

メカニクス・構造研究連絡委員会構造工学専門委員会報告

構造工学における現在の課題

設計クライテリアとコンピューター依存社会

平成17年8月31日

日本学術会議

メカニクス・構造研究連絡委員会構造工学専門委員会

この報告は、第19期日本学術会議メカニクス・構造研究連絡委員会構造工学専門委員会の審議結果を取りまとめ発表するものである。

第19期メカニクス・構造研究連絡委員会構造工学専門委員会

委員長	渡邊史夫	(京都大学大学院工学研究科教授)
幹事	山口宏樹	(埼玉大学工学部教授)
	上田哲彦	(名古屋大学大学院工学研究科教授)
委員	魚本健人	(東京大学生産技術研究所教授)
	桑村 仁	(東京大学大学院工学系研究科教授)
	鈴木英之	(東京大学大学院工学系研究科教授)
	松本 勝	(京都大学大学院工学研究科教授)
	森田耕次	(千葉大学工学部教授)
	依田照彦	(早稲田大学理工学部教授)

会議開催記録

第19期メカニクス・構造研究連絡委員会構造工学専門委員会

第1回委員会：	平成	15年	12月	8日
第2回委員会：	平成	16年	8月	19日
第3回委員会：	平成	16年	12月	18日
第4回委員会：	平成	17年	3月	28日
第5回委員会：	平成	17年	6月	14日

要 旨

1 報告の名称

構造工学における現在の課題

- 設計クライテリアとコンピューター依存社会 -

2 報告の内容

(1) 作成の背景

第18期では、構造工学を「基礎学理を基本として、環境や信頼性を考慮しながら、構造物のライフサイクルにおける一連の行為、すなわち、計画、設計、施工、維持管理、及び解体・再利用の各過程で必要とされる科学的手法を考究し、安全かつ安心な社会の構築に貢献する」とした。すなわち、構造工学は、新たな学術会議の体系の下、社会への貢献の具体的な方策あるいは形態として、社会を構成していく計画及び施策に対し、人間が自身のために構造物を通して環境に関与する方向が誤ったものにならぬよう、広く構造物に纏わる包括的見地から助言を発していく役割を担って行く。このような認識の下に、今後留意すべき構造工学の現在の課題は何であるかの抽出を試みた。

(2) 現状及び問題点

物造りでは、工学の範疇をこえた複数の条件下での意思決定が求められ、この問題を解決していくのが構造工学に与えられた課題であり、現代社会や人々が構造物に求める「クライテリア」を明確にし、信頼できる学術に根ざした構造物を世に出していく使命を負う。このときに、社会の動きに対応するクライテリアであるとともに、工学に基本的に求められることとして、それが、人類が存立するための付与環境である自然環境を、長期的に維持あるいは、更に改善するものでなければならないことを忘れてはいけない。また、物造りにおいては、コンピューター汎用ソフトウェアの使用が不可欠である一方、その使われている状況は徐々にブラックボックス化しており、コンピューター依存社会の台頭による弊害も生んでいる。

(3) 改善策、提言等の内容

物造りにおける意思決定のルール(クライテリア)を明らかにすべく、第19期においては、クライテリアの歴史的背景と時代変遷、多様化する要求性能、分野別のクライテリアの現状と動向を分析した上で、クライテリアの優先順位、クライテリアの相反問題、最適化、合意形成、クライテリアの照査技術、性能の評価技術、工学倫理、

技術者の責任等、クライテリア論の課題を示した。このクライテリア論の展開が、新しい価値を生み出す研究分野の開拓、社会に開かれた構造工学、若手研究者の育成、新しい構造物の創造等につながる。一方、汎用ソフトウェアの利用に関しては、構造工学の知識修得と正しい利用の重要性を指摘するとともに、人間の思考によって生み出された汎用ソフトウェアが人間の思考を奪いかねないものの、正しい利用を可能とする基礎学力の確保を疎かにしなければ、コンピューターの利用は代償作用を生み、人類にとって更なる未知に挑む余裕時間を得る、という利点を大いに活用すべきであることを述べている。

目 次

第1章 前書き	1
第2章 クライテリア論	2
2.1 クライテリア論が目指すもの	2
2.2 構造物に求められる性能とその多様化	2
2.3 分野別のクライテリアの現状と動向	4
2.3.1 建築構造物	4
2.3.2 土木構造物	7
2.3.3 航空機	10
2.3.4 船舶海洋構造物	12
2.4 クライテリア論の課題	15
2.5 結び	16
第3章 コンピューター依存社会の台頭と課題	17
3.1 数値解析法の進歩	17
3.2 有限要素汎用ソフトウェア	17
3.3 汎用ソフトウェア利用の功罪	18
3.4 力学的センスの醸成	20
3.5 将来への期待	21
第4章 まとめ(豊かな社会へ)	22
参考文献	23

第1章 前書き

構造工学は、関連する学術・技術を有機的連携のもとで結集し、求められる性能を保有する構造物を作りだすための学術・技術領域であり、その概念自体が、人間が与えられた環境に対して人工的に関与する際に必要な、基本的かつ包括的な領域である。

現在の構造工学専門委員会は、1957年に橋梁・構造工学研究連絡委員会として発足したものが現メカニクス・構造研究連絡委員会となり、そこに含まれる一専門委員会として設置されている。しかし、メカニクス・構造研究連絡委員会に、地震工学専門委員会(1964年)、レオロジー専門委員会(1988年)及び計算力学専門委員会(1997年)が設置され、構造工学を取り巻く学術の細分化が進んできた。これら細分化された学術領域が成熟に向かうと共に、社会の求めるものや人間の価値観が大きく変化する中で、構造工学に求められるものを見直し、新たな目標設定を行う必要が生じた。このような状況を踏まえて、第18期では、構造工学のあるべき姿を見直し、「基礎学理を基本として、環境や信頼性を考慮しながら、構造物のライフサイクルにおける一連の行為、すなわち計画、設計、施工、維持管理、及び解体・再利用の各過程で必要とされる科学的手法を考究し、安全かつ安心な社会の構築に貢献する」とした。ここに、原点に立ち帰った新生構造工学の姿がある。すなわち、構造工学は、社会環境との融合のなかでその存在意義は疑いのないものであり、今後、構造物がなくならぬ限り、自然環境との調和を保ちつつ、社会環境に応じた形で存立していく学術領域と捉えることができよう。そして、新たな学術会議の体系の下、構造工学の社会への貢献の具体的な方策あるいは形態として、社会を構成していく計画及び施策に対し、人間が自身のために構造物を通して環境に関与する方向が誤ったものにならぬよう、広く構造物に纏わる包括的見地から助言を発していく役割を担わなければならないと考える。

このような経緯を踏まえて、第19期では、構造工学のなすべき使命を再認識し、その役割を果たすべき検討を重ねてきた。その結果、包括的見地から二つの命題を取り上げ、本報告書を取りまとめた。一つは、変化する社会で求められている種々の要求を満足するための物造りににおける「クライテリア論」であり、クライテリアの現状と将来展開の方向を論じ、新たな研究分野の開拓、社会に開かれた構造工学、若手研究者の育成、新しい構造物の創造等につなげた。もう一つは、実際の物造りの現場で広く用いられている計算機ソフトウェア（汎用ソフトウェア）利用の功罪についてであり、構造工学の知識修得と正しい利用の重要性を指摘するとともに、人間の思考によって生み出された汎用ソフトウェアが、人間の思考を奪いかねないが、それは代償作用を生み、人類にとって更なる未知に挑む余裕時間を得るという将来の可能性への期待を示した。

