



超音波を用いたき裂寸法の高精度測定

島田平八*・伊達和博*

Crack Depth Measurement with High Accuracy by Ultrasonics

Heihachi SHIMADA and Kazuhiro DATE

1. はじめに

構造物や機械部品の健全性を確保する上で、非破壊検査技術は欠かせないものである。たとえ、設計上では強度が十分保障されているとしても、それらの部材にき裂などの欠陥が存在していた場合に、強度が著しく低下することは、過去の多くの事故例が示す通りである。近年、破壊力学の急速な進歩で欠陥を有する部材の強度や残存寿命が正確に評価できるようになりつつあり^{1)~3)}、これに伴って非破壊検査で欠陥、特にき裂の寸法を高精度に測定することが、一層重要となつてきている。

超音波探傷試験における欠陥寸法の推定には、通常図1に示すようなAVG線図(DGS線図とも言う)が用いられている⁴⁾⁵⁾。この方法は、欠陥からのエコー高さ、すなわち反射波の強さをもとに寸法を推定しようとするものであり、“エコー高さは欠陥寸法に比例する”という考え方を基礎にしている。しかし、エコー高さに影響を及ぼす因子は必ずしも欠陥寸法の大きさだけではないため、この手法では破壊力学的要求を満足するには十分な精度が得られない。そのため近年、き裂の寸法を高精度で測定するため、いくつかの探傷方法が提案されてい

る⁶⁾⁷⁾。これらは最近のコンピュータを用いた数値実験⁸⁾⁹⁾や、シュリーレン法や光弾性法を用いた実験手法^{10)~12)}などの開発で明らかになつた弾性波の挙動に基礎を置いたものであり、その測定精度は $\pm 0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ という非常に高いものである。この精度は、超音波を用いた板厚測定法にほぼ匹敵するものであり、また測定原理もエコー高さではなくエコーの伝播時間を用いるという共通点を有している。ここでは、最近試みられている超音波を用いたき裂寸法の高精度測定法と、その基礎となる弾性波の挙動などを中心に、筆者の私見を混えて述べる。また最後に、この技術の応用例として、き裂進展のモニタリングに適用した結果を紹介する。

