

ASTM E1820 による J_{Ic} 試験(その 1) - 弾塑性平面歪破壊靱性値 J_{Ic} の求め方 -

株式会社 シミズテック 技術顧問
木内 晃 (Akira KIUCHI)

1. まえがき

これまで、テクニカルレポート No.1¹⁾と No.5²⁾で、金属材料の線形平面歪破壊靱性値、 K_{Ic} を求める試験法、ASTM E399³⁾について説明してきた。

本報では、弾塑性破壊靱性値の1つの J_{Ic} を求める試験法、すなわち J_{Ic} 試験について説明する。

J_{Ic} はマイクロボイド合体形の安定延性き裂発生時のJ値であり、 J_{Ic} 試験は、通常、ASTM E1820⁴⁾に準じて実施される。マイクロボイド合体形の破壊靱性試験としては ASTM E399 の K_{Ic} 試験があるが、小規模降伏と平面歪条件を満足するための試験片寸法要件が厳しく、 K_{Ic} 試験が適用される Al 合金でも、その種類によっては素材寸法の制約から valid K_{Ic} が得られない場合がある。

ASTM E1820 では、小規模降伏の制約はなく、平面歪条件を満足するための試験片寸法要件も ASTM E399 に比べ、はるかに緩い*1)。したがって、寸法要件の面で不合格になることはほぼないと言えるが、それ以外にも合否判定項目が多くある。その中の1つでも満足できないと不合格になり、 J_{Ic} 値は得られない。材料スペックは十分満足するが、規格スペックを満足できないため、不合格になることがある。

本報では、ASTM E1820-22 による J_{Ic} 試験の手順を説明するとともに試験結果の合否判定について詳しく説明する。

2. ASTM E1820 による J_{Ic} 試験

2.1 J_{Ic} とは

J_{Ic} 試験は K_{Ic} 試験と異なり、荷重 - 変位線図が非線形を呈してからの破壊を対象としており、応力拡大係数、 K の代わりに弾塑性破壊力学パラメータのJ (J_{Ic} 試験では荷重 - 荷重線変位線図の面積から計算)を用いる。 J_{Ic} 試験は、Fig.1 に示すように、安定延性き裂発生時のJ値(J_{in})を破壊靱性とし、後述の試験片寸法要件を満足すれば試験片厚に依存しない弾塑性平面歪破壊靱性値、 J_{Ic} と見做す。

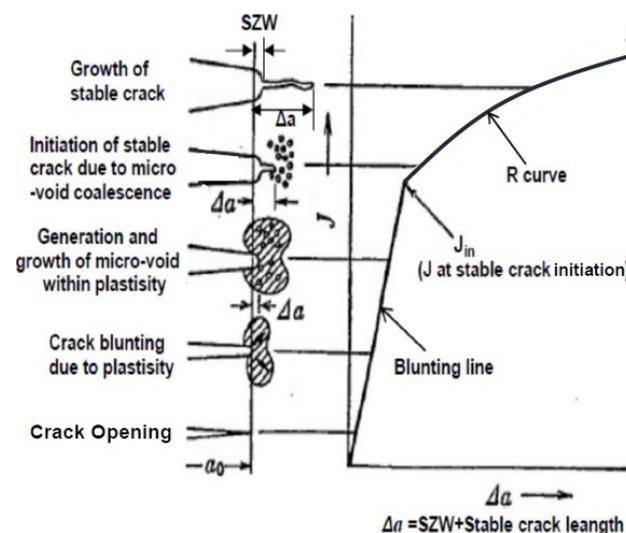


Fig.1 Schematic of initiation and growth of a stable ductile crack

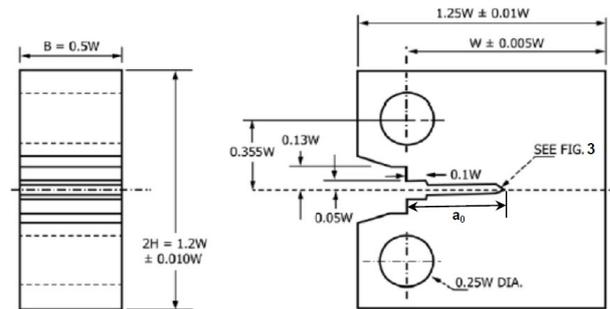
*1) ASTM E399 と ASTM E1820 の試験片寸法要件の差異とその根拠については次報で説明する。

