

(解説)

超音波TOFD法の応用技術と適用事例

Industrial Applied Techniques of Ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) for Various Field Targets



竹裏英之*
Hideyuki CHIKURI



福島盛弘*
Morihiro FUKUSHIMA



長濱憲之*
Noriyuki NAGAHAMA



西明ゆう子*
Yuko NISHIAKI



石垣 正*
Tadashi ISHIGAKI

The ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) technique has been used mainly to detect and precisely find the size of flaws in welded butt joints. But industrial applicability of the conventional TOFD technique is restricted due to the inspection targets' shape complexity. In order to increase the applicability of the TOFD technique for real industrial targets, various improved TOFD techniques have been developed. In this paper, industrial applications and limitations of the conventional TOFD technique and newly developed TOFD technologies, which can overcome those limitations, are presented.

まえがき = 鋼材溶接部の検査方法として、パルス反射法による超音波斜角探傷が一般的に使用されている。この探傷では、斜角探触子から溶接部に超音波を照射し、内在するきずで反射する超音波の反射時間からきずの位置を、反射強度からきずの大きさを判断する。しかしながら、反射強度はきずの大きさだけでなく、きずの形状や傾きなどの性状に大きく影響を受けるため、きずの大きさを正確に求めることは容易でない。

TOFD (Time of Flight Diffraction) 法は、きずの検出や寸法測定方法の一つとして 1980 年代に英国で開発された手法である。送信用及び受信用の縦波斜角探触子を試験体表面に一定距離を隔て対向配置し、複数の受信波の時間差を測定することできずの高さが計測できる。

近年、TOFD 法は、石油・化学プラント向け圧力容器の溶接部の検査に適用されており、その応用は他の産業に拡大されつつある。神鋼検査サービス㈱では、各種の機械製品や生産設備の検査に対して、TOFD 法を実用化する中で様々な技術課題の改善を進めてきた。本稿では、通常の TOFD 法の産業利用における限界について言及し、それを克服するために開発した新しい TOFD 法について紹介する。

1. TOFD 法の原理

図 1 に、溶接部を探傷する場合の探触子配置と走査方法を示す。図 1 に示すように、指向角の大きい縦波斜角探触子を 2 個一組とし、溶接部を挟んで一組の探触子に対向配置する。一方の探触子から超音波パルスを送信し、もう一方の探触子で受信する方法で、溶接部の板厚方向に対して一度に広範囲な探傷を行う。探触子を配置した後、対向した 2 個の探触子間隔を一定にしたまま溶接線方向に走査し、任意の走査間隔ごとに探傷波形を収

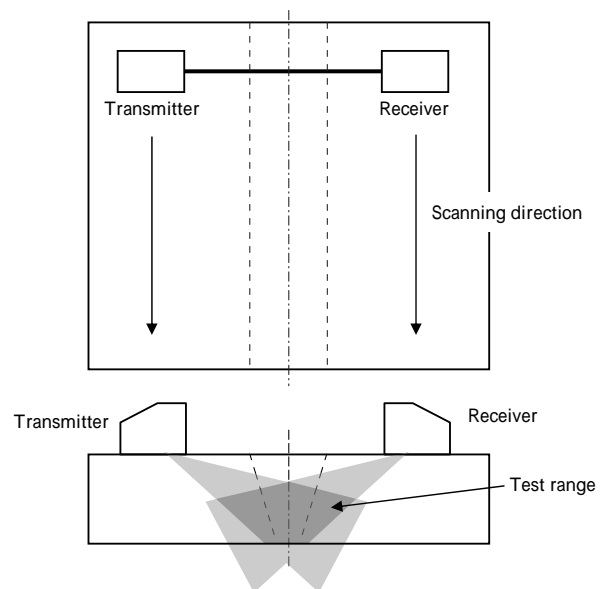


図 1 TOFD 法の探触子配置と走査方法¹⁾
Fig. 1 Probe arrangement and scanning method in TOFD technique¹⁾

集する。

図 2 に、内部きずがある場合の超音波の伝搬経路と探傷波形を示す。はラテラル波の伝搬経路を示している。ラテラル波とは探触子間を直接伝わる超音波で最も短距離の伝搬経路をとり、最も早い時間に検出される。次に、及びはきず上端部及び下端部からの回折波の伝搬経路を示している。探傷波形を見るとラテラル波の次に上端回折波が、その次に下端回折波が観測される。

