

S15CK 中央切欠試験片の延性破壊挙動に及ぼす
切欠長さの影響について*真壁朝敏*¹, 兼城英夫*², 高良一夫*²Effects of Notch Length on Extension Behavior of a Ductile Fracture
in a Center Notched Plate of S15CK

Chobin MAKABE, Hideo KANESHIRO, and Kazuo TAKARA

Ductile fracture extension of a notched specimen was investigated by means of the observation of the crack growth behavior on the specimen surface. Correlation between the ductile crack growth and the initial notch length was examined in order to understand the feature of the ductile fracture which was extended by the center crack. In this experiment, the crack growth rate, da/de , for the strain increment depends on the crack length, a , and the value of the nondimensionalized crack growth rate, $(da/de)/a$, is higher for the short notch length than the long notch length. Crack opening displacement near the crack tip is also dependent on the crack length and the behavior of the crack opening shows a good relation with that of crack growth.

Key Words: Fracture, Ductile Fracture, Center Notch, Crack Growth Rate, Crack Opening Displacement, Tensile Test, S 15 CK

1. 緒 言

延性破壊が進展する際には、ポイドの発生・成長、き裂の発生・成長およびき裂とポイドの干渉などの現象が生じる⁽¹⁾。き裂の発生を厳密に考察するには、微視的な立場からの検討が必要となると思われるが、その際には大塚らの研究⁽²⁾のようにポイドの発生や成長挙動に関連させて議論すべきであろう。微視的な観点から延性き裂進展開始を検討した研究には延性き裂と先行するポイドとの干渉を解析したものが⁽³⁾。しかし、延性き裂の進展過程において、直接実験的にポイドとき裂の干渉を観察し定量化するのは困難と思われる。また、最近のき裂や切欠きを含む平板試験片の延性き裂進展に関する研究には巨視的な観点から延性き裂の開口量、開口角や J 積分に関連したパラメータなどに注目したもの⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾が多いように思われる。本研究においては基礎実験的に巨視的な観点から試験片が十分に変形し、塑性崩壊する場合の延性破壊挙動について検討した。

著者らは、S 15 CK 中央切欠試験片⁽⁷⁾、70/30 黄銅中

央き裂試験片⁽⁸⁾を用いて塑性崩壊が生じた場合の引張破壊では、公称ひずみ増分 de に対するき裂進展速度 da/de が、き裂長さ a に依存し、進展するき裂の開口形状がき裂長さに関係して変化する場合があることを示した。前報⁽⁷⁾では主として初期切欠半径 ρ_0 の影響を調べ、 ρ_0 を 0.0~0.25 mm の範囲で変化させても、き裂進展速度 da/de 、き裂開口形状には ρ_0 の影響がほとんどないことを示したが、切欠長さや試験片寸法が異なる場合でもこのことが当てはまるのかは疑問である。そこで、本報では前報⁽⁷⁾の結果が初期切欠長さによってどのように変化するかを調べ、表面から観察した中央切欠試験片の延性破壊挙動について検討した。

2. 使用材料および実験方法

素材は、S 15 CK 丸棒材(直径 25 mm)である。それを 900°C で 1 h 焼なました後、試験片を製作した。その化学成分と機械的性質をそれぞれ表 1 および表 2 に示す。

試験片形状を図 1 に示す。試験片には図 2 に示す切欠きをゲージ部中央に加工し、中央切欠試験片とした。板幅は $2W=20$ mm であり、切欠長さ $2a_0$ は a_0/W_0 が $a_0/W_0=1/10, 1/6, 1/4, 1/3, 1/2$ の 5 通りと

* 平成元年 10 月 15 日 第 67 期全国大会講演会において講演。
原稿受付 平成元年 3 月 20 日。

¹ 正員、琉球大学短期大学部 (〒903-01 沖縄県西原町千原 1)。

² 正員、琉球大学工学部。

なるように放電加工した。切欠先端半径はいずれも $\rho_0 = 0.08 \text{ mm}$ である。

引張破壊試験は変位制御方式により引張速度 1 mm/min で行った。破断にいたるまでの切欠きの変形やき裂の発生・成長の様子は試験片表面を金属顕微鏡で観察することにより検討した。用いた試験機は島津オートグラフ IS-5000 形である。

