

安全・安心な社会を実現するための工学の役割

The Role of Engineering for the Establishment of Safe and Secure Society

松岡 猛

Takeshi MATSUOKA

- ◎東京大学大学院理学系研究科修了、工学博士、日本学術会議連携会員
- ◎研究・専門テーマは、システム工学、信頼性工学、安全工学
- ◎正員、宇都宮大学教授 大学院工学研究科
(〒321-8585 宇都宮市扇東 7-2-1 / E-mail : mats@cc.utsunomiya-u.ac.jp)



1. はじめに

機械、工学システムの発達により人間の生活は格段に便利となり効率化されてきていることは50年前、100年前の人々の生活を想像すると容易に理解できる。しかし、高度、複雑、巨大化した各種工学システム、交通システムが出現したことにより、これらに内在する危険と隣り合わせで生活せざるを得ない状況にもなっている。

工学の役割は、人類に利便性を提供するとともに、機械システムの構築においては可能な限り本質安全の追求を基本とすべきと考える。しかし、要求される機能によっては本質安全と相容れないシステムも存在する。その場合には機能安全により安全を確保している。この安全確保を目的とする機械システムの開発・提供も工学の大きな役割である。

一方、人類は古来より風水害、大規模な地震、噴火などの自然がもたらす不可避的な脅威に常にさらされてきた。これらの脅威は上記の人工物システムに内在する危険とは異なり、本来的に存在していた種類の危険である。これらの脅威を緩和・解消するために工学の果たしてきた役割は大変大きく、現代社会は過去に比較して格段に安全が確保された状態にあると言える。科学により自然の脅威のメカニズムが明らかにされ、各種技術・工学システムにより適切な対策がとられている。今後とも、この面での安全確保を目的とする機械システムの開発・提供が工学のもう一つの大きな役割である。

2. 安全学

従来から機械工学に限らず、電気工学、化学工業、建設・

建築等々、さまざまな分野において安全対策はとられてきており、安全のための技術はかなり成熟してきていると言える。しかし、安全技術はそれぞれの分野の知見と経験に深く根ざした個別的技術として発展し、他の分野の人からはなかなか窺い知れないところもある。各分野で開発、実現されている安全技術には共通部分や共通した考え方があることは、昔からよく知られた事実である。

それぞれの領域で努力され、実現されてきた各分野の安全の技術や考え方を整理し構造化することで、安全の知識の構造をよりいっそう明確にできる。この共通する考え方を一般化、原則化することで、他の分野の安全技術にも応用可能な道が開けるはずである。その際、安全を工学技術だけではなく、人間的側面、組織的側面、社会的側面も含めて抽象化、体系化して、「安全の理念」、さらにはより広い「安全学」(安全の学問)を構築していく必要がある¹⁾。

安全の知識の構造化、一般化、原則化のためには、「安全とは何か」という根源的な問が出てくる。安全をはっきりと目に見えるようにしたり自覚したりすることはなかなか難しい。安全の反対は危険である。事故が発生し、人命や財産が失われたときには、はっきりと目に見えてわかる。したがって、危険側から安全の定義を攻めるのが妥当であろう。はっきりと自覚できる“身体的な傷害や健康障害、または財産に対する害”を危害と呼ぶことにすると、現実には危害が生ずる前に危害の発生が予想されることが「危険」であると言える。危害を及ぼす源を危険源と呼ぶと、一般に危険源は各種・多数存在する。それらがすべて存在しないという反対の概念が「安全」となる。危険は一つ一つ指摘できるのに対して、その否定形である「安全」は具体的には指摘できないため、難しい概念になっている。

「危険」については、予想される危害に対して望ましくない程度や、予想が当たる可能性に程度があり得るから、一つ一つの危険に関して、ある程度、合理的に、その危険性を定量的に定義できそうである。これがリスクという概念につながる。

リスクとは、機械安全に関する国際安全規格²⁾では、おのおの危険源に対して“危害の発生確率及びその危害の程度の組合せ”と定義されている。この定義での“組合せ”という言葉が微妙で、かつ多様性を容認している。発生確率と危害の程度の“組合せ”に対して、安全の分野では、確率と金額の掛け算と解釈できるほどの単純化は、ほとんどの場合できない。

