

新しいプログラム形式による アナログ/ハイブリッド計算機

Analog/Hybrid Computer with New Programable Idea

The authors have recently developed a new analog/hybrid computer. Differing from its preceding type which required specific knowledge on electrics for operation this new computer can be used by any non-skilled users if it is programmed correctly according to formulas. Anyone with a basic knowledge on mathematics covering integration, addition, multiplication, etc. can handle it with utmost ease for calculation.

For improving reliability, Program Check System (PCS for short) and IC DC amplifiers have been extensively adopted in this machine. The PCS has provided it with functions equal to those of superlarge sized computers, while the latter has doubled its cost performance. In its control system relays have been discarded in favor of electronic components.

大村恒夫* Tsuneo Ohmura
河村重憲* Shigenori Kawamura
横沢典男** Norio Yokozawa

1 緒 言

アナログ/ハイブリッド計算機は、システムのダイナミックシミュレーションを行なうことを主目的とし、デジタル技術の導入をはじめ各種の改良がなされ、従来から広くユーザーに利用されてきた。

最近では各種工学分野以外に、新たに生物、環境、医学関係などの分野にもユーザー層が広がり、電気の専門家以外にも容易に使用できる計算機が望まれてきた。

今回、これらの用途に最適の新しい構成のアナログ/ハイブリッド計算機を開発したので、その開発構想について述べ、おおかたの参考にお供したい。

2 アナログ/ハイブリッド計算機の発展過程と 新形計算機の基本構想

表1は現在までのアナログ/ハイブリッド計算機の発展過程を示すものである。微分方程式の求解を当初のニーズとし、繰返し形から低速形に移行して、より高精度の解が得られるようになった。さらに繰返し形の長所である、パラメータの変更に対して解の速応性のすぐれた点が再認識され、繰返し

低速兼用に移っていった。

その後、演算対象がより複雑となり、最適値の求解、ハイブリッド系のシミュレーションの必要性から、さらに広範囲にわたる時定数を持つ複合システムの解析のニーズに応ずるため、論理演算要素の付加、自動演算、多時間演算機能の付加へと、機能の拡張が行なわれた。

電子技術の進歩に伴い、非常に複雑なシミュレーション対象の解析を必要とする一部の専門家にとって、有力な武器として効力を発揮したが、パッチ板上の端子は、機能の拡張、融通性の強化に伴って数が増加し、かつ複雑になってきた。しかも、これらの機能を十分活用するためには、各計算機特有の約束事や制約条件をよく理解しなければならず、そのためには高度な電気知識さえも必要となってきた。

これはプログラムを行なうのに高度の技術が必要なこととなり、非常に限られた専門家でないと使いこなせない結果を招き、一般には、アナログ/ハイブリッド計算機は使いにくいと言う声も聞かれるようになった。

化学、薬品、食品、農業、水産、医学、教育、経済などの

表1 アナログ/ハイブリッド計算機の発展過程 昭和28年に発表してから現在までのニーズ、計算システム、主要回路素子の変遷を述べたものである。

Table 1 Development Process of Analog/Hybrid Computer

年 次 (昭和)		28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
ニ ー ズ		微 分 方 程 式 求 解										最適値求解 ハイブリッド系シミュレーション		複合システム解析 (パターンコンセプト)		使い勝手の向上 (マン・マシン コミュニケーション)							
計 算 システム	アナログ/ハイブリッド	繰返し形 → 低速形 → 繰返し 低 速 兼用										論理要素付加		自動演算機能付加						数式どおりの演算可能			
	ハイブリッド											汎用デジタル計算機とのハイブリッド計算システム		専用デジタル計算機とのハイブリッド計算システム						ハイブリッドシミュレーションランゲージ			
主要回路素子		真 空 管										ト ラ ン ジ ス タ						IC					

*日立電子株式会社小金井工場 **日立製作所中央研究所

表 2 ALS-2000XおよびALS-200X仕様一覧表 数式どおりの演算が行なえるアナログ/ハイブリッド計算機ALS-2000XおよびALS-200Xの一般仕様と標準実装数を示したものである。

Table 2 Specifications for ALS-2000X and ALS-200X

項 目		卓上形 ALS-200X 仕様	据置形 ALS-2000X 仕様
外 形 寸 法		高さ 幅 奥行 約750mm 約1,150mm 約800mm	高さ 幅 奥行 約1,600mm 約1,650mm 約900mm
A C 電 源		100/110/120/200/220/240V 単相	±10% 50/60Hz ±1Hz
演 算 基 準 電 圧		±10V	
演 算 モ ー ド		アナログ演算モード ALL RESET,RESET,COMPUTE HOLD, POT SET, HYBRID, SLAVE, PCS CHECK ロジック演算モード CLEAR, RUN, STOP, STEP	
繰返し演算制御		タイマ, ロジック, オシロスコープ, 電圧比較器, デジタル計算機, 外部同期信号により可能。	
標 準 実 装 数	積 分 器	20	40
	加 算 器	20	40
	正 負 変 換 器	12	24
	係 数 器	80	40
	ディジタル 係数器	40	200
	関 数 発 生 器	20	40
	乗 算 器	12	24
	電子スイッチ	8	16
	比 較 器	8	16
	むだ時間 発生器	4	8
飽和, 不感帯 履歴, 絶対値		各 4	各 8

新しい分野では、対象とする現象、あるいはそれらを取り扱う式については専門家であっても、電気的知識には縁遠いユーザーが大半であり、それらの新しい、幅広いユーザーに使用してもらうためには、電気的知識の不要、できれば計算機の知識がいらないで使用できる計算機が必要となってきた。

その第一の解決法として、デジタル計算機の微分方程式解析用シミュレーション言語と同様なプログラムの方法で、使用できる自動結線のハイブリッド計算機の製品化が行なわれた。これは高度なシミュレーション言語を持つデジタル計算機プログラムの容易さと、従来のアナログ/ハイブリッド計算機の持つ演算処理の高速性、マン・マシンコミュニケーションの良さの両方の長を兼ね備えたもので、今後のハイブリッド計算機の主流をなすものである⁽¹⁾⁽²⁾。

