

機械構造部材の故障原因究明

中代 雅士 ^{*1}
Nakashiro Masashi

1. はじめに

機械装置はしばしば故障・不具合が発生し、場合によっては機器の故障が重大災害に発展することがある。機械の故障原因は種々の要因が考えられるが、その状態を表現するには故障発生要因に基づいて、機械の故障・不具合、または事故・損傷等と種々の言葉が使用されている。一般によく使われる言葉は、災害、事故、損傷、故障、不具合など発生した事象の大きさによっても区別されるようである。これらの言葉について辞書の説明を以下に紹介する。

- ・ 故障：物事の正常な働きが損なわれること、さしさわり、さしつかえ。事故、破損。
- ・ 不具合：製品などの具合が良くないこと、またその箇所。製造者の側から、「欠陥」の語を避けて言う。
- ・ 欠陥：欠けて足りないもの、不足、不備、欠点となるもの。用例：「欠陥車」
- ・ 損傷：損ない、きずを付けること。損なわれ、きず付けられること。用例：「機体に損傷を受ける」
- ・ 事故：思いがけず起こった悪い出来事、支障。「交通事故」等のように、機械の操作ミスによって発生する場合、偶発事故もこの中に含まれる。
- ・ 災害：異常な自然現象や、人為的原因によっ

て、人間の社会生活や人名に受ける被害。

- ・ 人災：人間の不注意などが原因となって起こる災害。
- ・ 天災：暴風・地震・落雷・洪水など、自然界の変化によって起こる災害。

これら言葉の説明から、機械設備の問題に限定して発生する事象をあえて分類すれば次のようになる。

- ①故障は問題が発生して機械の機能が損なわれること。
- ②不具合は、設計・製造過程に起因する問題で、製造者側の問題である。欠陥もこの不具合の一部である。
- ③事故は、人為的な問題であり、操作ミス、交通事故など使用者側が原因の場合である。
- ④災害は、①～③の要因で発生した問題で被害が発生する。その中に、人的なものと同様に自然現象によるものがあり、人災、天災と分類される。機械設備に生ずる事象はこのように分類できるが、実際の故障問題の取り扱いに於いてはあまり厳密に区別されておらず、曖昧な関係で使用されている。機械装置が壊れることのみ限定すれば、故障、不具合（欠陥含む）、事故、損傷である。製造者にとって重要なことは、不具合対応であるが、装置のライフアセスメントの見地からは、経年劣化、操作ミス、自然災害などを含めた広い範囲での事象を問題にするには、故障の言語が適切と考える。

*1：研究開発センター長 工学博士 技術士（金属部門・総合技術監理部門）

機械に故障が発生した場合には、故障原因を明らかにして、早急なる復旧と再発防止対策を取ることは最重要課題である。この対応を間違えば故障が再発し、製品の信頼性の失墜、安心・安全上の問題が大きくなり、経営的にも大きな問題となり、会社の業績が悪化する事例が何件も発生している。これら故障の原因究明には、決まりきった手法が確立されているだけでなく、その事象ごとの対応が重要である。さらに故障を解析する上では、調査担当者の経験と知識がものをいう。

本解説ではこの機械装置に故障が発生した時の原因究明について解説する。機械構造部材に故障が発生した場合の、原因究明プロセス、注意点、対策など、具体的事例を紹介しながら故障調査方法について解説する。

2. 故障原因の分類

機械装置に故障が発生する要因を分類した結果を表1に示す。この中で、自動車事故などの汎用品での一般的な故障（事故）は圧倒的に①の操作ミスである。操作ミスを少なくするためには、安易に操作ミスが起きないようにすることも対策と

して要求される。これらの発生した故障の対策を立てるには、故障発生の原因を的確に把握する必要がある、この原因究明を間違えば、当然対策も間違ったものになり、故障は再発する。従って、対策を立てるには、発生した故障の原因を正確に究明することが最重要である。

2.1 操作ミスによる故障

自動車、船、航空機など人の操縦による輸送機械の一般的な故障（事故）は、ヒューマンエラーと呼ばれる運転者の運転操縦の誤操作が主要因となって生じている。操作ミスによる故障事例は圧倒的に多く、製造側からは、使用者側の責任として扱い、新たな対策を取ることはしない。これらの故障調査は、警察が担当し、特に、死亡事故、破損事故などの人的被害が発生したときには、故障調査の主眼は過失による刑事責任の有無が主体である。警察による故障調査は事故発生の原因究明に主眼があるのではないので、技術的な真の故障原因は明らかにならないと理解しておくべきである。

