

静電容量による開口変位 (C.O.D.) の計測法

北村 茂*・前中 浩*・佐久間正明*

C.O.D. Measurement by Means of Electrostatic Capacitance Method

By

Shigeru KITAMURA, Hiroshi MAENAKA and Masaaki SAKUMA

Abstract

C.O.D. approach is widely used to assess brittle fracture toughness as well as K-value approach. However, only the C.O.D. approach is valid and powerful means to evaluate brittle fracture characteristics, in the case of brittle fracture with large scale yielding.

Crack opening displacement (C.O.D.) is measured by using various apparatus, such as clip gauges, optical appliances and so on. It is desirable to measure C.O.D. in proximity to the crack tip. The authors previously developed a measuring method of C.O.D. by means of electrostatic capacitance technique and published it in the previous report⁶⁾. The measuring point of C.O.D. by this method can be located nearer to the crack tip than the points by any other methods. As a result of applying this method to a large number of C.O.D. measurement, some parts of the method have been improved.

In this report, the principle of the method, application techniques and their properties are explained first. Then examples of C.O.D. measurement on various kinds of specimens are shown and the obtained C.O.D. data are discussed.

The results are summarized as follows:

- (1) Two sheets of electrodes inserted into slit gave a good measurement of initial electrostatic capacitance before crack opening.
- (2) As application techniques for C.O.D. measurement, three kinds of conversion methods are available: change of inter-electrode gap, change of electrodes opposing area and move of dielectric between electrodes.
- (3) Critical C.O.D. on parallel pair notch specimen was not constant to the change of distance between notches.
- (4) Dynamic critical C.O.D. on circumferential notch specimen was less than static one.

目 次

1. 序 言.....	57	4.1 電極間隔を変化させる方法.....	63
2. 原 理.....	57	4.2 電極対向面積を変化させる方法.....	66
3. 電 極.....	59	4.3 電極間の誘電体を移動させる方法.....	67
3.1 電極材料.....	59	5. 動的な特性.....	68
3.2 電極のコーティング.....	61	6. 計測方法.....	70
4. 静的な特性.....	62	7. 計測結果.....	70

* 船体構造部 原稿受付: 昭和48年12月6日

7.1 電極間隔を変化させる方法……………70	7.1.4 溶接継手に存在する近接切欠の開口変位……………75
7.1.1 Deep Notch Test の開口変位の計測……………70	7.2 電極対向面積を変化させる方法……………77
7.1.2 等長直線切欠の開口変位の計測……………72	7.3 動的な開口変位の計測……………78
7.1.3 不等長直線切欠, 等長並列切欠および等長 階段状切欠の開口変位の計測……………73	8. 結 論……………81
	参考文献

1. 序 言

従来, 脆性破壊特性のクライテリオンとしては塑性表面エネルギー, 破壊靱性値あるいは応力拡大係数がもちいられてきた。これらのクライテリオンは完全脆性材料の破壊あるいは亀裂先端の塑性変形領域が比較的小さい場合を対象とした理論に基づいている。溶接構造物で使用される鋼材のような延性材料の場合, 亀裂先端は応力集中による塑性変形領域が大きく, 実験温度によっては切欠断面が全面降伏をおこしてから脆性状の破壊を生ずる。最近, このような大きな塑性変形領域を伴う破壊現象を説明する手法として亀裂先端近傍の開口変位をもちいる研究がさかんにおこなわれるようになった^{1)~5)}。

開口変位を材料強度の尺度としてもちいる場合, 切欠付試験片で破壊発生時の限界開口量を計測し, 材料および温度により定まる定数として取り扱われる。亀裂あるいは試験片の形状寸法によらない値として亀裂先端の開口量を破壊のクライテリオンとしてもちいるが, 一般に亀裂あるいは切欠先端の開口量を計測することは不可能である。そこでできるだけ亀裂先端に近い場所で開口量を測定し, 亀裂先端の値を計算する方法がとられている。理論計算には転位の連続分布をモデルとした B.C.S. 理論あるいは有限要素法による計算結果等が利用される。

亀裂開口変位の計測はクリップゲージ, バドルゲージや光学的方法等がもちいられているが, 著者らは亀裂先端に金属箔電極を挿入し, 静電容量の変化として取り出す方法を考案した。この方法は亀裂先端の極く近傍で計測できるほか, いろいろの特徴をもっている⁶⁾。今までにこの方法をもちいて, 数多くの限界亀裂開口変位を計測してきた。計測法についてもいろいろと改良を加えた点もあるので本報告ではまとめの意味でこれまでの研究成果を総括してみた。

まず, 静電容量による計測原理について説明し, 金属箔電極をもちいて開口変位を計測する種々の方法についてその特性を示した。また, これまで実際に種々

の試験片で計測した結果を示し, 限界亀裂開口変位の特性を主に既発表の論文⁶⁾⁷⁾¹¹⁾¹²⁾¹⁴⁾¹⁷⁾ からまとめた。

2. 原 理

2枚の電極が図-1のように向い合っている時の電極間の静電容量 C は次式で示される。

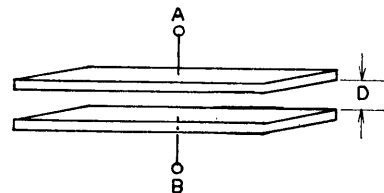


図-1 平行平板電極

$$C = \epsilon_0 \epsilon_s S / D \quad (PF) \quad (1)$$

S : 電極の対向面積 (m^2), D : 電極間隔 (m), ϵ_0 : 誘電率 ($\epsilon_0 = 8.855 \text{ PF/m}$), ϵ_s : 比誘電率 (空気の場合 $\epsilon_s \approx 1$)

したがって, 電極間隔が狭く, 電極面積が大きいほど静電容量は大きくなり, 電極間を比誘電率 ϵ_s の誘電体で満たすと静電容量は ϵ_s 倍の大きさになる。

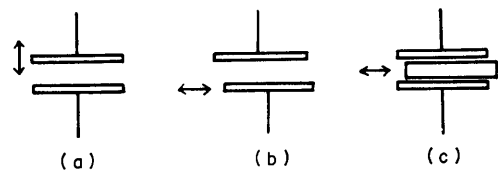


図-2 静電容量の変換方法

変位と静電容量の変換方法には図-2に示すように次の3つの方法がある。

- (a) 電極間隔を変化させる方法 (D , $\sqrt{S} \gg D$).
 - (b) 電極対向面積を変化させる方法 (S).
 - (c) 電極間の誘電体を移動させる方法 (ϵ_s).
- (a) の方法は微小な変位の計測に適し, (b), (c) は任意の大きさの変位の計測ができる。

静電容量を電圧に変換するには次のような回路があ

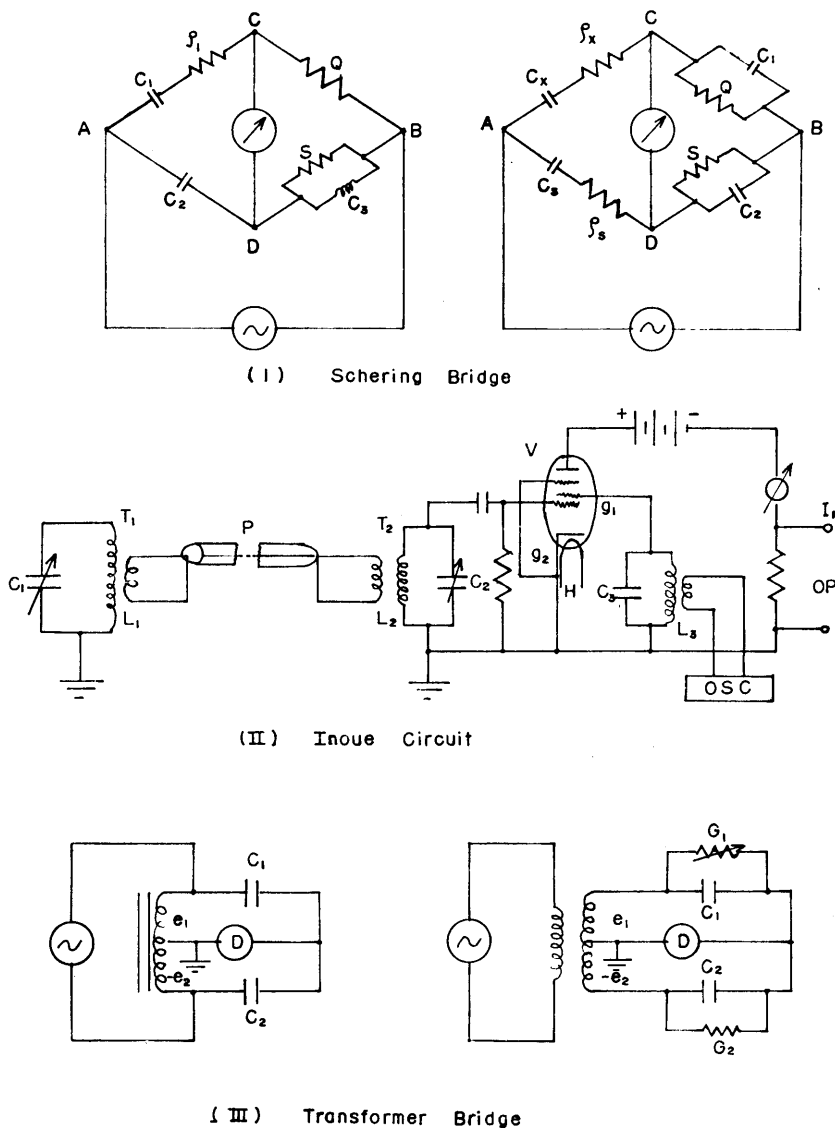


図-3 静電容量—電圧変換回路の一例

る。シェーリングブリッジによる方法(I), 井上回路による方法(II), 変成器ブリッジによる方法(III)および平衡回路(リング変調回路を改良したもの)による方法(IV)^{7,8)}等がある。これらの回路の一例を図-3 および図-5 に示す。シェーリングブリッジに比べ変成器ブリッジや平衡回路は素子の対地インピーダンスの影響が自動的に除かれ, 回路の平衡がとりやすく雑音が少なく, 回路しだいでは VHF (30 MHz~300 MHz) 程度まで使用できる特徴をもっている。変位を (a), (b), (c)

の方法で静電容量の変化に変換し, 静電容量の変化を平衡回路で電圧変化にして, これを増幅し記録する方法で計測をおこなう。これらの詳細については4章以下で説明する。

3. 電 極

3.1 電極材料

導電体はいずれも電極としてもちいることができるが, 低温または高温での計測を考慮して線膨張係数お

よび抵抗変化の小さい材料を選ぶ必要がある。低温用の電極材料としては銅-ニッケルの合金箔（アドバンス）が適している。厚さは 0.006 mm で線膨張係数の温度依存性は極めて小さい。高温用の電極材料としては線膨張係数が小さく、抵抗変化の少ないニッケル-クロムの合金箔（ニクロム）が 200°C ぐらいまで、さらにニッケル-クロム-アルミの合金箔（カルマ）が 330°C まで利用できる。電極材料の物理的性質を表-1に示す。金属箔の表面にはりつける絶縁材料は薄くて絶縁耐力が高く、比誘電率の大きいものほど感度

はよくなる。また温度による変化が少なく長期の安定性にすぐれた材料を選ぶ必要がある。金属箔の表面に厚さ 0.025~1 mm のポリエステルフィルムをエポキシ系の接着剤（アラルダイト）ではりつけ金属箔電極としてもちいる。ごく低温用にはポリイミドフィルムをエポキシ系の接着剤で、高温用にはマイカを無機質系の接着剤ではりつける。各種絶縁物の電気的特性および接着剤の一覧表を表-2 および表-3⁹⁾に示す。金属箔電極の温度依存性の一例を図-4に示す。7×19 および 8×23 mm² の金属箔をポリイミドおよびポリエ

表-1 銅-ニッケル合金、ニッケル-クロム-アルミ合金の物理特性表

項目	材料	銅-ニッケル合金 (商品名: アドバンス)	ニッケル-クロム-アルミ合金 (商品名: カルマ)
成分		43% Ni, Bal, Cu	73% Ni, 20% Cr, Bal, Al, Fe
比抵抗	$\times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$	49	.133
抵抗温度係数	$\times 10^{-6} \Omega / ^\circ \text{C}$	(20~100°C) ± 20	(20~105°C) ± 10
比熱	Cal/g/°C	0.094	0.104
熱伝導度	Cal/cm Sec°C	(20°C) 0.0546	(100°C) 0.0311
融点	°C	約 1,210	約 1,400
線膨張係数	$\times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$	(20~100°C) 14.9	(20~100°C) 13.3
引張強度	kg/cm ²	4,230~7,040	9,150~12,700
比重		8.9	8.11
銅に対する熱起電力	$\times 10^{-6} \text{V}/^\circ \text{C}$	43	3
ゲージ率		約 2	約 2.4

(Driver-Harris 社)

