



JAEA-Technology

2007-031



JP0750195

照射鋼材の破壊靱性試験の高度化技術開発

Technology Development on Analysis Program for Measuring
Fracture Toughness of Irradiated Specimens

柴田 晃 高田 文樹

Akira SHIBATA and Fumiki TAKADA

大洗研究開発センター材料試験炉部

Department of JMTR
Oarai Research and Development Center

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

照射鋼材の破壊靶性試験の高度化技術開発

日本原子力研究開発機構
大洗研究開発センター 材料試験炉部
柴田 晃、高田 文樹

(2007年 2月 7日受理)

破壊靶性は、鋼材の脆性および延性破壊に対する抵抗を現す最も重要な材料物性とされ、線形、非線形破壊力学評価上極めて重要な指標である。

JMTR ホットラボでは、圧力容器鋼やオーステナイト系ステンレス鋼材などに対する破壊靶性試験に関わるデータ取得のニーズに応えて、照射済材料の破壊靶性試験を実施してきた。しかしながら、ホットラボセル内に従来から設置されていた破壊靶性試験装置では取得データから破壊靶性値を解析するプログラムが旧式となり機能せず、利用者に対して荷重一変位の生データのみを提出していた。

近年、利用者から破壊靶性値の解析のニーズが高まり、そこで、利用者への便宜を図るために、最新の基準である ASTM E1820-01に基づき、除荷弾性コンプライアンス法を用いて当該試験装置により出力されたデータより、コンプライアンス、き裂進展量、破壊靶性値を求める解析プログラムを開発し、ホットセル内に設置した試験装置を用いた放射済試験片に対する破壊靶性試験の高度化を達成した。

この技術開発により、破壊靶性値解析の要求に応えることができるようになり、照射化試験片の破壊靶性値をユーザーに提供することが可能となった。

Technology Development on Analysis Program for Measuring Fracture Toughness of Irradiated Specimens

Akira SHIBATA and Fumiki TAKADA

Department of JMTR
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi,Higashiibaraki-gun,Ibaraki-ken

(Received February 7,2007)

The fracture toughness which represents resistance for brittle or ductile fracture is one of the most important material property concerning linear and non-linear fracture mechanics analyses.

In order to respond to needs of collecting data relating to fracture toughness of pressure vessel and austenitic stainless steels, fracture toughness test for irradiated materials has been performed in JMTR hot laboratory.

On the other hand, there has been no computer program for analysis of fracture toughness using the test data obtained from the test apparatus installed in the hot cell.

Therefore, only load-displacement data have been provided to users to calculate fracture toughness of irradiated materials.

Recently, request of analysis of fracture toughness have been increased. Thus a computer program, which calculates the amount of the crack extension, the compliance and the fracture toughness from the data acquired from the test apparatus installed in the hot cell, has been developed. In the program unloading elastic compliance method is applied based on ASTM E1820-01.

Through the above development, the request for the fracture toughness analysis can be satisfied and the fracture toughness of irradiated test specimens can be provided to users.

Keywords: Fracture Toughness, J_{IC} , Compact-tension, Crack Extension, Compliance, Computer Program, Irradiated Material, Hot Laboratory

目 次

1.	まえがき.....	1
2.	破壊靱性試験装置の概要.....	2
3.	破壊靱性の解析方法.....	4
3. 1	解析方法の概要.....	4
3. 2	き裂長さの計算.....	6
3. 3	J 積分値の計算.....	7
3. 4	破壊靱性(J_{IC})の算出.....	10
4.	解析プログラムの流れ.....	12
5.	まとめ.....	14
	謝辞.....	15
	参考文献.....	15
付録	プログラムの使用方法.....	16
A. 1	インストール.....	16
A. 2	起動.....	16
A. 3	き裂置換.....	18
A. 4	J 積分値およびき裂長さ a 等の計算結果の表示.....	20
A. 5	破壊靱性値(J_{IC})の決定.....	23
A. 6	非正規データの削除機能.....	24

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of the test apparatus	2
3. Analysis method of fracture toughness.....	4
3.1 Outline of analysis method	4
3.2 Calculation of crack length.....	6
3.3 Calculation of J integral value.....	7
3.4 Calculation of fracture toughness (J_{IC}).....	10
4. Flow of analysis program.....	12
5. Conclusions.....	14
Acknowledgement.....	15
References.....	15
Appendix User's Guide of the analysis program.....	16
A.1 Installation of analysis program.....	16
A.2 Start up of analysis program.....	16
A.3 Replacement of crack length.....	18
A.4 Display of the calculation result of J integral value and crack length.....	20
A.5 Determination of fracture toughness (J_{IC}).....	23
A.6 Function for deleting irregular data.....	24

1. まえがき

JMTR ホットラボでは、圧力容器鋼やオーステナイト系ステンレス鋼材などに対する破壊靶性試験に関わるデータ取得のニーズに応えて、照射材料の破壊靶性試験を実施してきた。

破壊靶性は、鋼材の脆性破壊および延性破壊に対する抵抗を現すもっとも重要な材料物性とされ、線形、非線形破壊力学評価上極めて重要な指標である。

日本原子力機構大洗研究開発センターJMTR ホットラボでは照射した鋼材に対する破壊靶性試験を実施してきたが、ホットラボセル内に従来から設置された破壊靶性試験装置では取得データから破壊靶性値を解析するプログラムが旧式となり機能せず、利用者に対して荷重一変位の生データのみを提出していた。

しかし、近年、利用者から破壊靶性値の解析のニーズが高まっており、そこで、利用者への便宜を図るため、ASTM E1820-01¹⁾に基づき、除荷弾性コンプライアンス法を用いて当該試験装置により出力されたデータより、コンプライアンス、き裂進展量、破壊靶性値を求める解析プログラムを開発した。

本報告書では、このプログラムに用いた解析方法及びプログラムの使用方法等を述べる。

2 破壊非性試験装置の概要

Fig2.1 に試験装置の概略図を示す。

試験機本体はホットセル内にあり、試験片の装着等はマニピュレータを用いて遠隔操作にて行う。試験装置は疲労試験機、試験片温度調節槽(恒温槽)、試験片伸び測定器、試験片制御装置等で構成される。疲労試験機は、負荷機構に油圧アクチュエータを使用した引張ー圧縮型のものである。恒温槽は、槽内にファンを取り付けて、高温試験では抵抗加熱方式、低温試験では液体窒素冷却方式とすることにより試験片温度を一定に制御している。恒温槽の温度制御範囲は−180 ~500°Cである。

