

自動設計

大阪大学工学部 牧之内 三郎

1. まえがき

電子計算機がわが国で実用に供され始めてからすでに15年近くにもなろう。現在では、電子計算機のことを単に計算機、あるいはコンピュータ (computer) といい、今後は情報化社会になるのだとも言われている。これらの事実は、コンピュータが、いろいろの分野で、一見派手なようではあるが地道に利用されて来たことを示すとともに、今後ますます多くの人々によって活用されるであろうことを意味している。エンジニアが行なう設計とコンピュータの関係については、すでに多くの文献^{1)~13)}があるが、“自動設計”の発展段階と現状について述べて見たい。

エンジニアは、物質とかエネルギー源の性質をよく調らべ、それらの長を有効に利用して、われわれに役立つ新しい装置あるいは生産システムを研究して、その生産手段あるいは実行手段を考え、一つの機械あるいはシステムを作り上げる。このとき、設計という過程がふまれる。この過程を次のように分析することができよう。

- (1) 機械あるいはシステムの構想をスケッチ図に表わし、その内容を記述する。
- (2) 必要なデータを整理、問題を解析して、
- (3) 解を求め、部品、要素などのパラメータを定量化する。そして、
- (4) 機械あるいはシステムの評価を行なう。

評価の結果が悪ければ、再び(1)にもどり、新しい設計概念に基づいてスケッチ図を書き換え、(2)、(3)、(4)のステップをたどる。そして、良い評価結果がえられるまで、これら四つのステップが繰返えし行なわれる(図1)。一般には、このループを何回となくぐるぐる廻るのが普通であろう。評

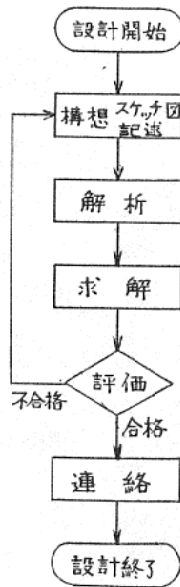


図1

価の結果が良ければ、

(5) 設計図のハード・コピーが作られ、その内容は関係者に伝えられて、機械が製造され、システムが実施される。

このように、“設計”には手間のかかる“計算”と“製図”が必要である。単なる製図のみでなく、試作機械の動作状態を撮影して、よりよい設計資料を作成することもある。設計業務には広範囲の図形処理が必要であり、グラフィック・システムの導入が要求される。したがって、“設計”、“計算”、“グラフィック”の三つの関係を図2のように図示しよう¹⁴⁾。

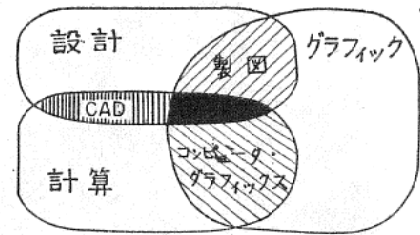


図2

簡単な設計計算には、計算尺、卓上型計算機が使用される。しかし、常微分方程式、あるいは偏微分方程式の数値解法、高速フーリエ変換法 (FFT、Fast Fourier Transform) による計算など、複雑な数値計算を必要とする場合には、FORTRAN (Formula Translator)、または ALGOL (Algorithmic Language) などの手続向言語 (procedure oriented language) を用い、最新の数値計算法を駆使してプログラムを作成し、コンピュータを利用して設計計算の大部分が行なわれる。これは周知のとおりであり、広義の意味で、“計算機援助による設計 (CAD、Computer-Aided Design)” がすでに行なわれて来たともいえる。実は、CAD の定義は人によってやや異なっているようであるが、ここでは、設計と計算すなわち設計とコンピュータの共通部分を CAD と解釈する(図2参照)。

