

# 残留応力場での疲労寿命推定



研究ノート

辻 昌 宏\*

## Prediction of Fatigue Lives in Residual Stress Fields

**Key Words** : Residual Stress, Fatigue Crack, Stress Intensity Factor, Crack Closure, Life Prediction.

### 1. はじめに

機械構造物における破損事故の原因の大部分を占めるものは疲労破壊であり、種々の状況下で適用可能な疲労強度に対する設計基準および保安基準を確立することは、極めて重要な課題である。そのため、このような機械構造物に対して、設計段階からきずや欠陥の存在を仮定し、所定の期間ごとに検査および必要に応じて補修を行えば、少なくとも使用期間内では、十分な安全な運転が確保できるといういわゆる損傷許容設計<sup>1)</sup>の概念が積極的に取り入れられるようになった。このような損傷を許容する設計においては、発生した疲労き裂の残存寿命を推定する技術が必要となる。このため、様々な条件下で、疲労き裂がどのように伝ばし不安定破壊に至るかを明らかにする多くの研究<sup>2)</sup>がなされると共に、これらから得られた知識をもとに、すでにいくつかの疲労き裂伝ば寿命推定法<sup>3)~5)</sup>が提案されている。しかしながら、それらの適用範囲は限られており、疲労き裂伝ば寿命の推定に関する研究は、現在も依然として重要な課題となっている。

ところで、実用の構造物には、少なからず残留応力が存在する。例えば溶接継手部などにお

ける疲労き裂の伝ば挙動は、この残留応力の影響を大きく受けることが一般に知られている。したがって、実機の疲労き裂の伝ば寿命推定法を確立するためには、残留応力場中を伝ばする疲労き裂の伝ば方向も含めた挙動を十分に把握し、それを基に残留応力場においても適用可能な疲労き裂伝ば寿命推定法を構築しておく必要がある。

溶接などによる残留応力が存在する部材の疲労き裂の伝ば挙動を扱った研究は多くみられる<sup>10)~20)</sup>。これらの知見により、残留応力場中を伝ばする疲労き裂に対しても、残留応力の存在しない場合の疲労き裂と同様に、き裂伝ば速度  $da/dN$  はき裂が開口している間の応力拡大係数範囲、すなわち有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$  の一価関数となることが、疲労き裂開口比  $U$  の実測から明らかになってきた。また、残留応力の効果は、き裂開閉口に及ぼす平均応力の効果と等価であることも示された。

しかしながら、このように種々の研究がなされているにもかかわらず、残留応力場における二次元疲労き裂に対してはもちろんのこと三次元疲労き裂に対しても、体系化され汎用性のある伝ば寿命の推定法を作り上げるまでには至っておらず、これを作り上げることは、現在もなお重要で早急に解決すべき問題である。

そこで、著者ら<sup>20)</sup>は、まず、残留応力場における二次元疲労き裂の寿命推定の問題を2つの場合にわけ、それらに共通する、普遍性のある二次元き裂の寿命推定法を提案し、次にこの寿命推定法を、三次元き裂に対しても適用がで

\*Masahiro TSUJI

1953年8月29日生

1979年大阪大学大学院工学研究  
科機械工学専攻前期課程修了現在、大阪大学工学部産業機械工  
学科大路・久保研究室、助手、工

学修士、機械材料工学

TEL 06-844-1151 (内線 5104)



きるように拡張した。さらに、これらの体系化された寿命推定法について、種々の残留応力場において、疲労き裂伝ば実験を行い、提案した寿命推定法の有効性を検証した。

なお、残留応力場における疲労き裂の伝ば方向<sup>30)</sup>については、紙面の都合上、割愛する。

## 2. 残留応力場における寿命推定

残留応力場における寿命推定を行う場合に実際に遭遇すると考えられる場合は、

- (A) 初期残留応力が既知の場合。
  - (B) 初期残留応力場にき裂が導入され、その初期残留応力が再分布した場合の再分布残留応力場が既知の場合。
- の2通りに分けられる。

次に、(A) および (B) の各々の場合に対して寿命推定法を提案する。これらの推定法に共通する基本的な原理は、残留応力の効果を平均応力の効果と等価であると考え、重ね合わせの原理を用いてき裂先端の実効の応力拡大係数を求めることである。

