

システム安全の概念と その基盤となる材料技術

大 塚 雄 市*

1. はじめに

「システム安全」とは、安全性を確保する技術とその確実な運用を担保するマネジメントを統合して、システムの安全を実現するという概念である。信頼性と安全性の概念は異なるものではあるが、材料の品質・信頼性・保全を通じて、安全性が確保されており、両者は密接に関連している。さらには、材料の機械的・物理的・化学的性質を活用して、確定的な安全機能が積極的に構築されている。初めに、システム安全の概念を概説し、材料との関連性を一般的に論じた後、安全性を向上させるための材料研究動向について論じる。

古今東西の事故の歴史を紐解くと、大抵の場合材料が原因となっている。古くは産業革命期の鉄道車輪の折損事故から、近年の飛行機墜落事故などである。さらには、設計のモジュール化・部品のモデル間共用の副作用として、単一部品の故障による製品事故・リコール数の急激な上昇等、経営に与える影響も増大している。このように、材料は構造物・システムの安全を確保する上で極めて重要な役割を果たすにも関わらず、機械工学・材料工学の講義カリキュラムにおいて安全の概念について体系的に習うことは少ない。図1に著者が所属するシステム安全専攻のカリキュラム体系を示すが、文理融合の科目構成の中で材料の安全性に関する科目は設置されており、当然のように学生が受講する(材料力学・金属材料工学の未受講者ばかりであるが、熱心に受講している)。この事実は、材料の安全性が、実務的にも重要であることを端的に示している。本稿では、システム安全の概念を概説した後、材料の安全性とは何か、安全性を材料によってどのように達成しているのかについて例示しながら説明を加

安全の原理	原理, 安全の歴史, 人権と安全 システム安全概論
分野共通 安全技術 / マネジメント	1. 安全設計・安全性評価技術 リスク評価, 機器安全設計など
	2. 安全マネジメント 安全管理, 品質, 労働, 衛生管理など
	3. システム構成要素の安全性 電気, 材料, 化学物質, 人的因子, 制御機能, 情報システム
	4. 安全規格・認証枠組み・法規制体系
個別分野 の安全性	ロボット, 医療, 騒音振動など

図1 システム安全専攻のカリキュラム体系 (著者が簡略化したもの)⁽¹⁾。

える。その後、安全性を向上させるための材料の研究展望について論じる。材料開発の研究者・技術者が多い本誌の読者にとってはなじみが薄い分野であるとは想像するが、安全性とはそもそも何なのかと考える機会になれば幸いである。

2. システム安全の概念

(1) システム安全の定義

システム安全とは、製品のライフサイクル全てを対象として事前にリスク評価を実施し、適切なリスク削減対策を講じることで目標の安全性を確保するための体系的枠組みである。すなわち、完成したシステムに安全性を付加するのではなく、想定されるリスクに対し適切な対応を施した結果として、安全性を予め組み込んだシステムを構築することである。システム安全という概念の成立背景については、元々軍事、

* 長岡技術科学大学講師；システム安全系(〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1)
Concept of System Safety and Materials as Safety Components; Yuichi Otsuka (Department of System Safety, Nagaoka University of Technology, Nagaoka)
Keywords: system safety, fail-safe, failure modes, reliability, validity
2012年7月3日受理

航空といった分野から発展してきたことが参考文献に詳説されている⁽²⁾⁽³⁾。

図1に示すとおり、システム安全の枠組みは以下の項目で構成されている。

- (1) 安全設計・安全性評価技術(信頼性・安全性評価, リスク削減技術)
- (2) 安全マネジメント(品質管理, 労働・衛生管理)
- (3) システム構成要素の安全性(電気, 材料, 化学物質, 人的因子, 制御機能, 情報システム, ロボットなど)
- (4) 安全規格・認証枠組み・法規制体系

目標となる安全性については, 法令・規格や社会の要求と製造者の技術的判断によって定まる。「どれだけ安全なら十分なのか」という問題は, 解決されていない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。少なくとも, ALARA (As Low As Reasonably Achievable: 合理的に達成可能な程度に低い)原則に従うことが重要である。また, 許容可能な水準までリスク低減を行っていることを説明するために, 図2に示すリスクアセスメントは必須である⁽⁶⁾。