表-2 各種絶縁物の比較

材料名	比誘電率 ϵ_s	耐電圧 KV/mm	比重	使用温度範囲 °C
空気	1	3.0	0	—
白雲母	5~9	10~80	2.76~2.0	<300
水晶	3.5~3.6	20~25	2.0~2.2	<500
酸化チタン磁器	90~150(-)	10~15	3.9	-100~120
紙	1.2~2.6	5~10	0.8~1.4	<120
綿	3.9~7.5	1~3	1.2~1.4	<120
絹	—	16~23	1.3~1.4	<70~80
セルロイド	3.3	14~23	1.3~1.4	<60
ベークライト	4~6	16~50	1.34~1.55	<150
パラフィン	1.9~2.5	8~12	0.85~0.92	<30~40
ポリエチレン	2.25~2.30(-)	20	0.92~0.93	-100~120
ポリスチロール	2.5~3.0(-)	20	1.05~1.08	-100~50
ポリエステル	3~5	—	—	-100~200
ポリイミド	3.5~3.7	3.6~7.0	≈ 1.0	-269~400

比誘電率 ϵ_s の欄の (-) は温度係数が負

表-3 接着剤一覧表

	分類	適用ゲージ	加圧力 kg/cm ²	硬化(または乾燥の条件)	使用温度範囲 C°	接着剤の保存条件
有機系	ニトロセル ローズ	標準紙ゲージ	指 圧 (0.5~1)	指圧(約1分間)後室温で4時 間以上または80°Cで1時間	-50~+80	温度30°C以下で 密栓する。
		厚紙ゲージ	0.5~1	0.5時間加圧後室温で6時間 以上または80°Cで1時間	"	
	フェノール	ベークライトゲージ	1.5~2	加圧状態で80°Cにて1時間 130°Cで2時間,さらに150°C で2時間	-50~+180	温度20°C以下で 直射日光をさける
	ポリエス テル	ベークライトゲージ	0.3~0.5	加圧状態で室温にて2時間以 上	-50~+170	"
		ポリエステルゲージ	"	"	"	"
		箔ゲージ	"	"	-50~+80	"
		半導体ゲージ	"	加圧状態で80°Cにて1時間	-20~+140	"
		ベークライトゲージ	0.5~1	加圧状態で室温にて1.5時間 以上	-50~+150	"
		ポリエステルゲージ	"	"	"	"
		箔ゲージ	"	"	-50~+80	"
		半導体ゲージ	"	加圧状態で80°Cにて1時間	-20~+140	"
	エポキシ	半導体ゲージ	0.3~0.5	加圧状態で130°Cで2時間後 150°Cで2時間	-50~+170	"
		箔ゲージ	0.5~0.75	加圧状態で室温にて24時間以 上または80°Cで2時間	-50~+80	"
		ベークライトゲージ	"	"	-50~+80	"
	シアノアク リレート	標準紙ゲージ	指 圧 (0.5~1)	指圧(約30秒)後室温にて4時 間以上	-20~+80	温度10°C以下の 暗所
		厚紙ゲージ	"	"	"	"
		ベークライトゲージ	"	"	-20~+100	"
		ポリエステルゲージ	"	"	"	"
箔ゲージ		"	"	-20~+80	"	
半導体ゲージ		"	"	-10~+100	"	
合成ゴム	塑性域用 大ひずみゲージ	指 圧 (0.5~1)	指圧(約1分間)後室温にて24 時間以上または60°Cで2時間	-10~+60	温度30°C以下で 密栓	
シリコン	高温用 アスベストゲージ	0.5~1	加圧状態で200°Cにて2時間 以上,加熱後加圧なしで420 °Cで2時間以上	-50~+400	温度20°C以下で 直射日光をさける	
無機系	水ガラス			<200		

(共和電業)

ステルフィルムで絶縁した金属箔電極を2枚および3枚重ねて接着剤で固定し,高温または低温に加熱冷却し室温になる過程での静電容量の変化をもとめた。絶縁物の厚さが薄く静電容量の大きいものほど温度依存性は大きくなるが,ポリイミド(0.025mm)はポリエステル(0.05mm)より温度依存性は小さい。

金属箔の表裏に変側および固定側絶縁物を接着剤ではりつけ金属箔電極としてもちいる。金属箔の面積が大きく,変側絶縁物の厚さが薄いほど感度はよく

なる。金属箔電極はある大きさ以上の面積なら任意の形状でもちいることができる。これらについては4.1章でのべる。平板電極(a)円弧電極(b)・(c)スライド電極(d)の一例を写真-1に示す。

3.2 電極のコーティング

室温から実験温度(100°C~-196°C)にしたとき空気中の湿気が凝縮して電極表面に水滴が付着し,静電容量が変化する。これを防止するために試験片の切欠部に粉末の乾燥剤(ニットーゲル)を充填し,切欠

部全体をブラックテープでおおいセメダイン（工業用接着剤 366）でコーティングする。さらに表面に白色ワセリンをぬり、リード線の引出口から湿気が侵入し

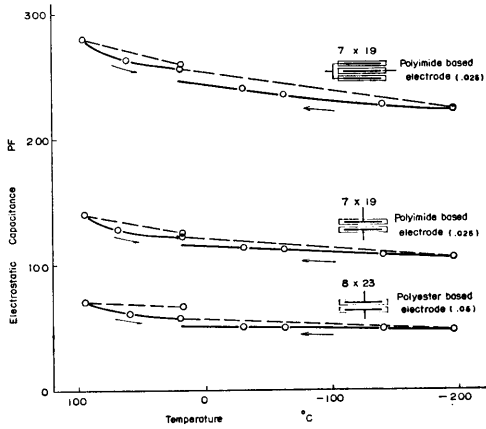


図-4 金属箔電極の温度特性

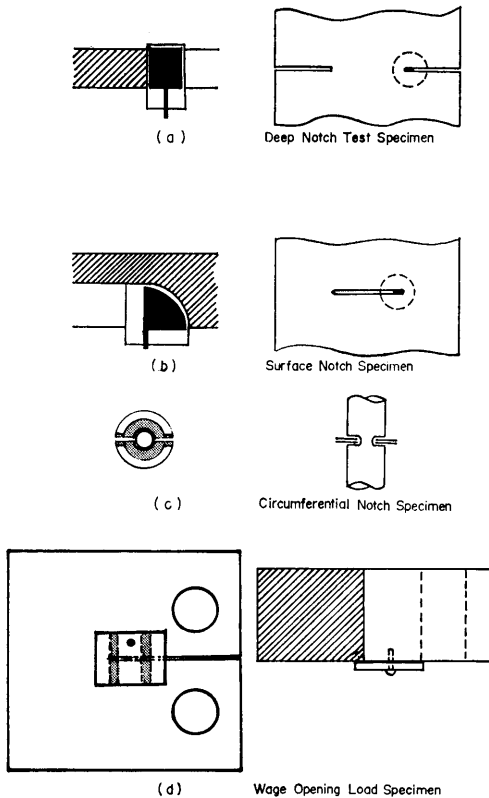


写真-1 金属箔電極の使用例

ないようにする。湿気を防止した時は静電容量の変化はほとんどない。

実験温度が高い場合は無機質または特に耐熱性のよいシリコン樹脂でコーティングする。円周切欠付丸棒引張試験片に円弧電極を挿入しコーティングした状態の一例を写真-2に示す。

4. 静的な特性

平衡回路(IV)で半導体整流器を図-5のように接続し、2つの相対する整流器(r_1 と r_2 , r_3 と r_4)の特性が完全に等しく、 C_1 と C_2 および r_5 と r_6 が等しければ、入力端子 1, 1' に電圧を加えても平衡したブリ

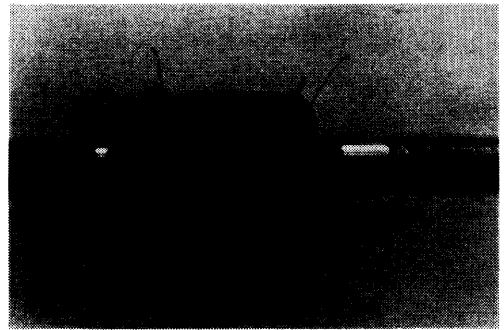
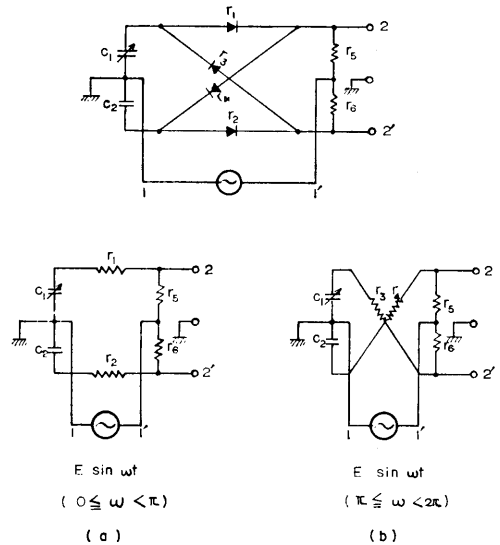


写真-2 丸棒試験片のコーティング



(IV) Balancing Circuit

図-5 平衡回路

ッジになり出力端子 2, 2' に電圧はあらわれない。入力端子 1 に正の電圧, 1' に負の電圧を加えると整流器 r_1, r_2 は順方向となるが r_3, r_4 は逆方向となって抵抗はほとんど無限大となり図-5 (a) に示す等価回路となる。端子 1 に負電圧, 1' に正電圧を加えると整流器 r_3, r_4 は順方向となり, r_1, r_2 は逆方向となって抵抗

は無限大になるので図-5 (b) のような等価回路となり前の場合と逆になる。この動作が 5MHz の周期でくり返される。 C_1 は平衡静電容量, C_2 は被測定静電容量を示す。

4.1 電極間隔を変化させる方法

試験片の切欠部の形状寸法より金属箔電極の面積 (S) および電極間隔 (D) の概略値をきめる。平行板コンデンサの静電容量図表を図-6 に示す。S と D の交点より対角線上の尺度で静電容量をもとめる。同じ静電容量の変化でも電極面積の大きいものほど大きな変位を得ることができるが、同時にその電極面積の平均値を測定することになる。電極間に表-2 の絶縁物を詰めると空気の場合の ϵ_s 倍になる。

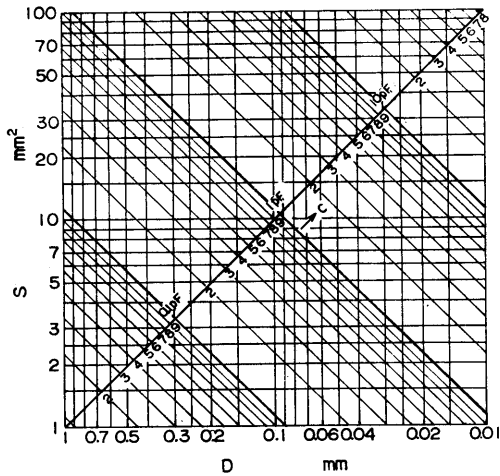


図-6 平行板コンデンサの静電容量図表

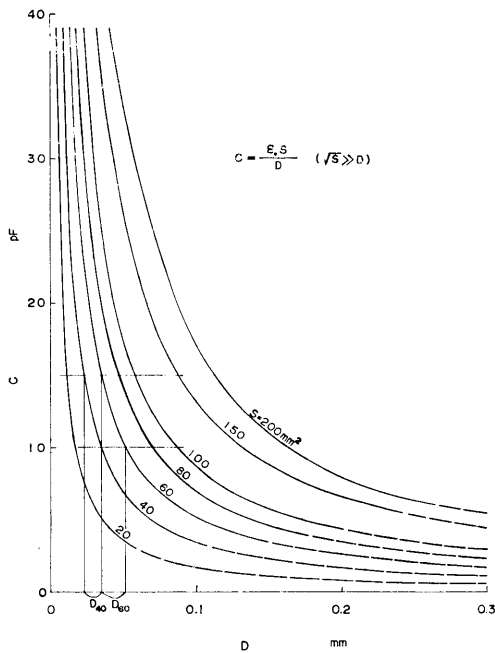
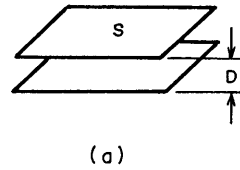
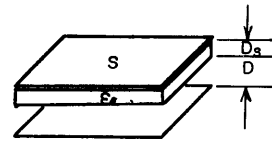


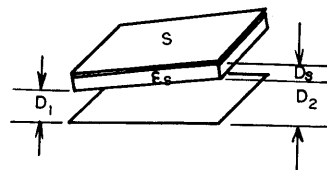
図-7 電極面積と電極間隔の関係



(a)



(b)



(c)

