

平成21年6月2日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560076
 研究課題名（和文） 接触型SH波線集束探触子によるき裂寸法測定の高精度化
 研究課題名（英文） Improvement of Accuracy of Crack Sizing by Contact-Type Line-Focus Ultrasonic SH-Wave Probe
 研究代表者
 井上 裕嗣（INOUE HIROTSUGU）
 東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
 研究者番号：90193606

研究成果の概要：

本研究では、通常の縦波に代えてSH波を利用したTOFD法によるき裂寸法測定の実現を目的として、SH波線集束探触子を開発した。探触子を試作してTOFD法に適用した結果、直接到達波およびき裂先端回折波が確認され、TOFD法に適用可能であることを確認した。なお、探触子の感度が低く、縦波線集束探触子と比較してき裂寸法測定の高精度化には至らなかったため、改善策として放物線型のSH波線集束探触子を考案した。

交付額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野:工学

科研費の分科・細目:機械工学・機械材料・材料力学

キーワード:非破壊検査, 超音波探傷, TOFD法, SH波, 探触子, き裂

1. 研究開始当初の背景

近年、機械や構造物の安全性を的確に維持管理するために、非破壊検査技術の重要性が一段と高まっている。各種の非破壊検査技術の中でも超音波探傷試験は最も広く実用に供されているが、その精度や信頼性の更なる向上が求められており、そのための一手段として多種多様な探触子が開発されている。

これに関連して、本研究の研究代表者らは従来数年に亘って、接触型線集束探触子と称する探触子を開発してきた。この探触子は、1/4円柱または1/2円柱のくさびの円筒面に圧電振動子を接着した構造を有する。圧電振動子にパルス電圧を印加すると、振動子が厚さ方向(すなわち、くさびの円筒面に垂直な方向)に振動するこ

とによってくさびの内部に縦波円筒面波が発生、伝播し、くさびの底面で一直線上に集束する。したがって、通常の斜角探触子と同様に使用すれば、試験体に対して0～90 degの全角度から同時に縦波が入射できる。従来の研究により、この探触子を用いれば、バルク材のRayleigh波、薄板のLamb波、表面コーティング層の一般化Lamb波が容易に励起・検出できること、またバルク材に対しては-90～90 degの全屈折角方向に縦波とSV波を同時に励起できることが確認されていた。さらに、この探触子は広い指向性を有する縦波が励起できることから、TOFD法への適用を検討した結果、市販のTOFD法用縦波斜角探触子に匹敵する性能を有することも確認されていた。

通常の TOFD 法では、試験体表面に沿って伝播した縦波(ラテラル波)と欠陥先端で回折した縦波に着目し、それらの伝播時間差に基づいて欠陥寸法を算出する。しかし、実際にはこれらの縦波のほかに反射、屈折、回折の際のモード変換によって発生する SV 波も存在し、ラテラル波および回折縦波の伝播時間差を評価する上でこの SV 波が障害となることがある。この難点を解決するために、Raoらは縦波の代わりに SH 波を利用した TOFD 法の可能性を検討している。また、Raoらが指摘しているように、横波は同一周波数の縦波に比べて波長が短いため、TOFD 法による欠陥寸法測定の高精度化も期待できる。本研究の開始時点では SH 波を利用した TOFD 法は未だ確立されていなかったが、さらなる検討の余地は残されており、そのためには適切な探触子の開発が期待されていた。

2. 研究の目的

本研究では、通常の縦波に代えて SH 波を利用した TOFD 法によるき裂寸法測定の実現を目的として、SH 波線集束探触子を試作し、実験と数値シミュレーションによって指向性を評価するとともに、TOFD 法への適用性を評価した。

3. 研究の方法

本研究の方法は、以下のように要約できる。

- (1) 縦波および SV 波の代わりに SH 波を励起・検出することのできる線集束探触子を試作する。
- (2) 試作した探触子の指向性を実験により評価する。
- (3) SH 波線集束探触子で励起される超音波の伝播挙動を数値シミュレーションによって可視化する。
- (4) TOFD 法への適用を試み、き裂の寸法測定の可能性を調べる。

