

寄稿論文

疲労破壊は、なぜ起こり易いのか

An Outline of Some Outbreaks of Fatigue Fracture

佐賀大学工学部
機械システム工学科教授

西田 新一

Shin-ichi Nishida



1 設計の基盤

近年、工業技術の発達とともに、設備機器においては高効率・高生産性を追求する一方、省力化・工程省略等低コストの諸条件を満たすべく方向に突き進んでいる。さらに、新分野への進出等時代の変革に従って、とくに鋼構造物を中心にますます大型化・高性能化し、その使用環境はより一層過酷化の傾向になっている。他方、社会科学の進歩により、各人の自意識が向上し、設備の安全性・信頼性は最優先事項に挙げられるようになってきている。一般に、高性能化や信頼性の向上を計ろうとした場合、設備の値段が高くなるし、逆に設備の値段を低く設定しようとするとき性能や信頼性を確保するのが困難となる。それゆえ、設計者は「高性能化」と「低コスト化」および「信頼性の向上」との相反する狭間に立って設計せざるを得ない状態に追い込まれている。

さて、実際の「設計の基盤」を破損の観点から大別した結果を、表-1に示す。これは、「Safe life design」と「Fail safe design」との二つに大別できる。前者の「Safe life design」は、「破損を許容しない設計」の意味で、設備もしくは部材は永久に破損しない考え方に基づいている。これ

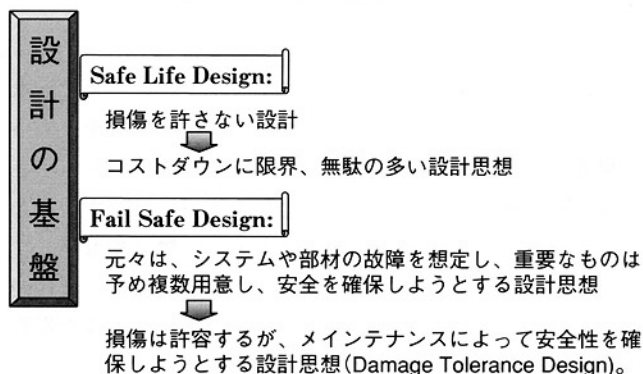
は、従来から長く設計の基本的考え方として採用されてきており、今なおこの考え方は根強く残っている。しかし、この考え方に基づいて設計する限り、コストダウンには限界があり、設備の寿命は有限であるのにそれが廃棄される時期がきてはなお、そこに使用されている部材の多くは健全であるという矛盾が起きることになる。

そこで、この矛盾点やコストダウンの限界を打破するために、「Fail safe design」の考え方が採用されるようになった。元来、「Fail safe design」は、安全性を確保するために複数の設備や方法を予め具備しておくという考え方であった。たとえば、飛行機をA空港からB空港に向けて飛行させる場合、天候異常等により万が一B空港が使えなくなってもその代替空港としてC空港を使用できるようにしておくシステムである。空港だけでなく飛行機そのものの重要部分にも、複数系統の制御装置が装備されていることは周知の通りである。このように元々は、設備というのは不具合を生じて本来の機能を発揮しない場合があるので、複数系統の設備を予め備えておくことで安全性を確保する考え方であったが、現在では「破損は許容するが、メンテナンスによって安全性を確保する考え方」に変化していった。すなわち、部材を有限寿命とみなし、壊滅的な破壊が発生する前にその部材を交換することにより安全性および本来の機能を確保しようとする考え方である。これはまた、「Damage tolerance design」ともいわれている。

この「Fail safe design」と類似の言葉に、LBF (Leak before failure) やLBB (Leak before break) がある。これらは、たとえば液体や気体が入っているタンクを想定した場合、き裂が板厚を貫通すると内部の液体や気体が洩れだしてくるので、壊滅的な破壊の前に予知することができるという意味である。技術の進歩に伴い、ほとんどすべての設備は有限寿命であるので、その間を不具合なく稼働すれば良いという考え方は極めて合理的であり、この考え方がかなり広がりつつあると思われる。