まず、二次元き裂に対して、小規模降伏条件を前提としてき裂伝ば寿命推定法を提案した。すなわち、

- (A) に対しては、
  - ① U 予測による寿命推定法
  - ② シミュレーション法
- (B) に対しては、
  - ③ 残存寿命推定法

の合計 3 つの寿命推定法を提案した。

①の U 予測による寿命推定法は、初期残留応力分布が既知である残留応力材の実効の応力比 R を重ね合わせの原理を用いて弾性解析により求め、これを別に無残留応力材に対する実験から得られた応力比 R とき裂開口比 U の関係に代入することにより残留応力材の U を求め寿命を推定する。解析と実験を組合せた寿命推定法である。

また、本方法は、後で述べるように、三次元き裂に対しても拡張される。

①のシミュレーション法は、初期残留応力分布が既知である残留応力材のき裂先端近傍の力学環境を無残留応力試験片に移し換えることに

より、すなわち、残留応力材のき裂先端の実効の応力拡大係数を弾性解析により求め、それと同じ応力拡大係数値になるように無残留応力材に対し荷重制御下でき裂伝ば実験を行い、寿命推定を行う方法である。

③の残存寿命推定法は、再分布した初期残留応力が既知である場合に、この再分布した残留応力から初期残留応力分布を推定し (A) の問題に帰着させる推定法である。

以下、本報告では紙面の都合上、主に①の U 予測による寿命推定法の解説に記述をとどめる。

U 予測による寿命推定法は、上でも述べたように残留応力の効果を取り入れた実効応力比 R を媒介として、残留応力材の  $\Delta K_{eff}$  を予測し、この値を無残留応力試験片のき裂伝ば特性に代入することにより寿命を推定する方法である。

図 1 に本推定法の流れ図を示す。流れ図中の残

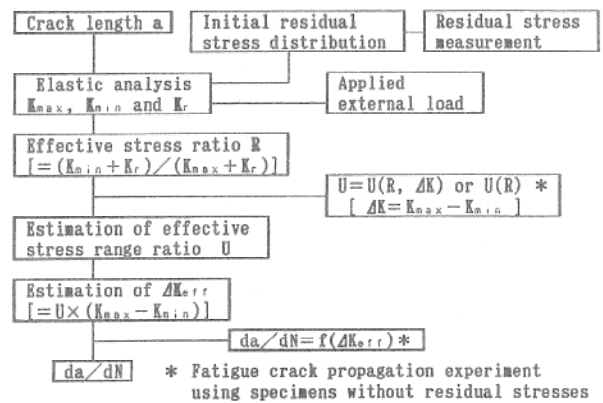


図 1 U 予測による寿命推定法

留応力の効果による応力拡大係数  $K_r$  は、重ね合わせの原理<sup>28)</sup>を用いて評価した。すなわち、き裂面の位置に存在する残留応力を符号を逆にして、き裂面に作用させる問題を解くことにより  $K_r$  を求めた。推定結果の一例として、図 2 に示す初期残留応力分布 (400℃ の場合) を持った試験片に対して、片側き裂を伝ばさせた場合の結果を図 3 に示す。尚、残留応力の導入には水焼入れ法<sup>31)</sup>を、初期残留応力分布の測定には、X 線応力推定法<sup>32)</sup>を用いた。実験中に測定したき裂開口比 U を用いて算出した  $\Delta K_{eff}$  によりき裂伝ば速度  $da/dN$  を整理した結果 ( $\Delta$  印) と本推定法により求められたき裂伝ば速度  $da/dN$  ( $\square$  印) が比較されている。また、応力拡大

