

船舶検査技術に関する調査研究

島田道男 *、成瀬 健 *、吉井徳治 *

Investigation on hull inspection techniques

by

Michio SHIMADA, Takeshi NARUSE, Tokuharu YOSHII

Abstract

Hull structure soundness of aged vessels is supported by periodical hull inspections and maintenance process. Recently, some oil tanker's shipwreck brought wide sea pollution which attracted an international attention for the safety of aged ships. As the result, a measure of enhanced survey which consists of increase in number of hull parts to be examined has been taken internationally. In actual inspection scenes, inspectors check and judge a hull safety based on the examination data by eye inspection and ultrasonic thickness meter. New inspection techniques have not been developed because it is not easy to apply nondestructive inspection technique due to hugeness of hull structure and dirtiness of hull parts such that covered with thick rust or sludge.

However, new inspection techniques are thought to be useful for effective employment of enhanced inspection and reduction of inspection cost. We carried out on-the-spot surveys of hull inspection and investigated on the present state of nondestructive inspection techniques to make clear the possibility of new development of hull inspection techniques. In this paper, the results of the investigation for hull inspection scenes and some kinds of nondestructive inspection technique to be applicable to hull inspection are described.

* 輸送高度化研究領域

原稿受付	平成	年	月	日
審査済	平成	年	月	日

目 次

1. はじめに
2. 調査方法
- 2.1 船舶検査
- 2.2 非破壊検査技術
3. 調査結果の概要及び改善が望まれる技術要素
- 3.1 船舶検査の現状
- 3.1.1 外観検査における問題点
- 3.1.2 アクセス手段の問題
- 3.1.3 板厚測定における問題点
- 3.2 必要な研究・開発
- 3.2.1 外観検査における判断
- 3.2.2 外観検査を補助する装置・機器等の開発
- 3.2.3 板厚測定の省力化を支援する機器等の開発
- 3.3 各種非破壊評価技術の船舶検査への適用に関する検討
4. 船舶検査現場調査の詳細
- 4.1 造船所における船舶検査・修繕等に関するヒヤリング
- 4.1.1 現場調査及び検査官ヒヤリング
- 4.2 海運支局(JG)の検査現場調査及び船舶検査官へのヒヤリング
- 4.2.1 対象船舶
- 4.2.2 現場調査詳細
- 4.2.3 船舶検査官へのヒヤリング調査
- 4.3 海事協会における船舶検査現場の調査および船舶検査員へのヒヤリング
- 4.3.1 検査対象船舶
- 4.3.2 現場調査の詳細
- 4.3.3 船舶検査員へのヒヤリング概要
5. 船舶検査への非破壊検査技術の適用に関する調査
- 5.1 はじめに
- 5.2 船舶検査における非破壊検査の適用性調査
- 5.3 船舶検査を目的とした非破壊検査技術の研究課題
6. まとめ
- 参考文献

1. はじめに

船舶は、高齢化に伴い徐々に経年構造劣化を生じ事故故障を起こし易くなる。そのため、定期的な船舶検査と修繕等の保守管理作業によりその構造健全性を確保している。修繕判断の基礎となる船舶検査については、近年のタンカー事故などから、検査強化が図られる傾向にある。そのため、重点検査箇所の増加等の対策が取られているが、船舶検査にかかわる技術に関しては、従来からの目視検査が主体で、検査技術の改善は行われていない。

また、安全や環境に関する国際基準を満たさず、海難事故を引き起こす外国船籍船に対処するため、PSC(ポートステートコントロール)に関する国際条約が整備され、PSCが実施されている。PSCにおいても、構造安全性は重要な評価項目であるが、検査時間は短く、基準に満たない船舶(サブスタンダード船)を峻別する検査技術もないため、検査機器開発に対する要望も大きい。

そこで、船舶検査の現場を調査すると共に、改善或いは開発が可能な非破壊検査手法の調査研究を実施した。

本調査の目的は、船舶検査の現状とその課題を検査現場の調査により明確化するとともに、各種非破壊検査技術の研究動向の把握とそれらの応用による船舶検査業務の省力化、効率化、安全性の向上等の可能性について検討を行うことにある。

本調査は、「船舶検査技術に関する研究」及び「材料劣化の非破壊計測法の研究」の一環として、船舶検査の現状並びに課題を明らかにするために実施したものであり、複数の船舶検査の現場調査と検査官ヒヤリングで得た情報を取り纏めた。また、船舶検査業務の省力化、効率化、安全性の向上等を目的として、文献調査等により各種非破壊検査技術の現状把握とそれらの適用法についても検討を加えた。

2. 調査方法

2.1 船舶検査

造船所修繕部門、海運支局(JG)及び日本海事協会(NK)における検査現場の調査と検査官等へのヒヤリング調査を行った。

2.2 非破壊検査技術

文献調査によって、各種非破壊検査技術の現状とそれらの船舶検査業務への適用可能性について検討した。

3. 調査結果の概要及び改善が望まれる技術要素

3.1 船舶検査の現状

現状の船舶検査は、様々な制約から、外観検査(目視検査)と超音波による板厚測定によって行われていると言える。これは、精密検査(Close-up survey)と呼ばれる現状で最も信頼できる検査方法においても同様である。その理由として以下の3点が挙げられる。船社においては、船舶運航管理のコスト低減の観点から、船舶検査・修繕の実施期間を船舶運行スケジュールとの調整で決めており、定まった期間内に適切な船舶検査を実施する必要があること。時間的にタイトな状況で検査が行われている。長期間運行した船舶には、腐食や付着物(貝殻、ヘドロ)等が多く、他分野で使用されている既存の非破壊・自動検査機器の使用が困難であること。

