

き裂と切欠きにおける大規模降伏条件下の力学的厳しさの尺度

藤崎, 渉

<https://doi.org/10.11501/3078956>

出版情報：九州大学，1994，博士（工学），論文博士
バージョン：
権利関係：



第 6 章

非線形き裂力学および非線形切欠き力学の有用性

本章では非線形き裂力学, 非線形切欠き力学の有用性をそれぞれ, き裂材の実験結果ならびにSEMサーボパルスによる切欠き材の延性破壊過程の観察と有限要素解析により検証する。

6.1 緒言

本章では弾塑性ひずみ場の等価性を保証する非線形き裂力学および非線形切欠き力学が同一の物理現象をどの程度保証しうるかをき裂材および切欠き材の延性破壊を主に対象として検討する。

き裂材の問題では、試験片製作の制約から他の研究者の研究結果と有限要素解析結果を比較することにより、切欠き材の問題ではSEMサーボパルスによる切欠き材の延性破壊過程の観察と有限要素解析の比較により検証する。

6.2 非線形き裂力学の有用性の検討

田中らは中央き裂(長さ $2a$)をもつ板状試験片(応力-ひずみ関係は図4-3)において寸法を広範囲に変えて引張試験を行い、き裂発生時の荷重を求めている⁽¹⁾。彼らのデータには小規模降伏条件下のものからほぼ全断面降伏のものまで含まれている。図6-1に田中らの結果(図中▲印)を示す。 $a \cong 6\text{mm}$ 程度以上の所では $K_I = \text{一定}$ のもとでき裂が発生しているが、 $a \cong 6\text{mm}$ 程度以下ではき裂発生時の K_I は一定とはなっていない。

非線形き裂力学によれば、き裂発生時の $\bar{\epsilon}^P_{max, rsm/c}$ は a のほぼ全範囲で一定となるはずである。図6-1中に、 $\bar{\epsilon}^P_{max, rsm/c} = \text{一定}$ (この場合0.17)としてき裂発生時の K_I を予測した値を△印で示す。予測値はき裂長さ a の全範囲において、極めてよく一致している。

このことは、ある a の値について実験して、き裂発生時の荷重を測定し、それに基づいてそのときの $\bar{\epsilon}^P_{max, rsm/c}$ を求めておけば、任意寸法の板状試験片におけるき裂発生荷重が小規模降伏条件下のみならず大規模降伏条件下においても計算によって求まることを意味している。

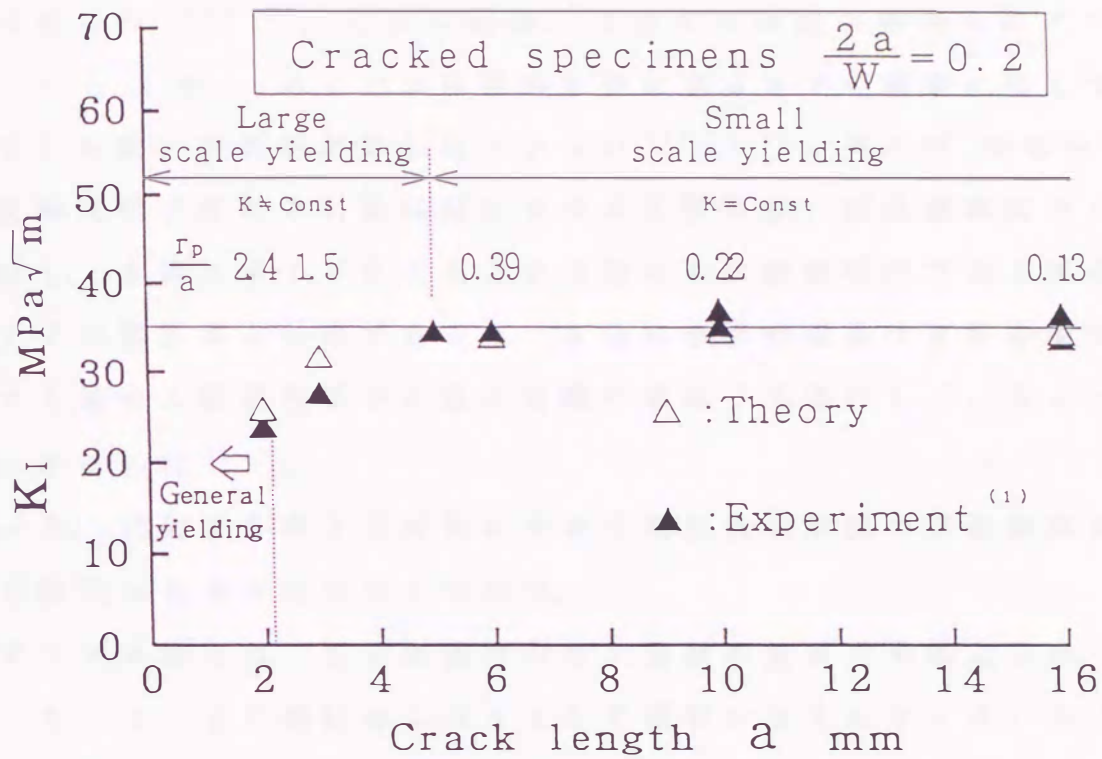


図6-1 非線形き裂力学の有用性を示すデータ

— き裂発生時の K_I と き裂長さ a の関係 —

[田中らの実験値と非線形き裂力学に基づく計算値

{ $\bar{\epsilon}^p_{max, FEMC} = \text{一定} (0.17)$ として計算 } の比較]

6.3 非線形切欠き力学の有用性の検討

非線形切欠き力学は大規模降伏条件下における強度評価法である。ここでは延性破壊現象を例に、その有効性を検討する。

延性破壊は一般に組織的要因に基づいて発生するボイドを起点として起こり^{(2)~(4)}、これに関連して種々の研究が報告されている^{(5)~(7)}。しかし、ボイドが巨視的き裂に至るまでの機構に関しては必ずしも統一の見解が得られていない^{(8)~(10)}。例えば、西谷らは7:3黄銅丸棒平滑材の引張試験におけるき裂発生、成長機構について検討し、き裂はボイドを起点とする強せん断変形域内の二次的なボイドの発生により生ずること、さらにき裂の成長はき裂先端に先行する強せん断変形域での面の分離の繰返しで進行していることを明らかにした⁽¹¹⁾。

一方、切欠きを有する材料における延性破壊過程の連続観察に基づく研究はあまり行われていない。

そこで本節では、まず単独ならびに複数の貫通穴を導入した、Ti-6Al-4V板材およびS45C板材のSEMサーボパルス内での引張試験を行い、試験片表面の連続観察により、き裂発生時の貫通穴の変形挙動について検討した。さらに併せて、貫通穴を有する材料のき裂発生の特徴、切欠き半径（貫通穴径の1/2）あるいは貫通穴の配置と引張強さの関係、2ヶ貫通穴の連結挙動、き裂発生時の貫通穴の変形挙動などについて検討する。

次に、有限要素解析により種々の切欠き材におけるき裂発生までの切欠き底の弾塑性ひずみ場を求め、実験結果と比較することにより非線形切欠き力学の有用性を検証する。

6.3.1 Ti-6Al-4V, S45C 切欠き材の変形挙動

(I) 平滑材および単独貫通穴材の変形挙動

用いた試験片は平滑材ならびに切欠き半径 $\rho = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ の単独貫通穴材 (図6-2(a)) である。図6-3に Ti-6Al-4V 試験片および S45C 試験片の破断後の外観を示す。き裂は多くの場合、水平から $30 \sim 45^\circ$ 方向に進行している。

図6-4, 図6-5に Ti-6Al-4V 試験片および S45C 試験片 (両材ともに $\rho = 0.1 \text{ mm}$ の単独貫通穴材) の応力-ひずみ曲線と貫通穴の変形挙動を示す。応力としては欠陥の存在を無視した公称応力を用いた。Ti-6Al-4V 材では最大荷重近傍において貫通穴の縁近くの微細な強変形域中 (図6-4中cの白色化部) からき裂が発生して急速に伝ばしている。初期の穴径を d とし、き裂発生時の貫通穴の引張方向の穴径を h_c としたとき $h_c/d = 1.74$ である。Ti-6Al-4V 材の場合、き裂が一旦発生するときわめて速やかに成長伝ばする。S45C 材の場合、図6-5に示すごとく、 σ_B より以前に小さな強せん断変形域⁽¹⁾ (図中b) からボイドが発生し(c), それが核となってき裂が発生し(d), 成長している。このき裂は活動を停止し、下に現れた新たなき裂(e) が成長して破断している。き裂発生時の $h_c/d = 2.01$ であり、Ti-6Al-4V 材よりき裂発生時の変形が大きい。また、ボイドそのものの成長合体により、巨視的き裂が生成されている兆候はみられない。

図6-6は両材の単独貫通穴試験片 ($\rho = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$) における $\sigma_B, \sigma_{\dots}$ と切欠き半径 ρ の関係を示したものである。ここで、 $\sigma_{\dots}$ は最大荷重を欠陥を除く実断面積で割った値である。両材の $\sigma_{\dots}$ は切欠き半径 ρ に無関係であり、 $\sigma_{\dots} \approx$ 平滑材の引張り強さ σ_B であることがわかる。このことは最小断面全体が σ_B に近い荷重で塑性変形していることによる。

図6-7に両材のき裂発生時の h_c/d と切欠き半径 ρ の関係を示す。

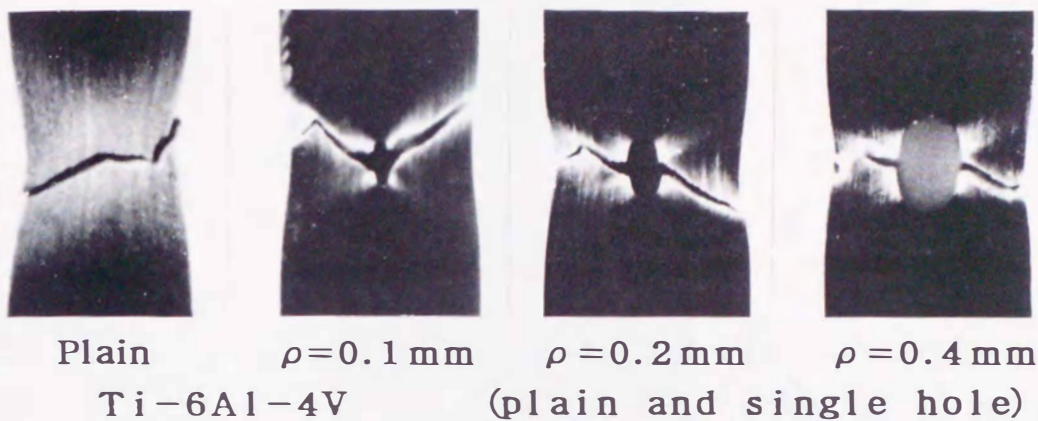
(a)				$\rho = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$
(b)				$\rho = 0.1 \text{ mm}$ $S/d = 1 \sim 5$
(c)				$\rho = 0.1 \text{ mm}$ $S/d = 1 \sim 5$
(d)				$\rho = 0.1 \text{ mm}$ $S/d = 2 \quad \theta = 0 \sim 90^\circ$
(e)				Notch depth = 0.4 mm $\rho = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$
(f)				Notch depth = 0.1, 0.2, 0.4 mm $\rho = 0.1 \text{ mm}$

$\rho = d/2$

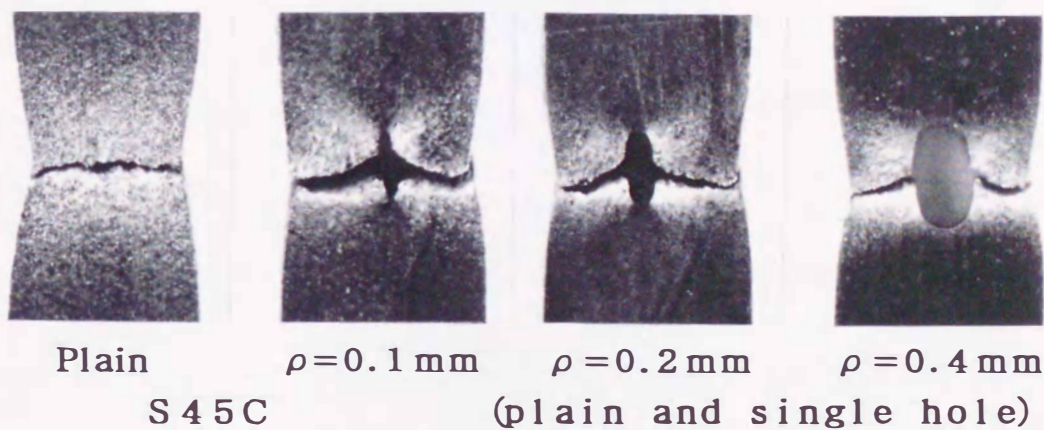
S: distance of holes

Notch depth: half length of cutting stress

図 6-2 貫通穴の配置



(a) Ti-6Al-4V



(b) S45C

図 6-3 試験片(単独貫通穴材)の破断後の外観

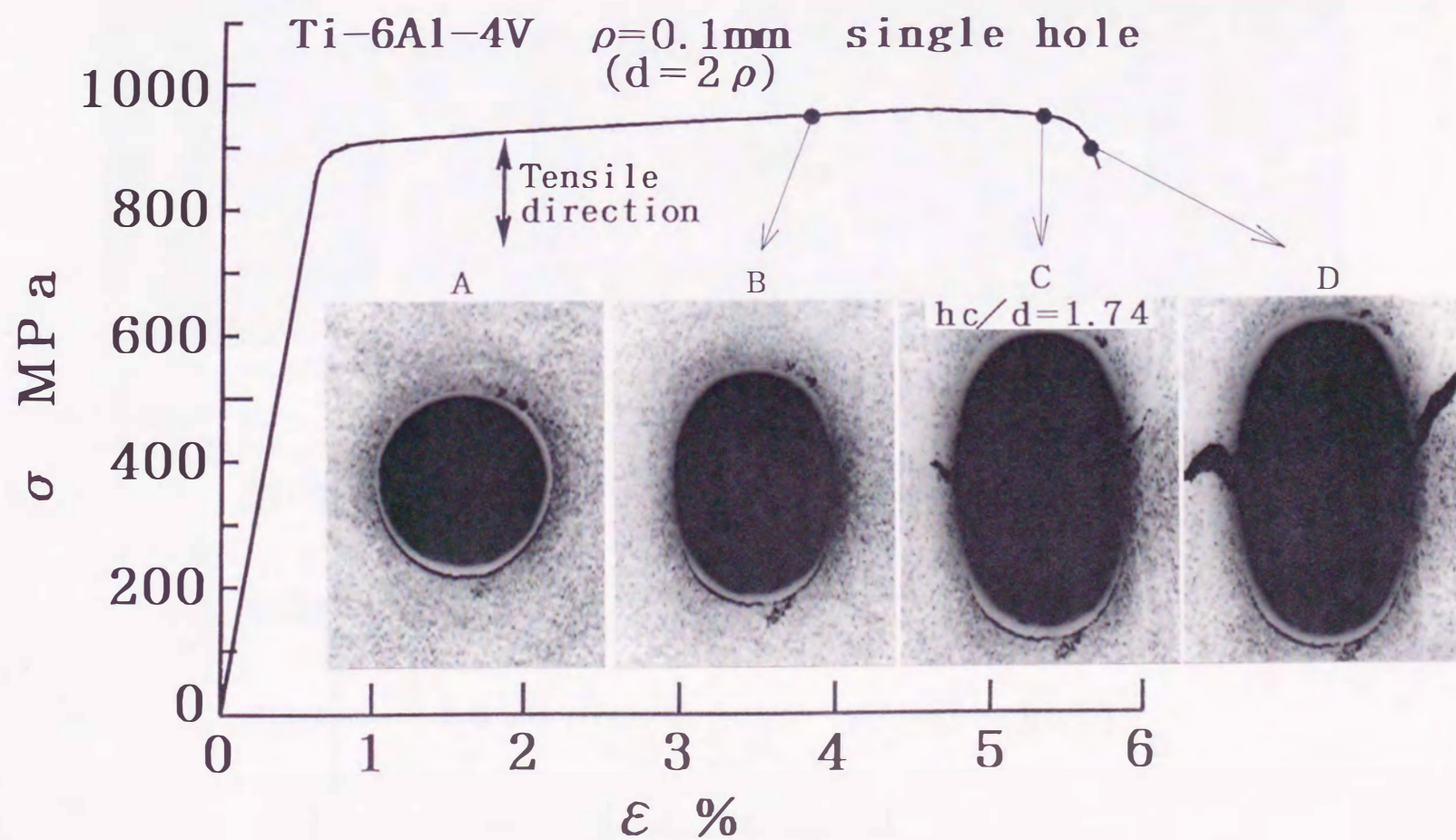


図6-4 Ti-6Al-4V試験片(単独貫通穴材)の変形挙動

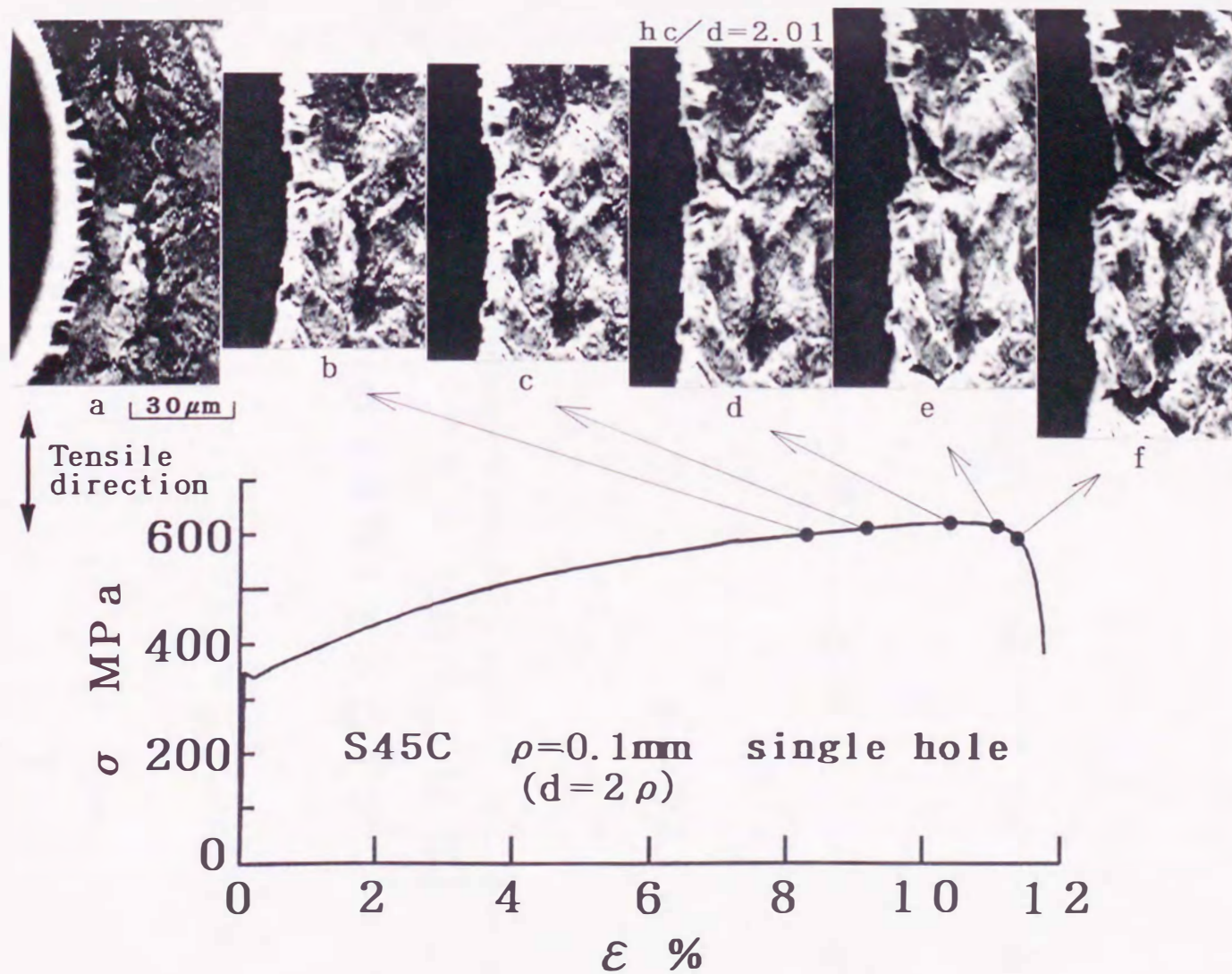


図 6-5 S45C 試験片 (単独貫通穴材) の変形挙動

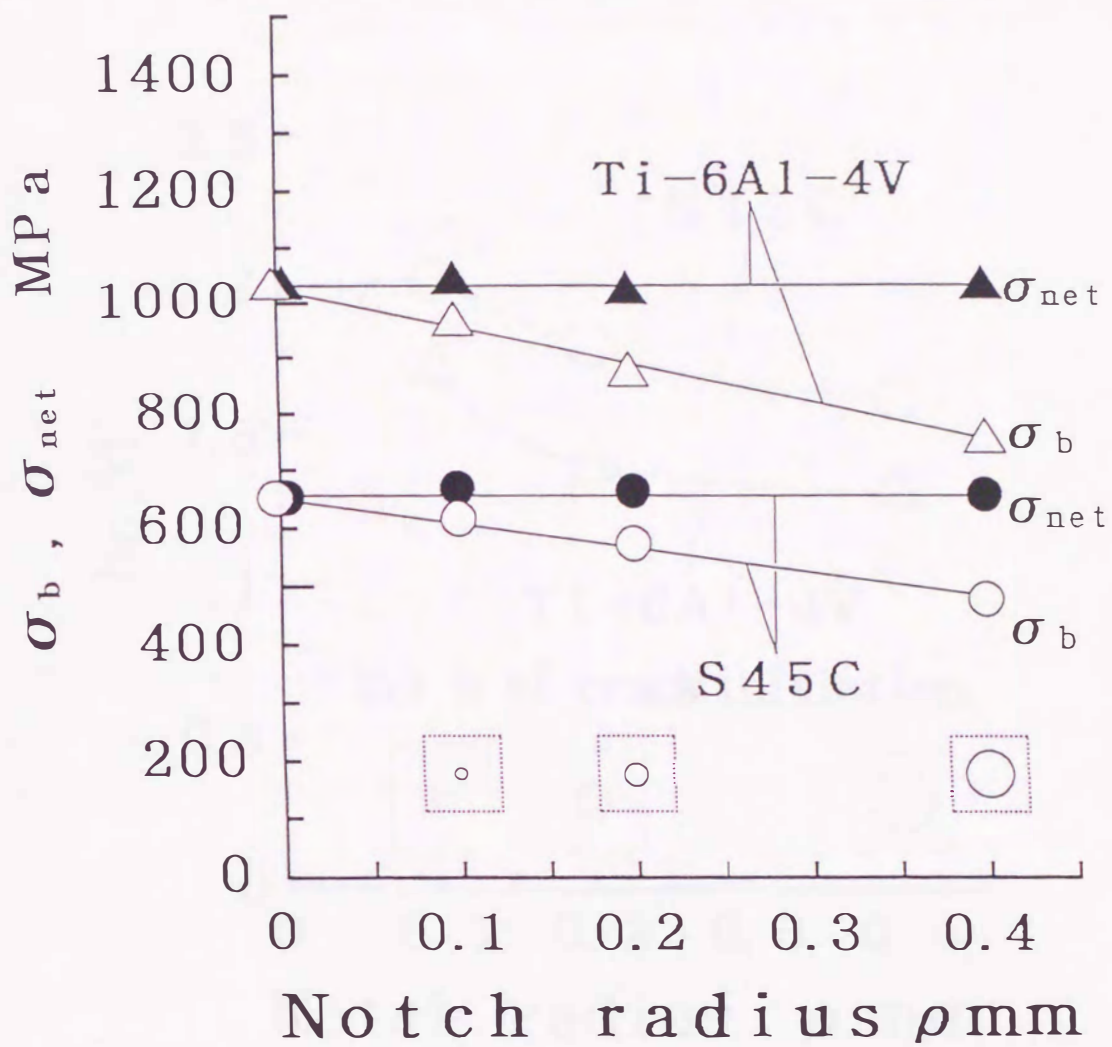


図 6-6 σ_b , σ_{net} と切欠き半径 ρ ($=d/2$) の関係

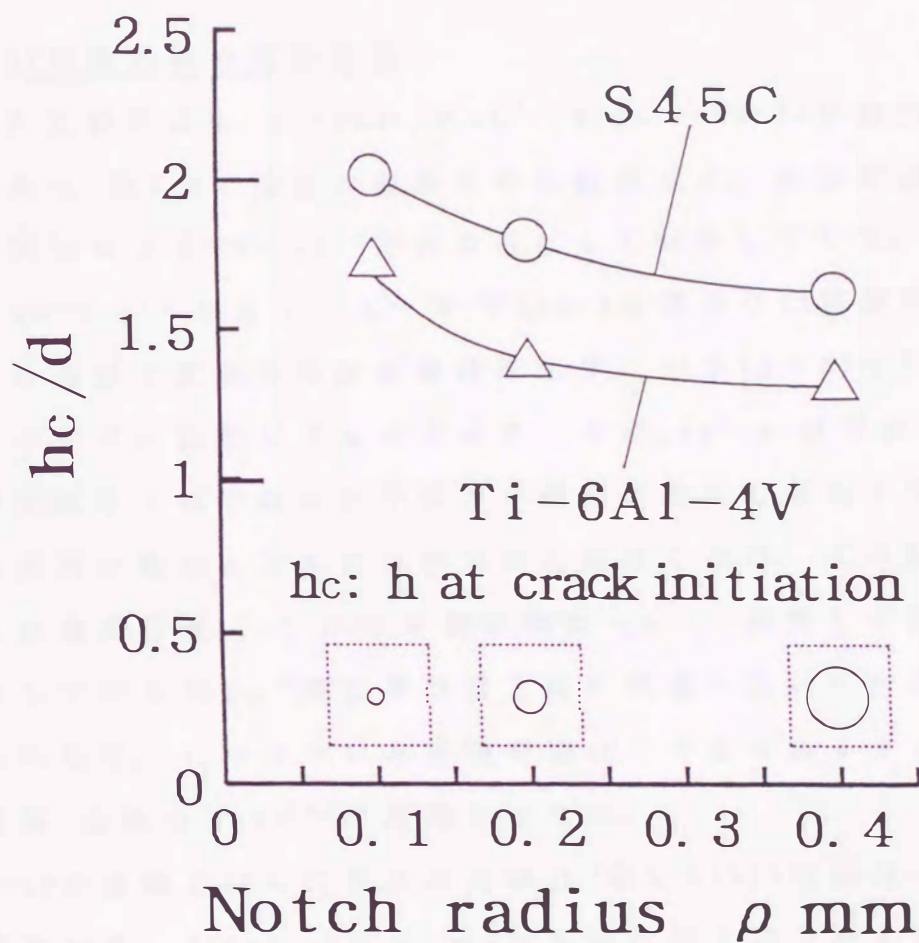


図 6-7 h_c/d と切欠き半径 ρ の関係

穴径が小さいほど大きく変形している。このことはき裂発生時における切欠き底の最大ひずみが切欠き半径 ρ が小さいほど大きいことを意味している。

(II) 2ヶ貫通穴材の変形挙動

用いた試験片は $\rho = 0.1\text{mm}$ で、 $\theta = 0^\circ$ 、 $S/d = 1 \sim 5$ の2ヶ貫通穴材(図6-2(b))であり、図6-8に両材の破断後の外観を示す。単独貫通穴材と同様、き裂はおよそ $30 \sim 45^\circ$ 方向に伝ばして破断している。

図6-9にTi-6Al-4V材で $S/d = 2$ の場合の2ヶ貫通穴材の応力-ひずみ曲線と貫通穴の変形挙動を示す。図中(A~D)は2ヶ貫通穴の変化をマクロに観察したものであり、また、(a~d)は写真A中四角で囲んだ領域のそれぞれのひずみでの様相を拡大したものである。貫通穴は変形の増加とともに引張方向に細長く伸び、穴の縁近くに形成された強変形域(b)からき裂が発生(c)、成長して貫通穴同士は連結している(d)。穴自身が横方向に成長し互いに合体する兆候はみられない。このように本実験の場合、Thomassonのボイドの成長・合体モデル^(*)は適用できない。

図6-10に板幅方向に穴をあけた場合(図6-2(b))の両材の σ_b と S/d の関係を示す。 $S/d = 1 \sim 2$ では、 σ_b は貫通穴同士の干渉により若干低下している。図6-11に引張方向に穴をあけた場合(図6-2(c))の両材の σ_b と S/d の関係を示す。 σ_b は S/d に関わらず一定となっている。図6-12に斜め方向に穴をあけた場合(図6-1(d))の両材の σ_b と S/d の関係を示す。 σ_b は θ が 90° に近づくにつれ大きくなる。

(III)

図6-13に切欠き深さ 0.4mm と一定で $\rho = 0.1\text{mm}$ の4連結貫通穴材、 $\rho = 0.2\text{mm}$ の2連結貫通穴材、 $\rho = 0.4\text{mm}$ の単独貫通穴材の場合(図6-2(e))の、両材における σ_b と切欠き半径 ρ の関係を示す。各材の σ_b は ρ

に無関係にほぼ一定となっている。図6-14は両材のき裂発生時の h_c/d と切欠き半径 ρ の関係を示したものである。図6-7と同様、 ρ が小さいほど大きく変形している。力を切る長さが一定の場合においても、切欠き半径 ρ が小さいほどき裂発生時における切欠底の最大ひずみが大きいことを意味する。

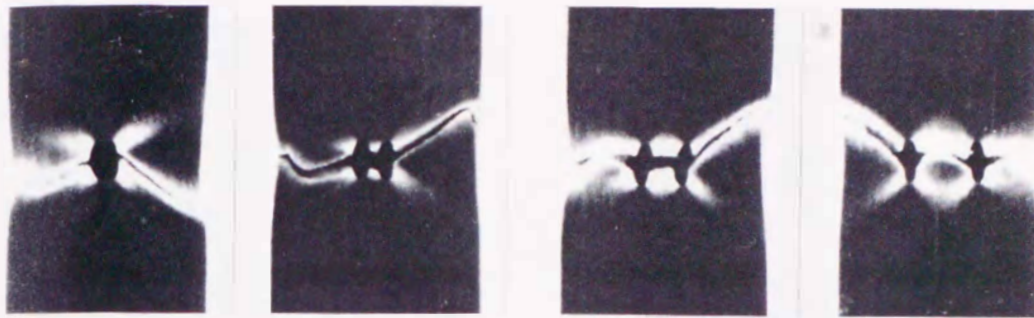
(IV) ρ 一定で切欠き深さを変えた複数貫通穴材の変形挙動

図6-15は $\rho = 0.1\text{mm}$ で、単独貫通穴材、2連結貫通穴材、4連結貫通穴材（図6-2(f)）のき裂発生時の h_c/d と切欠き半径 ρ の関係を示したものである。 ρ が同じであれば、切欠き深さが異なっても、 h_c/d はほぼ一定となる。このことは切欠き半径 ρ が同じであれば、切欠き底の最大ひずみがある一定値になったとき、き裂が発生することを意味している。