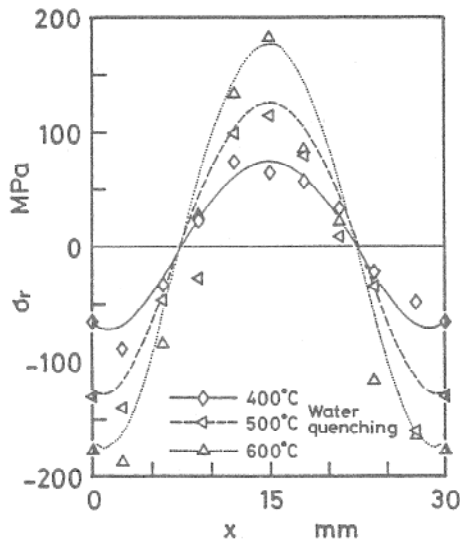


図2 水焼き入れ法による初期残留応力分布の例

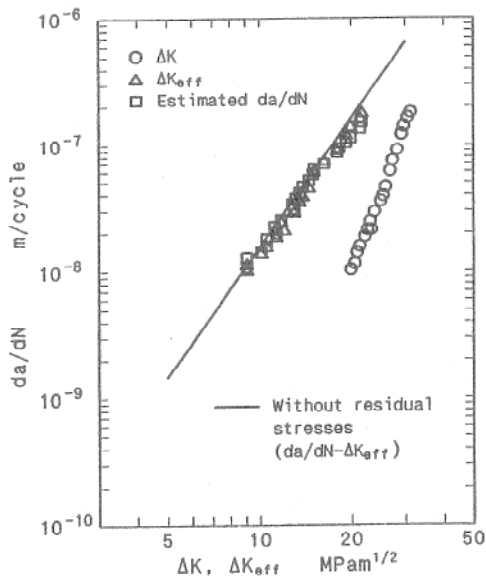


図3 寿命推定の一例(片側き裂：  
圧縮残留応力場よりき裂が伝ばする場合)

係数範囲  $\Delta K$  で  $da/dN$  を整理した結果 (○印) も示してある。図中の実線は、無残留応力試験片の  $\Delta K_{eff}$  と  $da/dN$  の関係である。

推定結果 (□印) は、実験結果 (△印) とよく一致しており、また、無残留応力試験片の疲労き裂伝ば特性ともよく一致している。本推定法が十分有効であることがわかる。

また、本報告の場合のように圧縮場からき裂が伝ばする場合、き裂面が弾性接触することが考えられる。このような場合には、向井らの考案した  $\Delta K_{act}^{33)}$  を用いて本推定法を適用してもよい。なお、本報告では、き裂のスターターとして放電加工によるノッチを導入しているため、き裂面の弾性接触は認められなかった。

次に二次元き裂に対して提案した疲労き裂伝ば寿命推定法を、三次元き裂に拡張する。拡張する際の基本的概念は、二次元き裂の場合に求められた各関係式が三次元き裂のき裂前縁の各点に適用することができるということである。拡張された疲労き裂伝ば寿命の推定法の流れ図を図4に示す。

半楕円表面き裂に対する本推定法の検証<sup>34)</sup>の一例を以下に示す。実験には、板厚15mmの溶接構造用圧延鋼SM41Bを用いた。残留応力は、電子ビーム溶接でメルト・ランを行うことにより導入した。残留応力の測定には磁気ひずみ式残留応力測定器(ニッコージ, MKP102)<sup>35)</sup>を用いた。残留応力の測定結果の一例を図5に示す。実験により得られたき裂伝ば速度  $da/dN$  を有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$  で整理した結果

