

第19回 千葉県非破壊検査研究会・研究発表会

〔千葉県非破壊検査研究会・神奈川県非破壊試験技術交流会
合同研究発表会〕

講演資料



日時 平成16年12月3日(金) 10:00~14:50

場所 君津勤労者総合福祉センター

目 次

発表会

1. 超音波プローブアレイを用いた薄鋼板のオンライン内部探傷技術 1
J F E 技研(株) ○高田 一
J F E スチール(株) 山崎拓也, 戸村幸男, 佐々木聡洋, 荒谷 誠
2. 磁化 E C T の検出信号とノイズ信号の数値解析による評価 7
職業能力開発総合大学 ○橋本光男, 浅井晃一
3. 塗装上からの回転一様渦電流プローブによる溶接部の検知について 11
日本大学大学院 ○成瀬 譲
日本大学生産工学部 星川 洋, 小山 潔
4. 超音波厚さ計用探触子の音場とエコー 17
神奈川県産業技術総合研究所 ○山田尚雄
5. 航空機の構造について 23
独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 ○松嶋正道
6. モード変換波法に関する実験的検討 29
ジャパンプローブ(株) ○高橋雅和
7. 自動超音波垂直探傷における検出性能の比較 37
(株)東京鉄骨橋梁 柳沼安俊, ○稲葉正利, 藤井淳平
8. J I S 技量認定の問題点と海外訓練センター事情 47
サイテックアソシエーツ ○柳 千秋

超音波プローブアレイを用いた薄鋼板のオンライン内部探傷技術

An On-line Detection Technique for Internal Flaws in As-hot-rolled Steel Strip Using Ultrasonic Probe Array

○高田 一* 山崎拓也** 戸村寧男** 佐々木聡洋** 荒谷 誠**
Hajime Takada Takuya Yamasaki Yasuo Tomura Toshihiro Sasaki Makoto Aratani

* JFE 技研(株)

JFE R&D Corp.

**JFE スチール(株)東日本製鉄所
East Japan Works, JFE Steel Corp.

概要

一定の幅の線状領域に存在する薄鋼板の微小な内部欠陥を1度の超音波送受信で検出可能な探傷方法および実用装置を開発し、東日本製鉄所千葉地区の酸洗ラインに設置した。オンラインテストの結果、再現性良く探傷が可能で、体積 $5 \times 10^{-5} \text{mm}^3$ の微小な介在物欠陥を検出できることを確認した。本装置は、順調に稼動を続けており、鋼板の内部品質保証に役立てられている。

KEYWORDS: Internal flaws, Non-metallic inclusion, Probe array, Steel strip

1. 緒言

薄鋼板の代表的な内部欠陥としてアルミニウムやカルシウムの酸化物を主な成分とする非金属介在物(以下、介在物)があげられる。これら介在物が存在する部位に大きな塑性変形が加えられると割れや破損が発生するため、ユーザーの製造工程において深絞りや絞りしごき成形などを加えられる薄鋼板は、板波探傷[1]や漏洩磁束探傷[2],[3]によって介在物検査されてから出荷されている。なお、漏洩磁束探傷の適用先は缶の素材となる冷延鋼板の出荷検査[2]に限られている。

最近、省資源・軽量化を目的とする鋼板の薄肉化、環境対策を目的とした塑性加工方法の変更により、有害な介在物のサイズは微小化してきており、薄鋼板の介在物検査手段には、従来の漏洩磁束探傷や板波探傷よりも高い検出能が必要となってきた。

一方、薄鋼板を製造する側からは、介在物検査の結果に応じて薄鋼板の用途を変更して歩留まりを向上させるため、精度の良い介在物検査を冷間圧延の前に行いたいというニーズがある。

上記の事情に鑑み、既に報告したリニアアレイプローブと電子スキャンとを組み合わせた二探触子による探傷法[4]をさらに発展させ、冷間圧延前の薄鋼板のオンライン探傷に適した検出能の高い水浸超音波探傷法(以下、超音波ラインセンサによる探傷方法)を開発し、東日本製鉄所千葉地区第一冷間圧延工場の酸洗ライン(以下、6PIC)に実用装置を設置したのでその概要を紹介する。

2. 超音波ラインセンサによる探傷方法とその特長

Fig.1 に超音波ラインセンサによる探傷方法の概要を示す。リニアアレイプローブからなる送信プローブおよび受信プローブを被検材を挟んで対向させて配置する。送信プローブからラインフォーカス(線集束)超音波ビーム(周波数:25MHz)を被検材に向けて送信し、介在物欠陥および被検材の表面または裏面で各1回反射した欠陥反射波を受信プローブによって収集する。受信プローブの各エレメントが

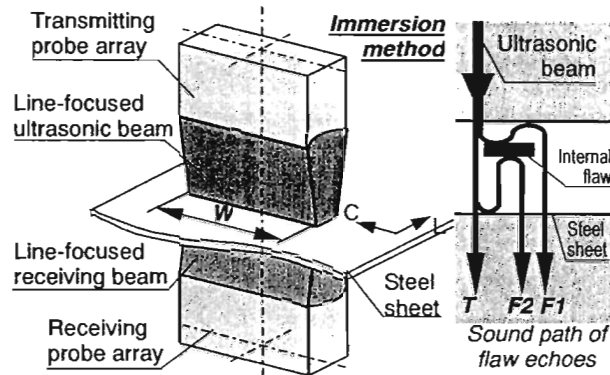


Fig.1 Schematic geometry of ultrasonic probes
T1: Transmitted wave F1, F2: Flaw echo

受信した信号を同時処理することにより、一定幅Wの線状の領域を1回の超音波送受信で探傷することができ、鋼板の搬送ラインなどにおける連続探傷に適用可能である。

送信プローブと受信プローブとの間の距離は、送信プローブの水中での焦点距離を F_T 、受信プローブの水中での焦点距離を F_R としたとき、 $F_T + F_R$ よりも短く設定している。この理由は下記の通りである。

- (1) 鋼板中では超音波ビームの焦点距離が水中より短縮する。[5]
- (2) Fig.1 の $F2$ で示すいったん介在物欠陥の周囲を通過し、鋼板の裏面で反射した後、介在物欠陥にもどり、ここで反射して受信プローブに受信される欠陥エコーの強度を十分とするためには、介在物欠陥に送信ビームの焦点を結ばせるのではなく、ある程度焦点をはずし、ビーム径を大きくする必要がある。

この探傷方法の特長として、表面直下不感帯が原理的には発生しないことがあげられる。送信プローブと受信プローブが鋼板の同じ側の面に配置されて実施される通常のパルスエコー型探傷では、超音波ビームの鋼板への入射の時に、鋼板の表面から大振幅の表面反射波が発生し、この残響がしばらく持続する。このため、表面直下の欠陥からの反射波はこの残響と重なって識別検出できず、表面直下にいわゆる不感帯が発生する。超音波ラインセンサによる探傷方法では Fig.1 の通り、 $F1$ 、 $F2$ (ビーム

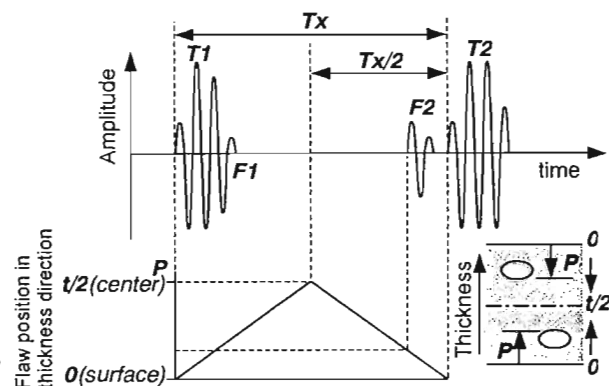


Fig.2 Relation between position of a flaw echo in A-scope display (RF) and its position in thickness direction
F1 superimposed upon T1.

路程が長い方を $F2$) の2通りの欠陥反射波が受信される。受信信号波形と欠陥深さ(表面または裏面の近い方の面からの深さ)との関係を Fig.2 に示す。欠陥反射波 $F1$ は、欠陥が表面または裏面の直下にある場合には、最初に受信される大振幅の透過波 $T1$ の

残響と重なって識別検出が困難である。これに対して、欠陥反射波 **F2** は透過波 **T1** の受信から $Tx/2$ の時間を経過した以後に受信されるので、透過波 **T1** の残響とは重ならない。また、欠陥反射波 **F2** は、欠陥が表面または裏面に近いほど受信タイミングが透過波 **T2** に近付くが、透過波 **T1** の残響が終了してから透過波 **T2** が受信されるまでは欠陥反射波の識別を妨害する干渉波はないので、識別検出できる。したがって、この探傷方法では表面直下の不感帯が原理的には存在しない。ただし、電気信号処理により最小 $30\mu\text{m}$ の不感帯が発生する。

3. オフライン欠陥検出能の評価

酸洗板サンプル(板厚:2.0~2.6mm)を数多く用いて、実験室において探傷試験を行い、超音波ラインセンサによる探傷方法の検出能を調査した。10dB以上の S/N で検出できた介在物欠陥の幅と長さとの関係を Fig.3 に示す。検出した欠陥の断面写真の代表例も合せて Fig.3 に示す。長さ $60\times$ 幅 $30\mu\text{m}$ 以上の大きさの介在物欠陥を検出可能である。介在物欠陥の長さおよび幅は C スキャン超音波探傷装置(周波数 50MHz)を用いて測定した。複数の介在物について断面の顕微鏡観察により介在物の厚さを測定し、長さおよび幅の測定結果と合せ、欠陥体積を算出した結果、体積 $5\times 10^{-6}\text{mm}^3$ 以上の欠陥を 10dB 以上の S/N で検出できることが判明した。なお、欠陥幅の測定では、予め C スキャン超音波探傷で測定した欠陥幅と顕微鏡観察で測定した真の欠陥幅との関係を求めておき、校正を行っている。

Fig.4 は酸洗による表面の酸化皮膜(スケール)除去の前後で同一の欠陥サンプルをオフライン探傷し、欠陥エコーの S/N の差異を調べた結果である。欠陥エコーの S/N は同等であり、酸化皮膜の有無に関係なく同等の欠陥検出能で探傷できること、検出能の面では、酸洗ラインへの探傷装置の設置に関して位置に制約がないことが判明した。

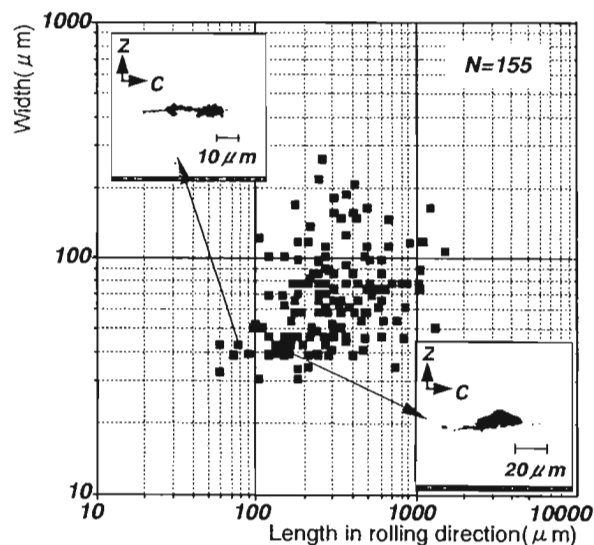


Fig.3 Relation between width and length of flaws detected with signal-to-noise ratio above 10dB

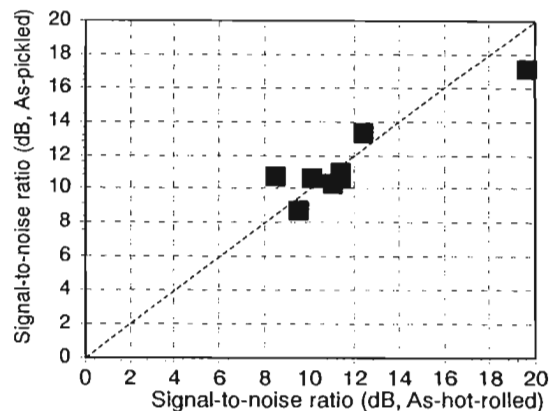


Fig.4 Change in signal-to-noise ratio by pickling

4. 実用装置の開発と生産ラインへの設置

鋼板の搬送ラインにおいて気泡の影響なく介在物探傷を行うための水浸機構の研究開発を経て、本探傷法を用いた内部欠陥探傷装置を開発し、千葉製鉄所 6PIC に設置した。

Fig. 5 に示すように酸洗槽入側において6本のデフレクタロールを用いて鋼板のパスを変更し、移送される鋼板を水槽に浸漬させるようにした。1つの送信プローブとこれに対向配置される受信プローブを1つの測定ヘッドと称することとすると、測定ヘッドを交互に千鳥状に配置させることにより、鋼板全幅を連続探傷可能とした。また、メンテナンス性を考慮し、測定ヘッドを取り付けるフレームはライン外への引き出しが可能でC型フレーム構造とした。欠陥検出能を検証するためのサンプル採取の便宜を図るため、欠陥を検出した位置にマーキングを行う装置を水槽出側に設置した。

探傷装置の感度校正はオフライン位置で試験片を用いて行っている。通常は Fig. 1 に示した透過波 $T1$ の振幅を計測し、この振幅が所定の範囲に納まるようにゲインを調整する。その他、人工きずからのエコー高さを測定して感度校正を行うこともできる。

探傷装置は概ね下記の機能を備えている。

- ① 通板されるコイルとコイル情報との関連付け
- ② コイル情報に従い、各種条件を設定し、探傷実施
- ③ 探傷データの収集、集約、表示、およびコイルの合否判定
- ④ サーバへの探傷結果詳細データの送信（欠陥マップは事務所にあるサーバに伝送されたデータを利用し作成）
- ⑤ センサ状態表示等のオペレータへのガイダンス

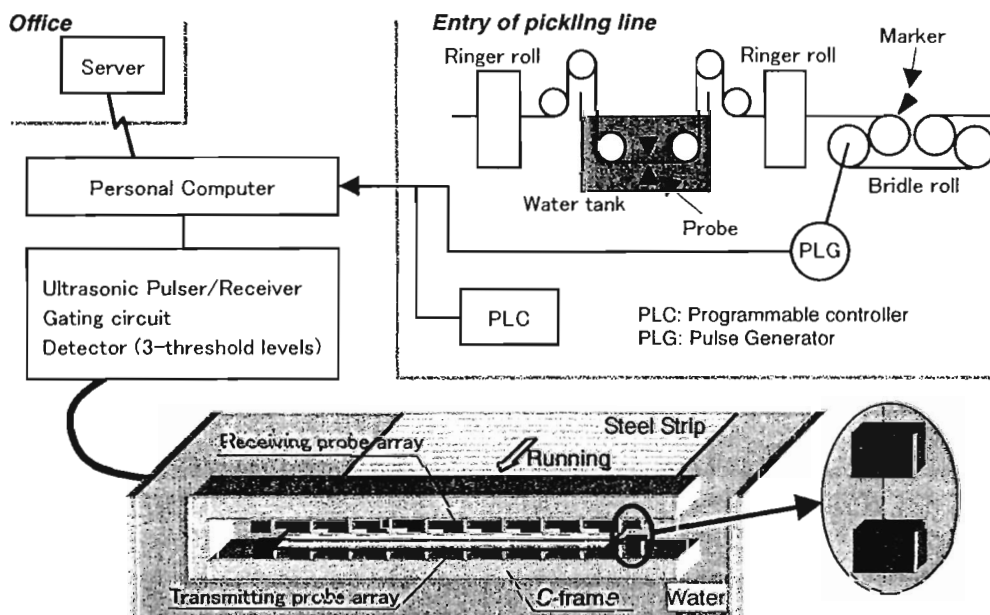


Fig.5 Schematic geometry of detecting head and block diagram of detecting system

5. オンライン探傷における欠陥検出能の検証

5.1 再現性の確認

Fig. 6 は探傷結果再現性の確認のため、同一の薄鋼板コイルを2回探傷装置に通して探傷し、欠陥指示およびその位置を比較した結果である。2回目の探傷結果を1回目とは約 50mm 幅方向にずらして表示している。板幅方向、長手方向共に同一場所で内部欠陥を検出しており、探傷結果の再現性を確認できた。

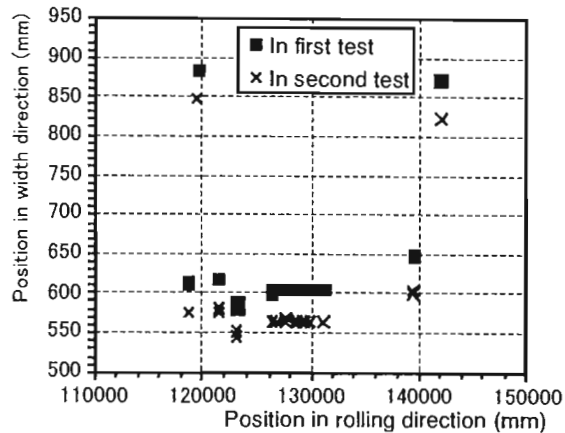


Fig.6 Comparison of flaw indications in two tests with the same coil

5.2 欠陥検出能の検証

オンライン探傷における本装置の欠陥検出能を下記の手順によって検証した。

- ① オンライン探傷により欠陥を検出し、欠陥検出部にマーキングを実施する。
- ② マーキング部分のサンプルを採取する。
- ③ 採取サンプルを超音波ラインセンサによりオフライン探傷し、欠陥位置を特定する。
- ④ Cスキャン探傷（日立建機ファイネック製 Hye-Focus 使用、周波数:50~200MHz）により検出した欠陥の長さ L および幅 W を測定する。
- ⑤ 超音波映像から切断位置を決定し、欠陥を切断する。
- ⑥ 断面観察により欠陥の厚さ D を測定し、また、欠陥幅 W を確認する。
- ⑦ 欠陥体積 V を算出する。 $V=L \times W \times D$

Fig. 7 に上記手順により採取した欠陥のオンライン探傷におけるエコー高さと欠陥体

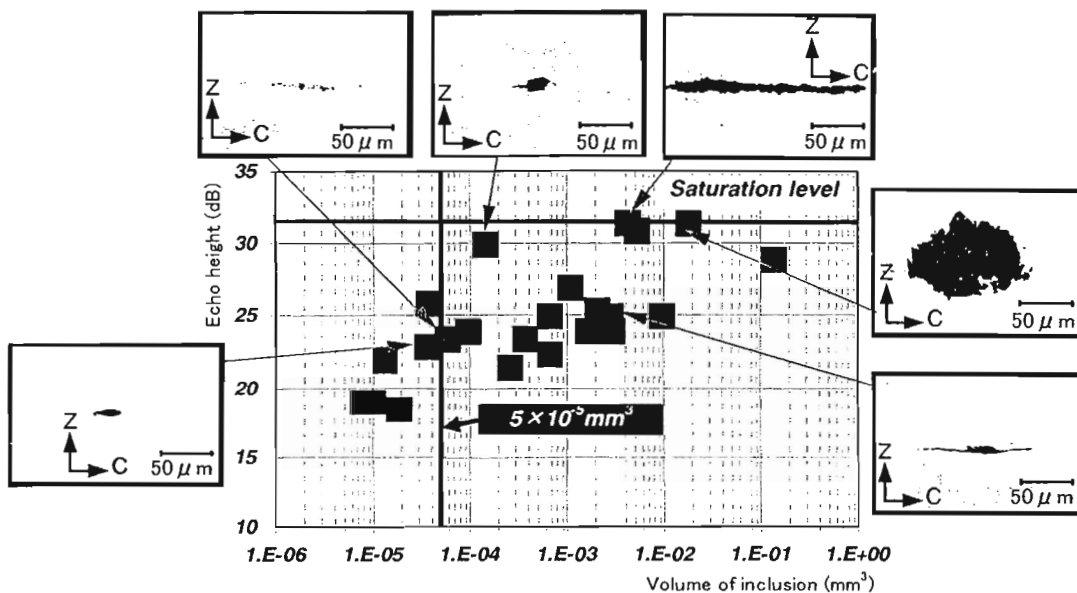


Fig.7 Relation between echo height and volume of detected non-metallic inclusions

積との関係を代表的な欠陥の断面写真とともに示す。体積 $5 \times 10^{-5} \text{mm}^3$ (直径約 $50 \mu\text{m}$ 相当) の微小介在物を $S/N: 9 \sim 10\text{dB}$ で検出できることを確認した。実験室でのサンプル板探傷試験で確認した欠陥検出能をオンライン探傷で実現できている。また、従来の板波探傷では体積 $3 \times 10^{-2} \text{mm}^3$ の介在物欠陥のオンライン検出が限界とされている [6] ので、本装置は板波探傷より 2 桁以上体積の小さな欠陥を検出できる。また、原因が特定され対策を行った誤検出や少数の表面きずの検出例を除けば、サンプル採取による断面観察の結果、マーキングした位置に介在物欠陥がない誤検出は 1 例もなかった。

6. 結言

一定の幅の線状領域に存在する薄鋼板の微小な介在物欠陥を 1 度の超音波送受信で検出可能な超音波ラインセンサによる探傷方法および実用装置を開発し、東日本製鉄所千葉地区 6PIC に設置した。オンラインテストの結果、再現性良く探傷が可能なこと、体積 $5 \times 10^{-5} \text{mm}^3$ の微小な介在物欠陥を検出できることを確認した。本装置は、順調に稼動を続けており、鋼板の内部品質保証に役立てられている。

