

電源開発（株）における土木設計とCAD

電源開発（株）建設部設計室 峰尾 肇

宮永佳晴

堀 正幸

○ 江原昌彦

矢吹信喜

1. はじめに

最近のコンピュータ及び関連技術の進展にはめざましいものがあり、中央演算装置（CPU）の高速化、小型化、低価格化或いはグラフィックディスプレイやその他周辺機器の高性能化、低価格化により、CAD/CAMの普及にも一層の拍車がかかった感がある。そうした傾向は特に最近のインテリジェントワークステーションやスタンドアロンタイプのCADシステムの市場の動向に窺える。また他方において巨大化する一方のデータベースと設計作業をリンクさせるため、種々のネットワーク技術が実用化されてきている。しかしながら土木分野においては、各種シミュレーション等大規模技術計算その他においてコンピュータの高度利用を図っているにもかかわらず、最近のCAD技術の取込みという観点からすれば、他の分野と比較してかなり遅れていると言わざるを得ない。こうした状況のなか当社では昭和59年7月にミニコンピュータをベースとしたCADシステムを導入し、大型計算機とオンライン化を図った上で、本格的な三次元の設計支援システムの構築に着手した。本論文では当社におけるCADシステムのシステム構成や設計支援システムとしての考え方及びその開発方針、そして設計業務への適用状況などを紹介する。そして土木設計業務をCADシステムにのせる場合の問題点を述べるとともに、その中でも大きなウェイトを占める地形情報の処理方法について、その方針と現在までに得られた知見を紹介する。

2. システム構成

現在、当社には大型計算機としてFACOM M-380S が設置されており、それに TSS 端末や RJE端末などが接続されている他各種制御用コンピュータとも連係をとっている。これらの機器構成を表-1に示す。この大型計算機に対し、米国コンピュータビジョン社製のCADシステム（CDS4000）が特定回線（9600 bit/sec）を用いて IBM3780手順によりオンライン化されている。さらにこのCADシステムには三菱電機製パーソナルコンピュータ Multi-16 IIが RS-232Cにより接続され、いわゆる分散処理形態のトータルシステムを構成している。システム構成表を表-2に示す。

表-1 大型計算機構成表

機 器 名 称	数量	仕 様
中央演算装置	1	FACOM M-380 S 主記憶容量：24 MB
磁気ディスク装置	—	200 MB×12 630 MB×24 合計 17.52 GB
磁気テープ装置	7	1600/6250 BPI
オンライン端末	55	TSS 及び RJE端末
ラインプリンタ	4	2000 line/min ×2 800 line/min ×1 600 line/min ×1
その他 I/O機器		プロッタ、カトリダ、ディスプレイ等 etc.
オンラインされている他コンピュータ	4	コンピュータビジョン CDS4000 TOSBAC 7000 NEC MS140 7*0 DN660

表-2 CADシステム構成表

機 器 名 称	数 量	仕 様
中央演算装置	1	2 CPU 構成: IPU(16bit CPU) 及び APU(32bit CPU) 主記憶容量: 4 MB (APU)及び 4 MB (IPU) 計 8 MB キャッシュメモリ: 16 KB CPU 間接続バス: 転送速度 14.22 MB/sec
磁気ディスク装置	2	300 MB リム-ハラルディスク/台 計 600 MB
磁気テープ装置	1	9 トラック、800/1600 BPI、45 IPS
グラフィック ディスプレイ端末	4	カラーラスターディスプレイ端末 (1024×1280 ドット) × 3 モノラスターディスプレイ端末 (512×512 ドット) × 1
キャラクタ ディスプレイ端末	4	英数字専用端末 × 2 漢字端末 × 2: パソコン Multi-16II (0-カルディスク 10MB)
ディジタイザ装置	1	サイズ 48" × 36" 解像度 ±0.001"
ラインプリンタ	1	300 line/min
静電プロッタ	1	ドラステム モデル 8600 解像度 400 dot/inch
ペンプロッタ	1	加コンフ モデル 1077 最大作図速度 132.8cm/sec 最大作図加速度 5.66G

