九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

疲労亀裂伝播試験法における亀裂開閉口および伝播挙動の評価手法に関する研究

村上，幸治

https://hdl.handle.net/2324/4784722

出版情報：Kyushu University, 2021, 博士（工学）, 論文博士
バージョン：
権利関係：

疲労亀裂伝播試験法における亀裂開閉口および伝播挙動の評価手法に関する研究

令和 3 年 11 月

村 上　幸 治

目次

用　語 …… 1

第 1 章　　緒　論 …… 4
1.1　研究の背景および目的 …… 4
1.1.1　疲労亀裂とは …… 4
1.1.2　金属疲労の研究の始まり …… 4
1.1.3　疲労亀裂の観察 …… 6
1.1.4　金属の破壊事故の種類と金属疲労による事故の現状 …… 7
1.1.5　疲労亀裂伝播挙動に関する従来の研究 …… 9
1.1.6　疲労亀裂先端近傍における亀裂開閉口挙動の観察 …… 11
1.1.7　除荷弾性コンプライアンス計測を含む試験システムと RPG 荷重の同定 …… 15
1.1.8　研究目的 …… 16
1.2　本論文の構成 …… 17

第 2 章　　K 値漸減試験の簡便化に向けた検討 …… 19
2.1　緒言 …… 19
2.2　伝播中の疲労亀裂が停留する要因 …… 21
2.3　既存の ΔK_{th} の決定方法 …… 23
2.3.1　疲労亀裂の停留判定 …… 23
2.3.2　WES 1111 における手法 …… 26
2.4　より簡便な ΔK_{th} 決定方法の提案 …… 27
2.4.1　亀裂停留判定の緩和 …… 27
2.4.2　検証結果と妥当性 …… 32
2.4.3　緩和条件の追加と検証結果 …… 36
2.5　K 値漸減試験における K 値減少率の数値検討 …… 38
2.6　結言 …… 43

第 3 章　　除荷弾性コンプライアンス法を用いた疲労亀裂開閉口挙動の計測 …… 45
3.1　緒言 …… 45
3.2　疲労亀裂の開閉口挙動と応力拡大係数範囲 …… 46

3.2.1　疲労亀裂の開口と Paris - Elber 則 …… 46
3.2.2　疲労亀裂の開閉口と除荷弾性コンプライアンス …… 48
3.3　ひずみとコンプライアンス変化の巨視的変化について …… 51
3.4　疲労亀裂伝播試験方法 …… 57
3.5　ヒステリシスループを用いた RPG 荷重の決定方法（反転法） …… 61
3.6　結言 …… 64

第 4 章　コンプライアンス自動計測機能付き疲労亀裂伝播試験システムの開発 …… 66
4.1　緒言 …… 66
4.2　試験システムの構成表 …… 68
4.2.1　選定機器の概要 …… 68
4.2.2　ロードセル …… 70
4.2.3　動ひずみ測定器 …… 72
4.2.4　疲労試験機 …… 73
4.3　試験片形状とひずみゲージ組合せの特徴 …… 75
4.4　P - ε 関係のヒステリシスループからの ε_{SUB} 処理 …… 80
4.5　各ヒステリシスループの描画性能 …… 83
4.6　結言 …… 85

第 5 章　RPG 荷重自動判定手法の構築 …… 87
5.1　緒言 …… 87
5.2　疲労亀裂伝播試験 …… 88
5.3　手作業による重ね合わせ …… 89
5.4　P_{RPG} および P_{op} の自動判定 …… 90
5.4.1　自動重ね合わせのアルゴリズム …… 90
5.4.2　重ね合わせの関数と判定方法 …… 92
5.4.3　P_{RPG} と P_{op} の判定方法 …… 98
5.5　供試材および手作業との結果比較 …… 100
5.5.1　P_{RPG} と亀裂長さの関係 …… 100
5.5.2　疲労亀裂伝播特性 …… 105
5.6　結言 …… 107

第 6 章　切欠底から発生する微小亀裂の成長挙動観察に適した試験片形状および観察方法の検討 …… 109
6.1　緒言 …… 109

6.2　SEM 内疲労試験による疲労亀裂の発生および成長挙動の観察 …… 111
6.2.1　試験片について …… 111
6.2.2　応力集中部から発生・成長する微小疲労亀裂の直接観察 …… 114
6.2.3　亀裂成長曲線の観察結果と豊貞らのモデルによる
推定結果との比較 …… 117
6.3　CCD カメラによる微小疲労亀裂の発生および成長挙動の観察 …… 121
6.3.1　微小疲労亀裂の発生および伝播観察用の試験片 …… 121
6.3.2　CCD カメラによる疲労亀裂発生および伝播の直接観察 …… 123
6.3.3　疲労亀裂の発生と成長解析の比較 …… 127
6.4　結言 …… 128

第 7 章　デジタル画像相関法を用いた疲労亀裂先端近傍の
両振り塑性域の測定 …… 129
7.1　緒言 …… 129
7.2　デジタル画像相関法について …… 131
7.2.1　画像相関の概要 …… 131
7.2.2　検査領域のサイズおよびオーバーラップによる補完 …… 132
7.3　疲労亀裂先端近傍の測定 …… 133
7.3.1　疲労亀裂先端近傍の弾塑性挙動 …… 133
7.3.2　試験条件 …… 136
7.4　デジタル画像処理によるひずみ場の取得 …… 137
7.4.1　ランダムパターンの作成方法 …… 137
7.4.2　デジタル画像相関によるヒステリシスループの描画 …… 139
7.5　ヒステリシスループ形状に基づく両振り塑性域寸法の取得 …… 144
7.5.1　評価に用いるヒステリシスループの決定 …… 144
7.5.2　標準偏差を用いた考察 …… 144
7.5.3　重み関数付き偏差を用いた考察 …… 146
7.5.4　測定結果の比較 …… 151
7.6　結言 …… 152

第 8 章　結　論 …… 153

付録 A　t 検定を用いた統計的仮説検定手法 …… 156
A.1　はじめに …… 156
A.2　t 検定とは …… 156
A.3　使用方法 …… 157

付録 B　微分法によるいくつかの荷重決定法について …… 160
B.1　はじめに …… 160
B.2　微分法とは …… 160
B.3　使用方法 …… 162
B.3.1　ヒステリシスカーブ微分法 …… 162
B.3.2　コンプライアンス微分法 …… 163
B.4　考察結果の検証 …… 165
B.5　総括 …… 166

付録 C　試験システムを構成している機器等の採用について …… 168
C.1　はじめに …… 168
C.2　使用機器等について …… 168
C.2.1　油圧サーボ試験機の制御ソフトウェア …… 168
C.2.2　ロードセル …… 169
C.2.3　動ひずみ測定器 …… 169
C.2.4　ひずみゲージの選定 …… 169
C.2.5　RPG 荷重決定ソフトウェア …… 169
C.3　総括 …… 170

付録 D　ΔK_{RPG} を用いた無欠陥状態部から発生，伝播する
微小疲労亀裂の成長モデルについて …… 171
D.1　はじめに …… 171
D.2　応力集中部から発生した微小疲労亀裂の成長モデル …… 171
D.3　第一結晶粒内における疲労亀裂伝播中の降伏応力について …… 174

付録 E　デジタル画像相関に用いた機材について …… 176
E.1　はじめに …… 176
E.2　使用機材等について …… 177
E.2.1　撮影環境 …… 177
E.2.2　ランダムパターン作成ツール …… 177
E.2.3　デジタル画像処理関連ソフトウェア …… 178
E.3　総括 …… 178

参考文献 …… 179

謝　辞 …… 188

用　語

・記号の意味と英語表記

a　亀裂長さ（Crack length）

C_K　K 値減少率（Normalized K-gradient）

da/dN　疲労亀裂伝播速度（Fatigue crack growth rate）

K　応力拡大係数（Stress intensity factor）

K_c　破壊靭性値（Fracture toughness）

K_{fc}　疲労破壊靭性値（Fatigue fracture toughness）

K_{max}　最大応力拡大係数（Maximum stress intensity factor）

K_{min}　最小応力拡大係数（Minimum stress intensity factor）

K_{op}　亀裂開口応力拡大係数（Crack opening stress intensity factor）

N　サイクル数（Number of cycles）

P　負荷荷重（Load）

P_{cl}　亀裂閉口荷重（Crack closure load）

P_{max}　最大荷重（Maximum load）

P_{op}　亀裂開口荷重（Crack opening load）

P_{RCPG}　再圧縮塑性域形成荷重（Re- Compressive Plastic zone’s Generated load）

P_{RPG}　再引張塑性域形成荷重（RPG 荷重；Re-tensile Plastic zone's Generated load）

R　応力比 ＝ 最小応力 σ_{min} / 最大応力 σ_{max}（Stress ratio）

U　亀裂開口比（Crack opening ratio）

δ　荷重方向変位（Load direction displacement）

ΔK　応力拡大係数範囲（Stress intensity factor range）

ΔK_{eff}　有効応力拡大係数範囲（Effective stress intensity factor range）

ΔK_{eff}^{cl}　亀裂閉口有効応力拡大係数範囲（Crack closure effective stress intensity factor range）

$(\Delta K_{eff})_{th}$　下限界有効応力拡大係数範囲（Threshold effective stress intensity factor range）

$(\Delta K_{eff}^{cl})_{th}$　下限界亀裂閉口有効応力拡大係数範囲（Threshold crack closure effective stress intensity factor range）

ΔK_{RPG}　RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲（Effective stress intensity factor range based upon the RPG load）

ΔK_{th}　下限界応力拡大係数範囲（Threshold stress intensity factor range）

$\Delta\sigma_{eff}$　有効応力範囲（Effective stress range）

λ　コンプライアンス（Compliance）

σ_a　応力振幅（Stress amplitude）

σ_{max}　最大応力（Maximum stress）

σ_{min}　最小応力（Minimum stress）

σ_{op}　亀裂開口応力（Crack opening stress）

$\tilde{\omega}$　両振り塑性域寸法（Length of reversed plastic zone）

・主要語句の英語表記

疲労亀裂（Fatigue crack）

低サイクル疲労（Low cycle fatigue）

高サイクル疲労（High cycle fatigue）

入り込み（Intrusions）

突き出し（Extrusions）

電位差法（Electrical potential method）

渦電流法（Eddy current method）

超音波法（Ultrasonic method）

レーザー干渉法，干渉ひずみ／変位ゲージ法（ISDG；Interferometric Strain/Displacement Gage）

アコースティックエミッション法（AE ; Acoustic emission method）

損傷許容設計（Damage tolerance design）

安全寿命設計（Safe life design）

修正 Paris - Elber 則（Modified Paris-Elber’s law）

除荷弾性コンプライアンス法（Unloading elastic compliance method）

ASTM（American Society for Testing and Materials ; ASTM International ）

ASTM E647（Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates ）

ISO 12108（Metallic materials — Fatigue testing — Fatigue crack growth method ）

WES 1111（(一社）日本溶接協会，疲労亀裂伝播試験方法 ; Standard test method for fatigue crack growth rates）

ビーチマーク法（Beach mark method）

亀裂結合力モデル（Cohesive force model）

デジタル画像相関法（DIC ; Digital image correlation method）

第１章

緒　論

1.1　研究の背景および目的

1.1.1　疲労亀裂とは

疲労亀裂とは, 材料表面の局部的な塑性変形の繰返しにより発生し, 亀裂先端の塑性変形による鈍化と再鋭化の繰返しにより伝播するものを指し，一般に繰返し数 10^5 回程度を境にして繰返し数が少ない方を低サイクル疲労, 多い方を高サイクル疲労と呼んでいる [1)]．材料の疲労過程は，亀裂の発生と伝播という二つの過程を含むことが古くから認識されていた [2)]．

1.1.2　金属疲労の研究の始まり

金属疲労の現象は 1800 年代初頭にはすでに認識されていたが，この現象に関する研究の始まりは 1829 年にドイツ人鉱山技術者の Albert が鉱山の巻上げ機に使用していた鉄製の鎖に関する耐久試験を目的とした試験機を考案し，試験を実施したこととされている [3)]．彼は Fig. 1.1 [4)] に示す直径 360 cm のディスクに支えられた鎖の末端に負荷をかけ，クランク機構を活用してディスクに沿った繰返し摺動を鎖に付与することで，鎖に繰返しの曲げ負荷が毎分 10 回作用するようにして，最高で 100,000 回の繰返し負荷を可能とした．この試験結果から，静的な破断応力より低い応力でも繰返し作用すれば，特に前兆現象を示すこと

なく突然破断することが証明された [5]．

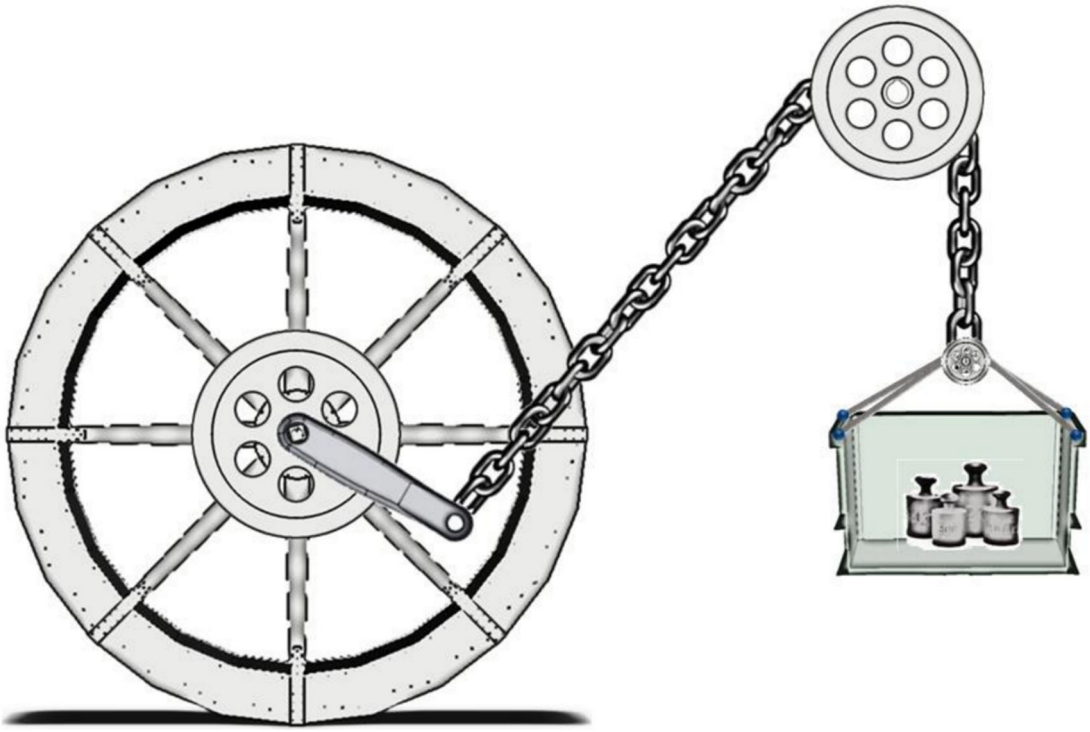


Fig. 1.1 Albert's first fatigue test machine [4].

その後，Wöhler が高速の小型疲労試験機を開発し，1866 年に疲労限度を含め疲労の最も基本的な S - N 関係を確立 [6] し，今日の疲労研究の基礎を築いた．

疲労亀裂を定量的に取り扱った研究は 1950 年代には広く行われるようになった [7] が，Hoeppner や Krupp ら [8] によると，（1.1）式に示す疲労亀裂伝播速度 da/dN（a : 亀裂長さ，N : サイクル数）を応力振幅 σ_a と亀裂長さ a の関数で表す方法であり，多くはべき乗の形式によるものであった．

$$\frac{da}{dN} = f\left(\sigma_a\,, a\,, \text{材料定数等}\right) \tag{1.1}$$

1.1.3　疲労亀裂の観察

材料の疲労過程は亀裂発生までの過程と亀裂伝播過程に大別されることは古くから認識されてきたが，Forsyth [9] は高力アルミニウム合金を用いて疲労亀裂の発生段階から破断に至るまで一連の成長過程を観察し，亀裂の発生と伝播の様子を Fig. 1.2 に模式的に示すように整理している．

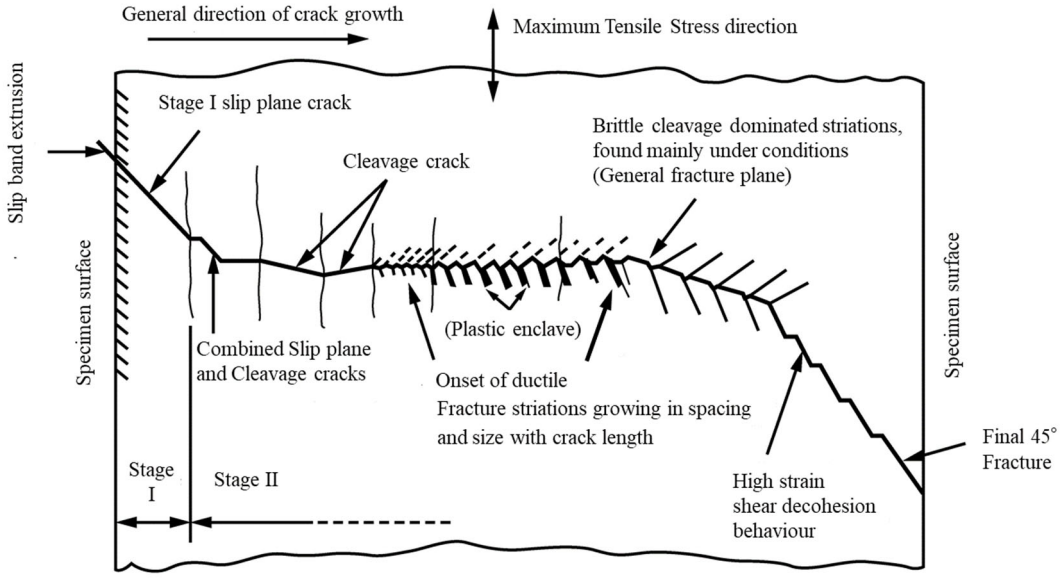


Fig. 1.2 Schematic illustration of the growth process of fatigue crack observed in a high strength aluminum alloy [9].

Forsyth は，すべりにより発生し内部方向へ伝播した亀裂が結晶粒界等のすべりに対する障害物に出会うと伝播を停止し，その後はすべり面分離とへき開の混合した亀裂伝播形態をとり，さらに十分に亀裂が長くなれば，結晶方位とは無関係に作用応力に垂直な方向へ亀裂が伝播することを確認している．

繰返し応力を受ける金属の表面には，せん断応力によりすべり帯が発生し，それが一般的には繰返しとともに発達し，「入り込み」や「突き出し」と称される

表面微視凹凸を生ずるとともに，深さが増すことで局所的な応力集中源が形成され，これを起点に亀裂が発生する．Forsyth は亀裂がせん断応力により材料内部に入り込んでいく過程の亀裂伝播を Stage I ，それに続く引張応力に依存した伝播挙動の亀裂伝播を Stage II と名付けたが，今でもこの分類が一般に用いられている [10]．

1.1.4　金属の破壊事故の種類と金属疲労による事故の現状

Fig. 1.3 は溶接構造物や機械部品の破損原因の内訳 [11] であるが，破損原因の 8 割弱が疲労に起因している．

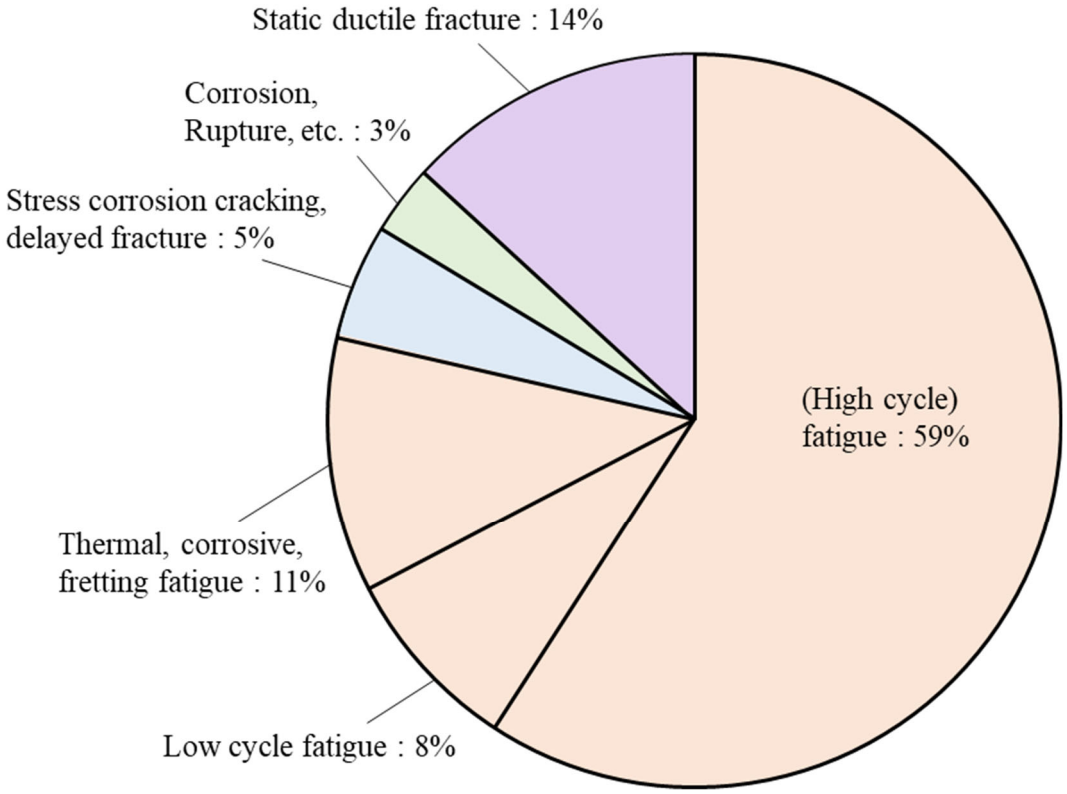
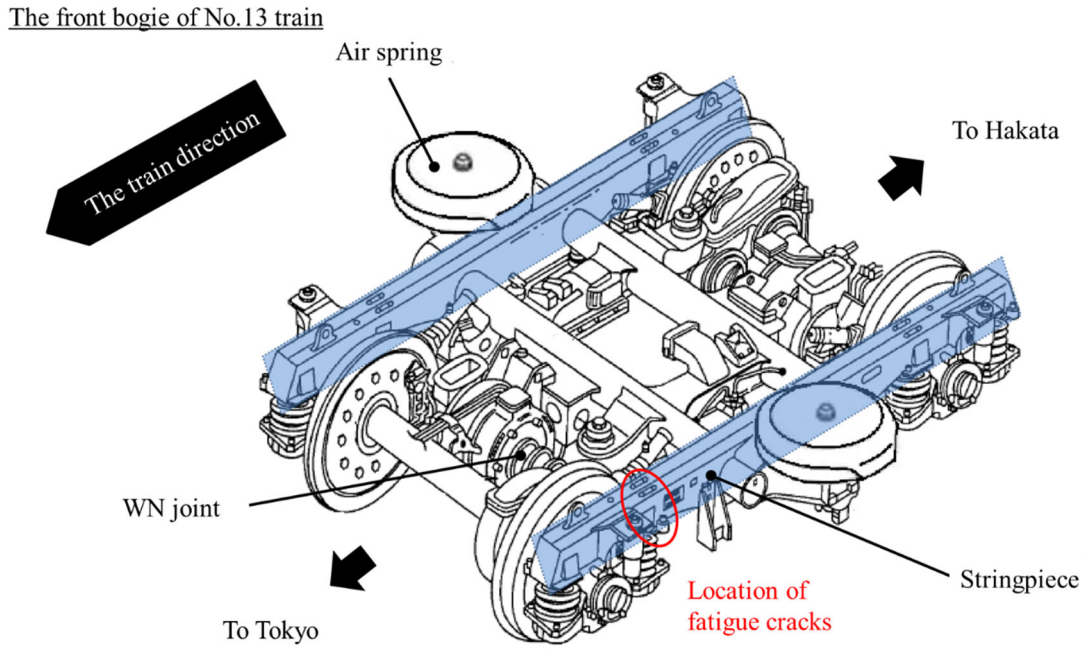


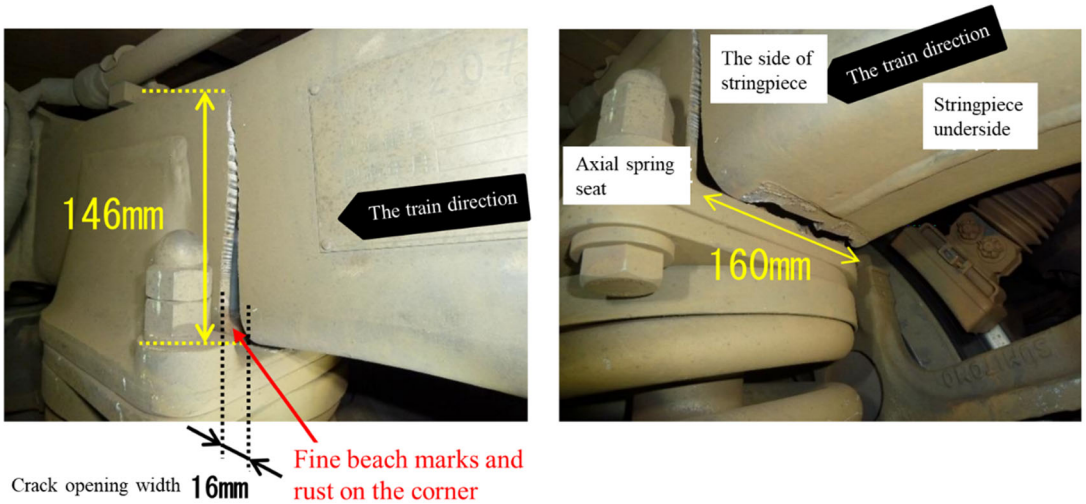
Fig. 1.3 Classification of causes of damage to welded structures and machine parts [11].

過去に金属疲労が原因で人命を失った事故は多いが，世界的に有名な事故としては 1954 年イギリスの世界初のジェット旅客機 Comet の墜落事故，国内では 1985 年に起きた日本航空 123 便ジャンボジェット機 B747 の墜落事故が挙げられる．この二件の飛行機墜落事故は，何れも機体内外の圧力差により発生する応力の繰返しにより生じた疲労亀裂が原因であった [12)]．最近では大事故には至らなかったものの，2017 年の JR 西日本所属車両新幹線 N700 系のぞみ 34 号の台車枠の側ばりに発生した疲労亀裂による車両障害（Fig. 1.4）が記憶に新しい [13)]．

このような事故例はほんの一部であり，現在も疲労に起因する事故は大小様々なものが発生している．このことは，疲労破壊の研究は未だ決定的な防止策を見い出せていないことを意味する．



a) The bogie on the Shinkansen train.



b) Crack photographed from the side. c) Crack photographed from the underside

Fig. 1.4 Fatigue crack in a Sinkansen train bogie [13].

1.1.5 疲労亀裂伝播挙動に関する従来の研究

Fig. 1.2 に示した Stage II の疲労亀裂伝播挙動に関しては力学的な取り扱いが多くなされてきたが，Paris と Erdogan [14] は疲労亀裂伝播速度 da/dN が応力拡大係数範囲 ΔK をパラメータとして（1.2）式により表現できることを示した．

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{1.2}$$

ここで，C および m は材料定数である．

（1.2）式は一般に Paris 則と呼ばれ，ΔK（$= K_{max} - K_{min}$）は応力拡大係数範囲である．da/dN と ΔK の関係は，通常 Fig. 1.5 に示すように逆 S 字形となるが，(1.2) 式は同図の両対数直線関係部分に相当する．

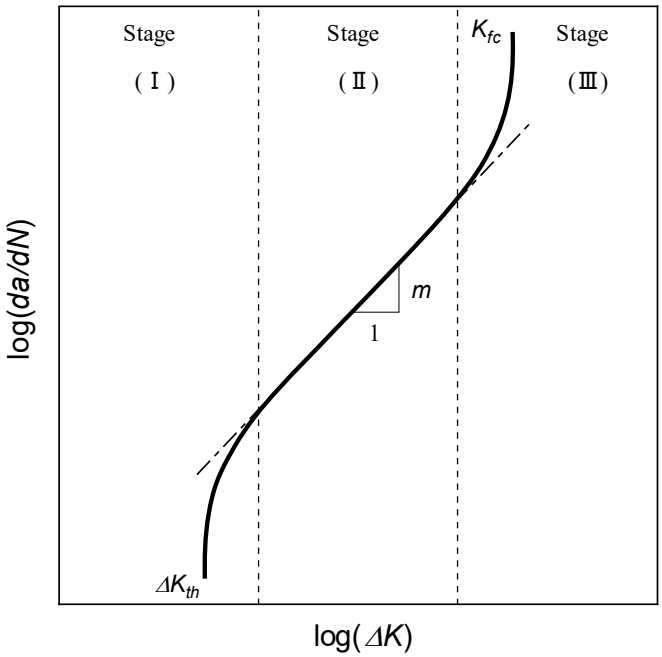


Fig. 1.5　Relationship between Fatigue crack growth rate and Stress intensity factor range.

同図に示す Stage I では亀裂の伝播速度が著しく遅くなり，ΔK の値がある限界値まで低下すると，事実上亀裂が伝播しなくなるとみなせる．この ΔK の値は ΔK_{th} と呼ばれ，ΔK_{th} の値に対応する da/dN は 0 として取り扱われることが一般的である．そのため，ΔK_{th} の値を材料の疲労亀裂伝播特性を表すパラメータとし

てとらえ，この値を材料開発の指標の一つと考える場合もある．また，機械や構造物の設計や保守においても，内在することを許容する亀裂寸法を供試材料の ΔK_{th} の値を考慮して設定するなどの対応がとられることもある．ただし，ΔK_{th} の値は応力比 R や亀裂の大きさに依存する [15),16)] ため，一義的な値として測定できないばかりか，同図を両線形グラフで表すと実際には極めて遅い伝播速度で疲労亀裂は伝播を継続していることが多い．そのため，伝播中の疲労亀裂が停留したか否かの判定を行うには数百～数千万回の繰返し負荷を継続する必要があるため，ΔK_{th} 値を測定するには相当な時間と労力を要する．

Stage II は，亀裂先端の塑性域が亀裂長さ a やリガメント部長さなどと比べて十分に小さいと見なせる小規模降伏状態にある場合に，ΔK と da/dN の間に Paris 則が成立する．また，亀裂は連続的に伝播するため，疲労破面上に繰返し応力 1 サイクルごとにストライエーションが形成される．

Stage III は低サイクルによる ΔK の増加に伴う da/dN の急激な上昇や，最大応力拡大係数 K_{max} の限界値に至る疲労破壊や不安定破壊の領域を示しており，疲労破壊靭性値 K_{fc} と呼ばれることもあるが，静的な破壊靭性値 K_c よりも低いことが知られている [10)]．

1.1.6　疲労亀裂先端近傍における亀裂開閉口挙動の観察

1970 年頃までは，疲労亀裂の開閉口は引張荷重下では開口し，圧縮荷重下では閉口するものと考えられていた [10)]．しかし，疲労亀裂は引張荷重下でも閉口することが，1971 年に Elber [17)] により実験的に確認された．Elber は亀裂が開口し始める荷重（亀裂開口荷重 P_{op}，Open 荷重とも称される）と最大荷重 P_{max} の間の応力範囲が疲労亀裂の成長に寄与するとの立場に立ち，有効応力範囲 $\Delta\sigma_{eff}$ を（1.3）式で与え，（1.2）式中の K 値範囲を $\Delta\sigma_{eff}$ に対する有効応力拡大係数範

囲 ΔK_{eff} とした（1.4）式を定義し，Paris 則の ΔK と置き換えることにより da/dN が表現できる（1.5）式を提唱した．同式を用いると Paris 則では統一的に説明できなかった，同一材料に対して R が異なる場合の da/dN を統一的に説明できるため，Elber の提案以降，da/dN が ΔK_{eff} の一価関数として表されることが多くなった．

$$\Delta\sigma_{eff} = \sigma_{max} - \sigma_{op} \tag{1.3}$$

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} = U\Delta K \tag{1.4}$$

$$\frac{da}{dN} = C_1\left(\Delta K_{eff}\right)^{m_1} = C_1(U\Delta K)^{m_1} \tag{1.5}$$

ここで，式中の U は（1.6）式で表される亀裂開口比である．

$$U = \Delta K_{eff}/\Delta K = \left(\sigma_{max} - \sigma_{op}\right)/(\sigma_{max} - \sigma_{min}) \tag{1.6}$$

ここで，σ_{op} は亀裂開口応力，σ_{max}，σ_{min} はそれぞれ最大および最小応力である．

疲労亀裂の開閉口挙動には，繰返し負荷に起因する亀裂先端近傍の塑性変形に限らず，特に下限界近傍ではフレッティングにより生じた酸化物や腐食生成物などの介在物 [18] や，粘性流体が疲労亀裂面に残留することに起因する「くさび」効果 [19]，金属のオーステナイト組織が塑性変形によりマルテンサイト変態を起こす体積膨張 [20]，亀裂開閉口を繰返すことで破面の粗さが増加する結果，くさび効果と同様の効果を生じる [21] など，塑性変形以外での亀裂閉口を誘起させる因子は数多くあることに注意が必要である．

疲労亀裂の開閉口挙動を解析的に評価することはかなり困難であるため，亀

裂の開閉口挙動は実測を通じて研究がなされてきた．これまでに提唱された亀裂開閉口挙動測定方法の分類を Fig. 1.6 に示す.

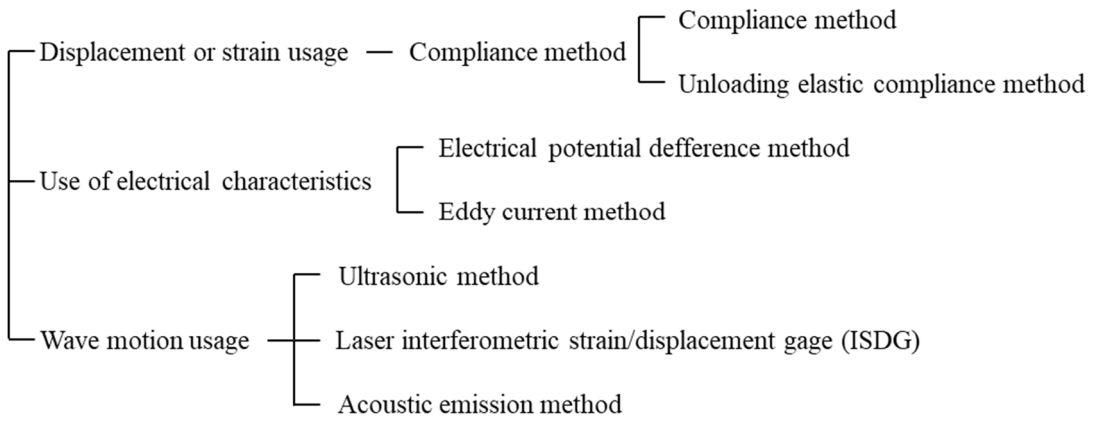


Fig. 1.6 Classification of measurement methods for crack openings.

変位・ひずみ利用法は試験片の弾性変形を利用するものであり, 負荷荷重 P と荷重方向変位 δ を（1.7）式で表し，式中の λ（コンプライアンス）の測定結果に基づき亀裂開口荷重などの特徴点を判定するものであり，一般的にはコンプライアンス法と呼ばれている.

$$\delta = \lambda P \tag{1.7}$$

しかしながら，P と δ の組合せでは，特に高サイクル疲労においては変位振幅が微小となり S/N 比が悪くなるため, 十分な測定精度が得られない場合が多い. そこで，菊川ら [22] は δ の代わりにひずみゲージを用いて疲労亀裂開閉口挙動を精度よく測定することを目的に，第 3 章で解説する電気回路（引算回路）を活用し，測定された亀裂材のひずみ履歴に対して亀裂が完全開口している除荷弾性範囲を抽出（除荷弾性コンプライアンス法と称される）することで亀裂開口点の

正確な検出を試みているが，開閉口挙動の詳細な観察までには至っていない.

一方，西谷ら [23] はサイドノッチ付平板試験片の亀裂前方に貼付したひずみゲージを引算回路に引込み，そこから出力された引算後のひずみを 10 倍に増幅させたヒステリシスループによる亀裂開閉口の観察を通じて，亀裂開口点と亀裂閉口点の荷重が異なること明らかにしたが，亀裂開閉口挙動とコンプライアンス変化の詳細な考察までは行われていない.

電位差法は，直流，交流も簡便に使用できるが，S/N 比が本質的に悪い [24] ことと，新しい亀裂面への酸化膜の形成により亀裂の開閉口挙動が検出されない可能性が高いため [25] 使用例は少ない.

渦電流法は，電磁誘導非破壊検査法を亀裂開閉口の測定に利用したものであるが，疲労亀裂伝播を連続的に調査するには，測定プローブを調査の度に設置する手間を要するため，Lal ら [26), 27] の研究以外での使用例は調査した範囲では見当たらない.

超音波法 [28] は市販の超音波探傷装置をそのまま利用できるが，探触子を試験片に固定する必要があるため測定周波数が上げられない.

レーザ干渉法は，正式には干渉ひずみ／変位ゲージ（ISDG）法 と称される．測定原理や測定方法の詳細は文献 [29] に譲るが，1988 年の文献では約 0.01μm の分解能を有していた [30]．加えて，測定されるデータはコンプライアンス変化なので現象の解釈も容易ではあるが，試験片表面の亀裂をはさんだ極近傍に圧痕を打つ必要があるため，亀裂伝播の連続的測定に不向きであることと，試験片表面上の挙動のみが測定されているという特徴がある [31]．

アコースティックエミッション（AE）法は，材料の変形や破壊時に蓄積されたひずみエネルギーが弾性波として放出される現象を利用したもので，AE 放出

が激しい応力区間の最大値を亀裂開口点としている [32] が，評価方法の詳細は明らかになっていない．

Fig. 1.6 に記載はないが，近年活用が進んでいるデジタル画像相関法は，試験片表面の変形前後のランダムパターン画像を比較することで視野内の変形量を測定する手法であるが，詳細な説明は第 7 章で行う．

1.1.7　除荷弾性コンプライアンス計測を含む試験システムと RPG 荷重の同定

豊貞ら [33] は，Chen ら [34] の装置を改良した高精度コンプライアンス計測装置を組み込んだ疲労亀裂伝播試験システムを開発し，疲労亀裂伝播 1 サイクル中における亀裂材のコンプライアンスの巨視的変化を測定し，測定結果に関する考察から，亀裂開口荷重と亀裂先端に引張塑性域が形成され始める荷重である再引張塑性域形成荷重（RPG 荷重；Re-tensile Plastic zone's Generated load）P_{RPG} が異なること，P_{RPG} 以上の荷重範囲が疲労亀裂伝播に真に寄与することを見出し，（1.8）式に示す RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} をパラメータとする伝播則を提案した．

$$\frac{da}{dN} = C_2(\Delta K_{RPG})^{m_2} \tag{1.8}$$

疲労亀裂の伝播駆動力は，亀裂先端に形成される両振り塑性域内で消費される塑性仕事であり，ΔK_{RPG} が両振り塑性域寸法と一義的に対応する [33] ことから，（1.8）式はより正確に疲労亀裂の伝播を評価できるものと期待される．（1.8）式は，（1.2）式や（1.5）式では評価外である下限界応力拡大係数範囲付近の疲労亀裂伝播の推定や，複数の周波数成分が重畳するような荷重履歴変動荷重履歴下においても，比較的良好な推定精度を有している．

RPG 荷重基準の疲労亀裂伝播則では，Paris 則や Elber 則で現れる疲労亀裂が停留する応力拡大係数範囲の下限界値である ΔK_{th} や，下限界有効応力拡大係数範囲$(\Delta K_{eff})_{th}$，下限界亀裂閉口有効応力拡大係数範囲$(\Delta K_{eff}^{cl})_{th}$が表れる Stage I の領域においても下限界が存在せず，極低疲労亀裂伝播速度範囲の伝播挙動も表現可能である [33]．すなわち ΔK_{th} のような下限界値が出現するのは，伝播則そのものが不完全なための，見かけ上の問題であると考えられる．

RPG 荷重基準の伝播則を用いた疲労亀裂伝播成長シミュレーションを実施するためには，伝播則の材料定数 C_2，m_2 を与える必要があるため，疲労亀裂伝播試験を実施して P_{RPG} を測定し，ΔK_{RPG} と da/dN の関係を決定する必要がある．P_{RPG} の測定は，亀裂先端近傍に貼付したひずみゲージ出力履歴から亀裂先端近傍でのヒステリシスループを描画し，後述する反転法を適用する際は，最終的に作業者が目視により判定する必要がある．そのため，作業者の熟練度が P_{RPG} 値の測定精度に影響を及ぼす．また，豊貞らの疲労試験システムは開発環境が CUI の OS，計測機器が 12bit の A/D 変換が主流の機器で構成されており，部品の調達が既に不可能であるために早急な機器の更新が望まれていた．加えて，測定したひずみ値と荷重値を適切に演算する自作回路（後述する引算回路）の維持管理を行う人材を育成する必要もある．

1.1.8　研究目的

前述のように，疲労亀裂特有の亀裂開閉口挙動について，その物理的意味を考慮しつつ定量的な評価を行うには，ΔK_{RPG} をパラメータとすることが有用である．一方，工業的な観点から ΔK_{th} の値を材料開発の指標とみなすこともあることから，疲労亀裂伝播挙動評価に基づいた大型溶接鋼構造物の性能評価を行うためには，

(1)　ΔK_{th} 値の測定手法の簡略化.

(2)　ΔK_{th} 値を測定するための，測定システムの自動化.

(3)　作業者の経験に依存せず P_{RPG} を同定する手法.

が必要である．また，(2) に関連し，調達が容易なパソコンと市販の計測機器で構成されたコンプライアンス自動計測システムの開発も必要である．本研究では，主に上記の二項目と関連するコンプライアンス計測システムの構築を実施した.

亀裂伝播に対し，広域な範囲で精度良くコンプライアンスを測定するには，複数のひずみゲージを近接して想定される亀裂伝播経路に貼付する必要があるが，この作業にも熟練が要求される．そこで，近年発達が著しいデジタル画像相関技術を用いることで，亀裂先端近傍のひずみ場を測定し，この結果からコンプライアンスを計測することの可能性も検証した.

加えて，RPG 荷重基準の疲労亀裂伝播則の優位点である，疲労亀裂発生から伝播を統一的に評価可能とする理論の妥当性確認を目的に，これに適した試験片の設計と発生から微小亀裂領域における伝播履歴の測定を行い，豊貞らの理論に基づく推定結果との比較検証も実施した.

1.2　本論文の構成

本論文は 7 つの章から構成されている.

第 1 章は緒論であり，研究背景，疲労亀裂観察の歴史と現状，種々の亀裂伝播則と実験方法，研究目的について述べた.

第 2 章では，疲労亀裂の伝播や停留の要因を把握した上で，疲労亀裂伝播試験のディファクトスタンダードである ASTM E647 [35] に沿って，疲労亀裂伝播速度を低減させる K 値漸減試験方法の問題点を考察するとともに，既報文献に

示された複数の実験結果に基づき ΔK_{th} 値の決定方法の簡略化と，疲労亀裂伝播成長シミュレーションを用いた試験条件緩和について提案する．

第 3 章では，除荷弾性コンプライアンス法を用いた疲労亀裂の開閉口挙動測定方法と，変動荷重条件下において精度よく疲労亀裂成長履歴を推定可能な RPG 荷重基準の疲労亀裂伝播則の適用に必要な RPG 荷重を，除荷弾性コンプライアンス法で測定する方法について詳細な検証を行う．

第 4 章では，高精度なコンプライアンス自動計測装置を組み込んだ疲労亀裂伝播試験システムの運用状況と設計思想を引き継いだ上で，ほぼ既製部品のみを用いた試験システムを構築する．

第 5 章では，第 4 章で構築したシステムから得られる測定データを元にしたヒステリシスループに反転法を適用して，P_{RPG} を人の手を介さず自動同定する手法を提案する．

第 6 章では，切欠底から発生・成長する疲労亀裂の微小亀裂段階（亀裂発生から数結晶粒径程度の大きさ）における，成長挙動観察に適した試験片形状および測定方法について提案する．

第 7 章では，非接触かつ面的にひずみ場計測が可能なデジタル画像相関法を用いて，疲労亀裂成長の駆動源と考えられる亀裂先端近傍に形成される，両振り塑性域の寸法や両振り塑性仕事の測定方法に関して検討した．

第 8 章は結論であり，本研究の成果と関連研究分野における将来課題について言及する．

第２章

K 値漸減試験の簡便化に向けた検討

2.1　緒言

疲労亀裂伝播則 $da/dN=C\Delta K^m$（C，m：材料定数）は Paris 則と呼ばれ，疲労亀裂伝播速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK による両対数グラフ上で直線関係を示す部分でのみ成立する．これは Fig. 1.5 に示す Stage II に相当し，この領域では亀裂破面にストライエーションが形成され疲労亀裂が安定成長している [14)]．

一方，Stage III はディンプル形成，へき開，粒界の擬脆性割れなどの静的破壊に類似した破壊機構が支配的な不安定破壊 [10)] や，低サイクルによる疲労破壊の領域である．

また，Stage I は Forsyth [9)] が確認したように，亀裂がせん断応力により材料内部に入り込んでいく過程を示すが，長い亀裂において ΔK の値が減少するにつれて da/dN が急激に減少することで，Paris 則が成立しない領域も便宜上 Stage I としている．この領域では，事実上 $da/dN=0$ として取り扱われる下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} が存在する．しかしながら，実際には ΔK_{th} 程度の ΔK 値でも，かなり緩やかではあるが亀裂は伝播を継続している場合が多いため，ΔK_{th} を特定するには，長期の試験時間を要する場合も珍しくない．

Fig. 2.1 は，Barsom による種々の鋼材における，応力比 R が ΔK_{th} に及ぼす影響に関する調査結果 [15)] である．一般に ΔK_{th} は材料定数と見なされているが，こ

の結果から ΔK_{th} は鋼材の機械的性質や組織の影響よりも R の影響を受けるため，異なる材料でも同一応力比条件下であれば ΔK_{th} はほぼ同じ値を取る．なお，R が大きいほど ΔK_{th} の値は低下する傾向にある．さらに，ΔK_{th} は亀裂長さ a にも依存することを，Tanaka [16] らが亀裂伝播の下限界は亀裂先端のすべり帯が結晶粒界で阻止された状態であるとした微視力学的な考えをもとに解析的に求めることで，ΔK_{th} は a の減少に伴い低下するとしている．このことより ΔK_{th} は負荷条件や幾何形状に影響を受けるため，亀裂を含む機械および構造物の設計や保守において ΔK_{th} は重要な材料特性値として用いられているが，材料固有の限界値ではないので，構造物等の損傷許容設計や安全寿命設計に際して [10] ΔK_{th} を指標とする場合は，その性質を十分に理解する必要がある．

疲労亀裂伝播試験方法のディファクトスタンダードとして広く用いられている ASTM E647 [35] に示された K 値漸減試験により ΔK_{th} を決定する場合，da/dN が 1.0×10^{-9} m/cycle 以下になるまで K 値を漸減させ続ける必要があるため，かなり長時間かつ継続的な疲労亀裂伝播試験が必要となる．一方，ASTM E647 の規定よりも ΔK_{th} の決定に要する時間を短縮する手法が検討され，WES 1111 [36]（日本溶接協会，疲労亀裂伝播試験方法）に採用されたが，検討に用いられた実験データに限りがあったことや，大幅な試験機の稼働時間短縮には至っていないことを考慮すれば，より簡便かつ実験に要する時間短縮についての検討は継続すべきであろう．

本章では，既報の疲労亀裂伝播試験のデータを整理するとともに，亀裂開閉口挙動を考慮した疲労亀裂伝播成長シミュレーション FLARP [37] も援用することで，より短時間の試験で済ませることの出来る簡便な ΔK_{th} の決定方法を検討した．

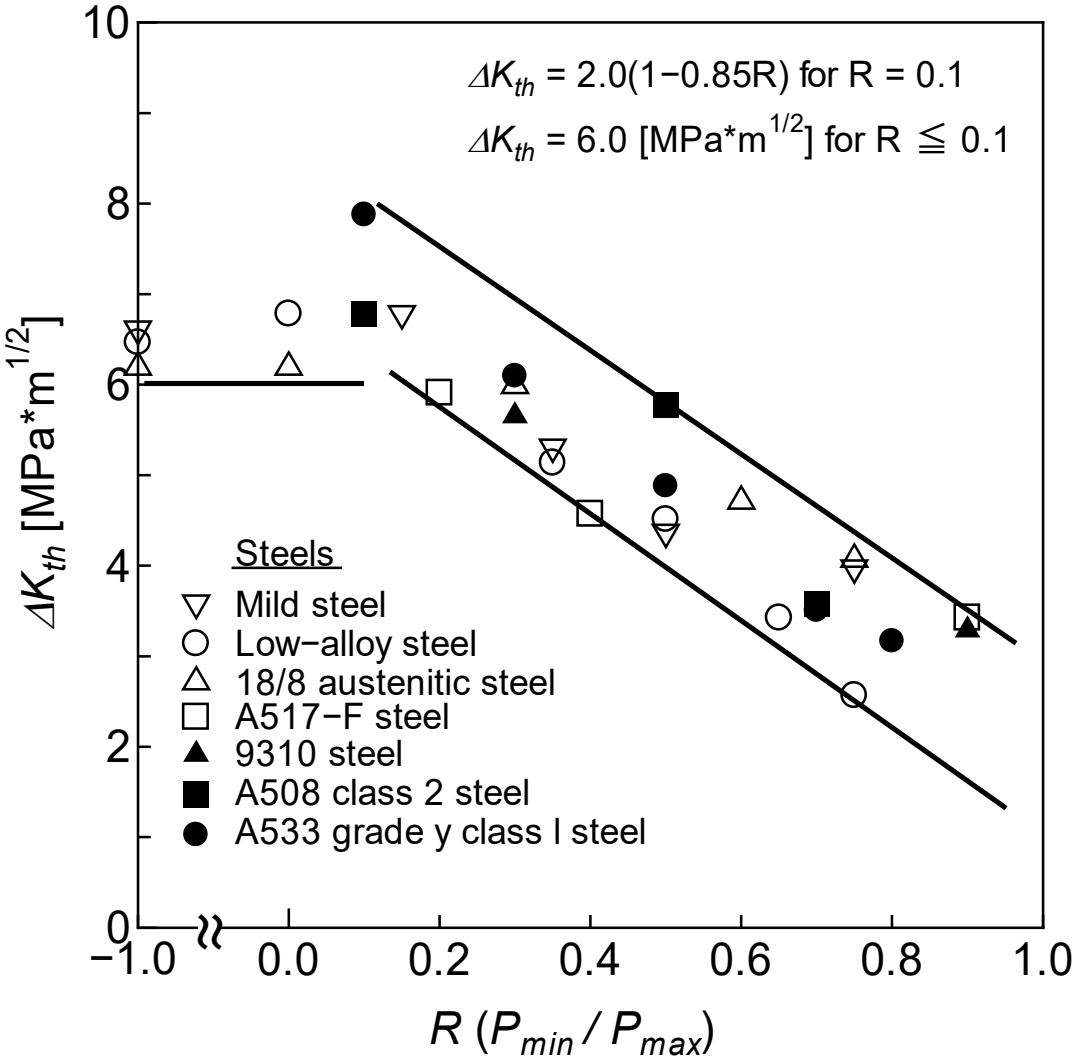


Fig. 2.1 Stress ratio dependence of ΔK_{th} value.

2.2　伝播中の疲労亀裂が停留する要因

疲労限度を有する材料の疲労試験において，疲労限度付近で一定の繰返し負荷が作用する場合，微小亀裂が発生し，その後最大でも 100 μm オーダの成長後に停留する [6] ことはあるが，機械や構造物中で目視で発見されるレベルの寸法の亀裂が停留するには，荷重振幅が減少する必要がある．したがって，ΔK_{th} を決定する方法として，ASTM E647 [35] では K 値漸減試験を行うのが一般的である．

Fig. 2.2 の黒塗り記号で示すように，ΔK_{th} 値は R や a に加え，K 値漸減試験開

始時の ΔK 値（ΔK_i）および漸減 1 ステップ当たりの K 値の減少量などの荷重履歴にも影響を受ける．一方，有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} で整理すると，K 値漸減試験の結果とこれとは逆に K 値を漸増させた試験結果（Fig. 2.2 の白丸）は一致する [38]．これは K 値漸減において負荷履歴中の K 値変化が緩やかな場合は，ΔK_{eff} で整理すれば疲労亀裂に特有に亀裂開閉口挙動を考慮した取り扱いが可能であること，疲労亀裂停留の要因として伝播に伴い亀裂面に取り込まれる残留引張変形層が重要な役割を担っていることを示唆している．

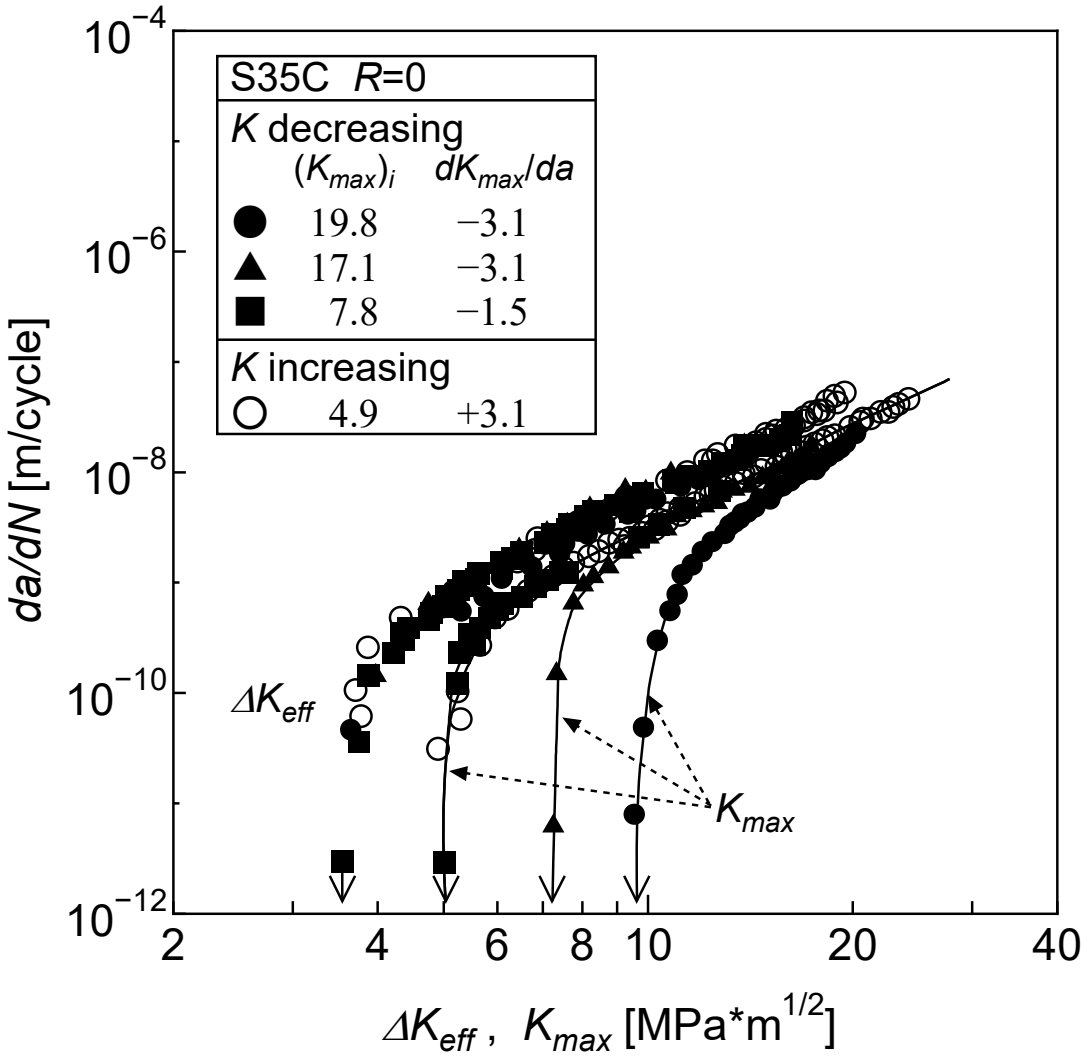


Fig. 2.2 Comparison of ΔK_{th} value at different start K of Decreasing Test and ΔK_{eff}.

