

パーソナルコンピュータによる連続系シミュレータ “SIGMA” とインバータ駆動モータへの応用†

笠井 一夫*・今林 弘資**・臼井 支朗***

ABSTRACT This report describes the outline and its application example of simulator “SIGMA” developed at Toyohashi University of Technology. “SIGMA” has the excellent man-machine interface alike to that of analog computer where the wiring of operational element through graphic display is only required.

As many kinds of elements are available and user can define the function of the element in FORTRAN, “SIGMA” can simulate complicated system including non-linear elements with a personal computer, which were conventionally carried out with a large-capacity computer.

To examine the applicability of “SIGMA”, the report analyzes the behavior of reciprocating compressor system driven by the vector-controlled induction motor. Each operational element was used to model the inverter with complicated switching operation, the induction motor which was transiently subjected to magnetic saturation, and the mechanical system which was accompanied by torsional vibration.

The model prepared can properly express the behavior of actual reciprocating compressor system in which the motor current and rotating speed of the motor are fluctuated together with the load fluctuation.

The simulation using “SIGMA” can be applied in substitute for actual machine test.

1. ま え が き

電磁機械、制御系、機械系を含むシステムの動的な振舞いは、常微分方程式で記述されることが多い。とくに電磁機械においては磁束飽和があり、それを制御する装置については各種スイッチング素子、アンプの飽和、機械系のバックラッシュ等、非線形要素を含むことが多い。このような複雑なシステムについて、実験データの分析、実験不可能な状態での挙動の推定など、計算機シミュレーションは有効な手段として多方面で活用されている。従来、こうした複雑なシステムのシミュレーションは大型計算機を用いて行われてき

た。本報告では、まず、こうした非線形システムにも対応できるパソコン連続系シミュレータ“SIGMA (Simulator with Interactive Graphics for Multi-purpose Analysis)”の概要について述べる。つぎに、応用例としてレシプロコンプレッサにベクトル制御された誘導機を適用した例を取り上げる。レシプロコンプレッサのように大きな変動トルクを発生する負荷の場合、制御性が要求されるため直流モータが使われることが多い。しかし、制御の難しい誘導機についても、最近のパワーエレクトロニクス技術の進歩の結果、ベクトル制御を用い、誘導電動機の励磁電流とトルク電流を非干渉化することにより、直流機並の性能を安価に実現する方式が普及し始めており、本例のような装置にも適用される可能性がある。本文では、こうした磁束飽和を考慮した誘導電動機やレシプロコンプレッサの反動トルクのモデル化の技法、電流変動低減制御の振舞いなどについて述べる。

2. デジタルシミュレーションの位置付け

デジタル計算機による数値シミュレーションのプログラミング言語としては、汎用プログラミング言語

Continuous System Simulator “SIGMA” on Personal Computer and its Application to an Inverter Driven Motor System.
By Kazuo Kasai (New Product Development section, Shinko Electric Co., Ltd.), Hirosuke Imabayashi (Development Laboratory, Shinko Electric Co., Ltd.) and Shiro Usui (Information and Computer Sciences, Toyohashi University of Technology).

*神鋼電機株式会社 製品開発部

**神鋼電機株式会社 研究部

***豊橋技術科学大学 情報工学系

†1989年2月17日受付

による方式と、シミュレーションする問題に適した専用言語による方式に分けられる¹⁾。後者の場合、あらかじめ定められた文法でモデルを記述し、それを汎用のプログラミング言語に変換する方式（シミュレーション言語）と、あらかじめ定められた文法でモデル記述を行なうが、シミュレーションに必要な機能を全て実行形式として持つ方式（シミュレータ）に分類される。また、定められた文法によるモデル記述方式も数式による記述方式と図形による記述方式がある。

2.1 シミュレーション方式の比較

◎汎用プログラミング言語による方式

文献²⁾は、誘導機の磁束飽和を考慮するために、FORTRANでシミュレーションをおこなった例である。このように、汎用言語による方式はそれぞれの問題に最適な入力形態、計算方法を採用できるが、プログラミングの知識が必要であり、計算以外の入出力、表示、ファイル操作等本質的でないとくに多大の労力を必要とする。またモデルの変更に際しては、ソースプログラムレベルから修正しなければならない。

◎シミュレーション言語

EMTP³⁾⁴⁾のように定められた文法により、モデルを記述し、それを汎用プログラミング言語に変換するという一種のプリプロセッサ、コンパイラの機能を持つもので、シミュレーション実行時にこれを実行形式に変換する必要がある。従ってモデルの構造を変更する場合には、シミュレーション言語レベルでの記述からやり直さなければならないが、モデルに応じた実行形式が得られるため、実行速度は速い。

◎シミュレータ

SIGMA⁵⁾のように、モデルの記述は定められた文法に従って行なうが、シミュレーションの実行に関する機能（エディタ、解析、結果表示、入出力など）を全て実行形式として持っており、このため、モデル記述後、直ちに計算を実行し、結果を出力することが可能である。また、結果を検討し、パラメータ修正や条件を変更して再実行させるなどの作業を、会話的に進めることができる。このようにマンマシンインターフェイスに優れている一方、インタプリティブであるため演算速度は多少遅い。

2.2 モデル記述方式の比較

シミュレーションを行なうためには、システムをモデル化し、計算機に入力する必要がある。その方式には数式記述方式とグラフィック・ディスプレイ（GD）装置などを利用した図形記述方式がある。ここでは、現在、我々が問題に応じて実用しているSIGMAと

EMTPを例に、比較検討する。

◎数式記述方式

数式記述方式にはEMTP³⁾⁴⁾、MCSP2¹⁾、CSMP⁶⁾、DAS⁷⁾等が挙げられる。記述法にも伝達関数を用いるもの、状態変数を用いるもの、微分方程式で記述するものなどがある。EMTPは電力系統における過渡現象解析を目的として大型計算機用ソフトウェアとして開発されたもので、対象が等価的に電気回路として表現できれば利用することができる。具体的には以下の素子を用いてモデルを記述する。

- a: 集中定数素子
- b: 分布定数線路
- c: 非線形抵抗, 非線形リアクタ
- d: スイッチ素子, 整流素子
- e: 変圧器
- f: 各種電源
- g: 回転機モデル（同期機, 誘導機, 直流機）
- h: 制御回路

