

応用力学の研究と Implementation

Research and Implementation of Applied Mechanics in Civil Engineering

東原紘道*

Hiromichi HIGASHIHARA

*フェロー会員 工博 東京大学 地震研究所 教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生1丁目1番1号)

Desirable ways for improvement of research and implementation of applied mechanics in Japanese civil engineering are identified and discussed. Current Japanese society is demanding revision of styles of conventional disciplines toward enhancement of productivity. We first review the sustainability condition of researchers and engineers. Next we generalize the basic concepts of applied mechanics so as to treat a wider range of problems. We finally apply our method to safety problems and, specifically, to earthquake engineering and nuclear cycle management.

Key Words : *extension of applied mechanics, implementation technology, productivity enhancement of research, risk management, sustainable research activity,*

1. 持続可能な研究のモデル

1.1 はじめに

土木工学のリストラと大学のリストラが同時並行的に進んでいる。いずれもスリム化を基調とするものである。前者は公共工事の縮小を反映したものであり、後者は少子化を反映している。もちろん少子化が根源的な現象で、間接的には前者にも大きな影響を与えている。

右肩上がりの経済から低成長経済に移行するので、サバイバルゲームは避けられない。応用力学の研究者もこのサバイバルゲームの中に投げ出される。

この背景を受けて、現行の改革の一つの基本は競争原理の導入にある。競争が入れば、脱落者や犠牲者が発生するのは必至である。パフォーマンスに応じた評価を受け、より厳しい条件に追い込まれる人や機関が出て来ることは避けられない。研究者としてはこのスクリーニング過程を前向きに乗り切る工夫をすることが必要である。

ただし、このシステム転換は、ゼロサム転換ではない。実施 (implementation) をうまくできれば、従来の非効率な部分を取り除かれることにより、実質的なパイが大きくなることは可能である。ただしそのためには問題の context を理解することが不可欠である。

context はリスクマネジメントで重要な概念であるが、要は木を見て森を見ない弊に陥ることのないよう、それを取り巻く全体状況を把握せよということであるから、およそ人間の行動をうまく講じるためには当たり前のことである。(その当たり前のことをあえて強調するのは、それが必ずしも当たり前でないことが多いからである。全体性の回復については、“越境する知”という言葉は流行にもなっているほどである。)

システム転換にあるということは、選択の余地があるということでもある。研究者であれば、まずテーマの選択がある。これはコンテンツの問題である。もう一つは研究のための環境整備である。これは logistics の問題である。discipline (例えば応用力学) の innovation (技術革新) には、この2面からの検討が必要である。

特に応用力学の範囲は広い。土木工学の範囲も広い。いずれも学際傾向の強い discipline である。それだけ選択の幅が広くチャンスが多様である。これを活用しなくてはならない。特に日本人の生活水準 (quality of life) はまだまだ低いし、それを支える社会資本は貧しい。社会基盤工学に対するニーズの存在ははっきりしているのである。

1.2 implementation とは何か

何らかの事業・企画を実施することを implement と言う。事業が大規模になると、実施体制も複雑になって、実施機関 implementer 以外に監視機関 overseer や規制機関 regulator が設けられる。公共事業の場合、例えば高速道路建設では、国 (国交省) は regulator で、道路公団が implementer である。もちろん現実の行政組織の制度および運用には、多種多様なバリエーションがある。

implementation は implement の内容であるから、事業を最終まで達成するために必要なあらゆる要素を含む。(さもないと事業は完成しない。) これは総合的とか実施という日本語では表現しきれないので、implementation と呼ぶことにする。

防災の implementation は、科学技術振興調整費研究 EqTAP (Development of Earthquake and Tsunami Disaster Mitigation Technologies and Their Integra-

tion For the Asia-Pacific Region)の中で、研究代表の亀田弘行先生が主唱されたものである¹⁾。直接にはEqTAPの個々の防災研究に、最終の適用までの目配りが届いていないことを戒められたものであるが、上述のように、現在の我が国の科学技術の欠点を衝いた、文明批判としての射程をもっている。

現在最終年度のとりまとめに入っているEqTAPは、次のようなキーワードをもっている²⁾：

- (1) regional characteristics
- (2) risk management
- (3) sustainability
- (4) implementation
- (5) interdisciplinarity
- (6) innovativeness

このうち、アジアの防災という特性に対応した(1)を除く事項は、EqTAPに限らず、土木工学にも応用力学にも適用する通則になっている。

risk managementは、riskの検出・同定、分析、評価(優先順位付け)、処理などから成るサイクルである。EqTAPはリスクマネジメントの枠組みとしてAustralia-New Zealandのガイドラインを採用したが、これはcontextとstakeholdersを重視するものである³⁾。

stakeholdersを重視するのは、後述のように、安全問題を伴う事業では合意形成が最重要事項となるからである。contextの重要性は既に言及した。これは研究の方向付けのために不可欠だけでなく、間接的には合意形成にも大きな影響をもつ。なぜなら問題の全体を見渡せていないような事業は信用されようがないからである。

1.3 sustainableな社会

sustainabilityの概念は、地球環境問題の深刻化の中で人類の前に立ち現れた概念であるが、しかしそれだけでなく、例えば研究者・技術者個人のsustainabilityの問題もある。例えば数年前に発表されたハイテク情報技術者の意識調査によれば、彼らの多くが、現時点の収入の高さを掻き消すほど強い不安—技術の進歩に取り残される不安—を表明していた。40歳前後の燃え尽き症候群も報道されており、彼らの心配は尤もである。労働様態からすれば、彼らは消耗品なのである。ITやバイオなど現代の先端技術が、労働集約的で集中を要する作業の反復を強いるものであることは問題である。これは日本社会のsustainabilityの危機でもある。

従来専門職では、相当長期の研修期間があった。医者が一人前になるまでには10年かかると現在でも言われているが、昔、製鉄会社に入った友人が人事部署にいた時、「10年間は会社の持ち出しの方が大きいし、それでいい」と言っていた。そう言われて見回すと、役所や公団のキャリア達を見ても、国が持ち出しだなど見える期間は相当長かった。学者も例外ではない。し

かし、これこそがsustainableな社会なのである。

競争の強化という現在の潮流が、科学技術に対してもリスクの最大のものは、おそらく研究者という生身の人間のsustainabilityであろう。それ抜きに組織だけはsustainableということは期待できないからである。

1.4 自己疎外の問題

研究が分断され全体像を見失うと、閉塞状況に至る。これは自己疎外(Entfremdung)である。自己疎外は、sustainabilityに対する重大な障壁である。

自己疎外についてはKarl Marxの有名な資本制生産社会の理論がある⁴⁾。労働者の自己疎外の結果、経済を自然科学的(力学的)にモデル化することが可能になる、とMarxは主張するのである。つまり人間が人間らしさを失い、型にはまった行動しかできなくなる。

Marxが観察した18世紀半ばの大英帝国では、資本家による収奪が甚だしく、労働者は単純再生産(つまり自分の生命力の維持と、自分と同程度の労働力をもつ子孫の育て上げ)かつかつの生活を強いられていたのだから、このモデルは現実の裏づけをもっていた。

現在の日本の技術者は、Marx時代の労働者とは比較にならない生活を享受できている筈である。にも拘らず自己疎外が起こるのはなぜか?。起こるところか自己疎外がどんどん深刻化しているのはなぜか?。

例えば、これは昨年11月に原子力関連の会合で講演した時の話である。“失敗学”⁵⁾の著者である畑村洋太郎教授が、不祥事を起こした自動車メーカの事例分析をされた結果があったので取り上げた。ところがそこに報告されているものは、“失敗”というやや牧歌的なニュアンスとはおよそ違う、組織を覆う自己疎外と、それによる技術の劣化という陰惨な姿であった⁶⁾。

Adam Smithは分業による生産性向上を讃えた⁷⁾。立ち並ぶ煙突群と共に、分業は大英帝国の繁栄のシンボルであったかもしれないが、人間が部品になるシステムは決してsustainableではなかったのである。

2. 応用力学の学際性

自己疎外からの回復にはcontext分析が助けになる。研究者を取り巻いている環境の中にその手がかりが隠されているのである。応用力学の場合はその学際性が一つの鍵である。

2.1 応用力学委員会の一つのルーツ

大抵のものは金で買える世の中に見えても、そうでないものも多い。歴史とか伝統はその一つであって、温故知新と呼ばれる不思議な力をもっている。

まずいかなる伝統といっても、その端緒には必ず、人間の創造活動があることを見逃してはいけない。日本

のスーパー貴族である藤原氏も、鎌足・不比等など初期の一族による、壮大緻密な律令制度をこなしした実績と、それを可能にした氏族を挙げての教育熱心、統治ノウハウの自覚的蓄積という知的エネルギーの卓越がある。(以後の栄華は創業者利益と言えないこともない。)

現在の応用力学委員会の設置をめざして、1985年頃、土木学会・構造工学委員会の中に応用力学小委員会が設置された。応用力学委員会は、小委員会の倉西茂委員長や応用力学委員会初代の小林昭一委員長などの創立者たちの理想から出発している。その理想は、ここでは詳しく述べないが、物理から計画論まで広い学際性を目指したものであった。