4. 研究成果

(1) 接触型 SH 波線集束探触子

SH 波線集束探触子の基本構造を図 1 に示す。くさびの円筒面には、円筒面の長手方向(図 1 の奥行方向)に厚みすべり振動する振動子が接着されている。この振動子にパルス電圧を印加すると、くさび内部に円筒面状の波面を有する SH 波が発生・伝播し、くさび底面において一直線上に集束するので、試験体に対して 0~90 deg の全角度から同時に SH 波を入射することができる。その結果、試験体の広範囲の屈折角方向に SH 波を伝播させること、すなわち TOFD 法に適した SH 波を励起することができると期待される。

試作した 2 種類の探触子は、それぞれ 1/2 円柱(図 1 の形状)および 1/4 円柱のくさびを有する。探触子のくさびの材質はポリスチレンであり、寸法は半径 10 mm、幅 10 mm である。また、振動子の公称周波数は 1 MHz である。

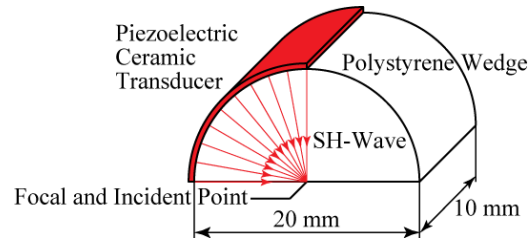


図 1 SH 波線集束探触子の基本構造

(2) 指向性評価実験

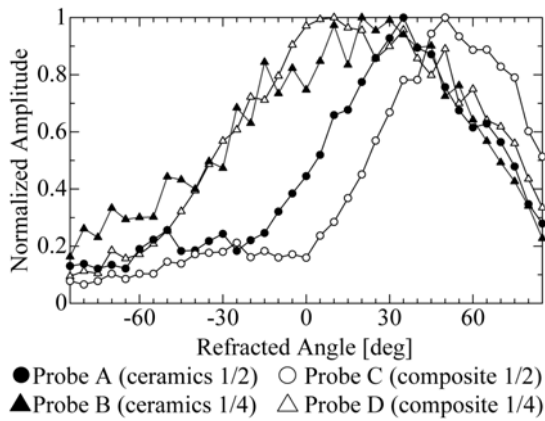
指向性評価実験では、試作した 2 種類の SH 波線集束探触子に加えて、くさび形状(1/2 円柱および 1/4 円柱)と振動子材質(圧電セラミックスおよびコンポジット)がそれぞれ異なる 4 種類の縦波線集束探触子の指向性も評価した。評価した線集束探触子の主な仕様を表 1 に示す。

表 1 評価した線集束探触子の仕様

	縦波(L) SH 波(SH)	振動子種類	くさび形状	周波数 [MHz]
A	L	Ceramics	1/2 円柱	2
B	L	Ceramics	1/4 円柱	2
C	L	Composite	1/2 円柱	2
D	L	Composite	1/4 円柱	2
E	SH	Ceramics	1/2 円柱	1
F	SH	Ceramics	1/4 円柱	1

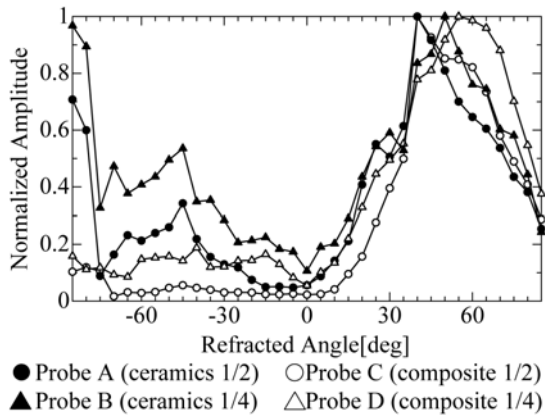
実験においては、鋼製の半円柱試験片(半径 100 mm、厚さ 70 mm)の中心に線集束探触子の入射点が一致するように配置し、線集束探触子によって励起された縦波、SV 波および SH 波を試験片の円筒面において縦波または横波探触子を用いて受信した。指向性は、屈折角が -85~85 deg の範囲において 5 deg 間隔で取得した受信波形の振幅によって評価した。