(2) 信頼性と安全性

信頼性と安全性は似て非なる概念なので, ここで改めて整理しておく。表1に信頼性と安全性の比較を示す。概念的な違いについては, 向殿の解説に詳述されている⁽⁷⁾。

信頼性…想定している機能の維持される度合い。すなわち,

機能が喪失されない度合い。

安全性…想定している状況で, 使用者・設備への危害が起きない度合い。

信頼性 R は故障率 f に対し, 次式の関係がある。

$$R = 1 - f \quad (1)$$

また, 安全性 S については, リスクの大きさを $H(h, p, d)$ で表現すると次式で表現できる。

$$S = 1 - H(h, p, d) \quad (2)$$

リスクの大きさ H は, 危険事象の種類 h , その発生頻度 p , 想定される被害の大きさ d によって規定される。わかりやすいのは, $H = p \times d$ とし, リスクの大きさを被害の大きさの期待値とすることである。このように, そもそも信頼性と安全性では, 変数の次元が異なることは留意すべきである。

一方で表1を見ると, 信頼性と安全性の関連も明確となる。信頼性が向上すると, 式(2)中のリスクの大きさを決定する関数 H が変化することは容易にわかる。そのため, 信頼性を向上させると, 安全性も向上する。一方で, 信頼性を向上させなくとも, 発生する被害の程度 d を小さくする, もしくはそもそもある危険事象 h が起きないような条件を達成する等して, 安全性を向上させることも可能となる。従って, 信頼性を向上させる対策と, 安全性を向上させる対策は重複する部分もあるが, 独自の部分も存在する。あえて信頼性と安全性を区分して対策を整理すると, 以下となる。

(a) 信頼性の向上のための対策⁽⁶⁾⁽⁷⁾

- Fault Avoidance(故障回避) 高信頼性の部品を利用する。
- Fault Tolerance(多様性・冗長性) 複数の同一部品による並列化や, 異なるメカニズムにより同一機能を実現することにより, システム全体の故障率を低下させる。
- 一般機能と安全機能の独立 一般機能が故障した際の Fail-Safe を可能にするために, 安全機能が故障しないような設計を行う。

(b) 安全性向上のための対策⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾

- 本質安全設計 そもそも危険事象自体が発生しないような設計を行う。代表的な例は本質防爆設計である⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。有名なダイソンの Air Multiplier™(エアマルチプライヤー)も, 切断・巻き込まれ危険源を有する羽根をなくしたとい

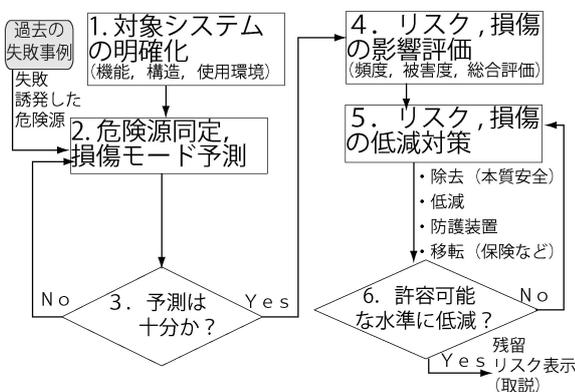


図2 リスクアセスメントの流れ。

表1 信頼性と安全性の対比。

	信頼性(式(1))	安全性(式(2))
定義	機能の維持される度合い	危害が生じない度合い
検討因子	故障率	発生事象, 頻度, 被害の程度
定量化プロセス	<ul style="list-style-type: none"> • 部品の試験・稼働データから故障率取得. • FTA 手法によりシステム全体の故障率を計算 	<ul style="list-style-type: none"> • 発生事象の想定が十分性が検討困難 • 被害の程度の定義が多様 • 低頻度重大被害への対応の必要性判断
不確定性	<ul style="list-style-type: none"> • 故障率の確率分布 	<ul style="list-style-type: none"> • 想定発生事象の複合・同時発生 • 被害の程度の想定手法 • 発生頻度の確率分布

