

# 法『構造』工学のススメ

杉浦 邦征<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 正会員 京都大学教授 地球環境学堂資源循環学廊都市基盤エンジニアリング論分野  
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

複合構造の分野における技術の体系化や今後の技術の発展に寄与する課題を系統的に挙げる「展望論文」に対して、ふさわしいテーマを絞り込んだ結果、論文タイトルとしては『法“構造”工学／臨床“構造”工学』をキーワードと定め、これまでの10数年の思いをまとめることとした。生活の質向上に向けて整備されてきた膨大な量の社会基盤施設のストックに対して、設計・製作・架設・維持管理において、「技術の質保証・持続性」、「事故（災害）調査」、「新技術の受容性とリスク」等を考えると、土木構造を専門とする研究者・実務者のみならず行政の専門家あるいは法曹実務家との協働作業、すなわち『法工学』が重要となってきた。本展望論文が、専門分野の横断的な新分野として展開のきっかけとなれば幸いである。

**Key Words:** forensic engineering, structural engineering, construction materials, failure, fault

## 1. はじめに<sup>1)2)</sup>

18世紀半ばから19世紀にかけて起こった一連の生産技術の発展と、それともなう社会構造の変革である『産業革命』が、製造過程におけるさまざまな技術革新、特に製鉄業の成長、動力源の刷新により、工場制機械工業を成立させ、広大な域圏での経済活動を可能とした。交通革命も連動し、経済史上においてもこの産業革命以降、それまで人的な生産体制として安定していた1人あたりのGDP（国内総生産）が、工業機械生産体制の導入により劇的に増加し、近現代の幕開けを告げる出来事であったと思われる。工業技術が生み出す高度な文明によって密度の高い生産・生存が可能となり、生活水準の改善・生活質の向上が持続的に成し遂げられている（図-1参照）。現代においては、その反面、これらの果実として手にした多くの技術（施設、設備、機器など）に埋もれ、それらの技術なくして社会経済活動・安寧な生活ができない状況にも係らず、空気のような無味乾燥なものと同様に捉えられる事も少なくない。また、将来への新たな課題も少なからず存在すると考えられる（図-2参照）。

参考までに筆者に衝撃を与えた重大事故の例を表-1に示すが、一般市民にとって、技術に関連した災害（あるいは事故）は、どこかの国・地域の不幸なニュース程度として受け止められ勝ちである。例えば、航空機の墜落事故、プラントの爆発事故などにより、身近な生活圏

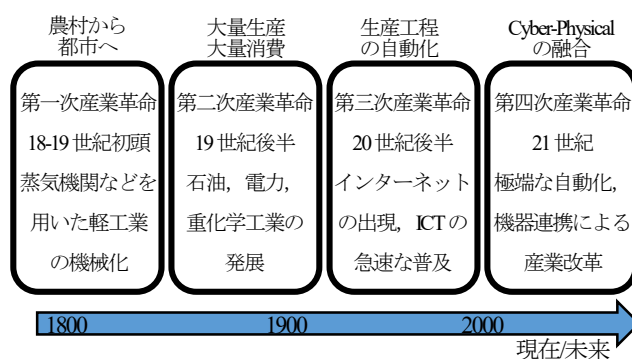


図-1 産業構造の変遷

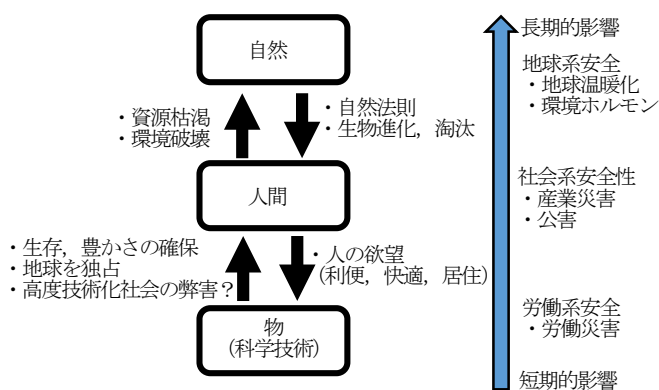


図-2 自然と人間と技術と安全の関わり

表-1 著者に衝撃を与えた主な重大事故

インフラ 施設関連	1991	広島新交通システム橋桁落下事故
	1995	阪神高速道路高架橋の地震による倒壊
	2001	米国ニューヨーク市の WTC ビル崩壊
	2012	笹子トンネル天井板落下
	2016	新名神橋桁落下事故
エネルギー 施設関連	1986	チェルノブイリ原発事故
	2011	福島原発事故
交通施設 関連	1985	日航ジャンボ機墜落
	1994	中華航空 140 便墜落事故
	2000	コンコルド墜落
	2005	JR 福知山線脱線事故
宇宙関連	1986	チャレンジャー爆発
	2008	コロンビア帰還失敗

で多くの人々が殺傷されるなどすると、はじめて技術に対する不安を抱くことになる。図-3に示すように労働災害による死亡者数は劇的に減ってきてはいるが、このような技術災害は、日常的に起こっており、足元にある文明の利器が一瞬にして恐るべき凶器となる可能性があることを技術者は知っておかなければならない。したがって、新たな技術を生み出す活動のみならず、技術災害の発生を未然に防止する技術の確立も不可欠と考える。

