材料のリスク —破壊事故のケーススタディからの考察—

小林 英 男

東京工業大学大学院理工学研究科

J. Japan Inst. Metals, Vol. 66, No. 12 (2002), pp. 1164-1169
Special Issue on Materials and Technologies for Risk Society
© 2002 The Japan Institute of Metals
Overview

Risk Associated with Materials —Lessons from Case Study of Failure Accidents—

Hideo Kobayashi

Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8552

Materials, which are intended to be used to safely, are often the source of hazards. The source may grow probabilistically into the hazards. Thus, the risk associated with materials has yet not been discussed quantitatively.

In the present paper, the hidden risks associated with materials which lead to failure accidents, are extracted and analyzed quantitatively, using data base and case study analyses of failure accidents.

Data bases and case studies of failure accidents have been shown to be useful in extracting hidden risk factors associated with materials. Hidden risks associated with materials are classified herein into three categories: material-intrinsic-risk, material-induced-risk and material-shared-risk. Finally, quantitative analysis of the hidden risk associated with materials is discussed.

(Received July 18, 2002; Accepted September 4, 2002)

Keywords: risk, materials, safety, hazard, failure, accident, probabilistic analysis, data base, case study

1. 序 言

通常、材料のリスクは、材料のもつ潜在的な危険性を意味する。代表的な危険性は、有毒性、有害性、燃焼・爆発性などである。これらの危険性をもつ材料は、特性が把握され、取扱いに規制と配慮がなされている。

一方、リスクの考え方を Fig. 1 に示す¹⁾。安全と危険の境界は、決定論的に区分できない。安全と危険を含めてリスクとみなし、リスクの低い方により安全が位置し、リスクの高い方により危険が位置するとして、影響度を考慮し、確率論的にリスクの許容値(目標値)を設定するのが、リスクの考え方である。

すなわち、安全と思われている材料にも、危険の芽が潜んでおり、確率的に成長して危険に至る。このような意味での材料のリスクは、定量的に論じられていない。本稿では、破壊事故のデータベースとケーススタディの結果から、破壊事故に至るような材料に潜むリスクを抽出し、その定量化を試みる。

2. 破壊事故と材料のリスク

2.1 失敗知識データベース

英語の failure は、失敗、事故、故障、破損などと和訳さ

Fig. 1 Concept of risk.

れる。要するに、これらは同意語である。最もわかり易い失敗が事故である。失敗と事故は、人の行為の結果である(ヒューマンファクター、ヒューマンエラー)。事故には、機器(ハード)の事故と運転(ソフト)の事故がある。両者とも、詰まる所はヒューマンファクターの問題であるが、前者には、技術の問題が関連する。機器の事故に限れば、潰滅的な事故が破壊事故である。

破壊事故の歴史と今を概観すれば、破壊事故の経験がものづくりの技術開発の糧となってきた事実と、その反面、同じ破壊事故の歴史が繰返されていることに気付く。ものづくりには、失敗知識の社会的共有と永続的な伝承が不可欠であり、そのために、失敗知識のデータベースを構築し、社会的活用を促進する必要がある。

現在、文部科学省のプロジェクトとして、失敗知識データベース整備事業が開始し(科学技術振興事業団, 2001 年度), データベースとシナリオの構築が進行中である。失敗知識を活用する新しいものづくりの技術展開が期待される。本稿では, このデータベースに収録予定の材料分野における破壊事故の事例を取上げ, 破壊事故のケーススタディの結果から, 破壊事故に至るような材料に潜むリスクを抽出し, その定量化を試みる²⁾。

2.2 事故に占める材料の役割

事故の原因が材料にあるか否かは別にして, 事故に何等かの形で材料が関与していることは, むしろ当然である³⁾。高圧ガス保安法関係の事故統計を Table 1 に示す⁴⁾。1996 年から 2000 年までの 5 年間の事故合計 500 件のうちで, 設備(ハード)の事故が 31.8%を占める。材料が関与している事故は, 合計の 13.4%, 設備の事故の 42.1%を占める。

