論 説

UDC 620. 179. 16

超音波探傷の最近の動向

山 本 英 爾*

Recent Trends of Ultrasonic Flaw Detection

Eiji Yamamoto

Synopsis

Recent ultrasonic flaw detection is described hereunder about the foundation, equipment, application of automatic operation mainly for iron and steelmaking, and trend of standardization.

As to ultrasonic flaw detection, like other non-destructive testing, the equipment for automatic operation has been rapidly advanced and this is necessary for reducing inspectors and also necessary for obtaining complete results without personal errors.

Recently, much application using ultrasonic flaw detectors the more review of fundamental research has being done to be able to decide flaw shapes. And, with improvement of equipment capability, the standardization to decide the test results is now under progress.

1. 緒 言

製品の品質向上が要求されるとともに、これに対する非破壊試験が広くとりあげられ、この一環としての内部欠陥検知の超音波探傷もあらゆる方面に広く活用されてきている。また超音波探傷の製鉄、製鋼への応用としては、検査試験の省力化のための自動探傷が実用化されつつある。いっぽう、超音波探傷装置の性能も一段と向上し、その規格化も進められている。これに反し、超音波探傷の基礎理論の展開はあまり進展していないようである。特に解析がむづかしい試験材中の欠陥から反射された超音波パルス（エコー）の挙動についてはほとんど説明されていない。

これら最近の超音波探傷の進歩の方向と、その問題

点を中心に説明する。

2. 超音波探傷の基礎の進展

欠陥から反射された超音波パルスのエコー高さから内部の欠陥の大きさを推定するという現探傷方式は、1942年、当時ミシガン大教授の Firestone がパルス方式超音波探傷器を発明し、これの非破壊検査への応用を提唱してから現在までほとんど変わっていない。しかしパルスである欠陥エコーの高さ（大きさ、エネルギーでなく音圧に比例した量）だけで欠陥の大きさ、形状を推定することは、情報量としては不十分である。

これらの問題に対し、東大尾上、新日鉄磯野らは主として板波について情報量の多い周波数領域表示により¹⁾、欠陥エコーなどの解析をしている。Baryshev は反射されたエコーの周波数スペクトラムを解析し、探傷器の周波数帯域幅はどの位にすべきかを解析して

昭和45年5月6日付

* ㈱東京計器製造所

いる²⁾。山本は探傷装置に起因する欠陥エコーの定量性を失わせる諸原因を、時間と周波数の両域表示により検討している³⁾。Fig. 1 に時間と周波数域表示例をしめす。米国でも Gericke⁴⁾, Serabian⁵⁾, Mesina⁶⁾ らが、試験材の減衰、探触子の検討、欠陥エコーの検討などを周波数領域表示で研究している。欠陥エコー

a) Indication of time (Indication on detector).

b) Indication of frequency band.

Carrier frequency : 2.25 MHz
Transducer : Crystal probe
Standard test block : STB III V15-5.6
Artificial defects

Fig. 1. Indication of time area of defect echo and indication of frequency band.

が欠陥からのパルス応答とするならば時間、周波数の両域表示が望ましいが、探傷装置が大型化する。これに対し Krautkrämer は受信帯域幅を可変にする方式により、欠陥の形状を推定する装置を提案している⁷⁾。これはクラックなどよりの反射エコーは鋭いため周波数スペクトラムは分散しており、介在物などよ

りのエコーは時間域表示で鈍っており、かつ波数が多いから周波数スペクトラムは分散していない。これを受信増幅器の帯域幅を広いものから狭いものに切換えると、前者はエコー高さが減少するが後者は減少しないということを利用している。今後この方面の研究はさらに進んで行くものと思う。

いっばう群馬大春海⁸⁾, 阪大仙田, 広瀬⁹⁾ はモデル欠陥によるエコーの問題を解析, 実験している。超音波探傷で取扱う金属内の欠陥からのエコーは位相が変わるだけでなく、縦波から横波へ、横波から縦波へと波動変換するから、取扱いは複雑となる。これらは欠陥形状推定のデータ・シートとして重要であろう。

従来の超音波探傷理論は探触子の負荷として水など液体を考えて組み立てられてきた。しかし金属探傷の場合、特に反射される欠陥エコーを取扱う場合は厳密には 6 次テンソル量として考えなければならない。Baryshev は 2 つの欠陥位置の差異による欠陥エコー波形の差をテンソル量で解析し、電子計算機により計算し、理論値と実験値との比較を行なっているが¹⁰⁾、この方面の研究は日本ではあまり行なわれていない。これによると、2 つの欠陥位置が波長に正規化された距離によりエコー高さが異なることをしめしている。