S : Area of Electrode
 ϵ_s : Dielectric Constant of Insulator

図-8 (a) 平板電極が平行にある場合
 (b) 絶縁された電極と平板電極が平行にある場合
 (c) 絶縁された電極と平板電極がかたむいている場合

電極面積をパラメータにし静電容量と電極間隔の関係をもとめると 図-7 のようになる。曲線の実線部分は計算によりもとめた実用の範囲である。例えば試験片の切欠部の形状より金属箔電極の面積を40~60mm²にでき、初期静電容量は15PFあり、これが10PFに変化した時の変位量は D_{40} または D_{60} である。変位量の概算より電極面積、絶縁物の種類および厚さ、電極間隔を決定する。この方法は測定点に非接触で計測できる特徴をもっている。

静電容量の計算は次のようにおこなう。平板電極が平行にある場合は次式のような関係がある(図-8(a))。

$$C_0 = \epsilon_0 S / D \quad (2)$$

ただし、 $\sqrt{S} \gg D$ の場合にもちいられる。

S: 電極面積 (m²), D: 電極間隔 (m), ϵ_0 : 誘電率

金属箔電極を切欠部に挿入した場合、切欠と金属箔との間には可変側絶縁物と空気の層がある。このような場合は図-8 (b) に示すように絶縁された電極と平板電極が平行にある場合に相当し次式で示される。

$$C_0 = \frac{S}{\frac{D}{\epsilon_0} + \frac{D_s}{\epsilon_0 \epsilon_s}} \quad (3)$$

ただし、S: 電極面積 (m²), D: 絶縁物の厚さを除いた電極間隔 (m), D_s : 絶縁物の厚さ (m), ϵ_0 : 誘電率, ϵ_s : 比誘電率

切欠がななめに開く場合は 図-8 (c) に示すように絶縁された電極がかたむいて開く場合に相当し次式で示される。

$$C_0 = \frac{\frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{D_s(D_2 - D_1)} \log \frac{D_2}{D_1}}{\frac{\log \frac{D_2}{D_1}}{D_2 - D_1} + \frac{\epsilon_s}{D_s}} \quad (4)$$

ただし、S: 電極面積 (m²), D_s : 絶縁物の厚さ (m), D_1, D_2 : 絶縁物の厚さを除いた電極間隔 (m), ϵ_0 : 誘電率, ϵ_s : 比誘電率,

計算値を検討するため 写真-3 に示すマイクロメータを改良して作った較正装置により、D の変化と C_0 の変化 ΔC_0 の関係をもとめた。(3)式による計算結果と計測値を初期静電容量 C_0 をパラメータにして 図-9 に示すと比較的よく合っている。初期静電容量が大きいほどすなわち電極間隔が狭いほど直線の比例部分は増大する。平板電極が平行に開いた場合は(3)式をもちいて計算できる。一方、曲げ試験等で切欠がなな

(108)

めに開く場合は(4)式をもちいれば正確な計算ができるが、(3)式により計算した場合、どれくらいの誤差が生ずるかしらべ 図-10 に示す。切欠のかたむき角 θ が小さければ(3)式をもちいて計算すればほとんど誤差を生じない。 θ が大きくても $\sqrt{S} \gg D_1, D_2$ の範囲で D_1, D_2 が大きければかなりの精度がえられる。したがって引張試験でも実際は切欠面はかたむいて開くと思われるが(3)式をもちいても十分な精度がえられる。

試験片の切欠部に電極を1枚挿入し切欠面の一方に電極を接着剤で固定した場合の静電容量は 図-11 のよ

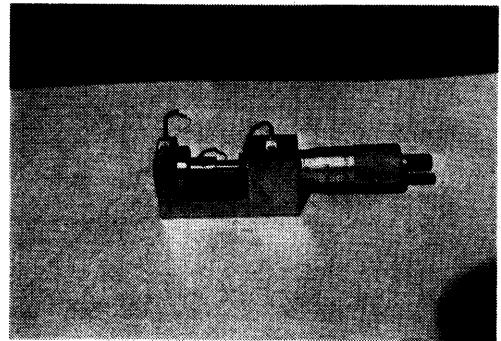


写真-3 較正装置

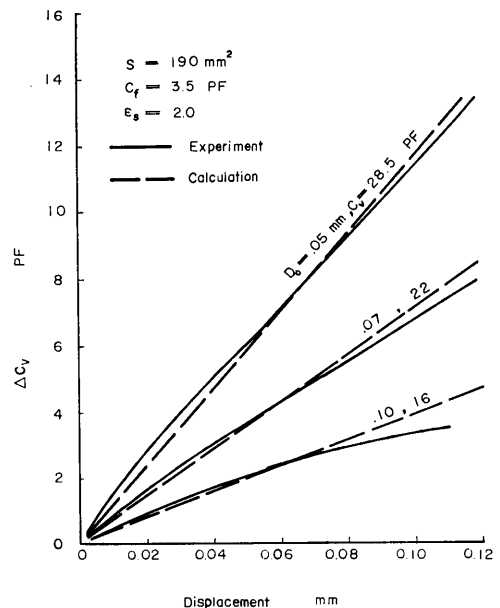


図-9 スリット間距離の変化と静電容量の変化の計算値と較正值の比較

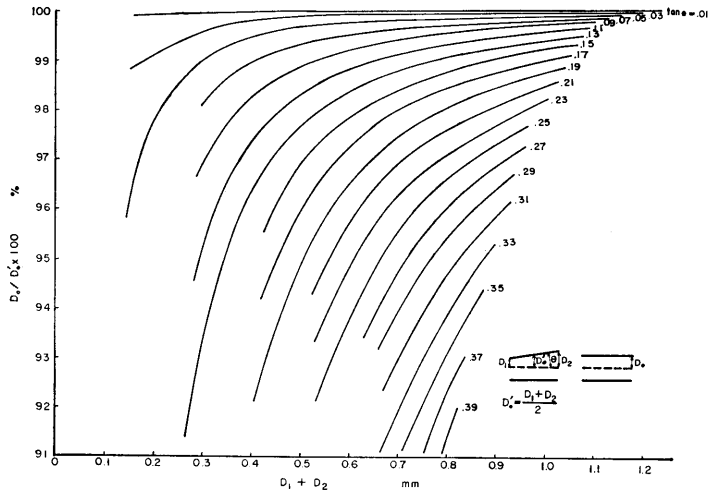


図-10 電極が平行に開いた場合とななめに開いた場合の計算値の比較

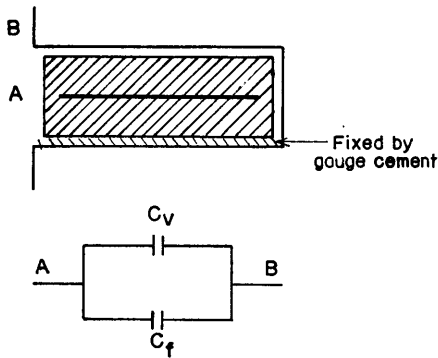


図-11 切欠部に電極を1枚挿入した時の等価回路

うな等価回路で示される。変位の計算には可変側の静電容量 C_v のみが必要であるが、固定側の静電容量 C_f を加えた値が計測される。電極を切欠部に挿入する前の C_f と挿入した時の C_f とは切欠面に電極を接着した接着剤の厚さや切欠部の浮遊容量の影響で異なった値を示す。この影響を除くために 図-12 に示すように2枚の電極を切欠に挿入し切欠面の両側に接着剤で固定した状態で可変側の静電容量 C_v および固定側の静電容量 C_f と C_f' を求める。この場合、2枚の金属箔電極が試験片の切欠間隔いっぱいになるように固定側絶縁物の厚さを調節し切欠面に電極を接着剤ではりつける。

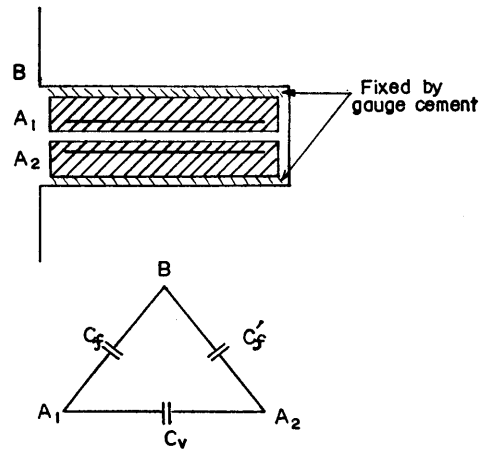


図-12 切欠部に電極を2枚挿入した時の等価回路

初期静電容量 C_0 は次のようにして求める。金属箔電極 A_2 を B に接地した場合、 A_1 と A_2 の静電容量 C_x は次式で示される。

$$C_x = C_0 + C_f \quad (5)$$

A_1 を接地した場合、 A_2 と A_1 の静電容量 C_y は次式で示される。

$$C_y = C_0 + C_f' \quad (6)$$

次に A_1 と A_2 を短絡し、 B との静電容量 C_z を求めると次式により示される。

$$C_z = C_f' + C_f \quad (7)$$

上記3式より次の関係が求められる。

$$\left. \begin{aligned} C_v &= \frac{1}{2}(C_x + C_y - C_z) \\ C_f &= \frac{1}{2}(C_x - C_y + C_z) \\ C_f' &= \frac{1}{2}(-C_x + C_y + C_z) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

2枚の金属箔電極をもちいれれば実験温度での C_v, C_f および C_f' をもとめることができる。

まず、切欠部の開口変位をもとめるには実験温度で 図-5 の平衡静電容量 C_1 をもちいてバランスをとる。電圧と静電容量の校正表は平衡静電容量のバランスをくずしてもとめる。校正表の一例を 図-13 に示す。図-9 でのべたように初期静電容量 C_v が大きいほど、勾配がきつくなり直線部分は増大する。初期の電極間隔 D_0 は (3) 式より次式で示される。

$$D_0 = \left(\frac{S}{C_v} - \frac{D_s}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right) \epsilon_0 \quad (9)$$

つぎに荷重をかけた時の電圧変化より静電容量の変化 ΔC_v を校正表よりもとめる。開口時の電極間隔 D が次式で計算できる。

$$\left. \begin{aligned} D &= \left(\frac{S}{C_v'} - \frac{D_s}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right) \epsilon_0 \\ C_v' &= C_v - \Delta C_v \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

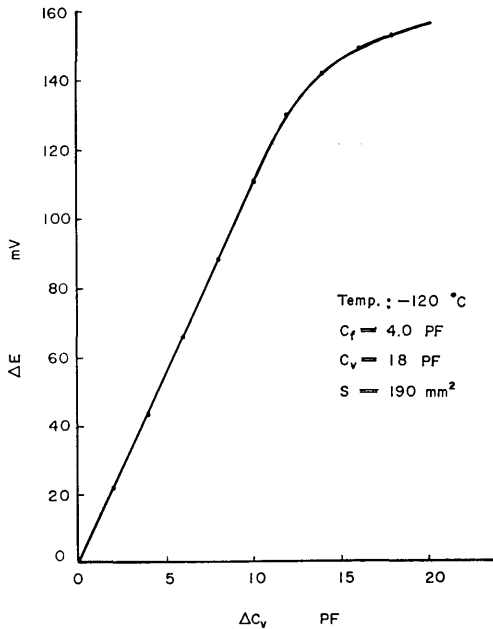


図-13 校正表の一例

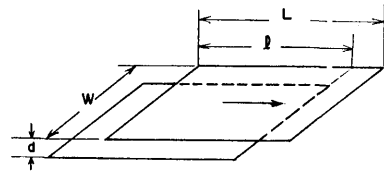
開口変位 Φ は (9) 式と (10) 式より次式のように示される。

$$\Phi = \left(\frac{1}{C_v'} - \frac{1}{C_v} \right) \epsilon_0 S \quad (11)$$

4.2 電極対向面積を変化させる方法

この方法は電極対向面積が $l \times W$ のものを 図-14 のように矢印の方向に移動したときの変位をもとめる。

(1) 式より明らかなように、電極の対向面積が大きいほど、また電極のスライド面の絶縁物の厚さが薄くて比誘電率が大きいほど、静電容量の変化は大きくなり測定感度は増大する。同時に測定精度は電極面のなめ



$$C_v = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s l W}{d}$$

図-14 電極対向面積が変化した場合

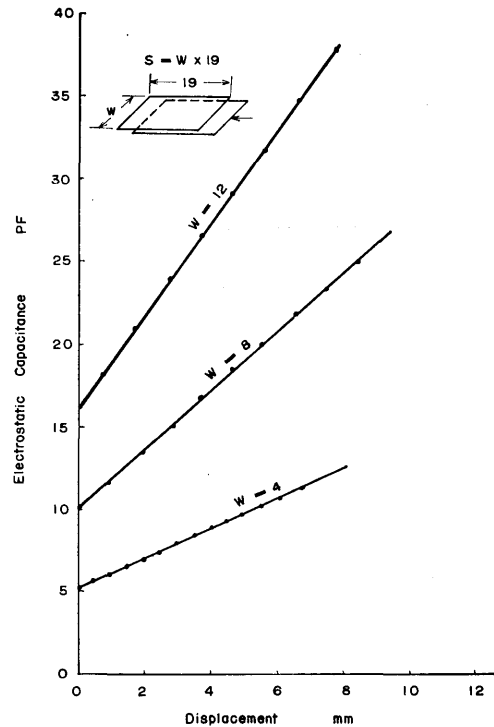


図-15 静電容量と変位の関係

らかさと電極の幅 W により決定され、変位の大きさは l によってきまる。この場合電極は平行に移動することが必要である。 W をパラメータにし静電容量と変位の関係をもとめると図-15 のようになり1本の直線で示される。また、端効果のため図-14 のように電極を移動方向にずらせて対向させた位置での変位はよい直線性がえられる。このことは電極間の誘電体を移動させる方法についてもいえる。