は裏面反射波の伝搬経路であり、下端回折波の次に観測される。これら ~ の伝搬時間の差からきず高さや深さを求めることができる。なお、ここで説明した ~ の波は全て縦波である。TOFD 法では、固体中で最も速い縦波を用いることで、縦波から横波へのモード変換

* 神鋼検査サービス株式会社 技術部

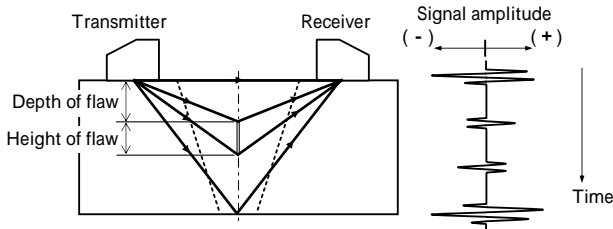


図2 内部きずがある場合の超音波伝搬経路及び探傷波形¹⁾
Fig. 2 Propagation path and received amplitude of ultrasonic wave¹⁾

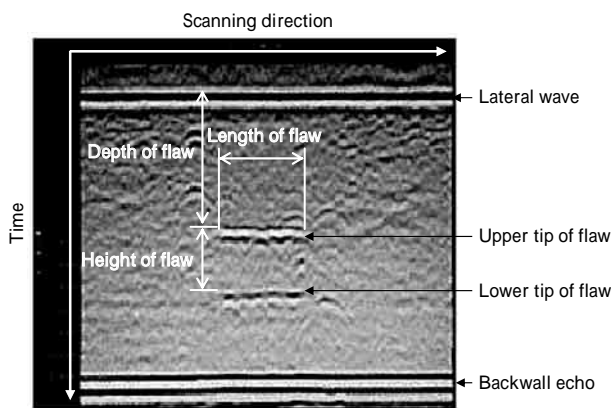


図3 きずがある場合に得られる画像例
Fig. 3 Example of TOFD data image

などによる妨害信号の影響を低減し、きず先端からのエコーを明瞭に検出できる特徴がある。また、超音波の振幅を用いてきず高さ測定を行うのではなく、伝搬時間からきず高さを測定するため、探傷の条件などの影響を受けにくく、安定した測定が可能である。

図3に、試験体内部にきずがある場合に得られる画像を示す。各走査位置における探傷波形の振幅を階調表示した画像である。一般的に、図3のように超音波照射方向と直交する方向に走査した場合に得られる画像はDスコープ表示と呼ばれる。きずの測定は、TOFD法により得られた画像からきず指示模様（上端回折波や下端回折波による模様）の時間位置（縦軸）と走査位置（横軸）を読み取って行う。

2. TOFD法の課題とその改良

TOFD法は、圧力容器の溶接部の検査に対して有効な検査手法である²⁾³⁾。しかしながら、検査対象が複雑な形状を有する場合にその適用が制限される。本章では、TOFD法の課題とその改良について報告する。

2.1 複雑な形状を対象としたときの課題

複雑な形状に対処する上でのTOFD法の主たる課題は以下の通りである。

1) 探触子配置の制約

平板突合せ溶接のような単純形状の検査対象物にTOFD法を適用する場合は、送信探触子も受信探触子も同一平面上に配置できるが、複雑な形状の場合、そのような探触子配置をすることはできない。したがって、適用可能な探触子配置とそのデータ解析手法を開発する必要がある。

2) エコーの解釈や解析が困難

TOFD法が平板突合せ溶接のような単純形状の検査対

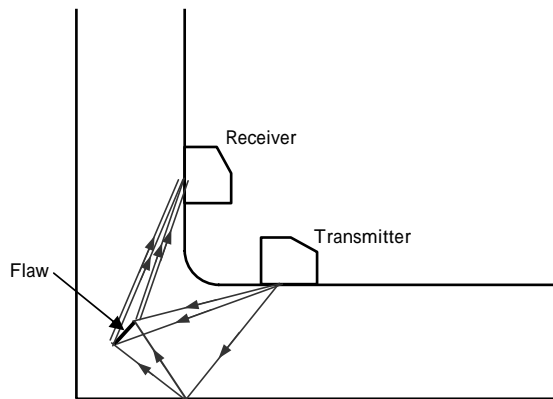


図4 複雑な検査対象に対する探触子配置と超音波伝搬経路の例
Fig. 4 Probe arrangement and propagation path of ultrasonic wave for complicated target

