

昭和61年度

千葉県非破壊検査研究会 研究発表会

日時 昭和62年4月25日(土)

12:00～17:00

会場 千葉県機械金属試験場

目 次

マイクロフォーカスX線装置 (MRS-160)による新素材の識別度	1
応力塗料法に関する利用度の調査	8
高温探傷における遅延材の影響	15
炭素鋼材熱交換器チューブの新しい渦流探傷法の開発	18
本州四国連絡橋における超音波自動探傷の適用	26
磁粉濃度監視装置について	32
NDIS-2413 音響異方性を有する鋼溶接部の超音波探傷について	37
諸外国の超音波探傷機器規格の動向と我が国の規格	42
超音波CTを中心とした産業における超音波応用の現状	53

微小焦点 X 線装置によるセラミックスの透過試験例
Radiographic Testing of Ceramics with Microfocus X-Ray System

理学電機(株) 花田 広, 田淵 良雄
久保寺 三義

概 要

微小焦点 X 線装置 (焦点寸法 $5 \sim 50 \mu\text{m}$) 理学 MRS-160 を用い数種のセラミックス試験片を拡大撮影。透視試験の結果、従来形 X 線装置 (焦点寸法 $0.4 \sim 0.5 \text{mm}$) 理学 RF-160 による通常撮影。透視試験では識別できなかった材厚の変化、空孔 (Pore)、割れ (Crack) 針金等が明瞭に識別できた。ここで、微小焦点 X 線装置「理学 MRS-160」によるセラミックス試験片の拡大透過試験法と従来形 X 線装置「理学 RF-160」による通常の透過試験法の識別相異実験例を報告する。

1. はじめに

X 線透過試験で微細な欠陥 ($50 \sim 70 \mu\text{m}$) とか細い針金 ($30 \mu\text{m}$ 程度) などを、焦点寸法 0.4mm 以上の従来形 X 線装置により識別する手段として (1)超微粒子フィルムを用い通常撮影 (拡大率 = 1) により得られたフィルムを写真引伸機で引き伸ばす写真的な拡大方法があり、非常に手間がかかり、粒状性の問題がある。(2)X 線ビジュンテレビにより X 線受光視野 $9.7 \times 12.5 \text{mm}$ をモニタ画面 $17.5 \times 23.0 \text{mm}$ (12 インチモニタ) あるいは、それ以上に X 線像を拡大透視方法があるが、X 線に対する感度 (鉄厚 2mm を透視するにはビジュン面上で約 10R/分 必要) とコントラスト (画像処理によりコントラスト強調をおこなっても) の点で問題がある。以上いずれにせよ基本的に焦点の大きさからくる像の拡大ボケとの関連から識別にはおのずから限界がある。次の手段として、数 μm の X 線焦点で試験体を X 線フィルム 又は X 線イメージインテンシファイヤ (透視法) から離し、画像コントラストを低下させることなく欠陥像を識別限界値以上に拡大して、前述(1)(2)の方法より鮮明で更に小さな欠陥 ($50 \mu\text{m}$ 以下の空孔、割れ)、針金 ($25 \mu\text{m}$ 以下) を識別することが期待できる。

幾何学的拡大と識別度について X 線焦点は、ある大きさをもっているが欠陥の大きさに比較して十分小さい場合は、透過写真コントラストに与える影響は無視でき、欠陥の大きさが焦点より小さくなると焦点寸法による幾何学的条件の影響が現われ補正係数 δ が小さくなりコントラストが低下する。同じ大きさの針金においても、透過写真上の針金像の幅 W が大きくなるにつれて、識別しやすくなる (識別限界コントラスト ΔD_{min} が小さくなる) が或る値以上になると変らなく、この範囲内に針金像の幅 W を拡大する手段が必要で、そのためには焦点寸法を小さくする必要がある。当社は、微小焦点 X 線装置 (50kV , 焦点寸法 $10 \mu\text{m}$) の技術延長として工業用可搬形微小焦点 X 線装置 MRD-150 (150kV , 焦点寸法 $200 \mu\text{m}$) 製品化 (1982 年 5 月)、続いてセラミックス並びに薄板金属溶接部等の微小欠陥検出を対象とした MRS-160 を 1984 年 9 月に製品化し、数多くの微小欠陥を有する試験片の拡大透過試験の結果識別度が勝れていることが判った。他方、微小焦点による拡大撮影方法の有効について、仙田・平山氏らによる研究においても明らかにされた (1985 年 9 月)¹⁾。以下数種のセラミック試験片を従来形 X 線装置と微小焦点 X 線装置による識別相異実験例を報告する。

2. 微小焦点X線透視システム「MRS-160」について

本装置は、X線焦点の大きさ最小5 μm 、最大X線管電圧160kVの微小焦点、高エネルギーの線源をもち、最大幾何学的拡大率は反射形ターゲット使用で38倍、透過形ターゲットで250倍で撮影又は透視試験ができるよう、X線照射ボックス内にX線管とX線イメージンテンシファイヤ管（以下X線I Iと呼ぶ）が設けられている。X線管放射IIとX線I Iとの間に試験体が連続的に移動できるサンプルポジションが設けられ、試験に際して透視システムによりテレビモニターで映像を観測しながら3軸方向に移動し欠陥箇所を捜すことができる。画像コントラストは、画像処理装置により低コントラストで雑音の多い直接X線透視像を高コントラスト、低雑音に改善し微細な箇所を写しださせる。更にX線フィルムをX線I I面上に置き直接撮影を行い高コントラスト、高鮮鋭の写真を得ることができる。

X線管は、図1に示すようにカソード部（フィラメント、電子銃からなる）電子集束部（ターゲット面に微小焦点を結ばせるための）とターゲット部（X線発生源）とからなっている。X線管は、開放形X線管の方式を採用しており、ターボ分子ポンプでX線管内を常に高真空(1×10^{-4} Pa以下)の状態に保たれる（携帯式X線装置のX線管は密閉式で真空排気系はない）。この方式は、ターゲット部の交換により反射形（管軸に対して直角方向にX線を放射）と透過形（管軸方向と同一方向にX線を放射）のいずれかを任意に選び交換できると、フィラメントの交換が可能である。

写真1は、電子集束部とターゲット部の外観で、左側に円盤状の集束レンズ（コイル）、中央部に反射形ターゲットが配置されている。集束レンズは管軸方向に移動しターゲット上に5~50 μm の焦点を結ばせる。またターゲットの冷却は水冷方式を採用している。

写真2は、微小焦点X線透視システム「MRS-160」の外観構成で、X線撮影試験のみでなくX線テレビ透視法によりリアルタイムで透視試験が行なえる。

- ① X線管内排気真空系統部
- ② X線管カソード部
- ③ X線照射ボックス（反射形、透過形X線放射両用）
- ④ X線I I+テレビカメラ部（反射形X線放射に適用）
- ⑤ X線I I+テレビカメラ部（透過形X線放射に適用）
- ⑥ 操作、観測キャビネット部

その他、写真には現れていないが高電圧発生器、X線管ターゲットの冷却とターボ分子ポンプの冷却用送水装置が用意されている。写真2の構成は、基本的なものであって、X線発生装置MRS-160以外の構成は、試験内容、目的に応じてそのつど用意される。

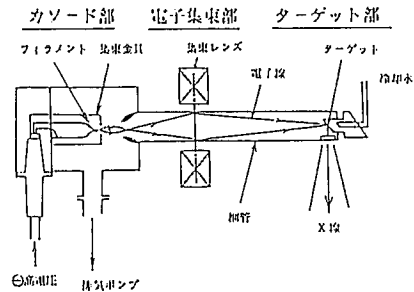


図1 微小焦点X線管（反射形ターゲット）

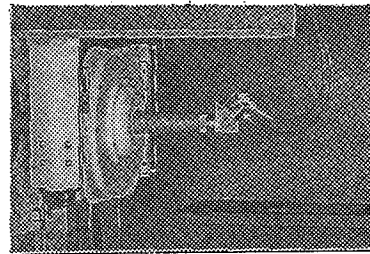


写真1 微小焦点X線管のX線発生部

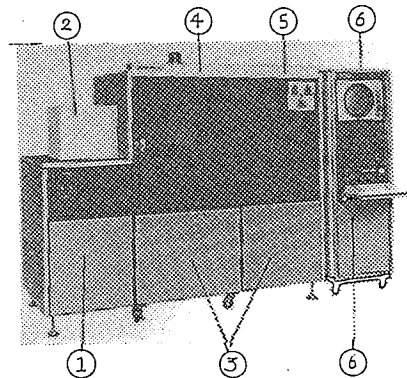


写真2 理学/微小焦点X線透視システム外観

3. X線透過試験例

本稿は特にセラミックス材のX線透過試験例を、X線フィルム撮影法とX線テレビ透視法に大別し、従来形X線装置(焦点寸法0.5mm)RF-160による通常撮影(拡大率・1)透視(拡大率・2)と微小焦点X線装置MRS-160の焦点寸法10 μ mで拡大撮影、透視(いずれも拡大率5~20)による識別の違いを求めた。

X線テレビ透視法は、両者ともX線I Iテレビシステムで、X線I IのX線受光視野は4吋(ϕ 100mm)とし ϕ 230mmのモニターに像拡大2.3倍で視測する。更にテレビ映像信号をデジタル変換し、加算処理、コントラスト強調した映像を観測し、加算値、コントラスト等は試験片によってそのつど最適画像が得られるようにした。

3.1 微小焦点による識別度の改善確認実験

3.1.1 X線テレビ透視法でマイクロテストチャート(Micro test chart)を用い、焦点寸法の違いによる解像力R(Resolution)の測定値を表1に、透視例を写真3に示す。評価として、微小焦点集合の分離計測には微小焦点による拡大試験が勝れていることが判る。

表1 マイクロテストチャートによる解像力の実験

X線装置(焦点寸法)			
RF-160(0.5mm)		MRS-160(10 μ m)	
拡大率	Lp/mm	拡大率	Lp/mm
2	3.1 Lp/mm	2	5.55 Lp/mm
5	3.1 3.4 Lp/mm	5	11.6 Lp/mm
10	3.1 Lp/mm	10	20.0 Lp/mm
20	2.8 3.1 Lp/mm	20	20.0 Lp/mm

注1) X線IIの受光視野、4吋(ϕ 100mm)
 注2) 拡大率1における解像力 RF-160: 2.0Lp/mm
 MRS-160: 2.5Lp/mm
 注3) RF-160の場合、不鮮明な解像(ボケ)

3.1.2 針金の識別を窒化珪素(Si₃N₄)

の厚さ14mmの中央部にタングステン線直径10, 15, 20, 30...80 μ mを約5mm間隔に配置し焼結したX線吸収の比が大きい試験体を用いた。焦点寸法による識別能を比較結果値を表2に示す。

撮影、透視法のいずれにおいても焦点10mm

拡大率5倍で10 μ mの針金が識別できるが、焦点0.5mmでの通常撮影、透視(拡大率2倍)で20 μ mの針金識別が限界である。透視像例を写真4に示す。

3.2 各種セラミックス試験片のX線透過試験

表2に示すように、代表的なセラミックス、アルミナ(Al₂O₃)、シリコンナイトライド(窒化珪素Si₃N₄)、ジルコニア各種内容の異った試験片並びに表2の例以外の試験片について比

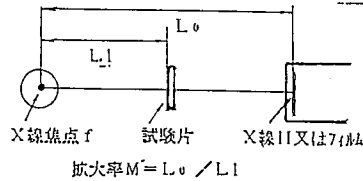


図2 X線透過試験の幾何学的配置(拡大率)

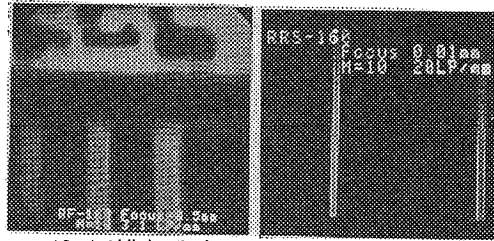


写真3 解像力の比較例 透視法 (拡大率=10)

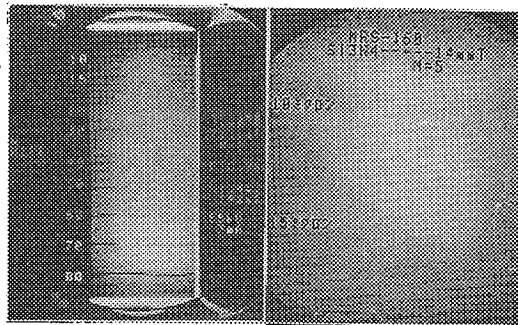


写真4 針金の識別例 透視法 (窒化珪素14mm内のタングステン線)

較実験を行った。

3.2.1 材厚変化の識別²⁾

窒化珪素厚さ5mmに表2に示すV溝を直線状に削り、溝深さは板厚に対し3, 1.6, 1.2, 0.6%である。焦点0.5mmでの通常試験では識別度1.6%程度であるが、10μmの微小焦点での拡大試験で0.6% (撮影法), 1.2% (透視法)と識別度が向上されている。尚、窒化珪素厚さ5mmのアルミニウムのX線等価厚(撮影法, 管電圧80kV)は約11mmであった。

3.2.2 空孔(Pore)の識別²⁾

アルミナ(Al₂O₃)厚さ4mmに表2に示す丸棒状直径60, 130, 200μm,長さ約10mmの空孔を設けた3個の試験片についての識別度を表2に示す。写真5は透視例を示す。写真6は、窒化珪素並びにジルコニア厚さ3μm, 空孔穴陥試験片の微小焦点10μmによる拡大透視試験例でいずれも30μm以上の空孔を識別している。

3.2.3 割れの識別³⁾

部分安定化ジルコニア(PSZ)試験片を三点曲げ試験にかけ、破断した試験片3個の透過試験の結果、拡大投影機(×50)で観察し明らかに割れ(幅5~10μm, 長さ50~500μm, 深さ200~500μm)がある試験片について、微小焦点10μmによる拡大透視。撮影法(拡大率10以上)で識別できた。

尚、部分安定化ジルコニア厚さ3mmの鉄のX線等価厚(撮影法, 管電圧90kV)は約5.5mmであった。拡大透視, 撮影例を写真7に示す。

表2 焦点寸法の違いによる識別度実験例(焦点0.5mmと10μm)

試験項目	試 験 法	小焦点(0.5mm)X線装置(RF-160)による通常撮影, 透視法		微小焦点(10μm)X線装置(MRS-160)による拡大撮影, 透視法		
		判 別	増 倍	判 別	増 倍	
刃金直径, 空孔, 割れの幅(μm)	撮影法	10	×	拡大率: 1 60kV 3mA	◎	拡大率: 5 110kV 0.1mA
		15	△		◎	
		20	○		◎	
		30	◎		◎	
		40	◎		◎	
	透視法	10	×	拡大率: 2 55kV 3mA	◎	拡大率: 5 100kV 0.1mA
		15	×		◎	
		20	△		◎	
		30	○		◎	
		40	○		◎	
材厚変化の識別	撮影法	30	×	拡大率: 1 50kV 3mA	◎	拡大率: 15 80kV 0.1mA
		60	△		◎	
		80	○		◎	
		150	◎		◎	
		300	◎		◎	
	透視法	30	×	拡大率: 2 40kV 3mA	×	拡大率: 15 70kV 0.1mA
		60	×		◎	
		80	○		◎	
		150	○		◎	
		300	○		◎	
空孔の識別	撮影法	60	△	拡大率: 1 50kV 3mA	◎	拡大率: 5 70kV 0.1mA
		130	○		◎	
		200	◎		◎	
	透視法	60	×	拡大率: 2 35kV 3mA	◎	拡大率: 5 50kV 0.1mA
		130	○		◎	
		200	○		◎	
割れの識別	撮影法	A	×	拡大率: 1 90kV 3mA	◎	拡大率: 15 138kV 0.1mA
		B	×		◎	
	透視法	A	×	拡大率: 2 80kV 3mA	◎	拡大率: 15 110kV 0.1mA
		B	×		◎	

- ※ ×: 識別出来ない! △: 不明瞭の識別(識別しない!!)
- : 識別出来る ◎: 明瞭に識別出来る
- ※ 部分安定化ジルコニア(PSZ)の割れ検出A, Bとも 幅5.0~15μm 長さ50~500μm 深さ200~500μm
- ※ 撮影法に用いたフィルムはφS O. 増感紙; 鉛箔増感紙 0.03mm 但し管電圧90kV以上
- ※ 透視法: テレビモニター16" (φ230mm) TV系拡大2.3倍 X線イメージインテンシファイヤ管視野4" (φ100mm)

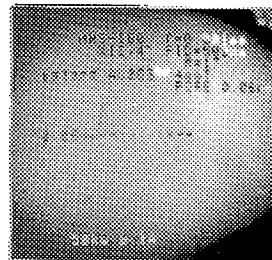
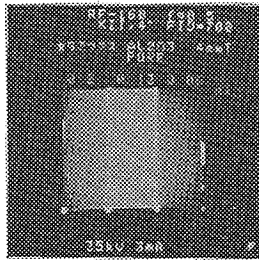
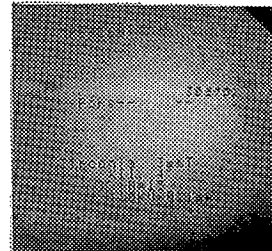
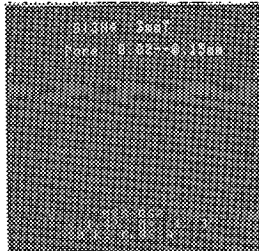
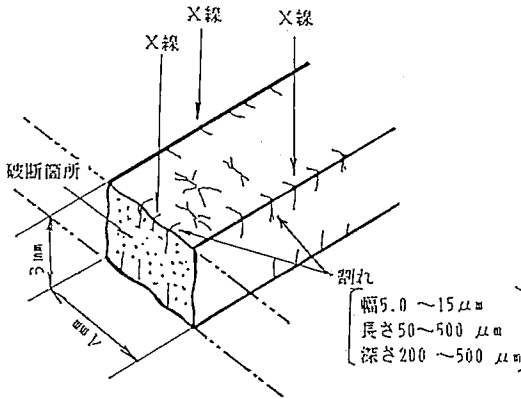


写真5 アルミナ4mm厚さ内の空孔(丸棒状)の識別例(透視法)



窒化珪素(Si₃N₄)試験片, 3mm厚さ ジルコニア試験片, 3mm厚さ
写真6 空孔(Pore)の識別例 透視法(MRS-160)

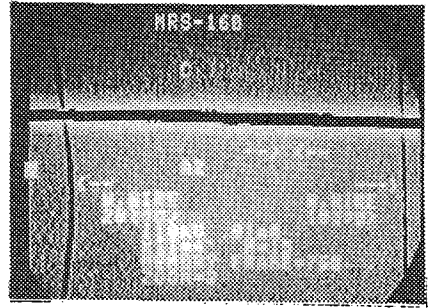
図3は、X線透過試験箇所と割れ個所を示す。尚、表面の微細な割れは識別できなかった。



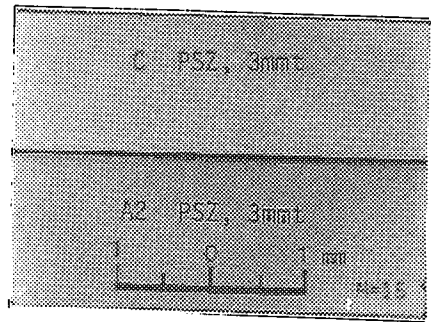
上43 部分安定化ジルコニアの試験箇所と割れの状態

4. おわりに

従来形X線装置による通常試験法に比して微小焦点X線装置での拡大試験法が解像力、識別度が勝れていることが、限られた数種の試験片で実証できた。実際の欠陥についてどこまで識別できるか今後の課題である。筆者らは一連の実験において、金属関係の放射透過試験に際して同一材質の透過度計（線又は孔）、階調計他識別ゲージを用いて識別度を定量化に評価している例にならって、是非とも規格化を計る必要があると考える。例えば電子部品ICの透過試験規準としてASTM: E801-81に Penetrater 図4なるものを使用するよう規準が設けられているように。



透視法 拡大率=15 Z00m Up = 2



撮影法 拡大率=15

写真7 部分安定化ジルコニア試験片の割れ識別 (MRS-160 による) 表2参照

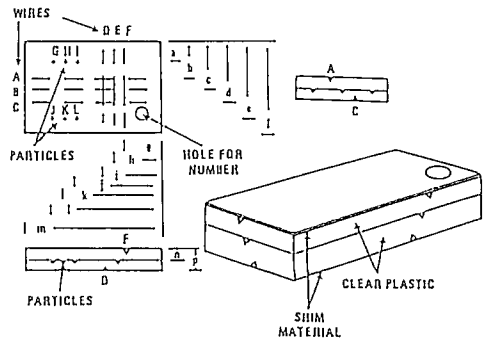


図4 IC部品のX線検査用透過度計 (ASTM E801-81)

資料、備考

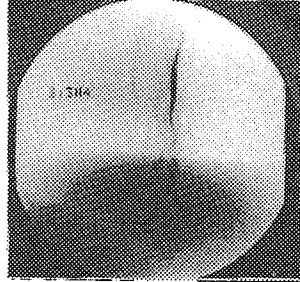
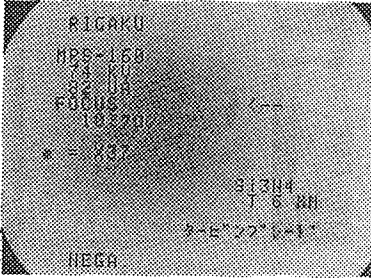
- 1) 大阪大学. 仙山, 平山, 飯島, 非破壊検査部. 正岡, 小野「微小焦点X線装置による拡大撮影法に関する研究」日本非破壊検査協会. 1985年秋季大会
- 2) 中立的機関より RT. UT 回送実験試験片
- 3) 中立的機関, 船舶技術研究所. 宮城氏よりの提供試験片
- 4) ASTM. Designation: E801-81. Standard Practice for CONTROLLING QUALITY OF RADIOGRAPHIC TESTING OF ELECTRONIC DEVICES

微小焦点X線装置による各種材料試体の透過型X線顕微鏡観察例

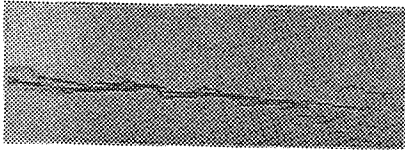
使用X線装置

理学/ 微小焦点X線透視システム MRS-160

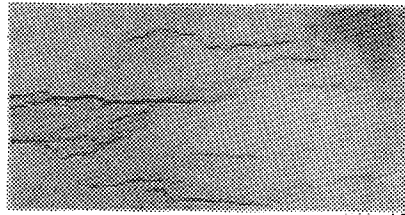
—— 焦点寸法 $\phi 10 \mu\text{m}$ にて透視および透過写真の撮影を行った。



セラミックス製タービンブレード内部の空孔 (Pore) および割れ (Crack)



拡大率 $m=10$ 0 2mm

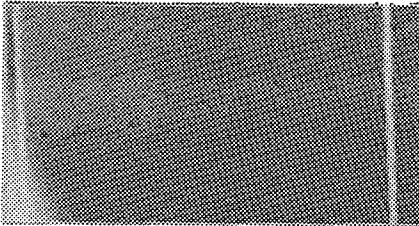


拡大率 $m=15$ 0 1 2mm

鋼曲げ疲労試験片の割れ

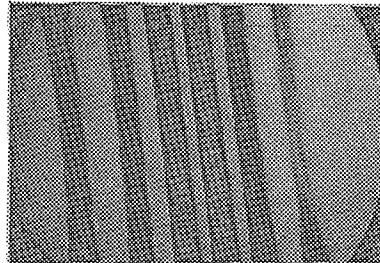
S01 $\phi 0.05\text{mm}$

$\phi 0.065\text{mm}$

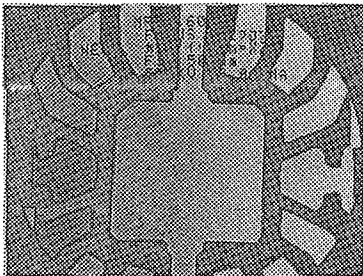


(溶接ビード幅 0.5mm 、拡大率 $m=20$)

薄板の電子ビーム溶接部



金属細線中の欠陥 (線径 $\phi 0.3\text{mm}$)



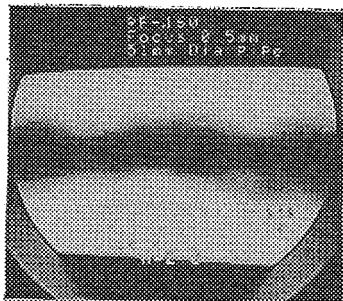
IC (ボンディングワイヤ径 約 $\phi 20 \mu\text{m}$)



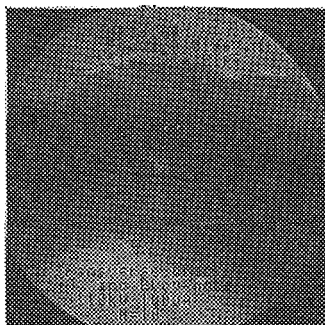
拡大率 $m=38$

微小焦点X線装置による各種管式管体の透過試験例

- ・使用X線装置 理学/ 微小焦点X線透視システム MRS-160
—— 焦点寸法 $\phi 10 \mu\text{m}$ にて透視および透過写真の撮影を行った。



X線装置 RF-160
(焦点寸法 $0.5 \times 0.5 \text{mm}$)



X線装置 MRS-160
(焦点寸法 $\phi 10 \mu\text{m}$)

ポイラーチューブの突き合わせ溶接部横割れ識別比較

応力塗料膜法のアンケート調査について

機械金属試験場 ○亀田進也 林 彰

1. アンケート調査の目的

応力塗料膜法（ひずみ塗料・ぜい性塗料）は、機械構造物の応力分布状態を非破壊試験の形で直接把握できる手法として、かなりの歴史を持っておりますが、まだその使用技術および実構造物での具体的な適用例について、報告の少ないのが現状です。

そこで、日本非破壊検査協会第4分科会410小委員会では、応力塗料膜法の活用と現状を把握し、この手法の普及進展の遅い原因を追求し、さらにその原因の改善を行いながら、関連技術者への普及を計る目的で、このアンケート調査を行いました。

2. 調査対象者

今回の調査対象者は、この手法に関連の深い応力・ひずみ・検査部門の方々3グループ、合計358件に発送した。その結果、回答者数149件で、回答率約42%が得られた。その詳細について下記に述べる。

2.1 日本非破壊検査協会第4分科会

この分科会は、この調査目的の応力塗料膜法をはじめ、応力測定部門（ひずみゲージ、モアレ、光弾性、X線、特殊ゲージ）により小委員会の形で組織されており、非常に関係の深い分野の方々である。そのためこの分科会195名全員に対し調査票を発送した。発送さきを分類、大別してみると右図のようになり、過半数以上の64%の方々に関東地区に集中している。