電極が図-14 のように対向している時(写真-1(d))の初期静電容量 C_0 は次式で示される。

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 W l}{d} \quad (12)$$

図より矢印の方向の開口変位 ϕ は次式で示される。

$$\phi = l \left(1 - \frac{C_0'}{C_0} \right) \quad (13)$$

ただし、 C_0 : 電極対向面積が変化する前の静電容量、 C_0' : 電極対向面積が変化した時の静電容量、 l : 電極の移動方向の対向長さを示す。

ある点の変位をもとめるには図-14 より移動方向の電極長さ L (電極対向長さ l) を大にし、移動方向と直交方向の電極の幅 W を小さくすれば、測定点の変位をもとめることができるが測定感度は悪くなる。しかし L を小さくして W を大きくすれば測定点近傍の平均の変位をもとめることになるが、測定感度は増大する。電極の L と W は測定精度と感度のかね合いから決定される。

4.3 電極間の誘電体を移動させる方法

この方法は図-16 のような等価回路で示され初期静電容量 C_0 は次式で示される。

$$C_0 = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0 W}{d} \{ \epsilon_s (L - X) + X \} \quad (14)$$

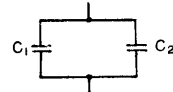
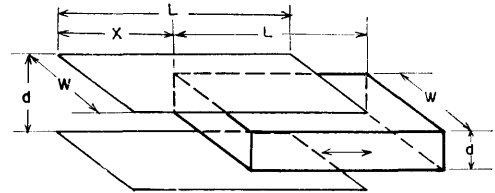
W : 荷重と直交方向の電極の幅、 d : 電極間隔(誘電体の厚さ)、 L : 移動方向の電極の対向長さ、 X : 移動方向に誘電体が移動した長さを示す。

また、変位は次式で示される。

$$\phi = \frac{(C_0' - C_0) \{ X + \epsilon_s (L - X) \}}{C_0 (\epsilon_s - 1)} \quad (15)$$

ただし、 C_0 : 電極間の誘電体が移動する前の静電容量、 C_0' : 電極間の誘電体が移動した後の静電容量、電極間隔が狭く比誘電率の大きい絶縁物ほど感度はよくなる。移動方向と直交方向の誘電体の幅 W は測定精度に関係し、移動方向の電極の長さ L は変位の大き

さに比例する。誘電体の W と L は測定感度と精度および変位の大きさにより決定される。この方法は機構が複雑で変位の測定に必ずしも適さない。誘電体の厚さ d をパラメータにして静電容量と変位の関係をもとめると図-17 のようになる。誘電体には厚さ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm の雲母をもちいた。変位が零の時は電極間に雲母がない時の静電容量を示す。



$$C_1 = \frac{\epsilon_0 W X}{d}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 W (L - X)}{d}$$

$$C_0 = C_1 + C_2$$

図-16 電極間の誘電体を移動させる場合

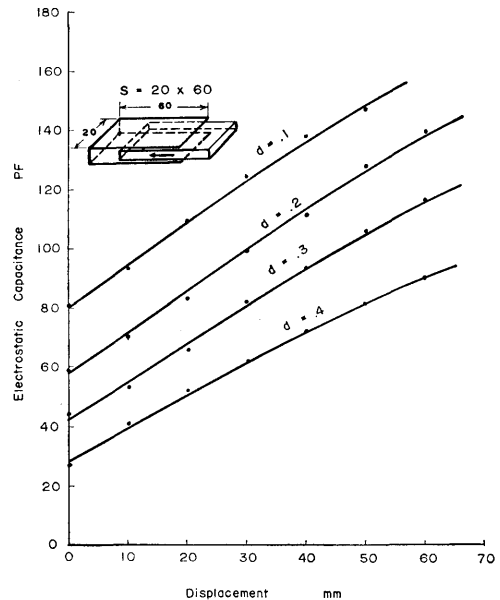


図-17 静電容量と変位の関係

5. 動的な特性

平衡回路の動的な特性をもとめるために図-5の回路を簡略化すると図-18(a)の等価回路で示される。階段関数波電圧を加えた場合の電流 i は次式で示される。

$$i = \frac{E}{R} e^{-t/CR} \quad (16)$$

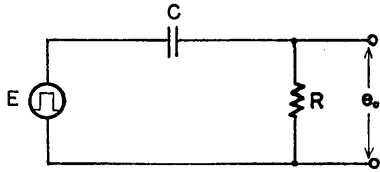
出力電圧 e_0 は次のように示される。

$$e_0 = E e^{-t/CR} \quad (17)$$

その時の時定数は次式で示される。

$$T = CR \text{ (sec)} \quad (18)$$

e_0 の時間的経過の様子は図-18 (b) に示す。CR が小さいほど時定数は小さくなる。もちいた平衡回路(図-5)の被測定静電容量 C_1 には C_0 とケーブルの静電容量が含まれている。 C_0 を 50, 100, 200 PF について瞬間的に変化させた時の波形の立ち上り曲線の一例を写真-4 に示す。回路, 制動抵抗およびインピーダンス

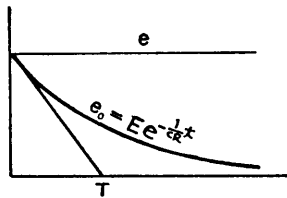


$$T = CR$$

$$0 \leq \omega < \pi \quad \left\{ \begin{array}{l} C = C_1 \quad R = r_1 + r_5 \\ \text{or} \\ C = C_2 \quad R = r_2 + r_6 \end{array} \right.$$

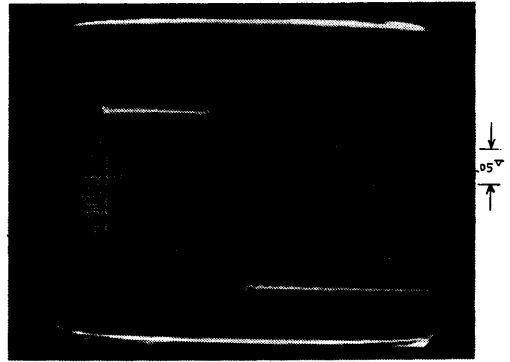
$$\pi \leq \omega < 2\pi \quad \left\{ \begin{array}{l} C = C_1 \quad R = r_3 + r_6 \\ \text{or} \\ C = C_2 \quad R = r_4 + r_5 \end{array} \right.$$

(a)



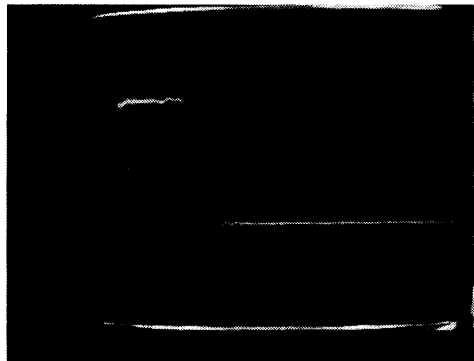
(b)

図-18 平衡回路の等価回路および動的な特性



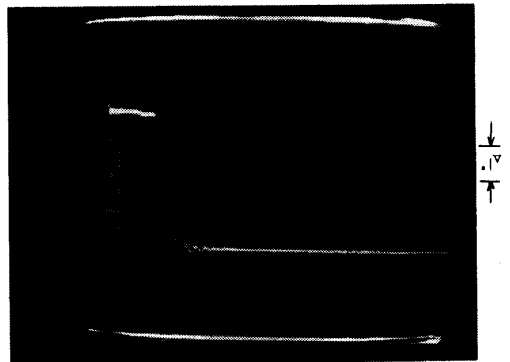
→20 μs←

$C_0 = 50 \text{ PF}$



→20 μs←

$C_0 = 100 \text{ PF}$



→20 μs←

$C_0 = 200 \text{ PF}$

写真-4 静電容量の変化による波形の立ち上り特性

スのマッチングを考慮し諸定数を適当に選ぶことによりよい波形の立ち上り曲線を与えることができた。

荷重の検出はロードセルによる方法と加速度計による方法とがある。シャルピー衝撃試験機の試験片受台

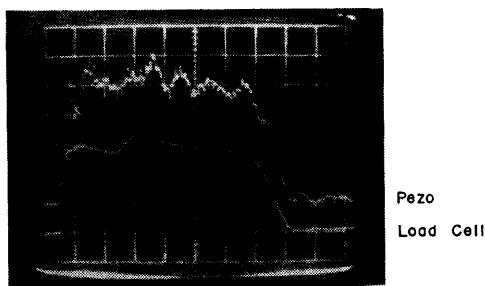


写真-5 荷重および加速度-時間特性

にロードセルを、ハンマに加速度計をとりつけ荷重-時間曲線および加速度-時間曲線をもとめ写真-5に示す¹⁶⁾。写真の下は荷重曲線、上は加速度の変化を示す。荷重と加速度計の変化にはよい相関関係のあることがわかる。加速度計にはゲージ型と圧電型の加速度計があり、衝撃速度の速いものは圧電型の加速度計をもちいる必要がある。圧電効果を持つ物質は単結晶と等方性磁器の2種類ある。単結晶は水晶、等方性磁器にはチタン酸バリウムで代表される。これらの圧電素子の一覧表を表-4に示す⁷⁾。圧電素子に発生する電圧は静電容量 C のコンデンサと等価である。その電圧を測るために圧電素子の端子を図-19(a)に示すようにオシロスコープに接続するとブラウン管上にあらわれる電圧は一定値を示さず図-19(b)のように時間とともに減衰する曲線を示し次式で示される。

$$V(t) = V_0 \exp\left(-\frac{t}{CR}\right) \quad (19)$$

CR が時定数でその大小で減衰の速さがきまる。図-19(a)は直接オシロスコープに接続しているが、普通

表-4 圧電素子

材 料	$d\left(\frac{\text{esu}}{\text{ダイン}}\right)$	ϵ_s	d/ϵ
ロッシェル塩 (34°C)	500×10^{-8}	200	2.5×10^{-8}
水 晶	6.4 "	4.5	1.4 "
第1リン酸アンモン (ADP)	60 "	17.5	3.2 "
チタン酸バリウム	570 "	1700	0.34 "
ギ酸ストロンチウム	347 "	4.6	7.55 "
リ ン 酸 カ リ	50 "	29	1.72 "

ϵ_s : 比誘電率
 d : 圧電率

はその間に増幅器がつながれる。増幅器が入った時の回路の時定数を定める R は増幅器の入力抵抗になる。

動的な測定では信号を歪なく伝送するために測定系の周波数レスポンス (応答性) が重視される。圧電素子は圧力を電圧に変換する変成器とみなされ変換される2量の間の周波数レスポンスは重要である。また測定における信号波形は、ケーブルのような分布定数回路、増幅器のような集中定数回路を通るがその間つねに入力信号と出力信号のレスポンスが問題になる。測定系は線型である。すなわち入出力の間には比例関係がなりたつ。この比例定数にあたるものが周波数の関数となり、これが周波数レスポンス関数とよばれる。レスポンス関数 $A(j\omega)$ は、その時の振幅の利得 $|A|$ と位相の変化 N とすると次式のように複素量としてあらわしたものにあたる。

$$A(j\omega) = |A| e^{jN} \quad (20)$$

その時の圧電素子の周波数特性を求めると図-20¹⁵⁾のようになり、角周波数が $1/\tau$ より充分大きいところで

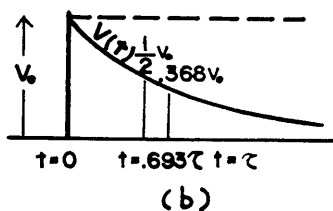
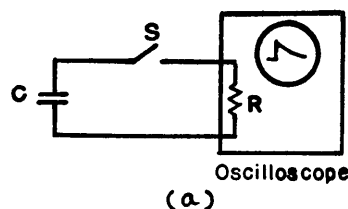