ところで、安全率を見込み少なくとも所定の期間は破壊しないように設計されたはずの構造物が、意外と低い荷重

表-1 設計の基盤



類似語

LBF; Leak Before Failure
LBB; Leak Before Break

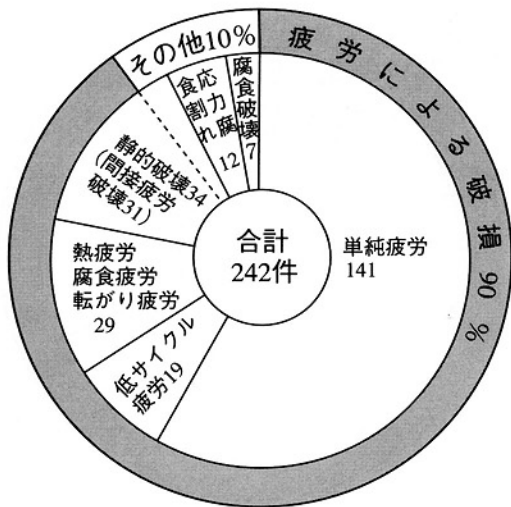


図-5 破損の原因別内訳

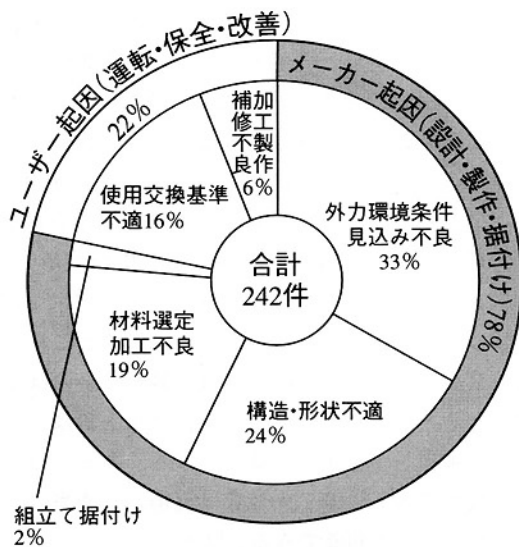


図-6 破損の要因別内訳

本のボルトが破断するか否かの間に、残りのすべてのボルトも破断した。これは、最後の3本のボルトだけでは最初の荷重を支えることができなくて「静的に破壊した」と判断された。最後の3本のボルトの破面を詳細に観察すれば、ねじ谷底近傍に微小な疲労き裂が確認されたかもしれないが、あるいは最初からゆるんでいたために、繰返し荷重を分担することなく、破断に至ることも考えられる。ところが、もしこのフランジ継手において、最初の計7本のボルトが「疲労破壊」していなければ、残りの3本のボルトも「静的に破壊」しなかったはずである。すなわち、残りの3本のボルトは、間接的には疲労破壊したと判断できる。「静的破壊」から、かかる割合を考慮すれば約10%が間接疲労となり、合計87%が疲労に起因すると考えられる。すなわち、鋼構造物の破損の85~90%以上は「疲労」に起因するという表現は決して過言ではないといえよう。

さらに、これらをその発生要因別に分類すると、図-6

のごとくなる²⁾⁻⁴⁾。すなわち、外力条件の見込み不良(35%)、加工製作(22%)および使用交換基準(16%)の不適正、材料選択不良(10%)などとなっている。すなわち、事前に十分に解析し、材料に対する知識を持ち、加工製作後の検査に注意を払っておけば、防ぐことのできる人為的要因による場合がほとんどである事実注目すべきである。また、外力・環境条件見込み不良、構造・形状不適、材料選定・加工不良および組立・据付けは、メーカー起因になり、これらの合計割合は78%に上る。一方、使用交換基準不適および加工製作・補修不良の合計は、22%となり、ユーザー起因と考えられる。すなわち、メーカー起因とユーザー起因の割合は、4:1となっており、破損原因のほとんどはメーカー責任に帰せられることがわかる。

4 強度に関する要因と強度評価

表-2に、強度に関する要因と強度評価を示す⁵⁾。この表から分かるように、実際の設計においては、実機部材の強度を算出する必要がある。しかし、実機部材の強度は通常実験では得られないので、試験片の強度をベースに経験則等を加味しながら、実機部材の強度を算出する方法がとられている。一番単純な方法は、安全率(Safety factor)をとって、基準応力を安全率で割った値を設計応力とするやり方である。この方法は簡単ではあるが、物理的根拠に乏しいために、コスト低下を計る場合に限界があるという問題点があった。