線形切欠き力学によれば、小規模降伏条件下において、切欠き半径が同一で同一現象がおきるときには、切欠き底に同一塑性量が生じることになるが、上記実験事実は大規模降伏条件下でも、このことが成り立つことを意味している。

(V) 板厚内部での貫通穴の様相

図6-16はTi-6Al-4V材で h/d が1.43のときに除荷した後の、試験片表面ならびに表面層を厚み Δt 除去した場合の穴の様相を示したものである。S45C材の場合（ h/d が1.79において除荷）を図6-17に示す。図6-18は、両材において表面層を $250\mu\text{m}$ 程度除去した場合（図6-16, 6-17中右から2番目）の穴の縁の拡大図である。Ti-6Al-4V材では内部に明瞭なき裂が生じており、S45C材では微細なき裂を含む不均一組織（フェライト・パーライト）の大変形が生じている。



S/d=1

S/d=2

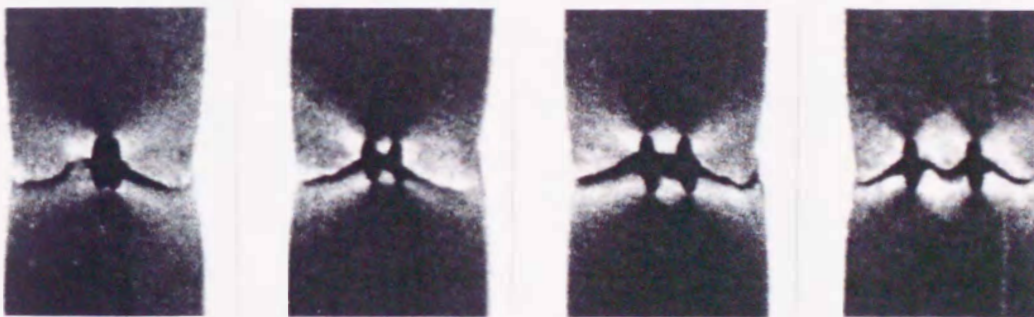
S/d=3

S/d=5

Ti-6Al-4V

($\rho=0.1\text{mm}$ double hole)

(a) Ti-6Al-4V



S/d=1

S/d=2

S/d=3

S/d=5

S45C

($\rho=0.1\text{mm}$ double hole)

(b) S45C

図6-8 試験片(2ヶ貫通穴材)の破断後の外観

Ti-6Al-4V
 $\rho=0.1\text{mm}$
 $(d=2\rho)$
 double hole
 □ Magnified

50 μm
 Tensile direction

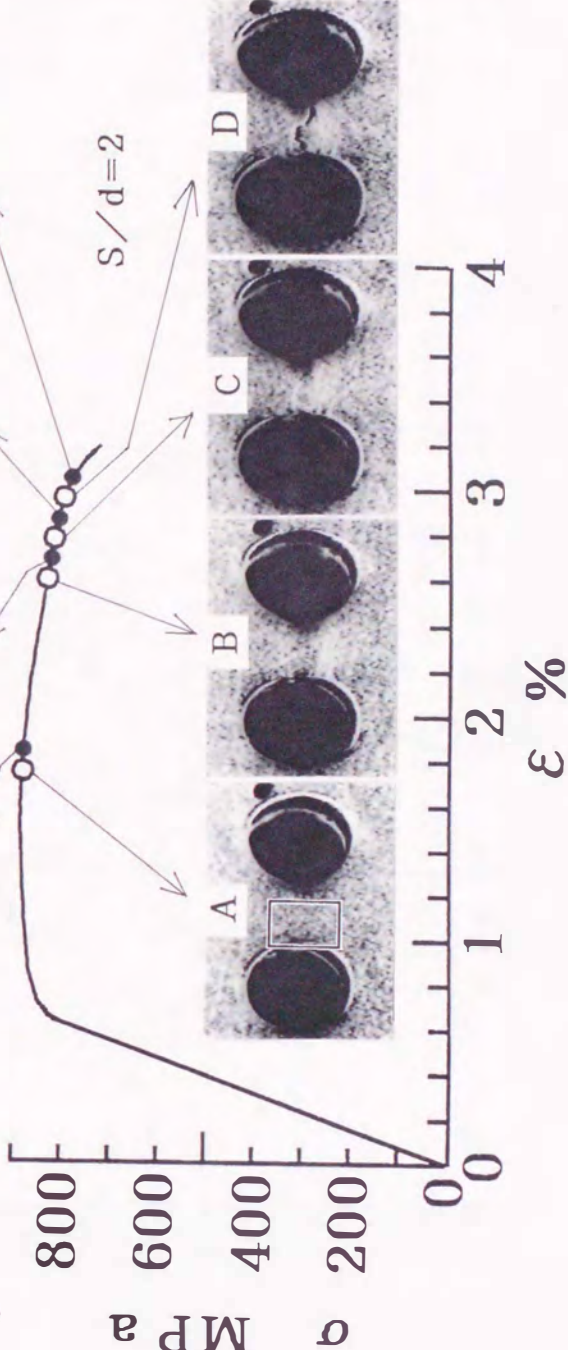
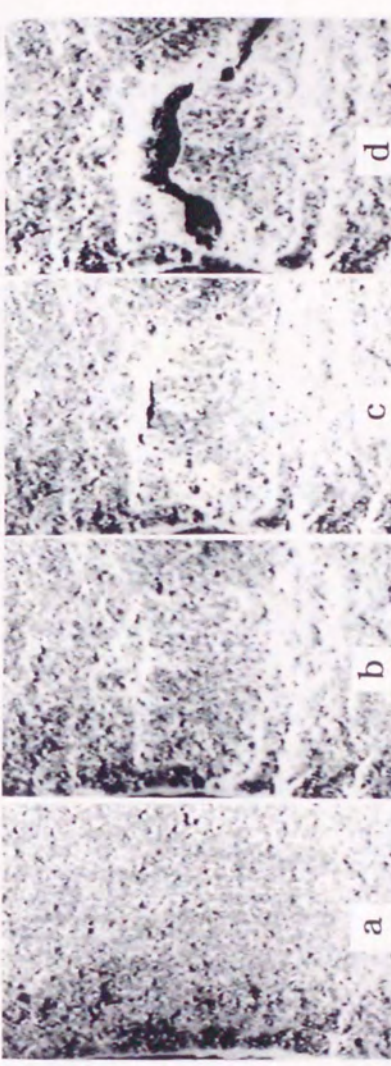


図 6-9 Ti-6Al-4V 試験片 (2 $\times$ 貫通穴材) の変形挙動

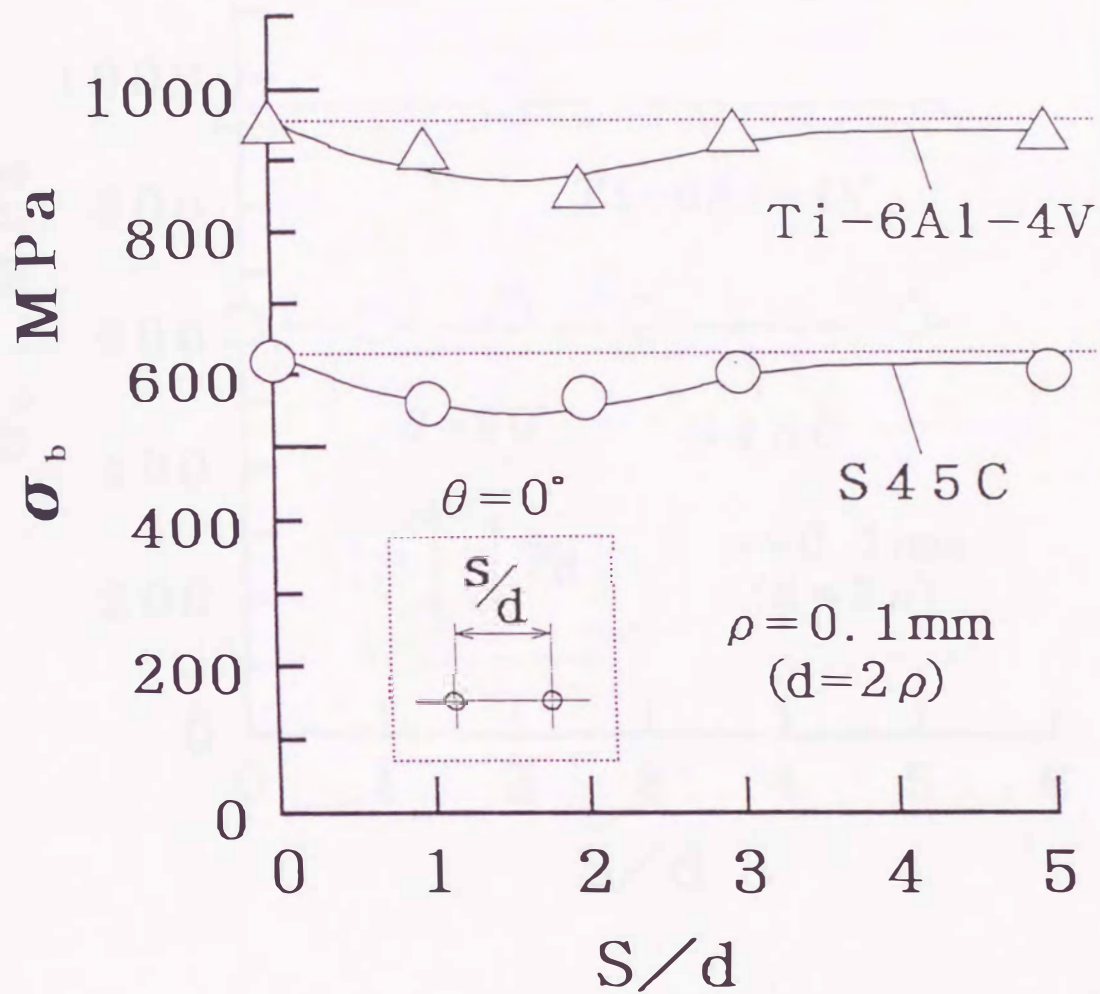


図 6-10 σ_b と S/d ($\theta = 0^\circ$) の関係

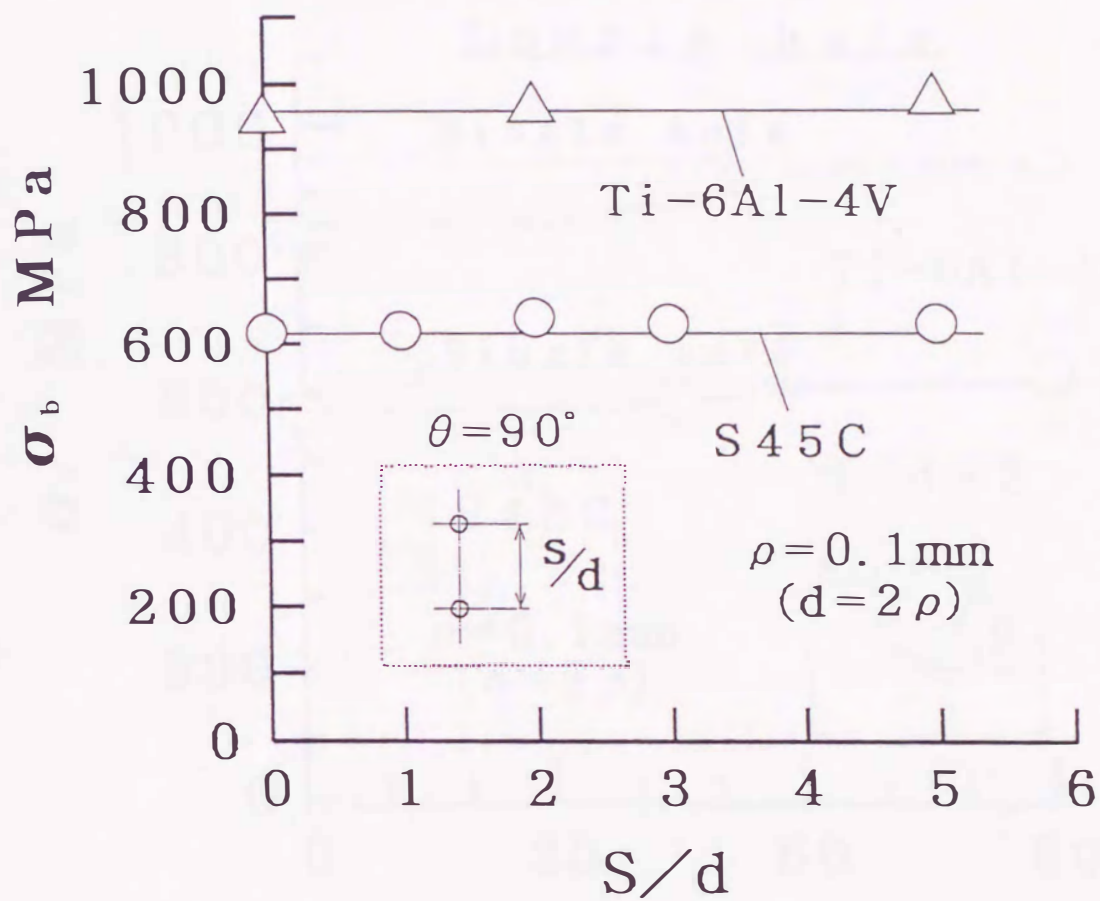


図 6-11 σ_b と S/d ($\theta = 90^\circ$) の関係

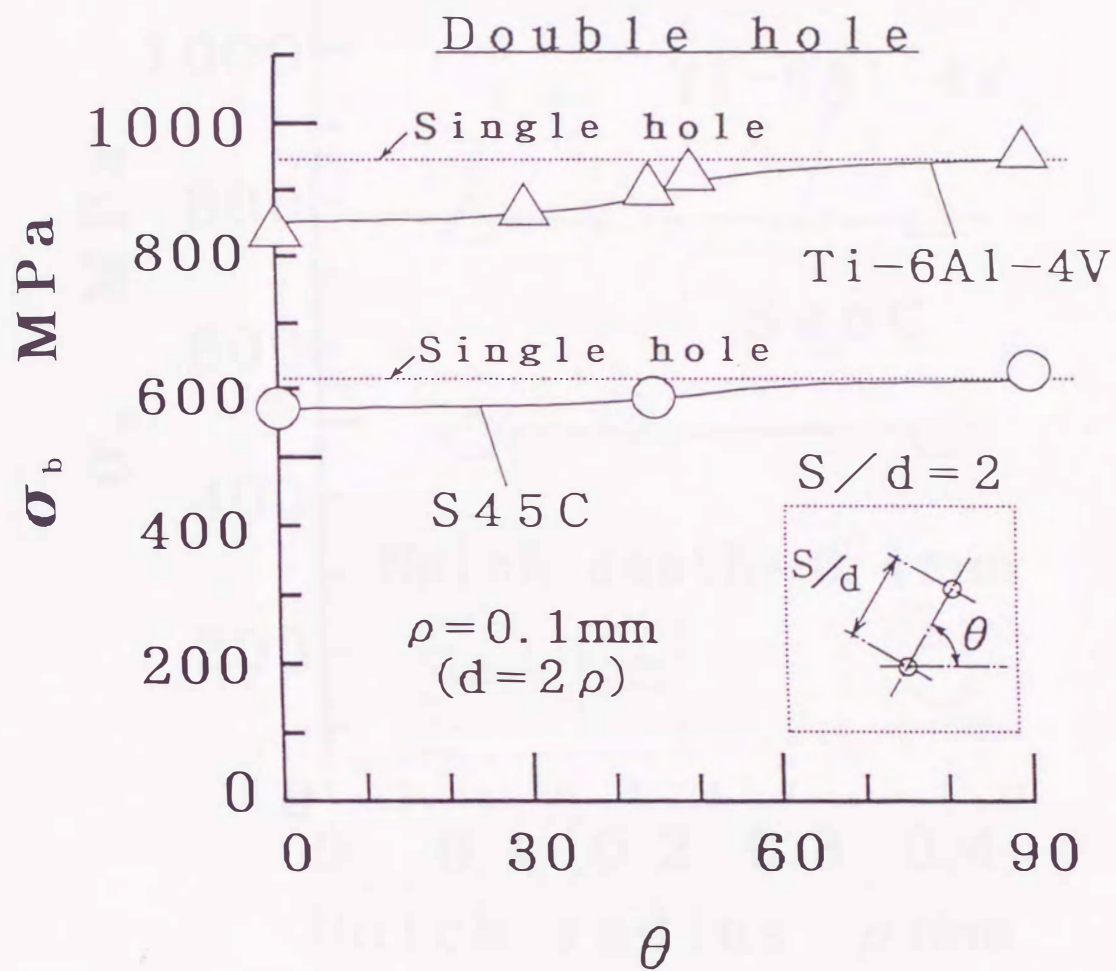


図 6-12 σ_b と θ ($s/d=2$) の関係

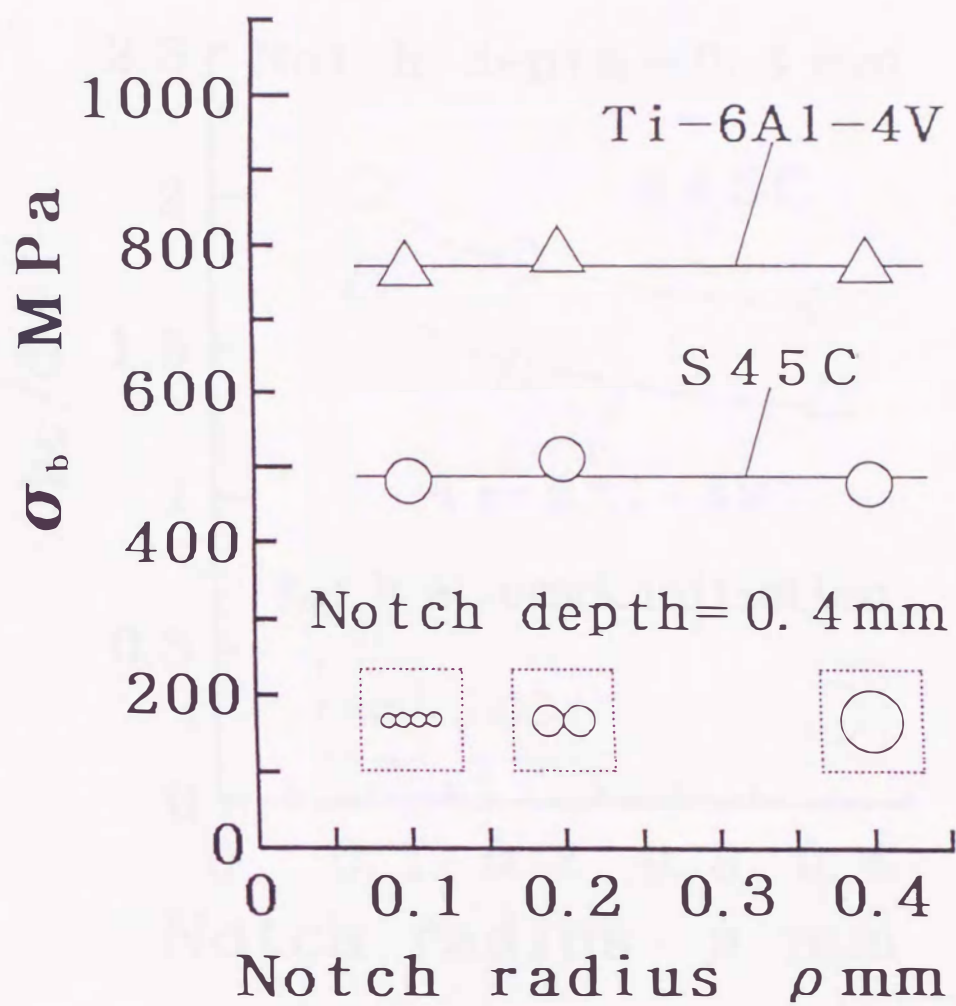


図 6-13 σ_b と切欠き半径 ρ の関係

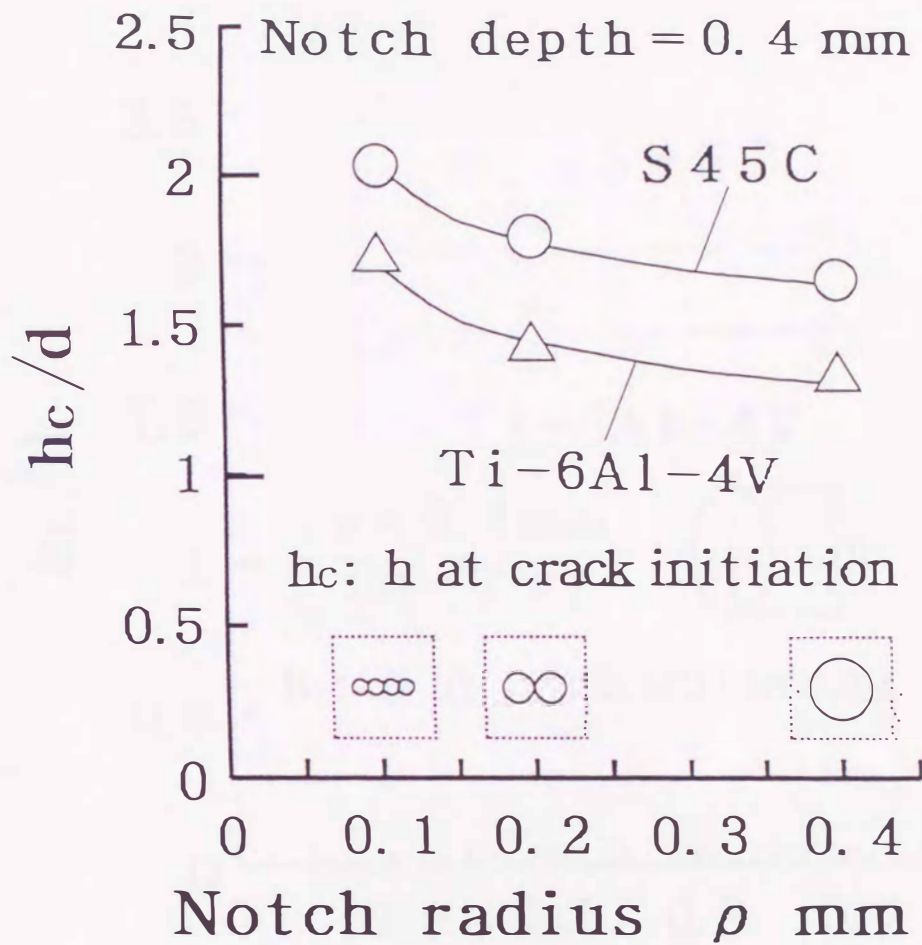


図 6-14 h_c/d と切欠き半径 ρ の関係

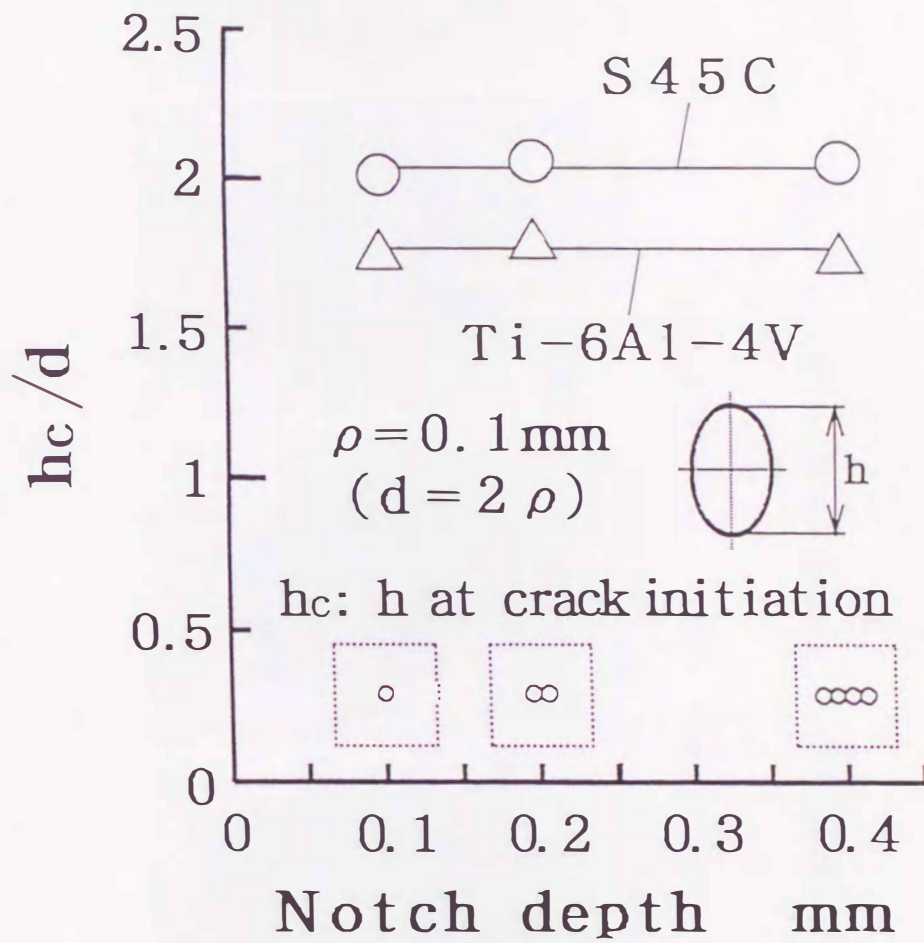


図 6-15 h_c/d と切欠き深さの関係

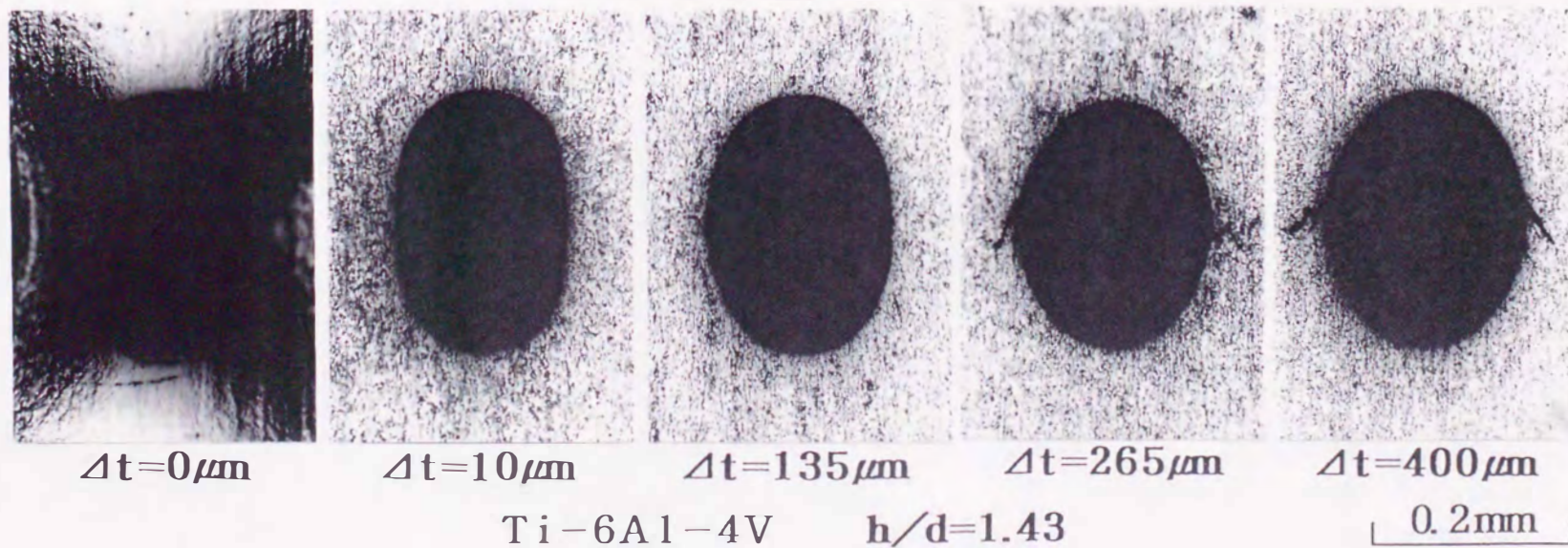


図 6-16 表面および内部での穴の様相 (Ti-6Al-4V材)