図-19 圧電素子を含む回路の時定数

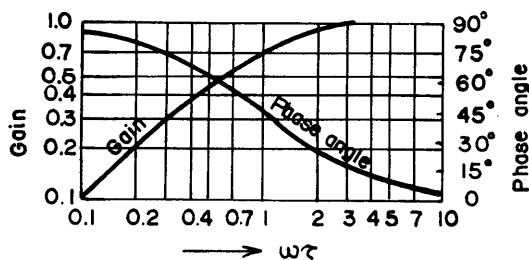


図-20 圧電素子変成器の周波数特性

は、入出力の比は一定と考えられるが、低い周波数では利得は下がり位相もずれるようになる。

6. 計測方法

測定回路のブロック線図を 図-21 に示す。平衡回路

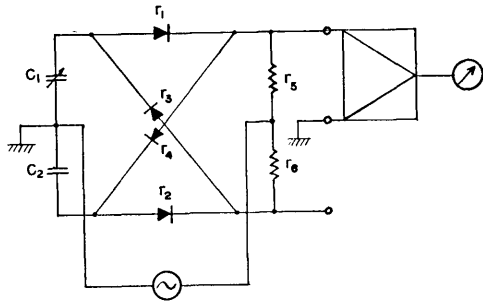


図-21 測定回路のブロック線図

で周波数が $0 \leq \omega < \pi$ の範囲では $C_1, C_2, r_1, r_2, r_5, r_6$ また $\pi \leq \omega < 2\pi$ の範囲では $C_1, C_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ でブリッジ回路を構成することは 図-5 に示されている。 C_2 は被測定静電容量で切欠部の電極間の静電容量および配線による浮遊容量を加えたものである。平衡静電容量 C_1 により平衡回路のバランスをとる。⊖ は平衡回路に高周波電圧を加えるための発振器で周波数は 5MHz である。⊠ は増幅器を示し平衡回路の不平衡電圧を増幅し記録計で記録する。

静電容量の変換方法は (a) (b) (c) の方法があり、金属箔電極の初期の静電容量の C_0 求め方は前述のような方法(4章)で実験温度での C_0 を求める。 C_0 は LC メータでもとめるが LC メータの取り扱いについては特に注意する必要がある。金属箔電極を平衡回路の測定端子に接続すると C_0 と配線による浮遊容量を含めて被測定静電容量 C_2 であらわされ、平衡回路のバランスは平衡静電容量 C_1 にとる。次に荷重をかけた時の静電容量の変化 ΔC_0 より前述のそれぞれの計算式(4章)で開口変位を求める。

7. 計測結果

7.1 電極間隔を変化させる方法

試験片の切欠内部に金属箔電極を挿入し、電極間隔を変化させる方法で破壊発生時の限界開口変位を計測したいいくつかの例を示す。

7.1.1 Deep Notch Test の開口変位の計測⁶⁾

供試鋼は 表-5 に示す化学成分と機械的性質をもつ、板厚 25 mm の SM 41 B である。試験片は 図-22 に示す形状寸法の Deep Notch Test 試験片で、切欠部は先端半径が 0.1 mm のスリットが 2 mm あり、つづいて電極を挿入するために幅 S の部分が 10 mm ある。切欠の全長は $C=80$ mm で、S を 0.2, 0.6, 1.2,

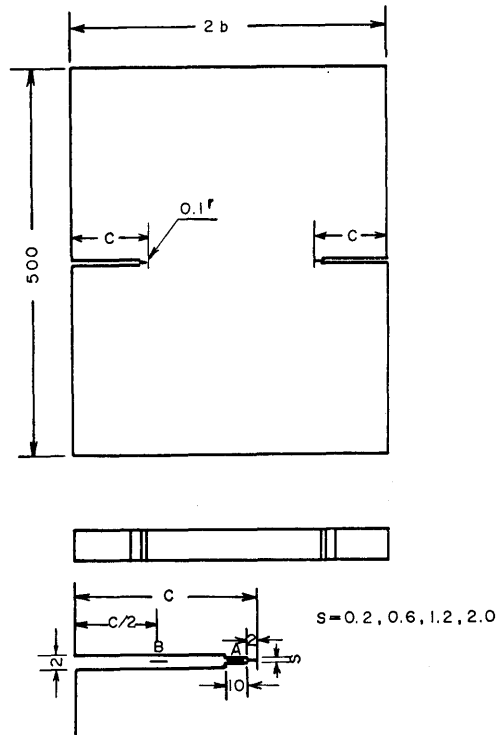


図-22 試験片の形状寸法

表-5 化学成分および機械的性質

	Chemical Composition (%)					Mechanical Properties			
	C	Si	Mn	P	S	Yield Point kg/mm ²	Tensile Strength kg/mm ²	Elongation %	Impact Value kgm/0°C
SM41B	0.16	0.04	1.15	0.008	0.020	29	45	35	15.5

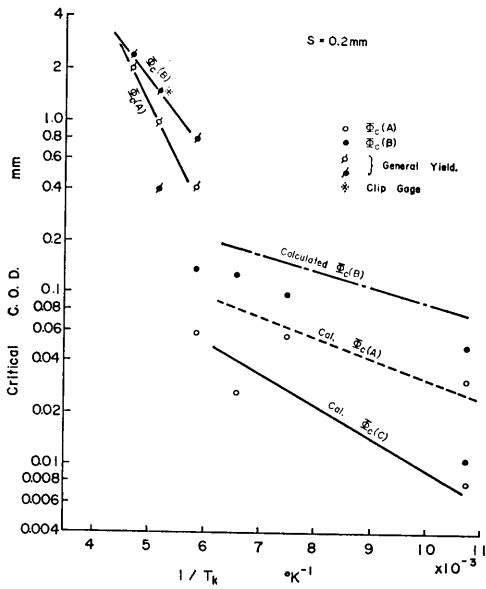


図-23 限界亀裂開口変位と絶対温度の逆数の関係 (S=0.2)

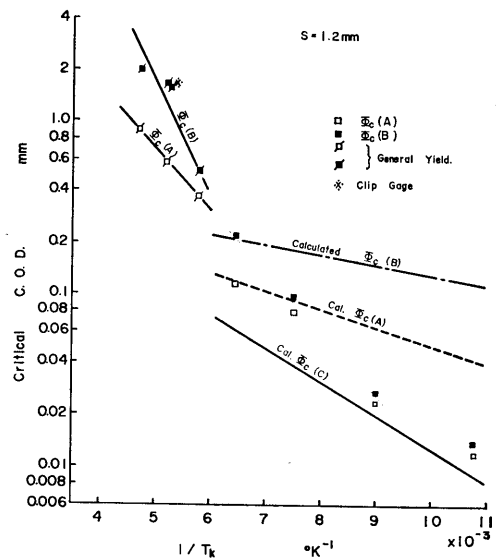


図-25 限界亀裂開口変位と絶対温度の逆数の関係 (S=1.2)

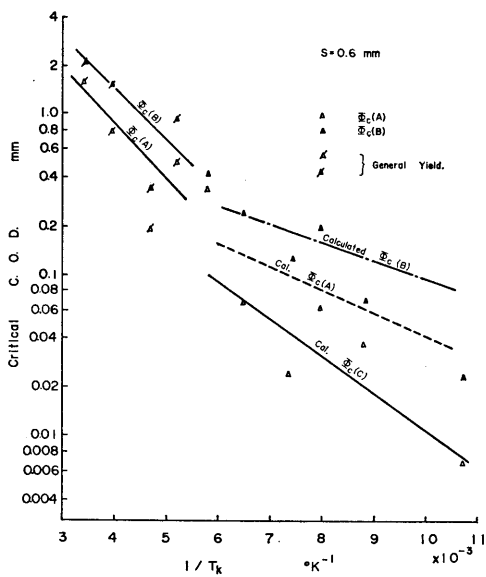


図-24 限界亀裂開口変位と絶対温度の逆数の関係 (S=0.6)

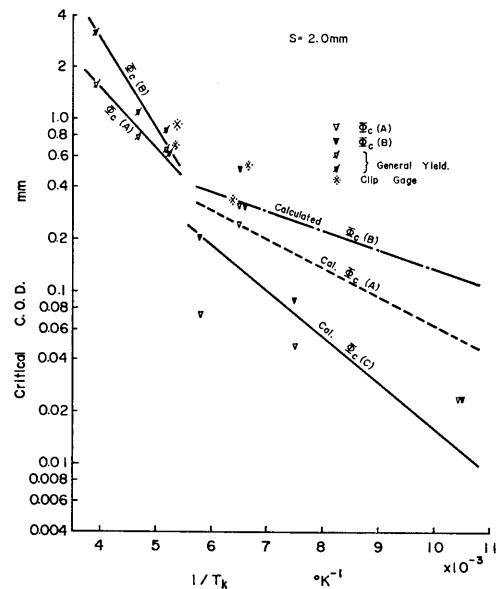


図-26 限界亀裂開口変位と絶対温度の逆数の関係 (S=2.0)

2.0 mm に変化させた。開口変位は $8 \times 16 \text{ mm}^2$ の面積をもつ電極を1枚使って、切欠先端近傍 (A) および中央位置 (B) で計測した。

計測結果は横軸に試験温度を絶対温度の逆数で示し、縦軸に限界亀裂開口変位をとって示すと $S=0.2 \text{ mm}$ については図-23 のようになる。また $S=0.6 \text{ mm}$ の結果を図-24, $S=1.2 \text{ mm}$ を図-25, $S=2.0 \text{ mm}$ を図-26 にそれぞれ示す。A点の計測値 $\phi_\alpha(A)$ は白ぬきの印でB点の $\phi_\alpha(B)$ は黒ぬり印で示してあるが $\phi_\alpha(B)$ が $\phi_\alpha(A)$ より大きい値を示す。試験片の切欠断面が全面降伏しない温度領域では BCS モデルによる理論をもちいて計算した結果と比較してみると $S=0.2, 0.6 \text{ mm}$ の計測値 $\phi_\alpha(A)$ が切欠先端での計算値 $\phi_\alpha(C)$ (実線) にほぼバラツキの範囲で等しくなる。しかし $S=1.2, 2.0 \text{ mm}$ では計測値と計算値は異なった傾向を示している。またこの場合、計測値の $\phi_\alpha(B)$ と $\phi_\alpha(A)$ の差は計算値の場合より小さくなった。これらのことから計測値 $\phi_\alpha(A)$ は比較的狭い切欠ではほぼ切欠先端の限界亀裂開口変位を示すと考えられる。全面降伏した場合の計測値は記号に斜線をつけて (例えば ϕ 印) 計測値を実線で結んで示した。全面降伏しないものと比べ

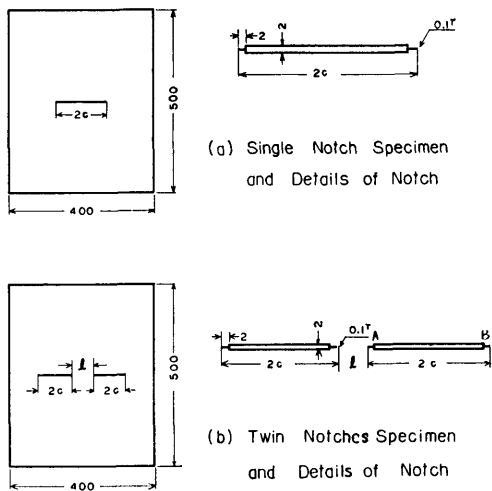


図-27 試験片の形状寸法

てみると計算値の直線 (破線および鎖線) より勾配は大きくなる。しかし計測値だけをみると、両領域の限界亀裂開口変位はバラツキの範囲内で1本の直線であらわすこともできる。またこの領域での $\phi_\alpha(B)$ と $\phi_\alpha(A)$ の差は比較的小さいが傾向は S が変わると一定ではない。本方法による計測値をクリップ・ゲージによる計測値 (※印) と比べてみるとほぼ一致した値を示した。

7.1.2 等長直線切欠の開口変位の計測¹⁰⁾

供試鋼は板厚 20 mm の 60 キロ高張力鋼で、その化学成分と機械的性質を表-6 に示す。試験片は図-27 に形状および寸法を示すように、長さ $2c$ の切欠2個が内側切欠間距離 l だけ離れて一直線上に並ぶ試験片である。 $2c$ および l を数種変化させ切欠相互の干渉効果をしらべるための試験片である。開口変位は、内側切欠先端近傍 (A) および外側切欠先端近傍 (B) の 2 mm

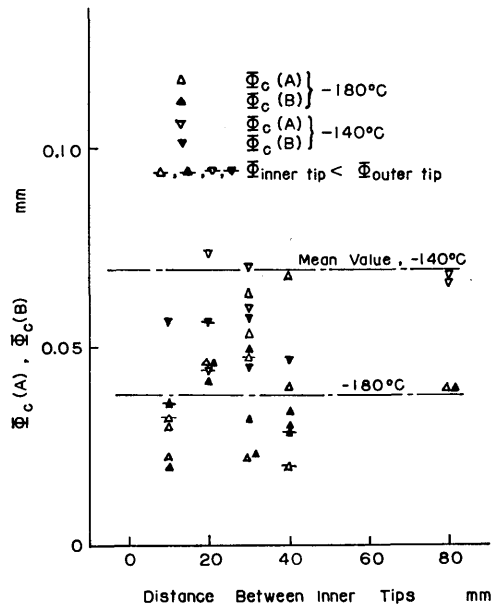


図-28 近接切欠試験片の限界C.O.D.と内側切欠間距離の関係 ($2c=40 \text{ mm}$)

