



研究ノート

実働荷重下の疲労寿命推定法

城野 政弘*

Estimation Method of Fatigue Lives under Service Loadings

Key Words : Fatigue Life, Service Load, Estimation Method, SEM Observation, Image Processing

1. はじめに

いささか旧聞に属するが、日航ジャンボジェット機が後部圧力隔壁の疲労破壊が引金となり墜落、多数の死傷者を出した事故は構造設計あるいは材料強度研究に携わる技術者、研究者に大きな衝撃を与えた。この事故の例を引き合いに出すまでもなく、機械・構造物の破損あるいは破壊の原因として、材料疲労はきわめて重要な問題である。図1は日本機械学会の技術資料にみられる機械・構造物の破損事故例¹⁾の様式別分類を表したものである。高温疲労、腐食疲労、

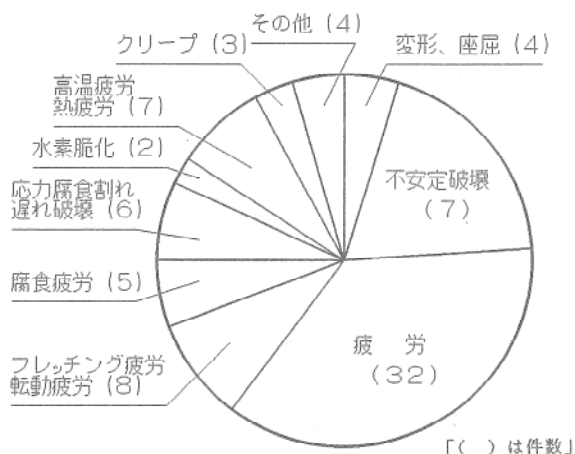


図1 機械・構造物の破損事例の様式別分類¹⁾

フレッチング疲労を含めた疲労による破損事例が約60%を占めている。不安定破壊が19%を占めているが、不安定破壊のうちかなりの事例では、初期欠陥から使用中の繰返し応力により疲労き裂が進展し、き裂が限界寸法に達した時点で不安定破壊を起こしていることから、破損事故の内約7~80%は疲労が関係しているといっても過言ではない。これは近年の機械・構造物の大型化、軽量化とともに、それらの使用条件、使用環境がますます苛酷化し、設計条件がより厳しくなっているためであり、また疲労現象が材料-応力-環境の組合せによる極めて複雑な現象であり、長い研究の歴史を有しながら、なお未解決の問題を多く残していることによるものである。

解決すべき重要な問題の一つに荷重変動状態の違いによる疲労強度の相違がある。一般に材料の疲労強度は一定振幅の繰返し応力により調べられるが、一方実際の機械・構造物に作用する荷重(応力)は平均、振幅、繰返し速度などが不規則に変動するランダム荷重であるところから、設計に際しては実働荷重下の疲労強度を一定振幅荷重下の疲労強度から推定する必要がある。当研究室では研究課題の一つの大きな柱としてこのような実働荷重下の疲労寿命推定法の問題に長年取り組んできている。ここではその考え方と最近の研究事例を一、二紹介する。

2. 疲労寿命の推定法

材料の疲労はき裂の発生までの過程と発生したき裂の進展過程に分けて取扱う必要がある。

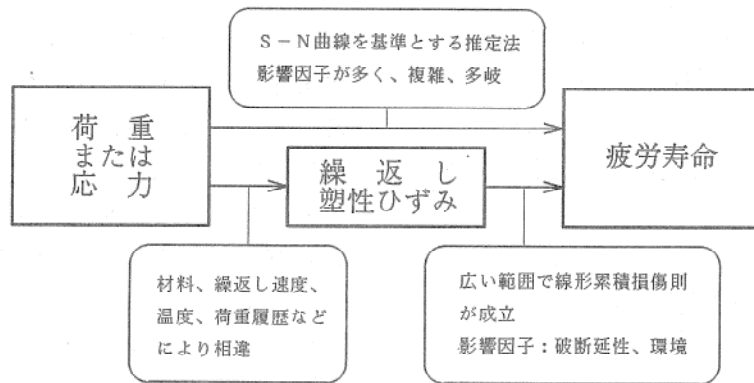


* Masahiro JONO
1940年5月6日生
昭和43年大阪大学大学院工学研究
科博士課程修了
現在、大阪大学工学部機械工学科
機械設計学講座、教授、工学博士、
材料強度学
TEL 06-877-5111(内線4201)