3. 実験結果および考察

平板試験片では、平面ひずみ状態であるのか、平面応力状態が支配的であるのかによって内部ボイドの成長の程度や巨視的な破面の様相が異なるが、本実験では平面応力形の進展挙動を示す延性破壊に注目し、塑性崩壊が生じた場合の表面でのき裂進展挙動を主に検討した。そのため平面ひずみ破壊じん性値などの破壊力学パラメータによる取扱いは行わず、基礎実験的にき裂進展挙動を調べた。そして、前報⁽⁷⁾⁽⁸⁾同様に荷重が最高荷重に達し、その後減少していく各段階の延性破壊挙動について考察した。

3.1 進展するき裂の周辺状況の観察 初期切欠長さ $2a_0 \cong 5 \text{ mm}$ の場合の延性き裂の進展状況を図 3 に示す。き裂の進展量は表面上で $2\Delta a = 3.4 \text{ mm}$ である。図 3 は試験片表面に平行に研磨したものであり、図 3 (a) が表面近くの断面(表面より $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ の深さ)におけるき裂の状態、図 3 (b) が板厚中央付近におけるき裂の状態を示している。き裂は引張軸より傾斜し混合モード形で進展している。試験片表面近くではき裂の上下面が比較的なめらかなのに対し、板厚中央付近ではジグザグしている。明らかに試験片の内部ではき裂とボイドが干渉しながら破壊が進展していることがわかる。そして、図 4 (a) に示すように内部ではき裂の先方にボイドがみられることが多い。したがって、厳密には試験片表面と内部では塑性拘束状態の違いなどのため、延性破壊の進展状況に多少の違いがある。試験片表面を研磨していくとき裂の形状が

徐々に変化していくのと同時に先行ボイドの位置や大きさが変化する。また、図 4 (b) に示すようにき裂面近くに西谷ら⁽⁹⁾が 70/30 黄銅で観察したのと類似した強せん断変形域での微小ボイドの発生と思われるすじ状の模様もみられる。このように試験片内部では、き裂先端・ボイド・すべり帯などが複雑に干渉するため、微視的あるいは局所的にみるとき裂先端の鈍化・鈍化

表 1 化学成分 (Wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
0.15	0.30	0.50	0.013	0.013	0.05	0.19	0.14

表 2 機械的性質

Lower yield point σ_{s1} (MPa)	Ultimate tensile strength σ_B (MPa)	True fracture stress σ_T (MPa)	Reduction of area ψ (%)
283	449	956	68.8

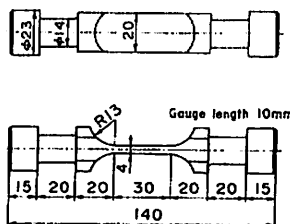


図 1 試験片形状 (mm)

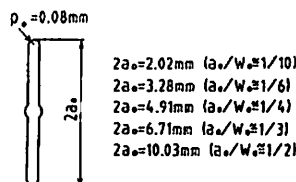
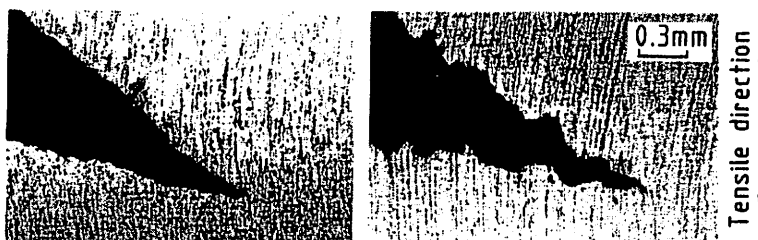