表-6 化学成分および機械的性質

Chemical Composition (%)									Mechanical Properties		
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Y.P. kg/mm ²	T.S. kg/mm ²	El. %
0.13	0.36	1.19	0.016	0.015	0.52	0.05	0.099	0.041	58	66	39

幅のスリットの先端に $9 \times 16 \text{ mm}^2$ の電極 1 枚を挿入して計測した。

$2c=40 \text{ mm}$ で試験温度 -140°C および -180°C の場合の限界亀裂開口変位と切欠間距離 l の関係を 図-28 に示す。また -180°C で $2c=40 \text{ mm}$ と 80 mm の計測結果を横軸に切欠長さ $2c$ と切欠間距離 l の比 λ をとってあらわすと 図-29 になる。内側切欠先端の計測値 $\Phi_c(A)$ が、外側切欠先端値 $\Phi_c(B)$ より全般に大きく、その差は切欠間距離が小さいほど大きく、切欠間距離が切欠長さの 2 倍になるとほぼ等しくなる。これは切欠が近い場合切欠相互の干渉効果により内側先端に歪集中をおこし $\Phi_c(A)$ が $\Phi_c(B)$ より大きくなる。したがって破壊は開口変位の大きい内側切欠先端から発生し、ついで外側切欠からでた亀裂が試験片を破断させると考えられる。測定値はかなりバラツキがあるが、各試験片について大きい方の Φ_c を平均してみると鎖線で示すように -140°C では $\Phi_c=0.069 \text{ mm}$ 、 -180°C では $\Phi_c=0.038 \text{ mm}$ となる。限界亀裂開口変位の考え方から Φ_c は材料および温度が定まれば一定値をとり、この値になると破壊が発生するとすれば破壊発生応力は、内側切欠先端の歪集中の大きい、つまり切欠間距離の小さい場合ほど低くなる。

7.1.3 不等長直線切欠、等長並列切欠および等長階段状切欠の開口変位の計測¹¹⁾

供試鋼は板厚 20 mm の 60 キロ 高張力鋼で、その化学成分と機械的性質を 表-7 に示す。開口変位の計測は、 $4 \times 19 \text{ mm}^2$ の金属箔電極 2 枚を幅 1 mm の切欠先端に挿入しておこなった。

不等長直線切欠試験片の形状寸法を 図-30 (a) に示す。中央に長さ $2c_1=80 \text{ mm}$ の切欠を配し、両側に長さ $2c_2$ の切欠を切欠間距離 l だけ離して配置したもので、長さの異なる切欠の干渉効果をしらべるためのものである。 $2c_2=40 \text{ mm}$ で l を変化させた場合の計測値を 図-31 に示す。中央の長い切欠の限界開口変位 (A 点白ぬき印) が両側の短い切欠 (B 点、黒ぬき印) より全般に大きいのが特徴である。また計測値は 0.01 か

ら 0.04 mm の範囲に分散しており、定量的な傾向はなく、ほぼ $\Phi_c=0.02 \text{ mm}$ で破壊が発生したと考えられる。この場合、等長直線切欠の場合と同じく切欠が近づくと干渉効果により歪集中が生じるので、破壊発生応力は切欠が近づくほど低下する。また、歪集中の程度が長い方の切欠先端で高いため、等長直線切欠の場合より破壊発生応力は低い。

等長並列切欠の試験片の形状寸法を 図-30 (b) に示す。2 個の等長切欠が並列しているもので、荷重方向の垂直距離 v を種々に変化させた。 $2c=40 \text{ mm}$ および 80 mm についてそれぞれの切欠先端で計測したものの最大値をとって示すと 図-32 のようになる。 v が小さくなって切欠が近づくほど限界開口変位が大き

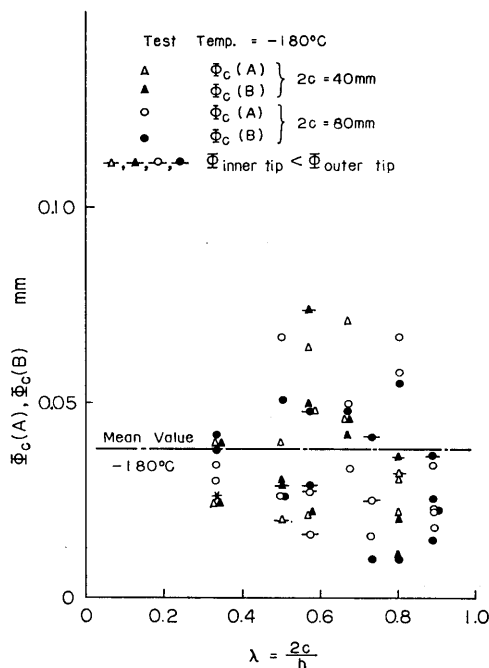
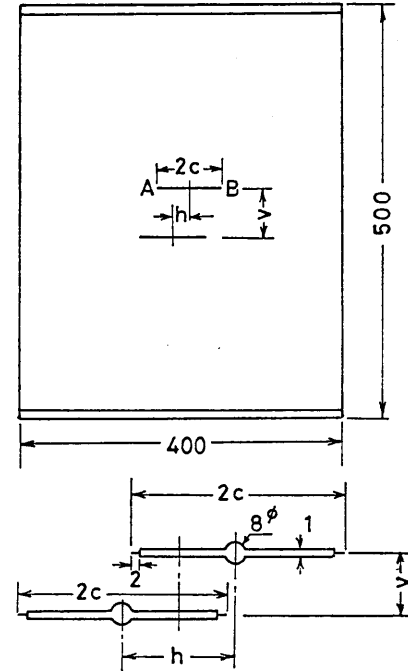
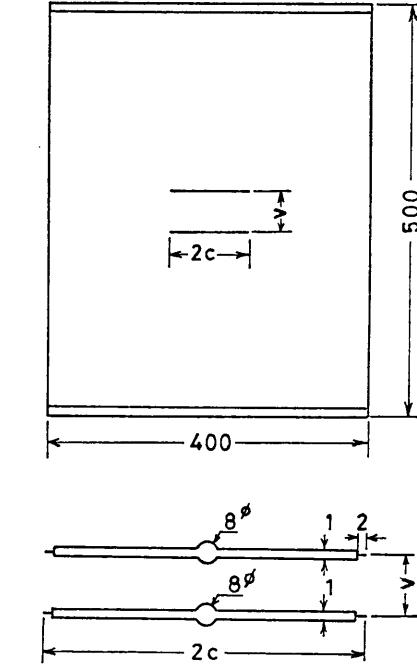
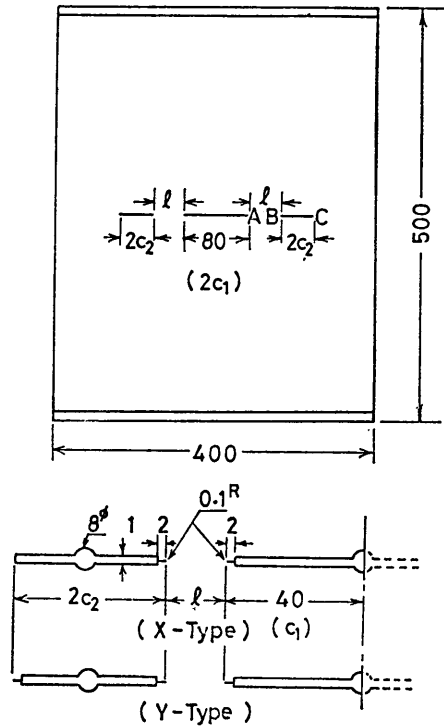


図-29 近接切欠試験片の限界 C.O.D. と λ の関係 (試験温度 -180°C)

表-7 化学成分および機械的性質

Steel	Chemical Composition (%)							Mechanical Properties		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Y.P. kg/mm ²	T.S. kg/mm ²	El. %
Welten 60 (Thickness 20 mm)	0.14	0.46	1.21	0.022	0.007	0.17	0.03	58	68	39



(a) Unequal Length Collinear Notches

(b) Equal Length Parallel Notches

(c) Equal Length Parallel Staggered Notches

図-30 試験片の形状寸法

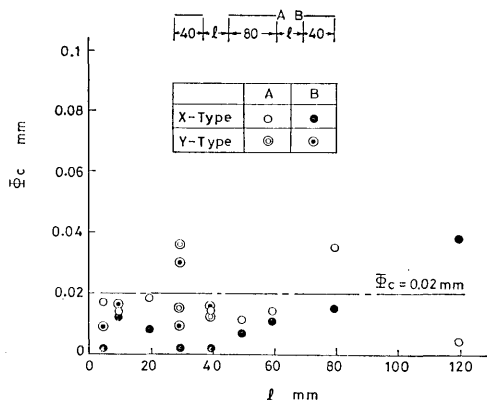


図-31 不等長直線切欠の Φ_c と切欠先端間距離の関係

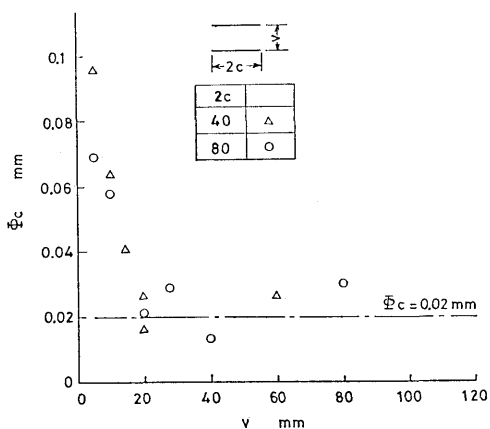


図-32 等長並列切欠の Φ_c (最大値) と垂直距離の関係

なるのが特徴で、切欠間隔が切欠長さの $1/2$ 程度になれば干渉効果はなくなり、材料の限界値 $\Phi_c=0.02$ mm で破壊が発生する。このことは極く近接した並列切欠については、限界亀裂開口変位論つまり開口変位が材料および温度により定まる限界値に達すると破壊が発生するという仮定に反する。また切欠が近づくとも2個の切欠にはさまれた部分に应力が伝わらないため開口量も小さくなり、破壊発生应力は切欠が近づくほど増加する。

階段状切欠の試験片形状寸法を図-30(c)に示す。これは垂直方向に v だけ離れた2個の切欠が荷重と直交方向(水平方向)に h だけずれたものである。開口変位は図に示すA点、B点の切欠先端で計測した。 $v=20$ mm の場合の計測値を横軸に水平距離と切欠長

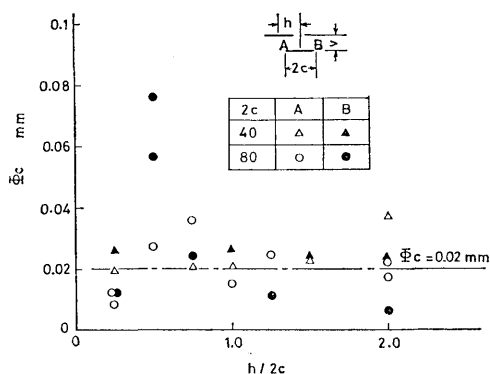


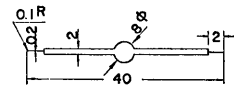
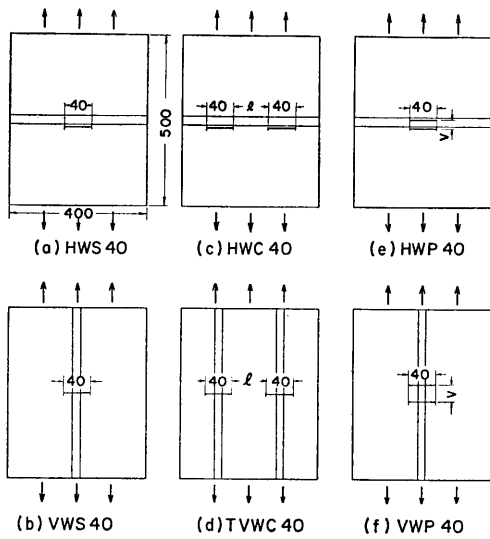
図-33 等長階段状切欠 ($v=20$ mm) の Φ_c と $h/2c$ の関係

さの比をとって示すと図-33のようになる。切欠がオーバーラップしているとき ($h/2c < 1$) ではB点の計測値がA点より大きいが、切欠が離れるとA点の計測値がB点より大きくなる。そして破壊はほぼ材料の限界値 $\Phi_c=0.02$ mm で発生していると考えられるが、切欠長さの長い $2c=80$ mm の場合 $v=20$ mm では $h/2c > 1.0$ で等長並列切欠の場合と同様 Φ_c が上昇する傾向を示す。

7.1.4 溶接継手に存在する近接切欠の開口変位¹²⁾

供試鋼は前項と同じ板厚 20 mm の 60 キロ高張力鋼をもちい、手溶接で、縦継手および横継手を製作し、それぞれに、単一切欠、等長直線切欠および等長並列切欠を入れた。試験片の形状寸法を図-34に示す。開口変位の計測は、 4×19 mm² の電極2枚を 0.1 mm 幅の切欠先端に挿入しておこなった。

