

超音波探傷試験TOFD法に関する研究 ～密着した欠陥の検出性について～

素材開発室 立川 克美, 齊藤 一夫, 吉田 浩之
企画調整室 長瀬 尚樹
(株)シーエックスアール 藤岡 克美, 宇田 吉臣, 井門 良雄
(株)検査技術研究所 林 栄男

Study on TOFD Technique ～ Detection of Adherent Crack ～

Katsumi TACHIKAWA, Kazuo SAITOH, Naoki NAGASE, Hiroyuki YOSHIDA,
Katsumi FUJIOKA¹, Yoshiomi UDA¹, Yoshio IDO¹ and Hideo HAYASI²
¹CXR Corporation ²KGK Co.,Ltd

超音波縦波の伝搬時間差により欠陥位置を計測するTOFD法は、従来法に比べて高精度で欠陥高さの測定が可能である。しかし、密着した欠陥については検出能が極端に低下することが前報によって明らかとなった。本報では、密着した欠陥の検出能を高めるため送受信探触子の改良とともに、疲労試験機を用いてき裂進展のモニタリングを行った結果、TOFD法の有効性と併せて適用限界を知ることができた。

1. はじめに

1980年代にきず高さの測定に超音波TOFD法が提案されて以来、我が国においても種々の産業分野で厚板材料を中心に適用事例が報告されている一方で、19mm以下の材料に対する研究報告はほとんど見あたらないのが実情である。しかし、19mm以下の板厚で構成される構造物は多数存在し、保守点検の必要性が高く、薄板材に対するTOFD法適用の可否について、検査を専門とする企業からのニーズに基づいて研究を開始した。¹⁾

前報²⁾までの研究成果から次の点が明らかとなった。

- ①TOFD法では、人工きずによる試験体では良好な検出性と高精度のきず高さが得られるものの、自然きずに近い溶接きずでは必ずしも良好でない。
- ②突合わせ溶接の溶込み不良のように、密着した欠陥部では欠陥端部からの散乱波信号強度は著しく低下する。
- ③TOFD法による欠陥検出能は散乱波及び回折波の信号強度とノイズ信号との比(SN比)に大きく左右される。

本研究では、これらの問題点を解決するために、

きず検出性の向上を目指したTOFD探触子の試作並びに改良とともに、実際のき裂に類似した欠陥を疲労試験により作製し、き裂発生から進展に至る過程をモニタリングし、TOFD法の有効性を確認した。

2. 実験方法

2.1 TOFD探触子の試作・改良

TOFD法で用いる送受信探触子は屈折角60度を用いる。交軸点を底面とした場合、板厚が薄くなるほど探触子間距離は小さくなるため、振動子径は小さくする必要がある。更に超音波エネルギーと受信効率率は振動子径が大きい方が有利である。また、分解能を高めるには高い周波数と高ダンピング特性が必要で、これら相反する特性を考慮しなければならない。

前報の実験結果から、幅の狭い密着した欠陥(以下きずと称する)からの信号が受信できないことが確認された。³⁾⁴⁾今回の実験では、測定可能なきず幅の測定下限値を下げることを目的として、SN比の向上が期待できるコンポジットタイプの15MHz複合型フォーカス探触子を開発した。更にTOFD法における受信波(欠陥先端部からの散乱波)の周波数分

析から中心周波数 7MHz の振動子も試作した。

2.2 疲労き裂のモニタリング

供用期間中の構造物に発生するき裂の多くは、疲労き裂によるものである。一般に疲労き裂は初期の段階では密着状態にあり、表面から発生するき裂の検出性は超音波探傷よりも蛍光磁粉探傷の方が優れていることが多い。しかし、深さ測定は超音波法であり、一般には端部エコー法が用いられている。

本研究では TOFD 法によるモニタリングを板厚 10 mm の試験体に初期き裂として深さ 1 mm の楕円きずを加工し、反対側の面に TOFD 法を固定したうえで、荷重制御による疲労試験を実施した。なお、き裂深さの目標値は、0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 3.0 mm, 4.0 mm とし、き裂が目標値に到達した時点で、き裂先端部からの超音波信号強度と負荷応力との関係を測定した。

3. 結果及び考察

3.1 試作探触子の比較

前報の実験で使用した探触子(6φ-15MHz)と、今回試作した探触子等の性能を板厚 12 mm t(減衰の影響)と板厚 6 mm t(ラテラル波と底面反射波間の時間差の少ない場合)の試験体を用いて、12t では比較的捕らえにくいきず(きず幅 5μm)を、6t では底面近傍のきず(きず高さ 0.6 mm, ここでは探傷面側からの深さ 5.4 mm)の検出度(SN 比)及びその時の測定感度等で比較した。

表 1-1, 1-2 に測定に使用した探触子の組合せと測定結果を、図 1-1~1-30 に測定で得られた波形及び D-スキャン画像を示す。なお SN 比はラテラル波~底面反射波間のノイズときず信号を波高値 10% に調整したときの感度差、測定感度はラテラル波の波高値を 80% に調整したときの感度を dB 値で示した。