このリスクという概念により「安全」を定義することができる。すなわち、安全は、「受容できないリスクが存在しないこと (Freedom from unacceptable risk)」と定義されている¹⁹⁾。これは、二重否定の定義となっている。

この定義では、絶対安全はないことが宣言されていることになる。安全とは、ある程度のリスクという危険性は残留しており、それが、受容できる (受け入れられる)、または許容できる (我慢できる) 程度に低く抑えられている状態を意味している。これが現在のグローバルスタンダードな安全の考え方である。

「あらゆる危険性がまったく存在しないことは現実には不可能である」ことを工学者は認識していたが、一般の人々に「安全」を説明するとき、従来往々にして「絶対安全」が成立しているかのように説明していた、あるいはせざるを得なかった。いわゆる絶対安全は、目標とか理想を語るなのであるならばいざ知らず、現実にはあり得ない概念である。現在では「絶対安全」は存在しないことが広く社会に受け入れられつつある。これも工学者が真摯に現実の工学システムについての説明を積み重ねてきた成果であろう。

安全学の構築のためには、次に「安全の構造」を明確にしておく必要がある。安全という言葉で、「何の名の下に」、「何を守るのか」、「何から守るのか」、「何で守るのか」等が「安全の構造」と言える。この構造を構成する要素の候補には以下のものが考えられる。

- (1) 何の名のもとに安全を守るのか?—人命尊重、人間尊重、人権、平和、正義、公平、公共性、社会的安定、神、安心な社会、等々
- (2) 何を守るのか?—人 (命、傷害、健康障害、精神障害、尊厳、心)、財産、機械システム (装置、機械的機能)、情報、家庭、組織、会社、社会、社会環境、自然環境、国家、人類 (未来の人間)、動物、等々
- (3) 何から守るのか?—自然災害、人間のミス、機械の故障、人の故意や悪意 (含む: ハッカー、オカルト集団、ハイジャック、侵略)
- (4) 何で守るのか?—人 (注意、教育、訓練)、技術 (機械の高信頼化、機械的機構、安全装置、自動監視)、情報 (伝達、蓄積、処理、コンピュータ、コミュニケーション)、人間機械系 (ヒューマンマシンインタフェース)、組織的機構 (管理、監査、認定、認証)、社会制度、法規 (規格、規制、法律、罰則)、等々

以上の検討の結果、先にも述べた各分野の安全の考え方に共通する考え方の抽出が可能となってくる。その共通項は技術的側面、組織的側面、人間的側面の三つに大分類することができるであろう。この三つの側面は、「安全の理念」あるいは安全哲学とも呼ぶべき理念的側面のもとで、統合的に整合化、包括化されて、安全に関する学問の体系である安全学の概略が見えてくる。

安全学は、技術的側面だけでなく、組織的、人間的側面を含めて、安全工学や安全科学を含んださらに広い分野、たとえば、自然科学、社会科学、人文科学等の分野を横断し、総合した学問として構築していく必要がある。

安全工学は、実際の問題を技術の問題として現実的、技術的に解決をしている立場と言える。機械工学が安全性向上のために貢献する方法は、安全学の枠組みの中で具体的には、「安全の構造」— (4) 何で守るのか?—技術 (機械の高信頼化、機械的機構、安全装置、自動監視) が主となっているのは自明であろう。しかし、人間機械系 (ヒューマンマシンインタフェース)、組織的機構 (管理、認証)、法規 (規格) も大いに関係してくる。このように、技術的側面だけでなく、組織的側面、人間的側面も含めた形での検討が必要となってくる。つまり、機械工学としては、安全学の構築に積極的に関与するとともに、具体的な課題の解決には安全学の考え方を基礎において行うべきである。

3. 安全目標

絶対安全が現実には存在しないということから、「安全目標 (どこまで安全を達成すればよいのか)」²⁰⁾ という重要な問題が浮かび上がってくる。

工学システムを導入する場合、利便性の向上と発生するリスクとの兼ね合いを考慮しつつ、リスク管理を行うこととなる。リスクには種々考えられるが、一般的には、S (Safety: 安全度、事故時の危険)、H (Health: 健康影響)、E (Environment: 環境影響) の三つの影響を考慮している。自動車や航空機等の交通システムでは人が直接的危害をうける「安全」の問題、すなわち事故時の危険度が主要なリスクとなる。

