

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, 桑川壯一: 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.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
 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。
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

大塚雄市