

複数回の過大引張荷重負荷による疲労亀裂伝播遅延現象に関する一考察

松田, 和貴
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

後藤, 浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

永金, 大志
九州大学大学院工学府船舶海洋工学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/7392977>

出版情報 : Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers.
41, pp.835-840, 2025-11-17. 日本船舶海洋工学会
バージョン :
権利関係 : ©The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers



複数回の過大引張荷重負荷による疲労亀裂伝播遅延現象に関する一考察

正会員 松田 和貴^{*}
正会員 後藤 浩二^{*}

永金 大志^{**}

A Study of Fatigue Crack Growth Retardation under Multiple Tensile Overloading

by Kazuki Matsuda^{*}, *Member*

Taishi Nagakane^{**}

Koji Gotoh^{*}, *Member*

Key Words: *Fatigue crack propagation, Retardation effect, Overloading, Crack closure*

要旨

疲労亀裂の伝播中に過大な引張荷重が作用すると、その後の亀裂伝播が遅延する現象は広く知られている。本研究では、初回の過大引張荷重の負荷後に一定のサイクル数を経て二度目の過大引張荷重を負荷した場合の亀裂伝播の遅延効果について数値解析を用いて検討した。過大引張荷重間のサイクル数を変化させて亀裂伝播解析を実施した結果、二度目の過大引張荷重による遅延効果は、その負荷タイミングに依存して変化することが明らかとなった。遅延効果の程度は、疲労亀裂先端位置と初回引張過大荷重により形成された塑性域先端との位置関係に影響されることが分かった。さらに、初回および二回目の過大引張荷重による遅延効果を分離し、二回目の過大引張荷重によって損失または増幅される遅延効果を定量的に評価し、両者の相互作用について考察した。

^{*}九州大学大学院工学研究院 海洋システム工学部門

^{**}九州大学大学院工学府 船舶海洋工学専攻

©日本船舶海洋工学会

1. 緒 言

船舶や海洋構造物などの大型溶接構造物では、S-N 線図に基づき疲労設計がなされることが一般的であるが、この方法では損傷の発展に伴う疲労亀裂長さの伝播履歴を荷重履歴に応じて推定することが出来ない。一方、既に存在する疲労亀裂に対する亀裂伝播履歴の予測には応力拡大係数範囲 ΔK をパラメータとする Paris 則¹⁾を用いることが一般的である。Paris 則は一定振幅荷重履歴下では良好に疲労亀裂伝播挙動を推定可能であるが、変動荷重履歴条件では推定精度が劣ることが知られている。変動荷重履歴条件下における疲労亀裂伝播挙動については、疲労亀裂に特有の亀裂開閉口挙動²⁾を定量的に考慮する必要がある。豊貞ら³⁾は疲労亀裂先端に再引張塑性域が形成される時の荷重 (RPG 荷重) から最大荷重までを有効応力範囲とした RPG 基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} をパラメータとする疲労亀裂伝播則を提案し、変動荷重履歴下に置いても疲労亀裂伝播挙動を精度よく推定できることを報告した。

$$da/dN = C(\Delta K_{RPG})^m \quad (1)$$

ただし、 a : 亀裂長さ、 N : サイクル数、 da/dN : 亀裂伝播速度 (m/cycles)、 ΔK_{RPG} : RPG 基準の応力拡大係数範囲 (MPa $m^{0.5}$)、 C, m : 材料定数

過大な引張荷重 (以降、単に過大荷重と記す) が伝播中の疲労亀裂に作用すると、その後亀裂の伝播が遅延する現象が知られている。この遅延効果に関しては、これまでに複数のメカニズムが提案されており、実働荷重履歴下での疲労亀裂伝播挙動を適切に評価する上で、過度な安全側設計を回避するためにも重要な知見である。実働構造物に作用する荷重履歴では、過大荷重が単発ではなく、一定の間隔を空けて複数回作用する場合も少なくない。しかしながら、複数回の過大荷重が作用した場合の亀裂伝播の遅延効果に関する詳細なメカニズムの検討は著者らの知る限り十分ではない。

