## 制御系の対話形CADシステム

## Interactive Computer Aided Control Design System

制御系の開発では、制御対象であるプロセスや機械を含めた制御系の解析に多くの費用と時間を使っており、効率の向上が望まれている。このため、規模の大きい制御系が扱え、またマンマシン性の良い実用的な制御系CADシステムを開発した。本システムの特長は、制御技術者に広く用いられているブロック線図をベースにしていることである。すなわち、非線形要素を含むブロック線図を図形処理端末から対話的に入力し、それを基に時間応答・周波数応答・根配置・最適化計算を行ない、結果を端末に表示する。ブロック線図は理解しやすい反面、解析には適していないという問題をもつが、状態変数法やタブロー法の応用によって解決した。本システムは、日立製作所の工場・研究所で実用されている。

田沼正也\* 諸岡泰男\*\*

高野たい子\*\*

Yasuo Morooka

Masaya Tanuma

Taiko Takano

#### 11 緒言

制御系の設計方法は、ディジタル制御技術の普及や制御系 CAD(Computer Aided Design)システムの出現によって大きく変わろうとしている。このうち、制御系CADに関しては、英国マンチェスター大学での研究を契機に<sup>1)</sup>、国内外で多くのシステムが開発されている<sup>2)</sup>。

制御系CADシステムは、制御系や対象プロセスの挙動をどのような形式で表わすかで、その形態や機能が変わる。多くのCADシステムでは、制御対象を線形な連立微分方程式、すなわち状態方程式で表わすことを前提としている。

一方、実際の制御系の解析や設計では、制御系やプロセス内の相互作用がとらえやすく、また非線形制御系にも適用できるブロック線図を用いている。このような状況を踏まえて、ブロック線図をベースとする制御系CADシステムを開発した3)~5)。 開発したシステムは、ブロック線図の対話形入力・線形解析・非線形解析・パラメータ最適化機能を備えている。そのはまた。CADEは世帯が関すると

析・非線形解析・パフメータ最適化機能を備えている。その特長は、CAD用端末HITAC-G760を介したブロック線図の対話形入力・表示によりプログラミング効率を大幅に向上させたこと、タブロー法などの新しい手法の導入によってブロック線図の高速計算を実現したこと、である。

#### 2 制御系CADシステムの位置付け

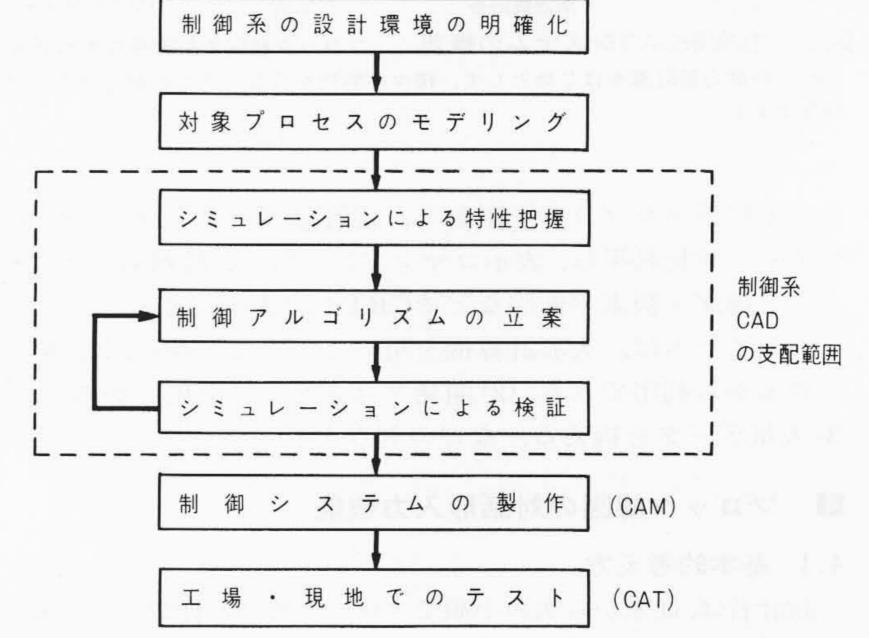
制御系の開発は、通常、**図1**に示すような手順で進められる。制御系CADシステムは、制御アルゴリズムの開発に必要な、次の項目を支援する。