3. 装置の改良

日本非破壊検査協会 (NDI) では超音波探傷装置の性能向上を旨とし、NDI 規格 (NDIS) として規格化し、その内容を発表している。また JIS Z-2344 超音波探傷法の見直し作業も原案が作成でき近く発表されようとしている¹¹⁾。これに装置の規格化が相当厳しく規定してある。Table 1 はその内容の概要である。

超音波探傷器の性能向上としては、電子部品の一般技術レベル向上による所が大きい。従来の真空管、サイクロンをトランジスタ、IC 化することにより装置は小型化し、その分だけ多性能が付加され、また装置の信頼性を向上させることができる。

いっばう探傷器としては、送信パルス発生部、受信増幅部の検討が、欠陥検知の定量性の面からと、分解能の面から検討された。例えば欠陥検知の分解能を高めるためには短い送信パルスの生成と、機械的ダンペン

Table 1. Standard of ultrasonic flaw detector in Japan

Item \ Standard	ND I S	JIS revised proposal
Linearity of amplifier	Grade 1, 2, 3 and out of grade	Grade 1, 2, 3 and out of grade, (up to 100% graticule is to be 1st grade.)
Resolving power	Grade A, B, C	Grade A, B, C
Presentation	—	dB or % not mm,
Linearity of time-base	Regulation for measuring method	Regulation for measuring method, (within $\pm 2\%$)
Measure of probe (Transducer)	—	Regulation for round number
Frequency	—	0.4, (0.5), 1, 2, (2.25), (3), (4), 5, (6), 10, (15). MHz

グのよい探触子と広帯域増幅器を使用すればよいが、これにより Botsco¹²⁾ は SPIDER と呼称した装置を製作し、0.5mmのステンレス鋼板の多重底面エコーを分離でき、また1/2インチのアルミニウム板にあげた径3/8インチ、深さ0.04インチの孔を検知できたとしている。しかしパルス幅が狭くなると周波数スペクトラムの分数が著しく、欠陥エコーの定量性は低下する。Serabian は超音波減衰の大きい試験材を超音波探傷するとき、欠陥エコーの高い周波数成分は減少することを実験で確かめている¹³⁾。これは短いパルスで超音波探傷するとき試験材中に入射した超音波は周波数分散し、この中で高い周波数成分が試験材の結晶構造などにより主として散乱減衰に基づきカットされる。このため、同一欠陥でもパルスの幅により、欠陥エコー高さが異なることとなる。Gerickel¹⁴⁾はこれに関連し、2周波数で同一欠陥のエコー高さを求めこれを Krautkrämer の AVG ダイアグラムを使い、波長で正規化し、実測値との差異を出している。欠陥の大きさを推定する方法として、多周波数によることも、今後さらに検討が行なわれるものと思う。

自動探傷装置では高い信頼性を持つ探傷器が必要である。このためには、探傷器の大部分の故障は真空管、またはサイラトロンにより起こるものとされている。よって真空管、サイラトロンを使用しないトランジスタ、IC化された装置が自動探傷には適している。しかし半導体化された装置は温度による特性の変化が著しいから、自動探傷装置としては空調された場

所にとりつけられることが多い。また自動探傷装置では多チャンネルの探触子を使い、探傷することが多い。このとき、チャンネル数が多くなると受信増幅器などを共用し、各探触子と電子切換スイッチ、または機械的切換スイッチにより切換える方式も使われている¹⁵⁾。この切換スイッチにより装置は簡単になるが、切換が正しく行なわれているかどうかの確認と、切換スイッチ（一般には電子スイッチ）の信頼性を高めておく必要がある。切換スイッチを使わないで数チャンネルから数10チャンネルを独立したユニットで組み立てる場合も多い。このときは多少探傷装置は複雑となるが、故障のときなど、交換が容易なため保守のとき便利である。

4. 自動探傷の製鉄、製鋼への応用

4.1 厚 鋼 板

従来は手探傷による交点探傷方式が行なわれていた。交点探傷とはマス目に線を引き、その交点を探傷する方式で、試験材により例えば300mm毎、100mm毎のマス目を作っていた。この探傷に対する探傷器の感度、使う探触子などはメーカー、ユーザーの取り決めがあり、規格化されていた。しかし厚鋼板の生産量が多くなると探傷には膨大な人手を要し、この自動化が検討されてきた。現在実用化されている全自動探傷方式は、Krautkrämer が開発した水ジェット方式である^{16), 17), 18)}。これは送受探触子より出る水ジェットの中に超音波を伝ばさせ、欠陥があると超音波の透

過量が減少し、これにより欠陥を検知する方式である。利点は、水ジェットの間を鋼板が通り抜ける間に探傷ができるから、直接探傷子が試験材に接触しないので曲っている厚板など、不整な形状のものも探傷できると同時に、それにより探触子や保持機構が破損することを防ぐ。全自動探傷方式では、このような考え方が最も大切なことである。欠点は大量の水を使用することと、厚鋼板の温度が高いと大量の水蒸気が発生することである。またこのシステムの全自動化には、付属装置、保護装置などが必要となり、全装置は膨大となる。Fig. 2 に実例をしめす。

Fig. 2. Continuous detecting equipment of plate.