この考えは、太平洋戦争前に東京大学工学部に設置された「力学研究会」を継承した形になっている。この研究会は discipline 横断的で、航空の人たちが中心とは言いながら、土木からは最上武雄先生が参加されているし、航空の森口繁一先生が吊橋の解析に挑戦されたこともある。この研究会の世界はまた、土木教室の学風でもあった。例えばその図書室には、Newton の”Principia(ラテン語)”が備え付けられていたし、超関数理論⁸⁾の創始者として有名な佐藤幹夫先生が教室に籍を置かれたこともある。

最上先生は講義の中でも常々、土の連続体モデルへの不満を漏らしておられたが、晩年に粒状体モデルを開発されたし⁹⁾、平井敦先生は、Maxwell の電磁理論に触発されて、これを弾性体に適用する研究に取り組まれた¹⁰⁾。有名な吊橋耐風性研究も、先生にとっては外向けの研究であり、それ以上のものではなかったのである。筆者はこの学風の源泉について考えてきたのだが、その後、岡本舜三先生から、量子仮説で有名な碩学 Max Planck の物理学叢書の邦訳が昭和元年以後順次刊行され¹¹⁾、当時の理科の学生はファッションとしてでも持っていないとおれない雰囲気があったということを知った。

昭和30年代でも、東京大学教養学部の推薦図書 of 物理学のトップは電磁気、熱学などいずれの分野もこの本であった。戦争を跨いでその寿命は長い。また別の機会に物理の久保亮五先生から、Courant-Hilbert の数理物理学を薦められたことがある¹²⁾。他の統計物理学者からさえ「名うての計算達人」と評されていた久保先生をして「これで物理学のために必要かつ十分」と言わせるのだから凄い。確かに Planck 同様、内容の拡がりや記述の重厚さは圧倒的なもので、ドイツ人学者の偉大さが感じられる。今も版を重ねている。

2.2 工学知なるものの存在

この時期の研究の学際性のもう一つの源泉は太平洋戦争である。遅まきながら米英の科学技術の威力を認識した軍部による、学者の根こそぎ動員が、半ば強制的に学際的なグループを実現したのである。合流の向

きは逆であるが、久保亮五先生は、真空管の技術者との交流の経験として、“無数の試行錯誤からできた複雑な材料や機器の中で起きている錯綜した物理過程を解きほぐす困難”を回想しておられる¹³⁾。

この“無数の試行錯誤からできた錯綜した物理過程”を作り上げる知性こそは工学固有のものである。それは久保先生ほどの碩学の理学知をすら超越したものである。この、理学知に還元できない工学知は、まぎれもない実在である。そして哲学者 H. Bergson は、「知性は人工の道具を製作する能力」と規定している¹⁴⁾。

しかし理学知と違い、工学知は活字だけでは習得が困難で、特に若い人には難解なものと思われる。私が教わった諸先生は知悉しておられたようであるが、私たちの世代が後進に大学できちんと伝達できているかどうかは心配である。

工学研究と言うと、直ぐに「実用性は？」と来る。これが工学と理学を分かつ分水嶺と考えて疑わない人は多いが、事実はそうでない。例えば、学術研究の中で競争的資金の占める割合が増えて研究計画の審査・査定が膨大になっているが、その審査の中で実用性が決め手となることは稀である。あくまで中味の重みというかモーメントが重視されている。(健全なことだ。)もちろん、研究の位置づけを申請者がよく考えていることは大切であるが、正確に言えば、これは研究の context 分析であり、実用性とは違う。

3. 応用力学の implementation

応用力学の implementation とは、応用力学に内在する価値を実現すること、と言ってもよい。1. の implementation 一般論によれば、制度しくみ (logistics) とコンテンツの両面から考察すべきということであった。そこで本章と5章ではコンテンツの面から、4章では logistics の面から応用力学の implementation の方策を検討し、6章以降で安全問題への応用を述べる。

3.1 formulation-solution

およそあらゆる量的な問題の分析は、定式化 (formulation) もしくはモデル化 (model building) と解法 (solution) の2段階から成る。formulation では、解析対象の特徴をなるべくシャープに捉えようとする。対象のもつ固有性の探求 (specification) と言ってもよい。対照的に後者は generic である。応用力学は、この二つの面から考察するのが便利である。

応用力学委員会の活動の多くは後者にある。このことは自然である。それは若い人は generic な解法をまずしっかり学ぶべきだからである。私は、応用力学研究の精髓は specification/formulation にあると考えているが、それでも応用力学の研究者の何割かが解法に特化するの、良いバランスであると思う。

ただし草サッカーになつては困る。草サッカーでは、たえず皆が球に殺到して団子になる。ファジーにせよ遺伝アルゴリズムにせよ、それぞれ立派なテーマだが、短い流行の渡り歩きとなると問題である。そしてこれは我々日本人の性分なのである。

筆者が学生の頃、有名な花森安治が編集する”暮らしの手帖”の中で評論家の笠信太郎が書いていた¹⁵⁾。

「(西洋は)自分自身のもの、そしてだいたいにおいて今までにたれもやらなかったようなもの、いわば、前人未到のものを、はじめて少しずつ、築き上げていった... 自分がつねにパイオニアです。その点が、日本は大いにちがいます。いつも、外から、何か新しいもののはいってきて、送迎のいとまがない。

こうして、日本人は、いつも外からくるものを心待ちする姿勢になります... これは、どうもやむをえなかったように思います。その歴史的なめぐり合わせのために、日本人はドイツ人がいうグルンドリッヒな仕事ができにくいのです。」

確かに Planck や Courant などのドイツ人科学者を思い起こすと、なるほどと言わざるをえない。併せて現在の日本が独創性を謳いすぎていることに危惧を感じる。競争的資金にせよ、独法化の中期計画にせよ、研究者が学習し成熟することをもっと重視する必要がある。さもないと大きな独創は生まれえないからである。

3.2 設計-力学の関係

経済学と一口に言っても、economics は現実への適合性に責任をもたなくてよい。それはモデルを定立し、それを解析し、その特性を明らかにすれば足りる。ここではモデルの論理的整合性だけが問われる。これが科学としての経済学である。

しかし経済学にはもう一つ、経世済民のための経済学がある。これは economics と区別して political economy(政治経済学)と呼ばれる。(私たちの感覚では、こちらこそ経済学ではないかと感じるのだが、まあ仕方がない。) 発生的には、個々の政治課題に対する処方箋を編み出す必要から、政治経済学が先に生まれた。その名のとおりに、政治経済学は人間活動の全体に直面している。(この点、civil engineering とよく似ている。) しかし処方箋を正しく書くためには診断が必要である。現象の理解が必要である。そして現象の理解なら、科学的な対応が可能になる。こうして economics が生まれる。

問題は economics で得られた命題が、果たして現実に適合するかどうかである。結論を言えば、論理的には何の保証もない。もしあるとすればそれは研究者が個人的に、economics の枠の外からの問題意識を取り込む場合だけである。つまり economics にとって本質的でない偶発的な条件でのみ成立する僥倖である。これは土木工学における設計と構造力学の関係と同じで

ある。元々の研究ニーズは明らかに設計・施工の実務から出発したであろうが、そのうち構造力学が独自の発展法則をもつことは、economics と同様である。

economics も応用力学も、大いにそのロジックに従って発展するべきである。ただしそれが社会との関連、社会への貢献を願うなら話は違ってくる。その内側の論理に従って生成されたアウトプットを社会に投げつけるだけでは、何の寄与にもならない。これがまさに研究の implementation の問題である。

3.3 specific-generic の関係

economics が扱うモデルは、もともと政治経済学的考察の中で、現実世界の現象をモデル化したものである。ところでモデル化は理想化であり抽象化である。出発点となった個別事象は specific であるが、得られたモデルは抽象化のフィルターを経て generic になっている。ここでモデルは概念と言ってもよい。例えば熱力学。熱平衡や準静可逆過程は、多種多様な個々の系から、具体的な細目を捨象して得られる。

微分方程式もまた generic である。無限小領域(時間または空間の)を考えることで、境界の複雑な影響を捨象できる結果、そこそこ単純な式が得られる。つまり人は複雑な問題を、抽象化・モデル化という単純化によって扱うことができるようになるのである。

定式化できれば、これを解析してある程度の知見が得られる。しかし政治経済学や設計、つまり研究の implementation 段階では、economics あるいは構造力学のモデル解析で得られた知見をもう一度現実に戻さなければならぬ。generic な知見を素材に対象に特化した知見を得る作業が specification である。しかしこれは困難な作業である。

論理学では、概念(つまり generic な知見)をいくら重ねても個体を特定できないという命題がある。同じ内容を Marx は「抽象に伴い内容は空疎になる」とも表現している。抽象は、手におえるだけ簡略なモデルを得る代償に豊富な細目の情報を捨てることである。現実に戻るには、この一度捨てられた情報を回復しなければならない。つまり specification は単なる移し替えではなく、必ず創造的な追加がなされている筈である。このことは implementation が創造を必要とすることも示唆している。