Fig.1 をもう少し詳しく説明する。Blunting line は J の増加に伴いき裂先端が鈍化する過程での J と Δa の関係、いっぽう、R curve は J と鈍化した初期き裂から発生、進展した安定延性き裂長さを含む Δa の関係である。試験片に負荷を与え、J 値が大きくなると初期き裂の先端に塑性域が生じ、き裂は鈍化する。鈍化過程では、Fig.1 に示すようにき裂は開口するだけでなく前方にせり出す。このせり出した量を Stretched Zone Width (SZW) と呼ぶ。Fig.1 の横軸の Δa は SZW と安定延性き裂長さの和である。Blunting line は安定延性き裂の発生前なので $\Delta a = \text{SZW}$ となる。また、鈍化過程では、J の増加に伴い塑性域内でマイクロボイドが発生、成長し、それらが合体して安定延性き裂となる。安定延性き裂発生時の J 値は、Blunting line と R curve の交点の J 値、 J_m で与えられる。

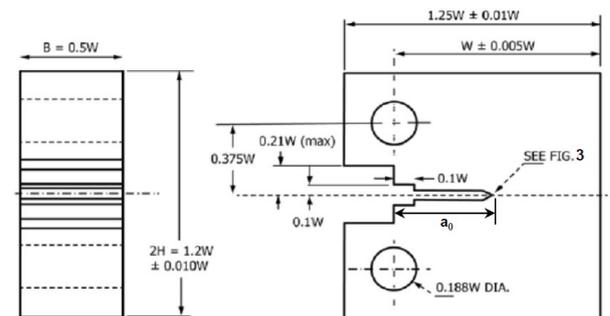
2.2 試験片

ASTM E1820 では、Compact Tension(CT)試験片、Disk Compact Tension 試験片および3点曲げ試験片が適用対象になっている。ここでは、広く利用されている CT 試験片について説明する。

CT 試験片を Fig.2 に、そのノッチ形状を Fig.3 に示す。試験片の形状比は、 $0.45 \leq a_0/W \leq 0.7$ 、 $2 \leq W/B \leq 4$ で、標準試験片は $a_0/W = 0.6$ 、 $W/B = 2$ である。なお、 a_0 ：初期き裂長さ(疲労き裂+機械ノッチ)の平均値、W：試験片幅、B：試験片厚で



(a) Pin diameter=0.25W



(b) Pin diameter=0.188W

Fig.2 Compact Tension specimen

ある。Fig.3 に示すように、ノッチ高さ h は 0.063W 以下、疲労予き裂長さは 0.5h と 0.25mm の大きい方の値以上、疲労予き裂長さ+ノッチ先端の V 形状部の長さが 2.0h 以上になる必要がある。疲労予き裂長さに関する要求は以前⁵⁾より緩く、ASTM E399³⁾に比べても緩い規格となっている*2)。