人間の活動に完全なものを求めるのは難しく、昨今でも多くの事故が発生している。これらの中には事故の原因あるいは因果関係が幸いにも明らかになったものもあるが、必ずしも明確に見いだせないものも少なくない。

“技術災害の原因究明はなぜ難しいのか？”の疑問に率直に答えると、多くの場合は、技術災害の原因調査が一部の関係者に限定されて行われたり、本業で多忙な技術者が好意的に片手間によって行われることが多いと感じられる。居住生活に影響する地震災害のように構造物の損傷の原因究明に全力が注がれ、多くの成果を上げ、技術基準が飛躍的に高度化してきた面もあるが、技術災害の原因究明のよりどころとなるべき学問体系、体系だった行政組織・司法体制も十分でないと考えられる。

世界の動きを見てみると、『国際規格および国際認証制度が生産の効率を改善し、国際貿易を容易なものとするができる』のように産業界や技術者を巻き込む経済環境は限りなくボーダーレス化しており、多くの工業製品の生産拠点は一国に留まらず、海外生産の増大や分業化が進んでいる。すなわち、自国を保護するための強制規格および任意規格の制定を規制する動きである。一方、海外資本の参入といった動きの中で、企業の多国籍化の進展を横に見つつ、科学立国を目指すためには国内での科学技術の育成・保護のための政策や支援なども急務であり、バランスある施策が求められている。

このような状況下で、技術者・研究者はそれぞれの立場において、現実問題に対処するにあたり、国々の社会の固有の文化と国際的な潮流との関連を的確に把握し、

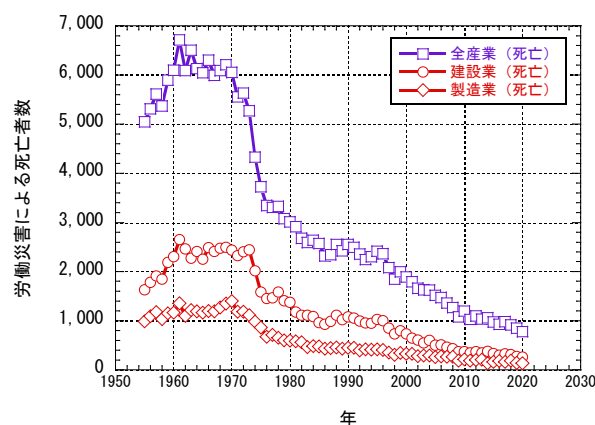


図-3 我国の労働災害による死亡者数の推移

行動をしていかなければならず、厳しい時代である。国際条約、域内条約、国内法規などの諸法令に関連し、マネジメントシステム規格との関連性、自主活動および技術者倫理との結び付け、技術者の専門的力量、学協会の役割を明確にしなければならないと言われている。特に、産業界、およびそれらを監督する行政機関においても不祥事が少なからず生じ、機能不全に至るケースに直面しても関連する個人が動じず、役割を果たしていくために、行動規範としての倫理のみではなく、実践的な課題解決のためのアプローチとしての『法工学 (Forensic Engineering)』もしくは『臨床工学 (Clinical Engineering)』の役割は急務と考える。このような役割は、周知のとおり犯罪捜査や裁判などの法の適用過程で必要とされる医学的事項を研究または応用する社会医学である法医学 (Forensic Medicine) の工学版と位置付けられる。

本論文では、工学倫理・法工学について背景・現状を概説し、2・3の代表的な事故調査を事例として取り上げ、技術者・研究者の役割のあり方について考え、学術論文の査読プロセスがその経験を積む良い機会であり、法『構造』工学分野への展開をまとめることとした。

## 2. 工学倫理について

京都大学工学部土木系学科（土木工学科及び交通土木工学科）では、1949年の新制大学教育課程で配当されていた『土木行政法』を引き継ぎ、2018年度の廃止まで4年生向けに『土木法規』が提供されてきた。ここでは、土木における官民の役割、土木事業（交通施設、水理施設、環境、防災、都市計画など）の基本となる法令について講述され、社会基盤整備・まちづくりに係る法制度等の役割や社会の要請に応じた変遷について理解し、社会基盤行政の諸課題と対応方策について考える機会となっていた<sup>3)</sup>。しかし、科学技術が高度に発達した現在において工学技術者・研究者にとって、工学的見地に基づ

く新しい意味での倫理が必要不可欠であり、京都大学工学部では、2001年度から工学部全学科において共通科目の『工学倫理 (Engineering Ethics)』が配当されるようになった。本科目では、1)倫理学の基礎理論、2)科学技術と倫理、3)技術者・研究者の倫理、4)特許と倫理、5)情報化社会における倫理および6)工学各分野での倫理に関する取組等といった構成で、技術者・研究者自信で判断できる能力を身に付けさせようとしている。しかし、土木分野では、官の役割が重要であるにもかかわらず、残念な事に法規に関連する科目は消滅してしまった。

