

高速炉構造材料のクリープ疲労き裂伝播に 関する試験研究・総合報告

<契約件名：高速炉構造材料の疲労き裂進展挙動特性に関する試験研究(IV)>

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1987年2月



社団法人 日本溶接協会
原子力研究委員会
F C C 小委員会

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配付するものです。従って、その取扱には十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。また今回の配布目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料についての問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4001

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

技術開発部・技術管理室

配 布 限 定
PNC SJ2534 87-002(2)
JWES-AE-8706
1987年2月

高速炉構造材料のクリープ疲労き裂伝播に 関する試験研究・総合報告

(独)日本溶接協会
原子力研究委員会
F C C 小委員会
主 査 朝 田 泰 英*

要 旨

この報告書は動力炉・核燃料開発事業団からの委託により昭和58年度から61年度の4年間にわたり実施した「高速増殖炉高温構造材料のクリープ疲労き裂伝播挙動に関する試験研究」の成果を取りまとめたものである。本試験研究の目標は高速炉高温機器の構造健全性評価を行うための破壊力学的手法を策定することであり、第一の目的はLMFBR用高温材料についてクリープ疲労き裂伝播データを蓄積するための標準試験法を提案すること、第二の目的はLMFBR高温機器の構造健全性評価に用い得る適切な破壊力学パラメータの抽出にある。

これらの目的に沿い、304ステンレス鋼について550～650℃の温度域での種々の負荷条件に対するき裂挙動を実験的、解析的に検討した。クリープ、疲労き裂伝播試験結果をもとに、実験的、解析的に詳細評価を行った。4年間活動の主なテーマを要約して示せば以下の通りである。

- ① 疲労、クリープ、及びクリープ疲労き裂伝播試験の実施
- ② 上記実験結果の例について弾塑性クリープ解析の実施
- ③ 将来のデータ蓄積のための標準的試験方法の検討
- ④ 高温機器に適用し得る塑性及びクリープ変形を考慮した破壊力学パラメータの非弾性有限要素解析法の開発
- ⑤ 実験及び解析結果の評価

4年間の活動の成果は以下のように要約できる。

- a. 304ステンレス鋼のLMFBR温度域におけるクリープ疲労き裂伝播挙動はJ積分を用いることにより現状では最っとも良く評価できることを明らかにした。

本報告書は、(社)日本溶接協会が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：610D015

事業団担当者：二瓶 勲(大洗工学センター機器構造開発部材料開発室)

*：東京大学 工学部機械工学科

- b. J積分を疲労J積分範囲とクリープJ積分範囲に分割することにより、クリープ疲労き裂伝播挙動の繰返しおよび時間依存挙動を記述できることを明らかにした。
- c. 疲労J積分範囲とクリープJ積分範囲を有限要素法による非弾性解析により求めた値は実験値と良好な一致を示すことを明らかにした。
- d. 将来のデータ蓄積のための標準試験法を提案した。
- e. 高温構造的な疲労およびクリープJ積分範囲非弾性解析の手法が提案された。
- f. 上記の成果に基づき LMFBR 高温構造物の健全性評価手法を将来提案するに必要な基盤が整備された。

本試験研究は動力炉・核燃料開発事業団の委託により(株)日本溶接協会 原子力研究委員会 FCC小委員会で昭和58～61年度の4年間にわたり実施された。FCC小委員会は、この間委託者より終始適切な指導と支援を受けたことについて厚く感謝する。又、各委員の献身的協力を深謝する。

**Creep-Fatigue Crack Propagation Behavior of
Structural Materials for LMFBR (General Report)**

Yasuhide Asada*, Chairman
FCC Subcommittee
Japan Welding Engineering Society

A b s t r a c t

This report describes the activities of the four year project on Creep-Fatigue Crack Propagation Behavior of Structural Materials for LMFBR (I ~ IV). The project intended to give a base for the future development of the fracture mechanics approach for an integrity assessment of high temperature components of LMFBR. The first purpose of the project is to give a standard test technique for accumulating creep-fatigue crack propagation data of LMFBR materials at high temperatures. The second purpose is to give a selection of fracture mechanics parameters suitably available in the integrity assessment of high temperature components in LMFBR.

For these purposes, experimental and numerical studies were developed with 304 stainless steel at high temperatures of 550-650°C under a various loading conditions. The results on creep-fatigue crack propagation studies were subjected to examinations based on further detailed experimental and numerical analyses. Following items are main topics of 4 year project activities.

- ① fatigue, creep and creep-fatigue crack propagation experiments
- ② elastic-plastic-creep FEM analyses with examples obtained in the experiments
- ③ examination and development efforts for a standard test technique for future data accumulation activities
- ④ development of inelastic FEM analysis techniques for numerical computation of the fracture mechanics parameters of plasticity and creep in high temperature components
- ⑤ evaluation of experimental and numerical works for future developments

The achievements of the 4 year project are summarized as following.

- a. The J integral is most reasonable at present state of the art for evaluation of creep-fatigue crack propagation behavior of 304 steel at LMFBR temperatures.
- b. A separating use of the J integral into the fatigue J integral and the creep J integral is available to describe the cycle-dependent and time-dependent behavior of creep-fatigue crack propagation.
- c. The fatigue J integral and the creep J integral are able to be computed with a finite element elastic-plastic-creep analyses which can give their values well coinciding with experimental values.
- d. A standard test technique was proposed for a future data accumulation.
- e. A methodology was proposed for computational evaluation of the fatigue and creep J integrals in high temperature components of LMFBR.
- f. Above results can give a base for further proposal of a system for the integrity assessment techniques of high temperature components of LMFBR.

The project was conducted by the FCC Subcommittee of the Japan Welding Engineering Society in 1983-1986 fiscal years under a contract with the Power Reactor and Nuclear Fuel De-

Work performed by The Japan Welding Engineering Society under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison: Isao Nihei (Materials Development Section, Systems and Components division, OARAI Engineering Center)

*: University of Tokyo, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering

velopment Corporation. The committee expresses its full thanks to a reasonable leadership and co-operation of the PNC given to the project activities during past four years. The chairman of the committee would like to express his gratitudes to all of the committee members for their devotional collaborations to the committee activities.

昭和61年度FCC小委員会名簿

	氏名	所属	住所
主査	朝田泰英	東京大学工学部機械工学科教授	113 文京区本郷7-3-1 03-812-2111 (内) 6275
副主査	結城良治	東京大学生産技術研究所助教授	106 港区六本木7-22-1 03-402-6231 (内) 2114
幹事	古平恒夫	日本原子力研究所 高温工学部 高温材料強度研究室主任研究員	319-11 那珂郡東海村 0292-82-5074
〃	北川正樹	石川島播磨重工業(株) 技術研究所金属材料部課長	135 江東区豊洲3-1-15 03-534-3387
〃	島川貴司	川崎重工業(株)原子力本部 技術部解析技術課	136 江東区南砂2-4-25 03-615-5165
中立委員	矢川元基	東京大学工学部原子力工学科教授	113 文京区本郷7-3-1 03-812-2111 (内) 6993
〃	小林一夫	金属材料技術研究所 疲れ試験部 第三研究室	153 目黒区中目黒2-3-12 03-719-2271 (内) 367
〃	新田明人	(財)電力中央研究所 狛江研究所 原子力部材料研究室主査研究員	201 狛江市岩戸北2-11-1 03-480-2111 (内) 467
会社委員	野中勇	石川島播磨重工業(株) 技術研究所金属材料部	135 江東区豊洲3-1-15 03-534-3392
〃	長渡甲太郎	川崎重工業(株)原子力本部 開発部開発試験課長	210 川崎市川崎区桜本 2-32-1 044-288-5351
〃	池本喜和	川崎重工業(株)技術研究所 溶接・加工研究室	650 神戸市中央区東川崎町 3-1-1 078-671-5001 (内) 3442
〃	松崎明博	川崎製鐵(株)鉄鋼研究所 厚板研究部厚板研究室主任研究員	260 千葉市川崎町1 0472-62-2446
〃	横幕俊典	(株)神戸製鋼所 鉄鋼技術センター 鉄鋼材料研究室主任研究員	651 神戸市中央区脇浜町 1-3-18 078-251-1551 (内) 2149
〃	高島弘教	新日本製鐵(株) 第二技術研究所 部長研究員	229 相模原市淵野辺5-10-1 0427-54-2111 (内) 582
〃	永田三郎	住友金属工業(株) 鋼管技術部主任部員	100 千代田区大手町1-1-3 03-282-6171
〃	時政勝行	住友金属工業(株)総合技術研究所 強度研究室主任研究員	660 尼崎市西長洲本通1-3 06-401-6201 (内) 332
〃	尾崎哲	(株)東芝 原子力事業本部 原子力技術研究所課長	235 横浜市磯子区新杉田8 045-756-2372

	氏 名	所 属	住 所
会社委員	宇 野 哲 老	(株) 東芝 原子力事業本部 原子力材料化学技術部主査	235 横浜市磯子区新杉田 8 045-756-2115
”	平 瀬 欣 弘	日本鋼管(株) 中央研究所 第一材料研究部強度研究室	210 川崎市川崎区南渡田町 1-1 044-355-1111 (内) 2184
”	吉 武 明 英	日本鋼管(株) 中央研究所 第二材料研究部環境材料研究室	210 川崎市川崎区南渡田町 1-1 044-355-1111 (内) 2846
”	本 間 亮 介	(株) 日本製鋼所 鉄鋼重機事業本部 技術部電力・原子力担当部長	100 千代田区有楽町 1-1-2 03-501-6165
”	長 井 史 朗	(株) 日本製鋼所 鉄鋼重機事業本部 技術部	100 千代田区有楽町 1-1-2 03-501-6165
”	岩 館 忠 雄	(株) 日本製鋼所 室蘭製作所 鉄鋼研究部長	051 室蘭市茶津町 4 0143-22-9211 (内) 3000
”	田 中 泰 彦	(株) 日本製鋼所 室蘭製作所 鉄鋼研究部	051 室蘭市茶津町 4 0143-22-9211 (内) 3016
”	宇佐美 三 郎	(株) 日立製作所 機械研究所 第三部主任研究員	300 土浦市神立町502 0298-31-5111 (内) 2483
”	佐 藤 善 美	(株) 日立製作所 機械研究所 第三部研究員	317 日立市幸町 3-1-1 0294-21-1111 (内) 2226
”	榎 田 義 勝	(株) 日立製作所 日立工場 原子力開発部開一設技師	317 日立市幸町 3-1-1 0294-21-1111 (内) 3364
”	中 島 力	富士電機(株) 原子力統括部 品質保証部長	210 川崎市川崎区田辺新田 1-1 044-333-7111 (内) 2401
”	山 下 満 男	(株) 富士電機総合研究所 基礎研究所副主任研究員	240-01 横須賀市長坂 2-2-1 0468-56-1191 (内) 342
”	遠 藤 忠 良	三菱重工業(株) 高砂研究所 材料強度研究室長	676 高砂市荒井町新浜 2-1-1 0794-442-2121(内) 4310
”	佐 近 淑 郎	三菱重工業(株) 高砂研究所 材料強度研究室主任	676 高砂市荒井町新浜 2-1-1 0794-442-2121(内) 4313
”	瀬戸口 克 哉	三菱重工業(株) 長崎研究所 強度研究室長	850-91 長崎市飽の浦町 1-1 0958-28-7090
”	田 北 勝 彦	三菱重工業(株) 長崎研究所 強度研究室	850-91 長崎市飽の浦町 1-1 0958-28-7092
”	紀 博 徳	三菱重工業(株) 名古屋研究所 材料・化学研究室主務	453 名古屋市中村区岩塚町 052-413-0993

	氏 名	所 属	住 所
委託者側 委 員	二 瓶 勲	動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター機器構造開発部 材料開発室長	311-13 東茨城郡大洗町成田町4002 0292-67-4141 (内) 360
〃	和 田 雄 作	動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター機器構造開発部 材料開発室副主任研究員	311-13 東茨城郡大洗町成田町4002 0292-67-4141 (内) 374
〃	青 砥 紀 身	動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター機器構造開発部 材料開発室	311-13 東茨城郡大洗町成田町4002 0292-67-4141 (内) 383
〃	斉 藤 正 雄	動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター機器構造開発部 材料開発室	311-13 東茨城郡大洗町成田町4002 0292-67-4141 (内) 383
〃	斎 藤 利 之	動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター機器構造開発部 構造工学室	311-13 東茨城郡大洗町成田町4002 0292-67-4141 (内) 353
〃	久保田 淳	動力炉・核燃料開発事業団 動力炉研究開発本部プラント技術 開発グループ副主任研究員	107 港区赤坂1-9-13 三会堂ビル 03-586-3311
事 務 担 当 者	嵯 峨 敬	(社)日本溶接協会 事業二課主任	101 千代田区神田佐久間町 1-11 03-257-1521
〃	小野沢 昭 一	(社)日本溶接協会 事業二課	101 千代田区神田佐久間町 1-11 03-257-1521

総合報告書執筆者氏名

朝	田	泰	英	(東京大学)
結	城	良	治	(")
古	平	恒	夫	(日本原子力研究所)
松	原	雅	昭	(財電力中央研究所)
北	川	正	樹	(石川島播磨重工業株)
野	中		勇	(")
島	川	貴	司	(川崎重工業株)
岡			裕	(川崎製鐵株)
横	幕	俊	典	(株神戸製鋼所)
高	島	弘	教	(新日本製鐵株)
田	中	健	一	(住友金属工業株)
尾	崎		哲	(株東芝)
田	中	信	彦	(")
吉	武	明	英	(日本鋼管株)
宇	佐	美	三	(株日立製作所)
山	下	満	男	(株富士電機総合研究所)
近	藤	良	之	(三菱重工業株)
紀		博	徳	(")

目 次

1. 緒 言	3
2. 破壊力学パラメータの選択	7
2.1 各種条件下でのき裂伝播特性の一義的表現能力	7
2.1.1 疲労き裂伝播における各種パラメータの比較	7
2.1.2 クリープ疲労き裂伝播における各種パラメータの比較	8
2.1.3 クリープき裂伝播における各種パラメータの比較	8
2.1.4 一義的表現能力の総合比較	8
2.2 構造物への適用性の検討	9
2.3 まとめ	9
3. 標準試験法	19
序	19
3.1 まえがき	20
3.1.1 目 的	20
3.1.2 試験方法の概要	20
3.1.3 意 義	21
3.1.4 その他の注意事項	22
3.2 用語の説明と記号の意味	22
3.2.1 用語の説明	22
3.2.2 記号の意味	26
3.3 試験方法	29
3.3.1 試験装置	29
3.3.2 試験片	33
3.3.3 測定項目	36
3.3.4 試験手順	37
3.4 試験結果の取り扱い	40
3.4.1 パラメータの選択	40
3.4.2 K , J , J' の計算	40
3.4.3 ΔJ_f の評価	44
3.4.4 ΔJ_c の評価	47
3.4.5 き裂伝播速度の計算方法	50
3.5 報 告	51
3.5.1 報告書に記載すべき事項	51
3.5.2 報告書に記載することが望ましい事項	52

4. 標準試験法の解説	77
4.1 まえがき	77
4.2 用語の説明と記号の意味	77
4.3 試験方法	77
4.3.1 試験装置	77
4.3.2 試験片	90
4.3.3 測定項目	91
4.3.4 試験手順	98
4.4 試験結果の取り扱い	101
4.4.1 パラメータの選択	101
4.4.2 K , J , J' の計算	101
4.4.3 ΔJ_I の評価	104
4.4.4 ΔJ_C の評価	108
4.4.5 き裂伝播速度の計算方法	111
4.5 報告	111
5. FBR温度におけるき裂伝播データ	115
5.1 クリープき裂伝播特性	115
5.2 疲労き裂伝播特性	115
5.3 荷重制御クリープ疲労き裂伝播特性	115
5.4 変位制御クリープ疲労き裂伝播特性	115
5.5 クリープの影響の顕著な領域でのクリープ疲労き裂伝播特性	116
5.6 繰返し数依存型き裂伝播特性に及ぼす予き裂導入法の影響	116
5.7 まとめ	117

List of Figures

Fig. 2.1.1-1	Comparison of the relationship between fatigue crack propagation rates (da/dN) and various fracture parameters	10
Fig. 2.1.1-2	Comparison of $da/dN-\Delta K$ relation and $da/dN-\Delta J$ relation of various specimen shapes and specimen sizes	12
Fig. 2.1.1-3	Effect of gauge length for load line displacement measurement on da/dN relation	13
Fig. 2.1.2-1	Creep and creep-fatigue crack growth characteristics of SUS 304 at 650°C and at 550°C: (da/dN) _c is the amount of crack growth accelerated by hold time	14
Fig. 2.1.2-2	Relation between crack propagation rate and J-integral range ΔJ_c with and without the collection for the ligament creep deformation during the hold time (SUS 304, 650°C)	15
Fig. 2.1.3-1	Comparison of relationships between creep crack growth rates (da/dt) and various fracture parameters	16
Fig. 3.2.1-1	Center cracked tension specimen (CCT)	27
Fig. 3.2.1-2	Compact type specimen (CT)	27
Fig. 3.2.1-3	Loading pattern	27
Fig. 3.2.1-4	Load vs. load-line deflection hysteresis loops of CT specimen under slope line control	28
Fig. 3.3.1-1	Clevis design for CT specimen	31
Fig. 3.3.1-2	Schematic example of fixturing techniques for CCT specimen designs	31
Fig. 3.3.1-3	Example of extensometer for load line deflection measurement for CT specimen	32
Fig. 3.3.1-4	Example of extensometer for CCT specimen (1)	32
Fig. 3.3.1-5	Example of extensometer for CCT specimen (2)	32
Fig. 3.3.2-1	CT specimen	35
Fig. 3.3.2-2	CCT specimen	35
Fig. 3.3.2-3	Machined notch	35
Fig. 3.3.4-1	Flow chart of test procedure	39
Fig. 3.4.2-1	Definition of area S_p on CCT specimen	43
Fig. 3.4.2-2	Definition of area S_p on CT specimen	43
Fig. 3.4.3-1	Definition of energy S_p for CT specimen and CCT specimen	46
Fig. 3.4.4-1	Definition of energy S_c for CT specimen and CCT specimen	49
Fig. 4.3.1-1	Photograph method	83

Fig. 4.3.1-2	Schematic diagram of the DC potential system	84
Fig. 4.3.1-3	Comparison between calibrated equations and fatigue crack growth tests	84
Fig. 4.3.1-4	AC potential drop method (CCT specimen)	85
Fig. 4.3.1-5	Calibration curve for crack length prediction	85
Fig. 4.3.1-6	Block diagram of AC potential equipment	86
Fig. 4.3.1-7	Normalized potential change vs. crack growth	86
Fig. 4.3.1-8	A record of AC potential change	87
Fig. 4.3.1-9	Variation with cycles of electrical potential	87
Fig. 4.3.1-10	Calibration curve between compliance and crack length	88
Fig. 4.3.1-11	Relationship between crack length and compliance change	88
Fig. 4.3.1-12	Computerized instrumentation system	89
Fig. 4.3.2-1	Example of CT specimen	92
Fig. 4.3.2-2	Example of CCT specimen (1)	93
Fig. 4.3.2-3	Example of CCT specimen (2)	94
Fig. 4.3.2-4	Side groove	95
Fig. 4.3.2-5	$da/dN \sim \Delta J_C$ relation in tension hold test using side grooved specimen	95
Fig. 4.3.2-6(a)	Relationship between da/dN and ΔJ_f (CT specimen)	96
Fig. 4.3.2-6(b)	Relationship between da/dN and ΔJ_f (CCT specimen)	96
Fig. 4.3.2-7	Relationship between S_p and number of cycles	97
Fig. 4.4.3-1	Comparison between simplified method and path integration method of J-integral evaluation	106
Fig. 4.4.3-2	Comparison between ΔJ_5 and ΔJ_{25}	106
Fig. 4.4.3-3	Crack closure point and crack opening point on the load versus load line displacement curve	107
Fig. 4.4.3-4	Comparison between ΔJ -integral calculated from crack closure point and ΔJ -integral calculated from crack opening point	107
Fig. 4.4.4-1	Comparison between ΔJ_{C5} and ΔJ_{C25}	110
Fig. 4.4.4-2	Comparison between simplified method and path integration method of J' -integral evaluation	110
Fig. 4.4.5-1	Fairing method of measured crack length	112
Fig. 4.4.5-2	Comparison of da/dN vs. ΔK relations obtained by three methods	112
Fig. 5.1-1	Relationship between da/dt and J' at 550°C	118

Fig. 5.1-2	Relationship between da/dt and J' at 550°C and 650°C	118
Fig. 5.2-1	da/dN vs. ΔJ_f relation	119
Fig. 5.3-1	Relation between da/dN and ΔJ_f	119
Fig. 5.4-1	Temperature effects on fatigue crack growth behavior of SUS304 steel	120
Fig. 5.4-2	Hold time effects on fatigue crack growth behavior at 550°C	120
Fig. 5.4-3	Relationships between da/dN and ΔJ_f	121
Fig. 5.5-1	Relation between da/dN and ΔJ_c	121
Fig. 5.5-2	Relation between da/dN and ΔJ_c	122
Fig. 5.6-1	da/dN vs. ΔJ_f relation	122

1. 緒 言

1. 緒 言

本試験研究の目的は高速炉高温機器構造の健全性評価に適用し得る破壊力学的手法の開発を行うことにあり、昭和58年度に開始された。本年度試験研究はその最終年度にあたる。

原子力機器の構造健全性評価に当っては、通常、次の手順がとられる。

- a. 欠陥の想定（位置、寸法、形状等）
- b. 想定された欠陥の成長速度の予測（通常の運転負荷による場合とし、事故荷重による成長は除く）
- c. 成長した欠陥による不安定破壊発生の有無の確認

以上の手順を通して、プラント寿命中に破局的な最終不安定破壊が生じないことを確認し、あるいは、寿命中にプラントを停止して、不安定破壊に連る欠陥の成長を防止する方策がとられる。

高速炉の建設状況から考えて、早い時期にこの手順による構造健全性の確認が可能な具体的手順の策定が望まれるが、軽水炉における経験を直接適用し難い点は、高速炉においては軽水炉より高温で使用されるため、その高温機器においてはクリープ変形が生じること、及び、冷却材としてNaを用いることから、大きな過度的熱負荷が生じることであり、この2点が最も影響を及ぼす項目として、前記手順中の想定欠陥の成長速度予測が挙げられ、この点で、軽水炉において提案された手法に対する代替法を用意する必要がある。

クリープ温度域における欠陥の成長については、世界的にみてデータの蓄積が少なく、かつ、試験も少ない。したがって、高速炉高温機器の構造健全性評価の基礎として使用し得る十分なデータが存在しない。これを充足することが先ず必要であるが、この為には、どのような方法の試験を行えば合目的なデータが得られるかを明らかにしておく必要があり、更に、このデータを用いて実際の機器構造の健全性評価を行う架橋としての破壊力学パラメータの策定がある。同時に、この破壊力学パラメータは高温における欠陥の成長速度に対する諸挙動を記述できるものである必要がある。それは、クリープ温度域においては欠陥の成長速度が負荷の時間的性質に関係してくることが予測されるからである。

以上の経過より、問題を高速炉構造材料のクリープ温度域におけるクリープ・疲労き裂伝播問題として把握し、その基礎的知見を得る試験研究を開始したが、その目標として、

- ① 高速炉高温機器の構造健全性評価に使用し得るクリープ・疲労き裂伝播挙動を適切に把握し得る標準試験方法の策定
- ② 暫定的に適切と考えられた試験法によるクリープ・疲労き裂伝播試験の実施とデータの蓄積
- ③ クリープ・疲労き裂伝播挙動を記述するための最適な破壊力学パラメータの策定
- ④ 以上に基づく高速炉高温機器の構造健全性評価手法の策定

以上を要約すると、この4年度にわたる試験研究において期待される最終成果として

- a. 高速炉高温機器構造の健全性評価手法の提案が可能であること。

- b. 上記手法を構成するシステムの提案が可能であること
- c. 上記システム構成の妥当性を示すデータの蓄積があること

この成果目標に到達するために、4年度にわたる試験研究で採用した具体的目標は次の2項目である。

- ① 繰返し負荷を受ける高温構造において、き裂の幾何学的性質ならびにき裂先端近傍における応力、歪場が明らかな時、き裂進展速度と一対一対応を持つ破壊力学パラメータを見出すこと。これが困難な場合でも、現在提案されている破壊力学パラメータとき裂進展速度との対応関係を明らかにしておくこと。
- ② 上記①を支持する裏付けデータを蓄積し、かつ、データ蓄積に必要な試験の方法を確立し標準化しておくこと。

この目的に沿って、4年度にわたり実施した項目を要約すれば以下のようなになる。

- a. 現在提案されている破壊力学パラメータのうち、高温で非弾性変形の繰返し負荷に対し適用可能なものを検討する。
- b. 上記aの破壊力学パラメータについて、実構造物の健全性評価に適用可能なものを検討する。
- c. 上記a, bの項目のうち、文献等による調査では不明な点について、実験的、解析的検討の実施
- d. 上記cを実施するに当たっての実験方法についての調査検討
- e. 上記cの実施を検討するに当たっての解析的検討による支援
- f. 各種条件下においての実験の実施
- g. 実験の方法、結果、破壊力学パラメータ等の適切さを評価するための解析的検討

以上の検討結果得られた知見は次のとおりである。

- ア. クリープ・疲労き裂伝播挙動を記述する破壊力学パラメータとしては、J積分が妥当であり、これを疲労J積分とクリープJ積分に分離評価する方法が妥当である。
- イ. 疲労J積分とクリープJ積分を用いることにより、クリープ疲労き裂伝播挙動における時間依存性を記述することが可能であり、かつ、疲労き裂伝播およびクリープき裂伝播挙動より、予測することができる。
- ウ. き裂体の弾塑性・クリープ解析を行うことにより、疲労J積分とクリープJ積分を実用上良好な精度で予測することができる。
- エ. 以上の成果に基づき、クリープ疲労き裂伝播データ蓄積の為に標準試験法の策定を行った。
- オ. 以上の成果に基づき、高温構造に存在するき裂の疲労J積分とクリープJ積分を解析的に予測することが可能となった。

尚、この4年度にわたる試験研究の実施にあたり、委託者である動力炉・核燃料開発事業団より、終始適切な御指導と御支援を受けたことを、ここに記し、厚く感謝する。

2. 破壊力学パラメータの選択

2. 破壊力学パラメータの選択

高温において構造物の健全性を評価するために破壊力学の適用研究がなされているが、構造物の健全性評価のために適当な破壊力学パラメータの選択が必要である。設計に使用可能であるために要求される破壊力学パラメータに対する条件として

- ① 各種荷重条件下でのき裂伝播特性を一義的に表現できること
(試験片形状, 負荷荷重条件等試験方法に対する独立性)
(FBRの高温状態で適用可能なこと)
- ② 適用する構造物の一般的雑多な形状に対するパラメータ値が容易に求まること
(経済性, 迅速性, 結果の精度等)

などがあげられる。この他、実験の容易さとか低温でのパラメータである K との連続性などの問題もあるが、ここでは上記二点がより重要であると考えて特に第1項の要求に重点をおいて検討を行った。

材料のき裂伝播特性の一義的表現能力の比較検討のためには、SUS304鋼を供試材とし、650°Cおよび550°Cにて疲労き裂伝播およびクリープ疲労き裂伝播、クリープき裂伝播実験を行った。それぞれの試験では、負荷荷重レベルや試験片形状、負荷制御方法などをパラメータとして変化させて実験を行い、比較対象に選んだ各破壊力学パラメータでき裂伝播特性を一義的に評価できるかどうかについて検討した。

パラメータ値の求め方の容易性の検討のためにその一段階として、実験に用いた試験片に対する破壊力学パラメータの計算を有限要素法やKumarら提案の簡易式を用いておこなった。

2.1 各種条件下でのき裂伝播特性の一義的表現能力

2.1.1 疲労き裂伝播における各種パラメータの比較

疲労き裂伝播特性用として検討した破壊力学パラメータは

$$\Delta K, \Delta K_{\text{eff}}, \Delta K_e, \Delta J$$

である。Fig. 2.1.1-1~2.1.1-2に示すように、全てのデータを最も一義的に整理できるのは、 $da/dN - \Delta J$ 関係であり、試験片形状や負荷荷重レベル、負荷制御方法など実験条件をいろいろ変化した実験結果を約2倍以内の狭い一本の分布帯で近似できることを確認した。一方、それ以外のパラメータで整理すると特に試験片形状によって異なる結果となる。例えば、 ΔK_{eff} など小規模降状条件下では有効であることがわかっているパラメータでも、高温でしかもひずみの大きな領域における破壊力学パラメータとしては好ましくないことを確認した。

J積分値を実験によって求めるのにはき裂荷重線変位の値が必要であるが、特にCCTタイプの試験片の場合に測定に注意が必要である。CCTタイプの試験片で荷重線変位を測定する時に用いるゲージ長さとしてはき裂長さと同じ位小さい値が必要で、例えば初期き裂が(一般によく使われる)2~3mmではゲージ長さは5mm程度が好ましく、5mmゲージで測定した ΔJ で整理したき裂伝播特性はFig. 2.1.1-3にその一例を示すように試験方法によらず一義的にき裂伝播特性を決めることができることを確認できた。同様のゲージ長さ効果は下記のク

クリープき裂伝播実験についても正しいことを実験と解析の両面から確認している。

2.1.2 クリープ疲労き裂伝播における各種パラメータの比較

クリープ疲労き裂伝播特性用として検討されたパラメータは

$$\Delta K, \Delta K_{\text{eff}}, \text{ および } \Delta J_f, \Delta J_c$$

である。

クリープ疲労き裂伝播の実験は 650°C および 550°C にて行い、それぞれ保持時間を最大 1 時間および 5 時間まで変化させて行った。650°C では 10 分ほどの短時間の実験でも破面は粒界型の破面であった。この傾向は荷重制御型試験で顕著であり、550°C ではより長時間の保持時間で粒界破面が観察された。破面の様子や $\Delta J_c / \Delta J_f$ の比から判断して今回の共同研究の実験の範囲が時間依存性のクリープ疲労き裂伝播挙動を含んだ条件下で計画されていることを確認している。

各種パラメータで整理したクリープ疲労き裂伝播特性の例を Fig. 2.1.2-1 に示す。共同研究の当初では実験データのばらつきも 5 倍程度と大きかった。例えば、550°C のデータでは 1 時間の保持で $\Delta J_c / \Delta J_f$ の比が 0.015 と小さく、かつ、き裂伝播速度が小さい領域であったため、き裂長さ測定精度上の困難さも伴ってデータのばらつきがでた。また、650°C では CCT 試験片の試験結果が CT 試験片による試験結果より見かけ上き裂伝播速度の小さい側にプロットされる傾向にあったが、これは 650°C ではクリープ変形しやすいので CCT 型試験片で負荷条件によっては荷重線変位の測定結果にリガメント部分のクリープ変形が加算されていたために見かけ上 ΔJ_c が大きくでてきたために起こった現象であろうと考えられている。クリープ成分を Norton 則によって推測して ΔJ_c を修正すると他のデータともかなりよく一致することが確認された (Fig. 2.1.2-2)。

以上の結果より時間依存性のクリープ疲労き裂伝播特性は大路らや大谷らの提案のように ΔJ_c でよく近似出来ることが確認された。

2.1.3 クリープき裂伝播における各種パラメータの比較

クリープき裂伝播挙動は試験片形状および負荷荷重レベルを変化させた実験結果をもとにパラメータの比較検討を行った。比較の対象になったパラメータは

$$\sigma_{\text{net}}, K, J' \text{ (または } C^*)$$

である。

da/dN とこれらのパラメータとの比較結果の一例を Fig. 2.1.3-1 に示すが、 K や σ_{net} で整理すると荷重条件や試験片形状によって異なった特性が得られ、クリープき裂伝播特性を一義的に決められない。

一方、 J' で整理するとばらついていたデータがかなりよく一致して、しかも上記のクリープ疲労き裂伝播の時間依存性き裂伝播特性ともよく一致することが確認された。

2.1.4 一義的表現能力の総合比較

以上の結果を総合的に判断すると、高温での非弾性ひずみが顕著に現れる領域でのき裂伝播

の材料特性を表現するパラメータとしてはJ積分値が最も適したパラメータであるといえる。

2.2 構造物への適用性の検討

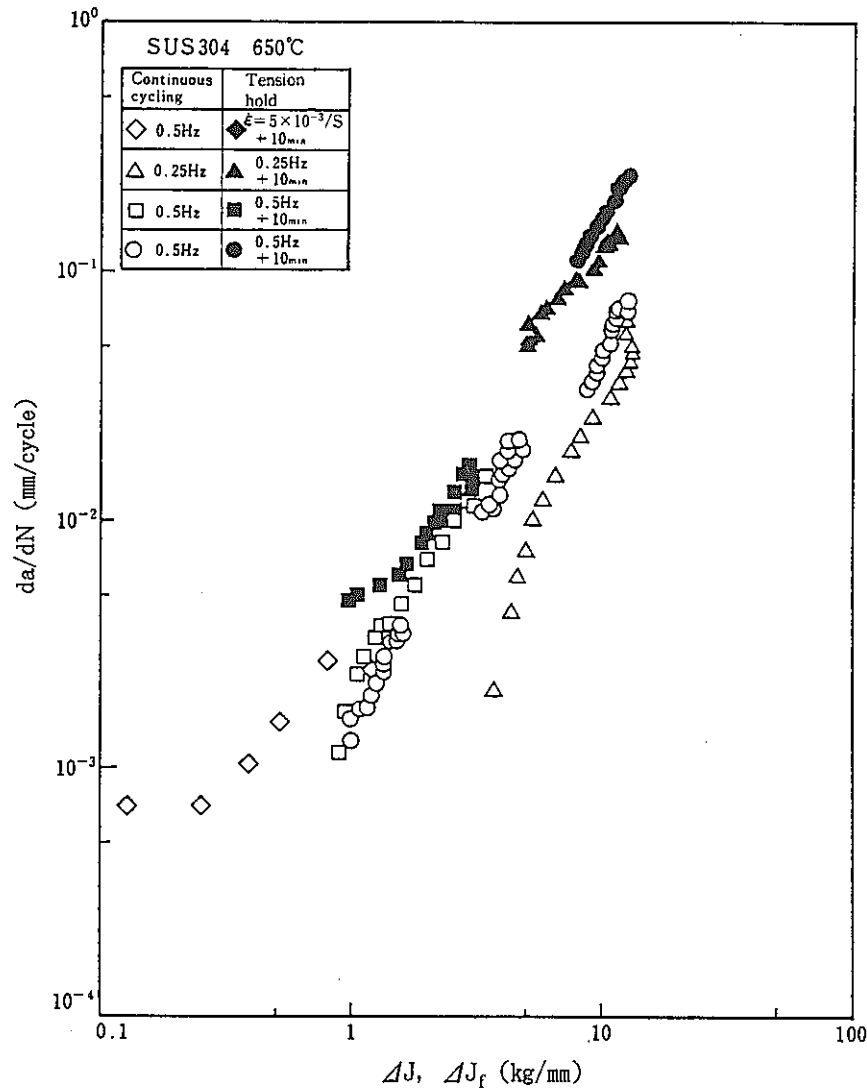
従来、破壊力学が構造健全性に適用されたのは温度の低い領域であったが、そこでは主に応力拡大係数Kが用いられてきた。そのため、各種のき裂形状や機器形状に対してKの値が表やグラフ、計算式の形で与えられてきている。しかし、Jについては未だ十分な簡易的方法がないのが現状である。実機の複雑な形状のJ積分を求めるには現状ではかなりおおがかりなFEMによる計算が必要である。仮に計算できたとしても計算の途中で採用された仮定の正しさ等についての検討が現段階では十分であるとはいいがたい。

材料強度上、き裂伝播を一義的に評価できるパラメータとしてJ積分または修正J積分、J積分範囲が現時点で最も有効なパラメータであることは実験結果より明らかになった。しかし、実機への適用を考えるともっと解析面での手法の開発が必要である。本共同研究では、FEMによる詳細解析と平行して簡易法の一方法としてKumarら提案の簡易評価式の適用性を検討したが、試験片レベルでは荷重があまり大きくない範囲でかなり精度よくJ積分値を計算によって求められることを確認出来た。今後同様の簡易評価式が開発されて行かねばならない。

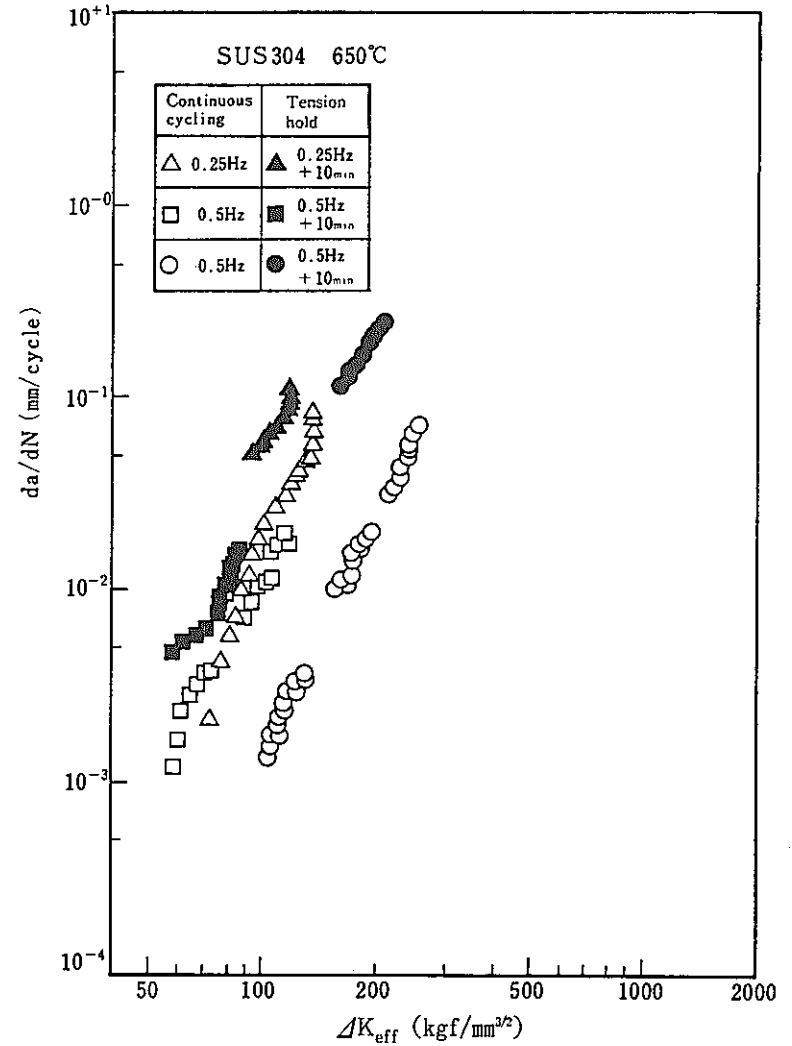
さらに、適用上の問題点として、熱応力をうける場合のJ積分値の評価、多軸応力や温度変動下のき裂伝播挙動に及ぼす影響の研究など今後実用化にむけて行われなければならない課題である。

2.3 まとめ

材料強度の観点から高温での繰り返し数依存型および時間依存型のき裂伝播特性を最もよく表現できる破壊力学パラメータはJ積分値であることがわかる。しかし、これを実機へ適用してゆくには実機の複雑な形状に対するJ積分値を現状より容易に求めることができる簡易法の開発が重要でそれらが開発されればJ積分値を用いた構造物の健全性評価手法が大きく進歩すると考えられる。

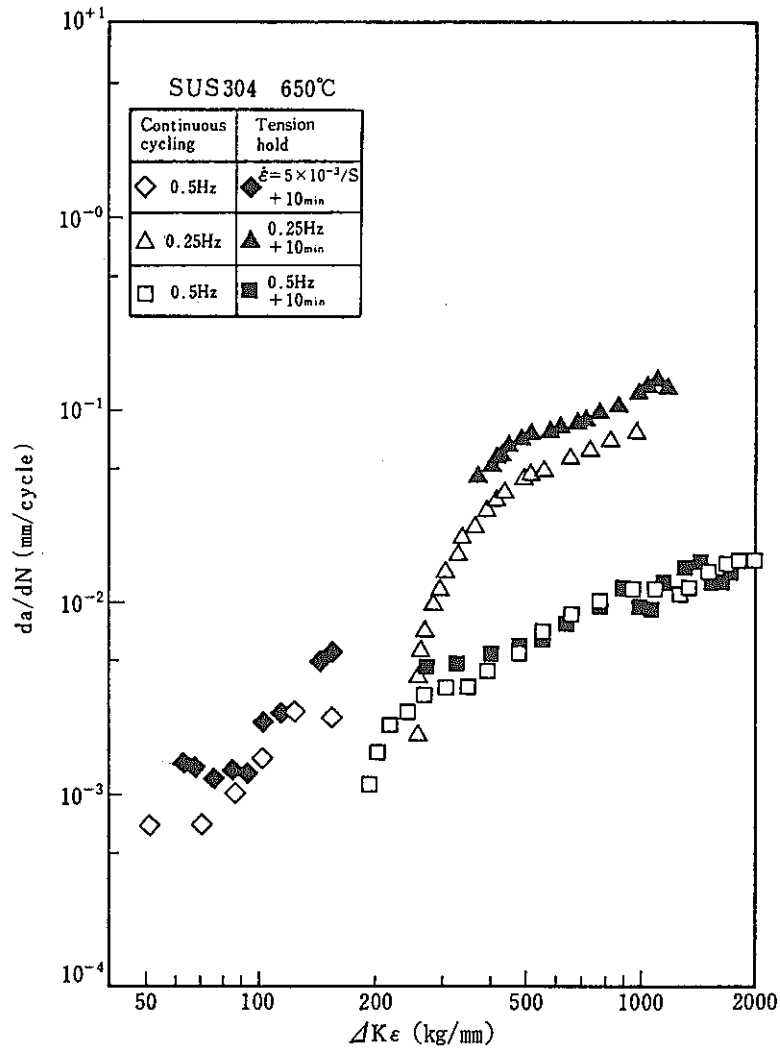


(a) $da/dN \sim \Delta J, \Delta J_f$ relationship



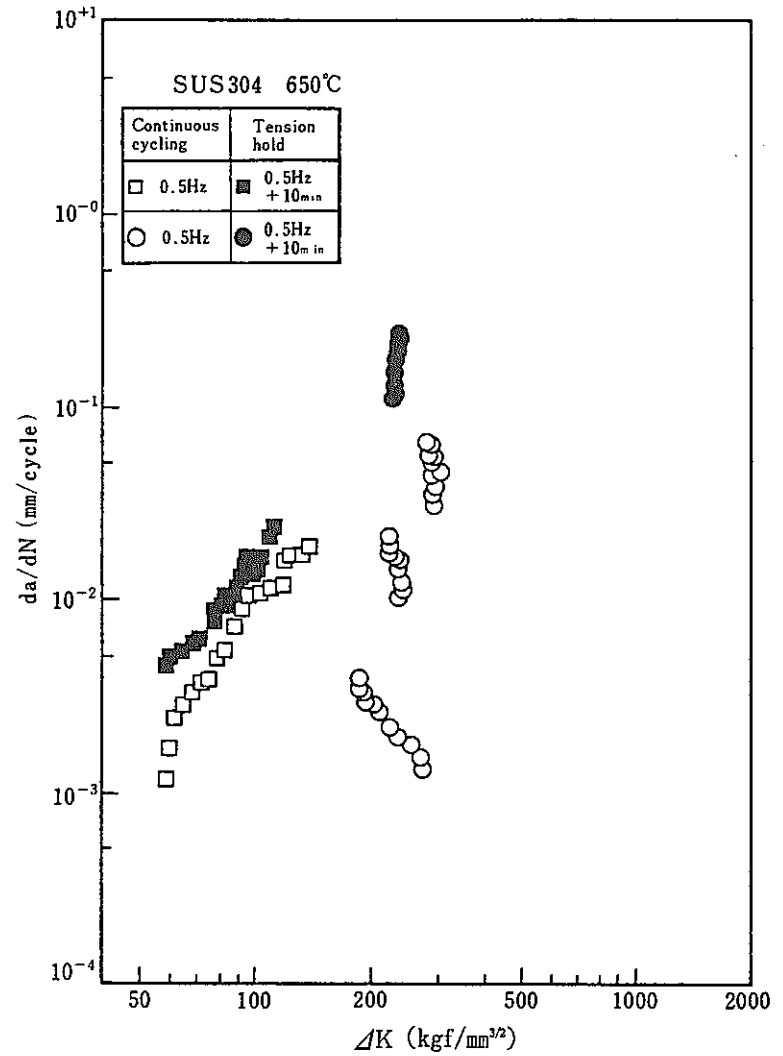
(b) $da/dN \sim \Delta K_{eff}$ relationship

