

超音波探傷試験TOFD法に関する研究
 ～薄板材料におけるTOFD法の適用～

素材開発室 立川克美, 斉藤一夫
 プロジェクト推進室 細谷昌裕, 企画調整室 長瀬尚樹
 (株)シーエックスアール千葉営業所 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
 ～Application of TOFD Technique for Thin Plate～

Katsumi TACHIKAWA, Kazuo SAITHO, Masahiro HOSOYA, Naoki NAGASE,
 Katsumi FUJIOKA¹, Yosiyomi UDA¹, Yosio IDO¹ and Hideo HAYASI²
¹CXR Corporation ²KGK Co.,Ltd

TOFD法による欠陥高さ測定は従来のパルス反射法と比較して測定精度は格段に高精度である。TOFD法のJIS規格化が望まれているところであるが、板厚20mm以下の材料に対する測定例はほとんど報告されていない。本研究は20mm以下の薄鋼板を対象に超音波TOFD法を用いて溶込み不良を測定し、薄板に適用する際の問題点を検討したところ、通常型の探触子では6mm板厚が下限値と目されるが、探触子の改良により6mm以下の材料への適用可能性を見いだした。更に、きずの開口幅が散乱波や回折波強度に大きく影響する結果も得た。

1. はじめに

金属材料中に存在する欠陥の非破壊検査では、内部欠陥については放射線や超音波を、表面欠陥については磁気や浸透探傷が有効とされている。しかし、いずれの手法も欠陥の指示長さ測定には有効であるものの、高さ(深さ)測定はほとんど不可能か、できても信頼性に乏しいのが実情である。

近年、英国にて欠陥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適用事例が報告されるようになった。しかし、これらの報告では、人工欠陥を用いた試験体では高い検出性と精度が得られるものの、自然欠陥では必ずしも良好な検出精度が得られないとの意見がある。

本研究では、平成13年度からの基礎的研究¹⁾やORT研修²⁾で得られた知見等を基に、板厚20mm以下の溶接試験材を対象に、欠陥の検出性と高さ測定の精度向上を目的に民間企業との共同研究を実施した。

2. TOFD法の特徴と現状

TOFD探傷法(Time-of-flight diffraction technique)は超音波モードの中で最も伝搬速度の速い縦波を使用し、2つの探触子間に存在する

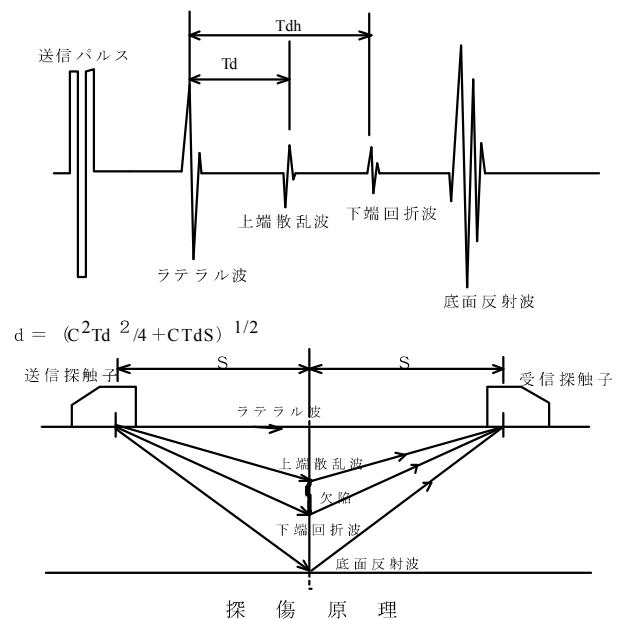


図1 一般的なTOFD法の原理

欠陥上端部からの散乱波と欠陥下端部からの回折波の伝搬時間差を計測して欠陥位置を測定する方法である。このTOFD法は欠陥高さを0.2mm単位の高い精度で測定可能なことが過去の基礎的実験や平成14年度のORT研修による実験で確認されている。

TOFD法は主として重工業の分野で板厚50～300mmの極厚鋼板を対象に適用した報告事例が多い。これらのデータを基にして2001年に、板厚20mm以上の板厚範囲で(社)日本非破壊検査協会の団体規格³⁾に制定された。

