

亀裂結合カモデルに基づく重畳応力条件下における 疲労亀裂伝播挙動に関する研究

松田, 和貴

<https://doi.org/10.15017/1500704>

出版情報：九州大学, 2014, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済

亀裂結合カモデルに基づく重畳応力条件下
における疲労亀裂伝播挙動に関する研究

平成 27 年 1 月

松田 和貴

目次

第 1 章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 疲労亀裂伝播挙動評価の歴史	2
1.3 重畳・実働応力履歴評価の歴史	7
1.4 本研究の目的	12
1.5 本論文の構成	13
第 2 章 亀裂結合カモデルに基づく疲労亀裂成長の数値シミュレーション	15
2.1 緒言	15
2.2 亀裂結合カモデル	16
2.3 各荷重段階における亀裂開閉口モデル	20
2.3.1 最大荷重時（現荷重により塑性域先端が過去に生じた塑性域よりも外側に存在する場合）	20
2.3.2 最小荷重時	23
2.3.3 RPG 荷重時	27
2.3.4 最大荷重時（現塑性域先端が過去に生じた塑性域よりも内側に存在する場合）	28
2.3.5 RCPG 荷重時	30
2.4 結言	31
第 3 章 不規則応力履歴下における有効応力履歴選択アルゴリズム	32
3.1 緒言	32
3.2 重畳応力条件下における疲労亀裂伝播試験	32
3.2.1 第一試験	32
3.2.2 第二試験	38
3.2.3 第三試験	44
3.3 有効応力履歴選択アルゴリズムの必要性	55
3.4 繰返し塑性仕事に着目した有効応力抽出基準値	57
3.5 不規則応力履歴下における有効応力履歴選択方法	59

3.6	不規則応力履歴下における有効応力履歴選択のための諸処理	62
3.7	重畳応力条件下における疲労亀裂伝播解析の妥当性の検証	72
3.7.1	第一試験	74
3.7.2	第二試験	82
3.7.3	第三試験	88
3.8	有効応力抽出基準値の物理的意味	99
3.9	結言	101
第4章	重畳応力履歴下における平均応力の伝播挙動に及ぼす影響	103
4.1	緒言	103
4.2	種々の平均応力条件における重畳応力履歴下疲労亀裂伝播試験	104
4.2.1	試験片の材料・形状	104
4.2.2	载荷条件	105
4.2.3	試験結果	111
4.3	疲労亀裂伝播解析	112
4.3.1	伝播則の材料定数 C 及び m の推定	112
4.3.2	有効応力履歴選択アルゴリズムを用いた疲労亀裂伝播解析	113
4.4	結言	125
第5章	等価疲労応力を用いた疲労亀裂伝播解析	126
5.1	緒言	126
5.2	等価疲労応力への変換方法	127
5.3	Paris 則による疲労亀裂伝播解析	128
5.4	RPG 基準の亀裂伝播則による疲労亀裂伝播解析	137
5.5	結言	146
第6章	重畳応力履歴下における諸因子の疲労寿命に対する影響	147
6.1	緒言	147
6.2	解析条件	147
6.3	疲労寿命と諸因子の関係の考察	148
6.3.1	疲労寿命と有効応力履歴の傾向	149
6.3.2	包絡波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比	157

6.3.3 低周波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比	165
6.3.4 高周波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比	170
6.4 結言	179
第7章 結論	181
付録 A 線形累積損傷被害則による疲労寿命評価	183
A.1 レインフロー法による波形計測アルゴリズム	183
A.2 線形累積損傷則による疲労寿命評価	185
付録 B 不規則応力履歴下における巻き戻し計算法	192
B.1 疲労亀裂伝播解析における巻き戻し計算の概要	192
B.2 巻き戻し計算における亀裂伝播量の内挿法	193
B.3 巻き戻し計算結果の比較	195
参考文献	197
謝辞	201

第1章 緒論

1.1 研究背景

1997年にポルトガル領アゾレス諸島付近において、大嵐を航行中のコンテナ船 MSC Carla 号（全長 289.5m）が折損事故を起こした。事故後に曳航された船体後半部を調査した結果、溶接部に存在した何らかの欠陥に起因した疲労亀裂に端を発するものである可能性が高いことが判明した。近年、コンテナ船の大型・高速化に伴い、必要な縦強度を確保するために、極厚板・高強度材料の導入が図られているものの、導入実績の少なから強度評価のためのバックグラウンドデータが必ずしも十分とは言い難い¹⁾。また、高強度材料の導入により母材の疲労強度が向上しても溶接継手部の疲労強度は上昇しないこと²⁾が知られており、本事案はこのような背景のもとで生じた事故の一つであると考えられる。

海洋を航行する船舶には Fig. 1.1 に示すように、静水中の縦曲げ応力に加えて波浪による変動縦曲げ応力、さらにホイッピング^{*1}やスプリング^{*2}等に起因する高周波数の弾性振動などが重畳した複雑な応力履歴が作用する。Storhaug ら³⁾は鉱石船の実船計測結果により疲労被害度の 41 - 73%が高周波の弾性振動に由来していると述べており、豊田ら⁴⁾は、コンテナ船の実船計測結果から、ホイッピングが重畳した場合の応力履歴の線形累積被害則における疲労被害度は、波浪変動外力のみの場合に比べると、Miner 則ベースで約 3.9 倍に増加すると報告している。船体の疲労強度を適切に評価するには、このような重畳応力履歴作用下における疲労亀裂の成長挙動を適切に評価する必要がある。

他分野においても、鉄道車両用の台車枠に作用する曲げ応力は重畳波形であることが報告されている⁵⁾。他にも、大型ディーゼル機関のピストンクラウンには、触火面と冷却面の温度差による熱応力と、ガス圧の変動に伴う機械的応力が重

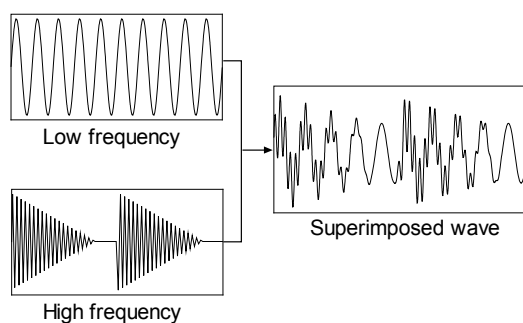


Fig. 1.1 Schematic illustration of superimposed wave.

*1 船首の船底が海面に叩きつけられる（スラミング）時に船体に生じる過渡的な振動。

*2 波浪作用に起因して船体に生じる持続的な振動。

畳して作用する。また、この場合には機関の発停に伴い間欠的に重畳応力が作用することが知られている⁶⁾。

重畳応力条件のような不規則に近い応力履歴下における従来の疲労寿命評価手法としては、レインフロー法⁷⁾による応力波形計測と一定振幅応力履歴下において求めた S-N 線図を用いた線形被害則が挙げられる。この手法を適用すると簡便に疲労寿命評価を行えるため、安全率も考慮することで多くの疲労設計指針で用いられている^{8),9)}。しかしながら、この手法では疲労亀裂の成長履歴を推定できないことや、S-N 線図から得られる疲労寿命と実構造物の疲労寿命との対応が明確でない¹⁰⁾などの問題点が指摘されている。一方、破壊力学的に疲労亀裂伝播挙動を推定する手法の変動応力履歴下における適用例¹¹⁾は数千～数万サイクル毎の一定振幅の繰返し程度であり、重畳応力履歴のように繰返し応力 1 サイクル毎に応力振幅や平均応力が変化するような応力履歴に対しての確立された推定手法は存在しておらず、重畳応力履歴下における定量的な疲労寿命評価手法の確立が必要とされているのが現状である。

1.2 疲労亀裂伝播挙動評価の歴史

機械・構造物における疲労損傷は 19 世紀の産業革命の頃から認知され始めた¹²⁾。当時は、蒸気機関車の車軸やポンプなどが、一度の载荷では何の被害も認められないような小さな荷重でも、何度も繰返し作用した後に破壊が生じることが知られており、破壊に巨視的な塑性変形が伴わないことが疑問視されていた。Wöhler 氏¹⁰⁾は早くから実験室において今日での疲労試験と呼べるものを実施し、原因究明と対策に取り組んだ。

20 世紀初頭に Ewing 氏¹³⁾は、鋼材を用いた回転曲げ試験を実施し、作用応力が降伏応力以下であっても材料の結晶粒内に滑り線が生じ、繰返し载荷により粒界を伝播し、それが亀裂に成長することを発見し、材料の問題としての疲労現象の基礎的な足がかりを示した。20 世紀前半には、微小な疲労亀裂の発生には繰返し载荷により生じる滑りの繰返しが不可欠であると考えられていたが、発生した滑りによりひずみ硬化した領域が疲労亀裂へと変化する機構が不明であった。1930 年代に Gough¹⁴⁾は、局所的に集中したひずみ硬化の持続限界の結果として疲労亀裂発生が生じると仮説を提案した。この仮説に基づいて 1939 年に Orowan¹⁵⁾は、局所的に延性が消耗することにより応力集中が生じ、最終的に亀裂が発生すると提唱した。1953 年に Head¹⁶⁾はこの考え方を基に、疲労亀裂成長の推定式として (1.1) 式を提案した。

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_1 \Delta \sigma^3 a^{3/2}}{(C_2 - \Delta \sigma) \omega^{1/2}} \quad (1.1)$$

ただし、 $\frac{da}{dN}$: 亀裂伝播速度 $\Delta \sigma$: 応力範囲
 a : 亀裂長さ C_1, C_2 : 材料定数
 ω : 亀裂先端に生じる塑性域 (不変量)

Head の考案した (1.1) 式は、亀裂先端に生じる塑性域 ω を不変と定義していたが、Frost ら¹⁷⁾は亀裂の伝播に伴い ω が増加することを実験により確認し、亀裂長さや塑性域寸法の関係を調査し、(1.1) 式を修正した。その他にも様々な亀裂伝播推定式が同時期に提案された^{18), 19)}。1963年に Paris ら²⁰⁾は、数多く提案された伝播則を種々の実験結果と比較し、最小応力から最大応力に至るまでの応力拡大係数の変化量である応力拡大係数範囲 ΔK をパラメータとした新たな亀裂伝播推定式を提案した。

$$\frac{da}{dN} = C_1 (\Delta K)^{m_1} \quad (1.2)$$

ここで、 C_1, m_1 : 材料定数

(1.2) 式は Paris 則 (Paris-Erdogan 則) と呼ばれ、現在では最も一般的な疲労亀裂伝播推定式として知られている。その後、広い範囲の亀裂伝播速度領域を (1.2) 式で表現することはできず、亀裂伝播速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係は一般に Fig. 1.2 に示すような逆 S 字形になるという事が Frost ら²¹⁾により明らかにされた。Fig. 1.2 の Stage II の ΔK 範囲は比較的疲労亀裂が安定して伝播する領域であり、この区間でのみ (1.2) 式を始め多くの疲労亀裂伝播推定式は適用が可能である。自然亀裂などの塑性変形を伴

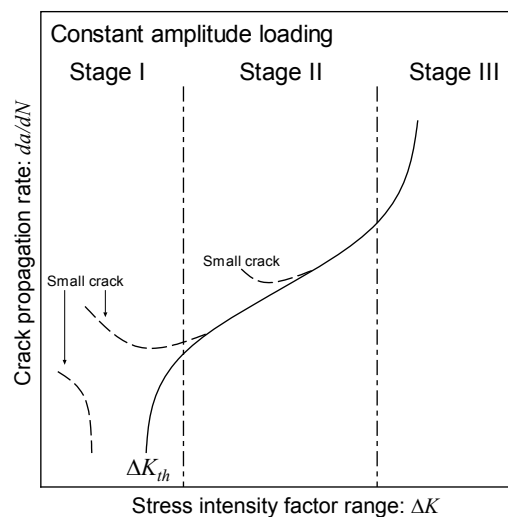


Fig. 1.2 Schematic illustration of the relation between da/dN and ΔK .

わな亀裂から発生した疲労亀裂も次第に実線に沿うように成長する。また、 ΔK が再び減少しても再び破線には戻らず、実線に沿って亀裂伝播速度が減少する。Stage I 領域に入ると急速に亀裂伝播速度は減少し、事実上疲労亀裂が伝播しなくなる ΔK の下限値 (ΔK_{th}) が存在する。しかし、表面欠陥などから生じる発生段階の微小な疲労亀裂は ΔK_{th} 以下の ΔK でも伝播する場合があります、あくまで ΔK_{th} は成長している長い疲労亀裂に対しての伝播限界と考えるべきである²²⁾。Stage III は疲労亀裂が十分に成長した後の不安定な挙動を示す領域である。

20 世紀中頃、疲労亀裂は自然亀裂と同様に、引張荷重下で開口し、圧縮荷重下で閉口していると信じられていたが、1971 年に Elber²³⁾は、疲労亀裂は亀裂先端に生じる引張の塑性変形層の中を伝播するため、完全除荷に至る前に閉口する亀裂閉口現象を観察により確認した。Fig. 1.3 に示すように、疲労亀裂とソーカット等の切断亀裂の先端を任意の Y-Y 区間で切り出して考えた場合、疲労

亀裂は以前の応力履歴で生じた引張の塑性変形層である残留引張変形層に亀裂面が覆われているため、疲労亀裂の亀裂開口変位 V_{FC} は切断亀裂の亀裂開口変位 V_{SC} よりも残留引張変形量 δ_0 だけ小さくなる。除荷過程においては、両者の亀裂は同じ速度割合で閉口していくため、疲労亀裂の方が切断亀裂よりも先に、たとえ引張荷重作用下でも閉口する。そして、この亀裂が閉口している応力区間は亀裂伝播には寄与しないとの考えから、Elber は亀裂伝播に有効な応力区間である有効応力比 U_{eff} を (1.3) 式で定義した。

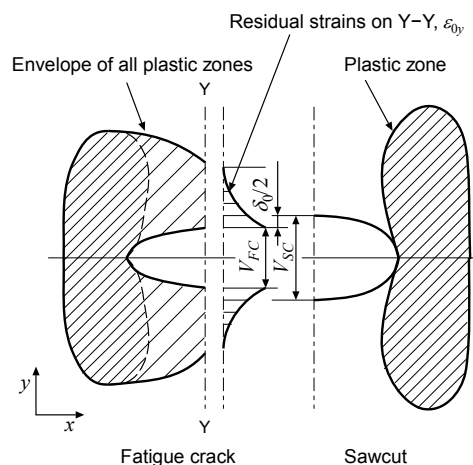


Fig. 1.3 Comparison of deformations near the crack tip for a fatigue crack and a saw cut crack.

$$U_{eff} = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{op})}{(\sigma_{max} - \sigma_{min})} \quad (1.3)$$

ただし、 σ_{max} : 最大応力 σ_{min} : 最小応力
 σ_{op} : 亀裂開口応力

そして、(1.3) 式を用いて、Paris らの提案した (2) 式を修正し、有効応力比を考慮した新たな疲労亀裂伝播推定式である (1.4) 式を考案した。

$$\frac{da}{dN} = C_2 (\Delta K_{eff})^{m_2} = C_2 (U_{eff} \Delta K)^{m_2} \quad (1.4)$$

ただし、 ΔK_{eff} : σ_{op} 基準の有効応力拡大係数範囲 C_2, m_2 : 材料定数

(1.4) 式は Elber 則と呼ばれ、作用応力履歴の応力比、または平均応力が疲労亀裂伝播に及ぼす影響や、変動荷重履歴下において観察される亀裂伝播の遅延現象や加速現象を考慮できると報告されている。種々の応力比で疲労亀裂伝播試験を実施し、 $\Delta K_{eff} \sim da/dN$ 関係を取得した結果例を Fig. 1.4 に示す。Fig. 1.4 より、応力比や最大・最小応力が変化しても亀裂伝播速度 da/dN は ΔK_{eff} のみに依存することが分かる。しかしながら、 ΔK_{eff} で結果を整理した場合でも亀裂伝播の下限界値が存在することが確認さ

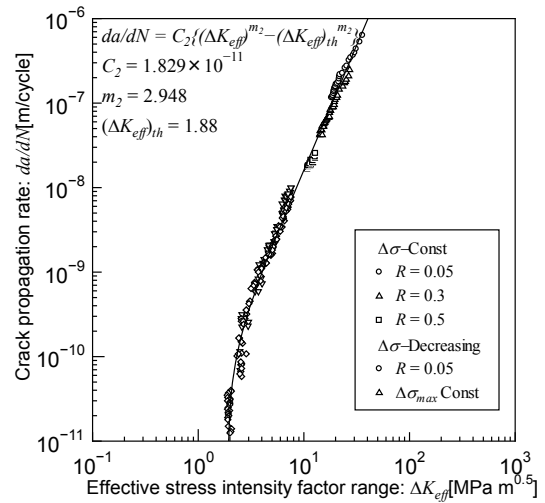


Fig. 1. 4 Crack propagation rates plotted against ΔK_{eff} ²⁴⁾.

れ、Elber の定義した有効荷重比 U_{eff} の中に必ずしも亀裂伝播に実効的でない部分も含まれることが示唆された。

豊貞ら²⁴⁾は繰返し载荷 1 サイクル中における、疲労亀裂の挙動を考察した。Fig. 1.5 (A) に示す最大応力 σ_{max} において、亀裂は開口しており、亀裂の先端には引張の塑性域 ω_1 が生じる。そして、同図 (B) に示す RCPG (Re-Compressive Plastic zone's Generated) 応力 σ_{RCPG} において、亀裂先端部分で圧縮降伏が生じ、続く同図 (C) 亀裂閉口応力 σ_{cl} において、亀裂先端は閉口し、同図 (D) に示す最小応力 σ_{min} において、亀裂先端近傍では圧縮塑性域 ω_3 が生じる。また、除荷過程において亀裂が伝播すると仮定し、同図 (E) に示す亀裂開口応力 σ_{op} において、亀裂先端は開口し、続いて同図 (F) に示す RPG (Re-tensile Plastic zone's Generated) 応力 σ_{RPG} において、亀裂先端部分で引張降伏が生じ、最後に同図 (A') に示す次の最大応力作用時には、亀裂先端には引張塑性域 ω_4 が生じる。この過程において、引張と圧縮の塑性域が重なる領域 (ω_1 と ω_3, ω_3 と ω_4) が、両振塑性域 $\tilde{\omega}$ であり、豊貞らはこの両振塑性域内で消費される引張と圧

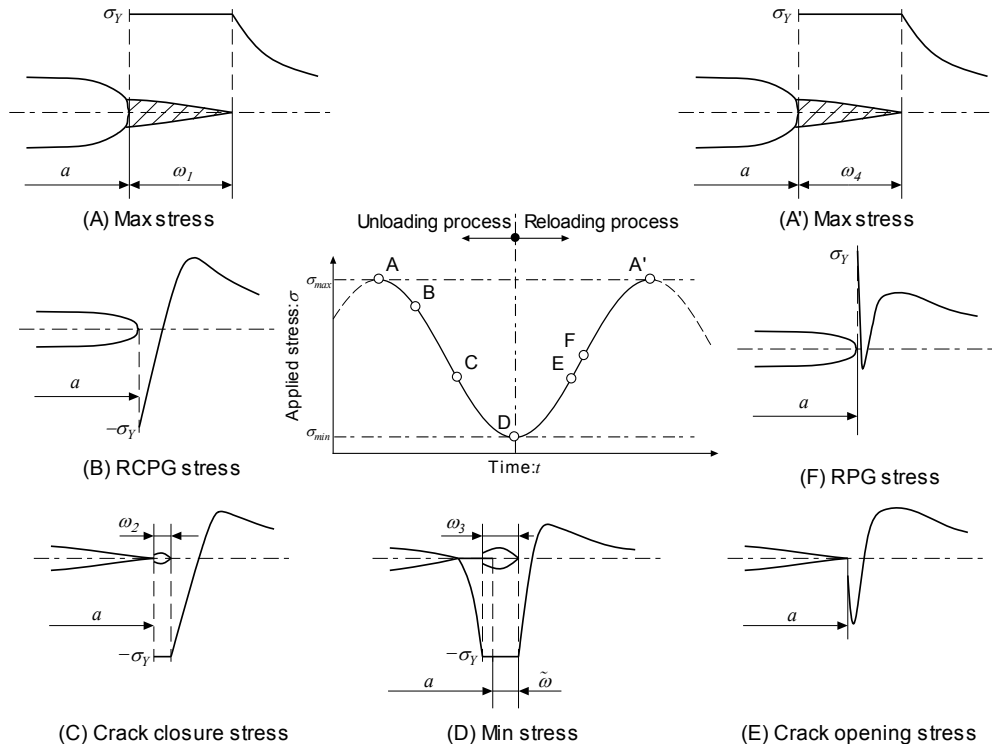


Fig. 1. 5 Plastic deformations and the working stress distribution along the crack line in one loading cycle during the fatigue crack propagation.

縮の繰返しの塑性仕事が疲労亀裂伝播の駆動源となるとの考えに立脚し，同図 (E) に示す亀裂開口応力で亀裂が開口し，同図 (F) に示す RPG 応力において亀裂先端が引張降伏を生じるまでの応力区間を除外した真の有効応力区間 U_{RPG} を (1. 5) 式で定義した。

$$U_{RPG} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{RPG}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} \quad (1. 5)$$

そして，(1. 5) 式を用いて Elber 則を修正し，(1. 6) 式を提案した。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{RPG})^m = C(U_{RPG} \Delta K)^m \quad (1. 6)$$

ただし， ΔK_{RPG} : RPG 応力基準の有効応力拡大係数範囲 C, m : 材料定数

RPG 応力は、一定振幅応力履歴下では基本的に亀裂開口応力と同様の変化挙動を示し、過大荷重直後では RPG 応力と亀裂開口応力はほぼ同じ値となる²⁵⁾。Fig. 1.4 と同様に、種々の条件で疲労亀裂伝播試験を行い、 $\Delta K_{RPG} \sim da/dN$ 関係で整理した結果を Fig. 1.6 に示す。Fig. 1.6 より、試験結果は Fig. 1.4 と同様に応力比に依らず一直線上に並んでおり、また、バラツキも少ないことが確認できる。最も大きな Fig. 1.4 との違いは、 ΔK_{RPG} で試験結果を整理した結果には、亀裂伝播の下限界値が確認できないことである。これは、 ΔK 漸減試験においては、応力振幅が小さくなるにつれて亀裂開口応力は最小応力に、RPG 応力は最大応力に徐々に近づいていくという変化挙動の違いのためである²⁶⁾。亀裂伝播の下限界値が存在しないという事が、RPG 応力から最大応力の応力区間でのみ亀裂先端に塑性ヒステリシスが形成され、その塑性仕事は亀裂伝播の駆動源になるという豊貞らの理論を裏付けている。

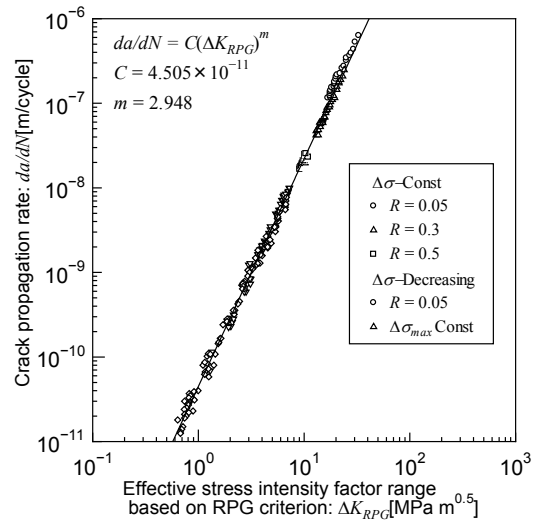


Fig. 1.6 Crack propagation rates plotted against ΔK_{RPG} ²⁴⁾.

1.3 重畳・実働応力履歴評価の歴史

実際の機械・構造物に作用する実働応力は実験室で主に用いられるような一定振幅の繰返し载荷とは異なり、Fig. 1.7 に示す実測された橋梁に作用する応力履歴のように、1 サイクル毎に応力振幅も平均応力も変化するような不規則なものである。このような実働応力下における疲労亀裂の成長メカニズムは今日においても解明されているとは言い難い。

実働応力履歴下における疲労強度設計は、疲労限度設計と疲労寿命設計に大別される。疲労限度設計は、疲労限度を安全率で除して許容応力を求め、設計段階で発生が想定される最大応力がその許容応力以下となるように設計を行う方法である。

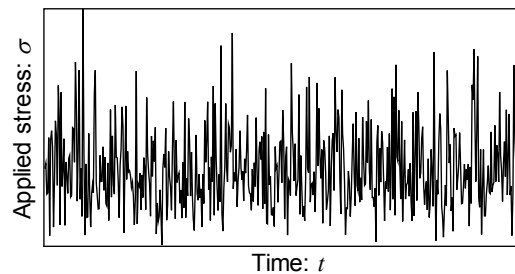


Fig. 1.7 An example of an applied service stress history.

一方疲労寿命設計は、使用が想定される応力頻度、環境、幾何的な条件などから、疲労被害を計算して寿命を予測し、必要な寿命が満足されるようにするものである。前節で述べた疲労亀裂伝播推定もこの範疇に含まれるが、当初、疲労亀裂の存在を前提としたこの考え方は受け入れられ難かった。しかし、変動応力履歴下では疲労限以下の応力振幅でも疲労亀裂が伝播することが発見され、完全な疲労被害の防止は技術的・経済的にも困難であると分かったことや、疲労亀裂伝播挙動に関する研究が進歩するとともに、徐々に受け入れられるようになった。

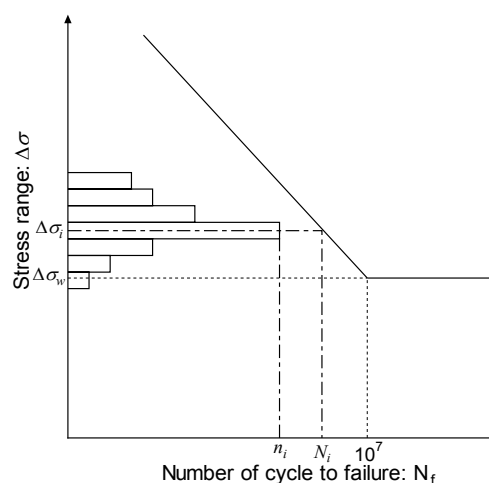


Fig. 1. 8 Schematic illustration of the linear accumulative damage method.

実働応力履歴下における疲労寿命評価手法で最も一般的な手法としては、一定振幅応力履歴下において求めた S-N 線図に基づく線形累積被害則が挙げられる。これは、1920年代初頭に Palmgren²⁷⁾によりその基礎となるものが発表されており、Fig. 1. 8 に示すように、S-N 線図から得られる i レベルの応力が単独で作用した場合の疲労寿命 N_i に対する現繰返し数 n_i の比 n_i/N_i の和が 1 となった時に破壊が生じるという考えの下で疲労寿命を推定するというものである。

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1.7)$$

(1.7) 式において、破壊の指標となる値 D は疲労被害度と呼ばれ、破壊時の理想的な値は 1 であるが、実際には、疲労限 $\Delta\sigma_w$ 以下の応力を打ち切った Miner 則では、疲労限以下の応力の頻度が多い場合には D の値が 0.01 ~ 0.001 でも破壊が生じることが知られている²⁸⁾。この原因としては、疲労限以下の微小な応力が疲労限以上の応力と組み合わせて載荷した場合、疲労限以下の応力でも疲労被害への影響が確認されることなどが挙げられる。そのため、疲労限以下の応力の影響を考慮するために、Fig. 1. 9 に示すように、S-N 線図を疲労限以下まで延長させた修正 Miner 則が比較的良好に使用されているが、変動応力履歴下では D の値が 1 からばらつくことが知られており、経験則的に安全率を決定した上で実設計に採り入れられているのが現状である。

また、Haibach²⁹⁾は多くのプログラム試験を実施し、疲労被害度 D が 1 になるための

S-N 線図の修正方法を提案した.

$$\begin{cases} \Delta\sigma^n N = B_1 \\ \Delta\sigma^{2n-1} N = B_2 \end{cases} \quad \text{For } \begin{cases} [N \leq 10^7] \\ [N > 10^7] \end{cases} \quad (1.8)$$

ただし, $\Delta\sigma$: 応力範囲 N : サイクル数
 n, B_1, B_2 : 材料, 形状による定数

本手法は, (1.8) 式により, Fig. 1.9 のように疲労限以下の応力範囲に対する疲労寿命が修正 Miner 則よりも長くなるように S-N 線図を修正する方法である. 本手法は疲労限度以下の応力頻度が疲労限度以上の頻度に対して極端に多い場合に対して有用である.

あるいは, S-N 線図そのものを修正する方法も存在し, Corten ら³⁰⁾は, 実働荷重下では応力範囲が小さいほど 1 サイクルによる疲労被害度は $1/N_i$ よりも大きくなるとの考えから, Fig. 1.9 のように一定振幅応力履歴下での S-N 線図を短寿命側に修正する方法を考案した.

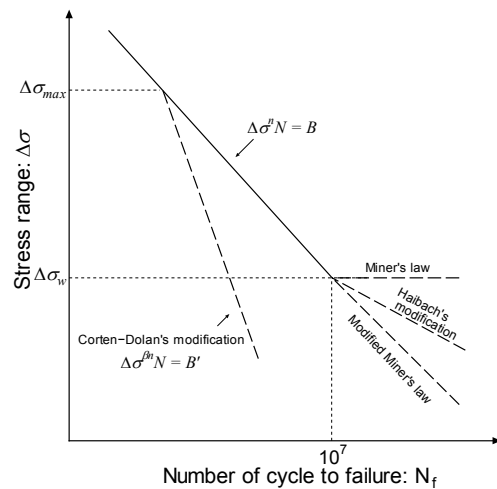


Fig. 1.9 Schematic illustration of the modifications of the S-N curve.

$$\Delta\sigma^{\beta n} N = B \quad (1.9)$$

ただし, β : S-N 線図勾配変換指数
 n, B : 材料, 形状による定数

(1.9) 式における β は 0.8 ~ 0.95 が適切であるといわれている. 本手法による変換は Haibach によるものと真逆の修正となるが, この原因は, 疲労試験において用いた実働応力履歴の相違によるものと考えられる.

この修正手法の矛盾が示すように, 線形累積被害則では, 変動応力履歴下における疲労亀裂伝播の遅延・加速効果をはじめとする作用応力履歴の影響を考慮できないという問題が依然解決していない. 応力履歴の影響を考慮するために疲労試験中の塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon_p$ を測定し, 疲労被害度をサイクル数に対して非線形にする手法も検討された. 城

野¹¹⁾は、低サイクル疲労に対して適用が可能である Manson-Coffin の式^{31),32)}である (1.10) 式で試験結果を整理することにより、変動応力履歴下でも一様に定義できる $\Delta\varepsilon_p - N$ 線図が得られることを示した。

$$\Delta\varepsilon_p^n N = B \quad (1.10)$$

ただし、 $\Delta\varepsilon_p$: 塑性ひずみ幅 n, B : 材料, 形状による定数

そして、非線形累積損傷則である (1.11) 式を提案し、変動応力履歴下においても良好な推定が可能であると提案している。

$$D = \sum (\Delta\varepsilon_p / B)^\alpha \quad (1.11)$$

ここで、 α, B : 材料, 形状による定数

しかしながら、現実の実働応力履歴下においては、疲労限度以下の一定振幅応力が連続して多く繰り返されるようなことは稀であり、実用的には線形累積損傷則を用いることが多い。

一方、1次の低周波振幅に2次の高周波振幅が重畳した波形は、ばね、歯車、車両用台車枠、船体、ディーゼル機関燃焼室壁部材、及びタービンなどの実働条件下において多く見られる²⁸⁾。重畳波形下の疲労強度が研究対象として採り上げられるようになったのは1950年頃からである。例えば河本ら³³⁾は、切欠き付丸棒試験片を用いて、一定振幅の高周波成分を重畳させた疲労試験を行い、重畳応力履歴の高周波振幅 σ_H と破断寿命 N の間には(1.12)式の関係が成立することを確認した。

$$\log(N) = \log(N_0) - k\sigma_H \quad (1.12)$$

ただし、 N_0 : 低周波応力のみが作用した場合の破断寿命
 k : 定数

(1.12) 式の模式図を Fig. 1.10 に示す. Fig. 1.10 に示すように, 定数 k は低周波振幅一波中における高周波振幅の波数 n_0 の関数であり, 実施した疲労試験の試験片における k の値を求め, 重畳波形下での疲労寿命は, 低周波振幅のみを载荷した条件の疲労寿命から推定できると提案している.

田中ら³⁴⁾は Fig. 1.11 に示す三種類の重畳波形による疲労試験を行い, 疲労寿命に影響を与えず無視しても差し支えない高周波振幅 σ_H の限界値を検討した. Fig. 1.11 の Type I, II の重畳波形はそれぞれ以下の (1.13), (1.14) 式により表される.

$$\sigma = \sigma_L \cos(2\pi f_L t) + \sigma_H \cos(2\pi f_H t), (f_L < f_H) \quad (1.13)$$

$$\sigma = \{\sigma_L + \sigma_H \cos(2\pi f_H t)\} \cos(2\pi f_L t), (f_L < f_H) \quad (1.14)$$

ただし, σ_L : 低周波応力振幅
 σ_H : 高周波応力振幅
 f_L : 低周波振幅周波数
 f_H : 高周波振幅周波数

これらの各重畳応力条件において, 種々の高周波振幅 σ_H を設定して疲労試験を行った結果, (I) においては, $f_H/f_L \approx 5$ では, $0.1 \leq \sigma_H/\sigma_{max} \leq 0.5$, そして $f_H/f_L \approx 10$ では, $0 \leq \sigma_H/\sigma_{max} \leq 0.35$, (II), (III) においては, おおよそ $\sigma_H/\sigma_{max} \leq 1.0$ の範囲では, 重畳波条件の方が同じ最大応力 σ_{max} を持つ一定応力振幅条件よりも寿命が長いという結果が得られた. このように, 重畳波によ

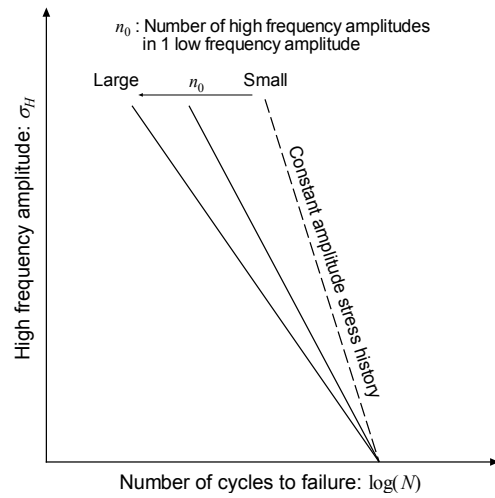
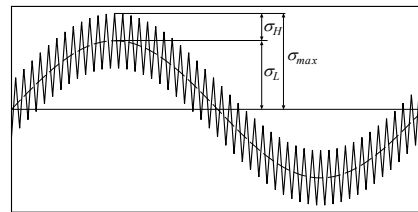
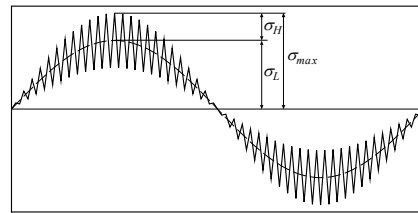


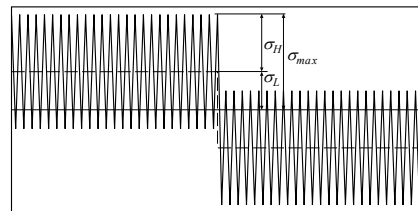
Fig. 1.10 Schematic illustration of the fatigue life under superimposed stress sequences.



(i) Type I



(ii) Type II



(iii) Type III

Fig. 1.11 Several pattern of superimposed stress sequences.

る疲労の研究は、疲労損傷の成長に寄与しない作用応力振幅の除去の問題へのアプローチを含んでいる。

近年においては、Fricke ら³⁵⁾は、荷重非伝達型の十字継手試験片に対し、低周波の応力振幅に一定振幅の高周波振幅が重畳する条件 ($\sigma_H/\sigma_{max}=0.5, 1.0$) と、減衰する高周波振幅が重畳する条件下における疲労試験を実施し、重畳応力履歴下における疲労被害度は、高周波振幅により増幅された包絡波振幅によるものが大部分であり、重畳する微小振幅による寄与は無視できるほど小さいと報告している。また、大沢ら^{36), 37)}は、一定振幅重畳試験 ($\sigma_H/\sigma_{max}=0.19 \sim 1.15$) と減衰重畳試験を複数実施し、重畳応力履歴から包絡波形のみを抽出して波形計測を行う **Enlargement** 法を提案し、この手法による疲労寿命評価結果をレインフロー法による結果と比較し、重畳応力履歴下における疲労寿命は、その包絡波により近似的に評価できることを示した。

これらの研究成果は非常に有益であるものの、限られた応力履歴条件下における試験結果に対してのものであるため、その適用範囲には限界があると考えられる。また、これら無効振幅除去の考え方に則った既存の研究の殆どは経験的に求められたものであり、重畳応力履歴下における疲労亀裂の成長挙動に関する力学的な考察は、ほぼなされていがないのが現状である。

1.4 本研究の目的

既存の重畳応力条件における研究アプローチは疲労強度に及ぼさない応力振幅を抽出・無視する方法を見出すという考えに則ったものが殆どである。これは、Fig. 1.12 に示すように、最大応力振幅に対する高周波振幅の比 σ_H/σ_{max} がある基準値よりも小さい場合には高周波振幅を無視して応力履歴中のピーク値を包絡する波形と見なし、 σ_H/σ_{max} がある基準値よりも大きい場合には高周波振幅一つひとつを考慮するとする両極端なもので、その間の範囲の応力条件に対しては、従来の疲労寿命評価手法による結果との誤差を求め、安全側の評価ができるような疲労被害度の値を暫定的に決定するといった経験則によるものが多い。

本研究では、重畳応力履歴下における疲労亀裂成長挙動の破壊力学的な見地による考察を行い、疲労亀裂伝播に寄与している有効な応力履歴の抽出アルゴリズムを考案し、RPG 応力基準の亀裂伝播推定式に則った疲労亀裂成長シミュレーションを用いて疲労亀裂成長推定を行う。そして、種々の重畳応力条件下において実施された疲労亀裂伝播試験との比較を行い、シミュレーション手法の妥当性を検証する。さらに最終的には、有効応力履歴の抽出アルゴリズムを実装した疲労亀裂成長シミュレーションを用いて種々の重畳応力条件の疲労亀裂伝播解析を行い、重畳応力波形の低周波振幅、高周波振幅、平均応力などの様々な因子と、疲労亀裂伝播に寄与する有効な応力履歴との関係を検討する。

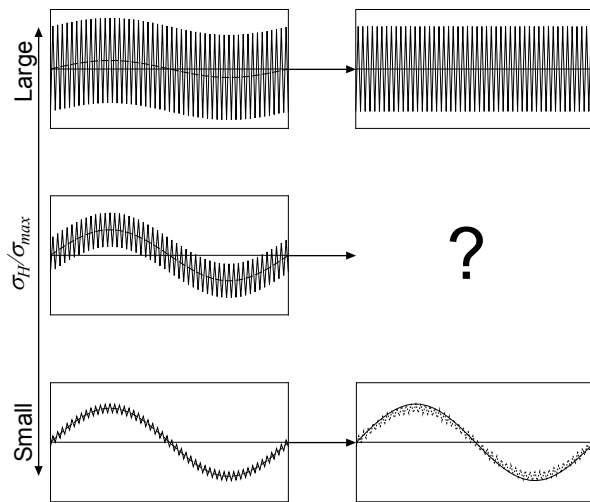


Fig. 1. 12 Schematic illustration of simplification of superimposed stress history by σ_H/σ_{max} .

1.5 本論文の構成

本論文は7つの章により構成されている。

第1章は、研究背景であり、疲労亀裂伝播評価、重畳応力履歴条件下における疲労強度評価の歴史と研究目的について述べた。

第2章では、本研究において用いたRPG基準の疲労亀裂成長シミュレーションの概要を説明し、疲労亀裂開閉口モデルについて説明する。

第3章では、不規則応力履歴下において疲労亀裂伝播に寄与する有効な応力履歴を抽出する有効応力履歴選択アルゴリズムについて解説し、それを実装した疲労亀裂成長シミュレーション結果と重畳応力履歴下において実施された疲労亀裂伝播試験の比較を通して、本研究で提案する数値シミュレーション手法の妥当性の検証を行う。

第4章では、種々の平均応力条件を設定した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験を実施し、有効応力履歴選択アルゴリズムを実装した疲労亀裂成長シミュレーションによる疲労亀裂伝播解析を行い、シミュレーションの妥当性を検討する。また、重畳応力履歴下における平均応力が疲労亀裂成長に与える影響についても検証を行う。

第5章では、等価疲労応力を用いて重畳応力履歴を一定振幅応力履歴に変換して、簡便に疲労亀裂伝播解析を行う手法について検証する。

第6章では、低周波振幅、高周波振幅、平均応力を変化させた重畳応力条件を多数設定し、有効応力履歴選択アルゴリズムを導入した疲労亀裂成長シミュレーションを用いて疲労亀裂伝播解析を行うことで、重畳応力履歴中の各因子が疲労亀裂伝播挙動に及ぼす影響について考察を行い、重畳応力履歴を一定振幅応力履歴とみなして疲労寿命評価を行う事の出来る範囲・条件について考察を行う。

第7章では、本研究に関する結論を述べるとともに本研究に関連する将来課題について言及する。

第2章 亀裂結合カモデルに基づく疲労亀裂成長の数値シミュレーション

2.1 緒言

本章では、亀裂結合カモデルに基づく疲労亀裂成長の数値シミュレーション²⁴⁾の概要を説明する。本研究で採用する疲労亀裂伝播則のパラメータ ΔK_{RPG} を算出するためには、疲労亀裂先端で生じる引張/圧縮の塑性域を適切に評価し、RPG 応力を求める必要があるが、その際に有限要素法 (FEM) 等を用いて疲労亀裂先端近傍の応力場を評価すると多くの計算時間を要する上に、FEM による RPG 応力の評価手法が確立されていないため実用的でない。

変動応力履歴下における亀裂遅延現象を考慮できる数値シミュレーションモデルとして、Willenborg ら³⁸⁾は過大応力作用後の最大荷重時の K 値 K_{max} を減少させることで亀裂伝播速度の低減を表現できるモデルを提案した。また、Wheeler³⁹⁾は前歴の過大応力により生じた塑性域 ω_{OL} の中に現応力履歴により生じた塑性域 ω が存在する場合に、遅延係数 ϕ により亀裂伝播速度の低減を表現できるモデルを提案した。これらの亀裂モデルはいずれも前歴の応力履歴により生じた亀裂先端部の引張塑性域の後続の応力履歴中で生じる圧縮残留応力のみを考慮したモデルである。一方、実際には塑性域内を疲労亀裂が伝播することにより亀裂上下面に塑性域 (残留引張変形層) が取り込まれることで、亀裂開閉口が生じることで亀裂伝播速度に影響を受ける。すなわちこれらの両方を考慮しなければ変動応力履歴下での疲労亀裂伝播の遅延現象を定量的に評価することができない。

Newman⁴⁰⁾は、Dugdale モデル⁴¹⁾により与えられる塑性域先端を仮想亀裂と見なし、仮想亀裂の亀裂開口変位を求め、その領域に剛塑性体の棒要素を配置することで、亀裂の伝播に伴って亀裂面に取り込まれる残留引張変形層を再現できる亀裂開閉口モデルを提案した。しかしながら、Newman のモデルでは、実亀裂面と仮想亀裂面に配置した棒要素の応力～ひずみ関係に剛塑性体を想定しているため、塑性域内における除荷及び再負荷時の弾性変形を考慮できないという問題が残されていた。

Toyosada ら²⁴⁾は、Newman の提案したモデルの応力～ひずみ関係に弾完全塑性体を想定することで、塑性域内における除荷及び再負荷時の弾性変形を考慮することのできる

モデルを考案した。本研究では、このモデルを発展させて重畳応力履歴下における疲労亀裂成長の数値シミュレーションを構築するので、本章において同シミュレーションの基礎理論を概説する。

2.2 亀裂結合カモデル

亀裂先端に生じる塑性域が細長くて限りなく薄いと仮定し、塑性域も含めて仮想的に亀裂と考えた場合、この仮想亀裂周りの弾性領域の変形は、塑性域に降伏応力を生じさせる亀裂面間の結合力が作用するモデルにより表現できる。

Dugdale⁴¹⁾は Fig. 2. 1 に示すように亀裂先端に生じる塑性域を仮想亀裂と見なし、実際の亀裂部分は自由表面、塑性域は仮想亀裂表面で降伏応力 σ_y の引張応力を受けているものと考えた。このモデル化と重ね合わせの原理を用いることで、Fig. 2. 2 (a) に示す外荷重 P が作用する亀裂の応力分布は、(b) 無亀裂材の亀裂想定線上に作用する応力分布と、(c) c の長さの亀裂面に (b) の応力分布が内圧として作用する場合と、(d) 塑性域（仮想亀裂面）に降伏点と等しい圧縮応力が作用する場合を重ね合わせることで表現できる。仮想亀裂の先端である $x = c$ では応力特異性が存在しないため、この点における応力拡大係数 K 値は 0 となる必要がある。したがって、Fig. 2. 2 (b)~(d) の K 値の和は 0 となる（ただし、(b) には亀裂が存在しないため $K = 0$ となる）条件から塑性域先端位置 c を求めることができる。

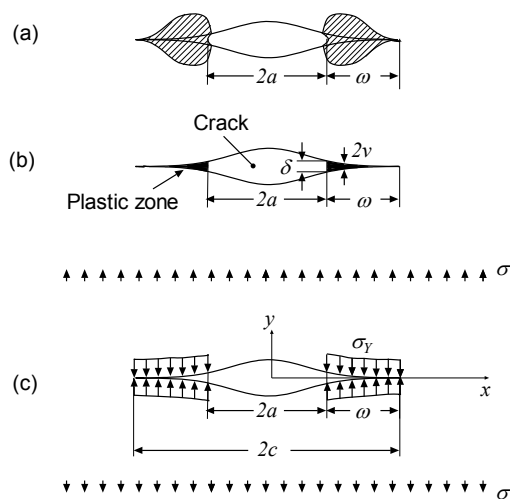


Fig. 2. 1 Schematic illustration of Dugdale model.

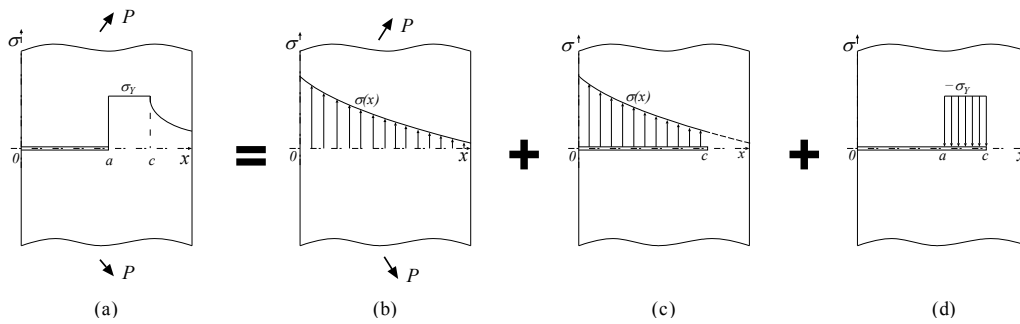


Fig. 2. 2 Principle of superposition concerning generalized strip yield model.

以下、亀裂結合力モデルによる塑性域先端位置と亀裂開口変位の計算方法について説明を行う。

Fig. 2. 3 に示すように、長さ c の亀裂の亀裂面の位置 x に集中荷重 P が作用した場合の K 値を (2. 1) 式とする。

$$K = Pg(x, c) \quad (2. 1)$$

ここで亀裂長と集中荷重作用位置の関数である $g(x, c)$ は K 値重み関数と称されるもので、単位集中荷重作用時の K 値に相当する。重み関数 $g(x, c)$ を用いると Fig. 2. 2 (c) の K 値は次式で表される。

$$K = \int_0^c \sigma(x)g(x, c)dx \quad (2. 2)$$

ここで、塑性域先端位置を改めて c と考えると、Fig. 2. 2 (d) の K 値は次式で表される。

$$K = -\sigma_y \int_a^c g(x, c)dx \quad (2. 3)$$

仮想亀裂先端位置での K 値は 0 となる必要があるため、次式が成立する。

$$\int_0^c \sigma(x)g(x, c)dx - \sigma_y \int_a^c g(x, c)dx = 0 \quad (2. 4)$$

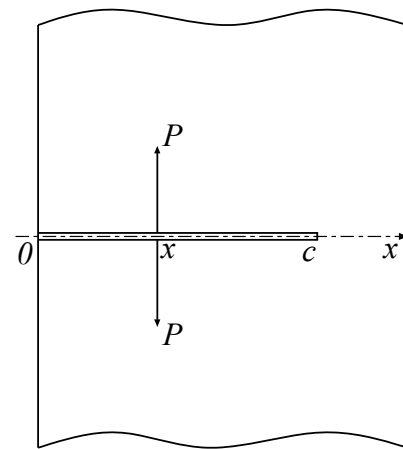


Fig. 2. 3 Schematic of crack subjected to concentrated force on crack surface.

(2.4) 式を c について解くことで、仮想亀裂先端位置を求めることができる。

また、長さ c の亀裂の亀裂面の位置 x に単位荷重が作用した場合の $x = x_j$ における亀裂開口変位は Paris の相反定理⁴²⁾より、次式で与えられる。

$$V(x_j) = \frac{2}{E'} \int_0^c g(x, a) g(x_j, a) da \quad (2.5)$$

ここで、

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

Fig. 2.2 (b) に示すように評価対象が無亀裂状態の場合の、亀裂位置における応力分布を $\sigma(x)$ とすると、Fig. 2.2 (c) の $x = x_j$ における亀裂開口変位 $V(x_j)$ は次式で与えることができる。

$$V(x_j) = \frac{2}{E'} \int_0^c \sigma(x) \int_0^c g(x, a) g(x_j, a) da dx \quad (2.6)$$

同様に考えると、Fig. 2.2 (d) の亀裂開口変位は次式で与えることができる。

$$V(x_j) = \frac{-2\sigma_Y}{E'} \int_a^c \int_0^c g(x, a) g(x_j, a) da dx \quad (2.7)$$

Fig. 2.2 (a) の亀裂開口変位は (2.6) 式と (2.7) 式の和をとることで、次式で与えられる。

$$V(x_j) = \frac{2}{E'} \left\{ \int_0^c \sigma(x) \int_0^c g(x, a) g(x_j, a) da dx - \sigma_Y \int_a^c \int_0^c g(x, a) g(x_j, a) da dx \right\} \quad (2.8)$$

一般的に、亀裂結合カモデルでは材料の応力ひずみ～関係に等方硬化弾完全塑性体を想定しているため、同モデルにより算出された亀裂開口変位は、実際よりも大きな値が得られる。そのため、これを補正するために降伏応力に塑性拘束係数 λ を乗じて、塑

塑性域に作用する結合力を修正する手法が広く用いられる^{40),43)}. 実際に (2.4) 式や (2.8) 式を用いる際には, 降伏応力 σ_Y の代わりにこの値を補正した $\lambda\sigma_Y$ を代入して計算を行う.

応力分布 $\sigma(x)$ が作用する亀裂材の亀裂開口変位 $V(x_j)$ を数値解析により計算する場合には, (2.4) 式を用いて塑性域先端位置 c を求めた後, (2.8) 式を用いるが, その際には, 応力が作用する実亀裂面, 及び仮想亀裂面を一定応力が作用すると近似できる微小範囲に離散化し, その微小範囲に作用する応力に対する亀裂開口変位の和を採ればよい.

Fig. 2.4 に示すように亀裂面を n 個に分割した場合, $x = x_j$ における亀裂開口変位 $V(x_j)$ を求める場合には, 次式で与えられる.

$$V(x_j) = \sum_{i=1}^n v_i(x_j) \quad (2.9)$$

ここで, $v_i(x_j)$ は次式により算出される.

$$v_i(x_j) = \frac{2\sigma_i}{E'} \int_{B_i}^{\beta} \sigma(x) \int_{\alpha}^c g(x,a) g(x_j,a) da dx \quad (2.10)$$

$$= \sigma_i F(x_j, x_i, c) \quad (2.11)$$

ただし,

$$x_i = (B_i + B_{i+1}) / 2$$

$$\text{また, } x_j < B_i \text{ の時} \quad \alpha = B_i, \beta = \min[B_{i+1}, a]$$

$$B_i \leq x_j \leq B_{i+1} \text{ の時} \quad \alpha = x_j, \beta = \min[B_{i+1}, a]$$

$$B_{i+1} < x_j \text{ の時} \quad \alpha = x_j, \beta = B_{i+1}$$

(2.10) 式により $v_i(x_j)$ を算出した後, 亀裂面に応力 $\sigma(x_j)$ が作用する場合の亀裂面 $x = x_j$ における亀裂開口変位 $V(x_j)$ は (2.9) 式より, 次式で表現できる.

$$V(x_j) = \sigma_i \sum_{i=1}^n F(x_j, x_i, c) \quad (2.12)$$

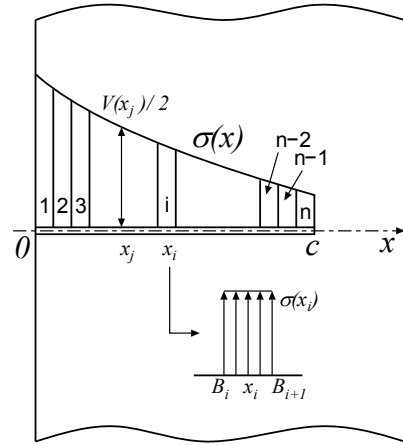


Fig. 2.4 Schematic of divided elements in crack surface.

2.3 各荷重段階における亀裂開閉口モデル

本研究における疲労亀裂成長シミュレーションでは、まず最大荷重時の亀裂開口変位を求め、続いて最小荷重時の亀裂開口変位の計算を行う。その後、 ΔK_{RPG} 基準の亀裂伝播則 (1.6) 式に必要な RPG 荷重の計算を実施する。また、本研究においては後述の重畳応力履歴下における有効応力履歴選択の実現のため、RPG 荷重後の再負荷過程最大荷重時の亀裂開口変位の計算も必要となる。本節では、各荷重段階での亀裂開口変位の計算方法について述べる。

2.3.1 最大荷重時（現荷重により塑性域先端が過去に生じた塑性域よりも外側に存在する場合）

Fig. 2.5 (a) に示すような初期亀裂長さ a_0 、現亀裂長さ a における最大荷重時の塑性域先端を c とし、 $a \sim c$ 間の長さを ω とする。また、単位荷重が作用した時の無亀裂状態における想定亀裂線上に作用する応力分布を $\sigma_S(x)$ とする。Fig. 2.5 (a) の亀裂開口変位は、Fig. 2.5 に示す重ね合わせにより求めることができる。

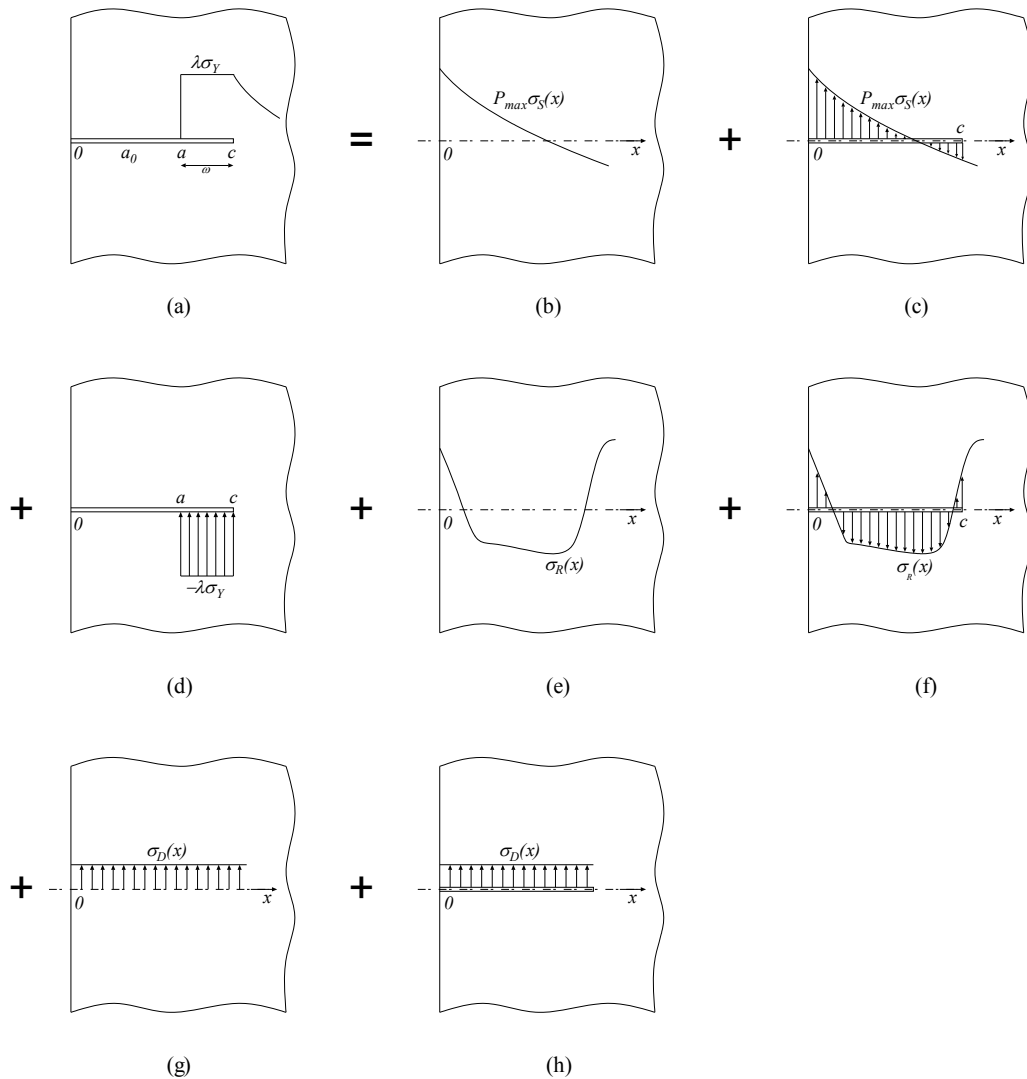


Fig. 2. 5 Principles of superposition at maximum stress condition.

ここで、Fig. 2. 5 (a)~(h)の各状態は以下の通りである。

- (a) 実亀裂長さ a の亀裂前方の応力分布
- (b) 亀裂が存在しないと仮定した状態で作用する外荷重 P_{max} による応力分布
- (c) 長さ a の亀裂に (b) の応力が内圧として作用する亀裂
- (d) $a \sim c$ 間に $-\lambda\sigma_y$ の一様応力が内圧として作用する亀裂
- (e) 亀裂が存在しない状態で作用していた残留応力分布
- (f) 長さ a の亀裂に (e) の応力が内圧として作用する亀裂
- (g) 亀裂が存在しないと仮定した状態で作用する死荷重による応力分布
- (h) 長さ a の亀裂に (g) の応力が内圧として作用する亀裂

Fig. 2.5 (b)~(h) の重ね合わせにより, Fig. 2.5 (a) の亀裂開口変位を計算することができる.

Fig. 2.5 (a) の亀裂開口変位を求めるため, 亀裂面を Fig. 2.6 に示すように短冊状の微小範囲に分割する. 領域 A は初期亀裂面 $[0, a_0]$, 領域 B は初期亀裂面を除いた実亀裂面 $[a_0, a]$ と塑性域 $[a, c]$ にそれぞれ対応しており, 区間 $[a_0, a]$ は, 亀裂の伝播に伴い亀裂面に取り込まれた残留引張変形層が存在し, 塑性域である区間 $[a, c]$ と共に, 弾完全塑性体の棒要素が埋め込まれている. 数値計算の利便性を考え, 領域 A の微小範囲も棒要素を配置し, この範囲に配置される棒要素の番号を 1, 2, 3, \dots NFA とする.

また, 領域 B $[a_0, c]$ における棒要素番号は 1, 2, 3, \dots NBAR とする. また, 実亀裂先端位置 a を過ぎた直後の棒要素番号を NCBAR とする.

最大荷重時に亀裂が完全に開口し, かつ現在の応力により生じた塑性域先端が過去に生じた塑性域外に存在する場合, Fig. 2.5 (a) の $x = x_j$ における亀裂開口変位 $V_{max}(x_j)$ は, Fig. 2.5 (c), (d), (f), (h) における亀裂開口変位の和として, 次式で与えられる.

$$\begin{aligned}
 V_{max}(x_j) = & P_{max} \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
 & - \lambda \sigma_Y \sum_{i=NCBAR}^{NBAR} F_B(x_j, x_i, c) \\
 & + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
 & + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

- ただし,
- $(\sigma_{SA})_i, (\sigma_{SB})_i$: $x = x_i$ における単位外荷重による応力 $\sigma_S(x)$ の値
 - $(\sigma_{RA})_i, (\sigma_{RB})_i$: $x = x_i$ における残留応力 $\sigma_R(x)$ の値
 - $(\sigma_{DA})_i, (\sigma_{DB})_i$: $x = x_i$ における死荷重応力 $\sigma_D(x)$ の値
 - λ : 塑性拘束係数

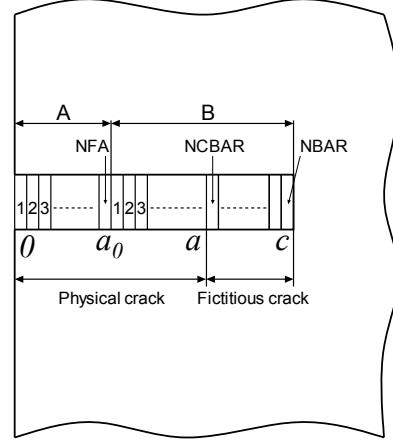


Fig. 2.6 Arrangement of bar elements.

なお、添え字 A, B は Fig. 2. 6 に示すように、A は初期亀裂に対応し、B は初期亀裂を除いた実亀裂と仮想亀裂（塑性域）に対応する。

仮想亀裂面（塑性域）に配置された棒要素 ($i = \text{NCBAR} \sim \text{NBAR}$) には仮想変位 $V_{\max}(x_j)$ が生じているが、この領域に配置された棒要素は塑性変形を生じていることから、完全に除荷されても Fig. 2. 7 (a) に示すように、 $V_{\max}(x_j)$ から弾性変形分を差し引いた長さを保持する。この長さを棒要素のゲージ長と定義し、弾完全塑性体を想定した場合、ゲージ長は次式で与えられる。

$$L_j = \frac{1}{1 + \lambda \sigma_Y / E'} V_{\max}(x_j) \quad (2. 14)$$

塑性域が初めて形成される場合の最大荷重時にも本節と同様のモデルが使用でき、この場合は Fig. 2. 6 で $a = a_0$ として、NCBAR = 1 から順に棒要素番号を設定すればよい。

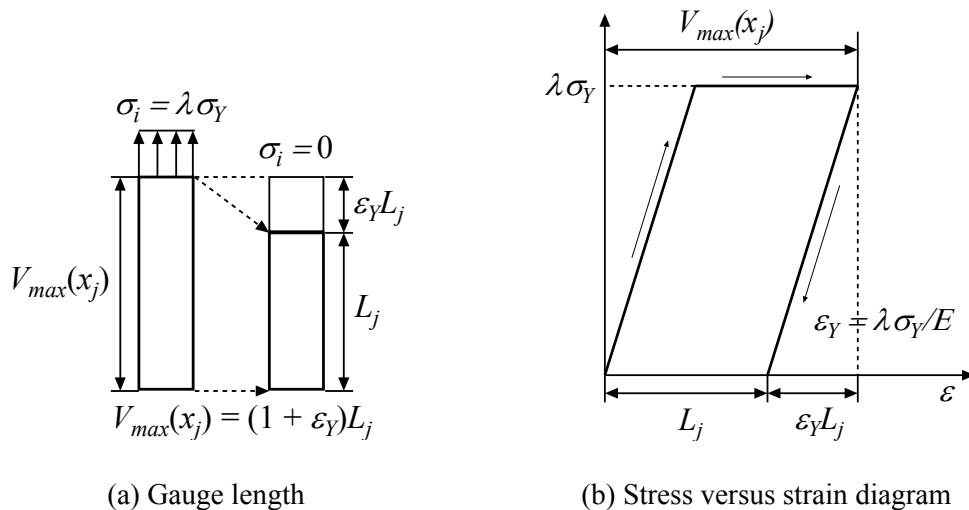


Fig. 2. 7 Schematic illustration of gauge length and stress versus strain diagram.

2.3.2 最小荷重時

最小応力時には、Fig. 2. 8 に示す重ね合わせの原理が成立する。ここで、Fig. 2. 8 (d) に示した応力分布は最小荷重時に亀裂面に作用する応力分布の符号を変えたものである。したがって、最小荷重時の亀裂開口変位 $V_{\min}(x_j)$ は、次式で与えられる

$$\begin{aligned}
V_{min}(x_j) = & P_{min} \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_A)_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \quad (2.15)
\end{aligned}$$

ただし, $(\sigma_A)_i, (\sigma_B)_i$: $x = x_i$ における最小荷重時に棒要素に作用する応力

なお, 初期亀裂面は, 実亀裂面に残留引張変形層が形成されていない解析最初期段階で過大圧縮荷重が作用するような場合を除いて, 常に開口していると考えられるため, $(\sigma_A)_i = 0$ である. また, $(\sigma_B)_i$ は現時点では未知数であり, 以下にその算出方法を述べる.

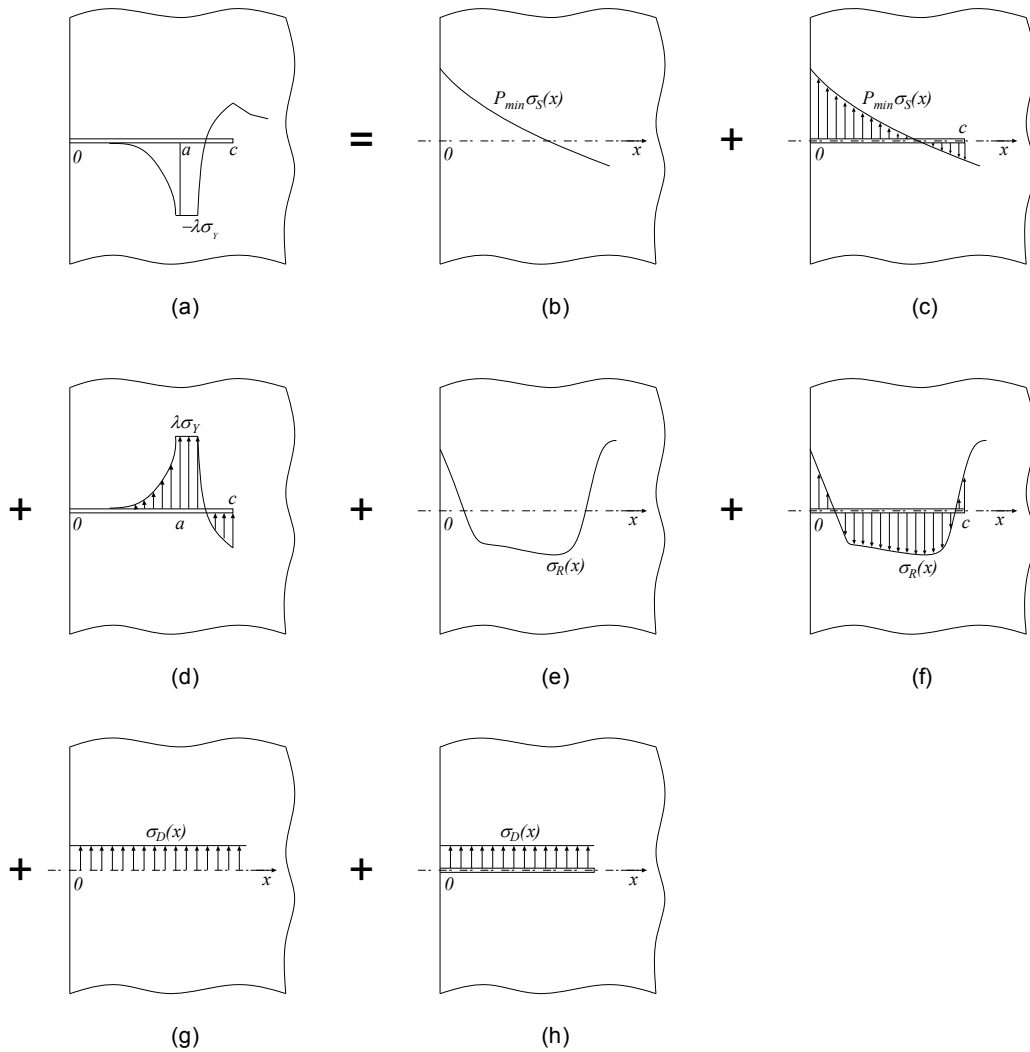


Fig. 2. 8 Principles of superposition at minimum stress condition.