Fig2.1.1-1 Comparison of the relationship between fatigue crack propagation rates (da/dN) and various fracture parameters (58-Fig.3.4.2-1—Fig.3.4.2-4) (Continued)



This scale for ◇ ◆ $\Delta K \epsilon = 1.1215 \Delta \epsilon \epsilon_t \sqrt{\pi a} \text{ (mm}^{1/2}\text{)}^{10^{-1}}$

(c) $da/dN \sim \Delta K \epsilon$ relationship



(d) $da/dN \sim \Delta K$ relationship

Fig2.1.1-1 Comparison of the relationship between fatigue crack propagation rates (da/dN) and various fracture parameters (58-Fig.3.4.2-1—Fig.3.4.2-4) (Continued)

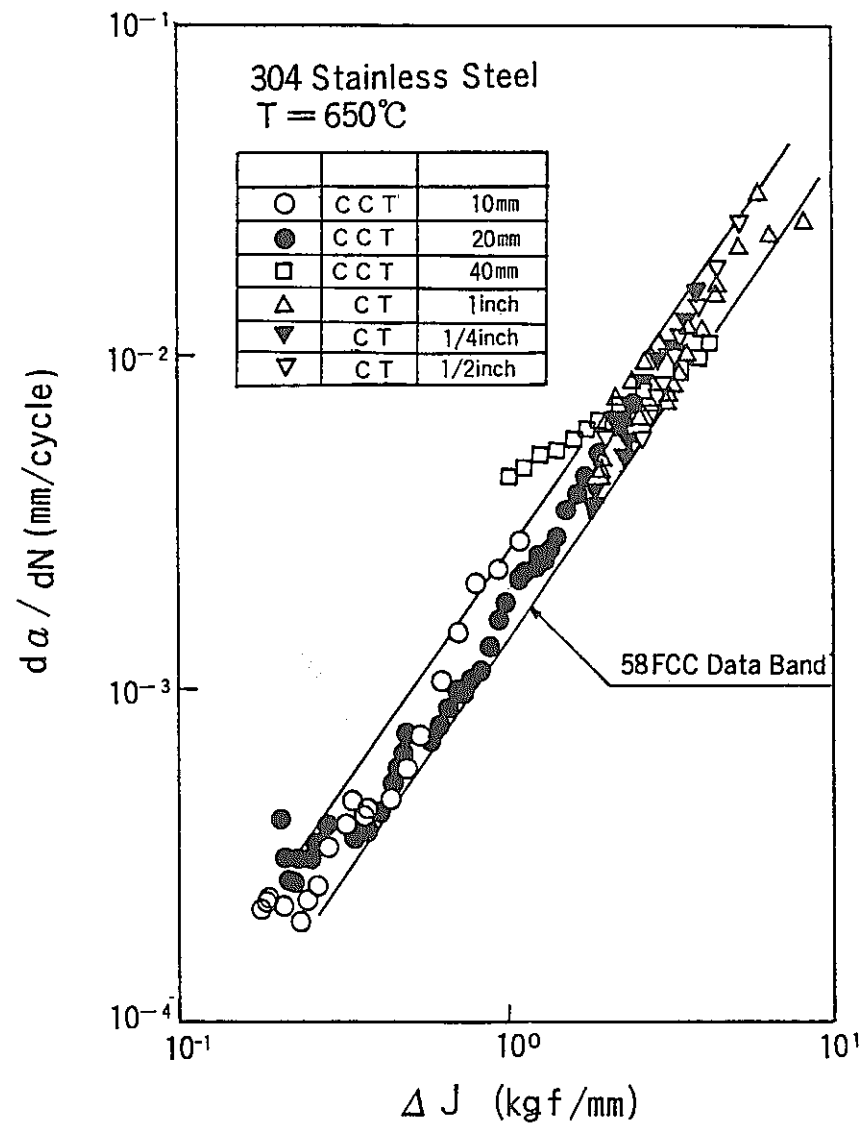
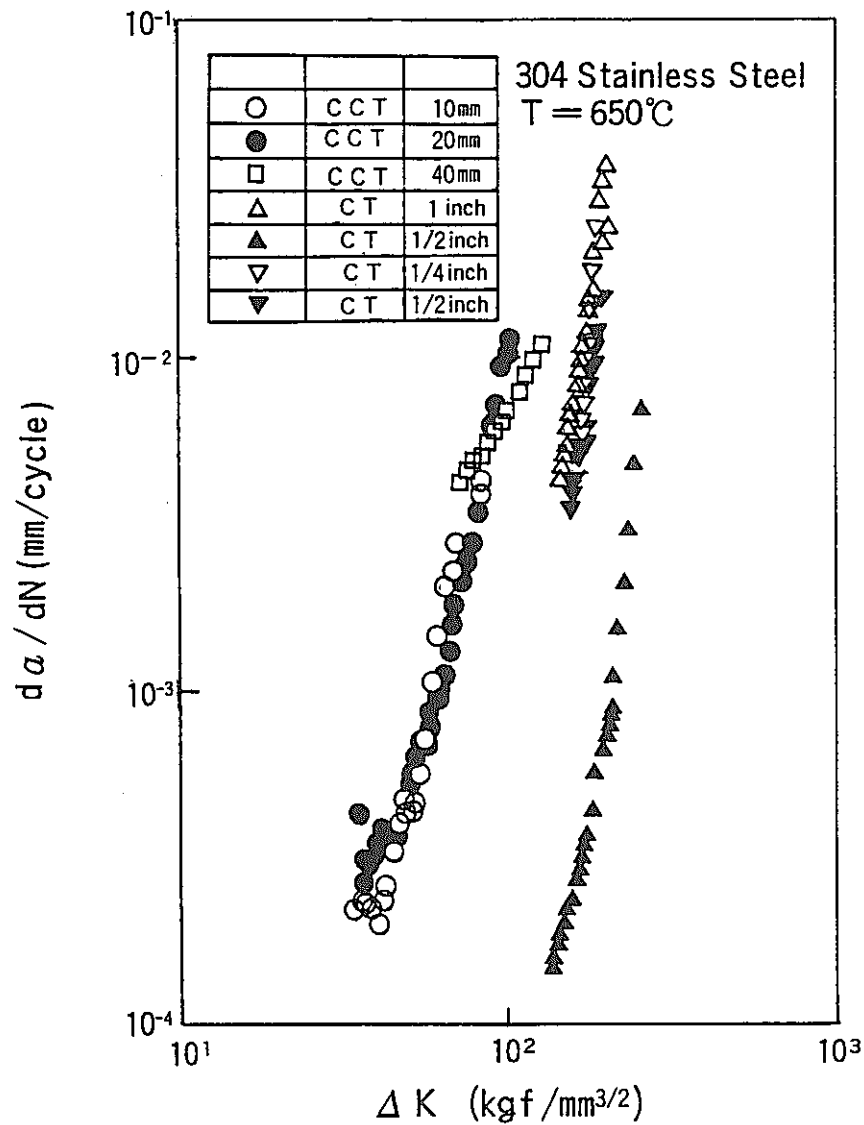


Fig.2.1.1-2 Comparison of $da/dN-\Delta K$ relation and $da/dN-\Delta J$ relation of various specimen shapes and specimen sizes

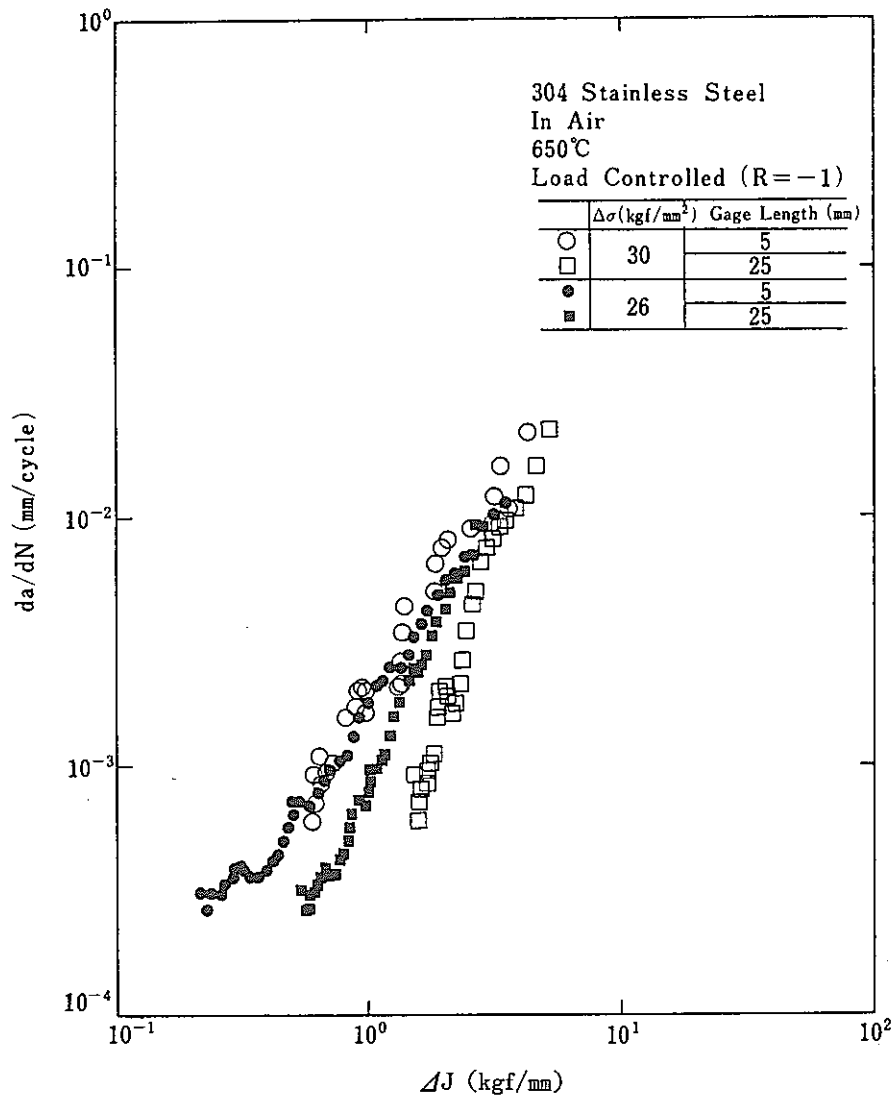
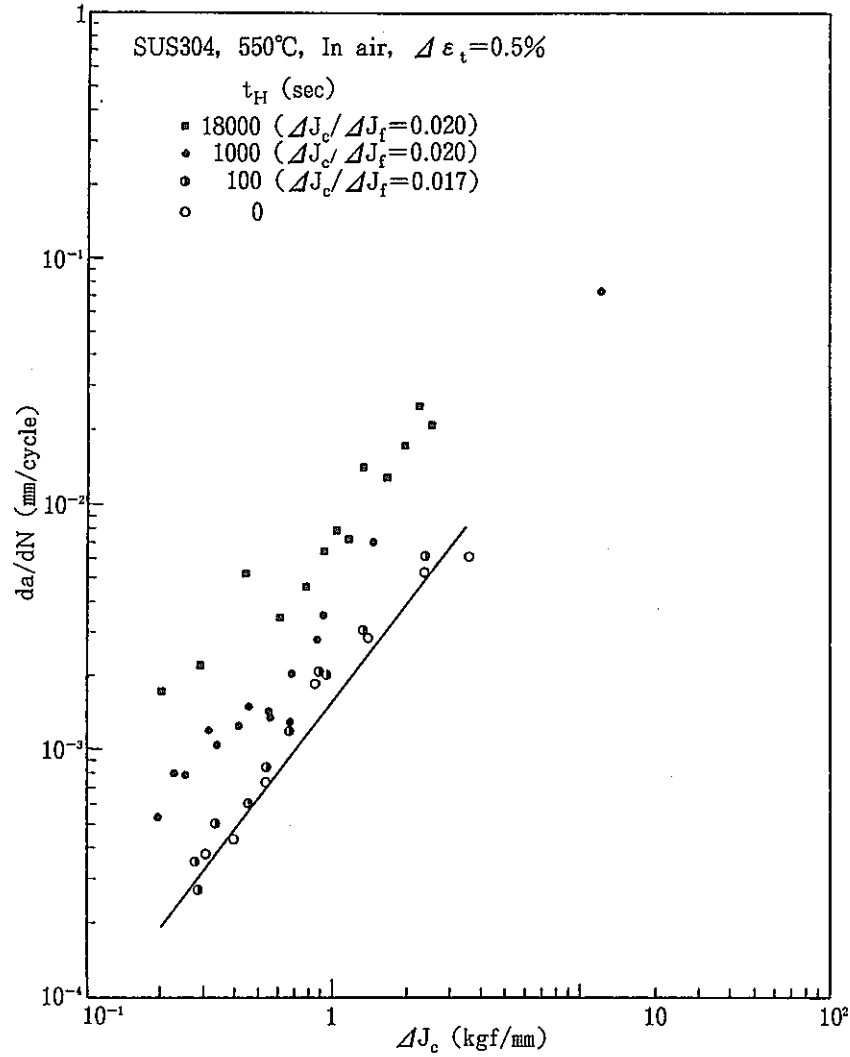
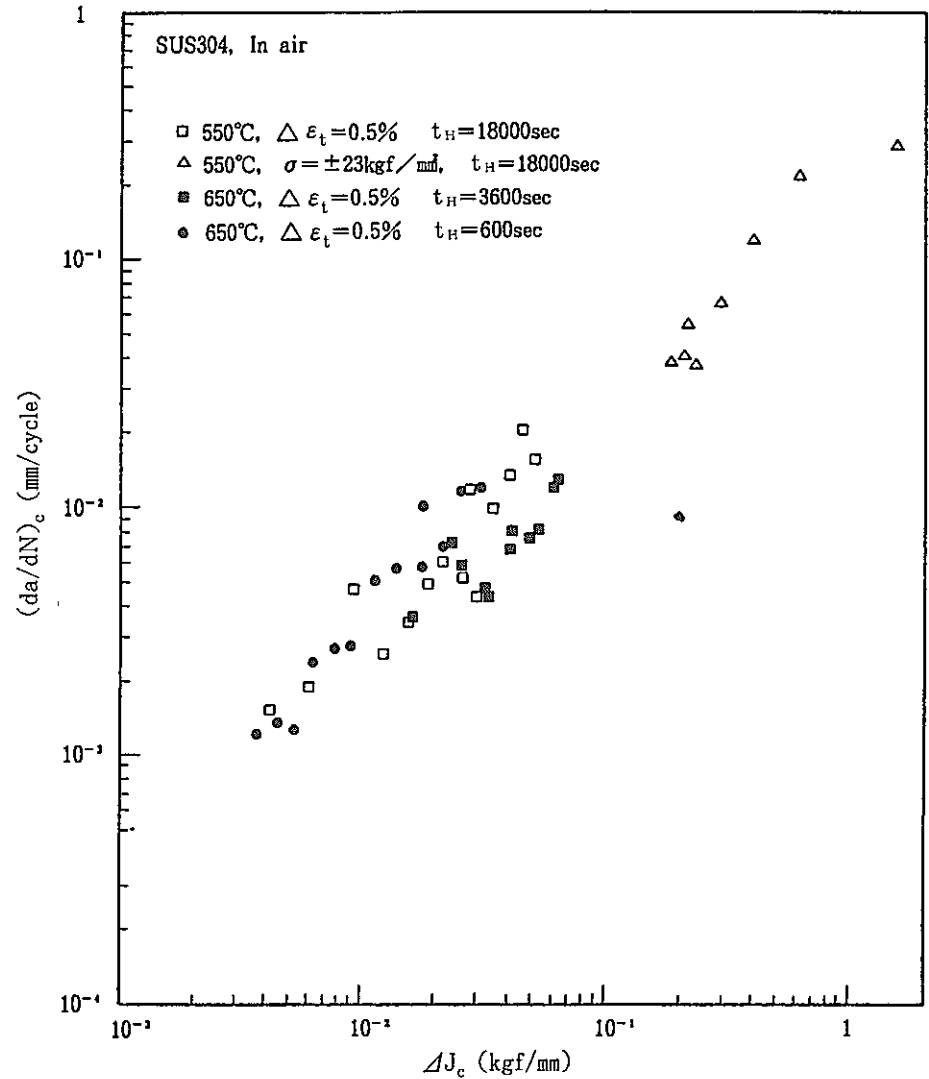


Fig.2.1.1-3 Effect of gauge length for load line displacement measurement on $da/dN-\Delta J$ relation (58—Fig.3.5.1)



(a) ΔJ_f and da/dN under creep-fatigue



(b) ΔJ_c and $(da/dN)_c$ under creep-fatigue

Fig.2.1.2-1 Creep and creep-fatigue crack growth characteristics of SUS 304 at 650°C and at 551°C: $(da/dN)_c$ is the amount of crack growth accelerated by hold time (Fig.2.3.1-7, 2.3.1-14)

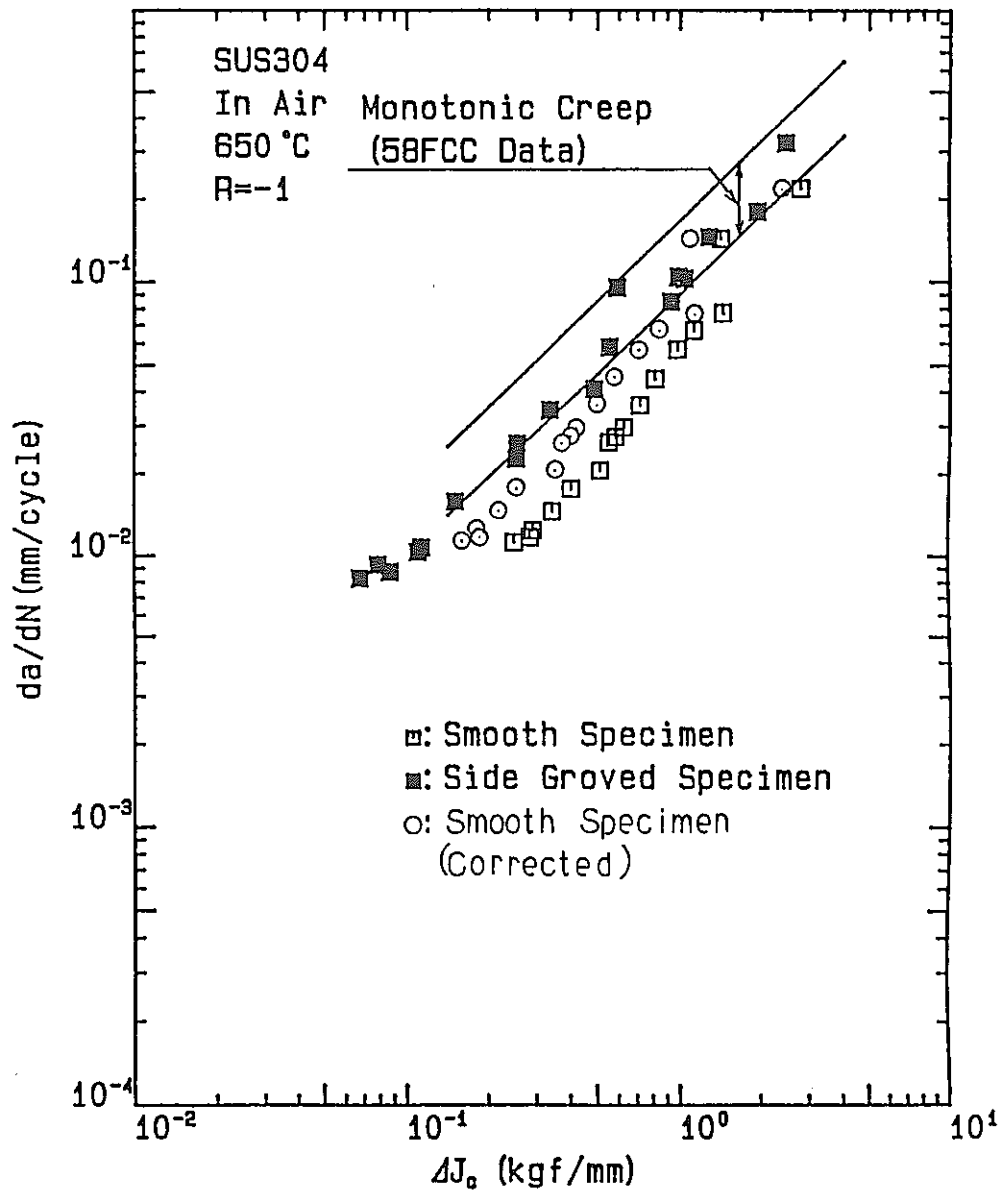
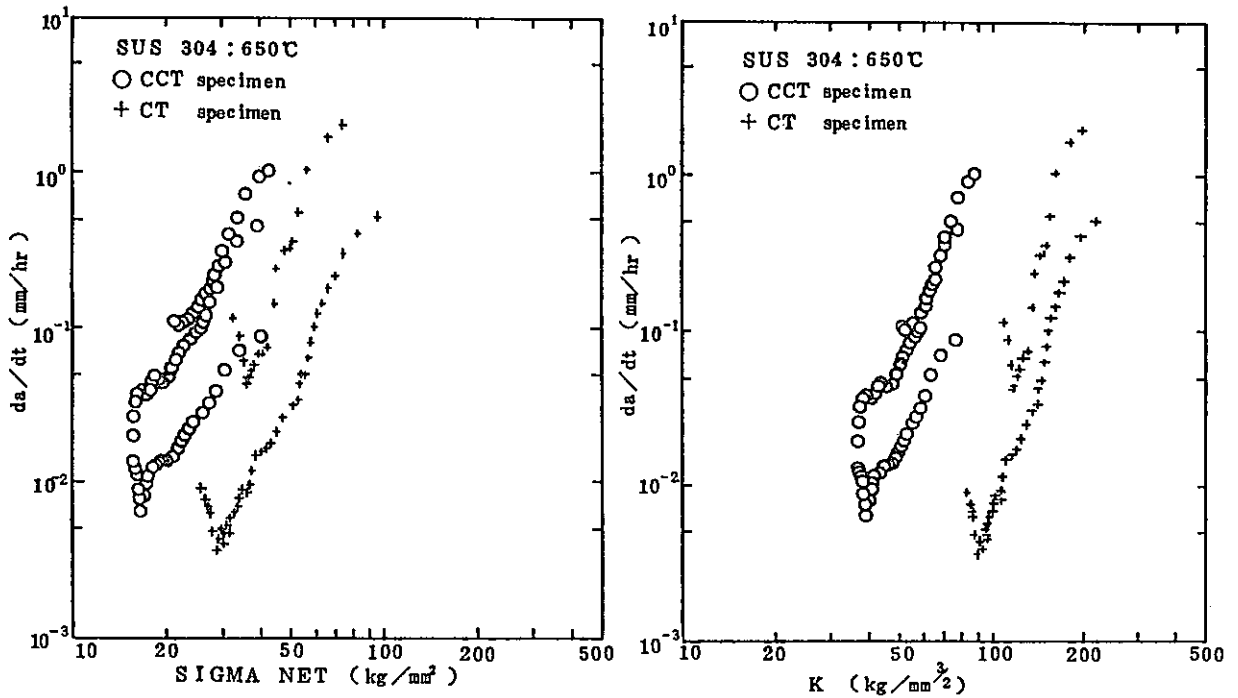
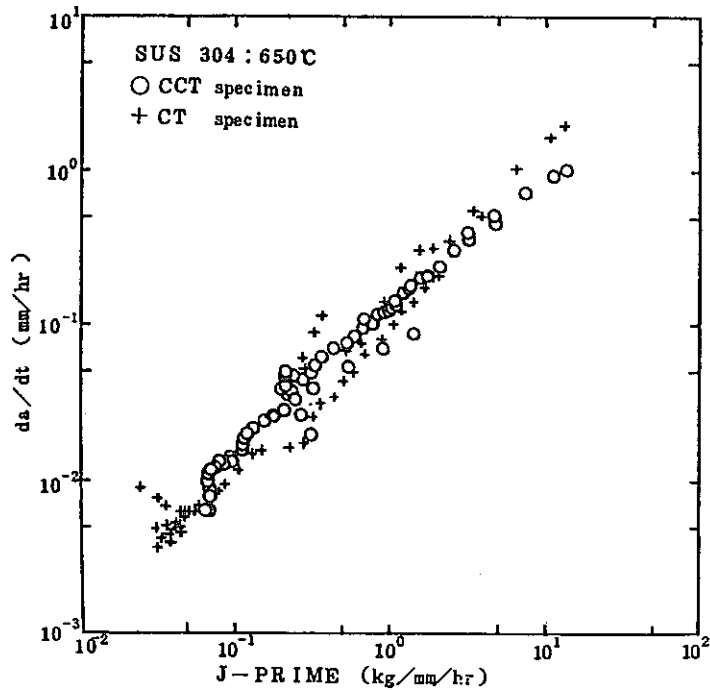


Fig.2.1.2-2 Relation between crack propagation rate and J-integral range ΔJ_c with and without the collection for the ligament creep deformation during the hold time (SUS304, 650°C) (Fig.2.2.3-15) .



(a) Relationship between σ_{net} and da/dt in CCT and CT specimens.

(b) Relationship between K and da/dt in CCT and CT specimens.



(c) Relationship between J' and da/dt in CCT and CT specimens.

Fig. 2.1.3-1 Comparison of relationships between creep crack growth rates (da/dt) and various fracture parameters(59—Fig.2.4-16 —Fig.2.4-18)

3. 標準試驗法

3. 標準試験法

序

構造健全性の保障は高速増殖炉においても、その安全評価上の重要な課題となっている。この保障の手法、論理については多様性があり得るが、軽水炉の例を引くと破断前漏洩（Leak Before Break, LBB）の成立性を破壊力学的手法により証明することによる解決法がとられており、高速炉においても現状では同様の概念が適用されている。LBB概念とは、評価対象部位および欠陥の存在を想定した後、この欠陥の運転中プラントが受ける負荷による安定成長を予測し、この安定成長が不安定成長に遷移する以前に、欠陥が冷却材バウンダリーを貫通して冷却材の漏洩をもたらす、これを検知することによって、プラントを停止して、破局的な破断が生じる事を防止できるとするものである。

この概念を実際のプラントに適用する場合には、開口漏洩時期・面積の正確な予測が、設計対応上重要となる。このため、欠陥の位置・寸法の想定、き裂の伝播速度の予測、不安定破壊発生条件、漏洩検知、安全裕度等の精度向上に関して、幾つかの要解決課題があるが、軽水炉と高速炉とで基本的に相違し、軽水炉の経験を応用できない事項としてき裂伝播速度の予測が第一に挙げられる。これは高速炉機器・構造の金属温度がクリープ温度域にあり、軽水炉において蓄積された線形破壊力学に基づく評価手法および諸データが適用範囲を超えることが予想されるためである。高温非弾性域のき裂伝播の予測に際しては、伝播速度予測曲線を材料試験をベースとして作成すること、その際適切な破壊力学パラメータを選定・使用することが基本的な重要課題であり、この標準試験方案は上記目的に沿って質の揃ったき裂伝播速度に関するデータを蓄積するための試験方案の標準を与えるため策定された。

本方案は昭和58年度より4年度にわたり日本溶接協会原子力研究委員会FCC小委員会が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した「高速炉構造材料のクリープ疲労き裂伝播に関する試験研究」において実施した調査および実験・解析を踏まえ作成・提案するものである。当面は、材料としてはSUS304鋼を、温度領域としては高速炉1次系金属温度を含む中高温度域を、環境としては大気中を、破壊力学パラメータとしてはJ積分およびJ'積分为、それぞれ念頭において、データの取得に当たって留意すべき事項、データの解析処理方法、評価方法等を規定したものである。

本方案は高温破壊力学に基づくものであるが、この分野は学問体系として確立したものでなく現在も急速に進歩しており、本案策定の段階においても未検討の課題が幾つか残されている。本方案が研究の現在の水準に基礎をおいて策定されたものである趣旨を鑑み、将来の研究開発成果により、今後さらに発展的に拡張されるべき要素も十分に存在することを了解され、本方案を利用され、かつ方案の向上に寄与されることを期待する。

3.1 まえがき

3.1.1 目的

この試験方案は高速炉構造材料の高速炉温度域におけるクリープ疲労き裂伝播速度を測定し、データ蓄積をはかる上で、均質なデータの取得を目的として策定されたものである。本方案の規定は、上記目的の試験に際し、試験者が自分の置かれた状況に応じた最適の試験計画を策定する際に、留意すべき基本事項を検討する場合のガイドラインを与えるものであって、試験者の裁量に対する拘束条件であるとは考えない方がよい。たとえば本方案に規定のない事項は、試験者の判断と選択に任せられたものであり、無規定の事項の実行・使用を禁止しているものではない。試験者は状況を勘案して、規定されていない事項を補完し、妥当な結果を得よう努力すべきである。又、妥当な理由により本規定によれない場合でも、得られた結果が直ちに棄却される事を意味するものではない。検討の結果、データの妥当性が示されたならば、本規定に代って採用された手法は妥当である。

ただし、いずれの場合にあっても試験者は自分の採用した方法が妥当な結果を与えることを確認し、かつ必要に応じ、その根拠を公開する態度を維持することが期待される。それはこの過程で得られた新しい知見が、本試験方法の拡充発展に寄与し、従って本方案の目的とするデータ取得に貢献するからである。

3.1.2 試験方法の概要

本試験方法は現在の基礎応用研究の成果に基づいて、次の各項目についての規定を包含する。

- ① 試験片形状・寸法と切欠・予き裂の作成
- ② 負荷装置及び制御方法
- ③ 加熱装置及び温度制御と温度分布
- ④ 荷重、変位、き裂長さの測定方法
- ⑤ データの測定、処理、保存方法
- ⑥ 破壊力学パラメータの評価方法
- ⑦ データの表示・報告事項

なお、本試験方法に規定のない事項あるいは本規定によれない場合に試験者独自の方法を策定する場合の参考として、次の関連規格を一例として挙げる。

- ① “Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-8} m/cycle” ASTM Standards. E647-83.
p.739-759 (1985)
- ② 「金属材料の引張クリープ試験方法」JIS Z 2271 (1978)
- ③ 「金属材料の引張クリープ破断試験方法」JIS Z 2272 (1978)
- ④ 「標準的な低サイクル疲労試験方法の検討」高速炉構造材料の高温低サイクル疲労試験方法に関する研究成果報告書、日本溶接協会原子力研究委員会P.F.C.I小委員会
p.113-170 (1980)

3.1.3 意 義

本試験方法は均質なクリープ疲労き裂伝播データの取得と蓄積を目的としている。その必要性は次の通りである。

高速炉温度域において、弾塑性クリープ変形下のき裂伝播挙動は時間依存性を有し、その時間依存性を支配する因子を抽出して、き裂伝播速度の予測精度を高めることが、高速炉の構造健全性を保障する上で重要課題となる。この因子抽出と各因子の支配傾向を定量化するには均質で多種のデータを必要とする。

本試験方法によって蓄積されたデータは将来、解析評価を受け、これに基づいてクリープ温度域におけるき裂伝播予測式の型にまとめられる。

このための研究開発の促進に資するのが本試験方案の立場であり、今後の研究開発によって本試験方案も当然改良・充実することになる。

3.1.4 その他の注意事項

本試験方案では、金属材料の大きな貫通モードⅠき裂を対象とし、その高温におけるき裂伝播特性が試験片・試験条件に依存しない材料特性として得られることを想定している。SUS304鋼の550℃、650℃の限られた範囲内の試験研究においては、その妥当性がほぼ検証できたが、試験方案の拡充・実機への適用を考慮すると、以下のような事項についても今後の検討が残されている。これらは主に本試験方案で採用している破壊力学パラメータが、その場合のき裂伝播特性を適確に記述できるか否か、未検討であることによる。

- ① 微小き裂の伝播およびき裂発生
- ② 混合モードき裂および表面未貫通き裂の伝播
- ③ 試験片のネッキングが著しい場合
- ④ 高温酸化など環境・雰囲気の影響が著しい場合
- ⑤ 温度変動が伴う場合

3.2 用語の説明と記号の意味

3.2.1 用語の説明

(1) 試験片に関する用語

(i) 中央き裂付平板試験片 (Center Cracked Tension Specimen)

Fig. 3.2.1-1 に示す中央に長さ $2a$ の貫通き裂を有する平板試験片で以後 CCT 試験片と略す。

(ii) コンパクト試験片 (Compact Type Specimen)

Fig. 3.2.1-2 に示す平板試験片で、比較的小さな荷重により広い範囲のき裂伝播データを得ることができる。以後 CT 試験片と略す。

(iii) 予き裂 (Pre-crack)

高温クリープ疲労き裂伝播データの採取に先立ち、試験片加工の影響を取り除くために導入される疲労き裂である。詳細は 3.3.2.2(2) を参照。

(iv) サイドグループ (Side-groove)

き裂前縁のトンネリングを防止するために、試験片側面き裂伝播線上に加工される溝。詳細は 3.3.2(1) を参照。

(v) ナイフエッジ (Knife-edge)

コンパクト試験片荷重線上にクリップゲージを取付けるために加工されるエッジ。詳細は 3.3.2(1) を参照。

(2) 計測項目に関する用語

(i) 荷重線変位 (Load Line Displacement), $\delta(L)$

CCT 試験片では板幅中心線に沿いき裂をはさんだ G.L. 間における変位、CT 試験片では荷重点であるピン中心を結ぶ線に沿いき裂をはさんだ G.L. 間における変位であり、G.L. が 0 の場合き裂開口変位 COD に一致する。

(ii) 荷重線変位速度 (Load Line Displacement Rate), $\delta(LT^{-1})$

荷重線変位より求まる速度。

(iii) き裂長さ (Crack Length), $a(L)$

試験片の参照平面 (CCT 試験片の場合には試験片板幅中心平面、CT 試験片の場合には端面に平行な荷重線を含む面) からき裂前縁までの長さで、Fig. 3.2.1-1, Fig. 3.2.1-2 にそれぞれ示す。なお CCT 試験片の場合には両側のき裂前縁間の長さの $\frac{1}{2}$ をき裂長さ a とすることができる。

(iv) き裂伝播速度 (Crack Growth Rate), $da/dN(L/cycle)$ or $da/dt(LT^{-1})$

試験中計測されるき裂長さの変化より計算されるき裂伝播速度で、計算方法については 3.4.5 を参照。

(3) 試験荷重に関する用語

(i) 保持時間 (Hold Time), t (T)

荷重制御下では荷重一定, 変位制御下では変位一定で保持される時間

(ii) ひずみ速度 (Strain Rate), $\dot{\epsilon}$ (T⁻¹)

変位制御の場合G.L.間の変位速度より求まる平均的なひずみ速度 (G.L.間変位速度) / (G.L.)

(iii) 三角波 (Triangular Wave)

Fig. 3. 2. 1-3(a) に示すような負荷速度と除荷速度が等しく保持時間を伴わない試験波形

(iv) 台形波 (Trapezoidal Wave)

Fig. 3. 2. 1-3(b) に示すような負荷速度と除荷速度が等しく保持時間を伴う試験波形

(v) 鋸歯状波 (Saw Wave)

Fig. 3. 2. 1-3(c) に示すような負荷速度と除荷速度が異なり保持時間を伴わない試験波形

(vi) スロープライン法 (Slope Line Control)

Fig. 3. 2. 1-4 に示すように, 繰返しの引張側では荷重軸と荷重線変位軸との間の斜線上で荷重反転を行い, 圧縮側では変位が0となった時に荷重反転を行うというような一定荷重制御試験と一定変位制御試験の中間的な試験方法。試験波形としては三角波もしくは台形波を用いる。

(4) 計測方法に関する用語

(i) 電位差法 (Electrical Potential Drop Method)

き裂をはさんで直流あるいは交流電流を流し, 端子間の電位差を測定する方法で, き裂長さの変化に応じた電位差の変化を予め求めておき, き裂長さに換算する。詳細は 3.3.1 (5)参照。

(ii) 除荷コンプライアンス法 (Unloading Compliance Method)

荷重-荷重線変位関係の除荷弾性線の傾き (コンプライアンス) の変化を測定する方法で, き裂長さの変化に応じたコンプライアンスの変化を予め求めておき, き裂長さに換算する。詳細は 3.3.1 (5)参照。

(5) 破壊力学パラメータに関する用語

(i) J積分 (J-integral), J (FL⁻¹)

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, 次式であらわされる。

$$J = P \left[Wdy - T_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} \right) ds \right] \dots\dots\dots (3. 2. 1-1)$$

ここに

Γ = き裂の下面から出発し、反時計まわりに
き裂の上面に至る任意の曲線

W = ひずみエネルギー密度

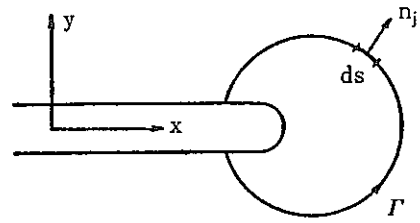
T_i = 曲線 Γ 上の表面力で、 Γ にそう外向き法
線ベクトルの成分を n_j とすれば

$T_i = \sigma_{ij} n_j$ で定義される。

u_i = 変位

ds = 曲線 Γ 上の線素

J 積分は経路独立性を有し、き裂先端近傍の特異応力-ひずみ場を記述する。



き裂先端を囲む積分路

(ii) 繰返し J 積分範囲 (Fatigue J -integral Range), ΔJ_f (FL^{-1})

繰返し荷重-変位ヒステリシスより得られる、き裂が開いている間の有効な J 積分範囲。ポテンシャルエネルギーの解放率としての意味は不明確であるが、 J 積分と同様き裂先端近傍の応力・ひずみの変動幅の特異性をあらわすパラメータで疲労き裂伝播特性を支配すると考えられる。評価方法については 3.4.3 参照。

(iii) 塑性 J 積分範囲 (Plastic J -integral Range), ΔJ_p (FL^{-1})

繰返し J 積分範囲から弾性成分を差し引いたもので次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \Delta J_p &= \Delta J_f - \Delta J_e \\ &= \Delta J_f - (\Delta K_{eff}^2 / E') \end{aligned}$$

ここに、

$$E' = \begin{cases} E & \text{平面応力} \\ E / (1 - \nu^2) & \text{平面ひずみ} \end{cases}$$

(iv) 修正 J 積分 (Creep J -integral), J' ($FL^{-1}T^{-1}$)

Hoff の相似則を用いて J 積分を定常クリープ条件下のき裂問題に適用したもので、(3.2.1-1) 式で $W \rightarrow W^c$ (クリープポテンシャル), $u_i \rightarrow \dot{u}_i$ に変えた形で記述される。

(v) クリープ J 積分範囲 (Creep J -integral Range), ΔJ_c (FL^{-1})

保持時間中の J' 積分の累積で、保持時間中のクリープき裂伝播特性をあらわすパラメータと考えられる。評価方法については 3.4.4 参照。

(vi) 応力拡大係数 (Stress Intensity Factor), K ($FL^{-3/2}$)

小規模降伏条件を満足する場合に、き裂先端近傍の特異応力-ひずみ場を記述するパラメータである。小規模降伏条件を満足する場合、 J 積分とは次の関係であらわされる。

$$J = K^2 / E'$$

ここに、

$$E' = \begin{cases} E & \text{平面応力} \\ E / (1 - \nu^2) & \text{平面ひずみ} \end{cases}$$

- (vi) 正味断面応力 (Net Section Stress), σ_{net} (FL^{-2})
き裂を除いた残存面積 (リガメント面積) で荷重, あるいはモーメントを受持ったとして算出される応力。
- (6) き裂進展速度の計算方法に関する用語
- (i) セカント法 (Secant Method)
き裂長さ a と繰返し数 N (時間 T) の関係において, 2 点のデータを直線で結び, その傾斜からき裂伝播速度を計算する方法。詳細は 3.4.5 を参照。
- (ii) インクリメンタル ポリノミアル法 (Incremental Polynomial Method)
き裂長さ a と繰返し数 N (時間 T) の関係において, $(2n + 1)$ 個の一連のデータを 2 次多項式で近似し, データの midpoint の傾斜よりき裂伝播速度を計算する方法。
詳細は 3.4.5 を参照。
- (7) 破面に関する用語
- (i) ストライエーション (Striation)
応力の繰返しにより破面に形成されるしま模様。応力繰返しの引張過程におけるき裂先端の塑性変形による鈍化と, 圧縮過程における再鋭化により形成されるもので, その間隔は 1 サイクル当りの疲労き裂伝播速度に対応する。
- (ii) 粒界破面 (Intergranular Fracture Surface)
結晶粒界に沿った破面でクリープによるき裂伝播が支配的な場合に現れる。
- (iii) ビーチマーク (Beach Mark)
応力繰返しの応力変動により現れるマクロなしま模様。電位差法や除荷コンプライアンス法におけるき裂長さ較正曲線を作成する際に利用される。
- (iv) トンネリング (Tunneling)
試験片表面と内部のき裂伝播速度の差によって生じるき裂前縁のわん曲。平面ひずみ状態である試験片内部の方が平面応力状態である試験片表面よりき裂伝播速度が速く, 内部のき裂が先行することがある。
- (8) その他
- (i) 塑性度, $\Delta J_p / (\Delta K^2 / E)$
き裂先端近傍の応力-ひずみ場の塑性の程度をあらわす。
- (ii) クリープ度, $\Delta J_c / \Delta J_f$
時間依存のき裂伝播か繰返し依存のき裂伝播かの目安となる値。

3.2.2 記号の意味

記号	単 位		意 味
	F : 力	L : 長さ T : 時間	
a	L		き裂長さ (CT), き裂半長 (CCT)
a ₀	L		機械加工された切欠きの長さ
B	L		試験片板厚
B _c	L		試験片等価板厚
B _n	L		サイドグループ底板厚
b	L		リガメント部長さ (CT), リガメント部半長 (CCT)
da/dN	L/cycle		1 サイクル当りのき裂伝播長さ
da/dt	LT ⁻¹		単位時間当りのき裂伝播長さ
E	FL ⁻²		ヤング率
G. L.	L		ゲージ長さ
ΔJ _f	FL ⁻¹		繰返し J 積分範囲
ΔJ _p	FL ⁻¹		塑性 J 積分範囲
J'	FL ⁻¹ T ⁻¹		修正 J 積分
ΔJ _c	FL ⁻¹		クリープ J 積分範囲
ΔK	FL ^{-3/2}		応力拡大係数範囲
K _{max}	FL ^{-3/2}		最大応力拡大係数
K _{min}	FL ^{-3/2}		最小応力拡大係数
K _{cl}	FL ^{-3/2}		き裂閉口応力拡大係数
K _{op}	FL ^{-3/2}		き裂開口応力拡大係数
K _r	FL ^{-3/2}		緩和応力拡大係数
ΔK _{eff}	FL ^{-3/2}		有効応力拡大係数範囲
n	—		Ramberg-Osgood型の応力-ひずみ関係式の指数
ΔP	F		荷重範囲
P _{max}	F		最大荷重
P _{min}	F		最小荷重
P _{cl}	F		き裂閉口荷重
P _{op}	F		き裂開口荷重
P _r	F		緩和後荷重
ΔP _{eff}	F		有効荷重範囲
R	—		応力比 (= P _{min} /P _{max} = σ _{min} /σ _{max})
S _p	FL		ΔJ _f の計算に用いるP-δ関係より求まる面積
S _c	FL		ΔJ _c の計算に用いるP-δ関係より求まる面積
W	L		試験片板幅
α	—		Norton則のクリープ指数
δ	L		荷重線変位
δ̇	LT ⁻¹		荷重線変位速度 (= dδ/dt)
Δε	—		CCT試験片のG. L.間平均ひずみ範囲
ε ₀	—		Ramberg-Osgood型応力-ひずみ関係式の比例限ひずみ
σ ₀	FL ⁻²		ε ₀ に対応する比例限応力
σ _y	FL ⁻²		降伏応力
Δσ	FL ⁻²		CCT試験片の公称応力範囲 (= ΔP/B · W)
σ _{max}	FL ⁻²		CCT試験片の公称最大応力 (= P _{max} /B · W)
σ _{min}	FL ⁻²		CCT試験片の公称最小応力 (= P _{min} /B · W)
σ _{cl}	FL ⁻²		CCT試験片のき裂閉口公称応力 (= P _{cl} /B · W)
σ _{op}	FL ⁻²		CCT試験片のき裂開口公称応力 (= P _{op} /B · W)
Δσ _{eff}	FL ⁻²		CCT試験片の有効公称応力範囲 (= ΔP _{eff} /B · W)

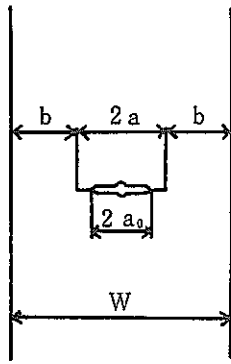


Fig.3.2.1-1 Center cracked tension specimen (CCT)

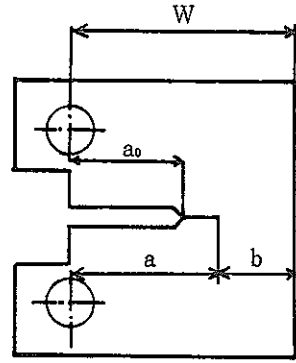
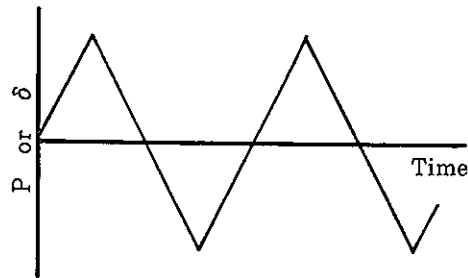
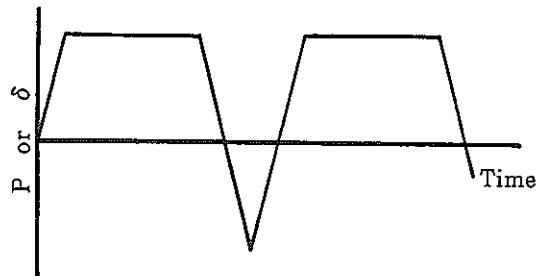


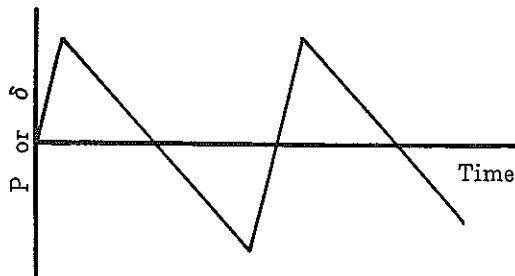
Fig.3.2.1-2 Compact type specimen (CT)



(a) Triangular wave



(b) Trapezoidal wave



(c) Saw wave

Fig.3.2.1-3 Loading pattern

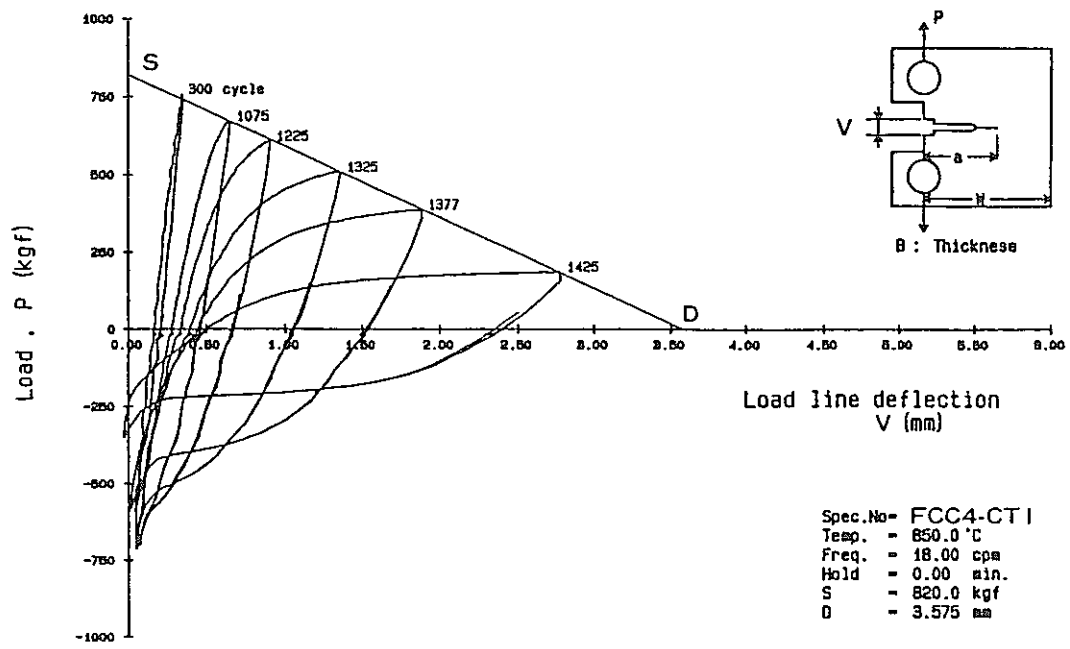


Fig.3.2.1-4 Load vs. load-line deflection hysteresis loops of CT specimen under slope line control.