リスクには環境影響のような極めて長期的な影響を考えるものと、事故時の危険など短期的影響がある。さらに「安全」にかかわるものでは、がん等長期的影響を考慮するものと、傷害・損傷などの短期的な影響が問題になる。

工学システムのリスクにおいてまず考えることは、死亡事故などにかかわる「安全目標」あるいは「許容できる (安全) 水準」である。これには、人間が生存していく場合における日常のリスクとの比較において考えるのが適当であろう。

次に、「安全目標」をクリアするための工学システムの「リスク管理目標」である。上記のようにリスクは工学システムにより多様であるが、大きく二つに分けられる。第一が、頻繁に起こる事象で事故死者数等実際の統計データがあるもので、リスク管理の目標はいかにそれを減らしていくかということである。これは直接的な「リスク管理目標」あるいは「安全管理目標」と言える。第二が、事故は極めてまれにしか生じないが、もし生ずると重大な結果となるもので、航空機や原子力発電施設等がある。少ない事故数のため事故統計データを直接使うことが難しく、システム・機器の性能に対して設計目標を定めて管理することになる。そこでこれを「性能 (管理) 目標」と呼ぶことにする。機器・装置の故障データや故障確率を利用して目標を定めるものである。膨大な機械・装置よりなる原子力プラントや精巧な機器類で構成される大型航空機では、これら故障確率を利用した確率論的な評価により性能の目標を定める手法が開発されている。

それではどの程度リスクなら人間・社会は受容できるのでしょうか。受容するだけでなく、さらにどのような状態であれば、人間社会は「安心」してその技術を活用し生活するでしょうか。リスクが受容されるのは、利便性との兼ね合いとともに、リスク減少のための技術が常に改善されていること、そして他のリスクとの比較から十分受容できると感じられるときと言える。リスク管理目標や安全目標は、社会のコンセンサスで決められていくべきであろう。

つまり、工学としては社会が安全目標設定のための判断を下せるのに必要な技術的情報を、正確になおかつわかりやすい形で提供する必要がある。それとともに工学の本来的な役割である、安価で優れた安全システムの提供（不断の改善）が求められている。これにより社会はよりいっそう合理的な安全目標設定が可能となる。工学は安全目標、安全管理目標を明確な形で考慮し、安全確保のための技術開発を進めていくべきである。

なお、現在提案されている主要な安全目標の具体的数値には以下のものがある。

わが国の水質、大気環境基準では、生涯リスクにして 10^{-7} 生涯のレベル（10万人に一人が生涯当たりこの要因で死亡する確率）を考え、これに対応する濃度を「リスク管理目標」として要求している。諸外国、関連国際機関等においてもおおむねこれと同等であるが、アメリカの各州やオランダでは 10^{-6} /生涯という数値も使われている。しかし一部の研究者は、喫煙、食生活など他の要因による膨大な発がん者数（ 10^{-1} /生涯のオーダー）と比較するとき、 10^{-6} /生涯という「リスク管理目標」は資源の浪費であると結論づけている。

自動車事故による死亡者数は年間6000人を割っている。これは 3×10^{-7} 生涯（1000人当たり3人が生涯の内にこの要因で死亡）のオーダーのリスクである。この値は安全目標というより現実に社会が利便性との兼ね合いで受け入れてしまっているリスクである。あるいは、頻繁に生ずる事象に対する「リスク管理目標」の一つであるということもできる。

比較的まれにしか発生しないが、しかし発生すると重大な結果となるものに航空分野がある。国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization: ICAO）では過去の事故経歴を基に各飛行段階における事故発生頻度を算出し、これをもとに目標安全度（Target Level of Safety）（「安全管理目標」に対応）を設定している。1959年から1990年までの期間の発生飛行実績は約2億3000万フライト（飛行）、3億3900万飛行時間（1フライト平均1.5時間）であり、その間に431件の機体損傷事故が発生している。ICAOは専門家の意見により各飛行段階別の事故リスクの目標水準を設定しているが、1回の飛行の全段階を通じた事故発生頻度の実績は 1.87×10^{-6} /フライトであり、これに対応する目標安全度は 1.5×10^{-7} /フライトである。

