コンピュータと解析法の歴史

和田　章*

1．はじめに

学研社発行「6年の科学」の1989年5月号に載っていたのだが，試算によると，宇宙に数ある星のなかで，現在の地球上の人類と同程度の文明をもっていると考えられる星は，地球を含めて2.6個となるそうだ。無数の星のなかで地球以外には1.6個の星しかあり得ないと考えると，ある意味では幸せな所に，幸せな時代に生まれたものだと感ずる。このような星があったとして，現在われわれが使っているようなコンピュータを持っているのだろうか，などと考えることも楽しい。

2．わが国の建設分野にコンピュータが導入されるまで

第2次世界大戦の終わる少し前の1944年，アメリカのハーバード大学において，IBMの協力により，Mark Iと呼ばれる大型自動計数型計算機が完成している。Mark Iは重量が5t，使われた電線の長さが800kmもあり，78台の機械で構成され，この機械には3304個の電磁式リレーが取り付けられていた。Mark Iの性能は，23けたの加減算を0.3秒，乗算を6秒で行うことができ，紙テープに穿孔した命令に従って作動し，結果を電動タイプライターに出力することができた。15年間にわたって活躍し，1959年に一線を退いた。最初の電子式計数型計算機はENIAC（Electronic Numerical Integrator And Calculator）と呼ばれ，アメリカ陸軍の要請でペンシルベニア大学のムーア電気工学研究所において設計され，1946年に完成している。電子式フリップ・フロップ回路を採用し，電子パルスを用いて真空管をスイッチのように点滅させ，ON，OFFの状態に数字の意味をもたせた。リレー式に比べ何千倍の速度で作動するこの計算機は，現在のコンピュータの開発のきっかけとなった。しかしながら，これらの機械はBoard System，すなわちPlug in Moduleと呼ばれる手法により計算順序の規制を行ったものであり，現在のコンピュータのようなプログラミングの概念にはなっていなかった。

一方，現在のコンピュータを完成させる重要な考え方として，プログラムをあらかじめコンピュータの中に記憶させておき，その手順に従ってデータを処理していく方式がある。この考え方は1940年代にDr. John von Neumannによって提案され，イギリスのケンブリッジ大学で，1949年にEDSAC（Electronic Delay Storage Automatic Computer）1号として開発され利用されはじめている。アメリカでは1949年から1952年の間に，この考え方に従った数台のコンピュータが作られている。たとえば，Aberdeen Proving GroundsのEDVAC（Electronic Discrete Variable Automatic Computer），MITのWirlwind 1，国勢調査局のUNIVAC I等である。

その後，1953年にはIBM 701が発表された。この機械では2進法とElectrostatics式の記憶装置を用いており，速度性能は格段に進歩した。この時代には次々と新しい機種が発表され，IBM 704，705が1955年11月，12月に，UNIVAC IIが1957年12月に生産されている。以上は当時の大型コンピュータであるが，小型コンピュータとしては，Bendix G-15，IBM 650等が同時期に生産されはじめている。IBM 704は1955年に東京の中央気象台へ輸入され，台風の予報に応用されていた。IBM 650は日本へも何台か輸入され，データセンターで数値計算の依頼を受け，活躍しはじめていた。

建築界でコンピュータの導入を初期に踏み切った故服部　正博士は，この時代（1959年）にニューヨークへ留学しており，帰国後，当時の小型コンピュータ（IBM

＊わだ・あきら／東京工業大学助教授　工学部建築学科（正会員）

1620）を輸入している。この時代は今と異なり国産品を擁護していたから，輸入のためには日本の大蔵省と通商産業省の許可が必要であり，「構造計算への計数型電子計算機導入計画書」という報告書を提出，たいへんなエネルギーをかけて政府を説得している。これは「序論」，「1. 我が国の建築物構造設計の現状」，「2. 米国における Digital Computer の利用状況」，「3. 如何なる計算に Computer を利用するか」，「4. 如何なる機械が望ましいか」，「5. 国産 Computer 及びその他の外国製品の検討」および「結論」で構成され，50 ページにわたる力作で，今読んでも，感動させられる報告書である。服部　正博士のコンピュータ導入への意気込みが感じられる序文の最後の部分を引用させていただく。

> Computer の導入によって，一切の建築の計算がこれにのるものであると，夢想っていない。量産の時代といえども手芸品は残るのである。然しながら，毎日の殆どが，この量産的設計に追われているのは実情である。構造設計者が，真に意を用いるべき処は他にある。決して計算のみが，構造設計者の仕事ではない。
>
> 地震国日本には，力学的問題は堆積している。速やかに，前記のような簿記的仕事に近い計算業務から解放されて，より高度な問題に，これまた Computer を利用して進めることこそ，我々の願いである。

（服部　正博士の軌跡「力学とコンピュータに憑かれて」の中から引用しました。）

IBM との契約は 1960 年 7 月 6 日に結ばれているが，そのときの月間レンタル費は，中央計算装置，紙テープ読取り装置，紙テープ穿孔機を合計して $1 600（約 60 万円）であった。服部　正博士と仕事をともにしていた加藤　進氏の記録によると，当時の給与が月 2 万円であったから 30 人分の費用に相当し，所員が 10 人の事務所としては，たいへんな決断であったことになる。

1962 年の調査によると，世界各国のコンピュータ設置台数は表—1 のようになっている。この時代においては日立，日本電気，富士通，沖，三菱等が国産コンピュータを生産し始めていたが，その生産台数は 1959 年から 14 台，33 台，73 台，150 台と増えていたものの，同時期に輸入したコンピュータの台数 37 台，97 台，126 台，220 台に比べると約 2/3 の数でしかなかった。

表—1　世界各国の電子計算機設置台数（1962）

国　名　等	台　数	割　合（%）
アメリカ	9 337	73
ソ　連	1 000	7.8
西欧諸国	1 622	12.7
中南米	222	1.7
オーストラリア	82	0.6
アフリカ・中東	58	0.5
アジア（日本を除く）	13	0.1
日　本	509	4.0