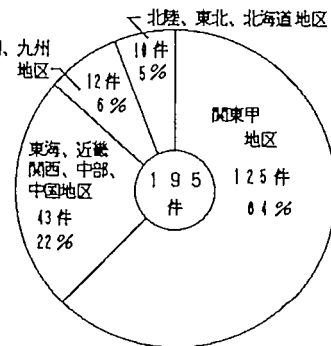


図. 1 第4分科会発送状況

2.2 塗料メーカーのユーザーリスト

このユーザー先は実際の使用者のほかに応力塗料の代理店や取り扱い店などが含まれ、一部利用者でない方の意見もあると想像される。

しかし今回はユーザー先全員106名の対象者に調査票を発送した。

発送先の分類は、右図の通りである。

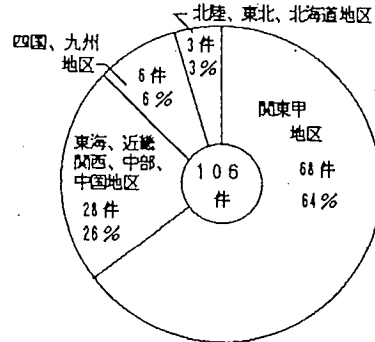


図. 2 ユーザー発送先状況

2.3 千葉県非破壊検査研究会

この研究会は、今回の調査に対し知識、技術度の高い方々であると思われ、この会員73名のうち大学、官公庁を除く57名を選定し、超音波、X線、磁気探傷などの非破壊検査法に直接あるいは間接的に、関連している方々についてアンケートを発送した結果、回答者13件、回答率22%が得られた。

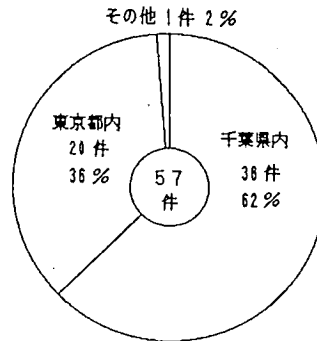


図. 3 研究会発送先状況

3. 集計結果

3.1 アンケート集計結果

この調査内容については、日本非破壊検査協会第4分科会410小委員会において約1年間検討し、61年8月～10月に調査票の発送および回収を行ったものである。その結果は調査対象者の頁で述べたように、合計358件に発送し、回答者数149件、回答率42%が得られた。集計内容は別添のアンケート集計結果による。

3.2 アンケート調査に対する問題点

3.2.1 設問方法について

1) 回答方法

回答方法について冒頭で記入例により説明しているが、正確に理解されないところがあった。例えば回答欄に□と記入されるなど、判断に苦慮する点があった。

2) 設問のフロー

最初から設問の流れに沿って回答すれば、最終まで進むように設問を設定したが、ひとたびフローからはずれると、流れに復帰することが困難なようである。そのため設問4～15の間は回答者が少ない。

3) 回答内容

設問の流れが常に一定方向に進むように設定した。そのため回答数が前後の設問に関係するはずであるが、数字的に一致しないところが一部あった。

3.2.2 調査票について

この調査票は応力塗料膜法を使用する際、その目的、利用法、結果の活用法まで、詳細なデータを収集することに主眼を置いたため、かえってきめ細かすぎて、回答者側からみれば理解しにくい点が多く、無回答のところも多かった。

3.3 調査結果からの問題点の抽出

3.3.1 代表的な問題点

集計の結果をまとめ、特に重要であると推定できる項目について8点を選定した。

1) 塗装方法

2) 乾燥方法

- 3) ひずみ感度
- 4) 負荷方法
- 5) 結果の記録
- 6) 評価・解析法
- 7) 他応力測定法との併用
- 8) 適用材料・形状・寸法

3.3.2 全般的な問題点

この応力塗料膜を利用して測定を行うとする人達は、当然のことながら簡単に取り扱いができ、結果がスピーディーに、さらに目標とした良い結果が得られることを望んでいる。

しかし全ての面に優れている応力測定法はなかなか確立されていないため、応力塗料法の一測定法のみでは困難な面が発生する。

そのため他の測定法の長所どうしを併用するということから、二測定法以上の併用が推奨され、その理由はこのような点にある。

4. 今後の対策および普及活動

この応力塗料膜法を多くの分野で活用していただくため、普及を目的とした事業を次の通り計画しております。ただし現時点で、最終計画案が具体化されていないので、概要のみを記載する。

4.1 結果の報告

- | | | |
|-------|------------------|-----------|
| 4.1.1 | 千葉県非破壊検査研究会 | S.62.4.25 |
| 4.1.2 | 日本非破壊検査協会410小委員会 | S.62.5.12 |
| 4.1.3 | ” 第4分科会 | S.62.5.13 |
| 4.1.4 | ” 会誌への記載 | S.62.8 頃 |
| 4.1.5 | 回答者への結果報告 | 検討中 |

4.2 普及活動

4.2.1 フォーラムおよび講習会の開催

日時：会誌および回答者への案内後

S.62.10 or 11 頃

場所：特殊塗料（株）本社

検討中

4.2.2 その他

5. あとがき

応力測定法の代表的なものとしては、ひずみゲージ法、光弾性法、モアレ法、銅メッキ法などが一般に良く知られている。しかしこれらの手法は、特殊な試験設備、装置、計測機器を必要とし、研究室・実験室的な要素も強く、現場での測定には困難な点も多い。

しかし、この応力塗料膜法は、塗料の装置、乾燥の場所、き裂をさせる負荷装置、記録装置などの設備を必要としていない。例えば負荷装置などは実働負荷でも充分可能であり、さらに熟練度を要する技術者を必要としないことなど優位な点が多々有している。

一方、今回のアンケート調査結果によると、実際に利用されている方々や経験者から多数の要望が寄せられ、その応用される分野も広く、多様化の傾向がうかがえる。その内容を要約すると、やはり取り扱いが簡単で熟練度を要さない、塗料膜の管理が簡単で价格的に安価などの点である。

この調査の結果、中小企業の現場技術者や設計者の分野に普及しにくい原因を把握することができたので、塗料の改善を進めながらより一層の普及活動を進めるため努力したいと考えています。

なお、本アンケートの調査にご回答下さいました方々に対し、深く感謝します。

アンケート調査対象者(358件)

昭和62年1月21日

回答結果(全回答者数149件)42%

設問 1. 応力塗料法をご存知ですか。

(1) はい 107件 72%
(2) いいえ 42件 28%
回答者は設問2へ
下記へ

応力塗料法を知らない方への質問

1-1 応力塗料法を知りたいと思いますか。

(1) はい 19件 45%
(2) いいえ 6件 14%
(3) 回答なし 17件 41%

1-2 資料を見て検討したいと思いますか。

(1) はい 19件 45%
(2) いいえ 6件 14%
(3) 回答なし 17件 41%

設問 2. 現在までに応力塗料法を適用したことがありますか。

(1) ある 68件 47%
(2) ない 77件 53%
回答者は設問3へ
下記へ

応力塗料法を適用したことがない方への質問

2-1 応力塗料法を検討して、使用したいと思いますが。

(1) はい 44件 57%
(2) いいえ 31件 40%
(3) 回答なし 2件 3%

2-2 今までに使用しなかった理由。

(1) 実際に使用するための資料不足 26件 34%
(2) 塗料法による測定を必要としない 27件 35%
(3) その他(塗装膜の特性、適応上から) 13件 17%
(4) 回答なし 11件 14%

2-3 応力塗料法を適用するうえでの困難なこと。

◎ 塗装膜の特性に問題 11件 46%
◎ 使用、適応上に問題 13件 54%

2-4 他の応力測定法と比較してのご意見。

◎ 優れていると考えた人 11件 46%
◎ 劣っていると考えた人 11件 46%
◎ 両方であると考えた人 2件 8%

設問 3. 応力塗料法を適用し、所期の結果が得られましたか。

(1) はい 39件 57%
(2) いいえ 29件 43%
回答者は設問4へ
下記へ

結果がよくなかったと答えた方への質問

3-1 よくなかった結果について。

(1) 焼割れが発生した 10件 34%
(2) き裂模様が得られなかった 10件 34%
(3) その他 9件 32%
ハクリしてしまった 2件
黒皮部の亀裂の判定 1件
定量的な値が得られない 2件
塗装技術の未熟 4件

3-2 考えられる原因について。

(1) 塗装の方法に問題がある 4件 14%
(2) 乾燥の方法 14件 48%
(3) 塗料の選択 4件 14%
(4) ひずみ感度 7件 24%
(5) その他 0件 0%

設問1.6. 設問1.7.A

設問 4. き裂模様の結果について。

(1) 所期の結果が充分得られた 17件 44%
(2) ほぼ得られた 22件 56%

高温探傷における遅延材の影響

新日本非破壊検査(株) 関東営業所 土野 宏 岩間将人 桐ヶ谷聡
君津出張所 水田 順 内藤俊美

概要

超音波探傷試験は肉厚減肉調査、溶接部の亀裂調査などの設備の保守検査に多用されている。最近では設備稼働中の余暇時間に検査する要望も多い。このような場合に探傷面が高温では厚さを大きめに表示したり、探傷不可能になる。

垂直探傷の耐熱用先端遅延材や分割探触子のクサビは高温にさらされると短時間に急速に音速が変化し、誤差のを生じることをアクリル他で実験し、注意項目をまとめた。

1. 遅延材の音速変化

図1は対比試験片を水中で厚さ測定した結果を示した。水温上昇とともに厚さ測定値は大きくなるが、遅延材のSエコーも移動している。厚さ測定値のずれが遅延材に原因のあることがわかる。

図2は一般に多用されているアクリル材の温度と伸びをまとめた。アクリルは温度が100度上昇すると実長が0.8%増加し、探傷器のブラウン管のビーム路程は1.7%増加した。

アクリル音速は100度付近で低下する。鋼縦波音速よりアクリル中の音速は遅いためアクリル厚さをAc、調整した室温と探傷面の温度差をΔtとして見掛けの厚さ測定誤差ΔLは1式で表現される。

$$\Delta L = Ac \times 0.0017 \div 1.0008 \times \Delta t \times 5.95 \div 2.73$$

$$= 0.0037 \times Ac \times \Delta t \quad \text{--- 1式}$$

図1の実験条件では Ac=10 Δt=70度

$$\Delta L = 0.0037 \times 10 \times 70 = 2.59\text{mm} \quad \text{実験結果に近い。}$$

2. 遅延材の耐熱限度

図3は探傷面の温度を一定にして、接触時間60秒まで放置したときの遅延材表面温度の上昇をまとめました。

図1

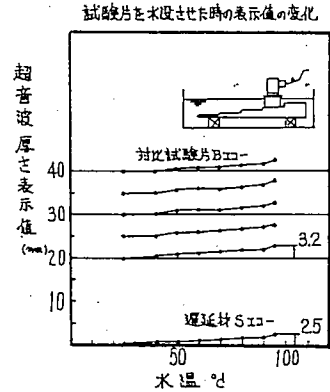


図2

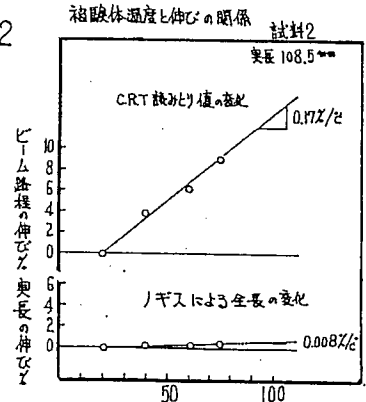
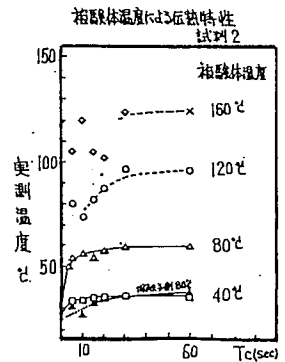


図3



探傷面温度が160度では60秒でアクリルは軟化して測定不可能でした。又80度以下では最初の10秒で温度が急速に変化し、その後熱平衡になりました。探傷面が80度するとき探触子側は約36度でした。

図4は耐熱性の高い樹脂で実験した結果で160度で軟化しないが探触子側に熱が伝達して探触子が破壊しました。

耐熱性能は遅延材の大きさと融点が主条件だが探傷面の温度と接触時間も条件に入れる必要がある。

図5は遅延材の厚さを変えた時の温度上昇の変化をまとめました。温度が40度では約5秒で熱平衡になり厚さの差は少ないが120度では厚さの差はおおきい。熱の伝達を遅くするためには遅延材の厚さは厚い方が良いが超音波の減衰が大きくなる。

3. 遅延材の減衰定数測定

図6はアクリル(試料2)と耐熱性の樹脂(試料3)のブロックを透過法でエコー高さ一定にする探傷器のゲインをまとめた。減衰は鋼より大きく、アクリルの5MHzの場合10mmでは6.7dB(室温25度)低下する。耐熱性の高い樹脂では13.6dBになり、厚さが増すと探傷器の感度余裕が小さくなるため、厚さの吟味が必要。

4. 接触媒質

図7は各種金属材料の底面エコー高さをまとめた。市販の高温用耐熱シューと接触媒質は濃度100%のグリセリンを使用した。探傷温度が160度以上では底面エコー高さは大きく低下した。これはグリセリンが気化した為で沸点が290度でも実際にはそれ以下でも気化しはじめることを表わしている。

図4

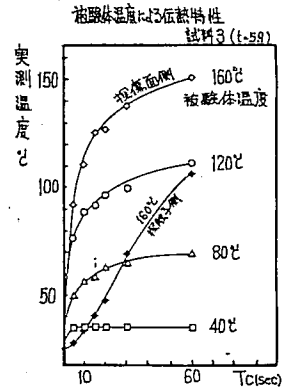


図5

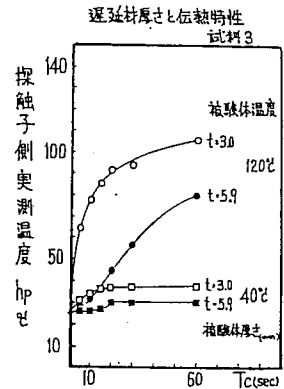


図6a

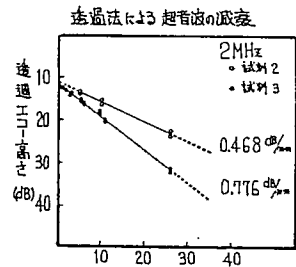
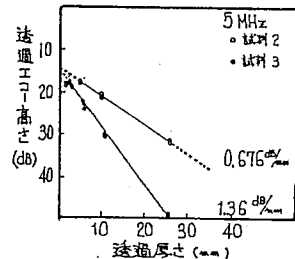


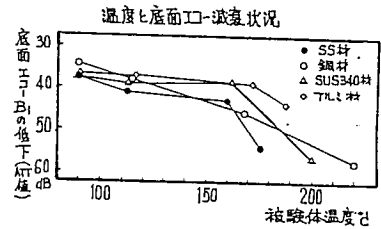
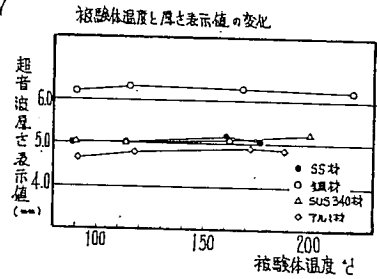
図6b



5. まとめ

1. アクリル材は探傷温度が120度では連続10秒以上の使用は避ける。
2. アクリルは100度の温度上昇で16.9%音速が低下し厚さは見掛け、大くなる。3. アクリル材は10mmで超音波を約7dB減衰させる。
4. 接触して最初の10秒間は遅延材の温度上昇とともに測定値が連続して変化する。
5. 接触媒質の気化により超音波が入射出来なくなる。グリセリンは160度以下で使用する。
6. アクリル材を遅延材として使用するときは温度が100度になるまでの時間を目安にする。
厚さ9.9mmの探傷温度120度で5秒以下、80度で60秒以下が目安。
7. 高温の被験体の厚さ測定を安定して、実施するためには厚い遅延材で短時間に測定するか薄い遅延材で予熱してから測定するのが良い。

図7



謝辞

装置の使用及び御助言を多数いただいた千葉機械金属試験場 検査課 立川先生に深く感謝します。

参考資料

1. 高温斜角探傷に関する研究 第1報 昭和52年NDI秋期大会 新日本製鉄(株) 製品技術研究所 相川 他
2. 溶接部の高温自動探傷に関する一実験 その一 昭和53年NDI関西支部研究発表会講演概要 (株)神戸製鋼所 浅田研究所 岩崎 他

炭素鋼材熱交換器チューブの新しい渦流探傷法の開発

<要 旨>

従来、熱交換器チューブの探傷には、渦流探傷法が広く利用されている。しかしチューブ材質が強磁性体のものには適用困難といわれている。

本稿は、強磁性体チューブを対象に、新規の技術開発に取り組み、一応の成果が得られた「外部磁化式渦流探傷法 (MET)」について紹介するものである。

1 はじめに

化学工場において2種流体間の熱の授受を行う設備として、熱交換器は製造設備の中で実に重要な役割を果たしている。また、その構造も多種多様で数も多く、あらゆる製品流体に対応するため、使用材料の種類も多い。一方、この熱交換器も長期使用することで汚れ、又は腐食を起こし(写真1に腐食損傷例を示す)、ときには割れ損傷を生ずるようなことも起こるため、損傷予想度合いに応じ、適切な保守検査を行い処置するようにして、トラブルの未然防止を図っているものである。保守検査の対象としては、熱交換器の能力及び寿命を決定する部材として、薄肉管で本数の多い熱交チューブを主に着眼する。

ところで、従来熱交換器チューブの寿命予測、又は、保守検査に関しては、渦流探傷検査(以下ETと称す)が広く使われているが、これはチューブ材質が強磁性体でない銅合金管やステンレス鋼管等に対象が限定されていた。この理由にはさまざまあるが、欠陥検出のためのET自体の技術が原理上、難しいとされる所が大きく、したがって、工場設備の中で多く使われている炭素鋼材やクロム・モリブデン鋼材の熱交換器チューブについては、設備管理上、有効な探傷方法が望まれていた。

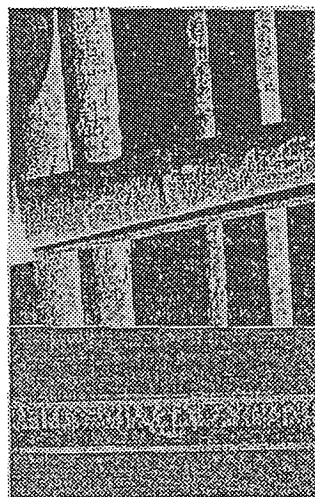


写真1 熱交チューブの腐食状況

炭素鋼材熱交換器チューブの新しい渦流探傷法の開発

本稿は、このニーズに対応し、強磁性体チューブを対象に外部より強制的に磁化することで、透磁率を下げ、従来の渦流法の設備で探傷可能にする外部磁化式渦流探傷検査（以下METと称す）について、新規に技術開発を行い当初の期待成果が出てきたので、以下にこれを紹介するものである。なお、本技術は出光石油化学㈱と非破壊検査㈱とが共同開発で進めてきたもので、現在、特許出願中のものである。

2 強磁性体熱交換チューブのET開発要点

強磁性体熱交換チューブのETで完成された技術はまだなく、従って検査業界では早急に開発すべきテーマの一つになっている。強磁性体チューブの場合は透磁率が非常に大きく、このためコイルインピーダンスが大きいとか、磁気浸透深さが浅いとか、又は信号ノイズが多いとかの理由で、欠陥の検出技術自体が確立していない。この点を改善するためには、検出技術の向上を図り、磁気浸透深さを大きくする等の方策を講じることで、強磁性体チューブ内外面の欠陥検出を可能にさせる必要がある。このためには、次式から判るように、被検査物材料の透磁率(μ)を下げるのが最も効果的であると言われている。

$$\text{磁気浸透深さ}(\delta) = 1 / \sqrt{\pi f \sigma \mu}$$

但し、f = 試験周波数

σ = 導電率 (1/Ω)

μ = 導体の透磁率

一方、最近では周波数(f)を下げて、磁気浸透深さを大きくする低周波プローブによるETの改善検討も進んでいる。通常、被検査物材料の透磁率を下げる手段としては、材料を磁化する方法が一般的に検討されているが、その方法は各種多様にある。表1に本磁化方式について、現在知られている方法を区分けして示す。

本稿での検討は、表1中の全体磁化法に類する事項に該当する。

3 MET開発研究、事前特性調査

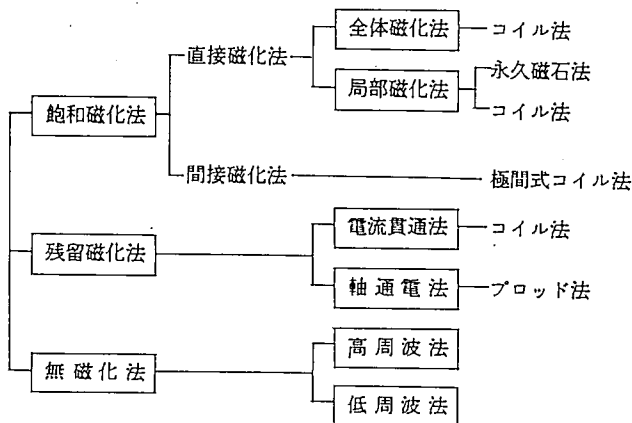
MET開発研究に際し事前調査として、本項ではMETの開発に至るまでの炭素鋼材の磁化特性調査と原理確認を兼ねた予備テストを行ったので、この内容について説明する。

3.1 炭素鋼材の透磁率の調査

炭素鋼材を磁化することによってどの程度の透磁率の変化を起こすのかを、任意の炭素鋼材について調べた結果を図1に示す。透磁率は同じでも成分割合や熱処理の有無等、各種要因により変化するものであるため、図1は炭素鋼材の傾向を示す参考図として取り扱い、考えることとする。

しかしながら図1からは、概略300e(エルステッド)値域から透磁率が極めて小さくなっていることが読みとれる。このことから、炭素鋼材にあっては所定の磁化力を与えれば、透磁率が極めて小さく

表1 磁化法開発体系表



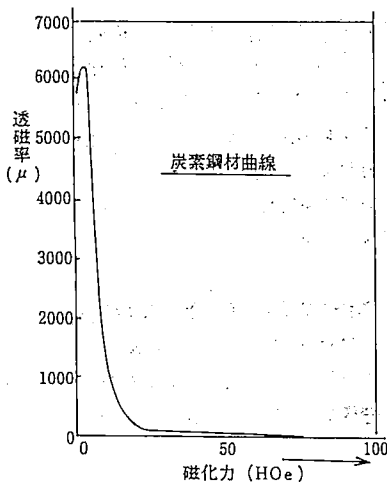


図1 透磁率と磁化力の関係

変化することが判った。なお、銅合金材は透磁率を1としている。

3.2 炭素鋼材の磁気ヒステリシス特性の調査

炭素鋼材の透磁率は、3.1項で磁場の強さに影響されることが判ったが、鋼材は一度磁化すると磁場を取除いても保磁力が働き磁気は残留する。そこで透磁率は、初磁化の場合は磁場の磁化力で評価されても、磁化を繰返すような場合にあっては、鋼材の磁化量を表わす磁束密度をもって目安として評価することの方が好ましい。即ち、鋼材に所定の磁束密度を負荷すれば透磁率は下がり、ETが可能となる訳である。STB材の場合、ETが可能なのは後述テスト結果により、磁束密度は12KG（キログウス）以上と判定された（図6参照）。一方、炭素鋼材についてETを行う場合、磁束密度が飽和する領域を選ぶことが理想であるが、そのためにはどの程度の磁束密度が必要となるか、また残留磁気でETが可能か否か等を判定するには、炭素鋼材の磁気ヒステリシス曲線が必要となったので、今回テストピースを作り、BHトレーサーを使って求めた結果を図2に示す。図2から磁気飽和域は約16KG、またSTB材においては保磁力が小さいため、残留磁化を利用して行うETは不適當となることが判った。加えて、今回のテストピースで、熱交チューブとしての新材

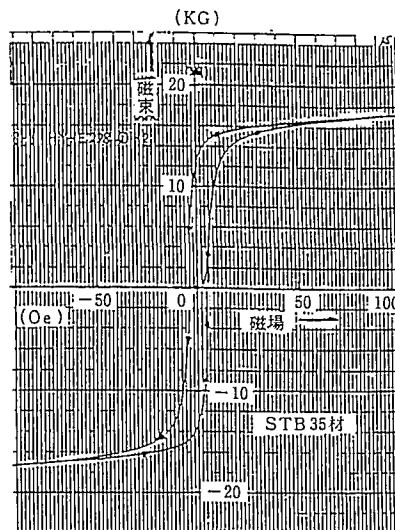


図2 S T B 35材の磁化曲線

及び使用材についての磁気ヒステリシス変化をも調べたが、大きな違いがないことも判った。

3.3 直流磁化におけるチューブ内外面の磁束密度

過去の調査で、チューブ内外面の磁束密度の変化に対し、交流磁化では表皮効果のためチューブ断面を一樣に磁化できないことが判っている。加えて、ETコイルの磁気浸透深さも一樣に深くすることもできないので、今回チューブの磁化には直流を選ぶことにした。直流磁化でチューブ内外表面で磁束密度変化に差が出るか否かについて、図3に示すような設備を作り、ホール素子で漏洩磁束測定を行った。図3中aは、テストチューブの内外面につけた人工欠陥で、深さ1mm程度の局部溝を想定して設けてある。測定結果、外面及び内面傷部廻りに発生している漏洩磁束密度は、ほとんど違いがないことが判った。

さらに内外面につけた傷により、チューブ自体の磁束密度の大きさと、発生する漏洩磁束の関係を求めるため、チューブ自体の磁束密度を変えながら測定したところ、図4に示すような結果が得られた。漏洩磁束の検出は、チューブの磁束密度が10KGを超えた範囲で発生し指示が出てくること、またそれ以上の領域においては、チューブの磁束密度変化に準じ大きく変化することも判った。

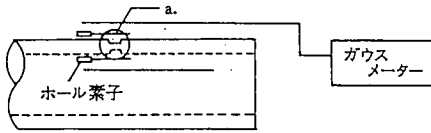


図3 漏洩磁束の測定法

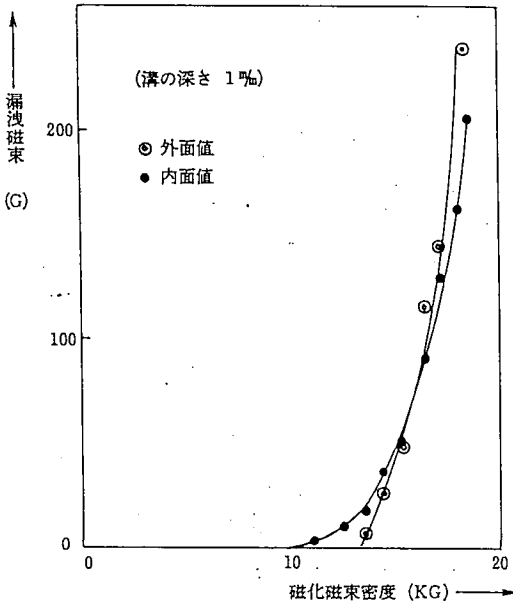


図4 漏洩磁束の検出量

3.4 磁化とET信号との関係

直流磁化による炭素鋼チューブの欠陥信号の検出確認テストを行うため、図5に示すような設備を作り、対比試験用のテストチューブを用意した。

テストチューブには貫通穴、スリット及び局部減肉をあらかじめ人工欠陥として作り、磁化器にはコイルを400回巻きしたものを使い（出力電流0～20A）、ETにはホッキング社製のフェゼックD4A、プローブには19 ϕ 、30KHz、自己比較型を採用した。本設備を使い各種調査した事項を以下に説明する。