社会資本である橋梁、建築構造物、エネルギー関連設備等の多くは板厚20mm以下の構造物で、これらは20世紀後半に作られたものが多い。これら構造物をできるだけ長寿命で安全に使い続けるには保守点検が重要な課題となり、非破壊的な測定方法の信頼性向上が要求される。亀裂などの欠陥高さを高精度で測定できれば、構造物の残存寿命の推定精度が増し、安全対策上からも欠陥高さの測定は重要な責務を帯びている。本研究では、20mm以下の材料に対する研究を行い、薄板材料におけるTOFD探傷法を確立し、関連企業への技術支援並びに将来TOFD関係のJIS規格制定に備えて、参考データの提供を目的とする。

本研究を実施するにはTOFD法の装置と超音波を送受信する超音波探触子の開発が必要である。そこで、TOFD装置を所有する企業及び探触子専業メーカーとの3者による共同研究とした。

3. 実験計画

共同研究は下記の項目について、平成15、16年度に亘って実施する。

- (1) 模擬亀裂欠陥のTOFD計測と材料切断にて得られた実測値との測定誤差検出・誤差要因の検討。
- (2) 下限板厚6mmへの適用並びに探触子の開発
- (3) 疲労試験機を使用し、自然欠陥に近い割れ試験体の検出性調査
- (4) 欠陥指示長さの検出方法の検討

この計画中で、平成15年度は項目(1)及び(2)を重点的に実施した。(1)は共同研究者が設備する探触子を用い、突合わせ溶接部の溶込み不良をき裂と見立て、TOFDによる欠陥高さの測定精度を求め、試験部のマクロ断面試験による実きず高さとの比較から検討することとした。

さらに(1)の結果を検討し、検出性の高い探触子の開発を試みることにした。

3. 1 装置

実験装置は図2の共同研究者が所有するTOFD探傷装置R/D Tech製のデジタル型超音波探傷装置を用いた。使用探触子は平成14年度ORT研修¹⁾で得られた知見を基に、クラウトクレーマー製の縦波斜角探触子φ0.25inchで、分解能と検出精度を高めるために、最もSN比が良くなるように送信側探触子周波数を15MHz、受信側探触子周波数を7.5MHzの組み合わせで屈折角60度を用いた。

TOFD法は魚群探知機のように板厚断面を画像表示するものであり、検出性の良否は欠陥画像がシャープに表示されることが条件である。それには欠陥からの散乱波や回折波の信号(S)と材料及び電氣的ノイズ(N)とのSN比が高いことを要求される。

3. 2 試験体

実験に用いたSM鋼材の板厚は14mm、12mm、9mm及び6mmで、溶接部溶込み不良の試験体概略を図

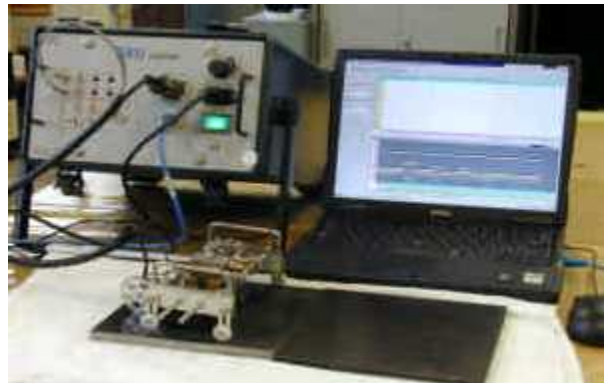


図2 TOFD装置 (R/D Tech製)

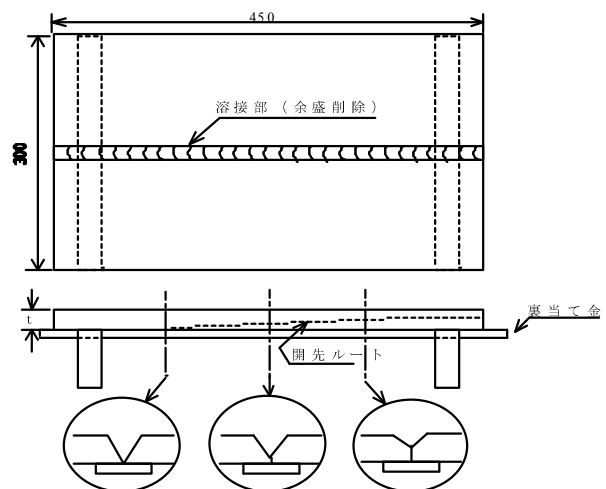


図3 試験体の概略寸法

3に示す。欠陥の作製は、溶接線方向に対してルート面高さをテーパ状に加工し、溶込み不良の高さが緩やかに変化するようにした。余盛ビードはTOFD測定のために削除した。