表1 18-20世紀の製鉄技術と構造力学の歴史年表

産業・社会の出来事	力学理論の発見
	1678 フックの法則 (英)
	1705 ベルヌイの梁理論 (仏)
1735 ダービー 2世が石炭高炉を操業(鑄鉄の工業生産, 英)	1744 オイラー座屈 (仏)
1769 ワットが高効率の復水式蒸気機関を発明 (英)	1744 オイラーのたわみ曲線の方程式 (仏)
1779 アイアンブリッジ (世界初の鉄橋, 鑄鉄, 英)	1807 ヤング係数 (英)
1784 コートがバドル法を発明 (鍊鉄の工業生産, 英)	1822 コーシーの応力-ひずみテンソル (仏)
1796 亜麻工場 (鑄鉄による工場建築架構, 英)	1823 ナビエの単純支持板の解 (仏)
1824 アスプディンがボルトランドセメントを発明 (英)	1828 グリーンのひずみエネルギー関数 (英)
1825 スチーブソンが蒸気機関車を完成 (英)	1829 ホアソン比 (仏)
1825 ガウンレス橋 (世界初の鉄道用橋, 鍊鉄, 英)	1837 サン・ブナンの原理 (仏)
1831 ファラデーが電磁誘導を発見 (電動機の原理, 英)	1839 ボンセレの金属疲労 (仏)
1832 チャンスが板ガラスの連続圧延製造法を発明 (英)	1840 頃 クラペイロンの力学エネルギー保存則 (仏)
1837 ユーストン駅 (鍊鉄, 英)	1843 ニューマンの光弾性 (独)
1851 クリスタルパレス (鍊鉄, 英)	1850 キルヒホッフの平板理論 (独)
1856 ベッセマーが転炉法を発明 (鋼の工業生産, 英)	1854 ジョラウスキーの梁のせん断応力度 (露)
1858 大島高任が洋式高炉の操業に成功 (釜石)	1855 サン・ブナンねじり (仏)
1864 シーメンスとマルタンが平炉法を発明 (鋼の工業生産, 英, 仏)	1860 リューダース降伏線 (独)
1866 英国海軍艦庫 (世界初のラーメン, 鍊鉄)	1860 頃 ヴェーラの疲労 S-N 曲線 (独)
1867 モニエが鉄筋コンクリートの特許 (仏)	1863 エアリーの応力関数 (英)
1870 頃 ジーメンスとグラムが電動機を完成 (独)	1864 マックスウェルの相反作用の定理 (英)
1874 イーズ橋 (世界初の鋼橋, 米)	1864 トレスカの降伏条件 (仏)
1877 軍艦アイリス号進水 (世界初の鋼船, 英)	1872 ベッティの相反作用の定理 (伊)
1880 電動エレベーターの発明 (独)	1875 カステリアーノの定理 (伊)
1885 ホームインシュアランスビル (鋼による初の高層建築, 米シカゴ)	1878 グラショフの平板近似解法 (独)
1887 ベナードスがアーク溶接法を発明 (露)	1882 モールの応力円 (独)
1889 エッフェル塔 (鍊鉄, 仏)	1883 ヘルツ応力 (独)
1894 秀英舎印刷工場 (日本初の鋼による鉄骨造建築物, ただし輸入鉄骨)	1886 パウシンガー効果 (独)
1899 エルーが電炉法を発明 (仏)	1889 エンゲッサーのタンジェント・モデュラス荷重 (独)
1901 官営八幡製鉄所が操業開始	1891 ブライアンの板座屈理論 (英)
1901 US スチール設立 (米)	1903 プラントルの膜類似理論 (独)
1911 フォードが自動車生産 (米)	1913 ミーゼスの降伏条件 (独)
1912 ストラウスが 18-8 ステンレス鋼を発明 (独)	1920 グリフィスの脆性破壊理論 (英)
1913 ウールワースビル (米 NY, 242 m)	1924 ヘンキーのせん断ひずみエネルギー説 (米)
1923 関東大震災	1929 ワグナーの反りねじり (独)
1929 三井本館 (国産の鋼による本格的鉄骨造)	1932 カルマンの板座屈有効幅 (米)
1931 エンパイアステートビル (米 NY, 381 m)	1934 ベニオフの地震応答スペクトル (米)
1938 ウィルソンが高力ボルト接合の実験 (米)	1937 ナダイの正八面体せん断応力説 (米)
1950 代 連続鑄造法の実用化	1943 ヨハンセンの降伏線理論 (デンマーク)
1951 レイクショアドライブ AP (米シカゴ)	1945 フローデンタールの信頼性理論 (イスラエル)
1956 第1回世界地震工学会議 (パークレー)	1947 シャンレーの有限変形座屈理論 (米)
1958 東京タワー	1951 グリーンバーグとブラガーの上界・下界定理 (米)
1961 ユニバーサル圧延による H 形鋼 (堺製鉄所)	1953 イングリッシュのモーメント分配法 (米)
1962 31 m 高さ制限撤廃 (建築基準法改正)	
1968 霞ヶ関ビル (日本初の超高層, 147 m)	
1973 ワールドトレードセンタービル (米 NY, 417 m)	
1974 シアーズタワー (米最高の超高層, 442 m)	
1993 横浜ランドマークタワー (日本最高の超高層, 296 m)	
1995 阪神・淡路大震災	
1997 ペトロナスタワー (20世紀最高の超高層建築, RC 柱, 452 m)	
1998 明石海峡大橋 (20世紀最長の吊橋, 中央スパン 1,990 m)	

第2章 クライテリア論

各種構造物を造りだすときには、持つべき性能を明確にすることより設計が始まる。ここでは、持つべき性能の集合を、構造物設計におけるクライテリアと呼ぶ。クライテリアに含まれる性能は、強さといった明確な工学的尺度を持つものから、例えば美観や景観といった、やや主観的な尺度まで幅広い。この幅広い範囲を包含するクライテリアをいかに設定し、それを満足する構造物を造りだすかが、構造工学の役割である。現代の多様化し変化する社会では、安全性、使用性、耐久性といった構造物そのものにかかわるもの、社会や経済にかかわるもの、エネルギー削減や美観・景観といった環境にかかわるものに加えて、さらに広範囲にわたってクライテリアが広がっていく可能性が高い。このような現状で、構造物設計におけるクライテリアの現状の取り纏めと将来のありかたを論じることは、より良い構造物を社会に供給していく上で意義深く、従来型の要素技術の集合とそのシステム化に加えた新しい発展の方向を示すことになる。

2.1 クライテリア論が目指すもの

構造物をつくる時、必ず合否の判定をする。例えば、許容応力度設計法においては、「構造物に生じる応力度が許容応力度以下であれば合格である」と判定する。これによって構造物は安全である、すなわち安全性という性能を構造物に付与したことになる。「構造物は安全でなければならない」という社会からの要求に対して構造工学がそれを実現する技術基盤をもっているわけである。

ところが、最近、構造物に求められる性能が多様化してきた。従来の安全性、機能性、耐久性、経済性といった性能以外に環境性やサステナビリティというような新たな性能が社会から求められている。そのとき、何がどうであれば合格と判定できるのか、すなわちクライテリアは何かが分からない状況にある。『クライテリア論』の使命は、社会（国民や個々の使用者）が求める構造物の性能は何か、その性能を評価する方法はどういうものか、合否の判定基準はどうあるべきか、複数の性能の対立関係（例えば環境性と経済性）をどのように克服すべきか、などを明らかにしていくことである。クライテリア論は、従来の工学論理のみならず、工学倫理をも巻込んだメタ・テクノロジーの性格を有するものに発展していくことは必至であり、多様化する文明の価値を支える工学理論となる。

21世紀の構造工学がこのような状況に置かれていることを考えると、『クライテリア論』という学問は、次のような成果を目標にすることができると考えられる。第一に、従来の「安全性」一辺倒の時代から脱皮し、新しい性能と価値を生み出す研究分野を開拓する。第二に、「構造工学」が社会に開かれた姿に生まれ変わる次の舞台の

幕を開き、国民の前にプロフェッショナルとして構造工学技術者が登場するために備えていなければならない基幹的考え方を示す。第三に、構造工学の学問としての発展を担う次世代の若手研究者が未来指向の提言を活発に行う場を提供する。第四に、新しいクライテリアが新しい構造の創造を促す。例えば、環境性クライテリアなるものが生む構造物は従来の構造物に更に価値を付加したものになると期待される。

2.2 構造物に求められる性能とその多様化

構造工学と呼ばれる学問が誕生する以前から、構造物はつくられており、それは経験的知識とその伝承によって支えられていた。そこでは、成功と失敗を繰り返しながら、機能性、経済性、安全性などがバランスする最適解をゆっくり時間をかけて見出していた。それは技術というよりも技能に近いものであったかもしれない。しかしながら、産業革命による競争社会の出現は、貴重な人工材料すなわち鉄を有効利用するために、もはや技能に頼っている時間的余裕はなく、様々な応用と創造を支える技術を必要とした。そのときに、数学と結びついた材料力学が発展した。表1にあるように、産業革命の時代には弾性力学の法則がたくさん発表されており、ベルヌイやオイラーなど数学者の貢献が大きい。弾性力学は、機械や建造物を機能的に使用し、安全性を材料（当時は鉄）に担保する許容応力度設計法の誕生を支えることとなる。