3.4.1 チューブ軸方向の磁化特性

図5に示したテストチューブを磁化器で磁化し、チューブ軸方向各位置における磁束密度を、さぐりコイルで測定した。本テストにて、METの基本原則を求めたので以下に報告する。

(1) チューブ軸方向の磁束密度は、磁化コイルの中心位置でピークを示し、それを外れた軸方向ではコイルより遠くなる程、磁束密度は著しく減衰することが判った。これによれば、チューブ全体を磁気飽和するにはチューブ全体を磁化コイルで巻くことが必要となるが、実機チューブバンドルを想定すると現実的でない。そこで磁化コイルを移動させながら、同時に磁束密度がピークを示す位置にETの探傷用プローブコイルをセットして、同期しながら一緒に移動することで磁気飽和条件を確保する方法のほうが現実的であると考えつき、今回の主原理として採用された。

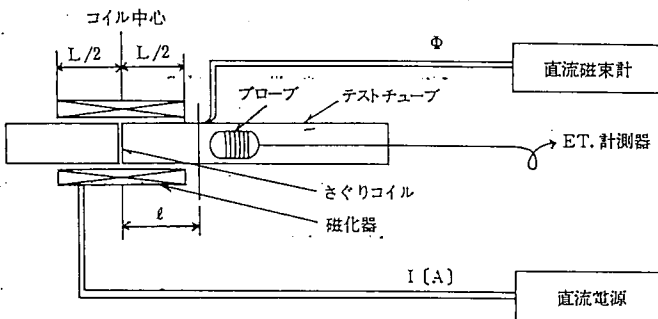


図5 磁化による欠陥検出方法

(2) チューブ軸方向の磁束密度の変化に関し、注意すべき事項のもう1点はチューブ端部の磁化状況である。チューブ端部においては反磁場が働き、磁束密度は端部で低下する傾向にあることが判った。このことは実機チューブバンドルにおいても同じことが予想されるので、実機テストで見極めることが必要となった。

3.4.2 磁化による磁性ノイズの影響

図5の設備を使ってETを実施し、得られた信号の中のノイズを各磁束密度でのX軸振幅値で評価した結果を図6に示す。これによれば、ある領域までは磁化することで、かえってノイズは増加する傾向にあり約8KGをピークに、その後は磁束密度を増加すると減少することが判った。そして約12KGを境にノイズは、ほとんどなくなるということが求められた。即ち、磁性ノイズを小さくして欠陥評価を正確に行うためには、磁束密度を少なくとも約10KG以上に保つことが必要であることが判った。

なお、磁束密度と透磁率の関係も図6に併記する。この結果、ノイズの減少については少なからず透磁率変化に関係することが伺える。

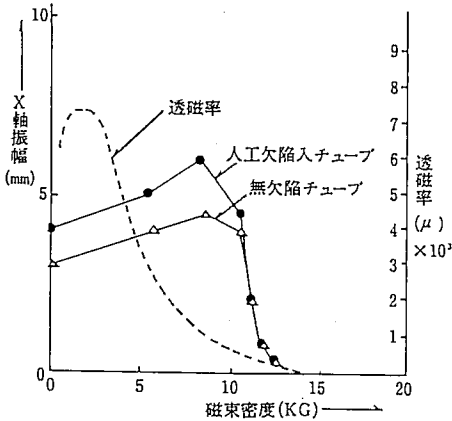


図6 磁束密度によるノイズの変化

3.4.3 欠陥信号とS/N比の関係

図5に示したテストピースの内部減肉(30%及び50%部分減肉)欠陥指示を各磁化条件下で求め、これを全振幅値と磁束密度で評価した結果を図7に示す。

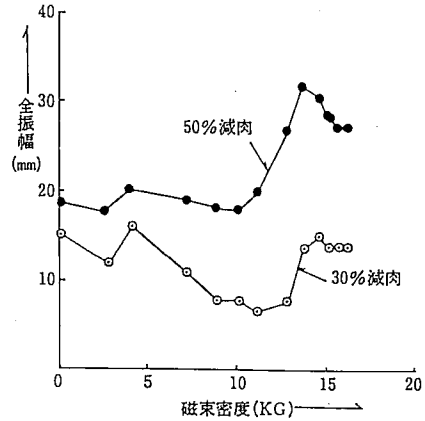


図7 欠陥信号の変化

この図7と、先の図6の結果を合成しS/N比で判定した結果を図8に示す。

図8より、METを行う場合、熱交チューブの磁化はチューブ磁束密度で約12KG以上の値が必要であることが判った。

これら一連のテストにより、実機チューブバンドルの探傷を行う場合、磁化の目標を磁束密度で10KG以上とする必要性が確認された。但し、磁化の最終目標は、図2より磁気飽和域で約16KGである。

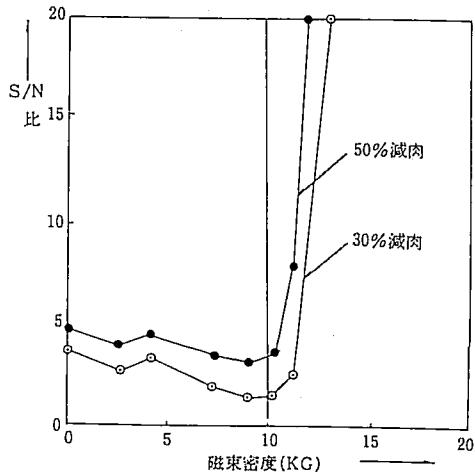


図8 S/N比の変化

炭素鋼材熱交換器チューブの新しい渦流探傷法の開発

3.5 実機チューブバンドルによるMET予備テスト

一連の研究成果により、METについては熱交換チューブを10KG以上に磁化することが可能であれば実施可能な期待が持てることが判った。また磁化力については、一様磁場の分布を持つ直流磁化法で、また直流を大きくしてコイル巻数を増やせば所定の磁化は原理的に可能となる筈であるが、実際のところチューブバンドル径や本数、又は構造に対し実現性のある値であるのかを見極める必要がある。

そこでMETモデルを作り、実機チューブバンドルを使用してテストを行い、MET用磁化設備について仕様確認を行った。テストはチューブバンドル径の異なる（チューブ本数もおおの異なるバンドルを選択した）4種の熱交換バンドルを対象に磁化して、そのときの磁束密度を、チューブに巻いたサーチコイルで測定することで所要電流を求めた。このテスト結果によれば、直流磁場内では均一磁化分布になる筈のものが、実際のチューブバンドルでは、内側と外側では磁場の広がりのため、磁束密度に差が出ることで、またチューブ端部では反磁場特性のため、磁束密度が弱まること等が判った。そしてその傾向はバンドル径が大きくなる程顕著になり、本テストでは約500U本のバンドルで、内側と外側で1:3、また端部では中心部の約1/4位になることが判った。

しかしながら、これらの結果は低電流域であって、一方大きな電流を流して磁場強度を上げることで、磁化量が飽和領域に近づくと、その差は極く微かになり、ETを行うに支障がなくなることも判った。本テストから、所定の磁場強度を保つためには、バンドルの大きさに準じ、次のような磁化能力の目安が求まった。

- ① 60 U本：約8～12KAT（キロアンペアターン）
- ② 200 U本：約14KAT
- ③ 500 U本：約36～48KAT

なお、参考までに熱交換バンドルの中央部に位置するチューブについて、磁化した場合の磁束密度の変化を、通電した磁化電流値で整理した結果を図9に

示す。この場合のチューブ本数は約200U本で、当工場ではほぼ平均的な大きさの熱交になる。図9から磁化電流を増やして行くことでチューブの磁束密度は上がり、約500A程度で磁気飽和域になっていることが伺える。また熱交チューブの各位置についても同じ傾向にあり、磁化電流値が大きい領域では磁気飽和のため、各チューブの磁化量に差はなくなっている。

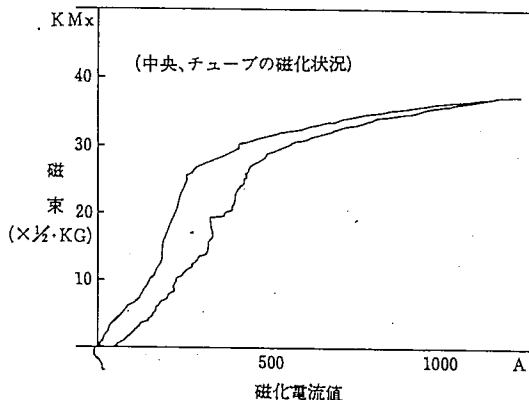


図9 熱交換チューブの磁化曲線

4 MET設備の仕様

以上のテスト結果に基づき実用化に向けて磁化設備を試作することとした。図10にMETのシステム図を示す。

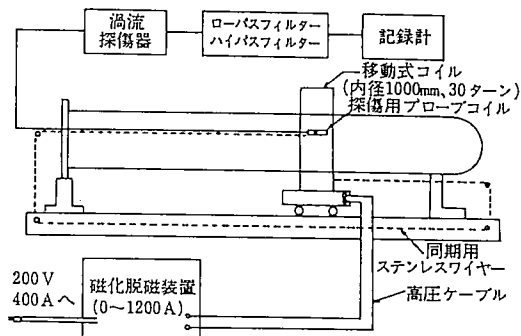


図10 METシステム図

外部磁化コイルについては、チューブバンドル外径に合わせたものが必要となるが、今回は試作第1段階として、200U本相当の1000mm径を製作し、その後のニーズに合わせて大口徑磁化コイルの検討をすることとした。なお、実機テストの結果からは、コイル巻数を増やすことの方が信号中のノイズが少なくなるということが判ったので、磁化設備は以下の仕様に決定した。

入 力：80KVA (200～400A)

磁 化：30KAT (50V)

コイル径：1000mm

写真2にMET用磁化設備について示す。

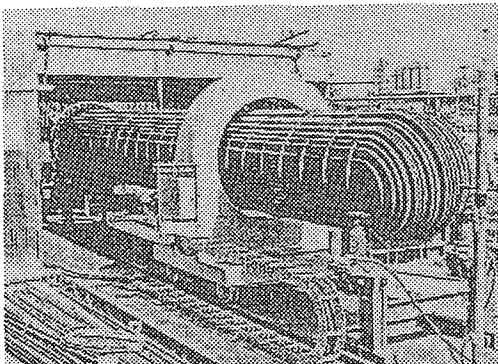


写真2 磁化設備の概要

5 実際の測定と評価判定

校正用炭素鋼チューブ（各種人工欠陥入り、2.77 tmm）を使ってMETを行い、その結果得られた信号波形を図11-a並びにbに示す。図11-aは磁化せずにETを行った場合の波形で、テストピースの継ぎ位置（接続せずにセットしているため）の信号が確認される程度で、その多くはノイズで人工欠陥の指示を確認することはできない。一方、図11-bは外部磁化コイルを使いチューブを磁気飽和させて得られた信号である。先の図11-aと比較して判るように、ノイズ信号は消滅し、変りに人工欠陥指示が明瞭に現われている。さらに欠陥信号の指示は、人工欠陥の大きさ、形状に応じて変化しており、評価のための校正曲線に期待が持てることが判った。



図11-a 無磁化時の信号波形



図11-b 磁化時の信号波形

さらに実際の装置で使用している熱交換器のチューブバンドル（炭素鋼材、2.77mm）にMETを適用し、得られた信号波形を図12に示す。図中、大きく指示の出ているバフフルプレートの指示間に内面からの孔食欠陥指示が認められた。なお、当欠陥指示については、当該チューブを抜管して半割し、その欠陥状況を確認した。また、林状に発生している指示は、ノイズではなくチューブ内面の全面腐食を指示していることを、同じく半割照合にて確認した。

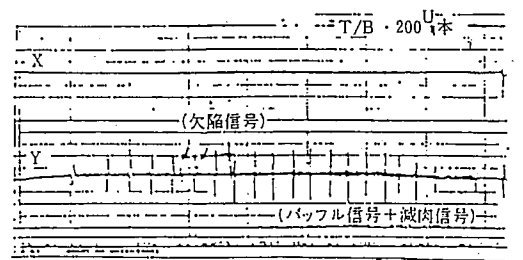


図12 使用管の腐食指示

腐食指示の出ている信号波形に着眼し、当該チューブについて半割照合にて、実際の欠陥と欠陥指示の相関を調査した。図13は実際の腐食欠陥について、形状を3つに分類して整理した結果で、広くて浅い減肉は振幅値が小さめに、また狭くて深い減肉は、振幅値は大きく指示することが判った。また、この図から欠陥形状によって、指示波形は相当変わることも確認できた。

炭素鋼材熱交換器チューブの新しい渦流探傷法の開発

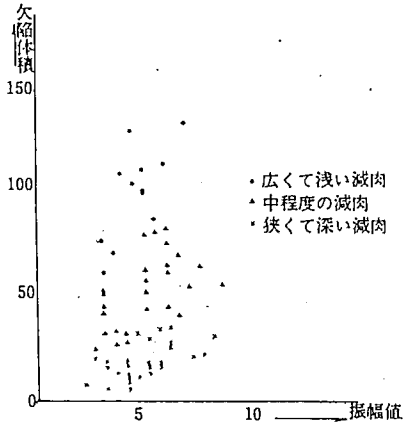


図13 評価図 No 1

図14は孔食を対象として、その深さと信号波形の指示の振幅値で整理した評価図を示す。図中、黒丸は内部減肉を、白丸は外面腐食を示すが、いずれも同一線上に乗る所から、残肉厚管理、即ちチューブ洩れ防止に役立つことが期待される。

METの評価判定は、図14を採用することとした。

6 METの完成技術

MET開発に伴う主な改善内容を次に示す。

- ① 炭素鋼材熱交換器チューブの直管部については、厚肉材でも内外面の欠陥検出が容易に精度良くできるようになった。
- ② スケール影響が少なく、清掃程度もプローブが入る程度で良い。
- ③ ET自体の操作は従来のETと変わりなく、探傷時間も従来法とほぼ同程度と考える。

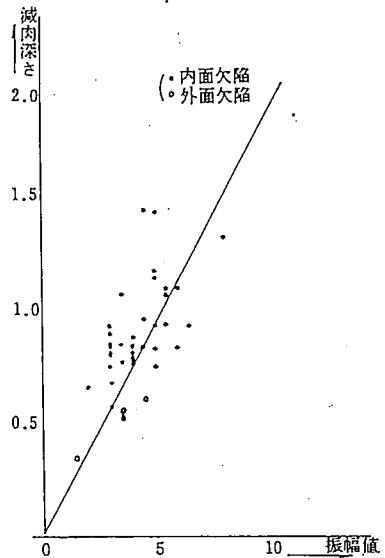


図14 評価図 No 2

- ④ 磁気飽和に伴う指示波形は、ノイズが極めて小さく、従ってS/N比が大きいので欠陥評価が容易である。

7 おわりに

従来難しいとされていた強磁性管の検査について、本METは一応の成果が得られる所まで来たが、欠陥対象及びその実績も未だ少ないので、今後一層データを重ねて信頼度の高い検査法へと改善していくことが必要と考える。

本技術について、関係者各位から御指導を頂き改善に役立てることを願う次第です。

本州四国連絡橋における超音波自動探傷の適用

中国エックス線株式会社

中 田 秀 夫

1. まえがき

弊社では従来より超音波探傷の自動化に取り組んできたが、この度本州四国連絡橋 坂出～児島ルートの橋梁の検査に「調質高張力鋼を用いた主構弦材の自動超音波探傷（PC-2Uシステム）」として参画することができた。

検査での新しい試みとして、システムの概要及び実験経過を紹介する。

2. 背景

本州四国連絡橋の長大併用橋では、従来の鉄道橋で使用実績の少ない58キロ鋼、70キロ鋼および80キロ鋼といった調質高張力鋼が大量に使用されるため、疲労に関する検討が重用とされた。このため本四公団により大型疲労試験をはじめとする多くの調査研究を実施され、その成果をもとに設計基準および製作基準が定められた。

本四連絡橋の疲労設計の考え方は「疲労亀裂の伸展」を前提とし、設計上の耐用年数（100年）の間に疲労亀裂が板厚を貫通することを防ぐことで破壊に対する安全を図っている。すなわち、部材の製作において疲労に対する考慮が最も重視されている主構弦材等のかど溶接を例とすれば、次の考え方に従い設計・製作が行われた。

- 1) 疲労の亀裂はルート部のブローホール等の溶接欠陥から発生する。
- 2) 疲労亀裂は応力の繰返しのごく初期に発生し、亀裂寿命はほぼ疲労進展寿命に等しい。
- 3) 疲労亀裂が板厚の80%まで進展する繰返し数を最終疲労寿命とする。
- 4) 疲労亀裂の起点となるブローホール等の溶接欠陥は完全に避けがたく、製作における初期欠陥の許容値を定め、許容値を越える欠陥は補修する。

このような考え方にに基づき、調質高張力を使用する部材の製作にあたっては、表1に示すように作用応力範囲と許容応力範囲の比によって部材を分類し、それぞれに対して検査基準および欠陥許容寸法が定められた。

部材分類	応力範囲 許容応力範囲	製 作				保 守		
		製作基準	検 査		検査 記録	検査 履歴		
			立会の有無	欠陥の 許容寸法			超音波 探傷	リブ十字の 止端フランジ角
特 A	$0.7 \leq \frac{\sigma_r}{\sigma_{ts}}$ あるいは $0.85 \leq \frac{\sigma_r}{\sigma_{rs}}$	「鋼構等製作 基準」および 「調質高張力鋼 を用いた部材 の角溶接に対 する追加事項」	原則とし て全数立 会	$W \leq 1.5 \text{ m}$ $H \leq 4 \text{ m}$ $\theta \geq 120^\circ$ (135°)	角 溶 接 法	リブ十字 溶接全 数	水 久 期	定 期
A	$0.5 \leq \frac{\sigma_r}{\sigma_{ts}} < 0.7$ あるいは $0.6 \leq \frac{\sigma_r}{\sigma_{rs}} < 0.85$		必 要 に	$W \leq 3 \text{ m}$ $H \leq 6 \text{ m}$ $\theta \geq 120^\circ$ (135°)	全 数		保 存	必 要 に
B	$\frac{\sigma_r}{\sigma_{ts}} < 0.5$ あるいは $\frac{\sigma_r}{\sigma_{rs}} < 0.6$		上 り	$W \leq 6 \text{ m}$ $H \leq 6 \text{ m}$	全 数 の 約 20%		必 要 に よ り	上 り

表1 調質高張鋼を用いた部材の等級分類と検査基準

ルート部ブローホールの他、疲労強度に影響をおよぼすと考えられる溶込み不整、溶込み不足等のルート部の欠陥及び一般部の溶接割れ、著しいブローホールやスラグ巻き込み及びルートフェース側の底面キズ、垂れ込み等の情報が必要とされた。

精度の厳しさ、記録性が問われることから自動超音波探傷の導入が行われた。

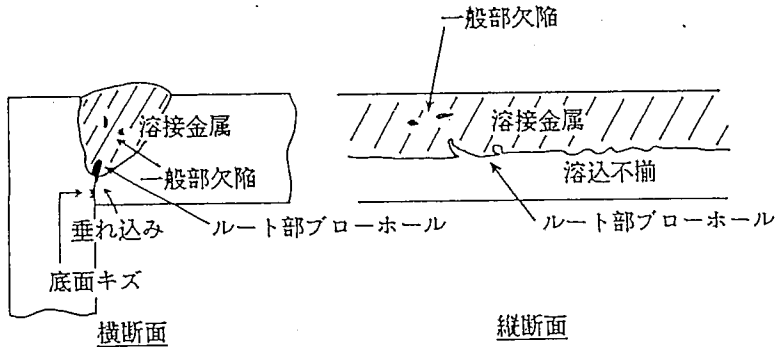


図1 かど継手に発生する欠陥の代表例

3. 装置の構成

超音波探傷装置（4台）、コントローラー、記録計、走行機より構成される。

PC-2Uシステムの構成を図2に示す。

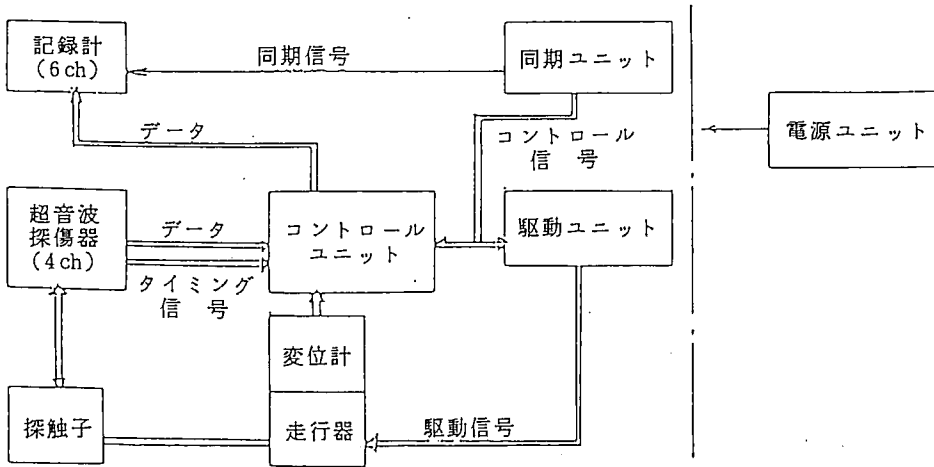


図2 システム構成図

4. 装置概要

- | | |
|-----------|--|
| (1) 目的 | : 溶け込み線形状の検出
溶け込み量の測定
ルート部に発生するBHの検出 ($W \geq 1.0$)
その他の溶接欠陥の検出 |
| (2) 規格 | : 本四公団特記仕様 |
| (3) 適用溶接部 | : 角継手部分溶け込み溶接部、隅肉溶接部 |
| (4) 操作方法 | : CPU制御によるルート線トレース方式 |
| (5) 走行速度 | : $\sim 800 \text{ mm/min}$ |
| (6) 探傷能率 | : $60 \sim 100 \text{ m/day}$ |
| (7) 探傷姿勢 | : 下向き (横向き可) |
| (8) 記録表示 | : Aスコープ
Cスコープ |

以下に対象物の概要、探触子の配置及び記録紙の例を示す。

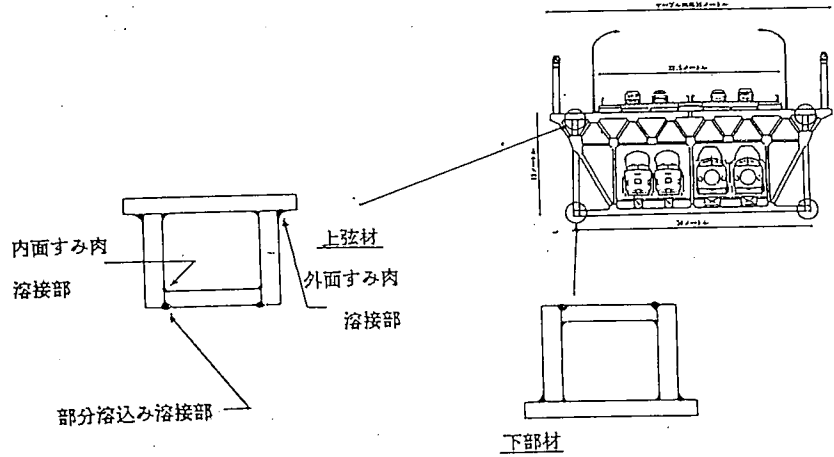


図3 検査対象物の概要

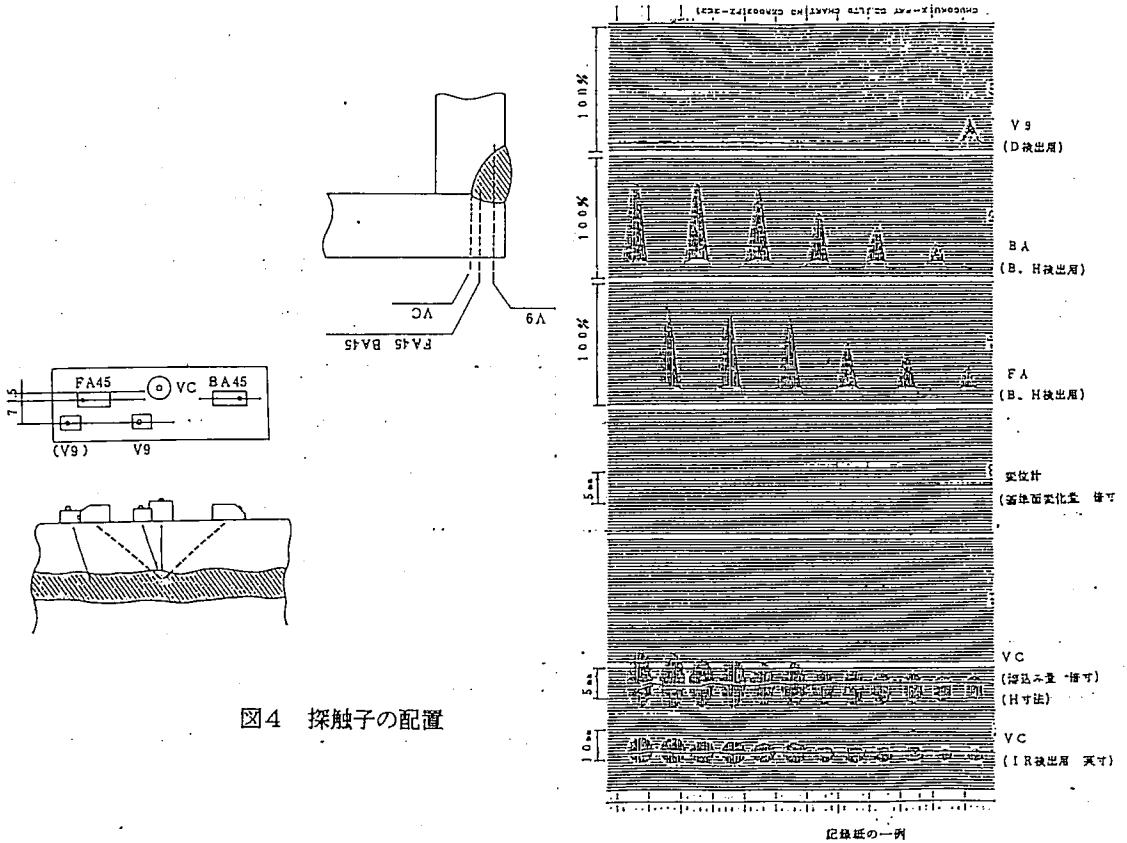


図4 探触子の配置

図5 記録紙の一例

5. PC-2U開発実験

PC-2Uシステムを本四橋で実施するまでには、下のような開発実験を経ている。

- | | |
|------------------|---|
| (a) 基礎実験 | 装置、探触子の選択
探傷方法の選択 |
| (b) 人工欠陥TPによる実験 | 対象欠陥に対する装置性能の確認
BH：検出能、分解能
ルート線：感度設定、精度確認 |
| (c) 自然欠陥TPによる実験 | BH：回帰式の作成（欠陥寸法推定）
その他欠陥：判別方法（判別集の作成）
溶け込み量：推定精度確認 |
| (d) 実大模型試験体による実験 | 超音波精度の確認（欠陥種、推定寸法の精度） |

