

JAERI-M

6740

熱交換基本モデルのハイブリッド計算

(シミュレーション誤差の検討)

1976年10月

上 藤 和 彦\*・白 井 甫 積・原 昌 雄

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

熱交換基本モデルのハイブリッド計算  
(シミュレーション誤差の検討)

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部  
工藤和彦\*・臼井甫積・原 昌雄  
(1976年9月18日 受理)

本報告は、熱交換器動特性のハイブリッド計算手法についての具体的な検討報告である。連立双曲線形偏微分方程式で表わされる熱交換の基本モデルに対しては、数年前よりCSDT (Continuous Space Discrete Time)法を用いたハイブリッド演算が有力な計算方法とされているが、その演算精度についての具体的な評価の報告が見あたらない。そこで、最も単純化された向流形線形モデルを対象にして、CSDT法特有のパラメータと演算精度の関係について詳細な検討を加え、適用上の指針を求めた。なお、精度比較は通常の階差法によるデジタル計算結果との対比で行なった。

---

\*) 九州大学工学部

Error Estimation of Hybrid Simulation Method for Basic Heat-Exchange Model

Kazuhiko KUDO\*, Hozumi USUI and Masao HARA

Reactor Engineering Division, Tokai, JAERI

(Received September 18, 1976)

A practical study of the hybrid computation method for the heat exchanger dynamics is described.

The mathematical model is usually expressed in a set of hyperbolic partial differential equations. The CSDT (Continuous-Space-Discrete-Time) method has been used as a powerful technique for the hybrid simulation, but any practical estimation of the computing error is not reported. Therefore the parameter effects of the CSDT method on the computing accuracy are studied in detail and also the problems in application of the method are discussed here. For the mathematical model, a simplified linear one of the counter flow type is chosen to simplify the subject clear. Accuracy of the method is examined by comparing with the results obtained by pure digital computation using a finite difference method.

---

\* Engineering Division, Kyushu University

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 熱交換基本モデル .....	2
2.1 向流型熱交換器の基礎式 .....	2
2.2 CSDT法の適用 .....	5
2.3 アナログ回路およびデジタル計算部分 .....	7
3. 熱交換基本モデルの計算 .....	10
3.1 計算パラメータ .....	10
3.2 空間温度分布の計算 .....	10
3.3 過渡応答の計算 .....	10
4. 計算結果の検討 .....	22
4.1 空間温度分布 .....	22
4.2 過渡応答 .....	23
4.3 CSDT法の評価 .....	24
5. 結 言 .....	33
参考文献 .....	34
付録-A 精度比較のためのデジタル計算(定常空間温度分布) .....	35
付録-B 精度比較のためのデジタル計算(過渡応答) .....	39
付録-C デジタル計算のプログラム .....	44
付録-D ハイブリッド計算のプログラム .....	50

## 1 ま え が き

原子炉の設計を進める過程において、原子炉をシステムとしてとらえ、特性を解析し、通常運転時および異常時等における挙動を推測するにはその仕様に対応したシミュレーションを行なう必要がある。またそれに基づいて制御系の設計・検討がなされねばならない。

本報告では原子炉システム全体のシステムシミュレーションを行なうことを前提として、システムコンポーネントの1部である熱交換器のハイブリッドシミュレーションを行なった結果を述べる。

原子炉システムでは炉心、熱交換器、蒸気発生器その他の各部で熱交換が行なわれ、この熱交換の高精度かつ効率的なシミュレーションが全システムシミュレーションの精度、能率に直接影響する。このため熱交換モデルの計算精度を定量的に検討する必要がある。筆者らは熱交換の基本モデルを計算するのに、計算の速度、システムシミュレーションへの移行性などの観点からハイブリッド計算機を用いることを考え、分布定数系の計算法として有力なCSDT法(Continuous-Space-Discrete-Time Method)を適用した。以下CSDT法を用いた背景について述べる。

熱交換モデルは本来分布定数系であり、一般に偏微分方程式で表わされる。この数値解を得る手段としてデジタルまたはアナログ計算機を用いる方法が多く知られている。前者では与式を差分形に変換し、与えられた初期条件および境界条件のもとに計算を行なう。このとき計算精度は用いる解法とデジタル計算機の演算精度に依存する。プログラミング上で精度を上げようとするれば倍精度演算の使用、差分の刻み巾を小さくする、また収束の判定条件を変える等の工夫があるが、これらはそのまま演算時間の増加へつながる。

一方アナログ計算機は現在の汎用形式のもの精度は個々の演算要素について0.1%(フルスケール直線性)程度である。しかし計算する式の数とその複雑さはパッチングする回路の複雑さには影響するが、演算時間には関係しない。またアナログ計算機は1回の計算の最終値以外の過去の計算値を記憶できないが、このことは偏微分方程式の計算に特に大きい影響をもつ。すなわち初期値問題の計算においては時間についての微分項を連続にとり、他の独立変数についての微分項を差分形として演算せねばならない。

これらのデジタルおよびアナログ計算機の特徴をそれぞれ生かすためにハイブリッド計算機が考案されたのはかなり以前であり、ハイブリッド計算についての報告も多く出されている。その中にハイブリッド計算に特有の計算法として、偏微分方程式を時間軸について差分形として、他の独立変数についての常微分方程式として解くCSDT法がある。この方法は後述するようにデジタル計算機をアナログ計算機の仮想的な一要素としてはたらかせるものであり、他のデジタル計算法、アナログ計算法と比べて記憶容量、アナログ要素数が比較的少く済む等の特徴を持ち、大規模系のシミュレーションにも向いていると考えられる。

このCSDT法を用いて熱交換基本モデルを計算する際にもとの式を変形する必要があるが、このとき与えられた仕様書の数値以外に数値計算上に用いるパラメータが現われ、これらの値により結果の精度が変わってくる。効率的かつ高精度な演算を行なうにはこれらのパラメータの値を適切に選ぶことが重要である。以下熱交換基本モデルの定式化、そのハイブリッド計算法と計算結果、比較のために行なったデジタル計算およびこれらの検討について述べる。

## 2 熱交換基本モデル

### 2.1 向流型熱交換器の基礎式

熱交換基本モデルとして向流型熱交換器をとりあげた。これは原子炉プラントによく用いられるものであることと、この計算式の定常解は容易に求まるが、動特性として重要な過渡応答の理論解を求めることが一般に困難であるのがとりあげた理由である。基礎式を導出するうえで我々は次の仮定をおいた。

- i) 熱交換器（以後HXRと略す）を金属壁を介して熱伝達を行なう1次元モデルとして取扱う。
- ii) HXRの外部への熱損失はない。
- iii) 金属壁における軸方向（流れの方向）の熱移動を無視する。
- iv) 1次、2次側の流体（この場合ナトリウム）の物性値は一定とする。

表1に本計算で対象として考えたHXRの仕様を示し、図1にそのモデル化した構造を示す。これらの数値は主として高速実験炉「常陽」の主中間熱交換器のものをを用いている。この熱交換器はシェルアンドチューブ型であり、熱交換を行なう部分が全て向流となっていないが、その影響を受ける熱伝達係数を一定値としているので、向流モデルとして取扱った。

上述の仮定によりこのモデルの基礎式を求めるにはそのエネルギーバランスのみを考慮すればよい。図1において軸方向に $u_1$ 、 $u_2$ 軸を取り、ある点 $u_1$ と $u_1 + \Delta u$ （または $u_2$ と $u_2 + \Delta u$ ）の間の長さ $\Delta u$ のセクションの時間 $\Delta t$ の間の熱収支より次のように基礎式が導かれる。

- 断面 $u_1$ よりこのセクションに入るエネルギー $Q_1$ は、

$$Q_1 = C_1 w_1 x_1 \Delta t$$

- 断面 $u_1 + \Delta u$ よりこのセクションから出ていくエネルギー $Q_2$ は、

$$Q_2 = C_1 w_1 \left( x_1 + \frac{\partial x_1}{\partial u_1} \Delta u \right) \Delta t$$

- このセクションの温度上昇に使われるエネルギー $Q_3$ は、

$$Q_3 = C_1 A_1 \rho_1 \Delta u \frac{\partial x_1}{\partial t} \Delta t$$

- 金属壁に移行するエネルギー $Q_4$ は、

$$Q_4 = U_1 S_1 \Delta u (x_1 - x_m) \Delta t$$

- 金属壁温の上昇に使われるエネルギー $Q_5$ は、

$$Q_5 = C_m A_m \rho_m \Delta u \frac{\partial x_m}{\partial t} \Delta t$$

- 金属壁から2次側の流体に移行するエネルギー $Q_6$ は、

$$Q_6 = U_2 S_2 \Delta u (x_m - x_2) \Delta t$$

- 以下2次側流体について

断面 $u_2$ よりこのセクションに入るエネルギー $Q_7$ は、

$$Q_7 = C_2 w_2 x_2 \Delta t$$

Table 1 Specification of Heat Exchanger

variable		unit	primary side	matel wall	secondary side
—	inlet temperature	°C	500	—	340
v	velocity	m/sec	0.14	—	0.51
U	heat transfer coefficient	$\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \text{sec } ^\circ\text{C}}$	0.963	—	2.584
—	heat transfer area	m <sup>2</sup>	500.2	—	441.0
L	length of HXR	m	3.2	—	3.2
S	heat transfer width	m	156.3	—	137.8
A	cross section	m <sup>2</sup>	2.656	0.191	0.68
C	specific heat	$\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$	0.31	0.138	0.31
$\rho$	density	$\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$	822	7800	850

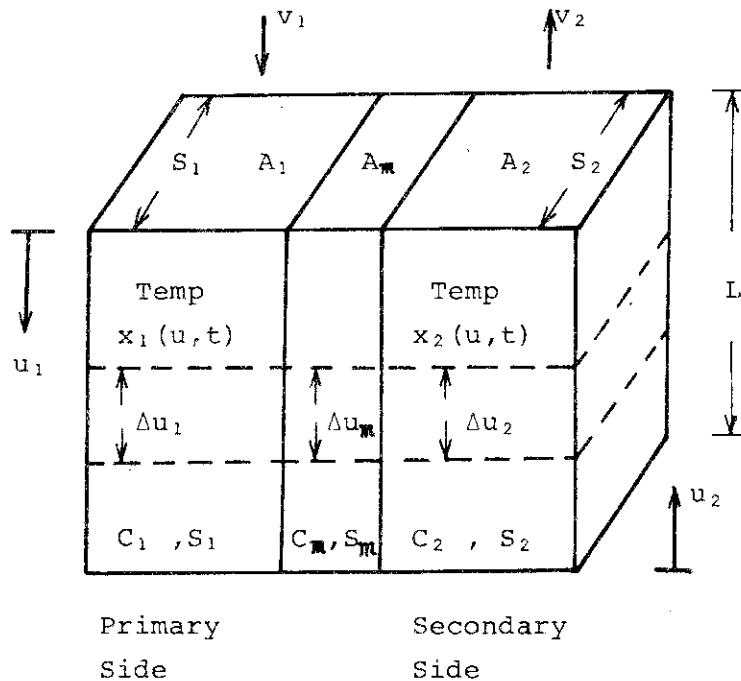


Fig. 1 Model of Counter Flow Type Heat Exchanger



○断面  $u_2 + \Delta u$  よりこのセクションから出てゆくエネルギー  $Q_8$  は,

$$Q_8 = C_2 w_2 x_2 + \frac{\partial x_2}{\partial u_2} \Delta u \Delta t$$

○このセクションの温度上昇に使われるエネルギー  $Q_9$  は,

$$Q_9 = C_2 A_2 \rho_2 \Delta u \frac{\partial x_2}{\partial t} \Delta t$$

ここに

添字 1 : 1次側流体

2 : 2次側流体

m : 金属壁

$x(t, u)$  : 温度  $^{\circ}\text{C}$

C : 比熱 kcal/kg  $^{\circ}\text{C}$

w : 重量流量 kg/sec

$\rho$  : 密度 kg/m<sup>3</sup>

U : 熱伝達係数 kcal/m<sup>2</sup> sec  $^{\circ}\text{C}$

A : 流路断面積 m<sup>2</sup>

S : 伝熱面積 m

$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$ ,  $Q_4 = Q_5 + Q_6$ ,  $Q_6 + Q_7 = Q_8 + Q_9$  が成り立つから, これらより次式を得る。

$$\frac{\partial x_1}{\partial t} + \frac{w_1}{A_1 \rho_1} \frac{\partial x_1}{\partial u_1} = - \frac{U_1 S_1}{C_1 A_1 \rho_1} (x_1 - x_m)$$

$$\frac{\partial x_m}{\partial t} = \frac{U_1 S_1}{C_m A_m \rho_m} (x_1 - x_m) - \frac{U_2 S_2}{C_m A_m \rho_m} (x_m - x_2)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial t} + \frac{w_2}{A_2 \rho_2} \frac{\partial x_2}{\partial u_2} = \frac{U_2 S_2}{C_2 A_2 \rho_2} (x_m - x_2)$$

上式よりモデルの基礎式として以下の3式を得る。

$$\frac{\partial x_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial x_1}{\partial u_1} = -H_1 (x_1 - x_m) \quad (21)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial t} + v_2 \frac{\partial x_2}{\partial u_2} = -H_2 (x_2 - x_m) \quad (22)$$

$$\frac{\partial x_m}{\partial t} = H_{m1} (x_1 - x_m) + H_{m2} (x_2 - x_m) \quad (23)$$

ここに

$v_1, v_2$  : 1次側, 2次側流速 m/sec

$$H_1 = \frac{U_1 S_1}{C_1 A_1 \rho_1}, \quad H_2 = \frac{U_2 S_2}{C_2 A_2 \rho_2}$$

$$H_{m1} = \frac{U_1 S_1}{C_m A_m \rho_m}, \quad H_{m2} = \frac{U_2 S_2}{C_m A_m \rho_m}$$

(21)と(22)は座標軸の方向が逆であるが、全く同じ形をしている。 $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_{m1}$  および  $H_{m2}$  は1次側, 2次側流体および金属壁各部の時定数ともいうべき定数であり, 各部の応答の早さを示す量であり [1/sec]の次元をもつ。また熱交換器の1次側と2次側の実際の長さ, すなわちシェルとチューブの長さは異なっている。しかし本モデルでは図1に示すようにその長さを同一としている。このようにモデル化するうえで熱交換の特性の変化を避けるために1次側, 2次側の伝熱面積が実際と変わらないように伝熱面巾  $S_1$ ,  $S_2$  で調節する。このように扱うことにより1次側, 2次側のセクションを同一に取ることができ, 計算が容易になる。

## 2.2 CSDT法の適用

(21)~(23)をハイブリッド計算機を用いて解く方法はいくつか考えられるが, まえがきで述べたようにCSDT法は偏微分方程式の有力な解法であるので, これを用いる。CSDT法による分布定数系のシミュレーション法については島崎らがくわしい検討を行なっている<sup>1)</sup>。そこでは2流体の場合について, 金属壁のダイナミックスが省略されるとき, 時間について後進差分にとった常微分方程式を用いている。またこのとき流れの方向が互に逆であるため, 計算のために互に他の流体の温度を用いるさいに1次側と2次側の流体温度の計算を時間軸をずらして行なうシリーズ計算と, 等価金属壁温度を用いて時間刻み巾  $\Delta t$  の間の金属壁温度の変化を無視するパラレル計算について検討している。

またVichnevetskyは偏微分方程式のシリアル計算法について検討し, 差分近似の際に前進差分, 後進差分の影響を除くパラメータを加えた式を提案し, これらを用いて1階, 2階の偏微分方程式が安定に解かれることを示した<sup>2)</sup>。

筆者らはシステムシミュレーションの時間的効率の点からパラレル計算法を用いることを考え, 計算の安定化および高精度化のためにはVichnevetskyの計算法が適していると考え, 基礎式をそれに従って変換した。

