

建築計算工学とは

Computational Engineering for Architecture

大崎純

Makoto OHSAKI

Overview of the field of 'Computational Engineering for Architecture' is presented. The fields of research and education related to computational engineering are summarized. Finally, the benefits and negative effects of using computers in structural analysis and design are discussed.

1. はじめに

本稿は、建築の分野での「計算」の位置付けについて、筆者の私見や今後の研究・教育展望を述べたものである。したがって、何ら一般的事実を示したのではなく、エッセイ的なものとして読んでいただきたい。

2. 建築計算工学の研究と教育

1Frank Lloyd Wright は、'Beautiful buildings are more than scientific. They are true organism, spiritually conceived; work of art, using the best technology by inspiration rather than the idiosyncrasies of mere taste or any averaging by the committee mind' といっている。

2. たぶん H. Hoover あるいは F. D. Roosevelt だったと思う。

3. このような状況は、文系出身者に支配される官僚の世界において、京大建築を卒業して上級の官僚になっても「技官」と言われることを反映しているようにも思われる（例えば、法制執務コラム集、<http://housekyoku.sangin.go.jp/column/column035.htm>）参照。

4. 超並列コンピュータによって、地球の内部と大気を丸ごと解析しようというプロジェクト。並列マシンの計算速度は現在世界一である。詳細は <http://www.es.jamstec.go.jp/esc/jp/> を参照すること。

建築学は工学と芸術の境界領域にあり、両者の協調によって人工物でありかつデザイン的作品である建築が創造される。しかし、建築が社会的評価を受ける際には「デザイン」が重要視される。また、コンペでの採否はデザイナーの知名度と力量に大きく左右されるため、どちらかといえば工学より芸術が優先される傾向にある¹。したがって、構造や環境の技術者の立場が正に評価されているとはいいがたく、単なるエンジニアとみなされているともいえる。昔アメリカの大統領が²、極めて困難に思われる開発計画を提案して、「あとはエンジニアに任せろ」と言ったということを聞いたことがある³。これを建築に置き換えると、デザイナーが実現困難な建築をデザインして、「あとは構造技術者に任せろ」ということになるであろうか。しかし、各所で語られていることであるが、ドームやアリーナなどの大スパン構造物は、力の流れを無視して設計することはできず、これらの建築では、力学的に無理のないことがデザイン面での美しさの前提条件となっているともいえる。

話の論点を絞るために、対象を限定して、建築構造学における研究の評価について考えてみる。筆者の主観を許していただくと、研究価値の順位は概ね次のようになっている。

1. 理論的研究によって普遍的法則を見出す。
2. 物理実験によって新しい現象を発見する。
3. 数値実験（数値解析、シミュレーション）によって新しい現象を発見する。
4. 数値解析法を提案する。
5. 既存の方法によって解析あるいは実験を行なう。

上記のように、物理実験は数値実験より上位である。また、年配の研究者の中では、数値実験では新しい現象や普遍的原理を発見することはできないので、物理実験を行なわなければならないと考えている人が多い。極端にいうと、数値実験（解析）をする人は所詮「計算屋」である。

それでは、本当に物理実験は数値実験の上位に位置するのであるか。地球シミュレータ⁴によって地球を丸ごと解析できる時代に、建築の分野だけそのような時代錯誤と思われるようなことを言っているののだろうか。現在の数値解析技術によれば、材料特性の不確定性が小さい場合、動的問題あるいは大変形問題でも、構造物の挙動を十分な精度で解析できると考えられる。また、新しい材料や構造形式を開発する際にも、数値実験は物理実験と比べ物になら

ないほど安価であり、塑性化や破壊をとまなう問題でも、パラメトリックに設定を変化させて数値実験を多数回行なうことができる。筆者の専門分野が建築構造であるため、構造実験を例にとって所見を述べたが、上記のような考察は、建築計画・環境・生産の諸分野でもいえることである。

物理実験や統計的調査のかわりに数値実験によって現象を明らかにし、それに基づいて設計や分析を行なうための学問を計算工学という。その手法は、線形代数のような基礎的分野から、システム工学や情報工学の中で「計算」に関連する諸分野を含む。本来、計算工学は Computational Engineering であり、工学の全ての分野を包括する学問であるべきである。しかし、専門領域が細分化されている現状において、工学の全ての計算をカバーする学問や、学会組織は存在しない。日本計算工学会⁵という学会があるが、そこでは力学が中心であり、名称としては「計算力学会」のほうが適当である。