荷重は一定変位ごとに部分除荷および再負荷することができる。油圧アクチュエータの荷重容量は 62kN である。

Fig.2.1 の試験装置から出力されるデータは荷重および変位である。出力されたデータよりプロットされる荷重ー変位曲線の例を Fig.2.2 に示す。

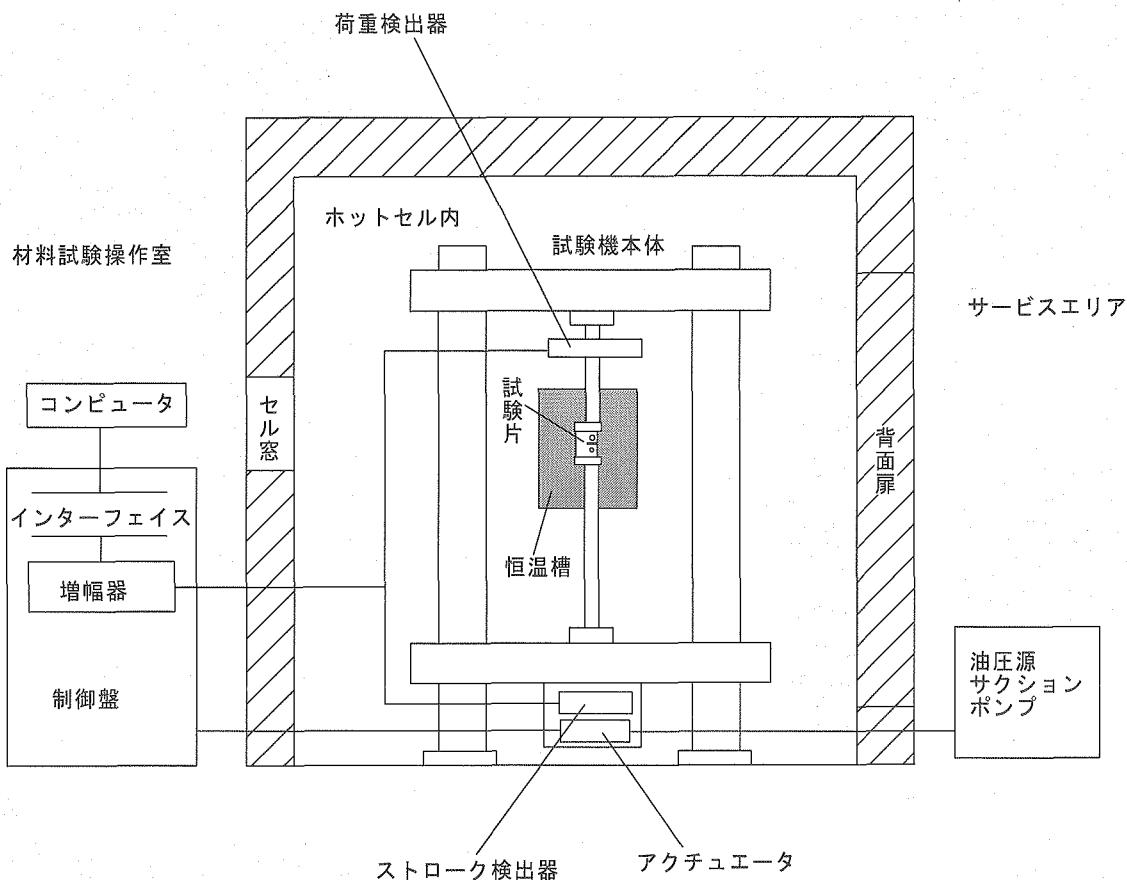


Fig.2.1 試験装置の概略図

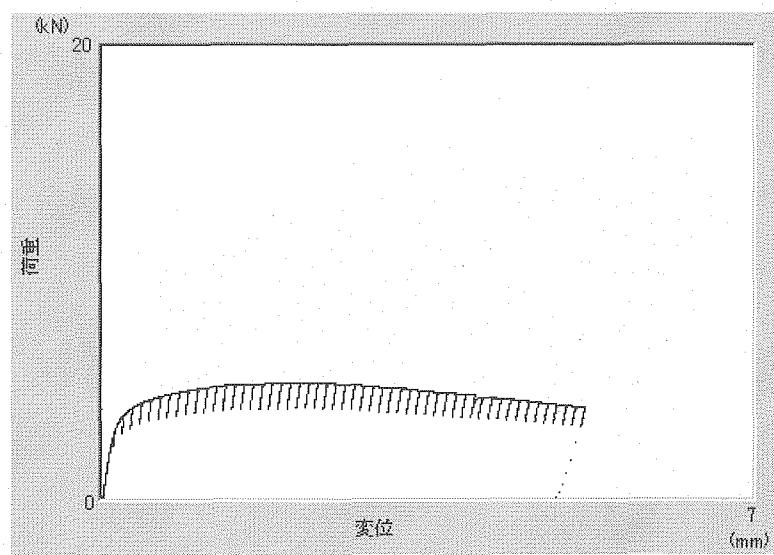


Fig.2.2 荷重-変位曲線の出力例

3. 破壊革性の解析方法

3. 1 解析方法の概要

ASTM E1820-01に基づく試験方法は、コンパクトテンション(CT)試験片の荷重一変位曲線から破壊革性(J_{IC})を決定するために適用するものである。破壊革性(J_{IC})は、き裂安定成長開始時の破壊革性として定義されており、モードIの平面ひずみ型延性引裂き破壊が開始する際の破壊抵抗である。 J_{IC} は、試験片形状・寸法および負荷方式に依存しない材料定数であり、き裂のある構造物の破壊発生を推定するために重要な材料物性である。

なお破壊革性 K_{IC} は小規模降伏条件を満足する場合、 J_{IC} と次式の関係がある。

$$J_{IC} = (1 - \nu^2) \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (3.1.1)$$

ここで ν はポアソン比、 E は縦弾性係数である。

本試験で推奨される試験片はピン荷重の引張型標準コンパクト(CT)試験片である。Fig.3.1 に標準的な試験片形状を示す。また、疲労き裂と機械加工ノッチ形状を Fig.3.2 に示す。試験片は無次元初期き裂長さ a_0/W (a_0 は初期き裂長さ、 W は荷重線から試験片末端までの長さ) が 0.45~0.7 であって、初期き裂前縁はノッチ平面とほぼ同一の平面内に存在する必要がある。また、 K_{IC} を求める場合には、 a_0/W は 0.45~0.55 でなくてはならない。

ASTM E1820-01 試験法では、安定き裂進展時のき裂寸法を除荷弾性コンプライアンス法により推定する方法を推奨している。除荷弾性コンプライアンス法では所定の変位ごとに 10%程度の荷重を除荷し、その後再負荷を繰返し、その時のき裂進展にともなうコンプライアンス値の変化から各除荷点におけるき裂進展量を推定する。この方法により推定したき裂進展量とその時の荷重一変位曲線から J 積分値を算出し、この J 積分値と安定き裂進展量から J_{IC} 値を推定する。

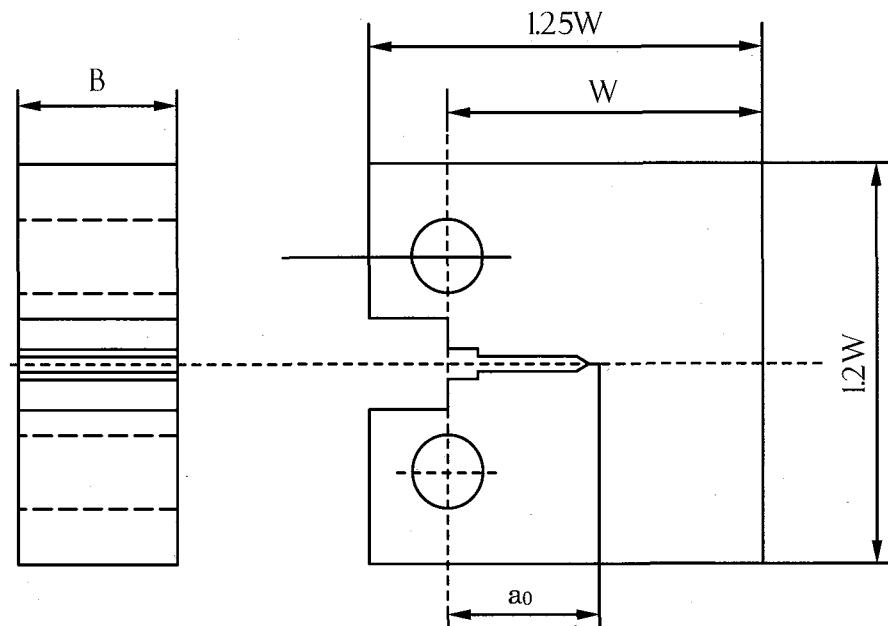


Fig.3.1 標準的な試験片形状

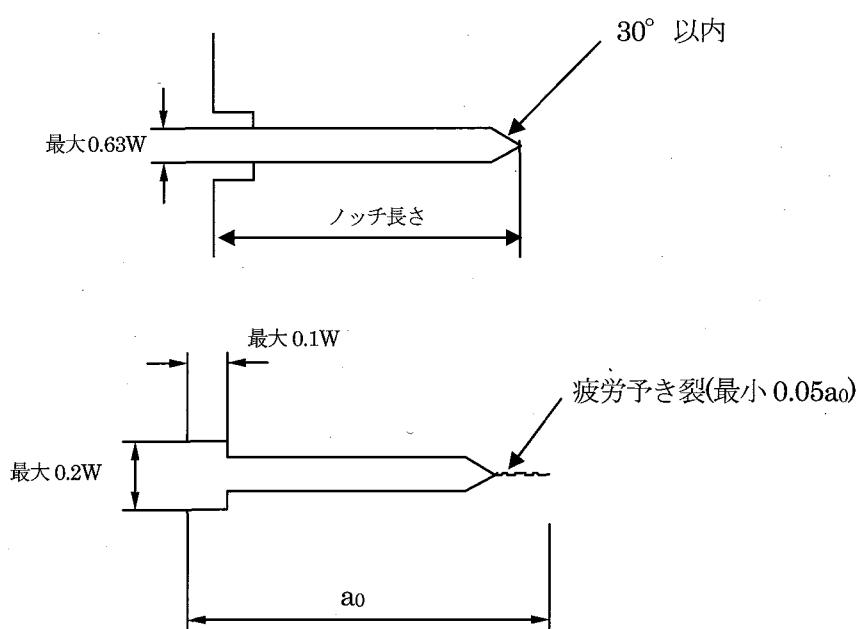


Fig.3.2 疲労予き裂とノッチの形状

3. 2 き裂長さの計算

ASTM E 1820-01 では除荷コンプライアンス法によるき裂長さの推定を推奨している。

コンプライアンスとは、荷重一変位曲線の勾配の逆数として定義される。除荷および再負荷時のパソコンから出力される荷重、変位のデジタル出力値から最小二乗近似直線の勾配よりこの逆数として求めることができる。