以下まずVichnevetskyの計算法につき概略を述べ, ついで基礎式のパラレル計算法を示す。

双曲型偏微分方程式

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -V \frac{\partial X}{\partial u} + g(X, u) \quad (24)$$

を境界条件

$$X(0, t) = X_0(t)$$

$$X(u, 0) = X_u(0)$$

のもとで解くことを考える。

$$t^i = i \Delta t$$

$$X^i(u) = X(u, t^i)$$

とおき, (24)を次のように差分近似する。

$$\frac{X^{i+1} - X^i}{\Delta t} \approx \theta \left[ -V \frac{dX^{i+1}}{du} + g(X^{i+1}, u) \right] + (1-\theta) \left[ -V \frac{dX^i}{du} + g(X^i, u) \right] \quad (25)$$

( 0 ≤ θ ≤ 1 )

(25)はθ=1のとき時間軸について後進差分, θ=0のとき前進差分の式となり, θの値が右辺の2項のウェイトを与える。(25)を次のように書換える。

$$\frac{dX^{i+1}}{du} + \frac{1}{\theta V} \left[ \frac{X^{i+1}}{\Delta t} - \theta \cdot g(X^{i+1}, u) \right] = \frac{X^i}{\theta V \Delta t} - \frac{1-\theta}{\theta V} \left[ V \frac{dX^i}{du} - g(X^i, u) \right] \quad (26)$$

さらに,

$$\frac{dX^{i+1}}{du} + \frac{1}{\theta V} \left[ \frac{X^{i+1}}{\Delta t} - \theta g(X^{i+1}, u) \right] = \frac{S^i}{\theta V \Delta t} \quad (27)$$

ここに

$$S^i = X^i - (1-\theta) \Delta t \left[ V \frac{dX^i}{du} - g(X^i, u) \right] \quad (28)$$

(28)よりS<sup>i</sup>は時刻 t = t<sup>i</sup> + (1-θ)Δt = t<sup>i+1-θ</sup> における X(u, t) の近似値であることがわかる。また(28)のiの代わりにi+1とおき(27)を入れると,

$$S^{i+1} = X^{i+1} + \frac{1-\theta}{\theta} (X^{i+1} - S^i) = S^i + \frac{1}{\theta} (X^{i+1} - S^i) \quad (29)$$

となり, X<sup>i+1</sup> が与えられると次の計算ステップで用いる S<sup>i+1</sup> が得られる。なお, (24)~(29)のXは温度の列ベクトル, gは熱的諸係数の列ベクトル, Vは流体速度を表わす対角行列である。

Vichnevetsky は求解中に計算の誤差が拡大することなく安定に(27)の解が求まる条件として, 特性方程式の根が負であることを示している<sup>3)</sup>。本報告で用いる(21), (22)を(24)~(29)に従って変形するとその条件が成立することがわかる。(次節参照)

次に基礎式(21)および(22)を変形して得られる式と(23)を差分化して得られる式とを示す。途中の計算は(24)~(29)と同じであるから省略する。ただし(23)はu方向の微分項がないので代数式に変換される。

$\frac{dx_1^{i+1}}{du_1} = -\frac{1}{\theta v_1} \left\{ \frac{x_1^{i+1}}{\Delta t} + \theta \cdot H_1(x_1^{i+1} - x_m^{i+1}) \right\} + \frac{1}{\theta v_1 \Delta t} S_1^i \quad (210)$
$\frac{dx_2^{i+1}}{du_2} = -\frac{1}{\theta v_2} \left\{ \frac{x_2^{i+1}}{\Delta t} + \theta \cdot H_2(x_2^{i+1} - x_m^{i+1}) \right\} + \frac{1}{\theta v_2 \Delta t} S_2^i \quad (211)$
$x_m^{i+1} = \frac{\Delta t \cdot \theta}{1 + \Delta t \cdot \theta (H_{m1} + H_{m2})} (H_{m1} x_1^{i+1} + H_{m2} x_2^{i+1}) + \frac{S_m^i}{1 + \Delta t \cdot \theta (H_{m1} + H_{m2})} \quad (212)$

ここに

$$\left. \begin{aligned} S_1^{i+1} &= S_1^i + \frac{1}{\theta} (x_1^{i+1} - S_1^i) \\ S_2^{i+1} &= S_2^i + \frac{1}{\theta} (x_2^{i+1} - S_2^i) \\ S_m^{i+1} &= x_m^i + \Delta t (1-\theta) \{ H_{m1} (x_1^i - x_m^i) + H_{m2} (x_2^i - x_m^i) \} \end{aligned} \right\} \quad (213)$$

(210)~(213)を計算する際に、2流体が向流であることからくる問題が生じる。すなわち(210)をハイブリッド回路で計算するとき、 $x_m^{i+1}$ 、 $S_1^i$ が必要であるが、 $S_1^i$ は(213)で前のステップにおいて計算できるのに対して、 $x_m^{i+1}$ は(212)により計算せねばならず、そのためには $x_2^{i+1}$ が必要である。また(211)の場合も同様に $x_1^{i+1}$ が必要であるが、 $u_1$ と $u_2$ は逆方向にとっているので $x_m^{i+1}$ は実際は計算できないことになる。これを解決するためにシリアル計算またはパラレル計算はどちらも $x_m^{i+1}$ を $x_m^i$ 、 $x_m^{i-1}$ の値などを用いて外挿して計算を進めているが、 $\Delta t$ を同じにとるとすれば(210)、(211)の計算が同時に行なわれる点からパラレル計算のほうが能率的である。以上より時間 $\Delta t$ の間の $x_m$ の変化を直線的であると仮定して(212)の代わりに次の外挿式を用いることにする。

$$x_m^{i+1} = x_m^i + \Delta x_m = x_m^i + (x_m^i - x_m^{i-1}) = 2x_m^i - x_m^{i-1} \quad (214)$$

(210)、(211)をアナログ回路で計算するためにスケーリングが必要であり、次のようにスケーリングファクタを定める。

$$T = \beta \cdot u \quad (T \text{はアナログ計算の積分時間})$$

$$X_i = \alpha \cdot x_i \quad (i=1, 2, m)$$

$$S_i = \alpha \cdot s_i \quad (i=1, 2)$$

これらより、

$$\frac{dX_1^{i+1}}{dT} = -\frac{1}{\beta \theta v_1} \left\{ \frac{X_1^{i+1}}{\Delta t} + \theta H_1 (X_1^{i+1} - X_m^{i+1}) \right\} + \frac{1}{\beta \theta v_1 \Delta t} S_1^i \quad (215)$$

$$\frac{dX_2^{i+1}}{dT} = -\frac{1}{\beta \theta v_2} \left\{ \frac{X_2^{i+1}}{\Delta t} + \theta H_2 (X_2^{i+1} - X_m^{i+1}) \right\} + \frac{1}{\beta \theta v_2 \Delta t} S_2^i \quad (216)$$

(212)~(214)はデジタル的に計算を行ない、(215)、(216)はアナログ回路を組んで演算する。次節にこれらの詳細を述べる。

### 2.3 アナログ回路およびデジタル計算部分

最初に前節に示した式のハイブリッド計算の手順のうちアナログ回路について検討する。

(215)と(216)は全く同じ形をしているので、(215)についてのみ考慮する。

(215)を1次系の標準形

$$\frac{dx}{dt} = ax + bu \quad (31)$$

で表わすと $a$ は

$$a = -\frac{1}{\beta \theta v_1} \left( \frac{1}{\Delta t} + \theta H_1 \right)$$

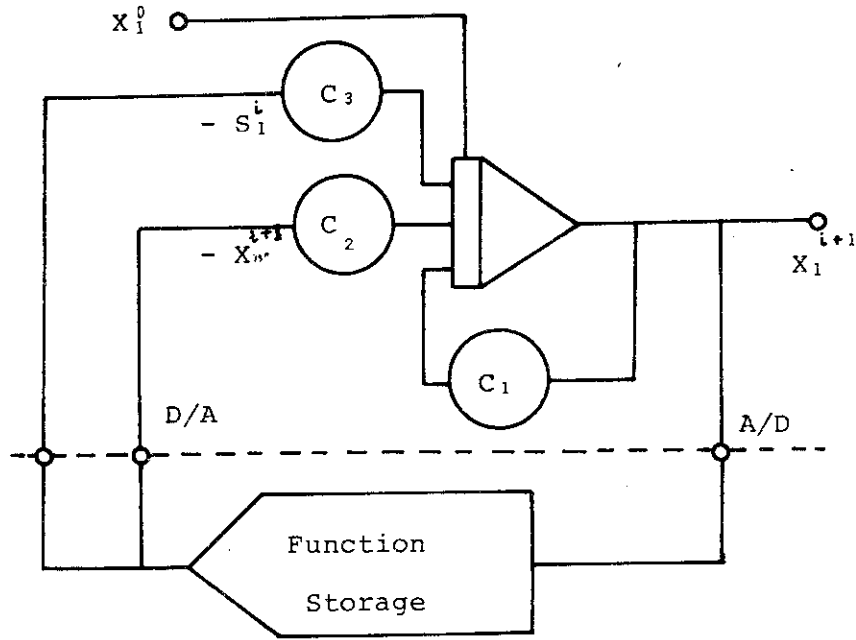
である。 $a$ は特性方程式の根であり明らかに負の値を持つからVichnevetskyが示した計算が安定に行なわれる条件を満たしている。

また島崎らは(215)において $\theta=1$ としたときの式について、その右辺の各項を連続量として扱う場合と不連続量すなわちA/D, D/A変換器を通して扱う場合について検討している<sup>1)</sup>。そしてむだ時間系として正確にシミュレートされるための条件と、それに熱伝達が加わった場合はより安定に解析できることを述べている。さらに(215)で $\theta=1$ としたとき、 $S_1^i = X_1^i$ は連続量として再現しては正確な分布のシミュレーションはかえってできにくくなること、しかし $X_m^{i+1}$ はもとの波形に近いものを再現した方がよいとしている。

以上のことを考慮して我々は図2に示すアナログ回路を用いた。実際には(215)と(216)のために図2の回路を2組用いる。要素の割りつけは付録Dに示す。

つぎに計算の全体の制御と、(213), (214)の計算はデジタル的に行なわれるのでそれについて述べる。(213), (214)は代数式であり $x_1^{i+1}$ ,  $x_2^{i+1}$ をA/D変換器を通してデジタル化すれば容易に計算できるが前述の波形の再現性が問題になる。あるサンプリング間隔 $\Delta T$ でA/D変換した値に基づいて $S_1^{i+1}$ ,  $S_2^{i+1}$ および $X_m^{i+1}$ をデジタル計算して、次回のアナログ計算にその値をそのままD/A変換して積分器への入力にしたとする。これらの値は階段状に変化するのでそれが積分器に入力されると図3に示す斜線の部分の値が積分されないことになってしまう。これをなくすには $S_1^{i+1}$ ,  $S_2^{i+1}$ ,  $X_m^{i+1}$ を適当に補正してやらねばならないが、ここでは $x_1^{i+1}$ ,  $x_2^{i+1}$ および $x_m^{i+1}$ の軸方向分布が定常状態ではほぼ直線的(3.2節参照)であるので $\Delta T$ のサンプリングごとの値を直線で近似して、その中点の値を求めそれを $S_1^{i+1}$ ,  $S_2^{i+1}$ ,  $X_m^{i+1}$ としてD/A変換器を通して積分器に加えることにする。

CSDT法では1回の積分により各変数の軸方向分布が得られ、その時間的变化を求めるには積分をくり返さねばならない。そのためアナログ回路の初期設定、積分、積分停止の制御をロジック回路およびデジタルプログラムでおこなう。デジタルプログラムの内容は付録Dに示す。



$$C_1 = \frac{1 + \theta \Delta t \cdot H_1}{\beta \cdot \theta \cdot v_1 \Delta t}, \quad C_2 = \frac{H_2}{\beta \cdot v_1}, \quad C_3 = \frac{1}{\beta \cdot \theta \cdot v_1 \cdot \Delta t}$$

Fig. 2 Analogue Part of CSDT Computation

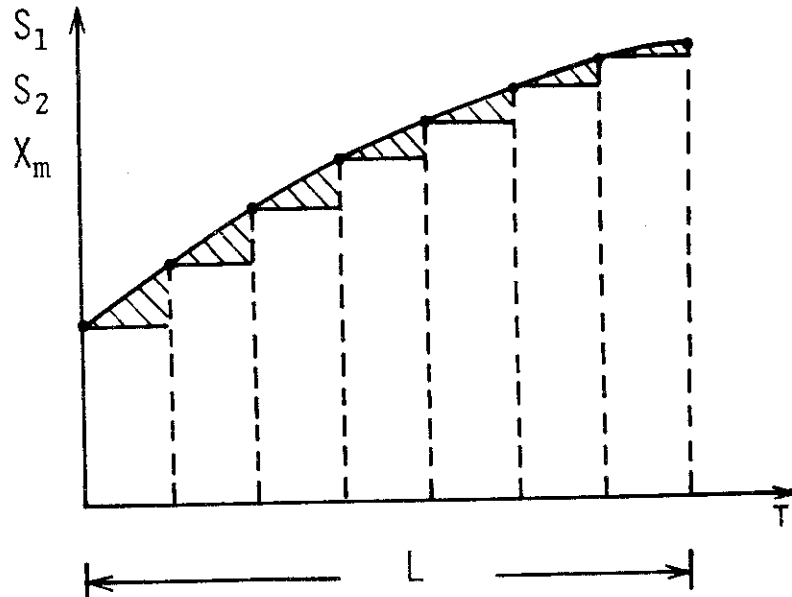


Fig. 3 Errors by A/D, D/A Conversion

### 3 熱交換基本モデルの計算

#### 3.1 計算パラメータ

(213)~(216)の各パラメータの値を与えれば計算が行なわれる。パラメータのうち $\beta$ ,  $\theta$ ,  $\Delta t$ 以外の値は表1に示したHX Rの仕様から決定される。また式中には出てきていないが $S_1^i$ ,  $S_2^i$  および  $X_m^{i+1}$  はD/A変換器を通して与えられ、1回の積分に要する時間を軸方向にサンプリングする点数 $n$ で割った値すなわちサンプリング間隔 $\Delta T$ も計算に関するパラメータとして決める必要がある。

従ってハイブリッド計算で問題を解くことによって派生するパラメータはこの場合 $\beta$ ,  $\theta$ ,  $\Delta t$  および  $n$ である。これらのパラメータは計算自体の精度に直接影響を与えるものであり、適切に決定されなければならない。しかしこれらを決定するための理論的検討はあまり報告されておらず、またこれらの値は一面では与えられた問題ごとに具体的な計算を行なって精度を比較したうえで決定されるべき性格のものである。

我々はCSDT法についての検討という観点から、 $\beta$ ,  $\theta$ ,  $\Delta t$  および  $n$ を変化させたとき、計算結果がどのように変化するかを実際に計算して検討することにした。従って表1に示したデータの値そのものの精度はここでは問題にしていない。

ここでスケールリングファクタ $\alpha$ ,  $\beta$ について考察する。 $\alpha$ は $x_i$  ( $i=1, 2, m$ ),  $S_i$  ( $i=1, 2$ )の値とアナログ回路の使用電圧範囲が広いほど計算精度が向上するのは明らかであるから、 $\alpha$ は $x_i$ ,  $S_i$ の上下限值に基いてできるだけ大きい値を用いることが望ましい。また $\beta$ はHX Rの軸長 $L$ と1回の積分時間とを結びつけるものである。計算能率の点からは積分時間はできるだけ短いほうがよい。しかしアナログ計算中にA/D, D/A変換器はサンプリング間隔 $\Delta T$ 毎に入出力を行なわねばならず、この入出力のデジタル処理に必要な時間より $\Delta T$ を小さくすることはできない。デジタル処理に必要な時間は用いるA/D, D/Aのチャンネル数によって異なるが、予備的な計算によればここではほぼ2msec/回以下であることがわかった。一方これは純粋にハードウェアの精度に依存することであるが、積分時間が変わったときの計算誤差の問題がある。このことについても予備的な計算を行なって、積分時間を100倍程度変えて演算しても結果の差はほぼ0.1%以下であった。これは他のパラメータによる影響よりも1桁低い値であるので、我々は $\Delta T$ が2msec以下にならない程度の短い積分時間を定めそれに応じた小さい $\beta$ を用いることにした。