最小荷重時に圧縮塑性しない領域では、棒要素には弾性変形しか生じないため、仮想亀裂部の弾性域、及び実亀裂部の亀裂閉口領域の弾性域では次式が成立する。

$$V_{min}(x_j) = \{1 + (\sigma_B)_j / E'\} L_j \quad (2.16)$$

この領域では、(2.15) 式と (2.16) 式より、次式が成立する。

$$\begin{aligned}
\left\{1 + \frac{(\sigma_B)_j}{E'}\right\} L_j = P_{\min} & \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& - \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \quad (2.17)
\end{aligned}$$

(2.17) 式を $(\sigma_B)_j$ について解くと、次式が得られる。

$$\begin{aligned}
(\sigma_B)_j = & \left[P_{\min} \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& - \left. \left\{ \sum_{i=1}^{j-1} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) + \sum_{i=j+1}^{NBAR} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& + \left. \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& + \left. \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& \left. - L_j \right] / \left\{ \frac{L_j}{E'} + F_B(x_j, x_i, c) \right\} \quad (2.18)
\end{aligned}$$

(2.18) 式は、NBAR 個の未知数 $(\sigma_B)_1 \sim (\sigma_B)_{NBAR}$ を持つ連立方程式であるため、Gauss-Seidel 法などの収束計算で解くことができる。この収束計算の過程では、

• 実亀裂面内 $[x_j < a]$:

$$\begin{aligned}
(\sigma_B)_j > 0 \text{ の時,} & \quad (\sigma_B)_j = 0 \\
(\sigma_B)_j < -\lambda\sigma_Y \text{ の時,} & \quad (\sigma_B)_j = -\lambda\sigma_Y
\end{aligned}$$

• 仮想亀裂面内 $[a < x_j < c]$:

$$\begin{aligned}
(\sigma_B)_j > \lambda\sigma_Y \text{ の時,} & \quad (\sigma_B)_j = \lambda\sigma_Y \\
(\sigma_B)_j < -\lambda\sigma_Y \text{ の時,} & \quad (\sigma_B)_j = -\lambda\sigma_Y \quad (2.19)
\end{aligned}$$

と置き換える必要がある。この置き換えを行いながら収束計算を繰り返すことで応力分布 $(\sigma_B)_j$ が得られ、この $(\sigma_B)_j$ を (2.15) 式に代入することで最小荷重時の亀裂開口変位 $V_{min}(x_j)$ を算出することができる。また、最小荷重時において圧縮降伏している棒要素は $(\sigma_B)_j = -\lambda\sigma_Y$ であり、これを満たす範囲として圧縮塑性域先端を決定することができる。

$(\sigma_B)_j = -\lambda\sigma_Y$ を満たす圧縮塑性変形域では、棒要素ゲージ長は次式のように変化する。

$$L_j = \frac{1}{1 - \lambda\sigma_Y/E'} V_{min}(x_j) \quad (2.20)$$

最小荷重時に圧縮降伏を生じない領域は、最大荷重時のゲージ長 (2.14) 式を保持する。

2.3.3 RPG 荷重時

RPG 荷重は再負荷過程に実亀裂先端が引張塑性変形を生じる時の荷重であり、この時の亀裂開口変位 $V_{RPG}(x_j)$ は、最小荷重時と同様に考え、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} V_{RPG}(x_j) = P_{RPG} & \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\ & - \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) \\ & + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\ & + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \quad (2.21) \end{aligned}$$

ここで、亀裂先端に配置されている棒要素（棒要素番号: NCBAR）は引張塑性しているため、 $(\sigma_B)_{NCBAR} = \lambda\sigma_Y$ となる。したがって、 $j = NCBAR$ の場合に (2.21) 式を P_{RPG} について解くことで次式が得られる。

$$\begin{aligned}
P_{RPG} = & \left[\left(1 + \frac{\lambda \sigma_Y}{E'} \right) L_{NCBAR} + \left\{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq NCBAR}}^{NBAR} (\sigma_B)_i F_B(x_{NCBAR}, x_i, c) + \lambda \sigma_Y F_B(x_{NCBAR}, x_{NCBAR}, c) \right\} \right. \\
& - \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_{NCBAR}, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_{NCBAR}, x_i, c) \right\} \\
& - \left. \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_{NCBAR}, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_{NCBAR}, x_i, c) \right\} \right] \\
& / \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_{NCBAR}, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_{NCBAR}, x_i, c) \right\} \quad (2.22)
\end{aligned}$$

また, $j \neq NCBAR$ の場合には次式が成立する.

$$\begin{aligned}
(\sigma_B)_j = & \left[P_{RPG} \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) - \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& - \left. \left\{ \lambda \sigma_Y F_B(x_j, x_{NCBAR}, c) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j \\ i \neq NCBAR}}^{NBAR} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& + \left. \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& + \left. \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& \left. - L_j \right] / \left(\frac{L_j}{E'} + F_B(x_j, x_i, c) \right) \quad (2.23)
\end{aligned}$$

ここで, L_j は直前の最小荷重時におけるゲージ長である.

(2.22) 式, (2.23) 式も Gauss-Seidel 法などの反復計算法を用い, その収束過程で (2.19) 式の置き換えを行うことで解くことができ, 得られた P_{RPG} , 及び $(\sigma_B)_j$ を (2.21) 式に代入することで RPG 荷重時の亀裂開口変位 $V_{RPG}(x_j)$ を求めることができる.

2.3.4 最大荷重時 (現塑性域先端が過去に生じた塑性域よりも内側に存在する場合)

最大荷重時に生じた引張塑性域がこれまでに生じた最大の塑性域よりも内側に留まる場合は, 重ね合わせの原理より (2.17) 式と同様の関係が成立する. すなわち,

$$\begin{aligned}
\left\{1 + \frac{(\sigma_B)_i}{E'}\right\} L_j = P_{max} & \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& - \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \quad (2.24)
\end{aligned}$$

が成立する. (2.24) 式を $(\sigma_B)_j$ について解くと,

$$\begin{aligned}
(\sigma_B)_j = & \left[P_{max} \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& - \left. \left\{ \sum_{i=1}^{j-1} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) + \sum_{i=j+1}^{NBAR} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& + \left. \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& + \left. \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& \left. - L_j \right] / \left\{ \frac{L_j}{E'} + F_B(x_j, x_i, c) \right\} \quad (2.25)
\end{aligned}$$

ただし, L_j は直前の最小荷重時における棒要素のゲージ長である.

(2.25) 式は (2.18) 式と同様に収束計算により解くことができる. また, 引張塑性変形が生じている領域は $(\sigma_B)_j = \lambda \sigma_Y$ であり, これを満たす範囲として現在の最大荷重による引張塑性域先端を決定できる. また, $(\sigma_B)_j = \lambda \sigma_Y$ を満たす引張塑性変形域では, 棒要素ゲージ長は (2.14) 式で計算される値に変化する.

(2.25) 式により算出した $(\sigma_B)_j$ を用いて, 現最大荷重時の亀裂開口変位 $V_{max}(x_j)$ は, 次式で与えられる.

$$\begin{aligned}
V_{max}(x_j) = P_{max} & \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& - \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{BARB})_i F_B(x_j, x_i, c) \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \quad (2.26)
\end{aligned}$$

2.3.5 RCPG 荷重時

RCPG 荷重は除荷過程（最大荷重 → 最小荷重）において実亀裂先端が圧縮塑性変形を生じ始める時の荷重であり，本研究における亀裂成長シミュレーションにおいて計算に必要なものではないが，疲労亀裂成長挙動に深く関係していると考えられるため，その計算方法を説明する．

RCPG 荷重時の亀裂開口変位 $V_{RCPG}(x_j)$ は，最小荷重時と同様の重ね合わせが適用できる．

$$\begin{aligned}
V_{RCPG}(x_j) = P_{RCPG} & \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& - \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \quad (2.27)
\end{aligned}$$

ただし，亀裂先端に配置されている棒要素（棒要素番号: NCBAR）は圧縮塑性しているため， $(\sigma_B)_{NCBAR} = -\lambda\sigma_Y$ となる．したがって， $j = NCBAR$ の場合に (2.27) 式を P_{RCPG} について解くことで次式が得られる．

$$\begin{aligned}
P_{RCPG} = & \left[\left(1 - \frac{\lambda \sigma_Y}{E'} \right) L_{NCBAR} + \left\{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq NCBAR}}^{NBAR} (\sigma_B)_i F_B(x_{NCBAR}, x_i, c) - \lambda \sigma_Y F_B(x_{NCBAR}, x_{NCBAR}, c) \right\} \right. \\
& - \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_{NCBAR}, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_{NCBAR}, x_i, c) \right\} \\
& - \left. \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_{NCBAR}, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_{NCBAR}, x_i, c) \right\} \right] \\
& / \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_{NCBAR}, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_{NCBAR}, x_i, c) \right\} \quad (2.28)
\end{aligned}$$

また, $j \neq NCBAR$ の場合には次式が成立する.

$$\begin{aligned}
(\sigma_B)_j = & \left[P_{RCPG} \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{SA})_i F_A(x_j, x_i, c) - \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{SB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& - \left. \left\{ -\lambda \sigma_Y F_B(x_j, x_{NCBAR}, c) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j \\ i \neq NCBAR}}^{NBAR} (\sigma_B)_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \right. \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{RA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{RB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& + \left\{ \sum_{i=1}^{NFA} (\sigma_{DA})_i F_A(x_j, x_i, c) + \sum_{i=1}^{NBAR} (\sigma_{DB})_i F_B(x_j, x_i, c) \right\} \\
& \left. - L_j \right] / \left(\frac{L_j}{E'} + F_B(x_j, x_i, c) \right) \quad (2.29)
\end{aligned}$$

ここで, L_j は直前の最大荷重時におけるゲージ長である.

(2.28) 式, (2.29) 式も Gauss-Seidel 法などの反復計算法を用い, その収束過程で (2.19) 式の置き換えを行うことで解くことができ, 得られた P_{RCPG} , 及び $(\sigma_B)_j$ を (2.27) 式に代入することで RCPG 荷重時の亀裂開口変位 $V_{RCPG}(x_j)$ を求めることができる.

2.4 結言

本章では, 本研究における疲労亀裂伝播解析で用いる亀裂結合力モデルについて, その概要を説明し, 各荷重段階における応力分布, 亀裂開口変位の計算方法について解説を行った.

第3章 不規則応力履歴下における有効応力履歴選択 アルゴリズム

3.1 緒言

本研究では、重畳応力履歴下における定量的な疲労亀裂伝播解析を行うために、疲労亀裂先端近傍で消費される繰返し塑性仕事量に相当する値を閾値として複雑に変化する応力履歴の中から疲労亀裂伝播に有効な応力を選択するアルゴリズムを考案した。

本章では、まずシミュレーションの妥当性を検証するために参照した他の研究者による重畳応力疲労亀裂伝播試験の概要を紹介する。続いて、有効応力履歴選択アルゴリズムの必要性について述べ、アルゴリズムの具体的な仕組みについて説明する。その後、提案アルゴリズムを実装させた疲労亀裂伝播解析結果と疲労亀裂伝播試験結果との比較を行い、シミュレーションの妥当性を検証する。

3.2 重畳応力条件下における疲労亀裂伝播試験

本節では、他の研究者らにより実施された重畳応力履歴条件下における疲労亀裂伝播試験について簡単に説明する。

3.2.1 第一試験

本試験は、船体に作用する縦曲げなど長周期の応力の繰返しにホイッピングやスプリングの振動がするような複数周波数成分を有する重畳応力条件下における疲労亀裂伝播挙動を検証する目的で実施された。疲労亀裂伝播試験の詳細な内容に関しては、文献⁴⁴⁾に紹介されている。

本試験における試験片鋼材は造船用鋼板 KA36(ClassNK) であり、機械的性質を Table 3.1 に、化学組成を Table 3.2 にそれぞれ示す。試験片形状は Fig. 3.1 に示す中央貫通亀裂試験片 (CCT) とし、切欠き全長は 40 mm である。なお、切欠き先端はワイヤカットにて幅 0.2 mm、長さ 1 mm に加工が施されている。

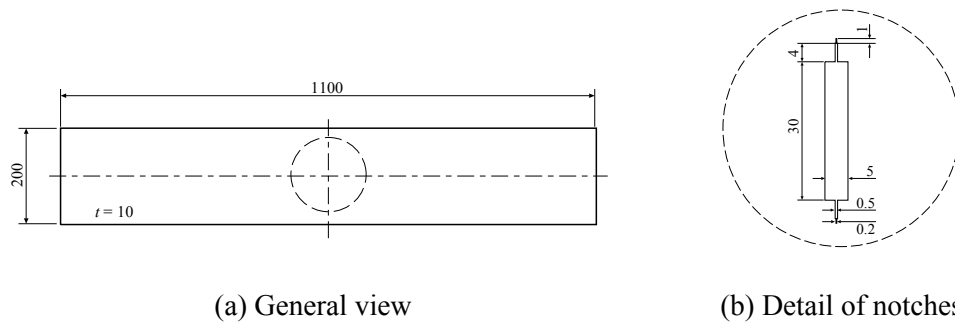
Table 3. 1 Mechanical properties.

Yield stress [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
457	577	20

Table 3. 2 Chemical composition (wt%).

		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ceq
Material		0.15	0.27	1.17	0.014	0.006	0.01	0.01	0.03	0.003	0.35
Rule	Max.	0.18	0.50	1.60	0.035	0.035	0.35	0.40	0.20	0.008	-
KA36	Min.	-	-	0.90	-	-	-	-	-	-	-

$$*Ceq = C + Mn/6 + (Ni+Cu) /15 + (Cr + Mo + V) /5$$



(a) General view

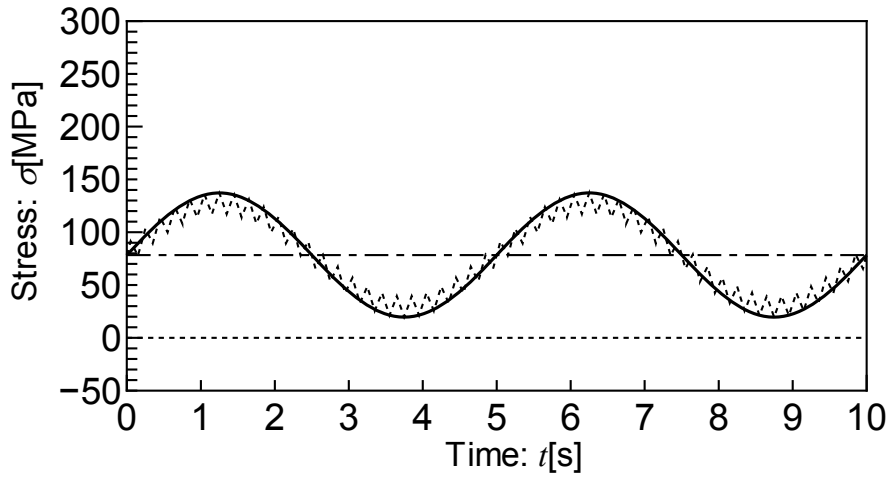
(b) Detail of notches

Fig. 3. 1 Specimen configuration used.

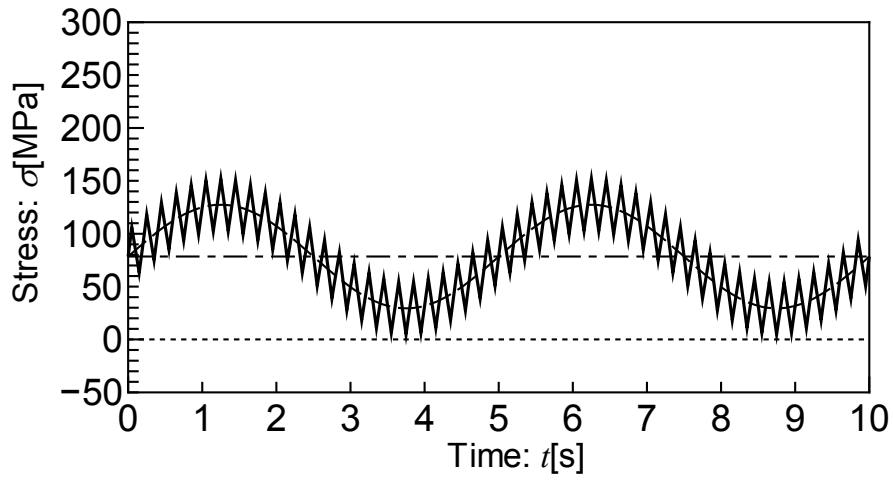
本試験において実施した試験条件を Table 3. 3 に、 載荷波形を Fig. 3. 2 にそれぞれ示す. (d) 試験 ID: L49H00M078 は低周波 (0.2 Hz) の一定応力振幅のみを付与した試験である. これに大小の一定振幅の高周波 (5 Hz) 成分を重畳させたものが一定振幅重畳波条件 (b) 試験 ID: L49H25M078 と (c) L49H10M078 である. そして, (c) L49H10M078 の最大応力と最小応力を連ねた包絡波を負荷した試験条件が (a) 試験 ID: L59H00M078 である. また, 実船で生じるホイッピング振動を模擬した応力履歴波形として, 一定の低周波応力振幅に大小の減衰する高周波成分を重畳させたものが減衰重畳波条件 (f) 試験 ID: L49H88M137_D と (g) L49H49M137_D である. 実船に作用するホイッピングによる弾性振動の周期は低周波の波浪変動外力の 1/5 程度で, 低周波 5,6 波の間に減衰して消失する⁴⁾ことが知られており, これらの試験条件はそれを再現したものとなっている. これらの条件から減衰する高周波成分を省いた低周波の低応力振幅のみを負荷した条件が試験 (e) ID: L49H00M137 である.

Table 3. 3 Applied stresses and damping conditions for 1st test.

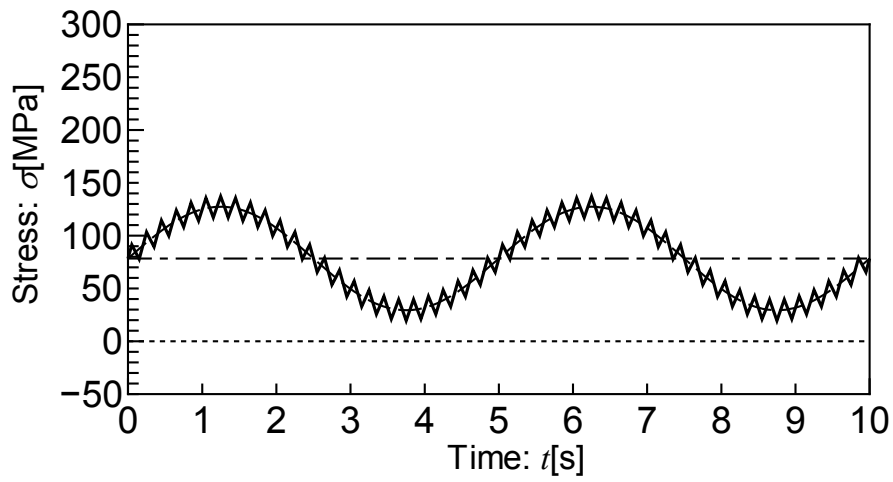
	Test ID	Amplitude [MPa]		Mean [MPa]	Damping
		Low	High		
(a)	L59H00M078	±58.8	±0.0	78.4	None
(b)	L49H25M078	±49.0	±24.5		
(c)	L49H10M078		±9.8		
(d)	L49H00M078		±0.0		
(e)	L49H00M137	±49.0	±0.0	137.2	Given
(f)	L49H88M137_D		±88.2		
(g)	L49H49M137_D		±49.0		



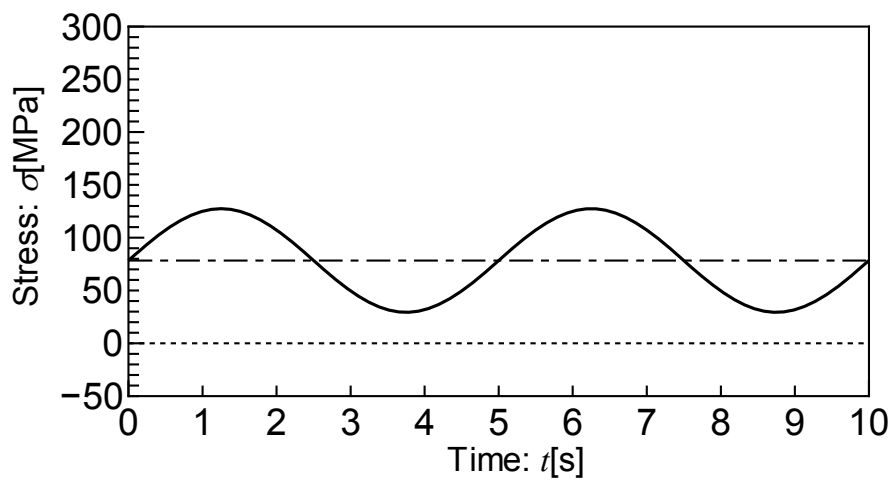
(a) L59H00M078



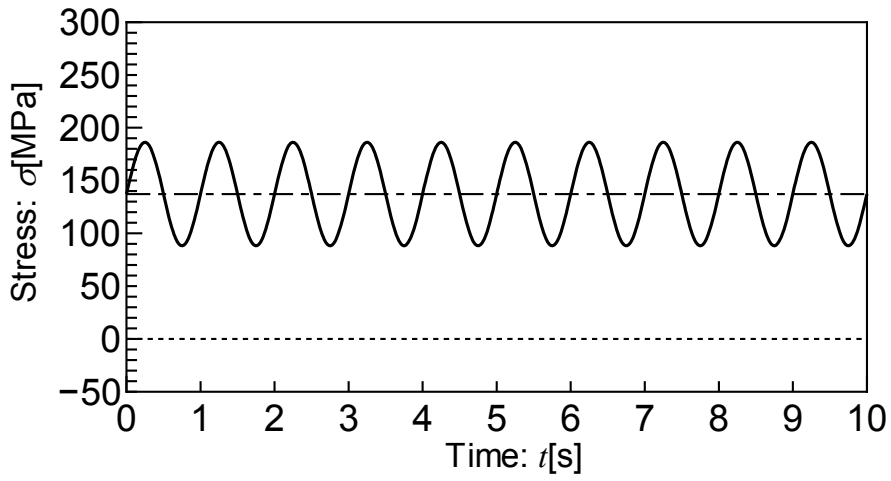
(b) L49H25M078



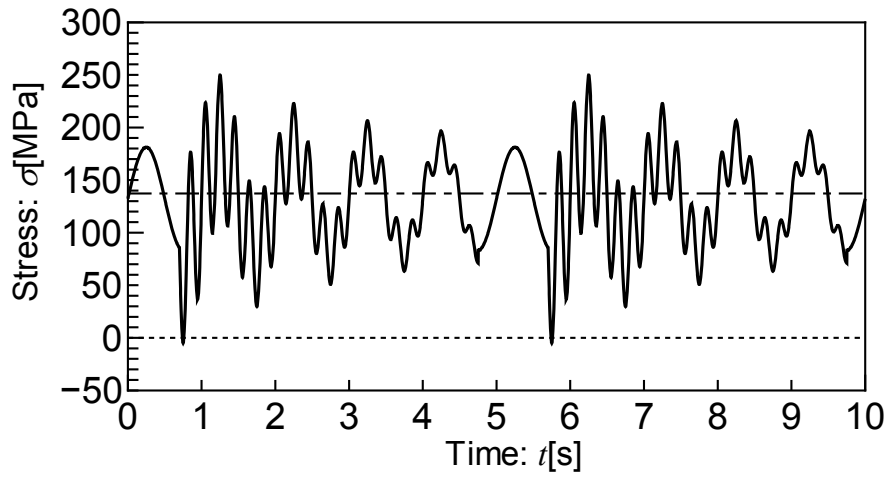
(c) L49H10M078



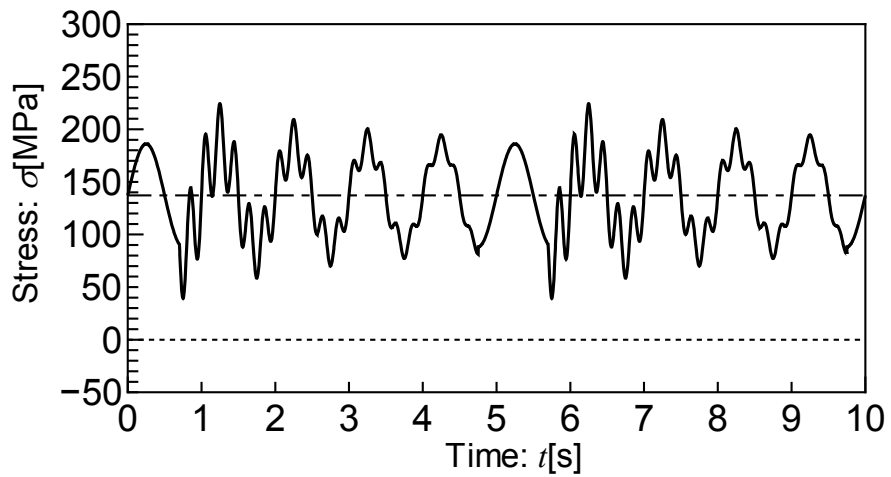
(d) L49H00M078



(e) L49H00M137



(f) L49H88M137_D



(g) L49H49M137_D

Fig. 3. 2 Applied stress sequences for 1st test.

Fig. 3. 2 に示した各試験条件の疲労亀裂伝播量と低周波サイクル数の関係を Fig. 3. 3 に示す. 各試験条件における疲労亀裂成長曲線は疲労亀裂始点から約 1mm 分を除外し, 疲労亀裂先端が試験片中央から 21 mm 地点に達した時点をもととして描画している. なお, 試験片設置前に試験片寸法, 及び試験片の反りを計測し, 適当な位置にクラックゲージ, ひずみゲージを貼付し, クラックゲージにより亀裂長さが計測された.

Fig. 3. 3 より, 以下の傾向が確認できる.

- 1) 一定振幅重畳波条件試験 (c) ID: L49H10M078 (Fig. 3. 3 中の黒下三角印) と包絡波条件 (a) 試験 ID: L59H00M078 (Fig. 3. 3 中の白下三角印) の亀裂伝播速度はほぼ同等である. ($\Delta a = 15$ mm 時点のサイクル数比 $L59H00M078 / L49H10M078 = 0.989$)
- 2) 高周波成分の大きい一定振幅重畳波条件 (b) 試験 ID : L49H25M078 (Fig. 3. 3 中の黒上三角印) の方が, 高周波成分の振幅が小さい一定振幅重畳波条件 (c) 試験 ID : L49H10M078 (Fig. 3. 3 中の黒下三角印) より亀裂伝播速度が大きい. (低周波条件 (e) L49H00M078 に対する $\Delta a = 15$ mm 時点のサイクル数比 $L49H25M078 / L49H00M078 = 0.231$, $L49H10M078 / L49H00M078 = 0.618$)
- 3) 高周波成分の振幅が大きい減衰重畳波条件 (f) 試験 ID : L49H88M137_D (Fig. 3. 3 中の黒白上三角印) の方が, 高周波成分の振幅が小さい減衰重畳波条件試験 (g) ID: L49H49M137_D (Fig. 3. 3 中の黒白下三角印) より亀裂伝播速度が大きい. (低周波条件 (e) L49H00M137 に対する $\Delta a = 15$ mm 時点のサイクル数比 $L49H88M137_D / L49H00M137 = 0.142$, $L49H49M137_D / L49H00M137 = 0.359$)

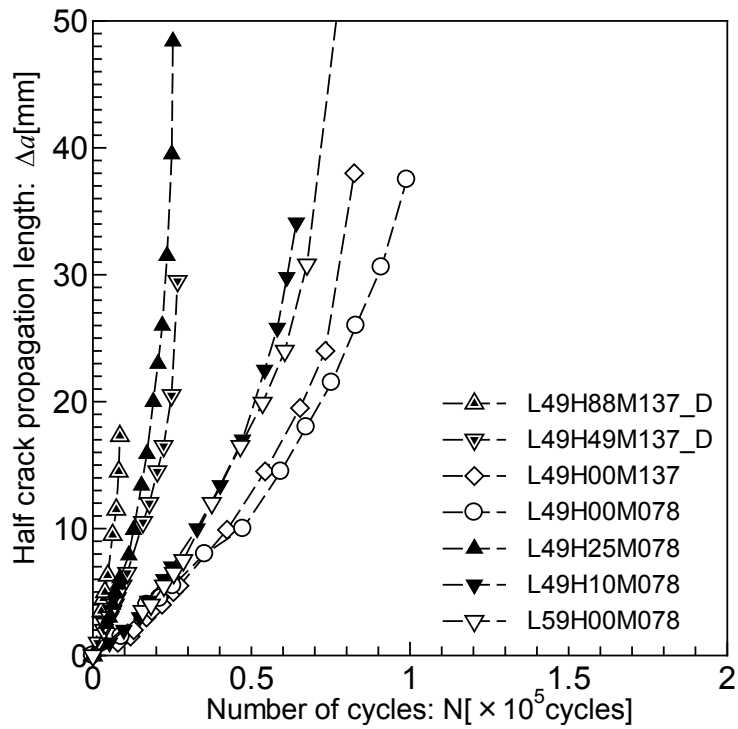


Fig. 3. 3 Measured fatigue crack growth curves under various stress conditions for 1st test.

3.2.2 第二試験

本試験は波浪荷重成分に相当する規則波形，スラミング及びホイッピング応力を重畳させた波形，及びその最大と最小を連ねた包絡波形の3種類の作用応力が疲労亀裂伝播挙動に与える影響を調査するために実施された．疲労亀裂伝播試験の詳細な内容に関しては，文献⁴⁵⁾に紹介されている．

本試験における試験鋼板は軟鋼 SM490A であり，機械的性質を Table 3. 4 に示す．試験片形状は Fig. 3. 4 に示す CT 試験片である．

Yield stress [MPa]	Tensile strength [MPa]
353	533

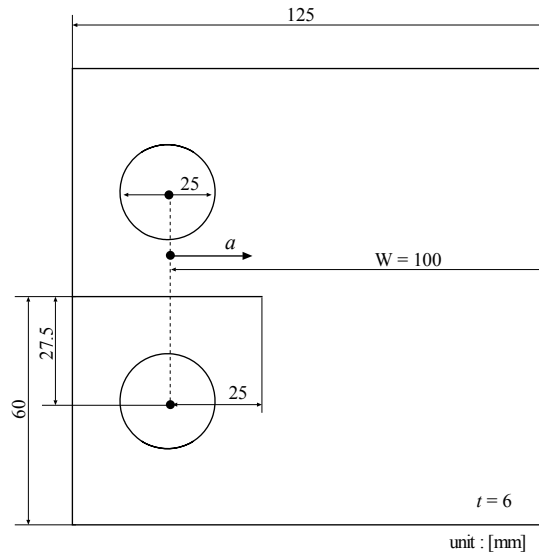


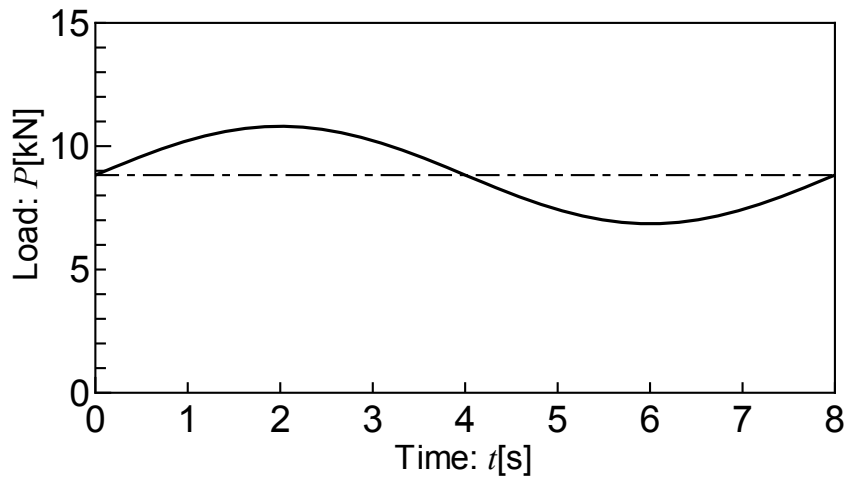
Fig. 3. 4 Specimen configuration used.

波浪変動外力（低周波成分）にスラミング・ホイッピングによる変動応力（高周波成分）が重畳する応力履歴の疲労強度に及ぼす影響を確認するため、Table 3.5 に示す試験条件を設定した。各試験条件の負荷波形を Fig. 3.5 に示す。

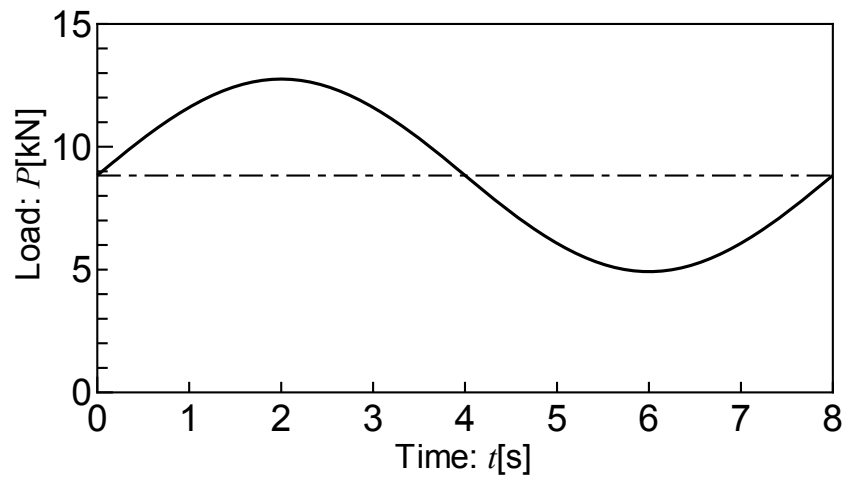
Fig. 3.5 より、試験 ID: W-1.0 は波浪成分を模擬した一定振幅規則波試験であり、これに一定振幅高周波成分を重畳させたものが試験 ID: WH-1.0 である。また、W-1.0 に減衰する高周波成分を重畳させたものが試験 ID: WS-1.0 であり、これの最大と最小を連ねたものが試験 ID: M-1.0 である。そして、WS-1.0 の高周波成分の振幅を 0.5, 1.5 倍して、W-1.0 に重畳させたものが、それぞれ試験 ID: WS-0.5, WS-1.5 である。これらの最大最小を連ねたものがそれぞれ試験 ID: M-0.5, M-1.5 である。

Table 3. 5 Applied load conditions for 2nd test.

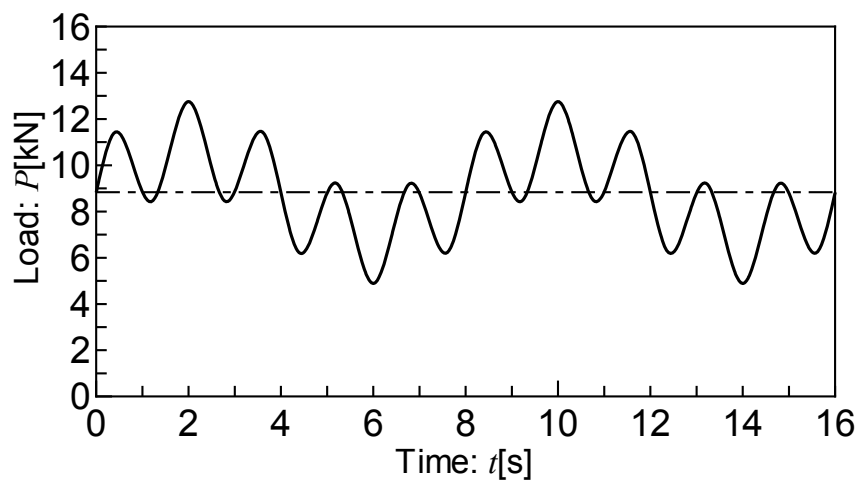
	Test ID	Load condition	Mean [kN]	Amplitude [kN]
(a)	W-1.0	Basic constant amplitude test	8.83	1.97
(b)	W-2.0	Load level is twice as high as W-1.0	8.83	3.92
(c)	WH-1.0	W-1.0 + High frequency constant amplitude with the same magnitude.	8.83	3.92
(d)	WS-1.0	W-1.0 + Slam-induced dynamic stress of the same amplitude	8.83	3.22
(e)	WS-0.5	W-1.0 + Slam-induced dynamic stress of the half amplitude	8.83	3.22
(f)	WS-1.5	W-1.0 + Slam-induced dynamic stress of the 150% amplitude	8.83	2.52
(g)	M-1.0	Low frequency stress with the same maximum and minimum stresses as those of WS-1.0	8.83	2.52
(h)	M-0.5	Low frequency stress with the same maximum and minimum stresses as those of WS-0.5	8.83	3.98
(i)	M-1.5	Low frequency stress with the same maximum and minimum stresses as those of WS-1.5	8.83	3.98



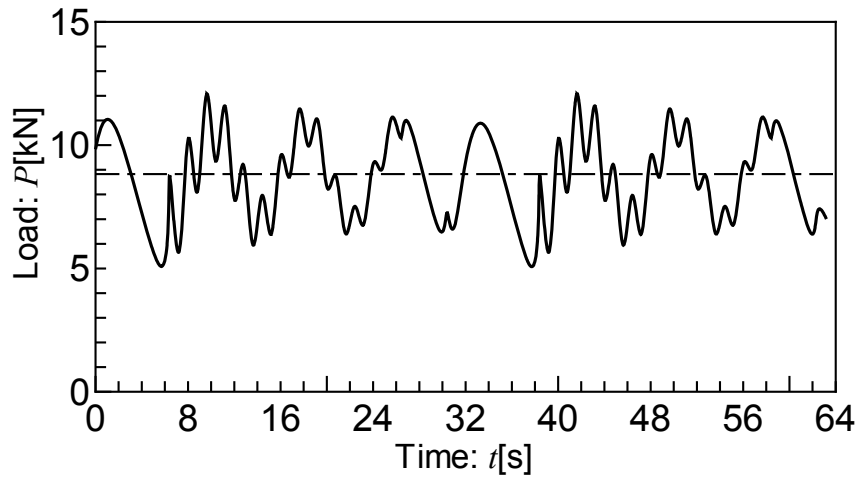
(a) W-1.0



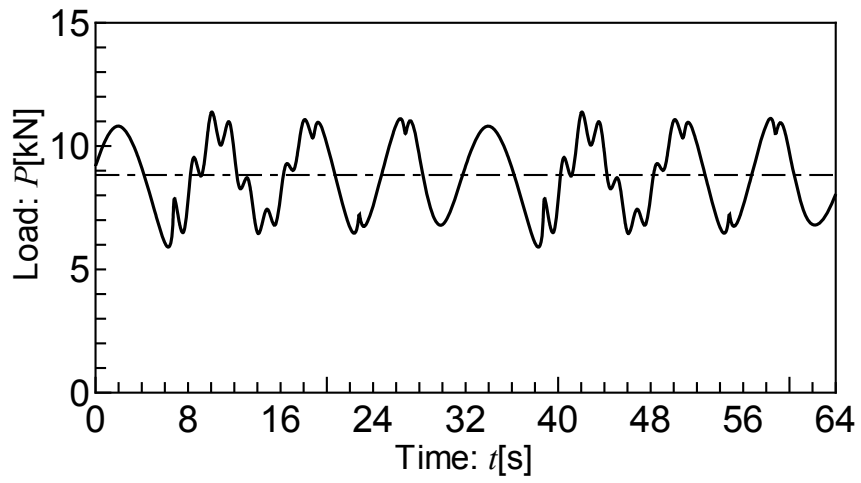
(b) W-2.0



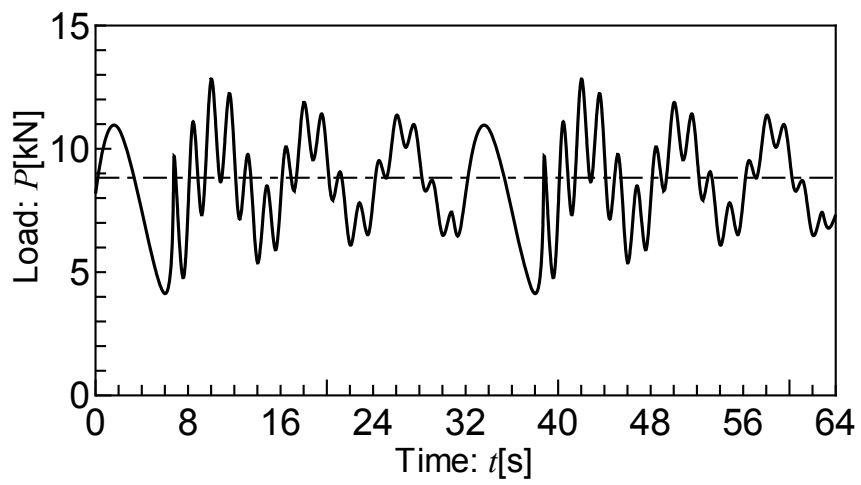
(c) WH-1.0



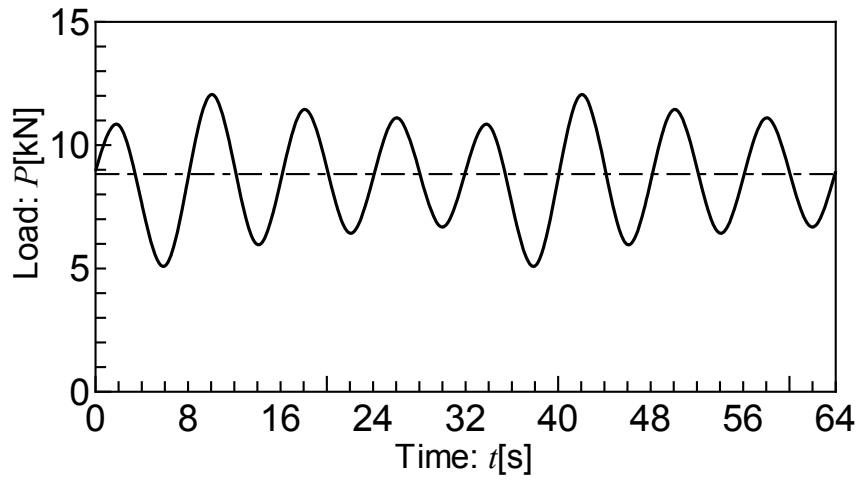
(d) WS-1.0



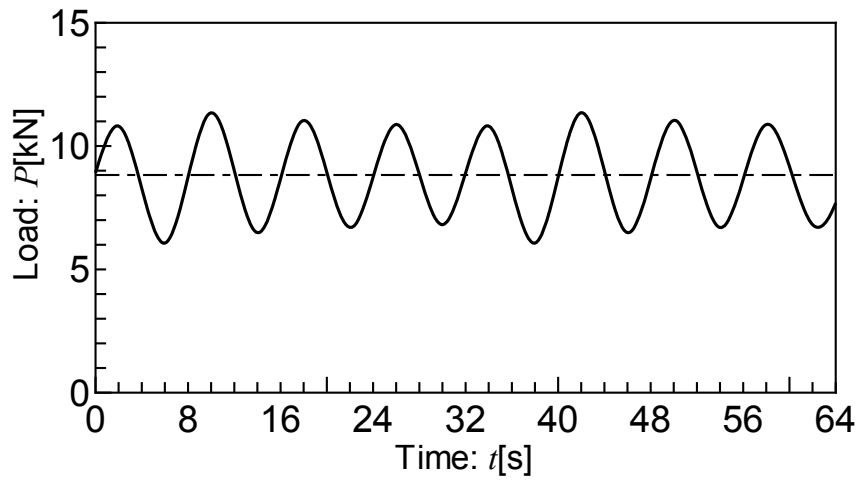
(e) WS-0.5



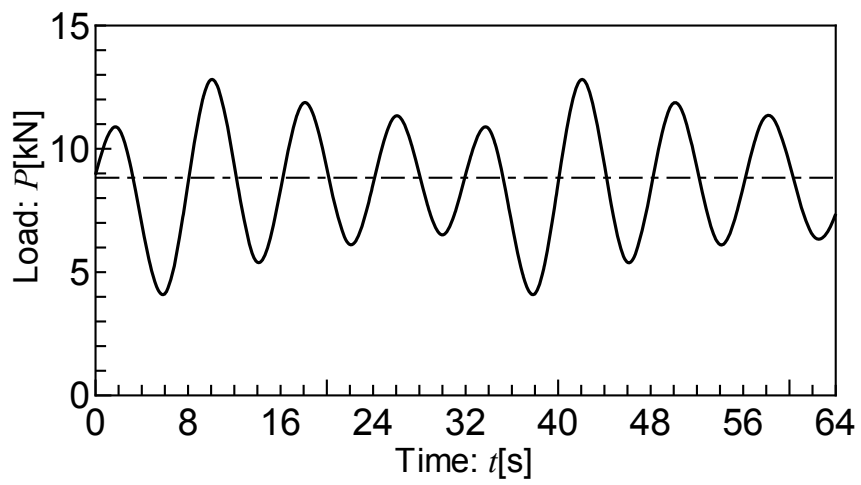
(f) WS-1.5



(g) M-1.0



(h) M-0.5



(i) M-1.5

Fig. 3. 5 Applied load sequences for 2nd test.

Fig. 3. 5 に示した各試験条件の疲労亀裂伝播量と低周波サイクル数の関係を Fig. 3. 6 に示す. 各試験条件における疲労亀裂成長曲線は疲労亀裂発生領域付近を除外し, 疲労亀裂先端が $a = 30 \text{ mm}$ 地点に達した時点をもととして描画している.

Fig. 3. 6 より, 以下の傾向が確認できる.

- 1) WS シリーズ (試験 ID: WS-1.0, WS-0.5, WS-1.5) の亀裂伝播速度を比較すると, 重畳する高周波振幅が大きい順に亀裂伝播速度が大きい. (低周波条件 W-1.0 に対する $\Delta a = 30 \text{ mm}$ 時点のサイクル数比 WS-1.5/W-1.0 = 0.195, WS-1.0/W-1.0 = 0.364, WS-0.5/W-1.0 = 0.857)
- 2) 各減衰重畳波条件とその包絡波条件の亀裂伝播速度を比較すると, 重畳波条件 / 包絡波条件の値はいずれもおおよそ 0.85 ~ 0.95 の範囲内である. ($\Delta a = 30 \text{ mm}$ 時点のサイクル数比 WS-1.5/M-1.5 = 0.864, WS-1.0/M-1.0 = 0.915, WS-0.5/M-0.5 = 0.969)

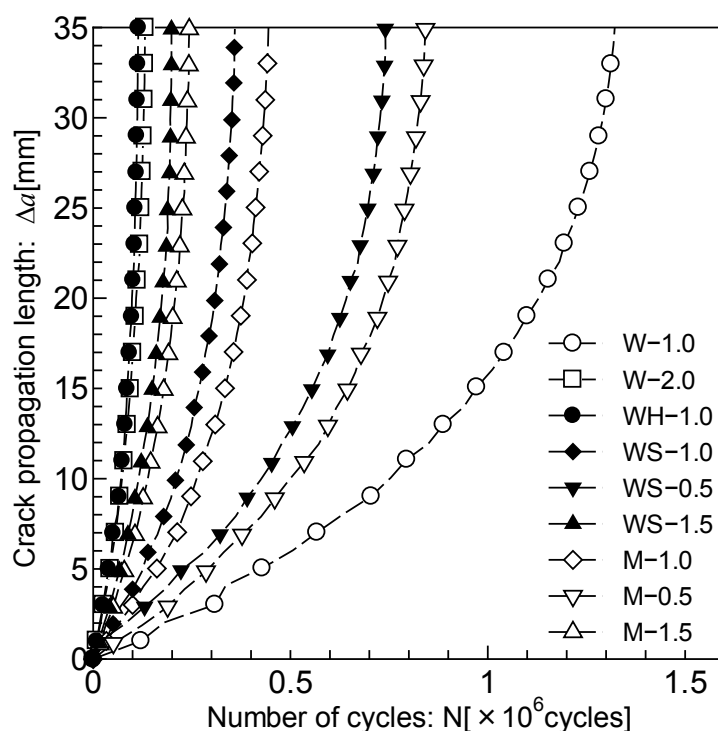


Fig. 3. 6 Measured fatigue crack growth curves under various stress conditions for 2nd test.

3.2.3 第三試験

疲労亀裂伝播試験の詳細な内容に関しては, 文献⁴⁶⁾に紹介されている. 本試験における試験片鋼材は造船用鋼板 AH36(LR) であり, 機械的性質を Table 3. 6 に, 化学組成を

Table 3. 7 にそれぞれ示す。試験片形状は Fig. 3. 1 に示したものと同様であるが、本試験片における切欠き先端は放電加工にて加工が施されている。

Table 3. 6 Mechanical properties.

Yield stress [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
435	526	24

Table 3. 7 Chemical composition (wt%).

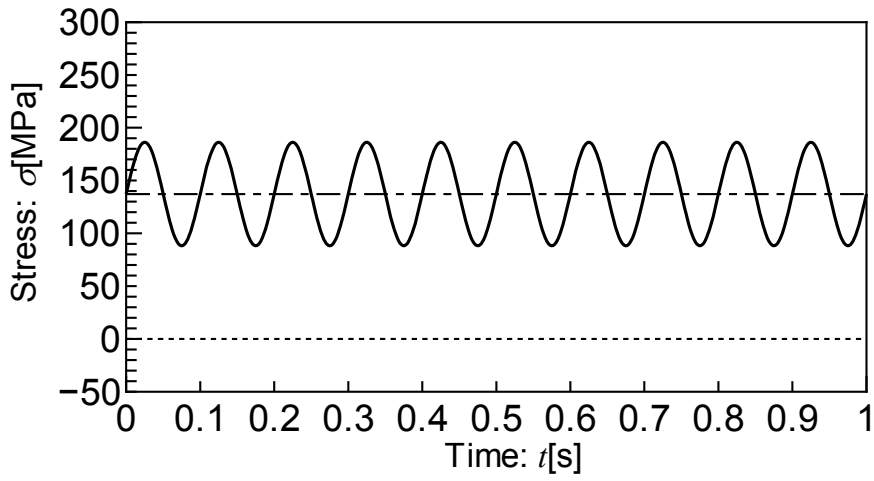
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ceq
Material		0.15	0.27	1.17	0.014	0.006	0.01	0.01	0.03	0.003	0.35
Rule	Max.	0.21	0.50	2.4-6C	0.035	0.035	-	-	-	-	-
AH36	Min.	-	-	2.5C	-	-	-	-	-	-	-

$$*Ceq = C + Mn/6 + (Ni+Cu) /15 + (Cr + Mo + V) /5$$

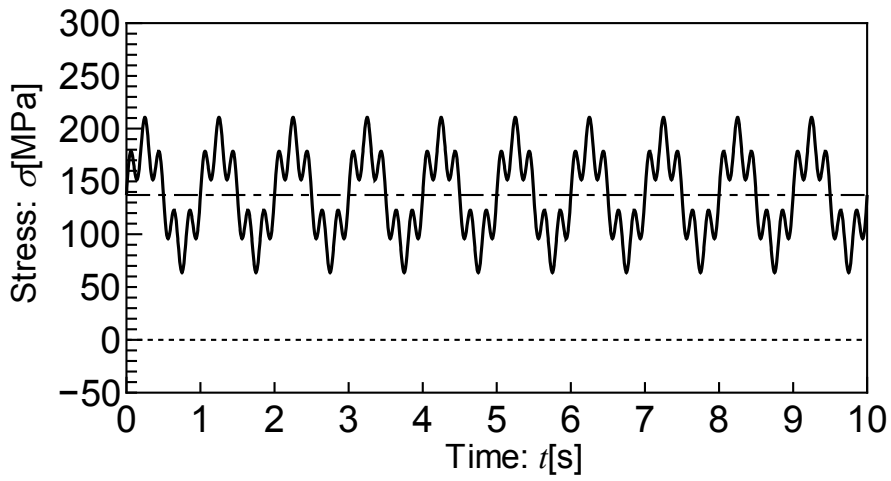
本試験において実施した試験条件を Table 3. 8 に、载荷波形を Fig. 3. 7 にそれぞれ示す。(a) 試験 ID: L49H00M137 は一定振幅の低周波応力のみを付与した試験条件であり、これに高周波の一定振幅応力を重畳させたものが (b) 試験 ID: L49H25M137 である。末尾に ”_D” が表記されている条件は減衰高周波を重畳させる条件であり、本試験では低周波応力を 49MPa で固定して、高周波振幅 / 低周波振幅が 0.25~1.00 まで 0.25 刻みで四つの条件を設定している。(f) 試験 ID: L49H49M137_D 及び (g) L49H88M137_D は、本試験と 2010 年に実施された 3.1 節の試験の供試材の比較用として設定された試験条件である。低周波振幅に “Random” と表記された試験条件は、低周波成分として実船計測結果の縦曲げ応力の波形を载荷した条件である。

Table 3. 8 Applied stress and damping conditions for 3rd test.

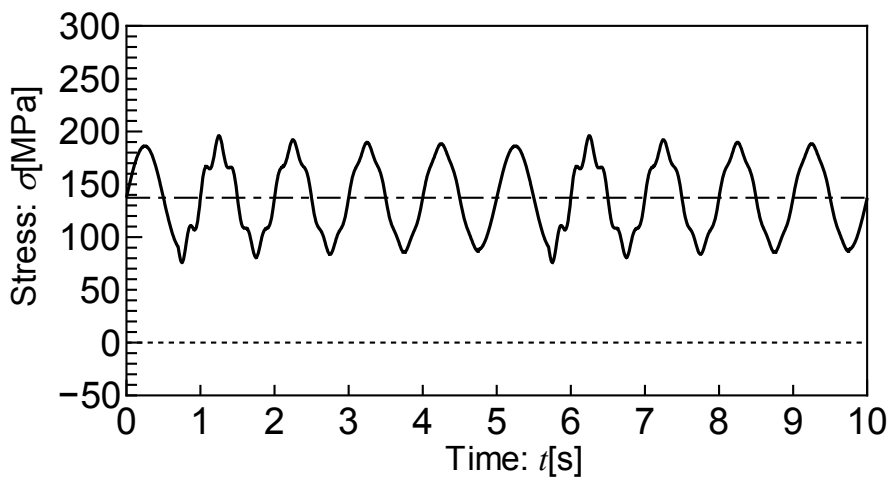
	Test ID	Amplitude [MPa]		Mean [MPa]	Damping	Stress ratio (H/L)	Cycle ratio (H/L)	Number of tests
		Low	High					
(a)	L49H00M137		±00.0	±137.2	None	0.00	0	2
(b)	L49H25M137		±24.5			0.50	5	2
(c)	L49H12M137_D		±12.3		Given	0.25		2
(d)	L49H25M137_D	±49.0	±24.5			0.50		2
(e)	L49H37M137_D		±36.7			0.75		2
(f)	L49H49M137_D		±49.0			1.00	5	1
(g)	L49H88M137_D		±88.2			1.80		1
(h)	L25H25M137_D	±25.0	±25.0		1.00		2	
(i)	L91H46M137_D	±91.4	±45.7		0.50		2	
(j)	L**H00M137	Random	±00.0		None	0.00	0	1
(k)	L**H54M137_D		±54.0		Given	-	5	1



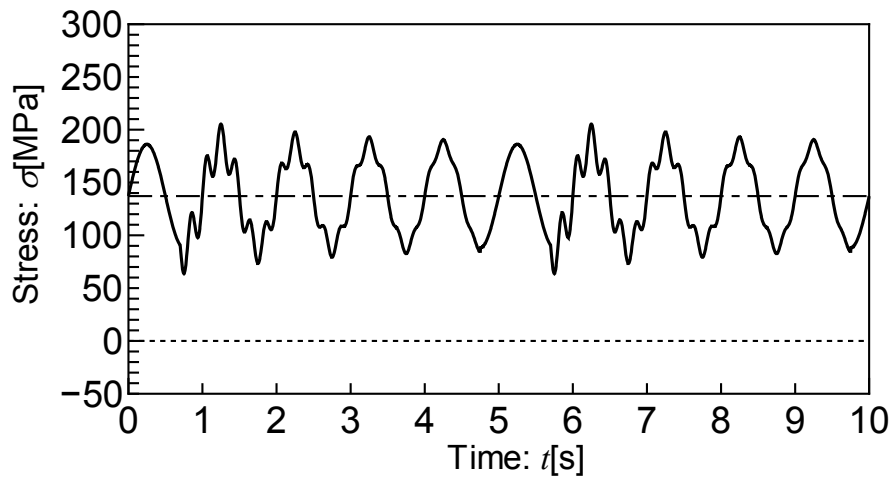
(a) L49H00M137



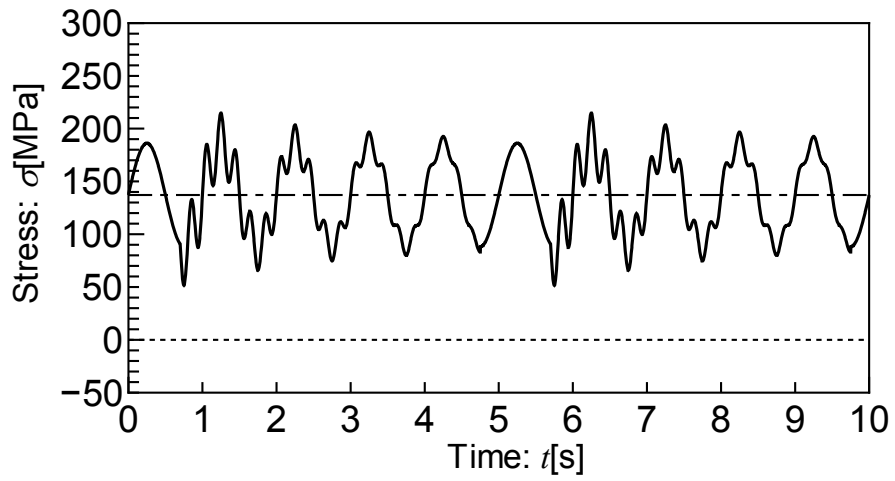
(b) L49H25M137



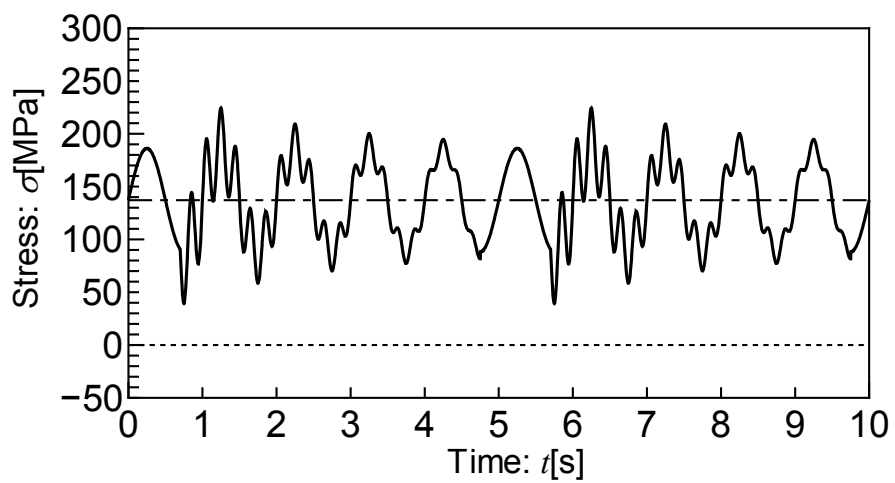
(c) L49H12M137_D



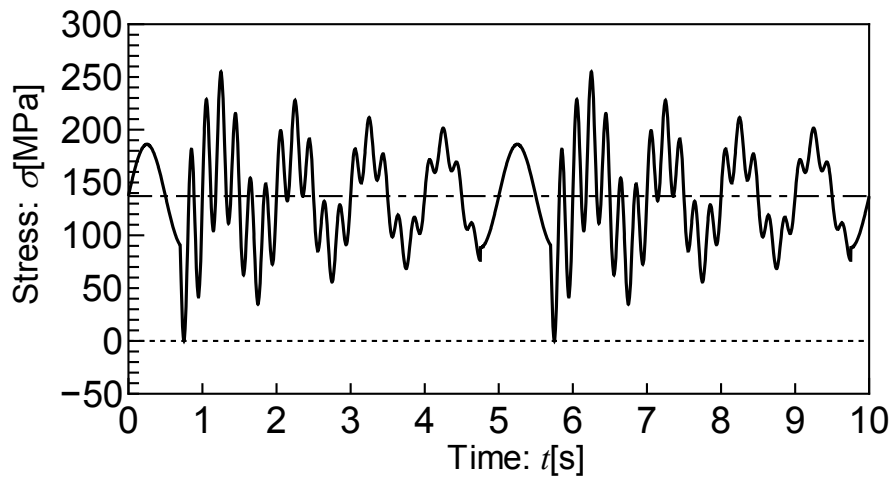
(d) L49H25M137_D



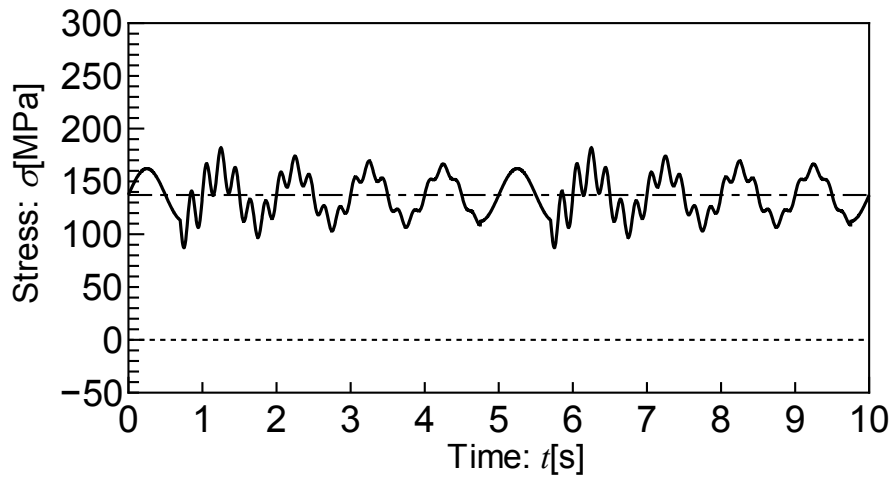
(e) L49H37M137_D



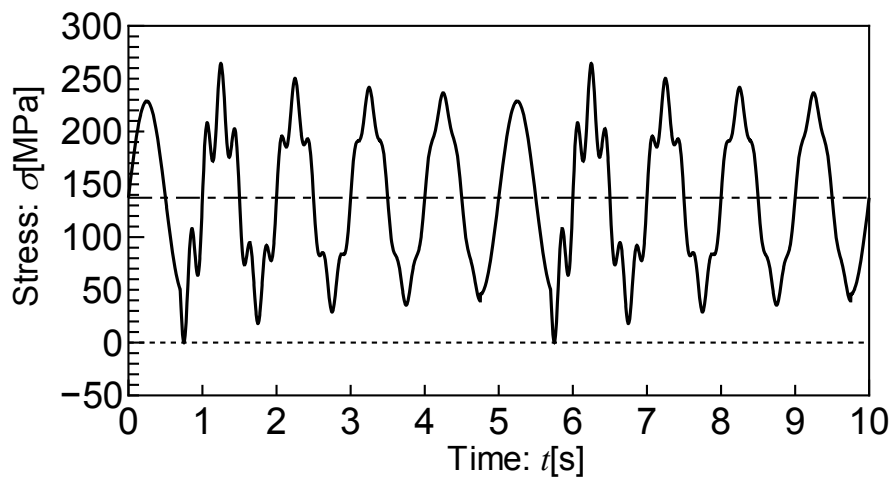
(f) L49H49M137_D



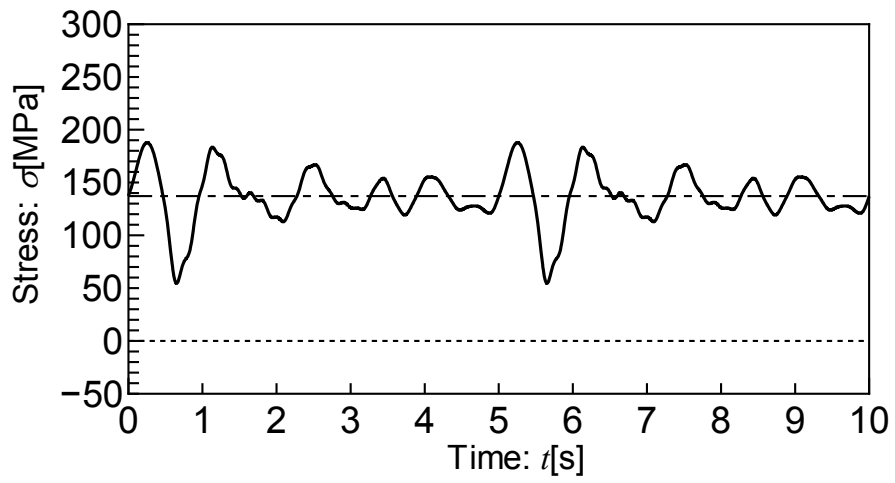
(g) L49H88M137_D



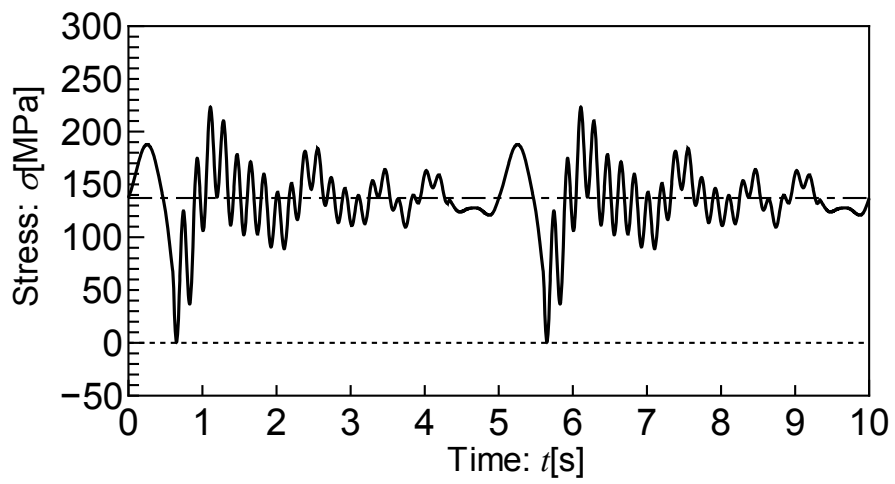
(h) L25H25M137_D



(i) L91H46M137_D



(j) L**H00M137



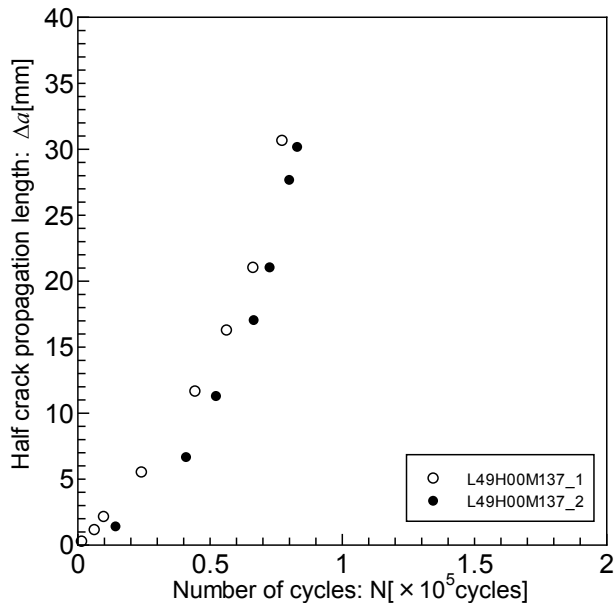
(k) L**H54M137_D

Fig. 3. 7 Applied stress sequences for 3rd test.

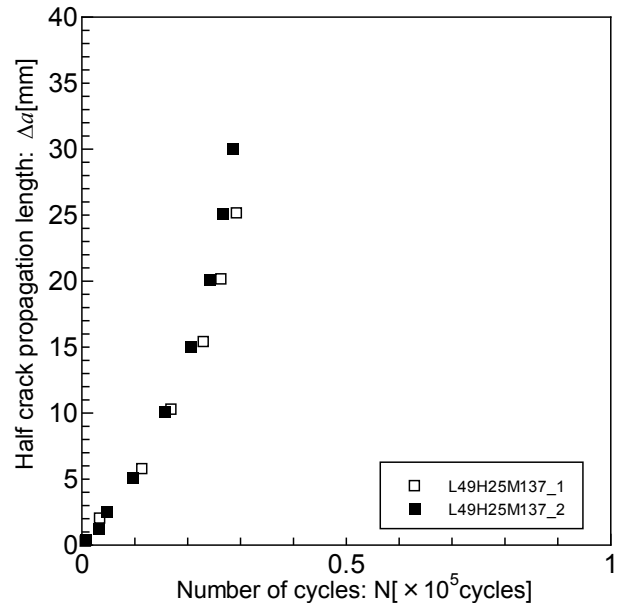
Fig. 3. 7に示した各試験条件の疲労亀裂伝播量と低周波サイクル数の関係を Fig. 3. 8に示す. 各試験条件における疲労亀裂成長曲線は疲労亀裂始点から約 5mm 分を除外し, 疲労亀裂先端が試験片中央から 25 mm 地点に達した時点をもととして描画している. なお, 亀裂長さはクラックゲージにより計測した.

Fig. 3. 8 より, 以下の傾向が確認できる.

