

特集：やさしい破壊力学

溶接構造物の疲労破壊強度評価と破壊力学

九州大学
後藤 浩二

1. はじめに

本号掲載記事「破壊力学とは？」の冒頭においても述べられているように、破壊力学とは「亀裂の力学」であり、解析的な立場からは切欠先端の曲率半径がゼロの極限状態である「亀裂」が存在することを前提として構築された学問体系である。したがって、破壊力学を活用した疲労強度評価では、評価対象である構造体や溶接継手に「亀裂」が存在することが前提となる。

溶接継手の疲労強度評価で主流の方法は、 $S-N$ 曲線（評価対象に作用する応力範囲*¹ S とその作用繰返し回数 N の関係）と、応力範囲の作用頻度を考慮した線形累積損傷則（いわゆるマイナー則）により評価される。 $S-N$ 曲線とは、材料や溶接継手がどのくらいの繰返し応力に耐えられるかを表すものであり、一般に繰返し数 N が増加するに従い、小さい応力範囲 S で疲労破壊することが知られている。

線形累積損傷則（マイナー則）とは、複数の応力範囲が作用した場合の疲労破壊判定に用いられる考え方であり、以下に概略を説明する（図1参照）。作用応力範囲が、 $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots$ と複数であり、それぞれの応力範囲が単独で作用する場合の破断までの繰返し数を順に $N_1, N_2, \dots, N_i, \dots$ 回とする。

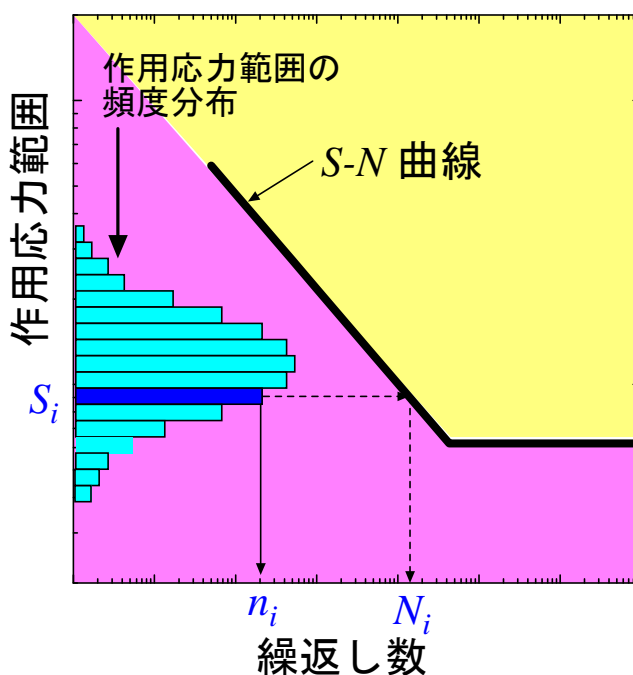


図1 S-N 曲線と線形累積損傷則（マイナー則）

一方、それぞれの作用応力範囲の実際の繰返し数が順に $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots$ 回るとき、各繰返し応力による損傷の度合いを $n_1/N_1, n_2/N_2, \dots, n_i/N_i, \dots$ と考える。線形累積損傷則では、それら個々の損傷度合いの和として全体の疲労損傷度 D を

$$D = \sum_i (n_i/N_i) \quad (1)$$

として定義し、 $D=1$ に達した段階で疲労破壊が発生すると考える。この方法を利用すれば、作用応力波形を分析すれば疲労強度評価が可能となるものの、初期亀裂の存在を考慮していない上に、疲労破壊したと判断された段階での欠陥寸法を定量的に与えることができないという欠点がある。加えて、作用応力の「履歴」は無視しており、あくまでも「頻度」のみを考慮する手法である。ところが、疲労亀裂の成長には「履歴」が大きく影響を及ぼすことが、実験事実として知られている。