かつて地震予知不可能を持論とする地震学者が、「地震は臨界現象であるから予測不可能」とか、「地震はカオスだから予測不可能」という主張をしたことがある。地震予知は、特定の地域の特定の時期について判断する、端的に specific な判断になると考えられる。一方、臨界現象とかカオスは generic な概念である。これらの概念は現実の強い理想化であり、現実のプロセスがそうであるということすら決して実証できない性質のものである。しかも現実の事象は、多少ともその理想状

態から偏奇しているであろう。だから問題はその偏奇を統計的な揺らぎとしてしか認識できないか、信号として見極められるかである。これは計測と信号処理の能力が決着をつけるべき問題である。つまり地震予知は、原理的可能性についての神学論争ではなく、科学と技術が決着をつける問題なのである。

キリストのペルソナ(神性)の証明に精力を注いだスコラ神学者の時代以来、genericな議論だけでspecificな結論は出せたためしはない。出せたとすれば、真にspecificな情報を添加したか、仮定を紛れ込ませたかである。

3.4 Wiener-Neumann の関係

N. Wiener と J. von Neumann はほぼ同じ時期に活躍した数学の巨人である。しかし二人の学風は対照的で、Wiener は解けないと分かっている問題に固執したのと対照的に、Neumann は、解ける問題だけを嗅ぎ分けたとされる。(実際の Neumann の活動を見ると、エネルギーに試行錯誤を続けており、要領のいい優等生のイメージとは程遠い。)二人とも同じように標的を見据えていたと考えられるが、ただ、Neumann は、攻略可能な要衝に的を絞ったということではできよう。いづれが劣るということはない。

しかし Neumann 型のアプローチでは、獲得した拠点から面全体はどうカバーされるのかという問題が残っている。この点で Wiener のこだわり姿勢には implementation を考えるうえで独自の意義がある。

生体の神経系に取り組んだ Wiener は、その著書の中で、現実の物理時間は、(数直線にプロットできるような)Newton 時間ではなく、Bergson 時間であると主張している¹⁶⁾。その Bergson の分析は、時間と空間のトポロジー(連続性)を見分けようとするものである¹⁷⁾。言うまでもなく、連続性こそは、Newton の微積分にトリガーされた近代解析学建設という巨大な運動の最大の成果である。

この理論は私たち工学者にも実効的な効用を与える。それは、これにより極限操作を自在に正確にできるようになるからである。人間の認識力はごく限られていて、常に適切な理想化(という名の近似)によってのみ定式化できる。その理想化としては、極限をとる方法が特にすぐれている。例えば最も単純な確率過程である coin tossing(2 項分布)も、有限な試行回数では、確率は煩雑を極め、殆ど手に負えない。それが極限では簡潔でしかも豊富な法則に従う。

なお Wiener の言うとおり、Bergson に特徴的なのは、時間の連続性の議論である。これは“存在”という古来の難問について哲学者を刺激した。また Bergson 時間は、どうやら私たちの意識の構造を反映しているものらしく、意識を重視した仏教では、当然、似た議論が古くから出されている¹⁸⁾。

3.5 アルゴリズムの拡張

方程式や計算公式はアルゴリズムとして理解し、アルゴリズムはプロセスの設計と見る必要がある。式をプログラムに書くというスタンスは禁物である。これは、Abel が、5 次以上の代数方程式には根の公式が作れないことを、アルゴリズムの分析を通して証明して以来¹⁹⁾ 発展した、現代代数学の基本思想に他ならないものでもある。

最近の大きな解析アルゴリズムは大抵逆解析である。しかし世の中の専門職の頭脳も逆解析をしているのである。例えば耐震設計スキームは、中では比較的単純な部類に属するので、最適化モデルとして理解することが可能である²⁰⁾。ただし応用力学などで見られるような数学的な最適性条件は、現実の複雑な問題に対して厳し過ぎ、もう少し柔軟な、言い換えれば非定型的な判定が必要なことが多い。そこで最適化のプロセスを、多数の要素手続(operation つまり広義の演算)の組み合わせとして構成する。筆者はこれを“推論の構造”と呼んでいる。このアプローチは、L2 設計地震動を考察する際や、重要構造物の地震時安全性を照査する際にも有効である。(8. 参照)

アルゴリズムの典型的な例は、訴訟法である。これは訴訟という特別なプロセスの制御プログラムに他ならない。そもそも法典には訴訟法と実体法がある。人間の行動や自然事象の結果、請求権や賠償責任という実体関係が生まれるが、これの生成消滅の法則を記述するのが実体法である。しかし、金銭を請求する権利が発生することと、それを現実に実現できることとの間には雲泥の差がある。その実現のルールが手続き法である。(近代裁判制度では実体関係を確認するのにも訴訟という手続き法を使っている。)

手続き法を研究すると、意思決定プロセスを管理し集団を運用するスキルが身につく。(私見では、法学出身者の実務能力が概して高いのは、手続き法の学習に由来する。)また実体法より手続き法の方が技術性が高い。つまり国による違いがあまりない。実に手続き法は、ローマ以来の人類普遍の知恵(jurisprudence)の精髓である。そしてそれはアルゴリズムという文理の別を超越した普遍的なものなのである。(これに対して実体法はそれぞれの国民の価値観や慣習を重く引き摺っている。)

関連して少し説明を追加しよう。法律家が支配するのは米国である。多くの米国の政治学者自身、米国の政治スタイルが法的思考過剰と認めているほどである。これに対して仏国ではエリートは数学で徹底的に格付けされる。一見すると両者は対照的に見える。

しかし法律と数学には重要な共通点がある。いずれも広義の言語だと言うことである。その本質はロゴス(言語を媒介とする知)であり、どちらも演繹的論理指向である。(これに対して英国は歴史重視の帰納指向である。)

4. 真に生産的な競争の創造の方途

4.1 研究のビジネスモデルの必要性

土木工学にせよ応用力学にせよ innovation のためには discipline のモデルが必要である。ここでこれをあえてビジネスモデルと呼んだのは、現在我々が直面している問題の本質は、企業の投資行動と変わらないからである。

現在の日本の不況は構造的で、その転換は遅々としている。ただし構造転換の根底には雇用問題があって、多くの生身の人間の人生に深刻な打撃を与えるから、米国からの加速要求に応じるのは難しい。金にまみれた腐敗や日本人に顕著とされる増上慢もけじめはついておらず、モラルが社会のインフラであること(4.5参照)から、改革抜きで景気最優先とはいかないという説にも理はある。

今回の不況は、(農村の疲弊など基礎条件の違いはあるが)、1927年昭和金融恐慌と共通点が多いように見える。この恐慌では、第1次世界大戦の戦時特需の中で腐敗が進行し、それを改善できなかったことが大きな原因とされている²¹⁾。結局、日本は構造改革ができず、「先二善隣ノ誼ヲ失ヒ延テ事ヲ列強ト構ヘ遂ニ悲痛ナル敗戦ニ終ル」²²⁾ 道を突き進むことになる。腐敗構造を伴う不況の持続は、社会の不安と不満を昂じ、モラルの低下を起こしつつ、坂道を転げ落ちる。現在の日本は大きな危険に直面している。このような状況下では、社会の各分野で sustainable growth に向けた転換を進めないと危うい。しかもその転換は自己疎外強化の方向であってはならず、創意工夫によって、つまり innovative に生産性を高めるものでなければならない。

innovation の本質は未知への挑戦であるから、高い不確実性を伴う。この不確実性はリスクでもあるから、リスクの検討が必要である。例えば研究開発のリスクを、個々の研究者の自己犠牲に押し付けるようではいずれ社会がもたなくなる。投資の受益の帰属を考えて、また負担余力を考えて、配分する必要がある。つまりはリスクの制御によって sustainable な社会を作り上げなければならない。

その点で、最近の日本の金融制度の改革は、参考になる。金融の本質はリスクの管理だからである。ただし現在の問題の本質は投資の低調にある。つまり活力が低下し、経済ファンダメンタルズが揺らいでいるのであって、ここに問題の根がある。

例えば既に、景気の牽引車としてベンチャービジネスが謳われて久しい。funding 制度の整備も進んでいる。しかし実績が上がらない。それは、ベンチャー投資が従来の日本の間接金融と違って、リスクが陽に立ち現れるからである。そして、日本全体がリスクを取ることに慣れておらず、スキルもないからである。そもそも投資行動は不確実性の中の意思決定であり、リ

スクが大きいから、リスクを分散して社会的に負担する工夫をしないと、投資は生じない。

学術研究への資源投入もれっきとした投資であり、質は異なるが、強いリスクをもっている。リスクマネジメントの重要性は変わらないし、情報の開示や規制などの制度設計は同様に必要である。国立大学も法人化を経て、早晚、同じように研究開発投資の掘り起こしと取り組むことが避けられなくなると見られる。

競争原理の導入と言っても、競争の創造は容易でない。また、競争があれば当然に生産性が上がるものではない。現に生産的な競争の創造には、世界中の多くの国が挑戦し、失敗を重ねている。しかし幸いなことに効率的な競争の組織化については日本は誇るに足る実績をもっている。産業政策がそれである。私たちがこれを参考にしない手はない。