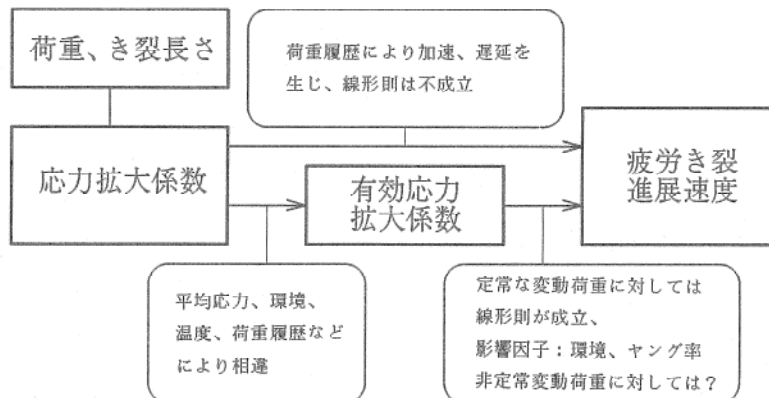
前者のき裂の発生までの寿命（通常は発生したき裂の進展寿命の短い小型試験片の破断寿命で代表する）は良く知られているように応力と破断寿命の関係であるS-N曲線を用いて評価される。一方疲労き裂の進展速度 da/dn は、き裂先端の応力が特異場となり無限大となることから、き裂先端近傍の応力、ひずみ状態を代表する応力拡大係数 K をもって表し、 $da/dn-\Delta K$ 曲線で評価される。また変動荷重下の疲労き裂発生（破断）寿命は、変動応力それぞれの繰返しに対しS-N曲線との比較から損傷割合（破断繰返し数に対する実際に負荷した繰返し数の比）を算出し、その線形和即ち累積疲労損傷値が1になるとき破断するものとして推定する。さらにき裂進展に対しても同様に変動応力から計算されるそれぞれの K に対する速度を $da/dn-\Delta K$ 曲線から求め寿命を推定するいわゆる線形則が用いられている。しかしながら疲労損傷な

らびに疲労き裂進展速度はきわめて強い荷重履歴効果を有し、上記のような履歴効果を無視した線形則では、変動荷重下の疲労寿命を推定することはできない。そのため実用的にはそれぞれの機械・構造物に作用する実働荷重に対し、実験から累積疲労損傷値が1になるようにS-N曲線を修正するか、累積疲労損傷値を1以下の適当な値に修正し、寿命推定を行っている。またき裂進展に対しても簡単な履歴効果の評価モデルを考え、モデルに含まれる修正係数を実験と合わせるように定めているのが現状である。

以上の推定は特定の機械・構造物の特定の实働荷重に対して成り立っても、一般性を持たないため対象や状況が異なれば同じ修正値を用いた推定法は適用できない。個々の場合について具体的な修正法を蓄積するのも重要ではあるが、疲労損傷の非線形累積が何に起因しているかを明かにすることが重要で、それが分かれば、具



(a) き裂発生（破断）寿命の評価



(b) き裂進展寿命の評価

図2 疲労寿命評価法

体的な推定法の構築も可能となる。筆者らはそのような観点から研究を進め、以下の事柄を見いだしている。

まず、き裂発生寿命については、疲労き裂の発生が繰返し応力による塑性すべりによることから、微小な繰返し塑性ひずみを高精度に検出し、図2(a)に示すように応力-寿命の関係を、応力-塑性ひずみ、塑性ひずみ-寿命の関係に分けて考えると、後者の関係は荷重変動履歴にはあまり影響されず、実働荷重に対しても塑性ひずみに関する線形累積損傷則が良く成り立つことを明らかにした。したがって荷重変動履歴による疲労寿命の複雑さは応力に対する塑性ひずみ即ち変形応答の相違にあることが理解でき、対象材料、対象荷重に対する材料応答を知ることができれば、時間がかかり高価となる疲労試験を実施しなくても、実働荷重下の疲労寿命をかなり精度良く推定することが可能となる。