2. き裂に入射した弾性波の挙動

超音波探傷試験では、主に図2に示すパルス反射法が行われている。探触子からは、中心周波数が5 MHzあるいは2 MHzの波形をした弾性波のパルスが、1sに

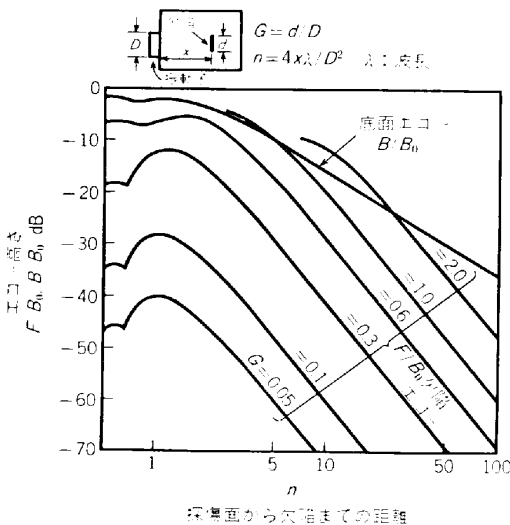


図1 AVG線図

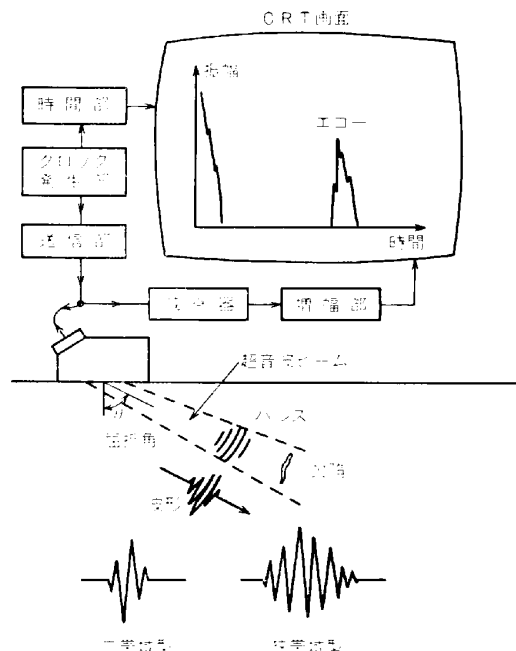
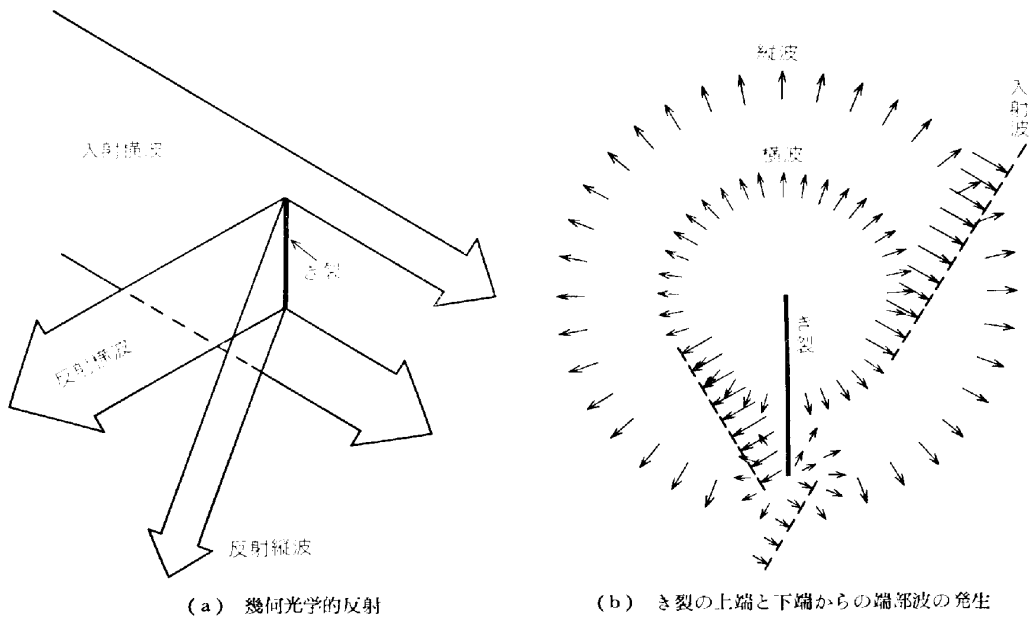


図2 超音波探傷装置と探触子

昭和57年8月2日受付 (Received Aug. 2, 1982) (依頼解説)

* 東北大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Tohoku University, Aza-Aoba Aramaki Sendai 980)



(a) 幾何光学的反射 (b) き裂の上端と下端からの端部波の発生
 図3 平坦な面を持つき裂に入射した超音波の散乱

およそ 1000 回前後の割で試験体中に放出される。この弾性波のパルスは、欠陥に入射し反射波となつて同じ探触子に受信され、増幅されて探傷器の CRT 画面上のエコーとして観察される。CRT 画面上の横軸は、探触子がパルスを放出してから経過時間を示すため、エコーの立ち上がり時間より欠陥と探触子の距離を知ることができる。最近では欠陥の分解能向上のため狭帯域型のものから広帯域型のパルス波形を放出する探触子が使われ始めている。また、パルスの送信と受信とを別々の探触子で行うタンデム法や透過法などもあるが¹⁹⁾、基本的には図2に示すものと同様の構成である。このように、超音波探傷試験は、欠陥に入射して生じた反射波や透過波を受信するものであるから、欠陥に入射した弾性波が“どちらの方向に、どの程度の強さ”に伝播して行くかを知ることが、実際の探傷を行う上で重要である。

図3はき裂に入射した弾性波の散乱のようすを示したものである¹⁹⁾。(a)は、いわゆる鏡面反射で幾何光学に類似したものであるが、固体中の弾性波には縦波と横波が存在するため、入射する横波の角度によつては、このようにモード変換により反射縦波も生ずる。このような強い反射波のほかに、実際には(b)に示すようなき裂の上端と下端を中心とした球面上あるいは円柱状の反射波(端部波, diffracted wave)が発生する。このように、平坦な面を持つき裂をパルス反射法で斜角探傷した際に、き裂からのエコーとして観察されるのは、この端部波であり他の鏡面反射した波は直接探触子には返つて来ない¹⁵⁾。従つて、端部波は実際の探傷では重要な反射波であり、き裂の寸法測定にもよく利用される。