設備と機器が材料で構成されている以上, 事故に材料が関与していることは当然で, 事故統計はそれを如実に示している。リスクは確率であるから, 母数の増大に伴い危険の発生件数も増大する。すなわち, 材料は事故原因としてのリスクを, 十分に保有しているのである。

事故は多くの場合に, 複数の原因の競合の結果として生ずる。複数の原因のうちで, 突出したものが, 主原因とみなされる。主原因が 1 つで, 他は主原因の加速要因にすぎない場合と, 主原因が複数で, いずれを欠いても事故に至らない場合がある。

特に, 機器の破壊事故の解析・調査では, 材料が必ず主原因の候補と目され, 材料の検査・試験が実施される。すなわち, 材料は最初から犯人扱いされるのである。これは機器の破壊が材料の破壊である以上, 已むを得ない。問題は, それを受けた破壊事故の解析・調査の結論である。我が国では, 例外なく主原因は複数となり, 材料は必ず主原因の 1 つに挙げられる。これは, 破壊事故の社会的責任をあいまいにし, 機器のユーザー, メーカーと材料メーカーに責任を分散するという, 我が国独自の風土に基づいている。大岡裁きの三方一両損の世界である。

2.3 ものの寿命と破壊事故

機器が破壊すれば, 単にその機能が損なわれるだけでなく, 人的災害や周辺への二次災害を生ずる⁵⁾。これが破壊事

故である。安全を確保するためには, 機器とそれを構成する材料が破壊しないこと, 破壊事故を起こさないことが前提となり, 安全と破壊は表裏一体の関係にある。この場合に, 機器の使用目的である機能を果たすために, 破壊しないという安全性はもちろん, 使用中に安全性が高い水準で維持され, 機能が損なわれないという信頼性が要求される。

しかるに, 形あるものは必ず壊れる。ものには寿命があることが, また自然界の鉄則である。そのために, 機器の設計では, 破壊に至る寿命を予測し, 耐用期間を予測寿命以下に制限する。予測は自然法則を含めた経験とデータに基づく外挿法の延長にあり, 外挿の範囲が広がるほど予測の精度は低下する。機器の寿命の予測が難しいのは, 外挿の範囲が広すぎることに尽きる。現状技術での予測は, 同種機器の使用経験と, 使用する材料の短期間の加速試験のデータに基づいて, 行われている。しかし, 予測の限度と技術の落度によって, 設定寿命がまっとうされない場合があり, これが実際の破壊事故の大半を占める。

もちろん, 破壊事故調査の直接の目的は, 原因を究明して, 再発防止対策を立てることにある。しかし, それを超えて同種機器・類似機器の破壊事故の経験は, 広く予測技術の進歩と技術の落度の救済に役立つ。破壊事故は貴重な実条件, 実環境での試験結果とみなすべきである。この意味において, 破壊事故調査は専門の技術者が組織的に徹底して行い, 結果を社会的に公開し, 工学・技術の進歩の糧にする必要がある。

3. 破壊事故の歴史的教訓そして今

3.1 歴史的教訓

特性の把握が不十分な新しい材料の使用が, 破壊事故の原因となる。20 世紀を振り返って, 破壊事故の歴史的遺産を以下に示す⁶⁾。

3.1.1 脆性破壊

- タイタニック号(1912)
- リバティ船(1939~1945)

3.1.2 疲労破壊

- 自由の鐘(博物館)
- コメット機(1954)
- 日航ジャンボ機(1985)

3.1.3 応力腐食割れ

- 原子力プラント(1965)
- フリックスボロー(1974)

20 世紀を振り返ってみれば, 産業革命(18 世紀~19 世紀末)以降, 鉄の時代を象徴する重厚長大産業の隆盛期となった 19 世紀後半から 20 世紀前半にかけて, 鋼構造物が潰滅的に壊れるという脆性破壊事故が多発するに至った。タイタニック号沈没を代表例として, 最近の阪神淡路大震災まで続いている。これは鋼の靱性(延性-脆性遷移を含めて)の把握が, 不十分であったことに起因している。鋼の需要拡大を支えたのは, リベット継手に代わる溶接継手の採用である。そして, 溶接継手の採用が, 脆性破壊事故の多発を加速した。最終的には, 材料, 溶接と破壊力学の技術開発の成果として,

Table 1 Failure statistics concerned with the high pressure gas safety law.