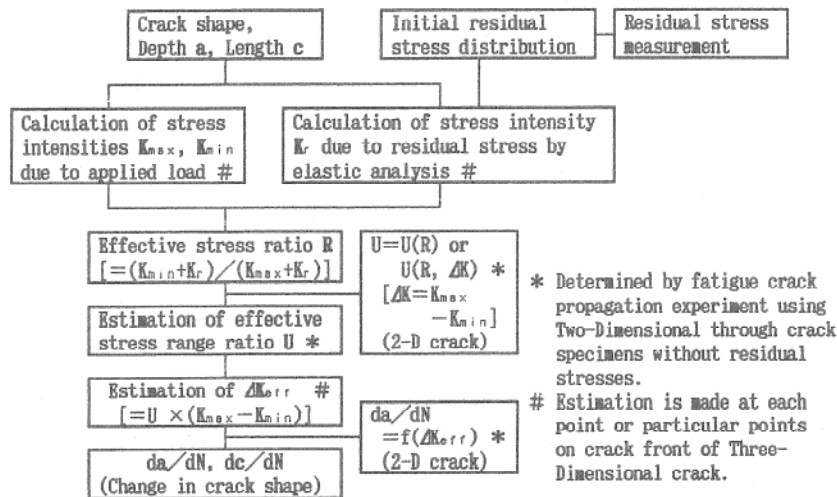


図4 拡張された三次元き裂の寿命推定法

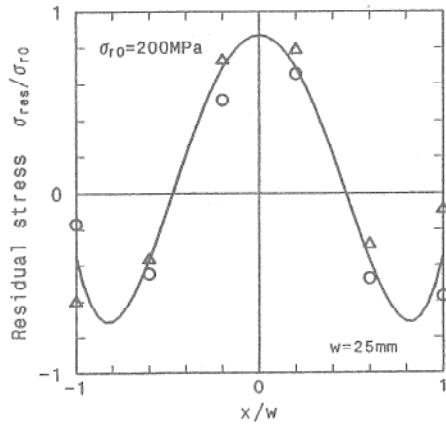


図5 初期残留応力分布の例

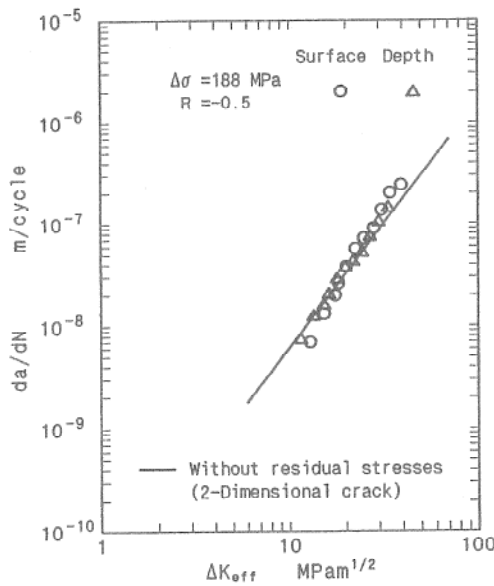


図6 き裂伝ば速度  $da/dN$  と有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$  の関係

を図6に示す。図中、 $\Delta$ 印および $\circ$ 印は、それぞれ、き裂深さ  $a$  および開口部側表面のき裂半長  $c$  に対する実験結果である。実線は、初期残留応力のない試験片に対する二次元貫通き裂のき裂伝ば特性である。

本実験の範囲では、残留応力が存在する三次元表面き裂の場合にも、残留応力の存在しない二次元貫通き裂の場合とまったく同じ  $da/dN$  と  $\Delta K_{eff}$  のべき乗関係が成立していることがわかる。図7に、き裂寸法と繰返し数の関係を示す。図中、 $\Delta$ 印および $\circ$ 印は、それぞれき裂深さ  $a$  および開口部側表面のき裂半長  $c$  に対する実験結果である。また、 $\nabla$ 印および $\square$ 印は、残留応力が存在しない場合の、き裂深さ  $a$  および

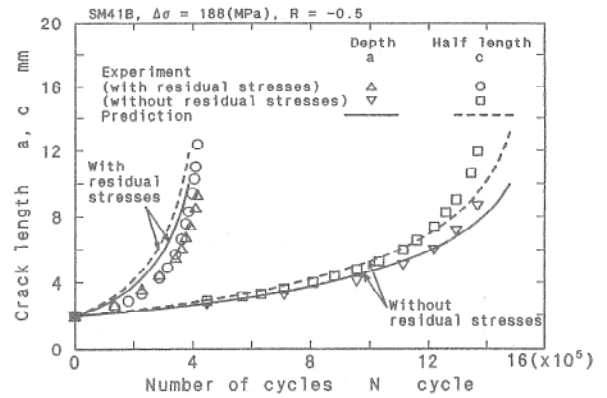


図7 繰返し数  $N$  とき裂深さ  $a$  およびき裂表面半長  $c$  との関係

開口部側表面のき裂半長  $c$  に対する実験結果である。図より、板幅中央部の引張り残留応力の影響により、残留応力がない場合に比べてき裂伝ばが加速されているのがよくわかる。また、実線はき裂深さ  $a$  の推定結果であり、破線は開口部側表面のき裂半長  $c$  の推定結果である。

残留応力が存在しない場合、実験結果と推定結果は非常によく一致しているのがわかる。また、残留応力が存在する場合も、推定結果が実験結果に比較して、若干大きな値となっているものの、全体として両者がよく一致しているのがわかる。