また、船舶の構造が巨大で複雑なことも、これらの検査機器適用の妨げになっている。各部位の必要強度を経験的に定めてきた船舶にあっては、検査においても検査官の経験や知識を重要視してきた。この点は、初期の実用化段階から応力計算等で安全性を確保してきた原子力・航空機分野等と大きく異なる。また、これらの分野とは事故の社会的影響度が異なったため、安全性に対する認識に歴史的背景による相違がある。

これらの状況をふまえた上で、現状の船舶検査の主な問題点を以下のように整理した。

3.1.1 外観検査における問題点

現状の外観検査では、時間的な制約等からすべての区画、部位を同じように検査することが難しく、実際には、検査者が船の履歴等を考慮して損傷のありそうな場所を抽出し、重点的に検査して船全体の安全性を判断している。したがって、判断基準が各検査者の経験、感覚に依存する部分がある。

3.1.2 アクセス手段の問題

高所、狭隘箇所など検査者が接近して検査することの難しい場所も多く、現状では、検査できる他の場所からその部分の状況を推定している場合が多い。

3.1.3 板厚測定における問題点

現在、一般的に用いられている超音波厚さ計で部材の板厚測定をするためには、十分な接触を得るために、測定前に腐食面のグラインダ掛けが必要となる。測定点数は、船の大きさ等により異なるものの、数百点から千点にも及ぶことから、その作業の省力化が問題となっている。

3.2 必要な研究・開発

3.2.1 外観検査における判断

現状では、NK発行の「船主／オペレータの為の船級維持の手引き」に「検査上の要点」がまとめられるなどの対策がとられているが、更なる安全性向上のためには、各検査者判断基準のより一層の統一化が必要であり、そのためにはデータベースの充実等を含む、ソフト面から検査者を支援するシステムを構築するための研究が必要と考えられる。

3.2.2 外観検査を補助する装置・機器等の開発

外観検査の効率化・信頼性向上を図るためには、接近することの難しい高所や狭隘箇所の情報を検査者の代わりに得る検査補助ロボットの開発が望まれる。しかし、緩やかな変形、錆の下の状態等、遠隔地からモニターを見るだけでは分からないことが多く、人間が実際にその場所に行ってみないと判断できない部分も多いと

考えられ、実際の検査現場で有効に機能させるところまで開発することは容易ではないと考えられる。

現在、外観検査の補助手段としてハンマーが使用されている（ハンマリング）。その主な目的は、検査部位の錆落としてであるが、音および感触等から骨の位置やおおよその板厚推定にも用いられており、定性的な情報ではあるが有効な検査器具の一つとなっている。この部分の定量化による簡易厚さ測定法、溶接部の腐食衰耗量推定法等への応用が期待される。

3.2.3 板厚測定の省力化を支援する機器等の開発

超音波厚さ測定前のグラインダ作業にかかる労力・費用は船舶検査の中で大きな部分を占めており、まず第一に省力化の望まれる部分と言える。そのためには、錆に関係なく、グラインダ掛けをすること無しに板厚測定できる手法の開発が望まれる。

3.3 各種非破壊評価技術の船舶検査への適用に関する検討

船舶検査に必要な技術を、腐食部材の厚さ計測技術、部材レベルのき裂探査技術、構造レベルのき裂探査技術、船舶形状計測技術、船体剛性評価技術に分類し、それらについての各種非破壊評価技術（超音波および電磁誘導法、電気抵抗法、サーモグラフィー法、振動解析＋ホログラフィー法、光波測距法、GPS計測法）の誤差、適用性を検討した。

4. 船舶検査現場調査の詳細

4.1 造船所における船舶検査・修繕等に関するヒヤリング

4.1.1 現場調査及び検査官ヒヤリング

(1) 検査一般（内検について）

- ・タンク1つにかけられる検査時間は6万トン級タンカーで15分程度である。
- ・タンク上部の検査は通常目視検査のみ。
- ・検査員は1船につき1人、その他に船主と造船所関係者が同行する。
- ・実際の検査では、検査員の経験や感覚に頼る部分が多いと思われる。
- ・トータルコストを考慮した際、き裂より腐食の方が問題は大きいと考える。
- ・LPG船の検査ではアンモニアリークテストを行っている。

(2) き裂検出

- ・長さ5mm程度のき裂であれば目視でも見えることがある。
- ・き裂の発生しやすい場所は経験から判断している。

- ・発見したき裂については必ず何らかの補修をする。
- ・塗膜の割れとき裂は塗装を剥がしてみないと分からない場合がある。

(3) 板厚測定

- ・船舶を管理する上では、局所的な腐食よりも船体全体の強度に関わる全体的な板厚減少の方が重要な問題であると認識している。
- ・板厚計測は5年に1回実施し、検査計画書にある位置の厚さを計測する。
- ・内部の構造部材では、板厚測定に外形パスを使用している。
- ・最近では、以前に比べて船の状態が良いので、鋼板に穴をあけて板厚を測定することは少なく、ほとんどが超音波による厚さ測定である。
- ・板厚測定は200～1000点ほど行うため、超音波厚さ計を使用するための前処理(グラインダ作業)が大変である。
- ・板厚測定は、通常、船主が測定業者を手配する。