本研究では、複数回の過大荷重が作用した場合における亀裂伝播の遅延現象について、亀裂先端の塑性挙動を考慮可能な疲労亀裂進展シミュレーションを用いて数値解析的に検討を行い、そのメカニズムを考察した結果について述べる。

2. 解析条件

本研究では、亀裂結合モデルを用いて亀裂先端の塑性挙動を表現し、 ΔK_{RPG} を基準とした亀裂伝播則として式 (1) を用いて、疲労亀裂伝播挙動の解析を実施した。まず、過大引張荷重が一回のみ作用する荷重履歴条件に対する伝播解析を行い、亀裂開閉口挙動を確認することで、解析結果の妥当性を検証した。次に、過大荷重が一回作用する荷重履歴条件

に対する伝播解析を実施し、二回目の過大荷重の負荷タイミングが遅延効果に及ぼす影響について整理した。

解析対象として、試験片形状の影響を排除するため Fig. 1 に示すような初期亀裂半長 20 mm の無限平板に存在する貫通亀裂を想定し、材料は等方硬化弾完全塑性体とし、降伏応力 σ_Y は一般的な軟鋼として 391 MPa とした。(1) 式における材料定数 C, m は $C = 7.787 \times 10^{-11}$, $m = 3.189$ を用いた。

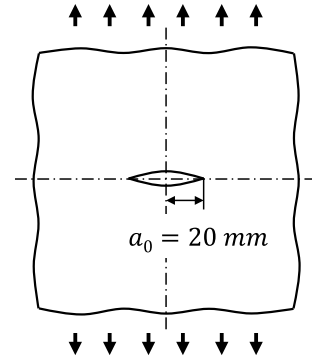


Fig. 1 Through-thickness crack in an infinity plate.

繰返し荷重条件は、応力比 $R = 0.1$ 、応力振幅 39.9 MPa ($\cong 0.1\sigma_Y$) の一定振幅応力履歴を作用させ、亀裂半長が 28 mm に達した時点で一定振幅の応力値の 1.5 倍の過大荷重を負荷し、その後は元の一定振幅荷重履歴を作用させた。比較条件として、過大荷重を作用させない一定振幅条件における伝播解析も実施した。

過大荷重二回負荷条件としては、亀裂半長 28 mm 時点で一回目の過大荷重を負荷させた後に、種々設定したサイクル数間隔の後に二回目の過大荷重を負荷させ、その後一定振幅荷重履歴を作用させる荷重条件を作成し、二回目の過大荷重負荷タイミングと遅延効果の関係について検討した。

3. 解析結果

3.1 過大荷重一回負荷条件

亀裂半長 28 mm 時点で一回過大荷重を負荷させた場合における亀裂長さ と RPG 応力の推移を Fig. 2 に示す。Fig. 2 より、過大引張荷重が負荷した直後は RPG 応力が一時的に低下し、その後増加した後に、徐々に元の値に漸近していく挙動を確認できる。疲労亀裂伝播の駆動源に対応する破壊力学パラメータである ΔK_{RPG} は RPG 応力から最大応力までの応力範囲に応じて変化することから、亀裂伝播は過大荷重負荷直後に僅かな間加速し、その後亀裂成長曲線は横ばいになり、遅延現象が生じることが分かる。

Fig. 2 中に破線で示した①～③の時点における、最大応力、最小応力時の亀裂開口変位を Fig. 3 に示す。比較のため、同じ亀裂長さにおいて過大荷重を負荷していない場合 (一定振

幅荷重履歴)の亀裂開口変位も、比較のため Fig. 3 に併せて描画した。

Fig. 3 より、①は過大荷重負荷直後であるが、最大応力時における亀裂開口変位は過大荷重無しの場合と比べて大きく、最小応力時にも亀裂先端の極近傍を除き亀裂が閉口していない。これは過大引張荷重により亀裂先端に大きな塑性変形が生じたためであると推測され、亀裂が閉口しにくくなったため、亀裂開口応力と RPG 応力が共に小さくなり、その結果として ΔK_{RPG} が大きくなるため、加速現象が生じたものと考えられる。