縦波線集束探触子の指向性評価結果を図 2 (縦波)および図 3 (SV 波)に示す。これらの図では、受信波形振幅を屈折角に対する最大値で正規化してプロットしている。縦波については幅広い指向性が確認でき、最大振幅が得られるのは、1/4 円柱くさび(Probe B および Probe D)の場合は屈折角 0~20 deg 付近、1/2 円柱くさび(Probe A および Probe C)の場合は屈折角 30~50 deg 付近である。TOFD 法への適用を考えれば、負の屈折角方向に超音波が励起される必要は無く、相対的に正の屈折角方向の感度が高いことが望まれるので、くさび形状は 1/4 円柱よりも 1/2 円柱の方が適していると考えられる。一方、SV 波については、1/4 円柱くさびと 1/2 円柱くさびの間に縦波ほどの指向性の差異は見られない。なお、縦波線集束探触子については、セラミック振動子(Probe A および Probe B)に比べてコンポジット振動子(Probe C および Probe D)の方が感度が高い。以上のことから、これら 4 種類の縦波線集束探触子の中では、Probe C が TOFD 法に最も適していると判断できる。



●Probe A (ceramics 1/2) ○Probe C (composite 1/2)
▲Probe B (ceramics 1/4) △Probe D (composite 1/4)

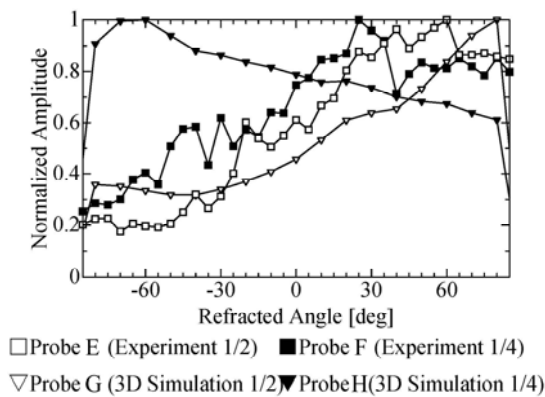
図2 縦波線集束探触子による縦波の指向性



●Probe A (ceramics 1/2) ○Probe C (composite 1/2)
▲Probe B (ceramics 1/4) △Probe D (composite 1/4)

図3 縦波線集束探触子によるSV波の指向性

SH波線集束探触子の指向性評価結果を図4に示す。1/4円柱くさび(Probe F)では屈折角25 deg付近、1/2円柱くさび(Probe E)では屈折角60 deg付近で最大振幅が得られているが、くさびの形状が指向性に及ぼす影響は図2の縦波の場合に比べると小さい。なお、SH波線集束探触子について、縦波およびSV波は検出されなかった。いずれのくさび形状においても屈折角が20~85 degの広い範囲においてSH波がほぼ様な振幅を示していることから、本研究において試作したSH波線集束探触子はTOFD法に適用できる可能性があるかと判断できる。



□Probe E (Experiment 1/2) ■Probe F (Experiment 1/4)
▽Probe G (3D Simulation 1/2) ▼Probe H (3D Simulation 1/4)