図4はき裂に入射した表面波(Rayleigh wave)の伝播のようすを示したものである。表面波は、表面付近の

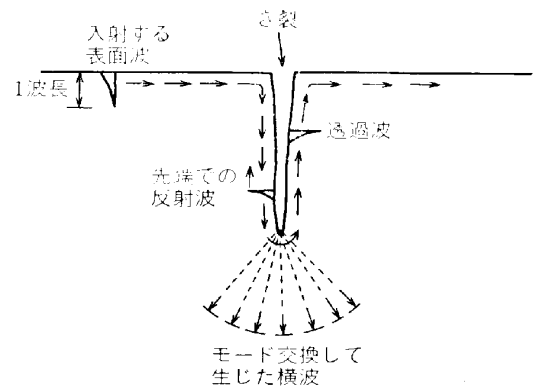


図4 き裂に入射した表面波の挙動

1 波長の領域にエネルギーが集中している弾性波で、表面のプロフィールに沿つて伝播する。き裂先端では、先端のプロフィールに沿つて伝播して行く表面波の他に、反射してもどつて行く表面波とモード変換して横波が発生する。このき裂先端での表面波から横波へのモード変換は、逆も成立し、横波が入射した場合には表面波を生じる^{16)~18)}。このように、き裂に弾性波が入射した場合、縦波・横波を含めて種々の波が発生するが、実際の探傷ではこれらの波すべてが観察されるわけではなく、ごく一部の強度の大きい波が探傷器の CRT 画面上に観察される。従つて、上述のような波がどの程度の強さを持っているかを知ることが、次に重要となつて来る。

弾性波がき裂先端に入射して生ずる種々の波の強度とき裂先端の開き量(き裂開口変位 δ_i)の関係を図5に示す^{19)~21)}。ここで、試験体中のき裂はできるだけ理想き裂(理論で取り扱うき裂)に近い状態で導入されたものであり、探傷は試験体に負荷を加え、適当にき裂先端の

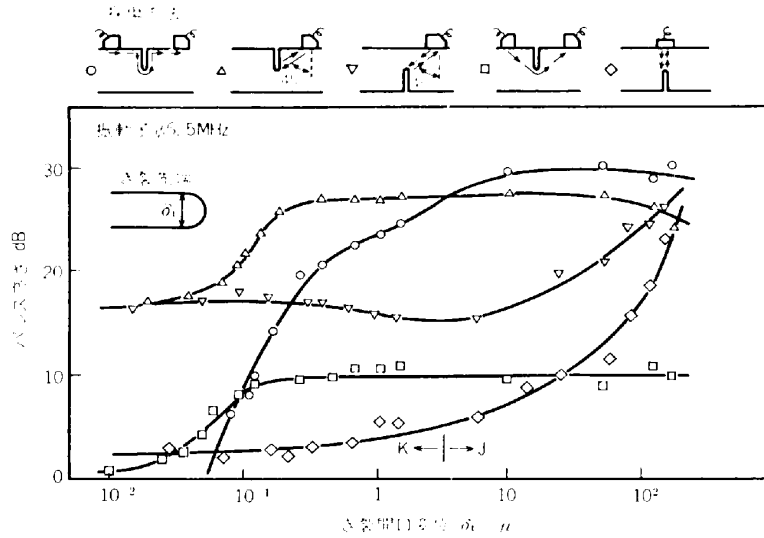


図 5 き裂先端の開き量と散乱波の強度の関係 (パルス高さの基準はノイズレベル)

開き量を変化させながら行っている。き裂先端の開き量は、破壊力学における応力拡大係数 K と J 積分を用いて計算し推定した。このように、図 3 (b) や図 4 で示した端部波や表面波の強さは、き裂先端の開き量に大きく依存し、その変化の傾向は弾性波を入射させる方向によっても異なっている。

図 6 (a) は 3 種類のき裂深さを有する試験体に表面波法を適用させた結果であり、き裂を開かせるために加えた荷重とそれによつて CRT 画面上に出現した表面波の透過パルス高さの関係を示したものである。この図から、表面波法では完全に閉じているき裂には適用できな