各除荷点 i において、き裂長さ a_i は除荷弾性コンプライアンス値から以下のように求めることができる。

$$a_i / W = C_0 + C_1 u + C_2 u^2 + C_3 u^3 + C_4 u^4 + C_5 u^5 \quad (3.2.1)$$

$$u = \frac{1}{1 + \sqrt{B_{eff} \times E \times \lambda}} \quad (3.2.2)$$

$$B_{eff} = B - \frac{(B - B_N)^2}{B} \quad (3.2.3)$$

ここで、

a_i : 除荷点 i におけるき裂長さ

W : 試験片幅(荷重線から試験片末端までの長さ)

B_{eff} : 試験片有効長さ

B : 試験片厚さ

B_N : 有効試験片厚さ

E : 縦弾性係数

λ : 除荷弾性コンプライアンス($\Delta v / \Delta P$)

また、 $C_0 \sim C_5$ はき裂長さ係数であり試験片形状に依存する定数である。CT 試験片形状の場合は、

$$a_i / W = 1.000196 - 4.06319u + 11.242u^2 - 106.043u^3 + 464.335u^4 - 650.677u^5 \quad (3.2.4)$$

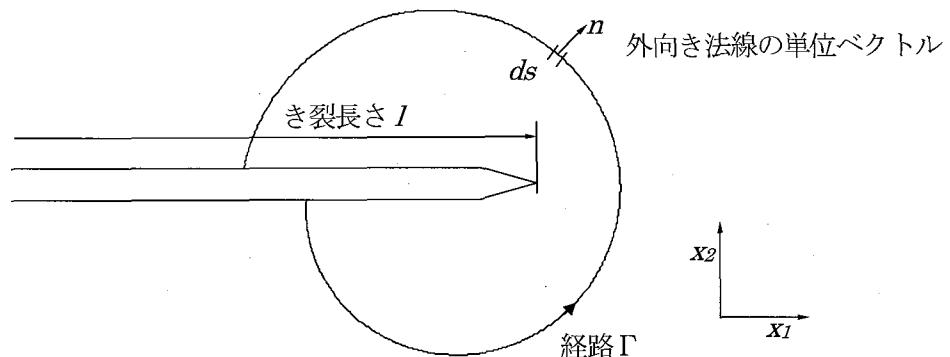
である。

なお、ASTM E1820-01 では、コンプライアンスを算出するときは、除荷および再負荷開始時の非直線性を考慮し、除荷および再負荷時の上下 10%程度を除去すべきとしている。なお、開発したプログラムではデフォルト値を 10%とし、試験で得られた荷重一変位曲線に応じて任意に除荷量を変更可能とした。

3. 3 J 積分値の計算

J 積分とは Fig.3.3 に示すとおり、き裂下面から出発して、き裂先端を囲んだ形でき裂上面に至る、任意の線あるいは面経路に関する積分であり、次式で定義される。ここで u_i , σ_{ij} および ε_{ij} は与えられた座標系に対する変位成分、応力およびひずみをそれぞれ現し、 n_j は Fig.3.3 で定義した n の x_j 成分を現す。²⁾

$$\left. \begin{aligned} J &= \int_{\Gamma} \left[W(\varepsilon_{mn}) dx_2 - Ti \frac{\partial u_i}{\partial x_1} ds \right], \\ W(\varepsilon_{mn}) &= \int^{\varepsilon_{mn}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}, \\ Ti &= \sigma_{ij} n_j \quad (\Gamma \text{上において}) \end{aligned} \right\} \quad (3.3.1)$$

Fig.3.3 J 積分の経路

J 積分はき裂先端近傍の局所的な応力一ひずみ場を現し、経路 Γ の取り方いかんに関わりのない安定した値である。また J 積分はき裂進展とともにエネルギー解放率と等しいという性質があり、これに基づき荷重一変位関係から比較的簡単に実験的に評価することができる。³⁾

各除荷点において荷重一変位曲線より以下の計算を行い、 J 積分値を求める。
 J 積分は、弾性および塑性部に分けられ以下のように現すことができる。

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (3.3.2)$$

J_{el} は J の弾性成分であり、 J_{pl} は J の塑性成分である。 J_{el} は以下のように求める。

$$J_{el} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} \quad (3.3.3)$$

ここで、CT試験片において荷重 P_{el} における K は以下で現される。

$$K_{(i)} = \frac{P_{(i)}}{(BB_N W)^{1/2}} f(a_i/W) \quad (3.3.4)$$

ここで、

$$f(a_i/W) = \frac{[(2+a_i/W)(0.886 + 4.64(a_i/W) - 13.32(a_i/W)^2 + 14.72(a_i/W)^3 - 5.6(a_i/W)^4)]}{(1-a_i/W)^{3/2}} \quad (3.3.5)$$

J_{pl} は荷重一変位曲線を用いて以下のように求めることができる。

き裂長さが a_o のとき、

$$J_{pl} = \frac{\eta A_{pl}}{B_N b_0} \quad (3.3.6)$$

ここで、

A_{pl} : Fig.3.4 に示す荷重一変位曲線の面積から弾性成分の面積を引いた面積

B_N : 実試験片厚さ(サイドグループを引いた厚さ)

$$b_o = W - a_o \quad (3.3.7)$$

η は CT 試験片に対しては次式を使用する。

$$\eta = 2 + 0.522 b_o / W \quad (3.3.8)$$

E : 縦弾性係数

ν : ポアソン比

である。

除荷点 i における J の計算法としては ASTM E1820-01 ANNEX 2 より

$$J_{(i)} = \frac{(K_{(i)})^2(1-\nu^2)}{E} + J_{pl(i)} \quad (3.3.9)$$

ここで $K_{(i)}$ は(3.3.4)に記した通りである。また、

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \cdot \left[1 - \gamma_{(i-1)} \frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right] \quad (3.3.10)$$

ここで、

$$\eta_{6-D} = 2 + 0.522 b_{6-D} / W \quad (3.3.11)$$

$$\gamma_{6-D} = 1.0 + 0.76 b_{6-D} / W \quad (3.3.12)$$

である。

ここで Fig.3.4 に示す Area A_{pl} は、各除荷点ごとに除荷および再負荷によって生ずる Original Loading Slope(傾き)を持つ直線を最小二乗近似により求めその延長線と横軸に囲まれた面積を数値積分して求める。

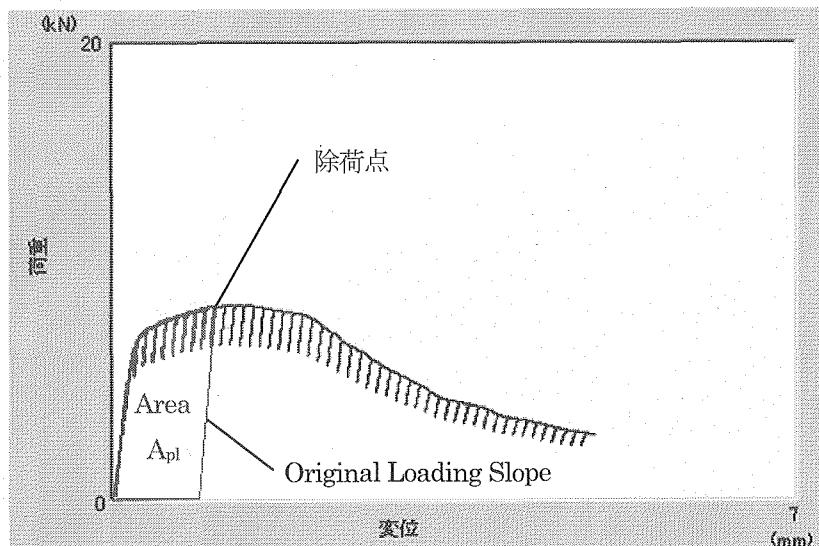


Fig.3.4 J 積分値計算に用いる Area A_{pl} の定義

3. 4 破壊韌性(J_{IC})の算出

3. 3に述べた方法により得られた各除荷点におけるき裂長さ a と J 積分値から以下のように破壊韌性(J_{IC})を算出する。

各除荷点における弾性コンプライアンスからき裂進展量 Δa 、すなわち、

$$\Delta a = a - a_0 \quad (3.4.1)$$

を求める。

次に Fig.3.5 に示すように、計算により求めたき裂進展量、または、実測した場合では実測値に基づいて補正したき裂進展量に対して J 積分値をプロットする。

次に次式に従って鈍化直線を決定する。

$$J = M \sigma_{fs} \Delta a \quad (3.4.2)$$

M は通常 2 とする。ただし、同種の材料について、推奨される鈍化直線の試験データがある場合にはそれを用いる。

ここで有効降伏応力 σ_{fs} は、次式で定義される。

$$\sigma_{fs} = \frac{\sigma_{ys} + \sigma_{ts}}{2} \quad (3.4.3)$$

σ_{ys} : 降伏応力または 0.2% 耐力

σ_{ts} : 引張強さ

Fig.3.5 に示すように鈍化直線をプロットし、それと平行に 0.15mm 横軸方向に平行移動させた 0.15mm 除外線、1.5mm 平行移動させた 1.5mm 除外線をプロットする。また、鈍化直線を横軸方向に 0.2mm 平行移動させたオフセット線をプロットする。