き裂進展速度については、荷重(応力拡大係数 K)の増大で加速を、減少あるいは小数回の過大荷重の負荷により減速を示すことが広く知られているが、その原因の重要な一つが、前歴荷重により形成されたき裂先端近傍の引張塑性変形がその後の除荷により圧縮残留応力を生じることによるき裂開口状態の相違にあることを明らかにするとともに、き裂の開口荷重を動的に高精度で検出する方法を開発した。それにより実働荷重負荷中に実際にき裂が開口する荷重範囲に対し、応力拡大係数を計算した有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} を用いれば図3に示すように、ランダム荷重下のき裂進展速度を一定振幅試験

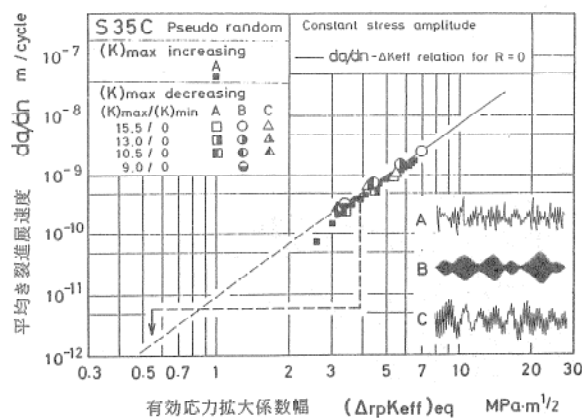
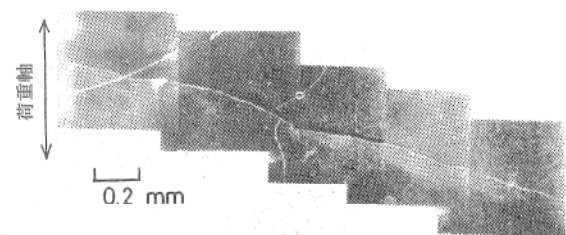


図3 ランダム荷重下の疲労き裂進展速度

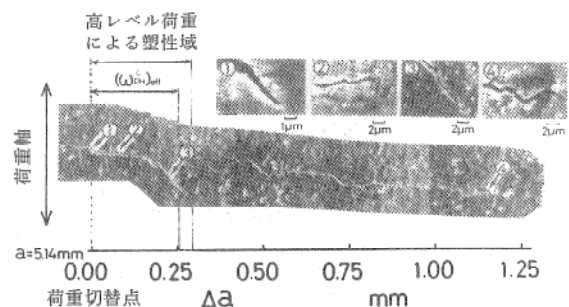
の結果から推定することが可能となり、き裂進展速度の非線形性は荷重履歴によるき裂開口挙動の相違によっていることが理解される。この推定法の流れを図2(b)に示す。微小き裂あるいは弾塑性き裂などの取扱いは若干異なるが、紙面の関係でここでは省略する。

3. 疲労現象の直接観察と画像処理技術の応用

前節で述べたアプローチは、工学的に測定が可能か、あるいは計算ができ、かつ疲労現象により密接に結びついたパラメータを用いることにより、複雑な疲労現象を筋立てて理解し、実働荷重下の疲労寿命推定法の基礎を確立したものである。しかしながら後者の関係において本手法が有効であるのは、定常な変動荷重に対してのみであり、非定常な変動荷重に対してなどなお精度良い推定には問題が残る。これは疲労現象は本来極めて局所的な現象であり、このような巨視的なパラメータと微視的な局所現象が必ずしも対応しているかどうかわからないためである。また疲労現象は荷重の繰返しとともに変化することから、その機構を明かにし本質的な理解を得るには、局所現象を微視的かつ動的