Fig.1 の R カーブを後述の除荷コンプライアンス法によって求める場合は、疲労予き裂導入後に

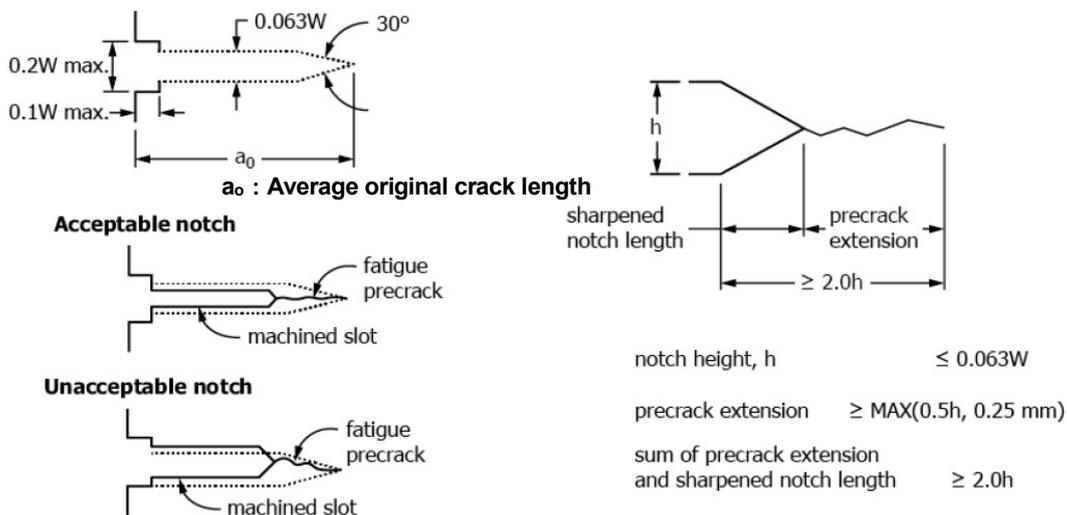


Fig.3 Envelope of fatigue crack and crack starter notches and requirement of fatigue crack length⁴⁾

サイドグループ(以後、SG と記す)と呼ばれる V 溝を試験片表裏面のノッチ延長線上に設けることを強く推奨している。その理由は 2.4.4 で述べる。ASTM E1820 に SG の形状・寸法は載っていないが、ASTM E399 に載っている図を Fig.4 に示す。

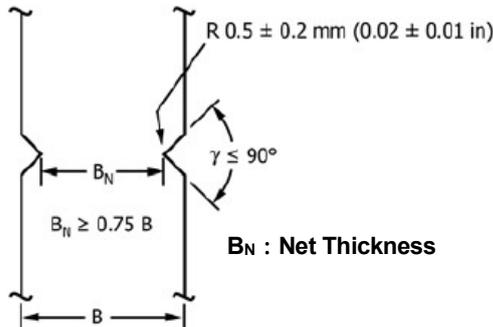


Fig.4 Schematic of side groove configuration³⁾

2.3 疲労予き裂導入条件

疲労予き裂導入時の荷重比(最小荷重/最大荷重)は 0.1 で実施するのが効果的である。

疲労予き裂導入の初期荷重は式(1)で与えられる P_m より小さくする必要がある。

$$P_m = 0.4Bb_0^2\sigma_Y / (2W + a_0) \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_Y = (\sigma_{ys} + \sigma_B) / 2$ 、 σ_{ys} : 試験温度での降伏応力、 σ_B : 試験温度での引張強さ、 b_0 : 初期リガメント長さ(= $W - a_0$)である。

疲労予き裂の導入は、K 値の最大、 $K_{f,max}$ が式(2)の K_{MAX} (単位: $MPa\sqrt{m}$)の約 70%でスタートし、 10^5 回繰返しても疲労予き裂が発生しなければ徐々に K_{MAX} まで増加させるのが望ましい。

$$K_{MAX} = (\sigma_{ys}^f / \sigma_{ys}^T) 0.063\sigma_{ys}^f \quad (2)$$

ここで、 σ_{ys}^f 、 σ_{ys}^T はそれぞれ疲労予き裂導入時と J_{Ic} 試験の温度での降伏応力(単位: MPa)である。

疲労予き裂導入の最終ステージでは、少なくとも疲労予き裂全長の最後の 50%において、式(3)を満足する必要がある。

$$K_{f,max} \leq 0.6(\sigma_{ys}^f / \sigma_{ys}^T) K_{JQ} \quad (3)$$

ここで、 $K_{JQ} = \{EJ_Q / (1 - \nu^2)\}^{1/2}$ 、 E : ヤング率、 J_Q : 暫定破壊靱性値(2.4.2 参照)、 ν : ポアソン比である。

2.4 試験方法

ASTM E1820 には、安定延性き裂発生時の J 値を求める方法として、①複数試験法と②除荷コンプライアンス法が記されている。

複数試験法は 5 体以上の試験片を準備する必要がある。各試験片を異なる荷重線変位まで載荷したのち除荷する。その後、鋼や Ti 合金では 300°C 程度で 30 分間加熱着色後に破壊、その他の材料は疲労破壊させ、破面から各試験片の Δa を計測する。