数学的方法を用いた弾性力学は、20世紀になると、数学的手法を用いた塑性力学に発展していくことになる。塑性力学は、金属材料の塑性加工に威力を発揮すると同時に、建造物についても塑性設計法（終局耐力設計法）を生むことになる。材料に塑性があれば、弾性の限界が突破されても構造物は崩壊しないので、塑性解析によって崩壊荷重を知ることによって、構造物の安全性を直接的に担保する仕組みが誕生した。その後、構造物の安全性に関わる荷重と構造耐力には確率統計的なばらつきが内在するという事実を考慮して安全性を評価する動きが現れ、これが限界状態設計法に発展していく。限界状態設計法では、安全性が破られる確率を許容確率以下に押さえることを目標とするため、性能の眼界をより明確に定義する作業が行われた。現在では、安全性と機能性の限界として終局限界状態と使用限界状態の2つの限界状態が設定され、設計規範が構築されている。

以上のように、構造設計法は許容応力度設計法、終局耐力設計法、限界状態設計法と発展し、その過程で、構造物の性能が少しずつ明示的になってきたと思われる。しかし、これらの設計法の中で扱われる性能は限られており、安全性を中心として、機能性や耐久性などが附随する形であった。ところが、工学が支えてきた産業社会は安定成長の時代を迎え、より高度で多様な性能が求められるようになってきた。安全であること（安全性）、便利に使用できること（機能性・使用性）、適正な費用で建設でき維持できること（経済性）、無理なくつくれること（施工性）は、もはや当然で

あり、美しいこと（美観性・意匠性・景観性）、寿命が長いこと（耐久性）、環境への負荷が小さいこと（環境性）、サステナブルであること（持続性）、万が一の損傷に対して修繕できること（修復性）、想定外の外乱が破局をもたらさないこと（ロバスト性）などの性能が話題になってきた。このような要求性能に応える技術の開発とその基盤を支える研究を進めていくことが、構造工学に求められている。

2.3 分野別のクライテリアの現状と動向

2.3.1 建築構造物

建築構造物に要求される性能は、安全性、使用性（機能性）、耐久性、経済性、施工性などである。これらの性能をバランスよく満足し、最適解を得ることが構造技術者の任務である。いわゆるデザインコードではこれらの性能を満たしているかどうかの判定方法が記されているが、すべてではない。許容応力度設計法は使用性の判定を記述し、安全率の導入によって間接的に安全性を担保している。終局耐力設計法は安全性の判定を記述している。限界状態設計法は、確率統計に立脚して使用性と安全性の判定を記述している。耐久性に関して明示的に判定方法を記述したものは少ない。経済性や施工性は設計者の判断にゆだねられており、建築の意匠性あるいは美観・景観性は構造技術者ではなく、むしろ、芸術的側面として建築家の任務と考えられている。

建築構造物に要求される性能は多様であるが、そのうち、安全であることを判定する規範（安全性のクライテリア）と機能的であることを判定する規範（使用性のクライテリア）が今までのデザインコードで明示的に記述されてきたのは、次のような理由がある。構造力学における工学量（例えば、応力度やひずみ、あるいは耐力や変形など）で判定基準が記述でき、それによって客観性を与えることができること、十分な学術的知見の蓄積があること、一般性あるいは再現性が有り専門家の合意が得やすいことなどである。これらの条件が欠けていると、耐久性や経済性、施工性のように、デザインコードの中でクライテリアの明示的記述が困難となる。

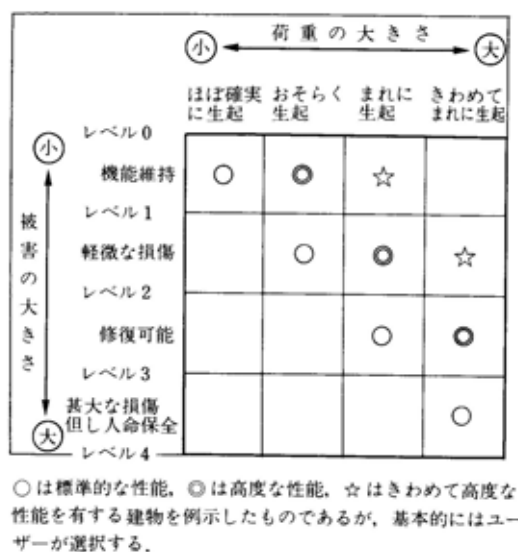


表2 性能マトリックスの例

許容応力度設計法、終局耐力設計法、限界状態設計法に次ぐ第四の設計法として、性能設計法の検討が現在進められている。性能設計法が従来の設計法と根本的に異なるのは、使用者の側に立った設計法であるという点である。構造物の性能（使用者から見れば価値）について設計者と使用者が理解を共有しようというものである。そのとき、両者のインターフェイスとなるのが表2の性能マトリックスと呼ばれるものである。マトリックスの列（横座標）は想定する荷重外力レベルを表し、行（縦軸）は損傷度による性能レベルを表す。このマトリックスにマークを付けることによって性能目標が決定される。荷重外力が大きいほど損傷も大きいので、マーク群は右下がりとなる。表の 印群が標準的な性能目標であるとする、 や 印のようにマーク群が右肩に上がるにつれてより高い性能目標となる。

このとき、性能レベルの表示は次の条件を満たさなければならないとされている。第一は、使用者に意味があるということである（meaningful）。これは、性能レベルの定義に用いられる損傷は使用者が被る被害（価値の喪失）と明瞭に対応付けられ、性能レベルが変わると使用者が被る不利益に質的・量的に明瞭な違いが現れるものでなければならないということであり、使用者の視点に立つ性能設計に課せられたもっとも本質的な要件と言える。第二は、同定が容易であるということである

（identifiable）。これは、性能レベルの定義に用いられる各種損傷は現実的なものであることは当然として、その発生や大きさが容易に確認できるものでなければならないということであり、設計者には使用者に対して説明責任あるいは結果責任があることを暗示したものである。第三は、性能の限界を工学量を用いて数理的・定量的に表現できるということである（quantifiable）。これは、損傷の発生や大きさを工学量で扱うことができ、性能レベルが突破される限界状態を数理的に表現し、当該性能が確保されることが客観的に検証可能でなければならないということであり、構造工学が慣用してきた合意形成の手法を継承したものである。

性能設計の始まりは1989年ロムプリータ地震による被害を契機にカリフォルニア構造技術者協会（Structural Engineers Association of California、略称SEAOC）が1992年に編成したビジョン2000委員会（Vision 2000 Committee）の活動に見ることができ、サンフランシスコ湾岸地域を襲ったロムプリータ地震（M7.1）はそれほど強い地震動ではなかったため、当時の設計基準で建てられた建築物は安全性を確保できたが、70億ドルの経済的損失を生じた。人命保護を中心としてきた耐震設計技術に財産保全の視点を加える必要から性能設計の検討が始まったわけである。このことから、性能設計には、従来の機能性、無損傷性、安全性に加えて、修復性という性能が求められるようになってきており、建築鋼構造の分野では表3のような性能レベルが提案されている。しかしながら、修復性に関する学術的知見は乏しく、quantifiableなクライテリアの構築に向けて検討が始まったばかりである。

表3 鋼構造建築物の性能レベル

性能レベル		評価対象別の被害状態					その他 所見
		建物全体	構造体	非構造部材	付帯設備	収容物	
レベル 1	機能維持 Functional	快適性や居住性、作業性が維持され、平常通りの生活や作業が可能。	損傷や劣化は生じない。感覚的障害をもたらすたわみや振動は生じない。	損傷や劣化は生じない。	平常通り稼働する。	完全に保護される。	使用者に不便は生じない。無被害。
(機能限界)							
レベル 2	無損傷 Undamaged	軽微な損傷が起きても基本機能は維持され、平常通りの生活や作業が可能。	応力集中部に局所的な降伏が生じる以外は目立った損傷や劣化は生じない。変形は弾性範囲におさまり、残留変形は生じない。点検や補修は不要。	小さな亀裂や剥離が生じて、雨漏りや建具の開閉時の不具合等は生じない。軽微な損傷は使用者側の都合のよいときに修繕できる。	緊急停止が起きることがあるが、直ちに再開できる。スプリンクラなどの非常用設備に誤作動は生じない。	軽微な備品類に移動や落下、転倒が生じることがあるが、基大な価値の減損は生じない。危険物は完全に保護される。	一時的に使用者が不便を感じるが、経済的損失はほとんどない。直ちに使用可(緑札)。
(損傷限界)							
レベル 3	修復可能 Reparable	明白な損傷が観察され、建物の価値が減損するが、技術的および経済的に修復可能で、建物の性能はほぼ元に復旧し再使用が可能。軽傷者が出る可能性がある。	変形は弾性範囲を突破し、降伏や座屈、破壊が部分的に発生する。構造の残存耐力は低下している。	中程度から基大な損傷を受けるが、部分的な取り替えも含めて修復が可能。落下物による大きな危険はない。	多くの設備が損傷を受けるか機能停止状態となるが、専門技術者の点検整備あるいは必要に応じて修理により回復する。その間は使用できない。	収容物の多くが移動や落下、転倒により損傷を受けるが、貴重品や危険物は保護される。	損傷を受けたままの状態での建物を使用できるか否かの判断に専門家の知識を要する(黄札)。
(修復限界)							
レベル 4	人命保護 Life Safe	基大な損傷を受けるが、建物全体は自立しており、床や屋根の崩落は起きないで人命は保護される。負傷者が出る可能性がある。	基大な損傷を受け、降伏や座屈、破壊が広範囲に発生するが、鉛直荷重を支持する能力が残っている。	広範囲にわたって基大な損傷を受けるが、落下物による致命的な危険はない。避難路に障害が生じることがあるが、自力脱出あるいは救助活動は可能。	人命保護に関わる非常用システムは稼働するが、他の多くの設備は機能不全に陥る。人命にかかわるような転倒や破壊は起きない。	多くのものが基大な被害を受けるが、周辺への波及が大きい危険物は保護される。	立ち入り禁止となる(赤札)。
(安全限界)							
レベル 5	崩壊 Collapse	建物の一部あるいは全体が崩壊し、人命が直接危険にさらされる。	鉛直荷重を支持する能力をほとんど完全に失う。	広範囲に破壊や脱落が起きる。落下物による危険が大きい。避難路に障害が生じ、脱出や救助が困難になる。	ほとんどすべての設備が停止し、多くは全損となる。	多くのものが全損となる。危険物が周辺に流出拡散する危険がある。	危険物を収容せずまた無人の建物のような特殊な場合を除き社会的に許容されない。