(4) X線による検査

- ・鋼板の切り替えを行った後に必ず溶接部の欠陥検査としてX線による検査を行っている。
- ・ブローホール等の体積のある欠陥にはX線検査は有効である(き裂のようなクリティカルなものは超音波で調査する)。
- ・X線検査の利点としては、超音波と違って記録に残すことができるため、あとで結果を船主等に見せられることが挙げられる(超音波でも同様に記録に残してあとから第三者が客観的に見られるような方法があるという)。

(5) ハンマリング

- ・ハンマリングで板厚は分からないと思われる(腐食の程度が著しい場合は分かるかもしれないが、あまりに著しいものだとハンマリングすらできない)。
- ・テストハンマーの役割は錆落としが主である。

(6) 検査現場から研究開発への要望

- ・板厚測定はグラインダ作業が大変であり、錆の上から板厚測定ができれば非常に良い(要求される精度としては板厚20mmに対して誤差0.5mm程度)。
- ・塗料の劣化および腐食の状態を定量化して測定・判断できる手法があると良い。

4.2 海運支局(JG)の検査現場調査及び船舶検査官へのヒアリング

4.2.1 対象船舶

- (1) ケミカルタンカー(497トン)、船齢8年(Photo.1)
検査項目： 外板、タンク、機関室、エンジンルーム

等外観検査(定期検査)

- (2) カーフェリー(693トン)、船齢16年(Photo.2)

検査項目： 船体板厚測定、船体外板、タンク、機関室外観検査、救命具等検査(定期検査)

4.2.2 現場調査詳細

(1) 外観検査

<ケミカルタンカーのタンク内およびチェンロッカー外観検査>

- ・COT(カゴオイルタンク)内の状態は非常に良く、ごく少数の初期腐食部を発見(今後進展するかどうかは不明。Photo.3)したが、ほぼ一見しただけで問題無しと判断した。検査官及び造船所の判断では、本船は船齢8年とまだ新しく、また、外観の状況から船主の管理が良いと判断できたことからタンク内外観検査は詳細には行わなかった(タンク2～3ヶ所を抽出して一見したのみ)。

<カーフェリーの外板外観検査>

- ・船底に、海難によると思われる変形(凹部)があったが、骨までは変形していないので、強度的な問題はなく切り替えの必要はないと判断した。
- ・船首部に、衝突によると思われる変形、き裂及び座屈が見つかった(この部分からは水が滴っており、外見からもき裂が存在する可能性を示唆していた。また、座屈した骨は切り替えが必要と判断された。Photo.4)。

(2) ハンマリング

- ・錆落としおよび骨の間隔を調べるのにハンマーを使用した。その際、ハンマリング音の違いにより骨の位置が分かることを確認した。また、船底外板と船側外板との間で、板厚の違いによるハンマリング音の差が確認された。

(3) 超音波による板厚測定

- ・φ50mm程度の範囲をあらかじめグラインダ掛けして表面を平滑にしてから測定した。
- ・デジタル超音波厚さ計を使用した。
- ・測定結果は0.2～0.3mm程度の衰耗量であった。

(4) タンク内外観検査

- ・塗料(水セメント)が所々はがれていた。また、船底タンクには1～2cm程度ビルジが溜まっていた。
- ・船底は狭く、這って入らなくてはならず、検査が行いにくい環境であった。
- ・水・油の溜まりやすい所、高温になる所(曝露甲板の裏側又はその近傍。Photo.5)等、同一タンク内でも条件によって腐食の程度に著しい差があることを確認したが、本船程度の腐食状況であれば切り替えの必要は無いと判断された。

(5) エンジンルーム船底外観検査

- ・スラッジが 2cm 程度溜まっていた。
- ・通常スラッジ下の腐食は少ないが、ボルト等異種金属が落ちている所に局部的な腐食があった。

(6) その他（救命具等の確認、主機、推進軸等分解・検査）

- ・救命具の数量、機関室ドアの作動テストを行った。
- ・推進軸は蛍光磁粉探傷でき裂の探査を行った。その際、推進軸の摺動部に鋳物の巣のような穴が数カ所（Photo.6）見られたが、埋めれば使用可能と判断した。

4.2.3 船舶検査官へのヒアリング調査

(1) 検査一般

- ・定期検査では、エンジンおよび船体の検査をそれぞれ 2 回に分けて行うのが一般的（1 回につき半日程度が必要）である。
- ・船体とエンジンの検査を同時進行で行わなければならない現状では、検査期間中はエンジンを分解して整備しているため、エンジンルームの床下は分解したエンジンの部品により十分に検査できないことが多い。
- ・一般に、船主は、密閉した部分を検査時にのみ開放するという場合が多い。
- ・検査では、時間的な問題から 2 ～ 3 のタンクを抽出して検査しているのが実態である。
- ・船主の考え方によるメンテナンスの差は大きい。

(2) 腐食

- ・最近では、自然衰耗が原因で検査に不合格となる船は少ない（自然衰耗・き裂による損傷より海難による損傷の方が多し）。
- ・タールエポキシの普及により、内部腐食の著しい船は少なくなった。
- ・板厚衰耗が理由で鋼板を切り替える船は少なくなった。
- ・最近では、全体にわたって 30% 以上も衰耗しているような管理の劣悪な船は見られなくなった（10 年程前までは見られた）。
- ・塗装が良ければ基本的に腐食衰耗は少ないので、塗装の状態から腐食の状況を判断できる。
- ・ホールドにブルドーザー等が乗る船は、その部分の腐食がひどくなりやすい。
- ・C 重油等を加熱するタンカーでは二重底のトップが腐食しやすい（腐食には温度の影響が大きい）。
- ・セメントを運ぶ船の腐食が激しい（二重底を交換することがある）。
- ・ビルジがたまったままの場所は他に比べて腐食が進行する。
- ・船首部、船尾部の電食は、防食用亜鉛の不足によることが多い。