②は遅延現象が生じている最中であり、過大荷重条件では過大荷重無しの場合と比べ最大応力時の亀裂開口変位が小さい。これは過大引張荷重により生じた塑性変形域内に疲労亀裂先端近傍が到達することで亀裂面に圧縮残留応力が作用したため、亀裂が閉口し辛くなったものと考えられる。これにより RPG 応力が上昇し、遅延現象が生じたと考えられる。

③は遅延現象がほぼ終了し、元の亀裂伝播速度に漸近した段階であり、亀裂開口変位は過大引張荷重の有無による差は無視できるレベルであると判断できる。

以上の結果は、過大荷重が疲労亀裂伝播に及ぼす影響に関する先行知見⁴⁾とも一致しており、本研究で用いた数値シミュレーションは疲労亀裂先端における塑性挙動を再現できていると考えられる。

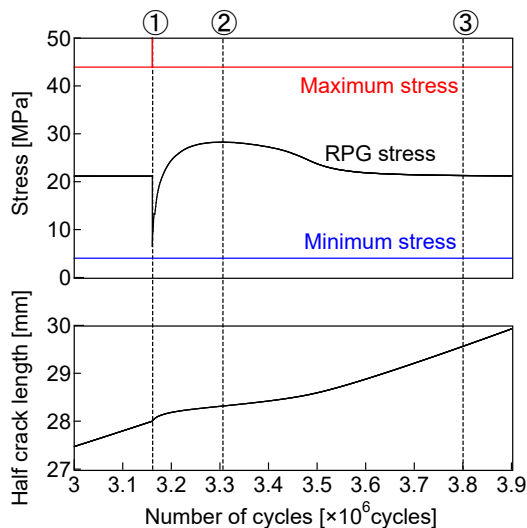


Fig. 2 Evolution of RPG stress and crack length under single overload condition.

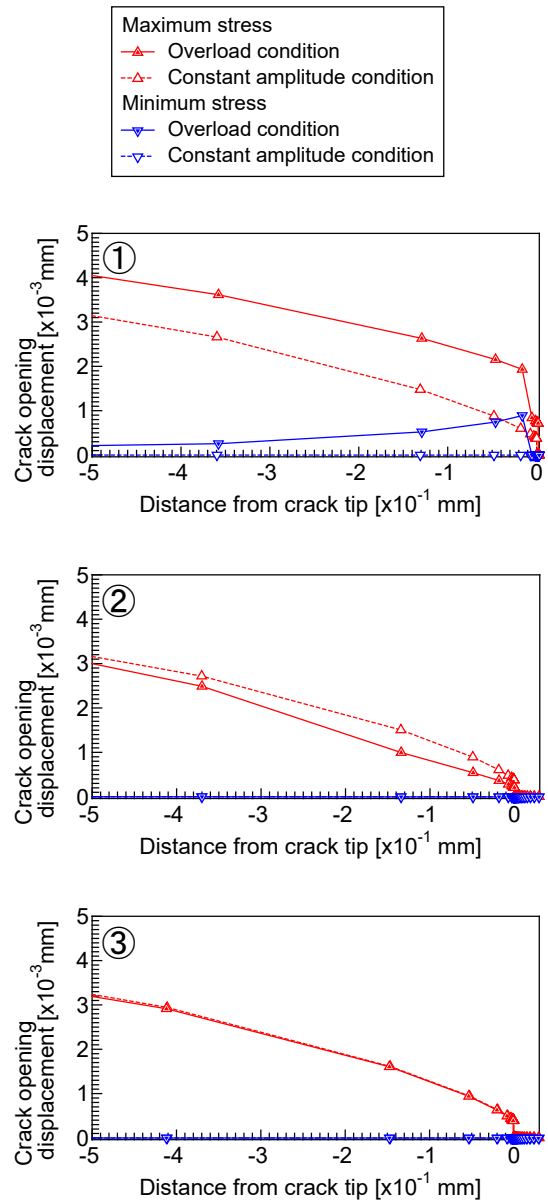


Fig. 3 Crack opening displacement at maximum and minimum stresses for various crack lengths.