実施工

ここでは、(c)で疲労上問題となるルート部ブローホールの回帰式を作成する時、必要とする大きさの溶接欠陥を作る技術が要求されることから、最も重要且つ困難な実験であった。回帰式の例を図6に示す。図中の点線は1.5mmにおける95%信頼区間(A)をあらわし、 $A < 0.8$ の精度が要求された。

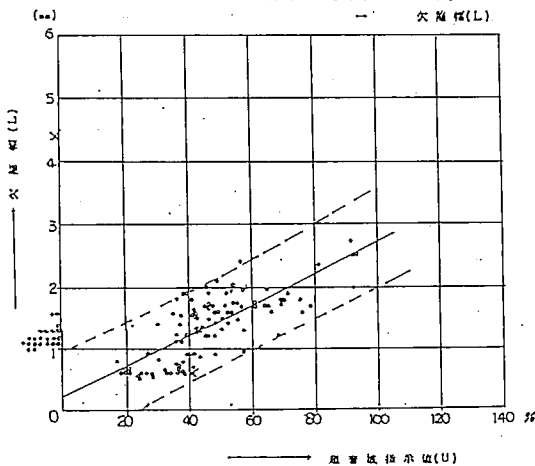


図6 回帰式

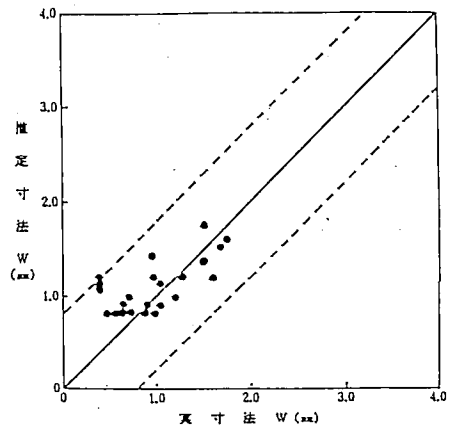


図7 推定寸法と破面寸法

回歸式は溶接試験体により得られたものだが、欠陥は半強制的に作られたものなので、実験の結果で確認する必要がある。

この確認を溶接施行法の確認試験である実大模型試験体による実験で、自動超音波試験を行い超音波の指示と破面を比較することで行った。

推定寸法と破面寸法の一例を図7に示す。

$A < 0.8$ の精度が満足されていることが確認出来る。又、ルート部ブローホール以外の欠陥の判別方法の実験も並行して進められ、図1に示されるような施行上可能性のある欠陥の判別要領を作成した。

6. 実施工

本四連絡橋Dルート各橋に適用されました。

トラス橋	与島橋、羽佐島高架橋、番の州高架橋
斜張橋	岩黒島橋、榎石島橋
吊橋	南備讃瀬戸大橋、北備讃瀬戸大橋、下津井瀬戸大橋
溶接延長	約15,000m以上

7. まとめ

世界的にもまれな一大プロジェクトに参加できたこと、及び従来の方法では困難であるとされた技術的要求に応えられたことを誇りに思うとともに、ここで培った技術、開発手法を橋梁はもとより各分野へ応用していくように考える。

現にPC-2Uの他に、鋼床版の突き合わせ溶接部検査用PC-2Bシステムを製作し、施工するとともにビル鉄骨の分野へも応用している。今後、各方面へ導入されることを期待する。

最後に、装置製作、実験及び施工について御指導賜った検討委員会委員の方々、本四公団職員の方々 又御協力下さった製作会社各社の方々へ、この場を借りて御礼申し上げます。

蛍光磁粉液の濃度自動監視装置について

栄進化学（株） 上村勝二

相村英行

概 要

従来、磁粉液の濃度管理については、スケールの混入等の種々の問題があり、適切な管理装置の開発が望まれていた。そこで当社では、目視による観察状態を想定し磁粉模様の見やすさ、すなわち磁粉模様の明るさ（蛍光輝度）に着目した蛍光磁粉液の濃度自動監視装置を開発した。本装置によれば、スケール等の異物が混入した場合でも、磁粉液の濃度を適正に管理することが可能となる。

1. まえがき

現在、磁粉探傷ラインにおける磁粉濃度の測定には、沈澱計やその他の濃度計が使用されているが、スケール等の異物が混入した場合には、必ずしも正確な濃度を測定しているとは言えず、またその測定結果から検出性能を評価することも困難である。ところが実際のラインにおいては、磁粉液の劣化は強磁性体であるスケールの混入による場合が多く、またその混入により磁粉模様の蛍光輝度は著しく低下し、検出感度の劣化につながっている。磁粉探傷試験において観察時における磁粉模様の見やすさは磁粉模様とバックグラウンドとのコントラストが最大の因子であり、特に磁粉模様の明るさすなわち蛍光輝度が問題となる。

そこで本装置の開発にあたっては、欠陥への磁粉の付着状態と目視による観察を想定し、磁粉液を管理する手段として磁粉模様の蛍光輝度に着目した。

これは電磁石にて採取された磁粉の蛍光輝度を、内蔵した標準蛍光体と比較して、その相対的な蛍光輝度を算出し、その数値によってスケールの混入や磁粉の持ち出し等による磁粉液の劣化に対処しようとするものである。

以下、本装置の概要につき報告する。

2. 原理及び基本的動作

本装置は、磁粉探傷装置の磁粉液循環系に設けたバイパスに接続し使用するものであり、被測定磁粉液はシャッターにて必要時にのみ磁粉液循環系より電磁石に適用され、またその蛍光輝度の測定は次に示す工程を1サイクルとして行う。

- ① 標準蛍光体の輝度測定
- ② ドラム180度回転しストップ
- ③ 電磁石にて採取した蛍光磁粉の輝度測定
- ④ ドラム180度回転しストップ
- ⑤ 電磁石を OFF にし水にて洗浄する
- ⑥ 電磁石を ON にしシャッターを開け電磁石に磁粉液を一定時間適用する。

(尚、この間、同時に ① の標準蛍光体の輝度測定を行っている。)

本装置では、あらかじめ標準蛍光体に対するサンプル磁粉液の使用可能な輝度範囲の上限と下限を設定して置き、フォトセンサーにて電気信号に変えられた測定値出力が設定値を越えた場合には、ランプ及びブザー出力される。

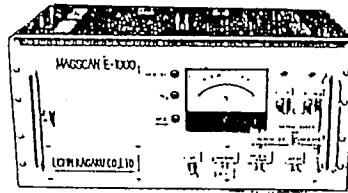


写真 1

写真 1 は本装置の外観を示し、
図 1 は本装置の原理を示す図です。

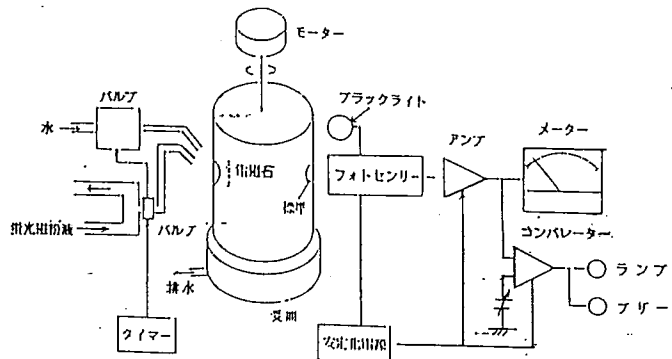


図 - 1

3. 実施例

1) Sy-7500 磁粉液におけるスケール混入量と蛍光輝度の関係 (図2参照)

磁粉濃度 1g/ℓ (水分散、分散剤ブレンデックス-B 2%含む)

ここで、蛍光輝度の値はスケールの混入が零の蛍光輝度を100%とした場合の相対値で表わしている。

スケールの混入に伴って電磁石にて採取された磁粉模様の蛍光輝度が著しく低下することがわかる。

この場合、50~60%以下の輝度では小さな欠陥を見逃す恐れがあった。

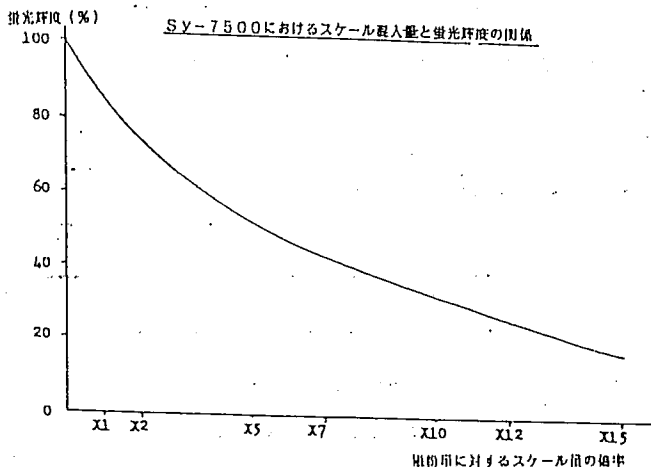


図-2

2) Sy-7500 磁粉液における磁粉濃度と蛍光輝度の関係 (図3参照)

磁粉濃度 0.1~1.5g/ℓ (水分散、分散剤ブレンデックス-B 2%含む)

ここで、蛍光輝度の値は磁粉濃度 1g/ℓ の蛍光輝度を100%とした時の相対値で表わしている。

磁粉濃度の増減により、電磁石にて採取された磁粉模様の蛍光輝度も増減することがわかる。

しかし、蛍光輝度の低下はスケールの混入の影響ほど大きくない。

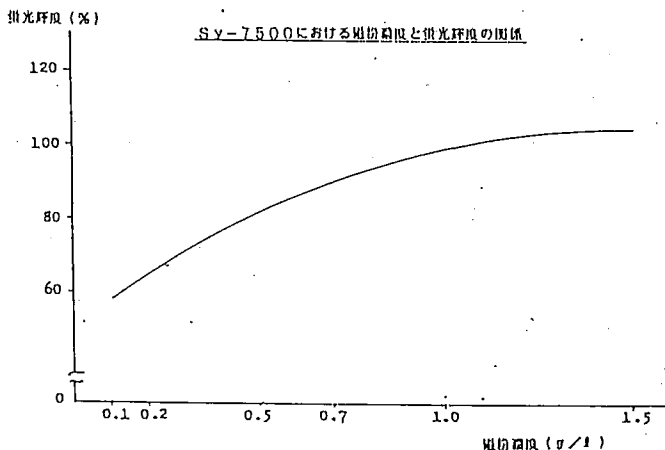


図-3

4. まとめ

実施例 1) 2) よりわかるように、電磁石にて採取された磁粉の蛍光輝度はスケールが混入することや、磁粉の持ち出しによる磁粉濃度の減少より著しく低下する。この蛍光輝度の低下は検出感度に大きな影響を与える。

しかし、従来の磁粉濃度計では磁粉液中の浮遊粒子量を光学的に測定したり、強磁性体粒子を電磁氣的に測定したりするために、沈澱計と同様にスケール等が混入した場合には誤った大きな数値を示す。

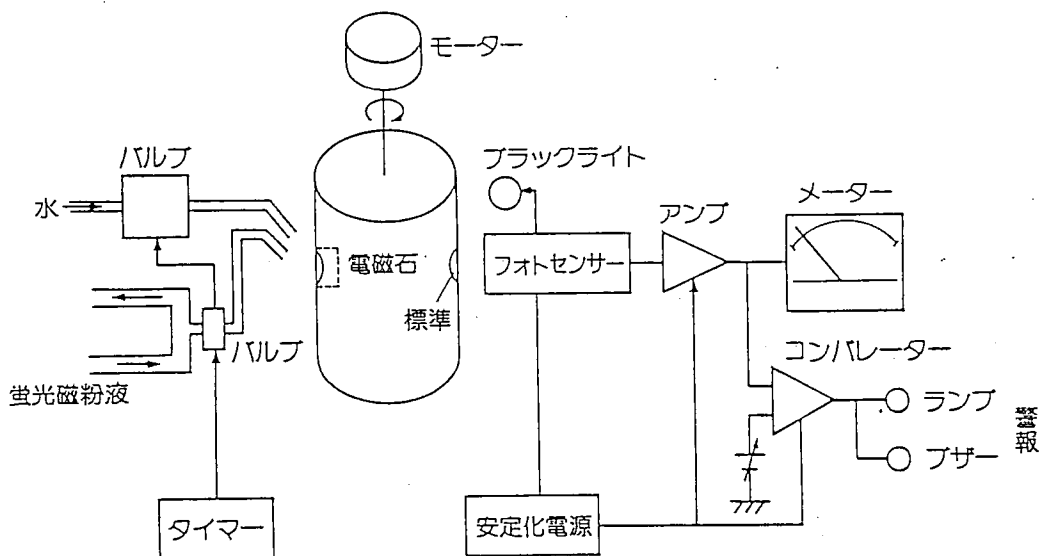
ところが、本装置では目視による観察状態を考慮し欠陥磁粉模様を想定して、その蛍光輝度を測定しており、かつあらかじめ使用可能な蛍光輝度範囲を定めているので、磁粉液にスケール等が混入しても常に一定の検出感度を維持することが可能である。

このように本装置の使用は目視検査、ITV 等による自動探傷に関わらず、検査精度が一定化され安定した検査の一助となろう。

なお、本装置は「MAG SCAN E-1000」という名称にて当社より販売している。

磁粉液自動監視装置

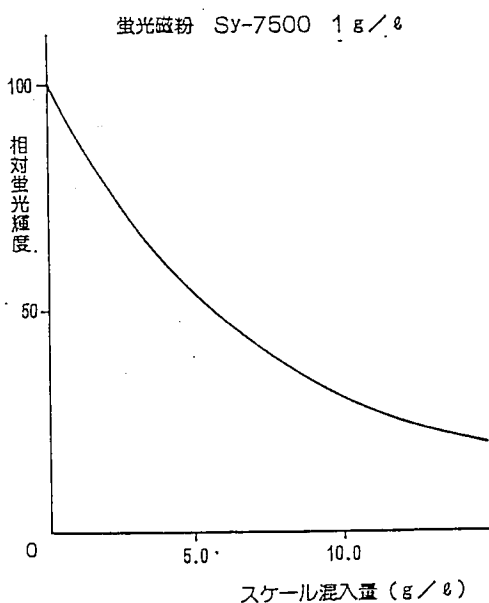
Magscan E-1000



● 特 長

1. スケール等の異物が混入しても、磁粉液濃度を管理できる。
2. 管理レベルを越えた場合には、警報（ランプ、音）を発する。
3. ラインに組み込み自動的に監視できる。
4. 磁粉の種類（型番、蛍光輝度等）に関係なく、全ての蛍光磁粉液に使用できる。
5. 取付が簡単。

● スケール混入量と蛍光輝度の関係



音響異方性を有する鋼溶接部の超音波探傷について

機械金属試験場 立川克美

資料1 NDIS 2413-86 (抜粋)

日本非破壊検査協会規格

NDIS 2413-86

音響異方性を有する鋼溶接部の超音波探傷試験方法 及び試験結果の等級分類方法

1. 適用範囲 この規格は、厚さ 6 mm 以上の主として海洋構造物及び船舶用に使用され、音響異方性を有するフェライト系鋼の完全溶込み溶接部の基本表示探傷器を使用するパルス反射法による超音波手動探傷試験方法について規定する。

ただし、以下の試験体には、この規格を適用しない。

- (1) 曲率半径が 50 mm 未満の試験体の円周継手
- (2) 曲率半径が 50 mm 未満及び肉厚対外径比が 13 % を超える試験体の長手継手
- (3) 鋼管の製造工程中にある継手

2. 一般事項

2.1 目的 この規格の目的は、試験の対象となる溶接部及び熱影響部に存在する欠陥の検出方法、寸法、位置の決定方法及び等級分類方法とする。また、曲率半径が 50 mm 以上 250 mm 未満の試験体の円周継手の斜角探傷は附属書 1、長手継手の斜角探傷は附属書 2、TKY 継手部の探傷は附属書 3 による。

2.2 探傷装置 探傷器は、A スコープ表示のパルス反射式超音波探傷器とし、使用する探傷器及び探触子に必要な性能は JIS Z 3060 (鋼溶接部の超音波探傷試験方法及び試験結果の等級分類方法) の附属書 1 による。なお、公称屈折角 65° の斜角探触子に必要な性能は、JIS Z 3060 附属書 1 の公称屈折角 70° の斜角探触子の性能を有するものとする。

2.3 探傷方法の指定 溶接部の探傷は、特に理由のない限り斜角法とし、直接接触法で行わなければならない。

2.4 検出レベルの指定 探傷目的によって、次のいずれかの検出レベルを指定する。

- (a) M 検出レベル M 線を超える高さの欠陥エコーを評価の対象とする。
- (b) L 検出レベル L 線を超える高さの欠陥エコーを評価の対象とする。

2.5 探傷の時期 溶接部に溶接後熱処理等の指定のある場合、可否の判定のための探傷は、原則として最終熱処理後に行わなければならない。

2.6 溶接部表面の手入れ 余盛の形状が試験結果の解釈に支障をきたす場合には、余盛の形状を適当に仕上げなければならない。溶接部表面から探傷を行う場合には、探触子をその上に直接載せて探傷に支障なく走査できるように平らに仕上げる。仕上げの面の粗さは 50S 程度とする。

2.7 探傷面の手入れ 探触子を接触させる面に、スパック、浮いたスケール及び超音波の伝達を妨げるような著しいさび、塗料などが存在する場合には、これらを除去する。面が粗い場合は、仕上げを行わなければならない。ただし、探傷に支障を生じないように注意する。

2.8 その他 この規格に規定する以外の事項は、JIS Z 2344 (1978) (金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験方法) JIS Z 3060 (1983) 及び JIS Z 3061 (1983) (曲面状の鋼溶接部の超音波探傷試験方法) による。

3. 用語の意味 この試験方法で用いる超音波探傷用語は、次に定義するもののほかは JIS Z 2344, JIS Z 3060 及び JIS Z 3061 による。

- (1) 音響異方性 鋼材中での超音波透過強度や、超音波の屈折角などの超音波伝播特性が、探傷方向によって規定値以上の差を生じること。
- (2) 探傷方向
探傷面に投影した超音波ビームの伝播方向
 - (a) L 方向 主圧延方向
 - (b) Q 方向 主圧延方向から 45° の方向
 - (c) C 方向 主圧延方向に直角な方向
- (3) 標準屈折角 JIS Z 2347 (超音波探傷用 A1 形標準試験片) に規定する STB-A1 又は JIS Z 2349 (超音波斜角探傷用 A3 形標準試験片) に規定する STB-A1 又は STB-A3 を用いて測定した屈折角の値。
- (4) 探傷屈折角 2 探触子による V 透過法を用いて、試験体上の探傷方向で測定した屈折角。
- (5) 音速比 板厚方向に横波を伝播させた場合に、横波の振動方向を L 方向にした場合の音速 (C_L) と、C 方向にした場合の音速 (C_C) との比 (C_L/C_C)。
- (6) 屈折角度差 ($\Delta\theta$) C 方向の探傷屈折角と L 方向の探傷屈折角との差。

4. 技術者 溶接部の超音波探傷試験に従事する技術者は、超音波探傷試験に関する基礎技術を習得している者で、かつ、試験の対象となる溶接部の性質及びその超音波探傷試験について、十分な知識と経験を持つ者でなければならない。

5. 標準試験片(STB)及び対比試験片(RB)

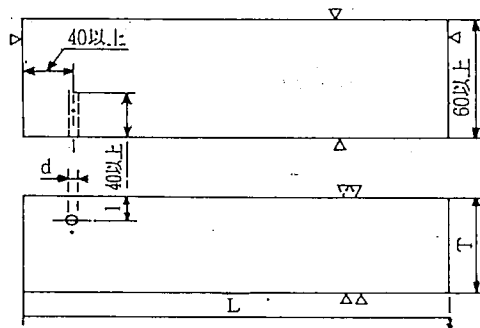
5.1 STB STB-A1 又は STB-A3 を使用する。ただし、STB-A3 は、周波数が 5MHz、振動子寸法が 10×10 mm の斜角探触子を用いて探傷する場合で、測定範囲が 250 mm 以内に限り使用することができる。また、入射点の測定、測定範囲の調整及び標準屈折角の測定に STB-A1 と STB-A3 を混用してはならない。

5.2 RB-4 図 1 及び表 1 に示す形状と寸法で、試験体又は試験体と超音波特性 (主として減衰) の近似した鋼材で製作する。標準穴と仕上面との平行度は、0.3mm でなければならない。また、両仕上面の平行度は 0.1mm でなければならない。

なお、図 1 に規定する以外の位置に標準穴を追加してもよい。

図 1 RB-4

単位mm



ここに、L: 対比試験片の長さ。使用するビーム路程により定める。

- T: 対比試験片の厚さ (表 1 参照)
- d: 標準穴の直径 (表 1 参照)
- l: 標準穴の位置 (表 1 参照)

表 1 RB-4 の寸法

試験片の名称	試験片の厚さ t	対比試験片の厚さ T	標準穴の位置 l	標準穴の直径 d mm
No. 1	25mm 以下	19mm 又は t(1)	T/2	2.4
No. 2	25mm を超え 50mm 以下	38mm 又は t	T/4	3.2
No. 3	50mm を超え 100mm 以下	75mm 又は t	T/4	4.8
No. 4	100mm を超え 150mm 以下	125mm 又は t	T/4	6.4
No. 5	150mm を超え 200mm 以下	175mm 又は t	T/4	7.9
No. 6	200mm を超えるもの	t	T/4	(2)

注 (1) T=t の場合には表面粗さは試験体のままとする。

(2) 試験体の厚さが 200mm を超える場合は、厚さが 50mm 又はその端数を増すごとに標準穴の直径を 1.6mm 増す。

6. 探傷装置の性能の点検

6.1 探傷器 探傷器の点検は、JIS Z 3060 附属書 1 に示す事項について、装置の使用開始時及び 12 ヶ月以内ごとに点検しなければならない。探触子の点検において、探触子を新品と交換しても、JIS Z 3060 附属書 1 に規定された性能に満たない場合には、前述の期間内においても点検を行わなければならない。

点検の結果、JIS Z 3060 附属書 1 に規定された性能に満たない場合には、使用してはならない。

6.2 斜角探触子 使用する探触子の点検は、JIS Z 3060 附属書 1 に示す事項について、使用開始時及び表 2 に規定した期間内に点検しなければならない。点検の結果、JIS Z 3060 附属書 1 に規定された性能に満たない場合は、使用してはならない。

表 2 斜角探触子の性能点検時期

点検項目	点検時期
接近限界長さ ビーム中心軸の偏り	作業開始時及び作業時間 8 時間ごと
A1 感度 A2 感度 遅距離分解能 不感帯	使用開始時及び補修を行ったとき

7. 音響異方性の検定 音響異方性の測定は附属書 4 のいずれかの方法で行い、次の(1)または(2)に該当する場合は、音響異方性があるものと判定する。

(1) 公称屈折角 60° の斜角探触子による屈折角度差の測定において、屈折角度差が 2° を超える場合

(2) 音速比の測定において、音速比が 1.02 を超える場合

8. 母材の探傷 探傷時に超音波の通過する部分の母材は、必要に応じてあらかじめ垂直探傷し、探傷の障害となる欠陥を記録する。この場合、探傷感度は健全部の第 2 回底面エコー高さが 80 % になるようにする。使用する探触子は板厚 40mm 以下の場合は 5MHz 20mmφ とし、板厚 40mm を超える場合は 2MHz 33mmφ とする。

9. 斜角探傷

9.1 探触子及び接触媒質の選定

9.1.1 周波数の選定 原則として表 3 による。ただし、超音波の減衰の著しい試験体の探傷には、表 3 に規定するより低い周波数を用いることができる。

表 3 使用する公称周波数

母材の板厚 t mm	周波数 MHz
75 以下	5(4) ⁽³⁾
75 を超えるもの	2(2.25) ⁽³⁾

注 (3) 括弧内の数値は、なるべく使用しないものとする。

資料2 JIS Z 3060 (抜粋)

5.10 音響異方性の検定

5.10.1 音響異方性の測定装置

- (1) 探傷屈折角及び屈折角度差を求める装置の性能は、4.3及び4.4に準ずる。
- (2) 探傷屈折角及び屈折角度差を求める際に使用する送受信の2つの斜角探触子は、探傷に使用する斜角探触子と同じ型式であって、それぞれ θ_{STB} の差異は、 2° 以内とする。
- (3) 音速比の測定に使用する装置は、試験体中に横波を垂直に伝搬させる横波垂直探触子又は、横波電磁超音波探触子を使用でき、有効数字が3桁以上の精度で、音速、音速比、板厚あるいは、ビーム路程が測定ができる装置とする。
- (4) 横波垂直探触子及び横波電磁探触子には、横波の振動方向を表示する。
- (5) 横波垂直探触子には横波用の接触媒質を使用する。

5.10.2 使用する試験片

音響異方性の測定には、下記のいずれかを使用する。

- (1) 試験体
- (2) 試験体と同一鋼板から採取された平板状試験片

5.10.3 音響異方性の推定

公称屈折角 70° 又は 65° の探触子を使用して探傷する場合で、溶接部の母材における音響異方性の有無が明らかでない場合、探傷面となる母材の音響異方性の推定を行う。

- (1) 探傷に使用する探触子及びそれと同じ公称屈折角の探触子を用いて、5.10.4に規定する屈折角度差の測定を行い、測定値が 3° を超える場合は、音響異方性があると推定する。
- (2) 横波垂直探触子を用いて、探傷面上で探触子を回転させながら、底面の多重エコーを観察して、 $B_1 \sim B_2$ の間で、L方向振動の横波とC方向振動の横波による底面エコーが分離する場合は、音響異方性があると推定する。

音響異方性があると推定された場合は、公称屈折角 60° の探触子を用いて、5.10.4、5.10.5及び5.11によって、音響異方性の検定を行う。

なお、この音響異方性の推定を省略して、直ちに音響異方性の検定を行なっても良い。

5.10.4 屈折角度差の測定

探傷に使用する斜角探触子と同じ形式の公称屈折角 60° の探触子を用いて、L方向又はC方向に、図14に示すように向い合わせ、V走査の配置で最大透過パルス強度が得られるように探触子位置を調整する。探傷屈折角 θ_L 又は θ_C は最大透過パルス強度が得られた位置における入射点間距離Y及び実測板厚tから次式によって 0.5° の単位で求める。

$$\theta_L(\theta_C) = \tan^{-1}(Y/2t)$$

θ_L と θ_C の測定値の差を屈折角度差とする。

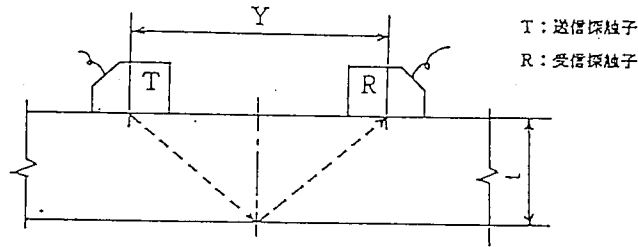


図14 V透過法

5.10.5 音速比の測定

(1) 試験片のL, C方向の確認

試験片の主圧延方向が不明の場合には、次のようにしてL, C方向を確認する。横波垂直探触子又は一方向振動横波を送信する電磁超音波探触子を試験片表面に押しあてながら回転させ、底面エコーの位置から読み取られた横波の音速値が最大となり、かつ、底面エコー高さが最大となるときの探触子の振動方向と一致する方向をL方向とする。L方向に直角な方向がC方向となる。