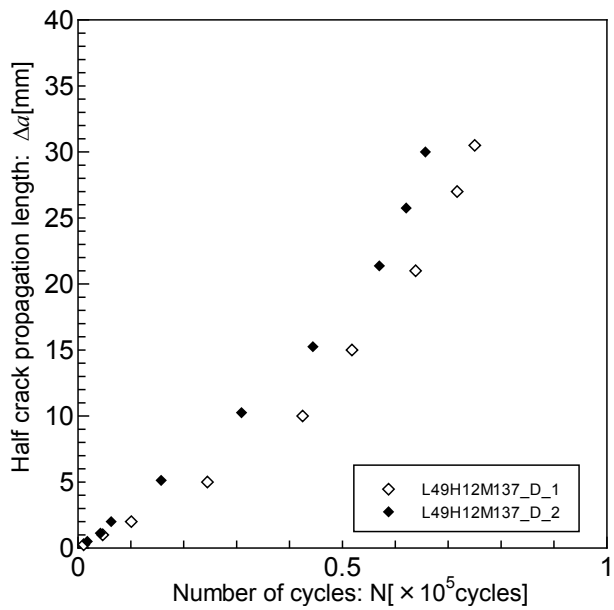
- 1) 低周波振幅 49 MPa 固定の減衰重畳条件の亀裂伝播速度を比較すると, 高周波振幅が増加するに伴って伝播速度が増加しているが, 高周波振幅の増加に対する亀裂伝播速度の増加量の変化挙動は非線形である. (低周波条件 L49H00M137 に対する $\Delta a = 15 \text{ mm}$ 時点のサイクル数比, $L49H12M137_D / L49H00M137 = 0.831$, $L49H25M137_D / L49H00M137 = 0.729$, $L49H37M137_D / L49H00M137 = 0.528$, $L49H49M137_D / L49H00M137 = 0.350$, $L49H88M137_D / L49H00M137 = 0.170$)
- 2) 一定振幅重畳波条件 (b) L49H25M137 と同じ低周波振幅, 高周波振幅の減衰重畳波条件 (d) L49H25M137_D の亀裂伝播速度を比較すると, (b) L49H25M137 の方が, 2 倍以上伝播速度が高い. ($\Delta a = 15 \text{ mm}$ 時点のサイクル数比, $L49H25M137 / L49H25M137_D = 0.376$)



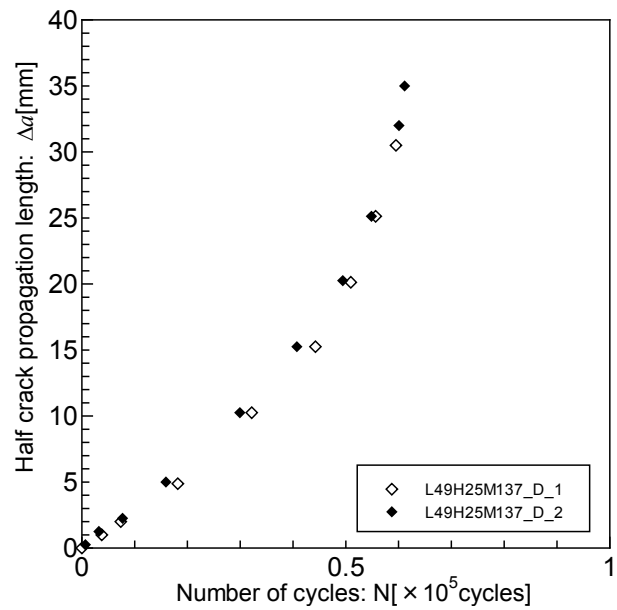
(a) L49H00M137



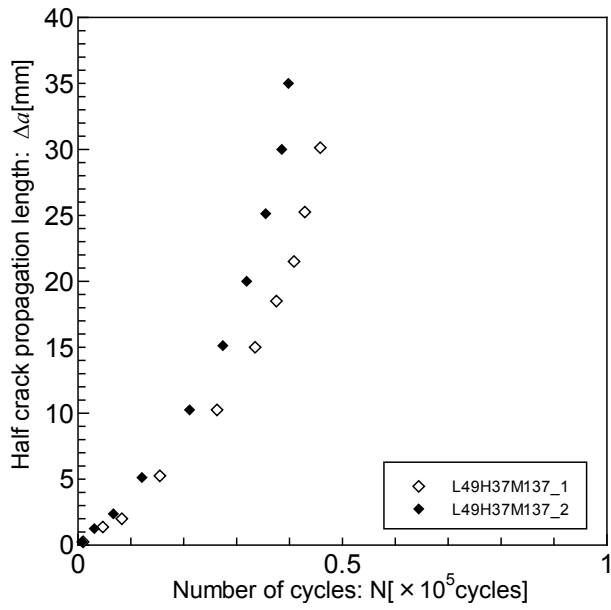
(b) L49H25M137



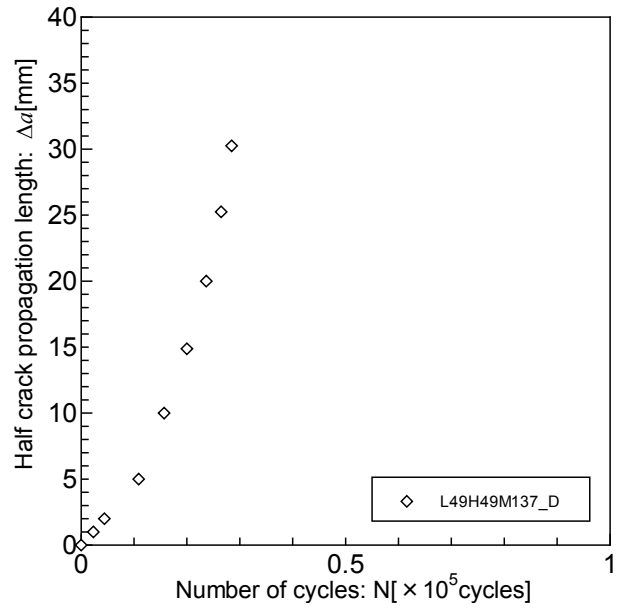
(c) L49H12M137_D



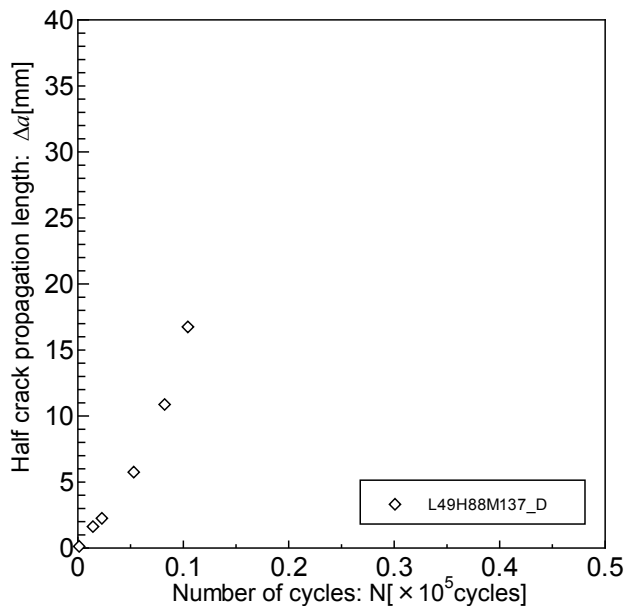
(d) L49H25M137_D



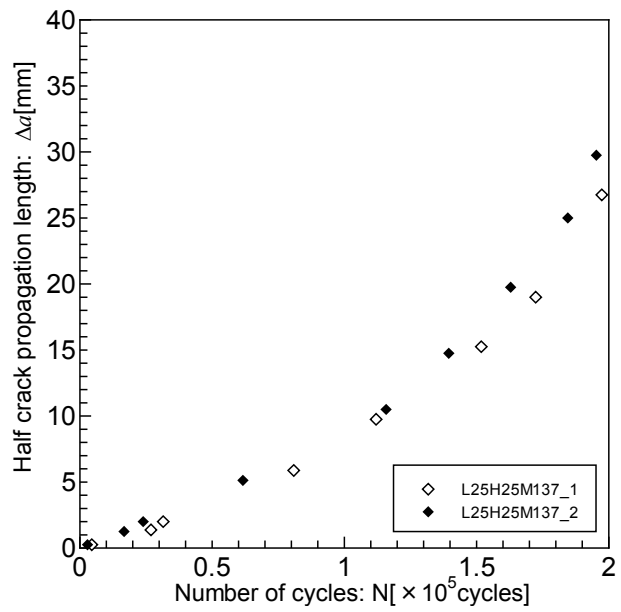
(e) L49H37M137_D



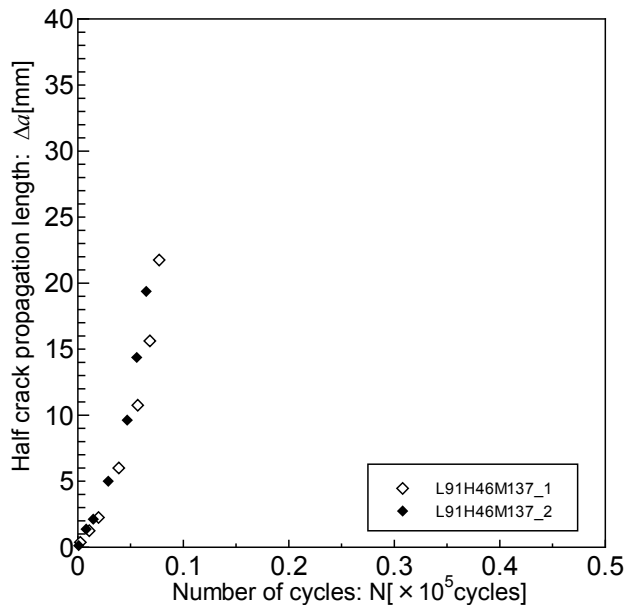
(f) L49H49M137_D



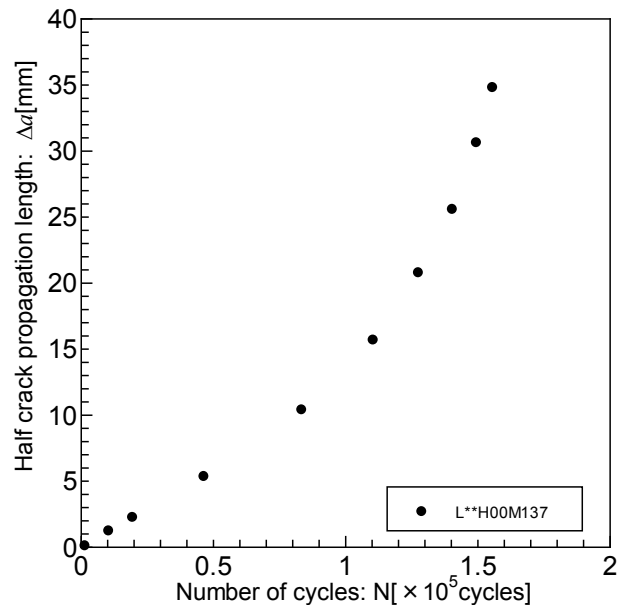
(g) L49H88M137_D



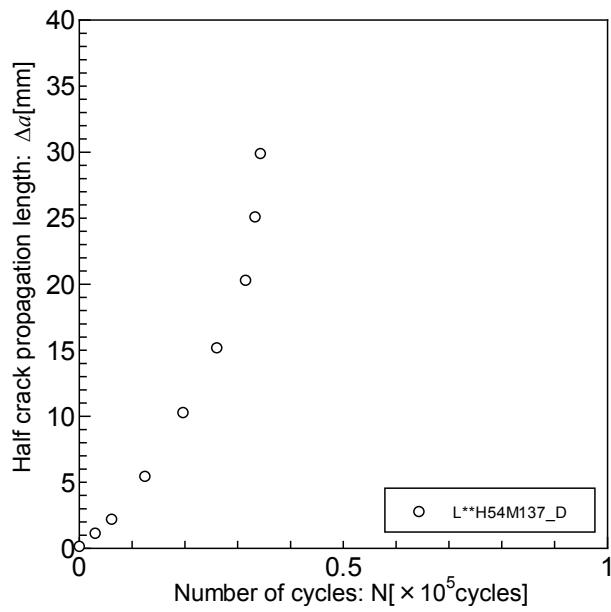
(h) L25H25M137_D



(i) L91H46M137_D



(j) L**H00M137



(k) L**H54M137_D

Fig. 3. 8 Measured crack growth curves under various stress conditions for 3rd test.

3.3 有効応力履歴選択アルゴリズムの必要性

第2章で述べた豊貞らの開発した従来の疲労亀裂成長シミュレーションを用いて、前節で紹介した疲労亀裂伝播試験の一定振幅重畳波条件（試験 ID: L49H25M137, L49H10M137）に対して疲労亀裂伝播解析を行った結果を Fig. 3.9 に示す。この解析で用いた RPG 基準の亀裂伝播則の定数 C , m は 3.7 節で後述する。

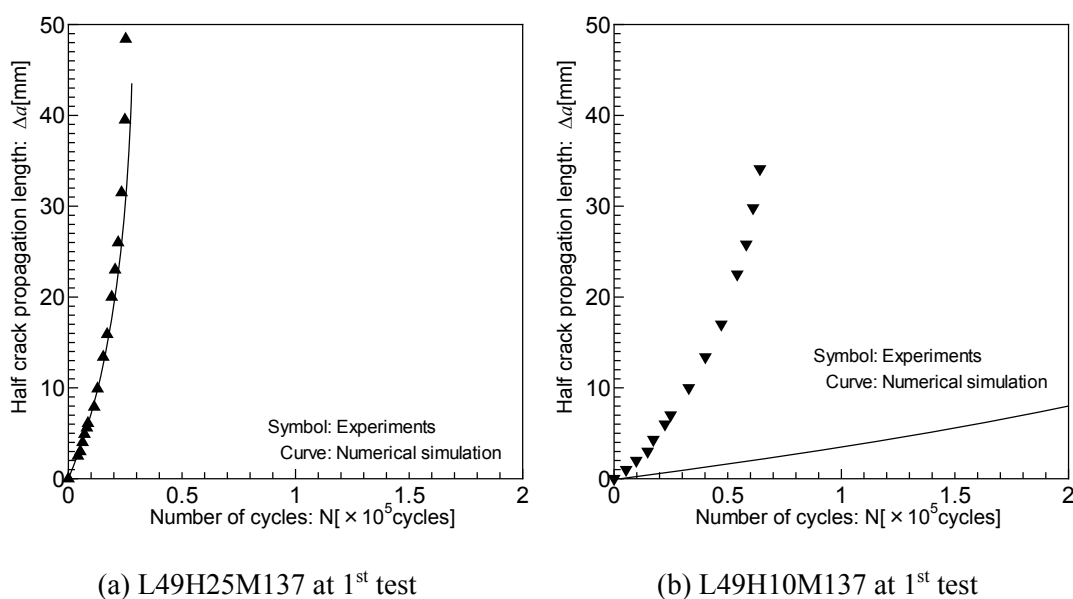
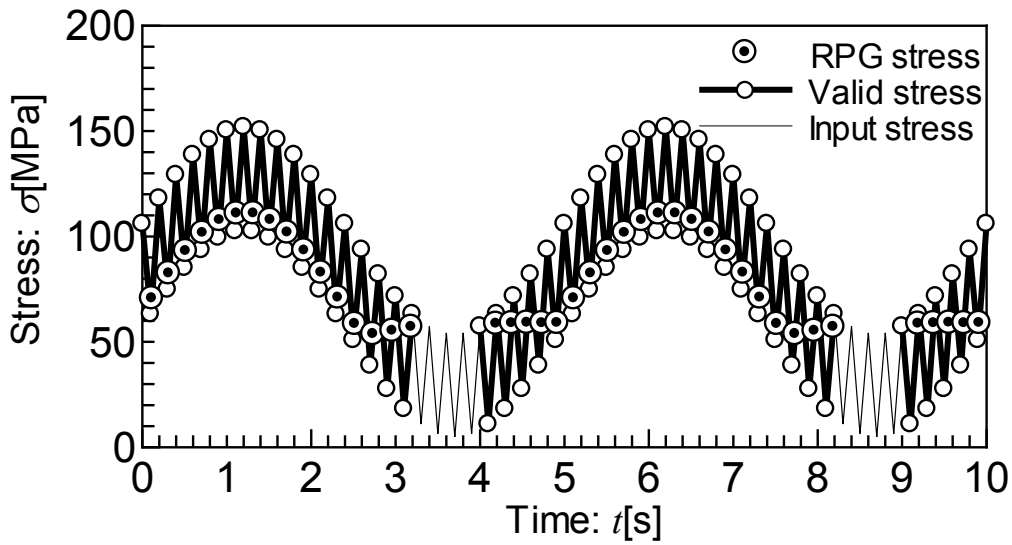
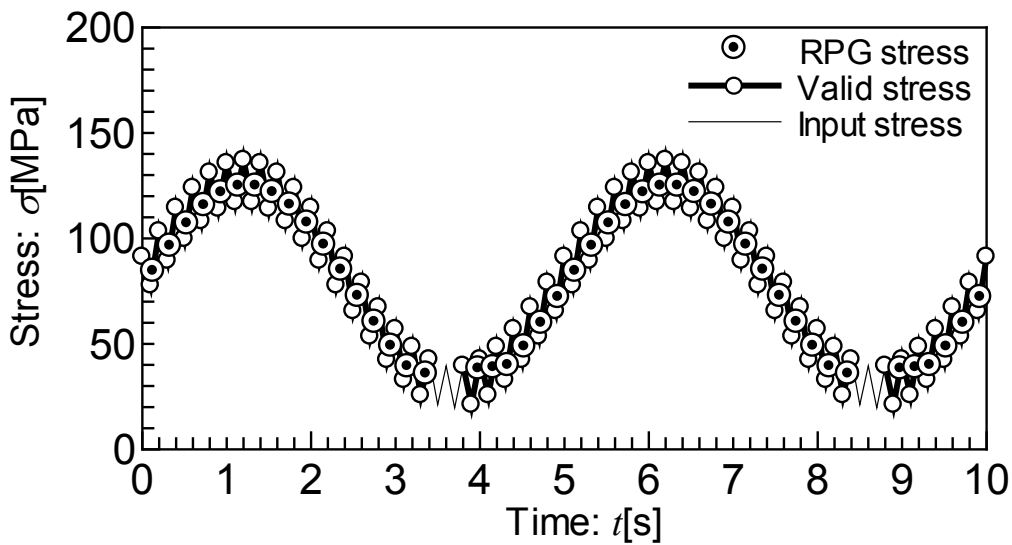


Fig. 3.9 Comparison of the results of conventional type simulation with one of experiments.

Fig. 3.9 より、試験 ID: L49H25M137 では、推定結果と試験結果は良好な一致が得られている。一方、L49H10M137 では、推定結果は試験結果よりも非常に亀裂伝播速度が遅いことが確認できる。この原因を考察するため、疲労亀裂伝播解析中において、疲労亀裂が約 5 mm 伝播した時点における亀裂伝播に寄与した有効な応力履歴を求めた結果を Fig. 3.10 に示す。



(a) L49H25M137



(b) L49H10M137

Fig. 3. 10 Examples of extracted effective stress sequences under superimposed stress conditions.

Fig. 3. 10 より、両条件ともに多くの高周波振幅を疲労亀裂伝播に有効な応力履歴として採用していることが確認できる。しかしながら、推定結果の精度に大きな差異があることや、高周波の応力振幅はある一定の大きさを下回ると、高周波振幅の影響は無視できること^{35), 36)}を勘案すると、重畳応力履歴下においては疲労亀裂伝播に有効な高周波振幅と無効な高周波振幅があることが推測される。したがって、重畳応力条件下にお

いて定量的な疲労亀裂伝播解析を行うには、重畳応力履歴の中から亀裂伝播に有効な応力振幅のみを選択して解析を行う必要があると考えられる。

3.4 繰返し塑性仕事に着目した有効応力抽出基準値

重畳応力履歴の中から疲労亀裂伝播に寄与する応力履歴を選択するためのパラメータを破壊力学的な見地から定義するため、Fig. 3.11 に模式的に示す応力履歴1サイクル ($\sigma_{max}^{(i)} \rightarrow \sigma_{min}^{(i)} \rightarrow \sigma_{max}^{(i+1)}$) 中の亀裂先端近傍における塑性挙動を考察する。

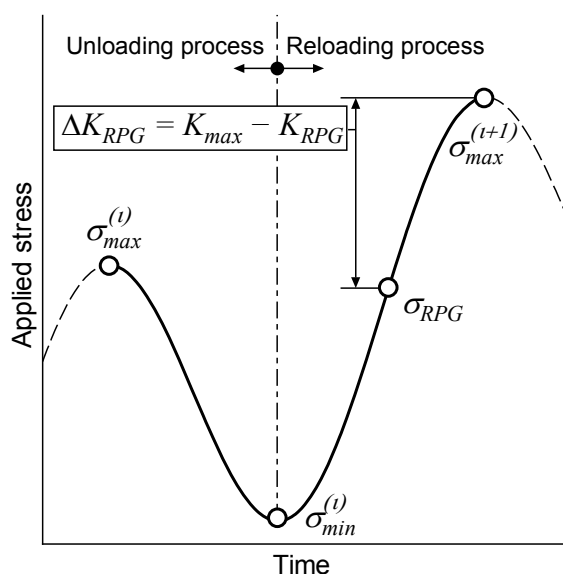


Fig. 3.11 Schematic illustration of one cycle during the cyclic stress.

疲労亀裂は繰返し応力履歴下で、開閉口を繰返ししながら伝播する。最大応力 $\sigma_{max}^{(i)}$ の作用時には、亀裂先端近傍には引張塑性域が生じる。続く除荷過程を経て、最小応力 $\sigma_{min}^{(i)}$ 作用時には、亀裂先端近傍には圧縮塑性域が生じる。除荷過程で引張と圧縮の塑性域が重複する領域を除荷過程両振塑性域 $\tilde{\omega}_L$ と定義する。その後の再負荷過程を経て、再負荷過程最大応力 $\sigma_{max}^{(i+1)}$ の作用時には、亀裂先端には引張塑性域が生じる。再負荷過程において、圧縮と引張の塑性域が重複した領域を再負荷過程両振塑性域 $\tilde{\omega}_R$ と定義する。除荷及び再負荷の両過程で生じる各両振塑性域内で引張と圧縮の塑性変形が生じる（すなわち、塑性ヒステリシスが出現する）ことで、疲労亀裂の伝播駆動力源となる塑性仕事が生じる。

除荷過程，再負荷過程それぞれにおける塑性ヒステリシスの模式図を Fig. 3. 12 に示す． Fig. 3. 12 中のハッチングされた領域の面積は単位体積当たりの塑性仕事量を表しており，この両過程において生じる塑性仕事量が亀裂が成長し新しい破面が形成されるための表面エネルギーとして補填される．すなわち，塑性仕事という非可逆エネルギーが生じることが亀裂伝播には必要となるが，疲労亀裂が伝播するためには，その駆動源である繰返し応力 1 サイクル中に供給される塑性仕事がある一定の値を超える必要があるとの考えられる．そこで本研究では，両振塑性域内で 1 サイクル中に生じる塑性仕事量を重畳応力履歴の中から亀裂伝播に有効な応力履歴を抽出するパラメータとして用いることを考えた．

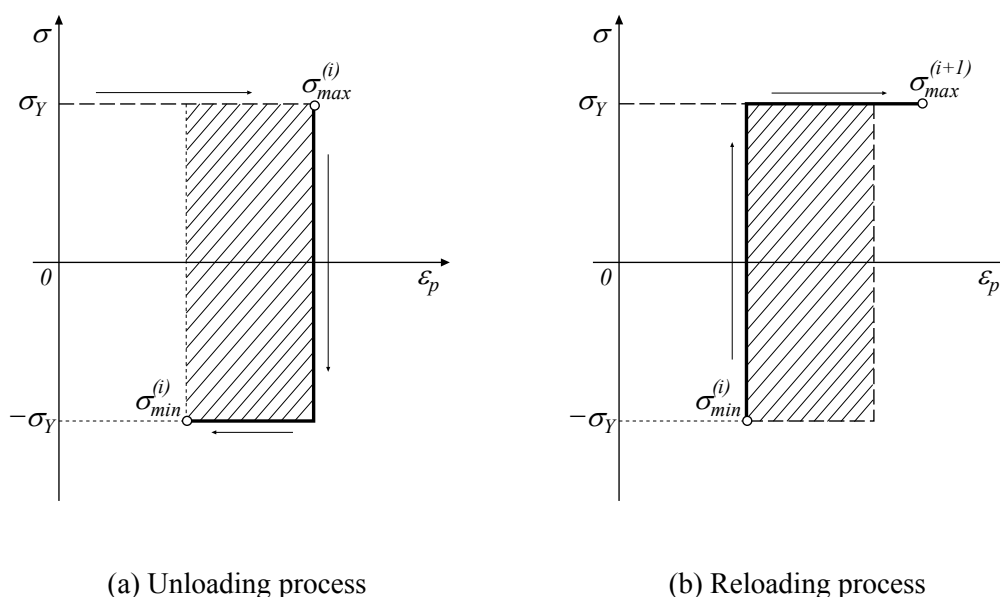


Fig. 3. 12 Schematic illustration of plastic hysteresis in one stress cycle.

Fig. 3. 13 に疲労亀裂先端で生じるひずみ分布の模式図を示す． Fig. 3. 13 及び材料を弾完全塑性体とした場合，(3. 1) 式で，両振塑性域内における塑性仕事に相当する値である有効応力抽出基準値 ξ (unit: N/mm) を定義する．

$$\xi = \int_{\tilde{\omega}} \sigma_Y d\epsilon_p dx \quad (3. 1)$$

ただし， $\tilde{\omega}$: 両振塑性域寸法 σ_Y : 降伏応力
 $d\epsilon_p$: 塑性ひずみ増分

有効応力抽出基準値 ξ は, Fig. 3. 12 に示した両振塑性域内の塑性ヒステリシスの面積である単位体積当たりの塑性仕事量を両振塑性域内で積分して得られる値であり, 両振塑性域内で消費される塑性仕事に相当する値である. 除荷過程, 再負荷過程それぞれの ξ がある一定の閾値 ξ_{limit} を上回った場合にのみ, その応力履歴が疲労亀裂の成長に寄与すると考え, これを採用するというアルゴリズムを従来の疲労亀裂成長シミュレーションに導入することで, 重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播に寄与しない無効な高周波振幅を無視し, 疲労亀裂伝播に有効な応力振幅を抽出して疲労亀裂伝播解析を行うことが可能となる. 閾値の値やその物理的意味に関しては次章で, アルゴリズムの具体的な内容については次節で述べる.

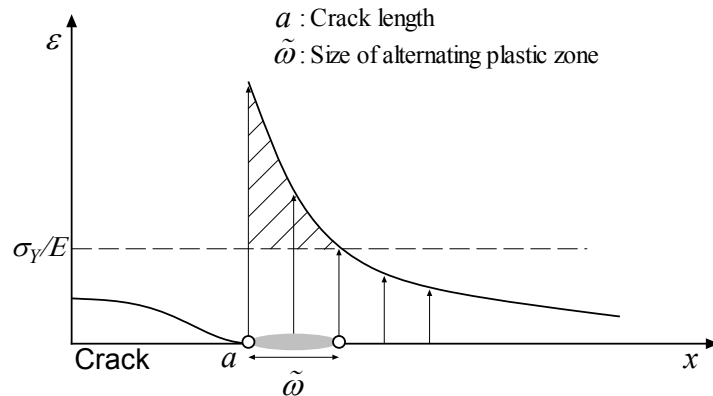


Fig. 3. 13 Schematic illustration of the strain distribution in vicinity of crack tip.

3.5 不規則応力履歴下における有効応力履歴選択方法

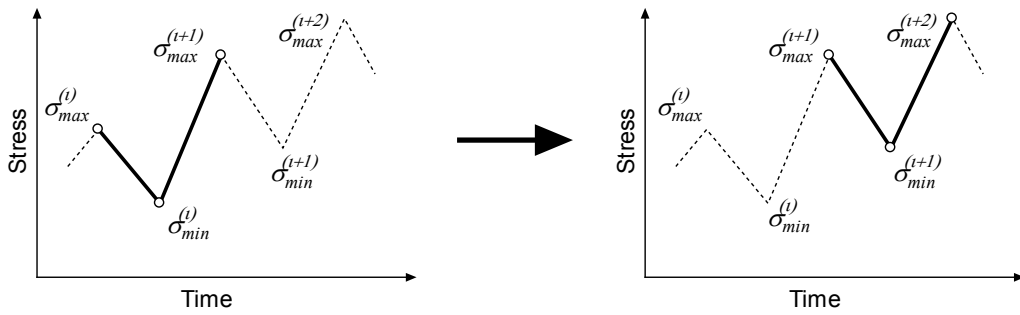
重畳応力履歴のような複雑な応力履歴から, (3. 1) 式により定義するパラメータ ξ を用いて疲労亀裂伝播に有効な応力履歴を抽出するには, 亀裂伝播に寄与しない高周波振幅を適切に省く必要がある. 疲労亀裂伝播解析 1 サイクル中に存在するピーク応力 $(\sigma_{max}^{(i)}, \sigma_{min}^{(i)}, \sigma_{max}^{(i+1)})$ を応力グループと定義する. 従来の疲労亀裂成長シミュレーションにおける応力グループの選択方法は Fig. 3. 14 (a) に示すように, 連続した応力成分から成る応力グループを順々に解析するというものである. これに従い, (3. 1) 式を用いて亀裂伝播に有効な応力グループを抽出すると, Fig. 3. 10 の最小応力付近において見られるような不連続な有効応力履歴が得られる場合が生じる.

そこで、現応力グループが疲労亀裂伝播に寄与しないと判定された場合、Fig. 3. 15 に示す場合分けに従い、Fig. 3. 14 (b), (c)に示すような、以前の応力グループの応力成分の一部を引き継いで新たな次の応力グループを作成するという有効応力の選択アルゴリズムを考案した。Fig. 3. 15 中の (a), (b) 及び (c) はそれぞれ Fig. 3. 14 の模式図に対応する。新たに導入された Fig. 3. 14 (b), (c) の応力選択パターン時の塑性ヒステリシスの模式図を Fig. 3. 16 に示す。

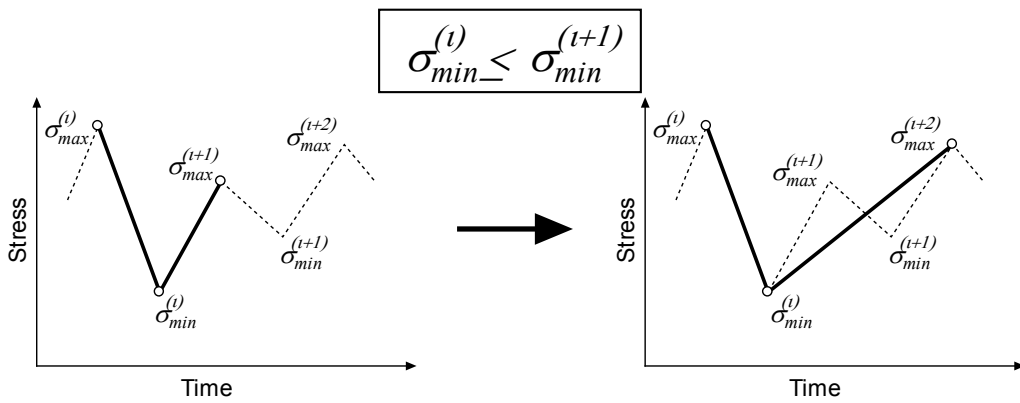
まず、Fig. 3. 14 (b) に示すように、前応力グループ ($\sigma_{max}^{(i)} \rightarrow \sigma_{min}^{(i)} \rightarrow \sigma_{max}^{(i+1)}$) が亀裂伝播に寄与しないと判定され、次の最小応力 $\sigma_{min}^{(i+1)}$ が今の最小応力 $\sigma_{min}^{(i)}$ よりも大きい場合は、Fig. 3. 16 (a) に示すように再負荷過程最大応力 $\sigma_{max}^{(i+1)}$ と次の最小応力 $\sigma_{min}^{(i+1)}$ の値次第では塑性ヒステリシスが形成されない（もしくは、形成されるが閾値 ξ_{limit} を満たさない）ことを意味する。この場合、応力区間 ($\sigma_{min}^{(i)} \rightarrow \sigma_{max}^{(i+1)} \rightarrow \sigma_{min}^{(i+1)}$) は無視され、($\sigma_{max}^{(i)} \rightarrow \sigma_{min}^{(i)} \rightarrow \sigma_{max}^{(i+2)}$) を新たな応力グループとして考える。

一方、Fig. 3. 14 (c) のように、同様に前応力グループが亀裂伝播に寄与しないと判定され、次の最小応力 $\sigma_{min}^{(i+1)}$ が今の最小応力 $\sigma_{min}^{(i)}$ よりも小さい場合、Fig. 3. 16 (b) に示すように再負荷過程最大応力 $\sigma_{max}^{(i+1)}$ では塑性ヒステリシスが形成されない（もしくは、形成されるが閾値 ξ_{limit} を満たさない）ことを意味する。この場合、応力区間 ($\sigma_{min}^{(i)} \rightarrow \sigma_{max}^{(i+1)} \rightarrow$ 圧縮降伏まで) は無視され、($\sigma_{max}^{(i)} \rightarrow \sigma_{min}^{(i+1)} \rightarrow \sigma_{max}^{(i+2)}$) を新たな応力グループとして考える。

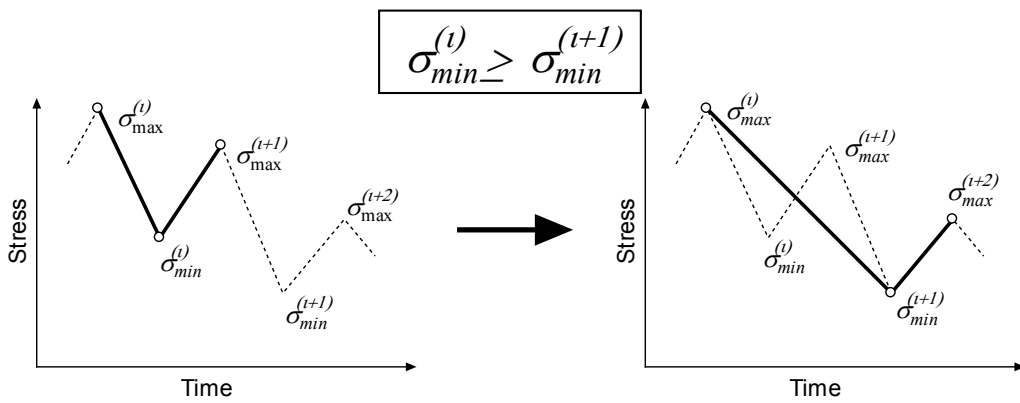
Fig. 3. 16 はどちらも新しい応力グループが亀裂伝播に有効となる場合の塑性ヒステリシスを示しており、実際には応力グループが有効と判定されるまでに複数回応力グループを形成しなおすこともあり得る。また、Fig. 3. 15 (a) の場合分けは、前応力グループ ($\sigma_{max}^{(i)} \rightarrow \sigma_{min}^{(i)} \rightarrow \sigma_{max}^{(i+1)}$) において塑性ヒステリシスが形成されないまま元の位置 ($\sigma_{max}^{(i)}$) に戻る場合を示しており、このパターンに該当した場合には有効応力履歴が不連続となるものの、実際には次節において述べる不規則応力履歴下における数値計算上の諸処理を施すことで、このパターンに入ることは回避される。



(a) Conventional method



(b) Pattern 1



(c) Pattern 2

Fig. 3. 14 Schematic illustration of the algorithm to the extract effective stress components.

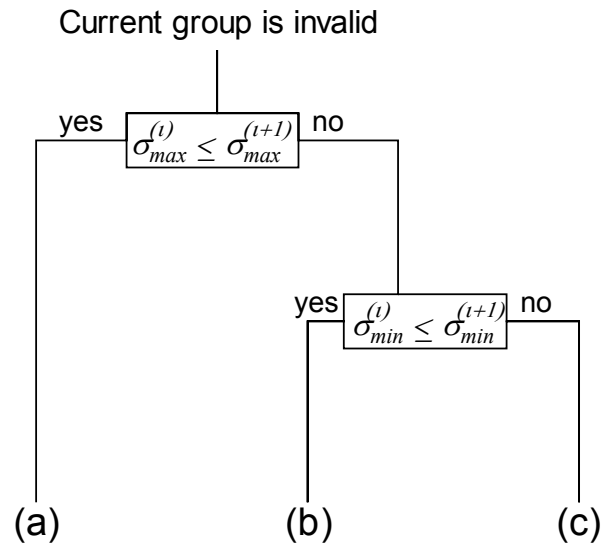


Fig. 3. 15 Flow chart the case that when current group is invalid for crack propagation.

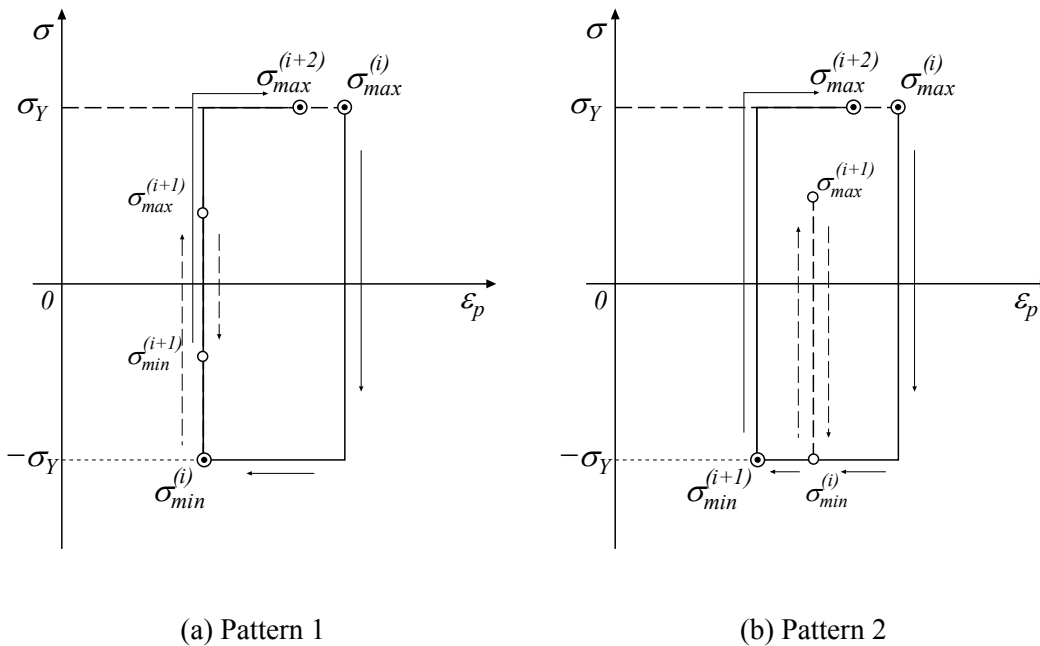
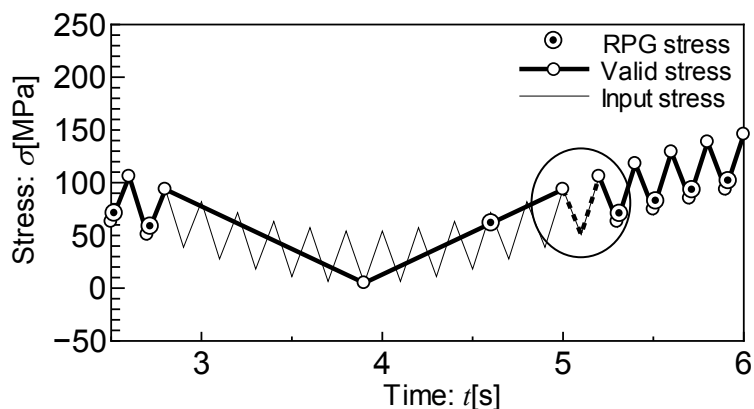


Fig. 3. 16 Schematic plastic hysteresis of stress extracting pattern shown in Fig. 3. 14 (b), (c).

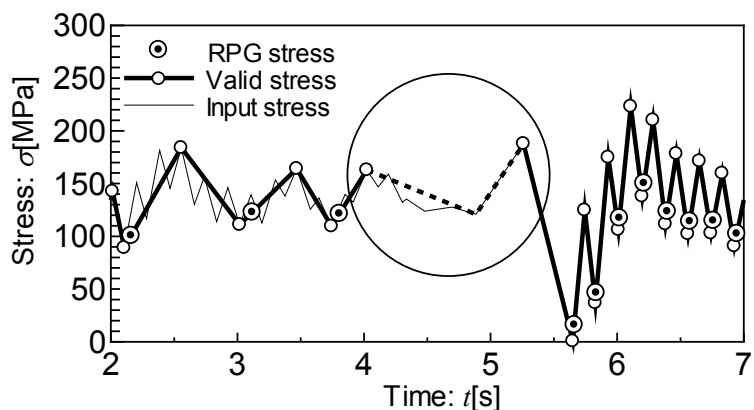
3.6 不規則応力履歴下における有効応力履歴選択のための諸処理

前節において、亀裂伝播に寄与しない応力グループの抽出方法について説明したが、実際に重畳応力等の不規則応力履歴の解析を行った場合、前節の場合分けだけでは適切に有効応力履歴を抽出できない場合がある。Fig. 3. 17 に、伝播解析において発生した

有効応力の選択が不完全であった一例を示す。本節ではこのような応力履歴に対処するための解析ステップ毎の場合分けについて説明する。



(a) L49H25M078 at 1st test



(b) L**H54M137_D at 3rd test

Fig. 3. 17 Examples of error extracting stress group.

Fig. 3. 17 (a) に示す破線のような亀裂伝播に無効な応力グループは、再負荷過程の最大応力が除荷過程の最大応力よりも大きいため、Fig. 3. 15 (a) の場合分けに入り、有効応力履歴は不連続となる。この応力グループは、本来その一つ前の多くの高周波振幅を跨いだ応力グループと一緒に取り込まれるべきである。Fig. 3. 17 (b) はさらに複雑で、破線で示した応力グループ中の最初の微小な応力グループが亀裂伝播に無効と判定され、その後も連続して応力グループを更新していき、図の破線の応力グループとなった時に、再負荷過程最大応力が除荷過程最大応力よりも大きくなるため、Fig. 3. 15 (a) の場合分けとなり、この部分の応力グループ全体が亀裂伝播に無効となる。この場合におい

でも、途中の微小な高周波振幅共々一つ前の有効応力グループに取り込まれるべきである。

このような応力履歴下において有効な応力履歴を連続的に抽出するためには、直前に有効と判定された応力グループを一時的に保持して、次の応力グループの判定を行う必要がある。この有効応力グループ保持の有無と、その際の応力グループの亀裂伝播への寄与の有無でそれぞれ場合分けを Table 3.9 に示すように行い、この問題へ対処する。

Table 3.9 Categorized by several states for extracting stress group.

		有効応力グループ保持	
		無	有
亀裂伝播の有無	伝播	(i)	(iii)
	停留	(ii)	(iv)

Table 3.9 に示す、四つの場合におけるの有効応力グループの保持、及び解析において使用する各変数の保持等の諸処理について、以下に説明する。ここで「亀裂伝播の有無：伝播」とは現応力グループが疲労亀裂伝播に有効であると判定された場合。「亀裂伝播の有無：停留」とは無効と判定された場合である。「有効応力グループ保持：有」とは一つ前の応力グループが亀裂伝播に有効と判断され、それを保持したまま現応力グループを解析している状態である。

(i) 有効応力グループ保持：無，亀裂伝播時, (Fig. 3.18)

Fig. 3.18 左図に例示する応力履歴を解析している場合，“Identification” と表記された応力グループまでが、既に有効と確定された応力履歴である。Fig. 3.18 左図に示すように 1 グループ前の応力グループを有効応力グループとして保持していない状態で現応力グループが疲労亀裂伝播に有効であると判定した場合、どのような場合でもその応力グループは確定せず保持し、全ての応力成分を更新し、右図のように次の応力グループへと進む。次の応力グループでは「有効応力グループ保持：有」に変更する。

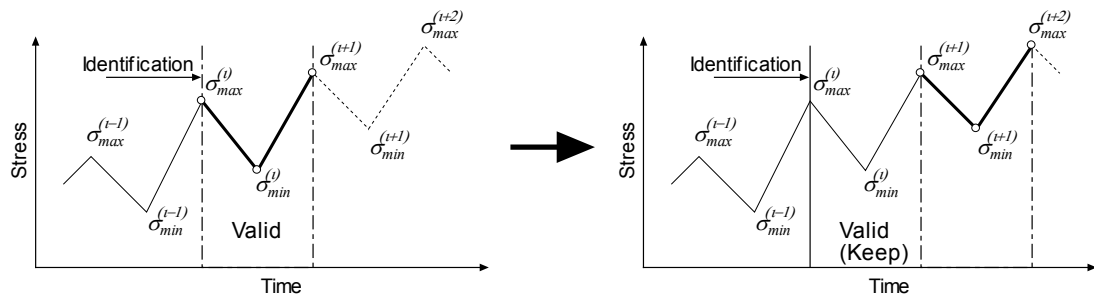


Fig. 3. 18 Procedure of stress group in case of (i) of Table 3. 9.

(ii) 有効応力グループ保持：無，亀裂停留時，(Fig. 3. 19)

Fig. 3. 19 左図に示すように，有効応力グループの保持が無い状態で，現応力グループが亀裂伝播に無効と判定された場合には，Fig. 3. 15 のフローチャートに従い，現応力グループの応力成分の一部を保持した状態で，右図のように次の応力グループを形成する．次の応力グループを評価している段階では，「有効応力保持：無」を維持する．

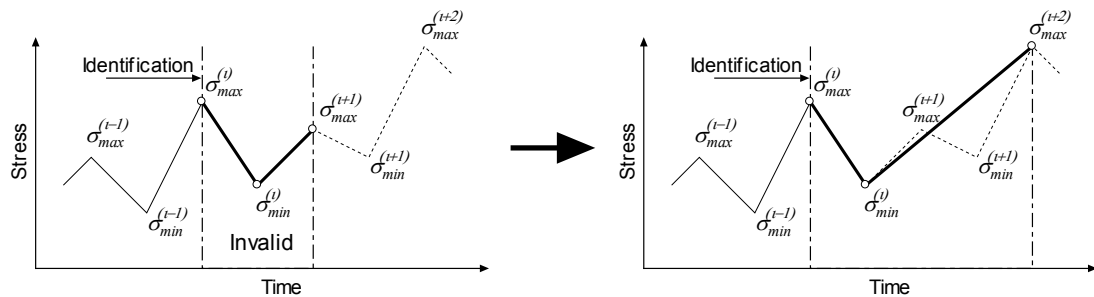


Fig. 3. 19 Procedure of stress group in case of (ii) of Table 3. 9.

(iii) 有効応力グループ保持：有，亀裂伝播時，(Fig. 3. 20)

Fig. 3. 20 左図に示すように，既に前の有効応力グループを保持している状態で，現応力グループが疲労亀裂の伝播に有効であると判定された場合，保持している一つ前の応力グループの有効を確定し，全ての応力成分を更新し，右図のように次の応力グループの評価へ進む．次の応力グループでは「有効応力保持：有」を維持する．

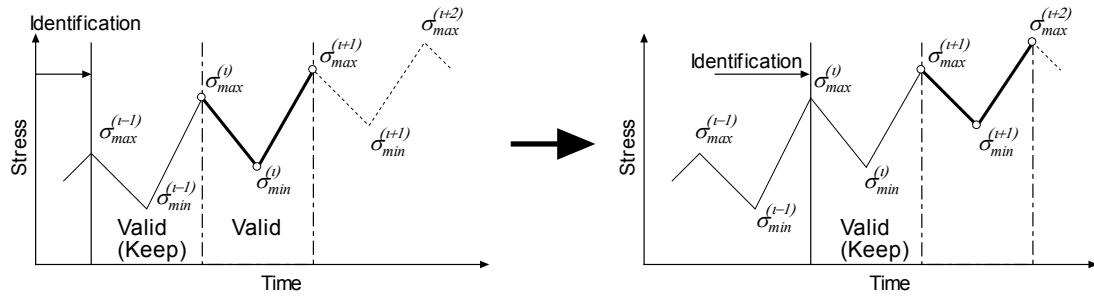


Fig. 3.20 Procedure of stress group in case of (iii) of Table 3.9.

(iv) 有効応力グループ保持：有，亀裂停留時

有効応力グループを保持している状態で，現応力グループが亀裂伝播に無効と判定された場合，Fig. 3.15 にしたがって次の応力グループを決定するか，もしくは保持している有効な応力グループと無効な現応力グループを統合させて次の応力グループとするかを判断する必要がある．この場合分けに入った場合には，Fig. 3.21 に示すフローチャートにしたがって更なる詳細な場合分けを行う．ここで， ξ_{UL} とは (3.1) 式に従って算出される除荷過程における有効応力履歴抽出基準値である．

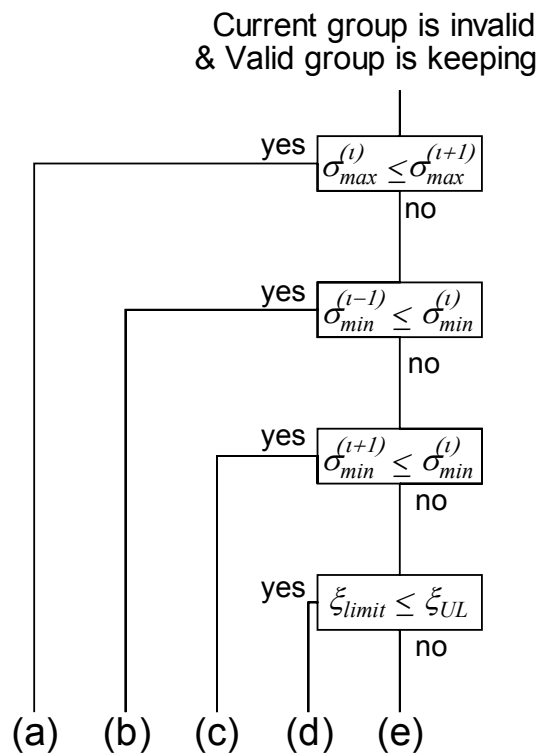


Fig. 3.21 Flow chart in case of (iv) of Table 3.9.

(iv - a) $\sigma_{max}^{(i)} \leq \sigma_{max}^{(i+1)}$ の場合

Fig. 3.22 に示すように、有効応力グループを保持している状態で、現応力グループが亀裂伝播に無効と判定され、かつ $\sigma_{max}^{(i)} \leq \sigma_{max}^{(i+1)}$ である場合、本来 Fig. 3.15 (a) に分類され、不連続な有効応力履歴が与えられるはずである。しかし、塑性ヒステリシスの挙動を考察すると、Fig. 3.23 に示すように、再負荷過程 ($\sigma_{min}^{(i-1)} \rightarrow \sigma_{max}^{(i)}$) において塑性変形が生じ、応力グループ ($\sigma_{max}^{(i-1)} \rightarrow \sigma_{min}^{(i-1)} \rightarrow \sigma_{max}^{(i)}$) が有効と判定された後の除荷過程 ($\sigma_{max}^{(i)} \rightarrow \sigma_{min}^{(i)}$) では塑性変形が生じないため、この部分は無視して、有効応力グループを ($\sigma_{max}^{(i-1)} \rightarrow \sigma_{min}^{(i-1)} \rightarrow \sigma_{max}^{(i+1)}$) に延長してよいと考えられる。そのため、Fig. 3.22 右図に示すように、保持していた有効応力グループと無効となった現応力グループを統合させ、新たな応力グループとして解析を行う。この処理により、Fig. 3.15 (a) の場合分けは回避され、有効応力履歴は連続となる。新たに作成した応力グループでは、1 グループ前の有効応力グループは保持しないとする。

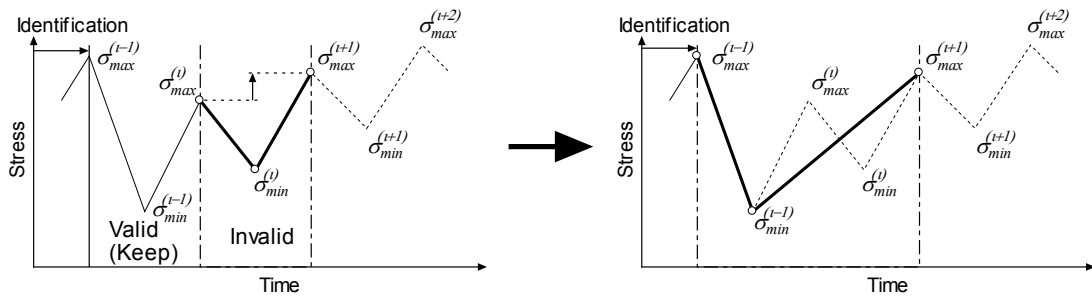


Fig. 3.22 Procedure of stress group in case of (a) of Fig. 3.21.

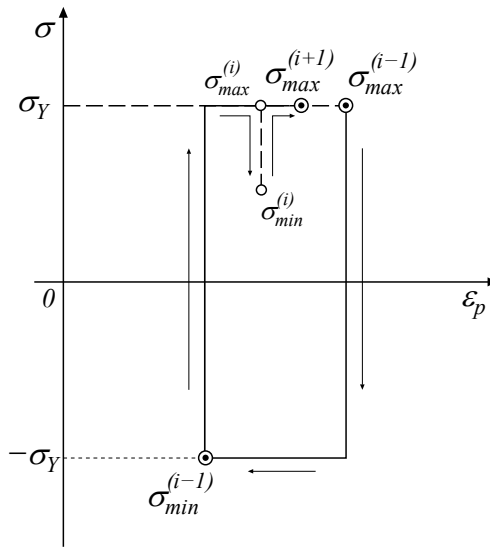


Fig. 3. 23 Schematic of plastic hysteresis in case of Fig. 3. 22.

(iv - b) $\sigma_{max}^{(i)} > \sigma_{max}^{(i+1)}$ かつ $\sigma_{min}^{(i-1)} \leq \sigma_{min}^{(i)}$ の場合

Fig. 3. 24 に示すように、有効応力グループを保持している状態で、現応力グループが亀裂伝播に無効と判定され、かつ $\sigma_{max}^{(i)} > \sigma_{max}^{(i+1)}$ 及び $\sigma_{min}^{(i-1)} \leq \sigma_{min}^{(i)}$ であった場合、この現応力グループは既に保持されている有効応力グループの応力範囲内に完全に留まっているため、このまま応力グループを更新していけば、いずれ応力グループが亀裂伝播に有効となる可能性がある。そこでこの場合においては、有効応力グループを保持したままで、Fig. 3. 15 にしたがって次の応力グループを決定する。次の応力グループでは「有効応力保持：有」を維持する。

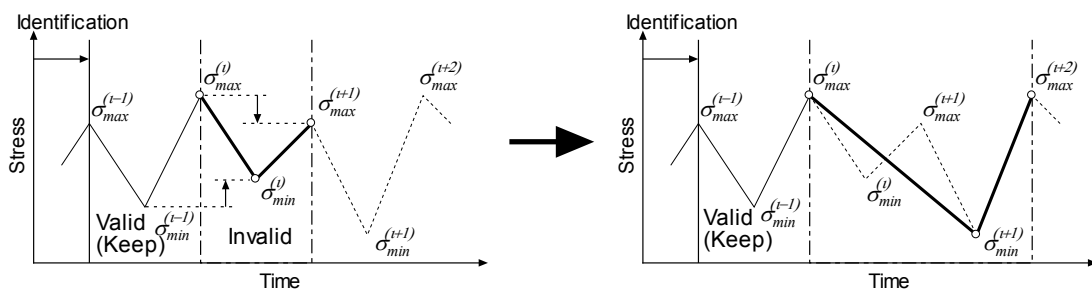


Fig. 3. 24 Procedure of stress group in case of (b) of Fig. 3. 21.

(iv - c) $\sigma_{max}^{(i)} > \sigma_{max}^{(i+1)}$ かつ $\sigma_{min}^{(i-1)} > \sigma_{min}^{(i)}$ かつ $\sigma_{min}^{(i+1)} \leq \sigma_{min}^{(i)}$ の場合

Fig. 3.25 に示すように、有効応力グループを保持している状態で、現応力グループが亀裂伝播に無効と判定され、かつ $\sigma_{max}^{(i)} > \sigma_{max}^{(i+1)}$ 、 $\sigma_{min}^{(i-1)} > \sigma_{min}^{(i)}$ 及び $\sigma_{min}^{(i+1)} \leq \sigma_{min}^{(i)}$ である場合、現応力グループは除荷過程では圧縮の塑性仕事が生じていないか、もしくは圧縮の塑性仕事は生じているが再負荷過程において塑性仕事が生じていない場合の二通りが考えられる。次の応力グループでは、 $\sigma_{min}^{(i+1)} \leq \sigma_{min}^{(i)}$ が成立しているため、上記のいずれの場合にしても次の応力グループの除荷過程中に現応力グループは取り込まれるため、有効応力グループは保持したままで、次の応力グループを決定する。次の応力グループでは、「有効応力グループ保持：有」を維持する。

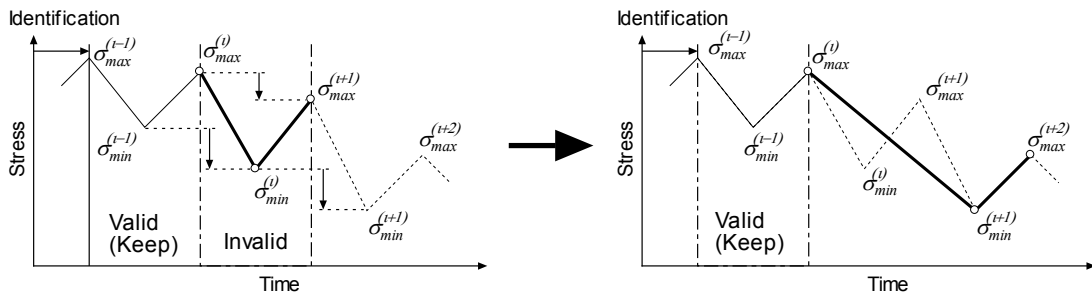


Fig. 3.25 Procedure of stress group in case of (c) of Fig. 3.21.

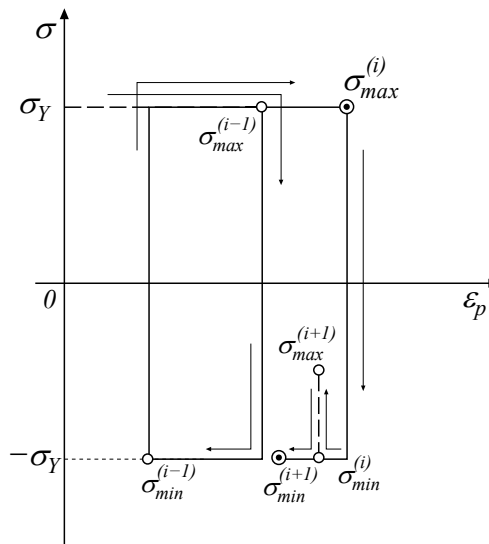


Fig. 3.26 Schematic of plastic hysteresis in case of Fig. 3.25.

(iv - d) $\sigma_{max}^{(i)} > \sigma_{max}^{(i+1)}$ かつ $\sigma_{min}^{(i-1)} > \sigma_{min}^{(i)}$ かつ $\sigma_{min}^{(i+1)} > \sigma_{min}^{(i)}$ かつ $\xi_{limit} \leq \xi_{UL}$ の場合

Fig. 3.27 に示すように、有効応力グループを保持している状態で、現応力グループが亀裂伝播に無効と判定され、かつ $\sigma_{max}^{(i)} > \sigma_{max}^{(i+1)}$ 、 $\sigma_{min}^{(i-1)} > \sigma_{min}^{(i)}$ かつ $\sigma_{min}^{(i+1)} > \sigma_{min}^{(i)}$ 及び $\xi_{limit} \leq \xi_{UL}$ である場合、既に最小応力 $\sigma_{min}^{(i)}$ では有効応力抽出基準値 ξ_{UL} が閾値 ξ_{limit} を上回り、圧縮の塑性仕事が生じているため、再負荷過程最大応力時の有効応力抽出基準値 ξ_{RL} が閾値 ξ_{limit} を上回れば、現応力グループは亀裂伝播に有効となる。そのため、この場合においても有効応力グループは保持したままで、次の応力グループを決定する。次の応力グループでは、「有効応力グループ保持：有」を維持する。

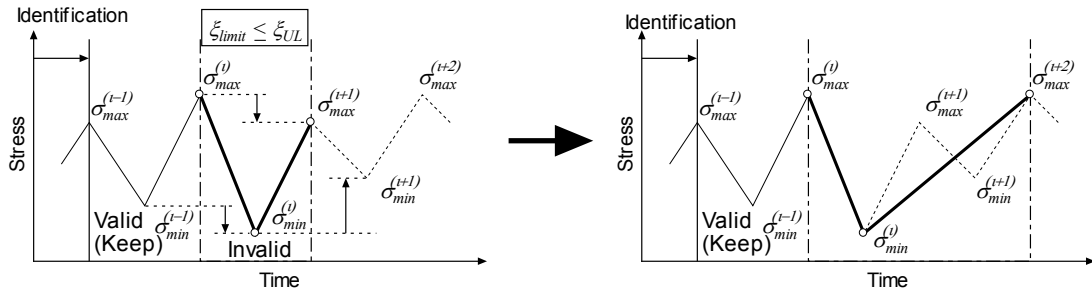


Fig. 3.27 Procedure of stress group in case of (d) of Fig. 3.21.

(iv - e) $\sigma_{max}^{(i)} > \sigma_{max}^{(i+1)}$ かつ $\sigma_{min}^{(i-1)} > \sigma_{min}^{(i)}$ かつ $\sigma_{min}^{(i+1)} > \sigma_{min}^{(i)}$ かつ $\xi_{limit} > \xi_{UL}$ の場合

Fig. 3.28 に示すように、有効応力グループを保持している状態で、現応力グループが亀裂伝播に無効となり、かつ $\sigma_{max}^{(i)} > \sigma_{max}^{(i+1)}$ 、 $\sigma_{min}^{(i-1)} > \sigma_{min}^{(i)}$ 、 $\sigma_{min}^{(i+1)} > \sigma_{min}^{(i)}$ 及び $\xi_{limit} > \xi_{UL}$ である場合、以降の応力履歴で最小応力が増加する場合にこの応力グループが亀裂伝播に有効と判定されることは不可能であるため、(iv - a) の場合と同様に、保持していた有効応力グループと亀裂伝播に無効な現応力グループを統合させ、新たな応力グループを構成する。保持している有効応力グループの再負荷過程 ($\sigma_{min}^{(i-1)} \rightarrow \sigma_{max}^{(i)}$) で、 $\xi_{limit} < \xi_{RL}$ を満たしているため、それよりも応力範囲の広い現応力グループの除荷過程 ($\sigma_{max}^{(i)} \rightarrow \sigma_{min}^{(i)}$) で $\xi_{limit} > \xi_{UL}$ となること及び、 $\sigma_{min}^{(i-1)} > \sigma_{min}^{(i)}$ と $\xi_{limit} > \xi_{UL}$ が同時に成立することは基本的にはあり得ないが、数値シミュレーション誤差の影響などに配慮して、本場合分けも数値シミュレーションには実装させた。次の応力グループでは、「有効応力グループ保持：無」とする。

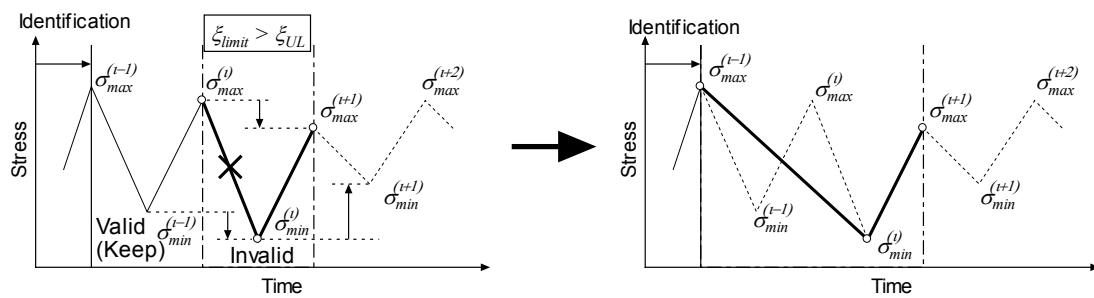
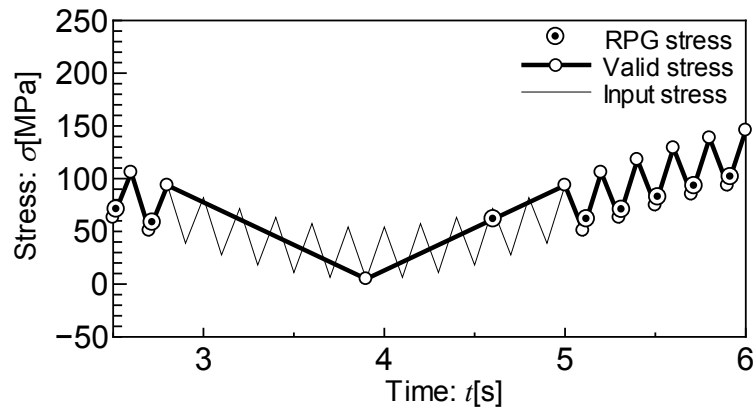
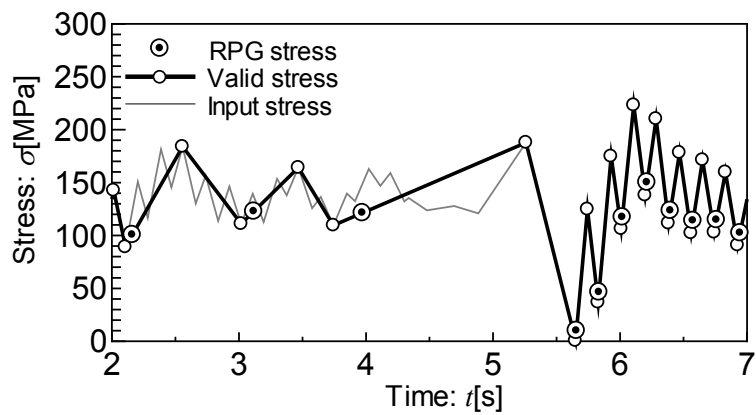


Fig. 3. 28 Procedure of stress group in case of (e) of Fig. 3. 21.

以上の場合分けを有効応力履歴選択アルゴリズムに実装し、再度 Fig. 3. 17 に示す応力履歴を解析し、亀裂伝播に有効な応力グループの抽出履歴を求めた結果を Fig. 3. 29 に示す。Fig. 3. 29 より、Fig. 3. 17 では一部で不連続となった有効応力履歴が、連続的に選択できていることが確認できる。



(a) L49H25M078 at 1st test



(b) L**H54M137_D at 3rd test

Fig. 3. 29 Examples of modified extracting stress group.

3.7 重畳応力条件下における疲労亀裂伝播解析の妥当性の検証

3.2 節で紹介した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験に対して、前節で述べた有効応力履歴選択アルゴリズムを実装した疲労亀裂成長シミュレーションを用いて疲労亀裂伝播解析を行い、試験結果との比較を通して本研究における解析手法の妥当性を検証する。

疲労亀裂成長シミュレーションに必要な RPG 応力基準の疲労亀裂伝播則 (1.6) 式の材料定数 C , m は、いずれの疲労亀裂伝播試験においても測定されていないため、以下の方法を用いて材料定数 C , m の値を同定した。

- i) 各試験の一定振幅载荷条件の試験結果から $a \sim da/dN$ 関係を取得する。

- ii) 数値シミュレーションにおける亀裂長さ $a \sim \text{RPG}$ 応力関係が正しいと仮定し, $a \sim \Delta K_{\text{RPG}}$ 関係を取得する.
- iii) i) 及び ii) の結果から亀裂長さ a を中継ぎにして $\Delta K_{\text{RPG}} \sim da/dN$ 関係を取得し, 最小二乗法近似により材料定数 C, m を同定する.

各試験において同定した RPG 応力基準の疲労亀裂伝播則の材料定数 C, m を Table 3. 10 に示す. また, Toyosada らが SM41B 材において同定した RPG 応力基準の疲労亀裂伝播則の材料定数も併せて Table 3. 10 に示す. また, Table 3. 10 に示した材料定数の関係を Fig. 3. 30 に示す. Fig. 3. 30 より, 第二試験の材料定数 C, m の値はおおよそ $\Delta K_{\text{RPG}} < 40$ の範囲において, 他の結果に比べ対応する da/dN の値が小さい傾向が確認できる.

Table 3. 10 Material constants of fatigue crack estimation law based on RPG criterion.

		C	m
Toyosada et al. ²⁴⁾		4.505×10^{-11}	2.692
Fatigue test	1 st (Subsection 3.1.1)	7.733×10^{-11}	2.614
	2 nd (Subsection 3.1.2)	6.897×10^{-12}	3.147
	3 rd (Subsection 3.1.3)	1.311×10^{-10}	2.325

※ C, m の値は K [MPa m^{0.5}], da/dN [m/cycle]

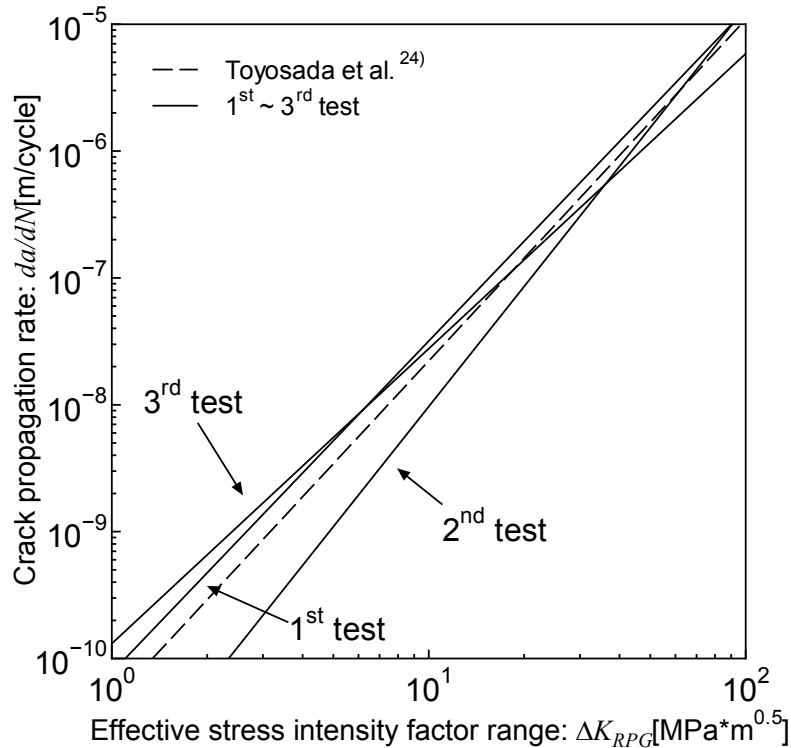


Fig. 3.30 Configurations of material constants of crack estimation law based on RPG criterion.