う点で本質安全設計に位置づけられる。

- Fail-Safe (Fail-Soft) 故障したときに、システム全体が安全な状態に収束するような対策を講じる。材料の例は後述する。
- Fool Proof (ヒューマンエラー防止) 人が誤って操作しないような設計を施す。例えば、緊急停止ボタンにカバーを付ける等である。
- 機能安全 例えば圧力容器内の圧力が高くなりすぎた場合にシステムを停止させるなど、制御機能によって安全な状態を維持する。
- 防護 工作機械を覆う防護柵のように、危険事象が生じたときの被害を緩和するもしくは、危険事象が発生する可能性のある場所から人を隔離するための対策である。

(3) 確定論, 確率論的安全性評価

図3に、信頼性、安全性評価の関連とその際の代表的な技法を示す。

(a) 信頼性解析

- 故障モード・影響度解析 (Failure Modes and Effects Analysis, FMEA⁽⁸⁾⁽⁹⁾) 何種類の故障モードが存在するのかを展開する技法
- 故障木解析 (Fault Tree Analysis, FTA⁽⁸⁾) 各故障モードの発生原因の掘下げを行う。また、原因の発生確率から、故障モードの発生確率の定量化にも用いられる。

(b) 安全性解析

- リスクアセスメント (RA⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾) ある危険源 (Hazard) から何種類の危険事象が発生するのかを展開する技法。

- イベントツリー (Event Tree, ET⁽⁸⁾) 安全機能の解析のために、危険事象の発生時にどのような安全機能がどのような順番で動作し、安全状態に収束するのか、それとも収束に失敗し危険事象が進展するのかのシーケンスを展開する技法。

確定論的安全性評価とは、図3の流れを用いて、ある部品の故障モードによってどのような危険事象が発生し、それがどのような安全機能によって安全状態に収束するのか、危険状態に進展するのかを明らかにするプロセスである。これに対して確率論的安全性評価では、FTA, ETに故障確率データを導入することで、故障モードの発生率および安全機能の故障率 (安全機能が正常に動作しない確率) を定量化し、被害度等を定量化することで、リスクの大きさを定量化するプロセスである。

重要なことは、どちらの手法においても、安全性を論理的に証明することが求められている点である。図2にリスクアセスメントの一般的な流れを示しているが、この流れは、リスクがどのように削減され、最終的に許容されているかを確認するプロセスである。すなわち、全ての危険事象について、どのようなリスク削減対策が施され (対策しないことも含む)、どの程度のリスクが残留しているのかを明らかにする。また、対策ができない危険事象を“想定外”としてリスク評価シート, ETの埒外に追いやるのではなく、それらを含め、対策に限界があることを明示しなければならない。

安全目標の定義とは、“許容できないリスクが存在しないこと”⁽⁶⁾⁽¹¹⁾である。あるリスクシナリオについて全て安全状態に収束すれば素晴らしいことであるが、不安全な状態は残