［西欧諸国の内訳］
西ドイツ 472，イギリス 389，フランス 342，イタリア 163，ベネルックス 110，スカンジナビア 74，その他 72 台
［資料］ 外国については，Datamation, Aug. 1962 および化学工学，Vol. 26, No. 4, 1962 による。
日本については，日本電子計算機社調べ（1962 年 12 月末）

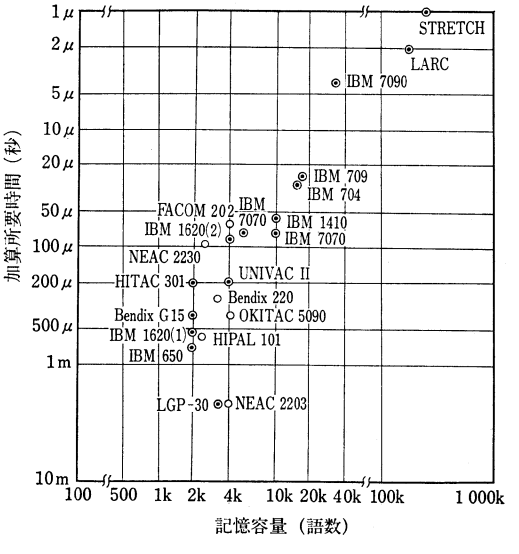
この時期におけるわが国の土木・建築分野への導入状況は，コンサルタントとしては先に述べた服部　正博士のほかに，日本技術開発が NEAC（日本電気社製）を，日本建設コンサルタントが FACOM（富士通社製）を導入している。建設会社では，ほぼ同時期に清水建設が LGP 30 を導入し，やや遅れて大成建設，千代田化工建設が IBM のコンピュータを導入している。

研究機関として，建設省建築研究所には NEAC，鉄道技術研究所には MELCOM（三菱社製），Bendix G-15 が導入されている。大学へも，このころにはコンピュータが設置されているが，ほとんどの場合が日本製であった。

このような状況でも一般の技術者にとってはコンピュータを利用することはむずかしく，どうしても必要な場合には民間の計算センターを利用せざるを得なかった。

図—1 に，この時代のコンピュータの加算に要する時間と記憶容量を示す。現在のパーソナルコンピュータ（パソコン）の性能と比較すると，両軸とも数百倍の違いがあることが読み取れると思う。コンピュータの値段は，物価が約 10 倍になっていることを無視しても，そのころの 1 か月分のレンタル費で現在のパソコンが数台買えるほど高価なものであった。

1964 年にコンピュータ導入を決断した日建設計の当時副社長の塚本猛次博士らが行った調査報告書によると，今から 25 年前の技術者がコンピュータに対してもっていた期待と不安がよく分かる。そのなかではきわめ



図—1　記憶容量と演算時間

て少数の意見であるとして，コンピュータ導入に対して批判的な考えを次のように挙げている。

1) 電子計算機よりも人間がやった方が速い。
2) 機械的な演算よりも，人間の感覚に重きをおいたデザインの占める要素のほうが多い。
3) 便利かもしれないが，その費用を考えると，人間が行ったほうが経済的である。
4) 複雑な機械だけに，これの運用に専門の人をつけて，はたして遊ぶことなく活用できるだけの仕事の量があるのか。
5) どうしても電子計算機の力を借りなければできないような仕事は，ケースごとに専門のコンピュータセンターに外注すればよいではないか。

また，肯定的，積極的意見としては次のようなことが述べられている。

1) 諸外国（アメリカ，ドイツ，ソ連）では，すでに実用化している。日本でも必ず電子計算機が実用化される日が近い。
2) 超高層建築の設計，あるいは今まで略算法しかなかった耐震設計などがダイナミックデザインに変わったときには，電子計算機がなくては設計不可能である。
3) 今まで高等のごとく考えられていた計算を機械がやることにより，優秀な人材をもっと人間でなければできない仕事のほう（基本計画，業務，その他）へ回すことができるではないか。
4) 建設技術者と言われる人の 1/2～2/3 の人のやっている仕事は構造，設備，土木，音響等の計算であり，熟練してくれば他の人の 1/2～1/3 の速さでやることはできるが，もし機械の運用をうまくやることができれば，これを想像もつかない速さ（たとえば 1/1 000）にまで短縮できるのである。
5) 今までは面倒であるためにやれなかった比較計算や，想像もしなかった計算にも活用できる。

*

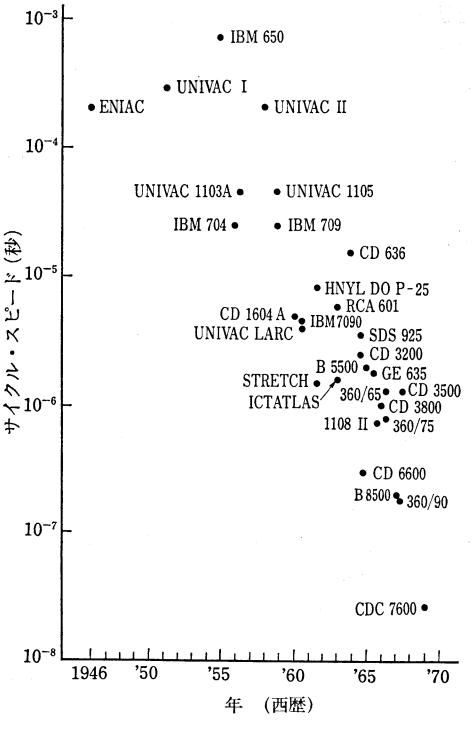
1964 年は東京オリンピックが開催され，東海道新幹線が開通した時代であり，その後大阪で万国博覧会が開催された 1970 年，新宿に 200 m の高さをほこる超高層ビルが建設されはじめたころまで，今では信じられないくらい低い性能で高価なコンピュータを相手に血眼になっていた人達が大勢いたのである。