3.3 試験方法

3.3.1 試験装置

(1) 試験機

引張、圧縮負荷が可能で、荷重、変位が任意に制御できる試験機を使用しなければならない。この試験機は、バックラッシュが最小になるように設計されたものでなければならない。閉ループ電気油圧サーボまたは電気機械サーボ方式の試験機が推奨される。荷重は、測定最大荷重に対して1%以上の精度で測定されなければならない。

(2) 試験片用治具

(i) CT試験片用治具

試験片の幅、厚さに適合した治具 (Fig. 3.3.1-1) を用いる (例えばASTM E-399 参照)。ピンとピン穴は摩擦が最小になり、かつ引張・圧縮負荷反転時のバックラッシュもできるだけ小さくなるように設計されていないなければならない。

治具は上下荷重軸に合致するよう、また試験片にねじりが加わらないように取り付けられていなければならない。

(ii) CCT試験片用治具

一般的な治具取付け状況を Fig. 3.3.1-2 に示す (例えばASTM E-606-80T 参照)。これらの治具は、荷重軸と試験片の厚さの中心が一致するように取付けなければならない。また、試験片に生じる曲げ応力が最小になるように治具の締付力を調整する必要がある。この曲げ応力は試験時の公称軸応力の5%以下にしなければならない。また、座屈を防ぐため荷重軸の長さは最小にすることが望ましい。

(3) 変位計

変位計は、CT試験片の場合には荷重線上の開口変位を、CCT試験片の場合には中心線上で切欠きを対称に挟む標点間の動変位を、それぞれ直接的に測定し得るものを原則とする。変位の測定誤差は試験時の変位振幅の $\pm 2.5\%$ 以下にしなければならない。キャリブレーションは各試験シリーズのはじめと終わりに行わなければならない。

(i) CT試験片用変位計

Fig. 3.3.1-3 に示す変位計が一般的に使用される。変位検出部は、試験片のナイフエッジと線接触するよう設計されたものでなければならない。

(ii) CCT試験片用変位計

Fig. 3.3.1-4 に示す押し当て式変位計が一般的に使用される。変位検出部は正確に標点部に点接触するよう設計されたものでなければならない。標点はき裂面にできるだけ近づくことが望ましく、例えば幅20mm、初期き裂全長2mmのCCT試験片に対しては標点距離を5mm以下にすべきである。また、Fig. 3.3.1-5 のように標点部に点溶接した微小金属線を介して変位をとることも、金属線のクリープ等の変形がない限り許容される。

(4) 加熱装置

加熱装置には、試験片の温度が試験期間中、設定値の $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内に保持できるものを用いなければならない。温度の検出は、き裂面の上下5mm以内に直接熱電対を取付けて行うのを原則とする。

温度分布については、CT試験片の場合、き裂成長線上で $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内にしなければならない。試験片全体では $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内にすることが望ましい。CCT試験片では、き裂面の上下10mm以内で $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内にしなければならない。

高周波誘導加熱の場合には、試験片内部にも温度分布が付くことがあるため、温度分布をできるだけ小さくするように注意する必要がある。

(5) き裂長さ測定法

高温試験の特殊性に鑑み、き裂長さ測定法としては、目視（有尺顕微鏡、読取顕微鏡、移動顕微鏡、測微顕微鏡、目盛付マイクロスコープ等）、写真撮影（VTR、画像処理法との組合せを含む）、電位差法（AC法、DC法）、除荷コンプライアンス法、ビーチマーク法、レプリカ法など、高温で測定可能な方法もしくは高温の試験片に直接接触を要しない方法であれば採用することができる。ただし、き裂長さの測定精度は、0.10mmまたは0.002 Wのいずれか大きい方とすること。また、間接的な方法の場合はドリフトが少なく、安定性が高いことを要する。なお、ビーチマーク法については、他の方法と組合せてき裂長さの較正法として利用することが望ましい。

高温での連続測定に関しては、電位差法および除荷コンプライアンス法を推奨する。

(6) 記録装置

荷重、変位、開口変位、（き裂測定の）電位差、温度はX-tレコーダに記録し、荷重-変位関係はX-Yレコーダに記録する。また、ミニコンやパソコンなどのコンピュータ、データレコーダ、その他の方法でも同等の精度が得られるならば採用できる。

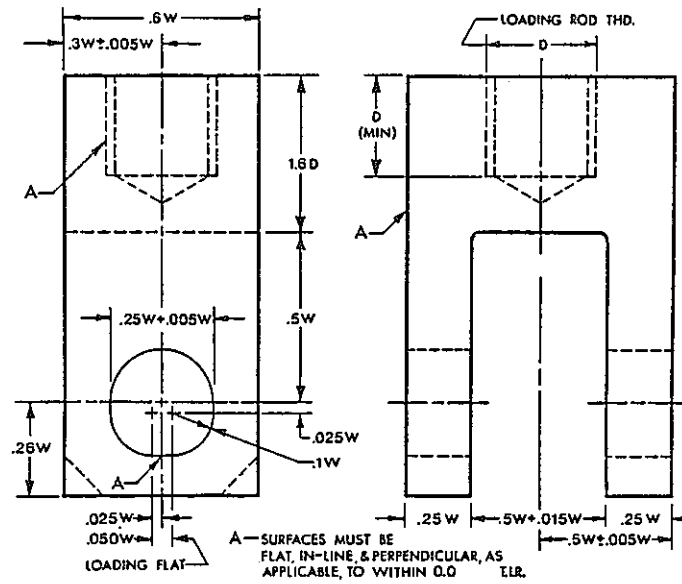
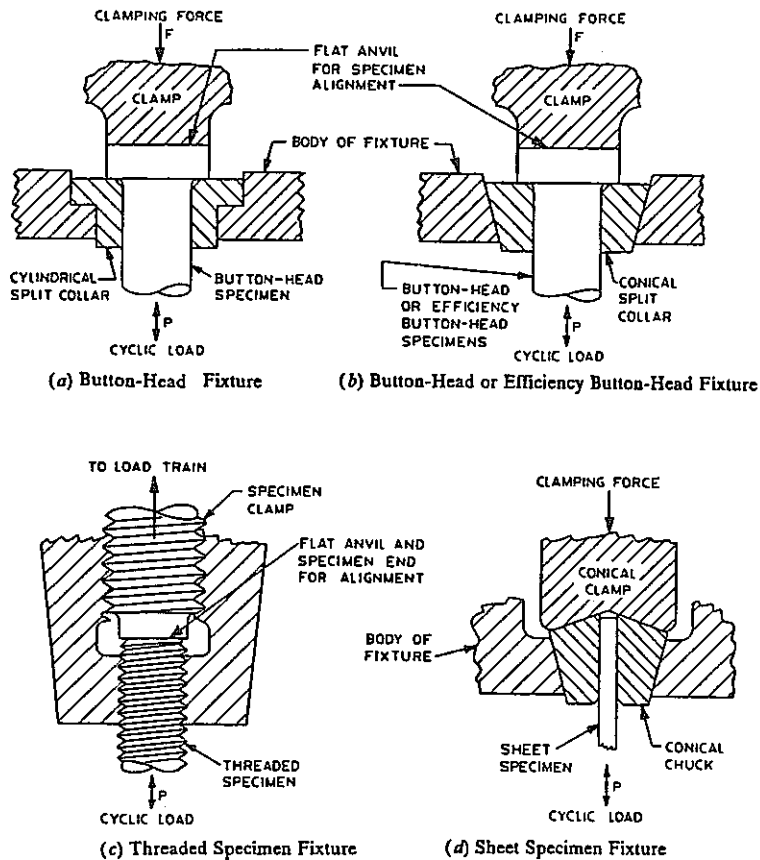


Fig.3.3.1-1 Clevis design for CT specimen



Note-The clamping force should be greater than the cyclic load to avoid backlash within the specimen fixture

Fig.3.3.1-2 Schematic examples of fixturing techniques for CCT specimen designs

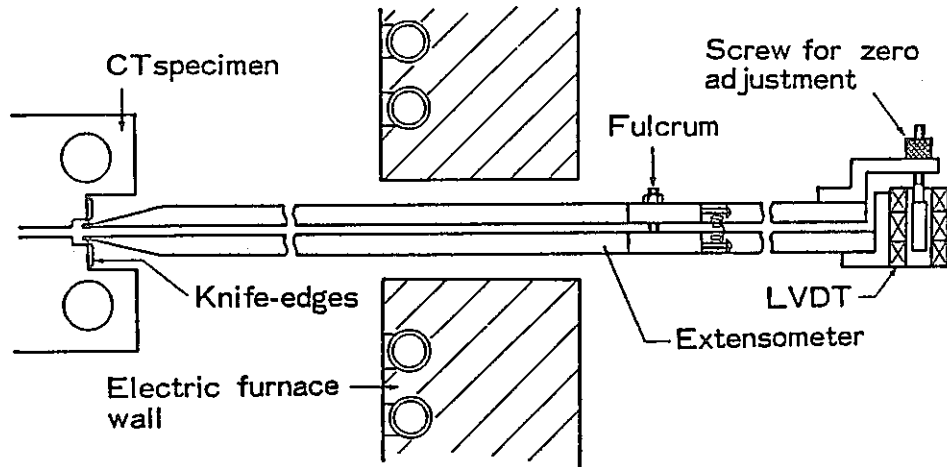


Fig.3.3.1-3 Example of extensometer for load line deflection measurement for CT specimen

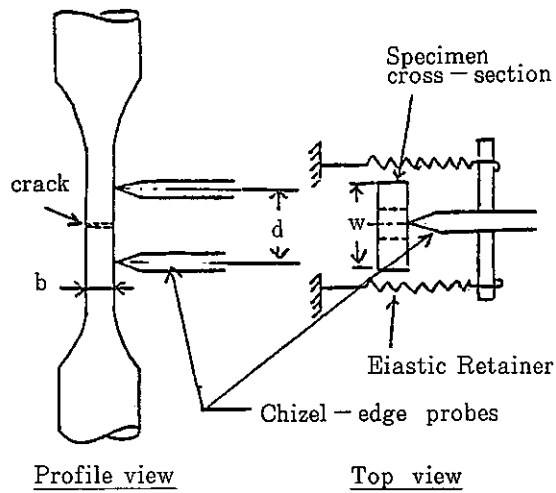


Fig.3.3.1-4 Example of extensometer for CCT specimen

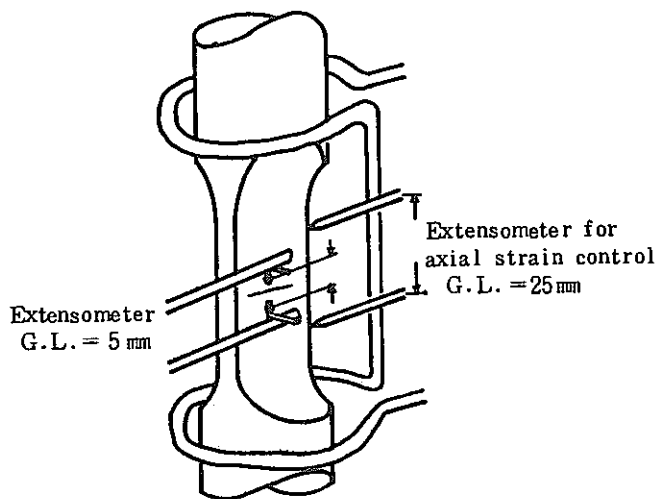


Fig.3.3.1-5 Example of extensometer for CCT specimen

3.3.2 試験片

(1) 試験片形状, 寸法

(i) 試験片形状

CT試験片と中央き裂付平板試験片(CCT)を標準とする。

CT試験片の標準形状を Fig. 3.3.2-1 に示す。

スリット側の切欠開口部は、荷重線変位を計測するための変位計取り付けスペースである。

図ではナイフエッジを用いたクリップゲージ方式の例を示しているが、変位計の取り付け方式に応じて変更してよい。

CCT試験片の標準形状を Fig. 3.3.2-2 に示す。

要求される試験片の最小平行部長さLはグリップの形式に依存するが、一定の応力分布が試験片のゲージ長にわたって発生する必要がある。

目的に応じて標準試験片以外の形状の試験片を使用してよい(ただし、破壊力学パラメータの求め方は試験片形式に応じて別途準備する必要がある)。

(ii) 試験片厚さ

いずれの試験片も厚さに制限はないが、薄すぎると座屈の恐れがあり、逆に厚すぎるとき裂のトンネリング現象が顕著となるので、下記寸法を目安とする。

CT試験片, CCT試験片とも

$$W/8 \leq B \leq W/2$$

(iii) 機械切欠の形状寸法

試験片の機械切欠は放電加工, 切削, 鋸加工等で入れる。種々の機械切欠形状の例を Fig. 3.3.2-3 に示す。

CT試験片の場合、疲労予き裂を含めた初期き裂寸法 a_0 を $a_0 \geq 0.45W$ となる様に機械切欠長さを決める。

(iv) サイドグループ

試験片形状や試験条件によっては、板厚内部でき裂が先行するトンネリング現象が生じることがあるが、試験片側面にサイドグループを付けることによって、防止できる場合がある。

(2) 疲労予き裂

高温における疲労き裂伝播, クリープ疲労き裂伝播試験を実施する際の疲労予き裂は、 ΔJ と da/dN とがほぼ直線関係を示す範囲のデータを取る時には必ずしも導入しなくて良い。ただし試験後のデータ整理の際には、試験開始直後の遷移挙動データ(加工硬化に伴う S_p の減少等)には注意を払い、削除する等の対策が必要である。

一方、クリープき裂伝播試験用試験片については疲労予き裂を ASTM E813, あるいは日本機械学会 J_{IC} 試験法に準拠して導入することが望ましい。

以下に疲労予き裂を導入する際の留意すべき項目について記述する。

① 疲労予き裂導入時期

疲労予き裂の導入は全ての熱処理ならびに加工を終了した状態で行なうことが必要である。

② 疲労予き裂導入のための負荷条件

クリープ試験片に予き裂を導入する場合の負荷条件は、クリープ試験の負荷条件よりも低い最大荷重 P_{max} の条件下で予き裂を導入することが望ましい。またこれらの条件を決定する上で ASTM E813 , あるいは日本機械学会 J_{IC} 試験法が参考になる。

③ 導入する疲労予き裂長さ及びき裂の角度

導入する疲労予き裂長さ及びき裂の角度については Fig. 3.3.2-3 に示す条件を満足しさらに疲労予き裂長さは $0.1B$ と h のどちらか大きい方より大きくなければならない。

④ 疲労予き裂導入時の応力比

疲労予き裂導入時の応力比については特に規定する条件はない。

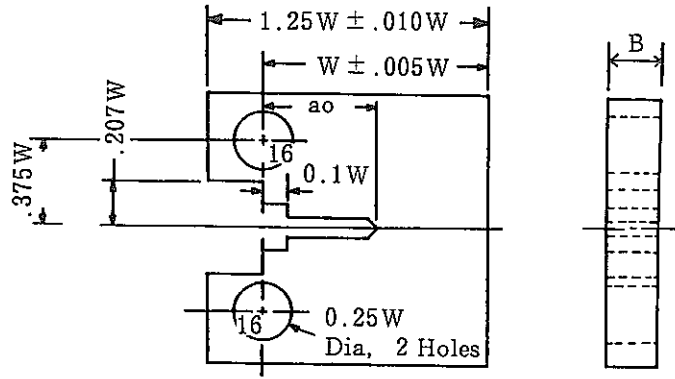


Fig.3.3.2-1 CT specimen

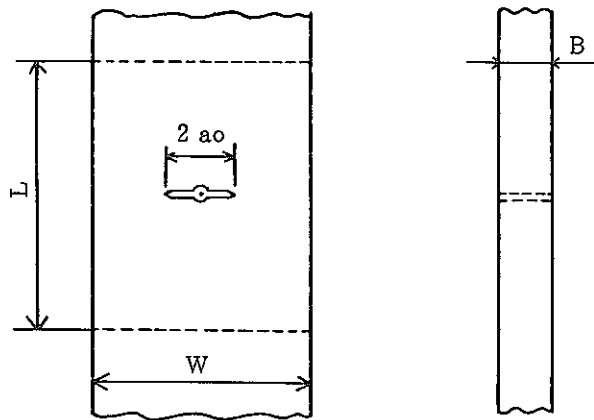


Fig.3.3.2-2 CCT specimen

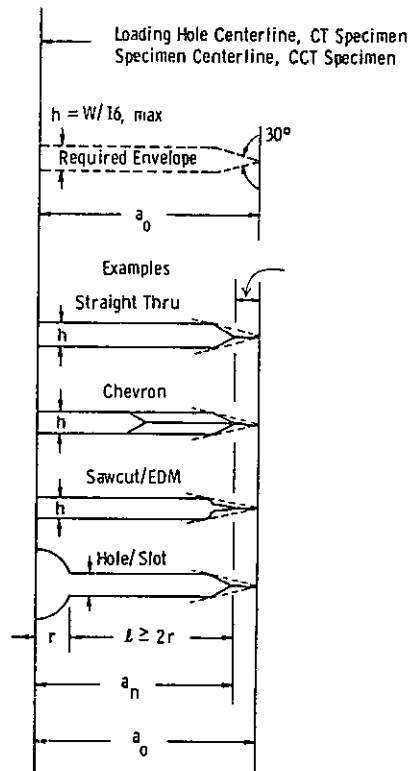


Fig.3.3.2-3 Machined notch

3.3.3 測定項目

高温におけるき裂伝播挙動を把握するためには以下の項目を測定し、き裂伝播速度と破壊力学パラメータを求め、その内必要なものは、3.3.5 項に従い結果を記録することが必要である。

測定すべき項目

- ① 試験片寸法 : 試験片寸法の測定は 3.3.4(1) 項に従い行い、3.3.2(1) 項に示す条件を満足していることを確認する。
- ② 試験温度 : 試験温度の測定は 3.3.4(4) 項に従い、温度の管理を行い計測を行う。
- ③ 試験荷重 : 試験荷重、試験変位（歪）の測定は試験中の荷重、変位の試験変位（歪）管理のためにも測定するのが望ましい。
- ④ 荷重－荷重線変位（荷重線開口変位） :
破壊力学パラメータ算出のために必要であり 3.3.4(5) 項に従い荷重－荷重線変位（荷重線開口変位）を測定する。
- ⑤ 疲労き裂長さ : 疲労き裂長さの測定は 3.3.4(6) 項に従い測定を行う。
- ⑥ 繰返し数（試験時間） : き裂伝播速度算出のため疲労試験の場合、荷重－荷重線変位（荷重線開口変位）の測定と同時に繰返し数を測定することが必要であり、クリープき裂進展試験の場合にはき裂長さ測定時に試験開始からの経過時間を測定することが必要である。

3.3.4 試験手順

試験手順のフローチャートを Fig. 3.3.4-1 に示す。

(1) 試験前の試験片寸法の測定

全試験片について、試験前に寸法を測定し、3.3.2 に示す許容誤差範囲内にあることを確認する。

(i) 厚さ

予き裂の延長上のリガメント部について、CT試験片では少なくとも3カ所、CCT試験片では両リガメント部の少なくとも各2カ所の厚さを測定し、その平均値をBとして記録する。測定精度は0.025mm又は0.1%のいずれか大きい方とする。

(ii) 幅および予き裂長さ

試験片の表裏にて、幅および予き裂長さを測定し、それぞれの平均値としてWおよび a_0' を記録する。測定精度は0.025mm又は0.1%のいずれか大きい方とする。

(2) 試験片の取付

(i) CT試験片の場合

上下治具の荷重軸の中心線は試験中常に0.75mm以内の誤差で一致するように取付ける。

(ii) CCT試験片の場合

試験片に生ずる曲げ応力が軸方向応力の5%以下となるように荷重軸と試験片の中心を一致させる。

(3) 試験片の負荷方法

試験目的に応じて、荷重制御、ひずみ制御等の制御方式、三角波、台形波等の波形、ひずみ速度などの負荷方法を選択する。荷重及びひずみはそれぞれ最大荷重の±1%以内、最大ひずみの±2.5%以内に制御されることが必要である。

(4) 試験温度

試験片におけるき裂成長経路に相当する部位の温度分布が試験温度に対して±5℃以内に保持されることが望ましい。昇温及び均熱時間については試験片の大きさ、加熱方法に応じて適宜設定することが必要である。

なお試験片の昇温、均熱及び試験温度は温度-時間曲線として記録する。

(5) 荷重-荷重線変位（開口変位）の記録

荷重-荷重線変位（開口変位）の測定時期はき裂長さ測定時期と一致させ、荷重-荷重線変位（開口変位）はX-Yプロッターに自動的に記録されるかあるいはデジタル値に変換されて外部記憶装置に保存されなければならない。

(6) き裂長さ測定

き裂長さを測定する方法としては、ポテンシャル法、除荷コンプライアンス法、目視（移動顕微鏡など）、写真法などがある。各方法に関しては、3.3.1.(5)項に記述されている。

(i) き裂長さ

き裂長さの定義については、3.2.1 項を参照のこと。

(ii) き裂長さ測定間隔

推奨される測定間隔は次のとおりである。

$$\text{CT試験片} \quad \Delta a \leq 0.02W \quad (0.25 \leq a/W \leq 0.60)$$

$$\Delta a \leq 0.01W \quad (a/W \geq 0.60)$$

$$\text{CCT試験片} \quad \Delta a \leq 0.03W \quad (2a/W < 0.60)$$

$$\Delta a \leq 0.02W \quad (2a/W > 0.60)$$

最小の Δa は、0.25mm以上であることが望ましい。

(iii) 較正曲線

ポテンシャル法および除荷コンプライアンス法では、予め作成された較正曲線によりき裂長さを求める。

(iv) 目視、写真法

測定には20倍以上の移動顕微鏡（写真法では最終倍率）を用いることが望ましい。

試験片破断後、き裂前縁わん曲を伴って進展している場合には、板厚方向平均的き裂長さを求め補正する。

(7) 試験中断

試験中断は行っても差し支えない。但し、再開後の開口変位、荷重（あるいは変位）の変化を記録する。

(8) 試験後の試験片の取扱い

試験後、試験片の破断状況として、側面外観、破断面外観および測定き裂長さ範囲にわたって、3ヶ所以上マイクロ破面も観察することが望ましい。

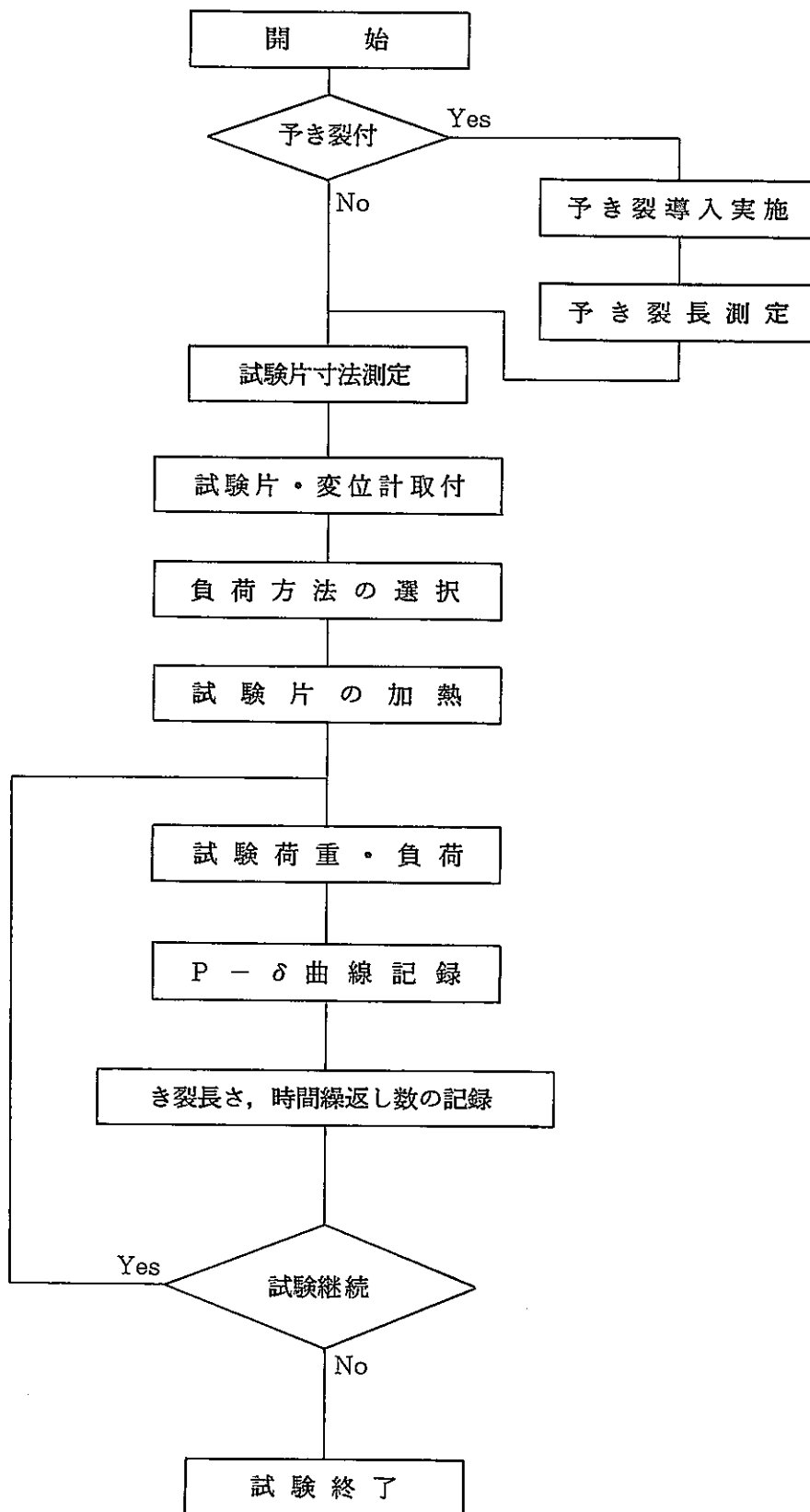


Fig.3.3.4-1 Flow chart of test procedure

3.4 試験結果の取り扱い

3.4.1 パラメータの選択

繰返し数依存形の疲労き裂伝播を示す場合には、弾塑性破壊力学に基づくJ積分による表示を原則とし、これを繰返しJ積分範囲、 ΔJ_I と表示する。なお、小規模降伏条件を満足する場合には、J積分は線形弾性破壊力学に基づく応力拡大係数Kと、 $J=K^2/E$ の関係性を有する。一方、時間依存形のクリープき裂伝播あるいはクリープ疲労き裂伝播を示す場合には、非線形破壊力学に基づく修正J積分、 J' あるいは J' の時間積分値であるクリープJ積分範囲、 ΔJ_c による表示を原則とする。

3.4.2 K, J, J'の計算

(1) 応力拡大係数, K

CCT試験片の場合は、次式により計算する。

$$K = \frac{P}{BW} \sqrt{\pi a} F(\xi)$$
$$F(\xi) = \sqrt{\sec(\pi \xi / 2)} \quad (\xi < 0.95)$$

ここで、P ; 荷重

B ; 試験片厚さ

ξ ; $2a/W$

W ; 試験片幅

$2a$; き裂長さ

である。F(ξ)の数值を付録4の付表4に示す。

CT試験片の場合は、次式により計算する。

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} F(\xi)$$
$$F(\xi) = \frac{(2 + \xi)}{(1 - \xi)^{3/2}} [0.886 + 4.64 \xi - 13.32 \xi^2 + 14.72 \xi^3 - 5.6 \xi^4] \quad (\xi \geq 0.2)$$

ここで、P ; 荷重

B ; 試験片厚さ

ξ ; a/W

W ; 試験片幅

a ; き裂長さ

である。F(ξ)の数值を付録4の付表5に示す。

サイドグループ付試験片の場合は、板厚Bとして次に示す等価板厚 B_e を使用する。

$$B_e = B - (B - B_N)^2 / B$$

ここで、

B_N ; サイドグループ付試験片のグループ底間の厚さ

である。

(2) J積分, J

CCT試験片の場合は、次式により計算する。

$$J = \frac{K^2}{E} + \frac{S_p}{Bb} \quad (0.1 \leq \xi \leq 0.75)$$

ここで, K ; 応力拡大係数

E ; 縦弾性係数

S_p ; Fig. 3.4.2-1 の荷重-荷重線変位 (開口変位) 曲線下の面積

B ; 試験片厚さ

b ; 試験片リガメント幅, $W/2 - a$

ξ ; $2a/W$

W ; 試験片幅

2a ; き裂長さ

である。

CT試験片の場合は、次式により計算する。

$$J = \frac{S_p}{Bb} F(\xi)$$

$$F(\xi) = 2 \left(\frac{1 + \eta}{1 + \eta^2} \right) \quad (\xi > 0.4)$$

$$\eta(\xi) = \sqrt{(2a/b)^2 + 2(2a/b) + 2} - (2a/b + 1)$$

ここで,

S_p ; Fig. 3.4.2-2 の荷重-荷重線変位曲線下の面積

B ; 試験片厚さ

b ; 試験片リガメント幅, $W - a$

ξ ; a/W

W ; 試験片幅

a ; き裂長さ

である。F(ξ) の数値を付録5の付表6に示す。

サイドグループ付試験片の場合は、板厚Bとして B_N を使用する。ここで、

B_N ; サイドグループ付試験片のグループ底間の厚さ

である。

(3) 修正J積分, J'

CCT試験片の場合は、次式により計算する。

$$J' = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \cdot \frac{P \delta}{2 B b}$$

ここで、P ; 荷重
 $\dot{\delta}$; 荷重線変位（開口変位）速度
 B ; 試験片厚さ
 b ; 試験片リガメント幅, W/2-a
 W ; 試験片幅
 2a ; き裂長さ
 α ; Norton 則のクリープ指数

である。

CT試験片の場合は、次式により計算する。

$$J' = \frac{\alpha}{\alpha+1} \cdot \frac{P \dot{\delta}}{B b} F(\xi)$$

$$F(\xi) = \gamma - \frac{\beta}{\alpha} \quad (\xi > 0.3)$$

$$\gamma = \frac{\frac{2(1+\eta)(1+\xi)}{(1+\eta^2)} + \eta(1-\xi)}{(1+\xi) + \eta(1-\xi)}$$

$$\beta = \frac{\eta}{\eta + \frac{1+\xi}{1-\xi}}$$

$$\eta = \sqrt{(2a/b)^2 + 2(2a/b) + 2} - (2a/b + 1)$$

ここで、P ; 荷重
 $\dot{\delta}$; 荷重線変位速度
 B ; 試験片厚さ
 b ; 試験片リガメント幅, W-a
 ξ ; a/W
 W ; 試験片幅
 a ; き裂長さ
 α ; Norton 則のクリープ指数

である。 γ , β の数値を付録6の付表7に、 $F(\xi)$ の数値を付録6の付表8に示す。

サイドグループ付試験片の場合には、J積分計算と同様に、板厚Bとしてグループ底間の厚さ B_N を使用する。

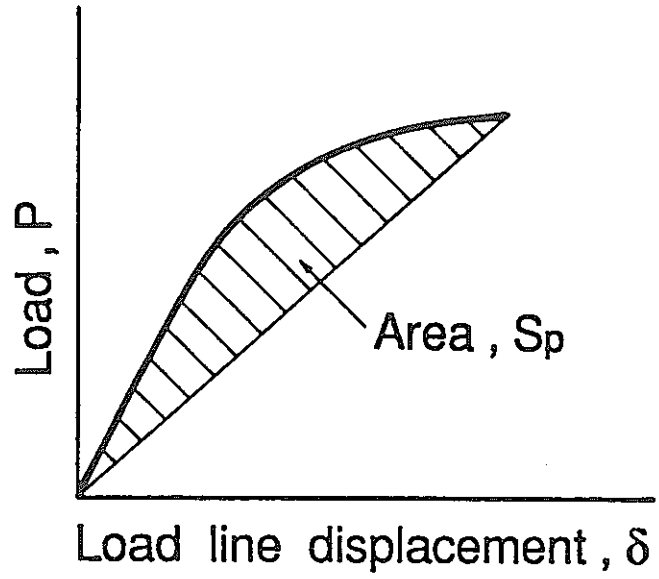
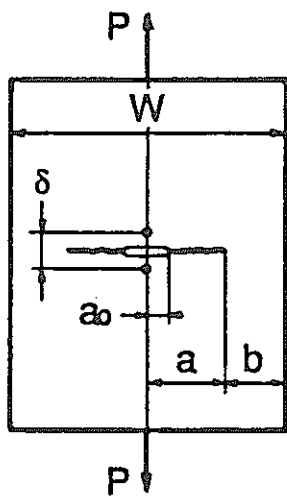


Fig.3.4.2-1 Definition of area S_p on CCT specimen

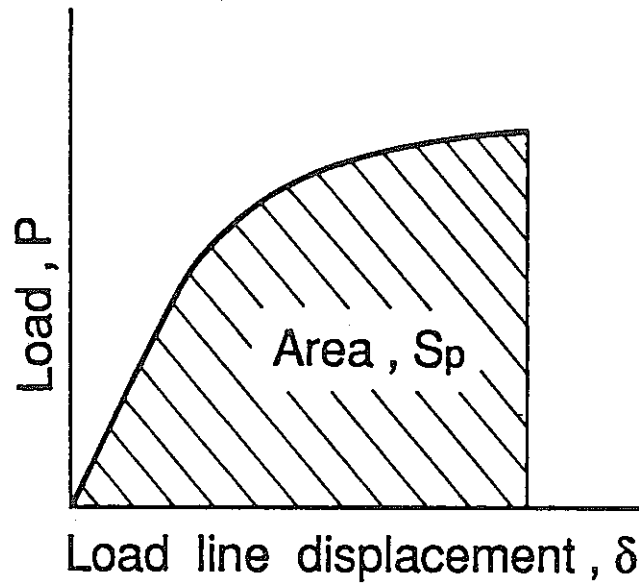
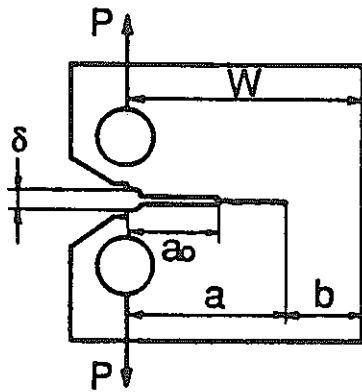


Fig.3.4.2-2 Definition of area S_p on CT specimen

3.4.3 ΔJ_I の評価

(1) CT試験片

CT試験片に対する ΔJ_I は、次式で定義される。

$$\Delta J_I = \frac{S_p}{B b} F(\xi) \dots\dots\dots (3.4.3-1)$$

$$F(\xi) = 2\left(\frac{1+\eta}{1+\eta^2}\right), \quad \eta(\xi) = \sqrt{(2a/b)^2 + 2(2a/b) + 2} - 2a/b - 1$$

ここで、 B ; 試験片板厚

b ; リガメント部長さ

a ; き裂長さ

S_p ; Fig. 3.4.3-1(a)で定義されたエネルギー

((3.4.3-1)式の背景については、4.4.3(1)を参照のこと)

(2) CCT試験片

CCT試験片に対する ΔJ_I は、次式で定義される。

$$\Delta J_I = \frac{\Delta K^2}{E'} + \frac{S_p}{B b} \dots\dots\dots (3.4.3-2)$$

$E' = E$ (平面応力), $E' = E/(1-\nu^2)$ (平面ひずみ)

$$\Delta K^2 = (\Delta P / BW) \sqrt{\pi a} F(\xi), \quad F(\xi) = \sqrt{\sec(\pi \xi/2)}$$

$$\text{または } F(\xi) = (1 - 0.5\xi + 0.370\xi^2 - 0.044\xi^3) / \sqrt{1-\xi},$$

$$\xi = 2a/W$$

ここで、 B ; 試験片板厚

W ; 試験片板幅

b ; リガメント半長

a ; き裂半長

E ; 縦弾性係数

ν ; ポアソン比

ΔP ; Fig. 3.4.3-1(b)で定義された荷重範囲

S_p ; Fig. 3.4.3-1(b)で定義されたエネルギー

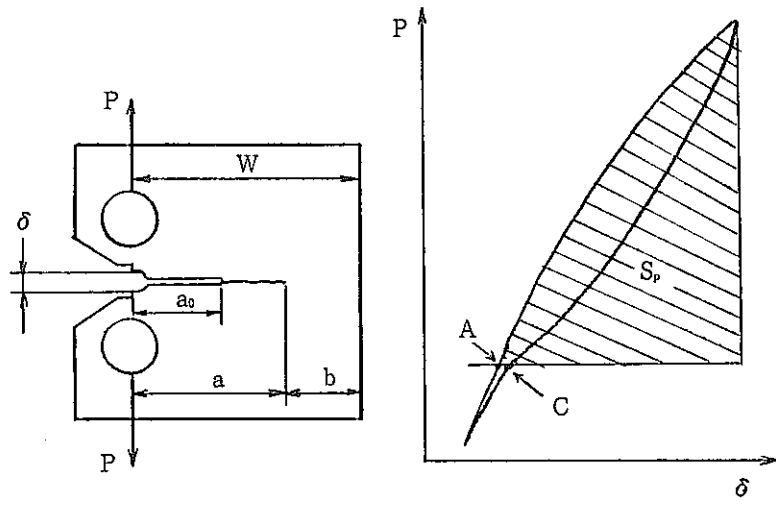
((3.4.3-2)式の背景については、4.4.3(2)を参照のこと)