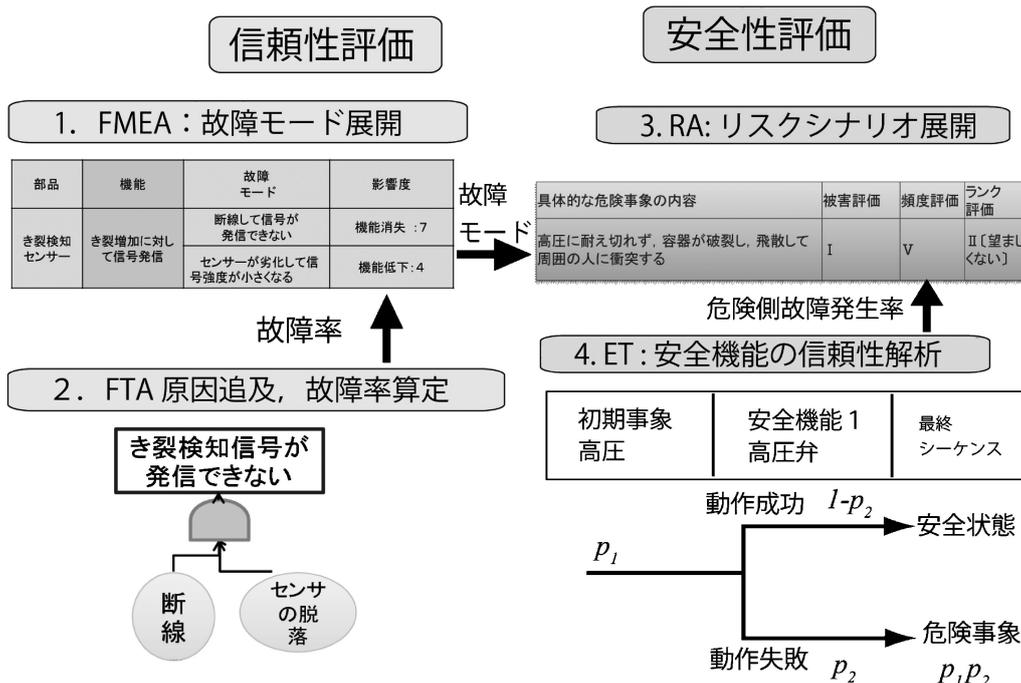


図3 信頼性評価, 安全性評価技法の関連性.

留せざるを得ない場合が通常である。その場合、リスク-便益分析によって、対策を講じるべきか、許容すべきかの判断を行う。

リスクの大きさ $H(h, p, d)$ を定量化することが望ましいが、特に、発生頻度 p 、被害度 d について以下の課題がある。

- 発生頻度 例えば原子力発電所やロケットのように一品物の場合、故障率のデータが、統計的に解析するには不十分な場合が多い
- 被害度 被害度を表現する変数が多様である。例えば死者数とするか、負傷者数とするか、損害金額とするかによっても異なる。

定量化するには膨大な調査データが必要となるが、その労力にもかかわらず、確定論的な評価にはあまり寄与しない。一般的には、リスクマトリックスを用いての発生頻度 p 、被害度 d のランク付けを行い、リスクの大きさ H の大きさを区分する定性的評価を用いる⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾。

(4) 危険側故障と安全側故障 (Fail-Safe)

前節では安全状態という用語を定義せずに用いていたので、安全状態を定義する。安全状態とは、想定している被害が起きない状態であり、以下のどれかの場合で表現が可能である⁽⁴⁾⁽¹²⁾。

(a) 停止状態(エネルギーが最低)

周囲への被害を与えるだけのエネルギーを有していない。

- 運動エネルギーの例 停止している自動車は衝突のリスクはないとみなせる。
- 位置エネルギーの例 地面においてある物体は、落下して衝突するリスクはない。
- 化学エネルギーの例 物質の引火点以下であれば、引火はしない

(b) 安定した稼働状態

- 機械の正常稼働…周囲から人が動作範囲に入ってこないよう防護された状態で、正常に制御されている限りにおいて、人を傷つけるリスクはないとみなせる。

安全状態と、危険事象が発生している危険状態のみが存在するわけではなく、グレーゾーンとしての不安全状態も当然存

在する。安全状態の定義も、不安全状態と区別するために論理的に行わねばならない。

故障が発生した時、図3のETを用いることで、安全側故障か危険側故障かを区別することができる。

(c) 安全側故障 (Fail (to) Safe)

部品や安全機能に故障が発生した場合に、安全状態に収束することが論理的に証明できるもの

(d) 危険側故障 (Fail to Danger)

部品や安全機能に故障が発生した場合に、どのような状態になるか予測できないものや、危険状態になると予測されるもの

図4を用いて具体例を示す。この高圧容器は2つの安全機能を有している。1つは高圧弁であり、もうひとつは容器の減肉、き裂を検知するセンサである。高圧弁は、普段は閉じているが通電により開放するノーマルクローズ形と、普段は開放しており、通電により閉鎖するノーマルオープン形に大別される。表2にそれぞれの形を利用した場合、断線して通電できないという故障モードが発生した場合の危険側故障と安全側故障の例を示す。内容物の違いにより安全状態の定義が変わり、そのため、同じ故障モードに対しても、安全側、危険側となることがわかる。表2の評価が、図2、図3のリスクアセスメントで用いられる。その結果として、バルブの適切な形式が、安全側故障となるよう選択される。

(5) 危険検出型回路と安全確認型回路⁽¹³⁾

洗濯機は、稼働中はふたにロックがかかり、完全に回転が停止して初めてロックがはずれ、中身を取り出すことが出来る。このケースでは、停止した(=安全状態)を検知して機能しているので、安全確認型回路という。一方で図4のき裂