図 2 切欠寸法



(a) 試験片表面近くのき裂形状

(b) 試験片内部でのき裂形状

図 3 延性き裂進展の観察

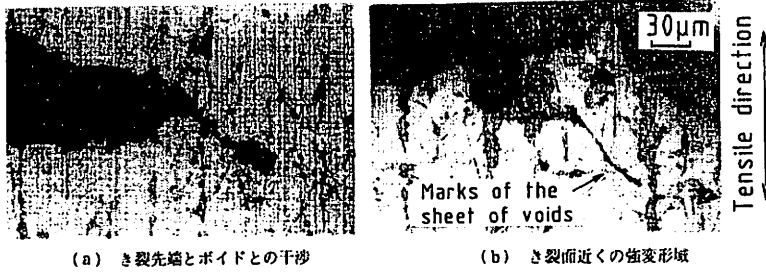


図4 き裂周辺の観察例

が不規則的に生じている。このような場合、き裂先端を局所的に評価すると不合理が生じることもありえるので、き裂進展に関するパラメータは平均的な値で評価する必要があるものと考えられる。なお、図3に示すように、き裂形状は表面と内部でジグザグの程度に差があるが、前報⁽⁷⁾に示したようにき裂開口量を測定した結果によると、き裂開口形状は表面と内部とでその平均的傾向には大差がない。このようなことから、問題の簡単化のため、本研究では巨視的な観点に立ち表面から観察した平均的な破壊現象を基にしてき裂進展に対する考察を行った。

3.2 延性き裂進展挙動に及ぼす切欠長さの影響

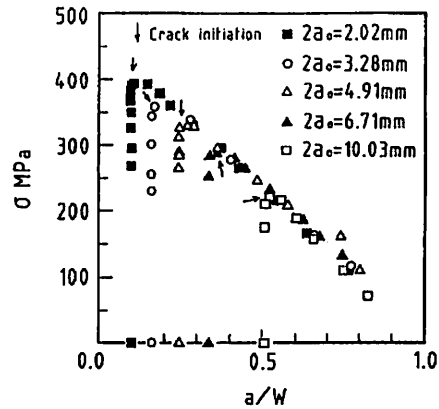
切欠端からのき裂の発生・進展によって試験片に破壊がもたらされたが、前報⁽⁷⁾⁽⁸⁾と同様にき裂は切欠試験片の最高応力 σ_f 付近で発生し、その後の応力の減少とともに進展した。図5に切欠きがないとして評価した公称応力 σ と変形時の切欠きあるいはき裂長さ $2a$ を板幅 $2W$ で無次元化した値 a/W の関係を示す。 a はき裂発生以前は切欠半長であり、き裂発生後は切欠半長を含んだき裂半長を引張軸に垂直な面に投影した表面長さである。荷重が最高応力 σ_f の時点から減少していく段階でき裂が顕著に成長していくことがわかるが、そのき裂進展段階においては用いた切欠長さによらず近似的に次式が成立している。

$$\sigma = \sigma_B(1 - a/W) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 σ_B は切欠きのない平滑試験片の引張強さであり、 $a_0/W_0 < a/W < 1$ である。正味応力概念⁽¹⁰⁾においては流動応力が塑性崩壊条件として用いられているが、本実験結果では、板厚 l の変形を無視し、板厚が元の厚さ l_0 から変化しないと仮定した(実際には l は変化する)

$$\sigma = \frac{P}{2(W-a) \cdot l_0} = \sigma_B \dots \dots \dots (2)$$

という仮の正味応力 σ がほぼ一定のまま破壊が進行しているという結果になっている。ここで、 P は荷重

図5 公称応力と無次元き裂長さ a/W の関係

であり、 $2(W-a)$ は表面上でのリガメント幅である。

図6に切欠先端より0.2mmの位置における切欠開口変位 ΔY と標線間 $L_0=10$ mmの切欠中心線上の公称ひずみ ϵ の関係を示す。これから ΔY と ϵ の関係には切欠長さの影響が少ないことがわかる。この関係は、これまでに知られているリガメントが全面降伏した場合の関係⁽¹¹⁾と同傾向を示している。また、 σ_f 以降ではほぼ $\Delta Y \propto L_0 \epsilon (=10\epsilon \text{ mm})$ となっている。

図7は、公称ひずみ ϵ と初期切欠長さで無次元化した切欠きあるいはき裂長さの対数 $\ln(a/a_0)$ との関係である。き裂の進展を生じる最高応力 σ_f 時点以後においては、 $\ln(a/a_0)$ と ϵ の関係にほぼ直線関係があり次式が成立している。

$$da/de = n \cdot a, \quad n = (da/de)/a \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 n は初期切欠長さ a_0 の変数であり、公称ひずみ増分に対する無次元化き裂進展速度とみなせる。前報⁽⁷⁾では、初期切欠長さを一定とし初期切欠半径を $a_0 = 0.0 \sim 0.25$ mm 範囲で変化させたが、その場合は式(3)の n の値は一定であった。しかし、 n の値は初期切欠長さによって変化し、初期切欠長さの無次元量