象物に適用される場合は、観測された信号波形に対して1章で述べた手法でラテラル波と裏面反射波の間に生じる回折波をきず端部信号と判定することができる。しかし、単純形状でない検査対象物の探傷を行う場合、きずの位置によっては縦波による送信きず受信という伝搬経路だけでは説明できない信号波形が観測される場合がある。その一例を図4に示す。送信用探触子から照射された超音波の一部は、いったん板の裏面で反射してきずに至り、上端回折波と下端回折波が発生する。受信用探触子は、これら二つの回折波が入交じった状態で受信する。この場合の伝搬経路は、指向角の広い超音波が裏面で反射するため、送信裏面きずの伝搬経路は特定の1本とは限らない。横板の板厚を正確に把握した上で測定を行わないと裏面での反射位置を誤り、測定誤差を生む結果になってしまう。また、裏面での反射の際、モード変換した波も発生するため、エコーの解釈やきずの位置特定を困難にする。

3) きずへの入射角による回折エコー強度の変化

TOFD法では、きずの向きに対する感度は通常のパルスエコー法よりも低い。きずの端部で回折した信号強度はきずへの入射角によって異なる。回折信号の強度を高めるために、きずへの入射角を適切に設計する必要がある。

2.2 CG-TOFD (Complex Geometry Time of Flight Diffraction) 法の導入

神鋼検査サービス(株)は、AEA Sonomatic社で開発されたCG-TOFD(Complex Geometry Time of Flight Diffraction)法⁴⁾を技術導入し、前述の課題の解決を図った。図5にCG-TOFD法の探触子配置とデータ解析例を示す。図の左側にあるDスコープ表示には様々なモードによる指示模様が観測される。CG-TOFD法では、検査対象の形状による信号ときず端部で回折した信号の伝搬時間を超音波のモードごとに計算し、右側のモデル図にきずが存在する可能性のある範囲を示すローカスを描く。きず端部の位置は異なるローカスの交点から求められる。