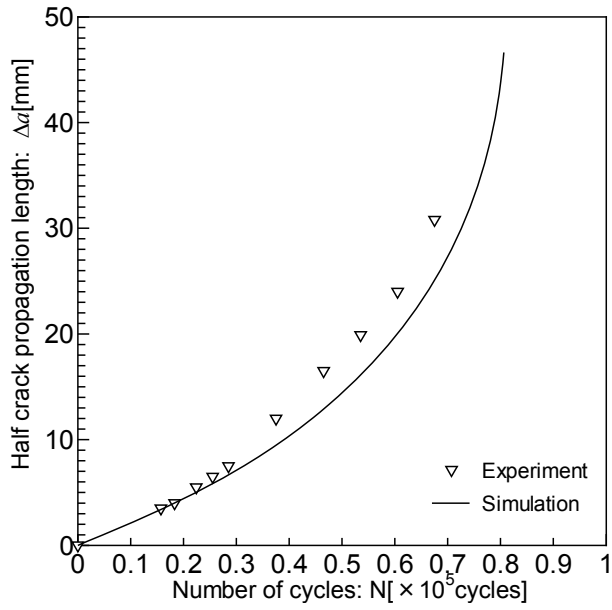
Table 3.10 に示した材料定数，及び 3.2 節で紹介した試験片の機械的性質や試験片形状などを入力データとして使用し，疲労亀裂伝播解析を実施した．有効応力抽出基準値の閾値 ξ_{limit} は種々の値を設定した解析を行い，試行錯誤的に最適値を求め， $\xi_{limit} = 0.3$ [N/mm] と設定した．この値の妥当性については 3.8 節で検討する．また，重畳応力条件に対しては解析結果同士の比較のため， $\xi_{limit} = 0$ と設定した場合の解析結果と，有効応力履歴として包絡波形を採用した場合の解析結果を併記する．包絡波形の定義³⁶⁾は，低周波振幅 1 周期中の最大応力と最小応力を連ねた波形である．

3.7.1 第一試験

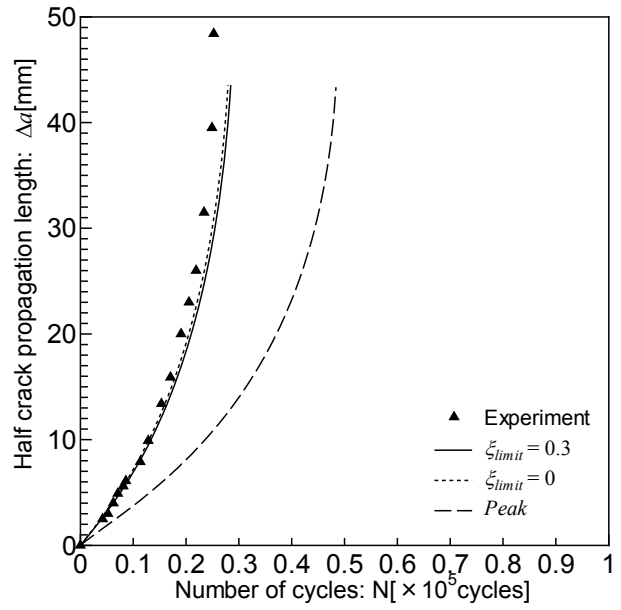
第一試験の試験条件に対する亀裂成長曲線の実測結果と数値シミュレーションの結果の比較を Fig. 3.31 に示す．Fig. 3.31 より，一定振幅重畳波条件 (b) L49H25M078 (高 / 低周波振幅比: 0.510) では，包絡波波形を採用して解析を行うと実測結果よりも亀裂伝播が非常に遅くなることが確認できる．一方，(c) L49H10M078 (高 / 低周波振幅比: 0.204) では，包絡波波形を採用して解析を行うと， $\xi_{limit} = 0.3$ と設定して疲労亀裂伝播に有効な応力履歴を抽出した場合の解析結果とほぼ同様で実測結果と良好な一致が得られた．逆に $\xi_{limit} = 0$ と設定して多くの高周波振幅を採用して解析を行うと，試験結果よ

りも非常に亀裂伝播挙動が遅くなることが確認できる。また、減衰重畳波条件 (f), (g) では、各解析で亀裂伝播速度に一定振幅重畳波条件ほどの差異は見られないものの、(f) L49H88M137_D では、高周波振幅を多く採用した場合 ($\xi_{limit} = 0$) と包絡波形を採用した場合はいずれも亀裂伝播速度がやや遅く、閾値 $\xi_{limit} = 0.3$ を設定した場合が最も亀裂伝播速度が速い結果が得られた。(g) L49H49M137_D (高 / 低周波振幅比: 1.00, 減衰有) では、(c) L49H10M078 と同様に $\xi_{limit} = 0$ と設定し高周波を多く採用した解析結果は、試験結果よりも亀裂伝播が遅い。

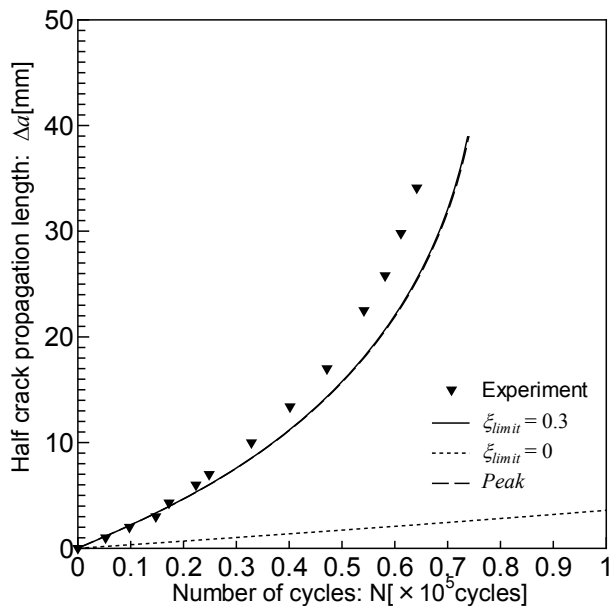
このように重畳応力条件下において亀裂伝播に有効な応力履歴は、応力履歴に応じて異なり、包絡波形を採用した場合も高周波振幅を全て採用した場合でも、条件次第では試験結果と大きな誤差が生じることが確認できる。しかしながら、(a), (d), (e) の一定振幅条件の解析結果と試験結果の誤差の程度から見ても、 $\xi_{limit} = 0.3$ と設定して疲労亀裂伝播に有効な応力履歴を抽出しつつ実施された疲労亀裂伝播解析の結果は、一定振幅条件と比べても遜色なく試験結果と良好な一致が得られていることが確認できる。



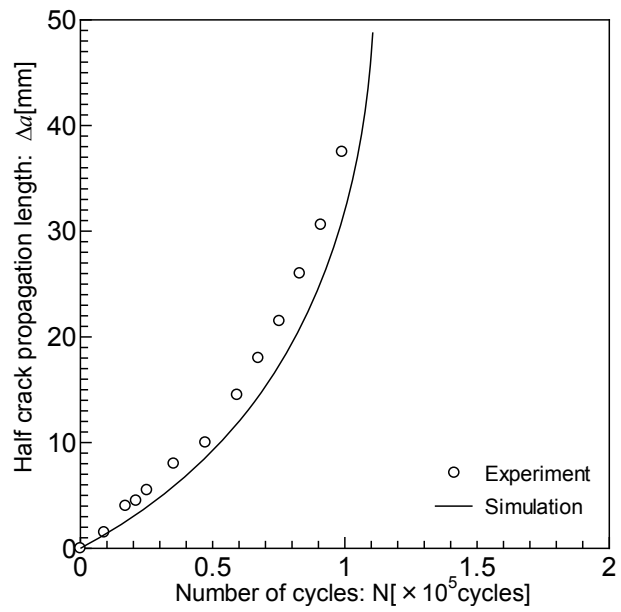
(a) L59H00M078



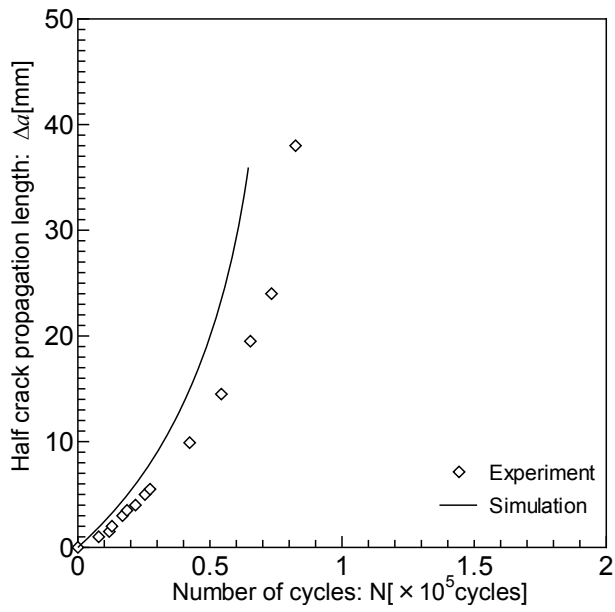
(b) L49H25M078



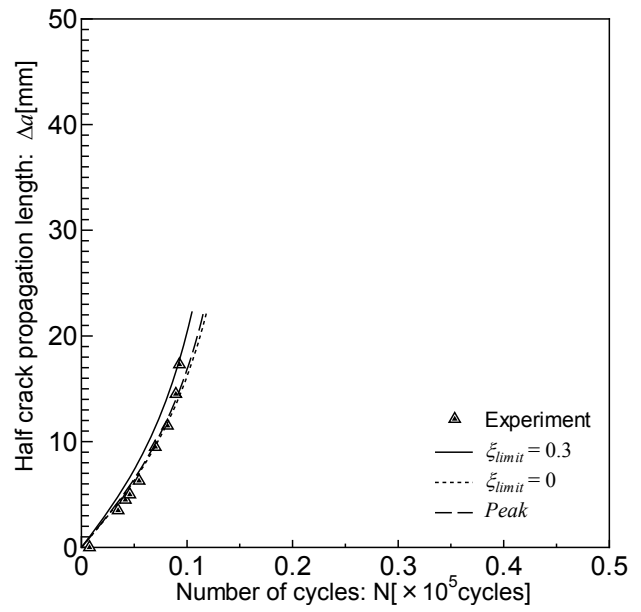
(c) L49H10M078



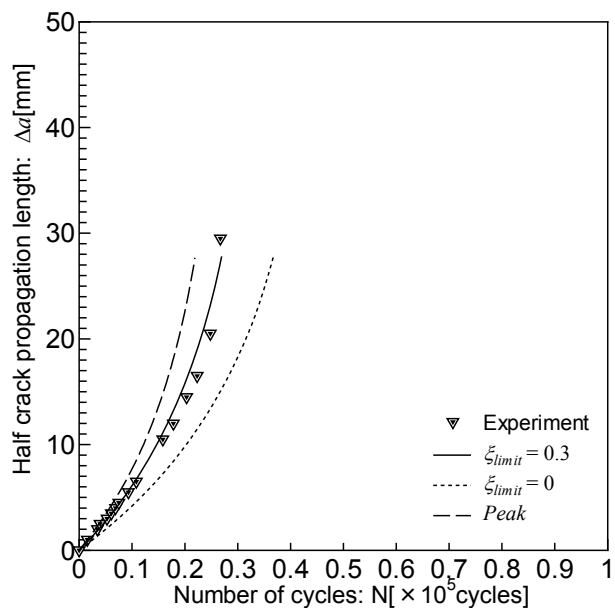
(d) L49H00M078



(e) L49H00M137



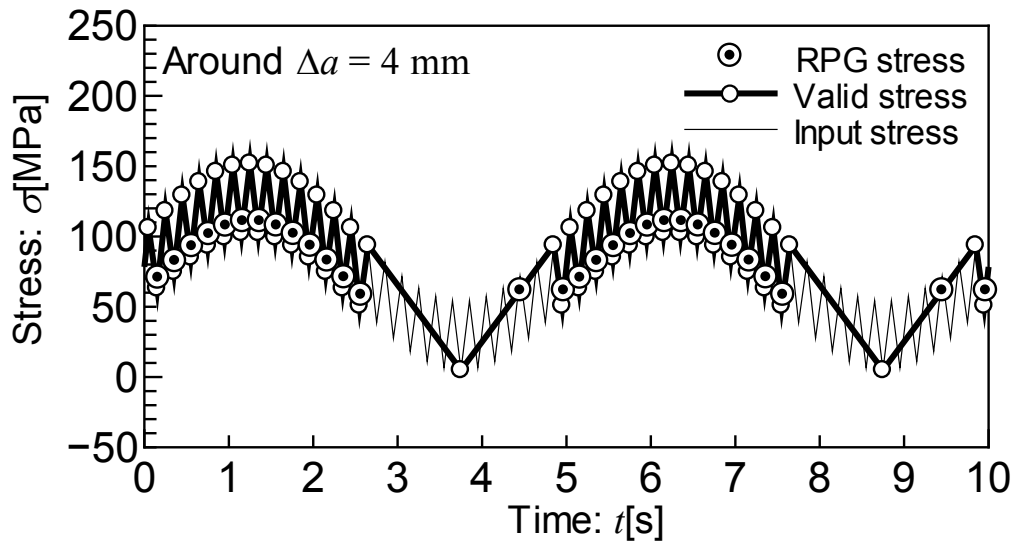
(f) L49H88M137_D



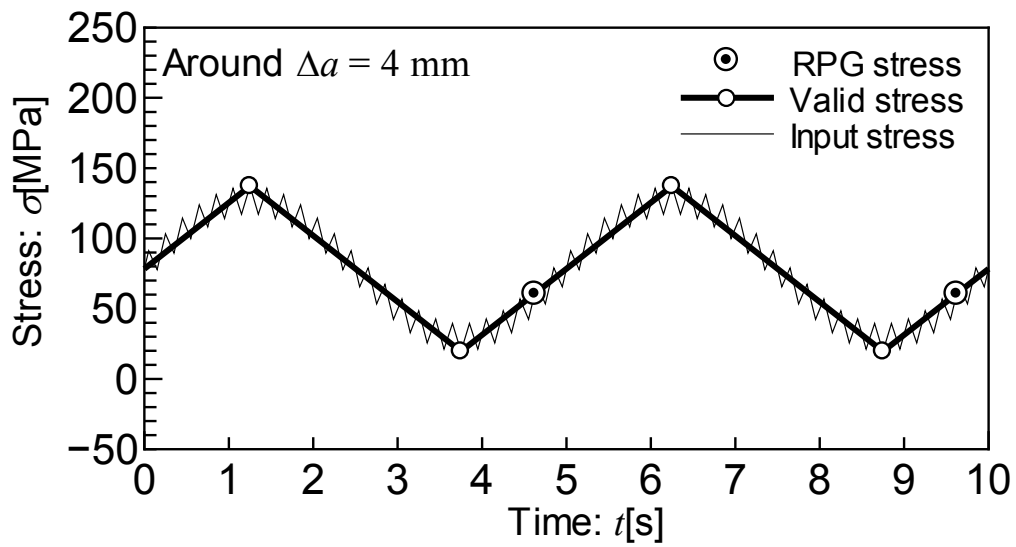
(g) L49H49M137_D

Fig. 3. 31 Comparison of measured crack growth curves with estimated ones for 1st test.

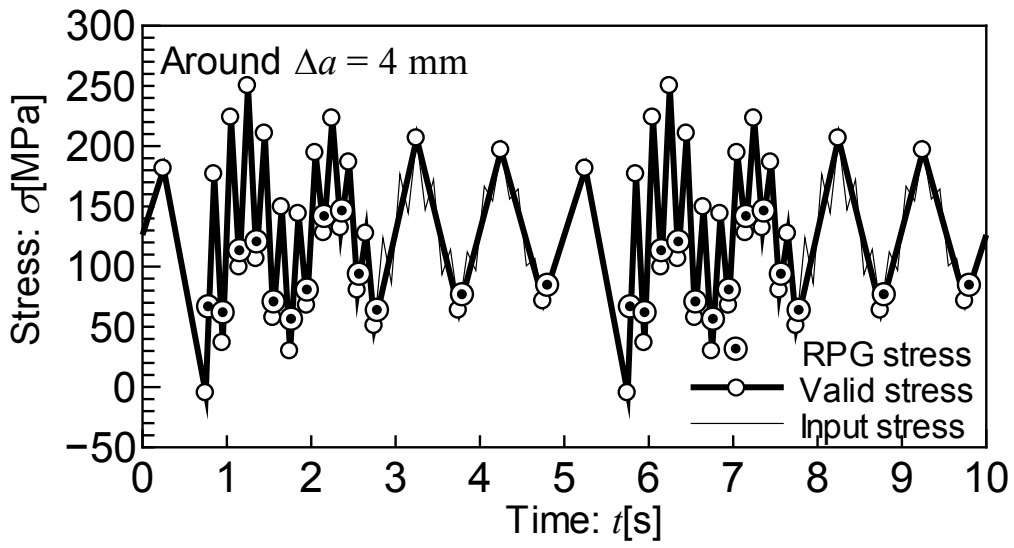
続いて、有効応力履歴選択アルゴリズムにおいて $\xi_{limit}=0.3$ と設定した伝播挙動解析において抽出された、疲労亀裂伝播に寄与する有効な応力履歴について検討する。Fig. 3.32 は、 $\Delta a=4\text{mm}$ 地点において抽出された、疲労亀裂伝播に有効に寄与すると判定された応力履歴である。Fig. 3.32 において太線が疲労亀裂伝播に有効に寄与するとして抽出された応力履歴であり、このピーク位置に白丸を付している。また白黒丸印は有効な応力履歴中の各段階における RPG 応力であり、RPG 応力から再負荷過程最大応力までの応力範囲が RPG 応力基準の疲労亀裂伝播則 (1.6) 式における有効応力範囲に相当する。Fig. 3.32 (a) に示すように L49H25M078 では、多くの高周波成分が有効な応力履歴として採用されている。一方、(b) L49H10M078 では、全ての高周波振幅を無視し、最大・最小応力を連ねた包絡波を疲労亀裂伝播に寄与する応力履歴として採用していることが分かる。Fig. 3.3 に示した実測された疲労亀裂伝播曲線において、この条件と包絡波条件 L59H00M078 の亀裂伝播挙動がほぼ同じであったことから、この程度の微小な高周波振幅は疲労亀裂伝播に対して有効に寄与しないと判断した有効応力履歴選択アルゴリズム及び設定した閾値は妥当であると判断できる。減衰重畳波条件 (c), (d) では、疲労亀裂伝播に寄与する比較的大きい高周波振幅のみを採用し、微小な高周波振幅は無視していることが確認できる。また、(a), (c), (d) の条件では、疲労亀裂が伝播するに伴い、疲労亀裂伝播に寄与するとして抽出された高周波振幅が徐々に増加したことを確認している。例として Fig. 3.33 に試験 ID: L49H10M078 の $\Delta a = 10, 20, 30, 40\text{mm}$ 時点における、疲労亀裂伝播に寄与する有効な応力履歴を示す。この理由は、疲労亀裂長さが増加すると、高周波成分の応力振幅が小さくても両振塑性域が形成されやすくなるためと考えられる。一方、(b) L49H10M078 では、伝播解析の最終段階に至るまで Fig. 3.32 (b) と同様の抽出結果を得た。この理由は、高周波振幅の絶対値が小さいためであると推察される。



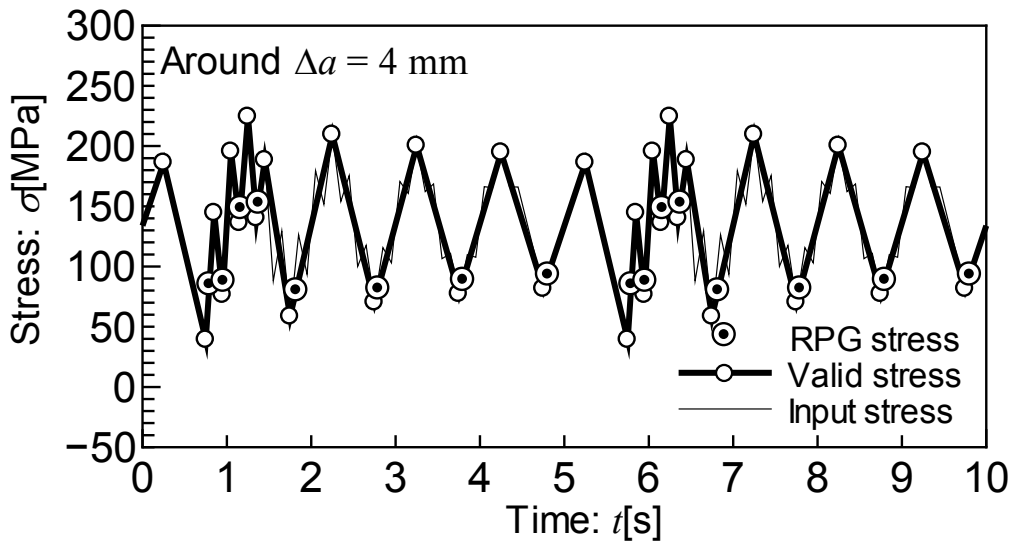
(a) L49H25M137



(b) L49H10M078

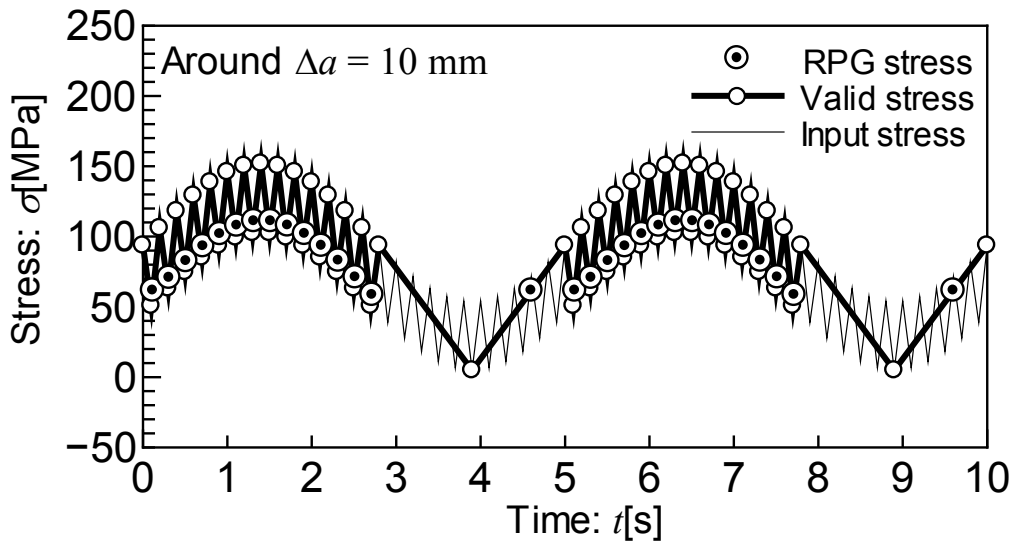


(c) L49H88M137_D

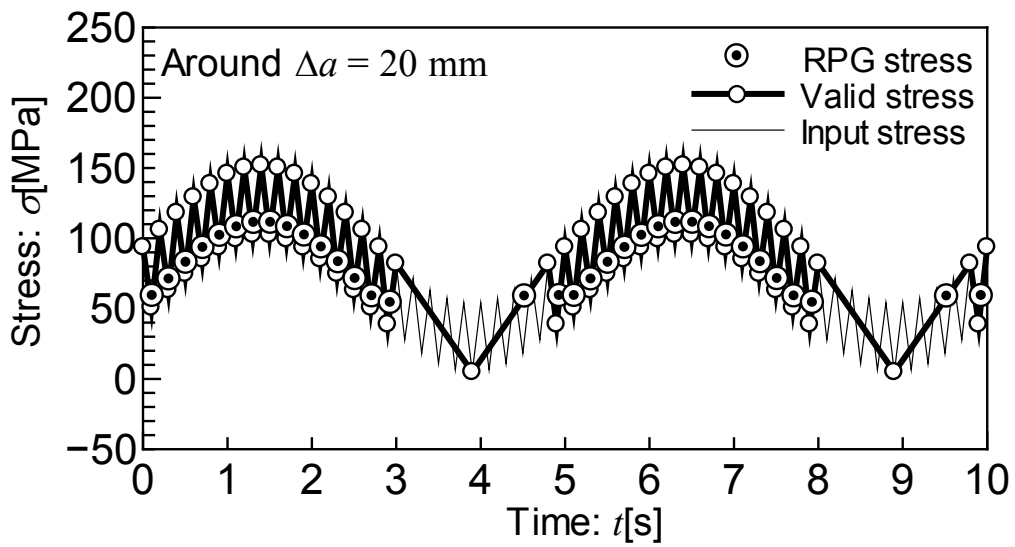


(d) L49H49M137_D

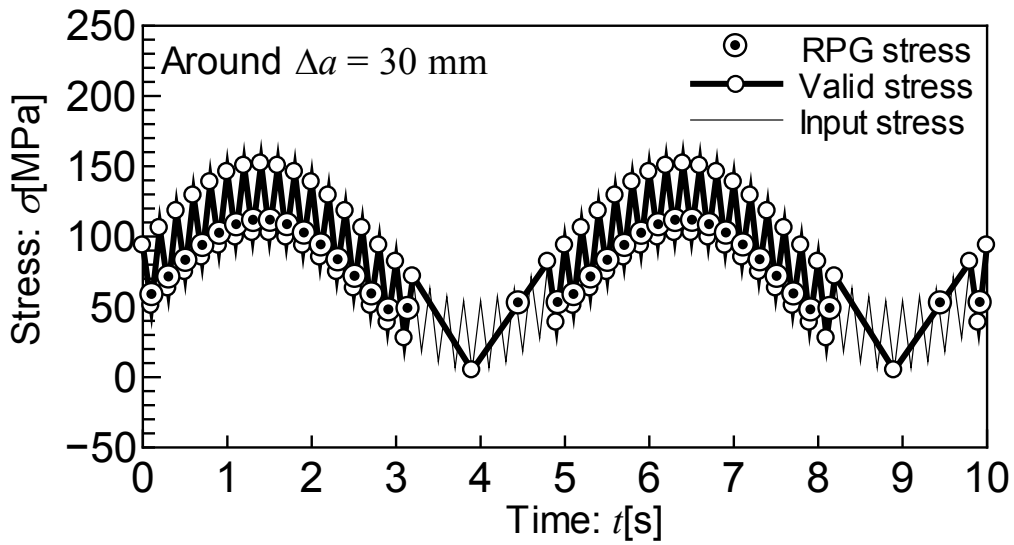
Fig. 3. 32 Examples of the extracted effective stress sequences for 1st test.



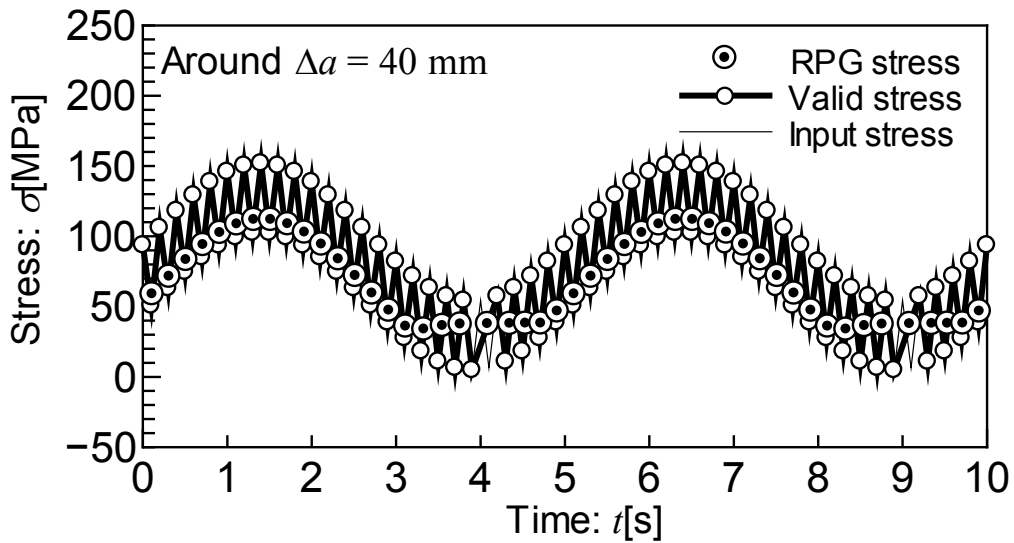
(a) $\Delta a = 10$ mm



(b) $\Delta a = 20$ mm



(c) $\Delta a = 30$ mm



(d) $\Delta a = 40$ mm

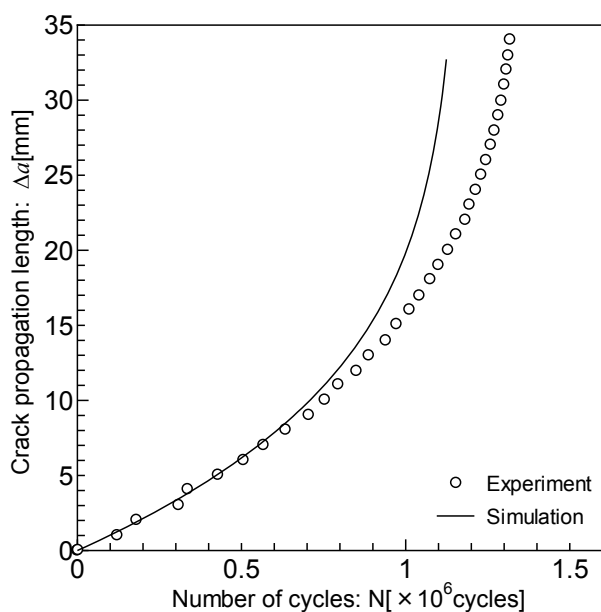
Fig. 3. 33 Extracted effective stress sequences of L49H25M078 for different Δa .

3.7.2 第二試験

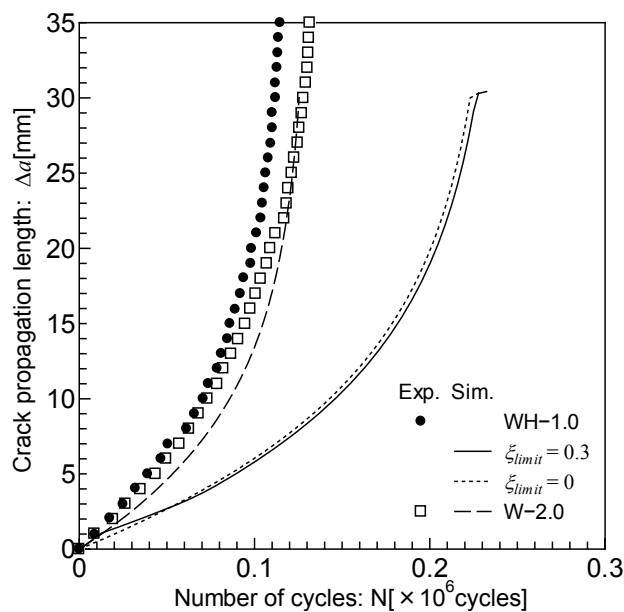
次に、3.2.2 節で紹介した第二試験に対して、疲労亀裂伝播解析を行った結果得られた亀裂成長曲線と試験結果の比較を Fig. 3. 34 に示す。有効応力抽出基準値の閾値は第一試験と同様に $\xi_{limit} = 0.3$ と設定した。本試験の重畳波条件に対しても、 $\xi_{limit} = 0$ と設定して解析を行った結果を併記する。また、包絡波形に関しては、WH-1.0 に対して W-2.0,

WS シリーズに対しては M シリーズの試験条件が設定されているため、各重畳波条件と包絡波条件の結果を一緒に併記している。

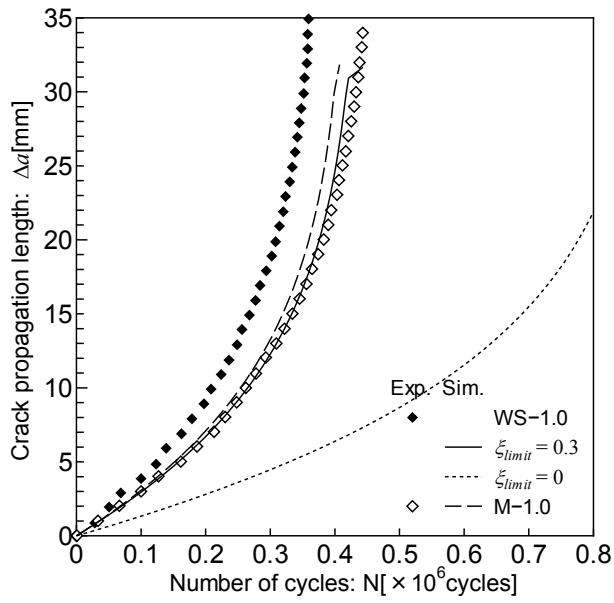
Fig. 3.34 (a) より、一定振幅条件 W-1.0 において、解析結果と試験結果は $\Delta a = 10\text{mm}$ 程度までは良好な一致が得られているものの、その後は解析結果の方が、亀裂伝播速度がやや速い傾向が確認できる。この傾向は他の解析結果にも表れており、原因としては亀裂伝播則の材料定数 C , m の値、もしくは K 値算出に用いる CT 試験片の K 値重み関数⁴⁷⁾の精度にあると考えられる。以降の重畳波条件の結果の考察においてこの傾向は差し引いて考える。(b)では、試験結果では W-2.0 よりも WH-1.0 の方が伝播速度が速いのにに対して、解析結果では WH-1.0 の方が伝播が遅いことが確認できる。また、(c)~(e) の WS シリーズと M シリーズにおいても、いずれも試験結果では WS シリーズの方が M シリーズよりも亀裂伝播速度が速いが、解析においては、WS-0.5 と M-0.5 がほぼ同等、WS-1.0 と WS-1.5 については、M-1.0, M-1.5 の方がそれぞれ亀裂伝播が速いという結果が得られた。このような結果が得られた原因について有効応力抽出結果と併せて考察をする。



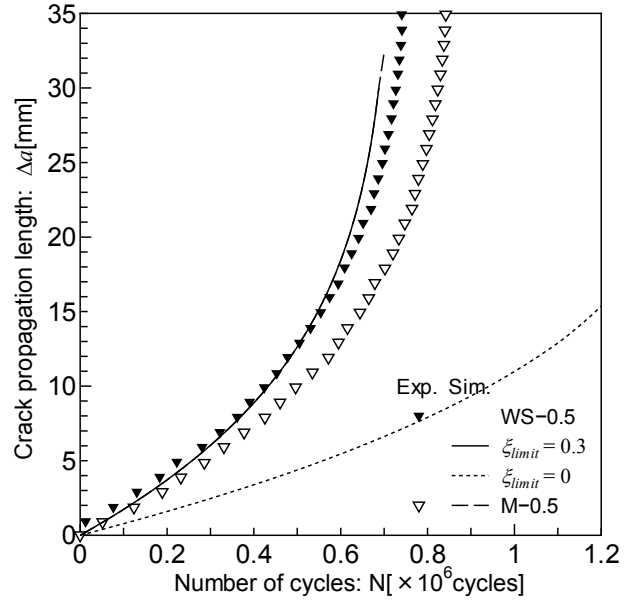
(a) W-1.0



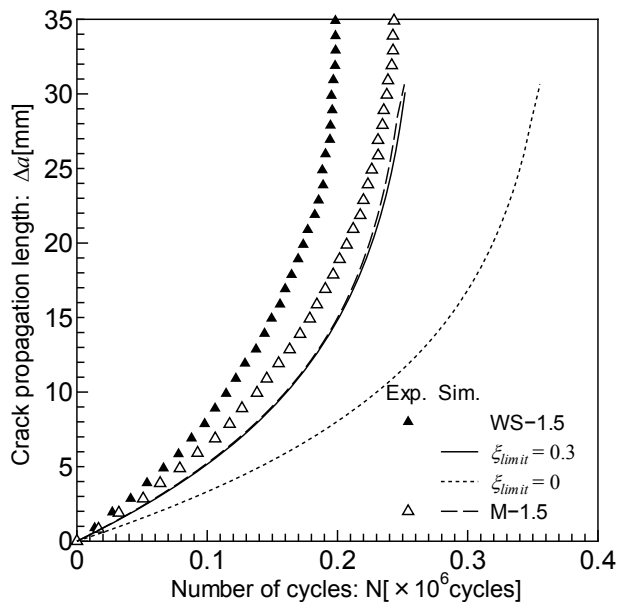
(b) WH-1.0 & W-2.0



(c) WS-1.0 & M-1.0



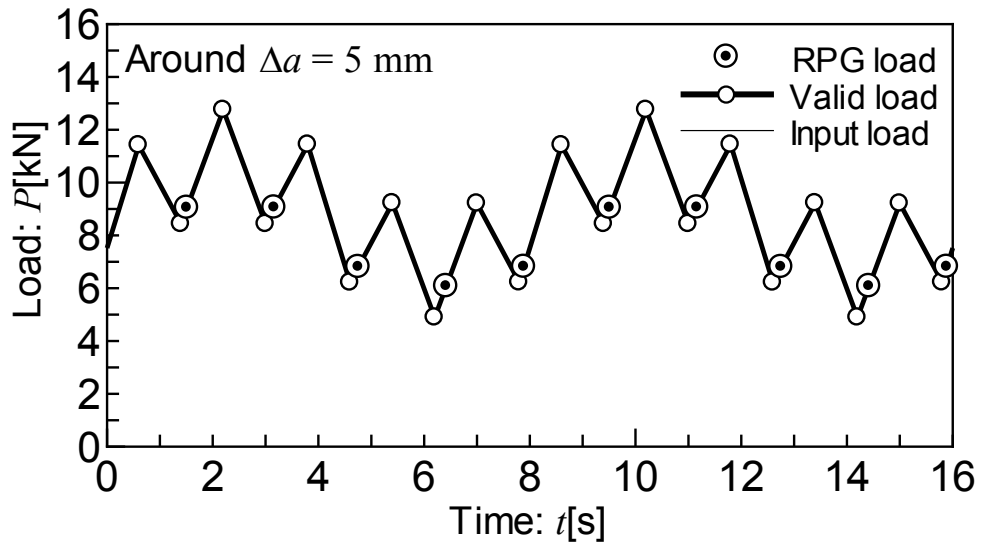
(d) WS-0.5 & M-0.5



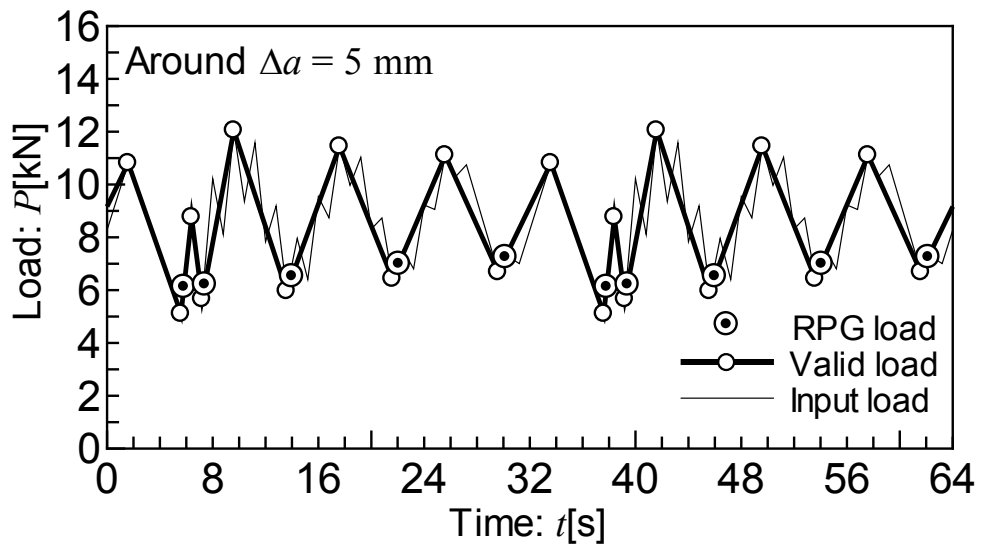
(e) WS-1.5 & M-1.5

Fig. 3. 34 Comparison of measured crack growth curves with estimated ones for 2nd test.

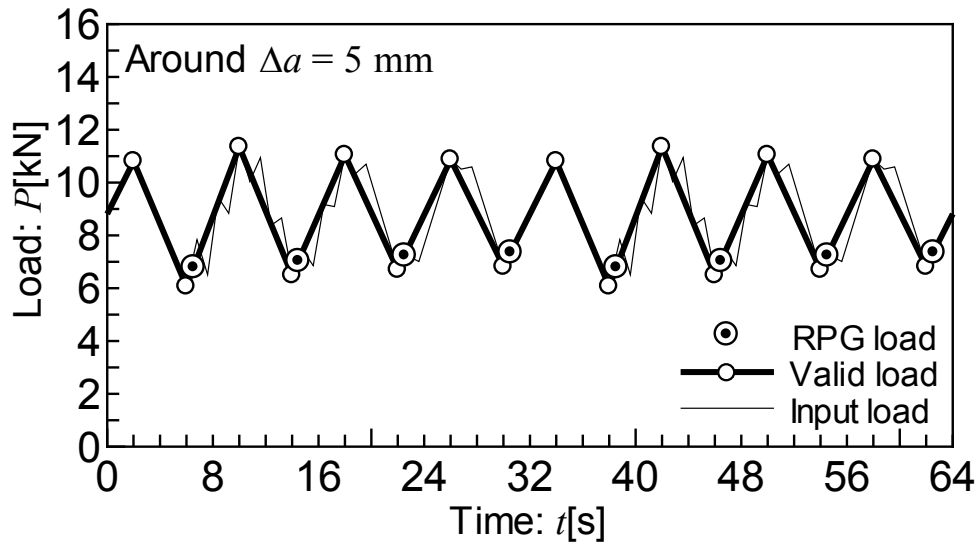
続いて、有効応力履歴選択アルゴリズムにおいて $\xi_{limit}=0.3$ と設定した伝播挙動解析中に抽出された、疲労亀裂伝播に有効に寄与する応力履歴について検討する。Fig. 3. 35 は、伝播解析中において $\Delta a = 5\text{mm}$ 程度に達した段階における有効応力履歴選択アルゴリズムにより抽出された亀裂伝播に有効に寄与する有効応力履歴である。Fig. 3. 35 (a) より、WH-1.0 では多くの高周波振幅を有効な応力として採用していることが確認できる。試験結果より WH-1.0 の高周波振幅は亀裂伝播速度を増加させるものと思われるが、伝播解析においては、高周波振幅を採用した結果逆に亀裂伝播速度が減少していることが分かる。(b)~(d) の減衰重畳波条件でも同様に、高周波振幅を多く採用している条件ほど、試験結果よりも亀裂伝播の遅い傾向が強くなり、包絡波形を有効応力履歴として採用している WS-0.5 が M-0.5 と同等な亀裂伝播挙動を示した。このように高周波振幅の亀裂伝播速度への寄与が試験結果と逆となった原因は、伝播則の定数 C , m や K 値重み関数の精度等にあることが推測される。



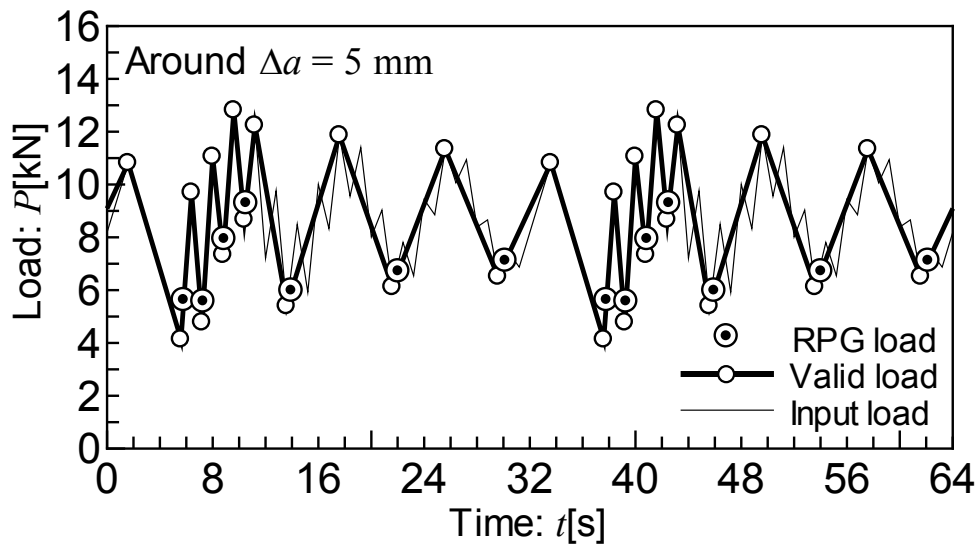
(a) WH-1.0



(b) WS-1.0



(c) WS-0.5



(d) WS-1.5

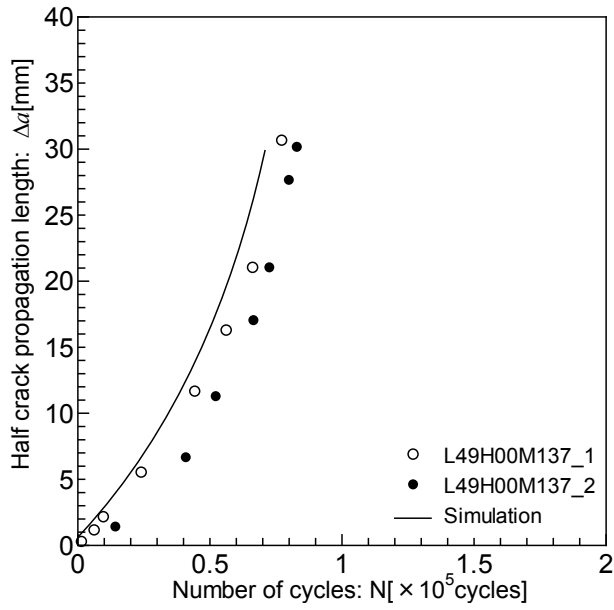
Fig. 3. 35 Examples of the extracted effective stress sequences for 2nd test.

3.7.3 第三試験

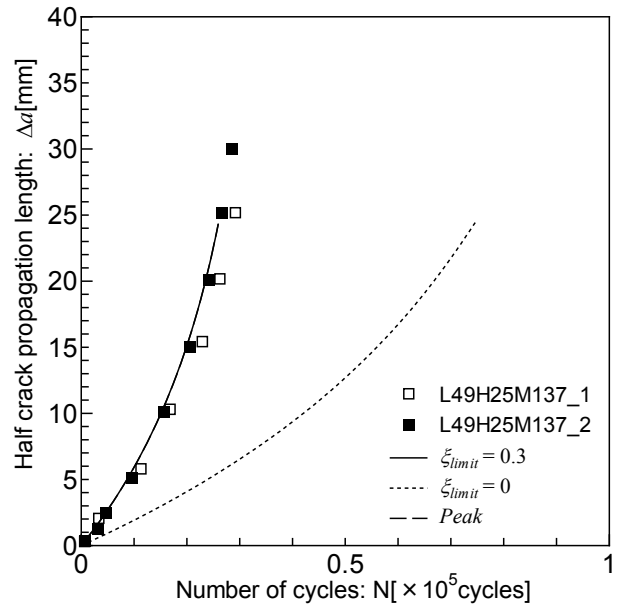
最後に、第三試験の試験条件に対する、疲労亀裂伝播解析により結果得られた亀裂成長曲線と試験結果との比較を Fig. 3. 36 に示す。まず、一定振幅条件である (a) L49H00M137 では、解析値は実験値やや亀裂伝播が速いものの良好な一致が得られた。

続いて、一定振幅重畳波条件 (b) L49H25M137 において、 $\xi_{limit}=0.3$ と設定した場合と包絡波を採用した場合の解析結果はほぼ同様で、試験結果と良好な一致が得られた。また、 $\xi_{limit}=0$ と設定した場合は、試験結果よりも著しく亀裂伝播が遅い結果が得られた。この条件は、第一試験の試験 ID: L49H25M078 と低周波振幅、高周波振幅の値が同じ条件であるが、Fig. 3. 31 (b) L49H25M078 では、 $\xi_{limit}=0$ 時の解析結果の方が試験結果と良好な一致を示し、包絡波形採用時の解析結果は試験結果よりも亀裂伝播が遅く、これは Fig. 3. 36 (b) に示す結果とは真逆の傾向を示している。この差異の原因は Fig. 3. 37 に示すように、試験 ID: L49H25M137 の低周波数に対する高周波数の比 f_L/f_H が $1/5$ と相対的に小さく（第一試験 L49H25M078, $f_L/f_H=1/25$ ）、高周波の応力振幅が低周波の大きな応力変動で軽減され、合成された応力振幅が小さくなったためであると推測される。

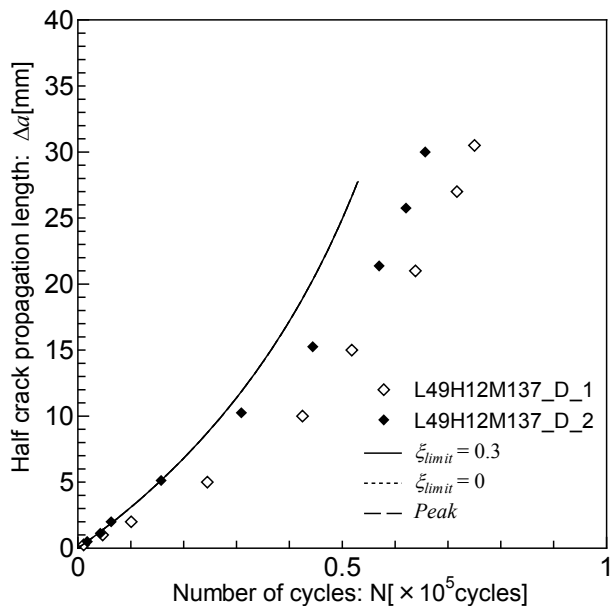
続いて、低周波振幅を 49MPa で固定して、重畳する高周波成分の振幅の大きさを变化させた減衰重畳波条件 (c)~(g) の結果について説明する。(c) L49H12M137_D では全解析結果が一致しているが、これは高周波振幅が小さすぎて $\xi_{limit}=0$ の場合でも高周波振幅が無視された結果であると考えられる。(d)~(f) では、 $\xi_{limit}=0$ と設定した解析結果は実験値よりも亀裂伝播が遅く、包絡波形を採用した場合が最も亀裂伝播が速い。しかし、(g) L49H88M137_D では、 $\xi_{limit}=0.3$ と設定した場合が最も亀裂伝播が速くかつ試験結果とも一致しており、包絡波を採用しておけば良好な推定が可能となるわけではないことが確認できる。一定振幅条件における解析結果と試験結果の誤差、及び複数同条件を実施した際の試験結果のバラツキを勘案すると、Fig. 3. 36 (b)~(i) の一定振幅重畳波条件、減衰重畳波条件においては、 $\xi_{limit}=0.3$ と設定した解析結果は試験結果と良好な一致が得られたと結論づけられる。一方、実測波模擬条件 (j), (k) では、いずれの解析結果でも試験結果と比べて亀裂伝播が遅い傾向が見られた。しかしながら、 $\xi_{limit}=0.3$ と設定した解析結果は、他のいずれの場合よりも最も試験結果に近いことから、必ずしも有効応力履歴の抽出結果手法に問題があるとは言い切れないため、これらの実測波模擬条件に関しては次章に示す重畳試験の際に再度検討を行う。



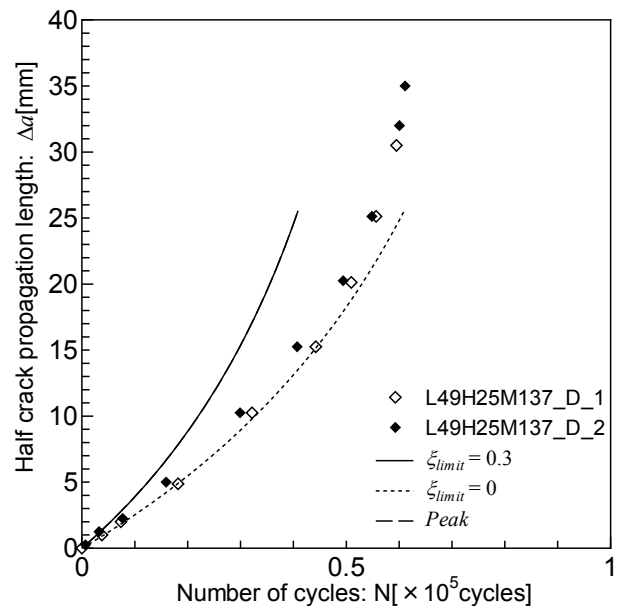
(a) L49H00M137



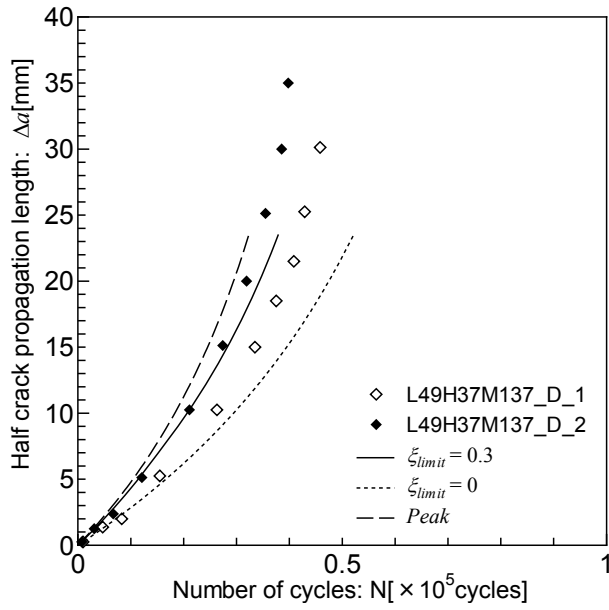
(b) L49H25M137



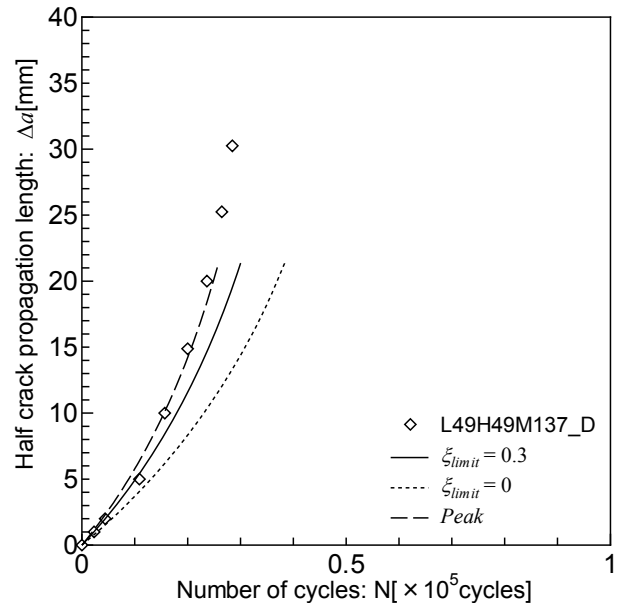
(c) L49H12M137_D



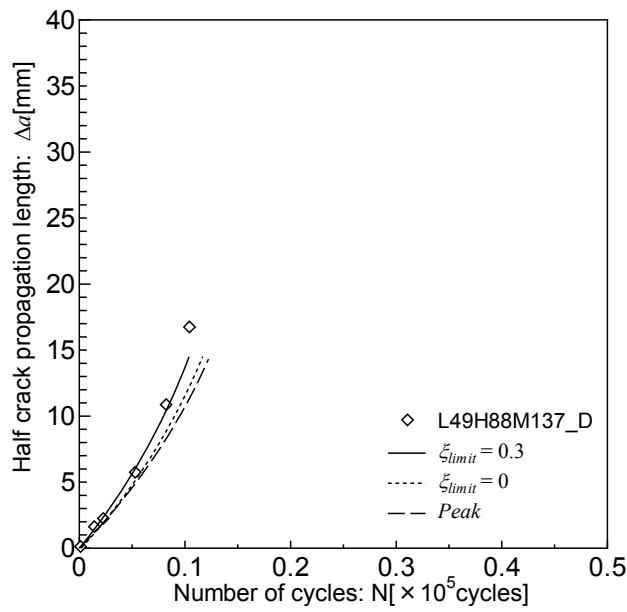
(d) L49H25M137_D



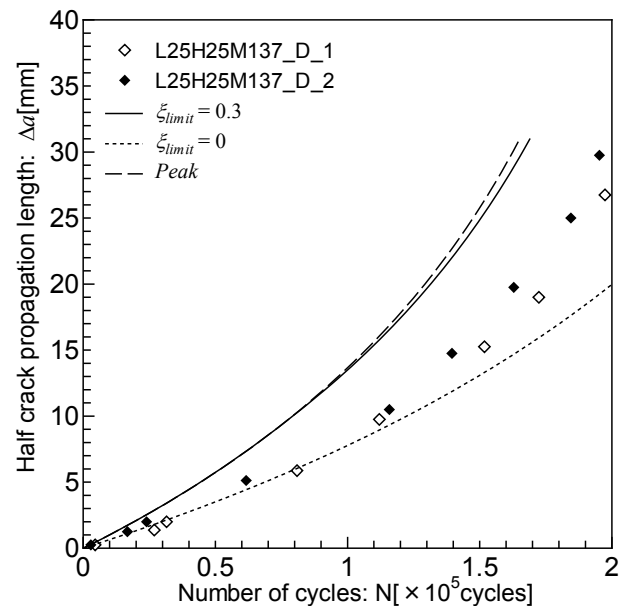
(e) L49H37M137_D



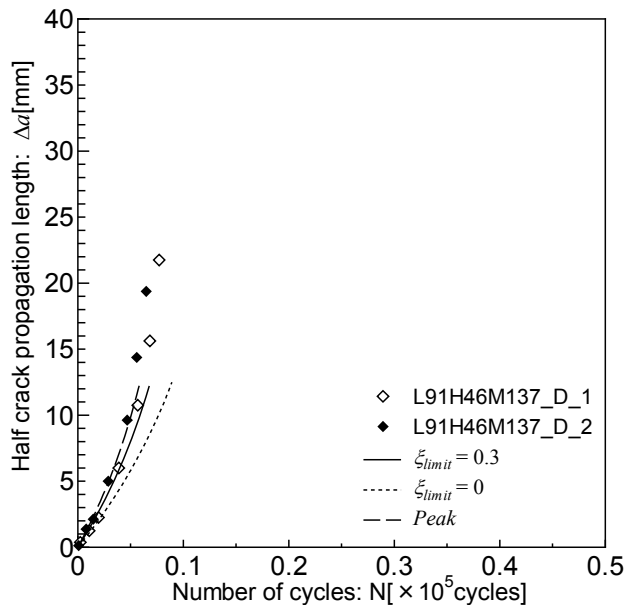
(f) L49H49M137_D



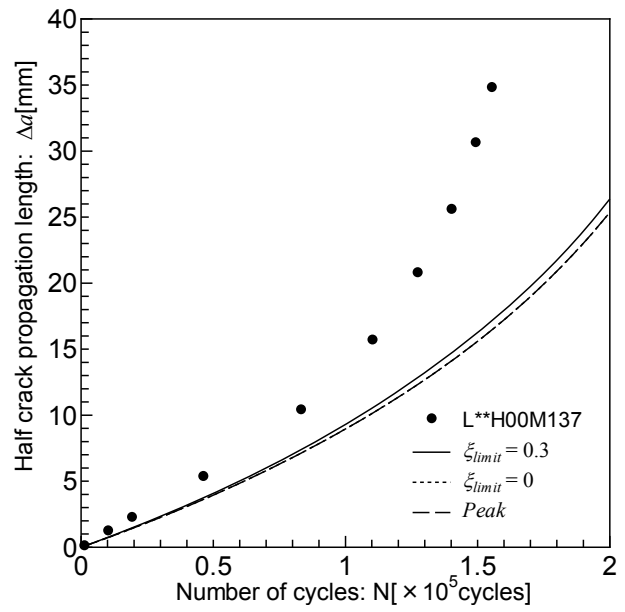
(g) L49H88M137_D



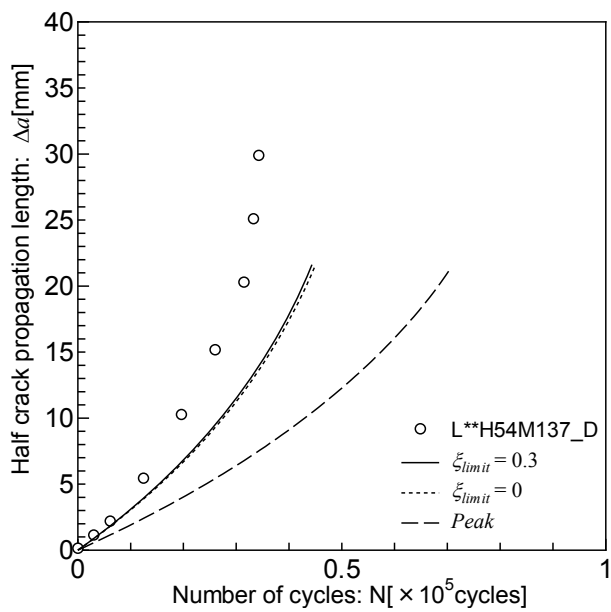
(h) L25H25M137_D



(i) L91H46M137_D

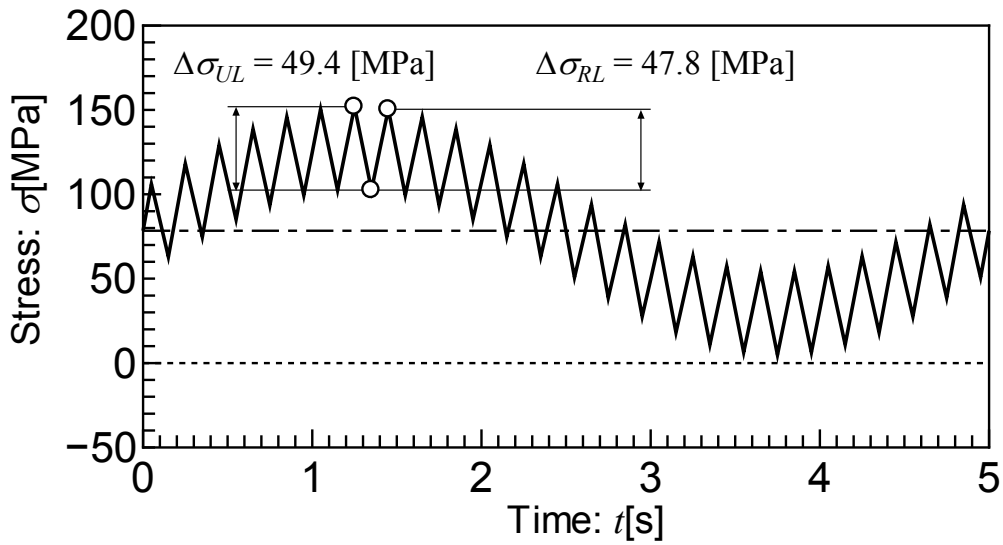


(j) L**H00M137

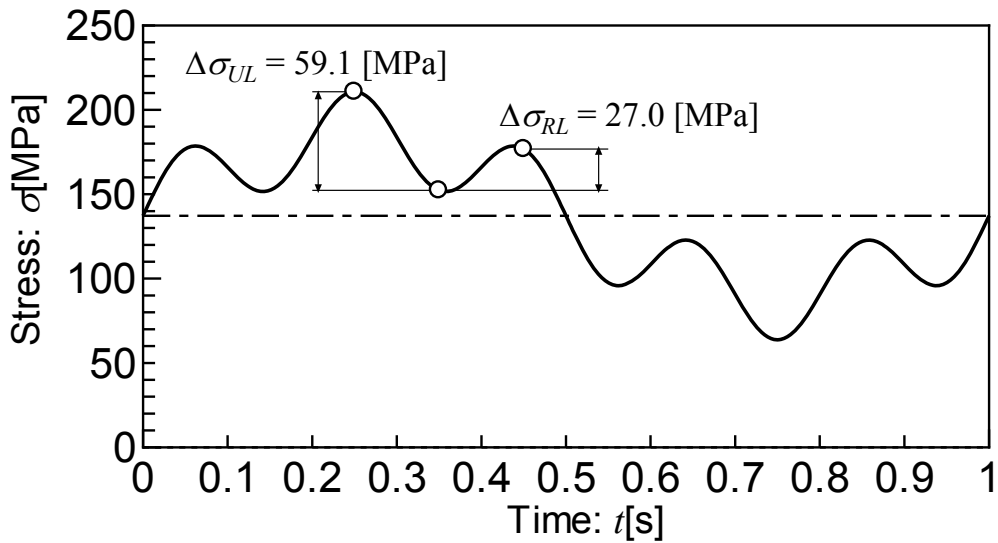


(k) L**H54M137_D

Fig. 3. 36 Comparison of measured crack growth curves with estimated ones for 3rd test.



(a) L49H25M078 for 1st test



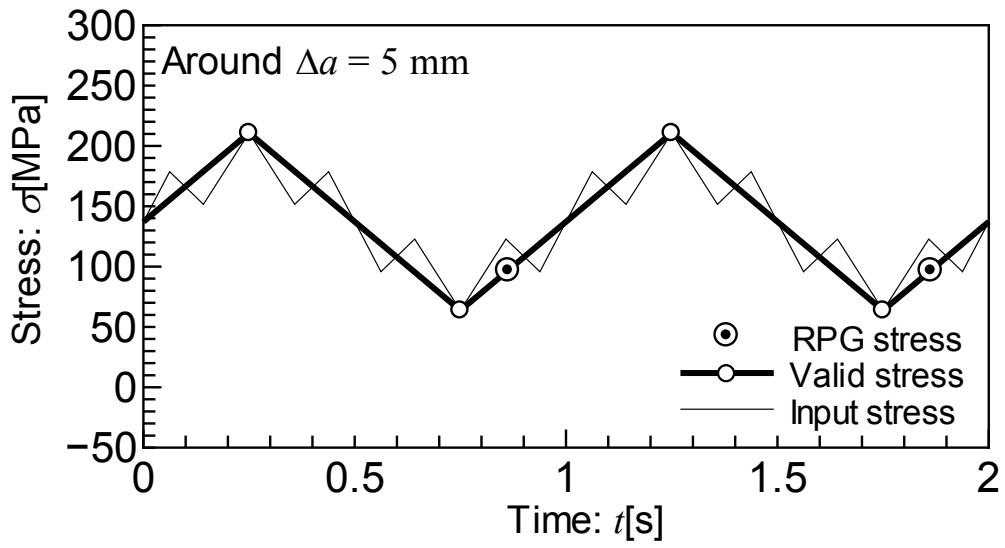
(b) L49H25M137 for 3rd test

Fig. 3. 37 Stress ranges after the maximum stress of two superimposed stress histories.