- (1) 対象プロセスの特性解析
- (2) 制御アルゴリズムの立案
- (3) 制御アルゴリズムの検証

プロセスのモデリングやディジタル制御装置のプログラミングを支援できるシステムも、制御系の開発上、非常に重要な意味をもつ。現在、各種の支援システムが整備されつつある6)~9)。

#### 3 制御系CADシステムの概要

開発システムの概要を**図2**に示す。本システムは大形計算機(HITAC M200H)と図形処理端末(G760)で構成している。設計者は、端末のタブレット上のメニューからコマンドを選



注:略語説明

CAD(Computer Aided Design)
CAM(Computer Aided Manufacturing)
CAT(Computer Aided Testing)

図 I 制御系CADシステムの位置付け 本CADシステムは、特性解析、制御アルゴリズムの開発・検証を支援する。

ぶことによって、制御系のブロック線図データや計算用データを対話的に入力できる。コマンドとして、ブロック線図入力用コマンド、解析用コマンド、解析結果の表示用コマンドを数十種類用意している。

ブロック線図の入力は、設計者が演算要素に該当するコマンド及びパラメータを選択することによって行なえる。そのデータはホストコンピュータのブロック線図入力システムに送られる。ホストコンピュータでは、コマンドとパラメータを解析し、それに基づいて要素の表示データの生成やデータベースへの格納を行なう。端末ではホストコンピュータから送信される表示データに基づき、ブロック線図を、CRT (Cathode Ray Tube)に表示する。これにより、設計者は入力結果をCRT上で容易に確認できる。