一見ヒューマンエラーによる故障と考えられる中にも、機械装置自体の欠陥による不具合が原因

表1 故障発生要因の分類

項目	原因（事象）	事例
①操作ミス（一般事故）	運転未熟、知識不足、異常状態、計器判断ミス、判断ミス	自動車事故、航空機事故の大半が該当する。 使用者の問題
②不具合（製造ミス）	粗製材料、施工、組み立て時のミス	手抜き、模造部品、再生部品、安物、粗悪部品、輸入部品。 製造者側の問題
③環境原因	腐食、温度、振動、過負荷	塩害、地震、凍結、生産能力向上。自然災害、使用条件変更など。 環境が問題
④2次的損傷	1次損傷が発生し、それが原因で他方面に損傷範囲が拡大する。	航空機ではFail to safe の思想で設計している。 複合的な損傷になる。1次損傷の原因を明らかにする。
⑤経年劣化	がた、老朽化、腐食、摩耗、変形、疲労き裂、クリーブ損傷	メンテナンス不良、寿命到達、耐用年数、精度低下、がたによる振動増加。 余寿命評価

で発生した故障も含まれている場合があり、操作ミスであるのか、機械部品そのものの欠陥、または製造ミスであるのかを正確に判定すべきである。過去に、この判断を間違えた例として、某自動車会社の自動車ハブの問題がある。ハブ固定ボルトの一連の破損事故では、同社は使用者側に整備不良があると主張し、トラック積載荷重オーバを原因として製造者責任としての対策（リコール）をしなかった。さらに自社による調査結果で、設計的に強度不足であったことが明らかになってからも、事実をさらに隠蔽してリコール対策を全く取らなかったために、対策が放置され、類似故障が頻発した。最終的に大型トラックの車輪脱落事故により人身事故が発生する最悪の状態となり、被害者側からメーカの製造責任を問う訴訟が起こされた。裁判所による厳密な事故調査の結果、これらの事実が明らかにされ、メーカ側の全面敗訴となった。さらに、リコール（回収・無償修理）を避けようと国に虚偽報告したとして、道路運送車両法違反に問われた経営幹部らは有罪判決を受けた。

このように、故障原因を操作ミスとするのは、最も安易な考えであり、なぜ操作ミスが発生したか、対策を取る必要がないのか、厳密に検討すべきである。さらに踏み込んで、人間行動学的に誤操作する問題に対する対策・検討をすべきである。例えば、本件の例で過載荷重が問題とするのなら、荷重検出器を付けて、限度以上の荷物を積みばエンジンがかからないようにするか、ハブが破損する前に軸受けのベアリングが破損するなどの、フェールセーフ的な設計思想を導入すべきであった。このように、自動車事故の場合は発生件数が多く、原因も操作ミスが圧倒的に多く、本格的な故障原因究明の調査は実施されない場合がほとんどである。

一方、航空機事故の場合も、大半はパイロット

の操縦ミス、管制官の指示ミスなどの人的要因が主体であるにもかかわらず、事故が発生すれば各機関の事故調査委員会による調査が実施され、徹底した原因究明が行われる。機体そのものの不具合が疑われることになれば、同型機種は原因が明らかになるまで即運行停止になる。

2.2 不具合による機械故障

機械に不具合があれば、当然故障する。表2に不具合要因の分類を示し、図1に機械装置の時間経過と故障頻度の関係（バスタブ曲線）を示す。図1で初期故障は設計・製造ミスなどによる製造者側の不具合が原因の故障である。自動車、電気製品のような量産品の場合には、市場に出す前に耐久試験を徹底的に実施し、耐久試験で発生した故障は原因を明らかにして対策を立てる。一般に量産品は製造過程では欠陥部品が入り込まないような製造プロセスを確立する。製造時に欠陥が入り込まないように完全に管理できない場合のみ、個別検査によって部品の品質を担保する。従って、量産品では図1の初期故障の事象はほとんど無い。一方、大型設備などの一品製品では実機での耐久試験は不可能であり、設計段階で詳細な検討、製造過程では欠陥が見逃ごされないような検査による管理が主体になる。それでも予測できない故障や、運用中の故障発生に対しては、的確な故障原因究明を行い、対策を立てて改善していく方法がとられる。このような装置には、図1での初期故障対策は重要事項となる。