3.1.1 ①6φ-15MHz 探触子の適用

表中の①は前報で使用した探触子で、送受信共に 6φ-15MHz 探触子を用い、この TOFD 画像データを基準として探触子改良を目的とした試作品の画像データと比較検討した。この探触子より SN 比や測定感度が改善されれば、試作探触子でのきず幅の測定下限値引き下げに寄与することになる。

表 1-1 12t 試験体代表きず測定結果

12t			測定感度 (dB)※	SN 比 (dB)※	きず高さ 誤差(mm)
①	T	6φ-15M	73.3	5.2	0.6
	R	6φ-15M	—	—	
②	T	6φ-15M	60.8	2.1	0.3
	R	6φ-7.5M	-12.5	-3.1	
③	T	4φ-15M	63.9	10.7	0.3
	R	4φ-15M	-9.4	5.5	
④	T	4φ-15M	59.5	7.0	0.3
	R	4φ-7M	-13.8	1.8	
⑤	T	4φ-15M	53.0	2.6	0.3
	R	6φ-7.5M	-20.3	-2.6	
⑥	T	4φ-15M	58.5	2.7	0.2
	R	23597-7M	-14.8	-2.5	
⑦	T	23228-15M	56.3	0.9	1.0
	R	23227-15M	-17.0	-4.3	
⑧	T	23228-15M	52.8	-2.0	0.5
	R	23597-7M	-20.5	-7.2	
⑨	T	23596-15M	53.4	1.4	0.0
	R	23597-7M	-19.9	-3.8	

※下段の数値は①との差を示す

表 1-2 6t 試験体代表きず測定結果

6t			測定感度 (dB)	SN 比 (dB)	きず高さ 誤差(mm)
①	T	6φ-15M	63.1	10.3	0.5
	R	6φ-15M	—	—	
②	T	6φ-15M	—	—	—
	R	6φ-7.5M	—	—	
③	T	4φ-15M	54.6	13.6	0.4
	R	4φ-15M	-8.5	3.3	
④	T	4φ-15M	51.2	9.1	0.4
	R	4φ-7M	-11.9	-1.2	
⑤	T	4φ-15M	—	—	—
	R	6φ-7.5M	—	—	
⑥	T	4φ-15M	—	—	—
	R	23597-7M	—	—	
⑦	T	23228-15M	46.5	0.2	1.4
	R	23227-15M	-16.6	-10.1	
⑧	T	23228-15M	51.2	3.3	0.6
	R	23597-7M	-11.9	-7.0	
⑨	T	23596-15M	41.7	0.5	-0.1
	R	23597-7M	-21.4	-9.8	

※下段の数値は①との差を示す

3. 1. 2 ②受信探触子 7.5MHz の適用

TOFD法の散乱波を周波数分析した結果、送信周波数15MHzを用いても散乱波信号の周波数は7～10MHzとなる結果が得られた。また、SN比を低下させるノイズの周波数は3MHz以下であった。そこで、受信側の探触子の効率を高めるため、中心周波数7.5MHzの探触子を試作した。②のケースで、12tの場合で①より12.5dB感度を改善することが出来たが、ノイズレベルと共に欠陥部からの信号強度も下がってしまい結果的には、SN比の低下を招いた。

この原因として、試作した6φ-7.5MHzの探触子は、受信帯域幅を5～10MHzで作製したため、若干狭帯域の性能を持つこととなった。このために波数が多く(3波)なり、D-スキャン画像的には、分解能が低下し、15MHzでの受信に比べてシャープさに欠ける画像が構成される結果となった。しかし、きず高さ測定においては欠陥部の信号を受信できているので、精度的には問題なかった。

3. 1. 3 ③4φ-15MHz の適用

薄板測定時にネックとなる探触子接近限界距離を小さくする目的から、振動子径 4φ探触子を試作した。測定感度は6φの①のものより下げることが出来た。(−8.5～−9.4dB)

薄板、特に6tへの適用では、交軸点を底面に合わせた場合にラテラル波と底面反射波との時間差が0.6μs以下となるため高い時間分解能が必要とされるので、高ダンピングタイプとしが、6t測定時には波形の分離がよく、D-スキャン画像が①よりシャープになり観察しやすくなった。しかし、探触子の特性からラテラル波～底面反射波間のノイズ(うねり)が多く、きずの判断が困難となる。きず部が特定できれば、SN比は一番高くなる。(今回の場合で6φの①より3.3～5.5dB向上)きず高さの測定精度は、きず部の信号を受信できているので問題は生じなかった。

3. 1. 4 ④受信側探触子 7MHz の適用

全体的な特徴としては、4φ-15MHzの送受信と変わらない。しかし6φの②と同様に測定感度は下げられてもSN比的には若干低下する。(今回の場合で③より測定感度3.4～4.4dB改善。SN比は3.7～4.5dBの低下。①とではSN比は−1.2～−1.8dBと大差なし)また、D-スキャン画像的にも、6φの②の場合