以上より残った計算精度に影響するパラメータはHX Rの空間軸方向のサンプリング点数 $n$ (点)、時間軸方向の刻み巾 $\Delta t$ (sec) および $\theta$ である。いくつかの予備的な計算に基いて、我々が望む精度と計算効率が得られそうなパラメータの範囲を定めて、それらを組合わせて計算を行なうことにした。これらのパラメータの値を表2に示す。

#### 3.2 空間温度分布の計算

空間温度分布はHX Rの軸にそって1次側および2次側の流体温度が変化する様子を示すものであり、次の過渡応答を計算する前に、計算の定常的な誤差を調べることができる。計算は前述のパラメータ $\Delta t$ ,  $n$ および $\theta$ を各種組合わせて行ない、定格値の入口温度に対する理論空

間温度分布を初期値として刻み  $\Delta t$  で 200 sec 経過した後に分布をプロットしている。図 4 ~ 6 にその結果を示す。曲線のみでは誤差の大きさが十分わからないので表 3 ~ 表 5 に出口温度の理論値と計算値とをまとめて示す。

### 3.3 過渡応答の計算

3.2 で計算した結果の詳しい検討は次節に述べるが、これらのうち比較的精度がよいと思われるパラメータの組合わせを選び、それらの過渡応答を計算した。過渡応答を得るために対象とする系に加える入力には種々のものがあるが、ここではステップ入力を用いた。大きいステップ入力が現実の系に加わることは一般に少なく、その点から言えばステップ応答は実際的でない面もあるが、系の遅れ時間、速応性などについて明確な判断ができ、過渡応答後の定常値の比較も容易である点からステップ入力を選んだ。

実際の計算は次のように行なった。まず初期の温度分布を与えるため予め長い時間 (約 300 sec) にわたって一定入口温度を系に加えて空間温度分布が安定した時の値を求めておく。これからはじめて 50 sec 後にステップ状の入口温度変化を 1 次側または 2 次側に加える。ステップは 100°C の上昇又は下降とするが、この大きさには特に意味はなく、応答の状態が十分にわかるように大きいステップを選んだ。系はほぼ 150 sec 程度で新しい定常状態に達するので 200 sec までの応答を計算した。

比較のためのデジタル計算値を同じスケールでプロットしたので、各時間における誤差の大きさを知ることができる。デジタル計算のパラメータは付録 B に述べているような検討によって得られたものを用いている。

ハイブリッド計算のパラメータの組合わせを表 6 に、ハイブリッド及びデジタル計算結果のプロットを図 7 ~ 図 9 に示す。またステップ応答後に定常状態になった時の 1 次側および 2 次側の出口温度の理論値と計算値を表 6 にあわせて示している。なお図 7 および図 8 の (a) は 1 次側入口温度の 100°C 上昇、(b) は 1 次側入口温度の 100°C 下降、(c) は 2 次側入口温度の 100°C 上昇、(d) は 2 次側入口温度の 100°C 下降、図 9 (a) ~ (d) は 1 次側入口温度の 100°C 上昇についてのステップ応答を表わしている。図はいずれも上の曲線が 2 次側出口温度、下の曲線が 1 次側出口温度を表わし、無印が比較のためのデジタル計算値、×印がハイブリッド計算値である。

Table 2 Parameter values in CSDT calculation

$H_1$	0.2223	$H_2$	1.987	$\frac{1}{\text{sec}}$
$H_{m1}$	0.7321	$H_{m2}$	1.732	
$\alpha$	0.007 ( $X_1, X_2$ is normalized by 470°C)			$\frac{1}{^\circ\text{C}}$
$\beta$	0.6 ~ 0.2			$\frac{\text{sec}}{\text{m}}$
$n$	256, 128, 64, 32, 16			points
$\Delta t$	10.0, 5.0, 2.0, 1.0, 0.5, 0.25			sec
$\theta$	1.0, 0.7, 0.6			—



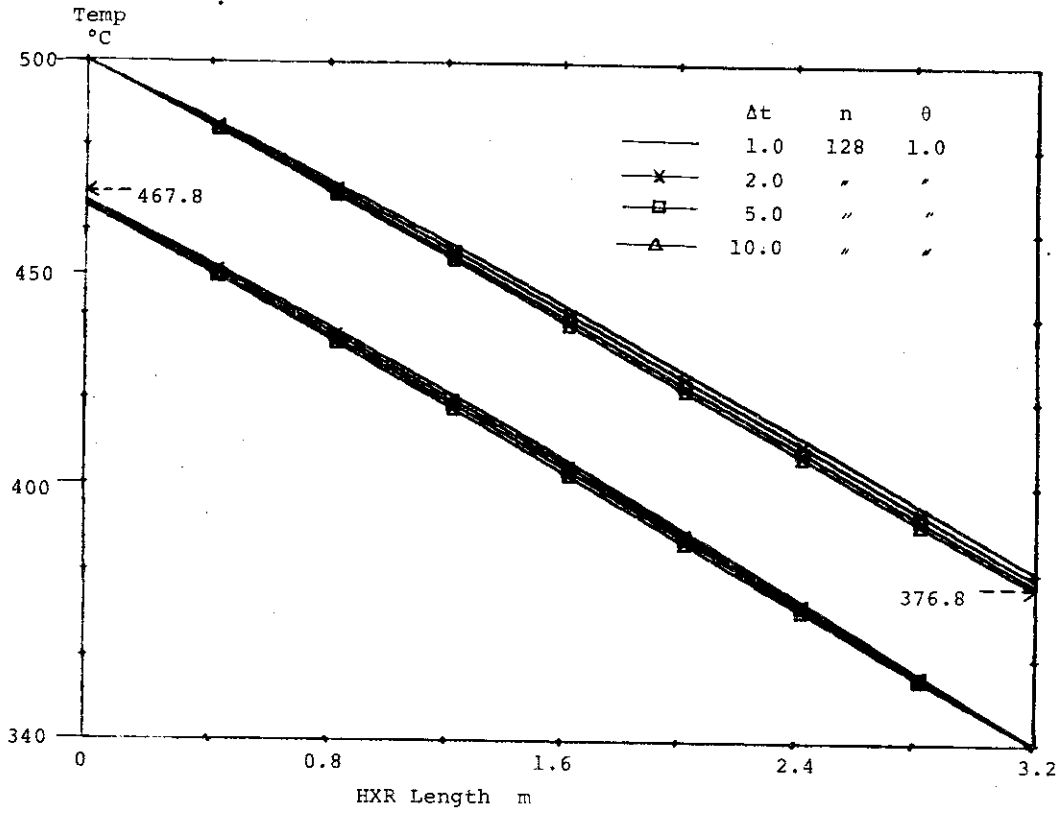


Fig. 4(a) Influences of  $\Delta t$  to Static spatial Temperature Distribution

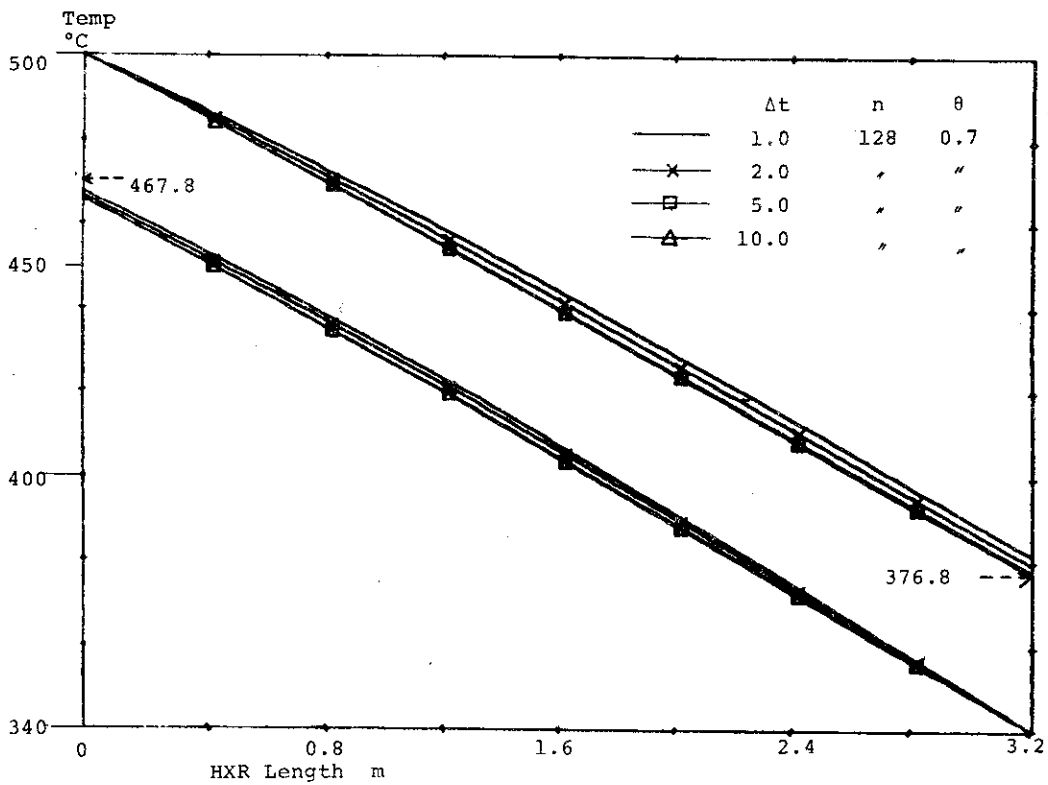


Fig. 4(b)

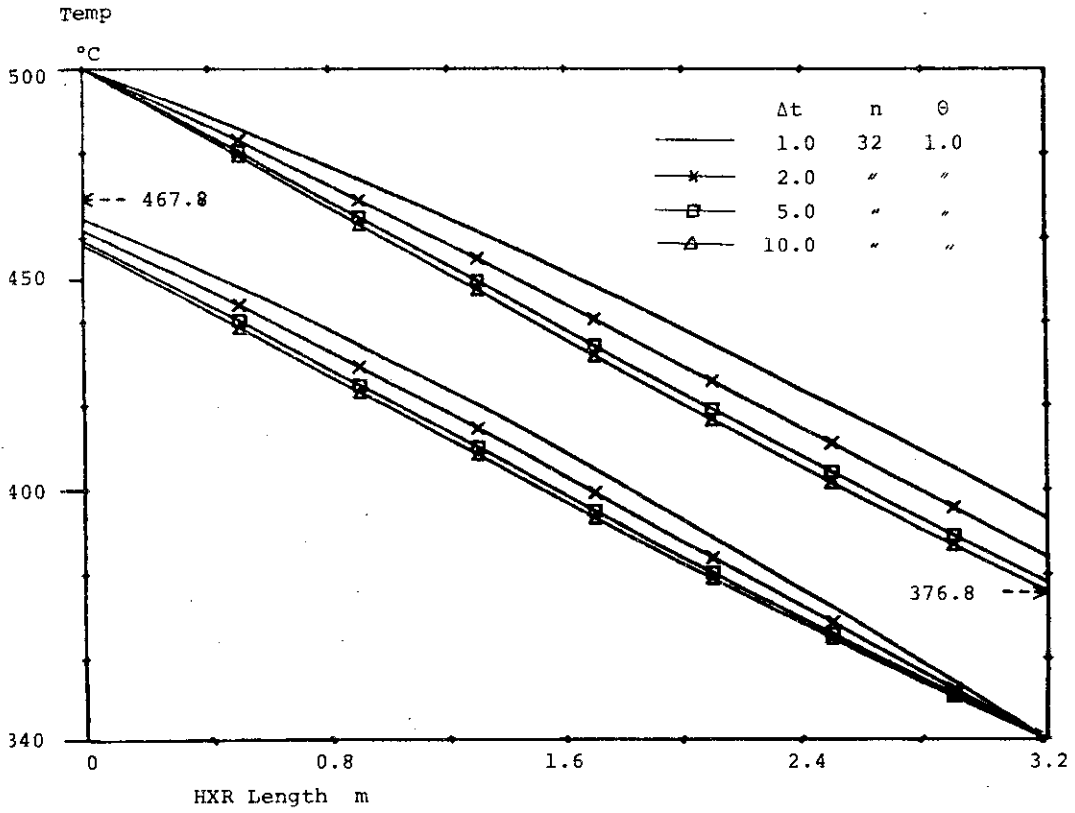
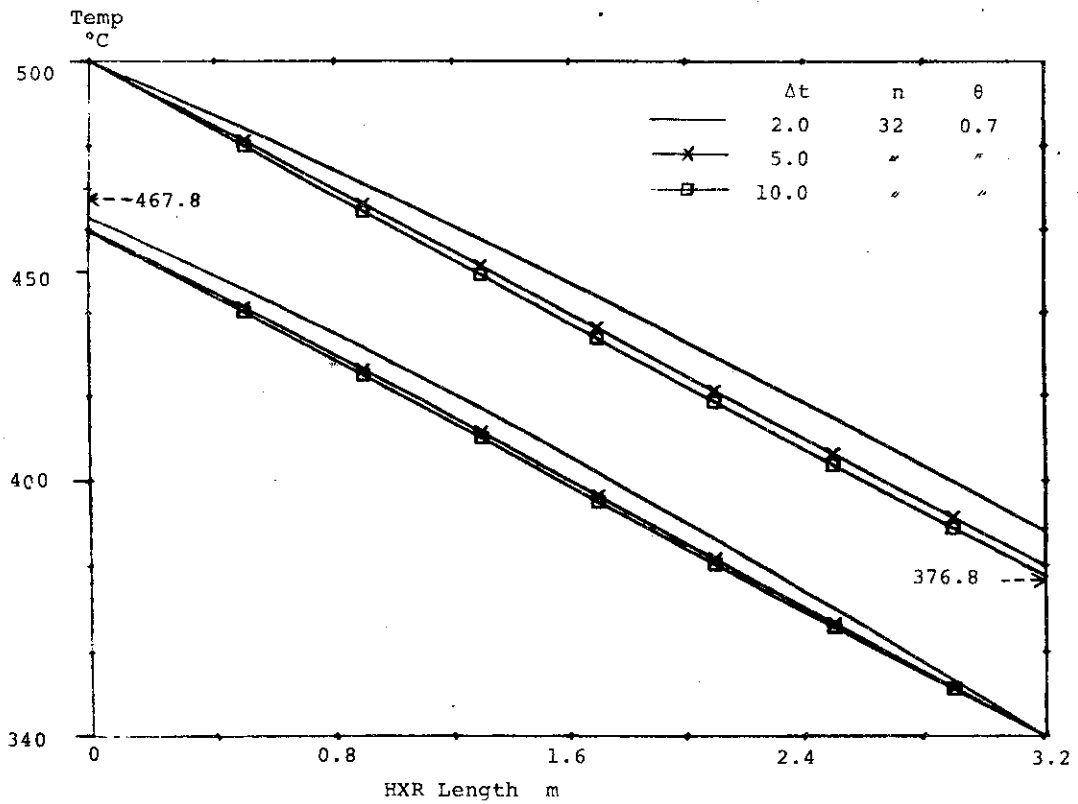


Fig. 4 (c)



(d)