亀裂を閉口させる他の影響因子には，過大荷重による亀裂先端近傍の圧縮残留応力形成による閉口や，試験環境における亀裂面のフレッティングによる酸化物誘起亀裂閉口 [18]，粘性流体誘起亀裂閉口 [19]，相変態誘起亀裂閉口 [20]，破面粗さ誘起亀裂閉口 [21] がある．

2.3 既存の ΔK_{th} の決定方法

2.3.1 疲労亀裂の停留判定

ASTM E647 では，K 値減少法 [35] により ΔK_{th} を決定する手順が以下のように規定されている．

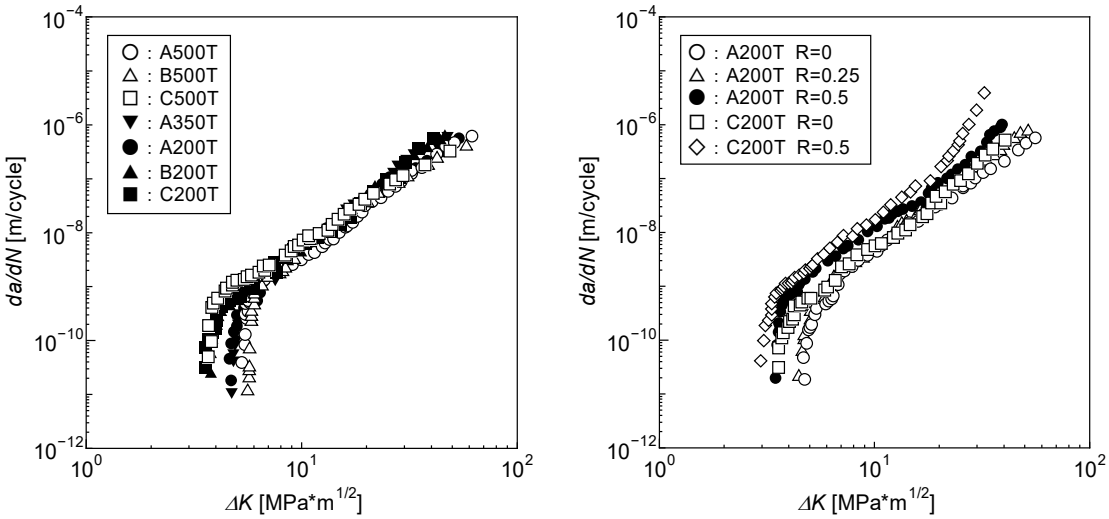
1) da/dN が 10^{-9}～10^{-10} m/cycle の領域にある da/dN - ΔK データを，K 値減少法を用いてほぼ等間隔に 5 点以上測定する．
2) データを直線回帰し，da/dN=10^{-10} m/cycle に対応する ΔK を ΔK_{th} とする．
3) da/dN が 10^{-9}～10^{-10} m/cycle の範囲で，ほぼ等間隔に 5 点のデータが取得できれば，試験を打ち切ることができる．

この手法に従うと，5 点以上の複数点でデータ測定を行う必要がある伝播速度のオーダが 10^{-10} m/cycle の極低速伝播速度領域に該当するが，この伝播速度に到達するには亀裂が事実上停留したと見なせる段階からさらに数十～数百万回の繰返し負荷を継続する必要があるため，実験に要する期間は非常に長期に渡ることになる．また，疲労亀裂伝播試験において，亀裂が停留したと判断するための判断基準が明示されていないこともあり，亀裂が停留したと判断するには，例えば以下のような確認作業を追加で行う必要がある．

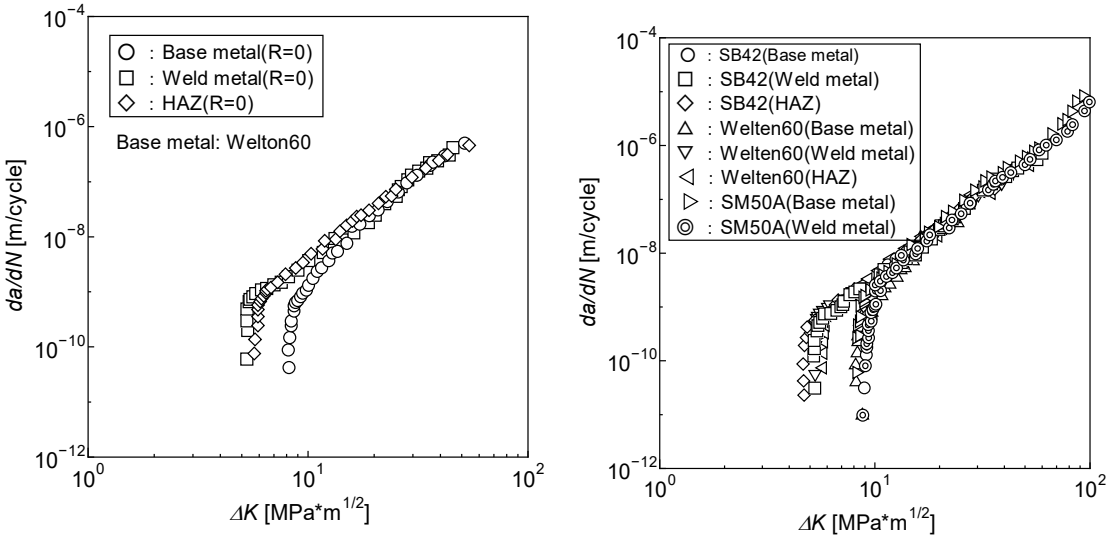
1. 始めに亀裂停留と判断した段階の疲労亀裂伝播速度 $(da/dN)_1$ よりも，さらに 1 オーダ下の疲労亀裂伝播速度 $(da/dN)_2$ で暫定的に試験を継続する．
2. 伝播速度を低下させた前後での亀裂成長挙動を比較して同様の停留状態であれば，疲労亀裂伝播速度 $(da/dN)_1$ の時点ですでに停留していたと判断.

従って，疲労試験時間の短縮にはできる限り，亀裂が停留したと判断してよい伝播速度が速いことが望ましい.

そこで，Fig. 2.3 に示す明らかに亀裂停留状態と判断できる段階の ΔK 値（ΔK_{th} と見なせる値）が示された疲労亀裂伝播試験結果 [39), 40)] について，Fig. 2.3 から判断できる ΔK_{th} 値と前述の ASTM E647 の手法に従って ΔK_{th} を求めた比較の結果を Fig. 2.4 に示す．同図において横軸は ASTM E647 の手法による ΔK_{th}，縦軸はそれぞれの疲労亀裂伝播試験結果において明らかに亀裂停留に至っていると見なせる段階の ΔK 値である．この結果より ASTM E647 の手法に従って同定される ΔK_{th} は安全側に評価されていることが確認できるため，ΔK_{th} 値同定条件のさらなる緩和が期待できる.



a) Ref.39).



b) Ref.40).

Fig. 2.3 Example for relation between the stress intensity factor range and fatigue crack growth rate.

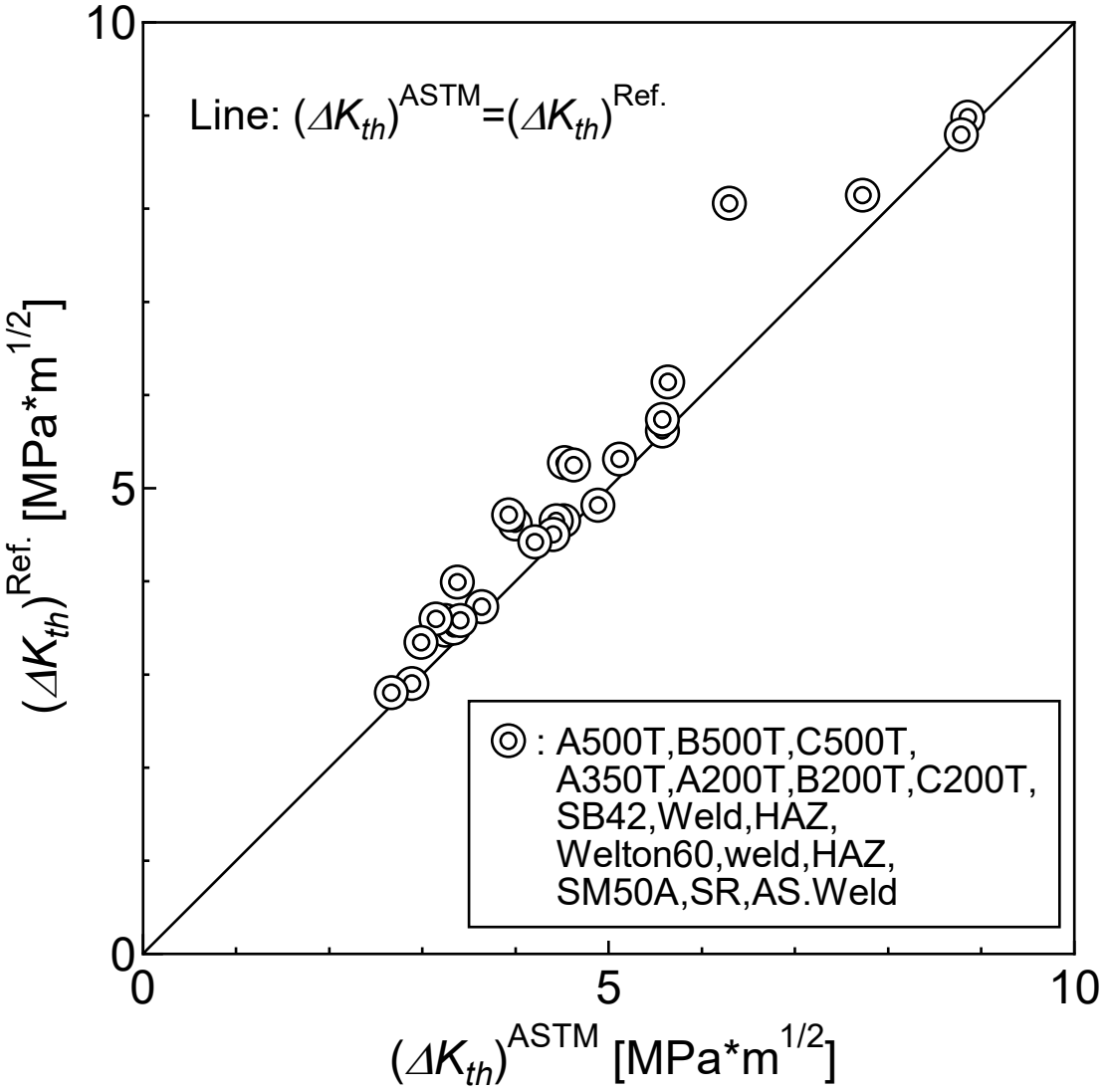


Fig. 2.4 Comparison of ΔK_{th} identification by Refs.39) and 40) with the one by ASTM-E647.

2.3.2 WES 1111 における手法

WES 1111 [36] は構造用鋼材の疲労亀裂伝播性能（ΔK と da/dN の関係）について，室温，大気中における一般的な疲労亀裂伝播試験方法として 2014 年に規定された．ASTM E647 [35] や ISO 12108 [41] を引用規格としているために類似点が多いが，ΔK_{th} 値は原則として ASTM E647 と同様に da/dN = 1.0 x 10^{-10} m/cycle における ΔK 値として与えるとしつつも，記録を残すことを前提に以下の取り扱

いも許容している．

1) 一定荷重振幅条件及び K 値漸減試験により取得した *da/dN* が 1.0 x 10^{-9} m/cycle 以上のデータと，1.0 x 10^{-9}～1.0 x 10^{-10} m/cycle の領域にある *ΔK* - *da/dN* 関係を両区間共にほぼ同間隔で 3 点以上取得し，最小二乗法等により *ΔK* と *da/dN* の関係を回帰式 [42] である（2.1）式で近似することで，疲労亀裂伝播則の *C*，*m* 及び ΔK_{th} を決定できる．

$$\frac{da}{dN} = C\{(\Delta K)^m - (\Delta K_{th})^m\} \tag{2.1}$$

2) 一定荷重振幅条件及び K 値漸減試験により，*da/dN* が 1.0 x 10^{-9}～1.0 x 10^{-10} m/cycle の領域にある *da/dN* - *ΔK* データを，ほぼ等間隔に 3 点以上測定し，直線回帰により得られる *da/dN* = 1.0 x 10^{-10} m/cycle に対応する *ΔK* として ΔK_{th} を決定できる．

3) *da/dN* = 1.0 x 10^{-9} m/cycle のデータを ΔK_{th} とすることも許容する．

方法 3) は試験後のデータ処理の簡略化や，試験後すぐに ΔK_{th} を示す必要性がある場合などの対応を想定して定められている．

2.1 で述べたように，WES 1111 の検討に用いられた実験データに限りがあったことや，大幅な試験機の稼働時間短縮には至っていないことを考慮すれば，より簡便かつ実験に要する時間短縮について検討の余地が残されている．

2.4 より簡便な ΔK_{th} 決定方法の提案

2.4.1 亀裂停留判定の緩和

Fig. 2.3 に示した実測データに加え，Fig. 2.5 ～ Fig. 2.8 に示す複数の材料や

種々の負荷条件下において実施された疲労亀裂伝播試験結果 [43)-46)] を整理し，ASTM E647 や WES 1111 で規定された手法と同程度の ΔK_{th} の値を与えることができ，かつ亀裂停留の判定条件を緩和できる手法を検討した．

具体的には最小二乗法により da/dN - ΔK 関係を（2.1）式で与えられる回帰式で近似することで ΔK_{th} 値を決定できるが，どの程度の範囲で得られた da/dN と ΔK のデータを用いるべきかについて，以下 a）～e）の条件について検討した．

a) da/dN=1.0 x 10^{-9}～1.0 x 10^{-10} m/cycle の範囲で，ほぼ等間隔に 5 点のデータ．

b) da/dN=1.0 x 10^{-9}～1.0 x 10^{-10} m/cycle の範囲で，ほぼ等間隔に 3 点のデータ．

c) da/dN=1.0 x 10^{-9} m/cycle 以下の全データ．

d) da/dN=1.0 x 10^{-9} m/cycle の前後領域にある 3 点ずつのデータ．

e) da/dN=1.0 x 10^{-8}～1.0 x 10^{-9} m/cycle の範囲で，ほぼ等間隔に 5 点のデータ．

なお，d) については，いくつかの da/dN の範囲について検討した．

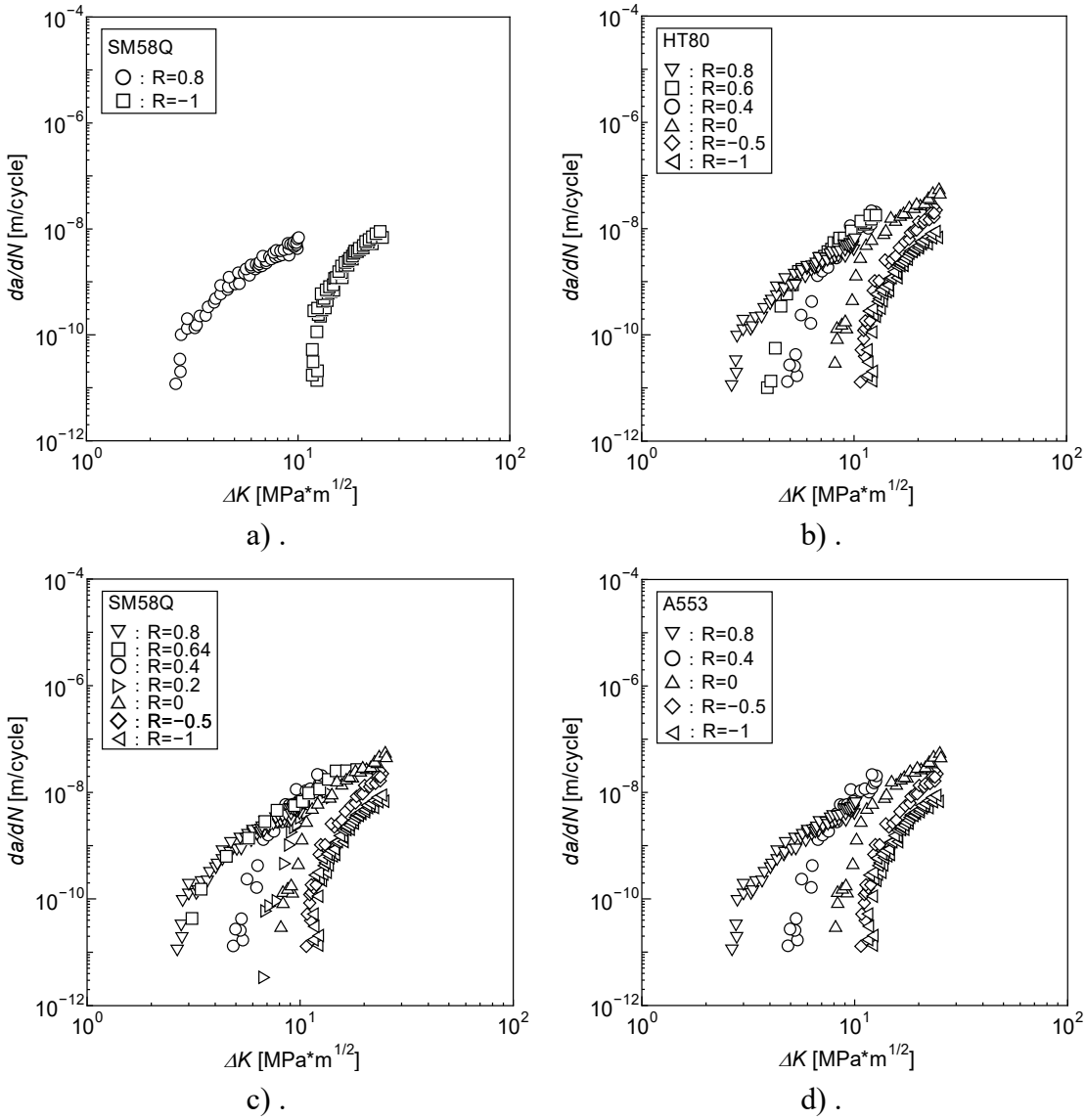
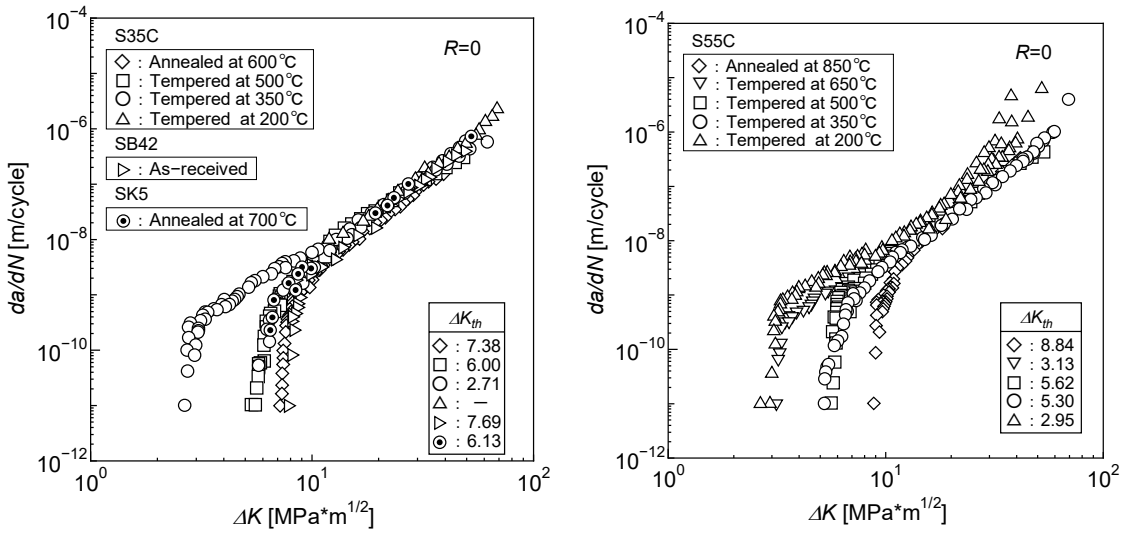
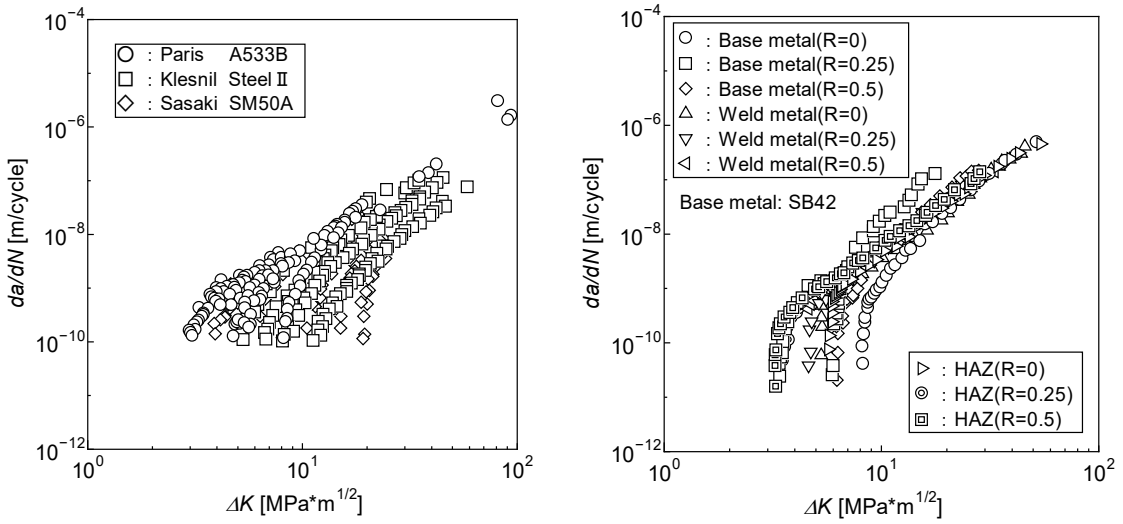


Fig. 2.5 Fatigue crack growth behavior under loading conditions with different stress ratios (Regarding the data in Ref.43).



a) . b).

Fig. 2.6 Fatigue crack growth behavior under loading conditions with different stress ratios (Regarding the data in Ref.44).



a) . b) .

Fig. 2.7 Fatigue crack growth behavior under loading conditions with different stress ratios (Regarding the data in Ref.45).

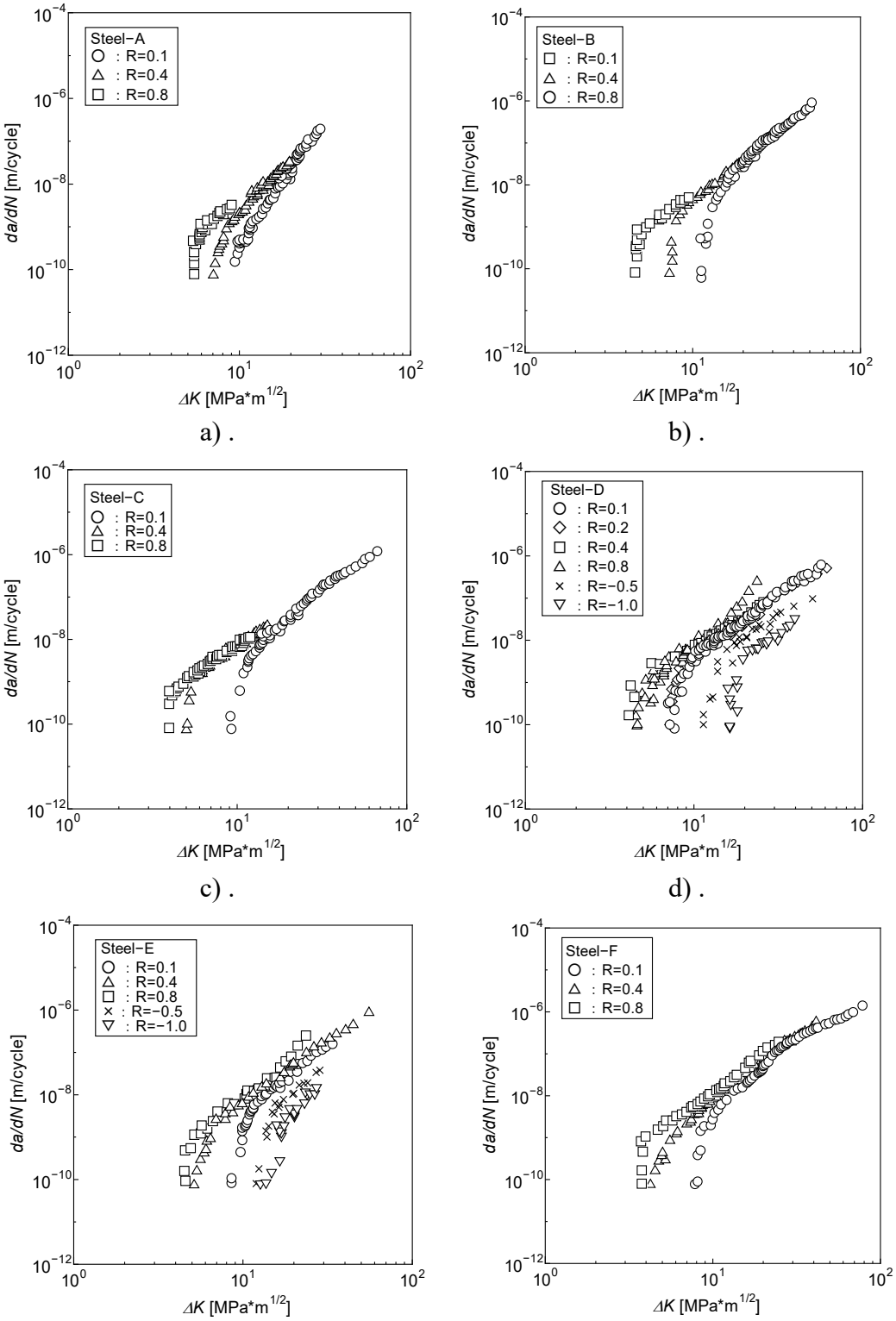


Fig. 2.8 Fatigue crack growth behavior under loading conditions with different stress ratios (Regarding the data in Ref.46).

2.4.2　検証結果と妥当性

Fig. 2.9 に a) ～e) の条件を適用して ΔK_{th} 値を検討した一例を示し，Fig. 2.10 a) ～e) にそれぞれの条件の検証結果を示す．Fig. 2.10 において横軸は ASTM E647 の手法に従って推定した ΔK_{th} 値を，縦軸は a) ～e) で規定したデータに対して（2.1）式の形式で最小二乗近似した結果として得られた ΔK_{th} 値を示す.

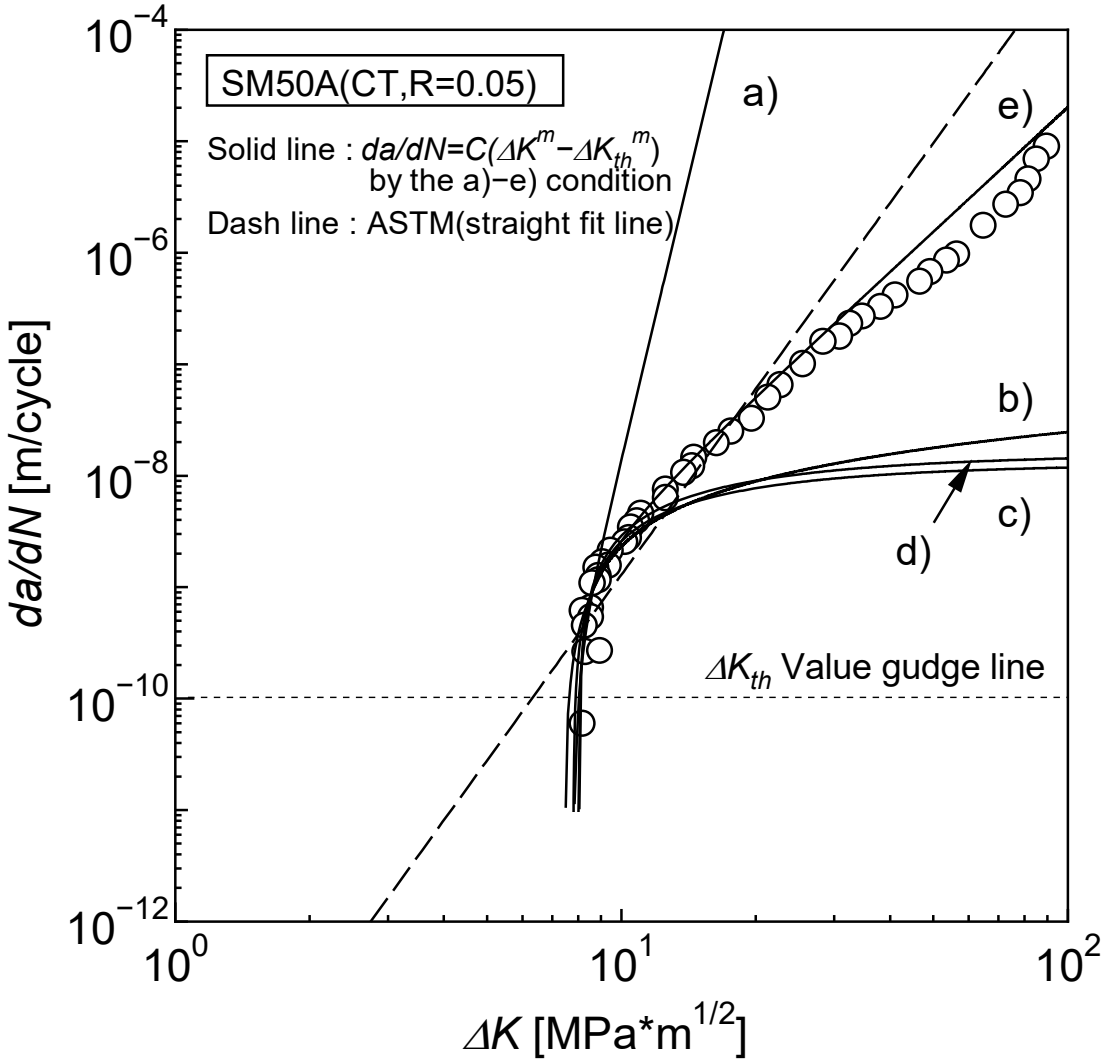
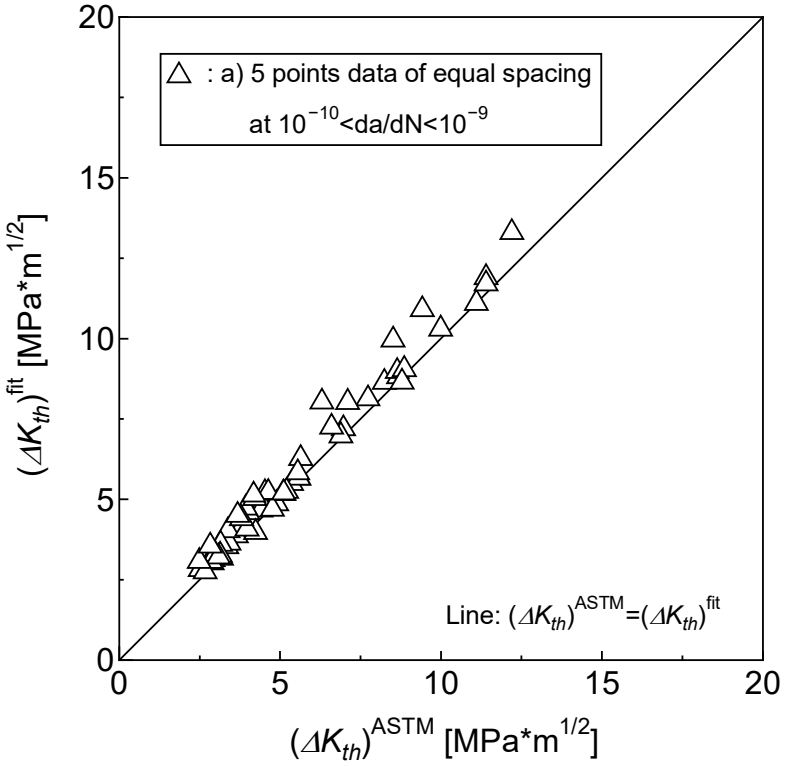
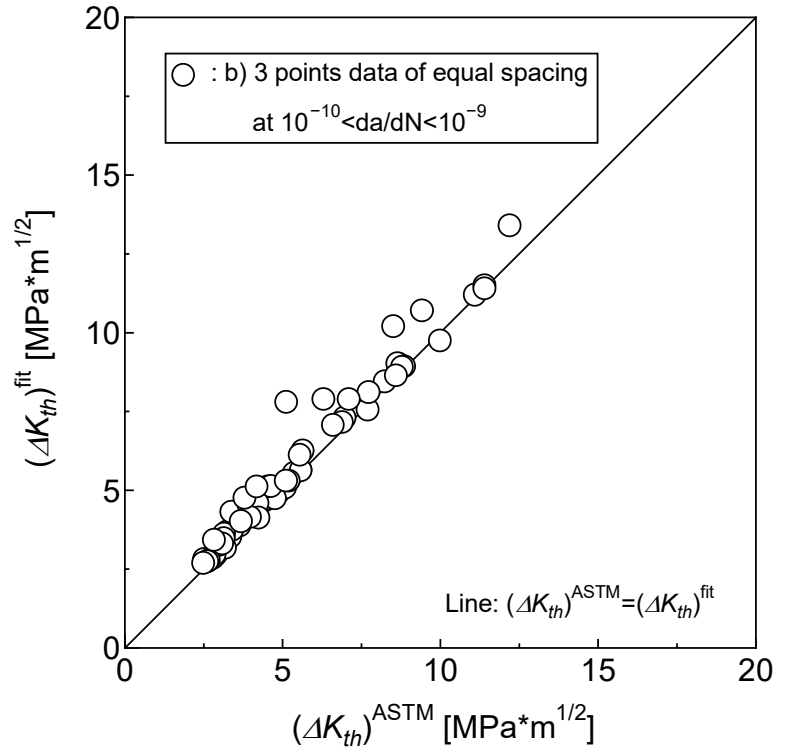


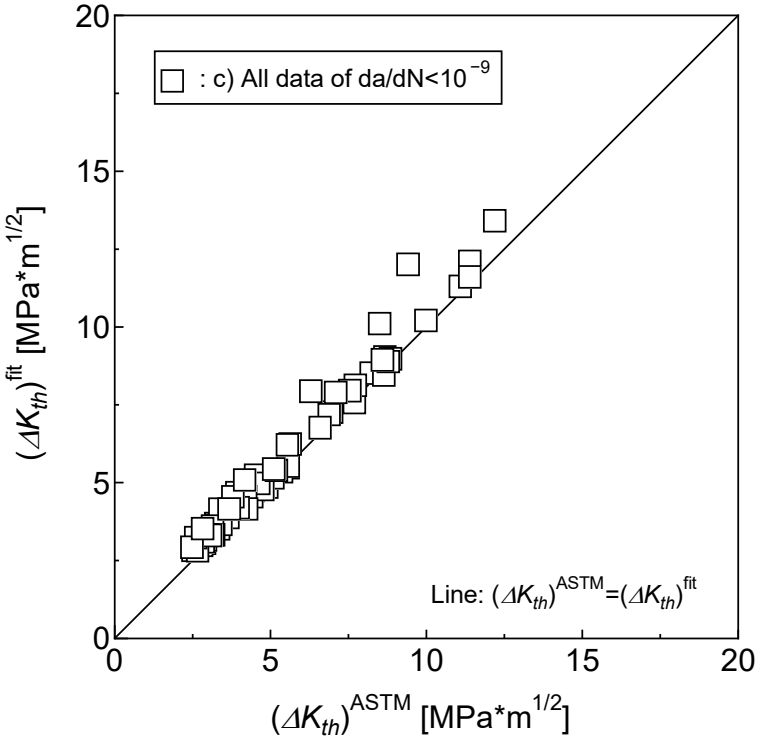
Fig.2.9 Examples of ΔK_{th} values identified under various least square fitting conditions.



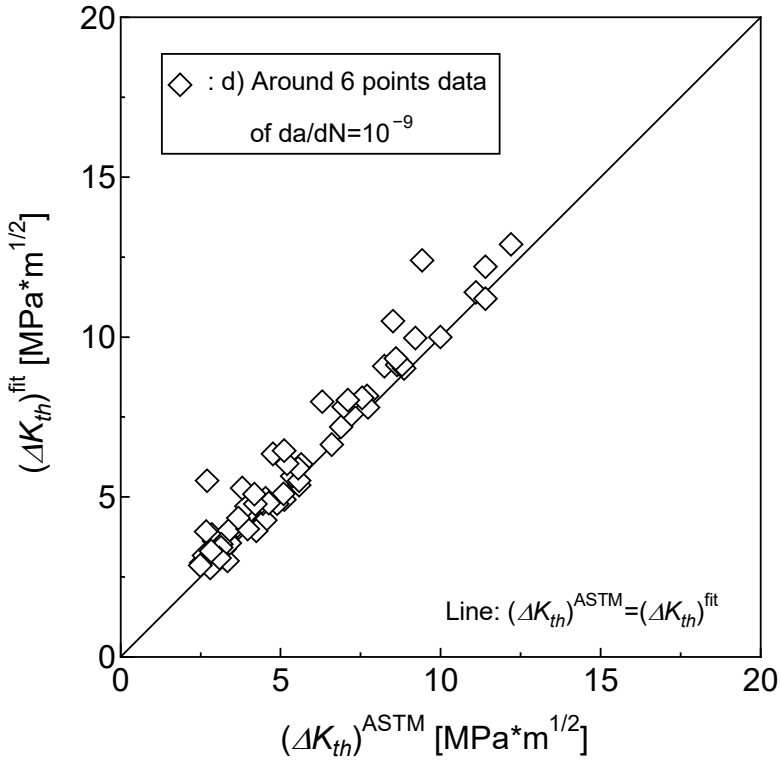
a) For condition a).



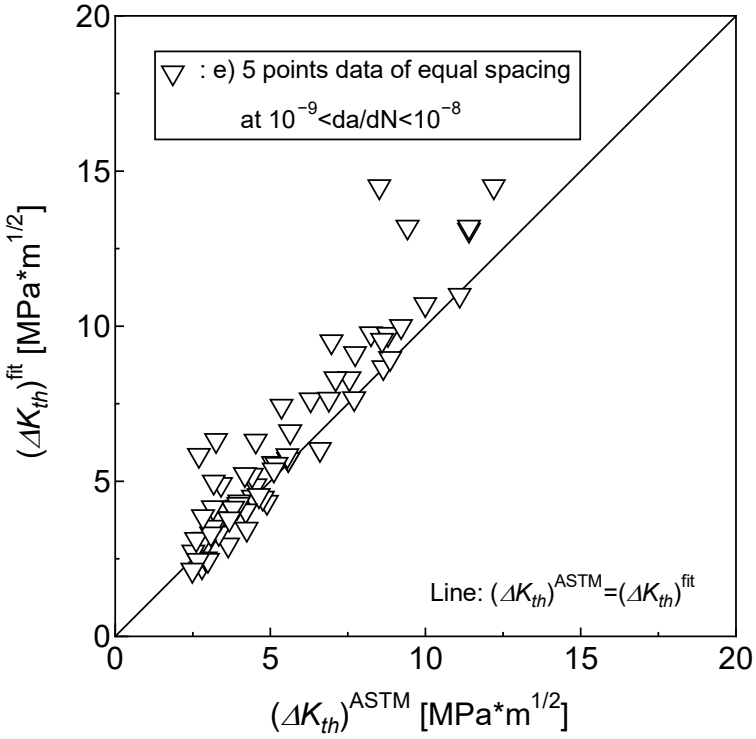
b) For condition b).



c) For condition c).



d) For condition d).



e) For condition e).

Fig. 2.10 Comparison of ΔK_{th} values obtained by adopting various decision conditions set in this study with the results obtained by ASTM E647.

Fig. 2.10 に示した一連の結果より，*da/dN* が 1.0 x 10^{-8} m/cycle 程度の実測データを含めると ΔK_{th} 値が大きくなる傾向があるが，*da/dN* が 1.0 x 10^{-9} m/cycle 程度までの実測データを求め，最小二乗近似により（2.1）式に当てはめることで，ASTM E647 で示された方法と同程度の ΔK_{th} 値が得られることが確認できる．同程度の値が得られていることに関する妥当性の検証は，統計的仮説検定の t 検定（付録 A 参照）を使い ASTM E647 の平均値との差に統計的な有意差がないことを確認した．さらに実験時間の短縮を考慮するならば，b)（1.0 x 10^{-9} ～ 1.0 x 10^{-10} m/cycle で等間隔に 3 点），d)（1.0 x 10^{-9} m/cycle の前後 3 点ずつのデータ），e)（1.0 x 10^{-8} ～ 1.0 x 10^{-9} m/cycle の等間隔に 5 点）の手法を採用することで数千万回程度の繰返し数の削減効果が期待でき，結果として総試験時間の短縮が期

待できる.

2.4.3　緩和条件の追加と検証結果

前項の結果を考慮しつつ，試験後のデータ処理の簡略化や試験後すぐに ΔK_{th} 値を示す必要性がある場合などの対応として，ASTM E647 で定める ΔK_{th} の決定方法の一つである，da/dN =1.0 x 10^{-10} m/cycle に対応する ΔK を ΔK_{th} とする方法を，da/dN = 1.0 x 10^{-9} m/cycle の時点の ΔK 値をそのまま ΔK_{th} 値として採用することへの妥当性を調査した.

複数の疲労亀裂伝播試験結果のうち Fig. 2.3 に加え，Fig. 2.5 ～ Fig. 2.8 に示す実測データおよび文献に示された 31 個の ΔK_{th} 値 [47] について, 横軸は Fig. 2.4 と同様に ASTM E647 の定義に従って求めた ΔK_{th} とし，縦軸を da/dN = 1.0 x 10^{-9} m/cycle の時点の ΔK_{th} として整理した結果を Fig. 2.11 に示す.

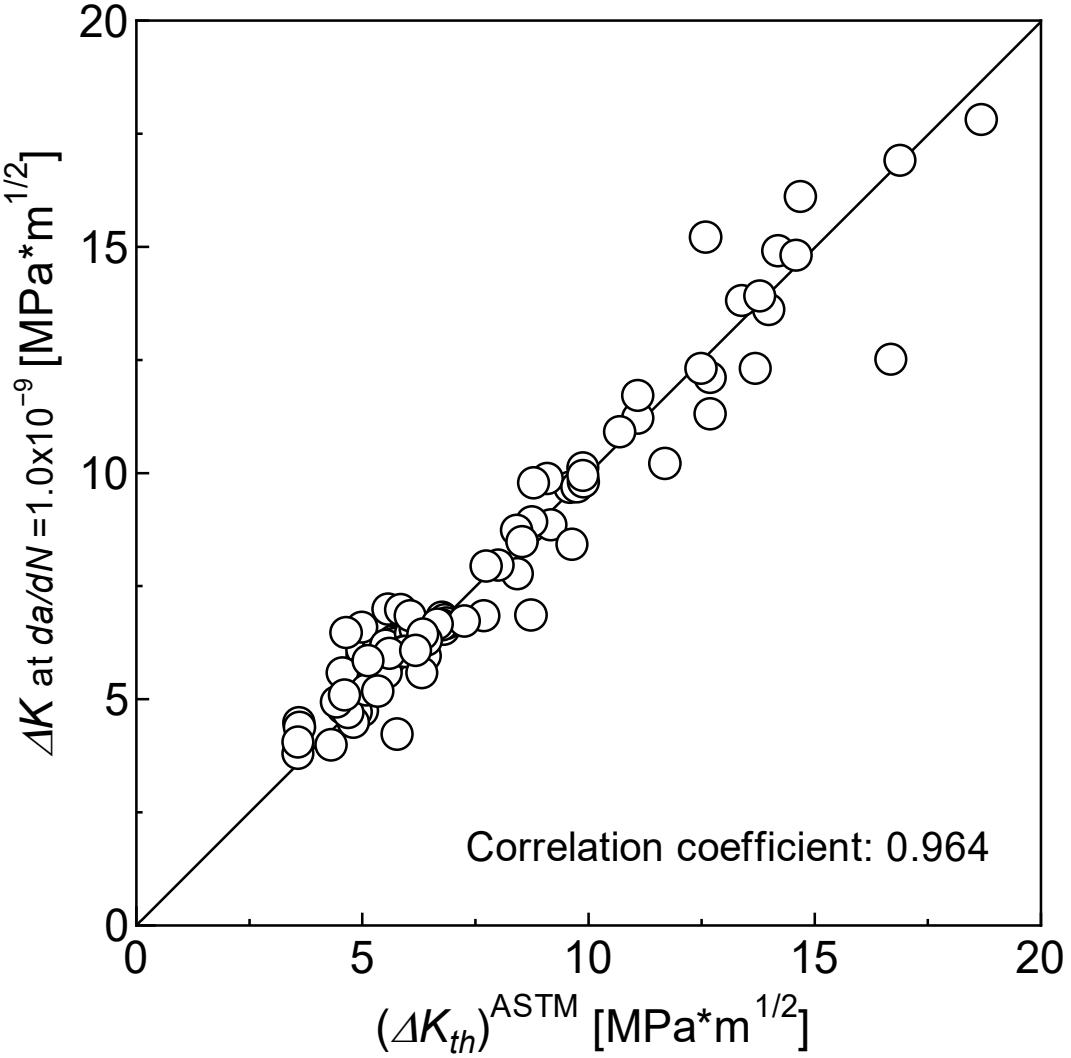


Fig. 2.11 Verification of giving the ΔK_{th} value as the ΔK value at da/dN=10^{-9} m/cycle.

Fig. 2.11 を参照すれば，da/dN = 1.0 x 10^{-9} m/cycle 時点の ΔK 値を ΔK_{th} として与えても ASTM E647 の従来の手法による値と同程度の結果が得られていると判断できる．なお，結果の妥当性については Fig. 2.10 と同様に，t 検定により有意差の無いことを確認している．この条件は WES 1111 に示す同定方法 3) の妥当性を示唆している．

以上の結果から，ASTM E647 にて規定された実験方法を緩和しても，同規格

の手法と有意差の無い ΔK_{th} 値を得ることが可能であると考えられる.

2.5　K 値漸減試験における K 値減少率の数値検討

ASTM E647 における実験要件の緩和には，K 値減少試験における K 値減少率 C_K の許容範囲に関する検討も必要である．C_K は次式で定義され，以下の条件を満たすように実験する必要がある.

$$C_K = \left(\frac{1}{K}\right)\left(\frac{dK}{da}\right) \tag{2.2}$$

- $C_K \geqq -0.08\mathrm{mm}^{-1}$ の条件を満たす範囲で荷重範囲を減少させること.
- 荷重を階段関数状に減少させる場合は，最大荷重 P_{max} の減少が，前段階の P_{max} の 10 %を超えないようにすること.
- 荷重を連続的に減少させる場合は，荷重減少率を 2 %以下とすること.
- 荷重範囲変更後は，疲労亀裂を 0.5mm 以上伝播させることを推奨.

K 値減少試験中の ΔK 値と，負荷荷重範囲 ΔP の関係に関する模式図を Fig. 2.12 に示す.

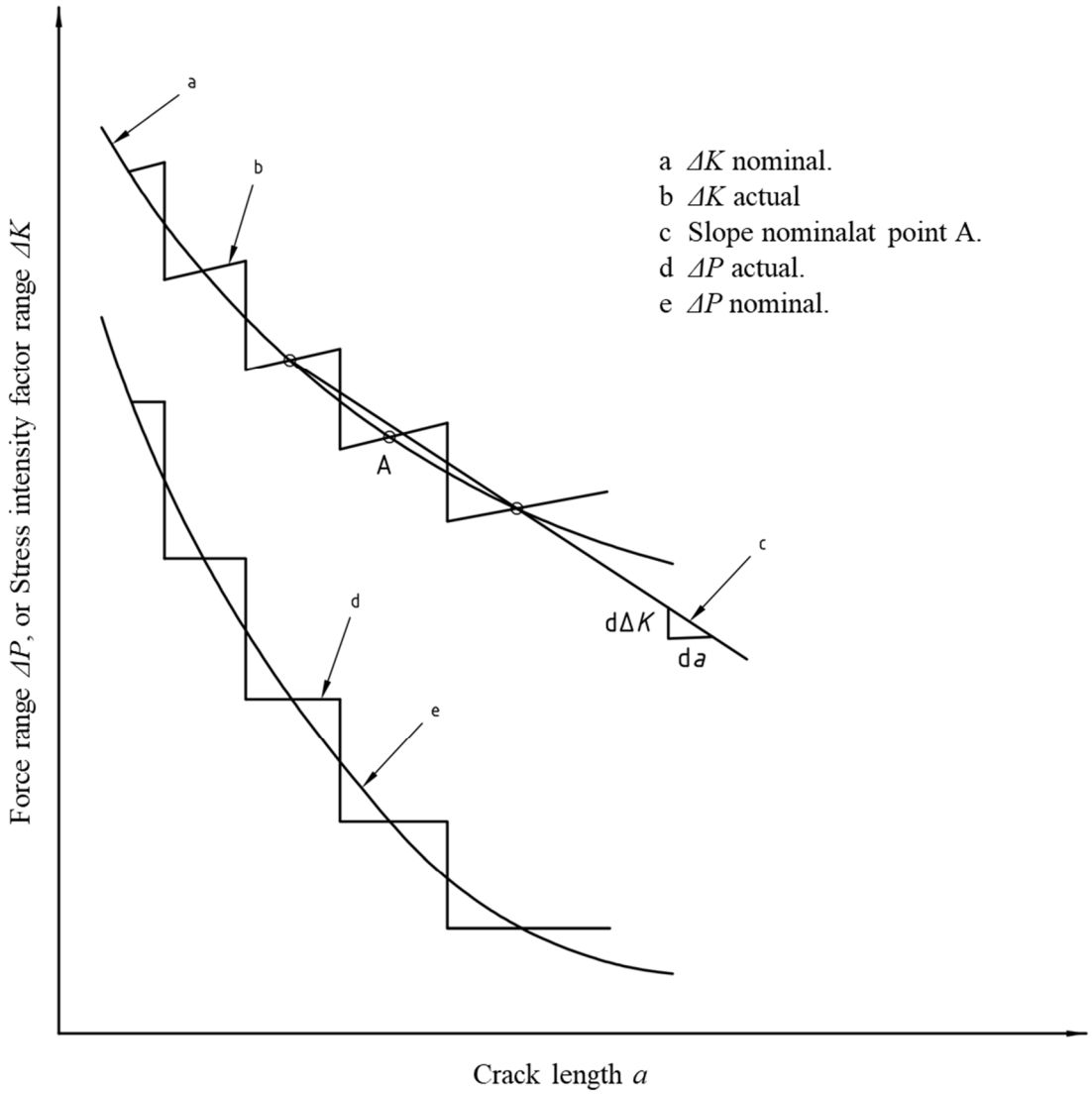


Fig. 2.12 Typical *K* Decreasing test by stepped force shedding.

これらの条件を全て忠実に守って K 値減少試験を実施すると長時間を要するため，荷重減少率緩和の可能性を検証する目的で，Table 2.1 に示す条件にて以下の数値検討を行った.

Table 2.1 Simulation conditions.

Specimen size (CCT type)		
Width (2W) [mm]	Thickness (t) [mm]	Start notch ($2a_0$) [mm]
100.0	1.0	20.0
Material Strength		
Young's modulus [MPa]	Yield stress [MPa]	Poisson's ratio
206,000	339	0.3
Load condition		
Stress range [MPa]	Stress ratio	
147.15	0.0944	

K 値減少シミュレーションには，疲労亀裂に特有の亀裂開閉口挙動を定量的に評価でき，亀裂成長挙動を精度良く推定できる豊貞らにより提案された疲労亀裂伝播成長シミュレーション FLARP[37] を活用した．ここで，疲労予亀裂の導入は 2.5 mm，K 値漸減試験開始時の ΔK は 29.5 MPa*m$^{1/2}$ としている．

1) C_K を-0.01 から-1.0 mm^{-1} の範囲で変化させ，C_K が亀裂伝播に与える影響を検証する．なお，ある荷重範囲を次の荷重範囲に減少させるまでの間の疲労亀裂伝播量 da は 0.5 mm に固定する．
2) C_K を ASTM-E647 で規定された最小許容値-0.08 mm^{-1} に固定し，荷重範囲低減後の da を 0.1，0.5，1.0 mm と変化させ，疲労亀裂伝播に与える影響を検証する．

条件 1) の検討結果を Fig. 2.13 に，2) の検討結果を Fig. 2.14 に示す．

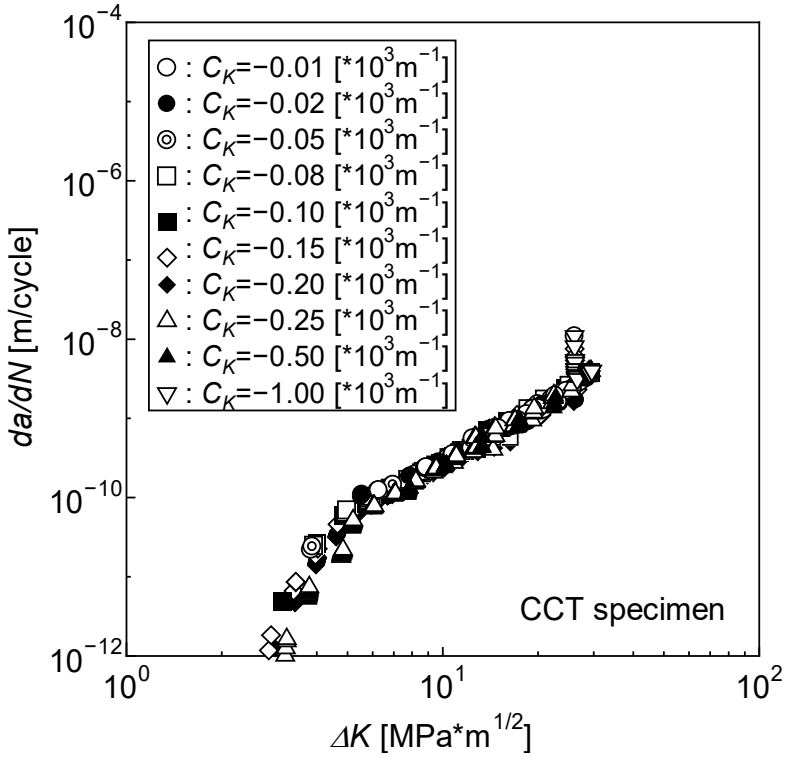


Fig. 2.13 Compared of ΔK decreasing simulation results by various C_k.

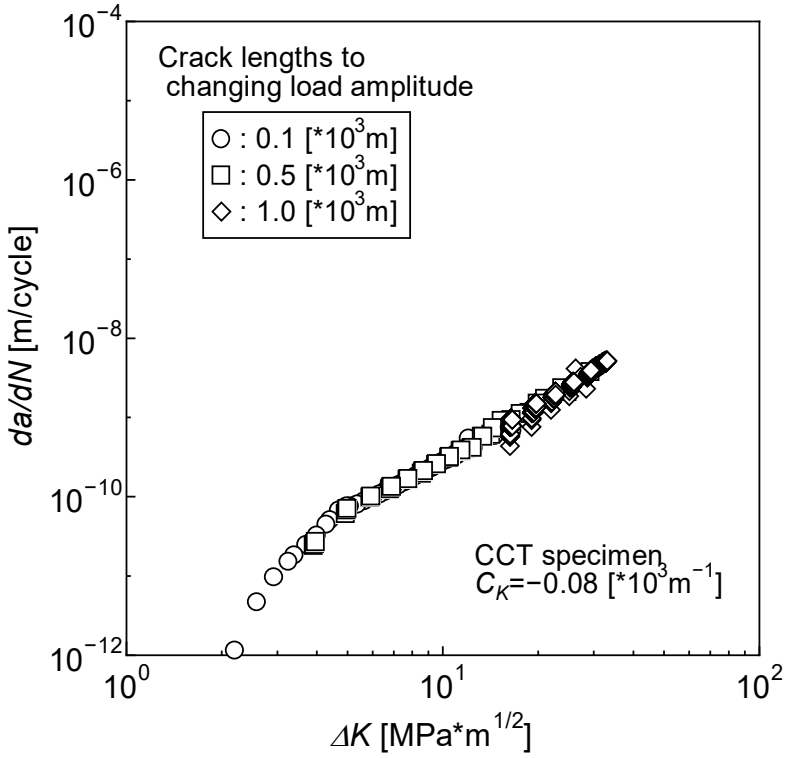


Fig. 2.14 Compared of ΔK decreasing simulation results by various da.

Fig. 2.13 の結果より，本検討範囲では C_K が ASTM E647 の規定値を超えた場合でも，*da/dN* - *ΔK* 関係に変化は見られなかった．そこで，同図に示す Stage II に相当する K 値の範囲内にある各結果の一次近似線から得られる *C*，*m* を用いて Fig. 2.15 に示す疲労亀裂成長曲線を確認したところ，C_K が規格の範囲外である-1.0 mm^{-1} の場合は，十分な疲労亀裂進展が得られる前に停留（疲労亀裂長さ 4 mm 未満）した範囲での *C*，*m* を用いていたため，実験条件には適さないと考える．一方，C_K が ASTM E647 の規格範囲外である-0.5 ～ -0.1 mm^{-1} の場合は疲労亀裂寿命が短い傾向ではあるが，規格範囲内の C_K と同様な疲労亀裂成長が得られた．これらの結果を参照すると，C_K に関する規定は，$-0.25 \leqq C_K$ $mm^{-1} < 0$ 程度に範囲を拡張しても妥当性は損なわれないと期待される．加えて，荷重を連続的に減少させる場合，1 回の荷重減少量が 2 %以上でも問題はないことを確認した．さらに，Fig. 2.14 より C_K を-0.08 mm^{-1} とした際の，荷重範囲低減後の *da* を 0.1 mm とした場合でも，Stage Ⅱ付近の *da/dN* は 0.5mm や 1.0mm と同様であるため，K 値減少試験の結果に影響がないと考えられる．

しかしながら，これらは全て数値シミュレーションによる検討結果であるため，実際に種々の荷重条件の下で K 値減少試験を実施した結果も勘案して，最終的な結論を導くべきと考えられる．

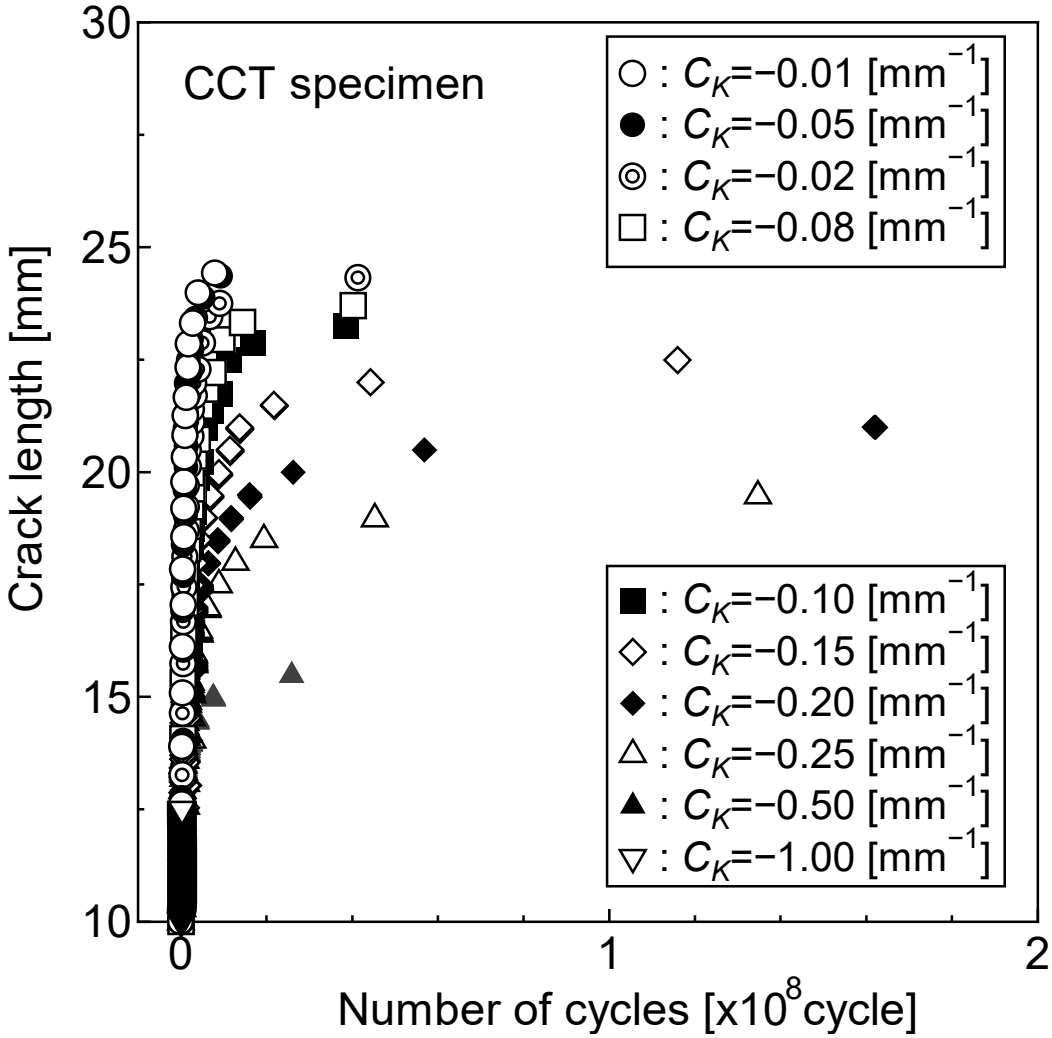


Fig.2.15 Fatigue crack growth curve of ΔK decreasing simulation results by various C_k.