さらに、装置の不具合による故障は、表2に示すようにメンテナンス時の不適切な対応によっても発生する。これは、2.1項のヒューマンエラーの要因も含まれるが、操作ミスとは区分けして装置の不具合として判断する。図1のバスタブ曲線で定常状態（偶発故障期）の故障にも含まれる。注意しなければならないのは、装置自体の不具合であるのか、メンテナンス、補修時の不具合によ

表 2 不具合要因の分類

不具合発生時期	項目	不具合要因
製造時の不具合	・設計ミス	材料データ評価ミス(強度、耐食性)、 設計計算ミス(荷重、加速度、応力) 環境条件の無考慮
	・材料の問題	異材使用、材料欠陥(不純物量) 規格はずれ・成分、鑄造欠陥、熱処理 製造技術(製造メーカーによる品質のばらつき)
	・施工の問題	加工キズ、仕上げ状態、熱処理、組み立てミス、 取り合い不良、溶接不良、溶接欠陥 補修
メンテナンス不良	・老朽化	装置の陳腐化、修理不能
	・機械的損傷の累積	疲労、クリープ、腐食、摩耗
	・部品交換	消耗品の交換、破損部品の交換
	・検査ミス	無検査、き裂の見逃し
寿命	・補修ミス	部品取り付けミス、
	・老朽化	経年劣化、耐用年数オーバ、材質劣化
	・信頼性低下	システムの劣化

損傷カーブ

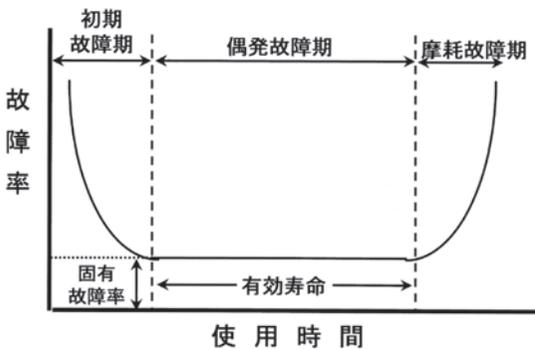


図 1 設備の損傷バスタブ曲線

るものなのか、明らかにしなければならない。故障原因によって対応策は全く異なるものになる。

さらに、経年劣化が進めば、図1の末期状態(摩耗故障期)で故障頻度が増加する。この時点になれば、装置の更新が検討される時期であるが、表2の経年劣化による不具合の対応は難しい。装置の寿命は部品によって大きく異なり、体系的な寿命管理が重要である。2.4項の経年劣化・寿命で詳細に述べるが、機械装置の寿命管理には、個々の部品別に寿命管理・運用しなければならない。

想定寿命よりも短時間で故障した場合には、何らかの不具合が存在すると考え、対策を検討しなければならない。

製造者責任としては、故障が発生すればその故障原因を明らかにすること、対策を立てる、改良することが要求される。故障原因がわからないまま機械を運用すれば故障は頻発する。特に量産品であれば、早急なる対策が必要であり、即製造ラインを止める、市場に出回っている製品を回収、修理する必要がある(リコール)。量産品でも生産実績のある製品であれば、設計による不具合よりも、製造過程での不具合要因を疑うべきであり、製造プロセスでの問題であれば、問題が発生する可能性のある時期だけがリコール対象となる。また、類似不具合の発生が予想される場合には、水平展開として他プラントの状況調査、対応策を立てる必要がある。生産設備の不具合による事故は、プラント設備が大型になり、甚大事故になる可能性があり、緊急対応が要求される。

製造時の不具合を削減するためには品質管理が重要であり、品質の確保は製造プロセスで管理す

るのが主流であるが、高い信頼性が要求されるもの、プロセス管理できないものは検査による品質保証が要求される。検査精度のレベル、許容欠陥サイズなどは機械装置によって個別に管理されており、要求される信頼性レベルはまちまちであり、部品価格も信頼性が要求されるほど上昇する。