建築特有の問題として、建築構造物の性能は構造躯体だけで担保されないという問題がある。構造躯体の損傷は、構造躯体になんらかの形態で接合あるいは設置されている非構造部材(内外装材や建具など)、設備、収容物の損傷に波及する。例えば、地震時に構造躯体に大きな変形が発生すれば、内外装材や配管、配線なども被害を受ける。したがって、表3にあるように構造躯体以外の非構造部材(内外装材や建具など)、設備、収容物も対象として性能を担保することを考えなければならない。しかし、従来、構造躯体とそれ以外の建築部分は同一の組上で性能が論じられたことがないので、クライテリアの形成には異分野間の協調関係が必要になってきている。

2.3.2 土木構造物

ここでは、設計規準との関連から土木鋼構造分野におけるクライテリア論について

論じる。設計規準を制定する主たる目的は技術等の内容を伝達することであり、設計規準を通じて技術の伝達が必要無い場合には、設計規準制定の必要性は無いといえる。また、個別性の高い特殊な構造物の場合には、設計規準による技術伝達は相応しくなく、個別の議論を委員会等を通じて行うのが一般的である。このような現状認識に立てば、設計規準で対象とするクライテリアは伝えるべき技術の成熟度と社会的・経済的環境とに大きく影響されると考えられる。今から3700年以上前に制定されたハムラビ法典が性能設計であったことを考えると、歴史を辿るまでもなく、クライテリアが時代とともに変化している様子がよく分かる。ローマ時代の構造技術者ヴィトルヴィウスは、用・強・美の三点を構造物に要求される機能と定義している。要するに、機能的で使いやすく、丈夫で長持ちし、魅力的で美しいことが構造物に期待されていたことになる。このクライテリアは現在の設計規準類でも踏襲されている。

どの時代でも安全性の確保がクライテリアであったことは間違いないが、実際クライテリアと呼べるレベルに設計法が具体化されたのは、許容応力度設計法が世の中に出てきてからである。フランス人のナヴィエが許容応力度の考え方を1826年に発表して以来、世界中で多くの構造物が効率よく造られた経緯がある。この時代にあっては構造物の安全性に関する規範だけが具体的なクライテリアであったといっても過言はでない。すべての部材において作用応力度を許容応力度以下にすることにより安全性を確保する方法は簡便で優れたクライテリアであった。安全性の中にすべての必要事項を暗に含めていたわけである。しかしながら、安全性だけを考え、使用性や美観に配慮していなかったわけではない。許容応力度設計法がクライテリアとして汎用性があったに過ぎない。

やがて時代と社会的・経済的環境が変化し、応力だけで部材の終局強度を評価すると、降伏応力を超えた領域での断面性能が正しく評価できていないとの判断のもと、限界状態設計法が欧州から提案され、他の国々もこれに追随した。その結果、安全性の照査指標は部材の終局限界状態を明確に表現できる断面力表示(モーメント、軸力、せん断力)に変更された。さらに、安全性と関係付けて終局限界状態を定義し、機能性と関連付けて使用限界状態を定義することにより、狭義の安全性のみをクライテリアとする時代からの脱皮が試みられた。その背景には、新たなクライテリアとしての経済性があったと考えられる。許容応力度設計法に見られる安全性のばらつきをなるべく揃えて、一様な安全性を確保し、経済性に配慮しようとの試みである。

しかしながら、設計規準のあるべき姿は、設計者が構造物の性能を正しく把握し、その性能を第三者に正しく伝えることができ、その適合性が正しく評価できるようにすることにある。従来技術の伝承だけでなく、技術に関する説明性が求められる時代となった現在では、専門家だけにわかる設計法では説明責任を果たせない。このような観点から提唱されたのが性能設計法である。性能設計法の利点は、機能を保持す

るために必要な性能は原則としてすべて考慮できる点にある。そこでは、安全性や使用性だけでなく、環境適合性・経済的合理性なども必要に応じて考慮することができる。土木構造物で考えられている性能のクライテリアの例を表4に示す。これらの中で最上位に置かれる性能は、広義の安全性である点は共通しているが、それ以降の優先順位は対象とする構造物によって異なっている。

表4 各規準類の構造物の要求性能の比較

設計の基本 (国土交通省) ¹⁾	ISO2394 (ISO) ²⁾	包括設計コード (土木学会) ³⁾	JSSCガイドライン (日本鋼構造協会) ⁴⁾
安全性 使用性 修復性	(基本的要求事項) 使用限界状態に関する要求 終局限界状態に関する要求 構造口バスト性の要求	安全性 使用性 環境性 施工性 経済性 など	安全性 使用性 環境適合性 施工性 維持管理性 解体再利用性
コンクリート 標準示方書 (土木学会) ⁵⁾	鋼構造性能設計 試案 (土木学会) ⁶⁾	道路橋示方書 (日本道路協会) ⁷⁾	鉄道コンクリート標準 (鉄道総合技術研究所) ⁸⁾
安全性 使用性 耐震性 耐久性	安全性 使用性 耐久性 耐震性 社会・環境適合性 施工性 初期健全性 維持管理性 解体再利用性	(設計の基本理念) 使用目的との適合性 構造物の安全性 耐久性 施工品質の確保 維持管理の容易さ 環境との調和 経済性	安全性 使用性 復旧性

さらに、これらのクライテリアのうち、従来型の照査式の形でクライテリアが与えられるものは、土木構造物に関する限り、安全性、使用性、耐久性がほとんどである。

現在、土木分野で課題となっている点は、性能を具体的に照査できる設計規準の項目がどの程度あるかという点と、性能照査指標として適切なものが設計レベルで常に決められるかという点である。性能照査指標については、作用が物理的作用か化学的作用か生物的作用かで区別し、それらに合わせて適切な物理量、化学量、生物量をクライテリアの構築に用いるのが良いと考えられている。例えば、耐久性に関して時間

がクライテリアの表現として適切であれば、物理量として時間を用いて照査式を構築すればよいことになる。

従来の設計法では許容応力度設計法にせよ、性能設計法にせよ、応答値が限界値以下になることを確認する作業が照査であった。しかしながら、不等式を満たせばどんなに応答値と限界値との間に差異があってもよいということにはならない。つまり、安全性と経済性、耐震性とリスクなど最適化を図らなければならない問題が生じてくる。これについては合意形成による解決方法が土木分野では一般的である。設計規準の説明性を向上させる上では、この最適性というクライテリアは非常に重要であり、技術の成熟度や社会・経済環境に依存するクライテリアであるように思われる。このクライテリアの妥当性は工学倫理や技術者倫理の範疇であるかもしれない。多くのクライテリアを持つことが技術の進歩であり、我が国の国際戦略として、あるいはアジア地域の地域戦略として、クライテリアに流動性と多様性を持たせることは必要不可欠であると考えられる。