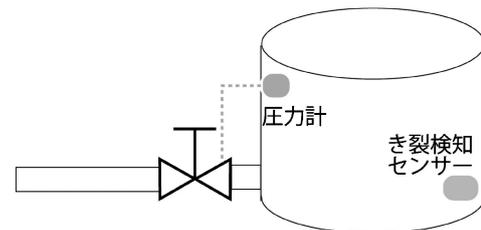


図4 安全機能を有する高圧容器(簡略化したもの)。

表2 図4の高圧弁が通電できない故障モードにおける危険側故障と安全側故障。

容器の内容物	安全状態	危険事象	ノーマルオープン形を用いた場合の故障時シナリオ	ノーマルクローズ形を用いた場合の故障時シナリオ
空気	容器が破裂することがない状態 (圧力0)	容器が破裂し、飛散して衝突	バルブを閉じることができないが、圧力は0になる。(安全側故障)	バルブを開けず、高圧を開放することが出来ない。(危険側故障)
毒劇物	内容物を容器内に保持している状態	内容物が周囲に漏えいし、中毒等の被害が生じる	バルブを閉じることが出来ず、内容物が漏えいする(危険側故障)	バルブを開くことが出来ないが、内容物は漏えいしない。(安全側故障)

検知のセンサは、一定レベル以上に減肉すると警報を発することから、危険状態を検出しているのが危険検出型回路という。この違いは、安全側故障の実現に致命的な影響を及ぼす。先の洗濯機の場合は、仮に回転数検知のセンサが故障したとしても、ふたが開くわけではないので安全側故障である。それに対しき裂検知センサの場合は、信号が来ないことは安全を意味しない。すなわち、き裂長さの過小評価による、早期の容器破損という危険側故障が避けられないことになる。この場合、容器の外に漏えい物質を受止めるキャッチャーを設ける Fail Safe、センサ自体の健全性を監視する多様化や、センサを複数設置する冗長性など様々な対応が考えられる。国際規格 ISO13849の安全機能の性能評価においても、危険側故障に対し、論理的に対策を講じることが求められる⁽⁴⁾。

(6) 信頼性、妥当性検証

図2の流れによってリスクを導出するが、得られた結果はどの程度正確なのであろうか。得られた結果の評価に関しては、信頼性、妥当性を検討する必要がある。

- 信頼性 リスクの大きさのばらつきがどの程度であるかを明らかにすること
- 妥当性 適切なリスクシナリオを十分に設定できているか

換言すれば、信頼性はアセスメントの不確定性、妥当性はモデリングの十分性を示している⁽¹⁴⁾。信頼性は確率論的評価そのものであるから定量化しやすいが、妥当性は定量化するのは困難であり、論理的に抜けがないのかを示すことが肝要である。どちらが重要かを良く間違えやすいが、妥当性がないと信頼性が高くても評価としては意味がない。間違ったリスクシナリオのリスクの大きさを精密に表現したとしても、現実に異なったリスクシナリオが発生しては無意味であるためである。元々多変量解析の分野で発展した信頼性と妥当性の考え方は、計算工学においてもその重要性が認知され、ガイドラインが発行されている⁽¹⁵⁾。

リスク評価についても信頼性、妥当性評価の重要性は認知されているものの⁽¹⁶⁾、特に妥当性評価については手法の検討段階に留まる⁽¹⁴⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。これは、全ての事象を含めようとするとリスク評価が発散してしまうため、合理的にリスクシナリオを限定しなければならないためである。

材料の場合は、信頼性・妥当性評価において以下を検討する。

(a) 信頼性評価

- 損傷、破壊モード⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾の設定。
- 応力、強度の確率分布の設定による破壊確率評価。

(b) 妥当性評価

- 想定している使用環境はどのように変動するのか。温度、腐食性環境等、材料の劣化をもたらす変化が起こりえないのか。
- 想定している負荷条件のばらつきが大きくなることは無い