$S-N$ 曲線は実験室レベルで負荷可能な試験片を用いて、一定の応力範囲条件下で実施した疲労試験結果に基づいて作成されるため、あくまでも「試験片の」疲労破壊に対応しており、実構造物の疲労強度評価にそのまま適用して「疲労破壊」と判定されても、直ちに構造物はその機能喪失に至るとはいえない。そこで、疲労によりある程度の大きさに成長した亀裂を有する部材の強度評価を行うことで構造物全体の健全性を評価すればよいという考えがあり得る。また溶接継手では、溶接低温割れ等の亀裂状の初期欠陥が存在しないことを全ての溶接線に対して完全に検査することは、通常の溶接構造物の建造工程では経済的な観点から困難である。そのため、通常の前破壊検査で検出することが容易でない寸法の亀裂状初期欠陥が存在すると仮定して溶接継手の強度評価を行うという考え方もあり得る。これらの考え方において、評価対象に「亀裂」が存在することを前提とする破壊力学を活用できると期待される。

2. 疲労亀裂伝播挙動の評価

以上述べた状況を考慮し、亀裂状初期欠陥を有する構造物が繰返し負荷を受ける条件下における疲労亀裂の成長挙動について、疲労亀裂伝播速度 da/dN (単位繰返し数あたりの疲労亀裂伝播量) が破壊力学パラメータである応力拡大係数範囲 ΔK の関数として表現できることが Paris ら¹⁾ により提唱された。疲労亀裂伝播速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を模式的に示すと、**図 2** のような逆 S 字型の関係を示す。なお、**図 2** は da/dN 及び ΔK を両対数グラフにプロットした結果である。また、**図 2** に示す関係は、後述の微小亀裂と異なり、ある程度の長さを有する初期亀裂が存在する場合の成長挙動を示している。

同図に示すように、疲労亀裂伝播過程は大きく 3 つの段階に分類できる。左端の Stage I と称される範囲では、 ΔK の低下に伴い疲労亀裂伝播速度が急速に低下し、図中に示す下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} 以下の ΔK では疲労亀裂は事実上伝播できないことが知られている。一方、右端の Stage III と称される範囲では急激に疲労亀裂伝播速度が大きくなり、 K_{max} が材料の破壊じん性値に近づくと不安定破壊を生じる。疲労亀裂が不安定破壊を生じるときの応力拡大係数 K は、ぜい性破壊における破壊じん性値 K_c と区別し、疲労破壊じん性値 K_{cf} と呼ばれている。

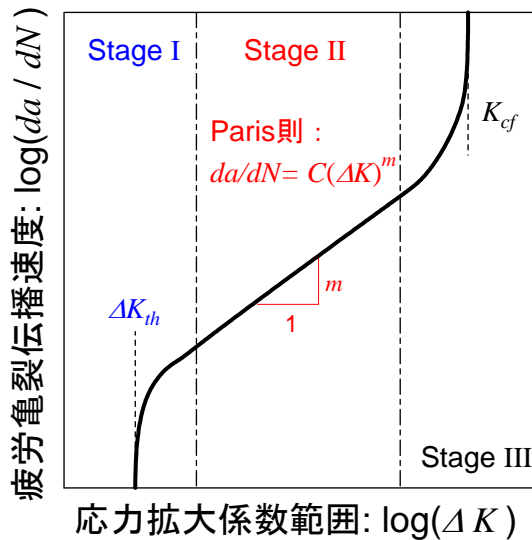


図2 応力拡大係数範囲と疲労亀裂伝播速度の関係（模式図）

中間領域は Stage II と称され、Stage I 及び III との境界近傍を除く中間領域は、安定な疲労亀裂伝播挙動を示し、この範囲における da/dN と ΔK の関係について Paris ら²⁾ は式 (2) に示す関係式で近似できることを示している。これは Paris 則として広く知られている。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

Paris 則を用いることで、以下に例示するように、疲労亀裂成長に要する繰返し数を推定することができる。

無限平板中に存在する亀裂半長 a の亀裂が遠方で亀裂線垂直方向に $\Delta\sigma$ の繰返し応力を受けると、亀裂半長が a_1 から a_2 に達するまでに要する繰返し数 N を求める。