建築の分野でも、計算工学を専門とする研究者のための組織は存在しない。建築学会の情報システム技術委員会は、計算以外の情報工学の諸分野（例えばデータベース、ネットワーク、コンピュータグラフィックスなど）を主な対象としており、「計算工学」に関する小委員会が存在しないのは極めて不自然である。その結果、計算屋は、建築計画、環境、構造の各委員会の下に分散して肩身の狭い思いをすることになる⁶。さらに、細かくみても、構造の分野では、応用力学、鋼構造、振動、シェル・空間構造などの運営委員会に分散している。このような状況なので、「私の専門は建築計算工学です」という研究者を見かけたことはない。

建築計算工学の発展の可能性について検討するため、建築学会論文集から、計算工学関連のキーワードを集めてみた。構造系、環境系、計画系のキーワードをそれぞれ表1,2,3に示す。昨年だけのデータなので、全てのキーワードを網羅しているとは限らず、各分野で一般的でない用語も含まれている。また、統計解析、微分方程式、線形代数などはすべての分野に関係するので省略している。これらの結果より、予想通り、類似の手法が複数の系で用いられていることが分かる。例えば、有限要素法は、構造解析と流体解析で用いられ、時系列解析は、すべての分野で利用されている。とくに、CFD（Computational Fluid Dynamics, 数値流体力学）は、耐風工学、火災シミュレーション、伝熱工学、環境制御など、極めて多くの分野で用いられている⁷。それにもかかわらず、各分野で共通に用いられている手法に関わる研究者の相互交流がほとんど見られないのは遺憾である⁸。

5. ホームページ (<http://www.jscs.org/>) の設立趣旨に書かれているとおり、学会の設置目的は、「計算力学」の発展にある。

6. 例えば、音響数値解析WG、計算応用力学小委員会、空間構造における計算機応用小委員会など。

7. 学会としても、日本風工学会、日本伝熱学会、日本流体力学会、日本レオロジー学会などが存在する。

8. 情報システム技術委員会の中の知的システム小委員会では、ソフトコンピューティング的な手法に限定して、建築の分野横断的な情報交換が行なわれている。

表1 構造系の計算工学

風応答解析	数値流体解析, 周波数応答解析, POD解析
空力不安定解析	数値流体解析, 有限要素法, 固有値解析
地震リスク分析	数理計画法, 信頼性解析, 確率論
弾塑性解析, 崩壊解析	有限要素法, 数理計画法, 信頼性解析
非線形解析, 座屈解析	ホモトピー, 固有値解析
地震応答解析	振動解析, 周波数応答解析, 応答スペクトル, 有限要素法, 数値積分法, モンテカルロシミュレーション
地震動解析	境界要素法, 有限要素法
システム同定, モニタリング	周波数応答解析, カルマンフィルター, ニューラルネットワーク, 時系列解析
制振(震), 免震	周波数応答解析, 時刻歴応答解析, 最適制御
破壊力学	有限要素法, 境界要素法
材料力学	確率論, 有限要素法, 均質化法
浮体構造物	流体解析, 特異積分
最適設計	数理計画法, 遺伝的アルゴリズム, ヒューリスティックス

表2 環境系の計算工学

火災安全性, 避難	信頼性工学, 確率論, モンテカルロシミュレーション, 数値積分
伝熱工学, 空調設備	回帰分析, エクセルギー, エントロピー, 流れの可視化, 信頼性解析, 確率理論, マルコフ過程, システム工学, モンテカルロシミュレーション, 熱伝導解析, 数値流体解析, 有限要素法, 時刻歴解析
熱環境制御	数値流体解析, ニューラルネットワーク
空気汚染	数値流体解析
音源解析	フィルタリング, 周波数応答解析, フーリエ解析, 伝達関数, インパルス応答
風環境	数値流体解析
煙流動解析	確率論, ランダム解析
交通振動	振動解析, 周波数応答解析, 応答スペクトル, 確率論