制御系の解析は、解析項目や必要データをコマンドで指示することによって行なえる。すなわち、コマンドによって該

<sup>\*</sup> 日立製作所日立研究所 工学博士 \*\* 日立製作所日立研究所

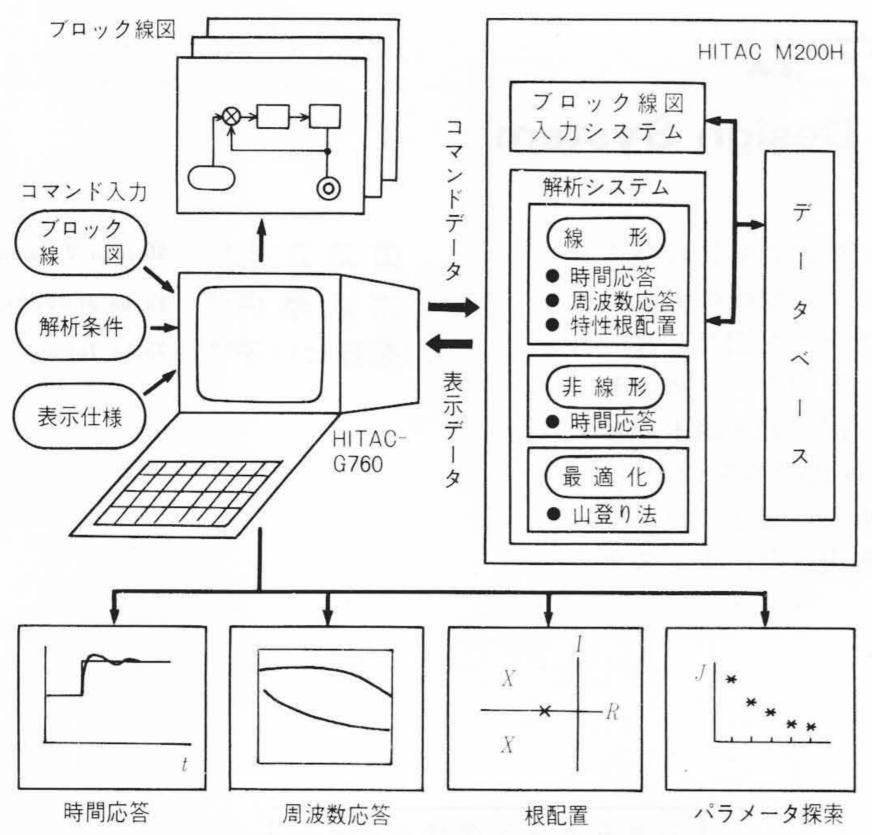


図 2 制御系CADシステムの概要 ブロック線図で制御系を表わせること, 時間応答計算をはじめとして, 種々の解析を行なえることがシステムの特長である。

当する解析プログラムを駆動し、応答計算をオンラインで実行する。解析結果は、表示コマンドによって、時系列グラフ・ボード線図・複素平面図などでCRT上に表示できる。

本システムは、大形計算機を用いていることから、(1)多くの端末から利用できる、(2)開発プログラムに汎用性がある、(3)大量データを扱える、などの利点をもつ。

## 4 ブロック線図の対話形入力機能

#### 4.1 基本的考え方

設計者は、従来から次の手順でブロック線図を作成している。 (1) 制御系を、機器やユニットプロセスなどサブシステムに 分割する。

- (2) 各サブシステムのブロック線図を, (a)演算ブロックの配置, (b)各ブロックの伝達関数の定義, (c)各ブロックの連結, などを繰り返して作成する。
- (3) ブロック線図間で矛盾がないかどうかをチェックし、全体として整合性をとる。

CADシステムでも、上記と同様の手順でブロック線図の入力ができるようにすべきであると考え、システム開発を進めた。

#### 4.2 対話形入力機能

ブロック線図入力システムの機能を図3に示す。一つの制御系に、最大30ページのブロック線図、最大500個の演算要素を使用できる。また、解析対象の制御システムを、1端末につき最大29種登録できる。

ブロック線図に含まれる情報を分類してみると、制御系の名称などのように制御系全体を示すデータ、ページの番号のようにページ全体を示すデータ、伝達関数など要素の属性を示すデータと階層化できる。これに基づき、次のように機能を階層化した。

#### (1) システム機能

新しい制御系の登録,不要になった制御系の消去,制御系 データの複写など,一つの制御系の全データを1コマンドで 操作できる。

表 I 伝達関数 本CADシステムでは、本表の要素を用いて制御系のブロック線図を記述、構成する。

分類	要素	シンボル	分 類	要 素	シンボル
動	積分	$\frac{K}{S}$	ne le contraction	商	A A/B
的要素	一次遅れ	$\frac{K}{1+TS}$		飽和	
术	二次遅れ	$S^2+2\zeta\omega_nS+\omega_n^2$	非線	不感帯	- /-/-
	上上例	(G)	形代	べき乗	(A) B
<b>公</b> 白	分岐 四本 4 11		数		↑B
線形	突き合せ 入力	+++	要素	正弦(余弦)	SIN
代数	(ステップ (ランプほか)	STEP		自然対数 (常用)	LOG
要	出力	<del>(0)</del>		平方根	SQRT
素	他ページとの			他5種類	1 1 1 1 1 1 1
	連結要素		特	サンプラ	-00
非線形代数	積	-X	殊 要 素	無駄時間	DELAY
代数		Ť	333.7	オン・オフ	