亀裂長 a 、作用応力 $\Delta\sigma$ の場合の応力拡大係数範囲は $\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$ であるので、Paris 則より

$$N = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{C(\Delta K)^m} = \frac{1}{C(\sqrt{\pi}\Delta\sigma)^m} \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{a^{m/2}} = \frac{2}{C(\sqrt{\pi}\Delta\sigma)^m (m-2)} \left[\frac{1}{a_1^{m/2-1}} - \frac{1}{a_2^{m/2-1}} \right]$$

Paris 則を用いることで疲労亀裂の成長に要する繰返し数を予測することは可能となったように見えるが、図 2 に示した da/dN と ΔK の関係は、 ΔK の値が同じでも応力比 $R (= \sigma_{\min}/\sigma_{\max})$ の値（すなわち、平均応力の値）が異なれば疲労亀裂伝播挙動が異なることが確認された。そのため、Paris 則を修正することが多くの研究者により試みられた。式 (3) に示す Forman の式³⁾ はその一例である。

$$da/dN = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_{cf} - \Delta K} \quad (3)$$

3. 微小亀裂の疲労亀裂伝播挙動

実際の構造物で疲労亀裂が問題となるのは、材料欠陥や応力集中部から発生・伝播する微小亀裂であることが多い。図3に微小疲労亀裂に対する da/dN と ΔK の関係を模式的に示す。同図には図2に示した、ある程度の長さをもつ亀裂の伝播挙動も併せて示している。微小亀裂の伝播速度は亀裂発生初期で長い亀裂のそれよりも一般的に高く、 ΔK の増加とともに一旦伝播速度が減少することもあるが、亀裂長さが増加するにつれて、長い貫通亀裂の伝播速度に近づいていくことが多い。微小亀裂は長い貫通亀裂の ΔK_{th} 以下でも発生・伝播するが、発生後少し伝播した後に停留する場合もある。切欠から発生した微小疲労亀裂は切欠による応力集中の影響により高い伝播速度を示すが、切欠から遠ざかるにつれ長い亀裂の伝播速度に近づく。微小亀裂の伝播挙動は材料の組織に依存するので、伝播速度のばらつきは大きい。

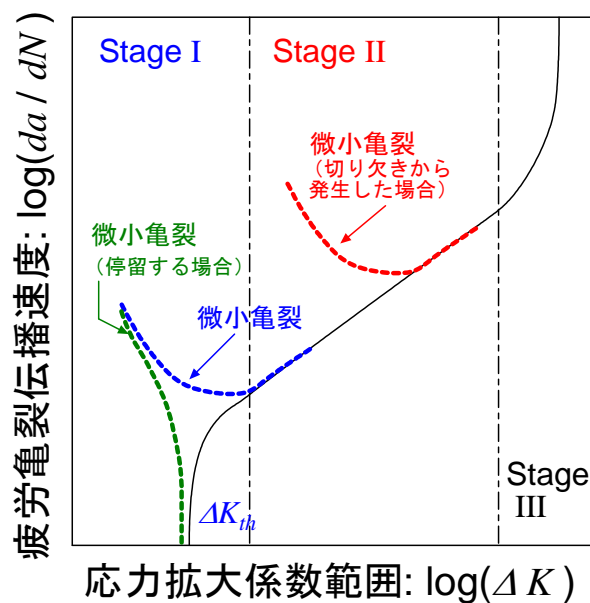


図3 微小亀裂の伝播挙動（模式図）

4. 疲労亀裂開閉口挙動

疲労亀裂はたとえ負荷応力が引張りのみでも全応力範囲に渡って開口しておらず、かなりの負荷レベルまでは閉口しているという疲労亀裂開閉口現象が Elber⁴⁾ により見出され、これが疲労亀裂伝播挙動に対して極めて重要な役割を果たすことが明らかにされている。図4は繰返し負荷を受け、ある程度成長した段階での疲労亀裂先端近傍の様子の模式図である。疲労亀裂では亀裂前方に形成された塑性変形領域内を伝播するために亀裂上下縁に引張塑性変形層が残留し、これがまわりの弾性域に拘束される結果、亀裂縁に圧縮の残留応力を生じる。図4には亀裂線上の応力分布も示しているが、最小荷重時（図4(a)）には亀裂面が閉口することで接触し、圧縮の応力が生じている。（亀裂先端の極近傍は極僅かであるが開口する場合もあるため、応力がゼロとなっている。）その後負荷されることで、疲労亀裂面全体が開口（図4(b)）し、最大荷重（図4(c)）に至る。図4(b)の応力分布に例示するように亀裂全体が開口することで、亀裂先端の応力は急激に上昇し引張降伏に至る。