合と同様で③の15MHzよりシャープさに欠ける結果となっている。(しかし、6φの①②よりは良い)きず高さの測定精度的には問題ない結果が得られた。

3. 1. 5 ⑤受信側探触子 6φ-7.5MHz の適用

④より更に受信効率を上げる目的で、受信側の振動子径を大きくしたが、測定感度的には6.5dBの改善は図れたものの、②と同様の結果で、SN比の向上にはつながらなかった。(④より測定感度6.5dB改善、SN比4.4dB低下)

3. 1. 6 ⑥受信側探触子 7MHz 7×7 の適用

きず部の信号の中心周波数は、周波数解析の結果15MHz以下(7～10MHz前後)となることから受信側に振動子寸法7×7の比較的大きなものを用いて更に、若干狭帯域化してきずからの信号を効率よく受信することを試みた。

しかし、狭帯域化した為か、ラテラル波の受信強度は思いのほか上がらず、測定感度58.5dBと④と変わらない結果となった。きずからの信号強度も改善されず、SN比は2.7dBと⑤と同等でSN比の向上には至らなかった。

3. 1. 7 ⑦フォーカス型探触子の適用

きず部に音圧の高い超音波を当て、且つ欠陥部信号を効率よく受信する目的から送信ビームをレンズで絞り込むフォーカスタイプの探触子を試作した。

従来通りのフォーカスタイプにすると、TOFD法では計測時に必要になるラテラル波が弱くなることを考慮し、ラテラル波用の振動子を併せ持つ複合型探触子を試作したが、今回の板厚範囲では狙い通りの結果とはならなかった。

板厚12tの場合、ラテラル波用の音圧が十分に上がらず、測定感度的な優位性は認められなかった。また、6tにおいては、ラテラル波用の振動子の周波数が低い為に、試験対象部の大半がラテラル波の不感領域と重なり、波形的にもD-スキャン画像としては非常に測定しにくいものとなった。

また、各探触子との比較対象とした代表きずについては、12t、6tともSN比1dB以下と非常に悪く、ほとんどきずの識別が出来ない状態である。そのため、他の探触子と違いきず高さ誤差も1.0mm以上の大きな値となった。