Year	Number of accident	Number of hard accident	Number of material-related accident
1996	98	36	11
1997	91	36	14
1998	95	33	15
1999	94	26	9
2000	122	28	18
合 計	500	159 (31.8%)	67 (13.4%)

要求靱性の確保が可能となり、脆性破壊の問題は解決し、現在に至った。

応力腐食割れも同様である。材料の高強度化と使用環境の苛酷化が、水素誘起割れを含めた広義の応力腐食割れの現象を生み出した。応力腐食割れは他の劣化・損傷と異なり、特定の材料と環境の組合せで生ずる。したがって、応力腐食割れの発生には、材料、環境と引張応力という3つの因子の競合が必要である。主として材料開発による対処で、応力腐食割れの問題は解決したかにみえた。

疲労破壊は、狭義の破壊事故の形態としては最も多く、漏洩を含めた広義の破壊事故の形態としては、腐食に次ぐ。しかし、疲労はすべての材料に共通して生ずる現象であり、材料開発による対処よりも、むしろ設計での寿命予測による対処によって、疲労破壊の問題は解決が図られてきた。すなわち、20世紀以前からの馬車に始まる車軸と、20世紀中頃からの航空機に代表される疲労破壊事故の経験を糧とし、材料の疲労特性の解明と疲労設計の技術開発が急速に進展し、疲労破壊事故の減少に寄与している。

破壊事故は、人と技術の失敗の結果であると同時に、技術進歩に伴う未知への遭遇による必然の結果でもある。新しい材料の使用は、新しい破壊事故の原因となる。これが、材料に潜むリスクである。

20世紀後半に出現したセラミックス、複合材料などの先進材料は、広く市場を拡大しつつある。しかし、主構造部材に使用されていないことと、使用期間が未だに短いことで、歴史に残るような破壊事故の経験はない。破壊事故の経験なしで先進材料を使いこなす技術開発が、今後の課題である。これが、材料に潜むリスクの抽出と定量化にほかならない。

3.2 そして今

3.2.1 疲労破壊

重厚長大から軽薄短小までの産業分野の拡大に伴い、機器、材料、環境は多様化し、さらに機器の高性能化が際限なく要求される現状において、20世紀末期に萌芽した新しいタイプの疲労破壊事故が、21世紀に続発する気配をみせている。

疲労破壊事故の分野の多様化を、以下に示す。

- オートドライブコンピュータ
- カラーテレビ
- 航空機
- ロケットエンジン
- 原子力発電プラント

原子力発電プラントを例にとれば、従来の設計想定事象は、圧力と温度の起動・停止サイクルによる応力を対象とする低サイクル疲労であった。低サイクル疲労に対しては設計規格・基準が整備されており、現実到低サイクル疲労破壊事故は起きていない。

現実には起きているのは、高サイクル疲労破壊事故である。しかも、高サイクル疲労を生ずる負荷は、圧力と温度の起動・停止サイクルによる応力を平均応力として、それに熱応力または振動応力による微小な応力振幅が重畳する変動応力パターンがすこぶる多い。また、残留応力が平均応力となる

場合も多い。これは、完全な設計想定外事象である。さらに、このような変動応力パターンのもたらす結果として、疲労限度(10^7 回時間強度)以下の応力振幅で生ずる超高サイクル疲労の現象が、脚光を浴びるに至っている。