例として、図1の2次遅れ系のモデルをEMTPでコーディングしたリストを図2に示す。計算時間やメモリ容量を考えなければシステムの規模に制限を受けないが、モデルの構造や変数の関係を視覚的にとらえることはむずかしい。

◎図形記述方式

SIGMA⁵⁾、EASL⁸⁾、MCSMP-G⁹⁾等に代表される図形記述方式は、システムをブロック図として記述するものである。この方式は電気回路、論理回路、制御システム等の実際の素子や基本モジュールを用い、ブロック図として明確に記述されるため、システムの構成が一目で理解できるという特徴を持つ。また、システムの記述にプログラミングなどの特殊な知識を必要とせず、記述した回路そのものをモデルのデータベースとして活用できる。

一方、システムは基本演算ブロックを結線して記述

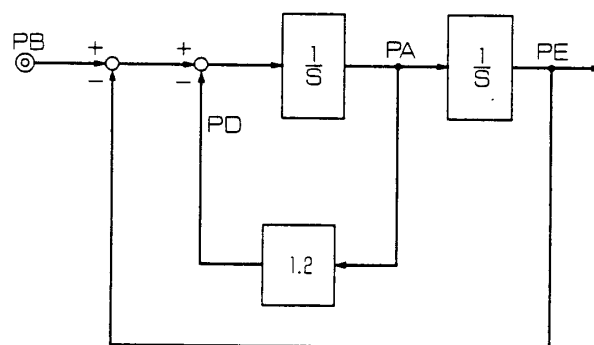


図1 2次系のモデル

```

BEGIN NEW DATA CASE
POWER FREQUENCY 500
ABSOLUTE TACS DIMENSIONS
45 50 50 60 50 200 30 30 30 100
60 60 100 50
PLOTTER PAPER HEIGHT 50
0.000400 3.0 50.0
100 2 1 1
C *** TACS DATA ***
TACS STAND ALONE
C 1PA +PB PE PD 1000
1.0 1000 1.0
1PE +PA 10
1.0 100
C ** TACS SOURCE **
11PB TC 00 25
C ** TACS SUPPLEMENTAL FUNCTION & DEVICE **
88PD = PA*1.2
C ** TACS OUTPUT VARIABLE **
PE PA
C ** TACS INITIAL CONDITION **
PA DO
PE DO
C *** BATCH MODE PLOTTING CARD ***
CALCOMP PLOT
SCALE 1 1.0
PEN CHOICE 1
1 10 4.0 HEIGHT
2 2 JI DKURE KEI
194200 0.00000 PE PE PE SYUTURYOKU
C --- PLOT CARD TERMINATE ---
END LAST DATA CASE
    
```

図2 EMTPのコーディング例

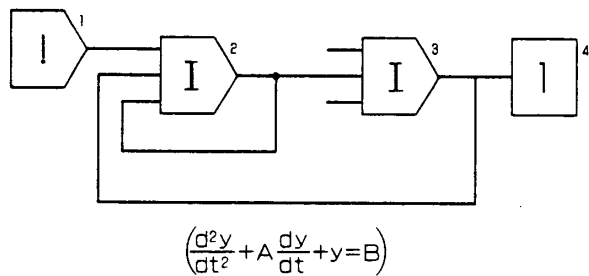


図3 SIGMAによる2次系のブロック図

されるため、複雑大規模になってくると、表示画面の制約を受ける。図3に2階微分方程式をSIGMAで記述した例を示す。一見して2次遅れ系とわかる。

3. SIGMAの概要

SIGMAは前項の分類ではシミュレータ、図形記述方式に属し、表1に示す、最大3入力、1出力の各演算要素（積分器、加算器など）をGD上でアナログ計算機のイメージで結線していくものである。以下にその概要と特徴をのべる。

3.1 使用手順

SIGMAの使用手順は、以下の通りである（図4参照）。

- (1) GD上でブロック図の記述、修正を行なう。
記述は各種機能を持つ要素（表1）をGD上で結線していく。具体的には、演算要素を画面上のおきたい位置にカーソルの交点を合わせ、演算要素に対

表1 SIGMAの演算要素

I: PULSE GEN.	@: OSCILLATOR	%: RAMP GEN.
f: FUNC. GEN.	B: BANG-BANG	C: COMPARATOR
D: DELAY	E: EXP. GEN.	F: FUNC. OPE.
G: GAIN	H: HYSTERESIS	I: INTEGRATOR
J: JITTER	K: CONSTANT	L: LIMITTER
M: MEMORY SUM	N: NEG. CLIPER	O: OFFSET
P: POS. CLIPER	Q: QUANTIZER	R: RELAY
S: DEAD SPACE	W: WEIGHT SUM	Z: ZERO HOLD
+: SUMMER	-: SIGN INVRT	*: MULTIPLIER
/: DIVIDER	&: STOPPER	#: DISP SCOPE

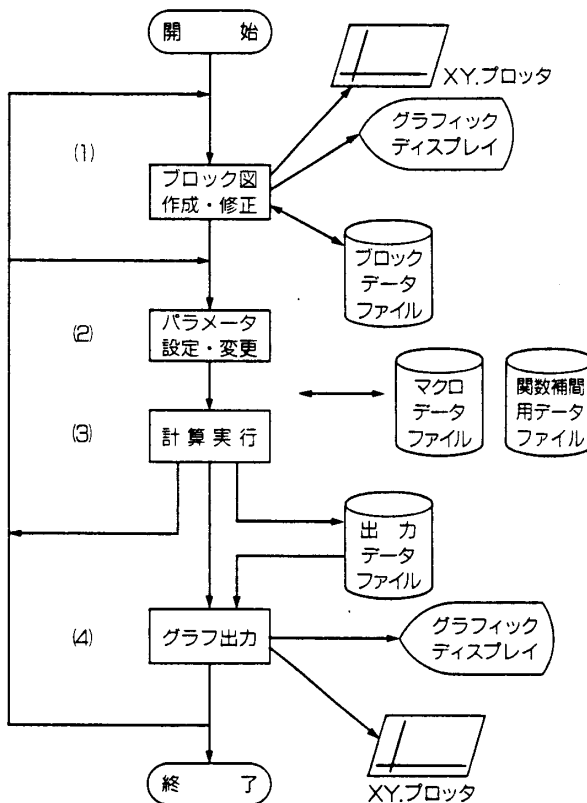


図4 SIGMAの使用手順

応する記号（積分器：I，加算器：Wなど）をキーボードより入力するとその要素が表示される。各要素の結線は、カーソルの交点を要素の入力または出力に合わせ、結線の始点記号（[）を入力し、カーソル交点を接続したい要素の入力または出力まで移動させ、結線終端の記号（]）を入力することにより行なわれる。できあがったブロック図は、ブロックデータファイルに保存される。