3.2 過大荷重二回負荷条件

亀裂半長 28 mm 時点で一回目の過大荷重を作用させ、その後それぞれ Fig. 2 に示した①～③の時点で二回目の過大荷重を作用させた場合の亀裂成長曲線を Fig. 4 に示す。Fig. 4 より、二回目の過大荷重の負荷タイミングにより亀裂伝播挙動は変化することが分かる。

①より、一回目の過大荷重を作用させた直後に二回目の過大荷重を作用させた場合には、過大荷重を一回のみ負荷させた場合と比べて遅延効果は殆ど生じないことが分かる。一方、遅延効果が最大、すなわち、RPG 応力の上昇が最大となる時点で二回目の過大荷重を作用させた②の時点、および遅延

現象がほぼ消失した③の時点で、それぞれ二回目の過大荷重を負荷した場合には、過大荷重を一回のみ負荷した場合と比べて亀裂伝播の遅延が大きいことが分かる。以上より、過大引張荷重を二回負荷する場合には、二回目の過大荷重の負荷タイミングによって遅延効果の程度は非線形に変化すると考えられる。

過大荷重を一回のみ負荷した条件、および①～③のタイミングで二回負荷した条件における RPG 応力の推移を Fig. 5 に示す。過大荷重負荷後には RPG 応力が一旦大きく低下した後に上昇し、遅延現象が生じるが、二回目の過大荷重後の RPG 応力の最大値は一回目の過大荷重後の最大値より小さくなり、さらに過大荷重の負荷タイミングによって変化することが分かる。この結果より、二回目の過大荷重による遅延現象は、それ以後の一回目の過大荷重による遅延効果を打ち消すことによる損失分と、RPG 応力の上昇による増幅分が複合することで、複雑な遅延効果が生じることが分かる。

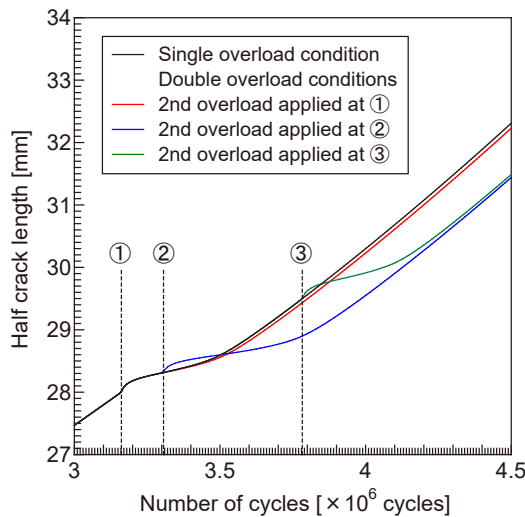


Fig. 4 Crack growth curves under double overload applied at various timing conditions.

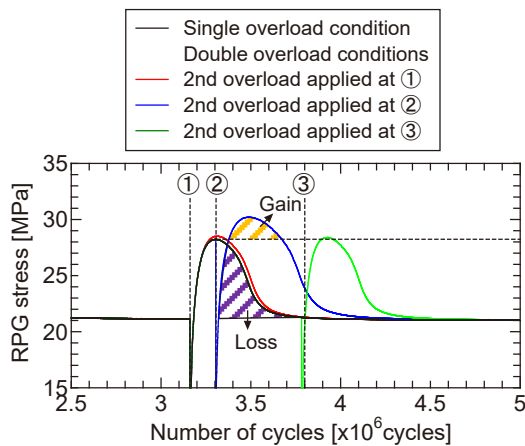


Fig. 5 Evolution of RPG stress under single and double overload conditions.