熱応力、振動応力と残留応力は、設計時に予測が困難な負荷である。さらに、熱応力と振動応力の予測に際しては、技術者の専門領域のミスマッチングという問題が存在する。構造設計に関わる材料強度、熱流体と振動の技術者は、自分の専門領域の枠に留まり、他領域との情報伝達と相互認識が不十分である。その結果として、熱応力と振動応力は、存在が見逃され、または予測が見込み違いとなる。

原子力発電プラント以外の分野でも、高サイクル疲労の問題は、ほとんど同様の状況である。

3.2.2 応力腐食割れ

応力腐食割れの問題は、主として材料開発による対処で、解決したかにみえた。しかし、今、再び応力腐食割れの事故が続発している。最近の事故を以下に示す。

- スクーバ用アルミニウム合金製容器の破裂(2000年6月30日)
(6000系アルミニウム合金の応力腐食割れ)
- 敦賀原子力発電所1号機シュラウドサポートの応力腐食割れ(1999年12月9日)
(インコネルの溶接金属の応力腐食割れ)
- 浜岡原子力発電所1号機制御棒駆動機構ハウジングからの漏洩(2001年11月9日)
(インコネルの溶接金属の応力腐食割れ)

耐食アルミニウム合金のA6351-T6合金とA6061-T6合金が、塩分と水の環境で応力腐食割れを起こす。熱影響部が鋭敏化し、応力腐食割れを生ずるオーステナイト系ステンレス鋼の溶接金属に替えて、インコネルの溶接金属が開発され、原子力発電プラントに適用されている。そのインコネルの溶接金属に、応力腐食割れが起きている。

応力腐食割れが材料開発による対処で解決できるという過去の教訓は、単なる材料の安全神話であった。応力腐食割れも疲労破壊と同様に、すべての材料に共通して生ずる現象であり、引張応力と環境に応じて寿命を予測することが、本質的な対処と考えられる。

4. 破壊事故のケーススタディ

以上の破壊事故の歴史的教訓、そして今では、材料のリスクを、特性の把握の不十分と一般的に表現した。しかし、材料に潜むリスクを抽出し、その定量化を試みるためには、もう一歩踏み込んだ解析と考察が必要である。以下では、個々の破壊事故のケーススタディの結果から、破壊事故に至るような材料に潜む典型的なリスクを抽出し、その定量化を試みる。

4.1 材料がもつリスク

一般に、失敗は人の行為の結果であり、失敗の原因は未知、無知、不注意、手順の不順守、誤判断、調査・検討の不足などのヒューマンファクターが多くを占める⁷⁾。機器

(ハード)の事故を対象とすれば、見逃しと見込み違いがこれに該当する⁸⁾。見逃しは、知らなかったという学識不足である。見込み違いは、知っていたけれども、定量的な予測を間違えたというやはり学識不足である。材料の特性の把握の不十分は、典型的な学識不足である。重要なポイントは、学識不足が人の問題なのか、または材料の問題なのかにある。材料に関する学識が十分で、人に提供されていれば、学識不足は人の問題である。材料に関する学識が不十分なままで、人に提供されていれば、学識不足は材料の問題である。後者が材料のもつリスクである。

4.1.1 ケーススタディ「材料の安全神話」

材料の特性の把握の不十分は、過信につながり、材料の安全神話を生む。これが典型的な材料がもつリスクである。

前述した応力腐食割れが典型的な例である。応力腐食割れは、材料、環境と引張応力の3つの因子の重畳効果によって生ずる。したがって応力腐食割れは、1つの因子に関する対策によって、完全に防止できるとされている。最も容易なのが材料に関する対策であり、新しい材料の開発または従来材料の特性向上によって、特定の環境と引張応力のもとで、応力腐食割れを生じない材料選定が可能とされている。これが、絶対に応力腐食割れをしないという材料の安全神話(リスクなし)である。ところが、この神話は短時間の加速試験結果に基づく予測であって、実環境で長時間使用の実績がない。現実には、予測の限度によって、応力腐食割れを生ずる結果となる。そして、再び新しい材料の開発または従来材料の特性向上によって、新しく材料の安全神話が誕生し、この繰返しが永遠に続く。