2.3 環境変化

表1で③項の環境原因による故障頻度は製造ミスによる故障頻度よりも高く、正常に使用している故障した場合は、このカテゴリで整理される場合がほとんどである。図1の偶発故障期に故障が発生したときにまず疑うのはこの環境の変化である。使用環境の変化には、自然環境、気候の変動など装置の周囲が変化する場合と、装置の運転・使用状況が変わる場合がある。この使用条件変更では、製造時の設計条件に合わなくなる場合もあり、安全係数が影響を受ける場合がある。運転条件の変更には、起動停止回数、稼働率、高出力化(温度、圧力上昇等)、加熱燃料変更、内部流体変更などがあり、これらの条件変更が故障原因となる場合が多い。使用環境変化では、塩害、応力腐食割れなど腐食が問題となる場合が多い。いずれにしても、故障原因がよくわからない場合は、環境の影響も検討すべきで、現場の状況調査が重要となる。表3に環境原因によって問題が発生する要因とそれを調査するための項目を示す。

表3 環境原因による故障と評価手法

環境項目	故障事象	調査項目
腐食・摩耗	全面腐食 局部腐食 孔食 応力腐食割れ 腐食疲労 水素侵食 摩耗	環境分析 水分析 油分析 燃料分析 燃焼灰分析 材料分析 肉厚計測
温度変化	局部異常昇温 熱疲労 高温酸化 高温腐食 気候変化 クリープ	昇温速度 燃焼変化 断熱効果、不良 温度分布 温度計測
振動	異常振動 軸受け不良 摩耗 バランス不良 き裂の発生 変形	加速度計 発生音計測 変位計測 寸法計測 振動計測
負荷	オーバロード 衝撃荷重 加速度 出力アップ	ひずみゲージ X線応力計測 変形計測 トルク計測 電流計測

環境変化による典型的な故障事例を図2で紹介する。本配管はステンレス鋼で何年も問題なく運用してきたが、短期間で腐食が原因と考えられる漏洩が発生した。漏洩箇所は、溶接部近傍であり、当初溶接部の問題ではと検討したが、腐食表面の走査電子顕微鏡 (SEM) 観察、断面マイクロ観察結果から、図2に示すように腐食状況はバクテリア

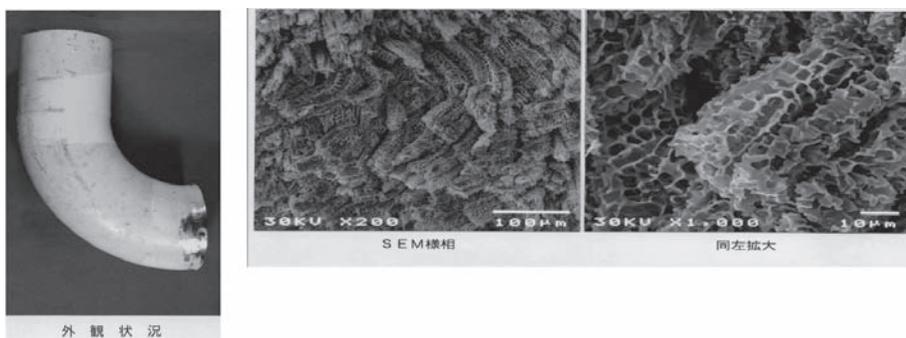


図2 ステンレス鋼管の微生物腐食 (SUS304 配管)

腐食の典型であるスケルトン模様（長時間腐食環境による金属凝固組織模様が出ている）が観察された。現地調査で配管に泥が付着しており、この泥に腐食の原因となった細菌が含まれていた。対策としては泥がつかないように定期的に洗浄するか、カバーを付けることにした。

また、使用条件変更例として火力発電設備で従来のベースロード運転（発電出力一定運転）から、電力需要によって出力を変動させる負荷変動運転モードに変更したことがある。負荷一定運転では使用中のクリーブ損傷だけを考慮していたが、負荷変動運転による疲労損傷形態も考慮しなければならず、疲労対策やクリーブ疲労の寿命評価技術開発が要求された。さらに、生産性向上のために設計許容範囲内でも高めの温度・圧力条件下で運用すれば、寿命消費が進み、短寿命となり、高精度な寿命管理評価が要求される。改造工事での対策には、当初の設計条件と異なる高強度材料が採用される。