ここで、解析が有効であるためには $J - \Delta a$ のプロット点が、0.2mm オフセットラインと 0.5mm 平行移動線の間、および、0.5mm 平行移動線から 1.5mm 除外線の間にそれぞれ最低一個必要である。

0.15mm 除外線と 1.5mm 除外線に挟まれ、かつ $J_{max} = b_0 \cdot \sigma_{fs} / 15$ により囲まれた区域内のすべての $J - \Delta a$ を有効なプロットとする。

この有効な $J - \Delta a$ プロット点に対して以下の形にて最小二乗近似を行い、 $J - \Delta a$ 曲線を決定する。

$$\ln J = \ln C_1 + C_2 \ln\left(\frac{\Delta a}{k}\right) \quad (3.4.4)$$

ここで $k=1.0$ である。

次に、得られた $J - \Delta a$ 曲線と 0.2mm オフセット線の交点における J 積分値を暫定的な $J_{Ic}(J_Q)$ とする。さらに、 J_Q の有効性を評価するため ASTM E1820-01 ANNEX 9 に記された下記条件を満足するかどうかを判定する。

試験片厚さ B に対し、

$$B > 25 J_Q / \sigma_{fs} \quad (3.4.5)$$

初期リガメント b_0 に対し、

$$b_0 > 25 J_Q / \sigma_{fs} \quad (3.4.6)$$

両条件を満足した場合は、有効な $J_{Ic} = J_Q$ と評価する。

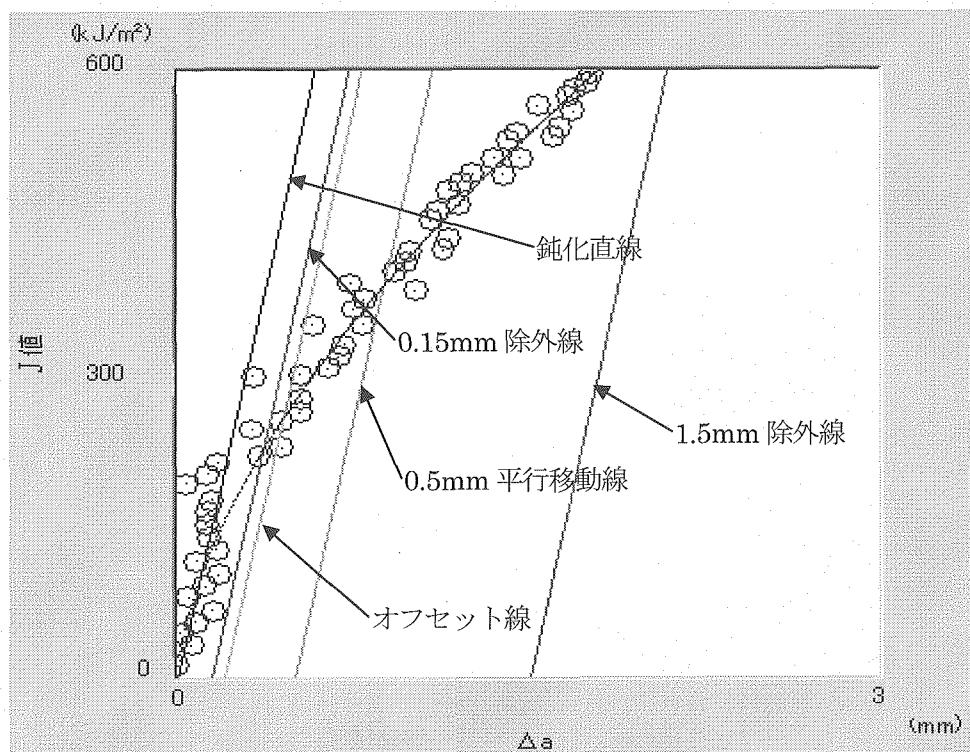


Fig.3.5 暫定的な J_{Ic} 決定のためのプロット図

4. 解析プログラムの流れ

プログラム起動から J_{IC} 値解析値表示までの流れを Fig.4.1 のフローチャートに示す。なお、ここで計算上の細かい分岐等は省略してある。

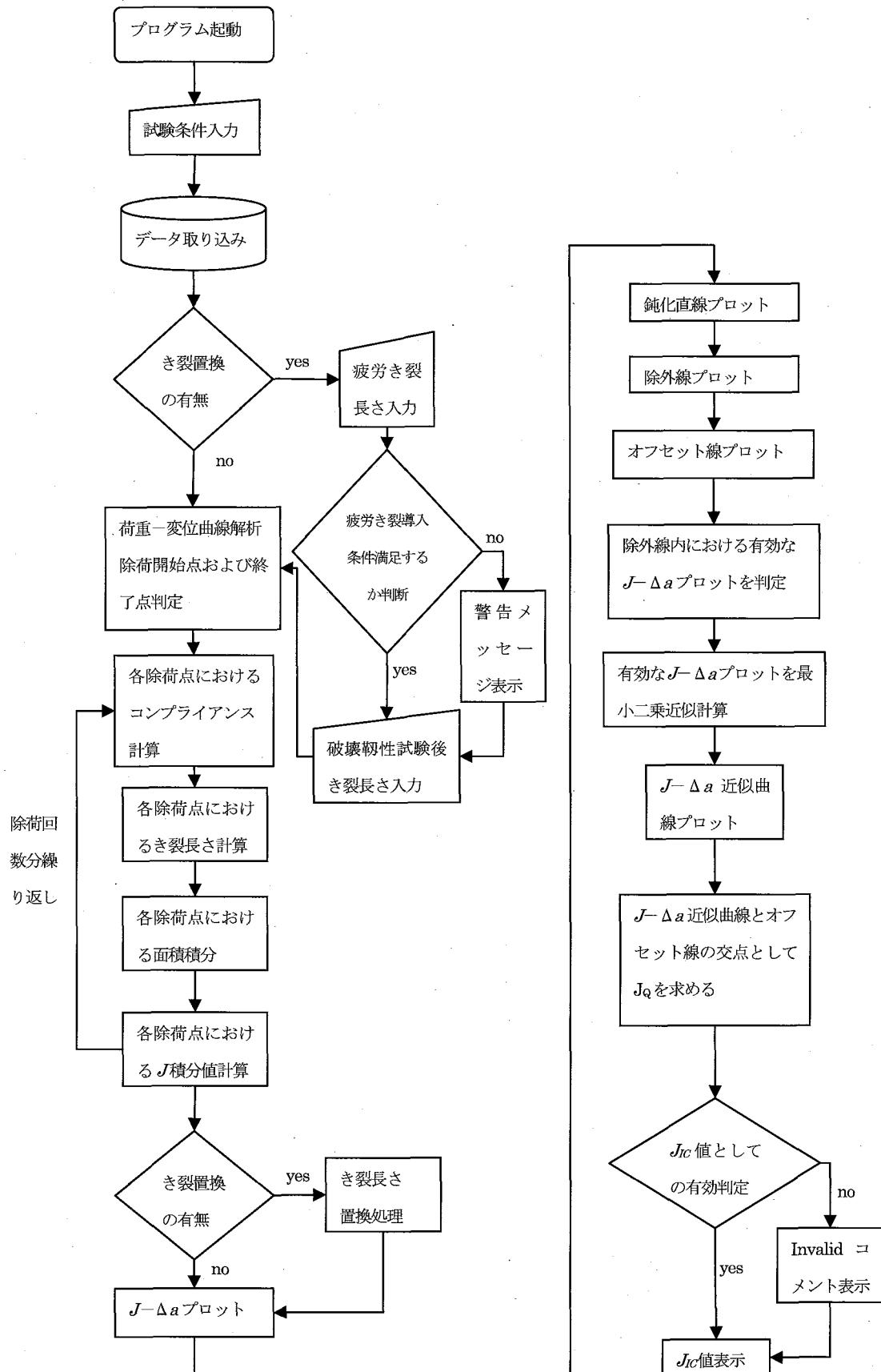


Fig.4.1 フローチャート

5. まとめ

本技術開発ではホットセル内に設置された試験装置から出力されたデジタルデータを解析し、弾塑性破壊革性 J_{IC} を求める解析プログラムを開発し、ホットセル内に設置した試験装置を用いた放射済試験片に対する破壊革性試験の高度化を達成した。