(3) CCT試験片の荷重線変位測定のための標点距離

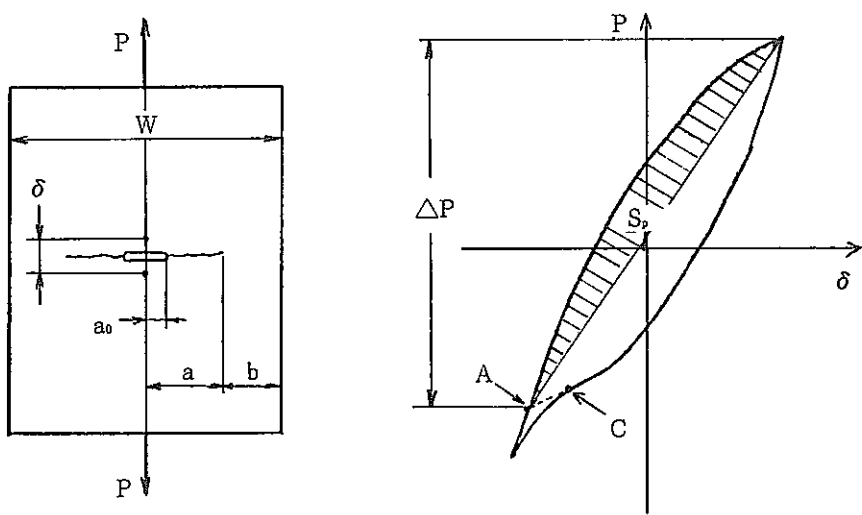
エネルギー S_p は、Fig. 3.4.3-1(b)に示すように、荷重-荷重線変位履歴曲線から求められる。荷重線変位を測定する場合、初期き裂から十分深いき裂まで有効な ΔJ_I を得るためには、き裂先端以外の情報が入らないように、標点距離を小さくしなければならない。また、適当な標点距離は、初期き裂長さ、板幅の他、負荷応力、試験温度、材料によっても異なる(詳細については、4.4.3(2)を参照のこと)。

(4) き裂開閉口

き裂開閉口が生じている場合、荷重－荷重線変位履歴曲線上のエネルギー S_p の測定開始点はき裂開閉口点とすることが望ましいが、荷重－荷重線変位履歴曲線においてはき裂開閉口点が求めにくい。ため、Fig. 3.4.3-1 に示すように、比較的求めやすいき裂閉口点を便宜的に、エネルギー S_p の測定開始点とする（詳細については、4.4.3(3)を参照のこと）。



(a) CT Specimen



(b) CCT Specimen

Fig.3.4.3-1 Definition of energy S_p for CT specimen and CCT specimen
(P ; Load, δ ; Load line displacement, C ; Crack closure point,
A ; Start point of S_p calculation)

3.4.4 ΔJ_c の評価

(1) CT試験片

CT試験片に対する ΔJ_c は、荷重保持の場合(3.4.4-1)式で、荷重点変位保持の場合(3.4.4-1)式あるいは(3.4.4-2)式で定義される。

ただし、(3.4.4-2)式は、保持中の荷重線変位の変化が小さい場合に限って有効である。

$$\Delta J_c = \frac{a}{a+1} \frac{S_c}{Bb} F(\xi) \quad \dots\dots\dots (3.4.4-1)$$

$$F(\xi) = r - \frac{\beta}{a}, \quad r = \frac{2(1+\eta)(1+\xi)}{(1+\eta^2)} + \eta(1-\xi) \\ \frac{(1+\xi) + \eta(1-\xi)}{}$$

$$\beta = \frac{\eta}{\eta + \frac{1+\xi}{1-\xi}}$$

$$\eta = \sqrt{(2a/b)^2 + 2(2a/b) + 2 - 2a/b - 1}, \quad \xi = a/W$$

ここで、B ; 試験片板厚

W ; 試験片板幅

b ; リガメント部長さ

a ; き裂長さ

α ; Norton 則における応力指数

S_c ; Fig. 3.4.4-1(a) で定義されたエネルギー

$$\Delta J_c = \frac{K_{max}^2 - K_r^2}{E'} \quad \dots\dots\dots (3.4.4-2)$$

$E' = E$ (平面応力), $E' = E / (1 - \nu^2)$ (平面ひずみ)

$K_{max} = (P_{max}/B\sqrt{W})F(\xi)$, $K_r = (P_r/B\sqrt{W})F(\xi)$

$$F(\xi) = \frac{2+\xi}{(1-\xi)^{3/2}} (0.886 + 4.64\xi - 13.32\xi^2 + 14.72\xi^3 - 5.6\xi^4)$$

$$\xi = a/W$$

ここで、B ; 試験片板厚

W ; 試験片板幅

a ; き裂長さ

E ; 縦弾性係数

ν ; ポアソン比

K_{max} ; Fig. 3.4.4-1(a) に示すように、荷重点変位保持開始時の荷重

K_r ; Fig. 3.4.4-1(a) に示すように、荷重点変位保持終了時の荷重

((3.4.4-2) 式の背景については、4.4.4(3) を参照のこと)

(2) CCT試験片

CCT試験片に対する ΔJ_c は、荷重保持の場合(3.4.4-3)式で、荷重点変位保持の場合(3.4.4-4)式で定義される。

ただし、(3.4.4-4)式は、保持中の荷重線変位の変化が小さい場合に限って有効である。

$$\Delta J_c = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \frac{S_c}{2 B b} \dots\dots\dots (3.4.4-3)$$

ここで、 B ; 試験片板厚

b ; リガメント半長

α ; Norton 則における応力指数

S_c ; Fig. 3.4.4-1(b) で定義されたエネルギー

$$\Delta J_c = \frac{K_{max}^2 - K_r^2}{E'} \dots\dots\dots (3.4.4-4)$$

$E' = E$ (平面応力), $E' = E / (1 - \nu^2)$ (平面ひずみ)

$K_{max} = (P_{max}/BW) \sqrt{\pi a} F(\xi)$, $K_r = (P_r/BW) \sqrt{\pi a} F(\xi)$

$F(\xi) = \sqrt{\sec(\pi \xi/2)}$ または, $F(\xi) = (1 - 0.5 \xi + 0.370 \xi^2 - 0.044 \xi^3) / \sqrt{1 - \xi}$, $\xi = 2a/W$

ここで、 B ; 試験片板厚

W ; 試験片板幅

a ; き裂半長

E ; 縦弾性係数

ν ; ポアソン比

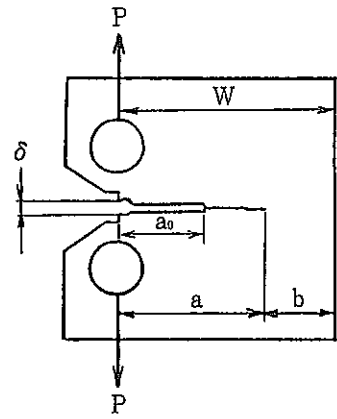
K_{max} ; Fig. 3.4.4-1(b) に示すように、荷重点変位保持開始時の荷重

K_r ; Fig. 3.4.4-1(b) に示すように、荷重点変位保持終了時の荷重

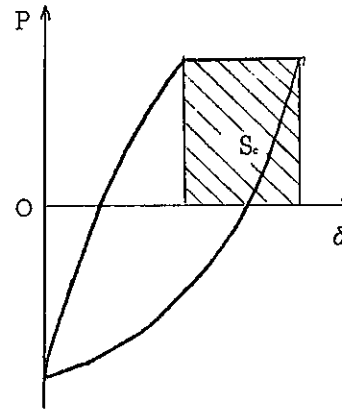
((3.4.4-4) 式の背景については、4.4.4(3) を参照のこと)

(3) CCT試験片の荷重線変位測定のための標点距離

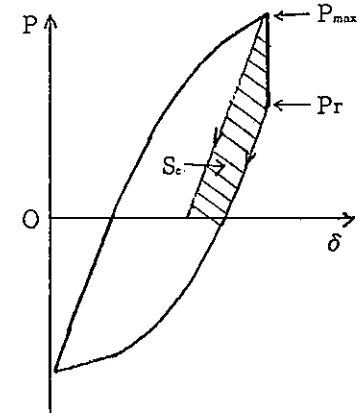
エネルギー S_c は、Fig. 3.4.4-1(b) に示すように、荷重-荷重線変位履歴曲線から求められる。荷重線変位を測定する場合、初期き裂から十分深いき裂まで有効な ΔJ_c を得るためには、き裂先端以外の情報が入らないように、標点距離を小さくしなければならない。また、適当な標点距離は、初期き裂長さ、板幅、板厚の他、負荷応力、試験温度、材料によっても異なる(詳細については、4.4.4(2) を参照のこと)。



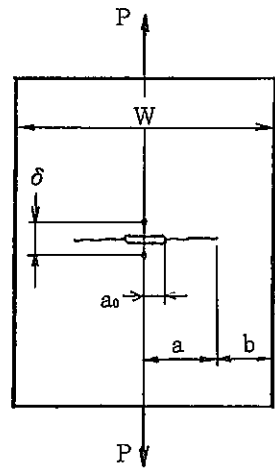
(a) CT Specimen



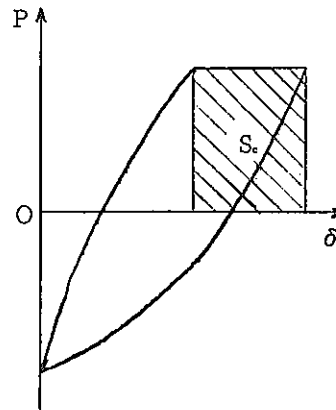
Load Hold



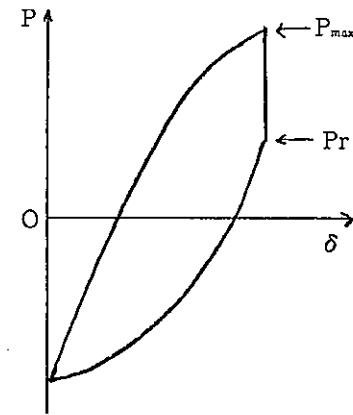
Load Point Displacement Hold



(b) CCT Specimen



Load Hold



Load Point Displacement Hold

Fig.3.4.4-1 Definition of energy S_p for CT specimen and CCT specimen (P; Load, δ ; Load line displacement)

3.4.5 き裂伝播速度の計算方法

各繰返し数 N_i におけるき裂長さ a_i が計測されている。高温での a_i の計測はコンプライアンス法あるいは電位差法によるのが一般的であり、これらの方法で求められた a_i はき裂前縁の形状（トンネリング）によらず平均的なき裂長さとして得られる。読取り顕微鏡等で試験片の表裏面で測定したき裂長さは表裏の平均値を a_i とする（CT試験片では2点，CCT試験片では4点の平均値）。

(1) Secant 法

相隣る2点のデータを直線で結びその傾斜から伝播速度を求める単純な方法であり、

$$(da/dN)_{\bar{a}} = (a_{i+1} - a_i) / (N_{i+1} - N_i) \dots\dots\dots (3.4.5-1)$$

で求められる。

ΔK あるいは ΔJ_I の計算に用いる a は $\bar{a} = (a_{i+1} + a_i) / 2$ であり、 N は $\bar{N} = (N_{i+1} + N_i) / 2$ である。

(2) Incremental Polynomial 法

a と N に関する $(2n+1)$ 個の一連のデータを2次多項式で近似し、データの中点の傾斜を計算し、順次データ点を1点ずつずらせながら計算して行く計算法である。従って、始めと終わりの各 $2n$ 個のデータは計算されない。

n としては1,2,3,4 が用いられ、 $n=3$ とした場合が7点法である。

$(2n+1)$ 個のデータのベストフィットカーブの式は

$$a_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2 \dots\dots\dots (3.4.5-2)$$

但し、

$$C_1 = 1/2(N_{i-n} + N_{i+n})$$

$$C_2 = 1/2(N_{i+n} - N_{i-n})$$

であり、 b_0 、 b_1 、 b_2 は最小二乗法で求められる。

伝播速度は、

$$(da/dN)_{\hat{a}_i} = b_1/C_2 + 2b_2(N_i - C_1)/(C_2)^2 \dots\dots\dots (3.4.5-3)$$

ΔK あるいは ΔJ_I の計算に用いる a_i であり、 N は N_i である。

なお、ASTM E647 では Fortran Program が示されているので、これを利用するのも一法である。

以上は da/dN についての計算法であった。高温での試験の場合、荷重保持時間が長い場合にはクリープの要素が強くなる。即ち、 ΔJ_I よりも ΔJ_0 の方が大きくなる場合には da/dt を求める必要がある。しかしこのような場合にも、前述の Secant 法や Incremental Polynomial 法が利用できる。

前述の繰返し数 N_i を時間 t_i に置き換えるだけでよく、 (a_i, t_i) の計測値があれば da/dt の計算は容易にできる。

3.5 報告

3.5.1 報告書に記載すべき事項

報告書は下記の事項を含まなければならない。

- (1) 試験材料, 採取位置およびき裂の進展方向
 - (i) 材料名
 - (ii) 材料の製造, 熱処理条件, 素材寸法
 - (iii) 材料の化学成分, 機械的性質
 - (iv) 試験片の採取方位及びき裂の進展方向〔付録1の付図1参照〕
- (2) 試験片の形状, 寸法
 - (i) 試験片の種類
 - (ii) 試験片厚さ, B
 - (iii) 試験片幅, W
 - (iv) 切欠きの形状, 寸法
 - (v) サイドグループの有無およびグループ底厚さ, B_N
 - (vi) 疲労予き裂の有無およびその寸法
- (3) 試験条件
 - (i) 試験片番号
 - (ii) 試験温度および温度分布
 - (iii) 加熱方法
 - (iv) 雰囲気
 - (v) 設定制御値 (荷重制御: 荷重範囲または応力範囲, 応力比; 変位制御: 軸方向全ひずみ範囲)
 - (vi) 制御波形 (周波数, 引張・圧縮負荷速度, 引張・圧縮保持時間)
 - (vii) 測定したき裂長さの範囲
 - (viii) 破壊までの繰返し数, 時間
- (4) 計測方法
 - (i) ひずみ計測方法およびそのゲージ長さ
 - (ii) 荷重線変位の計測方法およびそのゲージ長さ
 - (iii) き裂長さ計測方法
 - (iv) き裂伝播速度の求め方
- (5) 計測値
 - (i) 繰返し数または時間
 - (ii) き裂長さ
 - (iii) 荷重線変位の平均値および変動範囲
 - (iv) 荷重保持中における荷重線変位の増分 (荷重制御の場合)

- (v) 応力範囲, 上限応力および緩和後応力 (変位保持の場合)
- (6) 破壊力学特性値
 - (i) 計算き裂長さ
 - (ii) 計算に用いた縦弾性係数, E ; クリープ指数, α
 - (iii) 繰返し J 積分範囲, ΔJ_f
 - (iv) クリープ J 積分範囲, ΔJ_c
 - (v) 修正 J 積分, J'
 - (vi) 応力拡大係数範囲, ΔK (疲労, クリープ疲労) または応力拡大係数, K (クリープ)
 - (vii) 1 サイクル当たりまたは単位時間当たりのき裂伝播速度, da/dN , da/dt

(7) 試験機関, 担当者名, 報告年月

3.5.2 報告書に記載することが望ましい事項

報告書は下記の事項を含むことが望ましい。

(1) 材料, 試験片の詳細

- (i) 材料の組織写真
- (ii) 試験温度における材料の機械的性質
- (iii) 試験片の図面

(2) 試験方法の詳細

- (i) 試験機
- (ii) 計測器
- (iii) 試験概況を示す写真

(3) 疲労予き裂導入条件

- (i) 温度, 雰囲気
- (ii) 負荷条件, 繰返し数
- (iii) 導入末期のき裂伝播速度, da/dN

(4) 荷重-荷重線変位関係

- (i) 代表的荷重-荷重線変位曲線
- (ii) き裂開・閉口点
- (iii) 上記き裂開・閉口点を基準とした有効応力幅, 有効 J 積分範囲
- (iv) 応力幅, 全ひずみ幅, 塑性ひずみ幅, クリープひずみ

(5) 破壊力学的特性

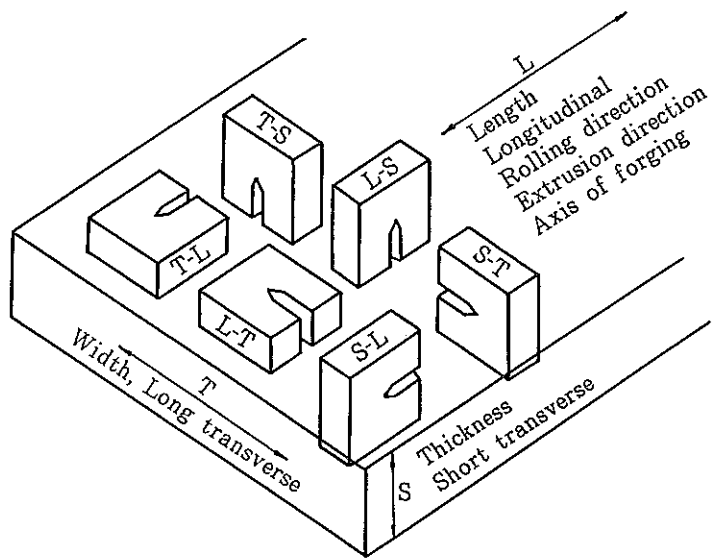
- (i) 塑性度, $\Delta J_p / (\Delta K^2 / E)$
- (ii) クリープ度, $\Delta J_c / \Delta J_f$
- (iii) 保持による加速量, $(da/dN) - (da/dN)_f$

ここに $(da/dN)_f$ は保持なしの場合の同一の ΔJ_f に対する進展速度で, その出典もあわせて示す。

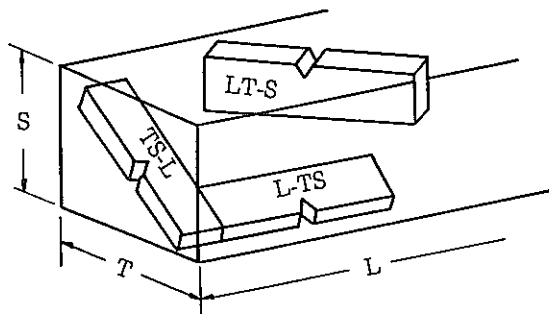
(6) 破 面

- (i) 破面の全体写真
- (ii) 破面の電子顕微鏡写真
- (iii) 試験片断面の顕微鏡写真

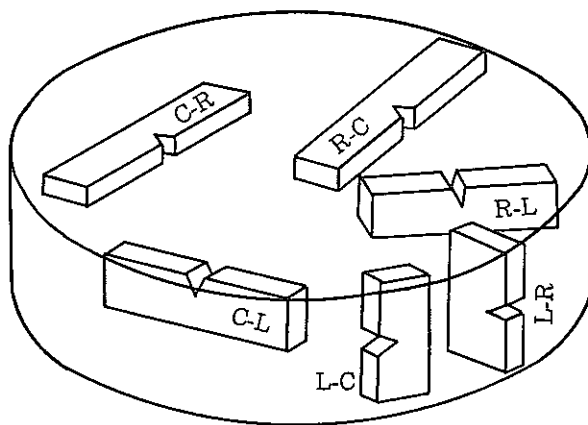
付録1 試料の採取方位及びき裂の進展方向の表示法



(a) 板材



(b) 板材 (傾斜切出し)



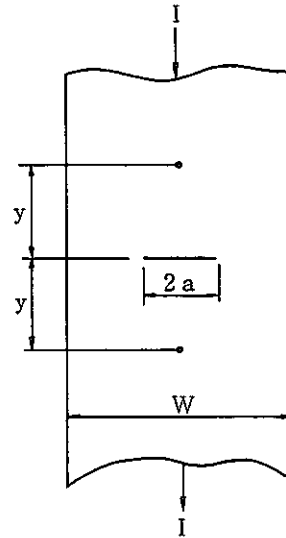
(c) 棒材

付録2 直流電位差とき裂長さの関係

(1) CCT試験片

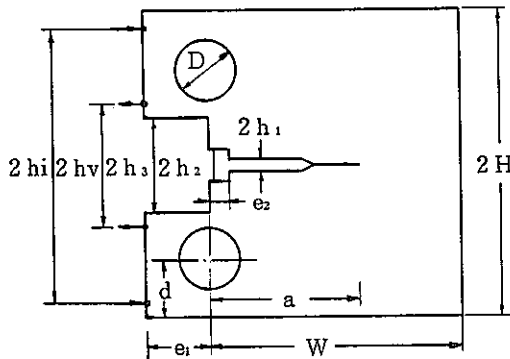
き裂長さが $2a_0$ と $2a$ の場合の電位差比¹⁾

$$\frac{V_a}{V_{a_0}} = \frac{\cosh^{-1} \left[\frac{\cos \pi y/W}{\cos \pi a/W} \right]}{\cosh^{-1} \left[\frac{\cosh \pi y/W}{\cosh \pi a_0/W} \right]} \quad \dots\dots\dots (付1)$$



(2) CT試験片

下図の形状については,²⁾



- H = 0.6W
- D = 0.25W
- d = 0.225W
- e₁ = 0.25W
- e₂ = 0.0785W
- h₁ = 0.0245W
- h₂ = 0.059W
- h₃ = 0.187W
- h_v = 0.246W
- h_i = 0.541W

$\xi = a/W$ から V_a/V_{a_0} を求める場合 ($0.25 \leq \xi \leq 0.9$)

$$\frac{V_a}{V_{a_0}} = 0.785 + 1.40 \xi - 2.51 \xi^2 + 2.29 \xi^3 + 6.19 \xi^4 - 13.1 \xi^5 + 7.29 \xi^6 \quad \dots\dots\dots (付2)$$

V_a/V_{a_0} から ξ を求める場合 ($0.25 \leq \xi \leq 0.95$)

$$\xi = -1.51 + 1.66 \left[\frac{V_a}{V_{a_0}} \right] + 0.866 \left[\frac{V_a}{V_{a_0}} \right]^2 - 1.03 \left[\frac{V_a}{V_{a_0}} \right]^3 + 0.296 \left[\frac{V_a}{V_{a_0}} \right]^4 - 0.260 \left[\frac{V_a}{V_{a_0}} \right]^5 \quad \dots\dots\dots (付3)$$

1) H. H. Johnson, "Calibrating the Electric Potential Method for Studying Slow Crack Growth," Materials and Standards, Vol. 5, No.9 (1965) pp. 442-445
 2) 紀博徳, 中島慶一, 山内英和, 山下康雄, "直流電気ポテンシャル法によるCT試験片の高温き裂長さ計測" 材料, 第35巻 第390号 (昭和61年3月) 312-316

付録3 荷重線変位とき裂長さの関係

(1) CCT試験片

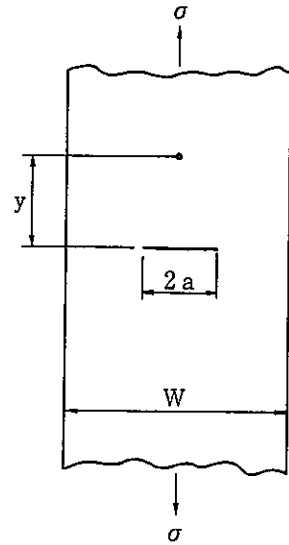
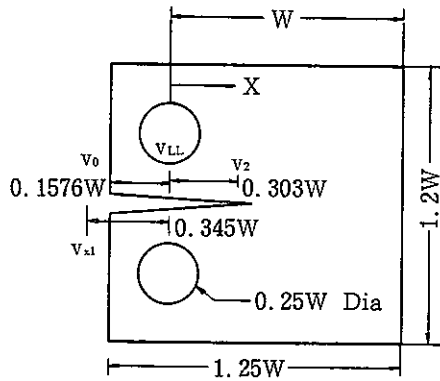
点 (0, y) での変位 v は¹⁾,

$$\frac{E}{\sigma W} v = \left[2 \left\{ \frac{2}{\pi y / W} \cosh^{-1} \left(\frac{\cosh(\pi y / W)}{\cosh(\pi \xi / 2)} \right) - \frac{1 + \nu}{\left[1 + \frac{\sin^2(\pi \xi / 2)}{\sin^2(\pi y / W)} \right]^{1/2} + \nu} \right\} \times \frac{y}{W} \left[\frac{\pi \xi}{2} \cos \frac{\pi \xi}{2} \right]^{1/2} \right] \dots\dots\dots (付4)$$

ここに、 $\xi = 2a / W$, Eは縦弾性係数, ν はポアソン比

(2) CT試験片

下図の標準CT試験片については、²⁾



a/Wの値から荷重線よりXなる点の変位 v_x を求める場合 ($0.2 \leq \xi \leq 0.975$)

$$\frac{BEv_x}{P} = \left[1 - \frac{X/W}{\xi} \right] \left[\frac{1 + \xi}{1 - \xi} \right]^2 \{ b_0 + b_1 \xi + b_2 \xi^2 + b_3 \xi^3 + b_4 \xi^4 + b_5 \xi^5 \} \dots (付5)$$

ここに、 $\xi = a/W$, Pは荷重, Bは板厚である。

付表1 式(付5)における定数

計測位置 X/W	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
-0.345 (v _{x1})	1.6396	11.020	-6.4495	-31.114	47.251	-18.343
-0.25 (v ₀)	1.6137	12.678	-14.231	-16.610	35.050	-14.494
-0.1576 (v ₁)	2.5376	3.9043	22.443	-91.534	107.40	-40.792
0 (v _{LL})	2.1630	12.219	-20.065	-0.9925	20.609	-9.9314

とくに、端面 ($X/W = -0.25$) での変位 V_0 は 0.5% の精度で次のように表される。

$$\frac{BEV_0}{P} = \left(1 + \frac{0.25}{\xi}\right) \left(\frac{1 + \xi^2}{1 - \xi}\right) \{1.61369 + 12.6778 \xi - 14.2311 \xi^2 - 16.6102 \xi^3 + 35.0499 \xi^4 - 14.4943 \xi^5\} \dots\dots\dots (付6)$$

荷重線変位 v_x から ξ の値は 0.05% の精度で下式より得られる ($0.2 \leq \xi \leq 0.975$)

$$a/W = C_0 + C_1(U_x)^2 + C_2(U_x)^3 + C_3(U_x)^4 + C_4(U_x)^5 + C_5(U_x)^6 \dots\dots\dots (付7)$$

$$U_x = \frac{1}{\left(\frac{BEV_x}{P}\right)^{1/2} + 1} \dots\dots\dots (付8)$$

付表2 式(付7)における定数

計測位置, X/W	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
-0.345 (v_{x1})	1.0012	-4.9165	23.057	-323.91	1798.3	-3513.2
-0.250 (v_0)	1.0010	-4.6695	18.460	-236.82	1214.9	-2143.6
-0.1576 (v_1)	1.0008	-4.4473	15.400	-180.55	870.92	-1411.3
0 (v_{LL})	1.0002	-4.0632	11.242	-106.04	464.33	-650.68

付表3 荷重線変位 v_x および回転 X_0/W の値

ξ	X/W					$\frac{X_0}{W}$
	-0.345	-0.25	0.1576	0	0.303	
	$\frac{BEV_{x1}}{P}$	$\frac{BEV_0}{P}$	$\frac{BEV_1}{P}$	$\frac{BEV_{LL}}{P}$	$\frac{BEV_2}{P}$	
0.2	20.86	17.69	14.61	8.6	-	0.2807
0.25	24.33	20.91	17.58	11.18	-	0.3302
0.30	28.66	24.90	21.24	14.28	4.64	0.3782
0.35	34.11	29.89	25.78	18.09	8.05	0.422
0.40	40.98	36.18	31.51	22.86	12.07	0.4658
0.45	49.78	44.23	38.83	28.96	17.24	0.5068
0.50	61.26	54.76	48.44	36.99	24.26	0.5506
0.55	76.77	69.00	61.44	47.90	34.26	0.5933
0.60	98.56	89.04	79.78	63.35	49.27	0.6385
0.65	130.73	118.7	107.0	86.36	73.29	0.6874
0.70	181.44	165.7	150.0	122.80	115.0	0.7366
0.75	267.92	245.4	223.5	185.4	195.1	0.7853
0.80	431.85	397.0	363.1	304.6	-	0.832
0.85	806.66	743.8	682.65	578.36	-	0.874
0.90	1921.25	1768.2	1628.06	1389.07	-	0.916
0.95	8095.73	7505.5	6931.4	5952.20	-	0.958
0.975	33370.9	30976.4	28647.5	24675.3	-	0.979
1.00	-	-	-	-	-	1.00

- 1) J. Eftis and H. Liebowitz, "On the Modified Westergaard Equations for Certain Plane Crack Problems," Intern. J. of Fracture Mechanics, Vol. 8, No.4 (1972) pp.383-391.
- 2) Ashok Saxena and S. J. Hudak, Jr., "Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens," Inten. J. of Fracture, Vol.14. No.5 (1978) pp.453-468.

付録4 応力拡大係数範囲 ΔK の値

(1) CCT試験片¹⁾

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} f(\xi), \quad 0 \leq \xi \leq 0.95 \quad \dots\dots\dots (付9)$$

$$f(\xi) = \sqrt{\sec \frac{\pi \xi}{2}}, \quad \xi = \frac{2a}{W} \quad \dots\dots\dots (付10)$$

付表4 式(付10)の $f(\xi)$ の値

$\xi=2a/W$	$f(\xi)$	$\xi=2a/W$	$f(\xi)$	$\xi=2a/W$	$f(\xi)$
0.05	1.002	0.35	1.083	0.65	1.383
0.10	1.006	0.40	1.112	0.70	1.484
0.15	1.014	0.45	1.147	0.75	1.617
0.20	1.025	0.50	1.189	0.80	1.799
0.25	1.040	0.55	1.241	0.85	2.070
0.30	1.059	0.60	1.304	0.90	2.528
				0.95	3.570

(2) CT試験片²⁾

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{Be\sqrt{W}} f(\xi), \quad 0.2 \leq \xi \quad \dots\dots\dots (付11)$$

$$f(\xi) = \frac{(2 + \xi)}{(1 - \xi)^{3/2}} (0.886 + 4.64 \xi - 13.32 \xi^2 + 14.72 \xi^3 - 5.6 \xi^4), \quad \xi = \frac{a}{W} \quad \dots\dots (付12)$$

付表5 式(付12)の $f(\xi)$ の値

$\xi=a/W$	$f(\xi)$	$\xi=a/W$	$f(\xi)$	$\xi=a/W$	$f(\xi)$	$\xi=a/W$	$f(\xi)$	$\xi=a/W$	$f(\xi)$	$\xi=a/W$	$f(\xi)$
0.450	8.34	0.500	9.66	0.550	11.36	0.600	13.65	0.650	16.86	0.700	21.55
0.455	8.46	0.505	9.81	0.555	11.56	0.605	13.93	0.655	17.25	0.705	22.14
0.460	8.58	0.510	9.96	0.560	11.77	0.610	14.21	0.660	17.65	0.710	22.75
0.465	8.70	0.515	10.12	0.565	11.98	0.615	14.50	0.665	18.07	0.715	23.40
0.470	8.83	0.520	10.29	0.570	12.20	0.620	14.80	0.670	18.51	0.720	24.07
0.475	8.96	0.525	10.45	0.575	12.42	0.625	15.11	0.675	18.97	0.725	24.77
0.480	9.09	0.530	10.63	0.580	12.65	0.630	15.44	0.680	19.44	0.730	25.51
0.485	9.23	0.535	10.80	0.585	12.89	0.635	15.77	0.685	19.94	0.735	26.29
0.490	9.37	0.540	10.98	0.590	13.14	0.640	16.12	0.690	20.45	0.740	27.10
0.495	9.51	0.545	11.17	0.595	13.39	0.645	16.48	0.695	20.99	0.745	27.96
										0.750	28.86

1) C. E. Feddersen, "Discussion in Plane-Strain Crack Toughness Testing of Metallic Materials," ASTM STP 410, Am. Soc. Testing Materials, (1976) pp. 77-79.

2) J. E. Srawley, "Wide Range Stress Intensity Factor Expressions for ASTM Method E399 Standard Fracture Toughness Specimens," Intern. J. of Fracture, Vol. 12, (1976) pp. 475-476.

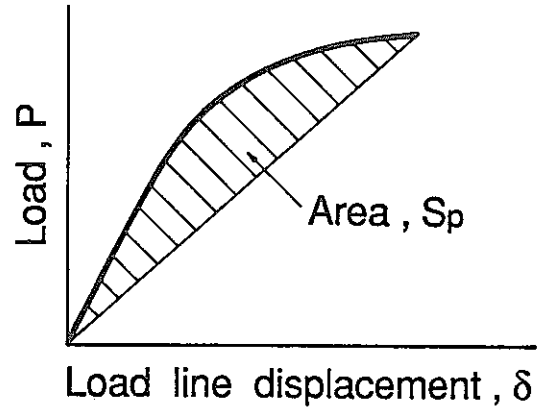
付録5 J積分範囲 ΔJ_f の値

(1) CCT試験片¹⁾

$$\Delta J_f = \frac{\Delta K^2}{E} + \frac{S_p}{B_e b}$$

$$0.1 \leq 2a/W \leq 0.75 \quad \dots\dots (付13)$$

ここに、 S_p は、右図に示すように、
P- δ ヒステリシスループの面積の1/2.



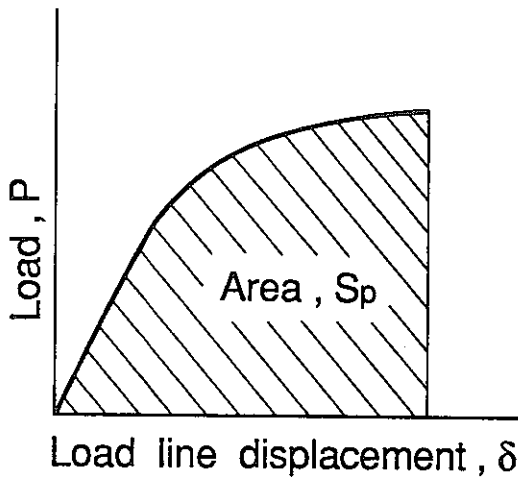
(2) CT試験片²⁾

$$\Delta J_f = - \frac{2 S_p}{B b} f(\eta(\xi)) \quad \dots\dots\dots (付14)$$

$$f(\eta(\xi)) = \frac{1 + \eta}{1 + \eta^2} \quad \dots\dots\dots (付15)$$

$$\eta(\xi) = \sqrt{(2\xi/1-\xi)^2 + 2(2\xi/1-\xi) + 2} - \frac{1+\xi}{1-\xi} \quad \dots\dots\dots (付16)$$

ここに、 $\xi = a/W$, S_p は下図に示すように、P- δ 線図下の面積。



付表6 式(付14)の $f(\xi)$ の値

$\xi = a/W$	$f(\xi)$	$\xi = a/W$	$f(\xi)$
0.45	2.2896	0.63	2.1966
0.46	2.2348	0.64	2.1912
0.47	2.2800	0.65	2.1858
0.48	2.2750	0.66	2.1804
0.49	2.2700	0.67	2.1748
0.50	2.2650	0.68	2.1694
0.51	2.2598	0.69	2.1640
0.52	2.2548	0.70	2.1586
0.53	2.2496	0.71	2.1532
0.54	2.2444	0.72	2.1476
0.55	2.2392	0.73	2.1422
0.56	2.2340	0.74	2.1368
0.57	2.2286	0.75	2.1314
0.58	2.2234	0.76	2.1260
0.59	2.2180	0.77	2.1206
0.60	2.2126	0.78	2.115
0.61	2.2074	0.79	2.1096
0.62	2.2020	0.80	2.1042

1) 平修二, 大谷隆一, 北村隆行, 山田勝彦, “クリープ疲労重畳下のき裂伝播に関するJ積分による検討”, 材料, 第28巻, 第308号(昭54)414-420
 2) J. G. Merkle and H. T. Corten, “A J Integral Analysis for the Compact Specimen Considering Axial Forces as Well as Bending Effects,” Trans. ASME, J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 96 (1974) pp. 286-292

付録6 修正J積分J'の値

(1) CCT試験片

$$J' = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \cdot \frac{P \dot{\delta}}{2 B e b} \quad \dots\dots\dots (付17)$$

ここに、 $\dot{\delta}$ は荷重線変位速度

(2) CT試験片¹⁾

$$J' = \frac{\alpha}{\alpha + 1} \cdot \frac{P \dot{\delta}}{B e b} F(\xi) \quad \dots\dots\dots (付18)$$

$$F(\xi) = \gamma - \frac{\beta}{\alpha}, \quad \xi = a/W \quad \dots\dots\dots (付19)$$

$$\gamma = \frac{\frac{2(1+\eta)(1+\xi)}{(1+\eta^2)} + \eta(1-\xi)}{(1+\xi) + \eta(1-\xi)} \quad \dots\dots\dots (付20)$$

$$\beta = \frac{\eta}{\eta + \frac{1+\xi}{1-\xi}} \quad \dots\dots\dots (付21)$$

$$\eta = \sqrt{(2\xi/(1-\xi))^2 + 2(2\xi/(1-\xi)) + 2} \frac{1+\xi}{1-\xi} \quad \dots\dots\dots (付22)$$

付表7 γ, β の値

ξ	γ	β
0.0	2.0	0.293
0.1	2.089	0.226
0.2	2.154	0.168
0.3	2.193	0.119
0.4	2.207	0.081
0.5	2.200	0.051
0.6	2.177	0.030
0.7	2.141	0.015
0.8	2.097	0.006
0.9	2.050	0.001
1.0	2.0	0

付表8 $\alpha = 7$ の場合の $F(\xi)$ の値

$\xi = a/W$	$F(\xi, \alpha=7)$	$\xi = a/W$	$F(\xi, \alpha=7)$	$\xi = a/W$	$F(\xi, \alpha=7)$
0.45	2.197	0.55	2.184	0.65	2.157
0.46	2.196	0.56	2.182	0.66	2.153
0.47	2.196	0.57	2.180	0.67	2.150
0.48	2.195	0.58	2.177	0.68	2.146
0.49	2.194	0.59	2.175	0.69	2.143
0.50	2.193	0.60	2.172	0.70	2.139
0.51	2.191	0.61	2.169	0.71	2.135
0.52	2.190	0.62	2.166	0.72	2.131
0.53	2.188	0.63	2.163	0.73	2.127
0.54	2.186	0.64	2.160	0.74	2.123
				0.75	2.119

1) H. A. Ernst, "Unified Solution for J Ranging Continuously from Pure Bending to Pure Tension,"
Fracture Mechanics : Fourteenth Conference, Vol. I : Theory and Analysis, ASTM STP 791 (1983)
pp. 1499-1519

付録7 クリープJ積分範囲 ΔJ_c の値

(1) CCT試験片

$$\Delta J_c = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \cdot \frac{P_{\max} \delta_c}{2 \text{Beb}} \quad : \quad \text{荷重保持の場合} \quad \dots\dots\dots (付23)$$

ここに、 δ_c は上限荷重保持中における荷重線変位の増分。

$$\Delta J_c = \frac{(K_{\max})^2 - (K_r)^2}{E^*} \quad : \quad \text{変位保持の場合} \quad \dots\dots\dots (付24)$$

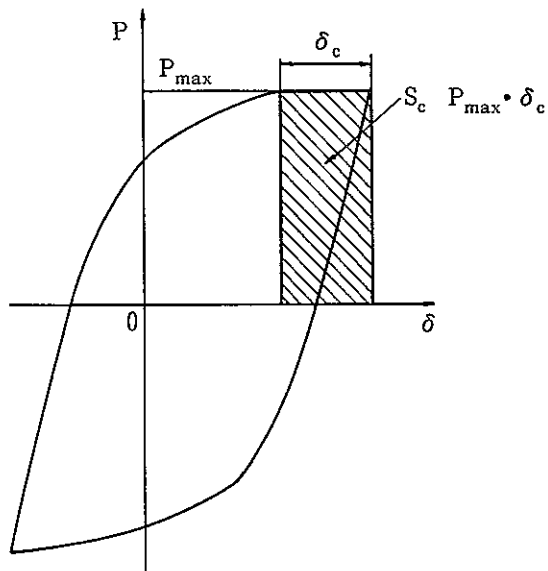
ここに、 K_{\max} 、 K_r は上限荷重、緩和後荷重に対応する応力拡大係数、 E^* は等価縦弾性係数で、平面応力では E 、平面ひずみでは $E/(1 - \nu^2)$ 。

(2) CT試験片

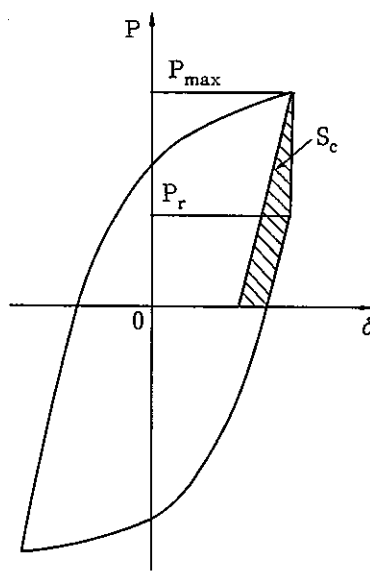
$$\Delta J_c = \frac{\alpha}{\alpha + 1} \cdot \frac{P \delta_c}{2 \text{Beb}} F(\xi) \quad : \quad \text{荷重保持の場合} \quad \dots\dots\dots (付25)$$

$F(\xi)$ は式 (付19) ~ (付22)。

$$\left. \begin{aligned} \Delta J_c &= \frac{(K_{\max})^2 - (K_r)^2}{E^*} \\ \text{又は } \Delta J_c &= \frac{\alpha}{\alpha + 1} \cdot \frac{S_c}{2 \text{Beb}} F(\xi) \end{aligned} \right\} : \quad \text{変位保持の場合} \quad \dots\dots\dots (付26)$$



上限荷重保持の場合



上限変位保持の場合

付録8 SUS 304 鋼の材料定数

(1) クリープ構成式

$$\dot{\epsilon}_c = A \cdot \sigma^\alpha; \sigma(\text{kgf/mm}^2), \dot{\epsilon}_c(\text{mm/mm/h}) \dots\dots\dots (\text{付27})$$

上記の Norton 形の式で近似した場合のパラメータ A, α の値を下表に示す。

付表9 式(付27)におけるパラメータ A, α (SUS 304鋼)

温度 (°C)	保持時間 (分)	パラメータ	
		A	α
550	10.0	3.2213×10^{-13}	7.0818
	60.0	6.3591×10^{-13}	6.7051
650	10.0	7.1122×10^{-10}	6.0504
	60.0	8.1709×10^{-10}	5.8650
550	30000.0	1.2527×10^{-12}	5.8128

(2) 繰返し応力-ひずみ関係式

(a) Ludwick 型関係式

(i) $\Delta\sigma/2 > \sigma_p$ のとき,

$$\log_{10}(\Delta\sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \log_{10}(\Delta\epsilon_t - \Delta\sigma/E) \dots\dots\dots (\text{付28})$$

(ii) $\Delta\sigma/2 \leq \sigma_p$ のとき,

$$\Delta\sigma = E \Delta\epsilon_t \dots\dots\dots (\text{付29})$$

ただし, $\Delta\sigma$; 応力範囲 (kgf/mm²), $\Delta\epsilon_t$; 全ひずみ範囲 (mm/mm)

温度範囲 550°C~650°C までの各パラメータを下表に示す。

付表10 式(付28)におけるパラメータの値 (SUS 304鋼)

温度 (°C)	550	600	650
パラメータ			
A ₀	2.4890	2.3577	2.1694
A ₁	0.4267	0.4008	0.3453
E	15678.0	15192.0	14706.0
σ_p	7.05	6.88	7.56

(b) Ramberg-Osgood 型関係式

$$\epsilon_p / \epsilon_0 = \alpha \cdot (\sigma / \sigma_0)^\beta \dots\dots\dots (\text{付30})$$