3.3 切断マクロ試験

TOFD測定で得られた画像データを基に、溶込み不良スタート点を特定し、これより30mm手前から10mmピッチで試験体を切断し、実欠陥高さを万能測定顕微鏡にて測定した。なお、超音波が散乱する溶込み不良先端部の形状観察及び測定は顕微鏡と走査型電子顕微鏡を用いた。

4. 結果及び考察

4.1 欠陥高さの測定

TOFD装置による測定から得られたDスコープ画像と欠陥先端深さ位置と断面マクロ試験による実測値の結果を板厚毎に図4～図11に示す。

14mm板厚ではTOFD測定結果と実欠陥高さとの相関が良好であるが、×印で示すように所々で欠陥画像の得られない部分がある。この傾向は板厚12mmでも同様の結果が得られた。6mm板厚では

中間層での実欠陥との整合は取れていたが、板厚底部付近での検出ができなかった。この傾向は板厚9mmでも同様で、使用探触子の分解能とSN比の問題と共に、送受信探触子間距離の問題も考えられるが、これらについての検証は次年度の実験にて確認する。

この結果から、欠陥高さのサイジングについては各板厚の試験体とも、満足できる結果が得られた。しかし、図4～図7に示すように数カ所で欠陥が存在するにもかかわらず、散乱波の受信できない箇所が生じた。

また、図10に示す板厚6mm試験体で、TOFD法及び放射線透過試験結果において、基準点からの距離200mm以内では溶込み不良は存在しないとの結果が得られたため、この位置をマクロ試験のスタート位置とした。しかし、切断の結果この位置よりも左側に溶込み不良の存在が明らかとなった。そこで、取得したTOFD画像データのコントラストを高めたところ、溶込み不良の先端部らしき画像が得られることが分かった。このことは、非常に微弱な散乱波信号を受信していたこ