3. J.H. Argyris が 20 年前に描いた夢

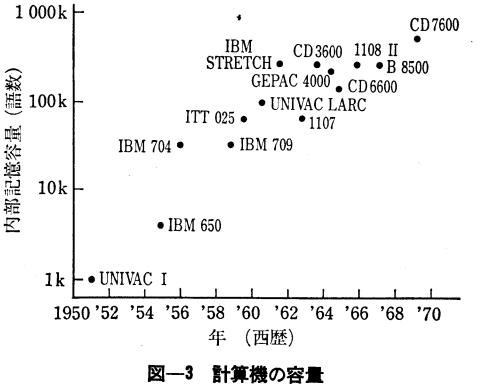
1960 年代の後半もっとも高速大容量と言われたコンピュータは CDC 7600 であり，これは現在の EWS（エンジニアリングワークステーション）と同レベルの能力であるが，西ドイツ・シュツットガルトの研究所で有限要素法の開発者として有名な J.H. Argyris は，このコンピュータを使っていた。そのときに J.H. Argyris が報告したコンピュータの性能に関する 2 つのグラフを図—2, 3 に示す。図—2 は，年代とコンピュータの計算速度（サイクルタイム）の関係を示している。図—3 は記憶容量を示しているが，倍精度の 500 k 語とは，今の単位で 4 M（メガ）バイトということになる。

J.H. Argyris は，ちょうど 20 年前の 1969 年 5 月に，“The Impact of the Digital Computer on Engineering Sciences” という特別講演をイギリスの王立航空協会で行っている。そのなかに，50 年後，100 年後のコンピュータおよび科学者，技術者の様子を予想している。

J.H. Argyris の予想はすばらしく，この CDC 7600



図—2 計算機の速度



図—3 計算機の容量

表—2 (a)　歴代の計算機一覧（東京工業大学総合情報処理センター）

年　月	計算機名	MFLOPS	記憶領域 (MB)（仮想記憶等）	ディスク位置決め時間 (m/sec)	ディスク回転待ち時間 (m/sec)	データ転送速度 (kB/sec)	1トラック記憶容量 (Byte)	備　考
1972. 1	H-8500	0.1	0.25	75	12.5	156	3 525	
1972.10	H-8700	0.4	0.21(1.05)	75	12.5	312	7 294	
1977. 1	M-180	1.3	1.0	25	8.4	806	13 030	
1980.10	M-200 H	10	3.0	25	8.4	806	13 030	アレイプロセッサ付
1981. 8	M-200 H	10	4.0	25	8.4	806	13 030	アレイプロセッサ付
1983. 8	M-280 H	20	4.0	18	8.4	1 198	19 069	アレイプロセッサ付
1987.12	M-280 H	20	5.0	17	8.3	3 000	47 476	アレイプロセッサ付
1988. 4	M-660 K	3.5	8.0(50)	17	8.3	3 000	47 476	
1988. 4	SUN 4/280	6	128					
1988.10	ETA 10/E	300	32(500)					スーパーコンピュータ 1 CPU 当り 計 8 CPU

（注）FLOPS：1 秒当りの浮動小数点演算回数（64 bit 演算），MFLOPS＝10^6 FLOPS

が 50 年後にはアタッシュケースに入ってしまうであろうと述べ，中央の計算機とは腕時計ほどの機械で通信ができるようになると言っている。Argyris の考えた 50 年後の予想の半分は，すでに達成されたとも言える。100 年後の予想はさすがに実現されていないが，人間の脳波とコンピュータが直接に情報交換を行うようになるのではないかと言っている。

4. コンピュータの発展と連立方程式の求解

構造解析をマトリックス変位法によって展開して解を得るためには，当然のことであるが多元連立方程式を解く必要がある。現在のマトリックス変位法がその原点を 1800 年代の研究に置いているにもかかわらず 1950 年代になって花が開いたのは，1800 年代には不可能であった多元の連立方程式をコンピュータによって解かせることができるようになったからである。20 年以上前のことになるが，初期の高層ビルの骨組解析に際して，未知数の数が 300 ほどの平面骨組を解くのに一晩を要し，朝になってプリンターの紙づまりが起きないようにプリンターのスイッチを切ったまま帰宅したこと，有限要素法により約 1 000 元に近い未知数の平面応力解析を行った際には，金曜日の夕方に計算を開始し，月曜日に答をチェックするという状況であった。スーパーコンピュータが使える現在においても，非線形応力解析を進めるためには連立方程式の求解にもっとも多くの時間を要しており，そのスピードはまだ十分とは言えず，さらにその向上が望まれる。

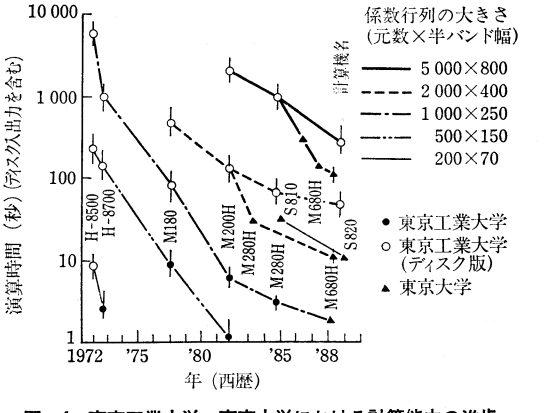
とくに最近のコンピュータの性能を述べるために他誌*に述べた内容，グラフを以下に示す。

過去 16 年間の東京工業大学総合情報処理センターおよび最近の東京大学大型計算機センターに設置された主

表—2 (b)　最近の計算機一覧（東京大学大型計算機センター主システム）

年　月	計算機名	MFLOPS	記憶領域 (MB)（仮想記憶等）	備　考
1982. 4	M 280 H	20	7.0	アレイプロセッサ付
1983.11	S 810/20	630	1.5(16)	スーパーコンピュータ
1985. 9	M 280 H	20	32	アレイプロセッサ付
1986. 5	M 680 H	40	32	アレイプロセッサ付
1986.11	S 810/20	630	1.5(64)	スーパーコンピュータ
1986.11	M 680 H	40	64	アレイプロセッサ付
1987. 1	S 810/20	630	1.5(128)	スーパーコンピュータ
1987. 4	M 680 H	52	64	アレイプロセッサ付
1988. 1	S 820/80	2 000	1.5(128)	スーパーコンピュータ