ところで、元来倫理は人文科学と自然科学のさまざまな分野を対象とする哲学の一部門をなすものであるが、大学における教育では、哲学・宗教と並ぶ一般教養科目の一つとして取り扱われている。しかし実社会では、公務員倫理・企業倫理・技術倫理・環境倫理などのように特定の分野ごとで仕切られて扱われ、主体者が明確であれば、例えば、技術倫理は技術者倫理として提示される。学校教育と実社会のいずれでも、“倫理は当然に遵守されるもの”として取り扱われているが、社会・文化的背景により倫理遵守の必然性の理由付けは異なると考える。欧米諸国においては、宗教的な背景もあり、中世以来の専門職業家（聖職者・医者・法律家の三大専門職業に対して、技術業は産業革命以降に地位向上）が加入する職能団体の文化の中で倫理は重要なものであり、組織ごとに行動規定を作成し、倫理を実践する主体者を明確に意識した倫理観が確立され、教育・実践が行われている。一例を挙げるとすれば、過積載車に対する考え方である。欧米諸国では極めて稀であるが、社会規範が重視されない国では、法定重量以上の車両走行によるペナルティより経済活動による利益を追求するのが一般的である。

日本においてもグローバル化の流れの中で欧米諸国の動向に対応して、高等教育においてその重要性が認識されてきた<sup>4)</sup>。例えば、1999年の日本技術者教育認定機構 (JABEE) の設立や2000年の技術士法の改正により、技術者資格制度の国際整合を図る環境整備の一環として、工学系学協会においても、倫理規定・倫理綱領が制定されるに至った。土木学会倫理規定<sup>5)</sup>は、1999年5月に制定された (2014年5月に一部改訂)。倫理綱領では、『土木技術者は、土木が有する社会および自然との深遠な関わりを認識し、品位と名誉を重んじ、技術の進歩ならびに知の深化および総合化に努め、国民および国家の安寧と繁栄、人類の福利とその持続的発展に、知徳をもって貢献する。』と述べられており、行動規範の第9条では、『法律、条例、規則等の拠って立つ理念を十分に理解して職務を行い、清廉を旨とし、率先して社会規範を遵守し、社会や技術等の変化に応じてその改善に努める。』と規定されている。特に、専門技術者として、『公衆、事業の依頼者、自己の属する組織および自

身に対して公正、不偏な態度を保ち、誠実に職務を遂行する』として、信認義務 (黙示的義務：自らの利益よりも他者の利益を優先させ、当該他者の便益のために尽くす義務) を負っている。なお、2021年2月末現在の土木学会個人会員は34,612名であるが、どれほどの会員が所属学会の技術者倫理規定を正確に把握しているだろうか。筆者は、ほとんどの会員が規定を遵守し、社会活動を行っていると願っている。

### 3. 法工学 (Forensic Engineering) について

前述の通り、現代社会においては科学技術の発展、法制度の充実、文明の高度化に伴って生活環境が良くなるであろうという期待とは裏腹に、さまざまなリスクが増え続けているという一面があるのが実状である。リスクマネジメントのための規制行政において、対象となる各種事業には多くの因子が関係しており、産業構造や社会の要請の変化、技術の進歩などの様々な要因に影響され、リスクを適切に管理しえなくなっていることを理解すべきである。また、規制法と規格・技術基準・技術標準が複雑に絡み合った技術規制システムでは、見直しと改正作業の継続的实施、規制法制と行政施策の連携、法律家と技術者の協働が不可欠である。

このように規制法の体系、行政府の構造、および現場に関連する規格・技術基準・技術標準の3種類の性格の異なるサブシステムが複合したものであるため、自然・生活環境を保護し、人々の健康と安全を確保することは容易でないことは明らかである (図4参照)。これらを主体とする学術研究を推し進めるためには、法律家と技術者が同じ土俵で活動ができる『協働の場』を整備し、法学・工学・政策を一体とした総合政策科学としての法工学の確立が望ましいと考えられている<sup>6)</sup>。

また、技術者の知識インフラとしての法工学であり、技術者の生活インフラとして学協会があるため、課題解決のためには学協会の役割は極めて重要である。なお、

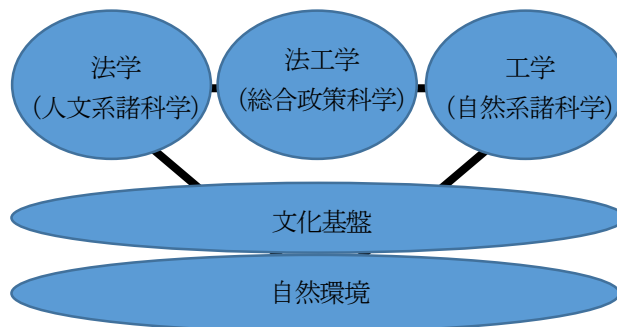


図4 法工学と既存の学問分野との関係

本論文でススめる法『構造』工学の目標は、構造物の利便性・安全性・環境適合性を確保することであり、構造物の設計・製作・架設・維持管理を通して「リスクを減らす、あるいはリスクを取り除く」ことである。社会経済活動・生活基盤を支える総合工学である土木工学において、費用や時間を考えて効果的・効率的にリスクを減らす行政の一例が「防災・減災」である。事故や災害が起きてから再発防止を考える事後対応型・対処療法型は、欧米諸国の規制行政 (Regulation) ではない。事故や災害を予測し、それへの備えを固める防災、あるいは万一の事故・災害に際しても被害を最小限に止める減災を規制行政と呼ぶ。規制することが目的ではなく、規制はあくまでも手段であり、より前向きな要素を含んだ行政であり、国の施策の目的を具体化し、それをどのようなメカニズムで具現化していくかの総合的な工夫・検討など、この実践のための学問が法工学であると考えられる<sup>7)</sup>。