2.4 経年劣化・寿命

一般に機械には寿命があることは漠然と認識できるが、具体的個別案件になれば寿命とする基準が不明確である。表4は代表的な設備・材料の寿命を概算で示している。一般には鉄骨構造物は、石や木造の建築物と比較して寿命が短い。ピラミッドは建設後数千年たっているし、法隆寺は1200年経過している。一方、エッフェル塔は1889年に完成したが、100年経過しない内に構造部材は新しい材料と交換されている。また、寿命は使い方、メンテナンスによって変化する。故障の原因究明で、図1のバスタブ曲線で定常状態での故障か、寿命末期による故障か判断しなければならない。寿命末期による故障であれば、修理による対策を立てるのではなく、機械装置の更新を検討する方が経済的であるし、安全である。従って、経年装置の故障調査では、寿命評価が重要になる。経年で問題になるのは表2の寿命項目であり、寿命は表4の概算時間で評価される。一般に橋梁やタンクなどの設置型の構造物は年数で評価され、回転機械、高温機器などは使用時間で管理されている。製品の耐用年数を明確に表示しているものは少なく、製造者側（メーカー）は最低無償保証期間として1年程度に設定しており、1年間は無償修理期間となる。

表4 各種機器の寿命

代表的機器設備・装置	標準耐用年数・耐久時間 (累積運転時間)
・鉄、鋼の寿命(存在)	2000年
・橋梁、クレーン、一般構造物	100～150年 100万時間
・水力発電設備	50年～ 50万時間
・原子力発電設備	40年(政府指導) 最長60年
・火力発電設備	30年～40年 20万時間
・石油化学プラント	10年～20年 10万時間
・船舶	20年～ 10万時間
・航空機	20年～ 5万時間
・自動車	2000時間～4000時間
・耐久家電(テレビ、ラジオなど)	10000時間以上
・家電(ラジカセ、ウォークマン等)	2000時間
・時計、冷蔵庫など	10年
・おもちゃ	100時間
・ロケットエンジン (LE-7A)	2000秒(33分) (注:6分稼働)

しかし、メーカーは設計条件に社内規準として耐久時間を設定している。この耐久時間に対して使用時間が寿命消費量となる。メーカーはこの設計耐久時間を一般には公表しておらず、保証期間として電化製品等の一般的な機械は1年、自動車の場合には年数と走行距離、住宅のような耐久消費財であれば5年と無償修理期間を提示しているだけである。耐久製品はメーカーとユーザー間で決めているものもあれば、価格との相関関係で評価する場合もある。例えば、100円ショップで販売している懐中電灯と航空機用の非常時懐中電灯では、価格は全く異なり、信頼性、寿命も大きく異なる。

2.5 経年劣化・寿命評価

表5に代表的な経年劣化・寿命が原因とされる項目と原因、検査・計測手法を示す。経年劣化による故障は図1のバスタブ曲線で末期症状であり、評価と対策が重要であり、対応を間違えると故障が頻発するばかりでなく、装置全体に及ぶ重大事故発生につながる可能性がある。部材の交換時期を的確に判定することは安全・コスト面から重要な課題である。構造部材の寿命管理は材質劣化(脆化)、腐食、摩耗、疲労、クリープの寿命消費要素を分析し、寿命消費速度と安全係数を考慮した健全性評価で寿命を決めるべきである。表5の各項目別に紹介する。

- ①腐食・摩耗は経年による劣化よりも環境の影響が大きい。外観目視や肉厚計測で比較的簡単に評価できる。経年で問題になるのは全面腐食、摩耗による減肉で長時間依存型の損傷形態である。一方、応力腐食割れ(SCC)は時間よりも環境・材料・応力の要因に支配され、経年による劣化よりも環境変化の影響が大きい。SCCは目視検査では発見が難しく、PT、UTによる詳細な検査が要求される。
- ②脆化・材質劣化は部材の材料内部の劣化であり、外観目視による評価は難しい。劣化を検

表5 経年劣化による損傷事例の分類と評価技術

経年劣化・損傷形態	損傷項目	評価技術
腐食・エロージョン	全面腐食 局部腐食 孔食 隙間腐食 もらい錆 異種金属腐食 アルカリ腐食 高温腐食 石炭灰腐食 粒界腐食 応力腐食割れ(SCC)	寸法計測 肉厚測定 減肉量測定 鋭敏化度計測 断面ミクロ観察
脆化・材質劣化	脆性破壊 水素浸食 遅れ破壊 疲労破壊 中性子脆化 青熱脆性	シャルピー試験 硬さ計測 パンチング試験
浸炭・窒化	表面硬化	硬さ
疲労	ハイサイクル疲労 低サイクル疲労 熱疲労 熱衝撃 転動疲労 腐食疲労 クリープ疲労	振動計測温度 ひずみ計測 MT、UT、PT
クリープ	組織変化(強度低下) 微小き裂発生 変形 長時間クリープによる損傷 析出・脆化 オーバヒート	寸法計測 レプリカ観察 UT