Fig.5 の領域 A と B に各 1 点以上、A、B を合わせて 5 点以上のデータが必要である。試験片 1 体で 1 点なので、余裕を考えれば 8 体ほど準備する

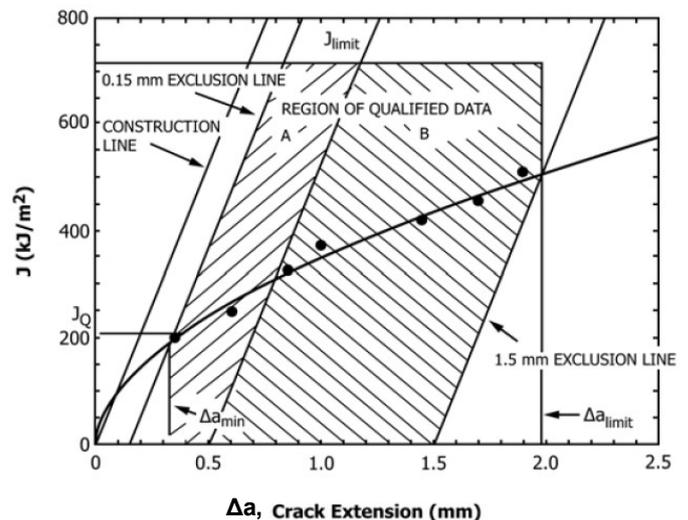


Fig. 5 Definition of Regions for Data Qualification⁴⁾

*2) ASTM 規格^{3)~7)}の疲労予き裂長さに関する比較表を巻末の付録に示す。同表には、同一規格で、要求値が変更になった際の変化も示した。ASTM E1820 および ASTM E1921 では、それぞれ 2016、2018 年に変更があり、Fig.3 のようになった。理由は定かでないが、変更後^{4)~6)}の疲労予き裂長さの要求は、変更前^{5)~7)}より緩い。なお、ASTM E399 は、最新の 2023 年版³⁾でも変更はなく、ASTM E1820 の変更前の 2015 年版⁵⁾と同じ要求である。

必要があり、試験片加工費を含めて試験費用が高くなる。除荷コンプライアンス法は1体の試験片で全点を採取できるので、除荷コンプライアンス法により J_{Ic} 試験が行われることが多い。

以下では、除荷コンプライアンス法による J_{Ic} 試験について説明する。

2.4.1 除荷コンプライアンス法による J_{Ic} 試験

除荷コンプライアンス法とは、Fig.6 に示すように、変位制御で荷重線変位を増加させながら、試験の途中で除荷・再負荷を繰り返す。規格では除荷量は式(1)の P_m の 10~20% を推奨している。き裂が長くなると、除荷時のコンプライアンス(変位/荷重)は大きくなる。両者の関係は定式化されており、コンプライアンスがわかると、き裂長さ a は計算で求められる。

市販の J_{Ic} 試験ソフトでは、除荷のポイントと除荷量を指定すると、自動的に除荷・再負荷を繰り返し、コンプライアンスの計測、き裂長さや J 値の計算も自動的に実施される。

なお、コンプライアンスや J の計算式は ASTM E1820⁴⁾ に記されているので、それを参照されたい。

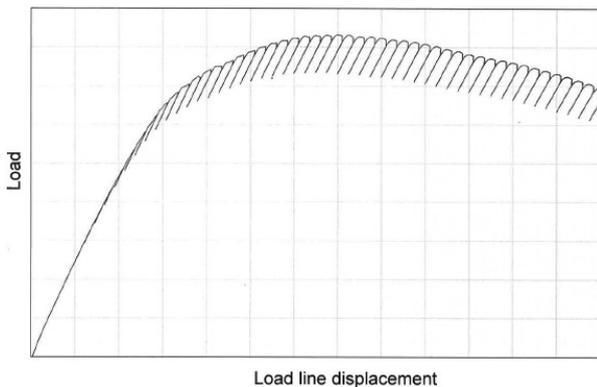


Fig.6 Example of load vs. load line displacement diagram at J_{Ic} test by unloading elastic compliance method