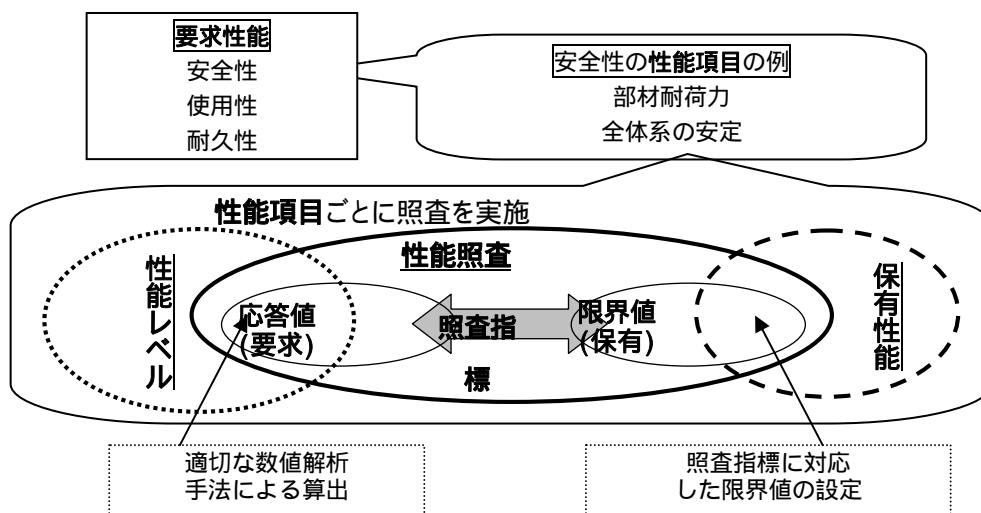


図1 性能照査型設計法の概念図

2.3.3 航空機

航空機構造のクライテリアの根本にあるのは、飛行で破壊しない限り「軽く」することである。破壊しない限りというのは安全な限りと言うこともできる。航空機はひたすらこれを追求する。なぜなら、飛行が可能であるためにはすでに軽量でなければならないが、それから更に構造重量が軽減されると、商いで言えば、「もうけ」に直接つながるペイロードと称する有償搭載量の増加に結びつく。すなわち、旅客輸送において、より多くの乗客をのせることができる。この明確な指標のもとに最小限必要な強度を保つための極限的な設計がなされる。

では、最小限必要な強度をどのように考えているか。これは、今日までの経験の蓄積を基に、国土交通省が監修する耐空性審査要領において規定されている。この規定は、米国のFAR (Federal Aviation Regulation) とほぼ共通である。そのなかでは航空機を破壊に導く外力として、大気乱流による突風荷重と、操縦運動によって引き起こされる運動荷重が規定される。

突風荷重は自然現象からくる荷重であり、建造物に対する地震荷重に相当するといえよう。すなわち、それがどれ程の大きさになるかは神のみぞ知る。とはいえ、何がしかの想定で荷重設定をしなければならない。幸い、これまでの経験や観測を踏まえた現存の算定は合理的レベルにあり、これを見直す議論は今のところ皆無である。将来的には、突風の予知能力が向上したり、能動制御により負荷が確実に軽減できたりすれば、変わる可能性がないとはいえない。突風の予知は空間的な検知であるから、地震予測と異なり、航路前方にある風を「見る」能力が問われる。

一方、運動荷重は、飛行機をどう飛ばすかに依存する荷重である。自動車では搭載するエンジンの能力により速度に限りができるが、航空機はその推進器の能力の限界にかかわらず、重力を利用した降下により速度はいくらでも速くなる。速度が速くなると操舵面に発生する空気力も増し、急激な操舵は機体全体に大きな荷重を生じさせる。この荷重範囲、すなわち運動範囲は、航空機の使用目的別に定められている。

これらの想定される外荷重を制限荷重と呼んでいる。航空機の構造設計におけるクライテリアは、この制限荷重内で有害な塑性変形を生じさせないこととなっている。また、その50%増の荷重を終極荷重とし、終極荷重までは破壊しないことを要求する。したがって、安全率という表現では、航空機の標準的な安全率は1.5である。

航空機構造設計の歴史において、そのクライテリアに落とし穴があった。それは疲労破壊である。初のジェット旅客機としてデビューした英国のコメット機は1952年の就航開始から2年後、立て続けに2件のなぞの空中分解を起こした。この事故に対して英国航空研究所の威信をかけた原因調査が行われ、胴体上部の自動方向探知器の切り欠き窓に発生した亀裂が原因であることがつきとめられた。ここで、ジェット化で高高度を飛行するために生じる、胴体の与圧による繰り返し荷重の経験が積まれた。この後、航空機の開発に際しては、疲労試験用に00 (ゼロゼロ) 号機による全機疲労試験が義務付けられた。

この疲労強度のクライテリアに関しては、その後、変遷がある。これを簡単に言うと、まず強度を十分にとって疲労破壊を起こさないようにするセーフライフ設計と呼ばれる安全寿命設計がなされた。しかし、冒頭で述べたような更なる構造重量の軽減と安全性が追及され、フェールセーフ設計が取り入れられた。これは、分割構造によってクラックの進展を防いだり、構造に冗長性をもたせたりして、局所的に壊れても致命的な破壊にならないようにするクライテリアである。そして更に、1980年初頭よ

り、疲労破壊の芽となる亀裂は始めから存在すると想定した、通称ダメトレと呼ばれる損傷許容設計法が用いられるようになった。これは、亀裂長さの発見確率を踏まえた、検査法と抱き合わせの設計法である。

このように、航空機の構造に対するクライテリアに関しては経験が積み重ねられ、ほぼ成熟したレベルとなってきた。しかし、ここにおいて、現在、日米共同開発中のドリームライナー（B787）にみられるように、複合材料が主構造へ多用されるといふ新たな局面が現れた。炭素繊維を主とした複合材料は、疲労や破壊のメカニズムが金属材料と全く異なるし、その予測も難しい。外部衝撃後に、繊維部とプラスチック部や繊維方向が異なる層間で剥離が生ずると、その圧縮強度が著しく低下する。また、外部衝撃によって構造内部が損傷しても外見上痕跡が残らず、損傷を発見しにくい。このため、現在、発見できない損傷は、設計寿命の間、放置しておいても問題はないNo-Damage Growthという考え方で設計する。不確定性のために安全率に乗ずる係数の値を大きくとらざるを得ない。したがって、非常に厚肉の部材を用いることとなり複合材料の特徴を活かし切れしていない。この複合材料に対するクライテリアは、そのライフサイクルの問題も含めて未知の部分がある。

複合材料構造に関しては、内部や外部にセンサを組み込み、材料の状態を常時、または、地上点検時に調べるヘルスマonitoring技術が研究されている。このような技術を導入することで、安全率に乗ずる係数を小さくすることができ、複合材料の特徴を活かすことができる。また、複合材料技術やヘルスマonitoringに用いるセンサ技術は、我が国が世界をリードする立場にあり、今後、航空機の設計基準が変わる場合には、我が国の技術者が貢献する可能性が十分にあるといえる。

また、少し視点の変わったところで、9月11日テロ以降の社会情勢が航空機のクライテリアに影響を与えたところがある。それは、ハイジャック対策のための操縦席への扉強度の強化である。これは構造工学の見地からは、なくて済ませたい有難くない用件である。その他、構造工学と若干質を異にするが、航空機の運航に絡むエンジン排気や騒音、あるいは超音速飛行の衝撃波に関するクライテリアや運航システム全体に関わるセキュリティ問題などがクライテリア論に関連すると思われる。

2.3.4 船舶海洋構造物

(1) 船舶のクライテリアの現状

船舶は海上物流を担う輸送機器であり、設計のクライテリアとしては、航海中に遭遇する海象条件下で十分に安全であることが第一義的に求められてきた。歴史的には保険業界から認定された公正な第三者である船級協会の検査を受け、船級および設備の登録が行われるという手順で安全性が確保されてきた。一方、国際航海に従事する船舶は、世界中を航行することから、船籍（国籍）が異なることによって安全性レベ

ルの異なる船舶が海洋中や港湾内において混在することはさまざまな不都合を生み出す。1912年のタイタニック号の事故を契機に、SOLAS条約（Safety of Life at Sea）をはじめとして、多くの条約が締結され、安全性に関しては国際的に統一した基準が制定されている。SOLAS条約では、船舶の密区画、隔壁、復原性について規定されている。また、過去の事故などの経験から損傷時の復原性についても規定されている。構造強度に関しても、各国政府は国内規則を制定して自国の船舶の安全性を確保している。通常、船級協会が政府に代わって国際条約及び国内規則に基づいて検査を行い、証書を与える権限を与えられている。我が国においては、船舶安全法が制定されこれに基づいて日本海事協会が検査を行い安全性が確保されている。

