

対話形電子回路シミュレータ

Interactive Circuit Simulator

ICの開発期間を長引かせる一因である回路設計不良を早期に発見するための回路シミュレータの解法と、使いやすさを改善したGRADASによる対話形回路シミュレーションシステムについて述べる。回路シミュレータの具備条件として、(1) TATの短縮、(2) シミュレーション機能の充実、(3) 入出力機能の充実、(4) 高精度デバイスモデル、(5) デバイスパラメータのライブラリ化、を挙げた。このうち、(1)を達成するため、記憶領域を削減し計算効率を高めるスパース行列技法、計算効率を高めるコード発生について述べた。また、実際の回路設計の局面で重要となる使いやすさを向上するため、インテリジェント端末GRADASにより回路図表示とシミュレーション結果表示をする対話形システムについて述べた。

小澤時典* Tokinori Kozawa

鈴木五郎** Gorô Suzuki

1 緒 言

ICの集積度は年々増加し、最近では1チップに100万個以上の素子を集積化したVLSIも出現するようになってきた。このようなVLSIを短期間に開発することが時代の要請となっている。このため、計算機を利用した設計技術(CAD: Computer Aided Design)が盛んに開発され、実際の設計に適用されてきている。本稿では、幾つかの設計工程のうち、VLSIの特性を支配する回路設計に焦点を絞り、そこで使用される回路CADについて述べる。

IC、LSIの回路設計についてみると、半導体プロセスの微細化によりデバイスの特性は複雑になり回路特性の予測が難しくなっている。回路シミュレータは、ICを試作する前にIC特性を予測し、事前に回路設計不良を摘出してICの開発期間短縮をねらったソフトウェアである。以下には、回路シミュレータの役割(2章)、具備条件(3章)、解法と高速化計算手法(4章)、及び対話形システム(5章)について述べる。

2 回路シミュレータの役割

回路設計の目的は、所望の回路特性を満足する回路接続とデバイス特性を決定することである。どのような回路構成にするかは人間の創造的な活動に依存するが、ある回路構成と物理的実現性のあるデバイス特性を仮定したとき、どのような回路特性を示すかを確認するために回路シミュレータは使用される。図1は、IC設計工程での回路シミュレータの位置づけを示したものである。従来は、ブレッドボード実験と称して、単体部品を用いて回路を組み立てるハードウェアシミュレーションが試みられてきたが、微細加工の進んだICでは全く無意味となり、回路シミュレーションだけが回路設計検証の道具となってきた。

回路シミュレータは、図1に示すように回路接続とデバイス特性を与えることにより、IC特性が出力されてくる。したがって、回路シミュレータの使用目的は、(1) 設計結果の確認、(2) 設計パラメータの選択、の二つに絞られてくる。特に後者が最も一般的な使用目的となってきた。

回路シミュレータの主な機能は、(1) 直流応答、(2) 過渡応答、(3) 周波数応答、の三つが基本機能である。デバイスは、抵抗、キャパシタ、インダクタ、ダイオード、バイポーラトランジ

