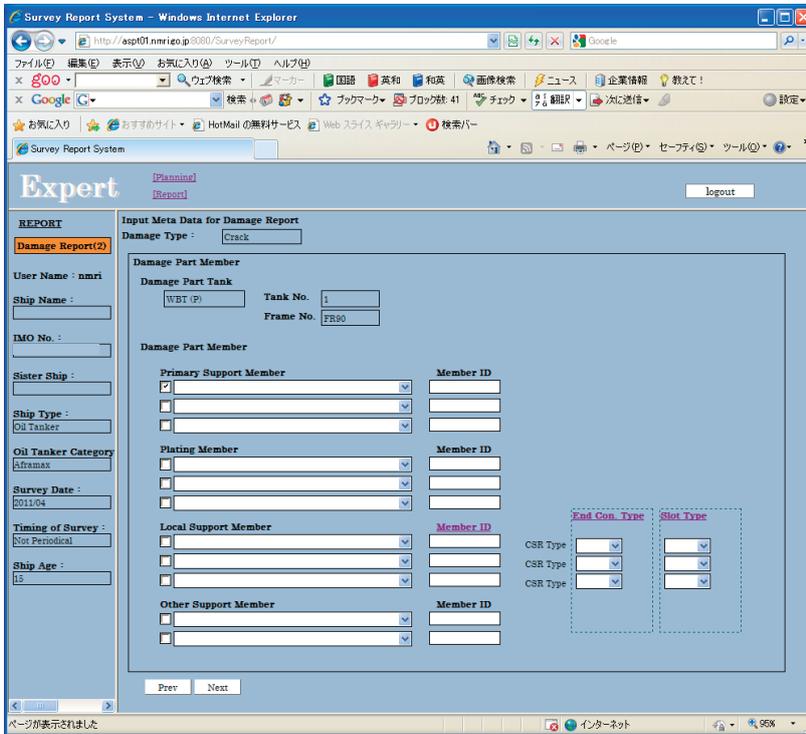


図-2.14 損傷部材入力画面(1)

ーンを見つけ出すことが可能になる。

さらに、図-2.15に示す画面にて、疲労き裂の場合、その起点とき裂長さ、き裂進展方向（損傷内容により、き裂の伝播方向図表示がかわる）等、損傷原因の推論に必要なデータ入力を行う。また、

写真やスケッチの参考データを添付して、データベースに送信（レポート）する。修繕計画図の提示を行っていく上で、対話的なやり取りを、思考・判断フロー（図-2.16画面表示参照）にしたがって、進めていくようにした。

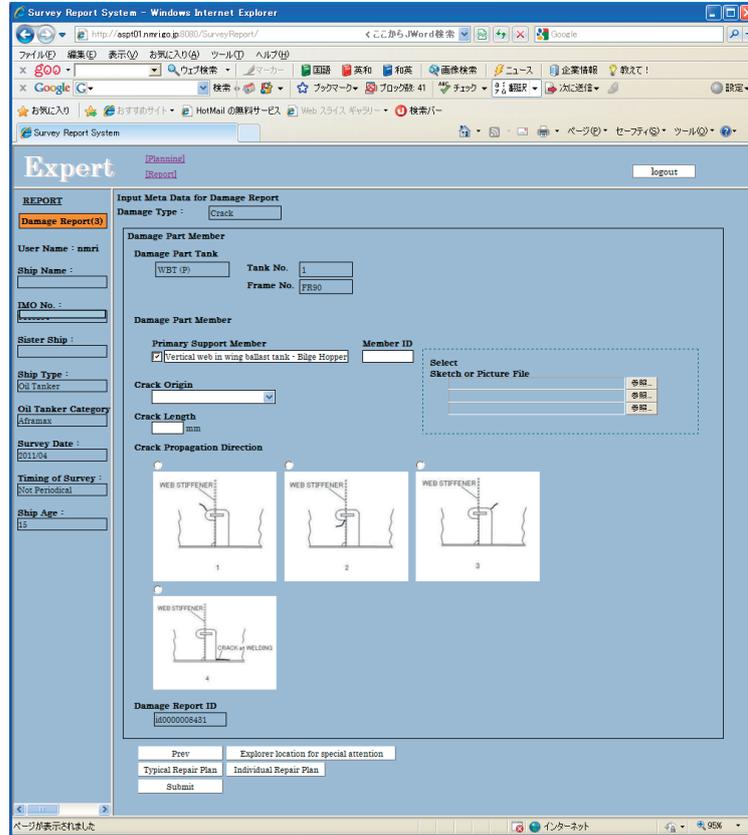


図-2.15 損傷部材入力画面(2)

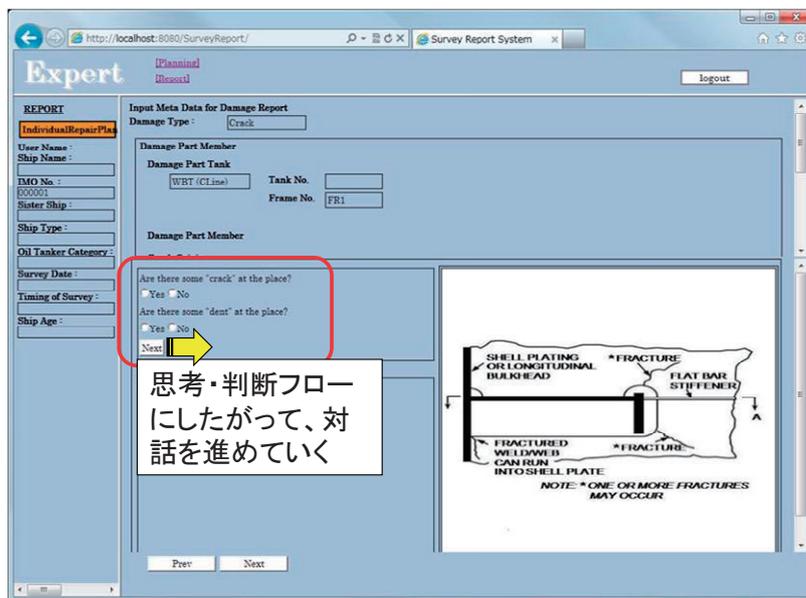


図-2.16 対話的やりとりの画面一例

### 3. 疲労損傷モニタリング技術の開発

前章では、船舶の損傷に関する経験知と船体検査や運航などの各種データを基に、個別の腐食衰耗・損傷状態に応じた、修繕方法の計画立案を可能とするシステムの開発を行った。

本システムを適切に運用していくためには、計画的修繕が行われるまでの期間について、損傷の進捗度合いを常時把握する場合は想定される。本章では、指向性の圧電素子を用いて疲労損傷をモニタリングする技術の開発を行った。

本章で想定する疲労き裂とそのモニタリング方法を図-3.1に示した。隅肉溶接部などで、疲労き裂発生が予想された場合に、当該個所を送信子・受信子で挟み、超音波の伝搬状態の変化を検出して、き裂の挙動をモニタする。

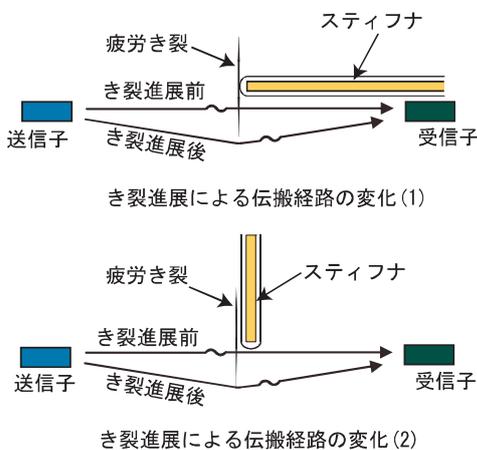


図-3.1 想定する疲労き裂に対するモニタリング方法

#### 3.1 圧電素子単体によるモニタリング

圧電素子を用いた損傷モニタリングに関して、いくつかの文献<sup>14),15),16)</sup>がある。これらは短冊形圧電素子2枚をモニタ対象板上に配置し、片方を発信用、他方を受信用とし、両者間を伝わるLamb波を利用する。この方法で使用する超音波には指向性があることと、周波数が低い点に特徴がある。低い周波数の波は減衰が小さく、長い距離を伝搬するので、船体のような大型構造物のモニタリングに適すると考えた。

圧電素子の送受信特性を調べるため、厚さ0.5mmで平面寸法が7mm×1mmの圧電素子(PZT)を用いて、図-3.2の配置で計測実験を行った。圧電素子の励振は電力増幅した40kHzの波形によった。また、圧電素子の出力を直接デジタルオシロスコープ(入力インピーダンス1MΩ)でデジタル値に変換しパソコンに取り込んだ。1mm、2mm、5mmの3種の板厚(t)でゼロ度方向

と90度方向で受信波を測定した結果を図-3.3に示した。

板厚1mmの結果をみると、ゼロ度方向では良好な波形が観測されるが、90度方向では、振幅が小さく波形も明瞭でない。この板厚では、指向性があり、ゼロ度方向で使用するならば送受信システムとして利用できそうである。

0度方向で受信素子に最も早く到達した波と励振パルスの時間差から音速を計算すると、1.14km/sが得られる。図-3.4の群速度計算図で確認すると、周波数板厚積が0.04MHz×mmなので、図左端のa0-modeであることが分かる。

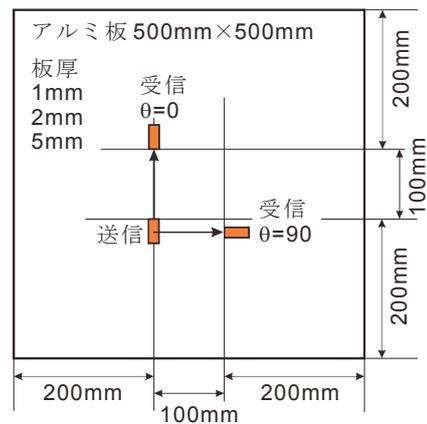


図-3.2 圧電素子の指向性の測定

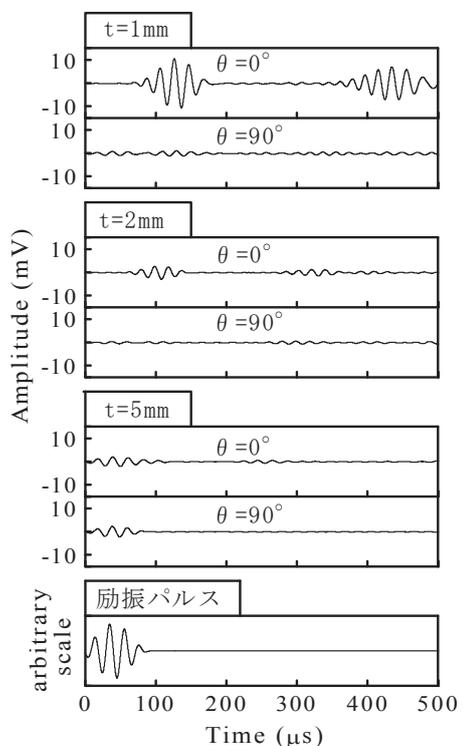


図-3.3 圧電素子の指向性測定結果(40kHz)

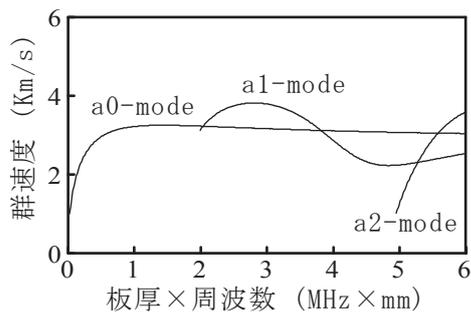


図-3.4 Lamb波の群速度

なお、左端の第二波の伝搬時間  $402\mu\text{s}$  は第一波の  $90\mu\text{s}$  の約 4.5 倍である。送信素子で発生した波が受信素子に到達し第一波を形成し、その後、試験体端部で反射し、受信素子に戻った波が第二波を形成したと考えられる。伝搬距離の比率から、伝搬時間の比率は 5 倍が予想されるが、伝搬速度の周波数依存性があるため、伝搬中の波形変化により、伝搬時間が変化し、4.5 倍になったと推測された。

板厚 2mm の場合、0 度方向では感度が低下するものの、板厚 1mm に近い波形が得られた。第一波の伝搬時間はやや短い。90 度方向では振幅の低下が著しい。

板厚 5mm では、二つの方向ともに小振幅の波形が左端近くに認められる。励振パルスとの時間差から音速を計算すると、0 度方向で  $18.8\text{km/s}$ 、90 度方向で  $21.0\text{km/s}$  となった。アルミ材の縦波音速は  $6.42\text{km/s}$  であり、これより早く振動が伝わることは考えにくい。超音波の励振は一定間隔で繰り返しているので、1 つ前の超音波振動の残響などと考えられる。