- ・スラッジの下に（特にボルト等の異種金属があると）局部腐食が隠れていることがある。
- ・機関室内の電食は、異種金属、帯電漏水によるものが多い。

(3) 変形

- ・船首部船底のパンチング変形は近海船に多く見られる。
- ・貨物船で、隔壁数が少ないために変形しハッチが閉じないなどの不具合が見つかることがある。

(4) き裂検出

- ・き裂は J G 船（全長 50 ～ 60m くらいの船）にはあまり見つからない（強度的な問題は 100m 程度から発生するのか、このレベルになるとき裂は見つかる）。

(5) ハンマリング

- ・ハンマリング音のみによる絶対的な板厚の推定は不可能と思われる。
- ・ハンマリングにより骨の位置等は分かる。
- ・ハンマーの柄の長さをものさし代わりに使うことがある。
- ・音以外に、叩いた時の“弾き（反発）”の感覚は一つの判断要素と思われる。

(6) 外観検査における経験的な判断要素および基準

(a) 変形について

- ・外板の局部的な変形（板厚の 1.5 ～ 2.0 倍程度まで）は修理の必要は無いと判断している。ただし、内構材の変形を伴う広範囲な変形（フレームスペースを超えるもの等）は修理が必要と判断している。
- ・変形（ホギング・サギング）については、老齢船では、記録等で経緯を見て判断する事が重要である。また、建造造船所による癖（精度の差等）もあり、それも考慮する必要がある。

(b) 電食について

- ・外舷外板部の点食は、広範囲にわたり進行が早くなることもあるので、原因究明を含め、早急に処置する方針をとる。
- ・バラストタンク、スロップタンク等の電食は、異種金属、洗浄水の化学変化等により急激に進行するため注意を要する。

(c) 破口等について

- ・小破口は、上架時に乾燥しにくいことから判明することがある。また、水圧試験をすれば一目瞭然である。

(d) 自然衰耗について

- ・外板 10mm 以下は 30%、20mm 以上は 25% が衰耗限界の

目安。

- ・ダブリング補修は、衰耗した板に歪みを生じさせ、亀裂が生じることがある。
- ・内検による衰耗の確認はFPT、APT及び中央部タンクを重点的に行う。

(7)検査現場から研究開発への要望等

- ・漁船等の小型の船は、元々検査を考慮した設計になっていないため、検査官が入れない所があり、外からそのような場所を検査できる方法(ファイバースコープ、内検用ロボット等)があると良い。
- ・圧力試験及び板厚計測に関する研究。

(8)まとめ

- ・現在の船舶検査の実状として、定められた判断基準(省令、告示)はあるものの、検査期間の短縮化(機関の検査との同時進行化)等の理由から、そのとおりに船全体をくまなく検査することは難しく、実際には検査官の経験に基づく判断から損傷しやすい場所を抽出し、その部分の状態から船全体の安全性を判断している。その結果、経験の少ない若い検査官ほど判断が過度に厳しくなる傾向がある。
- ・ハンマリング音のみから絶対的な板厚を推定することは困難であるが、相対的に骨のある位置を特定したり、

鋼板の状態の変化を検知することは可能である。また、ハンマリングにおいて“弾き(反発力)”の感覚も重要な判断要素である。しかし、結局のところ、現状では、正確な板厚は超音波計測等でなければ分からないのでハンマリングで疑わしいと感じた所は超音波等で計測する以外に無い。

・J Gの検査対象となる1000ト未満の船舶の中には、検査を考慮した設計がなされていないものも多く、人間が検査に入れないような場所があることから、ファイバースコープや内検用ロボットの開発は有効であろう。

・同一タンク内でも温度、流れ等の条件の違いで腐食の程度が著しく異なることがあり、一律な判断基準の設定は難しく、個々のケースで判断するしかないのが現状である。

4.3 海事協会における船舶検査現場の調査および船舶検査員へのヒアリング

4.3.1 検査対象船舶

(1)チップキャリア(38,000DWT)船齢12年(Photo.7)

検査項目: 船底検査、ホールド検査、ホールド内の板厚測定



Photo.1 チップキャリア(船齢12年)



Photo.2 カーフェリー(船齢16年)



Photo.3 ケミカルタンカーのCOT内部に見られた初期の腐食



Photo.4 座屈した内部構造部材



Photo.5 暴露甲板下の腐食



Photo.6 推進軸に見つかった欠陥

(2)バルクキャリア 船齢3年 (Photo.8)

検査項目：タンク内修繕部分の仕上がり検査

4.3.2 現場調査の詳細

(1)外観検査 - チップキャリア

- ・スラミングによる船首部船底の変形が発見されたが、構造強度上問題がないと判断して修繕はしなかった。
- ・キールの根本はき裂が発生しやすいので目視およびハンマリングで他よりも入念に調べた。
- ・船尾に小さいへこみがあったが修繕の必要なしと判断。ただし、鋭角的なへこみの場合は注意が必要とのこと。
- ・ビルジホッパー斜板と内底板のつなぎ目部分にクラックが発生していた (Photo.9,10)。近傍に、以前切り替えた部分があることから、その際、切り替えを行っていない部分に今回き裂が発生したと考えられる。
- ・ハッチエンドはクラックが出やすいところであり他よりも入念に調べた。き裂発生を抑えるためにあらかじめこの部分だけ鋼材をB級鋼に変えている場合がある。