原子力の利用においては、放射線・放射能によるリスクが問題である。国際放射線防護委員会（International Conference on Reactive Plasmas: ICRP）の国際基準では確

率的影響に対応する公衆の年間線量限度を $1\text{mSv}/\text{年}$ と規定している。一方、ICRPでは、放射線によるがんの発生率を安全側に考えて $5.5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ としている。これを用いて公衆の年間線量限度 $1\text{mSv}/\text{年}$ をがんの発生率に換算すると $5.5 \times 10^{-5}/\text{年}$ となる⁽⁴⁾。これは前述の大気環境基準の「リスク管理目標」である $10^{-5}/\text{生涯}$ に比べて緩やかに見えるが、放射線のリスクにおいては自然放射線（ $2.4\text{mSv}/\text{年}$ ）の存在や検査や医療に用いる放射線の影響があることを考慮に入れて定めている。

受容リスクという側面から見ると、便益の大きな技術に対しては比較的大きなリスクでも実社会では受け入れられているという事実がある。逆に、被害規模が大きいと予想される場合、新規技術、未知技術の場合は、わずかなリスクも受け入れられないというリスク回避の傾向が見られ、単一の数値で安全目標を決める難しさが存在する。

4. 安心

前段の安全目標において、「それではどの程度リスクなら人間・社会は受容できるのでしょうか。受容するだけでなく、さらにどのような状態であれば、人間社会は「安心」してその技術を活用し生活するでしょうか。」と述べた。つまり、最終的には「安心」が技術、工学システムを受け入れ使用するために必要となってくる。

それでは「安心」とは何であろうか。安心は人の心の問題でもあるので、客観性のある科学的・合理的判断と異なり、その人の属する社会の伝統・歴史、個人の生き立ち・経験などに基づいたリスク受容の判断ということができる。

原理や仕組みが簡単なシステム・技術なら、人はその内容を理解し、たとえ危険な状況になっても各個人レベルで妥当な対応を行うことができるので「安心」できる。しかし、最近の多くの工学システムは、極めて高度な科学技術が駆使されており、一般の人々は容易にはその詳細を理解するのが困難である。この場合、人はどのようなことで「安心」するであろうか。現状では、そのシステムや技術を十分よく知っている人が安全性について十分説明し保証してくれ、その説明者が信頼できると思ったとき、人はある程度安心する。そのような意味で、「安心」とは、社会的に合意されるレベルの安全が確保され、かつ安全であることが信じられることであろう。信じられるとは、理解できるか、説明内容ないし説明者が信頼できること、ということができる。すなわち、十分な安全が確保され信頼関係があることによって「安心」が導かれることになるが、一方、信頼関係は一瞬にして失われることもあり大変難しい問題である。

社会的に合意されるレベルの安全が確保されていないのに安心してしまっている場合は、真の意味での「安心」ではない。

以上のことから、社会の「安心」の実現のためには、工学・技術者は大変困難とも言うべき責務を負っている。安全についての技術的な事柄を十分わかりやすく説明するとともに、日頃の自身の行動を社会から信頼されるように律

していかななくてはならない。また、安易に安心してしまっている社会に対しては、積極的に真摯な警告を発しなくてはならない。一時期、重大事故の発生ごとに「想定外」という語が頻繁に使われたが、そのようなことのないよう、真の安心を実現すべく常に事前の分析・指摘をしてこそ工学・技術者の真の役割が果たせる。

5. 安全教育

安全・安心な社会の実現のためには社会の構成員である個々人の安全についての知識、心構えをしっかりとものにしておくことは、使用者に起因する事故原因としては、誤使用、目的外使用、想定外使用、果ては安全装置の停止までである。このような場合、いかに安全な機器・工学システムを設計しても簡単に安全は破られてしまう。それゆえ、安全の確保には安全教育が大きな役割を担っており、安全教育の重要性は各所で何度となく指摘されてきている⁽³⁾。

安全教育には「知識や技術を教える (K: knowledge)」と「態度を教える (A: attitude)」の二つの要素があり、これらが相まって初めて「安全を考えた行動 (B: behavior)」が達成されるという重要な指摘もなされている⁽⁴⁾。