同様の測定を 1MHz の励振パルスで行った結果を図-3.5 に示した。ただし、対象板は鋼板であり圧電素子の寸法は、厚さ 1mm で平面寸法が  $10\text{mm}\times 5\text{mm}$  である。板厚 1mm および 5mm で指向性が認められる。ただし、パルス幅に着目すると、0 度方向で第一波の幅が励振パルスの幅よりも大幅に拡大している。送信素子からの多数の経路・モードの振動が受信波形の成形に影響していると考えられる。パルス幅が大きいので、正確な音速は計算できないが、パルス幅の中央で計算すると、板厚 1mm、5mm について、それぞれ  $2.7\text{km/s}$ 、 $2.4\text{km/s}$  が得られる。鋼の縦波音速  $5.94\text{km/s}$ 、横波音速  $3.23\text{km/s}$ 、表面波音速  $2.98\text{km/s}$  のどれよりも遅く、多様な経路・モードが合成されたものと考えられる。

以上から、厚さ 10mm 以上の船体構造を対象としたモニタリング手法として単体で使用する圧電

素子は適さないと考えられた。そこで、発生する超音波のモードを限定できる楔付圧電素子を用いたモニタリング手法を開発することとした。

圧電素子単体と楔付圧電素子の外観を図-3.6 に、楔付圧電素子をケースに収めた探触子の外観を図-3.7 に示した。3.2 節以下は探触子を用いて検討を行った。

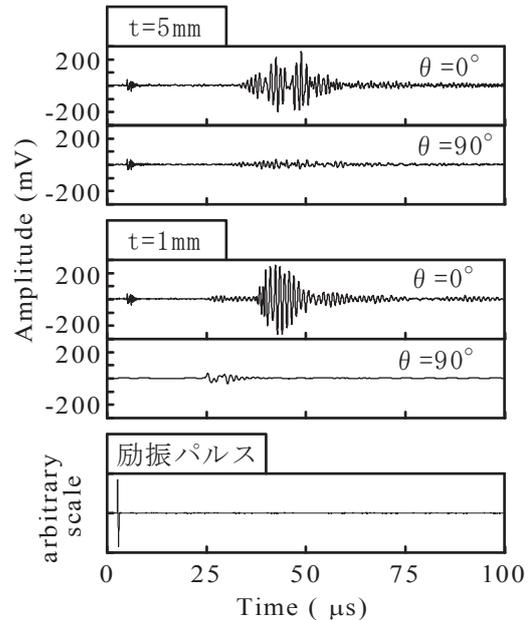


図-3.5 圧電素子の指向性測定結果(1MHz)

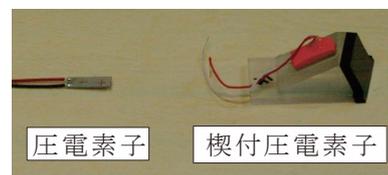


図-3.6 単体の圧電素子と楔付圧電素子



図-3.7 圧電素子を組み込んだ探触子

### 3.2 探触子を用いたモニタリングの検証

疲労き裂モニタリング法を開発するため、表-3.1 の 4 種の探触子による検証を行った。探触子の公称周波数はすべて 2MHz である。探触子の基本構造を示した図-3.8 において、適切な入射角  $i$  の楔を使用することにより、発生する超音波のモードと屈折角  $\theta$  を定めることができる。この原理により、板に沿って伝搬する縦波、横波 2 種、表面波を発生させ、検証に使用した。

横波 2 種の違いは、振動方向が図-3.8 の面内 (SV=Shear vertical) と面外 (SH=Shear Horizontal) である。SH 波は振動方向が表面に平行なため、剪断力を伝達できる高粘性の接触媒質を使用した。

計測システムの概略を図-3.9 に示した。電力増幅したファンクションジェネレータの波形を励振パルスとして超音波を発生させ、受信波はデジタルオシロスコープでデジタル変換しパソコンに取り込んだ。励振パルスの波形は 2MHz のサイン波 1 サイクルを平滑して作成した。絶対値検波とローパスフィルタを施した受信波形から、エコーのピーク点を検出し、エコー高さと TOF (伝搬時間) を求めた。

表-3.1 探触子の種類

Probe	sound mode	sound velocity	wave length	refraction angle
		(m/s)	(mm)	(deg)
2K10x4LA90	longitudinal	5900	3.0	90
2Z10x4A70	shear vertical	3230	1.6	70
2Z10x4R	rayleigh	2980	1.5	90
2Z10x4HA90	shear horizontal	3230	1.6	90

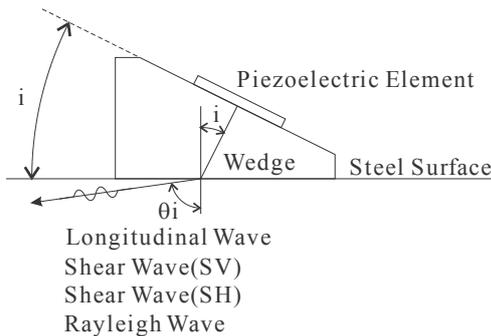


図-3.8 探触子の基本構造

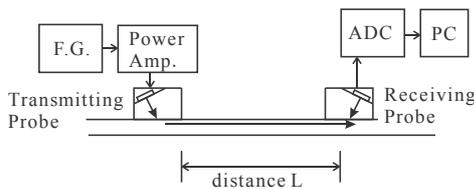


図-3.9 計測システム

3.2.1 隅肉試験片を用いた検証

貫通スリットを部分的に導入した厚さ 10mm で平面寸法が 0.5m×0.5m の鋼試験体について、スリットを挟んで配置した 2 つの探触子を用いて計測実験を行った。2 つの探触子の間を疲労き裂が進展する様子を、探触子対を移動させることで再現した。

スリットと探触子対の位置関係を図-3.10 に示した。図は、隅肉溶接付の試験体の例である。

隅肉溶接なしのスリットだけの測定も行っている。また、隅肉だけでスリットなしの試験体も参照用として測定した。探触子間隔は 100mm である。

エコー高さの測定結果を 4 種の探触子について、図-3.11 に示した。図右半はスリットも隅肉溶接もない平坦部である。図左半は隅肉だけ、スリットだけ、隅肉+スリットの 3 ケースを示した。

スリットの場合とスリット+隅肉の場合、スリットによる遮蔽効果のため、スリット部で大きくエコー高さが減少している。また、平坦部とスリット部の境界では、超音波ビームの半分がスリットで遮蔽されるので、理論的には -6dB のエコー高さの低下が予想される。この値は (スリットの場合)、2Z10x4A70、2Z10x4R、2Z10x4HA90、

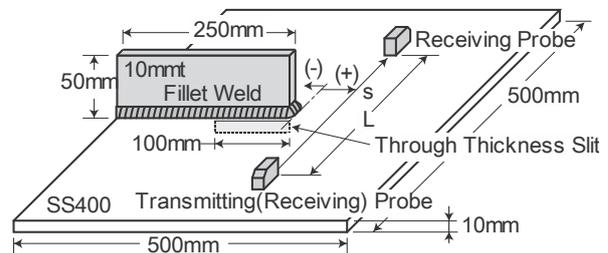


図-3.10 試験体と探触子の配置

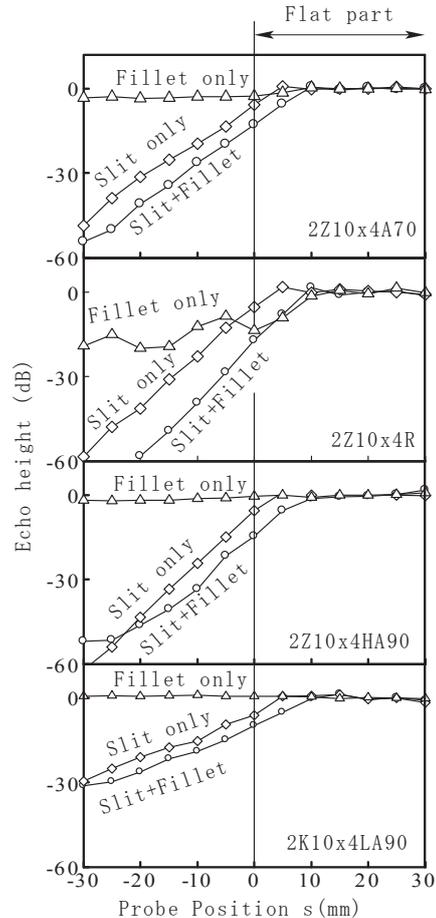


図-3.11 エコー高さ測定結果

2K10x4LA90 について、それぞれ-5.7dB、-5.3dB、-5.6dB、-6.1dB となっており、理論値からの大きな乖離はない。

2K10x4LA90 では、スリット部におけるエコー高さの低下が全体的に小さいように見える。この探触子では平坦部の透過エコー高さがもともと低いため、SN 比の点で他の3種の探触子より不利である。スリット部のエコー高さはノイズで嵩上げされている。

スリット+隅肉のエコー高さをスリットのみとのエコー高さの結果を比較すると、前者が後者よりエコー高さが常に低く、隅肉の影響が認められる。

隅肉によるエコー高さの低下は、2Z10x4R が他の探触子より大きい。表面波は隅肉の影響を受けやすい事がある。このことは、隅肉だけでスリットがない場合の2Z10x4R のエコー高さが他の3種のエコー高さより低いことでも確認できる。

TOF (伝搬時間) の測定結果を図-3.12 に示した。隅肉のみを除くと、右半の平坦部からスリットなどが存在する左半に入ると TOF が増加することが分かる。

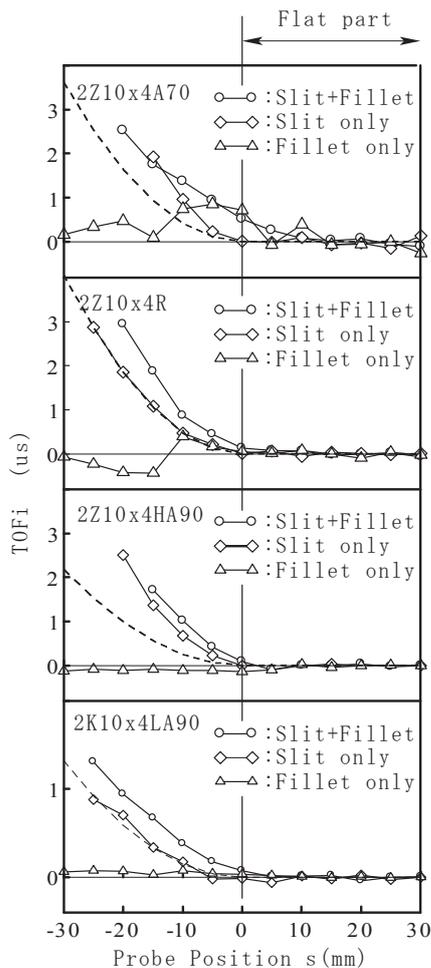


図-3.12 TOF 増加量の測定結果

TOF の増加量は、図-3.13 のモデルに従い次式で計算できる。

$$TOFi = \frac{2\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + s^2} - L}{c} \dots\dots(1)$$

ここで、c は音速である (表-3.1 参照)。

図-3.12 の点線は、TOF 増加量の計算結果である。2Z10x4R および 2K10x4LA90 では、スリットの結果が、計算値に合致している。2Z10x4A70 および 2Z10x4HA90 では、実験値の TOF 増加量がより大きい。

この原因は不明であるが、スリットに遮蔽された領域ではエコー高さが低下するとともに、波形変化を生じることが多い。波形変化により伝搬時間測定値に差異を生じることが原因として考えられる。

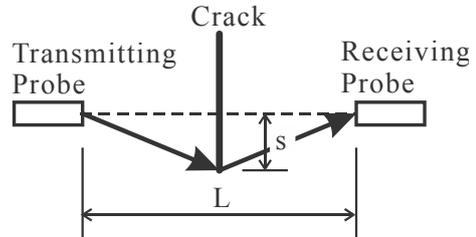


図-3.13 TOF の計算

### 3.2.2 疲労き裂に作用する応力の影響

引張疲労試験により一定長さまで疲労き裂を進展させた試験片によって、疲労き裂をモニタリングする場合の課題を調査した。試験片と測定方法を図-3.14 に示した。

作成した疲労き裂試験片のパラメタを表-3.2 にまとめた。疲労応力は最大 100MPa、最少 5MPa のサイン波である。

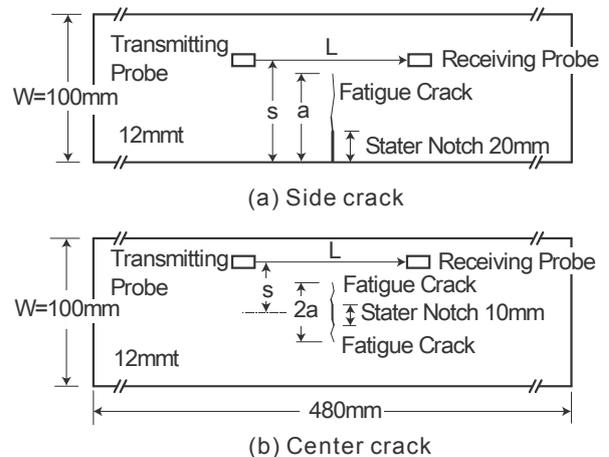


図-3.14 疲労試験片と測定配置

表-3.2 疲労き裂作成結果

notation	Crack Position	maximum stress* (MPa)	Stress ratio ( $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ )	crack size	
				Front (mm)	Back (mm)
K-4	side	100	0.05	a	
				50	51
D-3	center	100	0.05	2a	
				40	13

