

基礎研究と応用技術

機械・構造物の疲労破壊事故に関連して

城野政弘*



随 筆

Fundamental Research and Applied Technology - related to Fatigue Fracture of Machines and Structures

Key Words : Fatigue, Fundamental Research, Applied Technology, Service Loading, Life Estimation

1. はじめに

筆者の専門分野である材料の疲労に関連した分野では、近年、高速増殖原型炉もんじゅのナトリウム漏れ (95年)、原子力発電所配管からの1次冷却水漏れ (99年)、H-隼ロケット液体水素ターボポンプインデューサ羽根の欠損 (99年)、自動車ハブの破壊による脱輪事故 (02年)、新幹線ディスクブレーキボルトの折損・脱落 (04年)、原子力発電所低圧タービン動翼の流体振動による損傷 (05年) 等トラブルが続発し大きな社会問題になっている。これらは新聞紙上で大きく取上げられたことから、良く知られているが、一般に報道されていない機器の疲労破壊は依然として非常に多く、機械・構造物の破壊原因の7、8割を占めるといわれている。これらの破壊事故の原因は、システムが大型化、複雑化してくるにつれて、以前では考えられなかったような現象が生じ、そのため予測されなかった破壊が生じたともいえるが、原因がわかってみれば、予めもう少し十分な検討が行なわれていれば防げたものも多く、きちんとした技術評価がなされていないのではないかと懸念される。

ここでは、このような機械・構造物の疲労破壊事故に関連して、基礎研究がどのように発達してきた

かを振り返るとともに、基礎研究と応用技術の間の問題に関連し、日頃感じていることを二、三述べさせていただく。

2. 機械・構造物の疲労破壊事故と技術研究の進歩

材料の疲労研究は、実際の機械・構造物の破壊事故に遭遇し、その原因を究明していく過程で発達してきている。いくつかの重大な破壊事故とそれによる学問の発達を示すと以下のものが挙げられる¹⁾。

材料の疲労破壊が社会的な問題となった最初の事例は、19世紀イギリスにおける産業革命の主因となった蒸気機関車の発明にみられ、それまで馬車に固定され回転することがなかった車軸が、蒸気機関の往復運動を回転運動に変換した駆動力のため軸が回転使用されるようになったことに起因している。軸が回転する場合、外部荷重が一方向であっても軸には引張りと圧縮荷重が繰返し作用することになり、静的な破壊強度よりもはるかに小さい応力で疲労が生じ、重量増加とあいまって、そのようなことを予測していなかった車軸の疲労破壊とそれによる事故が頻発した。このことから材料の疲労研究がイギリスやドイツの鉄道技術者を中心として開始され、その成果として現在も使われている高サイクル疲労におけるS-N曲線や疲労限度設計の概念が確立された。

疲労研究の転機となった第2の大きな事故は、民間機初のジェット旅客機コメットで起こっている。1950年代の半ば、コメットが2機地中海沖で空中分解し、墜落した。海中から引き上げた機体の検証と地上水圧試験から、破壊は、与圧された胴体が上空と地上との圧力差で膨張、収縮を繰返し、窓枠等の剛い構造体近くの胴体薄板に大きなひずみの繰返しを生じた結果、そこからき裂が発生、進展したも



*Masahiro JONO

1940年5月生

1968年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了

現在、福井工業大学、副学長・機械工学科教授、大阪大学名誉教授、工学博士、材料力学・材料強度学

TEL 072-798-0483

FAX 072-798-0483

E-mail: jono-me@jttk.zaq.ne.jp

のであることが示された。そのことから大きなひずみの繰返しによる低サイクル疲労損傷の評価法や、き裂が一部に生じても全体破壊に至らないようにするフェイルセーフ設計の概念が発達した。

さらに、紙面の関係上詳細は省略するが、1960年代の終わりに起こったジェット戦闘機F-111の破壊事故から、膨大な数のリベットを全て完全に打つことはできないとして、はじめにリベットの不具合等欠陥があっても、最終破壊に導かないようにする損傷許容設計の概念や破壊力学の応用技術が、また1988年に起きたアロファ航空の経年機の事故から、腐食等による多くの損傷からの疲労破壊すなわちマルチサイト損傷の概念やその評価法等が発展してきている。

このように材料疲労の基礎研究やその成果を用いた疲労設計の概念は、事故の後追い対策として発達してきたものではあるが、それぞれの現象に対しては膨大な研究があり、かなりの精度で評価は可能となっている。今後も未知の現象に対して予測し得ない破壊が起こらないとはいえないが、始めに列挙した事故等については、未知の破壊現象というよりは、システムの大型化、複雑化による現象の複雑さに対する基礎知識の検討不足によっているように感じられる。応用技術としては、既知の基礎研究成果を十分に理解し、それを的確に応用する技術力のみならず、単に材料強度学や材料力学、機械力学に基づく評価にとどまらず、流体振動や熱応力の問題を含む分野を越えた広範囲の検討や組織的な評価が必要である。

3. 実働荷重下の疲労問題

疲労試験のほとんどは回転曲げ疲労試験等による一定応力振幅の繰返し試験によるものである。しかしながら、周知のように一般の機械・構造物に作用する荷重は、振幅や周波数が不規則に変動するランダム荷重であり、このような実働荷重に対する疲労寿命評価が重要となる。