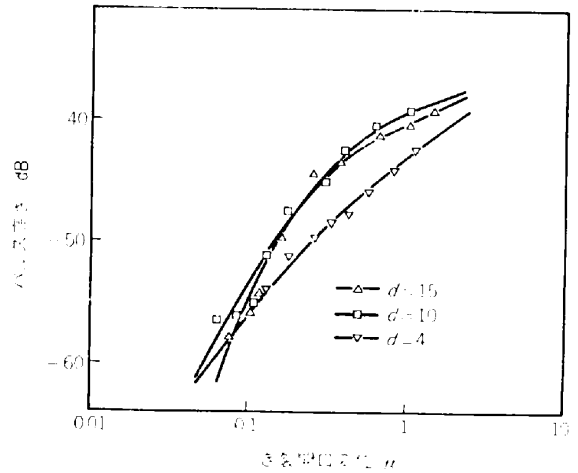


図 6 (b) き裂開口変位を用いたパルス高さの整理

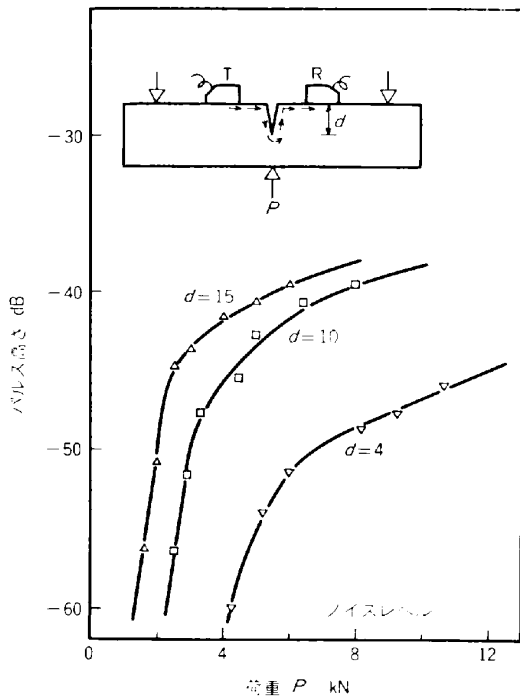


図 6 (a) 表面波法での荷重とパルス高さの関係

いことがわかるが、パルスの出現する荷重レベルがき裂深さによつて異なるため、表面波の透過パルスの大きさについては定量的に評価できない。図 6 (b) は、この結果をき裂先端の開き量で再整理したものであり、パルス高さがき裂開口変位を考慮することでき裂深さに関係なく取り扱うことができることを示している。

図 7 は、き裂先端の開き量が約 1μ における端部波の伝播距離と減衰するエコー高さの関係 (距離振幅特性) を示したものである。端部波の場合、き裂先端に当たる超音波ビームの方向によつて、エコー高さが約 10dB 異なるが、それらの距離振幅特性は同じ傾向である。また、エコー高さは横穴に比べて相当低いが、距離振幅特性は類似している。

このように、き裂を採傷した際のパルス高さを定量的に評価するためには、き裂先端の開き量も考慮する必要がある。ただ、図 5 に示したパルス高さとき裂開口変位 δ_i の関係が、探触子の周波数や屈折角が変わつても同

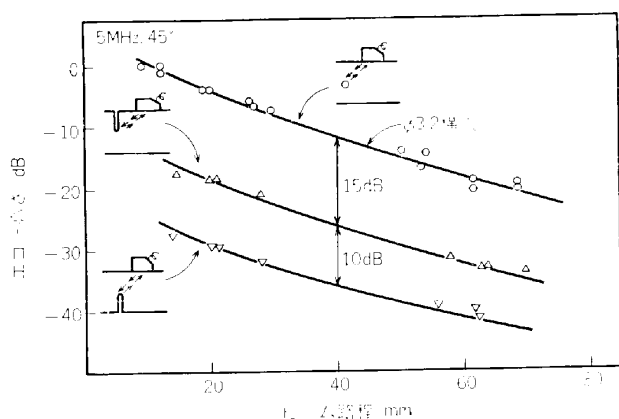


図7 端部波の距離振幅特性 ($\delta_t = 1\mu$ の場合)

様であり、 δ_t が $0.1 \sim 10\mu$ の範囲ではパルス高さがほぼ一定であることから、今後 $\delta_t = 1\mu$ を一つの標準的な先端の開き量として取り扱おうと、距離振幅特性などを検討する上で便利であると考えられる²¹⁾。

3. き裂寸法の各種測定法とその精度

ここでは、先に述べたき裂に入射した弾性波の散乱挙動に基づくき裂寸法の各種測定法について述べる。これらの手法は、主に弾性波の伝播時間あるいは伝播距離を用いたものであり、その精度は $\pm 0.1 \sim 0.2\text{mm}$ と非常に高い。

図8は端部ピークエコー法の測定原理を示す²²⁾。斜角

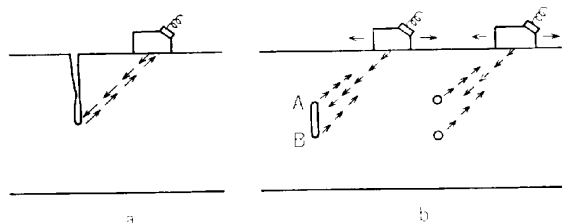


図8 端部ピークエコー法

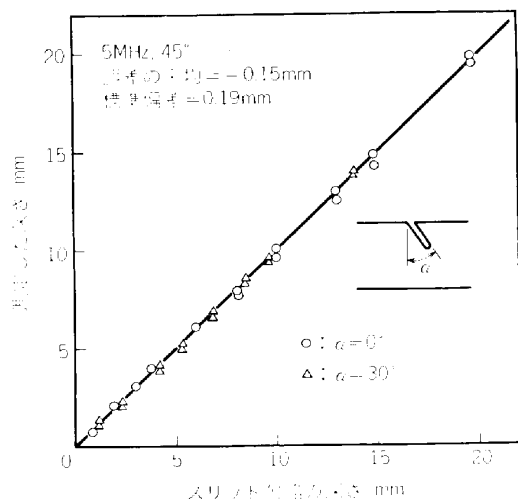


図9 端部ピークエコー法での測定結果

探触子のビーム中心がき裂先端に一致する時、最も高いエコー高さが得られる。その時のビーム路程（伝播距離）と探触子の屈折角を用いてき裂寸法を測定する。内部き裂の場合は、探触子を動かした際き裂の上端と下端でピークが得られるため、これを用いて寸法を推定するが、小さな欠陥が2個存在すると見なす場合があり注意を要する。この場合には、反射波の位相に注目するとよい²³⁾。図9は、スリット欠陥を探傷した結果を示す。この方法では、測定精度が探触子の屈折角に依存し、45°の屈折角で最も高い精度が得られる。