片側疲労試験片について、探触子位置とエコー高さの関係を図-3.15にまとめた。試験片に掛かる応力により疲労き裂の開き方が異なるので、5つの応力レベル(5,25,50,75,100MPa)で測定した結果を表示している。

左半がき裂部分であり、き裂の先端から遠く、き裂に遮蔽される度合いが大きいほど、エコー高さは低下する。4つの探触子についての結果を図示しているが、応力によるエコー高さの変化はほとんど観測されない。

TOF 増加量を示した図-3.16においても、測定時応力の影響はほとんど見られない。2Z10x4LA90の左端でばらつきがみられるが、エコー高さ低下によるノイズの影響と考えられる。

中央疲労き裂試験について、疲労き裂を中央に挟んだ時の透過エコー高さと負荷応力の関係を求め図-3.17に示した。2Z10x4Rを除く3種の探

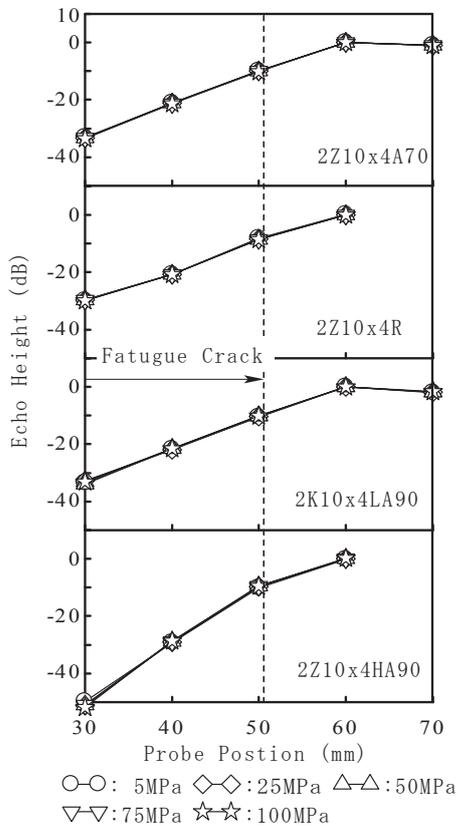


図-3.15 片側疲労き裂試験片の透過エコー高さ

触子の結果は似た特性で、応力の増加とともにエコー高さは低下する。応力増加に伴う疲労き裂の開口挙動が影響したと考えられる。

図-3.18では、最小応力5MPaのときのエコー高さを3種の位置で示した。エコー高さはき裂がない場所( $s=\pm 35\text{mm}$ )の平均エコー高さを基準にした。き裂中央でもっと大きくエコー高さを減じたのは2Z10x4Rであった。2Z10x4Rが生成する表面波のエネルギーは表層の2波長程度の浅い領域に限られ、表面き裂の有無に大きく反応し、応力負荷によるき裂開閉口挙動にはあまり反応しないと思われる。

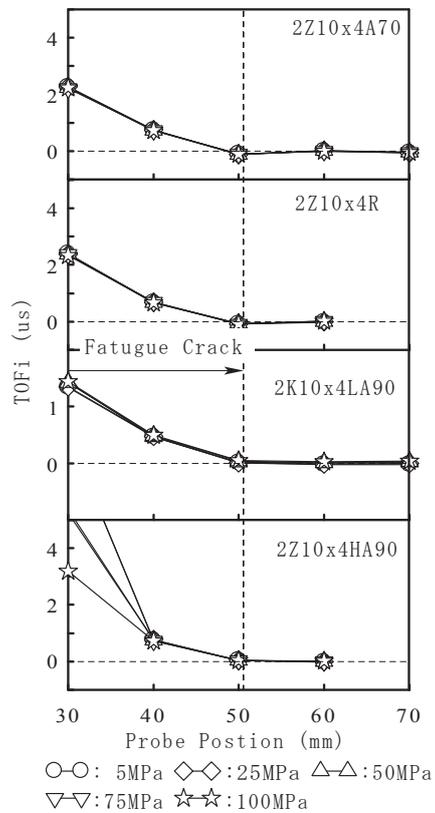


図-3.16 片側疲労試験片の TOF 増加量

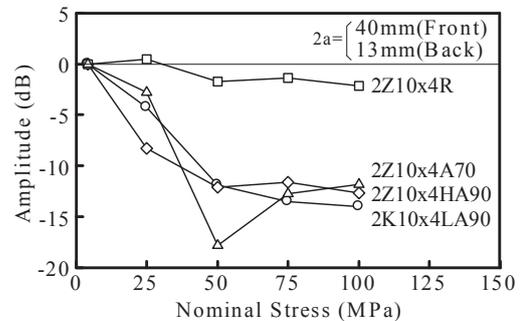


図-3.17 中央疲労き裂試験片の透過エコー高さ ( $s=0$ : き裂中央)

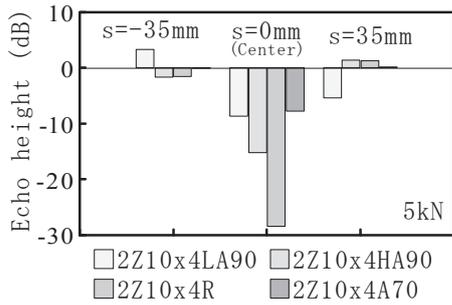


図-3.18 中央疲労き裂試験片の透過エコー高さ (除荷時)

3.2.3 塗膜の影響

図-3.14の疲労試験前の片側き裂試験片にエポキシ系塗膜を300μm塗布した試験片を作成し、塗膜がモニタリングに及ぼす影響を調べた。

き裂がない領域のエコー高さを基準にして、探触子位置とエコー高さの関係を求めると、図-3.19が得られた。き裂による遮蔽効果でエコー高さが低下する程度は、塗膜の有無により大きな影響を受けないことが分かった。4つの探触子で同じ傾向であった。2Z10x4HA90でやや違いが大きい。粘性の高い接触媒質を使っているため、接触媒質の厚さの再現性が悪いことが原因として考えられる。

鋼板上と塗膜上での計測値をすべて平均化し、受信信号の大きさで比較すると、図-3.20が得られる。鋼板上では探触子による違いが少ないが、塗膜上では2Z10x4Rがエコー高さ低下の程度が

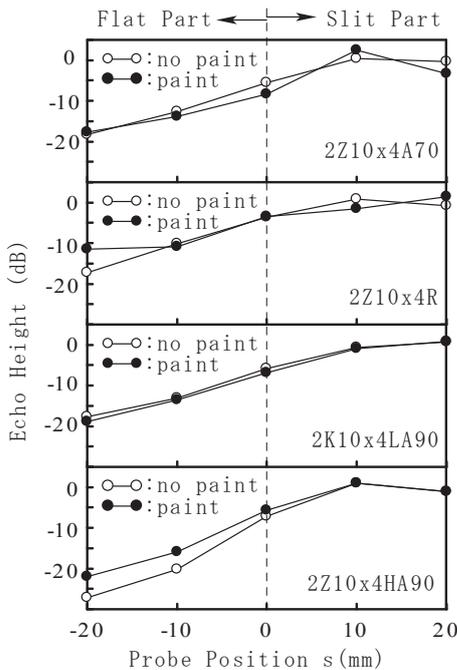


図-3.19 切欠部エコー高さに対する塗膜の影響

大きい。2K10x4LA90では塗膜における値がやや大きい。接触式の超音波計測における6dB程度の変動は通常観測の範囲内であるため、意義ある傾向とは考えられない。

2Z10x4Rが生成する表面波は表面上の付着物でも減衰する傾向があり、今回の場合は、二つの探触子間を覆う塗膜による減衰が影響したと考えられる。また、2K10x4LA90は表面に沿う縦波であり、2Z10x4Rと同様に塗膜による減衰効果が働いたと考えられる。

塗膜の影響は、2Z10x4Rにおいて受信波の信号強度低下をもたらすが、他の残りの3種の探触子では、影響は小さい。

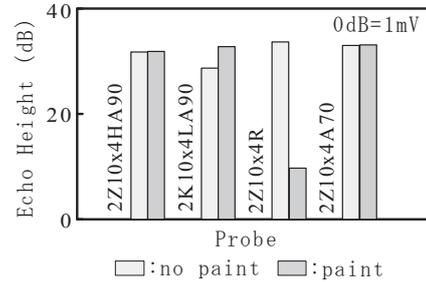


図-3.20 塗膜によるエコー高さの低下

3.3 モニタリング手法の適用性

板厚10mmを超える船体鋼板を対象とする疲労損傷のモニタリングシステムを構成するには、伝搬モード、経路が明確な楔を付けた圧電素子を利用する必要がある。

楔材を付けることにより、横波2種(SV,SH)と縦波、表面波を利用することができる。二つの探触子間を横切るき裂を対象としたモニタリングシステムにより、透過エコー高さの低下でき裂の進展をモニタリングすることができる。4種の探触子の中で、縦波(2K10x4LA90)は感度の点で不利であり、表面波(2Z10x4R)は感度が良いが、表面の形状や付着物の影響(塗膜を含む)が大きいので、現場への適用は慎重にならざるを得ないとする。

2種の横波を用いる方法は、貫通き裂に対しては、適用上の問題は少ないとする。非貫通き裂については、2種の横波における厚さ方向のエネルギーの分布の影響がある。板厚10mm以上ではこの効果が顕著になることを理解したうえで適用することが重要である。

疲労き裂については、計測時の荷重条件により透過エコー高さが影響を受ける場合がある。寸法の小さい疲労き裂に対しては、荷重の影響が大きい。したがって高精度のモニタリングを行うためには、船体運動と同期させ、計測時刻を引張荷重が大きくなるタイミングに合わせることを重要である。

#### 4. 航路標識の腐食劣化診断 モニタリング技術の開発

平成 24 年 12 月 2 日に発生した中央自動車道上り線笹子トンネルの天井板の崩落事故<sup>17)</sup>を受け、早急に交通インフラの点検を実施し、迅速に実態把握を行うとともに、現在、適切かつ効率的な交通インフラの維持管理・更新のあり方について見直しが行われているところである<sup>18)</sup>。その一環で、海上に設置されている航路標識等を対象に、腐食劣化の進捗度合いに応じた点検・保守管理手法の最適化を図る腐食劣化診断モニタリング技術の確立ならびに劣化診断マニュアルの作成を目的として国土交通省総合政策局より本章の研究を受託した。

ところで、海上に設置されている航路標識等は、直接に気象・海象といった自然現象等の影響を大きく受ける環境に曝されていることから、陸上に設置されている構造物と比較して、総じてその劣化が非常に著しい。また、設置場所によって自然現象等の規模や性質等が異なるため、劣化の度合いに差がでる。現在、その点検・保守には、膨大な数の箇所に設置されている航路標識等に対して船舶により接近・移乗した上での目視点検の実施、一律の期間経過後の換装等、大きな経費・労力を要している。そこで、構造物の設置場所や時期等を鑑み、腐食・劣化の進捗度合いに応じて点検・保守手法の最適化を図る腐食劣化診断モニタリング技術を確立し、劣化診断マニュアルを整備した。

本章では、受託した研究の一部である鋼製の浮体式灯標を対象とした研究成果を解説する。

#### 4.1 浮体式灯標の概要

##### 4.1.1 航路標識としての種別<sup>19)</sup>

航路標識とは、「灯光、形象、彩色、音響、電波等の手段により港、湾、海峡、その他の日本国の沿岸水域を航行する船舶の指標とするための灯台、灯標、立標、浮標、霧信号所、無線方位信号所ならびにその他の施設をいう。」と航路標識法に定義されている。また、海上保安庁では、現在、視覚により利用する光波標識、無線を用いる電波標識および他の施設に大別している。浮体式灯標は、光波標識に区分される。

##### 4.1.2 灯標としての機能

灯標とは、船舶に障害物および航路の所在等を示すために岩礁、浅瀬等に設置された構造物で灯光を発生し、構造が塔状のものをいい、RC 製、鋼製および FRP 製のものがある（以下、本章では後述の浮体式灯標以外の灯標を「固定式灯標」という）。通常は小型であるが稀に大型のものもある。

また、海底に設置された沈錘の係留装置で接続し、航路等を示す浮体式灯標と呼ばれるものもある。

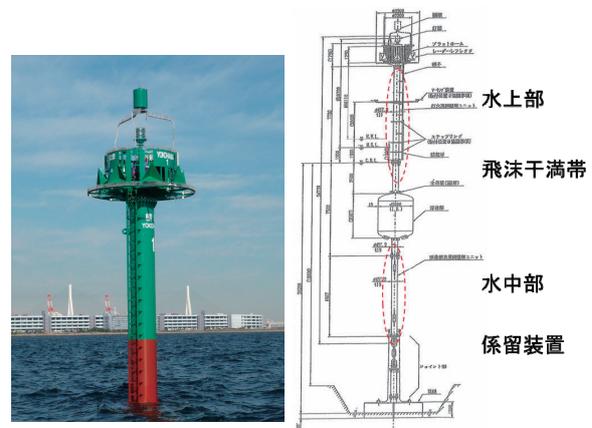
##### 4.1.3 浮体式灯標の構造、設置基数と設置年度

平成 24 年度末において、海上保安庁で管理・運用されている灯標は、固定式灯標が 356 基、浮体式灯標が 168 基である。

運用されている浮体式灯標の構造・形式は、浮体式灯標特型が 1 基、浮体式灯標 R 型が 167 基である。図-4.1 に浮体式灯標 R 型の外観と構造の一例を示す。浮体式灯標 R 型は、灯浮標（灯光を発生する浮標）にみられる揺れ回りが少なく水域を効率的に利用できる特徴を有していることから、平成 14 年度から灯浮標から浮体式灯標に順次換装されている。構造・