2.6　結言

疲労亀裂伝播試験法の事実上のディファクトスタンダードである ASTM E647 における K 値減少法を用いた ΔK_{th} 決定法は，長時間の試験を必要とすることから実験時間の短縮や試験後のデータ処理の簡略化，試験後すぐに ΔK_{th} 値を決定するための簡素化の手法を検討した．

その結果，ASTM E647 による手法により得られる ΔK_{th} 値と有意差のない ΔK_{th} 値が得られる方法として，以下に記す方法を提案する．

1) 一定荷重振幅条件及び K 値漸減試験により，da/dN が 1.0 x 10^{-9} m/cycle 付近のデータ前後領域にある ΔK と da/dN の関係をほぼ同間隔で 3 点以上ずつ取得し，最小二乗法等により ΔK と da/dN の関係を（2.1）式で近似することで，C，m 及び ΔK_{th} を決定する．この際，結果が鋭角に ΔK_{th} に向かうことがないように使用するデータの間隔を調査した結果，使用する da/dN は， 8.0 x 10^{-10} m/cycle ～ 2.0 x 10^{-9} m/cycle 付近のデータ範囲を同間隔に使用することを推奨する．

2) da/dN = 1.0 x 10^{-9} m/cycle の時の ΔK 値を ΔK_{th} として与えることも許容する．

3) K 値減少試験における C_K の緩和に関しては数値解析により検討したが，実験による検証が実施できていないことから，基本的には ASTM E647 と同様の実施条件とすることが好ましいが，実験時間短縮の観点から Fig. 2.14 の結果を参照して，荷重範囲変更後に要求する da を 0.25mm とすることを提案する．

K 値減少率 C_K に関する推奨値については，これを検証する疲労亀裂伝播試験の実施が今後の課題であると考える．

第３章

除荷弾性コンプライアンス法を用いた疲労亀裂開閉口挙動の計測

3.1　緒言

Elber [17] の実験結果が広く認知されて以降，疲労亀裂伝播速度 da/dN が有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} をパラメータとして表されることが多くなった．その後，亀裂開閉口挙動に関する多数の報告 [7] が行われ，西谷ら [6] は後述する除荷弾性コンプライアンス法により取得したヒステリシスループ（負荷荷重－塑性ひずみの関係）の巨視的変化より，亀裂の開口荷重と閉口荷重が一致しないことを報告している．

一方，豊貞ら [33] は，独自に開発した高精度コンプライアンス計測装置を組み込んだ疲労亀裂伝播試験システムにより測定した亀裂先端近傍におけるヒステリシスループの巨視的変化と疲労亀裂の開閉口挙動を考察し，繰返し負荷時に亀裂先端に両振り塑性域が形成される再引張塑性域形成荷重（RPG 荷重（Re-tensile Plastic zone's Generated load））P_{RPG} の存在を提示すると共に，RPG 荷重 P_{RPG} 以上の荷重範囲が疲労亀裂の成長に寄与することを確認している．そして，P_{RPG} 以上の荷重範囲が疲労亀裂の成長に真に寄与すると考える RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} を定義し，ΔK_{eff} を ΔK_{RPG} に置き換えた新しい疲労亀裂伝播則を提案した．

本章では，亀裂開閉口挙動を考慮した疲労亀裂成長挙動評価に関する研究の発展，疲労亀裂伝播試験方法について紹介するとともに，高精度な疲労亀裂伝播則である RPG 荷重基準の伝播則の利用に不可欠となる P_{RPG} の決定法に関する豊貞らの手法について説明し，同手法の問題点について考察した結果を述べる．

3.2　疲労亀裂の開閉口挙動と応力拡大係数範囲

3.2.1　疲労亀裂の開口と Paris - Elber 則

Paris と Erdogan は，疲労亀裂が安定的に成長している段階において，疲労亀裂先端近傍の応力場を表現するパラメータである応力拡大係数範囲 ΔK と da/dN の関係は両対数グラフ上で直線関係を示すことを示した [14]．この疲労亀裂伝播則は一般的に Paris 則と称されるが，同一の材料，試験片形状を用いて負荷応力範囲を同じ値に設定した試験でも，負荷する応力比 R が異なると異なる ΔK - da/dN 関係が得られてしまうという問題が指摘された．

その後，Elber が疲労亀裂は引張荷重下でも閉口することを実験的に確認 [17] し，疲労亀裂開閉口現象に亀裂先端近傍の塑性域形成の状況が影響を及ぼしていることを Fig. 3.1 に示す模式図を用いて説明している．Elber は，疲労亀裂先端が閉口している負荷範囲は亀裂が新たに伝播するには寄与しないと考え，実際に亀裂先端が開口している間の K 値範囲を ΔK_{eff} として（1.4）式で定義し，Paris 則の ΔK と置き換えることで新たな疲労亀裂伝播則として（1.5）式を提案した．

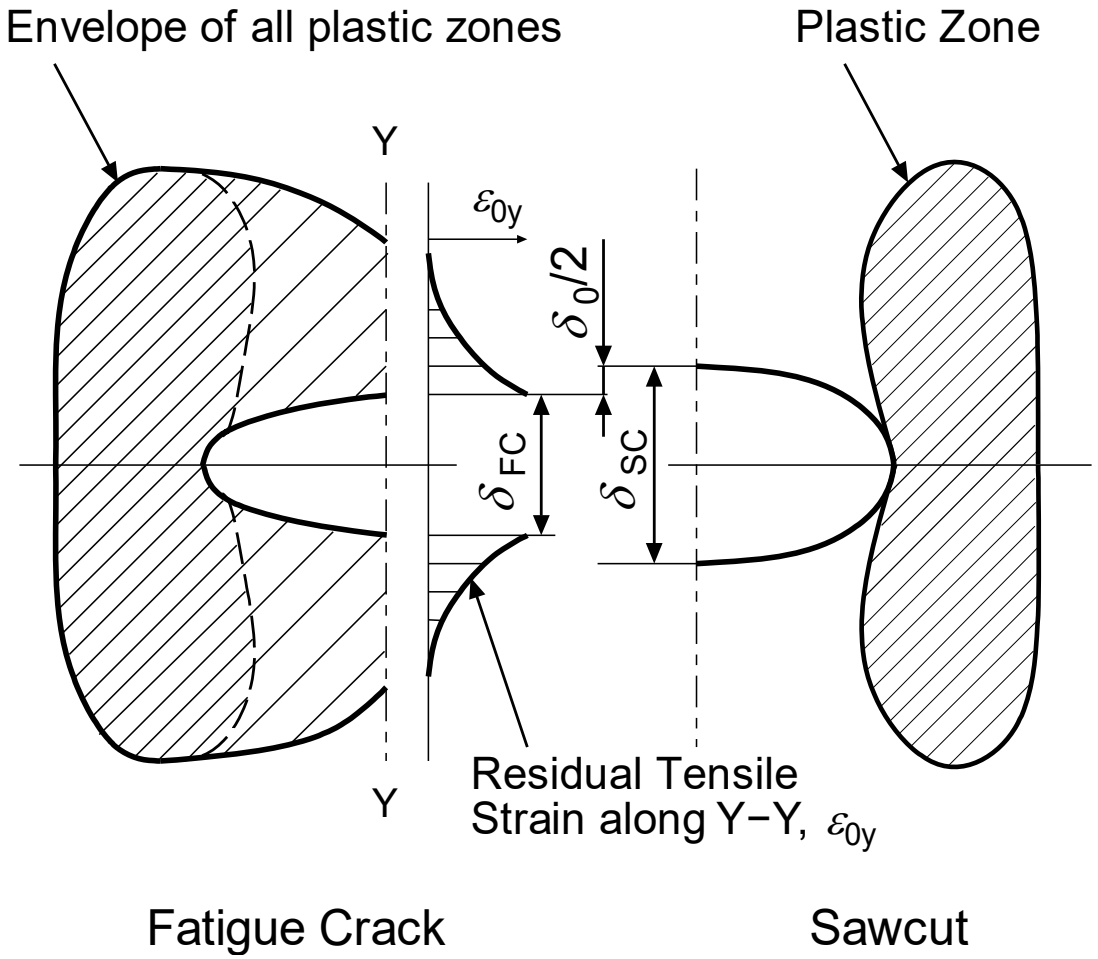


Fig.3.1 Comparison of deformations near the crack tip for a fatigue crack and a saw cut crack.

そして， Paris 則では一義的に表現できなかった R が異なる疲労亀裂伝播試験結果を（1.5）式で整理すると，Fig. 2.1 に示すように R の値に関係なく疲労亀裂伝播試験結果を整理できることを示している．

さらに，城野ら [48] は，除荷弾性コンプライアンス法を用いた疲労亀裂伝播試験で得られた結果を，Fig. 3.2 に示すように $\Delta K_{eff}/E$ で整理することにより，R だけでなく，下限界有効応力拡大係数範囲$(\Delta K_{eff})_{th}$ 付近を除けば鋼材の種類によらず 1 本にまとまると報告している．

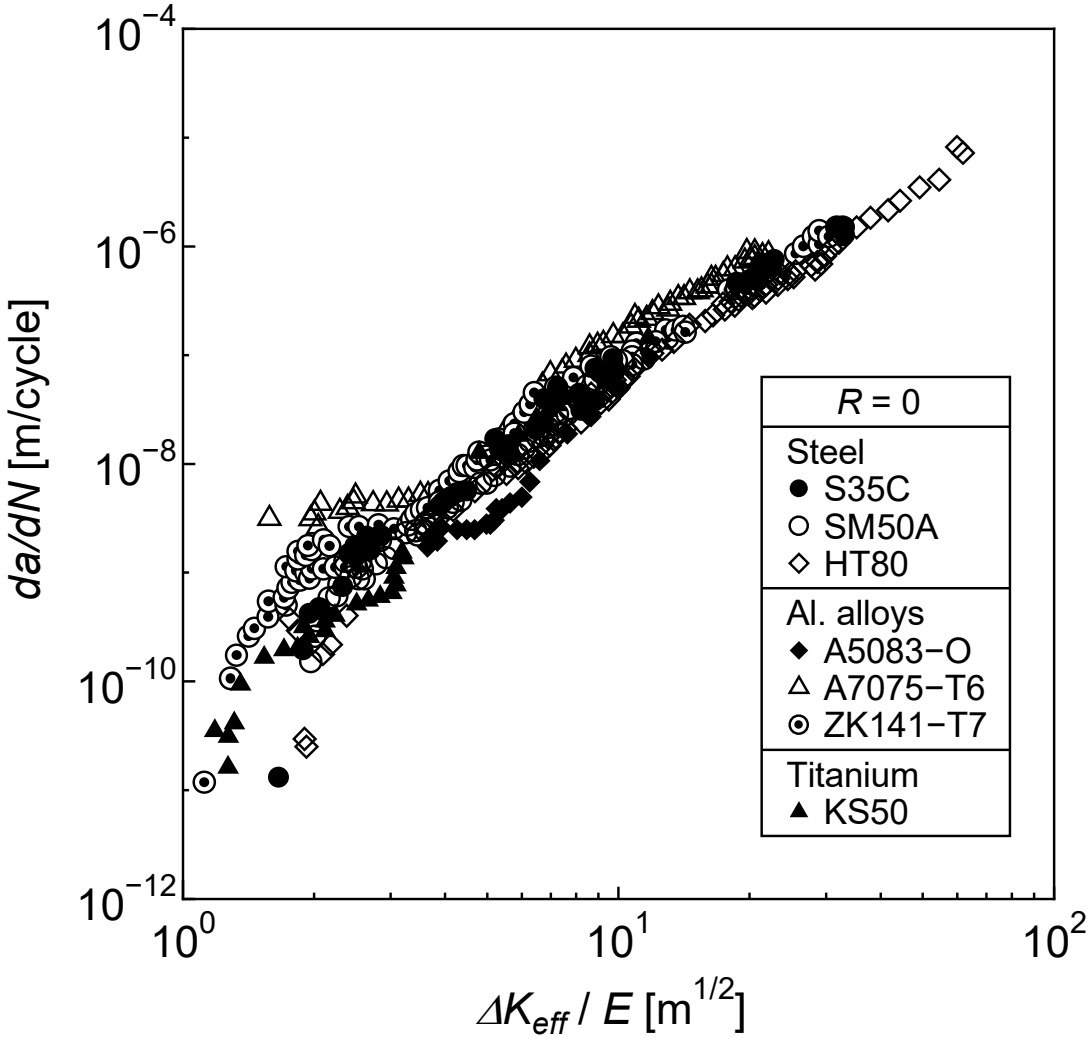


Fig.3.2 Effect of Young's modulus E on fatigue crack growth rate.

3.2.2　疲労亀裂の開閉口と除荷弾性コンプライアンス

疲労亀裂開閉口を伴う適当な繰返し毎の亀裂長さ測定には，Fig. 1.6 に示した亀裂長さ測定方法 [7] の多くが利用できる．しかし，ある亀裂長さにおける繰返し負荷 1 サイクル間の亀裂開閉口挙動の連続的変化の測定の場合，疲労亀裂は開口変位が非常に小さいことに加え，通常試験での繰返し速度は数 Hz 以上で行われるため測定精度が問題となる．これらのうち最も簡便な測定方法としてコ

ンプライアンス法 [35] があるが，荷重 P－変位 δ 関係から得られるヒステリシスループを利用するため測定精度が十分でない場合が多い．

そこで，菊川ら [22] は Fig. 3.3 に示す引算回路を用いて亀裂が完全開口している除荷弾性範囲について，荷重軸と平行になる処理を行う除荷弾性コンプライアンス法で P－引算後変位 δ_{SUB} のヒステリシスループを得ることで，亀裂開口点の正確な検出を試みている．

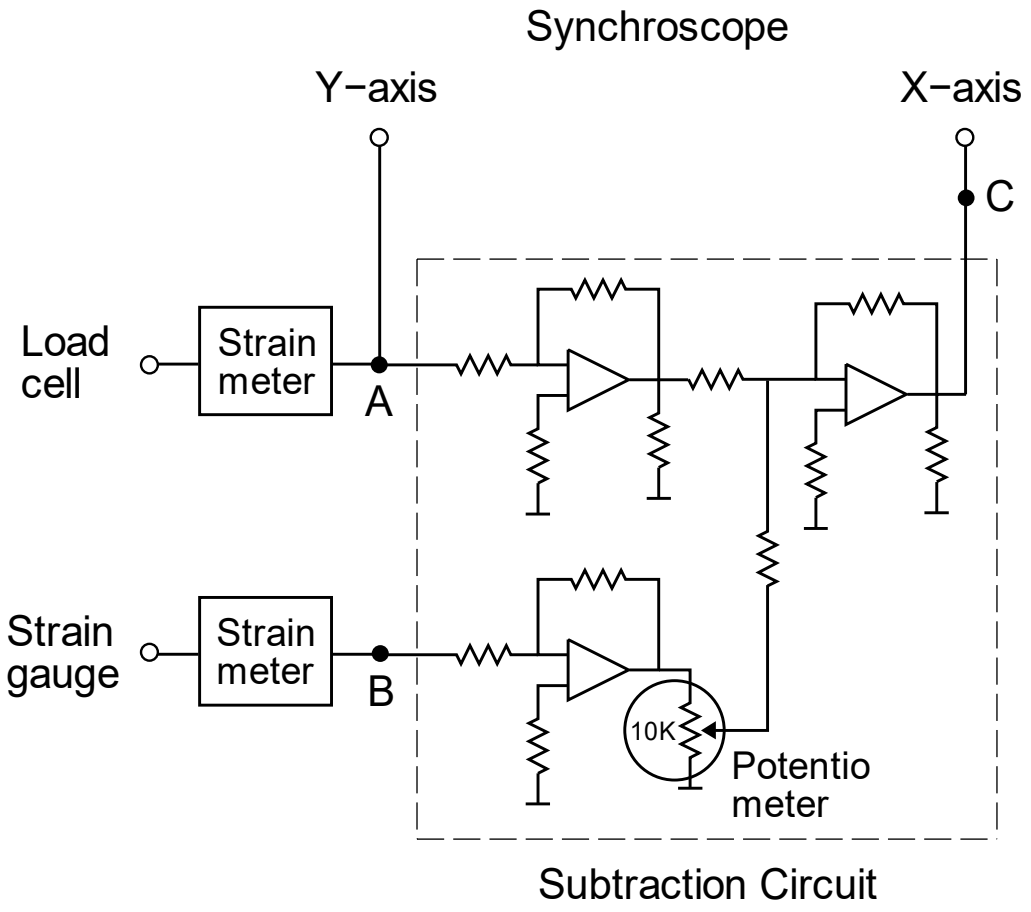
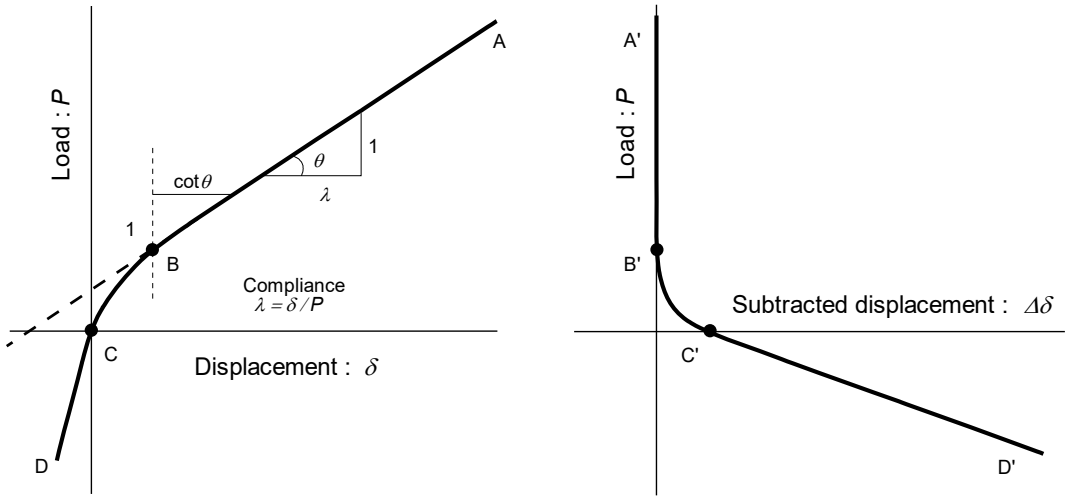


Fig.3.3 Subtraction circuit to find the hysteresis loop, which is the relationship between subtraction strain and load.

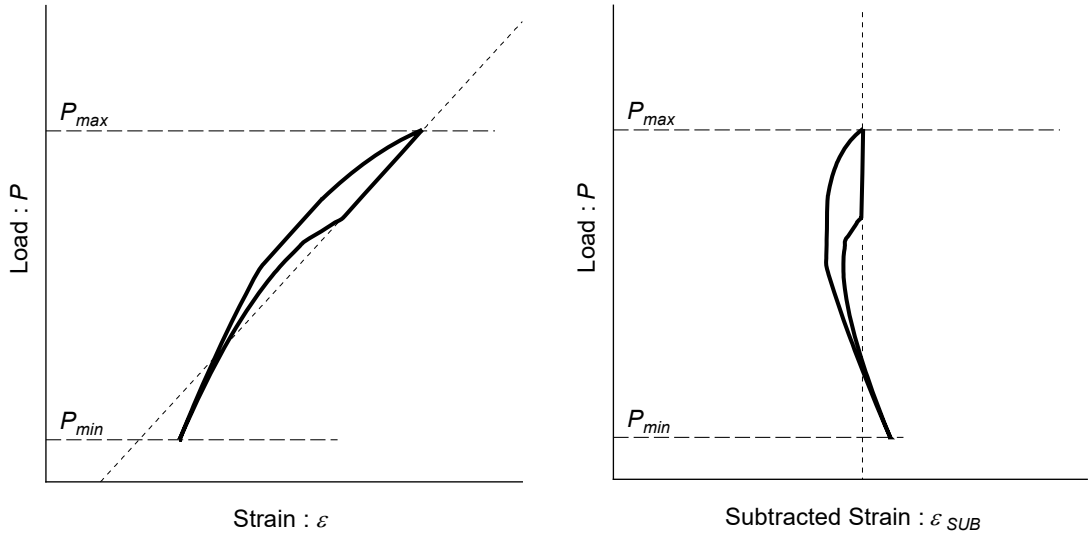
同回路は（1.7）式で表す P - δ 関係から得られるコンプライアンス λ の変化を，Fig. 3.4 a) に示す亀裂が完全開口している A - B の区間について荷重軸と平

行になるように変位全体から除荷弾性変形成分を引いた Fig. 3.4 b) に示す変位（「除荷弾性変位」と称する）を取得できる回路である．この回路を用いると，Fig. 3.5 a) に示すように δ を疲労亀裂先端近傍のひずみ ε に置き換えた P - ε 関係のヒステリシスループに対しても，除荷弾性成分をひずみ全体から引いた引算ひずみ ε_{SUB} が得られるので，Fig. 3.5 b) に例示する P - ε_{SUB} 関係のヒステリシスループが取得できる．これ以降，断りのない限りヒステリシスループは，除荷弾性コンプライアンス法を適用した P - ε_{SUB} 関係を指す．



a) Compliance.　　b) Unloading elastic compliance.

Fig.3.4 Unloading elastic compliance method.



a) Relation between Point A and B on Fig.3.4 during one cycle.

b) Relation between Point A and C on Fig.3.4 during one cycle.

Fig. 3.5 An example for the subtracted hysteresis loop obtained from Unloading elastic compliance method.

Elber あるいは菊川らは，コンプライアンス変化から亀裂開口点を決定しているが，繰返し負荷中の亀裂材の挙動とコンプライアンス変化の対応に関しては十分に考察していない．その後，西谷ら [23] は同手法を用いて取得した除荷弾性コンプライアンス法にて取得したヒステリシスループの詳細な観察を行い，亀裂の開口荷重と閉口荷重が一致しないことを確認しているものの，測定精度の都合もあり，詳細な考察には至らなかった．

3.3 ひずみとコンプライアンス変化の巨視的変化について

亀裂材の繰返し負荷 1 サイクル中の P - ε_{SUB} 関係から得られるヒステリシスループの考察は，Elber [17] や菊川ら [22] による亀裂開口点，西谷ら [23] による亀裂閉口点に対する考察が一般的に知られている．

一方，豊貞ら [33] は，繰返し負荷 1 サイクル中のヒステリシスループを詳細に考察し，これが Fig. 3.6 に示す履歴を経ていることを示した．さらに，亀裂先端近傍におけるひずみ変化と，亀裂開閉口および両振り塑性挙動との関連性を考察し，Fig. 3.7 に模式的に示す履歴を経ることを明らかとした．そして，亀裂開口荷重と亀裂先端に引張塑性域が形成され始める荷重が異なること，及び再引張塑性域形成荷重（RPG 荷重；Re-tensile Plastic zone's Generated load）P_{RPG} の存在を提案した. 加えて RPG 荷重 P_{RPG} 以上の荷重範囲が疲労亀裂伝播に真に寄与することを見出し，(1.8) 式に示す RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} をパラメータとする伝播則を提案している.

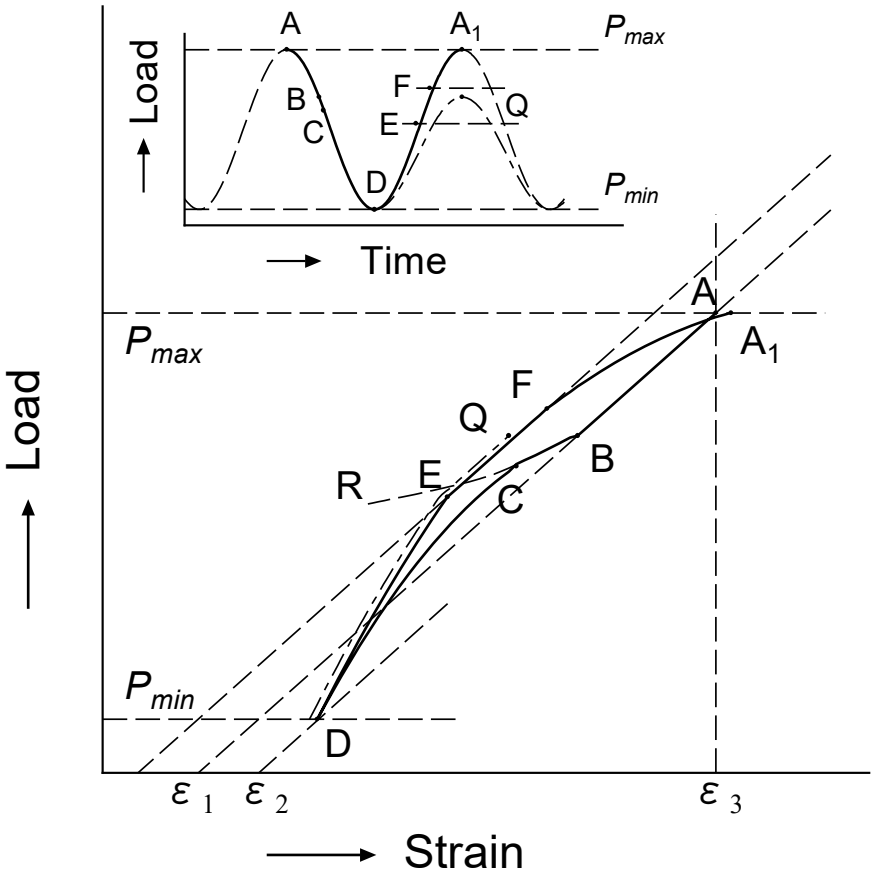


Fig.3.6 Relation between Strain and Load at fatigue cracking during one cycle [37].

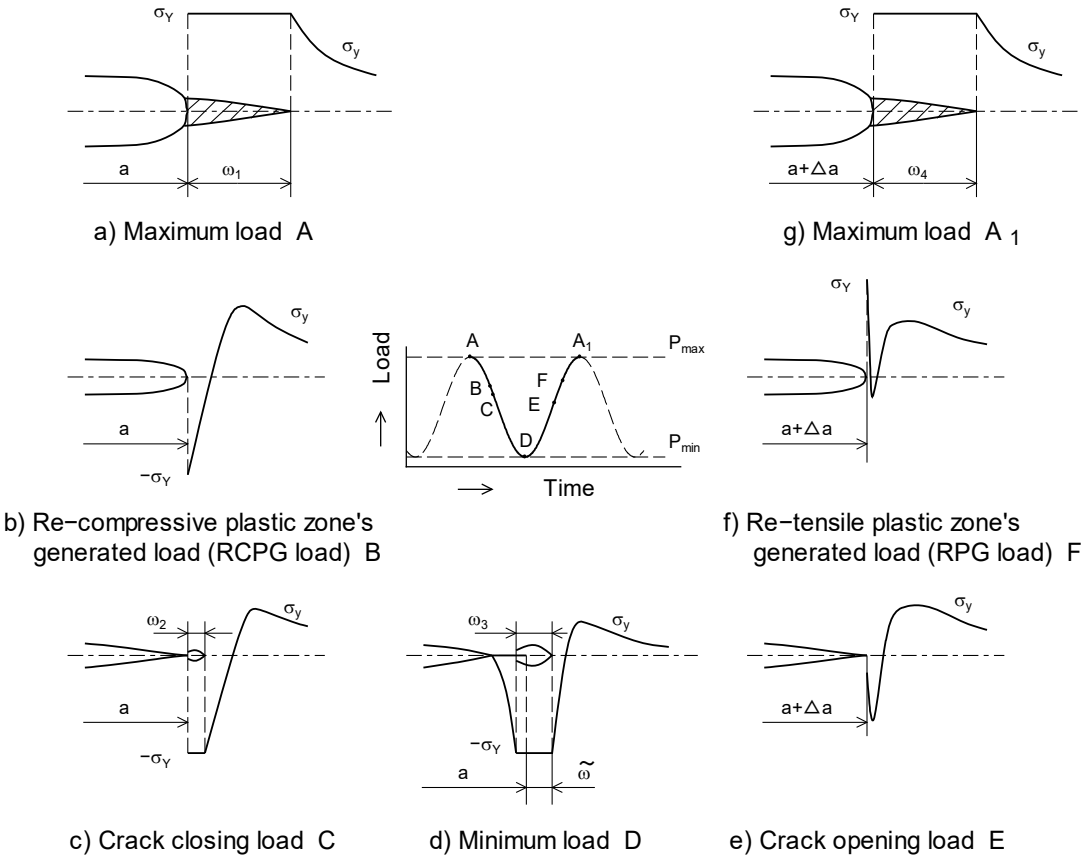


Fig.3.7 Behavior near the crack tip during one cycle [37].

以下では，豊貞らの考察について Fig. 3.6，Fig. 3.7 を用いて，最大荷重 P_{max} 時に亀裂が開口している状態からの繰返し負荷 1 サイクルにおけるひずみやコンプライアンス変化について説明する．

Fig. 3.7 中の亀裂線垂直方向応力 σ_y は材料が弾完全塑性体で，亀裂線上において亀裂線直角方向にしか応力が作用しない，すなわち単軸応力状態にあると理想化した状態としている．Fig. 3.7 a) において，亀裂先端には引張塑性域（塑性域寸法 ω_1 ）が形成されている．この状態から除荷されると亀裂前方のリガメント全体が弾性状態（ω_1 の部分は除荷弾性域）となる．弾性状態では亀裂面の変位は小さいので，除荷が進行すると亀裂が開口した状態で亀裂先端には亀裂自

身の応力集中のため圧縮塑性域が形成されるようになる．Fig. 3.7 b) は圧縮塑性域が亀裂先端に生じ出す瞬間の荷重を示し，再圧縮塑性域形成荷重（Re-Compressive Plastic zone's Generated load）という意味から RCPG 荷重 P_{RCPG} と名付けられている．

P_{max} から P_{RCPG} に至る除荷過程ではリガメント全体が弾性挙動を示すため，巨視的には任意点でのひずみは荷重に対して線形的に変化する．このため亀裂前方のひずみは，Fig. 3.6 において A → B と線形的に小さくなる．

P_{RCPG} からさらに除荷を行うと，除荷の進行につれて亀裂先端で圧縮塑性域が成長する．この除荷過程では圧縮塑性変形のため，亀裂の変位減少量は大きくなる．そのため，除荷が進行すると Elber が指摘したように，前段階までに亀裂縁に取り込んだ残留引張変形層の影響により亀裂先端が閉口し始める．この時の荷重が Fig. 3.7 c) に示す亀裂閉口荷重 P_{cl} であり，圧縮塑性域寸法は ω_2 となる．このとき外荷重が部分引張片振状態でも，亀裂先端では高応力集中のため両振応力状態を呈し，除荷過程での圧縮塑性域の成長は負荷過程のそれよりかなり小さくなる．P_{RCPG} から P_{cl} に至る除荷過程では，塑性変形が亀裂先端で成長するため，リガメント全体が除荷弾性状態となっている P_{max} から P_{RCPG} に至る過程よりも，塑性域形成による応力再配分のためにひずみ変化やコンプライアンスが大きくなり Fig. 3.6 上の B → C へと変化する．すなわち，塑性域はコンプライアンスを大きくする働きをしている．仮にその後も除荷過程で亀裂閉口が生じなければ，Fig. 3.6 上の B → C → R と移動する．この場合，亀裂先端から離れるに従い，塑性域形成に伴い生じる応力再配分による応力増分は小さくなるため，亀裂先端に近い箇所でひずみ測定を行う方が，コンプライアンスの微小な変化を検出しやすいことを意味する．

P_{cl} からさらに除荷が進むと除荷につれて亀裂閉口域が成長する．P_{max} から P_{cl} に至る除荷過程では，亀裂は完全に開口しているため亀裂部では荷重を受け持たないが，亀裂が閉口するとその亀裂閉口域の亀裂面も荷重を受け持つことになる．このため見掛け上のリガメントが除荷とともに増加することで，ひずみ変化やコンプライアンスが小さくなり，Fig. 3.6 上の B - C - R 曲線から外れた C → D へと軌跡を描き最小荷重 P_{min} である D に至る．

したがって，Fig. 3.6 上の B - C - D 曲線における変曲点である C が P_{cl} となる．P_{cl} から P_{min} に至る過程では亀裂面も荷重を分担するため，圧縮塑性域の成長速度は P_{RCPG} から P_{cl} に至る除荷過程よりも遅くなる．そして P_{min} 時には亀裂面に圧縮塑性域が形成されることになる．ただし亀裂閉口域の成長より圧縮塑性域の成長が速くなる場合，コンプライアンスが大きくなり，（後続の報告はないが）C - D 間にも変曲点が生じる．

P_{min} より負荷過程に入った直後は，亀裂閉口域およびリガメント全体が再び弾性状態となる．このとき亀裂閉口箇所は応力集中源として作用するため，容易に開口し負荷とともに亀裂閉口域が小さくなっていくため，荷重を受け持つ領域が負荷とともに小さくなり，コンプライアンスは大きくなる．ただし C → D の除荷過程では圧縮塑性域が存在していたが，D → E の負荷過程では全体が弾性挙動をすることで塑性域が存在しないため，C → D の除荷過程よりも見掛け上のコンプライアンスは小さくなる．その結果，Fig. 3.6 上の D → E の軌跡を描き，最終的に E で亀裂が完全に開口する亀裂開口荷重 P_{op} となる．

亀裂が開口する瞬間までは亀裂先端が応力集中源として働いていないことと，リガメント全体が弾性状態のため亀裂先端には圧縮応力が作用している可能性が大きい．つまりこの段階ではリガメント全体が弾性状態に保たれていることに加え負荷側での亀裂進展は極微小であるから， A → B におけるリガメント

とほぼ同じ大きさのリガメントとなっているため，亀裂開口直後の負荷過程において，A → B と同じコンプライアンスを保持することを意味する．そのため巨視的には Fig. 3.6 において A - B と平行な E → F という軌跡を描くことになる．

亀裂先端に再び引張塑性域が形成される瞬間点 F の荷重として，P_{RPG} を定義する．P_{RPG} よりさらに負荷すると負荷の増大に応じて亀裂先端で引張塑性域が成長し，これに対応してコンプライアンスが大きくなるため，Fig. 3.6 上で F → A_1 という軌跡を描く．A から A_1 の 1 サイクルでは亀裂成長は極微小であるから，A と A_1 はほとんど一致する．

Fig. 3.8 は軟鋼の SM400B 材より作成した CT 試験片を用いた疲労亀裂伝播試験結果 [33] である．同図は同一の伝播試験結果を，ΔK，ΔK_{eff}，ΔK_{RPG} と異なる指標を用いて整理した結果である．同図を参照すると，ΔK と ΔK_{eff} を指標とした場合は Stage Iに相当する極低疲労亀裂伝播速度領域において下限界が表れるが，ΔK_{RPG} を指標とすれば下限界は生じないことが確認できる．

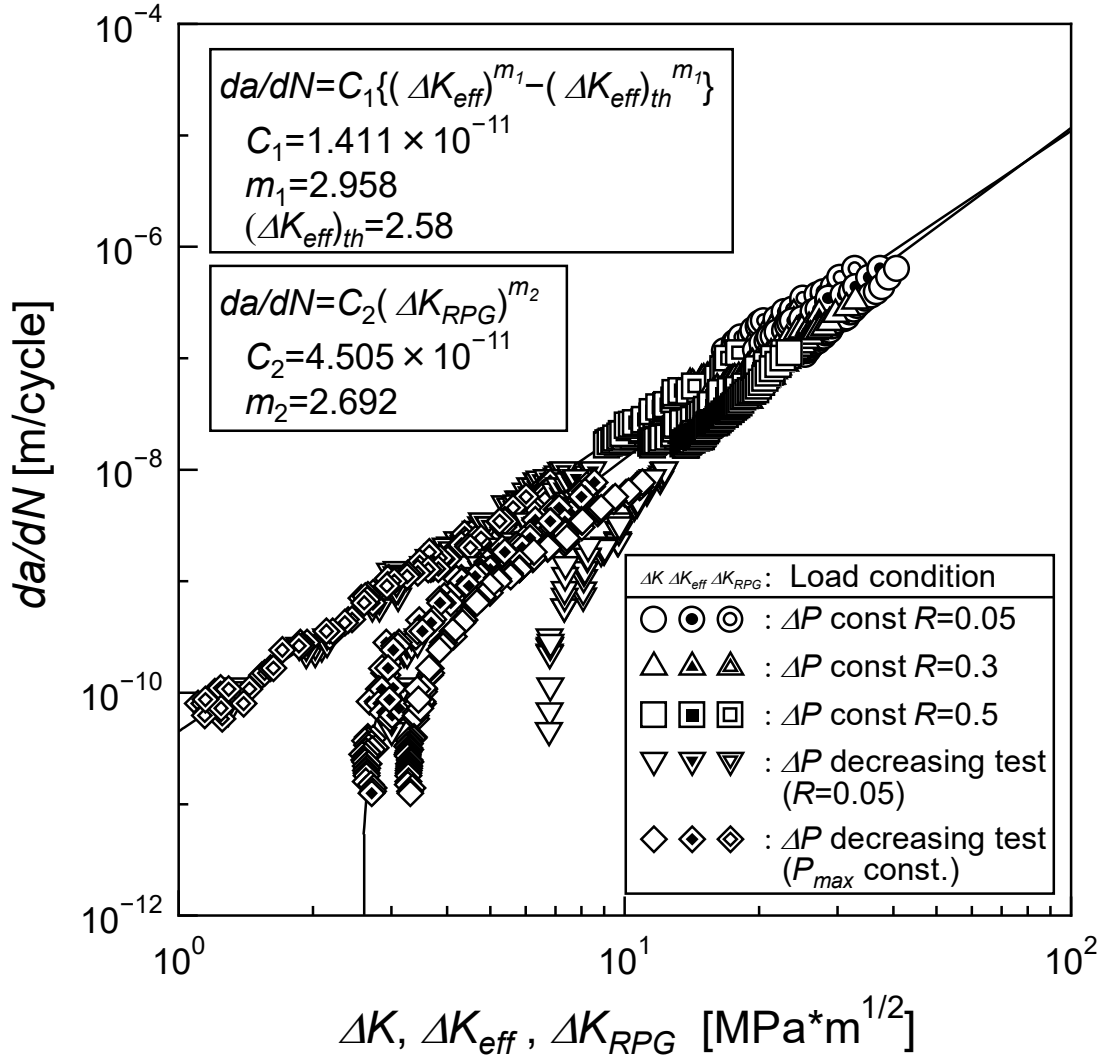


Fig.3.8 Relation between ΔK, ΔK_{eff}, ΔK_{RPG} and fatigue crack growth rate.

3.4 疲労亀裂伝播試験方法

疲労亀裂伝播速度を測定するための試験方法は，ASTM E647 がディファクトスタンダードとして利用されている．類似の試験法として ISO 12108 [41] があり，共に荷重振幅一定による K 値漸増と荷重振幅を一定の条件下で減少させる K 値漸減の方法が規定されている．一方，国内では ASTM E647 における R が負の場

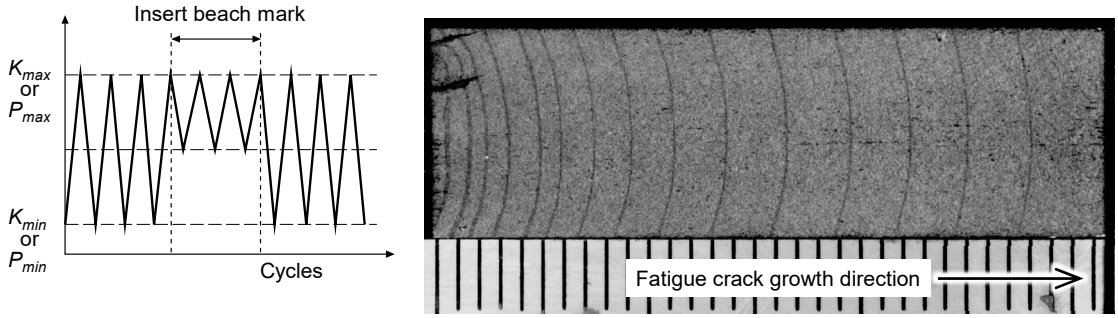
合の ΔK 値評価法の改善や ΔK_{th} 値の測定要件緩和を目的に WES 1111 [36] があるが，ASTM E647 が主に薄板をターゲットにしているのに対し，WES 1111 は大型溶接構造物に使用される厚鋼板をターゲットとしている等の違いがある．

亀裂の測定方法は Fig. 1.6 に示したように複数の手法があるが，以下に述べるコンプライアンス法を用いて自動計測することが，測定労力の観点から有用である．

(1) 同一形状の試験片に対して疲労亀裂伝播の履歴に伴う，コンプライアンス値と亀裂長さの変化履歴を測定し，コンプライアンス値と亀裂長さの変化履歴を，Fig. 3.10 例示する「較正曲線」として整理する．

(2) 較正曲線の亀裂長さは，Fig. 3.9 に示すビーチマーク法（後述）により測定する．

(3) 疲労亀裂伝播試験では，亀裂成長に伴うコンプライアンス変化履歴のみを計測し，上述の較正曲線を用いて亀裂長さに換算する．なお，同時に計測する荷重履歴も用いて K 値を On-line で計算し，ASTM E647 の要求を満たすよう荷重制御を行う場合が多い．



a) Input load amplitude image　　b) Beach mark on fatigue crack surface

Fig. 3.9 Beach mark method.

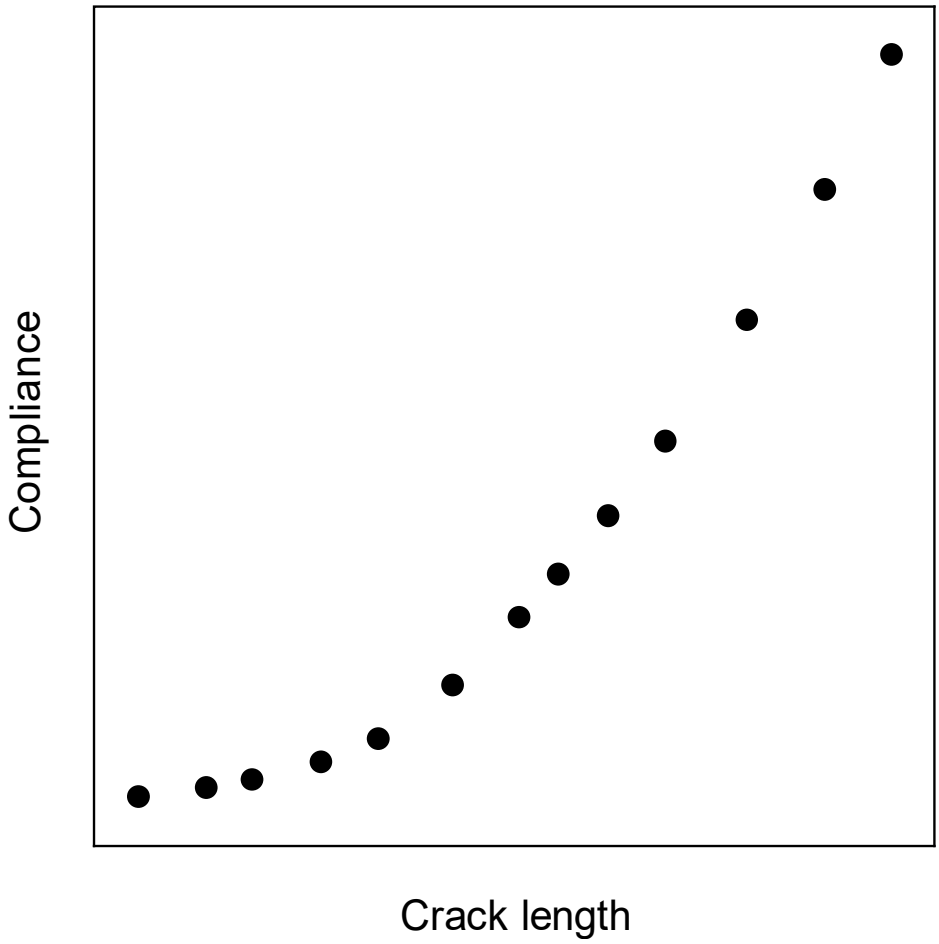


Fig. 3.10 An example of Relation between Fatigue crack length and Compliance.

ビーチマーク法とは，Fig. 3.9 a) に示すように，一般に最大荷重を保持したまま最小荷重を上げ，Fig. 3.9 b) に示すような疲労亀裂破面上にビーチマークと呼ばれる跡を残す方法である．このマークは荷重振幅を減少させると疲労亀裂伝播速度が低下するため亀裂の伝播状況が変化する結果として，破面の様相が変化（破面の粗さや伝播方向の傾斜度合い）することによりに生じる．最大荷重を一定に保持しているのは，亀裂の停留を防ぐためである．マークを導入した時点のコンプライアンスと亀裂発生箇所からマークまでの距離，すなわち亀裂長さとの関係を求めることで Fig. 3.10 に例示する較正曲線が得られる．

豊貞らは P_{RPG} を測定するためのヒステリシスループの測定を目的に, Fig. 3.11 に示す高精度コンプライアンス計測装置を組み込んだ疲労亀裂伝播試験システム [33] を開発している. 亀裂長さの測定にビーチマーク法であらかじめ得た較正曲線を用いることで，試験中に任意の亀裂長さでの荷重制御を可能としている.

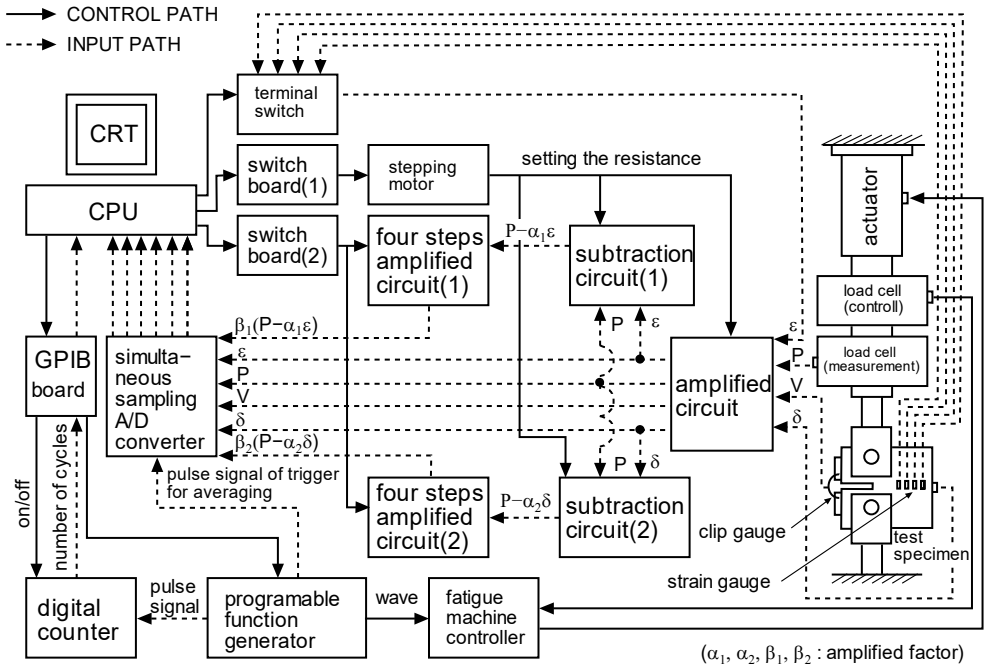


Fig. 3.11 Automatic fatigue crack growth testing system [33].

較正曲線は試験片形状や材料毎に準備する必要がある[*1]. また，較正曲線に用いるデータ間の亀裂長さの決定には，試験中に測定されたコンプライアンスデータを挟む較正データの 2 点による直線近似と，コンプライアンス値の低い 2 点と高い 1 点，および低い 1 点と高い 2 点のそれぞれ 3 点から得られる 2 つの二次曲線との平均値を，測定コンプライアンス値における亀裂長さとしている.

---

*1 ロットが違う材料の場合，ロット毎に較正曲線を取得することを推奨する.

なお，測定コンプライアンス値がデータ外の場合は，直近 2 点の直線近似から決定している．

3.5　ヒステリシスループを用いた P_{RPG} の決定方法（反転法）

豊貞らは，ヒステリシスループ上の特徴点である P_{RPG} について，元のヒステリシスループにこれを反転させた曲線を重ね合わせることで特徴点を見出す決定法（以下,「反転法」）を提案している．なお, P_{RPG} を決定する他の手法として，町田ら [49] による ε_{SUB} を P で複数回微分する手法（以下,「微分法」）もあるが，微分法の概要は付録 B に示す．

反転法とは，Fig. 3.5 b) に示す P と ε_{SUB} からなるヒステリシスループを用いて，Fig. 3.12 の実線に示すヒステリシスループ（以下,「正転ループ」）と，これら両座標の符号を反転描画させた破線のヒステリシスループ（以下,「反転ループ」）を亀裂の開閉口挙動を含む弾性ひずみの範囲で重ね合わせ，両者にずれが生じ始める点を求める手法である．

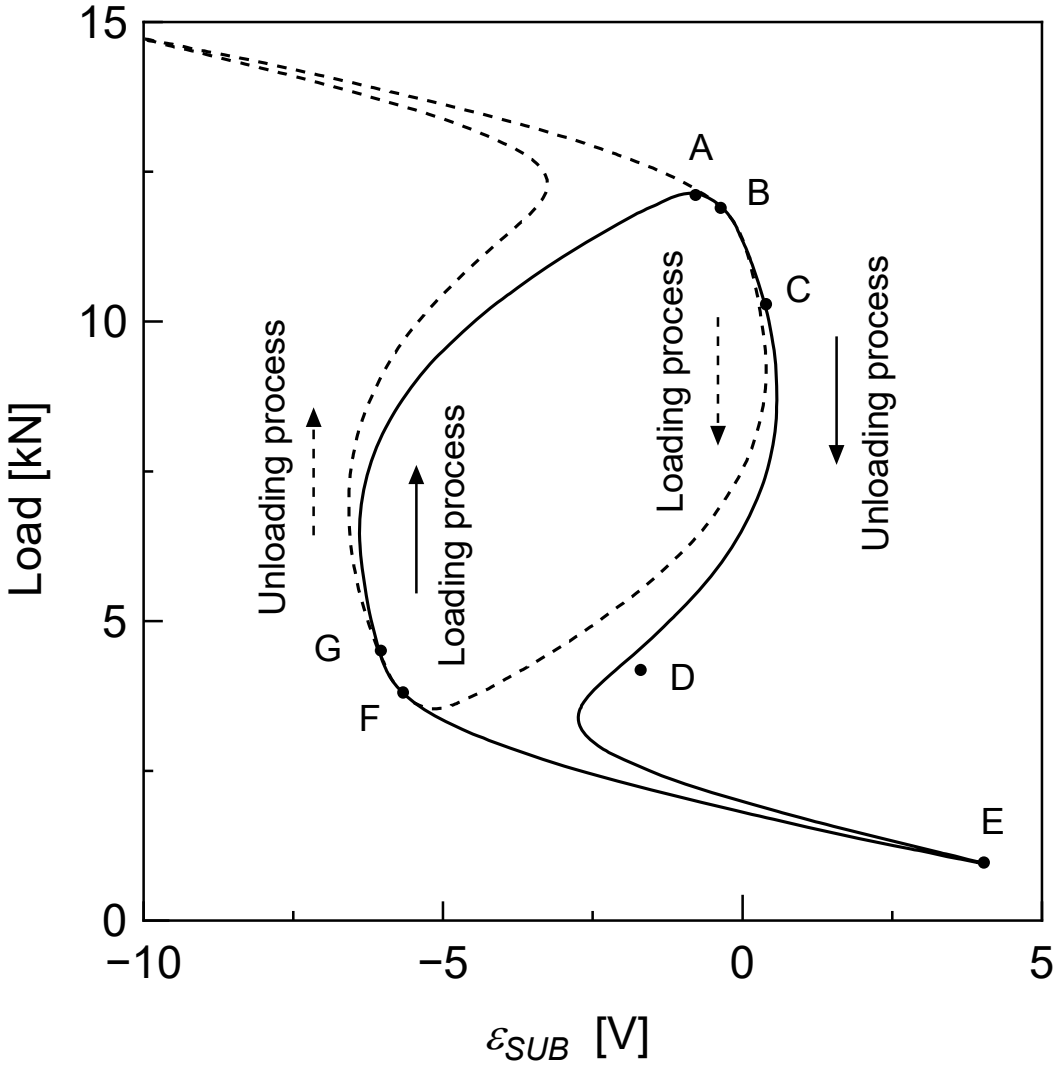


Fig. 3.12 Overlapping of load-subtracted strain hysteresis with the rolled one.

P_{RPG} の決定には高精度なヒステリシスループの測定が必要不可欠であるが，繰返し負荷に伴う微小なひずみ変化は，相対的に大きな計測ノイズを含むデータが計測されてしまう．そこで豊貞らは， 3.2.2 で説明したように菊川ら [22] の開発した引算回路に Chen ら [34] が試作した引算後のひずみを手動で高倍率に拡大する仕様を元に，後述する引算回路への入出力信号を自動調整可能な制御機構を組込んだ独自の自動計測試験システムを開発している．なお，高サイクル疲労試験は通常，数 Hz オーダ以上の周波数条件下で実施されるが，菊川，Chen ら

の引算回路は，入力信号の周波数と引算回路に用いる IC 部品の回路定数による応答性能の都合上，除荷弾性コンプライアンス法を適用したヒステリシスループの測定時は試験周波数を 0.1 Hz 程度まで落とすことと，測定の都度，手動で感度調整を行う必要があったため，長時間の試験に測定者を拘束しなければならなかった．

ヒステリシスループの測定について，システムの運用と安定した測定精度の観点から許容されるひずみ履歴計測を達成するには，試験システムを構成する IC 毎にチューニングパラメータである定数を事前に取得し，自動測定を実施する手間が必要不可欠である．また，アナログ信号の S/N 比改善にはバンドパスフィルター等のノイズ除去回路を用いるのが一般的である．

豊貞らの開発したシステムに組込まれている引算回路を Fig. 3.13 に示す．同回路は Fig. 3.3 と違い，引算ひずみの生成と増幅調整を疲労試験中に自動出力することが可能である．また，ノイズフィルターを用いない代わりに引算回路周辺に高，低周波のノイズシールドを施すことで，数十 Hz の繰返し振幅を維持したまま測定が可能であるため，繰返し負荷で生じているコンプライアンスの局所的な変化がノイズ処理の過程で消失することがない．P_{RPG} を決定する際にはスパイクノイズのような外乱ノイズを抑えるために，ヒステリシスループに影響が見られない程度に平均化（通常 10 サイクルほど）したヒステリシスループを用いることで，さらなるノイズ低減処理を行っている．

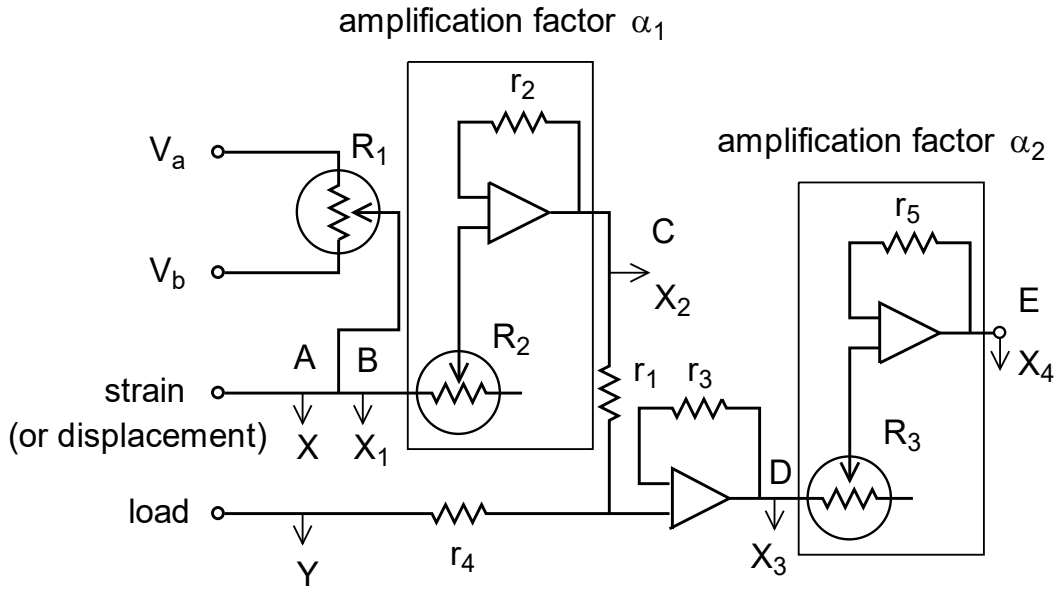


Fig. 3.13 Subtraction circuit included by Toyosada's testing system.