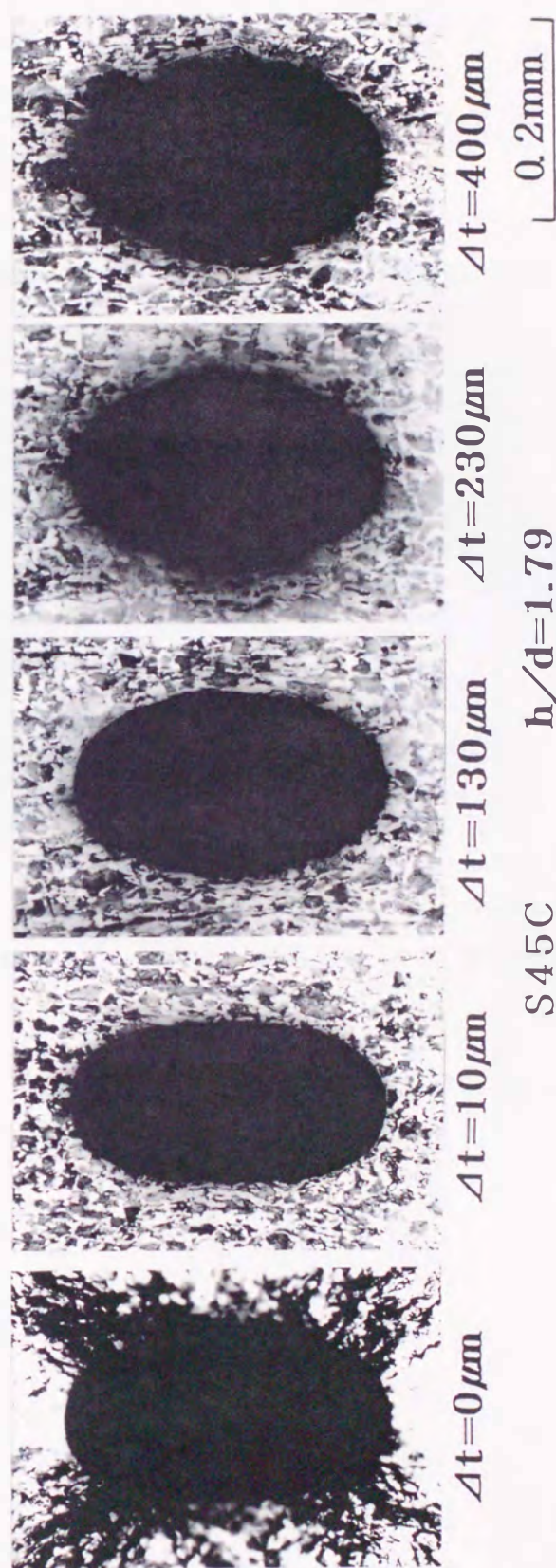
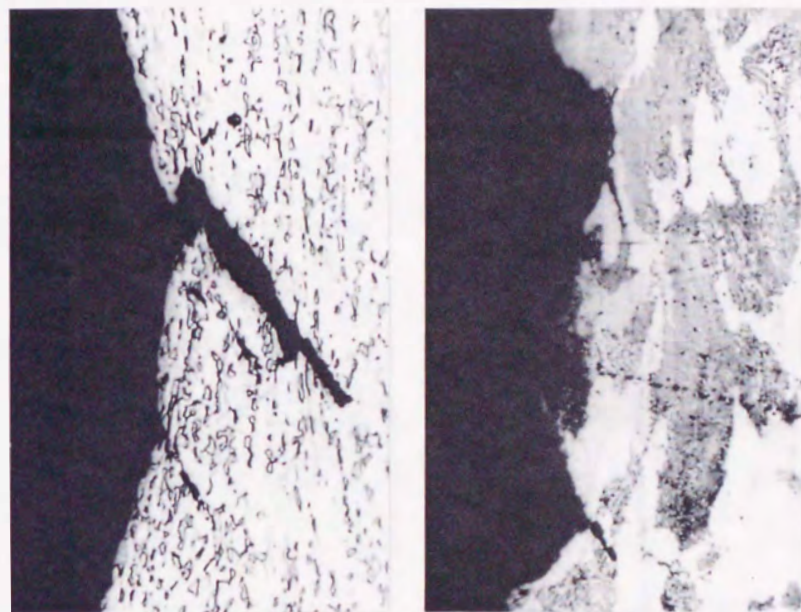


図 6-17 表面および内部での穴の横相 (S45C材)



$\Delta t = 265 \mu\text{m}$ $30 \mu\text{m}$ $\Delta t = 230 \mu\text{m}$
 $h/d = 1.43$ $h/d = 1.79$
(a) Ti-6Al-4V (b) S45C

図6-18 内部での穴縁の拡大図

6.3.2 フラクトグラフィによる検討

切欠き半径 $\rho = 0.1, 0.2, 0.4\text{mm}$ 単独切欠き材を有する Ti-6Al-4V 板材の破断後の断面を図 6-19 に示す。図 6-19 上段の写真からわかるように、切欠き底付近では垂直引張りによる延性破壊を示す三角形領域が存在している。切欠き縁を拡大して図 6-19 下段に示す。切欠き縁近くで凸凹が大きいことがわかる。このことは、き裂が縁近くからせん断型で生じていることによる。さらに、図中の切欠き半径 $\rho = 0.1\text{mm}$ 単独切欠き材の切欠き縁を拡大したものを図 6-20 に示す。引張り破壊に特徴的なディンプル破面の様相を呈している。

切欠き半径 $\rho = 0.1, 0.2, 0.4\text{mm}$ 単独切欠き材を有する S45C 材における破断後の断面を図 6-21 に示す。Ti-6Al-4V 材と同様に垂直引張りによる延性破壊を示す三角形領域がみられるが、パーライト・フェライト組織の影響により領域の境界はやや不明確である。さらに、図中の切欠き半径 $\rho = 0.1\text{mm}$ 単独切欠き材の切欠き縁を拡大したものを図 6-22 に示す。引張り破壊に特徴的なディンプル破面の様相を呈している。Ti-6Al-4V 材に比べて切欠き縁、三角形領域内ともに破面の凹凸が激しいことがわかる。このことは、き裂の発生位置が複数であること、き裂は不均一なパーライト・フェライト組織の弱い部分を通っていることによる。

Ti-6Al-4V

$\rho = 0.1\text{mm}$
N.D. = 0.1mm

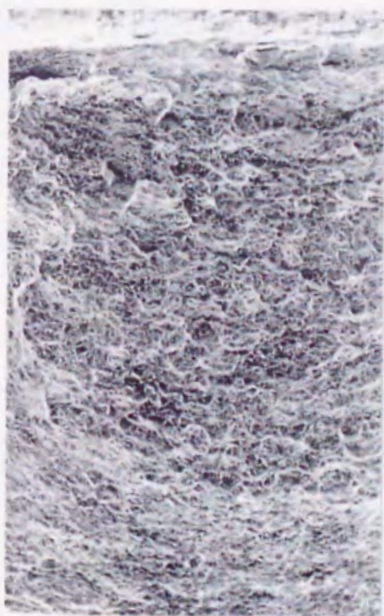


0.5mm

$\rho = 0.2\text{mm}$
N.D. = 0.2mm



$\rho = 0.4\text{mm}$
N.D. = 0.4mm



0.2mm

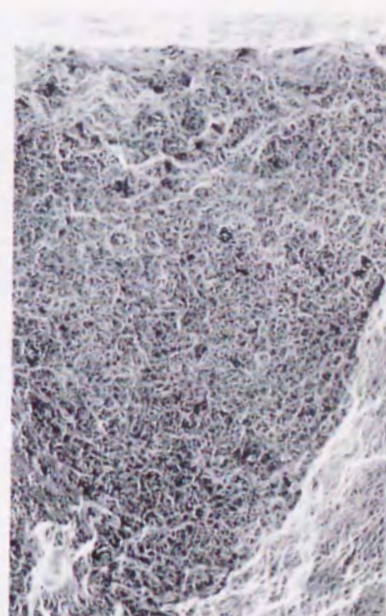
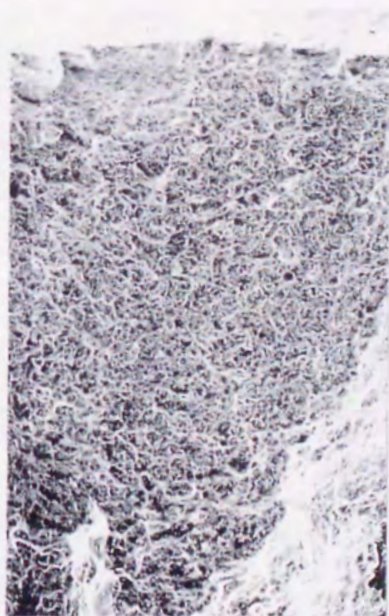
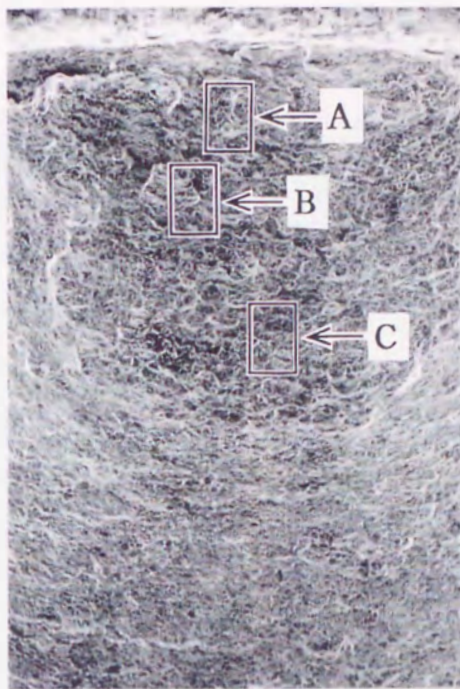
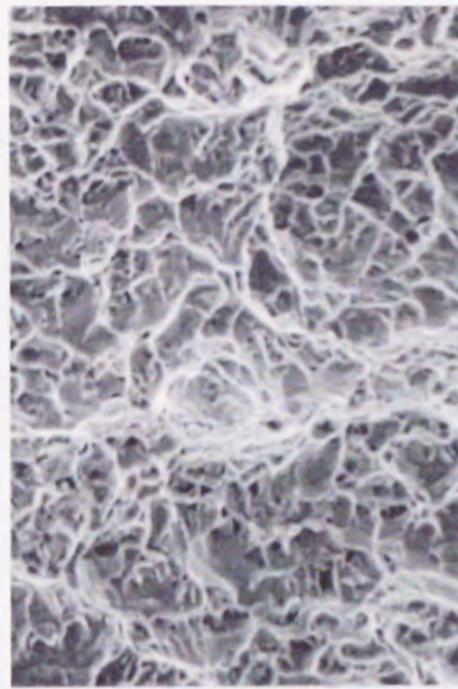


図6-19 単独穴切欠き材の破面 (Ti-6Al-4V材)

Ti-6Al-4V $\rho=0.1\text{mm}$ N.D.=0.1mm



200 μm



20 μm

A



C

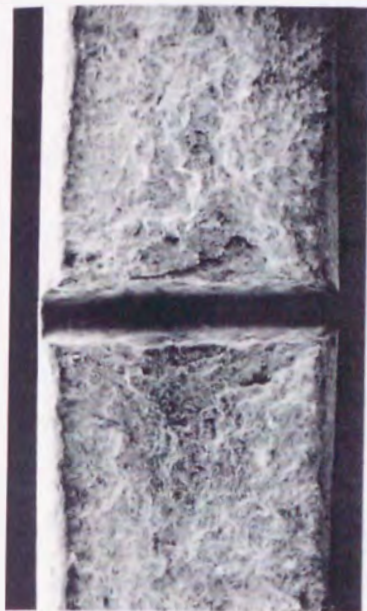


B

図6-20 単独穴切欠き材の破面 (Ti-6Al-4V材, $\rho=0.1\text{mm}$)

S 4 5 C

$\rho = 0.1\text{mm}$
N.D. = 0.1mm

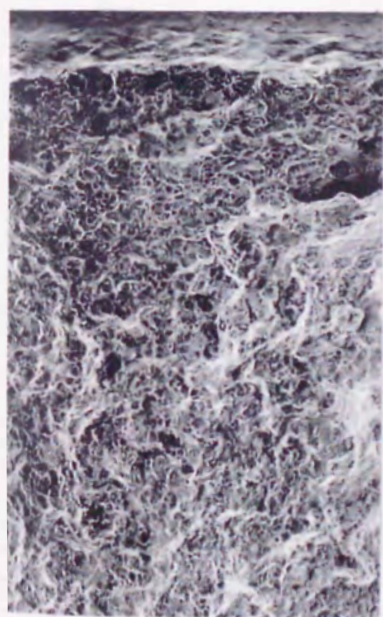


0.5mm

$\rho = 0.2\text{mm}$
N.D. = 0.2mm



$\rho = 0.4\text{mm}$
N.D. = 0.4mm



0.2mm

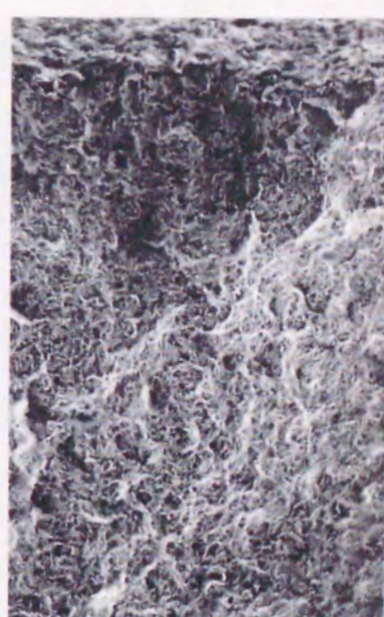
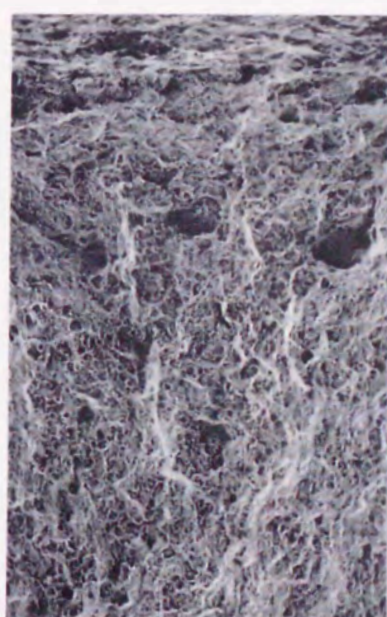
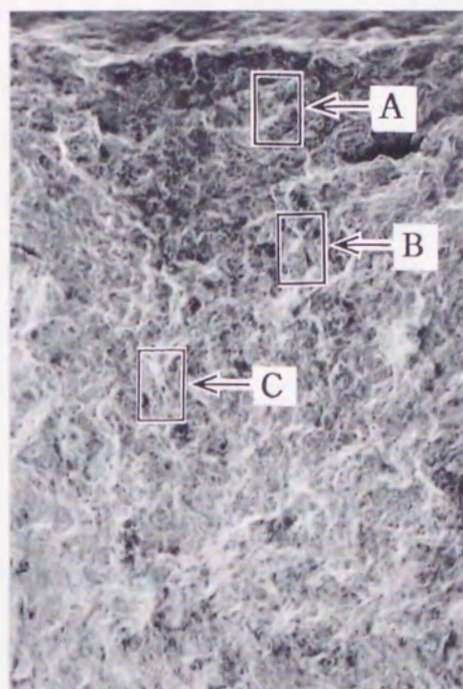
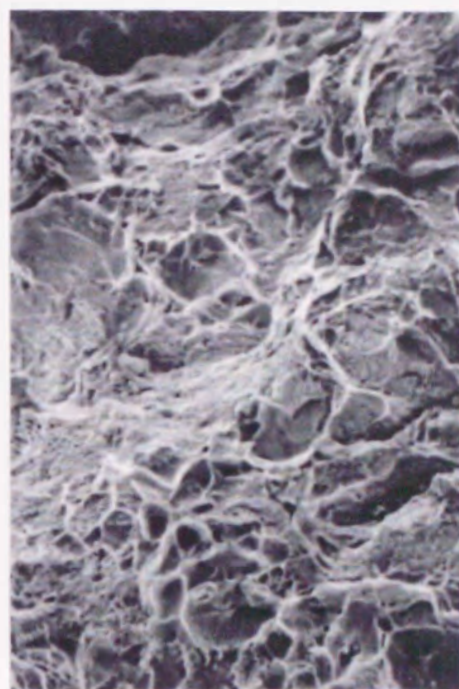


図 6-21 単独穴切欠き材の破面 (S45C材)

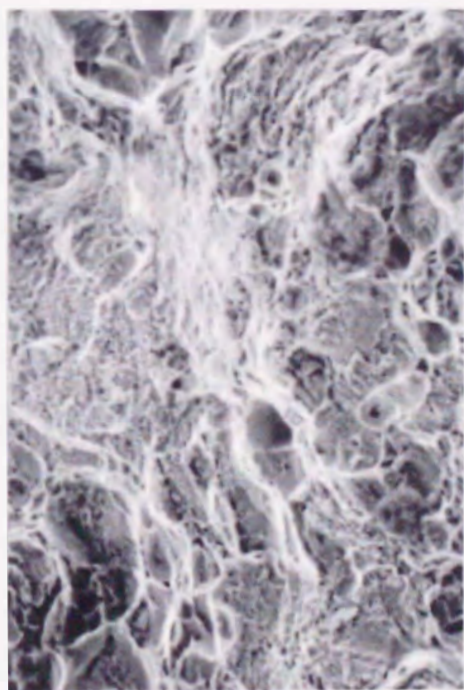
S 4 5 C $\rho = 0.1 \text{ mm}$ N. D. = 0.1 mm



200 μm



20 μm A



C



B

図 6-22 単独穴切欠き材の破面 (S45C材, $\rho = 0.1 \text{ mm}$)

6.3.3 有限要素解析

本節では、有限要素解析により、Ti-6Al-4V, S45C 板材の切欠き底の塑性ひずみ、切欠き形状変化を求め、実験結果と比較することにより、非線形切欠き力学の有効性を検証する。すなわち、き裂発生時の塑性ひずみが板厚一定条件の下では切欠き半径のみによって一意的に決まることを明らかにする。

計算に用いた切欠き材の形状は図6-23に示す通りであり、引張試験片中央部の1/4に相当する。切欠き半径 ρ が0.1mmと一定で切欠き深さ N.D. を0.1, 0.2, 0.4mmと変えた切欠き形状(図6-23(a), (b), (c)), および単独穴形状で切欠き半径 ρ を0.1から0.2, 0.4mmと変えた切欠き形状(図6-23(d), (e))について計算を行った。要素分割の一例として切欠き半径 ρ が0.2mmの場合の全体図を図6-24に、穴付近の拡大図を図6-25に示す。全体の要素数は977, 節点数は1075である。Ti-6Al-4VならびにS45C平滑材の応力-ひずみ曲線(標線間距離8mm)を図6-26に示す。この図に基づく真応力-対数ひずみ曲線を折線で近似して加工硬化曲線の入力データとした。非線形方程式の解法はニュートン・ラプソン法による増分解法であり、大変形問題の定式化ではアップデイト・ラグランジェ法を用いている。

(I) 計算結果

Ti-6Al-4V 切欠き材の応力-ひずみ曲線を図6-27に、同様にS45C切欠き材のそれを図6-28に示す。両材ともに切欠き深さが0.1, 0.2, 0.4mmと大きくなるほどより小さい公称ひずみで破断している。実験⁽¹²⁾によるき裂発生時の穴の変形比 h_c/d と切欠き深さの関係は図6-15に示したとおりである(ここで d は引張り前の穴径であり、 h_c はき裂が発生した時の引張り方向の穴径 h である)。図からわかるように切欠き半径 ρ が同一であれば、ほぼ同じ h_c/d にお

いてき裂が発生している。

切欠き半径 ρ が 0.1mm と一定で切欠き深さ $N.D.$ を 0.1 , 0.2 , 0.4mm と変えた切欠き底付近の F E M 計算による塑性域の進展の様子を T i - 6 A l - 4 V 切欠き材では図 6-29 ~ 図 6-31 に, S 4 5 C 切欠き材では図 6-32 ~ 図 6-34 に示す。さらに, 両切欠き材において, 切欠き底における最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ が同じ場合の切欠き底近傍のひずみ分布 ϵ^P_x を図 6-35, 6-36 に示す。図からわかるように, 切欠き半径が同じであれば (図中 $\rho = 0.1\text{mm}$ の場合), 切欠き深さが $0.1(\triangle)$, $0.2(\Delta)$, $0.4\text{mm}(\blacktriangle)$ と異なっても, 切欠き底付近のひずみ分布は同じである。また, 切欠き半径 ρ が 0.1mm から $0.2, 0.4\text{mm}$ と大きくなるにつれて, 塑性ひずみはよりゆるやかに減少する。切欠き底における塑性ひずみの勾配 $(1/\bar{\epsilon}^P_{max, FEM} \cdot d\bar{\epsilon}^P_{FEM}/dx|_{x=0})$ は図 6-37, 6-38 に示すように $1/\rho$ に比例している。図 6-39, 6-40 は両材において切欠き半径 ρ が 0.1mm と同一で切欠き深さが異なる場合の各材の公称ひずみ ϵ と切欠き底における最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ との関係を示したものである。この図からわかるように切欠き半径 ρ が同じであれば, き裂はほぼ同一の相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ で生じる。

図 6-41, 6-42 に両切欠き材での穴の変形比 h/d と切欠き底における最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}$ の関係を示す。このように両者は切欠き半径とは無関係にほぼ 1 対 1 に対応している。

図 6-43 は両材において切欠き深さが同じで, 切欠き半径が異なる場合のき裂発生時の hc/d を示したものである。切欠き半径 ρ が大きいほど, hc/d が小さい, すなわちき裂発生時の最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^P_{max, FEM}|_c$ が小さくなっている。このことは図 6-35, 6-36, 図 6-37, 6-38 に示すように, 切欠き底の塑性ひずみ分布が主として切欠き半径のみによって支配されることを通じて説明することができる。

図 6-44 は両材における切欠き半径 ρ とき裂発生時の切欠き底にお

ける相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^{P_{max, FEMC}}$ との関係为非線形切欠き力学の考え方で整理したものである。き裂発生時においては、切欠き底における相当塑性ひずみは、このように切欠き深さとは無関係に、切欠き半径 ρ と 1 対 1 に対応している。このことは切欠き半径 ρ が同一の場合、切欠き底付近の相当塑性ひずみ分布が切欠き半径 ρ のみに支配されることに起因している。なお、両材のき裂発生条件の整理に従来の線形切欠き力学を適用すると図 6-45, 6-46 のようにき裂発生時の切欠き底の最大弾性応力は切欠き半径 ρ をそろえても広範囲にばらつく。

中央切欠き（切欠き深さ a ）をもつ S 4 5 C 板状試験片において a を種々変えて引張試験を行い、き裂発生時（全断面降伏後）の応力を求め、そのときの $\bar{\epsilon}^{P_{max, FEMC}}$ を計算した。結果を図 6-47 に示す。このように、 ρ が一定であれば、き裂発生時の $\bar{\epsilon}^{P_{max, FEMC}}$ は a に無関係にほぼ一定となる。

このことは、 ρ を変えて実験しき裂発生時の $\bar{\epsilon}^{P_{max, FEMC}}$ を求めておけば、任意寸法の板状試験片におけるき裂発生荷重が計算によって求まることを意味している。

図 6-48 は両材の $\rho = 0.1 \text{ mm}$ 単独穴材における公称ひずみと h/d の関係の計算値と実験値を比較したものである。公称ひずみ ϵ が小さい間は、計算値と実験値はよく一致している。しかし、公称ひずみ ϵ が大きくなると実験値は急速に大きくなって合わなくなっている。そこで、穴の変形比が計算値と合わなくなっている範囲で、どのような変化が両材の穴付近に生じているのかを図 6-16, 6-17, 6-18 に示している。すなわち、図 6-49 において計算値が一致しなくなるのは内部にき裂が発生することによる。

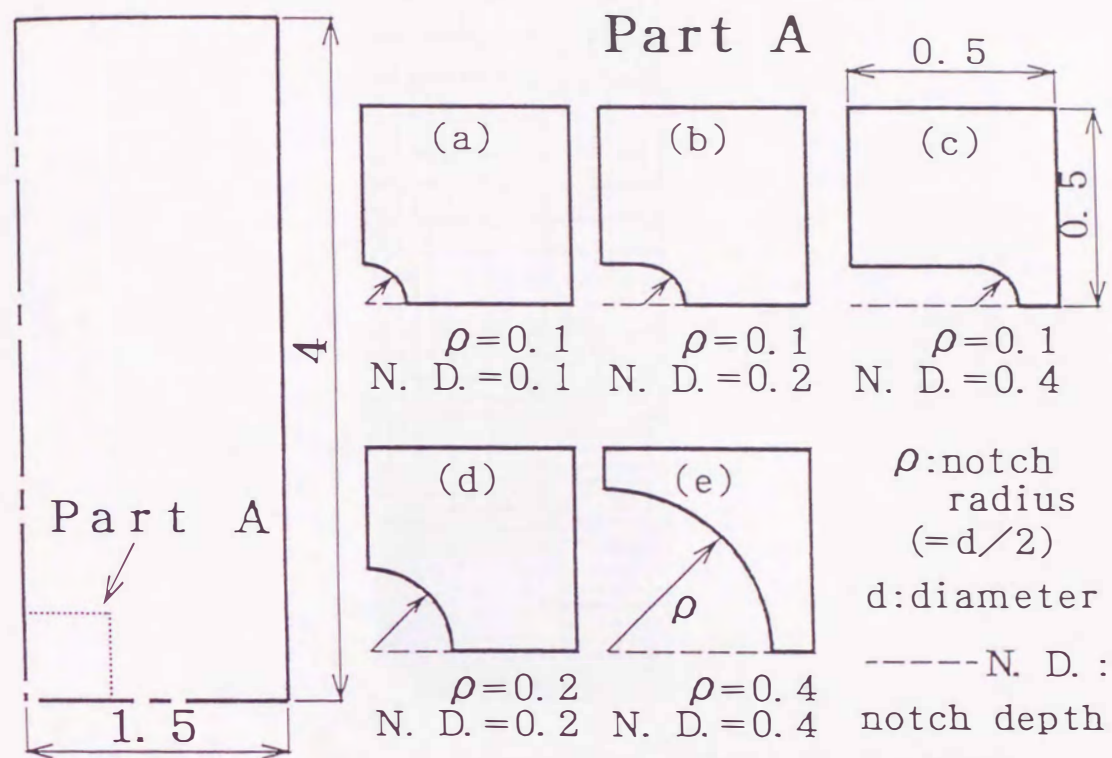
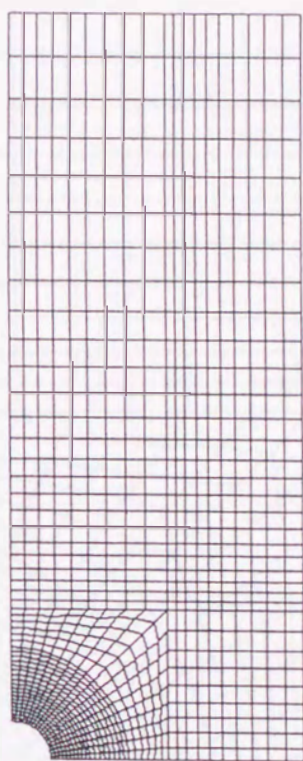


図 6-23 計算に用いた切欠き材の形状・寸法



ORTHO V.P. 0.000E+00 0.000E+00 0.100E+01



图 6-24 要素分割 (全体図)

Number of Elements=977

Number of Nodes=1075

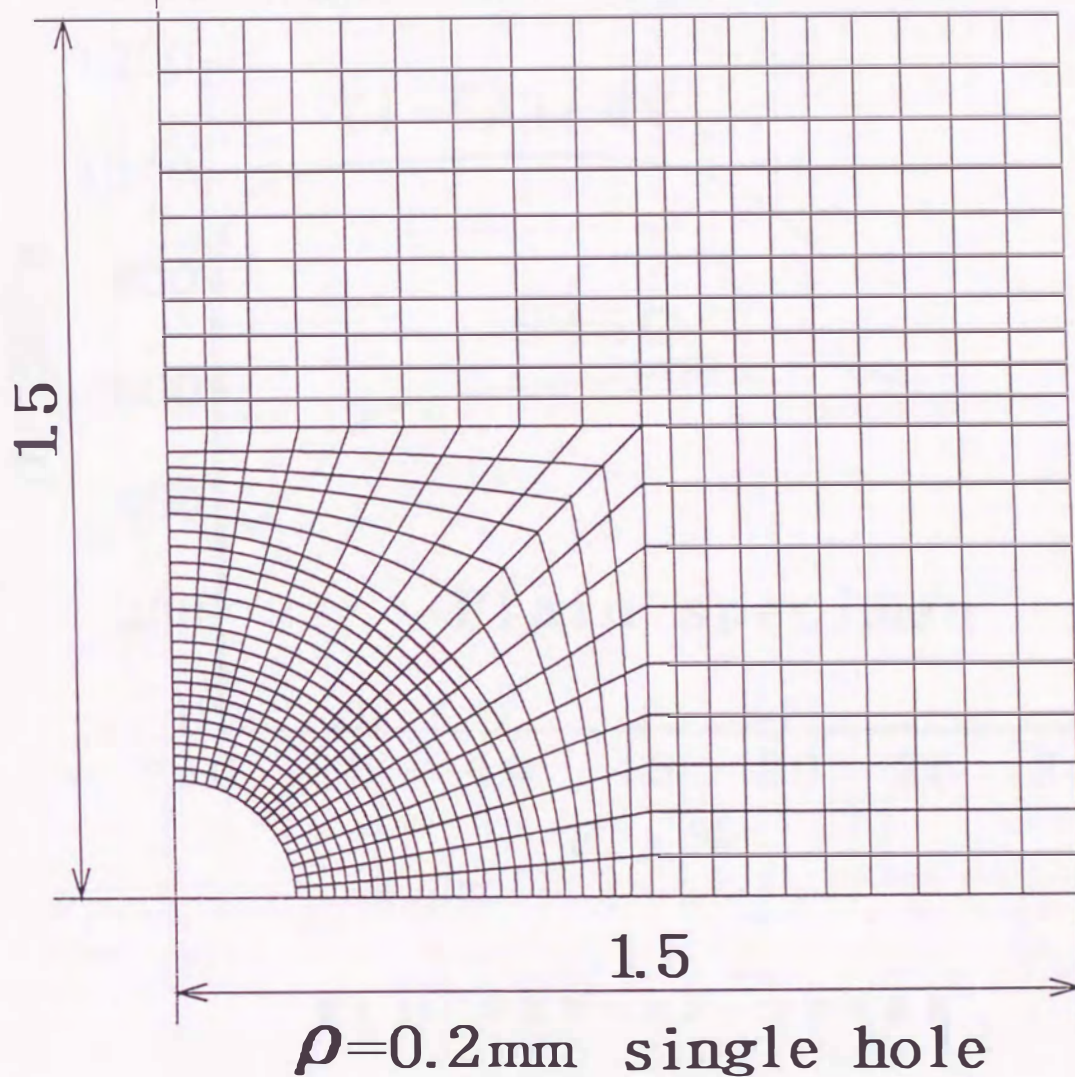


图 6-25 要素分割 (扩大图)