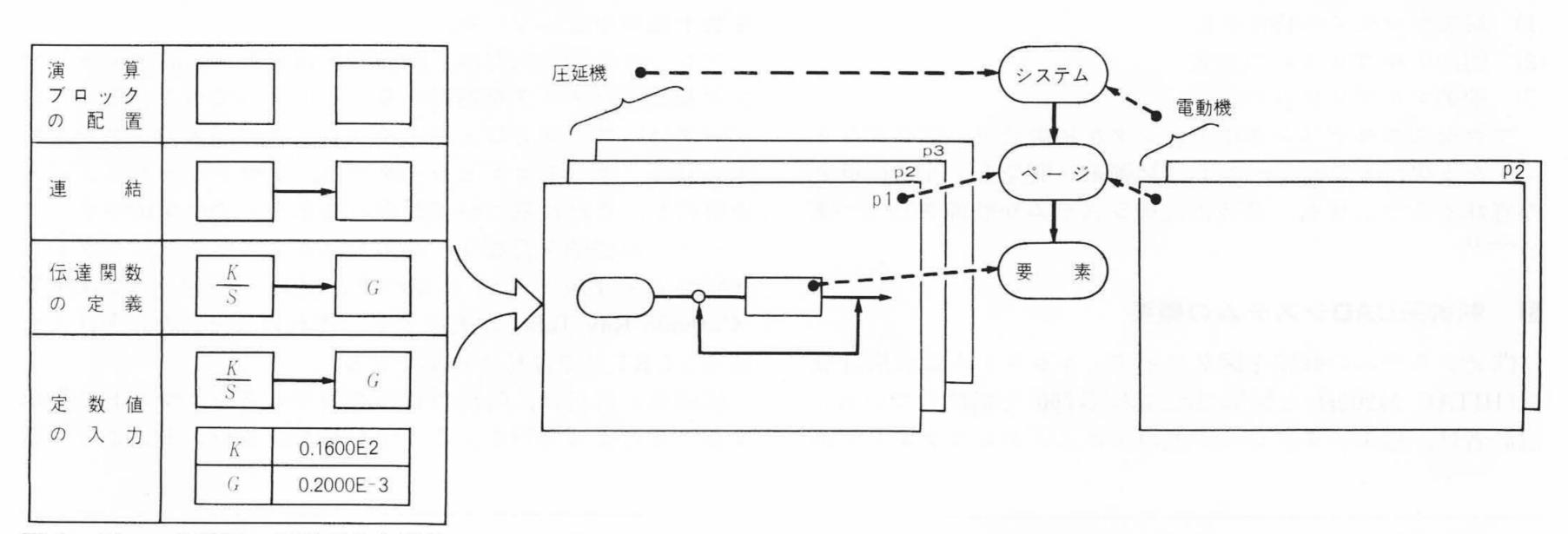


図3 ブロック線図の対話形入力機能

設計者がブロック線図を書くのと同様の手順で,端末への入力が行なえる。

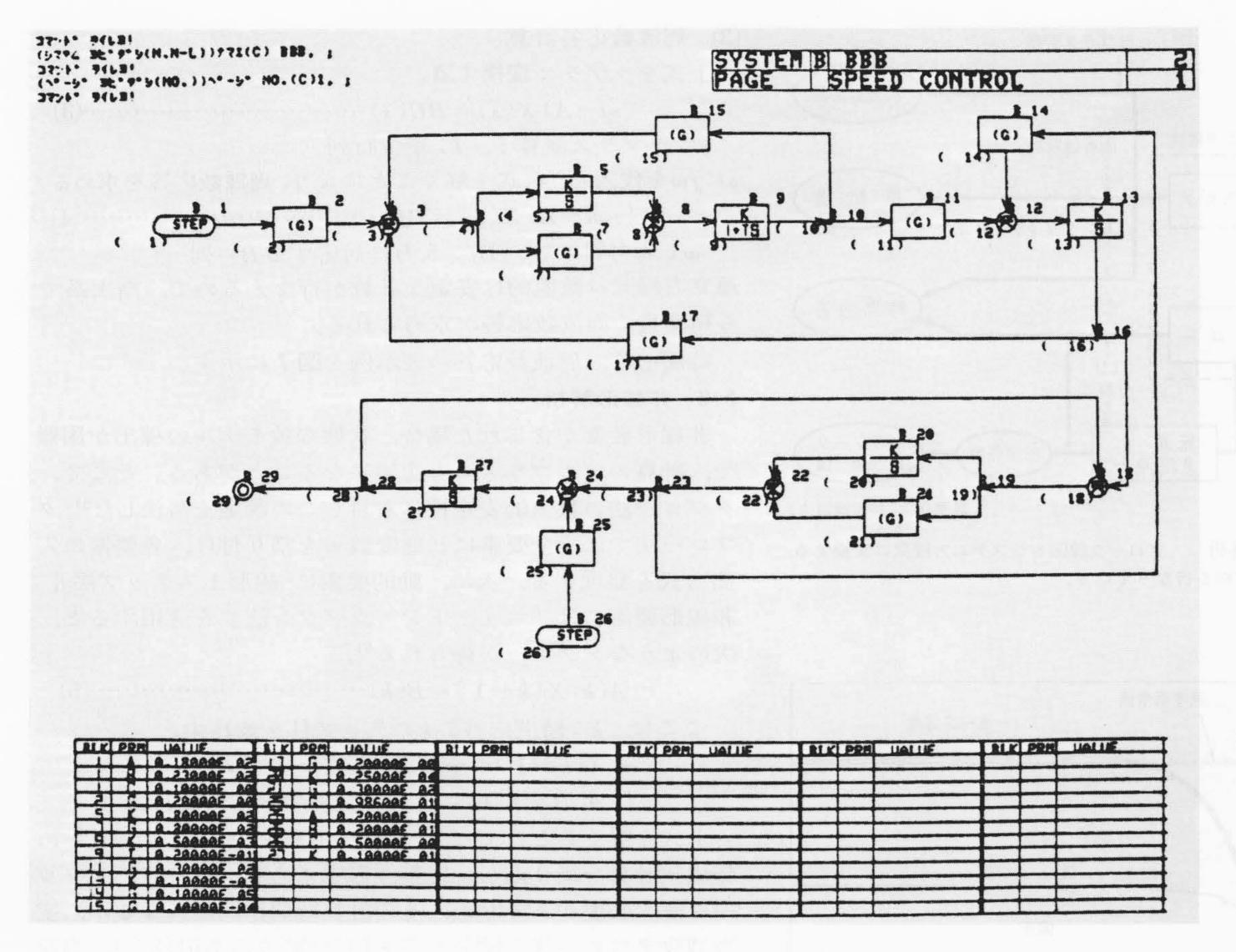


図4 ブロック線図の表示例 直流電動機の 連度制御系のブロック線図 入力例を示す。画面上で要素の修正,追加を容易に行なえる。また,ページを増やすことにより,ロール負荷などのブロック線図の追加も可能である。

#### (2) ページ機能

一つの制御系での新しいページの追加,削除など1ページ 全体のデータを操作できる。

#### (3) 要素機能

演算ブロックの配置・伝達関数の定義・定数の入力・要素 間の連結など、要素に関するデータを操作できる。伝達関数 としては、表1に示すものが使用できる。非線形関数を含む 30種類の伝達関数を使用できるため、広い範囲の制御系を表 現できる。

ブロック線図の表示例を**図4**に示す。この入力は約30分で 行なえた。

#### 5 ブロック線図の解析機能

#### 5.1 解析システムの概要

ブロック線図は、情報の流れや要素間の関係を理解するのに便利な媒体である。しかし、これは一種のグラフであり、解析にはあまり適していない。設計者にとって、要素間の関係をとらえてシステム方程式を導くのは、比較的容易である。一方、計算機では、図5に示すように、個々の要素とその入出力信号しか認識できない。このため、各要素の出力値を信号の流れに沿って、順次、計算する逐次計算法が用いられることが多かった。しかし、応用性という点で難点がある。日立製作所は、ブロック線図を直接処理する代わりに、図5に示すようにシステム方程式にいったん変換することによって、種々の解析を可能にした。

解析機能の概要を図6に示す。まず、ブロック線図から、システム方程式を導く。すなわち、線形系は最も処理が容易な状態方程式に、非線形系はタブローに変換する。それを基にして、時間応答だけでなく、周波数応答や系の安定性を判定できる根配置を計算し、結果をCRTに表示する。また、山登り法を用いて、パラメータ最適値を探索する。