反転法では正転，反転ループそれぞれの弾性挙動の範囲において，亀裂開閉口挙動が同じ領域であればコンプライアンス変化は一致するが，それぞれの荷重範囲で重ね合わせた場合には（P_{max} - P_{RCPG}）＞（P_{RPG} - P_{op}）の関係となる．また，塑性域寸法の変化に相当するひずみ変化については，同じ荷重範囲内であれば，負荷過程 ＞ 除荷過程となるため，亀裂開閉口挙動に対応するコンプライアンス変化を理解していれば，重なり合う領域が一義的に決まらない場合や S/N 比に改善が見られないヒステリシスループにおいても判定ミスを軽減することが可能となる．

3.6　結言

疲労亀裂長さの測定には，ASTM E647 の解説にある電位差法やコンプライアンス法を援用することは可能だが，電位差法は使用機器の性能上，測定時には繰返し負荷の周波数を数 Hz 以下に下げる必要があり，コンプライアンス法はビー

チマーク法と併用することで，亀裂長さを自動測定可能な試験システムが構築可能となる．

一方，ある亀裂長さにおける繰返し負荷 1 サイクルにおける亀裂開閉口挙動の連続的変化測定には，荷重と亀裂先端近傍に貼付したひずみゲージを用いた除荷弾性コンプライアンス法より取得したヒステリシスループにて，簡便かつ精度よく測定できる．これにより，豊貞らは疲労亀裂を伝播させる駆動源は亀裂開口荷重ではなく，RPG 荷重以上の荷重範囲であることを実験的考察から提案し，高精度コンプライアンス計測装置を組み込んだ疲労亀裂伝播試験システムの開発と，ΔK_{RPG} をパラメータとする伝播則を定義した．

豊貞らの試験システムを用いて疲労亀裂伝播試験の方法として事実上のディファクトスタンダードである ASTM E647 に準拠した疲労試験を実施し，疲労亀裂の開閉口挙動を含むヒステリシスループを取得することで，ΔK_{eff} や下限界亀裂閉口有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff}^{cl} に必要な荷重範囲のパラメータである P_{op} や P_{cl} が得られるだけでなく，反転法を用いることで ΔK_{RPG} の算定に必要な P_{RPG} が測定可能となった．ただし，豊貞らのシステムは現在では入手困難な機器や部品が使用されていることと，引算回路の製作，維持に必要なアナログオペアンプの技量が必要なため，将来的な装置の安定的な運用と維持管理面でも問題が生じている．

加えて，反転法はヒステリシスループを構成するコンプライアンス変化の現象を理解した熟練者が P_{RPG} の同定作業を行うことが望ましく，微分法は S/N 比に多大な影響を受けることと，P_{op} が同定できないことを確認した．

第４章

コンプライアンス自動計測機能付き
疲労亀裂伝播試験システムの開発

4.1　緒言

豊貞ら [33] は，除荷弾性コンプライアンス法により取得した荷重 P－引算ひずみ ε_{SUB} 関係によるヒステリシスループをもとに，疲労亀裂伝播 1 サイクル中におけるコンプライアンスの巨視的な変化と亀裂開閉口挙動の関係を考察し，再引張塑性域形成荷重（RPG 荷重（Re-tensile Plastic zone's Generated load））P_{RPG} 以上の応力拡大係数範囲が亀裂伝播に寄与していることを見出し，RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} をパラメータとする伝播則（1.8）式を提案した．

ΔK_{RPG} をパラメータとする伝播則は従来の伝播則と比較すると，以下の点で優位性を有する．

(1) 亀裂成長履歴推定の精度が大きく劣る変動荷重履歴下においても，比較的良好に亀裂成長履歴を推定できる．

(2) ΔK_{th} や $(\Delta K_{eff})_{th}$ あるいは $(\Delta K_{eff}{}^{cl})_{th}$ として知られる，伝播中の亀裂が停留する応力拡大係数範囲の下限界値は，実験した範囲内では存在しない．

(3) 従来の伝播則が初期亀裂の存在を前提とする，いわゆる「長い」亀裂に対するものであることに対し，第 6 章で取り扱う応力集中場からの亀裂発生

段階から伝播過程までを統一して取り扱える．

一方，ΔK_{RPG} をパラメータとする伝播則を適用するには，種々の評価対象材料に対して伝播則中の材料定数 C_2，m_2 を与えておくことが必要であり，一定荷重振幅条件のように比較的簡単に実施できる疲労亀裂伝播試験にて P_{RPG} を測定すればよい．P_{RPG} の測定には，第 3 章で説明したように専用のコンプライアンス計測機器を用いて実験データを収集した後，熟練者による処理作業が必要となる．豊貞らが開発した高精度コンプライアンス計測装置を組み込んだ疲労亀裂伝播試験システムでは，ヒステリシスループの測定精度の観点から引算回路の利用が不可欠であるが，彼らの装置は開発から 30 年近く経過していることもあり，システムに組込まれている旧式のパソコンや入手困難な部品があるため，将来的な装置の安定運用と維持管理面で問題が生じている．

そこで本章では，豊貞らの試験システムと同様に数十 Hz の繰返し試験周波数を維持したまま，繰返し負荷数や疲労亀裂の伝播量などの計測条件に応じて，荷重や変位，ひずみの自動計測が可能な疲労亀裂伝播試験システムを開発した結果を述べる．新たに開発したシステムは，

(1) 回路毎にチューニングパラメータを決定する必要がある自作の引算回路を用いる代わりに，P - ε 関係のヒステリシスループを A/D 分解能に優れる動ひずみ測定器で取得する．

(2) パソコンで動作可能なソフトウェアで構成された市販品の機器の組合せにより動作する．

という特長を有する．

加えて，疲労亀裂伝播試験における P_{RPG} 測定時の注意を記す．

4.2　試験システムの構成

4.2.1　選定機器の概要

Fig. 3.11 に豊貞らの高精度コンプライアンス計測装置を組み込んだ疲労亀裂伝播試験システム，Fig. 4.1 に新規開発した自動コンプライアンス計測機能付疲労試験システム（以下,「試験システム」）の概要を示し，Table 4.1 に試験システムの主な比較内容を示す（仕様の詳細は付録 C 参照）.

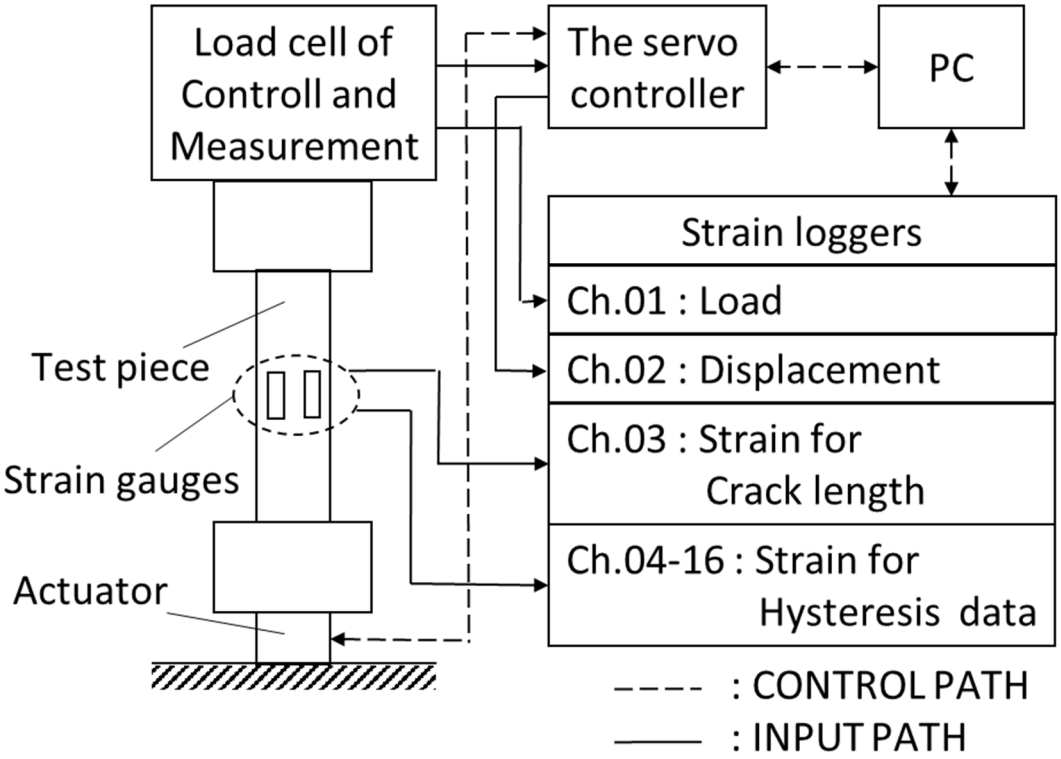


Fig. 4.1 Developed measurement of compliance system.

Table 4.1 Comparison of hardware for Toyosada's and the new test system.

	Toyosada's system	The new system
PC(OS)	PC-9801 (MS-DOS)	PC/AT (Windows)
Controller	Original (N88-BASIC)	Dedicated only
A/D resolution	12bit	16bit
Strain sensor	Strain gauge	
Measured data	Load, Displacement, Strain and Subtracted strain	Load, Displacement and Strain
Special note	Need a subtraction circuit	Not a subtraction circuit
Sampling rate	1kHz	2kHz

P_{RPG} を求めるためには，試験体への繰返し負荷の履歴と疲労亀裂先端近傍のひずみ変化を同時に測定する必要がある．その際，繰返される荷重はロードセル，ひずみは接触式の抵抗線ひずみゲージ（以下，「ひずみゲージ」）を用いる方法が一般的である．ひずみ測定に関しては近年，耐疲労性能を向上させたひずみゲージ [50] や，第 7 章で取り扱う非接触のカメラで静止画や動画を記録し，画像相関の技術を用いたひずみ解析を行う手法 [51] も普及しつつあるが，現状では広く普及しているとは言い難いため，本試験システムでは利用実績が豊富なひずみゲージを採用した．

P と ε の測定精度は P_{RPG} の同定結果に影響を及ぼすため，可能な限り S/N 比の向上に努める必要がある．また，ロードセルの容量や動ひずみアンプの設定レンジは負荷する繰返しひずみ範囲と同程度に設定し，疲労亀裂伝播に伴うひずみゲージ周辺の平均ひずみ値の上昇分は，測定時にリバランスを行うと同時に上昇量を別途記録しておき，必要に応じて測定データの補正に活用する．ロードセルは Fig. 4.1 に例示するように，試験機制御用と P_{RPG} 測定用の 2 系統出力を

有する装置，もしくはそれに準ずる装置が必要である．動ひずみアンプはメーカの違いやノイズフィルターの設定値により出力時の位相差が出る場合が多いため，特に複数メーカ製の機器や設定を混在して使用する際は，ひずみゲージへの印加電圧の同期も併せて注意が必要である．関連して，動ひずみアンプのノイズフィルターを S/N 比の改善対策として使用する際には，繰返し負荷周波数と同じ桁の設定レンジで使用すると微小なひずみ変化が消失する可能性があるため，ノイズフィルターの減衰特性にもよるが，著者の経験上およそ繰返し周波数の 5 倍程度以上の遮断周波数を用いるとデータ処理上の問題は生じていない．

4.2.2　ロードセル

ここでは，一般に広く普及しているひずみゲージ式ロードセル [52] を採用してシステムを構築したが，荷重値は除荷弾性コンプライアンス法に使用するため，出力信号に含まれる温度ドリフト等の製品固有の精度特性のうち，特に Fig. 4.2 に示す直線性誤差とヒステリシス誤差の値を把握しておく必要がある．この理由は，P - ε 関係のヒステリシスループの挙動に試験片に生じたひずみ以外のひずみ（試験機等に生じるひずみなど）が含まれる程度を把握することで，亀裂開閉口挙動によるひずみ履歴変化と混同しないようにするためであるが，これまでの著者の測定経験から，0.1%以下の性能誤差であれば影響はないと判断できる．

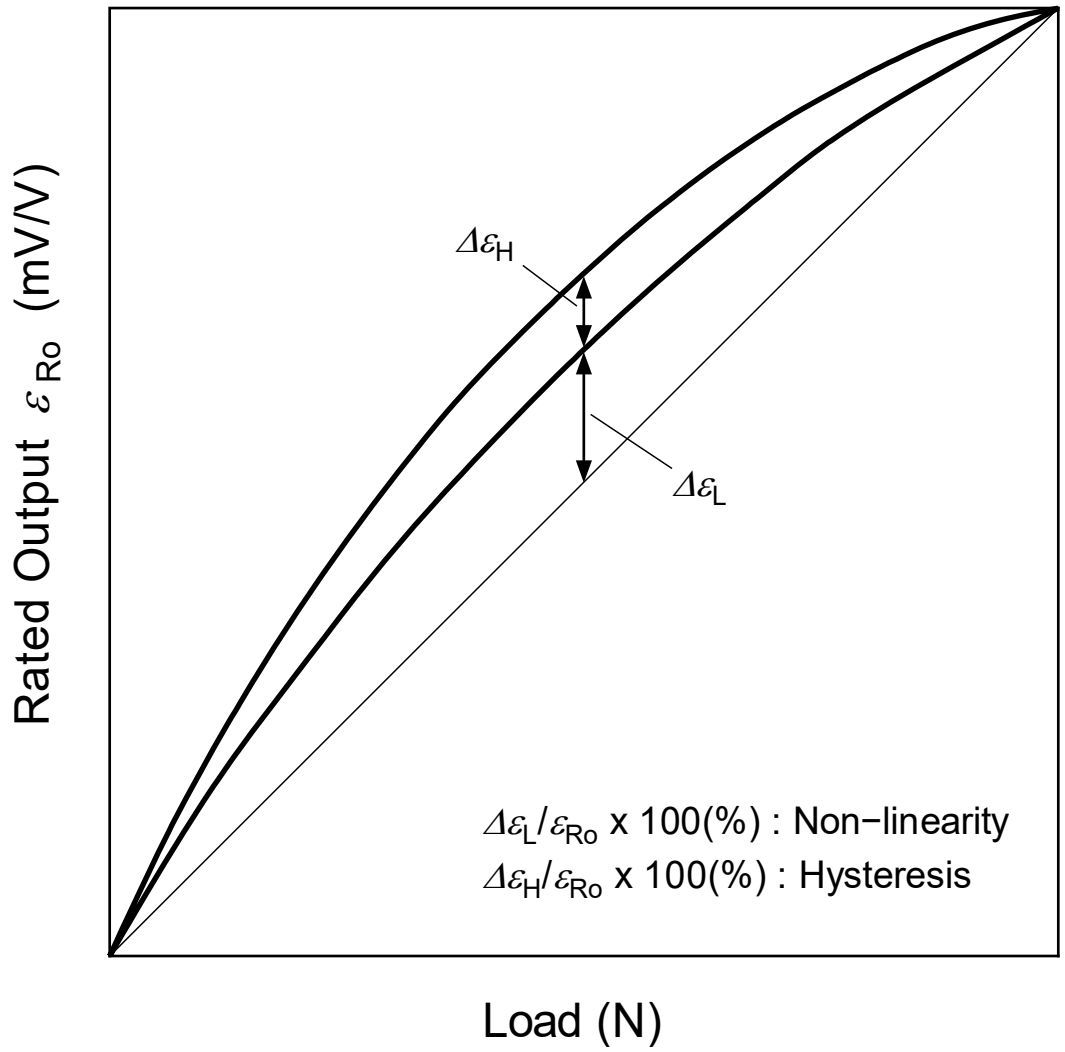


Fig. 4.2 An example of the difference between load and transducer output.

一方，ロードセルの出力信号は試験機の荷重制御にも必要であるため，豊貞らは試験機制御用とヒステリシス測定用に 2 つのロードセルを使用していたが，使用する試験機の形状によっては 2 つのロードセルを設置するスペースが確保できない場合や，出力値の検定に 2 倍の費用を要する．そこで本計測システムでは，Fig. 4.3 に示すような 2 系統出力に改良したロードセルを用いることでこれらの問題を解消している．

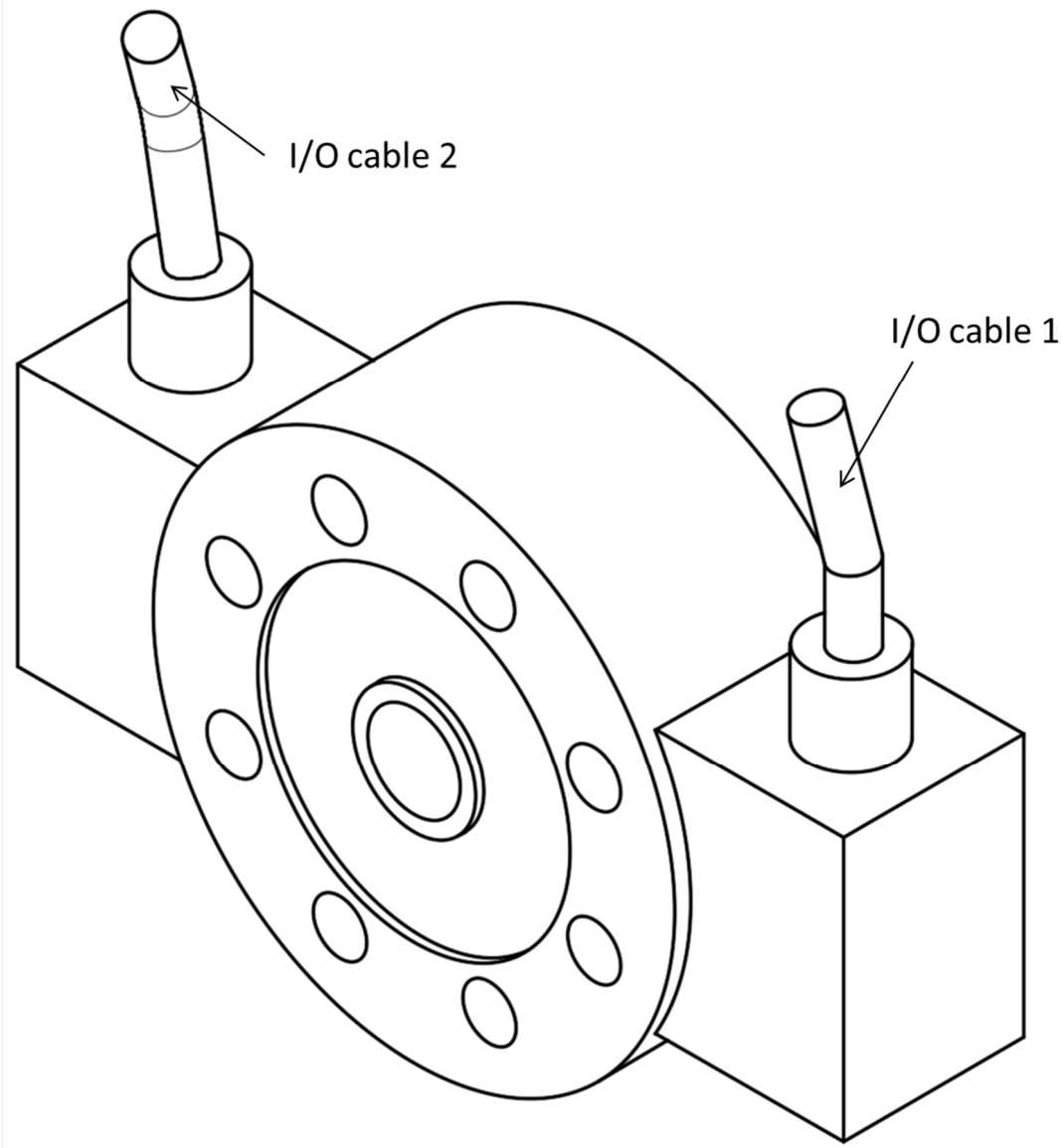


Fig. 4.3 An example of load cell with two output functions.

4.2.3　動ひずみ測定器

動ひずみ測定器では，時間とともに変化する力やひずみを，ロードセルやひずみゲージなどのセンサーを通じて測定することで，測定対象物の動的な挙動を数値化している．一般的にはアナログ信号（入力信号）を増幅出力する機能を指すが，現在はアナログ信号を高速でデジタル化し内部メモリに記録後パソコン

に転送する機能が追加された，デジタル動ひずみ測定器（以下,「動ひずみ計」）が主流となりつつある．

選定した動ひずみ計のメリットは, アナログ信号の増幅と 16bit の A/D 変換を測定器内で行うため，ノイズの発生要因はひずみゲージ等のセンサーに印加するブリッジ電源とアナログ信号が外乱の影響を受ける分だけとなる．ただし，ブリッジ電源が交流を用いた搬送波型の場合は直流型よりも S/N 比が高いため，ブリッジ電源からのノイズ影響はほぼ受けない．加えて，測定器使用時の校正ひずみの設定やアンプの感度調整が不要となることや，測定器のコントロールをパソコンで行えることが挙げられる．しかしながら，デジタル変換されたひずみの最小分解能は 1.0×10^{-6} ひずみである場合が多いため，引算回路を用いずにデータ処理で Fig. 3.4 に示した除荷弾性コンプライアンス法相当の演算を行うと，最小分解能がノイズよりも大きくなる場合がある．

一般に流通しているひずみゲージの多くは弾性ひずみの測定を想定した製品であるため，ひずみ範囲が 10^{-3} オーダ以上の繰返し測定は製品の保証外となっている．そこで，荷重や変位，ひずみの自動計測を行うための動ひずみ計において，ひずみの測定範囲を上限値に近い約$\pm 3.0 \times 10^{-2}$ から約$\pm 3.0 \times 10^{-3}$ に 1 桁絞る代わりに，測定ひずみの最小分解能を 1.0×10^{-7} とする外部コマンド機能を追加した．

4.2.4　疲労試験機

疲労亀裂伝播試験に用いる試験体は，主に鋼材から採取した切欠き付平板を用いるため，試験機は電気油圧サーボ式強度試験機を使用する．試験機の制御は Fig. 4.1 に示すように専用のコントローラにパソコンを繋いで，疲労試験の規格に沿った外部制御を行う．

疲労試験には軸力（引張，圧縮）および，曲げ（3 点，4 点，平面，回転）やせん断ねじり等の負荷方法があり，それぞれに標準的な試験方法として JIS や ISO，ASTM 等の規格 [53)-68)] が存在するが，ここでは軸力試験に限定した疲労試験方法とする．

疲労試験制御ソフト（以下,「制御ソフト」）は試験機メーカの通常製品に以下の機能を組込むことで，試験中に測定したコンプライアンス値から亀裂長さに換算し，一定荷重振幅試験や K 値漸減試験だけでなく，プログラム波形入力による試験等を亀裂の伝播量で試験制御することを実現している．

(1) Fig. 3.10 に例示する「較正曲線」を制御ソフトに事前に読み込み，試験中の亀裂長さの換算に使用する．
(2) コンプライアンスの適用範囲は試験荷重の範囲内で調整可能としておく．

較正曲線を用いた亀裂長さの換算方法は，第 3 章で説明した豊貞らのシステムと同様の手法を採用している．

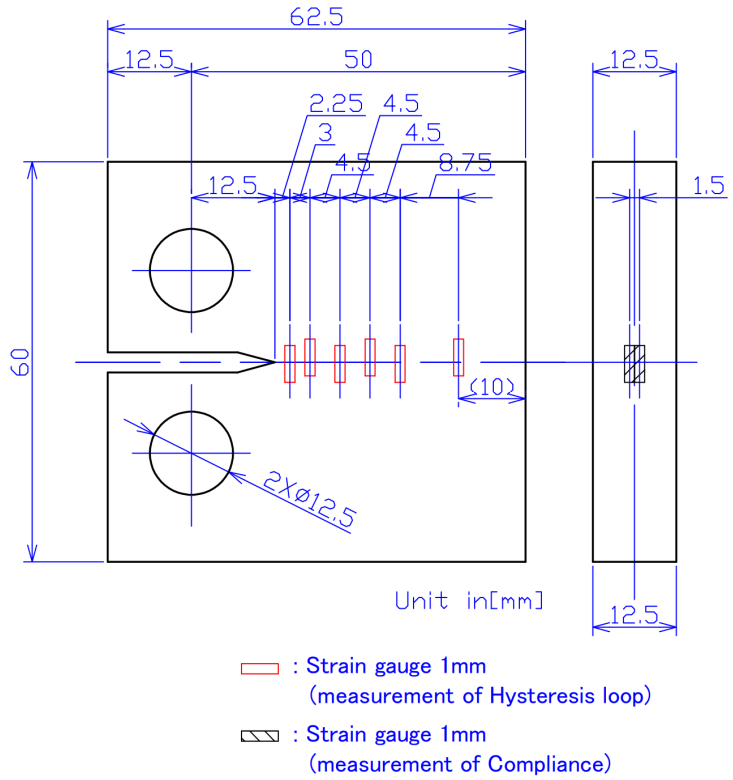
試験中のコンプライアンス値や P - ε 関係のヒステリシスループの測定には，4.2.3 で説明した動ひずみ計の連動制御が欠かせないため，これらの制御機能も同様に疲労試験制御ソフトに組込んだ．主な機能を以下に示す．

(1) 動ひずみ計の各チャンネルの個別設定．
(2) サンプリングの周期と測定周期数の設定．
(3) 測定間隔の繰返し数もしくは亀裂伝播量による設定．
(4) 試験中のオートバランス機能．
(5) 試験中にスパイク負荷を挿入する機能．

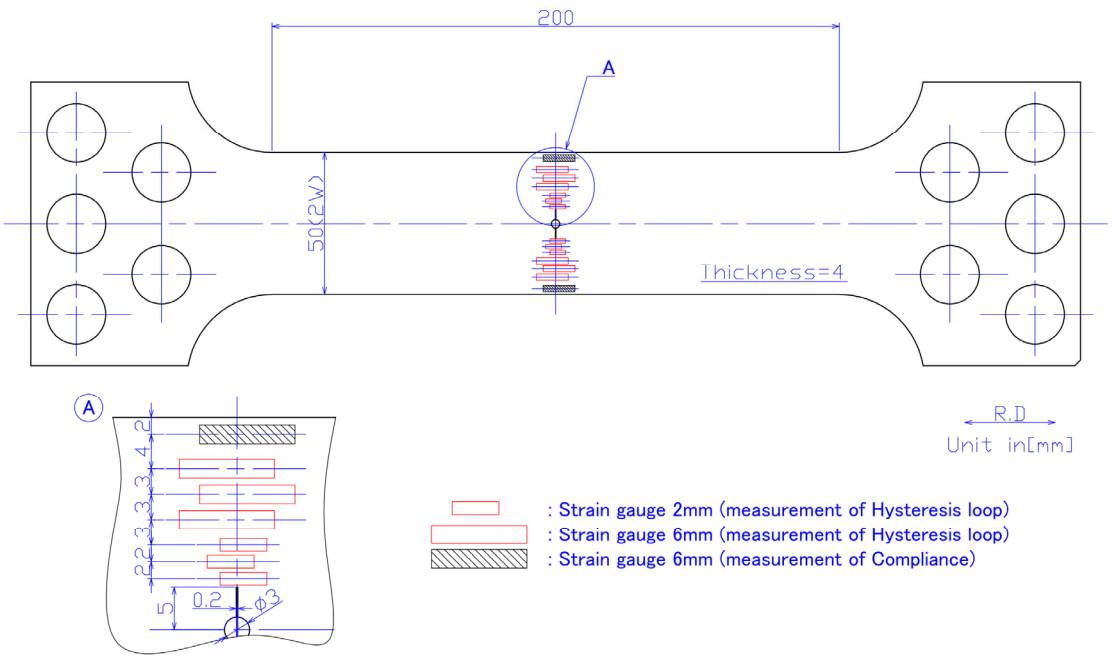
ロードセルの出力信号数の追加や，試験機の制御ソフトに動ひずみ計のコマンド機能を組込むなど一部改造は要したものの，市販品の機器で構成されたコンプライアンス自動計測機能付き疲労亀裂伝播試験システムが構築できたことにより，第 3 章で説明した引算回路等の自作装置が不要となり，データ処理に関する熟練度要求の低減が期待できる.

4.3　試験片形状とひずみゲージ組合せの特徴

Fig. 4.4 に本試験システムを利用した疲労亀裂伝播試験で使用を想定している主な試験片形状と，各試験片のコンプライアンスとヒステリシスループを測定するためのひずみゲージの貼付位置の例を示す.



a) CT type specimen.



b) CCT type specimen.

Fig. 4.4 A example specimens and strain gauges put on specimen.

ヒステリシスループ測定用のひずみゲージの貼付位置は，疲労亀裂の伝播が予想される経路上に直交する位置である．ひずみゲージのゲージ長は，亀裂発生箇所や伝播経路が特定できる場合にはゲージ長 1 mm 程度でも測定に影響はないが，亀裂伝播経路の逸脱にも対応できるように，少なくともゲージ長が 2 mm 以上のものを使用することが望ましい．なお，ゲージ長は亀裂が荷重軸に直交せずに伝播する場合を考慮して設定しているが，WES 1111 [36] で紹介している 1 シートにゲージを密に配置した応力集中ゲージなどを用いてもよい．貼付間隔は動ひずみ計のチャンネル数で決定している．

Fig. 4.4 a) に示す CT（Compact Tension）試験片を使用する場合，試験片表裏の同位置にあるゲージを Fig. 4.5 に示すような，2 アクティブ 2 ダミー法とするブリッジ回路の構成が可能となる．この方法を選択した場合，試験環境の温度変化による見かけのひずみ抑制と試験片の面外曲げをキャンセルするだけでなく，ひずみの出力感度を通常のブリッジ回路の構成に対し 2 倍に引き上げることができるために，S/N 比の改善という観点では有利となる．

同試験片の亀裂開閉口挙動は，疲労亀裂発生及び伝播の初期段階から亀裂開閉口挙動が比較的大きいため，測定データからの P_{RPG} 測定も比較的容易ではあるが，疲労亀裂の成長に伴い繰返し負荷 1 サイクル中の亀裂開閉口挙動のうち開口状態が長くなるため，P_{RPG} と亀裂開口荷重 P_{op} に明瞭な判別は困難となっていく．

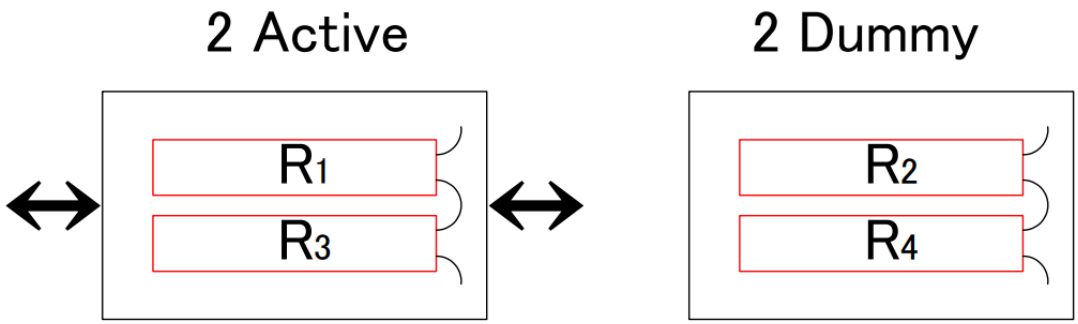


Fig. 4.5 Bridge circuit configuration of two active versus two dummy gauges.

一方，Fig. 4.4 b) に示す CCT（Center Crack Tension）試験片は Fig. 4.4 a) と比較すると，試験片表裏だけでなく切り欠き部左右の同位置にあるゲージでブリッジ回路を構成することが可能となるため，一般にゲージメーカの技術資料では紹介されていない，いわゆる「4 アクティブ 4 ダミー法」となる回路構成が可能となる（Fig. 4.6 参照）．同手法は温度保証や面外曲げのキャンセルに加え，ひずみの出力感度を通常のブリッジ回路の構成に対し最大 4 倍とすることが可能となるため，S/N 比の改善では非常に有利となる．

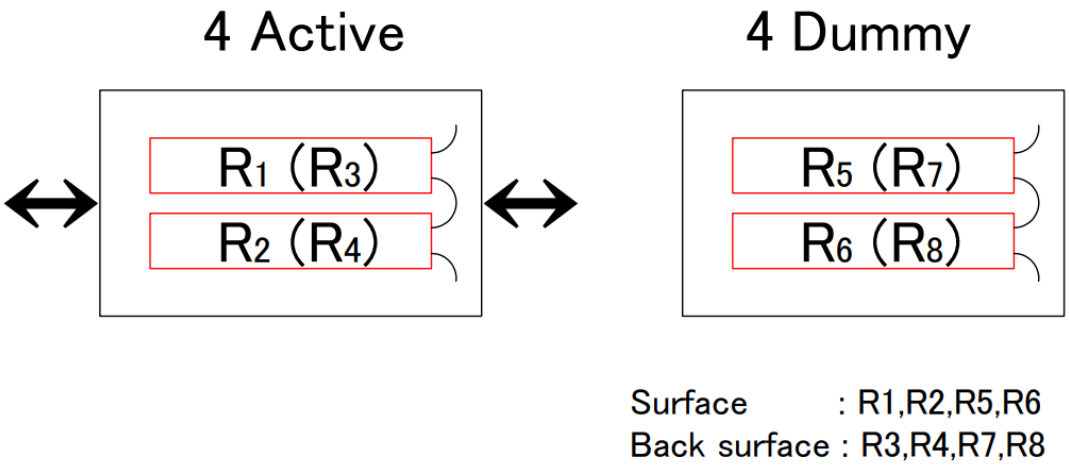
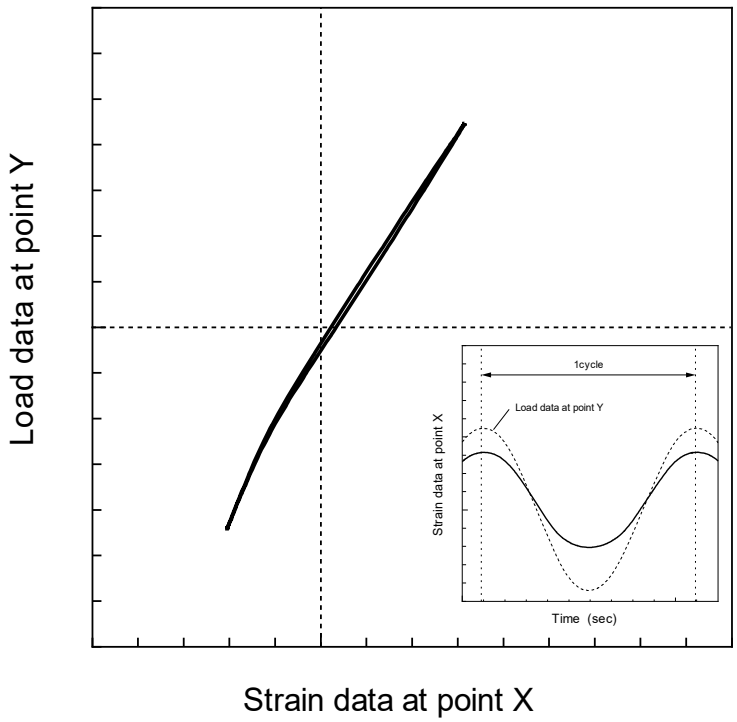


Fig. 4.6 Bridge circuit configuration of four active versus four dummy gauges.

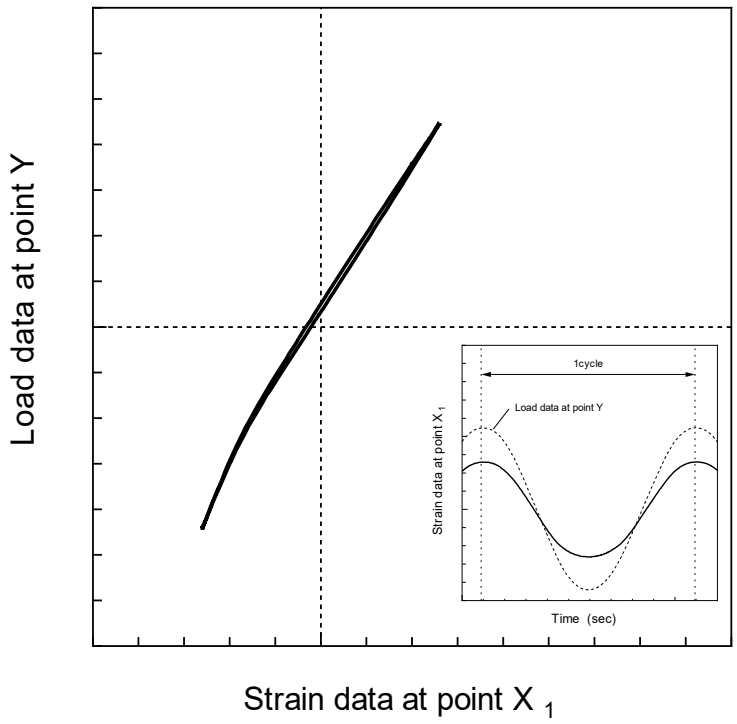
Fig. 4.4 a) に示す CT 試験片と同一の負荷応力とした場合の開閉口挙動を比較すると，繰返し負荷 1 サイクル中における疲労亀裂開閉口挙動は CT 試験片の開閉口挙動よりも小さくなるため，特に疲労亀裂の発生段階では亀裂先端近傍でのヒステリシスループは必ずしも明瞭とは言えないが，疲労亀裂伝播挙動の Stage III の直前程度まで広範囲の ΔK に渡り P_{RPG} を比較的容易に測定できる利点がある．ただし，疲労亀裂は表裏左右のノッチ部からそれぞれ発生するため，亀裂の発生と伝播のタイミングにズレが生じることがあることや，亀裂伝播方向が負荷方向と必ずしも直交しない場合があるため，試験片加工精度やひずみゲージの貼付スキル，試験機への設置時に注意が必要である．

4.4 P - ε 関係のヒステリシスループからの ε_{SUB} 処理

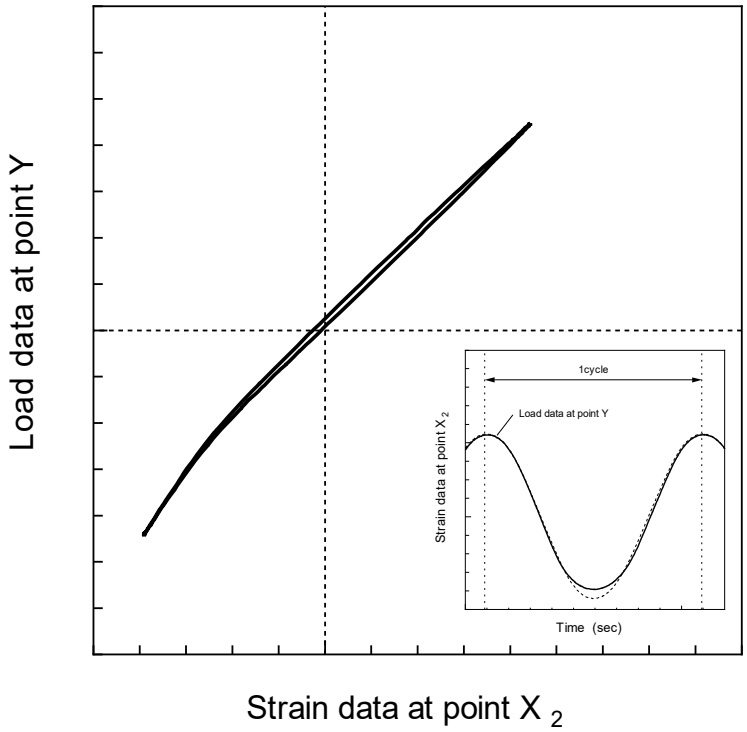
Fig. 4.7 に P - ε 関係のヒステリシスループから，除荷弾性コンプライアンス法に相当するデータ処理を行い P - ε_{SUB} 関係のヒステリシスループを描画するまでの工程を，Fig. 3.13 に示す引算回路内の経路をたどる形式を用いて説明する．



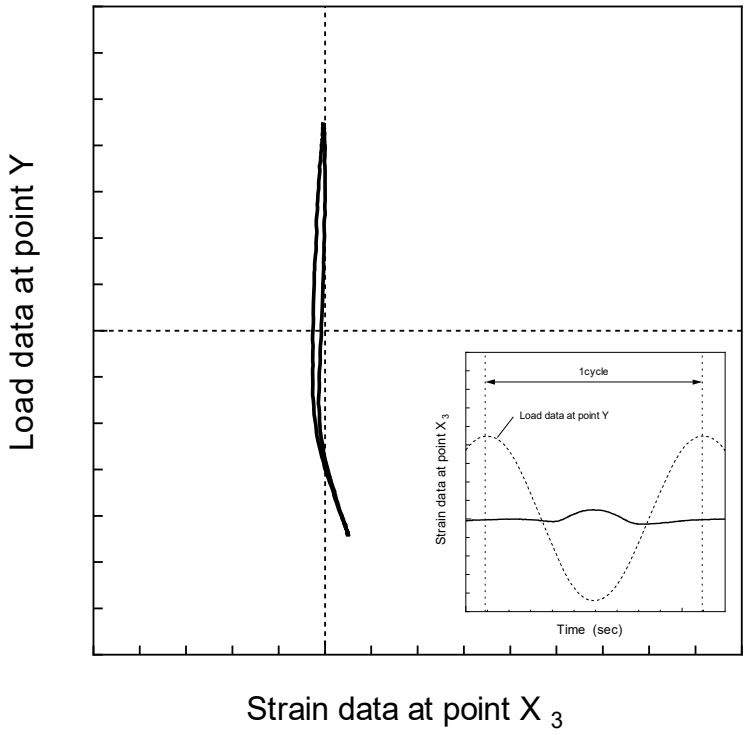
(a) Relationship between output Y and output X.



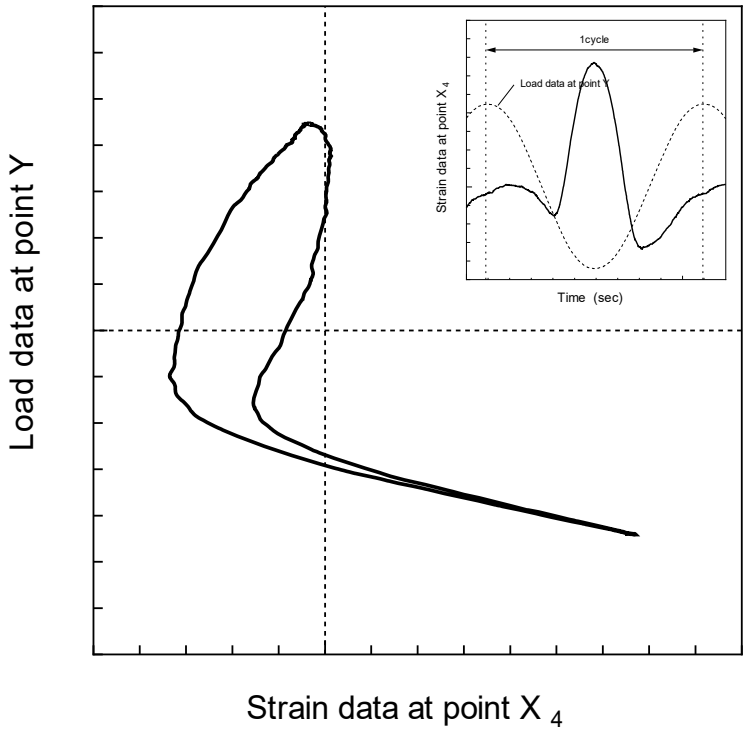
(b) Relationship between output Y and output X_1.



(c) Relationship between output Y and output X_2.



(d) Relationship between output Y and output X_3.



(e) Relationship between output Y and output X_4.

Fig. 4.7 Example for hysteresis loop determination process based upon subtracted circuit by Fig. 3.13.

(a) 測定された P - ε 関係.

(b) 除荷弾性が線形相当と判断できる領域で一次近似を求め，切片がゼロになるようにひずみ値をオフセットする.

(c) (b)で求めた近似線の傾きが 1 となるように，オフセットしたひずみ値に倍数をかける.

(d) (c)で求めた横軸のデータと荷重データの差分を行う.

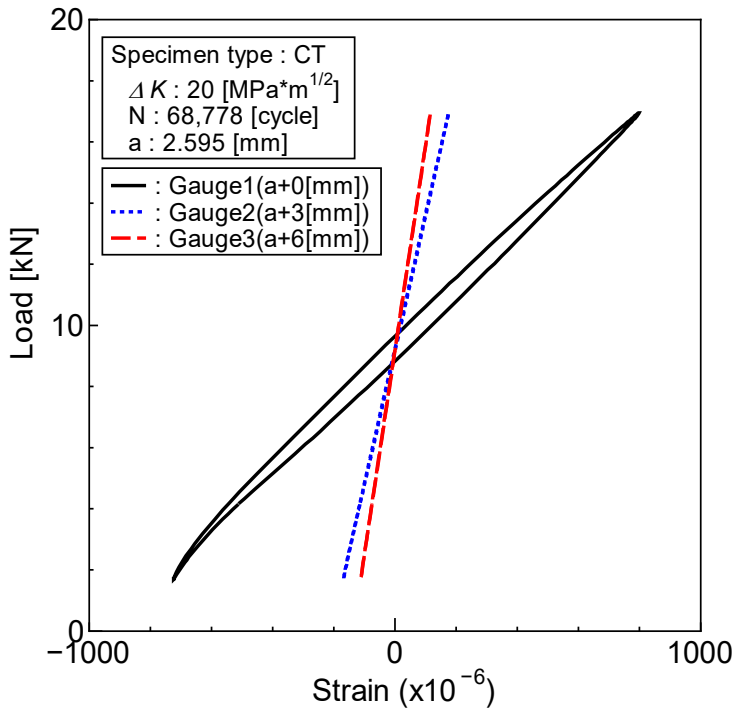
(e) (d)で求めた横軸のデータに倍数をかけた値を ε_{SUB} とする.

工程 (d) の演算データの状態では，測定されたひずみ値 (a) と比べ値が小さいため，工程 (e) に示すように演算データを適度に増幅することで ε_{SUB} とする

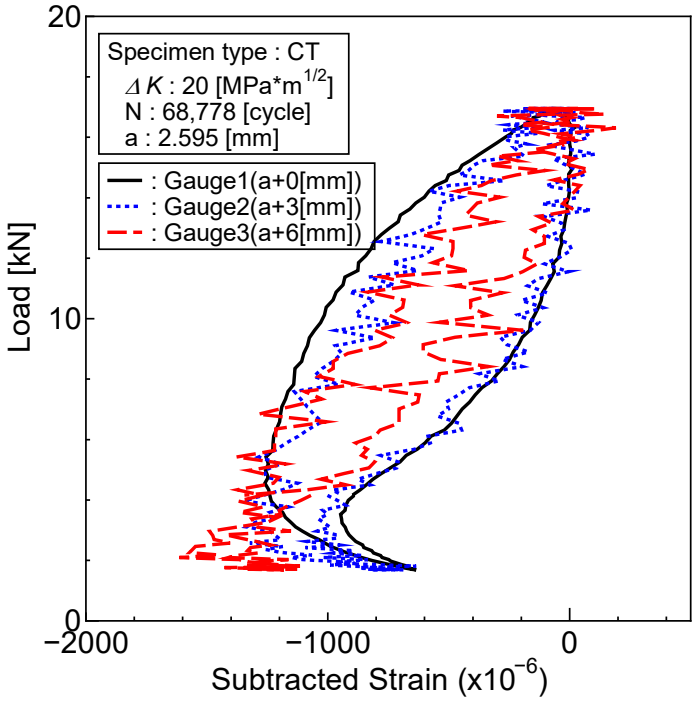
ため，P や ε の S/N 比の改善対策や A/D 変換の分解能，ひずみの最小表示値がヒステリシスループの描画結果に影響を与えることが分かる．例えば，測定されたひずみ振幅値が微小な場合，入力信号に相対的に大きなノイズが入る．A/D 分解能については，12bit と 16bit では入力信号の検出精度に 16 倍の差がある．

4.5　各ヒステリシスループの描画性能

Fig. 4.8 a) に，同一の繰返し数における疲労亀裂先端からひずみゲージの貼付位置の違う P - ε 関係のヒステリシスループの結果を示し，同図 b) に測定データを除荷弾性コンプライアンス法に相当する演算処理で得られたヒステリシスループの結果を示す．



a) Comparison of hysteresis loop.



b) Comparison of subtracted strain loop.

Fig. 4.8 Effect of different strain gauge attachment positions on the measurement accuracy of hysteresis loops.

同図より，動ひずみ計のゼロバランスを行っているため平均値は未確認であるものの，疲労亀裂先端に近いひずみゲージ（図中の Gauge1）のひずみ範囲がほぼ弾性挙動であるにも関わらず，精度良く引算回路の効果に類似した測定結果得られていると判断できる．したがって，P_{RPG} を容易に判定できると考えられるが，ひずみゲージ貼付位置が図中の Gauge2 や Gauge3 のように数 mm でも疲労亀裂先端から遠方になるだけで計測ノイズが急増し，測定されたヒステリシスループから P_{RPG} を決定することは難しくなる．これらは試験システム全体の S/N 比対策の程度に依存するが，可能な限り疲労亀裂先端近傍で繰返しひずみを測定する必要性を示唆している．そこで，ひずみゲージは WES 1111 [36] に示されている応力集中ゲージを用いるのも効果的である．

測定時の S/N 比の改善対策ではなく，取得した測定データを FFT や移動平均などの手法にて補正する方法では，ヒステリシスループの形状自体が変形する現象が散見されるため計測後の補正は望ましくない．ただし，Paris 則が成立する領域において，数サイクル程度では疲労亀裂の成長やヒステリシスループの形状に明らかな違いは見受けられないため，S/N 比を改善する目的として 10 サイクル程度のヒステリシスループの平均化を行うことで，スパイクノイズが低減される．波形の平均化は P_{RPG} の判定が容易となるが，著者のこれまでの経験では，数十サイクル以上の平均化を試みても S/N 比の改善効果は期待できないことを確認している．

4.6 結言

P_{RPG} を同定するためには，P - ε 関係のヒステリシスループか，P - ε_{SUB} 関係のヒステリシスループを精度良く取得する必要がある．豊貞らが開発した高精度コンプライアンス計測装置を組み込んだ疲労亀裂伝播試験システムは引算回路

の利用が不可欠であることと，開発から 30 年近く経過していることもあり機器の維持管理が困難な状態にあった.

そこで, 自作の引算回路を組込まずに, パソコンと市販の機器のみで豊貞らの試験システムと同様な試験制御や測定結果が得られる, 荷重や変位, ひずみの自動計測が可能な疲労亀裂伝播試験システムを開発した.

ただし，P_{RPG} を同定するためには，熟練者による処理作業が必要となる課題は残っているため，この処理の自動化に関して次章で検討する.

第５章

RPG 荷重自動判定手法の構築

5.1　緒言

前章では，RPG 荷重 P_{RPG} を決定するために必要な繰返し負荷中のコンプライアンス変化を自動的に測定可能な，市中で容易に調達可能な機器から構成される疲労試験システム（以下,「試験システム」）を構築した．この試験システムでは引算回路を使用せずとも除荷弾性コンプライアンス法 [22] のアルゴリズムに従ったヒステリシスループを得ることが可能である．

RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} をパラメータとする疲労亀裂伝播則（$da/dN = C_2 (\Delta K_{RPG})^{m_2}$）を適用するためには，疲労亀裂伝播試験を実施して P_{RPG} を測定し，この結果に基づいて伝播則の材料定数 C_2，m_2 を決定することが必要である．第 3 章で述べたように，P_{RPG} の判定法には 2 種類あるが，P_{RPG} だけでなく亀裂開口荷重 P_{op} も同定可能なのは反転法だけである．それぞれの値の同定精度はヒステリシスループそのものの測定精度に影響を受けるため，実験データの S/N 比の影響が小さい反転法の適用が望ましい．しかしながら反転法では，ヒステリシスループ（正転ループ）とこれの符号を反転させたヒステリシスループ（反転ループ）を手動で重ね合わせ，正転ループの負荷弾性範囲のうち，両ループの重なりが解消され始める点として P_{RPG} を判定する作業が必要である．このため，重ね合わせ作業に対する作業者の熟練度に影響を受けるという問題

点がある．加えて長期間に測定された疲労試験の全データを手動で処理するため，膨大な労力が必要となる．

本章では実験データの処理結果が人的要因による影響を受けることなく，かつ作業労力を軽減することで，RPG 荷重基準の疲労亀裂伝播則の適用を拡大する．そのため，実験データの S/N 比の影響を比較的受けにくい反転法を用いて，P_{RPG} の判定作業を自動で実施する方法を提案するとともに，ΔK_{RPG} をパラメータとする疲労亀裂伝播則の材料定数のばらつきに対する許容範囲を調査した．

5.2　疲労亀裂伝播試験

試験片は，疲労亀裂先端に CT 試験片のように亀裂進展に伴い誘起される回転曲げの影響がない CCT 試験片を用いた．試験片寸法は試験機の載荷能力 50 kN を考慮して，主に Fig. 4.4 b) に示すような全幅 50 mm，板厚 4 mm とし，幅 0.2 mm，試験片幅中心から長さ 5 mm（全長 10mm）のスタートノッチをワイヤー放電加工により施している．ただし，幅中心部にはワイヤーを通すために直径 3 mm の穴を設けている．ヒステリシスループの測定には同図に示すように，試験片表裏面の疲労亀裂伝播経路上の左右に貼付したゲージ長 2 mm および 6 mm の接触式抵抗線ひずみゲージを含む Fig. 4.1 に示す試験システムを用いて，1 サイクル 200 点ほどのデータを数千サイクル毎に取得している．なお，ひずみ測定に関しては，疲労亀裂先端に最も近い表裏左右それぞれの伝播経路上にある同位置のゲージの平均ひずみ値を取得しているため，何れかのゲージが破断した場合，疲労亀裂先端から次に遠い同位置のゲージを用いた測定となる．そのため，ゲージと疲労亀裂先端との距離はゲージが切り替わるごとに貼付したゲージの間隔により数 mm～0.1 mm 程度の範囲で変化するため，ひずみ振幅は 10^{-4}～10^{-3} のオーダで変化することを考慮し，ひずみ値は 10^{-7}～10^{-6} のオーダの分解能で

測定している．

繰返し一定荷重振幅試験により取得した荷重 P－ひずみ ε 関係に除荷弾性コンプライアンス処理で得た正転ループと，符号を反転した反転ループを同時に描画し，正転ループの負荷弾性範囲内の両ループに共通するコンプライアンス変化部分を重ね合わせることで，P_{RPG} 等を判定する（Fig.3.12 参照）．

これら両ループに基づき，反転法を用いた P_{RPG} と P_{op} 判定までの流れを次節で説明する．

5.3　手作業による重ね合わせ

ヒステリシスループの形状は，除荷弾性と判断する範囲や亀裂長さ，材料等の違いにより一義的に定まらない．両コンプライアンス変化の一致判断には作業者の経験が特に重要となるが，ループ形状の違いはあるものの，重ね合わせ時に正転ループの負荷弾性範囲に重ねる反転ループの除荷弾性範囲を，正転の範囲のできるだけ下限側に注視して重ね合わせるとよい．これは 3.3 で説明したように，負荷時の弾性範囲内における亀裂開口開始荷重付近から再引張塑性域形成荷重に至るまでの挙動が，除荷弾性範囲内の亀裂の開口状態から閉口開始に至るまでの領域のコンプライアンス変化と一致する範囲に相当することを意味している．重ね合わせ時の注意点としては，反転ループのプロットデータを正転ループと同一座標で表した場合，両ループの同一引算ひずみ値における反転ループの除荷側の荷重値が，正転ループの負荷側の値よりも下限値とならないことへの配慮が必要である．

一方，反転法を手動で行うと正転，反転ループの重ね具合が作業者により異なり，処理結果にバラツキが生じることが多々ある．これは同一試験中における亀裂の発生や伝播過程でのヒステリシスループが変化する [69] ことに加え，測定デ

ータに含まれるノイズや評価素材，試験片形状，負荷応力などの違いが疲労亀裂開閉口挙動を表すヒステリシスループの形状に影響を与えるためである．その結果，データ処理結果に熟練具合が影響を及ぼす．

5.4 P_{RPG} および P_{op} の自動判定

5.4.1 自動重ね合わせのアルゴリズム

Fig. 5.1 に P_{RPG} を自動決定するまでのデータ処理フローを示す．フローは主に (1) データのノイズ改善，(2) ループの重ね合せと重なり具合の判定，(3) RPG 荷重，Open 荷重の判定で構成されている．プログラムは将来，データ処理の経験を機械学習できるアルゴリズムを活用することで，複数の材料や試験片形状に依存しない定量的なデータ処理を実現することを念頭に，Python と各種データサイエンスライブラリがパッケージングされている Python ディストリビューションの Anaconda [70] を使用して構築した．なお，プログラム開発当時の Python のバージョンは 3.7.0 である．

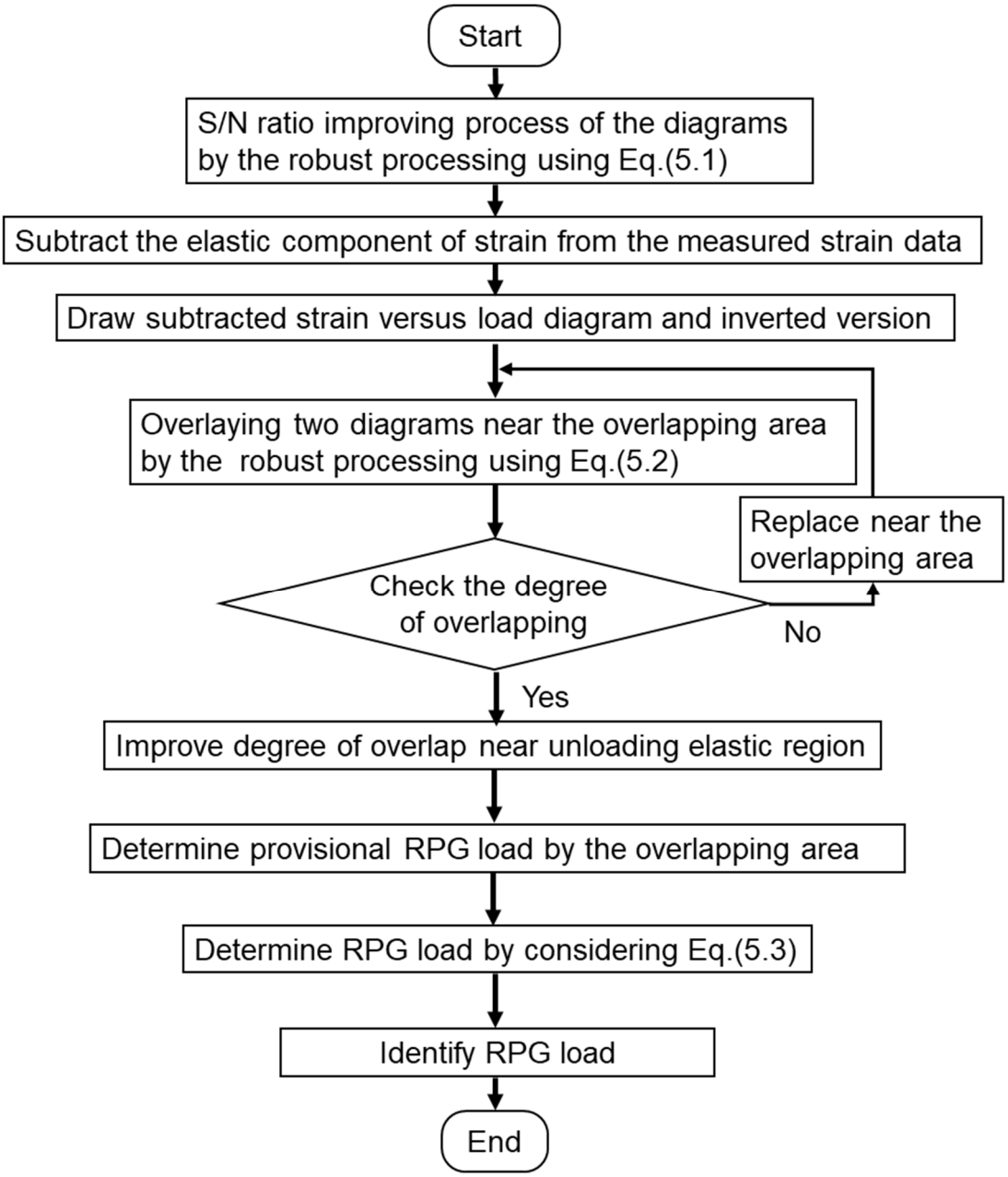


Fig. 5.1 The flow chart of Automatic measurement.