図10は縦波回折波法を示す²⁴⁾²⁵⁾。縦波斜角探触子を図のような配置にすると、き裂先端で発生した弱い回折波が得られる。探触子間の距離を一定に保つと、回折波の到達時間がき裂深さに比例することから、寸法が測定できる。この方法では、き裂深さが変わっても回折波の到達時間がそれ程変化しないため、到達時間の測定には他の方法よりも高い精度が要求される。また、探傷して得られるパルス高さが低いので雑音との識別や、探触子の接触状態に注意を要する。しかし、パルス高さはき裂先端の開き量やき裂の傾きなどにはあまり影響されない²⁶⁾。

図11は表面波法の原理を示したものである。表面波を用いてき裂深さを測定する方法には、大きく分けて2通りある。第1は、き裂先端を経由して来た表面波の伝播距離が、き裂深さに比例することを用いる方法²⁷⁾、第2は、き裂先端でモード変換した横波の伝播時間を用いる方法⁷⁾¹⁶⁾¹⁷⁾である。表1は第1の方法でスリット欠陥の深さを測定した結果である。この表に示されるように、実寸法と測定値はよく一致しており、この精度は他の方法に比べて最も良い。しかし、この方法は表面に垂直で比較的平坦な面を持つたき裂でなければ適用できな

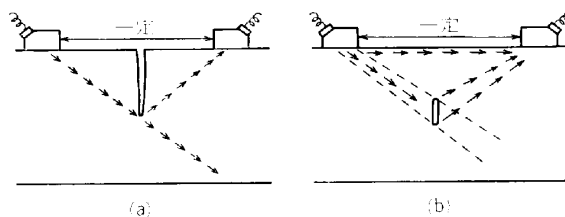


図10 縦波回折波法

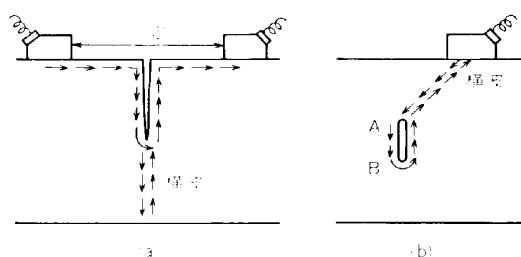


図11 表面波法

表 1 表面波法の結果

(mm)	
実 寸 法	測 定 値
19.73	19.67
14.90	14.92
13.02	13.11
9.97	9.98
8.09	8.04
6.01	6.02
3.92	4.10
3.00	3.05
1.95	2.00
0.82	0.92

いなど、実際のき裂に適用する場合に、いくつかの改良点が残されている。第2の方法は、これらの点を考慮した方法である。すなわち、き裂先端でモード変換して生じた横波は、底面で反射し、再びき裂先端に達して表面波に変わり受信される。この波と、き裂先端を經由して来た表面波との時間差は、板厚とき裂深さの差となり、き裂深さが測定できる。このようなモード変換を利用して内部き裂の寸法を測定した結果も報告されている²⁸⁾。

これは、第1と第2の方法を組み合わせたもので、斜角探傷で横波を入射させると、先端Aで表面波にモード変換し、これが先端Bを經由してAに来ると再び横波となつて探触子に受信される。このエコーと、直接先端Aで反射したエコーの時間差から測定するものである。ただし、表面波は伝播する表面状態の影響を受けやすく、ビーム上に油滴が存在したり手で触れただけでも大きく減衰することや、デンプル破面上では非常に減衰が大きい²⁹⁾など、実際面では注意が必要である。

この他に、図12に示すような垂直探傷法もある。また、この方法で内部のき裂の寸法が測定できることも報告されている³⁰⁾。これはA点とB点両方のエコーが観察されることから、き裂の寸法を測定するものである。これらの方法では、図5を参照すると、き裂先端の形状によつてエコー高さが大きく変わり、ある程度開いたき裂に適用は限られる。

以上、き裂寸法を高精度で測定できるいくつかの方法を紹介したが、これらの手法については弾性波とき裂の関係が十分明らかになつていないため、その特徴や適用範囲などまだ不明な点が多い。しかし、ある条件さえ整えば表面波法と垂直探傷法は容易に高い精度が得られ、