形式としては、3 種類の標準型が設定されており、設置場所ごとの風、潮流、波浪等の外力および海底底質の状況に合わせて採用する型式を決定している。係留装置としては、ユニバーサルジョイント式とショートチェーン式の 2 種類があり、水深や海底底質の状況に合わせて採用する形式を決定している。

表-4.1 に浮体式灯標 R 型の管区別・年度別設置基数を示す。



(a) 水上部外観

(b) 全体図

図-4.1 浮体式灯標 R 型の外観と構造の一例

表-4.1 浮体式灯標 R 型管区別・年度別設置基数

	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	計
一管区									4	1		5
二管区				4								4
三管区	4	29	11	11	8			6	11		1	81
四管区		17			1	7						25
五管区		13		2								15
六管区			4									4
七管区		22			3							25
八管区					3							3
九管区												0
十管区												0
十一管区		4		1								5
計	4	85	15	18	15	7	0	6	15	1	1	167

4.2 浮体式灯標の現地調査

4.2.1 現地調査箇所の選定要件

設置環境や設置年数を基本とし、表-4.2 に示す選定要件を基に現地調査を実施する浮体式灯標を選定した。表-4.1 から分かるように、平成15年度に5つの管区に全設置基数(167基)の半数に当たる85基、第三管区には同じく全設置基数の半数に当たる81基の浮体式灯標が整備されている。そこで、設置年度は平成15年度と定め、設置数の多い第三管区とそれ以外の管区から現地調査対象を決定する。

表-4.2 浮体式灯標の選定要件

要件	内容
設置後の経過年数	設置後の経過年数が長く、整備された年度に近い標識
設置環境	水深、潮流、水質等の地理的環境が異なる海域(比較的船舶交通の輻輳度が低い海域)に設置された標識
管区要請	損耗度の点検が比較的容易なショートチェーン式による係留具を採用し、その損耗等が懸念される標識
その他	製造時における塗装仕様および塗装メーカー等が同一の標識

4.2.2 調査対象標識

4.2.1 項の選定要件を勘案し、表-4.3 に示す平成15年度に第三管区(3基)と第十一管区(1基)に設置された4基の浮体式灯標を現地調査対象とした。なお、研究期間中(平成25年度)に事故等により揚陸された表-4.4 に示す2基の浮体式灯標も調査対象とした。

表-4.3 調査対象とした浮体式灯標

標識名	管理部署	型式	設置年月	水深	塗料メーカー
千葉港口第三号灯標	千葉	R-1	平成15年3月	16m	中国塗料
那覇港倭口第二号灯標	那覇	R-1	平成15年3月	20m	中国塗料
千葉港姉崎航路第三号灯標	千葉	R-1	平成15年12月	20m	中国塗料
川崎航路第一号灯標	横浜	R-3	平成15年3月	22m	中国塗料

表-4.4 事故により揚陸された浮体式灯標

標識名	管理部署	型式	設置年月	水深	塗料メーカー
千葉港第四号灯標	千葉	R-1	平成16年1月	16.6m	中国塗料
若松航路第七号灯標	若松	R-1	平成15年1月	10.8m	カナエ塗料

4.2.3 現地調査項目

海上に設置される海洋構造物の腐食環境は、海水と接触する条件や酸素供給量の違いによる垂直方向、すなわち①水上部、②飛沫干満帯部(平均干満線直下)、③水中部及び海底土中部に分類することができる(図-4.1 参照)。特に、飛沫干満帯部(平均干満線直下)の腐食環境は厳しい。そこで、浮体式灯標については、表-4.5 に示す現地調査を実施し、腐食状況を確認する。水上部は、腐食環境は他の部位に比べマイルドであり、灯標

の色の識別が重要な意味を持つため、塗膜の膜厚や欠陥(膨れ、はがれ)の検査を重点項目とする。飛沫干満帯部は、腐食環境(犠牲陽極の防錆効果も期待できない)が厳しく、かつ、風、潮流並びに波浪による曲げモーメントが最も大きい部位であるため、板厚検査を重点項目とする。水中部は、犠牲陽極による防食効果により、腐食環境は比較的マイルドであるため、犠牲陽極の衰耗状況の調査と自然電位計測を重点項目とする。ジョイント部(係留装置)は、係留鎖の状況を観察する。なお、プラットフォームはアルミニウム製であること、浮体部は板厚が9mmと薄いことなどを理由に板厚測定は実施しない(図-4.1 一点鎖線赤丸印で板厚計測を実施)。

表-4.5 浮体式灯標の現地調査項目

部位	調査項目
水上部	外観検査(目視確認、写真撮影)、板厚計測、膜厚計測等
飛沫干満帯部	潜水士による外観検査(目視確認、写真撮影)、海洋付着生物等を除去後の超音波方式により板厚計測等
水中部	潜水士による外観検査(目視確認、写真撮影)、海洋付着生物等を除去後の超音波方式により板厚計測、犠牲陽極の衰耗状況の調査、自然電位測定
ジョイント部	潜水士による係留鎖の状況を観察(ノギスによる計測を含む)

4.2.4 現地調査結果

(1)外観検査、板厚検査ならびに膜厚計測結果

外観検査結果概要を表-4.6 に示す。本体や付属物に一部塗装剥離および発錆が認められたが著しい損傷はなかった。また、千葉港姉崎航路第三号灯標のプラットフォームの塗装の剥離が著しく、かつ、第三管区に設置された3基の浮体式灯標の鳥の糞害が著しいため、今後、標識としての機能上、補修ならびに洗浄等の手当が必要であるものと判断される。外観検査で観察された軽微な塗膜損傷等の典型的な事例を図-4.2 に示す。

表-4.6 浮体式灯標の外観検査結果

標識名	外観検査(水上部、飛沫干満帯部、水中部)
千葉港口第三号灯標	・本体付属物に一部塗装剥離があるが、 <b>顕著な損傷はない。</b> ・ <b>鳥の糞害が著しい。</b>
那覇港倭口第二号灯標	・ <b>塗装の剥離および損傷はほとんどない。</b> ・鳥の糞害なし。
千葉港姉崎航路第三号灯標	・本体に一部塗装の剥離および発錆があるが、 <b>顕著な損傷はない。</b> ・ <b>プラットフォームの塗装の剥離が著しい。</b> ・ <b>鳥の糞害が著しい。</b>
川崎航路第一号灯標	・ <b>塗装の剥離および損傷はほとんどない。</b> ・ <b>鳥の糞害が著しい。</b> (灯器が鳥の糞で真っ白)。

板厚検査結果を表-4.7 に示す。図-4.1 の一点鎖線赤丸印で示した灯火高ならびに水深調整ユニットの公称板厚は、R-1 型が19mm、R-3 型が12.7mm であるが、表-4.7 から分かるように著しい減肉は認められない。

塗膜の膜厚計測結果を表-4.8 に示す。塗装仕

様の灯火高調整ユニットの膜厚(DFT)は660 $\mu$ mであるが、約3倍の膜厚の塗装がなされている浮体式灯標があった。

表-4.7 浮体式灯標の板厚計測結果

標識名	板厚計測(灯火高ならびに水深調整ユニット)
千葉港口第三号灯標	・板厚は18.3~19.7mmであり、 <b>顕著な減肉はない。</b>
那覇港倭口第二号灯標	・板厚は18.3~19.1mmであり、 <b>顕著な減肉はない。</b>
千葉港姉崎航路第三号灯標	・板厚は18.3~19.1mmであり、 <b>顕著な減肉はない。</b>
川崎航路第一号灯標	・板厚は12.6~13.3mmであり、 <b>顕著な減肉はない。</b>

表-4.8 浮体式灯標の膜厚計測結果

標識名	膜厚計測(灯火高調整ユニット)
千葉港口第三号灯標	・膜厚は、 <b>1.6~2.0mm</b> であった。
那覇港倭口第二号灯標	・膜厚は、 <b>650~750<math>\mu</math>m</b> であった。
千葉港姉崎航路第三号灯標	・膜厚は、 <b>550~650<math>\mu</math>m</b> であった。
川崎航路第一号灯標	・膜厚は、 <b>1.6~2.2mm</b> であった。



(a) 付属物の塗膜剥離



(b) 本体の塗装剥離および発錆と鳥の糞害



(c) プラットフォームの塗装剥離

図-4.2 軽微な塗膜損傷等の典型的な事例

(2)潜水調査結果

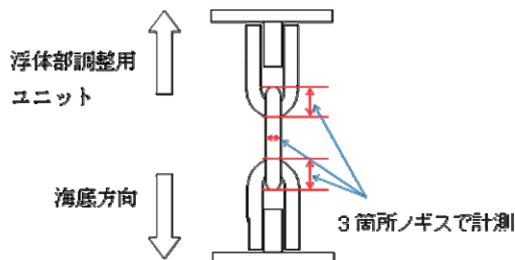
水中部の塗膜劣化状況、係留具摩耗状況、犠牲陽極衰耗状況ならびに自然電位測定結果についてその概要を述べる。

水中部の塗膜劣化状況概要を表-4.9に示す。表-4.9から分かるように、目立った問題はなく良好な状態であった。また、那覇港倭口第二号灯標ではケレン後、鋼材表面の状況を確認したが孔食等の腐食は認められなかった。

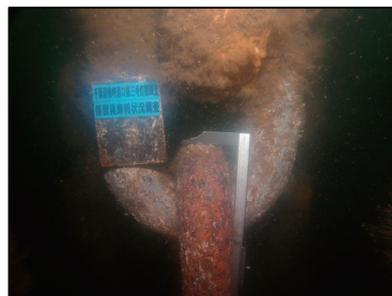
係留具の寸法は、ケレン後、図-4.3に示すようにシャックルとリンク(リンクとリンク)の交差部の両端にノギス当て測定した。なお、規定値(最小寸法)はシャックルとリンク(寸法A)の場合186mm、リンクとリンク(寸法B)の場合180mmである。係留具摩耗状況概要を表-4.10に示す。表-4.10から分かるように、いずれの浮体式灯標もプラス交差に加えて数mm程度の摩耗量であり、著しい摩耗は生じていない。補助係留チェーンについては、フランジとの接触により1/3程度摩耗している浮体式灯標があり、交換が必要と判断された。

表-4.9 浮体式灯標の水中部の塗膜劣化状況

標識名	塗膜劣化状況
千葉港口第三号灯標	・目立った問題はなく、 <b>良好な状態。</b>
那覇港倭口第二号灯標	・目立った問題はなく、 <b>良好な状態。</b> ・一部ケレン後、 <b>鋼材表面の状況を確認したが、孔食等の腐食は認められない。</b>
千葉港姉崎航路第三号灯標	・目立った問題はなく、 <b>良好な状態。</b>
川崎航路第一号灯標	・目立った問題はなく、 <b>良好な状態。</b>



(a) 係留具(ショートチェーン)の計測例



(b) ジョイント部測定状況

図-4.3 係留具の寸法の計測方法

犠牲陽極衰耗状況概要を表-4.11に示す。表-4.11から分かるように、犠牲陽極の残存量は7割以上あり、塗装劣化状況結果を裏付ける結果であった。

自然電位計測結果を表-4.12に示す。電位計測時の照合電極は塩水塩化銀電極であり、防食基準電位は-780mVである。いずれの浮体式灯標においても、計測された自然電位は防食基準電位より低く、良好な防食状態であった。この事実は、塗膜劣化状況および犠牲陽極衰耗状況結果を裏付ける結果である。

表-4.10 浮体式灯標の係留具摩耗状況

標識名	係留具摩耗状況
千葉港口 第三号灯標	・ショートチェーンの寸法Aは183.5~184mmで、 <b>プラス公差に加え2.5mm程度の摩耗量</b> 。 ・補助係留チェーンには摩耗ない(フランジあり)。
那覇港倭口 第二号灯標	・ショートチェーンの寸法Aは183mmで、 <b>プラス公差に加え3mm程度の摩耗量</b> 。 ・補助係留チェーンには摩耗ない(フランジなし)。
千葉港姉崎航路 第三号灯標	・ショートチェーンの寸法Aは182~185mmで、 <b>プラス公差に加え4mm程度の摩耗量</b> 。 ・ショートチェーンの寸法Bは181~182mmで、 <b>プラス公差内の摩耗量</b> 。 ・補助係留チェーンはフランジとの接触により <b>1/3程度、摩耗していた</b> (フランジあり)。
川崎航路 第一号灯標	・ショートチェーンの寸法Aは180~183mmで、 <b>プラス公差に加え6mm程度の摩耗量</b> 。 ・補助係留チェーンはフランジとの接触により <b>1/3程度、摩耗していた</b> (フランジあり)。