以上説明した疲労亀裂の挙動を考慮すると、疲労亀裂を伝播させる駆動力は前項で述べたような全応力範囲に対応した応力拡大係数範囲 ΔK ではなく、疲労亀裂全体が完全に開口状態を保持する応

力範囲に対応した応力拡大係数範囲とすべきと考えられる。そこで、Elber⁴⁾は、式(4)で定義される有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} をパラメータとして疲労亀裂伝播挙動を評価する必要があると提唱した。

$$\Delta K_{eff} = (\sigma_{max} - \sigma_{op}) \sqrt{\pi a} F(a/W) \quad (4)$$

ここで σ_{op} は亀裂先端が開口するときの応力である。 σ_{op} の値を机上で与えるためには数値シミュレーション⁵⁾が必要であるが、実用的には開口比 U を用いて $\Delta K_{eff} = U \Delta K$ として計算することが有用である。 U は材料や応力比に依存し、簡易推定式も与えられている。

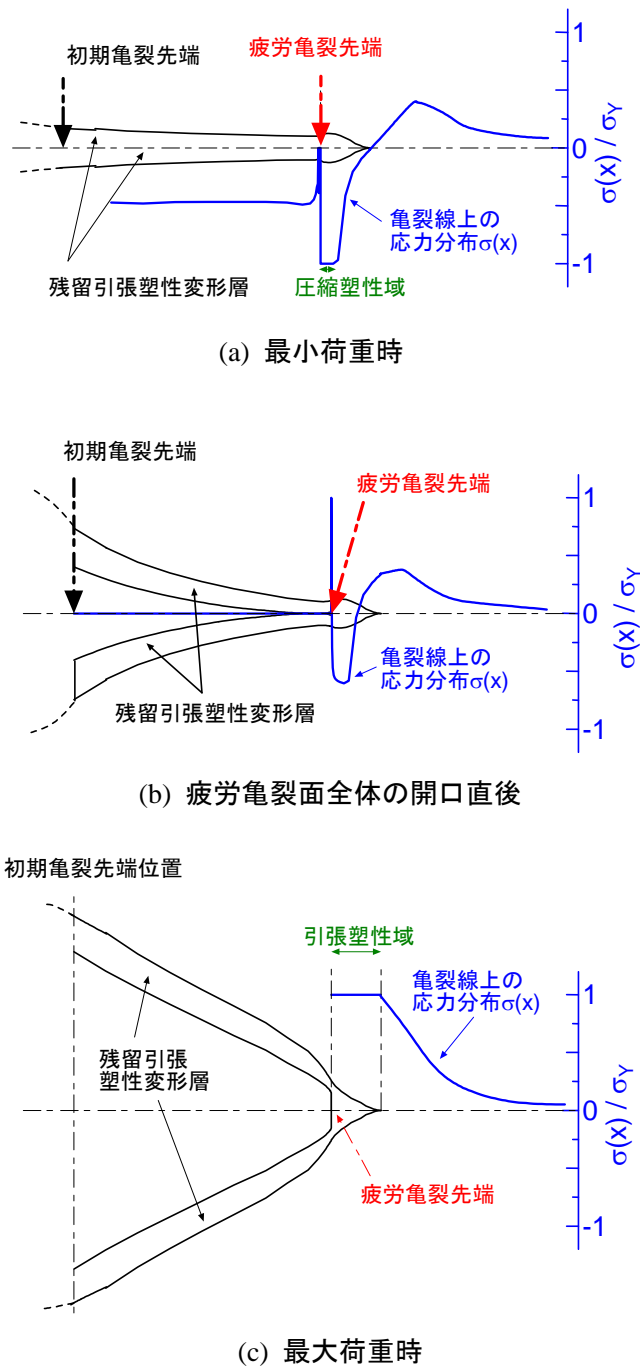


図4 疲労亀裂開閉挙動に関する模式図

疲労亀裂伝播挙動について、 da/dN と ΔK の関係に代わり da/dN と ΔK_{eff} の関係で整理すると、応力比に関係なく材料ごとに1本の曲線で表される。