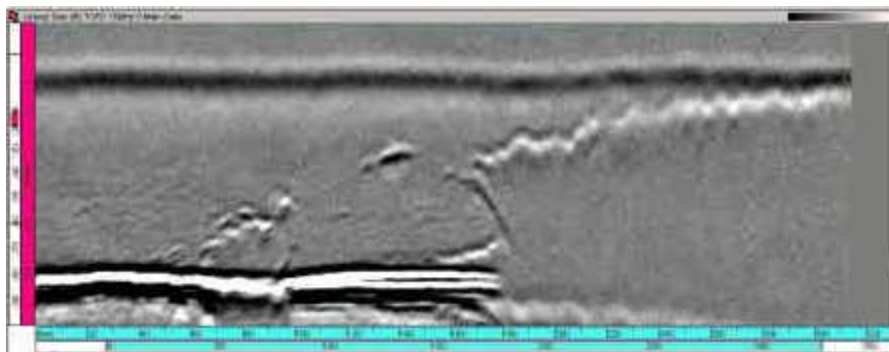


図4 板厚14mm試験体のTOFD画像

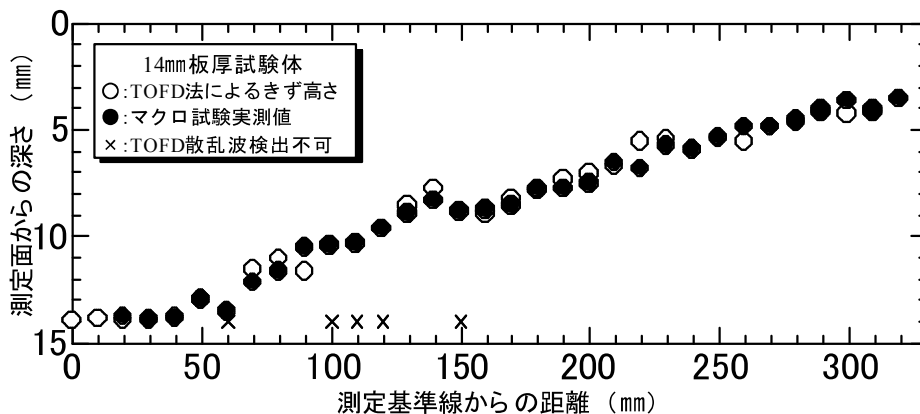


図5 板厚14mm試験体のTOFDきず高さ測定と実測値

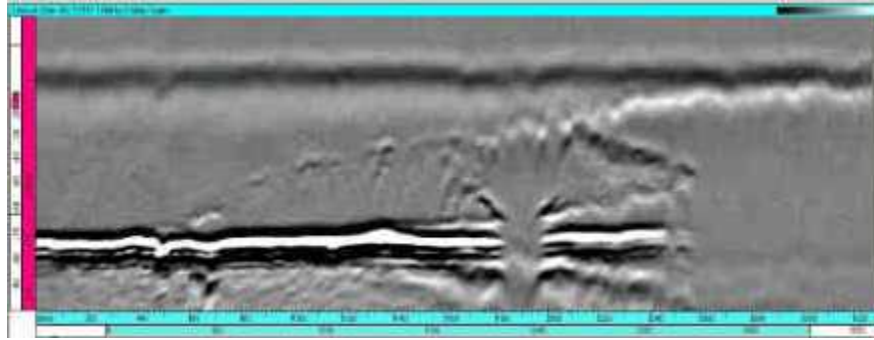


図6 板厚12mm試験体のTOFD画像

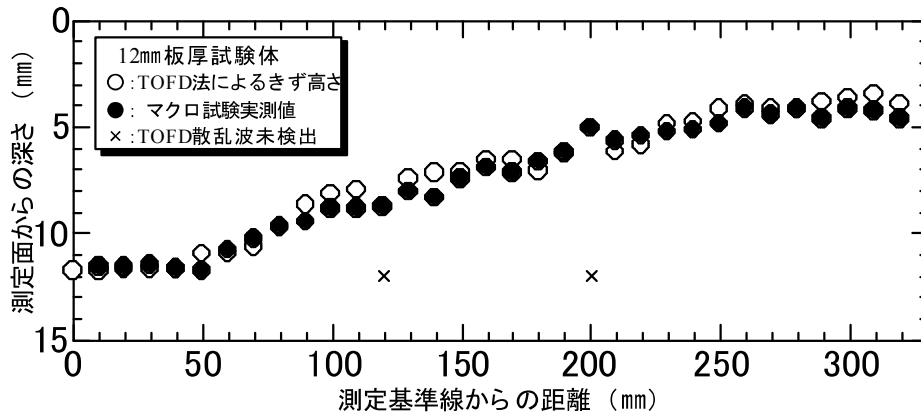


図7 板厚12mm試験体のTOFDきず高さ測定と実測値

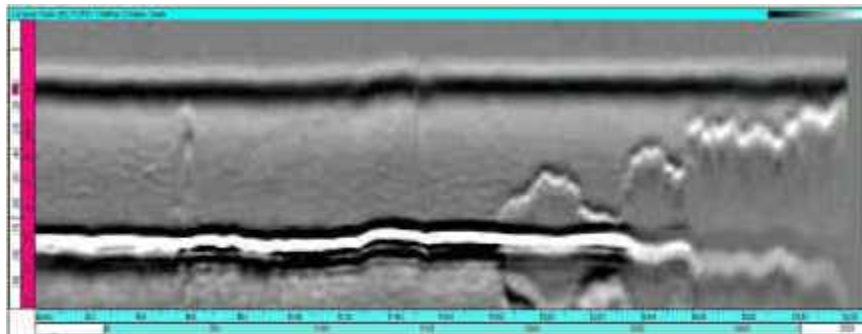


図8 板厚9mm試験体のTOFD画像

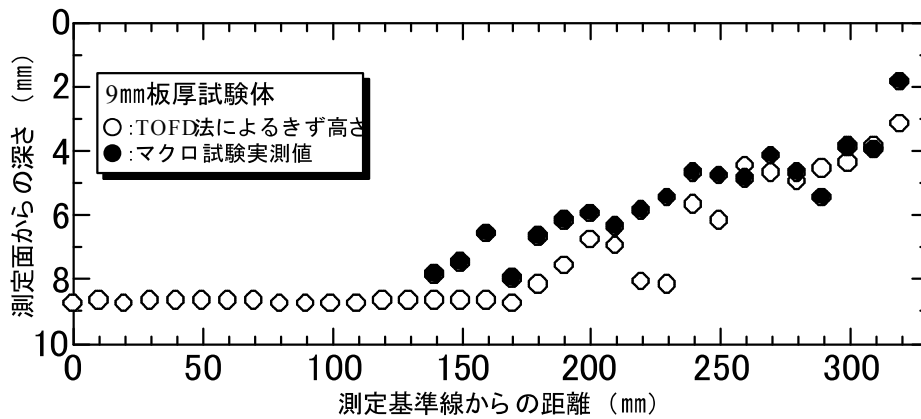


図9 板厚9mm試験体のTOFDきず高さ測定と実測値

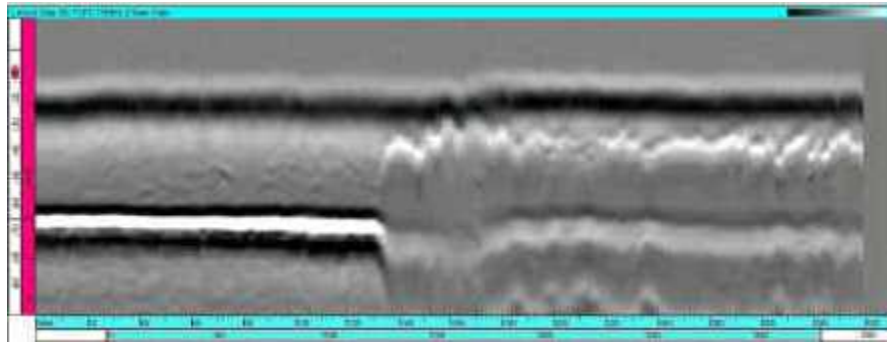


図10 板厚6mm試験体のTOFD画像