設計に役立つ問題向言語 (problem oriented language) を用いるコンピュータの利用概況については、第3節で述べよう。

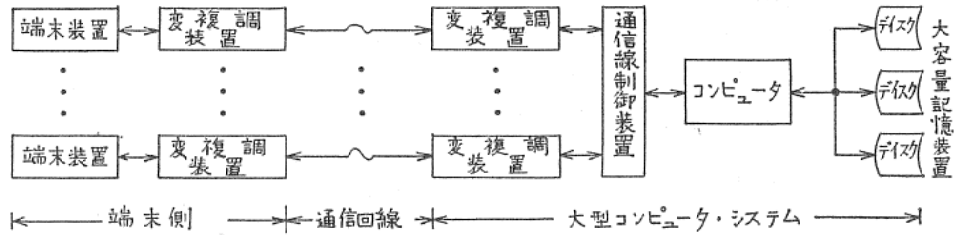


図4

ているが、人間とコンピュータの対話 (man-machine communication) の可能性を大幅に増大させたことに大きな意味をもっている。米国では、端末装置を数十台から数百台も持っている TSS が多数稼動している。わが国においても、このようなコンピュータ・システムが逐次増設されて行くであろう。幸い、大阪大学においては、日本電気株式会社、電電公社の厚意もあって、わが国最初の実用タイム・シェアリング・システムが1968年頭頃から稼動している。

3. 設計に役立つ問題向言語

設計に役立つ問題向言語がすでに多数用いられている。電子工学関係では、回路設計用プログラム言語として、たとえば

ECAP (Electronic Circuit Analysis Program)¹⁵⁾ があり、とくに集積回路 (IC, Integrated Circuit) 設計用としては

CADIC (Computer-Aided Design of Integrated Circuits)¹⁶⁾ が有名で、配線用プログラムとしては

ACCEL (Automatic Circuit Card Etching Layout)¹⁷⁾ などがある。

問題向言語による設計の一例として、ECAP 言語を用いた簡単なプログラム例を示しておこう。図5 (1) の直流回路を考えると、回路に流れる電流と、各抵抗の端子における未知の電位を知りたいという問題がある。ECAP を用いる場合には、等価回路を図5 (2) のように書き、節点 (node) 0, 1, 2 (図では、これらに○

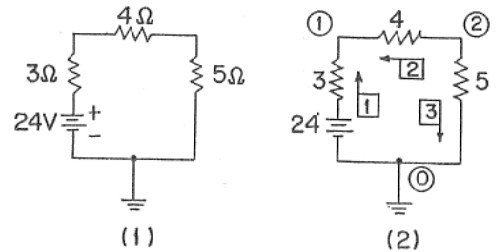


図5

印がつけられている) を定め、各節点間を流れる電流の向きを図の矢印の方向と仮定する。(節点1, 2間の電流の向きを実際とは反対方向にとっている。このため、この区間を流れる電流値の計算結果の符号がマイナスになる。これが図7に示されている。) 次に、プログラム・シートに図6のようなプログラムを書く。図6の最上端にある列番号 1, 2, ..., 29は、それぞれ、IBM 80 欄カードにおける欄番号 1, 2, ..., 29 に対応していることを示している。

横1行の文章は1ステートメント (statement) と呼ばれ、1枚の80欄カードに穿孔される。各ステートメントの意味を簡単に説明しておく。

第1行 注釈文である。計算そのものには関係しない。文字Cは、第1行のステートメントが注釈 (comment) 文であることを示す。

第2行 直流回路であることを宣言している。

第3行 ブランチ (Branch) 1を定義する。すなわち、節点0から初まり、節点1で終る間を分岐回路1と名付け、この部分に、回路定数として抵抗3Ω、電圧24Vの電源があることを示している。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
C																													

- 第4行 第3行と同様に、ブランチ2を定義している。ただし、この分岐回路は節点2に始まり、節点1で終ると定義していることに注意されたい(図5(2)の矢印2を参照)。
- 第5行 ブランチ3を定義している。
- 第6行 すべての節点の電位、およびすべての回路素子を通る電流の値を印字(出力)せよ。
- 第7行 問題の回路についての記述は以上で終了。回路解析を実行せよ。

```

C          CODING INTRODUCTION
DC
B1 N(0,1),R=3,E=24
B2 N(2,1),R=4
B3 N(2,0),R=5
PRINT,NV,CA
EXECUTE

NODE VOLTAGES

NODES          VOLTAGES
1- 2          0.17999999D 02  0.99999996D 01

ELEMENT CURRENTS

BRANCHES          CURRENTS
1- 3          0.20000003D 01  -0.19999998D 01  0.19999998D 01