（注）表—2 (a) に同じ。

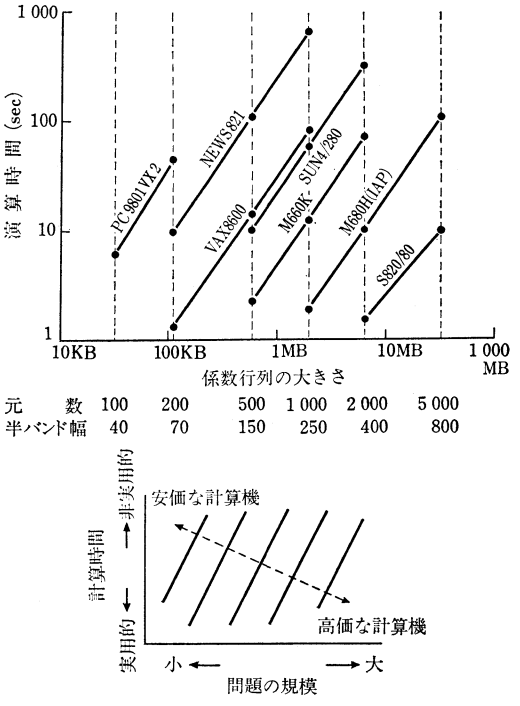


図—4　東京工業大学，東京大学における計算能力の進歩

力計算機の性能表（表—2）を用い，連立 1 次方程式の解を得るのに必要な時間の推移をまとめ，図—4 に示す。ここに挙げた時間のうち，現在のものは実測値，過去のものは，CPU の速さと必要な演算回数，およびディスクの読み書き回数とその速度から求めたものである。計算機の速度は年々速まり，とくにスーパーコンピュータの登場により，その性能が劇的に向上していることが分かる。

図—5 の上段は，上記のテストを行った結果（実測値）を示したものである。ここにあげた計算機は，いずれもネットワークを通じて利用できるものである。このよう

* 和田　章・久保田英之：実規模鋼構造骨組の 3 次元非線形解析へのスーパーコンピュータの応用，日本建築学会構造系論文報告集，No. 394，昭 63.12



図—5 最近の計算機の計算能力

に問題の規模に応じて計算機を使い分けられることも，近年の特徴である。

図—5 の下段は上段の図をより現実的な視点から見た評価である。計算機の値段によって実用的な範囲の時間内で計算できる規模は定まってくる。しかし，この関係は絶対的なものではなく，値段に対する性能は上昇する一方である。このことは，かつての大型計算機をしのぐ性能の計算機を一人で独占して使用することが現在では可能となっていることを表している。しかも，バッチ処理とは異なり，現在では入力から出力までに要する時間が短くなっているため，さまざまなパラメータ解析が行えるようになったことも最近の計算機利用環境の変化と言える。

数値解析の欠点の一つは，その出力が数値の羅列であり，結果の工学的判断がむずかしい，というところにある。この欠点は，計算機のグラフィック機能の充実により，形状や変形だけでなく，三次元の応力分布なども含めて，さまざまな角度から出力結果を考察することができるようになり，解消されつつある。

これらの状況をふまえて，新しい形態の計算機の積極的利用をはかる必要があると考える。たとえば，一つの例として，現在実用化に向かって研究が進められている数千数万に及ぶ多数の計算機を並列化した計算機システムがある。この計算機システムによれば，現在有限要素法の欠点とされている個々の要素剛性マトリックスの作成に時間を要する点も，1つの要素に1つの計算機を当てはめることにより解消すると思われる。

5. 構造解析へのコンピュータ利用

コンピュータの出現によって実用化されたマトリックス変位法の基本原理は，1800 年代に発表されていた論文にさかのぼるから興味深い。表—3 には，この時代から 1967 年までのマトリックス構造解析法の発展に関連する年表を示す。

以下に，有限要素法に注目してその歴史を述べる。

1956 年 9 月号の “Journal of the Aeronautical Sciences” に，有限要素法に関する初めての論文 “Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures” が，ボーイング社のエンジニア M.J. Turner, L.J. Topp, カリフォルニア大学の R.W. Clough とワシントン大学の H.C. Martin によって発表されている。この考え方の発展形として，1960 年 2 月号の同誌には，M.J. Turner, E.H. Dill, H.C. Martin, R.J. Melosh によって “Large Deflection of Structures Subjected to Heating and External Loads” が発表されている。この論文は，有限変位を考慮する解析法をマトリックス展開して Step by Step 法，Iteration 法による収束計算によって行い得ることを論じた最初の論文である。

1960 年には，西ドイツ・シュツットガルト大学の Argyris によって “Energy Theorems and Structural Analysis” が発表され，応力法と変位法を併記している。このときの変位法は，現在 Direct Stiffness Method として使われている変位法とは異なり，応力法と対称的に考えられた方法で，不静定にかかわる変位だけを未知量として問題を解くものである。

1965 年には，日本語に翻訳された初めてのマトリックス法の教科書 “Introduction to Matrix Method of Structural Analysis” が H.C. Martin によって書かれ，単行本としては初めて有限要素法を紹介している “Stress Analysis” も，同年に O.C. Zienkiewicz と G.S. Holister によって書かれている。1967 年に O.C. Zienkiewicz, Y.K. Cheung によって “The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics” が発刊され，その後のはなばなしい有限要素法に関する開発が始められる。有限要素法，マトリックス法の考え方は力学理論のもっとも基本に立って作られており，汎用的であるため，その応用は航空機，船，建築，土木等の分野にかかわらず，共通に適用できる特徴がある。

この時代の有限要素法のための汎用プログラムシステムについて，K.E. Buck, D.W. Scharpf. E. Schrem, E. Stein が行ったアンケート集計をもとに，その概要を表—4～表—6 に示す。この集計は約 20 のシステムについて行われているが，ここには，現在でも使われてい