(2) 測定方法

音速比の測定は、試験片表面の同一箇所において、L方向及びC方向に横波垂直探触子又は電磁超音波探触子の振動方向をそろえ、以下のいずれかの方法によって行う。ただし全方向振動横波を送信する電磁超音波探触子を使用する場合は、方向は任意で良い。

(a) 音速計による場合

振動方向をL方向及びC方向として得られた横波音速値 C_{SL} (m/s)及び C_{SC} (m/s)の比 C_{SL}/C_{SC} を小数点以下2桁まで求め音速比とする。

(b) 超音波厚さ計による場合

振動方向をL方向及びC方向として得られた厚さ t_L (mm)及び t_C (mm)の比 t_C/t_L を小数点以下2桁まで求め音速比とする。

(c) 超音波探傷器による場合

振動方向をL方向及びC方向として測定したときの時間軸上の試験体の厚さの差が、1%以下で読み取れる場合にのみ適用する。

振動方向をL方向及びC方向としたときの試験片の第1回底面エコーのビーム路程を各々読み取り、その値をそれぞれ S_{SL} 、 S_{SC} とする、この比 S_{SC}/S_{SL} を小数点以下2桁まで求め音速比とする。

5.11 音響異方性の検定

音響異方性は、5.10.4又は5.10.5のいずれかの方法によって測定し、次の

(1)又は(2)に該当する場合には、音響異方性があるものと判定する。

(1) 公称屈折角 60° の斜角探触子による屈折角度差の測定において、屈折角度差が 2° を超える場合

(2) 音速比の測定において、音速比が、1.02を超える場合

検定の結果、音響異方性があると判定された場合、探傷には、公称屈折角 60° 又は 65° の探触子を使用する。

超音波探傷装置に関する各国の規格

三菱電機 鎌倉製作所 松山 宏

1. まえがき

今日では、超音波探傷法は非破壊検査の分野では定着しており、種々な試験体に関する超音波探傷法の規格が制定されるようになった。

試験体を含む製品においては、超音波探傷方法による試験の評価結果が、その商取引上、又は残存する寿命の推定に重要な影響を与えている。

このような背景で、超音波探傷の結果について、次のような点が国際的にも要求されるようになった。

- (1) 探傷結果に再現性があること
- (2) 機差がないこと

このような要求事項を満たすためには、超音波探傷では必ず使用する超音波探傷装置の性能が判明していなければならない。そこで各国とも超音波探傷装置の性能測定方法に関する国家規格を制定するようになった。

本紙では、次の項目に関し極く概略を述べることにする。

- 1) 超音波探傷器と探触子の組み合わせによる性能測定方法
 - 2) 電子機器を用いた超音波探傷器の性能測定方法
 - 3) 電子機器及び試験片を用いた性能測定方法
 - 4) 標準試験片と対比試験片
 - 5) 接触媒質
- ### 2. 超音波探傷器と探触子の組み合わせによる性能測定方法

探傷器と探触子の組み合わせにより、性能を測定する方法に関しては次のようなものがある。

- 1) J I S Z 2344 金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験方法通則 (General Standard of Ultrasonic Testing of Metals by the Pulse Echo Technique)
 - 2) A S T M E 317 Standard Recommended Practice for EVALUATING PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF ULTRASONIC PULSE ECHO TESTING SYSTEM WITHOUT THE USE OF ELECTRIC MEASUREMENT INSTRUMENT
 - 3) B S 4331 PART 1 Methods for Assessing the performance characteristics of flaw detection--Overall performance : on site methods
 - 4) D I N 54214 Nondestructive testing : Control of testing equipment with pulse echo sets : Control of the test site.
 - 5) Z B Y 230-84 A型脈沖反射式超声探傷 通用技術条件 (Commonly used specification for A-mode ultrasonic flaw detector using pulse echo technique)
- これらの極く概要を表1に示す。

3. 電子計測器を用いた超音波探傷器の性能測定方法

電子計測器を用いた超音波探傷器の性能測定方法には次のような規格がある。

- 1) J I S Z 2344 金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験方法通則 附属書1 (General Standard of Ultrasonic Testing of Metals by the Pulse Echo Technique)
- 2) A S T M Proposal Practice for EVALUATING THE ELECTRIC CHARACTERISTICS OF SECTION OF PULSE-ECHO ULTRASONIC INSPECTION INSTRUMENT

3) BS 4331 PART 2 Methods for Assessing the Performance Characteristics of Ultrasonic Flaw Detection Equipment

4) ZB Y230-84 A型脈沖反射式超声探傷 運用技術条件 (Commonly used specification for A mode ultrasonic flaw detection using pulse echo technique) これらの概要を表2に示す。

4. 探触子の試験片・電子計測器を用いた性能測定方法

探触子の性能測定方法としては、探傷器と試験片とを用いて測定する方法と、これらの方法と専用の電子計測器を用いる方法とを併用して測定する方法に大別できる。

探触子は探傷の目的に応じて選択され、極めて多くの種類が存在するため、何れの国の規格でも、総べての種類のプロブの性能測定方法を包含しているものはない。

探触子の性能測定方法に関する規格には次のようなものがある。なお、我が国の場合、JISには測定方法が斜角探触子だけに限られているため、ここでは、NDIS 2108も述べることにする。

- 1) JIS Z 2344 金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験方法通則 附属書2 (General Standard of Ultrasonic Testing of Metals by the Pulse Echo Technique)
- 2) NDIS 2108 超音波探触子の性能測定方法と表示方法 (Methods for measurement and representation of performance characteristics of ultrasonic probes)
- 3) ASTM E 1065 Guidance on Evaluating the characteristics of ultrasonic search units.
- 4) BS 4331 PART 3 Methods for Assessing the Performance of Ultrasonic Flaw Detection Equipment : Guidance on the in-service monitoring of probes excluding immersion probes.

これらの極く概要を表3に示す。

5. 標準試験片と対比試験片に関する規格

超音波探傷において、探傷システムの総合感度の構成や、探触子の諸性能の測定、測定範囲の設定などのために、標準試験片や対比試験片が用いられている。

使用目的が殆ど同じにも拘わらず、その形状や寸法はISOで規定された試験片を除き同様のものが少ない。このような現状のために、国際標準化機構 (ISO) TC135 SC3 において、各国で用いられている試験片のうちから、共通化できるものから国際的に共通しようとする活動が始まっている。

各国の標準試験片や対比試験片に関する規格には次のようなものがある。

- 1) JIS Z 2345 超音波探傷用標準試験片 (Standard test blocks for ultrasonic testing)
- 2) ASTM E 127 Standard Practice for FABRICATING AND CHECKING ALUMINUM ALLOY ULTRASONIC STANDARD REFERENCE BLOCKS
- 3) ASTM E 428 Standard Practice for FABRICATION AND CONTROL OF STEEL REFERENCE BLOCKS USED IN ULTRASONIC INSPECTION
- 4) BS 2704 Specification for Calibration Blocks for Use in Ultrasonic Flaw Detection
- 5) ZB Y232-84 超声探傷用1号標準試験片技術条件 (Specification of NO.1 standard test block for use in ultrasonic flaw detection)

我が国の標準試験片と対比試験片を表4に、米国の標準試験片と対比試験片を表5に、英国の標準試験片と対比試験片を表6に、そうして中国の標準試験片と対比試験片を表7に示す。

6. 接触媒質

接触媒質に関する独立した規格は、何れの国にも存在しない。そこで各国の規格の中で見られる接触媒質について簡単に述べておく。

1) 日本

J I S Z 2 3 4 4	(1) 各種液体 (水、油、グリセリンなど)
	(2) 各種糊状のもの
	(3) ゲル状のもの
J I S Z 3 0 6 0	水又は油
J I S G (鍛鋼品)	マシン油
J I S G 0 8 0 1	水

2) 米国

A S T M E 1 1 4	水、セルローズゲル、油、グリセリン
A S T M E 1 2 7 水	
A S T M E 4 2 8	油、グリセリン但し確性試験用は水

3) 英国

B S 3 9 2 3	液体または糊状物質
B S 5 9 9 6	液体又は糊状物質

4) 中国

Z B Y 2 3 1 - 8 4	直接接触の場合 油
	水浸探傷の場合 非加圧水を25時間以上放置したもの

5) 西独

D I N 5 4 1 2 6	(1) 音響伝達損失が小さいこと
	(2) 探傷面が粗い場合は糊状のものが推奨される
	(3) 探傷後容易に除去できるものであること
	(4) 安全であること

表1 超音波探傷器と探傷車を組み合わせて性能を測定する方法

	JIS Z 2344	ASTM E 317	BS 4331 PART 1	DIN 54124	ZB Y230	備考
1. 増幅直線性	<p>適当な反射源からのエコーを用い、内蔵ゲイン調整の読みと、表示器上のエコー高さの比例関係を見る</p>	<p>2つの横穴を持つ試験片からのエコーを使い、内蔵ゲイン調整を式に入れて、この2つのエコー高さの比例関係を見る</p>	<p>2枚試験片の1.5mm又は5mmの横穴のエコーを、最初90%に設定し内蔵ゲイン調整を変えて表示器上のエコー高さと内蔵ゲイン調整のステップとの比例関係を見る</p>	<p>送信パルス幅の3倍以上離れたところにある任意のエコーを最初90%に設定し、内蔵ゲイン調整を変えて表示器上のエコーの高さと内蔵ゲイン調整のステップとの比例関係を見る</p>	<p>適当な反射源からのエコーを用い、内蔵ゲイン調整を変えて表示器上のエコー高さと内蔵ゲイン調整のステップの比例関係を見る</p>	<p>1) ASTM E 317のMethod Bには外付き調整器を用いた方法が規定されている。 2) BS 4331 PART 1ではこれを“増幅器とゲイン調整器の比の直線性”と呼んでいる</p>
2. 時間軸直線性	<p>底面多重エコーを用い、エコーの高さを80%とした時のパルスの立ち上がりを読み基準値との差を見る</p>	<p>底面多重エコーを用い、各エコー高さを50%とした時のパルスの立ち上りを読み基準値との差を見る</p>	<p>底面多重エコーを用い、各エコー高さを80%とした時のパルスの立ち上りを読み基準値との差を見る</p>	<p>底面エコーを用い、各エコーの高さを80%とした時のパルスの立ち上りを読み基準値との差を見る</p>	<p>底面多重エコーを用い、各エコーの高さを80%とした時のパルスの立ち上りを読み基準値との差を見る</p>	
3. 分解能	<p>欠陥エコーの高さを100%とした時、2つの谷間のレベルが3dB又は30dBとなった時、分解されたという</p>	<p>欠陥エコー高さを80%とした時、2つの谷間のレベルが20dB以下となったとき分解されたという</p>	<p>欠陥又は底面のエコーを100%に設定した時、10%のパルス幅を試験片長さで読む</p>	<p>第1回底面エコー(50mm)を80%に設定したときの高さ20%のところのパルス幅を読み、次にエコー高さを20%のところのパルス幅を読み、それぞれの値で分解能を見る</p>	<p>第1号試験片の第1回底面エコーの高さを80%に設定した時の高さ20%のパルス幅を求め、斜中線距離で表す</p>	
4. 感度又はS/N	<p>STB-6 V15-5.6のエコー高さを50%とした時のゲイン調整の読みと、標準レベルを10%とした時のゲイン調整の読みとの比</p>	<p>感度と雑音 標準レベルが20dB以下欠陥エコーレベルが60%以上となる人工欠陥を求め、試験片の番号で表す</p>	<p>感度と信号対雑音比 2枚試験片の横穴エコーを最大となるように位置を設定し、このエコーの高さを20%とする。次にゲインを上げて雑音レベルが20%となるようにする。この時の両方の値の差(dB)をいう。</p>	<p>厚さ25mmの第1回底面エコーの高さを40%に合わせた時のゲイン調整の値を置く。次に試験片を試験片から外し、雑音レベルが40%となるようにした時のゲイン調整の値を読み、これらの読みの差を感度とする。</p>	<p>感度レベル ゲイン調整を最大となるように設定した時の雑音の平均レベルを読む 感度余裕 Z、Z' を用い標準水晶探傷器を用いた時、レベルを10%以下とし、この時のゲイン調整の値を置く。次にZ' またはZの欠陥エコーを50%とした時のゲイン調整の値を読み、この両方の差を感度(dB)を感度余裕という</p>	

表2 電子計測器を用いた超音波探傷器の性能測定項目

J I S Z 2344	A S T M proposed Practice	B S 4331 PART 2	Z B-Y230
<p>送信部実効出力インピーダンス 送信パルスの繰返し周波数 送信パルスの立ち上がり時間 送信パルスの幅 送信パルスの振幅 感度 ゲイン調整器 増幅直線性 追い込み特性 D A C ゲート回路の遅延範囲 ゲートマーカーの幅 ゲートマーカーの形状 ゲートの動作とマーカーのずれ ゲート回路の出力直線性 ゲート内エコー信号の位置とアナログ出力 信号の変化の程度 試験周波数</p>	<p>送信パルス波形 送信パルスの繰返し周波数 送信パルスの立ち上がり時間 送信パルスの幅 送信パルスの振幅 送信パルスの周波数特性 垂直軸の直線性 受信部の周波数特性 受信部の雑音と感度指数 表示部 水平軸の直線性 (B方法)</p>	<p>送信部実効出力インピーダンス (一探触子法の場合) 送信部実効出力インピーダンス (二探触子法の場合) 送信パルス繰返し周波数 送信パルスの振幅 送信パルスの形状 送信パルスの立ち上がり時間 送信パルス立ち下がり時間 送信パルス幅 送信パルスの短時間安定度 受信部の使用可能最高感度 増幅直線性 受信部の周波数レスポンス 等価入力雑音レベル スレシホールド 送信パルス後の停止期間 掃引ゲイン 時間軸直線性 ゲートの遅延範囲 ゲート時間の表示 トリガー安定度 電源電圧安定度 異常電圧遮断機能</p>	<p>減衰器の誤差 垂直直線性誤差 水平軸の誤差 雑音レベル 受信系最大使用感度 受信系周波数特性 追い込み特性 送信パルス幅 送信パルス立ち上がり時間 送信出力回路インピーダンス 送信パルス繰返し周波数 掃引範囲 エコーのパルス幅 エコーノ周波数誤差 サブレシジョン 外部磁界の影響</p>

表3 探触子の試験片と電子計測器を用いた性能測定項目

JIS Z 2344 附表 2	NDIS 2108	ASTM E 1065.	BS J531 PART 2	ZB-Y231	ISO, TC135 Proposal SC3
<p>探触子の公称寸法 探触子の表示方式</p>	<p>共通パラメータ (1) 電気インピーダンス (2) 試験周波数 (3) 探触子の有効寸法 (4) ヒート数 (N) (5) 中心感度及び帯域幅 直接探触—探触子探触子 (1) ビームの傾斜と傾り角 (2) 不感帯 直接探触—探触子探触子 (1) 集束断面 (2) ビーム幅 二探触子探触子 (1) 表面エコーレベル (SL) (2) 距離感度特性 (3) NI 感度 (4) ビーム幅 直接探触—探触子探触子 (1) ビーム中心の傾り (2) 入射角 (3) 不感帯 直接探触—探触子探触子 (1) 集束断面 (2) ビーム幅 (3) 感度</p>	<p>周波数測定感度の測定 (1) 探触子の帯域幅 (2) 相對ハルズエコー感度 時間測定感度の測定 (1) ダンピング (2) ハルズエコーの幅 電気インピーダンスの測定 音場パラメータの測定 1) 水浸・平面 (非集束) 探触子のパラメータ (1) 有効開口寸法 (2) 傾方向のビーム形状 (3) 軸上のビーム形状 (4) 超音波ビームの広がり 水浸集束探触子の音場のパラメータ (1) 開口寸法 (2) 集束長さ (3) 集束長さ (4) 最大感度での音場の直径 直接探触—探触子探触子のパラメータ (1) くさび出口の開口寸法 (2) 傾方向のビーム形状 (3) 軸方向のビーム形状 (4) 超音波ビームの広がり (5) 超音波の放射角度 (6) 傾き角度</p>	<p>入射点 (横探触子) 傾り角 (横探触子) 超音波ビームのやぶにらみ 深さ方向の分解能 角度方向の分解能 空間的周波数 ハルズ幅 不感帯 近距離音場 傾り感度比 総合評価 「この項は直接探触法又は水浸探触法及び傾斜探触子に関する規定している。」</p>	<p>直接探触—探触子 (1) 相對感度 (2) イニシヤルハルズの幅 (3) エコーの周波数 (4) エコーのハルズ幅 (5) 距離感度特性 (6) 超音波ビームの傾りとビーム幅 (7) 電気インピーダンス 直接探触—探触子 (1) 相對感度 (2) 無負荷入射ハルズ幅 (3) エコー周波数 (4) エコー幅 (5) 入射点 (6) 接近限界長さ (7) dB値 (8) 距離感度特性 (9) 兩位差ビーム幅 (10) 左右差ビーム幅 (11) ビームの傾り角 (12) 電気インピーダンス 二探触子探触子 (1) 距離感度特性 (2) 相對感度 (3) くさび内エコーの幅 (4) エコーの周波数 (5) エコーのハルズ幅 (6) ビーム幅 (7) 電気インピーダンス 水浸探触子 (1) 距離感度特性 (2) 相對感度 (3) エコー周波数 (4) エコーのハルズ幅 (5) 電気インピーダンス</p>	<p>時間測定感度の測定 (1) ヒート数 (N) 周波数測定感度の測定 (1) 帯域幅 (2) 中心周波数 音場パラメータ (1) 探触子有効寸法 水浸集束探触子のパラメータ (1) 距離感度特性 (2) 相對感度 (3) エコー周波数 (4) エコーのハルズ幅 (5) 電気インピーダンス</p>

表4 日本の標準試験片と対比試験片

表3.3.1-1 標準試験片の種類、種類記号、主な用途及び形状寸法

標準試験片の種類	種類記号	探傷様式	試験対象物の例	主な使用目的 (参考)	セットの本数	形状寸法
超音波探傷用G形感度標準試験片	STB-G	垂直	極厚板 鉄鋼 鋳造品	探傷感度の調整 垂直探触子の特性測定	10本	図3.3.1-1
掘取超音波探傷用N1形感度標準試験片	STB-N1		厚板	探傷感度の調整	1本	図3.3.1-2
超音波探傷用A1形標準試験片	STB-A1	垂直及び斜角	溶接部 管	斜角探触子の特性測定 斜角探触子の入射点及び屈折角の測定 測定範囲の調整 探傷感度の調整	1本	図3.3.1-3
超音波斜角探傷用A2形感度標準試験片	STB-A2	斜角	溶接部 管	探傷感度の調整 探傷器の総合特性測定	1本	図3.3.1-4
超音波斜角探傷用A21形及びA22形感度標準試験片	STB-A21 STB-A22				1本 1本	省略
超音波斜角探傷用A3形標準試験片	STB-A3		溶接部	斜角探触子の入射点及び屈折角の測定 測定範囲の調整 探傷感度の調整	1本	図3.3.1-5

表3.3.1-2 対比試験片の種類記号、主な用途及び形状寸法

対比試験片の記号	関連する規格	探傷様式	主な使用目的	形状寸法
1) RB-RA	JIS Z 2344	垂直探傷	垂直遅距離分解能測定	JIS Z 2344 附録書 図9
2) RB-RB	JIS Z 2344	垂直探傷	垂直遅距離分解能測定	
3) RB-RC	JIS Z 2344	垂直探傷	垂直近距離分解能測定	JIS Z 2344 附録書 図10
4) RB-RD	JIS Z 2344	斜角探傷	斜角遅距離分解能測定	
5) RB-4	JIS Z 3060	垂直探傷 斜角探傷	探傷感度の調整 エコー高さ区分線の作成	図3.3.1-6
6) RB-A6	JIS Z 3060	斜角探傷 (曲面)	入射点の測定 測定範囲の調整	図3.3.1-7
7) RB-A7	JIS Z 3060	斜角探傷 (曲面)	入射点の測定 測定範囲の調整 エコー高さ区分線の作成 探傷感度の調整	図3.3.1-8
8) RB-A8	JIS Z 3060	斜角探傷 (曲面)	同上	図3.3.1-9
9) RB-D	JIS G 0801	垂直探傷	二振動子探触子の距離 振幅特性の測定	図3.3.1-10

2 ASTM E 127 アルミニウム合金標準試験片

表5 米田の標準試験片と対比試験片 (その1)

距離 (インチ)	表示
0.125	0012
0.375	0038
0.625	0062
0.875	0088

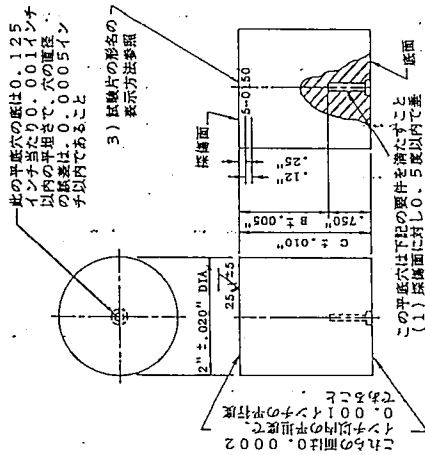
1) 試験片の適用範囲

この試験片は次の用途に使用する。

- (1) 超音波探傷計の性能のチェック
- (2) 水浸法又は直探法により縦波探傷波パルスで、アルミニウム合金製品 品の超音波探傷試験を行う場合の標準化と管理

2) この試験片の形状と寸法を図3.3.2-1に示す。

図 E 127



此の平底穴の底は0.125インチ当たり0.001インチ以内の平面で、穴の直径は0.0005インチ以内であること

3) 試験片の形名の表示方法参照

この平底穴は下記の条件を満たすこと
(1) 探傷面に対し0.5度以内で垂直であること
(2) 縦軸に対し0.10インチ以内の所にあること

図3.3.2-1 ASTM E 127標準試験片の形状寸法

3) 試験片の形名の表示方法

試験片の形名は、次の一連の番号で表示されている。

- ①-②③④⑤
- ①: 平底穴の直径で、n x 1/64インチのnを表す。
- ②③④⑤: 探傷面から平底穴までの距離をインチで表す。

例) 3-0300

平底穴の直径: 3/64インチ

探傷面から平底穴までの距離: 3.00インチ

但し 次の例があるので注意すること。

4) 試験片の構成

試験片は次の3つのグループで構成されている。

- (1) Basic Set
 - (2) Area-Amplitude Set
 - (3) Distance-Amplitude Set
- 表3.3.2-1に示すように、10個の試験片で構成されている。この中には Area-Amplitude SetとDistance-Amplitude Setの一部が含まれている。
- この試験片のグループは探傷面から平底穴までの距離はすべて3.00インチであり、平底穴の直径だけが異なるものである。
- 表3.3.2-2に示すように8個の試験片で構成されている。
- この試験片のグループは、平底穴の直径は、3/64、5/64及び8/64インチの3種類で、探傷面から平底穴までの距離が異なる。表3.3.2-3に示すように、各平底穴の直径毎に30本で合計90本で構成されている。

表3.3.2-1 Basic Set

Area-Amplitude Set	Distance-Amplitude Set
3-0300	N-0016
3-0300	N-0175
3-0300	N-0425
3-0300	N-0025
3-0300	N-0200
3-0300	N-0450
3-0300	N-0038
3-0300	N-0225
3-0300	N-0475
3-0300	N-0050
3-0300	N-0250
3-0300	N-0500
3-0300	N-0075
3-0300	N-0275
3-0300	N-0525
3-0300	N-0088
3-0300	N-0325
3-0300	N-0575
3-0300	N-0125
3-0300	N-0350
3-0300	N-0600
3-0300	N-0150
3-0300	N-0400
3-0300	N-0650

表3.3.2-2 Area-Amplitude Set

Area-Amplitude Set	Distance-Amplitude Set
1-0300	N-0016
1-0300	N-0175
1-0300	N-0425
1-0300	N-0025
1-0300	N-0200
1-0300	N-0450
1-0300	N-0038
1-0300	N-0225
1-0300	N-0475
1-0300	N-0050
1-0300	N-0250
1-0300	N-0500
1-0300	N-0075
1-0300	N-0275
1-0300	N-0525
1-0300	N-0088
1-0300	N-0325
1-0300	N-0575
1-0300	N-0125
1-0300	N-0350
1-0300	N-0600
1-0300	N-0150
1-0300	N-0400
1-0300	N-0650

表3.3.2-3 Basic Set

Area-Amplitude Set	Distance-Amplitude Set
3-0300	N-0016
3-0300	N-0175
3-0300	N-0425
3-0300	N-0025
3-0300	N-0200
3-0300	N-0450
3-0300	N-0038
3-0300	N-0225
3-0300	N-0475
3-0300	N-0050
3-0300	N-0250
3-0300	N-0500
3-0300	N-0075
3-0300	N-0275
3-0300	N-0525
3-0300	N-0088
3-0300	N-0325
3-0300	N-0575
3-0300	N-0125
3-0300	N-0350
3-0300	N-0600
3-0300	N-0150
3-0300	N-0400
3-0300	N-0650

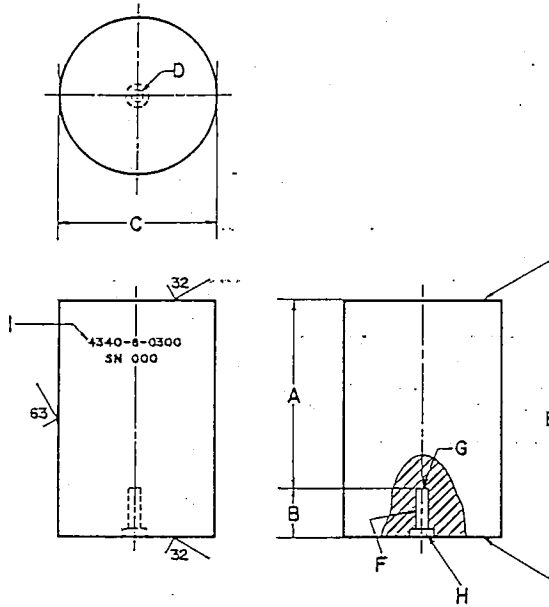
ここで、N は3/64、5/64及び8/64インチを表す。

5) 試験片を評価するための超音波探傷装置の条件

この規格の4. Significanceの項に、「試験片素数5 MHzで水浸探傷法を用いたときだけ、Area-Amplitude SetとDistance Amplitude Setとの間に規定した関係が存在する」と記述されている。そして、この試験片を評価するための超音波探傷装置としては、次の性能が要求されている。

表5 米国の標準試験片と対比試験片 (その2)

ASTM E 428



A: 探傷面から平底穴までの距離 ± 0.015 インチ

B: 平底穴の深さは $3/4$ インチ $\pm 1/16$ インチ

C: 試験片の直径は下記の通り

探傷面から平底穴までの距離	試験片の直径
6 インチまで	2 インチ
12 インチまで	2 1/2 インチ
12 インチ以上	より大きい直径又は 側面にぎざぎざ溝の あるもの