```

図7

さて、上記のプログラムをコンピュータに入力すると、図7の計算結果が出力される。計算結果によると、各ブランチを通る電流は $0.20000003 \times 10^1 \text{ A}$, $0.19999998 \times 10^1 \text{ A}$, $0.19999998 \times 10^1 \text{ A}$ となっている。これらはすべて $24/(3+4+5)=2\text{ A}$ となるべきであるから、計算結果には $3 \times 10^{-7} \text{ A}$ あるいは $2 \times 10^{-7} \text{ A}$ の絶対誤差がある。これらの誤差には、10進数を2進数に、2進数を10進数にそれぞれ変換するときの誤差、および計算途中における丸め誤差などが含まれている。しかし、この程度の誤差は実用上差支えない。

土木、建築関係にもいろいろの問題向言語が用いられている。たとえば、

STRESS (Structural Engineering System Solver)¹⁸⁾

は、1962年、S. J. Fenves 指導の下に M. I. T. で開発された骨組構造物設計用の言語であり、平面トラス、平面ラーメン、格子構造物、立体トラス、立体ラーメンに関する計算を行なうことができる。また、M. I. T. の土木工学研究所では、土木工学関係の全分野の設計を総合的に行なうためのプログラム・パッケージ (program package)

ICES (Integrated Civil Engineering System)¹⁹⁾ が開発されている。この基本構成は、測量計算のための COGO (Coordinate Geometry)

高速道路設計関係の

ROADS (Highway Design)

BRIDGE (Optimum Design of Highway Bridge)

STRESS を改良した

STRUDL (Structure Analysis)

などの9個のサブ・システムと6個のシステム・プログラム (system program) となっている。

設計計算が、オン・ラインあるいはオフ・ラインのいずれの処理方式によるものであれ、問題向言語によって実行されるならば、プログラミングに対する知識の少ない設計技術者でも容易にコンピュータを活用しうるのである。

4. CAD 計画と自動設計

1950年の初期、M. I. T. の自動制御研究所(現在のエレクトロニック・システム研究所)は世界最初の数値制御(N/C、Numerically Controlled)工作機械を開発した。当時、工具の運動などの指令を数値制御工作機械に与えるための制御テープを、オペレータが製作図面を見ながら丹念に作らなければならなかった。この操作は煩雑である。とくに複雑な形状の工作物を製造する場合には、穿孔テープを作成する前に、相当量の数値計算を行わなければならないことがある。

1950年末、エレクトロニック・システム研究所のコンピュータ応用グループは上記の制御テープの作成を容易にするため、数値制御用のプログラム言語

APT (Automatically Programmed Tools)²⁰⁾

の開発に着手した(現在は、IITRI (Illinois Institute of Technology Research Institute) を中心として APT 言語の開発が続行されている)。

このような環境の下に研究が行なわれていた M. I. T. において、機械工学科の設計分野のメンバーと上記のコンピュータ応用グループは、1959年頃、設計に対するコンピュータの積極的活用方式についての会合をもったのである。話題の要点は

設計者は、オン・ラインのグラフィック・ディスプレイである CRT 操作卓の前に座って、ライト・ペン (light pen) で CRT 面上に機械のスケッチ図を画く。必要な計算、処理をコンピュータで行ない、その結果を見ながらスケッチ図をさらに完全なものに変更し、設計概念をよりよいものへと修正する。そして、コンピュータの優れた計算能力、データ処理能力と人間の優れた知性を結合した設計方式を確立したい