表-2 疲労強度に関する要因と強度評価

試験片の強度:	(例) #600エメリー研磨、φ10mm 平滑材、大気中、等方性、均質、均一
低下	<ul style="list-style-type: none"> 表面性状 寸法 切欠き効果 残留応力 環境効果 異方性 不均質(材質) 不均一(応力)等
	<p>(関与する工学分野(一部重複するものも含む))</p> <p>応力: 材料力学、弾性力学、塑性力学、材料強度学、金属疲労、破壊力学、フラクトグラフィ、設計学、FEM 等</p> <p>材料: 材料工学、金属材料、物理冶金、転位論、物性科学、金属間化合物、溶接工学、接着接合、新素材 等</p> <p>環境: 界面物性、表面工学、腐食工学、高温酸化 等</p>
実機部材の強度:	(例) 荒仕上げ、φ500mm、切欠き材、ネジ穴付き 腐食環境、異方性、不均質、不均一

ところで、試験片の強度に比較して、実機部材の強度の方が低下するのが普通である。

その低下の原因として、両者の間に種々の相違点が存在することに起因する。それらの相違点には、以下のようなものがある；表面性状、寸法効果、切欠き効果、残留応力、環境効果、異方性、不均質(材質)、不均一(応力)等。そこで、試験片の強度から実機部材の強度を推定するのに、できるだけ論理的に行う必要がある。そのためには、種々の工学的手法をうまく活用しなければならないが、材料強度に関する工学的手法ははなはだ分野が広範に渡っている。

6 まとめ

以上、述べてきたことを要約すると以下のごとく示すことができる。

(1) 破損事例の統計的解析結果から、破損の90%以上は応力集中部から発生し、破損の90%程度は、直接または間接的に疲労に起因する。

(2) 疲労き裂は、最も塑性変形し易い結晶粒に繰返し応力（負荷と除荷との組合せ）が加えられることにより発生する。この現象は、引張強さはもちろんのこと、降伏強さよりも低い応力においても起こり得る。疲労き裂の発生後は、原則としてき裂は伝ば過程をたどり、最終破壊に至る。従って、部材の表面になんらかの欠陥や切欠きが存在すると、予想よりもはるかに低い応力がかかる現象が起こり得るので、上記(1)が説明できる。

(3) 疲労に関与する因子や学問領域が広範囲に渡るために、疲労破壊を防止することは極めて困難であると言う印象を抱かれているが、要因を一つずつ抑えていくことによって疲労破壊の防止も不可能ではない。

参考文献

- 1) 西田新一, 浦島, 榎本, 第26回国内破壊シンポジウム論文集, (1981), P.91
- 2) 西田新一, 機械機器破損の原因と対策, (昭和61), 日刊工業新聞社
- 3) S.Nishida, Failure Analysis in Engineering Analysis, (1992), Butterworth Heinemann Co. Ltd.
- 4) 西田新一, 機械・構造物の破損解析と対策, (1995), 金華堂
- 5) 西田新一, 日本機械学会RC130高サイクル疲労に関する調査研究分科会, (1996), P.57
- 6) 西田新一, 新日鐵八幡技研報告, (昭和51-9), P.76
- 7) P. Neumann, Z. Metallkde, 58 (1967), P.780 および Acta. Meta. 17, (1969), P.1219



5 疲労き裂の発生および伝ば

すでに図-4に示したように、通常、疲労き裂は、材料の欠陥または切欠きなどの応力集中の著しい部分から発生する。これらの部分もミクロ的に観察すれば、平面に近いと考えられる。その部分からの疲労き裂の発生をモデル図で説明する(図-7参照²⁾⁻⁴⁾。応力をゼロから徐々に上げていくと、結晶が塑性変形(すべり)を起こし始める。