3. 1. 8 ⑧送信フォーカス型-受信 7MHz の適用

受信側に複合型探触子を用いなかったため、⑦



図 1-1 12t 試験体 ①による代表きず部波形

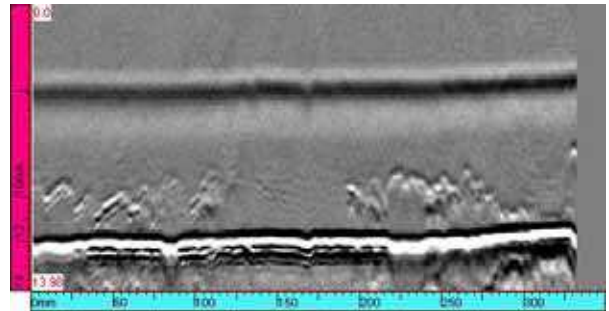


図 1-2 12t 試験体 ①によるD-スキャン画像



図 1-3 12t 試験体 ②による代表きず部波形

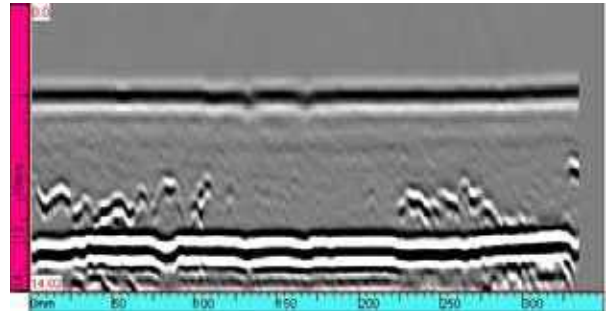


図 1-4 12t 試験体 ②によるD-スキャン画像



図 1-5 12t 試験体 ③による代表きず部波形

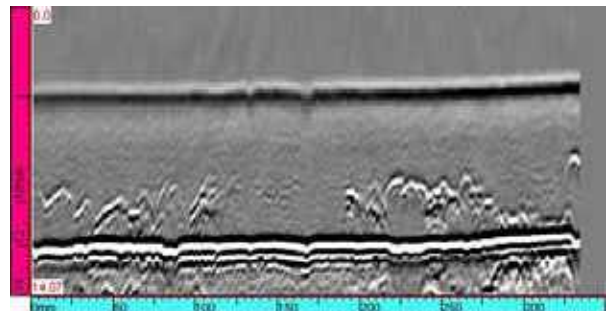


図 1-6 12t 試験体 ③によるD-スキャン画像



図 1-7 12t 試験体 ④による代表きず部波形

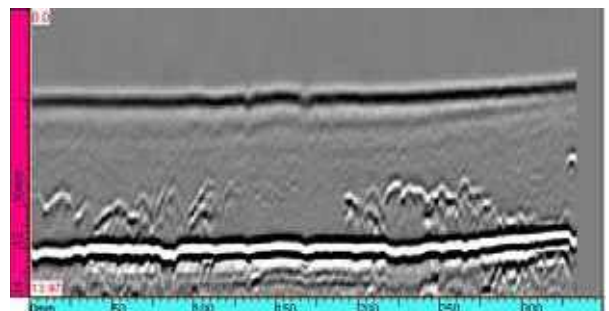


図 1-8 12t 試験体 ④によるD-スキャン画像

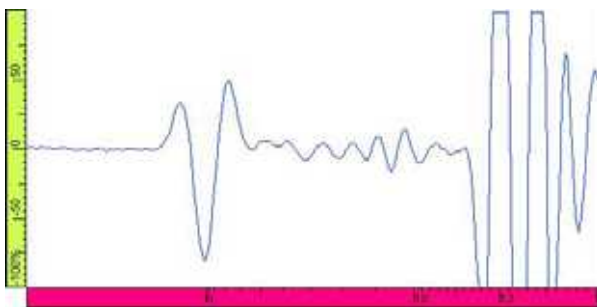


図 1-9 12t 試験体 ⑤による代表きず部波形

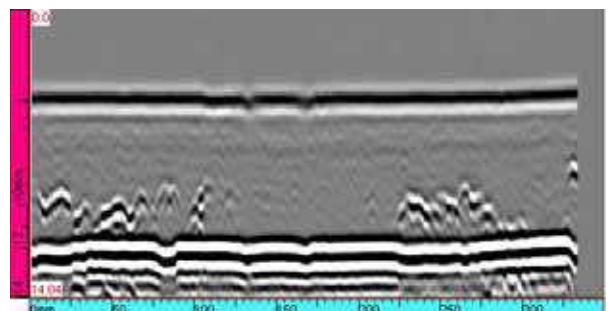


図 1-10 12t 試験体 ⑤によるD-スキャン画像



図 1-11 12t 試験体 ⑥による代表きず部波形

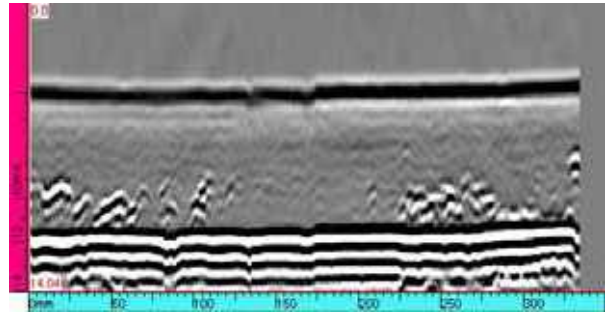


図 1-12 12t 試験体 ⑥による D-スキャン画像

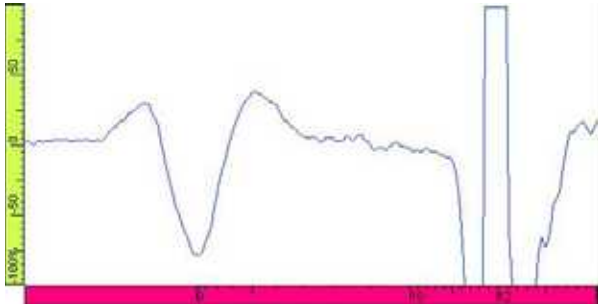


図 1-13 12t 試験体 ⑦による代表きず部波形

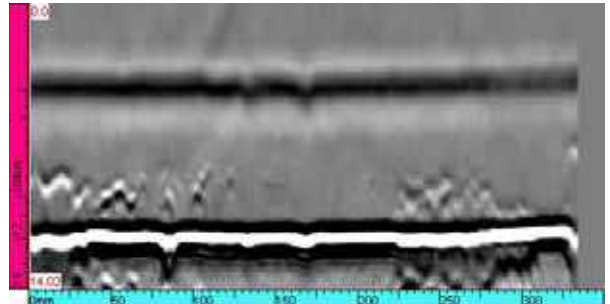


図 1-14 12t 試験体 ⑦による D-スキャン画像

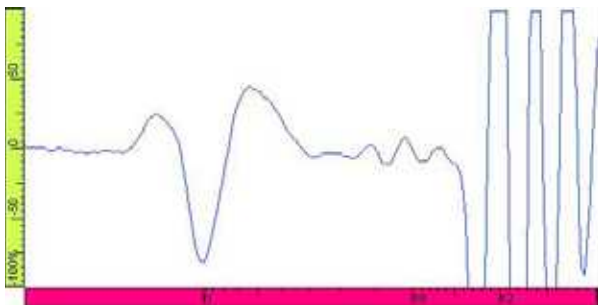


図 1-15 12t 試験体 ⑧による代表きず部波形