表—3　マトリックス構造解析法の発展に関連する歴史（須藤福三博士による）

西歴年	人　　名	業績の主要な事項
	L. Euler (1707～83)（スイス，バーゼル大）	・曲げひずみのエネルギーを表示した。
	G. Green (1793～1841)	・応力成分によってひずみエネルギーを一般に表示した。
1858	L.F. Ménabréa（伊，軍技術者）	・力学平衡状態にあるトラスのひずみエネルギー最小の原理を唱える。
1864	J.C. Maxwell (1831～79)（英，ケンブリッジ大）	・マックスウェルの定理を発見した（δ_{ij} 法のアイデア，不静定トラスの解析法）。
1873	Alberto Castigliano (1847～84)（伊，エンジニア）	・力と変位が線形の場合に，系のひずみエネルギーから不静定力，変位を求める方式を発表した。
1874	Otto Mohr (1835～1918)（独，鉄道技術者）	・Maxwell による不静定トラスの解法を発展させた。
1886	H. Müller-Breslau（独，エンジニア）	・仮想変位法の原理により複雑な静定トラスの解法を示す（δ_{ij} 法）。
1892	A.E.H. Love (1863～1940)（英，ケンブリッジ大）	・名著 "A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity" を発行した。
1896	Lord Rayleigh	・構造物の平衡時は仮想変位によるエネルギーは最小，仮想力によるエネルギーは最大となることを示す。
1899	F. Engesser (1848～1931)（独，カールスルーエ大）	・Castigliano の定理を一般化した。これには，Complementary Energy の定義を前提とし，力と変位が非線形の場合にも Castigliano の定理の使用ができるようにした。
1914	A. Bendixen	・ラーメン構造計算に対するアルファ方程式の方法についての発表をした。
1914～16	S.P. Timoshenko (1878～1973)（米，スタンフォード大）	・名著 "Theory of Elasticity" を発刊した。
1918	H. Liebmann	・ラプラスの偏微分方程式の差分解法を示した。
1926	A. Ostenfeld	・変位法に関する論文を発表した。
	F. Wolf	・重調和偏微分方程式の差分解法を示した。
1935	L. Collatz	・重調和偏微分方程式の高精度差分解法を示した。
1937	H. Ebner & H. Koeller	・δ_{ij} 法を力学解析に組織的に利用した。
1940	R.V. Southwell（英，オックスフォード大）	・工学における Relaxation Method についての発表をした。
1941	H.M. Westergaad	・F. Engessor の Complementary Energy 法の利点を強調した。
1947	S. Levy	・応力法（Force Method）を発表した。
	W. Prager & J.L. Synge	・関数概念にもとづく弾性学問題の近似解法を示した。
1950	S.P. Timoshenko	・"History of Strength of Material" を発刊した。
1951	A.L. Lang, R.L. Bisplinghoff, B. Langfors & L.B. Wehle	・応力法のマトリックス表示法を発表した。
	T. Rand	・不静定力を少数の不静定力に置き換える方法を示した。
1953	S. Levy	・Stiffness Method（剛性法）の有効性を示唆した。
	J.H. Argyris	・熱応力問題解析とエネルギー理論について発表した。
	H.U. Schuerch	・剛性法のもつ潜在的利点を論じた。
1956	M.J. Turner, R.W. Clough, H.C. Martin & Topp	・"Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures" を発表した。
	Turner, Clough, Martin & Topp	・線材骨組と面材（面内力）について，Direct Stiffness Method の論文を発表した。
	S. Falk	・高架橋のトランスファ・マトリックスによる解法を発表した。
	J.H. Argyris, S. Kelsey & H. Kamel	・構造力学におけるマトリックス応力法とその新しい応用例を発表した。
1957	B. Klein	・マトリックス構造解析の簡便法を発表した。
	S. Falk	・トランスファ・マトリックスによるラーメン構造の計算法を示した。
	J.H. Argyris	・静力学のマトリックス解法理論およびマトリックス応力法，マトリックス変位法の対比を行った。
1958	J.H. Argyris	・複合弾性構造物のマトリックスによる解析法を示した。
1959	J.H. Argyris & S. Kelsey	・飛行機胴体（複雑な形状）の解析例を示した。
	E. Pestel	・トランスファ・マトリックスによる構造物の動力学を発表した。
1960	R.W. Clough	・平面応力解析における Finite Element（有限要素）の方法を発表した。
	F. Leckie & E. Pestel	・トランスファ・マトリックスの基本事項についてまとめて発表した。
	J.H. Argyris	・応力法理論のまとめ，航空機翼の解例と応力法，変位法のマトリックス理論式の対比を集大成した。
	E.L. Wilson	・非線形構造物のマトリックスによる解析法を示した。
	M.J. Turner, H.C. Martin & R.J. Melosh	・構造物の大変形問題をマトリックス法により扱うことを発表した。
1963	J.H. Percy, W.A. Loden & D.R. Navaratna	・非弾性構造をマトリックス解法することを示した。
1964	M.J. Turner, H.C. Martin & R.C. Weikel	・マトリックス構造解析法を著す。
	R.K. Livesley	・"Matrix Methods of Structural Analysis" を著す。
	O.C. Zienkiewicz & Y.K. Cheung	・振動解析用の，弾性等方または直交等方性スラブ・マスマトリックス解析のための有限要素法を示した。
1965	B. Fraejis De Veuberke	・有限要素法における変位平衡モデルを示す。Complementary Energy Method による剛性マトリックスの誘導を行う。
	D.J. Dawe	・板振動問題への有限要素法による取扱い方を示した。
	R.W. Clough & A.K. Chopra	・アースダムの地震時応力の有限要素法による振動解析例を示した。
1966	K.K. Kapur & B.J. Hartz	・有限要素法による薄板の安定問題を論じた。
1967	O.C. Zienkiewics & Y.K. Cheung	・"The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics. 1st ed." を発刊した。