3. 当社におけるCADシステムの考え方

著者らが所属する設計室は、国内外の水力、火力及び原子力発電所の土木設計並びに研究開発が主たる業務となっている。また発注サイドの設計業務であることから、種々の構造物に対し、最適化のための比較設計もかなりの幅を持って行われることが通例である。こうした状況に対処するため、従来図形処理関係では表-3に示すようなプログラムを開発・利用してきた。しかしながらこれらのプログラムは、(1) 入出力サポートが貧弱なこと、(2) カードベースのバッチ処理であること、(3) 入力データの準備が大変なこと、などプログラム自身及び実行環境上の制約などから、あまり利用頻度の高いものではなかった。

一般に大規模プロジェクトにおいては、標準化によりコスト低減が可能である部分と、最適化によってコスト低減が図れる部分とが混在する。そして設計業務の効率化及びプロジェクト全体の最適化のためには、前述の標準化・標準設計を行う部分と、レイアウトや形状その他に対して最適設計を行う部分とを分類し、使い分けることが重要である。しかしながら当社では、従来標準化への対する指向はあまり強くなかったが、前述の理由から、今後はシステム開発と並行してこうした標準化への努力が必須であると考えている。

このような事情を前提として当社のCADシステムに要求されることは、以下の通りであると考えている。

- (1) CADシステムの位置付けとしては、単なる製図システムというよりは、モデリングが容易であったり、数量を迅速に求められるような、いわゆる設計者が最適設計を行う際の支援システムとなる必要があること。
- (2) CADシステムが対象とするのは、設計者の判断が不可欠な対話型処理を主体とする。バッチ形式の自動製図は主として大型計算機側で実行させることとする。従って当社におけるCADシステムの理想的な形態としては、設計データベースと、細分化、モジュール化された個々のルーチンを適当なマン・マシンインターフェイスを通じて設計者自らが操作し、設計することである、と言える。

- (3) 有限要素解析用メッシュデータ作成などのように、一貫した設計作業でなくてもCADシステムは多大な効果を発揮する部分もあるので、利用を狭義の設計者に限ることなく、広く一般の技術者にもシステムを開放することとする。従って操作教育等も含め、オープン制を前提としたシステム管理・運用を行うこととする。

表-3 従来の図形処理ソフトウェア
(バッチ処理専用)

プログラム	作成年
1.等高線データ→グリッドデータ 変換プログラム	1972. 6 ('82 Rev.)
2.グリッドデータ→等高線データ 変換プログラム	1972. 6 ('79 Rev.)
3.三次元透視図作成プログラム	1974. 4
4.フィルダムの土工量計算と断面図 作成プログラム	1976. 3
5.グリッドデータから鳥かん図作成	1976. 6
6.土工量計算及び断面図作成プログラム	1976. 6
7.ランダムデータ→グリッドデータ 変換プログラム	1976. 6

4. システム開発計画

導入したCADシステムはターンキータイプであり、基本的な三次元ワイヤフレームモデル及びサーフェスモデルのモデリング機能をはじめとして、有限要素解析の前・後処理機能や土工量計算等の数値地形情報に関連したデータ処理を行うアプリケーションソフトウェア等も備えている。しかしながらCADシステムのような高度かつ複雑な図形処理プログラムの適用に当っては、小さいところでは図面記号その他各種パラメータが従来の製図基準となじまない等の問題から、大きいところではソフトウェアそのものの仕様が合わなかったり、アルゴリズム等に起因して結果が満足できないなどといった問題が部分的に発生するのが現状である。またさらに基本機能とユーザーサイドのニーズとのギャップを埋めるためのソフトウェアも用意する必要がある。

こうした実情に鑑み、大型計算機側のデータベースとのリンケージまでも含めた全体システムの構築は5ヵ年計画で実施することとし、そのなかでも特にCADシステム側については立ち上げを早めるように、最初の1年間に開発のピークを設定することとした。開発の全体工程を図-1に示す。