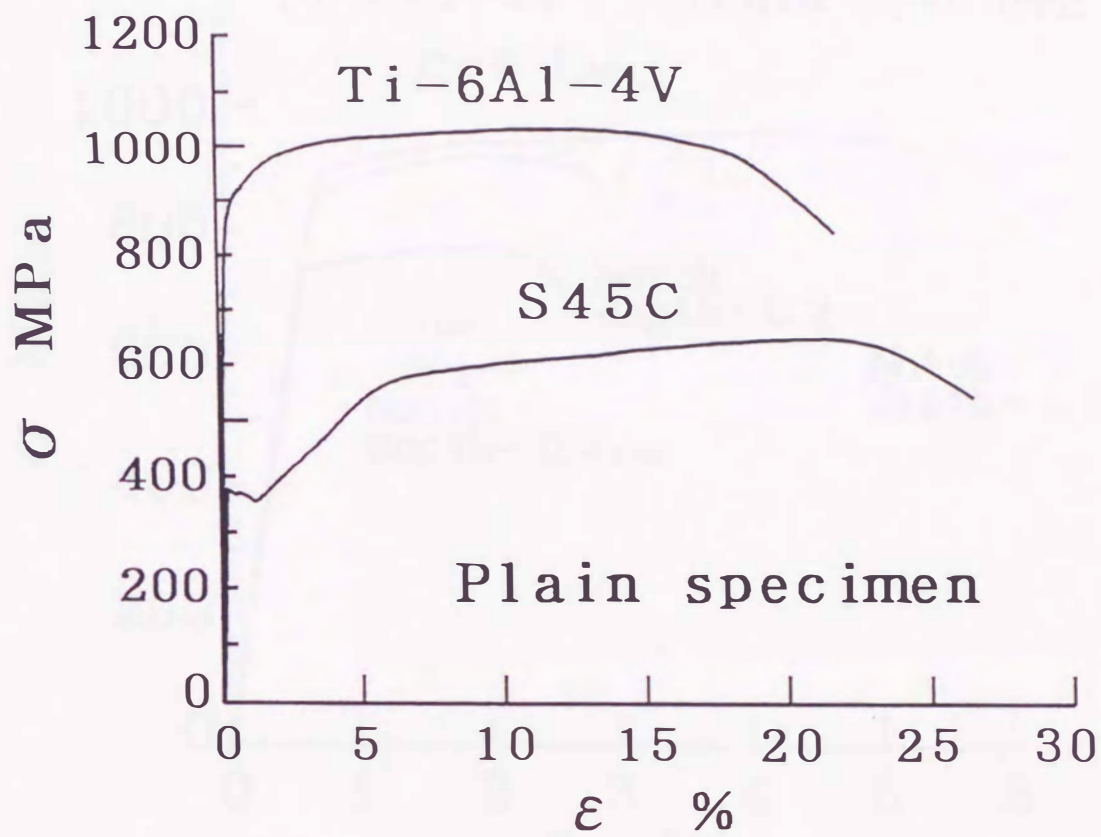


図 6-26 平滑材の応力-ひずみ曲線

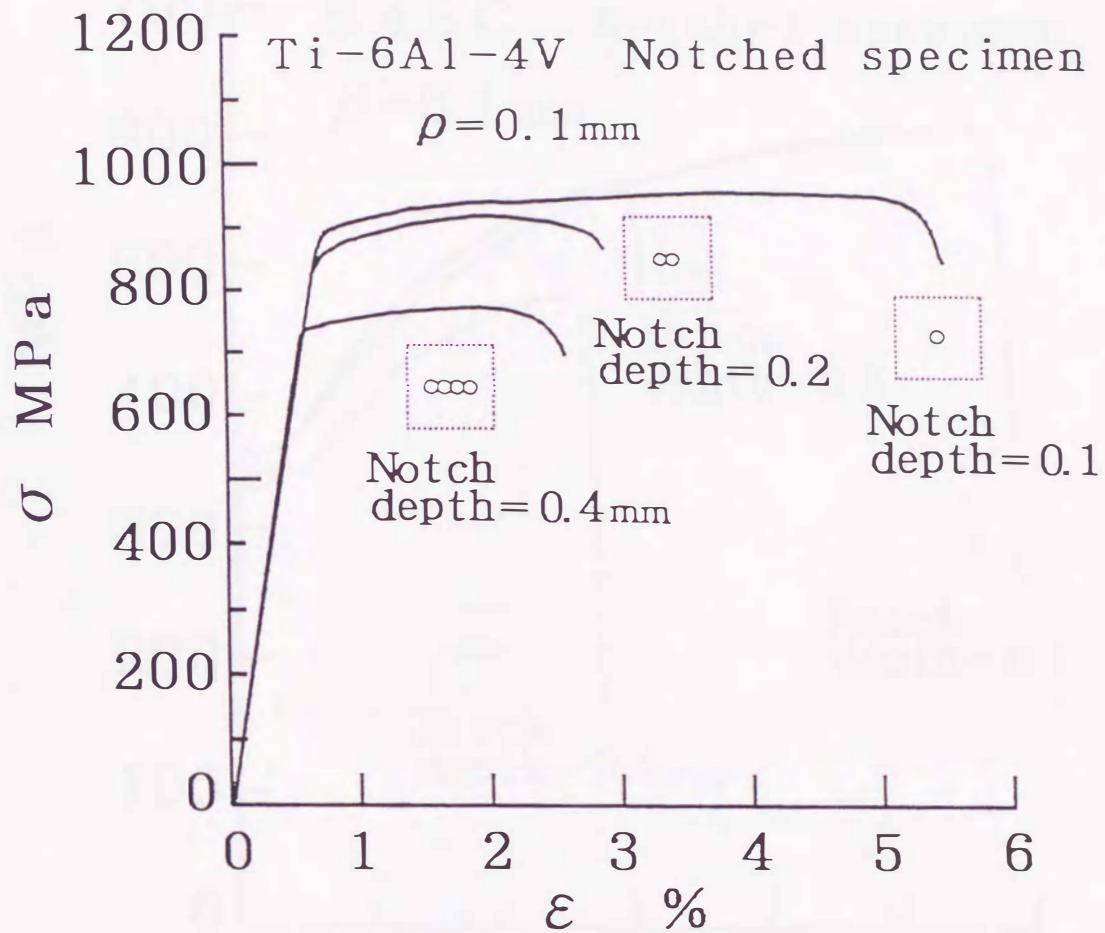


図 6-27 Ti-6Al-4V 切欠き材の応力-ひずみ曲線

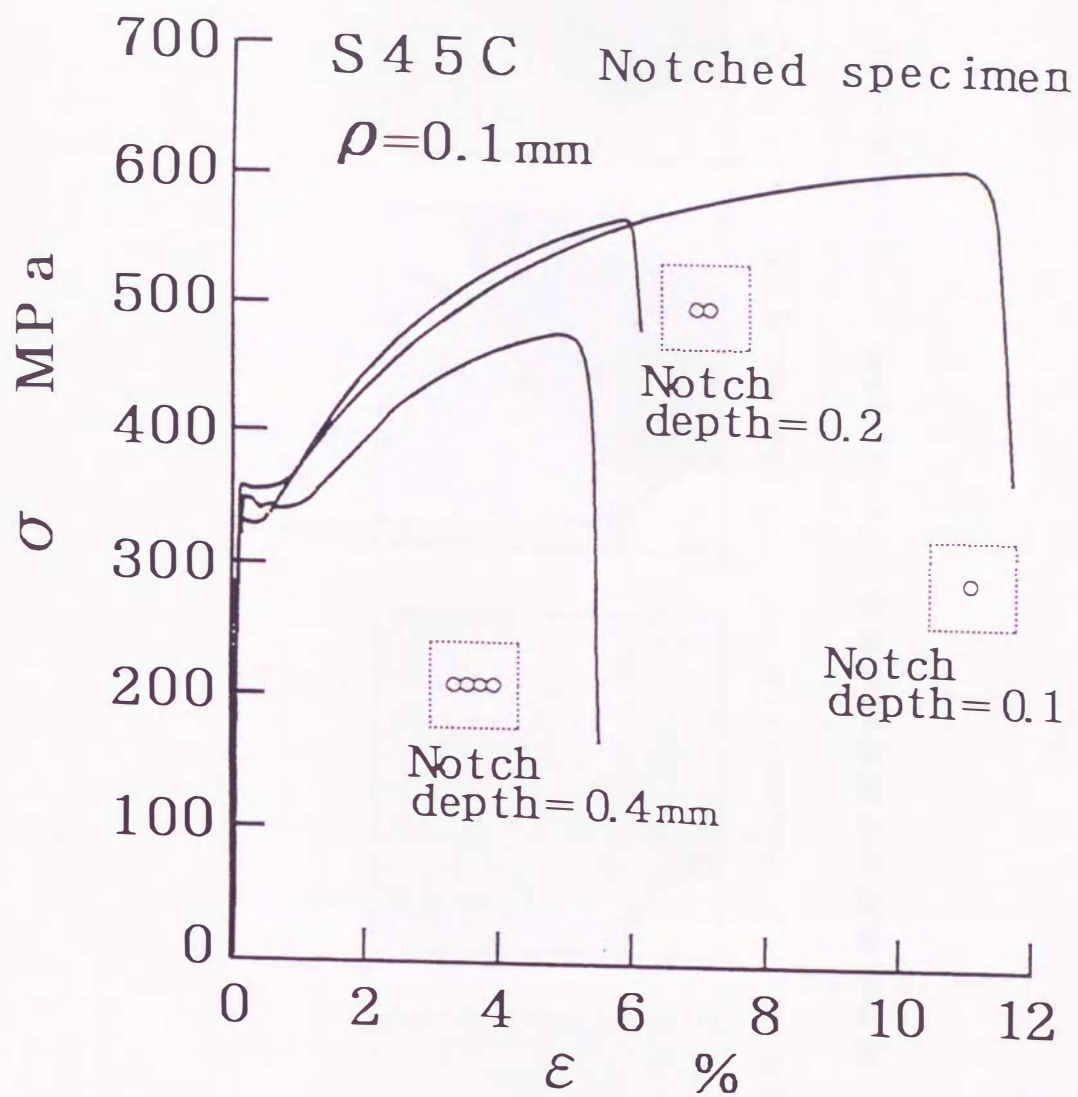


図 6-28 S45C切欠き材の応力-ひずみ曲線

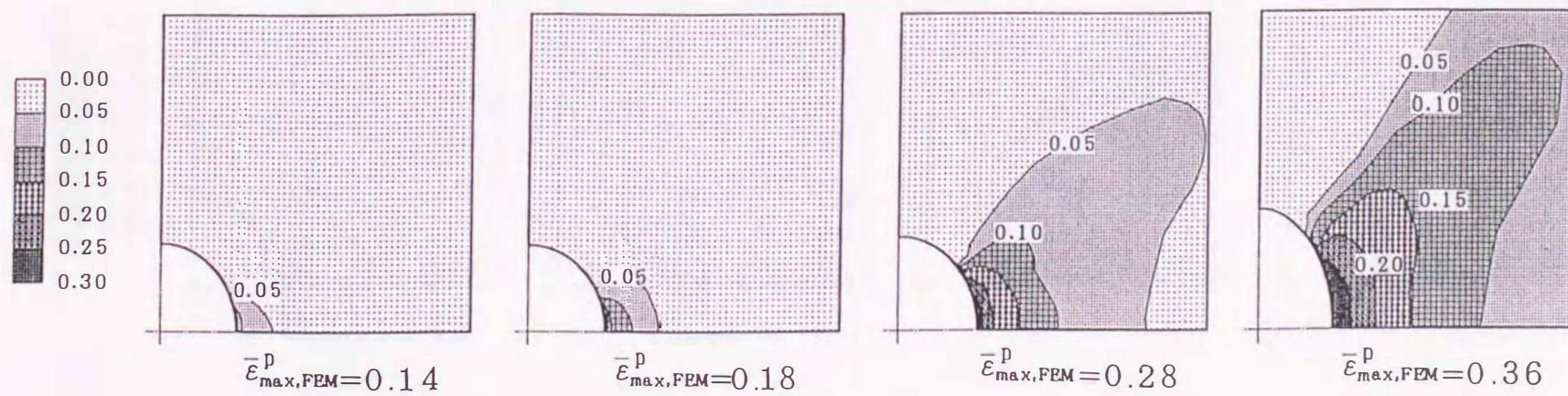


図6-29 切欠き底付近の塑性域の進展 (Ti-6Al-4V材, $\rho = 0.1$, $N.D. = 0.1$)

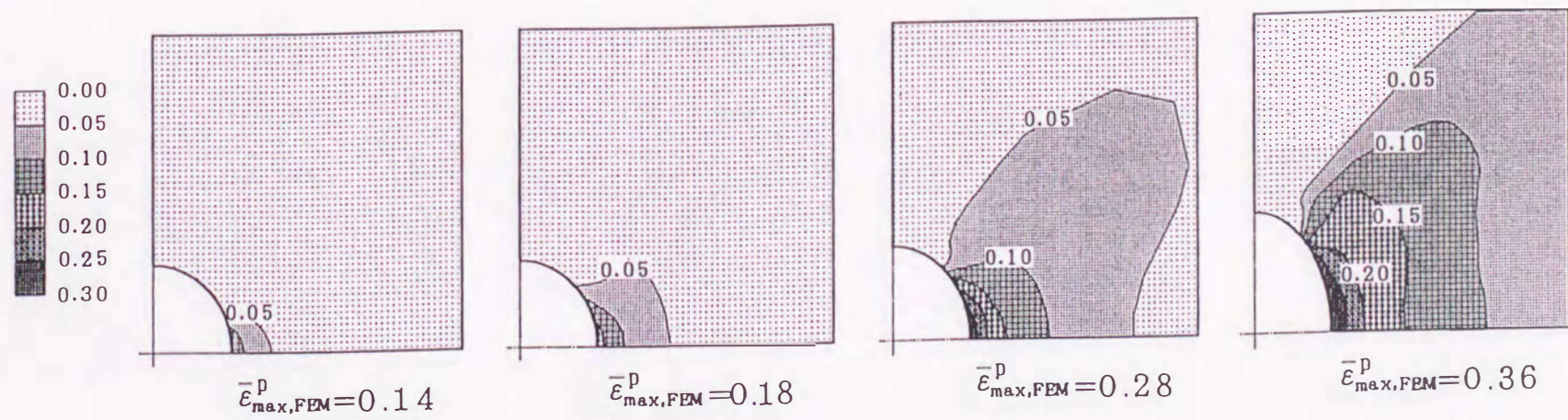


図 6-30 切欠き底付近の塑性域の進展 (Ti-6Al-4V材, $\rho = 0.1$, $N.D. = 0.2$)

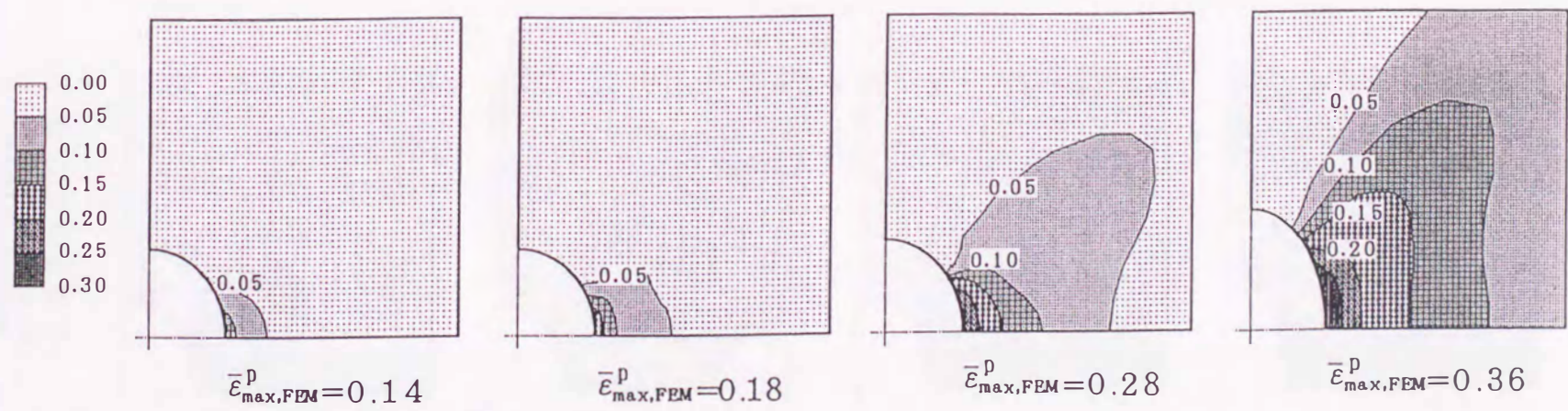


図6-31 切欠き底付近の塑性域の進展 (Ti-6Al-4V材, $\rho = 0.1$, N.D. = 0.4)

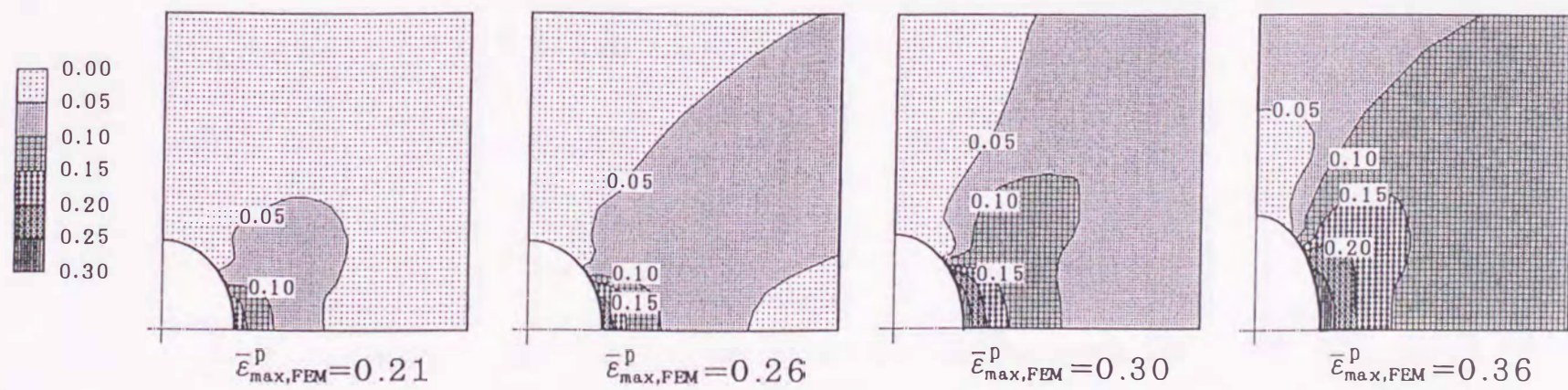


図6-32 切欠き底付近の塑性域の進展 (S45C材, $\rho = 0.1$, N.D. = 0.1)

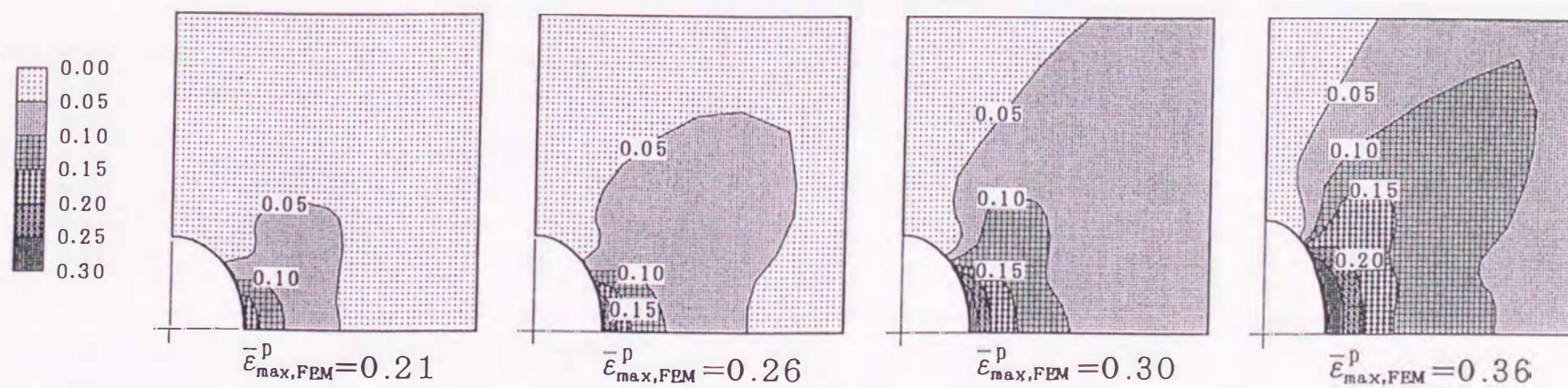


図6-33 切欠き底付近の塑性域の進展 (S45C材, $\rho = 0.1$, N.D. = 0.2)

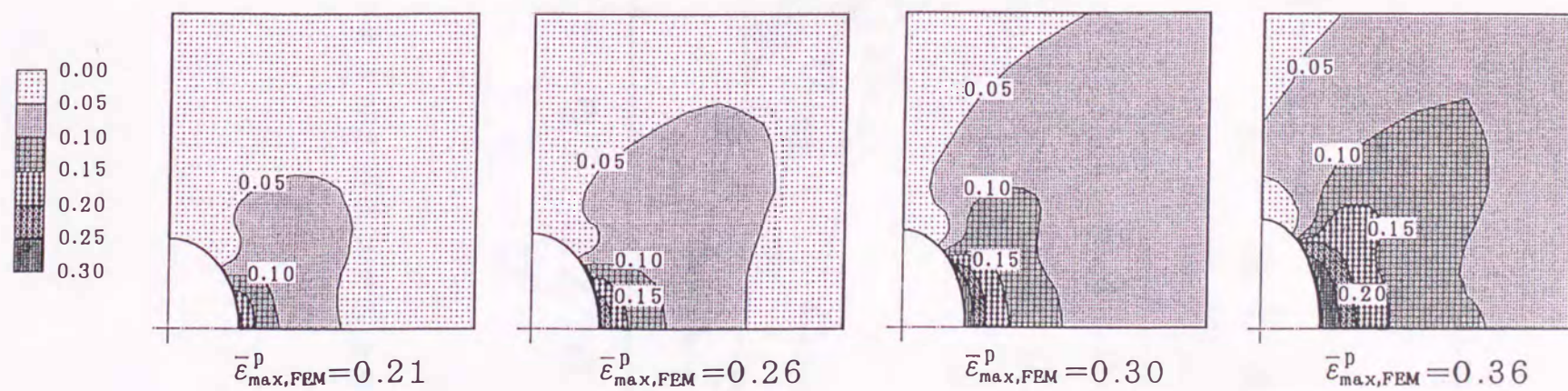


図6-34 切欠き底付近の塑性域の進展 (S45C材, $\rho = 0.1$, N.D. = 0.4)

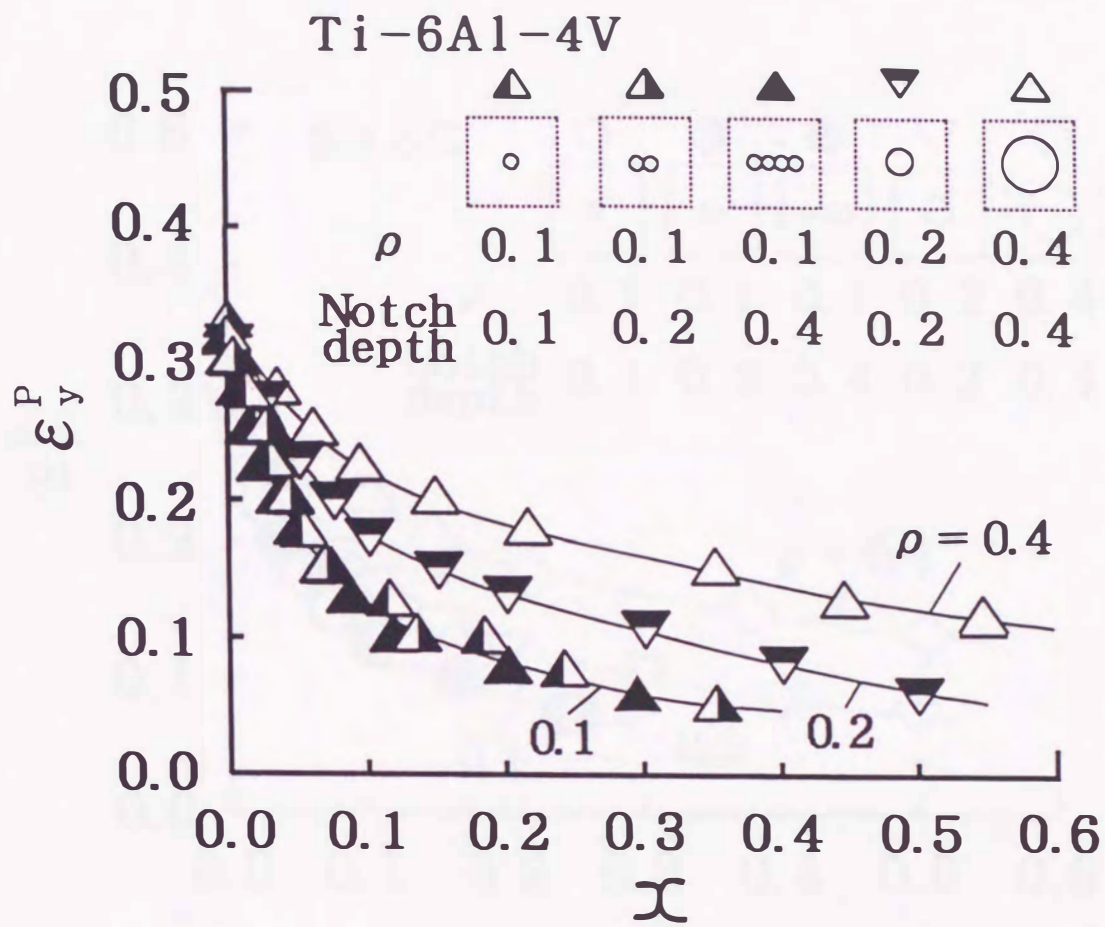


図6-35 計算による相当塑性ひずみ分布 (Ti-6Al-4V材)

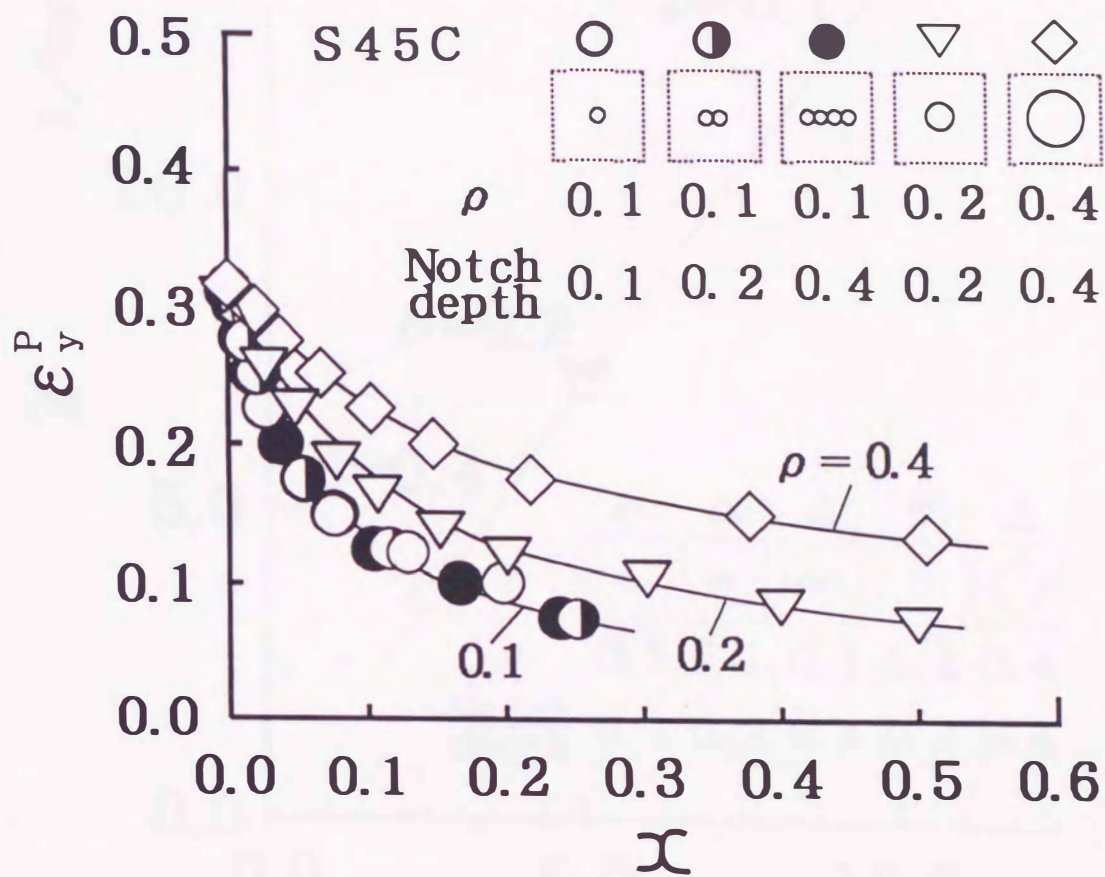


図 6-36 計算による相当塑性ひずみ分布 (S45C材)

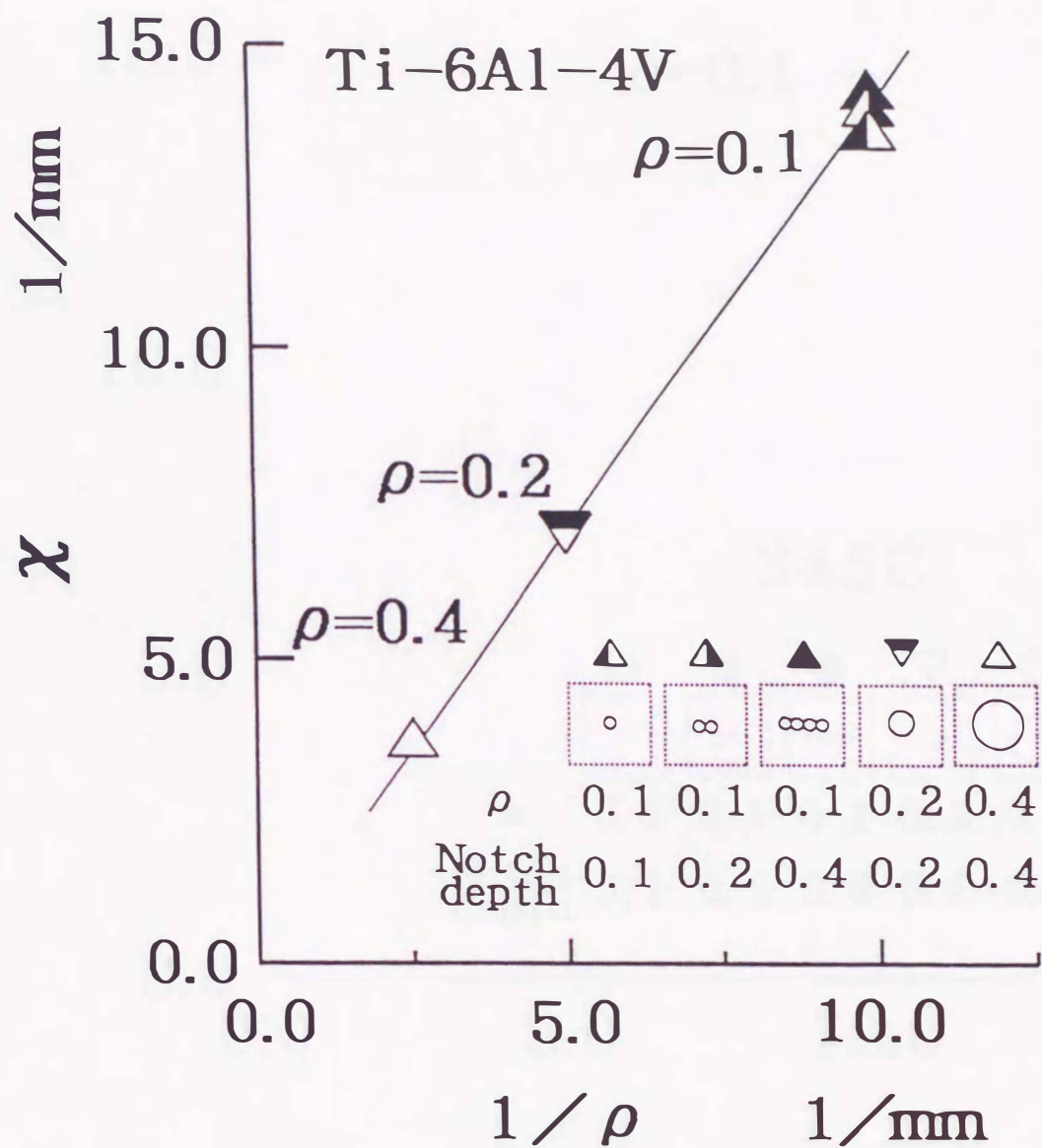


図 6-37 ひずみ勾配と切欠き半径 ρ の関係 (Ti-6Al-4V材)