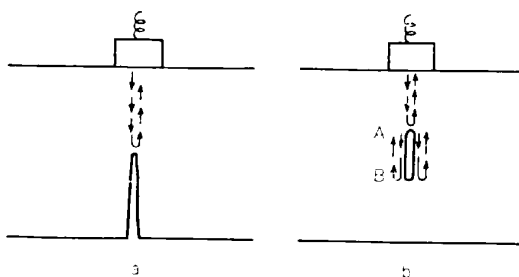


図12 垂直探傷法

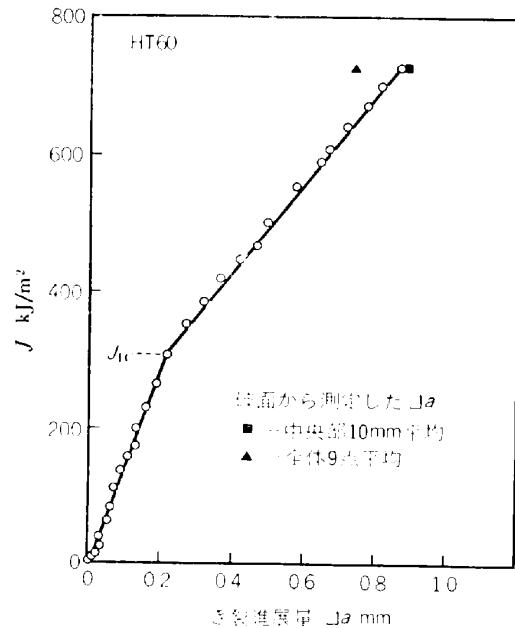


図13 表面波法で測定した R-曲線

一方閉じたき裂 (Tight なき裂) へは図5から端部ピークエコー法が優れていることが言える。

4. 高精度測定法の応用例

前章では、き裂寸法の高精度な測定方法について述べたが、ここではこの方法を弾塑性破壊靱性試験中のき裂進展量の測定と疲労き裂の開閉口挙動の測定に応用した例を紹介する。

図13は表面波法を弾塑性破壊靱性試験に適用し、試験中のき裂深さの変化すなわちき裂の進展量を測定することにより、材料の破壊抵抗である R-曲線を単一の試験片で計測した例である²⁹⁾³¹⁾。この図からわかるように、き裂先端の鈍化曲線を含めた形で R-曲線が測定されており、また破面から測定したき裂進展量ともよく一致している。この他に、垂直探傷法 (End-on 法) でも R-曲線の計測例がいくつか報告されているが³²⁾³³⁾、き裂先端の鈍化曲線を完全に含むことはむずかしいようである。

疲労き裂進展量の計測には、多くの例が認められる。ここでは、その中で表面波法を適用し、疲労き裂進展量の測定と同時に、疲労き裂の開閉口挙動を観察した結果を述べる³⁴⁾。従来の疲労き裂の開閉口挙動の測定方法では、き裂の閉口荷重点のみが決定できるだけであるが、この方法を用いると疲労き裂の閉口荷重点の測定ができると同時に、き裂先端から後方の疲労破面上のどの位置が閉口し、接しているかを知ることができる。図14は疲労試験中に応力拡大係数範囲 JK を段階的に下げ、破面の残留変形を変えて行つた実験で得られる CRT 画面とそれから推定される閉口挙動を示す。JK を変化

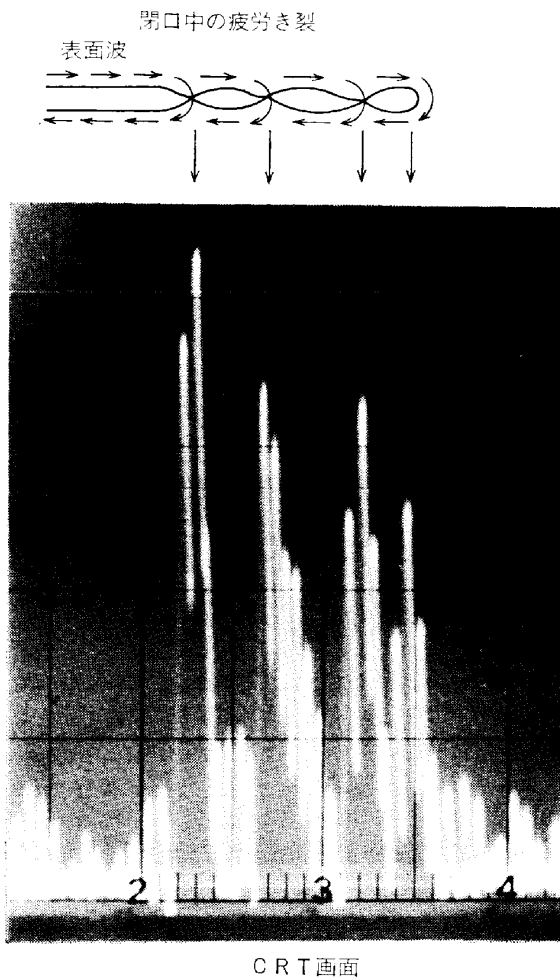


図14 表面波法で観察した疲労き裂の開閉口挙動

させた時に対応するき裂長さの部分が、破面上で接しているのが、CRT 画面上の表面波の伝播距離から知ることができる。このような観察から、疲労サイクル中のき裂の開閉口挙動が、今まで以上に調べることが可能である。