表-4.11 浮体式灯標の犠牲陽極衰耗状況

標識名	犠牲陽極衰耗状況
千葉港口 第三号灯標	・各犠牲陽極の残存量は <b>93~97%であり、ほとんど衰耗していない</b> 。
那覇港倭口 第二号灯標	・各犠牲陽極の残存量は <b>69~88%であり、特に、水深調整ユニットの衰耗がわずかに多い</b> 。
千葉港姉崎航路 第三号灯標	・各犠牲陽極の残存量は <b>76~86%であり、わずかに衰耗していた</b> 。
川崎航路 第一号灯標	・各犠牲陽極の残存量は <b>94~99%であり、ほとんど衰耗していない</b> 。

表-4.12 浮体式灯標の自然電位計測結果

標識名	自然電位
千葉港口 第三号灯標	・-1.041~-1.049mVであり、 <b>良好な防食状態</b> である。
那覇港倭口 第二号灯標	・-849~-858mVであり、 <b>良好な防食状態</b> である。
千葉港姉崎航路 第三号灯標	・-1.075~-1.088mVであり、 <b>良好な防食状態</b> である。
川崎航路 第一号灯標	・-1.092~-1.109mVであり、 <b>良好な防食状態</b> である。

(3) 事故品の調査結果

事故品の外観検査結果概要を表-4.13に示す。塗装の剥離等の損傷はなく、健全な状態であった。ただし、過去に接触事故により変形した本体の一部に発錆が認められた。

事故品の板厚計測結果を表-4.14に示す。R-1型の浮体部の公称板厚は9mm、灯火高ならびに水深調整ユニット部の公称板厚は9mmであるが、いずれの浮体式灯標においても著しい減肉は認められない。

事故品の膜厚計測結果を表-4.15に示す。中国塗料の塗装仕様では、水上部の膜厚(DFT)は660μm、水中部の膜厚(DFT)は700μmである。カナエ塗料の塗装仕様では、水上部の膜厚(DFT)は568μm、水中部の膜厚(DFT)は1,118μmである。中国塗料で塗布された千葉港第四号灯標は塗装仕様の約2倍の膜厚を有しており、またカナエ塗料で塗布された若松航路第七号灯標の水上部の膜厚は200μm程度のばらつきがあり、塗装仕様より薄めの膜厚となっていた。表-4.8に示した結果と同様、塗装仕様どおり塗装されていない浮体式灯標が散見された。

事故品の係留具摩耗状況概要を表-4.16に示す。表-4.10の結果と同様、プラス交差を加えて数mm程度の摩耗量であり、著しい摩耗は生じていない。なお、ショートチェーンの摩耗については、シャックルが第三種相当品であり、リンクが第四種相当品であるため、図-4.4示すように、シャックルとリンクが接触する箇所ではリンクはほとんど摩耗せず、シャックルのみ摩耗していた。

事故品の犠牲陽極衰耗状況概要を表-4.17に示す。表-4.11の結果同様、犠牲陽極はほとんど衰耗していなかった。特に、千葉港第四号灯標では、犠牲陽極のエッジが残っていた。

表-4.13 浮体式灯標(事故品)の外観検査結果

標識名	外観検査(水上部、飛沫干満帯部、水中部)
千葉港 第四号灯標	・水中部の塗装の <b>剥離等の損傷は全くない</b> 。
若松航路 第七号灯標	・ <b>補修を行った形跡</b> がある。 ・灯火高調整ユニットに、過去の接触事故により変形した本体の一部に <b>発錆</b> がある。 ・ <b>塗装の剥離および損傷はほとんどない</b> 。

表-4.14 浮体式灯標(事故品)の板厚計測結果

標識名	板厚計測(浮体部、灯火高ならびに水深調整ユニット)
千葉港 第四号灯標	・浮体部は8.4~9.1mm、水深調整ユニット部は18.4~19.0mmであり、 <b>顕著な減肉はない</b> 。
若松航路 第七号灯標	・灯火高調整ユニット部は17.6~18.8mm、浮体部は8.3~9.1mm、水深調整ユニット部は17.7~18.3mmであり、 <b>顕著な減肉はない</b> 。

表-4.15 浮体式灯標(事故品)の膜厚計測結果

標識名	膜厚計測(浮体部、灯火高ならびに水深調整ユニット)
千葉港 第四号灯標	・浮体部、水深調整ユニット部ともに <b>1.3~1.5mm</b> であった。
若松航路 第七号灯標	・灯火高調整ユニット部は365~568μm、浮体部および水深調整ユニット部は1,113~1,655μmであり、 <b>灯火高調整ユニットの膜厚が仕様比べて薄い</b> 。

表-4.16 浮体式灯標(事故品)の係留具摩耗状況

標識名	係留具摩耗状況
千葉港 第四号灯標	・ショートチェーンの寸法Aは181.5~183.5mmで、 <b>プラス公差に加え4.5mm程度の摩耗量</b> (シャックルが5.5mm摩耗していた)。
若松航路 第七号灯標	・ <b>リンクの摩耗量はほとんどない</b> 。シャックルは計測不可。



図-4.4 千葉港第四号灯標のショートチェーンの摩耗状況

表-4.17 浮体式灯標（事故品）の犠牲陽極衰耗状況

標識名	犠牲陽極衰耗状況
千葉港第四号灯標	・犠牲陽極のエッジが残っており、 <b>ほとんど損耗していない。</b>
若松航路第七号灯標	・ <b>ほとんど損耗していない。</b>

#### (4) 現地調査のまとめ

浮体式灯標の現地調査結果から、10年前後経過した浮体式灯標は健全であり、今後約10年間は健全な状態が保たれるものと期待される。評価理由は以下に示すとおりである。

- 浮体式灯標の本体の塗装状態は健全であり、設置年数が10年前後の浮体式灯標は防食面や強度面に問題がない。
- 犠牲陽極は最高約30%衰耗していたが、無塗装で15年防食効果を期待して設計されていることを考慮すると、塗膜の状態にかかわらず、水中部では今後約10年間は犠牲陽極による防食効果が期待できる。
- 浮体式灯標の寿命を決定付ける部位であるショートチェーンについては、シャックルとリンクの組み合わせにおいて最小規格値から最大でも6mmの摩耗量であり、この量がシャックルですべて摩耗したと仮定しても約6.3%程度の摩耗率となる。プラス交差を考慮する必要があるが、使用限度摩耗率を25%と仮定すると、今後約10年は交換不要と考えられる。

ただし、以下に示す3点については、近い将来、補修や交換が必要と考えられる。

##### ①プラットフォーム部の再塗装

材質がアルミニウムであり、塗装の相性が良くないため、プラットフォームの塗膜剥離が著しく、色の識別において標識の意味を成さなくなる恐れがある。

##### ②灯器や標識本体の清掃作業

鳥の糞害が著しく、色の識別において標識等の意味を成していない。

##### ③補助係留チェーンの交換

強度計算書によると、補助係留チェーンは定期的に交換（およそ、5年）することを前提に設計されているにもかかわらず、これまで交換実績がない。また、補助係留チェーンがフランジ部と接触し、約1/3程度、摩耗しているものもある。

#### 4.3 腐食劣化診断モニタリング技術の開発

腐食状況の把握を非破壊で判断する手法として一般的に用いられている腐食劣化診断モニタリング技術について、航路標識の設置環境条件に適した手法を抽出し、実用化のための実証試験を行うことにより、それらの技術的課題を抽出し、劣化診断マニュアルの作成に必要な計測手法について開発を行った。

##### 4.3.1 浮体式灯標の環境<sup>20)</sup>に適した手法の抽出

###### (1) 水上部

他の区分と比較して、比較的マイルドな腐食環境であり、腐食劣化速度が緩やかであると考えられるため、主に塗膜の劣化度に着目する。そこで以下の手法を抽出した。

- ・アクティブ赤外線サーモグラフィ法<sup>21),22)</sup>による塗膜劣化診断
- ・インピーダンス計測による塗膜劣化診断<sup>23)</sup>
- ・ロングレンジ超音波法による腐食診断<sup>24)</sup>

###### (2) 飛沫干満対部

他の区分と比較して、漂流物との接触や海洋生成物の付着により塗膜が損傷し、犠牲陽極による防食効果も期待できない最も厳しい環境にあるため、主に鋼板の板厚に着目する。そこで以下の手法を抽出した。

- ・パルス渦流式探傷による板厚計測<sup>25)</sup>
- ・ロングレンジ超音波法による腐食診断

###### (3) 水中部

一般に海面からおおよそ1mまでの水深は腐食の著しい場所であるが、塗膜による防食の他、犠牲陽極による防食措置が施されているため、鋼材自体の腐食環境は厳しいとは言えない状況であり、主に犠牲陽極の衰耗量と自然電位に着目する。そこで以下の手法を抽出した。

- ・水中カメラを用いた犠牲陽極の残存量監視による塗膜劣化診断
- ・自然電位計測による塗膜劣化診断

###### (4) ジョイント部

- ・シャックルとリンク（リンクとリンク）の摩耗量の計測

##### 4.3.2 計測法の開発等

4.2節で実施した現地調査時に、4.3.1項に挙げた腐食診断手法の航路標識への適用性について検

討した。

(1)アクティブ赤外線サーモグラフィ法による塗膜劣化診断

①供試体

浮体式灯標を供試体として、アクティブサーモグラフィ法による塗膜劣化診断技術（遠距離加熱装置の開発を含む）の開発ならびに適用性の検討を行った。当初、作業船上から遠距離加熱装置により浮体式灯標の本体表面を加熱し、塗膜劣化診断を行う予定であったが、作業船の揺れが予想以上に大きく、船上での作業は困難であると判断し、浮標基地に事故品として揚陸された表-4.4 に示した若松航路第七号灯標の灯火高調整ユニット部を供試体（後述の図-4.9 参照）として検討した。

②試験装置

試験には、赤外線サーモグラフィ装置、3倍レンズ、遠距離加熱装置（ハロゲンランプとキセノンショートアークランプ）を用いた。

太陽光の影響を比較的受けにくい長波長の検出波長帯域を持つ市販の赤外線サーモグラフィ装置に3倍レンズを装着して使用する。

遠距離加熱装置は、照射径300mmの放射面で可視光から赤外線まで熱エネルギーを90%以上反射するガラス製反射鏡を有する。電球にハロゲン球タイプ（JS100V～110V、1000W）を使用するものと、ショートアークキセノン球（1000W）を使用するものの2種類を用意した。灯体本体は市販品を使用し、前面を開放して運用するため反射鏡前面の保護ガラスは容易に開放できる構造とした。また、使用電源は商用100Vを使用する。図-4.5に遠距離加熱装置外観を示す。



図-4.5 遠距離加熱装置外観

③検討方法

灯火高調整ユニットの表面を遠距離加熱装置で加熱し、赤外線サーモグラフィ装置で上昇温度を測定する。塗膜の放射率が不明なため、正確な上昇温度は測定できない。しかし、本検討により、加熱光や外乱（背景放射）の影響を受ける中、健

全部の温度上昇が確認できれば、塗膜劣化（剥離欠陥）部の検知は可能と考えられる（剥離欠陥上部の塗膜は熱容量が小さいため、健全部より上昇温度は高くなるものと考えられる）。

④検討結果

灯火高調整ユニット表面から3.0m離れた位置から遠距離加熱装置により60秒間加熱し、表面の温度変化を計測した。その結果を図-4.6に示す。加熱前と加熱終了後の熱画像から、遠距離加熱により表面温度が上昇していることが確認できる。

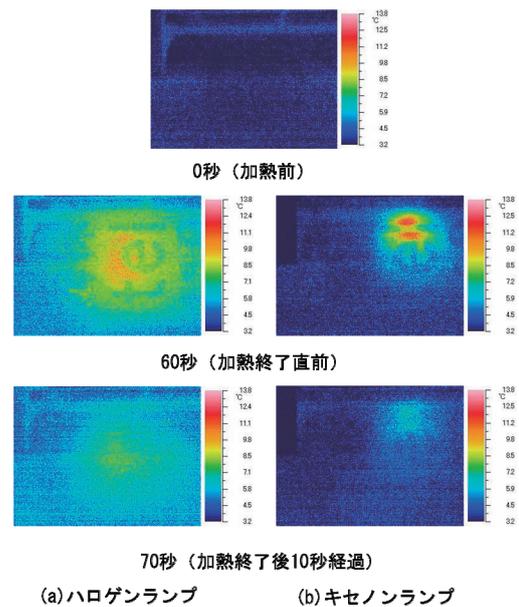
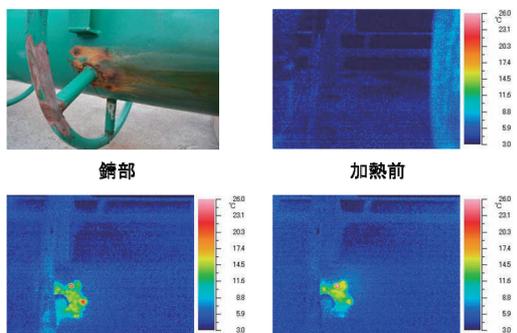