厚鋼板の探傷には半自動方式がある。これは探触子を多数使用し、人力または機械駆動によって厚板を動かし探傷するもので、欠陥があるとブザー、ペンキマークまたはプリンタを作動させる。探触子はベスレームスチールでは薄膜の水浸探傷方式で、日本では分割型探触子の例が多い^{19) 20)}。何れも反射式による探傷方式である。この方法の利点は探傷時間が人力によるよりも大幅に短縮できること、探触子と試験材の結合条件さえ良ければ、手動探傷よりも精度が高められることなので、全自動方式に比較し欠点は、オフライン探傷であること、よって、厚板を探傷用に送るラインが必要かまたは厚板を、探傷場所まで移動させる必要のあることなどである。また2分割探傷方式においては、現在感度基準の試験片はすべて1探触子方式のものであるため、国内外ともに感度基準の合わせ方が規定されていないので、著しく不便であるが、2分割探触子の探傷は広く行なわれているので、近くこの問題も解決されるであろう。

高温の状態で圧力を加えると、接触媒質がなくとも超音波は試験材に入り、探傷が可能となることについて Atkins²¹⁾ は実験したが、この方式の厚鋼板の超音波探傷応用について魚住ら²²⁾ が精力的に研究、開発を行なっている。

4.2 薄鋼板

薄鋼板は板波によって連続自動探傷が行なわれている。

薄板の片側にタイヤ型回転探触子を置くと板波は1 m程度伝播する。よって1.8mの幅の薄板では2個のタイヤ探触子をとつければよい。厚鋼板と比較し1～2個の探触子でほとんど全域の薄板を探傷できるため装置も簡単となり、自動探傷を行ない易い。また、薄板は連続的に高速に製造されるため、手探傷はほとんど不可能であり、早くから自動探傷が行なわれてきた。

Fig. 3, 4 に装備場所と方式を略示する。

薄鋼板の板波による探傷は井元、尾上、磯野らが理論の展開と応用研究を行ない、世界に類のない板波標準試験片ND I-P 1を規格化した。板波は熱延、冷延の鋼板に使用されるが、従来は3 mm以下が最も効果的とされていた。これに対し Ermolov²³⁾ は8 mm程度までの(中)厚板の熱延板について、板波探傷の可能性を提唱し、土門²⁴⁾ らは8 mmまでの熱延板をタイヤ探触子で板波探傷し、層状欠陥を検知している。土門らはこれを電縫管用コイルの板幅の中間部の自動探傷に実用している。

Fig. 3. Automatic detecting system by wheel type-probe for sheet.

Fig. 4 Layout of automatic equipment for detecting defects of sheet.

(U.S.T. Position of tire probe equipment)

4. 3 鋼管、管

鋼管の自動探傷は最も早くから行なわれ、現在は国内外とも広く応用されている。方式は部分水浸探傷方式が多く、1957年 Oliver らが原子力用管の水浸斜角探傷方式を開発し、その後一般用鋼管にも使用されるようになった。現在は試験材の管を全面にわたって探傷するには、管を回転する方式と、探触子を回転する方式とがある。Krautkrämer は前者を RST、後者を ROT と言っている。前者は管を外周より駆動する場合が多く、このとき回転と送りが精密に調整できないので、重なって探傷する部分と、探傷しない部分ができる欠点はあるが、装置は簡便である。後者は管に比較し軽い探触子を回転させるので便利ではあるが、精密な調整を要する探触子体の回転なので、この部分の機構が複雑となり、故障し易い。このほかグリセリンを接触媒質に使い、直接接触の斜角探触子で連続自動探傷している例もある²⁵⁾。

このほかに製鉄、製鋼関係の応用にはビレット、スラブ、型钢などの自動探傷例もあるが数が少ないので省略する。

5. 他工業の自動化の動き

5. 1 原子力用

現在原子力用に最も多く使用されているものは燃料被覆管の超音波自動探傷で、10mm 程度のジルカロイ管を10MHzを使用して数10 μ の深さの欠陥も十分検知している。青木、立石ら²⁶⁾はこの方面の研究開発を行なっている。現在はこれ以外の自動探傷例は少ない。