4.2 東アジアの奇跡

1985年のプラザ合意の後、過酷な円高に直面した日本企業は、怒涛のように海外に出るとともに、それが波及して東アジア次いで東南アジアの経済的成功が生まれた²³⁾。製品を買い続けてくれた米国とともに日本の貢献は非常に大きい。

ところがこれに対し1994年、New Yorkの著名なエコノミスト Krugman は、アジアの成功を1950年代のソ連の再来と断じ、生産の増加は資本投入の増加分しかない、つまり生産性の向上はないと批判した²⁴⁾。

1997年タイ・パーツの暴落を機にこれらアジア諸国が大混乱したので、投資国では Krugman 流のバッシングが荒れ狂った。経済危機はアジア諸国の制度不備や権力構造の腐敗による、つまりアジアのせいだと言うのである。IMFも金融支援時に出す条件(conditionality)で、過酷に公共支出を禁じた。つまりはアジアの諸国民はたっぷり灰汁を飲まされたのである。

Krugman 説は結果オーライだが、その根拠は怪しいものである。だからその後、欧米からもアジアからも多くの反論が出された²⁵⁾。今では、主因が外からのマネーの殺到にあり、各国の運営はむしろ健全であったというのが定説になっている。(例外はあるし、改善すべき点が多くあることはもちろんである。)

しかし、ここから本題に入るが、アジア諸国の政策のうち、輸出優遇策および外国直接投資優遇策は、経済成長に寄与したが、産業政策は東アジアの成長に貢献しないか逆に有害であったとされている²⁶⁾。

産業政策とは、一国の生産活動を民間の自由競争に委ねず国が直接介入することである。もちろん国は、交通ネットワークや工業団地などのハードなインフラ、市場のルール作りや規制、関連制度の創設・監視などのソフトなインフラを整備して、産業活動を促す。これは欧米を含めすべての国がしていることである。

しかしそれだけでなく直接介入もありうる。これは

育成する業種や企業を特定して、資金割り当てその他で優遇することである。選ばれば極めて有利であるから、指名をめざす競争は激しく、恣意的な政治介入が容易になる。結局は腐敗に至る虞が大きいから、IMFや世界銀行を支配する米国がこれを目の敵にすることはもっともなことではある。ところが1世代前の日本を含め、高度成長を遂げた多くのアジア諸国は産業政策を進めたため、欧米との間で多くの摩擦があった。その産業政策の多くは上述のとおり効果なしとされた。ところが日本だけは成功していたのである。どの計量経済分析も、日本の成果は否認できないのである。

4.3 日本の魔術

それだからこそ、1980年代米国の学者は、日本の成功、なかんずく通産省の産業政策を徹底的に研究した。そして、例えば、霞ヶ関の官僚が、有能で野心的で、強い使命感と並々ならぬ熱意をもっていったこととか、政治その他の外的な誘惑から比較的効果的に遮断されていたこととか、政府介入が効果的な競争をオーガナイズしたこととか、業種内の優れた企業が主導できたこととか、いろいろな特徴を指摘している。

結果論的に言うと、「産業政策是か非か」という問い方は、非常に粗く、混乱を持ち込む議論である。我々の言葉を使えば generic に過ぎる(3.3参照)。競争と言い、市場と言っても、微妙な多くの側面がある。だから specific な分析が必要であり、ここに政策の implementation の本質的な問題がある。

因みにこのシステムは、「1940年体制」とも呼ばれ、貧乏国日本が大国相手に総力戦を遂行しようとして構築したシステムである²⁷⁾。太平洋戦争では、軍の圧力下で機能できず、強力な米国の前に潰れてしまったが、世界を驚愕させた戦後復興から高度成長までのをやったのけた統治モデルがこれである。そして我々がそこからの脱却を図って努力しているのもこのモデルなのである。

このモデルは、1970年代のオイルショック乗り切りに次いで、百数十%という戦慄的な円高を乗り切った活力を作り出していた。いずれも諸外国は奇跡としている。(ただしこの結果、当時から指摘されていたように、産業の空洞化をもたらした。「1940年体制」の膨大な正負の遺産の組み替えは、私たち世代の義務である。)

4.4 モニタリングの重要性

日本の産業政策の成功の鍵の一つは、企業活動をモニターすることに成功したことにある。これが有効な競争の組織化、産業の転換などの基礎になった。正確なモニタリングと評価こそは、効率的な生産活動の基本である。ここで生産とはもちろん、物の生産だけでなく、サービスも含む。したがって教育や研究も含む。国立大学の法人化や競争的外部資金へのシフトがうま

く行くかどうかの鍵も、やはり正確なモニタリングと評価である。

この文脈で言えば、通産省のモニタリング成功が偉大なのは、本来的にモニタリングが至難の業だからである。至難なのは、その問題に限れば、モニタリングの対象である企業が、モニターよりも遥かに強力なプロで、事態を知悉し掌握しており、事態を自分に有利に操ろうとするからである。(原発関連で不祥事が続くのも、モニタリングの困難さを示すものである。)それに間合いの取り方も難しく、深入りすると癒着の危険がある。(これは次に述べる client-agent 関係の一例である。)

通産省が産業政策で見せた強力なモニタリングは、pervasive oversight と呼ばれる。法的な権限だけでなく、行政指導(日本論で有名な Wolfren はこれを「おどしによる威圧」と呼んでいる²⁸⁾)を駆使して徹底的に介入し、「箸の上げ下げ」にまで容喙したとされる。

筆者がこれに関心をもつのは、安全監視の強化の関心からである。この pervasive 性が必要なのは、安全問題には多くの専門分野が関係することと、これらの連繋に隙間が生じると危険極まりないことからである。安全監視に必要なのは徹底性であり、危険の可能性を有意に残すことは許されない。その点で、あの通産行政の強力な監視が必要とされるのである。(事実、米国では、原子力の規制を受け持つ NRC が pervasive oversight を標榜し、膨大な専門スタッフを抱えて、権限を振りかざして、実施機関の調査項目やその手法の詳細にまで一々口ばしを入れ、徹底的にモニターする。)

学術研究のモニタリングは当然、これとは全く異なった原理に従うべきものであることは明らかである。例えば peer review を重視すべきであり、それも日常活動の中でソフトに実施するのが望ましい。(この点で学会の委員会活動が重要になる。)

4.5 client-agent 問題

重い病気に罹り医者に掛かる。あるいはトラブルに巻き込まれて弁護士を依頼する。いずれでも典型的な client-agent 関係が生まれる。

agent は委任を受け、対価を得て client のために専門的活動をする。そしてその結果は client に帰属する。(誤診をするのは agent でも死ぬのは client である。)これら agent は社会的にもステータスが高く、高い収入の職業として人々の羨望の的になっている。事実、彼らの専門知識の量は膨大であり、仕事の密度も高い。

しかし悪徳弁護士や悪質な誤診の報道は絶えない。法律に素人の依頼人は弁護士に対抗できるわけがないから、つまりは高い金を払って狼を引き入れているという話になる。これでは社会はもたない。これ以外にも不良建築など client 泣かせの欠陥商品は多い。

これは client と agent の力関係に大きな偏りがある

からで、本当は client が監視監督すべきところ、その能力がないのである(だからこそ依頼した筈)。当の client に agent を制御する能力がないのはやむをえないから、社会的に面倒を見る必要がある。

安全問題の中枢にはこの client-agent 問題が潜んでいることが多い。と言うより、むしろ最も厄介な問題であることが多い。それはこの関係に利害の対立、とりわけ既得権が絡んでいることが多いからで、政治問題化することも多い。

しかし考えて見れば、この種のパリティは、現代社会では至る所に存在する。欠陥商品は消費者-生産者問題であり、日本の株主無視は投資家-経営者問題である。さらに社内では監査役-取締役-代表取締役問題の弊害(監査役、取締役会の空洞化)が指摘されて久しい。公共事業では、規制者-実施者問題となる。先の通産省と同様、本質的にゼネラリスト機能も果たさないといけない規制側が、個々の問題で実施者と同じ精通を得るのは無理であるから、不良工事は後を絶たない。

ソ連崩壊前、その支配下のワルシャワ条約機構軍が西側 NATO 軍と対峙していた。ところが東独部隊の背後にはソ連の精鋭部隊が配されていた。東独部隊は機構軍の中でも強力と評判だったのにもかかわらず、なぜこうだったのか?。応援のためではもちろんない。話は逆で、ゲルマン人が寝返って襲ってくるのを恐れたのである。(これではソ連の覇権は sustainable でありえなかったわけだ。)このような部隊を督戦隊と呼ぶ。督戦隊は忠誠心と戦意が旺盛であってしかも、その疑わしい軍隊にも打ち勝つだけ強力でなければならない。つまりは最優秀な部隊である。たいへんなムダである。督戦隊の忠誠に不安があり、さらに督戦隊が置かれた例も多い。つまり、いろいろな制御スキームを考えるにしても、監視・規制は必ずどこかで打ち切るしかない。下手をするとソ連軍のように屋上屋を重ねることになる。そしてぎりぎり最後は信用の問題あるいはモラルの問題に辿り着く。社会のモラル水準は、低コスト社会にとって根本的なインフラなのである。