この技術開発により、従来よりユーザーからニーズの高かった破壊革性値解析の要求に応えることができるようになり、照射済試験片の破壊革性値をユーザーに提供することが可能になった。

当プログラムを用いて求められた解析結果は、国プロの報告等に利用されており、当プログラム開発の意義は大きい。

なお、今後の課題として、他の試験機データを解析する汎用プログラム、および、多様な試験片形状に対応したプログラムの開発の要望があり、今後、そのニーズに応えていく計画である。

謝辞

本開発においてホットラボ課の清水道雄課長、近江正男課長代理ならびに株式会社アトックス富田英樹氏から多大な協力と激励を賜った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) ASTM E 1820-01 : "Standard Test Method for Measurement of Fracture toughness", (1999).
- 2) 金沢武・越賀房夫：“脆性破壊 2”, p73-74, (1977).
- 3) 日本材料学会：“材料強度学”, p74-75, (1993).

付録 プログラムの使用方法

第3章及び第4章に述べた方法に基づき作成した解析プログラム FRACT の使用方法を以下に示す。

A. 1 インストール

プログラムは使用環境として、OS に Windows2000 以降が稼働するコンピュータ上において VB6 ランタイムモジュールを必要とする。インストールはプログラム格納用ディレクトリを作成し、ロードモジュール(FRACT.EXE)をこのディレクトリに格納することによって行う。

A. 2 起動

起動は、ロードモジュール”FRACT.EXE”を実行することにより行う。

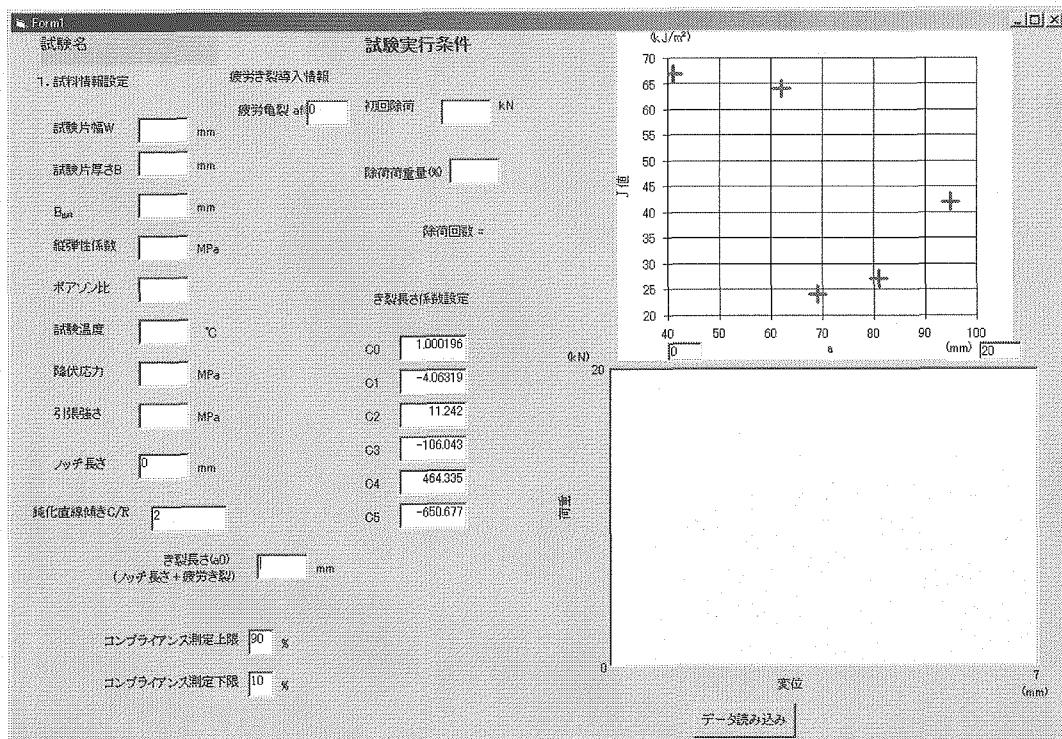


Fig.A.1 試験データの入力画面

本プログラムを起動すると最初に Fig.A.1 の入力画面が表示される。この画面に従って試験片および試験条件のデータの入力を行う。入力するデータは、試験片幅(荷重線から試験片末端までの長さ)W、試験片厚さB、縦弾性係数、泊松比、試験温度、降伏応力、引張強さ、初期き裂長さあるいはノッチ長さと疲労き裂長さ、コンプライアンス測定上限およびコンプライアンス測定下限、初回除荷の荷重である。

コンプライアンス測定上限およびコンプライアンス測定下限は3章に記述したとおりであり、除荷および再負荷開始時の非直線性を考慮して90%と10%をデフォルト値としている。

試験片幅は有効試験片幅である。き裂長さ係数は、試験片形状に依存した数値であり、CT 試験片の場合は変更しない。将来的に三点曲げ試験を行うときのための入力欄であり現状では入力

の必要はない。

B_{net} は試験片厚さから両面のサイドグループ(き裂が進展しやすいように試験片側面に加工された溝)深さを引いた厚さである。試験片形状の例を Fig.A.2 に示す。

初回除荷は試験開始初期のデータのばらつきを除荷と認識しないようにするために、入力を必要とする。本プログラムにおける除荷の判定は、ある荷重点から除荷荷重量として設定した値の 80%(通常はその点の荷重の 8%を除荷した荷重量)減じた荷重量に達した点として行われている。

Fig.A.1 の画面入力が終了後、『データ読み込み』ボタンをクリックするとファイル選択画面が表示される。ファイル選択画面から、破壊非性試験の荷重、変位データファイルを選択する。荷重、変位データはあらかじめコンピュータ内の任意のディレクトリに格納しておく必要がある。ファイルを選択するとデータが読み込まれ、Fig.A.2 に示すように荷重-変位曲線がプロットされる。

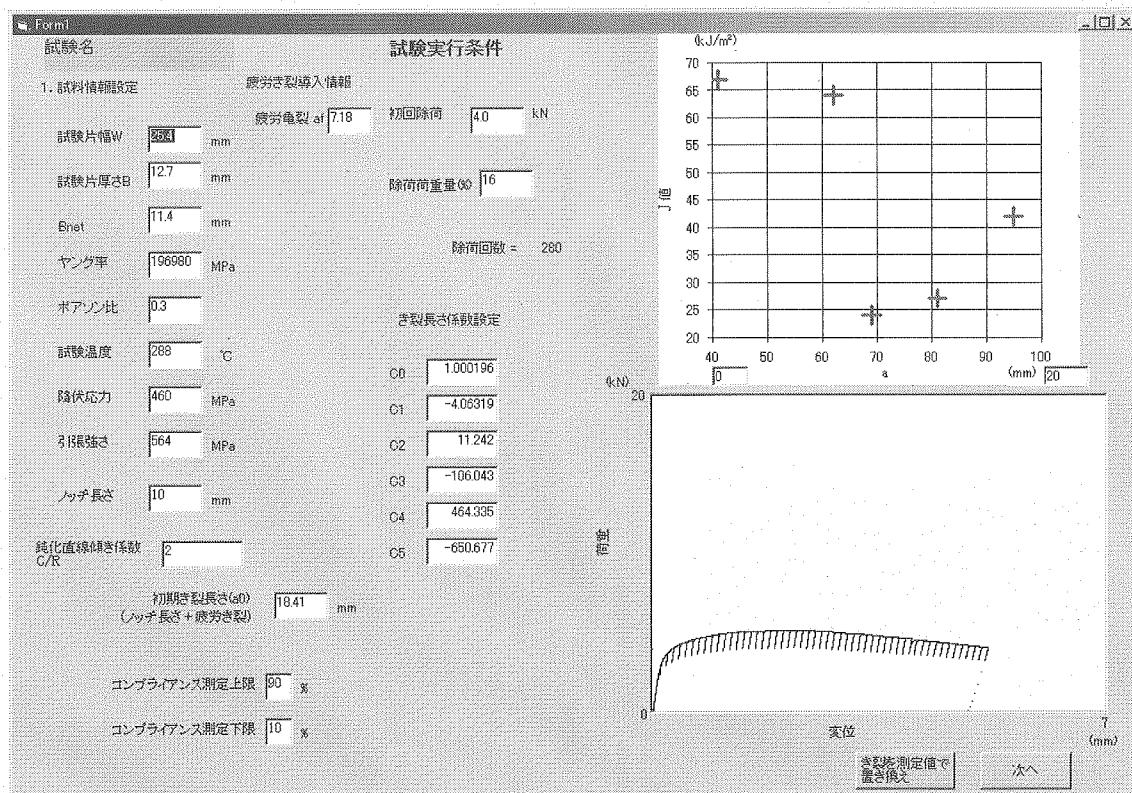


Fig.A.2 荷重-変位データの表示

なお、破壊非性試験後に試験片の破面観察を行い、疲労き裂と破壊非性試験におけるき裂を測定する場合は、き裂進展量の計算値を実測値に基づいて補正するため、『き裂を測定値で置き換える』ボタンを押し A. 3 節へと進む。