2.3 片側TOFD法の開発

CG-TOFD法の活用により、前述した三つの課題のうち、探触子配置や信号解析については、使用上の制約を

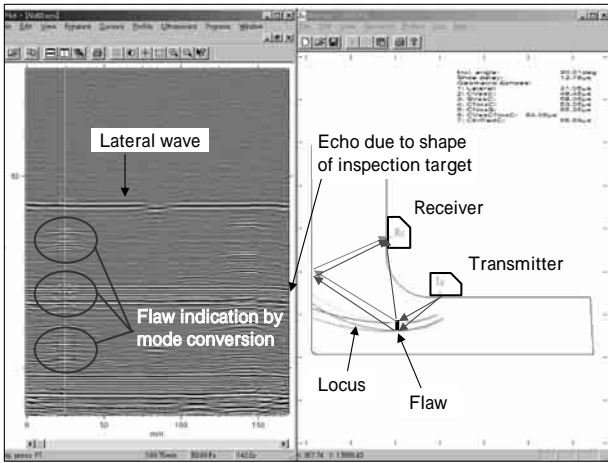


図5 CG-TOFD法の探触子配置とデータ解析例
Fig. 5 Example of CG-TOFD data

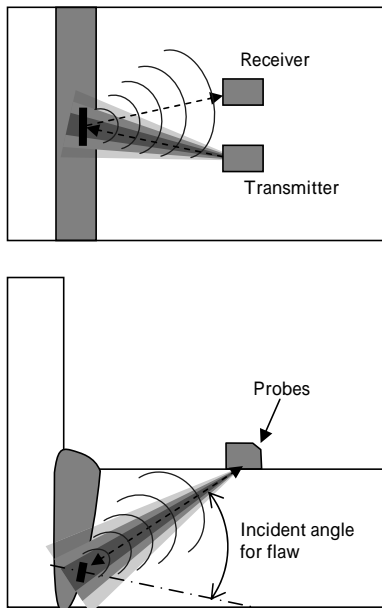


図6 片側 TOFD の配置例
Fig. 6 Example of the one-side-access probe layout

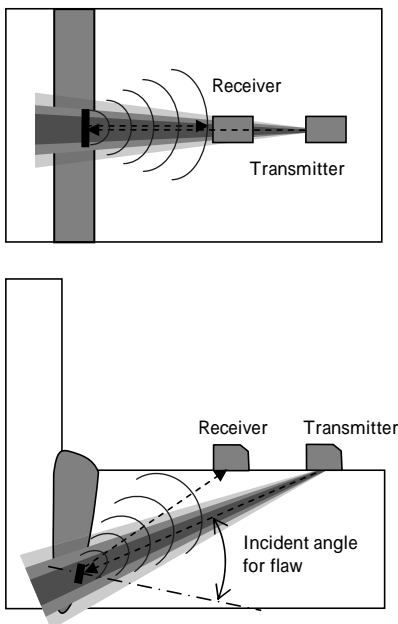


図7 片側 TOFD の発展例
Fig. 7 Another example of one-side-access probe layout

伴いながらも部分的に改善できた。しかし、回折エコー強度については、従来の探触子配置は十分ではない。

例えば、厚肉のL字継手溶接部を検査する場合、図4に示した探触子配置では、底面での反射を使用するため、回折波の強度ならびにS/N比が低くなる。また、どの深さで反射するのかを正確に求めるためには、検査対象の板厚を正確に把握しておく必要がある。これらの課題に対して、以下の2点の改良を行った。

第一に、図6に示す片側TOFD法の探触子配置を考案した⁵⁾⁶⁾。通常のTOFD法では、送信探触子と受信探触子は溶接線を挟んで対向させて配置していたが、本配置では、送信探触子と受信探触子を同じ側の探傷面上に並列配置する。本片側TOFD法では、検査対象の形状の制約を受けにくく、きずに対する入射角を適切に選定できることから、受信する回折波強度の低減を抑制させることが可能である。

また、底面での反射波を使用してきずの検出と解析を行う場合、検査対象の板厚を正確に把握できないと誤差が生じる問題点があった。しかし、片側TOFD法では、きずに直接超音波を照射して回折波を受信するため、肉厚の製作誤差の影響を受けにくく、高い検査性能が得られる。また、片側TOFD法の発展例として、図7に示すように、探触子を直列配置する方法を考案した。同一線上に配置するため、溶接線の長さ方向の精度が向上するとともに、対象面が曲面の場合でも走査しやすい構成となる。

第二に、新しい探触子配置での探傷によって得られたTOFDデータを解析するための新しいプログラムを開発した。この新しいプログラムは、きず指示模様が検出されている時間に基づいてビーム路程を計算し、検査対象を模式化した幾何モデル図の中にきずの存在する可能性がある位置にローカスを描く(図8及び図9を参照)。ここで描かれるローカスは、超音波の広がり方を考慮しているため、円弧状のローカスとなる。また、検査員は、こ

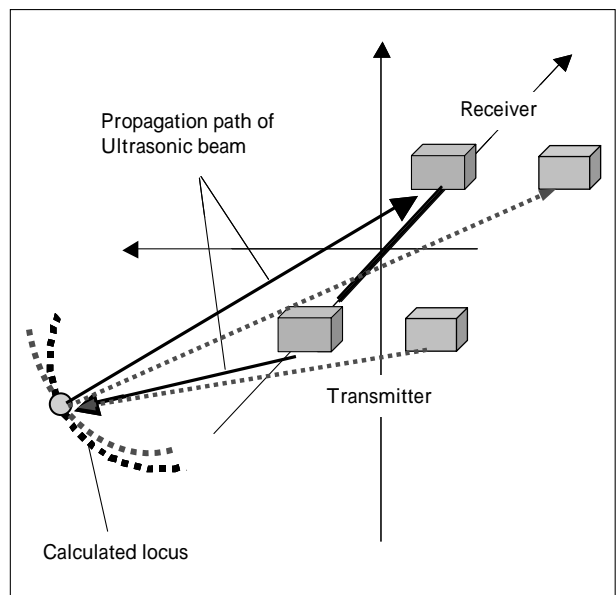


図8 きず信号源の位置解析
Fig. 8 Calculated locus from echo signal

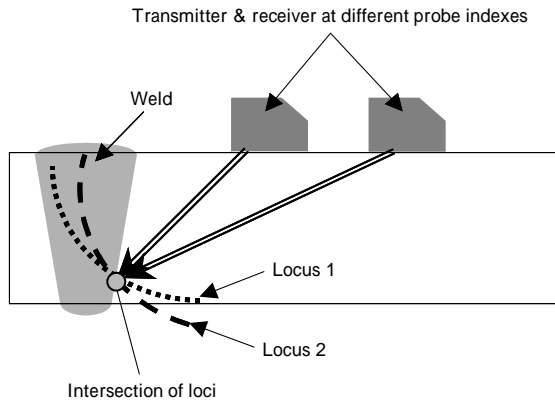


図9 探触子位置変更によるきず信号源の推定

Fig. 9 Estimation of flaw tip position by different probe arrangement

の新しいプログラムを用いることによって様々なモードによるきず指示模様を識別することができるうえに、縦波モードの回折波に加え、同じきず端部でモード変換した回折波を解析することもできる。このため、きず指示模様がモードの違いによって複数検出される場合は、ローカスも複数描画され、これらの交点にきずが存在すると判断される。