CADシステム開発計画は、一般的にベースとするハードウェア及びソフトウェアの環境やユーザーのCADシステムに対する考え方や位置付けにより大きく異なる。当社では、CDS4000 システムの基本機能を考慮して表-4に示す開発項目を設定した。これらのうち項目B,D,E 及びF,G の一部については第一期開発期間(昭和59年 7月～昭和60年 3月)において終了している。

5. CADシステムの利用状況及び適用例について

ここでは、昨年 7月のCADシステム導入以降のシステムの利用状況の推移と実際の適用例を紹介する。当社では、前述した通りオープン制を前提としたシステム管理・運用を行っているため、それに起因して運用上、システム操作教育及びそれに付随するトレーニングの占める割合が比較的多くなっていることが特徴的である。図-2には、システムを導入して以来の用途別利用時間割合の推移を示してある。なおこの図にはシステムが大型計算機とオンライン化された10月以降のデータが示されており、また端末1台あたりの稼働時間は平均約8時間/日で、いままでの期間を通じてほぼ一定である。この図から、全体的に見ればシス

図一 1 CADシステム開発工程

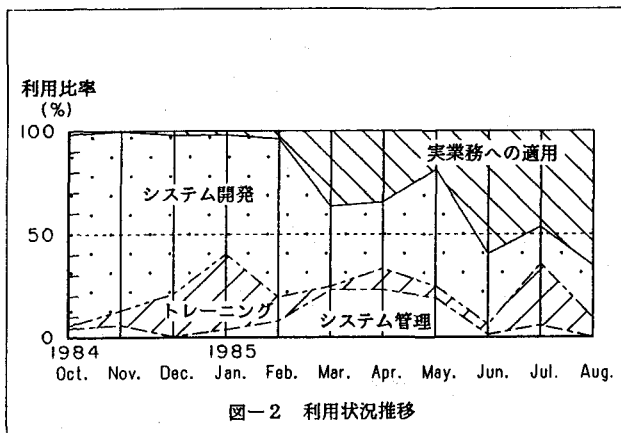
項 目	昭和59年度	60	61	62	63	64
全 体 工 程	第一期開発	第二期開発	第三期開発	第四期開発	第五期開発	全面実用化
	CDS4000 側の開発が主体			※ストリクト・ユーザ側DBとの関係		
A.標準化構造物の自動生成						
B.数値地形情報処理						
C.数量計算システム						
D.有限要素解析支援システム						
E.技術計算						
F.図面作成関連						
G.システム管理・運用						
H.データの高速転送用ネットワークの検討						
I.全体システムの構築						

表一 4 CADシステム開発項目

項 目	内 容
A.標準化構造物の自動生成	パラメトリックに形状が定義できるものについてはプログラムにより対応し、一定寸法のものについてはその形状を登録しておく。
B.数値地形情報処理	(1) 数値地形モデル(Digital Terrain Model) 用地形データの合理的・効率的入力方法の検討 (2) 等高線データ～グリッドデータの相互変換プログラムの作成 (3) 掘削・盛土用汎用プログラムの作成
C.数量計算システム	数量計算の効率化を図るためのプログラムで計算書を作成する機能も付加する。
D.有限要素解析支援システム	(1) 有限要素モデリングの機能強化 (2) 前処理プログラム(解析プログラム用フォーマット)の整備 (3) 後処理プログラムの整備 (4) 解析用データベースの整備(諸材料の物性値、入力地震動 etc.)
E.技術計算	斜面安定解析や不等流計算等、従来大型計算機で処理されてきた技術計算プログラムをCADシステム側に取り込み、システムの持つ豊富な図形処理機能を利用して計算業務の効率化を図る。
F.図面作成関連	(1) 図面記号や頻繁に使用される技術用語の登録 (2) 基本パラメータ(単位系や製図基準、技術基準に基づくパラメータ)やデフォルト値(省略時解釈値)の設定
G.システム管理・運用	(1) 大型計算機とのオンライン環境設定 (2) パーソナルコンピュータとのオンラインプログラムの効率化 (3) システム利用統計値(アカウント情報)の処理プログラムの作成 (4) 効率的データバックアップ体系の確立 (5) 各種ユーティリティプログラムの作成