一方、計算値のみから算出する場合は、『次へ』をクリックし、A. 4 節の処理に進む。

A. 3 き裂置換

き裂置換は、破壊靱性試験終了後に破面観察を行った場合に適用する。なお、破面観察は試験終了後疲労荷重により試験片を分割して行う。この試験終了後に行う破面観察によるき裂の測定例を Fig.A.5 に示す。

Fig.A.2 の画面で『き裂を測定値で置き換え』ボタンを押すと Fig.A.3 の画面が表示され、試験片のノッチ長さ及び、初期き裂長さ(疲労き裂長さ)の実測値を入力する。

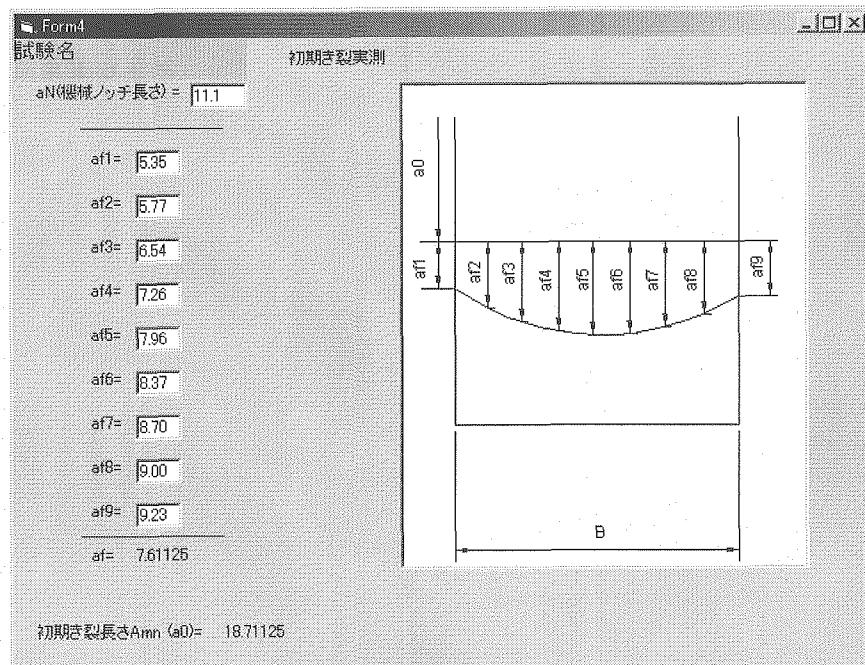


Fig.A.3 初期き裂の入力画面

Fig.A.3 の画面で『次へ』をクリックすると Fig.A.4 の画面が表示される。

前画面と同様に、破壊靱性試験終了後のき裂長さの実測値を入力する。Fig.A.4 の画面で次へをクリックすると Fig.A.6 の画面が表示される。

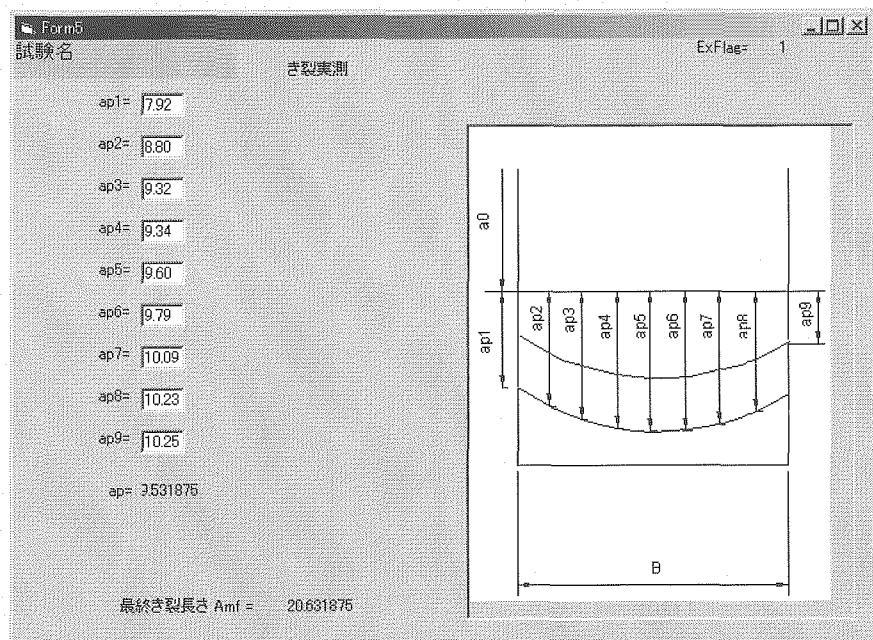


Fig.A.4 破壊靶性試験き裂進展量の入力画面

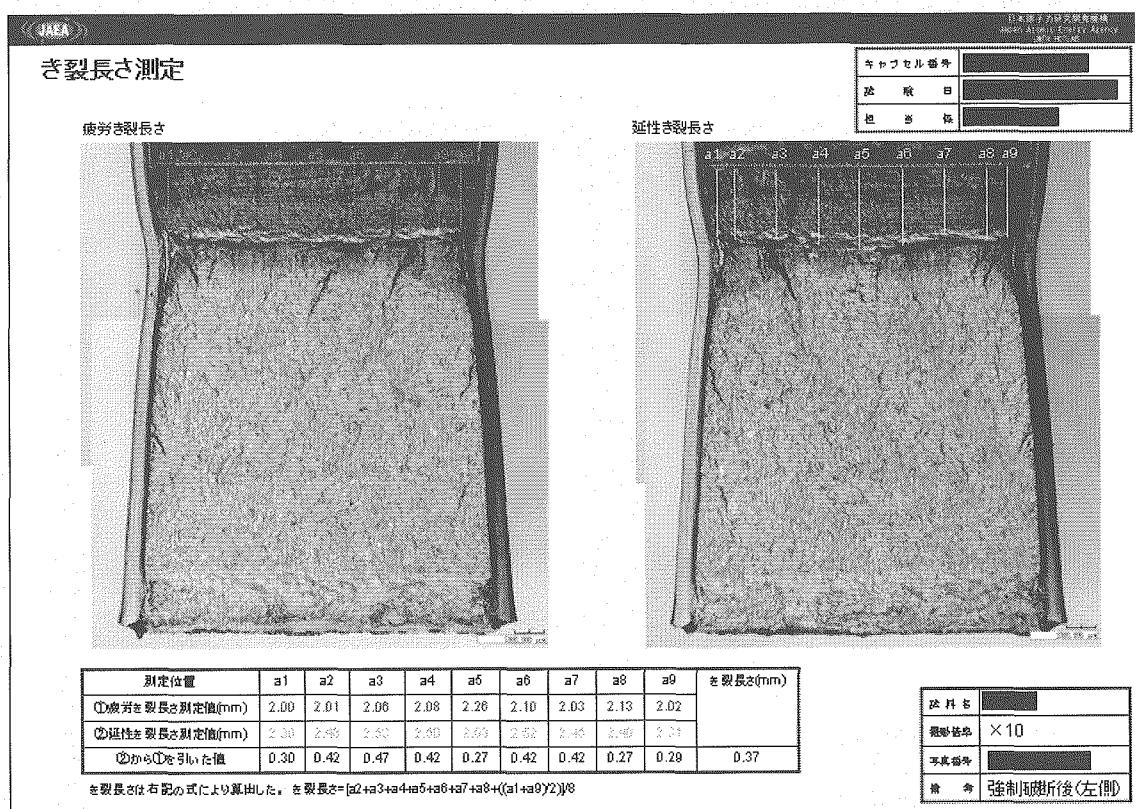


Fig.A.5 寸法測定例

A. 4 J 積分値およびき裂長さ a 等の計算結果の表示

き裂置換のない場合は Fig.A.2、き裂置換のある場合は Fig.A.4 の画面で『次へ』をクリックすると Fig.A.6 および Fig.A.7 の画面が表示される。Fig.A.6 では、各除荷点におけるコンプライアンス、き裂長さの計算値(あるいは実測値からのき裂長さへの換算値)、 J 積分値、Fig.3.4 で定義した面積、荷重、伸びが計算され表示される。また、Fig.A.7 ではき裂長さ a と J 積分値の関係がプロットされる。