るシステムのみを示した。その後に作られた汎用プログラムシステムとして著名なものは，ANSYS, ADINA, ABACUS 等がある。

鉄筋コンクリート構造の解析へも有限要素法は使われており，現在でもその弾塑性挙動の解析的究明のために，応力-ひずみ関係，ひびわれのモデル化を中心に精力的な研究が進められている。実際の設計への直接的な応用という面では，最近になってやっと実用化されつつある状態ということができる。これらの状況については，Arthur H. Nilson らによってまとめられ，ASCE から発行された "State-of-the-Art Report on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete"，日本コンクリート工学協会から発行された「RC構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集」(1984.12)，Christian Meyer と Hajime Okamura の監修により ASCE から発行された "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures (1986)" および「コンクリート構造物の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン」(1989.3) に詳しく述べられているので，ここでは省略する。

このほかに，土木構造設計，建築構造設計の実務計算を機械化し，効率を上げようとする努力が続けられている。ビル建築の構造計算を自動化しようとすることはコンピュータ導入当初から行われており，日本電信電話公社（現 NTT）の開発した DEMOS-E (BUILD) が 1974 年7月に公開されたことをはじめとして，現在では 200 近いプログラムが各社で作られ，使われている。

6. コンピュータ時代の教育

われわれの世代が小学生のころは，算数の応用問題として，たとえば「つるかめ算」，「過不足算」等の，一つ一つに名前のついた問題をよく勉強した。「つるかめ算」とは "つるとかめの足を合わせて 14 本，頭を合わせて 5 頭のとき，つるとかめは何頭ずつか" という問題であり，解き方としては，すべてがつるとすると足は (2×5=) 10 本となり，余った 4 本は1匹のかめの足が1羽のつるより 2 本多いためであるから，(4÷2=) 2 頭がかめとなり，残りの (5−2=) 3 頭がつるという方法である。このほかも似たような応用問題がたくさんあったが，x, y を使うことは禁じられていた。現在では，小学校でも x, y の使い方を教えているので，われわれがしてきた

表—4 MARC の機能 (1972 年の調査)

（1） 一般的事項

プログラムの名称：MARC (CDC)
使用できる施設：K. Lorenz cc., Control Data GmbH, Rechenzentrum, 7 Stuttgart N, Kriegsbergstrassell
ドキュメンテーション：MARC (CDC)-Manual
解析手法：B. 変位法
適用範囲：a. 線形静的弾性問題，c. 非線形静的問題
開発状況：1971 年4月に完全稼動 Bac
利用者の範囲：Statikabteilungen von Firmen aller Konstruktionszweige

（2） 要素についての情報

	棒	線材 ⓐ	線材 ⓑ	平板 (面内)	曲面板 (面内)	板（面外） キルヒホッフ	板（面外） ライスナー	シェル キルヒホッフ	シェル ライスナー	三次元連続体
① 使用できる要素の数	1	1		2		1		1	1	2
② 要素当りの節点数	2	2		3, 4		6		2	3	3, 8
③ 要素当りの自由度の数	2	12		6, 8		12		6	27	6, 24
④ モデル	V	V		V		V		V	V	V
⑤ 要素の構成	L	L		D, V		D		Lr	D	Dr, H
⑥ 要素の形状	G	G		E		E			B	
⑦ 境界				G		G		K	G	G
⑧ 断面データ	Qk	Qk, Tv		Qk		Qk		Qk	Qk	
⑨ 材質データ	I	I		I		I		I	I	I
⑩ 外荷重	K	K		F		F		F	F	F, F, V
⑪ 初期応力	N	N		N		N		N	N	N
⑫ 質量マトリックス										
⑬ 幾何剛性マトリックス	N	N		N		N		N	N	N

(注) ⓐ 節点の位置が重心等のように断面内に固定されている。
ⓑ 節点を断面内に自由に選択できる（偏心取付け）。
④ K：応力法モデル，V：変位法モデル，H：ハイブリッドモデル，G：混合モデル，
⑤ L：線材，D：三角形，R：長方形，V：任意の四角形，T：四角形，P：五角形，Q：立方体形，H：任意の六角形，r：回転体要素，s：回転体の扇形断片
⑥,⑦ G：直線状，K：曲線状，E：平面，S：ゆるやかな曲面，B：任意の曲面
⑧,⑨ Q：断面積または厚み，T：断面2次モーメント，I：均質，O：非均質，A：一般の非均質，k：一定，v：可変
⑩ K：ユーザーが節点に荷重を与える。P：集中荷重，L：線状荷重，F：面状荷重，V：体積荷重
⑪ N：なし，T：熱的な均一応力だけ，B：任意の初期応力
⑫ P：ユーザーが集中質量を与える。V：分布質量から等価質量マトリックスを計算。
⑬ N：適用なし，S：1次的不安定性だけ（固有問題としての座屈解析をする)。G：幾何学的非線形問題一般を扱う。

表—5 NASTRAN の機能 (1972 年の調査)

(1) 一般的事項

プログラムの名称：NASTRAN

使用できる施設：COSMIC, Barrow Hall, University of Georgia, Athens, Ga. 30601

ドキュメンテーション：Theoretical Manual NASA SP-221
User's Manual NASA SP-222
Programmer's Manual NASA SP-223
Demonstration Problem Manual NASA SP-224

解析手法：B. 変位法

適用範囲：a. 線形静的弾性問題, b. 線形動的問題, c. 非線形静的問題, d. 非線形動的問題

開発状況：1971 年 4 月に完全稼動—Babcd

利用者の範囲：allgemein zugänglich für amerikanische Gesellschaften, Universitäten usw durch COSMIC