単一切欠が母材 (BMS 40)、横継手のボンド部 (HWS 40) および縦継手に直角方向 (VWS 40) に存在する場合の限界亀裂開口変位と絶対温度の逆数の関係を図-35に示す。なお、同図には B.C.S. モデルによる理論式をもちいて求めた BMS 40 および HWS 40 の Φ_c の値をそれぞれ実線と破線で示した。図から、まず、VWS 40 が示した Φ_c 値は BMS 40 のそれとほぼバラツキの範囲で一致していることがわかる。これは従来から溶接部の問題に適用されていた「荷重によって生ずる亀裂開口変位 Φ_A のみが破壊に寄与する」という C.O.D. 仮説の妥当なことを裏付ける結果といえる。これに対して HWS 40 の場合、当然のことながら切欠存在部の材質が劣化しているため、 Φ_c 値は母材より低くなっている。また、BMS 40 および VWS 40 の実測値はその測定位置(切欠先端から 3 mm 内



Details of Notch
 図-34 試験片の形状寸法

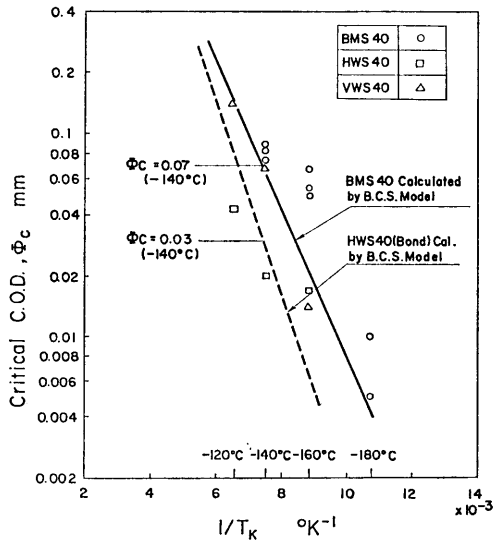


図-35 限界亀裂開口変位と絶対温度の逆数の関係

側)を考慮すると B.C.S. モデルによる切欠先端の ϕ_c 値と比較的よく一致している。しかし HWS 40 は実験値のバラツキも大きく、B.C.S. モデルによる計算値

(120)

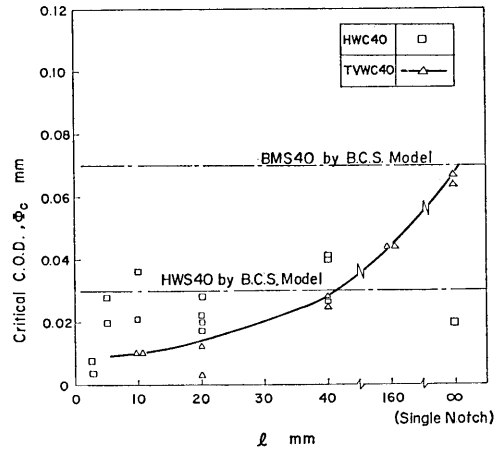


図-36 等長直線切欠の限界亀裂開口変位と切欠間距離の関係 (試験温度 -140°C)

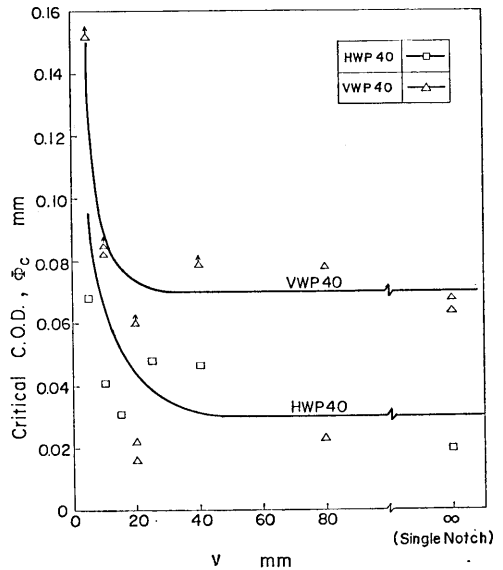


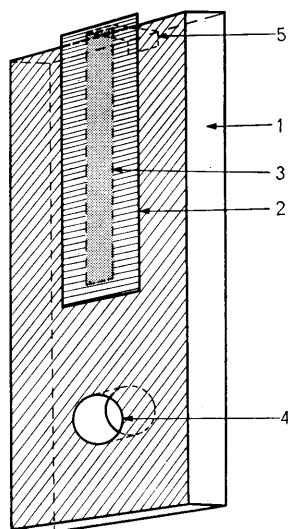
図-37 等長並列切欠の限界亀裂開口変位と切欠間距離の関係 (試験温度 -140°C)

より小さいものもある。

横継手のボンド部に存在する等長直線切欠 (HWC 40) および2つの縦継手に存在する等長直線切欠 (TVWC 40) の限界亀裂開口変位の計測結果を図-36に示す。限界亀裂開口変位は2つの切欠の各切欠先端近傍で計測したが、おおむね内側先端の値が外側の値より大きく、母材試験結果と同様に破壊は内側切欠先端から発生したと考えられる。そこで HWC 40 および

TVWC 40 について、内側切欠先端の計測値をとり切欠間距離 l との関係を示した。計測値にバラツキもあるが、HWC 40 については l がごく小さいもの以外はほぼ一定で、単一切欠の HWS 40 と同様 $\Phi_0 \approx 0.03$ mm で破壊する。TVWC 40 については切欠間距離が増大するにつれて実測値は実線のように増大するが BMS 40 (=VWS 40) の鎖線 ($\Phi_0 \approx 0.07$ mm) より低い。これは 2 本の縦継手にはさまれた切欠先端近傍が、高い引張残留応力のため切欠挿入時に予荷重効果をうけたためか。溶接線直角方向の残留応力が比較的高いため拘束の影響をうけたものと思われる。

等長並列切欠について横継手に存在する並列切欠 (HWP 40) および縦継手の並列切欠 (VWP 40) の限界亀裂開口変位は破断した切欠の値が破断しない切欠よ



1. Bakelite Plate
2. Insulator (Cemented Polyester Film)
3. Foil Electrode (Copper-Nickel Alloy)
4. Hole for Attaching to Test Piece
5. Terminal for Lead Wire

図-38 (a) 変位計測用電極素子

り大きい傾向を示した。破断した切欠の Φ_0 を平均して v との関係を図-37 に示す。実測値はバラツキも大きい、 v が小さくなると増大する傾向を示す。この傾向は母材試験片の並列切欠の場合と同じく「 Φ_0 が一定で破壊が発生する」とする C.O.D. 仮説と相違する。

7.2 電極対向面積を変化させる方法

ベーク板または絶縁板の上に金属箔電極を接着剤ではりつけ、さらにその上に比誘電率の大きい絶縁フィルムを接着剤ではりスライド電極素子をつくる。電極素子の一例を図-38 (a)(b) に示す。電極素子を試験片にとりつけるには試験片にドリルで穴をあけ、タップをたて電極素子を平行に保持するようにスプリングでおさえネジで固定する。

この方法で測定した計測結果の一例を図-39 に示す。供試鋼は板厚 20 mm の SM41B および WT-60 でその化学成分および機械的性質を表-8 に示す。試験片は図-22 に示す形状寸法の Deep Notch Test 試験片

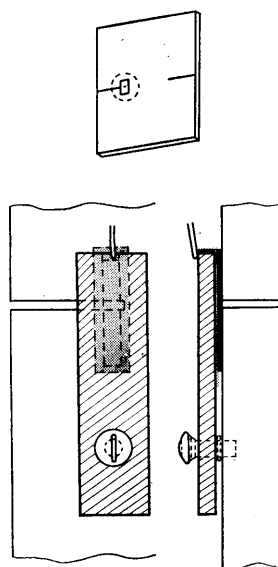


図-38 (b) 変位計測の一例

表-8 化学成分および機械的性質

	Chemical Composition (%)						Mechanical Properties			
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Y.P. kg/mm ²	T.S. kg/mm ²	El. %	I.V. kgm/0°C
SM 41B	0.12	0.25	1.02	0.016	0.017		22	43	29	13.8
WT60	0.11	0.26	1.18	0.015	0.009	0.002	58	65	42	26.1

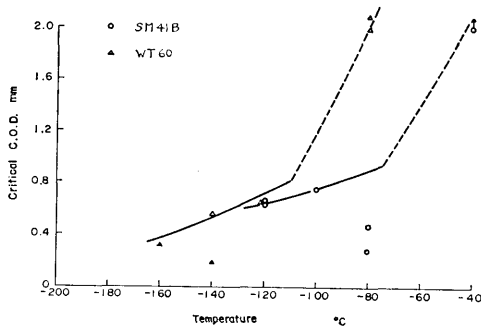


図-39 限界亀裂開口変位と実験温度の関係

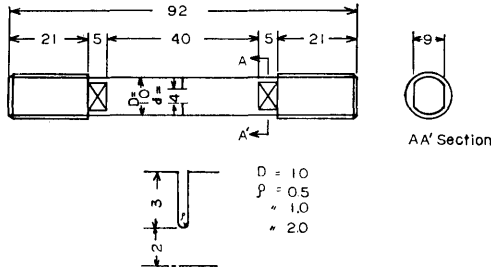
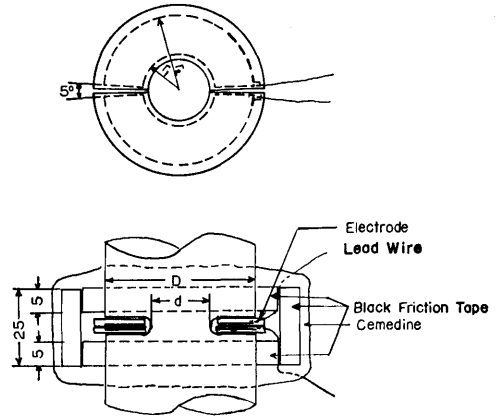


図-40 試験片の形状寸法

$$d/D = 0.6$$

D	r ₁	r ₂
10	2.2	5.0
15	3.2	7.5
20	4.3	10.0
25	5.3	12.5

図-41 円弧電極の挿入およびコーティングの状態

で $2b=400\text{ mm}$, $c=120\text{ mm}$ の切欠が入っている。その切欠先端から 1 mm はなれた所で切欠に直交するようにスライド電極素子を取りつけ開口変位を計測した。各供試鋼について、低温で実験をおこない開口変位をもとめ、SM41B については [○] 印で WT-60 は [△] 印で示す。計測値もかなりばらついているが、スライド電極素子の取付面の研磨に特に注意を払うと、さらに精度よく計測できる。また、いずれも延性破壊の開口変位が大きいのは切欠先端近傍の試験片の断面収縮による変位が入っているものと考えられる。

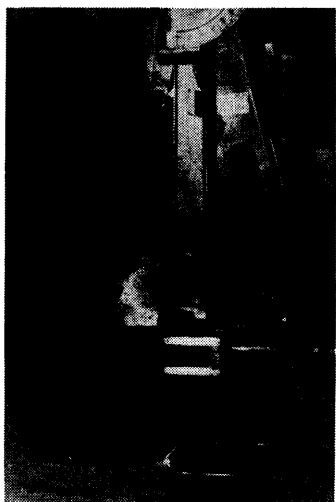
7.3 動的な開口変位の計測¹⁷⁾

衝撃荷重が加わり比較的大きな歪速度のもとで破壊が発生するような場合は静的な開口変位を適用することは適当でない¹³⁾¹⁴⁾。円周切欠付丸棒引張試験片の切欠先端半径を変えて、動的な開口変位をもとめ、静的な開口変位と比較した。

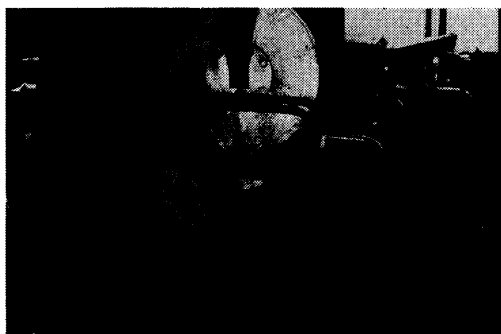
供試鋼は板厚 25 mm の SM41B をもちい、その化学成分および機械的性質は 7.1.1 章でもちいた材料と同じである。試験片は 図-40 に示すような円周切欠

付丸棒引張試験片で、直径の比 $(d/D)=0.4$ を一定にした。直径が 10ϕ で切欠先端半径 ρ が $0.5, 1.0, 2.0$ については動的な引張試験および静的な引張試験をおこなった。丸棒引張試験片の円周切欠部に 図-41 に示すように円弧電極を 2 枚向かい合わせてドーナツ型に入れ試験片の切欠面に接着する。切欠先端半径 ρ の大きいものについては電極と試験片の切欠面の間にスペーサを挿入し、電極間隔ができるだけ狭くなるように接着剤で固定する。電極を保護するために丸棒引張試験片の円周切欠の両側に 5 mm 幅のブラックテープを巻きつけ、さらにその上に 25 mm 幅のブラックテープを巻きセメダインでコーティングする。