4. 考察

二回目の過大荷重により生じる遅延現象をより詳細に調査するため、一回目と二回目の過大荷重間のサイクル数を種々変化させて亀裂伝播解析を実施した。また、過大荷重による亀裂伝播遅延現象を定量的に評価するため、遅延サイクル数という指標を新たに導入する。

過大荷重が一回作用する場合における模式図を Fig. 6 に示す。過大荷重負荷の無い一定振幅荷重履歴条件を比較対象とし、過大荷重を負荷した時点の亀裂長さを a_{1s} とし、その後、一定振幅条件と過大荷重負荷条件の両者において同じ亀裂長さで亀裂伝播速度が等しくなった時点の亀裂長さを a_{1e} とし、亀裂長さ a_{1s} から a_{1e} までに費やしたサイクル数の両荷重履歴条件での差 N_1 を遅延サイクル数と定義する。 N_1 を算出するため、亀裂が単位長さ伝播するのに必要なサイクル数 dN/da [m/cycle] と亀裂長さの関係を求め、一定振幅条件と過大荷重条件のこれらをそれぞれ $f_0(a)$, $f_1(a)$ とする (Fig. 6 右側参照) と、これらの差を a_{1s} から a_{1e} まで積分することで N_1 を算出できる。

$$N_1 = \int_{a_{1s}}^{a_{1e}} \{f_1(a) - f_0(a)\} da \quad (2)$$

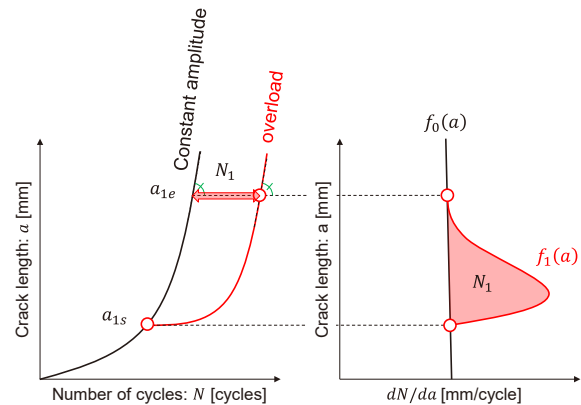


Fig. 6 Schematic illustration of retardation cycles induced by a single overload (first).

過大荷重が二回作用する場合の模式図を Fig. 7 に示す。同様の手順で、過大荷重が二回負荷される場合の dN/da と亀裂長さの関係を $f_{12}(a)$ とすると、遅延サイクル数 N_{12} は次式で表される。

$$N_{12} = \int_{a_{1s}}^{a_{2e}} \{f_{12}(a) - f_0(a)\} da \quad (3)$$

ここで、 a_{2f} は二回目の過大荷重負荷後に一定振幅条件と

過大荷重負荷条件で同じ亀裂長さで亀裂伝播速度が等しくなった時点の亀裂長さである。

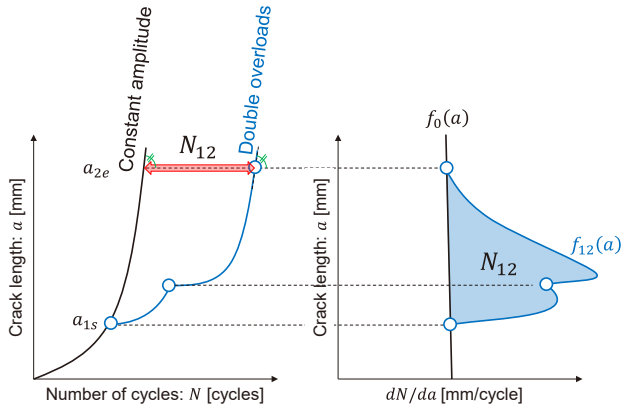


Fig. 7 Schematic illustration of retardation cycles induced by double overloads.