図-4.6 加熱後の塗膜表面の温度変化

両ランプの光源の大きさの違いにより放射光のばやけ方が異なるため、放射強度分布が異なっている。ハロゲンランプは大きい範囲が、キセノンランプは小さい範囲が加熱されている。キセノンランプの方が集中して加熱されているにもかかわらず、加熱後の上昇温度は低い。実験室レベルで塗膜（ただし色違い）の分光放射率は近赤外域で低いことを確認しており、本結果は、近赤外放射光を出すキセノンランプより、幅広い赤外放射光を出すハロゲンランプの方が加熱効率は良いことを示している。

次に、錆びている部分（図-4.7 左上）に対し、2.5m離れた位置から遠距離加熱装置により30秒間加熱した。加熱終了後の熱画像を図-4.7の下端に示す。一般に酸化金属の放射率は高いため、ハロゲンランプおよびキセノンランプともに加熱後の温度上昇は高くなった。また、膨れを生じている部分がより高温になっていることも確認できる。今回は、目視でも確認できるレベルの錆が緑

色塗料に生じていたため、目視でも簡単に検知できた。しかし、赤色や黒色塗料の場合は目視による検知は難しくなると予測され、錆部や塗膜膨れ部の検知においてもアクティブ赤外線サーモグラフィ法は有効である。



30秒加熱後 (ハロゲンランプ) 30秒加熱後 (キセノンランプ)  
図-4.7 錆部および塗膜膨れ部への適用例

⑤まとめ

動揺する船上から加熱するのではなく、遠距離加熱装置の小型化を図り、たとえば、浮体式灯標上から加熱するなどの見直しを図ることで、アクティブ赤外線サーモグラフィ法による塗膜劣化診断は十分に有効な手法と考えられる。

(2)インピーダンス計測による塗膜劣化診断

インピーダンス計測による塗膜劣化診断技術は、素地の鋼板と塗膜間のインピーダンスを測定し、その経時変化から塗膜劣化度(塗膜の劣化、膨れ、錆の発生を段階ごとに特定)を客観的に評価する技術である。しかしながら、航路標識のような構造物の厚膜かつ高抵抗の重防食塗膜に対応したポータブル式のインピーダンス計測器は未だ開発されておらず、市販品でどこまで対応できるか浮体式灯標を供試体として調査した。

①インピーダンス計測の原理

塗膜表面に外部電極を取付け、素地の鋼板(灯火高調整ユニットの鋼管)をもう一方の電極とした場合に塗膜は、概略、図-4.8 の等価回路と見なすことができる。塗膜の劣化により塗膜コンデンサ容量  $C$  は増加し、塗膜抵抗  $R$  は減少する傾向にあるため、これを計測することで塗膜の劣化に関する情報を得ることができる。

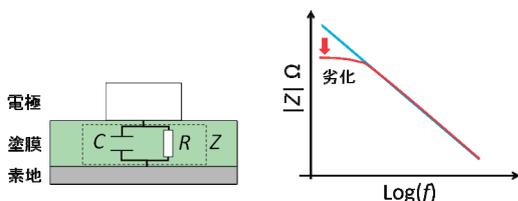


図-4.8 塗膜の等価電気回路

②供試体と測定方法

表-4.4 に示した若松航路第七号灯標の灯火高調整ユニット部を供試体とし、図-4.9 に示す 8 箇所(1)の塗膜のインピーダンスを測定した。表-4.15 に示したように、灯火高調整ユニットの塗膜は  $365\sim 568\mu\text{m}$  であり、塗装仕様の  $568\mu\text{m}$  より薄い膜厚であった。なお、位置②は発錆箇所近傍を、位置④は塗膜割れ箇所近傍を測定し、インピーダンスを比較検討した。

交流インピーダンス計測には、市販品である塗膜劣化診断システム(TOMAC)を使用した。

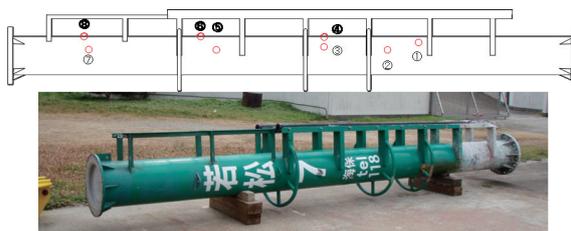


図-4.9 供試体のインピーダンス測定位置

③インピーダンス計測結果

8 箇所(1)の膜厚補正インピーダンス(インピーダンス  $Z \times$  膜厚  $d /$  電極面積  $S$ )計測結果を図-4.10 に示す。いずれの場合も高いインピーダンスを維持していた。また、位置②の発錆箇所近傍(図-4.11 参照)や位置④塗膜割れ箇所近傍(図-4.12

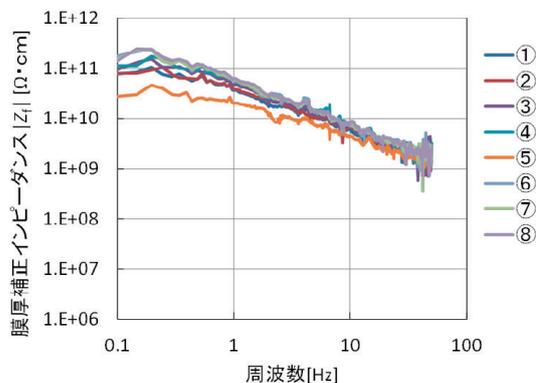


図-4.10 計測箇所の膜厚補正インピーダンス



図-4.11 位置②：発錆箇所近傍

参照)でも、位置①等の塗膜外観が正常な箇所同様、高いインピーダンス値を示した。この結果から、塗膜下の腐食は進行していないことと推察される。



図-4.12 位置④：塗膜割れ箇所近傍

④まとめ

塗装仕様が  $600\mu\text{m}$  程度であれば、市販の塗膜劣化診断システムを使用し、インピーダンス計測による塗膜劣化診断は可能と判断できるが、より厚い塗膜やインピーダンスの高い重防食系塗料に対応した計測装置の開発が望まれる。

浮体式灯標の防食塗装については、年代により塗装仕様が異なること、同じ塗装仕様であっても表-4.8 および表-4.15 に示したように、実際の膜厚は塗装仕様と比べて  $200\mu\text{m}$  程度薄い膜厚や2~3倍厚い膜厚となっている。今後、膨れの発生および塗膜下腐食の発生をその前段階で評価可能な指標の整備が必要となるが、膜厚依存性のある評価指標を使用する場合には防食塗装の膜厚管理精度を向上させるか、または、膜厚依存性のない評価指標について検討する必要がある。

(3)パルス渦流式探傷による板厚計測

パルス渦流式探傷は強磁性体の測定物に対し、測定面とセンサの距離(リフトオフ 100mm 以下)が離れた状態で、板厚の減肉の有無および測定範囲における平均板厚を測定できる技術である。この技術を用いて、浮体式灯標の飛沫干満帯部の腐食状況について海洋生成物を除去せずに腐食評価する方法について検討・開発を行った。

①パルス渦流式探傷の原理

図-4.13 にパルス渦流式探傷の原理を示す。センサから与えられた磁束により対象物に渦電流が発生し、その渦電流の変化を捉えることにより板厚変化を検出する。

図-4.14 に測定原理を示す。センサで検出した電圧信号の時間変化から板厚の違いが捉えられる。測定対象の板厚が増す場合は変化点の時間が遅くなり、一方肉厚が減る場合は早くなる。測定波形の例を図-4.15 に示す。このグラフは板厚を変えて測定した時の波形である。板厚が厚くなるほど、

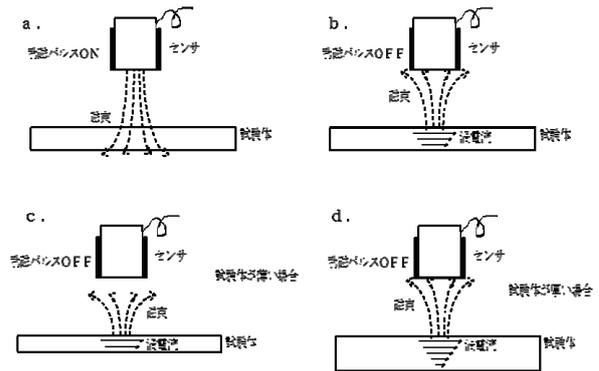


図-4.13 パルス渦流式探傷の原理

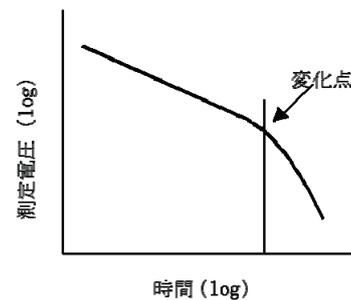


図-4.14 パルス渦流式探傷測定原理

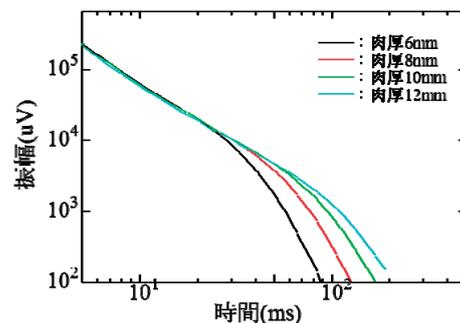


図-4.15 パルス渦流式探傷の測定波形の一例

波形の変化点の時間が遅くなる。

センサが捉える測定対象物の測定範囲は、リフトオフ、板金の有無、センサのタイプ等に影響するため考慮する必要がある。

測定結果は、健全と考えられる箇所を基準点(この点を板厚 100%とする)とし、この点に対する板厚% (基準点と測定点の相対比較) を測定点の結果として出力する。

②センサの開発

浮体式灯標の飛沫干満帯部における腐食状況(腐食形態、腐食範囲、腐食量等)ならびに海洋生成物の付着状況を考慮して、パルス渦流式探傷のセンサを製作した。製作したセンサの仕様を表-4.18 に、その外観を図-4.16 に示す。

板厚を4段階(板厚:9.2mm、12.4mm、15.6mm、

18.8mm) 変化させ、リフトオフを 0mm から 100mm まで 6 段階変えた測定を大気中と水中にて実施した。その結果、大気中及び水中において、板厚約 9mm から 19mm の範囲において測定波形より評価した体積比 (%) と板厚との相関が得られており、製作したセンサはリフトオフが 0mm から 80mm まで測定可能であることが確認された。リフトオフ 80mm の大気中の結果を図-4.17 に、海水中の結果を図-4.18 に例示する。

防水性能を確認するために耐圧試験を実施した。試験は加圧槽にて 10 気圧の加圧試験を 2 時間実施し、試験後センサ内部に漏れのないことが確認された。

なお、実機対象物を測定する場合、浮体式灯標上から飛沫干満帯部でセンサを固定でき、海洋生成物がある状態でセンサを固定できる治具を製作した。

表-4.18 製作したセンサの仕様

	項目	仕様
センサ寸法	直径	φ200mm (取手含まず)
	厚さ	40mm
	材質	ポリフェニレンサルファイド (PPS) 樹脂
励磁コイル	コイル径	内径60mm、外径70mm
	コイル厚さ	15mm
	コイル線径	φ0.34mm
	コイル巻数	632T
検出コイル	コイル径	内径20mm、外径60mm
	コイル厚さ	15mm
	コイル線径	φ0.14mm
	コイル巻数	11910T
防水性	耐圧性能	5気圧
その他	ケーブル長	15m



図-4.16 センサの外観

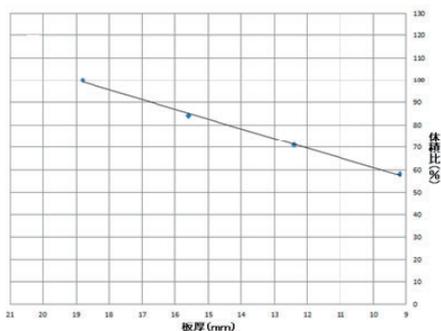


図-4.17 大気中における相関結果の一例

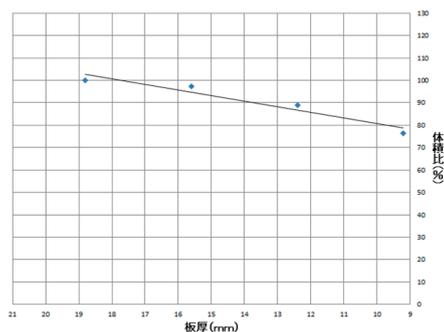


図-4.18 海水中における相関結果の一例

③実証試験

表-4.3 に示した千葉港姉崎航路第三号灯標と川崎航路第一号灯標においてパルス渦流式探傷の実証試験を実施した。計測装置は、4.3.2(3)②項のセンサの他、パルス ET 測定装置とパルス ET 解析ソフトを用いた。実証試験結果を表-4.19 に、実証試験状況の一例(千葉港姉崎航路第三号灯標)を図-4.19 に示す。なお、健全部と想定される箇所を相対体積比 100%とした。

表-4.19 の結果から、パルス渦流式探傷にて測定した飛沫干満帯部には減肉は認められないと評価された。この結果は、表-4.7 の結果と同様であり、パルス渦流式探傷の有効性が確認された。