(2)ホールド内の板厚測定 - チップキャリア

<測定方法の詳細>

- ・接触媒質：ソニコート
- ・グラインダーは使用せず、ハンマーで測定面をならしただけの状態で測定 (Photo.11)
- ・アナログ超音波探傷器使用
- ・多重エコー (B1- B2方式) により測定
- ・探触子：φ 20mm、周波数：5MHz
- ・測定点数は約 1000 点

(3)外観検査 - バルクキャリア

- ・トップサイドタンク構造材のバックリング部および接触による外板損傷部の切り替えについて、それらの仕上がりを目視で検査した。
- ・外板切り替え部は、目視検査の後、圧力試験 (圧力をかけて外側から石鹼水で漏れを確認する方法、

Photo.12)を行っていた。コーナー部は、圧力試験の後、さらにX線で検査する予定である。

4.3.3 船舶検査員へのヒアリング概要

(1)検査一般

- ・事務手続きに時間がかかるのが現状の検査において問題となっている。特にアフロート (年次検査等において入渠させずに浮いた状態で行う検査) の場合、現場での検査時間が短くなり、判断が甘くなる可能性がある。
- ・タンクに入って検査するのは定期検査時のみのことが多い。
- ・検査するポイントの選定が非常に重要である。
- ・タンク内の目視検査において、特に、大きな曲がりを見つけるにためにはタンク全体を照らす光が必要である。しかし、現状では、検査するタンク全部について十分な照明を設置して検査することは難しく、過去のデータから危ないところのみを重点的に見ることで対応している。特に、塗料がタールエポキシの場合は暗くて見にくい。

(2)き裂検出

- ・日本の船社は管理体制が良いため、あらかじめ本船側でき裂を発見していることが多く、検査時に新たにき裂が見つかる場合はあまり多くない。
- ・染色探傷はほとんどやっていない。外観検査で疑わしい場合のみ行う。

(3)板厚測定

- ・板厚測定業者は、NK承認業者の中から船社が指定するのが一般的である。
- ・ナホトカ号のような腐食の進行した船は特殊であり、現在は、板厚測定の際に塗料をはがさないで行うことが多い。
- ・外国の船社 (中国、台湾等) の場合、レコードと実際の板厚とが異なる場合がある。
- ・外国船等で、明らかに板厚データをねつ造しているような危険な船をアフロートで検査する場合、誤差が1～

2mmあっても、錆の上から削ることなしに板厚測定できる方法があれば、修繕の説得をする上で有効であると思われる。この場合、ハンマリング音だけでは説得力がなく、数値で示せることが重要である。

(4)ハンマリング

- ・クラックがある場合、ハンマリング音に“びびり”がある。
- ・ハンマリングにより、骨の位置及びおおよその厚さが分かる（厚い - 高音、薄い - 低音）。

(5)検査現場から研究開発への要望

- ・検査を補助するロボットがあると良い。現状では、高所の検査には、チリピッカー（高所作業車）または足場を組んで対応しているが、これらには手間と費用を要する問題点がある。また、緩やかな変形、錆の下の状態等、遠隔地からモニターを見るだけでは分からないことも多く、結局は人が実際に行ってみないと判断できない部分が多いと考えられ、その点が、検査補助ロボットの開発における難点ではないかと考えられる（実際に、ダイバーズインスペクションにおいて、潜ったダイバーでな

ければ分からない情報が多いことを経験している）。

5. 船舶検査への非破壊検査技術の適用に関する調査

5.1 はじめに

近年増加した海難事故やPSCへ対応するため、運用中の船舶の検査に関して、より効率的で、より定量的あるいは確実な検査の実施が要望されている。そのため検査の高度化の一環として、船舶検査への適用を目的とした非破壊検査技術の積極的な研究開発が求められるようになった。

しかし、船舶検査の分野は、著しい腐食、船体の巨大さ等の船舶特有の事情があり非破壊検査技術の極めて適用しにくい環境にあることから、現在、船舶検査への非破壊検査技術の適用はX線による溶接欠陥検出、超音波による板厚測定等の限られたものになっている。また、研究開発も積極的に行われて来なかったのが実状である。

ここでは、船舶検査の目的、環境と非破壊検査技術の機能、特徴を考慮した上で、船舶検査への非破壊検査技



Photo.7 チップキャリア(船齢12年)



Photo.8 バルクキャリア(船齢3年)



Photo.9 カーゴホールド内の亀裂 その1



Photo.10 カーゴホールド内の亀裂 その2



Photo.11 板厚測定

術の適用分野および開発努力すべき研究課題について検討した。

5.2 船舶検査における非破壊検査の適用性調査

長期間運用している船体構造を対象とした非破壊検査技術の必要機能を以下の通りと考える。

- ・大きな船体構造を対象とすることから高効率の検査あるいは大面積をカバーする機能
- ・構造部材の腐食、塗膜の浮上り、ヘドロ堆積等の悪い検査環境下でも適用できる機能
- ・現在の検査業務の支援を考えた場合には、検査官に負担を与えない携帯性、簡便性
- ・個々の微小な劣化損傷を問題とせず、比較的大きな劣化損傷を確実に検出する機能