4.1.2 ケーススタディ「プラスチック製スキー靴の破壊」

ゲレンデで主流のプラスチック製のスキー靴が急に壊れる事故が広く起きている。1987年から1993年までに、国民生活センターに集まった事故事例は合計57件、メーカーは約20社である。古いほど事故は増えるが、買ってから1年以内でも起きたケースがある。

プラスチックは、吸水劣化する。吸水劣化によって、特に圧縮強度が低下する。プラスチックは水と薬品に強いという社会一般の誤った常識が、事故の背景にある。メーカーとユーザーの両方に、吸水劣化の認識がなかったことが、事故の原因である。

同様に、材料の破壊特性が向上すれば、絶対に壊れないという安全神話が生まれる。その結果、限界を超えた使用がなされ、壊れるだけでなく、逆に大きな二次災害を生ずる。材料の特性に絶対の安全神話はない。材料は生き物である。材料は変わる。材料は腐る。材料は壊れる。そして、材料には寿命がある。これは自然界の鉄則である。

4.2 材料が誘起するリスク

特定の目的に対して特性を確保した材料が、その特性に起因して、想定しなかった危険を誘起する。これが、材料が誘起するリスクである。

4.2.1 ケーススタディ「強化ガラスの強度と破壊」

強化ガラスは、板ガラスを700℃に加熱し、空気吹付けで急冷して、表面に圧縮の残留応力を導入する。ガラスは欠

陥だらけで、表面の欠陥を起点として時間依存型き裂進展(静疲労、応力腐食割れ、遅れ破壊)によって、破壊する。強化ガラスに曲げ負荷すると、表面で残留応力が曲げ応力を相殺し、普通の板ガラスの3倍～5倍に強度が増加する。一方、内部には引張りの残留応力が導入されるから、き裂進展が加速され、高速き裂が分岐し(枝分れし)、粉々に破壊する結果となる。普通の板ガラスは破壊すると大きな破片となり、人が必ずけがをする。しかし、強化ガラスは粉々に破壊するから、人はけがをしない。このように残留応力の導入によって、破壊を制御し、ガラスを強化するばかりでなく、安全性という機能を付与できる⁹⁾。

強化ガラスは以前に、自動車のフロントガラスとして使用された。飛翔体がフロントガラスに衝突して貫通すれば、ガラスは粉々に破壊するから、人に対して安全である。ところが、飛翔体がガラスを貫通しなかった場合、ガラスは高速き裂が分岐した結果、曇りガラスの状態となり、運転者の視野を妨げ、運転の障害となる。これが、典型的な材料が誘起するリスクである。現在、自動車のフロントガラスは、強化ガラスから合わせガラスに変更されている。

4.2.2 ケーススタディ「強化ガラス製食器の破損」

小学校では、給食に強化ガラス製食器が使用されている。小学生の児童が食器を落としても、丈夫で壊れないし、たとえ壊れても細々になり、けがをしないという安全上の選択である。しかし、1996年7月と1999年2月に、小学校で2件の事故が発生した。

いずれの事故でも、給食後の食器をかたづけようとした際に、小学生の児童の手から強化ガラス製食器がプラスチックタイル床に落ち、破損し、飛散したガラス破片が当該児童の目に当たり、水晶体を損傷した。

普通の板ガラスは壊れやすいが、強化ガラスは壊れにくい。壊れにくい強化ガラスでも、限界(落下高さ)を超えれば、必ず壊れる。しかも与えたエネルギー(落下高さ)が大きい分だけ、壊れた後の飛散エネルギーが大きくなる。