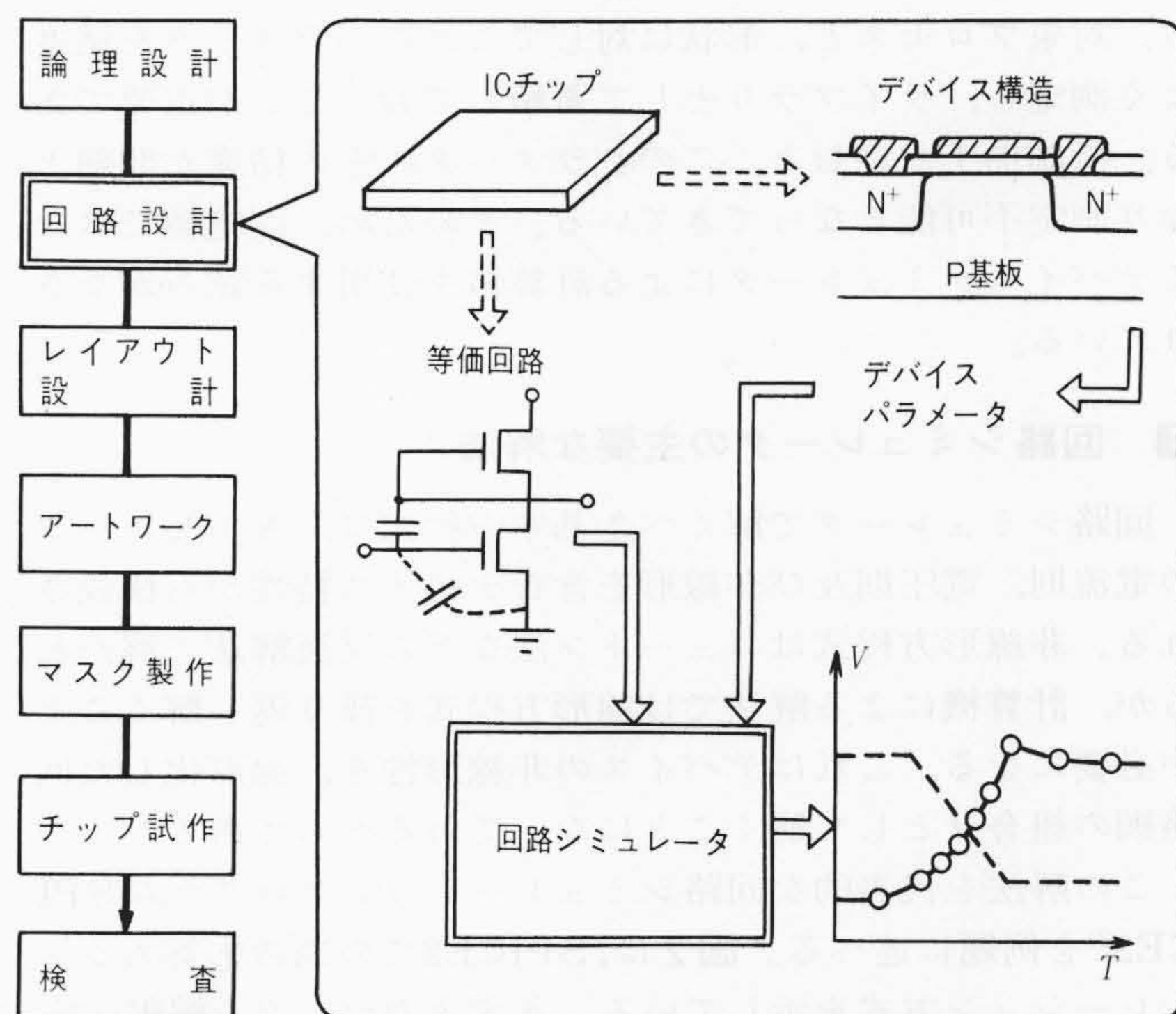


図1 回路シミュレータの役割 ICの設計工程と回路シミュレータの入出力データの性質を示す。

スタ、MOSトランジスタ、接合形電界効果トランジスタ、及び分布定数線路がモデル化されている。

システムとしての取扱い規模は、これまで実用的には数百デバイスであったが、大形計算機の進歩に伴い1,000~5,000デバイスが実用範囲に入ってきたが、それにしてもチップ全体をシミュレーションするにはほど遠い数値である。現実には繰返し部分を省略するとか、特性的に微妙な部分を取り出すとかしてシミュレーションを行なっている。

3 回路シミュレータの具備条件

回路シミュレータが、回路設計に力を発揮するための必要条件として、次の項目は重要である。

(1) 早いTAT

計算を依頼してから結果を得るまでの時間(これをTAT: Turn Around Timeと呼ぶ。)の短縮。このための技術課題は

* 日立製作所中央研究所 ** 日立製作所日立研究所

高速計算手法である(これについては、4章で述べる)。

(2) シミュレーション機能の充実

基本機能のほか、パラメータのばらつきによる特性変化を調べるための統計解析、時定数が大幅に異なる回路を安定にシミュレーション可能とするスティッフな回路のシミュレーションなど、設計者の要求にこたえる技術開発が重要である。

(3) 入出力機能の充実

回路の記述及び修正を容易にすること、シミュレーション結果を見やすくすることなどは実用上重要である。入出力は、グラフィック端末を利用した対話形機能が使いやすい(これについては、5章で述べる)。

(4) デバイスモデルの精度

等価回路及び特性式で表現されたモデルで、実際のデバイスの特性にどこまで近づけられるかが課題である。プロセスの進歩に伴い複雑な物理現象を表現するモデルが要求されている。

(5) デバイスパラメータの測定と精度

トランジスタのモデルは、数十個のパラメータを含んでいる。対象プロセスと、形状に対してこれらパラメータを精度よく測定し、ライブラリとして蓄積しておくことが重要である。微細加工が進むと、このパラメータ測定の精度が問題となり測定不可能となってきた。そのため、測定値ではなくデバイスシミュレータによる計算値を使用する試みがなされている。

4 回路シミュレータの主要な解法¹⁾

回路シミュレータで解くべき基本方程式は、キルヒホッフの電流則、電圧則及び非線形を含むデバイス特性から構成される。非線形方程式はニュートン法などの反復解法で解かれるが、計算機による解法では線形方程式を繰り返し解くことが必要になる。これはデバイスの非線形性を、線形化した回路網の組合せとして解くことになっているからである。