a_0/W_0 と n の関係は図 8 のようになる。つまり、本実験範囲においては、公称ひずみ増分に対するき裂進展速度 $da/d\varepsilon$ は前報同様にき裂長さ $2a$ に比例する。そして、無次元化き裂進展速度 n は、初期切欠長さが短いほど大きくなり、近似的には図 8 に描いた次式の曲線のように変化する。

$$n = 10(1 - \sqrt{a_0/W_0}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

前報¹⁷⁾によると、板厚が比較的薄く、切欠長さが短い ($a_0/W_0 \cong 1/4$) 場合、き裂の進展とともにき裂開口形状が変化することがある。そこで、き裂開口形状を調べたのが、図 9 である。横軸にき裂先端よりき裂中心方向への距離 x をき裂半長 a で無次元化した量 x/a 、縦軸に x の位置でのき裂開口量 $\delta(x)$ をとっている。 $\delta(x)$ は引張軸方向に測定した開口量である。図 9 (a) に切欠長さ $2a_0 \cong 6.7 \text{ mm}$ ($a_0/W_0 \cong 1/3$) の場合を、図 9 (b) に切欠長さ $2a_0 \cong 2.0 \text{ mm}$ ($a_0/W_0 \cong 1/10$) の場合を示した。 $\delta(x)$ と x/a の間にはよい相関関係があり、おのおのの初期切欠長さの場合において平均的には一定した直線関係がある。図 10 はき裂先端が $d\delta$ 開口した場合のき裂開口形状の変化を示した模式図である。図 10 (b) は図 10 (a) の横軸をき裂半長で無次元化したものである。前報¹⁷⁾によると図 10 に示すようにき裂進展速度 $da/d\delta$ 、またはき裂開口形状 $d\delta/da$ が次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} da/d\delta &= C \cdot a \\ \text{または} & \\ (d\delta/da) \cdot a &= 1/C \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

図 9 から上式の C の値は切欠長さによって変化することがわかる。また実測した $\delta(x)$ と x/a の関係より得られるき裂開口角が、図 10 に示す模式図の $d\delta$ と da/da から得られるき裂開口角に対応すると考えると次式が成り立つ。

$$C = (da/d\delta)/a = (x/a)/\delta(x) \quad \dots\dots\dots (6)$$

C の値は図 9 の傾きより求められるが、 C の値と無次元切欠長さ a_0/W_0 の関係は図 11 のようになる。これから初期切欠長さの長い場合のほうが同じき裂長さに対するき裂開口角は大きくなることわかる。

式(3)の n の値と式(6)の C の値は、どちらもき裂進展速度を表し、初期切欠長さの関数となっていると思われるので、両者の関係について検討する。図 6 よりき裂進展後は $\Delta Y \propto L_0 \cdot \varepsilon$ の関係があり、 $d\Delta Y = L_0 \cdot d\varepsilon$ となる。また $\delta(x)$ と x/a の直線性より $d\Delta Y = d\delta$ と仮定できる。よって両者から $d\delta = L_0 \cdot d\varepsilon$ が得られる。この関係を式(6)に代入すると

$$C = n/L_0$$

n は式(4)のように表現できるので

$$C = 10/L_0(1 - \sqrt{a_0/W_0}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