(2) 要素についての情報

	棒	線材 ⓐ	線材 ⓑ	平板 (面内)	曲面板 (面内)	板(面外) キルヒホッフ	板(面外) ライスナー	シェル キルヒホッフ	シェル ライスナー	三次元連続体
① 使用できる要素の数	1		1	2	2		2		1	5
② 要素当りの節点数	2		2	3, 4	3, 4		3, 4		2	4, 6, 8
③ 要素当りの自由度の数	4		12	6, 8	6, 8		15, 20		10	12, 18, 24
④ モデル	V		V	V	V		V		V	V
⑤ 要素の構成	L		L	D, V	D, V		D, V		Lr	Ds, Vs, T, P, H
⑥ 要素の形状	G		G		B		S			
⑦ 境界				G	G		G		G, B	K
⑧ 断面データ	Qk		Qk, Tk	Qk	Qk		Qk, Tk		Qk, Tk	
⑨ 材質データ	Ik		Ik	Ak	Ak		Ak		Ok	Ik
⑩ 外荷重	K		K	F	F		F		F	Y
⑪ 初期応力	B		T	T	T		T		T	T
⑫ 質量マトリックス	P, V		P, V	P, V	P, V		P, V		P, V	P, V
⑬ 幾何剛性マトリックス	S		S	S	S		S		S	N

(注) 記号は表—4 に同じ。

表—6 SAP の機能 (1972 年の調査)

(1) 一般的事項

プログラムの名称：SAP

使用できる施設：Prof. E.L. Wilson, Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley, CA 94720

ドキュメンテーション：SAP A General Structural Analysis Program, Report No. Ucsesm 70-20, Structures and Materials Research, Dept. of Civil Engineering, University of California

解析手法：B. 変位法

適用範囲：a. 線形静的弾性問題, b. 線形動的問題

開発状況：1971 年 4 月に完全稼動—Bab

利用者の範囲：Ungefähr 20 Gesellschaften Universitäten

(2) 要素についての情報

	棒	線材 ⓐ	線材 ⓑ	平板 (面内)	曲面板 (面内)	板(面外) キルヒホッフ	板(面外) ライスナー	シェル キルヒホッフ	シェル ライスナー	三次元連続体
① 使用できる要素の数	•		•	•	•		•		•	•
② 要素当たりの節点数	2		2	4	4		4		4	8
③ 要素当りの自由度の数	6		12	12	12		12		20	24
④ モデル	V		V	V	V		V		V	V
⑤ 要素の構成	L		L	V, D	V, D		V, D		V, D	H, T
⑥ 要素の形状	L		L	E	E		E		E	
⑦ 境界				G	G		G		G	K
⑧ 断面データ	Q		Q, T							
⑨ 材質データ				O	O		O		O	I
⑩ 外荷重	L, V		L, V	L, F, V	L, F, V		L, F, V		L, F, V	L, F, V
⑪ 初期応力	T		T	T	T		T		T	T
⑫ 質量マトリックス	V		V	V	V		V		V	V
⑬ 幾何剛性マトリックス	N		N	N	N		N		N	N

(注) 記号は表—4 に同じ。

ように一つ一つの応用問題ごとに用意された解法を記憶する必要はない。

構造力学の教育について置き換えて考えると，似たようなところがある。大学に入って骨組解析法を勉強していたころ，トラス構造はクレモナ，鉄筋コンクリート造の鉛直荷重時の応力を解くなら固定モーメント法，水平力に対する応力・変形を求めるならば，たわみ角法，または整形な骨組のときは武藤式略算法，このほかにもいろいろと教えてもらったように思うが，ちょうど先に書いた小学校時代のように一つ一つの問題ごとに解法を理解し覚えなければならないかと少々憂鬱に感じていた。しかし，3年生のころ（1966年）にマトリックス法を習い，アメリカ製の FRAN という汎用骨組解析プログラムが日本へも導入され，大規模な建物の構造計算には使われていると聞き，ほっとしたことがある。ちょうど中学で連立方程式を習ったときの気分である。

実際には，これらの開発は，これより 10 年も前から活発に始められていたわけである。しかし，それから 20 年以上もすぎた今になっても，小学校の算数の教育という面でも同じであろうが，大学の教育という面でも，統一的な解法だけを教え，あとはコンピュータが計算してくれるからなんでもできるという方式がよいか，一つ一つ知恵を絞って解く方式で勉強したほうがよいかの結論は出ていない。しかし，実際の設計の場面は，教育とは異なり時間との戦いであり，略算よりは精算が望まれるから，悠長なことは言っていられず，次々にコンピュータ化されてゆくであろう。せめて大学では，数値の流れの追える方法で勉強しておくのがよいように感ずる。

7. 手計算の手法とコンピュータ解析

スーパーコンピュータが使える時代にあっても，計算尺とそろばんを手放さない設計者が多い。そろばんと電卓で計算スピードのコンテストをやると，そろばんのほうが勝つそうである。計算尺にしても，そろばんにしても，計算しようとしている人間が，その道具に値をセットし終わったときには，そこに答が出ているわけであるから，そろばんと計算尺は世界で一番速い計算機と言えるかもしれない。

計算尺の良い点は，常に有効けた数が一定に保たれていることである。建築の部材設計にどんな計算機を使って 10 けたの答を出してみたところで，はりのせいは 5 cm でピッチ 150 cm ぐらいが普通の限度であり，はりの幅については 60 cm ぐらいが限度であるから，有効けた数は 2 けたあれば十分である。鉄筋の本数にしても，10 本にするか 11 本にするかという話はあったにせよ，100 本にするか 101 本にするかで悩むことはない。ゆえに，計算尺のもつ有効数字 2.5 けたで十分なわけである。

では，なぜ電卓を使うのか。また，なぜコンピュータは，有効数字を 6 けたも 16 けたも計算して数字の羅列ばかりプリントしてしまうことになるのであろうか。

なぜ電卓を使うのかについては，計算尺の場合，位取りの計算を別にやる必要があって，それを間違えると，何をやっているのかまったく無意味になってしまうことが一つの理由である。さらに基本的なことを言えば，工学における多くの計算式や，そこに用いるべき数字について，ていねいに行うべき計算とラフにしてもよい計算，無視できるような式や値と重要な式や値の区別がつかなくなっていることも理由となろう。