第二の方法として、従来のパッチ板による結線を生かしなが、だれでも容易にプログラムでき、容易に使えるためには、パッチ板上のプログラムが数式どおりに行なえる計算システムを実現することである。

この目標に対し、次の基本構想のもとに、新しい考え方のアナログ/ハイブリッド計算機の開発を行なった。

- (1) 電気的知識を全く必要としないで使用できること。
- (2) 数式どおりに結線する以外には、プログラム上の約束事、制約をできるかぎりなくすこと。
- (3) 人間のプログラムミス、パッチングミスのチェックが容易であること。

表 2 は、今回開発した数式どおりのアナログ/ハイブリッド計算機ALS-2000XおよびALS-200Xの仕様一覧表である。卓上形の標準実装数の2倍が、据置形の標準実装数となっているが、据置形ALS-2000Xはハイブリッド計算システムへの移行の面から、デジタル係数器の実装を基本とし、卓上形ALS-200Xは手動の係数器を基本実装としている。

図 1 は、卓上形ALS-200Xの外観である。

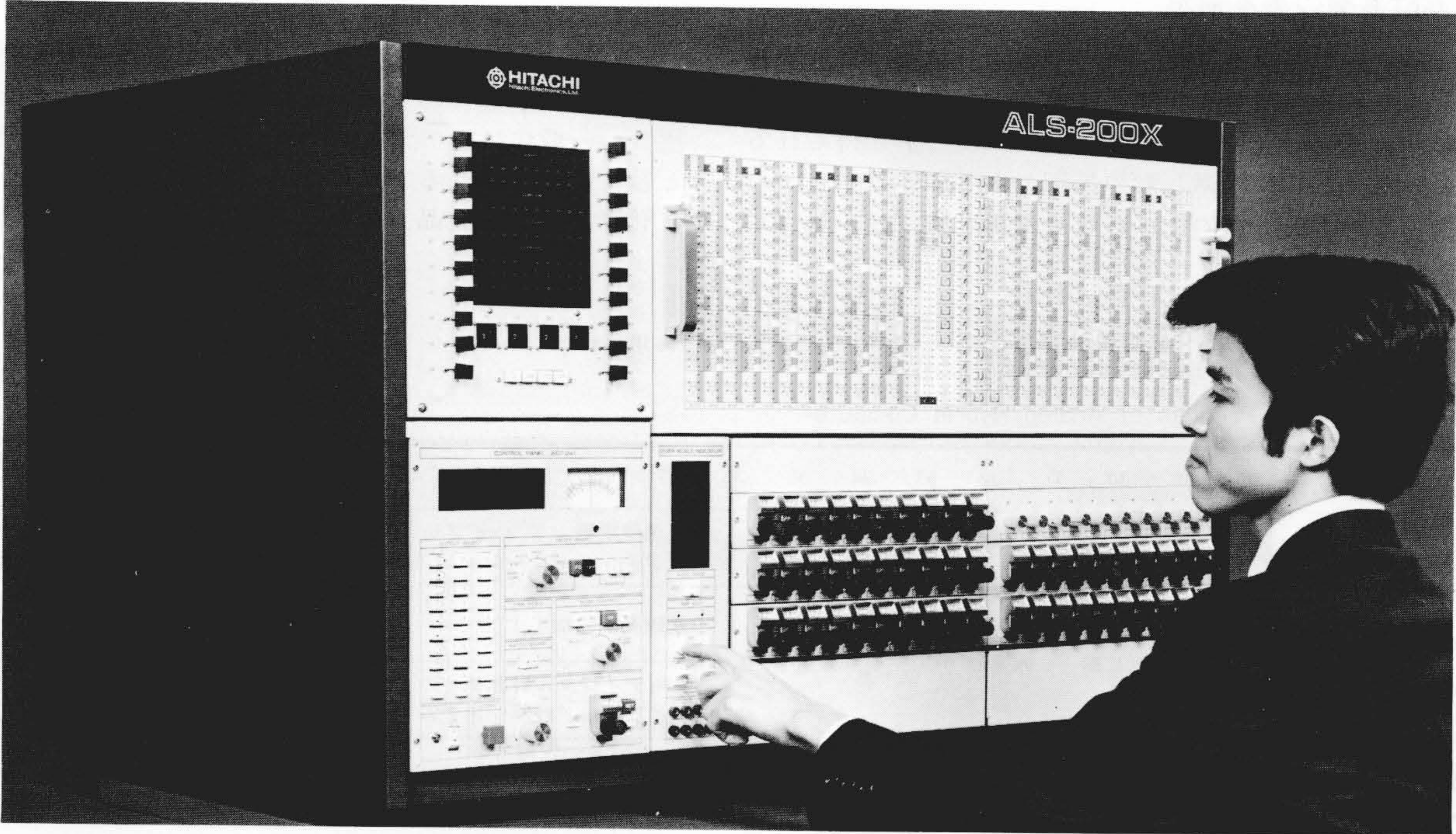


図 1 数式どおりの演算が行なえるアナログ/ハイブリッド計算機ALS-200X外観 卓上形計算機ALS-200Xの外観である。
Fig. 1 Front View of Analog/Hybrid Computer

3 従来のアナログ/ハイブリッド計算機におけるプログラム上の基本的難点

従来の計算機では、常識としてユーザー側に押しつけていたプログラム上の不自然さを考え直してみると、次のような基本的難点があげられる。

3.1 入出力の符号が数式どおりでない

直流増幅器を使用した演算器である、係数器、積分器、演算増幅器などは、入力と出力とで正負の符号が変わり、数式どおりの演算を行なう際に符号を十分考慮する必要がある。

3.2 ポテンショメータは負荷効果がある

ポテンショメータは負荷効果があり、目盛の値を信用して設定を行なうと大きな誤差となる。

3.3 出力電流の制限がある

一つの演算器出力に接続しうる次の演算器の数は、前の演算器の取りうる出力電流を知ったうえで次の演算器のおおの消費電流（または入力抵抗）を加え合わせ、過電流にならない注意が必要である。