以上より、三次元き裂に対して本推定法が十分有効であることがわかる。

### 3. おわりに

現在、上で述べたように残留応力場における寿命推定はかなり精度良くできるようになった。著者ら以外にも数々の残留応力場における寿命推定法が提案され、それぞれ一様によい結果を得ている。しかしながら、ここに、一つの盲点がある。それは、残留応力分布が精度良く測定できれば、ということである。残留応力の測定法は、本報告で使用したX線法や磁気ひずみ法、あるいは音弾性法や切り出し法など数々あるが、どれも一長一短がある。特に、研究室レベルでは、非常によい方法と考えられても、さて、実際に使用するとなると考えさせられるものもある。残留応力の簡便で精度のよい測定が今後の課題となるであろう。

参 考 文 献

- 1) 上山, 日本航空宇宙学会誌, 25-278, 1 (1977).
- 2) 総説としてたとえば,  
北川, 材料, 26-284, 482 (1977).  
北川, 材料, 26-285, 590 (1977).  
大路清嗣, “総合材料強度学 5, 破壊強度学”. オーム社, 183 (1985).
- 3) 的場・広川, 日本造船学会論文集, 132, 429 (1972).
- 4) W. Elber, ASTM STP 559, 45 (1974).
- 5) 田中・橋内・長屋, 日本機械学会講演論文集, 760-13, 180 (1976).
- 6) 向井・西村・溶接学会誌, 51-11, 903 (1982).
- 7) 小林・荒居・中村, 材料, 36-409 (1987).
- 8) 太田・前田・小菅・町田・吉成, 溶接学会論文集, 3, 391 (1989).
- 9) 仁瓶・尾野・恒成, 造船学会論文集, 152, 390 (1982).
- 10) 福田・渡・堀川, 日本機械学会論文集, A編, 47-416384 (1981).
- 11) 森・堀川, 溶接学会論文集, 1-3, 436 (1981).
- 12) 橋内, 日本機械学会論文集, A編, 47-419, 677 (1981).
- 13) 橋内, 材料, 32-363, 1376 (1983).
- 14) 福田・岸本・西尾・堀川, 日本機械学会論文集, A編, 49-440, 460 (1983).
- 15) 村上・秋園, 溶接学会論文集, 2-4, 714 (1984).
- 16) 村上・秋園, 材料, 34-377, 190 (1985).
- 17) 榊原・堀川・森, 溶接学会論文集, 4-1, 193 (1986).
- 18) 向井・西村・金, 溶接学会論文集, 5-1, 113 (1987).
- 19) 田中・征矢, 溶接学会論文集, 5-1, 119 (1987).
- 20) 向井・西村・金, 溶接学会論文集, 5-2, 272 (1987).
- 21) 橋内・小林・成木・石塚・飯田・吉久, 材料, 36-409, 1077 (1987).
- 22) 太田・小菅・廻・西島, 溶接学会論文集, 5-1, 127 (1987).
- 23) 荒居・小林・大沢・轟, 日本機械学会論文集, A編, 53-492, 1574 (1987).
- 24) 村田・向井, 材料, 40-458, 1435 (1991).
- 25) 本田・鳥居・熊沢, 日本機械学会論文集, A編, 47-416, 376 (1981).
- 26) 本田・鳥居・戸井, 材料, 33-365, 209 (1984).
- 27) 鳥居・本田・浜野, 日本機械学会論文集, A編, 54-500, 679 (1988).
- 28) G. Glinka, ASTM STP 677P 198 (1979).
- 29) 大路・久保・辻・小川・桜田, 日本機械学会論文集, A編, 53-492 (1987).
- 30) 大路・辻・久保・小野・八幡・梅井, 日本機械学会論文集, A編, 59-562 (1993).
- 31) 本田・鳥居・戸井・元木, 材料, 31, 908 (1982).
- 32) X線材料強度部門委員会, “X線応力測定標準”, 日本材料学会, (1974).
- 33) 向井・村田・金, 溶接学会論文集, 5-2, 269 (1991).
- 34) K. OHJI, S. KUBO, and M. TSUJI, ICM-6, Vol.2, 233 (1992).
- 35) 安福精一, “磁気プローブによる溶接部残留応力の解析”, (株)ニッコーシ資料