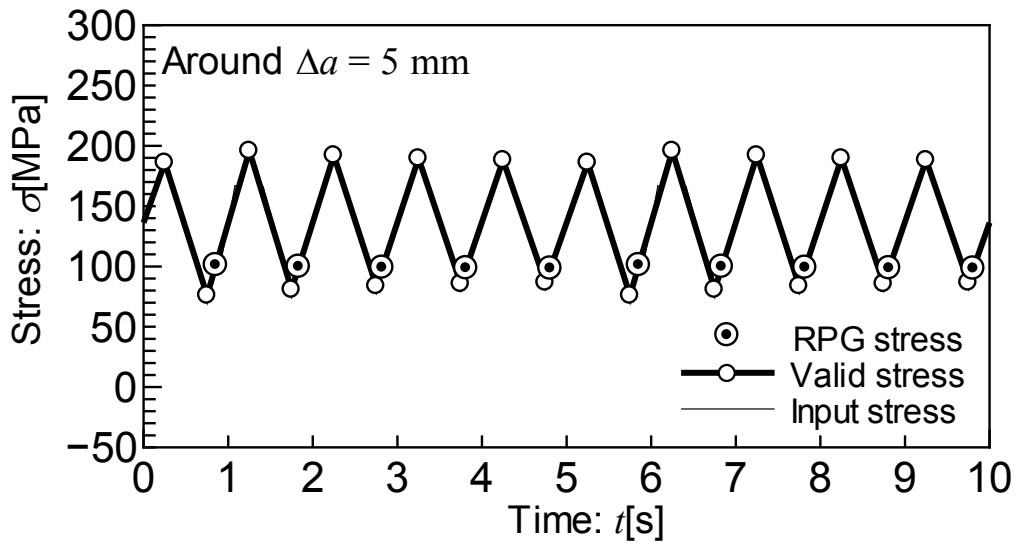
次に第三試験に対する $\xi_{limit} = 0.3$ と設定した疲労亀裂伝播解析で抽出された、疲労亀裂伝播に有効に寄与する応力履歴について検討する。Fig. 3. 38 は、伝播解析中において $\Delta a = 5\text{mm}$ 程度に達した段階において有効応力履歴選択アルゴリズムにより抽出された亀裂伝播に有効な応力履歴である。Fig. 3. 38 (a) より、一定振幅重畳波条件 L49H25M137 に対する有効応力履歴は包絡波形となっている。これは第一試験の Fig. 3. 32 (c) L49H25M078 の結果と異なるが、前述の通り低周波一波当たりの高周波振幅が少ないた

め、合成波の振幅が小さくなったためと考えられる。また、低周波振幅を固定して高周波振幅の大きさを変化させた減衰重畳波条件 Fig. 3. 38 (b)~(f) より、高周波振幅が大きくなるほど、有効応力履歴として採用される高周波成分の割合が多くなることが確認できる。Fig. 3. 36 (c) ~ (g) に示す包絡波形採用時の亀裂成長曲線と併せると、L49H88M137_Dでのみ $\xi_{limit} = 0.3$ の解析結果が最も亀裂伝播が速く、重畳する高周波振幅が亀裂伝播速度の増加に寄与することが考えられる。Fig. 3. 38 (i) より、実測模擬条件 L**H00M137 では、高周波振幅がほぼ存在しないため、Fig. 3. 36 (j) に示すように、有効応力履歴を変化させてもさほど伝播解析の結果は変化しないことが確認できる。これに減衰する高周波振幅を重畳させた条件 Fig. 3. 38 (j) L**H54M137 では多くの高周波振幅を採用していることが分かる。Fig. 3. 36 (k) が示すように、包絡波形を採用した場合は亀裂伝播速度が著しく低下することが分かるものの、この条件においてもどのように有効応力履歴を変化させても依然試験結果より遅い傾向が見られることが分かる。

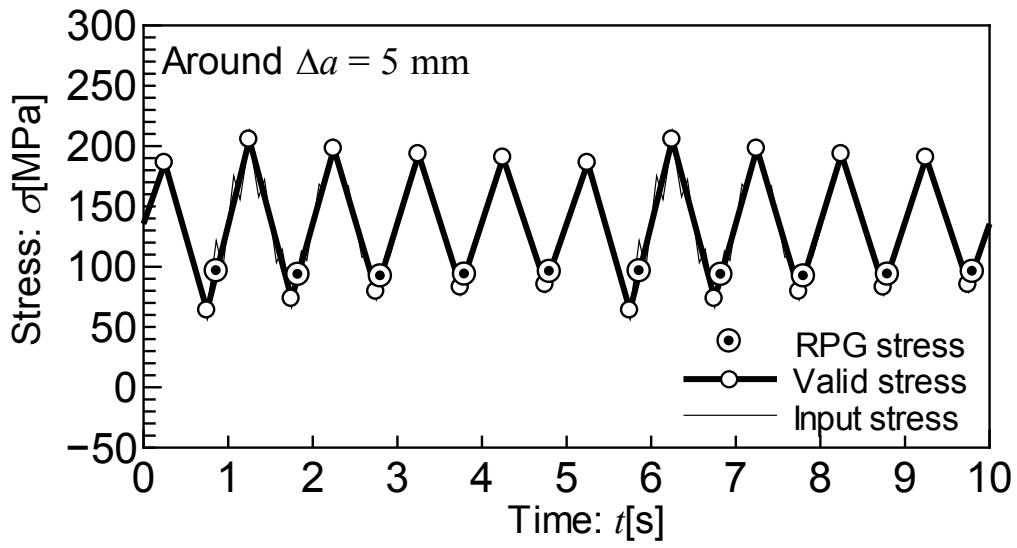
以上三つの試験結果との比較により、本章において提案した有効応力履歴選択アルゴリズムは一定振幅重畳波、減衰重畳波条件いずれの場合においても、亀裂伝播に有効な応力履歴を抽出でき、比較的良好な精度で疲労亀裂伝播解析が行えるものと考えられる。ランダム波形に近い実測模擬条件に関しては、類似の応力履歴条件下における疲労試験を行い、有効応力履歴選択アルゴリズムの妥当性について検討を行う。



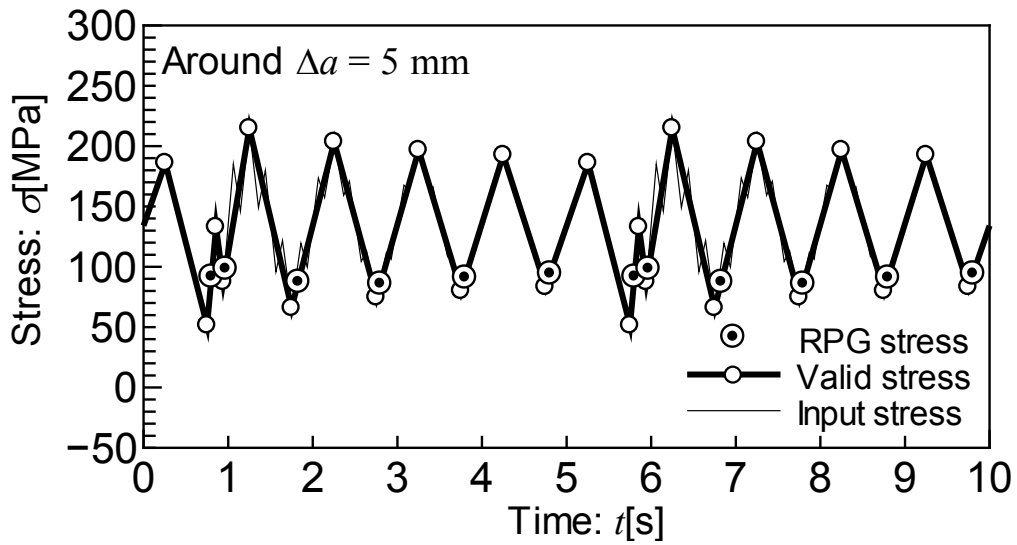
(a) L49H25M137



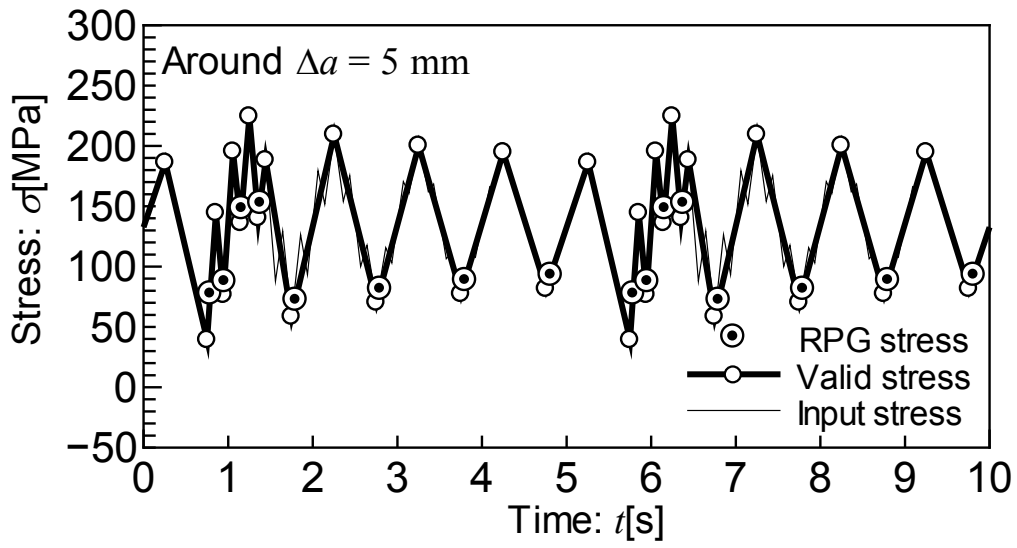
(b) L49H12M137_D



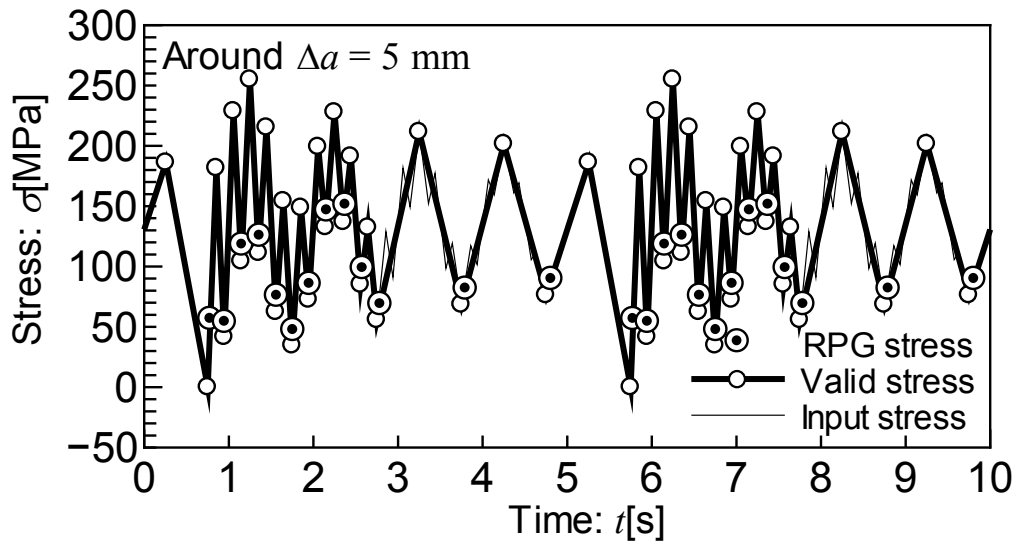
(c) L49H25M137_D



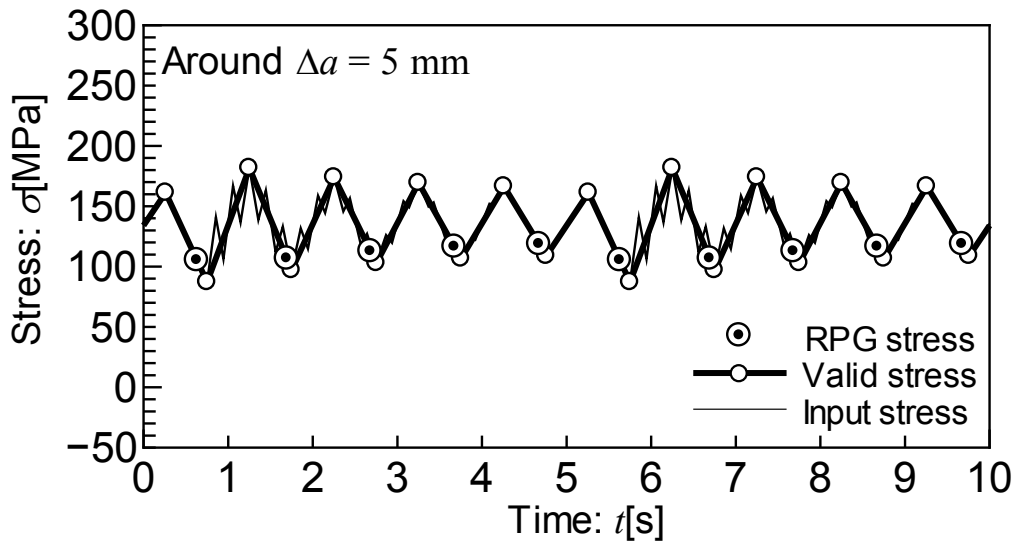
(d) L49H37M137_D



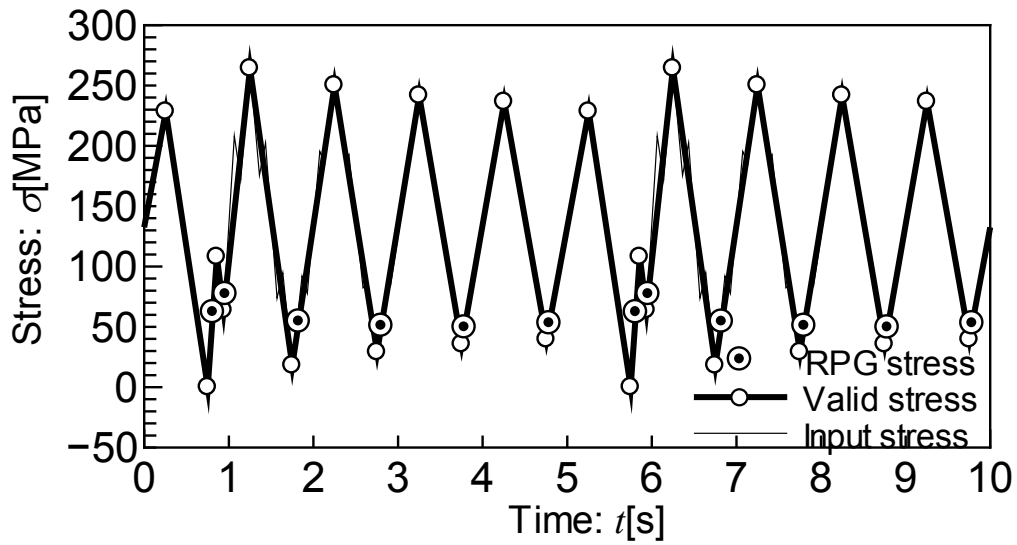
(e) L49H49M137_D



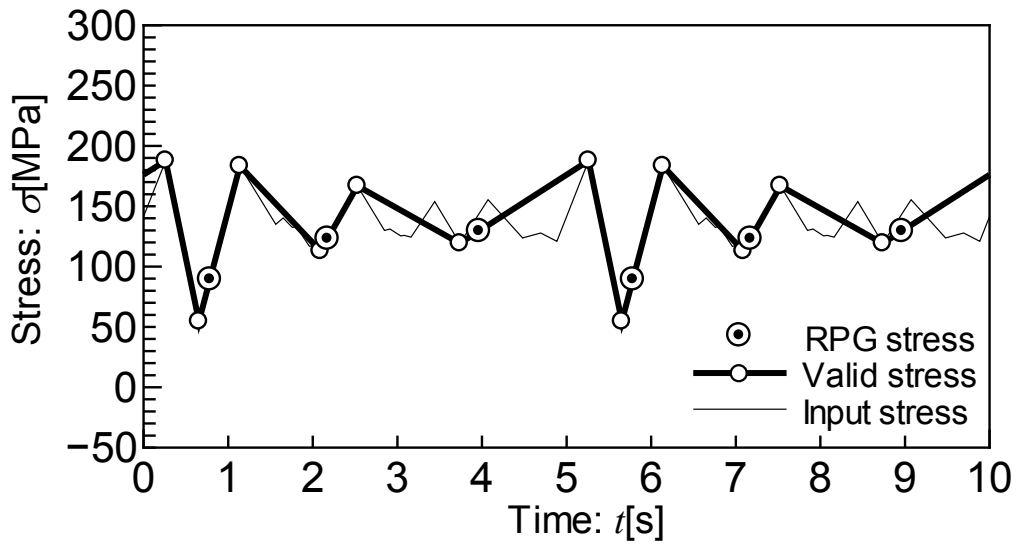
(f) L49H88M137_D



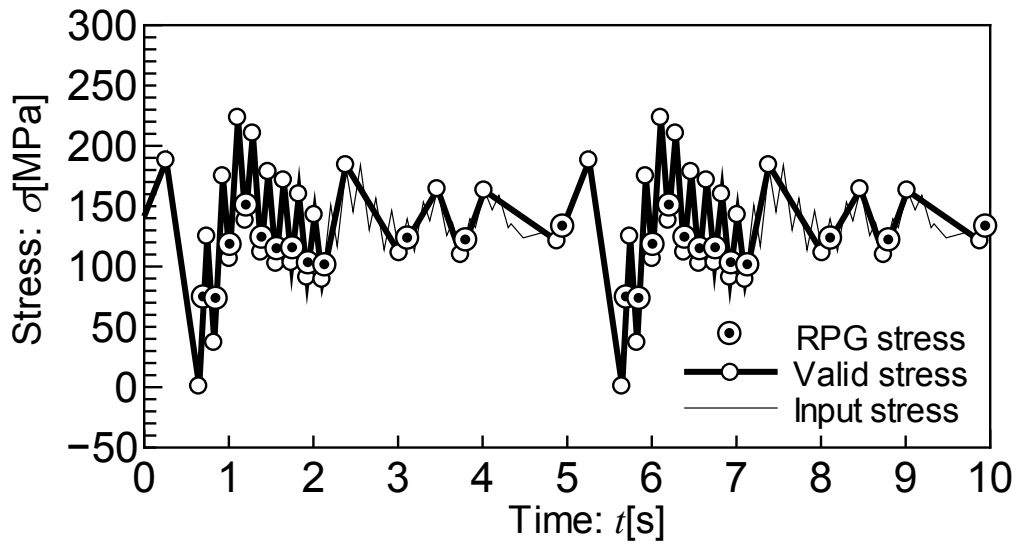
(g) L25H25M137_D



(h) L91H46M137_D



(i) L**H00M137

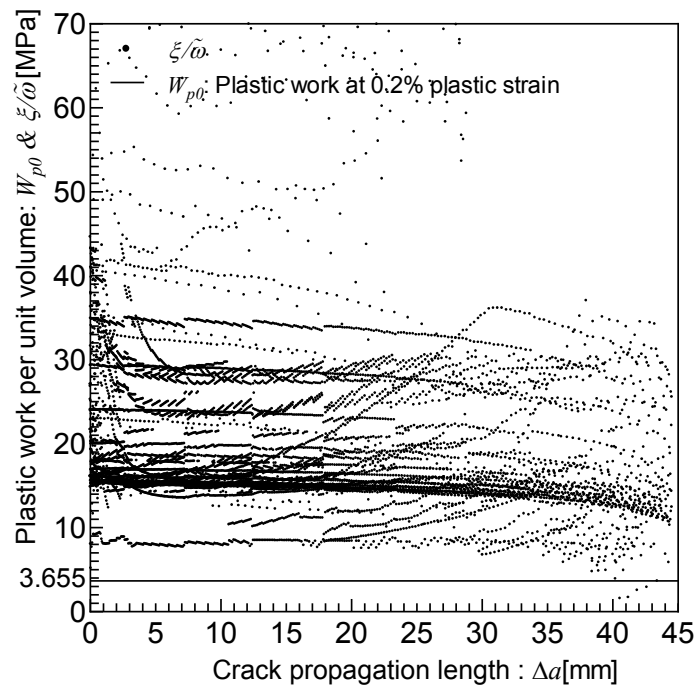


(j) L**H54M137_D

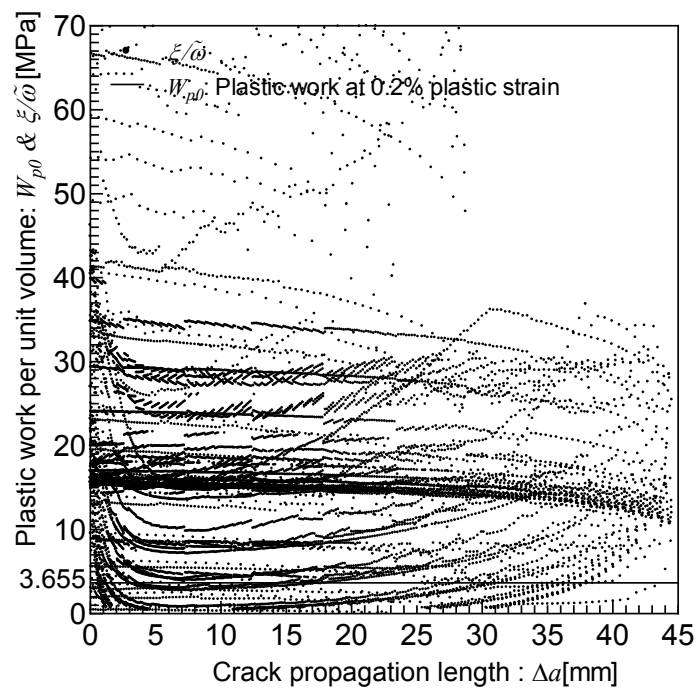
Fig. 3. 38 Examples of the extracted effective stress sequences for 3rd test.

3.8 有効応力抽出基準値の物理的意味

本研究で提案する疲労亀裂伝播解析に際して設定した有効応力抽出基準値の閾値 ξ_{limit} について考察する。有効応力抽出基準値は、(3.1) 式に示すように、亀裂先端近傍で 1 サイクル中に生じる単位体積当たりの塑性仕事量を両振塑性域で積分した値であるため、これを両振塑性域寸法で除すことで、単位体積当たりの値（両振塑性域内の平均値）に変換できる。単位体積当たりの塑性仕事量は繰返し载荷時の応力 ~ ひずみ線図に描かれるヒステリシスの面積で表される。今、一つの目安として、明確な降伏現象を示さない材料において 0.2%耐力を降伏の目安とする取り扱いも勘案して、弾完全塑性体の塑性ひずみが 0.2%となる時の単位体積当たりの塑性仕事量 W_{p0} をヒステリシスの面積から求め、疲労亀裂伝播解析において各応力グループから算出される ξ から求められる単位体積当たりの塑性仕事量 $\xi/\bar{\omega}$ の値と比較した結果の一例を Fig. 3.39 に示す。Fig. 3.39 の実線は塑性ヒステリシスから算出した第一試験における 0.2%塑性ひずみ時の単位体積当たりの塑性仕事量 W_{p0} を、黒点は重畳応力条件 (L49H88M137_D, L49H49M137_D, L49H25M078, 及び L49H10M078) に対する疲労亀裂伝播解析中に得られた除荷/再負荷両過程における有効応力抽出基準値 ξ を両振塑性域寸法 \bar{a} で除した値をそれぞれ示している。また、(a) は $\xi_{limit}=0.3$ の比較結果を、(b) は $\xi_{limit}=0$ の比較結果を示している。(a) では殆どの応力グループにおいて $\xi/\bar{\omega}$ の値は W_{p0} (=3.655MPa) を上回っており、一方、(b) では 0 にごく近い値においても $\xi/\bar{\omega}$ が存在していることが分かる。本研究における疲労亀裂伝播解析では材料の応力 ~ ひずみ関係を等方硬化弾完全塑性体と理想化していることに対し、供試材料は加工硬化挙動を示すことを考慮すれば、 $\xi_{limit}=0$ の場合の解析において生じている 0 にごく近い塑性仕事は、実際の材料においては弾性変形域となり塑性仕事が生じない領域であると考えられる。以上より、本研究において設定した有効応力抽出基準値の閾値は、疲労亀裂伝播には亀裂先端近傍において両振塑性域が生じ、伝播の駆動源を供給する必要があるとの、Toyosada ら²⁴⁾の考え方を支持している。また、(a) において、 W_{p0} は $\xi/\bar{\omega}$ の値の分布の最小値付近とはなっていないが、これは 0.2%塑性ひずみ時の塑性仕事量 W_{p0} が必ずしも超えるべき閾値の値であるわけではないことや、本研究で採用した各応力条件の高周波振幅の大きさの設定条件に限りがあるためである。



(a) $\xi_{limit} = 0.3$



(b) $\xi_{limit} = 0$

Fig. 3. 39 Comparison of the calculated plastic work by unit region with W_{p0} for 1st test.

Toyosada ら²⁶⁾が実施した応力拡大係数範囲漸減試験 (ΔK_{th} 試験) に対して、疲労亀裂伝播解析を行い、同試験中の有効応力抽出基準値 ξ の推移を求めた結果を Fig. 3. 40 に示す。Fig. 3. 40 より、本章の疲労亀裂伝播解析で設定した $\xi_{limit} = 0.3$ という値は、応力拡大係数範囲漸減試験における ξ の最小値とほぼ同程度であった。ここで参照した応力拡大係数範囲漸減試験では、疲労亀裂伝播速度 da/dN が 1.0×10^{-11} [m/cycle] という極低伝播速度領域まで、 $\Delta K_{RPG} \sim da/dN$ 関係に下限界値は生じていなかったことから、 ξ_{limit} を導入することが ΔK_{RPG} 値に下限界値が存在することを示唆しているのではないと考えられる。

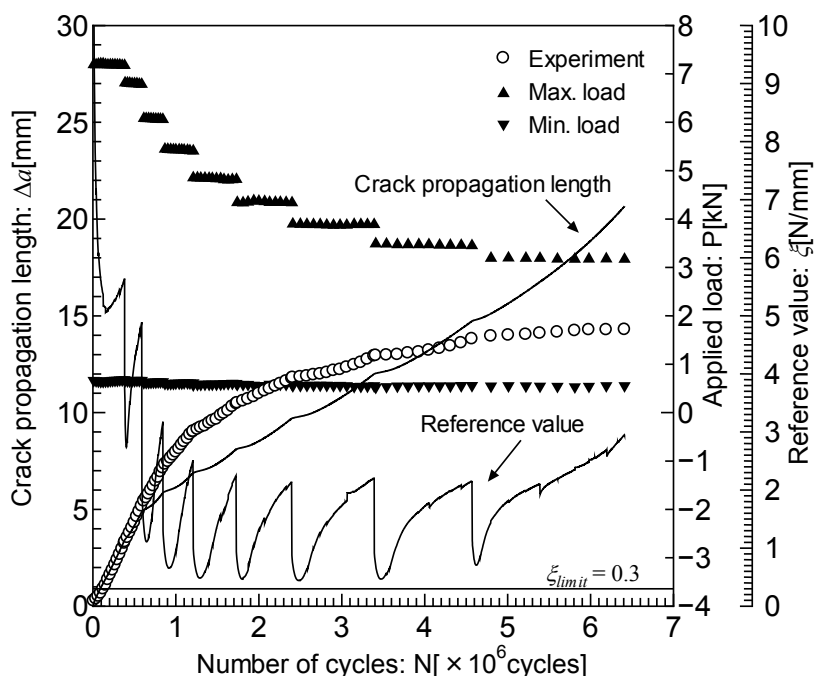


Fig. 3. 40 The relation between parameter ξ and loading cycles.

3.9 結言

本章ではまず、他研究者らにより実施された重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験について紹介し、同試験に対して従来の疲労亀裂成長シミュレーションによる疲労亀裂伝播解析を行い、亀裂進展に有効な応力履歴の選択の必要性について述べた。そして有効応力履歴選択のアルゴリズムについてその仕組みを解説し、同アルゴリズムを実装させた疲労亀裂伝播解析を実施し、疲労亀裂伝播試験の結果との比較を通して同解析手法の妥当線の検証を行った。以下に本章の結論を述べる。

- 重畳応力履歴に対して、入力応力履歴を順々に疲労亀裂伝播解析しても試験結果と良好な一致は得られなかった。
- 両振塑性域内で消費される塑性仕事に相当する値を有効応力抽出基準値として閾値を設定し、重畳応力履歴から亀裂進展に有効な応力履歴を連続的に抽出することのできるアルゴリズムを作成した。
- 同アルゴリズムを実装して RPG 応力基準の亀裂伝播則を用いて疲労亀裂伝播解析を行った結果、一定振幅重畳波応力履歴下、及び減衰重畳波応力履歴下において実施された疲労亀裂伝播試験の結果と良好な一致を示した。
- 疲労亀裂伝播解析において設定した有効応力抽出基準値の閾値の物理的意味に関して考察を行い、
- 0.2%塑性ひずみ時の単位体積当たりの塑性仕事量と閾値を設定した場合の有効応力抽出基準値から算出される両振塑性域内で消費される単位体積当たりの塑性仕事量、及び閾値を設定しなかった場合の同値の疲労亀裂伝播解析における推移を比較した結果、閾値を設定した場合の塑性仕事量はおおよそ全て 0.2%塑性ひずみ時の塑性仕事量を上回っている一方で、閾値を設定しなかった場合では 0.2%塑性ひずみ時の塑性仕事量を下回っていた。
- 応力拡大係数範囲漸減試験に対して、疲労亀裂伝播解析を実施し、試験中における有効応力抽出基準値の値の推移を求めた結果、亀裂伝播速度が 1.0×10^{-11} [m/cycle] という極低伝播速度領域まで、本章で設定した閾値 $\xi_{limit} = 0.3$ を下回ることはなく、 $\Delta K_{RPG} \sim da/dN$ 関係に下限界値は生じていなかったことから、 ξ_{limit} を導入することが ΔK_{RPG} 値に下限界値が存在することを示唆しているのではないと考えられる。

第4章 重畳応力履歴下における平均応力の伝播挙動 に及ぼす影響

4.1 緒言

前章で採り上げた三つの重畳応力条件下における疲労試験では、高周波成分振幅の大小が亀裂伝播挙動に与える影響に関しては検討されたものの、全ての試験条件において平均応力は一定であり、平均応力が亀裂伝播挙動に与える影響に関しては未検討である。現実の機械・構造物に作用する応力履歴は、航空機の翼に作用する G-A-G (Ground to Air to Ground) 荷重や、船舶における満載状態とバラスト状態の繰返しなど、平均応力が著しく変動する場合がある。

このような応力履歴中の平均応力の変動が疲労寿命に及ぼす影響を検討した研究の一例として、堀川ら⁶⁾は、Fig. 4.1 に示す大型ディーゼル機関のピストンクラウンに作用する応力履歴を模擬した間欠応力履歴条件下における疲労試験を実施し、平均応力が変動する場合には一定平均応力の結果を用いて疲労寿命を評価すると危険側の結果となることを示している。

応力波形カウントを行う際に、修正 Goodman 線図に基づく (4.1) 式を用いて任意の変動応力を両振応力状態 ($R = -1$) に変換することができる。

$$\sigma_a^{(m=0)} = \frac{\sigma_{a_0}}{1 - \sigma_{m_0} / \sigma_B} \quad (4.1)$$

ただし、 σ_{a_0} : 元々の応力振幅

σ_{m_0} : 元々の平均応力

$\sigma_a^{(m=0)}$: 平均応力を 0 に変換した (両振状態の) 応力振幅

σ_B : 引張強さ

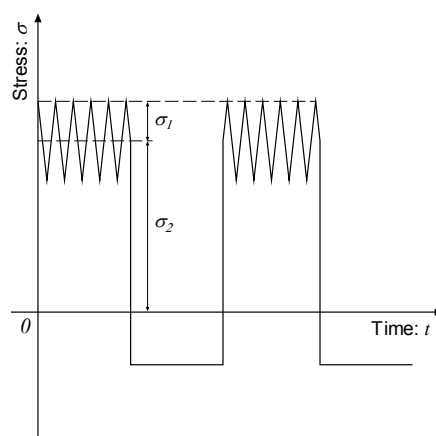


Fig. 4.1 Applied intermittent stress configuration.

しかしながら、高杉ら⁴⁸⁾は重畳応力履歴下における疲労試験を実施し、種々の波形計測法と

(4.1) 式による平均応力変換を用いて疲労寿命評価の比較を行った結果、平均応力の影響は複雑であり、修正 Goodman 線図を用いて評価するには種々の問題が存在すると報告している。

このように平均応力が変動する応力履歴下における平均応力が疲労強度に及ぼす影響の評価手法は確立されておらず、ましてや平均応力が変化する重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播挙動については未知な部分が多い。

本章では、種々の平均応力条件を設定した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験を実施し、重畳応力履歴下において平均応力が疲労亀裂伝播に与える影響について検討する。そして、前章で述べた不規則な応力履歴下から疲労亀裂伝播に有効な応力履歴を抽出するアルゴリズムを実装した疲労亀裂成長シミュレーションにより疲労亀裂伝播解析を実施し、同手法の妥当性の検証を行う。

4.2 種々の平均応力条件における重畳応力履歴下疲労亀裂伝播試験

4.2.1 試験片の材料・形状

本試験における供試鋼材は軟鋼 SM400B であり、鋼材の機械的性質を Table 4.1 に、化学組成を Table 4.2 にそれぞれ示す。試験片形状は Fig. 4.2 に示す中央貫通亀裂試験片であり、加工亀裂先端はワイヤカットにて幅 0.2 mm で加工した。

Table 4.1 Mechanical properties.

Yield stress [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
299	452	33

Table 4.2 Chemical composition (wt%).

		C	Si	Mn	P	S
Material		0.15	0.20	1.05	0.009	0.002
Rule	Max.	0.20	0.35	1.50	0.035	0.035
SM400B	Min.	-	-	0.60	-	-

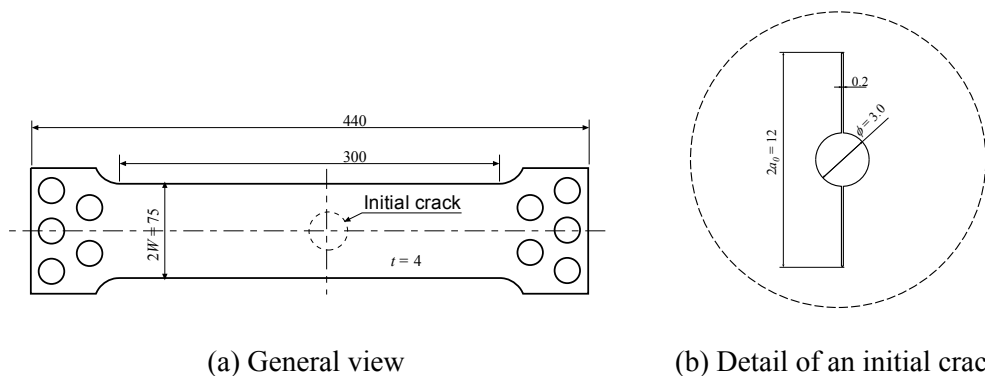


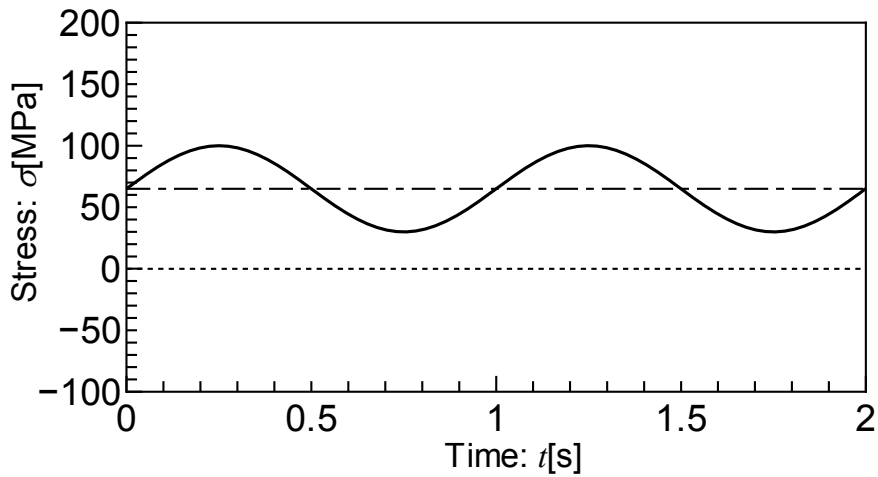
Fig. 4. 2 Specimen configuration used.

4.2.2 载荷条件

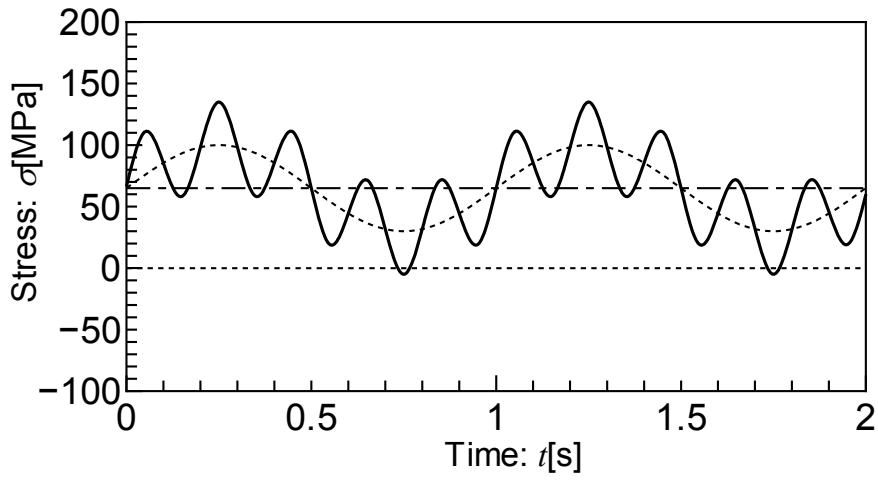
载荷条件を Table 4. 3 に、载荷波形を Fig. 4. 3 にそれぞれ示す. 試験 ID L4t は低周波の一定応力振幅のみを付与した試験条件である. これに低周波と同じ大きさの振幅で 5 倍の周波数の高周波成分を重畳させた試験条件が試験 ID Sa4t_M であり、この最大応力と最小応力を連ねた包絡波を载荷した試験条件が試験 ID Pa4t_M である. さらに、Sa4t_M, Pa4t_M の平均応力を 30MPa 増加、減少させた試験条件が試験 ID Sa4t_H, Pa4t_H, そして試験 ID Sa4t_L, Pa4t_L である. そして、さらに平均応力の低い領域での亀裂伝播挙動を検討するため、Sa4t_M からさらに平均応力を 45, 60MPa 減少させた試験条件が試験 ID Sa4t_LL, Sa4t_LLL である. 続いて、平均応力変動条件として、Sa4t_H と Sa4t_L を低周波応力サイクル数 20,000 回毎に繰返し载荷した試験条件が試験 ID Va4t_HL であり、さらに平均応力を 65→95→65→35MPa と階段状に変動する 3 段階平均応力変動条件が試験 ID Va4t_HML である. そして、実測波模擬条件として、3.2.3 で述べた疲労亀裂伝播試験における試験 ID: L**H54M137_D の载荷波形の最大応力を 70 MPa になるように全体の波形を縮小し、平均応力を 65 MPa に合わせた条件が試験 ID: Ra4tD_M であり、この平均応力を 65→95→65→35MPa と階段状に変動させた条件が試験 ID Ra4tD_HML である. なお、Table 4. 3 に示した応力は目標値であり、実際に試験において計測された応力は数%の誤差を含んでいたため、後述の疲労亀裂伝播解析では実際に計測された応力履歴を用いて計算を実施した.

Table 4. 3 Applied stress conditions.

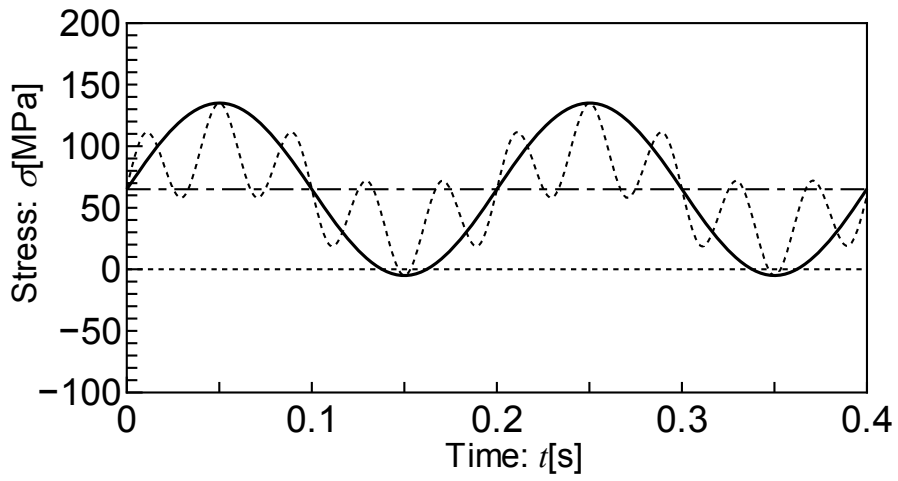
Test ID	Amplitude [MPa]		Mean [MPa]	Cycle term
	High	Low		
L4t	± 0	± 35	65	Throughout
Sa4t_M	± 35	± 35		
Pa4t_M	± 0	± 70		
Sa4t_H	± 35	± 35	95	
Pa4t_H	± 0	± 70		
Sa4t_L	± 35	± 35	35	
Pa4t_L	± 0	± 70		
Sa4t_LL	± 35	± 35	20	
Sa4t_LLL			5	
Va4t_HL			95 \rightarrow 35	
Va4t_HML			65 \rightarrow 95 \rightarrow 65 \rightarrow 35	20,000
Ra4tD_M	Random		65	Throughout
Ra4tD_HML			65 \rightarrow 95 \rightarrow 65 \rightarrow 35	20,000



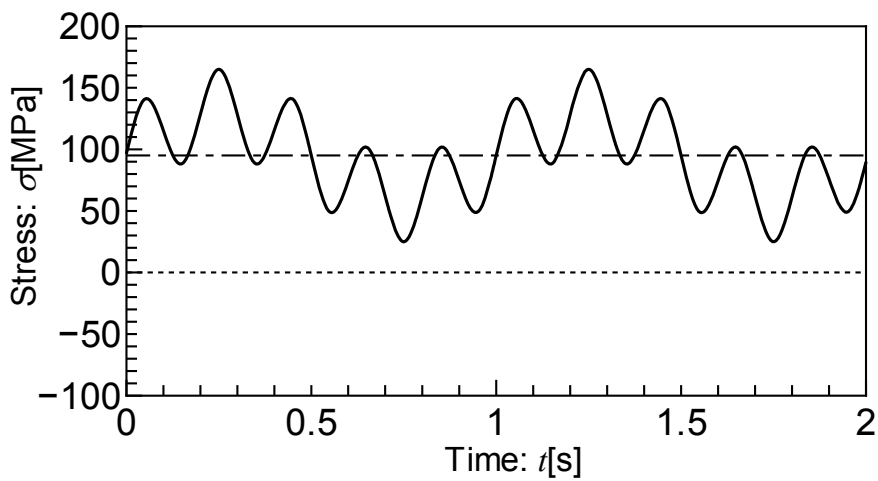
(a) L4t



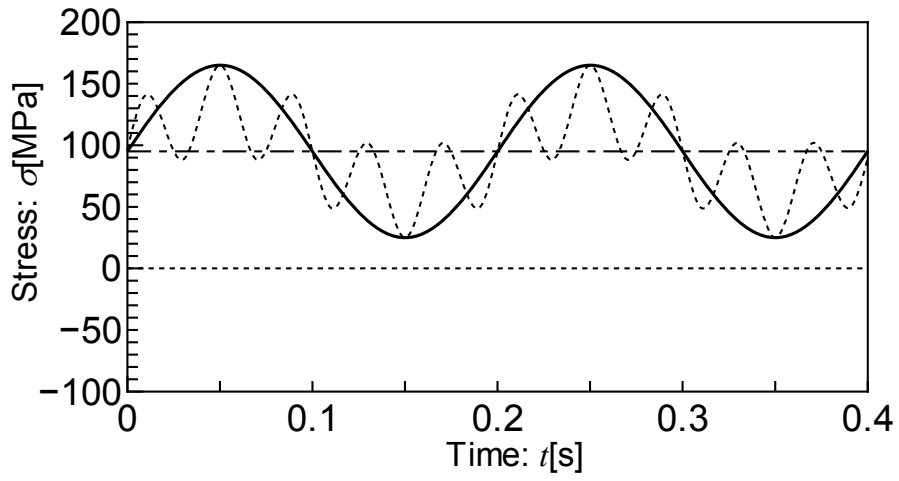
(b) Sa4t_M



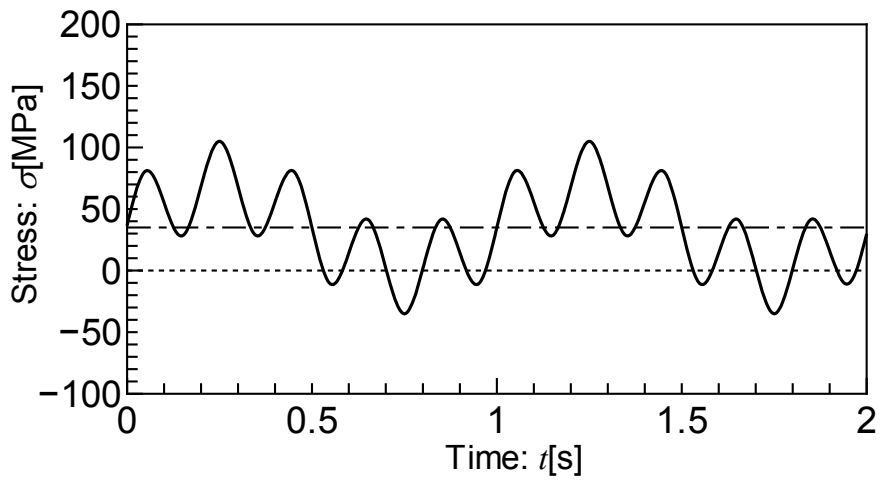
(c) Pa4t_M



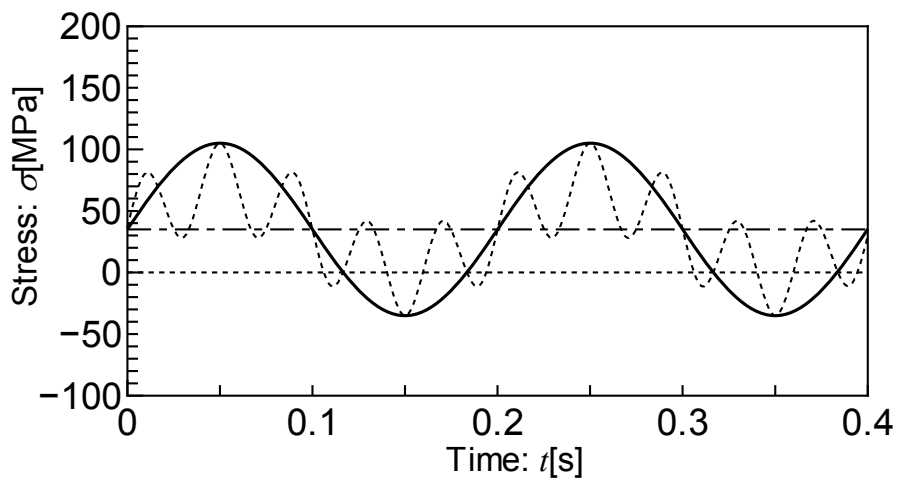
(d) Sa4t_H



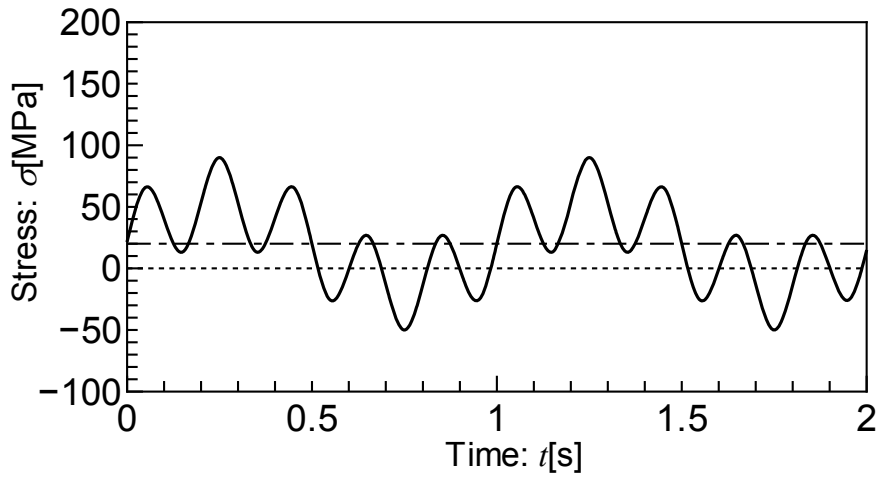
(e) Pa4t_H



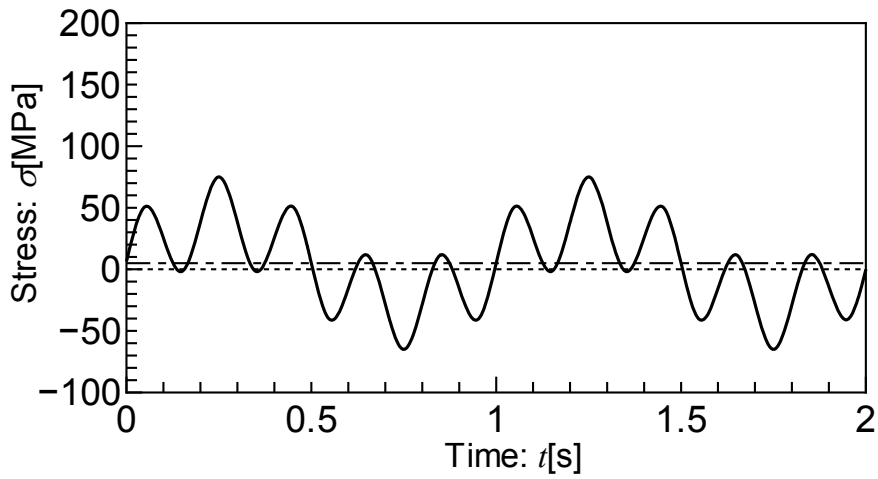
(f) Sa4t_L



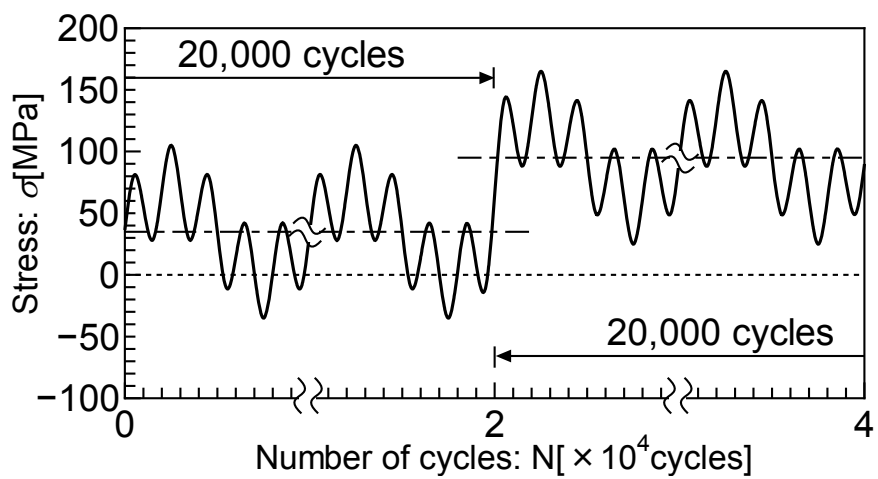
(g) Pa4t_L



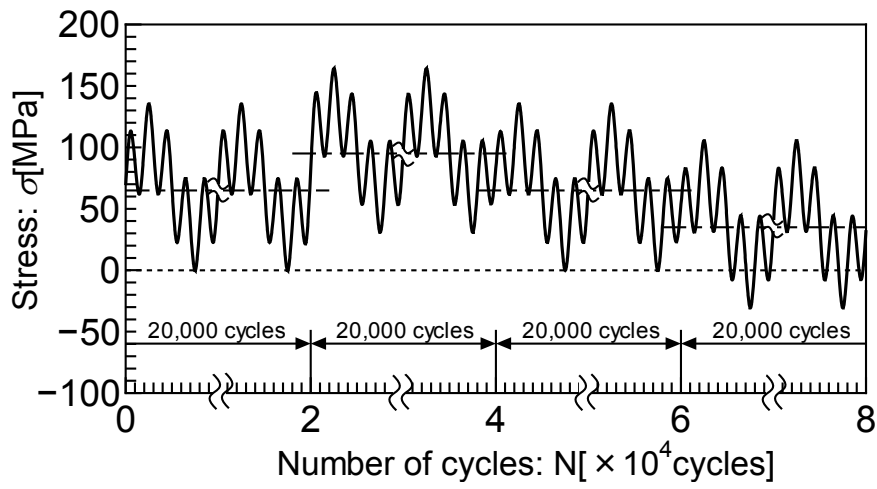
(h) Sa4t_LL



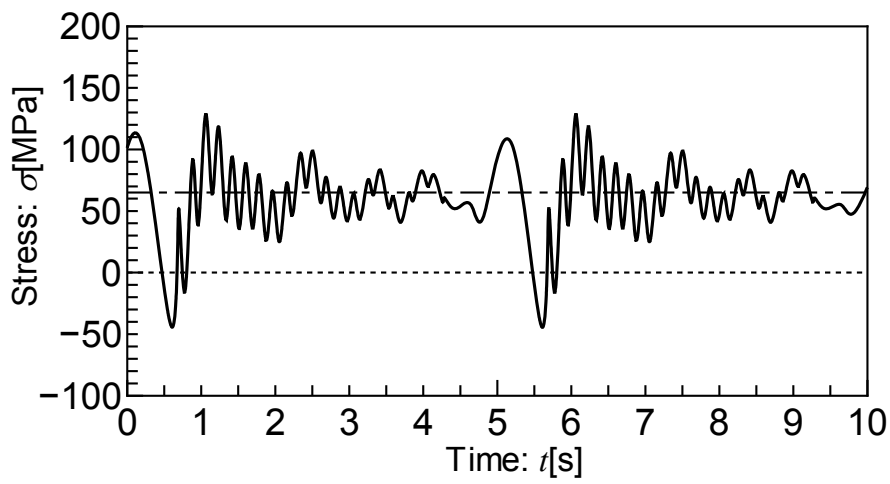
(i) Sa4t_LLL



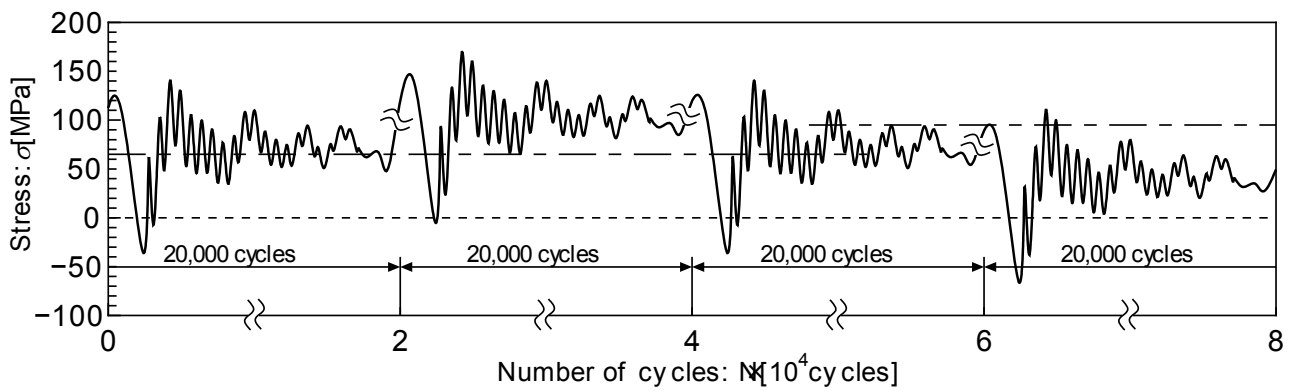
(j) Va4t_HL



(k) Va4t_HML



(k) Ra4tD_M



(l) Ra4tD_HML

Fig. 4. 3 Applied stress sequences.

4.2.3 試験結果

Fig. 4. 3 に示した各試験条件の疲労亀裂伝播量と低周波サイクル数の関係を Fig. 4. 4 に示す. 各試験条件における疲労亀裂成長曲線は疲労亀裂始点から約 1mm 分を除外し, 疲労亀裂先端が試験片中央から 7mm 地点に達した時点を原点として描画している. 本試験の疲労亀裂伝播量はコンプライアンス法により全亀裂長を測定し, それを半分にすることで半亀裂長 a を求めた. なお, コンプライアンス法による疲労亀裂長さ測定は, 繰り返し载荷中のコンプライアンス変化が比較的大きい CT 試験片に対しては広く適用されているが, CCT 試験片に対しても適切に亀裂長さを同定できた実績⁴⁹⁾もあることから, これを適用して亀裂長さを測定した.

Fig. 4. 4 より, 以下に述べるような傾向が確認できる.

- 1) いずれの平均応力においても重畳波条件の方が包絡波条件より伝播が速い. (疲労亀裂伝播長さ $\Delta a = 5$ mm 時点で比較すると, サイクル数比 $Sa4t_H / Pa4t_H = 0.655$, $Sa4t_M / Pa4t_M = 0.627$, $Sa4t_L / Pa4t_L = 0.752$)
- 2) 平均応力毎で比較すると, 重畳波条件, 包絡波条件いずれにおいても平均応力が高い方が伝播が速い. (同様に $\Delta a = 5$ mm 時点, $Sa4t_H / Sa4t_M = 0.977$, $Sa4t_L / Sa4t_M = 2.535$, $Sa4t_LL / Sa4t_M = 2.783$, $Sa4t_LLL / Sa4t_M = 4.190$. また, $Pa4t_H / Pa4t_M = 0.935$, $Pa4t_L / Pa4t_M = 2.113$)
- 3) $Sa4t_H$, $Sa4t_M$, $Sa4t_L$, $Sa4t_LLL$ はそれぞれ平均応力が 30MPa ずつ異なるが, $Sa4t_H$ と $Sa4t_M$ の伝播速度の差は殆どなく, $Sa4t_M$ と $Sa4t_L$ の差が最も大きい.

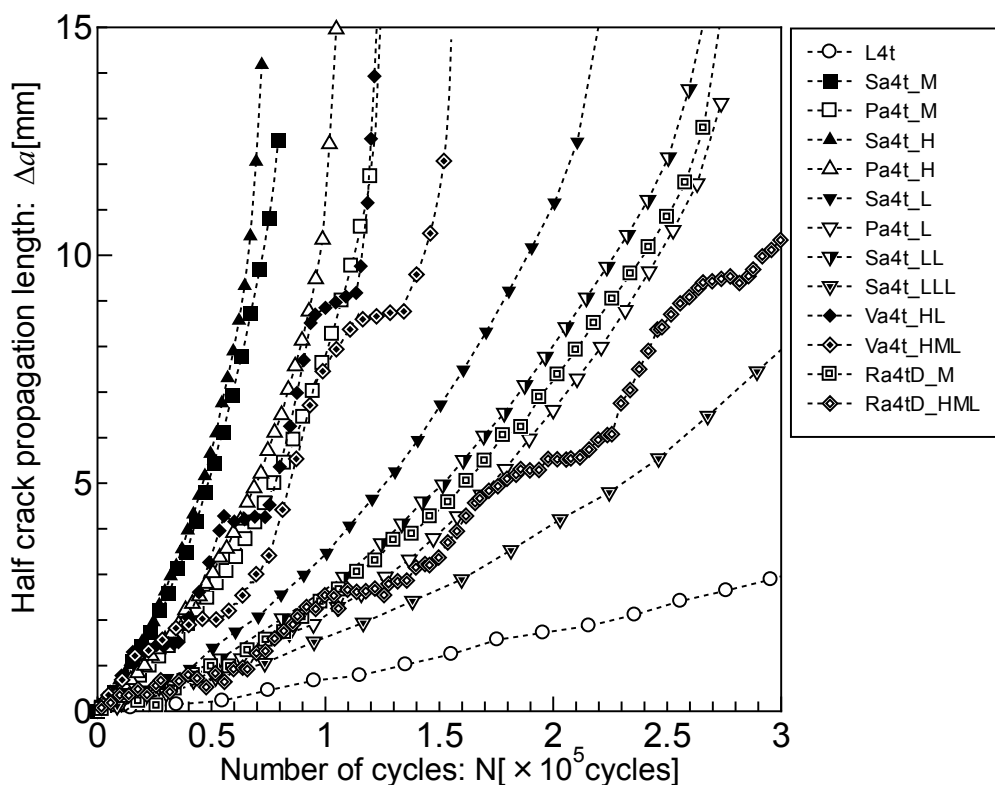


Fig. 4. 4 Measured fatigue crack growth curves under various stress conditions.

4.3 疲労亀裂伝播解析

本節では、4.2 節で述べた種々の平均応力条件を設定した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験で設定した载荷条件下における疲労亀裂伝播解析を行った結果を述べる。始めに、供試材に対する RPG 基準の疲労亀裂伝播則 (1.6) 式 of 材料定数 C, m の推定を行い、次に、前章で述べた有効応力履歴選択アルゴリズムを実装した疲労亀裂伝播解析を行い、その結果について考察を行う。

4.3.1 伝播則の材料定数 C 及び m の推定

疲労亀裂成長シミュレーションに必要な RPG 応力基準の疲労亀裂伝播則 (1.6) 式 of 材料定数 C, m の値は、一定応力振幅試験 (試験 ID: L4t, Pa4t_M, Pa4t_H, Pa4t_L) における亀裂先端近傍のヒステリシスループ計測結果等の計測値を基に、Toyosada ら²⁴⁾ の手法を適用して Fig. 4.5 に示す $\Delta K_{RPG} \sim da/dN$ 関係を推定し、それらのデータから最小二乗法による近似曲線を引くことにより以下の値を得た。

$$C = 1.932 \times 10^{-10}, m = 2.091 \quad (4.2)$$

ただし, K 値の単位 $[\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}]$, da/dN の単位 $[\text{m}/\text{cycle}]$.

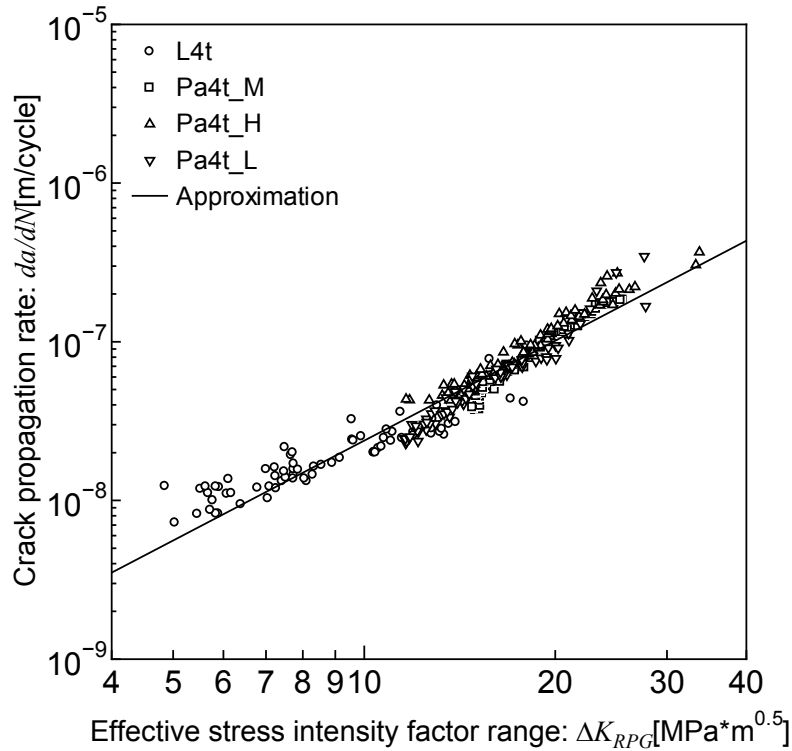


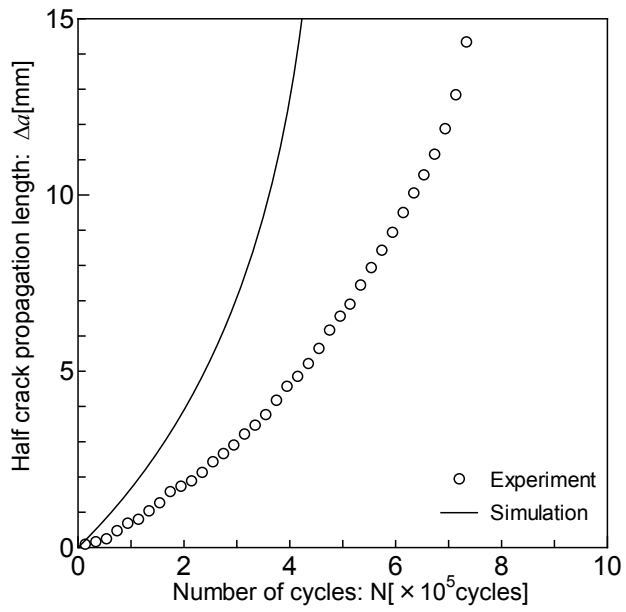
Fig. 4.5 Relation between ΔK_{RPG} and da/dN .

4.3.2 有効応力履歴選択アルゴリズムを用いた疲労亀裂伝播解析

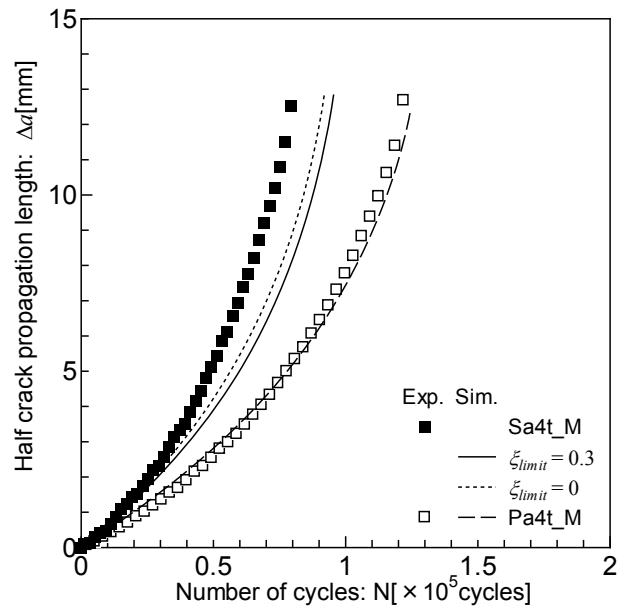
前章で提案した有効応力履歴選択アルゴリズムを実装させた疲労亀裂成長シミュレーションにより, 疲労亀裂伝播解析を実施した. 有効応力抽出基準値の閾値の値は, 前章の解析時と同じく $\xi_{limit} = 0.3 [\text{N}/\text{mm}]$ とした. その他の伝播解析に必要となる各種定数は 4.2 節において示した値を用いた.

Table 4.3 に示した試験条件に対して疲労亀裂伝播解析を実施した結果得られた亀裂成長曲線と試験結果の比較を Fig. 4.6 に示す. 重畳応力条件については, 3.7 節と同様に $\xi_{limit} = 0$ と設定した場合と, 有効応力履歴としてピーク波形を採用した場合の解析結果も, 比較のために描画している. また, 試験 ID: Sa4t_M, Sa4t_H, Sa4t_L においてはピーク波形とそれぞれの包絡波条件 (Pa4t_M, Pa4t_H, Pa4t_L) の応力波形の差がほぼ 0 であるため, 包絡波条件の結果のみを示している.