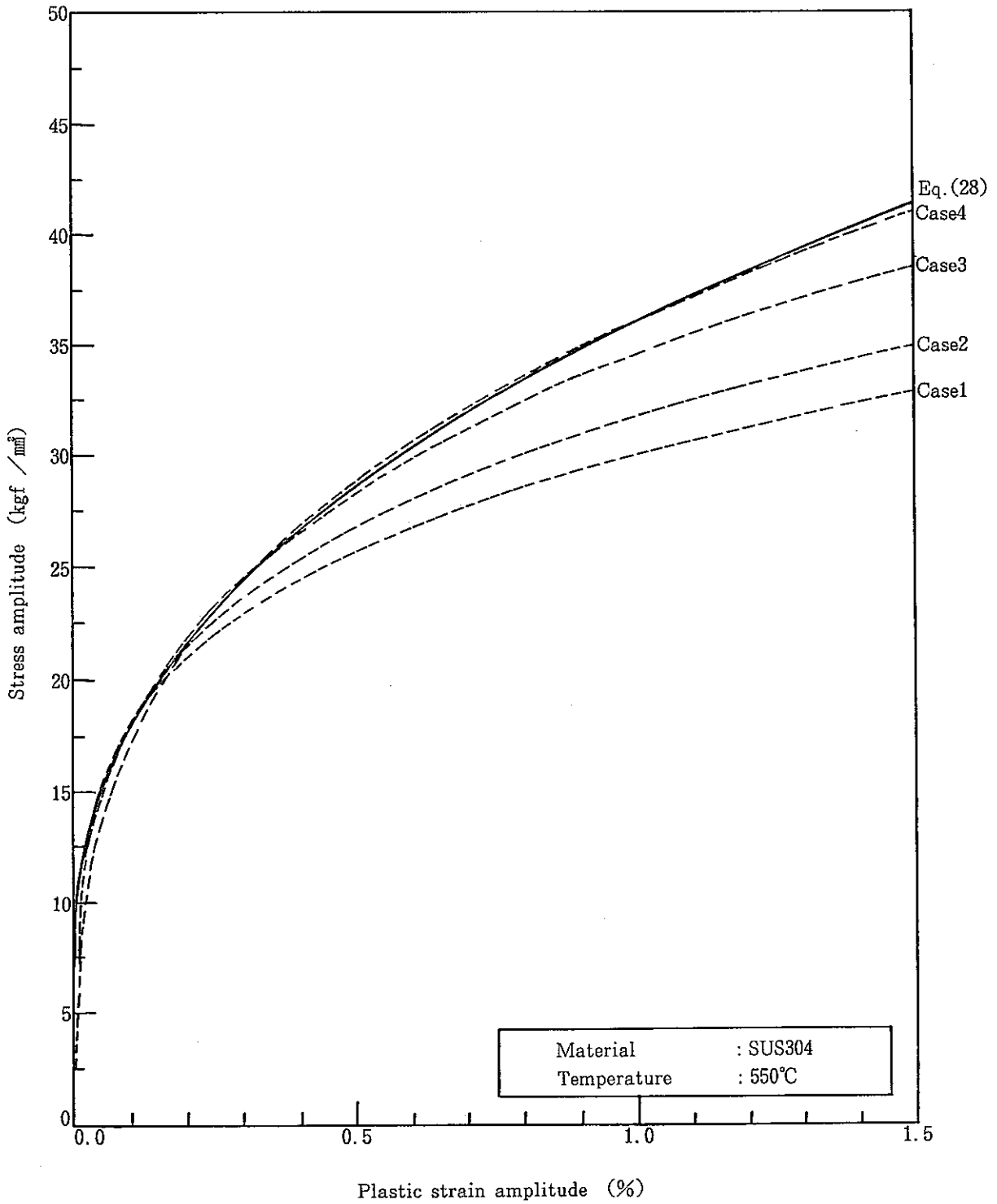
ただし, ϵ_0 ; 比例限 (%), σ_0 ; 比例限 (kgf/mm²)

4 区分された各々のひずみ範囲における, 温度 550°C~650°C までの各パラメータの値は次頁の表に示す通りである。

付表11 式(付30)におけるパラメータ α , n の値

温度 (°C)	ひずみ範囲 (%)	α	n	
550°C $\epsilon_0=0.044967\%$ $\sigma_0=7.05\text{kgf/mm}^2$	$0.0 \leq \epsilon_p \leq 0.10$	0.37516×10^{-1}	4.39829	Case 1
	$0.0 \leq \epsilon_p \leq 0.20$	0.47748×10^{-1}	4.07869	Case 2
	$0.0 \leq \epsilon_p \leq 0.50$	0.82022×10^{-1}	3.52608	Case 3
	$0.0 \leq \epsilon_p \leq 1.50$	0.14262	3.08826	Case 4
600°C $\epsilon_0=0.045287\%$ $\sigma_0=6.88\text{kgf/mm}^2$	$0.0 \leq \epsilon_p \leq 0.10$	0.32584×10^{-1}	4.90486	
	$0.0 \leq \epsilon_p \leq 0.20$	0.41807×10^{-1}	4.55090	
	$0.0 \leq \epsilon_p \leq 0.50$	0.73441×10^{-1}	3.92856	
	$0.0 \leq \epsilon_p \leq 1.50$	0.13200	3.42337	
650°C $\epsilon_0=0.051406\%$ $\sigma_0=7.56\text{kgf/mm}^2$	$0.0 \leq \epsilon_p \leq 0.10$	0.18597×10^{-1}	6.12629	
	$0.0 \leq \epsilon_p \leq 0.20$	0.24232×10^{-1}	5.70897	
	$0.0 \leq \epsilon_p \leq 0.50$	0.44090×10^{-1}	4.95587	
	$0.0 \leq \epsilon_p \leq 1.50$	0.83851×10^{-1}	4.31136	

550°C における Ludwick 型関係式 (付28), (付29) とそれを Ramberg-Osgood 型関係式 (付30) で近似した場合の対応を付図に示す。式 (付30) では σ_0 以下の応力でも ϵ_p の値を表わす。式 (付30) のパラメータ α , n を用いて Kumar-German-Shih の式などを用いて解析的に ΔJ_I の値を求める場合, 実断面積当りの応力に対応する式 (付28) のひずみ値が式 (付30) でよく近似されていることを確認しておく必要がある。



4 Kinds of stress-strain relationship employed in the calculation

付録9 報告書用図表の例

実験データ報告書

昭和 年 月

試験者	機関名			担当者名		
試験片	材料名	JIS 素材ID	試験片採取位置 き裂の進展方向		試験片寸法	厚さ mm 幅 mm
	試験片の種類	1.中央き裂入り平板 2.CT 3.その他()		サイドグループ	1.有 2.無 グループ底厚さ mm	
	切欠きの形状・寸法	mm	疲労予き裂	1.有 2.無 寸法 mm	その他	
試験条件	温度	°C± °C	加熱方法		雰囲気	
	制御方法	1.荷重制御 2.変位(ひずみ)制御 3.荷重一定(クリープ) 4.その他()				
計測方法	ひずみ計測方法・ゲージ長さ			mm		
	荷重点変位計測方法・ゲージ長さ			mm		
	き裂長さ計測方法					
	き裂伝播速度の求め方			1.Incremental Polynomial法 2.Secant法 3.その他()		
	計算に用いた材料定数			E = kgf/mm ² , α =		
実験結果	試験片番号					
	設定荷重・ひずみ					
	制御波形, 引張・圧縮負荷速度, 保持時間					
	測定したき裂長さ a の範囲	~ mm	~ mm	~ mm	~ mm	~ mm
	実験サイクル数・時間					
	塑性度 $\Delta J_p / (\Delta K^2 / E)$	~	~	~	~	~
	クリープ度 $\Delta J_c / \Delta J_f$	~	~	~	~	~
	その他					

素材の基礎データ記入用紙

素材	規格名 (社内規格のときはCMと記入する。)	K:キルド, S:セミキルドなどの別 R:リムド, X:不明		成形法 F:鍛造, R:熱間圧延, E:押出, S:抽伸, D:ダイキャスト C:鋳造, W:冷間加工, O:その他, X:不明		受入時素材寸法mm		清浄度%													
	溶解方法 E:電気炉, O:平炉, C:転炉 S:真空溶解などの特殊処理, X:不明	材料記号		相当材のときはEと記入する。	製造年	鍛造比 押出比(%)	製造所[英文(略号可)]		板 幅	厚 さ	A系	B系	C系	合計							
		管 外径	厚 さ	介在物	介在物	介在物	管 外径	厚 さ	管 外径	厚 さ	介在物	介在物	介在物								
11 G, A	13	17		31 32 34	36 37 38 39 40	43		61	65	69	72	75	78								
化学成分	化学成分重量% (Mo<0.05などの微量成分表示については以下の例に従い各欄とも左端よりつめて記入する。)											その他の成分									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Ti	成分重量%	成分重量%							
11 F, E	13	17	21	26	30	34	39	44	48	52	57	62	67	69	74	76					
熱処理・硬さ	熱処理時寸法 mm		素材の熱処理 (冷却法 A:空冷, F:炉冷, O:油冷, W:水冷 S:2段熱処理のように次段に連続, Y:溶体化処理)										N:番号	BR:ブリネル	VS:ビッカース						
	板 幅	厚 さ	第1回		第2回		第3回		第4回		冷却法	D:粒径	SH:ショア	VM:マイクロビッカース							
	管 外径	厚 さ	温度	保持時間	温度	保持時間	温度	保持時間	温度	保持時間	冷却法	結晶粒径	RB:ロックウェル	Bスケール	RC:ロックス	Cスケール	RF:リット	Fスケール			
11 H, T	13	17	21	25	29	31	35	39	41	45	49	50	51	55	59	60	61	65	67	71	75
機械的性質	引張試験片					引張試験結果										引張試験温度 ℃					
	採取方向	試験片形状		試験部寸法 mm			Y:上降伏点を示すとき L:下降伏点を示すとき P:耐力を示すとき		引張強さ		伸び		絞り		真破断ひずみ						
		(I)B;棒, W;線 P;板, T;管, S;角棒		板 幅	厚 さ	標点間距離 mm	試験片数	降伏点 又は0.2%耐力		MPa	(3) 変動係数	%	(3) 変動係数	%	(3) 変動係数		%	(3) 変動係数			
		試験片形状規格		管 外径	厚 さ			MPa	(3) 変動係数										MPa	(3) 変動係数	MPa
*	規格	記号	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*					
11 M, U	13	15	19	23	24	28	32	35	37	38	42	46	50	54	57	61	64	68	71	75	
11 M, U	13	15	19	23	24	28	32	35	37	38	42	46	50	54	57	61	64	68	71	75	
11 M, U	13	15	19	23	24	28	32	35	37	38	42	46	50	54	57	61	64	68	71	75	
11 M, U	13	15	19	23	24	28	32	35	37	38	42	46	50	54	57	61	64	68	71	75	

(1) 板, 角棒の区別は次による。
板 P; w/t > 2, 角棒 S; w/t ≤ 2

(2) 熱処理条件不明のとき以下により該当コードを記入。
R:供給のまま, Q:調質したが条件不明, H:熱処理したが条件不明

(3) 変動係数vは次式によって算出する。

$$v = \frac{\sqrt{\frac{\sum (X_i - \mu)^2}{n-1}}}{\mu}$$

ここに, X_i:観測値
n:観測値の数
μ:観測値の平均値

溶接材料の基礎データ記入用紙

溶接材料	規格 (社内規格のときはCM)	材料記号	相当材のときはEと記入する				製造年	棒径 mm	重量%		重量%		重量%		重量%		重量%								
			*	*	*	*			成分	成分	成分	成分	成分	成分	成分	成分									
11 W A	13	17					31	32	34	36	39	41	47	49	55	57	63	65	71	73					
11 W B											39	41	47	49	55	57	63	65	71	73					
溶接条件	B;突合せ, L;かど T;T字, O;その他 C;十字		I, V, U, J, K, X 開先はそのまゝ記入 L;波形, D;両U E;両J, O;その他		(2)溶接方向	溶接電流 A	溶接電圧 V	溶接速度 cm/min	入熱量 kJ/cm	予熱温度 ℃	バス間 温度 ℃	溶接後熱処理				W;溶接金属, B;境部 H;熱影響部, M;混合 U;不明, O;その他									
	溶接法 (1)	継手形状 * 主平板厚 mm	開先形状 * パス数 裏側 裏側	温度 ℃								保持時間 h	冷却法 * 雰囲気 * 温度 ℃	保持時間 h	冷却法 * 雰囲気 * 温度 ℃	試験部位 * 方向 * 値 MPa	試験部位 * 方向 * 値 MPa	試験部位 * 方向 * 値 MPa	試験部位 * 方向 * 値 MPa						
11 W C	13	15	16	20	21	23	25	27	31	34	38	42	46	50	52	56	60	61	63	67	71	72	73	75	76
化学成分	溶接金属化学成分 重量%											その他の成分													
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Ti	成分	重量%	成分	重量%									
11 W D	13	17	21	26	30	34	39	44	48	52	57	62	67	69	74	76									
機械的性質	溶接金属引張試験片											引張試験結果											引張試験温度 ℃		
	(5)採取方向 *	試験片形状			試験片寸法 mm			標点間距離 mm	試験片数 *	Y;上降伏点を示すとき L;下降伏点を示すとき P;耐力を示すとき		引張強さ		伸び		絞り		真破断ひずみ							
		(6)B;棒, W;線 P;板, T;管, S;角棒			板 角棒	幅	厚さ			降伏点 又は0.2%耐力	MPa	(6) 変動係数	MPa	(6) 変動係数	%	(6) 変動係数	%	(6) 変動係数	%	(6) 変動係数					
		試験片形状規格			棒 線	一 直 径	管 外径														厚さ				
規格	記号	*	管	外径	厚さ																				
11 W E	13	15	19	23	24	28	32	35	37	38	42	46	50	54	57	61	64	68	71	75					
11 W E	13	15	19	23	24	28	32	35	37	38	42	46	50	54	57	61	64	68	71	75					
11 W E	13	15	19	23	24	28	32	35	37	38	42	46	50	54	57	61	64	68	71	75					

(1) 溶接法コードは以下の中から選択する。
 MW;手溶接 ES;エレクトロスラグ FW;原棒溶接
 TG;TIG EG;エレクトログラス DB;拡散接合
 MG;MIG EB;電子ビーム BL;ろう接合
 SM;サブマージ RW;抵抗溶接 OT;その他

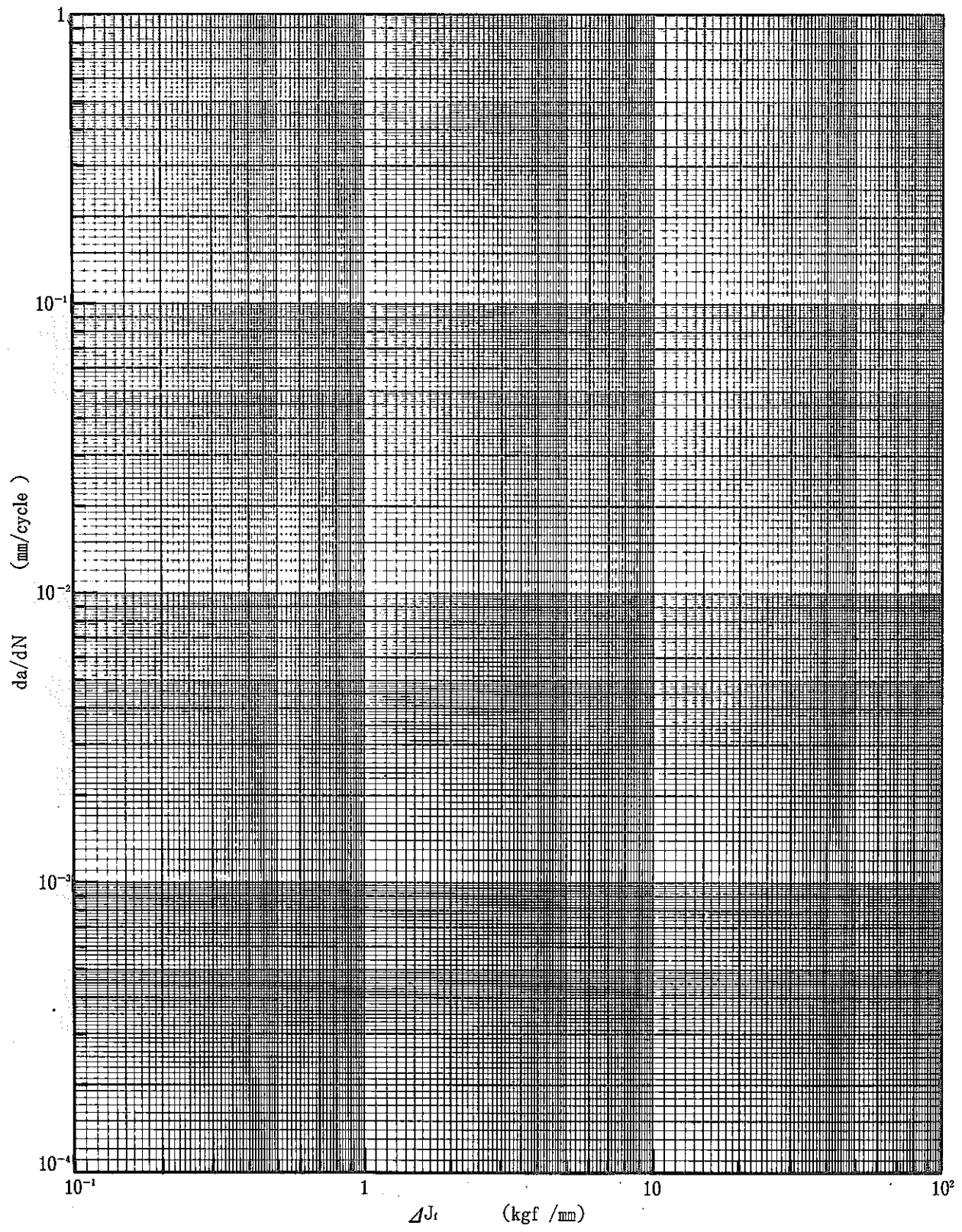
(2) 溶接方向は別表2による。
 (3) 雰囲気, 冷却法のコードは以下の中から選択する。
 雰 (AE;空気中, VC;真空中
 開 (AR;アルゴン中, N2;窒素中) 冷却 (A;空冷, O;油冷
 気 (H2;水素中, OT;その他) 法 (F;炉冷, W;水冷)

(4) き裂の方向は別表3による。
 (5) 採取方向は別表1による。
 (6) 素材基礎データ記入用紙の脚注(3)を参照。

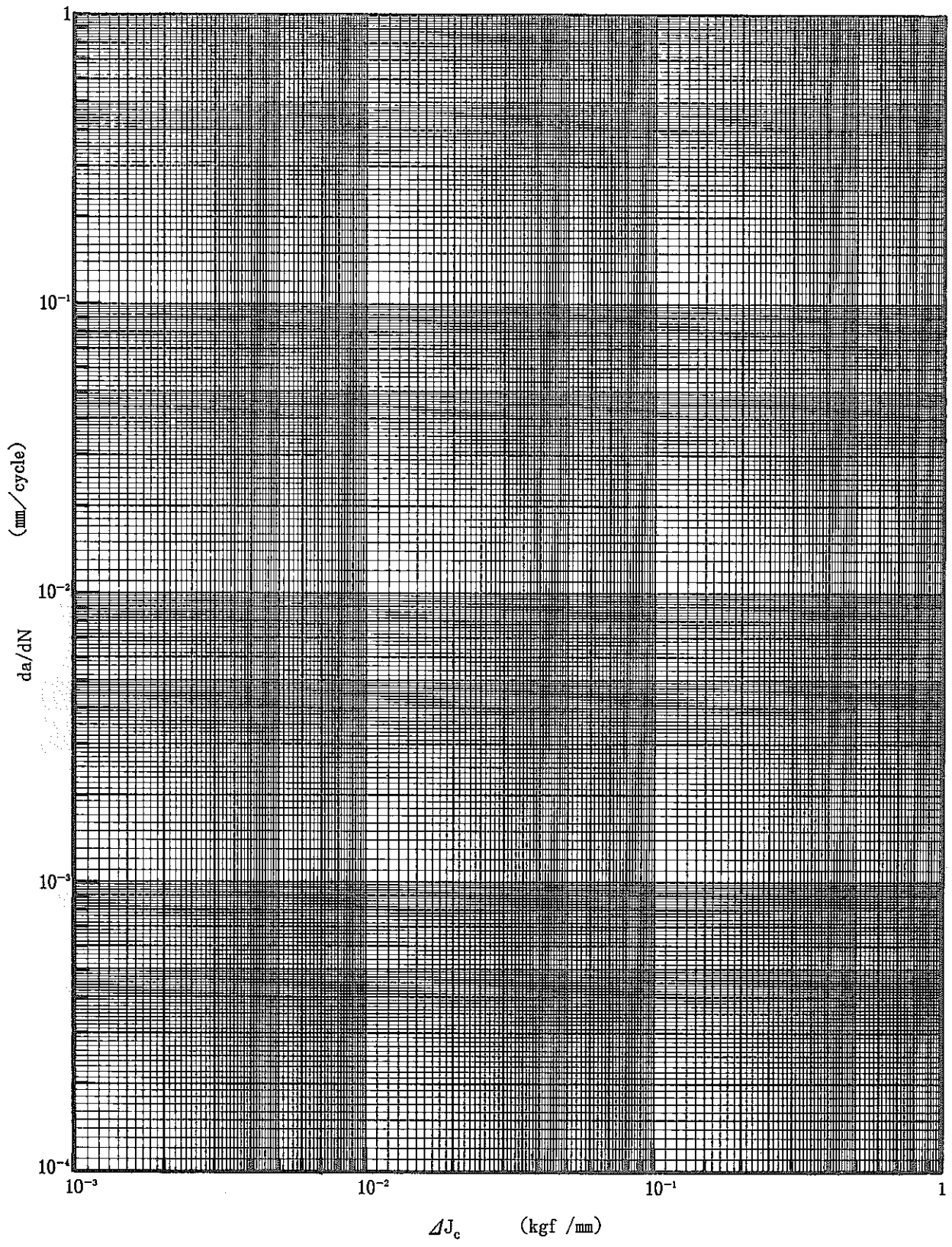
実験データ整理表

No. _____

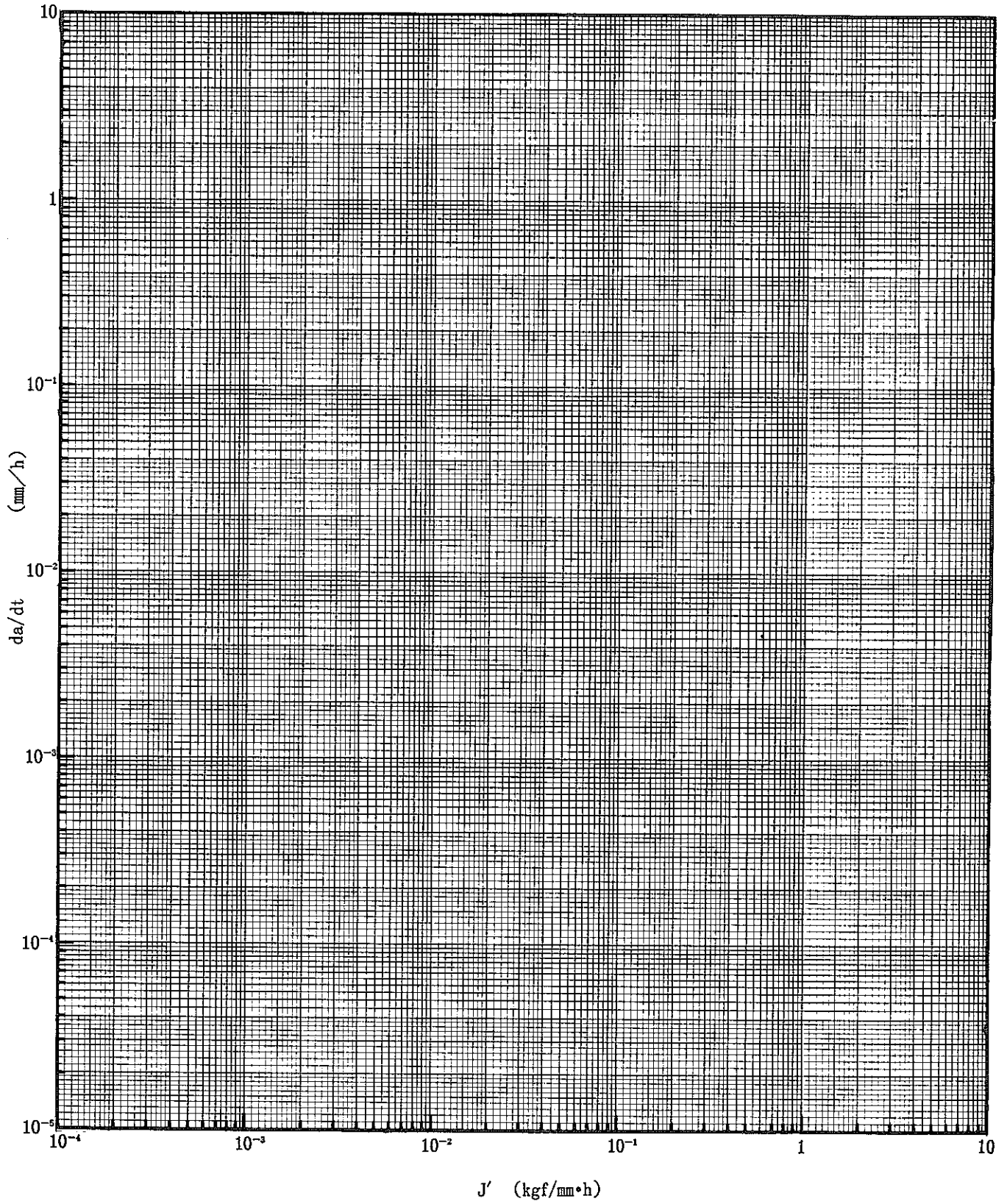
試験片の種類 _____		試験片番号 _____		試験温度 _____ °C										
制御方法 _____		設定荷重・ひずみ _____		制御波形 _____										
N (cycle) 又は t (h)	a(実測) (mm)	a(計算) (mm)	da/dN (mm/cycle) 又は da/dt (mm/h)	荷重線変位 δ			応力又は荷重 (変位制御の場合)			ΔJ_i (kgf/mm) 又は J' (kgf/mmh)	ΔJ_e (kgf/mm)	ΔK 又は K (kgf/mm ^{3/2})	$\frac{da}{dN} - \left[\frac{da}{dN} \right]_t$ (mm/cycle)	備考
				平均値 (μm)	変動範囲 (μm)	クリープ 変形 (μm)	$\Delta \sigma$ (kgf/mm) 又は ΔP (kgf)	σ_{max} (kgf/mm) 又は P_{max} (kgf)	σ_r (kgf/mm) 又は P_r (kgf)					



ΔJ_r と da/dN の関係



ΔJ_c と da/dN の関係



J' と da/dN の関係

4. 標準試験法の解説

4. 標準試験法の解説

4.1 まえがき

(特に無し)

4.2 用語の説明と記号の意味

(特に無し)

4.3 試験方法

4.3.1 試験装置

(1) 試験機

引張・圧縮疲労試験機としては、閉ループ電気油圧サーボおよび電気機械サーボ制御方式が最適であるが、応力、変位を任意に制御できればスクリュウ・ドライブ方式を使用してもよい。前二者の試験機は、波形制御が自由にでき精度がよい等の利点があり、一般的に広く使用されている。特に油圧サーボ方式は応答性がよく、広い周波数範囲の試験に適用可能であり、一方電気機械サーボ方式は保持を伴う波形や超低周波域の試験に適している。

(2) 試験片用治具

(i) CT試験片用治具

試験片の厚さ方向に一樣な応力が負荷されるよう、厚さ中央と荷重軸心を一致させなければならない。そのため試験片寸法に適合した治具を用いる必要がある。試験片厚さに対してクレビスの間隔が大きすぎるものを用いると軸心がずれることがあるため、き裂の偏心や変位誤差を生じる原因になる。

ピンとピン穴をあまりタイトにしすぎると摩擦のために自由な回転がおさえられるため変位やコンプライアンスに影響するし、逆に過大な間隙があると両振の場合に負荷反転時に試験片が踊るため、変位の誤差や荷重・変位ヒステリシスループの乱れに繋がる。0.05~0.1 mm程度の間隙が適切である。

ASTM-E813 に、 J_{IC} 試験用治具が示されており、本試験に適用できる。

(ii) CCT試験片用治具

き裂が偏心して伝ばしたり試験片が座屈したりするのを避けるため、試験片軸と荷重軸が一致するよう、治具の取付けには十分注意しなければならない。特にCCT試験片の場合には僅かな偏心や不均一な締付け力によって、試験片に大きな曲げひずみを生じることになるので注意する必要がある。

また、つかみ部分は、装着時に試験片に過大なねじりモーメントが負荷されない構造になっていなければならない。試験片取付け法の推奨例がASTM-E606規格に示されているので参考になる。

(3) 変位計

CT試験片ではクリップゲージ、CCT試験片では押当て式軸方向変位計が一般に用いられる。それぞれ、ASTM-E399（またはASTM-E813）およびASTM-E83が参考になる。これら変位計は長時間動的測定に適したものであればよい。

変位計は荷重線上のき裂開口変位を正確に測れるように装着しなければならない。CCT試験片の場合、標点間距離が試験片の幅やき裂長さに対して、あまり大きくなるとJ積分値の誤差要因になったり、正確なき裂閉口点を検出できないため注意しなければならない。有限要素解析による結果によれば、幅20mm、初期き裂全長2mmのCCT試験片に対しては標点間距離は5mm以下にすべきことが明らかにされている。

(4) 加熱装置

電気抵抗炉、副射炉、高周波誘導加熱、直接通電加熱などが一般的な加熱方式である。電気抵抗炉、副射炉は試験片の温度分布の点で好ましいが、変位、き裂長さの検出に工夫を要する。高周波誘導加熱の場合にはこれらの検出は容易になるが、加熱コイルの形状、被加熱物の材質、発振周波数などによって、温度分布が異なる。特に発振周波数が高い場合や、試験片が厚い場合には表面の方が内部より高温になるため、注意を要する。

温度の検出用に、試験片表面上でき裂面の±5mm以内に少なくとも1箇所、熱電対を点溶接するのが望ましい。

有限要素解析結果によれば、幅50mmのCT試験片に対してはき裂の成長線上で±5℃以内、また幅20mmのCCT試験片に対しては25mmの平行部内で±5℃以内であればJ積分の誤差は十分小さいことが確認されている。CT試験片の場合、試験片全体で温度差が大きいと、開口変位やコンプライアンスに影響をおよぼすため、できれば±10℃以下にすることが望ましい。

(5) き裂長さ測定法

き裂長さ測定法としては、目視（有尺顕微鏡、読取顕微鏡、移動顕微鏡、測微顕微鏡、目盛付マイクロスコープ等）、写真撮影、電位差法（AC法、DC法）、除荷コンプライアンス法、などが一般的であるが、そのほかにバックストレイン法、ビーチマーク法、レプリカ法、クラックゲージ法、マイクログリッド法なども行われている。また、写真撮影の変形としてのVTR利用の画像処理法も報告されている。このうち、ビーチマーク法についてはき裂長さが直接測定できるため、他の方法と組合せてき裂長さの較正法として利用されている。

高温下のき裂長さ測定では、一般に、以下のような問題があるとされている。

- ① 試験片への接触や接近が困難になるほか、測定器の耐熱性、温度特性、高温での劣化等が問題となる。
- ② 保持時間効果を調べる場合など、試験が長時間に亘ることが多い。
- ③ き裂先端に分岐や先行するボイド等の発生があり、先端の判別が困難になる。
- ④ き裂フロントのわん曲やトンネリングの発生があり、試験片表裏面でのき裂長さが異なることや、平均き裂長さとして試験片表裏面でのき裂長さが異なることが多い。

⑤ 試験片表面に酸化被膜が付着して、き裂先端が見にくくなる。

高温下でのき裂長さ測定法の採用にあたっては、以上のような特殊性を考慮する必要がある。以下ではFCC小委員会の参加機関で採用している方法のうち、代表的なものについて比較を行う。

(i) 目視

目視は、FCC小委員会では昭和58年度には13機関中6機関と約半数で採用していたが、60年度には13機関中4機関に減少している。

目視には、有尺顕微鏡（読取顕微鏡，測微顕微鏡，移動顕微鏡とも言う）または目盛付マイクロスコープを用いるが、前者では副尺付スケールまたはマイクロメータを備え、倍率50ないし100倍で1/100mmないし1/1000mmの精度の測定ができるのに対し、後者では倍率10倍程度であり精度は良くない。目視は直接的で簡便であるが、き裂先端を判別する困難を伴い、開口時でないとは分りにくい、無人化できない、連続測定ができない、試験片の表面でのき裂長さしか測れない、即ち、き裂のトンネリングがある場合には平均き裂長さとは一致しない、などの短所がある。有尺顕微鏡に電気マイクロメータを組み合わせることで数値の読取りや記録の自動化は可能であるが、上述の短所を除くことはできない。また、高温では加熱装置があるためアクセスしにくいことや、試験片によっては酸化でスケールができるためき裂が見にくくなることなどの問題もある。

目視は直接的である点については捨てがたい魅力があるが、以上のように難点も多く、採用にあたっては注意が必要である。

(ii) 写真撮影

写真撮影は58年度には3機関、60年度には2機関が採用している。カメラと拡大用のマクロレンズまたは顕微鏡とを組合せて引伸し倍率で7.5ないし20倍としており、目視のパリエーションとも言えるが、き裂長さの測定を印画紙上で行う点で異なっている。一般にはき裂が進展したときに視野から外れる恐れがあって、倍率をあまり高くすることができない。特別の工夫によりき裂の進展を追って視野を移動させる試みもあるが、一般的ではない。写真撮影はインターバルタイマーや試験器の制御系と組合せて自動化が可能である。また、最近では画像処理による情報処理の試みもある。

一般に、写真撮影は比較的低い倍率と間接的である点で目視よりも精度が悪いと考えられるので、採用に際しては注意が必要である。

(iii) 電位差法

電位差法は、FCC小委員会では58年度には4機関であったのが、60年度には13機関中6機関と約半数にまで増加している。電位差法にはDC法とAC法とがあるが、実用上の差はあまりないと考えてよい。（それぞれの詳しい説明はJSME S001などを参照されたい。）電位差法とは試験片に交流または直流の定電流を印加し、き裂の上下に生じる電位差を測定して（即ち、試験片のリガメント部の面積に対応する電気抵抗を求めて）き裂長さに換算す

るものである。

FCC小委員会での実施例ではDC法とAC法が2例ずつであるが、AC法の例は市販品(「クラックメーター」)に限られ、この場合、電位差はき裂長さに換算されて直流出力される。DC法の場合は電位差をJohnsonの式(CCT試験片,注1)または紀らの式(CT試験片,注2)などでき裂長さに換算するが、AC法でもDC法でも実際のき裂で較正を行って、計算値と一致することを確認している。

電位差法は、連続的かつ無人で、き裂フロントの形状によらず平均的なき裂長さの測定が可能であり、温度、材質等の影響を受けるとは言え、それらが一定であれば良い精度で測定ができる特徴がある。特に、速い現象を捕えることでは他に方法がない。ただし、き裂フロントがトンネリングを起こすような場合には較正曲線が合わないケースもあるので、その場合は似たき裂フロントの形状で較正をするなどの注意が必要である。

電位差法は精度良くき裂長さの測定ができるため、諸外国でも一般化しており、標準的な方法として推奨し得るものである。

(iv) レプリカ法

レプリカ法は樹脂などでき裂の型を採る方法で、低温では簡便な方法であるが、高温の場合は一度温度を下げてから最大開口まで負荷して型を採る必要があるため、試験の中断を要し、あまり効率的ではない。ただし、試験の中間におけるき裂形状が分る点では有効である。また、微小き裂や表面き裂の形状およびき裂長さ(幅および深さ)が分る点でも特徴があるが、実施機関も少なく、一般的ではない。

(v) 除荷コンプライアンス法

除荷コンプライアンス法は、弾塑性破壊靱性試験(J_{IC}試験法)においてもき裂進展量の測定方法として規定されており、良く知られた方法である(ASTM E813, JSME S 001)。即ち、き裂の進展中に荷重を10%ないし30%程度除荷して除荷時の荷重-変位曲線の傾き(コンプライアンス)を求め、Saxena-Hudakの式(注3)などで計算または予め作成した較正曲線によりき裂長さを求めるものである。

この方法は特別な装置なしで平均的なき裂長さの測定ができる便利な方法であるが、本質的には断続測定法である。精度を良くするためには荷重と変位の正確な測定を必要とし、コンピューターで制御・記録する必要があるため、必ずしも一般的でなく、FCC小委員会でも実施機関は2機関と少ない。しかし、試験機のコンピューター化が進めば除荷コンプライアンス法も有利になるものと思われる。なお、測定に当ってはコンプライアンスの測定精度の維持のため、治具と試験片との摩擦やクリップ・ゲージとナイフ・エッジとの摩擦を極力小さくするなどの注意が必要である。

以下にき裂長さの測定例を示す。

Fig. 4.3.1-1は写真撮影の例であるが、目視の場合も同様のき裂が見られる。

Fig. 4.3.1-2 はDCポテンシャル法 (CT試験片) の計画の例である。また, Fig. 4.3.1-3 はその較正曲線と実施のき裂から求めた実験値との比較であるが, 良く一致していることが分る。

Fig. 4.3.1-4 はACポテンシャル法 (CCT試験片) の例である。

Fig. 4.3.1-5 はDCポテンシャル法 (CCT試験片) の較正曲線と実験値とを比較したものである。

Fig. 4.3.1-6 はACポテンシャル法 (CT試験片) の計測の例であるが, この場合は装置内部で電位差からき裂長さに換算されている。Fig. 4.3.1-7 はその場合の換算出力とき裂長さの実測値との比較をしたものである。三角波と台形波の場合で較正曲線が異なることと, トンネリングに対するサイドグループの効果が示されている。

Fig. 4.3.1-8 およびFig. 4.3.1-9 は, それぞれACおよびDCポテンシャルの変化を時間に対して示したもので, き裂の進展が連続的に捕えられていることが分る。

Fig. 4.3.1-10 およびFig. 4.3.1-11 は除荷コンプライアンス法の較正曲線の例である。

(注1) Johnson の式 (CCT試験片, 付録2 参照)

$$\frac{V_a}{V_{a_0}} = \frac{\cosh^{-1} \left[\frac{\cosh \pi y/W}{\cos \pi a/W} \right]}{\cosh^{-1} \left[\frac{\cosh \pi y/W}{\cos \pi a_0/W} \right]}$$

ただし, V_a および V_{a_0} は, それぞれき裂長さ a および a_0 に対応する電位差の測定値, y はき裂中央から電位差測定点までの距離, W は試験片幅である。

(注2) 紀らの式 (CT試験片, 付録2 参照)

$$\frac{a}{W} \rightarrow \frac{V_a}{V_{a_0}} \quad (\text{適応範囲 ; } 0.25 \leq \frac{a}{W} \leq 0.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{V_a}{V_{a_0}} = & 0.785 + 1.40 \left(\frac{a}{W} \right) - 2.51 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 2.29 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 6.19 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \\ & - 13.1 \left(\frac{a}{W} \right)^5 + 7.29 \left(\frac{a}{W} \right)^6 \end{aligned}$$

$$\frac{V_a}{V_{a_0}} \rightarrow \frac{a}{W} \quad (\text{適応範囲 ; } 0.25 \leq \frac{a}{W} \leq 0.975)$$

$$\begin{aligned} \frac{a}{W} = & -1.51 + 1.66 \left(\frac{V_a}{V_{a_0}} \right) + 0.866 \left(\frac{V_a}{V_{a_0}} \right)^2 - 1.03 \left(\frac{V_a}{V_{a_0}} \right)^3 \\ & + 0.296 \left(\frac{V_a}{V_{a_0}} \right)^4 - 0.0260 \left(\frac{V_a}{V_{a_0}} \right)^5 \end{aligned}$$

(注3) Saxena-Hudak の式 (付録2 参照)

$$a/W = 1.0002 - 4.06319U + 11.242U^2 - 106.043U^3 + 464.335U^4 - 650.677U^5$$

$$\text{ただし, } U = 1 / \left\{ \left(\frac{EVB}{P} \right)^{1/2} + 1 \right\}$$

V/P はコンプライアンス, E はヤング率, B は試験片厚さである。

(6) 記録装置

試験データの記録装置としては、FCC小委員会の報告書にも多くの記述がないが、荷重、変位、開口変位、（き裂測定の）電位差、温度等はX-tレコーダに記録し、荷重-変位関係はX-Yレコーダに記録することが一般に行われている。また、ミニコンやパソコンなどのコンピュータにデータを採取し、フロッピーディスクに記録した後に、適当な処理をして結果をプロッターやプリンターで出力することも多くなっている。あるいは、データレコーダやストレージスコープに一度データを採取した後で、アナログまたはデジタルで出力し、同様の処理をするケースもある。この場合は特に速い現象を捕えるときに有効である。

全体に試験もデータ処理も電算機化が進み、小型機での分散処理や大型機との接続によるネットワーク化あるいはデータベース化まで行われるようになってきている。Fig. 4. 3. 1-12 はパソコンを利用した計測系の例である。

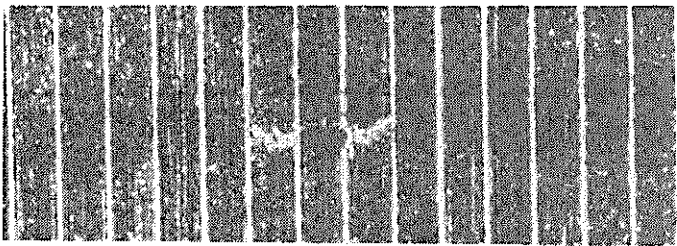
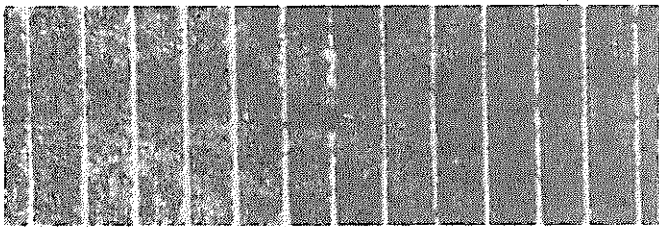
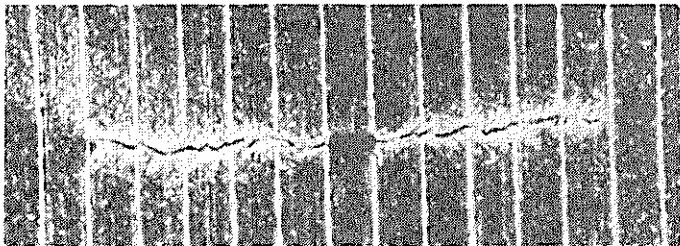
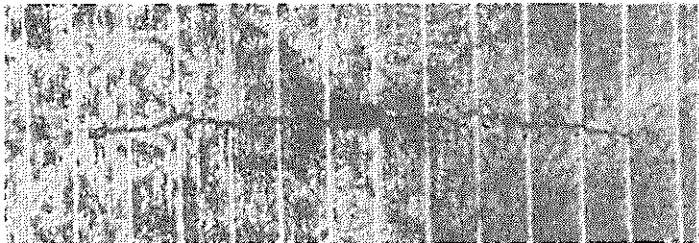
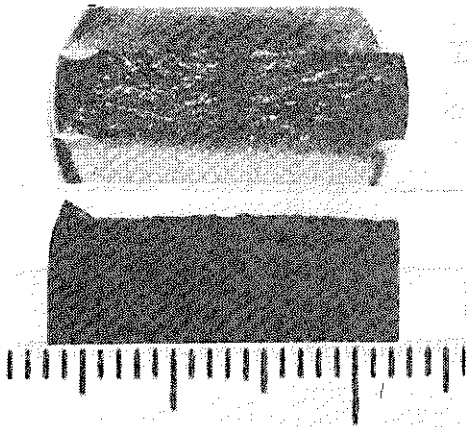
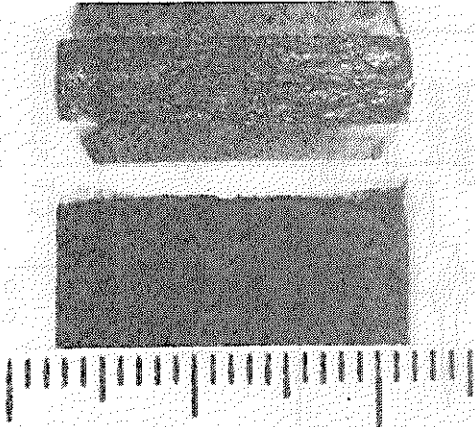
	triangular wave	10min hold
a=1.4mm		
a=5.3mm		
Fracture appearance		