これらの改良によって高精度なデータ解析を実現することができた。また、計測データをデジタルで保存し、収集後に解析することから、様々なモードや走査位置による指示模様からきず位置を多面的に計測することが可能になった。

この片側 TOFD 法の開発により、複雑な形状や応力腐食割れ検査など、TOFD 法の適用範囲を拡大させることができた。

3. 開発した TOFD 法の適用事例

3.1 十字溶接継手の検査

建設機械、造船、鉄骨などを主たる対象とした鋼構造

物の溶接において、十字継手やT継手の溶込み不良を正確に検査することは困難とされていた。開発した片側 TOFD 法を用いて、十字溶接継手における溶込み不良部の高さの検出性能を確認するため、図10に示す3種類の試験片を製作した。各試験片の溶込み不良部の設計高さ、計測した高さを表1に示す。また、開発した TOFD データ解析ソフトにより試験片 No.2 を対象に処理した一例を図11に示す。通常の TOFD 法とは異なり、本手法は明瞭な回折エコーが検出でき、高い計測精度が得られた。

3.2 応力腐食割れの検査

化学プラント用ステンレス製容器に発生する応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking : 以下 SCC) を検査するため、開発した片側 TOFD 法を適用した。8mm 厚のステンレス鋼板の突合せ溶接部に人工的な SCC を製作した試験片を図12に示す。ステンレス鋼板溶接部の結

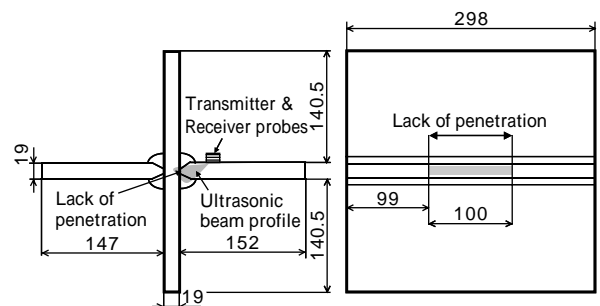


図10 十字溶接継手の試験片

Fig.10 Test piece of a cross welded

表1 溶込み不良部の高さの計測結果

Table 1 Height measurement results of lack of penetration

No. of test piece	Target height (mm)	Measured height (mm)
1	3	3.0
2	5	5.4
3	9	10.2

