

## 失敗から材料を学ぶ — Learning of Materials from Failure —

小林 英男 Hideo KOBAYASHI  
東京工業大学

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.

**KeyWords :** Risk, Materials, Safety, Hazard, Failure, Accident, Probabilistic Analysis, Data Base, Case Study

### 1. はじめに

英語のfailureは、失敗、事故、故障、破損などと和訳される。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<sup>(1)</sup>。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、失敗から材料を学ぶ知識の定量化を試みる<sup>(2)</sup>。

### 2. 失敗原因の抽出

#### 2-1) 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。高圧ガス保安法関係の事故統計を表-1に示す<sup>(3)</sup>。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。

表-1 高圧ガス保安法関係の事故統計

年	事故件数	設備(ハード)の事故件数	材料関与の事故件数
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%)

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。

## 2-2) 失敗原因としての学識不足

失敗のシナリオ構成は、原因→行動→結果となる。個人に起因する失敗の原因は、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である<sup>(4)</sup>。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。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。しかし、人の問題か、材料の問題かという判別は難しい。何も考えずに使用材料を選定したとか、指定され

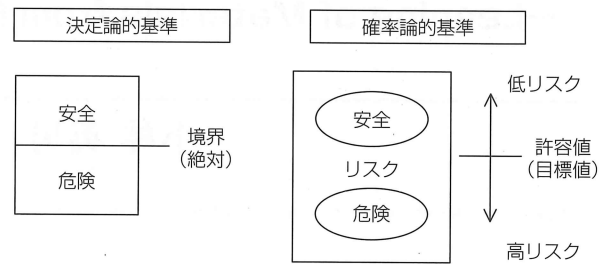


図-1 リスクの考え方

た材料を使用しなかったとかは、明らかに学識不足以前の人の問題である。実際の失敗の事例の多くは、人と材料の双方の学識不足に起因している。以下では、これを材料のリスクとして取り上げ、失敗から材料を学ぶ知識の定量化を試みる。

## 2-3) 材料のリスク

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、リスクの本来の考え方を図-1に示す<sup>(5)</sup>。安全(成功)と危険(失敗)の境界は、決定論的に区別できない。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、リスクの本来の考え方である。

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、人と材料の双方の学識不足の問題であり、下記の3つに分類できる<sup>(6)</sup>。

- ①材料がもつリスク
- ②材料が誘起するリスク
- ③材料が負うリスク

以下では、上記の分類ごとに、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。

## 3. 破壊事故のケーススタディ

### 3-1) 材料がもつリスク

学識不足が材料の問題であり、これに誤認識、過信

という人の問題が重畳して失敗に至るケースが、材料がもつリスクである。

#### (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。

現在、原子力発電所で頻発している応力腐食割れが、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。

#### (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。

### 3-2) 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。

#### (1) ケーススタディ「強化ガラスの安全性」

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。

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。

#### (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。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。

### 3-3) 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使用される場合、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、材料が負うリスクである。

#### (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。

#### (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。高圧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、材料が負うリスクである。

#### (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<sup>7)</sup>。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。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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) 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度流体が流れ、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。

### 3-4) 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。

#### (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、材料がもつリスクである。③は、高圧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、材料が負うリスクである。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、純粹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<sup>8)</sup>。確率論的基準の適用によっ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<sup>9)</sup>。

## 4. おわりに

破壊事故のケーススタディの結果から、失敗から材料を学ぶ知識の定量化を試みた。材料のリスクの認識が、知識の定量化に有用である。材料のリスクは、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つに分類できる。材料のリスクの定量化が、今後の課題である。

### 参考文献

1. 失敗知識データベース整備事業、科学技術振興事業団ホームページ、事業紹介、<http://www.jst.go.jp/>。
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、(2001)、日本高圧力技術協会。
3. 高圧ガス保安総覧平成13年度版、(2001)、高圧ガス保安協会。
4. 畑村洋太郎：失敗学のすすめ、(2000)、50、講談社。
5. 小林英男：失敗とリスクマネジメント、日本機械学会誌、103-980(2000)、449-451。
6. 小林英男：材料のリスクー破壊事故のケーススタディからの考察一、日本金属学会誌、66-12(2002)、1164-1169。
7. 小林英男：破壊力学、(1993)、160-163、共立出版。
8. J.Andrews and J.Dugan：Fault Tree Analysis for Reliability and Risk Assessment、(2002)、Wiley。
9. 小林英男：リスクベースの工学/技術、材料科学、37-4(2000)、171-177。
10. 小林英男：失敗から材料を学ぶ、日本機械学会誌、106-1011(2003)、114-117。

(平成15年4月21日)