この解法を代表的な回路シミュレーションプログラム SPICE2²⁾を例題に述べる。図2は、SPICE2での過渡応答のシミュレーション方式を示している。まず入力データを解釈して、回路接続を表わしたテーブルと、方程式を解くための行列構造を決定する。電子回路の接続行列は、行列要素が非零になるものが極めて少ないという特徴をもっている。零要素数と全要素数の比をスパースリティと呼んでいるが、大規模回路では、98~99%にもなる。この性質を利用して、行列要素の記憶領域を減らすことと、線形方程式を短時間に解くことをねらったスパース行列技法が採用されている。圧縮したデータの記憶法として最も簡単なのは、各非零要素の行と列の番号及び要素の値を記憶する方法である。このとき、後の繰返し計算で非零要素が増えたりすると、データ構造の変更が必要となり計算時間増加の一因となる。この非零要素の湧き出しを抑えるため、あらかじめ接続行列を作成する時点で、行列の入れ替えを行っておく。

行列構造が決定されると、非線形方程式を解くための繰返し計算に入る。解くべき式は、アドミタンス行列を用いた行列式であり、その行列要素がデバイス特性に対応する。入力信号の変化によって、ある時刻の入力電源値が決められる。デバイスの特性は、前の計算での節点電圧から計算される。その結果、行列要素の値が決められる。こうして、次の電圧値が求められる。前回と今回の電圧値の差が誤差範囲内に入らなければ、未収束として行列要素の計算に戻る。この繰返しは、非線形方程式のニュートン法による解法となっている。

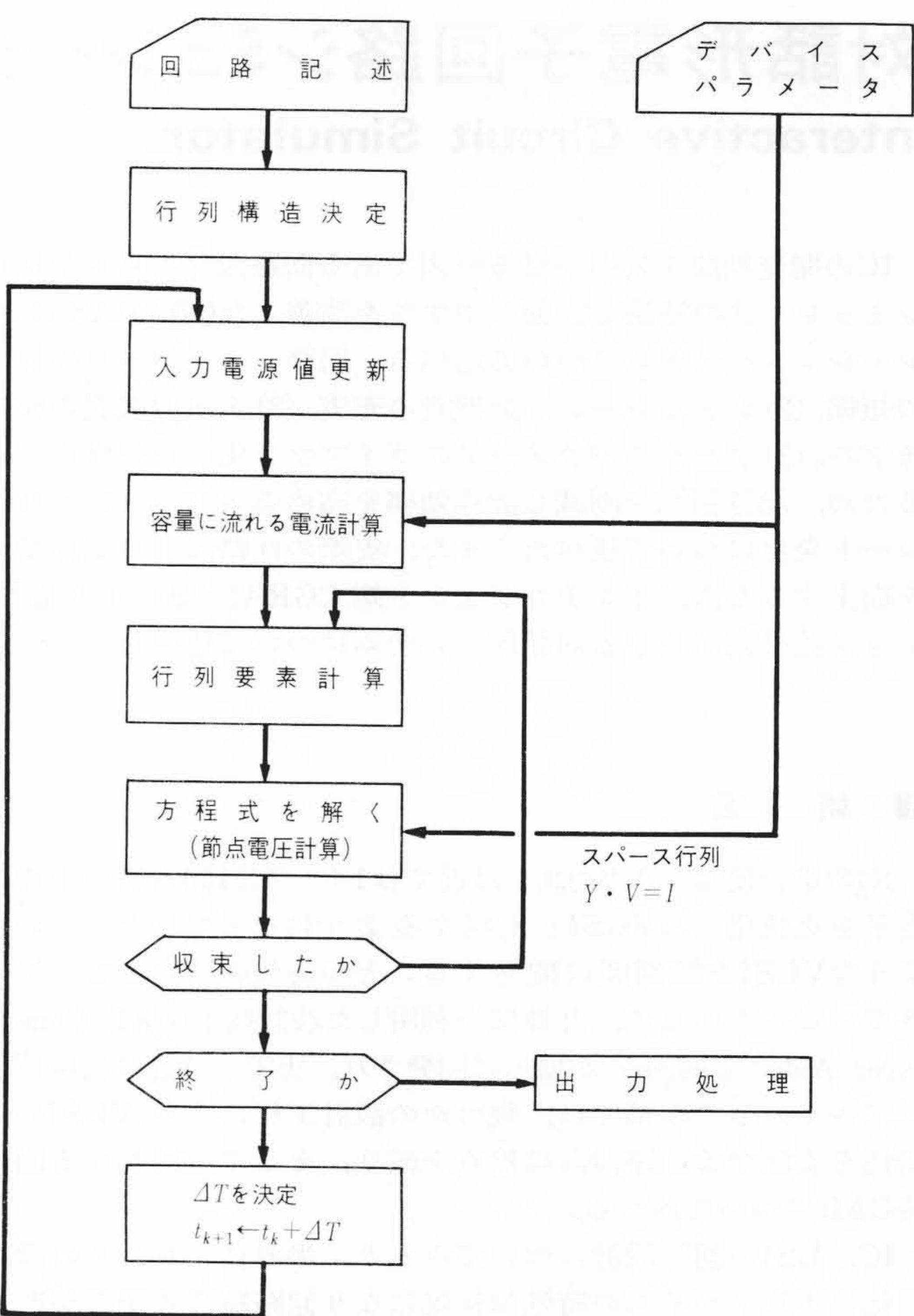


図2 SPICE2のシミュレーション方式 デバイス特性(行列要素)と線形方程式の解が繰返し行なわれる。

もし、電圧値の差が誤差の範囲内に入れば収束したといい、その時刻の節点電圧が最終的に決定される。この各節点の電圧が出力され、時刻 t_k を ΔT だけ進めて、次の時刻の電圧を求める計算に戻る。 ΔT の値は、波形の変化状況を考慮して自動的に決定される。波形が急峻ならば ΔT は小さく、緩やかならば ΔT は大きめに決められる。これを自動刻みと呼んでいる。