D: 平底穴の直径 $1/16$ インチ未満 ± 0.0005 インチ

$1/16$ インチ以上 ± 0.001 インチ

E: 面の粗さ 0.005 インチ以下 平行度 0.001 インチ以下

F: 穴の直交度 0.2° 以下

G: 穴底の面粗さ $0.001/8$ インチ以下

図3.3.2-2 ASTM E 428の対比試験片の形状寸法

表6 英国の標準試験片と対比試験片

表3.3.2-2 標準試験片以外の探触子性能評価用試験片

試験片	探傷様式	主な使用目的	形状寸法
BS 4331 PART 3 Fig.4	斜角	屈折角のチェック	図2.3.4-1
BS 4331 PART 3 Fig.5	垂直	超音波ビーム形状の測定	図2.3.4-2'
BS 4331 PART 3 Fig.7	垂直及び斜角	エコー周波数のチェック	図2.3.4-4
BS 4331 PART 3 Fig.13	垂直	近距離音場の測定とチェック	図2.3.4-10
BS 4331 PART 3 Fig.14	斜角	近距離音場の測定とチェック	図2.3.4-11
BS 4331 PART 3 Fig.22	垂直	遠距離分解能の測定	図2.3.4-18

表3.3.2-1 標準試験片の種類とそのおもな使用目的

標準試験片の種類	探傷様式	主な使用目的	形状寸法
Block A2 (IIW block ISO 2400)	垂直及び斜角	斜角探触子の入射点及び屈折角の測定 測定範囲の測定 探傷感度の調整など	図3.3.2-1
Block A2 (Modification 1)			図3.3.2-2
Block A2 (Modification 2)			図3.3.2-3
Block A4 (IIW Block)	斜角	測定範囲の調整 探傷感度の調整	図3.3.2-4
Block A5	斜角	超音波ビームの形状測定 深さ方向の分解能の測定	図2.3.4-3
Block A6	垂直及び斜角	垂直探触子及び斜角探触子二振動子探触子の不感帯(近距離分解能の測定)	図2.3.4-8
Block A7 (BS 3927 PART 3)	垂直及び斜角	垂直探触子及び斜角探触子の遠距離分解能の測定	図2.3.4-19

表7 中国の標準試験片と対比試験片

表3.3.4-1 中国の標準試験片と対比試験片の種類と用途

試験片の種類	主な使用目的		二探触子法	セット数	形状寸法
	垂直探傷法	斜角探傷法			
1号標準試験片	測定範囲の測定	測定範囲の測定 相対感度の測定 入射点の測定 K値の測定		1	STB-A1と 同じである (省略)
DB-P 対比試験片	垂直直線性誤差の 測定 時間軸直線性の 測定 相対感度の測定 エコー周波数 エコーパルス幅 距離振幅特性	エコー周波数の測定 エコーパルスの幅 の測定	距離振幅特性 エコー周波数 エコーパルス幅	1 2	図3.3.34-1
		前後ビーム幅の測定			
DB-H ₂ 対比試験片		距離振幅特性 左右ビーム幅の測定 ビームの偏り角		1	図3.3.3.4-3
DB-H ₁ 対比試験片	ビームの偏り角		ビーム幅の測定	1	図3.3.3.4-2
DB-D1 対比試験片	時間軸直線性 追い込み特性		距離振幅特性 相対感度 くさび内エコーの 振幅	1	JIS G 0801 のRB-Dと同じ (省略)
DB-R 対比試験片	インピーダンス	インピーダンス	インピーダンス	1	図3.3.3.4-4

産業における超音波応用の現状について

— 超音波CTを中心として —

日本大学 山田 博章

内 容

1. Computed Tomography (計算機断層像) の歴史
2. CTにおける像再生の原理
3. 超音波CT問題点と現状
 - (1) FAN-BEAM方式でのProjection Data数と再生像
 - (2) 多重層媒体での超音波B-Mode表示の問題点
 - (3) 超音波CTによる内部温度計測のシミュレーション
 - (4) 木柱、木材への応用例
4. 超音波Motorの特徴
5. マイクロコンピュータによる超音波探傷エキスパートシステム
6. 参考文献
 1. 2. : 岩井 CTスキャナ コロナ社
 3. : 山田 電子通信学会 US87-26
 4. : 伊勢、富川 松下技報とかEMシンポジウム86
 5. : 松山 情報論 Vol27 No. 2 1986

1. Computed Tomography (計算機断層像) の歴史

断層撮影とCTの歴史

1914		Karl Mayer (断層撮影)
1915		J. Baese (断層撮影)
1917	J. Radon	2次元あるいは3次元物体は、その投影データの無限集合から一意的に再生できることを数学的に証明。
1956	B.N. Bracewell	電波天文学で実用。
1957	S. Takahashi	医学の分野で発表。
1963	A.M. Cormack	ファントムに応用。
~64		
"	G. Hounsfield	CTスキャナー開発
	* Gordon, Bender, Herman	:ART法による再構成
	* Ramachandran, Lakshinarayan	:Convolution法
1973	G. Hounsfield	CTスキャナー商品化

2. CTにおける像再生の原理

2. CT の原理

CT の画像再構成 (reconstruction) の問題はある横断面内の密度関数 $f(x, y)$ をある方向に合計して得た投影を多方向から求め、それらから何らかの方法によって横断面の分布を復元することに帰着する。この問題は原理的には 1917 年に Radon によって解かれていたといわれる。しかし、CT の開発と相前後して多くの手法が報告された。ここでは代表的なものを原理を中心に説明する

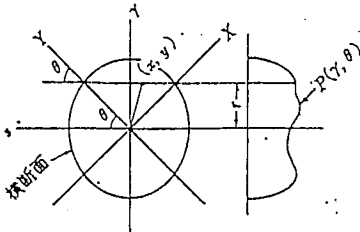


図 3 CT の座標系と投影の関係

まず、図 3 において、被写体の横断面の固定座標系 (x, y) と投影方向を示す回転座標系 (r, s) の関係を示す。CT のデータが得られる線は座標 (r, θ) によって決まるが、 θ は y 軸からの回転角度であるし、 r は原点からの距離である。一般に、投影は次の関係で線和と結びつけられる。

$$P(r, \theta) = \int_{r, \theta} f(x, y) ds \quad (4)$$

式(4)は $f(x, y)$ を線 (r, θ) に沿って積分したものであり、X線の CT の場合は $f(x, y)$ は横断面の X 線吸収係数を表す。

$$I = I_0 \exp\left[-\int \mu(x, y) ds\right] \quad (5)$$

となり、投影 P は次式で表される

$$P = \ln(I_0/I) \quad (6)$$

一方、RI を用いる CT では $f(x, y)$ は直接、RI 濃度分布として表されるし、最近、話題になっている核磁気共鳴 (NMR) CT では陽子スピンの分布として表されるので、これらでは式(4) そのものの形で投影データが与えられる。一組の投影はある角度 θ において、 r の全範囲について得られたものである。

次に、線 (r, θ) と固定座標系における点 (x, y) との関係を知っておく必要があるが、次式によって示す。

$$r = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (7)$$

理想的には $f(x, y)$ は連続関数であり、投影データも無限個得られることが望ましいわけであるが、実際には投影は r 方向、 θ 方向とも有限であり、再構成される $f(x, y)$ も有限の画素からなることを注意しておこう。

さて、CT 像の再構成であるが、投影 P が $f(x, y)$ のある線に沿っての和であることから、原理的には、 $f(x, y)$ に関する多次元 1 次連立方程式を解けば求まることになるのであるが、実際には画素数が極めて大きいため、逆マトリクスの計算はとても実用にはならない。そのために幾つかの方法が工夫されているが、そのうちの (a) 逐次近似法と (b) 解析的方法について述べることにしよう。

3.1 逐次近似法

本法では図 4 に示すように、横断面を複数の画素に分割し、各画素に適当な初期値を配分する。初期値としては例えば、一定値でもよい。次に、ある線の

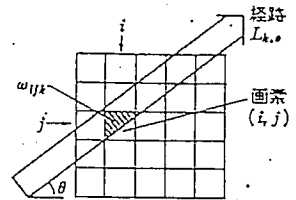


図 4 逐次近似法における画素と線和の関係

経路 $L_{k, \theta}$ に沿って合計を次の式によって算出する。

$$R(k, \theta) = \sum \omega_{i,j,k} f(i, j) \quad (8)$$

ここで、合計は $L_{k, \theta}$ が通過する画素について行われ、 $\omega_{i,j,k}$ は各画素を経路 $L_{k, \theta}$ が通過する面積に比例する荷重係数である。

このようにして得た計算値 $R(k, \theta)$ と実測した投影データ $P(k, \theta)$ とを比較してその差を小さくするように画素 (i, j) の値 $f(i, j)$ を修正し、これをすべての実測投影データについて順次繰り返す。逐次的に近似してゆく。

$f(i, j)$ を修正する方法には数種あるが、加法的 ART (Algebraic Reconstruction Technique: 代数的復元法)⁽⁴⁾ について述べる。その方法では、 n 次の推定値 $f^{(n)}(i, j)$ は次式によって算出される。

$$f^{(n+1)}(i, j) = \max\left\{ f^{(n)}(i, j) + \frac{P(k, \theta) - R(k, \theta)}{N_{k, \theta}}, 0 \right\} \quad (9)$$

ここで、 $N_{k, \theta}$ は経路 $L_{k, \theta}$ に含まれる画素数であり、式(8)の荷重係数も考慮されている。

この修正を各投影ごとに行い、全方向について終ると初めからやり直す。 $f^{(n+1)}$ と $f^{(n)}$ の差がある値以下になった場合に近似を停止する。

逐次近似法には ART のほかに、幾つかの手法が報告されている。ART では 1 個の投影より画素の値を修正するが、ある画素に対し、そこを通るすべての投影を同時に用いて修正を行う方法を SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique: 同時逐次近似法)⁽⁴⁾ という。又、 $P(k, \theta)$ と $R(k, \theta)$ の差が最小 2 乗法によって最小となるように修正を行う方法を LSIT (Least Square Iterative Technique: 最小 2 乗逐次近似法)⁽⁴⁾ という。

これらの逐次近似法は繰返しが多いため計算時間が長く、後で述べる解析的方法に比して精度も悪いといわれており、実用機の CT には使われていない。

3.2 解析的方法

解析的方法としても、幾つかの手法が開発されているが、ここでは基本的な二つの方法について述べる。

(1) フーリエ変換法

本法では投影切断面の定理を利用する。図 5 において固定した直交座標を (x, y) とし、これと角度 θ だけ異なる座標を (x', y') とする。今、被写体の断面を (x', y') 系で、 $f(x', y')$ と書くと、この関数の y' 方向への投影は次式で表される。

$$P_\theta(x') = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x', y') dy' \quad (10)$$

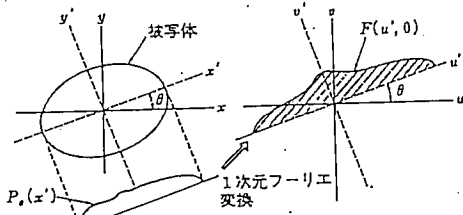


図 5 フーリエ変換法—投影切断面の定理

一方、断面の密度関数 $f(x', y')$ の 2 次元フーリエ変換を周波数座標 (u', v') に関して、 $F(u', v')$ と書くと次の関係がある。

$$F(u', v') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x', y') \exp\{-2\pi i(x'u' + y'v')\} \times dx' dy' \quad (11)$$

この 2 次元フーリエ面の $v'=0$ なる断面は、

$$F(u', 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} f(x', y') dy' \right\} \cdot \exp(-2\pi i x' u') dx' \quad (12)$$

となり、これに式 (10) を代入すれば、

$$F(u', 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_\theta(x') \exp(-2\pi i x' u') dx' \quad (13)$$

が求まる。すなわち、ある原断面の一つの方向の投影の 1 次元フーリエ変換は、原断面の 2 次元フーリエ変換を対応する角度で切った中心断面に等しい。

従って、この定理によると、測定された多方向からの投影を 1 次元フーリエ変換すれば、原断面の空間周波数分布曲面の原点を横切る多数の放射状の断面が得られるから、原断面のフーリエ変換が極座標表示で得られることになる。そこで、これを 2 次元逆フーリエ変換すれば原断面に復元できるが、高速フーリエ変換を実行するには直交座標系で行わねばならないため、極座標系で求められた曲面を内そうして直交座標系に変換してから計算を行う。

(2) フィルタ補正逆投影法

この逆投影を数式で表すと、式 (7) を用いて次のように表される。

$$\hat{f}(x, y) = \sum_{j=1}^m p(x \cos \theta_j + y \sin \theta_j, \theta_j) d\theta \quad (14)$$

ここで、 θ_j は j 番目の投影データ取得角度、 $d\theta$ は投影間の角度、 $(=\pi/m)$ 、 m は全投影の数である。 \hat{f} は参考図 1: 示したように、真の密度関数 (原断面: f) とは異なることを示している。まず、

横断面の密度関数 $f(x, y)$ の 2 次元フーリエ変換を極座標表示で表す。

$$f(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{+\infty} F(u, v) \exp[2\pi i R(x \cos \theta + y \sin \theta)] |R| dR d\theta \quad (15)$$

ここで、

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v}{u}\right) \quad (16)$$

$$R = (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (17)$$

ここで、3.2 (1) の投影切断面の定理 (式 (13)) より、

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(r, \theta) \exp(-2\pi i R r) dr = P(R, \theta) \quad (18)$$

そこで、式 (15) は次のように書ける。

$$f(x, y) = \int_0^\pi p^*(r, \theta) d\theta \quad (19)$$

$$P^*(r, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} |R| P(R, \theta) \exp(2\pi i R r) dR \quad (20)$$

この結果は本質的には式 (14) と同じであるが、逆投影すべき投影データが p から p^* に変わっている。式 (19) を実際の和で表せば、次のようになる。

この結果は本質的には式(14)と同じであるが、逆投影すべき投影データが p から p^* へ変っている。式(19)を実際和で表せば、次のようになる。

$$f(x, y) = \sum_{j=1}^{m} p^*(x \cos \theta_j + y \sin \theta_j, \theta_j) d\theta \quad (21)$$

さて、式(20)を見てみると、 p から p^* への変化は $|R|$ という操作によるフィルタ処理となっていることが分かる。フーリエ領域でのフィルタ処理は空間領域では重畳積分で表されるから、次式が得られる。

$$f(x, y) = \int_0^{\infty} (p(r, \theta) * g(r)) dr \quad (22)$$

但し、

$$g(r) = \int_{-\infty}^{\infty} |R| \exp(-2\pi i r R) dR \quad (23)$$

式(22)の *印は1次元重畳積分を示す。

実際には $p(r, \theta)$ は有限個に標本化されるものであるから、その間隔を a とすると、式(23)の積分は空間周波数の上限である Nyquist 周波数 (R_n) までである。

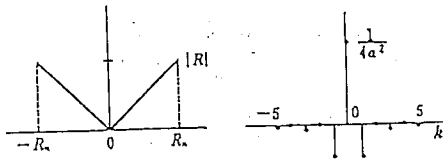
$$R_n = 1/2a \quad (24)$$

式(23)は次のように書き改められる。

$$g(r) = \int_{-R_n}^{R_n} |R| \cos(2\pi r R) dR \quad (25)$$

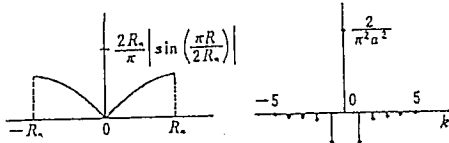
この積分を求め、 $r = Ka$ ($K=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) を代入したものが、Ramachandran によるフィルタ関数として知られているもので、次式で示される⁽¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} g(Ka) &= \frac{1}{4a^2} (K=0) \\ &= -\frac{1}{(\pi Ka)^2} (K=\text{奇数}) \\ &= 0 (K=\text{偶数}) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$



(左) フーリエ領域 (右) 実空間領域

図8 Ramachandran によるフィルタ関数



(左) フーリエ領域 (右) 実空間領域

図9 Shepp によるフィルタ関数

このフィルタ関数の図式的に示したものが、図8であり、左にフーリエ領域、右に空間領域の特性を表す。この関数は R_n で急激な cut-off を行っているため、再構成される CT 像にリングングが生ずる。

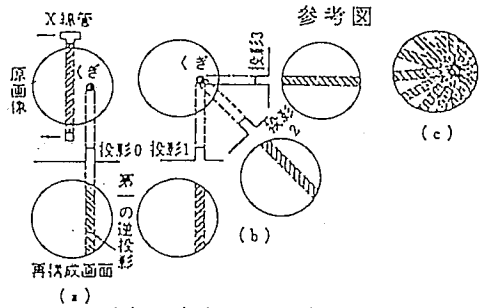
上述のフィルタ関数を修正して、良好な CT 像を得よう多くの研究が行われた。代表的なフィルタは Shepp らによるもので、その空間周波数特性は次式で与えられる⁽¹⁾。

$$G(R) = \frac{2R_n}{\pi} \left| \sin\left(\frac{\pi R}{2R_n}\right) \right| \quad (27)$$

空間領域では、フーリエ逆変換すると、

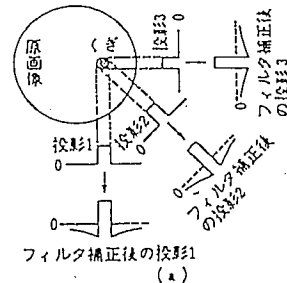
$$g(r) = \frac{2}{\pi^2 a^2 (1-4r^2)} \quad (28)$$

この関数を図9に示す。このフィルタは良好な CT 像を与え、商用の CT 装置ではこれに近い補正関数が使われているといわれている。



(a) 第1投影の取得とその逆投影
(b) 多方向からの投影とその逆投影
(c) 多方向からの逆投影の重ね合せ

参考図1 逆投影法の図式的説明



フィルタ補正後の投影1
(a)

フィルタ補正後の逆投影重ね合せ
(b)

(a) 多方向からの投影取得とフィルタ補正
(b) フィルタ補正後の逆投影による重ね合せ

参考図2 フィルタ補正逆投影 (FBP) 法の図式的説明

3. 超音波CT問題点と現状

(1) FAN-BEAM方式でのProjection Data数と再生像

1 はじめに

超音波は現在CTだけでなく多くの分野で使用されており、他に比べて設備的に容易であり又、人体に無害である等の利点がある。しかし、超音波は、反射、屈折、回折などの影響により像が歪んでしまうという欠点もある(2)。ファンビーム投影データから像再生を試みた時の相互の関係については十分に検討されているとは言い難い。そこで、マイクロコンピュータによるシミュレーションにより、投影データ数と再生像の歪み、及び画質の評価を試みた。但しここではデータ収集の高速化のためファンビーム方式でかつ、T. O. Fによる Mapping についてのみの論議である。

2 超音波ビームの分布と投影データ数

超音波は異物体境界では反射や屈折をする。その様子について円柱上物体へファンビームを照射した場合の一例を示したのが写真(a)(b)である。投影データの収集は、case(1)は変換子[1]を10度おきに、変換子[2]を20度おきにずらして、 9×36 個のデータをとる場合、case(2)は変換子[1]はそのままに、変換子[2]を10度おきし、2倍の 18×36 個のデータをとる。case(3)は変換子[1]を5度おきにして、4倍の 18×72 個のデータをとる3通りとした。この投影データ数で比較し、実用的な投影データ数を決定しようと試みた。再生像としては2値画像で評価する事とし、2値化のThreshold levelを決定するためのシミュレーションを行った。Fig. 1にその結果を示した。ここでは半径の比が $r_1/r_2 = 20$ (%)の場合で、これよりThreshold levelの最適値を求めると、36.8となる。ただし、これらの条件は、対象物中の超音波ビームの速度比により異なる事は言うまでもなく、上記の条件は速度比、 $C_2/C_1 = 2.0$ (対象物の速度が遅い場合)の場合であり、 $C_2/C_1 = 0.5$ (対象物の速度が速い場合)について求めた場合も図中に併記してある。

3 対象物の大きさによる差異

対象物の大きさによる再生像歪は、超音波ビームの測定範囲内分布状態に依存し異なるはずであり、超音波ビームの測定範囲内分布状態の1例を写真(c)に示す。

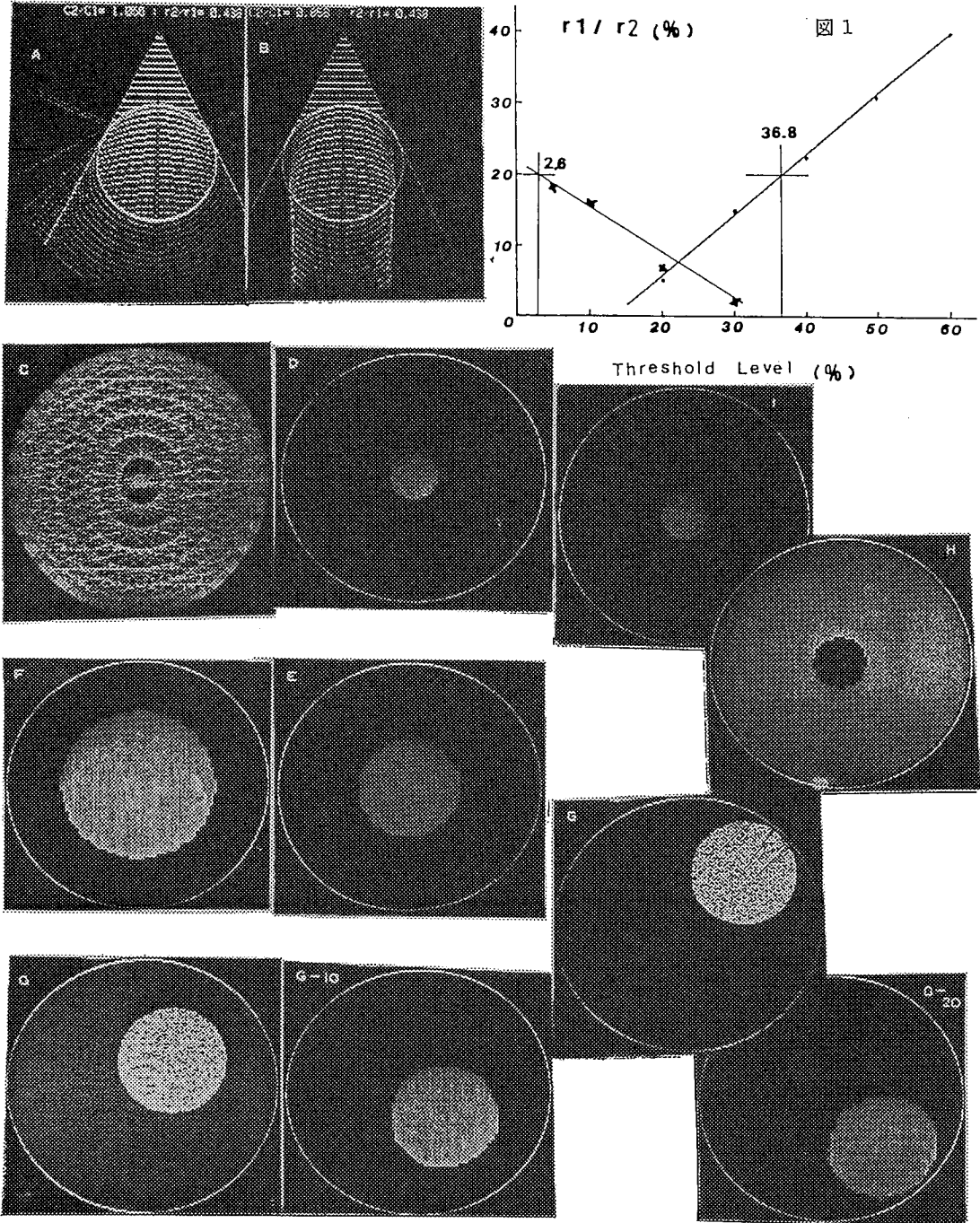
対象物中心が同じ位置にあり、半径が異なる場合を比較した結果を写真(d)、(e)、(f)、($r_1 = 10$, 20 , 30)に示した。この結果からは大きな影響は認められないが、半径比が特異な場合には端部に大きな歪が生ずる事がある。但しここでは測定範囲の半径は、($r_2 = 50$)一定とした。投影データは計算機により作成し、像再生を試みることにした。像再生アルゴリズム(3)についてはFan-Parallel Beam変換後補間を行い、Filtered Back Projection法により再構成し、Filter関数はRamachandranのものを用いた。なお超音波ビームは、あくまでも、直進するものとして、投影データを計算により得た。

4 測定範囲内の対象物の位置と速度比による再生像の歪

測定範囲内でのビーム分布の不均一により再生像歪みの場所依存性があり、その再生像は、測定範囲中心より、少しずれた場合の方が、歪んだ再生像になり、逆に測定範囲中心より遠ざかるほど、再生像は対象物に近いものが得られることがあることもわかった。超音波ビームの分布の様子と対応した再生像を写真Gに示した。但し投影データ分布図と再生像での対象物の位置関係は意図的にずらして表示した。この場合の投影データ数は 9×36 の場合である。この写真は、中心座標をX, Y方向に5(pixel)づつ移動させたものである。測定範囲内では、角度方向の歪は同一であり、径方向についてののみを検討する事で十分である。念のためシミュレーションを行ったが、当然の事ながら両者の差は認められなかった。速度比については、速い場合の結果を写真H($C_2/C_1 = 0.5$)、遅い場合を写真I($C_2/C_1 = 4$)、に示した。但し半径 $r_1 = 10$ の場合である。正方形対象物についてのシミュレーション結果も行ったが同様の結果がえられた。

5 結論

Fan-Beam方式の超音波CTにおける投影データ数と像再生上での実用的な意味での最少投影データ数と再生像歪み分布を求めるべく、2, 3のシミュレーションを行った。本シミュレーションの結論としては、実用的には投影データ数が 18×72 程度であれば、産業用における、特に筆者等らのおこなっている木柱への応用(4)~(6)にかぎって云えばほぼ満足出来る再生像がえられるであろうと予測される。しかし、この問題はここでのシミュレーション解析の結果のみで解決出来ることではなく、Fan-BeamよりParallel-Beamへの変換、データ補間の問題等多くの課題があり、今後これらについての検討がなされる必要がある。