強化ガラス製食器の取扱いについては、経済産業省が注意喚起している¹⁰⁾。しかし、これは1例にすぎない。材料が誘起するリスクの例を、より広く抽出する必要がある。

4.3 材料が負うリスク

材料は、多種多様の用途と環境で使用される。それぞれの用途と環境に応じて、要求される特性は異なる。したがって、材料は想定されていない用途と環境で 사용되는場合、または材料が要求特性を満足していない場合には、必然的に事故に至る。これは、材料のリスクとは言えない。しかし、用途と環境の正確な想定は、極めて難しい。現実には、幅広く用途と環境を想定し、これに対処できるように、要求特性を設定している。ここに落とし穴があり、想定外の用途と環境に起因して、事故に至る。これが、材料の負うリスクである。

4.3.1 ケーススタディ「機能材料の破壊」

材料には、使用目的に応じて、構造材料(強度材料)と機能材料の区分がある。構造材料は文字どおりに、機器の構造を形成する材料で、強度を負担する。したがって、構造材料には、所定の強度特性が要求される。機能材料の定義は、明確

ではない。強度以外の機能の特性の発揮を主目的とするのが、古い機能材料の定義である。最近では、明確で特殊な機能を発揮することを目指して作られた高付加価値材料を、機能材料という。ここでいう機能材料は、前者または後者のいずれであっても構わない。強度も機能の1つであり、そもそも構造材料と機能材料という区分がおかしいことは、さておく。現実には、機器の設計において、機能材料には力が加わらないことが前提であり、したがって強度特性は要求されない。しかし、加わるはずのない力によって機能材料が破壊し、機器またはシステム全体の機能劣化と破壊に至る事故が多発している。機能材料といえども機器の構成材料である以上、力が加わることは当然で、強度特性は要求されるのである。

4.3.2 ケーススタディ「カラーテレビの発火・発煙」

カラーテレビの発火・発煙事故が、機能材料の破壊の好例である。国内の大手家電メーカー4社が、1990年に入り、実際に起きた発火・発煙事故は、確認されたものだけで計20件を超すことを公表した(1990年2月発表)。

カラーテレビは、オンオフの温度サイクル(0~100℃)を受ける。絶縁材料として使用されているエポキシ樹脂が熱応力の繰返しを受け、熱疲労によってひび割れができる。高压回路周辺でひび割れは、電気的な絶縁破壊を誘起し、金属部品への火花放電が起きる。家庭のカラーテレビはほこりをかぶっており、カラーテレビには可燃性部品がある。火花放電がほこりと可燃性部品に着火し、発火・発煙事故に至る。諸悪の根源は、エポキシ樹脂の疲労にある。機能材料といえどもエポキシ樹脂には、疲労特性は要求されるのである。これが、材料の負うリスクである。

4.3.3 ケーススタディ「オートドライブコンピュータの疲労」

エンジンが突発的に高速回転し、オートマチック車(AT車)が急発進する暴走が日米両国で問題となっているなかで、コンピュータの劣化によっても暴走することを示す例が1987年に明らかとなった。問題の車は国内の自動車会社のスポーツカー(1981年型)で、コンピュータは1986年秋からリコール(無料回収・修理)の対象となっていたが、未回収のままだった。

コンピュータを構成するIC(集積回路)のはんだが疲労する¹¹⁾。ICのマイクロ接続技術として、フリップチップボンディングがある。Al₂O₃基盤とSiチップを多数のはんだで接続する。エンジン内に組み込まれたオートドライブコンピュータの場合、強制冷却されるコンピュータ内部のICは、オンオフの温度サイクル(0~150℃)を受ける。基盤とチップは線膨張係数が異なり、はんだに熱変形の不マッチングでせん断応力が生じ、疲労によってき裂が発生する。き裂は温度サイクルによって開閉口し、通電に干渉する。これが、コンピュータの劣化である。

はんだにも、疲労特性は要求されるのである。しかも、はんだは融点が低く、はんだにとって室温は、クリープを生ずる苛酷な温度領域にある。したがって、疲労特性には、クリープとの相互干渉効果の考慮が不可欠である。