その現象はあたかも積木を重ねて斜めにずらしたように変形すると考えてよい。すなわち、静的引張りの場合、ステップが生ずるのみである。一方、疲労の場合は、逆方向の応力が加えられることと、一度すべった面はすべりにくくなる現象のために、表面から観察すると応力繰返しとともに、だんだんと凹凸が著しくなる。さらに繰返し数が多くなると、これが「微視的き裂」となる。静的引張りと疲

勞との相違のために、微視的組織を観察した場合、前者では「すべり線」が認められるのに対し、後者では「すべり帯」となり、工学顕微鏡観察では黒っぽく見える。(図-8参照)

次に、この微視的き裂の発生の応力レベルについて議論する。静的降伏強さとは、ほぼ試験片の断面全体が(マクロ的)塑性変形を開始する応力であるのに対し、上記のミクロ的塑性変形は、極端な場合降伏強さの1/3程度の応力レベルでも一部の結晶粒で塑性変形し始めると言われている⁶⁾。それは、試験片全体から見れば、極く一部にしか過ぎないので、マクロ的には塑性変形が認められないと判断される。それゆえ、通常の疲労破面には、最終破面を除いて塑性変形が認められず、平滑な破面を呈している場合が多い。従って、疲労破壊を防止するためには、原則として疲労き裂を発生させないことで、そのためにはマクロ的にもミクロ的にも応力集中部を設けないことである。

微視的き裂が発生した後は、繰返しによる被害はもっぱらき裂の両端部に集中し、き裂の伝ば→最終破壊への過程をたどることになる。俗に言う「蟻の穴から堤が壊れる」の格言のごとく徐々にき裂は伝ばしていく。

上記のモデルで疲労き裂が発生した後、き裂の両端にはひずみが集中する。応力振幅がある限度以上であれば、き裂は伝ばを開始する。すなわち、繰返し数の増加とともにき裂は長くなっていく。

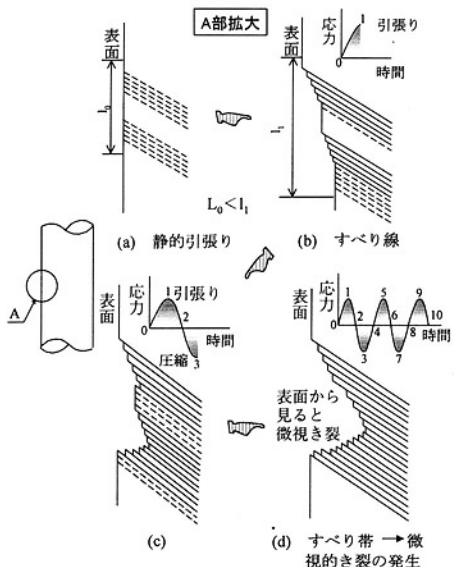


図-7 静的引張りと疲労の機構の相違 (モデル)

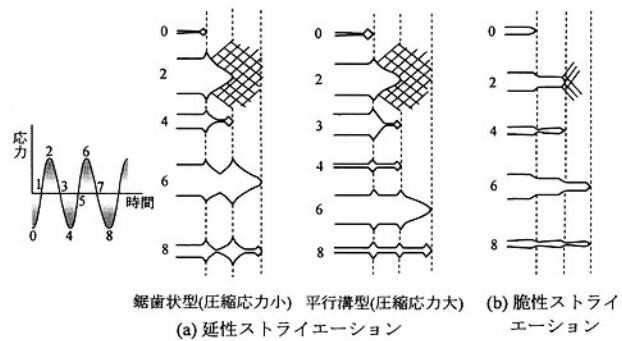


図-9 ストライエーションの形成機構(疲労き裂の伝ばモデル)

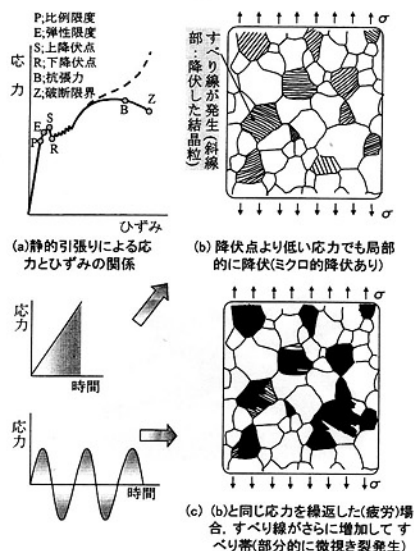


図-8 静的引張りと疲労の場合の微視的組織変化の相違 (モデル)