5. 技術ターゲティング

さて前章は日本の産業政策が成功した政治的な条件なのであるが、もう一つ、重要な問題がある。それは育成すべき産業の選定に成功したことである。自動車や家電が代表的であるが、早い時期の造船や繊維など多くのものがある。これが技術ターゲティングの問題である。技術ターゲティングは、個々の研究者から企業、一国に至るまで、各級で存在する重要な課題である。

しかし近年、状況は激変した。OECD など多くのレポートは、通産省の競争組み立て能力、勝者摘み上げ能力が低下したことを指摘する。”日本の産業行政は

もはや大魚を見分けることはできなくなった。そこで「やす」で大物を突く漁法から「底引き網」に移っている”というのである。開発の的を絞りきれず、複数の代替的な、競合的な技術を並行開発するようになったからである²⁹⁾。

上の著者は、先端技術開発での”袋小路(blind alley)”探索の不可避性を指摘する。”袋小路”とは、選択を誤って、行き止まりとなる開発に投資したことを意味する。これは研究開発という計画がもつ多くのリスクの中でも基本的なもので、先端技術の研究開発投資は”袋小路”の危険から逃げることは絶対にできない³⁰⁾。

同様に文部科学行政でも、高等教育や科学技術研究の生産性は、国のターゲティング行動に大きく依存する。この面で国に求められるのは、広く知恵をオーガナイズして、投資家として合理的な funding 能力を発揮することである。(これに対応して、研究機関のトップは、entrepreneur 性を発揮して研究活動を組織することになる。)ただしその前提として、投資候補を養成しなければならない。つまり個々の研究者の創意工夫を最大限に発揮させる工夫が必要である。

6. 安全問題の基礎概念

最近の我が国の科学技術行政では、社会生活の安全が重要な研究課題になっている。安全問題は土木工学にとっても本質的な課題であるし、直接間接に安全問題を蔵する公共事業は多い。このような場合、合意を形成しつつ事業を遂行することが必要であるが、合意形成こそは民主主義の急所であり³¹⁾、難問である。

6.1 技術中心思考と accountability

安全問題は純技術的ではありえない。技術者は、先ず自分達だけで純技術的に検討して、成案を得たうえでそれを関係者に理解して貰う、という風に考える習性があるが、これはリスクマネジメントの原則に反し、大きな誤りである。この性癖は事業の implementation にとって重大な障害である。

スイスでは、核廃棄物の地層処分(9.2 参照)の実施機関 NAGRA が Wellenberg に建設する計画が、1995 年の州民投票で否決されてしまった³²⁾。原因はいろいろあるが、ここで注目すべきは、実施機関の PR 活動が技術的観点に終始したことである。説明者たちが自らの信念に誠実であったことは疑いない。しかし残念ながらそれはユーザー不在の論理でもあった。反対運動が、合理性の乏しい極端に危険なシナリオを喧伝して州民を揺さぶったにも拘らず、それへの対応もできなかったようである。

近年の技術者は accountability を口にし始めた。ただし accountability の本質は、会議を公開したり資料や議事録を公表することではない。それは信認(credibility)

を旨として account する ability なのである。だから accountability は目標ではありえない。目標は credibility の獲得である。

公共事業では公衆は、一般に専門的判断ができない状態に置かれている。それにもかかわらず相手の credibility を見分けようとするれば、議論の中味ではなく相手の信頼性、場合によっては人物そのものの信頼性を見ることをする。だから、結論を出した本人や即答できる権限ある人、つまり真に当事者能力のある人以外が対応すると必ず失敗する。

6.2 価値論と行政論

安全問題の根底には人命の価値や個人の尊厳がある。しかしここで技術者の思考が停止することが多い。例えば技術者が地震災害や原子力事故の分析をした時、せいぜいリスクの assessment の終了時点で、(つまり対応策の提案はおろか、優先度評価もすることなしで、)「後は行政の問題ですね」とか「後は政治の問題ですね」と述べて打ち切ることが多い。

しかしそれで引継ぎはどうなるのだろうか？。仮に行政や政治家が引き継ごうとしても、そのアウトプットはどのように使えるのだろうか？。山彦が山の幸を海彦に贈るといっても、とんでもない崖っぷちに置いたのでは兄弟喧嘩になるだろう。リスクアナリストは、そのアウトプットの行く末まで気かけなければならない。

安全問題の多くは行政が関与する行政プロセスであり、専門家はそこに動員される形になる。リスク対応には、チームの結束が不可欠であるから、専門委員と事務局の信頼関係は決定的に重要である。そのために理系の専門家であっても、行政システム(関連法、組織構成、運用実態)を理解する必要がある。これについては別の機会に述べたい。

刑法学の団藤重光先生は、1974年に東京大学から最高裁判所に移られた時の著書で、こう述べている³³⁾。

”本書に述べるところは、いうまでもないことながら、わたくしの学者としての所説であって、裁判官としての意見ではない。... 裁判官の良心は、国家的機構としての司法部の一員として司法過程に活動するところの良心であり、... ところが法学者の良心にはこうした制約は全然存在しない。国家や法を否定することも、法学者としての立場とすこしも矛盾するものではない。”

刑法は、数多い法律の中でも特に、扱いを誤ると国民の人権を侵害すること最も深刻であるから、法的安定性が重要である。(裁判所の判断がころころ変わるのでは国民が困るし、判決がぼろぼろに叩かれるようでは制度そのものが信用されなくなる。)

それにも拘らず学者に発言の自由を保障するのは、統制するより益が多いからである。ここに法学者達の智慧がある。(事実、学者が最高裁判決を自由に叩いても、大法廷が僅差で死刑判決をひっくり返しても、国民の

信認は損なわれていない。)

周知のとおり生体の免疫メカニズムは、異物が侵入すると、無作為に(あるいは盲目的に)ひたすら膨大な数の抗体候補を生成しようとする。そしてそれを侵入物にぶつけて本命を見つけ出す。これは5.で述べた産業政策の「底引き網」スタイルに他ならない。最もプリミティブな、泥臭いスキームであるが、最もタフでもある。特に先端的な未踏性の高い問題に挑戦する場合(例えばネット犯罪や遺伝子犯罪など新しい事件)は、やはりこの方法によるのが、長期的には間違いのないのである。

したがって現在の日本の産業政策が底引き網になること自体は、理論的には正しい。問題は底引き網の是非ではなくて、いかに賢明な底引きを実現するか、つまり implementation の問題なのである。この戦術のパフォーマンスは、偏にどこまで多くの案を引き出せるかに依存する。最初から選別をするようなことを慎み、ひたすら案出しに専念する。これは法律学に限らず、開発研究的な discipline に不可欠である。

ただし学者の意見がばらばらでは意味がない。そこで意見や情報を交換し合う場を設営して、個人研究を奨励し、多くのアイデアを生成するとともに、活発な議論の中で、多数説が無理なく形成できるようにする。これは学会の重要な機能である。耐震基準に対する土木学会についても同じことが言える^{34) 35)}。専門家の間で承認された定説が出来ていれば、社会に対する責任を背負う行政が基準を定める場合の作業も、説明責任も大いに軽減されるからである。

6.3 リスクの検出

リスクマネジメントは、リスクの検出・同定、分析、評価、処理などから成るサイクルであるが、中でも最も困難なのはリスクの検出である。ここでは、死角を封じるための俯瞰性と、急所に切り込む考え方について述べる。

(1) 俯瞰性(原子力安全の会合で出したメモ)

昨今、「俯瞰工学」とか「社会技術」が言われることが多くなった。「Implementation technology」とも呼ばれる。技術を実世界に implement する場合には、死角があると失敗する。ここが研究だけの場合と違うところで、仮に異分野の研究者が大勢集合しても、個々の研究者が既往の discipline の中に留まっている限り、それらの和集合から落ちこぼれる隙間が発生する。しかし実世界にはそのような隙間は存在しない。隙間は人間側の都合に過ぎない。近年はこの隙間が原因となった問題がたくさん発生しているように思われる。”(私はこの問題は理学から人文社会にかけてすべての学問領域に存在すると見ているが、その性格上、工学でもっとも顕著に表れるとは言えるのかもしれない。)

(2) 鷺津教授の戒め

さて話をフラッターに移そう。フラッターとは高速な流れの中の物体の自励振動である。例えば飛行中の飛行機が速度が大きくなると、機体や翼の振動が空気力を生じ、その空気力が振動を更に増幅する場合がある。このタイプの振動は急激に発散して破壊にいたる致命的な現象である。

防止のためには機体や翼の剛性を高めるのがよいが、飛行機では軽量化が宿命で、身を削るようにスリムにするから、剛性不足になりがちで、翼だけでなく胴体でも局部的にフラッターを起こす。飛行機以外でもタービン翼などに発生する。フラッターの事故例は限りなく多い。有名な日本海軍のゼロ戦は、燃料・機関・金属など当時の日本の基礎工業力の弱さを空力設計で補うために軽量化に徹したから、実にいろいろなフラッターが発生した。