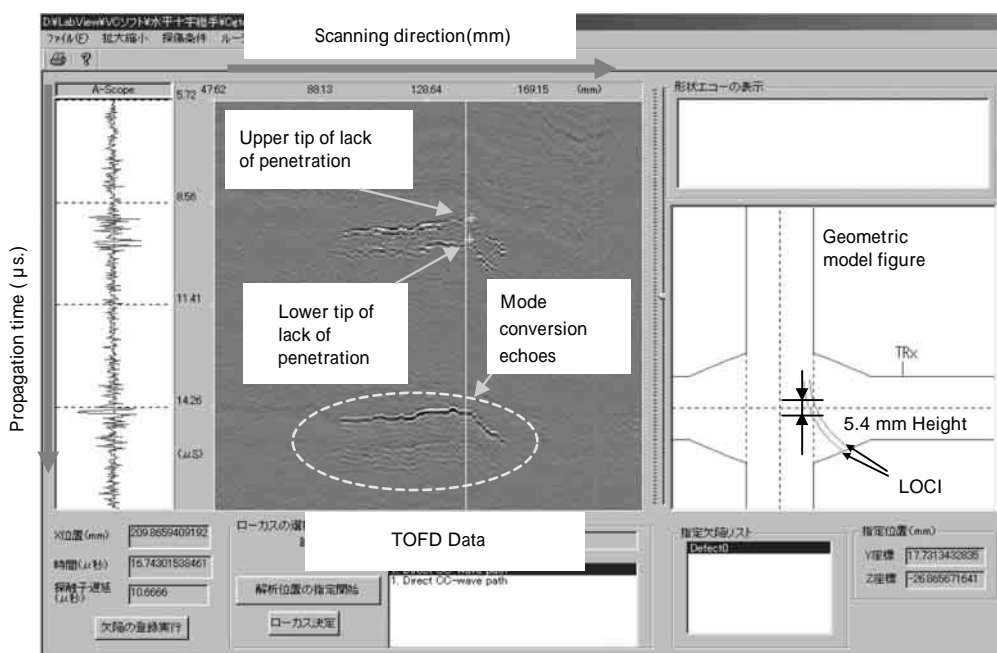


図11 片側 TOFD 法の解析結果

Fig.11 Data analysis result of one side TOFD technique

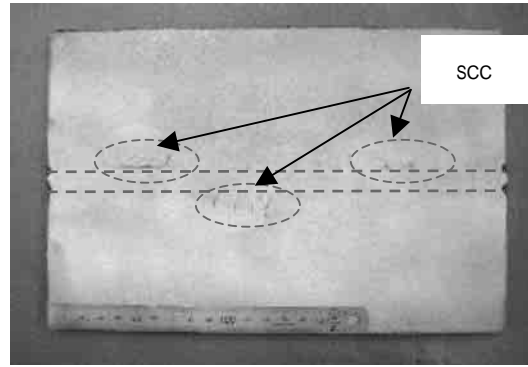
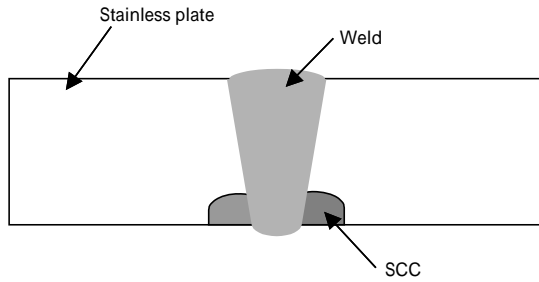


図12 ステンレス鋼板溶接部の人工 SCC
Fig.12 Artificial SCC on stainless steel plate weld

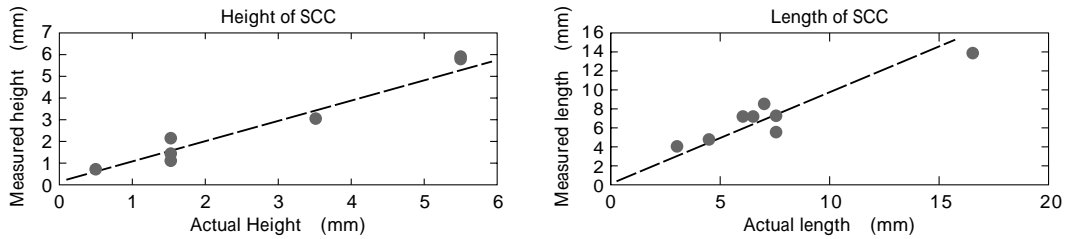


図13 SCC の高さおよび長さ計測結果
Fig.13 Results of SCC height and length measurements

晶粒径が大きく、超音波が散乱されやすいため、従来のプローブ配置ではきずによる回折エコーの弁別ができなかった。片側 TOFD 法では、溶接部を回避して超音波を送受信することにより、図13に示すようにきずの高さおよび長さの計測結果が実際のきず性状に良く一致することを確認した。

むすび=通常の TOFD 法の産業用途における限界と、それを克服するために開発した新しい TOFD 技術について紹介した。実験の結果、片側 TOFD 法による新しい探触子配置と、そのデータ解析ソフトの有効性を確認した。また通常の TOFD 法に対して、機能的に付加するこ

とによって様々な産業用途に適用拡大できるとともに、探傷の高精度化が実現できることを確認した。

参考文献

- 1) 村井康生ほか：神戸製鋼技報，Vol.49, No.2(1999) p.45.
- 2) Nose S. et al. : Proceedings of ASME/JSME Joint Pressure Vessels and Piping Conference, Vol.371(1998) p.143.
- 3) Nose S. et al. : Proceedings of the 52nd Annual Assembly of IIW(1999)
- 4) Trimbom N. et al. : Proceedings of the 7th European Conference on Non-Destructive Testing(1998)
- 5) 鈴木紀生ほか：特許 3740123号(2005)
- 6) Nishikawa A. et al. : Weld World, Vol.49, No.9-10(2005) p.68.