Fig.4 (d) Influences of  $\Delta t$  to Static Spatial Temperature Distribution

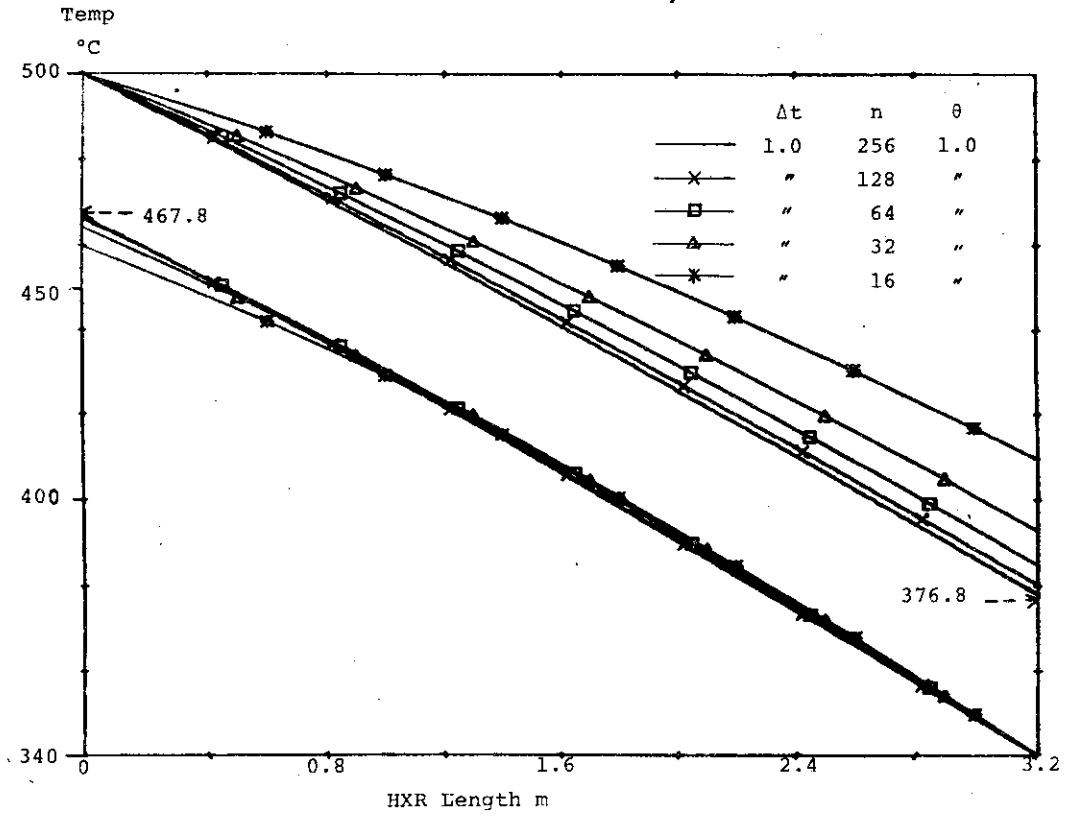


Fig. 5 (a) Influences of  $n$  to Static Spatial Temperature Distribution

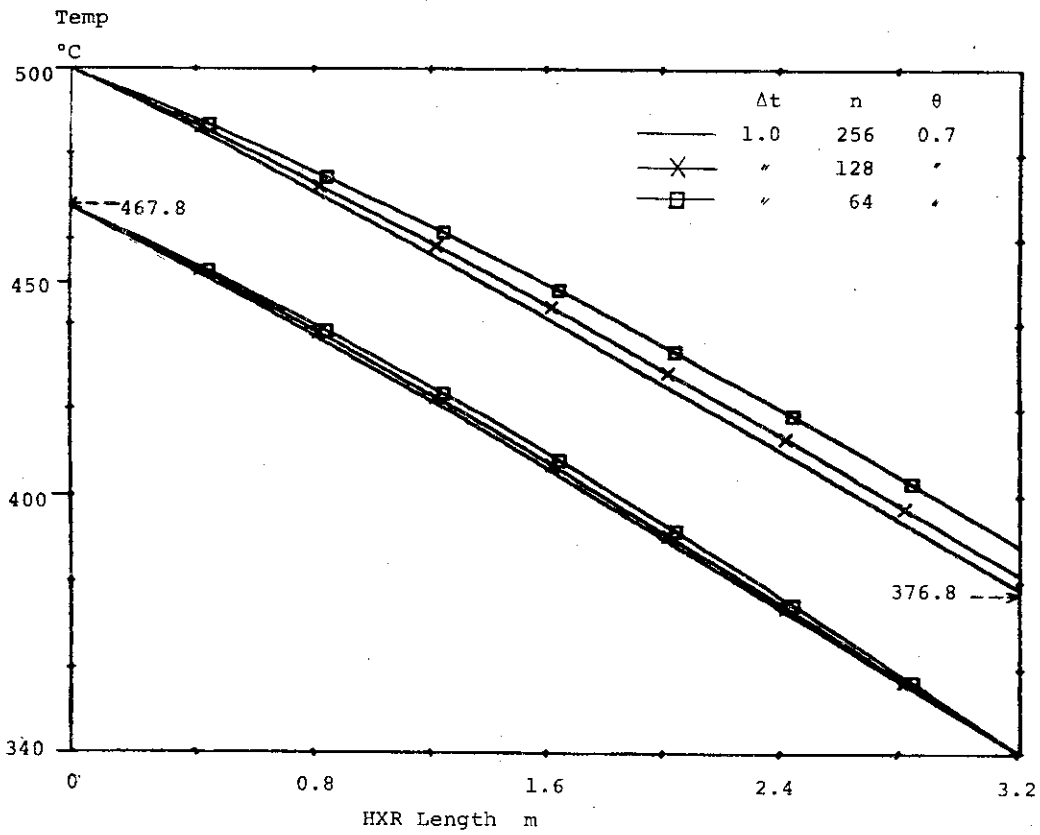


Fig. 5 (b)

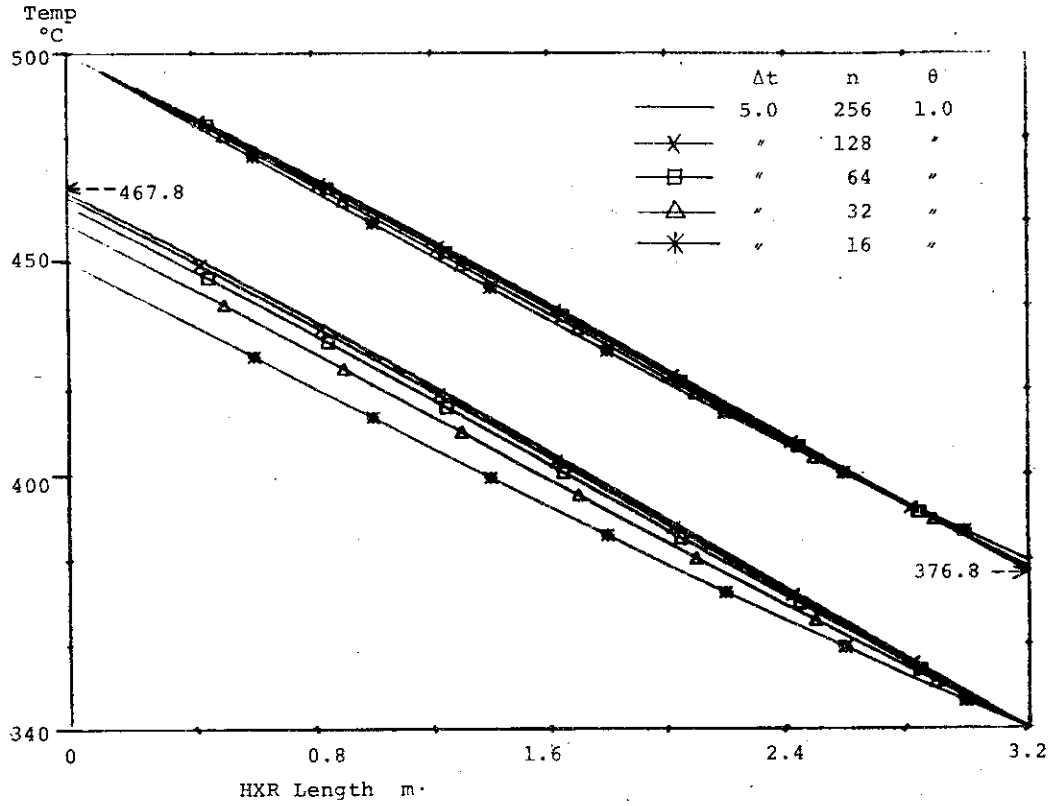
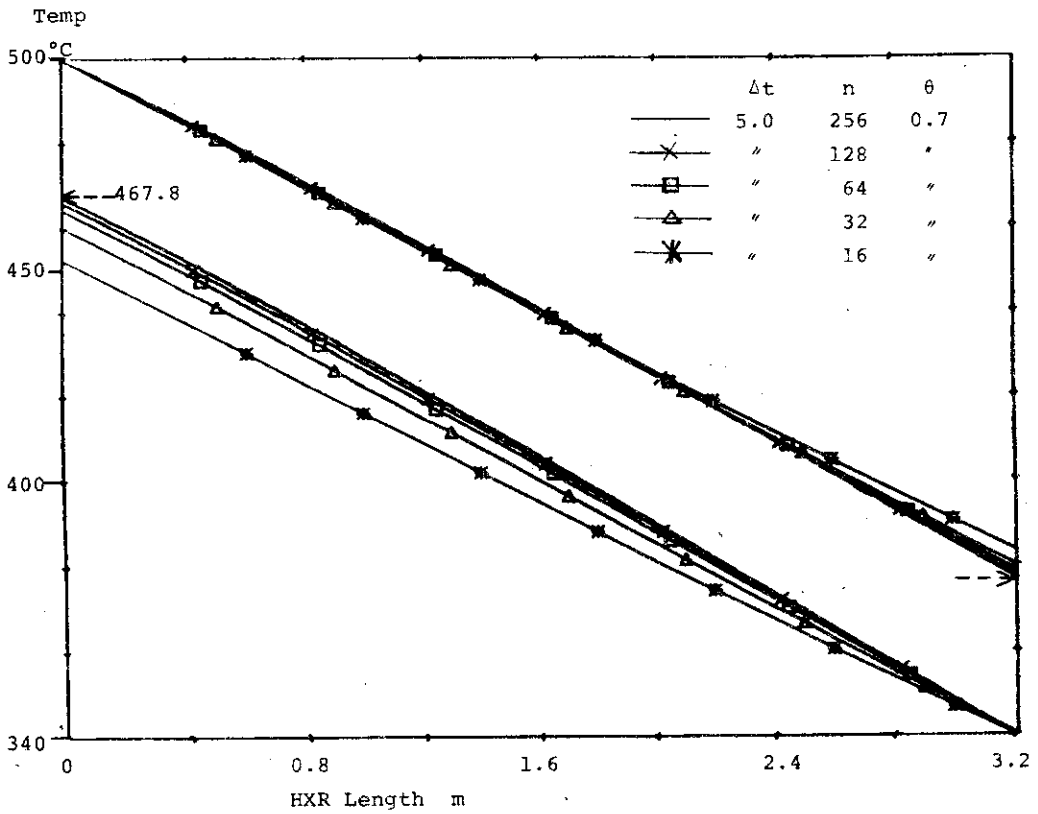


Fig. 5 (c)



(d)

Fig.5 (d) Influences of  $n$  to Static Spatial Temperature Distribution

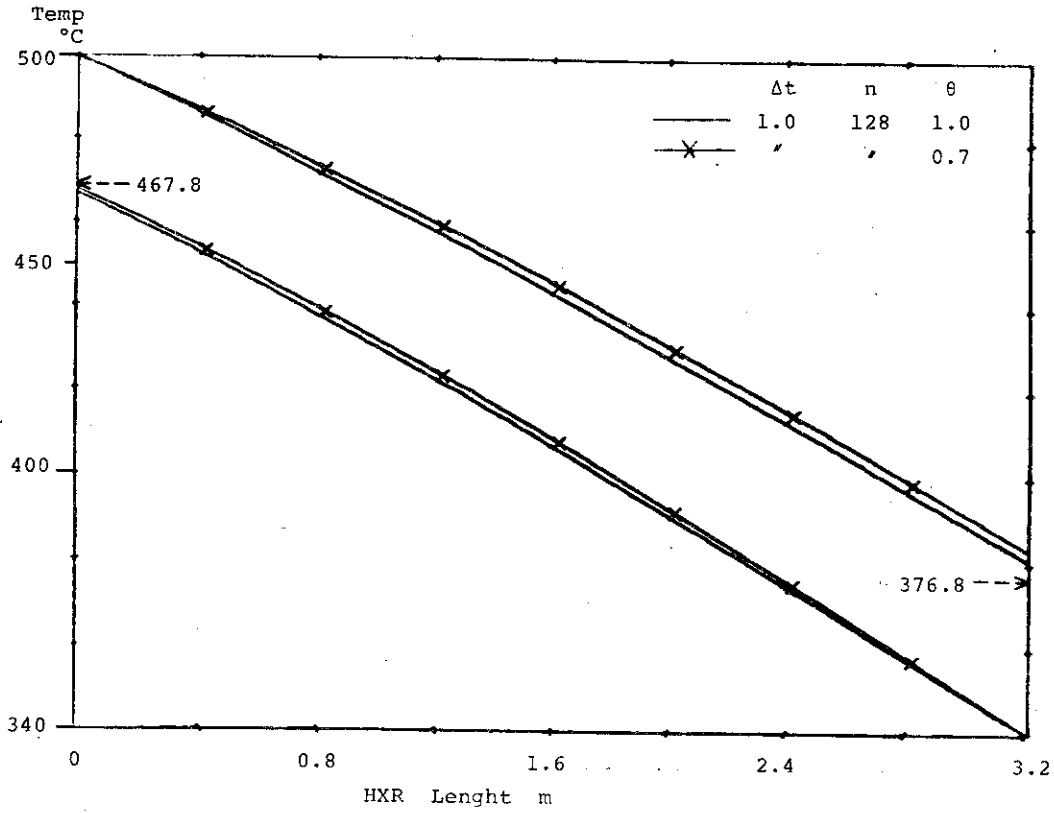


Fig. 6 (a) Influences of  $\theta$  to Static Spatial Temperature Distribution

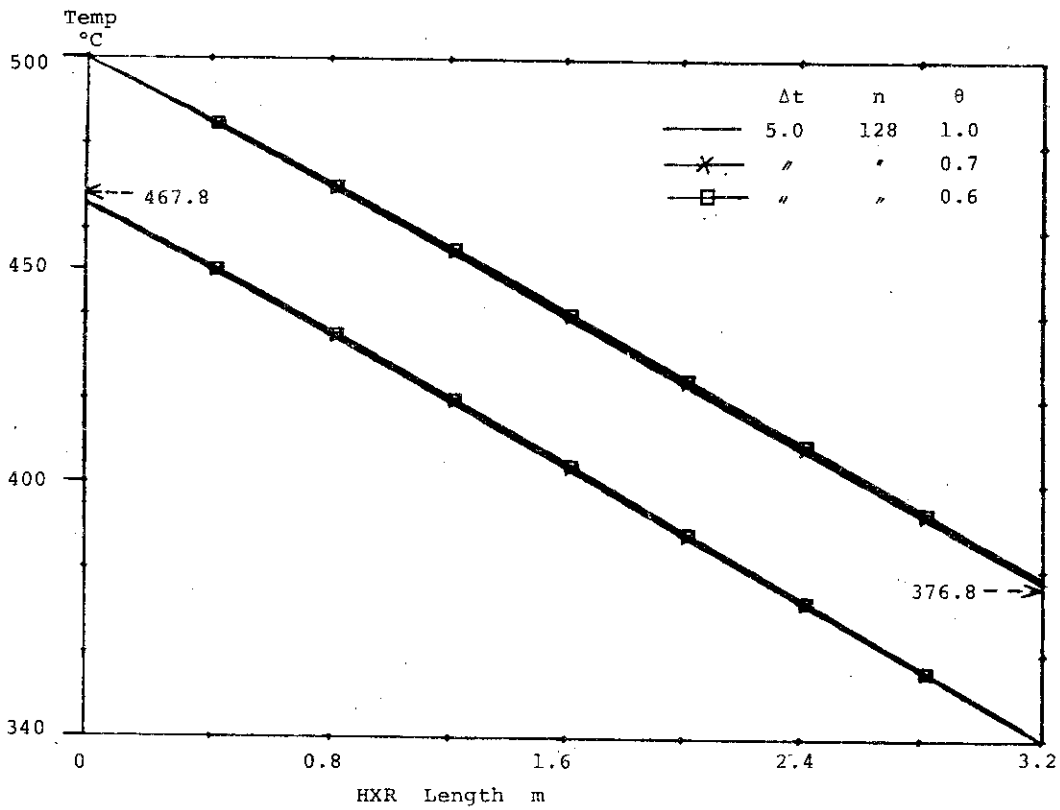


Fig. 6 (b)