シミュレーションに要する計算機使用時間は、回路規模と計算点数に依存している。一点の計算時間は、回路規模にはほぼ比例する。これを高速化する手法について次に述べる。先に述べたシミュレーション方式の最初の部分で行列構造を決定するが、この構造は、繰返し計算の途中では変更されないことに着目して、データのアドレス計算の省略と実行部分を直接機械語に翻訳して計算効率を上げようとするのがコード発生方式である。これにより、記憶領域は増加するが、計算機使用時間を短くすることができる。1,000トランジスタ程度の大規模回路では、約 $\frac{1}{2}$ に短縮できるという効果が得られている。

5 GRADASを用いた回路シミュレーション

回路シミュレータの重要課題の一つとして先に入出力機能の充実を挙げたが、ここではGRADAS(Graphics system for Design and Manufacturing Assistance)というグラフィック端末を利用した対話形回路シミュレーションについて述べる。

5.1 回路シミュレータの利用形態

回路シミュレータを利用する場合を振り返ってみる。まず、人手で描いた回路図に関して同電位信号線を抽出し、信号線を区別するための信号名を割り当てる。この信号名を用いて回路の接続情報を記述したデータを作成し、それをカードあるいはキャラクタ端末を使用して計算機に入力している。シミュレータはこの情報を読み込んで実行されるが、その結果はリストとして出力されるか、あるいはグラフィック端末へグラフの形で表示される。シミュレーション結果に応じ、必要ならば回路素子のパラメータ値を変更したり、あるいは回路接続情報の変更を行なうことになるが、これらの作業はすべてキャラクタデータの修正という形で行なわれている。ここで、電氣的に最適な特性が満足されるまで、回路素子のパラメータ値の変更や回路接続情報の変更と回路シミュレーションとが交互に何度か繰り返される。

以上述べたような形での回路シミュレータの利用方法は、決して効率の良いものとはなっていない。その理由は次の点である。

- (1) 回路設計をする場合にはトランジスタや抵抗などを図形、すなわちグラフィックデータとして取り扱っているが、回路シミュレータを利用する場合にはそれらをいちいちキャラクタデータに変換しなければならない煩わしさがある。
- (2) キャラクタ端末やグラフィック端末など、複数種類の入出力装置を使用しなければならない。

これらの問題点を解決する手段として、設計者と計算機とのインタフェースにグラフィックデータが利用できるインテリジェント端末GRADASの利用が考えられる。以下、まずGRADAS自体を説明し、次にこのGRADASを用いた対話形回路シミュレーションシステムについて述べる。

5.2 インテリジェント端末GRADAS

図3にGRADASの外観を示す。端末はタブレット(508mm×508mm)、スタイラス、カラーディスプレイ(リフレッシュタイプ、1,024×1,024)及び16ビットの小形計算機から構成されており、通信回線を介して大形計算機と接続されている。