テム開発作業と実際の業務への適用が徐々に
入れ替わってきている様子が窺える。また操
作教育については全体的な講習会は年一回で
それ以外には随時必要に応じて実施している
講習会の実績としては受講者は昭和59年度が
27名、昭和60年度が18名である。表一5に今
年度の教育カリキュラムを示す。

適用分野は現在、水力、火力及び原子力発
電計画に関係する土木が主体で、一部建築分
野にも応用されている。適用業務内容として
は、現在までのところ開発がほとんど終了し
ている有限要素解析関連がもっとも多く、ま
たシステム導入前と比較して著しく省力化が
実現されているのもこの分野である。表一6
に現在までの適用業務とその内容を掲げてあ
るまた写真一1、2及び図一3は、表一6に
示される項目の例である。



表一5 昭和60年度教育カリキュラム

教 育 コ ー ス	日数
1.基礎コース ※	5
2.応用コース ※	5
3.製図コース ※	1
4.〇Sコース	1
5.有限要素解析コース	3
6.土木設計コース	3
7.言語 (NEWVAR)	2
合 計 日 数	20

注) ※印は必修コースを示す。

表一6 CADシステムの適用業務

適用業務	内 容
1.有限要素解析	地盤解析（応力・変形・安定解析）やアーチダム解析等のモデルのモデリングを行い、オンラインにより大型計算機で計算を実施する。また必要により後処理を行う
2.構造物や地盤等の三次元モデリング	地層境界にサーフェスを張り、任意断面においてカットすることにより地質図を作成する。ダム、発電所等の三次元モデルを作成する。
3.図面作成	三次元モデルから図面を起こしたり、また直接、二次元で図面を作成する。
4.景観評価	サーフェスモデルに対してシェーディングを行い、発電所等の新設による周囲の景観への影響を評価する。

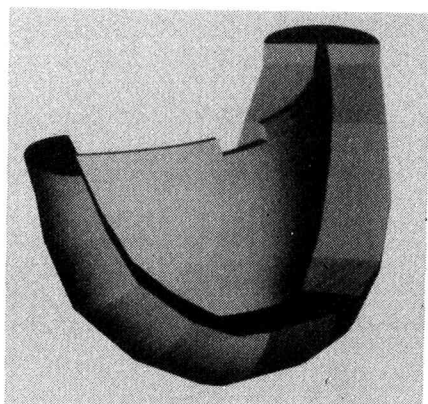


写真-1

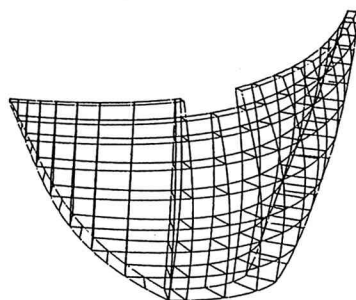


図-3

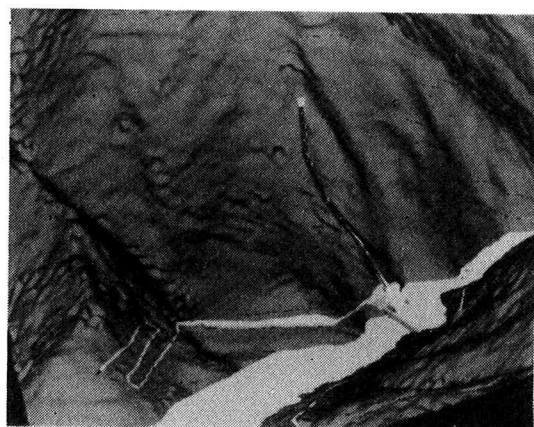


写真-2

写真-1 アーチダム及び基礎岩盤の三次元モデル（サーフェスモデル）をシェーディングしたもの

図-3 写真-1のアーチダムの有限要素モデル

写真-2 水力発電所遠景

6. 数値地形情報処理について

ここでは、当社のCADシステムにけるDTM（Digital Terrain Model：数値地形モデル）の処理の流れと、そこで採用されているアルゴリズムと適用例を紹介する。