出するには、衝撃試験、硬さ試験などの材料試験、検査が必要である。

- ③浸炭、窒化は特殊ガス環境中で、経年とともに部材表面が硬化する。
- ④疲労は損傷過程がき裂発生と伝播の二つに分類されて評価される。一般的な高サイクル疲労では、寿命によるき裂発生までの時間が長く、伝播時間は短時間なのでき裂の発見に主眼が置かれる。一方、起動停止時の熱応力が問題となるような低サイクル疲労では、き裂の発生よりも伝播時間が長く、き裂成長速度による寿命評価で管理されている。いずれにしても、疲労損傷は部分的であり、き裂の削除、溶接による補修、き裂先端にストップホー

ルをあけてき裂伝播を止める方法などの対策が適用されている。

- ⑤クリープは材質劣化と同様に外観目視では発見が難しく、専門家による詳細な検査が要求される。高温機器の余寿命評価といえ、このクリープ寿命評価とはほぼ同義語として使用されているぐらい、クリープの損傷量評価は重要である。クリープ損傷は、疲労とは大きく異なり損傷範囲が広く、部材全体に広がっている場合があり、部分補修よりも全面更新をする場合が多い。クリープ損傷形態としては、組織変化、変形、ポイド・微小き裂の発生成長の3形態に分類される。組織変化では、100倍以上のマイクロ観察が重要であり、一般的にはスンプ（SUMP：Suzuki's Universal Micro-Printing Method）と呼ばれるレプリカによる型取り後、顕微鏡観察が行われる。また、組織変化に対応して強度も変化するので、硬さ計測による評価を採用することがある。変形では、オーバヒートによる膨出した場合を除き、通常の使用条件下では、変形量は1%以下のひずみを計測することが要求される。ノギスなどの計測方法では、被計測部が高温酸化により腐食している場合が多く、計測は難しい。変形に対応した結晶粒変形の方位依存性を評価する手法が開発されている。ポイド、微小き裂の発生では、組織変化と同じ手法が採用される。ポイドは数 μm 以下、微小き裂の場合でも0.1mm以下のき裂を発見しなければならない。また、火力発電用ボイラで問題になっているクロムモリブデン鋼の溶接継手部で熱影響部（HAZ部）-母材の境界に発生するき裂（タイプIVクラック）は、**図3**に示すように部材内部からポイド、微小き裂が発生するので、表面のレプリカ観察以外に内部の微小欠陥を評価する特殊超音波法（IICではI-CLAT法）が要求される。

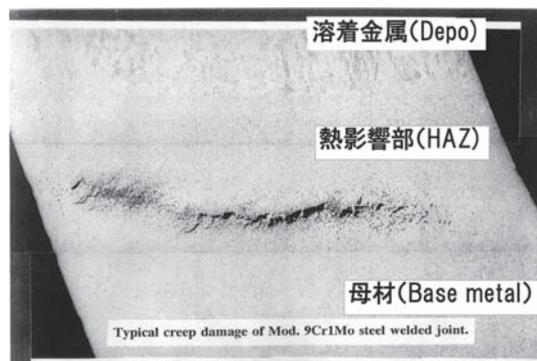


図3 高Cr鋼溶接継手部の内圧クリープ試験後のマイクロ組織

3. 故障原因究明法

故障原因究明には決まった手法がとられるのではなく、故障した規模によって個別対応をしている。自転車のタイヤ空気抜け故障とスペースシャトルチャレンジャー号、コロンビア号の事故、日航ジャンボ機の墜落のような大きな事故調査の場合とでは調査対象規模が違うが、原因究明の基本的な手順は同じであり、調査対象の分品数が異なるだけである。いずれも、故障、不具合が発生した真の原因を明らかにして今後の対策を立てなければならない。