- (2) 各要素のパラメータを設定、変更する。ブロック図および設定値は必要に応じてプロッタ、又はプリンタへ出力できる。

- (3) 計算を実行する。計算結果は出力データファイルに保存される。
- (4) 計算結果をGD上に表示し、プロッタ又はプリンタへ出力する。

3.2 SIGMA の特徴

- (1) シミュレーションモデルを作る上で、プログラミングなどの専門的知識を必要としない。
- (2) モデルの構造、結果の検証などを視覚的に把握でき、全ての操作を会話形式で行なえる。
- (3) 非線形要素などの対応が容易であり、また、ユーザがきめ細かく記述することのできる、ユーザ定義の要素がある。
- (4) 本質的な計算以外のスケールリング、入出力表示、ファイル操作などが簡略である。
- (5) 微分方程式の解の精度が高い
- (6) 記述されたシステムの保存、修正が簡単である。

以上の長所に対し、パソコンのメモリ制約のため記述できるモデルの大きさや計算ステップなどに若干の問題はあるが、気軽に使えるメリットは大きい。また使用できる要素数は120以下、計算ステップは3万回以下という基本的制約はあるが、FORTRANで記述できるユーザ定義の要素を用いて、幾つかの要素を1つにまとめることにより、かなり大規模なモデルにも対応でき、また、パラメータセット機能を用いることにより、長い計算ステップにも対応できる。

4. モデル化の技法

今回、応用例で取り上げるインバータ、誘導電動機のモデル化について説明する。

4.1 インバータのモデル化

図5にインバータのモデルを示す。速度制御を行っており、速度調節器の出力がトルク電流指令 i_t^* となる。この i_t^* と励磁電流指令 i_f^* およびモータ角速度より、電流ベクトルと電源周波数を算出し、それをモータ電流指令値として、モータ電流が指令値通りになるよう、インバータ出力電圧が制御される。電流調節器の出力を主回路の電圧基準に換算し、パルス幅制御(PWM-pulse width modulation)された電圧波形を作り出す。なお、三相の誘導電動機を二相誘導電動機モデルで表わすため、三相電圧、電流は二相電圧、電流に変換している。

4.2 誘導電動機のモデル

回転機の解析には二軸理論が使われる。これは回転機の軸に垂直な平面内に座標軸として直交二軸(電気角で 90° で交わる二軸)をとり、電圧、電流、磁束などの変数をそれぞれ各座標軸の成分として表わし、回転機の電磁的な特性を解析する理論である。直交二軸は一方を d 軸(direct axis)、他方を q 軸(quadrature axis)と呼ぶ。誘導機などの非突極機に対しては任意の主要巻線の巻線軸(その巻線電流による空隙磁界分布の中心軸)を d 軸とし、 q 軸は d 軸から原則として反時計方向に電気角で 90° 回転した方向にとる。対称三相巻線の電圧、電流を d, q 巻線の電圧、電流に変換する関係式を図5に示すが、この変換の前後で空隙磁束、電力は不変である。次に一般的に知られている誘導電動機の等価回路を d, q 軸について図6のように構成し、電圧、電流に関する以下の関係式(1)~(11)を立てる。また、この時のモータギャップトルク