安全教育は、人間の成長段階における学校教育全般を通じた安全教育と社会に出てからの安全教育に大別できる。政府の「事故災害防止安全対策会議報告書」(平成11年12月8日)では、①学校教育全般を通じた安全教育の充実のための対策、②事業者等における安全教育と安全意識の徹底を図る対策、の二つの取り組みが挙げられている。社会に出てからの安全教育には、ここで指摘された産業活動従事者に対する教育のほかに、家庭・地域における市民、つまり主として機器・工学システムの使用者、便益享受者に対する教育もある。

大学には教育という使命があるので、大学内で事故を起こさないようにする教育と、安全の意識・知識を持った社会人を送り出すための役割がある。日本の大学においては、組織として実施するためのカリキュラムは貧弱な状態である。初等教育の現場でも、本格的な安全教育はこれからという現状である。今後、小中高における生徒の安全教育、家庭・地域における安全教育も含めて、学会活動として公開の安全教育の場を充実することにより工学・技術者が社会の安全向上に教育の面からも役割を果たしていくことができる。

企業における安全教育は、企業の業績に直結しているとの認識のもと、多くの企業で充実した安全教育が実施されていると考えられる。ある企業では安全教育の目指すところは、安全に強い人づくりと捉え、その条件として10カ条を決めていた。その中の主要なものに「危ない、注意点を見極める力」、「異常処理作業時の対応能力」、「ヒヤリハット体験を生かした危険予知の実践」、「決めたことは全員で守る」等がある。これらの根底にあるものは、ルールに従っていれば安全は守られるというのではなく、自律的に物事を理解し判断する能力がないと真の安全は達成できないと

いう考えである。

安全教育の具体的なアイデアとして、現在普及しつつあるドライブレコーダの実際の事故事例の映像を運転者・歩行者等に見せることが考えられる。プライバシーの問題を解決する必要があるが、実際にどのような事故が起こり得て、どのような被害が発生するか、現実には事故を体験するのに近いインパクトが与えられる。これにより自動車運転時の安全に対する意識が相当に向上することが期待でき、現代社会で最もリスクが高いと言われている自動車事故の大幅な減少につながるであろう。

6. まとめ

安全・安心な社会を実現するための工学の役割の表題に関連させて、安全の知識の構造化から始めて、安全の理念、安全目標、安心、安全教育と安全に関する各項目を検討した。併せて、機械工学を念頭に置き、工学あるいは工学者・技術者が安全・安心の実現に今後どのように役割を果たしていくべきかを論じた。

本論は第21期日本学術会議「総合工学委員会・機械工学委員会」に設置された「工学システムに関する安全・安心・リスク検討分科会」で進められている審議内容をもとにまとめたものである。分科会メンバーに御礼申し上げます。ただし、本論はあくまでも私個人の責任でまとめたもので、必ずしも分科会を代表する意見ではないことをここに記しておく。

社会の安全・安心の実現には本論でも指摘したように工学以外の分野を含む多分野・広範囲にわたる協力が必要である。工学分野間のみであるが、(社)日本機械学会をはじめとする40学協会の共催により毎年「安全工学シンポジウム」が日本学術会議の主催で開催されてきている。すでに41回41年間継続した開催を行っており、異なる工学分野間の安全に関する情報交換の貴重な場を提供している。平成23年度は本学会が幹事学会となり2011年7月7日～8日、機械振興会館にて開催される。本学会員の皆様の例年にも増しての積極的な参加をお願いしたい。

また、工学以外の分野を含めた安全に関する継続的な情報交換の場を本学会が中心となり実現していくことを期待する。

(原稿受付 2010年11月28日)

●文献

- (1) 向殿政男, 「安全の理念」, 学術の動向, 14-9 (2009), 14-19.
- (2) ISO/IEC ガイド 51 (JIS Z 8051): 安全側面—規格への導入指針
- (3) 成合美樹, 「安全目標」, 学術の動向, 14-9 (2009), 20-27.
- (4) ICRP Publication 103, 3.2 The induction of stochastic effects, Table 1, *Annals of the ICRP*, (2007), 53.
- (5) 安全工学の新たな展開—安心社会への安全工学のあり方—, 人間と工学研究連絡委員会安全工学専門委員会, (2003).
- (6) 安全・安心な社会構築への安全工学の果たすべき役割, 人間と工学研究連絡委員会安全工学専門委員会, (2005).