動揺や振動、騒音については、規則では船員の健康を害しないことが求められているが、それ以上の性能に関して規制する規則は特に定められていない。多くの場合、造船所と船主の協議により、仕様書に適用される基準が盛り込まれる形で定められている。振動に関してはISO6954（2000）、騒音に関してはIMOの決議に基づくことが多い。

船舶は、近年の大型化により、船体や上部構造物が相対的に柔軟になってきており、機関とプロペラの発生する起振力は、船体や上部構造の局所構造に振動を生じやすくなっている。機関とプロペラの発生する起振力の周波数成分は、船速とともに変化するため、船舶のあらゆる使用条件を通じて共振を完全に回避することは難しい。このため、船体の設計では、振動解析を行い共振回避の設計を基本としているが、避けることの出来ない共振に関しては制振対策を取る。また、機関の振動が船体に伝わることを遮断するための防振（免振）対策も取っている。

客船に関しては、静粛性が商品価値を決める重要な要素であり、振動・騒音の低減は最重要技術課題である。低振動・低騒音化へ向けては低起振力プロペラの開発や設計段階における最適な船体防振設計・騒音予測がおこなわれる。また、一般人が乗船することから動揺についても低減する必要があり、フィンスタビライザーが用いられる。

船舶で美しさを求められるのは唯一客船であるが、旅客輸送に供される輸送機器としての性能が優先されるため、推進性能、強度、動揺性能などが優先され、これらの性能を阻害しない形で、上部構造物の設計に意匠の観点から設計が行われる。

船舶の事故では、場合によっては著しく環境に影響を及ぼす場合がある。有名な事故としては1989年3月にアラスカ湾で発生したエクソン・バルディス号の事故があり、これを契機として1992年に海洋汚染防止条約（MARPOL条約）が改正され、原油タンカーの船殻の二重化が義務付けられている。

(2) 海洋構造物のクライテリアの現状

海洋構造物は主として海洋石油・天然ガスの開発・生産に用いられる構造物である。このため、一定期間一定の海域に止まって作業を行うことから、その海域を管轄する沿岸国の規制を受ける。また、船舶と同じく海域から海域へ移動するため、異なった安全レベルにある構造物が洋上に混在することは、海上における安全性を確保する観点から好ましくない。そこで、船舶と同じく旗国主義をとり、船籍を置く国の規制の下に置かれるとともに、旗国は国際条約によって、管轄する構造物が一定の水準を満たすようにすることが求められている。これによって、海上において一定のレベルの安全性が確保されるように図られている。機能性に関しては、開発・生産に用いられる機器が正しく機能するために、動揺、振動が制限され、また、船舶と同様に居住性の観点から動揺、振動、騒音に関する制限が定められる。一方、実用性を最優先とする用途に供されるため、美しさの観点からの設計は通常求められない。

海洋構造物の設計法に大きく影響した事故として、1980年に北海で発生したアレキサンダーキーランド号の事故がある。アレキサンダーキーランド号は、浮力体を多数のブレースで支持する構造形式を取っていたが、ブレースに設置したハイドロフォン取り付け孔回りの溶接止端部から発生した疲労亀裂が進展し、ブレースの破断に至り、荷重再配分により荷重が増加したその他のブレースが荒天下で次々と破断し、荒天が収まる前に浮力体が脱落、転覆するという経過をたどったものである。また、1988年に英国北海油田で発生したジャケット、パイパーアルファの爆発事故では、処理施設からの漏逸した可燃性ガスに引火し爆発したものであった。

アレキサンダーキーランド号の事故からは、半潜水式の構造形式としてブレースを多用することを避け、単純な構造形式を採用するようになった。また、一部損傷した状態でも十分な余剰強度を有すること、さらに、水密区画が浸水した場合にも、十分な余剰浮力と復原性を有することが義務付けられるようになった。また、パイパーアルファの事故に関しては、Cullen卿による事故調査と勧告が行われ、海洋における安全確保が革新的に進展した。英国においてHSE(Health and Safety Executive)が創設され海洋における安全を監督することとなった。さらに、目標設定型規則の制定に至った。これは、従来の仕様を定めた処方せん型の規則体系ではなく、安全に関する目標設定と、適切な手法により目標を達成することを求める目標設定型あるいは性能規定型の柔軟な規則体系であり、安全規則に関する大きな変革となった。さらに、海洋構造物の設計や操業が安全であることを建造する側が立証することが義務付けられるように方向転換が行われた。

海洋においては、事故を契機として損傷時の剰余強度、安定性に関する規則が整備され、また、防火・防災、避難などの安全性に関する規定が仕様に関するものから、性能に関するものに大きく変更される動きの契機となっている。

(3) クライテリアの動向

現在の船舶設計は低船価または初期投資最小の考え方が主流となっている。これは我が国の船主の多くが、船を新造した後10年程度で売船することに起因しているが、これを改め、生涯価値(LCV: Life Cycle Value)を最大にする船の開発を行い、船主と荷主の運航経済性だけでなく、環境負荷、安全性等の面でも価値の高い船舶を提供することが重要と考えられ、検討が進められている。

高価格のLNG(液化天然ガス)船では、有限要素法に基づく全船解析モデルによる波浪中応答解析と部分詳細解析モデルによる数千箇所局部応力計算を実施し、これらに基づき40年の疲労寿命の保証を行い、さらにホーム・ドクター方式による長期補修を行い、信頼性の向上を図っている例がある。

船舶の寿命に関しては、従来の規則には明示的なものは無かったが、ナホトカ号、エリカ号、プレスティッジ号などの老朽化したタンカーやばら積み貨物船による海難事故で、多くの人命喪失と海洋環境汚染を引き起こしたことから、船舶の寿命を勘案した目標的構造基準(Goal based new ship construction standards)の策定も検討されている。

船舶海洋構造物に起因する環境問題については強い関心が持たれており、順次規則の対象となりつつある。船舶から排出されるオゾン層破壊物質、NO_x、SO_xなど大気汚染の排出についても、従来は公海上においては規制が無かったが、国際条約により規制されようとしている。また、船舶のバラスト水には様々な生物が混入しているが、これらが船舶の移動に伴い、本来の生息地を大きく離れた海域に移動し、海洋環境に悪影響を与える問題が生じており、バラスト水の排出についても規制が行われようとしている。

2.4 クライテリア論の課題

クライテリア論を進めるに当たって大切なことは、先ず、構造物の構築行為における最上位目標の再確認をすることである。すなわち、構造技術者が果たすべき目標として、国民の生命・健康を守る、国民の財産を守る、次世代へ健全な遺産(繁栄の源泉)を残すといったことがあり、もう一度原点に戻って、これらの共通認識を持つ必要がある。これが無ければ、多様化する価値の衝突を解決できず、クライテリアの技術面だけの皮相な議論に終わってしまい、技術者は倫理的混乱に身を投じるはめになる。ここで、さらに大切と思われることは、長期的視点に立ち、地球環境に対する意識を組み込むことである。例えば、土木構造物や船舶及び海洋構造物の寿命は長く、それだけ自然環境に与える影響が大きくなりうることを心すべきであろう。

次に検討すべきことは、上記の最上位目標を実現する構造工学的要求性能を整理することである。社会が求める構造物に対する要求が構造物の性能と表裏一体であること

は言うまでもない。安全性、耐久性、機能性、経済性、環境性、修復性、リサイクル性など多様な要求性能を、社会の視点に立って、指針として与えることができるようにする。

その次に行うべきことは、上記の性能に対するクライテリアの現状を整理することである。性能を評価する技術が確立されているものとそうでないものがある。安全性、耐久性などの古くからの性能については技術基盤がしっかりしているが、成長の時代から持続の時代に変化してきている現代に新しく生まれた要求性能、例えば、環境性などに対しては、技術基盤が薄弱である。このとき、性能はいかなる工学量で表示することが最適であるのか、また、それは計量可能であるのか、さらには合否の判定基準すなわちクライテリアが従来型の「能力 負荷」の形でよいのかを見定める。

クライテリア論が取り組まなければならない最後の難題は、多様化する価値の対立をどのように解決するかという、クライテリアの相反問題である。環境性クライテリアを満たし、経済性クライテリアを満たさない場合にどのように解決するか、クライテリアの優先順位はどうあるべきか、合意形成はどのようにして達成できるかという困難な問題に直面するであろう。このとき、構造工学に携わる専門家は、構造工学が果たすべき基本的使命に立ち返って指針を与えることが求められる。

2.5 結び

構造工学は既に成熟した学術分野であるという意見が多いが、これは構造物に求められる性能すなわち価値を旧来の価値に固定化した場合の話であって、社会が求める多様な価値を実現するという使命に照らすと、まだまだ未熟な学術分野であると認識する必要がある。その突破口を開くための足掛かりとしてクライテリア論を進める必要がある。