端末でもっている小形計算機と大形計算機では、次のように機能を分担している。

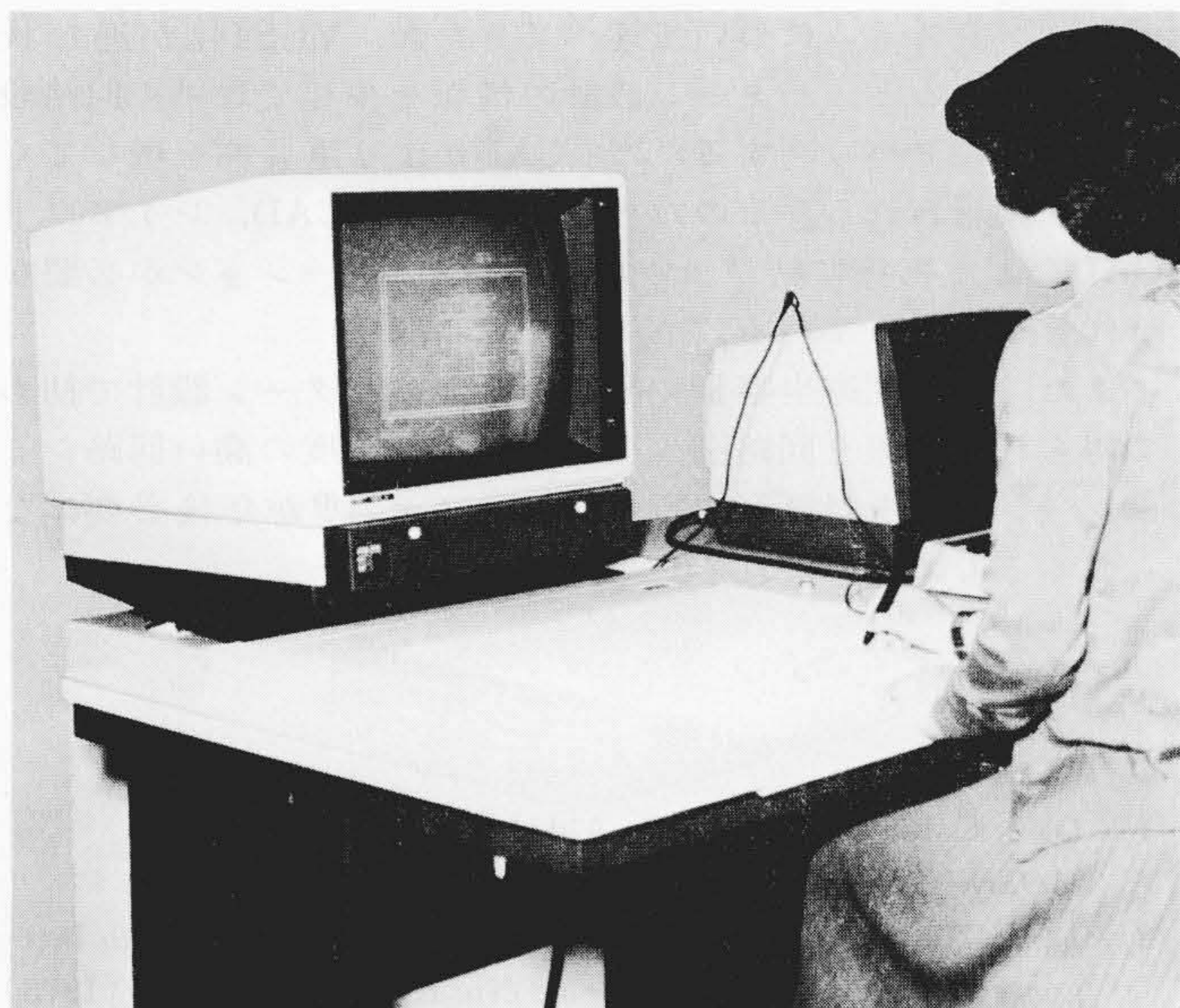


図3 GRADASの外観 タブレット、スタイラス、カラーディスプレイ及び小形計算機から構成されている。

(1) 小形計算機の機能

(a) コマンドの解読

タブレット上のメニュー領域から必要なコマンドの枠をスタイラスで指定すると、それがどんなコマンド(計算機に何をやらせたいのかという命令)なのかを解読し、その情報を大形計算機に転送する。

(b) パラメータの解読

パラメータとはコマンドと対で入力される情報であり、次の3種類がある。

(i) Pパラメータ

タブレットをスタイラスで指定することにより直接得られる座標情報であり、図形を配置したい場所を教える場合などに使われる。

(ii) Eパラメータ

ディスプレイ上に表示されている図形要素に付けられている識別番号であり、図形を移動したり消去するときに使われる。

(iii) Cパラメータ

文字情報であり、図形に名前を付ける場合などに使われる。

これらのパラメータを入力する手段は、原則としてタブレットをスタイラスで指定する方法である。Pパラメータはタブレットから得られる座標情報そのものであるが、Eパラメータ及びCパラメータは、スタイラスで指定した点に最も近い図形要素を捜し、その識別番号を見付け出すとか、指定された点の含まれる領域に割り当てられた文字(あらかじめどの領域に何という文字を割り当てるかは登録されている。)を認識するとかの処理を行ない、パラメータの情報を大形計算機へ転送する。

(c) 作画

大形計算機から送られてくる作画命令により、ディスプレイ上に図形を表示すると同時に、小形計算機のメモリ上に図形情報を蓄える。

(d) 画面の制御

小形計算機のメモリ上の図形情報に関して、拡大・縮小、移動などの処理を高速で行なう。この機能を利用することで、かなり複雑な図面でも実際に識別できるぐらいの大きさに拡大しながら作業を進めることができる。

(2) 大形計算機の機能

(a) 図形情報データベース構築

端末から送られてくるコマンドやパラメータによって、図形情報に関するデータベースを構築する。

(b) 作画命令の発行

ディスプレイ上に図形を表示する命令を発行する。

(c) 各種解析プログラムの実行

データベース上の図形情報に基づいて、各種解析プログラムを実行する。

(d) その他の大形CADプログラムの実行

5.3 対話形回路シミュレーションシステム

図4にGRADASを用いた対話形回路シミュレーションシステムのソフトウェア構成を示す。同図中のプログラムやファイルは、すべて大形計算機で管理されるものである。

あらかじめ端末に登録しておいたトランジスタや抵抗などの素子、及び配線類を、タブレット上の該当箇所をスタイラスで指示しながら対話的に入力してゆく。この過程でカラーディスプレイ上に入力した図形が表示されると同時に、回路図の図形データの格納されているファイルが構築される。図5