DTMの手法には、等高線を記憶させるもの、四角形グリッド状のもの、三角形グリッド状のもの、地形に面をはるようなもの等、様々のタイプがあるが、当社では、等間隔の四角形グリッド状のモデルを採用している。

当社のCADシステムにおけるDTMの処理のフローを図-4に示す。一般的には地形の情報源は等高線地形図であるが、航空写真をソースとして用いることも可能である。

等高線地形図からグリッドデータを作成するには、一般的には二つの方法が考えられる。一つは地形図にメッシュをはり、人が格子点上の標高値を読み取る方法であり、もう一つは等高線沿いの点データをディジタルでサンプリングし、グリッドデータを周囲の点データから内挿して求める方法である。前者の方法では、かなり精度の良いデータが得られるものの、データの読取りに非常に時間を要するため実用的ではない。後者の方法は、前者の方法と比較すると短時間で効率的にDTMが作成出来るため、当社ではこの方法を採用している。

次に、等高線に沿った点データ群からグリッドデータを内挿する計算プログラムのアルゴリズムを以下に示す。図-5のように等高線沿いの点データがサンプリングされているとすると、標高値を求めたい格子点の近傍にある6～21個の点データを選び、格子点とそれらの点とのXY平面上での距離の2乗の逆数の重み

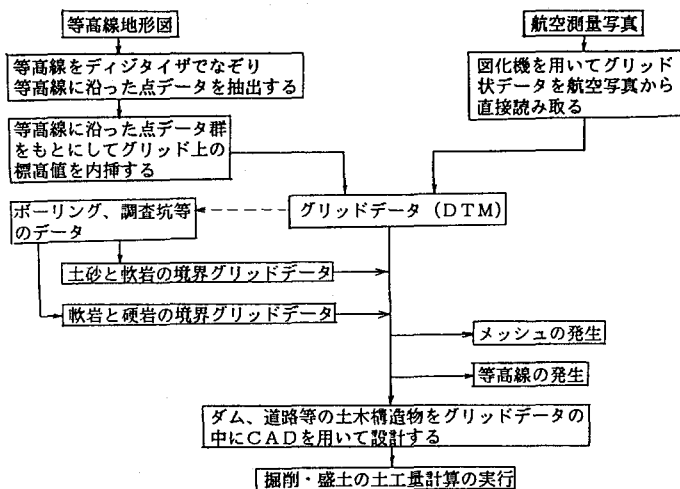


図-4 当社のCADシステムにおけるDTMの処理フロー

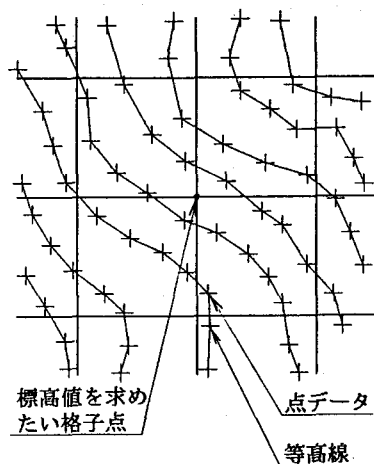


図-5 デジタイズされた等高線とグリッド

をつけて、最小二乗法によって二次曲面

$$Z = AX^2 + BXY + CY^2 + DX + EY + F$$

を決める。格子点上の標高値はこの曲面上の一点として上の式より計算される。これを全ての格子点に対して行ないグリッドデータ (DTM) を作成するものである。

内挿計算に用いる格子点の近傍点は、一方向に偏らないように、格子点を中心とした局所XY座標系の4つの象限から点データを選択し、もし、ある象限に点がない場合は、その格子点の計算は行わない。また、選択した点データのコンビネーションにより、稀に異常に高い (あるいは、低い) 標高値を内挿する場合があるが、その場合は、二次曲面をはらずに、単純な重み付き平均により標高値を求める。