以上は必ずしも同時に満たす必要はないが、これらは船体に適用するための非破壊評価技術開発の基本要件と考える。

一方、船体の劣化状態を的確に把握するためには、評価部位の大きさに応じて以下の評価項目について情報を得ることが重要である。

- ・部材レベル : 疲労劣化、腐食衰耗、亀裂、塗膜劣化
- ・構造レベル : 亀裂、座屈、塑性変形
- ・船舶全体レベル : 変形、剛性

部材レベル及び構造レベルの評価項目は、現状の船舶検査においても重要項目になっているが、専ら目視検査と超音波厚さ測定に依存している。これらについては、新しい評価技術の検討が求められている。船舶全体レベルの評価項目は、従来の船舶検査にはないが、船体の腐食衰耗に伴う板厚減少の結果がこれらに反映する。船体劣化の評価上、重要な情報を提供できる。



Photo.12 圧力試験

これらの中で、船舶健全性を評価するために特に重要な項目を当面の課題として挙げると以下のものが考えられる。

(1) 部材レベル

- a. 腐食部材の板厚計測 腐食面の凹凸に左右されない測定方法
- b. 部材レベルの亀裂探査 検査官が目視で行う亀裂探査、特に塗膜下、腐食生成物下の亀裂探査を支援する技術

(2) 構造レベル

- a. 構造レベルの亀裂探査 広範囲を効率的にカバーできる亀裂探査

(3) 船舶全体レベル

- a. 船体形状計測 運用中に生じる船体構造の変形を測定し、船体構造の健全性評価の目安とする。定期検査時にドライドックで船体構造の寸法を精密計測する。
- b. 船体の剛性評価 載荷に伴う船体構造の弾性変形を計測し、船体の剛性評価を行う。剛性から船体の健全性評価を行う。

5.3 船舶検査を目的とした非破壊検査技術の研究課題

(1) 腐食部材の板厚計測技術

a. 超音波法

表面が滑らかな平板に対しては、十分な精度で超音波厚さ計による板厚計測が可能である。腐食部材に対しては、表面の凹凸による超音波エコー高さの低下、ノイズレベルの上昇により計測困難となる。超音波周波数が高いほど、センサの径が大きいほど、表面性状の悪化にともなう困難さが増大するので、超音波周波数の低下、接触部の面積を減じる(Fig.1参照)等の工夫による適用性向上が期待される¹⁾。10 ~ 20 mmの板厚計測では、多重

反射の基本周波数も100kHz～500kHzであるので原理的にはこのような周波数レンジによる計測も検討する価値があると思われる。

また、高粘度、高密度の接触媒質によって凹凸面における適用性と精度が向上する傾向があるので、実際の腐食部材を対象に、探触子と接触媒質の最適化を検討することも重要である。

また、電磁的に超音波の発生検出を行う電磁超音波探触子²⁾は、接触媒質が不要なため、凹凸のある表面における超音波計測に適している(Fig.2参照)。電磁超音波探触子は大型であること、従来からの圧電素子を利用した超音波探触子よりも超音波感度の低い等の欠点もあるが、これらを克服する研究が望まれる。

b. 電磁誘導法

電磁誘導法は、交流磁場に伴って導電性材料中に生じる渦電流が亀裂等によって遮られた時の変化を検出する。強磁性材料である鉄鋼材料では、磁束が深くまで浸透しないため、これまで適用されてなかったが、近年リモートフィールド法(誘導コイルによる直接磁界が十分小さいところで材料中を伝わる間接磁界を計測する方法)によって、鉄製配管の検査が可能になってきた。同じ原理を板厚測定に適用するには、磁化周波数を下げて磁化深さを増すと共に検出感度向上が必要となる。本方法は表面性状の影響が少ないと期待される。

また、鋼板を磁気飽和させたときには、変分透磁率($\delta B / \delta H$)がほとんど真空と同じになるため、電磁誘導法の適用が容易になる。ただし、問題点として、磁気飽和用のコイルと電流源が別途必要になる。

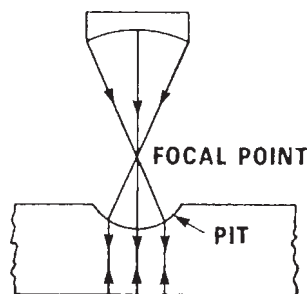


Fig.1 腐食部材に対する集束探触子の適用性¹⁾

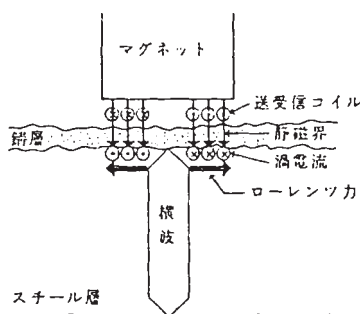


Fig.2 横波電磁超音波の原理²⁾

c. 電気抵抗法

導体に電流を流した時の電位差を測定し、板厚の評価を行う方法である。本方法は、鋼板に電流を流すための電極と電位差を検出するための電極が必要であり³⁾、腐食部材面とオーミックな接触を実現するため、多少の腐食面の調整が必要である。オーミックな接触が比較的容易に実現出来るならば、扱い易い板厚計測手法として開発できると思われる。

(2)部材レベルの亀裂探査技術

a. 電気抵抗法

腐食生成物やヘドロ等によって亀裂の確認が困難な場合に、電気抵抗法による亀裂探査法³⁾が期待される(Fig.3参照)。技術的困難さは前項の<電気抵抗法>と同じであるが、比較的扱い易い検査機器にできる可能性がある。

b. 表面SH波法⁴⁾

表面SH波は、振動方向が板表面に平行で、表面に沿って伝搬する横波超音波である。表面の凹凸による減衰が少なく、遠距離まで伝搬する性質がある。たとえば、周波数0.5MHz振動子寸法20mm×20mmの探触子で、5m先の長さ22mm、深さ2mmの表面亀裂が検出できる。遠距離まで伝搬する性質から広い範囲を調べることができ、また、塗膜下の亀裂の検出に有効と思われる。ただし、超音波が亀裂に斜め入射した場合には、亀裂の検出感度が下がるので、あらかじめ亀裂の発生が予想できる部位の検査に適用可能と考えられる。