(a)は対話入力された回路図をディスプレイ上に表示した例である。計算機は入力された回路図データから自動的に同電位信号線を抽出し、信号名を割り当てて回路シミュレータ用の入力データを作り出す。このデータを回路シミュレータが読み込んで計算を行なうわけであるが、その結果は計算結果データファイルに格納され、必要なときに必要な信号線の計算結果を回路図を入力したのと同じディスプレイ上に表示することができる。まず計算結果を見たい回路図を表示し、スタイラスで信号名を指示することにより必要な信号線の計算結果データをファイルの中から選択し、編集してグラフの形で表示する。同図(b)は同図(a)の回路にステップ状の波形を入力した場合に、ある信号線に現われる過渡応答を表示した例である。

この計算結果から判断して、必要ならば回路素子のパラメータ値の変更あるいは回路接続情報の変更をGRADASのディスプレイ上で行ない、再び回路シミュレーションを行なうことになる。すなわち、ある程度の規模の回路ならば、GRADASの前に座ったままで回路図をあくまでもグラフィックデータとして扱うだけで回路の最適設計を効率良く行なうことが可能となる。

このシステムでは、回路図のシンタックスエラー（素子名の二重定義など）チェックを自動で行なう機能もっており、このような機能を使いながら対話的に回路図を作成すると、回路シミュレータ用の入力データを作成するのに従来と比べて $\frac{1}{2}$ 程度の工数で済むという結果が得られている。