Fig. 4.3.1-1 Photograph method

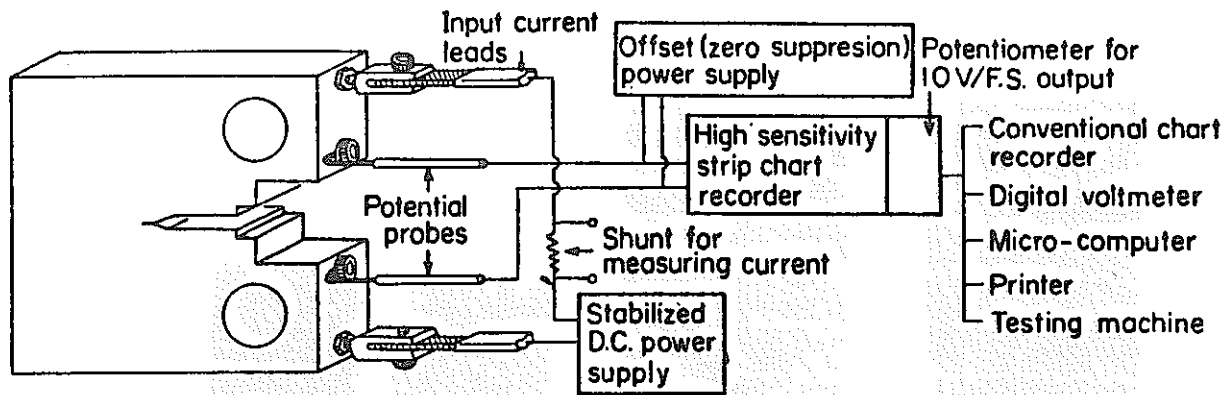


Fig.4.3.1-2 Schematic diagram of the D. C. potential system

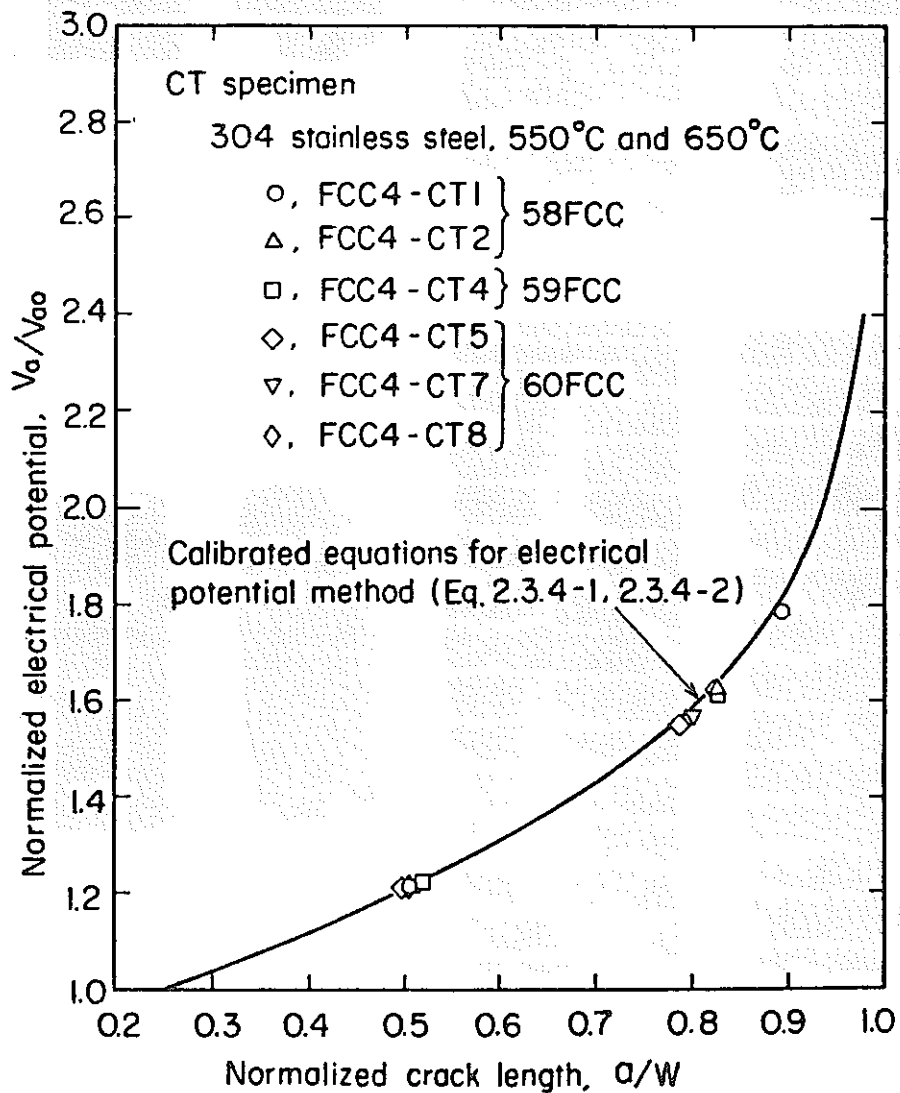
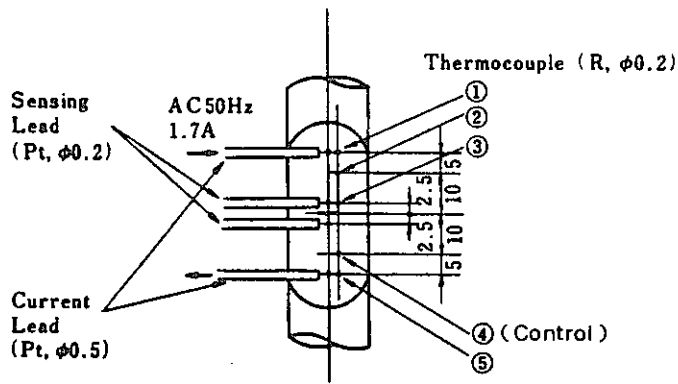
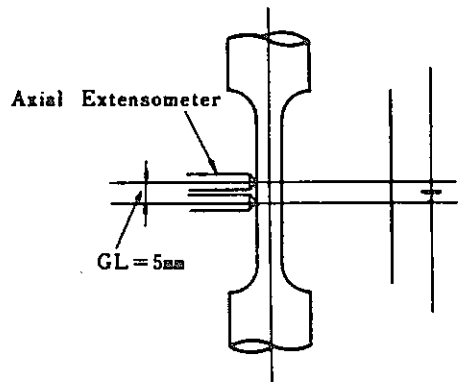


Fig.4.3.1-3 Comparison between calibrated equations and fatigue crack growth tests



(a) Temperature and AC potential measurement.



(b) Displacement measurement.

Fig. 4.3.1-4 AC potential drop method (CCT specimen)

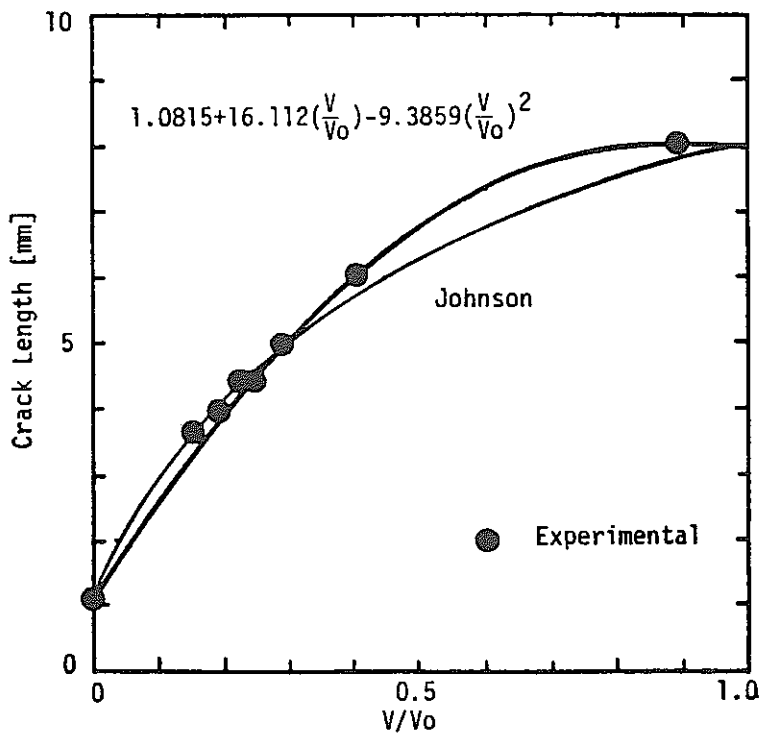


Fig. 4.3.1-5 Calibration curve for crack length prediction

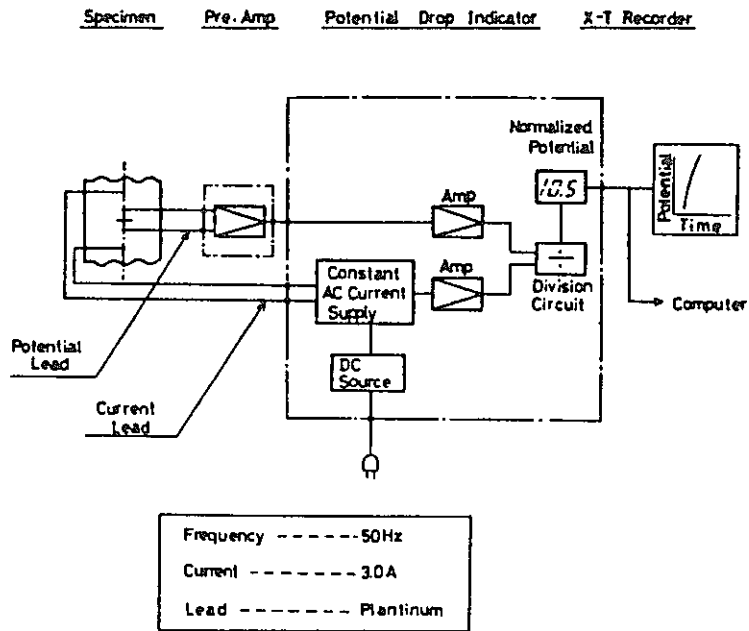


Fig. 4.3.1-6 Block diagram of AC potential equipment

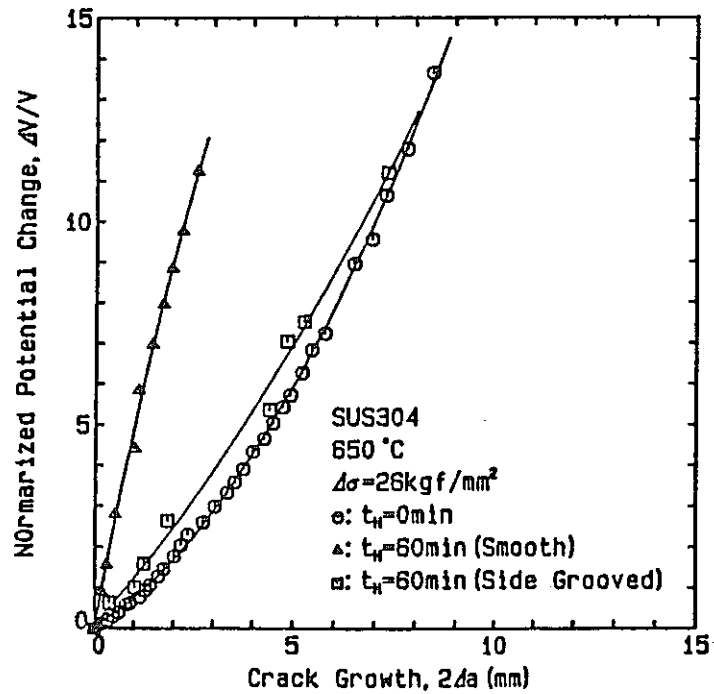


Fig. 4.3.1-7 Normalized potential change vs. crack growth

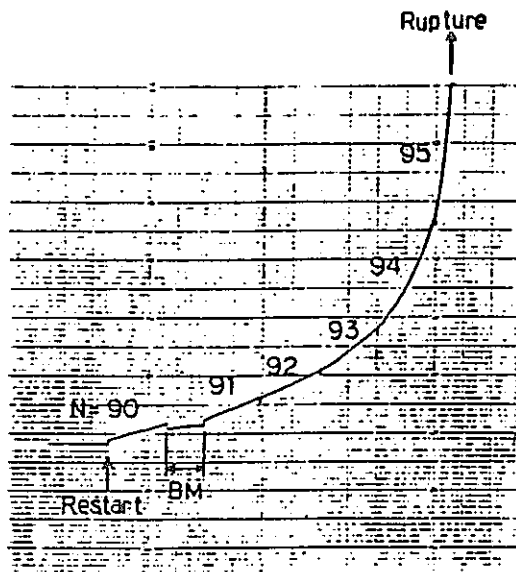


Fig. 4.3.1-8 A record of AC potential change ($\Delta \sigma = 26 \text{ kgf/mm}^2$, $t_H = 60 \text{ min}$)

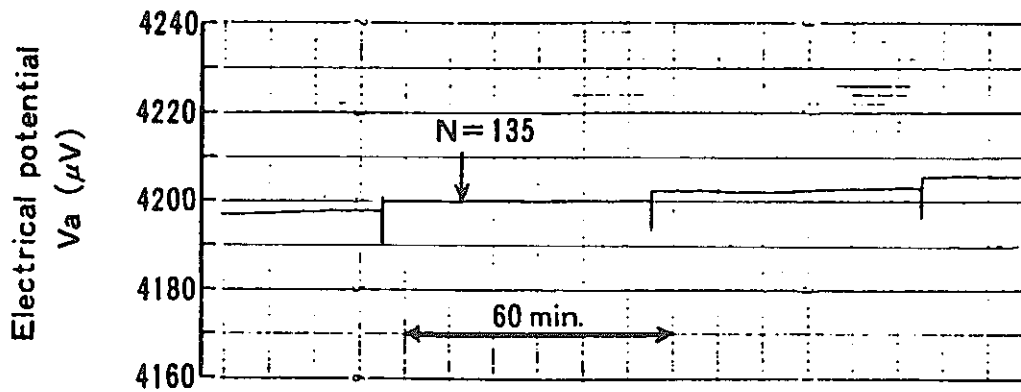


Fig. 4.3.1-9 Variation with cycles of electrical potential (FCC 4-CT 4, tensile deflection hold trapezoidal wave, $0.08 \text{ Hz} + 60 \text{ min}$)

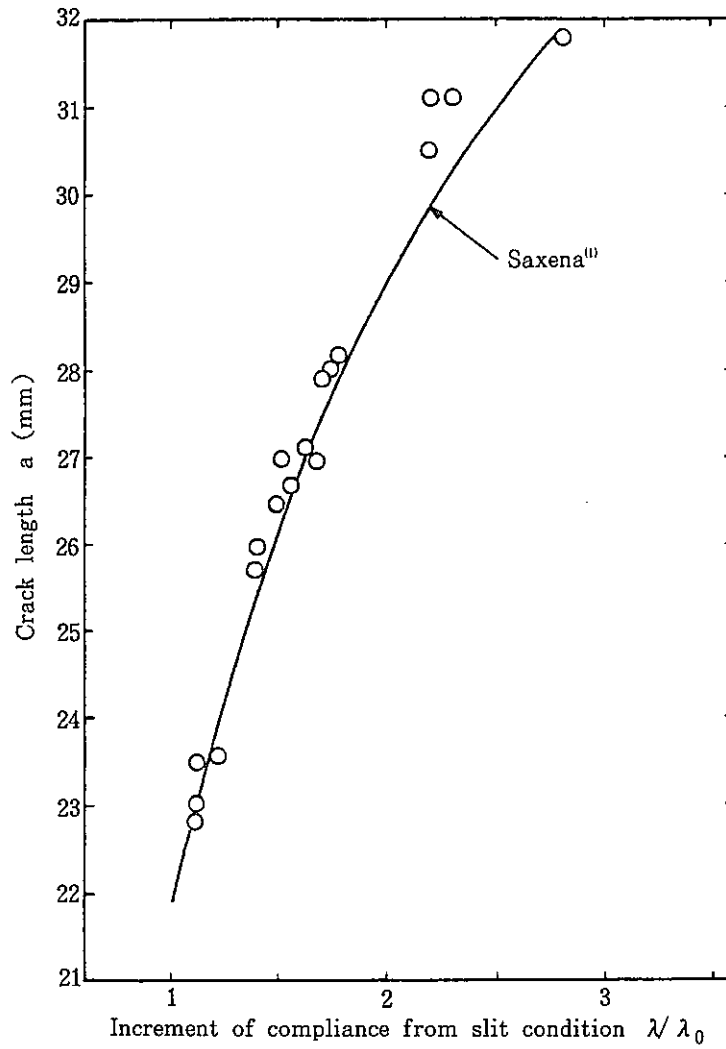


Fig. 4.3.1-10 Calibration curve between compliance and crack length

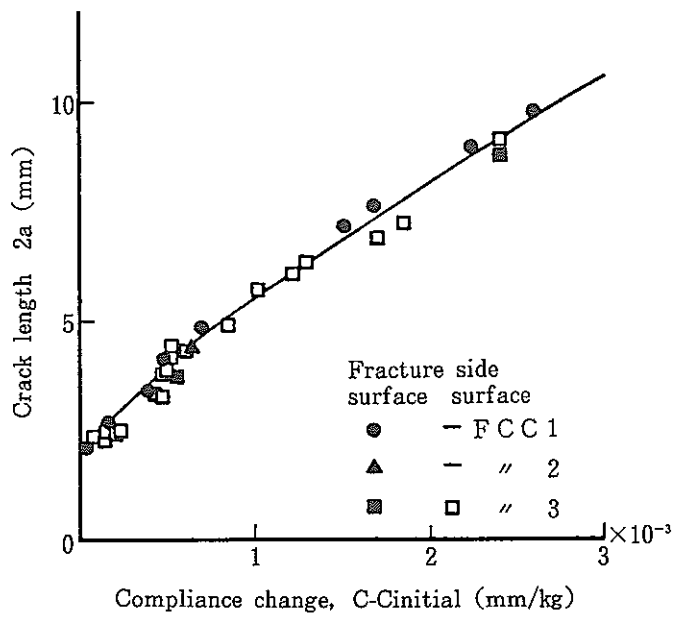


Fig. 4.3.1-11 Relationship between crack length and compliance change

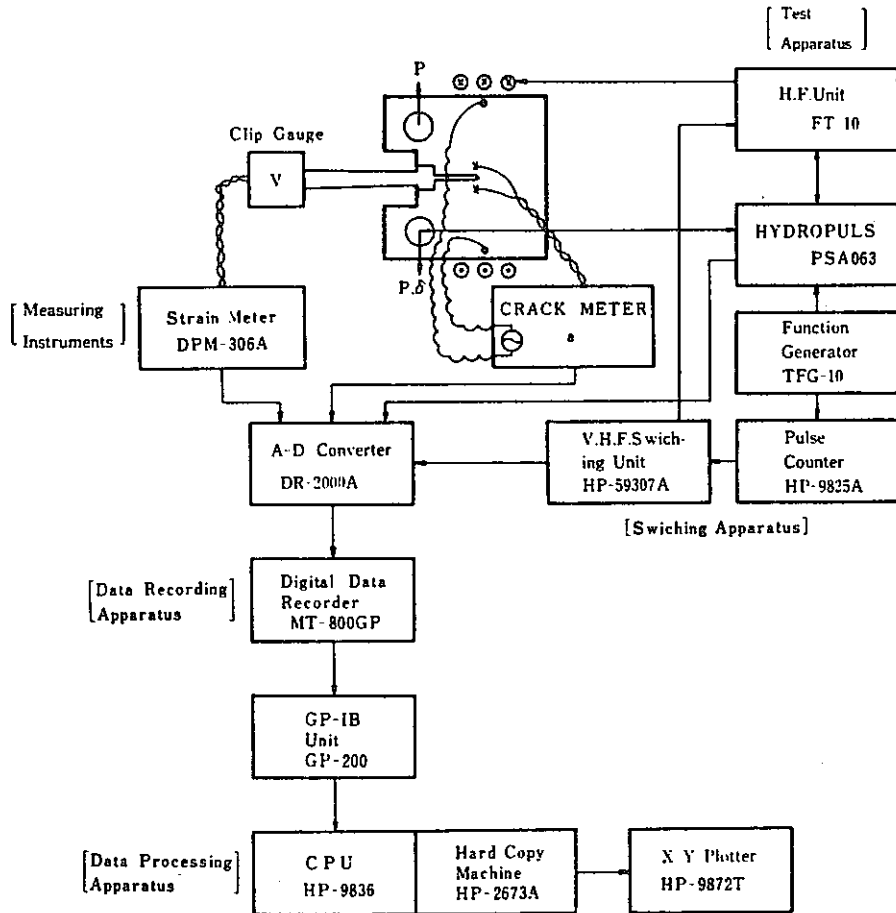


Fig. 4.3.1-12 Computerized instrumentation system

4.3.2 試験片

(1) 試験片形状, 寸法

(i) 試験片形状

CT試験片の標準形状は、ASTM E813-81 に準拠している。

CCCT試験片の平行部長さに関する条件は、一定の応力分布が試験片のゲージ長にわたって発生するための条件から決まり、試験片つかみ条件に依存する。

ASTM E647-86 では、油圧チャック使用の場合 Fig. 3.3.2-2 で $L/W \geq 1.2$ としており、複数のボルトで締付ける場合 $L/W \geq 1.5$ 、dog bone type の試験片に単一ピンで負荷する場合 $L/W \geq 1.7$ となっている。低サイクル疲労き裂伝ば試験で、通常用いられる太径棒を減肉して平板部を加工し、両端を試験機に締付ける形式では $L/W \geq 1.5$ 程度とすればよい。

試験片の実施例を Fig. 4.3.2-1～-3 に示す。

(ii) 試験片厚さ

試験片厚さは制限はないが、トンネリング現象、座屈現象に対して試験が容易な様に経験的に決定した。

(iii) 機械切欠寸法

CT試験片の初期き裂長さは、J積分評価に簡易式を使用する場合の式の有効範囲の条件 $a/W > 0.4$ を考慮し、 $a_0/W \geq 0.45$ とした。

CCCT試験片の初期き裂長さは試験片幅 20mm で、ゲージ長さ 5 mm 以内で荷重線変位を計測し、簡易式によってJ積分値を求める場合、式の有効範囲の条件から $2a_0/W \geq 0.1$ とするとよい。

(iv) サイドグループ

サイドグループはトンネリング現象の防止と、き裂面近傍にひずみを集中させる効果がある。

保持なし荷重波形の場合はトンネリング現象が軽微な場合が多いので、必ずしもサイドグループを付ける必要はない。

保持あり荷重波形の場合はトンネリング現象が顕著となる場合が多く、サイドグループを付けることが望ましい。き裂前縁形状が直線となる最適サイドグループ形状は材料、荷重波形、荷重レベルに応じて変化するため、予備試験によって決定するのがよい。

目安としては、Fig. 4.3.2-4 に示す様に $\rho = 1.5\text{mm}$ 、 $B_N/B \geq 0.8$ 程度である。サイドグループを付した場合の ΔJ の算出にはサイドグループ底板厚 B_N を用いると Fig. 4.3.2-5 の様に 1本のバンドに収まるとともにサイドグループなしの結果（コンプライアンス法で平均き裂長さを計測した結果）に一致する。

(2) 疲労予き裂

高温における疲労き裂伝播試験に先だつ疲労予き裂の必要性に関しては、本委員会のこれまでの疲労予き裂の有る、無しの試験片に関するき裂伝播速度の比較検討から、両者の間には差

異は認められず、必ずしも疲労予き裂を導入しなくても良いことが明らかにされている。Fig. 4.3.2-6 に結果の一例を示す。なお、本検討においてはき裂伝播データの整理において、応力繰返しに伴う試験初期の加工硬化に起因すると考えられる S_p の減少 (Fig. 4.3.2-7 内矢印までのデータ)、あるいは $da/dN - \Delta J$ 線図における極端な遷移状態のデータは削除している。こうしたデータ整理を施すと両者のき裂伝播速度には差異は認められず必ずしも予き裂を導入しなくとも安定したき裂伝播挙動の得られることが確認された。

一方、もし疲労予き裂を導入しその後にき裂伝播試験を実施する場合には、過度に高い荷重条件による予き裂導入は避けるべきであり、荷重条件の決定にあたっては例えば ASTM E813 あるいは日本機械学会 J_{IC} 試験法に示されている方法を参考にすると良い。

4.3.3 測定項目

高温におけるき裂伝播挙動を把握するための試験で測定しておかねばならない項目、測定しておくことが望ましい項目をまとめて記載した。

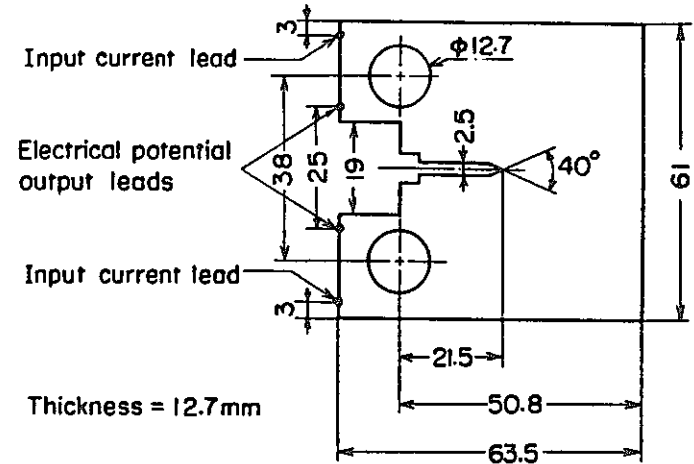
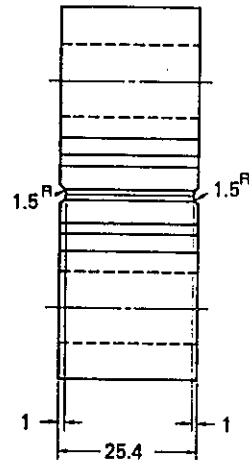
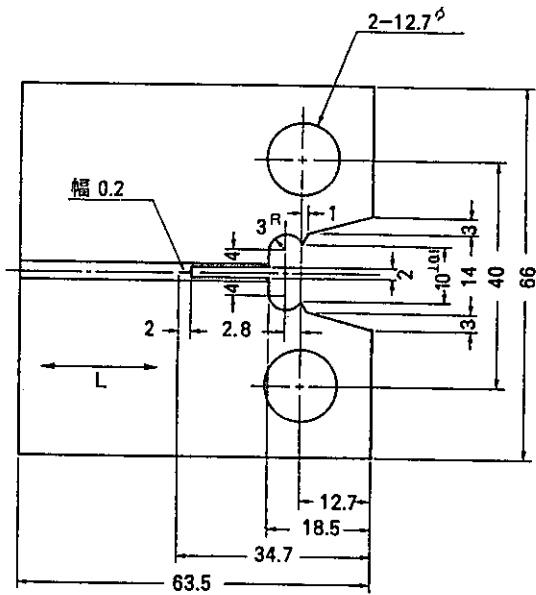
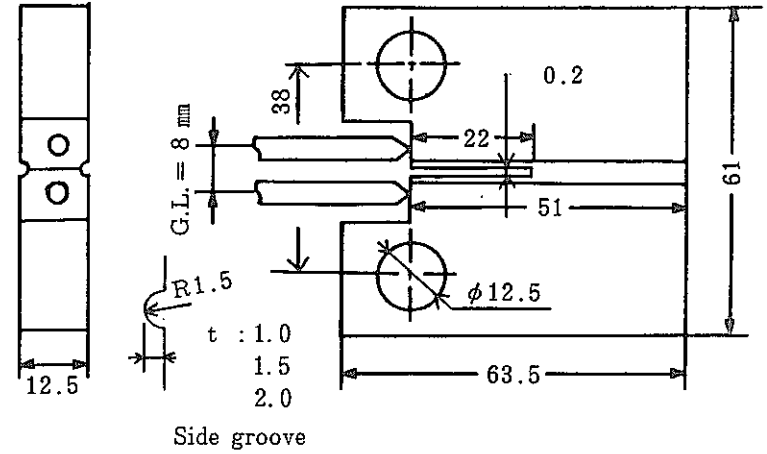
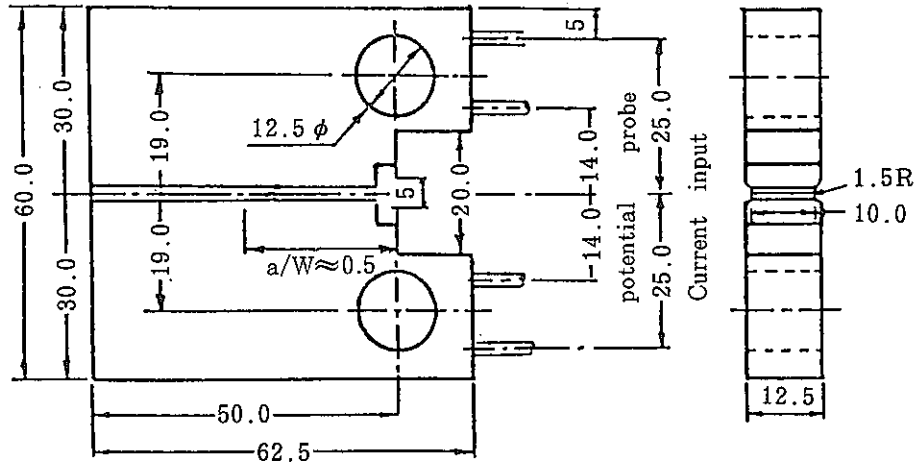


Fig. 4. 3. 2-1 Example of CT specimen

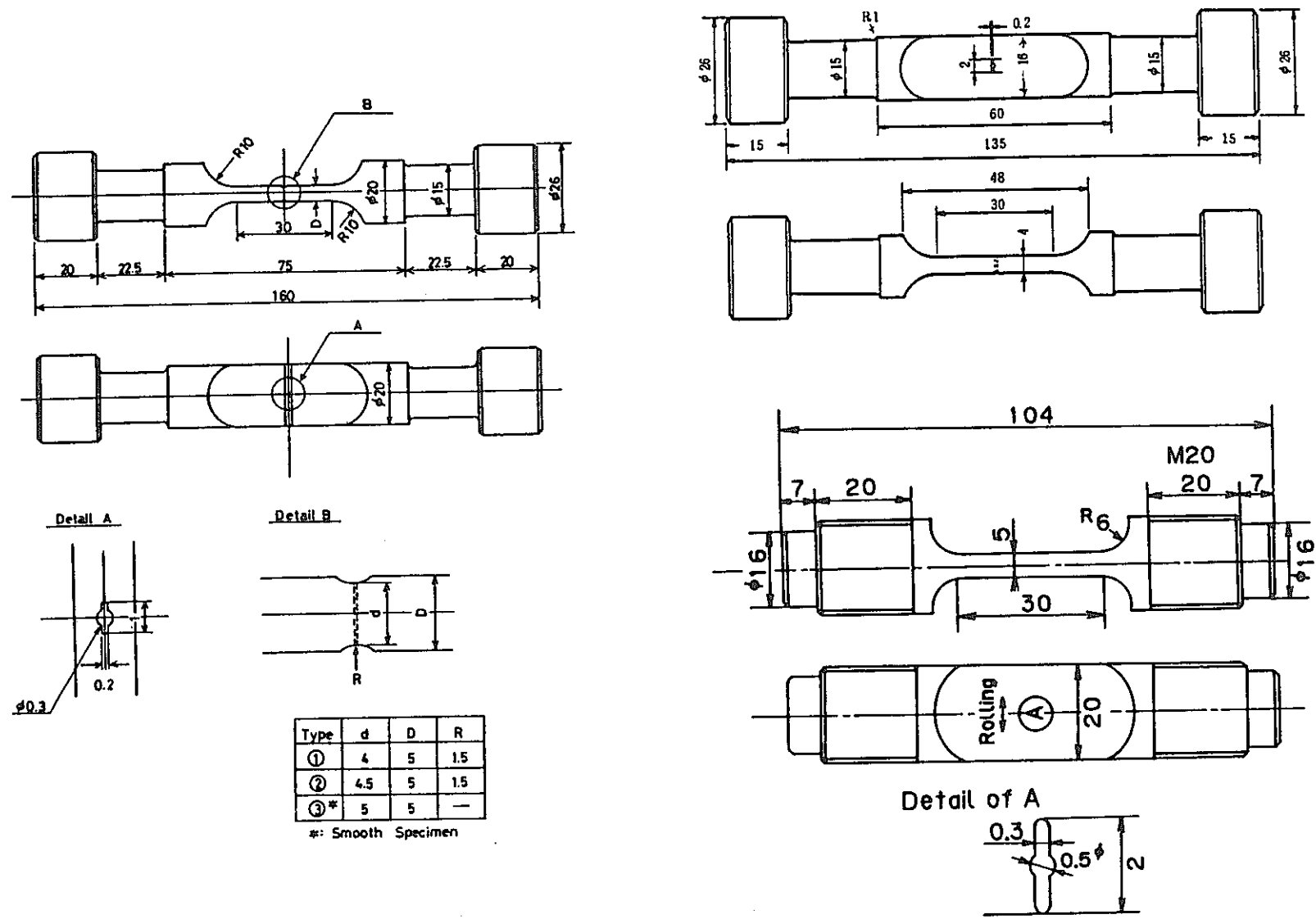


Fig.4.3.2-2 Example of CCT specimen

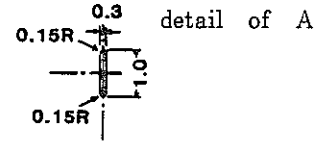
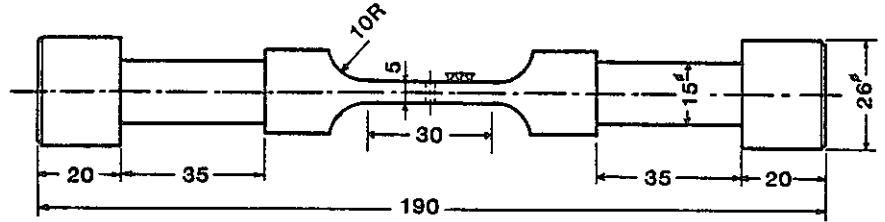
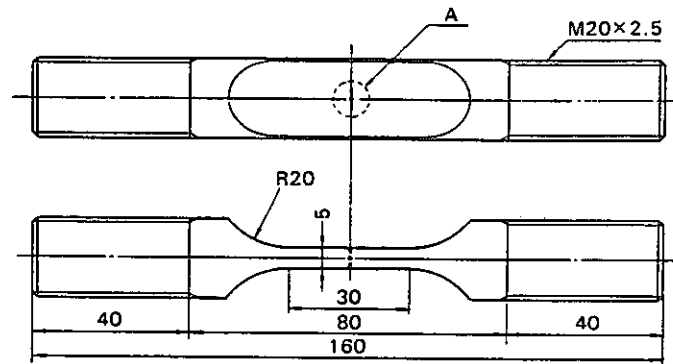
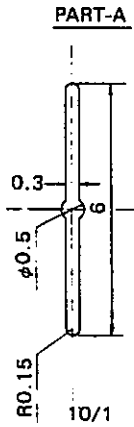
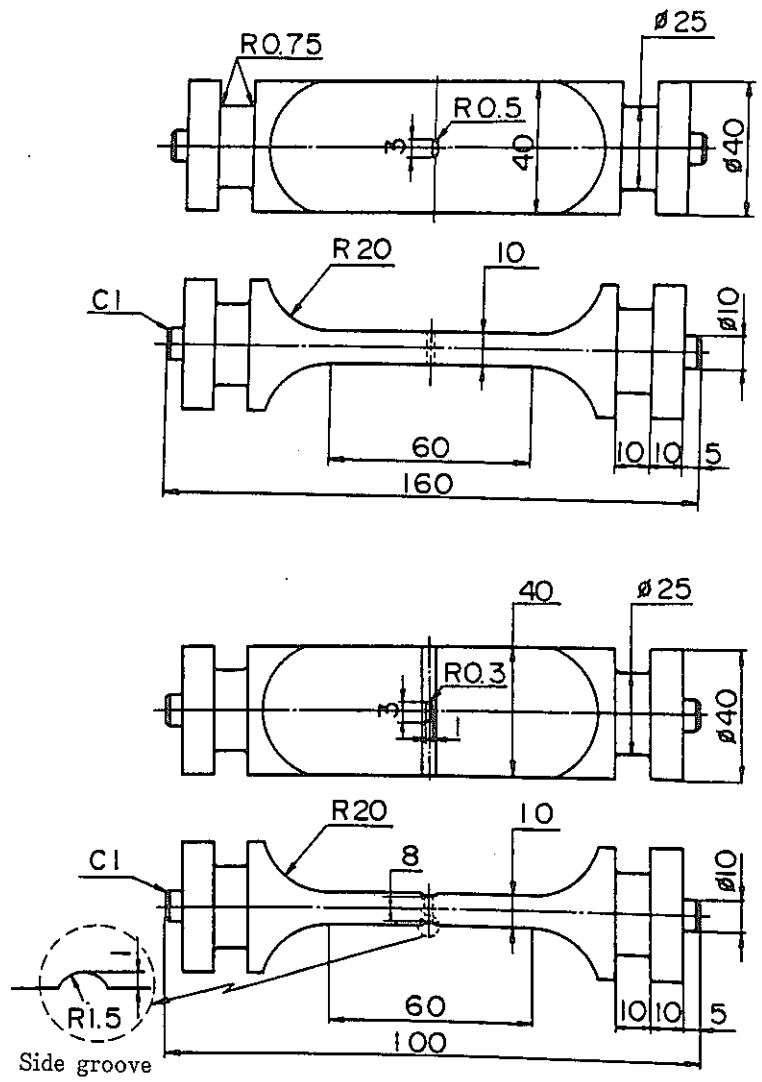


Fig. 4.3.2-3 Example of CCT specimen

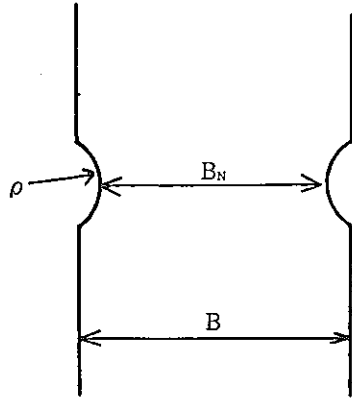


Fig. 4.3.2-4 Side groove

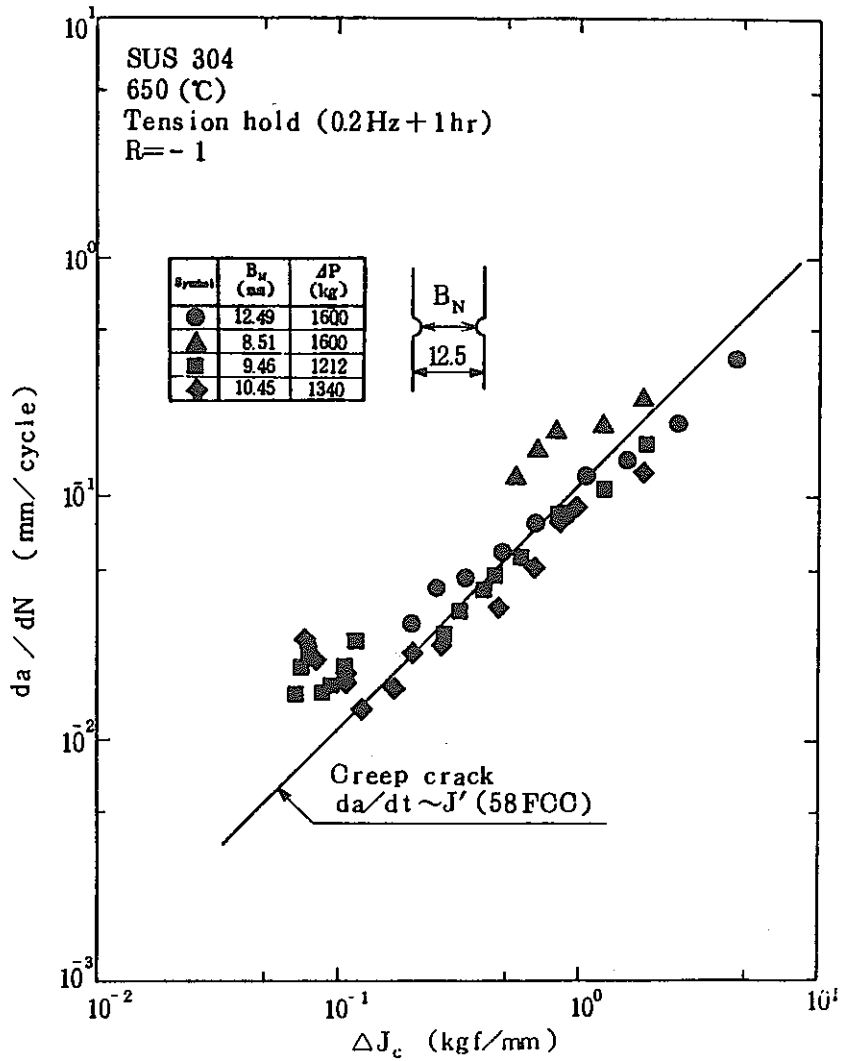


Fig. 4.3.2-5 $da/dN \sim \Delta J_c$ relation in tension hold test using side grooved specimen

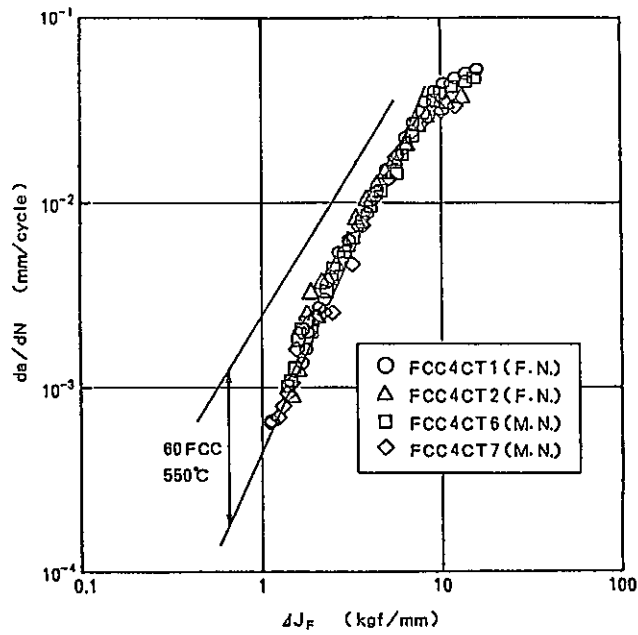


Fig.4.3.2-6(a) Relationship between da/dN and ΔJ_f (CT specimen)
 (FCC4CT1, 2 : fatigue precrack, FCC4CT6, 7 : machine notch)