P_{RPG} の自動判定にあたっては，データ処理の熟練度に直結するチューニングパラメータの使用を最小限に抑えつつ，使用するアルゴリズムは Python に提供されている関数の使用で実現することに注力した．最終的に Python に提供されている関数のみで開発を行ったが，正転，反転ループの重ね合わせ作業が容易に

自動化され，かつ両ループの一致度が作業者に依存しない荷重値を得ることができた．

反転法を対象とした自動処理では，正転ループを最小二乗法等により関数近似し，これを反転させた反転ループとを自動で重ね合わせることで，正転および反転ループにおける除荷弾性コンプライアンス変化が一致する領域を探し，この結果から P_{RPG} を判定する．なお，P_{op} の判定についても同手法の援用を試みている．

5.4.2　重ね合わせの関数と判定方法

正転および反転ループには，測定時のノイズが多く含まれる場合もあるため，両ループの重ね合わせに支障をきたす場合がある．そのため，正転ループの関数近似には単なる最小二乗法ではなく，ロバスト推定手法の一種である Biweight 推定法 [71] を適用することで近似の改善を行った．

Biweight 推定法は誤差が大きい場合には重みを小さくして例外値の影響を小さくする手法であり，この操作のために（5.1）式に示す重み関数を考慮する．

$$w_a(d_i) = \begin{cases} 0 & (d_i < -W_a, W_a < d_i) \\ \{1-(d_i/W_a)^2\}^2 & (-W_a \le d_i \le W_a) \end{cases} \tag{5.1}$$

$w_a(d_i)$:　重み関数,

d_i:　誤差,

i:　データ番号（i=1~6）,

W_a:　$d_{(j)max}$，$d_{(j-1)max}$,

$d_{(j)max}$:　最小二乗近似を行うデータ群での最大誤差,

j:　収束計算回数.

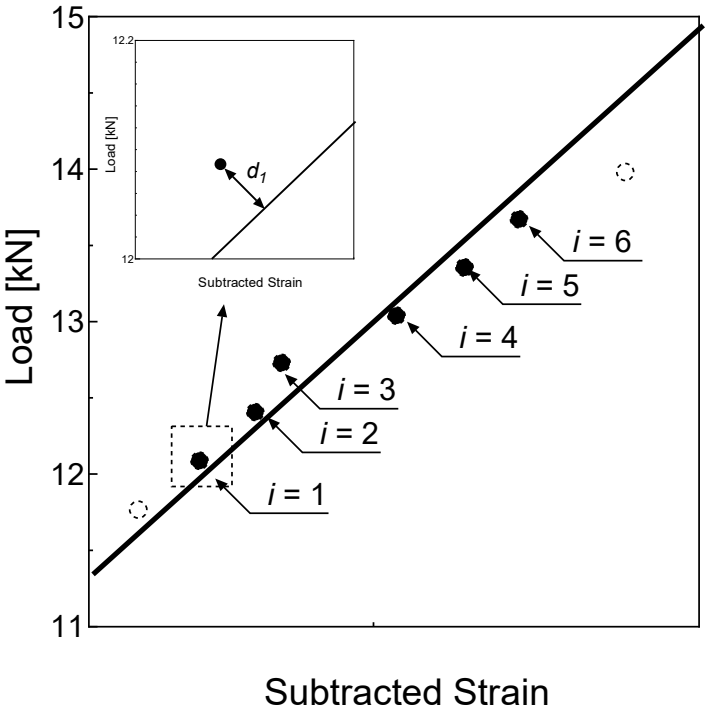
ここで，Biweight 推定法に基づいた重みを付与したデータに最小二乗法を適用し，正転ループを構成するデータの連続した 6 点を一つのデータ群として取り扱い，そこから 1 点ずつ順次ずらしたデータ群に対して Fig. 5.2 に例示する処理を行った．具体的な処理手続きは以下の通りである．

(i) Fig. 5.2 a) に例示するように，データ群を最小二乗法で近似し，（5.1）式中の d_i を決定する．ここで，一つのデータ群の中で最も大きな d_i を $d_{(j)max}$ とし，（5.1）式中の W_a としている．

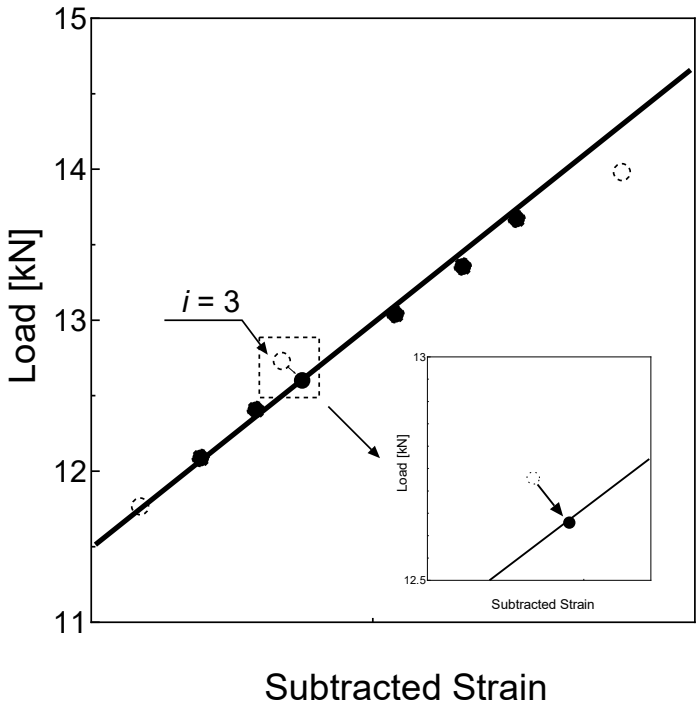
(ii) （5.1）式により算出した重みを考慮し， 各データ群の近似直線の傾きと切片が収束するまで繰返し計算する．このとき，W_a は一つ前の収束計算で決定した $d_{(j-1)max}$ として更新する．

(iii) 収束後，Fig. 5.2 b) に示すように，近似線データ群中の中央付近にある 3 番目の並びのデータを近似直線上に垂直距離移動させる．

(iv) 荷重の並びに対して i を整理し直す．



a) Before convergence.



b) After convergence.

Fig. 5.2 Smoothing of hysteresis curve by the weighted least square approximation.

最小二乗法に用いるデータ群を構成するデータ数の決定は，3～11 点を各単位とした収束結果と処理前の正転ループの形状を目視で比較し，P_{RPG} および P_{op} と想定される近傍の近似結果より判断している．今回は 10Hz の繰返し一定荷重振幅試験に対し，100Hz のローパスフィルターを用いて，1 サイクルあたり 200 点の取得データを一例としてデータ群の最適単位を決定しているが，(iii) の処理のままでは，特に荷重の極性が変わる付近で荷重値とデータの並びが入れ替わる場合があるため，(iv) の処理を追加で行うことでデータの順序の整合性を保ちつつ，後述するデータ処理に影響がないことを確認している．

正転及び反転ループのコンプライアンス変化が一致する領域の探索には，Anaconda に標準装備されている科学技術計算ライブラリ Scipy [72] の optimize.least_squares 関数を用いた．同関数のアルゴリズムについては解説サイト [73] に譲る．

Fig. 5.3 は実際の疲労亀裂伝播試験により測定されたヒステリシスループより，除荷弾性コンプライアンス法にて得たヒステリシスループを元にコンプライアンス変化の考察に従って，正転，反転ループによる重ね合せを行った部分のうち，Fig. 3.12 で示す P_{RPG} および P_{op} 付近の拡大図の一例であり，同図を用いて探索プロセスを説明する．Fig. 5.3 a) に探索状況を示すが，正転ループの負荷側と反転ループの除荷弾性荷重付近のデータを（5.2）式に示す Biweight 推定法で重みを付けた値とし，前述の関数にて非線形最小二乗最適化を行う．もしここで最適な一致状態とならない場合は，両ループを（5.2）式の W_b 以下となるデータ範囲に引き算ひずみの範囲を減らしながら，正転ループに対する反転ループの相対移動量が収束するまでフィッティング処理を繰返す．その後，フィッティングの微調整を行うために，Fig. 5.3 a) に示すように一致探索完了後の両ループの最小引算ひずみ値の座標が揃うように反転ループを移動させ，このときに生じた両

ループが交錯する領域を有効探査範囲とし，上限値と下限値の間のデータのみで再度，前述の Biweight 推定法にて両ループを重ね合わせることで，Fig. 5.3 b) に示すように，手作業の工程と同様に精度良く一致領域を特定することが可能である．

以上の手法により，従来，手作業で行う必要があった正転，反転ループの重ね合せを自動で行うことが可能となった．

$$w_b(d_{l,m}) = \begin{cases} 0 & (d_{l,m} < -W_b, W_b < d_{l,m}) \\ \left\{1 - \left(d_{l,m}/W_b\right)^2\right\}^2 & (-W_b \leq d_{l,m} \leq W_b) \end{cases} \tag{5.2}$$

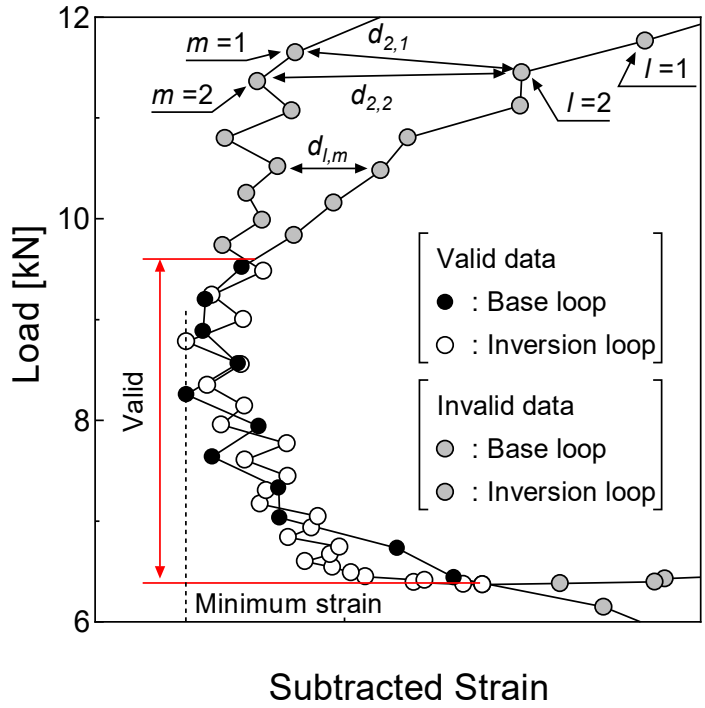
$w_b(d_{l,m})$: 重み関数,

$d_{l,m}$: 各点の距離,

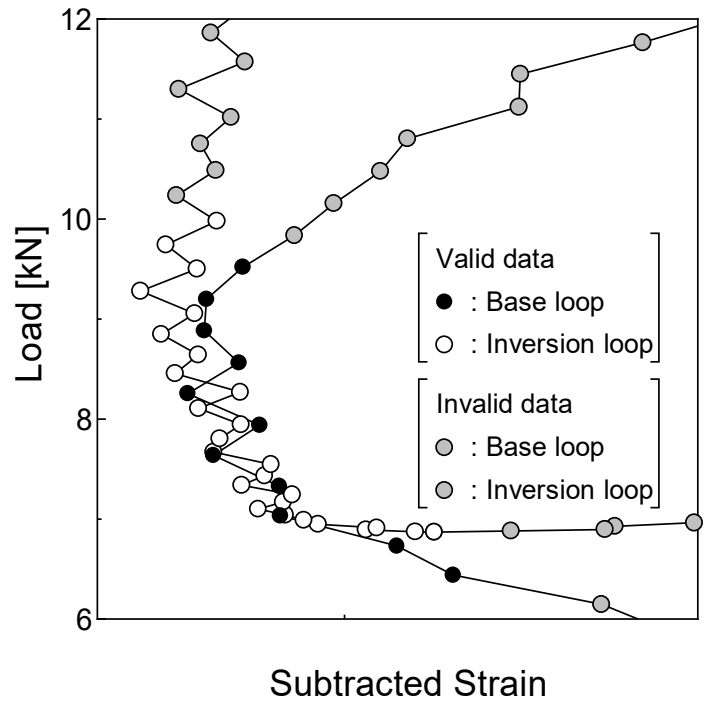
l: 正転ループのデータ番号,

m: 反転ループのデータ番号,

W_b: 重みの設定範囲，全 $d_{l,m}$ の平均値.



a) Before convergence.



b) After convergence.

Fig. 5.3 Schematic illustration of the base and inversion hysteresis loops matching procedure.

5.4.3　P_{RPG} と P_{op} の判定方法

反転法において，正転，反転ループの重なりにずれが生じ始める点として定義される P_{RPG} について，（5.3）式に示す条件より両ループの離反点を決定する．P_{RPG} の判定に際し両ループに重畳するノイズの影響により，局所的に正転と反転ループが判定条件を満たす範囲内に接近した場合，真の値に対して大きな誤差を含んでしまう可能性が生じる．そこで，反転ループの除荷弾性範囲相当内における正転ループの荷重範囲のひずみ値に（5.3）式の条件を考慮することで，P_{RPG} 判定の誤差を抑制した．

Fig. 5.4 a) は P_{RPG} 判定に関する一例であるが，ある条件の閾値を満たす最大荷重値を P_{RPG} としている．なお，（5.3）式中の D_U は，除荷弾性範囲における正転，反転ループが交錯する範囲内での最大の引算ひずみ幅であり，ノイズの大きさを表す指標である．ここで，（5.3）式の閾値を満たす荷重内の最小値を P_{op} として採用した．

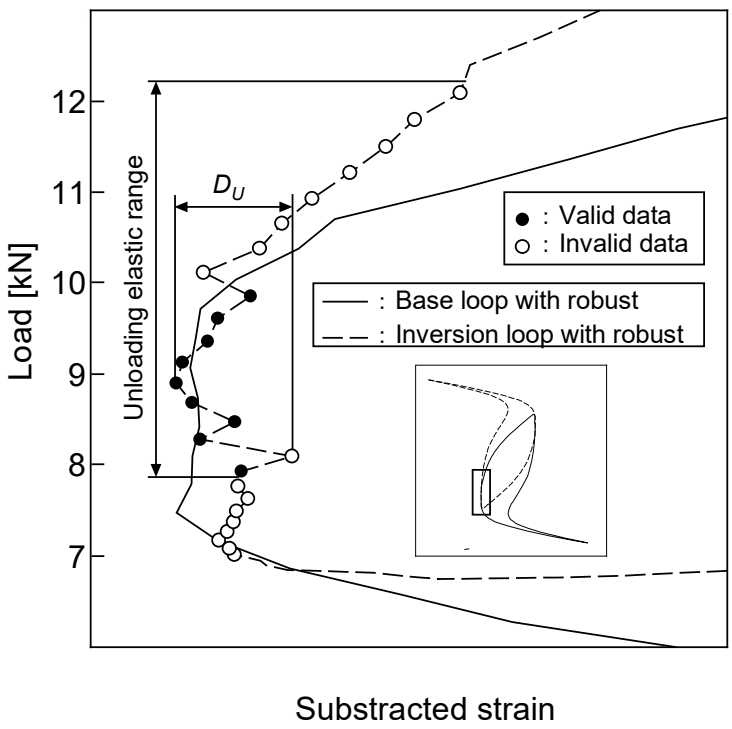
$$T_{RPG},\ T_{Open} = \left\{1 - \left(\frac{D_f - D_{r(i)}}{D_U}\right)^2\right\}^2 \tag{5.3}$$

T_{RPG}, T_{Open}：　P_{RPG} ，P_{op} 決定のための閾値，

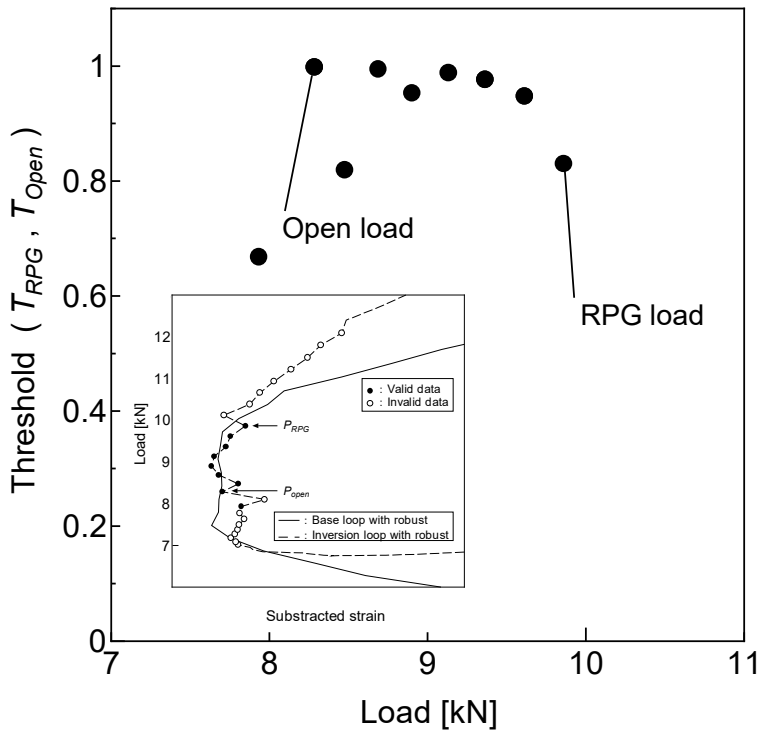
$D_{r(i)}$：　反転ループの i 番目のコンプライアンス値，

D_f：　$D_{r(i)}$ と同じ荷重レベルでの正転ループのコンプライアンス値，

D_U：　除荷弾性範囲の最大引算ひずみ幅．



a) Schematic illustration of the overlapping aria.



b) Determination of RPG and Open loads.

Fig. 5.4 Determination of RPG Load by the threshold values.

Fig. 5.4 b) は P_{RPG} 判定に及ぼす閾値 T の条件を確認した一例である．反転法を用いた P_{RPG} の手動判定によるこれまでの経験では，データに含まれるノイズ影響に対して両ループ全体を視認した考慮にて重なり判定を行っていた．本手法では，両ループ毎に異なるノイズ影響に関する T について，Table 5.1 に示すように後述する過去の実験結果と比較して得られた値に設定することで，これまでの手動判定と同程度の判定結果が得られることを確認できた. ここで T は，1 に近いほどノイズを含む両ループの離反距離に敏感で，数値が低いと寛容であることを意味するが，P_{RPG} 判定の際，両ループの位置関係により許容範囲が変わる結果となる．

Table 5.1 The threshold values of RPG and Open Load.

	$D_f - D_{r(i)} > 0$	$D_f - D_{r(i)} < 0$
T_{RPG}	0.5	1.0
T_{Open}	0.9	0.95

T を適切に設定することで，Biweight 推定法を適用しても十分に除去できなかったノイズ影響をできる限り排除した P_{RPG} の判定が可能となった．なお，反転法による P_{op} の自動判定にも同様な閾値を設定することで適用可能であると考えられる．

5.5 供試材および手作業との結果比較

5.5.1 P_{RPG} と亀裂長さの関係

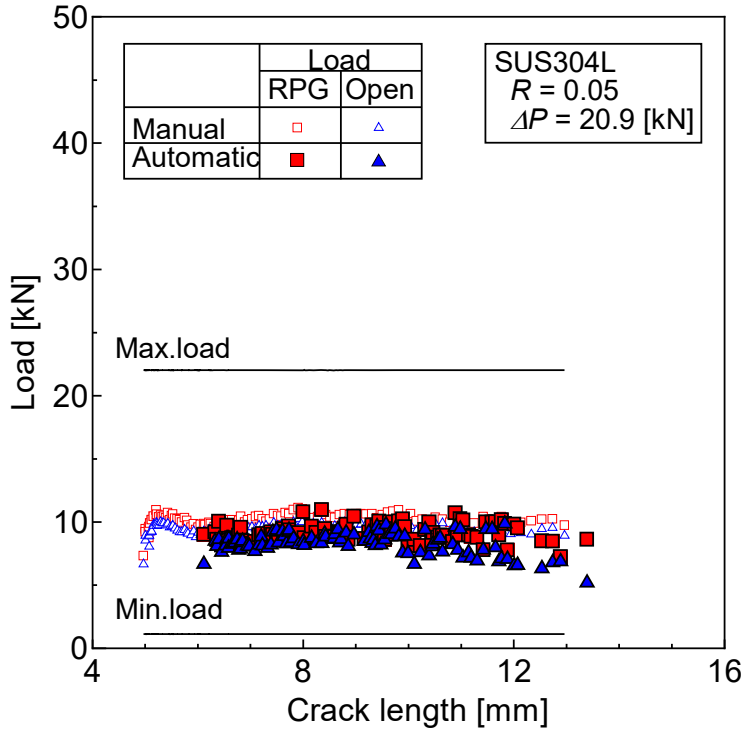
P_{RPG} および P_{op} の自動判定手法の妥当性を検証するため，Table 5.2 に示すような過去に複数の材料及び複数の応力比条件下で実施された疲労亀裂伝播試験

[74)-76)] において反転法（手動操作）により測定された P_{RPG} と P_{op} に関して，反転法自動処理により再度両荷重値を算定し，既報の手動判定による値との比較を行った結果を Fig. 5.5，Fig. 5.6 に示す．ここで，Table 5.2 に示す 18G2A 鋼（降伏応力 398 MPa，引張強さ 590 MPa，伸び 57 %）は Poland 規格の溶接構造用鋼（PN-H-84018 : 1986）であり，豊貞らの試験システムにて取得している．

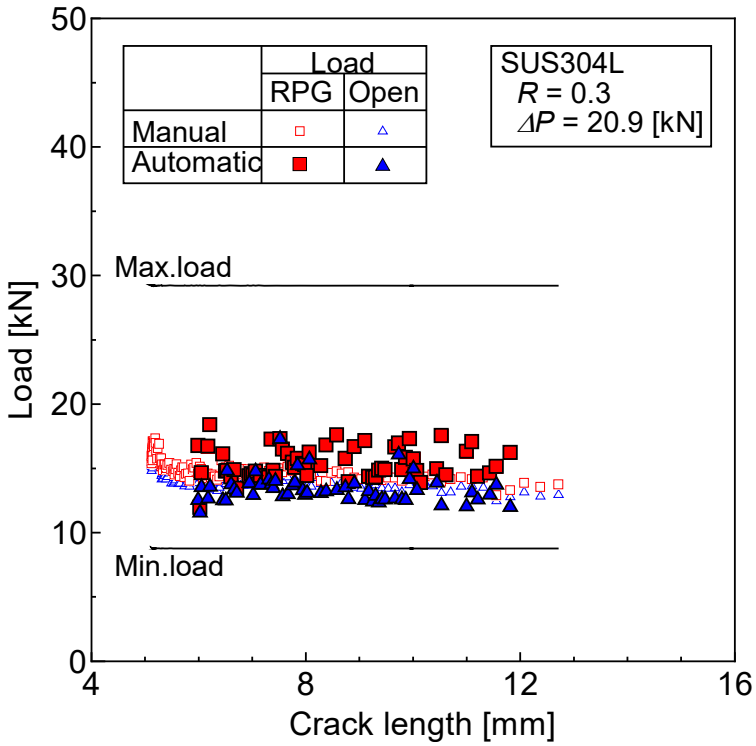
Table 5.2 Mechanical properties and specimen configuration used.

	SUS304L	18G2A	SUS316LN	A5083-O
Mechanical properties				
Yield stress [MPa]	282	397	402	183
Tensile strength [MPa]	574	540	678	335
Specimen configuration				
Specimen type	CCT			
Width ($2w$) [mm]	50	100	50	50
Thickness (t) [mm]	4			
Start notch ($2a$) [mm]	10	16	10	10
Frequency [Hz]	10			

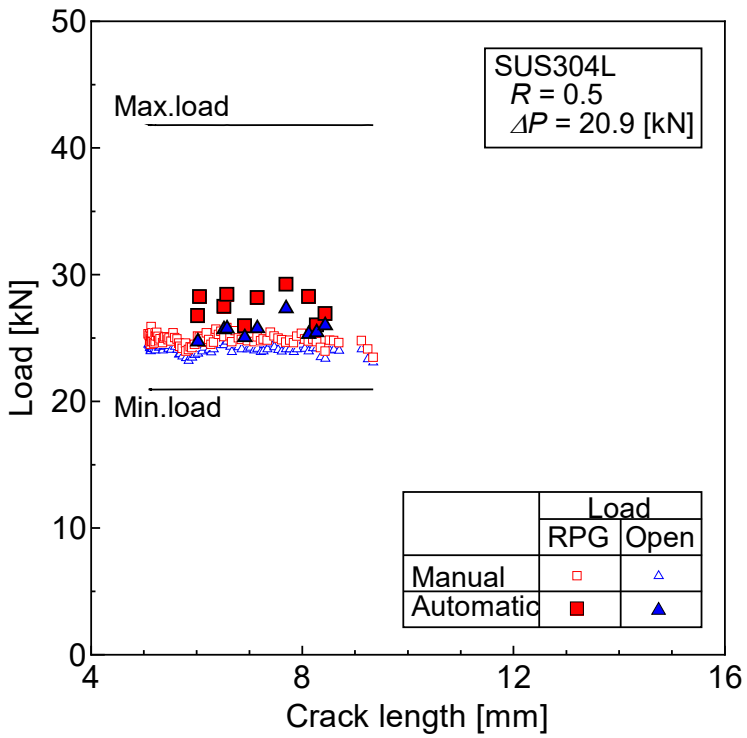
Fig. 5.5 は供試材料の代表的な応力比のみ掲載している．P_{RPG} は荷重振幅を揃えた場合，応力比の違いにより絶対値は異なった値を示すが依存性がない [37)] ため，他の応力比の掲載は省略している．確認した限りにおいて，材料や負荷応力比に関わらず P_{RPG} と P_{op} を良好に推定できている．


Load
RPG
Open
Manual
Automatic
SUS304L
R = 0.05
ΔP = 20.9 [kN]
Max.load
Min.load
Load [kN]
Crack length [mm]
0
10
20
30
40
50
4
8
12
16

a) R= 0.05.

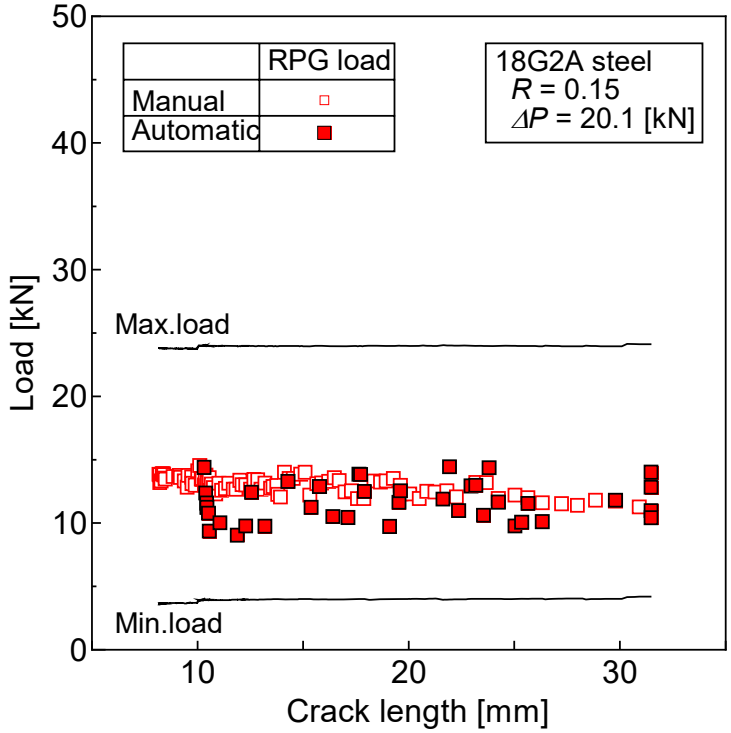

Load
RPG
Open
Manual
Automatic
SUS304L
R = 0.3
ΔP = 20.9 [kN]
Max.load
Min.load
Load [kN]
Crack length [mm]
0
10
20
30
40
50
4
8
12
16

b) R= 0.3.

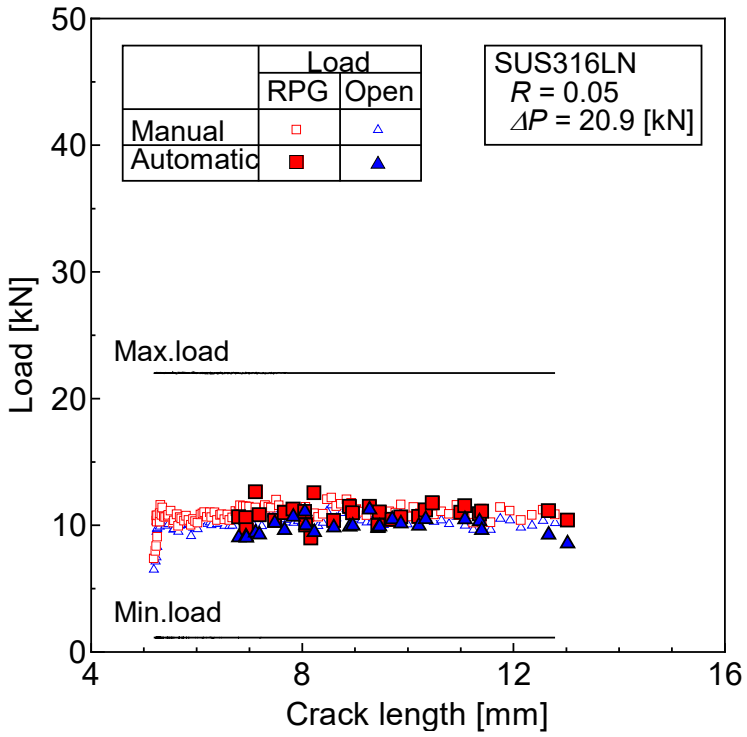


c) R= 0.5.

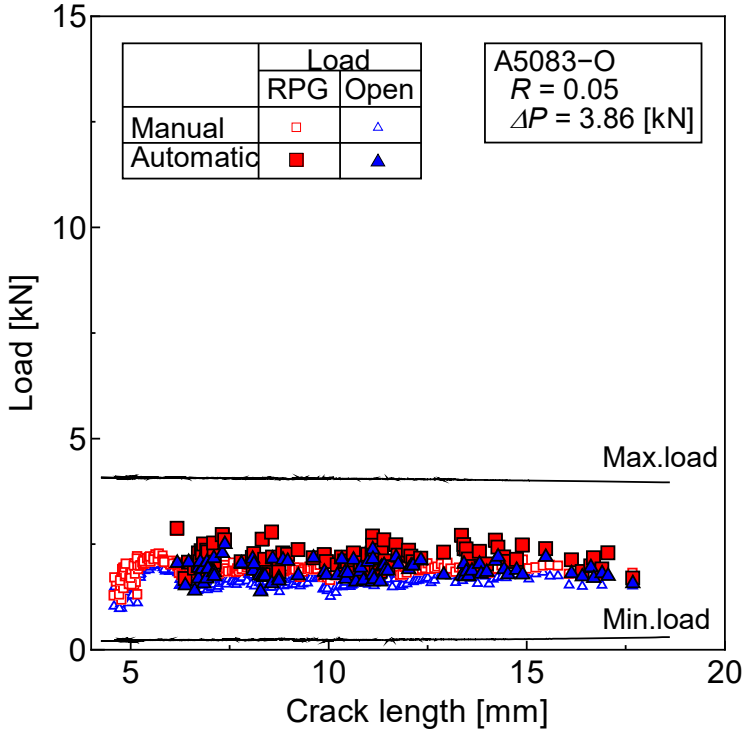
Fig. 5.5 Comparison of RPG loads by automatic and manual measurements technique under several stress ratio (R) conditions (Material: SUS304L).



a) Polish Standard 18G2A (S355J0) Steel.



b) SUS316LN.



c)　A5083-O.

Fig. 5.6 Comparison of RPG load between automatic and manual measurements technique for various metal materials.

Fig. 5.5，Fig. 5.6 から判断する限りにおいて，P_{RPG}，P_{op} ともに手動判定と比較して数 kN のバラツキが見られるが，後述する 5.5.2 項の結果がほぼ同等であるため，この程度の値の相違は許容できるものと考える．

5.5.2　疲労亀裂伝播特性

Fig. 5.5 に示す自動判定により求めた P_{RPG} より，（1.6）式に示す ΔK_{RPG} 基準による疲労亀裂伝播則の C_2，m_2 を求めた結果の一例を Fig. 5.7 に示す．

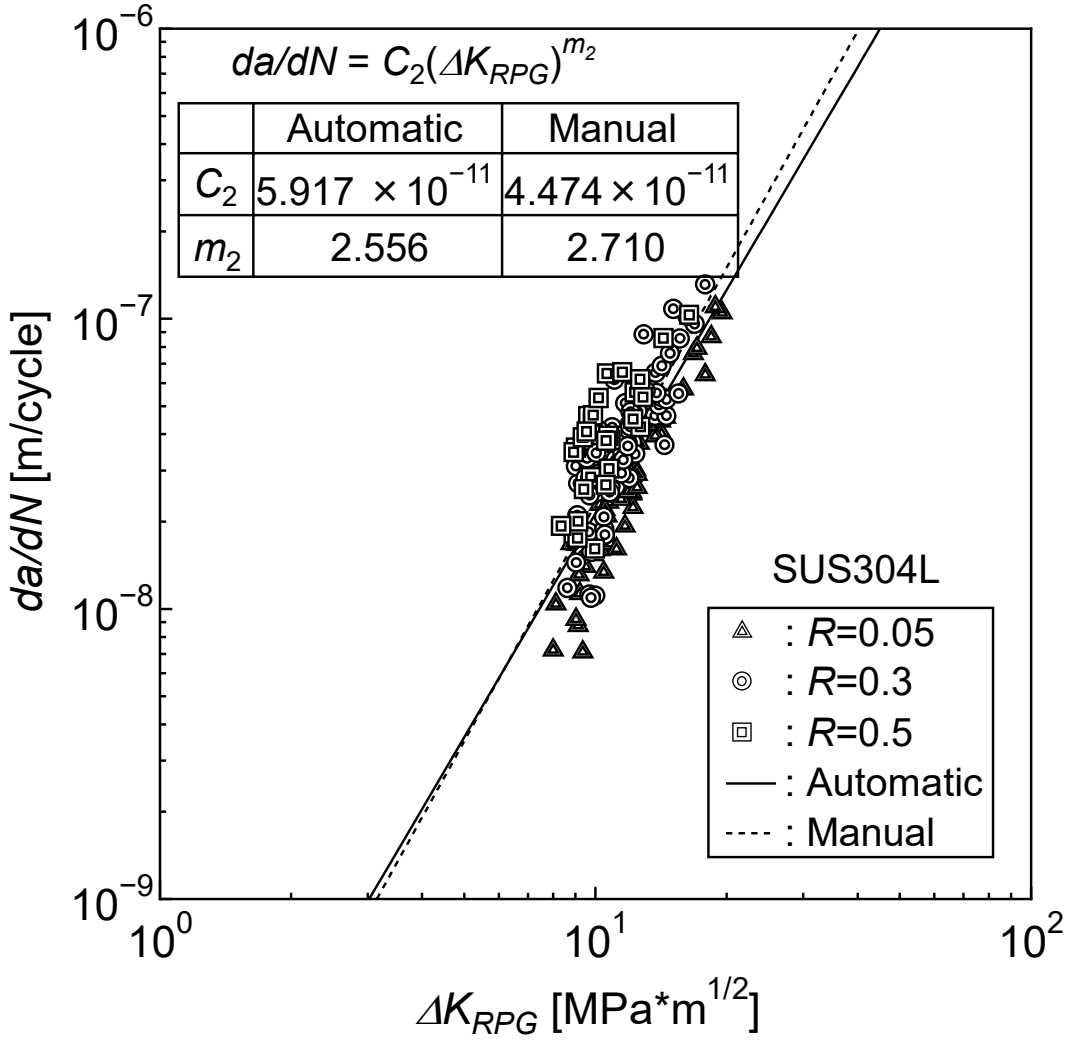


Fig. 5.7　Comparison of da/dN-ΔK_{RPG} by the automatic measurement at SUS304L.

同図より，自動判定による P_{RPG} に基づき決定した C_2，m_2 は，過去に手動判定した P_{RPG} に基づき決定した結果と近い値を示している．

そこで，自動判定による材料定数と過去に実施した手動判定による材料定数を用いて，疲労亀裂伝播成長シミュレーション FLARP[37] を行い，亀裂成長曲線を求めた結果を Fig. 5.8 に示すが，当然の結果ではあるが，疲労亀裂成長履歴の推定結果もほぼ同程度のものが得られた．

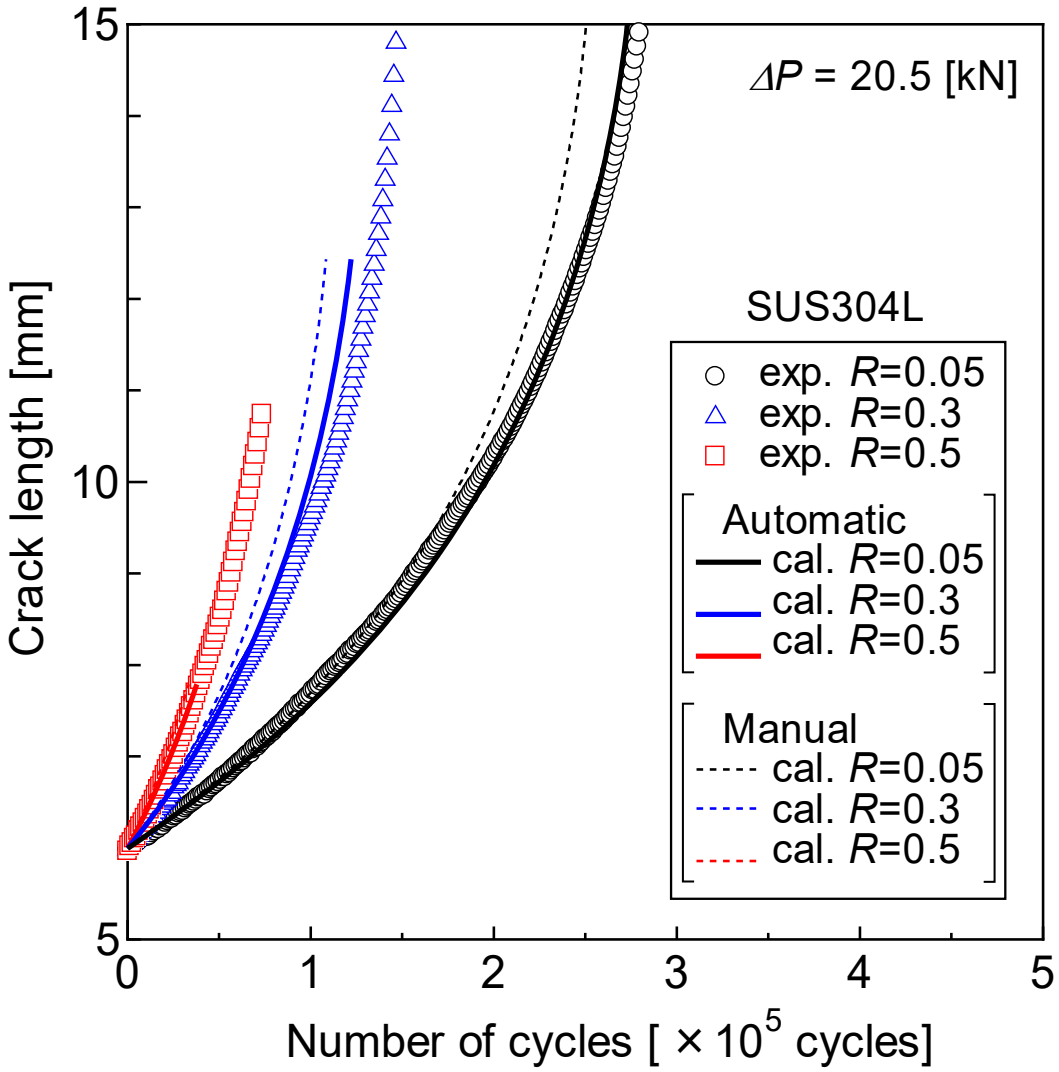


Fig. 5.8 Comparison between estimated fatigue crack propagation histories with measured value at SUS304L.

これらの結果より，自動判定により得られた P_{RPG} はこれまでの手動判定結果と同等のものが得られると判断できる．

5.6 結言

RPG 荷重基準に基づく疲労亀裂伝播則は，特に変動荷重履歴下における優位性を有しているため，大型溶接構造物の疲労亀裂伝播履歴推定に一層活用され

ることが期待される．

一方，供試材料に対してこの伝播則における材料定数を同定するには，同種材料により疲労亀裂伝播試験を実施し，亀裂伝播に応じた P_{RPG} の変化履歴の測定が必要不可欠である．加えて，P_{RPG} の判定には作業者の育成を要するという問題点が残されていたが，P_{RPG} を自動判定する手法の構築により，一定荷重振幅における複数の鋼材で作業者に依存しない P_{RPG} 値を取得することが可能となった．これにより，ΔK_{RPG} をパラメータとする伝播則が広く活用される可能性が広がった．

第６章

切欠底から発生する微小亀裂の成長挙動観察に適した試験片形状および観察方法の検討

6.1　緒言

疲労亀裂の寿命は，亀裂の発生寿命と発生した亀裂の伝播寿命の和として与えられるが，Forsyth [9] は亀裂発生から伝播までの一連の成長状況について直接観察結果から，以下に述べる過程を経て成長すると説明している．

(1) 疲労亀裂は繰返し負荷を受けた材料中に「固執すべり帯」と称される局在化した金属組織が形成され，これに伴い自由表面近傍で「入り込み」や「突き出し」と称される微視的な凹凸が形成され，これが応力集中源となって亀裂が発生する．この段階では，亀裂が生じた結晶粒内ですべり面に沿ったせん断亀裂として成長するため，亀裂は閉口したままである．

(2) その後，結晶粒界等の障害物に亀裂が到達後は，すべり面の分離とへき開が混合した状態で粒界を破壊して隣の結晶に亀裂が伝播するが，すべり面方位が前の結晶とは異なることが一般的であるため，疲労亀裂の開閉口挙動が生じ始める．

(3) 更に亀裂の成長に伴い開口モードが支配的になり，負荷方向に直交する方向に亀裂は伝播する．

上記のように，疲労亀裂発生位置に存在する最初の結晶粒内（以後，「第一結晶粒」と称する）での亀裂成長はせん断型であるため，開口型の亀裂とこれに対する応力拡大係数範囲に基づく Paris 則や有効応力拡大係数範囲に Elber 則といった従来の疲労亀裂伝播則では，亀裂発生段階から一貫した寿命評価は不可能である．なお，この段階におけるせん断型亀裂の成長挙動評価法については豊貞ら [37]の提案があり，検証例は少ないものの，その有効性が示されている．同手法の概要は付録 D にて紹介する．

上述の Forsyth の報告では，定性的な亀裂成長挙動に関する説明は述べられているものの，繰返し数と亀裂長さの関係に関して疲労亀裂成長履歴予測の立場から整理，検討された事例は少ないため，疲労亀裂初期段階の成長履歴も考慮した寿命予測手法確立のためにも，この段階における亀裂成長履歴の測定データの蓄積が期待される．また，彼の報告は面心立方構造であるアルミニウム合金に対する観察結果であるが，大型溶接構造物の大半は体心立方構造である鋼が主に使用されることも考慮すれば，鋼材の疲労亀裂発生挙動を詳細かつ定量的に観察することには意義があると考えられる．加えて，構造様式次第では全寿命に及ぼす亀裂発生寿命の割合がかなりの割合を占める場合もある．さらに，微小亀裂成長をその場観察しようとすれば，板状の試験片を用いて CCD カメラ等により試験片表面部を観察することになるが，局所的な応力集中状態は板厚方向で均一でないため，観察が不可能な板厚方向中央部などで亀裂が発生することが懸念され，試験片表面での観察では，せん断型の亀裂成長を観察できない可能性も大きい．

以上の観点から，本章では，応力集中場から発生する疲労亀裂の成長初期段階（数結晶粒オーダ）における疲労亀裂成長履歴の観察方法，観察に適する試験片について以下に示す二つの方法で検討した．

(1)　SEM 内疲労試験機を用いた疲労亀裂発生および成長初期段階の観察.

(2)　通常のサーボ油圧式疲労試験機を用いた疲労亀裂の発生，および（1）よりも長期間の成長初期段階の観察.

6.2　SEM 内疲労試験による疲労亀裂の発生および成長挙動の観察

6.2.1　試験片について

通常，疲労亀裂の評価に用いられる試験片は，CT（Compact Tension）や CCT（Center Crack Tension），SEC（Single Edge Crack Tension）（ASTM E647 に従えば，順に C(T)，M(T)，ESE(T) と表記 [35]）に代表されるように板厚を有しているため，これらの試験片では，疲労亀裂発生の初期段階であるせん断型亀裂は試験片表面部でなく板厚方向内部位置で生じることもあり得るため，板表面における疲労亀裂観察を確実に可能とする何らかの工夫が必要である.

そこで，想定される亀裂伝播経路の板厚を結晶粒径オーダまで極力薄くし，かつ観察を容易にするために亀裂発生個所を限定できる切欠付き試験片を用いて疲労試験を行えば，発生初期段階のせん断型亀裂の成長観察が可能と考えた.

上記の条件を可能とし，かつ微小な亀裂成長を連続観察することを目的に，Fig. 6.1 に示す SEM （Scanning Electron Microscope；走査電子顕微鏡）内疲労試験機（島津 SEM サーボパルサ，±5 k N，ABT-32）で使用できる試験片として，Fig. 6.2 に示す SEC 型試験片を採用することとした.

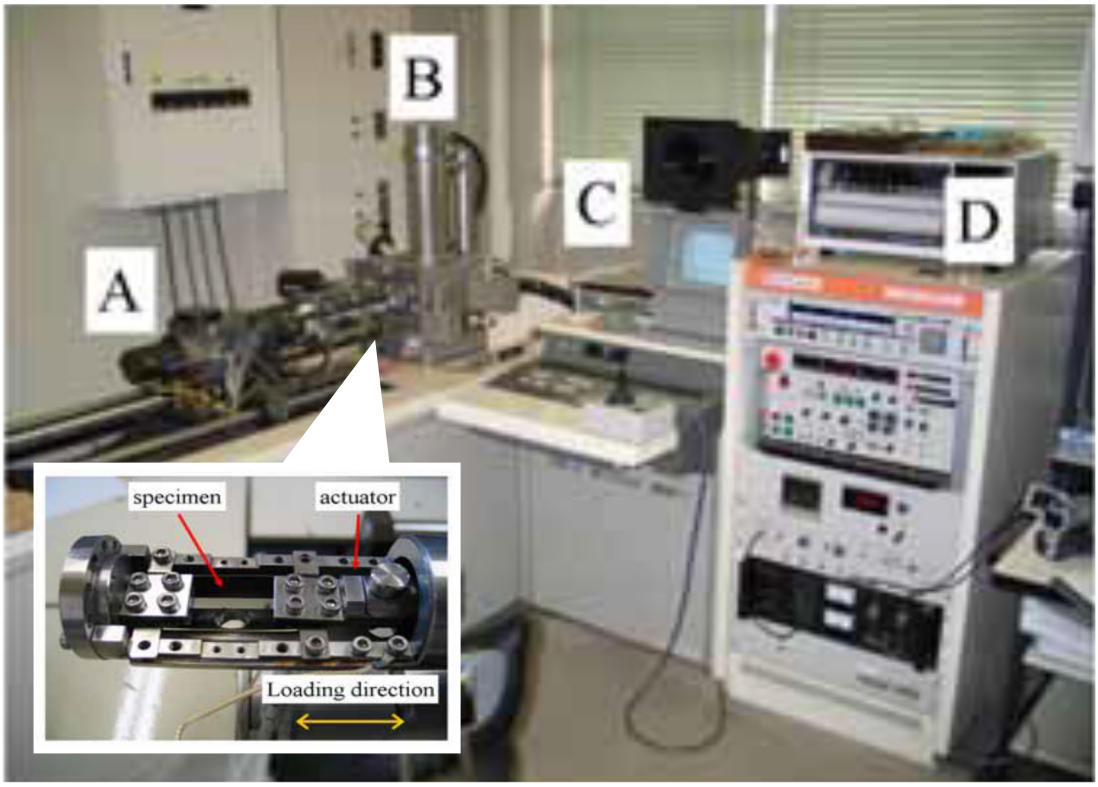


Fig. 6.1 SEM internal fatigue testing machine.

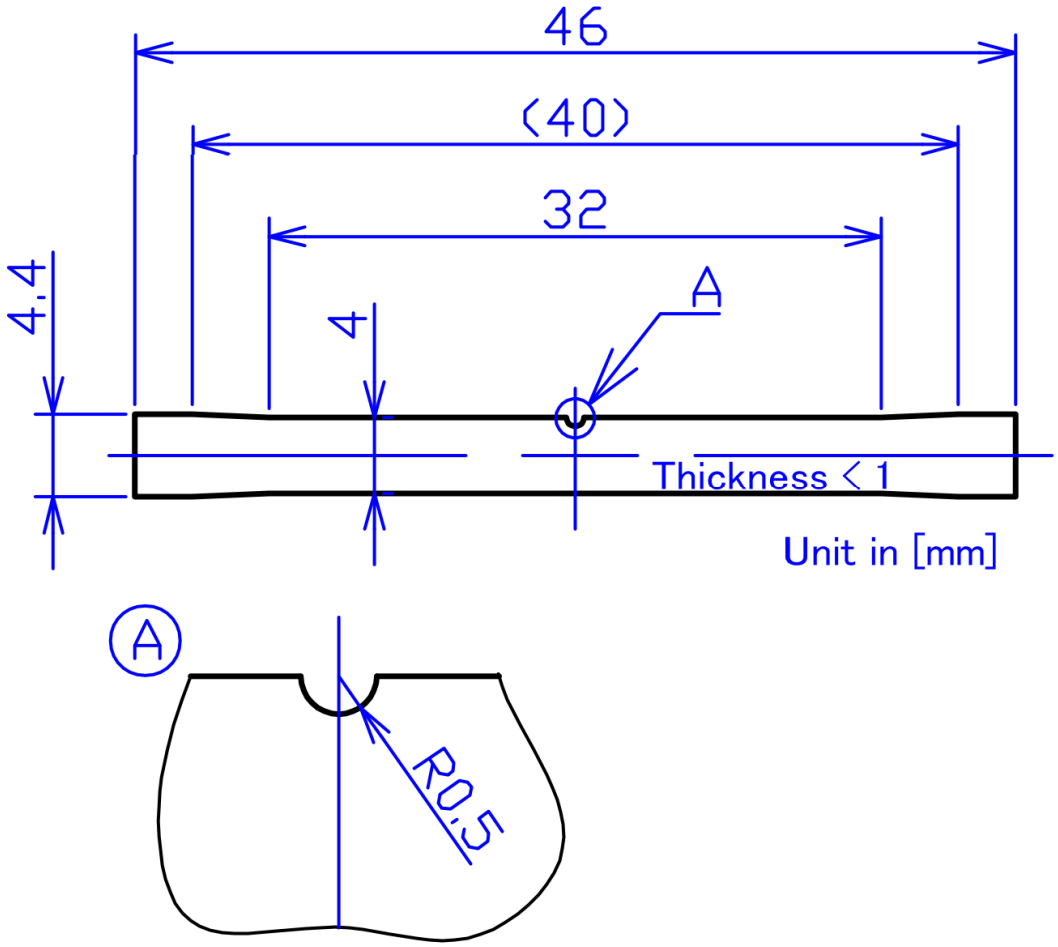


Fig. 6.2 SEC type specimen.

試験片の板厚を極力薄くする作業は手作業で実施した．エメリー紙にて板厚方向に結晶粒が 0.1mm オーダ程度の板厚となるまで減厚後，疲労亀裂発生位置の確認を容易にすること及び更なる減厚を目的に，バフ研磨にて鏡面仕上げを行った．供試材は大型溶接鋼構造物での使用頻度が高い溶接構造用圧延鋼材（SM400B，16 mm）であり，化学組成と機械的特性を Table 6.1 に示す．

Table 6.1 Chemical composition and Mechanical properties of SM400B steel.

Chemical composition [wt%]				
C	Si	Mn	P	S
X 100			X 1,000	
12	13	99	14	2

Mechanical properties		
Yeild strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
305.0	437.4	33

6.2.2　応力集中部から発生・成長する微小疲労亀裂の直接観察

応力集中部で発生したせん断型亀裂が数結晶粒の範囲まで成長するまでの挙動を連続して詳細に観察するには，疲労亀裂伝播速度を考慮する必要がある．そこで，別途実施した予備検討を踏まえ，Table 6.2 に示す応力比 $R = 0.05$ となる負荷条件にて疲労試験を実施した．試験片板厚は手作業による研磨のため，最大で 0.36 mm の個体差が生じているが，SM400B 鋼の平均結晶粒径が約 0.03 mm（30 μm ）であることを考慮すると，試験片板厚方向には最大でも結晶粒 15 個程度であるため，結果的に試験片表面の観察により，第一結晶粒内を成長するせん断型亀裂の観察は可能であった．

Table 6.2 Loading conditions for each specimen (R=0.05).