試験名	コンプライアンス (mm/kN)	き裂(l/mm)	き裂長さ 置換値(mm)	面積(エネルギー (N·mm))	J 値(kJ/m ²)	除荷点荷重 (kN)	除荷点伸び (mm)
除荷コンプライアンス開始点	5.130E-2	18.711	0.000	0.25	0.59	4.00	0.28
除荷コンプライアンス終点	5.052E-2	18.656	-0.055	0.62	12.97	4.31	0.39
1	5.217E-2	18.772	0.060	1.01	19.78	4.42	0.48
548	5.147E-2	18.723	0.012	1.46	27.18	4.49	0.58
604	5.250E-2	18.794	0.083	1.88	34.22	4.66	0.68
2	5.199E-2	18.769	0.048	2.34	41.84	4.61	0.78
819	5.316E-2	18.839	0.128	2.81	49.52	4.65	0.88
878	5.410E-2	18.901	0.169	3.27	57.15	4.70	0.98
3	5.255E-2	18.798	0.087	3.73	64.79	4.72	1.08
1092	5.393E-2	18.893	0.162	4.20	72.55	4.77	1.18
1153	5.347E-2	18.859	0.148	4.67	80.41	4.80	1.29
4	5.320E-2	18.841	0.130	5.14	88.01	4.81	1.39
1370	5.327E-2	18.846	0.135	5.63	96.10	4.87	1.49
1433	5.352E-2	18.870	0.158	6.12	104.07	4.84	1.59
5	5.181E-2	18.747	0.035	6.60	111.95	4.86	1.69
1644	5.328E-2	18.847	0.136	7.10	120.18	4.87	1.79
1709	5.404E-2	18.897	0.186	7.58	128.05	4.85	1.89
6	5.710E-2	19.059	0.378	8.07	136.13	4.81	1.99
1925	5.692E-2	19.197	0.486	8.52	143.58	4.79	2.09
1992	5.600E-2	19.059	0.347	8.99	151.47	4.77	2.19
7	5.693E-2	19.191	0.480	9.56	159.46	4.75	2.30
2203	6.036E-2	19.279	0.567	9.96	167.18	4.74	2.40
2267	6.049E-2	19.286	0.576	10.43	176.07	4.74	2.50
8	5.663E-2	19.050	0.349	10.91	182.84	4.70	2.60
2482	6.043E-2	19.282	0.571	11.43	191.12	4.70	2.70
2551	6.276E-2	19.409	0.598	11.86	198.40	4.68	2.80
9	6.370E-2	19.458	0.747	12.31	205.81	4.66	2.90
2762	6.422E-2	19.466	0.774	12.79	213.71	4.63	3.00
2830	6.160E-2	19.342	0.630	13.26	221.27	4.60	3.10
10	6.596E-2	19.572	0.961	14.18	229.15	4.56	3.21
3042	6.507E-2	19.528	0.817	14.65	236.41	4.51	3.31
3111	6.608E-2	19.578	0.867	15.09	243.99	4.46	3.41
11	6.479E-2	19.514	0.803	15.55	251.11	4.43	3.51
3225	7.118E-2	19.816	1.105	15.95	258.51	4.40	3.61
3392	6.913E-2	19.723	1.012	16.41	265.36	4.36	3.71
12	7.007E-2	19.766	1.055	16.84	272.77	4.33	3.81
3597	7.064E-2	19.792	1.081	17.27	279.79	4.28	3.91
3667	7.415E-2	19.943	1.232	17.68	286.82	4.25	4.01
13						4.22	4.11
3980							
3948							
14							
4162							

Fig.A.6 コンプライアンス値、き裂長さ、 J 積分値等の計算結果の表示

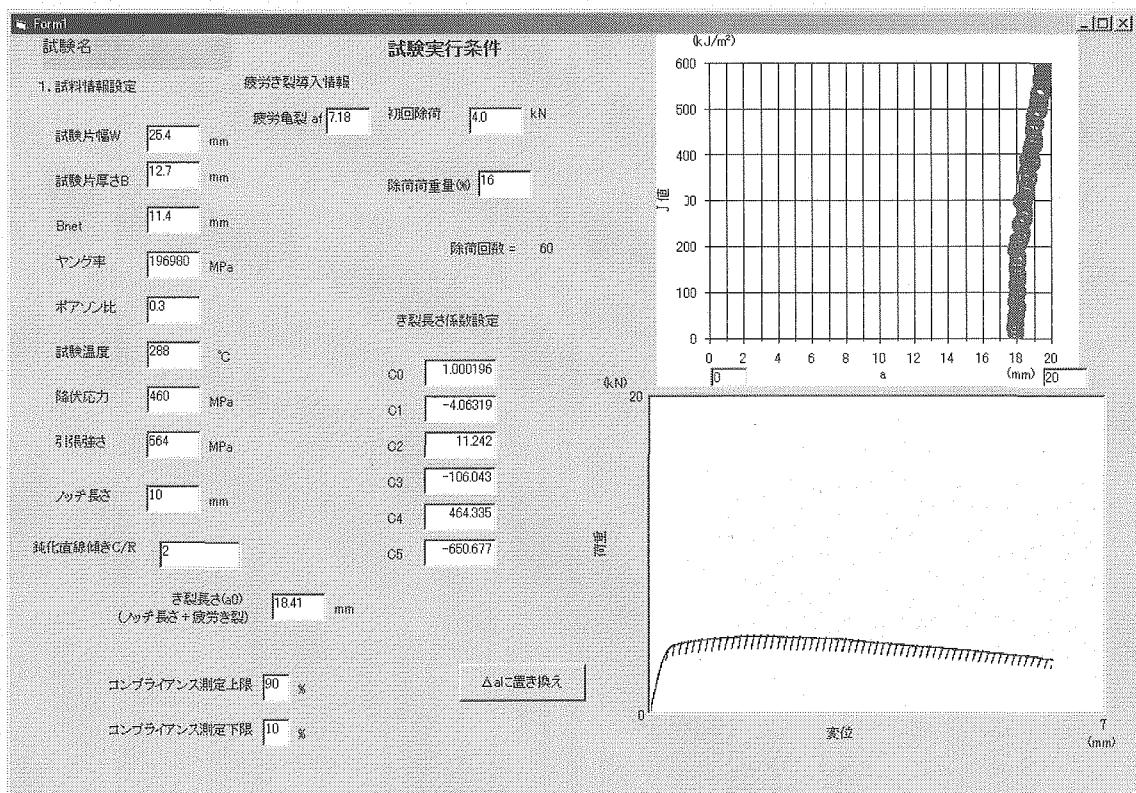
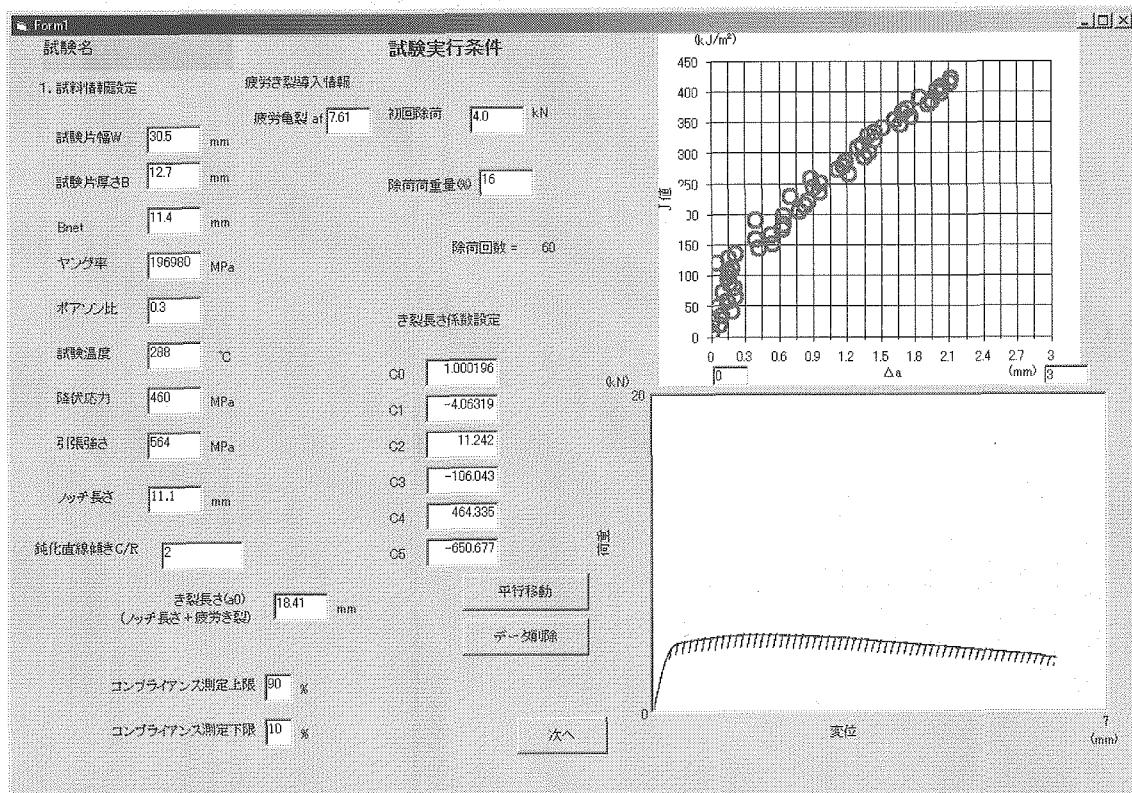
Fig.A.7 J 積分値ーき裂長さ a のプロット