第3章 コンピューター依存社会の台頭と課題

前章で述べたクライテリアを満足する物造りは、計算機汎用ソフトウェアの支援なくしては成立しない。特に構造物の解析においては、ブラックボックス化した汎用ソフトウェアが多用されており、学術原理に対する理解無くしても構造物解析が出来る、いわゆる、科学と無縁の世界が台頭しつつある。このような状況は、汎用ソフトウェアの中身である学術原理の理解不足や誤った使い方をすると、前章で述べたクライテリアを満足できないばかりか、重大な事故に繋がる。ブラックボックス化した汎用ソフトウェアを有効利用し、その恩恵を得るためには、開発された歴史とそれに含まれる学術原理を理解しなければいけない。本章では、構造物設計に不可欠なものと汎用ソフトウェアを位置づけ、その歴史、現状及び正しく使うために期待される教育等を論じる。

3.1 数値解析法の進歩

ニュートン (Isac Newton 1642-1727)、オイラー (Leonhaldt Euler 1707-1783)、ラグランジェ (Joseph Lagrange 1736-1813)ら天才数学者により、構造物の静的あるいは動的な釣り合い式、運動方程式が導かれ、ハミルトン (Rowan William Hamilton 1805-1855)により、エネルギー論に基づく変分原理により体系化されたことはよく知られている。これらいわゆる古典力学における数学的な表現は、1850年代までには確立されており、今我々が用いている力学や構造解析の基礎となっている。1945年のモックリーとエッカードによる電子計算機の発明以来の急速な計算機の発達により、今日、これらの基礎式が数値的に解けるようになったといえよう。これらある境界条件の下で微分方程式を解く(いわゆる境界値問題を解く)ために、いろいろな手法が開発されてきた。差分法による解法は、解析対象空間をメッシュ分割しそれらの各節点の値を境界条件を満足するように微分方程式を引き算の形として逐一計算により近似解求めることになるが、安定したより精度の高い解を得るための研究も多くなされて来たことは周知のことである。この差分法解析は、数学者によって発展を遂げたのに対し、有限要素解析法は、航空工学の研究者により発展を遂げた。

3.2 有限要素解析汎用ソフトウェア

有限要素法は、1945年のエッカードとモックリーによる電子計算機の発明とそれ以降のめざましい精度向上により一躍多用されることになるが、1956年にターナー (M.Turner)、クラフ (R.W.Clough)、マーチン (H.Martin)、トップ (L.Toop)の論文に始まり、1960年の、アーグリス (J.H.Argyris)とケスレー (S.Kesley)による、最初に連続な構造体を離散化し、行列表現する論文を発表した。そして今日の有限要素

法の原型は、ツェンケビッチ (O.C.Zienkiewicz) によって完成された。この有限要素法の原点は、変分原理にさかのぼる。今日よく使われる有限要素法は大きく、変分有限要素法と重み付き残差有限要素法に大別されるものの、基本的には両者ともにこの変分原理に立脚している。つまり、有限要素法は、この変分原理におけるオイラーの式に対応する微分方程式を、逆に積分系にし(変分原理の逆をたどる様なものであるが)、それをさらに要素ごとその微分方程式を適用することで、各要素を定義づける接点や要素内部の変数を、境界条件、拘束条件を満足するように高次代数連立方程式を解くことで近似解を求めるという過程をとる。その意味で、計算機の発達は、有限要素解析の精度向上には欠かせない要素といえる。つまり、ハードウェアとしての計算機の性能向上を得て、現在では構造物の汎用設計ツールとして広く一般的に使用されているといえる。現在よく知られている市販の構造解析用汎用ソフトウェアとしては、ABACUS、NASTRAN、ANSYS、ADINA、DIANAなどがある。

有限要素解析手法は、現在いろいろな構造物の力学解析に多く使われており、その場合に、汎用ソフトウェアを用いていることが多い。極端な言い方をすれば、構造解析を行うために基礎となる微分方程式の物理的な意味や、その誘導過程、用いている有限要素法についての十分な知識がなくても「らしき解」が得られるわけであるが、それだけに、便利ではあるが、反面大きなリスクを負うことにもなる。したがって、ここでは構造解析のための有限要素解析汎用ソフトウェア利用についての功罪について述べてみたい。

3.3 汎用ソフトウェア利用の功罪

まず、その“功”の方については、社会の受けている恩恵といえる。つまり構造物を設計するときの、構造物を自由に象れるという意味での、構造形態の自由度であり、適当に構造物をメッシュに切ること、構造解析手法の知識がなくとも、処理できるという点にある。さらに、構造物の継ぎ手など、ごく局所的な力学現象・特性も、精緻な解析計算により、知ることが可能である。この能力のおかげで、例えば、航空機の外板では芸術的といえるほど無駄を取り除いた板厚分布が実現している。また、線形構造解析に限れば、入力データさえ間違いがなければ、たとえ、構造解析の知識が十分でなくとも、かなり正しい解が得られることや、広い汎用性があるという点が大きな功としてあげられる。一方、力学現象のマクロモデルの構築や、出来上がったマクロモデルの妥当性を検証することも可能となるなど多くの利点がある。さらに、流体解析などで、Navier-Stokes方程式を離散化された空間において数値解析されることも多い。このとき適当なメッシュを切れば、局所的な流れの様子も解析でき、実験などではきわめて難しい場所での、その様子を知ることができるなどの利点もある。ただし、得られた精度は、用いられたメッシュや、解析プログラム、乱流のモデ

ル化などにより決まるなど十分に留意しなければならない。

その反面、汎用ソフトウェアの“罪”いわゆる“負”の面にも注意しなければならない。一言で言えば、汎用ソフトウェアを用いた場合、解析内容を考える過程がチェックできないという点である。いわゆるブラックボックスになっている。このため、入力データを一桁間違っても、解は得られ、名だたるソフトウェアのもとで得られた、また、計算や解析において、今や人間より遙かに優れていると信じられている、計算機による結果であることだけが理由で、その解が信用されてしまう点である。また、その汎用ソフトウェアが適応可能な対象を超えて使われも、それらしき解を得るという点である。実はこれが大変なくせ者で、正解ではないが、それらしく見える解こそが最も気をつけねばならない。

汎用ソフトウェア利用の功罪を検討するに当たって、実務レベルでの意見も収集した。その中で狩野正人氏（JIPテクノサイエンス株）は、有限要素解析汎用ソフトウェアによる解の妥当性を考える上で、次の4つの世界を念頭におくことを指摘している。それは、1．「現実の世界」、2．「理論の世界」、3．「離散化された理論の世界」、4．「プログラムの世界」であり、実際に現象を明らかにするためには、これらの世界を、数字の順にランクダウンしていくことになる。ここで汎用ソフトウェアは、2、3、4の世界を扱うものであるが、1と2では、実際に生じる実現象を理論により理想化していることになり、2で理想化されたものは多くの場合、偏微分方程式をある境界条件で解を求めるといふようになりかなり複雑な場合が多い。それを解くために、3の世界が必要となり、またそのためにプログラムが必要となる。さらに同氏は、その間に入る誤差について次のように述べている。これらの各世界にブレークダウンするたびにその都度ある誤差が生まれる。逆にこれらの各プロセスに生じる誤差がたまたまキャンセルされ、最終的得られた解が結果的に誤差の少ないものになっているかもしれない。ところが、他の場合にはこのような誤差のキャンセルが起こらず、最終的な解に大きな誤差を含む場合も否定できないであろう。さらに、拘束条件や境界条件の与え方にも十分に注意が必要であることを指摘している。要は、汎用ソフトウェアを用いる場合、解析対象としている問題に応じて、これら各種の誤差がどのように処理されているのかを十分に認識することが必要であるにもかかわらず、それが十分になされていないことによる精度に対する評価の難しさである。その一例として、コンクリート構造物の解析の場合に、汎用ソフトウェアに添付されている材料サブルーチン（例えば、材料パネルモデルの剛性、降伏回転角、降伏局面など）により結果が大きく左右される。この材料サブルーチンは、あくまで解析のための約束事であって、現実の応答との一致等は約束されていないと考えた方がよい。また、性能設計で重要となる材料応答（材料の損傷評価が性能設計ではキー要素の一つ）

まで予測できるのかという問題もある。つまり、構造工学が取り扱う問題はそのほとんどがリアルな世界の現象であり、コンピューターソフトウェアが与える解とは常にギャップがあると考えるのが自然である。（つまり、先に述べた狩野氏の言う4つの世界の間には存在する誤差が存在することに対応する。）構造解析における汎用プログラムの利用について、注意を払わなければならない点を要約すれば、次のようにまとめられる。