疲労亀裂伝播に及ぼす平均荷重の影響のほか、微小亀裂伝播挙動、疲労亀裂停留の理由、変動荷重履歴下における疲労亀裂伝播挙動なども、亀裂開閉口現象を考慮することで説明できる場合が多い。亀裂閉口現象は亀裂縁に取り込まれた残留引張塑性変形層により引き起こされるので、これを塑性誘起亀裂閉口と称する。亀裂閉口機構はこれ以外にも指摘されており、例えば破面の粗さが原因となる破面粗さ誘起亀裂閉口や、酸化物が亀裂内に堆積することが原因の酸化物誘起亀裂閉口がある。

5. 変動荷重履歴下の疲労亀裂伝播挙動

疲労亀裂伝播挙動には、荷重履歴が大きな影響を及ぼすことが知られている。一般に過大荷重あるいはピーク荷重が作用した後に続けて低レベル荷重が作用すると、後続の低レベル荷重段階では、亀裂伝播は著しく遅延あるいは停留する。また、荷重履歴次第では亀裂伝播が加速する場合もある。

このような亀裂伝播速度の変動は、亀裂の伝播に伴い亀裂上下縁に取り込まれた残留引張塑性変形層が亀裂閉口挙動に影響を及ぼすことが原因として説明できることから、残留引張塑性変形層の形成を忠実にシミュレーションすることで、疲労亀裂伝播挙動に及ぼす荷重履歴の影響を定量的評価できることが示されている⁶⁾。

6. まとめ

本稿では、疲労現象について破壊力学の立場からの解釈について解説した。破壊力学を溶接構造物の疲労強度評価の解釈に適用するには初期亀裂の存在を前提とするが、疲労亀裂の成長から継手の不安定破壊までを一貫して評価できるという優れた利点を有することから、*S-N* 曲線による疲労強度評価に替わり、疲労強度評価手法の主流になることが期待される。

参考文献

- 1) Paris, P.C., Gomez, M.P. and Anderson, W.E. : A rational analytical theory of fatigue, The Trend of Engineering, Vol.13, 1961, pp.9-14.
- 2) Paris, P.C. and Erdogan, F.: A critical analysis of crack propagation laws, Trans. ASME, Ser. D, Vol.85, 1963, pp.528-535.
- 3) Forman, R.G., Kearney, V.E. and Engle, R.M. : Numerical analysis of crack propagation in cyclic loaded structures, Journal of Basic Engineering, Vol.D89, 1967, pp.459-464.
- 4) Elber, W. : The significance of fatigue crack closure, ASTM STP 415 (Damage tolerance in aircraft structures), 1967, pp.247-309.
- 5) 例えば, Newman, J.C.: FASTRAN II –Fatigue Crack Growth Structural Analysis, <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19940002843>, (accessed on 27 Dec. 2017) .
- 6) Toyosada, M., Gotoh, K. and Niwa, T. : Fatigue crack propagation for a through thickness crack: a crack propagation law considering cyclic plasticity near the crack tip, International Journal of Fatigue, Vol.26, 2004, pp.983-992.

脚注

*1：繰返し負荷において作用する最大応力を σ_{\max} 、最小応力を σ_{\min} とすると、応力範囲は $\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$ で与えられる。一方、*S-N* 曲線の評価指標として、 $(\sigma_{\max}-\sigma_{\min})/2$ で与えられる応力振幅（応力範囲の半分の値）が採用される場合もある。これらは評価対象に適用される規格ごとに異なるため、注意が必要。

<略歴>

後藤 浩二（ごとう こうじ）

1995年 九州大学 大学院 工学研究科 博士後期課程修了 博士（工学）取得

1995年 九州大学 工学部 講師

1997年 九州大学 工学部 助教授

2017年 九州大学 大学院 工学研究院 教授

現在に至る