

解説 2

安全技術面からみた変遷と今後の展望

明治大学 理工学部 情報科学科 新領域創造専攻安全学系 教授

向殿 政男 MUKAIDONO Masao

1 まえがき

私たちが日常生活を安全に過ごし、職場等で安全に仕事をするためには、自分たち人間が注意するだけでなく、法律や規則等の社会制度や仕組みが必要なのももちろんである。しかし、その前に技術的に施設・設備・機械等を安全に構築しておくことが大前提である。歴史的にみて、人間側の注意力は大昔とそんなに変わっているとは到底思えないし、安全確保における仕組みについても、試行錯誤を重ねつつその進歩は遅々たるものがある。これに比べ、安全技術は積み重ねがきき、その進歩は着実であり、確実である。安全確保において、安全技術の役割は本質的である。

人間は、生活のために、また自分の生きがいのために、常にリスクに挑戦する。これは人間の本能であろう。したがって、安全確保のための技術の開発が常に要請されてきた。さらに、時代とともに人間が作るモノや設備

等が高度化するに従い、常に新しいリスクが生じる。そのため、安全技術の開発は、進歩・高度化するとともに、絶え間なく新しい状況に対応せざるを得ない運命を担っている。このことと同時に、「絶対安全」が存在しない以上、安全技術は、これでよいという状態には決して到達しない。

安全技術の歴史はどのように始まり、どのように変遷してきたのであろうか。大変興味ある課題であるが、もちろん、安全の分野によってその内容は大きく変わるはずである。例えば、自然災害からの安全の例として、水害に対する灌漑工事技術などは紀元前からの歴史がある。建築の安全に関しては、例えば、「新しい家に手を入れるときは屋根の周囲に手すりを付けなさい、誰かが転落して、あなたの家に血のりを残さないように」ということが既に聖書モーセに記されているという。食品の安全は、腐敗の防御、毒物に対する解毒、細菌の対策等でそれぞれの歴史を有している。

このように、分野を限らなければ安全の歴史は語れない。ここでは、機械・設備・装置等の分野（これを機械安全の分野と呼んでおこう）に限って安全技術の変遷を簡単に振り返ってみよう。

機械としては、機構としての滑車やてこ等の利用のほか、自然エネルギーの動力源としての水車や風車等の利用における安全もあったかもしれないが、本格的な安全技術の開発は、蒸気機関の発明、すなわち産業革命から始まったと考えることにしよう。

プロフィール



明治大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。現在、明治大学理工学部情報科学科・理工学研究科新領域創造専攻安全学系教授。工学博士。フェールセーフ論理やファジィ論理の研究等を経て、現在は、安全学を提唱。経済産業省製品安全部会の部会長、国土交通省昇降機等事故対策委員会委員長、私立大学情報教育協会会長など。

現在は、安全学を提唱。経済産業省製品安全部会の部会長、国土交通省昇降機等事故対策委員会委員長、私立大学情報教育協会会長など。

2 機械安全における安全技術の変遷

蒸気機関の動力源としてボイラーが用いられるようになると、その圧力が増すに従って、ボイラー圧力器の破裂が絶えなく発生し、多くの死者が出るようになった。これが機械安全における技術的な対策の始めと考えてよいかもしれない。ボイラーの破裂事故を防ぐには、圧力壁の材質、耐圧力の研究という材料・物理的な安全対策と、ある圧力以上になると蒸気を逃がす安全弁の設置という機械的な安全装置の技術開発が必要となった。なお、技術的な取り組みと同時に、ボイラーの検定基準の策定、その監視、認証という組織的な取り組みが始まった。事実、ドイツの認証機関である TÜV の前身は蒸気ボイラー監視協会である。

人間の力をはるかに凌駕するエネルギーを出す蒸気機関は多くの分野で利用され、ひとつ間違えると、その圧倒的なエネルギーの前に、人間の命はひとたまりもなかった。そのため、蒸気機関を利用する列車、船舶、工場等々、それぞれの分野で独自の安全技術が開発され、それぞれの安全の分野が確立されていった。

なお、蒸気機関は当初、石炭で熱を得ていたため、炭鉱産業が盛んになった。このため、過酷な労働と不安全な職場に対する労働安全の課題が大きくなり、労働安全衛生については独自の安全活動の歴史を持っている¹⁾。