Specimens symbol	A	B	C	D	E	F
Max. Load [N]	165.2	149.0	82.2	73.2	77.0	415.7
Min. Load [N]	8.3	7.4	4.1	3.7	3.9	20.8
Ave. Load [N]	86.7	78.2	43.1	38.5	40.5	218.2
thickness [mm]	0.193	0.174	0.096	0.077	0.081	0.437
Max. Stress [MPa]	225.9	225.9	225.9	225.9	225.9	225.9
Min. Stress [MPa]	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3

疲労試験にて観察された，疲労亀裂が発生した切欠底に生じたすべりの様子を Fig. 6.3 に示す．すべり方向は荷重軸とほぼ 45° をなしており，同一面の A 面と B 面には段差が生じている．この様子は，これまでに考えられてきた疲労亀裂発生機構と同様の形態であった．

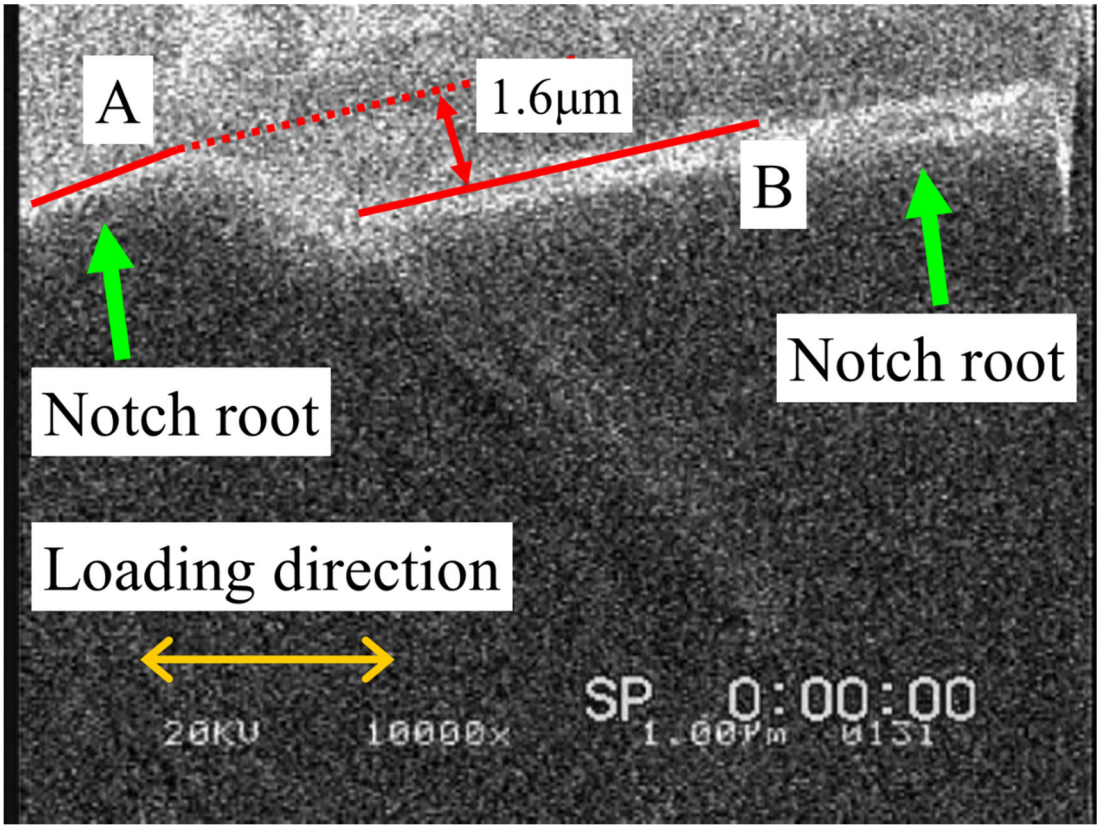


Fig. 6.3 Observed slip line emanating from notch root.

Fig. 6.4 に第一結晶粒内を伝播する疲労亀裂と，その伝播経路の一例を示す．図中の下向き矢印は亀裂伝播方向を表しており，同図より切欠底での亀裂初期の発生方向は荷重軸とほぼ 45° 方向に伝播し，第一結晶粒内を伝播中でも亀裂伝播方向が変化する場合があり得ることが確認された．Hansson ら [77] の提案した刃状転位とすべり線成長に基づく第一結晶粒内におけるせん断型疲労亀裂成

長モデルによれば，結晶方位や初期すべり線発生角度次第で屈曲型の亀裂成長経路をとる可能性が指摘されており，観察結果は妥当であると判断できる．

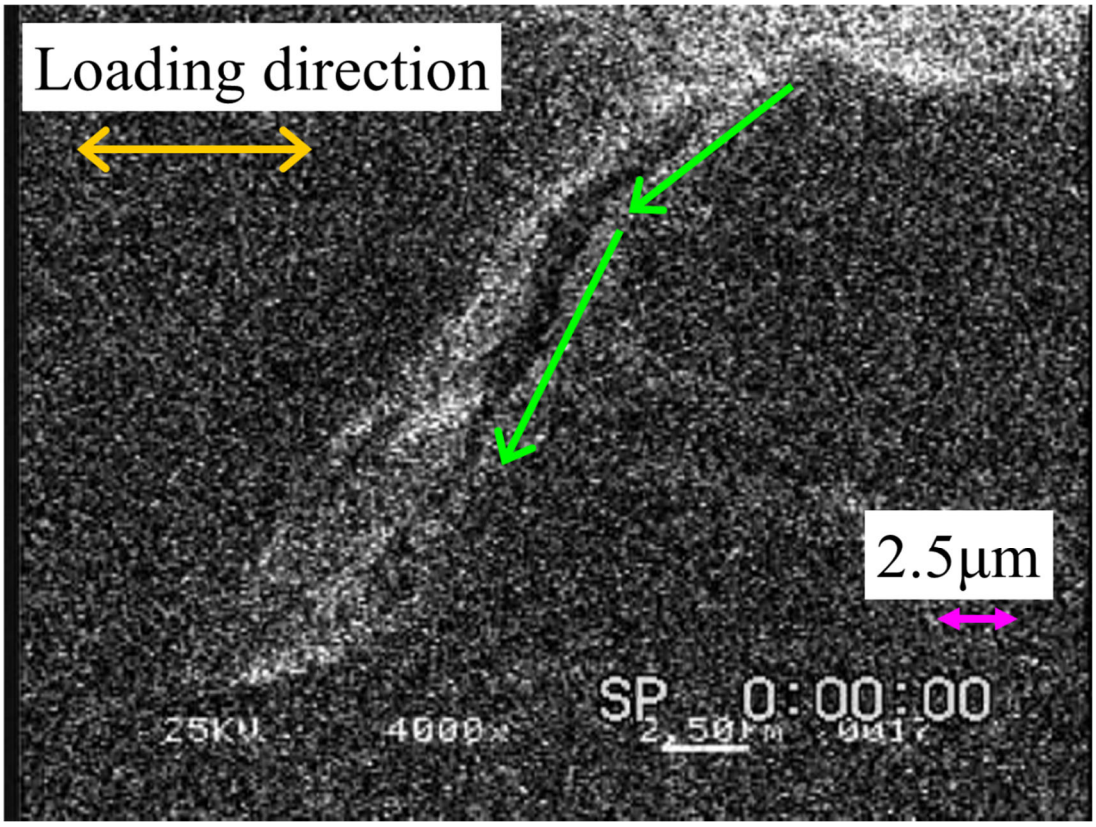


Fig. 6.4 Observed fatigue crack growth in the first grain.

ここで用いた SEM 内疲労試験機は CRT や録画機器のフレームレートが 30fps であるため，Fig. 6.3 および Fig. 6.4 に示すような繰返しせん断挙動を把握する際には，試験周波数を 1Hz 以下とする必要があった．加えて，せん断亀裂発生観察の予備試験として約 70 体要した．さらに，試験片幅（リガメント寸法）が小さく，亀裂発生後すぐに全断面降伏に至るため，亀裂成長履歴の観察点数を多く採れないなど，試験の労力や時間，使用機器に改善の余地が残る結果となった．

6.2.3　亀裂成長曲線の観察結果と豊貞らのモデル[37]による推定結果との比較

亀裂発生点から第一結晶粒界を突破した点までの距離を測定するため，Fig. 6.5 の一例に示すように SEM 内疲労試験終了後に亀裂発生付近の表面を 5%ナイタール液で腐食[78]させ粒界を明瞭にした．

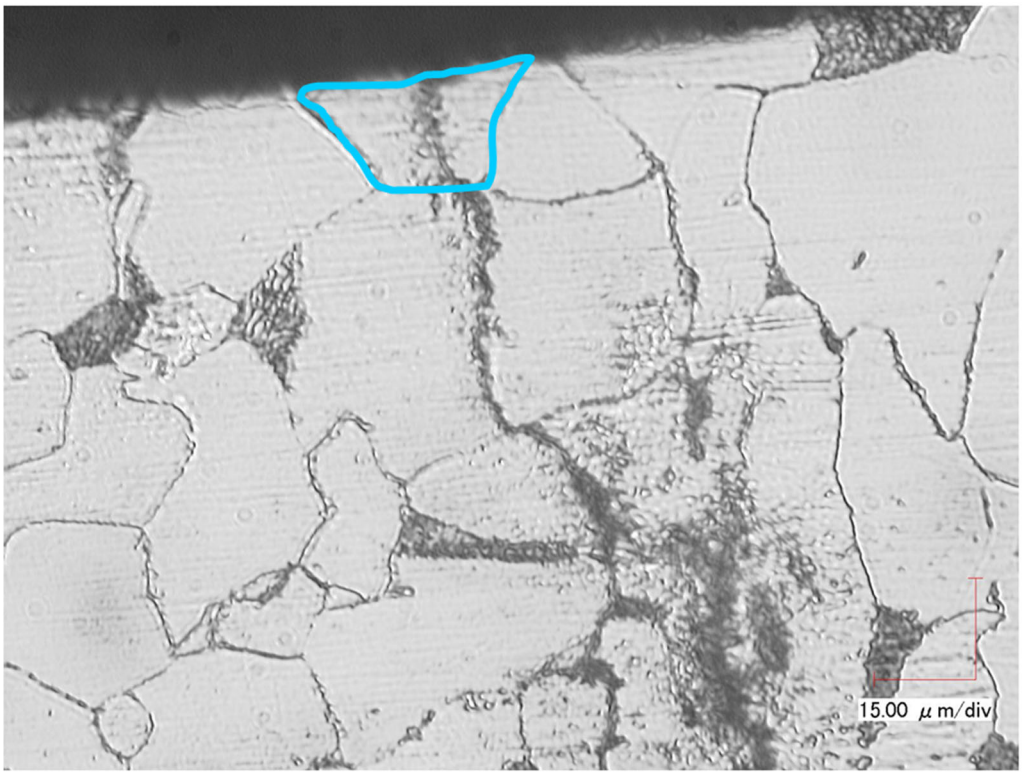


Fig. 6.5 Measurement of the first grain on surface by corrosion treated of specimen D.

図中の上部中央にあるフリーハンドの実線で囲った領域が第一結晶粒（せん断型の疲労亀裂が発生した結晶粒）である．また，Table 6.3 に各試験片における亀裂の結晶粒界までの距離を測定した結果を示す．ここで，亀裂の第一結晶粒界までの距離 r_0 は豊貞らのモデルにおける定義に従い，亀裂発生点から粒界に到達した距離のうち，荷重軸垂直方向への正射影長さとした．

Table 6.3 Distance from the crack initiation point to the first grain boundary r_o (value of the orthogonal component of the load line) for each specimen.

Specimens symbol	A	B	C	D	E	F
r_0 [μm]	17	35	10	14	10	9

Fig. 6.6～Fig. 6.11 は測定した第一結晶粒界までの亀裂長さ a－繰返し数 N の関係を，付録 D に示す（D.1）式を用いて亀裂成長曲線を推定した結果である．式中にある RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} は，（1.8）式の伝播則に示す材料定数 C_2，m_2 を与える必要があるが，同一材料の長い亀裂に対して求めた材料定数が利用できる．r_0 には Table 6.3 の値と，それぞれの比較用に SM400B 鋼の平均結晶粒径（30 μm）の値を入力している．

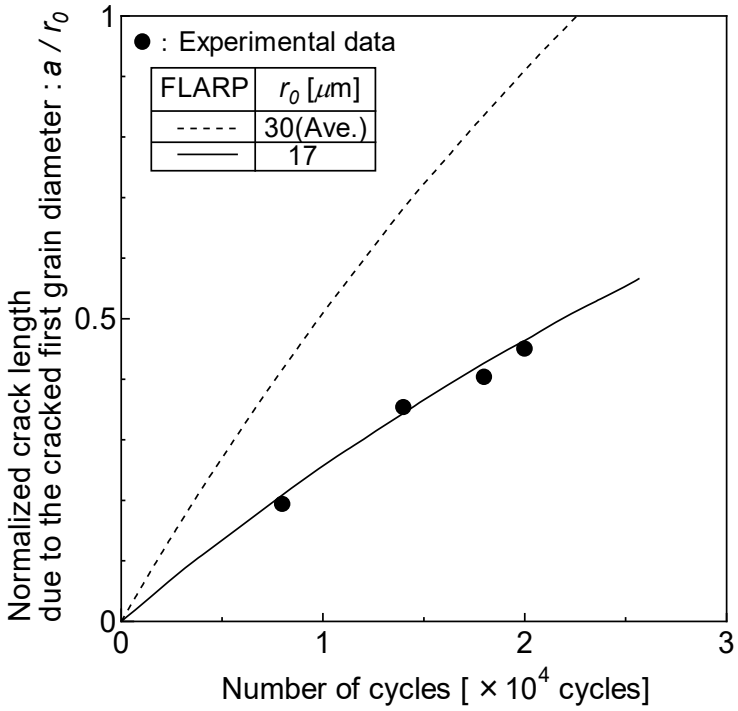


Fig. 6.6 Comparison of the measured fatigue crack growth curves of specimen A with the calculated value by applying FLARP.

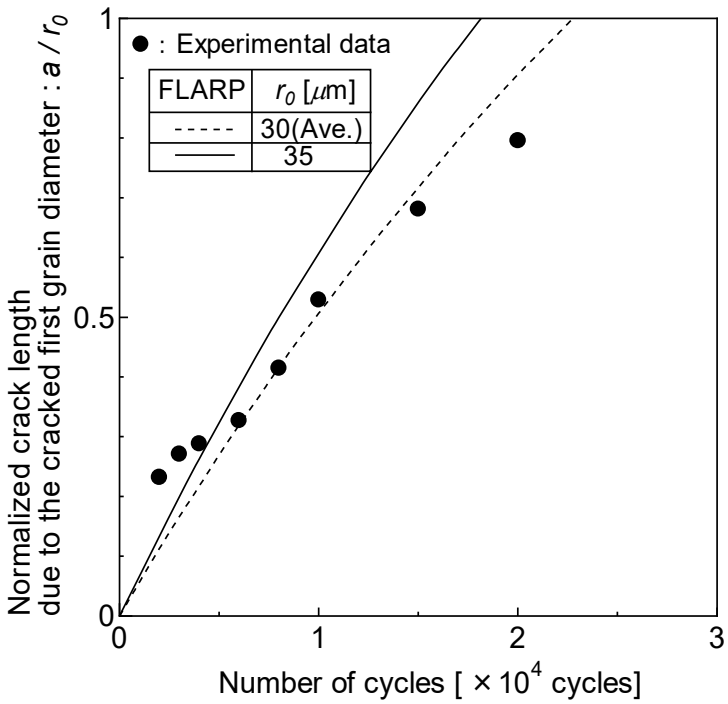


Fig. 6. 7 Comparison of the measured fatigue crack growth curves of specimen B with the calculated value by applying FLARP.

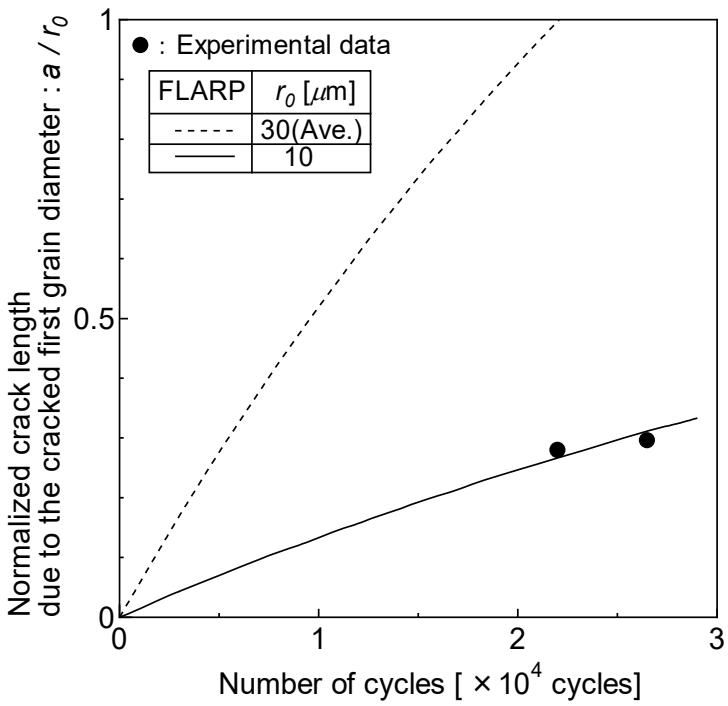


Fig. 6.8 Comparison of the measured fatigue crack growth curves of specimen C with the calculated value by applying FLARP.

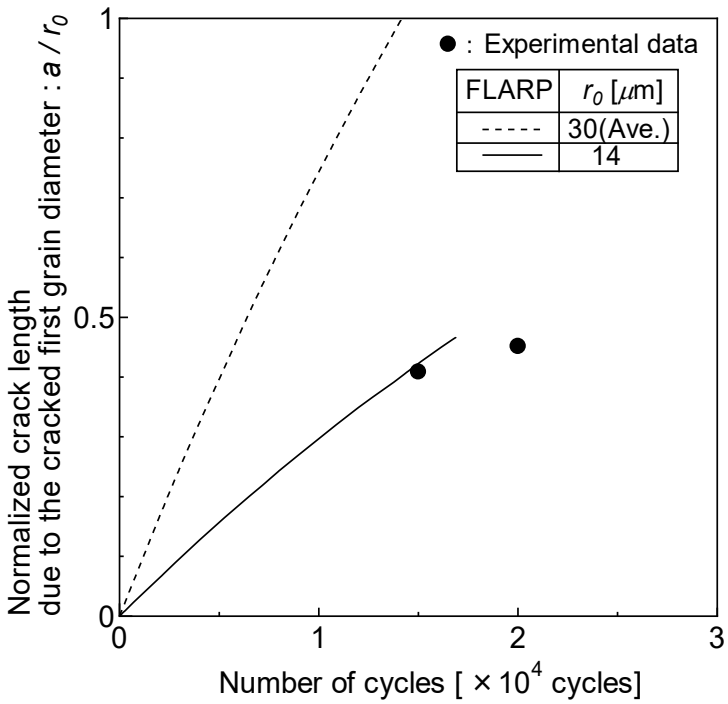


Fig. 6.9 Comparison of the measured fatigue crack growth curves of specimen D with the calculated value by applying FLARP.

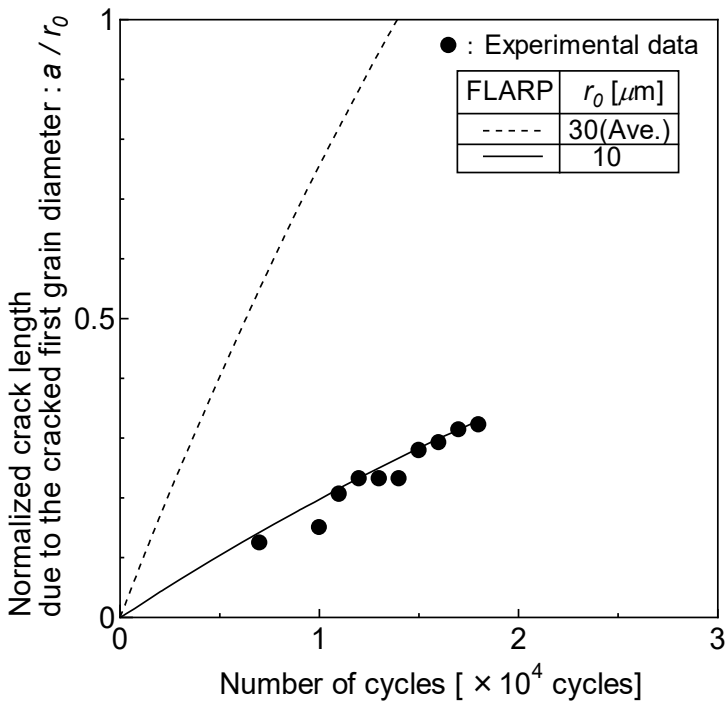


Fig. 6.10 Comparison of the measured fatigue crack growth curves of specimen E with the calculated value by applying FLARP.

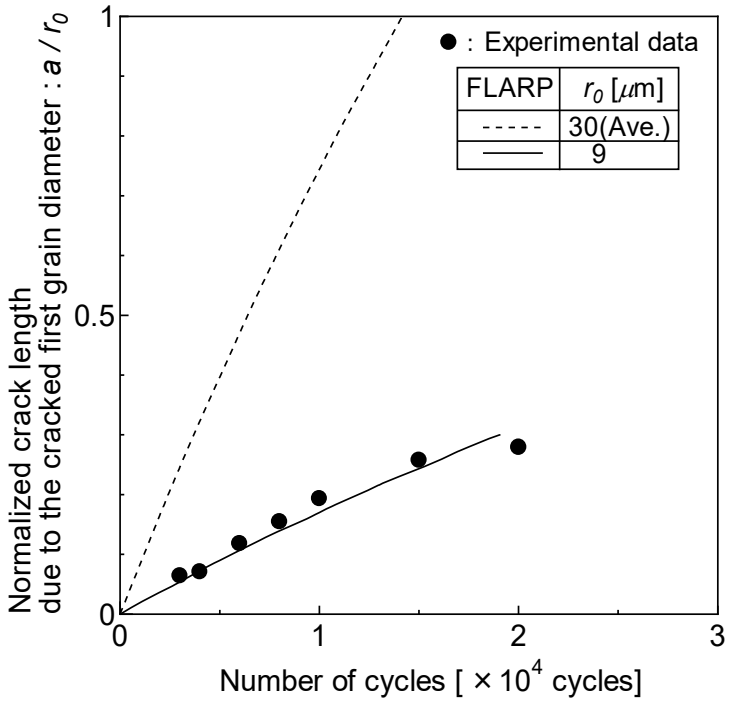


Fig. 6.11　Comparison of the measured fatigue crack growth curves of specimen F with the calculated value by applying FLARP.

平均結晶粒径との比較結果より，切欠底からの亀裂発生観察結果と上述の計算結果は比較的一致していることから，豊貞らの提案する疲労亀裂発生からせん断型亀裂としての成長モデルの妥当性が確認できる．

6.3　CCD カメラによる微小疲労亀裂の発生および成長挙動の観察

6.3.1　微小疲労亀裂の発生および伝播観察用の試験片

前節では，SEM 内疲労試験機を用いて，疲労亀裂の発生，せん断型亀裂としての成長及び開口型亀裂への遷移挙動の観察を行ったが，

(1) 疲労試験の結果にはバラツキが多いため，観察結果の積み上げが重要.

(2) SEM 内疲労試験機で実験するための試験片加工には多大な労力を要する.

特に亀裂発生部となる切欠底をできるだけ滑らかにしなければ，予期せぬ箇

所から亀裂が発生し，せん断型亀裂の観察の機会が失われる．

(3) 使用した SEM 内疲労試験機では，亀裂成長量を測定するには CRT モニタを写真撮影し，写真上で亀裂長さを測定する必要があるため，測定精度が必ずしも十分ではない．また，視野の関係から亀裂発生段階を見逃した実験も複数回あった．（Table 6.2 では，これらの実験は削除している．）

(4) 試験片幅（リガメント寸法）が小さいため，亀裂発生後すぐに全断面降伏に至ることから，亀裂成長履歴の観察点数が少なくならざるを得ない．

等の問題点があった．

そこで，観察数の上積みにあたり，上記の問題点を考慮して試験片形状，試験機および亀裂観察方法の改善を行った．

試験片は，

(1) 前節で示した試験片と同様に亀裂発生部として切欠きを設定．

(2) 疲労亀裂伝播履歴を板表面からの観察により測定するために減厚し，かつより長い亀裂長さまでの観察を可能とする試験片寸法とする．

(3) 通常の疲労試験機での実験を可能とするため，試験片外形を Fig. 6.12 に示す CT 試験片に準じた形状とする．

等に変更した．観察用試験片は 2 つ用いており，図中に示す極薄部厚さ t_2 は各 0.154 mm と 0.161 mm である．極薄部の加工方法は，フライス加工によりある程度まで減厚したのちに，前節で示した試験片の減厚方法と同様に手作業による研磨によった．供試材は軟鋼 SS400（ミルシート値：降伏応力 303 MPa，引張強さ 429 MPa，伸び 31 %）とし，疲労亀裂発生挙動を定量的に観察するための一定振幅荷重条件を Table 6.4 に示すように設定した．使用した試験は±100kN の油圧式サーボ試験機（鷺宮製作所，ADH912）を使用した．

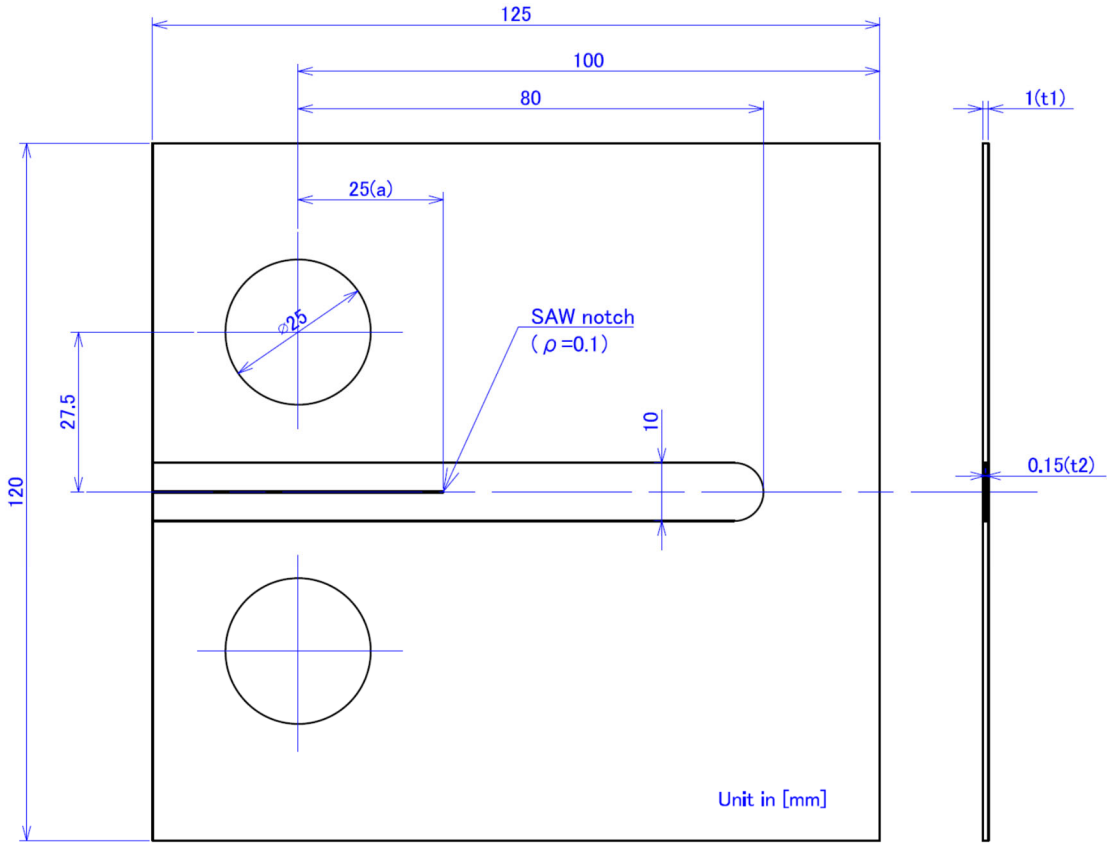


Fig. 6.12 Specimen configuration used.

Table 6.4 Reference data of applied load.

Max.Load [kN]	Min.Load [kN]	Load amplitude [kN]	Stress ratio [R]
0.420	0.126	0.294	0.3

6.3.2　CCD カメラによる疲労亀裂発生および伝播の直接観察

疲労亀裂成長の観察に用いた CCD カメラと試験風景を Fig. 6.13 に示す．図中に示す A は試験片と CCD カメラのレンズをセットした状態の油圧式サーボ試験機（±100kN，鷺宮 ADH912），B は CCD カメラ本体（211 万画素，キーエンス，VH-8000），C は負荷荷重や変位を記録するための動ひずみ計とデータロガーで

ある．観察に用いたレンズ（キーエンス，VH-Z450）はラチェット式で複数倍率が設定可能であるが，主に 450 倍と 1,000 倍（視野対角は 0.85 mm，0.38 mm）を使用した．試験片の治具への設置は図中の小窓に示すように治具の外側に取付けたが，これはレンズの焦点距離が 7.3 mm と狭いためである．ただし，試験片が薄いため，偏心等による実験への影響は生じないと判断した．

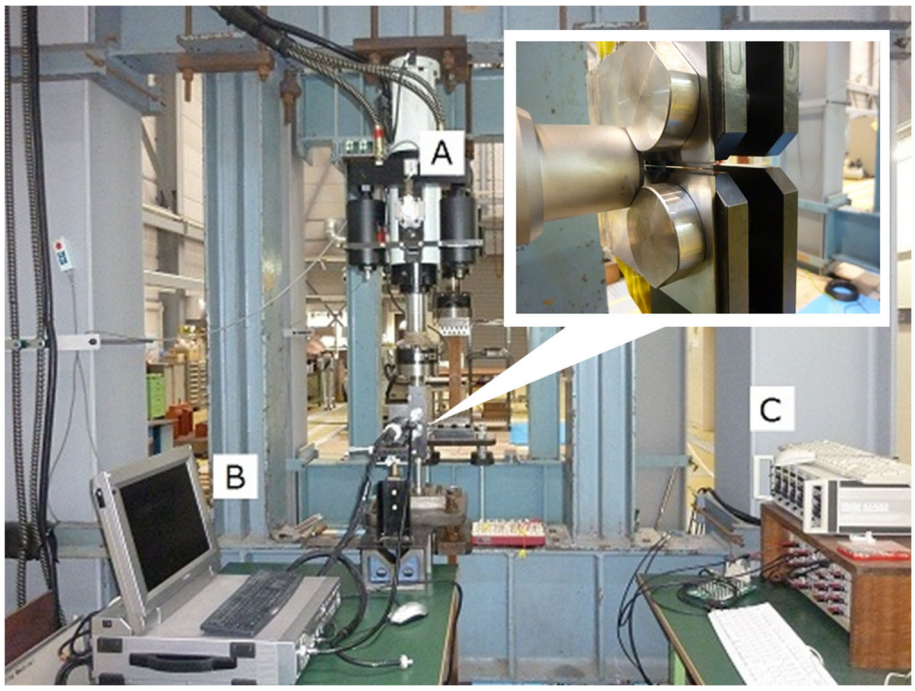
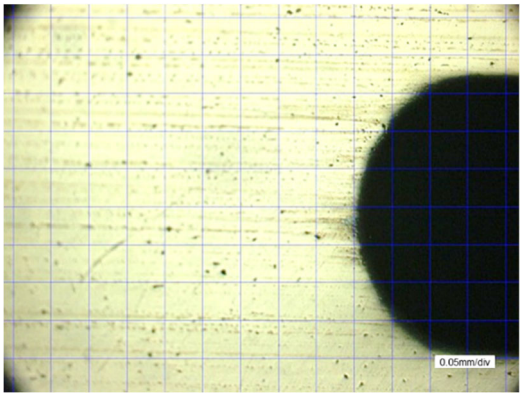


Fig. 6.13 Fatigue testing machine and CCD camera.

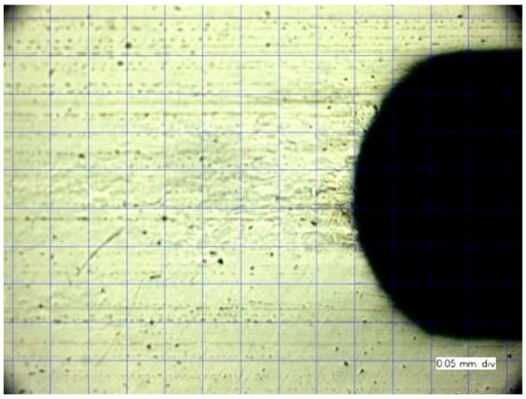
疲労亀裂の撮影については，切欠底に生じる亀裂は第一結晶粒界に達するまでは閉口していると考えられるため，その成長挙動の観察は非常に困難である．そこで，試験片の切欠底周辺を CCD カメラで一定サイクル数毎に拡大撮影を行い，亀裂長さ a と繰返し負荷数 N の関係を可能な限り亀裂が微小な領域で測定した．ただし，前項では第一結晶粒内のせん断型亀裂の成長についてのみ観察したことに対し，本項では開口型亀裂への遷移挙動までを連続して観察している．

なお，亀裂の撮影時は，最大荷重，最小荷重それぞれの状態を保持して行った．

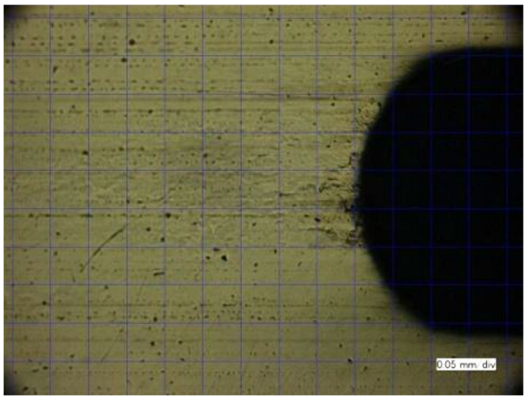
CCD カメラで撮影した試験片切欠底周辺の写真（試験開始前～試験終了）の一例を Fig. 6.14 (a) ～ (j) に示す．同写真図より，切欠底で複数のすべりが発生し，最も応力の高い切欠底から亀裂が成長していることが確認できるが，表面亀裂発生時の切欠底表面に出現すると考えられている，入り込みや突き出しの確認には至らなかった．



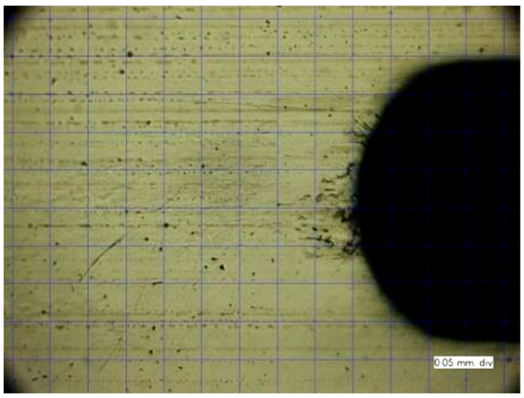
(a) Before experiment.



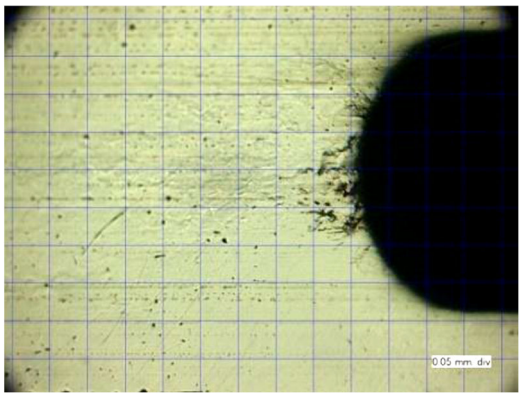
(b) 1,000 cycles.



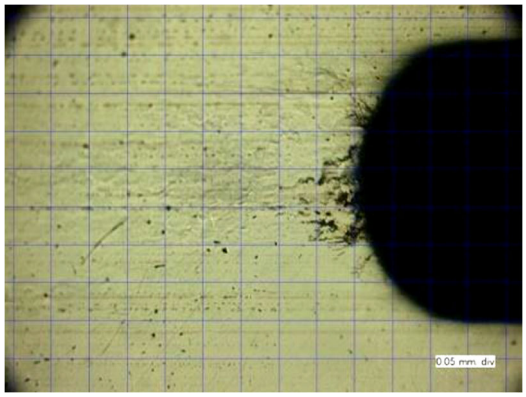
(c) 5,000 cycles.



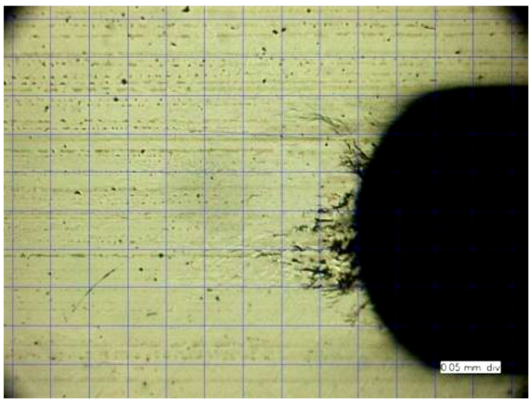
(d) 10,000cycles.



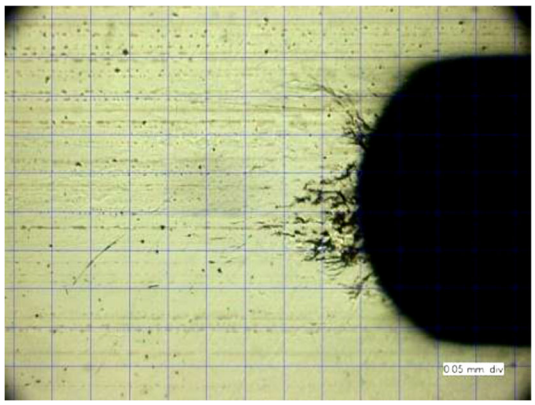
(e) 18,128 cycles.



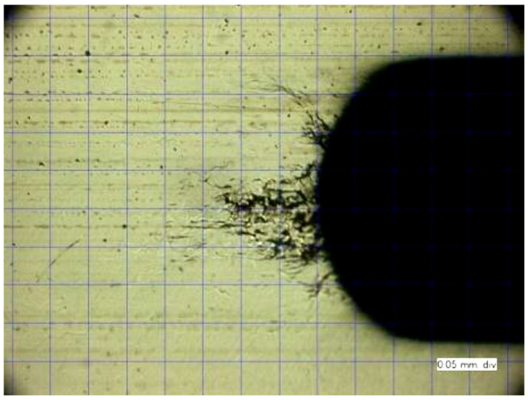
(f) 22,078 cycles.



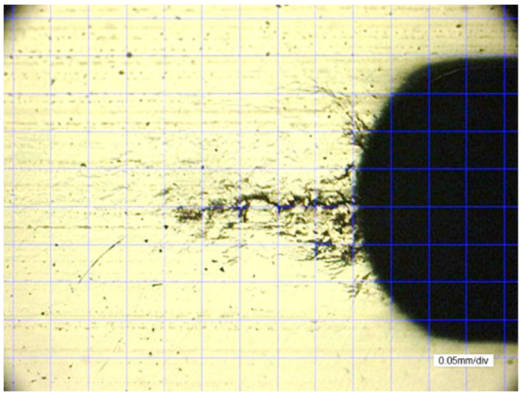
(g) 29,800 cycles.



(h) 40,415 cycles.



(i) 50,798 cycles.



(j) 71,311 cycles (Finished).

Fig. 6.14 Enlarged images of notch root images.

6.3.3　疲労亀裂の発生と成長解析の比較

前述の亀裂成長観察の結果に対し，豊貞らのモデルによる推定結果との比較を行った．なお，推定方法の詳細説明は文献 [79] に譲る．観察結果はせん断型の亀裂成長に限定されず，開口型への遷移段階及び，開口型の成長挙動を示した段階も含まれるため，亀裂発生から開口型での成長履歴までを一貫して推定可能とするように，第一結晶粒内のせん断亀裂長さを ΔK_{RPG} を用いた等価な式への置き換え，及び亀裂結合力モデルに基づく亀裂開閉口モデルが実装された疲労亀裂伝播成長シミュレーション FLARP [37] を用いており，これにより得られた亀裂成長曲線を Fig. 6.15 に示す．

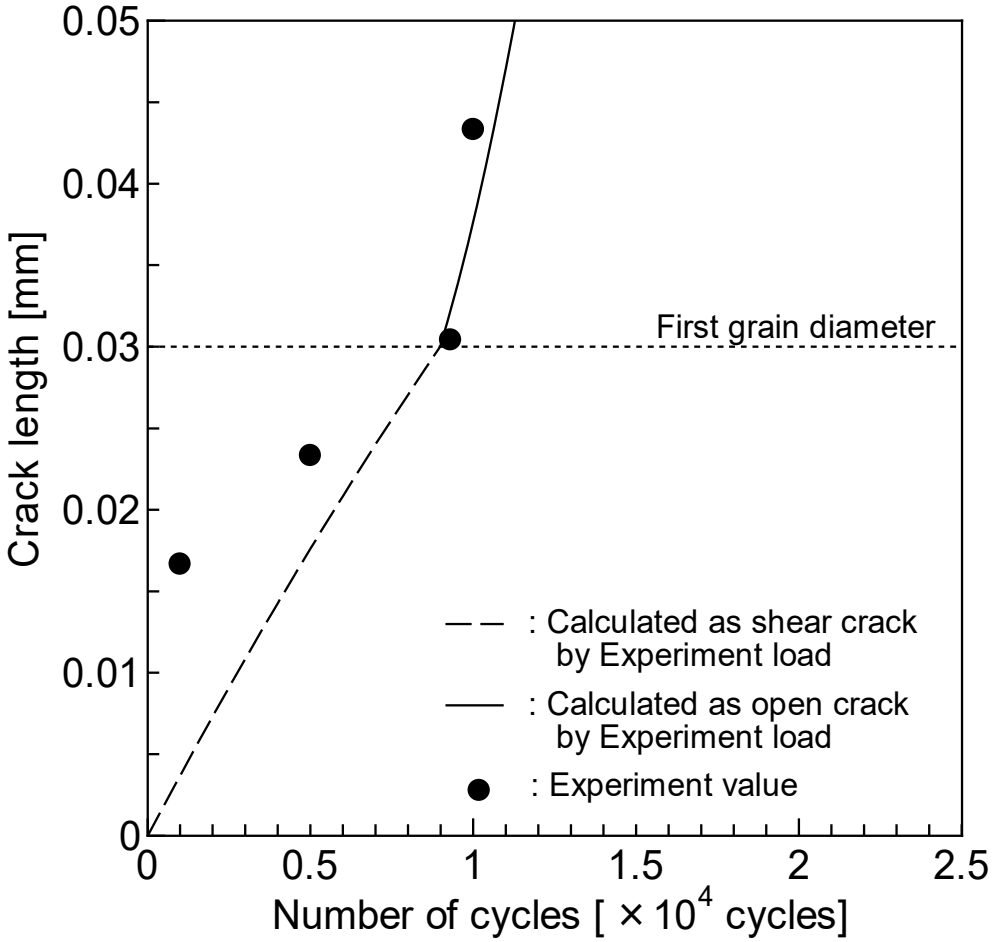


Fig. 6.15 Comparison of experimental results and numerical simulations.

丸印は観察結果，破線・実線部が解析結果である．図中の破線は結晶粒寸法を30 μm と仮定した第一結晶粒内を伝播するせん断亀裂，実線は開口型亀裂としての解析結果を示している．同図より，せん断亀裂が結晶粒界に到達するまでの疲労亀裂伝播挙動は誤差があるものの，結晶粒界へ到達した際の疲労亀裂発生寿命については観察結果と比較的良好な一致を示していることが確認できる．

6.4　結言

疲労亀裂の成長挙動は，亀裂の発生と亀裂の伝播に区分して評価されることが一般的であるが，本来，これらの現象は連続していることから統一して評価されるべきものである．このためには，亀裂発生初期段階における成長挙動を観察し，この結果の積み上げに基づく亀裂成長履歴推定手法を構築する必要があり，これに資する実験方法の確立が重要課題である．

そこで本章では，切欠底から発生する疲労亀裂の微小亀裂段階における成長履歴を精度よく測定するために適した試験片形状および実験方法を検討し，実測事例を示すことで提案手法の妥当性を確認した．

第７章

デジタル画像相関法を用いた疲労亀裂先端近傍の両振り塑性域の測定

7.1　緒言

Paris 則，Elber 則，RPG 荷重基準などの破壊力学的手法により疲労亀裂の成長履歴を推定できることは知られているものの，実構造物では破壊力学パラメータである応力拡大係数 K そのものの算出が難しい場合も多いため，同手法に基づく疲労亀裂成長推定手法では，その推定精度が K 値や疲労亀裂開閉口挙動の影響を受ける有効応力拡大係数範囲（ΔK_{eff}やΔK_{RPG}）の推定精度に依存する．

一方，疲労亀裂伝播の駆動源は，亀裂先端近傍で最大荷重時に形成される引張塑性域と，最小荷重時に形成される圧縮塑性域が重なる両振り塑性域と呼ばれる領域内で，不可逆的に消費される引張・圧縮の繰返し塑性仕事である．この領域における亀裂伝播方向の幅を「両振り塑性域寸法 $\tilde{\omega}$ 」と定義し，両振り塑性域でなされる仕事や$\tilde{\omega}$を直接評価し，これらをパラメータとする疲労亀裂伝播則の構築も期待される．

しかし，$\tilde{\omega}$の直接計測が困難であるため，定量的にこれに取り組んだ事例は，著者が調べた範囲では，平ら [80] による最大塑性域寸法の X 線による測定結果に基づいた伝播則の提案のみであった．

そもそも豊貞らの RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} をパラメータ

とする疲労亀裂伝播則も，亀裂先端近傍の両振り塑性仕事が亀裂進展の駆動力であるとの立場に立ち，$\tilde{\omega}$の直接計測が困難であったことから，数値解析により確認したΔK_{RPG}と$\tilde{\omega}$が一義的な関係を有することに着目して，ΔK_{RPG}をパラメータとする伝播則が提唱されたものである．

繰返し負荷中の塑性域寸法履歴を継続的に測定及び推定することは非常に困難であるが，山下ら[81]および山口ら[82]は弾塑性 FE 解析による亀裂先端近傍の両振り塑性域の推定ならびに一定荷重振幅試験結果を比較して, Paris 則, Elber 則，RPG 荷重基準などの疲労亀裂伝播則にそれぞれのパラメータを設定することで，二段ブロック及びスパイク荷重履歴下における疲労亀裂伝播試験結果を比較的良好に推定できることを示している．この結果は，両振り塑性域寸法等の亀裂先端近傍における両振り塑性挙動を記述するパラメータにより，疲労亀裂伝播挙動を説明できることを示唆している．一方，この考え方の妥当性を示すには，疲労亀裂伝播試験中に亀裂先端で生じる $\tilde{\omega}$ や塑性仕事を直接計測し，これと疲労亀裂伝播速度の関係を与える必要がある．しかしながら，通常のひずみゲージを用いた測定では，貼付する面積相当のひずみ平均値となることが塑性域寸法の測定を困難とするだけでなく，亀裂先端が繰返し負荷毎に伝播するため，亀裂先端とひずみゲージとの距離が変化することや，亀裂の伝播経路を正確に予測してひずみゲージを貼付できないことなど，ひずみゲージを用いた実測には困難が予想される．

山﨑ら[83]は，非接触測定法の一種であるデジタル画像相関法（DIC）を用いて疲労亀裂先端近傍の $\tilde{\omega}$ の測定を試み，その可能性は見出したものの，計測事例が少ないなど十分な検証には至っていない．

本章ではヒステリシスループを荷重とひずみゲージから得る以外の方法として，山﨑らの画像相関技術に必要に応じた改善を加え，疲労亀裂の伝播に沿って

撮影箇所を随時変えて取得した画像情報から「ひずみ場」を得る．その後，複数の疲労試験に対するヒステリシスループを画像情報から得られるひずみを用いて，繰返し負荷中の疲労亀裂先端近傍の $\tilde{\omega}$ の測定を試みることで，同手法の検証と測定精度向上等の改善すべき箇所の確認を行った．

7.2　デジタル画像相関法について

7.2.1　画像相関の概要

デジタル画像相関法 [84] とは, 変形前後のランダムパターン画像から視野内の変位場を推定する手法であり，対象物表面の輝度分布から変位を推定する．Fig. 7.1 の模式図に推定の一例を示す．ある点の輝度は変形の前後で変化しないという仮定に基づき，画像を検査領域やサブセットと呼ばれるという小区間に分割し，変形の前後で検査領域内の輝度分布と最も高い相関を示す区間を検索することで視野全体の変位を算出している．

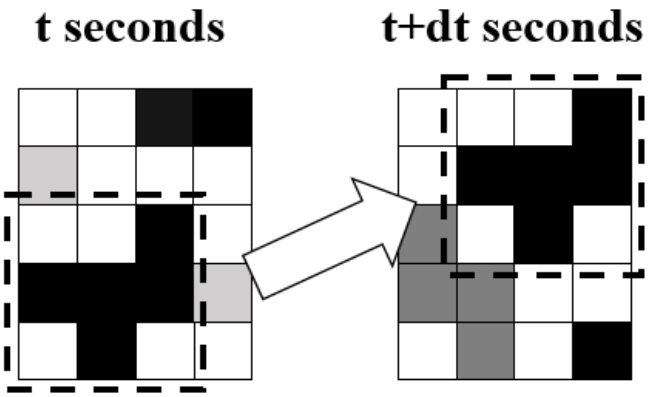


Fig. 7.1 Schematic diagram of digital image correlation.

7.2.2　検査領域のサイズおよびオーバーラップによる補完

画像を分割する小区間は複数の画素から構成されており，それぞれの画素は Fig. 7.2 の模式図に示すような検査領域となる．検査領域を大きく設定すると，移動を推定する際の輝度の情報量が増加するため安定した計算が可能となるが，画像分割サイズも同様に大きくなるため，解析の分解能が低下する．一つの検査領域では一点のひずみ値を計算するため，検査領域内の変形が平均化された結果となるため，検査領域内に変形の勾配が大きい位置などが予想される場合は注意が必要となる．

そこで，後述するランダムパターンを構成するスプレー塗料の粒子径との条件探索の結果，検査領域のサイズを 41 x 41pixel とした．

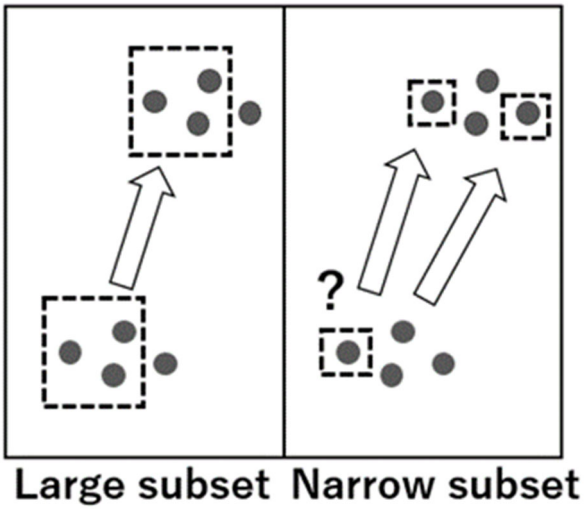


Fig. 7.2 Schematic diagram of subset.

検査領域の欠点を一部補う手法として Fig. 7.3 の模式図に示すオーバーラップという手法がある．同手法は，検査領域の一部を重複させて設置することによりひずみの計算点を増やす方法があるが，計算コストが増大することと検査領域内の変形を平均化するような傾向に対しては効果がない．使用する画像に対す

る効果を検討した結果，オーバーラップの設定を 50%で適用することにした．

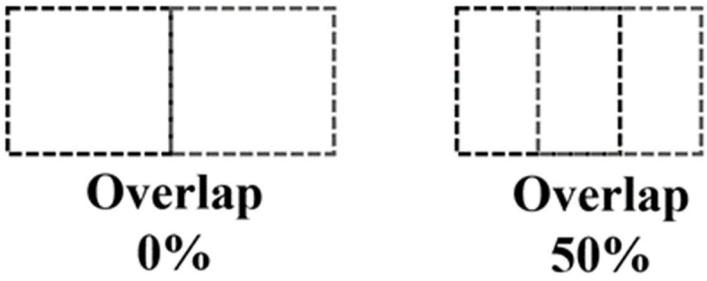


Fig. 7.3 Schematic diagram of overlap.

7.3　疲労亀裂先端近傍の測定

7.3.1　疲労亀裂先端近傍の弾塑性挙動

繰返し負荷における疲労亀裂先端において，Fig. 7.4 に示す最大荷重時に形成される引張塑性域と最小荷重時に形成される圧縮塑性域が重なる領域は，両振り塑性域と呼ばれ，この領域における亀裂伝播方向の幅は $\tilde{\omega}$ である．

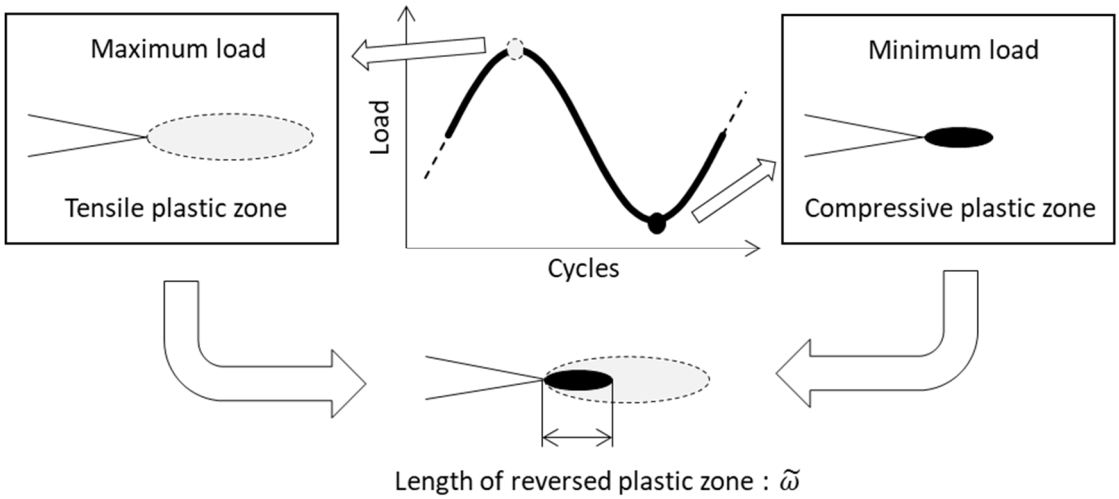


Fig. 7.4 Reversed plastic zone near the crack tip.

勝田らの研究グループ[85)-87)]は，CT 試験片を用いて疲労亀裂先端付近のひずみ場を画像測定し，特定のひずみ値に達した領域を両振り塑性域としている．ただし，繰返し負荷履歴や鋼材の種類に応じて応力－ひずみ関係は複雑に変化するため，特定の閾値で両振り塑性域を判定するのは困難としつつ，測定対象にレンズを接触させて撮影時のノイズを低減させるなどの工夫を加えることで，両振り塑性域の直接測定が可能であると結論付けている．

一方，平面応力状態の半無限版に一軸方向の引張，圧縮荷重が繰返し作用する場合，両振り塑性域内の応力－ひずみ関係は，Fig. 7.5 に模式的に示すような弾性変形を含むヒステリシスループを形成している．両振り塑性域内には，ヒステリシスループが囲む面積に相当する「塑性仕事」と称される仕事が生じるため，塑性仕事により供給されるエネルギが疲労亀裂伝播の駆動源であると考えられる．

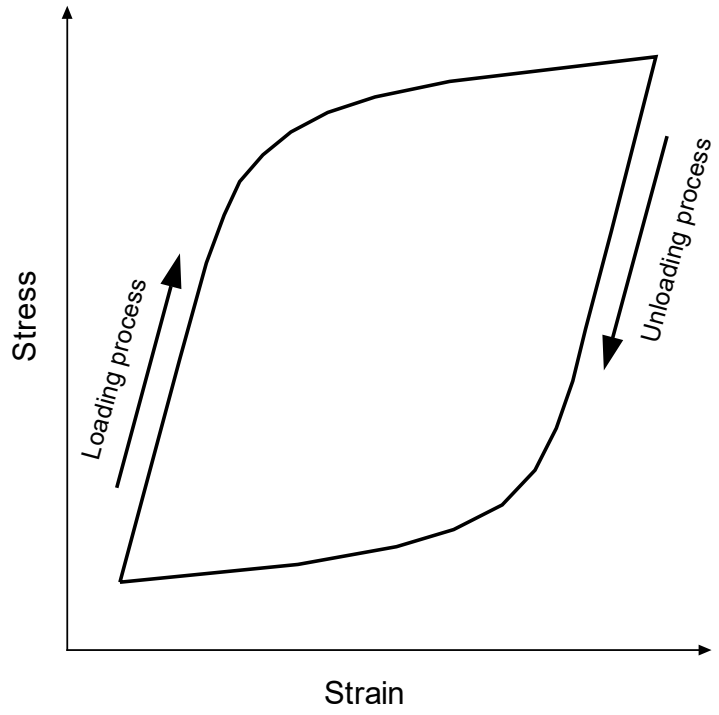


Fig. 7.5 Hysteresis loop in reversed plastic zone.