3.4 SJ(Summing Junction)端子が必要である

SJと呼ぶ特殊な入力端子があり、それとフリーの抵抗、コンデンサ、ダイオードなどを組み合わせて、電気回路を組んだ、演算器をユーザーが構成していた。

3.5 発振対策が必要である

接続の方法、演算回路の作り方によっては、発振を生ずることがあり、それに対処するコンデンサを演算誤差をそこなわない程度に入れる。

上記のように電気知識が必要なことを、アナログ/ハイブリ

ッド計算機のユーザーに基本事項として行なってもらっていた。これらの難点を除去することに重点を置いて、次のように具体策をまとめた。

4 従来のプログラム上の難点の対策と新アナログ/ハイブリッド計算機の特長

前記の基本構想に基づき、従来のプログラム上の難点を解決し、工学以外の分野にも簡単に使用できる計算システムとするため、次の対策を行なった。

4.1 すべてのプログラムは全く数式どおり行なえる

これは3.1および3.2の欠点をカバーするものである。従来は数式と異なり、入力と出力との符号が変わっていたのでこれを積分器、加算器の入出力符号が、数式どおり行なえるように改良した。また従来、正出力で係数が1までの係数器（ポテンショメータ）を、正負両出力が取れ、係数も0.1, 1, 10までの3とおとり取れるようにし、負荷効果を考えることなく、目盛どおりの設定値が得られる。これは、積分、加算、係数が数式と全く1対1で対応可能とするための対策である。

表3は各演算器の従来の計算機と新計算機の対応を、図2は非線形微分方程式の演算例の対応を示すものである。図2の対応でも明らかなように数式どおりのプログラムを行なうことができるので、要素数が少なくてもよい。

4.2 パッチ板上の結線は、ブロック図と同一記号の要素を自由に結線できる

これは3.3の欠点をカバーするものであり、パッチ板(図3参照)の要素記号は、ブロック図の記号と同一で、その結線は全く自由にパッチ穴数だけ行なうことができる。

例題：

$$\begin{cases} \frac{d^2y}{dt^2} - \epsilon \left\{ 1 - y^2 \right\} \frac{dy}{dt} + y = 0 \\ t=0 \text{ のとき } \frac{dy}{dt} = y = 0 \quad \epsilon > 0 \end{cases}$$

解： $\frac{dy}{dt}$, y の推定最大値を3とする。

変数	推定最大値	スケールファクタ	計算機変数
y	3	$\frac{1}{3}$	$\left[\frac{y}{3} \right]$
$\frac{dy}{dt}$	3	$\frac{1}{3}$	$\left[\frac{dy}{dt} \right]$
$\frac{d^2y}{dt^2}$	3	$\frac{1}{3}$	$\left[\frac{d^2y}{dt^2} \right]$

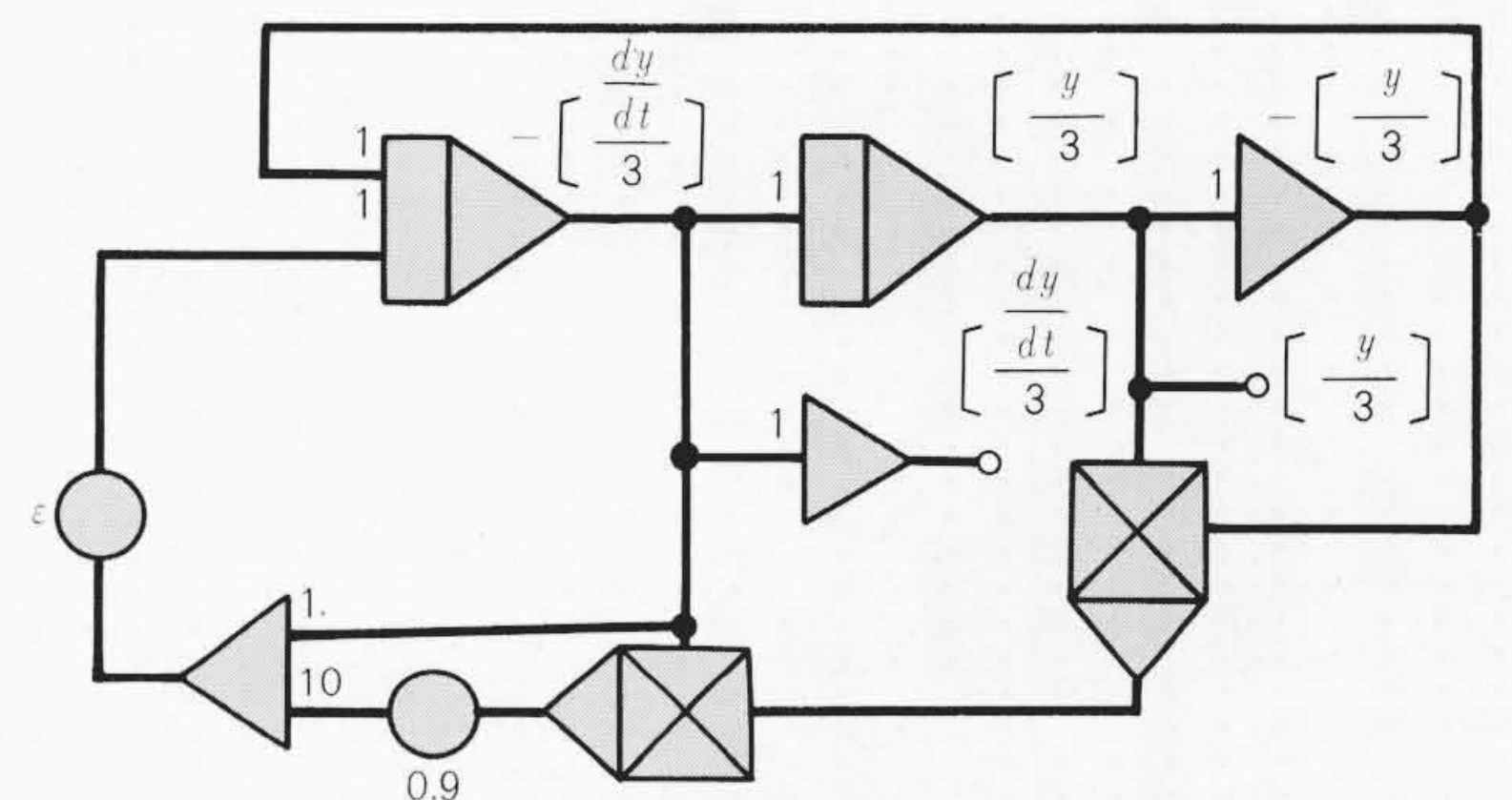
$$\text{計算機変数} = \frac{\text{変数}}{\text{推定最大値}}$$