故障原因を明らかにするには、考えられる要因を列挙し、現物の損傷状況と対照させて評価し、該当しない要因を取り除き、原因を絞り込んでいく。現物の状況だけでは原因が絞りきれない場合に、損傷品の精密検査が要求される。当社はこの精密検査に豊富な経験があり、損傷部材の破面観察などの材料調査、使用されている材料の化学分析・環境計測、部材の使用状況再現における変形・応力計測などの技術を提供できる。これらの分析手法の中で、最も有力な情報が得られるのは、やはり損傷部材の調査である。構造材料には金属以外にセラミックス、有機材料（プラスチック）、木材、コンクリートなどの標準的なものから、最近では種々の材料を原料とした高性能な新素材の開発と実用化が進んでいる。特

に注目されているのは炭素繊維強化プラスチック材料（CFRP）が民間航空機体に採用されるなど、新素材の利用が広がっていることであり、損傷材料の調査方法は材料別に異なる手法が採用されている。本解説では技術的にほぼ確立している金属材料について損傷部材の調査方法について紹介する。

3.1 破面観察（フラクトグラフィ）による損傷原因究明

セラミックス・ガラス材のような脆性破壊のみの壊れ方とは異なり、金属材料は破壊状況によって特有の破壊形態を示すので、破壊形態、破面観察により破壊原因がかなり特定できる。表6は破面の形態分類と代表的な損傷要因の関係を示したものである。損傷部材の使用状況と破面観察からマクロな破壊原因はかなり絞れる。例えば、オーバロードによる破壊であれば、塑性変形し、破面は延性破面を示している。繰返し荷重が負荷され、外観上で軸の段差部、キー溝などの応力集中部からき裂が進展、破面にはビーチマーク（貝殻模様）が観察されれば疲労損傷である。これら破面観察には通常走査電子顕微鏡（SEM）が用いられ、数十倍の低倍率から数千倍の高倍率で観察される。

破面の保持は重要であり、故障品の破面はできるだけ現状を保存する必要がある。破面を取り出すためにガスカット切断などは言語道断である。

図4は大型渦巻きポンプの損傷事例であるが、図

に示すように慎重に開放し、全破面を観察、起点を調査した。この例のように、破面をできるだけすずを付けない、変形させないようにして開放することが要求される。この開放は高度な技術が必要で、開放は専門家に依頼すべきである。

損傷原因究明には、き裂観察が重要(き裂開放)

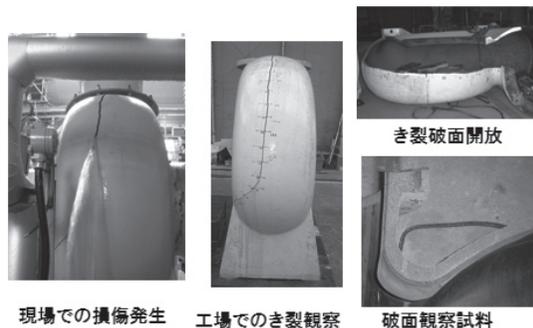


図4 渦巻きポンプの損傷と調査手順

表6 破面観察による破壊機構の分類

破壊形態	分類	破壊要因
粒内破壊	延性破壊	オーバロードによる変形破壊
	脆性破壊	劈開破壊
	疲労破壊	特徴のある破面、貝殻模様
	クリープ	オーバヒートなどの短時間破壊
	応力腐食割れSCC	貫粒型SCC
粒界破壊	脆性破壊	粒界に偏析
	応力腐食割れ	粒界型SCC
	クリープ	長時間クリープによる損傷
	低サイクル疲労	高温領域の損傷
	クリープ疲労	クリープ損傷が大きい

3.2 ミクロ観察（金属組織観察）による損傷原因 究明

損傷形態の種類によっては、破面を観察するよりも損傷部位近傍の破損部断面ミクロ観察による方が、損傷形態が明らかになる場合がある。図5はステンレス鋼の溶接ビード肉盛りした下面に応力腐食割れ（SCC）が発生した状況を示している。このき裂伝播状況から、き裂が多数分岐しており、明らかに疲労破壊ではなく、溶接時の熱応力による残留応力が応力源となったSCCによる損傷と判断した。図3は9Cr鋼管溶接継手部の内圧クリープ試験後のミクロ観察である。溶接熱影響部にボイドの発生と連結による微小き裂が観察され、タ