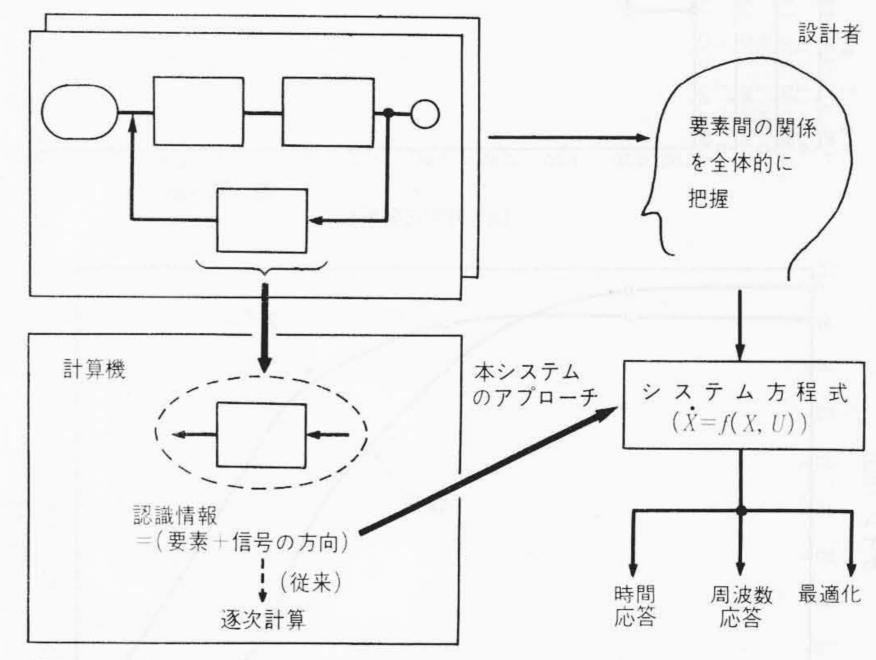


図 5 応答計算におけるブロック線図の処理方法 グラフであるブロック線図の解釈は、計算機にとっては難しい。本システムでは、ブロック線図をシステム方程式に変換し、種々の解析を可能にした。

#### 5.2 線形解析

ブロック線図が動的要素と線形代数要素で構成されている場合,線形性の特徴を生かして,次に述べるように種々の処理を行なう。

#### (1) 状態方程式の導出

状態方程式は、動的要素に着目し、その関係を定式化したものである。しかし、それを求めるため、動的要素間の関係を信号線上でたどると、分岐や突き合わせのため、探索径路数が非常に増加する。このため、突き合わせ要素にダミー変数を割り付け、次の状態方程式を簡単に導出できるようにした。