リスク検出については、学位論文の指導を頂いた鷺津久一郎先生から受けた戒めがある。それは”フラッターの可能性がちらとでも脳裏をかすめたら、必ずあると自分に言い聞かせて精査せよ。”というものである。ここで精査するとは、その思いついたモードの特徴を使って方程式を線形化して解くことである。それで確かに予想した解が見つければ、一つのフラッターが検出されたことになる。

この戒めが示しているのは、フラッターの解決は試行錯誤的にしか進まないこと、したがってそのリスクを完全に消去することは原理的に不可能であるということである。近似計算をするにはモデルが必要である。実験でも、相似性を確保するための条件の絞り込みが必要で、やはりモデルが必要である。このモデル作りには技術者の個人的力量がものを言う。しかもこの力量の中心は着想、閃きの才である。

運動方程式が非線形で複雑だから、解析解を構成することはできない。言い換えれば演繹アプローチによって系統的にすべての解をたぐり出すということではできないのである。つまり危険な解が見つからないままに潜んでいる可能性がなくなることはない。

特定の機種 of 飛行機なりタービンなりが、運転実績を積み、改良が重ねられて成熟すると、まあ大丈夫であろうとの心証が得られる。(ただしこの判断は、本質的に専門家の心証である。万人に分かる説明はできないものである。)しかしそれまでは、フラッターは、近似計算や実験、あるいは事故による手痛い教訓と、何ら定石のない世界を、あの手この手を一つ一つ考案しては検討し、見つけ出して潰していくしかないのである。これには王道はない。

これは何もフラッターに限ったことではない。少し複雑な非線形系では、常に想定できない(それでいて危険な)モードが潜んでいるとして、慎重を期するべきである³⁶⁾。まさに想定外事態は遍在するのである。

7. 地震工学への応用

7.1 1995年兵庫県南部地震

空力弾性学は、空気力学+弾力学+振動学という学際学であり、しかも3分野のそれぞれが大きな内容をもっている³⁷⁾。地震工学も同じことで、地震学+地盤工学+構造工学という学際学である。あくまで全体像を統一的に見るべきで、それを欠く設計は危険である。

地震学者の安芸敬一先生は震源の解析と地盤振動の解析の両方で一流の成果を出された³⁸⁾。1975年頃、土木学会耐震工学委員会での講演の席上で「震源と地盤震動とどちらが面白い」と質問された時、「もちろん震源」というのが先生の答えであった。

ところが当時の地震工学では、震源の情報を欠いたままに入力地震動を議論していた。最悪地震動など多くの研究がなされていたが、その最悪条件は、極度に単純化されたもので、根拠に乏しく、事実、設計には使えないものが多かった。これはつまりは事実を充てるべきところを、仮定で逃げていたものと言える。明らかに震源の情報が最大の隘路であった。

しかしこの時期、地震学者は壁を打ち破りつつあった。すなわち地震研究所の丸山卓男先生らによるダブルカップル点震源に対する波動公式の誘導³⁹⁾以来、震源モデルおよびインバージョンが米国で大いに発展していた⁴⁰⁾。

我が国は後塵を拝しているものの、兵庫県南部地震で実用化が大きく進んだ。地震の3日後には地震研究所の菊地正幸教授の震源モデルの図が出回った。簡潔なモデルだが本質を捉えていて、その後の詳細な解析が続いても⁴¹⁾、修正の必要がなかった。筆者は10回以上被災地入りしたが、菊地教授の解を参照することで常にストーリーが描け、効率的に動けた。これは画期的なことであった。

その後、学会で耐震基準の見直しが進められた⁴²⁾。しかし重要な問題が解明され尽くしたわけではない。

(1) 明石海峡

震源域の地殻構造と破壊過程は、予知研究および直下地震の地震動予測にとって重要である。明石海峡は地震の前から注目していた地域であった。観測に向けて本四公団の工事事務所と打ち合わせていた最中に地震が来たので、観測には至らなかったが、内陸地震の震源域の応力構造を知る上で貴重な地域である。

地震研究所の溝上恵教授が指摘した正断層型余震の存在、SAR画像が捉えた地表面のそり(warp)変形(須磨周辺にらせん転位型特異点)、明石海峡直下の表層断層が動いたのは本震の終末期であったという事実⁴³⁾などは、我が国の内陸に多いpull-basin構造を理解する手がかりになると考えて検討を続けている。

(2) 東部域の地震動

これまでの議論は神戸の中心市街地の被害に集中し

てきた。西宮から宝塚に至る東部域では地震動も被害も大きかったが、あまり注意が払われず、説明も終わっていない。しかし強震動の観点からは、開始点より破壊終端域の方が重要である。幕引きとはいかない。

震源運動の終端域では先行する波が重なるのでインバージョン解析が妨げられるという事情もあるのだが、3次元不均質を考慮した最近の逆解析結果では、東部のモーメント放出量が大きくなるよう⁴⁴⁾注目される。

(3) 構造細目の重要性

土木学会の調査団(第3次)では、長滝重義教授の班に参加した。震源域の明石海峡の調査が済んだので、RC構造物の被害の観察を意図したのである。岡村甫教授について新幹線の被害など問題の東部を回り、その分析を拝聴できた。

例えば高架橋の場合、単柱脚でも門型ラーメンでも、いずれも基準を満たすように設計でき、両者は基準の想定内では違いは生じない。しかしながら、想定外となった時には大きな違いが生じる。同じように想定外事態で構造物の生死を決めるのは、帯鉄筋の端をどこまで丁寧に曲げるかであったりする。これらの知恵はいずれも耐震基準の枠の外、つまり技術力である。(耐震基準は一国全体の水準の表れであって、個々の技術者の技術力とは違う。)

7.2 地震予知

兵庫県南部地震の後、国の地震予知の実用化研究は取り止めとなった、というのが世上の認識のようである。しかし、1998年測地学審議会建議⁴⁵⁾に沿って大学の研究は粛々と続けられており、しかも私見では確実に前進している。

ただし私は、この建議の演繹的アプローチには批判的である³⁶⁾。地震予知研究を推進している上田誠也先生から伺ったお話であるが、有名なLord KelvinはWright兄弟が初飛行する(1903年)少し前に、飛行機が原理的に不可能であることを証明した論文を出しているとのことである。

まさに理学知についての重大な警告がここにある。つまり空気力学その他の知識が蓄積されたら飛行機が出現するというのではない。飛行機という着想、そのデバイス、製作と実行が当然に出るわけではない。しかし逆は真である。飛行機が出来るデータが貯まり、あるいは事故が問題を提起し、ニーズも生み出すから、必ず空気力学が急進歩を遂げるのである。

筆者も上田説に賛成で、予知が先決問題で、震源の現象の詳細な知識は、むしろ予知ができれば進む話であると考え。この順序が重要である。知識が貯まるまで予知をしないのでは百年河清を待つに等しく、着想と分析の弁証法を理解しないものと言わなければならない。幸い、最近の研究の進展はめざましく、地下構造や地震パターンについて、知識が飛躍的に広がっ

ている。筆者が学生時代に金井清先生の講義で、地震予知は(複雑)³⁾であるという説明があったのを記憶しているが、今では(複雑)¹⁾ぐらいにきていると言えよう。残る1乗は手強いが、これまで達成された進歩も大きいものである。

7.3 across 法

芸に"花"を求め続けた世阿弥の「花伝書」には、「初心不可忘」とある。この"初心"とは、何か新しい経験をしたときの感触といったもののことである。私事であるが、筆者の地震研究所での"初心"は、高価な装置がふんだんにある、ということであった。つまり市販品だったということである。これにはいたくがっかりさせられた。(近年の地震研究所では、深海底諸観測や深ポアホール用高感度テンソルひずみ計など、独自の装置開発が進んでいる⁴⁶⁾。)

考えてみればそもそも私たち工学者が理学者を尊敬措く能わざる所以は、彼らが、実用性などと無関係に、もの凄く高い精度のデータを取得していたり、私たちが予想もしない知見をもっていることである。既往のデータの精度を3割上げたとか、2倍速いプログラムなどというのは、価値なしとまでは言わないが、少なくとも大学の研究成果としては尊敬には値しない。(私見だが、大学の研究には、何かの驚きが期待されていると言える。目の覚めるような"花"が願わしい。オリジナリティは新鮮な驚嘆を伴うものではないだろうか。)

"花"を追う一つの途は、強力な計測装置を作ることであろう。それに地震研究所の精華と言えやはり先端的な観測研究である。そこで精密制御震源による地震トモグラフィシステム(acrossと略称)の開発に取り組むことにした。