参考文献

- [1] 越野勝, 野中俊彦, 大久保寛之, 鈴木純, 江崎員人: CAMP-ISIJ, 8(1995), p.361
- [2] 横田廣幸, 増野彦, 白石利明, 林浩正, 小林真, 児玉俊文: CAMP-ISIJ, 7(1994), p.1270
- [3] 岩永賢一, 前田孝三, 長棟章生, 保久光男, 加藤宏晴, 四辻淳一: CAMP-ISIJ, 10(1997), p.1036
- [4] 高田一, 虎尾彰, 鎌田征雄, 市川文彦, 白石利明: (社)日本非破壊検査協会平成 9 年度春季大会講演概要集(1997), p.225
- [5] 日本非破壊検査協会: 超音波探傷試験Ⅲ(2001), p.48-49
- [6] 市川文彦, 丸山英雄, 栗田邦夫, 高橋暁: 川崎製鉄技報, 18-2(1986), p.192-198

磁化 ECT の検出信号とノイズ信号の数値解析による評価

Evaluation in numerical analysis of detected signal and noise signal of magnetized eddy current testing

橋本光男 浅井晃一

職業能力開発総合大学校

1. はじめに

国内における鉄鋼製品には高品質が求められ、これに対応した品質計測技術がますます重要となっている。鉄鋼製品の表面検査の一つとして渦電流探傷法が用いられている。この手法は高速かつ非接触で検査ができる特徴を持つが、鉄鋼の持つ磁気ノイズ信号の弁別に課題があるのが現状である。そのため検査の高精度化には、きず信号とノイズの検出特性を評価することが重要となる。

一方、渦電流探傷法は電磁現象に支配され、この現象が直感的に理解しにくいところも検査を難しくしている。近年、数値解析技術の進展と計算機能力が格段に向上したことが相まって、数値解析による渦電流探傷試験の現象解明が実用的になってきた。そこで、数値解析を用いて、きずの検出信号の解析手法を確立することによって、この検査手法の高精度化が期待できる。本報は、実験とき裂の検出信号とノイズ信号の数値解析手法を検討したので報告する。

2. 実験結果

図 1 に実験システムを示す。このシステムは磁化器と X-Y テーブルにより制御される ECT プローブにより二次元計測ができる。作成した試験片についてきずの検出特性を測定した実験結果を図 2 に示す。測定範囲は三つのきずをカバーする $20\text{mm} \times 80\text{mm}$ の領域で、測定のパッチは 0.5mm である。この結果から分かるように直流励磁を加えないときは磁気ノイズが大きく、最も大きい長さ 3mm のきず以外の信号は検出されない。励磁なしでは、圧延の影響と思われる全体的に変化のあるノイズも見られた。しかし、直流励磁を上げていくと磁気ノイズが減り、きず信号も大きくなり十分な S/N 比ですべてのきずが検出できることが分かる。

図 3 に励磁電流に対する信号およびノイズの検出信号の強度を示す。この図からわかるように、最も大きいきずの検出信号は励磁電流が増えるに従い大きくなり、磁化電流が 2.5A を超えると飽和する傾向が見られた。また、①と②のきずについても磁化することにより検出信号は大きくなること分かる。図中で各きずの検出信号

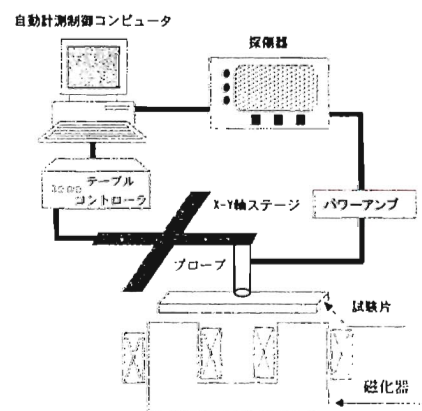


図 1 実験システム

強度がプロットしていない点は、十分な S/N 比が得られず信号強度が判別できないためである。深さが深いきずほど励磁の増加により信号がより大きくなる傾向が見られた。

一方、ノイズ信号は励磁電流を上げることによりより減少する。このため励磁電流を上げると S/N 比は明らかに向上することがわかる。励磁電流 1.5A では、3 種類のきず全てが S/N 比 2 以上で検出できることが確認できた。

3. 鋼板の渦電流探傷試験の数値解析法の検討

磁化渦電流探傷法は、直流磁化下における微小な交流磁界による渦電流場の解析が必要となる。鋼板の直流磁化による渦電流探傷の数値解析法の流れ図を図 4 に示す。用いた解析の一連の流れを以下に説明する。最初に直流励磁における非線形静磁界解析による鋼板内の磁束密度を求める。他のモデルで求めた直流励磁下における微小変動磁界に対する透磁率を求める。ここではこれを交流透磁率と呼ぶことにする。この特性を使って、非線形静磁界解析により求められた直流励磁による鋼板内の磁束密度に相当する交流透磁率を鋼板内に割り当てる。これを使って線形交流渦電流解析を行い、渦電流探傷法で測定されるきず直

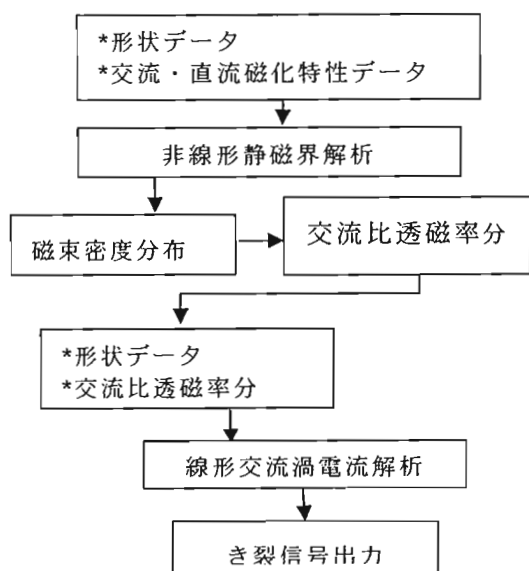
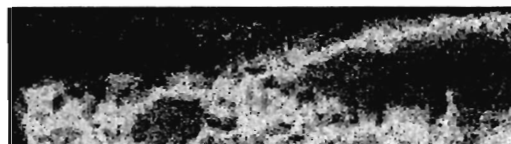


図 4 数値解析法

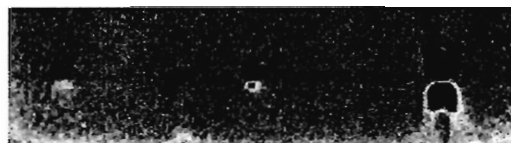


- ① 1mm 長さ×0.1mm 幅×0.05mm 深さ
- ② 1mm 長さ×0.1mm 幅×0.1mm 深さ
- ③ 3mm 長さ×0.2mm 幅×0.2mm 深さ

(a) 各きずの寸法



(b) 直流励磁 0A



(c) 直流励磁 3A

図 2 ECT 測定結果

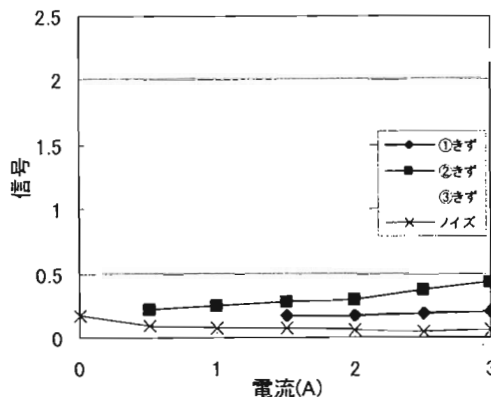


図 3 励磁電流に対する検出信号強度

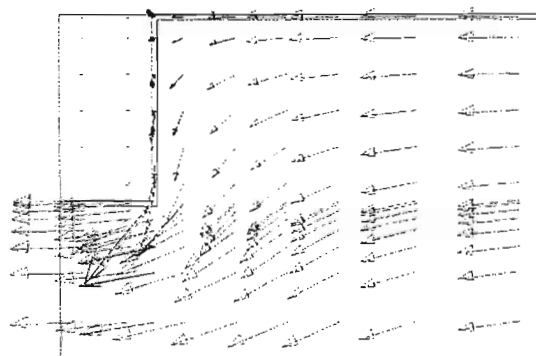


図 5 鋼板内の磁束密度

上の空間の磁束密度分布を求める。

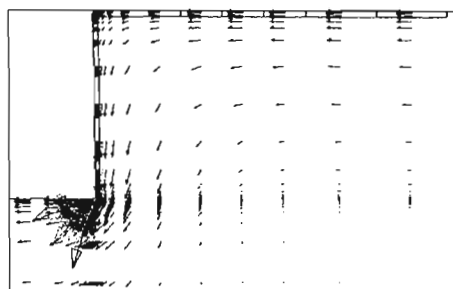
解析結果を以下に示す。図 5 は励磁電流 1.5A 時の鋼板内のきず③のモデルの中心位置におけるきずに垂直断面の磁束密度分布の解析結果を示す。きずから離れた領域ではほぼ磁気飽和領域であり、約 1.7T の磁束密度となっている。きずが存在すると、きずにより磁束の流れが制限されるため、磁束がきずを避けるように流れる。そのとききずの両側では磁束密度の低い領域が生じる。これは大きなきずになるほど顕著になる。

次に図 4 に示すように得られた板内の磁束密度に対応する交流の透磁率を求める。従って傷より離れた位置では、磁気飽和領域で交流透磁率が低いのに対し、きずの両サイドでは磁束密度が低いため大きな交流透磁率の領域が存在することになる。

このように交流透磁率を与え直したモデルに線形渦電流解析をおこなう。この解析結果を図 6 に示す。(a)図は、きずに垂直断面のきず近傍の渦電流分布を示す。試験周波数が高いため、板の表面に渦電流が集中していることがわかる。(b)図は、鋼板の上面の渦電流分布を示している。きずを避けるように渦電流分布が発生していることがわかる。このように渦電流の流れにきずによる乱れが生じるため、上面の空間には磁束密度の変化が生じる。この渦電流の回転により板に垂直方向に磁束が発生する。この磁束をプローブの検出コイルが計測する。この板上面の検出コイルが移動する面の板に垂直成分の磁束密度を図 7 に示す。ここでは、4 分の 1 モデルで解析している結果を示しているが、この結果から分かるように、きずの端でピークの磁束密度を検出できることが分かる。これは実験結果をよく説明している。

このピーク値を各きずについて解析結果をまとめた図を図 8 に示す。この結果、きずの断面積が大きいほど検出信号が大きく、且つ励磁電流を大きくするに従いその検出信号が増加している。磁化渦電流探傷試験は、きずだけでなくきず近傍の透磁率の変化も検出するため、磁化を大きくすることによりきずの検出を容易にすることが分かった。

ノイズのモデル化は、要素群に異なる磁気特性を与え、図 4 と同じ手法で解析することを検



(a) 鋼板内の電流密度分布

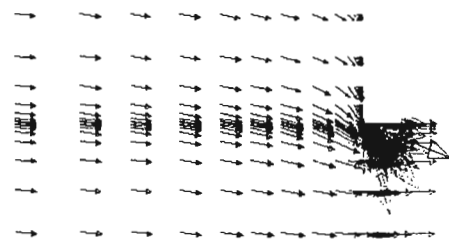


図 6 渦電流探傷試験による鋼板内の渦電流分布(周波数:100kHz)



図 7 ECT 検出信号

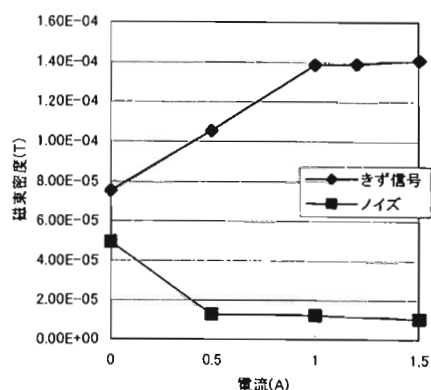
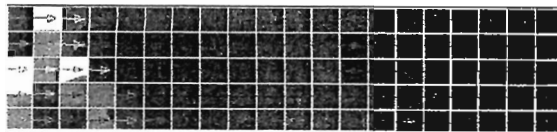
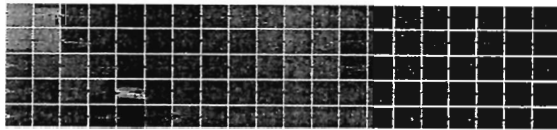


図 8 きずおよびノイズ信

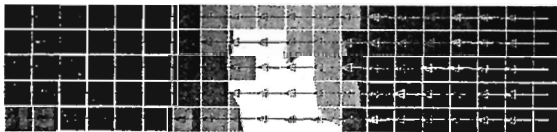


(a) 励磁電流 0.5 A

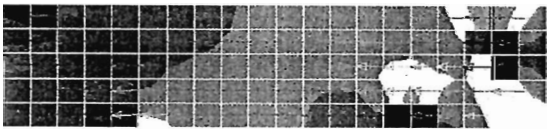


(b) 励磁電流 1.0 A

Fig.9 板表面の直流解析による磁束密度分

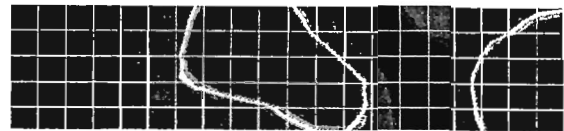


(a) 励磁電流 0.5 A

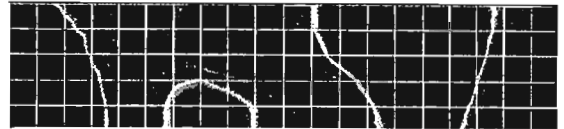


(b) 励磁電流 1.0 A

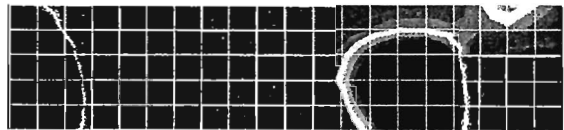
Fig.10 板表面の渦電流分布



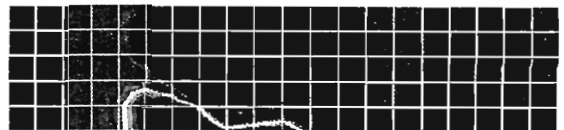
(a) 直流励磁 0A (MAX : 3.5e-2 MIN : -3.0e-2)



(b) 直流励磁 0.5A (MAX : 4.0e-3 MIN : -5.2e-3)



(c) 直流励磁 1A (MAX : 2.9e-3 MIN : -3.3e-3)



(d) 直流励磁 1.5A (MAX : 2.9e-3 MIN : -3.3e-3)

Fig.11 各励磁における ECT ノイズ信号

討した。均一に要素分割した各要素を細かくブロック化し、それぞれのブロックに異なる磁気特性を与えた。各 B-H 特性は、初期透磁率のばらつきと、B-H 特性に幅を持たせた。

図 9 は、直流励磁電流 0.5A と 1A のときの、板表面の磁束密度分布を示している。この磁束密度を用いて、板内の交流透磁率を求め、それによる交流渦電流解析を行った。図 10 は図 9 と同じ条件における電流分布を示している。励磁電流が増えるに従い、渦電流が平滑化されていることがわかる。図 11 は渦電流試験における直流励磁電流を変化させたときの検出面の磁束密度の垂直成分の分布図を示している。(a)図の直流励磁 0A は初期透磁率分布のばらつきによるノイズで、(b)~(c)は、励磁電流を増加したときのノイズ信号を示している。図中のカラーバーにより励磁電流を増やすことにより、ノイズが低下することが分かる。またその変化は、励磁電流が 1A を超えると顕著ではなくなるが、その二次元分布は平坦になり、ノイズの二次元分布も低下し S/N 比が高く計測できることが分かる。

4. まとめ

鉄鋼製品の表面検査に用いる渦電流探傷法について、き裂と磁気ノイズの数値解析法を検討した。磁化することによりノイズが低減することは知られていたが、それを定量的に評価するため、数値解析法とノイズの磁気特性モデル化を行った。その結果、ノイズ除去のための直流磁化を加えることによりきずの検出信号は大きくなり、磁気ノイズが低減することを確認し、実験結果をよく説明できる結果が得られた。この解析法を応用して、実際のきずのモデル化を進めることにより、より精度の高いプローブやきず診断手法の開発が期待できる。

塗装上からの回転一様渦電流プローブによる溶接部の検知について

Detection of Weld Zone by an Electromagnetic Induction Probe

○成瀬 譲*

星川 洋**

小山 潔**

YUZURU NARUSE

HIROSHI HOSHIKAWA

KIYOSHI KOYAMA

*日本大学大学院

**日本大学生産工学部

* Graduate School of Nihon University

** College of Industrial Technology, Nihon University

概 要

電磁誘導を利用する回転一様渦電流プローブを用いて溶接部を塗装上から検知することを検討した。その結果、プローブの差動信号と位相により溶接部の位置と方向を余盛りの有無に関わらず検知できることを確認した。また、従来のプローブに比べて塗装の厚さによる信号の減衰が小さいことも確認した。

キーワード : 溶接部検知、電磁誘導、回転一様渦電流プローブ

1. はじめに

近年、溶接部の保守検査において塗装を剥がすことなくその上からセンサにより溶接部の位置と方向を検知して追従する技術が必要とされている¹⁾。渦流探傷試験で用いられている渦電流プローブは、電磁誘導を利用して非接触で試験導体の欠陥を検出する。この渦電流プローブを溶接部検知のセンサとして用いられれば、余盛りのある溶接部については母材部と溶接部での電磁気特性の相違や余盛りによる形状変化を、余盛りのない溶接部については母材部と溶接部での電磁気特性の相違を利用して塗装上から溶接部を検知できる可能性がある。しかし、従来の差動上置渦電流プローブ²⁾(以下、差動プローブ)では、溶接部の位置は検知できるが方向を検知できず、塗装が厚くなると信号が大きく減衰してしまうという問題がある。そこで、溶接部の位置だけでなく方向も検知できる回転一様渦電流プローブ³⁾(以下、RUECP)の適用を提案する。RUECP を余盛り有無の溶接試験体に用いて溶接部の検知について検討した結果、余盛りの有無に関わらず位置と方向を検知でき、従来のプローブに比べて塗装の厚さによる信号の減衰が小さいことを確認したので報告する。

2. 溶接部検知の原理

2-1 差動プローブによる溶接部の検知

従来より平板の探傷に用いられている渦電流プローブに図1に示すような上置渦電流プローブがある。上置渦電流プローブはパンケーキ状の円形コイルで構成しており、交流電流を流したプローブを試験導体に近づけると試験導体を貫く磁束が時間とともに変化するため電磁誘導作用により渦電流が誘導される。プローブが溶接部上に位置すると、母材部と溶接部での電磁気特性の相違や余盛りによる形状変化によって渦電流が変化する。このため、プローブを貫く総磁束が変化してプローブの起電力が変化する。この起電力変化が溶接部の検知信号であるのだが、塗装の厚さ変化や溶接部の電磁気特性や形状の部分的な変化

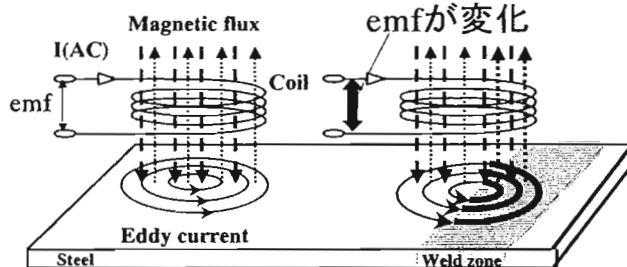


図1 従来の円形コイルによる溶接検知の原理

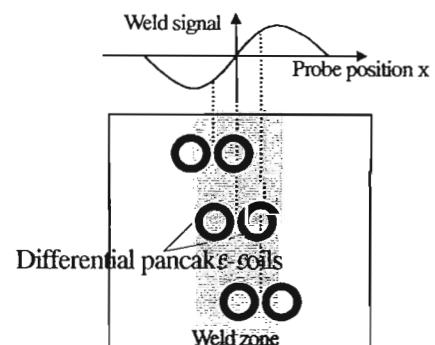


図2 差動プローブによる溶接部検知

に対しても渦電流が変化するためこの場合にも起電力が変化してしまい溶接部検知の妨げとなる。このような影響を受けない工夫として円形コイルを2個並置して差動検出としたものが差動プローブである。図2に示すように差動プローブでは2つの円形コイルに起電力差が生じたときに信号が発生するため、溶接部中央に対し左右の位置で極性の異なる差動信号が得られ、その零値と極性により溶接部の位置を検知できる。しかし、差動プローブの原理では溶接部の方向を検知することが不可能である。

2-2 RUECPの構造と原理

RUECPの構造は図3に示すように、2つの矩形縦置きコイルを十字に組み合わせた励磁コイルとその中心下に配置した円形検出コイルから構成される。RUECPの2つの励磁コイルに互いに 90° 位相の異なる交流電流を流すことにより回転磁界が発生する。この回転磁界により、試験導体には図4に示すような励磁電流に同期して方向が回転する様な渦電流(以下、回転渦電流)が誘導される。図5に示すように一様な渦電流上に置かれた円形検出コイルの各巻線部分では、それと平行な渦電流成分により起電力が発生する。発生した起電力は円形検出コイルの巻線方向に関して互いに逆向きとなり、互いに打ち消し合う。回転渦電流が一様な場合には、検出コイルの起電力は平衡を保つので発生しない。この特性によりRUECPと試験導体とが軸対称を保つ限りにおいて、追従に伴う塗装厚さの変化や上下振動によってRUECPと試験導体との距離が変化しても、原理的に雑音は発生しない。