ともかく，なんでもぎりぎりの有効数字で計算しておけば安心であり，一度電卓のとりこになってしまった人は，なかなか計算尺，そろばんに戻れないし，もともと学生時代から電卓しか使ったことがない人には，計算尺やそろばんはこわくて使えないということであろう。

では，コンピュータは，なぜ有効数字を多く必要とするのであろうか。

元来，コンピュータに組まれているプログラムは，できるかぎり汎用性を高めることを目的の一つとしている。たとえ 1 mm×1 mm の柱の計算でも，10 m×10 m の柱の計算でもできなくてはならないし，それが混在している問題があったとしても，正しく解けなければならない。人間であれば，10 m×10 m の柱と 1 mm×1 mm の柱が混在しているときは，自動的に 1 mm×1 mm を無視する，ということで2.5 けたの計算尺にのせられるが，計算機にはそのような直感はないから，1 mm×1 mm についての計算についての計算値も正しく出さなくてはならず，計算結果を人間が判断して 1 mm×1 mm を無視することになる。そのために，計算機には有効数字が多く必要，ということになる。

実際に応力計算の部分では，double precision という有効数字が 16 けたもある計算で計算が進められていることがほとんどであろう。そこでやはり不思議に思えるのは，最終的に建ち上がる建築や土木構造物の形や作り方が 20 年，30 年前とそんなに変わっていないのに，なぜ計算尺の 2.5 けたでできたものが 16 けたもの計算を必要とするのであろうか，という点である。

それについて考えられる一つは，先にも述べたが，プログラムの汎用性という問題である。汎用骨組解析プログラムを用いれば，普通のビル骨組も解けるし，山形ラーメンも解けるし，トラスも解けるし，円弧を細かく折線に近似すればアーチも解ける。これに反して，計算尺とそろばんによる計算によってできる骨組計算の手法は，先にも述べたように，たとえば山形ラーメンには山形ラーメンの解法，トラスにはクレモナ，鉛直荷重時の

ビル骨組の計算には固定モーメント法，水平荷重時の解法としては武藤式略算法がある。このように，問題別に昔の賢人は解法を考え出し，それが普及していった。

「汎用的解法」と「問題別解法」について別の見方をすると，それは“全体を扱っておいて，そのなかの差として部分を解く”という考え方と，“部分-部分の関係を計算していって，その集まりとして全体が解ける”という考え方に分けることができる。たとえば固定モーメント法では，節点に集まるモーメントを柱やはりの剛性の率で分配するだけで，とくに骨組全体を直接扱っていないし，武藤式略算法では，建物の層ごとに柱や壁の剛性の比を計算しておき，水平力をその比で分けもつというだけで，やはり建物全体を直接扱ってはいない。昔から手回し計算機を使わなければたやすく解けなかったたわみ角法による骨組計算にしても，「層間変位/階高」という相対的なものを未知量として解く方法を用いている。

これに反して，今のコンピュータのやり方は，すべて原点から計った絶対的な変位を未知量としている。これは，たとえば，超高層ビルの最上階の水平変位と，その下の階の差を知りたいときに，最上階が 102 cm で下の階が 100 cm，結果としてその差が 2 cm というように求める考え方である。はじめから 2 cm という値を使って計算するたわみ角法に比べて，同じ精度の答を得るためには，2 けただけ多くの有効数字が必要となる。

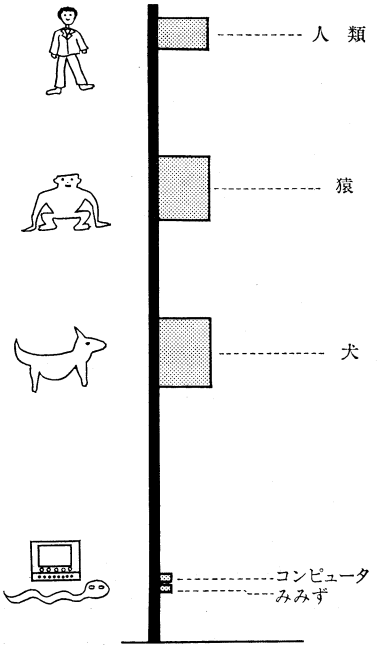
先に述べた 2 つの略算法においては，ある値（たとえば曲げモーメント，水平力）を単に比例配分する，という計算の積み重ねであるから，誤差の入り込む余地はまったくない。計算尺もそろばんも，これらの略算法も，非常にバランスよく，うまく出来ているものだ，と感心する。

8. おわりに

「解析」という言葉は，英語では“Analysis”と言う。Analysis に対する言葉として“Synthesis”という言葉があり，日本語では「総合」つまり「設計」ということになる。建築・土木の設計は，出来上がった建物や構造物を使う相手が人間であるから，すべて数式に載るはずもないのであるが，そのなかの構造設計についても，全体のデザインの一部であるから切り離して考え，それだけを数式に載せて進めても無意味である。よって，構造設計の手順をフローチャートにし，コンピュータのプログラムに組み込んだとしても，自動設計プログラム等というものが出来るはずはない。このように，Synthesis（設計，総合）はむずかしく，逆に Analysis（解析）はやさしい。対象とする構造物は，たしかに規模が大きく，いろいろな材料で作られ，複雑な形状をしているから，それを解き明かすために苦労は多い。しかし，必要なことはインプットの労力とコンピュータ費用だけ，と言ってもよい時代になってきた。別の意味で問題は，解析技術が進みすぎ，それを解釈し総合して設計に役立てようとする人間の側が，解析結果を判断し把握できなくなってしまっていることである。

総合つまり設計は，人間が行わなければならないことで，一つ一つのことについて背骨につらさを感じ，心を込め，愛着をもって決めなければならないと思う。人工知能（Artificial Intelligence）の技術も進んでゆくであろうが，逆に言えば，設計者にとってもっとも楽しい部分である創造的な仕事までをコンピュータにやらせることはない。

最後に，アメリカ・シアトル市の John Skilling 構造事務所の壁にあったポスターを示す（**図—6**）。これによると，コンピュータの知能指数は，みみずより少しましとなっている。



図—6 知能指数の高さ