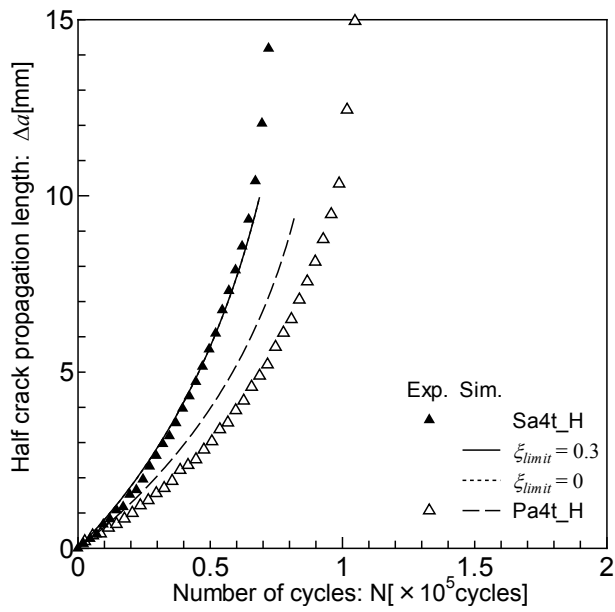
Fig. 4. 6 より，一定振幅条件である (a) L4t では解析結果の亀裂伝播速度が試験結果よりも速い傾向が確認できる．また，重畳波条件の結果を見ると，全体的に包絡波を有効応力履歴として採用した場合は亀裂伝播速度が小さい傾向が見られる．これは，節に示した第三試験の結果とは逆の傾向である．各条件の結果を詳細に考察すると，(b) Sa4t_M や (c) Sa4t_H 等の ΔK_{RPG} が比較的大きいと考えられる試験条件では，解析結果の亀裂伝播速度がやや遅い傾向が見られる． ΔK_{RPG} が比較的小さいと考えられる(a) L4t, (d) Sa4t_L, (e) Sa4t_LL, (f) Sa4t_LLL では解析結果が安全側となっていることを勘案すると，これらの傾向は伝播則の定数 C, m の精度に依るものと推測される．しかしながら，本試験における $\Delta K_{RPG} \sim da/dN$ 関係は一定振幅応力条件から取得されており，応力拡大係数範囲漸減試験（いわゆる ΔK_{th} 試験）に比べて ΔK_{RPG} の範囲が狭いことや，一般的に疲労試験では試験結果のバラツキが少ないことを考慮すれば，本手法による疲労亀裂伝播解析は良好な推定ができていると考えてよかろう．また， ΔK_{RPG} の値が幅広く分布していると思われる平均応力変動条件 (g) Va4t_HL, (h) Va4t_HML, (j) Ra4tD_HML では，良好な推定結果が得られている．解析終盤に解析結果の亀裂伝播速度が試験結果に比べて増加しているのは，本研究における疲労亀裂成長シミュレーションでは材料の応力 ~ ひずみ関係に等方硬化弾完全塑性体を想定しているため，実際よりも亀裂伝播遅延効果の影響が小さいためであると考えられる．また，実測波模擬条件 (i) Ra4tD_M, (j) Ra4tD_HML においても良好な推定結果が得られていることから，第 4 章において提案した有効応力履歴選択アルゴリズムを実装した疲労亀裂成長シミュレーションは重畳応力履歴下における平均応力影響も定量的に評価ができるものと考えられる．



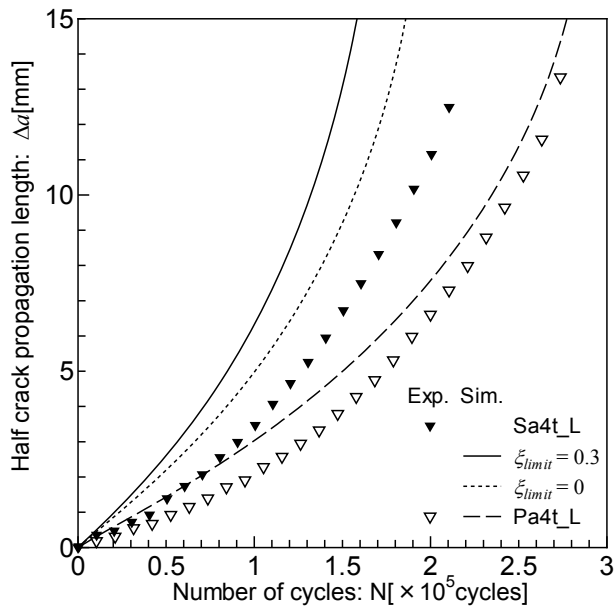
(a) L4t



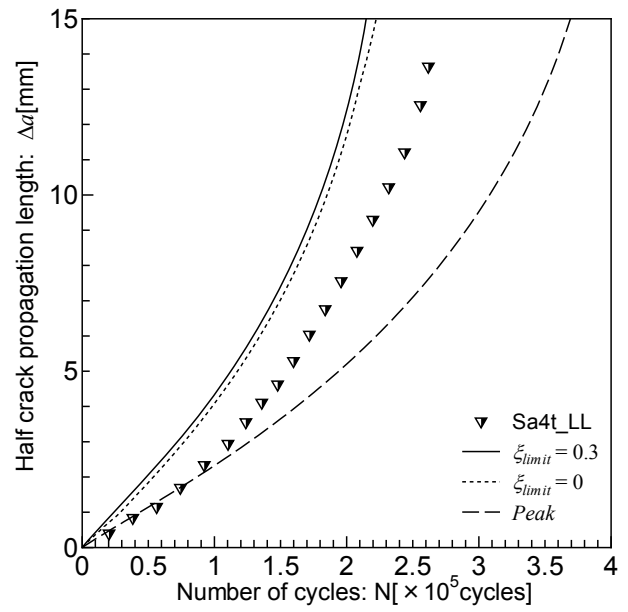
(b) Sa4t_M & Pa4t_M



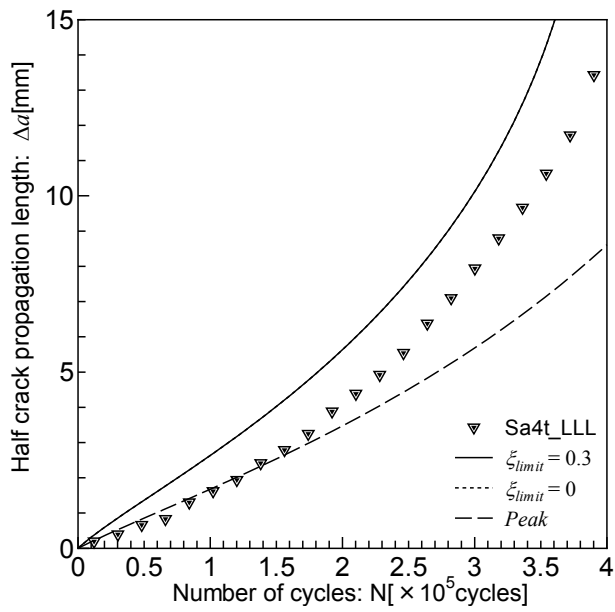
(c) Sa4t_H & Pa4t_H



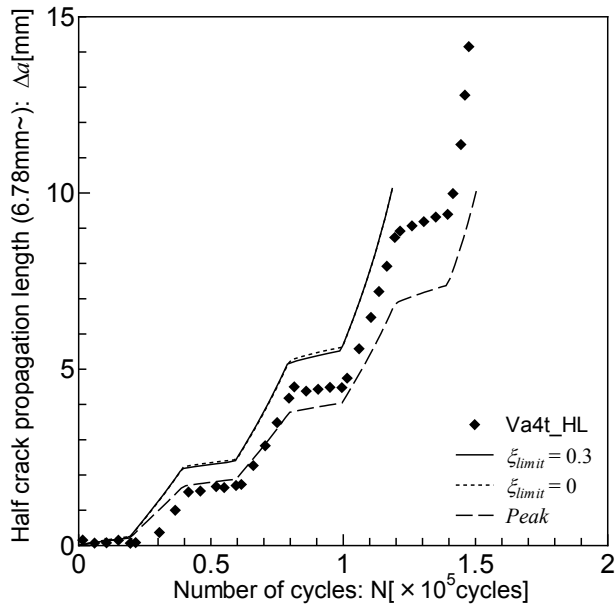
(d) Sa4t_L & Pa4t_L



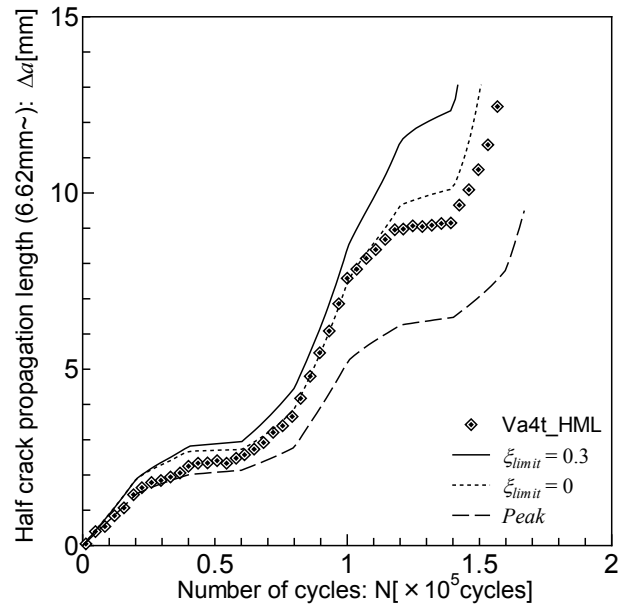
(e) Sa4t_LL



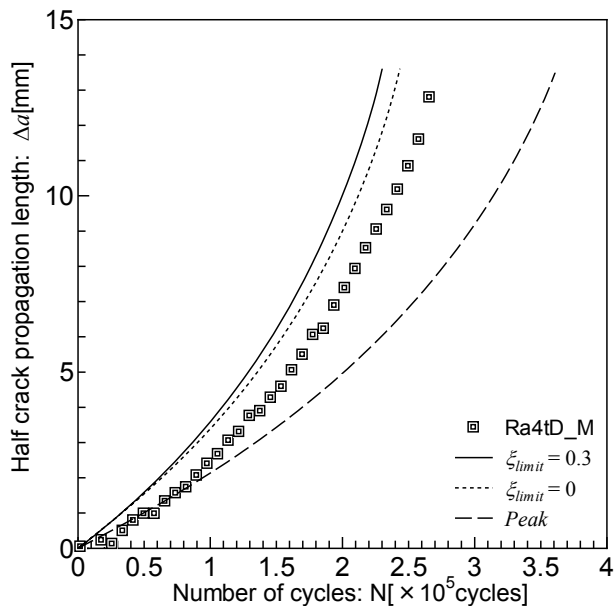
(f) Sa4t_LLL



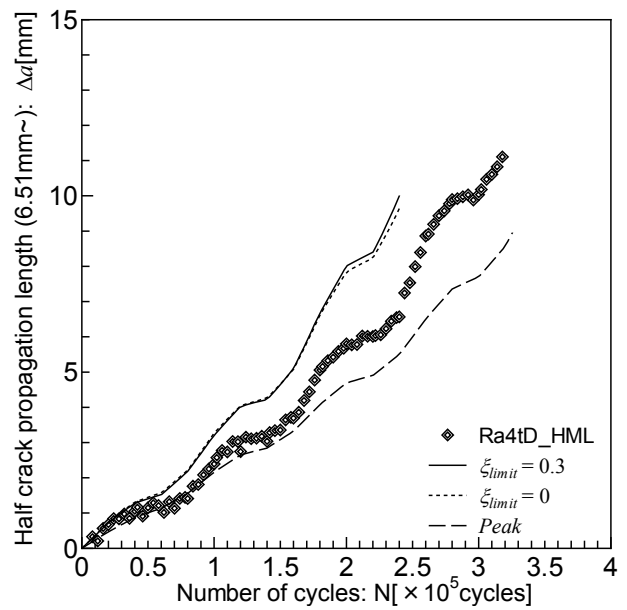
(g) Va4t_HL



(h) Va4t_HML



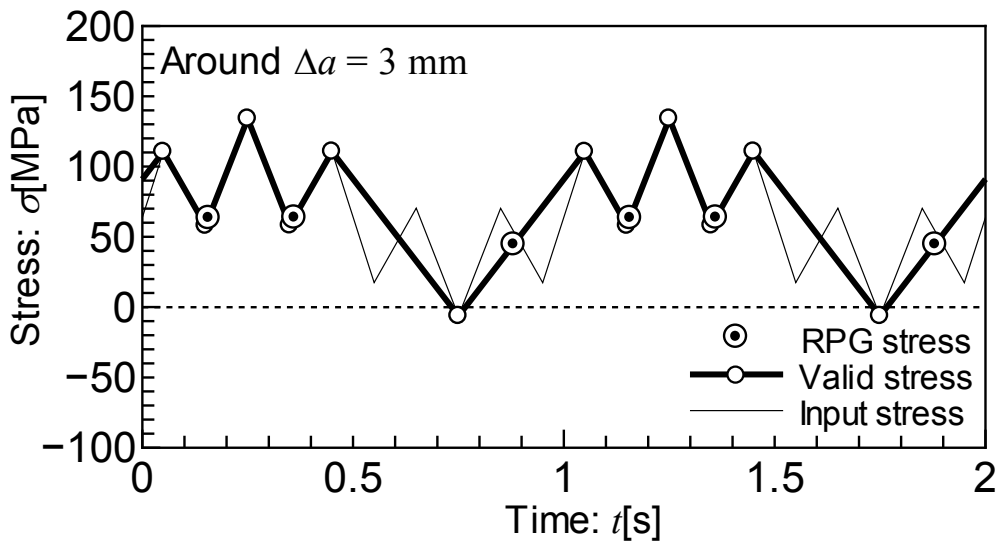
(i) Ra4tD_M



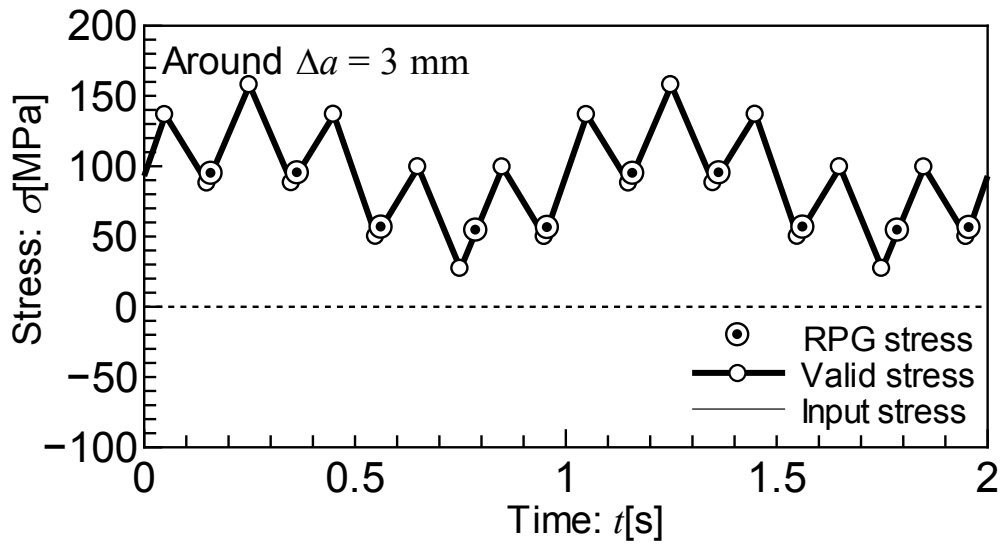
(j) Ra4tD_HML

Fig. 4. 6 Comparison of measured crack growth curves with estimated ones.

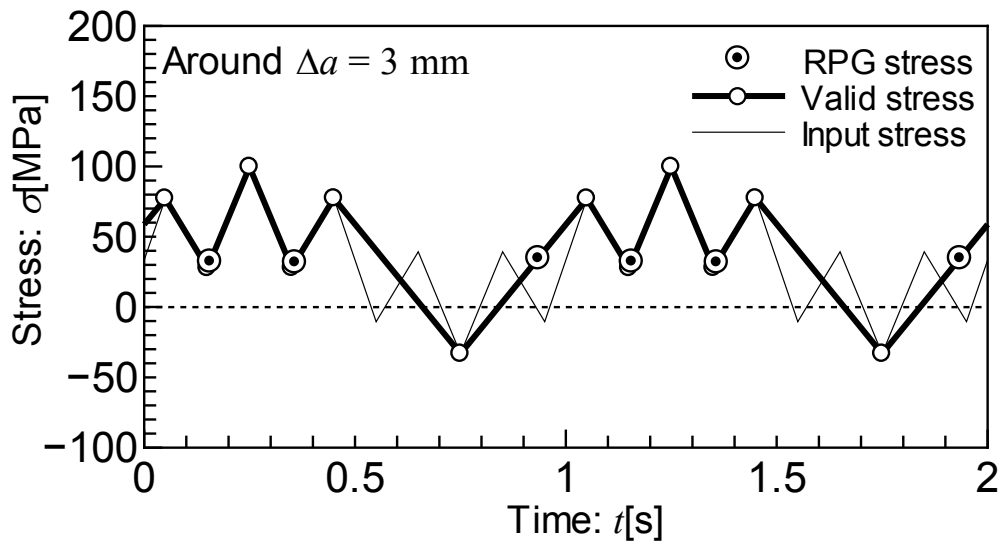
続いて、有効応力履歴選択アルゴリズムにより抽出された、疲労亀裂伝播に寄与する有効な応力履歴について検討する。Fig. 4.7は、 $\Delta a = 3\text{mm}$ 時点、Va4t_HL では $\Delta a = 3\text{mm}$ 以降の平均応力変更点、その他の平均応力変動条件では $\Delta a = 3\text{mm}$ に最も近い応力ブロック中において抽出された、応力履歴である。Fig. 4.7 (a) ~ (e) より、亀裂伝播に有効な応力履歴は平均応力が高くなるにつれて、高周波振幅を採用する割合が大きくなることが確認できる。また、(c) Sa4t_L と (f) Va4t_HL の平均応力が低い部分、(g-3) Va4t_HML (Low part) は同じ応力履歴であるが、抽出された応力履歴が異なっている。この原因は、平均応力が低い応力履歴域では、疲労亀裂は平均応力が高い応力履歴により生じた塑性域の中を伝播するため、亀裂が開口しにくくなるためであると考えられる。Fig. 4.7 (b) → (a) → (c) では平均応力が 95, 65, 35MPa と下がる毎に線形的に高周波振幅の採用割合は低下しているものの、(d), (e) で 20, 5 MPa と平均応力がさらに低下しても有効応力履歴は変化しないことから、低周波、高周波の応力振幅次第で、有効応力波形は必ずしも重畳波形のピーク値を包絡する波形とならないことも確認できる。また、実測波模擬平均応力変動条件 Ra4tD_HML では、(i-1), (i-2), (i-3)の順に平均応力が 95, 65, 35 MPa と下がるものの、高周波採用割合は (g) Va4t_HML とは異なり(i-2), (i-1), (i-3)の順に高くなる。すなわち、このように複雑な応力履歴では、平均応力と高周波振幅の採用割合に一貫した傾向が見られないことが確認できる。



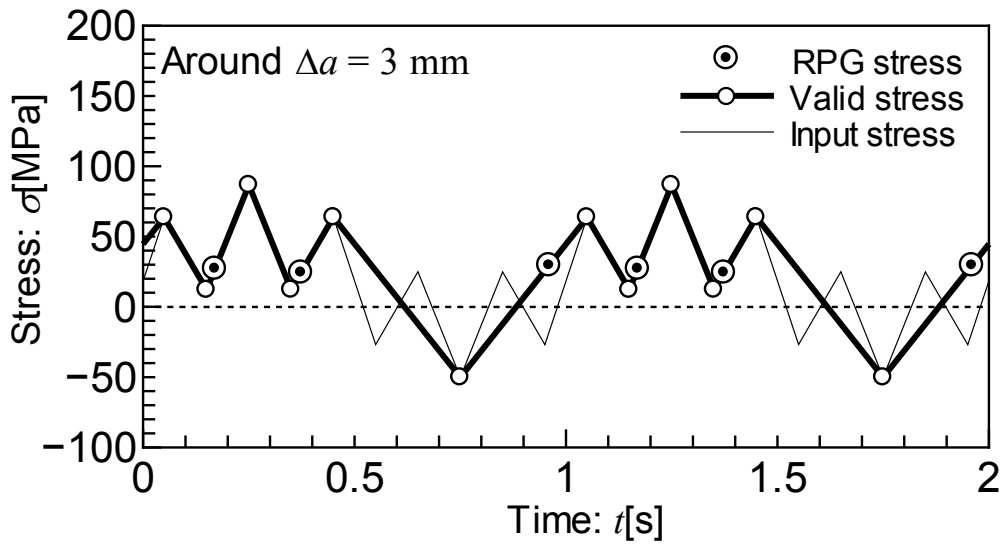
(a) Sa4t_M



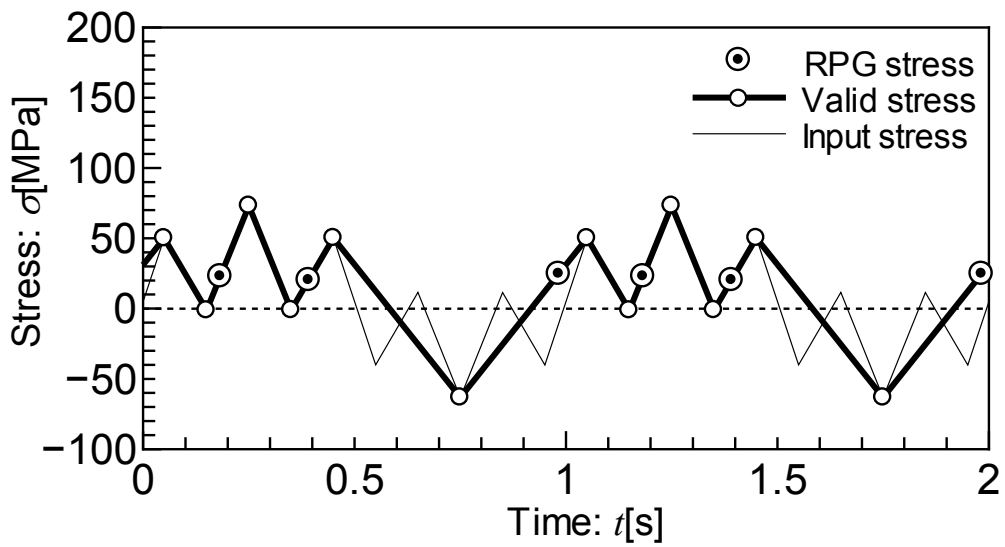
(b) Sa4t_H



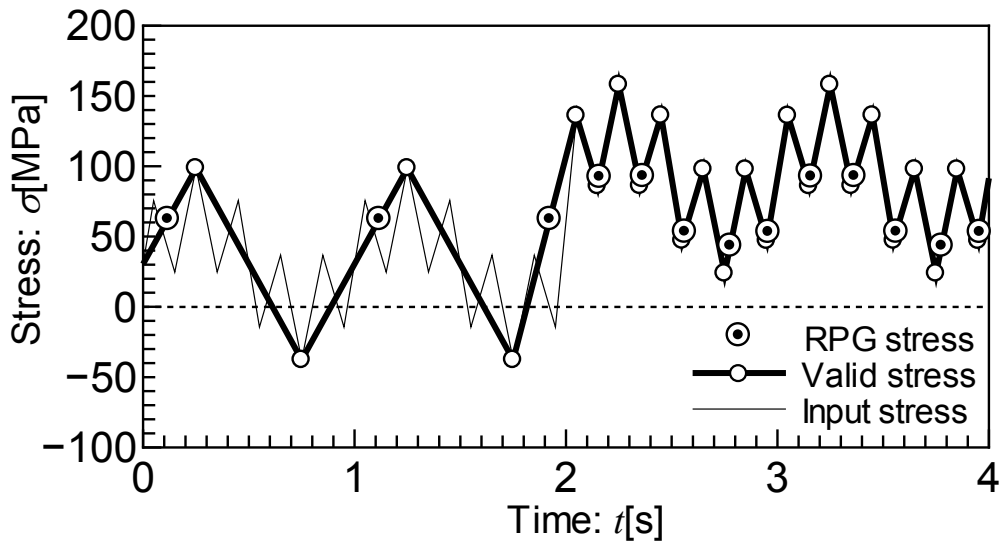
(c) Sa4t_L



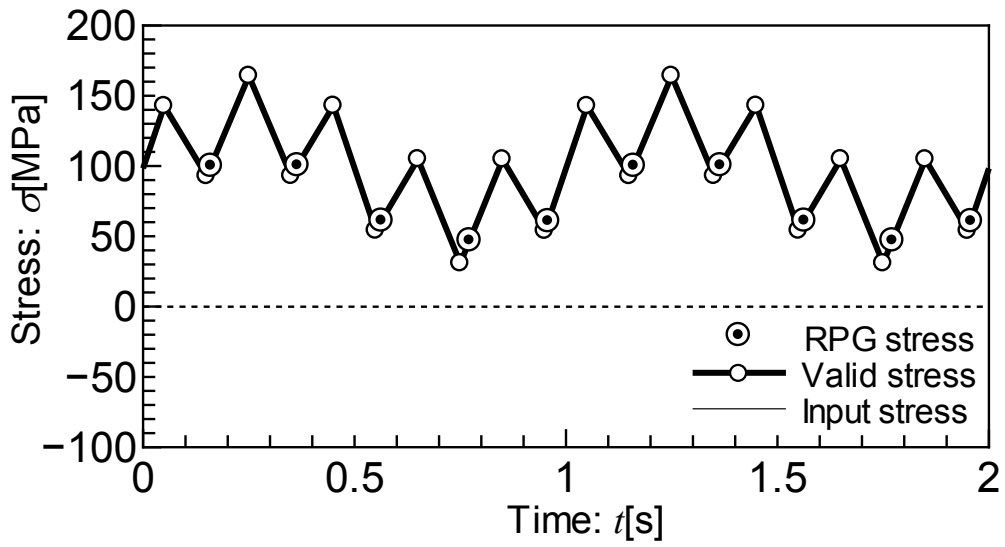
(d) Sa4t_LL



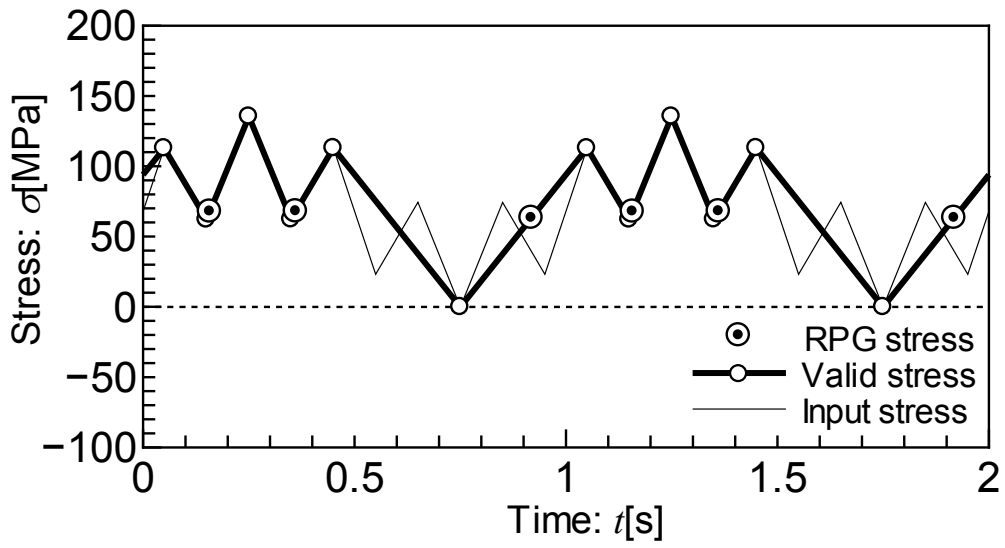
(e) Sa4t_LLL



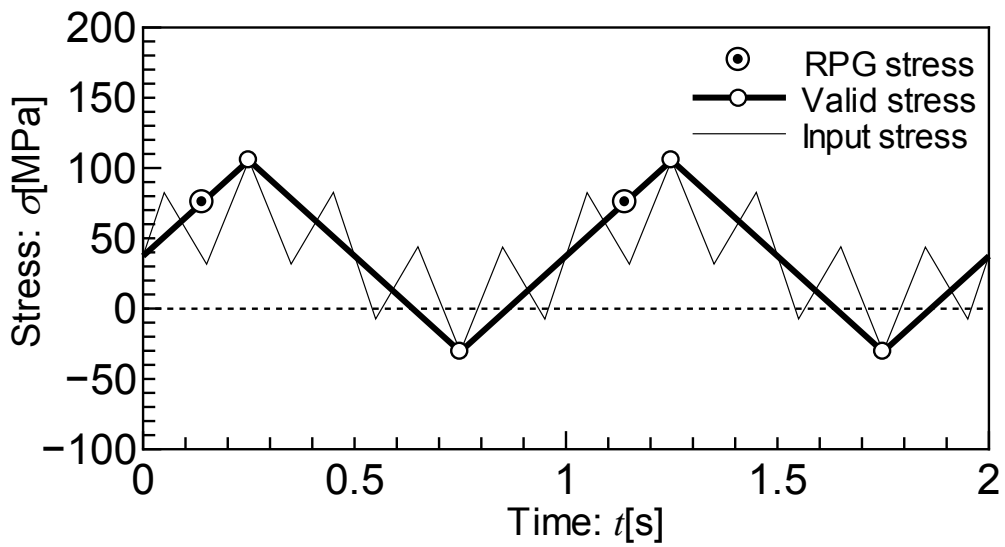
(f) Va4t_HL



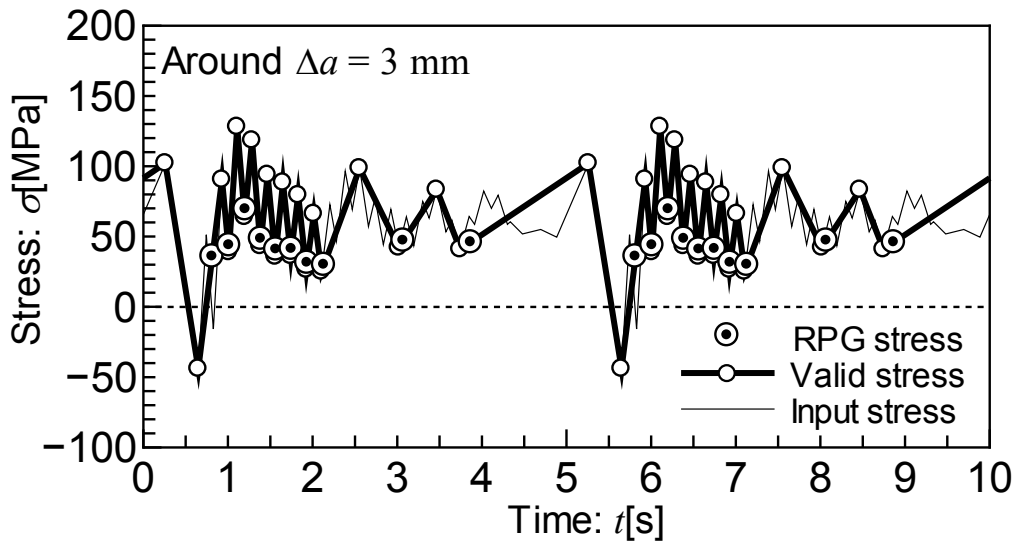
(g-1) Va4t_HML (High part)



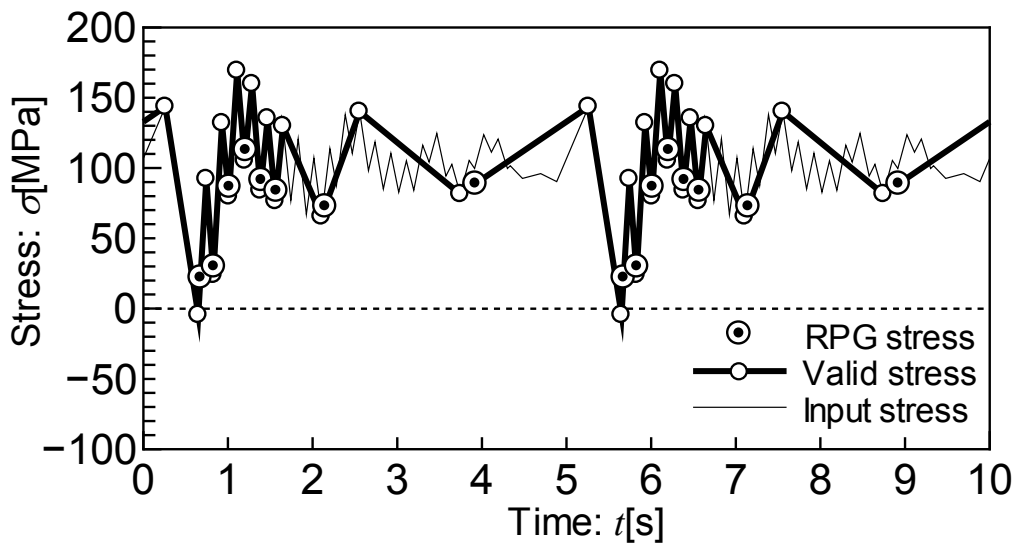
(g-2) Va4t_HML (Middle part)



(g-3) Va4t_HML (Low part)



(h) Ra4tD_M



(i-1) Ra4tD_HML (High part)

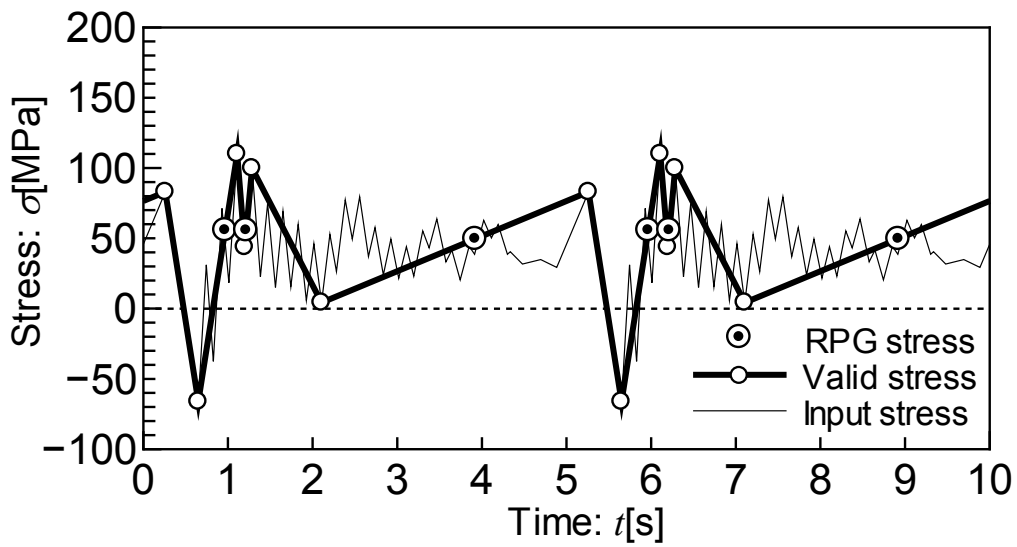
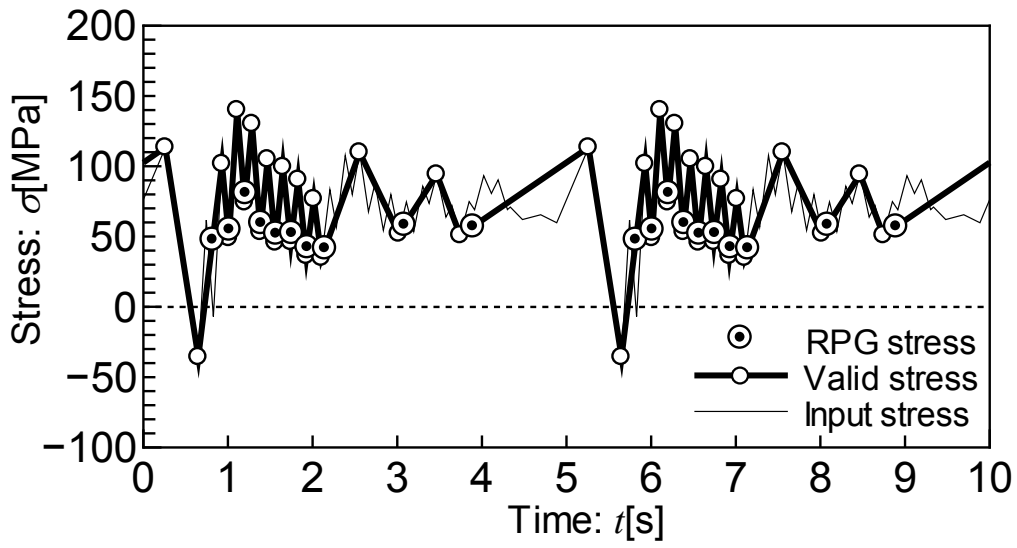


Fig. 4. 7 Examples of the extracted effective stress sequences under variable loadings.

4.4 結言

本章では、重畳応力履歴下における平均応力が疲労亀裂伝播挙動に及ぼす影響を検討するため、種々の平均応力条件を設定した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験を実施した。そして、同試験に対して前章において提案した有効応力履歴選択アルゴリズムを実装した疲労亀裂伝播解析を行い、試験結果との比較を通して本研究における提案手法の妥当性の検証を行った。以下に本章の結論を述べる。

- 種々の一定平均応力条件を設定した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験結果より、平均応力が高いほど亀裂伝播が速い傾向が見られたものの、平均応力の増加と亀裂伝播速度の上昇の関係は線形では無いことを確認した。
- 第 3 章において提案した有効応力履歴選択アルゴリズムを実装した疲労亀裂伝播解析結果は試験結果と良好な一致を示し、同手法は重畳応力履歴における平均応力の影響についても考慮できることを確認した。
- 有効応力履歴選択アルゴリズムにより伝播解析中に抽出された疲労亀裂伝播に有効な応力履歴は応力振幅だけではなく、平均応力、及び応力履歴の前歴の影響も受けて変化することを確認した。

第5章 等価疲労応力を用いた疲労亀裂伝播解析

5.1 緒言

第3章において提案した有効応力履歴選択アルゴリズムを実装した疲労亀裂伝播解析結果は、他研究者らの実施した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験の結果と良好な一致を示し、第4章において同アルゴリズムを実装した疲労亀裂伝播解析は重畳応力履歴下における平均応力影響についても考慮できることを確認した。しかしながら、本研究において提案した疲労亀裂伝播解析手法は、複雑な手順を必要とし、また、計算にも長時間を要する。そこで本章では、重畳応力履歴を一定振幅応力履歴に変換し、簡便に亀裂伝播挙動の推定を行う事を試みる。

不規則な载荷履歴条件下において、線形累積損傷被害則を用いた疲労寿命評価を行う場合に、不規則な载荷履歴をこれと等価な疲労被害度を与える一定応力範囲である”等価疲労応力範囲”に変換し、これを用いて疲労亀裂成長挙動を評価する場合がある⁹⁾。ここで、等価疲労応力範囲 $\Delta\sigma_{eq}$ は次式で表される。

$$\Delta\sigma_{eq} = \sqrt[m]{\frac{\sum(\Delta\sigma_i^m \cdot n_i)}{\sum n_i}} \quad (5.1)$$

ただし、 $\Delta\sigma_i$: レベル i の応力範囲 n_i : レベル i の応力回数
 m : S-N 線図もしくは亀裂伝播則の定数 (後述)

本章では、線形累積損傷被害則と疲労亀裂成長挙動を関連付ける一手法として、等価疲労応力範囲を用いた疲労亀裂伝播解析を行い、前節で述べた重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験との比較を通して得られた結果の考察を行う。また、伝播解析に用いる疲労亀裂伝播則は、一般的な手法である Paris 則 (1.2) 式と、RPG 基準の亀裂伝播則 (1.6) 式の二通りとし、両者の解析結果の比較を行う。

5.2 等価疲労応力への変換方法

等価疲労応力範囲の式を用いた応力履歴の変換方法について説明する。(5.1) 式の定数 m は S-N 線図を両対数グラフで描画した場合の勾配を用いる場合⁹⁾と、疲労亀裂伝播則の指数 m を用いる場合^{36), 45)}の 2 通りが存在し、船舶や海洋構造物の強度評価に際しては、後者の取り扱いを行うことが多い。前者の場合には線形累積損傷被害則で考えると、変換前と後の応力履歴が作用した場合における疲労寿命は等しいはずである。また、前述の通り等価疲労応力変換と伝播解析に用いる疲労亀裂伝播則は、一般的な手法である Paris 則 (1.2) 式と、RPG 基準の亀裂伝播則 (1.6) 式の二通りとし、両者の解析結果の比較を行う。

解析手法のフローチャートを Fig. 5.1 に示す。まず、重畳応力条件に対してレインフロー法を用いて波形計測を行い、修正 Goodman 線図に基づく (4.1) 式により計測した応力範囲の平均応力を 0 ($R = -1$) に変換する。そして、(5.1) 式を用いて一定振幅の等価疲労応力履歴への変換を行う。等価疲労応力範囲を用いた応力変換の詳細については伝播則毎に分けて後述する。ここで、Paris 則は応力比 R の影響を考慮することができないため、この $R = -1$ 段階の応力履歴に対して、(1.2) 式を用いて疲労亀裂伝播解析を行う。一方、RPG 応力基準の亀裂伝播則は応力比の影響も考慮できるため、再度 (4.1) 式を用いてこの $R = -1$ 状態の等価疲労応力履歴を元々の重畳応力履歴の平均応力に変換し、(1.6) 式を用いて疲労亀裂伝播解析を行う。

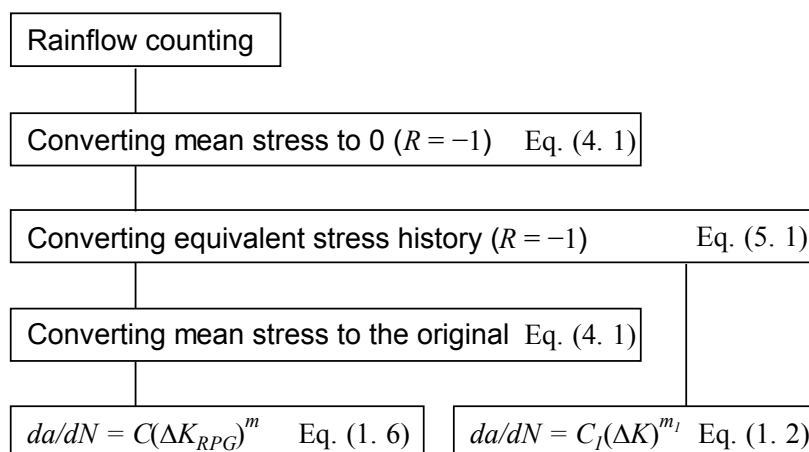


Fig. 5.1 Flowchart of numerical simulation using equivalent stress history.

5.3 Paris 則による疲労亀裂伝播解析

Paris 則を用いた伝播解析における等価疲労応力範囲を用いた応力変換について説明する。前述のように、(5.1) 式による等価応力範囲の変換手法には S-N 線図の勾配を採る場合と、疲労亀裂伝播則の指数を用いる場合の 2 通りが存在するため、本節では両方の場合において解析を行う。S-N 線図は、一定応力範囲条件である試験 ID: L4t, Pa4t_M, Pa4t_H, Pa4t_L の亀裂長さ 7 ~ 12mm のサイクル数範囲を基準として、UK-HSE 設計曲線⁵⁰⁾の D curve の勾配 ($m = 3.0$) を用いて最小二乗法により近似した。この詳細については付録 A に示す。また、サイクル数が 10^7 を超える範囲の S-N 曲線は Haibach 修正を行った。一方、Paris 則に関しては、文献⁹⁾に記載されている鋼及びその溶接継手を対象とする平均設計曲線の値を用いた ($C = 1.5 \times 10^{-11}$, $m = 2.75$: K 値の単位 $\text{N/mm}^{1.5}$, 亀裂長さの単位 mm)。以上 2 通りの定数を用いて等価疲労応力へ変換した。また、(5.1) 式の合計サイクル数 $\sum n_i$ は低周波のみをカウントする場合（以降、低周波サイクル数基準と称す）と高周波も合計してカウントする場合（以降、高周波サイクル数基準と称す）が考えられるため、両方の考え方に基づいた検討を実施した。

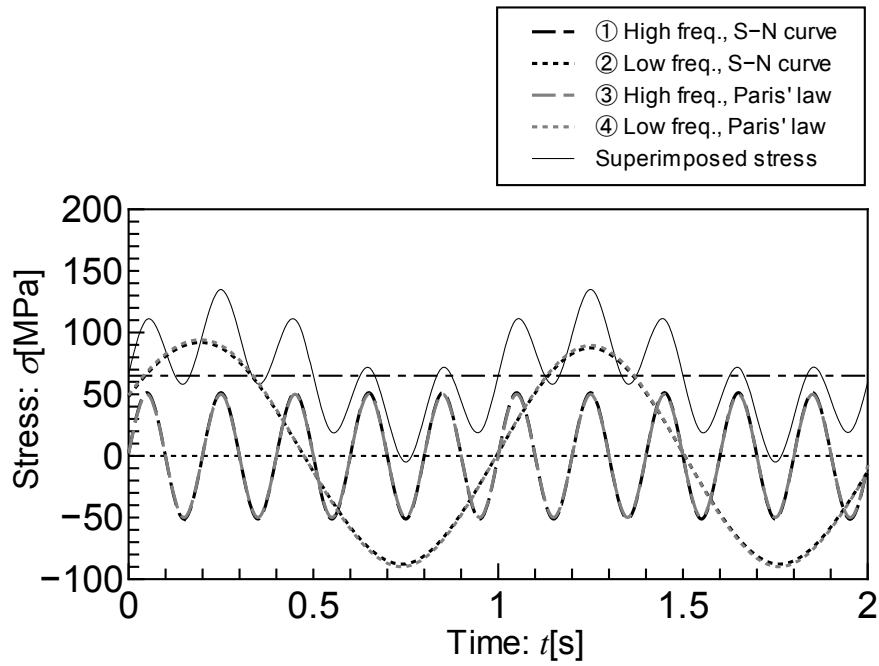
なお、S-N 線図基準での等価疲労応力範囲を算出する際には、 $\Delta\sigma_i$ に対する破断サイクル数 N_i が 10^7 を超える場合は Haibach 修正を適用して m を修正した。また、平均応力変動条件（試験 ID: Va4t_HL, Va4t_HML, Ra4tD_HML）に関しては、試験開始～亀裂長さ 12 mm 時点に達するまでの間の応力履歴に対して (5.1) 式を適用し、等価疲労応力範囲を算出した。以上、計 4 通りの変換方法の分類を Table 5.1 に示す。Table 5.1 のそれぞれの方法で変換した応力履歴の一覧を Table 5.2 に、応力波形を Fig. 5.2 にそれぞれ示す。なお、Fig. 5.2 において平均応力が 3 段階変動する条件においては図中に元の応力履歴を描画すると煩雑になり過ぎるため、等価疲労応力履歴のみを描画している。

Table 5.1 Criterion of equivalent stress range for Paris' law.

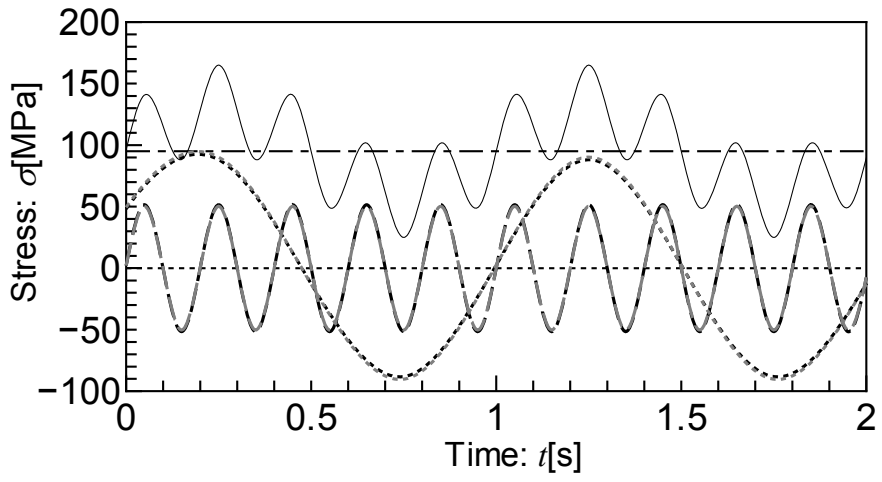
Criterion	S-N curve	Paris' law
High frequency	①	③
Low frequency	②	④

Table 5. 2 Converted equivalent stress conditions for Paris' law.

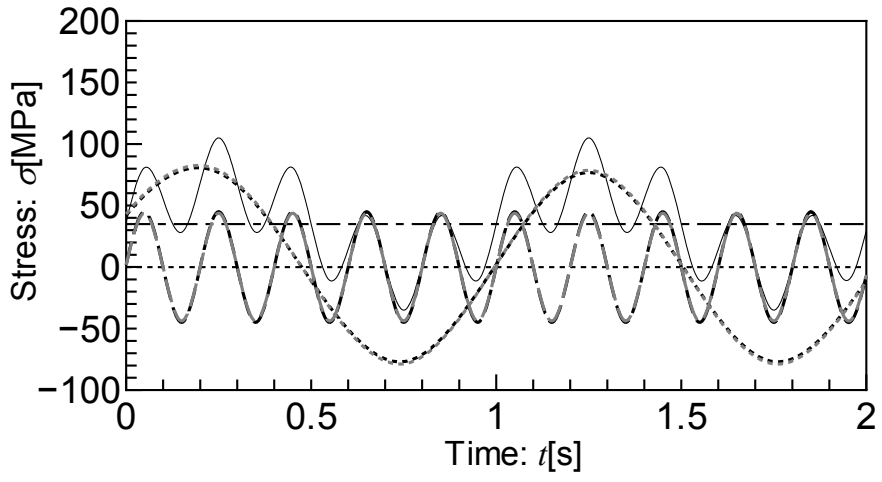
Test ID	Amplitude [MPa]				Mean [MPa]
	①	②	③	④	
Sa4t_M	51.207	87.563	49.921	89.629	0
Sa4t_H	51.531	88.116	50.239	90.202	0
Sa4t_L	44.930	76.829	43.795	78.631	0
Sa4t_LL	44.713	76.459	43.603	78.287	0
Sa4t_LLL	43.137	73.764	42.064	75.523	0
Va4t_HL	49.537	84.707	48.273	86.672	0
Va4t_HML	50.366	86.124	49.092	88.141	0
Ra4tD_M	72.917	121.269	35.684	62.154	0
Ra4tD_HML	78.919	131.250	37.771	65.791	0



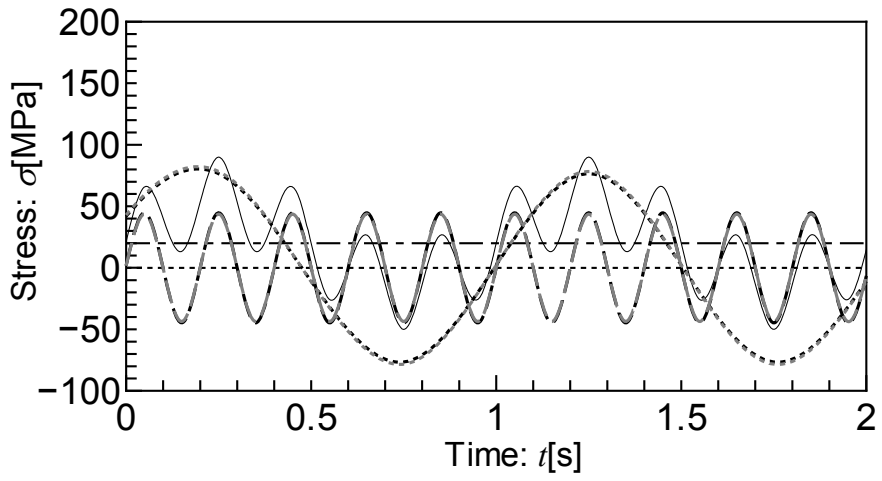
(a) Sa4t_M



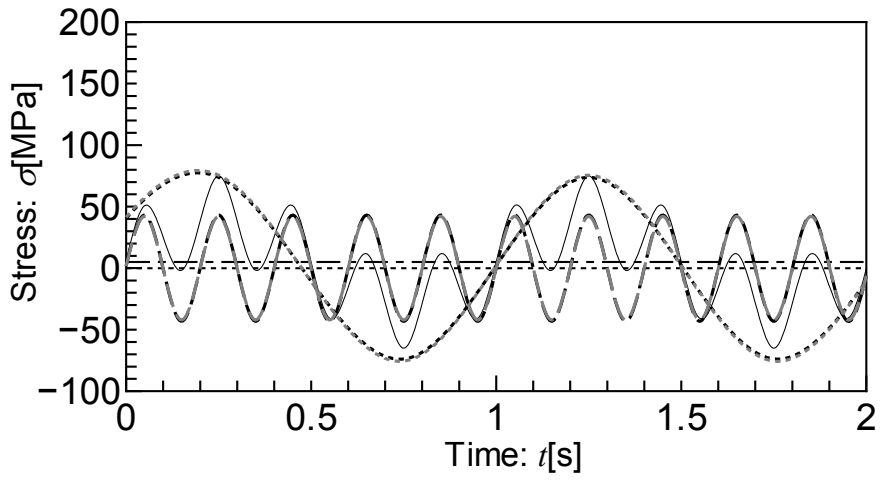
(b) Sa4t_H



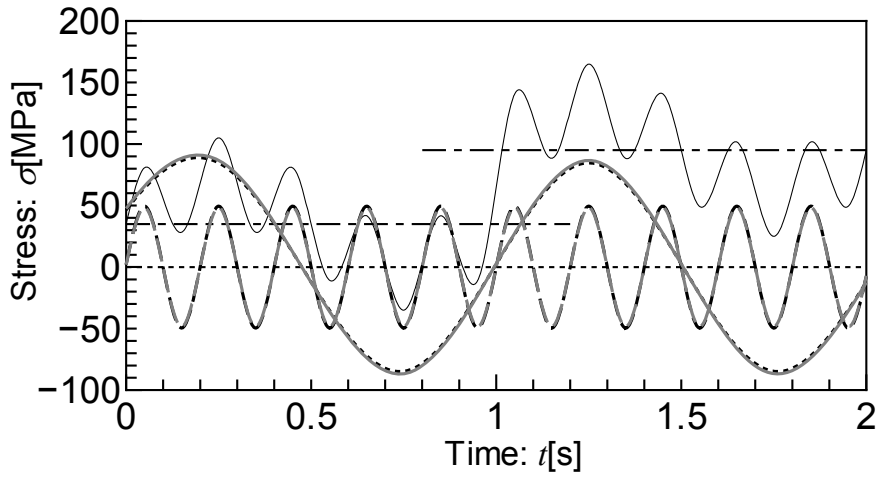
(c) Sa4t_L



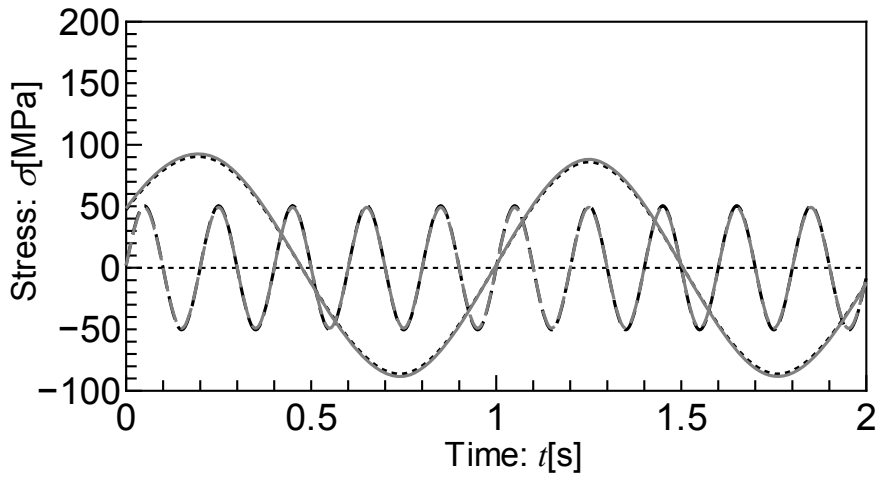
(d) Sa4t_LL



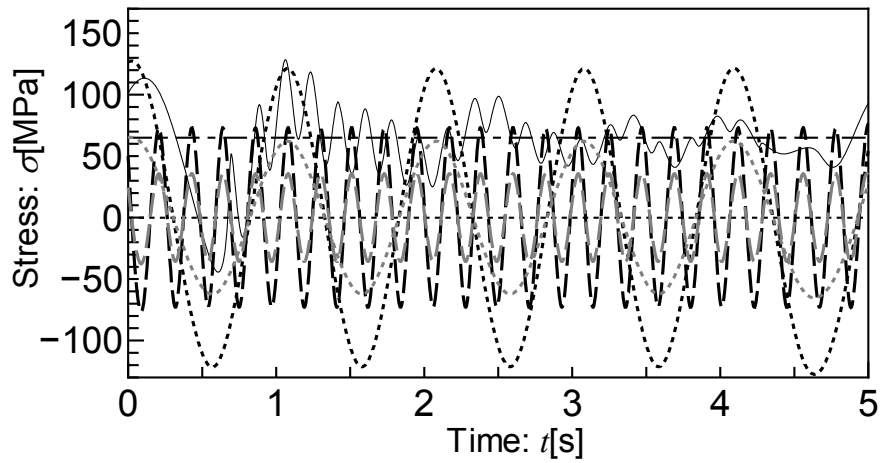
(e) Sa4t_LLL



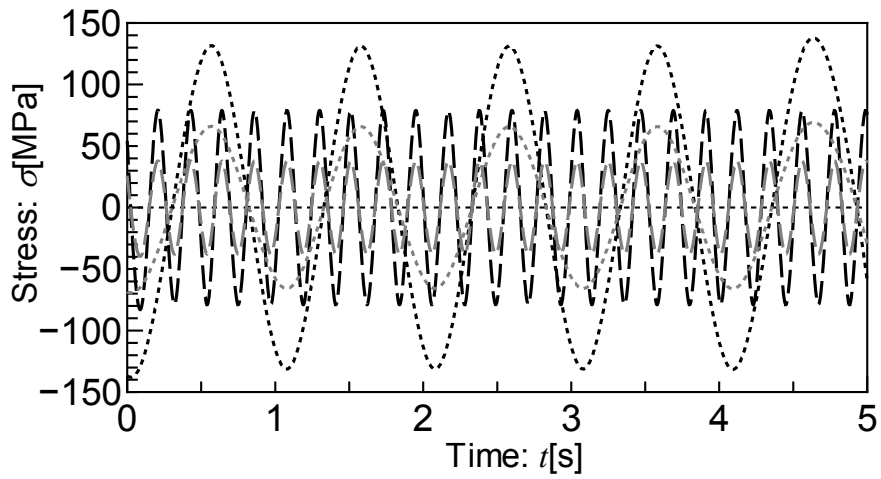
(f) Va4t_HL



(g) Va4t_HML



(h) Ra4tD_M



(i) Ra4tD_HML

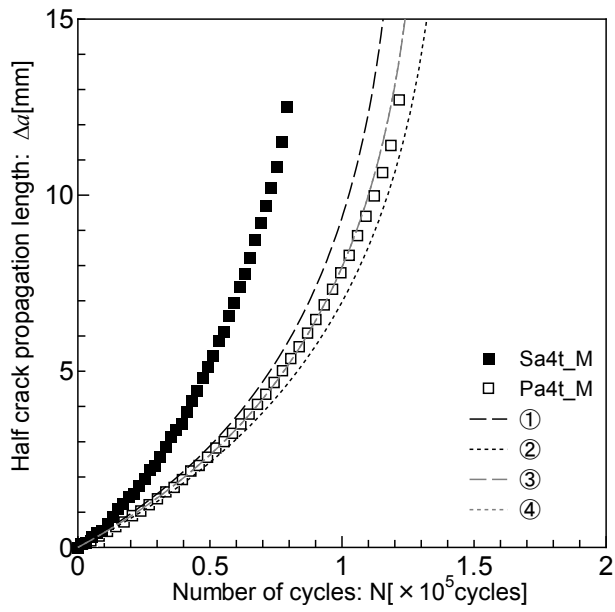
Fig. 5. 2 Equivalent stress history configurations for numerical simulation using Paris' law.

Fig. 5.2 に示した等価疲労応力履歴に対して Paris 則を用いた疲労亀裂伝播解析を行う。(1.2) 式の材料定数 C_I, m_I は前述の等価疲労応力変換時と同様である。なお、この材料定数 C_I, m_I は応力比が高い場合に相当しており、 R の値に関わらずこの値を用いる場合は安全側の結果が得られる⁹⁾とされている。

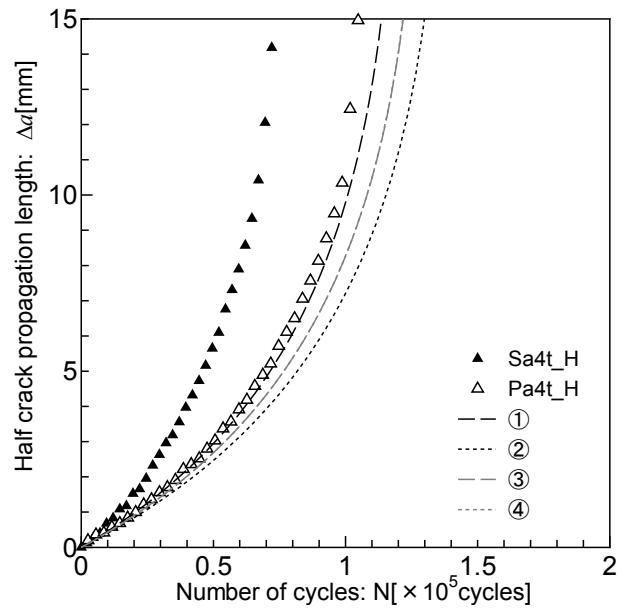
Table 5.2 に示したそれぞれの応力条件を入力し、疲労亀裂伝播解析を行った結果得られた亀裂成長曲線と試験結果との比較を Fig. 5.3 に示す。平均応力変動条件に関しては、等価疲労応力範囲の算出に用いた範囲である $\Delta a = 5 \text{ mm}$ の地点に一点鎖線を描画している。

Fig. 5.3 より、全ての図において③ (Paris 則基準, 高周波基準) と④ (Paris 則基準, 低周波基準) の線は重なっている。前述のように本解析で用いた Paris 則の材料定数 C_I, m_I は応力比 R が高い場合に対応しており、応力履歴を両振り状態 ($R = -1$) に変換しているため、全体的に安全側の評価が得られることが期待されたが、実際に全解析結果が安全側となっているのは (d) Sa4t_LL と (e) Sa4t_LLL 等の元々平均応力が低い条件のみであり、平均応力が高い (a) Sa4t_M や (b) Sa4t_H は全解析結果が危険側となった。

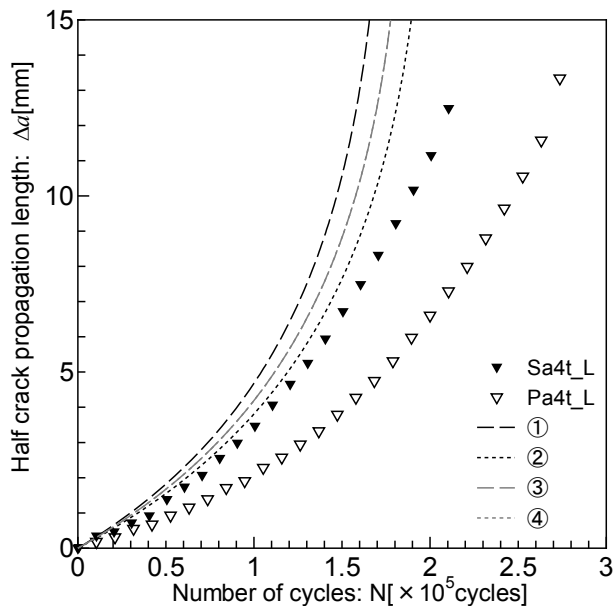
また、平均応力変動条件においては、S-N 線図基準で変換した応力履歴においては推定結果のバラツキが大きいものの、Paris 則基準 (③, ④) により変換した応力履歴は非常に高精度な推定結果が得られている。しかしながら、一定平均応力条件においては平均応力による推定結果のバラツキが大きいことから、これらの結果は平均応力変動により誤差のバラツキが相殺されたことによると考えられる。本解析における試験条件では平均応力 95MPa (危険側), 65MPa (危険側), 35MPa (安全側) の繰返しであったため誤差の相殺が生じたものの、65MPa 以上や 35MPa 以下でのみ平均応力の変動が生じる場合には推定結果に大きな誤差が生じることが危惧される。



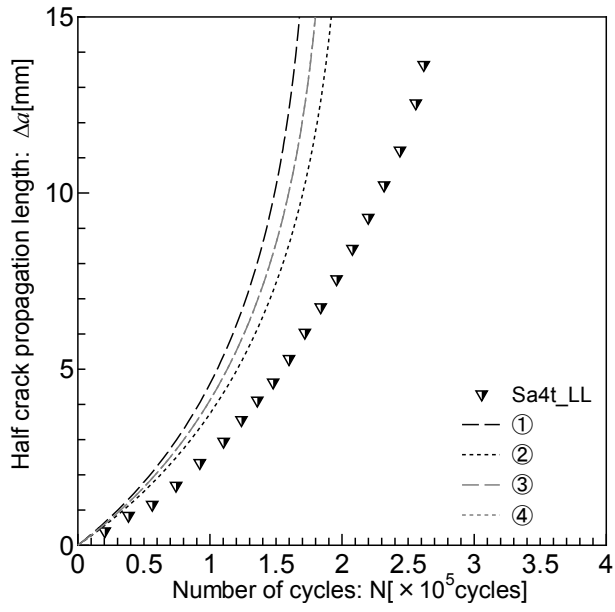
(a) Sa4t_M



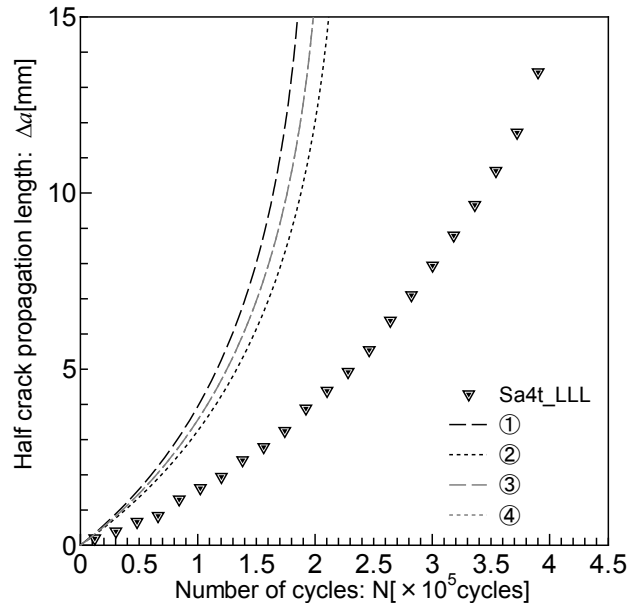
(b) Sa4t_H



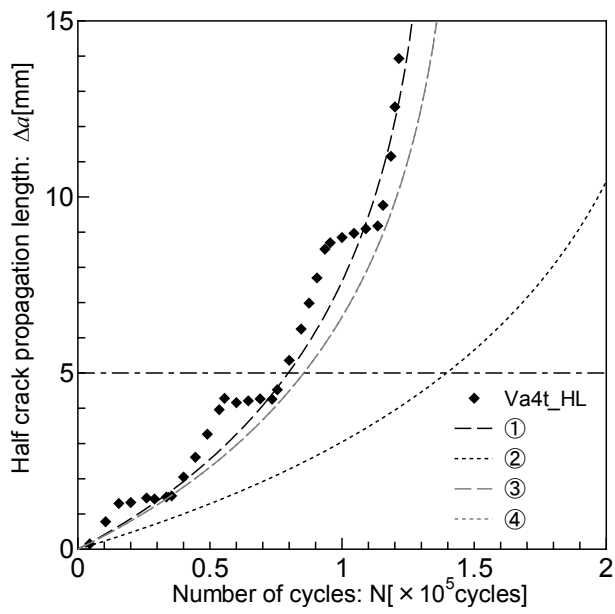
(c) Sa4t_L



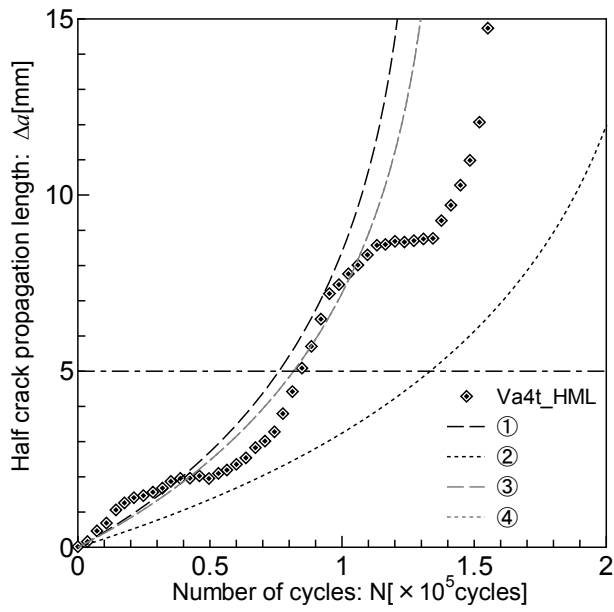
(d) Sa4t_LL



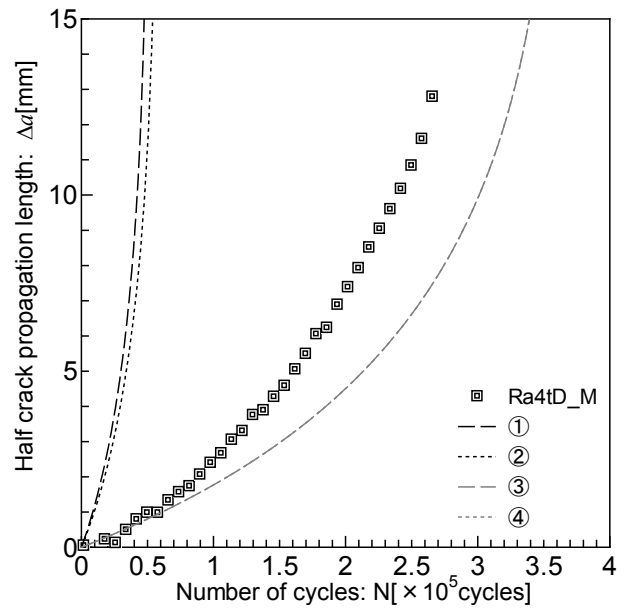
(e) Sa4t_LLL



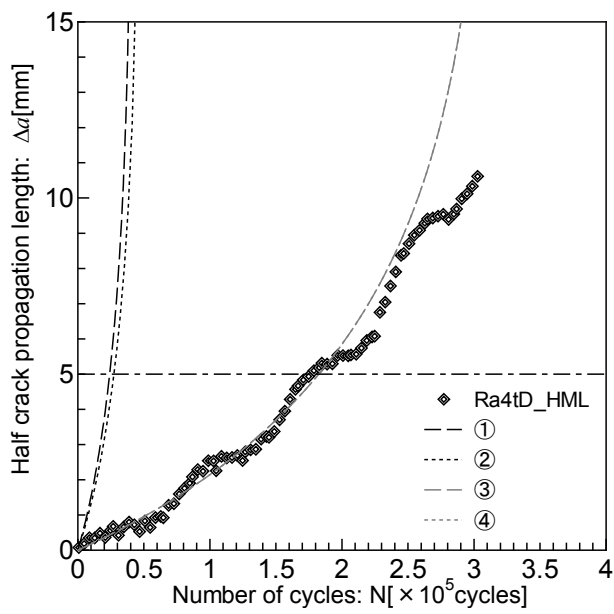
(f) Va4t_HL



(g) Va4t_HML



(h) Ra4tD_M



(i) Ra4t_HML

Fig. 5. 3 Comparison of measured crack growth curves with the simulated ones obtained from Paris' law.

5.4 RPG 基準の亀裂伝播則による疲労亀裂伝播解析

RPG 基準の亀裂伝播則を用いた伝播解析における等価疲労応力範囲を用いた応力変換について説明する。S-N 線図を用いた場合の変換手法は前述の Paris 則の場合と同様である。一方、RPG 基準の亀裂伝播則の材料定数に関しては、(4. 2) 式の値を用いた。また、合計サイクル数 Σn_i は低周波基準と高周波基準の 2 通りの場合について変換を行った。そして、前述のように RPG 基準の亀裂伝播則 (1. 6) 式では応力履歴の平均応力の影響を考慮することができるため、再度 (4. 1) 式を用いてこの $R = -1$ 状態の等価疲労応力履歴を元々の重畳応力履歴の平均応力に変換した。なお、平均応力変動条件(試験 ID: Va4t_HL, Va4t_HML, Ra4tD_HML) に関しては、応力変換後の平均応力はそれぞれの平均値 (いずれも 65 MPa) とした。

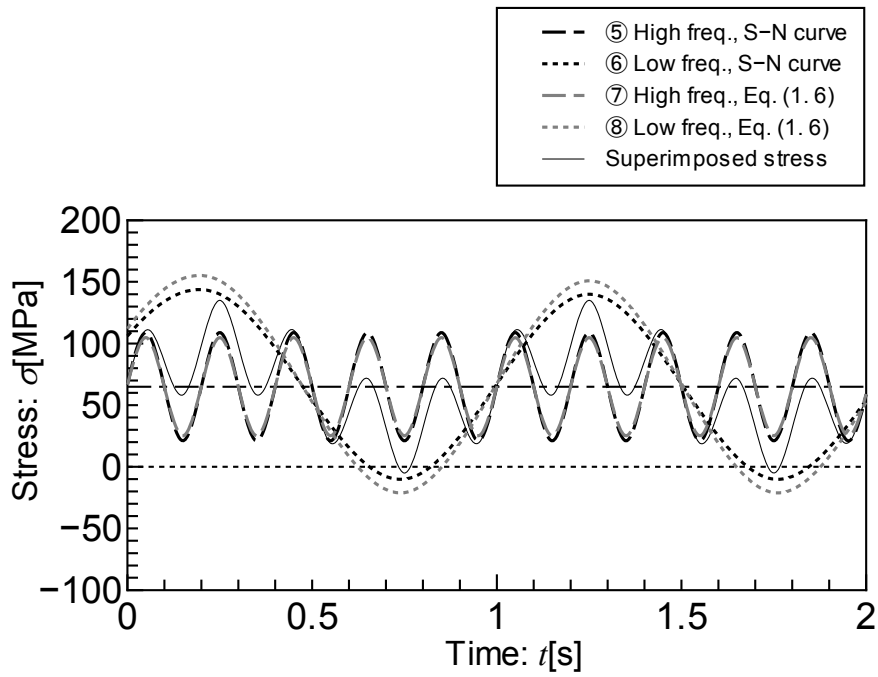
以上、計 4 通りの変換方法の分類を Table 5. 3 に示す。Table 5. 3 のそれぞれの方法で変換した応力履歴の一覧を Table 5. 4 に、応力波形を Fig. 5. 4 にそれぞれ示す。

Table 5. 3 Criterion of equivalent stress range for crack propagation law based on RPG criterion.

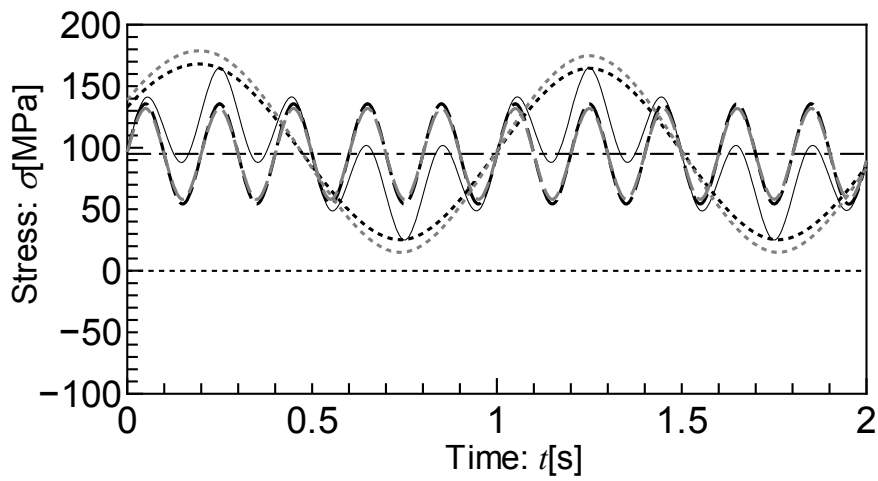
Criterion	S-N curve	Eq. (1. 6)
High frequency	⑤	⑦
Low frequency	⑥	⑧

Table 5. 4 Converted equivalent stress conditions.