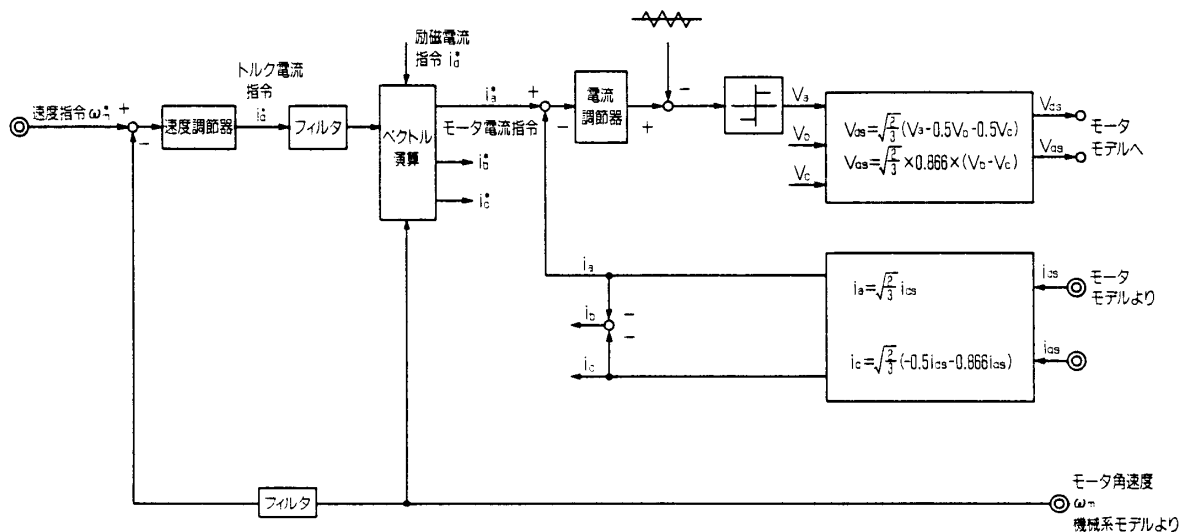


図5 インバータのモデル

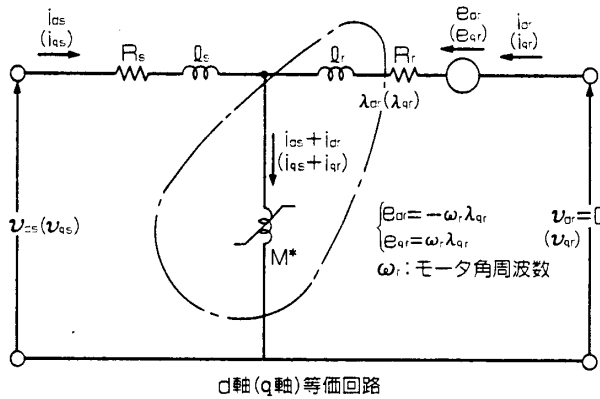


図6 誘導電動機の等価回路

は、(12)式で表わされる¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} v_{ds} &= (R_s + Sl_s) \cdot i_{ds} + S\lambda_{md} & (1) \\ v_{qs} &= (R_s + Sl_s) \cdot i_{qs} + S\lambda_{mq} & (2) \\ 0 &= (R_r + Sl_r) \cdot i_{dr} + S\lambda_{md} - e_{dr} & (3) \\ 0 &= (R_r + Sl_r) \cdot i_{qr} + S\lambda_{mq} - e_{qr} & (4) \\ \lambda_{md} &= M^* \cdot (i_{ds} + i_{dr}) & (5) \\ \lambda_{mq} &= M^* \cdot (i_{qs} + i_{qr}) & (6) \\ M^* &= \lambda_m / i_m & (7) \\ \lambda_{dr} &= \lambda_{md} + l_r \cdot i_{dr} & (8) \\ \lambda_{qr} &= \lambda_{mq} + l_r \cdot i_{qr} & (9) \\ e_{dr} &= -\omega_r \cdot \lambda_{qr} & (10) \\ e_{qr} &= \omega_r \cdot \lambda_{dr} & (11) \\ T &= (n/2) \cdot (i_{qr}\lambda_{dr} - i_{dr}\lambda_{qr}) & (12) \end{aligned}$$

ここで、

- v_{ds}, v_{qs} : モータ印加電圧 (V)
- R_s, R_r : モータ 1 次巻線, 2 次巻線の抵抗値 (Ω)
- l_s, l_r : 1 次巻線の漏れインダクタンス, 2 次巻線の漏れインダクタンス (H)
- λ_m : 空隙磁束 (Wb)
- i_m : 励磁電流 (A)
- M^* : 相互インダクタンス (H)
- e_{dr}, e_{qr} : d 軸, q 軸の速度起電圧 (V)
- i_{ds}, i_{dr} : d 軸の 1 次巻線, 2 次巻線電流 (A)
- i_{qs}, i_{qr} : q 軸の 1 次巻線, 2 次巻線電流 (A)
- $\lambda_{md}, \lambda_{mq}$: λ_m の d 軸成分, q 軸成分 (Wb)
- ω_r : 電源周波数 (rad/sec)
- λ_{dr} : d 軸 2 次巻線の磁束鎖交 (Wb)
- λ_{qr} : q 軸 2 次巻線の磁束鎖交 (Wb)
- n : モータ極数
- T : モータギャップトルク (Nm)
- S : 微分演算子

回転機の磁気飽和の与え方は凸極形の同期機のように

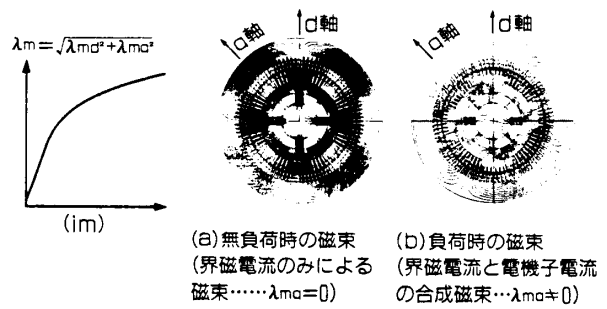


図7 円筒形同期機の磁束線図

に d 軸, q 軸の磁気パーミアンスが異なる場合には各々の軸について磁気飽和を独立に与えるが, 円筒形同期機や誘導機の場合には, d 軸, q 軸の磁気パーミアンスが等しいため, 総合磁束について飽和を考慮し, それをおのおのの軸に配分する. 図7に円筒形同期機の無負荷時, および, 負荷時の磁束線図を示す. 無負荷時には総合磁束の中心は d 軸に一致するが, 負荷時には電機子反作用のため, 総合磁束の中心は d 軸よりずれてくる. この場合, 励磁電流 i_m に対し総合空隙磁束 λ_m を求め, これを d, q 軸に分解して, $\lambda_{md}, \lambda_{mq}$ とする¹¹⁾. (8), (9)式の $\lambda_{dr}, \lambda_{qr}$ は $\lambda_{md}, \lambda_{mq}$ に 2 次巻線の漏れ磁束を加えたものである. 次に (1)~(12)式をブロック図に変換する. まず, (5)~(11)式の関係を用いて, (1)~(4)式を各電流について解く. 例えば (1), (3), (5)式より i_{ds} は次式のようになる.

$$\begin{aligned} i_{ds} &= (M^* + l_r) \int (V_{ds} - R_s i_{ds}) dt \\ & / (M^* l_s + M^* l_r + l_s l_r) \\ & + M^* \int (-R_r i_{dr} - \omega_r \lambda_{qr}) dt \\ & / (M^* l_s + M^* l_r + l_s l_r) \end{aligned}$$

上記手順を各電流について行い, 離散化をおこない図8のブロック図を得る. 励磁電流 i_m と空隙磁束 λ_m との関係は折れ線で近似した. トルクは 2 次巻線電流と 2 次巻線磁束鎖交の積を極対数倍したものである.

5. シミュレーションの評価

シミュレーションの評価として, 実測データとの比較, および, こうしたシミュレーションに実績のある EMTP との比較を行ない, SIGMA によるモデル化がこの種のシミュレーションに有効であることを示す.