ということであつたらしい。そして、Computer-Aided Design という研究課題について共同研究が開始されたといわれる²¹⁾。

CAD 計画の目標は

- (1) 多数の設計者は、それぞれ、操作卓の前に座って、同時に、計算機と対話しながら計算を行ない、設計も行なう
- (2) 各設計者は、互に他の設計者の設計内容が直ちにわかること。ただし、設計者は情報交換を行なうための事務的煩雑さから開放されること

であった。これらの目標が達成されると、設計者は困難な問題を解決する余裕がえられる。また、過去に行なわれた設計資料を参考にすることも極めて容易であり、設計能率が向上するであろう。

このため、コンピュータは

- (1) 図形の入力、出力が可能であり
- (2) 標準の部品、材料、工作法などに関する情報を記憶していて、いわゆる情報検索 (IR, Information Retrieval) が容易にできる

ことが要求された。なお、コンピュータに準備されるべき大切な設計用ルーチン (routine) として、特定の機械を設計するためのプログラムを多数集め、各種の設計者の要求に添えられるルーチンを用意することも考えられる。しかし、これは避けるべきである。なぜならば、既成概念にこだわることなく、設計そのものをどのようにして行なうべきかという問題が設計の過程で解決されなければならないことがあるからである。したがって、

- (3) 汎用の設計用プログラム・ルーチンを二つか三つ、できることならばただ一つ用意すべきである。そして、このルーチンは、各種の設計者特有の言語、図形によって修正されるものでなければならない

と考えられた。MAC 計画の一環として発足した CAD 計画は、当然のことながら、タイム・シェアリング・システムに立脚した自動設計の思想を打出したのである。

このような構想の下に展開された研究の成果として、1963年、I. E. Sutherland (当時、M. I. T. リンカーン研究所、現在ユタ大学) はグラフィック・ソフトウェア SKETCHPAD²³⁾ を発表した。その内容は次のようなものであった。

ライト・ペンを持ち、フリーハンドで直線あるいは円を画き、適当なボタンを押すと、CRT 面上に正確な直線や円が画かれる。正確な円の外にフリーハンドで六角形を画き、六角形の頂点を逐次円周上に移動させ、六角形をこの円に内接させる。そして、各辺の長さを等しくとり、円を消去すると正六角形が CRT 面上に画かれる。記憶された正六角形を7個呼び出して、それらの頂点をつなぐと蜂の巣形の模様が画かれる。このように、書いたり、消したりしながら、少ない基本図形を組立てて行くと、いろいろの図形表示が可能であることが具体的に

示された。また、電子回路図の作成、橋梁の強度計算などの応用例も示された。

さらに、3次元の図形処理を行なう SKETCHPAD III²³⁾ については T. E. Johnson (M. I. T. 機械工学科) が発表し、コンピュータ内部におけるデータ構造に関する研究内容は D. T. Ross 等²⁴⁾ によって公表された。

さて、このようなオン・ライン CRT グラフィック・ディスプレイ装置をもつコンピュータ・システムについて詳述することを避けるが、このハードウェア、ソフトウェア・システムの規模はともに相当大きいのである。図8に構成例を示しておこう²⁵⁾。

SKETCHPAD が公表されて以来、CRT グラフィック・ディスプレイを用いた図形処理方式について活発な研究が続行されている。そして、図形の拡大、縮小、移動、回転はもちろんのこと、透視図も自由に CRT 面上に画かれるようになり、コンピュータ・グラフィックスの設計への応用範囲は拡大されつつある。たとえば、自動車の車体の設計^{26), 27)}、航空機の機体設計²⁸⁾、IC設計¹⁶⁾、建築構造設計²⁹⁾などがあり、関連する文献は相当数にのぼっている。

5. むすび

上述したように、CAD 計画の夢が一步前進できたことは事実である。たとえば、Lockheed-Georgia 社は CAD 計画を製造過程にまで活かしている。同社は、オン・ラインの CRT グラフィック・ディスプレイ装置を用いて、航空機の機体、部品の設計を行なっているが、グラフィック N/C システムをも開発している²⁸⁾。