4.3.4 ケーススタディ「付着物による環境割れ」

オーステナイト系ステンレス鋼(SUS316L)の配管施行時に、マーキングのために塩化ビニール粘着テープを貼る。これを残したまま運転した。保温された配管内を高温流体が流れ、塩化ビニールが熱分解して、塩化物イオンが生成し、配管の内圧による応力と残留応力の作用のもとで、配管外面に応力腐食割れが生じた。

1996年に、敦賀原子力発電所2号機で、化学体積制御系抽出配管エルボから一次冷却水が漏洩する事故があった。加熱炉からエルボ製造用の短管を取り出す際に、取出し用鉤棒を介して、作業場内塗装部に存在する亜鉛が、短管内側に付着した。エルボ製造の熱間曲げ加工時に、亜鉛による低融点金属割れが発生した。エルボは検査なしで供用され、割れを起点として疲労き裂が進展し、肉厚貫通して漏洩に至った。

上記の2つの事例のほかにも、類似した事例は多い。配管の材料から見れば、材料が負うリスクであるが、付着物の材料から見れば、材料が持つリスクである。

4.4 複合リスク

事故は多くの場合に、複数の原因の競合の結果として生ずる。以下では、複数の原因の競合の事例を示す。

4.4.1 ケーススタディ「スクーバ用アルミニウム合金製容器の破裂」

2001年10月に、沖縄県宮古島の空気充填所で、スクーバ用アルミニウム合金製容器が空気充填終了直後に、突然破裂した。その後の調査で、多くの容器頭部の内面ねじ部に軸方向き裂があることが判明した。原因は粒界腐食と応力腐食割れであり、容器検査規則の改正などの対策が実施された。

典型的な複合原因である。6つの原因を以下に示す。どの原因が欠けても、破裂事故には至らなかった。

- ① 材料(A6351-T6)
- ② 製作(結晶粒の粗大化)
- ③ 容器への水分、塩分の浸入
- ④ 容器再検査の目視検査でき裂検出困難
- ⑤ 破断前漏洩(LBB)の不成立
- ⑥ 事故情報(国外での類似事故の経験)の欠如

①の持続負荷割れ、粒界腐食、応力腐食割れの感受性の強い材料選択の不適切と、②の容器頭部の製作時の加工、熱処理条件の不適切は、材料のもつリスクである。③は、高压空気を充填する容器への水分、塩分の浸入はあると想定すべきで、材料の負うリスクである。④と⑤は材料に無関係なように思われるが、そうではない。内面ねじ部起点の応力腐食割れは、腐食環境がねじ部から供給され、応力が高い胴部へ向けて、トンネルを掘るように内部をサムネイル状で進展し、外面へ貫通しない。これは典型的な応力腐食割れの形態であり、材料が誘起するリスクの一種とみなせる。⑥は材料に関する学識(経験)で、学識不足は材料がもつリスクとなる。

もちろん、上記①~⑥は、材料に関与しているが、広く設計、製造、供用、維持管理の問題である。①の材料選択も、純粋に材料の問題ではなく、歴史的、経済的な背景がある。すでに、フォールトツリー解析では、事故原因の特定に確率論的基準が導入されている¹²⁾。確率論的基準の適用によ

て材料の関与を定量的に示すことができれば、それが材料のリスクの定量化につながる。最終の目標は、材料を含めて、機器の総合的なリスク(複合リスク)の定量化である。

5. 材料のリスクの定量化

機器の構造設計では、応力を構成材料の基準強度(降伏応力、引張強さ、疲労強度など)以下に制限する。しかし、応力と基準強度は確定値ではなく、確率変数(x)である。強度の信頼度を Fig. 2 に示す。 $f(x)$ が応力の頻度分布(確率密度関数)、 $g(x)$ が基準強度の頻度分布である。応力の中央値 $\bar{\sigma}$ が基準強度の中央値 $\bar{\sigma}_c$ 以下であっても、 $f(x)$ の裾野と $g(x)$ の裾野で斜線で示す重なりが生じ、そこでは応力が基準強度を超えて、破壊が起きる。この場合の破壊確率 F は、次式で与えられる¹³⁾。