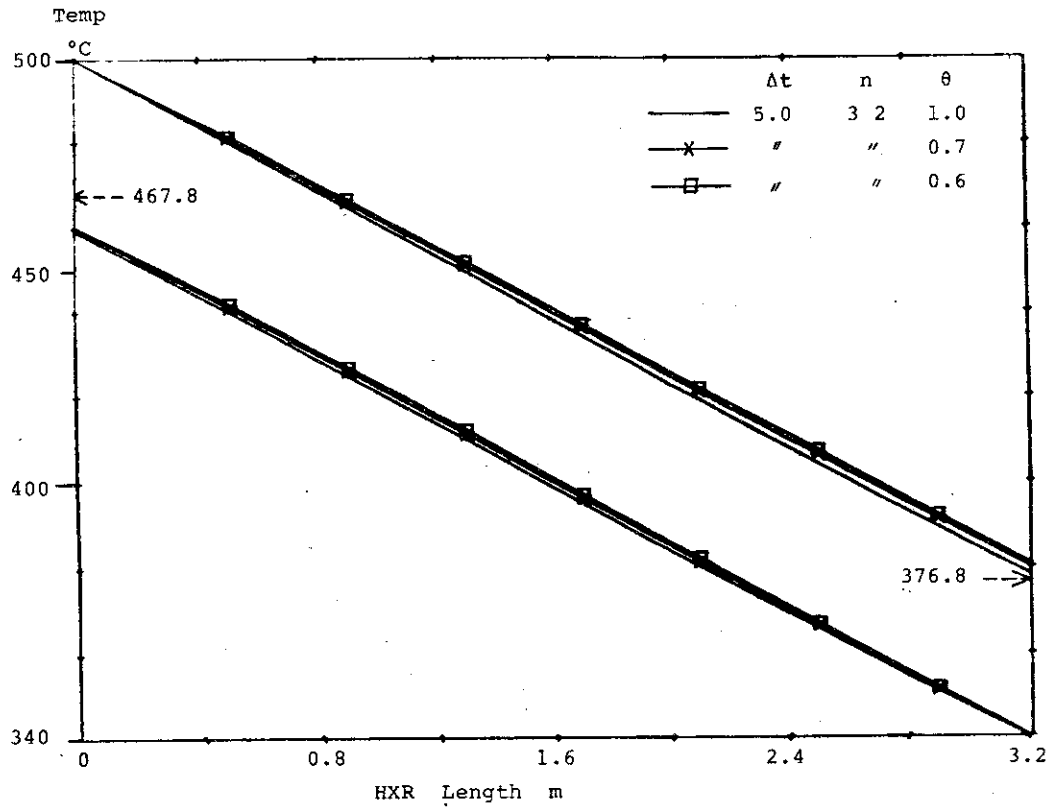
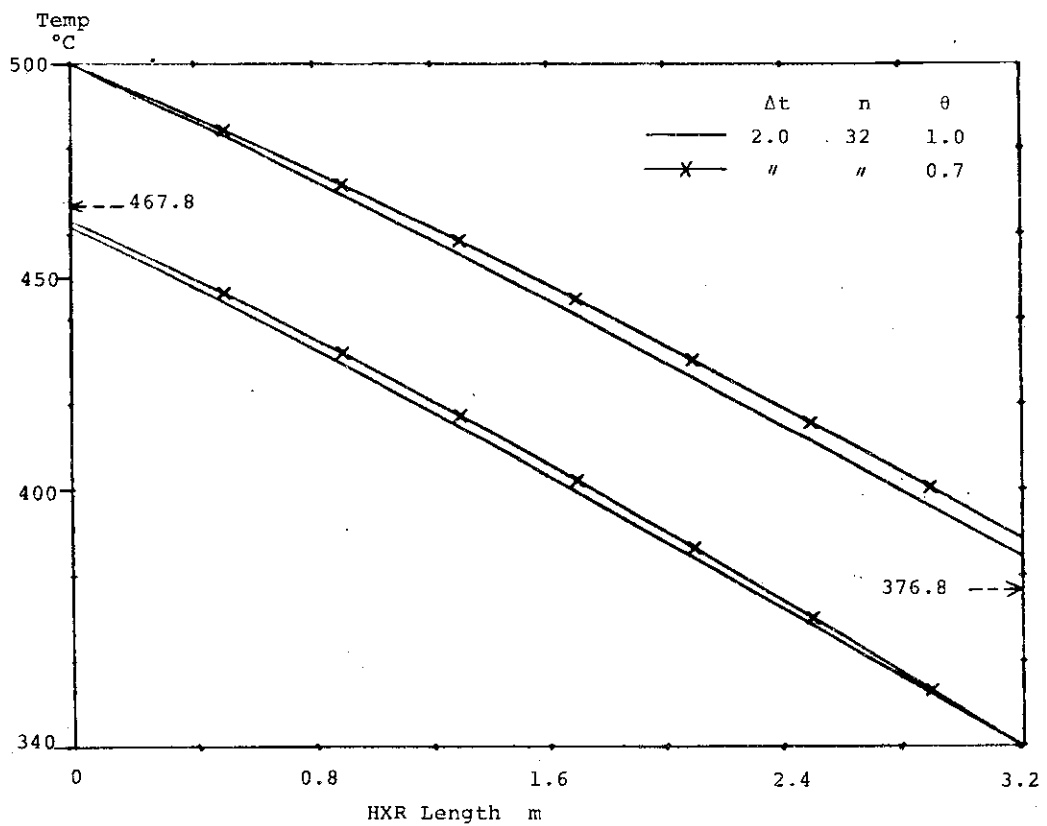


Fig. 6 (c)



(d)

Fig.6 (d) Influences of  $\theta$  to Static Spatial Temperature Distribution

Table 3 Influences of  $\Delta t$  to Outlet Temperatures

parameter			outlet temperature °C		error °C	
$\Delta t$	n	$\theta$	primary	secondary	primary	secondary
1.0	128	1.0	380.4	466.7	3.6	-1.1
2.0	"	"	378.7	466.1	1.9	-1.7
5.0	"	"	377.4	465.6	0.6	-2.2
10.0	"	"	376.5	465.3	-0.3	-2.5
1.0	"	0.7	381.7	467.6	4.9	-0.2
2.0	"	"	379.5	466.7	2.7	-1.1
5.0	"	"	377.8	465.8	1.0	-2.0
10.0	"	"	377.4	465.9	0.6	-1.9
1.0	32	1.0	393.5	464.4	16.7	-3.4
2.0	"	"	384.2	461.6	7.4	-6.2
5.0	"	"	378.1	459.2	1.3	-8.6
10.0	"	"	376.0	458.2	-0.8	-9.6
2.0	"	0.7	388.1	462.9	11.3	-4.9
5.0	"	"	380.0	460.0	3.2	-7.8
10.0	"	"	377.1	458.6	0.3	-9.2
theoretical value			376.8	467.8	—	—

Table 4 Influences of n to Outlet Temperatures

parameter			outlet temperature °C		error °C	
$\Delta t$	n	$\theta$	primary	secondary	primary	secondary
1.0	256	1.0	378.3	467.1	1.5	-0.7
"	128	"	380.5	466.7	3.7	-1.1
"	64	"	385.0	466.1	8.2	-1.7
"	32	"	393.0	464.2	16.2	-3.6
"	16	"	409.6	459.8	32.8	-8.0
"	256	0.7	378.4	467.5	1.6	-0.3
"	128	"	381.7	467.8	4.9	0.0
"	64	"	388.5	467.6	11.7	-0.2
5.0	256	1.0	377.2	466.8	0.4	-1.0
"	128	"	377.3	465.6	0.5	-2.2
"	64	"	377.5	463.6	0.7	-4.2
"	32	"	378.2	459.2	1.4	-8.6
"	16	"	379.8	450.4	3.0	-17.4
"	256	0.7	377.4	467.4	0.6	-0.4
"	128	"	377.7	465.9	0.9	-1.9
"	64	"	378.4	463.9	1.6	-3.9
"	32	"	380.0	460.0	3.2	-7.8
"	16	"	383.5	452.2	6.2	-15.6
theoretical value			376.8	467.8	—	—



Table 5 Influences of  $\theta$  to Outlet Temperatures

parameter			outlet temperature °C		error °C	
$\Delta t$	n	$\theta$	primary	secondary	primary	secondary
1.0	128	1.0	381.0	467.3	4.2	-0.5
"	"	0.7	383.0	468.1	6.2	0.3
5.0	"	1.0	377.8	466.0	1.0	-1.8
"	"	0.7	376.8	467.8	0.0	0.0
"	"	0.6	378.4	466.1	1.6	-1.7
"	32	1.0	378.2	459.1	1.4	-8.7
"	"	0.7	380.0	459.8	3.2	-8.0
"	"	0.6	381.0	460.3	4.2	-7.5
2.0	"	1.0	388.7	463.2	11.9	-4.6
"	"	0.7	384.4	461.8	7.6	-6.0
theoretical value			376.8	467.8	—	—

Table 6 Parameter of Step Response and Static Outlet Temperatures

theoretical value		step input	outlet temperature °C		error °C				
			primary	secondary					
		A	400.0	547.6					
		B	353.8	387.9					
		C	453.8	487.9					
		D	300.0	447.6					
hybrid computation		step input	outlet temperature °C		error °C				
Fig.no.	Δt		n	θ		primary	secondary		
Fig.7	(a)	0.25	256	1.0	400.6	547.3	0.6	-0.3	
	(b)	"	"	"	353.6	388.0	-0.2	0.1	
	(c)	"	"	"	453.4	486.6	-0.4	-1.3	
	(d)	"	"	"	300.9	447.3	0.9	-0.3	
Fig.8	(a)	0.5	128	1.0	401.1	548.1	1.1	0.5	
	(b)	"	"	"	353.9	388.3	0.1	0.4	
	(c)	"	"	"	453.9	487.5	0.1	-0.4	
	(d)	"	"	"	301.1	447.6	1.1	0.0	
Fig.9	(a)	0.5	500	1.0	395.4	547.2	-4.4	-0.4	
	(b)	"	256	0.7	395.7	544.9	-4.3	-2.7	
	(c)	"	128	0.7	393.8	544.0	-6.2	-3.6	
	(d)	"	64	1.0	404.4	548.8	4.4	1.2	
A : primary inlet temperature 100 °C up		C : secondary inlet temperature 100 °C up							
B : down		down		D :		down		down	

## 4 計算結果の検討

### 4.1 空間温度分布

空間温度分布の初期値として理論温度分布を与えて計算しているから、計算の進行に伴う温度分布の変動は計算法に起因する。計算上のパラメータ  $\Delta t$ ,  $n$ ,  $\theta$  について、その影響を考察し、計算結果と対応させる。

#### 1) $\Delta t$ の影響

定常な空間温度分布においては  $\Delta t$  の影響は本質的にはないはずであるが計算結果では、 $\Delta t$  を変えると空間温度分布が変わってくる。しかし、これは CSDT法の計算上で生じる連続量と不連続量の差にもとづく問題であり、CSDT法では、定常空間温度分布の計算に、本来  $\Delta t$  の影響をもたない。ここでは、不連続波形の処理の仕方によっては、本来、影響のないはずのパラメータでも影響が現われる例として、あえてとりあげた。以下、詳しく述べる。

(213), (215) において、 $\theta = 1$  とすると、 $S_1^i = X_1^i$  であるから

$$\frac{dX_1^{i+1}}{dT} = -\frac{1}{\beta v_1 \Delta t} (X_1^{i+1} - X_1^i) - \frac{H_1}{\beta v_1} (X_1^{i+1} - X_m^{i+1}) \quad (41)$$

(41) を実際に計算するとき、 $X_1^{i+1}$  は連続的に、 $X_1^i$ ,  $X_m^{i+1}$  は Function Storage 機能を用いてデジタル値を D/A 変換して階段状に変化する関数として与えられる。図 3 に示したようにこれによる誤差が生じるとすれば、1 次側の温度  $X_1^i$  は高温から低温へ変化するので、(41) の積分の途中では  $X_1^{i+1} \leq X_1^i$  となり、右辺第 1 項は 0 又はわずかに正の値をとることになる。これにより  $X_1^{i+1}$  の出口温度は 1 回前の積分の値よりも高くなることが考えられる。このとき  $\Delta t$  が分母に入っているので、 $\Delta t$  が大きいほどこの誤差は小さくなる。一方  $x_m^{i+1}$  を考えると、 $\theta = 1$  のとき

$$x_m^{i+1} = \frac{1}{1 + \Delta t (H_{m1} + H_{m2})} \{ x_m^i + \Delta t (H_{m1} x_1^{i+1} + H_{m2} x_2^{i+1}) \} \quad (42)$$

であり  $x_2^{i+1}$  が一定と仮定すれば、 $x_1^{i+1}$  が高くなると、 $x_m^{i+1}$  は  $x_m^i$  より高くなるがその上昇分は  $x_1^{i+1}$  の上昇分より小さく、 $\Delta t$  が小さいほど小さい。(41) のくり返し計算によって  $X_1^{i+1}$  の出口温度が理論値より  $\epsilon_1$  だけ高い値に落ちついたとする。このとき (42) において  $X_m^{i+1}$  が  $\epsilon_m$  だけ高い値になったとすると、

$$\epsilon_m = \frac{1}{1 + \Delta t (H_{m1} + H_{m2})} \{ \epsilon_m + \Delta t H_{m1} \epsilon_1 \} \quad (43)$$

となり、

$$\epsilon_m = \frac{H_{m1}}{H_{m1} + H_{m2}} \epsilon_1 \quad (< \epsilon_1)$$

である。

同様に (213), (216) において  $X_2^{i+1}$  と  $x_m^{i+1}$  の誤差を考えると、2 次側の温度  $X_2^{i+1}$  は低温から高温へ変化するので  $X_2^{i+1} \geq X_2^i$  となり、 $X_2^{i+1}$  の出口温度は 1 回前の積分の値よりも低くなると思われる。 $X_2^{i+1}$  の出口温度が理論値より  $\epsilon_2$  だけ低い値に落ちついたとき  $X_m^{i+1}$  が  $\epsilon'_m$  だけ低い値になったとすると、

$$\epsilon'_m = \frac{H_{m2}}{H_{m1} + H_{m2}} \epsilon_2 \quad (< \epsilon_2)$$

となる。

以上より理論定常温度分布を初期値として計算をするとき、1次側出口温度は高いほうへ、2次側出口温度は低いほうへずれる可能性があるが、その傾向は図4にもあらわれている。