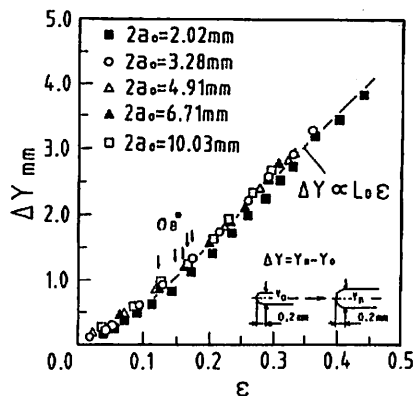


図 6 引張りによる切欠開口変位の変化

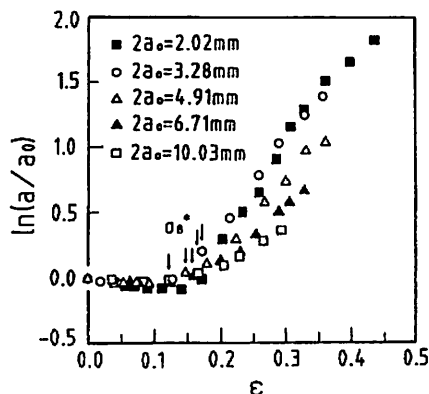


図 7 き裂進展曲線

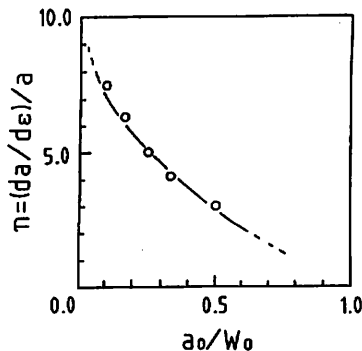


図 8 き裂進展速度に及ぼす切欠長さの影響

図 11 の実線は式 (7) に $L_0=10\text{ mm}$ を代入して得られたものであるが実験点と比較よく一致している。このことから本実験の場合の塑性崩壊が生じた場合の平面応力形の破壊ではき裂進展速度 da/de とき裂開口形状 $d\delta/da$ が反比例の関係にあることがわかる。

図 12 は試験片に加わるエネルギーを荷重と試験機のカロスヘッド変位より求めたものである。最高応力直前にき裂が発生するので、衝撃試験の手法⁽¹²⁾にない近似的にエネルギー E_1 をき裂発生に要したエネルギー、エネルギー E_2 をき裂進展に要したエネルギーとして全エネルギーを最高応力を境にわけてある。試験片の変位を連続的に測定しておらず、その代用としてクロスヘッド変位を用いているため質のよいデータではないが、 E_2 と切欠長さ a_0/W_0 には近似的に次式の関係がある。

$$E_2 \propto (1 - \sqrt{a_0/W_0})$$

この式と式 (4), (7) を比較すると本実験ではき裂進展

速度はき裂進展に要したエネルギー E_2 に関連していることが期待できると考えられる。

以上のことから、本実験範囲では、き裂の進展挙動

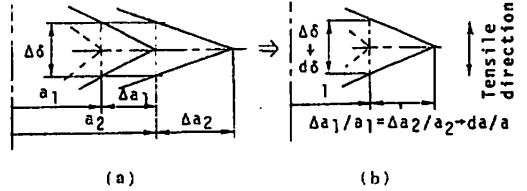
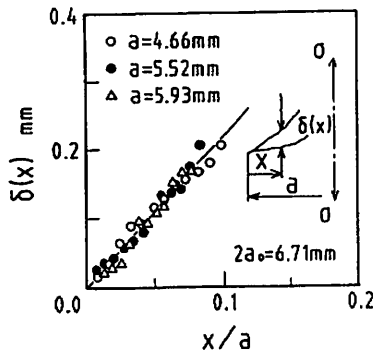
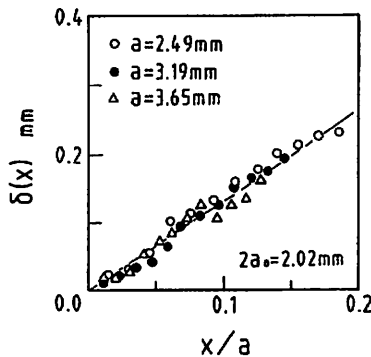