5.1 実測データとの比較

上記インバータ, モータモデルを用いて, 誘導機型の AC サーボモータの加減速特性に関するシミュレー

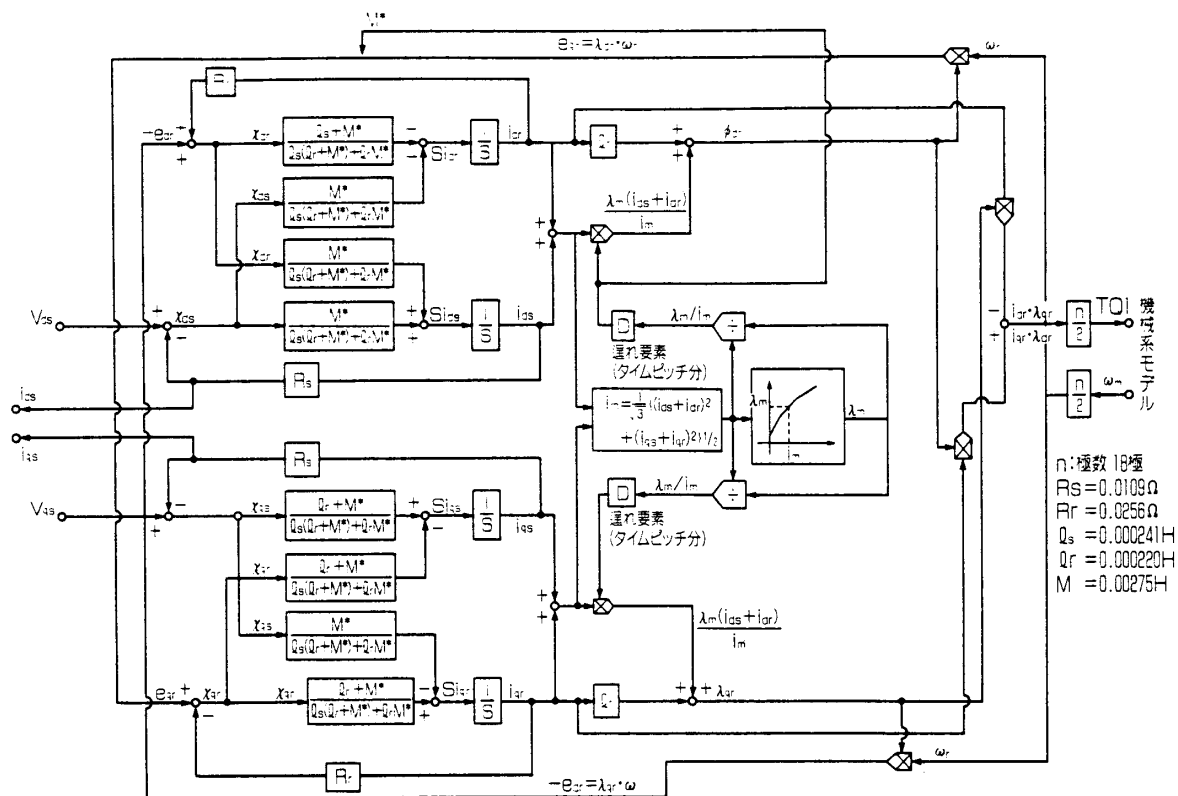


図8 誘導電動機のモデル

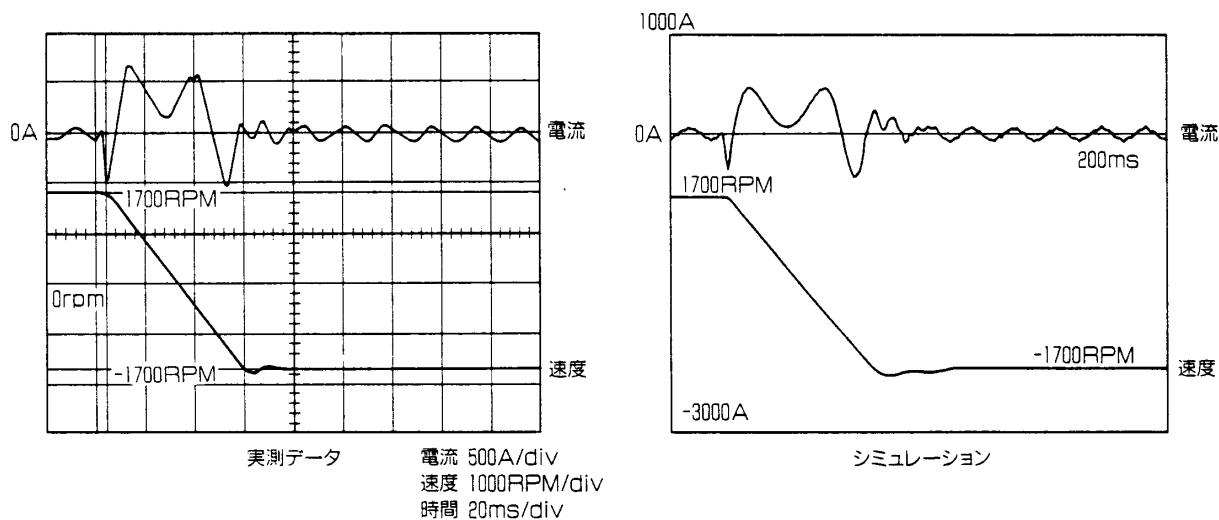


図9 誘導電動機に加減速特性

シミュレーションを行い、実測データと比較した。機械系は一質点として、モータ自身の機械損に相当する負荷トルクを加える。モータ容量は30 kW、4極、慣性モーメントは0.50 Nms²、負荷の慣性モーメントは0.45 Nms²である。図9に1700 rpmより、-1700 rpmの速度逆転指令を与えた時の回転数とモータ電流波形の実測データ、およびSIGMAによるシミュレーション結果を

示す。約60 msで逆転が完了しており、両者の波形はよく一致している。

5.2 EMTP との比較

5.1と同一条件でモータギャップトルクについてEMTPとSIGMAの双方でシミュレーションを行ない、モータギャップトルクについて比較したものを図10に示す。微分方程式の解法はSIGMAの場合、ルン

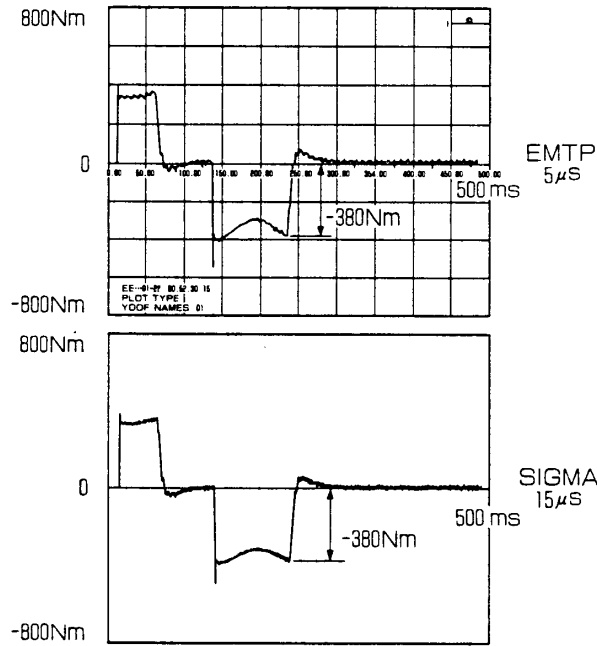


図10 誘導電動機のギャップトルク

ゲクッタギル法, EMTP の場合はオイラーの予測子修正子法であり, 同一のタイムピッチでは両者の間に結果の差異が生じた. ここでは PWM の電圧波形として実機に近い波形を用いており, スwitching要素を使用しているため, 適切なタイムピッチは予測し難いが, 図10に示す通り, EMTP では $5\mu\text{s}$, SIGMA では $15\mu\text{s}$ で両者の波形がほぼ一致した. なお, SIGMA の場合, PC 9801 Vm 2 (数値演算プロセッサ付) で計算時間120分, EMTP の場合, 日立 M 240 で CPU 時間34分, JOB 全体の時間は50分であった.