#### ii) n の影響

前述のFunction Storageによる $X_1^i, X_2^i$ の階段状変化と、 $X_1^{i+1}, X_2^{i+1}$ の連続積分との関係から、nが大きいほど、すなわちHX R軸方向の刻み巾が小さいほど誤差が小さくなることは明らかである。表4の誤差の値によればnが16, 32, 64と変わるにつれて精度は上昇するが、上昇の割合はnが大きくなるにつれて鈍くなっていく。その様子を図10に示す。従って、これらの結果を参考にして要求される計算精度と計算の効率とを考えあわせてnを選ぶ必要がある。

#### iii) $\theta$ の影響

(213)に示したように $S_1^{i+1}, S_2^{i+1}$ は $S_1^i$ と $x_1^{i+1}$ または $S_2^i$ と $x_2^{i+1}$ に重みをかけて加算した形をしている。そして $x_1^{i+1}, x_2^{i+1}$ の値が時間とともに変動するとき $\theta$ が1に近いほど $S_1^{i+1}, S_2^{i+1}$ に加わる変動の値は小さくなる。これは $\theta=1$ のとき $S_1^{i+1}=x_1^{i+1}$ 、 $\theta=0.5$ のとき $S_1^{i+1}=2x_1^{i+1}-S_1^i$ となることから明らかである。空間温度分布の定常値計算のさいは $x_1^{i+1}$ と $S_1^i$ または $x_2^{i+1}$ と $S_2^i$ との差はハイブリッド計算に起因する誤差のみである。図6および表5から $\theta$ の変化に伴う精度の変化を調べても $\Delta t$ やnが変わったときの影響よりも小さく、その傾向は一定していない。従って $\theta$ の値の選択は過渡応答のほうから行なわれるべきであろう。

図4～6の結果より精度がよいと思われるパラメータとして我々は $\Delta t=0.25, 0.5, 1.0$ 、 $n=500, 256, 128, 64$ 、 $\theta=1.0, 0.7$ を選んだ。これらを組合わせて過渡応答の計算を行なった。

## 4.2 過渡応答

前節で選んだパラメータの組合わせについて全て計算を行なったが、図7～9にはその一部を示している。定常温度分布の計算により、計算精度に最も影響するのはnであり、次いで $\Delta t$ が影響し<sup>\*</sup>、 $\theta$ の変化による結果の変動は一定せずその幅も比較的小さいことがわかった。ここでは定常値とともにステップ応答の途中の値に対するこれらのパラメータの影響をしらべる。計算結果のうち図7および図8が精度がよかったものであり、図9は比較のためつけ加えておいたので、図7, 8を主として検討する。

1) 計算機のアナログ要素の個々の精度はかなり良い(フルスケール直線性0.1%以下)が、A/D, D/A変換器を含んだループを組み、繰返し演算を行なうと、全体としての精度が悪くなると考えられる。たとえば定常値における理論値とのずれは図7で0.9～1.3℃、図8で1.1～0.4℃の範囲である。これを計算機内での数値の変動巾(ほぼ200℃)と比べるとほぼ0.7%以内であり、単純に数値の上限(550℃)と比べるとほぼ0.24%以内の誤差となる。

<sup>\*</sup> 今回の計算結果では $\Delta t$ の影響がみられるが、4.1-1)で述べたようにCSDT法では起り得ない性質のものである。

個々の要素の精度を考えるとこの程度の精度がCSDT計算のひとつの上限ではないかと考えられる。

実際図7と図8は定常値でみる限り精度的にはほとんど差がないと見られる。

2) 図7, 8のいずれもCSDT計算値はデジタル計算値より遅れをもって変化する。すなわち過渡応答中の誤差は, 2次側ともステップ入力があるときは負の, 負のときは正の値をとる。そしてこの誤差は応答の立上がり部(または立下がり部)の急なところで大きい値をとる。図7より最大の誤差の大よその値を調べると4~5℃程度である。これは数値の変動巾(200℃)と比べると2~2.5%, 数値の上限(550℃)と比べると0.73~0.91%となる。

3) 定常温度分布の計算結果, 軸方向の分割数 $n$ がある程度大きくなると精度の向上が鈍くなることがわかったが, ここでもそれが見られ, 計算時間, 記憶容量の点も含めて $n=256\sim 128$ 程度が実際的な値であると思われる。

また図7, 8の過渡状態における誤差の大きさは主として $\Delta t$ に依存すると考えられるが, 両者を比較すると図8の誤差のほうが図7のそれよりほぼ1~2℃づつ大きくなっている。図7は $\Delta t=0.25$ , 図8は $\Delta t=0.5$ (sec)としているが, 実際のプラントにおいて通常運転時は100℃ステップ状変化といった急激な入力変化はほとんど起り得ないであろうから,  $\Delta t=0.25$ のように細かい刻みは必ずしも必要でないと思われる。

次に前節で考察したように $\theta$ が小さいほど過渡応答における立上がり(立下がり)時の精度が向上するのではないかと考えられたが, 図9で見る限り $\theta$ の変化による結果への影響は少ない。これは恐らく $\Delta t$ が十分小さいことにより $X_1^{i+1}$ と $S_1^{i+1}$ または $X_2^{i+1}$ と $S_2^{i+1}$ の差が小さく $\theta$ の影響がかなり小さく押えられているためではないかと思われる。

### 4.3 CSDT法の評価

本解析を通してシミュレーションの一方法としてのCSDT法のいくつかの特徴が明らかになった。ここでは前節の定量的考察に加えて計算時間, 記憶容量等の計算効率を含んだCSDT法の検討を述べる。

1) ここで用いたCSDT法では結果(1, 2次側出口温度の時間変化)は理論値, デジタル計算値と比較するとき, ある遅れをもって変化する。言いかえれば連続的な入力変化に対する出力は, 実物の出力よりも変化巾が多少小さく, かつ位相も少し遅れるのでその点を考慮して解析する必要がある。この値はステップ応答の場合前述のように出力巾で約2~2.5%, 遅れでおおよそ2~3 sec(いずれも最大値,  $\Delta t=0.5$  sec,  $n=128$ ,  $\theta=1$ のとき)程度である。

このことは安全性検討などのために本計算法を用いるとき, 計算結果に多少の余裕をもって見る必要がある事を意味する。

2) 本計算に用いたアナログおよびデジタルの要素数, 計算時間等は次のとおりである。

アナログ要素

積分器	2台
係数器	8台
A/Dチャンネル	2
D/Aチャンネル	4

## デジタルプログラム

ステップ数 約900 (octal 74000語)

## 計算時間

積分1回あたり 0.5~2 sec (nにより異なる)

図7~9の計算に必要な時間 200~300 sec ( $\Delta t$ により異なる。図1つあたり)

一方付録Bに示している比較のためのデジタル計算においては、

## デジタルプログラム

ステップ数 約450 (octal 77000語)

## 計算時間

図B1~図B4の計算に必要な時間 約80 sec (図1つあたり)

上の比較のみではデジタル計算のほうが計算が早い。しかし計算する式(210), (211)の係数, たとえば熱伝達係数が温度の関数となると, 式は非線形となる。デジタル計算でこれ解くには非線形となったパラメータの計算が必要となるのに対し, ハイブリッド計算では乗除算器, 関数発生器などを付加すればよい。プラントシミュレーションの際には非線形の常微分方程式の計算がしばしば必要になるので, ここでの計算結果はひとつの目安と考えるべきであり, CSDT法が非能率であると結論はできない。

また両方法のデジタル計算機に必要な記憶容量にはほとんど差はないが, 計算する式の数が更にふえた時にはデジタル計算のほうが必要メモリ数が増加する割合はるかに早い。プラントシミュレーションを行なうにはデジタル計算のみで計算するとき, かなり大きい計算機が必要になるであろう。

なお本報告はプラントシミュレーションのためにCSDT法を用いるうえでの検討を行なったものであり, その点から以下のような各問題についての解析が加わることが望ましい。

- i) 今回の計算では金属壁の熱容量を無視できないと考えて式をたてているが, 金属壁のダイナミクスを無視した方式で計算し, その結果と比較して, シミュレーションの容易な方式を見つける必要がある。
- ii) 計算能率のため1次, 2次側のtおよびu方向の刻み巾を同じにして計算している。輸送おくれの分布を正確にシミュレートするためには流速の違いにあわせて刻み巾を変えたがよいと言われているが<sup>1)</sup>, 本報告より更に高精度の計算が必要ならばこの点を考慮すべきであろう。