2.4.2 暫定破壊靱性値 J_Q の求め方

Fig.1 に示す安定延性き裂発生時の J 値である J_{in} を安定して求めることは難しいので、ASTM

E1820 では、Fig.7 に示すように、 J と Δa の関係の立ち上がりの線である Construction Line (Fig.1 の Blunting line に相当)と平行に、横軸の $\Delta a=0.2\text{mm}$ を通る 0.2mm Offset Line (傾きは $2\sigma_y$) を引き、それと Power Law Regression Line (Fig.1 の R カurve に相当)の交点を暫定破壊靱性値、 J_Q とし、2.4.3 に示す J_{Ic} 判定条件を全て満足すると、 $J_Q=J_{Ic}$ となる。

Power Law Regression Line は式(4)で表される。Fig.5 の領域 A と B のデータを対象に、最小 2 乗近似により式(4)の係数 C_1 、 C_2 を求める。

$$\ln J = \ln C_1 + C_2 \ln(\Delta a) \quad (4)$$

Fig.7 の横軸の Δa はコンプライアンスから求めた初期き裂長さ a_{oq} が基準となるので、 J_Q の値は a_{oq} に敏感である。したがって、 J_{Ic} 試験後に a_{oq} を以下の要領で再計算する。荷重 - 荷重線変位の最大荷重までの J と a のデータを用いて、式(5)の J と a の累乗近似式の係数 C_3 、 C_4 及び a_{oq} を求める。その求め方は ASTM E1820 の Appendix XI を参照されたい。式(5)の $a - a_{oq}$ が Δa となる。なお、疲労予き裂導入時の最大荷重より小さい荷重から得られたデータは解析対象としない。

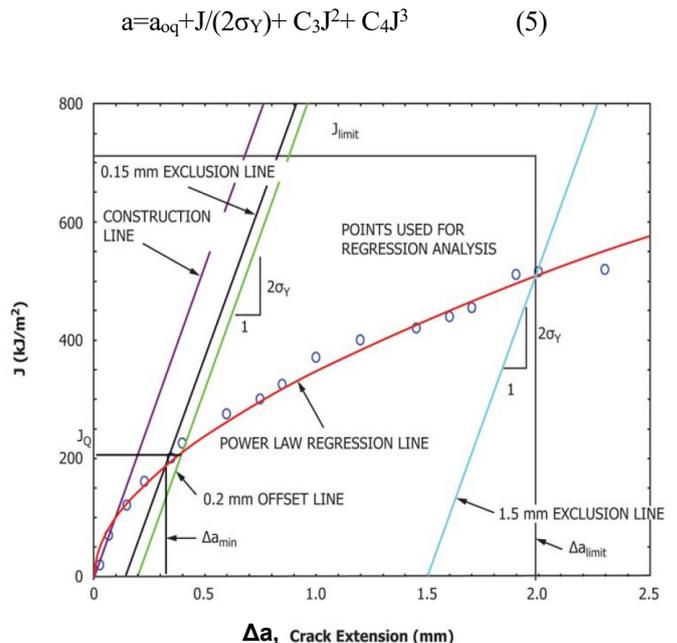


Fig.7 How to obtain provisional fracture toughness, J_Q ⁴⁾

2.4.3 $J_Q=J_{Ic}$ となるための判定条件

J_Q を J_{Ic} と見做すには、以下に示す(1)~(6)の条件⁴⁾を全て満足する必要がある。それ以外にも、2.2 と 2.3 の条件を満足する必要がある。

(1) 試験片寸法要件

式(6)の試験片寸法要件を満足すること。

$$B, b_0 > 10(J_Q/\sigma_Y) \quad (6)$$

(2) 必要実験データ数と存在領域

- 1) 有効データが、Fig.5 の領域 A と B で各 1 点以上、2つの領域を合わせて 5 点以上必要
- 2) 荷重 - 荷重線変位の関係の最大荷重までに 8 点以上 (a_{oq} の再計算に使用)
- 3) $0.4J_Q \sim J_Q$ の間に 3 点以上 (a_{oq} の再計算に使用)