6. 応用例

応用例として, レシプロコンプレッサをベクトル制御の誘導電動機で駆動するシステムを取り上げる. これは社内試験が困難なものであり, 事前にシミュレーションによる検討が必要と考えられた. 全体のシステムは, モータとコンプレッサがフライホイールカップリングにより直結されており (図12参照), コンプレッサは二質点から成っている. モータはインバータより給電され, ベクトル制御により, トルク電流と励磁電流が非干渉化されている. インバータは, モータに直結された回転数検出器の出力を基に, モータ回転数を制御している. ここではコンプレッサの負荷変動に起因するモータ電流及び回転数変動を求めた. 4項で述べたインバータ, モータモデルに機械系モデルを追加し, シミュレーションを行ない, 電流変動, 回転数

変動を求めた. また, ベクトル制御を行ない, 誘導電動機のトルク電流と励磁電流を非干渉化しているため, 直流電動機のようにトルク電流指令にモータギャップトルクが瞬時に追従するという仮定に基づいて, モデルを簡略化した. 簡略モデルよりボード線図を作成し, 電流変動, 回転数変動を求め, シミュレーション結果と比較した. 検討の目的は, 速度調節器の特性を変えて上記の検討を行ない, 許容できる電流変動, 回転数変動を与える速度調節器を決定すること, および簡略モデルで十分な精度が得られ, ベクトル制御される誘導電動機が直流電動機と同等に扱えるかを調べることにある.

6.1 シミュレーションモデル

応用例としてとりあげた誘導電動機の容量は, 160 kW, 18極, 使用回転範囲 118~400 rpm であり, 図5, 図8のモデルについて定数を設定する. 機械系についてはレシプロコンプレッサを使用しており, 機械の回転位相角により, 負荷トルクの値が大きく変動する. ここで用いたコンプレッサの特性を検討した結果, 回転角周波数が負荷トルクの基本周波数成分であり, 16次以上のトルク成分は無視できる値であること, 118~400 rpm の間ではほぼ一定のトルクパターンをもつことが分ったため, シミュレーションには 118 rpm 時のデータを用い, コンプレッサの回転角周波数の15次成分までを考慮した. コンプレッサの負荷トルクは図11のように負荷質点の回転位相角を入力とし, SIGMA のユーザ要素を用いて記述した. 機械系全体はモータ質点, 回転数変動を抑えるためのフライホイール, 及び2質点より成るコンプレッサより構成され, それらのねじり振動固有周波数, 振動モードは図12に示される特性をもつ. 次に図12をもとに4質点モデルを2質点モデルに縮約した. 上限回転数 400 rpm でのコンプレッサの脈動トルクの15成分の周波数は 100 Hz ($15 \times 400/60$) となり, 図12のモード2の 166 Hz を下回るため, モード1のみを考慮したモ

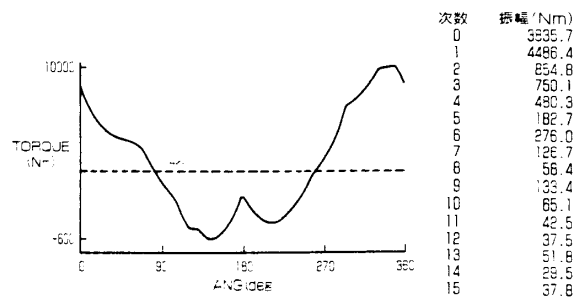


図11 コンプレッサの負荷トルク

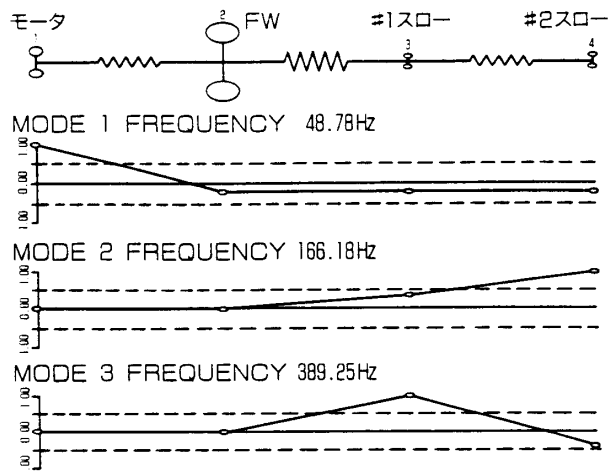


図12 軸系の固有周波数と振動モード

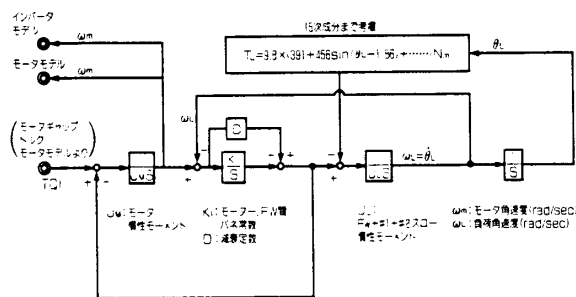


図13 機械系のモデル

デルで充分と考えられる。モード1ではモータとフライホイールの間に振動が現われるため、モータと他の質点からなる2質点モデルとし、図13のように表した。図14は、これらインバータ(図5)、誘導機(図8)および機械系(図13)の各モデルを結合し、SIGMAで表現した全体のシステムである。使用した要素数は75であり、まだ充分余裕がある。