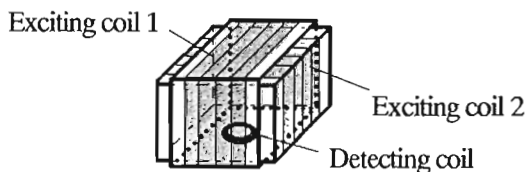


図3 RUECPの構造

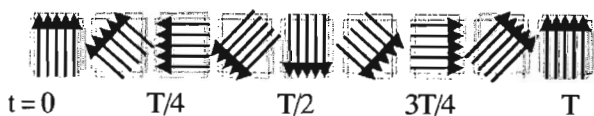


図4 誘導される回転渦電流

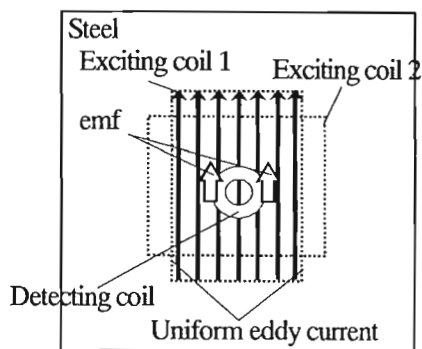


図5 円形検出コイルの起電力
(一様な渦電流では信号は発生せず)

2-3 RUECPによる位置検知

回転渦電流は溶接部に平行な成分(以下、平行成分)と垂直な成分(以下、垂直成分)の合成であり、ここで2つの成分に分けて考える。図6(a)のように垂直成分では渦電流が検出コイルの中心軸で対称となるため、検出コイルの起電力は巻線方向(図では、時計回り方向とする)を正、逆向きを負とすると正負の平衡を保つので、信号は発生しない。垂直成分ではRUECPの位置に関わりなく常に信号は発生しない。図(b)のよ

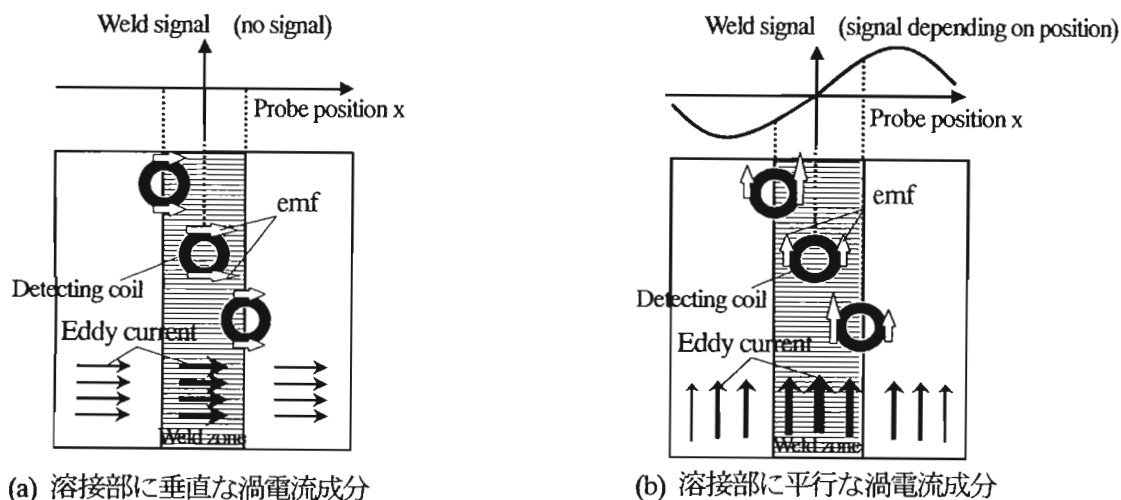


図6 溶接部における渦電流と起電力

うに平行成分では母材部と溶接部での電磁気特性の相違や余盛りの形状変化により渦電流が変化している。RUECP が溶接部中央から左側(x 負方向)に外れると、検出コイルの起電力は負が正に対して優勢となり平衡が崩れて負極性の信号が発生する。逆に、右側(x 正方向)に外れると起電力は正が負に対して優勢となり平衡が崩れて正極性の信号が発生する。RUECP が溶接部中央に位置した場合には渦電流が検出コイルの中心軸で対称となるため起電力の平衡が保たれ、信号は発生しない。したがって、回転渦電流はこの2つの成分の合成であり、RUECP による検知信号は平行成分により発生している。その信号は溶接部中央に対し左右の位置で極性の異なる差動信号で得られ、その零値と極性により溶接部の位置を検知できる。

2-4 RUECP による方向検知の原理

図7に RUECP の向きと、回転渦電流の方向の時間的変化とそれに伴う検知信号の変化を示す。図7(a) のように RUECP が溶接部と同方向の場合には、回転渦電流の方向は溶接方向から励磁電流に同期して角速度 ω 、周期Tで回転を始める。検知信号は回転渦電流の平行成分により発生しており、回転渦電流が溶接部と同方向のときに($t = 0$)に最大、垂直方向のとき($t = T/4$)に零となる正弦波である。図7(b)のように RUECP の向きが $-\theta$ 方向の場合には、回転渦電流の方向は $-\theta$ 方向から励磁電流に同期して角速度 ω 、周期Tで回転を始める。このため、回転渦電流は $t = -\theta/\omega$ のときに溶接部と同方向となるので、同図(a)の場合に比べて検知信号が最大となる時刻にプローブ方向のずれである $-\theta$ の分だけ時間のずれが生じる。この時間のずれにより検知信号の位相は θ だけ遅れる。したがって、RUECP は溶接部とプローブとの方向角を検知信号の位相角により検知することができる。

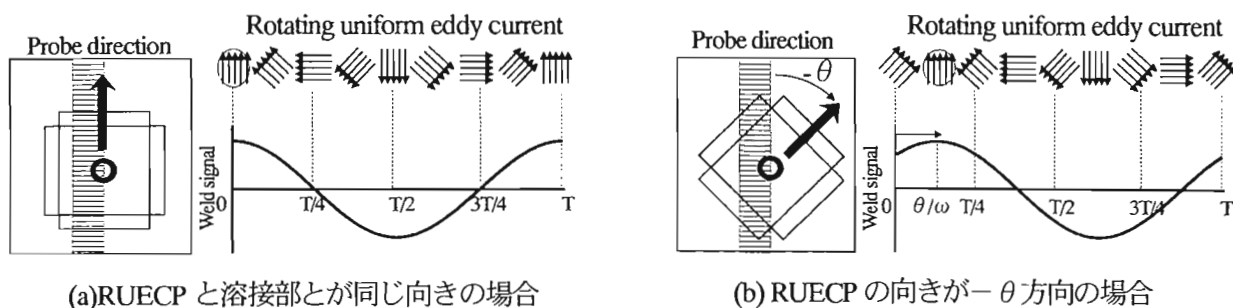


図7 RUECP の方向による検知信号の位相の変化

3. 溶接部検知の実験

RUECP と差動プローブを用いて溶接部検知の実験を行った。図8に実験の概要と用いた溶接試験体を示す。溶接試験体には、中央に幅約12mmの溶接を施した一辺160mm、厚さ10mm、材質SS400の鋼平板を2つ用いた。一方の溶接試験体には余盛り高さが約1mm程度あり、もう一方は余盛りが研磨されている。アクリル板により厚さ1mmの塗装を想定した。RUECPの励磁コイルは、幅30mm、長さ40mm、高さ30mm、検出コイルは外径6mm、巻線断面積 $1 \times 1 \text{mm}^2$ である。差動プローブはRUECPの検出コイルと同じ寸法のものを用いた。試験周波数は50kHzである。検出コイルの起電力は励磁電流に対して同相成分(In-phase component)と 90° 進相成分(Quadrature component)の複素信号¹⁾であり、RUECPの向きが溶接部と同方向のときに検知信号は同相成分のみが発生するよう位相調整を行い、このときの位相を 0° とした。試験体の中心を原点として溶接に対して垂直方向にx軸をとり、 $x = \pm 6 \text{mm}$ (溶接部の左端から右端まで)の範囲でRUECPを走査して信号を得た。

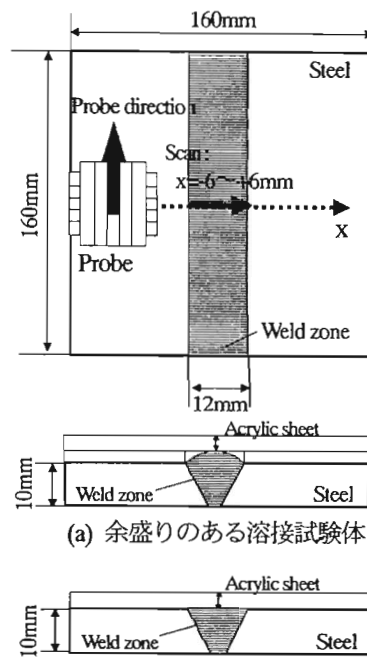


図8 溶接試験体と実験方法

4. 実験結果

溶接部上でのプローブ位置に対する検知信号の同相成分を図 9 に示し、同図(a)に差動プローブ、(b)に RUECP による結果を示す。図中の点線は余盛りのある溶接試験体、実線は余盛りの研磨された溶接試験体の結果である。どちらのプローブにおいてもプローブが溶接部の中央より左側(-x 側)に位置したときには負極生、右側(+x 側)に位置したときには正極性となり、溶接部の中央(x=0mm)に位置すると信号は零値となる。したがって、RUECP の検知信号は余盛りの有無に関わらず溶接部の位置に応じた差動信号で得られ、従来の差動プローブと同じように位置の検知が可能である。また、余盛りの研磨された溶接試験体では余盛りによる形状変化が無くなり母材部と溶接部での電磁気特性の相違のみを検出するため図のように余盛りがある場合に比べて信号振幅が小さくなるが、RUECP では差動プローブに比べて振幅の減衰が小さい。

図 10 は余盛りのある溶接試験体を、図 11 は余盛りのない溶接試験体を用いて溶接部に対してプローブの向きを $\pm 45^\circ$ と変えて得た検知信号のパターンである。図はプローブを溶接部の左端から右端まで走査した際に得られる複素信号平面上の検知信号の軌跡を示しており、□はプローブ位置が溶接部の左端、○は中央、△は右端にあることを示している。同図(a)に差動プローブ、同図(b)に RUECP の結果を示す。RUECP では余盛りの有無に関わらず励磁電流に同期した回転渦電流によりプローブの向きが変わるとそれに対応して信号位相が変化する。これは、RUECP は検知信号の位相角により溶接部とプローブの方向を検知できることを示す。一方、従来の差動プローブでは向きが変わっても信号位相に変化がなく方向の検知ができない。

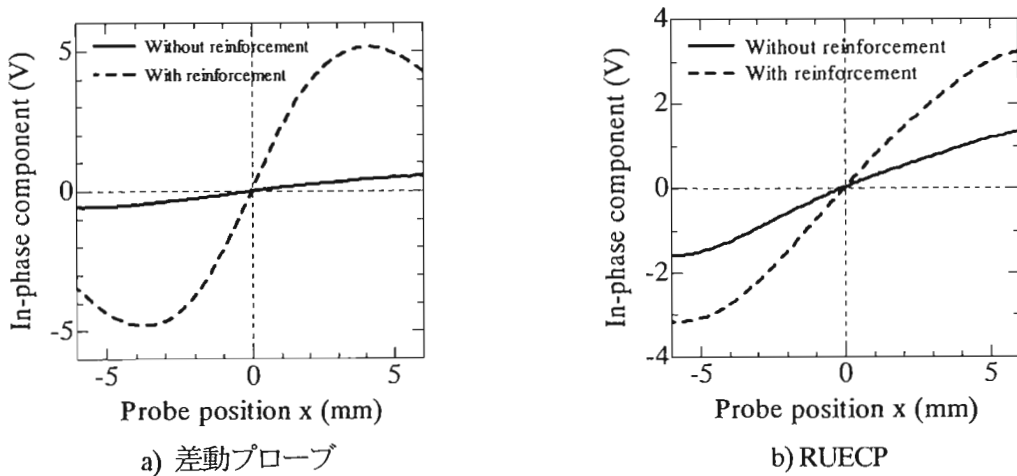


図 9 プローブ位置に対する検知信号

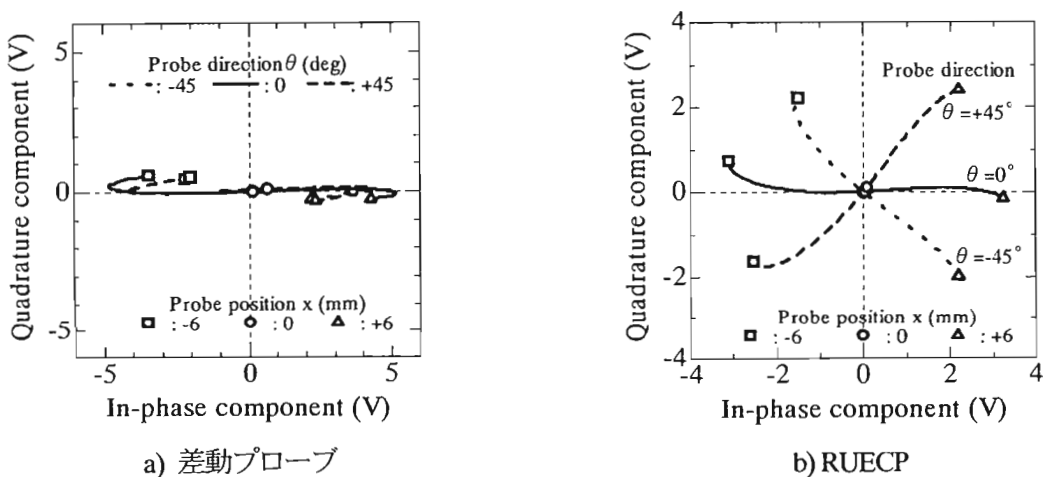


図 10 プローブの向きに対する信号位相
(余盛りのある溶接試験体)

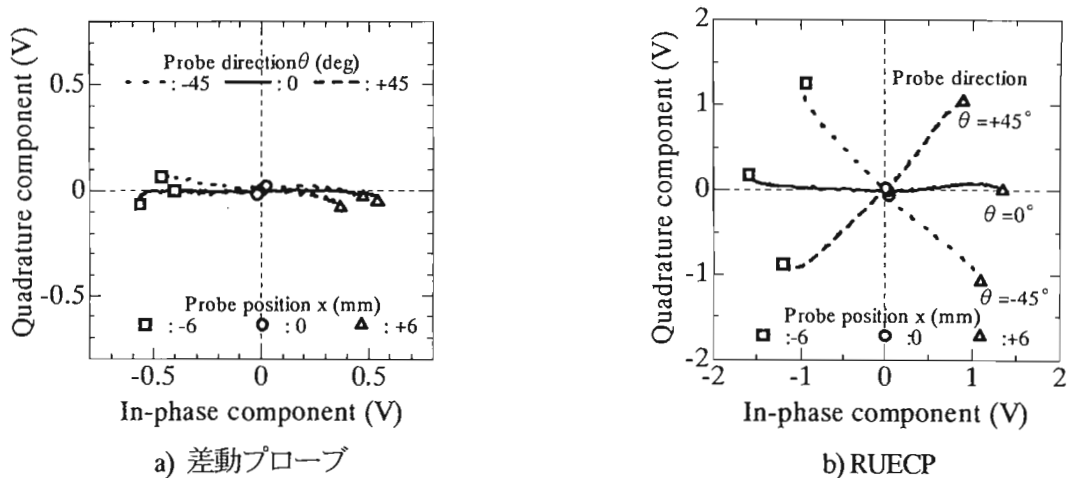


図11 プローブの向きに対する信号位相
(余盛りのない溶接試験体)

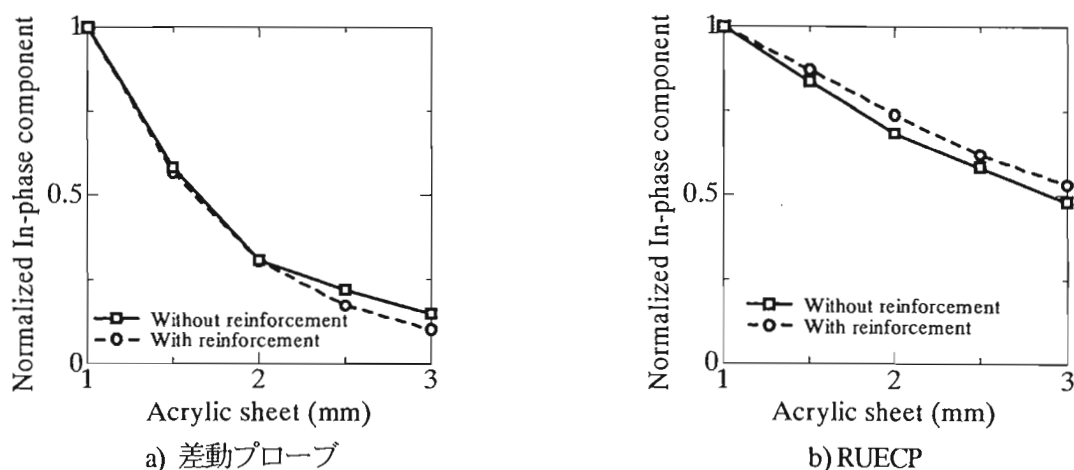


図12 塗装の厚さによる信号の減衰

図12に塗装の厚さを1mmから3mmまで変えて検知信号の減衰を調べた結果を示す。図はプローブが溶接端部に位置したときの信号振幅をそれぞれ正規化したものである。同図(a)に差動プローブ、(b)にRUECPによる結果を示す。図中の点線は余盛りのある溶接試験体、実線は余盛りの研磨された溶接試験体の結果である。差動プローブでは、余盛り有無の溶接試験体のどちらにおいても塗装が厚くなるのに伴い信号が大きく減衰してしまう。これに対してRUECPでは、どちらの溶接試験体においても従来の差動プローブに比べて塗装の厚さによる信号の減衰が小さい。

5. おわりに

回転一様渦電流プローブを用いれば、余盛りの有無に関わらず従来のプローブに比べて確実に溶接部の位置と方向を検知できることを確認した。また、塗装の厚さによる信号の減衰が小さいので塗装上から溶接部を検知できる。

参考文献

- 1) 小山潔, 星川洋, 成瀬謙, 「電磁誘導を利用した塗装上からの検知」電気学会論文誌A, Vol.124, No.9, pp.797-802 (2004)
- 2) 日本非破壊検査協会編: 新非破壊検査便覧, PP.396-397, 日刊工業新聞 (1992)
- 3) 星川洋, 小山潔, 「回転一様渦電流プローブを利用した渦流探傷プローブ」日本AEM学会誌, Vol.3, No.3, pp.36-42 (1995)

超音波厚さ計用探触子の音場とエコー

Ultrasonic field and echo of a double transducer probe for thickness measurement

神奈川県産業技術総合研究所 山田尚雄

1. はじめに

超音波厚さ計は、鋼板の腐食による厚さの変化を調べる場合などに使われている測定器で、板や管の片側からの測定で、その厚さを知ることができる。もっともよく使われているデジタル表示超音波厚さ計では、図 1 のような、2 振動子探触子が使われることが多い。

この探触子では、半円形の 2 枚の振動子により超音波を送受信することにより、1~50 mm くらいの鋼板の厚さが測定されている。この型の探触子の音場とエコーを数値計算して、その特徴を調べた。

振動子の音場を表すレーリー積分を数値計算する方法で、超音波厚さ計用の 2 振動子探触子に使われている半円形振動子の音場を計算した。また、この音場を利用して、小さな反射体の位置とエコーの関係性を求めた。その結果から、2 つの振動子の傾斜角を適切に選ぶことにより、比較的広い厚さの範囲で、感度の変動が少なく、超音波の伝搬方向に垂直な方向の幅の変動も少ない検出領域が得られることを示すことができた。

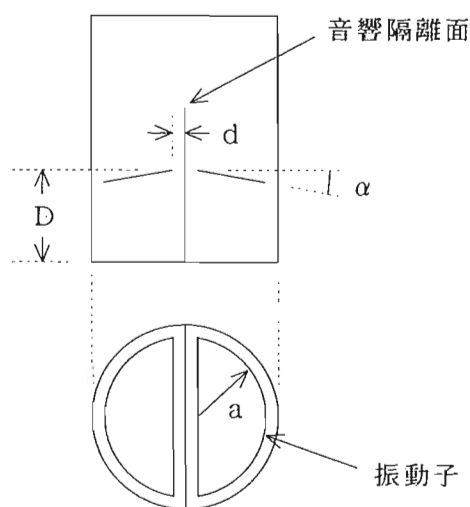


図 1 2 振動子探触子の構造

2. 方法と結果

2.1 半円形振動子の音場

計算には、円形振動子についてのプログラムを、積分経路を円形から半円形に修正して利用した。この計算法では、ピストン運動をする平面振動子の音場を表すレーリー積分を、振動子の縁に沿う 1 次元の積分に変換してから計算する。計算時間を短くするために、誤差の評価式を利用して積分区間を自動分割して、それぞれの区間ではフレネル積分を利用している。

また、図 2 は汎用厚さ計に使われている

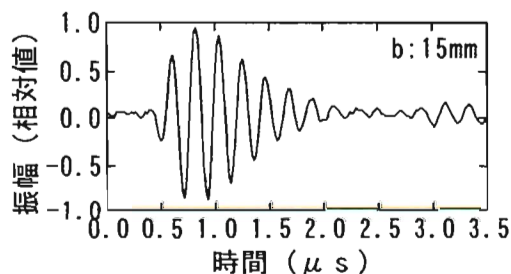


図 2 厚さ計用 2 振動子探触子の B₁ エコーの例 (エコーが最大になる厚さ付近での波形)