“Forensic Engineering”という専門用語を最初に知ったのは、正確な年は定かではないが、2000年頃の恩師の福本 秀士先生との会話で、SSRC (Structural Stability Rresearch Council) の年次会議で、“Forensic Engineering”といった論文発表があったとお聞きしたのが初めてと記憶している。米国土木学会 (ASCE) のホームページを見てみると、Forensic Engineering 部門のサイトがあり、2001年9月に委員会が設置されたとある<sup>8)</sup>。この部門は、構造物の事故 (破壊、損傷や機能異常) の調査における工学諸原理の適用に関することとし、これらの調査結果の法定証言も行うこととし、具体的な活動内容として：(i)事故の数を減らすための実践と手順の開発；(ii)事故とその原因に関する情報の周知；(iii)事故調査を実施するためのガイドラインの構築および(iv)法工学における倫理的行動のガイドラインの構築を挙げている。なお、活動成果の一例としては、『Guidelines for Failure Investigation』<sup>9)</sup>を発刊するなど、毎年、『Forensic Engineering Congress』を開催しており、2021年11月開催の会議は第9回となる。

著者が入手した文献 10)および 11)においては、法工学の実践事例を用いて、具体的に役割が紹介されているので、参考にして頂きたい。なお、法工学調査の手順としては、(a)事故後可能な限り早く情報収集すること、(b)現地での情報収集に対する適切な装備の準備をすること、(c)基礎情報/現地調査/機器を用いた検査/事後における検査/試験/標準解析/シミュレーション/調査研究などで構成すること、(d)報告書のとりまとめとなる。また、法工学者であるための資格として、1: Capability to deal with the problem (対処能力)、2: Level of Competence (力量)、3: Conflict of interests (利益相反)、4: Coordinate efforts (作業調整)、5: Commitment of time (義務履行)、6: Ability to Communicate (コミュニケーション能力)、および 7: Cost of services (用務費) の 7C を挙げている。

#### 4. 事故などの分析事例

土木学会では、大地震に代表される自然災害が発生すれば、被害調査団を結成し、現地調査に基づき関連する報告書が取りまとめられてきた。これらの成果は構造物の安全性を向上するための基準整備において貢献してきた。これら以外にも、多くの事故が発生しており、技術の発展に寄与してきた。例えば、文献 12), 13), 14), 15) および 16) のように過去の事故事例を用いて、原因究明 (Cause Analysis) ・失敗防止 (Failure Prevention) ・知識配布 (Knowledge Distribution) の重要性を説明しているので、是非とも一読してもらいたい。

ここでは、まず 2003年8月26日(火)午後8時20分頃に新潟市万代島にある朱鷺メッセ内の連絡デッキの一部が突然落下した事故 (図-5 参照) があり、土木学会誌の記事をベースに概観してみる<sup>17)</sup>。なお、施設設置者である新潟県は、事故の原因究明と復旧方法の検討を行うために、第三者機関として朱鷺メッセ連絡デッキ落下事故調査委員会を直ちに設置したが、丸山久一委員長 (当時、長岡技術科学大学教授) のもと、調査が行われた。

本調査委員会は、コンクリートを専門とする丸山久一委員長に加え、国の研究所から1名 (建築)、大学から2名 (鋼上部構造と基礎構造を専門とするものそれぞれ1名) および道路会社から1名の5名で構成されており、体制としては申し分ないと思われる。強いてあげれば、施工を専門とする技術者が入っても良かったかと思われる。建設地が軟弱地盤であったため軽量構造が採用され、斜材ロッド定着部の設計耐力に余裕がなかったこと、ジャッキダウン時の施工上のミスがあったことから自重で崩落したとされている。発注者も設計者も施工者も安全性を追求していただろうが、どれほど確信していたかは不明である。歩道橋 (土木構造) であるのか、歩行者用デッキ (建築構造) といった構造種別に基づく詳細設計が、時として設計思想に差異がある建築設計会社で行われており、産官学の間での統一的な結論に至らなかったのが訴訟に至った経緯と考えられる。10回に及ぶ事故原因調査委員会の結論に対して、『設計ミス』の主要原因に真っ向から反論した建築設計集団との裁判 (新潟県は、設計・施工・監理を担当した計6社に対して、約9億円の損害賠償請求の訴訟) は、第2審の高等裁の審理の過程での勧告を受けて、2013年に和解の成立で終結した。県側の勝訴とも取れるが、賠償額は約1/10であり、建築

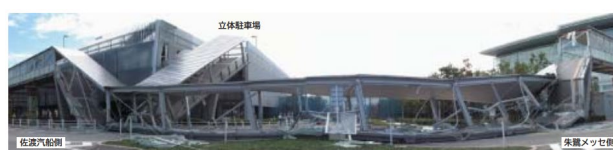


図-5 連絡デッキの崩落状況 (土木学会誌より)

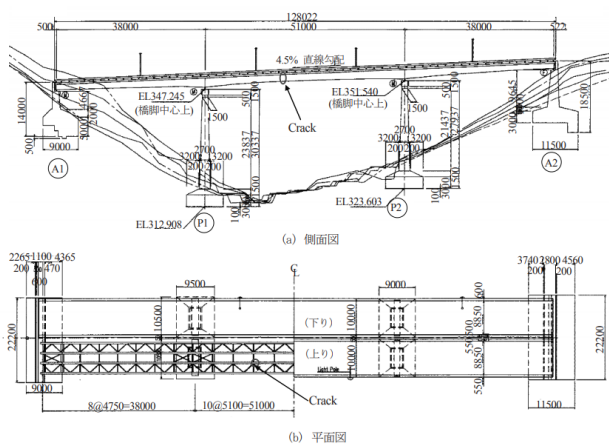


図-6 山添橋の概要と損傷部位 (文献23)より

設計集団の主張が認められたとも考えられる。なお、建築設計集団側は、独自の調査報告をまとめ、情報発信がなされている<sup>18)19)</sup>。一方で、本件の発注側である県の情報を入手しようとしたのですが、一切の情報公開がなされていないことは残念と思われる。