$$Y = CX + DU \cdots (2)$$

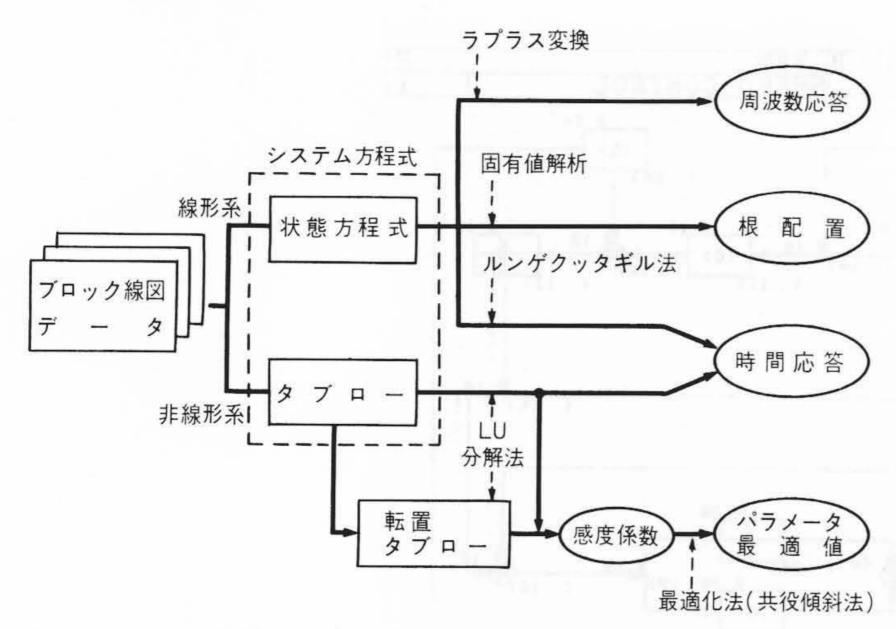
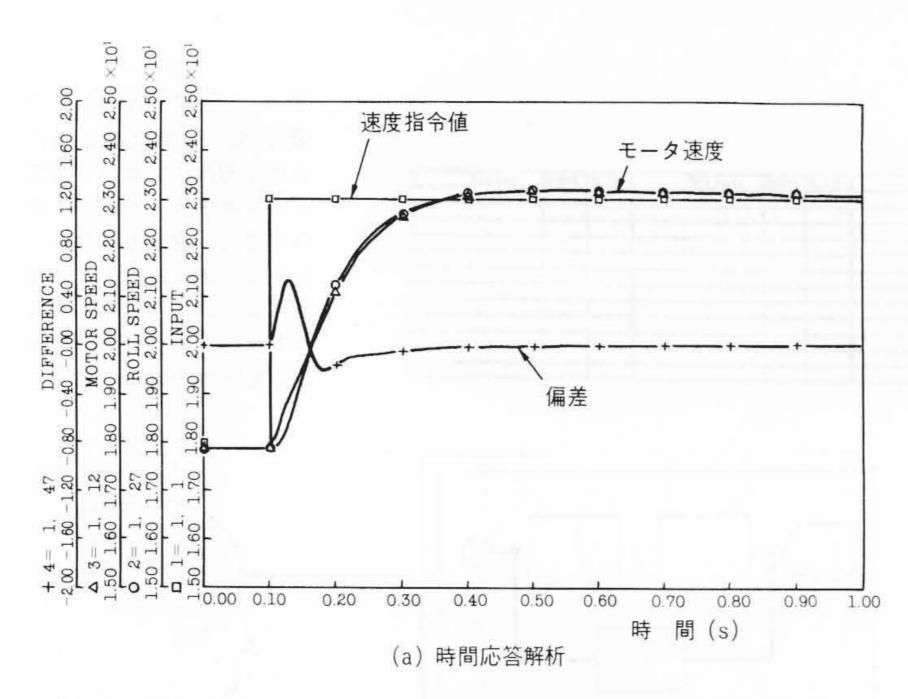