のか。例としては、実働荷重を用いて疲労寿命評価を行う時、その実働荷重のヒストグラムが変化することが寿命にどのような影響を与えるのか。

- 想定している強度のばらつきが大きくなることは無いのか。例えば材料の品質が、熱処理条件の変動によってばらつきが大きくなることはないのか。
- 構造組立てプロセスの影響はどの程度か。例えばねじ止め、溶接等組み立てる際にどの程度特性が変動するのか。
- 想定している損傷、破壊モードは十分か。これは、前述の使用環境、負荷条件、材料特性、構造の各々の検討が十分かを検討することに対応する。
- 寿命評価、非破壊検査に用いる情報が保守的なのか、危険側なのか。例えば、超音波探傷によって得られるき裂長さの分解能や得られたき裂長さを実際とのずれ方が考えられる。また、き裂進展寿命評価に用いる欠陥寸法や下限界値のずれ、消失などが危険側の予測を与える。

これらの検証を通じて、材料の損傷がどのように発生し、その対策(材料選定、品質管理、非破壊検査による監視、保全)をどう取っているのかが明示される。例えば高強度材を用いて信頼性を向上させたり、耐食材を用いて腐食環境でのリスクシナリオ設定を不要とするなどである。このように、材料の物理的・機械的性質は信頼性、妥当性評価にも非常に有効であることがわかる。

(7) 安全対策と費用対効果

安全対策を施す場合、必ず言われるのは、安全と費用がトレードオフになると言うことである。安全対策の実施費用が明確であるのに対して、その効果が測りにくいためである。しかし多くの事例は、後付けで安全対策を施すより、設計段階から安全性を組込んでおくことの方が安上がりであると述べている⁽²⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾。また、安全性が向上することにより装置の停止や休業が減り、生産性の向上にもつながることが期待できる。

安全性を向上させることが経営的にも有意義であり、かつ企業価値・ブランド価値の向上にもつながる⁽²²⁾ことは強調すべき点である。中災防の調査報告によれば安全対策の費用対効果は1以上であることは述べられている⁽²¹⁾が、アンケート調査に基づくものであり、実績値ではない。安全対策の効果の評価方法自体も、企業の実践事例の分析を通じて発展することが期待される。

3. 材料分野での安全性向上に関する研究例

これまで、材料は安全性向上のために不可欠であることを解説した。本節では、安全性向上に位置づけられる研究例を紹介する。

(1) 故障モード展開手法(妥当性評価支援)

材料、応力、環境の3因子によって損傷、破壊モードが

多岐にわたることは知られている⁽¹⁹⁾。一方、設計段階において、製品機能に潜む故障モードは通常経験的に導出される。Shimizu *et al.* は、故障モードの導出に当たり設計変更や環境変化に着目し、故障モードの一覧を整備することにより故障モードを“同定”するよう改良した枠組みを提案している⁽²³⁾。著者のグループでは、機能の一般表現を用いて材料の正常状態を定義し、正常状態にパターン化されたずれを導入することで、整備された故障モードの一覧から同定する手法を提案し、経験が浅い学生の試行においても故障モード導出数が増加したことを示している⁽²⁴⁾。

(2) 本質安全化(危険源の除去)：疲労限度を有するアルミ合金の開発

金属材料の耐久性を表す疲労強度には、SNカーブ上に明瞭な折れ点が存在する場合と、なだらかに低下していく場合とに分かれる。前者の場合は疲労限度といい、原理的には疲労限度以下に負荷を制限すれば無限寿命設計が可能となる(近年内部起点型破壊が超長寿命側で起こることが報告されているが、その寿命以下の範囲で制限すれば、折れ点を疲労限度として用いることはなお有効である)。炭素鋼などの鉄鋼材料では疲労限度が存在するが、アルミ合金では疲労限度が存在しないとされてきた。最近、Takahashi, Shikama *et al.*⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾は、ひずみ時効効果を高めることで疲労限度を有するとみなせるアルミ合金が開発できたことを報告している。疲労限度に基づく設計であれば、応力に基づく設計であるので簡便であり、かつ寿命評価のばらつきよりも小さいことが期待でき、安全性向上にも極めて有効であると考えられる。

(3) 本質的安全設計(リスク削減)：耐食複合コーティング

耐久性を考える上で、腐食環境の影響は予測しづらい。金属材料では腐食疲労で疲労強度が大幅に低減することが知られている。表面改質やコーティングにより、腐食の影響を除外できる構造にできれば安全性評価もより容易になる。一例を挙げると、Shanewaz *et al.* はマグネシウム合金に陽極酸化と塗装を併用することで、大気中での疲労強度と同等の、塩水噴霧環境での疲労強度を実現できることを報告している⁽²⁷⁾。