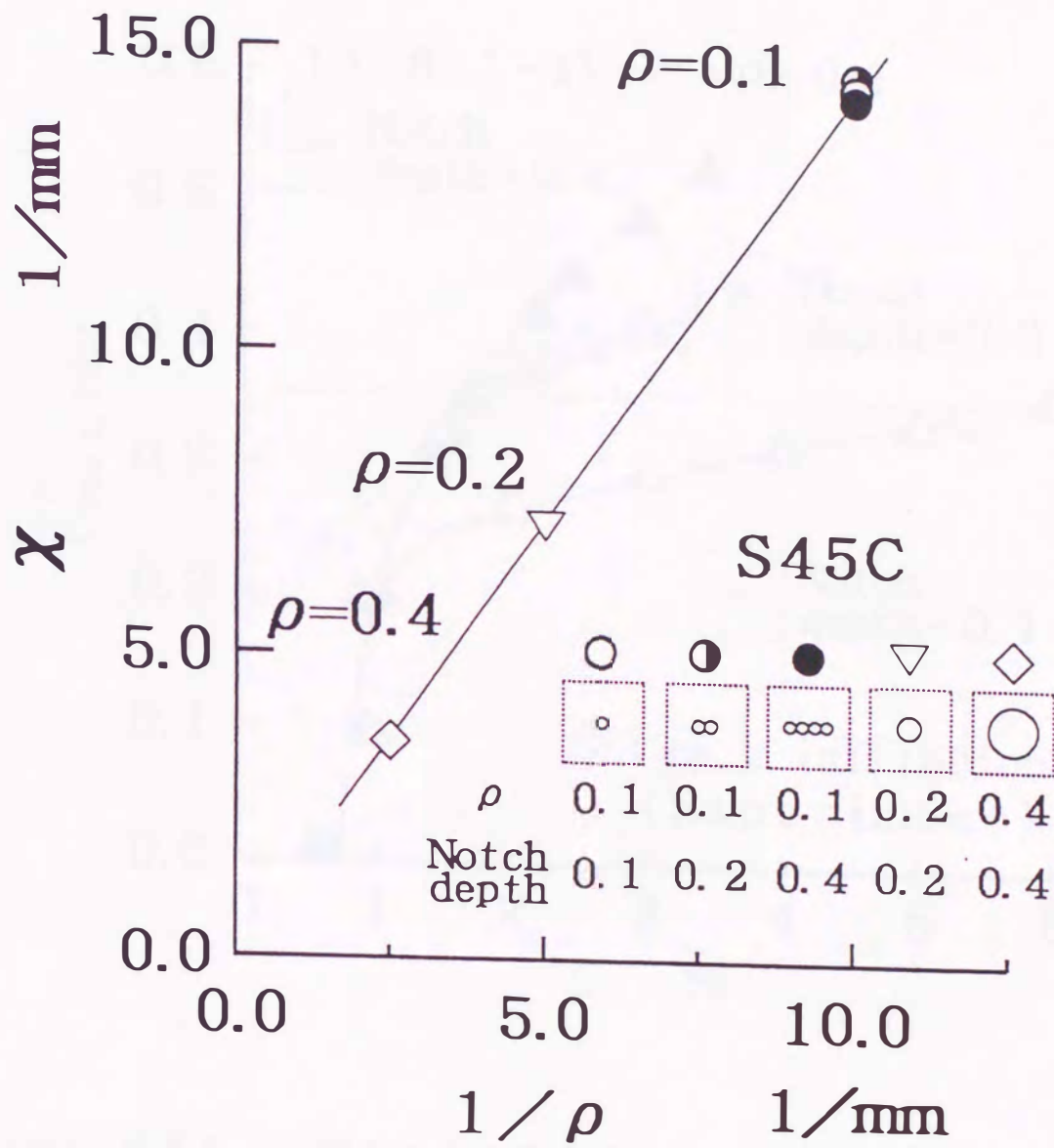


図 6-38 ひずみ勾配と切欠き半径 ρ の関係 (S45C材)

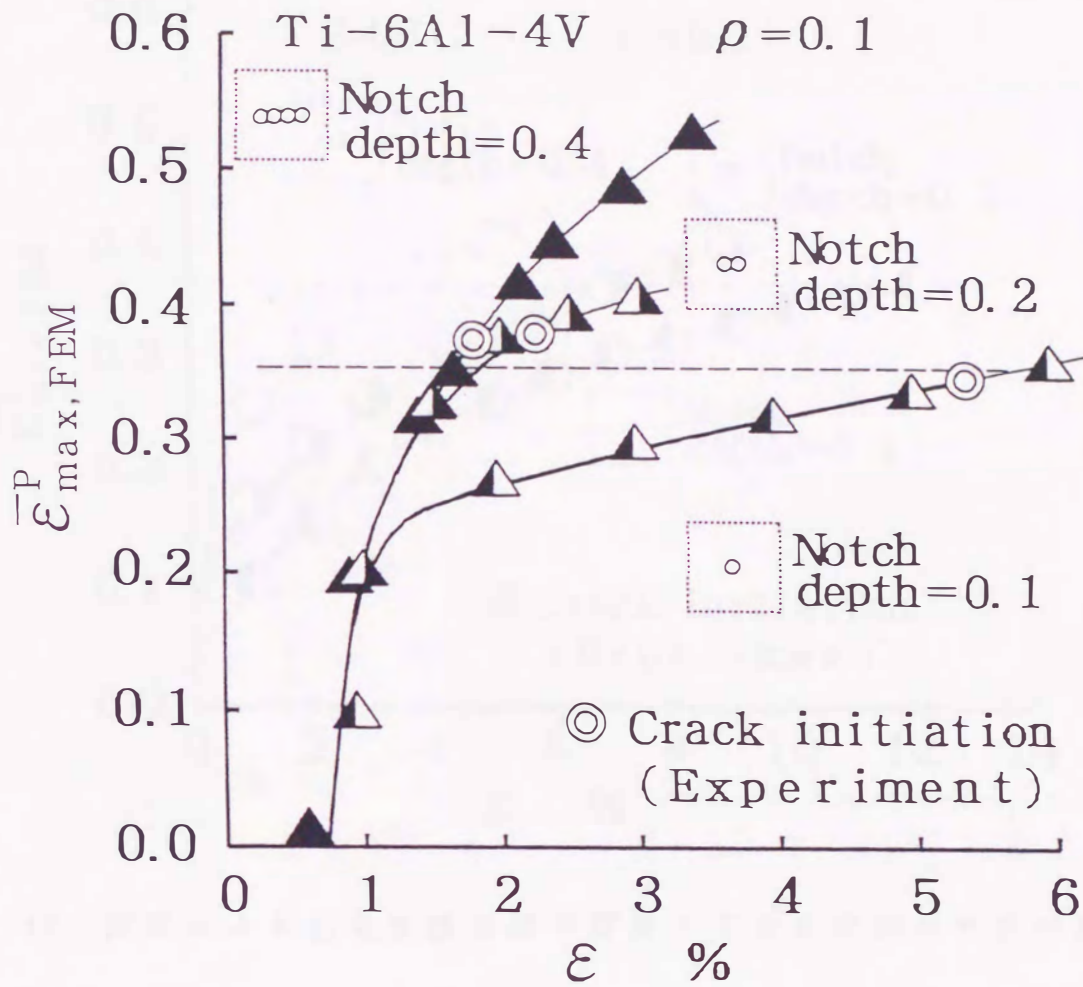


図 6-39 計算による切欠き底の相当塑性ひずみと公称ひずみの関係

(Ti-6Al-4V材)

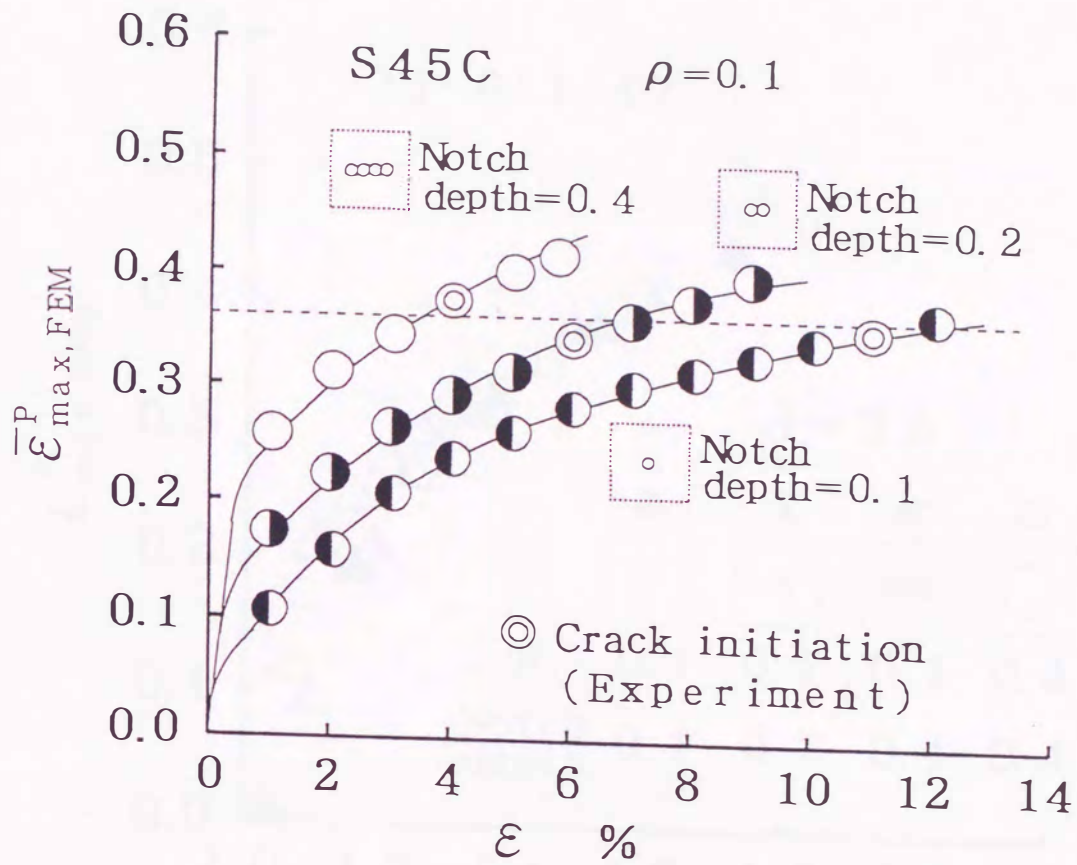
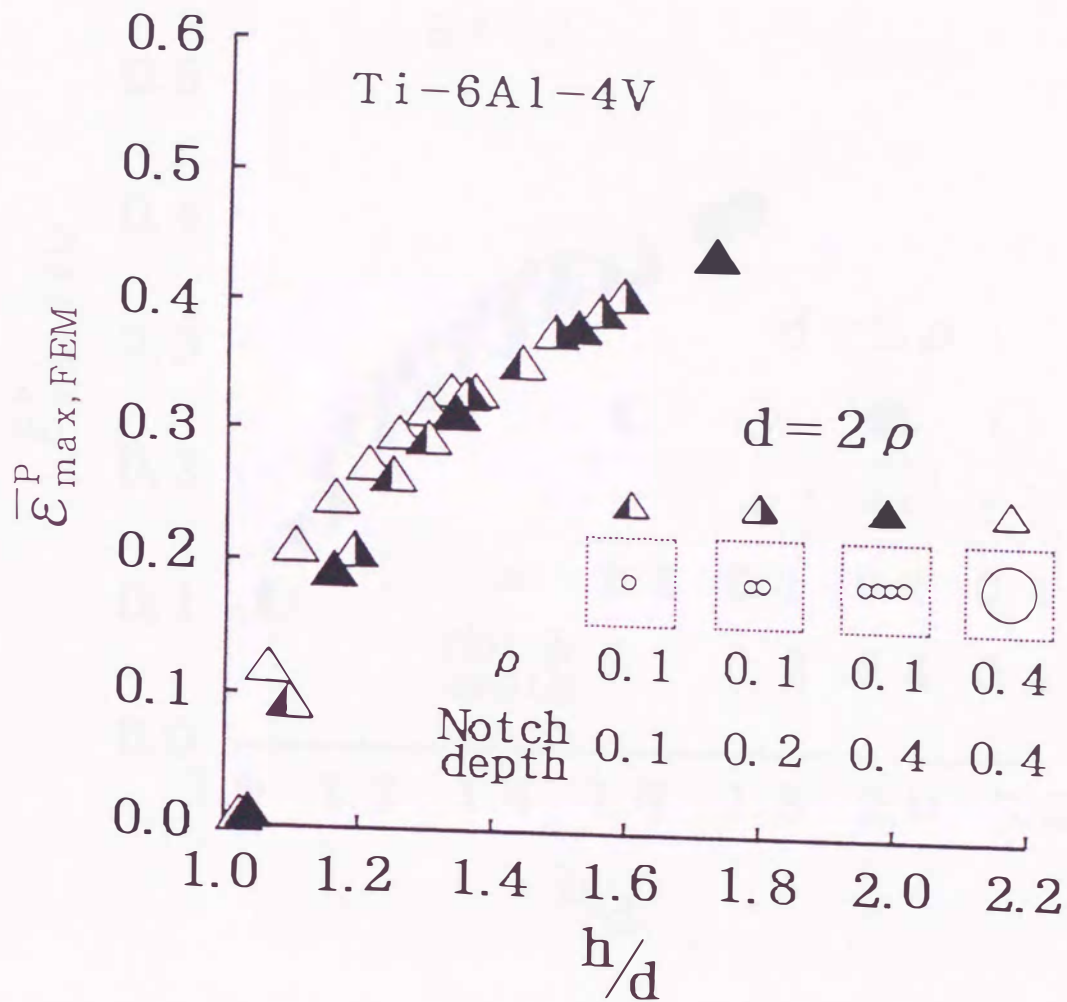


図 6-40 計算による切欠き底の相当塑性ひずみと公称ひずみの関係

(S 4 5 C 材)



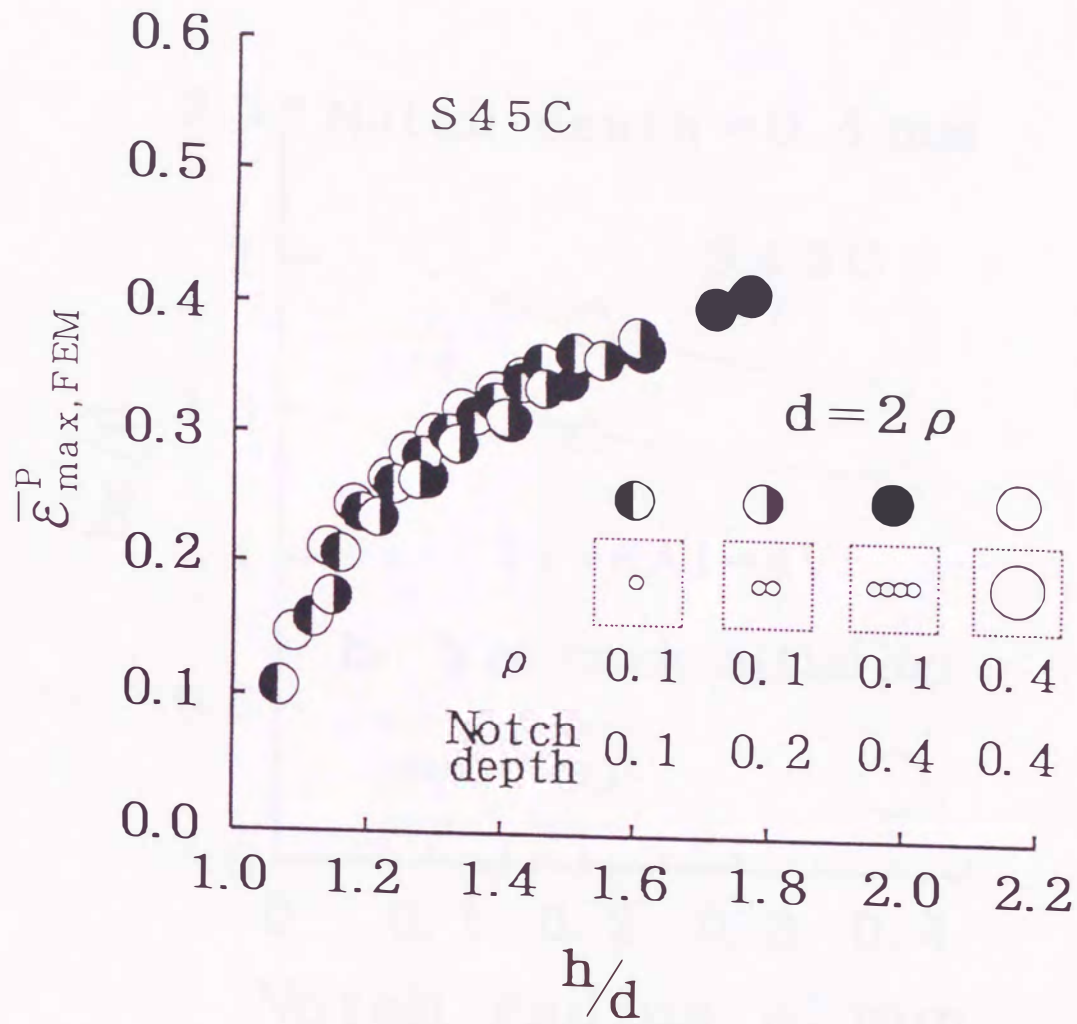


図 6-42 計算による切欠き底の相当塑性ひずみと穴の変形比 h_c/d の

関係 (S45C材)

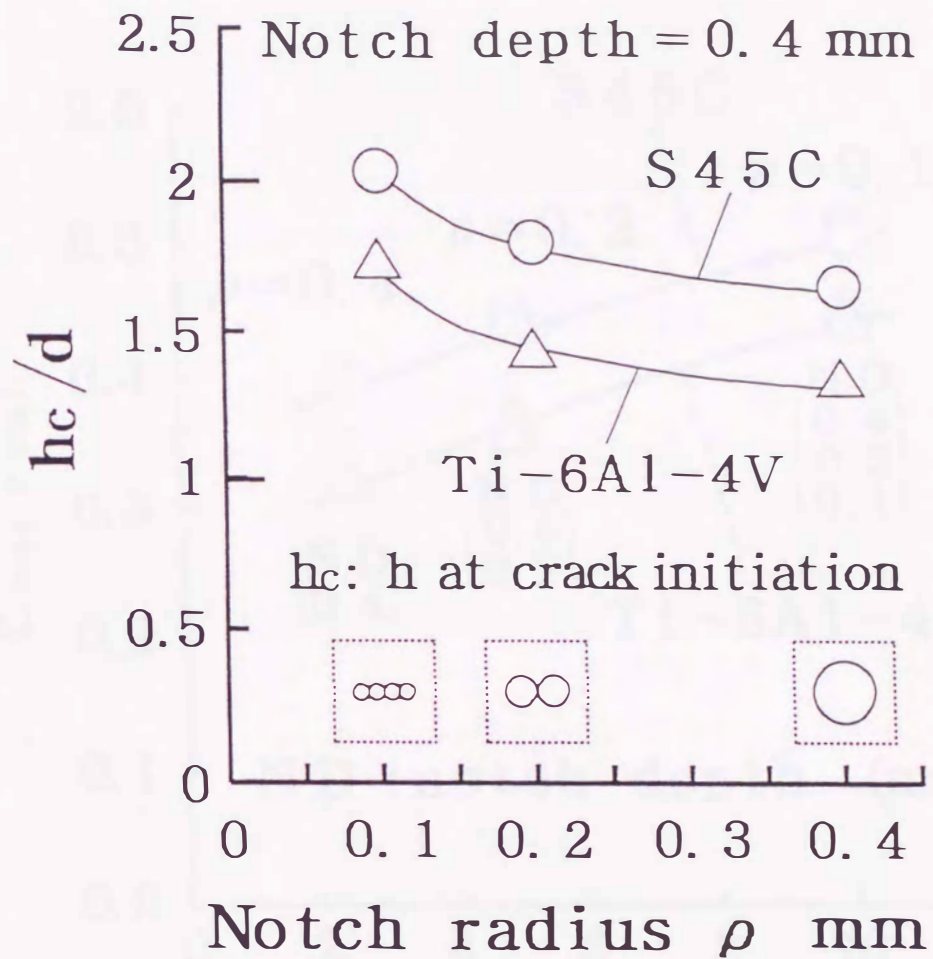


図 6-43 実験によるき裂発生時の穴の変形比 h_c/d と切欠き半径 ρ の関係

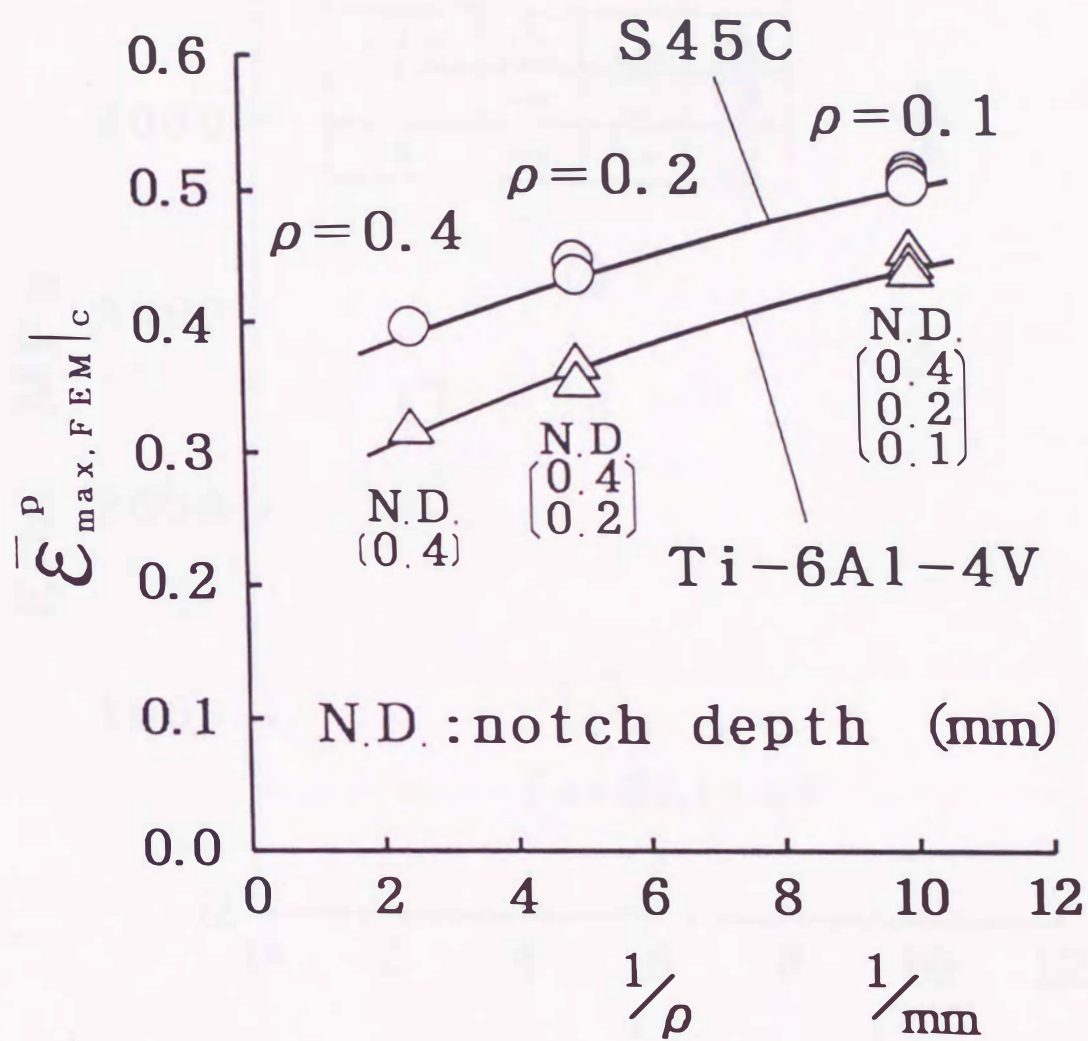


図 6-44 非線形切欠き力学による整理

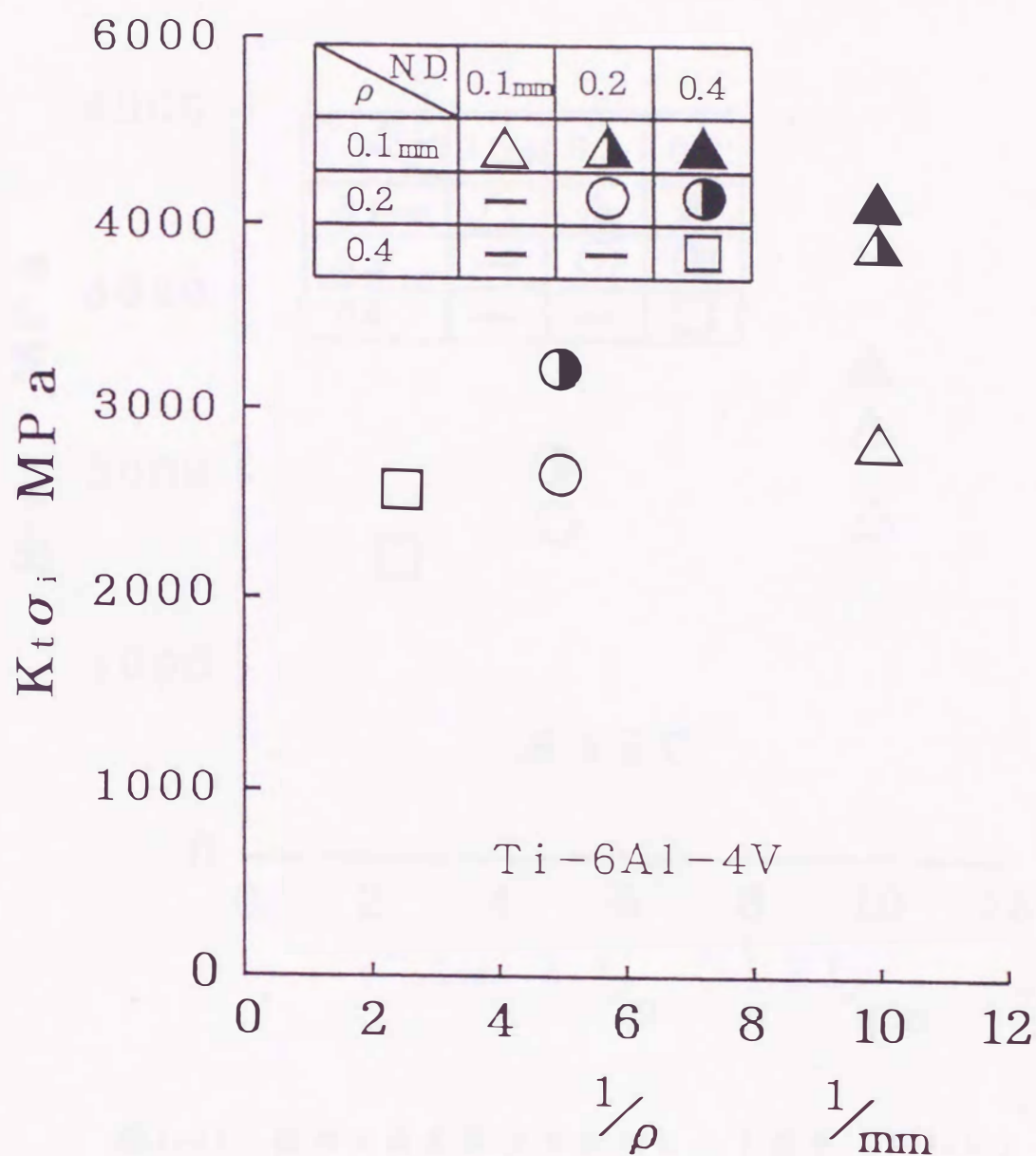


図 6-45 従来の線形切欠き力学による整理 (Ti-6Al-4V材)