図 6 ブロック線図の解析 ブロック線図をシステム方程式に変換する ことによって、効率のよい解析を行なっている。



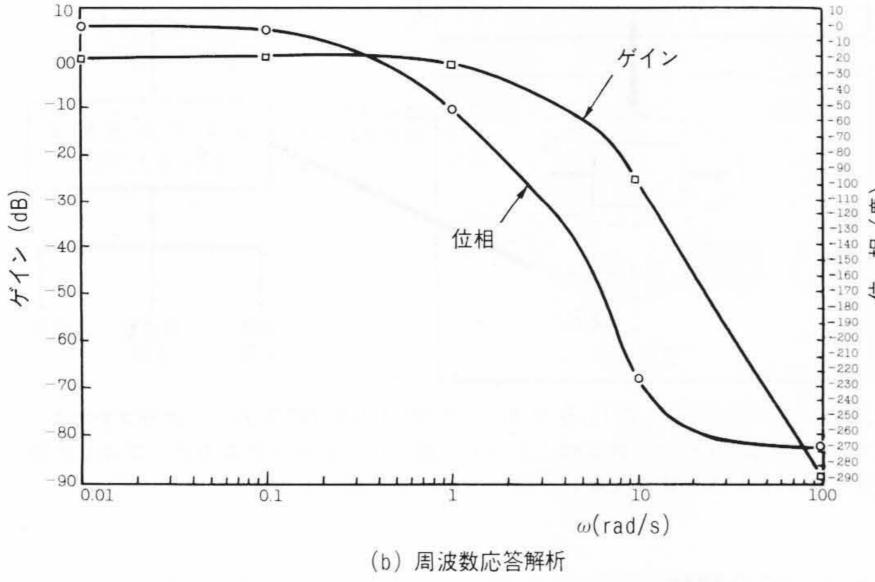


図 7 応答計算結果の表示例 図 4 の直流電動機速度制御系で,速度指令値をステップ的に変化させたときの時間応答解析と,周波数応答解析の結果例を示す。

# ここに X, U, Y: 状態変数,入力,出力ベクトル A, B, C, D: 定数行列

#### (2) 時間応答計算

上式を用いれば、入力変化に対する系の時間応答は簡単に計算できる。(a) 入力としてCRT上で定義した任意波形を用いることができる、(b) 初期バランス計算ができる、などの特長をもつ。

(3) 周波数応答計算

上式をラプラス変換する。

$$(sI-A)X(s) = BU(s)$$
 .....(3)

s:ラプラス演算子, I:単位行列

sに $j\omega$ を代入し、次式を解くことにより、周波数応答を求める。

$$(j\omega I - A) X(\omega) = Bj \cdots (4)$$

 $\omega$ : 入力周波数, Bj: 入力に対応するBの列連立方程式は数値的に安定な計算が行なえるので, 高次系でも精度良く周波数応答が求められる。

時間応答, 周波数応答の表示例を図7に示す。

#### 5.3 非線形解析

非線形要素が含まれた場合、状態変数モデルの導出が困難で、計算のアルゴリズムも複雑になることがある。そこで、タブロー法の数値的安定性に着目しこの課題を解決した $^{5)}$ 。タブロー法では、全要素に状態変数 $x_i$ を割り付け、各要素の入出力式を整理する。次に、動的要素に「線形1ステップ法」、非線形要素には「ニュートン・ラプソン法」を適用すると、次のようなタブローが得られる $^{5)}$ 。

$$A(k)X(k+1) = B(k) \cdots (5)$$

ここに k:時間応答のkステップ目を表わす。

X(k+1): 全要素の状態ベクトル

A, B: X(k)によって計算できる係数行列

上式を解くことによって、X(k+1)が求まる。タブローの作成・計算を繰り返し、応答波形を求める。毎時点、タブローを解く必要があるため、その計算時間が問題になるが、変数減少タブロー法の開発や高速LU分解法の適用により、高速計算を可能とした。

タブロー法で用いている線形1ステップ法は安定な計算法 であるため、従来法に比べると計算時間刻みを大きくできる。 これは、計算時間を短縮することになる。

### 6 結 言

ブロック線図をベースにし、かつ豊富な解析機能を備えている制御系CADシステムを開発した。本システムは、実際の制御系の設計業務に適しており、社内の工場・研究所で実用している。

#### 参考文献

- 1) 木村:多変数制御系のCAD, 計測と制御, 15-12, 17/26(1976)
- 2) 例えば, 古田,外:制御系のためのCAD, 計測と制御, 9-5, (1979)
- M. Tanuma, et al.: Interactive Simulator Using a Graphic Terminal for Linear Control System, Preprint of 8th IFAC World Congress, XI-35/40(1981)
- 4) 諸岡,外:制御系の設計時間が量以下に、日立、対話形式の CAD開発,日経メカニカル,1-4,66/77(1982)
- 5) M. Tanuma, et al.: Interactive Simulation Method Using Tableau Approach for Nonlinear Control System, IFAC Symposium of Computer Aided Design of Multivariable Technological Systems (1982)
- 6) 大成,外:システムシミュレーション技術の動向,日立評論, 64,9,633~638(昭57-9)
- 7) 青津,外:制御向け高位言語によるマイクロコントローラ用プログラミング支援装置,第20回SICE学術講演会(1981)
- 8) 鈴木,外:原子力発電プラントの対話型PID設計システム,第 21回SICE学術講演会(1982)
- 9) 田沼,外:非線形制御系の対話型最適化システム,第5回 Dynamical System Theory シンポジウム(計測自動制御学会),61/64(1982)