5. 2 航空機、ロケット

航空機産業、ロケット産業への自動探傷の応用例は日本では極めて少ない。この方面の研究は米国の独壇場であり、このため探傷装置、探触子、探触子走査装置などが幅広く開発されている。

5. 3 自動車、その他

単純な形状の自動車部品の超音波自動探傷は、最近ようやく使用されてきた。しかし最終加工工程に近い部品は一次部品とは異なり形状が複雑で、全体を超音波探傷することは非常に困難である。よって探傷は重要な部分にのみ限定し自動化する場合が多い。日本においては製鉄、製鋼以外の超音波探傷の自動化はまだ

例は少ない。

新しい超音波探傷方法としては Automation Industries Inc. の Sperry Division では20~40 KHz の空中超音波を使い、探触子を試験材に直接接触させないで内部欠陥を検知する方式を開発し製品化している。Sondicator³⁷⁾ の商品名であるが、これは数波の正弦波を送り、受波電圧の正弦波の位相解析により欠陥の有無を検査する方式で全く新しいものである。超音波の通りにくさは周波数を下げることにより解決し、欠陥の情報量不足をベクトル量、すなわち、振幅と位相の両量で検知するもので単に透過量を測定する従来の方式より周波数が低くとも安定に探傷できる。米国ではブレーキシュアの欠陥や、航空機用ハニカム構造の剝離を分解能1/2インチで検知しているという。将来性のある一つの方向であろう。

6. 規格化

超音波探傷の規格化は国内外とも急速に進むものと思う。国内では J I S Z-2344改訂が進んでおり、国外では、装置については I I W で装置の規定や表示方式の recommendation が行なわれている。いっぽう、米国では压力容器の非破壊検査の一環として超音波試験が規定されており、また溶接部の超音波探傷については AWS の規定がある。日本においても N D I S の原案作成中である。管については A P I 規格がある。超音波探傷として米国では A S T M, A S M E, 英国では B S, ドイツでは D I N 規格があるが用語、試験片、方式の規格が多く、まだ具体的な装置の規格、判定基準にはなっていないようである。

7. 結 言

以上簡単に超音波探傷の最近の動向を述べたが、要約すれば基礎の見直し、装置の性能向上、自動化および規格化の方向に進んでいる。この中で探傷器としては定量性の優れたもの、分解能の高いもの、探触子としては小型で取扱い易く、機械的ダンピングの良いもの、探触子保持装置は試験材との接触条件がよく、パルスの繰返し周波数と超音波入射数の比が1に近いものなどが開発の方向であろう。

(文 献)

- 1) 尾上, 磯野他; 昭和45年 N D I 春期連大予稿
- 2) S.E. Baryshev, I. V. Mikhailov; Defektskopiya, (英文) (1968) No. 4
- 3) 山本; 電子通信学会 超音波研究会資料, US69-37 (1970)
- 4) O.R. Gericke; Material Research and Standard, Jan. (1965)
- 5) S. Serabian; Mat. Evaluation, Sept. (1968)
- 6) J.M. Mesina; JICST, No. 50958
- 7) J. Krautkrämer; 日本特許, 昭44-28947
- 8) 春海; N D I 資料, 2350 (1969)
- 9) 仙田, 広瀬他; 昭和45年 N D I 春期連大予稿
- 10) 2)と同じ
- 11) 丹羽; J I S Z-2353 改訂委資料, N D I 資料 2353 (1970)
- 12) R.J. Botsco; Mat. Evaluation, April (1967)
- 13) 5)と同じ
- 14) O.R. Gericke; Jour. Acou, Soc. Am. 36 (1964) 2
- 15) 山本; 学振19委資料, 8853 (1968)
- 16) 日本学術振興会; 厚板 自動 探傷法 研究会 報告, (1968)
- 17) 関野, 山本; 6 I C N T 予稿 (N D I, 1970)
- 18) 白岩他; 住友金属, 21 (1969) 3
- 19) E.M. Nusbickel et al; Mat. Evaluation, Jan. (1970)
- 20) 武藤, 松村他; 日本鋼管技報, No. 45
- 21) M. Atkins et al; J. of Iron and Steel Inst., June (1966)
- 22) 魚住他; 6 I C N T 予稿, (N D I, 1970)
- 23) I.N. Ermolov; JICST, No. 37782
- 24) 土門他; N D I 資料, 2358 (1970)
- 25) 青木, 立石; N D I, 16 (1968) 12
- 26) Sondicator S-1, S-2 カタログによる Automation Ind. Sperry Division