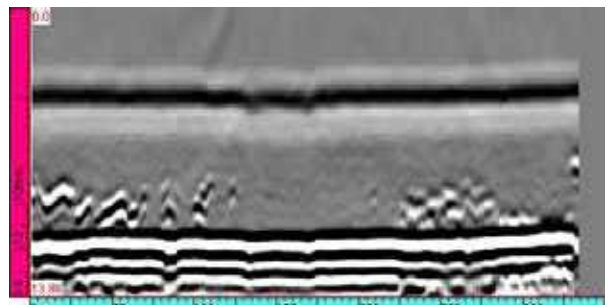


図 1-16 12t 試験体 ⑧による D-スキャン画像



図 1-17 12t 試験体 ⑨による代表きず部波形

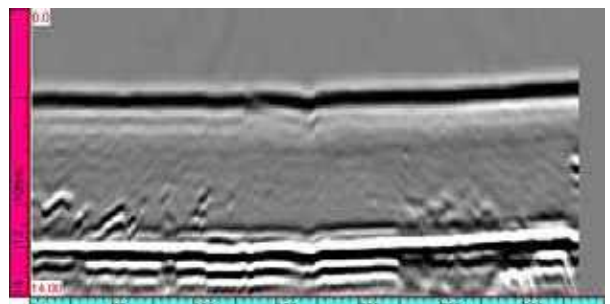


図 1-18 12t 試験体 ⑨による D-スキャン画像

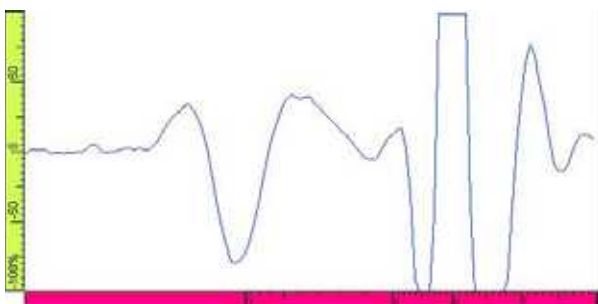


図 1-19 6t 試験体 ①による代表きず部波形

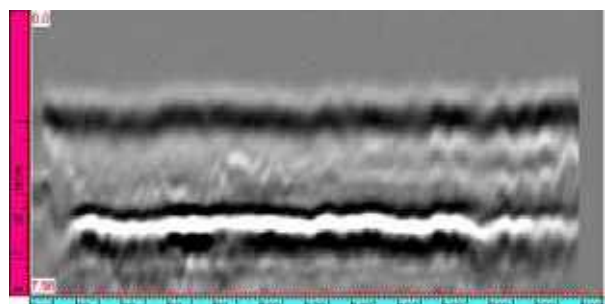


図 1-20 6t 試験体 ①による D-スキャン画像



図 1-21 6t 試験体 ③による代表きず部波形

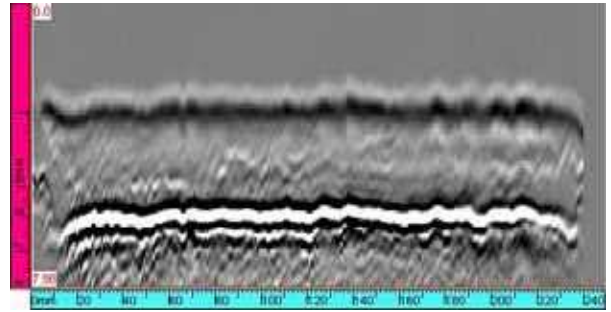


図 1-22 6t 試験体 ③によるD-スキャン画像

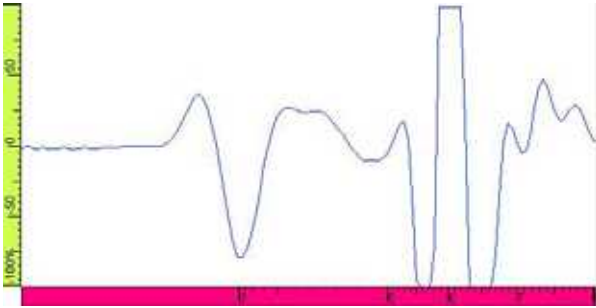


図 1-23 6t 試験体 ④による代表きず部波形

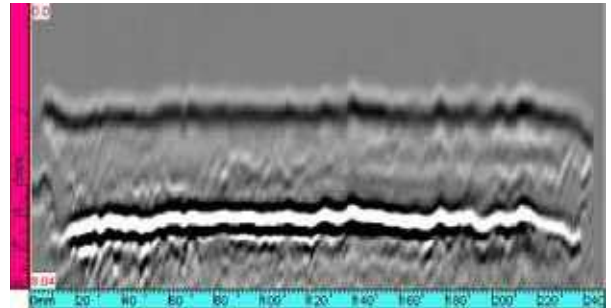


図 1-24 6t 試験体 ④によるD-スキャン画像

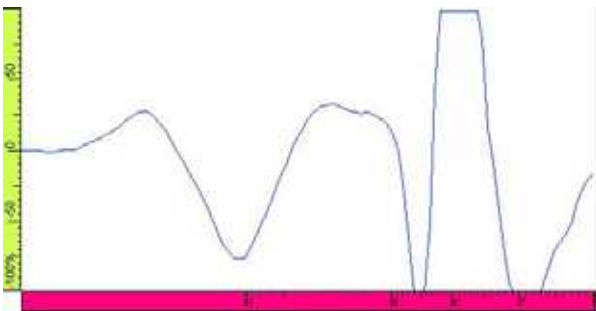


図 1-25 6t 試験体 ⑦による代表きず部波形

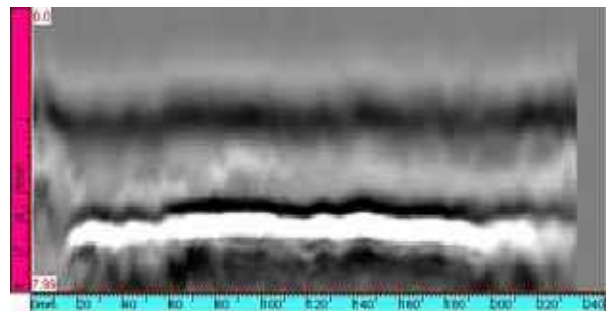


図 1-26 6t 試験体 ⑦によるD-スキャン画像

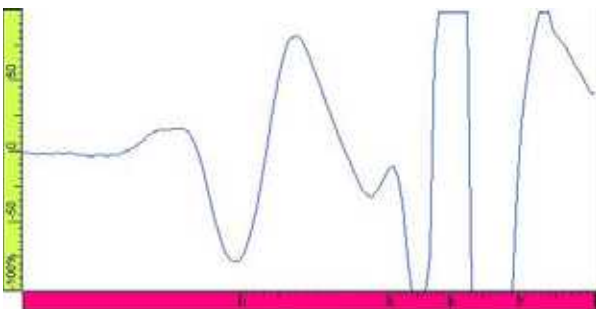


図 1-27 6t 試験体 ⑧による代表きず部波形

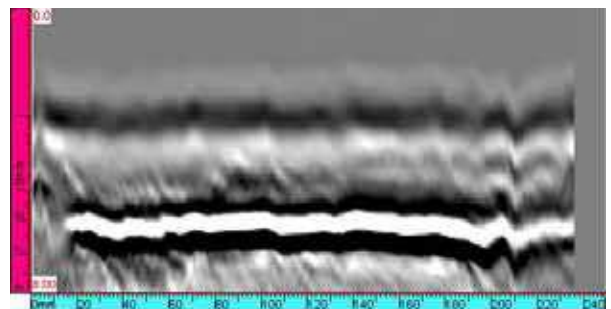


図 1-28 6t 試験体 ⑧によるD-スキャン画像



図 1-29 6t 試験体 ⑨による代表きず部波形

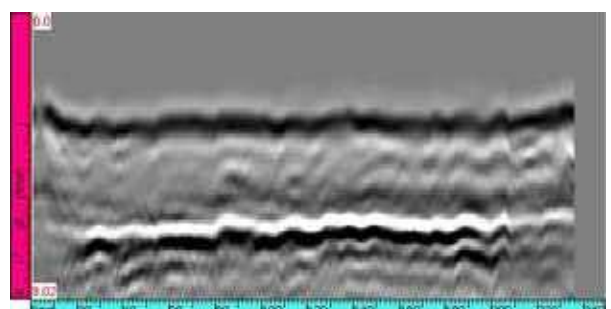