二回の過大引張荷重が作用する場合の遅延サイクル数 N_{12} をさらに分割して考察する。Fig. 7 に示した N_{12} の面積のうち亀裂長さ a_{1s} から二回目の過大荷重負荷時点の亀裂長さ a_{2s} までの範囲は、Fig. 6 に示した一回目の過大荷重の遅延サイクル数と同じである。亀裂長さ a_{2s} 以降では、二回目の過大荷重が作用するため、一回目の過大荷重により生じるはずの遅延効果は Fig. 8 に示すように損失する。Fig. 8 に示した N_{loss} は、二回目の過大荷重を負荷しなくても遅延していたサイクル数であり、次式で表される。

$$N_{loss} = \int_{a_{2s}}^{a_{1e}} \{f_1(a) - f_0(a)\} da \quad (4)$$

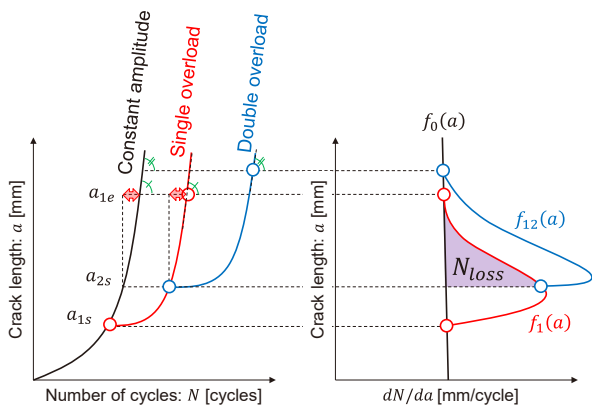


Fig. 8 Schematic illustration of loss cycles induced by double overloads.

続いて、二回目の過大荷重により増幅される遅延サイクル数について考察する。二回目の過大荷重負荷タイミング a_{2s}

において初めて過大荷重を負荷した場合の dN/da である $f_2(a)$ と比べ、二回目に過大荷重を負荷した場合の $f_{12}(a)$ は Fig. 9 に示すように大きくなる。Fig. 9 に示した N_{gain} は、二回目の過大荷重のみを単独で負荷した場合よりも増加した遅延サイクル数であり、次式で表される。

$$N_{gain} = \int_{a_{2s}}^{a_{12e}} \{f_{12}(a) - f_2(a)\} da \quad (5)$$

さらに、二回目の過大荷重負荷タイミングで初めて過大荷重を負荷した場合の遅延サイクル数は Fig. 10 に示すように、次式で表される。

$$N_2 = \int_{a_{2s}}^{a_{2e}} \{f_2(a) - f_0(a)\} da \quad (6)$$

以上より、Fig. 6 から Fig. 10 を参照すると、次式が成立する。

$$N_{12} = N_1 + N_2 - N_{loss} + N_{gain} \quad (7)$$

二回の過大荷重のサイクル数間隔と種々の遅延サイクル数の関係を Fig. 11 に示す。 N_{12} は当初 N_1 とほぼ等しいが、急激に増加して $N_1 + N_2$ を上回り最大値をとった後に、徐々に $N_1 + N_2$ に漸近する。Fig. 11 において N_1 は定数であり、さらに N_2 も本描画範囲においてはほぼ一定であるため、 N_{12} の変化挙動の主要因は、 N_{loss} と N_{gain} によるものである。 N_{loss} は当初大きく、サイクル数間隔が大きくなるにつれて急速に減少する。一方、 N_{gain} は負荷タイミングが早い場合は小さく、その後急激に増加して最大値をとった後に減少する。 N_{gain} が最大値をとる負荷タイミングは N_{12} のそれよりも小さいが、これは (6) 式より、単調減少する N_{loss} の寄与によるものである。 N_{gain} の値は RPG 応力の上昇と対応するが、RPG 応力を最も上昇させる（すなわち、亀裂停留し易い）負荷タイミングと、遅延現象を狙って人為的に過大荷重を負荷する場合には、この最大値発生タイミングの違いを考慮する必要があることが示唆される。

5. 結 言

本研究では、二回の過大荷重が作用した場合における亀裂進展遅延現象について、亀裂先端の塑性挙動を考慮可能な疲労亀裂進展シミュレーションを用いて数値解析的に検討を行い、そのメカニズムを考察した。得られた結論を以下に述べる。

