

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成24年 6月15日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560840

研究課題名（和文） 圧電素子を用いた疲労損傷モニタリング技術の開発

研究課題名（英文） Development of a monitoring method for fatigue damage using piezoelectric element

研究代表者

丹羽 敏男 (NIWA TOSHIO)

独立行政法人海上技術安全研究所

研究者番号：10208267

研究成果の概要（和文）：

船体の隅肉溶接部近傍に発生する疲労き裂をモニタリングする超音波送受信システムを構築した。送信用と受信用の探触子を配置し、挟まれた領域で発生伝搬する疲労き裂をモニタリングできる。透過波と反射波計測を組み合わせることで、信頼性が向上する。

船体の実疲労き裂では、き裂部に作用する船体運動による変動応力が存在するため、モニタリング計測のタイミングが重要であることが分かった。十分な精度を得るためには、疲労き裂が完全に開口する実働応力振幅の高応力振幅側での計測が必要である。

研究成果の概要（英文）：

This paper describes a development of ultrasonic monitoring technique applied for through thickness fatigue cracks neighboring fillet weld parts. A combination of transmitted wave measurement and reflected wave measurement was found to be useful in quantitative detection of the fatigue crack. In case of 100mm separation between transmitting probe and receiving probe, our method obtains 40mm as an effective area for the quantitative detection. In other hand, fatigue crack bring about an underestimation of the cracks under lower stress amplitude. Therefore, it is important for a timing optimization of data acquisition by a synchronization with ship movement.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：船舶検査, モニタリング, 超音波, 疲労き裂, 応力, 隅肉溶接

1. 研究開始当初の背景

国際条約などによる船舶への安全規制の強化に伴い、船舶運航に対する社会的コストの増加が懸念され、船舶の安全性向上と社会的な負担のバランス確保が求められている。両者を整合化した安全規制体系を主導していくためには、安全性を担保した上での保守・メンテナンス費用の削減、検査手法・基準の合理化の研究が重要である。

2. 研究の目的

船体に発生する疲労き裂は、その環境などの要因により目視で見えない事も多く、船舶の安全向上に関する課題となっている。そのため、運行履歴や検査記録、構造図面などから疲労き裂の発生予想部位を特定し、適切に監視することにより補修等の維持管理を最適化することが考えられている。船体の疲労き裂は隅肉溶接部廻りなどの応力集中部で発生するので、当該部位における疲労き裂の伝播挙動をモニタできる計測方法の開発が必要とされる。本研究では、貫通き裂を対

象として、超音波計測技術を利用した手法について、隅肉部への適用性や船体荷重の及ぼす影響などを調べ、モニタリング技法として確立するための条件を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 計測システムの整備

送信センサで発生させた超音波を受信センサで検出し、送受信センサ間での亀裂の発生伝搬に関する情報をモニタする計測システムを構築した。

送信センサの励振は電力増幅したファンクションジェネレータの信号を用いた。信号の波形はローパスフィルタによって周波数帯域を狭くして、Lamb 波モードの単純化を図った。また、適切な計測条件を検討するために、周波数を自由に換えられる設定とした。

受信センサは直接デジタルオシロに接続し、デジタル信号に変換してパソコンに取り込んだ。

(2) モニタリング方法

亀裂の発生・伝搬が予想される部位を挟んで送信用と受信用センサを配置し、受信信号の変化から亀裂挙動をモニタする。送信及び受信用センサとしては、Lamb 波を対象とした圧電素子を用いる方法と、特定の超音波モードが励起できる探触子を用いる方法を検討した。平坦部における伝搬特性と並んで、隅肉溶接部近傍での疲労亀裂の評価が重要であるため、隅肉溶接部を透過する超音波の電波特性を調べた。なお、特定の超音波モードとしては、横波 90 度 (SH 波)、横波 70 度 (SV 波)、縦波 90 度 (L 波)、表面波 (R 波) の 4 種を検討した。

(3) 評価方法

① 貫通スリットによる評価

貫通スリット付平板試験片及び隅肉近傍に貫通スリットを有する試験片を用いて、スリットに対する探査範囲や、検出能力、定量評価能力を調べた。センサによる評価の性質や船体への適用性などの性質を検討した。