このシステムでは、機械部品の設計結果を CRT 面上に画いた後、さらに、これを加工するための工具軌跡も CRT 面上に画かせ、それを設計者がチェックして、工具軌跡を決定すると、この部品を数値制御工作機械で加工するためのパート・プログラムが自動的に作成される。すなわち、このシステムを用いると、APT 言語で加工手順を記述してパート・プログラムを作成する必要がないのである。同社の経験によれば、航空機部品1500点を APT 言語で記述するのに1部品当り平均60時間を要したが、グラフィック N/C システムを用いると1部品当り平均10時間を要したに過ぎないという。

ところで、グラフィック・システムの構成例 (図8) からわかるように、このシステムは相当高価なものである。自動設計システムは、理想的なものには違いないが、米国においても今のところ TSS ほどには普及していない。その理由はいろいろあろうが、最大の原因は価格が高いということらしい。現在、

- (1) 安価な図形処理用端末装置³⁰⁾

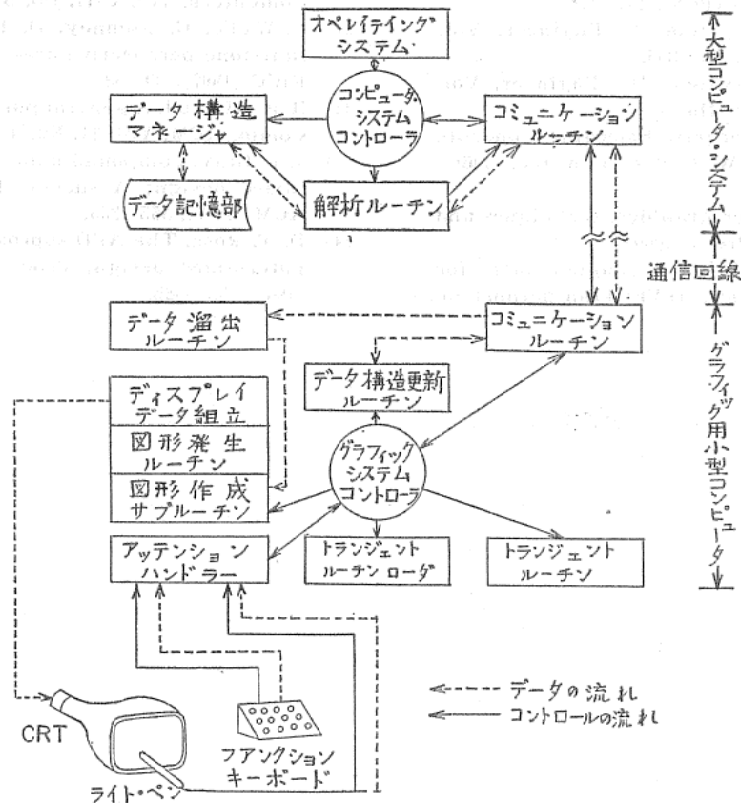


図8

(2) 線図以外の図形処理装置³¹⁾など、ハードウェアに関する研究と、
 (3) 汎用の図形処理言語³²⁾、データ構造³³⁾、³⁴⁾など、ソフトウェアに関する研究が鋭意行なわれている。
 これらの研究成果が実ったあかつきには、CADの夢は実現され、自動設計→自動製図→自動加工→自動組立などが実施せられ、いわゆる無人工場の夢が正夢に近いものとなるう。