変動荷重による疲労の研究は、荷重を2段や多段に変動させた試験（これをプログラム試験という）結果から、変動荷重下の疲労寿命を推定することが主であり、マイナー則に代表される線形累積損傷則やその修正が多く提案されている。すなわち、変動荷重の一つの応力だけを繰返したとき（一定応力振

幅試験）の疲労寿命を N_i とし、実際の変動荷重試験での繰返し数を n_i とすると、その荷重での疲労損傷は n_i/N_i と考え、これを全ての荷重について足した $\sum n_i/N_i$ が1になったとき破壊が生じると考えるのが、マイナー則である。荷重順序にかかわらず線形加算則が成り立つとするものであるが、実際にはこの値は荷重順序に左右され、また条件によっては2桁程度ばらつくこともある。さらに、変動荷重試験では、疲労限度以下の応力も疲労損傷を与えることが広く知られており、これらを考えてS-N曲線の時間強度部分を疲労限度以下まで延長した修正マイナー則やS-N曲線の傾きを修正する方法等が考えられているが、これらの修正は、実験結果とどのように修正するものあり、合理的な根拠を持った評価法は確立されていなかった。

このような状況に対し、筆者らは、ランダム荷重下でも、疲労寿命を直接支配するのは繰返し塑性ひずみであるとの認識の下、疲労試験中の繰返し塑性ひずみを計測し、応力-ひずみヒステリシスの挙動からランダム荷重のカウント法として、ヒステリシス幅をカウントできるレンジペアカウント法（欧米で広く用いられているレインフロー法はこの方法をもとにコンピュータ処理を簡単化したもの）が合理的であることを見出すとともに、疲労損傷則として、塑性ひずみに基づく線形累積損傷則ならびにそれに基づくS-N曲線の修正法を提案した²⁾。これによると寿命のばらつきはほぼ1/2~2の範囲にはいり、元のS-N曲線を用いた応力に基づく寿命評価が大きくばらつくのは、荷重履歴により応力-ひずみの関係が変化することによることを明らかにした。

このように基礎研究としては、定常なランダム荷重下の疲労寿命を合理的に評価する方法を提案したが、しかしながら、実際の問題では、塑性ひずみは簡単に計測できないこと、使用環境が苛酷であること、また、たまたまいくつかの悪い条件が重なったときに破壊が生じる等、現象は極めて複雑であり、簡単な考え方のみでは済まないようである。再現性のない偶発的な事故の原因を究明することは非常に難しく、論理的な根拠を示すことは困難ではあるが、経験の深い企業技術者は、基礎研究の筋道をたどりながらも、過去の実績をも踏まえながらS-N曲線の修正や許容応力、安全率の見直しを行い、破壊が起こらないように努力してきたと側聞している。

4. 技術継承と学会シニア会の活動

以上のように、機械・構造物の破壊防止には、基礎研究の発展はもちろんのこと、それを使う応用技術として、十分な理解とともに深い経験に基づく広い視野や分野を越えた組織的な対応が重要である。然るに最近では、企業の研究所からこのような経験を積み事情のわかった研究者がどんどん減っているようであり、いわゆる2007年問題といわれる技術継承が大きな問題となってきている。それに対し、定年年齢に達した技術者、研究者は、まだまだ元気であり、むしろ自身の技術力を生かす場を求めている。これを解決する方法として、最近各学会において、シニアメンバーの活用が検討されている。身近なところを紹介すると、筆者の所属する日本機械学会関西支部では、06年4月にシニア会を発足させ、「シニア間の親睦、情報交換を図るとともに、シニアの経験、技術、知恵を次世代に伝授し、特に学生や企業技術者を支援する」ことを謳っている。現在120名強の参加があり、企業や大学・高専における技術支援に対するニーズを調査しているところである。このような活動が、懸念される技術継承のギャップを埋める一助になればと願っている。

5. おわりに

以上疲労強度を例として、基礎研究の発展とその技術の実際問題への応用に関し、日頃感じているこ

との一端を述べた。ひとたび大きな事故が生じれば、その後処理、保証、今後の対策等多大の経費と努力が求められるが、基礎研究が進み破壊の防止が図られると、壊れないのが当たり前として、その予防や新しい研究投資についてはついにしがらみにされがちである。ともすれば先端材料やミクロ現象等の研究に目が行きがちで（もちろんこれらも重要であることは論を待たないが）、機械・構造物の強度や安全性といった地味な研究が忘れられ、企業も含めこの分野の研究者が減少していることを憂慮している。現実には、前述の破壊事故例にも見られるように、機械・構造物が大型化、複雑化してきていることに対応して、予見しにくい事故が起こっている。それに対し、研究はますます専門化・細分化され、その分野のことについては詳しいが、それを越えた現象には対応できていないようなことが起こっている。朝日新聞の記事にも指摘されている³⁾ように、専門の枠を越えた広い見地からの評価・検討ができるシステムや人材の育成が重要である。

文 献

- 1) 日本材料学会編：改定材料強度学第1章 (2005)、日本材料学会
- 2) 城野政弘：西谷弘信編総合材料強度学講座6、疲労強度学第5章 (1985)、オーム社
- 3) 朝日新聞：平成18年10月10日付け夕刊 (3版)、高サイクル疲労