5. おわりに

ここでは、最近の超音波探傷法の研究の1つであるき裂寸法の高精度測定法について、その基礎となる弾性波の挙動と応用例を含めて簡単に述べた。これらの手法は、板厚測定が超音波の伝播時間を用いて高い精度の測定が可能となったことと同様、き裂からの反射波の到達時間を用いたことで、その精度も $\pm 0.1 \sim 0.2$ mm と板厚測定に近づきつつある。エコー高さが、探触子の接触状態、き裂の傾きや開き量などに影響されやすいのに対して、伝播時間の方はそれらによつて大きく変化しないところが、高い精度の得られやすい理由であると思われる。しかし、これらの手法がすべてのき裂に適用できるわけではなく、現在はき裂形状の比較的単純で孤立したものに限られており、今後溶接部への適用も含めて研究

の発展に期待するところも多い。

一方、上述のような適用範囲から考えると、実験室的な規模でのき裂の寸法測定には、ここで述べた手法が非常に有効であろう。その例として、本稿では弾塑性破壊靱性試験と疲労き裂伝播の試験に適用した結果を紹介した。

高強度材や厚板材の使用頻度が高くなつてきた昨今、それらの強度の確保、安全性の保障には非破壊検査技術が不可欠である。にもかかわらず、この方面の基礎的な研究者は必ずしも多くはない。今後、このような研究が一層活発となることを希望すると同時に、本稿がそれらの一助となれば幸いである。

文 献

- 1) J. F. KNOTT: Fundamentals of Fracture Mechanics (1973), p. 176 [Butterworths, London]
- 2) 岡村弘之: 線形破壊力学入門 (1976), p. 133 [培風館]
- 3) 小林英男: 第63・64回西山記念技術講座テキスト (日本鉄鋼協会編) (1979), p. 29
- 4) J. クラウトクレマー, H. クラウトクレマー: 超音波探傷試験技術 (1980), p. 79 [日本能率協会]
- 5) 日本非破壊検査協会: 超音波探傷試験 A (1976), p. 113 [日本非破壊検査協会]
- 6) P. A. DOYLE and C. M. SCALA: Ultrasonics, 16 (1978) 4, p. 164
- 7) 伊達和博, 島田平八, 池永則夫: 非破壊検査, 30 (1981) 2, p. 79
- 8) 春海佳三郎, 齊藤鉄夫, 藤盛紀明: 同上, 28 (1979) 2, p. 88
- 9) 春海佳三郎: 同上, 29 (1980) 3, p. 212
- 10) D. M. MARSH: Research Techniques in Nondestructive Testing II, ed. by R. S. SHARPE (1977), Chap. 10 [Academic Press, London]
- 11) G. HALL: Ultrasonics, 15 (1977) 2, p. 57
- 12) K. G. HALL: Non-Destruct. Test., 9 (1976) P. 121
- 13) 学振製鋼 19 委員会: 超音波探傷法 (1974), p. 180 [日刊工業新聞社]
- 14) J. F. COFFEY: The Measurement of Crack Length and Shape During Fracture and Fatigue, ed. by C. J. BEEVERS, (1980), p. 345 [Chameleon Press, London]
- 15) 小倉幸夫: 非破壊検査, 27 (1978) 7, p. 389
- 16) R. J. HUDGELL, L. L. MORGAN, and R. F. LUMB: Brit. J. Nondestruct. Test., 16 (1974), p. 144
- 17) M. G. SILK: NDT Int., 9 (1976), p. 290
- 18) 小倉幸夫: 非破壊検査, 28 (1979) 3, p. 182
- 19) 伊達和博, 島田平八, 宇佐美隆二: 同上, 30 (1981) 2, p. 134
- 20) 同上 : 同上, 30 (1981) 9, p. 682
- 21) 伊達和博, 島田平八, 松沢秀貢: 同上, 31 (1982) 2, p. 142
- 22) 加藤 功, 桜井善茂, 松村民久: 同上, 26 (1977) 5, p. 320
- 23) 福原熙明, 本村勝美: NDI 資料, No. 2905 (1982), p. 21
- 24) M. G. SILK: Research Techniques in