(4) Fail Safe な材料開発：自己治癒材料、自己治癒コーティング

生体構造には修復機構が備わっているが、一般的な人工材料はそうではない。構造材料に修復機能が備われば、故障時も危険側となる可能性が低下し、安全性も向上することが期待できる。White *et al.*⁽²⁸⁾が高分子基複合材料にマイクロカプセルを封入しき裂を修復するという自己治癒材料の開発成果を報告したのを契機に、精力的に研究が進められている。最近では自己治癒コーティングの開発が進められ、モバイル電子機器での実用化に至ったことが報告されている⁽²⁹⁾。

(5) Fail Soft：き裂進展抵抗を向上させた生体模倣型金属基複合材料

セラミック材料は一般的に硬いが脆く、そのため構造材料としては使用しづらい。最近、アルミナとAl-Si合金の複合材料を氷晶テンプレート法にて作成し、破壊じん性値が20(MPam^{0.5})と従来のセラミック材料からの大幅な向上を達成したことが報告されている⁽³⁰⁾。このような材料であれば、荷重が掛かることを想定していない材料が、予測外の負荷を受けた時も抵抗を期待でき、従って安全性も向上する。

以上のように、材料の研究開発が、安全性向上に位置づけられる例は多岐にわたる。ただし、特定分野のリスク事象に対応して設計されていることから、システム安全という一般的な考え方で捉えた例は少ないと思われる。海外、国内とも、システム安全と材料のキーワードではほとんど検索に掛からない。例えば安全機能の構築に対し、外部からのエネルギー入力が必要としない受動安全性⁽³¹⁾を実現するために、材料の物理的・機械的性質が用いられることもしばしばある。ラプチャーディスク⁽³²⁾や、自己調温発熱体⁽³³⁾などである。このような具体例も、安全性評価と関連付けて検討を進めることで、その要求仕様がより具体化され、開発が加速することが期待できる。物質・材料研究機構の調査報告書において「安全安心用素材」について言及され、安全性の向上という目的のために材料設計が行われる例が増えていくと指摘されている⁽³³⁾。

4. おわりに：材料システム安全へ

材料の安全性評価とは、材料の品質管理、使用環境・負荷・強度モデルの信頼性・妥当性評価、非破壊検査、保守管理手法などを統合し、材料が想定寿命内でその特性を維持するための枠組みを構築することである。この考え方はシステム安全の概念と明らかに対応する。事故事例や経験に基づき設定された破壊、損傷モードに基づく対応のみでは、妥当性を有するとはいえない。材料の使用においても、システム安全手法に基づきそのリスクを評価し、使用限界を明示することが必要である。

安全性評価においても一つ重要なのは、外部に対する透明性(説明責任)である。どのようにして安全性を確保しているかを、非専門家に対して説明せねばならない。そのような場合、単純に説明できる方が望ましく、そのためには材料の性質を利用した単純だが確実な機能がより好ましいと考えられる。一般社会の安心の観点からも、このように金属を含む材料の役割は大きいものを占めている。一人でも多くの金属材料研究者の方々に、安全性は研究・技術開発の分野として有意義であるのご理解頂ければ幸いである。

本執筆に当たっては、長岡技術科学大学 永田晃則実務家教授、武藤陸治教授、三上喜貴教授を始めとしたシステム安全系教員、明治大学 杉本旭教授との討論及び助言が大変参

考になった。御礼申し上げます。著者は、執筆当時、文部科学省科学技術振興調整費「若手研究者の自立的な研究環境整備促進」事業「産学融合トップランナー発掘・養成システム」の支援を受けており、謝意を表す。