Fig.A.7において『 Δa に置き換え』ボタンをクリックすると、Fig.A.8に示すようにグラフが更新され、 Δa と J 積分値のプロットが表示される。

このFig.A.8における、 $J-\Delta a$ のプロットの横軸のスケールは Δa の軸にあるテキストボックスに最大値と最小値を入力することにより任意に変更可能である。

このスケールはFig.A.9における最終的なプロットにも適用するので、必要に応じて設定する。

Fig.A.8 J 積分値 - Δa のプロット

A. 5 破壊靱性値(J_{IC})の決定

Fig.A.8において『次へ』をクリックすると Fig.A.9 が表示される。

この画面では各除荷点におけるき裂進展量 Δa と J 積分値がプロットされる。

3. 4 節で述べたように鈍化直線を Δa 軸方向に 0.15mm 及び 1.5mm 平行移動した除外線の内側にプロットされた点のみを有効と見なし、有効な点を 3.4.4 式にて近似した曲線とオフセット線の交点が J_{IC} 値(暫定値 J_Q)として表示される。また、 $b_0B > 25 J_Q / \sigma_{fs}$ の条件が満足されるかどうかが表示される。これを満足するとき有効(Valid)な J_{IC} であるとする。

また、鈍化直線を 0.5mm 横軸方向に平行移動した線がプロットされる。この解析が可能な条件として、前述のように鈍化直線を 0.5mm 平行移動線に対し、 $J - \Delta a$ のプロット点は 0.2mm オフセット線と 0.5mm 平行移動線の間に最低一つ、0.5mm 平行移動した線から 1.5mm 除外線の間に最低一つのプロット点が存在しなければならない。

Fig.A.9 では、両除外線内側の有効なプロット点のみに基づく指数近似曲線の係数が表示される。また、ファイル出力ボタンをクリックすることにより、 J_{IC} 値、プロットデータ、近似曲線係数、鈍化直線式が CSV 形式で指定する任意のフォルダにファイル出力される。

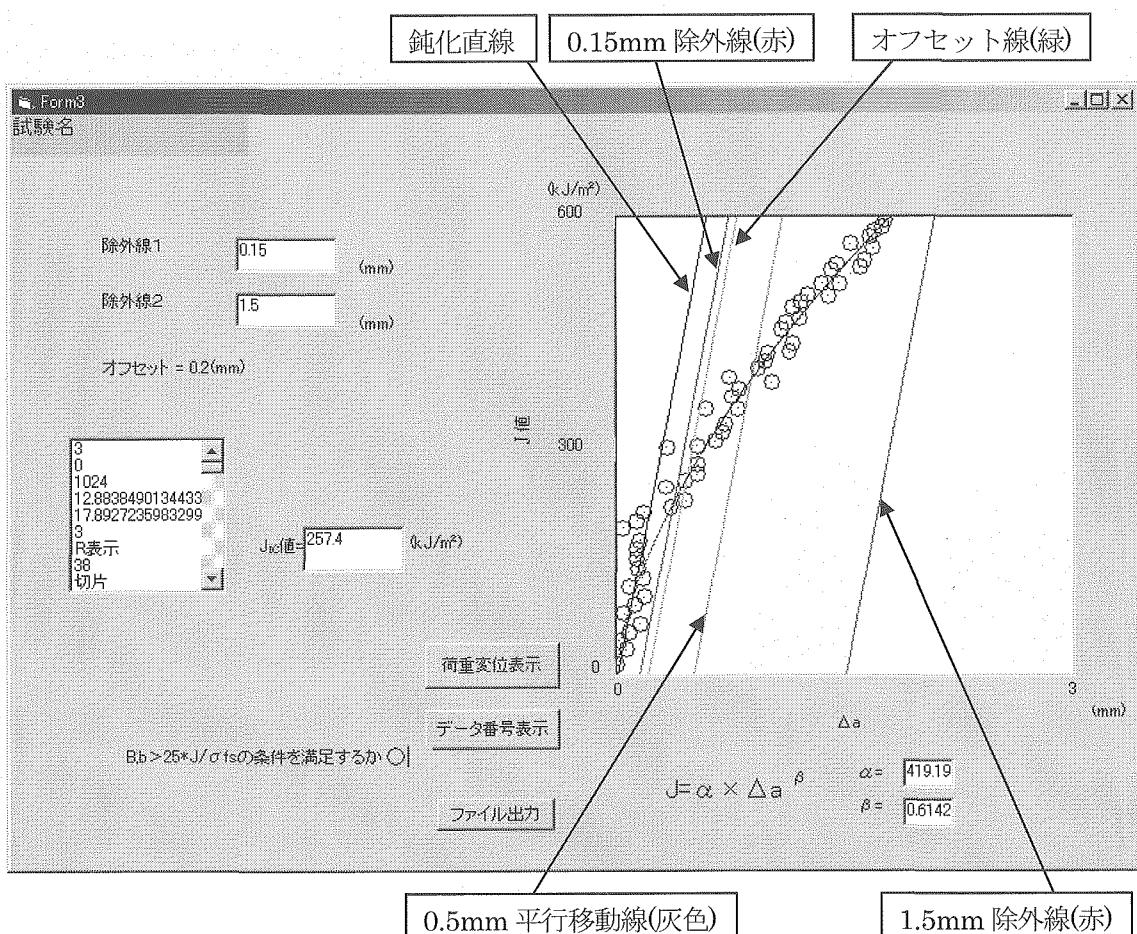


Fig.A.9 J 積分値 - Δa のプロット図および J_{IC} の表示画面

A. 6 非正規データの削除機能

試験中明らかにイレギュラーなデータがプロットされる場合があり、依頼者側よりそのデータを取り除いた解析値を求められることから、任意のデータを削除する機能を付加した。

まず、Fig.A.9 のデータ番号表示のボタンをクリックし、プロットされたデータの対応番号を表示する。削除するデータの対応番号を確認し、次に Fig.A.8 の画面においてデータ削除ボタンをクリックし、非正規データを削除する。なおこの非正規データの削除は番号の大きいものから入力する必要がある。

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル毎秒	m^{-1}
密度(質量密度)	キログラム每立法メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア每平方米メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア每メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル每立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ每平方メートル	cd/m^2
屈折率	(数の)	1
		1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アトト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
圧力	ニュートン	N	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	$N \cdot m$
功率、放熱束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$N \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
コンダクタンス	ジemens	S	V/A
磁束密度	テスラ	T	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
インダクタンス	ヘンリ	H	$V \cdot s$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	Wb/m^2
照度	ルーメン	lm	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
(放射性核種)の放射能	ベクレル	Bq	Wb/A
吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマ	グレイ	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個	シーベルト	Sv	J/kg
人線量当量、組織線量当量			$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際にには、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は示されない。

(c) 制光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートンメートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方米	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール每ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー	ジュール每ケルビン	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
(比エネルギー)	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量	グレイ	Gy	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每メートル	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表6. 國際単位系と併用されるが國際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 國際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 國際単位系に属さないが國際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アーレル	ル	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボア	P	1 P=1 dyn · s / cm ² =0.1Pa · s
ストップス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホタル	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 國際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	IX unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャニスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W · m ⁻² · Hz ⁻¹
フェルミ	fermi	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	Torr	1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁷ kg
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
力口リ	cal	1 cal=10 ⁴ J
ミクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m