6.2 モータ電流変動、回転数変動の検討

まず、図5, 8, 13を簡略化し、速度制御のみを考慮した図15のブロック図より各伝達関数を求め、電流変動、回転数変動を計算する。すなわち、ベクトル制御のためトルク制御に励磁電流の影響を受けないことと、電流調節器のゲインが充分高くとってあるため、トルク電流指令値がモータギャップトルクに対応するとし、電流変動、回転数変動はほぼ速度制御系のみで決まると仮定する。図15の速度帰還ループのゲイン0.2387は角速度(rad/sec)を10Vに正規化するための係数である。図15より i_q^*/T_L , ω/T_L の伝達関数を求め、ボード線図を作成する。変動トルク T_L を決定し、 i_q^* , ω の変動を求め、シミュレーションと比較する。変動トルク T_L は、図11より最低回転数(118rpm)時のトルク変動の基本周波数成分を選び、片振幅4486Nm, 周波数1.97Hzとする。また、速度調節器の数値を表2に示す通りに変えて各変動値を求め

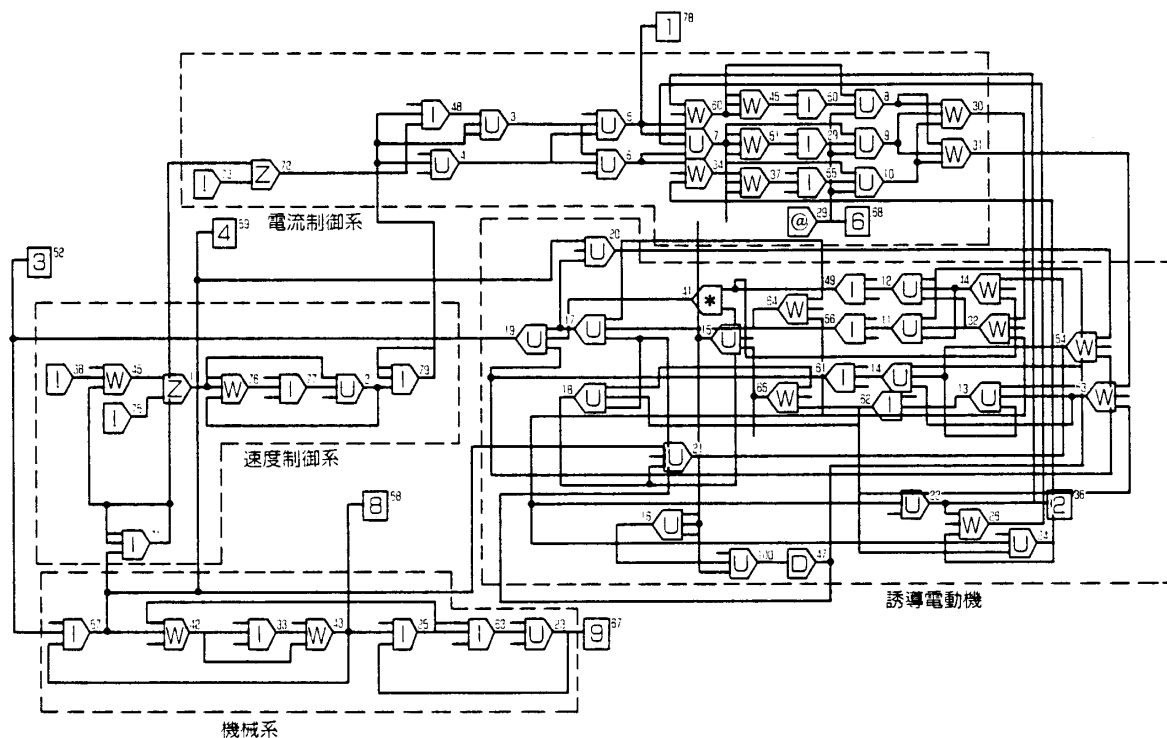
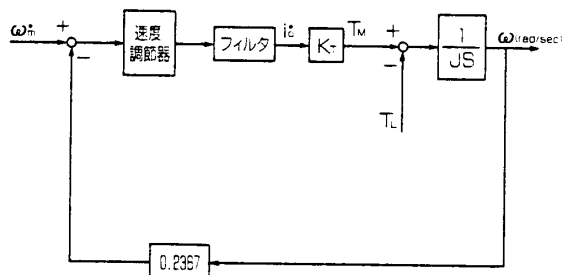


図14 全体のブロック図



ω^* : 速度指令 (V) J : 機械全体の慣性モーメント (Nms²)
 K_T : トルク係数 (Nm/V) ω : 機械の角速度 (rad/sec)
 T_m : モータギャップトルク (Nm) i^* : トルク電流指令 (V)
 T_L : コンプレッサ負荷トルク (Nm)

図15 簡略化したブロック図

表2 負荷変動による回転数変動と電流変動

No.	速度調節系の特性	外乱トルク	回転数変動 (W/TL)		電流変動 (ITL) (10V=√2×555A)	
			ボード線図	シミュレーション	ボード線図	シミュレーション
1	20rpm垂下 13.88(1+1.386S) 1+2.394S	片巻機 486N·m 巻速数 1.97Hz	±0.859rad/sec (±6.2RPM)	±0.964rad/sec (±9.2RPM)	±1.14V (±99.5A)	±1.27V (±99.7A)
2	10rpm垂下 27.50(1+1.386S) 1+2.422S		±0.996rad/sec (±9.42RPM)	±1.00rad/sec (±9.55RPM)	±1.70V (±133.4A)	±1.81V (±142A)
3	垂下なし (20+20S)/S		±1.14rad/sec (±10.9RPM)	±1.26rad/sec (±12RPM)	±3.48V (±273A)	±3.14V (±245A)
4	(20+20S)/S 各調節器のクランプ 値を2倍とする。		±1.14rad/sec (±10.9RPM)	±1.14rad/sec (±10.9RPM)	±3.48V (±273A)	±3.51V (±275A)

た。表2は T_L に起因するモータの電流変動と回転数変動をシミュレーション及びボード線図より求め比較したものである。表2のNo. 1は、定格トルクで速度偏差20rpm, No. 2は、10rpmの速度垂下特性の場合、No. 3は垂下特性のない調節器の場合である。No. 4はシミュレーションのみ実施したもので、No. 3と同じ速度調節器で、速度、電流調節器のクランプ値を2倍にし、PWM搬送波の振幅も2倍にし、飽和の影響が出ないようにしたものである。ボード線図から得られる i_q^* はトルク電流の変動のため、一定値である励磁電流分を(13)式の様に補正して電流変動成分とした。

$$\Delta i = \sqrt{(i_q^* + \Delta i_q^*)^2 + (i_d^*)^2} - \sqrt{(i_q^*)^2 + (i_d^*)^2} \quad (13)$$