参考文献

- 1) 鈴木達朗、光学レンズの自動設計の発展、応用物理、第35巻、第3号(昭和41年3月)、222-224。
- 2) 鴨井 幸、生産の自動化について、日本機械学会誌、第69巻、第569号(昭和41年6月)、53-59。
- 3) 渡辺 茂、自動設計の利用と効果、日本機械学会誌、第70巻、第576号(昭和42年1月)、30-35。
- 4) 研野和人、設計の自動化(APT言語による曲面の創成)、日本機械学会誌、第70巻、第577号(昭和42年2月)、169-175。
- 5) 研野和人、自由曲面の設計と加工システム、精密機械、34巻、1号(昭和43年1月)、11-16。
- 6) 研野和人、曲面の設計と加工システム、機械の研究、第20巻、第1号(昭和43年1月)、201-206。
- 7) 藤田速雄、設計製図の自動化、日本機械学会誌、第71巻、第590号(昭和43年3月)、394-401。
- 8) 徳坂 衛、計算機援助による設計方式、日本機械学会誌、第71巻、第590号(昭和43年3月)、402-411。
- 9) 奥島啓式、星 鉄太郎、機械製造におけるコンピュータ利用の現状と将来、日本機械学会誌、第72巻、第603号(昭和44年4月)、467-475。
- 10) 藤野 勉、電子計算機の設計への応用、日本機械学会誌、第73巻、第612号(昭和45年1月)、76-85。

- 11) 沖野教郎、自動設計の現状、計測と制御、第9巻、第1号(昭和45年1月)、15-27。
- 12) 沖野教郎、自動デザイン、日刊工業新聞社(昭和42年)。
- 13) 研野和人、自動設計法、コロナ社(昭和44年)。
- 14) W. A. Fetter, Orientation to a working approach-computer graphics, Computer graphics for designers, The University of Michigan Engineering Summer Conferences (June 17-28, 1968), 95-105。
- 15) R. W. Jensen and M. D. Lieberman, IBM electronic circuit analysis program, Prentice-Hall (1968)。
- 16) A. Spitalny and M. Goldberg, Drawing board for IC's, Electronics, Vol. 40, No. 18 (1967), 83-88。
- 17) J. Mittleman, Computer-aided design 11, Short cuts to IC's and p-c boards, Electronics, Vol. 40, No. 18 (1967), 70-71。
- 18) S. J. Fenves, R. D. Logcher, and S. P. Mauch, STRESS: A reference manual, A problem-oriented computer language for structural engineering, The M. I. T. Press (1965)。
- 19) D. Ross, ICES system design, The M. I. T. Press (1967)。
- 20) APT part programming, McGraw-Hill (1967)。
- 21) S. A. Coons, An outline of the requirements for a computer-aided design system, Proc. SJCC (1963), 299-304。
- 22) I. E. Sutherland, SKETCHPAD, A man-machine graphical communication system, Proc. SJCC (1963), 329-346。
- 23) T. E. Johnson, SKETCHPAD III, A computer program for drawing in three dimensions, Proc. SJCC (1963), 347-353。
- 24) D. T. Ross and J. E. Rodriguez, Theoretical foundations for the computer-aided design system, Proc. SJCC (1963), 305-322。
- 25) C. I. Johnson, Interactive graphics in data processing, principles of interactive systems, IBM Sys-

- tems Jour., Nos. 3 & 4 (1968), 147-173.
- 26) Man computer design system (I), Engineer, Vol. 219, No. 5691 (Feb. 1965), 363-365.
 - 27) Man computer design system (II), Engineer, Vol. 219, No. 5692 (Feb. 1965), 416-419.
 - 28) D. Secrest and J. Nievergelt, Emerging concepts in computer graphics, W. A. Benjamin, Inc. (1968), 255-309.
 - 29) R. D. Parslow, Computer graphics, techniques and applications, Plenum Press (1969).
 - 30) J. C. Miller and C. M. Wine, A simple display for characters and graphics, IEEE Transactions on Computers, Vol. C-17, No. 5 (May 1968), 470-475.
 - 31) C. Wylie, G. Romney, D. Evans, and A. Erdahl, Half-tone perspective drawing by computer, Proc. FJCC (1967), 49-58.
 - 32) H. E. Klusrud, A general purpose graphic language, Comm. ACM, Vol. 11, No. 4 (1968), 247-254.
 - 33) J. C. Gray, Compound data structure for computer-aided design; A survey, Proc. 22nd Nat. Conf. ACM (1967), 355-365.
 - 34) D. T. Ross, The AED approach to generalized computer-aided design, Proc. 22nd Nat. Conf. ACM (1967), 367-385.