計算機変数を用いて、方程式を書きなおして移項すると、

$$\left[\frac{d^2y}{dt^2} \right] = \epsilon \left\{ 1 - 9 \left[\frac{y}{3} \right]^2 \right\} \left[\frac{dy}{dt} \right] - \left[\frac{y}{3} \right]$$

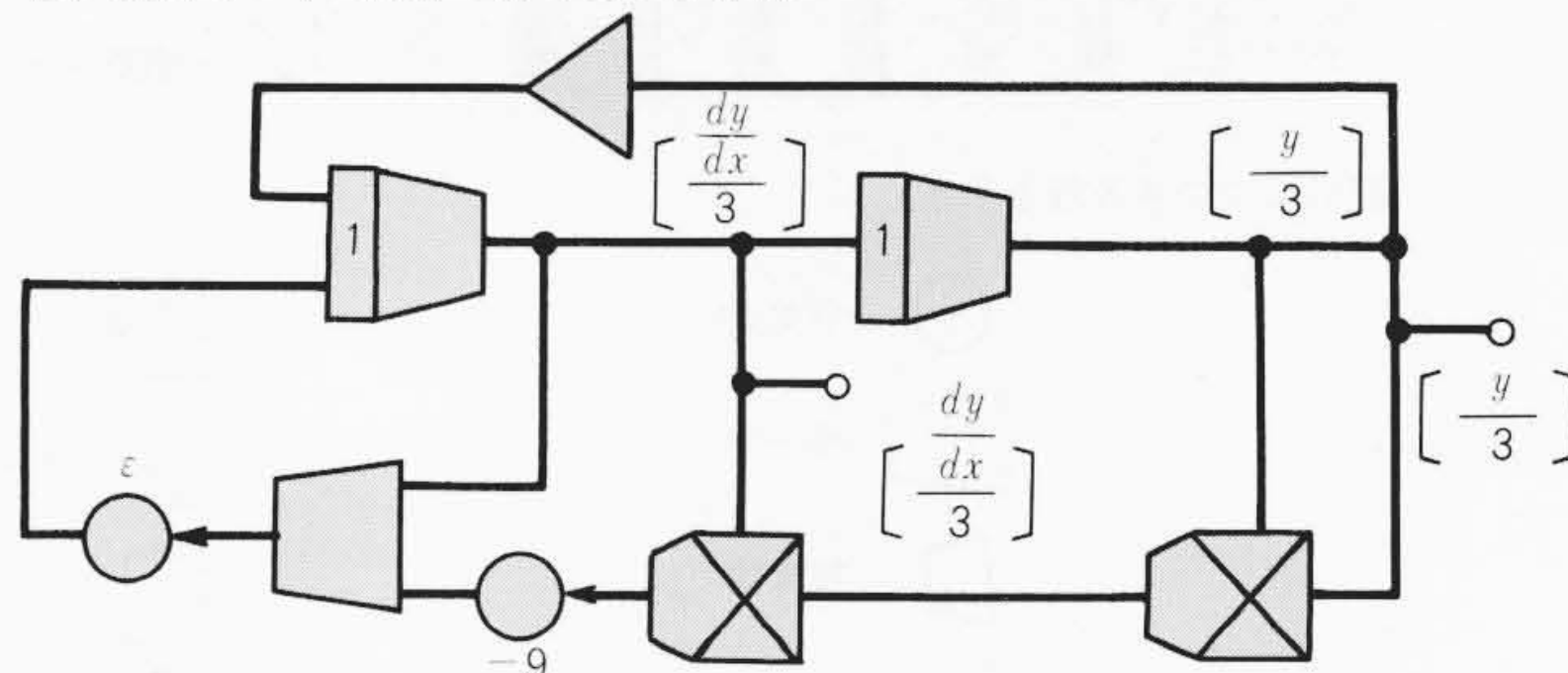
ブロック図を作成すると、

(a) 従来の計算機



積分器 2台 加算器 1台 正負変換器 2台 ポテンショメータ 2個 乗算器 2台

(b) 数式どおりの演算が行なえる計算機



積分器 2台 加算器 1台 正負変換器 1台 係数器 2台 乗算器 2台

図2 非線形微分方程式の演算例 非線形微分方程式の解法と計算ブロック図を示している。

Fig. 2 Example of Operation for Non-linear Differential Equation

表3 演算式 従来の計算機と数式どおりの演算が行なえる計算機との演算式の相違を示している。

Table 3 Equation of Operation

要素名	従来の計算機	数式どおりの演算が行なえる計算機
積分	$y = -\int_0^t (x_1 + x_2 + 10x_3 + 10x_4) dt$ -IC y: 出力 $x_1 \sim x_4$: 入力 IC: 初期入力	$y = \int_0^t (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) dt$ +IC
加算	$y = -(x_1 + x_2 + 10x_3 + 10x_4)$	$y = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$
定数乗算	$y = ax_1$ $0 < a < 1$	$y = ax_1$ $-10 < a < 10$ または $-1 < a < 1$ または $-0.1 < a < 0.1$
乗算	$y = -x_1$	$y = x_1 \cdot x_2$
除算	$y = -\frac{x_2}{x_1}$ ただし、 $x_1 > 0$	$y = \frac{x_2}{x_1}$