2振動子探触子で検出される底面エコーの例で、比較的狭帯域の波形が使われていることがわかる。そのため、音場とエコーの数値は、連続波についての計算結果をそのまま利用した。

2.2 屈折の効果

探触子内部の音響遅延材と測定対象の材質が異なることの影響は、境界面での超音波の屈折の効果をも、図3のように測定対象内部での見かけ上の深さが、OからO'へと屈折率に比例して変わると考えることで単純化した。

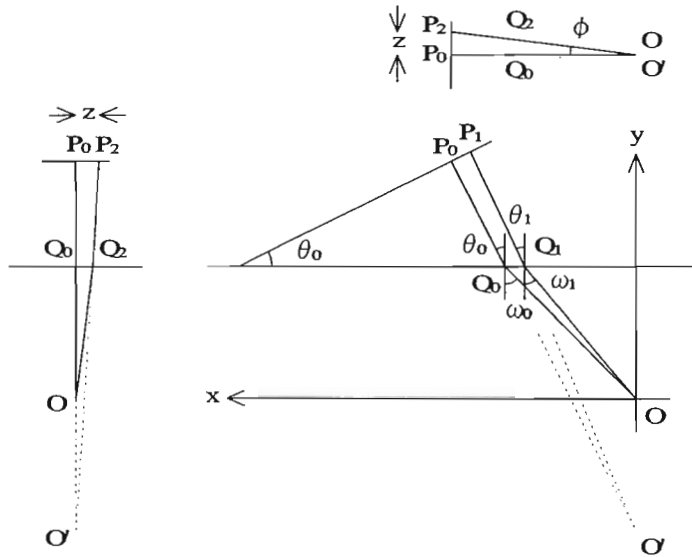


図3 試験体内部での超音波の屈折

図3の P_0 、 P_1 、 P_2 は振動子の表面上の点を表し、 Q_0 、 Q_1 、 Q_2 はそれぞれの点から放射された波がO点に向けて伝搬するときに通過する、境界面上の点を表す。振動子面と垂直に交わる P_0Q_0O の経路の周囲を伝搬する波は、O点に同位相で集まり、ビームの中心を構成する。この部分の波と P_1Q_1O を伝搬する波の位相差を、図3に表されている幾何学的な関係から求めると、角度についての2次の精度で

$$\begin{aligned} \delta\alpha &= \frac{\overline{P_1Q_1} - \overline{P_0Q_0}}{\lambda_a} + \frac{\overline{Q_1O} - \overline{Q_0O}}{\lambda_b} = \frac{\overline{P_0Q_0}}{2\lambda_a} (\theta_1 - \theta_0)^2 + \frac{\overline{Q_0O}}{2\lambda_b} (\omega_1 - \omega_0)_2 \\ &= \frac{1}{2\lambda_a} \left[\overline{P_0Q_0} + \overline{Q_0O} \left(\frac{\cos \theta_0}{\cos \omega_0} \right)^2 \right] (\theta_1 - \theta_0)^2 \end{aligned}$$

になる。 $\overline{P_1Q_1}$ などは、 P_1 と Q_1 を結ぶ線分の長さなどを表し、 λ_a と λ_b は境界面の上下の媒体（音響遅延材と測定対象）内部の超音波の波長を表している。また、 P_0Q_0O と P_2Q_2O を伝搬する波の位相差は、同じ精度で

$$\begin{aligned}\delta\alpha &= \frac{\overline{P_2Q_2} - \overline{P_0Q_0}}{\lambda_a} + \frac{\overline{Q_2O} - \overline{Q_0O}}{\lambda_b} = \frac{\overline{P_0Q_0}}{2\lambda_a} (\sin\theta_0 \cdot \phi)^2 + \frac{\overline{Q_0O}}{2\lambda_b} (\sin\omega_0 \cdot \phi)^2 \\ &= \frac{1}{2\lambda_a} [\overline{P_0Q_0} + \overline{Q_0O}'] (\sin\theta_0 \cdot \phi)^2\end{aligned}$$

になる。この2式から、 $(\cos\theta_0/\cos\omega_0)^2$ が1に近ければ、2つの媒質が異なり境界面があるときのO点の音場と、媒質が1つのときのO'点の音場とは、波の干渉の効果については同等に近いと考えることができる。表1の数値から、 $(\cos\theta_0/\cos\omega_0)^2$ を計算すると、 $\alpha = 2.5^\circ$ 、 5° 、 10° のときに、それぞれ1.01、1.03、1.13になる。

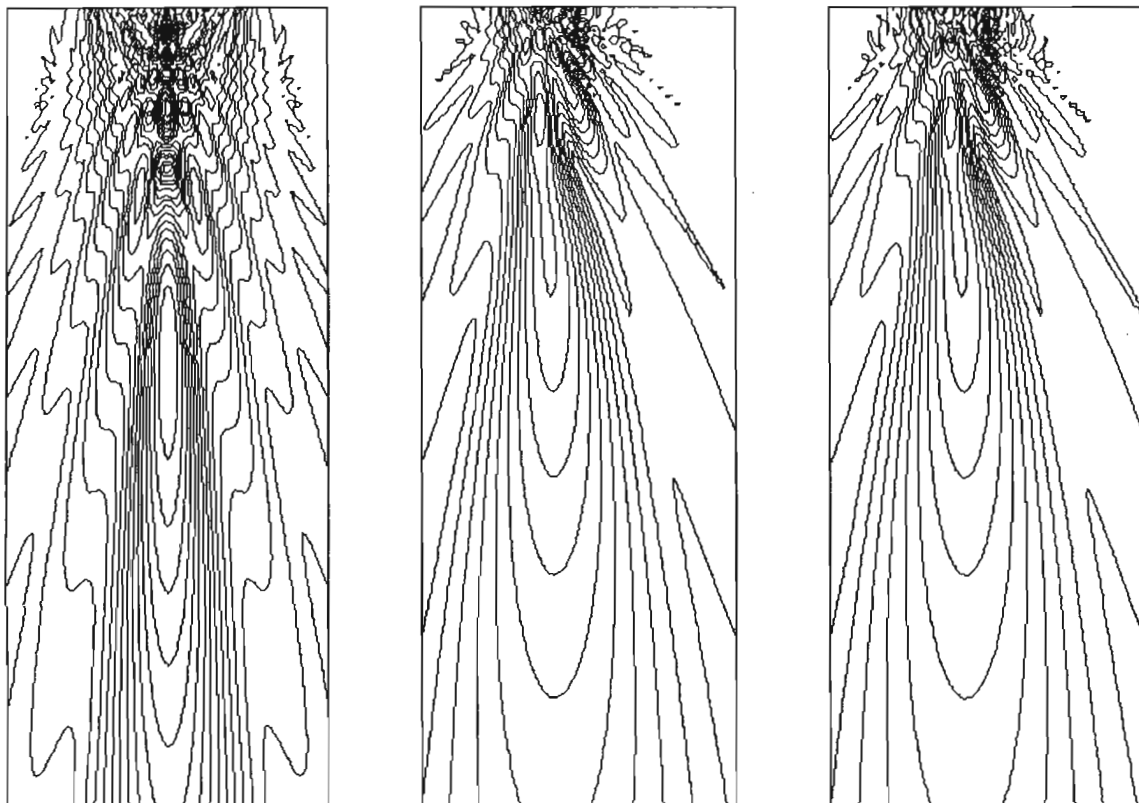
表1 計算に使った数値

a	d	D	α	c_a	c_b
5mm	0.5mm	10mm	$2.5 \cdot 10^\circ$	2700m/s	5900m/s

2.3 音場の計算結果

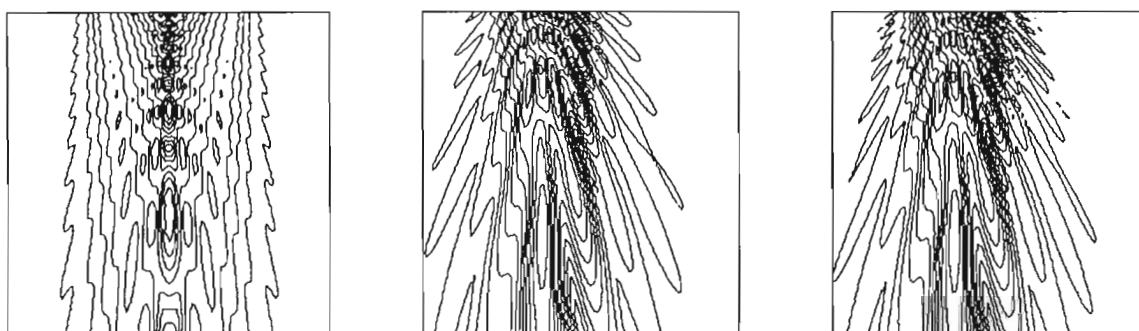
図1のような振動子の配置と表1の数値を仮定して、音響隔離面に垂直な断面内での半円形振動子の音場を計算した。表1の c_a と c_b は、音響遅延材と測定対象の音速を表している。結果は、図4と図5のようになった。

図4の等高線は、一定周波数（5MHzと10MHz）の連続波についての振幅の計算値（相対値）を表している。図4のa)は、比較のための円形振動子の音場で、b)の音場を左右逆にして2つ重ねる（振幅だけではなく、位相も含む量として）と、a)と完全に一致する。c)は、周波数が10MHzの場合で、図のように縦軸のスケールを1/2にすると、ごく近距離を除いて、b)とほとんど一致する。そのため、10MHzについてはエコーの計算を行わなかった。



a) 円形振動子 (5MHz) b) 半円形振動子 (5MHz) c) 半円形振動子 (10MHz)

図 4 直径 10mm の振動子の音場. 等高線の高さの間隔は, a) の最大値の 1/16. 図の横幅は 20mm, 縦幅は a) b) は 100mm, c) は 200mm で, 振動子の中心は a) b) では上端面中央から 2.5mm, c) では 5mm の高さにある. 半円形振動子は左半分だけがある場合.



a) 円形振動子 (5MHz) b) 半円形振動子 (5MHz) c) 半円形振動子 (10MHz)

図 5 図 4 の上端に近い部分 (近距離音場) を拡大した計算結果. a) だけは等高線の高さの間隔が最大値の 1/8.

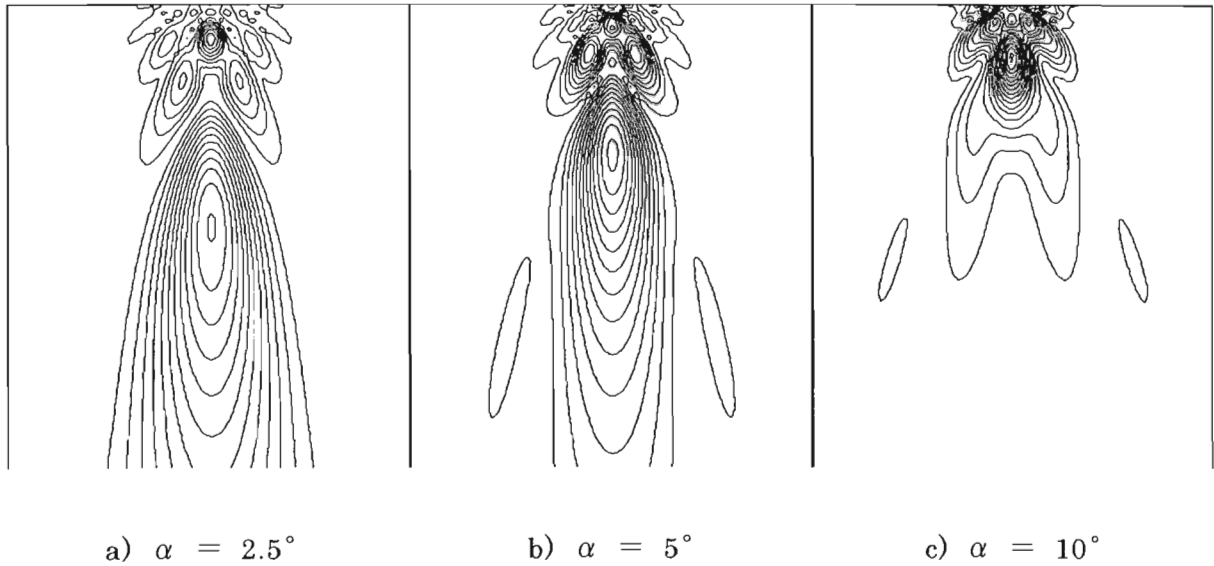


図6 α が $2.5^\circ \sim 10^\circ$ のときのエコーの計算値(振幅だけを表示). 等高線の高さの間隔は相対値. 図の横幅は21.8mm, 縦幅は200mmで, 振動子の中心は上端面中央から10mmの高さの位置にある.

2.4 エコーの計算

図1のような振動子の配置と表1の数値により, 音響隔離面と垂直な断面内の, 点状の反射体(たとえば球)からのエコーを計算した。結果は, 図6のようになった。図の等高線は, 一定周波数(5MHz)の連続波についての計算値(相対値)を表している。図6の $\alpha=5^\circ$ のときの計算値には, 安定したエコーの得られる細長い矩形領域が現れている。また, このときのエコーの距離振幅特性は, 通常の2振動子探触子についての実験結果と比較的よく一致しているようにみえた。しかし, 計算値は探触子の中央にある音響隔離面の影響を考慮してはいないため, ごく浅い位置や中心軸から外れた位置にあるピークは実在しない可能性が高い。

3. まとめ

半円形振動子の音場と, この振動子を2個組み合わせた2振動子探触子により計測されるエコーとを数値計算するソフトウェアを製作した。この計算結果から, 超音波厚さ計用の探触子として有効な特性を備えた探触子の設計に役立つ条件を, この方法で知ることができそうなことがわかった。

航空機の構造について

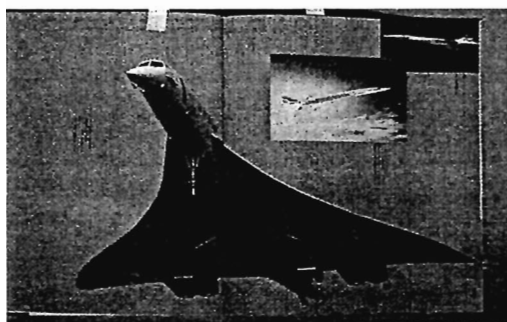
宇宙航空研究開発機構

先進複合材評価技術開発センター

松嶋正道

航空機とロケットの概要

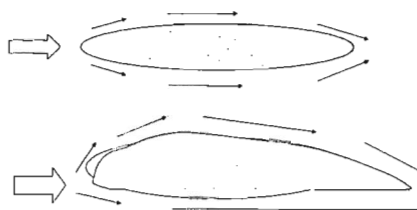
宇宙航空研究開発機構
先進複合材評価技術開発センター
松嶋 正道



揚力と重量

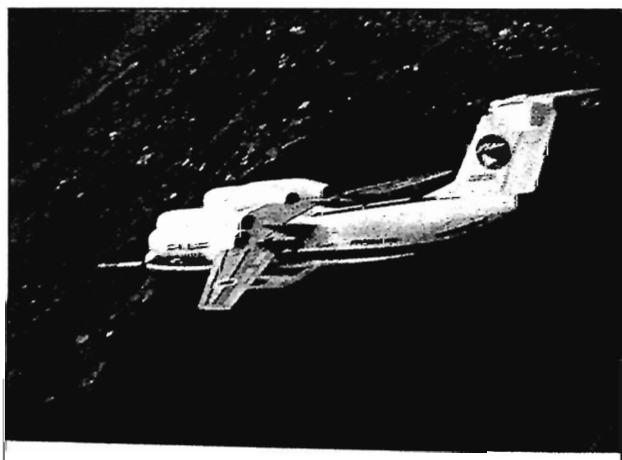
- 1.揚力とは？
- 2.空気の性質
- 3.空気の流れと密度
- 4.機体の重量
- 5.機体総重量と揚力
- 6.速度との関係
- 7.機体の形状

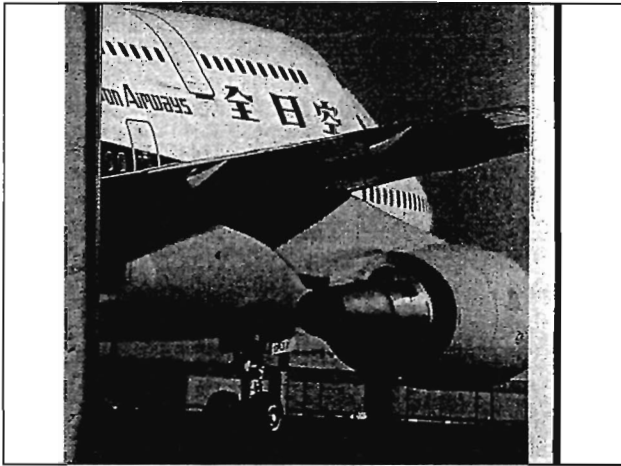
揚力:空気の流れと密度



空気(気体)の性質

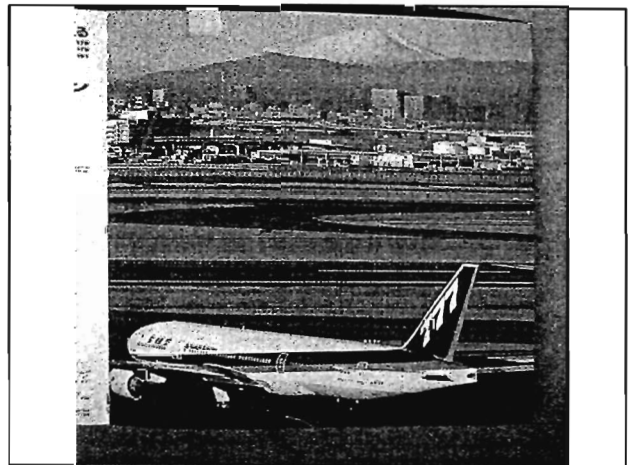
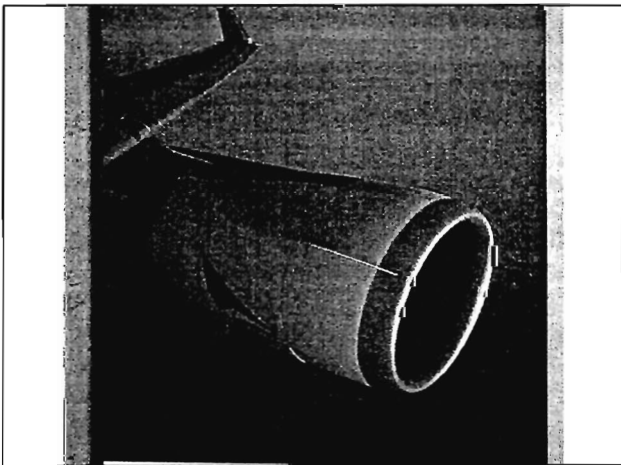
- 1.圧力と密度の関係
- 2.流速と密度の関係
- 3.圧力とは？
- 4.密度とは？
- 5.流速とは？
- 6.揚力と密度の関係





空気の流れと密度

- 1. 気体と液体は、ほぼ同じ性質を持っている。(流体の特徴)
- 2. 違いは、密度が影響している。
- 3. 流れる面の平滑性が重要
- 4. 面からの流体はく離(ストリップ)

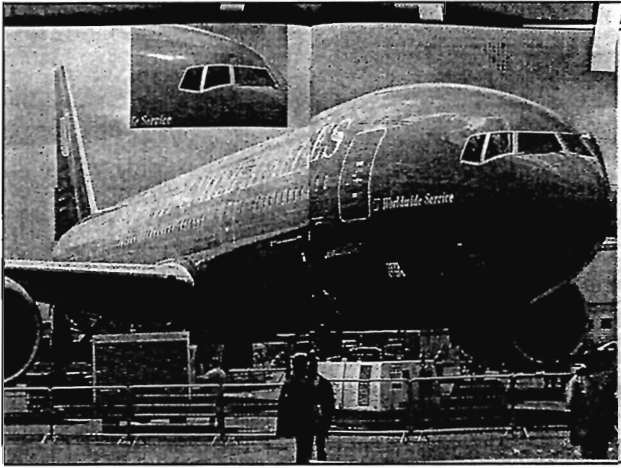


機体総重量と揚力

- 機体総重量は前項目+燃料+ペイロード
- ペイロード: 乗客・貨物や衛星(ロケット)
- 燃料: 航空機はケロシン(白灯油類)
ロケットは2種類(固体と液体)