② 疲労亀裂への適用性の評価

船体運動によって、モニタリング中の疲労亀裂に作用する応力は常に変動していると考えられる。応力は、亀裂の開閉挙動に密接に関連することにより、モニタリングの能力に大きな影響を及ぼすと考えられる。

このような効果を解明し、モニタリングの適用方法を適正化するための情報を解明する。

4. 研究成果

(1) Lamb 波によるモニタリング方法

鋼板上に設置した圧電素子を適切な周波

数で励振することで発生する Lamb 波は、計測系が単純化するため、モニタリングに適した性質をもつ。また、Lamb 波の周波数は低く伝搬損失が少ないため、広範囲のモニタリングが期待される。

そこで、板厚 1mm、2mm、5mm、10mm 鋼板 (500mm 角) 上で二つの圧電素子 (PZT: 0.5T*1*10mm) を接触媒質を介して接触させ、Lamb 波の発生検出実験を実施した。励振波形の周波数は 50kHz とした。板厚と振幅の関係をまとめると図 1 が得られた。板厚が大きいと急速に振幅が低下する傾向が見られた。大きな板厚では多様な次数の Lamb 波が存在するため、励振信号のエネルギーが分散し、受信波の振幅が低下したと考えられた。また、大きな板厚では Lamb 波の指向性も急速に低下していることが観測された。図 2 は、センサ間隔を伝搬時間で除算して得た伝搬速度と板厚の関係を示す。実線は理論解である。板厚 1mm 及び 2mm では理論値に近く Lamb 波伝搬モードは a₀ モードと思われた。5mm は振幅が小さいため、測定値が正確でない。

一方、励振周波数を上げていくと、板厚 10mm でも十分な SN 比で受信波を検出できる場合があった。センサ間隔を 50mm~250mm の計測で 1MHz 励振による伝搬速度が 5600m/s 程度の波動が観測された。波形はそれほど複雑でなく、多様な次数の Lamb 波 (板厚 10mm 周波数 1MHz に場合) の伝搬ではないと考えられた。通常の探触子で発生する超音波 (縦波) と考えられた。

以上のことから、Lamb 波によるモニタリングの構築は困難と考えられたので、以降は超音波探触子を用いた方法を検討した。

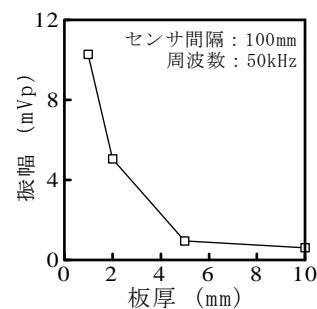


図 1 板厚とLamb波振幅の関係

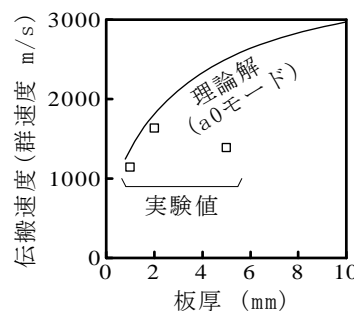


図 2 板厚とLamb波伝搬速度の関係

(2) 探触子を用いたモニタリング方法

疲労き裂の超音波計測に与える隅肉溶接の影響を調べるため、スリットを導入した試験片(図3参照)を準備し、超音波探触子(以下、探触子と記す)2個を配置して、透過波を計測する。

超音波の励振は平滑化した1サイクルのサイン波を入力した電力増幅器によった。受信は探触子を直接デジタルオシロに接続して行った。反射波の測定は、励振波と分離する回路を用いて1探触子を送受信として適宜行った。

探触子としては、波のモードが異なる4種を(表1参照)用いた。探査範囲を広く、減衰を少なくするため、周波数は2MHz、振動子寸法は、10mm(縦)×4mm(横)を採用した。計算で求めたビームの広がり角を表に示した。

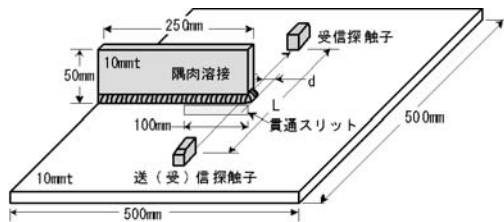


図3 隅肉溶接試験体(スリット付)