図 1-30 6t 試験体 ⑨によるD-スキャン画像

よりは改善されているが、おおむね同様の結果となった。12t では、測定感度が⑦より 3.5dB 改善され測定感度が一番低く設定できた。きず信号については確認は出来るものの、SN 比的には-2.0dB と良い結果にはならなかった。

6t への適用では、測定感度的な優位な認められないものの、きず信号は確認でき SN 比 3.3dB と⑦より改善された。

しかし、⑦同様にラテラル波不感帯が広く、底面側の 1.5 mm 程度しか測定できない状態であり、あまり実用的ではないが、12t、6t とともにきず部の高さ測定精度的には問題ない。

3.1.9 ⑨送信フォーカス型-受信 7MHz の適用

振動子寸法 7×7 の振動子であるため、測定感度的には比較的優位な結果が得られた。(①より 12t で 19.9dB、6t で 21.4dB 改善)しかし、SN 比的には 0.5~1.4dB とあまり良い結果とはならなかったのは受信周波数帯域が狭いためである。

以上の結果から、4φ-15MHz の送受信が 12t 及び 6t において①より改善されたものとなった。

幅のないきずの測定下限値については、③の 4φ-15MHz の送受信をもってしても 12t のきず幅 5μm の代表きずの SN 比が①より 5.5dB 改善された程度で、測定下限値を引き上げるまでには至らなかった。しかし、薄板測定時には、探触子接近限界距離と時間分解能の高さが重要であるので、この点においては③の探触子の有効性は十分実証された結果となった。

3.1.10 試験部の断面観察

実験に使用した試験体切断面の顕微鏡観察の結果、欠陥幅と SN 比との関係を図 2、図 3、図 4 に示す。各板厚ともに欠陥の検出限界は、概ねきず幅が 1~2 ミクロンであることを示している。

これらの結果から、欠陥先端幅が 1~2μm 以下の密着した状態において、超音波は欠陥部を通過するため、散乱波や回折波の SN 比が低下する。結果として TOFD 法による欠陥を指示する画像が得られにくくなることが分かった。