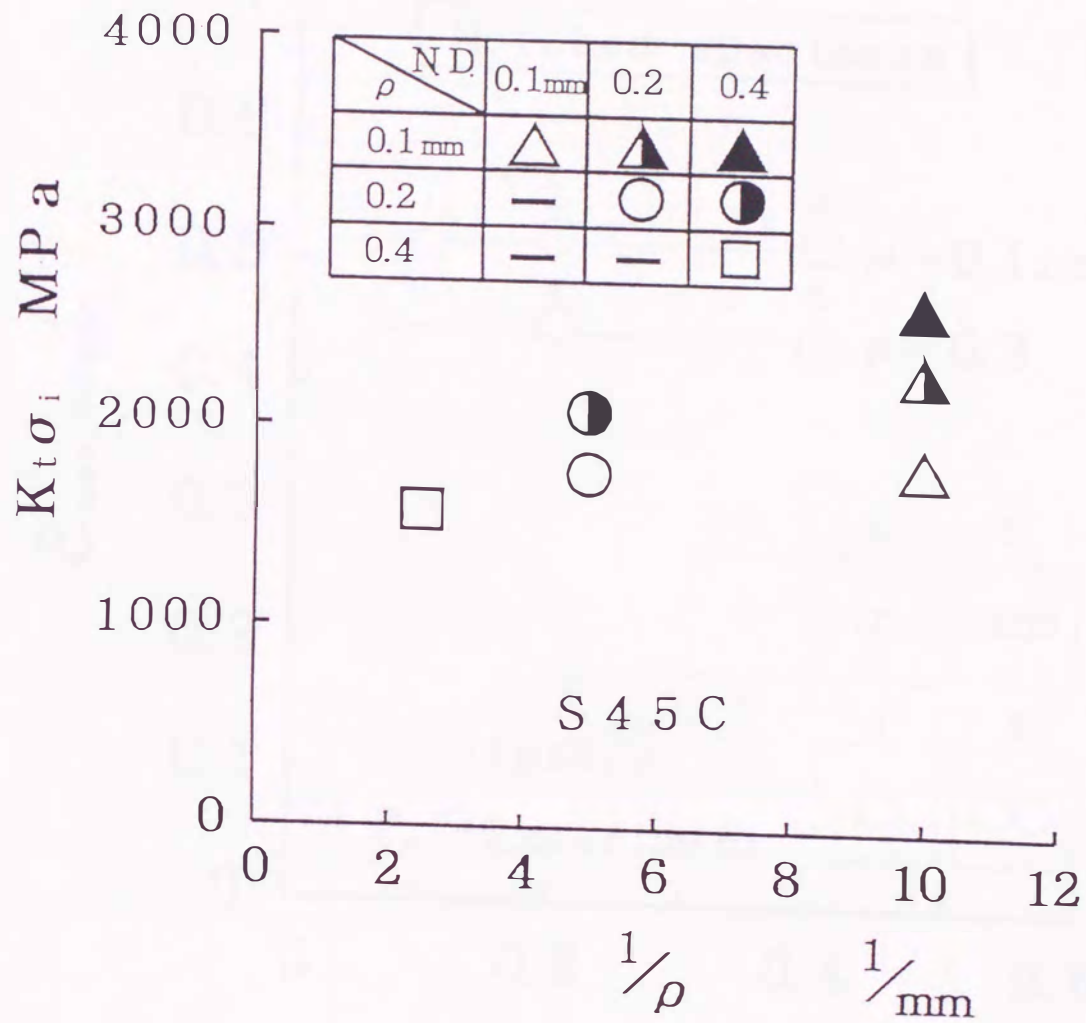


図 6-46 従来の線形切欠き力学による整理 (S45C材)

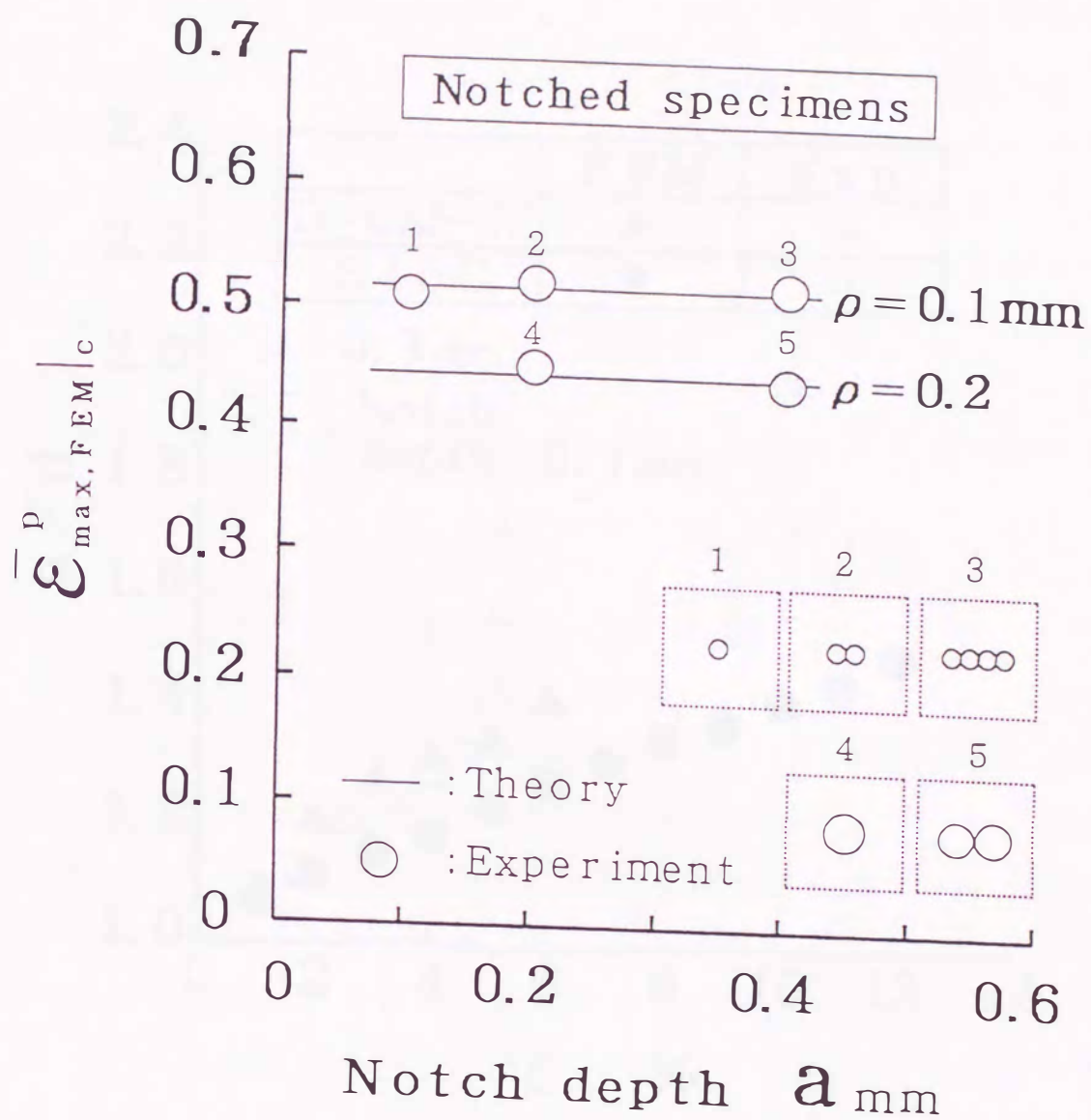


図 6-47 非線形切欠き力学の有用性を示すデータ

— き裂発生時の最大相当塑性ひずみ

$\bar{\epsilon}_{\max, FEM}^p$ と切欠き深さ a の関係 —

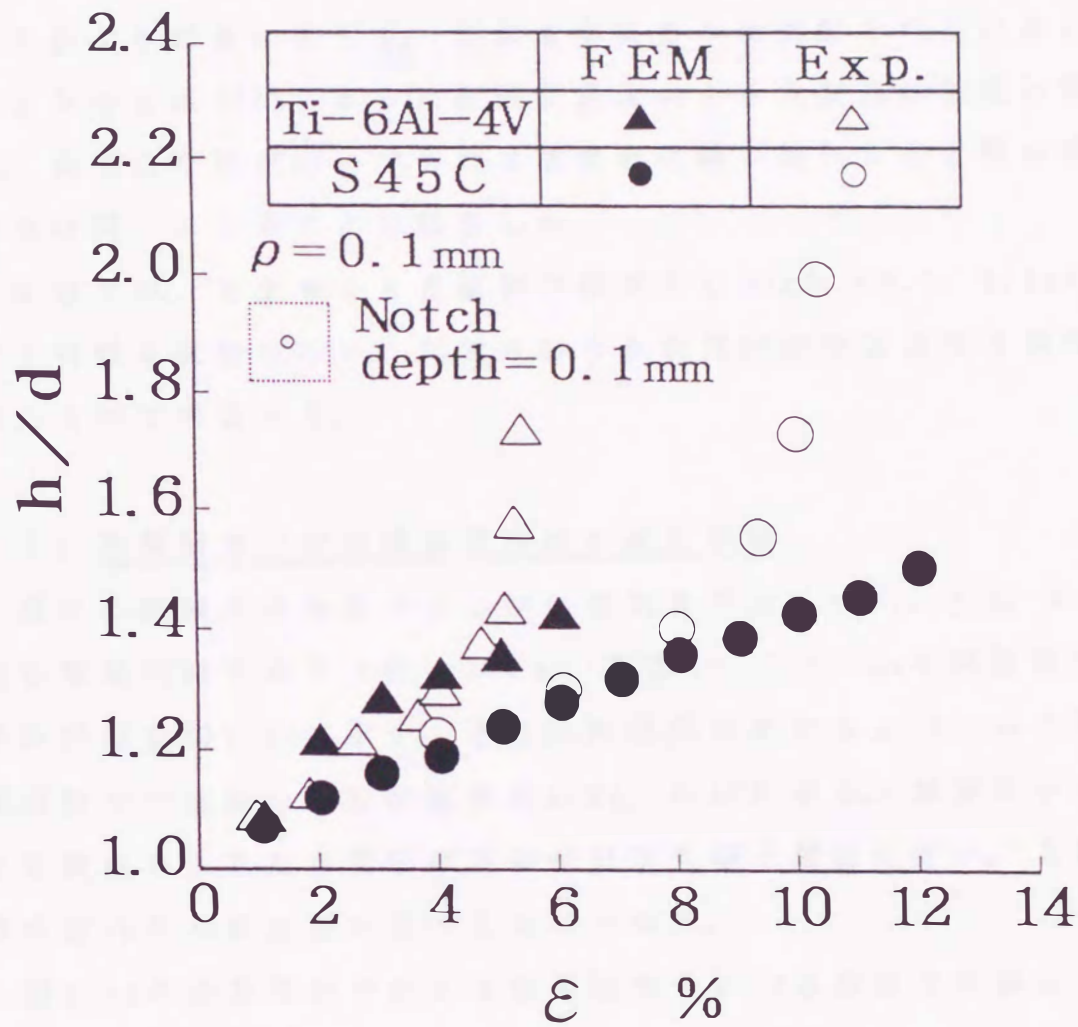


図 6-48 穴の変形比 h_c/d と公称ひずみ ϵ の関係

6.3.4 板厚の影響

前節までにおいて貫通穴を有するS45C板材（板厚1mm）の引張り変形および破壊の過程をSEMサーボパルスによる連続観察により詳細に検討し、板厚一定条件のもとではき裂発生時の穴の変形比は切欠き深さによらず、切欠き半径のみに支配されていることを明らかにした⁽¹²⁾。さらに有限要素法による大変形弾塑性計算により、切欠き半径が同一であればき裂発生時の切欠き底近傍の塑性ひずみは同一となることを報告した。

本節では、まずS45C板材の板厚を1.0mmから0.5, 0.3mmと変えて引張り試験を行い、切欠き材のき裂発生条件に及ぼす板厚の影響について考察する。

(I) 平滑材および単独貫通穴材の変形挙動

用いた試験片は平滑材ならびに切欠き半径 $\rho = 0.1, 0.2, 0.4\text{mm}$ の単独貫通穴材である（図6-49）。板厚 $t = 1.0, 0.5\text{mm}$ の試験片の破断後の外観を図6-50に示す。さらに両板厚における $\rho = 0.1\text{mm}$ の単独貫通穴材の穴近傍の変形挙動を図6-51, 6-52に示す。板厚が小さくなると表面から見たき裂伝ば方向は引張り軸と垂直に近い。これはき裂の面外せん断変形に基づくものである。

図6-53に各板厚におけるき裂発生時の h_c/d と切欠き半径 ρ の関係を示す。図より切欠き半径が小さいほどき裂発生時までに大きく変形していることがわかる。また板厚が小さくなると h_c/d は若干低下している。

(II) h_c/d と切欠き深さの関係

図6-54は $\rho = 0.1\text{mm}$ の場合の各板厚におけるき裂発生時の h_c/d と切欠き深さの関係である。切欠き半径 ρ が同じであれば、切欠き深さが異なっても h_c/d はほぼ一定となる。また板厚が小さくなると h_c/d

は若干低下している。

(Ⅲ) $\bar{\epsilon}^{P_{max, FEM}}_{lc}$ と板厚の関係

穴の変形比 h/d と切欠き底の最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^{P_{max, FEM}}$ は、切欠き半径に関わらず、ほぼ一対一に対応している⁽²⁾。図6-55は図6-53, 6-54を非線形切欠き力学の考え方、すなわち切欠き半径 ρ の逆数とき裂発生時の切欠き底における最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^{P_{max, FEM}}_{lc}$ の関係で整理したものである。板厚が異なっても、板厚一定条件下では、き裂発生時における切欠き底の相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^{P_{max, FEM}}_{lc}$ は、切欠き深さとは無関係に、切欠き半径 ρ と1対1に対応している。また、同一の ρ に対する $\bar{\epsilon}^{P_{max, FEM}}_{lc}$ は板厚が小さくなるにつれて低下する。

(Ⅳ) フラクトグラフィによる検討

板厚 $t=1.0, 0.5\text{mm}$ における $\rho=0.1, 0.2, 0.4\text{mm}$ の単独貫通穴材の破面を図6-56, 6-57に示す。穴付近の破面の凹凸が激しいことがわかる。両板厚において $t/\rho=5$ の破面(図中 A_1, B_1 と A_2, B_2)を比較すると、引張方向にほぼ垂直な延性破面領域(図中点線で示す三角形形状の領域)は板厚が小さいほど、相対的に大きくなる(すなわち、三角形形状の領域の頂角が小さくなる)。このことは、切欠き半径が小さいほど、き裂発生までにより大きい変形が必要となることに対応している。

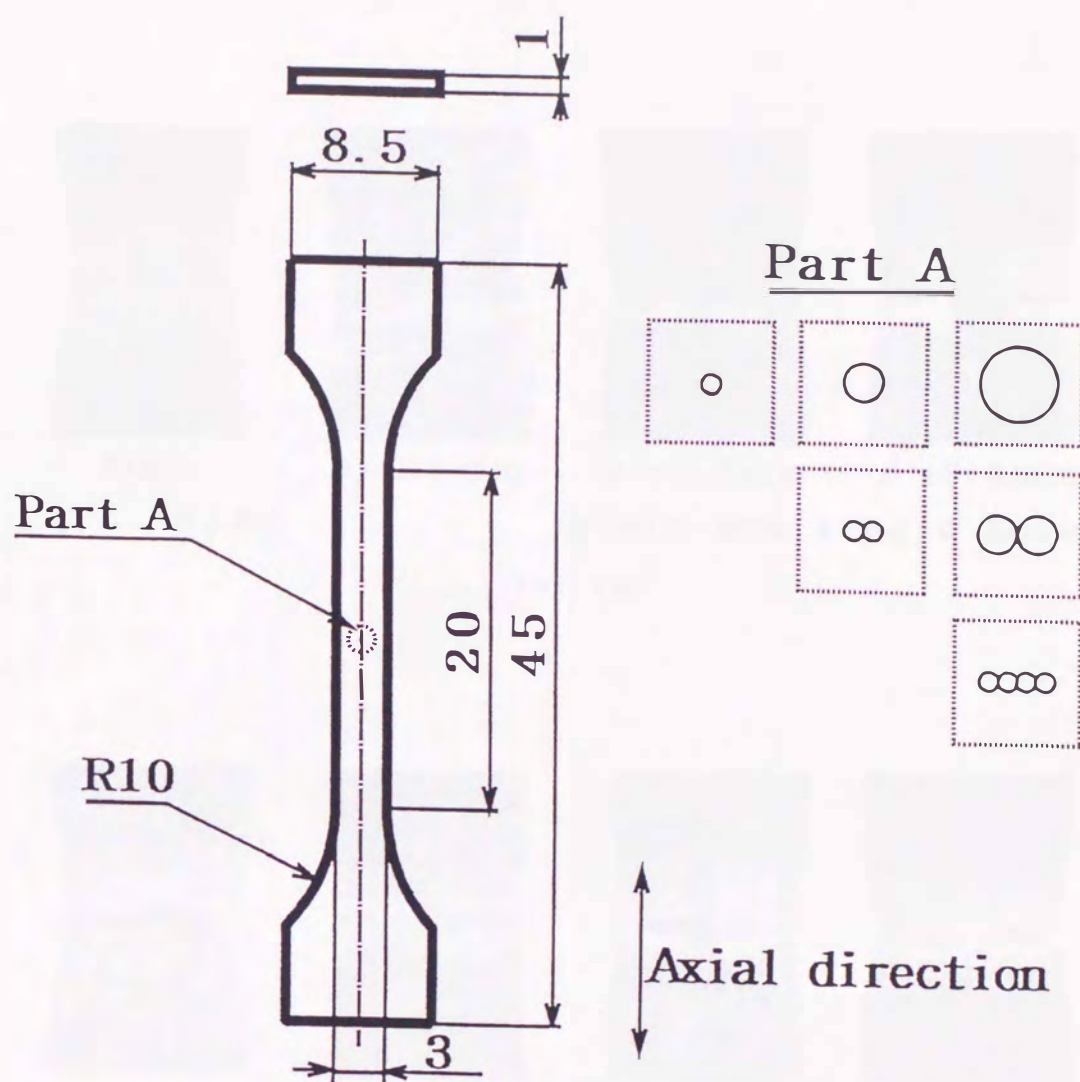
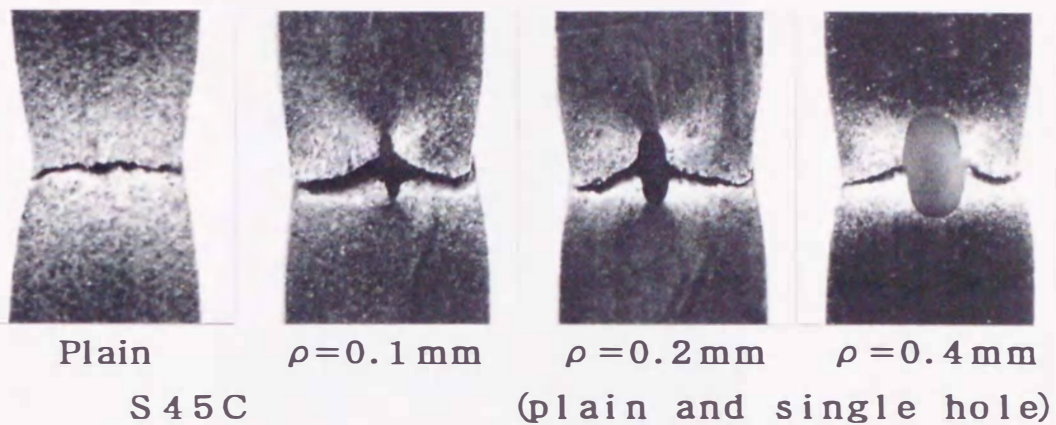
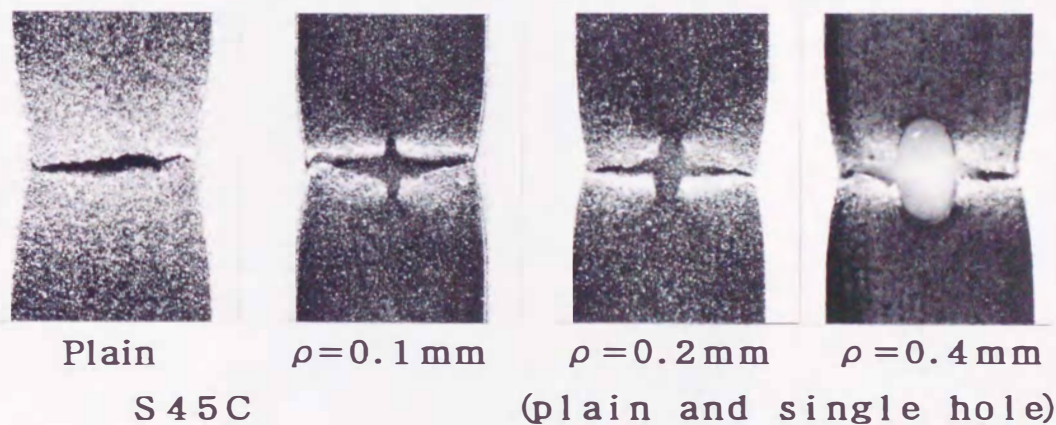


図 6-49 試験片形状・寸法

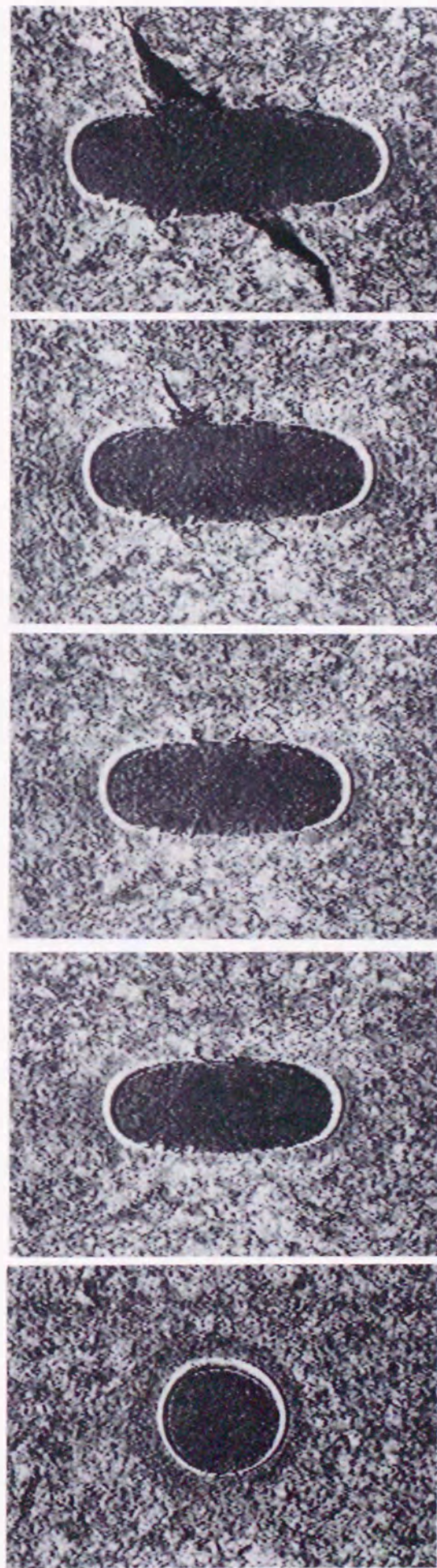


(a) $t = 1.0 \text{ mm}$



(b) $t = 0.5 \mu s$

図 6-50 破断後の外観



$\varepsilon = 0\%$ 14.0% 15.9% 16.5% 16.8%

S45C $t=1.0\text{mm}$ $\rho=0.1\text{mm}$ single hole $\longleftrightarrow$ Axial direction

図 6-51 単独貫通穴材の変形挙動 ($t=1.0\text{mm}$)

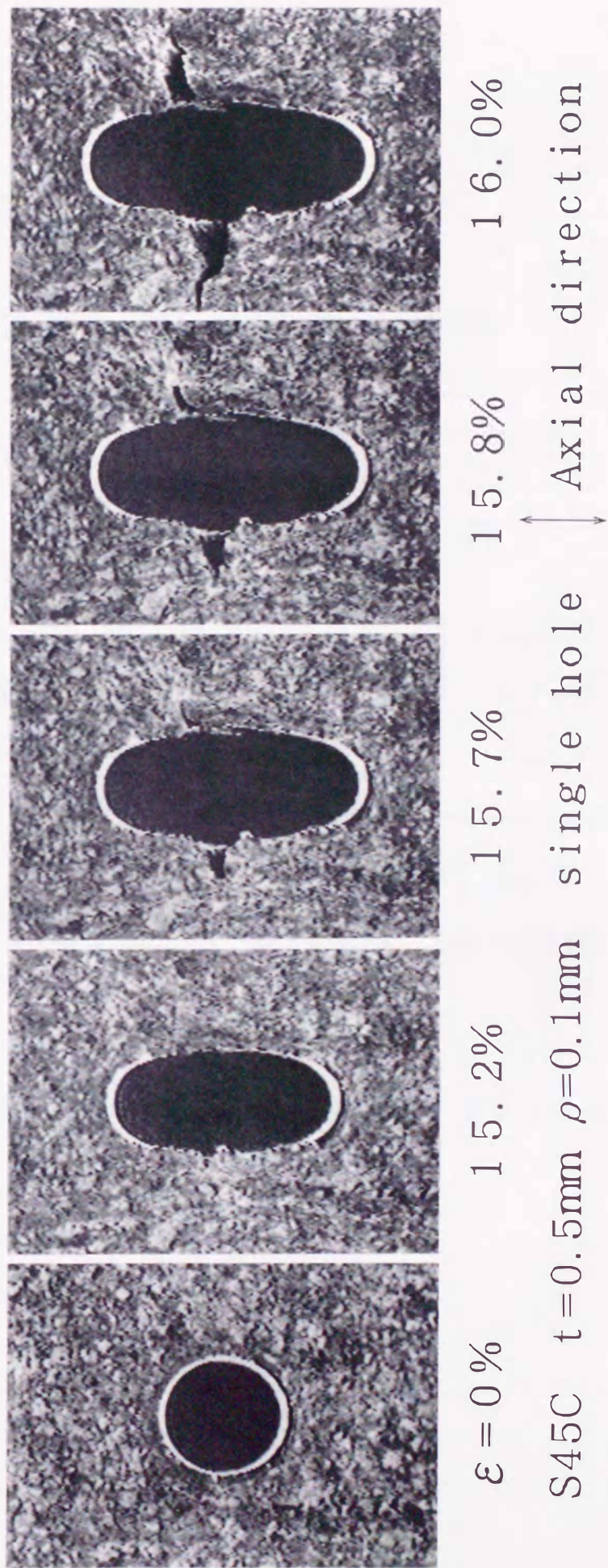


図 6-52 単独貫通穴材の変形挙動 ($t=0.5\text{mm}$)