(3) 疲労予き裂および安定延性き裂の長さや形状

- 1) 破断面から計測した疲労予き裂長さ a_F は 2.2 に示した要求を満足すること。
- 2) 初期き裂長さ(a_M+a_F)および安定延性き裂を含む最終き裂長さ($a_M+a_F+\Delta a_p$)は、Fig.8 に示す破面から計測した 9 点のいずれにおいても平均値との差が $0.1(b_0B_N)^{1/2}$ または $0.1(b_0B)^{1/2}$ 以下であること。
- 3) 安定延性き裂長さ Δa_p は Fig.8 の 9 点のいずれにおいても平均値の 50%以上であること。
- 4) 最終の除荷コンプライアンスから求めた安定延性き裂長さ $\Delta a_{p, predicted}$ と実測長さの平均値 $\Delta a_{p, ave.}$ との差は、式(7)又は(8)を満足すること。

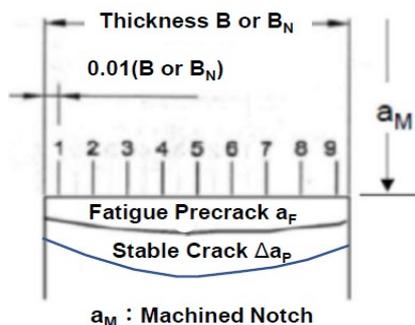


Fig. 8 Crack length measurement positions

$\Delta a_{p, predicted} < 0.2b_0$ の場合

$$|\Delta a_{p, ave.} - \Delta a_{p, predicted}| \leq 0.15 \Delta a_{p, ave.} \quad (7)$$

$\Delta a_{p, predicted} \geq 0.2b_0$ の場合

$$|\Delta a_{p, ave.} - \Delta a_{p, predicted}| \leq 0.03b_0 \quad (8)$$

(4) Power Law Regression Line

式(4)の相関係数は 0.96 より大きいこと。また、式(4)の係数 C_2 は 1 より小さいこと。

(5) a_{oq} と a_o の比較

式(5)で求めた a_{oq} と a_o (初期き裂長さの実測平均値)との差は、 $0.01W$ または 0.5 mm の大きい方を超えてはならない。なお、 a_o は、Fig.8 に示す表裏面近傍の 1 と 9 の初期き裂長さ(a_M+a_F)の平均値と 1~9 を 8 等分した 2~8 の 7 点の初期き裂長さを合わせた計 8 点の平均で与えられる。安定延性き裂長さや最終き裂長さの平均も同様である。

(6) 試験速度に関する条件

変位制御で試験を行うが、載荷開始から式(1)の P_m までの時間を 0.1~3 分の範囲で試験する。なお、 P_m は荷重 - 荷重線変位線図の最大荷重ではない。

2.4.4 J_{Ic} の合否判定条件に関する注意事項

式(6)に示す ASTM E1820 の試験片寸法要件は ASTM E399 に比べてはるかに緩く、式(6)を満足しないため不合格になることは、ほとんど無い。

ASTM E1820 の合否判定で一番難しいのは 2.4.3 の(3)の 2)と 4)、すなわち安定延性き裂前縁の直線性に関するものである。その理由は、サイドグループ(SG)がない場合、安定延性き裂は 3 軸応力度が高い試験片厚中央で先行し、サムネイル形状を示すためである。特に、除荷コンプライアンス法を適用する場合、SG なしで式(7)又は式(8)を満足させることは容易ではない。それ故、2.2 項に記したように除荷コンプライアンス法を適用する場合、SG を設けることを強く推奨している。しかし、ASTM E1820 に SG の図は載っておらず、SG についての記述は、ASTM E1820 の 7.5 項の以下の文面だけであり、見落とししてしまう危険性がある。

7.5 Sid Grooves - Side grooves are highly recommended when the compliance method of crack size prediction is used.

また、薄板材では適切な SG を加工することが難しい場合もある。そのような場合は、SG なしの試験片で、2.4 に示した複数試験法で試験することになるが、その場合でも、2.4.3 の(3)の 2)、すなわち、安定延性き裂前縁の直線性に関する条件を満足できないケースがある。