図4 SH波線集束探触子の指向性

(3) 数値シミュレーション

3次元超音波伝播シミュレーションソフトウェアWave3000(CyberLogic)を使用して数値シミュレーションを行った。1/2円柱くさびの解析モデルを図5に示す。1/4円柱くさびについても同様の解析モデルを作成した。モデルの要素分割と計算機のメモリ容量の都合により、探触子のくさび半径およびモデルの厚みはともに2 mmとした。探触子との接触面以外の試験体の3表面においては、無反射境界条件を設定した。また、このソフトウェアでは平板状の振動子しか設定できないため、くさびの円筒面上の20~90 degの範囲の10 deg毎の8箇所平板状の振動子を配置し、モデルの奥行き方向の振動を与えることによって、実際の探触子におけるSH波の励起をモデル化した。入力波形は、Gauss関数で振幅変調した1 MHzの正弦波とした。指向性の評価に当たっては、試験体の超音波入射点から4 mmの距離において、屈折角-90~90 degの範囲の10 deg毎の19点でモデルの奥行き方向の変位の時間変化を求めた。

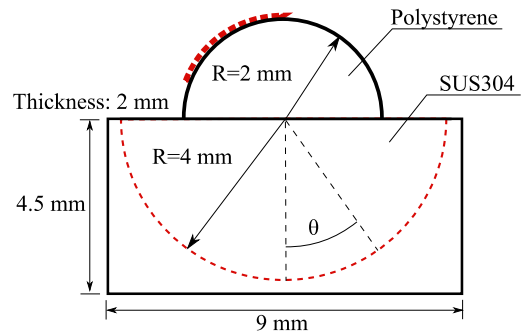


図5 1/2円柱くさびのシミュレーションモデル

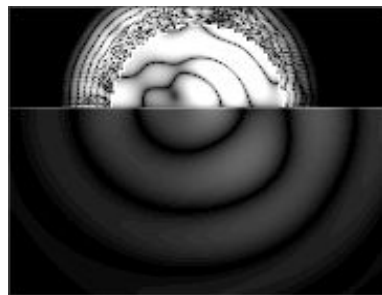


図6 1/2円柱くさびのシミュレーション結果

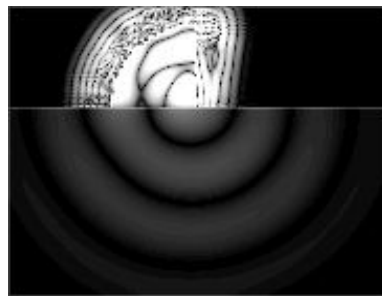


図7 1/4円柱くさびのシミュレーション結果

図6と7は、数値シミュレーションによって試験体内の超音波の伝播挙動を可視化した結果である。図6は1/2円柱くさびの場合、図7は1/4円柱くさびの場合のSH波の伝播挙動である。いずれの場合についても、試験体の超音波入射点を中心として同心円状にSH波が伝播している。なお、複数の波面が観察される理由は、入射波が正負合わせて6つ程度のピークを有するためである。この結果によれば、線集束SH波探触子は幅広い指向性を有しており、TOFD法への適用が十分に期待できる。

数値シミュレーションによる指向性の評価結果を図4に示す。1/2円柱くさび(Probe G)については実験結果に近い傾向を示しており、屈折角80 degで最大振幅が得られている。一方、1/4円柱くさび(Probe H)については全般的に実験結果と全く異なる傾向を示しており、屈折角が-70~-60 degの範囲において最大振幅が得られている。このような差異が生じた原因は、数値シミュレーションにおける種々の制約にあると推察される。

(4) TOFD法への適用

TOFD法探傷実験の装置構成を図8に示す。超音波の送信にはパルサとして超音波探傷器(Krautkramer, USIP12)を、受信には超音波レシーバ(RITEC, BR-640A)を使用し、入射波形を確認するためにダイプレクサ(RITEC, RDX-6)も使用した。接触媒質には、ニチゴー日興株式会社製ソニコートBS-400(縦波用)、東芝タンガロイ株式会社製タンソニックオイル SH-H(横波用)を使用した。