注：新しい計算機では、積分、加算など数式どおりの演算が行なえる、また定数乗算は正、負両出力が出ることにより、従来の計算機に比較して、同一演算時、正負変換器の数を大幅に省略できる。

4.3 電気知識が不要である

これは3.4および3.5の欠点をカバーするものであり、従来ユーザーが組み合わせ使用していた特殊非線形（飽和、不感帯、絶対値、履歴など）、その他の特殊要素は、すべて専用の演算要素としたため、電気知識は不要である。

4.4 プログラム・チェック・システム(以下、PCSと略す)の採用

従来は超大形計算機システムだけに組み込まれていたパッチ板上での結線を、なんら変更することなく、全演算器の機能チェック、回路の接続状況、パッチピンの接触状況のチェックが可能なPCS機構を採用し、

- (1) 従来のパッチングのチェックの手間が $\frac{1}{10}$ となった。
- (2) 不良演算器の抽出が容易になった。
- (3) パッチコードの接続状況のチェックが、使用時と同一状態で行なえる。

アナログ/ハイブリッド計算機を使用する際、従来最も不安な要素であった接触状況のチェックができ、デバッグ時間の短縮も行なえるのでこれが新計算機のメリットになりうる。

図4はPCS機構の一例を示すもので、積分器および加算器の出力に模擬入力を与え、それに接続されている各演算器、パッチコード、パッチピン接続状況をチェックする。

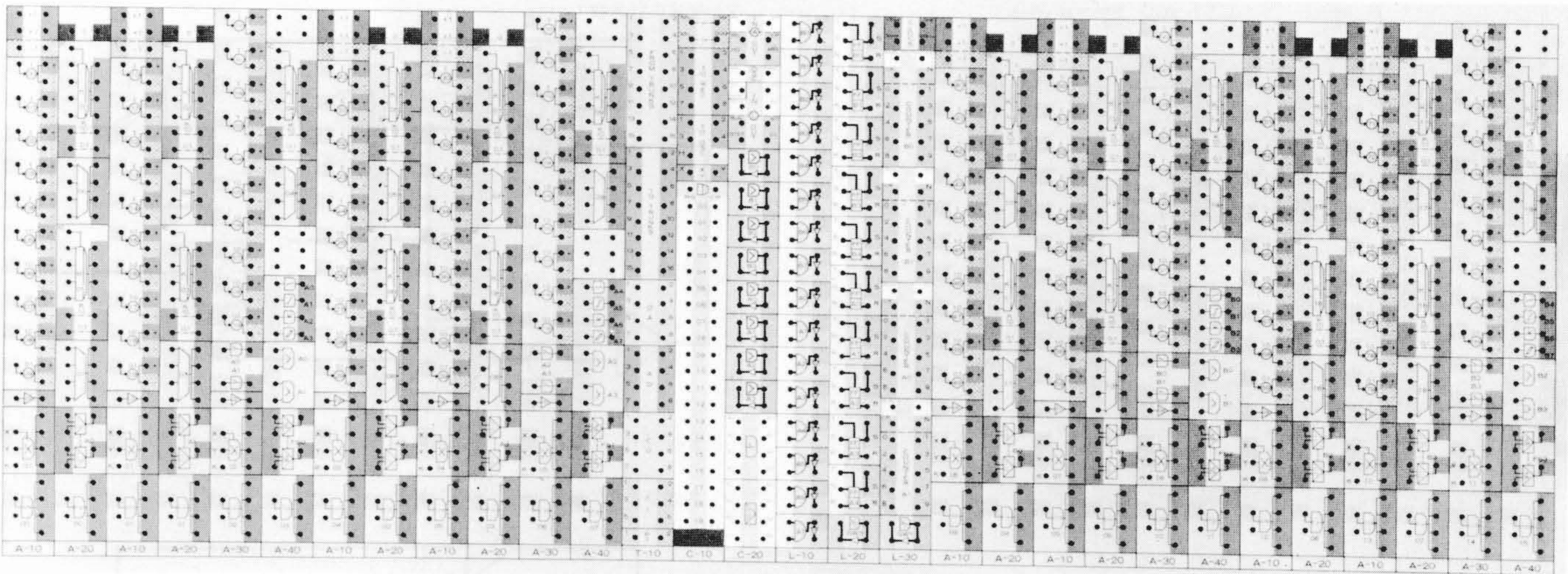
このとき計算機は、オール・リセット状態であり、数学的には、微分方程式の初期条件が入力される状態である。