表3 計画系の計算工学

住環境評価	ファジイ理論, CG
景観評価	SD法, 画像解析, フーリエ変換, 効用理論
空間・形態認識	VR, CG, 統計解析, グラフ理論, 遺伝的アルゴリズム, 知識工学, 述語論理
スケジューリング	確率論
都市解析	コンジョイント分析, 計算幾何学 (ボロノイ分割, デローネ網), グラフ理論 (最短木), 情報理論
施設配置, 室配置	多目的計画法, 最適化, グラフ理論, ニューラルネットワーク, マルチエージェントシステム, 自律分散システム, 数理計画法, 遺伝的アルゴリズム
地域・空間分析	フラクタル, カルマンフィルター, 情報理論, エントロピー, セルオートマトン, 確率論
建築経済	データマイニング, 情報理論, エントロピー, エージェント理論, 遺伝的アルゴリズム, ニューラルネットワーク, 多目的最適化, ゲーム理論
景観分析・感性工学	画像解析, ウェーブレット変換, データマイニング
プロジェクトマネジメント	リスク分析

計算工学関係の手法を、数学的対象によって分類すると、例えば下記のような分類にしたがって、計算工学関連の研究分野の再構成が可能になると考えられる。

1. 微分方程式

- ① 初期値問題 (時刻歴解析, 数値積分法, 時系列解析, ホモトピー, 周波数応答解析)
- ② 境界値問題 (有限要素法, 境界要素法, 逆問題)
- 2. 確率論・統計解析 (信頼性解析, モンテカルロ法, カルマンフィルター, 回帰分析, マルコフ過程)
- 3. ソフトコンピューティング (遺伝的アルゴリズム, ニューラルネットワーク, ファジイ理論)
- 4. システム工学 (数理計画法, 最適制御, グラフ理論, 計算幾何学)
- 5. 線形代数 (線形方程式, 固有値解析)

以上のように、建築の諸分野では、計算工学的手法は必要不可欠であり、また、それらの手法は各分野に横断的に利用されていることがわかる。したがって、大学及び大学院において、それらを系統的に教育する必要がある。そこで、京都大学建築学科・建築学専攻でのシラバスの中で、計算工学に関するキーワードを挙げてみると、表4のようになる⁹。

9. シラバスのキーワードを挙げたので、実際に教えられているかどうかは不明である。

表4 京都大学での計算工学関係の講義内容

建築環境工学・演習	波動伝搬理論, 周波数特性解析
建築情報処理演習	Fortranプログラミング
工業数学	フーリエ変換
建築構造解析 構造解析学特論	確率論, 振動解析, 有限要素法, 境界要素法, 非線形解析法
耐震構造	周波数領域解析, 波動論, 振動解析
建築応用数学	確率論, 微分方程式, フーリエ変換, 変分法
建築情報システム学 建築情報システム学特論	数理計画法, 組合せ最適化, 計算幾何学, グラフ理論, 微分幾何学, 遺伝的アルゴリズム, ファジイ理論, ニューラルネットワーク, ヒューリスティックス, データマイニング, ソフトウェア工学
耐風構造	流体解析
建築振動論	振動解析, 不規則振動論, 信頼性解析

例えば、環境系でも重要である有限要素法は、構造系で教えられ、環境系の学生は受講していない。また、流体解析や振動論は、構造と環境で重複して教えられている。このような状況を整理して、建築計算工学を系統的に教えるためのカリキュラムが必要である。

いうまでもなく、計算工学の教育目的は、アプリケーションの使用法ではない。その内容としては次のような項目が考えられる。

- 1. 各分野での基礎理論。(例えば有限要素法では変分法など)
- 2. 複数の手法やアルゴリズムがある場合、各手法の概要と比較。
- 3. ソフトウェア工学の基礎とプログラミング技術。
- 4. 結果の評価・検証方法。
- 5. アプリケーションの使用法。
- 6. ハードウェア, ネットワーク技術などの基礎。

3. 建築構造設計における計算工学

前節では、建築全般での研究・教育を視野に入れて、建築計算工学の必要性を述べた。本節では、とくに構造設計での現状と課題について考えてみる。構造設計におけるコンピュータ利用の弊害については、1970年代に一貫構造計算プログラムが開発されて以来、議論し尽くされてきた感がある。しかし、最近の急速な技術革新により、専門家でない人でも、構造設計を極めて安易に実行できるようになったため、新たに問題点が顕在化している。このような状況において、コンピュータ利用の功罪について、学会レベルでも再検討されている¹⁰。構造設計に関わる功罪をまとめてみると、例えば次のようになる。