図-9に、疲労き裂伝ばのモデルを示す⁷⁾。これは、もともと疲労特有のストライエーション形成機構を示すものであるが、疲労き裂伝ば機構の説明にも活用できる。応力の繰返しとともに、疲労き裂の先端部に塑性変形領域が形成され、引張応力の増加過程でその長さが延びる。また、圧縮応力負荷過程では、き裂先端部に形成された塑性変形領域のために、き裂は必ずしも完全には閉じず、そこは「溝」状となる。溝でないところは山となるので、山と谷のベヤが形成される。このき裂を破面観察すれば、山と谷はき裂発生起点を中心として鈍い円弧状となっており、疲労特有のストライエーションと呼ばれている。

で破損に至る例がしばしば報告されている¹⁾⁻⁴⁾。具体的には後に述べるが、鋼構造物の場合、その破損事例の80～95%以上は、直接または間接的に「疲労」に起因しているといわれている。そのため、わが国では疲労研究者はかなりの多いし、疲労現象を重要視する人達もけっして少なくはない。また、一般に「金属疲労」という言葉は、そのメカニズムについては必ずしも理解されていなくとも、現象的にはかなり広く知れ渡っているといえよう。しかし、これまではどちらかといえば、かかる分野における研究の力点は基礎現象の解明に置かれており、とくに疲労破損に関与する因子が極めて多く、かつ費用と時間がかかる割には研究論文になりにくい等の理由から実用的な研究が遅れているのが現状である。

2 破損の定義

破損に関連した用語を挙げると以下のごとくなる。破損、破壊、破断、切断、切損、折損、損耗、横裂、損傷、欠損、座屈、破潰、破裂、断線、圧潰、摩耗、など。このうち、頻繁に使用されている言葉として、破損、損傷、破壊、破断、などがある。その他のものは、使用する対象が限定されていたり、あるいは現場用語として限定された範囲内でのみ使用されていると考えられる。以上の言葉はいずれも類似のものであるが、その言葉の定義は必ずしも明解とは言えない。そこで、頻繁に使用されている技術用語に限定して、その定義を引張試験の応力-ひずみ線図を例に示す。

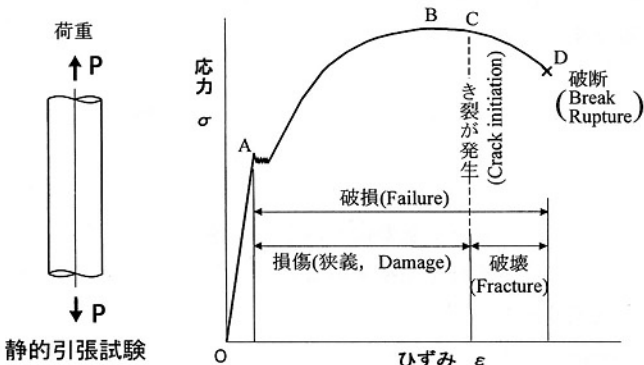


図-1 応力ひずみ線図と破損

図-1において、縦軸は応力、横軸はひずみである²⁾。A点は降伏点を、B点は引張強さを、そしてD点は最終破壊を示す。試験片に引張応力を加えて、それを増加させていった場合、まず塑性変形を起こしはじめ、やがてき裂が発生し、ついには二つ以上に完全に分離するに至る。この塑性変形開始からき裂発生までの過程を①「損傷(狭義, Damage)」といい、新品に比較して何らかの塑性変形が蓄積された状態を指すが、部材としてはまだ使用に耐える状

態と考えてよい。そして、き裂発生から二つ以上に分離するまでの過程を②「破壊 (Fracture)」といい、破壊には、き裂を必然的に伴うので、Fracture mechanicsは、「き裂」を工学的に取り扱う学問を意味することになる。③「破断 (Break, Rupture)」は、部材が完全に二つ以上に分離した状態を意味する。Ruptureは、破断の特別な場合で、大きな塑性ひびきを伴った破断である。いずれも、部材として使用に耐えないか、それに近い状態にある。「破損 (Failure)」は、部材が塑性変形を開始する状態から完全に二つ以上に分離するまでの広い領域を意味する総称であり、上記のすべてを含む。また、広義の損傷は、破損と同意義に使用されている場合もある。