3.2 き裂のモニタリング

き裂進展の試験には、島津サーボパルサー-EHF-UD5 型の小型疲労試験機を用いた。振幅応力荷重振幅条件は試験条件は片振り引張り、応力振幅は 0~

160MPa とした。いずれの試験片もき裂の開始は振幅の繰り返し数 6×10^5 回前後からスタートし、所定のき裂深さにき裂が進展するまで TOFD 法にてモニタリングを行った。

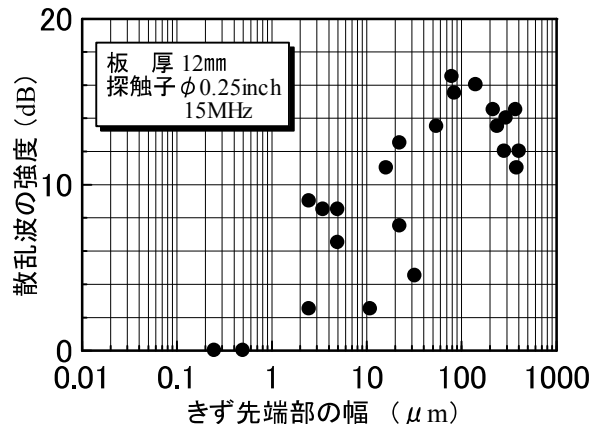


図 2 欠陥の密着幅と散乱波強度(板厚12mm)

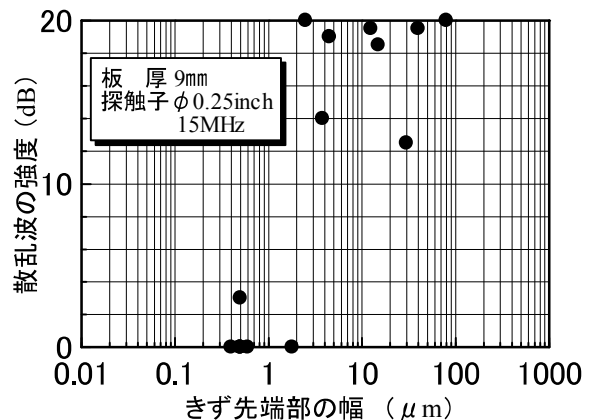


図 3 欠陥の密着幅と散乱波強度(板厚9mm)

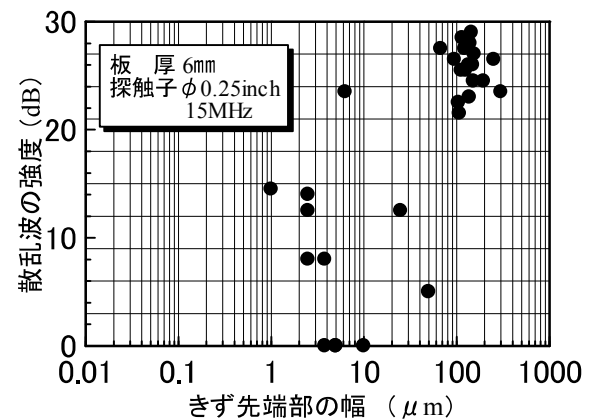


図 4 欠陥の密着幅と散乱波強度(板厚6mm)

3.2.1 疲労き裂の測定結果

初期き裂として試験体に深さ1mmのノッチを加工した。疲労き裂はノッチ部から楕円状に進展するため、最もき裂進展の早い試験体中央部の信号が受信できるようにTOFD探触子を配置した。

き裂深さの目標値、0.5mm～4.0mmまでの6試験体について、TOFD法にて計測したき裂深さが、それぞれの目標値に達したところで試験を終了し、き裂開口変位等を試験した後に切断し、断面観察から実測値を得た。

TOFD法による計測と切断結果との関係を図5に示す。平均的な誤差は0.1mm以下の高い精度で測定することができ、実際のき裂測定においてもTOFD法は有効であることが確認できた。

3.2.2 き裂先端の開口幅と散乱波強度

疲労試験片に加工したノッチきずの半楕円形状であり、き裂先端部の応力拡大係数は⁵⁾⁶⁾、表面の半楕円板状割れの応力拡大係数 K_I^A を求めたうえで、ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, “Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components” に示されている膜応力補正係数と形状パラメータから算出した⁷⁾。

応力拡大係数 K_I^A を基にして、き裂先端開口変位CTOD(Crack Tip Opening Displacement)を求めた結果を図6に示す。き裂深さが最小の0.5mm試験体では、負荷応力0MPaの場合ではき裂開口幅が1 μ m以下で、2 μ m以上となるのは負荷応力40MPa程度となる。き裂進展深さが大きくなるにつれて、CTODは大きくなる傾向にある。

疲労試験片のスリットからのき裂が、それぞれの目標値に達した時点で、試験体に0MPa～147.1MPaまで14.7MPa(1.5kgf/mm²)ステップで負荷応力を加え、TOFD法によるき裂先端部からの信号を受信した結果を図7に示す。この結果からき裂深さ0.5mm試験体では、き裂先端からの散乱波信号が明確に識別できたのは負荷応力29.4MPa以上であった。このときのCTODは0.416 μ mと計算された。図2～図4の結果と若干異なるが、前者は溶接ひずみによる圧縮応力を受けた状態であり、後者は疲労き裂先端部で、塑性変形を伴うためである。