表1 探触子

Probe	Nominal Frequency	Ultrasonic Mode	Velocity	Refraction angle	3dB angle of beam spread
	(MHz)				
2K10x4LA90	2	Longitudinal	5900	90	19.1
2Z10x4HA90	2	Shear(SH)	3230	90	10.3
2Z10x4R	2	Rayleigh	2980	90	9.5
2Z10x4A70	2	Shear(SV)	3230	70	10.3

①貫通スリットによる評価

隅肉と平行に探触子対を移動させて測定した透過波と反射波の振幅測定例(2Z10x4HA90)を図4及び図5に示した。○は隅肉がスリットより送信側の場合、△は逆の場合、□はスリットを導入しない隅肉試験片の場合である。探触子間隔Lは100mmである。それぞれ平板部透過波振幅、スリット部反射波振幅を基準にグラフ化している。スリット部では透過波が低減し、スリット端から30mm以上内側では、透過波はノイズレベル以下となった。スリット端から15mm以上離れると、反射波振幅がノイズレベル以下となった。

図6には、透過波の伝搬時間(以下、TOFと記す)を平板部からの増加量で示した。スリットが探触子対を遮る位置になると、スリット先端までの迂回経路を超音波が伝搬することになり、TOFが増加する。図3の記号を使うと、TOF増加量は以下の式で計算される。

$$TOF_{\text{increment}} = \frac{2\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + d^2} - L}{c} \dots (1)$$

cは音速である。

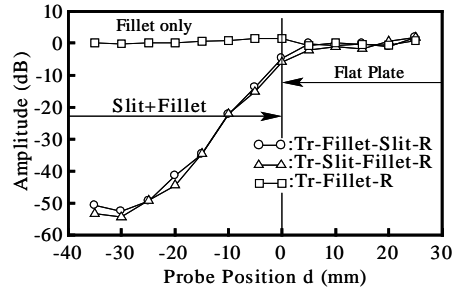


図4 透過波振幅(2Z10x4HA90)

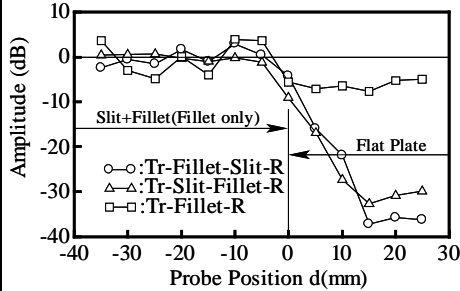


図5 反射波振幅(2Z10x4HA90)

(1)式の計算結果を図6に破線で示した。探触子位置dが-15mmないし-20mmまでは実験値とほぼ同じ値となった。

隅肉の影響を定量化するため、透過波とスリットからの反射波の経路に隅肉が有る場合を無い場合と比較し、それぞれの隅肉による減衰を測定した結果を図7に示した。2Z10x4R(表面波)は隅肉による減衰があり、2Z10x4A70(70度斜角)もやや大きい減衰が観測された。しかし、これらの探触子は透過波、反射波の振幅が大きく、測定が容易な一面もあるので、探触子選択には、さらなる検討を要す。

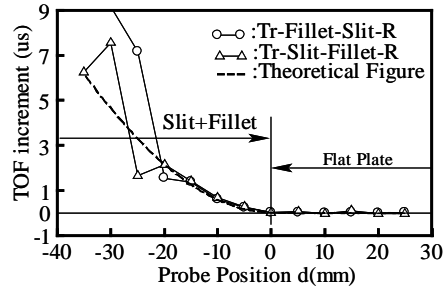


図6 透過波のTOF増加量(2Z10x4HA90)

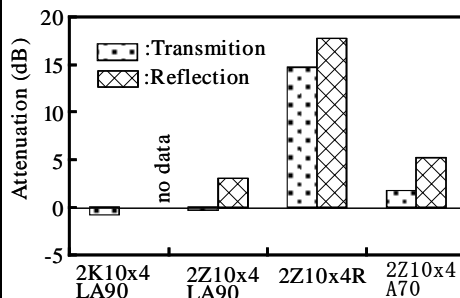


図7 隅肉溶接部での減衰

②疲労亀裂への適用性の評価

図8に示した片側及び中央の切欠きから公称応力 120MPa の応力振幅で伝播させた試験片について、透過波の計測を行った。探触子間隔 L は 100mm である。片側き裂からほぼ板中央 ($a=50.6\text{mm}$) まで疲労き裂が進展した試験片について透過波の振幅、TOF の計測例 (2Z10x4HA90) を図9及び図10に示した。探触子対の間にき裂が入ると、急激に振幅が低下し、TOF が増加した。図中の MPa は計測時に試験片に加えた応力であるが、負荷応力が増大しても透過波の振幅と TOF には変化がなかった。疲労き裂が十分大きいので、き裂先端のみ閉口し、大半が開口状態で、応力の効果が現れなかったと考えられた。