図 10 き裂開口量変化の模式図(き裂先端付近を示した)⁽¹⁾



(a) $a_0/W_0=1/3$ の場合



(b) $a_0/W_0=1/10$ の場合

図 9 き裂開口形状

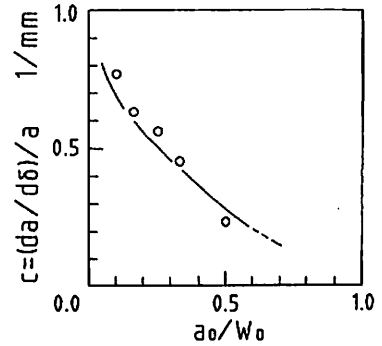


図 11 き裂開口変化に及ぼす切欠長さの影響

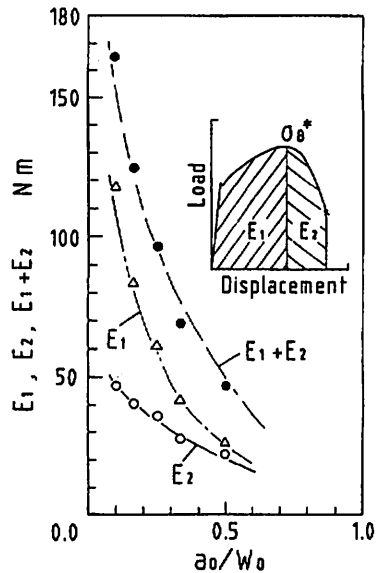


図 12 エネルギー量と切欠長さ a_0/W_0 の関係

は正味応力および公称ひずみの変化の平均的傾向で評価できることがわかった。また、き裂が塑性不安定時付近から進展することが影響していると考えられるが、平均的なき裂開口形状は直線的であり、き裂進展速度 $da/d\varepsilon$ とよい相関関係があることがわかった。なお、前報⁽⁷⁾によると $a_0/W_0=1/4$ 程度の切欠長さでは本実験の切欠半径の場合の結果はほぼ中央き裂試験片の場合の結果と等しい。このことから本実験結果は低炭素鋼薄板の中央き裂試験片にも適用できることが期待できる。

4. 結 言

S 15 CK 中央切欠試験片の延性破壊挙動について、基礎実験的な観点にたち表面から観察した結果を基にして前報⁽¹⁰⁾と同様な方法によって考察した。本実験の場合は塑性崩壊が生じる平面応力形の破壊であるが、き裂進展挙動には初期切欠長さが影響する。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 進展するき裂は、試験片表面と内部とでジグザグする程度が異なるが、前報と合せて考えるとジグザグの程度はき裂の平均的な開口形状に大きく影響しない。

(2) き裂は最高応力 σ_0 付近で発生し、その後の荷重の減少とともに進展していく。き裂進展段階では次式の仮の正味応力 σ' は初期切欠長さによらず一定となる。 $(\sigma_0$ は平滑試験片の引張強さ)

$$\sigma' = \frac{P}{2(W-a) \cdot b} = \sigma_0$$

(3) き裂進展が顕著である σ_0 以後の変形段階では、無次元化したき裂長さの対数 $\ln(a/a_0)$ と公称ひずみ ε の関係より次式が成り立つ。

$$da/d\varepsilon = n \cdot a, \quad n = (da/d\varepsilon)/a$$

そして、公称ひずみ増分に対する無次元化き裂進展速度 n は初期切欠長さが短い場合のほうが大きく近似的に次のような実験式が得られた。

$$n = 10(1 - \sqrt{a_0/W_0})$$

(4) 平均的な表面でのき裂開口形状 $d\delta/da$ には近似的に直線性があり、次式ようになる。

$$(d\delta/da) \cdot a = 1/C$$

変数 C は初期切欠長さによって変化するが、この値は結言(3)の n の値とほぼ $n = L_0 \cdot C$ という関係をなしている。このことから、本実験ではき裂進展速度 $da/d\varepsilon$ とき裂開口形状 $d\delta/da$ は反比例の関係にあることがわかった。

最後にご助言をいただいた九州大学工学部 村上敬宜教授ならびに西谷弘信教授に感謝申し上げます。本研究は昭和62年度文部省科学研究費奨励研究(A)の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。また、本研究を行うに当たり卒業研究として実験にご協力いただいた折田強氏〔三菱自動車(株)〕に感謝いたします。

文 献

- (1) 例えば、小倉・大路、機誌、75-642、(1982)、1099。
- (2) 大塚・ほか2名、材料、35-395(1986)、867。
- (3) 青木・ほか3名、機論、50-454、A(1984)、1201。
- (4) 矢川、機論、48-425、A(1982)、3。
- (5) Hutchinson, J. W. and Paris, P. C., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 668(1979)、37。
- (6) 坂・阿部、機論、49-438、A(1983)、172。
- (7) 真壁・兼城、機論、54-499、A(1988)、503。
- (8) 真壁・村上、機論、53-486、A(1987)、261。
- (9) 西谷・真壁、材料、31-344(1982)、452。
- (10) 矢川編、破壊力学、(1988)、166、培風館。
- (11) 佐藤・ほか2名、溶接工学、(1979)、155、理工学社。
- (12) 砂田、演習・材料試験入門、(1987)、79、大河出版。