(a) 2段繰返し変動荷重



(b) 高-低2段変動荷重

図4 変動荷重下の疲労き裂進展挙動の直接観察

に連続して観察することが重要となる。そのため筆者らはいち早く走査型電子顕微鏡の中に疲労試験装置を組み込み、疲労き裂発生ならびに進展挙動を直接観察することにより疲労破壊機構の解明に努めきた。図4 (a) は定常な繰返し2段変動荷重下で進展した疲労き裂の観察例であるが、進展径路は結晶粒界での小さな屈曲をのぞいてはほぼ直線的であり、一定振幅荷重下で観察されるものとほとんど変わらない。それに対し図4 (b) に示す高一低2段変動荷重下では、荷重の減少にともないき裂進展速度の遅れ遅延が見られるとともにき裂進展径路は大きく屈曲し複雑な進展挙動を示す。小さい写真で示す微視的な進展挙動はより複雑であり、有効応力拡大係数など巨視的なパラメータとは全く対応していない。その理由は現在のところ不明であるが、解明には進展挙動の定性的な観察のみならず、き裂先端開口変位や先端近傍領域の変形挙動の定量的な把握が必要かと思われる。図5は変動荷重試験におけるき裂開口状態の観察例と画像処理により最小と最大荷重での観察画像の比較から求めたき裂先端近傍の変形状態である。本手法は現在開発途上でありまだあまり多くの結果を得ていないが、このような観察と処理により変動荷重の各荷重での変形状態の相違など

を定量的に把握することが可能となり、微視的な変形挙動と巨視的パラメータとの関係の考察を通じて、非定常変動荷重を含む実働荷重下の疲労き裂進展寿命の精度良い推定が可能となるものと期待される。

4. おわりに

以上実働荷重下の疲労寿命推定法として、疲労現象により密接に関連し、かつ工学的に実測が可能なパラメータによる評価法の重要性を紹介した。近年の材料関係の研究においてはともすれば高機能な新材料の開発に目が奪われがちであるが、実際の現場においては破損事故についてまだまだ未解決の問題を多く抱えている。事故が起こってからの後追いの研究ではなく、現象を良く理解した論理的な寿命評価、破損防止対策につながる研究が望まれる。また、新材料の使用に際しても、機能性のみでなく強度あるいは耐久性の評価は欠かせない。材料開発と強度評価ならびに実際の設計に携わる技術者、研究者の協力が益々重要となっている。

参考文献

- 1) 技術資料“機械・構造物の破損事例と解析技術”，(1984)，日本機械学会

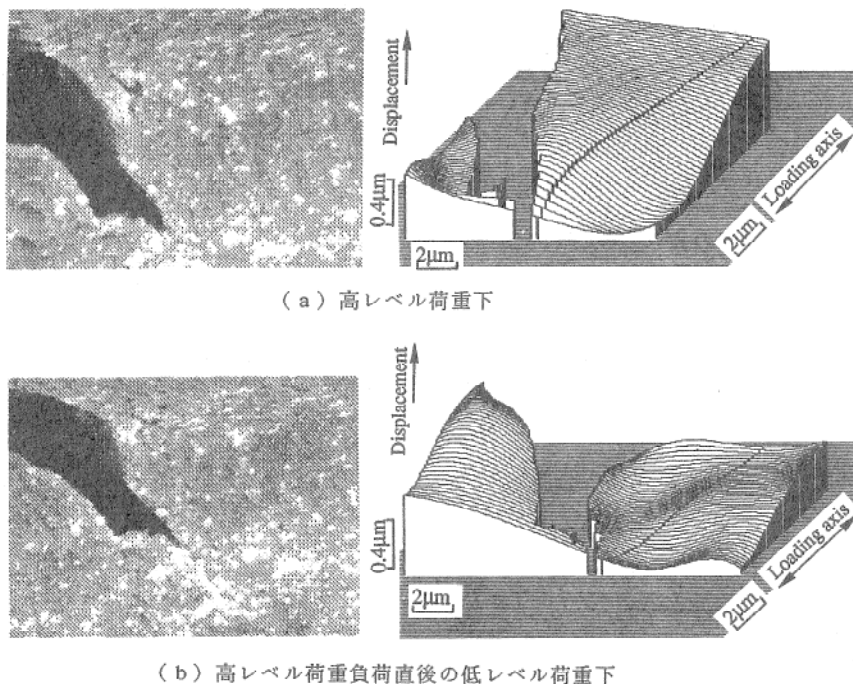


図5 変動荷重下の疲労き裂とき裂先端近傍変位場の計測例