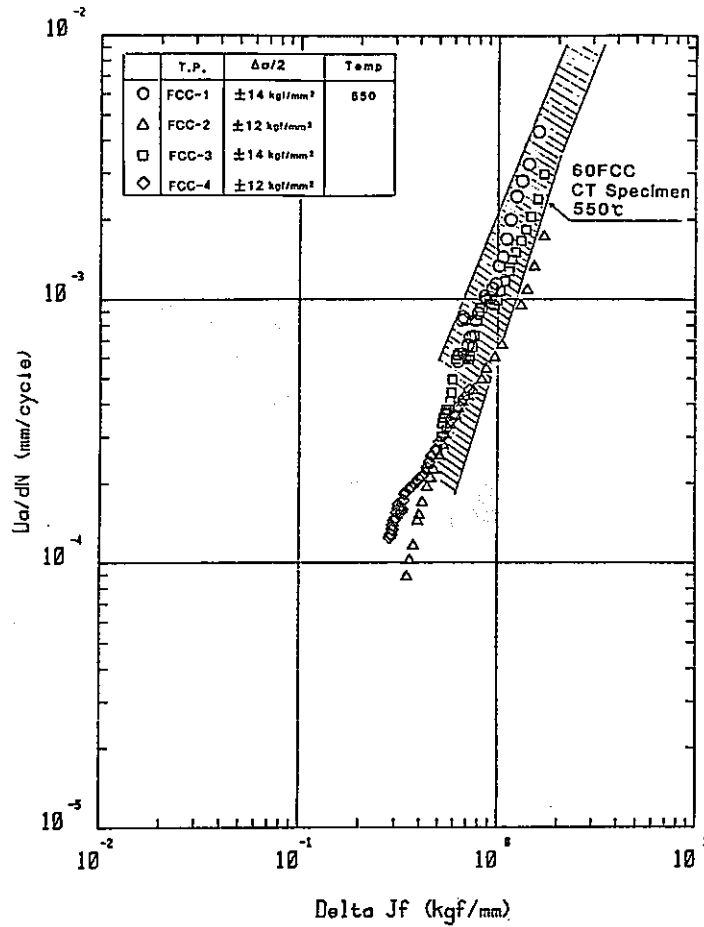


Fig.4.3.2-6(a) Relationship between da/dN and ΔJ_f (CCT specimen)
 (FCC4CT1, 2 : fatigue precrack, FCC-3, 4 : machine notch)

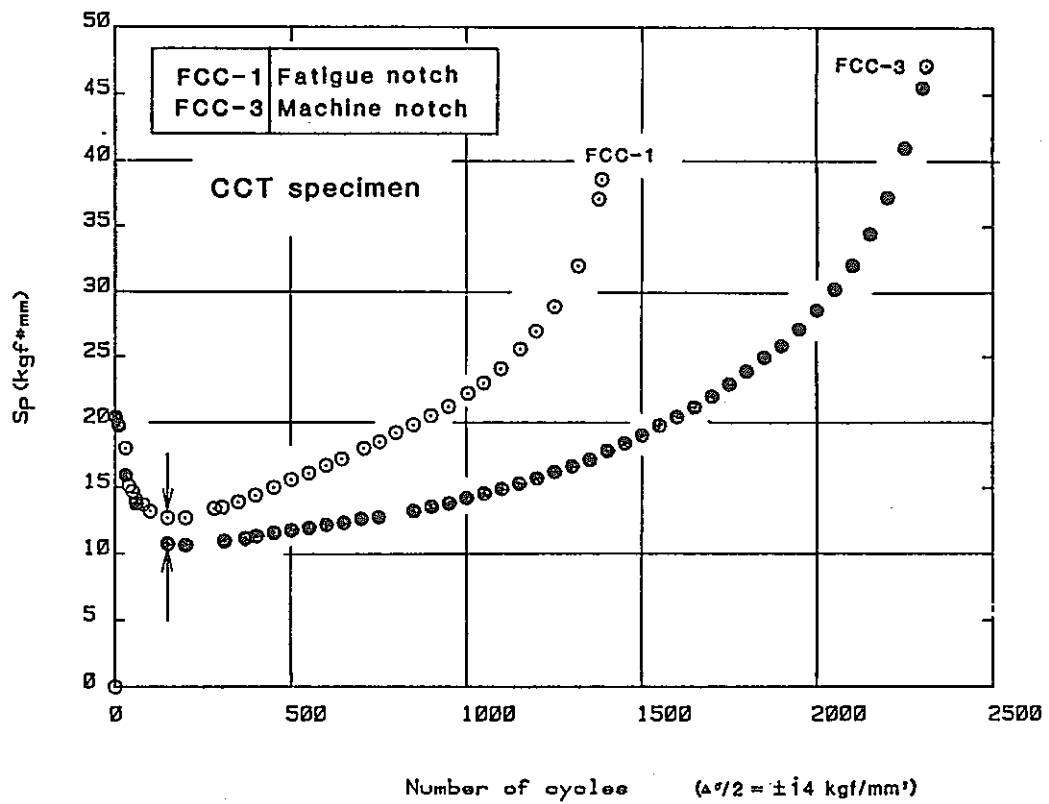
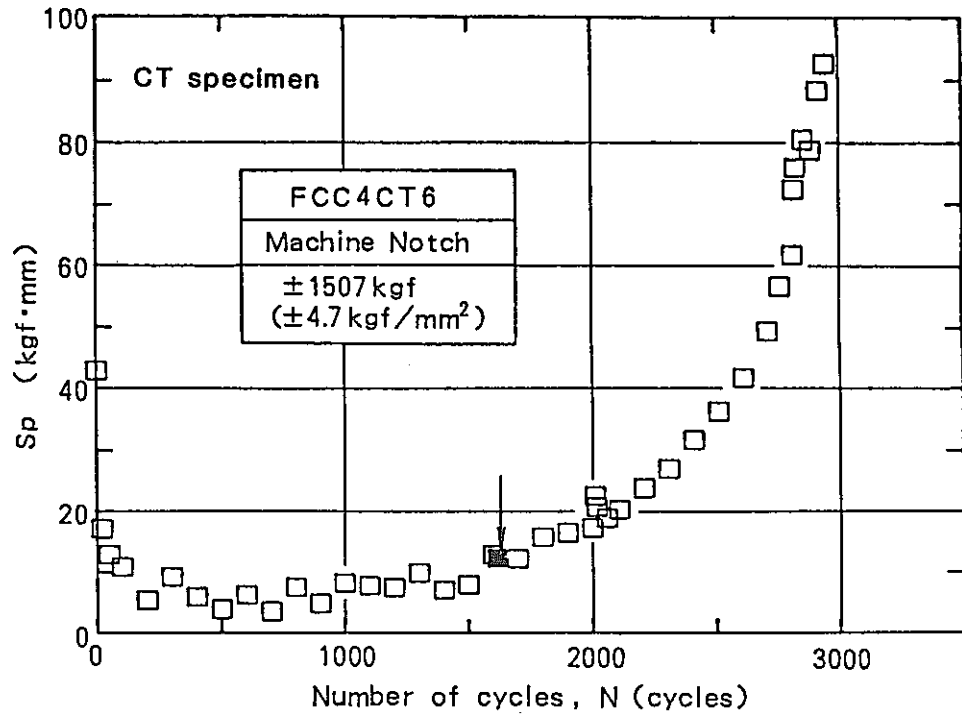


Fig. 4.3.2-7 Relationship between S_p and number of cycles

4.3.4 試験手順

(1) 試験前の試験片寸法の測定

試験片寸法の測定精度に関しては、 J_{IC} 試験を行う場合のCT試験片についてはASTM規格 E813 および JSME 規格 S001 の規定があり、0.025mm 又は 0.1% のいずれか大きい方をとることになっている。

CCCT試験片についても、これと同じ精度内で測定するよう規定した。

(2) 試験片の取付

(i) CT試験片の場合

試験片および治具の取付が不適切で負荷軸の偏心があると、試験に誤差を生じ、又き裂前縁が均一に進行せず試験片表裏のき裂長さの差が大きくなり正確な評価ができなくなる。

荷重軸の中心線の誤差は ASTM 規格 E813 では 0.76mm、JSME 規格では 0.75mm と定められている。

(ii) CCCT試験片の場合

取付けによる曲げが生じやすく、できるだけ小さくすることが望ましい。低サイクル疲労試験法 ASTM E 606-77T では丸棒試験片に対し、曲げひずみは最小ひずみレンジの5%以下と規定している。

(3) 試験片の負荷方法

試験対象としている構造物の温度、応力、変形様式等の環境を考慮して制御方式、波形、ひずみ速度などの負荷条件を決定する。

波形には鋸歯状波、台形波、三角波がある。クリープ効果は鋸歯状波で得られやすい。台形波の場合、荷重制御ではクリープ効果が大きく、一方、ひずみ制御では比較的小さいという傾向がある。荷重制御及びひずみ制御では1本の試験片で得られる ΔJ の範囲は狭く、広い範囲の ΔJ についてのデータを1本の試験片で得る場合にはスロープライン制御が用いられる場合がある。

(4) 試験温度

本試験で用いるCT及びCCCT試験片の試験中における試験片内の温度分布を均一に保持するために、試験開始までの昇温及び均熱保持方法を考慮することが必要である。例えば、電気炉方式の加熱の場合には日本工業規格 JIS Z 2271「金属材料の引張クリープ試験方法」に定める「試験温度近くまでの加熱に要する時間は原則として最低1時間以上でなければならない」という規定を参考に昇温方法を決定することが望ましい。高周波加熱の場合には試験片自体が発熱することを考慮すると昇温時間を短くすることができる。

昇温後試験片を均熱状態にするために試験片の大きさを考慮して均熱時間を設けることが必要であり、負荷前の最終温度調節はこの時間内に行う。

試験片内の温度分布の許容値はFCC小委員会の60年度報告「高速炉構造材料のクリープ疲労き裂伝播に関する試験研究(Ⅲ)」を参考にして本試験では試験片の温度制御の精度をき裂

伝播面上下±5 mm の範囲で±5℃に規定した。

(5) 荷重-荷重線変位（開口変位）の記録

疲労き裂伝播速度を ΔJ で整理するために荷重-荷重線変位（開口変位）の測定が必要である。したがって、荷重-荷重線変位（開口変位）は、3.3.4(6)の規定に従いき裂長さを測定する時にくり返し数とともに測定記録されなければならない。

荷重-荷重線変位（開口変位）の記録に際しては ΔJ の算出精度を上げるためにXYプロッターによる連続記録が推奨される。データをデジタル化して記憶装置に保存する場合はスムーズなループが描けるような測定点数を確保しなければならない。

(6) き裂長さ測定

(i) き裂長さ測定間隔

測定間隔については、ASTM E647-83に準じているが、この規格では、最小測定間隔について「CT, CCT試験片いずれの場合でも、最小の Δa は0.25mm以上、かつ反復測定で決定されるき裂長さの平均値の標準偏差の10倍以上」と規定されているが、高温クリープ疲労き裂試験では、試験片形状によっては（CCTなど）、き裂長さ測定範囲が短くなり、 $\Delta a = 0.25\text{mm}$ を確保すると、測定点数が少なくなり、かえって da/dN 特性が把握しにくくなる場合がある。この場合には、0.25mm以下でも、測定点数を増やした方が、incremental polynomialで整理すれば、 da/dN 特性の傾向がより正確に把握できる。

(ii) 較正曲線

較正曲線の検定、作成におけるピーチマークにわん曲が認められる場合には、板厚方向平均値で補正を要する場合がある。き裂前線の補正に関しては、ASTM E647-83, E399-83およびJSME S001-81の平均き裂長さ（予き裂）算出方法として、板厚方向 $1/4t$, $2/4t$, $3/4t$ での3点平均を規定している。

(iii) 目視、写真法

E647-83では、目視測定法が推奨されており、目視測定に関し詳細に規定されている。

その概要は次のとおりである。

試験片には、あらかじめ、き裂が進展する方向に、一定間隔の参照線を引いておくと、移動顕微鏡などの位置ずれによる誤差を防止できる。測定には、20~50倍の移動顕微鏡が使用できる。

き裂長さの測定は、 $B/W \leq 0.15$ の試験片については片表面だけでよいが、 $B/W \geq 0.15$ については、両表面を測定し、（CT試験片：2点、CCT試験片：4点）、平均値を使用する。また、これら測定点のうち、2点の差は、 $0.025W$ 以下、かつ、 $0.25B$ 以下でなければならない。また、き裂は試験片の対称面から±5以上ずれてはいけない。

試験終了後に、破面の2ヶ所（例えば、き裂初期段階およびデータ取得最終段階）において、試験片厚さ方向のき裂前線のわん曲を測定する。板厚方向3点（ $1/4t$, $2/4t$, $3/4t$ ）の平均き裂長さとして、試験中表面にて測定したき裂長さ（平均値）の差が、算出した破壊

力学パラメータの値に5%以上の差異を生じた場合には、トンネリングの補正を行う。
補正値がき裂長さとともに変化する場合には、わん曲測定点以外のデータに対して線形補間法を適用する。線形補間は、少なくとも0.25W, Bいずれか大きい方の距離離れたき裂前縁わん曲に対し行う。わん曲の状況がき裂長さとともに、とくに変化しない場合には、測定したわん曲の補正値の平均値を用いて一律に補正する。

4.4 試験結果の取り扱い

4.4.1 パラメータの選択

(特に無し)

4.4.2 K, J, J' の計算

(1) 応力拡大係数, K

CCT試験片及びCT試験片に対するK値計算式は、何れもASTM E399 および E647 で採用されているものである。サイドグループの影響については、ASTM E813 のコンプライアンス計算においても採用されている Shih ら⁹⁾の等価板厚計算式を使用している。本計算式の妥当性は、61FCC⁹⁾のFEMき裂解析によっても検証されている。

(2) J積分, J

CCT試験片及びCT試験片のJ積分計算式は、何れもRiceら³⁾による提案をもとにしたものである。CCT試験片のJ値は、弾性J値と塑性J値との和を取るという方法で求めているが、Riceらの提案式ではき裂長さの長い場合にのみ有効であった。その後、平ら⁴⁾によって、き裂長さの短い場合に対しては荷重点変位の代わりに荷重線上のき裂開口変位(δ)を使用する方法が提案されており、その根拠は星出⁵⁾によって調べられている。荷重点変位を使用するRiceらの計算式は、Landesら⁶⁾によって $2a/W > 0.4$ で有効であることが実験的に確認されている。一方、き裂開口変位(δ)を使用する平らの計算式は、星出⁵⁾によってFEMき裂解析の結果から $0.125 < 2a/W < 0.75$ の範囲で有効であることが確認されており、また、59FCC⁷⁾の結果でも $2a/W = 0.1$ 程度まで実用上問題となるような誤差を生じないことが確認されている。

CT試験片では、リガメント部に曲げが作用するが、引張の影響も無視することが出来ない。Merkle-Corten⁸⁾は、純曲げに対するRiceら³⁾の提案式に軸力補正を施し、さらにLandesら⁶⁾によって簡略化されて来た。Landesらの提案式は、CCT試験片と同様な実験的方法によって $a/W > 0.4$ で有効であることが確認され、ASTME813に採用されるなど世界的に広く使用されており、3.4.2(2)でもこれを採用した。また、61FCCのFEM解析の結果⁹⁾でも本計算式の有効性が確認されている。3.4.2(2)の $\eta(\xi)$ 計算式は、 ξ の関数として、

$$\eta(\xi) = \sqrt{\left[\frac{2\xi}{1-\xi}\right]^2 + 2} \left[\frac{2\xi}{1-\xi}\right] + 2 - \left[\frac{1+\xi}{1-\xi}\right]$$

のようにも表示出来る。また、3.4.2(2)のCT試験片の $F(\xi)$ の計算式とほぼ同様の値を示す簡易式として次式が提案されている⁹⁾¹⁰⁾。

$$F(\xi) = 2 \left[\frac{1+\eta}{1+\eta^2} \right] = 2 (1.261 - 0.261 \xi)$$

弾塑性域におけるサイドグループの影響については、ASTM E813でも推奨されている等価板厚(B_e)として B_N を使用する方法を採用した。なお、弾性域も含めて、60FCC報告書¹¹⁾(p.51)にサイドグループの影響に関する文献調査結果が掲載されている。61FCCでは、FEM解析により B_N を使用することの妥当性が検討されている²⁾。

(3) 修正 J 積分, J'

修正 J 積分は, C^* 積分とも称されており, 応力-ひずみ場で定義された J 積分を応力-ひずみ速度場に拡張したものである。そこで, J 積分の簡易評価手法は, 塑性とクリープのアナロジーを用いて修正 J 積分の計算に適用可能であり, 以下に CT 試験片の計算式の導出例を示す。H. A. Ernst¹²⁾は, Rice³⁾, Merkle⁸⁾ によって提案された深いき裂を有する試験片の J 値簡易評価法をさらに発展させ, 引張成分と曲げ成分が任意の割合を有する緑き裂試験片に適用可能な評価法を検討している。この中で,

$$P = k \delta_p^{1/n}$$

(P ; 荷重, δ_p ; 荷重線変位の塑性分, n ; 加工硬化係数)

を仮定すると, J の塑性分 J_p は

$$J_p = \frac{F(\xi)}{Bb} \int_0^{\delta_p} P d\delta_p$$

($F(\xi)$; $\gamma - \beta/n$ b ; $W - a$, B ; 板厚)

となることを示している。塑性とクリープのアナロジーから,

$$P = C \dot{\delta}_c^{1/\alpha}$$

($\dot{\delta}_c$; 荷重点変位の変位速度 (厳密にはクリープ成分), α ; クリープ指数)

を仮定すると, J' 積分値は次のようになる (有効範囲は $a/W > 0.3$)¹³⁾。

$$\begin{aligned} J' &= \frac{F(\xi)}{Bb} \int_0^{\dot{\delta}_c} P d\dot{\delta}_c = \frac{F(\xi)}{Bb} \int_0^{\dot{\delta}_c} C \dot{\delta}_c^{1/\alpha} d\dot{\delta}_c \\ &= \frac{\alpha}{\alpha+1} \frac{F(\xi)}{Bb} C \dot{\delta}_c^{(\alpha+1)/\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha+1} \frac{P \dot{\delta}_c}{Bb} F(\xi) \end{aligned}$$

ここで, CT 試験片に対する $F(\xi)$ は, 3.4.2 (3) で示されている。61FCC の FEM 解析の結果²⁾により, 本計算式の有効性が確認されつつある。なお, γ 及び β について, 最近, Saxena¹⁴⁾ により次のような多項式表示の近似式が与えられているので, 参考までに記す。但し, β については Saxena 提案式に誤りがあったので, 暫定式を示した。

$$\begin{aligned} \gamma &= 2.0 + 0.9717 \xi - 0.9756 \xi^2 - 0.6371 \xi^3 + 0.6352 \xi^4 \\ &\quad (0.35 \leq \xi \leq 0.95) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta &= 0.306 - 0.823 \xi + 0.745 \xi^2 - 0.243 \xi^3 + 0.0145 \xi^4 \\ &\quad (0.35 \leq \xi \leq 0.75) \end{aligned}$$

CCCT 試験片についても前記と同様に導出されており, き裂開口変位速度 ($\dot{\delta}$) 及び荷重点変位速度を使用した計算式が大路¹⁵⁾ 及び Saxena¹³⁾ から提案されている。荷重点変位速度を使用した場合には, J 積分計算式と同様にき裂長さが長い $2a/W > 0.4$ で有効と考えられるが, き裂開口変位速度 ($\dot{\delta}$) を使用した場合には, クリープ指数 (α) が大きくなると $2a/W$ の全域にわたり, 有効となることが指摘されている¹⁵⁾。また, 58FCC から 61FCC にわたる FEM 解析によっても, 本計算式の有効性が裏付けられつつある。

クリープ条件下のサイドグループの影響については, 弾性及び弾塑性条件下に比較すると明

確ではなく、今後の課題として残されており、取り敢えずJ積分値に対する取扱いを流用した。

(参考文献)

- (1) C. F. Shih, H. G. DeLorenzi and W. R. Andrews, *Int. J. of Fracture*, Vol. 13, (1977), pp. 544-548
- (2) 日本溶接協会 61FCC 小委員会成果報告書, PNC SJ 2534 87-002 (1) (JWES-AE-8705), (1987-2)
- (3) J. R. Rice, P. C. Paris and J. G. Merkle, *ASTM STP 536*, (1973), pp. 231-245
- (4) 平・大谷・北村・山田, *材料*, Vol. 28, (1979), pp. 414-420
- (5) 星出, 京都大学学位論文, (1983)
- (6) J. D. Landes, H. Walker and G. A. Clarke, *ASTM STP 668*, (1979), pp. 266-287
- (7) 日本溶接協会 59FCC 小委員会成果報告書, PNC SJ 225 85-03 (JWES-AE-8504), (1985-2)
- (8) J. G. Merkle and H. T. Corten, *Trans. ASME, J. of Pressure Vessel Technology*, Vol. 96, (1974), pp. 286-292
- (9) H. A. Ernst, P. C. Paris and J. D. Landes, *ASTM STP 743*, (1981), pp. 476-502
- (10) G. A. Clarke, *ASTM STP 743*, (1981), pp. 553-575
- (11) 日本溶接協会 60FCC 小委員会成果報告書, PNC SJ 225 86-03 (JWES-AE-8605), (1986-2)
- (12) H. A. Ernst, *ASTM STP 791*, (1983), pp. I-499 -I-519
- (13) A. Saxena and J. D. Landes, Paper presented to ICF-6, (1984)
- (14) A. Saxena, unpublished report
- (15) 大路・小倉・久保, *日本機械学会論文集*, Vol. 44, (1978), pp. 1831-1838

4.4.3 J_I の評価

(1) CT試験片に対する簡便評価式の背景

CT試験片のJ積分簡便評価式については、Merkle-Corten¹⁾により軸力効果の修正がなされ、Clarke-Landes²⁾により簡略化がなされた。Dowling³⁾はこの簡便評価式を荷重-荷重線変位履歴曲線に適用することにより、J積分範囲を評価し、疲労き裂伝播速度を整理した。疲労き裂伝播においては、除荷およびき裂開閉口が存在するので、理論的にはJ積分の適用に問題があるが、1サイクルのき裂進展量が小さく、安定した荷重-変位ループが得られれば、き裂が開閉している間のJ積分範囲がき裂先端の応力・ひずみの状態値の変動幅を代表していると考えられる。

(2) CCT試験片に対する簡便評価式の背景

Dowling³⁾は、Rice-Paris-Merkle⁴⁾のJ積分簡便評価式を荷重-荷重点変位履歴曲線に適用することによりJ積分範囲の簡便評価式を提案した。また、平-大谷ら⁵⁾は、浅いき裂への拡張として、荷重-荷重点変位履歴曲線の代りに荷重-き裂中央開口変位履歴曲線を用いて、同様なJ積分範囲の簡便評価式を提案している。

次に、平-大谷らのJ積分範囲についての簡便評価式を用いる場合、荷重線変位測定のための標点距離について検討した。304ステンレス鋼の650°CにおけるFEM解析の結果⁶⁾をFig. 4.4.3-1に示す。標点距離が5mm ($Y=2.5$ mm)以上になると、簡便評価式から得られるJ積分値は、十分深いき裂に対しては経路積分値と等しいが、浅いき裂に対しては過大であることがわかる。同様に、304ステンレス鋼の650°Cにおける実験結果⁷⁾をFig. 4.4.3-2に示す。FEM解析の結果と同様に、標点距離25mmの荷重線変位から得られるJ積分範囲は、十分深いき裂に対しては、標点距離5mmのJ積分範囲と等しいが、浅いき裂に対しては過大であることがわかる。FEM解析および実験の結果、304ステンレス鋼の初期き裂長さ2mm、板幅20mm、板厚5mmの試験片で、650°Cにおける疲労き裂伝播試験を行う場合、初期き裂から十分深いき裂まで、有効なJ積分範囲を得るためには、標点距離を5mm以下にする必要がある。

(3) 簡便評価式におけるき裂開閉口の処理

通常、荷重-荷重線変位履歴曲線において、き裂閉口点は除荷時の変曲点として、き裂開口点は負荷時の屈曲点として現われるが、き裂開口点はき裂閉口点に比較して明瞭でないため、Fig. 3.4.3-1で示したように、簡便評価式におけるエネルギー S_p の測定開始点はき裂閉口点としている。

しかし、304ステンレス鋼の室温におけるき裂開閉口を目視法、電位差法、および超音波法で測定した結果⁸⁾によると、Fig. 4.4.3-3で模式的に示すように、き裂開口点とき裂閉口点はほぼ等しい荷重線変位上にあり、どちらの点を基準にするかにより、J積分範囲は比較的大きく異なる。同様に、304ステンレス鋼の650°Cにおける実験結果⁹⁾をFig. 4.4.3-4に示す。目視法によるき裂閉口点から得られるJ積分範囲は、従来法(荷重-荷重線変位履歴曲線)によるき裂閉口点から得られるJ積分範囲とほぼ等しいが、目視法によるき裂開口点から得られる

J積分範囲は閉口点から得られる場合の約半分である。これらの実験結果から、目視法、除荷弾性コンプライアンス法⁽¹⁰⁾、電位差法および超音波法等により、き裂開口点が正確に求められた場合は、J積分範囲の算出の基準点をき裂開口点とすることが望ましい。

(参考文献)

- (1) J. G. Merkle and H. T. Corten, A J integral analysis for the compact specimen, considering axial force as well as bending effects. Trans. ASME, J. Press. Vessel Tech., pp. 286-292 (1974)
- (2) G. A. Clarke and J. D. Landes, Evaluation of the J integral for the compact specimen. J. Testing and Evaluation, 7, pp. 264-269 (1979)
- (3) N. E. Dowling, Geometry effects and the J-integral approach to elastic-plastic fatigue crack growth. ASTM STP 601, pp. 19-32 (1976).
- (4) J. R. Rice, P. C. Paris and J. G. Merkle, Some further results of J-integral analysis and estimates. ASTM STP 668, pp. 266-287 (1979)
- (5) 平修二, 大谷隆一, 北村隆行, 山田勝彦, クリープ・疲労重畳下のき裂伝播に関するJ積分による検討。材料, 28-308, pp. 414-420 (1979)
- (6) 日本溶接協会FCC小委員会59年度成果報告書, PNC SJ 225 85-03, JWES-AE-8504 (1985)
- (7) 日本溶接協会FCC小委員会58年度成果報告書, PNC SJ 225 84-01, JWES-AE-8403 (1985)
- (8) 野中勇, 北川正樹, 大友暁, 朝田泰英, 高温低サイクル疲労き裂伝播のJ積分測定におけるゲージ長の問題。第34期学術講演会前刷, 日本材料学会, pp. 52-54 (1985)
- (9) 日本溶接協会FCC小委員会61年度成果報告書, PNC SJ2534 87-002(1), JWES-AE-8705 (1987)
- (10) 菊川真, 城野政弘, 田中健一, 高谷勝, 除荷弾性コンプライアンス法による低進展速度領域における疲労き裂進展速度とき裂開閉口挙動の測定, 材料, 25-276, pp. 899-903 (1976)

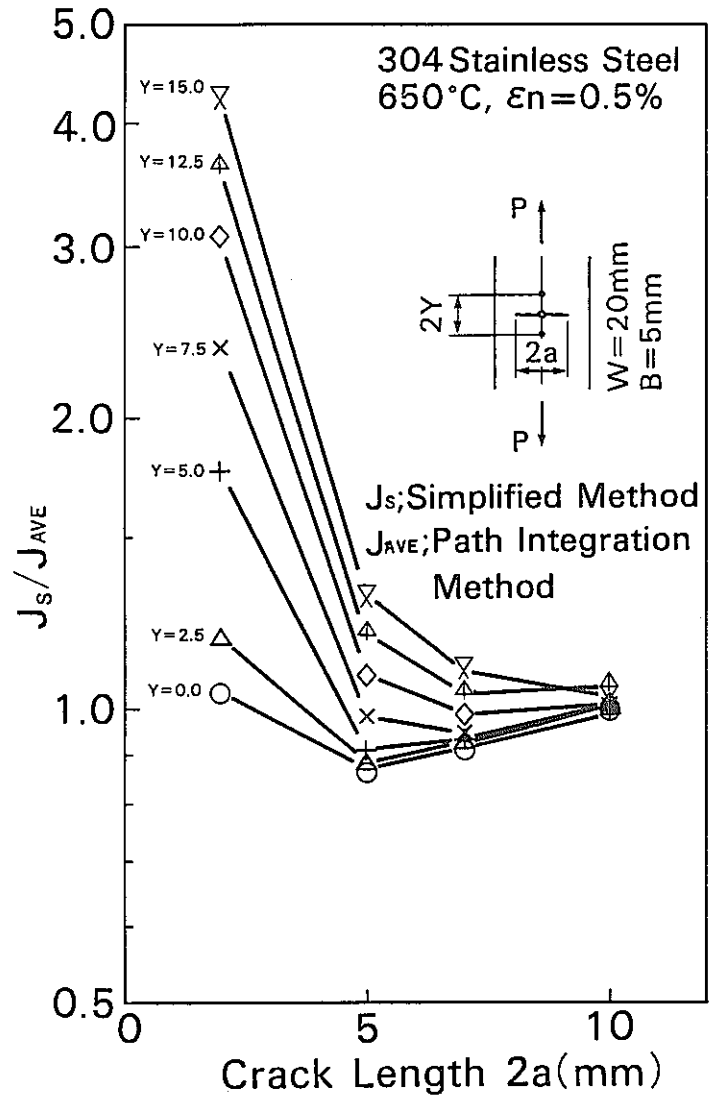


Fig.4.4.3-1 Comparison between simplified method and path integration method of J-integral evaluation

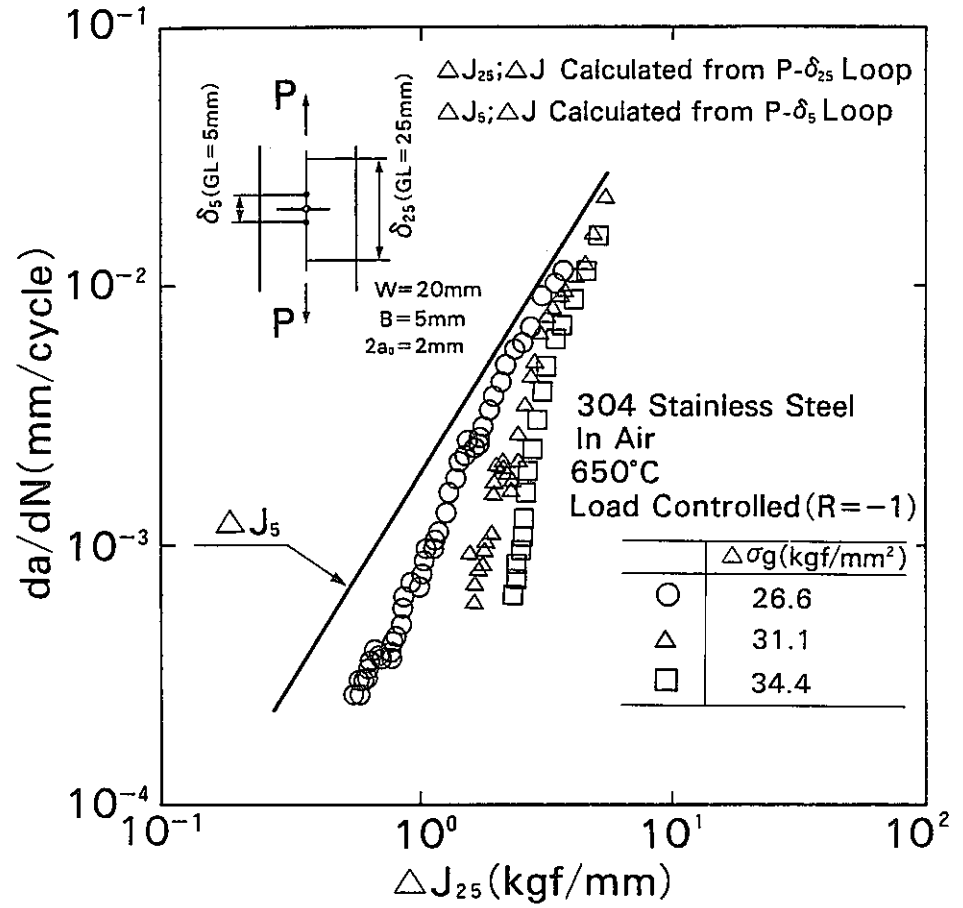


Fig.4.4.3-2 Comparison between ΔJ_5 and ΔJ_{25}

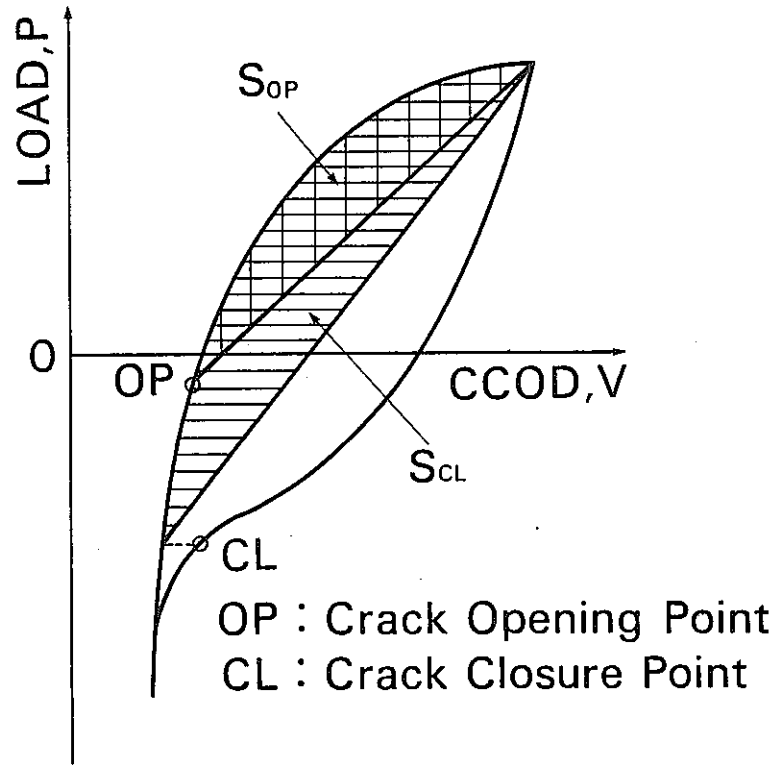


Fig.4.4.3-3 Crack closure point and crack opening point on the load versus load line displacement curve

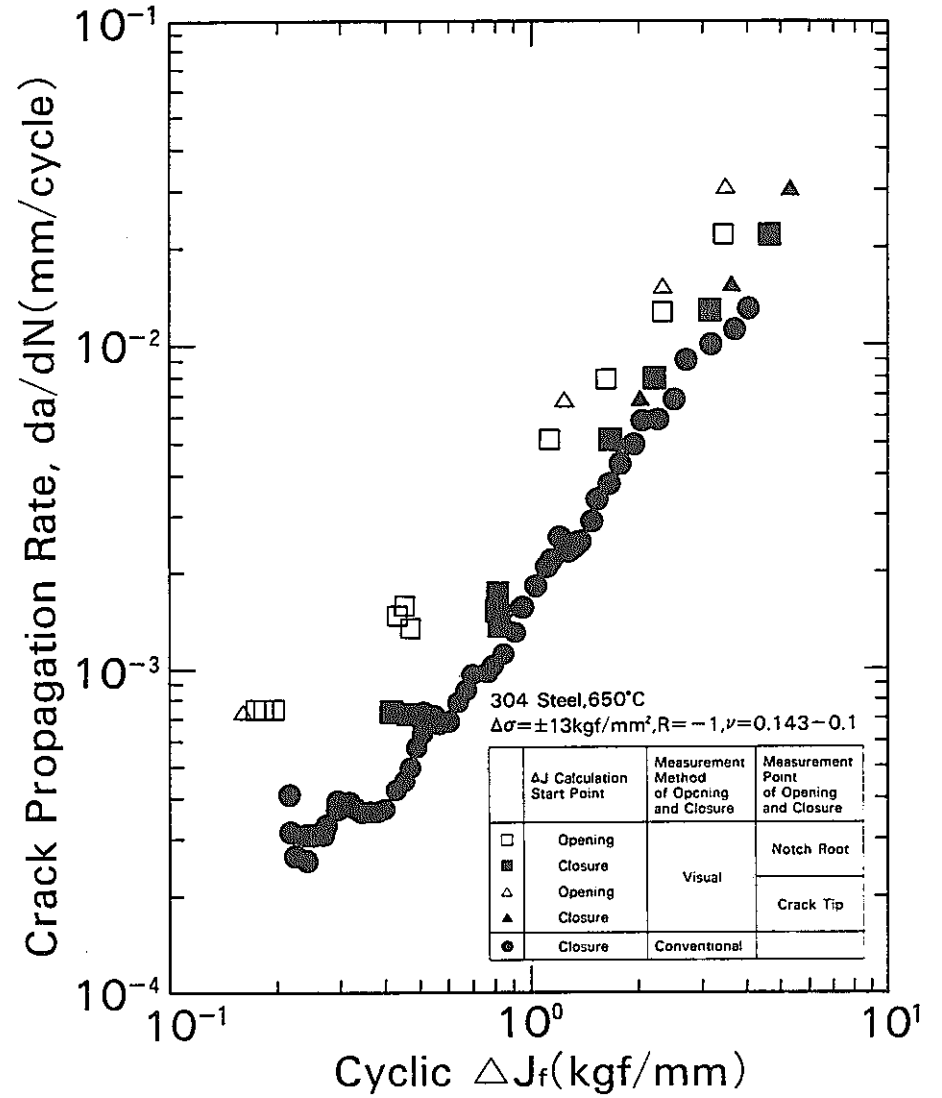


Fig.4.4.3-4 Comparison between ΔJ -integral calculated from crack closure point and ΔJ -integral calculated from crack opening point

4.4.4 ΔJ_c の評価

- (1) 簡便評価式 ; $\Delta J_c = \frac{\alpha}{\alpha+1} \frac{S_c}{Bb} F(\xi)$ の背景

Mrekle-Corten¹⁾ は、曲げとともに引張りを考慮したCT試験片のJ積分簡便評価式を提案したが、さらに、Ernst²⁾ は、単純曲げから、単純引張りまでの範囲を連続的に表現する統一解を提案した。この式に基づき、非線型、弾性の応力・ひずみ解と定常クリープの応力・ひずみ速度解の相似側から、ひずみとひずみ速度に、またひずみ硬化指数をクリープ指数の逆数に置き換えたのが、修正J積分 J' である。さらに、荷重保持の場合、一定荷重下のクリープき裂に関して提案された J' が、各引張半サイクル中に適用できるとし、 J' を保持時間 t_H で積分したのが、クリープJ積分範囲 ΔJ_c である。また、荷重点変位保持の場合、変位保持中の除荷過程にも J' が適用できると仮定すると、 ΔJ_c が有効であると考えられる。

$$\begin{aligned} \Delta J_c &= \int_0^{t_H} J' dt \\ &= \frac{\alpha}{\alpha+1} F(\xi) \frac{1}{Bb} \int_0^{t_H} P \cdot \dot{\delta} dt \\ &= \frac{\alpha}{\alpha+1} F(\xi) \frac{P \Delta \delta}{Bb} \\ &= \frac{\alpha}{\alpha+1} \frac{S_c}{Bb} F(\xi) \end{aligned}$$

- (2) 簡便評価式 ; $\Delta J_c = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} \frac{S_c}{2Bb}$ の背景

大路ら³⁾ は、CCT試験片の J' 簡便評価式を提案している。平一大谷ら⁴⁾ は一定荷重下のクリープき裂に対して提案された大路らの簡便評価式が変動応力下のクリープき裂に対しても各引張半サイクル中に適用できるとし、 J' を t_H で積分した ΔJ_c を提案している。

$$\begin{aligned} \Delta J_c &= \int_0^{t_H} J' dt \\ &= \frac{\alpha-1}{\alpha+1} \frac{1}{2Bb} \int_0^{t_H} P \dot{\delta} dt \\ &= \frac{\alpha-1}{\alpha+1} \frac{P \Delta \delta}{2Bb} \\ &= \frac{\alpha-1}{\alpha+1} \frac{S_c}{2Bb} \end{aligned}$$

次に、この簡便評価式における荷重線変位測定のための標点距離について検討した。304ステンレス鋼の650°Cにおける実験結果をFig.4.4.4-1に、同じく、FEM解析の結果をFig.4.4.4-2に示す。これらの結果から、 ΔJ_c の場合と同様に304ステンレス鋼の初期き裂長さ2mm、板幅20mm、板厚さ5mmの試験片で、650°Cにおけるクリープ疲労き裂伝播試験を行う場合、初期き裂から十分深いき裂まで、有効なクリープJ積分範囲を得るためには、標点距離

を 5 mm以下にする必要がある。

(3) 簡便評価式 ; $\Delta J_c = \frac{K_{\max}^2 - K_{\min}^2}{E'}$ の背景

本式は荷重点変位保持中の荷重線変位の変化が小さい場合に限って有効であると考えられる。保持の開始点と終了点における J 積分の弾性成分の差がクリープ J 積分と等しいと考えて提案された。

(参考文献)

- (1) J. G. Merkle and H. T. Corten, A J integral analysis for the compact specimen, considering axial force as well as bending effects. Trans. ASME, J. Press. Vessel Tech., P P. 286-292 (1974)
- (2) H. A. Ernst, Unified solution for J ranging continuously from pure bending to pure tension. ASTM STP 791, P P. I-499 -I-519 (1983)
- (3) 大路清嗣, 小倉敬二, 久保司郎, 全断面塑性における J 積分の簡便式とそれのクリープき裂問題への応用, 日本機械学会論文集, 44-382, P P. 1831-1838 (1978)
- (4) 平修二, 大谷隆一, 北村隆行, 山田勝彦, クリープ・疲労重畳下のき裂伝ばに関する J 積分による検討・材料, 28-308, P P. 414-420 (1979)
- (5) 日本溶接協会 F C C 小委員会 59 年度成果報告書, PNC SJ-225 85-03, JWES-AE-8504 (1985)