3. むすび

本報告では、① J_{Ic} 値とは、②ASTM E1820 による J_{Ic} 試験の手順、③ASTM E1820 の J_{Ic} 合否判定の内容、④ASTM E1820 の J_{Ic} 試験の注意事項について説明した。ASTM E1820 の J_{Ic} 試験は ASTM E399 の K_{Ic} 試験に比べて、試験手順が複雑で試験結果の合否判定の項目が多い。規格では、それらの 1 つでも不合格なら invalid となり、 J_{Ic} は得られない。

2.3 で疲労予き裂長さに関する変更について記したが、それ以外にも 2.4.3 の(3)の 2)は 2020 年に本報告の内容に変更になっている。このように、しばしば変更になるので、常に最新版を参照する

必要がある。

本文で示したように ASTM E1820 の試験片寸法要件は ASTM E399 の K_{Ic} 試験に比べて、はるかに緩い。今回は、両者の比較とその根拠について説明する。

参考文献

- 1) Shimizu-tech Technical Report No.1; “ASTM E399 による K_{Ic} 試験の合否判定基準の意義と必要性”, 2021.
- 2) Shimizu-tech Technical Report No.2; “ASTM E399 の改訂のフォロー-ASTM E399-22 の改訂内容”, 2023.
- 3) ASTM E399-23; “Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”, 2022.
- 4) ASTM E1820-22; “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness”, 2022.
- 5) ASTM E1820-15a; “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness”, 2015.
- 6) ASTM E1921-22; “Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_o , for Ferritic Steels in the Transition Range”, 2022.
- 7) ASTM E1921-17; “Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_o , for Ferritic Steels in the Transition Range”, 2017.

付録 ASTM 規格の疲労予き裂長さに関する要求最小値の比較

ASTM E1820、ASTM E399 および ASTM 1921 の疲労予き裂長さに関する要求最小値の比較を下表に示す。ASTM E1820 および ASTM E1921 では、それぞれ 2016、2018 年に要求値の変更があったので、変更前と変更後(最新版)を示した。近年、小形試験片では、ノッチを放電加工で設けることが多い。この場合は、通常、Narrow Notch となる。Narrow Notch (ASTM E1820 の場合、 $B \leq 24\text{mm}$)では、要求最小疲労予き裂長さは、変更前は 0.6mm、変更後は 0.25mm となり、変更に伴い要求値は緩くなっている。

Type of Notch Standard	Wide Notch	Narrow Notch	Remark
	$h^{*1} \leq 0.063W$ ^{4), 5), 6)} $h \leq \text{Lesser of } 0.063W \text{ or } 6.25\text{mm}$ ⁷⁾ $h < 0.1W$ (h need not be less than 1.6mm) ³⁾	$h \leq 0.01W$ ⁵⁾ $h \leq 0.16\text{mm}$ ^{6), 4) *2)} $h \leq \text{Greater of } 0.01W \text{ or } 0.25\text{mm}$ ⁷⁾ $h < 0.01W$ (h need not be less than 0.3mm) ³⁾	
ASTM E1820-22 ⁴⁾	Greater of 0.5h or 0.25mm		Changed in 2016
ASTM E1820-15 ⁵⁾	Greater of 0.05B or 1.3mm ^{*3)}	Greater of 0.025B or 0.6mm ^{*4)}	
ASTM E399-23 ³⁾	Greater of 0.025W or 1.3mm ^{*3)}	Greater of 0.0125W or 0.6mm ^{*4)}	
ASTM E1921-22 ⁶⁾	Greater of 0.5h or 0.25mm		Changed in 2018
ASTM E1921-17 ⁷⁾	Greater of 0.5h or 1.3mm	Greater of 0.5h or 0.6mm	

^{*1} h : Hight of Notch (See Fig.3 on page 2) ^{*2} The definition of h in narrow notch is not clear for ASTM E1820-22⁴⁾

^{*3} : Same requirement for standard specimen (W/B=2)

^{*4} : Same requirement for standard specimen (W/B=2)