動的な開口変位の計測はシャルピー衝撃試験機のハンマの背に試験片を取りつけ、ハンマを振り下した時に試験片の先端にとりつけたブロックがアンビルにひっかり試験先を破断させる方法でおこなった。試験片を実験温度に冷却あるいは加熱する時の様子を写真-6 に示す。ハンマを振り下し方向に持ち上げ試験片が地面に垂直になるように固定する。恒温槽をハンマ



(1)



(2)

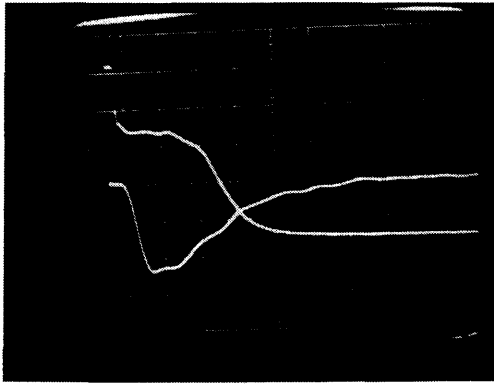


(3)

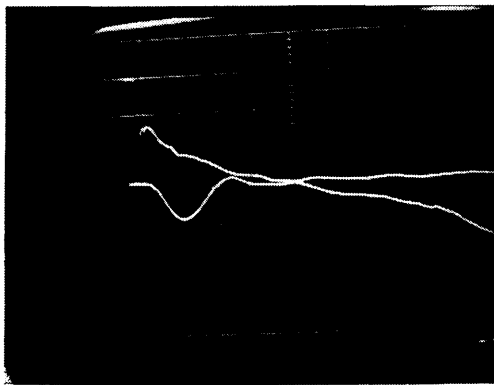


(4)

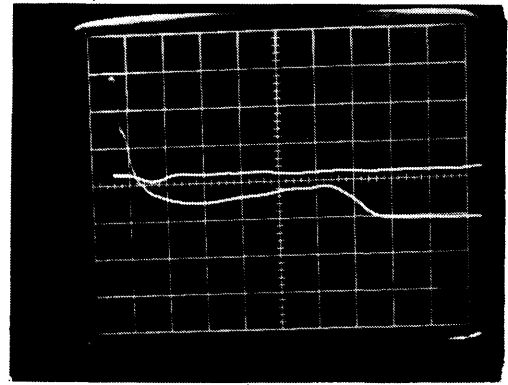
写真-6 実験状況



実験温度 16°C 吸収エネルギー 15.5 kgm



実験温度 -35°C 吸収エネルギー 1.5 kgm



実験温度 -55°C 吸収エネルギー 3 kgm

写真-7 計測結果

の下にとりつけ液体窒素および温水で試験片を浸漬して、実験温度近傍に達したらハンマをもどし、所定の打撃エネルギーのところまでもち上げる。シンクロスコープに零点のスポットをだし既知量変化させるにどれだけの静電容量が必要か平衡回路のダイヤルでよみ

とる。シャルピー衝撃試験機の引金をひきハンマが試験片に当たる直前にフォト・トランジスタ回路の光を切りトリガ回路を働かす。その時の静電容量の変化およびハンマにとりつけた加速度計¹⁵⁾¹⁶⁾の変化をシンクロスコープに記録しポラロイドカメラで撮影する。そ

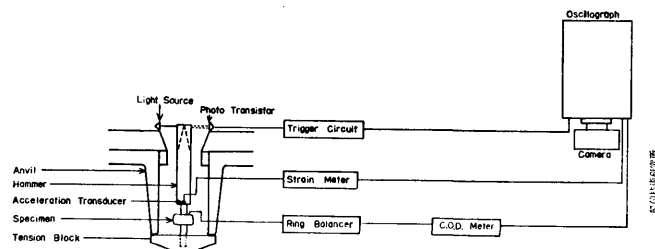


図-42 ブロック線図

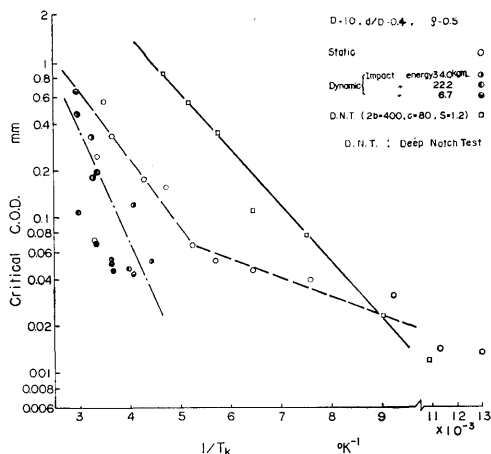


図-43 限界亀裂開口変位と絶対温度の逆数の関係 ($\rho=0.5$)

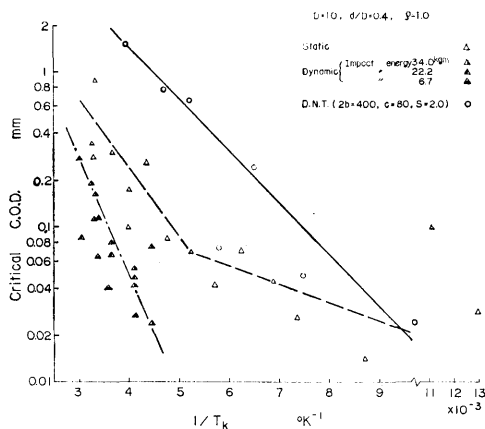


図-44 限界亀裂開口変位と絶対温度の逆数の関係 ($\rho=1.0$)

の計測結果の一例を写真-7 に示す。加速度計の最大すなわち荷重が最大のときの静電容量をとって開口変位の計算をおこない、限界亀裂開口変位と絶対温度の逆数との関係をもとめた。もちいた計測回路のブロック線図を図-42 に示す。

試験片の直径が 10ϕ で $\rho=0.5$ の場合の開口変位と絶対温度の逆数の関係を図-43 に示す。静的な引張試験でもとめた開口変位は最大応力に達してから破壊する延性破壊の場合と最大応力に達する前に破壊する場合の開口変位は異なり、図に示すような折れ線で近似できる。

衝撃エネルギーを 34.0, 22.2, 6.7 kgm に変えた場合の開口変位を \bullet , \circ , \ominus 印で示すと 1 点鎖線の直線で示される。実験値も少ないので衝撃エネルギーの変化による定量的な傾向はつかめなかった。衝撃引張試験で求めた開口変位は静的な引張試験で求めた開口変位より小さく温度依存性も大である。Deep Notch Test で切欠幅 ($S=1.2$ mm) で切欠先端から 6 mm 近傍の開口変位の平均値を \square 印で参考までに示すと 1 本の直線で近似される。

同様に直径が 10ϕ で $\rho=1.0$ の場合の開口変位と絶対温度の逆数の関係を図-44 に示す。静的な開口変位を \triangle 印で示すと $\rho=0.5$ の場合と同様破線の折線で示される。衝撃引張試験の開口変位は衝撃エネルギー (\blacktriangle , \blacktriangle , \blacktriangle 印) にかかわらず 1 点鎖線のような直線で示され、静的な場合より温度依存性は大である。

$\rho=2.0$ の場合の開口変位と絶対温度の逆数の関係を図-45 に示す。 \square 印は静的な開口変位で破線のよう

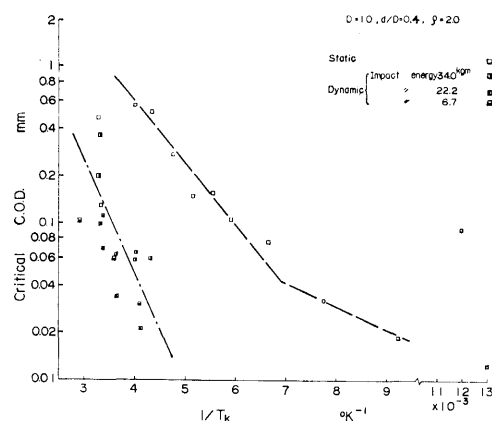


図-45 限界亀裂開口変位と絶対温度の逆数の関係 ($\rho=2.0$)

な折線で示される。衝撃引張試験の開口変位 (\square, \blacksquare , \blacksquare 印) は 1 点鎖線のような直線で示され、静的な開口変位との差異は ρ が大きくなれば増大する傾向を示す。

8. 結 論

亀裂開口変位を静電容量の変化として計測する方法について、その原理および諸特性について説明した。また今までにこの方法を用いて計測した結果を示した。その内容を要約すると次のとおりである。

1. 電極間隔を変えて計測する方法は、微小な変位の計測に適し、静的な変位のみならず動的な微小変位の計測も可能である。また、この方法は測定点に非

接触でも測定できるので、高温あるいは変動する供試体の測定等への応用が可能である。

2. 電極対向面積を変化させる方法は電極の形状を考慮すれば、任意の大きさの変位と精度をうるることができる。この場合電極素子の試験片へのとりつけは測定体と一定の間隔を保つよう工夫が必要である。
3. 電極間の誘電体を変化させる方法は誘電体の形状を考慮すれば、変位の大きさおよび精度を調整できるが、電極素子の機構が複雑で試験体にとりつけるのに工夫が必要である。
4. 計測に際しては変化前の初期値の把握が測定精度を左右するので、電極のコーティングを完全にすると同時に初期値の計測は試験温度でおこなうのが望ましい。また、電極を切欠に挿入して計測するときは、2枚電極をもちいるなどして可変側の初期値を正確につかむ必要がある。
5. 試験片の開口変位を主として電極間隔を変える方法で計測し、限界亀裂開口変位を破壊のクライテリオンにもちいた。計測値はクリップゲージと比較して大差はなかったが、電極を細いスリットにも挿入できるので、計算による切欠先端値に近い値を計測できる。
6. 限界亀裂開口変位は、母材の場合でも溶接継手の切欠の場合でも破壊のクライテリオンとしてもちいることができるが、並列する近接切欠の場合、切欠が近づくと限界亀裂開口変位は大きくなる傾向を示す。また、動的な限界亀裂開口変位は静的な場合より小さくなる。

参 考 文 献

- 1) R. W. Nichols, F. M. Burdekin, A. Cowan, D. Elliott & T. Ingham: The use of critical crack opening displacement techniques for the selection of fracture resistant materials I.I.W. IX-655-69, X-534-69. 1969
- 2) 金沢武, 町田進, 百田昌司, 荻原行人: 破壊発生条件に関する研究 (第1報), 日本造船学会論文第124号, 昭和43年, p. 311
- 3) 越賀房夫, 石原耕司: 脆性破壊発生COD説に関する予備的攻究, 日本造船学会論文集, 第123号, 昭和43年, p. 244
- 4) 酒井啓一, 飯野暢: きれつの変位挙動と脆性破壊の発生, 日本造船学会論文集, 第127号, 昭和45年, p. 227
- 5) 木原博, 池田一夫: 脆性破壊の発生に関する研究 (第2報), 日本造船学会論文集, 第118号, 昭和40年, p. 204
- 6) 池田一夫, 北村茂, 前中浩: 亀裂開口変位の新しい計測法—静電容量型による Deep Notch Test の脆性破壊特性, 日本造船学会論文集, 第129号, 昭和46年, p. 277
- 7) 桜井良文, 小畑耕郎: 振動衝撃の計測, 朝倉書店
- 8) 立木二郎: 微小変位の電圧変換, 生産研究, 第8巻第6号, p. 285
- 9) 渡辺理: ひずみゲージとその応用, 日刊工業新聞社
- 10) 池田一夫, 前中浩, 北村茂: 近接切欠の脆性破壊発生特性 (第1報), 日本造船学会論文集, 第129号, 昭和46年, p. 257
- 11) 永井欣一, 池田一夫, 岩田光正, 前中浩, 梶本勝也, 北村茂, 南渚夫: 近接切欠の脆性破壊発生特性 (第2報), 日本造船学会論文集, 第132号, 昭和47年, p. 405
- 12) 永井欣一, 池田一夫, 岩田光正, 前中浩, 梶本勝也, 北村茂, 南渚夫: 近接切欠の脆性破壊発生特性 (第3報), 日本造船学会論文集, 第134号, 昭和48年, p. 383
- 13) 作井誠太, 中村正久, 大森正信, 布村成具: 軟鋼の低温における衝撃引張特性, 鉄と鋼, 第49年第1号, p. 55
- 14) 前中浩, 北村茂, 佐久間正明: 亀裂開口変位について (その3), 船研研究発表会第19回講演概要, 昭和47年
- 15) 田中一三: 圧電素子を使った動圧測定, 工業火薬協会誌, Vol. 26, No. 6, p. 45
- 16) 頓所進: 乗車用安全帽衝撃試験方法の問題点, 産業安全研究所技術資料, 昭和46年
- 17) 池田一夫, 有田喜久雄, 前中浩, 北村茂, 佐久間正明: 衝撃引張試験における亀裂開口変位, 溶接学会全国大会講演概要, 第13集