文 献

- (1) 長岡技術科学大学 技術経営研究科専門職大学院システム安全専攻 <http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/system-safety/definition.html>
- (2) N. C. Leveson: Safeware: System Safety and Computer 1st edition, Pearson Education Inc., (1995).
- (3) R. A. Stephans: System Safety for the 21st Century: The Updated and Revised Edition of System Safety 2000, John Wiley & Sons, Inc., (2004).
- (4) 清水久二, 福田隆文: 機械安全工学 基礎理論と国際規格, 養賢堂, (2006).
- (5) P. Slovic: The Perception of Risk, Earthscan publications Ltd., London, (2000).
- (6) JIS ハンドブック72, 機械安全, 日本規格協会.
- (7) 向殿政男: IEICE Fundamentals reviews, 4(2010), 129-135.
- (8) 酒井信介監訳: 技術分野におけるリスクアセスメント, 森北出版, (2003).
- (9) 日本品質管理学会中部支部産学連携研究会編: “Q”の確保, 日本規格協会, (2010), 179-206.
- (10) 日本機械工業連合会編: 機械・設備のリスクアセスメント, 日本規格協会, (2011).
- (11) 安全工学協会編: 新安全工学便覧, コロナ社, (1999).
- (12) 杉本 旭, 糸川壮一: 安全工学, 26(1987), 119-122.
- (13) 杉本 旭: 日本機械学会機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, 15(2007), 1-6.
- (14) 大塚雄市, 野口博司: 日本機械学会論文集 C 編, 75(2010), 207-216.
- (15) ASME V&V 10-2006: Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, (2006).
- (16) T. Aven and B. Heide: Reliab. Eng. Syst. Saf., 94(2009), 1862-1868.
- (17) T. C. Wallsreom: Reliab. Eng. Syst. Saf., 96(2011), 1053-1062.
- (18) Y. Otsuka: Safety and Risk Modeling and Their Applications, Chapter 8, (Hoang, P., ed.), Springer, (2011), 219-242.
- (19) 小林英男編著: 破壊事故—失敗知識の活用—, 共立出版, (2007), 15-28.
- (20) D. R. T. Lowe: Reliab. Eng., 9(1984), 243-256.
- (21) 中央労働災害防止協会: 安全対策の費用対効果—企業の安全対策の現状とその効果の分析—調査報告書, (2001).
- (22) 栗原史郎監修: 安全は競争力, 日刊工業新聞社, (2009).
- (23) H. Shimizu, Y. Otsuka and H. Noguchi: Int. J. Vehicle Design, 53(2009), 149-165.
- (24) 大塚雄市, 植和田充, 宮下幸雄, 武藤睦治: 日本機械学会年次大会2011, 講演論文集, (CD-ROM), (2011).
- (25) Y. Takahashi, T. Shikama, S. Yoshihara, T. Aiura and H. Noguchi: Acta Mater., 60(2012), 2554-2567.
- (26) T. Shikama, Y. Takahashi, L. Zeng, S. Yoshihara, T. Aiura, K. Higashida and H. Noguchi: Scr. Mater., 67(2012), 49-52.
- (27) M. Shahnewaz Bhuiyana, Y. Ostuka, Y. Mutoh, T. Murai and S. Iwakami: Mater. Sci. Eng. A, 527(2010), 4978-4984.
- (28) S. R. White, N. R. Sottos, P. H. Geubelle, J. S. Moore, M. R. Kessler, S. R. Sriram, E. N. Brown and S. Viswanathan: Nature, 409(2001), 794-797.
- (29) 技術情報協会: 自己修復(キズ復元)材料の最新技術, メーカー採用のトレンド, (2011).
- (30) M. E. Launey, E. Munch, D. Hein Alsem, E. Saiz, A. P. Tomsia and R. O. Ritchie: J. R. Soc. Interf., 7(2010), 741-753.
- (31) 松岡 猛: 電子情報通信学会技術研究報告, SSS 安全性, 99(2000), 27-32.
- (32) 小野和夫: 配管技術, 51(2009), 27-30.
- (33) 物質・材料研究機構ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター: ナノテクノロジー技術動向調査報告書, (2004), 504-520.



大塚雄市

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
2007年3月 九州大学大学院工学府機械科学専攻博士課程修了(博士(工学))
2007年10月 長岡技術科学大学 産学融合トップランナー養成センター 産学融合特任講師
2012年4月—長岡技術科学大学 システム安全系 講師
現在に至る
専門分野: 材料強度学, 安全設計工学
◎材料の応力-強度モデルを安全性評価における妥当性検証に展開した研究に従事. 環境強度に着目した医療用コーティングの構造解析や評価技術の研究に従事.
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★