1. 計算技術の発展により、構造計算に必要とされる時間が短縮され、構造設計者は余剰時間を創造的な仕事に使うことができるようになった。しかし、それがより良い設計につながるかどうかは疑問であり、単に工期や経費の削減を強要される結果になる可能性もある。一方、「暗算」→「筆算」→「算盤」→「計算尺」→「電卓」→「メインフレーム」→「スーパーコンピュータ」→「ワークステーション」→「パソコン」という発展に伴う単純作業からの開放という意味での恩恵については疑問の余地はない。
2. 非線形解析、弾塑性解析、有限要素解析など、高精度の解析が可能となった。それにともない、高性能の材料やデバイスを用いることができるようになり、建築構造物の安全性や信頼性が向上した。ところが、建築の構造設計では、地震荷重や材料特性など、極めて不確定な量が多い。このことを理由に、解析プログラムの精度が悪くても良いと考えるのは大きな誤りである¹¹。例えば時刻歴動的応答解析では、定められた問題設定の下で、時間ステップを小さくすれば必ず正解に収束することが保証されていなければならない。解析法の開発を目的とする論文では、解析結果を十分な精度（例えば6桁）で示す必要がある。しかし、そのプログラムを使って構造設計を行なったときに、地震応答解析結果として4桁以上の結果を示すのは無意味である。
3. コンピュータを利用すれば、構造力学などの基礎知識を持たない素人でも構造設計を行なうことができる。その結果、とんでもない間違いに気づかない場合がある。また、構造技術者の社会的地位を維持できず、優秀な人材が構造技術者を志望しなくなるという弊害がある。したがって、「素人でも使える」ことを宣伝文句とするソフトを開発することは、構造技術者が自らの境遇を悪化させることにも繋がりがかねない。このような意味からも、建築計算工学の分野を確立し、大学のみならず学会で生涯にわたって再教育し、有能な建築計算工学技術者を育成するべきである¹²。
4. 解析がブラックボックス化し、解析の過程やそのような結果が得られた理由が見えてこないという弊害がある。この点は、現建築学会長が最も危惧されている点である¹³。しかし、熟練技術者ならば数値解析結果から力学的考察をすることは可能である。したがって、コンピュータ利用に問題があるのではなく、非熟練技術者が利用することに問題がある。自動車の運転が未熟な人が事故を起こしても、自動車そのものの価値を否定する人はいないであろう。
5. 上記と類似した弊害として、解析の対象範囲を超えて使ってしまうという弊害も考えられる。しかし、このこともコンピュータを利用することに問題があるのではなく、技術が伝承されずマニュアルも読まないことに問題がある。使用法の間違いをチェックするためのリスク管理マニュアル（ソフトのマニュアルではない）が必要である。また、プログラムが間違っていた場合の責任の所在も明確にしなければならない。あるいは、非線形解析や動的解析では、プログラムごとに結果が異なるのは常識的である。間違いではなくてもモデル化や解析パラメータによって結果が異なる場合があり、何が正しいのか判断できない。そのため、複数のソフトを利用できる環境にある場合は、最も望ましい結果が得られるようなソフトを使ってしまうという弊害（恩恵？）も考えられる。

10. 建築設計全般におけるIT化の功罪については、日本建築学会の「情報化時代の建築設計のあり方に関する特別調査委員会」で現在検討している。2節の内容はその一部である。本来ならば、委員会が審議中の内容をこのような形で公開することは望ましくないが、本年8月の建築学会大会での研究協議会で、審議内容を公開して会員からの意見及び情報を収集することになっているため、それを先取りした形ということでお許しいただきたい。この場を借りて、和田 章委員長及び委員各位に謝意を表します。

11. モデル化と解析の精度については、「建築構造設計用解析モデルの信頼性と精度、日本建築学会近畿支部構造力学部会、構造力学講究録、第37号、2004年3月」で議論されている。

12. 機械工学の分野では、CAE (Computer-Aided Engineering) の技術者の地位は社会的に認められているといえる。また、機械学会や、非線形CAE協会 (<http://www.jancae.org/>) などで、活発に勉強会やセミナーを開催している。

13. 秋山 宏, 年頭の挨拶, 建築雑誌, Vol. 119, No. 1513, pp. 4-6, 2004.

4. おわりに

将来の研究分野としての、建築計算工学のあり方について私論を述べてみた。教育レベルでは、「建築計算工学」のような講義は必要不可欠である。また、学会レベルでは、建築全般の計算工学を包括するような学問分野が必要である。情報化という必然的な時代の流れに乗り遅れないよう、既存の学問分野の擁護だけでなく、将来を見据えた対応が期待される。