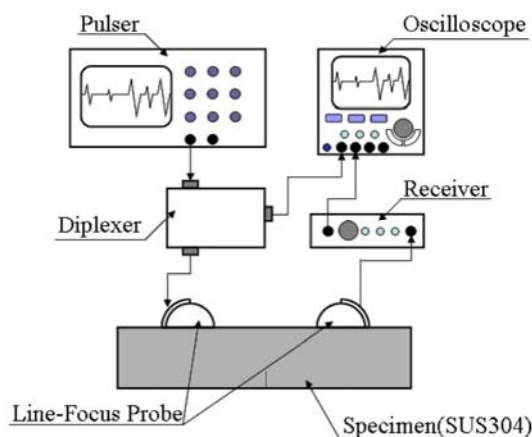


図8 TOFD法探傷実験の装置構成

試験片はステンレス鋼SUS304製であり、寸法は、高さ40 mm、長さ300 mm、幅30 mmである。図8に示すように、試験片底部に高さ10 mmの切り込みを導入した。

実験には、前出の1/2円柱くさびのSH波線集束探触子を使用し、比較のために市販のSH波斜角探触子(ジャンププローブ, 5C10×10HA45, 鋼に対する屈折角45 deg, 5 MHz)も使用した。

図9に市販SH波斜角探触子による探傷結果、図10にそのウェーブレット変換を示す。図中Lは送信探触子から受信探触子に直接到達するSH波、Dは切り込み先端からの回折(反射)波、Bは試験片底面からの反射波の到達予想時刻を示す。これらの結果によれば、DとBに対応するパルスは明瞭に観察されるが、Lに対応するパルスは観察できない。これは、探触子の屈折角が45 degであるために、試験片の表面に沿う方向にはSH波がほとんど励起されなかったことが原因である。しかしながら、SH波の場合でも、十分に幅広い指向性を有する探触子を使用し、Lに対応するパルスも励起・検出できるようにすれば、縦波を用いた場合と同様にTOFD法によるき裂寸法測定が可能になることが知られた。

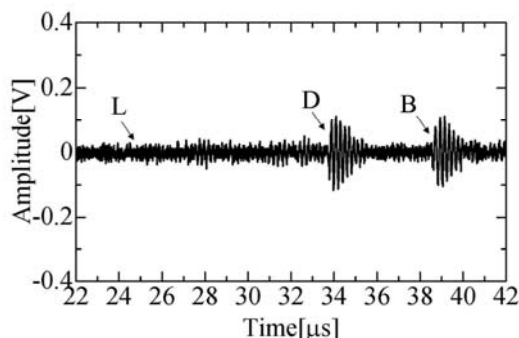


図9 市販SH波斜角探触子による探傷結果

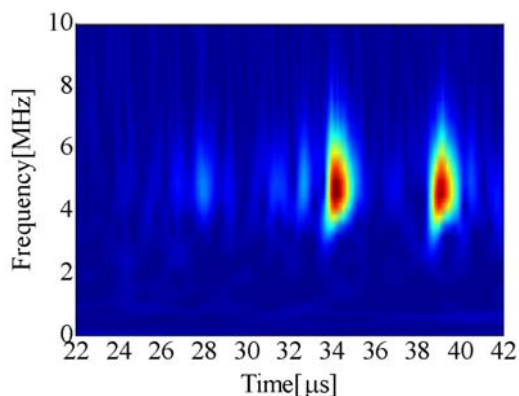


図10 図9の波形のウェーブレット変換

一方、図11はSH波線集束探触子による探傷結果、図12はそのウェーブレット変換を示している。先の市販SH波斜角探触子の場合と比較すると、DとBに対応するパルスだけでなく、Lに対応するパルスも検出されている点が異なる。このことから、SH波線集束探触子は、十分に幅広い指向性を有するSH波を励起しており、基本的にTOFD法に対して適用可能であると判断できる。ただし、この探傷波形においては、TOFD法において必要となるL、D、Bのパルスの大きさが小さく、他の波形をノイズとしたときのS/N比が小さい。この原因は探触子の感度が低いためであり、今後探触子の感度を高めることが必要であると考えられる。