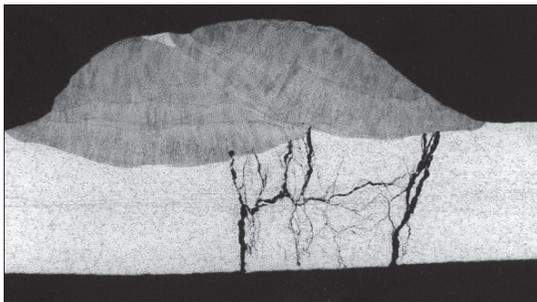


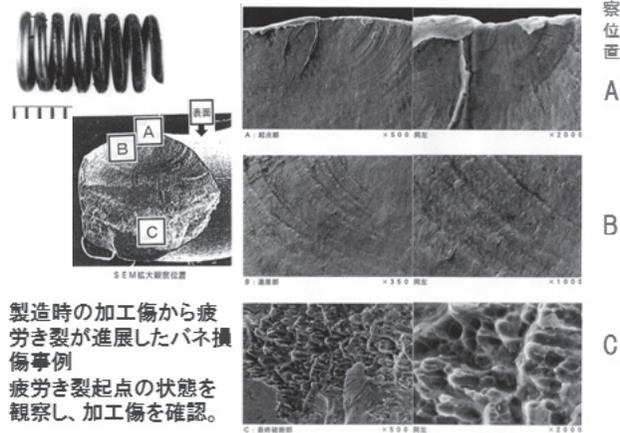
図5 溶接時の残留応力が原因で発生した応力腐食割れ（SCC割れ）

イプ4と呼ばれる典型的な損傷事例である。実機損傷材で、このような損傷形態が確認できれば、クリープ損傷と判断できる。本事例で注意すべきことは、部材内部にクリープボイドが多数発生しており、外表面の調査では事前に発見できず、内部に発生したボイドの発生評価が重要になる。

3.3 き裂発生起点の観察

損傷形態で疲労き裂、脆性破壊の場合は、これら損傷の形態自体が問題ではなく、起点を正確に把握することが重要である。例えば、図6はスプリングバネの破面観察例である。バネ表面の加工きず（図中A部）から疲労き裂が発生伝播し（図中B部）、有効断面積減少により最終的に延性破壊（図中C部）した破面である。当然、損傷原因は起点の加工きずであり、疲労損傷、延性破壊は2次、3次要因による損傷である。破面観察では、き裂発生部位（起点）の状況把握が最重要である。起点となるのは、加工ミスによる加工きず、応力集中係数を下げるためのR加工コーナ部のR寸法不足、素材製造過程での casting 欠陥、金属介在物、鍛造・圧延過程でのかみ込みきず、ロールきずなどの欠陥、使用中における腐食ピット、SCC、水素浸食による割れ、摩耗による減肉、打ちきずな

製造工程時の加工傷を起点とした疲労破壊



製造時の加工傷から疲労き裂が進展したバネ損傷事例
疲労き裂起点の状態を観察し、加工傷を確認。

図6 疲労損傷したバネの観察位置と破面写真

クリープ損傷事例(SUS316鋼大径管)

クリープ損傷は粒界にポイド(キャビティー)が発生してそれが連結、き裂に成長する。



図7 火力発電用ボイラ主蒸気管のクリープ損傷事例

どさまざまである。また、主き裂以外にサブクラックの発生状態を調査することも重要である。主き裂の破面形態は観察時点で打ちきず、こすれなどの損傷を受けている場合が多いのに対し、サブクラックは初期き裂の発生状況が残っており、損傷の発生原因を把握しやすい場合がある。図7は火力発電設備用 SUS316 鋼の主蒸気管クリープ損傷事例である。破面観察では粒界破壊であるが、断面ミクロ観察で、粒界にポイド、微小き裂、多数のサブクラックが発生しているのが観察され、典型的なクリープ損傷であること、損傷は管外表面部から内部に進展していることが明らかになった。

4. 終わりに

機械の故障原因究明について紹介した。故障原因は多岐にわたり、多くの原因究明経験を蓄積することが肝要である。理詰めで追究しても、想定以外の要因が含まれている場合もあり、直観による調査を先行するのではなく、常に幅広い可能性を考慮した検討を行い、可能性がないものから順次消去法によって真の原因を明らかにしていかなければならない。本解説では、故障原因究明についてのみであったが、原因が明らかになれば、的確な対策を立てる必要がある。対策については別の機会に紹介したい。



研究開発センター長
工学博士
技術士(金属部門・総合技術監理部門)

中代 雅士

TEL. 045-791-3522

FAX. 045-791-3547