表-4.19 実証試験結果

測定箇所	千葉港姉崎航路 第三号灯標 (公称板厚19mm)	川崎航路 第一号灯標 (公称板厚12.7mm)
健全部と想定される箇所	100%	100%
飛沫干満帯部	99%	101%



(a) 健全部 (b) 飛沫干満帯部

図-4.19 実証試験状況の一例

④まとめ

対象物に腐食が一部認められたものの非常に軽微で、概ね健全であったため、腐食形態に関する情報は得られておらず、十分なパルス渦流式探傷の実証試験ができたとは言えないものの、本技術は浮体式灯標の腐食劣化診断モニタリング手法として適用の可能性が確認されたものと評価できる。なお、固定ジグについては、作業性の面からも改

良の余地があるものと考えられる。

(4) ロングレンジ超音波法による腐食診断

ロングレンジ超音波法は、配管の一部にセンサを取り付けることで数十メートルの長さを高速に腐食調査する技術である。この技術を用いて浮体式灯標の飛沫干満帯部ならびに水上部の腐食状況について海洋生成物を除去せずに腐食評価する方法について検討・開発を行った。

① ロングレンジ超音波法について

図-4.20 に示すように、従来の超音波探傷では探傷領域がセンサの直下のみであるのに対し、ロングレンジ超音波法は配管の軸方向に超音波を伝搬させて長距離の探傷が可能である。

ロングレンジ超音波法の一般的な特徴を以下に示す。

a) 長所

- ・ 広範囲・全面を高速スクリーニング検査可能。
- ・ 他の詳細検査と組み合わせることで、低コスト・高効率な検査が可能。
- ・ コーティングの剥離等の前処理不要で、接触媒質不要で探傷可。
- ・ 保温材の影響は受けないため、センサ設置位置の保温材解体のみで適用可能。
- ・ 一度の探傷で配管の内外面の異常部の検出が可能。

b) 短所

- ・ 欠陥の軸方向及び周方向の位置が確認できるが、内外面の判別は不可能。
- ・ 減肉深さの定量評価は困難。

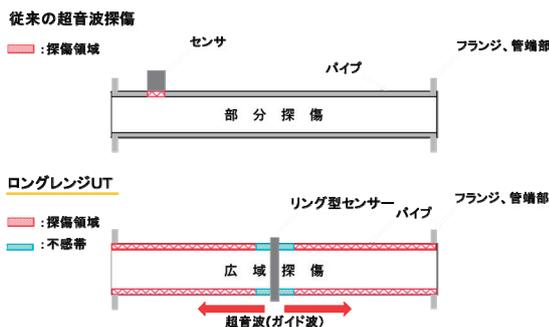


図-4.20 従来の超音波探傷とロングレンジ超音波法との比較

② 適用性の検討

浮体式灯標の構造、飛沫干満帯部ならびに水上部の腐食状況（腐食形態、腐食範囲、腐食量等）、海洋生成物の付着状況を考慮してロングレンジ超音波法の適用性を検討した。

浮体式灯標の構造およびロングレンジ超音波法の測定範囲を図-4.21 に示す。ロングレンジ超音波法は、一般的にセンサの両側の20m程度が探傷

可能であり、今回の測定範囲としては10m程度であることから適用は可能と考える。また、ロングレンジ超音波法では、センサの両側約1.5m程度が不感帯（図-4.20 参照）となるため、本対象物におけるセンサの設置位置は灯火高調整ユニット（プラットフォームと浮体部中間浮体ユニットの間）の気中部が適切であると考えられる。

一般的な腐食検出性能は、配管断面積の10%程度から検出可能とされており、本対象物における腐食形態、腐食範囲、腐食量等によりロングレンジ超音波法の適用を考慮する必要がある。ただし、常設センサを使用してモニタリング技術として用いる場合は、腐食検出性能は配管断面積の1%程度から検出可能とされていることからある程度面積を持った腐食（孔食以外）に対して適用可能と考えられるが、コストパフォーマンスの観点から現実的ではない。

上述したように、設置位置は灯火高調整ユニット（プラットフォームと浮体部中間浮体ユニットの間）の中間位置が適切であると考えており、この位置は水上部であるため、防水性は特に考慮する必要は少なく、完全防水は必要ない。

その他、測定等において考慮すべき点として、測定は海上での作業となり、船上または浮体式灯標上で測定できることが条件となるため、浮体式灯標の現地調査において現場の状況等を確認した結果を反映した。これらを考慮し検討し、必要な事項を抽出したものを以下に示す。

- ・ センササイズは実機調査対象より選定する。
- ・ センサを設置する場合、落下防止養生が必要。
- ・ 測定を船上で行う（探傷器が船上）場合、センサと探傷器を接続するケーブルの長さは10m以上必要。

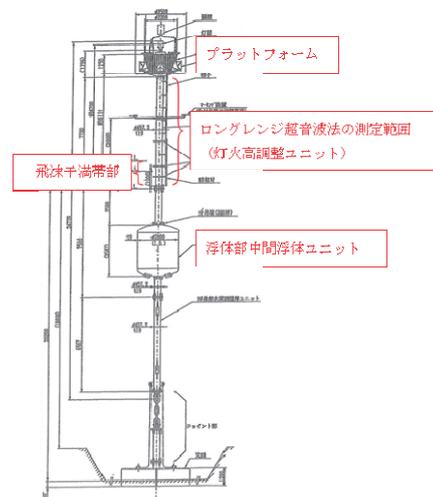


図-4.21 ロングレンジ超音波法の測定範囲

③実証試験

表-4.3 に示した千葉港姉崎航路第三号灯標にてロングレンジ超音波法の実証試験を実施した。使用した装置は、Wavemaker 測定器、解析 PC ならびに鋼管径φ457.2mm 用に製作された Inflatable リングを使用した。実証試験結果を図-4.22 に示す。図-4.22 において、灯火高調整ユニットの上下フランジ間には断面欠損率が 10% 以上の有意な信号は検出されなかった。ただし、今回の探傷における下側フランジの信号が不明瞭であり信号レベルは良好とは言えない。

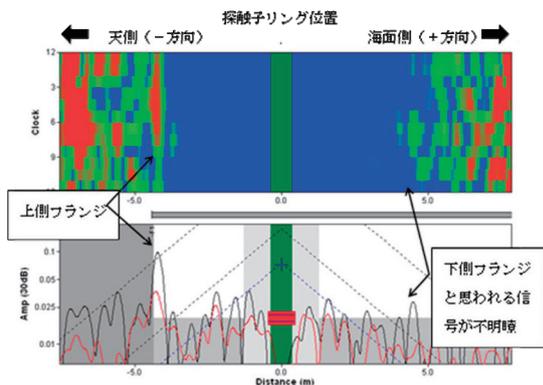


図-4.22 実証試験結果

④まとめ

ロングレンジ超音波法における実証試験結果から、本技術は浮体式灯標の腐食劣化診断モニタリング手法として適用の可能性は示唆されたが、十分なデータが得られたとは言えないため、今後の検討が必要である。

(5)水中カメラを用いた犠牲陽極の残存量監視による塗膜劣化診断

小型水中カメラを使用して浮体式灯標の犠牲陽極を撮影し、画像からその残存量を推定して海洋生成物を除去せずに塗膜劣化を診断する方法について検討した。

①撮影装置

図-4.23 に撮影装置の概要を示す。装置は、水中カメラ（主な仕様は表-4.20 とおり）、コントローラ、ディスプレイ、バッテリーから構成される。水中カメラはコントローラを介して撮影した映像信号をディスプレイに出力する。ディスプレイは入力された映像信号をリアルタイムに表示するとともに、任意のタイミングで DV カセットテープに入力映像を記録することができる。カメラ部にはレンズを囲むように 12 灯の LED 光源が配置され、これらを点灯することで暗い水中でもある程度の撮影が可能となる。また、カメラやコントローラへの給電はバッテリーにより行う。

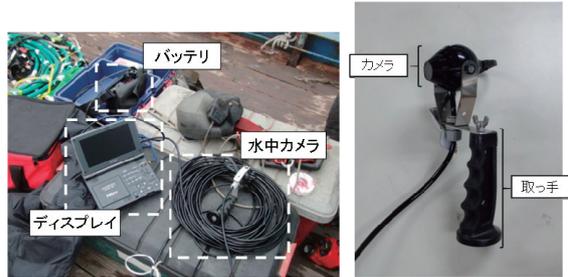


図-4.23 撮影装置一式（左）、カメラ部（右）

表-4.20 水中カメラの主な仕様

撮影素子	1/8" カラー CCD
総画素数	40万画素
水平解像度	480TV本
最低被写体照度	0.8Lux (F1.4)
レンズ	f=2.9(F2)
画角(空気中)	94.7° × 70.8°
画角(水中)	80.4° × 58.9°
アイリス	電子アイリス
ホワイトバランス	オート
フォーカス	固定 (0.2m-∞)
水中ケーブル長	25m
電源	AC100V または DC12V
映像出力端子	RCA端子 (コンポジット映像信号)

②撮影方法

水中カメラを持った潜水士が潜り、犠牲陽極を撮影する。撮影は犠牲陽極のケレン（付着生物の除去作業）の前後で 2 回行う。

③残存量監視の試行

図-4.24 および図-4.25 に、姉崎航路第三号灯標と川崎航路第一号灯標において水中カメラで撮影した犠牲陽極画像の例をそれぞれ示す。

実施した 2 基の浮体式灯標（姉崎航路第三号灯標と川崎航路第一号灯標）のいずれについても、犠牲陽極上に大量の海洋生成物（貝類および藻類）の付着が見られた。ケレン前後の画像を比較すると、海洋生成物が犠牲陽極全体を覆い、その形状が明確に把握できないことが分かる。このため、撮影画像のみから犠牲陽極の残存量を定量的に評価することは困難である。

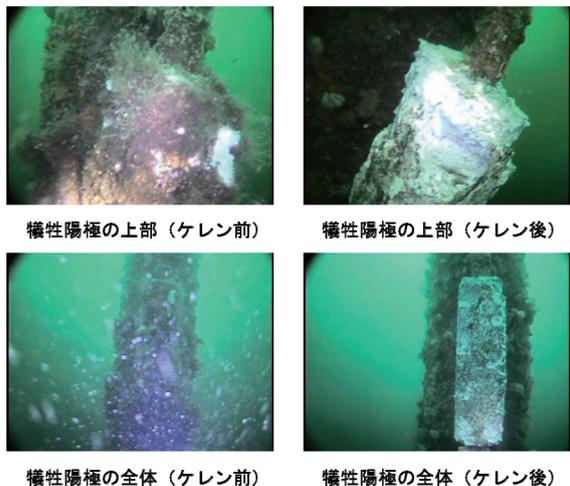


図-4.24 姉崎航路第三号灯標の撮影例

一方で、海洋生成物が付着した状態であっても、極端な衰耗(半減等)があれば画像上から判定できると推測される。このことから、犠牲陽極の残存量についてはある程度の定性的な評価は可能であると考えられる。

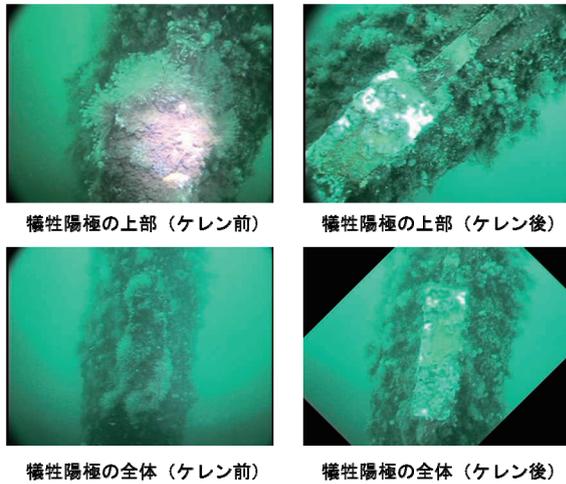


図-4.25 川崎航路第一号灯標の撮影例

④まとめ

水中カメラを用いた犠牲陽極の残存量監視による塗膜劣化診断法について検討し、以下の結論を得た。

- ・犠牲陽極に海洋生成物が付着した状態では定量的な評価(寸法計測等)は困難である。
- ・犠牲陽極残存量についてはある程度の判定が可能である。
- ・安価な小型水中カメラが市販されており、正確な寸法測定を行わずに犠牲陽極の残存量のみを判定する場合については、潜水士観測に替わる手段として期待できる。

(6)自然電位計測による塗膜劣化診断

計測結果については、表-4.12に示す。

自然電位計測は以下に示す特徴を有し、浮体式灯標の水中部の防食状態を迅速かつ安価に把握できる。従来からある技術であるが、非常に有効な手法である。ただし、数種類の照合電極があるので配慮する必要がある。

- ・測定機器は、比較的安価、かつ、操作も簡単で、技術的知識を必要としない(測定機器:デジタルマルチメータと照合電極)。
- ・計測時間が短い(水深20m前後の浮体式灯標の水中部を1mごとに計測した場合、およそ30分)。
- ・浮体大気部から導線が取れるので 備船のみで、潜水士を雇用する必要がない。
- ・一般職員での施工も可能である。