4.5 ハイブリッド計算システムへの移行が容易

(1) デジタル係数器の採用

従来の計算機の自動設定ポテンショメータはサーボ設定方式のため、設定時間が1秒から2秒要した。

新計算機は、全電子式のデジタル係数器を採用し、設定時間が10msのものおよび50μsの高速形のもの二とおりを用意している。



注：上記写真の記号は次の演算器を示す。



図3 ALS-200Xのパッチ板 卓上形計算機ALS-200Xのパッチ板の図面と記号説明である。

Fig. 3 Pre-patch Board of ALS-200X

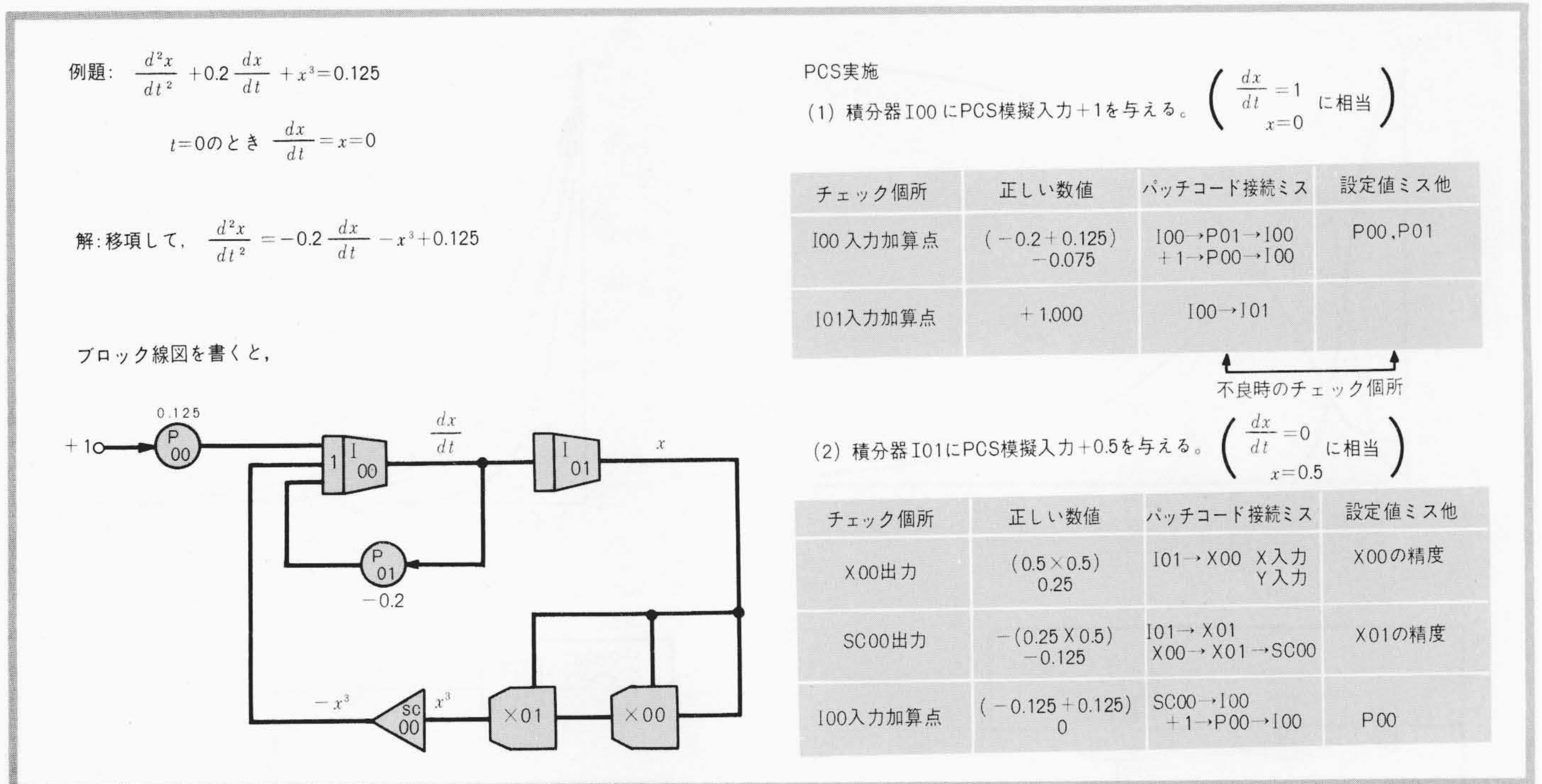


図4 PCS機能の実例 PCS機能の実例を非線形微分方程式について行なった。
Fig. 4 Example of PCS (Program Checking System)

本デジタル係数器は、デジタル量とアナログ量の乗算が行なえるので、ハイブリッド計算中デジタル-アナログ変換器 (D-A 変換器) に使用したり、従来 D-A 変換器とアナログ乗算器を組み合わせ使用していたものの代わりにも使用できる。

(2) HIDASP ソフトウェアサービスが受けられる⁽¹⁾。

アナログ/ハイブリッド計算機のプログラミングを行なうとき、そのスケール変換がユーザーの悩みの種であったが、それを一挙に解決する新しい概念のソフトウェアパッケージを作成した。

すなわち、HIDASP (Hitachi Digitaly Aided Scaling Program) がそれで、連続系のシミュレーション・ランゲージを使用している。これは次の特長を有する。

原方程式を微分方程式の形のまま、図5に示すように入力でき、スケール変換された演算方程式の出力、接続用パッチングリスト出力が得られるほか、デジタル計算による解の算出も可能である。

(3) DASC (Digital Automatic Setting and Checking Program) ソフトウェアサービスが受けられる⁽¹⁾。

新計算機の PCS 機構のマン・マシンコントロールが行なえるほか、ハイブリッドリンクエージ部、アナログ/ハイブリッド計算部の点検、定数変更、演算がタイプライタとの会話形式で行なえる。

4.6 大幅な IC (集積回路) の採用

IC 直流増幅器および IC 論理回路の大幅採用により、従来の計算機に比較して使用部品点数が約 3/5、スペースファクタが約 1/2 となり、コストパフォーマンスは約 2 倍、信頼度も約 2 倍にそれぞれ向上した。

5 応用例

5.1 病気の伝染に関する事例

総人口 1,000 人中に 10 人の伝染病患者がおり、そのうち 900

例題を HIDASP を使用して計算する。

$$\begin{cases} \frac{d^2y}{dt^2} + 0.5 \frac{dy}{dt} + 2y + 3x = 0 \cdots \cdots (1) \\ \frac{d^2x}{dt^2} + 0.8 \frac{dx}{dt} + 4x + y = 0 \cdots \cdots (2) \\ t=0 \text{ のとき } \frac{dy}{dt} = \frac{dx}{dt} = 0 \quad y=0.5, x=0.3 \end{cases}$$