次に、図-6に示す鋼道路橋の損傷事例として疲労き裂が発生して交通規制に至った『山添橋』を取り上げる。山添橋は、一般国道25号で奈良県山辺郡山添村に位置する3径間連続鋼非合成鈹桁橋(橋長:128m, 全幅員:9.9m, 4主桁)であり、1971年に竣工し、橋齢35年時の2006年の点検で損傷が発見された。57,099台/日の交通量で、大型車も多く通行することによって、主桁に疲労亀裂が発生したと考えられる。亀裂が急速に進展し、最悪の場合は落橋に至る危険性があったため、直ちに通行止めを行うとともに、緊急点検と応急復旧が行なわれ、23時間にわたって上り車線が全面通行止めとなった橋梁である<sup>20)</sup>。

き裂進展防止のストップホール施工とき裂部への当て板補強、さらに措置中の不測の事故防止に必要な耐荷力確保のためき裂部を跨ぐように主桁下フランジに補強H鋼を設置し、応急復旧がされている(図-7参照)。復旧後も、応力計測やFE解析などで補強対策などが検討され、同種の継手部の疲労耐久性に関して委員会が設置されるなど、予防保全に役立てられている<sup>21)</sup>。

また、構造諸元ならびに損傷状況が公開されれば、事故後に文献22)および23)に見られるように、多様な調査研究が進められる。それぞれ、き裂損傷に伴う残存耐荷性能および剛性の変化を検証したり、き裂の位置や長さを変化させた解析を行うことで、疲労き裂の進展挙動を把握するなどして、弾性範囲内における設計荷重下での多主桁による荷重分配機能、き裂の進展速度、および最大荷重時(終局時)の桁の変形挙動を詳細に検証できるため、将来起こりうる事故時対応・対策などの参考とできる。特に、将来の構造ディテールの改良、もしくは同種の損傷シミュレーションの在り方に貢献できることと



当て板(700×900×12mm) ストップホールとボルト締め用の併用

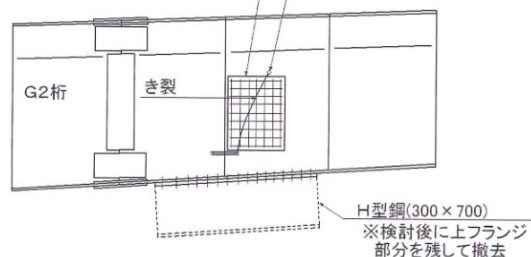


図-7 当て板による応急復旧の状況 (文献20)より

考える。そのためにも、建造物の2D/3Dモデル情報が不可欠であるので、竣工時にはデジタル情報として構造諸元が把握できるようなBIM(Building Information Modeling)の普及に期待したいところである。

最後に、『舞鶴クレーンブリッジ』を取り上げる。本稿をまとめている段階で知るに至った事例である。舞鶴クレーンブリッジは、京都府舞鶴市の舞鶴湾奥北東部の平湾に架けられた全長735mの鋼斜張橋(最大支間長:350m, 主塔高さ:92m)であり、1995年に供用を開始している。市職員が、巡回時にローラーの上に乗る上沓が傾いているのを見つけ、2020年9月29日より通行止めとした。損傷発見後、舞鶴市は損傷原因ならびに対策を検討するため専門家会議を設置した。本会議は玉田和也委員長(舞鶴工業高等専門学校教授)に加えて、大学から1名(鋼構造の専門)、国から1名(道路管理部門)、建設サイドから2名(橋梁製作および支承製作からそれぞれ1名)の5名で構成された。しかし、製作・架設会社から、その業界団体を代表して、委員となっているのは補修工法の検討には相応しいが、原因究明には不十分と考える。市が公開している議事録によれば、支承のローラー割れが供用開始当時から起きていたのではないかとしている。性能を確保するため、ステンレス合金製のピンには各種熱処理が行われているが、詳細な製作・品質保証記録がなく、事後分析のみからでは原因特定は難しい状況と考えられる。補修方法などが議論されてきたが、舞鶴に特化した気象環境下での損傷発生・進行であったのか?製作時の初期欠陥であったのかは詳細に検討すべきと考える。したがって、損傷の形態からして、専門家会議には、冶金を専門とする学識経験者・実務経験者をに入れておいた方が良かったのではないかと考える。

## 5. 論文査読の心得

なぜ本展望論文の展開で、『論文査読につながるのか?』と不思議がる読者もいるかと思う。筆者は、論文査読が法工学を实践する上での一種の経験と考えるため、査読の心得について述べる。