(3)構造レベルの亀裂探査技術

a. サーマグラフィ法⁵⁾

現在、物体表面からの放射赤外線を検出し、温度分布像を表示するサーモグラフィ計測が容易になった。これによって、±0.1の温度分解能の画像が得られる。亀裂部では周囲の平面部とは赤外線放射率が異なるので、亀裂探査が可能になる。特に、平板裏面から加熱し熱流束を与えた場合には、検出感度が向上することが知られている(Fig.4参照)。金属表面上で周囲からの反射成分がない場合には、0.2W×5L×0.1Dのスリット欠陥検出ができる。放射率εが1の場合には、完全黒体で表面からの放射赤外成分だけであるが、1以下の普通の

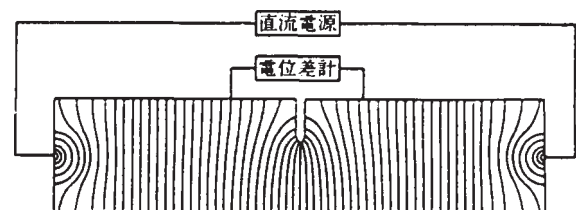


Fig.3 電気抵抗法の原理³⁾

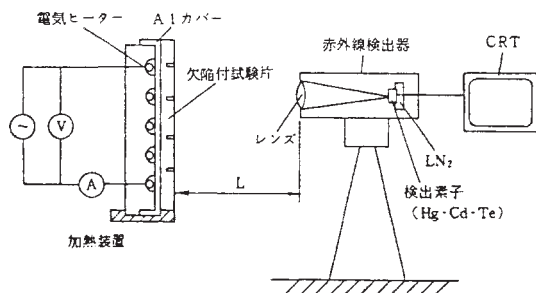


Fig. 4 サーモグラフィーによる欠陥検出⁴⁾

表面では、放射成分が減少し、周囲からの反射成分が増し、測定が困難となる。特に、表面が常温の時には周囲の写り込みが激しくなる。従って、本手法によって亀裂探査を行うには、検査対象表面温度を周囲の温度より十分高くするとともに、加熱用の熱源は対象部材の裏面に位置させる等の工夫が必要となる。

本手法は、比較的広範囲な平板を対象とし、背面に加熱用熱源が設置できる時には有効な亀裂探査手法として期待される。

b. 振動解析 + ホログラフィ法^{6,7)}

物を叩いたときの音から材料の様子を探ることは、だれでも最初にすることである。マンホール鉄蓋の検査等に有効なことが報告されている。亀裂の存在によって、部材の共振周波数や振動モードが変化するので、これを検出して亀裂探査を行う。しかし、船舶構造部材では、周囲の拘束条件や亀裂発生場所が検査箇所ごとに異なるので、あらかじめ想定される条件下での部材の応答を求めておく必要がある。振動検出センサは、加速度計が一般的であるが、取付取外しの手間を省くため、高周波マイクロホン等の非接触センサを検討する必要がある。

また、亀裂の発生場所や腐食等で板厚が一定でない等、拘束条件が特定できない場合には、ホログラフィ法 (Fig. 5、6参照) によって振動の状態を面で捕らえることが望まれる。ホログラフィの適用は、レーザー装置や反射鏡等の光学計が必要であり必ずしも簡便ではないので、装置の小型システム化を図っていくことが望まれる。

c. 音響インテンシティ法⁸⁾

複数のマイクロフォンによる音圧波形から音響放射マップを作成する音響インテンシティ法は、構造物の振動特性を非接触でとらえる可能性がある。構造物の骨部位は振動が小さく、亀裂周囲では振動が大きいため、ハンマで励起した鋼板振動の2次元マップから亀裂の検出ができる可能性がある。音響インテンシティ法の装置は比較的小型にできるので、船舶検査に適した検査法としてその有効性に関する実験的検討が望まれる。

(4) 船舶形状計測技術

a. 光波測距法⁹⁾

現在、測量用の光波測距儀でレンジ0.2 ~ 60000m、精度 $\pm 1 \sim 5\text{mm} + 1\text{ppm}$ のものが市販されている。これらは目標ターゲットとして反射鏡を必要とするが、強い強度のレーザー光を用いることにより、反射鏡不要で計測できるシステムを構築できると考えられる。また、角度の測定では1秒程度の精度を有する機器 (セオドライトと呼ぶ) が市販されている。Table 1 参照。

ドック側面を移動する機構とこれらの機器を組み合わせることにより、船側、船底の形状を3次的にミリメートル級の精度で測定する。定期検査毎に測定しておくことにより、船舶構造の変形を定量的に把握することができると考えられる。

(5) 船体剛性評価技術

a. GPS 測距法¹⁰⁾

一般に1台のGPS受信機を用いた航法用測位では10m以上の誤差があるが、測量用では2台のGPS受信機を用いて相対位置を3次元空間上で1ppmの精度で決定する測地干渉法 (Fig. 7 参照) がある。2台のGPS受信機で同時にそれぞれ4個のGPS衛星の電波を受信する。2台のGPS受信機間の時計誤差の修正も行っており精度を高めている。