- Nondestructive Testing III, ed. by R. S. SHARPE (1977), Chap. 2 [Academic Press, London]
- 25) M. G. SILK: Brit. J. Nondestruct. Test. (1979) Jan. p. 12
 - 26) 伊達和博, 島田平八, 池永則夫: 非破壊検査, 29 (1980) 9, p. 648
 - 27) D. COOK: Proc. Brit. Acoustical Soc. Spring Meeting (1972), 72U19
 - 28) 小倉幸夫: 非破壊検査, 28 (1979) 3, p. 182
 - 29) 伊達和博, 島田平八, 伊東義晃: 同上, 31 (1982) 4, p. 247
 - 30) 小倉幸夫: 同上, 30 (1981) 9, p. 686
 - 31) K. DATE, H. SHIMADA, and Y. ITO: Proc. 1982 Joint Conf. on Exp. Mech., Part II (1982), p. 761
 - 32) J. H. UNDERWOOD: Exp. Mech. (1978) Sept, p. 350
 - 33) 平野一美, 小林英男, 中沢 一: 機械学会講演論文集, 820 (1982) 2, p. 301
 - 34) 伊達和博, 島田平八, 松沢秀貢: 同上, 820 (1982) 12, p. 717

統 計

先進国及び主要国の粗鋼生産・製法別構成推移

先進国における粗鋼生産・製法別構成推移は平炉の転炉・電炉への移行であり、さらには電炉比率増の傾向を示す。国別に見ると、転炉・電炉化の進展段階で次の3グループに区分できる。

第1グループはもつとも進展の顕著な日本で1970年代前半に転炉・電炉化を完了し、電炉率増の傾向にある。現状の電炉率は25%である。

第2グループは10年間に急激に転炉・電炉化し、ほぼ完了段階にあり、西独、フランス、イギリスが属

する。

第3グループは転炉・電炉への進展が軽微なグループでアメリカ、ソ連が属する。ソ連の平炉率は依然60%である。

一方、主要国における製法別構成推移は第2・第3グループ型と言える。

イタリア、スペインは第2グループに属し、ポーランドは典型的な第3グループである。韓国は1973年に転炉が導入され、急増するのに伴い、電炉・平炉率が激減する特異な推移を示している。

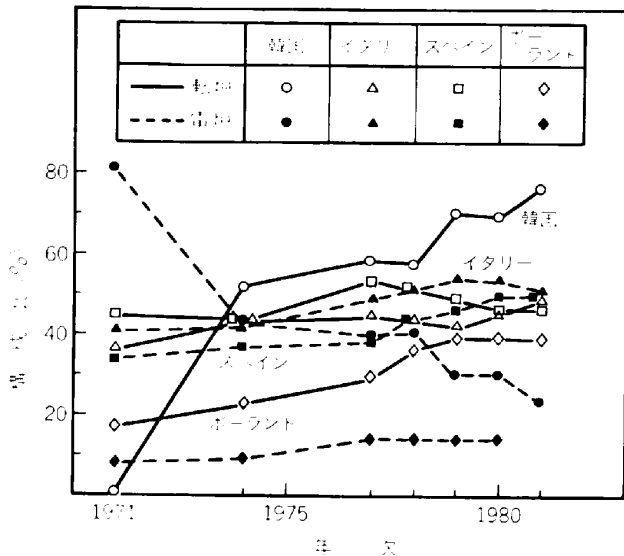


図1 先進国の粗鋼生産・製法別構成推移

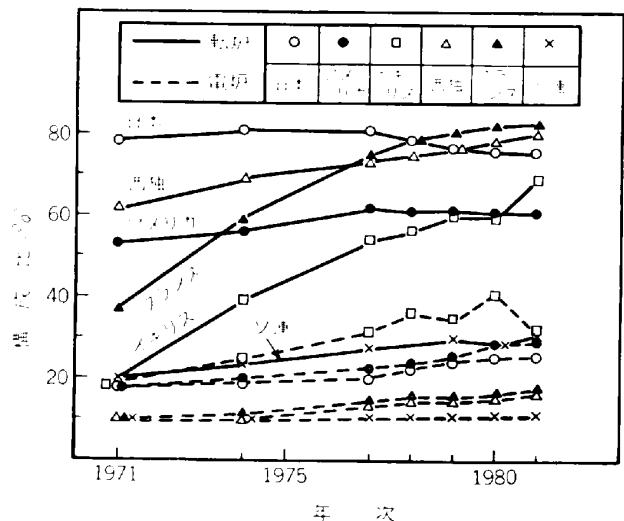


図2 主要国の粗鋼生産・製法別構成推移
出典：鉄鋼統計要覧(1982)鉄鋼統計委員会(鉄連)