解: HIDASP プログラム用入力テープ、フォーマット

D2Y	-5×DIY	-2×Y	-3×X	(1)式に対応	
D2X	-8×DIX	-4×X	-Y	(2)式に対応	
D1Y	INT (D2Y, 0.)				$\frac{dy}{dt} = \int \frac{d^2y}{dt^2} dt$ で $t=0$ のとき $\frac{dy}{dt}=0$
Y	INT (D1Y, .5)				$y = \int \frac{dy}{dt} dt$ で $t=0$ のとき $y=0.5$
D1X	INT (D2X, 0.)				$\frac{dx}{dt} = \int \frac{d^2x}{dt^2} dt$ で $t=0$ のとき $\frac{dx}{dt}=0$
X	INT (D1X, .3)				$x = \int \frac{dx}{dt} dt$ で $t=0$ のとき $x=0.3$
	OUT (X, Y)				x と y のデジタル解を出力する。
	FIN (T, 10.)				演算は 0 から 10 秒
	END				プログラム終了

(シミュレーション・ランゲージのため、式がそのまま入力できる)

HIDASP プログラムは上記フォーマットの入力テープを読み、

- (1) 結線リストを出力する。
- (2) 係数器の設定値を出力する。
- (3) 各変数の推定最大値を出力する。
- (4) 時間換算係数を出力する。
- (5) 方程式のデジタル計算機解を出力する (不要なら削除可能)。

図5 HIDASPの演算例 HIDASPにて線形微分方程式を解析するときのプログラム例を示すものである。

Fig. 5 Example of HIDASP.

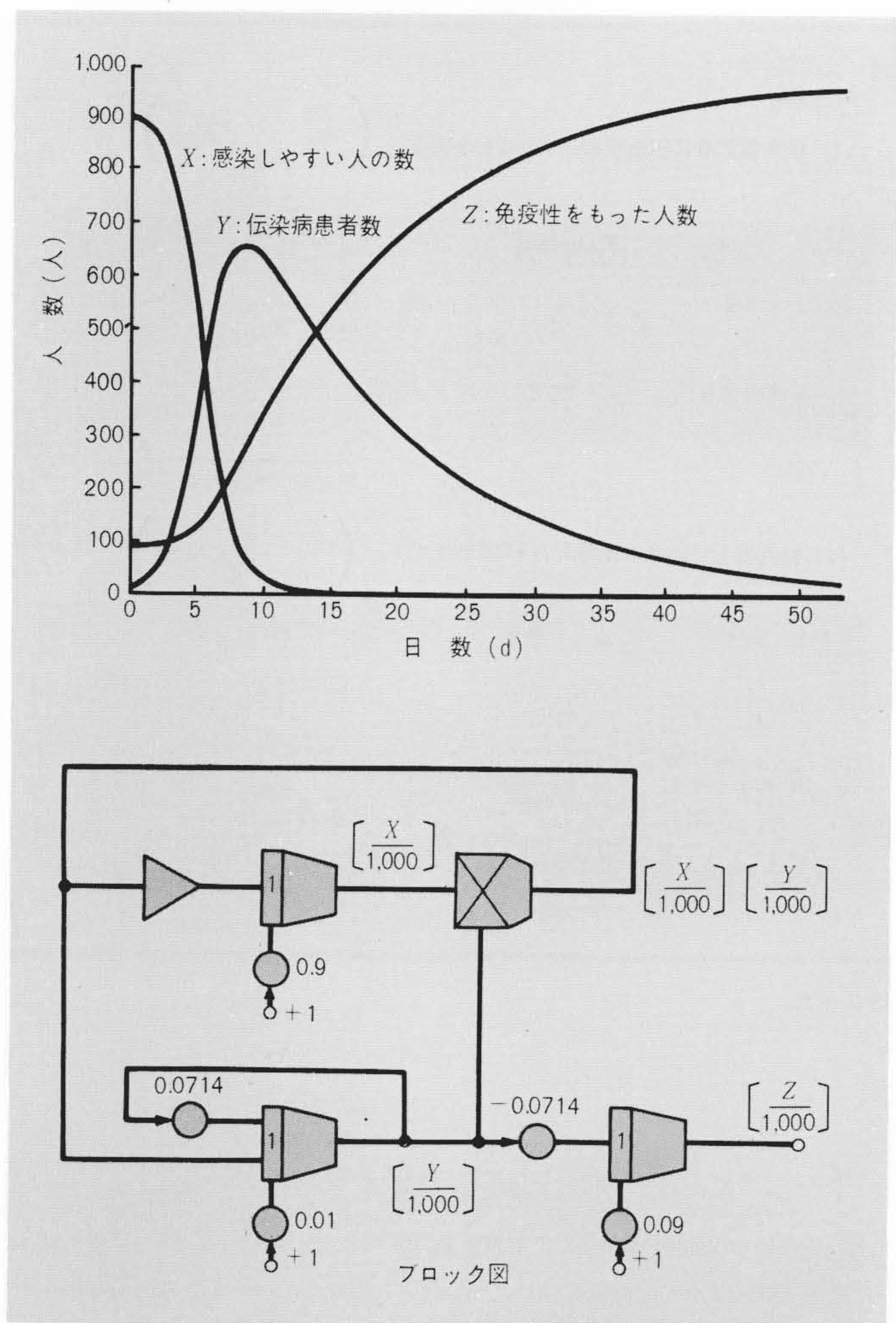


図6 5.1の本文例題の解とブロック図 病気の伝染に関する例題の解答および計算ブロック図を示す。

Fig. 6 Block Diagram and Solution of Example 5.1

人は病気にかかりやすく、残り90人はすでに回復して、免疫性をもつ。各伝染病患者は、平均1日に残りの感染しやすい人員の1/1,000の人間に感染させる。14日経過すると病気は回復し、免疫性を持つようになる。

感染しやすい人間の数を X 、伝染病患者数を Y 、回復し免疫性を持った人数を Z とすると、

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = -\frac{1}{1,000}XY \\ \frac{dY}{dt} = \frac{1}{1,000}XY - \frac{1}{14}Y \\ \frac{dZ}{dt} = \frac{1}{14}Y \end{cases}$$