筆者は1980年頃から、半無限弾性体の弾性波動の数学的な解析をしていた⁴⁷⁾。この種の研究は、1904年のLambの有名な論文が先鞭をつけて以来、最新の地震学(震源インバージョンや地球内部トモグラフィなど)の基礎ともなっている。この研究の過程で、もし極めて精密な調和波動を発生することができれば、それを使って、従来の地震探査法より遥かに高分解能でかつ連続的な探査が可能であることが分かっていた。それを実行に移したのである。周波数領域は、計算の便宜上、計算の途中でだけ現れる架空の空間と受け止められている。across法は、周波数伝達関数を直接、物理的に計測することに相当する。そして多様な数学処理を可能にすることが分かっている。

問題はテクノロジーである。実際、GPSが実現した長期安定な高精度時刻信号、モーターの高精度速度制御、光通信による長距離通信、広帯域地震計などのセンサーおよび、大量高速のデータ処理能力、さらには高度のインバージョン計算技術のすべてがあっただけで始めて可能なもので、1990年代に始めて出揃ったものであ

る。この方法は現代計測の基本である間接計測の典型例であって、先端的な試みである⁴⁸⁾。

驚いたのは、”この道を行きし人”が居たことである。1990年代の初めのことで、理学部の地球物理教室の熊澤峰夫先生の口から across の話が出てきたのである。教授は明らかに私より前を行っていた。しかし明確な違いもあったので、教授と連絡を取りつつ、独自に開発を進めた⁴⁹⁾。先に述べた測地学審議会建議が「地震発生準備過程の最終段階では、局所的な応力の解放と集中が起こり、それに伴って様々な物理・化学過程が活性化すると考えられている。これらの源は局在し、信号も微弱であることが予想される。… 地下構造の時間変化の高精度観測が必要なことから、精密制御震源を用いた連続または繰り返し観測を実施する。」と裏書きしてくれたこともあってか、科学研究費の土木分野(構造・地震)が相当期間連続して採択してくれたので、助走段階を抜け出すことができた⁵⁰⁾。未踏技術だから最初から満足な装置ができるわけではない。何度も細目の設計変更が不可避であったから、大金を積まれたからといって一気に成功する自信がなかった。だから、持続的な採択には感謝している。

8. 設計地震動

8.1 強震動予測の意味

前述の土木学会の耐震基準見直しで導入された L2 地震動は、許容応力度設計法とは整合しない。許容応力度設計法は、論理的に洗練された立派な体系で、地震作用が震度でモデル化できる限り、問題がない。しかし、従来の震度法から L2 地震動に移るには、許容応力度設計体系以前の根幹に戻って出直さなければならない。この経緯を考えてみよう。

まず強震動計算法が設計地震動理論に必須の要素技術であることは間違いない。すなわち、地震の条件を設定し、構造諸元を与えて応答を計算する。これが要素となる。重要なのは、地震動計算と構造物の応答計算の過程は不可分であって、地震動だけ分離できないことである。(分離できるということは地震動の標準化ができるということである。もしそうなら考慮すべき要素過程の個数が激減するという大きな数学的メリットがある。)

例えばもし地震作用が最大加速度というスカラーで表示できるなら、このことは可能である。(これが許容応力度設計法+震度法の体系である。)しかし波行情報を維持する以上、無理に分離しても、個々のケースの強震動は”単なる計算例”以上のものではありません、それ以上の使い道はない。(近年、多くの機関が、具体的に震源域を想定した強震動のシミュレーションを行い、結果を公表している。しかし信頼性を含め、この結果が設計など人間の意思決定にどのような意味をも

つのか、はいささか疑問である。)

さらに設計と照査を区別する。論理的には、設計手続は、照査手続を原始手続とし、これを組み合わせることで構成することができる。照査の場合は、対象となる構造が定まっているので、設計よりも一段簡単で、考察に適している。つまり、照査手続こそは、耐震設計手続の基本である。

8.2 照査用地震動の設定

照査/設計用地震動を設定する問題においては、地震時刻歴は一つの標本過程である。可能な地震動の母集団 Ω を考えなければならないということであり、これは一つの確率過程である。設計地震動の設定とは、この Ω から”最悪”な標本過程を選出することである。

(これまで”最悪地震動”の研究がいろいろ存在してきた。そこでは計算の便宜的な仮定によって極度に単純化した最適性規範が仮定された。このアプローチには問題が多い。しかし説明には便利なので、ここでだけはこの言葉を使う。)

最悪地震動は構造物に応じて変わる。(一つの構造物の中でも、異なる二つの部材にとっては、最悪地震動は異なる。)つまり構造物を超越した普遍的な最悪地震動が与えられることはない。そして最悪地震動の選定と照査は同時に完了することになる。

照査をするためには、観念の上で、可能な地震動の全てについて応答計算を行なう。その結果をスキャンすることで、構造物が安全なのか、あるいはどのような損傷が生じるのかを判定する。この作業は一つの逆問題に他ならない。このプロセスで最も厄介なのは、膨大な応答結果から、最悪なケースを選出することである。そしてこれが逆問題の困難さの本質に他ならない。

照査のアルゴリズムができれば、その走査スキームを、今度は構造物の母集団 Θ に適用する。つまり設計はもう一つの走査ループをもつ。あるいは直積 $\Omega \times \Theta$ からペアを選択する問題となる。(設計者はそれを、多くの経験や、それから割り出した勘の形で成し遂げている。)

8.3 照査理論の適用性

社会には、照査だけですむものは多い。既設構造物の耐震診断はその例である。対象となる構造が既に存在している場合、 Θ を考える必要はなく、一つの元が決まっているから、震源モデルの適合精度がぐんと高まる。そこで地震研究所の宮武陸助教授と協力して、地震工学委員会の減震・免震・制震小委員会(家村浩和委員長)で免震橋梁用地震動の設定の研究をしたり³⁵⁾、首都高速の橋梁の照査を行なった。

損害保険もまた既設の施設に対して行なうから、その査定では、照査能力さえあればよい。今後は日本でも、保険が地震のリスクヘッジの重要な手段になる。地震

工学の成果を活用して査定の精度を上げることで、社会の防災力が高まることが期待される。

我が国の原発では、厳格な安全審査手続に従って、実施機関(電力会社+メーカー)、審査庁(経済産業省)、原子力安全委員会(内閣府)が何段階もの照査を行なう。制度設計としては十分なので、課題は、多段階の審査を体系的に組んで、真の多重スクリーニングを実現することである。これを次に述べよう。

9. 安全の審査

9.1 安全審査の方法論

設計の成案が既にあるとしてこの耐震性能を審査することを考えてみよう。その際、設計基準の体系と審査する専門家の知識体系を区別することが必要である。つまりここでのポイントは、

”照査において専門家は、設計基準との照合ではなく、自己の知識体系との照合をする” ということである。

あえてこのように言う理由は、耐震性能が極めて複雑であって夥しい数の要因が関与するため、如何に大がかりな基準をもってしても、基準に反映できない膨大な知見が残るという事実である。つまり基準の規定力は根本的に限られているということである。(これは法律一般に生じる規定力の問題である。もちろん設計基準も広義の法典である。)その証拠に、結果は運用者の力量に大きく左右される。

伯野元彦先生が「とにかく耐震設計をした構造物は大丈夫」と言われたことがある。一見自明なことのようだが最初の4文字は「内容は問わない」と言っている。だからこれは凄いメッセージであり、卓抜な正論でもある。

関与するパラメータが極めて多いから、基準でカバーしきれないストーリーが多すぎる。形式的に基準の事項をすべてクリアできても安全の確保はおぼつかない。それならいっそのこと技術者にフリーハンドを与えてしまったら、というのがそのココロである。これだと安全審査に不可欠な統一性が保証される魅力も大きい。(ただしこの技術者が1人前であることはもちろん必要である。)

基準適合性の検認はもちろん不可欠であるし、法的責任が問われるのはこちらである。しかし専門家を動員する以上、その知識体系を活用しなければ意味がない。また多段階審査をするのであれば、基準照合という縦糸と知識照合という横糸でマトリクスを形成すべきである。同種の審査を重ねるのでは無駄が多い。

安全審査では、専門家は行政官と2人3脚で進む。ところが専門家が基準という枠組みの外で議論を始めると事務局が不安をもつ。(それは尤もでもあろう。設計者は、設計基準を規範として設計した筈である。それを設計の後で基準以外の条件で批判されては困るだ

ろう)しかし専門家であれば、その知識体系は基準も踏まえている筈である。何よりも大事なことは危険を見逃さないことだ。

これは accountability にも関係する。合意形成論の観点からは、安全問題の説明責任は、判定者が直接説明すべきである⁵¹⁾。しかも説明者は、あらゆる疑問に対して、その場で、ピントの合った答えを、自分の言葉で出せなければいけない。そしてそのために必要なことは、いつでも全体像を示せること、つまり context を論じる用意がなければいけないのである。それを「基準に合致したことを確認した」と繰り返すのは、相手のフラストレーションを高め、結局は不信感を与えるだけである。

9.2 高レベル放射性廃棄物の事例

“特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律”が平成12年6月に成立した。特定放射性廃棄物とは、原発の使用済み燃料を再処理する過程で生じる高レベル放射性廃棄物のことで、夥しい種類の放射性元素を含み、その一部は 10^5 年スケールの長い半減期をもつ。最終処分法は、この廃棄物を地下数百mの地下に埋設する“深地層処分”の方法を選択し、これに伴う事業を規定している。