筆者が査読を伴う学術誌に論文を投稿したのは、修士論文の一部を1984年の留学時に併せて、ASCE/EM (Journal of Engineering Mechanics) に英語で論文を書いたのが初めてであった<sup>24)</sup>。留学地の米国NY州バッファロー市で、採択の通知を受けて、現地の指導教員(G. C. Lee教授)の支援もあり、修正意見に対応して、掲載に至った。その後も、博士の研究を3編の論文にまとめて、同じくASCE/EMに投稿し掲載されたが、査読で論文が返却になるとは全く意識していなかった。

しかし、1988年11月に京都大学に助手として赴任した直後に、研究室で構造工学論文集への投稿論文の修正に追われているのを見て、初めて3人の査読者の結果に基づき掲載の可否が決まり、査読者の意見への対応次第では、否になることもあることを知るに至った。翌年には、当時の構造工学論文集編集委員会事務局の手書きの封書で投稿論文、査読要領と査読結果取りまとめ用紙が届き、査読したのが初めての経験であった。渡邊英一・京都大学名誉教授(当時は、所属する研究室の教授)から、『自分の専門的知識に基づき判断しなさい』と言われ、迷いながら4点を付けたことが懐かしく思える(6点満点で、掲載可としての最低点)。その後、土木学会論文集I部門、日本鋼構造協会年次論文報告集、材料などの国内外の学術誌への投稿論文を数多く査読してきた。これまで、筆者がいつも厳しい査読をして、掲載否で回答すると周囲から言われることが多いが、論文著者の意図する研究目的に対して、如何に論理的に、信頼あるアプローチで結論に至っているかを見てきたのみで、論文のレベルを見下したりした身覚えはないと断言できる。

ところで、大学で教育研究に従事する者は、経験があるかと思うが、各大学では、e-Learningとして、(1)研究公正研修、(2)研究費等の適正な使用についての研修および(3)情報セキュリティ研修を年一度必ず受けなければならない。しかし、論文査読者、論文集編集委員などに従事する場合、同様な研修を受けることが義務化されているだろうか? 答えは、否です。現在は、各自、例えば、土木学会論文集査読要領<sup>25)</sup>を読み、理解し、適宜対応しなさいと思われる。しかし、土木学会論文集に関する倫理基準では、『土木学会(JSCE)は、1999年に「土木技術者の倫理規定」<sup>26)</sup>を制定し(2014年改定)、成果の公表に関して、「事実に基づく客観性および他者の知的成果を尊重し、信念と良心にしたがって、論文および報告等による新たな知見の公表および政策提言を行い、専

門家および公衆との共有に努める」とした。今般、当学会の論文公表に関する信頼性をさらに高めるため、土木学会論文集投稿要領、査読要領における関係者の倫理に関わる内容を整理し、土木学会論文集に関する倫理基準として制定、公表する』と明記されている。自身の考えとは異なるとして、論文評価はしてはならないと理解する。しかし、昨今の現状は大きく異なると思ふ。

例えば、筆者の論文が掲載否で返却されてくる際の理由文に対して疑問を感じるが多い。一例であるが、『鋼トラス橋の部材破断時に生じる衝撃係数に関する一考察』の投稿論文に対して、“返却理由：本論文では、表題のテーマに関してFE解析による検討が行われ、貴重な検討結果が含まれているとは思われます。しかしながら、実験結果と解析結果には隔たりがあり、解析結果の有効性の検証が必ずしも十分ではないと判断されます。そのため、有用性、完成度の観点から、論文として掲載するレベルには達しているとは判断されず、このような査読結果となりました”です。現在の研究手法として、FE解析は不可欠である。しかし、文献27)、28)などで始まった鋼トラス橋のリダンダンシー解析に対して、著者らの実橋を用いた部材破断時の衝撃応答<sup>29)</sup>に対して、リダンダンシー解析を行い、実験値と解析値が一部整合しない状況で、解析法の見直しを示唆した内容となっている。にもかかわらず、編集委員会の結論は、掲載否である。FE解析を用いたシミュレーションでは多くの仮定が導入され、必ずしも解析結果が実現象を表現しているとは限らない。実橋梁での計測結果は実現象を示すものであるが、解析手法の提案および解析に基づく研究論文が採択される一方で、それらを検証する取り組みを「実験と解析が合わないことが説明されていない」といった理由だけで却下することができるのであろうか。これ自体が問題提起であり、学術的な議論を更に進めるために必要なプロセスと考える。なお、シミュレーション法の発展にとともに、FE解析が実務で積極的に使われ始めた2000年頃から、その品質管理・品質保証が重視され、すなわちV&V (Verification & Validation) : 検証と妥当性確認と呼ばれる解析手法の検証プロセスが求められている。実世界の実体を記述し、それを理想化して概念モデルを作成し、さらに数値データに置き換えた解析モデルを作成して計算することによって、実体の挙動の予測結果を得る工学シミュレーションにおいて不可欠である。

著者が判断するに、論文主旨・結果が査読者の見解と相違しているとの判断で、投稿論文を低評価するのは望ましくないと考える。多くの情報が氾濫している状況で、少なくとも研究主旨のロジックが妥当で、結果に信頼性があれば、論文内容の責任は著者にあり、意見が異なるのであれば学術誌上で討議すればよいだけのことと考えられる。このような状況を筆者は望んでいる。