(2) 多重層媒体での超音波B-Mode表示の問題点

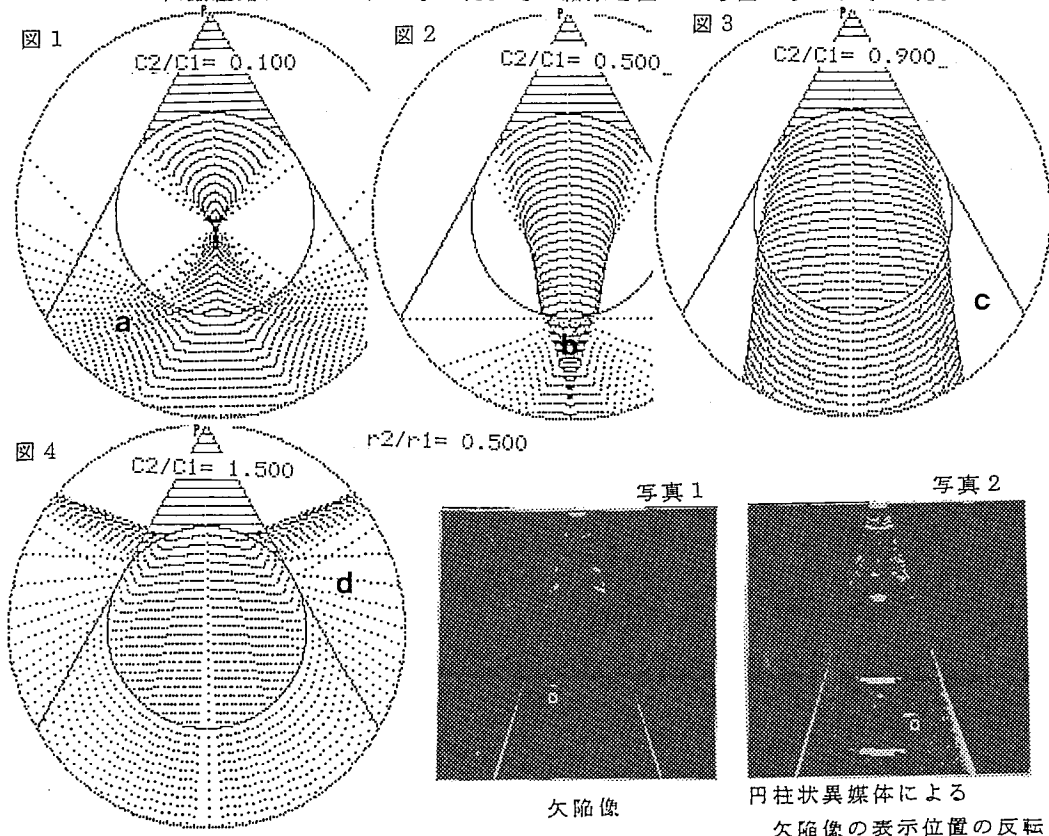
1. はじめに

超音波パルス・エコー法によるBモード像により得られる断層像は医療用として多く用いられている。しかし、この方式により表示される画像は、CT(Computed Tomography)画像に比べて、計測される物理量、音響インピーダンス差等に定量性が乏しく又、画像構成アルゴリズムが伝搬媒質内での超音波の速度、減衰量は一定と仮定したものでこれらによる画像歪、分解能の劣化、更に音場の広がりや反射、屈折、干渉、モード変換等にも問題がある。即ちBモード断層像では、超音波が媒体内を直進するとして断層像を表示する。従って、周囲と音速の異なる組織の境界面では、超音波ビームが反射屈折するため超音波断層面をゆがめた像となる。そこで、これらにおける画像歪み、及び分解能について音線理論によるシミュレーションをおこない、その特異性を指摘し、実験的にも確認する事が出来た。

2. 多重層への超音波ファンビーム入射時の歪みとShadow Zoneの発生

超音波が媒体内を直進するとき、媒質中に異物体形状が円柱状の場合においては、速度比、形状比によりビームが当たらない所(Shadow Zone)が発生することがあり、又、逆にビームが重なり表示位置の誤りが生ずる。そこで、円柱状異物体の背後のビームの伝搬経路についてシミュレーションを行った。

シミュレーションの方法は、第1、2媒体の半径と音速を定めたととき、点Pから垂直に入射した場合よりの超音波ビームを第2媒体の円の接線まで入射するものとして、そのビームの伝搬経路についておこなった。その結果を図1から図4までに示した。



P点より右側に入射したビームが左側に進む部分aや(図1)、重なる部分b(図2)ができる。これらにより、得られる像は、aの部分にある物体は、表示位置は左右反転して示される。実験における中央部の○印部分の表示がこの場合に相当する。(写真1、2) bの部分にある物体は、像が広がり大きく表示される。図3は、第2媒体があるため、その背後にビームが当たらない部分cが発生する場合である。このため、cの部分にある物体は当然、なにも像を得られないことになる。(Shadow Zoneとよばれている。)

図4は、 $C_1 < C_2$ の場合で、ビームは広がるように入り射角がある程度以上になると全反射となり、また、ビームが重なる部分dができる。dの部分にある物体は、前者と同様に複数表示されることになる。

図5は、二重層へのファンビームが入射する場合について、第1、2媒体の半径を与え、速度比(n)を0.01から2.00まで変化させたときのShadow Zoneの角度を求めた結果を示す。但し、Shadow Zoneがない場合、ビームが重なる部分をマイナス角度とした。

又、半径比(r_2/r_1)が与えられたとき、 (c_2/c_1) を変数にShadow zoneを解析的に求めると以下の3つの部分に分割して定式化する事が出来る。当然の事ながら多重層の場合には、これの繰り返しで求まることは言うまでもない。

3. 疑似表示を同定するための実験

シミュレーションの結果から予想される映像の表示位置は左右反対で、欠陥位置までの距離は遠くに表示される。このれを同定するために同一形状で異物体が存在する被検体と、そうでないものを試作し Doppler Echo Graph(SSD 910型)で実験を行った。その結果が、写真1、2である。又、同じ条件でシミュレーションを行ない実験結果と一致した。

4. 結論

ここ数年来、超音波CTの木柱への適用を試みており、この時に問題となる辺材部、心材部の二重層への超音波ファンビームの入射時における諸問題につき検討を加える必然性が生じ、地震学上のShadow Zoneに対応する問題点と、逆の現象として現れるOverlapによるBモード表示位置での誤表示、重なり、歪み等の現象をシミュレーション及び解析的にも求めると同時に実験的にも立証する事ができた。

(i) の部分の式 $\gamma = 4 \sin^{-1} \left(\frac{r_2}{r_1} \right) - 2 \cos^{-1} \left(\frac{c_2}{c_1} \right)$

(ii) の部分の式 $\overline{\gamma} = 2 \cos^{-1} \left(\frac{c_2}{c_1} \right)$

(iii) の部分の式 $\overline{\gamma} = \sin^{-1} \left(\frac{c_1}{c_2} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{r_2 c_1}{r_1 c_2} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$

$$c = \frac{\sqrt{r_1^2 - r_2^2}}{r_1}$$

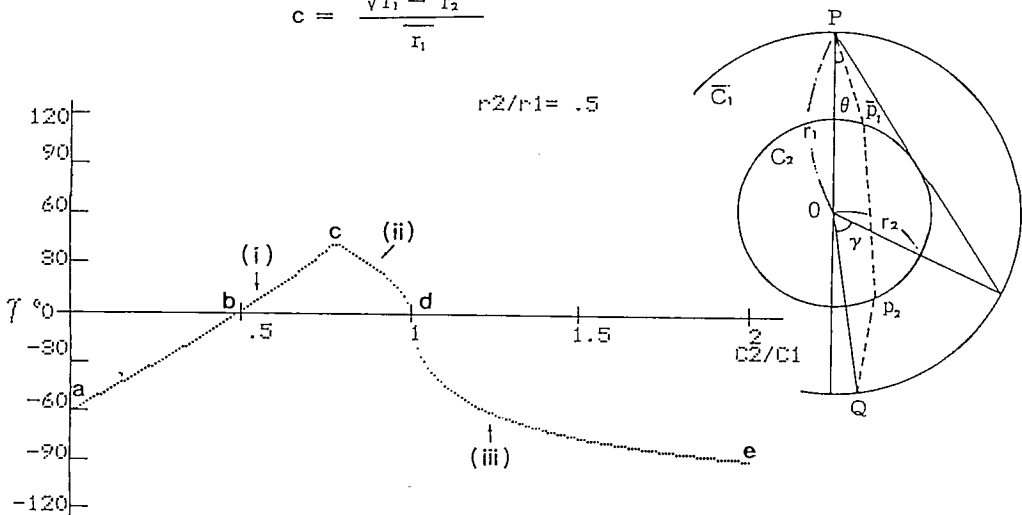


図5

(3) 超音波CTによる内部温度計測のシミュレーション

まえがき: 本文はTime of Flightによる超音波CTを使用した内部温度計測のシミュレーション結果について報告する。⁽¹⁾ すなわち、物体内部の温度を計測したいとする工学的要求を想定し、その一方法として超音波CTの応用を考えた。本文では超音波の伝搬媒体として“水”を考え、例えば温度差5°Cとする3層同心円の温度分布を超音波CTで識別できるかどうか検討した。ここに、投影データとしてはその伝搬時間を使用した。すなわち、温度によって超音波の伝搬速度が変化する現象を利用するものである。シミュレーションの結果、再生像だけによる温度計測は雑音が目立ち、温度分布の判定がむずかしい。これは本超音波CTの投影データ数の不足による原理的なものも原因している。そこで、再生像の雑音除去を目的として平滑化処理を試みた。その結果、温度差5°Cの温度分布、すなわち、超音波伝搬速度にして約10m/s(0.85%)の差の場合でも内部温度分布が十分、識別判定できる事が確かめられた。

超音波CTと画像構成の方法: (a) **超音波CT** 本文で使用する超音波CTの原理を簡単に説明する。先ず、Fig.1のように被検体を超音波探触子間に挿入して、超音波の伝搬時間を測定する。Figs.2,3にデータの収集方法を示す。すなわち、9×36個の測定データが得られる。しかし、画像構成するには、このデータ数だけでは不十分である。そのため、補間法を取るによりデータ数の増加を計る。さらに、Figs.2,3に示した測定方法によるfan-beam形式の投影データの同一方向のものを集め、parallel-beam形式の投影データ(36方向)に編

成しなおし、均一間隔のデータに作りなおす(各方向79個の投影データ)。この36方向の投影データを各方向から重ね合せて、画素を1点ずつ再構成していく。

(b) 雑音の除去

しかし、このままではCT画像に雑音が目立ち温度分布の判定がむずかしい。そこで、雑音をできるだけ少なくするための検討を行なった。

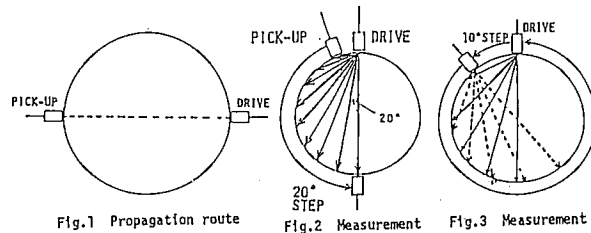


Fig.1 Propagation route

Fig.2 Measurement

Fig.3 Measurement

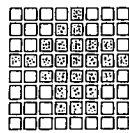


Fig.4 Model of pixels

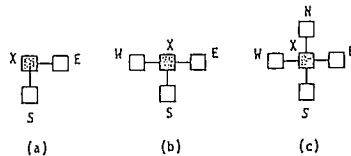
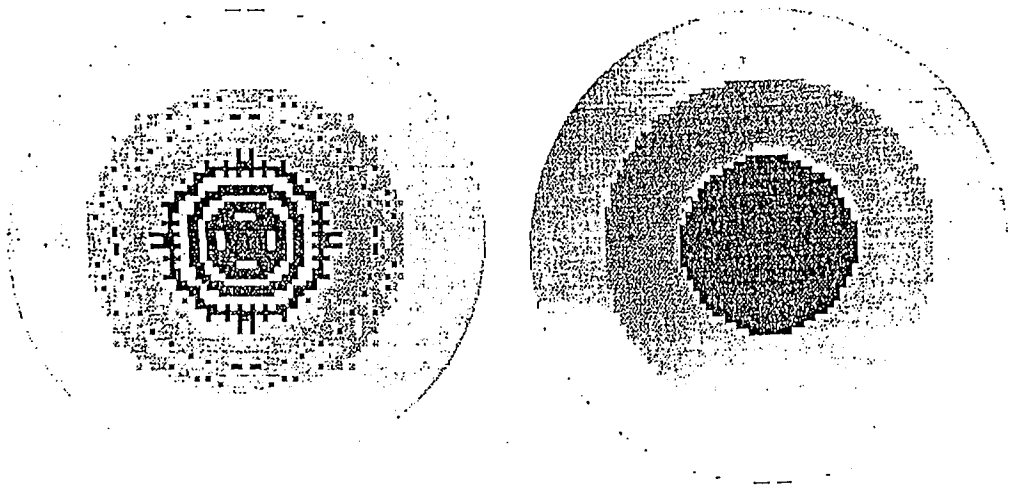
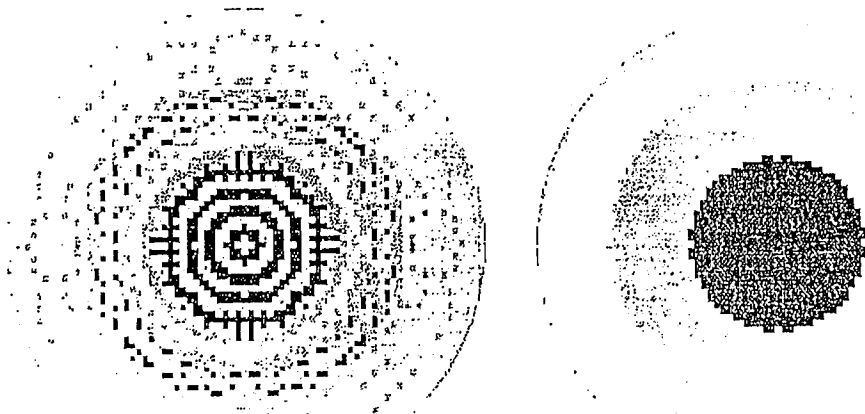


Fig.5 Arrangement of pixels



温度差15°Cの場合



温度差 5°C の場合

すなわち、雑音処理として最も基本的な手法である平滑化処理を取り入れ、画像の改善を試みた。本文での画像は円形なので、Fig.4 に示すように円線上で部分的にカットされる画素がある。その配置状態として、大きくわけるとFig.5(a),(b)のように2通り考えられる。(c)は円内部の画素の配置状態を表したものである。これらの演算処理の方法として次のような方法をとった。先ず(c)については(1)式を演算式とし、(b)については(2)式同様に(a)の場合は、(3)式の演算式を使用した。

$$X' = (N + S + E + W + 4X) / 8 \quad (1)$$

$$X' = (2S + E + W + 4X) / 8 \quad (2)$$

$$X' = (2S + 2E + 4X) / 8 \quad (3)$$

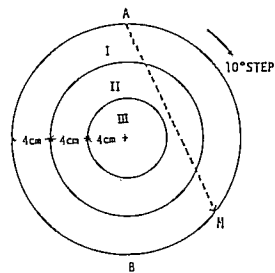


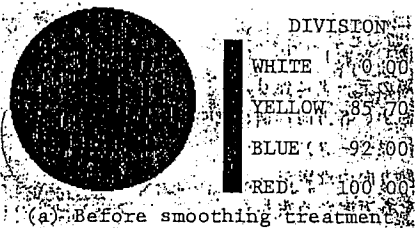
Fig.6 Model for measurement of temperature distribution

シミュレーション:

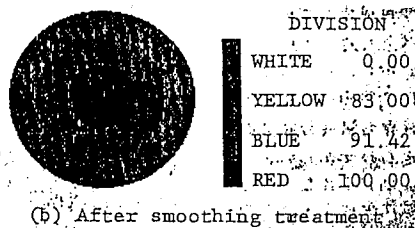
超音波伝搬媒体としてFig.6のように半径12cmの3層同心円の"水"を想定した。各層の温度を(4)式のように設定し5°Cの温度差とした。これをもとに、Fig.6のA点からB点まで10°ずつ18個のAM間の伝搬時間を計算した。その結果、この場合のCT像としてFig.7(a),(b)が得られた。

- 第I層: 37°C (1523.93m/s)
- 第II層: 42°C (1532.37m/s) (4)
- 第III層: 47°C (1539.34m/s)

むすび: 以上から、温度差が5°Cの水でも、簡単な画像処理を行うだけで内部温度分布が十分判定できることが分かった。ただし、この場合、画像の色分けのための分割が重要となる。尚、この方法による温度計測の限界であるが、3°Cの差までは十分識別できることが分かった。1°Cの温度差は識別がむずかしいようである。これらについては今後さらによく検討していきたい。実際の適用にあたっては、測定したい温度差についての色分けの条件を与えてやり、内部温度を細かに計測したり、あらく計測したりすることが出来れば理想的である。尚、温度差により超音波が直進しなくなる事も考えられるので、この補正も必要となる。



(a) Before smoothing treatment



(b) After smoothing treatment

Fig.7 CT results

(4) 木柱、木材への応用例

超音波CTによる杉丸太かくれ節の検出

Nondestructive Inspection of Hidden Knots in a Japanese Cedar Log
Using Ultrasonic Computed Tomography

1. まえがき 杉丸太など木の特性として、外面上から節の存在が確認できなくても内部にかくれ節が存在する場合がある。このかくれ節を超音波CTによって検出することを試みた。本文はその結果を報告する。

2. 超音波CTとその結果 木柱の腐朽検出⁽¹⁾⁽²⁾用に開発した、超音波の伝播時間に注目したCTを適用した⁽³⁾⁽⁴⁾すなわち、腐朽部が存在すると超音波はその部分をまわりこんで伝播するから他の部分より大きな伝播時間が観測される。本CT法ではこの特性を利用して腐朽部は直進してきた超音波を遅延させる異物と考え、CT再構成像を得る。かくれ節が存在する場合も、超音波伝播時間特性は腐朽部と同様となり、超音波は遅れるから、本CTが

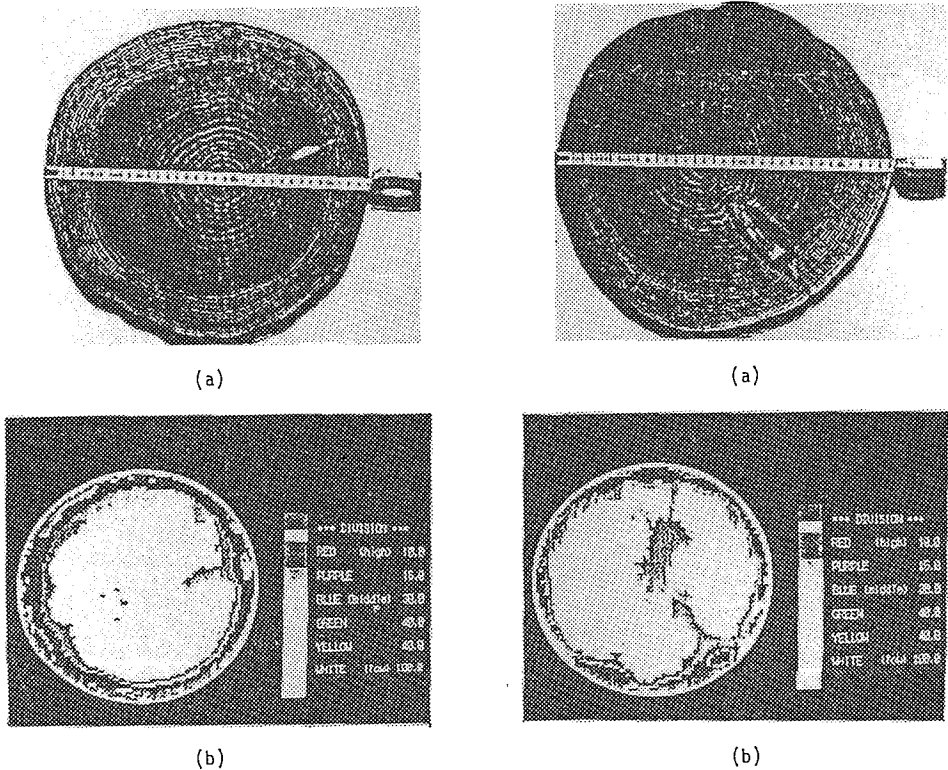


Fig.1 Japanese cedar log with a hidden knot (a) and its CT result (b)

Fig.2 Japanese cedar log with two hidden knots (a) and its CT result (b)

適用できると考えた。Figs.1,2の(a)は検出を目的とした杉丸太試料(直径34~35cm)の断面写真、同図(b)はそれぞれの場合のCT再構成図である。また、Figs.3,4はこの試料の超音波伝播時間特性(周波数78kHz)で各直径部での測定結果を示す。かくれ節の存在している部分については伝播時間が大きくなるから、およその位置は推察されるが、腐朽した木柱のように超音波伝播時間に顕著な差がみられない。このため、CT再構成像での色わけが重要となり、ここではFigs.1,2の(b)に示すような色わけとした。すなわち、このようにする

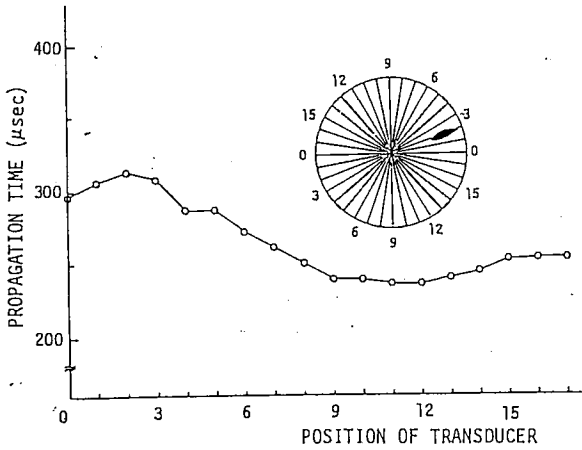


Fig.3 Measured propagation time of ultrasound in a cedar log

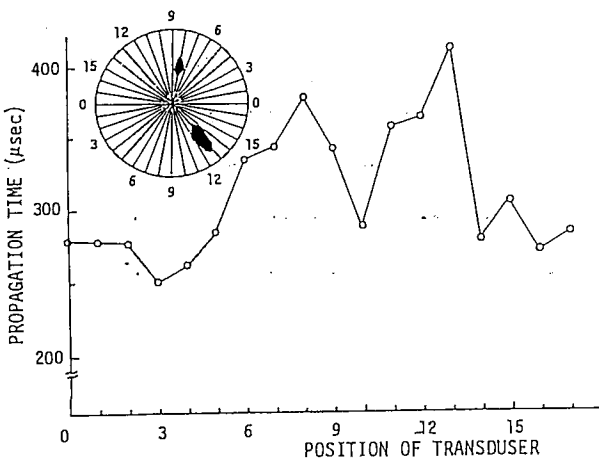


Fig.4 Measured propagation time of ultrasound in a cedar log

とかくれ節が1つ、あるいは2つのいずれの場合も、本CTによって十分検出でき、その結果は、実際の節と比較的よく対応していることが分った。尚、本CTでは杉丸太は完全な円であるとして計算処理するので、周辺の形状の影響も含まれる。

Figs.1,2(b)の再構成図では周辺に節部よりも超音波伝播時間の大きい部分が表示されている。これは、辺材部が心材部よりも超音波伝播速度が遅いことによるもので、また本試料周辺には水分が多く含まれさらに伝播速度が低下した影響の加わった事も原因している。従来、かくれ節の検出は専門家の勘によって行なわれていたようであるが、本CTを適用すると比較的容易に行なわれ、結果も十分目的を達することが確認できた。

(謝辞) 杉丸太の試料を提供していただいた秋田県工業技術センターの佐々木卓男専門研究員、ならびに佐藤和人技師に感謝申し上げます。

(文献)

- (1) 有田他: 非破壊検査, Vol.34, No.9, (昭80-09)
- (2) 有田他: 木材工業, Vol.41-8, No.473, (1986-08)
- (3) Y.Tomikawa, et al: IEEE Vol.UFFC-33, No.4, (1986-07)
- (4) 富川他: NDI 第1回産業における画像センシング技術シンポジウム, No.11-3, (1986-06)

4. 超音波Motorの特徴

超音波モータ

1 概要

超音波モータは超音波¹⁾振動を駆動力とするモータである。電気入力によって振動体に微小な弾性往復振動を励振し、この往復運動を移動体の直線運動(一方向運動)に変換するものである。

電流と磁界の相互作用によって駆動力を得る従来のモータ²⁾に対し、超音波振動する振動体と移動体の間に働く摩擦力を、回転力として取り出すもので全く異なる原理によって動作する。これまでの超音波モータは変換効率が低い(25%程度)欠点を持っていたが、我々は超音波振動モードの検討と摩擦材料の開発を行うことによって高い変換効率(45%)を実現し、より実用性の高い超音波モータを開発した。

この超音波モータは ①構造が単純 ②小型・軽量 ③速い応答性 ④低速回転・高トルクが可能であるため、カメラのレンズ駆動・自動車用電装品への応用や 各種OA機器・FA機器への利用などが考えられる。

2 超音波モータの動作原理

現在、超音波モータには定在波を用いる方式³⁾と進行波を用いる方式⁴⁾とが知られている。

定在波方式では、振動片によって周期的に移動体を実いて動かすのに対し、進行波方式では連続的に移動体に対して駆動力が働く利点があり、我々はこの進行波方式を採用した。

ここでは、撓み振動を用いた場合についての進行波方式の動作原理について述べる。

(1) 動作原理

厚さ T 幅 W 長さ L 密度 ρ ヤング率 Y の矩形板は両端($X=0$, $X=L$)における変位が等しい場合

$$T \ll L, W \ll L$$

(1)

として、厚さT方向の変位 ξ_1 は

$$\xi_1 = \xi_0 \sin(nX) \cdot \sin(\omega_0 t) \quad (2)$$

である。 $n^4 = 12\omega_0^2 \rho / (Y T^2) \quad (3)$

$$nL = 2\pi S \quad S = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

$$\lambda = L / S$$

$$\omega_0 = (2\pi / \lambda)^2 T (Y / 12\rho)^{1/2} \quad (5)$$

λ は波長である。同様に、位置的にかつ時間的に $\pi/2$ の位相を変えると

$$\xi_2 = \xi_0 \cos(nX) \cdot \cos(\omega_0 t) \quad (6)$$

この二つの振動が加え合わされると 撓み振動の進行波が得られる。

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = \xi_0 \cos(nX - \omega_0 t) \quad (7)$$

位相速度 v は $v = \omega_0 / n = (2\pi / \lambda) T (Y / 12\rho)^{1/2} \quad (8)$

この振動は中性面に対するものであり、厚さ T の表面においては(中性面から $T/2$ 離れた位置では)

$$\begin{aligned} \zeta &= \xi_0 n (T/2) \sin(nX - \omega_0 t) \\ &= \pi \xi_0 (T/\lambda) \sin(nX - \omega_0 t) \end{aligned} \quad (9)$$

で示される横方向(長さL方向)の変位が生じる。

式(7)と式(9)は表面上の質点が、縦方向と横方向の比を $1 : \pi T/\lambda$ とする楕円運動をしていることを示す。縦方向変位 ξ が最大の場合 ($nX = \omega_0 t$)、横方向変位 ζ は最小である。