- 1) 二回の過大荷重を負荷した場合、二回の過大荷重の負荷サイクル数間隔によって遅延サイクル数は変化した。
- 2) 過大荷重の負荷サイクル数間隔が短い場合には、過大荷重を単独で負荷した場合の遅延サイクル数の和と比べ遅延サイクル数は小さくなり、負荷サイクル数間隔が長くなるにつれて遅延サイクル数は単独負荷の遅延サイクル数の和より大きくなり、その後、単独負荷の遅延サイクル数の和に漸近していく挙動を示した。
- 3) 二回目の過大荷重の影響により、一回目の過大荷重による遅延効果が損失する影響、および、単独で過大荷重を負荷するよりも二回目に負荷する方が、遅延効果が増幅される影響をそれぞれ遅延サイクル数として定量化し、過大荷重負荷サイクル数間隔との関係を整理した。その結果、RPG 応力が最も上昇する条件と遅延サイクル数が最も大きくなる条件は異なっていた。

本研究結果は全て数値解析的に得られた結果に基づく知見であり、今後は本結果を検証するための疲労亀裂伝播試験を実施する予定である。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP23K26319 の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) Paris, P.C. and Erdogan, F.: A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Journal of Basic Engineering, Vol. 85, pp. 528-533, 1963.
- 2) Elber, W.: The significance of fatigue crack closure, ASTM STP 415 (Damage Tolerance in Aircraft Structures), 1967, 247-309.
- 3) M. Toyosada, K. Gotoh, 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, 26, 9, 2004, 983-992.
- 4) W. Geary: A Review of Some Aspects of Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading, International Journal of Fatigue, 14, 2, 377-386, 1992.

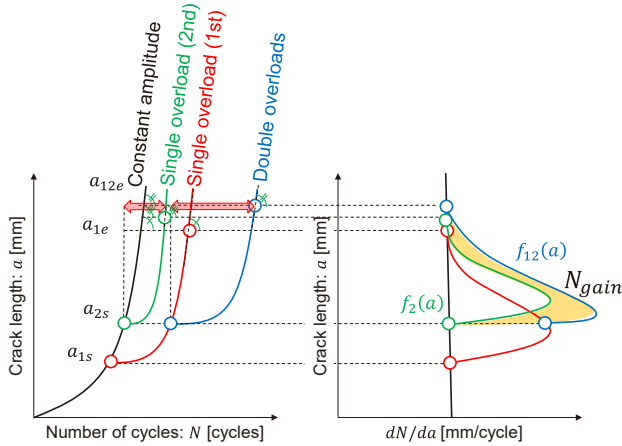


Fig. 9 Schematic illustration of gain cycles induced by double overloads.

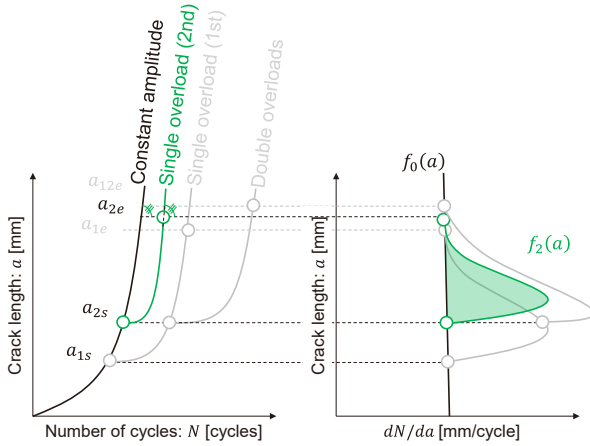


Fig. 10 Schematic illustration of retardation cycles induced by a single overload (second).

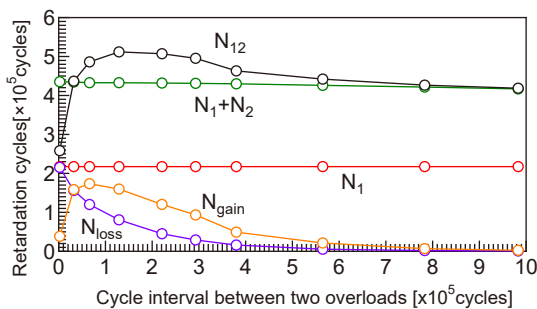


Fig. 11 Relationship between the cycle interval of two overloads and each component of retardation cycles.