以上のようなアルゴリズムのため、デジタイズした点データの量やちらばり具合によって精度が左右されるので、なるべく多くの等高線を平面的に見て偏りのないようにサンプリングするよう留意する必要がある。また、等高線のデジタイズ作業には多大な労力と時間を要するので、オートデジタイザの利用も検討中であるが、オートデジタイザの本格的な実用化までには、ハード・ソフトの両面からまだ時間がかかりそうである。

航空写真から地形データを抽出する際は、航空写真用の図化機を用いる。これは、航空写真上の任意の点の標高値、X、Y座標が直接測定出来、直ちにコンピュータに記憶されるものである。当社では、この作業は航空測量会社に発注し、成果品は磁気テープで受取っている。この方法には、航空写真から直接、グリッドデータを読み取ることが出来るので、等高線をデジタイズする必要がなく、内挿計算による誤差が発生しないという利点がある。さらに、地形図化をグリッドデータをもとに行なえる可能性があるので、図化の方法、地物データの扱い方等について現在検討中である。

次に土工量計算プログラムのアルゴリズムを紹介する。まずDTMの完成後、CADでダム、道路等の構造物を設計する。土工量は、現況の地表面と掘削面・盛土面（ここでは、『設計面』と呼ぶ）との間の体積である。これを求めるためにDTMよりさらに細かいメッシュを設計面内にはり、地表面と設計面との間にメッシュの四角形を底面とする直方体の柱を立ててその体積を計算し、設計面が地表面よりも上ならば盛土、下ならば掘削と判断し、それぞれの柱の体積の合計を求めるようになっている。このプログラムでは、ボーリングや調査坑等のデータをもとに地表面と同じようにグリッド状のDTMを土砂層と軟岩層の境界、軟岩層と硬岩層の境界に対しても作成しておけば、土砂、軟岩、硬岩の掘削土工量を別々に計算出来るようになっている。

電力土木施設、特に水力発電所等の計画・設計においては、かなり広範囲の領域を数値化するため、そのデータ量は相当大きなものになる。図-6の例は比較的狭い領域なので、グリッドデータが12KB、メッシュ図が52KBとデータ量は小さい。しかし、 $1.89\text{km} \times 1.16\text{km}$ の非長方形領域（面積約 1.5km^2 ）について航空写真から5m間隔のグリッドデータを抽出した際は、グリッドデータが1.90MB、メッシュ図が3.17MB、発生させた等高線が4.16MB、という膨大なデータ量であった。

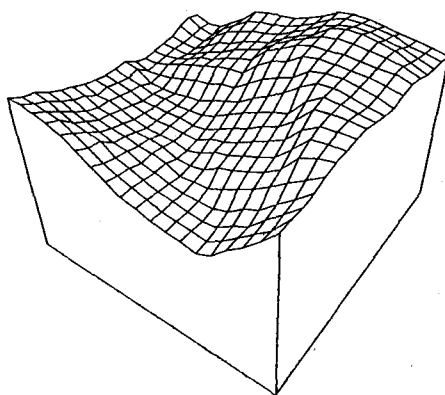


図-6 DTMの例（メッシュ状に表現）

7. おわりに

冒頭において述べたようにマイクロプロセッサ等の高性能化、低価格化とCADシステムの需要サイドのニーズそしてメーカーの経営戦略的な方針とから、最近ますますミニCAD、マイクロCADともいふべき小規模なCADシステムが市場に登場してきている。こうしたシステムは、適用目的を明確にし、その限界を認識して用いるならばかなりの効果をもたらすものと考えられる。当社においても将来的にはこうしたシステムを全国各地の建設所等に設置し、大型計算機や本店のCADシステムとオンライン化することにより、設計変更等現場における設計業務を効率化することが考えられる。その際に重要となるのはやはり図形・非図形を問わず、広範な情報のデータベースであることは言うまでもない。そうした問題も含めて、今後CADシステム開発を展開して行く過程で得られた知見等については、逐次紹介して行く予定である。