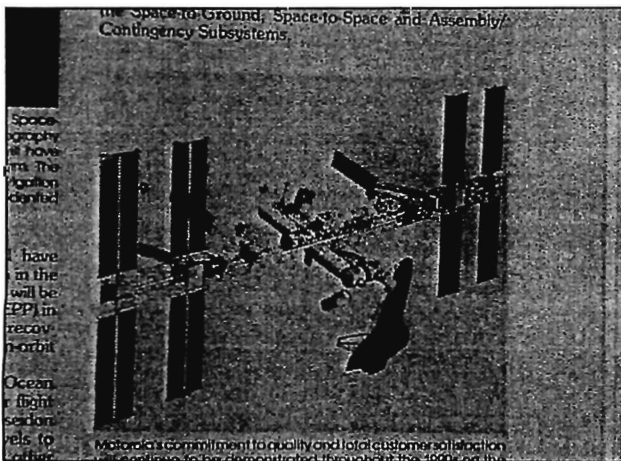
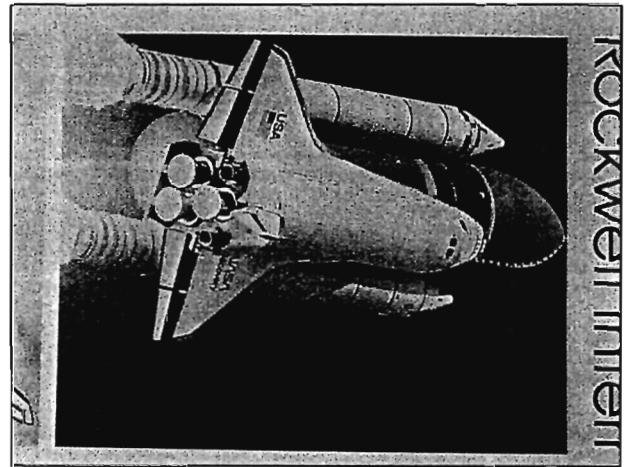
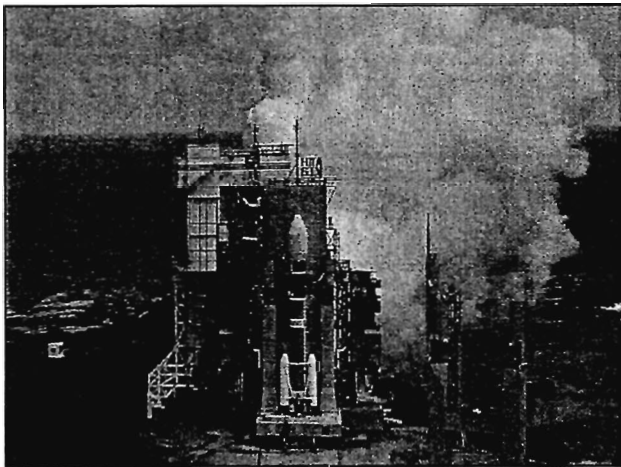
機体総重量は、主翼面積の揚力と機体形状で受け持っています。





速度との関係(高度)

- 速度は、大気中の空気密度に関係する。
- 高度が高くなるほど、空気の密度が低くなり、高速で飛行する為には、高度が必要。
- 特別に低空で飛行する場合には、大きなエンジン出力が必要。(アフターバーナー)
- 高度30000フィート(約10000m)で旅客機が飛行する場合と2000m高低が変化すると燃料消費が1割以上の差がある。

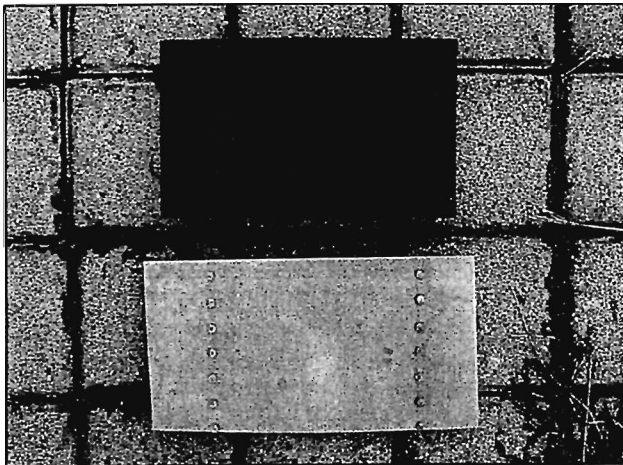
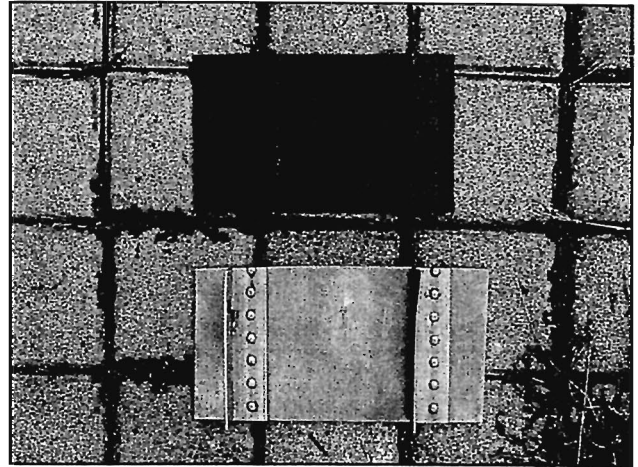


先進複合材料について

軽くて剛性が高く強い性質を持つ複合材料の特性と適用例

複合材料の概要(FRP)

- 1.比重と軽量化
- 2.一体成型によるノンファスナー構造
- 3.異方向性材料の特徴
- 4.脆性材料(衝撃に弱い)
- 5.熱硬化と熱可塑の違い
- 6.耐熱・高温特性



FRPの歴史 (竹から生まれたCFRP)

- 1.GFRPとの出会い
- 2.CFRPの開発
- 3.アラミド繊維(ケブラー)KFRP
- 4.炭化ケイ素(SiC)繊維
- 5.ボロン(ホウ素)繊維
- 6.アルミナ(Al_2O_3)繊維

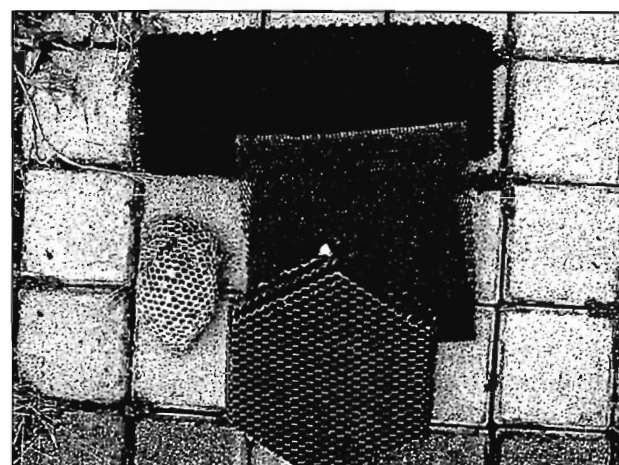
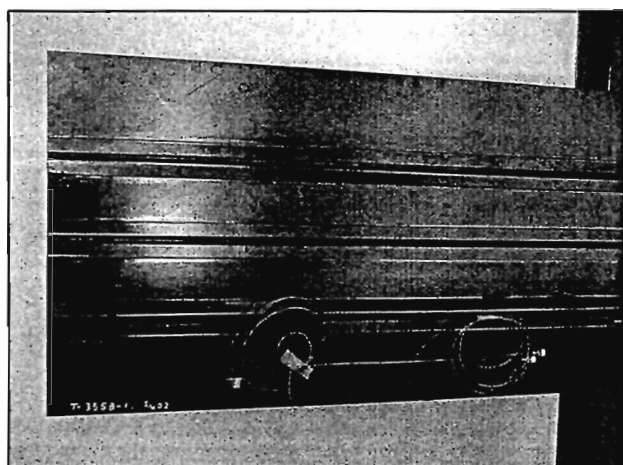
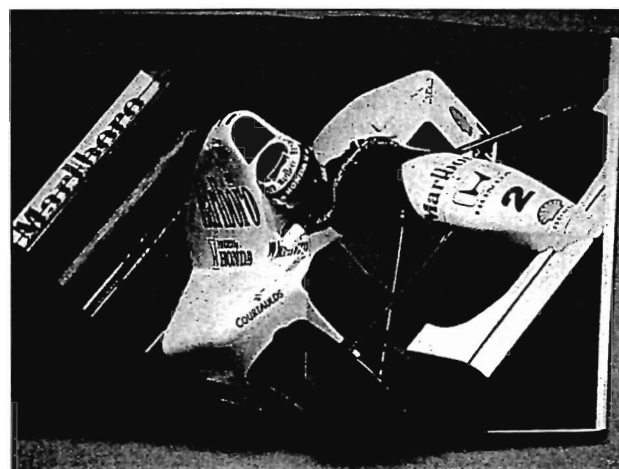
強化繊維の形態

- 1.一方向繊維(UDプリプレグ)
- 2.織物繊維 (Cloth)
- 3.三次元織物 (3D)
- 4.短繊維
- 5.チョップド・ストランド
- 6.マット

樹脂(マトリクス)

- 1.エポキシ樹脂
- 2.熱可塑樹脂
- 3.ポリエステル樹脂
- 4.フェノール樹脂(高温C/C材料)

FRPの適用例



モード変換波法に関する実験的検討

Experimental Study of Mode Conversion Waves Method

ジャパンプローブ(株) 高橋 雅和

概 要

J E A G 4 2 0 7 - 2 0 0 4 の指針の中でモード変換波法、2次クリーピング波法等が示され注目されている。そこでこれらのモードについて、きずの検出の可能性を検討した。確認実験では、試験片の底面側に開口溝を加工し、縦波斜角探触子で溝を探傷した。実験では2次クリーピング波のエコーは確認できなかった。溝のエコーは横波のコーナーエコーとモード変換による三角経路の横波⇄縦波のエコーであった。以下実験結果とその考察を述べる。

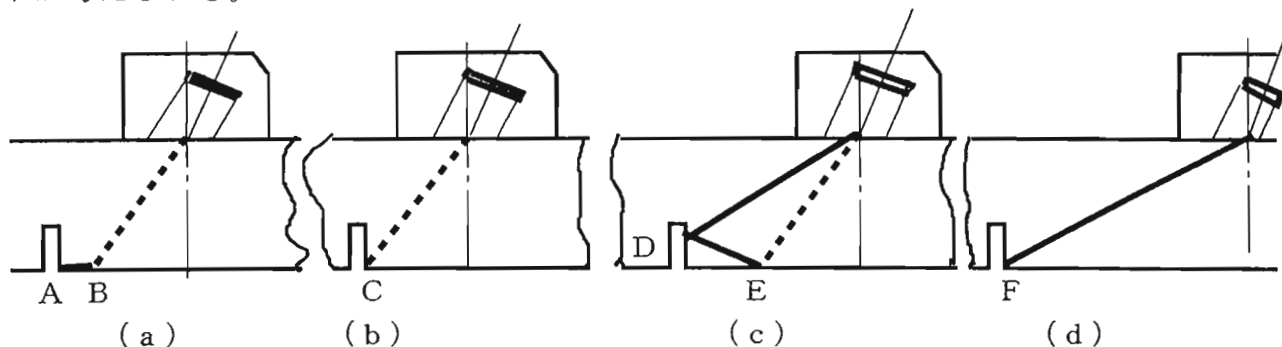
keyword: 2次クリーピング波、モード変換波法、横波のコーナーエコー、音圧往復反射率

1. まえがき

最近、J E A G 4 2 0 7 - 2 0 0 4 の指針の中でモード変換波法、2次クリーピング波法等^{1)~4)}が示され注目されている。そこでこれらのモードについて、きず検出の可能性を検討した。確認実験では、板厚30mmの底面側に深さ0.25~1.0mmの開口溝を加工し、縦波斜角探触子で溝を探傷した。実験では2次クリーピング波のエコーは確認できなかった。溝のエコーは横波のコーナーエコーとモード変換による三角経路の横波⇄縦波のエコーであった。以下実験結果とその考察を述べる。

2. モードの検討

図1は縦波屈折角 70° の縦波斜角探触子で底面側の開口溝を探傷する場合に次のモードが考えられる。



2次クリーピング波 横波のコーナーエコー モード変換波法 縦波のコーナーエコー

図1 底面開口溝の検出のための想定されるモード

図1で実線(——)が縦波、点線(.....)が横波を表している。

図1(a)はA B間を2次クリーピング波が伝搬したと考えた場合で、探触子から横波が放射され底面のB点でモード変換して縦波に変換され、溝部で反射してB点で横波にモード変換し横波が探触子に戻ったと仮定した場合である。

図1(b)は横波の直射による溝のC点近傍のコーナー反射エコーである。

図1(c)は探触子より横波が放射され底面のE点で横波⇄縦波にモード変換して溝部で

縦波反射し探触子でエコーを受信する、所謂三角経路を形成するモード変換波法である。

図1(d)は縦波の直射による溝のF点近傍のコーナー反射エコーである。

3. 各モードによる溝のエコー高さ・受信できる条件の検討

1) 2次クリーピング波法

図1(a)のB点で横波がモード変換して縦波になり溝で反射してB点で横波に変換されエコーが探触子を受信されたと仮定する。今、B点での平面波の横波⇄縦波の音圧往復反射率 $R_{s-L-L-s}$ を考えると式(1)となる。但し R_{s-L} 、 R_{L-s} は横波⇒縦波、縦波⇒横波の音圧反射率で式(2)～式(3)で⁵⁾示される。

$$R_{s-L-L-s} = R_{s-L} * R_{L-s} \text{-----(1)}$$

$$R_{s-L} = - \frac{\sin 4 \theta_L}{N} \text{-----(2)}$$

$$R_{L-s} = \frac{2 (C_s/C_L)^2 \sin 2 \theta_L \cos 2 \theta_s - \cos^2 2 \theta_s}{N} \text{-----(3)}$$

但し、 $N = (C_s/C_L)^2 \sin 2 \theta_L \sin 2 \theta_s + \cos^2 2 \theta_s$ 、

θ_s 、 θ_L は底面での横波入射・反射角度、縦波入射・反射角度である。図2は音圧往復反射率 $R_{s-L-L-s}$ の計算結果である。この計算結果は福原の計算結果⁶⁾と一致している。図2で2次クリーピング波が発生する条件では、 $R_{s-L-L-s}$ は零となり、2次クリーピング波のエコーは受信できないと考えられる。JISの用語の定義⁷⁾によれば、クリーピング波とは縦波臨界角(第一臨界角)で試験体に入射した場合に発生し、試験体の表面を直進する縦波であるとしている。縦波の角度 θ_L が $50 \sim 90^\circ$ の範囲のものまで2次クリーピング波と考えれば、2次クリーピング波のエコーは受信できる。

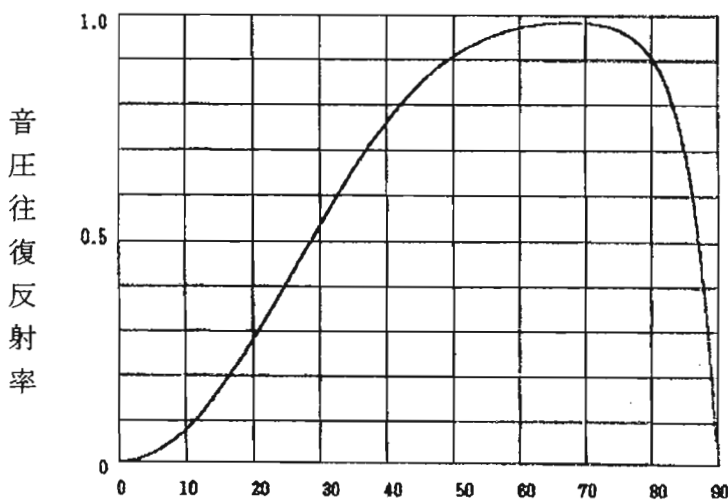


図2 音圧往復反射率 $R_{s-L-L-s}$ の計算結果

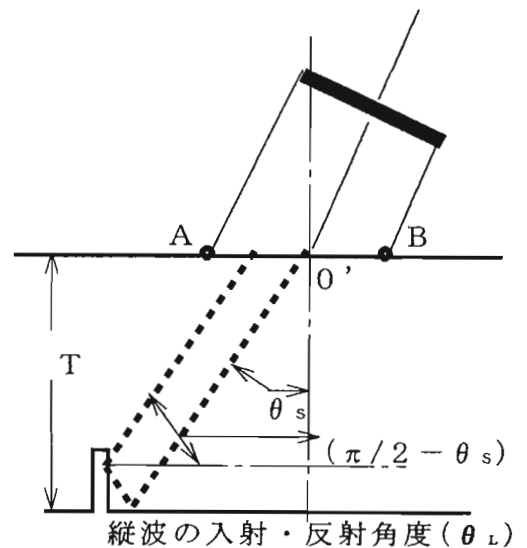


図3 溝のコーナー反射効果

2) 横波のコーナーエコー

図3の溝のエコーはコーナー反射で検出できる。その時のエコー高さ P_s はビーム路程を無視すれば式(4)で示される。

$$P_s = C \cdot R_s(\theta_s) R_s(\pi/2 - \theta_s) \cdot T_s \cdot D(\theta)^2 \text{ ----- (4)}$$

ここで、 C : 定数、 $R_s(\theta_s)$ 、 $R_s(\pi/2 - \theta_s)$ は、底面及び溝の側面での横波の反射率、 T_s : 横波の往復通過率、 $D(\theta)$ は探触子の指向性である。反射率 $R_s(\theta_s)$ は式(5)で計算できる。

$$\left\{ \begin{array}{l} R_s(\theta_s) = \frac{4QS(Q-S)^{1/2}(1-S)^{1/2} - (1-2S)^{1/2}}{4QS(Q-S)^{1/2}(1-S)^{1/2} + (1-2S)^{1/2}} \text{ ----- (5)} \\ R_s(\theta_s) = 1 \end{array} \right. \begin{array}{l} \theta_s < \theta_c \\ \theta_s > \theta_c \end{array}$$

$Q = (C_s/C_L)^2$ 、 $S = \sin(\theta_s)$ 、 $R_s(\pi/2 - \theta_s)$ は式(5)の S を $S = \sin(\pi/2 - \theta_s)$ とする。

3) モード変換波法(横波⇒縦波⇒縦波)

図1(c)のモード変換波法(横波⇔縦波⇔縦波)では、板厚 T 、溝深さ t によって探触子でモード変換波のエコーを受信できる探触子距離 Y が決まる。図4はこの条件を求めるための幾何学的寸法の記号を示す。いま振動子中心 O 点から放射された超音波が O' 点に到達して、屈折横波が C 点に到達する。そして底面で縦波にモード変換して、溝の E 点で縦波で反射する経路で探触子に戻ったとする。三角形 $O'CE$ を考えて条件を整理すると、式(6)～式(13)となる。

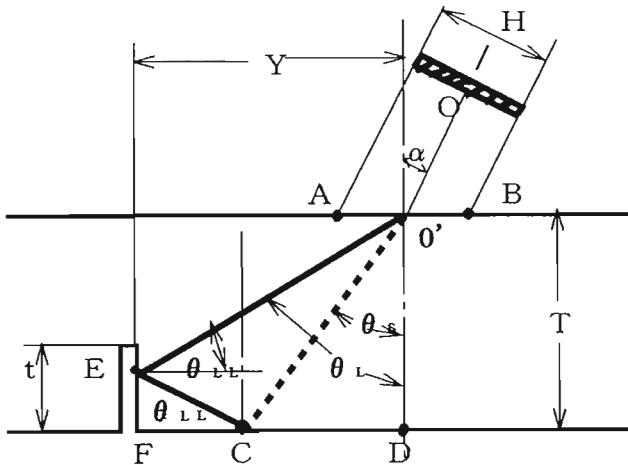


図4はこの条件を求めるための幾何学的寸法の記号を示す。いま振動子中心 O 点から放射された超音波が O' 点に到達して、屈折横波が C 点に到達する。そして底面で縦波にモード変換して、溝の E 点で縦波で反射する経路で探触子に戻ったとする。三角形 $O'CE$ を考えて条件を整理すると、式(6)～式(13)となる。

$$\theta_{LL} = \pi/2 - \theta_L \text{ ----- (6)}$$

$$C_{L2}/\sin(\theta_L) = C_{s2}/\sin(\theta_s) \text{ ----- (7)}$$

図4 モード変換波法でエコーが受信できる条件

三角形 $O'CE$ で正弦定理を適用すると

$$\overline{O'C}/\sin(2\theta_{LL}) = \overline{O'E}/\sin(\pi/2 - \theta_{LL} + \theta_s) \text{ ----- (8)}$$

$$\overline{O'E} = Y/\sin(\theta_L) \text{ ----- (9)}$$

$$\overline{CE} = [T - Y/\tan(\theta_L)]/\cos(\theta_L) \text{ ----- (10)}$$

$$\overline{O'C} = T/\cos(\theta_s) \text{ ----- (11)}$$

$$\text{ビーム路程 } W = [\overline{O'E} + \overline{CE} + \overline{O'C} * (C_{L2}/C_{s2})]/2 \text{ ----- (12)}$$

$$\overline{EF} = \overline{CE} * \cos(\theta_L) = T - \tan(\theta_L) \text{-----} (13)$$

今回は中心ビームの点O'の線上で考えたが、ビームが試験片の表面A点とB点の内側にあればエコーは受信することができる探触子距離Yの範囲は大きくなる。三角形経路のエコー高さP_{S-L-L}は式(14)で示される。

$$P_{S-L-L} = C \cdot T_{L \rightarrow S} * R_{S \rightarrow L-L} * T_{L-L} * D_{\theta S} * D_{\theta L} / W \text{-----} (14)$$

ここで、C：定数、T_{L→S}：(縦波)アクリル⇒(横波)鋼の往路の音圧通過率、T_{L→L}：鋼⇒アクリルの復路の縦波の音圧通過率、R_{S→L-L}：鋼中での横波⇒縦波⇒縦波の音圧反射率、D_{θS}=D_{θL}：探触子の指向性、W：ビーム路程である。

4) 縦波のコーナーエコー

図1(d)の縦波のコーナーエコーはビーム路程が長くエコー高さが最も低くなる。式(4)と同様な計算が可能であるが、ここでは省略した。

4. 実験による確認

- 1) 試験片：厚さ30mm、巾30mm、長さ300mmの試験片に巾1mm、長さ30mmで、深さ0.25mm～10mmの開口溝を加工した。溝の深さは0.25、0.50、0.75、1、2、4、6、8、10mmの9種類である。図5に試験片の外観写真を示す。
- 2) 探触子：5K10×10LA70、2K10×10LA90である。
- 3) 超音波探傷器：菱電湘南エレクトロニクス(株)UI-25
- 4) 接触媒質：マシン油
- 5) 実験方法：図6に実験方法を示す。試験片の片側に鋼製スケールを置き、これをガイドにして探触子を前後走査してCRT上のエコーを観察した。各モードのピークエコー高さとビーム路程を測定した。特に今回は、探触子の前後走査に対するエコー高さの変化をMA図形として残した。