- 1) 実験は適切に行われれば、常に真実を語るのに対し、理論やモデルはある種仮定に基づいているので、真実とは限らない。
- 2) モデル化を行う際には、常に実際に生じている物理現象に立ち返らなければならない。モデルの美しさに酔いしれ、モデルのためのモデルを追求してはいけない。
- 3) 解析（静力学問題の場合）で得られた結果が完全に正しいのは、力の一致、変形の一致、歪みの一致が得られた場合のみである。
- 4) あらゆるモデルには、適用範囲があり、モデルの出生をよく理解しておく必要がある。間違って用いることは、無知のなせる業で工学における倫理観欠如に繋がる。

さらに、コンピューターソフトウェアを駆使して得られた解は、現象そのものが複雑な問題を解析対象とすることが多いことと相まって、その信頼性や精度の照査がむづかしくなっている。つまり、極端な言い方をすれば、対象としている微分方程式の意味するところすら知らなくとも、マニュアルに従ってデータを入力すれば、構造物の応力なり、歪みあるいは変形、振動モード、振動数などが得られる。それが正しいかどうかの判断もできないまま、それが絶対に正しい解であると信じてしまう。つまり、構造解析において、考える必要はないのである。これは大変危険であり、コンピューターは皮肉にも人をだめにしてしまうおそれすらある。恐ろしいことである。もちろん構造解析を行う多く人は、ある程度は構造解析に必要な知識は持ち合わせているであろうが、構造解析、解析用にモデル化されたり参加モデル、そしてそれらの離散的解法など具体的な中身を果たしてどこまで正しく理解しているかである。ところが、上にも述べたように、多くの市販されている汎用ソフトウェアは、中身がのぞけないようなブラックボックスになっており、このため、構造物をどのように改良すればより合理的なものになるかという新しい構造物の創成というアプローチに対しては、汎用ソフトウェアを利用するだけではほとんど役に立たない。一方、実験による検証や閉じた解が求められる場合には、有限要素解析により得られた解と比較することで、解析に用いられた汎用ソフトウェアの信頼性、精度は、ある程度は保証されよう。しかしながら、実験による検証が困難で、また閉じた形での解析解が求められないような複雑な構造系や局所的な場所などの場合ほど、有限要素解析の利用

価値が高まる訳であるが、そのようなケースこそ得られた解の精度を保証することは極めて難しい。ここに大きなジレンマがあるといえる。市販されている汎用ソフトウェアも、それぞれ得意の分野があるはずであり、ユーザーとしては、それらを正しく判別して使い分けなければならないといったやっかいな問題が残されている。

3.4 力学的センスの醸成

上に述べたような、有限要素解析汎用ソフトウェアによる構造解析の負の面をできるだけ低減するためには、やはり構造工学・構造力学に関する教育が重要である。構造工学や橋梁工学等の基礎となる構造力学では「計算」・「経験」・「カン」が重要である。中でも、一見学問とは関係ないような「カン」の部分が重要であると思われる。敢えて「カン」の文字をカタカナにしているのは訳がある。通常「カン」といえば「勘」の字を連想するが、「感」の文字がよいと考えている。感性とか直感力を意味する「感」である。構造力学の分野ではこの「感」のことを「力学的センス」と呼ぶことが多い。構造物の設計・架設・維持管理・補修などあらゆる段階における判断が即座に「力学的センス」に基づいてなされ、判断が常に最善であればよいはずである。実際にはすぐにそのようなレベルに到達することはない。そこに至るまでには、基礎的な学問の修得が前提になり、最小限の経験が必要となる。力学的センスの醸成に繋がるような経験をしなければならない。これとても高等教育機関だけでは難しい。比較的簡単にできる経験としては、よい経験に繋がるような例題について机上で演習することである。各自が自力で計算を正しく行い、妥当な結果を得て、適切に評価されることがよい経験に繋がり、力学的センスの醸成に結びつくのではないであろうか。このような教育方法は、手計算を前提とした時代から受けつがれて来た。その効果は必ずしも期待どおりではないものの、多くの技術者がその成果を認めている。問題は「計算」の部分をそのまま「コンピューターを利用した計算」に置き換えても「力学的センス」が醸成できるかどうかである。コンピューターの利用が不可欠である現在では、「力学的センス」を付けさせるための力学教育は従来とは異なるものになるであろう。

3.5 将来への期待

コンピューターの著しい発展、汎用ソフトウェアの普及は科学技術の発展に大きな貢献をしているのは紛れもない事実であるが、留意すべきは、人間の思考によって生み出されたコンピューターソフトウェアが、人間の思考の一部を奪ってしまうということである。しかし、人間にはあくまで未知の世界に挑むDNAが組み込まれており、もし、汎用ソフトウェアが人間の思考のある部分を奪ったとしても、正しい利用を可能とする基礎学力の確保を疎かにしなければ、コンピューターの利用は代償作用を

生み、人類にとって更なる未知に挑む余裕時間を得る。この利点を大いに活用すべきである。

別の言い方をすれば、人間の本来になうべき役割である「発想」に、人間が集中できることになる。その意味でも、汎用ソフトウェアを正しく有効利用し、是非とも科学・技術の発展につなげたいと考える。

第4章 まとめ（豊かな社会へ）

構造工学は、社会への貢献の具体的な方策あるいは形態として、新たな学術会議の体系において、社会を構成していく計画及び施策に対し、広く構造物に纏わる包括的見地から、人間が与えられた環境に対して自分たち自身のために構造物を通して関与する方向が、誤ったものにならぬよう助言を発していく役割を担っている。すなわち、構造工学は、人間社会を安心かつ安全を伴ったより豊かなものにするためのものでなければならず、現状は必ずしも満足すべき状況にあるとはいえない。そこで、本報告書では、総合の学問領域である構造工学が直面する課題を、建築構造物、土木構造物、航空機及び船舶海洋構造物の各分野において検討し、物造りにおける「クライテリア」と「コンピューター依存社会の台頭」の二つを取り上げ、現状分析と将来への展望を取りまとめた。詳しい内容は、第3章までに譲るとして、ここでは、これら二つを総括しまとめとしたい。

クライテリア：物造りでは、工学の範疇に入らない種々の周辺条件や相容れないものも含む複数の条件下での意思決定が求められる。いかにしてこの問題を解決していくのが構造工学に与えられた課題といえよう。すなわち、物造りの各種段階における判断や決定を下す際に基づくべきルールまたは基準、つまり「クライテリア」が極めて重要となる。現代社会や人々が求めるクライテリアを明確にし、これを構造工学に取り入れて初めて、構造工学に課せられた社会的責任が果たせるもので、従来 of 工学のみに偏ったものでなく、構造工学を、総合化された物造りの体系としなければいけない。また、このクライテリア論の更なる展開が、新しい価値を生み出す研究分野の開拓、社会に開かれた構造工学、若手研究者の育成、新しい構造物の創造等につながるものと考えられる。

コンピューター依存社会：計算機の進歩に伴って、構造工学の分野でも、既製の汎用ソフトウェアが広く用いられており、これなしでは物造りが出来ない状況にある。その使われている状況は、使用者が中身を理解出来ないブラックボックスと化しているが、構造物が多様化、複雑化する社会では避けられない状況である一方、間違いも多く発生する。すなわち汎用ソフトウェアの位置付けやそれに含まれる基礎学術情報を理解する為の、新たな教育体系が求められる。また、人間の思考によって生み出されたコンピューターが、人間の思考を奪いかねない。しかし、もし汎用ソフトウェアが人類の思考のある部分を奪ったとしても、正しい利用を可能とする基礎学力の確保を疎かにしなければ、それは代償作用を生み、人類にとってさらなる未知に挑む余裕時間を得ることに繋がる。汎用ソフトウェアを正しく有効利用し、是非とも科学・技術の発展につなげたい。

参考文献

- 1) 国土交通省 土木・建築にかかる設計の基本検討委員会：「土木・建築にかかる設計の基本」、2002.10.
- 2) ISO: ISO2394 “General Principles on Reliability for Structures”、1998.3
- 3) 土木学会設計コード策定基礎調査委員会：包括設計コード 第1版 PLATFORM ver.1、2003.3.
- 4) 日本鋼構造協会土木鋼構造の性能設計に関する調査研究小委員会：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン、JSSCテクニカルレポート、2001.10.
- 5) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]、2002.7.
- 6) 土木学会 鋼構造委員会 鋼構造物の性能照査型設計法に関する調査特別小委員会：鋼構造物の性能照査型設計体系の構築に向けて、2003.4.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（II 鋼橋編）、2002.3.
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）、2004.4.