本手法は、光波測距と異なり、2台のGPS受信機が見通せなくても適用できる。そのため、船橋に邪魔されることなく船首と船尾の間で測距ができる。このような測

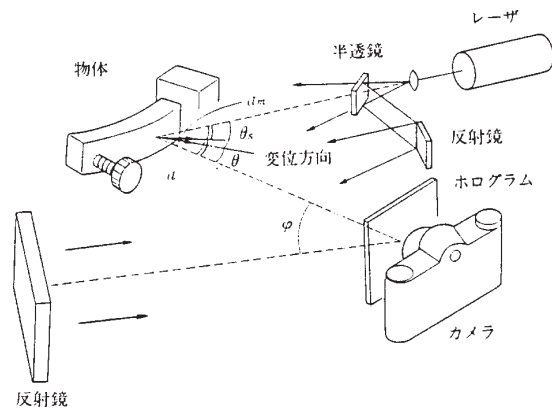


Fig. 5 ホログラフィの原理⁵⁾

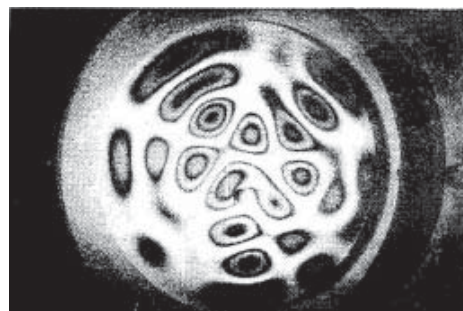


Fig. 6 ホログラフィによる振動パターンの観測例⁶⁾

距装置を船舶上に数台、陸上に1台設置してから、載荷に伴う船舶の沈み込み量と船舶全体の変形挙動を観測すれば、船舶の健全性に関する重要なデータ得られると思われる。

6. まとめ

船舶検査の現場では、大きくて複雑な船体構造を決められた期間内で検査し、その健全性や修理についての的確な判断が検査者に求められる。検査者が利用できるデータは限られた部材の目視と超音波厚さ測定の結果であり、船舶の状態を把握するためのデータとして十分でない。検査者は、過去の検査履歴データも参照し、経験で補っているのが現状である。今後検査の適用のあり方と検査手法の両面の検討が必要と思われる。特に、サブスタンダード船を見分ける検査技術や、検査のコストや時間を節約できる検査をさらに考えていく必要がある。

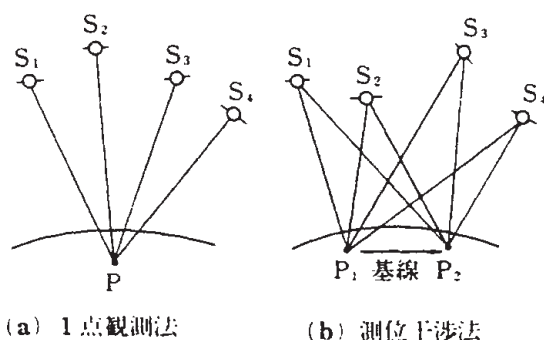


Fig.7 GPSによる測位¹⁰⁾

参考文献

- 1.A.Singhほか："Automated Inspection of corroded steel structures", Materials evaluation(1983) 41-5, pp568-570
2. 藤懸ほか：横波電磁超音波による腐食残存肉厚の測定，非破壊検査，34-9A, pp668-669
3. 新非破壊検査便覧，日刊工業新聞社，pp369
4. 横野ほか：表面S H波による表面及び表面近傍のきずの検出とその定量評価，非破壊検査，45-2, pp136-144(1996)
5. 岡本ほか：赤外線放射温度計による欠陥の検出(2) 表面線状欠陥，非破壊検査，38-6, pp525-530
6. 新非破壊検査便覧，pp844
7. 新非破壊検査便覧，pp846
8. 鈴木：音響インテンシティーによる音源探査，非破壊検査，47-7, pp475-479(1998)
9. 土木工学ハンドブック，第4版技法出版，pp756
10. 土木工学ハンドブック，第4版技法出版，pp762

Table 1 トータルステーションの性能⁹⁾

機種	最小測定値及び測距精度	測定可能距離(mm)	光源	変調周波数	電源電圧 消費電力	質量 (Kg)
TC2000 (ウルト)	(測角) 0.1" (測距) 1mm 2mm+2ppm	5000	GaAs発光ダイ オード	4.87MHz	DC12V 5W	9.6
ELTA2 (カルツァイス)	(測角)0.6" (測距) 1mm ± 2mm+10-5D	5000	GaAs	30kHz, 300kHz, 15MHz	DC7.2V 5W	
DTM-1 (ニコン)	(測角)1" (測距) 1mm ± (5mm+5ppm)	2300	GaAs	15MHz帯 3波	DC8.4V 7W	8.5
DTM-10 (ニコン)	(測角)10" (測距) 1mm ± (5mm+5ppm)	2300	GaAs	15MHz帯 3波	DC8.4V 6W	6.4
SET2 (測機舎)	(測角)1" (測距) 1mm ± (5mm+2ppm)	3100 (3素子)	赤外線 発光ダイオード			
SET2EX (測機舎)	(測角)1" (測距) 1mm ± (5mm+2ppm)	3100 (3素子)	赤外線 発光ダイオード		DC6V	7.6
ET-2 (東京光学)	(測角)0.5" (測距) 1mm ± (5mm+3ppm)	3000	赤外線 発光ダイオード	15MHz, 75kHz, 72kHz	DC8.4V 9W	8.5