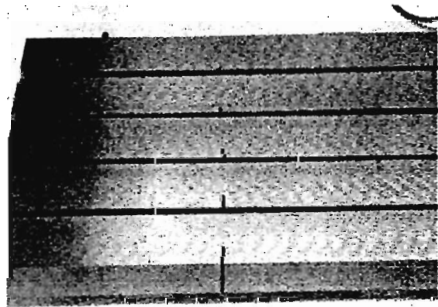


図5 試験片の外観写真

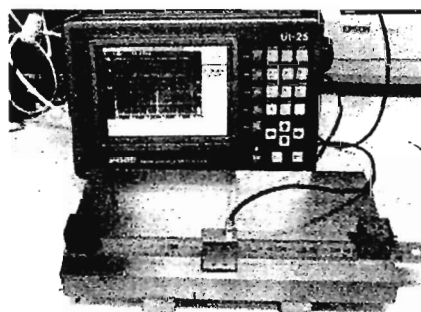


図6 実験方法(状況)の写真

5. 実験結果と考察

1) 探触子の前後走査による各モードの確認

図7はコーナーの前後走査図形、図8は溝深さ10mmの前後走査図形を示す。ここで確認できたのは、横波の直射によるコーナーエコーとモード変換波法によるエコーで、2次クレーピングエコーは確認できなかった。縦波の直射のコーナーエコーは非常に感度は低い。

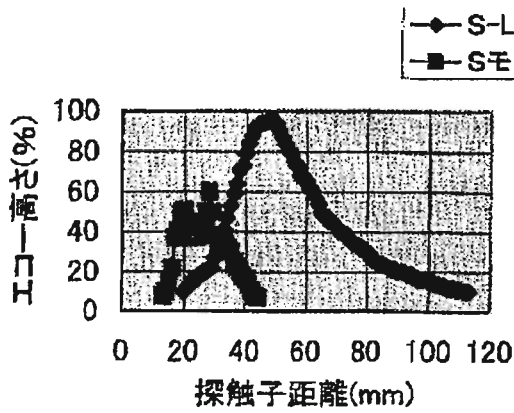


図7 コーナーの前後走査図形

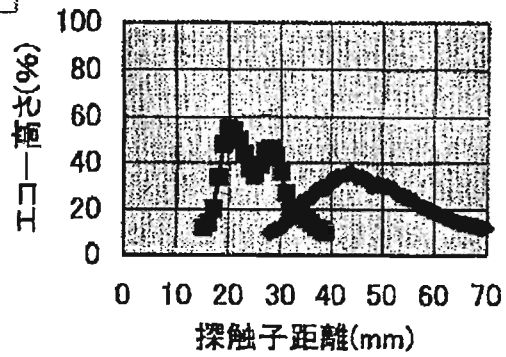
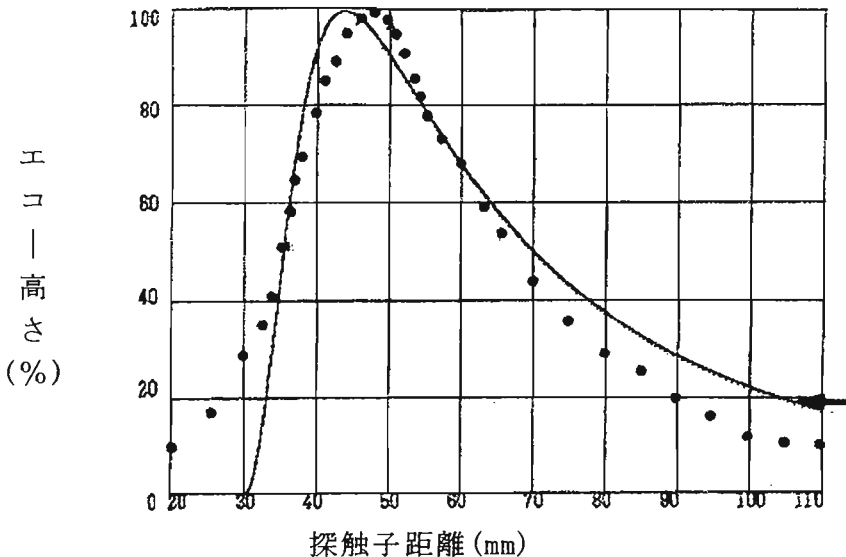


図8 溝の深さ10mmの前後走査図形

2) モード変換波法

モード変換波法のエコーは図7のコーナーでは、探触子距離 $Y = 20 \sim 113$ mmの広範囲に表れるが、図8の深さ10 mmの溝では、 $Y = 25 \sim 70$ mmと限定される。これは、探触子で受信できる探触子距離 Y は式(6)~式(13)を満足する必要があるが、板厚 T とすれば、モード変換波のエコーを受信できる溝深さ t の範囲は、 $t > 0.24T$ であるが、今回の実験では、 $6 \geq t$ の場合($t > 0.2T$)モード変換波のエコーが得られた。 $t = 4$ mm以下ではエコーが得られなかった。底面側のきずが深くないとモード変換波のエコーは得られない。



モード変換波法は底面側のきずが深いかどうかの判断には有効である。

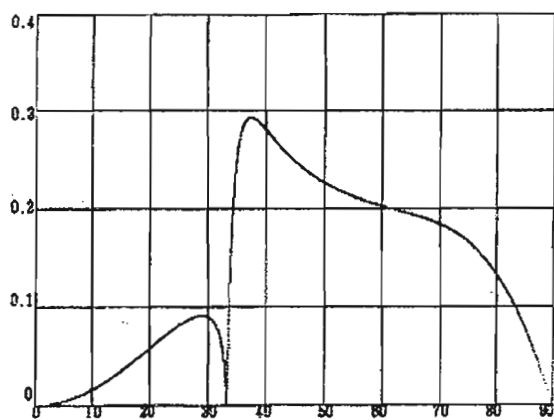
図9はコーナーの前後走査図形の実験結果と計算結果の比較を示す。両者は必ずしも一致してないが、全体の傾向は示している。計算は式(14)を使用した。●は実験結果、実線が式(14)の計算値である。

図9 コーナーの前後走査図形の実験結果と計算結果の比較

3) 横波のコーナーエコー

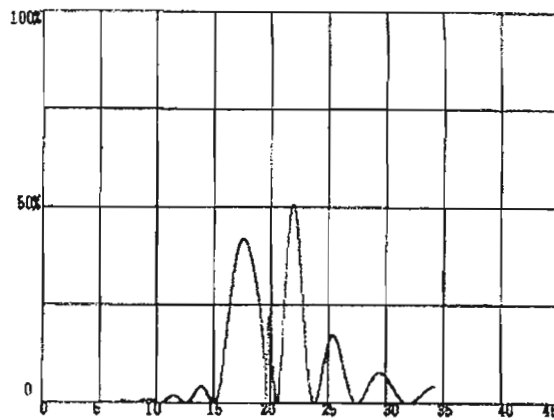
図7~図8の横波のコーナーエコーは双峰性を示し2つのピークを示している。前峰のピークは $\theta_s = 33^\circ$ 、後峰のピークは $\theta_s = 43^\circ$ 程度でこれは横波の往復通過率の影響を強く受けているものと思われる。溝の深さが浅くなるとピークは単峰となる。

図12は深さ $t = 0.25$ mmの溝のコーナーエコーで、明瞭なエコーが得られている。図10は横波の往復通過率、図11は横波のコーナー反射時の前後走査図形の計算例を示す。図11の計算は式(4)に示される。



横波屈折角 (θ_s)

図 10 横波の往復通過率



探触子距離 Y (mm)

図 11 横波のコーナ反射時の前後走査図形

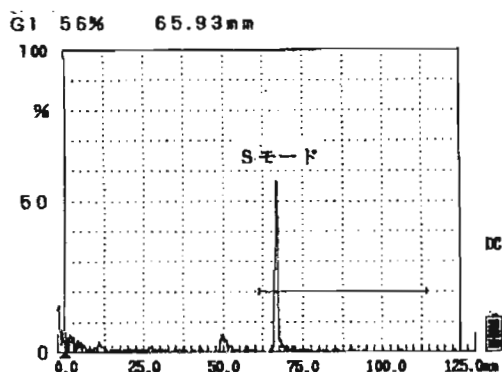


図 12 深さ0.25mmの溝のコーナエコー

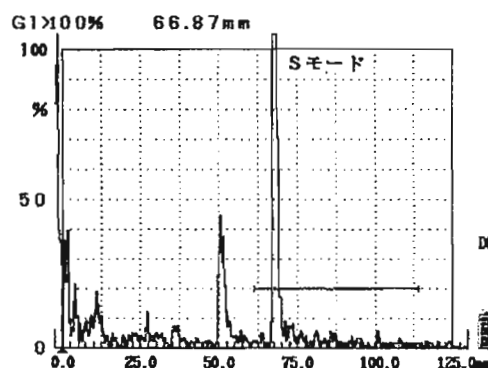


図 13 深さ10mmの溝のコーナエコー
(2次クリーピング波の確認のため感度上昇)

図 12、図 13 の探触子距離 Y は 19.5 mm である。探触子距離 Y から判断すると、横波屈折角 θ_s は 33° に相当する。また、ビーム路程 (65.9 ~ 66.9 mm) から判断しても、エコーは明らかに横波のコーナエコーである。図 14 は S V 波による溝の深さとエコー高さの関係を示す。ここで問題なのは、5K10×10LA70 では (横波屈折角 θ_s は 33° 前後)、溝の深さに関係なくエコー高さはほぼ一定となる。エコー高さからは、溝の深さは推定できない。この現象は以前、斜角探傷における人工溝の深さと音束変位に関する実験⁹⁾でも角度が臨界角に近い場合に同様な現象が表れた。しかし、5Z10×10A45 では、溝の深さとエコー高さは比例関係⁹⁾にある。

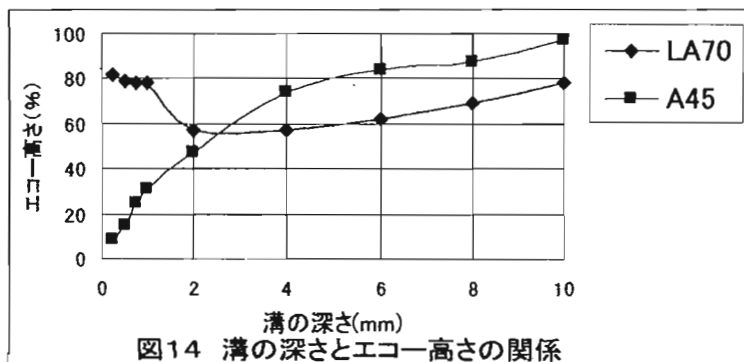


図 14 溝の深さとエコー高さの関係

4) 2次クリーピング波

図 13 は溝深さ 10 mm の横波の直射エコー (CRT 上 55%) より更に 16 dB 感度を上げ前後走査を実施したが、2次クリーピング波は確認できなかった。もし2次クリーピン

グ波が発生し、探触子で受信したとすれば、横波の直射エコーの後に表れる筈である。今回は反射源がコーナーであったが、きずがコーナーでなく底面に対して傾斜していれば、きずの傾斜面に、 $\theta_{\perp} = 50 \sim 90^{\circ}$ のビームが垂直に入射すれば、図2の音圧往復反射率のピークに近いので大きなエコーが受信できると思われる。

6. 結論

今回の実験は底面側にあるきずに対して、モード変換波法・2次クリーピング波法について検討した。その結果今回の実験範囲で、次の結論が得られた。

- 1) 今回の実験で2次クリーピング波を確認できなかった。
- 2) モード変換波は底面側に存在する溝が深ければ発生し、溝の深さのおよその判断に有効である。板厚 T 、きず深さ t とすれば、 $t > 0.20T$ の条件を満足すればモード変換波のエコーは受信できると思われる。
- 3) 溝の深さ10mm以下では横波のコーナーエコーが最も高い。

参考文献

- 1) 日本電気協会：軽水炉原子力発電用機器の期間中検査における超音波探傷試験指針、J E A G 4 2 0 7 - 2 0 0 4、pp. 付-4~5, (2004)
- 2) 田中 徹他：2次クリーピング波のコンピュータ・シミュレーション、平成16年春季大会講演概要集、pp. 85-86, (2004)
- 3) 河野 尚幸他：縦波・横波を併用した2次モードセクタスキャン法によるオーステナイト系溶接部の超音波探傷、平成16年春季大会講演概要集、pp. 101-102, (2004)
- 4) 古川 敬、古村一郎：欠陥深さ予備測定に関するシミュレーション解析、超音波分科会資料NO. 21733, pp49-54, (2004)
- 5) J. & H. Krautkrämer : Ultrasonic testing of materials, Appendix p. 478, (1968)
- 6) 福原 照明：クリーピング波の理論、波動理論体系化研究委員会資料HT-12, (2004)
- 7) J I S Z 2 3 0 0 - 1 9 9 1 : 非破壊試験用語、p. 25, (1991)
- 8) 高橋 雅和：斜角探傷における人工溝の深さと音速変位に関する実験的検討、39(5), pp. 396-401, (1990)
- 9) 高橋 雅和：人工溝の深さと超音波斜角探傷のエコー高さの関係、非破壊検査、31(9), pp. 629-639, (1982)

自動超音波垂直探傷における検出性能の比較

－ 3 溶接線が交差する隅角部ウェブ面からの超音波垂直探傷－

Research of Applying Ultrasonic Inspection System for Vertical Welded Joint

柳沼 安俊 稲葉 正利 藤井 淳平
Y. Yaginuma M. Inaba J. Fujii

(株)東京鐵骨橋梁
TTK CORPORATION

概 要

近年、鋼製橋脚隅角部の疲労損傷事例が多数報告されている。疲労損傷の原因として、交通量の増大と通行車輛の大型化、隅角部溶接継手の不溶着部の存在などが挙げられている。従来、鋼製橋脚隅角部の溶接継手は、超音波斜角探傷法により、継手内部の品質検査が行われている。しかしながら、ウェブ勝ちの板組における3溶接線交差部には、ウェブ面に平行な融合不良など反射指向性の高い面状きずが生じる可能性もあり、斜角探傷法のみで溶接品質をカバーしきれるとは言い難い。このような、ウェブ面に平行なきずの検出に対しては、ウェブ側面からの垂直探傷が最も有効であると考え、3溶接線交差部に溶接欠陥を挿入した小型試験体を用いて、種々の条件により超音波垂直探傷試験を行い、きずの検出性能について比較を行った。

1. まえがき

近年、鋼製橋脚隅角部の疲労損傷事例が多数報告されている。疲労損傷の原因として、交通量の増大と通行車輛の大型化、隅角部溶接継手の不溶着部の存在などが挙げられている。隅角部の3溶接線交差部における溶接施工性に着目すれば、その難易度の今昔に大きな変わりはなく、①板組および板厚を十分理解した部材設計を行う、②溶接の棒継ぎが確実に行うことができるようコーナーカットを設けた開先形状を選定する、③開先の向きや溶接姿勢および溶接手順を考慮した部材の反転計画を立てる、④溶接継手の品質管理手法を充実させるなど、堅実な製品を提供するための十分な配慮が必要である。

一般に鋼製橋脚隅角部の溶接継手は、超音波斜角探傷法により、継手内部の品質検査が行われている。しかしながら、ウェブ勝ちの板組における3溶接線交差部には、ウェブ面に平行な融合不良など反射指向性の高い面状きずが生じる可能性もあり、斜角探傷法のみで溶接品質をカバーしきれるとは言い難い。このような、ウェブ面に平行なきずの検出に対しては、ウェブ側面からの垂直探傷が最も有効であると考え。

橋梁部材における垂直探傷試験の施工実績としては、本州四国連絡橋トラス弦材の部分溶込みかど継手の検査が挙げられる。しかしながら、この検査は、部分溶込みかど継手の溶込み深さと溶込み線のなだらかさを検証するものであり、探傷とは目的が異なる。したがって、溶接部の内在きずに対する垂直探傷条件やその検出精度については不明瞭な部分も多く、適用にあたっては探傷性能に対する検証を要する。

そこで、鋼製橋脚隅角部の3溶接線交差部に超音波垂直探傷試験を適用するにあたり、溶接欠陥を挿入した小型試験体を用いて、種々の条件により超音波垂直探傷試験を行い、きずの検出性能について比較を行った。本稿では、その試験結果について報告する。

2. 試験体形状

試験体形状を図-1に示す。試験体の用いた鋼材の板厚は40mm、材質はSM490Aである。

各溶接線は完全溶込み溶接とした。

柱フランジかど継手においては、梁フランジおよびダイヤフラムの存在により溶接の連続性が途絶え、3溶接線交差部で棒継ぎが必要となる。溶接の始末端は、一般部に比べてきずの混入確率が高くなる。

本試験体では、3溶接線交差部の柱フランジかど継手の棒継ぎ部に、ウェブ底面に沿うように融合不良を混入させて、これを超音波垂直探傷試験の評価対象とした。

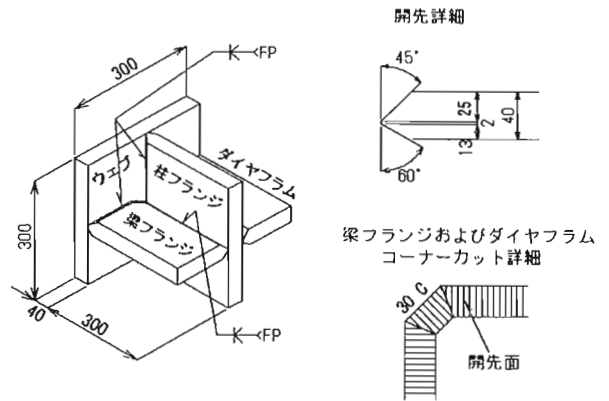


図-1 試験体形状

3. 超音波垂直探傷条件

3-1 使用探触子と探傷方法

超音波探傷試験で用いた垂直探触子は、ノーマル型 5Z10N および 5Z20N、集束型 SB5Z10N（いずれもジャパンプローブ社製）の3種類である。接触媒質はグリセリン（100%）を用いた。使用した垂直探触子の音場特性を図-2に示す。今回使用した集束型垂直探触子（SB5Z10N）の集束範囲は7~40mm程度であり、最大集束ポイントは17mmの深さである。今回の試験対象板厚は40mmであり、適正な探触子を選定したとは言い難い。しかしながら、①最大集束ポイントが40mm前後の集束型垂直探触子が手元になかったこと、②図-2に示すとおり、40mm位置のビーム幅が集束型垂直探触子では4.5mm、ノーマル型探触子 5Z10Nでは6.0mm、5Z20Nでは13.0mmと他の垂直探触子と比べて集束型垂直探触子の方が十分絞れていることから、本探触子をそのまま用いることとした。

探傷方法は、手探傷と自動探傷の2種類について実施した。自動探傷ではx y方向とも1mmピッチで探傷し、1ゲート1エコー方式でデータを採取した。ゲート幅は、ウェブ底面を基準に±5mmの範囲に設定した。

垂直探傷条件をまとめて表-1に示す。

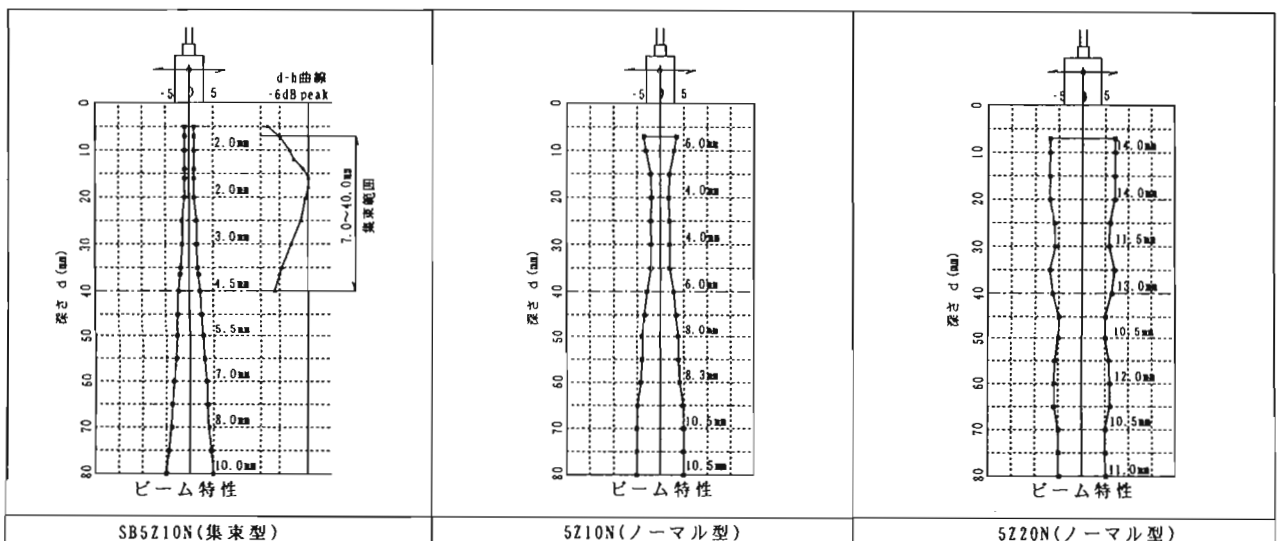


図-2 音場特性

表-1 超音波垂直探傷条件

探傷条件	探傷方法	探 触 子	探 傷 感 度	検 出 レ ベ ル
A	手 探 傷	5Z10N(ノーマル型)	RB-41 No.2 φ3mm横孔:80%(H線)	L/2検出レベル
B		5Z20N(ノーマル型)	RB-41 No.2 φ3mm横孔:80%(H線)	L/2検出レベル
C		5Z20N(ノーマル型)	ウェブ底面エコー:80%	40%(6dBドロップ)
D		SB5Z10N(集束型)	RB-41 No.2 φ3mm横孔:80%(H線)	L/2検出レベル
E	自動探傷	SB5Z10N(集束型)	ウェブ底面エコー:80%	40%(6dBドロップ)
F		SB5Z10N(集束型)	ウェブ底面エコー:80%	20%(12dBドロップ)