そこで，Fig. 7.6 に示すように，疲労亀裂先端近傍から亀裂伝播方向に対し複数の位置でのひずみ場をデジタル画像相関法により取得し，そこから得られる応力（もしくは荷重 P）－ひずみ関係のヒステリシスループのうち，除荷弾性コンプライアンス法により取得した引算ひずみ ε_{SUB} とのヒステリシスループ内面積を評価することで，亀裂開閉口挙動を含む塑性仕事に対応する両振り塑性域の測定を行った，

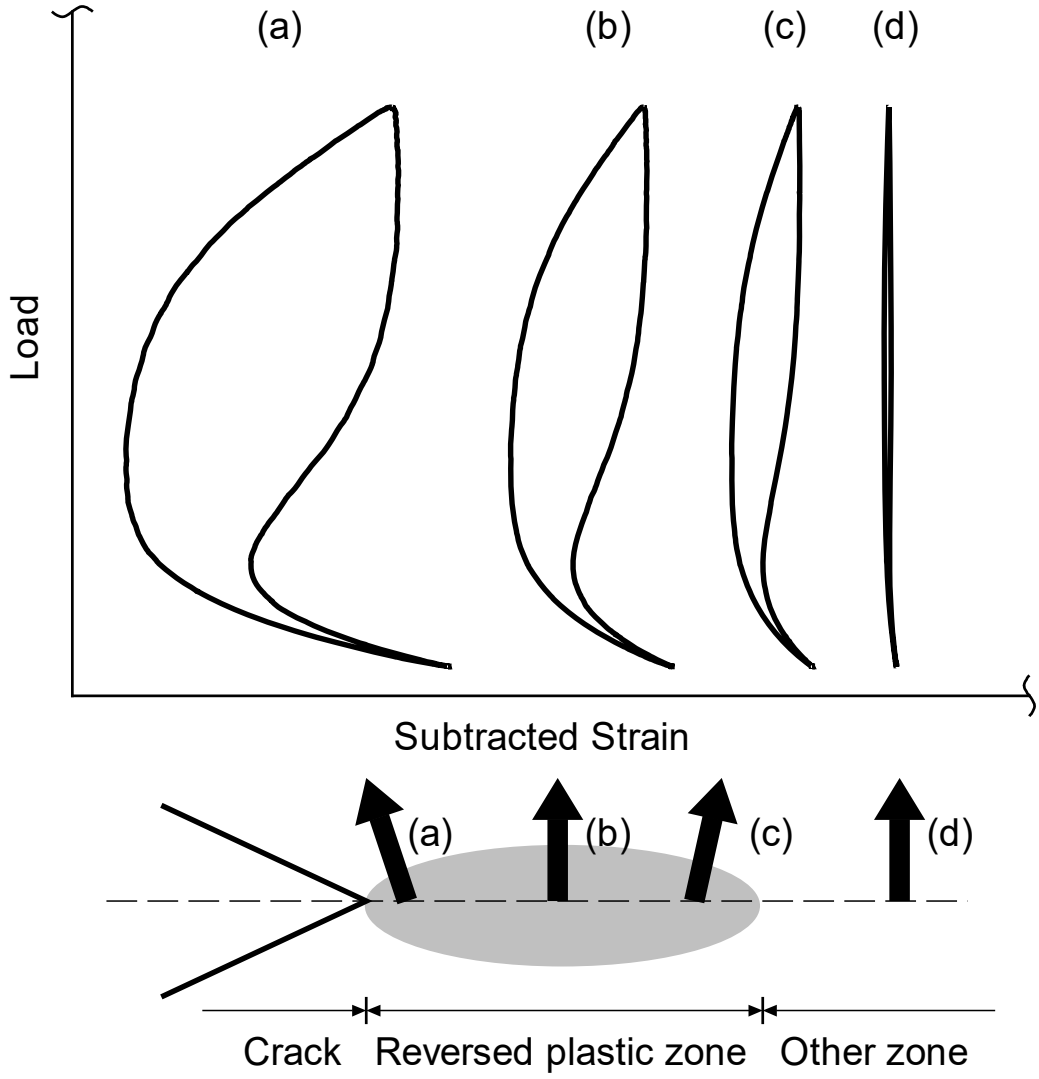


Fig. 7.6 Transition of subtracted loop shape.

ヒステリシスループは，Fig. 7.6 の図中 (a) ～ (d) のように疲労亀裂先端から遠ざかるにつれ，ヒステリシスループの幅が徐々に狭まった形状となる．これは両振り塑性の度合いや亀裂開閉口の影響が小さくなるためであり，この形状の推移は荷重条件や鋼材とは無関係に必ず確認される．そこで，各ヒステリシスループの形状を評価することで，種々の試験条件に依存しない $\tilde{\omega}$ の測定が可能となる．

7.3.2　試験条件

撮影に用いた試験片形状は，負荷振幅による撮影箇所の変動がほぼ荷重軸に限定される CCT 試験片（Fig. 4.4 b) 参照）とした．供試材は二種類の鋼材（以下，「TS-1」，「TS-2」と称する）を用いて，Table 7.1 に示す試験条件にて電気油圧サーボ式強度試験機を用いた繰返し一定荷重振幅試験を行った. Table 7.2 に示す撮影条件にて，高速度カメラを用いて Fig. 7.7 に示すように試験片表面を撮影した動画に対し，デジタル画像相関法を適用することで疲労亀裂先端近傍のひずみ場を取得した．なお，使用した機器の詳細は，後述するランダムパターンの作成に用いた機材と合せて付録 E に示す.

Table 7.1 Experimental conditions.

Specimen No.	TS-1	TS-2
Yield stress [MPa]	427	378
Young’s modulus [MPa]	206,000	
Maximum load [kN]	28.0	17.3
Minimum load [kN]	1.4	1.73
Frequency [Hz]	10	

Table 7.2 Shooting condition.

Frame rate [fps]	1,000
Shutter speed [s]	1/1,000
Visual field [pixel]	2,560 x 1,920
Length per 1 pixel [mm/pixel]	0.0033

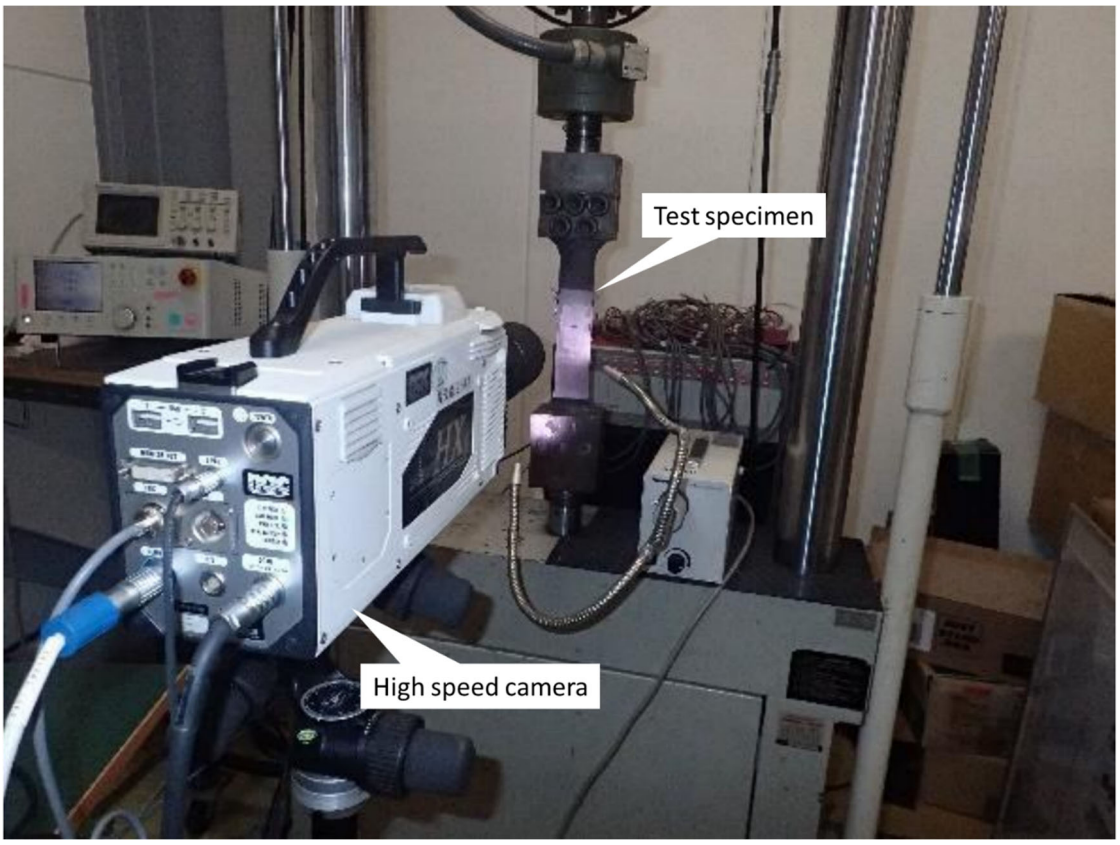


Fig. 7.7 Fatigue testing specimen and Digital High-speed camera.

7.4　デジタル画像処理によるひずみ場の取得

7.4.1　ランダムパターンの作成方法

デジタル画像相関法は，測定精度の向上のために撮影対象表面に輝度の違い

が明瞭なランダムパターンを塗装するのが一般的である[88) - 90)]．そこで試験片表面に，ベース色としてアクリル系のつや消し白色塗料を試験片表面が隠れる程度に吹き付け塗装を行い，その表面に黒のつや消し塗料をノズル口径 0.2 mm のエアブラシ用いて高低差約 1 m の高さから，Fig. 7.8 に示すようにコントラストが 50%程度の二値化ランダムパターン画像となるように吹き付け塗装を行った．なお，コントラストと粒子径分布の確認には，米国国立衛生研究所（NIH：National Institute of Health）によりサイエンス向けの画像処理ソフトウェアとしてオープンソースで開発された「Image J」[91)] を使用した．

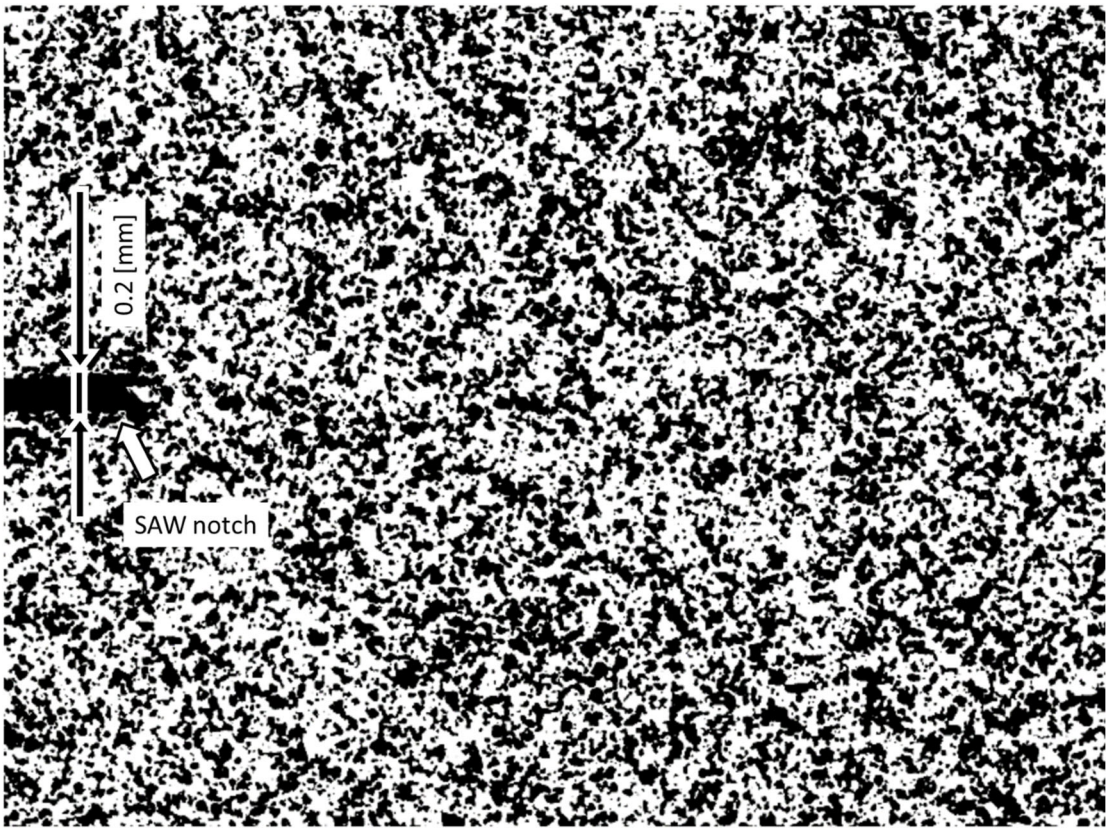


Fig. 7.8 Random pattern printed on specimen surface.

ランダムパターンを作成する際，粒子径が小さいほど検査領域を細かく設定

できるため測定精度の向上につながるが，粒子径が極端に小さい場合は動画撮影時の画素数とフレームレートとの組合せにより，一様な変形が生じる場合でも Fig. 7.9 に示すようなエイリアシングというモアレ縞のような変形推定処理を行う場合がある [92]．

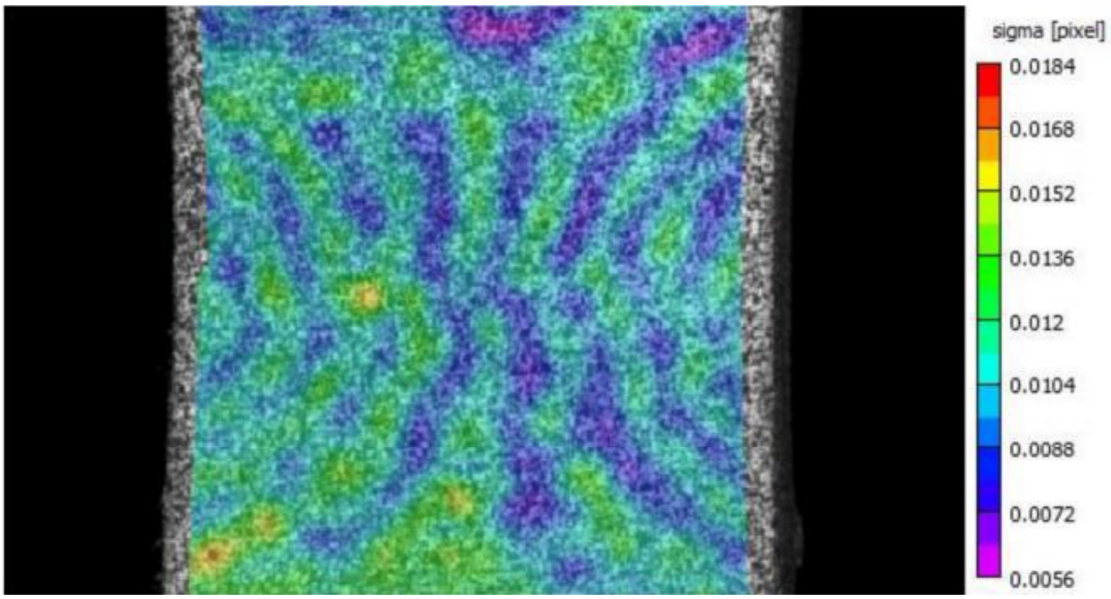


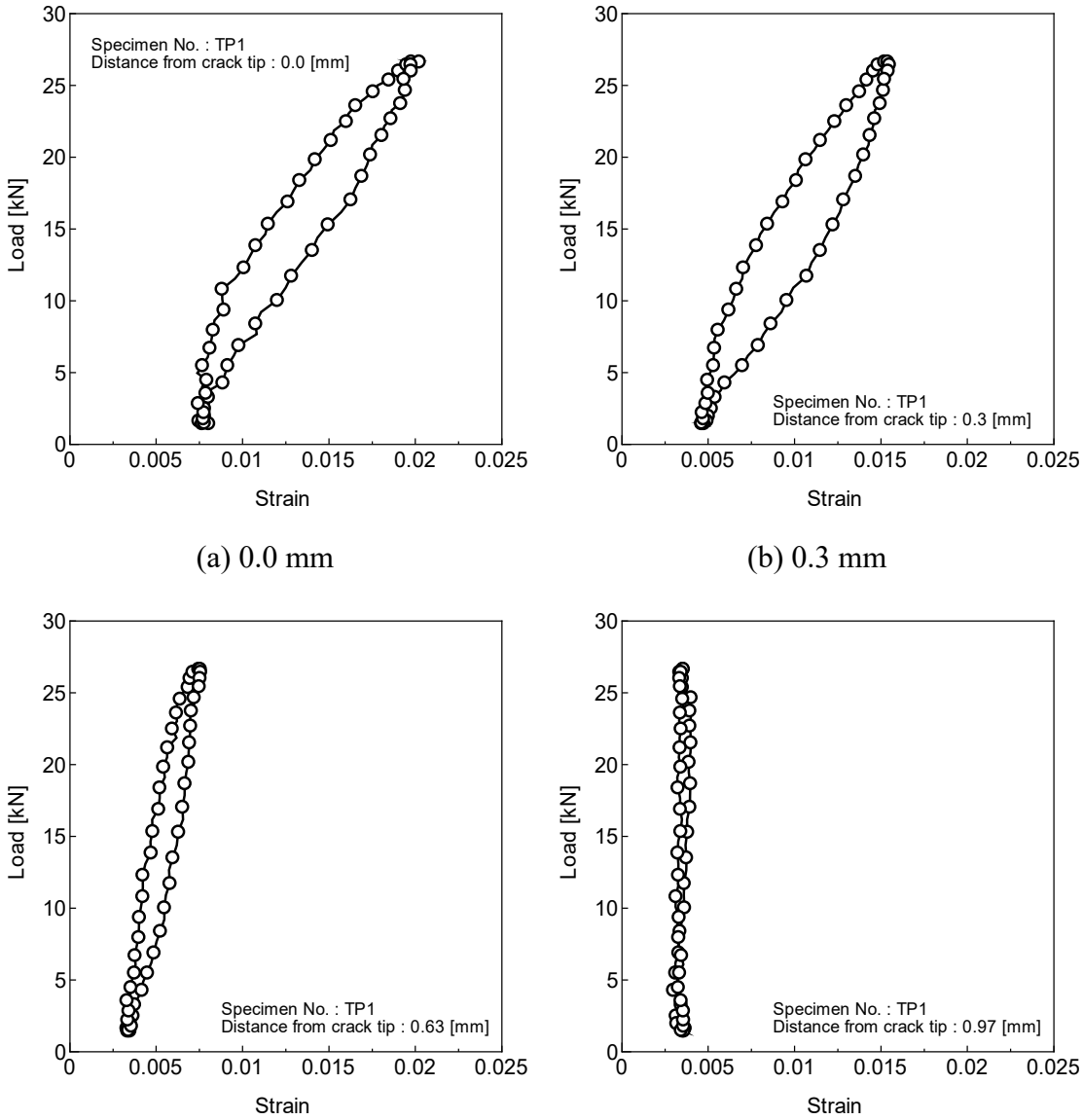
Fig. 7.9 The result of overly-fine speckles causing aliasing (moiré pattern showing).

7.4.2　デジタル画像相関によるヒステリシスループの描画

疲労亀裂先端近傍のひずみ場測定には, PIV 演算処理を行う流体解析画像ソフトウェア DaVis 8.3.1（LaVision 社）を用いた．負荷履歴とカメラのシャッターは，外部トリガにて撮影の同期を図っている．

Fig. 7.10 に TP1，Fig. 7.11 に TP2 のデジタル画像相関法にて取得した荷重 P－ひずみ ε 関係を示す．ひずみ場の撮影位置は，疲労亀裂が安定的かつ十分に伝播した箇所として，切欠き底から約 11 mm の亀裂伝播位置を起点とし，そこから 0.3 mm ，0.63 mm ，0.97 mm の計 4 箇所をデジタル画像相関処理した．なお，取得したひずみは亀裂伝播経路上の負荷方向のひずみとし，ゲージ長は検査領

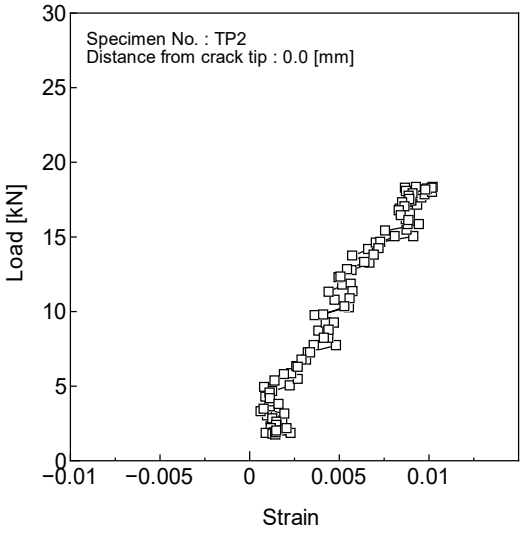
域のサイズ（41pixel）とした.



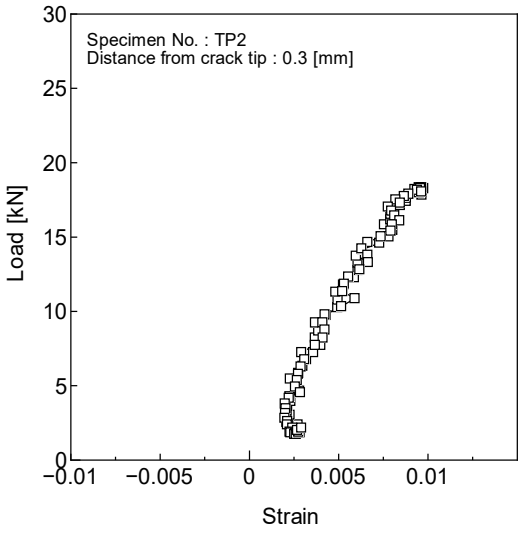
(a) 0.0 mm (b) 0.3 mm

(c) 0.63 mm (d) 0.97 mm

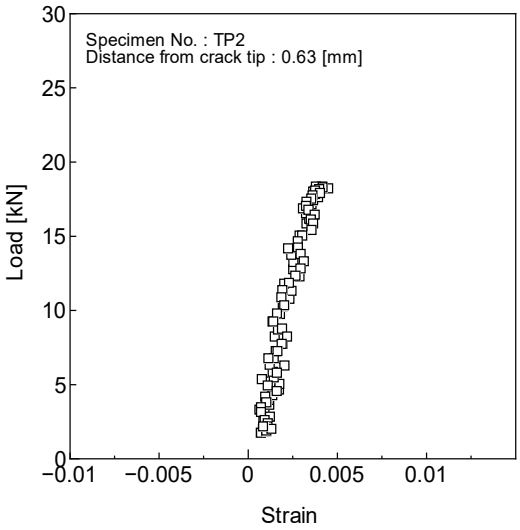
Fig. 7.10 Relationship between load and strain for each distance from crack tip of TP1.



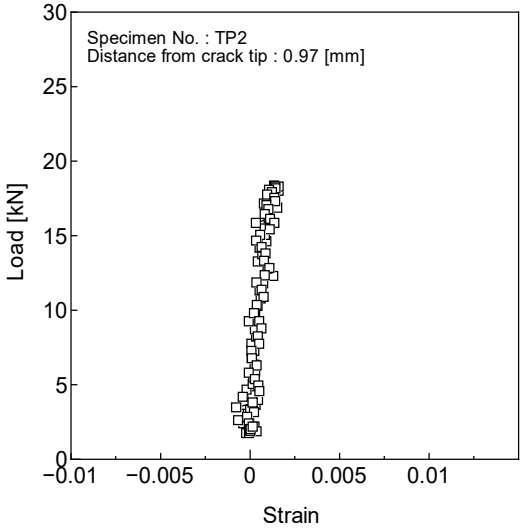
(a) 0.0 mm



(b) 0.3 mm



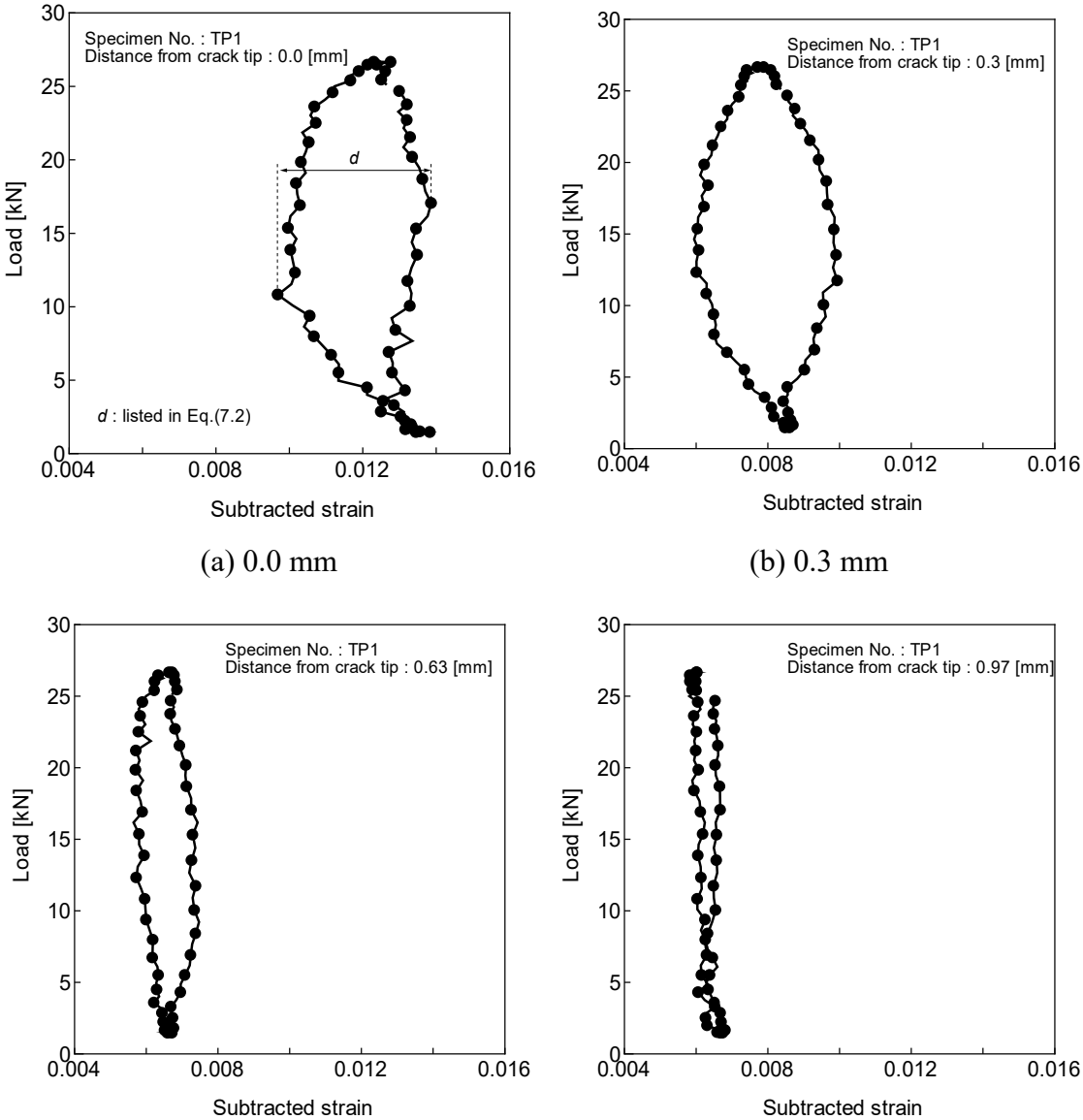
(c) 0.63 mm



(d) 0.97 mm

Fig. 7.11　Relationship between load and strain for each distance from crack tip of TP2.

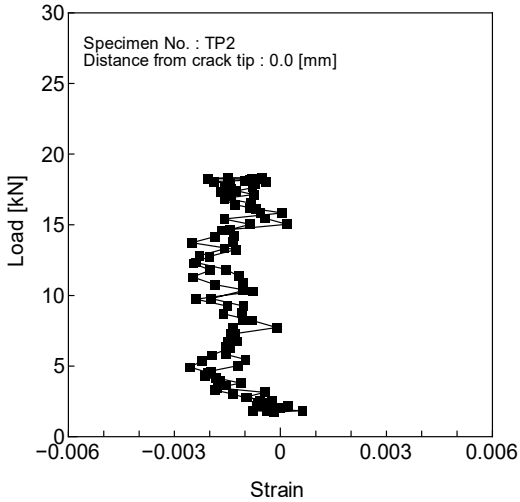
Fig. 7.10，Fig. 7.11 より，除荷弾性コンプライアンス法により得られた P - ε_{SUB} 関係のヒステリシスループを Fig. 7.12，Fig. 7.13 に示す．ここで，除荷弾性範囲は最大荷重から除荷範囲の 2～8 割程度の荷重範囲を都度判断している．



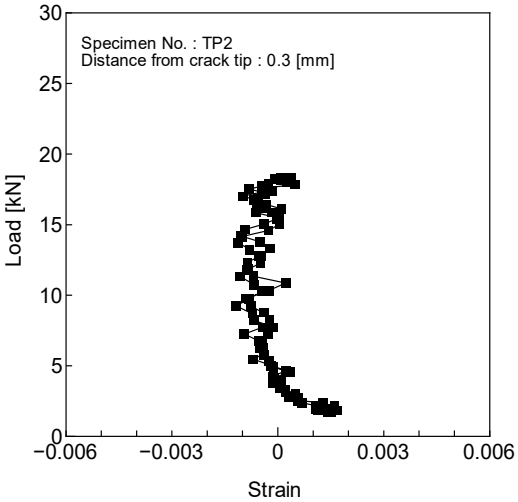
(a) 0.0 mm (b) 0.3 mm

(c) 0.63 mm (d) 0.97 mm

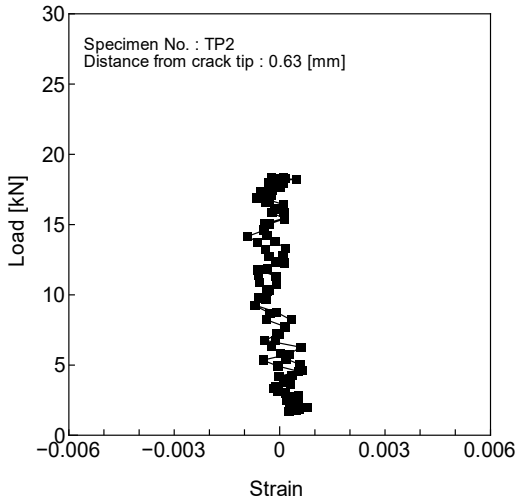
Fig. 7.12 Transition of measured subtracted hysteresis loops for each distance from crack tip of TP1.



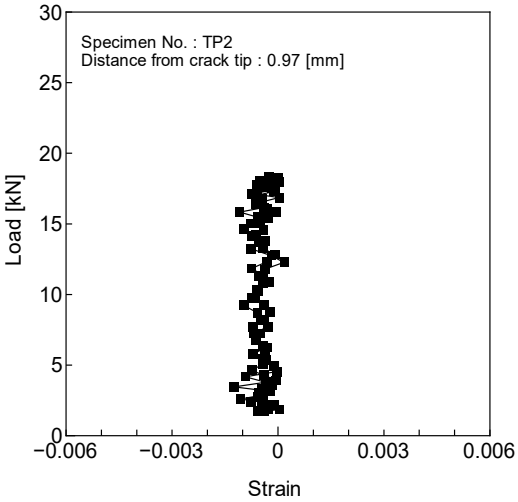
(a) 0.0 mm



(b) 0.3 mm



(c) 0.63 mm



(d) 0.97 mm

Fig. 7.13 Transition of measured subtracted hysteresis loops for each distance from crack tip of TP2.

Fig. 7.12 は負荷と除荷の過程が明瞭かつ，亀裂先端からの距離に応じてループ幅が狭くなっているのが確認できるが，Fig. 7.13 は疲労亀裂開閉口挙動と思われる形状の違いが見られるだけで，ループを描くまでに至っていない．これは試験の設定荷重が低いため，塑性域の形成範囲が小さかったことが原因と考えられる．

7.5　ヒステリシスループ形状に基づく両振り塑性域寸法の取得

7.5.1　評価に用いるヒステリシスループの決定

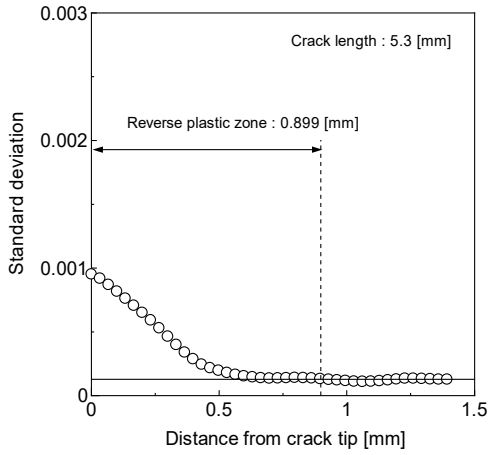
Fig. 7.12，Fig. 7.13 より，比較的ループ形状が明確であった TP1 のデータから両振り塑性域を推定することとした．両振り塑性域ではヒステリシスループ形状は Fig. 7.6 (a) ～ (c) のような膨らんだ形状となり，弾性領域では Fig. 7.6 (d) のようにほぼ線形状態となる．そこで，疲労亀裂線上の複数点においてヒステリシスループの形状を確認し，亀裂先端から閉じたヒステリシスループを示す範囲までを$\tilde{\omega}$とした．

7.5.2　標準偏差を用いた考察

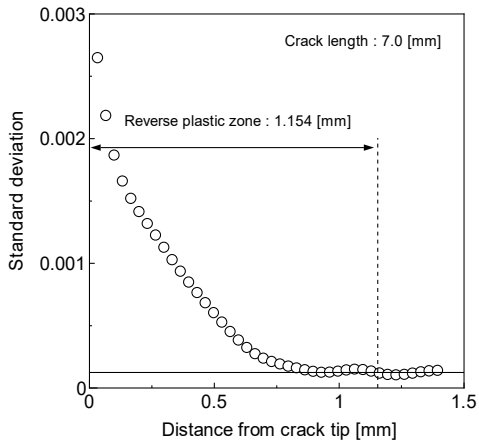
疲労亀裂長さ 5.3 mm，7.0 mm，11 mm における各亀裂先端近傍からの負荷の違いによるヒステリシスループ幅の変化の推移毎に（7.1）式に示す標準偏差から評価値を求め，その評価値と両振り塑性域外と考えられる領域部分の平均値の交点を $\tilde{\omega}$ として決定した結果を Fig. 7.14 に示す．

$$S = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2} \tag{7.1}$$

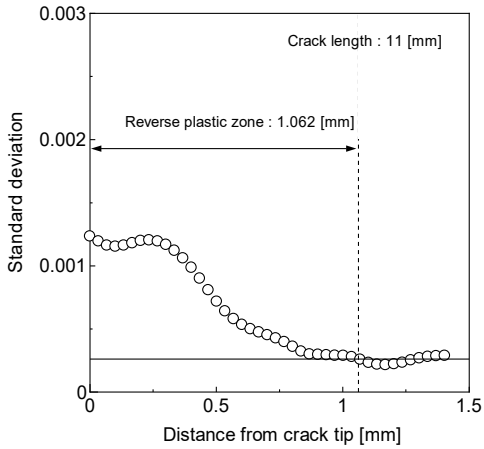
S:　標準偏差,
x_i:　各データ数,
μ:　平均値,
n:　データ数.



(a) 5.3 mm, 370,470 cycles



(b) 7.0 mm, 432,814 cycles



(c) 11 mm, 526,417 cycles

Fig. 7.14 Transition of standard deviation.

図より両振り塑性域範囲の安定的な評価をするためには，両振り塑性域外と考えられる領域部分を定量的に評価する基準の考察が必要である．加えて，標準偏差は平均からのばらつきを示す評価値であるため，両振り塑性域でのヒステリシスループの膨らみ具合（ループの幅）の標準偏差を計算するとある一定の値となるが，亀裂開閉口挙動の影響が見られない弾性域ではゼロ付近に収束すると考えられるためである．そこで，まず明らかに収束域（弾性域）と考えられる領域の標準偏差の平均を収束値とし，亀裂先端から初めて収束値と等しい値を取るまでを両振り塑性域とした．

7.5.3　重み関数付き偏差を用いた考察

ヒステリシスループの幅に対しノイズ影響を受け難く評価する手法として，（7.2）式に示すように ε_{SUB} に重みを乗じた関数 [93] による評価を行った一例を Fig. 7.15 に示す．

$$S_W = \frac{1}{n}\sum w(x,y)\varepsilon_{\mathrm{dsub}} \tag{7.2}$$

ここで，

$$w(x,y) = \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{W}x\right)\sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{d}y\right)$$

S_W:　重み付き偏差，

n:　データ数，

$w(x,y)$:　重み関数，

$\varepsilon_{\mathrm{dsub}}$:　ヒステリシスループの負荷・除荷の差，

W:　亀裂開口部の測定フレーム数，

d:　　ヒステリシスループの負荷・除荷の最大差（Fig. 7.12(a)例示）.

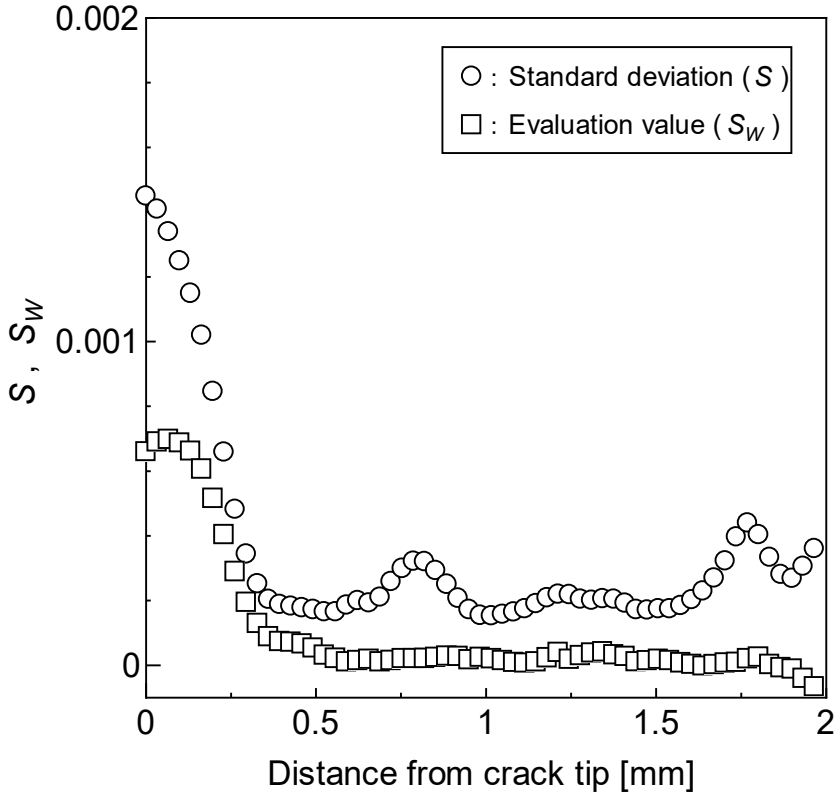


Fig. 7.15 Comparison of evaluation values.

重み付き関数を用いた偏差によるヒステリシスループ幅の安定的な評価の実現に加え，疲労亀裂先端から両振り塑性域とみなせる領域の境目を特定することも同時に検討した．そこで，亀裂先端近傍から十分に離れた弾性域を収束値と考え，（7.3）式に示すロバスト推定手法である Biweight 推定法 [71] を用いることで，収束値の誤差の軽減を試みた．

$$w(d) = \begin{cases} 0 & (d < -W, W < d) \\ \{1 - (d/W)^2\}^2 & (-W \leq d \leq W) \end{cases} \tag{7.3}$$

w(*d*):　　重み関数,

d:　　各データの近似式での最大誤差,

W:　　許容誤差 W_1, W_2.

疲労亀裂長さ 7.0 mm における亀裂先端近傍から重み付き関数を用いた偏差による種々のヒステリシスループ幅の評価値に対して，Biweight 推定法を適用して求めた最小二乗近似の一例を Fig. 7.16 に示す．各収束計算は 20 回とし，1～10 回の収束計算では許容誤差 W_1 を最初の近似直線との最大誤差を用い, 11～20 回の許容誤差 W_2 は W_1 の 0.5 倍とすることで収束の厳密化を図った.

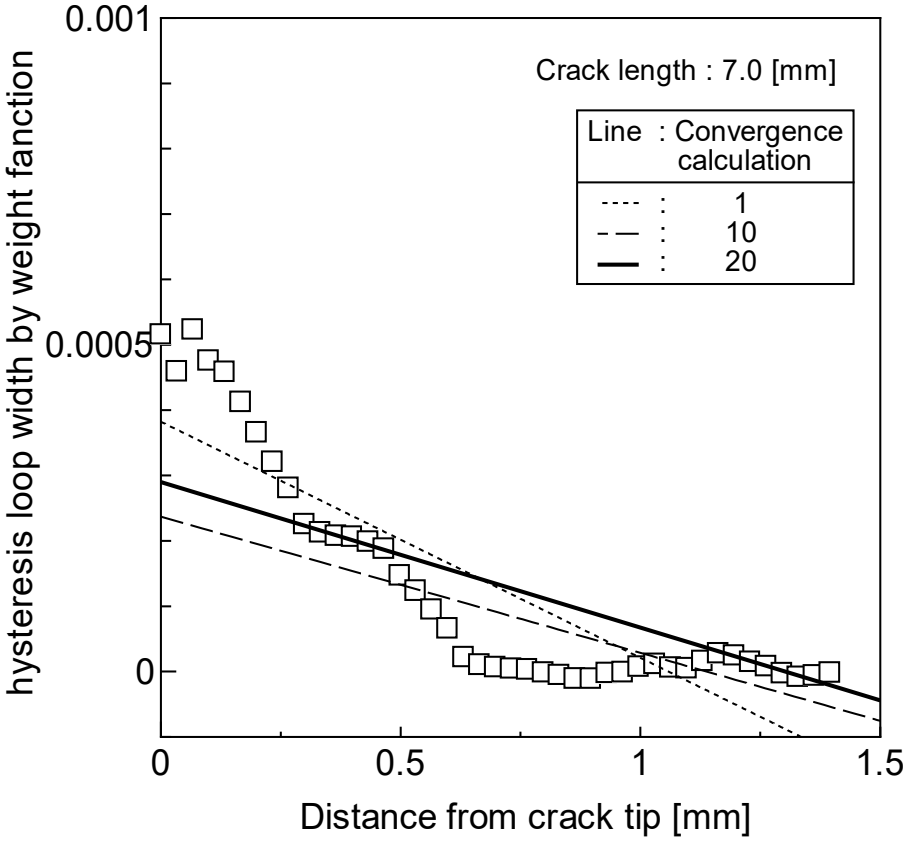
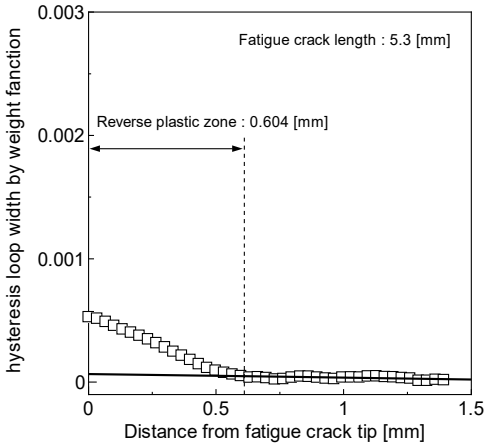
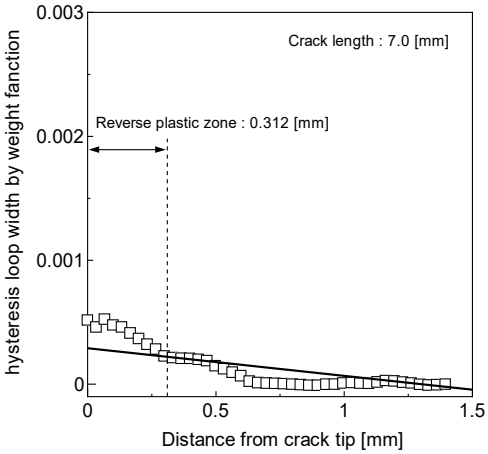


Fig. 7.16 A example of convergence calculation by the weighted least squares approximation.

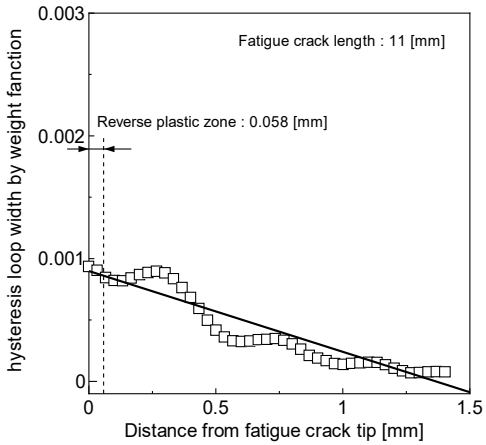
Fig. 7.14 に示す各亀裂長さに対し, 収束計算により得られた近似直線とヒステリシスループ幅の評価値との交点を，亀裂先端からの $\tilde{\omega}$ とした結果を Fig. 7.17 に示す.



(a) 5.3 mm, 370,470 cycles



(b) 7 mm, 432,814 cycles



(c) 11 mm, 526,417 cycles

Fig.7.17 Transition of weighted deviation value.

7.5.4　測定結果の比較

測定した $\tilde{\omega}$ を整理した結果を Fig. 7.18 に示す. 比較のために疲労亀裂伝播成長シミュレーション FLARP [37] による，$\tilde{\omega}$ の推定結果も併せて示す（グラフ上では初期亀裂 5.0 mm を含む）．同図に示すように，標準偏差による $\tilde{\omega}$ の推定は大きめの値を与える結果となった. 一方, 重み付き関数を用いた偏差に基づく推定では，測定結果と推定結果の一致の程度は改善すると期待されたが，Fig. 7.15 に示した評価値の推移グラフ形状が良好であった亀裂長さ 5.3 mm においても推定結果との差は大きいなど，測定結果が妥当であるとは結論付けられない結果となった.

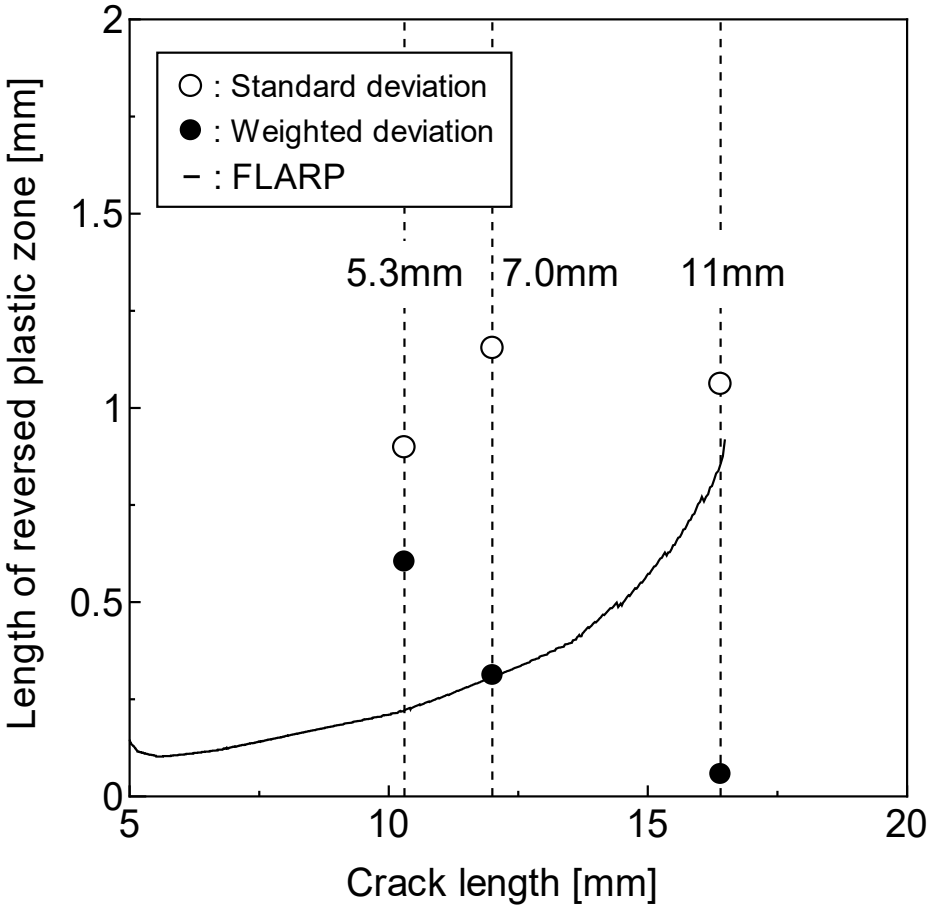


Fig.7.18 Comparison of length of reversed plastic zone by DIC and ones by FLARP.

7.6　結言

デジタル画像相関法により亀裂先端近傍に形成されるひずみ場を測定し，これより抽出したひずみ値の標準偏差を指標とする手法に基づき $\tilde{\omega}$ を決定した．この実験より，ひずみ値が小さい場合はノイズの影響を強く受けるため，ノイズ影響に強いと考えられた重み付き関数を考慮した標準偏差を指標としても，その改善は十分でないことを確認した．

そのため，ノイズ影響を極力除去する改善法の導入が不可欠であり，具体的にはカメラの解像度やシャッタースピード，試験片へのランダムパターン塗装法の工夫など，撮影条件の改善が不可欠であることが示唆された．

第８章

結　論

本研究では，破壊力学的手法により疲労亀裂伝播挙動を評価し，これに基づく疲労強度評価に必要な，各種パラメータを高精度に取得するための実験手法に関して研究を実施した．

着目したパラメータは，疲労亀裂伝播特性を評価する際に広く参照されている下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} と，変動荷重履歴下においても良好に疲労亀裂成長履歴を推定可能な，RPG 荷重基準に基づく有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} である．

前者については，これを決定するまでに必要な時間がかなり長時間であるため，実験時間を短縮しても従来知見と同程度の値を得るための試験方法について検討を実施した．

後者については，疲労亀裂成長に有効に寄与する荷重範囲の起点となる RPG 荷重 P_{RPG} を広く一般的に導入可能な測定機器を活用しつつ，高精度かつデータ処理における熟練性を不要とするデータ処理自動化について研究を実施した．更に，ΔK_{RPG} をパラメータとする手法の特長である疲労亀裂発生段階から連続して疲労亀裂伝播挙動を評価できることを，定量的に検証するための試験片形状及び実験方法を検討した．加えて，ひずみゲージでは不可能な疲労亀裂先端近傍のひずみ場を，二次元的に測定できるデジタル画像相関法を用いた疲労亀裂先

端近傍のひずみ場測定技術に関する検討も実施した.

本研究の結果を要約すると以下のとおりである.

(1) ASTM E647 における K 値減少法から得られる ΔK_{th} と有意差のない ΔK_{th} 値が得られる簡易的手法を提案した.

(2) 市販の測定機器に最低限の改良を加えたコンプライアンス自動計測機能付き疲労亀裂伝播試験システムを構築することで，これまで除荷弾性コンプライアンスを得るために必要であった引算回路を用いることなく，ASTM E647 に準拠した疲労試験にて取得したヒステリシスループより，疲労亀裂の開閉口挙動を含む引算ひずみ ε_{SUB} を取得することを可能とした.

(3) P_{RPG} を自動判定する手法を構築することで，作業者に依存しない P_{RPG} 値を取得することを可能とした.

(4) 疲労亀裂発生から数結晶粒段階の成長状態のその場観察に適した試験片を提案し，実際に観察を行うことでその有効性を確認した.

(5) ひずみゲージに代わる新たなひずみ測定手法として，デジタル画像相関法を用いた測定を実施し，荷重 P－ひずみ ε 関係のヒステリシスループの取得と，そこから除荷弾性コンプライアンス法により得られた ε_{SUB} によるヒステリシスループが取得可能であることと，繰返し両振り塑性域寸法 $\tilde{\omega}$ の特定に関する可能性を示唆することを確認した.

以上のように，疲労亀裂伝播の停留判定基準の簡易化と P_{RPG} の安定的な測定技術と自動判定手法の確立，および ΔK_{RPG} 基準の伝播則が，疲労亀裂の発生から伝播までを統一的に評価可能であることを，実験的検証により明らかにする

ことができた.

一方，P_{RPG} は，適用する供試材毎に疲労亀裂伝播試験から取得する必要があるため，現時点で評価材料数が不足していることに加え，P_{RPG} の自動判定アルゴリズムには, 将来, 評価可能な材料が増えることに対応させた機械学習機能を組込んだシステムの確立が必要である.

付録 A

t 検定を用いた統計的仮説検定手法

A.1　はじめに

実験から得られる測定データと数値シミュレーションによって得られる解析結果を比較する際, 相互の妥当性を判断するための指標や基準が必要となる. そこで科学的根拠に基づいた実験を定量的に行い，その結果を以て結論を述べる方法が最善であると考えるが, 時間や労力などの費用対効果を考慮した際, 学術的に理論かつ信頼性の高い手法を用いることは非常に有効な手段であると考える.

そこで，統計学を用いて理論上，信頼性が高いと考えられている，統計的仮説検定の中でよく利用されている t 検定を用いることとした.

A.2　t 検定とは

t 検定とは，例えば 2 つのグループの「平均の差」が，有意であるか偶然的な誤差の範囲であるかを調べる統計学的仮設検定法の一つであり，主にデータに対応がある際の t 検定と，データに対応がない Student's，Welch の t 検定とがある．なお，JIS Z 8101-1 [94] では，「帰無仮説を棄却して対立仮説を支持できるかどうかを決定する手続き。」として定義されている検定法に用いる確率分布の一つとして，t 分布検定法がある.

A.3　使用方法

ここでは，表計算ソフトウェア MS-Excel の追加機能である，統計学的および工学的分析を行うためのデータ分析ツールの一つである t 検定の機能を例に説明する．

Fig. 2.5 a) ～ e) のプロットデータの一部を Table A.1 に示す．表に示す ASTM 基準で求めた下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の列と，ASTM 基準の緩和提案である a) ～ e) それぞれの列は 1 対 1 で対応していることがわかる．

Table A.1 Protted data in Fig. 2.5 a) ～ e) .

	A	B	C	D	E	F
1	ΔK_{th}	Various mitigation conditions				
2	ASTM	a)	b)	c)	d)	e)
3	5.12E+00	5.19E+00	7.80E+00	5.37E+00	4.92E+00	5.58E+00
4	5.58E+00	5.67E+00	5.64E+00	5.47E+00	5.37E+00	5.71E+00
5	3.25E+00	3.64E+00	3.67E+00	3.68E+00	3.45E+00	3.47E+00
6	4.89E+00	4.87E+00	4.94E+00	4.85E+00	4.79E+00	4.33E+00
7	4.52E+00	4.73E+00	5.08E+00	4.79E+00	4.27E+00	4.86E+00
8	3.64E+00	3.87E+00	3.88E+00	3.87E+00	4.09E+00	2.95E+00
9	3.25E+00	3.65E+00	3.69E+00	3.62E+00	3.37E+00	6.32E+00
10	4.44E+00	4.84E+00	4.67E+00	4.74E+00	4.79E+00	4.49E+00
11	4.41E+00	4.67E+00	4.70E+00	4.54E+00	4.85E+00	5.20E+00
12	3.34E+00	3.53E+00	3.52E+00	3.51E+00	3.00E+00	3.33E+00
13	3.41E+00	3.64E+00	3.75E+00	3.66E+00	3.56E+00	4.90E+00
14	2.89E+00	3.03E+00	2.95E+00	3.05E+00	3.18E+00	2.89E+00
15	9.42E+00	1.09E+01	1.07E+01	1.20E+01	1.24E+01	1.32E+01
16	2.80E+00	3.06E+00	2.86E+00	2.98E+00	2.78E+00	2.25E+00
17	1.22E+01	1.33E+01	1.34E+01	1.34E+01	1.29E+01	1.45E+01
18	1.11E+01	1.11E+01	1.12E+01	1.13E+01	1.14E+01	1.10E+01
19	8.24E+00	8.64E+00	8.45E+00	8.51E+00	9.09E+00	9.76E+00
20	5.36E+00	5.50E+00	5.54E+00	5.34E+00	5.65E+00	7.42E+00
21	3.83E+00	4.18E+00	4.25E+00	4.17E+00	4.35E+00	4.08E+00
22	3.03E+00	3.13E+00	3.16E+00	3.15E+00	3.63E+00	3.50E+00

そこで，MS-Excel のコマンドである「データ」タブ，「データ分析」ボタン，「t 検定 ： 一対の標本による平均の検定」を順に選択することで，Fig. A.1 のウ

インドウが開くので，各項目に Table A.2 に示す値を入力すると，Fig. A.2 に示す検定結果が表示される．

Fig. A.1 Input Form.

Table A.2 Contents at a) in the input form.

変数 1 の入力範囲(1) :	$A$3:$A$63
変数 2 の入力範囲(2) :	$B$3:$B$63
仮説平均との差異(Y) :	0
ラベル(L) :	チェック
α (A)	0.05

t-検定: 等分散を仮定した2標本による検定		
	5.122883	5.194795
平均	5.316043	5.715773
分散	6.507467	7.098236
観測数	60	60
プールされた分散	6.802851	
仮説平均との差異	0	
自由度	118	
t	−0.83942	
P(T<=t) 片側	0.201464	
t 境界値 片側	1.65787	
P(T<=t) 両側	0.402929	
t 境界値 両側	1.980272	

Fig. A.2 Result of the t-test.

t 検定の結果は，図中に示す一般的に p 値と呼ばれる「P(T<=t) 片側」もしくは「P(T<=t) 両側」の検定値が，有意水準確率より大きいか小さいかで判断するため，Fig. A.2 に示す有意水準 α が仮にデフォルト値のまま（0.05（5%の意味））とした場合，

・p 値が 0.05 以下の場合，平均値の差に有意差がある．

・p 値が 0.05 より大きい場合，平均値の差に有意差がない．

との判断となるため，この例では「両データに有意差はない」との結論となる．

なお，t 検定の p 値については，T.TEST 関数でも求めることが可能であるが，ここでは割愛する．

付録 B

微分法によるいくつかの荷重決定法について

B.1　はじめに

豊貞らによると，疲労亀裂の伝播は再引張塑性域形成荷重（RPG 荷重）P_{RPG} 以上の繰返し負荷が必要であるが，RPG 荷重 P_{RPG} を決定するには繰返し負荷 1 サイクルあたりのコンプライアンス変化を測定した荷重 P－ひずみ ε 関係によるヒステリシスループが必要不可欠である．

本研究では，P_{RPG} の決定に「反転法」を採用しているが，町田ら [49]によると除荷弾性コンプライアンス法により得た引算ひずみループを構成する負荷過程の引算ひずみ ε_{SUB} に対し，荷重 P による微分を複数回行うことで，変化曲線より P_{RPG} に相当する変曲点が現れるとしている．

そこで，町田らの手法（以下，「微分法」）について解説を行うとともに，利便性について紹介する．

B.2　微分法とは

微分法とは，P - ε 関係から除荷弾性コンプライアンス法により取得した例を Fig. B.1 示す，P - ε_{SUB} 関係によるヒステリシスループの広義の意味でのコンプライアンス変化率の推移を確認する方法である．作業としては，ε_{SUB} に対し P で複数回の微分を行うことで，亀裂閉口荷重 P_{cl} や P_{RPG} が求まるとしているが，亀裂

開口荷重 P_{op} は決定できないと結論づけている.