初期条件は、 $X=900$ 人、 $Y=10$ 人、 $Z=90$ 人となる。

図6は、上記の計算機による解を示すものである。

5.2 細菌の生存に関する事例

3種類の細菌が含まれている、ある汚水中に消毒剤を入れた場合、それぞれの細菌は指数関数的な生存特性を示し、最初の1分間で、第一の細菌は50%、第二の細菌は30%、第三の細菌は20%死滅した。

3種類の細菌数がそれぞれ、はじめ 10^5 個/mlであれば、各細菌数の生存数は次式となる。

第一の細菌 $X = X_0 e^{-\lambda_1 t}$ 、第二の細菌 $Y = Y_0 e^{-\lambda_2 t}$ 、第三の細菌 $Z = Z_0 e^{-\lambda_3 t}$ 生存数を求めるため、微分して次式となる。

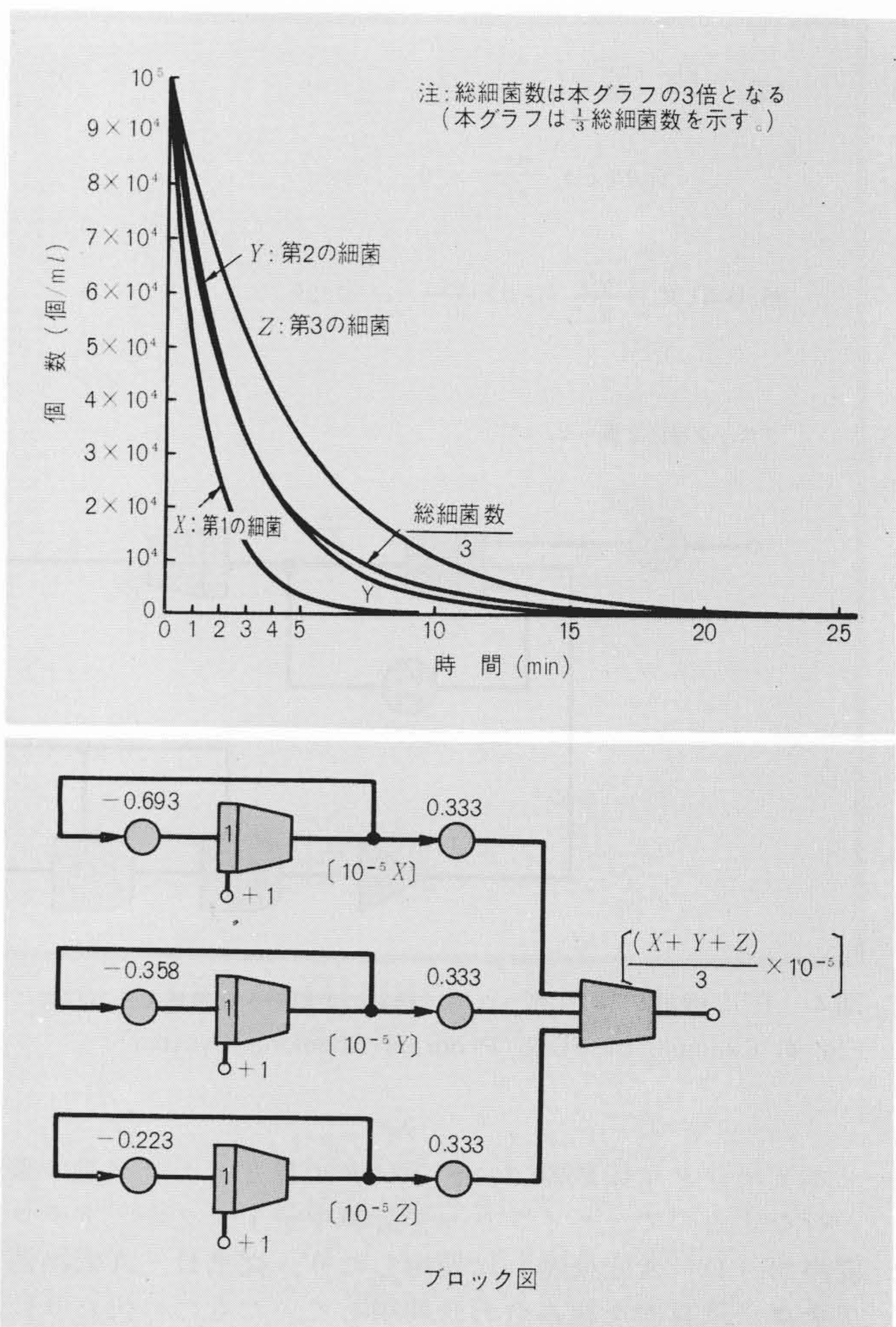


図7 5.2の本文例題の解とブロック図 細菌の生存に関する例題の解答および計算ブロック図を示す。

Fig. 7 Block Diagram and Solution of Example 5.2

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = -0.693 X \\ \frac{dY}{dt} = -0.358 Y \\ \frac{dZ}{dt} = -0.223 Z \end{cases} \quad \text{初期条件 } X=Y=Z=10^5 \text{ 個/ml}$$

図7は、上記の計算機による解を示すものである。

6 結 言

従来のアナログ/ハイブリッド計算機のユーザーには、プログラムの考え方の面で、まごつくこともあると思われるが、数式どおりの演算が行なえるアナログ/ハイブリッド計算機の開発は、幅広い層のユーザーの希望とも合致しており、物理現象や数学解析の面で、今まで以上に役だつことと思う。

われわれ計算機システムのメーカーは、ユーザーの要望に合致するシステムを、開発、製作する使命があり、要望により伝達関数や自動求解器などの特殊回路のハードウェアパッケージ化も実現したいと考えている。

参考文献

- (1) 三浦武雄：電気学会雑誌 Vol.92, No.1 (J.I.E.E.J. 1/72)
- (2) G.A.ベケイ, W.J.カープラス著 三浦武雄, 遠藤武之訳：ハイブリッド計算システムとその応用 (昭-46 培風館)