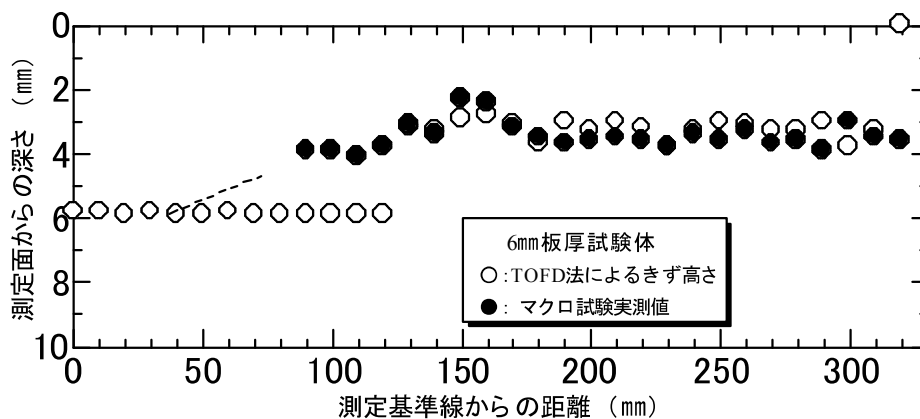


図11 板厚6mm試験体のTOFDきず高さ測定と実測値

とを意味し、欠陥検出性は探傷感度と表示画像の階調も重要なファクターであることを示している。

4.2 欠陥先端部の幅と散乱波強度の検討

過去に実施した基礎実験やORTの研究では、十分な散乱波の超音波信号強度が得られていた。これは、使用した試験片は放電加工機により作製した人工きずで、そのきず幅は $300\sim 500\mu\text{m}$ であった。三原⁴⁾らは散乱波・回折波強度ときずの先端幅に密接な関係があると報告している。

そこで、14mm試験体を対象に10mmピッチで切断したマクロ試験片のきず先端部の幅と同位置の散乱波強度の関係を求めたのが図12である。散乱波の信号強度は、試験体の健全部で、ラテラル波と底面波間のノイズレベル(10%)との比で表した。図12中の散乱波強度が0dBのプロット点は、図5で×印の付いた所と同一箇所である。残りの1箇所は欠陥高さが0.3mmに満たない箇所である。