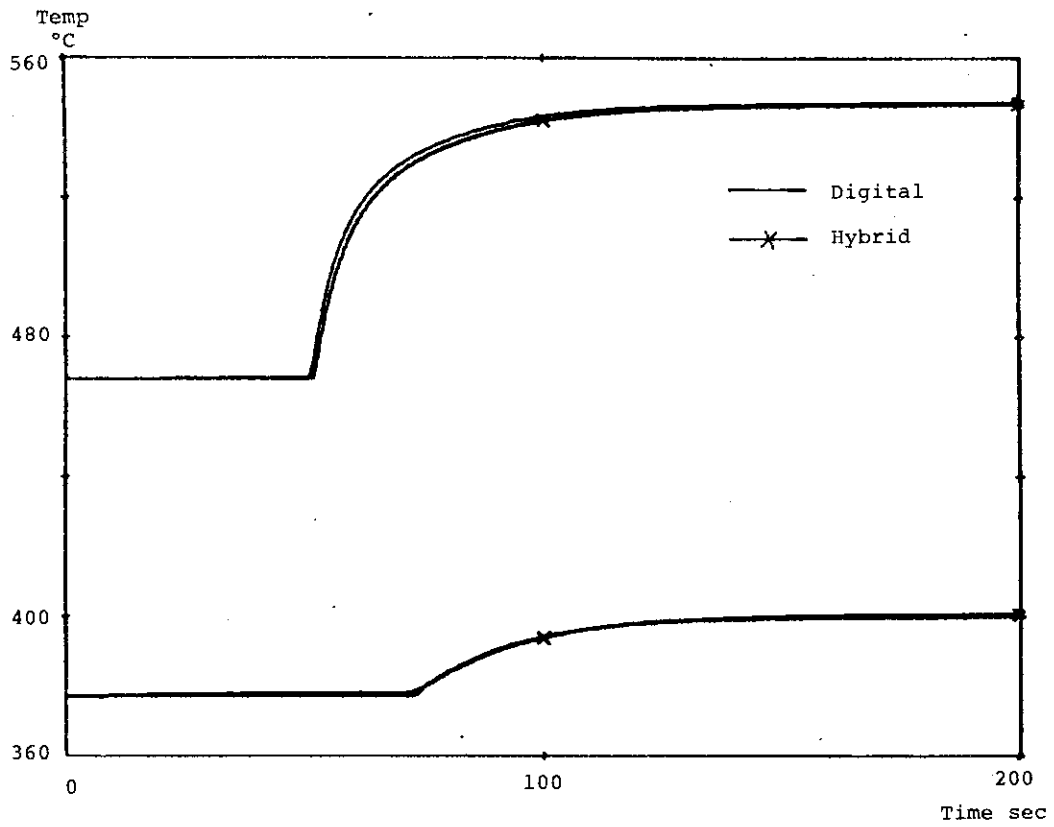


Fig. 7(a) primary inlet temperature 100 °C up

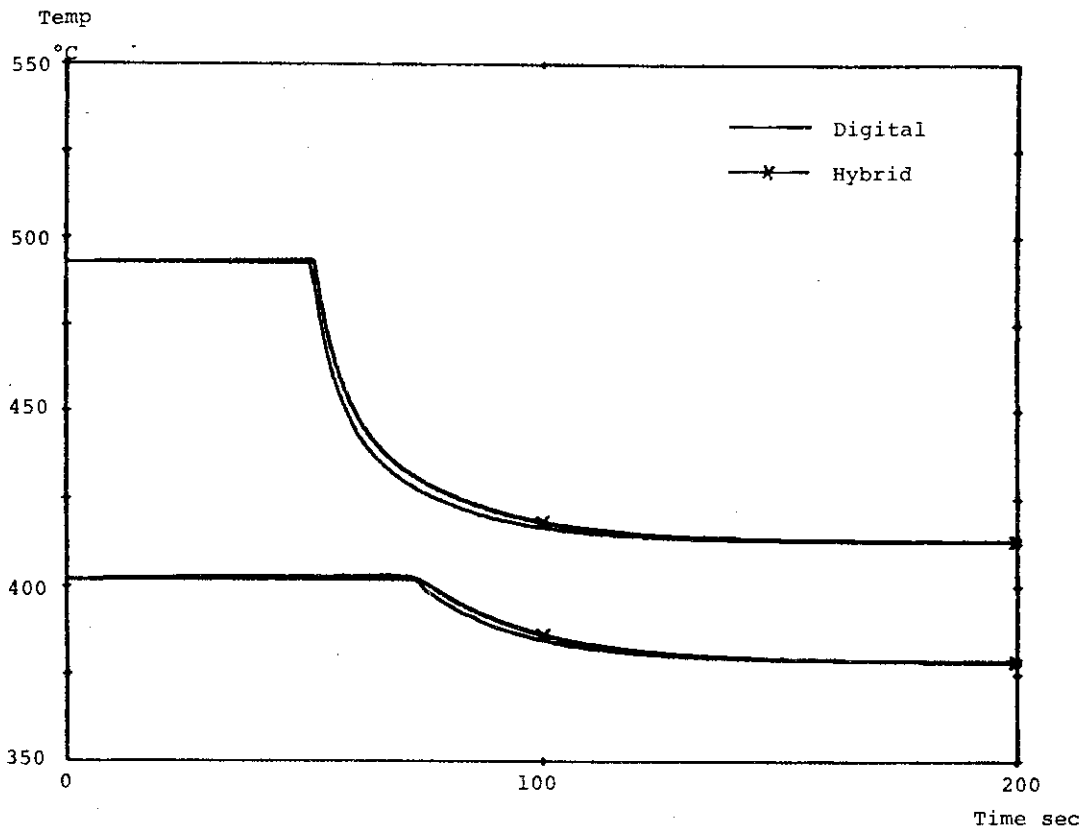


Fig. 7(b) primary inlet temperature 100 °C down

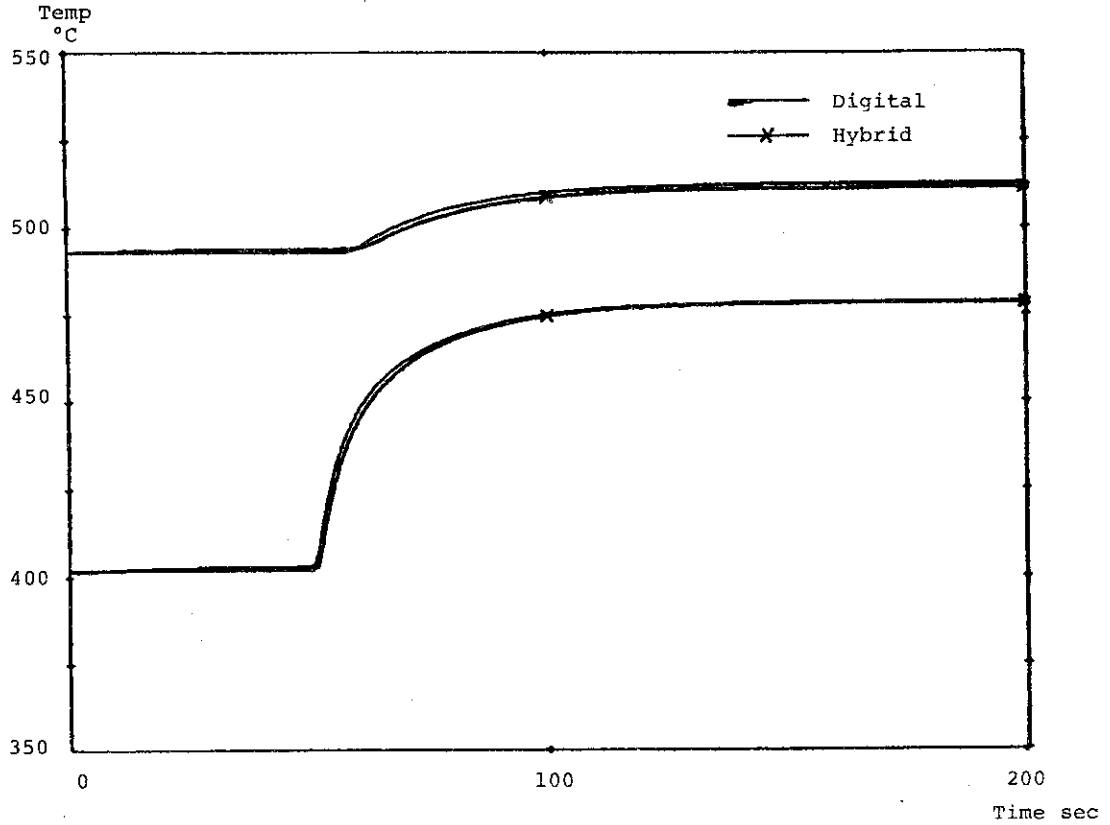
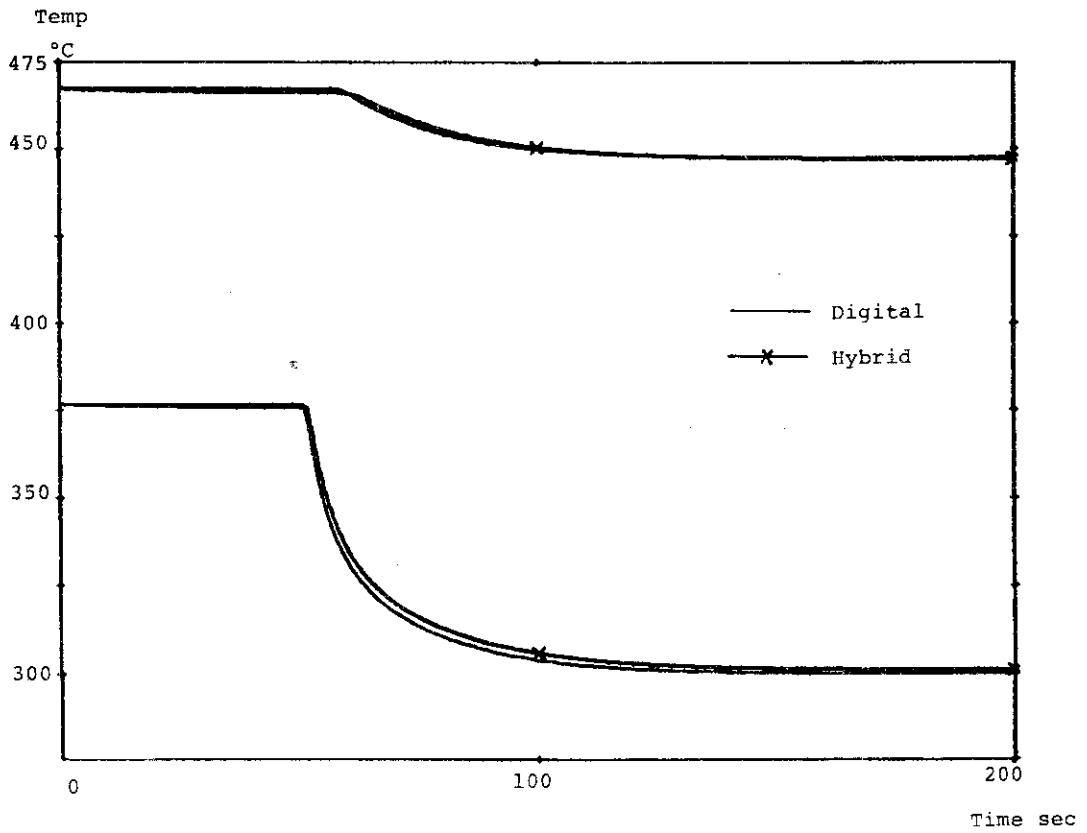


Fig. 7 (c) secondary inlet temperature 100 °C up



(d) secondary inlet temperature 100 °C down

Fig. 7 (c) Step Response  $\Delta t = 0.25$ ,  $n = 256$ ,  $\theta = 1.0$



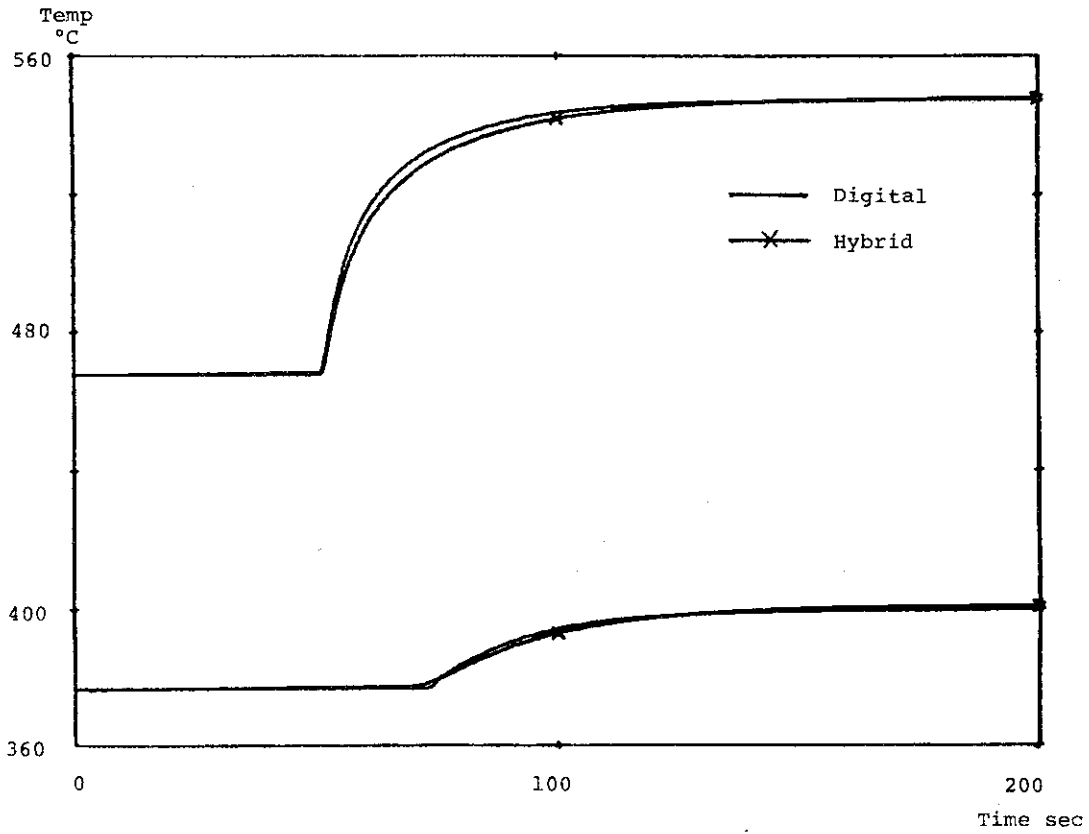


Fig. 8 (a) primary inlet temperature 100 °C up

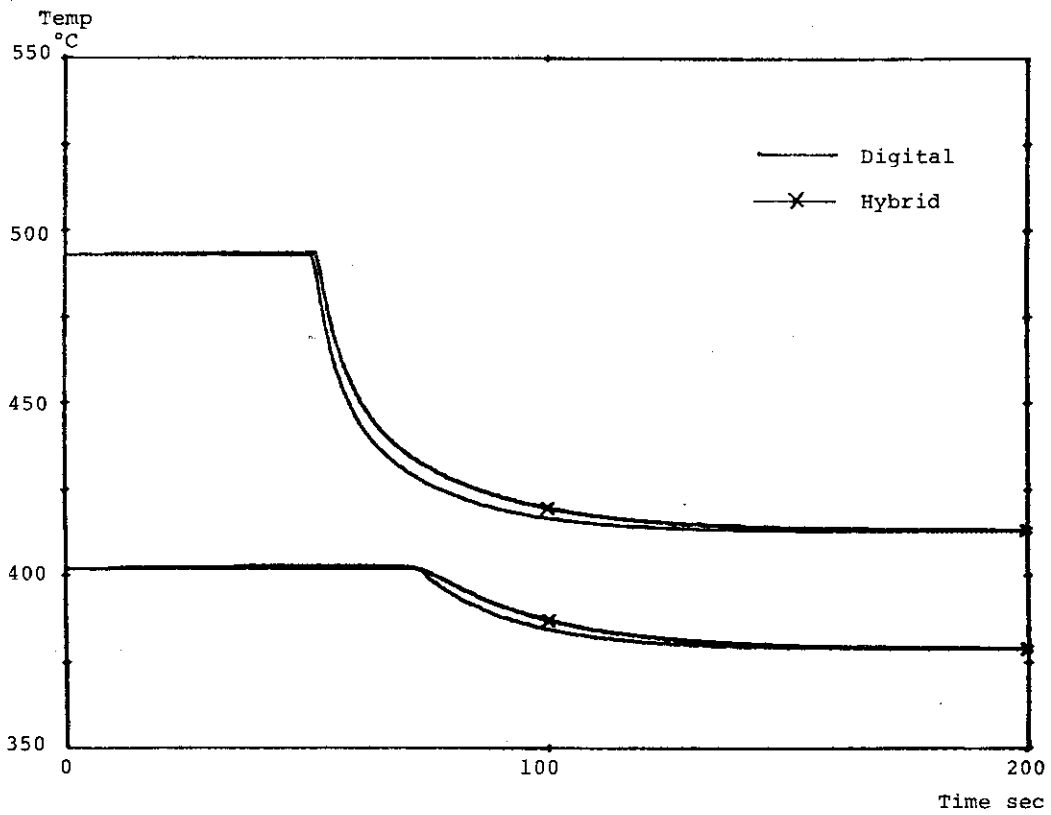


Fig. 8 (b) primary inlet temperature 100 °C down

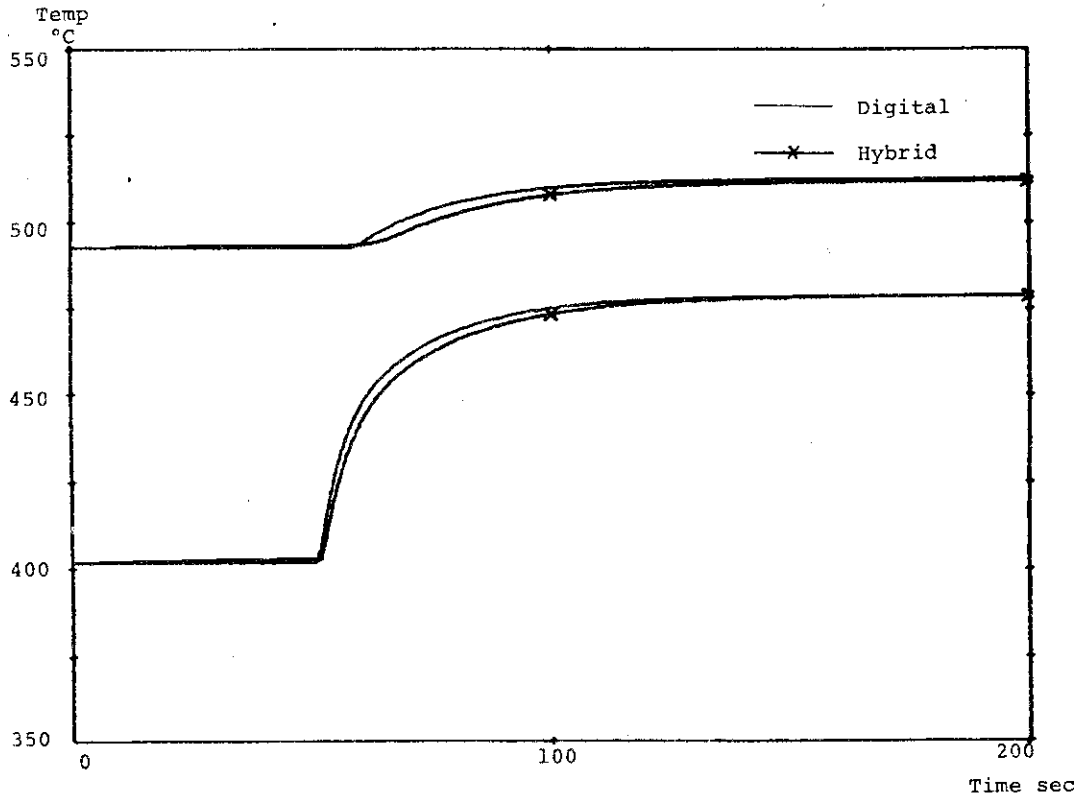
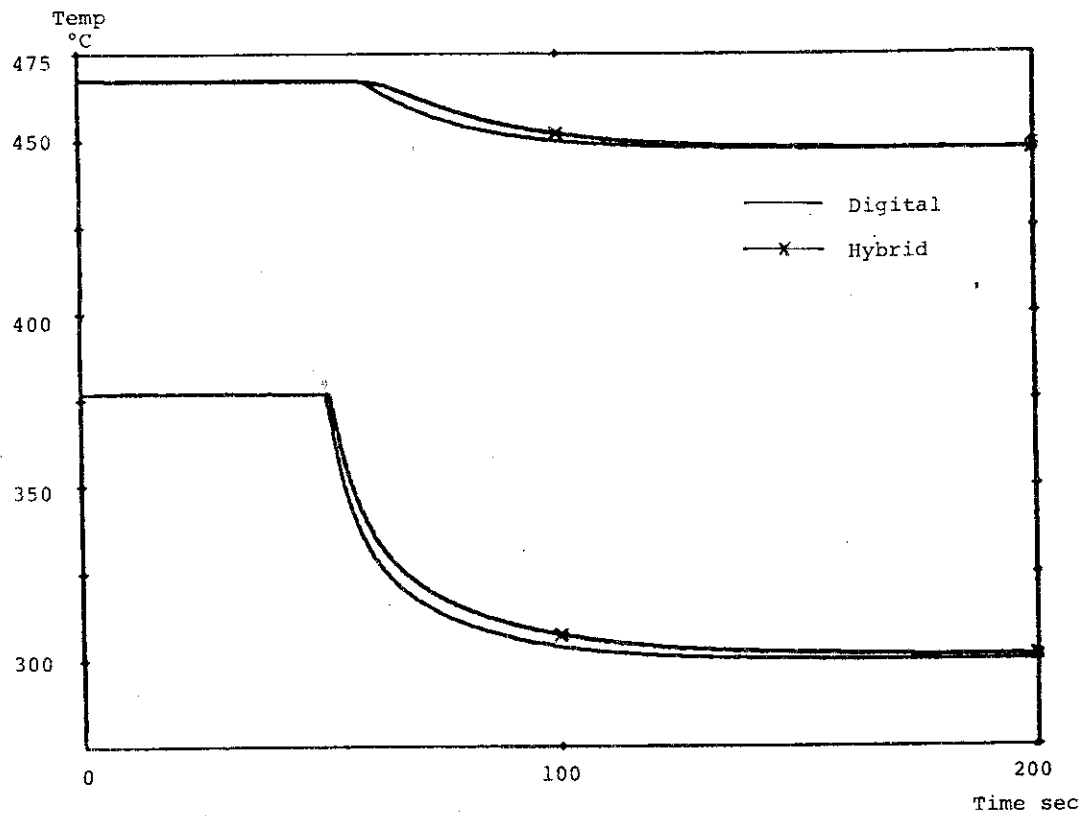