商用原子力では、原子炉、核燃料と廃棄物で3点セットをなす。このうち、原子炉と核燃料は、米欧が進んでいて、技術的にはかなり成熟しているから、これらの知見を参照できる。国土の違いも地震などに限定され、それ以外の汎用的な技術領域が非常に多い。したがって国際標準をベースに考えるという方針が可能であるし、妥当でもある。

しかし、深地層処分では、米国、フィンランドなど建設に着手し始めた国もあるが、多くの国では反対運動も強く難航している。また地殻による長期の放射能封じ込め能力が問題になるので、地質環境という国毎に大きく違う要素が重要な役割をもってくる。他国の経験は活用するにしても、基本は自前の研究開発に拠るしかない。

未踏技術である上に、極めて長期に亘る問題であるため、研究開発と施設建設を同時進行させなければならない。安全の審査・監視も同時進行せざるを得ない。(そしてあの“袋小路の恐怖”もピッタリついてくる。)

調査未了を理由に事業着手に反対する専門家もいる。しかし実施と検証が併行すること自体は問題でない。Boeing747ジャンボ機の時クローズアップされたことだが、現在の旅客機は、供用しながら耐久性試験を同時に行なっている。人類初のジェット旅客機コメット号の空中分解以来、疲労耐久試験が不可欠であることはよく知られているが、耐久試験(長い時間を要する)を待ってから使用するのではコストが大きすぎるので、監視しながら供用する。コストとリスクを比較したう

えで、利用者も各国政府もその対応を受け容れているのである。

残念ながら人間世界では、リスクの問題で回避ということはありえない。それは別のリスクに移しただけのことである。つまり被造物の生活は不可避免的にリスクを伴い、常に相対的な選択しか許されない。そしてそれは被造物の存在形式なのである。

参考文献

- 1) アジア・太平洋地域に適した地震・津波災害軽減技術の開発とその体系化に関する研究 (EqTAP) - 防災研究への新たな挑戦, 震災予防, 186号, pp.24-33, 2002
- 2) <http://www.edm.bosai.go.jp/eqtap/default.htm>
- 3) Standards Australia(1999), Risk Management, AS/NZS 4360:1999
- 4) ドイツ・イデオロギー, マルクス・エンゲルス選集, 新潮社, 1956
- 5) 失敗学のすすめ, 講談社, 2000. 最近では, 畑村洋太郎, 失敗学ができた, 学士会会報 No.841, 2003. ただし自己疎外との関連づけはされていないようである。
- 6) 結論の要旨は, 製造技術の高度化・複雑化 → 設計者が使いこなせない。外部委託の進行 → メーカーは不具合を発見できない → エラーの連鎖を断ち切れない
- 7) 大内兵衛・松川七郎訳, 諸国民の富 I,II, 岩波書店, 1969
- 8) 森本光生, 佐藤超函数入門, 現代の数学 20, 共立出版, 1976
- 9) A statistical approach to the mechanics of granular material, *Soil and Foundation*, Vol.V, No.2, pp.26-36, 1965
- 10) 変形する物体の力学に関する一考察, 土木学会論文集 No.190, pp.1-9, 1971
- 11) 寺沢寛一訳で以下のものがある。括弧内は共訳者。一般力学(久末啓一郎), 変形する物体の力学(野田哲夫), 理論電気磁気学, 理論光學(坂井卓三), 理論熱學(小谷正雄)
- 12) Methoden der Mathematischen Physik, Bd.I,II, Springer-Verlag, 1968, 初版は1924
数理物理学の方法, 1-4, 東京図書, 1959
- 13) 久保亮五教授還暦記念事業実行委員会, 統計力学の進歩, 葦華房, 1981
- 14) 真方敬道訳, 創造的進化, 岩波文庫, 1979
- 15) なくてなくて, 笠信太郎全集 5, 朝日新聞社, 1969
- 16) サイバネティックス, 岩波書店, 1962
- 17) 時間と自由, ベルグソン全集 1, 白水社, 1965
- 18) 道元, 正法眼蔵 20, 有時, 岩波書店, 1970
- 19) 高木貞治, 改訂代数学講義, 共立出版, 1960
- 20) 強震動地震学と土木耐震設計論, 地震 2 Vol.47, pp.203-224, 1994
- 21) 高橋亀吉, 森垣淑, 昭和金融恐慌史, 講談社学術文庫, 1993, 初出は1968
- 22) 昭和天皇, 国民への謝罪詔書草稿, 文芸春秋, 2003
- 23) 世界銀行, 東アジアの奇跡, 白鳥正喜監訳, 東洋経済新報社, 1994
- 24) Krugman P., The Myth of Asia's Miracle, *Foreign Affairs*, pp.62-78, 1994 Nov/Dec
- 25) 例えば, ステイグリッツ, 世界を不幸にしたグローバリズムの正体, 徳間書店, 2002,
Stiglitz, J.E. and Yusuf, S. (eds.), *Rethinking the East Asian Miracle*, WB & Oxford Univ., 2001
リチャード・クー, アジア通貨危機の実態と教訓, "変わる東南アジア", 慶應義塾大学出版会, 2002
- 26) 例えば Bhagwati J., The miracle that did happen: Understanding East Asia in comparative perspective, 1996 (Columbia 大学のホームページにある)

- 27) 野口悠紀雄, 1940年体制, 東洋経済新報社, 新版2002年
- 28) カレル・ヴァン・ウォルフレン, 日本権力構造の謎, 早川書房, 1994, 初出は1989
- 29) フォング, G. R., 日本の産業政策におけるターゲティングの衰退, 日本国際政治学会編, 21世紀の日本, アジア, 世界, 国際書院 pp.313-346, 2000
- 30) 例えば Day G.S. and Schoemaker P., *Managing Emerging Technology*, John Wiley, 2000
- 31) リンゼイ, 民主主義の本質, 未来社, 1964
- 32) IAEA, Retrievability of high level waste and spent nuclear fuel, TECDOC-1187, 2000
- 33) 新刑事訴訟法綱要, 七訂版第十七刷, 創文社, 1975
- 34) 松尾稔, パラダイム転換の世界と時代を駆ける, 土木学会誌, Vol.81-7, pp.14-18, 1996
- 35) 土木学会 地震工学委員会 減震・免震・制震小委員会, 減震・免震・制震構造設計法ガイドライン(案), 2002
- 36) 東原紘道, 地震科学者の説明責任, 科学, Vol.67, No.11, pp.831-835, 1997
- 37) 鷲津久一郎, 空力弾性学, 共立出版, 1957
- 38) Aki, K. and Richards, P.G., *Quantitative Seismology*, W.H. Freeman, 1980
- 39) Maruyama, T., On the force equivalents of dynamical elastic dislocations with reference to the earthquake mechanism, 地震研究所彙報, 41, pp.467-486, 1963
Burrige, R., Knopoff, L., Body force equivalents for seismic dislocations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 54-6, pp.1875-1888, 1964
- 40) Aki, K., Seismic displacements near a fault, *Journal of Geophysical Research* 73, pp.5359-5376, 1968
Hartzell, S.H. and Heaton, T.H., Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial valley, California, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp. 1553-1583, 1983
- 41) 例えば Ide, S. et al., Source process of the 1995 Kobe earthquake: Determination of spatio-temporal slip distribution by Bayesian Modeling, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.86, No.3, pp.547-566, 1996
また Koketsu K. et al., A fault model of the 1995 Kobe earthquake derived from the GPS data on the Akashi Kaikyo Bridge and other datasets, *Earth Planets Space*, 50, pp.803-811, 1998
- 42) 土木学会 耐震基準等に関する提言集, 土木学会, 1996
- 43) Megawati K. et al., Derivation of near-source ground motion of the 1995 Kobe (Hyogo-ken Nanbu) earthquake from vibration records of the Akashi Kaikyo Bridge and its implications, *Engineering Structures*, 23, pp.1256-1268, 2001
- 44) Koketsu, K. et al., Rupture process inversion using 3-D Green's functions: the 1995 Kobe earthquake revisited, (in preparation) 2003
- 45) 測地学審議会, 地震予知のための新たな観測研究計画の推進について(建議), 1998
- 46) 菊地正幸編, 地殻ダイナミクスと地震発生, 朝倉書店, 2002
- 47) 例えば, 半無限弾性体上の円板の水平, ロッキング連成振動, 土木学会論文集, No.386, I-8, pp.98-105, 1987
- 48) 東原紘道, 土木工学のパラダイム転換と応用力学のすすめ, 土木学会誌, Vol.85-8, pp.6-8, 2000
- 49) 東原紘道, ACROSS the tide of recession, 月刊地球号外, Vol.20, pp.204-208, 1998
- 50) 佐伯昌之他, 精密制御震源の大深度地下展開とその性能検証, 応用力学論文集, Vol.6, 2003
- 51) 東原紘道, リスク管理技法の実装, 原環センタートピックス, No.64, pp.1-7, 2003

(2003年4月18日受付)