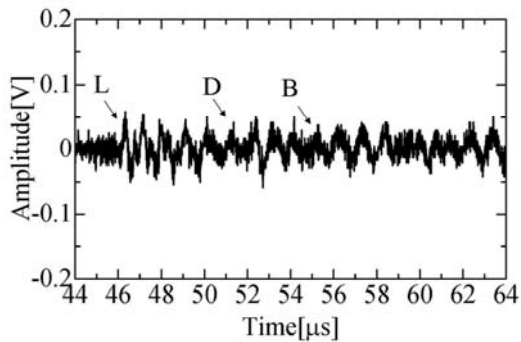


図 11 SH 波線集束探触子による探傷結果

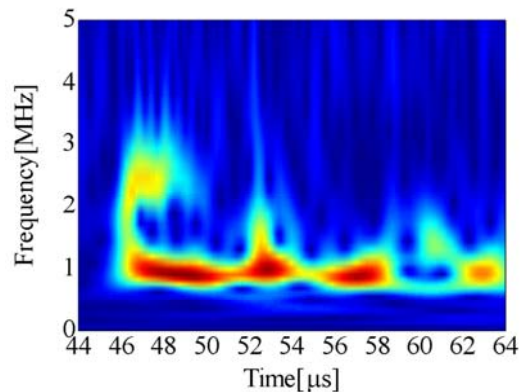


図 12 図 10 の波形のウェーブレット変換

(5) 改良型探触子の考案

本研究で試作した SH 波線集束探触子は、基本的には TOFD 法に適用可能であるが、感度の点で改良の余地がある。SH 波線集束探触子は円筒状に湾曲した振動子を用いなければならないが、この点が加工の難しさ、引いては SH 波の励起特性(すなわち感度)に影響を及ぼした可能性が考えられる。

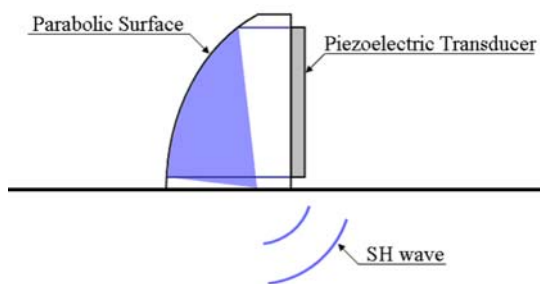


図 13 放物線型 SH 波線集束探触子

そこで、図 13 に示す放物線型 SH 波線集束探触子を考案した。この探触子は、放物面を有するくさびと、放物面に対して SH 波を照射するように配置された平面振動子で構成されている。振動子で励起された SH 波は、放物面で反射され、幅広い入射角をもってくさび底面で一直線上に集束する。この探触子では、振動子が曲面

ではなく平面であるので、振動子に負荷がかかり難く、また加工も容易であることから、感度の向上が期待できる。今後は、この放物線型 SH 波線集束探触子を試作して、TOFD 法への適用性を検討する予定である。

(6) まとめ

本研究の成果を要約すれば以下の通りである。

- ① 試作した SH 波線集束探触子は、十分に幅広い指向性を有することを示した。
- ② 試作した SH 波線集束探触子は、直接到達波およびき裂先端回折波を励起・検出することが可能であり、基本的に TOFD 法に適用可能であることを示した。
- ③ SH 波線集束探触子の感度を向上させるために、放物線型の SH 波線集束探触子を考案した。

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)

[学会発表](計 3 件)

- ① Yuta MORIYA, Hirotsugu INOUE, Development of Ultrasonic Line-Focus SH-Wave Probe, The 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008 年 10 月 26 日, Shanghai Exhibition Center
- ② 守屋悠太, 井上裕嗣, 黒川悠, 線集束 SH 波超音波探触子の TOFD 法への適用, 日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008 年 9 月 17 日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス
- ③ 井上裕嗣, 守屋悠太, 線集束 SH 超音波探触子の開発, 日本機械学会 M&M2007 材料力学カンファレンス, 2007 年 10 月 24 日, 東京大学生産技術研究所

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 裕嗣(INOUE HIROTSUGU)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号:90193606

(2)研究分担者

黒川 悠(KUROKAWA YU)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号:40513461

(3)連携研究者

該当なし