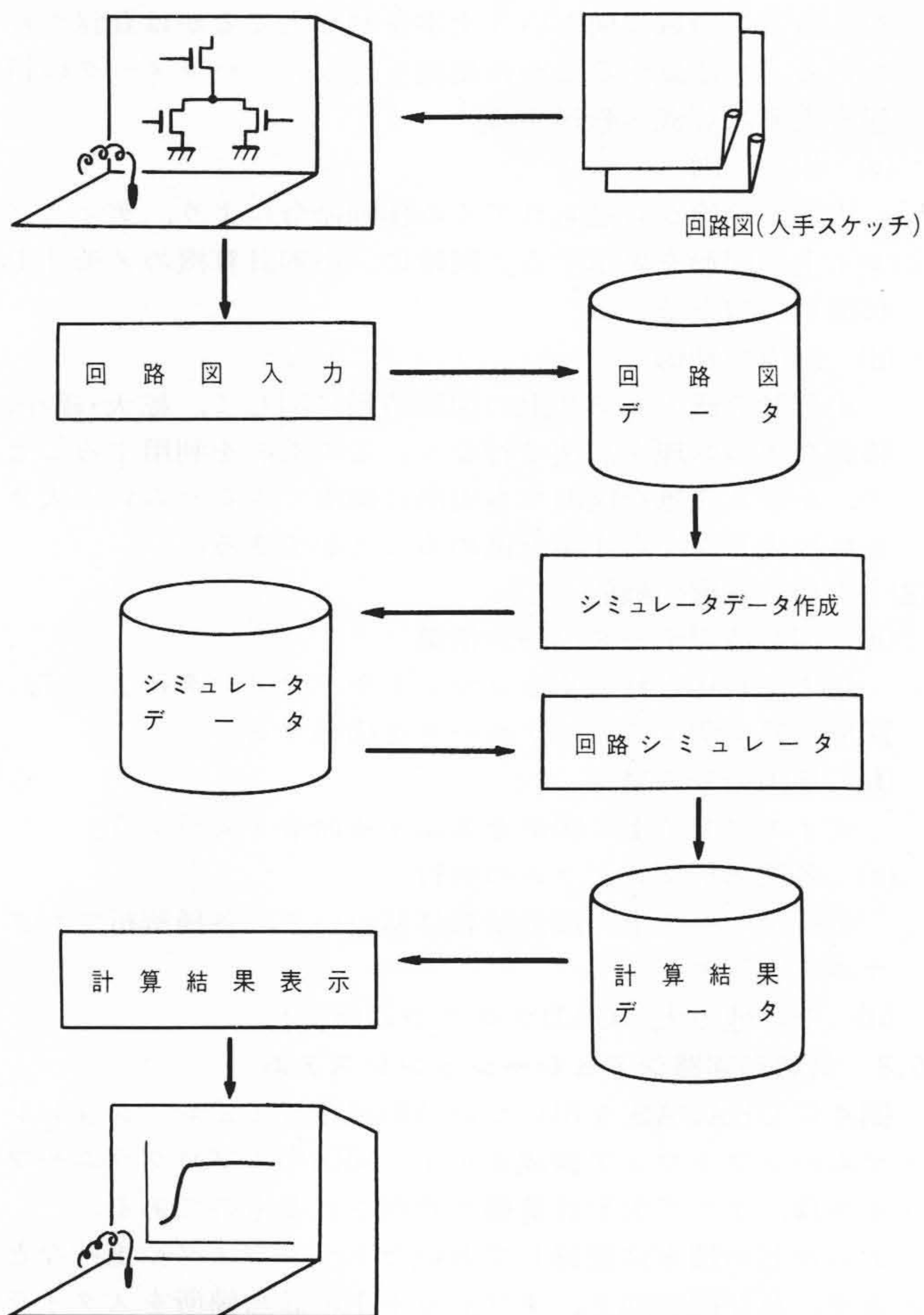
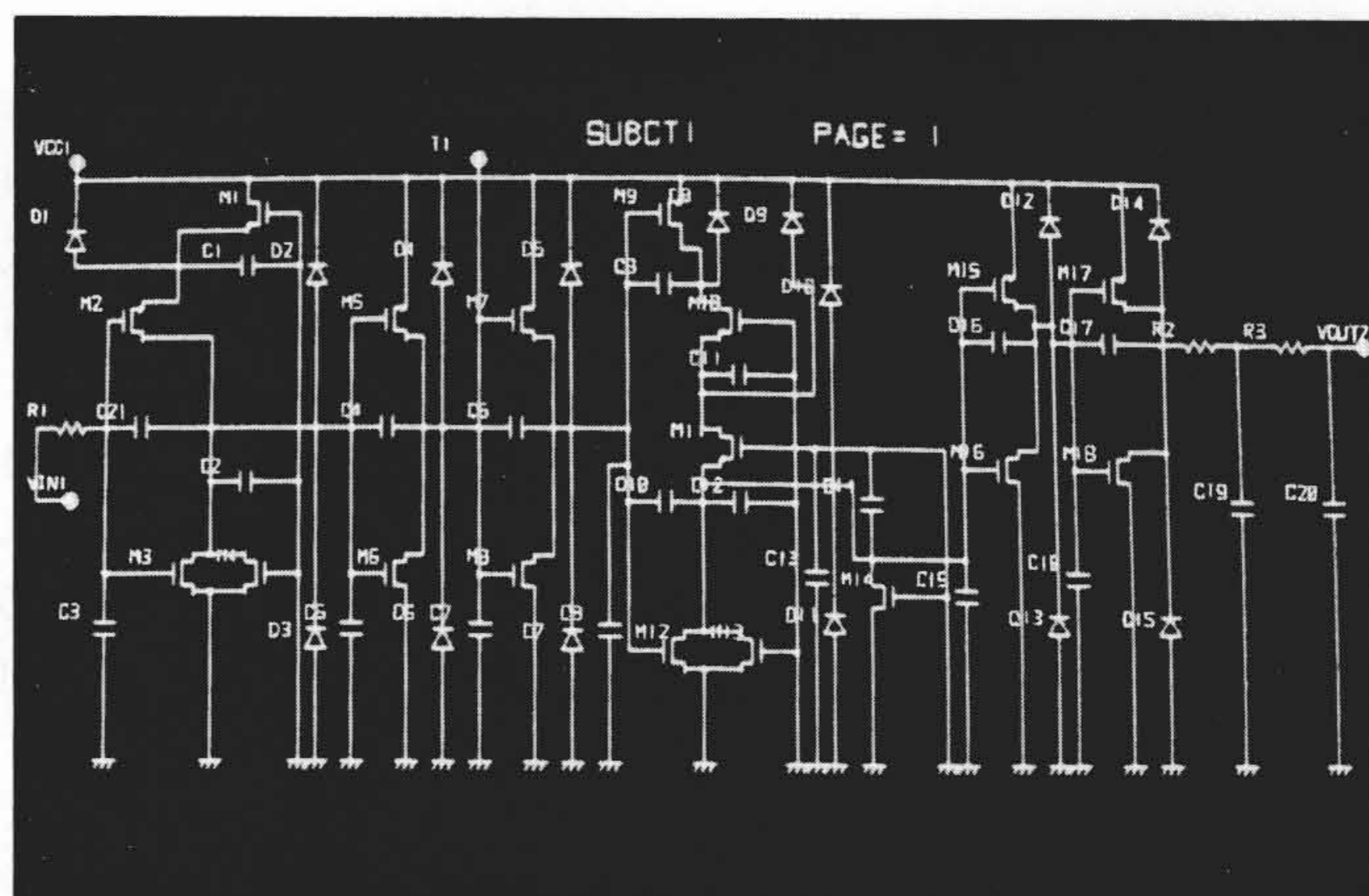
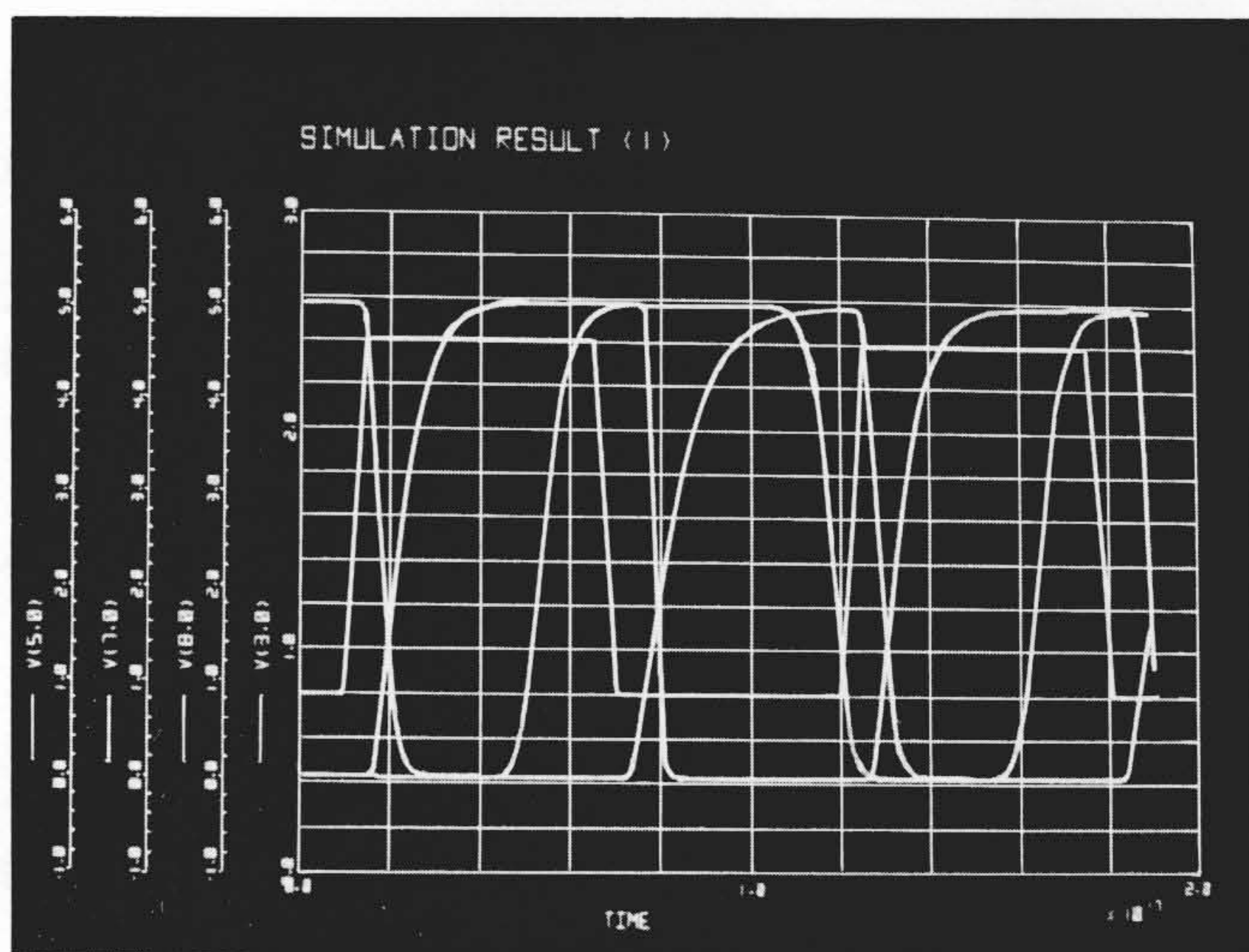