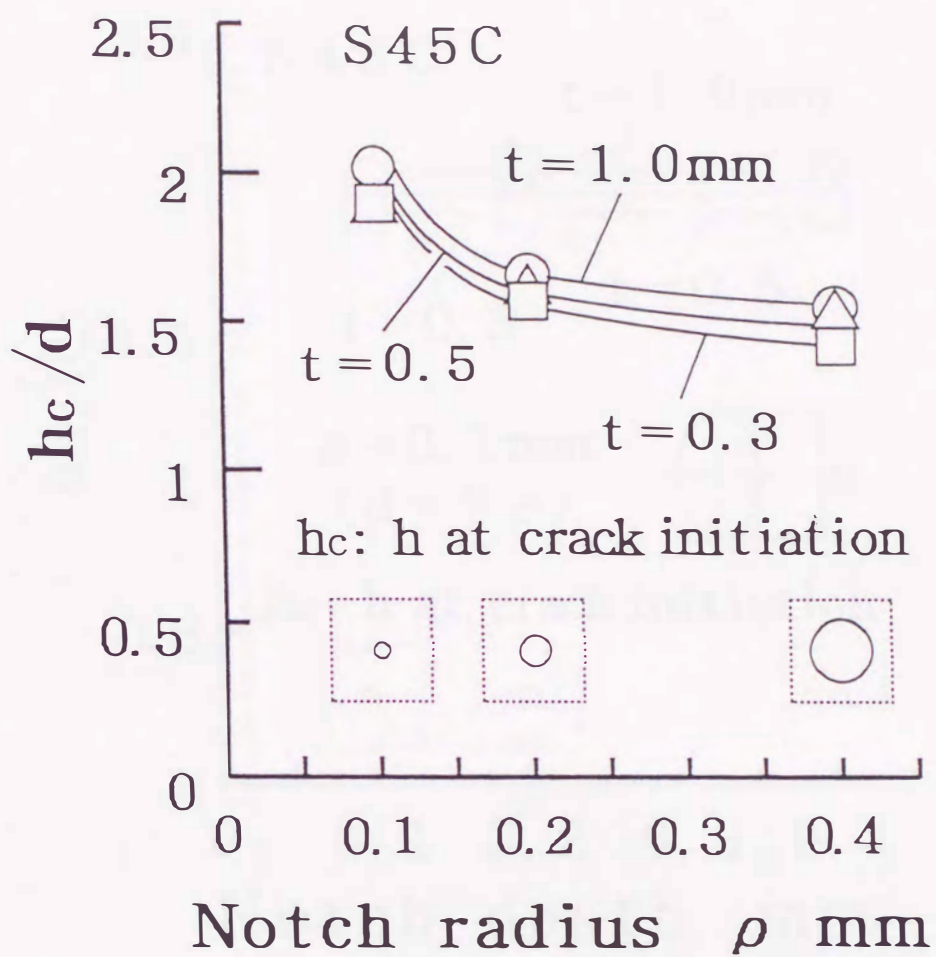


図 6-53 h_c/d と切欠き半径 ρ の関係に及ぼす板厚の影響

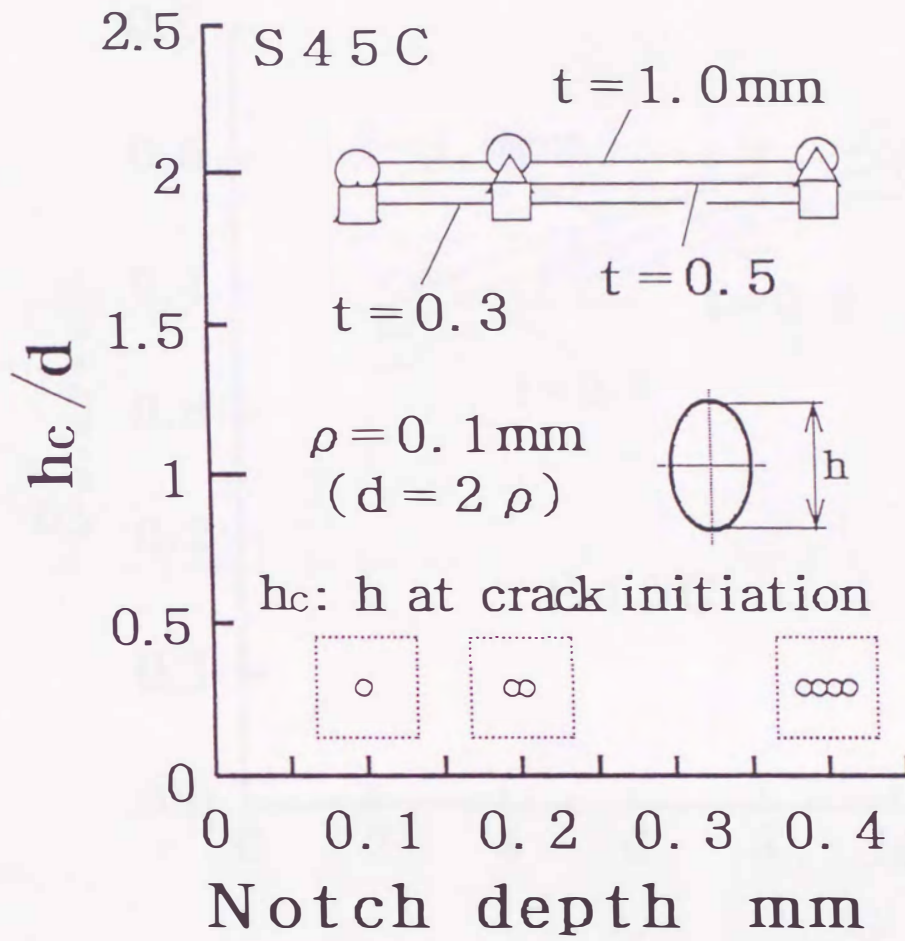


図 6-54 h_c/d と切欠き深さの係に及ぼす板厚の影響

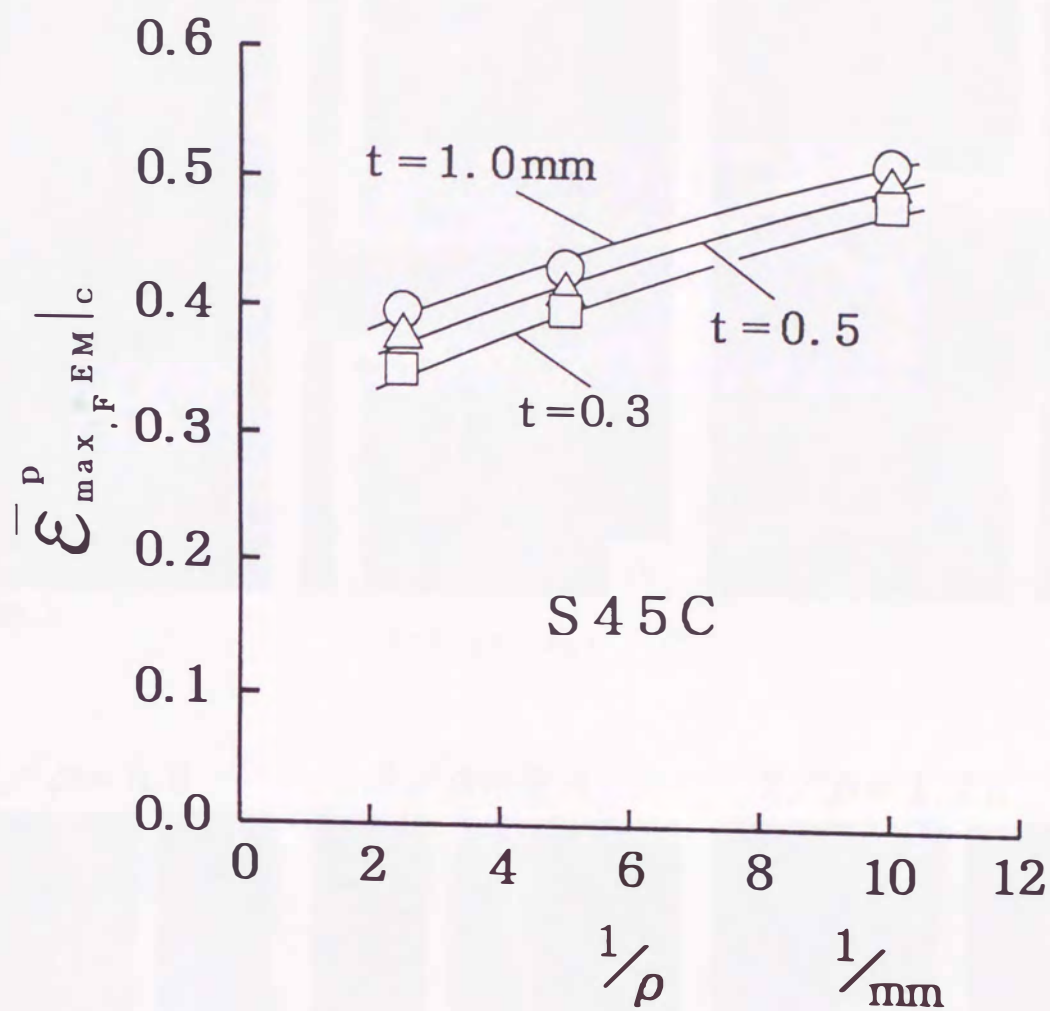


図 6-55 $\bar{\epsilon}_{\max, FEM|c}^p$ と $1/\rho$ の関係に及ぼす板厚の影響

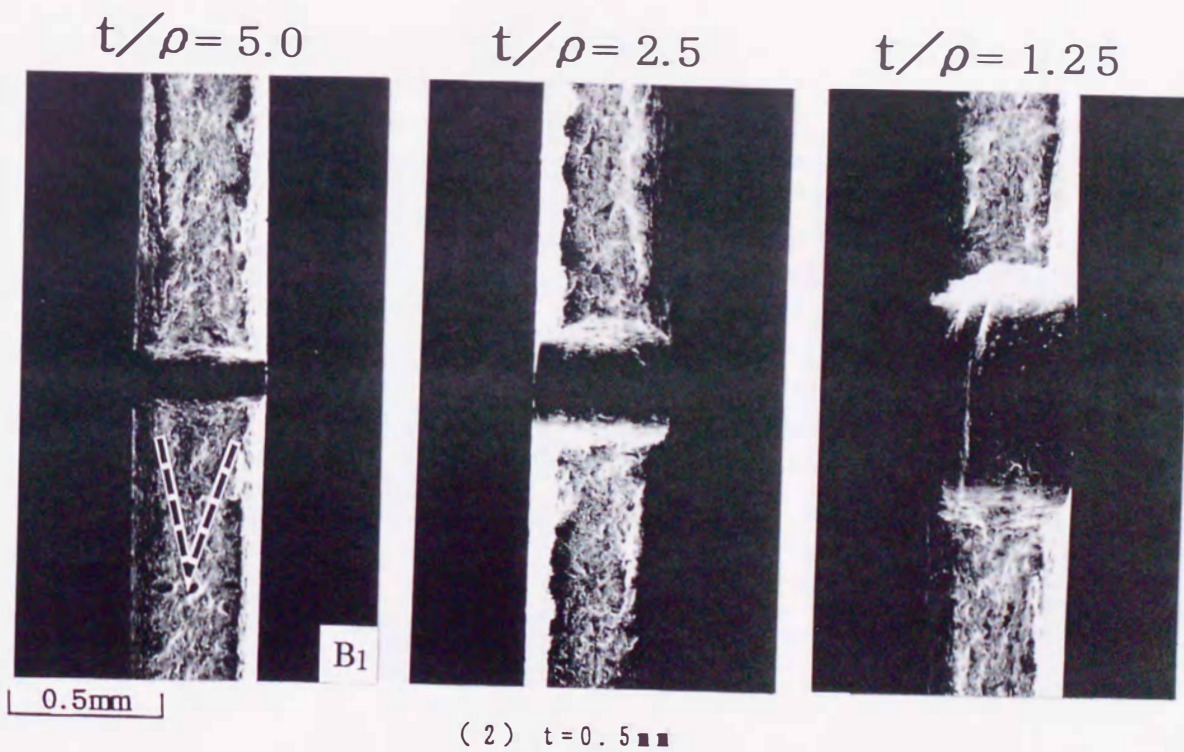
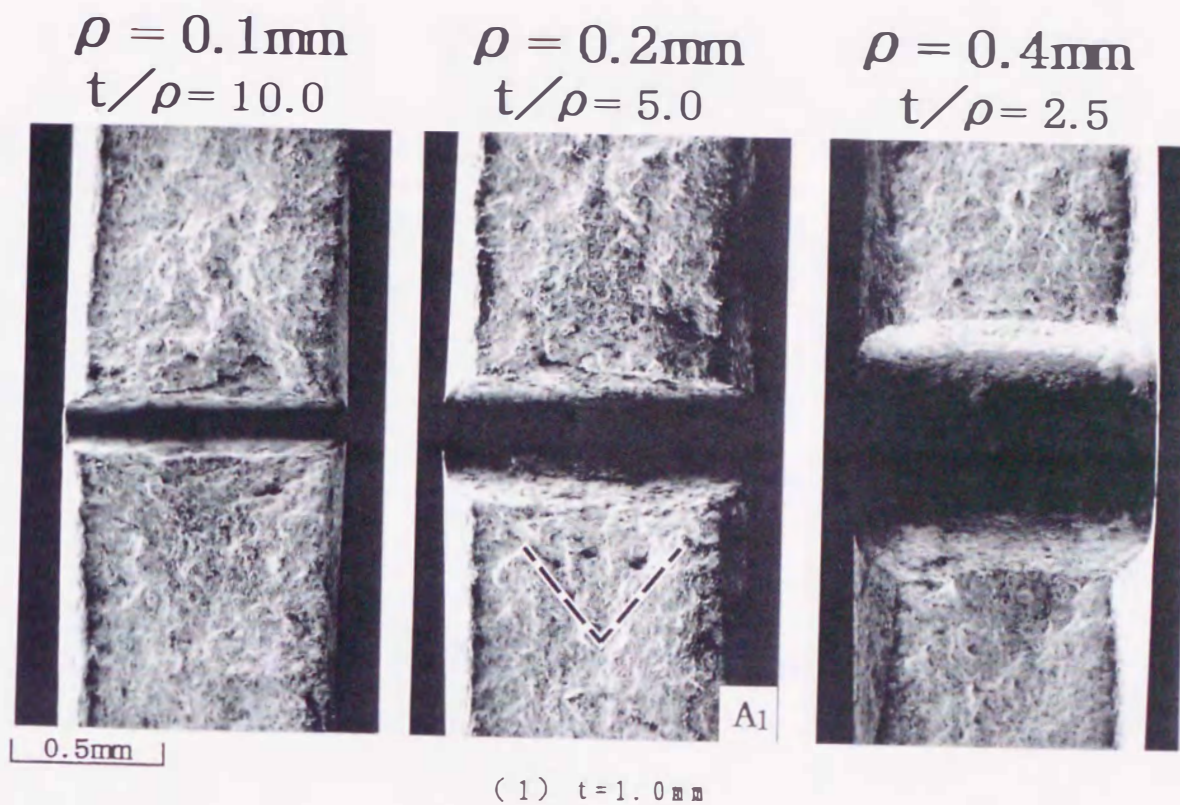


図 6-56 破面の様相 (単独貫通穴材)

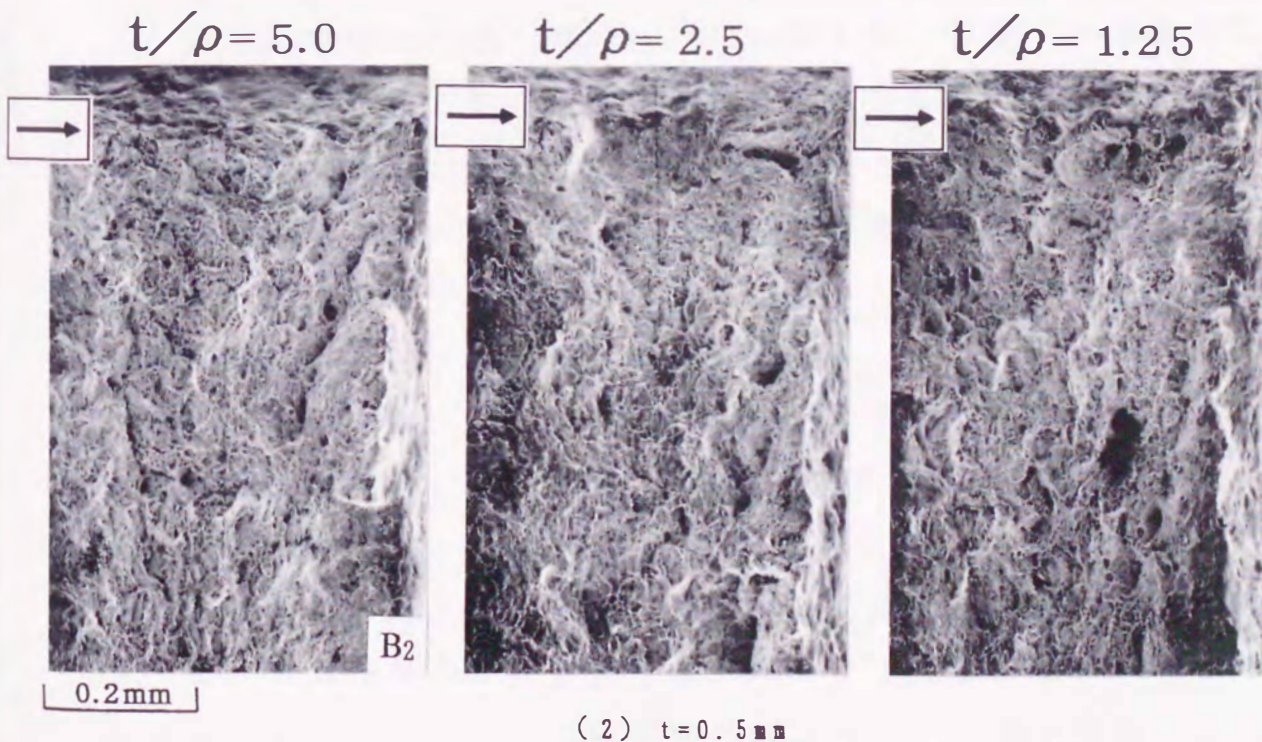
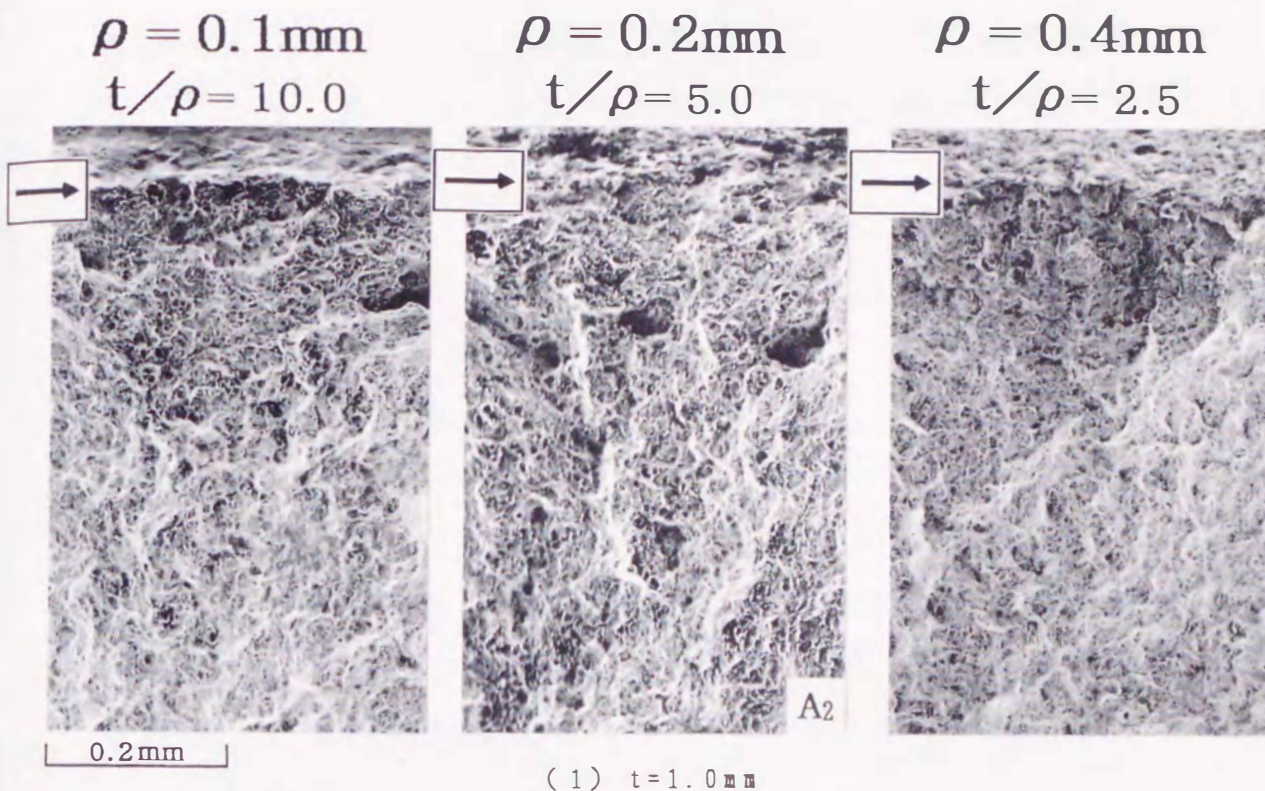


図 6-57 破面の様相 (穴縁)

6.3.5 応力－ひずみ曲線と線形切欠き力学の適用限界

本節では、焼入れを施したS45C材のき裂発生条件を調べ、線形切欠き力学の適用範囲について検討する。

(I) 実験方法

供試材はS45C圧延丸棒（ $\phi 22\text{mm}$ ）であり、焼入れ後の機械的性質を表6-1に示す。 σ_B は焼入れすることにより、焼なまし材のそれより3.1倍程度高くなる。

試験片は図6-58に示す焼入れを施した後、ワイヤーカットにより図6-49に示す形状（板厚0.5mm）に機械加工し、試験部Part Aにマイクロドリルを用いて切欠きを制作した。また、試験部表面はエメリー紙およびアルミナ研磨の順で仕上げた後、ナイトル腐食により組織を出した後、試験に供した。

(II) 変形挙動

図6-59(a)は焼入れ材の切欠き半径 $\rho = 0.1\text{mm}$ の単独貫通穴材における貫通穴の変形挙動、図6-59(b)はその応力－ひずみ曲線を示している。焼入れ材ではき裂発生と同時に破断に至っている。また、き裂発生時の穴の変形比 $h_c/d = 1.09$ であった。

図6-60は両材の $\rho = 0.1\text{mm}$ におけるき裂発生時の穴の変形比 h_c/d と切欠き深さの関係を示す。切欠き半径 ρ が同じであれば、切欠き深さが異なっても h_c/d はほぼ一定となる。

図6-61は両材の $\rho = 0.1\text{mm}$ における σ_{max} と切欠き深さの関係を示す。焼なまし材の σ_{max} は切欠き深さに関係なく、平滑材の引張り強さ σ_B にほぼ等しくなる。一方、焼入れ材では σ_{max} は切欠き深さが大きくなるにつれ、小さくなっており、応力集中係数に依存している。焼入れ材の場合の線形切欠き力学による整理を図6-62に示す。焼なまし材のそれに比べて線形切欠き力学が、若干の誤差はあるものの、適用できることがわかる。図より、線形切欠き力学の適用範囲は、最大弾性応力／降伏応力で3程度までである。

表 6-1 機 械 的 性 質

Mechanical properties				
H_v	$\sigma_{0.2}$	σ_B	σ_T	ϕ
	M P a			%
701	1648	2003	2123	15.8

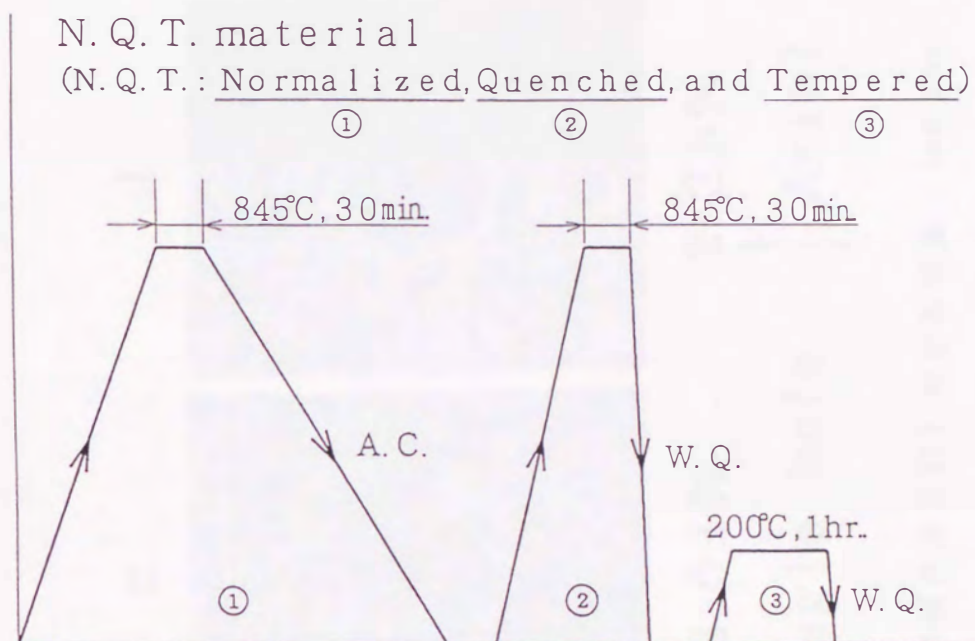


图 6-58 热处理条件

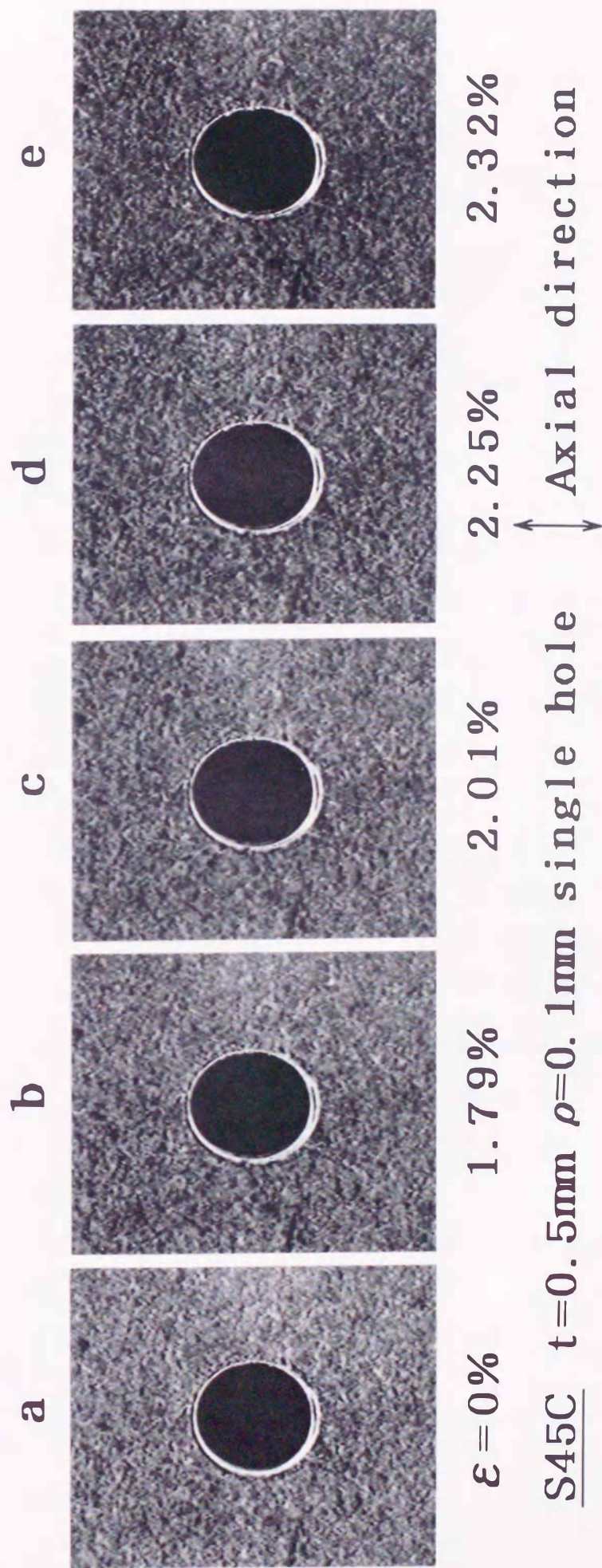


図 6-59 (a) 焼入れ材 (単独貫通穴材) の変形挙動 ($t=0.5\text{mm}$)