その後、各分野独自の風土の下、多くの独自の安全技術が蓄積され、発展していったが、そこには技術的に共通の考え方が存在すると見るべきであろう。列車の安全を例にとると、故障したときは常に安全側の状態にすべきであるというフェールセーフという安全の思想や、同じ区間に列車は2つは存在させないという閉塞区間制御（ロックアウトやイ

ンターロック）という安全の論理、さらには、危険な機械と人間とは隔離し、危険なところを枠で囲うといった安全対策等は、どの分野にも適用可能なものである。

次に、機械設備のエネルギー源として電気が用いられるようになると、新たな安全問題が生じた。漏電や加熱に起因する火災の問題である。有名なのは、エジソンによって電気事業が始められたころ、1893年にシカゴで万博が開催され、白熱電球による火災が頻発したことである。これを契機に、電気製品の技術基準が制定され、検査業務が開始された。これ以降、検査を受けたものは保険の対象になる等の検査制度や保険制度が、安全技術開発をバックアップする重要な役割を果たすようになった。事実、アメリカの UL（米国保険業者安全試験所：Underwriters Laboratories）の始まりは、火災保険協会の支援を受けつつ電気製品の検査業務からである。もちろん、これ以外にも、電気にかかわる安全問題は、高電圧による感電や粉じんの中での火花による爆発等があり、独自の安全技術が開発されていった。

その後、エネルギー源としては、蒸気機関の代わりに電動機が用いられるようになった。現代では、電気・電子機器が入っていない機械を探すことのほうが困難な時代になった。しかし、安全という観点からは、電気エネルギーによって動かされる機械的な可動部分が危険源のほとんどであることには変わりはない。

次に、電気がエネルギーとしてではなく、信号の伝達機能として用いられることで、安全装置や安全制御にも電気・電子信号が用いられるようになった。このとき、安全技術は次へのステージに歩み出したといえる。すなわち、機械設備に電気・電子機器が入り込み、機械の安全制御や安全装置として、センサーと連動して安全確保に本質的な役割を果

たすようになってきたからである。現代では、機械類のほとんどの安全装置には、電気・電子機器が組み込まれている。このことは、現在の機械類の国際安全規格の体系³⁰を眺めれば明らかである。すなわち、各種の機械類に共通に使える安全装置の規格が規定されている B 規格（インタロック規格 ISO 14119 や電気設備安全規格 IEC 60204-1 など）には、機械類の安全性の電氣的側面として、ISO とともに IEC が多くの安全規格を制定している。

3 現在の安全技術と今後の展望

機械安全における安全技術の変遷において、機械の材料・構造から安全を組み込む技術と、初めから危険源が存在しないように設計する技術、すなわち構造安全と本質安全の技術を第1ステージとすると、第2のステージは、電気・電子信号を用いた安全制御の技術³¹の出現であろう。そして、その次の第3ステージが、コンピューターを導入して安全を実現しようとする機能安全であり、現在、安全技術の開発はこのステージに入っている。

現代では、機械類にコンピューターが導入され、高度な機能が実現されている。しかし、長い間、安全に直接かかわる部分には、コンピューターは使用すべきでないと主張する人々がいた。なぜならば、コンピューターを構成している半導体などの電子部品は、どのように壊れるか保証はないし、ソフトウェアにバグがないことを保証することはほとんど不可能だからである。一方、コンピューターの高度な機能を安全の実現のために使わない手はないと考えるのも、また自然な発想である。完全な機能を保証できないコンピューターを中心とした電気・電子・プログラマブル電子装置をどのように安全の実現に

利用するか、これに対する答えが、機能安全という考え方である。

機能安全³²というものは、構造安全や本質安全という考え方に対比して提唱されはじめた概念であり、簡単にいえば、安全関連系（安全装置と考えてよい）の機能を用いてシステムの安全を維持し、安全関連系が正しく機能する確率を高くすることでシステムが安全である確率を高くしようとする考え方である。要は電気・電子・プログラマブル電子装置を使用し、危険側故障率の発生は避けられないとしても、その確率をいかに少なくするかを、ハードウェア上については多重系等で、ソフトウェアについては構築のプロセス等で実現しようとするものである。第1ステージの構造安全、本質安全が確定論的安全と呼ばれるのに対して、第3ステージの機能安全は確率論的安全と呼ばれ、リスクの概念を用いて、どのようなリスクのレベルまで実現するかという観点からの安全の実現を考えている。この点からは、第2ステージは、その両者を未分化の形で含んでいるとも考えられる。今後、ますます複雑で高度化しつつある人命を預かるようなシステムの安全確保の高信頼化に対して、コンピューターを中心とした ICT（情報通信技術）の導入の方向は必須である。どのような考え方で合意を得ながら高信頼の安全性を導入していくかという機能安全が、当面の安全技術の課題である。