3-2 探傷感度の設定ときずの検出レベル

今回の試験で適用した探傷感度ときずの検出レベルは、次のとおりである。

(1) 対比試験片の標準孔による感度設定

JIS Z 3060 に準拠し対比試験片 (RB-41 No.2 φ3mm 横孔) により距離振幅特性曲線(H線:80%)を作成し、検出レベルを L/2 線に設定した。

対比試験片により感度設定を行う場合、きずの大きさはφ3mm 横孔に対する相対評価となるため、きずの種類に応じて検出レベルを設定する必要がある。

(2) ウェブ底面エコーに基づく感度設定

ウェブ底面エコーを80%に合わせ、これを探傷感度とした。検出レベルは、底面エコー高さの1/2(6dBドロップ法)または1/4(12dBドロップ法)とした。

底面エコー方式できずを評価する場合の留意事項は、以下のとおりである。

- ① きず寸法の評価を適正に行えるきずの形状は、超音波ビームに対して直角に平面的な広がりをもつきずである。ビームの照射面積とエコー高さの比例関係が成り立てば、エコー高さが1/2に低下する(6dBドロップ)ポイントが、健全部ときずの境界を示す。
- ② しかしながら、ビーム幅に比べてきずの寸法が小さい場合、きずの幅ではなくビームの広がりを測定することになりかねないので注意を要する。
- ③ 例えば球状きずなど、平面きずに比べて形状反射率小さい場合、きずを過小評価する場合や、検出が困難な場合がある。
- ④ 探傷感度は、底面エコーを基に定めているため、きず位置が底面と異なる場合、ビーム路程の差による減衰等の影響により、きずの大きさを適正に評価することは難しい。

4. 実きずの発生状況および探傷結果

超音波探傷試験終了後、試験体をウェブ外面より38mmの位置で切断してスライスマクロのNo.1とした。それ以降は2mmピッチでNo.16(深さ68mm)までスライスマクロを実施した。その中で今回の目的である3溶接線交差部の柱フランジかど継手の棒継ぎ部であるスライスマクロNo.2(深さ40mm(ウェブ底面位置))での実きずの発生状態について観察した。

観察した実きずおよび超音波垂直探傷試験で記録されたきずの広がり、定量的な評価を行うために、WES 2805「溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法」に準じてきず寸法の標準化を行った。つまり、きずの大きさを包括する最小面積の長方形を描き、この長方形に内接する楕円の長軸および短軸をきず寸法として整理した。以下、きずの面積を比較する際には、この楕円面積を用いるものとした。

なお、WES 2805では、隣接するきずの間隔がある一定の条件を満たす場合に、1つの複合きずとして評価する手法が定められている。ここでは、きずの分解能を含めた探傷性

能を確認したかったので、すべて単独きずとして取り扱うこととした。

実きずと探傷結果について比較検討する範囲は、上下・左右の溶接線が交差する正方形領域である。試験体の断面マクロ写真と超音波試験結果を図-3~7に示す。また、きず寸法の測定結果の一覧を表-2に示す。

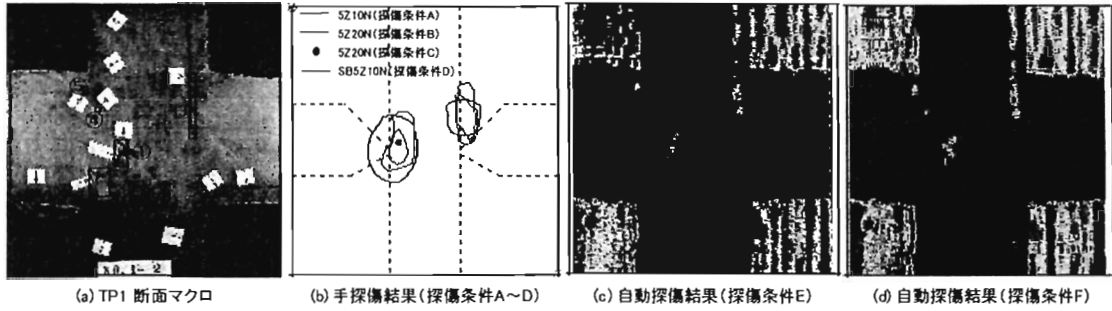


図-3 試験体TP1 断面マクロと超音波探傷結果

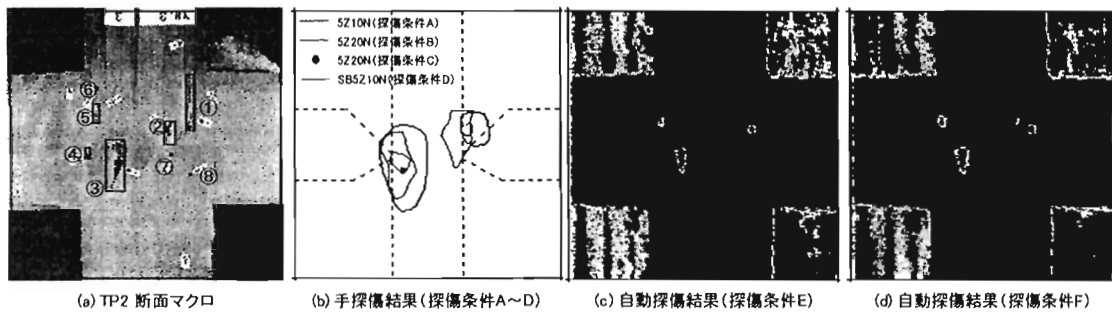


図-4 試験体TP2 断面マクロと超音波探傷結果

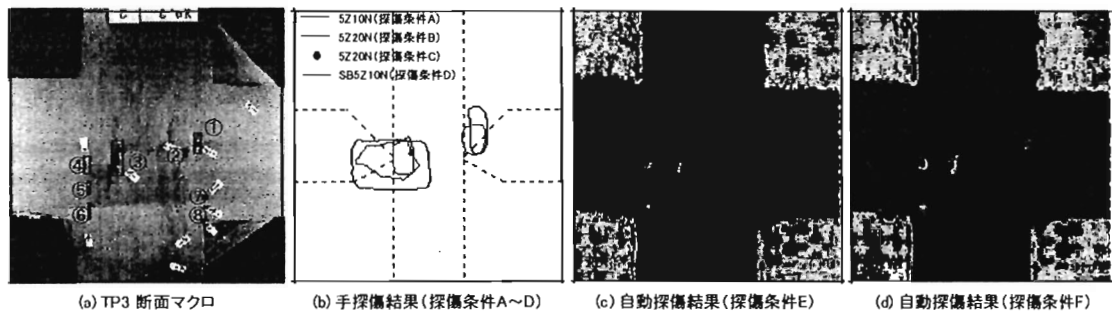


図-5 試験体TP3 断面マクロと超音波探傷結果

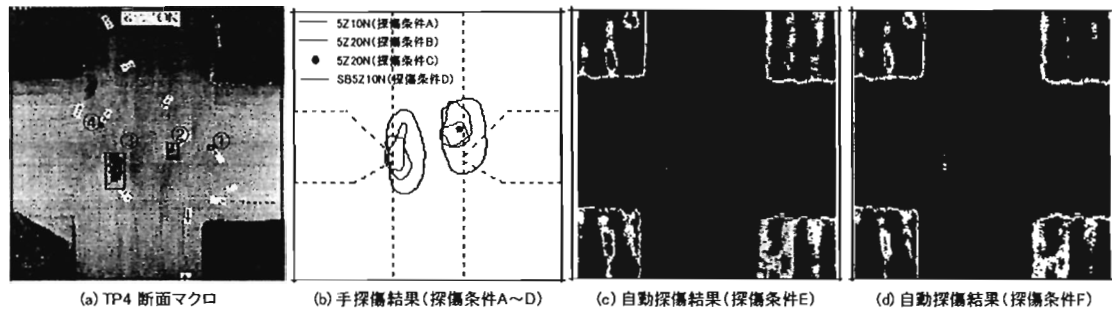


図-6 試験体TP4 断面マクロと超音波探傷結果

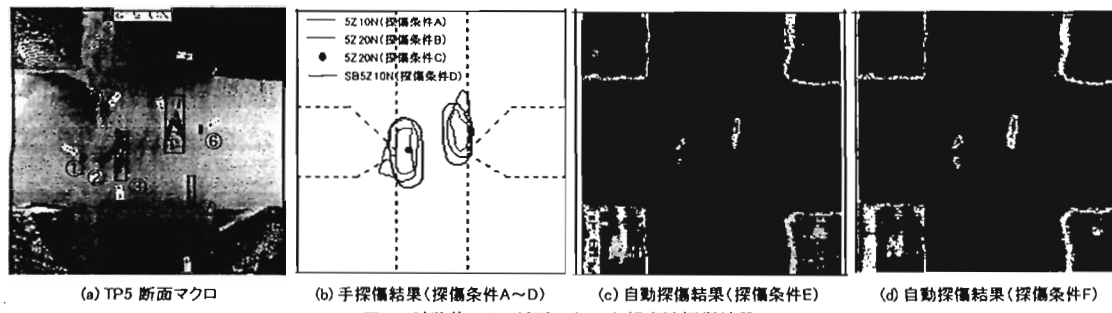


図-7 試験体TP5 断面マクロと超音波探傷結果

表-2 きず寸法測定結果

試験体	実きず	探傷方法																		
		手探				傷探				自動探傷										
		探傷条件A		探傷条件B		探傷条件C		探傷条件D		探傷条件E		探傷条件F								
	きずNo.	a	b	A	a	b	A	a	b	A	a	b	A	a	b	A	a	b	A	
TP1	① LF	15.1	6.6	78.3	35	17	467.3	38	25	746.1	spot	20	10	157.1	18	9	127.2	20.5	11.5	185.2
	② LF	15.7	10.9	134.4	35	12	329.9	20	19	298.5	—	30	14	329.9	33	7	181.4	8.5	4.5	30.0
	③ LF	35.7	3.2	89.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.5	4.5	15.9	36	9.5	268.6
	④ 密集BH	2.6	2.2	4.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	4	22.0	7.5	7.5	44.2
	⑤ 密集BH	5.2	2.5	10.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.5	5.5	28.1	9.5	6.5	48.5
TP2	① LF	31	3.9	95.0	22	13	224.6	—	—	—	—	8	6	37.7	6.5	5.5	28.1	31	8	194.8
	② LF	13.3	5.7	59.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	2.5	11.8	19	6.5	97.0
	③ LF	28.4	10.4	232.0	—	—	—	—	—	—	spot	13	9	91.9	24.5	10.5	202.0	27.5	14.5	313.2
	④ LF	6.5	3.1	15.8	40	18	565.49	50	30	1178.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	⑤ 密集BH	10.4	3.5	28.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9.5	5.5	41.0	11	7.5	64.8
TP3	⑥ 単独BH	0.9	0.9	0.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	⑦ 単独BH	1.2	1.1	1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	⑧ 単独BH	1	1	0.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	① LF	11.2	3.6	31.7	17	15	200.3	26	10	204.2	—	—	—	—	8	4	25.1	11	6.5	56.2
	② LF	4.2	1.7	5.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	2	3.1
TP4	③ LF	19	6.5	97.0	—	—	—	—	—	—	spot	20	11	172.8	12	7.5	70.7	15.5	11	133.9
	④ 密集BH	9.8	3.3	25.4	37	24	697.43	40	25	785.4	—	—	—	—	8	6	37.7	10.5	7.5	61.9
	⑤ 密集BH	7.2	1.1	6.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	5	31.4
	⑥ 密集BH	8.3	1.4	9.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	4.5	24.7	11	6.5	56.2
	⑦ 密集BH	1.9	1.5	2.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	5.5	25.9
TP5	⑧ 単独BH	1	1	0.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	5	19.6
	① LF	3	2.5	5.9	23	20	361.3	45	25	883.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	② LF+密集BH	9	6.1	43.1	—	—	—	—	—	—	spot	16	14	175.9	—	—	—	4	3.5	11.0
	③ LF	20.4	9.9	158.6	35	15	412.3	45	20	706.9	—	—	—	—	11.5	3	27.1	18.5	11	159.8
	④ 単独BH	1.5	1.5	1.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TP5	① LF	2.7	2.7	5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	② 単独BH	1	0.9	0.7	31	20	486.95	42	20	659.73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	③ LF	27.7	6.1	132.7	—	—	—	—	—	—	spot	28	9	197.92	21.5	9.5	160.4	27	12.5	265.1
	④ LF	7.2	3.4	19.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	⑤ LF	32.7	10.3	264.5	40	15	471.2	37	16	465.0	—	—	—	—	22	8	138.2	25	10.5	206.2
⑥ 密集BH	4.3	0.9	3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
⑦ LF+密集BH	17.1	3.3	44.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.5	2.5	8.8	

注 a寸法:きず形状を楕円に置き換えたときの長さ(mm) LF:融合不良
 b寸法:きず形状を楕円に置き換えたときの短径(mm) BH:ブローホール
 A寸法:きず形状を楕円に置き換えたときの面積(mm²) spot:きずからのエコーをスポット的に検出するもの(探触子を移動するとすぐエコーが消失してしまうもの)

4-1 試験体における実きずの発生状況

断面マクロで確認されたきず実きずは、試験体ごとに通し番号を付けて整理した。各試験体における実きずの発生状況は以下のとおりである。

(1)試験体 TP1

- ・ 柱フランジかど継手の棒継ぎ部に生じた融合不良：2箇所（きず No.①，②）
- ・ 柱フランジかど継手のパス間に生じた細長い融合不良：1箇所（きず No.③）
- ・ 1mm以下の微細な密集ブローホール：2箇所（きず No.④，⑤）

(2)試験体 TP2

- ・ 柱フランジかど継手のパス間に生じた細長い融合不良：1箇所（きず No.①）
- ・ 柱フランジかど継手の棒継ぎ部に生じた融合不良：2箇所（きず No.②，③）
- ・ ダイヤフラムかど継手のビード始末端に生じた融合不良：1箇所（きず No.④）
- ・ 1mm以下の微細なブローホール：5箇所（きず No.⑤～⑧）

(3)試験体 TP3

- ・ 柱フランジかど継手の棒継ぎ部に生じた融合不良：3箇所（きず No.①～③）
- ・ 1mm以下の微細なブローホール：5箇所（きず No.④～⑧）

(4)試験体 TP4

- ・ 梁フランジかど継手のビード始末端に生じた融合不良：1箇所（きず No.①）
- ・ 柱フランジかど継手の棒継ぎ部に生じた融合不良と密集ブローホール：1箇所（きず No.②）
- ・ 柱フランジかど継手の棒継ぎ部に生じた融合不良：1箇所（きず No.③）
- ・ 1.5mmの単独ブローホール：1箇所（きず No.④）

(5)試験体 TP5

- ・ ダイヤフラムかど継手のビード始末端に生じた微細な融合不良：2箇所（きず No.①，④）
- ・ 柱フランジかど継手の棒継ぎ部に生じた融合不良：2箇所（きず No.③，⑤）
- ・ 1.5mmの単独ブローホール：1箇所（きず No.④）
- ・ 1mm以下の微細な融合不良およびブローホール：3箇所（きず No.②，⑥，⑦）

平成14年3月に改訂された道路橋示方書から、鋼道路橋においても本格的に疲労設計が導入された。溶接継手の許容きず寸法は、設計で定める継手の強度等級により決定されるが、一般に道路橋示方書に準じて製作された製品に対する許容きず寸法は $t/3$ 、疲労を考慮する場合の許容きず寸法は $t/6$ と言われている。

本試験体の構成板厚はすべて40mmであるため、この場合の許容きず寸法としては、 $t/3=13.3\text{mm}$ あるいは $t/6=6.6\text{mm}$ が一応の目安となる。表-2に試験体のきず寸法を示したが、柱フランジかど継手に意図的に挿入した融合不良は、いずれも $t/6$ を上回るきず寸法である。

4-2 探傷結果

手探傷では、設定した検出レベルを超えるエコーを追従し、その軌跡を記録した。なお、手探傷を行う検査員には、きずはできるだけ分離して検出するよう指示し、探傷の段階で同一きず群として記録することがないよう配慮した。

自動探傷では、検出レベルを超えるエコーを色調表示して平面Cスコープ画像として処理した。ここでは、底面エコー方式の6dBドロップ法と12dBドロップ法により整理した探傷記録を示しているが、両者の探傷データは同一である。両者の検出レベルに合わせて、画像表示のしきい値のみを変えてデータ処理を行ったものである。

探傷条件別のきずの検出結果は次のとおりである。

- (1)探傷条件 A (手探傷, ノーマル型探触子 5Z10N, 対比試験片方式, L/2 検出レベル)
 - ・ 隣接するきずを完全に分離して検出せず, それらを複合した領域として評価している。
 - ・ 微細なブローホールは検出していないが, $t/6$ 以上のきずはほとんど検出している。
- (2)探傷条件 B (手探傷, ノーマル型探触子 5Z20N, 対比試験片方式, L/2 検出レベル)
 - ・ 隣接するきずを完全に分離して検出せず, それらを複合した領域として評価している。
 - ・ きずは探傷条件 A よりも過大に評価する傾向にある。
 - ・ 微細なブローホールは検出していないが, $t/6$ 以上のきずはほとんど検出している。
- (3)探傷条件 C (手探傷, ノーマル型探触子 5Z20N, 底面エコー方式, 6dB ドロップ法)
 - ・ $t/3$ 以上の比較的大きなきずについても, エコーがスポット的に現れるのみである。探触子を移動するとすぐにエコーが消失してしまう。
 - ・ 探触子と感度設定のバランスが悪く, きずの検出が困難である。なお, 同一探触子を用いた探傷条件 B の検出レベルは, 当条件の検出レベルの約 8 倍である。
- (4)探傷条件 D (手探傷, 集束型探触子 SB5Z10N, 対比試験片方式, L/2 検出レベル)
 - ・ 探触子のきず分解能が高いため, 探傷条件 A および B と比べて, $t/3$ 以上の大きなきずに対する寸法精度が高い。
 - ・ 反面, 大きなきずに隣接する密集ブローホール等の見逃しが高くなっている。
 - ・ 微細なブローホールは検出していない。
 - ・ 同一探触子を用いた探傷条件 E および F の検出レベルは, それぞれ当条件の検出レベルの約 $1/4$ および $1/8$ である。
- (5)探傷条件 E (自動探傷, 集束型探触子 SB5Z10N, 底面エコー方式, 6dB ドロップ法)
 - ・ きずの分解能が高く, 断面マクロと探傷画像のきずの分布はほぼ一致する。
 - ・ 長径が $t/3$ 以上のきずの検出率は 82%(検出数/きず数=9/11)である。
 - ・ 長径が $t/6$ 以上のきずの検出率は 72%(検出数/きず数=13/18)である。
 - ・ 単独および密集ブローホールの検出率は 43%(検出数/きず数=6/14)である。
- (6)探傷条件 F (自動探傷, 集束型探触子 SB5Z10N, 底面エコー方式, 12dB ドロップ法)
 - ・ きずの分解能が高く, 断面マクロと探傷画像のきずの分布はほぼ一致する。
 - ・ 長径が $t/3$ 以上のきずについては, すべて検出している。
 - ・ 長径が $t/6$ 以上のきずの検出率は 94%(検出数/きず数=17/18)である。長径が $t/6$ 以上で検出できなかったきずは, 試験体 TP5 きず No.④の融合不良 (7.2×3.4mm) である。
 - ・ 単独および密集ブローホールの検出率は 71%(検出数/きず数=10/14)である。

4-3 きず寸法の測定精度

(1)きず面積

図-8 は WES 2805 に基づいてきずの標準化を行い, きずを楕円形状に置き換えた場合の面積比較である。横軸は試験体の断面マクロの測定寸法 (長軸および短軸) から算出した換算楕円面積で実きずに近い値を示す。縦軸は超音波探傷結果から求めた換算楕円面積である。

探傷条件 A, B および D の検出結果のうち, 隣接したきずを複合された状態で検出し, 大きな領域を有する 1 つのきずとして判定しているものがある。これらについては, 次の要領で面積比較を行っている。

- ① 複合して評価したと思われる複数の実きずを断面マクロから拾い上げる (表-2 参照)。
- ② その対象となる個々の実きずの換算楕円面積を合計し, 探傷結果の換算楕円面積と比較する。このような要領できず面積を整理すると, 探傷条件 A および B は, 実きずに対していずれも 2 倍以上過大に面積評価している。探傷条件 D の結果と実きずの換算

楕円面積には、明瞭な相関が現れていない

③ 自動探傷で行った条件

Eについては、特別な相関はないが、若干小さめの面積評価を与える。探傷条件Eよりも画像表示のしきい値を6dB下げた探傷条件Fは、もっとも高い相関を示し、きず面積としては安全側の評価を与える。

(2)きず寸法

図-3～7に示すとおり、自動探傷の結果が個々のきずに対して最も高い分解能を示し、手探傷の結果では、きず寸法を個別に評価することは難しい。したがって、ここでは、自動探傷で行った条件EおよびFについてのみ、きず寸法（長軸、短軸）の比較を行った。