## 6. 次世代を担う実務者・研究者へ

図-8に示す通り、1995年をピークに建設投資は激減している。2011年の東日本大地震を契機に上昇傾向にあるが、2021年に延期された東京オリンピック後の予測は非常に難しい。一方、図-9に示す通り、日本の総人口も2005年ごろをピークに徐々に減り始めており、建設就業者数もこれに合わせて減少している。図-10には、土木学会論文集（構造・応用力学部門）ならびに構造工学論文集の掲載論文数の推移を示している。建設投資もしくは建設就業者数に連動して、推移していることが伺える。今後の建設プロジェクトは、1990年代のバブル期のように乱発されるものでなく、財務状況に応じて必要最小限に限られ、順次進んでいくものと考えられる。このような限られた機会を有効に使い、新しい技術の開発を積極的に進め、国内外での展開に期待するものであるが、構造分野は、技術展開が非常に標準的であるため、先進国と技術の発展を競い合わなければならないので、幅広い考え方で研究開発・教育に取り組むべきと考える。

欧米の方が劇的に新しい取り組みをして、情報発信をしている（例えば、文献30）。日本も学ばなければと思う。また、法律であつたり<sup>31)</sup>、人であつたり<sup>32)</sup>と向き合うことで、安全・安心な社会作り<sup>33)</sup>、豊かで活力ある社会作りが可能であり、それに貢献できる土木技術者（もしくは構造技術者）として誇れることとなる。

## 7. 最後に

世の中の技術革新は著しい速さで起こっている。構造物の一生にとって、材料技術、設計技術、製作技術、架設技術、維持管理技術など、土木構造技術者が得意とする専門的な分野のみならず、ICT、IoT、DX、AIに至るなど新しい技術を取り入れて、将来を見据えた技術開発が求められているのが現状と考える。特に、構造物の性能評価・診断では、シミュレーション手法および非破壊評価手法の採用が不可欠で、しかも調査から運営にいたるすべてのプロセスで一貫してBIMの活用、目視できないところを可視化・診断することが求められている。これからの世代の構造技術者にとって、極めて困難な時と思われるが、異分野の専門家とコミュニケーションを活発に行い、既成概念にとらわれず、品質・環境・労働安全衛生マネジメントをバランスよく組み上げ、法規的な裏付けも得た専門分野の横断的な新分野としての『構造』工学への発展となれば幸いである。

**謝辞：**複合構造の分野における技術の体系化や今後の技術の発展に寄与する課題を系統的に挙げる「展望論文」

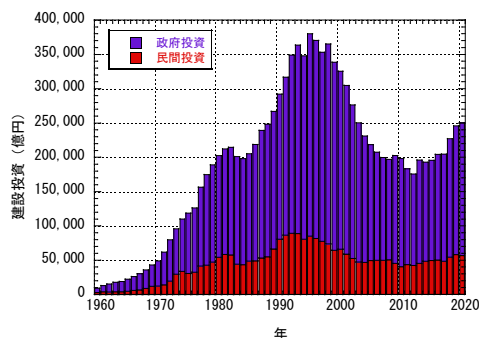


図-8 日本における建設投資の推移

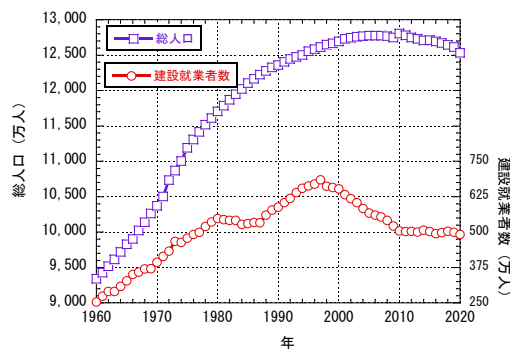


図-9 日本の総人口と建設就業者数の推移

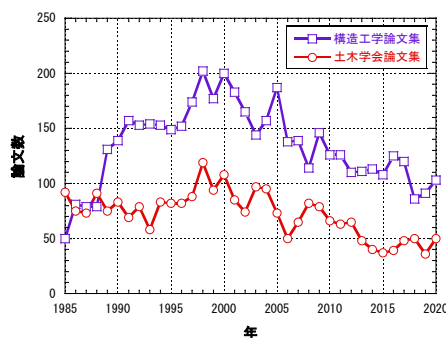


図-10 構造系論文数の推移

としてふさわしいテーマが何であるべきか悩んだ末に、『法工学 (Forensic Engineering)』とした。1988年に京都大学に着任して以来、多くの経験をさせていただきましたが、直近の十数年の思いをまとめるのに時間がかかってしまい、編集委員会には多大なご迷惑をお掛けしました。ここに、お詫びとともに忍耐に謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 合田良実：土木と文明，鹿島出版会，1996。
- 2) 高橋裕：現代日本土木史，彰国社，2007。
- 3) 岡尚平：土木法規へのアプローチ，技報堂出版，1989。
- 4) 清水克彦：技術者倫理と法工学，共立出版，2003。
- 5) 土木学会：土木技術者の倫理規定（1999年制定・2014年改訂）<https://www.jsce.or.jp/rules/rinnri.shtml>
- 6) 日本機械学会編：機械工学便覧 デザイン編 99 法工学，丸善，2003。
- 7) 日本学術振興会・産学連携第180委員会：リスクベースメンテナンス入門，養賢堂，2017。