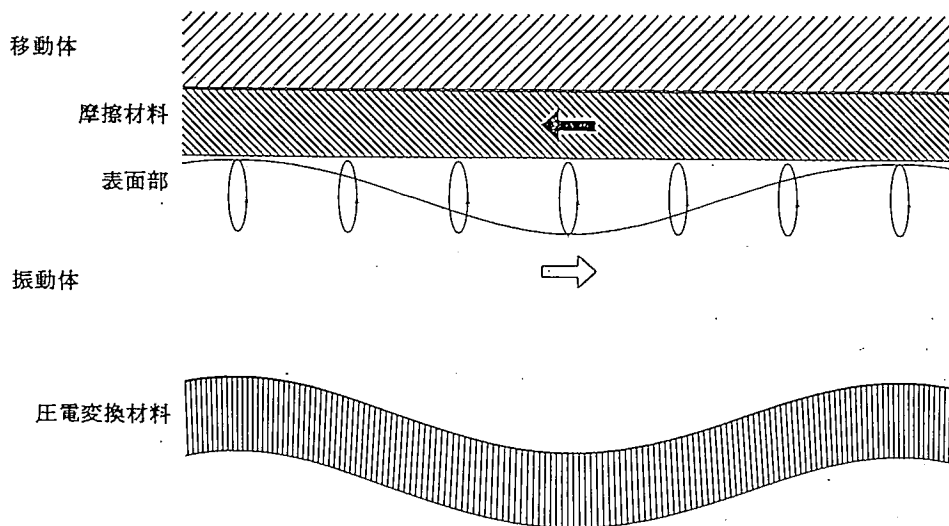
横方向変位 ζ の速度Uも最大となり、

$$\begin{aligned} U &= d\zeta/dt = -\pi\omega_0 \xi_0 (T/\lambda) \cos(nX - \omega_0 t) \\ U_{\max} &= -\pi\omega_0 \xi_0 T/\lambda \end{aligned} \quad (10)$$

進行波であるから縦方向変位 ξ の最大点は位相速度 v で移行するが、その頂点に接触する物体は上式で一定方向に移動する。第1図の動作説明図で示すように、撓み振動の波長に比べて長い平板を振動体の上に置くと、平板は波頭(縦方向変位 ξ の最大点)にのみ接触して、

振動の位相速度 v に対し、方向が反対の速度 U_{max} で動かされる。これが超音波モータの動作原理である。

なお両者の比は、
$$U_{max}/v = -\pi n \xi_0 T / \lambda = -2\pi^2 \xi_0 T / \lambda^2 \quad (11)$$



第1図 超音波モータ動作説明図

(2) 圧電変換材料

電気入力によって 振動体に撓み振動を励振するための 電気-機械変換材料として圧電セラミック材料を用いている。使用したPCM[®]セラミック材料の組成は次のとおりであり、材料定数を第1表に示す。

組 成	PCM-5	$Pb(W_{1/3}Nb_{2/3})TiZrO_3$ ⁵⁾
	PCM-80	$Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})(Sn_{1/3}Nb_{2/3})TiZrO_3 + MnO_2$ ⁶⁾
	PCM-88	$PbSr(Zn_{1/3}Nb_{2/3})(Sn_{1/3}Nb_{2/3})TiZrO_3 + MnO_2$ ^{7), 8)}

これらの圧電セラミック薄板を円環状あるいは円板状に加工し、式(2)および式(6)で示す振動を励振できるように分極処理をおこない電極を設ける。この圧電セラミック素子を鉄などで作られた振動体材料に接着し、振動体を構成する。

圧電変換材料に要求される特性は、①変換能率が高く、②大振幅動作時に特性劣化が少なく、③内部損失の小さいことである。

第1表 PCM® セラミック材料定数表

		PCM-5	PCM-80	PCM-88
比誘電率	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1950	1200	1950
誘電正接	$\tan\delta$ %	1.5	0.5	0.3
周波数定数	N_p Hz-m	1970	2250	2250
	N_t Hz-m	1980	2040	2090
結合係数	K_p	0.65	0.58	0.56
	K_{31}	0.38	0.35	0.32
	K_{33}	0.71	0.69	0.69
ヤング率	Y_{E1} N/m	6.3×10^{10}	8.5×10^{10}	8.0×10^{10}
	Y_{E3} N/m	5.7×10^{10}	7.0×10^{10}	6.7×10^{10}
圧電定数	d_{31} m/V	-186×10^{-12}	-122×10^{-12}	-150×10^{-12}
	d_{33} m/V	423×10^{-12}	273×10^{-12}	351×10^{-12}
圧電定数	g_{31} Vm/N	-12.3×10^{-3}	-11.3×10^{-3}	-8.7×10^{-3}
	g_{33} Vm/N	28.2×10^{-3}	25.5×10^{-3}	20.3×10^{-3}
ポアソン比	ν	0.34	0.29	0.34
機械的	Q Q_m	70	2000	610
キュリー温度	T_c °C	325	283	266
密度	ρ g/cm ³	7.65	7.80	7.67
温度係数	Fr -20~20°C	+150	+180	+90
	Fr 20~60°C	+200	-250	+90
	C -20~20°C	+3000	+3500	+2700
	C 20~60°C	+3000	+3300	+2700

(3) 摩擦材料

摩擦材料は振動体と移動体との接触摩擦面に接着固定され、振動体と移動体との間の摩擦力を効率よく移動体に伝達するためのものである。

芳香族ポリアミド繊維をポリイミドなどの樹脂で固めたシート状複合プラスチックを用いて構成している。

この摩擦材料は、①摩擦力が大きい、②摩耗が少なく接触摩擦力の経時変化が小さい、③摩擦雑音が発生しない、などの特徴がある。

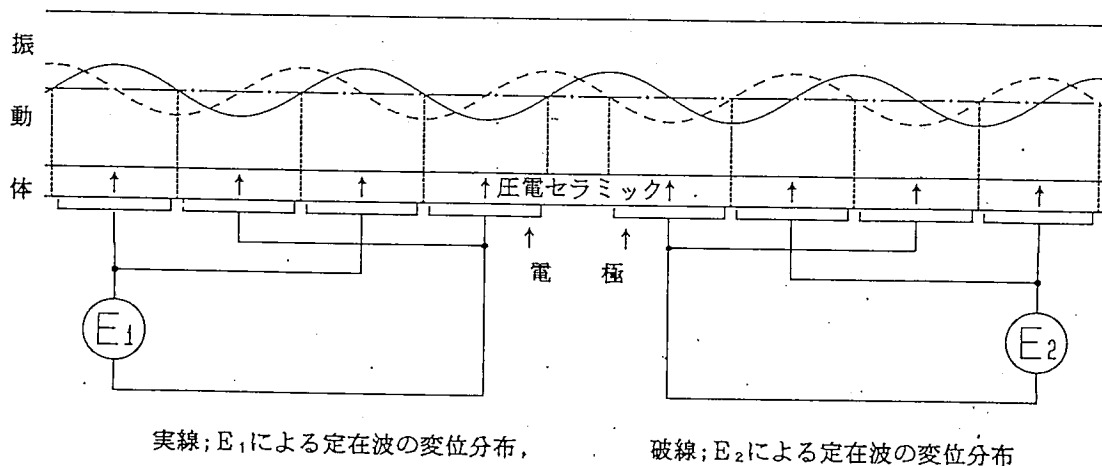
(4) 駆動方式

第2図に示す振動体において、圧電セラミックは厚み方向に均一に分極されている。この圧電セラミックに撓み振動の半波長ピッチの電極を複数個設け、この電極群に共振周波数の電気入力を加えると撓み振動の定在波が励振される。この電極群は振動体全面に設ける必要は無く、一部にあればよい。同様にもう一組の電極群を設け、この電極群によって励振される定在波の位相差が $\pi/2$ となるようにする。

さらに、これらの電極群に印加する電気入力の位相差を $\pi/2$ とすると、式(2)と式(6)に対応する振動が励振され、この結果進行波が励振される。

このため、駆動回路は共振周波数を自動追尾する機能と、 $\pi/2$ の位相差を持つ2組の電力増幅機能を必要とする。(下図の E_1 と E_2 が $\pi/2$ の位相差を持つことによって進行波が励振される。)

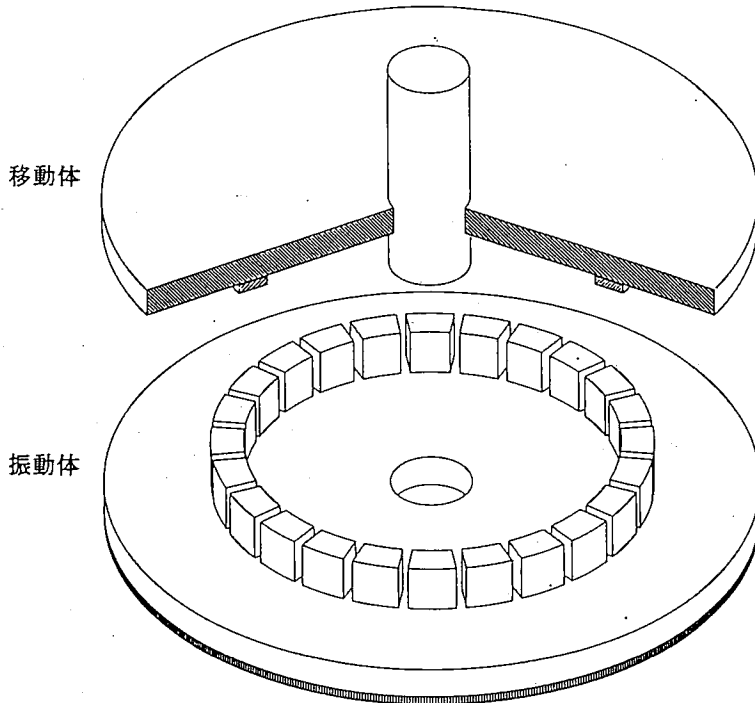
なお現実には圧電セラミックの分極方向を選ぶことによって、それぞれの電極群は一つの電極となっている。



第2図 駆動方式

3 円板型超音波モータ

円板型超音波モータの構造は、第3図に示すように、底面に圧電セラミック素子を接着した円板振動体(金属)と、この振動体に加圧接触された円板移動体とで構成されている。



第3図 円板型超音波モータ

円板型超音波モータは節円を持つ円板の振動を利用している。第4図に利用した円板の変位分布を示す。半径方向の変位分布は極大値と極小値(節)を有しており、この極大となる位置に機械出力を取り出すための凸部をリング状に設けている。節円部は支持のために用いる。

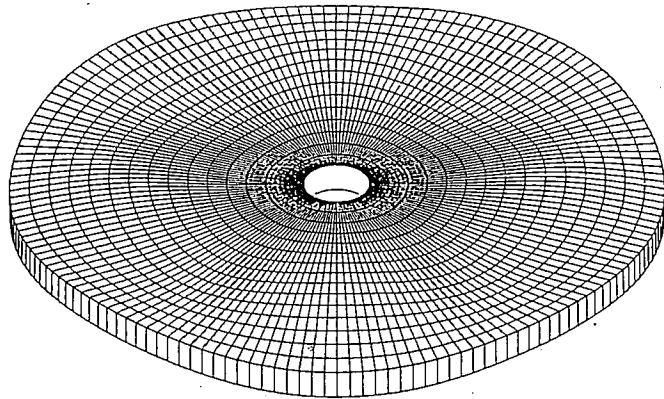
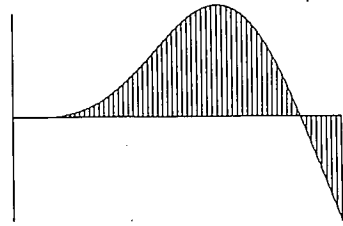
円周方向の変位分布は正弦的になっている。第4図の場合は円周方向に4つの波が在る。前に述べたように円板の撓み振動の進行波を励振するために、円周方向に $\pi/2$ 位相差を持つ二つの定在波が励振できる電極構造を持つ圧電セラミック円板が振動体の裏面に接着されている。

振動体のリング状凸部の上面は円周方向に進行波が生じている。この進行波に対する機械的なかたさの増加を避けるためにリング状凸部に切り欠き部を設けている。

このリング状凸部に対向する位置に摩擦材料を取り付けられた移動体が置かれ、回転する。

出力取り出し位置 ↓ 節円位置 ↓

半径方向の変位分布



円板型超音波モータの特

第4図 円板型超音波モータの変位分布

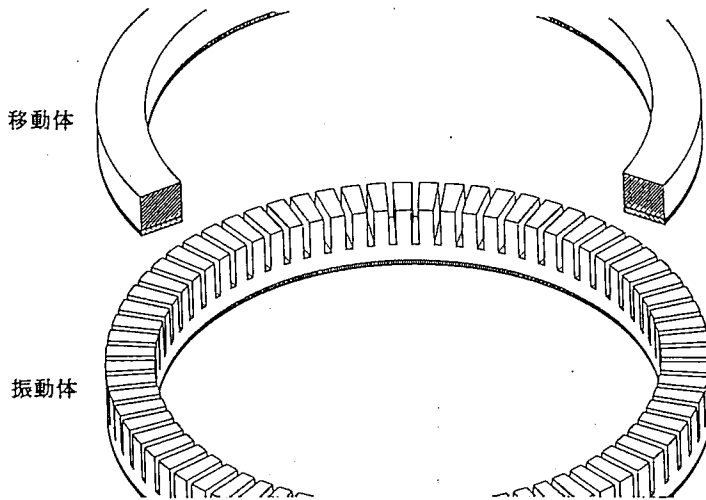
徴は①節円を持つため支持が容易で、②振動系の質量を大きくできるため負荷変動の影響を受けにくい、③接触圧力(振動体-移動体間)の印加が容易なことである。

第2表、第7図にに試作超音波モータの特性例を示す。

4 円環型超音波モータ

円環型超音波モータの構造は、第5図に示すように、リング状振動体(金属)の底面に、圧電セラミック素子を接着し、振動体の上面にリング状移動体を加圧接触した構成である。

このリング状振動体に撓み振動が励振されるように圧電素子に電気入力を印加している。



第5図 円環型超音波モータ

円環型超音波モータは、動作原理の説明に用いた細い棒の両端を継ぎ合わせた構造を持つ。

第6図に利用した円環の変位分布を示す。半径方向の変位分布は内周部より外周部が大きく、この両者の変位差は幅が小さいほど少なくなる。

円周方向の変位分布は正弦的になっている。第6図の場合は円周方向に9波あり、円環の撓み振動の進行波を励振するために、円周方向に $\pi/2$ 位相差を持つ二つの定在波が励振できる電

極構造を持つ圧電セラミッ

ク円環が振動体の裏面に接

着されている。振動体の上

面は円周方向に進行波が生

じている。この進行波に対

する機械的なかたさの増加

を避け、振幅の拡大を図る

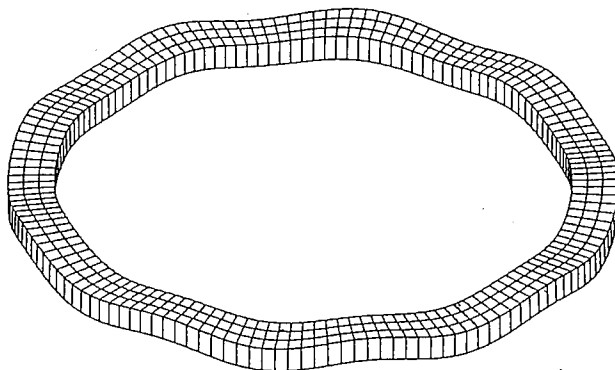
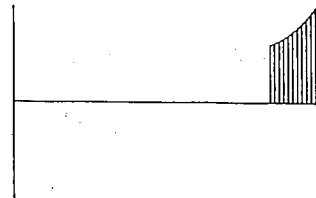
ために切り欠き部を設けて

いる。円環状振動体に対向

する位置に摩擦材料を取り

付けた移動体が置かれ、回転する。

半径方向の変位分布



第6図 円環型超音波モータの変位分布

円環型超音波モータの特徴は①中空構造であり、②軽量化が容易なことである。

第2表、第8図に試作超音波モータの特性例を示す。

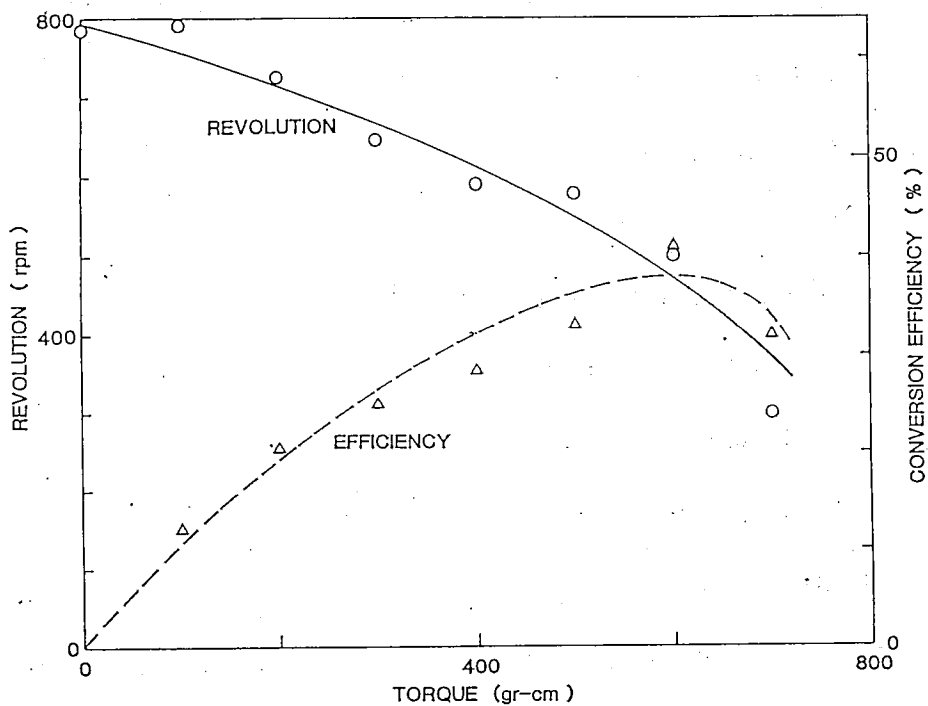
第2表 試作超音波モータの性能

		円板型モータ	円環型モータ
形 状	外 径	40 mm	50 mm
	内 径	-	42 mm
	高 さ	10 mm	10 mm
	重 さ	60 g	40 g
入 力	周 波 数	72 kHz	28 kHz
	電 力	3.5 W	3.5 W
出 力	無負荷回転数	600 rpm	500 rpm
	起動トルク	1.0 Kg·cm	1.2 Kg·cm
	変換効率	45 %	45 %

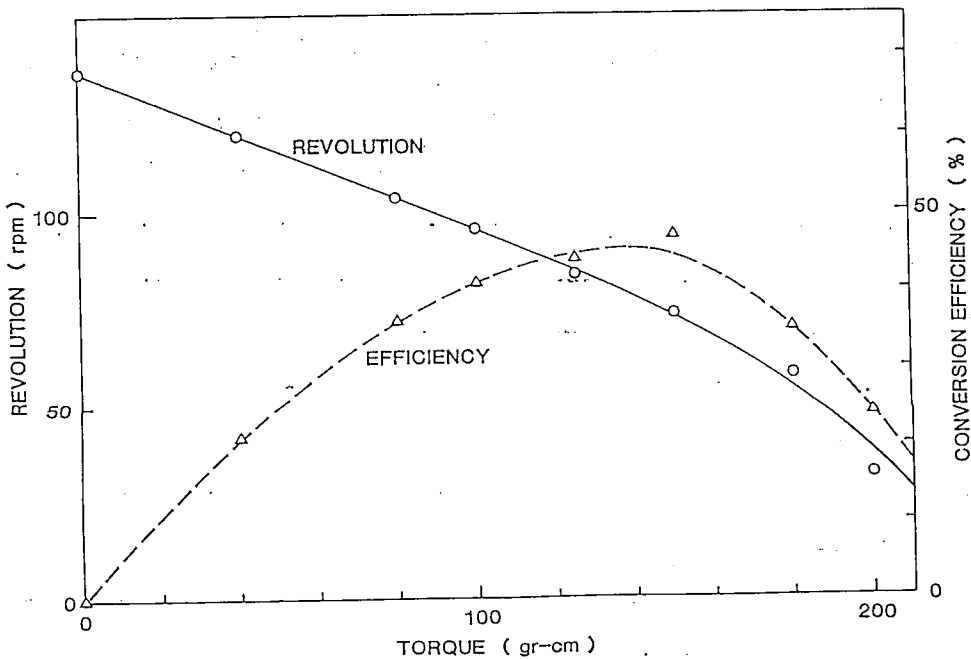
5 超音波モータの展望

以上述べたように、摩擦を駆動力とする超音波モータは

- (1) 低速・高トルクが得やすく
- (2) 保持トルクも大きくできる
- (3) この結果、応答性に優れる。
- (4) 小型軽量化が可能であり
- (5) 構造が単純であるため
- (6) 低コスト化が期待できる。
- (7) 形状の自由度が大きい
- (8) 装置の最適設計が容易である。



第7図 円板型超音波モータの特性例



第8図 円環型超音波モータの特性例

などの特徴を有している。しかしながら、僅かな変位(～10 μ m)を有効に利用するためには

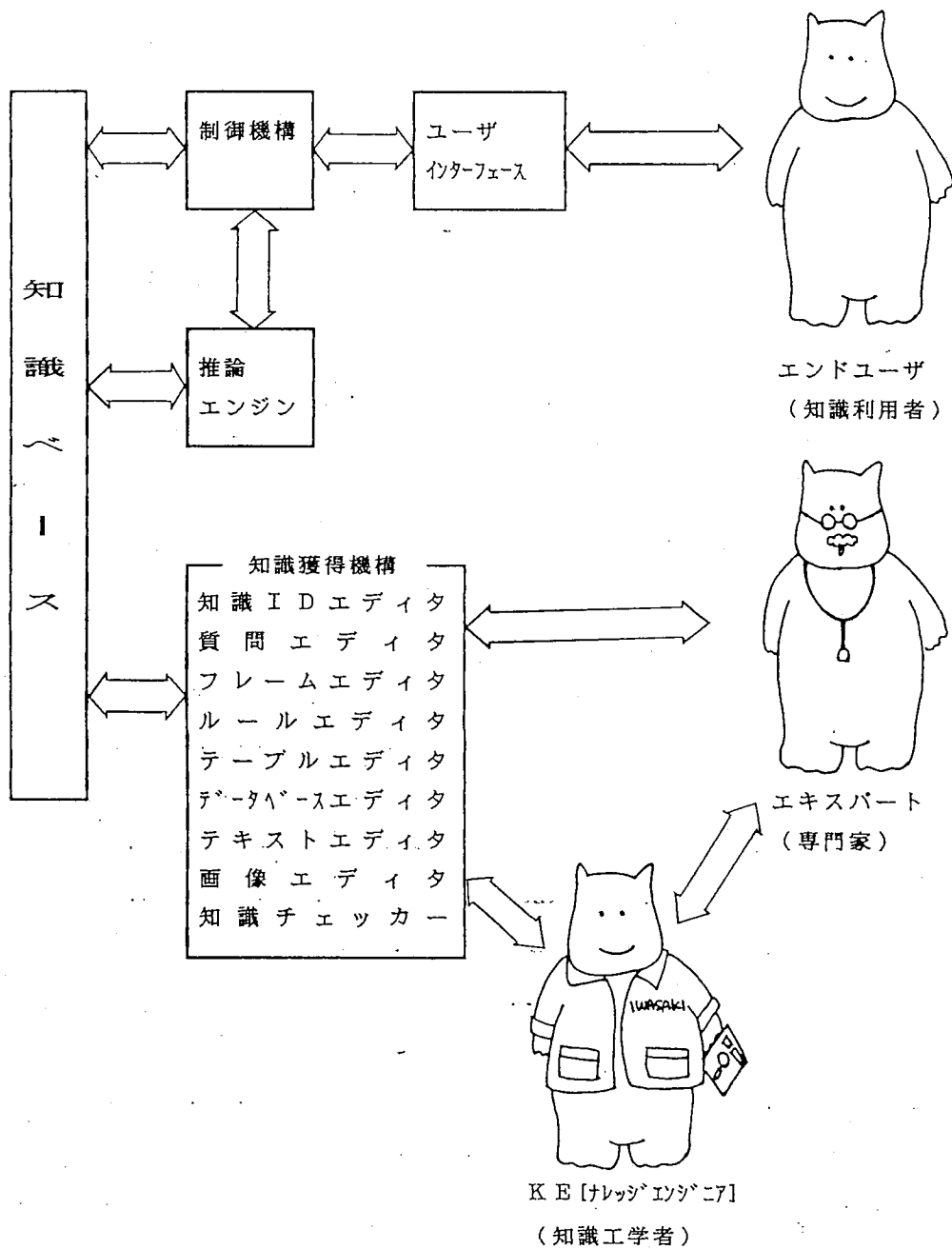
- (1) 摩擦面における高精度加工法,
- (2) 可聴音を出さない構造設計,
- (3) 支持方法の改善や
- (4) 自動追尾回路方式の検討が必要であり、

- さらに
- (5) より摩耗の少ない摩擦材料,
 - (6) より機械的に強い圧電セラミック材料の検討によって
 - (7) より高い変換効率

を実現しなければならない。

超音波モータは、摩擦材料・振動材料・変換材料などの材料検討に加え、振動解析・構造設計や駆動回路の最適化によって、小出力の分野で従来のモータと異なるアクチエータが期待できる。これに伴い機器・装置においても新しい構成の設計が可能となるであろう。

5. マイクロコンピュータによる超音波探傷エキスパートシステム



図, 1 TELLにおけるエキスパートシステムの構成

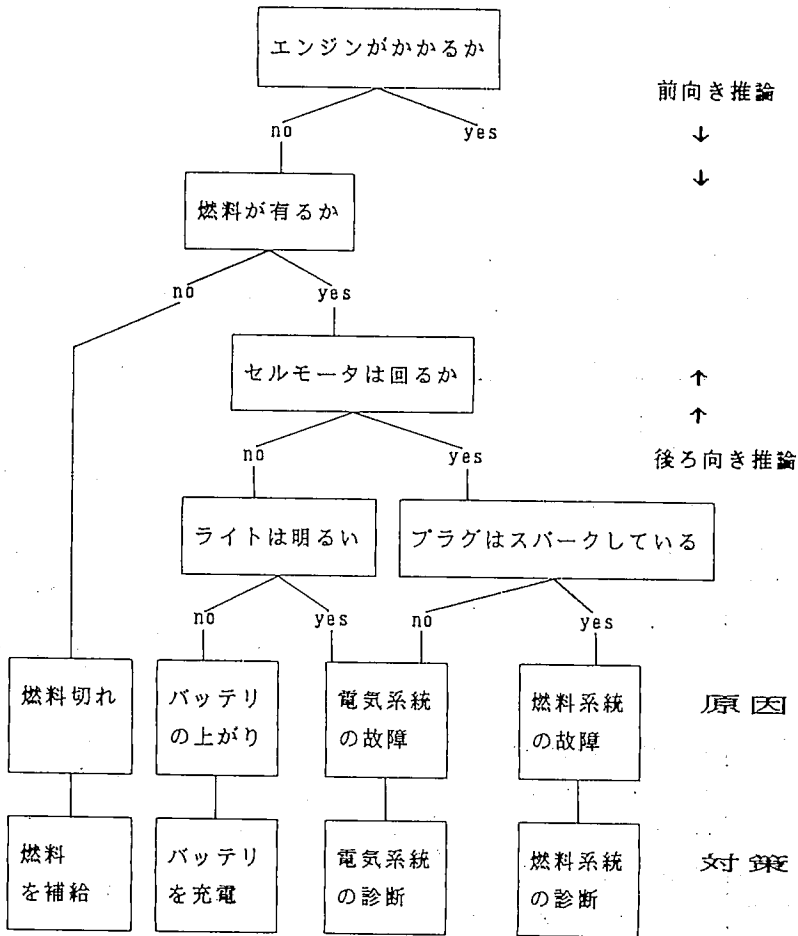


図. 2 故障診断のモデル