この結果から、今回の実験に使用した探触子及び探傷条件では、TOFDによるきず幅の検出限界は約 $1.5\mu\text{m}$ であることが分かった。

4.3 改良型TOFD探触子の検討

良好なTOFD画像を得るには超音波探触子の距離分解能とSN比の向上である。分解能の向上を図るにはダンピングを強力に掛けると共に周波数を高める手段がある。しかし、過度に行うと超音波のエネルギー低下と減衰を招きSN比が低下する。そこで、今回対象とする板厚範囲で、いくつかの条件を組合せて良好な検出結果が得られるようなTOFD用縦波探触子を試作した。

図13は試作No.5の探触子を送信側探触子とし、試作No.4の探触子を受信側にセットして、図11の波線で示した6mm試験体の左側200mm以内の測定点における位置でのAC波形である。図14は同位置を本研究の通常型による15MHz探触子で測定したものである。通常型探触子では欠陥エコーはラテラル波の中に埋もれており、この状態では画像の表示は望めない。試作の探触子でのTOFD装置による画像描写は未実施であるが、両者のAC波形比較からSN比のよい画像が期待できる。

今回の研究成果により、さらにSN比の向上を目指した改良型探触子製作の知見と可能性を見いだした。

5. まとめ

1. 板厚14mm及び12mmの溶接欠陥部においても、欠陥高さの測定結果は高い精度で測定可能なことが確認された。しかし、板厚9mm及び6mmでは板厚の中間層までは検出及び測定精度は良好であったが、板厚底部付近の検出性が不十分であった。
2. 欠陥上端部の散乱波波強度は欠陥先端部の幅に大きく依存する。本実験に用いた送信側探触子周波数15MHz、受信側探触子周波数7.5MHzの組み合わせの場合、欠陥の検出限界は欠陥先端幅で約1.5 μ mであった。
3. 薄板では探触子の接近限界距離が測定結果に影響を及ぼす。探触子のくさび形状や送受信探触子特性の改良を図り、さらに高分解能と高いSN比の探触子開発を目指す。

参考文献

- 1) 千葉県機械金属試験場, 平成13年度研究報告 p18~20
- 2) 千葉県機械金属試験場, 平成14年度ORT研修論文集p44~48
- 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

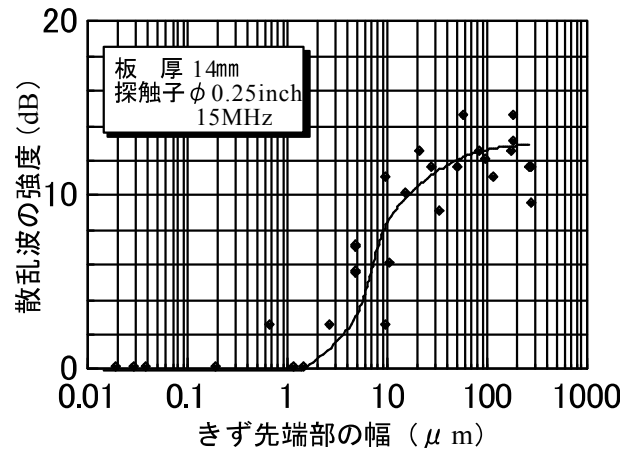


図1.2 欠陥先端幅と散乱波強度との関係

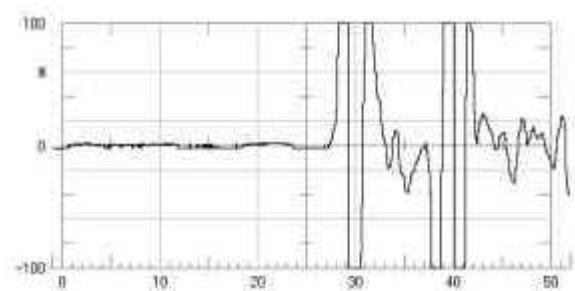


図1.3 試作探触子のAC波形

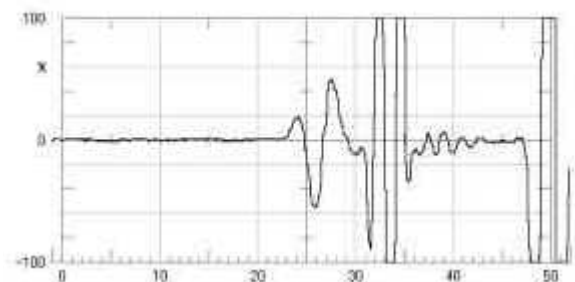


図1.4 既存タイプのAC波形