$$F = \int_0^x G(x)f(x)dx$$

$$G(x) = 1 - \int_x^{\infty} g(x)dx = \int_0^x g(x)dx \quad (1)$$

安全係数(安全率) S は、次式で定義される。

$$\bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_c / S \quad (2)$$

安全係数を大きくとれば、 $\bar{\sigma}$ と $\bar{\sigma}_c$ の間隔が広くなり、両分布の裾野の重なりが減少し、破壊確率は低下する。逆に言えば、破壊確率を指定すれば、安全係数が一義的に定まる。

式(2)を次式のように書き直す。

$$S_2 \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_c / S_1$$

$$S = S_1 S_2$$

ここで、 S_1 は基準強度の安全係数(割引き係数)、 S_2 は応力の安全係数(割増し係数)である。 S_1 と S_2 を部分安全係数(partial safety factor)と言う。材料のリスクの定量化の最終目標は、基準強度の安全係数の設定に集約される。

しかし、この道は前途多難である。材料がもつリスク、基準強度が疲労強度という最も単純な場合を想定しても、確率論的な信頼度のデータ採取以前に、リスクの抽出が不十分である。疲労のS-N曲線に関する最近の知見を、Fig. 3 に示す。高強度材料と低強度材料のS-N曲線は交差し、低サイクル疲労と高サイクル疲労では、材料の特性が逆転する。さらに、高強度材料には、超高サイクル領域(10^7 回以上)で、材料内部を破壊起点とする別の形のS-N曲線が存在し、温度がこれに強く影響する。

当面の課題は、材料のリスクの抽出、その重要度分類と定性的適用(工学的判断による部分安全係数の設定など)である。それを実行しながら、確率論的な信頼度のデータ採取を積上げて行くことになる。

6. 結 言

破壊事故のデータベースとケーススタディの結果から、破壊事故に至るような材料に潜むリスクを抽出し、その定量化を試みた。結果をまとめれば、以下のとおりである。

(1) 材料のリスクの抽出に、破壊事故のデータベースとケーススタディの結果が、有用なことを示した。

Fig. 2 Typical continuous probability distributions.

Fig. 3 S-N curves for high-strength and low-strength materials.

(2) ケーススタディの結果から、材料のリスクを、材料がもつリスク、材料が誘起するリスク、材料が負うリスクの3つに分類した。

(3) 材料のリスクの定量化の指針を示した。

文 献

- 1) 小林英男：日本機械学会誌 **103**(2000) No. 980, 449-451.
- 2) 小林英男ほか9名：科学技術振興事業団委託失敗知識データベース(材料分野)成果報告書(日本高圧力技術協会, 2001).
- 3) H. Kobayashi: *Materia Japan* **38**(1999) 678-683.
- 4) 高圧ガス保安総覧平成13年度版(高圧ガス保安協会, 2001).
- 5) 小林英男：日本機械学会誌 **98**(1995) No. 915, 97-100.
- 6) 小林英男：第258回疲労部門委員会, 第104回破壊力学部門委員会合同公開委員会研究討論会資料(日本材料学会, 2002), Vol. 50, No. 3, pp. 1-9.
- 7) 畑村洋太郎：失敗学のすすめ(講談社, 2000) p. 50.
- 8) 小林英男：高圧ガス **27**(1990) No. 5, 344-355.
- 9) 小林英男：クレーン **38**(2000) No. 2, 20996-21010.
- 10) 消費者行政ニュース(経済産業省, 2001) No. 59.
- 11) 小林英男：破壊力学(共立出版, 1993) pp. 160-163.
- 12) J. Andrews and J. Dugan: *Fault Tree Analysis for Reliability and Risk Assessment* (Wiley, 2002).
- 13) 小林英男：材料科学 **37**(2000) No. 4, 171-177.