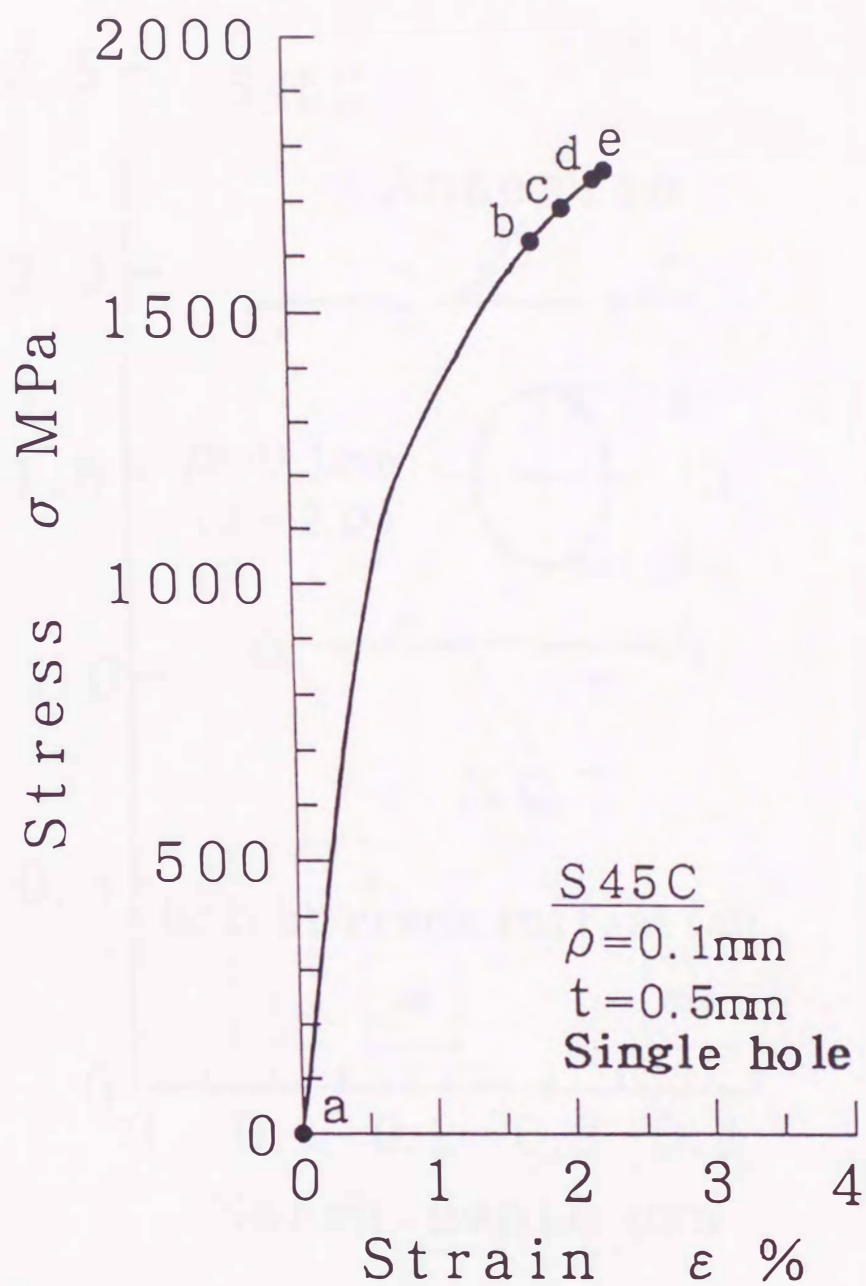


図6-59 (b) 焼入れ材の応力-ひずみ曲線

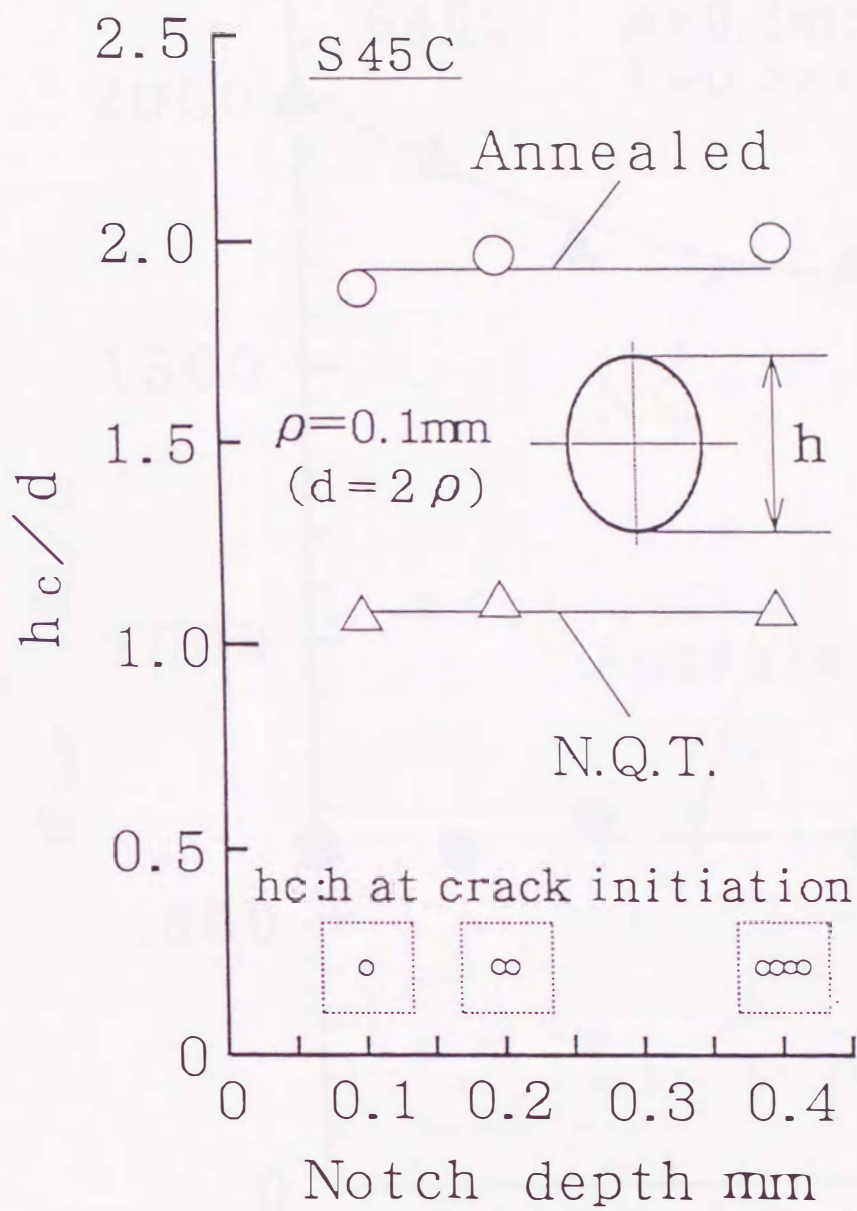


図6-60 h_c/d と切欠き深さの係に及ぼす熱処理の影響

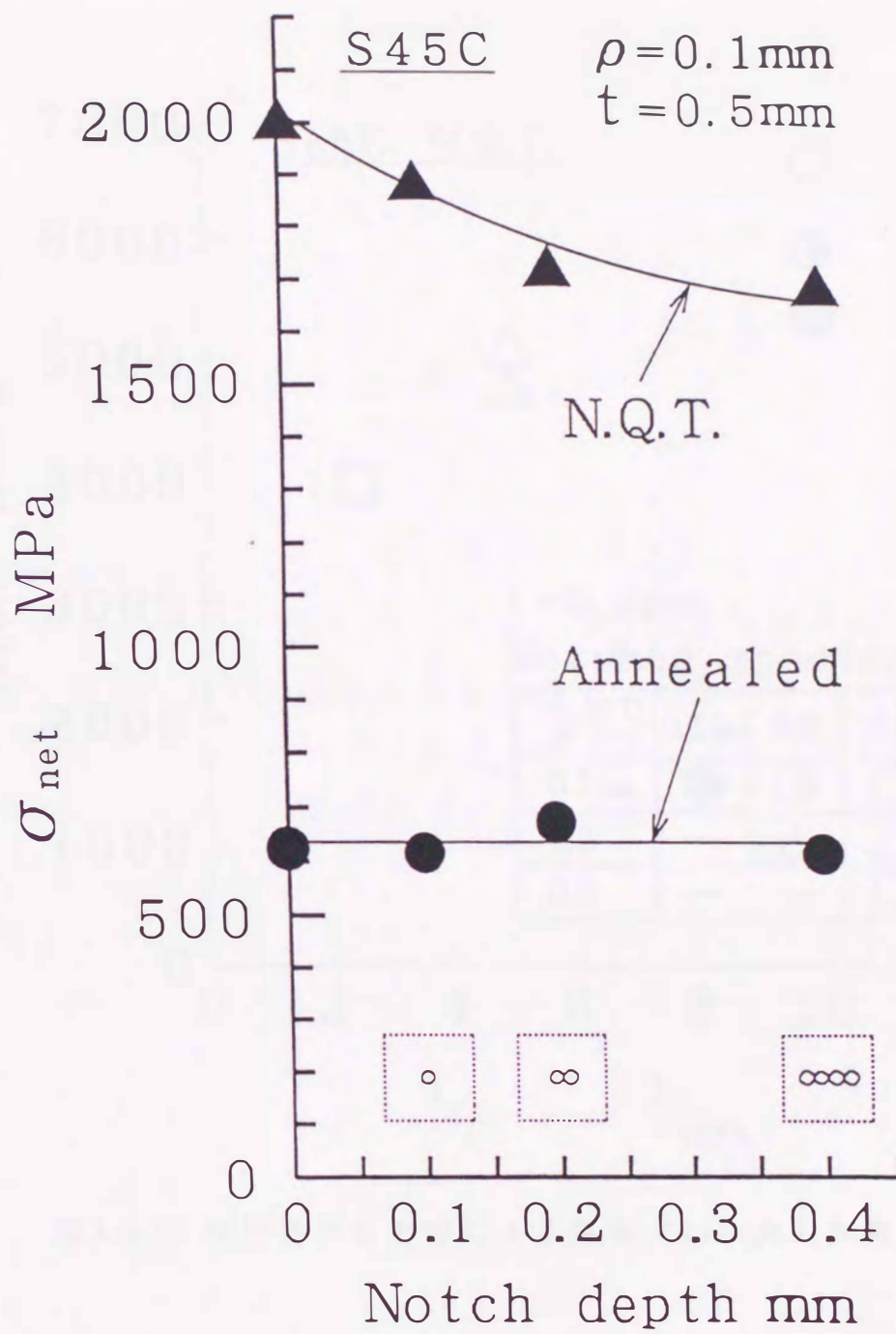


図6-61 σ_{net} と切欠き深さの関係に及ぼす熱処理の影響

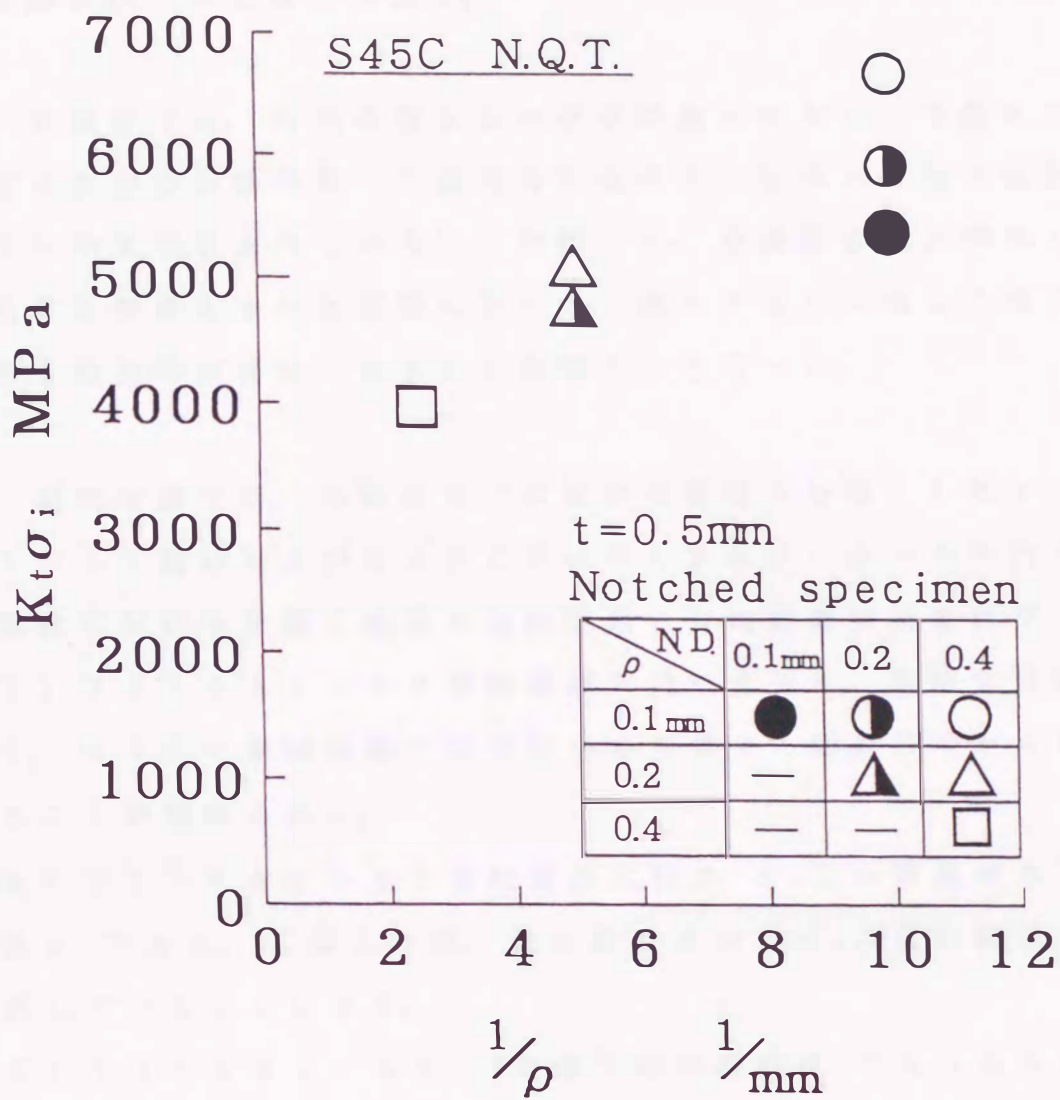


図6-62 線形切欠き力学による整理 (S45C焼入れ材)

6.4 結 言

非線形き裂力学および非線形切欠き力学の有用性を検証した。主な結論は以下のとおりである。

1. き裂材では、中央き裂をもつ板状試験片において寸法を広範囲に変えた引張試験結果（小規模降伏条件下のものからほぼ全断面降伏のものまで含まれている）と比較した。非線形き裂力学による予測値はき裂長さ a の全範囲において、極めてよく一致しており、非線形き裂力学が有効であることが明らかとなった。

2. 切欠き材では、単独ならびに複数の貫通穴を導入した Ti-6Al-4V 板材および S45C 板材の SEM サーボパルス内での引張試験における試験片表面の連続観察と有限要素解析を行なった。

(1) Ti-6Al-4V 単独貫通穴材のき裂は、微細な強変形域から、S45C 単独貫通穴材では小さな強せん断変形域から生じていることが観察された。

(2) Ti-6Al-4V 単独貫通穴材の $\sigma_{max} \approx$ 平滑材の引張り強さ σ_B である。このことは、最小断面全体が σ_B に近い荷重で塑性変形していることによる。

(3) Ti-6Al-4V 2ヶ貫通穴材の連結は、Thomas のボイドの成長・合体モデルのごとく穴自身が横方向に成長し互いに合体するのではなく、強変形域からのき裂の発生・成長によるものである。

(4) 切欠き半径 ρ が小さいほどき裂発生時の hc/d は大きい。 ρ が同じであれば、切欠き深さが異なっても、き裂発生時の hc/d はほぼ一定となる。

(5) き裂発生時の切欠き底における最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_{max, F_{max}}$ は、切欠き深さに無関係に、切欠き半径 ρ のみに支配されてい

る。

(6) 上記(1)の事実は相対相当塑性ひずみ分布の相似性に基づいて説明できる。したがって、非線形切欠き力学が有効であることが明らかとなった。

さらに、切欠き材のき裂発生条件に及ぼす板厚の影響、応力-ひずみ曲線と線形切欠き力学の適用範囲について検討した。

(7) 板厚が異なっても、板厚一定条件下では、き裂発生時における切欠き底の最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p_{max, FEM}$ は、切欠き深さとは無関係に、切欠き半径 ρ のみに支配されている。また、同一の ρ に対する $\bar{\epsilon}^p_{max, FEM}$ は板厚が小さくなるにつれて低下する。

(8) t/ρ が同一の破面を比較すると、引張方向にはほぼ垂直な延性破面領域は板厚が小さいほど、相対的に大きくなる。このことは、切欠き半径が小さいほど、き裂発生までにより大きい変形が必要となることに対応している。

(9) 焼入れにより h_c/d が1.88から1.09に低下すると、き裂発生条件は線形切欠き力学によってほぼ整理できる。線形切欠き力学の適用範囲は、最大弾性応力/降伏応力で3程度までである。

6.5 参考文献

- (1) 田中・秋田・高松, 材料強度学会誌, 13-4(1974)487.
- (2) Rogers, H. C., Ductility, Chap. 2, ASM(1968)31.
- (3) 大路清嗣, ほか2名, 機論, 40-339, (1974)2979.
- (4) Puttick, K. E., Phil. Mag., 4, (1959)946.
- (5) Dubensky, E. M. and Koss, D. A., Met. Trans.,
18A(1987)1887.
- (6) Fleck, N. A., Hutchinson, J. W. and Tvergaard, V.,
J. Mech. Phys. Solids, 37, (1989)515.
- (7) Needleman, A., Tvergaard, V., Hutchinson, J. W.,
Topics in Fracture and Fatigue, (Editor,
Argon, A. S.) Chapter. 4, (1992) Springer-Verlag.
- (8) McClintock, F. A., Ductility, Chap. 2, ASM(1968)225.
- (9) Thomason, P. F., J. Inst. Metal, 96(1968), 360.
- (10) 西谷, ほか2名, 日本材料学会第27期学術講演
会前刷, (1978), 115.
- (11) 西谷・真壁, 材料, 31-344, (1982), 452.
- (12) 田中・藤崎・西谷・寺西, 機論, 60-569, A(1994), 185.

第 7 章

結 論

本章は第 3 章～第 6 章で得られた研究の結果を総括し，試験片の強度から実物の強度を予測する方法についてまとめる。

本研究は大規模降伏条件下においてき裂材、切欠き材の破損および破壊現象が生ずる原因の強さの尺度を検討したものである。

本研究の着目点は、第一に、き裂または切欠きを有する試験片と実物で同じ延性破壊現象が生じるためのマクロな力学的厳しさの尺度を明らかにすることであり、さらに設計への応用を考え、有限要素法援用の立場からみた、等価な厳しさの尺度について言及したものである。

本研究で得られた結論は各章毎に詳述したが、ここで改めてそれらを要約すると以下のとおりである。

1. 非線形き裂力学、非線形切欠き力学の提案

大規模降伏条件下のき裂材、切欠き材の強度評価法として、新たに非線形き裂力学、非線形切欠き力学を提案した。これらは二つの部材において、力学的厳しさの尺度、すなわち最大塑性ひずみと切欠き半径をそれぞれ揃えると（き裂材の問題では最大塑性ひずみのみ）、他の幾何学的条件と無関係に、大規模降伏条件下の弾塑性応力場の同一性が保証され、同一の物理現象が生ずるという考え方である。

2. 非線形き裂力学の物理的背景

（１）き裂長に比較して塑性域が十分大きな大規模降伏の範囲の各変形段階において、最大塑性ひずみが同一であれば同一塑性ひずみ場が保証されている。

（２）上記の事実は非線形き裂力学が成立する有力な根拠のひとつとなる。

（３）非線形き裂力学は、「切欠き半径 ρ 一定（き裂材では $\rho = 0$ ）の条件下では、切欠き底の最大全ひずみ $\varepsilon_{\max}^t$ が厳しさの尺度として有効である」との原理から導かれたものであるとみなすことが

できる。

3. 非線形切欠き力学の物理的背景

(1) 切欠き半径に比較して塑性域が十分大きな大規模降伏の範囲の各変形段階において、最大塑性ひずみと切欠き半径 ρ がそれぞれ同一であれば同一塑性ひずみ場が保証されている。

(2) 上記の事実は非線形切欠き力学が成立する有力な根拠のひとつとなる。

(3) 非線形切欠き力学は、非線形き裂力学と同様に「切欠き半径 ρ 一定の条件下では、切欠き底の最大全ひずみ $\varepsilon_{\max}^t$ が厳しさの尺度として有効である」との原理から導かれたものであるとみなすことができる。

4. 非線形き裂力学の有用性

(1) き裂材では、中央き裂をもつ板状試験片において寸法を広範囲に変えた引張試験結果（小規模降伏条件下のものからほぼ全断面降伏のものまで含まれている）と比較した。非線形き裂力学による予測値はき裂長さ a の全範囲において、極めてよく一致しており、非線形き裂力学が有効であることが明らかとなった。

5. 非線形切欠き力学の有効性

I. 中央切欠き材の引張り変形および破壊挙動

(1) Ti-6Al-4V 単独貫通穴材のき裂は、微細な強変形域から、S45C 単独貫通穴材では小さな強せん断変形域から生じていることが観察された。

(2) Ti-6Al-4V 単独貫通穴材の $\sigma_{\max} \approx$ 平滑材の引張り強さ σ_s である。このことは、最小断面全体が σ_s に近い荷重で塑性変形していることによる。

(3) Ti-6Al-4V 2ヶ貫通穴材の連結は, Thomason のボイドの成長・合体モデルのごとく穴自身が横方向に成長し互いに合体するのではなく, 強変形域からのき裂の発生・成長によるものである。

(4) 切欠き半径 ρ が小さいほどき裂発生時の h_c/d は大きい。 ρ が同じであれば, 切欠き深さが異なっても, き裂発生時の h_c/d はほぼ一定となる。

II. 中央切欠き板材のき裂発生条件

(1) き裂発生時の切欠き底における最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^{P_{max}lc}$ は, 切欠き深さに無関係に, 切欠き半径 ρ のみに支配されている。

(2) 上記(1)の事実は相対相当塑性ひずみ分布の相似性に基づいて説明できる。したがって, 非線形き裂力学が有効であることが明らかとなった。

(3) 穴の変形比 h/d と公称ひずみとの関係は Ti-6Al-4V 材では内部でのき裂発生まで, S45C 材では微細なき裂を含む不均一組織の大変形が生じるまで実験値とよく一致する。

III. 中央切欠き材のき裂発生条件に及ぼす板厚の影響

S45C 板材の板厚を 1.0 mm から 0.5, 0.3 mm と変えて引張試験を行い, 切欠き材のき裂発生条件に及ぼす板厚の影響について考察した。主な結果は次のとおりである。

(1) 板厚が異なっても, 板厚一定条件下では, き裂発生時における切欠き底の最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^{P_{max}lc}$ は, 切欠き深さとは無関係に, 切欠き半径 ρ のみに支配されている。また, 同一の ρ に対する $\bar{\epsilon}^{P_{max}lc}$ は板厚が小さくなるにつれて低下する。

(2) t/ρ が同一の破面を比較すると, 引張方向にほぼ垂直な延性破面領域は板厚が小さいほど, 相対的に大きくなる。このことは, 切欠き半径が小さいほど, き裂発生までにより大きい変形が必要と

なることに対応している。

IV. 応力－ひずみ曲線と線形切欠き力学の適用限界の関係

単独ならびに複数の貫通穴を導入した S 4 5 C 焼入れ板材の引張試験における試験片表面の連続観察を行った。主な結果は、次のとおりである。

(1) 焼入れ材においても焼なまし材同様、切欠き半径が同じであれば、切欠き深さによらずき裂発生時の貫通穴の変形比 h_c / d はほぼ一定である。

(2) 焼入れにより h_c / d が 1.88 から 1.09 に低下すると、き裂発生条件は線形切欠き力学によってほぼ整理できる。線形切欠き力学の適用範囲は最大弾性応力／降伏応力は 3 程度までである。

6. 試験片の強度から実物の強度を予測する方法

本研究の総括として、試験片の強度から実物の強度を予測する方法についてまとめる。

試験片の強度から実物の強度を予測するためには、試験片と実物において同一現象が生じるための条件が分かればよい。これまでに述べてきたところによると、その条件は図 7-1 で表される。図中には試験片と実物で同一現象（例えば、同一長さのき裂発生など）が生ずるときの実物の荷重決定法も同時に示してある。

小規模降伏条件下において、き裂または切欠きをもつ実物の強度を予測する方法に関するものが、それぞれ線形き裂力学および線形切欠き力学である。

また、大規模降伏条件下において、き裂または切欠きをもつ実物の強度を予測する方法に関するものが、それぞれ非線形き裂力学および非線形切欠き力学である。

なお、有限要素法解析援用の立場からは、切欠き底の最大全ひず

みと等価なパラメータとして、切欠き底の第一要素の最大塑性ひずみを用いることができる。

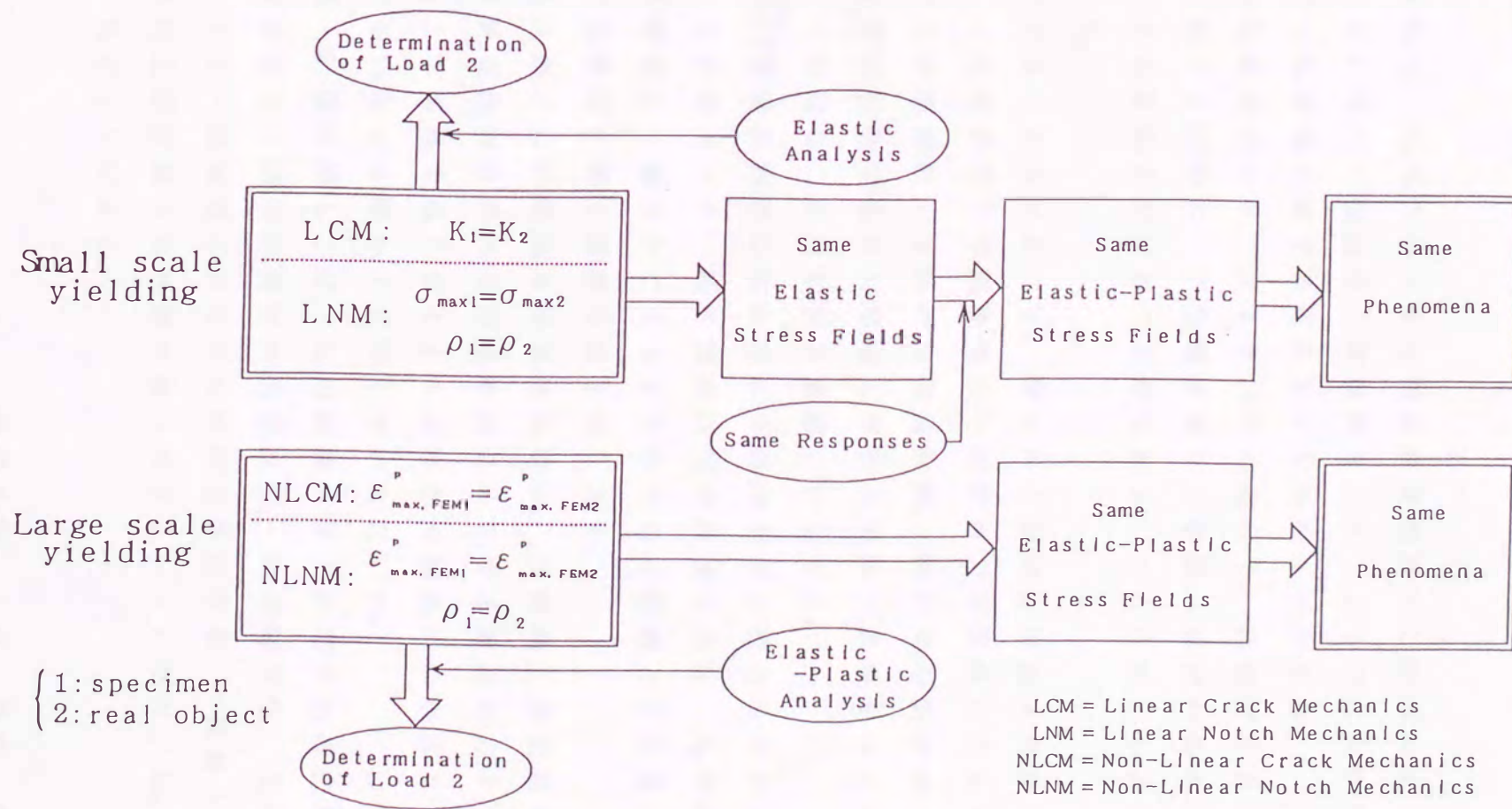


図7-1 試験片と実物で同一現象が生ずるための条件およびそのときの実物の荷重の決定方法

謝 辞

本研究は、九州大学工学部西谷弘信教授のご指導のもとで、著者が昭和59年から福岡県工業技術センターならびに九州産業大学でおこなった破壊に関する研究をまとめたものである。

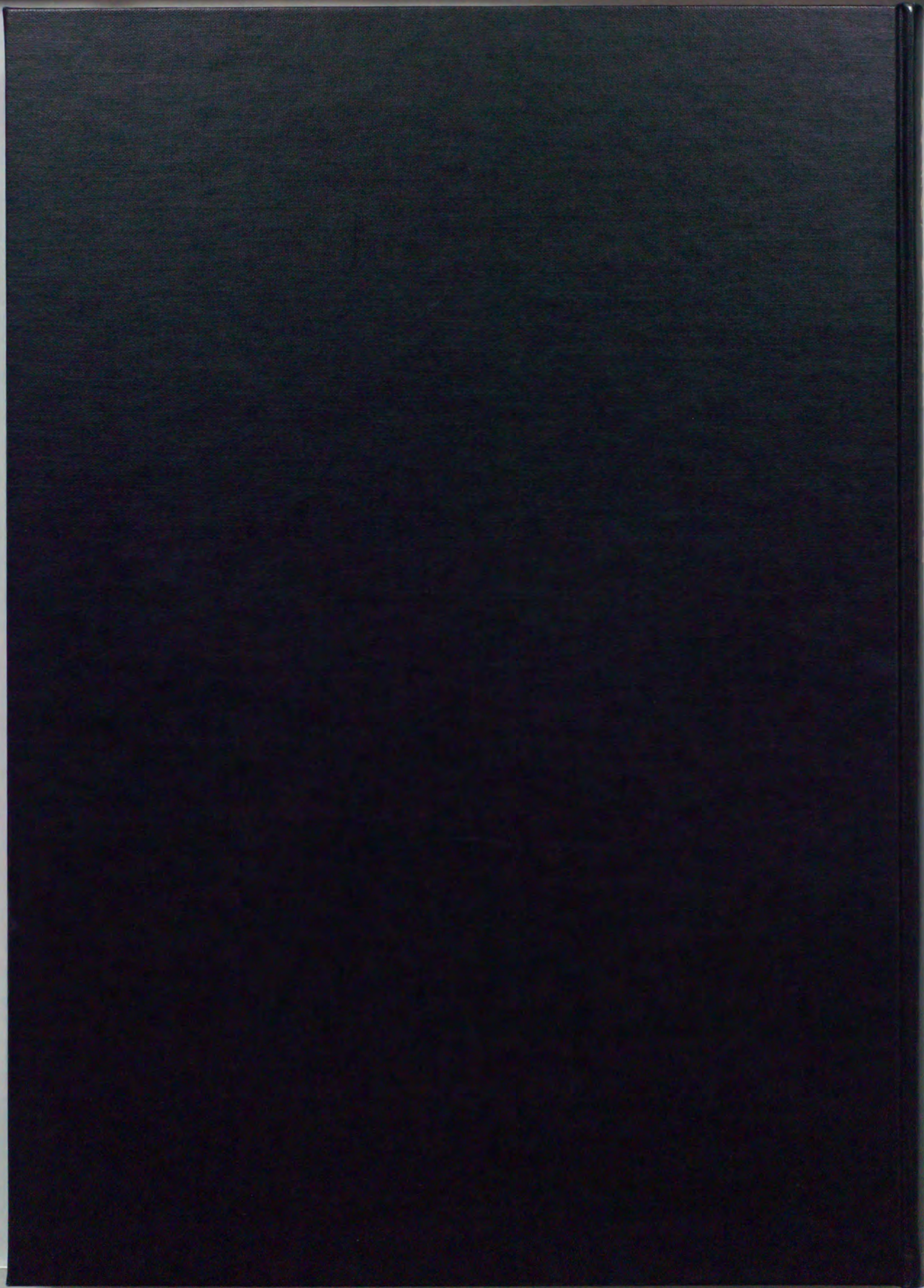
西谷弘信教授には、およそ10年に渡って、終始暖かきご指導・ご鞭撻を賜ると同時に、ご指導を通じて学問・研究の基本的姿勢に関する先生の薫陶を受けることができましたことに、心よりお礼申し上げます。

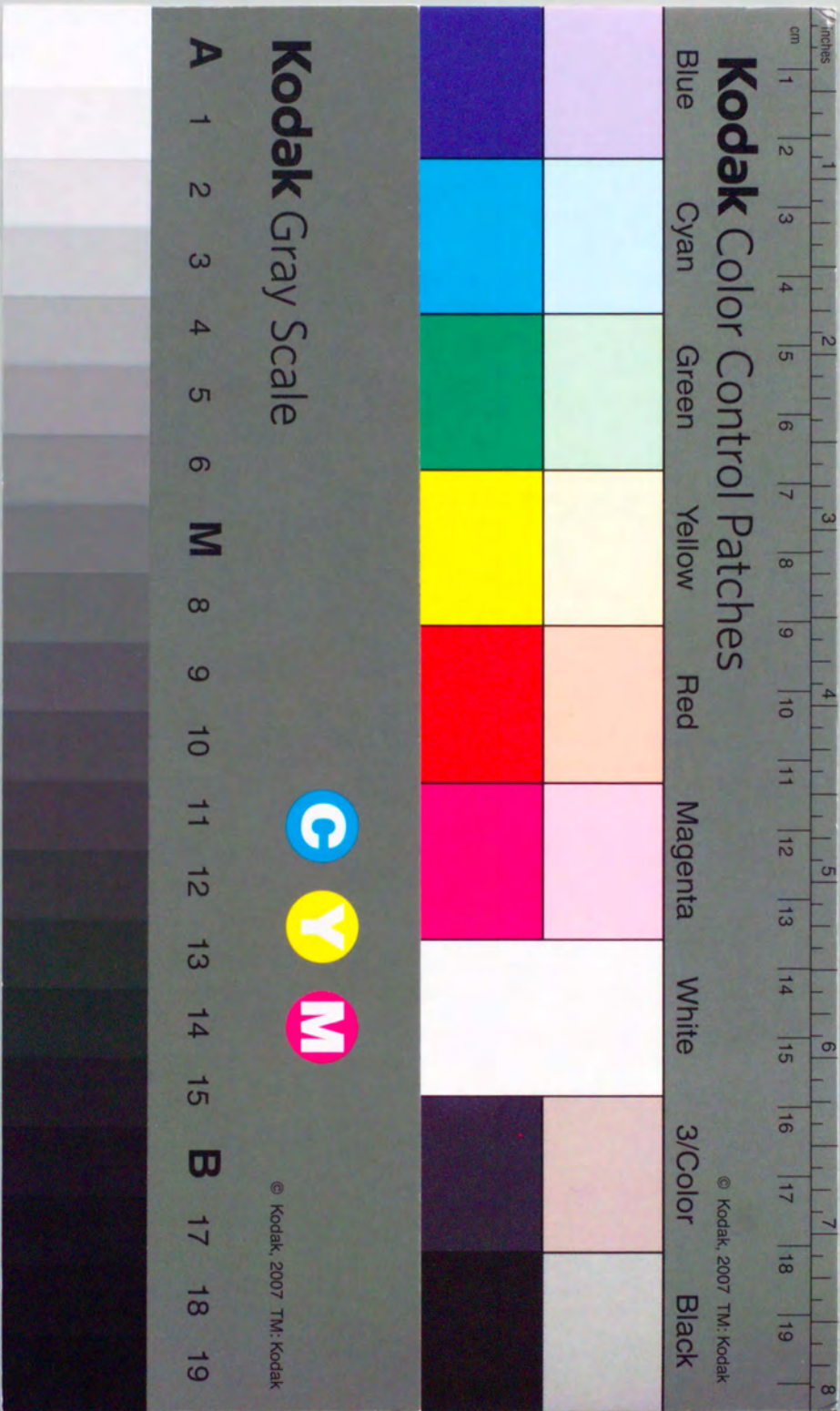
研究を遂行するにおいて、種々のご指導と便宜をはかっていただきました九州大学工学部機械工学科固体力学講座の方々ならびに九州大学工学部機械工学科村上敬宜教授、野口博司助教授、KITA材料強度研究会の佐賀大学理工学部西田新一教授をはじめとする諸先生には有益なご教示を戴き感謝いたします。

また、著者が西谷弘信教授にご指導を仰ぐ機会を与えて戴いた福岡県工業技術センター電子技術課田中洋征元課長、九州産業大学において継続して研究ができるよう多大のご配慮とご指導いただいた田中哲志教授に深く感謝の意を表します。

旧北九州工業試験場永田重幸元場長、福岡県工業技術センター機械電子研究所赤星勇自元所長をはじめとする職員の方々、九州産業大学の工学部長をはじめとする工学部の諸先生には種々のご指導・ご激励をいただき暖かく見守っていただいた。

実験・計算に関しては、九州産業大学工学部寺西高広助手をはじめ藤崎研究室・田中研究室の大学院生、卒業研究生、ならびに工業技術センター機械電子研究所の原田豊満研究員、古賀義人主任技師、中村憲和主任技師らに長期に渡って手伝っていただいた。ここに記してお礼申し上げます。





Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19