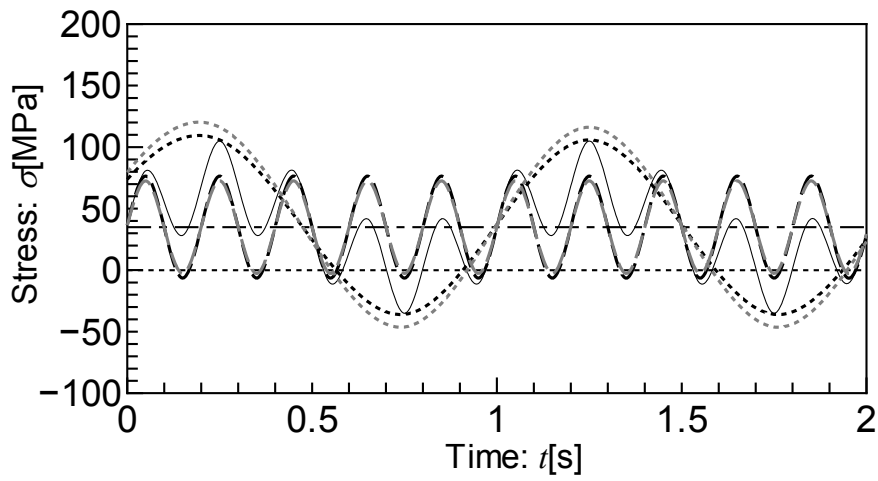
Test ID	Amplitude [MPa]				Mean [MPa]
	⑤	⑥	⑦	⑧	
Sa4t_M	43.843	74.971	39.784	85.899	65
Sa4t_H	40.700	69.596	36.944	79.765	95
Sa4t_L	41.451	70.880	37.591	81.164	35
Sa4t_LL	42.735	73.076	38.830	83.839	20
Sa4t_LLL	42.660	72.948	38.751	83.667	5
Va4t_HL	42.413	72.526	38.434	82.983	65
Va4t_HML	43.123	73.739	39.108	84.438	65
Ra4tD_M	62.431	103.83	26.254	54.469	65
Ra4tD_HML	67.570	112.376	27.784	57.643	65



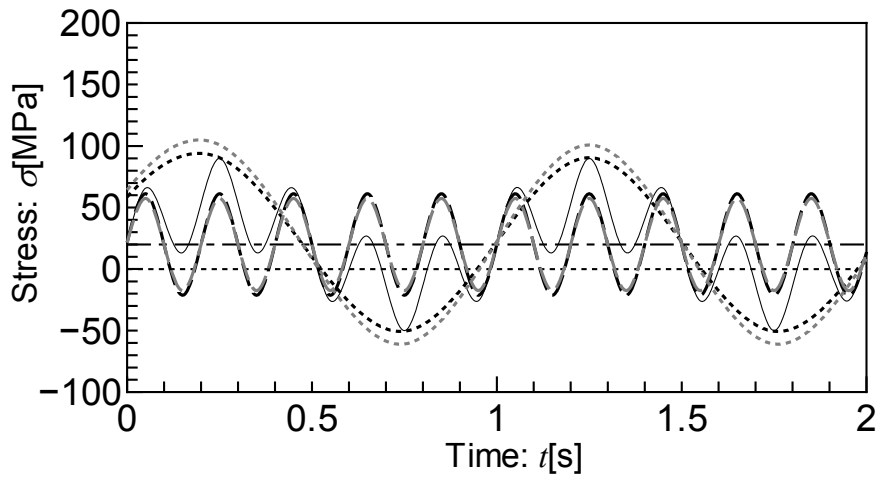
(a) Sa4t_M



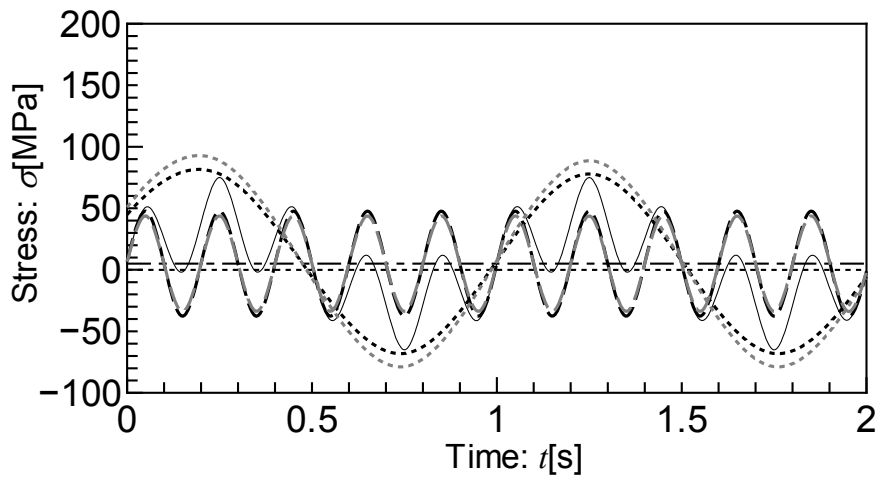
(b) Sa4t_H



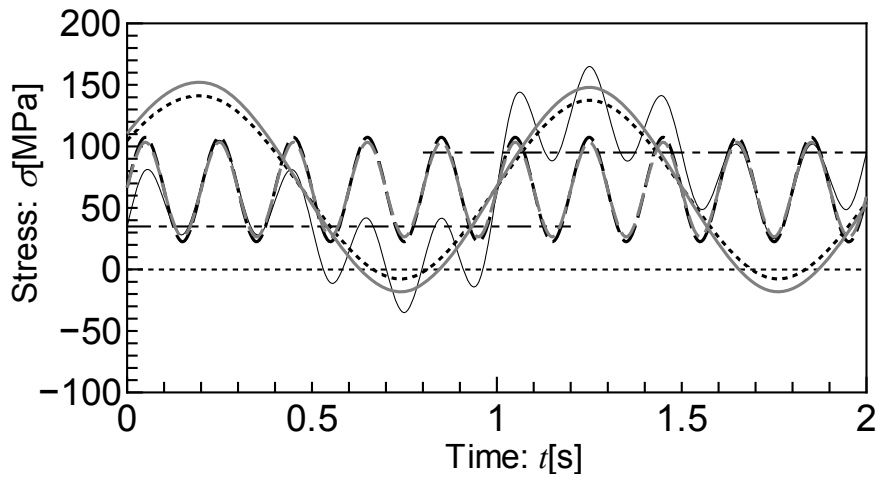
(c) Sa4t_L



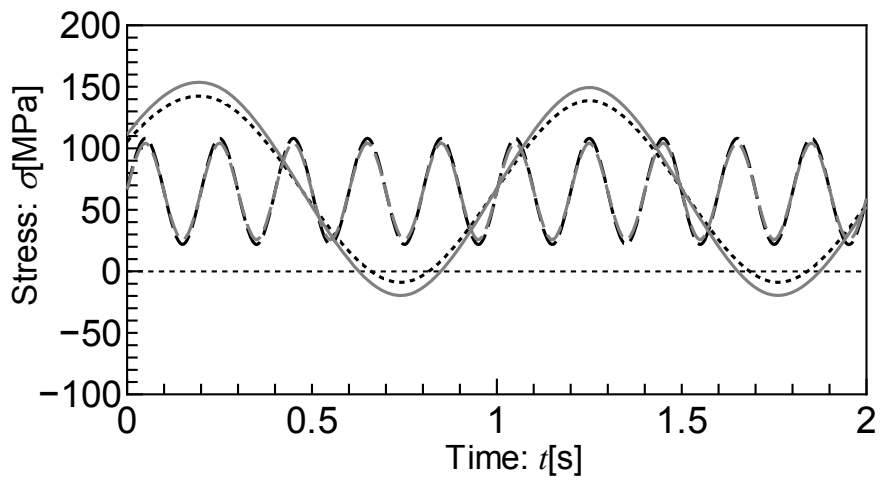
(d) Sa4t_LL



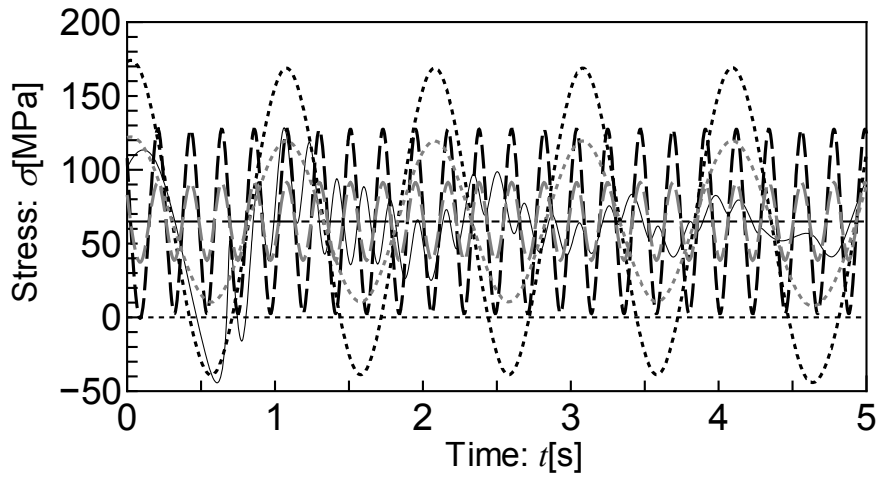
(e) Sa4t_LLL



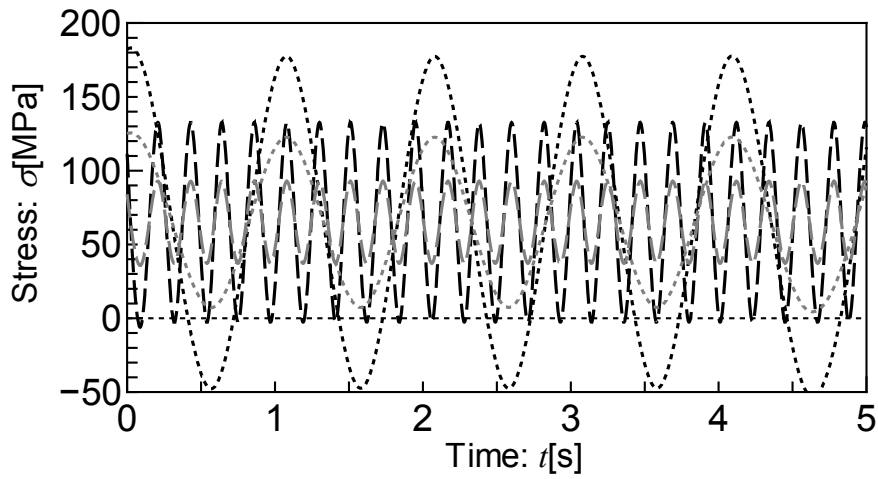
(f) Va4t_HL



(g) Va4t_HML



(h) Ra4tD_M

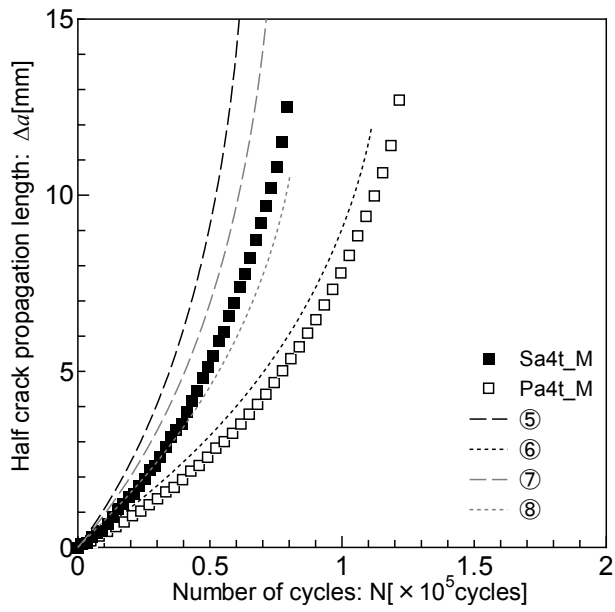


(i) Ra4tD_HML

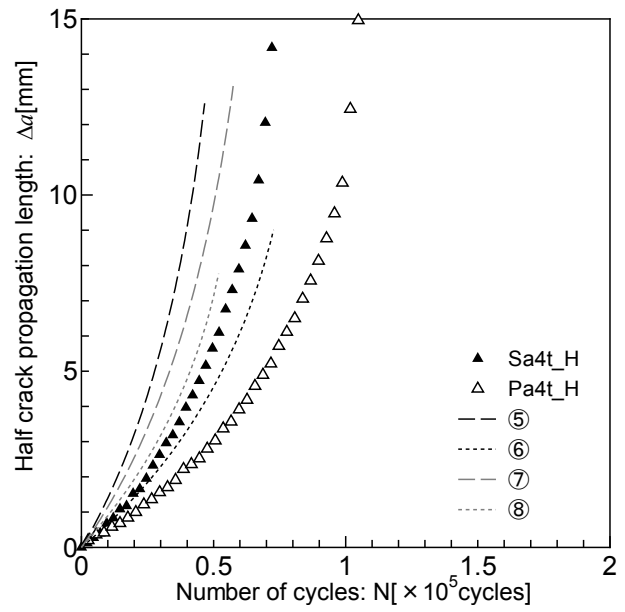
Fig. 5. 4 Equivalent stress history configurations for numerical simulation using crack propagation law based on RPG criterion.

Table 5.4 に示したそれぞれの応力条件を入力し、疲労亀裂成長シミュレーションを行った結果得られた亀裂成長曲線と試験結果との比較を Fig. 5.5 に示す。平均応力変動条件に関しては、等価疲労応力範囲の算出に用いた範囲である $\Delta a = 5 \text{ mm}$ の地点に一点鎖線を描画している。解析における RPG 基準の亀裂伝播則の材料定数は (4.2) 式に示した値を用いた。その他の伝播解析に必要となる各種定数は 4.2 節において示した値を用いた。

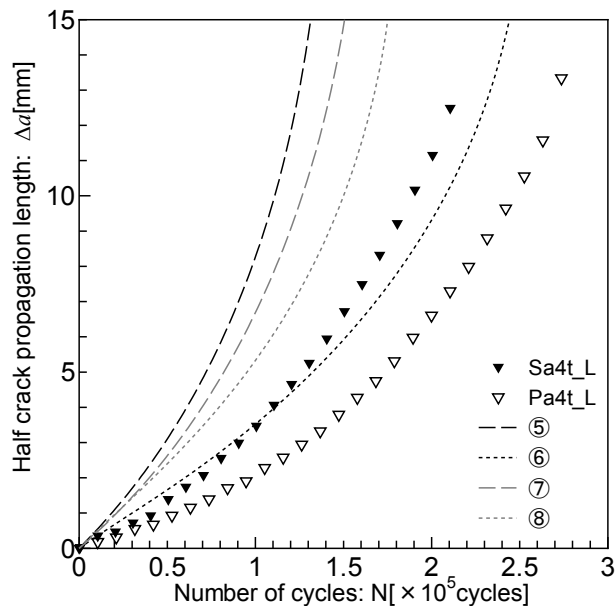
Fig. 5.5 より、応力変換手法に応じて伝播速度のバラツキが大きいものの、Fig. 5.3 で見られたような、元の平均応力が高いほど解析結果の亀裂伝播速度が実測結果よりも速くなる傾向は見られないことが確認できる。(e) Sa4t_LLL の伝播則基準 (⑦, ⑧) 以外の条件では、いずれも低周波サイクル数基準の場合よりも高周波サイクル数基準の方が、亀裂伝播速度が大きい。また、平均応力変動条件 (f) Va4t_HL, (g) Va4t_HML, (i) Ra4tD_HML では、全解析結果で試験結果よりも相対的に亀裂伝播速度が大きいことが確認できる。この原因は等価疲労応力範囲の変換では応力変動による疲労亀裂遅延現象を考慮できないためと推測される。また、全試験条件の中で⑤「高周波サイクル数基準かつ S-N 線図基準」の解析結果はいずれも試験結果よりも伝播が速く、安全側の結果が得られていることが分かる。しかし、それぞれの解析結果はバラツキが大きく、特にランダムに近い条件 (平均応力変動条件, 実測波模擬条件) で誤差が大きくなる傾向が見られる。



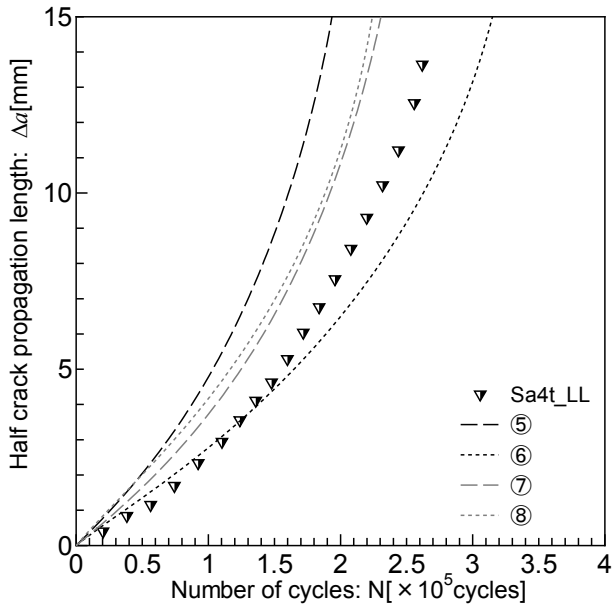
(a) Sa4t_M



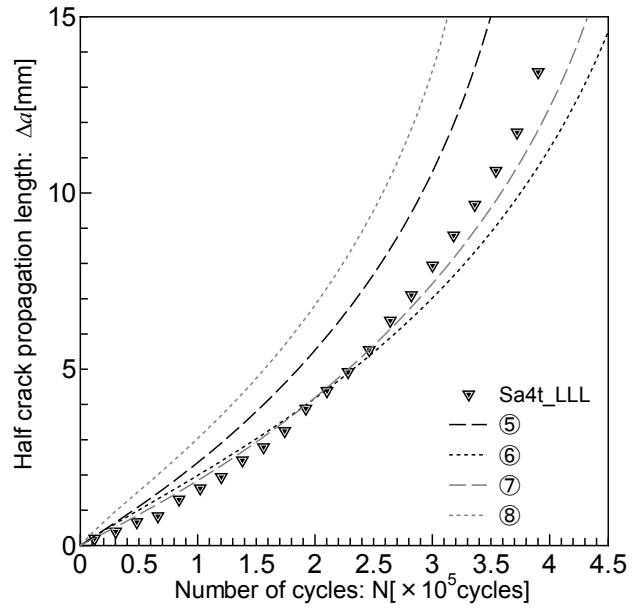
(b) Sa4t_H



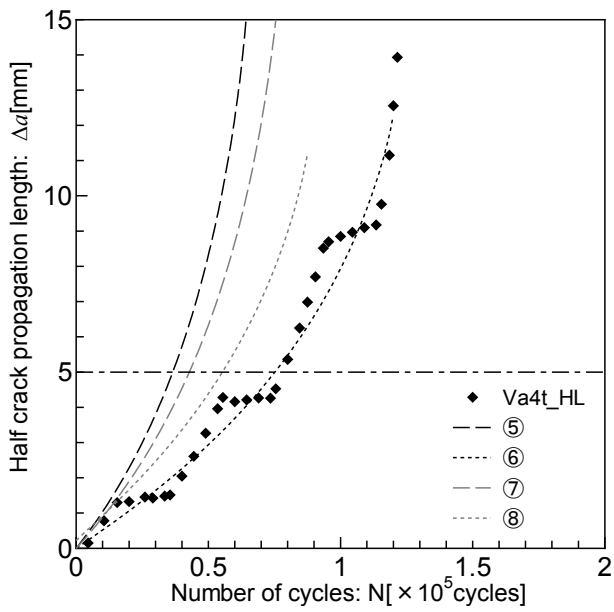
(c) Sa4t_L



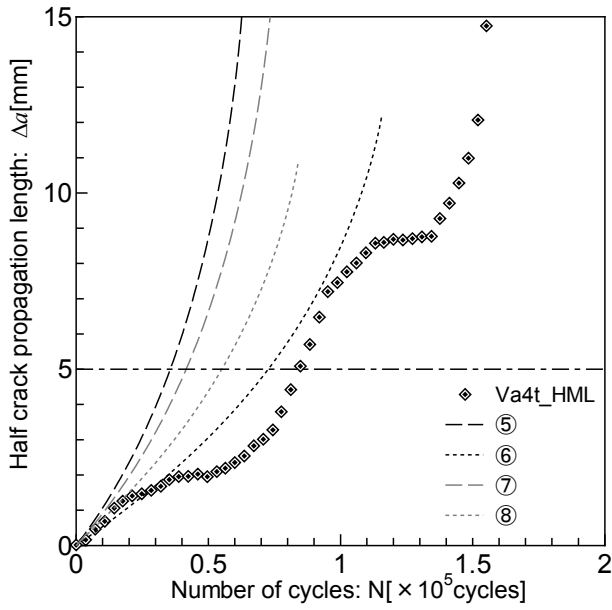
(d) Sa4t_LL



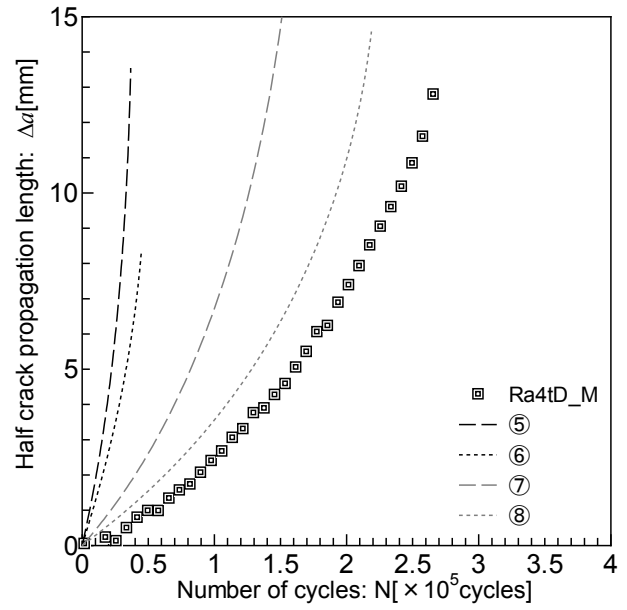
(e) Sa4t_LLL



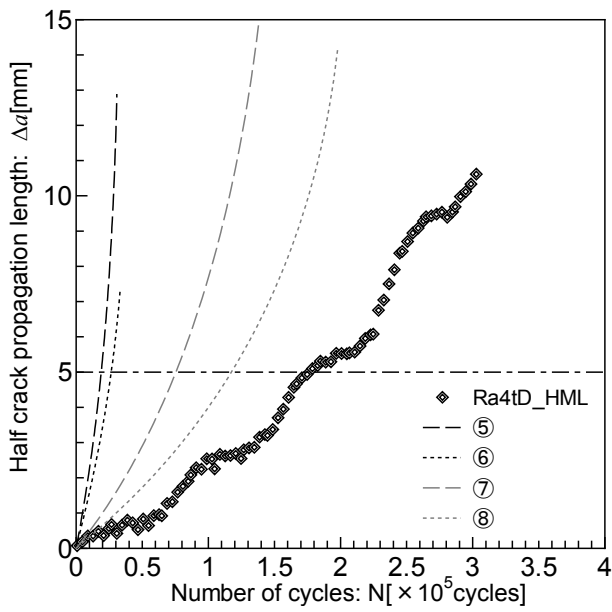
(f) Va4t_HL



(g) Va4t_HML



(h) Ra4tD_M



(i) Ra4tD_HML

Fig. 5. 5 Comparison of measured crack growth curves with estimated ones.

5.5 結言

本章では、重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播解析を簡便に行う手法として、累積損傷被害則を基とした等価疲労応力範囲の式を用いて重畳応力履歴を等価な疲労被害度を与える一定振幅応力履歴に変換し疲労亀裂伝播解析を行う手法を検討した。解析対象とした試験は 4.2 節で紹介した疲労亀裂伝播試験であり、Paris 則と RPG 基準の伝播則の 2 種類の疲労亀裂伝播則を用いて疲労亀裂伝播解析を行った。以下に本章の結論を述べる。

- Paris 則を用いた疲労亀裂伝播解析結果は、修正 Goodman 線図により等価疲労応力履歴を両振状態 ($R = -1$) にしても、元々の平均応力に応じて、平均応力が高いほど解析結果が試験結果よりも伝播が遅くなる傾向が確認された。
- RPG 基準の亀裂伝播則を用いた疲労亀裂伝播解析結果は、平均応力により誤差の程度が変化することは無かったが、応力変動による亀裂進展の遅延効果を考慮できないため、平均応力が変動する応力履歴に対しては試験結果に比べ亀裂伝播が著しく速い解析結果が得られた。

第6章 重畳応力履歴下における諸因子の疲労寿命に 対する影響

6.1 緒言

第3章では、重畳応力履歴から疲労亀裂伝播に有効な応力履歴を抽出するアルゴリズムを導入した疲労亀裂伝播解析を行い、試験結果との比較を行うことで提案手法の妥当性を検証した。また、第4章では、種々の平均応力条件を設定した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験を実施し、これに対応する疲労亀裂伝播解析を行うことで、提案手法が重畳応力履歴下における平均応力影響も考慮できることを検証した。そして第5章では、重畳応力履歴を、簡便に考慮することの可能な一定振幅応力履歴へと変換して疲労亀裂伝播解析を行う手法を検討したが、良好な解析結果は必ずしも得られないことを確認した。

本章では、4.2節で説明した疲労亀裂伝播試験の条件をベースに種々の高周波振幅、低周波振幅、平均応力を設定した多数の重畳応力履歴を作成し、それらに対して有効応力履歴選択アルゴリズムを実装した疲労亀裂伝播解析を実施し、重畳応力履歴下においてその応力波形を構成する低周波応力振幅、高周波応力振幅、平均応力が疲労亀裂成長に与える影響について考察を行い、重畳応力履歴下における疲労寿命と最大・最小を包絡させた一定振幅条件、低周波のみを載荷した条件、高周波のみを載荷した条件下における疲労寿命を比較し、重畳応力履歴を一定振幅応力履歴へ変換できる各因子の関係性について検討を行う。

6.2 解析条件

試験片形状は Fig. 4.2 に示す中央貫通亀裂試験片とし、解析に必要な諸定数の値を Table 6.1 に示す。疲労亀裂伝播解析を行った亀裂長さの範囲は 6 mm（加工亀裂先端）～ 15 mm までであり、本章ではこの区間を亀裂が伝播するのに必要なサイクル数を疲労寿命と定義する。

Table 6. 1 Conditions of numerical simulation.

Young's modulus	[MPa]	206000
Poisson's ratio	-	0.3
Yield stress	[MPa]	299
C	$K : [\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}]$	1.932×10^{-10}
m	$da/dN : [\text{m}/\text{cycle}]$	2.091
ξ_{limit}	[N/mm]	0.3

解析を行う応力条件について説明する。応力履歴は一定振幅の低周波振幅に周波数 5 倍の一定振幅高周波振幅が重畳した応力波形とし、最大応力は 4.2 節に示した疲労亀裂伝播試験における試験条件で設定した応力値の中に留まるように 160MPa 以下とした。そして、平均応力、低周波振幅、高周波振幅の合計がそれ以下となるように各値を 10MPa 刻みで変化させた条件を設定した。

6.3 疲労寿命と諸因子の関係の考察

本節では、前節で示した解析条件において疲労亀裂伝播解析を実施し、得られた重畳波応力履歴条件の疲労寿命について、その最大と最小を連ねた包絡波や、低周波振幅のみを繰り返した条件、高周波条件のみを繰り返した条件の疲労寿命との比の値を用いてその傾向の考察を行う。

本節で用いる記号・用語として、以下のものを定義する。(Fig. 6.1 参照)

σ_H : 高周波振幅 σ_L : 低周波振幅 σ_m : 平均応力

重畳波条件 : 重畳波応力履歴を載荷した条件.

包絡波条件 : 重畳波条件の最大応力と最小応力を連ねた一定振幅条件.
平均応力 : σ_m , 応力振幅 : $\sigma_H + \sigma_L$

低周波条件 : 重畳波条件の低周波振幅のみを載荷した一定振幅条件.
平均応力 : σ_m , 応力振幅 : σ_L

高周波条件 : 重畳波条件の高周波振幅のみを載荷した一定振幅条件.
平均応力 : σ_m , 応力振幅 : σ_H

最大平均高周波条件 : 重畳波条件の低周波振幅の最大値を平均応力とし, 高周波振幅のみを载荷した一定振幅条件.

平均応力 : $\sigma_m + \sigma_L$, 応力振幅 : σ_H

N_{Sup} : 重畳波条件の疲労寿命

N_{Env} : 包絡波条件の疲労寿命

N_{Low} : 低周波条件の疲労寿命

N_{High} : 高周波条件の疲労寿命

$N_{Maxhigh}$: 最大平均高周波条件の疲労寿命

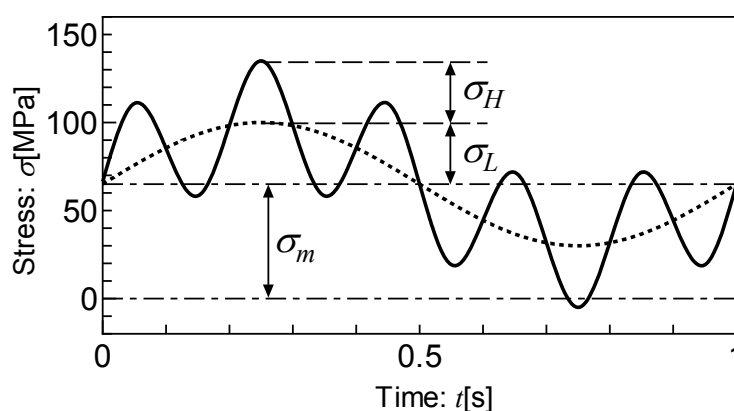
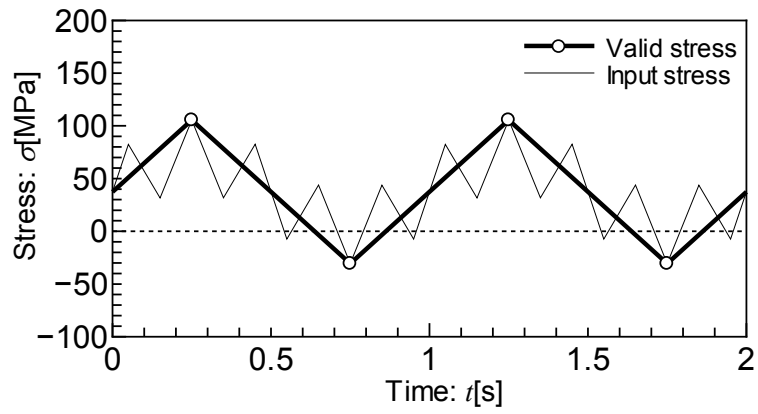


Fig. 6. 1 Schematic illustration of terms of superimposed loading history.

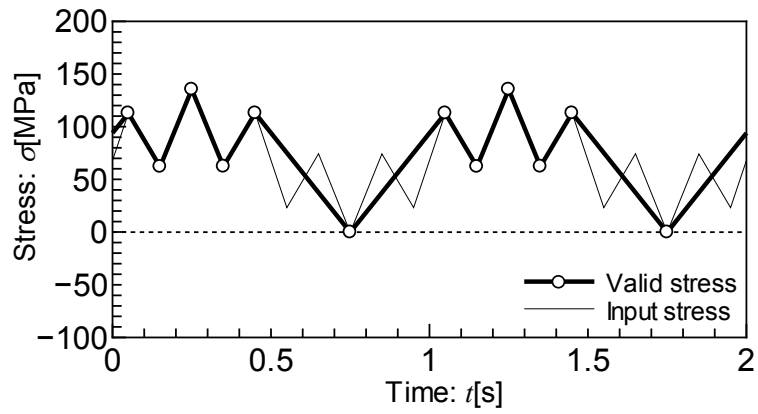
6.3.1 疲労寿命と有効応力履歴の傾向

まず, 6.2 節に示した解析条件において, 疲労亀裂伝播解析を実施した結果得られた疲労寿命を Table 6.2 に示す. Table 6.2 において ”-” と記載した条件は最初から亀裂が伝播しなかった条件であり, ”〇〇 mm” と記載した条件は亀裂長さが 15 mm に達する前に亀裂伝播が停止した条件であり, 停止時の亀裂長さ (6~15 mm) を示している.

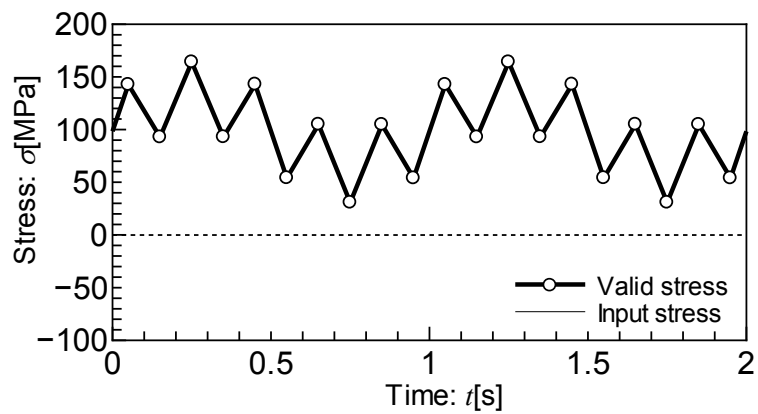
Table 6.2 に示した各条件における疲労亀裂伝播解析で疲労亀裂長さが約 10mm に達した時点において抽出された有効応力履歴を求めた結果, Fig. 6.2 に示す, 三種類の有効応力履歴のパターンが存在することが判明した. Table 6.2 において黒色に塗りつぶされた部分の条件は, Fig. 6.2 (a) に示すように有効応力履歴として包絡波を採用している条件, 灰色に塗りつぶされた条件は (b) に示すような中間程度採用頻度の過渡的な応力波形となる条件, 塗りつぶしなしの条件は (c) のような全高周波振幅を採用している条件に相当する.



(a) Peak



(b) Transition



(c) All adopted

Fig. 6. 2 Schematic illustrations of 3 patterns effective loading sequences.

Table 6. 2 Number of cycles from 6 mm to 15 mm in numerical simulation.

(a) Mean 100 MPa

Mean		High amplitude: σ_H					
100		0	10	20	30	40	50
Low amplitude: σ_L	10	5878172	-	388546	81307	43539	27619
	20	1034168	413552	228655	84535	44513	
	30	420954	228655	149070	97287		
	40	232004	154968	104921			
	50	154968	107539				
	60	107539					

(b) Mean 90 MPa

Mean		High amplitude: σ_H						
90		0	10	20	30	40	50	60
Low amplitude: σ_L	10	5528014	-	367147	81785	45696	29438	20756
	20	1021415	419975	242833	86116	46747	29561	
	30	430554	242833	163203	100244	47961		
	40	246516	170221	117005	94280			
	50	170221	120248	86633				
	60	120248	88870					
	70	88870						

(c) Mean 80 MPa

Mean		High amplitude: σ_H							
80		0	10	20	30	40	50	60	70
Low amplitude: σ_L	10	5225144	6.01 mm	344286	85085	49088	32922	23772	17554
	20	1013794	439233	265502	90979	50821	32311	21789	
	30	452924	265502	182743	104351	52492	32398		
	40	269459	190711	132771	106952	53291			
	50	190711	137547	99012	77641				
	60	137547	101413	74936					
	70	101413	77906						
	80	77906							

(d) Mean 70 MPa

Mean		High amplitude: σ_H								
70		0	10	20	30	40	50	60	70	80
Low amplitude: σ_L	10	4970953	1009426	320659	91771	54917	38440	27835	20484	15257
	20	1028838	475660	299729	100388	56237	35485	24692	17685	
	30	491977	298695	209038	127437	59063	35949	23716		
	40	304572	216909	152817	120534	60838	35751			
	50	216909	160248	114120	90067	62947				
	60	160248	117402	86355	65865					
	70	117402	89489	65865						
	80	89489	69058							
	90	69058								

(e) Mean 60 MPa

Mean		High amplitude: σ_H									
60		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Low amplitude: σ_L	10	4769675	1051421	300298	101154	65637	46008	32931	24041	17800	13314
	20	1078099	533973	342028	116108	62837	41435	29203	20804	15180	
	30	551148	346109	244073	135153	66512	40042	26167	18262		
	40	356429	250648	178505	137731	72709	40255	25641			
	50	250648	187582	132551	104044	70907	39693				
	60	187582	137195	99771	75892	68551					
	70	137195	102431	75892	58144						
	80	102431	79294	60850							
	90	79294	60850								
	100	60850									

(f) Mean 50 MPa

Mean		High amplitude: σ_H										
50		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Low amplitude: σ_L	10	4656337	1160104	280410	122784	81418	56037	39456	28352	20769	15427	11565
	20	1195171	627997	393673	140843	75888	50548	34865	24710	17756	13081	
	30	643045	414599	291782	145544	78309	45676	30586	21320	15189		
	40	434144	297984	211341	147692	77165	45088	28384	19102			
	50	297984	220633	155461	123879	75650	44890	27740				
	60	220633	162959	115853	87514	73638	43278					
	70	162959	119389	87513	66764	71504						
	80	119389	90903	69850	51296							
	90	90903	69850	53440								
	100	69850	53440									
	110	53440										

(g) Mean 40 MPa

Mean		High amplitude: σ_H											
40		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Low amplitude: σ_L	10	4734234	1372976	325927	161804	104154	69535	47891	33712	24286	17781	13197	9947
	20	1414994	779789	437665	163877	97262	63066	42365	29505	20775	14998	11081	
	30	792853	516183	357298	156855	87808	55862	36897	25260	17743	12762		
	40	540449	369158	253914	158006	82390	50906	32304	21752	15197			
	50	369158	261337	184213	146410	80889	48084	30636	20103				
	60	261337	193799	135494	101369	78669	46325	29744					
	70	193799	140796	101197	76567	76443	44432						
	80	140796	104314	79850	58545	59575							
	90	104314	79850	61290	45206								
	100	79850	61290	46682									
	110	61290	46682										
	120	46682											

(h) Mean 30 MPa

Mean		High amplitude: σ_H												
30		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Low amplitude: σ_L	10	5228753	1790157	449195	237674	137762	88382	59020	40513	28642	20704	15249	11396	8656
	20	1826864	1040222	445897	215719	135249	80452	52289	35272	24596	17477	12737	9468	
	30	1076692	667589	448817	177041	108551	108551	45472	30374	20975	14824	10771		
	40	686141	472209	310801	171678	90588	57970	39122	26008	17929	12714			
	50	472209	319090	220997	169096	86687	51236	33687	22634	15562				
	60	319090	230849	160050	118712	84643	49545	32256	21417					
	70	230849	168425	118121	88787	83372	47868	31095						
	80	168425	121849	92382	67715	74289	47239							
	90	121849	92382	70666	52274	44067								
	100	92382	70666	54224	40841									
	110	70666	54224	41921										
	120	54224	41921											
	130	41921												

(i) Mean 20 MPa

Mean		High amplitude: σ_H													
20		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Low amplitude: σ_L	10	7134535	2729250	704369	385258	189616	116130	74721	50011	34488	24439	17723	13098	9861	7574
	20	2792920	1495949	609058	300473	181015	106618	66542	43444	29492	20492	14597	10684	7965	
	30	1549956	903111	563029	234134	140618	89604	57657	37188	24848	17120	12183	8995		
	40	924492	605647	390536	195066	111833	71031	47435	31361	21066	14676	10622			
	50	605647	407203	271191	189991	95577	58542	38845	26900	18170	12749				
	60	407203	278978	193590	148119	93090	53292	34301	23711	16118					
	70	278978	203372	140899	104556	90465	52720	32940	23126						
	80	203372	146581	107488	79052	83246	50818	32937							
	90	146581	107488	82288	60723	55577	48867								
	100	107488	82288	62827	47325	37415									
	110	82288	62827	48457	37415										
	120	62827	48457	38633											
	130	48457	38633												
	140	38633													

(j) Mean 10 MPa

Mean		High amplitude: σ_H														
10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	
Low amplitude: σ_L	10	15450240	5066691	2053401	599379	306549	160656	97974	63131	42299	29260	20791	15142	11265	8574	6690
	20	5174549	2362877	1271009	450449	252037	150765	87089	54406	35499	24040	16803	12097	8906	6763	
	30	2405130	1303724	789280	340538	190927	115797	73467	46341	29612	19773	13756	9915	7452		
	40	1361405	806529	509792	261204	147789	89827	57377	38172	24785	16932	11943	8715			
	50	806529	536143	342920	218698	117410	71177	46413	31096	21201	14634	10497				
	60	536143	353571	238801	189636	102579	60816	38656	26270	18470	12867					
	70	353571	248671	170751	124723	98892	56756	36552	23760	16788						
	80	248671	179115	128653	93198	93762	54822	35274	24363							
	90	179115	128653	96703	71022	80292	52933	34047								
	100	128653	96703	73825	55082	43514	51090									
	110	96703	73825	56786	43515	34915										
	120	73825	56786	44756	35953											
	130	56786	44756	35953												
	140	44756	35953													
150	35953															

Table 6.2 に示した選択された有効応力履歴のパターン（表の塗りつぶし）より、全体的に低周波振幅に対して高周波振幅が小さいほど、高周波振幅が無視されやすい傾向が確認できる。そして、同一の低周波振幅・高周波振幅で考えると平均応力が高いほど高周波振幅が無視されやすい傾向が確認できる。また、平均応力が低くなるほど、表中灰色の塗りつぶしで表現される Fig. 6.2 (b) のような有効応力波形の占める割合が大きくなっていることが分かる。なお、以上の有効応力履歴は亀裂長さが 10 mm 時点のものを例として抽出したものであるため、有効応力履歴の波形を確認する亀裂伝播量次第では Table 6.2 に示した結果と同様な傾向が得られるものではないことに留意する必要がある。

6.3.2 包絡波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比

Table 6.2 に示した各解析条件において、その最大と最小を包絡させた包絡波条件に対する各重畳波条件の疲労寿命の比 N_{Sup}/N_{Env} を Table 6.3 に示す。また、各表において黒色に塗りつぶされた部分は数値が 1.0 以上のものであり、重畳波条件と包絡波条件の疲労寿命が同じである、若しくは後述の重畳波による疲労寿命の延長効果が見られるものであり、灰色に塗りつぶされた部分は数値が 0.90 以上のもの、つまり、包絡波条件の疲労寿命に対して重畳波条件の疲労寿命が 90% 以上の場合（包絡波として評価することで、概ねの疲労寿命評価が可能である場合）を表している。

Table 6.3 The ratio of the fatigue life of superimposed condition to one of envelope condition.

(a) Mean 100 MPa

Mean		High amplitude: σ_H				
100		10	20	30	40	50
Low amplitude: σ_L	10	-	0.92	0.35	0.28	0.26
	20	0.98	0.99	0.55	0.41	
	30	0.99	0.96	0.90		
	40	1.00	0.98			
	50	1.00				
	60					

(b) Mean 90 MPa

Mean		High amplitude: σ_H					
90		10	20	30	40	50	60
Low amplitude: σ_L	10	-	0.85	0.33	0.27	0.24	0.33
	20	0.98	0.99	0.51	0.39	0.33	
	30	0.99	0.96	0.83	0.54		
	40	1.00	0.97	1.06			
	50	1.00	0.97				
	60	1.00					
	70						

(c) Mean 80MPa

Mean		High amplitude: σ_H						
80		10	20	30	40	50	60	70
Low amplitude: σ_L	10	-	0.76	0.32	0.26	0.24	0.23	0.23
	20	0.97	0.99	0.48	0.37	0.32	0.28	
	30	0.99	0.96	0.76	0.52	0.42		
	40	1.00	0.97	1.05	0.68			
	50	1.00	0.98	1.00				
	60	1.00	0.96					
	70	1.00						
	80							

(d) Mean 70 MPa

Mean		High amplitude: σ_H							
70		10	20	30	40	50	60	70	80
Low amplitude: σ_L	10	0.98	0.65	0.30	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22
	20	0.97	0.98	0.46	0.35	0.30	0.28	0.26	
	30	0.98	0.96	0.80	0.50	0.40	0.34		
	40	1.00	0.95	1.03	0.68	0.52			
	50	1.00	0.97	1.01	0.91				
	60	1.00	0.96	0.95					
	70	1.00	0.95						
	80	1.00							
	90								

(e) Mean 60 MPa

Mean		High amplitude: σ_H								
60		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Low amplitude: σ_L	10	0.98	0.54	0.28	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.22
	20	0.97	0.96	0.46	0.33	0.30	0.29	0.26	0.25	
	30	0.97	0.97	0.72	0.48	0.39	0.33	0.30		
	40	1.00	0.95	1.00	0.71	0.51	0.42			
	50	1.00	0.97	1.02	0.89	0.65				
	60	1.00	0.97	0.96	1.13					
	70	1.00	0.96	0.96						
	80	1.00	1.00							
	90	1.00								
	100									

(f) Mean 50 MPa

Mean		High amplitude: σ_H									
50		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Low amplitude: σ_L	10	0.97	0.44	0.28	0.27	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22	0.22
	20	0.98	0.91	0.47	0.34	0.31	0.29	0.27	0.25	0.24	
	30	0.95	0.98	0.66	0.48	0.38	0.34	0.31	0.28		
	40	1.00	0.96	0.91	0.65	0.50	0.41	0.36			
	50	1.00	0.95	1.04	0.83	0.64	0.52				
	60	1.00	0.97	0.96	1.05	0.81					
	70	1.00	0.96	0.96	1.34						
	80	1.00	1.00	0.96							
	90	1.00	1.00								
	100	1.00									
	110										

(g) Mean 40 MPa

Mean		High amplitude: σ_H										
40		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Low amplitude: σ_L	10	0.97	0.41	0.30	0.28	0.27	0.25	0.24	0.23	0.22	0.22	0.21
	20	0.98	0.81	0.44	0.37	0.33	0.30	0.28	0.26	0.24	0.24	
	30	0.96	0.97	0.60	0.45	0.40	0.35	0.32	0.29	0.27		
	40	1.00	0.97	0.82	0.59	0.49	0.40	0.35	0.33			
	50	1.00	0.95	1.04	0.78	0.60	0.50	0.43				
	60	1.00	0.96	0.97	0.99	0.76	0.64					
	70	1.00	0.97	0.96	1.25	0.95						
	80	1.00	1.00	0.96	1.28							
	90	1.00	1.00	0.97								
	100	1.00	1.00									
	110	1.00										
	120											

(g) Mean 30 MPa

Mean		High amplitude: σ_H											
30		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Low amplitude: σ_L	10	0.98	0.42	0.35	0.29	0.28	0.26	0.24	0.24	0.22	0.22	0.21	0.21
	20	0.97	0.65	0.46	0.42	0.35	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.23	
	30	0.97	0.95	0.55	0.47	0.64	0.37	0.33	0.30	0.27	0.26		
	40	1.00	0.97	0.74	0.54	0.48	0.42	0.37	0.33	0.30			
	50	1.00	0.96	1.00	0.71	0.55	0.48	0.42	0.37				
	60	1.00	0.95	0.97	0.92	0.70	0.59	0.51					
	70	1.00	0.97	0.96	1.18	0.88	0.74						
	80	1.00	1.00	0.96	1.37	1.13							
	90	1.00	1.00	0.96	1.05								
	100	1.00	1.00	0.97									
	110	1.00	1.00										
	120	1.00											
	130												

(h) Mean 20 MPa

Mean		High amplitude: σ_H												
20		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Low amplitude: σ_L	10	0.98	0.45	0.42	0.31	0.29	0.27	0.25	0.24	0.23	0.22	0.21	0.20	0.20
	20	0.97	0.66	0.50	0.44	0.38	0.33	0.30	0.27	0.25	0.23	0.22	0.21	
	30	0.98	0.93	0.57	0.50	0.44	0.39	0.35	0.30	0.27	0.25	0.23		
	40	1.00	0.96	0.70	0.55	0.48	0.44	0.38	0.34	0.30	0.27			
	50	1.00	0.97	0.93	0.65	0.54	0.47	0.43	0.37	0.33				
	60	1.00	0.95	1.01	0.87	0.65	0.55	0.49	0.42					
	70	1.00	0.96	0.97	1.10	0.84	0.68	0.60						
	80	1.00	1.00	0.96	1.33	1.05	0.85							
	90	1.00	1.00	0.97	1.15	1.26								
	100	1.00	1.00	0.98	0.97									
	110	1.00	1.00	0.97										
	120	1.00	1.00											
	130	1.00												
	140													

(i) Mean 10 MPa

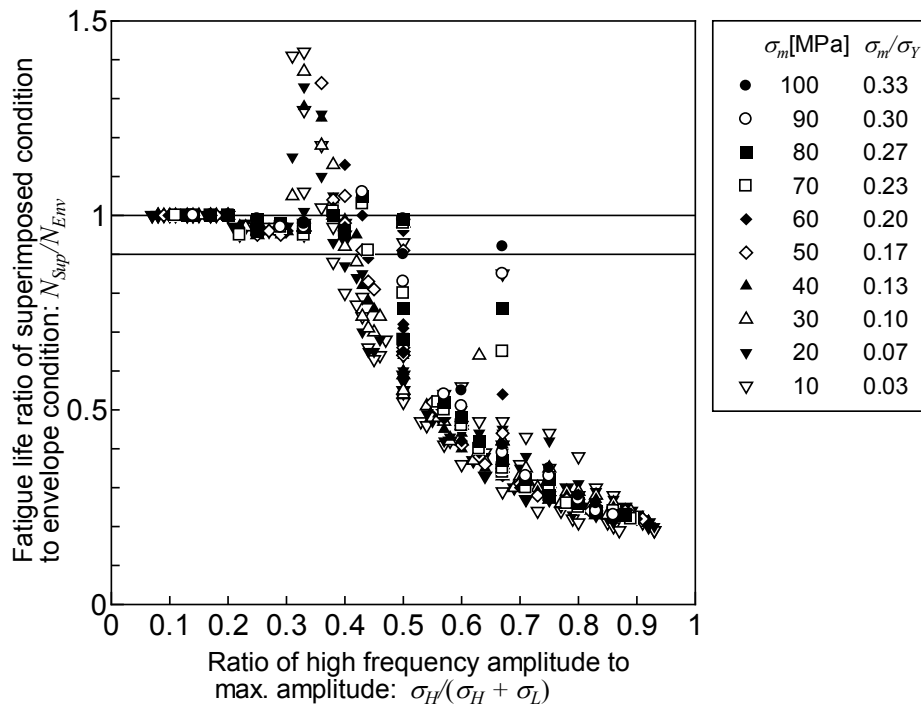
Mean		High amplitude: σ_H													
10		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Low amplitude: σ_L	10	0.98	0.85	0.44	0.38	0.30	0.28	0.25	0.24	0.23	0.21	0.21	0.20	0.19	0.19
	20	0.98	0.93	0.56	0.47	0.43	0.35	0.30	0.28	0.25	0.23	0.21	0.20	0.19	
	30	0.96	0.98	0.64	0.54	0.47	0.41	0.36	0.31	0.27	0.24	0.22	0.21		
	40	1.00	0.95	0.74	0.59	0.50	0.45	0.39	0.34	0.30	0.27	0.24			
	50	1.00	0.97	0.88	0.66	0.55	0.48	0.42	0.37	0.33	0.29				
	60	1.00	0.96	1.06	0.80	0.63	0.52	0.46	0.41	0.36					
	70	1.00	0.95	0.97	1.02	0.77	0.64	0.53	0.47						
	80	1.00	1.00	0.96	1.27	0.97	0.79	0.68							
	90	1.00	1.00	0.96	1.41	1.18	0.95								
	100	1.00	1.00	0.97	0.97	1.42									
	110	1.00	1.00	0.97	0.97										
	120	1.00	1.00	1.00											
	130	1.00	1.00												
	140	1.00													
	150														

Table 6.3 の結果を最大応力振幅（高周波振幅 σ_H + 低周波振幅 σ_L ）に対する高周波振幅の比 $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L)$ で整理した結果を Fig. 6.3 に示す. Fig. 6.3 より, 平均応力に依らず $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L)$ が 0.36 以下, つまり $\sigma_H/\sigma_L \leq 0.56$ であれば, 重畳波条件の疲労寿命 N_{Sup} は包絡波条件の疲労寿命 N_{Env} に対して 90%を超えており, 高周波振幅の疲労寿命に及ぼす影響を実質的に無視できることが分かる. この結果は Fricke ら³⁵⁾, 田中ら³⁴⁾の結果と一致している. ただし, Fricke らの結果は荷重非伝達型十字継手試験片で両振り荷重(平均応力 0), かつ低周波一波当たりの高周波振幅数(以下重畳山数と称する)が 9 であり, 田中の結果は切欠き付き丸棒で両振り荷重(平均応力 0), かつ重畳山数は本研究と同じ 5 である. また, Osawa ら³⁶⁾は "Enlargement 法" により重畳応力履歴の中から包絡波形を抽出して疲労寿命評価を行う簡易的な手法を提案したが, Fig. 6.3 より低周波振幅に対して高周波振幅が比較的小さい重畳応力履歴であれば, 大沢らの手法は非常に有効であることが考えられる. また, 減衰重畳応力履歴に対しても, 初期の比較的大きな高周波振幅による低周波振幅の増大を考慮すれば, 後に重畳する微小振幅は殆ど無視しても推定される疲労寿命に及ぼす影響は少ないことが予想される.

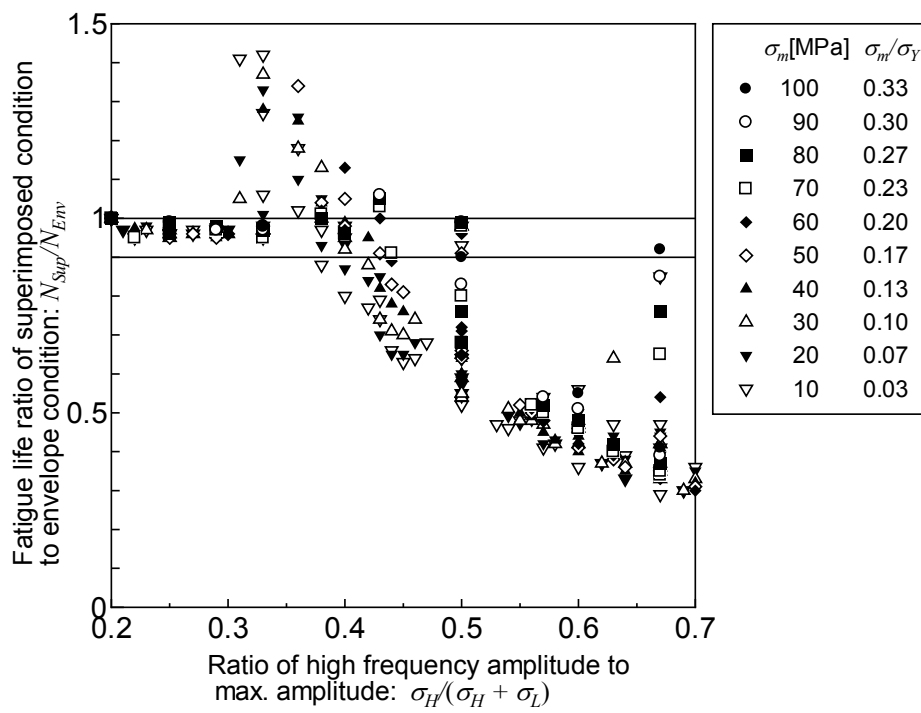
また, Fig. 6.3 より, $\sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L) = 0.5$, 及び 0.67, つまり, $\sigma_H/\sigma_L = 1.0$, 及び 2.0 の時点において疲労寿命比のバラツキが大きくなっていることが確認できる. この原因を考察するため, $\sigma_H/\sigma_L = 1.0$ 時点における疲労寿命比 N_{Sup}/N_{Env} と降伏応力に対する低周波振幅の比 σ_L/σ_Y の関係を Fig. 6.4 に示す. Fig. 6.4 より, σ_H/σ_L が同じ値であっても, 低・高周波振幅両方が小さくなるほど疲労寿命比 N_{Sup}/N_{Env} は 1 に近い値となることが分かる. 本章における解析条件では各応力の値は 10MPa 刻みで変化させているため, 最大応力振幅が最小の 20MPa, その次の 30MPa となる条件では, $(\sigma_H, \sigma_L) = (10, 10), (10, 20)$, 及び $(20, 10)$ となり, $\sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L) = 0.33, 0.50$, 及び 0.67 となるため, この地点における N_{Sup}/N_{Env} の大きなバラツキが生じたものと推測される.

また, Fig. 6.3 より, $\sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L)$ がおおよそ 0.3~0.45 の範囲で, 包絡波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比 N_{Sup}/N_{Env} が 1 を超える(重畳波中の高周波振幅が疲労寿命を延ばす側に寄与している)条件が見られることが分かる. これと同様な傾向は田中ら³⁴⁾, 角ら⁵¹⁾も確認しており, 角らは重畳する小振幅による亀裂伝播遅延効果のメカニズムは, 疲労亀裂表面の残留塑性域層の挙動により解明できるのではないかと考察している.

過去の研究結果と本章における解析結果において, 重畳波による疲労寿命の延長現象が生じている領域は, Table 6.4 及び Fig. 6.5 に示すようにまとめられる.



(a) All data



(b) $2.0 \leq \sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L) \leq 7.0$

Fig. 6. 3 Relation between N_{Sup}/N_{Env} and $\sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L)$.

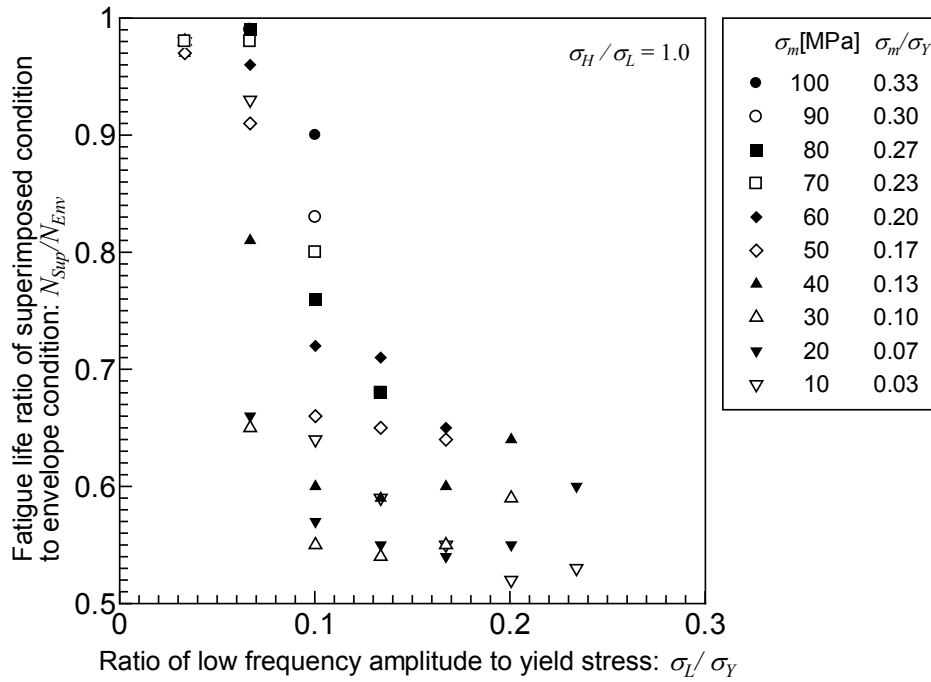


Fig. 6. 4 Relation between N_{Sup}/N_{Env} and σ_L/σ_Y at $\sigma_H/\sigma_L = 1.0$.

Table 6. 4 The details of certain conditions whose fatigue life is longer than the envelope conditions.

	Mean stress σ_m	Ratio to yield stress σ_m/σ_Y	$\sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L)$
Experiment after Tanaka et al. ³⁴⁾	0	0.00	0.2 ~ 0.4
Simulation	10	0.03	0.31 ~ 0.35
	20	0.07	0.31 ~ 0.38
	30	0.10	0.31 ~ 0.38
	40	0.13	0.33 ~ 0.38
	50	0.17	0.33 ~ 0.38
	60	0.20	0.35 ~ 0.40
	70	0.23	0.38 ~ 0.43
	80	0.27	0.38 ~ 0.43
	90	0.30	0.42
	100	0.33	Nothing

[unit: MPa]

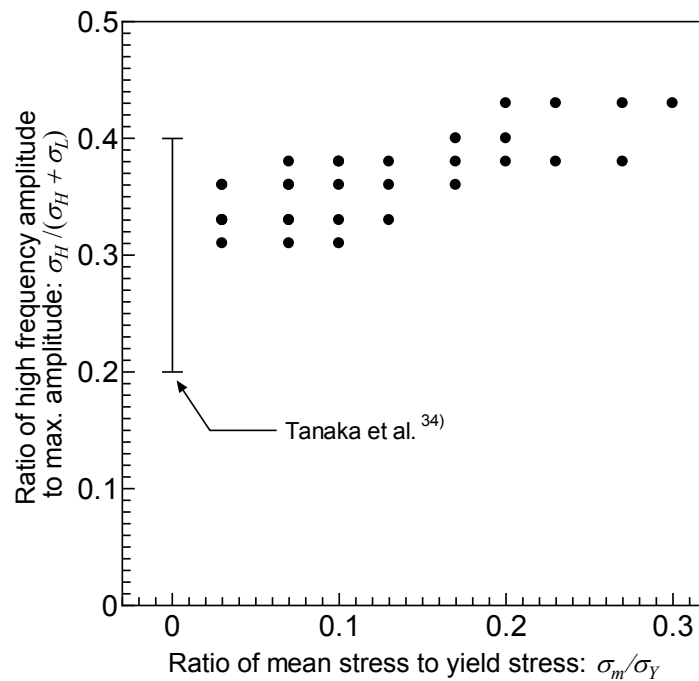


Fig. 6. 5 Relation between $\sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L)$ and σ_m/σ_Y .

Table 6. 4, 及び Fig. 6. 5 より, 解析結果から得られた各平均応力における重畳波による疲労寿命の延長現象が見られる $\sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L)$ の範囲は, おおよそ田中らの結果を支持していると考えられる. また, 同現象が見られる $\sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L)$ の値の範囲は, 平均応力が高くなるにつれて徐々に上昇する傾向が確認できる. なお, この結果は数値シミュレーションのみから導かれたものであることは留意すべきである.

6.3.3 低周波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比

続いて, 低周波振幅のみを载荷した低周波条件に対する重畳波条件の疲労寿命の比 N_{Sup}/N_{Low} を Table 6. 5 に示す.

Table 6. 5 The ratio of the fatigue life of superimposed condition to one of low frequency condition.

(a) Mean 100 MPa

Mean		High amplitude: σ_H				
100		10	20	30	40	50
Low amplitude: σ_L	10	-	0.07	0.01	0.01	0.00
	20	0.40	0.22	0.08	0.04	
	30	0.54	0.35	0.23		
	40	0.67	0.45			
	50	0.69				
	60					

(b) Mean 90 MPa

Mean		High amplitude: σ_H					
90		10	20	30	40	50	60
Low amplitude: σ_L	10	-	0.07	0.01	0.01	0.01	0.00
	20	0.41	0.24	0.08	0.05	0.03	
	30	0.56	0.38	0.23	0.11		
	40	0.69	0.47	0.38			
	50	0.71	0.51				
	60	0.74					
	70						
	80						

(c) Mean 80MPa

Mean		High amplitude: σ_H						
80		10	20	30	40	50	60	70
Low amplitude: σ_L	10	-	0.07	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00
	20	0.43	0.26	0.09	0.05	0.03	0.02	
	30	0.59	0.40	0.23	0.12	0.07		
	40	0.71	0.49	0.40	0.20			
	50	0.72	0.52	0.41				
	60	0.74	0.54					
	70	0.77						
	80							
	90							

(d) Mean 70 MPa

Mean		High amplitude: σ_H							
70		10	20	30	40	50	60	70	80
Low amplitude: σ_L	10	0.20	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
	20	0.46	0.29	0.10	0.05	0.03	0.02	0.02	
	30	0.61	0.42	0.26	0.12	0.07	0.05		
	40	0.71	0.50	0.40	0.20	0.12			
	50	0.74	0.53	0.42	0.29				
	60	0.73	0.54	0.41					
	70	0.76	0.56						
	80	0.77							
	90								

(e) Mean 60 MPa

Mean		High amplitude: σ_H								
60		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Low amplitude: σ_L	10	0.22	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
	20	0.50	0.32	0.11	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	
	30	0.63	0.44	0.25	0.12	0.07	0.05	0.03		
	40	0.70	0.50	0.39	0.20	0.11	0.07			
	50	0.75	0.53	0.42	0.28	0.16				
	60	0.73	0.53	0.40	0.37					
	70	0.75	0.55	0.42						
	80	0.77	0.59							
	90	0.77								
	100									

(f) Mean 50 MPa

Mean		High amplitude: σ_H									
50		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Low amplitude: σ_L	10	0.25	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
	20	0.53	0.33	0.12	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	
	30	0.64	0.45	0.23	0.12	0.07	0.05	0.03	0.02		
	40	0.69	0.49	0.34	0.18	0.10	0.07	0.04			
	50	0.74	0.52	0.42	0.25	0.15	0.09				
	60	0.74	0.53	0.40	0.33	0.20					
	70	0.73	0.54	0.41	0.44						
	80	0.76	0.59	0.43							
	90	0.77	0.59								
	100	0.77									
	110										

(g) Mean 40 MPa

Mean		High amplitude: σ_H										
40		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Low amplitude: σ_L	10	0.29	0.07	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
	20	0.55	0.31	0.12	0.07	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	
	30	0.65	0.45	0.20	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02		
	40	0.68	0.47	0.29	0.15	0.09	0.06	0.04	0.03			
	50	0.71	0.50	0.40	0.22	0.13	0.08	0.05				
	60	0.74	0.52	0.39	0.30	0.18	0.11					
	70	0.73	0.52	0.40	0.39	0.23						
	80	0.74	0.57	0.42	0.42							
	90	0.77	0.59	0.43								
	100	0.77	0.58									
	110	0.76										
	120											

(g) Mean 30 MPa

Mean		High amplitude: σ_H											
30		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Low amplitude: σ_L	10	0.34	0.09	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	20	0.57	0.24	0.12	0.07	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	
	30	0.62	0.42	0.16	0.10	0.10	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01		
	40	0.69	0.45	0.25	0.13	0.08	0.06	0.04	0.03	0.02			
	50	0.68	0.47	0.36	0.18	0.11	0.07	0.05	0.03				
	60	0.72	0.50	0.37	0.27	0.16	0.10	0.07					
	70	0.73	0.51	0.38	0.36	0.21	0.13						
	80	0.72	0.55	0.40	0.44	0.28							
	90	0.76	0.58	0.43	0.36								
	100	0.76	0.59	0.44									
	110	0.77	0.59										
	120	0.77											
	130												

(h) Mean 20 MPa

Mean		High amplitude: σ_H												
20		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Low amplitude: σ_L	10	0.38	0.10	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	20	0.54	0.22	0.11	0.06	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	
	30	0.58	0.36	0.15	0.09	0.06	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01		
	40	0.66	0.42	0.21	0.12	0.08	0.05	0.03	0.02	0.02	0.01			
	50	0.67	0.45	0.31	0.16	0.10	0.06	0.04	0.03	0.02				
	60	0.69	0.48	0.36	0.23	0.13	0.08	0.06	0.04					
	70	0.73	0.51	0.37	0.32	0.19	0.12	0.08						
	80	0.72	0.53	0.39	0.41	0.25	0.16							
	90	0.73	0.56	0.41	0.38	0.33								
	100	0.77	0.58	0.44	0.35									
	110	0.76	0.59	0.45										
	120	0.77	0.61											
	130	0.80												
	140													

(i) Mean 10 MPa

Mean		High amplitude: σ_H													
10		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Low amplitude: σ_L	10	0.33	0.13	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	20	0.46	0.25	0.09	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	30	0.54	0.33	0.14	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00		
	40	0.59	0.37	0.19	0.11	0.07	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01			
	50	0.66	0.43	0.27	0.15	0.09	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01				
	60	0.66	0.45	0.35	0.19	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02					
	70	0.70	0.48	0.35	0.28	0.16	0.10	0.07	0.05						
	80	0.72	0.52	0.37	0.38	0.22	0.14	0.10							
	90	0.72	0.54	0.40	0.45	0.30	0.19								
	100	0.75	0.57	0.43	0.34	0.40									
	110	0.76	0.59	0.45	0.36										
	120	0.77	0.61	0.49											
	130	0.79	0.63												
	140	0.80													
	150														

Table 6.5 の結果を最大応力振幅に対する高周波振幅の比 $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L)$ で整理した結果を Fig. 6.6 に示す. Fig. 6.6 より, いずれの条件においても低周波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比 N_{Sup}/N_{Low} は 0.9 を下回っていることが分かる. すなわち, 重畳応力履歴下の疲労寿命を評価する際に高周波振幅の影響を無視することは, 高周波振幅が低周波振幅に対してどれだけ小さくても危険な結果を与える可能性を示唆している. 一方, Fig. 6.3 より, 包絡波条件と重畳波条件の疲労寿命の比では 0.9 以上の条件も多く存在したことから, これらの結果は, 「高周波振幅による疲労被害の増加は最大応力振幅の増加によるものが殆どで, 重畳する微小振幅の影響は比較的小さい」という, 先の多くの研究者による結論を支持していることが分かる.