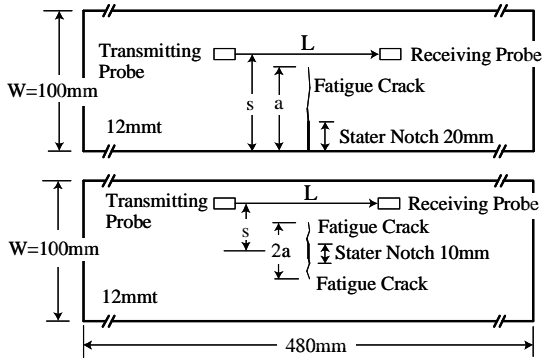


図8 疲労試験片

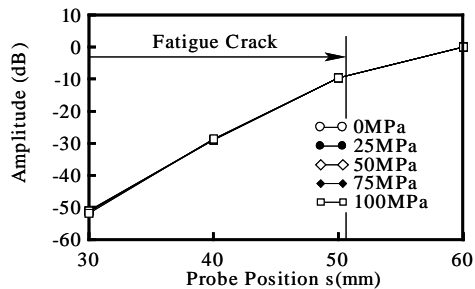


図9 透過波振幅(2Z10x4HA90)

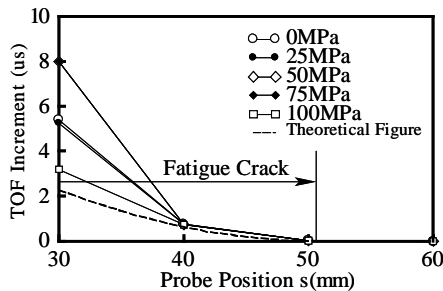


図10 透過波のTOF増加量

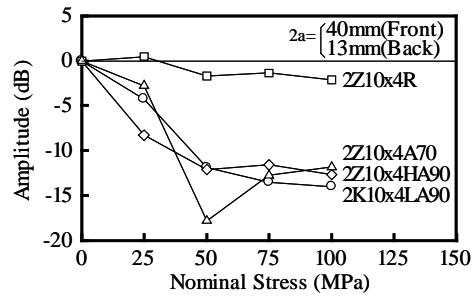


図11 応力による透過波の減衰

中央切欠きから疲労き裂を進展させた試験片について同様の測定を行った。き裂中央 ($s=0\text{mm}$) で計測された透過波振幅 (0MPa を基準にした値) と計測時応力の関係を図11に示した。計測時応力の増加に伴い振幅が低下する傾向が認められた。

(3) まとめ

透過波と反射波の計測によって隅肉溶接部近傍に発生する貫通疲労き裂の検出が可能であることが分かった。モニタリングでは、探触子位置が固定であるため、探査範囲を予め明らかにして探触子設置場所を決定することが重要になる。探触子間隔が 100mm の場合、 $d=10\sim 30\text{mm}$ 程度であった。また、小さい疲労き裂では、低応力時にき裂が閉じているため過小評価になるので、船体運動との同期によって低応力時の計測を回避することが重要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 1 件)

島田道男, 丹羽敏男, 田中義久, 船体溶接部近傍の貫通疲労き裂をモニタリングするための超音波送受信システムの構築, 日本機械学会関東支部 18 期講演会論文集, 査読無, p407-408

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丹羽 敏男 (NIWA TOSHIO)
(独)海上技術安全研究所・構造系・上席研究員
研究者番号：10208267

(2) 研究分担者

島田 道男 (SHIMADA MICHIO)
(独)海上技術安全研究所・構造系・上席研究員
研究者番号：30396246
田中 義久 (TANAKA YASHIHISA)
(独)海上技術安全研究所・構造系・主任研究員
研究者番号：70399517

(3) 連携研究者