さらに、より広義の破損には、静的な場合も含めて「疲労」「腐食」「摩耗」などが含まれる。その発生頻度は、疲労、腐食、摩耗の順となっており、そのマクロ的な現象として、とくに疲労の場合応力集中部に発生し易く、そこは通常目に見えないか、あるいは目にみえにくい箇所のため、外観的には突然破断に至るという印象が強いのにに対し、腐食や摩耗は目に見え、しかも徐々に進行するので、使用途中部分的手入れまたは部品の交換によって復元でき、それほど危険な印象を受けにくい。

3 破損事故の発生条件とその内訳

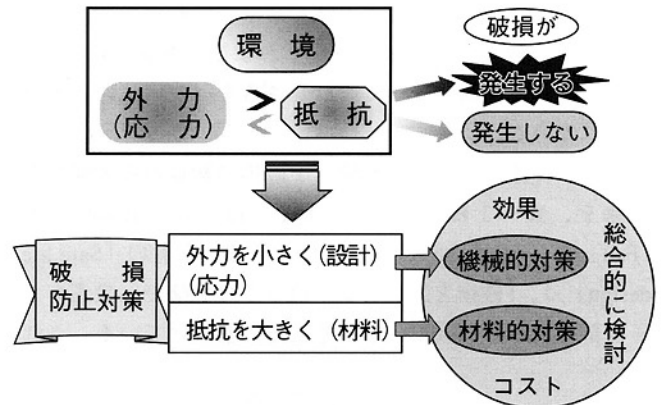


図-2 破損の発生と対策

図-2に、破損事故の発生条件を示す²⁾。言うまでもなく破損が発生するのは、外力が材料の有する抵抗を上回った場合である。逆に、外力が材料の有する抵抗よりも小さければ、破損は発生しない。外力は、応力に換算することができるので、外力の代わりに応力と言い換えても同じことである。この「外力」と「抵抗」との力関係に、環境が加わってくる。とりわけ、環境は材料の抵抗に大きな影響を与える。いずれにしても、上記の不等式は、破損防止対策を考える場合に極めて重要となってくる。というのも、鋼構造物の設計者は、機械系もしくはそれに近い学科の卒業生が大半であり、彼等は力学的センスには長けているが、

材料に関する知識が乏しい場合が多い。従って、破損が生じてそれへの対策を考える場合、必ずと言ってよい程「外力（もしくは応力）が大きい過ぎた」と結論づける。そして、外力（応力）を低下させることに全精力を注ぎ込もうとする。これを「機械的対策」と称することにする。一方、少ないかも知れないが、設計者が材料系学科出身者の場合、破損の発生対策として、「これは材料が悪い」ときめつける場合が多い。そして、より高級な材料の採用を検討しようとする傾向にある。これを「材料的対策」と称することにする。

もちろん、それぞれの意見が正しい場合も少なくないが、そこから得られる結論はかならずしもベストのものとは限らない。かかる実用問題に対しては、答えはいくつも有るのが普通である。一番大事なのは、破損事故の発生条件が「外力」と「抵抗」との力関係によって決定されるということである。それゆえ、その対策として、機械的対策のみならず材料的対策の双方について、種々検討し、それらの中から効果が最大で、しかもコスト的に最低となるものを案出することが肝要である。機械的対策、もしくは材料的対策のどちらか一方の側からしか判断できないような場合は、より理想的な対策に結びつけることは困難である。