(7)シャックルとリンク(リンクとリンク)の摩耗量の計測

ショートチェーンは伸張状態にあり、シャックルおよびリンク個々の摩耗量は計測できない。そこで、4.2.4(2)項で記述したとおり、現地調査の際、図-4.3に示したように、ケレン後にシャックルとリンク(リンクとリンク)の交差部の両端にノギスを当て、計測できるか否か検討したところ、計測可能であることが判明した。

また、4.2.4(3)項で記述したとおり、ショートチェーンの摩耗については、シャックルが第三種相当品であり、リンクが第四種相当品であるため、シャックルとリンクが接触する箇所ではリンクはほとんど摩耗せず、シャックルのみ摩耗していた。

上記の事実より、シャックルとリンク(リンクとリンク)の交差部の両端の計測値より摩耗量Aを算出し、部品の組み合わせにより以下のとおり決定することで摩耗量の概略値を算出できる。なお、現状では規格値との差(シャックルとリンクの場合、リンクのプラス公差分を考慮しないことで安全側の評価となる)で摩耗量を判断することとなるが、新規に設置する浮体式灯標に関しては初期値を記録すれば、より精度良く摩耗量を算出できる。

- ・シャックルとリンクの場合  
 シャックルの摩耗量: 計測値-規格値  
 リンクの摩耗量 : ゼロ
- ・リンクとリンクの場合  
 リンクの摩耗量 : (計測値-規格値) / 2

4.4 劣化診断マニュアルの作成

4.2節と4.3節の現地調査を通じて航路標識の腐食診断手法としての適否を評価し、表-4.21に示す浮体式灯標の劣化診断マニュアルを作成した。作成した劣化診断マニュアルは、各部位の重要な腐食・劣化事象に着目しており、すべての事象に対応した劣化診断マニュアルではないことをご理解頂きたい。

なお、今回調査した設置年数が10年前後の浮体式灯標は、健全な状態であった。しかしながら、設置年数10年以上の浮体式灯標が約90基(全浮体式灯標の半数以上)あり、かつ、耐用年数が15年であることを考慮すると、計画的に浮体式灯標の健全度を把握し、今後の補修・交換計画を立案することは急務と考えられる。

航路標識の腐食診断手法として不相当と判断した手法について、改良すべき点について、表-4.22にまとめる。

表-4.21 浮体式灯標の劣化診断マニュアル（その1）

部位	危険度	診断方法	クライテリア	備考
プラットフォーム 灯火高調整ユニット (鋼材以外)	1	目視検査	塗膜のはがれの等級 JIS K 5600-8-5 (0~5の 6段階評価) 面積等級5 (15%以上) あるいは 大きさ等級5 (平均 30mm以上)	<ul style="list-style-type: none"> <li>アルミニウムは塗膜との相性が悪く、剥離しやすい。</li> <li>腐食は考慮しなくて良い。</li> <li>標識としての色の識別重視。</li> </ul>
			鳥の糞害 面積30%以上	<ul style="list-style-type: none"> <li>灯器や標体本体の標識としての色の識別重視。 (塗膜劣化にほとんど影響を与えないと思われるので上記の塗膜の基準より緩和)</li> </ul>
灯火高調整ユニット (水上部)	2	目視検査	塗膜の膨れの等級 JIS K 5600-8-2 (2~5の 4段階評価) 大きさ等級3ならびに密 度等級3 あるいは 錆の等級 JIS K 5600-8-3 (Ri0~ Ri5の6段階評価) 面積等級Ri3 (1%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>水上部(海上大気部)の腐食速度は0.01~ 0.1mm/年で、比較的マイルドな環境にある。</li> <li>灯火高ユニットの寿命は、飛沫干満帯部(腐食 速度: 0.1~0.3mm/年)での腐食量で決まる。</li> <li>標識としての色の識別重視。</li> </ul>
			鳥の糞害 面積30%以上	<ul style="list-style-type: none"> <li>標識としての色の識別重視。 (塗膜劣化にほとんど影響を与えないと思われるので上記の塗膜の基準より緩和)</li> </ul>
灯火高調整ユニット (飛沫干満帯部)	4			<ul style="list-style-type: none"> <li>風、潮流、波等による曲げモーメントが最大となる部位。</li> <li>強度低下をとまなう腐食による板厚減肉量に着目。</li> </ul>
		パルス渦流式探傷	腐食による板厚減肉量 1.5mm以下	<ul style="list-style-type: none"> <li>海洋生成物を除去する必要がなく、塗膜の状態を悪化させない。</li> <li>センサが高価。</li> <li>計測作業は外注。</li> </ul>
		超音波法による板厚検査	同上	<ul style="list-style-type: none"> <li>潜水士による海洋生成物を除去等のケレン作業や計測後の塗膜等の補修作業が必要。</li> <li>計測機器は比較的安価。</li> <li>非破壊検査資格を有する作業員による計測を推奨。</li> </ul>
浮体部 水深調整ユニット	3			<ul style="list-style-type: none"> <li>防食状態に着目。</li> </ul>
		潜水士による犠牲陽極の残存量の監視	残存量	<ul style="list-style-type: none"> <li>潜水士による海洋生成物を除去等のケレン作業が必要。</li> <li>残存量を正確に計測できる。</li> <li>残存量を時系列で把握することにより犠牲陽極の寿命が把握できる(設計時、無塗装で15年耐用としているので、たとえば残存量が70%あれば、今後無塗装で10.5年(15年×0.7)防食効果が期待できる)。</li> </ul>
		水中カメラによる犠牲陽極の残存量の監視	同上	<ul style="list-style-type: none"> <li>海洋生成物が付着しているため、正確な残存量は計測不可。</li> <li>残存の有無の判断は可能。</li> <li>比較的安価な水中カメラが市販されている。</li> </ul>
		自然電位計測	-780mV以下 (v.s.海水塩化銀電極)	<ul style="list-style-type: none"> <li>防食状態を迅速かつ安価に把握でき、非常に有効な手法。</li> <li>機器も安価で、デジタルマルチメータと照合電極があれば計測可。</li> <li>水深20m前後の浮体式灯標の水中部を1mごとに計測した場合、計測時間はおよそ30分。</li> <li>浮体大気部から導線を取れば、潜水士は不要。</li> </ul>
ジョイント部 (ショートチェーン)	5	ノギス計測	最大摩耗量25%以下	<ul style="list-style-type: none"> <li>シャックルとリンク(リンクとリンク)の交差点の両端の計測</li> <li>シャックルとリンクの組み合わせ シャックルの摩耗量=計測値-規格値(186mm) リンクの摩耗量=ゼロ</li> <li>リンクとリンクの組み合わせ リンクの摩耗量=(計測値-規格値(180mm))/2</li> </ul>
ジョイント部 (補助係留チェーン)	1	なし	5年交換	<ul style="list-style-type: none"> <li>強度計算書では、5年で交換することを前提としている。</li> </ul>

表-4.22 不適当と判断した手法の改善すべき点

診断方法	改良点等
インピーダンス計測	<ul style="list-style-type: none"> <li>・膜厚管理の徹底 年代により塗装仕様が異なる。また、同じ塗装仕様でも膜厚が異なる(現地調査では塗装仕様の3倍超の膜厚も存在)。</li> <li>・極膜厚に対応したポータブル型のインピーダンス計測器の開発</li> <li>・膨れの発生および塗膜下腐食の発生をその前段階で評価可能な指標の整備</li> </ul>
アクティブ赤外線サーモグラフィ法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・遠距離加熱方法の見直し 動揺する船上から加熱するのではなく、遠距離加熱装置の小型化を図り、浮体式灯標上から加熱するなどの見直しを行う。</li> </ul>
ロングレンジ超音波法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・精度向上(常設センサは不可)</li> </ul>

5. あとがき

参考文献

損傷事例と専門家の意見等を整理して、船体検査に利用できる経験的知識を反映したシステムを作成した。このようなシステムを作成するにいたった経緯として、経験と知識の伝承が本分野において必要と考えたためである。しかしながら、知識の伝承において、伝える側から伝えられる側への一方的な情報提供では、十分でないことも同時に体得した。正しく伝承されたか否かは、伝えられる側の検査報告書作成過程が重要であると考え、今後、技術伝承の観点から何らかの工夫が求められるものと考ええる。

また、経験知などを活用して個々の損傷について検査・修繕が計画的になされる状態を想定すると、現時点では脅威ではないと判定された損傷について、安全確保のため、次の検査まで継続的に損傷モニタリングが要請されるケースが考えられる。そこで、モニタリング領域を挟む位置に送信探触子と受信探触子を設定し、透過波を計測することにより、疲労き裂進展をモニタできるシステムを構築した。隅肉等の鋼板上の障害物に影響されることなくモニタするための条件を明らかにした。小さい疲労き裂は、疲労応力によるき裂の開閉口挙動が透過波強度に影響するので、計測タイミングを船体運動と同期させ、最大応力付近で計測することが重要である。

さらに、航路標識の腐食劣化診断モニタリング技術の開発では、浮体式灯標の劣化診断マニュアルを作成し、海上保安庁に提出した。現在、海上保安庁では、採用に向けた検討を行っている。

謝 辞

4章で報告した研究は、国土交通省総合政策局から受託した「航路標識等の腐食劣化診断モニタリング技術の開発」の一環として実施されたものである。有益な指導と討論を頂いた委員ならびに関係各位に対して、ここに記して深く感謝します。

- 1) 平方勝、他、船体構造の診断(検査・修繕の計画)支援システムの開発、海上技術安全研究所報告、第7巻第3号特集号(2007)、pp.69-131
- 2) 高野裕文、他、疲労センサを応用した船体寿命監視システム、溶接学会全国大会講演概要第81集(2007)、pp.F-9 - F-14
- 3) 高橋一比古、他、き裂検出用塗料と耐疲労スマート材料の開発、溶接学会全国大会講演概要第81集(2007)、pp.F-15 - F-20
- 4) 村山英晶、他、光ファイバセンサによる溶接部のひずみ分布計測、溶接学会全国大会講演概要第81集(2007)、pp.F-31 - F-35
- 5) 山本規雄、他、構造物検査と検査情報の有効利用に関する信頼性工学アプローチ、第12回海洋工学シンポジウム(1994)、pp.285-292
- 6) 和田隼夫、損傷と修繕、日本造船学会誌787号(1995)、pp.12-16
- 7) 日本造船研究協会、き裂伝播解析手法の実用化に関する研究 成果報告書(1996)
- 8) 武田英明、人工知能におけるオントロジーとその応用、情報知識学会第9回研究会講演論文集(2001)、pp.1-12
- 9) 稗方和夫、他、オントロジーを利用した生産工程記述手法に関する研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集第7E号(2008)、pp.131-132
- 10) 稗方和夫、他、造船業における知識伝承システムに関する研究、日本船舶海洋工学会論文集2巻(2005)、pp.131-137
- 11) 岡田哲男、F.P. TANK 内外板ロンジのスロット損傷について、日本造船学会誌882号(2004)、pp.14-16
- 12) Yasuhisa Okumoto, et al., Design of Ship Hull Structures, Springer
- 13) IMO, Guidelines on the Enhanced Programme of Inspections during Surveys of Bulk Carriers and Oil Tankers, 2005
- 14) 胡寧、他：ラム波による構造物ヘルスマニタリングに関する研究、JCROSSAR2007 論文集、

- pp.381-384 (同じ)
- 15) 遠山暢之、他：ラム波指向性圧電素子を用いた構造ヘルスマニタリング技術の開発、JCROSSAR2007 論文集、pp.385-390
- 16) 谷口龍太、他：波動伝搬特性を用いた損傷検知手法に関する基礎的研究、応用力学論文集、pp.1-8
- 17) 国土交通省、中央自動車道笹子トンネル天井板落下事故関連情報、  
[http://www.mlit.go.jp/road/road\\_tk1\\_000033.html](http://www.mlit.go.jp/road/road_tk1_000033.html)
- 18) 国土交通省：社会資本の老朽化対策に関する国土交通省の主な取組、  
[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/point/sosei\\_point\\_mn\\_000003.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/point/sosei_point_mn_000003.html)
- 19) (一財)日本航路標識協会：航路標識、  
[http://www.jana.or.jp/kouro/new\\_kouro.html](http://www.jana.or.jp/kouro/new_kouro.html)
- 20) 防錆・防食技術総覧委員会、防錆・防食技術総覧、産業技術サービスセンター(2000)、pp.121-134
- 21) 日本機械学会編、非破壊検査工学最前線、共立出版(2009)
- 22) 小笠原永久、他、遠距離加熱赤外線サーモグラフィ法による非破壊検査、(2012)  
<http://www.mod.go.jp/trdi/research/dts2012/P-18.pdf>
- 23) 竹内文章、他、携帯性と適用性を向上させた塗膜劣化診断システム、東芝レビュー、Vol.60、No.6(2005)、pp.60-63
- 24) 非破壊検査(株)、長距離超音波探傷システム ロングレンジ UT  
<https://www.hihakaikensa.co.jp/long.html>
- 25) 非破壊検査(株)、平成 24 年度ボイラー・タービン主任技術者会議 最近の非破壊検査技術の御紹介(2013)、pp.56