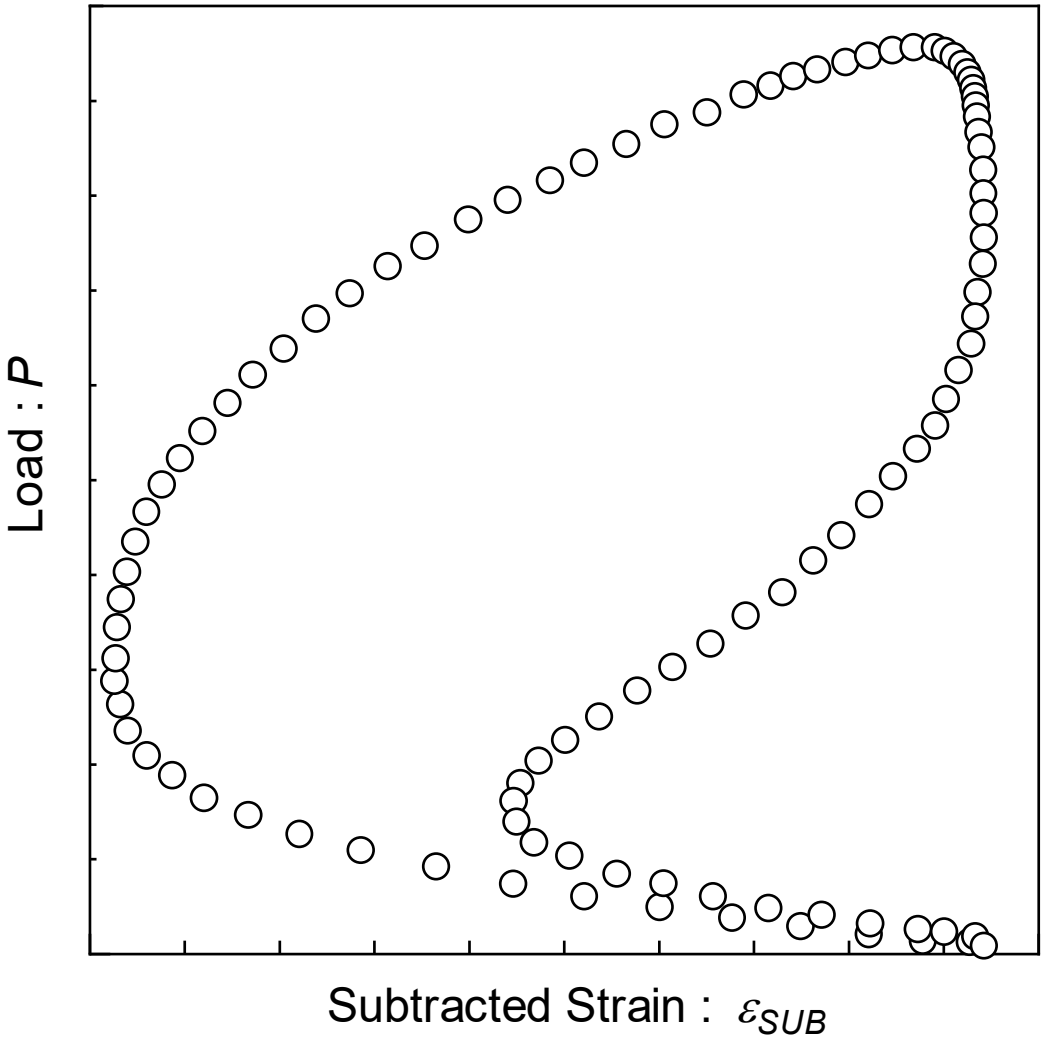


Fig. B.1 Example of subtracted hysteresis with the rolled one.

ここで，一階の微分 $d\varepsilon_{SUB}/dp$ は「ヒステリシスカーブ微分法」，二階の微分 $d^2\varepsilon_{SUB}/dp^2$ は「コンプライアンス微分法」と呼ぶ.

B.3　使用方法

B.3.1　ヒステリシスカーブ微分法

まず最初に，Fig. B.1 に示すヒステリシスループを構成している ε_{SUB} を，ヒステリシスカーブ微分法として P で微分（$d\varepsilon_{SUB}/dp$）して得た変化を Fig. B.2 に示す.

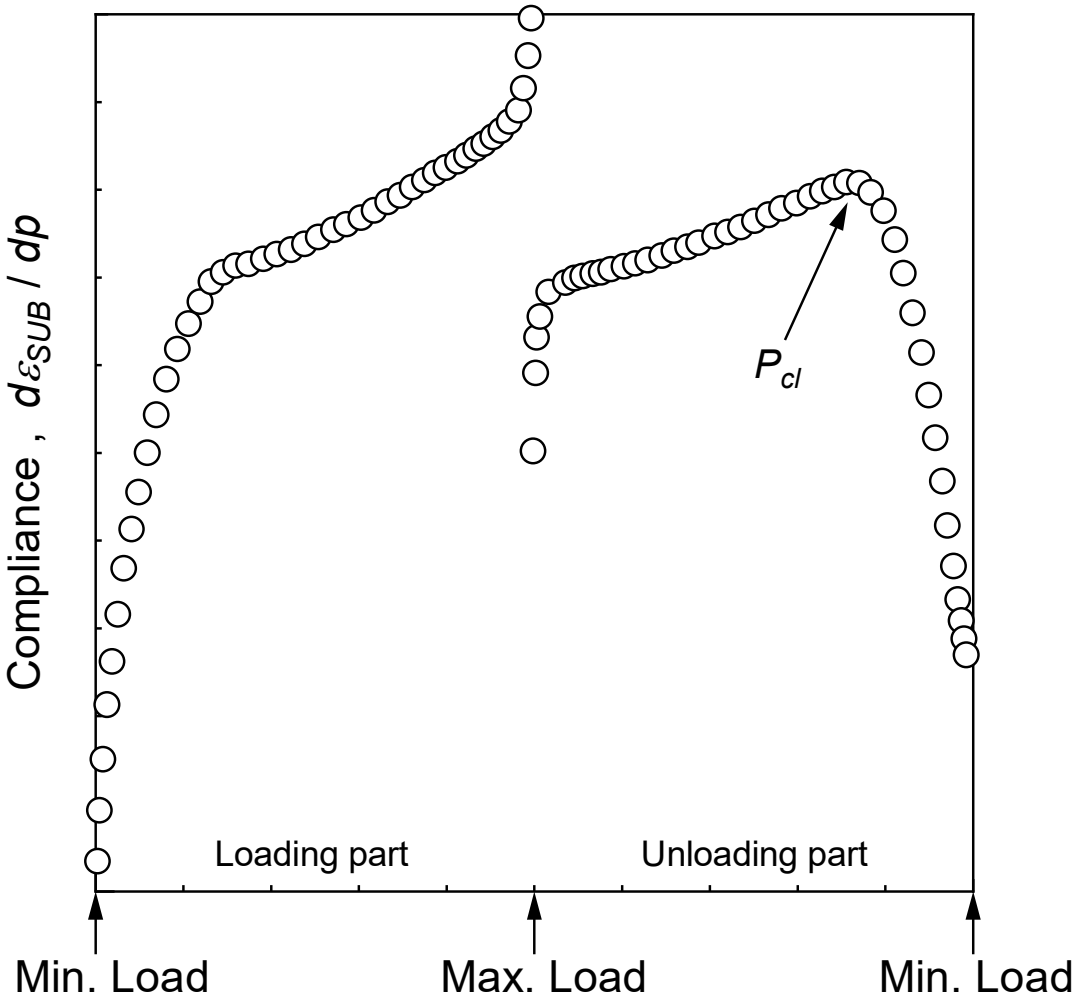


Fig. B.2 Change of compliance during one cycle.

ここで，実際に測定した ε と ε_{SUB} には（B.1）式の関係があるため，それぞれ

の微分値 $d\varepsilon/dp$，$d\varepsilon_{SUB}/dp$ は（B.2）式の関係となる．

$$\varepsilon_{SUB} = C_1 \times \varepsilon + C_2 \times p + C_3 \tag{B.1}$$

$$\frac{d\varepsilon_{SUB}}{dp} = C_1 \times \frac{d\varepsilon}{dp} + C_2 \tag{B.2}$$

ここで，C_1，C_2，C_3 は定数である．

一般にヒステリシスループの形状や大きさは，供試材の種類や試験片形状，亀裂の開閉口挙動，亀裂の成長過程（Stage I，II，III）の違いだけでなく，除荷弾性の設定範囲や亀裂先端とひずみの測定位置など，あらゆる要素が影響する状態で変化していくため，定数（C_1，C_2，C_3）を一義的に定めるのは困難である．

町田らは，ヒステリシスカーブ微分法で得た Fig. B.2 右側の曲線に示す除荷過程中に表れる極大点は，西谷ら [23] の考察に基づき，亀裂閉口以前が（亀裂先端再圧縮塑性域形成による）コンプライアンスの上昇過程であるのに対し，亀裂閉口後は見かけの断面積が増加することでコンプライアンスは下降過程となるため，除荷過程の変曲点は P_{cl} であるとしている．ここで，負荷過程においては特徴的な変化点が見られないため，P_{op} の特定は困難としている．

B.3.2　コンプライアンス微分法

ヒステリシスカーブ微分法で得た微分値 $d\varepsilon_{SUB}/dp$ を，さらに P で微分するコンプライアンス微分法により得た微分値 $d^2\varepsilon_{SUB}/dp^2$ の結果を Fig. B.3 に示す．

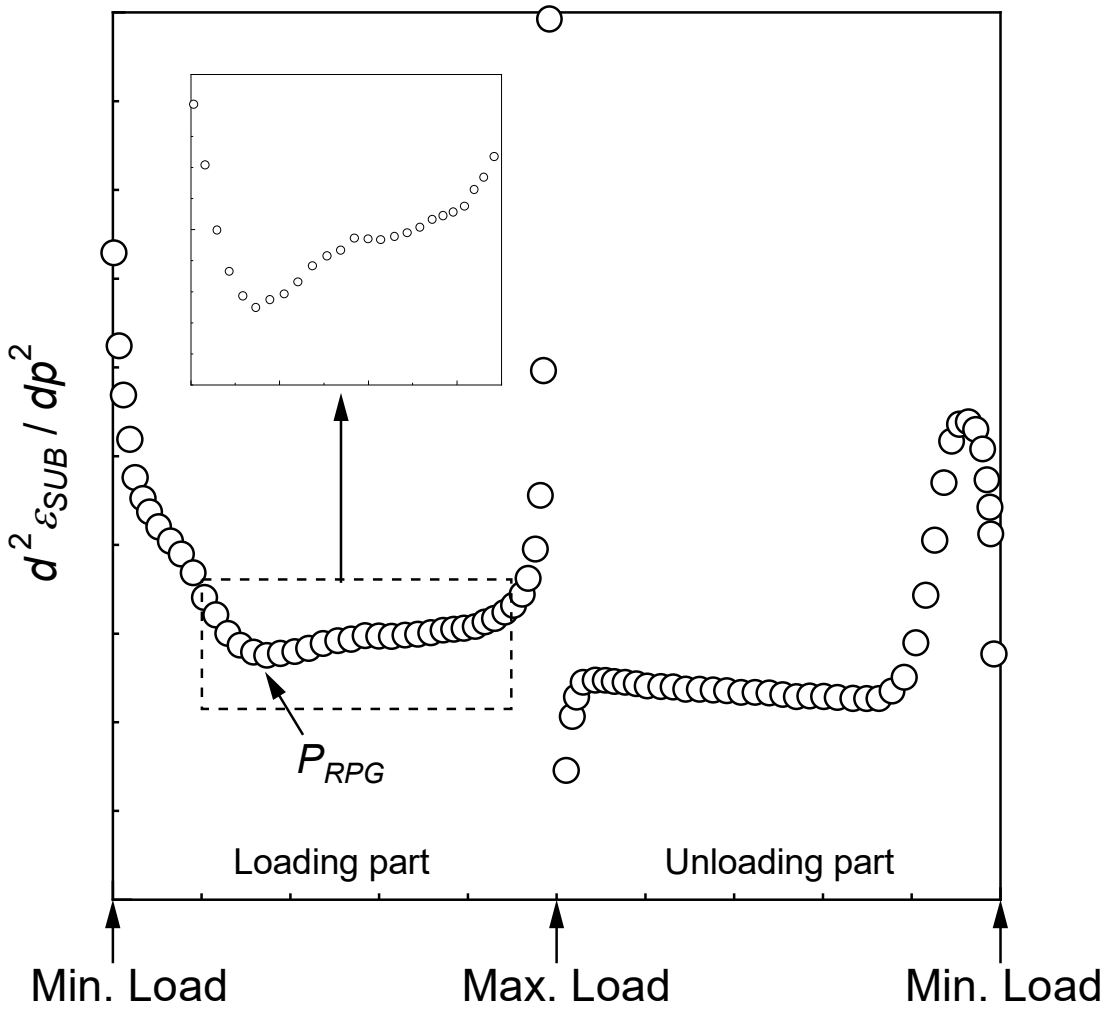


Fig. B.3 Curve of the change rate of compliance during one cycle.

ここで，ε と ε_{SUB} のそれぞれの二階微分値 $d^2\varepsilon/dp^2$，$d^2\varepsilon_{SUB}/dp^2$ は，（B.1）式，（B.2）式と同様に（B.3）式となる．

$$\frac{d^2\varepsilon_{SUB}}{dp^2} = C_1 \times \frac{d^2\varepsilon}{dp^2} \tag{B.3}$$

町田らは，Fig. B.3 より負荷過程における極小点は，亀裂閉口後に増加していた見かけ上の断面積が減少する中で，亀裂先端が開口状態となる荷重 P_{op} か，亀

裂先端に再引張塑性域が生じ出す荷重（RPG 荷重）P_{RPG} の何れかのコンプライアンス変化が表われた変曲点であると考え，以下の考察理由から変曲点は RPG 荷重 P_{RPG} であると結論づけている．

- 再引張塑性域寸法は，荷重増分のほぼ二乗に比例して増加すると考えられる．
- 繰返し負荷中の 1 サイクルにおいて，常に亀裂が開口状態の測定データでも変曲点が表れている．
- 試験片が破断直前の測定データにも変曲点が見られる．
- 豊貞らの考察 [95] に従うと, 亀裂開口点と再引張塑性域が生じだす時点は一致しない.

B.4 考察結果の検証

Fig. B.4 に微分法による得られる変曲点の荷重と，反転法により得られる荷重を，同一の試験データから得た結果を示す.

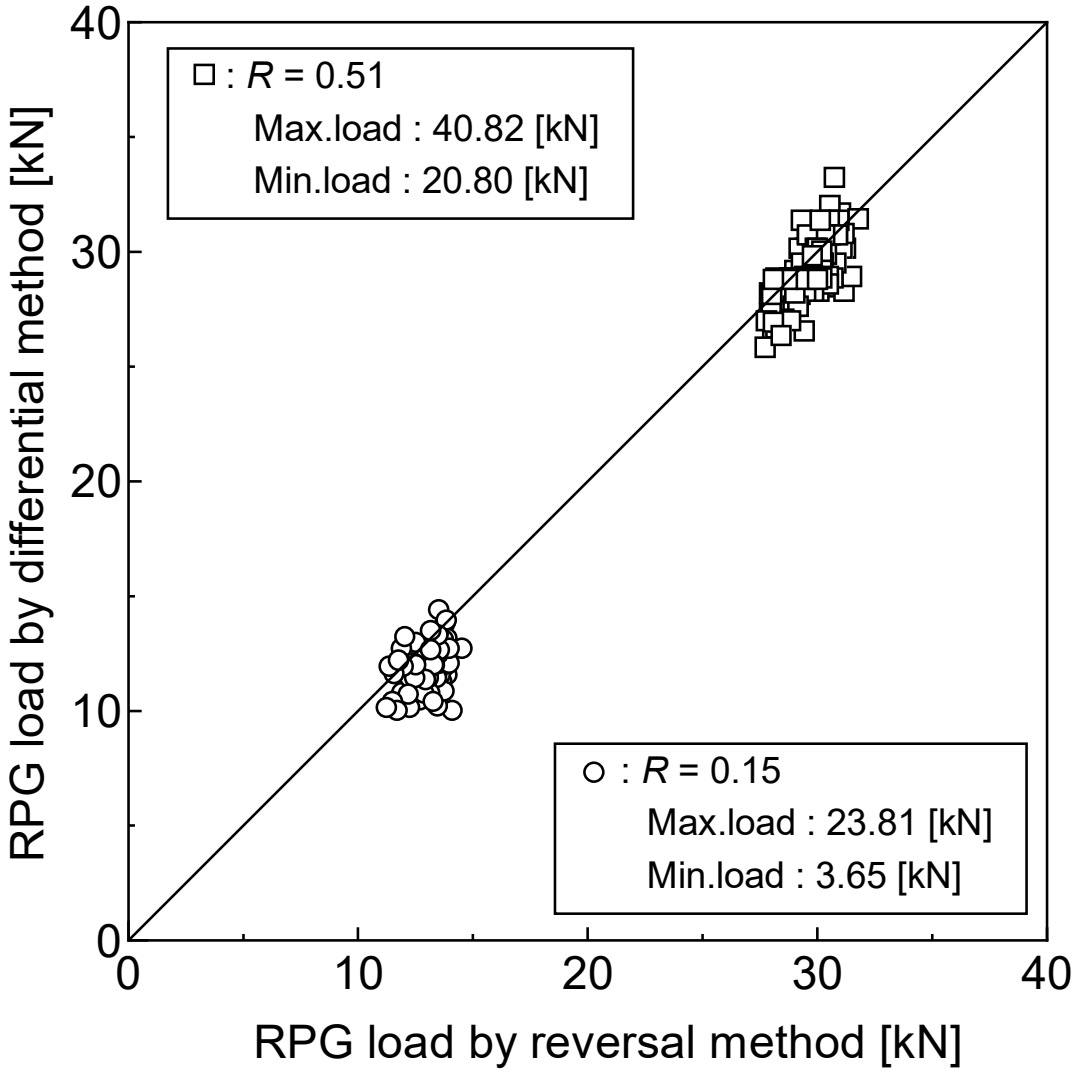


Fig. B.4 Relationship between measured RPG load by a differential method and one by a reversal method.

同図より，町田らの考察結果と反転法から決定した P_{RPG} に相関関係があると言える形となっていることがわかる．

B.5 総括

微分法は，ヒステリシスカーブ微分法（一階微分）にて P_{cl} が決定でき，コンプライアンス微分法（二階微分）にて P_{RPG} が決定できるが P_{op} の決定は困難と

結論づけている.

加えて, 微分法適用時の注意としては, 測定する信号に対するローパスフィルターの適応（町田らの設定値は不明）と，波形データのアベレージング（町田らは 6 波形を平均処理）を行い，十分にノイズを除去しておく必要がある.

付録 C

試験システムを構成している機器等の採用について

C.1　はじめに

市販のひずみ測定機器や計測ソフトウェア等は数年単位で更新されているが，常に最新の機器で実験環境を維持することは予算や労力の規模的に困難であるため，機器のメンテンナンスを通じて試験システムの長期運用を行うのが通常である．しかしながら，計測機器に使われる電子部品やパソコンの性能向上や製品の更新ペースが早いため，数年後には修理用の部品調達が困難になることが多々ある．

Fig. 3.11 に示す豊貞らが開発した高精度コンプライアンス計測装置を組み込んだ疲労亀裂伝播試験システムも同様に，維持管理が困難となっていたためシステム全体の更新が望まれていた．

そこで，本付録では本研究で開発した「コンプライアンス自動計測機能付き疲労亀裂伝播試験システム」を構成する機器等を紹介するが，本研究期間に入手したものであるため，今後，更新されずに廃盤になる可能性がある．

C.2　使用機器等について

C.2.1　油圧サーボ試験機の制御ソフトウェア

Fig. 4.1 に示す試験システムを構成している油圧サーボ試験機は，島津製作所

社製の制御コントローラ 4830 形が使用できる試験機であればよい. 本研究では, フレームタイプが EHF-E, 動的負荷能力が±50 [kN]と, フレームタイプが EHF-U, 動的負荷能力が±100 [kN] の 2 種類を運用し, 詳細な技術仕様は「4.2.4　疲労試験機」に示す.

それぞれの制御コントローラをオプションのパソコン用ソフトウェア「GLUON4830（島津製作所）」を元に, 後述する動ひずみ測定器をコントロールするための付加機能を追加して, 試験システム全体の制御を行っている.

C.2.2　ロードセル

形状の模式図を Fig. 4.3 に示し, 主な要求仕様は「4.2.2　ロードセル」に示す. 本研究に用いた製品は, 「TCLM-50KNS002-D（東京測器研究所）」, もしくは「TCLM-100KNS002-D（東京測器研究所）」を使用している.

C.2.3　動ひずみ測定器

主な要求仕様を「4.2.3　動ひずみ測定器」に示す. 仕様を満たす測定器の外部コマンドをパソコン用ソフトウェア GLUON4830 に組み込むことで, 試験機の制御ソフトを中心とした疲労試験システムの構築が可能となっている.

本研究に用いた動ひずみ測定器は, 「DRA-162B（東京測器研究所）」である.

C.2.4　ひずみゲージの選定

詳細は「4.3　試験片形状とひずみゲージ組合せの特徴」に示すが, ひずみゲージの性能については, メーカの仕様書に従う.

C.2.5　RPG 荷重決定ソフトウェア

コンプライアンス自動計測機能付き疲労亀裂伝播試験システムにて取得した測定データから，RPG 荷重等を決定するための GUI の一例を Fig. C.1 に示し，本ソフトウェア開発時に特に考慮した点を以下に示す．

- ひずみゲージのブリッジ構成の違いに対応した機能
- 試験中に評価した亀裂長さ再評価する機能
- 除荷弾性範囲の調整を常時可能とする機能

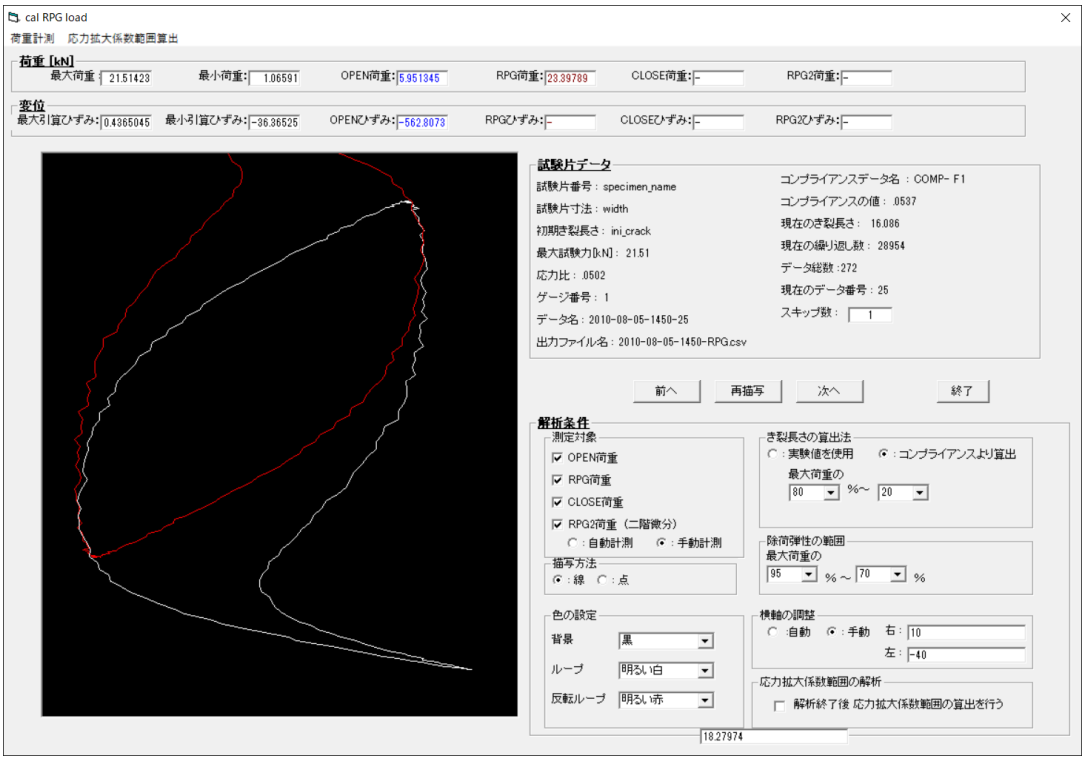


Fig. C.1　An example of application development to identify RPG load.

C.3　総括

機器の仕様条件は必須ではないが，試験システムの開発，運用に関する費用や労力等の負担軽減の観点から参考にするのは有効と考える．

付録 D

ΔK_{RPG} を用いた無欠陥状態部から発生，伝播する微小疲労亀裂の成長モデルについて

D.1　はじめに

ここでは，豊貞らが提案した疲労亀裂が発生し第一結晶粒内をせん断型亀裂として成長するときの RPG 荷重及びΔK_{RPG}の評価法に関する理論[96)]の概要を紹介する．第 6 章において示した亀裂成長履歴の推定はここで示す理論を実装したプログラムにより計算されたものである．

D.2　応力集中部から発生した微小疲労亀裂の成長モデル

単軸負荷が作用すると，最大せん断応力面に近い面ですべりが生じる．すべり面上に障害物が存在する場合，転位はその手前で集積する．集積した転位はその近傍での二次すべりを誘発し，その二次すべりも次の粒界（b_1, b_2）や障害物（b_3）などに妨げられる．このように結晶粒界では次々と転位が集積し，その近傍で二次すべりが誘発される．そして転位が障害物を越えて運動できなくなる位置が弾塑性境界となる．豊貞らは，この段階までの亀裂成長の様子を模式的に Fig. D.1 により示している．

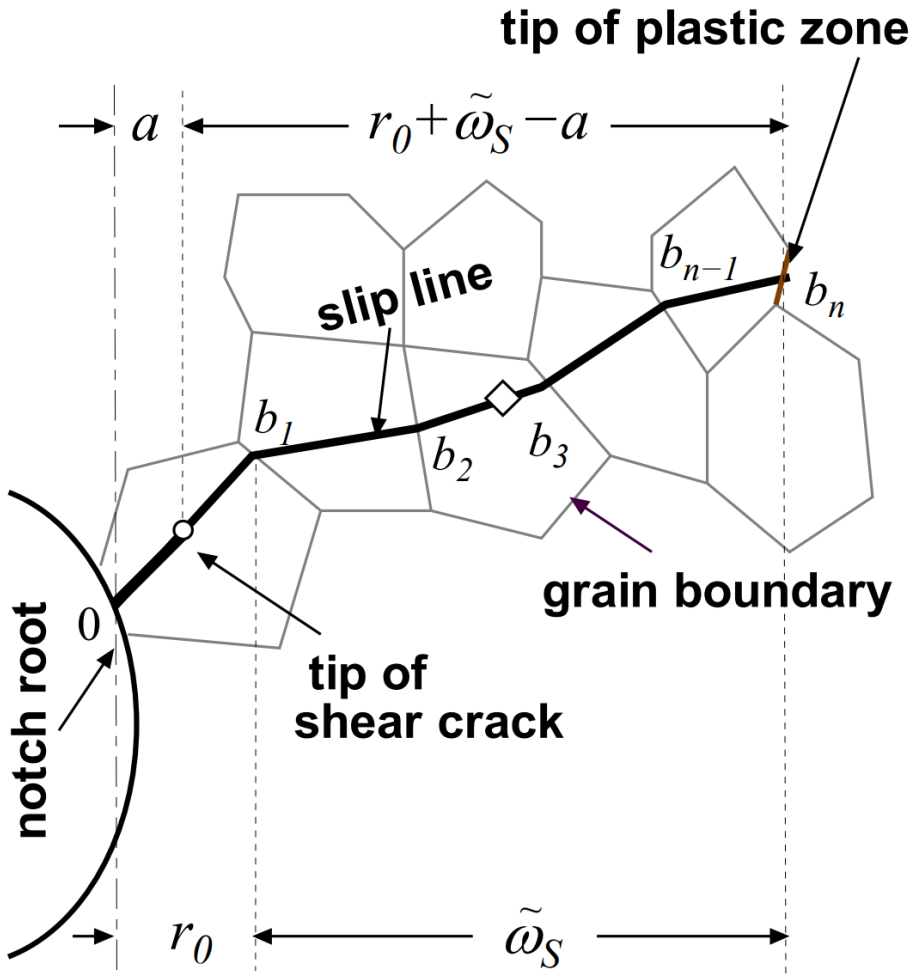


Fig. D.1 Size of the cyclic plastic region ahead of a shear crack in the first grain.

開口型の長い亀裂に対しては，両振り塑性域寸法 $\tilde{\omega}$ と RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} の間には（D.1）式の関係が成立する．

$$\tilde{\omega} = \frac{1.55\pi}{8}\left(\frac{\Delta K_{RPG}}{2\sigma_{YC}}\right)^2 \qquad \text{(D. 1)}$$

$\tilde{\omega}$: 両振り塑性域寸法,

ΔK_{RPG}: RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲,

σ_{YC}: 繰返し負荷条件下の降伏応力.

せん断亀裂における亀裂結合力モデルである BCSS [97] モデルと，開口型亀裂の亀裂結合力モデルである Dugdale モデル [98] における仮想亀裂先端位置と実亀裂先端位置の関係が両者で等しく，かつ前者のせん断変位と後者の亀裂開口変位が等しいことから，開口型亀裂における両振り塑性域寸法 $\tilde{\omega}$ と RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} の関係はせん断亀裂に対しても成立すると仮定する．最初の結晶粒内を伝播中のせん断亀裂は閉口したままであるため，結晶粒界まで亀裂が伝播した時点の ΔK_{RPG} からその時点の $\tilde{\omega}_S$ を算出し，亀裂先端から結晶粒界までの距離を差し引くことで，せん断亀裂での疲労被害度蓄積領域寸法 a を求めることができる．その後，（D.1）式を上述のことを考慮して変形した（D.2）式により等価な ΔK_{RPG} を与え，これを（1.8）式に代入すれば，疲労亀裂成長解析が可能となる．

$$(\Delta K_{RPG})_{eq} = 2\sigma_{YC}\sqrt{1.64(r_0 + \tilde{\omega}_S - a)} \qquad \text{(D. 2)}$$

$(\Delta K_{RPG})_{eq}$: 第一結晶粒内をせん断型で成長する疲労亀裂の ΔK_{RPG},
σ_{YC} : 繰返し負荷条件下での降伏点,
r_0 : 疲労亀裂が発生した結晶（第一結晶）粒径寸法（荷重線垂直方向への正射影値）,
$\tilde{\omega}_S$: 疲労亀裂がせん断型で第一結晶粒内を成長しているときの両振り塑性域寸法,
a : せん断亀裂での疲労亀裂長さ（荷重線垂直方向への正射影値）.

D.3　第一結晶粒内における疲労亀裂伝播中の降伏応力について

（D.2）式より，最初の 1 結晶粒内を成長する疲労亀裂は，亀裂が大きくなるにつれて $(\Delta K_{RPG})_{eq}$ が小さくなるため，これに対応して疲労亀裂伝播速度は遅くなることが予想される．微小疲労亀裂では，亀裂が大きくなるにつれて疲労亀裂伝播速度が遅くなる現象が生じるが，（D.2）式はこの現象に対応していると考えられる．

亀裂開口モード下では，亀裂閉口による応力再配分が生じるため，亀裂前方の弾塑性境界付近は降伏ひずみレベルの繰り返しを過去にほとんど受けない状態にあり，弾塑性境界は静的降伏応力に支配される．一方，切欠底に位置する第一結晶粒内を伝播しているせん断亀裂は閉口したままのため，亀裂開閉口による応力再配分は生じない．そのため，亀裂開口モードに遷移するまで亀裂前方の弾塑性境界付近は，降伏ひずみレベルに相当する繰返し応力に支配されることになる．

このときの降伏応力は，転位が動き出す応力となるため，静的降伏応力より低い．つまり，当初塑性域は小さいが，同じレベルの繰返し応力の影響により，静的降伏点で規定される降伏域より大きくなるため，せん断亀裂はこの繰返し降伏点で規定される塑性域内を成長することになる．したがって，降伏応力は，Fig. D.2 に模式的に示すように遷移するため，疲労亀裂成長シミュレーション計算では，静的降伏点で規定される引張塑性域が過去の引張塑性域を超えない場合，過去の引張塑性域先端が保持されるように降伏点が変化すると仮定している．

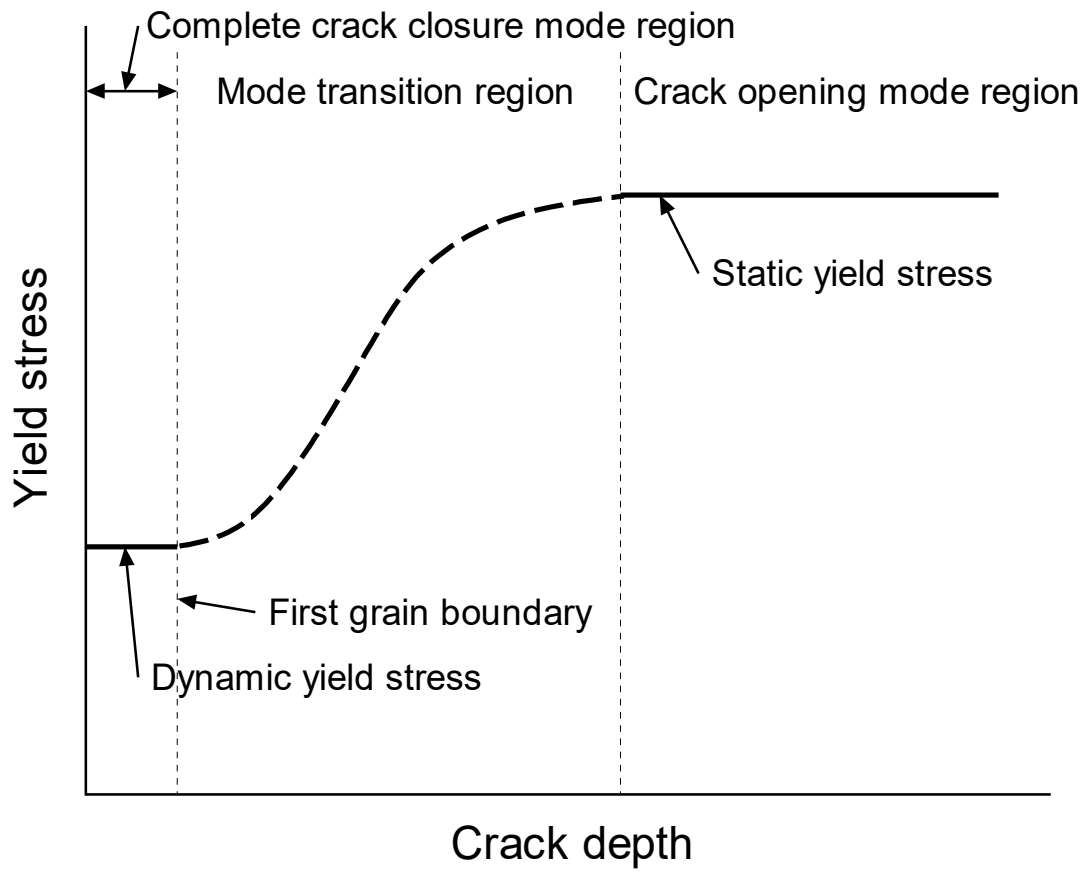


Fig. D.2 Transition of yield stress with change in mode of fatigue crack propagation.

付録 E

デジタル画像相関に用いた機材について

E.1　はじめに

デジタル画像の画質向上とデータ補完や処理技術の進歩は速く，高性能化が進みつつも販売価格帯は下がっているため，手頃感が強くなり研究導入へのハードルが下がっている．

一方，ひずみ測定に主として用いられているひずみゲージの信頼性は非常に高く，また単価も数百円と安いため，使い捨てセンサーとして多くの業界と研究分野で広く普及している．しかしながら，ひずみゲージは測定対象物に直接貼付する必要があることと，繰返し弾塑性挙動に対する測定精度の保証が低い．加えて，事前に貼付箇所のブラスト処理などが必要になる場合がある．その点においては，デジタル画像相関法に用いるデジタル画像は測定対象物を非接触で撮影できるというメリットがある．現在のデジタル画像相関法に用いる画像はコントラストを明確にしたランダムパターンが必要であるが，画像処理アルゴリズムの発展により，撮影の前処理が不要になることが期待される．

そこで，本研究に用いたデジタル画像の撮影機材や解析ソフトウェア，撮影の前処理に関する手順のいくつかを紹介する．

E.2　使用機材等について

E.2.1　撮影環境

繰返し負荷には，油圧サーボ試験機「EHF-EB5-10L（島津製作所）」を使用し，画像撮影には高速度カメラ「MEMRECAM HX（nac 社）」とレンズ「VS-LTC3.3-45/FS（VS テクノロジー社）」の組合せを用いた．使用したレンズは，被写界深度内において撮影対象の見かけの大きさが変化しないテレセントリックレンズであるため，試験中の面外変形による影響を最小限に留めることができると期待される．

E.2.2　ランダムパターン作成ツール

試験片の撮影箇所には，コントラスト比の高いランダムパターンを作成する必要があるため，Fig. E.1 に示すエアブラシ「カスタムミクロン CM-C Plus（アネスト岩田）」を用いた．

Fig. E.1 Airbrush for printed random pattern on specimen surface.

塗装用塗料にはランダムパターンのコントラストを明確にするために，下地

に「アクリルミニ X-2 ホワイト（タミヤ）」，続けて「アクリルミニ X-1 ブラック（タミヤ）」を吹き付け塗装しているが，適切な粒子径やコントラスト比は画像処理ソフトウェアの仕様に沿う必要があることに注意が必要である．

E.2.3　デジタル画像処理関連ソフトウェア

デジタル画像相関法は，粒子追跡流速計測法である PIV（Particle Image Velocimetry）技術を活用している．具体的には，色の濃淡情報となるトレーサー群を逐次画像間でトラッキングを行い，マッチングさせていく手法である．

本研究に用いた PIV 演算処理を行う流体解析画像ソフトウェア DaVis 8.3.1（LaVision 社）は，ランダムパターンの粒子径やコントラスト比を検査領域やオーバーラップの程度に合わせて調整する必要がある．

E.3　総括

機材の構成は必須ではないが，デジタル画像の撮影とその後の処理に関する費用や労力等の負担軽減を考慮するならば，本手法を参考にするのは有効と考える．

参考文献

1) 日本材料学会疲労部門委員会 ： 初心者のための疲労設計法, 西村信天堂, 2004.

2) 小林英男 ： フラクトグラフィと破壊力学 2. 疲労き裂伝ぱの破壊力学と金属組織, 材料, 第 29 巻, 第 317 号, 1980, pp.198-203.

3) Suresh,S.著, 岸本喜久雄訳 ： 材料の疲労破壊, 培風館, 2005.

4) Giovanni De Morais Teixeira, Fatigue of Metals: Failure and Success, https://www.researchgate.net/publication/316735574, (accessed on July 9, 2021).

5) Albert, W.A.J.: Über Treibseile am Harz, Archiv für Mineralogie Geognosie Bergbau und Hüttenkunde, vol.10, 1838, pp.215-234.

6) 西谷弘信 ： 疲労強度学, オーム社, 1985.

7) 城野政弘, 宋智浩 ： 疲労き裂, 大阪大学出版会, 2005.

8) Hoeppner, D.W. and Krupp, W.F.: PREDICTION OF COMPONENT LIFE BY APPLICATION OF FATIGUE CRACK GROWTH KNOWLEDGE, Engineering Fatigue Mechanics, Vol.6, 1974, pp.47-70.

9) Forsyth, P.J.E.： Fatigue damage and crack growth in aluminium alloys, Acta Metallurgica, Vol. 11, No.7, 1963, pp.703-715.

10) 日本材料学会 ： 疲労設計便覧, 養賢堂, 1995.

11) 西田新一 ： 溶接構造物の疲労破壊と疲労強度因子（1）, 溶接学会誌, Vol.62, No.8, 1993, pp.595-598.

12) 畑村洋太郎 ： 続々・実際の設計，日刊工業新聞社, 1996.

13) 国土交通省 運輸安全委員会 ： 鉄道重大インシデント調査報告書, RI2019-1-1, 2019.

14) Paris, P.C. and Erdogan, F.: A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, Series D, Vol.85, 1963, pp.528-534.

15) Barsom, J. M.: Fatigue Behavior of Pressure-Vessel Steels, Welding Research Council Bulletin, Issue 194, 1974.

16) Tanaka, K., Nakai, Y. and Yamashita, M.: Fatigue growth threshold of small cracks, International Journal of Fracture, Vol.17, 1981, pp.519-533.

17) Elber, W.: The Signicance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP-486, 1971, pp.230-242.

18) Stewart, A.T.: The influence of environment and stress ratio on fatigue crack growth at near threshold stress intensities in low-alloy steels, Engineering Fracture Mechanics Vol.13, 1980, pp.463–478.

19) 遠藤吉郎，駒井謙治郎，松田喜彦 ： 鋼の腐食疲労き裂の進展に対する腐食生成物の力学的効果，日本機械学会論文集 A 編, 46 巻, 412 号, 1980, pp.1337-1343.

20) Suresh, S., and Ritchie, R.O.: in Fatigue Crack Growth Threshold Concepts, D.L. Davidson and S. Suresh, eds., TMS-AIME, Warrendale, PA, 1984, pp.227–261.

21) Walker, N. and Beevers, C.J.: A FATIGUE CRACK CLOSURE MECHANISM IN TITANIUM, Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol.1, 1979, pp.135-148.

22) 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，第 25 巻，第 276 号, 1976, pp.899-903.

23) 西谷弘信, 陳玳珩 : 除荷弾性コンプライアンス法に関する一考察, 日本機械学会論文集 A 編, 51 巻, 465 号, 1985, pp.1436-1441.

24) Shih, T.T. and Wei, R.P.: A Study of Crack Closure in Fatigue, Engineering Fracture Mechanics, Vol.6, 1974, pp.19-32.

25) Clarke, C.K. and Cassatt, G.C.: A study of fatigue crack closure using electric potential and compliance techniques, Engineering Fracture Mechanics, Vol.9, 1977, pp.675-688.

26) Lal, K.M.: On crack opening stress level in fatigue by Eddy current technique, Engineering Fracture Mechanics, Vol.12, 1979, pp.185-190.

27) Lal, K.M., Garg, S.B. L. and May, I.Le.: On Effective Stress Range Factor in Fatigue, Journal of Engineering Materials and Technology, ASME, Vol.102, Issue 1, 1980, pp.147-152.

28) Buck, O., Ho, C.L., Marcus, H.L. and Thompson, R.B.: Rayleigh Waves for Continuous Monitoring of a Propagating Crack Front, ASTM STP 513, 1972, pp.280-291.

29) Sharpe, Jr.W.N.: Applications Of The Interferometric Strain/Displacement Gage, Optical Engineering, Vol.21, 1982, pp.483-488.

30) Sharpe, Jr.W.N. and Su, X.: Closure Measurements of Naturally Initiating Small Cracks, Engineering Fracture Mechanics, Vol.30, 1988, pp.275-294.

31) Akiniwa, Y., Harada, S. and Fukushi, Y.: Dynamic Measurement of Clack Closure Behaviour of Small Fatigue Cracks by an Interferometric Strain/Displacement Gauge with a Laser Diode, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures Vol.14, 1991, pp.317-328.

32) Berkovits, A. and Fang, D.: Study of fatigue crack characteristics by acoustic emission, Engineering Fracture Mechanics, Vol.51, 1995, pp.401-416.

33) Toyosada, M. and Niwa, T.: The significance of RPG load for fatigue crack propagation and the development of a compliance measuring system, International Journal of Fracture, Vol.67, Issue 3, 1994, pp.217-230.

34) Chen, D. and Nishitani, H.: Analytical and Experimental Study of Crack Closure Behavior Based on an S-Shaped Unloading Curve, ASTM STP, 982, 1988, pp.475–488.

35) ASTM E647 : Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM International, 2008.

36) WES 1111 : 疲労亀裂伝播試験方法, （一社）日本溶接協会, 2014.

37) Toyosada, M., Gotoh, K. and Niwa, T.: Fatigue Crack propagation for a through thickness crack: a crack propagation law considering cyclic plasticity near the crack tip, International Journal of Fatigue, Vol.26, Issue 9, 2004, pp.983-992.

38) 菊川真, 城野政弘, 近藤良之 : 疲労き裂進展下限界条件試験法に対する検討（き裂開閉口挙動に及ぼす荷重履歴の影響）, 材料, 第 30 巻, 第 330 号, 1981, pp.276-282.

39) 橘内良雄 : 高強度鋼の疲労き裂伝播機構に及ぼす微視的組織の影響, 材料, 第 29 巻, 第 323 号, 1980, pp.795-800.

40) 橘内良雄 : 突合せ溶接材および母材の疲労き裂伝ぱ挙動, 日本機械学会論文集 A 編, 47 巻, 419 号, 1981, pp.677-688.

41) ISO 12108 : Metallic materials — Fatigue testing — Fatigue crack growth method, International Organization for Standardization, 2018.

42) Klesnil, M and Lukas, P.: Effect of Stress Cycle Asymmetry on Fatigue Crack Growth, Materials Science and Engineering, Vol.9, 1972, pp.231-240.

43) 太田昭彦, 佐々木悦男, 小菅通雄 : 疲労き裂伝ぱ速度に及ぼす平均応力の影響, 日本機械学会論文集, 43 巻, 373 号, 1977, pp.3179-3188.

44) 橘内良雄 : 炭素鋼の疲労き裂伝播機構に及ぼす微視的組織の影響, 材料, 第 29 巻, 第 325 号, 1980, pp.1018-1023.

45) 加藤昭彦, 栗原正好, 川原正言 : 広範囲の応力条件下での疲労き裂伝播速度式の検討, 日本造船学会論文集, 第 153 号, 1983, pp.336-343.

46) 田中洋一, 征矢勇夫 : 各種溶接構造用鋼の疲労亀裂伝播特性の検討, 溶接学会論文集, Vol.7, No.2, 1989, pp.90-97.

47) 鉄鋼基礎共同研究会, 鉄鋼の環境強度部会 : 鉄鋼材料の海水中腐食疲労・応力腐食割れデータ集, Vol.1, 1986, pp.44-222.

48) 城野政弘, 宋智浩, 三上省二, 大垣雅由 : 機械構造用材料の疲労き裂進展抵抗とき裂開閉口挙動, 材料, 第 33 巻, 第 367 号, 1984, pp.468-474.

49) 町田進, 吉成仁志, 牧野寛之 : 疲労き裂先端ひずみ変化の詳細観察, 材料, 第 46 巻, 第 496 号, 1997, pp.138-142.

50) 栗生隆啓, 荒井靖市, 齋藤好泰, 中西孝次, 内田勝正, 高戸谷健, 熊澤寿, 横関智弘 : CFRP 材の大ひずみ疲労強度試験への高耐久ひずみゲージの適用性, (一社)日本非破壊検査協会 平成 26 年度秋季講演大会, 2014.

51) 新井拓, 小幡充男, 西村光平, 島田平八 : Digital 像相関法による二次元非接触変位測定, 非破壊検査 vol.37 No.8, 1988, pp.643-648.

52) JIS B7612-1 : 質量計用ロードセル– 第 1 部 : アナログロードセル, 日本産業規格, 2008.

53) JIS Z 2273 : 金属材料の疲れ試験方法通則, 日本産業規格, 1978.

54) JIS Z 2274 : 金属材料の回転曲げ疲れ試験方法, 日本産業規格, 1978.

55) JIS Z 2275 : 金属平板の平面曲げ疲れ試験方法, 日本産業規格, 1978.

56) JIS Z 2278 : 金属材料の熱疲労試験方法, 日本産業規格, 1992.

57) JIS Z 2279 : 金属材料の高温低サイクル疲労試験方法, 日本産業規格, 1992.

58) JIS Z 2286 : 金属材料の高温回転曲げ疲労試験方法, 日本産業規格, 2003.

59) ISO 1099 : Metallic materials — Fatigue testing — Axial force-controlled method, International Organization for Standardization, 2017.

60) ISO 1143 : Metallic materials — Rotating bar bending fatigue testing, International Organization for Standardization, 2010.

61) ISO 1352 : Metallic materials — Torque-controlled fatigue testing, International Organization for Standardization, 2011.

62) ISO 12106 : Metallic materials — Fatigue testing — Axial-strain-controlled method, International Organization for Standardization, 2017.

63) ASTM E466 : Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM International, 2021.

64) ASTM E606 : Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, ASTM International, 2021.

65) ASTM E2207 : Standard Practice for Strain-Controlled Axial-Torsional Fatigue Testing with Thin-Walled Tubular Specimens, ASTM International, 2015.

66) ASTM E2714 : Standard Test Method for Creep-Fatigue Testing, ASTM International, 2013.

67) JSME S 002 : 統計的疲労試験方法, 日本機械学会基準, 1994.

68) JSME S 015 : フレッティング疲労試験方法, 日本機械学会基準, 2009.

69) 豊貞雅宏, 丹羽敏男 : 鋼構造物の疲労寿命予測, 共立出版, 2001.

70) https://www.anaconda.com/distribution/ (accessed on 27, September, 2019)

71) Beaton, A.E. Tukey, J.W.: The fitting of power series, meaning polynomials, illustrated on band-spectroscopic data, Technimetrics, Vol.16, 1974, pp.147-185.

72) https://www.scipy.org/ (accessed on 27, September, 2019)

73) https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/tutorial/optimize.html#least-squares-minimization-least-squares

74) 内村秀之, 宅野正夫, 村上幸治, 後藤浩二 : ケミカルタンカーに使用されるオーステナイト系ステンレス鋼板の疲労強度に関する一考察, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 16 号, 2012, pp.89-97.

75) 豊貞雅宏, 丹羽敏男, 村上幸治 : RPG 荷重決定法に関する一考察, 西部造船会会報 第 103 号, 2002, pp.167-172.

76) Gotoh, K., Murakami, K., and Noda, Y.: Fatigue crack growth behaviour of A5083 series aluminum alloys and their welded joints, Journal of Marine Science and Technology, Vol.16, 2011, pp.343-353.

77) Hansson, P. and Melin, S.: Dislocation-based modeling of the growth of a microstructurally short crack by single shear due to fatigue loading, International Journal of Fatigue, Vol.27, Issue 4, 2005, pp.347-356.

78) JIS G 0553 : 鋼のマクロ組織試験方法, 日本産業規格, 1958.

79) 松田和貴, 辻隆太郎, 村上幸治, 後藤浩二 : せん断型から開口型に至る疲労き裂成長履歴推定手法の実験的検証, 日本船舶海洋工学会 講演会論文集, 第 15 号, 2012, pp.147-150.

80) 平修二, 田中啓介, 島田具明 : 低炭素鋼における 2 段 2 重重複繰返し応力下での疲労き裂伝ぱ(き裂先端近傍の残留応力分布および塑性変形分布からの検討), 材料, 第 21 巻, 第 231 号, 1972, pp.1142-1149.

81) 山下紘平, 後藤浩二 : 弾塑性有限要素解析を用いた疲労亀裂伝播シミュレーションと塑性ひずみエネルギの蓄積を考慮した疲労亀裂伝播則の一検討, 日本船舶海洋工学会 講演会論文集, 第 21 号, 2015, pp.369-374.

82) 山口絢也, 後藤浩二 : 弾塑性 FE 解析を用いた亀裂先端の両振り塑性挙動を考慮した疲労亀裂伝播解析, 日本船舶海洋工学会 講演会論文集, 第 32 号, 2021, pp.417-422.

83) 山崎正尚, 村上幸治, 後藤浩二 : デジタル画像相関法を用いた疲労亀裂先端近傍の両振り塑性域寸法の測定, 日本船舶海洋工学会 講演会論文集, 第 25 号, 2017, pp.341-346.

84) Sutton, Michael A., Orteu, Jean Jose, Schreier, Hubert.: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements Basic Concepts, Theory and Applications, Springer, 2009.

85) 牛島大介, 藤田晃司, 森山雅雄, 勝田順一 : 疲労き裂先端における開閉口挙動のＰＩＶ法を用いた分析, 日本船舶海洋工学会 講演会論文集, 第 12 号, 2011, pp.297-300.

86) 西村和也, 勝田順一, 和田眞禎, 森山雅雄 : PIV 法を用いた疲労亀裂先端の再圧縮塑性域寸法の算出について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 19 号, 2014, pp.267-268.

87) 石井成政, 白石麻理子, 才木隼, 勝田順一 : 画像処理による CT 型試験片を伝播する疲労亀裂の挙動評価の改善について, 溶接学会九州支部講演論文集, No.15, 2018, pp.49-52.

88) 増山知也, 吉泉聡, 井上克己 : 画像情報に基づく歯元ひずみの定量評価, 日本機械学会論文集 C 編, 72 巻, 714 号, 2006, pp.599-606.

89) 米山聡, 小柳潤, 有川秀一 : 有限要素メッシュを利用した画像相関法による不連続変位･ひずみ分布の測定, 日本複合材料学会誌, 第 40 巻, 第 4 号, 2014, pp.180-188.

90) 平野義鎮, 草野英昭, 青木雄一郎 : 異なるひずみ速度における CFRP 引張試験の高速度撮影および DIC 解析による評価, 日本複合材料学会誌, 第 40 巻, 第 4 号, 2014, pp.153-159.

91) https://imagej.nih.gov/ij/index.html

National Institute on Neurological Disorders and Stroke

92) correlated SOLUTIONS: Application Note AN-1701 Speckle Pattern Fundamentals.

93) 山崎真尚 ： 亀裂先端近傍の繰返し塑性挙動を考慮した疲労亀裂成長挙動評価手法, 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 平成 30 年度修士論文, 2019.

94) JIS Z 8101-1：統計−用語及び記号−第 1 部：一般統計用語及び確率で用いられる用語, 日本産業規格, 2015.

95) 豊貞雅宏, 山口喜久次, 丹羽敏男, 武中秀樹, 梶本勝也, 矢島浩 ：新疲労き裂伝播パラメータの提案と高精度コンプライアンス計測法の開発 RPG 規準による疲労き裂伝播挙動の研究 (第 1 報), 日本造船学会論文集, 第 169 号, 1991, pp.245-255.

96) Toyosada, M., Gotoh, K. and Niwa, T.: Fatigue life assessment for welded structure without initial defects: an algorithm for predicting fatigue crack growth from a sound site, International Journal of Fatigue, Vol.26, Issue 9, 2004, pp.993-1002.

97) Bilby, BA, Cottrell AH and Swinden KH.: The spread of plastic yield from a notch, Proceedings the Royal Society A, Vol.272, Issue 1350, 1963, pp.304-314.

98) Dugdale, D.S.: Yielding of steel sheets containing slits, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.8, Issue 2, 1960, pp.100-104.

謝　辞

この度の研究成果は，九州大学大学院海洋システム工学部門教授　後藤浩二博士のご指導の下に行われています．私が九州大学工学部採用時よりご指導ご鞭撻をいただくことで，多くの業務を本成果につなげていただきました．心より感謝申し上げます．

本論文の審査にあたり，九州大学大学院海洋システム工学部門教授　宇都宮智昭　博士，九州大学大学院海洋システム工学部門教授　柳原大輔　博士，国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所特別研究主幹　丹羽敏男　博士におかれましては，新型コロナ禍対応で非常にご多忙にも関わらず有益な御助言を頂きました．厚く御礼申し上げます．

九州大学大学院工学研究院海洋システム工学科助手　山口喜久次氏（当時），九州大学大学院海洋システム工学部門助教　堤成一郎　博士（現 大阪大学准教授）には，実験の計画から実施まで多くのご教示と多大なご援助を頂きました．深く感謝申し上げます．

本研究の一部は，一般社団法人日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会 FGT 委員会（疲労試験の標準化・規格化）（平成 21 年度～25 年度）の委員各位より有益なご意見を賜りました．謹んで御礼申し上げます．

本研究の遂行にあたっては，九州大学工学部地球環境工学科船舶海洋システム工学コース生産システム工学研究室の卒業生・修了生，ならびに在学生の皆様に多大な協力を頂きました．特に橋本勝　氏（平成 22 年卒），白方裕葵　氏（平成 27 年卒）には，第 2 章の参考論文のデータ整理とシミュレーションの条件出

し，大森徹也　氏（平成 23 年卒），宅野正夫　氏（平成 23 年卒）には，第 4 章での重ね合わせソフトの作り込みとサンプリングデータの抽出作業，森平尚樹氏（平成 29 年卒），森下瑞生　氏（平成 28 年卒）には，第 5 章のアルゴリズム開発時の試行錯誤，杉谷大輔　氏（平成 16 年卒），明石裕太　氏（平成 30 年卒）には，第 6 章の表面亀裂発生の根気強い観察，山﨑真尚　氏（平成 29 年卒），山口絢也　氏（平成 31 年卒），尾島直樹　氏（現 M1）には，第 7 章のデジタル画像処理の多くの作業を担当して頂きました．歴代博士後期課程の皆様には，常に研究に邁進し若手研究者へと成長していく過程に触れることで，自身のモチベーションを保つことができました．ここに感謝の意を表します．

平成 28 年度に工学部技術部が発足し配置換えとなりましたが，理解のある上司，同僚，後輩技術職員に恵まれたこともあり，この研究をまとめ上げることができたことに深く感謝申し上げます．

本研究の背景には，豊貞雅宏　九州大学名誉教授（現　愛媛大学客員教授）の RPG 荷重基準による疲労亀裂伝播則の活用が着眼点となっています．先生には，九州大学採用選考時から日々の業務への御指導，本研究遂行時の御助言に留まらず結婚式の仲人など，多大な御支援を賜りました．心より感謝申し上げます．

最後に，二十年以上に渡り本研究テーマを続けられたのは，妻と子どもたち家族の理解と心の支えをもらえたことです．何にも代え難い存在として深く感謝しています．