図4 対話形回路シミュレーションシステムの構成 GRADASを用いて対話的に回路図を入力するだけで回路シミュレーションが行なえ、結果を画面上で確認することができる。



(a) 回路図表示例



(b) 回路シミュレーション結果表示例

図5 GRADAS画面表示例 GRADAS画面上には、回路図とそのシミュレーション結果が表示される。

6 結 言

回路設計でのシミュレータの役割、そこで使われている計算手法、及び使いやすさを良くする対話形回路シミュレーションシステムについて述べてきたが、VLSI化が進む状況の中でみると、パターン設計の情報を少しでも早く回路設計へフィードバックするためのCADがより重要性を増してくるようになると思われる。そのために、デバイスCAD、レイアウトCADなどと密接に結びついた回路シミュレーションが必要な時代となってきている。

また、配線間寄生容量や配線抵抗などパターン設計で初めて得られる情報を回路図へ反映し、より精度の高い回路シミュレーションを対話形で行なえるシステム³⁾が今後必要になってくるものと思われる。

参考文献

- 1) D. A. Calahan : Computer Aided Network Design, McGraw-Hill (1972)
- 2) L. W. Nagel, et al. : SPICE, Simulation Programs with Integrated Circuit Analysis, Memo No. ERL-M382, UCB (1973)
- 3) 鈴木, 外 : 対話形マスクパターン回路図変換プログラム, 電子通信学会全国大会予稿(昭56-10)