検討結果は表2に示すが、参考として図16に表2のNo. 1とNo. 4の条件でのボード線図とシミュレーションによるモータ電流波形の計算結果を示す。表2より、シミュレーションとボード線図から求めた数値は充分良い一致を示している。No. 1, 2, 4についてはシミュレーションから求めた電流変動の数値がボード線図から求めた値より大きくなっているのに対し、

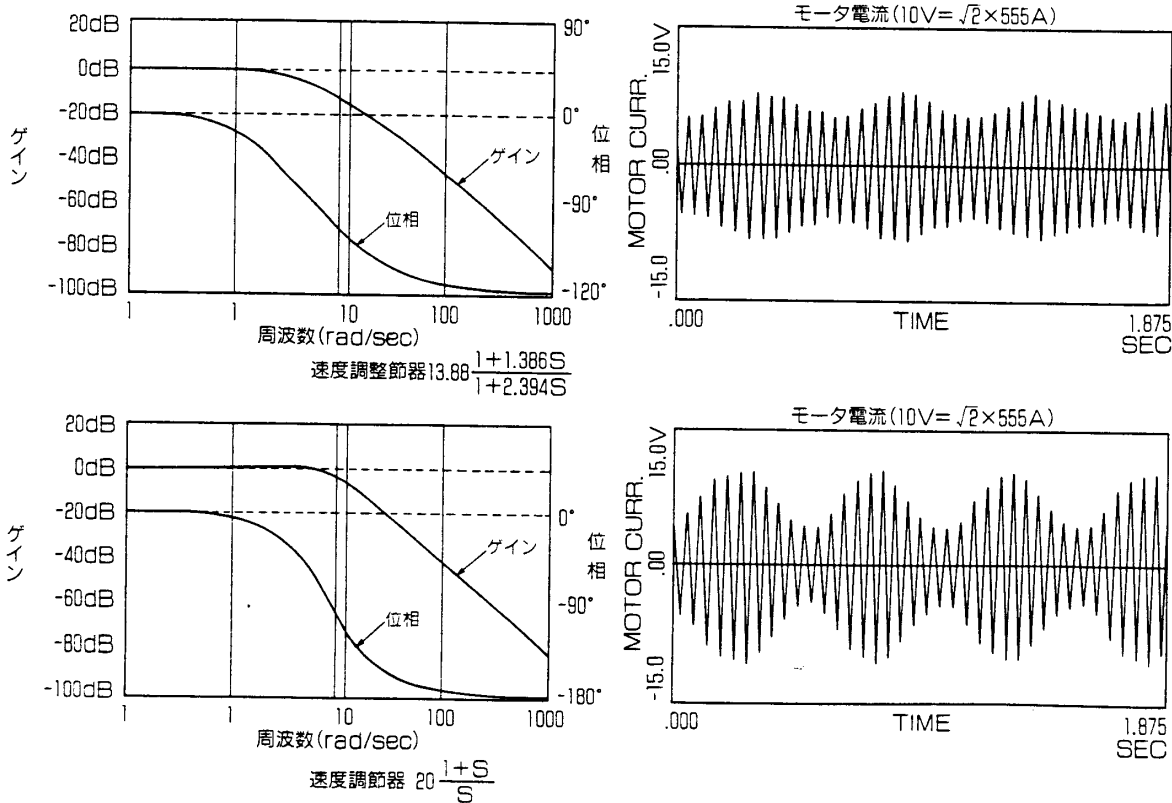


図16 モータ電流変動

No. 3 の場合, 逆にシミュレーションの電流変動値がボード線図の値より, 小さくなっている. これは No. 4 の結果から見て, 飽和の影響により (i/T_L) のゲインが下がっているものと考えられる. 電流変動は速度垂下特性を大きくするほど小さくなるのに対し, 回転数変動は全体の慣性モーメントで決まり, 速度調節器を変えてもほとんど変化しない. 以上の結果より, 図15の簡略モデルで十分な精度が得られ, 最初の仮定である「トルク電流指令値=モータギャップトルク」とみなせることが分った.

7. ま と め

従来大型計算機で行なわれていた電磁機械系のシミュレーションを SIGMA を用い, パソコン上で実行した. 容量の点からくる制約は多少あるが, 今回行なったシミュレーションはインバータ, 電磁機械, 機械装置を含み, 充分実用に耐え得ることが分った. また EMTP と比較したが, 精度等の問題もなく, SIGMA はマンマシンインターフェイスに優れ, 使いやすいシミュレータであることが実証された. 今後このような実機試験の代わりになり得るシミュレータとして多方面で使用されていくものと思われる.

参 考 文 献

- 1) 池野, 宮地, 重松, 臼井: 連続系のシミュレーション技法, 電子通信学会技術研究報告, MBE85-93 (1986)
- 2) 今林, 野村: 磁束飽和を考慮した VVVF 駆動誘導電動機の始動引き込み過渡現象解析, 電気学会全国大会, 1519 (1988)
- 3) 雨谷: 汎用過渡解析プログラム EMTP, 電学誌102-6 (1982)
- 4) 今林: “EMTP”を用いた複合系シミュレーションの実例, 神鋼電機28-4 (1983)
- 5) S. Usui, R. Matsuda, H. Ikeno and H. Miyaji: Continuous System Simulator (SIGMA) on Personal Computer, Proc. of JSST Int. Conf. (Tokyo), 135/140 (1986)
- 6) F. H. Speckhart and W. L. Green: A guide to Using CSMP-The Continuous System Modeling Program, Prentice-Hall (1976)
- 7) R. A. Gaskill, J. W. Harris and A. L. Monknight: DAS-A Digital Analog Simulator, Proc. of Spring Joint Computer Conference (1963)
- 8) S. I. Schlesinger and L. Schkin: EASL-A Digital Computer Language for “Hand on” Simulation, Simulation, 110/119 (1966)
- 9) 天水: グラフック連続系シミュレータ (MCSMP-G), 京都大学計算機センター広報, 8-4 174/177 (1975)
- 10) 猪狩: 電機機械理論, コロナ社 (1977)
- 11) 日本 EMTP 委員会: EMTP Theory Book, 368/374 (1987)