これらの結果から、疲労き裂が0.5mm以上進行した時点で、応力が29MPa(3kgf/mm²)を超えるとTOFD法

では確実にき裂先端の検出をできることが分かった。また、塑性変形を伴う疲労き裂では、き裂先端開口変位が10 μ m以上になると散乱波の信号強度は一定値を示すことが分かった。

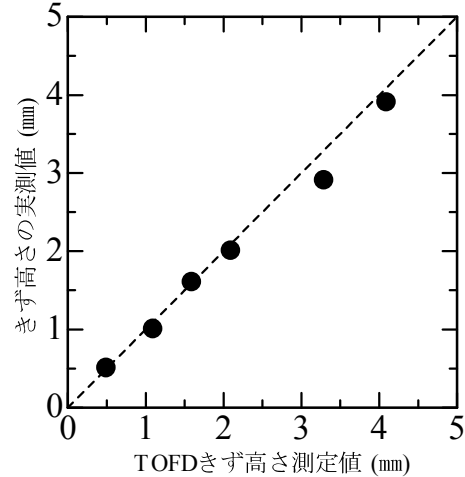


図5 疲労き裂深さの測定誤差

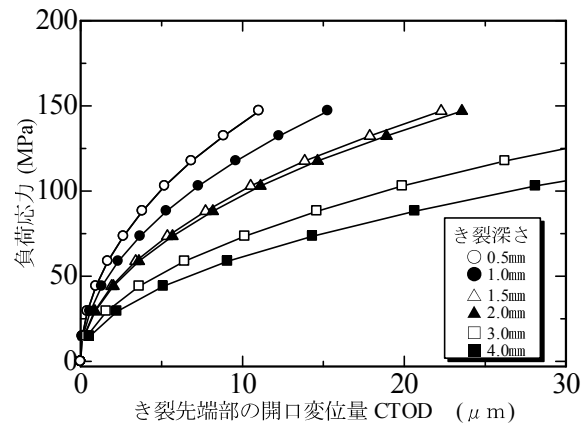


図6 応力条件下におけるき裂開口変位

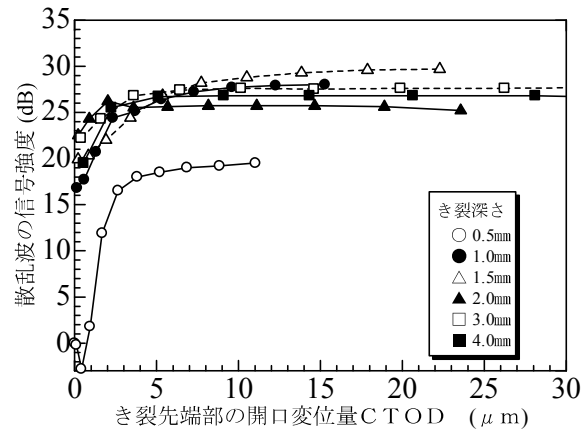


図7 疲労き裂先端の開口幅と散乱波強度

4. まとめ

本研究では、開口幅の少ない密着した欠陥の検出能を高めるためのTOFD用探触子の改良とともに、疲労試験によるき裂進展のモニタリングを行った結果、以下の知見を得ることができた。

- 1) TOFD法による散乱波及び回折波の信号強度は欠陥部のきず幅の影響を受け、圧縮応力を受ける溶込み不良では検出限界は $2\mu\text{m}$ 程度である。
- 2) 疲労き裂進展のモニタリング結果では、板厚10mmの場合、材料に29.4MPa以上の負荷応力が存在すれば、き裂進展深さ0.3mmを検出することが可能である。
- 3) TOFD法では、探触子の周波数と形状の改良により、板厚6mmまでの材料に対し適用可能なことが確認された。
- 4) 密着したきずの信号を効率よく受信できる高いSN比を有する探触子の開発を試みた結果、TOFD画像に寄与する探触子特性を知ることができ、周波数15MHzの高分解能型探触子が有効である。

最後に、本研究に実施に当たり、共同研究者として多大なご協力頂いた、株式会社シーエックスアール並びに株式会社検査技術研究所の関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 千葉県機械金属試験場，平成 14 年度 ORT 研修論文集 p44～48
- 2) 千葉県産業支援技術研究所，研究報告 2004, No.2 p-22～27
- 3) (社)日本非破壊検査協会，NDIS2423—2001：TOFD法によるきず高さ測定方法
- 4) (社)日本非破壊検査協会，平成 13 年秋季大会論文集 p43～44
- 5) (社)日本非破壊検査協会，金属材料概論，線形破壊力学
- 6) 森北出版，金属の破壊と強度：黒木剛司郎，大森宮次郎，友田陽共著，p-8～83破壊力学概説
- 7) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, Article A-300 Method for K_I Determination