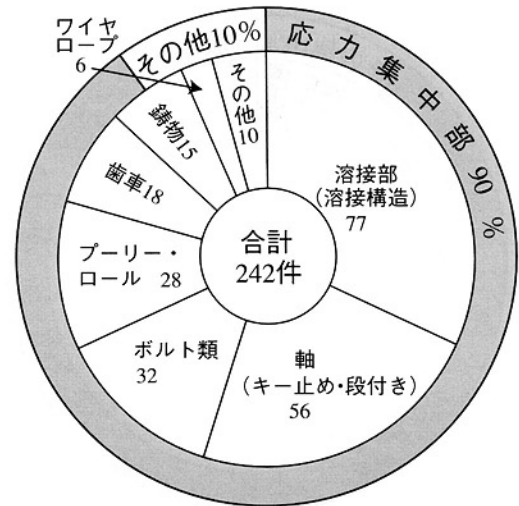


図-4 破損の部材別内訳

う。この図から分かるように、溶接部、軸、ボルト類、プーリー、ロール、歯車、ワイヤロープ等の順になっている。組立て部材はほとんど溶接構造となっているために、絶対件数が多いのと、一般に溶接部は母材に比べて疲労強度が低いために、破損件数が多く計上されていると考えられる。次に、軸は動力を伝達する点で重要部材であり、しかも代替部品がすぐには入手できにくい場合が多いため、破損件数として第2番目に位置して来ているのであろう。ボルト類は第3番目となっているが、実際のところ、あらゆる機械部品の中で破損の絶対件数が最も多いのはこのボルト類であると推定される。しかし、ボルト類は、特殊品を除いて、破損してもすぐに購入できる、あるいは自分のところで製作できるので、大部分は現場にて適当に交換して済まされていると判断できる。以下、プーリー、ロール、歯車、ワイヤロープと続いているが、いずれも軸などと同様に荷重伝達上不可欠の部品ばかりで、それぞれ単体で代表的な機械部品である。いずれにしても、応力集中部からの破損が90%となっており、破損の大多数は応力集中部から発生していると言える。また、その他（10%）にしても、マクロ的には平滑部から破損が発生しているかもしれないが、ミクロ的に観察すれば、例えば介在物等の応力集中部からの場合もかなり含まれているものと想定できる。

これを原因別に分類し、図-5に示す²⁾⁻⁴⁾。上述のように、これらのうち、約80%近くが疲労（純粋疲労、腐食疲労、熱疲労などを含む）に起因し、以下、静的破壊（13%）、応力腐食割れ/遅れ破壊（5%）、腐食/破裂等（3%）の順となっている。ところで、静的破壊の割合が異常に高いことに気づく。設計や製作技術が格段に進歩した現状では、このように高い割合で静的に破壊することは考えにくい。たとえば、10本のボルトで締結されたフランジ継手を考える。これに繰返し荷重が加わっていて、まず最初3本のボルトが破断した。これらは疲労に起因する。続いて、4本のボルトが破断した。これも疲労に起因する。この4

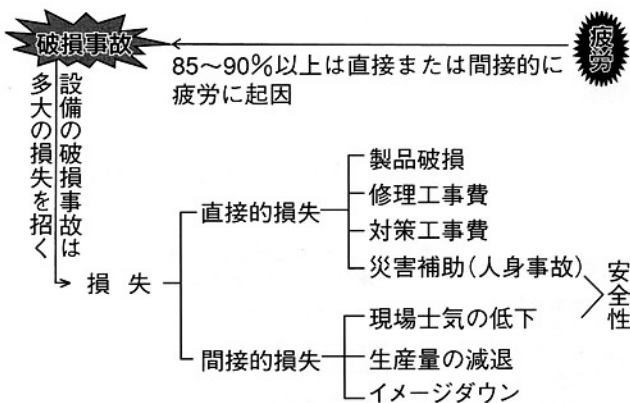


図-3 破損事故と損失の種類

図-3に、破損事故による損失を示す。破損事故による損失は、直接的損失と間接的損失に分けられる。前者には、製品破損、修理工事費、対策工事費および災害保証などが含まれる。後者には、現場士気の低下、生産量の減退およびイメージダウンなどが含まれる。従来は、直接的損失の防止に重点が置かれていたが、最近では間接的損失のうち、優秀な人材の確保の妨げとなったり、企業の信頼性を損ないかねない「イメージダウン」等にかかなり考慮されるようになってきている。

図-4に、著者等が関係した機械・機器部材の破損の内訳を示す²⁾⁻⁴⁾。破損解析を行おうとした場合、通常1件あたり3か月～2年間程度を要するので、母数241件は、かなり膨大な数字であることが理解していただけるであら