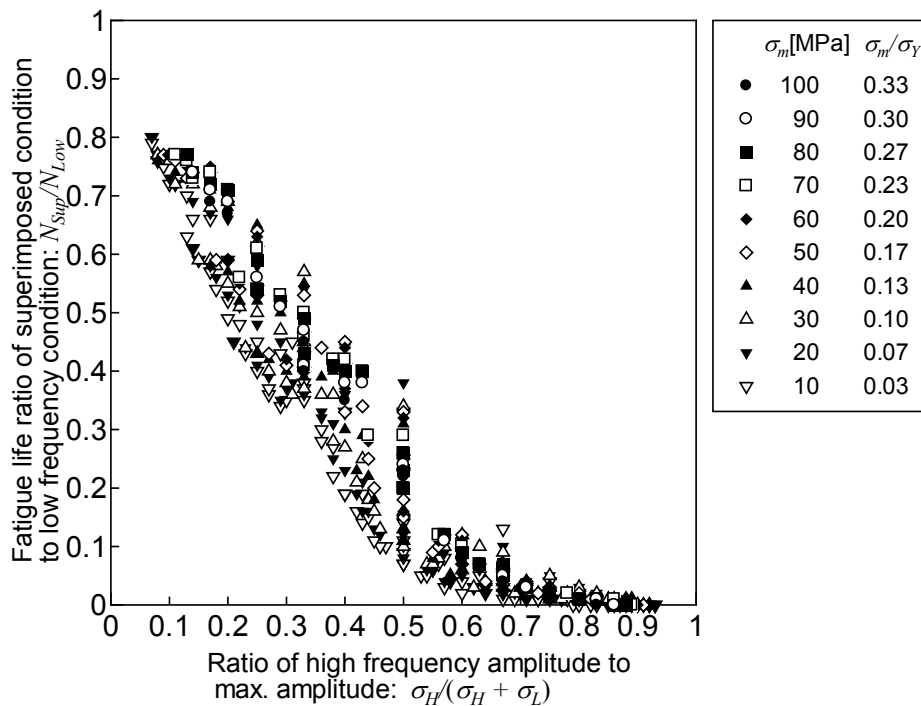


Fig. 6.6 Relation between N_{Sup}/N_{Low} and $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L)$.

6.3.4 高周波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比

続いて, 低周波振幅を省き高周波振幅成分のみを繰返し載荷した高周波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比 N_{Sup}/N_{High} を Table 6.6 に示す. また, 各表において黒色に塗りつぶされた部分は数値が 1.0 以上のものであり, 重畳波条件と包絡波条件の疲労寿命が同じであるか, 若しくは重畳波の方が疲労寿命が長い条件であり, 灰色に塗りつぶされた部分は数値が 0.90 以上のもの, つまり, 高周波条件の疲労寿命に対して重畳波条件

の疲労寿命が 90%以上の場合（高周波振幅の繰返しとして評価することで、概ねの疲労寿命評価が可能である場合）を表している。

Table 6. 6 The ratio of the fatigue life of superimposed condition to one of high frequency condition.

(a) Mean 100 MPa

Mean		High amplitude: σ_H				
100		10	20	30	40	50
Low amplitude: σ_L	10	-	1.88	0.97	0.94	0.89
	20	0.35	1.11	1.00	0.96	
	30	0.19	0.72	1.16		
	40	0.13	0.51			
	50	0.09				
	60					

(b) Mean 90 MPa

Mean		High amplitude: σ_H					
90		10	20	30	40	50	60
Low amplitude: σ_L	10	-	1.80	0.95	0.93	0.86	0.86
	20	0.38	1.19	1.00	0.95	0.87	
	30	0.22	0.80	1.16	0.97		
	40	0.15	0.57	1.09			
	50	0.11	0.42				
	60	0.08					
	70						

(c) Mean 80MPa

Mean		High amplitude: σ_H						
80		10	20	30	40	50	60	70
Low amplitude: σ_L	10	-	1.70	0.94	0.91	0.86	0.86	0.87
	20	0.42	1.31	1.00	0.94	0.85	0.79	
	30	0.25	0.90	1.15	0.97	0.85		
	40	0.18	0.65	1.18	0.99			
	50	0.13	0.49	0.86				
	60	0.10	0.37					
	70	0.07						
	80							

(d) Mean 70 MPa

Mean		High amplitude: σ_H							
70		10	20	30	40	50	60	70	80
Low amplitude: σ_L	10	1.02	1.56	0.93	0.90	0.89	0.87	0.87	0.85
	20	0.48	1.46	1.02	0.92	0.82	0.77	0.75	
	30	0.30	1.02	1.30	0.97	0.83	0.74		
	40	0.22	0.74	1.23	1.00	0.82			
	50	0.16	0.55	0.92	1.03				
	60	0.12	0.42	0.67					
	70	0.09	0.32						
	80	0.07							
	90								

(e) Mean 60 MPa

Mean		High amplitude: σ_H								
60		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Low amplitude: σ_L	10	1.10	1.39	0.92	0.92	0.92	0.88	0.88	0.87	0.84
	20	0.56	1.59	1.05	0.88	0.83	0.78	0.76	0.74	
	30	0.36	1.13	1.23	0.93	0.80	0.70	0.67		
	40	0.26	0.83	1.25	1.02	0.80	0.68			
	50	0.20	0.61	0.94	0.99	0.79				
	60	0.14	0.46	0.69	0.96					
	70	0.11	0.35	0.53						
	80	0.08	0.28							
	90	0.06								
	100									

(f) Mean 50 MPa

Mean		High amplitude: σ_H									
50		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Low amplitude: σ_L	10	1.25	1.17	0.95	0.94	0.94	0.89	0.87	0.87	0.85	0.83
	20	0.67	1.65	1.10	0.87	0.85	0.79	0.76	0.74	0.72	
	30	0.45	1.22	1.13	0.90	0.77	0.69	0.65	0.64		
	40	0.32	0.88	1.15	0.89	0.76	0.64	0.59			
	50	0.24	0.65	0.96	0.87	0.75	0.63				
	60	0.17	0.48	0.68	0.85	0.73					
	70	0.13	0.37	0.52	0.82						
	80	0.10	0.29	0.40							
	90	0.08	0.22								
	100	0.06									
	110										

(g) Mean 40 MPa

Mean		High amplitude: σ_H										
40		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Low amplitude: σ_L	10	1.45	1.15	1.02	0.96	0.94	0.92	0.87	0.86	0.85	0.83	0.81
	20	0.82	1.55	1.03	0.90	0.85	0.81	0.76	0.74	0.72	0.69	
	30	0.55	1.26	0.99	0.81	0.76	0.71	0.65	0.63	0.61		
	40	0.39	0.90	1.00	0.76	0.69	0.62	0.56	0.54			
	50	0.28	0.65	0.92	0.75	0.65	0.59	0.52				
	60	0.20	0.48	0.64	0.73	0.63	0.57					
	70	0.15	0.36	0.48	0.71	0.60						
	80	0.11	0.28	0.37	0.55							
	90	0.08	0.22	0.29								
	100	0.06	0.16									
	110	0.05										
	120											

(g) Mean 30 MPa

Mean		High amplitude: σ_H											
30		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Low amplitude: σ_L	10	1.71	1.23	1.10	1.00	0.94	0.92	0.88	0.85	0.85	0.83	0.81	0.80
	20	0.99	1.22	1.00	0.99	0.85	0.82	0.76	0.73	0.72	0.69	0.67	
	30	0.64	1.23	0.82	0.79	1.15	0.71	0.66	0.62	0.61	0.58		
	40	0.45	0.85	0.80	0.66	0.61	0.61	0.56	0.53	0.52			
	50	0.31	0.60	0.79	0.63	0.54	0.53	0.49	0.46				
	60	0.22	0.44	0.55	0.62	0.52	0.51	0.46					
	70	0.16	0.32	0.41	0.61	0.51	0.49						
	80	0.12	0.25	0.31	0.54	0.50							
	90	0.09	0.19	0.24	0.32								
	100	0.07	0.15	0.19									
	110	0.05	0.11										
	120	0.04											
	130												

(h) Mean 20 MPa

Mean		High amplitude: σ_H												
20		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Low amplitude: σ_L	10	1.91	1.26	1.24	1.03	0.96	0.92	0.90	0.85	0.83	0.82	0.80	0.78	0.78
	20	1.05	1.09	0.97	0.98	0.88	0.82	0.78	0.73	0.70	0.68	0.65	0.63	
	30	0.63	1.01	0.76	0.76	0.74	0.71	0.67	0.61	0.58	0.57	0.55		
	40	0.42	0.70	0.63	0.60	0.59	0.58	0.56	0.52	0.50	0.49			
	50	0.29	0.49	0.61	0.52	0.48	0.48	0.48	0.45	0.43				
	60	0.20	0.35	0.48	0.50	0.44	0.42	0.42	0.40					
	70	0.14	0.25	0.34	0.49	0.44	0.40	0.41						
	80	0.10	0.19	0.26	0.45	0.42	0.40							
	90	0.08	0.15	0.20	0.30	0.40								
	100	0.06	0.11	0.15	0.20									
	110	0.04	0.09	0.12										
	120	0.03	0.07											
	130	0.03												
	140													

(i) Mean 10 MPa

Mean		High amplitude: σ_H													
10		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Low amplitude: σ_L	10	1.64	1.98	1.25	1.13	1.00	0.91	0.89	0.85	0.82	0.81	0.78	0.76	0.75	0.75
	20	0.76	1.23	0.94	0.93	0.93	0.81	0.77	0.71	0.67	0.65	0.63	0.60	0.60	
	30	0.42	0.76	0.71	0.70	0.72	0.69	0.66	0.60	0.55	0.53	0.51	0.50		
	40	0.26	0.49	0.54	0.54	0.56	0.54	0.54	0.50	0.47	0.46	0.45			
	50	0.17	0.33	0.45	0.43	0.44	0.43	0.44	0.43	0.41	0.41				
	60	0.11	0.23	0.39	0.38	0.38	0.36	0.37	0.37	0.36					
	70	0.08	0.16	0.26	0.36	0.35	0.34	0.34	0.34						
	80	0.06	0.12	0.19	0.34	0.34	0.33	0.34							
	90	0.04	0.09	0.15	0.29	0.33	0.32								
	100	0.03	0.07	0.11	0.16	0.32									
	110	0.02	0.05	0.09	0.13										
	120	0.02	0.04	0.07											
	130	0.01	0.03												
	140	0.01													
	150														

Table 6. 6 に示した疲労寿命比の中には値が 1.00 を超えるものも多く存在するが、この原因としては、低周波の最大振幅と高周波の最大振幅が重なった時点において亀裂先端に生じた大きな塑性域の存在が、以降の応力サイクルで生じる亀裂伝播を遅延させる現象が生じているためではないかと考えられる。また、高周波振幅が 10MPa 付近の小さい条件では、低周波振幅の増大に伴って急激に疲労寿命比が低下しているが、この傾向に関しては、微小な高周波振幅が重畳した応力履歴は変動応力により疲労限が低下することで、一定平均応力条件に比べて疲労寿命が著しく低下するという結果⁵²⁾と、同様の原因であると考えられる。

Table 6. 6 の結果を最大応力振幅に対する高周波振幅の比 $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L)$ で整理した結果を Fig. 6. 7 に示す。Fig. 6. 7 より、 $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L) \leq 0.3$ の範囲では、最大応力振幅に対する高周波振幅の比が増加するにつれて疲労寿命比 N_{Sup}/N_{High} の値が増加することが確認できるが、疲労寿命比 $N_{Sup}/N_{High} > 0.90$ となる結果が分布している $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L) > 0.3$ の範囲ではバラツキが大きいことが確認できる。また、 $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L) = 0.5$ 、及び 0.67 つまり $\sigma_H/\sigma_L = 1.0$ 、及び 2.0 の時点において疲労寿命比 N_{Sup}/N_{High} のバラツキが大きくなっていることが確認できるが、この理由は Fig. 6. 3 と同様に、 $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L) = 0.5$ 、及び 0.67 付近における解析条件の数が多く、解析を実施した低周波振幅、高周波振幅の値の範囲が幅広いことも一因であると考えられる。Fig. 6. 7 中 $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L) = 0.5$ 時点における疲労寿命比 N_{Sup}/N_{High} と降伏応力に対する低周波振幅 σ_L/σ_Y の関係を Fig. 6. 8 に示す。Fig. 6. 8 より、 σ_L/σ_Y が増加するにつれて疲労寿命比 N_{Sup}/N_{High} は減少する傾向が確認できる。

Fig. 6. 7, Fig. 6. 8 より、最大応力振幅に対して高周波振幅が小さいほど、かつ降伏応力に対して最大応力振幅が小さいほど疲労寿命比 N_{Sup}/N_{High} は 1 に近くなる傾向が確認できる。これらの結果より、降伏応力に対する最大応力振幅の比で疲労寿命比 N_{Sup}/N_{High} を整理した結果を Fig. 6. 9 に示す。Fig. 6. 9 より、 $(\sigma_H+\sigma_L)/\sigma_Y \leq 0.35$ の範囲では $N_{Sup}/N_{High} > 0.9$ となる結果が存在することが確認できるものの、この結果も依然としてバラツキが大きいことが確認できる。以上の結果から、本章の解析結果から重畳波条件を高周波条件と置き換えて疲労寿命評価を行う事の出来る範囲・条件を導出することは困難であると思われる。

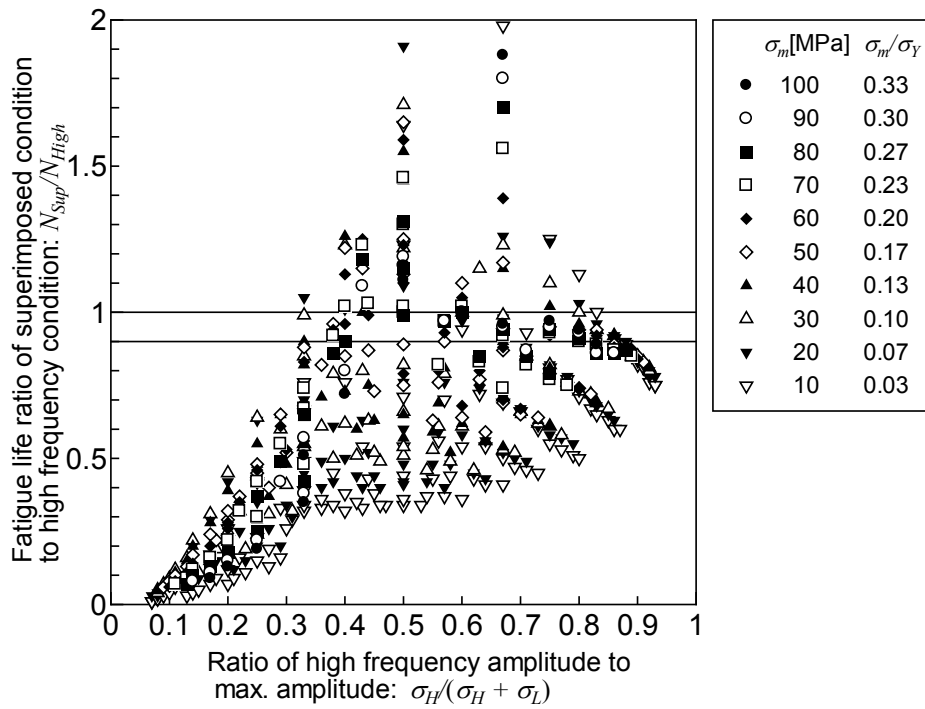


Fig. 6. 7 Relation between N_{Sup}/N_{High} and $\sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L)$.

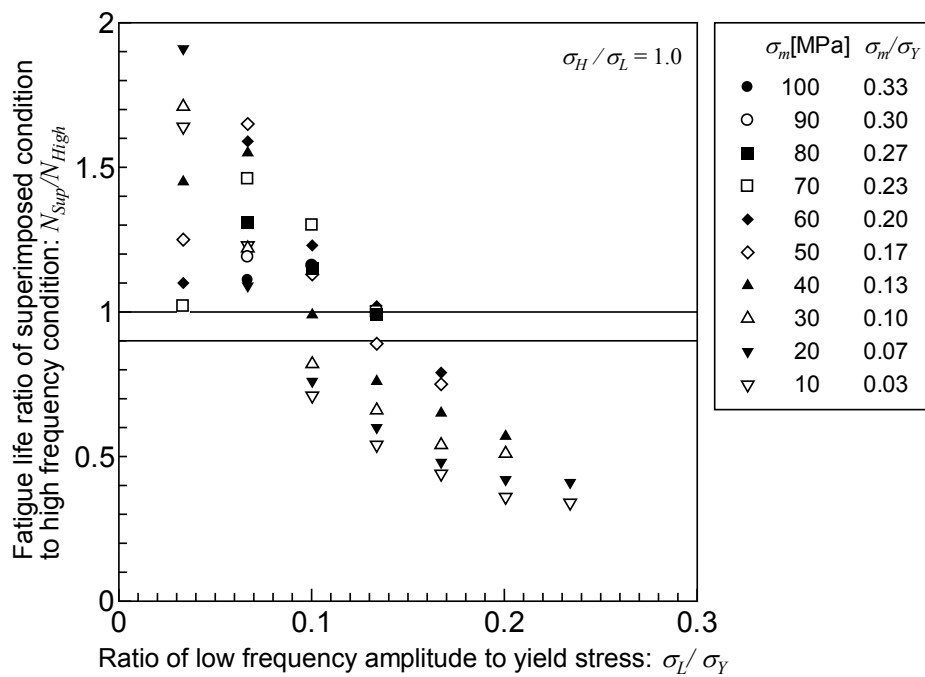


Fig. 6. 8 Relation between N_{Sup}/N_{High} and σ_L/σ_Y at $\sigma_H/\sigma_L = 1.0$

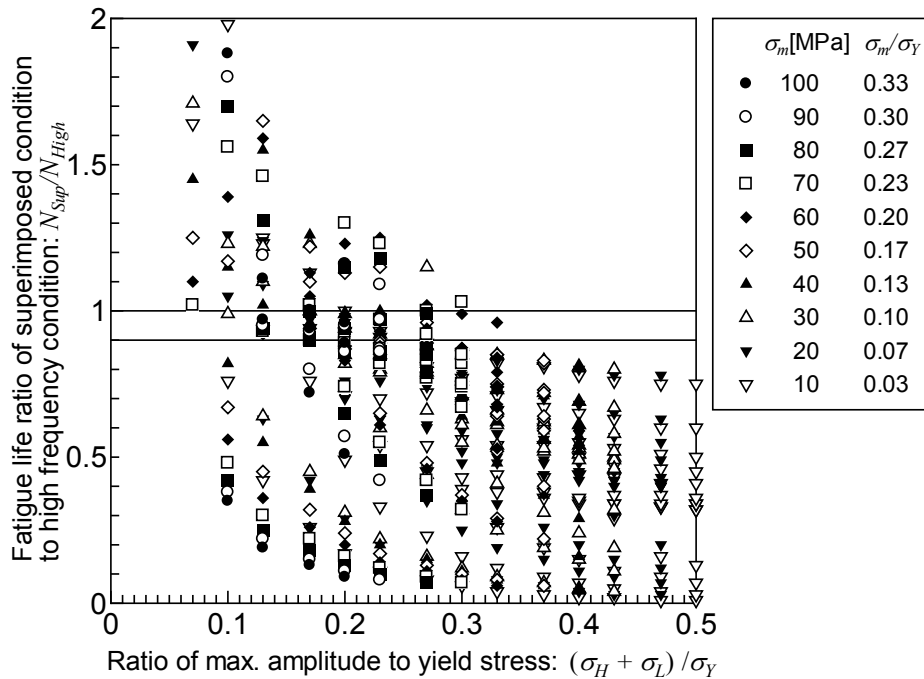
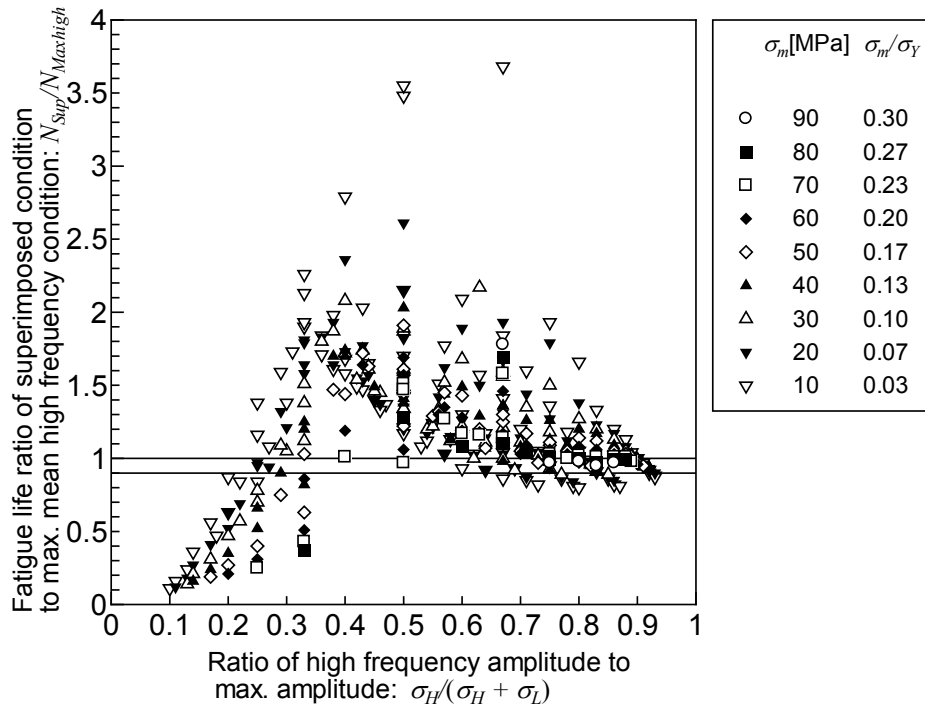


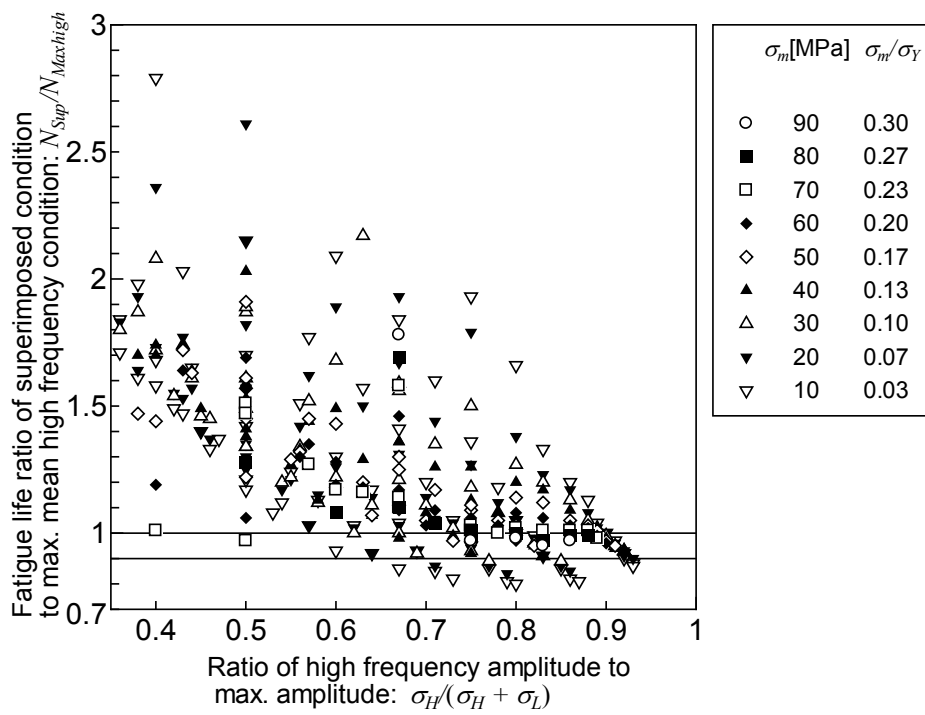
Fig. 6.9 Relation between N_{Sup}/N_{High} and $(\sigma_H + \sigma_L)/\sigma_Y$.

山田ら⁵²⁾は重畳波応力履歴下における疲労試験を実施し得られた S-N 線図と、種々の平均応力を設定した一定振幅応力履歴下における S-N 線図を比較することで、重畳波条件の疲労寿命は低周振幅の最大応力を平均応力とした一定振幅応力履歴を載荷した場合の疲労寿命により代用できる場合があると報告している。そこで、山田らの結論に沿って、本章で実施した解析条件における最大平均高周波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比 $N_{Sup}/N_{Maxhigh}$ と最大応力振幅に対する高周波振幅比 $\sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L)$ の関係を調査した結果を Fig. 6.10 に示す。

Fig. 6.10 より、 $0.35 < \sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L) < 0.64$ の範囲では疲労寿命比 $N_{Sup}/N_{Maxhigh}$ は概ね 0.9 を上回っており、この範囲では重畳波条件の疲労寿命は最大平均高周波条件の疲労寿命で代用しても危険側の結果とはならないことが予想される。しかしながら、疲労寿命比 $N_{Sup}/N_{Maxhigh}$ はバラツキが大きく、中には 3.0 を超える結果も存在している。



(a) All data



(b) $0.35 \leq \sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L) \leq 1.0$

Fig. 6. 10 Relation between $N_{Sup}/N_{Maxhigh}$ and $\sigma_H/(\sigma_H + \sigma_L)$.

6.4 結言

本章で実施した複数の重畳応力履歴下、一定振幅応力履歴下における疲労亀裂伝播解析結果の比較により得られた結論を以下にまとめる。

- ・重畳応力履歴の低周波振幅に対する高周波振幅の比 σ_H/σ_L が 0.56 以下であれば、最大・最小を包絡させた包絡波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比 N_{Sup}/N_{Env} は 0.9 以上の値となるため、一定振幅の包絡波条件に置き換えて疲労寿命を評価することが概ね可能であると考えられる。
- ・重畳応力履歴の最大応力振幅に対する高周波振幅の比 $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L)$ が 0.31 ~ 0.43 の範囲では、一部の条件で包絡波条件よりも重畳波条件の方が、疲労寿命が長くなる現象が確認された。同現象は応力履歴中の最大応力が比較的大きい場合にのみ生じていた。また、平均応力が高くなるほど同現象の生じる $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L)$ の範囲は上昇する傾向が確認された。
- ・低周波のみを載荷した低周波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比 N_{Sup}/N_{Low} は、本章で実施した全解析条件において 0.9 未満となり、重畳波条件を低周波条件に置き換えて疲労寿命を評価すると、実際よりも短い疲労寿命を与える可能性があることを示した。
- ・高周波振幅が極小さい条件において、上記の疲労寿命比が 0.9 を超える範囲から外れると高周波条件に対して重畳波条件の疲労寿命が著しく低くなる領域が確認された。
- ・重畳波条件と高周波条件の疲労寿命の比を比較すると、重畳波条件の方が高周波条件よりも疲労寿命が長い場合が複数確認されたが、この原因は低周波の最大振幅と高周波の最大振幅が重なった時点において亀裂先端に大きな塑性域が形成された影響で、以降の応力履歴中で僅かながらの亀裂伝播遅延現象が生じているためではないかと考えられる。
- ・重畳応力履歴の最大応力振幅に対する高周波振幅の比 $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L)$ が 0.3 以上の条件、または、降伏応力に対する最大応力振幅の比 $(\sigma_H+\sigma_L)/\sigma_Y$ が 0.35 以下の条件では、高周波振幅のみを載荷した高周波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比 N_{Sup}/N_{High} が 0.9 を超える条件が確認されたものの、これら結果はバラツキが非常に大きく、 $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L)$ 、及び $(\sigma_H+\sigma_L)/\sigma_Y$ の値から N_{Sup}/N_{High} が 0.9 を超える範囲・条件を一概に定めることはできなかった。

- ・重畳応力履歴の最大応力振幅に対する高周波振幅の比 $\sigma_H/(\sigma_H+\sigma_L)$ が 0.35 ~ 0.64 の範囲では、重畳応力履歴の低周波振幅の最大応力を平均応力として高周波振幅のみを載荷した最大平均高周波条件に対する重畳波条件の疲労寿命比 $N_{Sup}/N_{Maxhigh}$ は 0.9 以上となるため、この範囲の重畳波条件は最大平均高周波条件に置き換えて疲労寿命評価を行えば、安全側の結果が得られることが推測されるものの、この結果はバラツキが大きく、 $N_{Sup}/N_{Maxhigh} > 3.0$ となる結果もあることから、この置き換えにより精度良い疲労寿命推定を行うことは困難であると考えられる。

第7章 結論

本研究は、重畳応力履歴下における疲労亀裂先端の塑性挙動に着目し、亀裂先端に形成される両振塑性域内で消費される繰返し塑性仕事を閾値とし、疲労亀裂伝播に寄与する有効応力履歴を抽出する有効応力履歴選択アルゴリズムを考案し、RPG 基準による疲労亀裂伝播則を用いて疲労亀裂伝播解析を行った。そして、重畳応力条件下における疲労亀裂伝播試験結果と解析結果を比較し、提案手法の妥当性を検証した。また、種々の平均応力条件を設定した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験を実施し、数値シミュレーション結果との比較を通して同手法の平均応力影響の対応を検証するとともに、重畳応力履歴下において平均応力が疲労亀裂成長挙動に与える影響について考察を行った。また、等価疲労応力を用いて重畳応力履歴を一定振幅応力履歴に変換して簡便に疲労亀裂伝播解析を行う方法について検討した。最後に、種々の応力条件を設定した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播解析を実施し、各因子が亀裂伝播挙動に与える影響を考察するとともに、重畳応力履歴を一定振幅応力履歴と置き換えて疲労寿命評価を行うことの出来る範囲・条件について検討を行った。

以下に結論を述べる。

- ・ 大小の高周波振幅が重畳した一定振幅重畳波条件と減衰重畳波条件に対して有効応力履歴選択アルゴリズムを導入した疲労亀裂成長シミュレーションを用いて疲労亀裂伝播解析を行った結果、試験結果と解析結果は良好な一致を示し、シミュレーション手法の妥当性を確認した。
- ・ 重畳応力履歴を解析した際の有効応力抽出基準値から算出される単位体積当たりの塑性仕事の推移と、応力 ~ ひずみ関係に弾完全塑性体を想定した場合の 0.2% 永久ひずみ時の単位体積当たり塑性仕事量を比較から、重畳応力履歴下において疲労亀裂が伝播するために必要な塑性仕事量についての考察を行ない、設定した閾値の妥当性を確認した。
- ・ 種々の平均応力条件を設定した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験を実施し、有効応力履歴選択アルゴリズムを導入した疲労亀裂成長シミュレーションを用いて疲労亀裂伝播解析を実施し、提案手法が重畳応力履歴下における平均応力影響についても考慮できることを確認した。

- ・等価疲労応力範囲を用いて重畳応力履歴を一定振幅応力履歴に変換して、RPG 基準の疲労亀裂伝播則を用いて疲労亀裂伝播解析を行った結果、Paris 則を用いた場合に比べ応力履歴の平均応力影響の考慮について改善が見られたものの、解析結果は応力変換手法によるバラツキが大きく、この手法による疲労亀裂伝播解析は必ずしも良好な結果ではないことが分かった。
- ・種々の低周波応力振幅、高周波応力振幅、平均応力を設定した一定振幅重畳波条件を作成し、有効応力履歴選択アルゴリズムを導入した RPG 基準の亀裂伝播則に基づく疲労亀裂伝播解析を行った結果、得られた傾向は他の研究者らによる研究成果と概ね一致していることを確認し、重畳応力履歴を特定の一定振幅応力履歴に変換できる範囲・条件についてその傾向を確認した。

以上の結果より、本研究において提案した、不規則な応力履歴の中から疲労亀裂伝播に有効な応力成分を抽出する有効応力履歴選択アルゴリズムと、それを導入した RPG 基準の疲労亀裂成長シミュレーションは種々の低周波応力振幅、高周波振幅、及び平均応力条件下での一定振幅重畳応力履歴下において良好な疲労亀裂伝播挙動推定を行うことができると考えられる。また、減衰する高周波振幅が重畳した応力履歴や、平均応力が変動する重畳応力履歴下、実船に作用する実働応力を模擬した応力履歴下においても同シミュレーションは試験結果と良好な一致を示しており、実働応力履歴下においても良好な一致が得られるものと期待される。

今後はさらなる汎用性のため、表面亀裂問題や、多軸応力下の提案手法の拡張が望まれる。

付録 A 線形累積損傷被害則による疲労寿命評価

重畳応力履歴等の実働応力履歴下における疲労寿命評価の主流は、一定振幅応力条件から求めた S-N 線図を用いた線形累積損傷被害則である。本章では、本論文で紹介した重畳応力条件下における疲労試験に対して、一定振幅条件下から S-N 線図を近似し、線形累積損傷被害則による疲労寿命推定を実施し、重畳応力履歴下における同手法の疲労寿命評価結果の傾向について検討する。

A.1 レインフロー法による波形計測アルゴリズム

レインフロー法による波形計測について説明する⁵³⁾。レインフロー法は低サイクル疲労のような塑性ひずみが直接計測できるか、あるいは弾性ひずみ成分が無視できる場合に有効な方法である。厳密にはレインフロー法はひずみ成分、もしくは塑性ひずみ増分に対して適用されるべきだが、データ量が十分に大きい時には応力成分に対して適用しても結果に大きな差異は生じない。そのため、応力成分から容易に波形計測を行う方法として、ヒステリシスループ法が提案されている。任意の繰返し応力を受ける部材の内部の応力～ひずみ線図は Fig. A. 1 に示すようにヒステリシスループを形成する。このヒステリシスループが形成されるたびに応力～ひずみ線図からこれを取り除き、そのヒステリシスの両端のピーク値がレンジペアを形成するものとして評価するのが変動応力履歴に対しての波形計測方法の基本的な考え方である。しかし、一般に測定データとして得られるのは応力あるいはひずみのいずれか一方であり、これだけでは Fig. A. 1 のような応力～ひずみ線図を描くことができない。したがって、ヒステリシスループが形成されたことの判定を、ひずみ、応力、応力拡大係数などの一つだけの成分の時間変動記録から行うことが必要になる。ひずみ、もしくは応力データから簡便にヒステリシスループ形成の判定を行う方法がレインフロー法である。

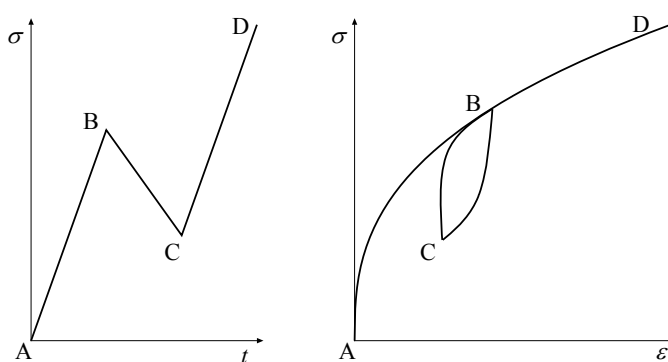


Fig. A. 1 Schematic of stress history and hysteresis loop.

Fig. A.1のように、応力がA → B → C → Dと変化する時、応力～ひずみ線図上では、ピークBとピークCの間にヒステリシスループが形成されている。つまり、B点で応力値が折り返した後、C点まで応力が減少し、C点で再び折り返して応力が増加すると応力～ひずみ履歴は再びB点を通じた後D点まで到達する。その際、B → Dの経路はA → Bの経路の延長線上に来るものとする。この間、A～D点における各応力をそれぞれ、 $\sigma_A \sim \sigma_D$ とすると、以下の関係が成立している。

$$\sigma_A < \sigma_C < \sigma_B < \sigma_D \quad (\text{A. 1})$$

つまり、連続する四つのピーク値の間に (A. 1) 式の関係が成立する時（あるいは、(A. 1) 式の不等号が全て逆の場合でも良い）に、ピークB, Cの間でヒステリシスループを形成するものと判断することができる。そして、応力履歴から σ_B, σ_C を取り除き、波形計測を継続する。

また、Fig. A.2のような応力履歴が現れた場合、これらの応力ピーク値と (A. 1) 式を比較すると、 σ_A と σ_C の大小関係が逆になっており、ループ形成判定の関係を満足しない。このようなピーク値列に対しては、ヒステリシスループは形成されないものとし、ループの片側の一片であると

解釈する。この半波により蓄積される損傷は、半波と同じ応力範囲のヒステリシスループ1サイクル分の半分であるとして評価を行う。半波の判定は (A. 1) 式による判定を行った後に、以下の (A. 2) 式により行う。

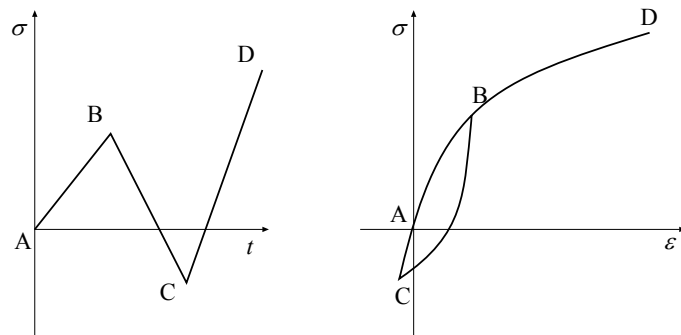


Fig. A. 2 Schematic of stress history and hysteresis.

$$|\sigma_i - \sigma_{i+1}| < |\sigma_{i+1} - \sigma_{i+2}| \quad (\text{A. 2})$$

(A. 2) 式の関係が成立する時、 σ_i と σ_{i+1} のペアは半波であることが確定するため、応力履歴から取り除く。(A. 1) 式、(A. 2) 式による判定処理を行った後には、応力範囲の値が漸減するようなピーク値列が残る。これらの連続するピーク値列間で形成されるレンジは全て半波であるものとして記録し、応力履歴全ての波形計測が完了となる。

A.2 線形累積損傷則による疲労寿命評価

本節では、第4章で述べた種々の平均応力条件を設定した重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播試験で実施した重畳応力条件に対して線形累積損傷則による疲労寿命評価を実施し、結果の考察を行う。

まず、S-N線図の基準となる疲労寿命の定義を行う。本研究では、疲労亀裂の伝播寿命の部分に重点を置くため、亀裂長さが7~12 mm ($\Delta a = 1 \sim 6$ mm) のサイクル数範囲を疲労寿命と定義した。Table 4.3に記載した各条件における $\Delta a = 1, 6$ mm 時点のサイクル数と、その差である疲労寿命をTable A.1に示す。なお、Table A.1に示したサイクル数はいずれも試験開始時を0として計測した。

Table A.1 List of various number of cycles.

Test ID	Number of cycles at 7mm : N_{7mm}	Number of cycles at 12mm : N_{12mm}	Fatigue life : $N_{12mm} - N_{7mm}$
L4t	248,691	673,795	425,104
Pa4t_H	39,600	109,264	69,644
Pa4t_M	39,140	116,913	77,773
Pa4t_L	73,700	247,064	173,364
Sa4t_H	25,430	71,580	46,150
Sa4t_M	24,777	73,250	48,473
Sa4t_L	59,458	185,722	126,264
Sa4t_LL	49,876	203,851	153,975
Sa4t_LLL	76,024	306,909	230,885
Va4t_HL	45,821	124,296	78,476
Va4t_HML	24,665	109,129	84,464
Ra4tD_M	50,212	198,790	148,578
Ra4tD_HML	35,243	210,699	175,456

続いて、一定振幅応力条件（試験 ID: L4t, Pa4t_M, Pa4t_H, Pa4t_L）の結果より、(A.3)式に示す S-N 線図の近似を行った。

$$\Delta \sigma^m N = B \quad (\text{A.3})$$

また、S-N 曲線の勾配である (A. 3) 式の n には、UK-HSE 設計曲線⁵⁰⁾の D curve の値 ($n=3.0$) を用いて、定数 B を最小二乗法により近似した。また、各条件の平均応力はそれぞれ異なっているため、修正 Goodman 線図による修正式 (4. 1) 式により、平均応力 $\sigma_m = 0$ に変換した。なお、 $N > 10^7$ の範囲は Haibach 修正²⁹⁾による (1. 7) 式により勾配を変更している。近似した S-N 線図の概形を Fig. A. 3 に、(1. 7) 式中の定数 n, B の値を Table A. 2 に示す。

Table A. 2 Constant value of approximated S-N curve.

n	$B_1 [N \leq 10^7]$	$B_2 [N > 10^7]$
3.0	3.661×10^{11}	4.037×10^{14}

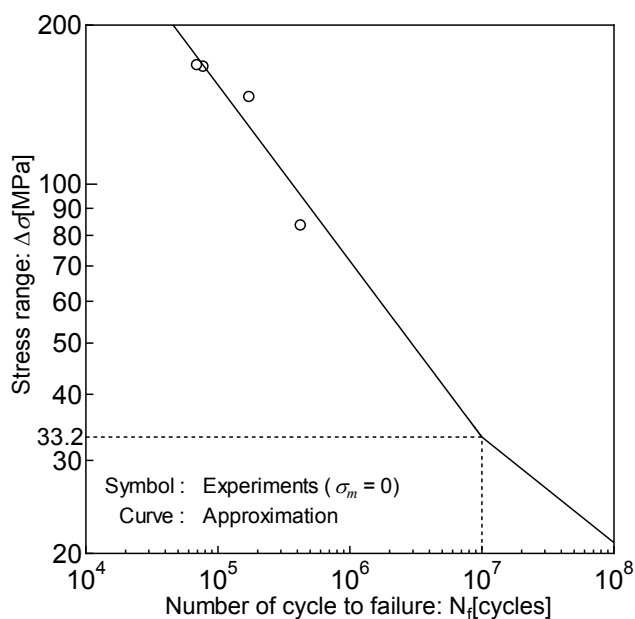


Fig. A. 3 Approximated S-N curve.

続いて、重畳応力条件の応力波形、及び Fig. 4. 7 に示すような、疲労亀裂伝播解析において有効応力履歴選択アルゴリズムを適用して抽出された亀裂伝播に有効な応力波形に対して、レインフロー法による波形計測を行った。有効応力波形の波形計測範囲は疲労寿命の定義と同じく $\Delta a = 1 \sim 6 \text{ mm}$ のサイクル数範囲とした。なお、波形計測の際には、計測応力レンジの平均応力も併せて計数する二次元レインフロー法を用い、(4. 1) 式により平均応力を 0 に変換した。以上の条件において各重畳波条件に対して波形計

測，及び応力変換を行った結果を Table A. 3 に示す．Table A. 3 より，”Input” は試験時に計測した応力波形低周波 1 周期中（実測波模擬条件 Ra4tD_M においては低周波 5 周期中）の波形計測結果を示しており，”Valid ratio” は有効応力履歴選択アルゴリズムにより抽出された有効応力履歴の $\Delta a = 1 \sim 6 \text{ mm}$ のサイクル数範囲のレインフロー法計測結果を，低周波サイクル数（Ra4tD_M においては低周波サイクル数/5）で除した値となっており，各応力レンジが有効応力振幅として採用されている割合を示している．(i) Ra4tD_HML では各平均応力毎における計測応力範囲に同じ値があるため，Valid ratio は算出することができない．なお，応力の単位は MPa である．

Table A. 3 Results of rain-flow counting.

(a) Sa4t_H

σ	Input	Valid ratio
60	2	2.00
65	2	2.00
165	1	1.00

(b) Sa4t_M

σ	Input	Valid ratio
59	2	0.08
65	2	2.00
164	1	1.00

(c) Sa4t_L

σ	Input	Valid ratio
52	2	0
56	1	1.00
57	1	1.00
144	1	1.00

(d) Sa4t_LL

σ	Input	Valid ratio
52	2	0
57	2	2.00
143	1	1.00

(e) Sa4t_LLL

σ	Input	Valid ratio
50	2	0
55	2	2.00
138	1	1.00

(f) Va4t_HL

σ	Input	Valid ratio
High part		
61	2	2.00
67	2	2.00
168	1	1.00
Low part		
53	2	0
58	2	0
147	1	1.00

(g) Va4t_HML

σ	Input	Valid ratio
High part		
62	2	2.00
68	2	2.00
171	1	1.00
Middle part		
58	2	0
63	2	2.00
160	1	1.00
Low part		
54	2	0
59	2	0
149	1	1

(h) Ra4tD_M

σ	Input	Valid ratio
3	1	0
4	1	0
7	1	0
10	1	0
12	1	0
14	1	0
24	2	0
29	1	0
30	1	0
34	1	0
39	1	0
45	1	0.82
48	1	1.00
50	1	1.00
60	1	1.00
61	1	1.00
62	1	1.00
69	2	2.00
70	1	0
90	1	1.00
190	1	1.00

(i) Ra4tD_HML

High part		Middle part		Low part	
σ	Input	σ	Input	σ	Input
3	1	3	1	3	1
5	1	4	1	4	1
8	1	7	1	7	1
11	1	10	1	10	1
13	1	12	1	11	1
16	1	15	1	14	1
27	2	25	2	23	2
33	1	30	1	28	1
34	1	32	1	30	1
38	1	36	1	33	1
44	1	41	1	38	1
50	1	47	1	43	1
55	1	51	1	47	1
57	1	53	1	49	1
68	1	63	1	59	2
69	1	64	1	60	1
70	1	65	1	67	2
78	2	72	2	69	1
79	1	74	1	88	1
102	1	94	1	186	1
213	1	199	1		

Table A. 3 より, "Valid ratio" が "input" と同じ値である行は疲労亀裂伝播解析全般に渡って高周波振幅が有効と判断されている応力レンジであり, 0 の行は全般に渡って亀裂伝播に寄与しないと判断されている応力レンジである. "Valid ratio" の傾向を見ると, おおよそ 55MPa 未満の応力は有効応力振幅として採用されていないことが確認できる

ものの、(h) Ra4tD_M では 45MPa 近辺までの応力が有効として採用されていることから、応力波形により応力レンジ(高周波振幅)の採用される条件は変化すること分かる。

以上の結果を用いて、疲労被害度 D 、及び有効応力履歴から算出した疲労被害度 D_{eff} を求めた結果を Table A. 4 に示す。

Table A. 4 Results of fatigue life evaluation.

Test ID	Damage factor by input load : D	Damage factor by valid load : D_{eff}
L4t	0.675	-
Pa4t_H	0.900	-
Pa4t_M	0.985	-
Pa4t_L	1.479	-
Sa4t_H	0.690	0.690
Sa4t_M	0.711	0.659
Sa4t_L	1.251	1.154
Sa4t_LL	1.504	1.385
Sa4t_LLL	2.025	1.867
Va4t_HL	1.031	0.956
Va4t_HML	1.173	1.091
Ra4tD_M	0.791	0.750
Ra4tD_HML	1.094	1.009

Table A. 4 より、平均応力が低くなるほど D が大きくなる傾向が確認できる。これは一定振幅条件 (Pa4t_シリーズ) にも重畳波条件 (Sa4t_シリーズ) にも同じ傾向が見られることから、本試験結果全体に見られる傾向であることが推測される。また、重畳波条件の D と D_{eff} を比較すると、 D_{eff} では平均応力が低いほど D との差が大きく、全体として平均応力が低いほど D が大きくなるという傾向が若干改善されていることが分かる。この原因は、平均応力が低い条件ほど、亀裂伝播に寄与しない高周波振幅の割合が多いためであると考えられるが、その改善度合いは僅かであるため、亀裂伝播に寄与しない高周波振幅の疲労被害度 D へ与える影響は小さいことが考えられる。この結果は、既知の研究結果と同様の傾向である^{35),36)}。また、平均応力変動条件 Va4t_HL, Va4t_HML, Ra4tD_HML では、いずれも疲労被害度が 1 に近い良好な推定結果となっている。この

理由としては、これらの条件は、重畳波条件 Sa4t_H, Sa4t_L 等による疲労被害度を足し合わせたものであるため、この結果は、平均応力の差異による誤差が相殺したものと推測される。

付録 B 不規則応力履歴下における巻き戻し計算法

B.1 疲労亀裂伝播解析における巻き戻し計算の概要

本研究における疲労亀裂伝播解析では、各計算ステップにおいて一定距離 Δa (= 両振塑性域の 5%) 毎に疲労亀裂を伝播させ、次の計算ステップで疲労亀裂を Δa だけ伝播させるのに必要なサイクル数 ΔN を算出することで、伝播解析を実現している。

同解析では、Fig. B. 1 に示すように、算出した ΔN により現サイクル数 $N^{(i-1)} + \Delta N$ が現応力履歴のサイクル数範囲 N_2 を超えた場合には、Fig. B. 2 に示すように、サイクル数を、 $N^{(i-1)} + \Delta N^* = N_2$ が満たされるように“巻き戻し計算”を行い、その ΔN^* に対応する疲労亀裂増加量 Δa^* を求める必要がある。全応力履歴の中で応力変動の回数が増えれば、この巻き戻し計算における多少の誤差は実用上問題にはならない。しかしながら、重畳応力履歴を解析する場合には、1 サイクル毎に応力履歴が変動するため、毎サイクルこの巻き戻し計算を行う必要がある。また、両振塑性域の 5% の長さである当初の亀裂伝播量 Δa に対応するサイクル数増分 ΔN は実際の解析ではおおよそ数十 ~ 数百サイクル程度の値となるが、修正後のサイクル数増分 ΔN^* は常に 1 であり、高々 1 サイクルから数%程度の誤差に留める必要がある。

本付録では、従来の疲労亀裂成長シミュレーションに実装されている巻き戻し計算の方法と新たに考案した巻き戻し計算方法についてそれぞれ説明し、それらを重畳応力履歴に対して適用した場合の精度について検討を行う。

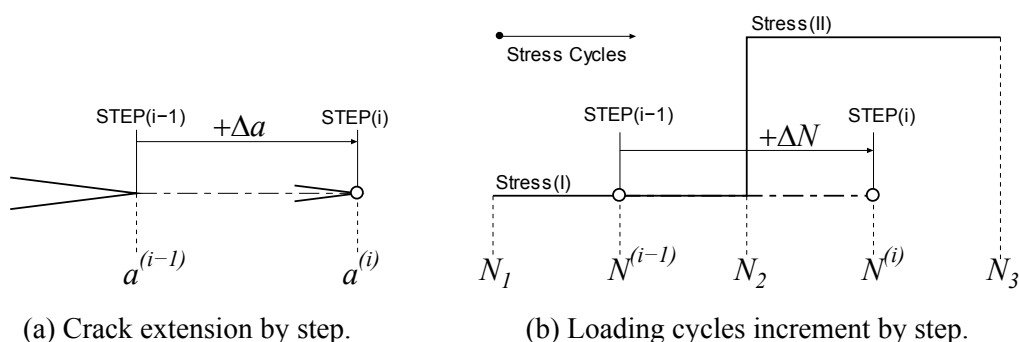


Fig. B. 1 Schematic illustration of crack growth over the stress cycle range.

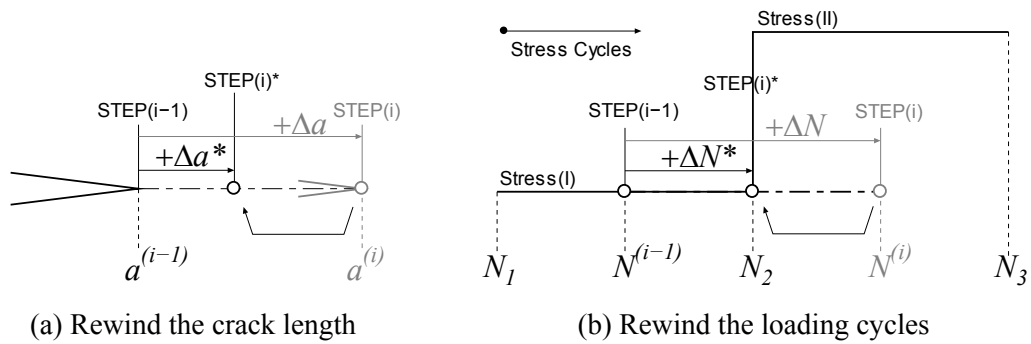


Fig. B. 2 Schematic illustration of rewind the crack length.

B.2 巻き戻し計算における亀裂伝播量の内挿法

まず、従来の方法²⁴⁾におけるサイクル数の巻き戻し計算における亀裂伝播量の内挿法の模式図を Fig. B. 3 に示す。従来の巻き戻し計算は、STEP(*i*-1) と STEP(*i*) において算出された ΔK_{RPG} (それぞれ Fig. B. 3 中 (*i*-1), (*i*) の添え字) を用いて、 Δa^* における ΔK_{RPG} を線形内挿し、以下の (B. 1) 式により適切な ΔN^* となる積分範囲 Δa^* を二分法による収束計算で算出する。

$$\Delta N^* = \int_{\Delta a^*} \frac{da}{C(\Delta K_{RPG})^m} \quad (\text{B. 1})$$

ただし、 C, m : RPG 基準の亀裂伝播則の材料定数

しかしながら、 ΔK_{RPG} と亀裂長さ a の関係は線形ではないため、この方法により求めた ΔN^* の値に誤差が生じることは避けられない。

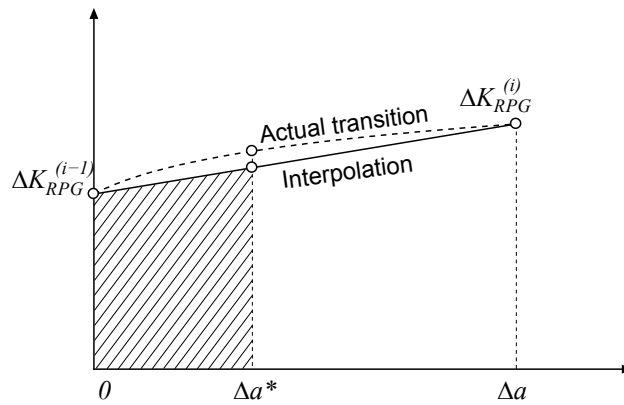


Fig. B. 3 Schematic illustration of rewind crack length interpolation (Before).

続いて、新たに導入したサイクル数巻き戻し計算における亀裂伝播量の内挿法の模式図を Fig. B. 4 に示す。この手法は単純に現応力履歴サイクル数範囲から超過したサイクル数 ΔN と亀裂伝播量 Δa から現サイクル数範囲の最終サイクル数に合うサイクル数増分 ΔN^* の亀裂伝播量 Δa^* を線形内挿するというものである。亀裂長さ a とサイクル数 N の関係も当然ながら線形ではないが、従来の方法のように線形に近似した ΔK_{RPG} を積分して用いるよりも、直接 ΔN^* を線形内挿した方が最終的に生じる誤差は小さくなるものと考えられる。

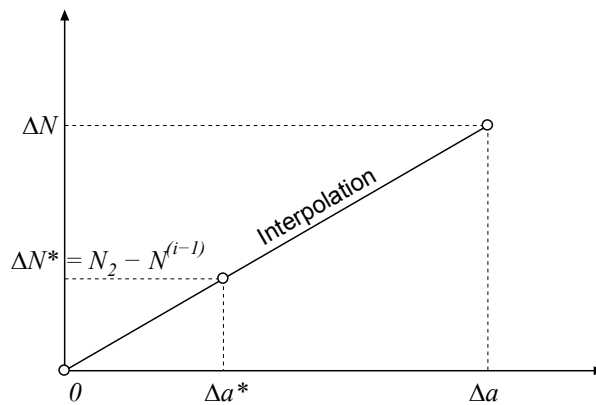


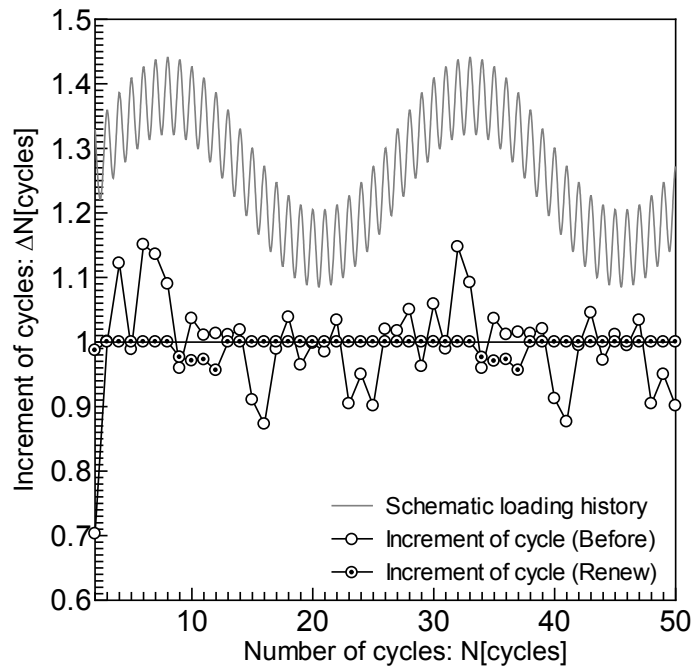
Fig. B. 4 Schematic illustration of rewind crack length interpolation (Renew).

B.3 巻き戻し計算結果の比較

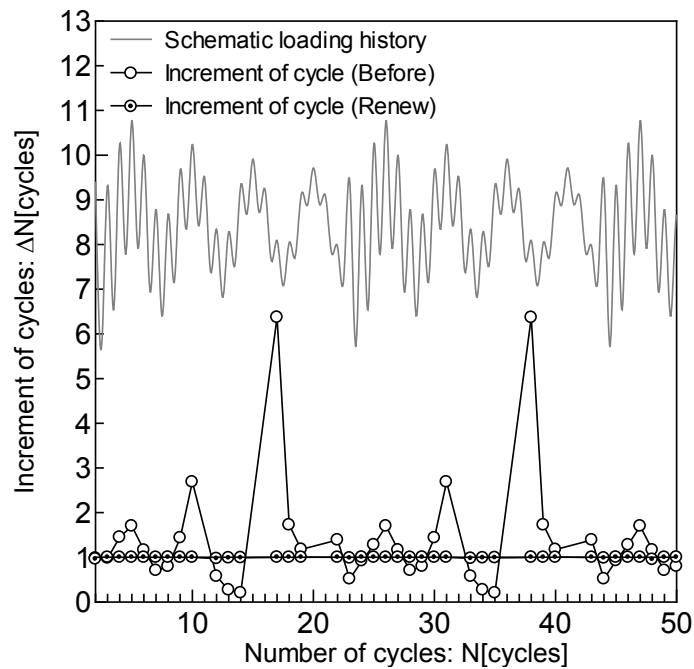
前節で説明した 2 つのサイクル数巻き戻し計算を重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播解析に適用した際に得られた修正したサイクル数増分 ΔN^* の値を Fig. B. 5 に示す。

Fig. B. 5 より、以前の手法による巻き戻し計算に比べ、新しく導入した手法による計算結果は非常に精度が良いことが確認できる。特に (b) の減衰重畳波条件においては、以前の手法では 1 サイクル中に 6 サイクル分もの亀裂長さが増加していたのに対し、新手法では誤差が非常に小さく、良好な精度で解析が行えていることが分かる。また、(a) 一定振幅重畳波条件の一部に見られるように、以前の手法よりも誤差が大きかった部分もあることから、巻き戻し計算時の ΔN^* が目標値に比べ誤差が大きかった場合には、相対誤差を基準として繰返し計算を行うことで、目標値以内に誤差を収めることが可能である。

本研究では、この新しいサイクル数巻き戻し計算方法を導入することで、重畳応力履歴下における疲労亀裂伝播解析を行っている。



(a) Constant amplitude superimposed.



(b) Damped amplitude superimposed

Fig. B. 5 Comparison of renew rewind cycles calculation method with conventional ones.

参考文献

- 1) Y. Sumi, H. Yajima, M. Toyosada, T. Yoshikawa, S. Aihara, K. Gotoh, Y. Ogawa, T. Matsumoto, K. Hirota, H. Hirasawa, M. Toyoda and Y. Morikage: Fracture control of extremely thick welded steel plates applied to the deck structure of large container ships, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.18, pp. 497-514, 2013.
- 2) 渡辺修, 松本重人, 中野善文, 斉藤良行: 高強度鋼溶接継手の疲労強度とその支配因子, *溶接学会論文集*, 第13巻, 第3号, pp. 438-443, 1995.
- 3) G. Storhaug, E. Moe and G. Holtmark: Measurements of Wave Induced Hull Girder Vibrations of an Ore Carrier in Different Trades, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 129, pp. 279-289, 2007.
- 4) K. Toyoda, T. Matsumoto, N. Yamamoto and K. Terai: Simplified Fatigue Assessment Considering the Occurrence Probability of Hydro-Elastic Response in Actual Sea State Conditions, *Hydroelasticity in Marine Technology 2012*, pp. 367-375, Tokyo, Japan, 2012.
- 5) 中村宏, 田村伸二, 渡辺喜一: ばね鋼の疲れ強さに及ぼす重畳波形の影響 (第1報), *ばね論文集*, Vol.1961, No.7, pp. 116-120, 1961.
- 6) 堀川武, 中村宏, 公江茂樹: 重畳微小波を持つ繰返し荷重による疲れの研究 (第4報, 平均応力が方形波状に変動する重畳波の実験), *日本機械学会論文集*, Vol. 40, 333, pp. 1239-1245, 1974.
- 7) ASTM International: Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis, ASTM E1049-85, 2011.
- 8) International Association of Classification Society: No. 56 Fatigue assessment of ship structures, *IACS Recommendations*, 1999.
- 9) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説-付・設計例-, 技報堂出版, 2012.
- 10) W. Schütz: A History of Fatigue, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 54, No. 2, pp. 263-300, 1996.
- 11) M. Jono: Fatigue Damage and Crack Growth under Variable Amplitude Loading with Reference to the Counting Methods of Stress-Strain ranges, *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, pp. 1006-1015, 2005.
- 12) J. Schijve: Fatigue of Structures and Materials in the 20th century and the State of the Art, *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp. 679-702, 2003.

- 13) J. A. Ewing and J. C. W. Humfrey: The Fracture of Metals under Repeated Alternations of Stress, Philosophical transactions of the royal society, A200, pp.241-250, 1903.
- 14) H. J. Gough: Crystalline Structure in Relation to Failure of Metals: Especially by Fatigue, Proceedings of ASTM, American Society for Testing and Materials, Vol. 33, pp. 3-114, 1933.
- 15) E. Orowan: Theory of the Fatigue of Metals, Proceedings of the Royal Society, A171, pp. 79-106, 1939.
- 16) A. K. Head: The Growth of Fatigue Cracks, Philosophical Magazine Series7, Vol.44, Issue 356, pp. 925-938, 1953.
- 17) N. E. Frost and D. S. Dugdale: The Propagation of Fatigue Cracks in Sheet Specimens, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.6, pp. 92-110, 1958.
- 18) A. J. McEvily and W. Illg: The Rate of Crack Propagation in Two Aluminum Alloys, NACA Technical Note 4394, 1958.
- 19) H. W. Liu: Crack Propagation in Thin Metal Sheet under Repeated Loading, Journal of Fluids Engineering, Vol.83, No. 1, pp. 23-31, 1961.
- 20) P. C. Paris and F. Erdogan: A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Transaction of the ASME, Series D, Vol. 85, pp. 528-534, 1963.
- 21) N. E. Frost, L. P. Pook and K. Denton: A Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Crack Growth Data for Various Materials, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 3, pp. 109-126, 1971.
- 22) J. C. Newman, Jr.: Modeling of Fatigue Crack Growth: Numerical Model, Comprehensive Structural Integrity, pp. 209-220, 2003.
- 23) W. Elber: The Significance of Fatigue Crack Closure, Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP-486, pp. 203-242, 1971.
- 24) M. Toyosada, K. Gotoh and T. Niwa: 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, No9, pp. 983-992, 2004.
- 25) 豊貞雅宏, 丹羽敏男, 後藤浩二, 坂井淳一: ΔK_{RP} の物理的意味と構造物の疲労寿命推定法: RPG 規準による疲労き裂伝播挙動の研究 (第 8 報), 日本造船学会論文集, 第 180 巻, pp. 539-547, 1996.

- 26) T. Toyosada, T. Niwa: The Significance of RPG Load for Fatigue Crack Propagation and the Development of a Compliance Measuring System, *International Journal of Fracture*, Vol. 67, pp. 217-230, 1994.
- 27) A. Pålmgren: The Endurance of Ball Bearings, *Z Ver Deut Ing*, Vol. 68, pp. 339-341, 1923 (in German).
- 28) 中村 宏, 田中 真一: 機械の疲れ寿命算出法, 養賢堂, 1972.
- 29) E. Haibach: The Allowable Stresses under Variable Amplitude Loading of Welded Joints, *Conference on fatigue of welded structures*, Vol. 2, pp. 328-339, 1971.
- 30) H. T. Corten and T. J. Dolan: *Proceedings of International Conference on Fatigue of Metals*, Institution of Mechanical Engineers, ASME, pp. 235-246, 1956.
- 31) F. L. Coffin: A Study of the Effect of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal, *Transaction ASME*, Vol. 76, pp. 931-950, 1954.
- 32) S. S. Manson: Fatigue: A Complex Subject-Some Simple Approximations, *Experimental Mechanics*, Vol. 5, pp. 193-226, 1964.
- 33) 河本実, 近藤昭, 浜田博久: 鋼の疲れ強さに及ぼす二次応力波の影響, *日本機械学会論文集*, 17 巻, 61 号, pp. 143-146, 1951.
- 34) 田中道七, 出納真平: 重畳波による疲労, *材料*, 19 巻, 202 号, pp. 629-634, 1970.
- 35) W. Fricke and H. Paetzold: Experimental Investigations on Fatigue Damage of Ship Structures Caused by Whipping Stresses, *Proceedings of PRADS2013*, pp. 465-470, 2013.
- 36) N. Osawa, T. Nakamura, N. Yamamoto and J. Sawamura: Experimental Study on High Frequency Effect on Fatigue Strength of Welded Joints by Using Plate-Bending-Vibration Type Fatigue Testing Machine, *Proceedings of OMAE2014*, Paper No.23856, San Francisco, California, USA, 2014.
- 37) N. Osawa, T. Nakamura, N. Yamamoto and J. Sawamura: Experimental Study on High Frequency Effect on Fatigue by Using the New High Speed Fatigue Testing Machine, *Proceedings of PRADS2013*, pp. 550-556, 2013.
- 38) J. Willenborg, R. M. Engle and H. A. Wood: A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept, Report No. AFFDL-TR71-1. Air Force Flight Dynamic Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, USA, 1971.
- 39) O. E. Wheeler: Spectrum Loading and Crack Growth, *Journal of Basic Engineering*, Vol. 94 (1), pp. 181-186, 1972.

- 40) J. C. Newman: Fastran II -A Fatigue Crack Growth Structural Analysis Program, NASA TM-104159, 1992.
- 41) D. S. Dugdale: Yielding of Steel Sheets Containing Slits, Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 8, pp. 100-104, 1960.
- 42) P. C. Paris: The Mechanics of Fracture Propagation and Solution to Fracture Arrester Problem, Document D2-2195, The Boeing Company, 1957.
- 43) G. R. Irwin: Plastic Zone Near a Crack and Fracture Toughness, Proceedings of the 7th Sagamore Conference, pp. IV.63-IV.77, 1960.
- 44) 北村欧, 杉村忠志, 中山伸, 廣田一博: 高-低周波重畳応力作用下における疲労き裂伝播試験の一考察, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 14 号, pp. 13-16, 2012.
- 45) Y. Sumi: Fatigue crack propagation in marine structures under seaway loading, International Journal of Fatigue, Vol. 58, pp. 218-224, 2014.
- 46) 一般財団法人日本海事協会他: 船体構造強度に対するホイッピング影響に関する調査研究報告書, 2014, 3 月.
- 47) 豊貞雅宏, 後藤浩二, 丹羽敏男, 牧美津栄: き裂面に集中荷重が作用する場合の K 値について, 西部造船会会報, Vol. 93, pp. 103-110, 1997.
- 48) 高杉俊二, 堀川武, 恒成利康, 中村博: 重畳波形下の推定疲労寿命に及ぼす諸因子と寿命推定法の検討, 材料, Vol. 33, 371, pp. 973-979, 1984.
- 49) 豊貞雅宏, 丹羽敏男, 山口喜久次: 長いき裂に対する疲労き裂遅延減速現象とき裂停留条件について, 日本造船学会論文集, Vol. 176, pp. 439-446, 1994.
- 50) Status of technical guidance and information on design: Health and Safety Executive(UK-HSE), construction and operation of offshore installation, 2012.
- 51) 角洋一, 高崎怜史, 早川銀河: 小振幅荷重を重畳した繰返し荷重下の疲労き裂伝播について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第 16 号, pp. 519-522, 2013.
- 52) 山田敏郎, 北川茂, 小長哲郎: 平均応力が変動する場合の疲労試験, 材料 13 巻, 127 号, pp. 270-275, 1964.
- 53) 得丸英勝: 統計工学ハンドブック, 培風館, pp. 658-663, 1987.

謝辞

本研究は九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門准教授 後藤浩二 博士の御指導の下に行われたものである。研究を遂行するにあたって、終始懇切丁寧な御指導と御鞭撻を頂きましたことに心より感謝申し上げます。

本論文の審査にあたり、有益な御助言を頂きました九州大学大学院工学研究院機械工学部門教授 野口博司 博士、九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門教授 吉川孝男 博士、九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門教授 園田佳巨 博士に厚く御礼申し上げます。

九州大学大学院工学府建設システム工学専攻技術専門職員 村上幸治 氏には研究室配属時から研究・生活両面でいつも相談に乗っていただき、また、第4章における疲労亀裂伝播試験を遂行するにあたっては計画から実施まで多くの御助言を頂き、多大な御援助を頂きました。厚く御礼申し上げます。

また、大阪大学接合科学研究所准教授（前九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門助教）堤成一郎 博士には在任当時から現在まで、折にふれて有益な御助言を頂きました。ここに感謝申し上げます。

本研究の一部は科学研究費（特別研究員奨励費 26004132）の助成を受けて実施したものである。ここに記して御礼申し上げます。

また、本研究の内容に関しては（一社）溶接学会溶接疲労強度研究委員会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は日頃から多大な協力を頂きました。特に平成21年卒（現三菱重工業株式会社）高橋宏和氏は本研究における解析アルゴリズムの前身となる基礎的な理論を構築され、在学当時には懇切丁寧な御指導を頂きました。謹んで御礼申し上げます。その他にも多くの先輩方に研究のみに留まらず様々な事を御指導頂きました。深く感謝申し上げます。

また、平成25年卒 杉野弘樹 氏、並びに平成26年卒 石飛雄大 氏は第4章における試験の大部分の作業を担当し、多大な労力を割いて下さいました。ここに感謝の意を表します。また、その他にも多くの後輩方は未だ浅学菲才な指導にもかかわらず、若輩者の私についてきてくれました。厚く感謝申し上げます。皆様の将来のさらなる御活躍をお祈りいたします。

同級生である平成 23 年卒 赤星直紀 氏, 大森徹也 氏, 宅野正夫 氏, 宮本大地 氏は, 長きにわたって互いに切磋琢磨し, 時に励ましの言葉をかけてくれました. 諸氏との辛くも楽しい日々があったからこそ, 長い学生生活をやり遂げることができました. ここに深謝の意を表します.

最後に, 帰りが遅くなってもいつも晩御飯を用意してくれた母親をはじめ, 私の学生生活を温かく見守ってくれた家族に心より感謝申し上げます.