今後は、安全技術は総合化、システム化に向かわざるを得ないだろう。一方で、危険源として、これまでシステム内の故障、障害や人間の過誤を対象としてきたが、今後は、人間の悪意といったセキュリティ上の危険源まで取り込むことになると考えられる。その場合、安全技術として、今後、ヒューマンエラーはもちろんのこと、人間の意志・意図や社会制度等との融合化の方向も考えざるを得なくなるだろう。

なお、ここでは、安全技術の各論とその中でわが国の貢献等について述べるゆとりはなかったが、わが国から、例えばフェールセールの論理と技術の開発⁶⁾や、安全確認型の提唱⁷⁾等があることを紹介しておこう。

4 あとがき

機械安全の立場から安全技術の変遷を概観したが、それを要約すると、大きく分けて3つのステージに分けられることを紹介した。最初のステージは、機械の構造として安全を組み込む構造安全、本質安全の技術であり、次のステージが電気・電子信号を用いた安全制御技術の出現である。そして、3つ目のステージは、現在、わが国も真剣に取り組もうとしているコンピューター（電気・電子・プログラマブル電子装置）を導入して安全を実現しようとする機能安全の技術である。

新しいステージがきたからといって、前のものが不要になったわけではない。安全の度合いを上げるために、さらに進化して新しく付け加わった形であり、依然として、第1と第2のステージの安全技術は不可欠であり、本質的である。これは、機械安全設計の基本である3-ステップメソッド²⁾に対比することができたと筆者は考えている。すなわち、最初のステップで施すべき“本質安全設計によるリスクの低減”は、第1のステージの構造安全、本質安全に対応している。次のステップで施すべき“安全防護方策（安全装置）によるリスクの低減”は、第2のステージの安全制御に対応している。最後のステップの“使用上の情報の提供によるリスクの低減”は、第3のステージの機能安全を経由して初めて本格的に可能になると思われる。リスクに基づく安全評価をして、残留リスクのレベルを明らかにし、それを情報開示をして使用者との合意を得ることによって、はじめ

て使用者に安全の実現を委ねることができると。機能安全は、ICTを用いた安全確保の高度化とともに、使用者とのリスクコミュニケーションのためのステップという面があることを見過ごしてはならない。この意味で、機能安全は、3-ステップメソッドの第2ステップと第3ステップの両方に関連する重要な安全技術である。

こう考えると、安全技術の変遷は、安全設計の重要さの度合いに沿ってこれまで進歩してきている。そして、機械設備そのものの安全化とその高度化から、使用する人間の価値観をも取り込む方向にも変遷してきている。この方向に従えば、今後の安全技術は、技術的側面だけでなく、人間の特性や価値観を考慮した人間的側面、そして、技術と人間の側面を制度や仕組みや組織で担保する組織的側面の三側面を考慮して、統一的に包括的に取り組み、最終的には安全文化の醸成に向かう、安全学⁸⁾の主張に沿って進んでいくのではないだろうか。安全技術の変遷を振り返ると、われわれは自ずとその方向に向かいつつあることを示しているように思われる。

参考文献

- 1) 中央労働災害防止協会（編）、安全衛生運動史、中央労働災害防止協会、1984-5
- 2) 向殿政男監修、安全設計の基本概念、日本規格協会、2007-5
- 3) 向殿政男監修、制御システムの安全、日本規格協会、2007-9
- 4) 向殿政男、コンピュータ安全と機能安全、IEICE Fundamentals Review, Vol.4, No.2, pp.129-135、電子情報通信学会、2010-10
- 5) 向殿政男編、フォールト・トレラント・コンピューティング、丸善株、1989-9
- 6) 杉本旭、蓬原弘一、安全の原理、日本機械学会論文誌 (C)、Vol.56, No.530、1990-10
- 7) 安全技術応用研究会編、安全システム構築総覧、通産資料調査会、2001-6
- 8) 向殿政男、北野大、他、安全学入門—安全の確立から安心へ、研成社、2009

安全と健康

INDUSTRIAL SAFETY & HEALTH

1

JANUARY 2011

特集

産業安全運動100年記念企画

産業安全運動の変遷とこれからの展望



「安全専一」から100年
2011 産業安全運動 未来へつなごう安全の心

平成23年年間標語・産業安全運動100年記念事業スローガン