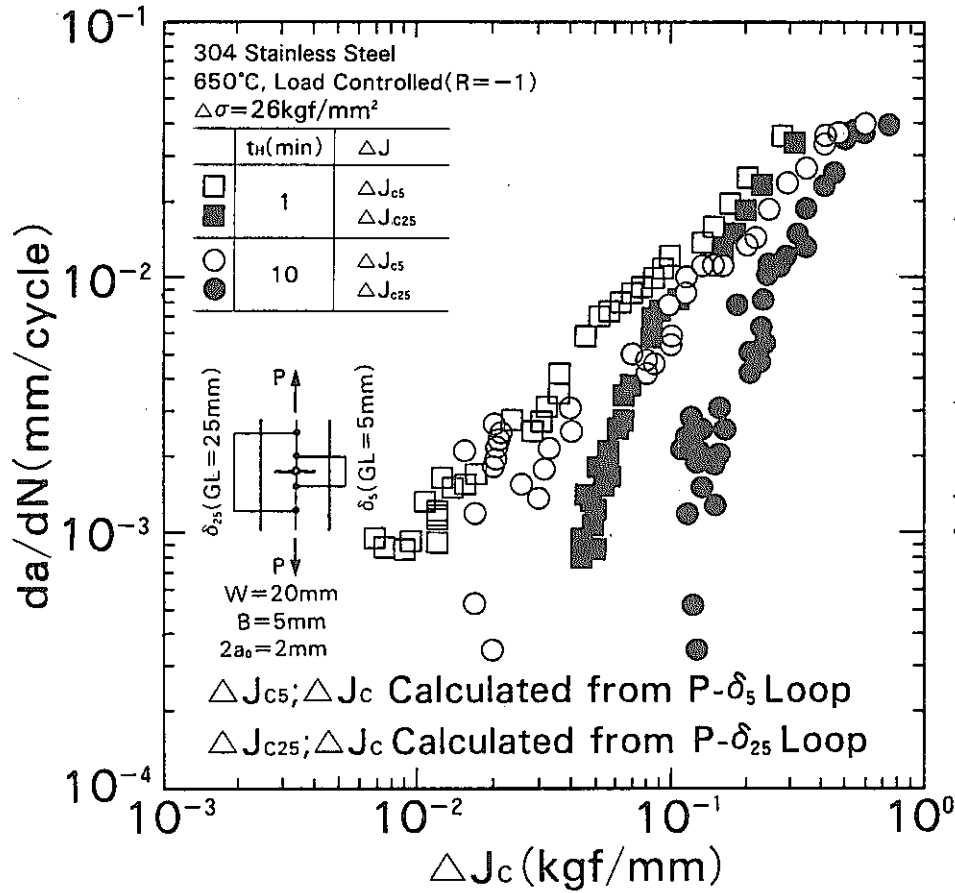


Fig.4.4.4-1 Comparison between ΔJ_{c5} and ΔJ_{c25}

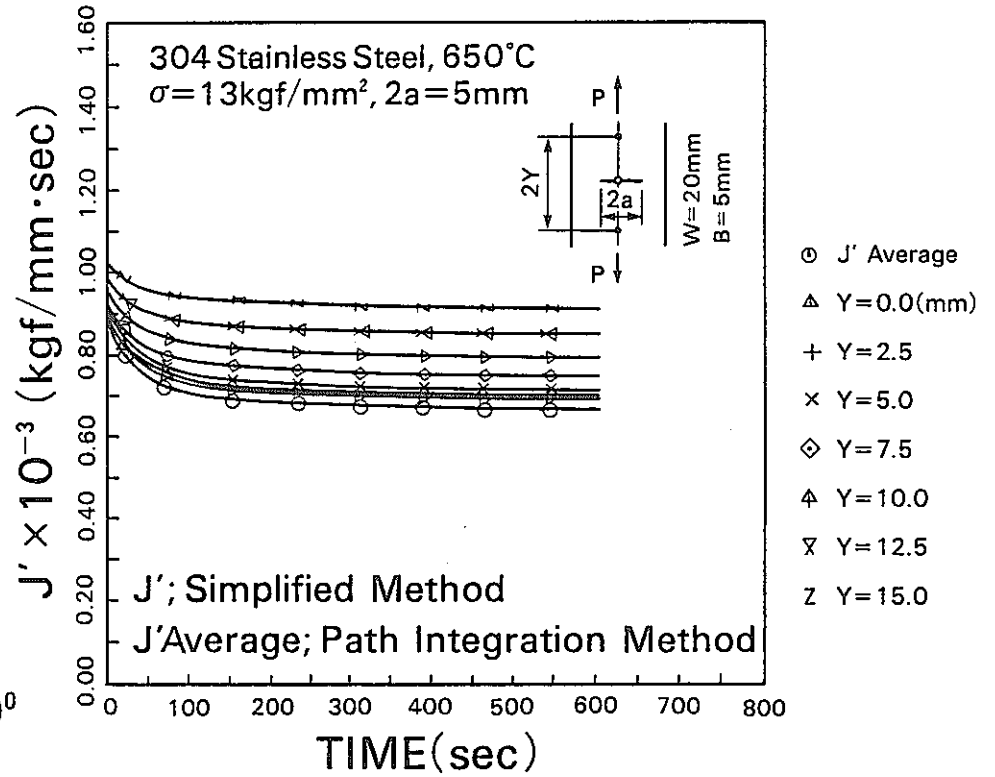


Fig.4.4.4-2 Comparison between simplified method and path integration method of J'-integral evaluation

4.4.5 き裂伝播速度の計算方法

Incremental Polynomial 法はある程度の Smoothing が行われている。従ってバラツキの大きいデータは Incremental Polynomial 法で処理した方がよい。なお、Smoothing 法（フェアリング法）としては例えば以下のような方法がある。

たとえば Fig. 4.4.5-1 のように 8 組の (a_i, N_i) が与えられたとき、

- ① $a_1 \sim a_5$ の 5 個（この個数は任意の数を指定できる）の \otimes 印データにより最小自乗法二次曲線上の $+$ 印の位置に修正し、それを $a'_1 \sim a'_5$ とする。
- ② 次に $a'_2 \sim a'_3$ と $a_4 \sim a_6$ の 5 個のデータより二次曲線を求め、 a_4 を曲線上の位置に修正し、それを a'_4 とする。以下同様に $a'_3 \sim a'_4$ と $a_5 \sim a_7$ により a'_5 を求め、 $a'_4 \sim a'_5$ と $a_6 \sim a_8$ により a'_6 を求める。
- ③ 最後に、 $a'_4 \sim a'_6$ と $a_7 \sim a_8$ により a'_7 を求め、 $a'_4 \sim a'_7$ と a_8 により a'_8 を求める。

この①から③までのプロセスを 3 回反復する。

このようにして求めた a_i と N_i について Incremental Polynomial 法を適用してき裂伝播速度を求めればよい。Secant 法、Incremental Polynomial 法及び Smoothing 法（5-points）で求めた da/dN と $\angle K$ の関係を Fig. 4.4.5-2 に示す。 $da/dN \sim \angle K$ 線図で直線領域が狭い場合の例であるが、三者間で大差はない。強いていえば、Secant 法で求めた伝播速度は各測定点毎にフェアリングなしに伝播速度を計算しているので出入りが大きくなりがちである。

4.5 報 告

（特に無し）

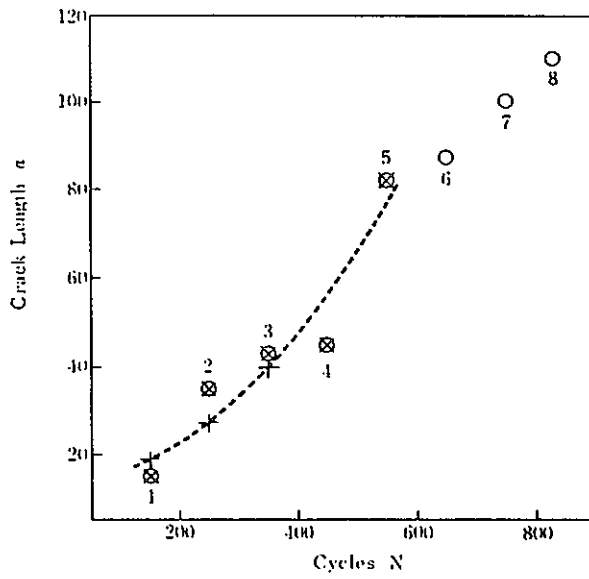


Fig.4.4.5-1 Fairing method of measured crack length

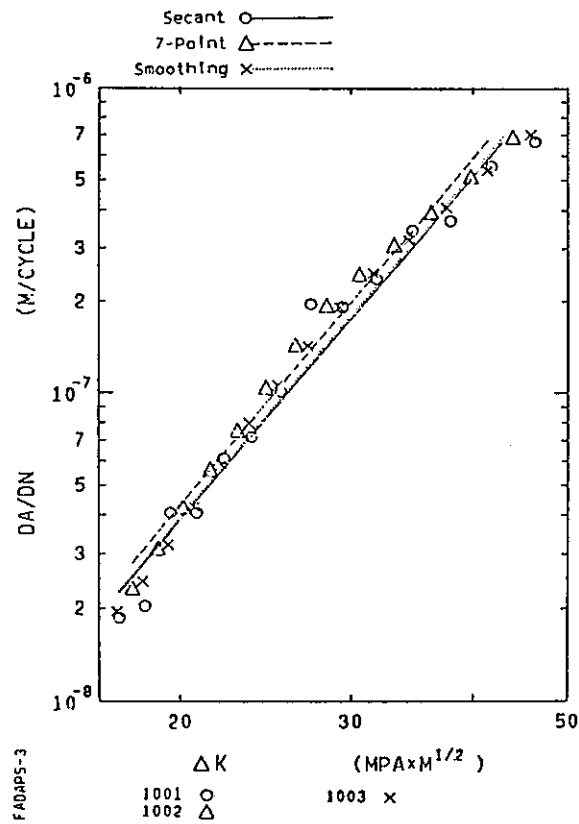


Fig.4.4.5-2 Comparison of da/dN vs ΔK relations obtained by three methods

5. FBR温度におけるき裂伝播データ

5. FBR温度におけるき裂伝播データ

FBRの設計最高温度（550℃）におけるき裂伝播特性データについて、以下に得られた知見をまとめる。

5.1 クリープき裂伝播特性

CT試験片により実施したクリープき裂伝播試験結果を Fig. 5.1-1 に示す。これらの図からわかるように、測定結果から求められたき裂伝播速度 da/dt を修正 J 積分 J' によって整理すると、負荷荷重条件によらず良好な相関関係が得られる。

この結果を 650℃ の試験温度で得られた結果と比較したものを Fig. 5.1-2 に示す（一部 CCT 試験片データを含む）。 J' で整理すると、試験温度、試験片形状および負荷応力レベルの相違に関係なく、ほぼ同じ $da/dt-J'$ 関係が得られる。これより、クリープき裂伝播挙動を表わす破壊力学パラメータとして J' の有効性が認められる。

5.2 疲労き裂伝播特性

CCT試験片を用いて 550℃ の荷重（公称応力）制御条件（周波数 $\nu=0.25\text{Hz}$ ，三角波）下で繰返し数依存型の高温疲労き裂伝播試験を行った。結果を Fig. 5.2-1 に示す。同図から、疲労 J 積分範囲 ΔJ_f でき裂伝播速度 da/dN を整理すると、負荷荷重条件によらず良好な相関関係が得られることがわかる。また、同図には 650℃ で行われた試験結果をバンド幅として与えているが、 $da/dN-\Delta J_f$ 関係は試験温度にほとんど依存しないこともわかる。これより、繰返し数依存型の高温疲労き裂伝播に対して ΔJ_f が破壊力学パラメータとして有効であることが認められる。

5.3 荷重制御クリープ疲労き裂伝播特性

CCT試験片を用いて 550℃ において行った保持時間をともなう荷重（公称応力）制御条件下のクリープ疲労き裂伝播試験結果を ΔJ_f で整理して Fig. 5.3-1 に示す。図中には、比較のため 650℃ における試験結果も併記している。

Fig. 5.3-1 より、550℃ の全ての試験結果および 650℃ の保持なし試験結果ではほぼ同一の $da/dN-\Delta J_f$ 関係が得られており、クリープの影響が顕著でない繰返し数依存型のき裂伝播特性を示していると考えられる。

一方、クリープの影響が顕著となると考えられる 650℃ の保持有り試験結果では、 $da/dN-\Delta J_f$ 関係が上記特性とは一致せず、時間依存型のき裂伝播に対しては ΔJ_f が適用できないものと推察される。

5.4 変位制御クリープ疲労き裂伝播特性

CT試験片を用いた変位制御条件下のクリープ疲労き裂伝播試験結果を Fig. 5.4-1 および Fig.

5.4-2 に示す。

Fig. 5.4-1 はスロープライン制御法によって求められた 550°C における繰返し数依存型のき裂伝播特性を疲労 J 積分範囲 ΔJ_f を用いて整理したものである。図中には、650°C における試験結果を併記している。図より、スロープライン制御法によれば、一本の試験片で広範囲にわたる $da/dN - \Delta J_f$ 関係を得ることができることがわかる。また、先と同様に繰返し数依存型の高温疲労き裂伝播に対する ΔJ_f の有効性が認められる。

Fig. 5.4-2 は変位制御保持時間を 1 時間とした場合の試験結果である。同図には、比較のため、550°C におけるスロープライン制御法によって得られた三角波（周波数 $\nu = 0.3\text{Hz}$ ）の試験結果も併記してある。この図より、クリープの影響が顕著になると、繰返し数依存型のき裂伝播の支配力学パラメータである ΔJ_f は適用できないことがわかる。

また、Fig. 5.4-3 には DEN 試験片を用い、550°C において一定の応力範囲（ $\Delta \sigma = 30\text{kgf}/\text{mm}^2$ ）条件下で応力比 $R (= \sigma_{\min}/\sigma_{\max})$ を変えた場合の $da/dN - \Delta J_f$ 関係を示す。図の結果では R の変化に伴って両者の関係が大きく異なっている。クリープ疲労き裂伝播に及ぼす R の影響の検討（破壊力学パラメータの評価も含めて）については今後の課題である。

5.5 クリープの影響の顕著な領域でのクリープ疲労き裂伝播特性

破面形態において粒界割れが支配的となり、クリープの影響が比較的顕著な領域でのき裂伝播試験を行って、時間依存型のき裂伝播に対する ΔJ_c の有効性が検証されている。550°C において CCT 試験片と DEN 試験片を用いて行った試験結果を、 $da/dN - \Delta J_c$ 関係としてそれぞれ Fig. 5.5-1 および 5.5-2 に示す。

Fig. 5.5-1 には、Fig. 5.3-1 に示した保持時間 10min および 60min のデータならびに 550°C の静的クリープき裂伝播特性も合わせて示している。明瞭な粒界割れ破面を呈する保持時間 300min の結果は他のデータの延長線上にあり、且つ静的クリープき裂伝播特性とも比較的よく一致している。

Fig. 5.5-2 の DEN 試験片の結果についても、Fig. 5.5-1 と同様に比較データが併記されており、その傾向も上述の結果とほぼ一致している。このように、粒界割れが支配的となるクリープの影響が顕著な領域では、時間依存型の高温疲労き裂伝播速度 da/dN は ΔJ_c の一価関係として表わせ、 ΔJ_c が有効であることがわかる。

5.6 繰返し数依存型き裂伝播特性に及ぼす予き裂導入法の影響

CCT 試験片および CT 試験片を用いて、疲労予き裂の有無が 550°C での繰返し数依存型のき裂伝播特性に及ぼす影響について検討した。CCT 試験片の場合の結果を Fig. 5.6-1 に示す。

同図は $da/dN - \Delta J_f$ 関係を示している。これより、切欠きと疲労予き裂の両者の結果にはほとんど差異がなく、 $da/dN - \Delta J_f$ 関係に初期き裂形状の影響がないことがわかる。

5.7 まとめ

FBR温度におけるき裂伝播挙動を検討した。その結果を要約すると以下の如くである。

- (1) $da/dN - \Delta J_f$ 関係を用いて繰返し数依存型の高温疲労き裂形状、負荷条件および試験片形状等に関係なく一本の直線で記述し得る。
- (2) 時間依存型のクリープ疲労き裂伝播特性を $da/dN - \Delta J_c$ 関係として整理すると、粒界割れが支配的となりクリープの影響が大きい領域では試験温度、負荷条件や試験片形状等に関係なく一価関係が得られる。

これより、高速炉高温構造の健全性評価に適用し得る破壊力学的手法の開発に当り、クリープ疲労き裂伝播特性を整理するために従来提唱されてきた破壊力学パラメータ、 J' 、 ΔJ_f 及び ΔJ_c を用いることの有効性が検証されたものと考えられる。

したがって、標準試験法が確立されて（破壊力学パラメータの評価法の標準化も含めて）これに基づいてデータの取得および蓄積が行われれば、破壊力学的健全性評価に資する妥当なデータが得られるものと期待される。

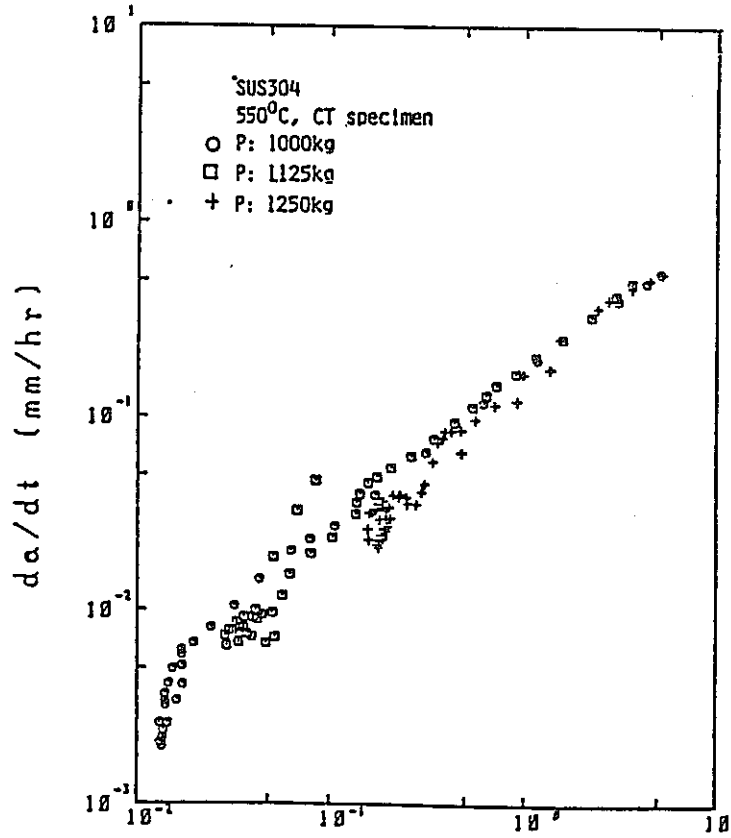


Fig.5.1-1 Relationship between da/dt and J' at 550°C

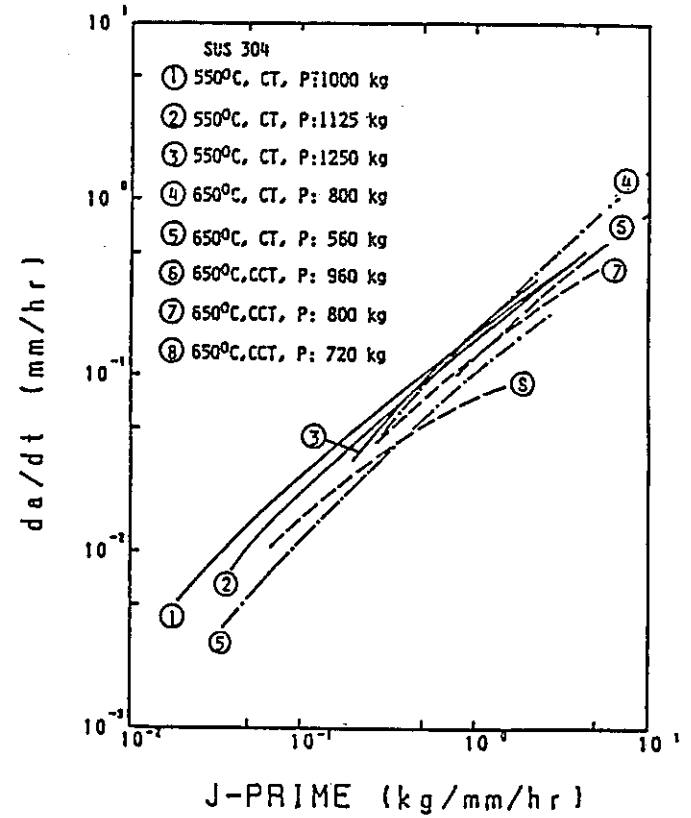


Fig.5.1-2 Relationship between da/dt and J' at 550°C and 650°C

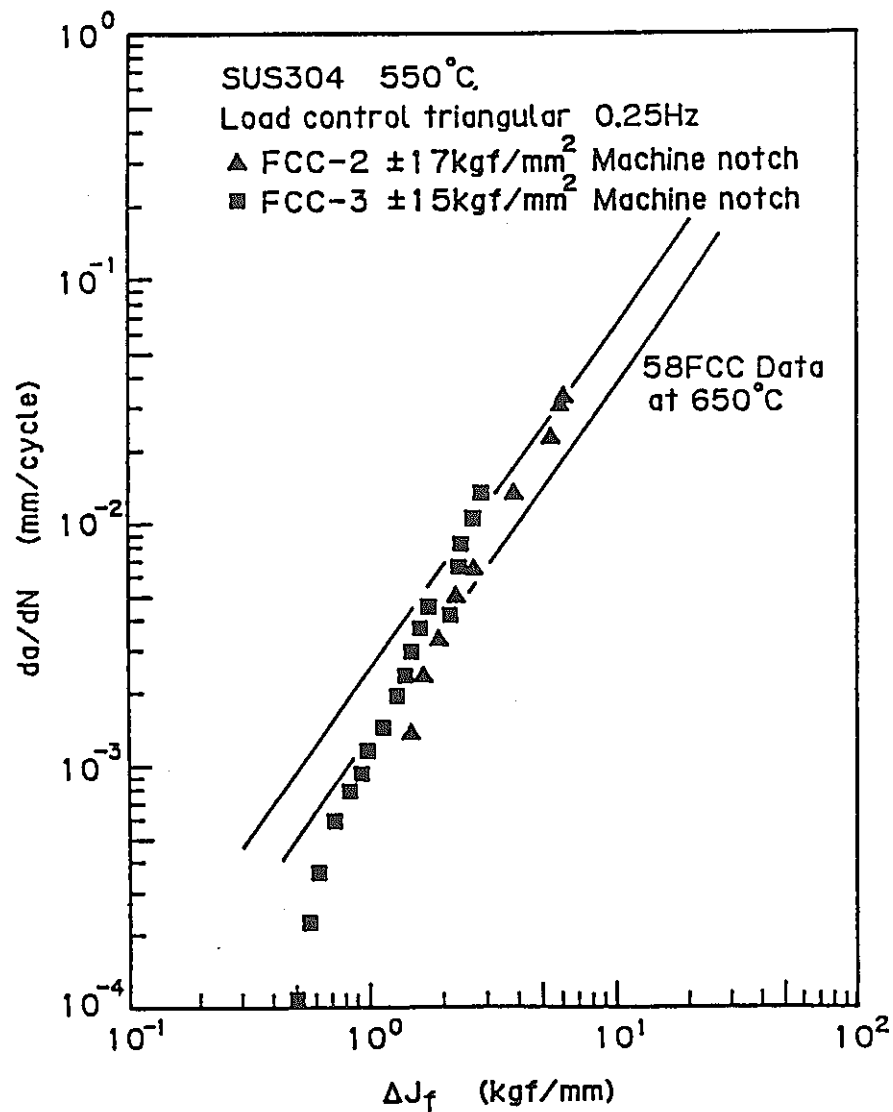


Fig.5.2-1 da/dN vs. ΔJ_f relation

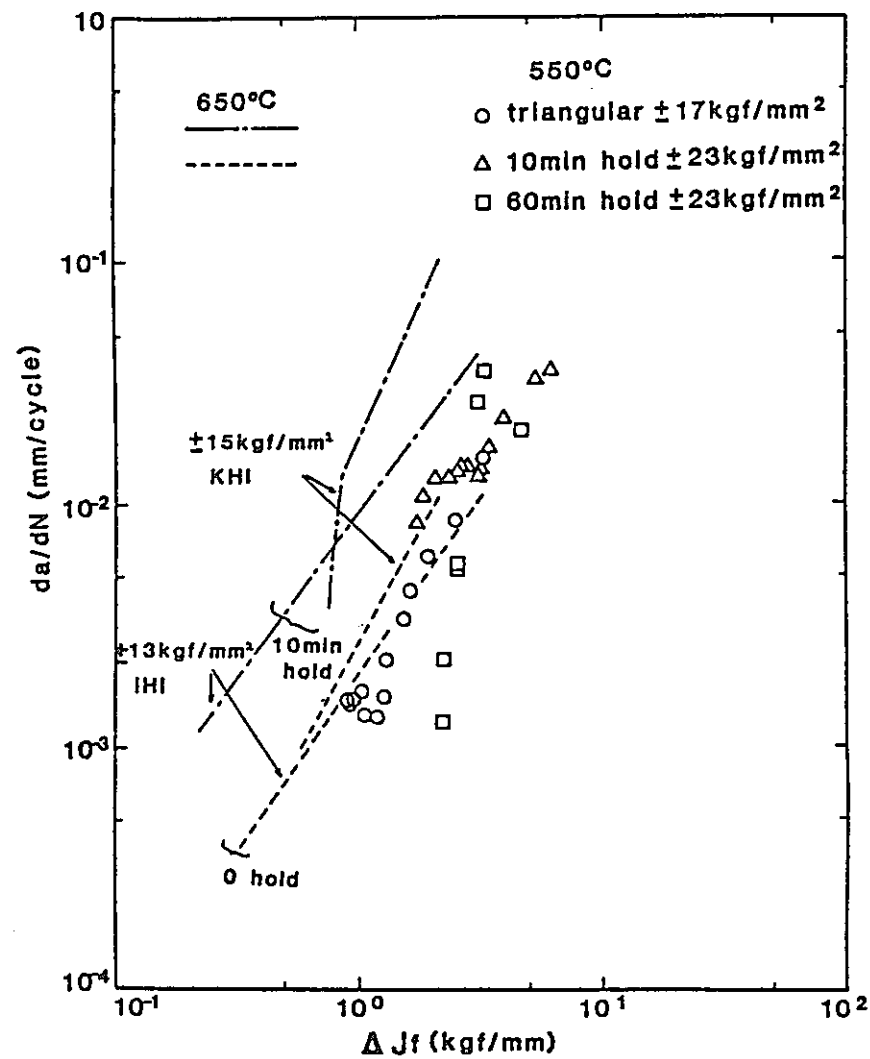


Fig.5.3-1 Relationship between da/dN and ΔJ_f

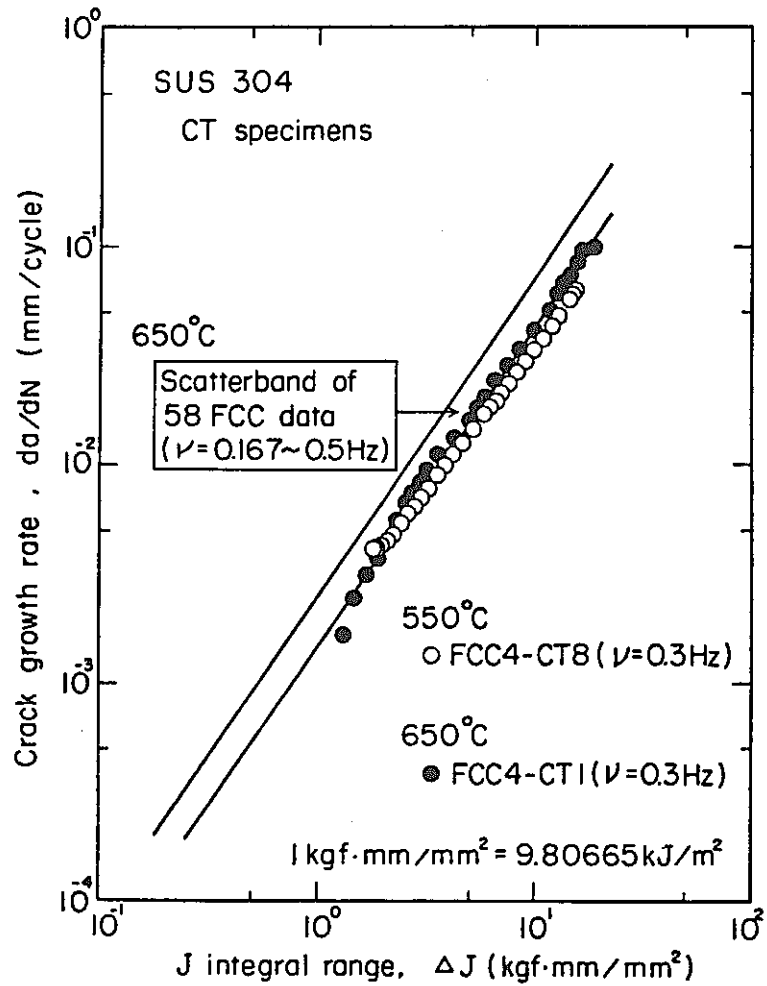


Fig.5.4-1 Temperature effects on fatigue crack growth behavior of SUS 304 steel

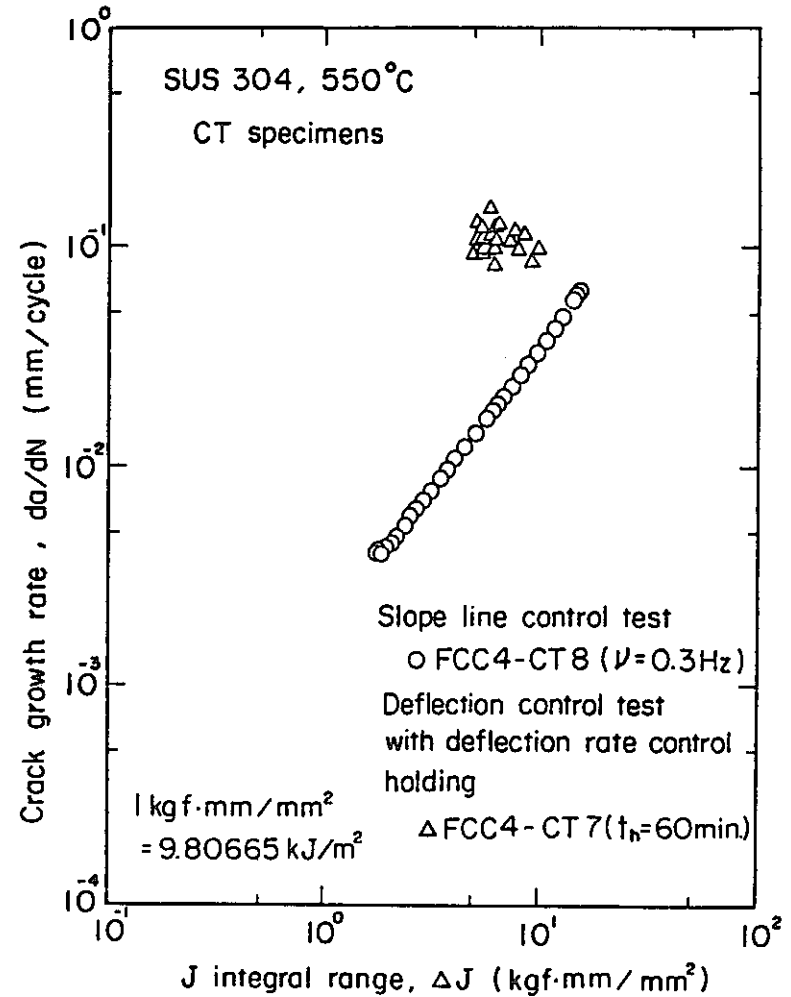


Fig.5.4-2 Hold time effects on fatigue crack growth behavior at 550°C

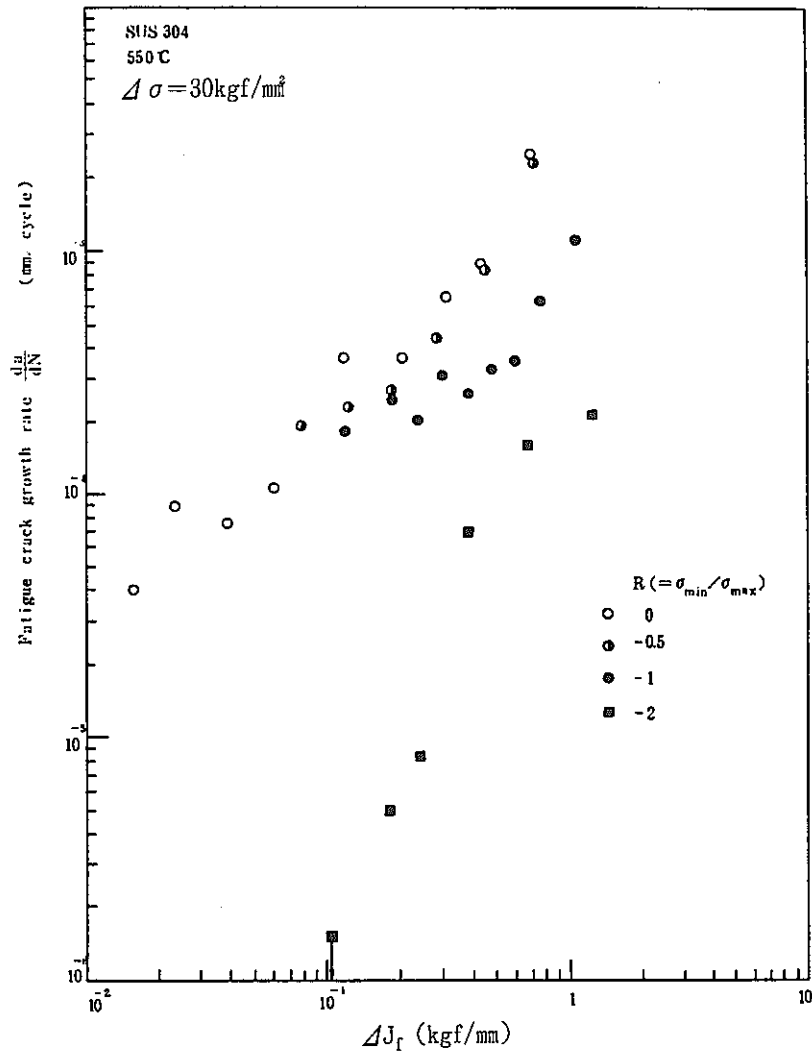


Fig.5.4-3 Relationship between da/dN and ΔJ_f

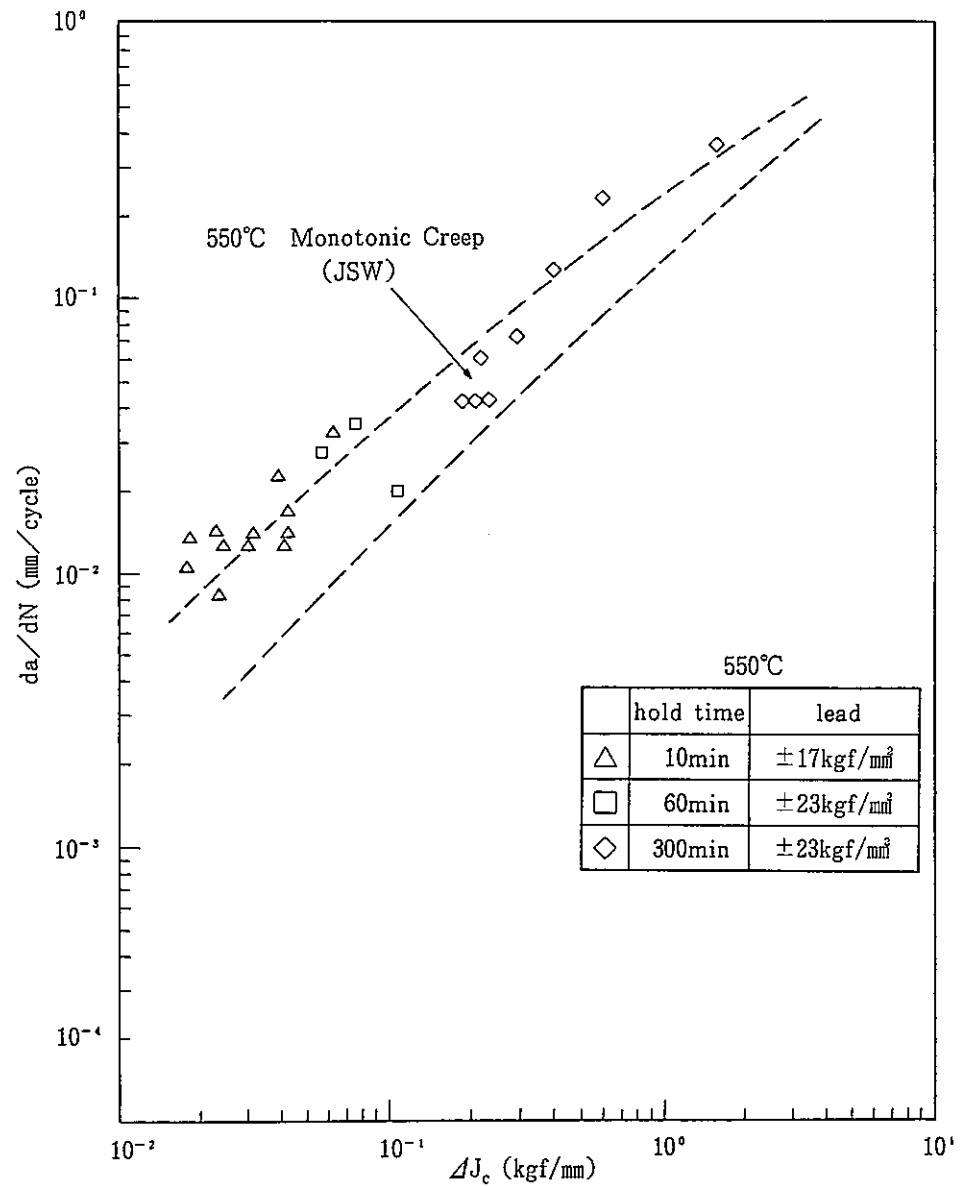


Fig.5.5-1 Relation between da/dN and ΔJ_c

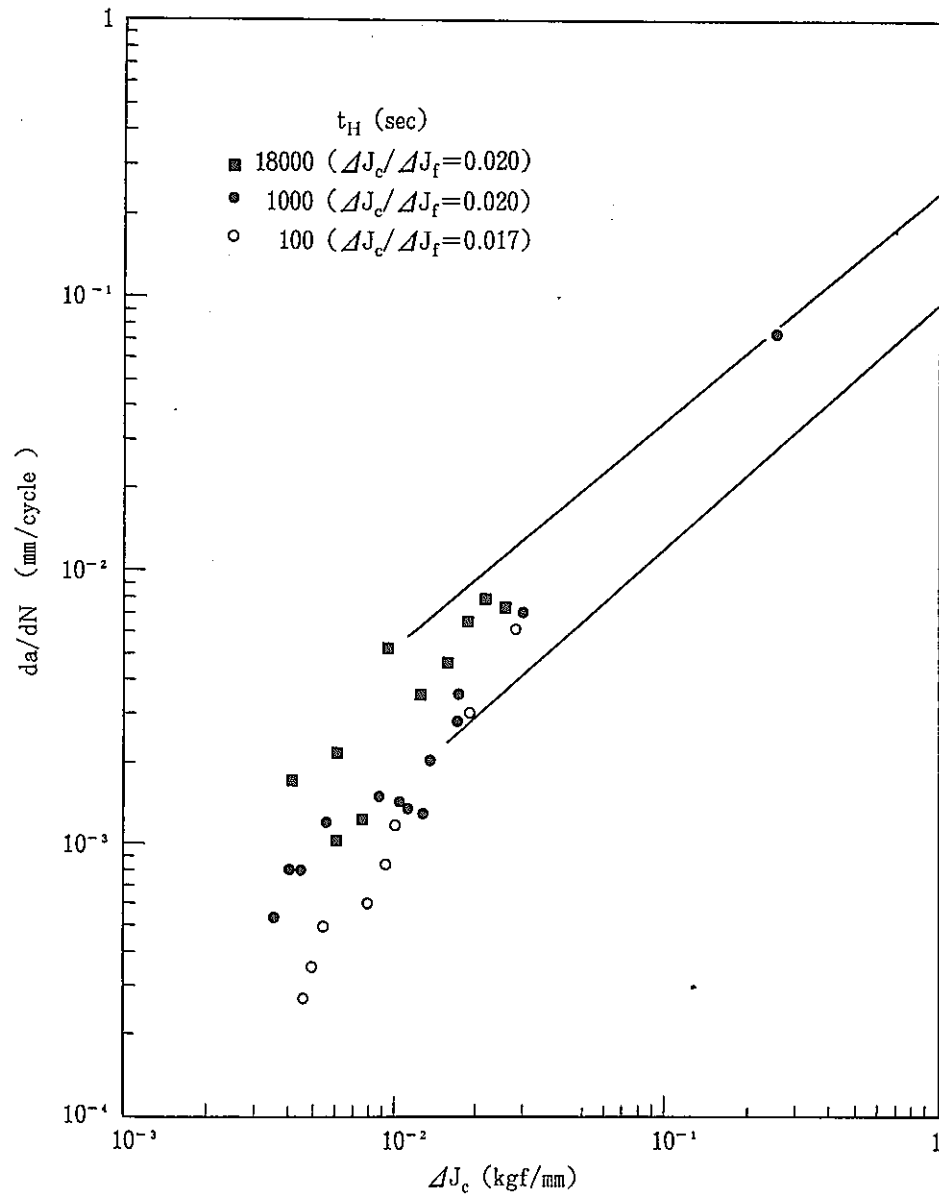


Fig.5.5-2 Relationship between da/dN and ΔJ_c

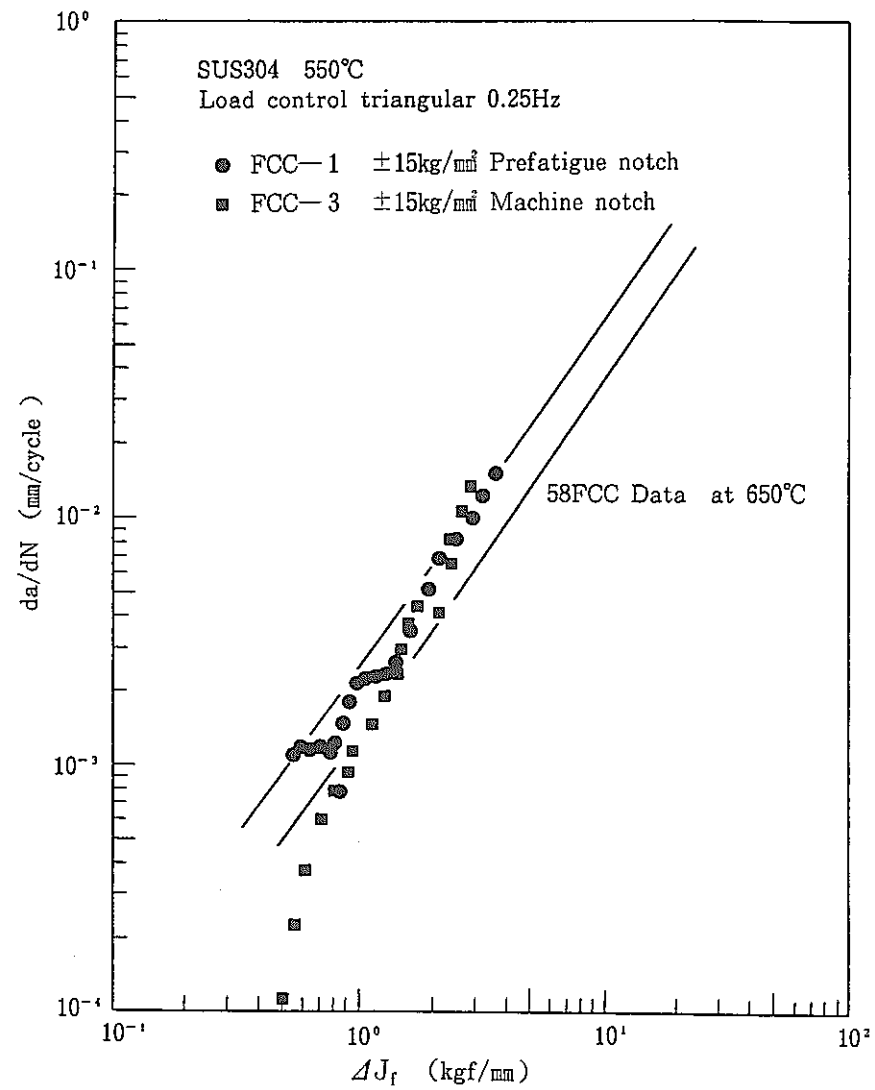


Fig.5.6-1 da/dN vs. ΔJ_f relation