図-9は、横軸に断面マクロから測定したきず寸法を示し、縦軸は自動探傷結果の平面Cスコープ画像から求めたきず寸法である。本図は、1つのきずに対して求められた長軸と短軸の2つの寸法を同時にプロットしている。また、横軸のゼロ線上にプロットされているものは、自動探傷では検出できなかったものを示している。

探傷条件Eは、10mm以上のきずに対して小さめに評価している傾向を示すが、検出した10mm未満のきずについてはほぼ適正にサイジングされている。

探傷条件Fは、10mm以上のきずに対して断面マクロから求めたきず寸法との相関性が高い。一方、10mm未満の大きめに評価する傾向を示している。一般に小さいきずは、ビーム幅に依存すると言われている。探傷条件Fでは、しきい値を下げたことにより見かけ上ビーム幅が広がり、10mm未満のきずを過大評価したものと考えられる。

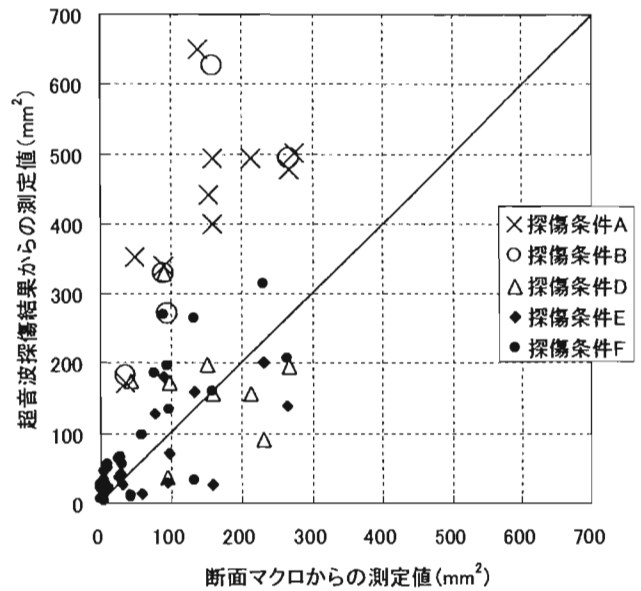


図-8 楕円形状に換算したきず面積

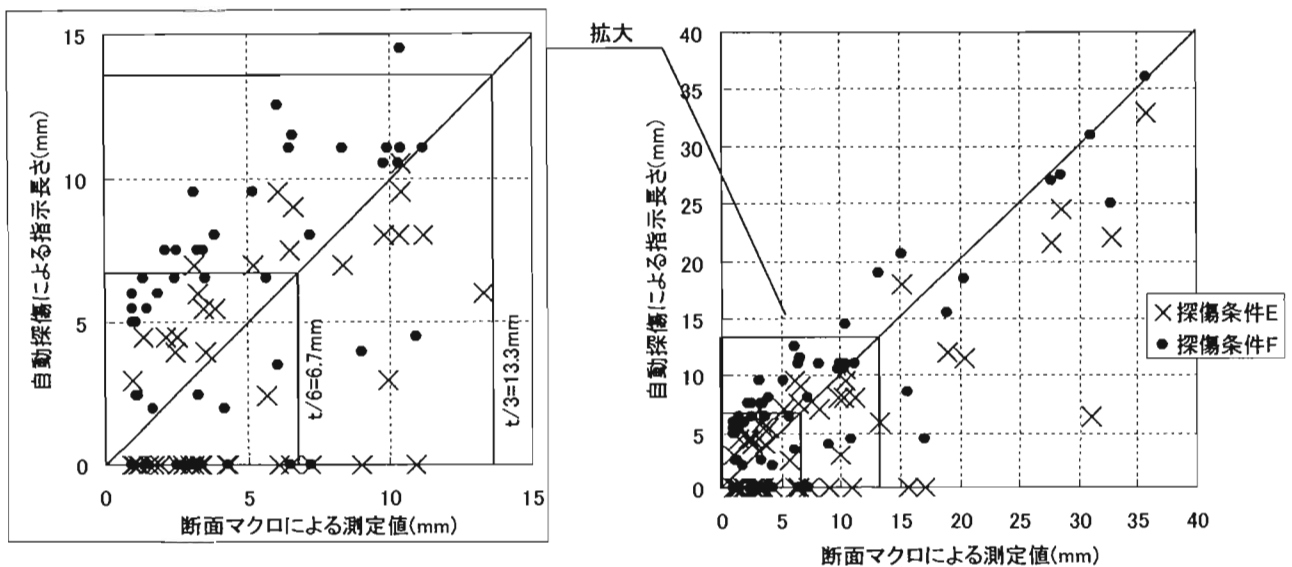


図-9 自動探傷におけるきず寸法（長径、短径）の測定精度

5. まとめ

本試験体では、3溶接線交差部の柱フランジかど継手の棒継ぎ部に、ウェブ底面に沿うように融合不良等を混入させて、これをウェブ側面から超音波垂直探傷試験を行い、探傷条件別にきずの検出性能について検証した。

本試験の結果を以下にまとめる。

- ① 探傷条件 A および探傷条件 B では、きず長さが $t/6$ 以上のものについてはほとんど検出した。比較的大きなきず（密集ブローホールを除く）の見落としを無くすという観点から、予備探傷としての感度設定に有効であると考えられる。しかしながら、隣接するきずを同一きず群として検出しているため、単独きずとして個々の寸法精度が要求される場合には過大評価となる。
- ② 探傷条件 C では、きずの検出ができなかった。一方、同一探触子を用いた探傷条件 B（検出レベル比で 8 倍）は、若干過大評価の傾向にある。したがって、本探触子（ノーマル型 5Z20N）を用いた場合は、両者の中間的な検出レベルに設定すれば、検出精度が向上するものと思われる。
- ③ ノーマル型探触子による手探傷（条件 A および B）よりも、集束型探触子を用いた手探傷（条件 D）の方が、 $t/3$ 以上の大きなきずに対しては、実きずに近い形で検出される。
- ④ 自動探傷（条件 E および F）におけるきず位置および大きさに対する検出精度は、手探傷に比べて非常に高く、微細なきずに対しても見落としが少ない。3溶接線交差部の探傷結果について、きずのサイジングを行う場合は自動探傷の適用が必須条件であると考えられる。
- ⑤ WES 2805 によりきず寸法の評価を試みた。探傷条件 F は、きず寸法（長軸および短軸）、楕円換算面積ともに実きずと最も高い相関を示した。

6. おわりに

鋼製橋脚隅角コーナーの 3 溶接交差部の溶接施工は難しい。板組により種々の欠陥が生じる恐れがあり、その方向性も発生位置も様々である。溶接施工が難しければ、当然ながら手直しも同様である。隅角コーナー部は応力的にも卓越する部位でもあり、非破壊検査精度が要求される場所である。

本稿で検証の対象としたきずは、ウェブ底面に生じた融合不良に限定したものであり、一例に過ぎない。今後も引き続き、①ウェブの板厚と探触子特性、②きずの種類、形状および発生位置に対する検出性能などに着目した実験データを蓄積し、より精度の高い探傷結果が得られるよう検討していく予定である。

【参考文献】

- 1) (社) 日本溶接協会：WES 2085-1997「溶接継手の脆性破壊発生および疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法」
- 2) (社) 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説，丸善，2002.3
- 3) (社) 日本道路協会：鋼道路の疲労設計指針，丸善，2002.3

JIS 技量認定の問題点と海外訓練センター事情

サイテックアソシエーツ 柳 千秋

1. はじめに

非破壊試験（NDT）要員の技量認定制度は、旧制度（NDIS 0601, NDIS J 001）から JIS Z 2305:2001 への一元化移行が、昨年度以来進んでいる。当初の不安をかき消して、一見順調に進み出したかのように見える新制度は、根底に大きな矛盾をはらみ、今後小さな障害にも大波乱を招きかねない、危うい状況が見えかくれしている。

もしその判断を誤り、歪みを深めるような舵取りの結果、取りかえしのつかない事態に発展する可能性さえあるとすれば、今のうちにまず問題意識を合わせるよう努力しなくてはなるまい。そして問題点がしばられたとしても、何も手を打てなかりとうするあきらめに支配されることなく、中長期的展望に立った解決策を何としても模索する必要がある。

ここではその出発点としての問題提起を試み、活発な討論の糸口となることを期待して論を進めたい。

2. 工業分野

1970 年代の初め、ISO/TC135（NDT 専門委員会）に SC7（要員認証分科委員会）が設けられたとき、フランス代表から提出された ISO 9712 素案は、とくに工業分野での専門的な訓練・認定を厳格に定めたことを特徴としたものだった。たとえば宇宙航空、鑄造、溶接、造管、製鉄などでは、それぞれの分野で特有な知識と技量を必ず要求されるので、一般的な訓練・認定だけでなく、特定専門分野の訓練・認定を明確に区別して設け、コースごとに現場作業ですぐ役立つ要員を育成する主旨だった。この精神は現行 ISO 9712 にもそのままの形で反映されている。

しかし移行後の一元化運用では、この主旨が全く活かされず、すべての資格者をマルチセクター扱いとすることにされてしまった。マルチセクターとは複数の工業分野で NDT 作業に従事することを求められる要員、すなわち ISO 原案では検査会社の従業員のみ認められた特例であって、通常の事業所で定まった製品・構造物を扱うだけの要員には適用できないはずの工業分野である。我が国ですべてマルチセクター扱いとされた背景には、今までの NDIS 0601 の資格が工業分野別けされずに与えられてきたこと、したがって数万人の資格者を今さら工業分野ごとに認定し直すのはきわめて難しいこと、さらに専門分野での訓練認定について打診しても各工業分野からの反応が鈍いこと・などがあったようだ。

JIS Z 2305 の付属書 I には、認証機関が工業分野を創出する際、望ましい参考例として、鑄造・鍛造・溶接・細管及び配管・鍛造を除く加工製品（板、棒、条）・・をあげ、最後に検査会社を意識した“マルチセクター”を次のように規定している。すなわち「ある応用例（たとえば、航空宇宙、供用期間中検査など）又はあるタイプの材料（例えば鉄鋼材料、

非鉄材料など) についての、すべての又は幾つかの製品を含むセクターの組合せ」と定めている。

以上から見て JSNDI 現行の JIS 一元化運用でのマルチセクター (材料、溶接、構造物) はやむなくひねり出した苦肉の策と云わざるを得ず、とくに何の構造物かを特定されない、莫とした“構造物”は、世界に類例のない工業分野であり、各国がその実態を知れば到底工業分野として認め難いものである。いつの日か工業分野を ISO 9712 の精神にもとづいて設定し直し、JIS 一元化運用を本来の姿に取り戻さなくては、後述の拡大しつつある溝を埋めることは不可能になる。

3. 一般と専門

文字通り「一般」は常識的に求められる全般的通念としての知識・技量であり、ISO 9712 では該当 NDT 方法における原理のみをあげている。これに対して「専門」は夫々の工業分野でだけ必要な特定の知識・技量であり、同規格では対象製品に関する知識のほか関連規格、NDT 仕様書、合否判定基準の知識等が含まれるとしている。

これはたとえば製鉄業界では、溶接や鍛造品 (DGS 線図など) の知識・技量が不要な代わりに、探傷すべき鉄鋼製品各種の詳細特性や、自動化機器の取扱い、与えられ得る規格・仕様書の解釈、あるいは探傷結果の合否判定等々において、プロ中のプロでなくてはならぬことを意味する。また航空機業界では、航空機部品に特有なきずの特性を良く知り、それを検出する指定探傷機器/治具の操作に習熟し、手順/指示書を適切に読み取って合否判定できれば、それ以外の知識技量は一切問われない。同様に鍛造品について専門の知識・技量を要するのは、車軸・ロールなど一部の業界であり、裏当金付きの溶接部探傷は鉄骨構造を扱う業界に限定要求される知識・技量となる。

このように JSNDI による JIS 運用が、工業製品全般への探傷応用例を、浅く広く授けるとする現状の「専門」のとらえ方は、明らかに ISO 9712 からの逸脱であり、NDT 現場に直結して業務遂行に欠かせぬ要件を細大もらさず訓練し、その結果を試験で確認することこそ「専門」である・・との正しい認識への回帰は大きく強調に値する。

JSNDI はなるべく早く「一般」のみの訓練・試験に撤退し、各工業分野の工業会・各企業を主体に「専門」の訓練・試験を確立できる日をめざして、長期計画をたてガイドラインを示さなくてはならない。ISO 9712 は、その試験に合格した NDT 要員が、翌日から直ちに現場で活躍できることに狙いを定めた規格なのである。

4. 訓練

JIS Z 2305 の忠実な適用を図る上で、大きな困難を感じさせていることの一つが長い訓練期間である。たとえば RT, UT のレベル 2 を受験しようとする、レベル 1 をすでに持っていて各 80 時間、レベル 1 がなくて直接受験するなら各 120 時間の訓練を必要とする。これは従来 (NDIS 0601) の 2 倍 (直接受験なら 3 倍) 以上をかけることになり、受

験側・指導側とも全関係者を当惑させている。しかしもともとこの時間数の中には、工業分野別の専門訓練が含まれて適切に充足する構成になっており、それを逃げて今までどおりの内容を薄め、ひたすら時間数を延ばそうとすれば、負担を感じて当然である。残念ながら我が国は ISO ドラフトに対して所要視力などで意見を出したが、訓練時間の削減にコメントしたことはない。

欧米におけるクラスルーム・トレーニングでは、常に 10 名前後の受講生を 1 人のインストラクターが受け持ち、長期間にわたり講義と実技を間混じえながら、一貫した指導が行われる。受講生は一人一人違うくせや経歴を持っており、インストラクターは短時間でそれらをよく把握して個別指導を行う能力がある。ISO 方式がそうした前提で作られている以上、一面だけの追従は矛盾を作り出す。我が国の集団一斉指導・大規模試験方式は、高度成長期までの間、効率よく回転してそれなりの役割を果たしてきたとしても、JIS 移行を機会に抜本的な見直しを迫られたはずなのに、逆行に拍車をかける動きすら見られる。いま景気低迷やデジタル化が従来の単純な延長を許さなくなった各種の事情から見ても、訓練試験センターの多様化と量的拡大に転換する取り組みが強く求められている。

訓練のコースアウトライン(訓練要目)について、JIS Z 2305 では ASNT(アメリカ NDT 協会)、IAEA(国際原子力機関)、ICNDT(国際 NDT 会議)のモデルを手引きにして内容作成しても良いとされている。これらを参照しつつ我が国でも推奨カリキュラムが作成されたが、ここに同じ項目が並んでいれば、各国で同じ内容の訓練が行われていると思うのは短絡である。たとえばアメリカでは我が国と違って、水浸法 UT、プロッド法 MT、プローブ法 ETなどで、探傷現場での実務遂行能力を、どのレベルでも必要とされる。またレベルⅢベーシックでは、鉄鋼材料以外にアルミニウム、チタンやマグネシウムなどの取り扱いにも常識がなくてはならない。

アメリカの NDT は宇宙航空と原子力分野に軸足を置いているのに比べ、我が国は鉄鋼製品に重点がある実情から、産業基盤の異なる国の間では、訓練要目の表面だけでとても中味を統一できるものではない。さらに後述の BOK では、訓練用目とテキスト、試験問題との整合を求めているので、その面での見直しも必要となろう。

5. 試 験

JIS 一元化の試験における ISO 方式適用の基本的な問題点は訓練と同じく、全員マルチセクターとする一般試験と専門試験との不分離である。したがって一般試験と専門試験がカバーする範囲の境界が明らかでないため、問題によってはどちらから出題されても不思議ではなく、また JIS が専門試験の問題数は対象とする複数工業分野に等分すべきと規定する各分野への割り振られ方もあいまいである。

従来、試験問題の作成をめぐる取沙汰された数々の課題がこの移行で決して解消されていない。まず他国に比べて理論計算に焦点が当てられ過ぎた出題傾向から、現場で遭遇する問題解決や規格の解釈などに舵を向け直す必要がある。この点でレベル 3 出題の一部

には逆行の動きが見られる。また長い間、試験問題作成方法に基本的ルールを定めぬまま走ってきたため、出題のねらいや問題本体・選択肢の作り方などで、様々な不統一が目立ち、体系化の必要がしばしば叫ばれてきた。

必ずしもアメリカの後を追うこともなかろうが、G.ホーラーがまとめた ASNT の試験運営ガイドラインは多くの点で非常に参考になる。本書はマルチ・チョイス問題とは何か？から始まって、問題本体と選択肢の作り方へと進むが、敬服するのはそこから先である。試験の管理法、試験結果の評価方法では統計や数式を用いて全面解析を加え、1問ごとに有効性、信頼性を厳密な秤にかける。そして最終的に難易度と識別性をコントロールして、試験の適切さを常に維持しようとする。マルチ・チョイス方式は記述式と違って、まぐれ当たりや勘違いのはずれを潜在させているので、誰もが納得する透明性のある科学的試験管理を欠くことができず、今後の重大な指標となろう。

試験問題を全部公開しなくてはならぬと錯覚している人がいる。JIS Z 2305 にはそのような記載は一切なく、どこの国でも全面公開はしていない。SNT TC-1A のレベルⅢ試験では、公開されているサンプル・クエッションと同じ問題が出題されるのは稀であり、各部門とも毎回全問題中一定の部分（10～20％）は必ず新しい問題に入れかえられている。さらに JIS Z 2305, 2-0) 項で試験員（試験官）は自らが指導した人の受験を担当してはならない、と定めているのは少人数教室の訓練の後だと、どうしても情が移りがちになるからで、一般的な訓練担当者グループ、試験担当者グループ間の分離を指すのではなく、この点も誤った解釈が横行している。前述「訓練」の項で挙げたように、10名以下のクラス単位で受講を終えた候補者は、部門によってはほぼ1人1日の実技試験を課せられ、本当に明日から作業を任せられるかをいくつもの試験体で試される。JIS 一元化での実技試験で、探傷手順の観察に大きな配点が与えられているにもかかわらず、短時間・同時進行による流れ作業の試験で採点が困難になる問題点は、訓練での指摘と同様に、大量一斉試験方式が ISO 9712 にそぐわないからにはほかならない。

さらに以前から問題視されていた、テキストと筆記試験出題の不適合、すなわち試験問題は必ずテキストに関連記述があり、そこを参照すれば正しく解くことができるはずとする整合課題は、BOK（各レベルに必要とされる一連の知識）の討論によって前進を余儀なくされるであろう。但し BOK に忠実であろうとすれば、その規定内容に対応する問題を多数追加作成する必要がある、全対応が実現するまでにはかなりの時間を要するものと見られる。

6. 海外における訓練センターの実情

1997年現在アメリカには96、イギリスには21のNDT要員訓練施設があり、ほとんどが充実した器材と宿泊設備を持って、民間で運営されている。我が国でも訓練施設の多様化と量的拡大を目指すなら、どのような条件を満たすべきかのガイドラインを提供しなくてはならない。そのため以下にクラスルーム・トレーニングのいくつかの例をあげ参考に供

したい。

1) 英国溶接協会 (The Welding Institute)

同協会 NDT センターでは CSWIP, PCN, ASNT の各コースを常時実施している。

主要 5 部門のほか宇宙航空や水中 (海洋構造物) などのコースがあり、国内外のどこから受講者を受け入れられるよう、宿泊施設も完備している。4 カ国に海外提供施設を持つ。

2) フォース研究所 (デンマーク溶接協会)

付属の訓練センターで NORDTEST/EN473, EWF (欧州溶接連盟)、ASNT の各コースを実施している。北欧では各国ともこの施設を利用して NDT 要員を育てている。

3) アメリカ

国内約 70 の協会 / 民間施設が ASNT 方式による各部門各レベルいずれかの訓練を毎月のように行っており、このうち 5 施設が公認試験センターにも指定されている。また約 110 校に及ぶ大学・専門学校が何らかの形で NDT の講座を設けており、応用物理の博士課程に NDT を組みこもうとしている例もある。

7. まとめ

現状の JIS 技量認定運用には、ISO 9712 の精神を無視して形だけを追った部分が包含されており、それらが多くの歪みを生み出している。このまま放置して成り行きにまかせるなら、思わぬ挫折へ進む可能性がある。しかし方向を転じて基本的解決に歩み出すならば、そこには従来と全く異なる視点と新しい希望を持つことができる。

主な課題は真の工業分野の確立、訓練 / 試験における一般・専門の完全分離と夫々の充実、集団一斉訓練・大規模試験方式の改廃、JSNDI の「専門」訓練 / 試験からの撤退、各工業分野での「専門」訓練 / 試験へのガイドラインの確立・そしてこれらの実現を目指す中・長期計画の策定である。少なくともこれ以上矛盾を深めないように努めながら、着実にステップを積重ねて行く以外に近道はない。

アメリカが懸命に EN 473 との相互乗り入れをはかり、それらを ISO 9712 に反映した修正に持ち込みたいと策動しているが、各国の利害を伴った修正の動機づけはこれからも繰返されるに違いない。外圧にふりまわされるのが嫌ならば、我が国の進め方を世界基準とするよう働きかける他ないが、それもままならぬ現実では、少なくとも足をさらわれ難い制度に建て直さなくては、これからも海外から何回となく押し寄せるゆさぶりに耐えられない。

先行きを憂える多くの方がこの議論に参加され、絆創膏ではない本質的解決に向けて力をあわせて下さることを期待してやまない。

参考文献

- 1) JIS Z 2305 : 2001 非破壊試験 - 技術者の資格および認証

- 2) G. C. Wheeler : A Guide for Developing NDT Certification Examinations, ASNT,
(1992)
- 3) 柳 千秋 : 非破壊試験のグローバル化、「非破壊検査」 vol.51、No.12