- 8) ASCE-Forensic Engineering Division: <https://www.asce.org/forensic-engineering/forensic-engineering-division/>
- 9) ASCE: *Guidelines for Failure Investigation*, 2<sup>nd</sup> Edition, edited by R. S. Barrow, R. W. Anthony, K. J. Beasley and S. M. Verhulst, 2018.
- 10) Ratay, R. T.: *Forensic Structural Engineering Handbook*, 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill, 2010.
- 11) Franck, H. and Franck, D.: *Forensic Engineering Fundamentals*, CRC Press, 2013.
- 12) Åkesson, B.: *Understanding Bridges Collapses*, Taylor & Francis, UK, 2008.
- 13) Bethea, N. B.: *The Science of A Bridge Collapse*, Cerry Lake Publishing, 2015.
- 14) 小林英雄(編)：破壊事故－失敗知識の活用－，共立出版，2007.
- 15) (NPO)安全工学会編：事故・災害事例とその対策－再発防止のための処方箋－，養賢堂，2005.
- 16) 玉井信行，石野和男，榎田真也，前野詩朗，渡邊康玄：豪雨による河川橋梁災害－その原因と対策－，技報堂出版，2015.
- 17) 丸山久一：朱鷺メッセ連絡橋デッキの事故調査について，土木学会誌，Vol.89，No.4，pp.51-55，2004.
- 18) 日本建築構造技術者協会（朱鷺メッセ連絡橋事故調査タスク・フォース）：朱鷺メッセ連絡橋事故調査報告書，2004. [https://www.jsca.or.jp/vol5/p2\\_2\\_news\\_release/2003toki/2003toki-tf\\_index.php](https://www.jsca.or.jp/vol5/p2_2_news_release/2003toki/2003toki-tf_index.php)
- 19) 渡辺邦夫：（インタビュー）何故，落ちたのか 新潟県は事故の真相解明に取り組み，建築ジャーナル，Vol.1204(10)，pp.8-13，2012.
- 20) 玉越隆史，三宅淳市，村越潤：鋼部材の疲労き裂について（その 1）－道路橋の主桁－，土木技術資料，10月号，pp.39-40，2009.
- 21) 新都市社会技術融合創造研究会：鋼橋の疲労亀裂破壊調査の効率化に関する研究（プロジェクトリーダー：坂野昌弘・関西大学教授），<https://www.kkr.mlit.go.jp/road/shintoshikenkyukai/project/35.html>
- 22) 山口隆司，金仁浩，北田俊行，村本和之：大きなき裂損傷が発生した鋼桁橋の全体残存耐力に関する解析的検討，鋼構造論文集，日本鋼構造協会，第 16 卷，第 63 号，pp.15-25，2009.
- 23) 橋本国太郎，茅野牧夫，鈴木康夫，杉浦邦征，渡邊英一：疲労き裂を有する連続鋼桁橋の残存性能に関する解析的研究，鋼構造論文集，日本鋼構造協会，第 22 卷，第 85 号，pp.111-120，2015.
- 24) Sugiura, K., Mizuno, E. and Fukumoto, Y.: Dynamic instability analyses of axially impacted columns, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.111, No.7, pp.893-908, 1985.
- 25) 土木学会論文集編集委員会：査読要領，2017. (<https://committees.jsce.or.jp/jjsce/node/73>)
- 26) 土木学会論文集編集委員会：土木学会論文集に関する倫理基準，2020. (<https://committees.jsce.or.jp/jjsce/node/69>)
- 27) 永谷秀樹，明石直光，松田岳憲，安田昌宏，石井博典，宮森雅之，小幡泰弘，平山博，奥井義昭：我が国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討，土木学会論文集 A，Vol.65，No.2，pp.410-425，2009.
- 28) 後藤芳顕，川西直樹，本多一成：リダンダンシー解析における鋼トラス橋の引張り斜材破断時の衝撃係数，構造工学論文集，土木学会，Vol.56A，pp.792-805，2010.3.
- 29) 橋本国太郎，中村衣里，杉浦邦征：既設鋼トラス橋の部材破断による衝撃係数および応力再分配の実測，構造工学論文集，土木学会，Vol.59A，pp.180-189，2013.
- 30) ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.140, *Climate-Resilient Infrastructures - Adaptive Design and Risk Management -*, ASCE, Edited by B. M. Ayyub, 2018.
- 31) 江副哲：建設現場のトラブル相談，清文社，2018.
- 32) 石光俊介，佐藤秀紀：人間工学の基礎，養賢堂，2018.
- 33) 長岡科学技術大学システム安全専攻：システム安全入門，養賢堂，2016.

(Received March 31, 2021)

(Accepted April 13, 2021)

## ENCOURAGEMENT OF FORENSIC “STRUCTURAL” ENGINEERING

Kunitomo SUGIURA

As a “prospect paper” supposed to review the state of arts of current technology for systemization and the future technology development regarding hybrid structures, the suitable issue was deliberated carefully and eventually the tentative title of the prospect paper was decided such as Forensic Structural Engineering or Clinical Structural Engineering in the keyword so as to summarize what I had been thinking about for the past several decades. For the enormous stock of important civil infrastructures that have been maintained continuously in order to improve the quality of life, related to design, fabrication, erection and maintenance of civil infrastructures, “technology quality assurance/sustainability”, “accident (disaster) investigation”, “acceptability and risk of new technology” must be dealt with across various fields by not only researchers and practitioners but also administrative experts or legal practitioners; that is, “Forensic Engineering” is becoming very important. I hope that the content of this manuscript will help structural engineers to widen a new and cross sectoral research field based on their specialization.