Fig. 8 (c) secondary inlet temperature 100 °C up



(d) secondary inlet temperature 100 °C down

Fig.8 (d) Step Response  $\Delta t = 0.5, n = 128, \theta = 1.0$

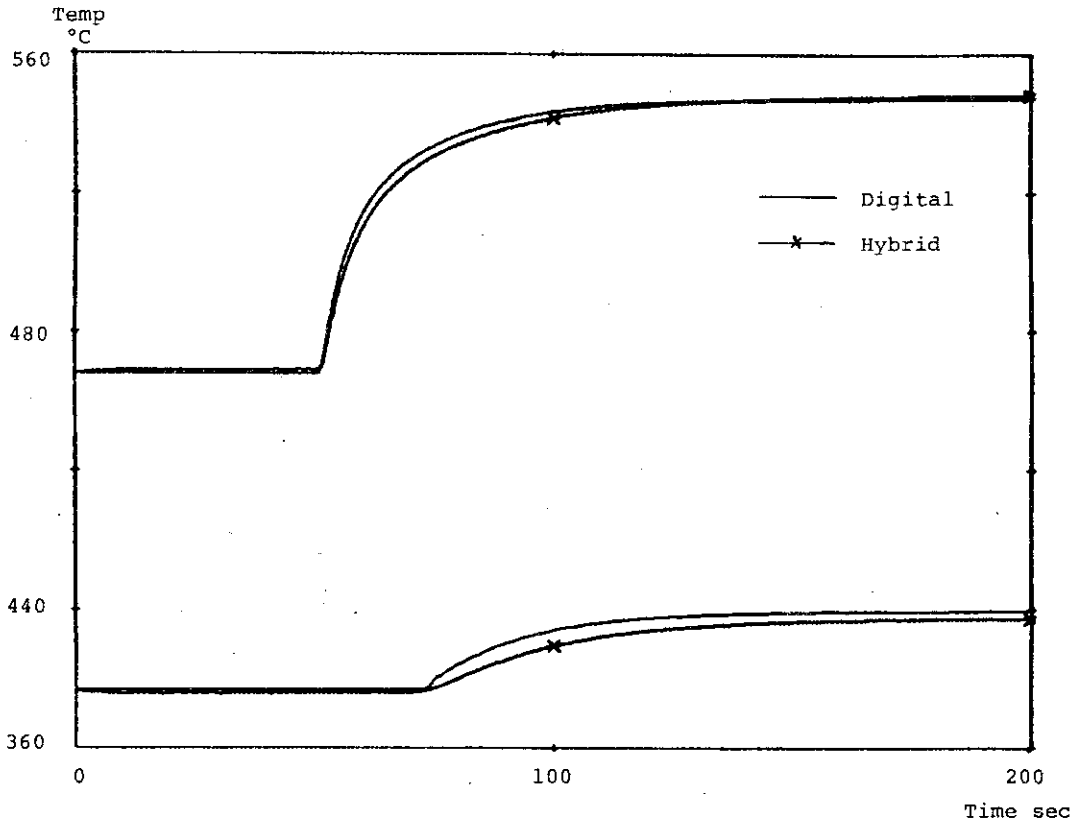


Fig. 9(a) primary inlet temperature 100 °C up  
 $\Delta t = 0.5, n = 500, \theta = 1.0$

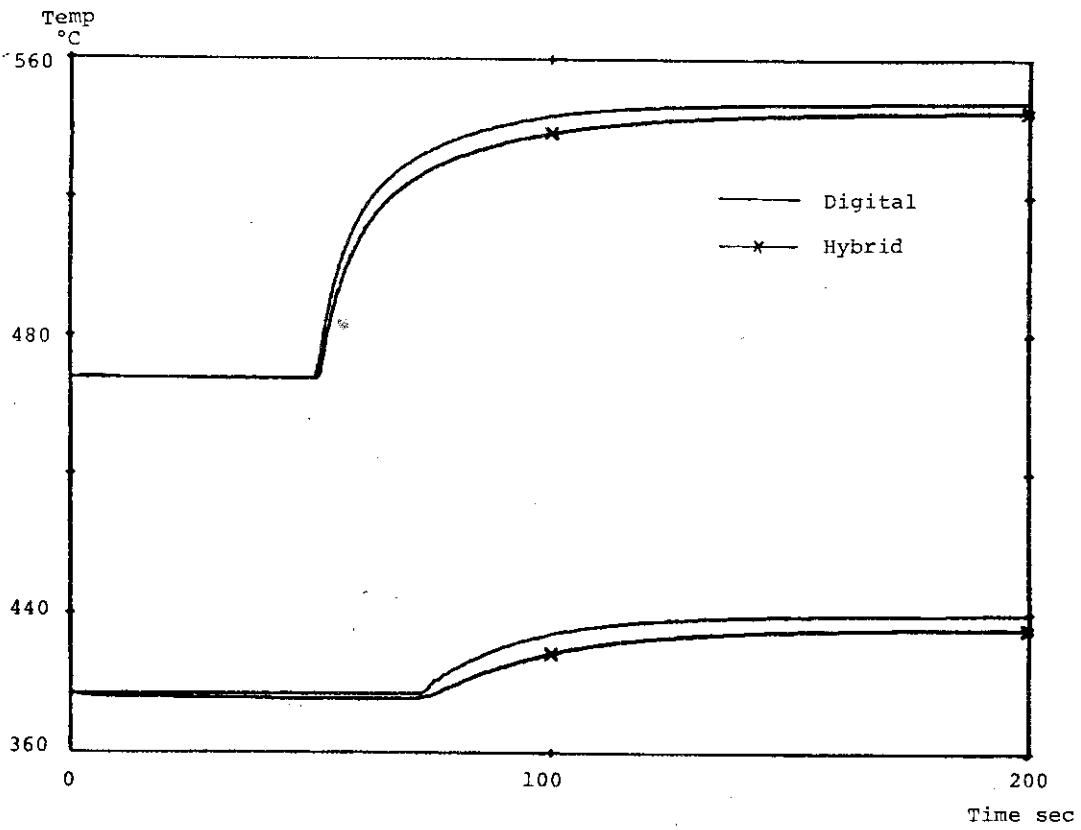


Fig. 9(b) primary inlet temperature 100 °C up  
 $\Delta t = 0.5, n = 256, \theta = 0.7$

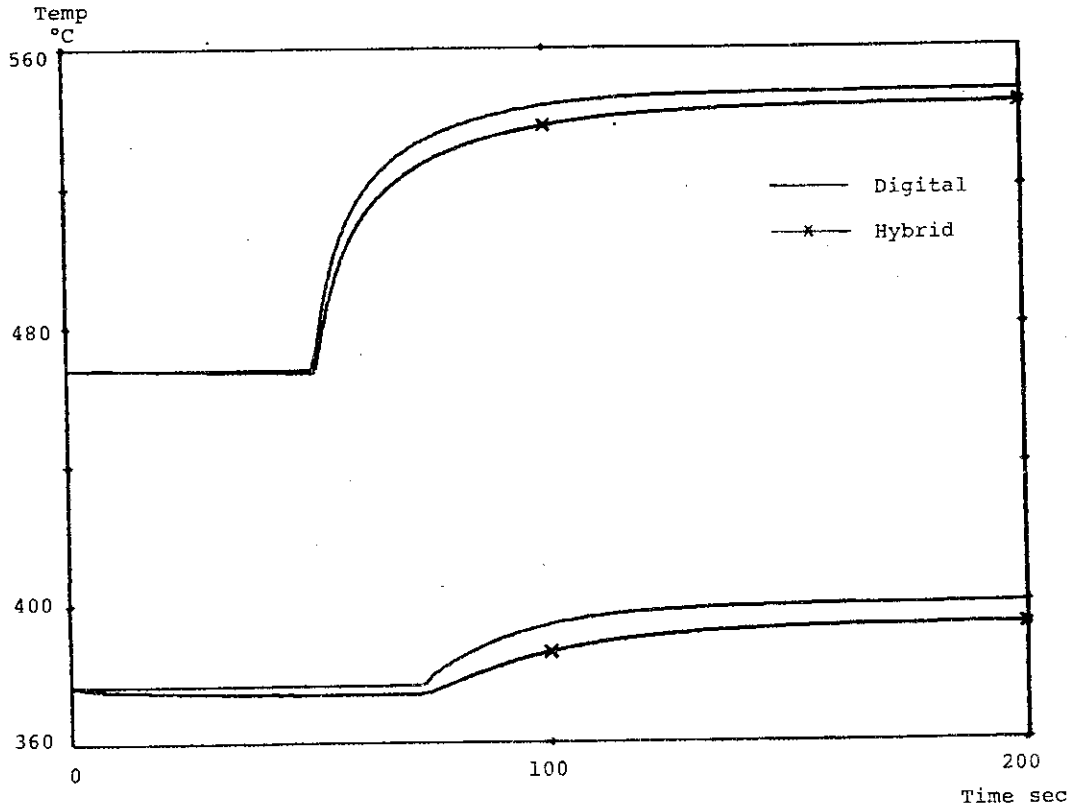
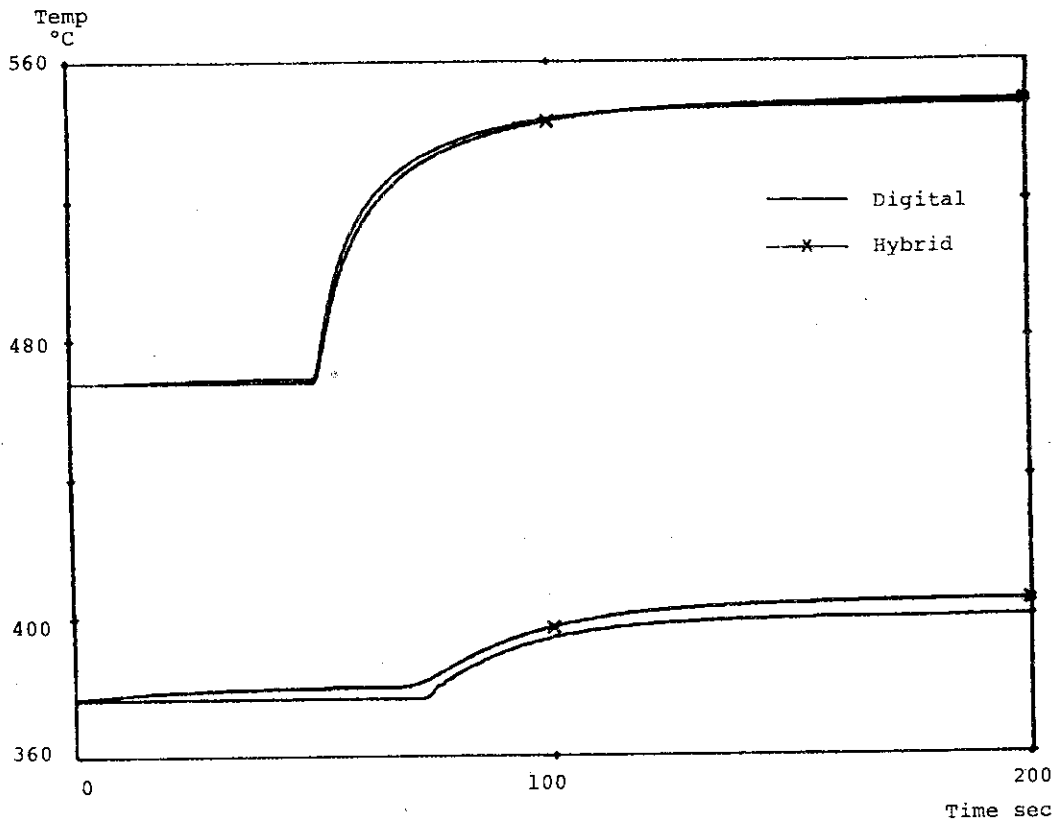


Fig. 9 (c) primary inlet temperature 100 °C up  
 $\Delta t = 0.5, n = 128, \theta = 0.7$



(d) primary inlet temperature 100 °C up  
 $\Delta t = 0.5, n = 64, \theta = 1.0$

Fig.9 (d) Step Response

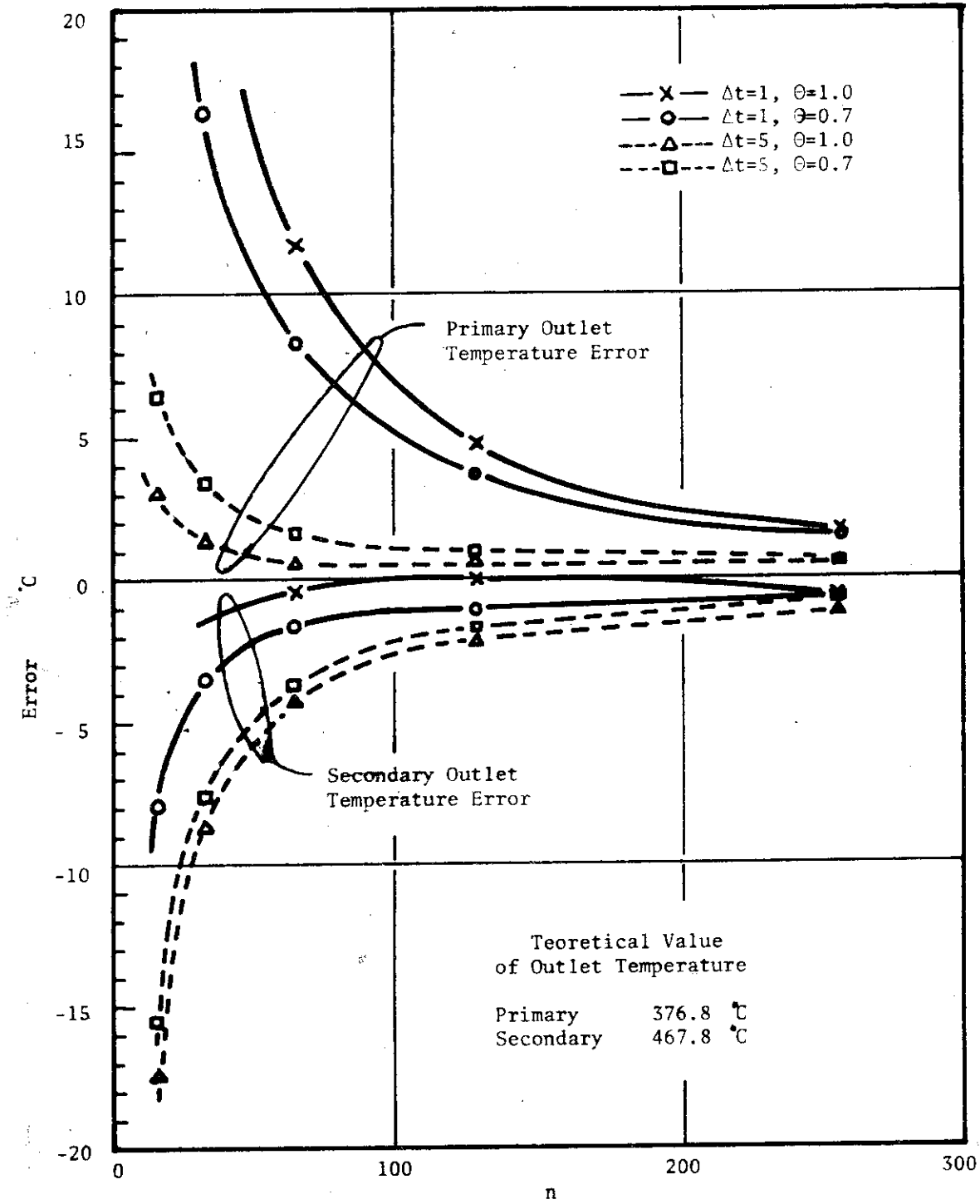


Fig. 10 Influence of n to Outlet Temperature Error

## 5 結 言

原子力プラントシミュレーションのために、そのコンポーネントとしての熱交換器基本モデルの計算を行った。

本研究ではそのためにハイブリッド計算機を用い、偏微分方程式の計算法としていくつかの特長をもつCSDT法を適用した。ここでは特に、CSDT法で用いる三つのパラメータ  $\Delta t$ 、 $n$ 、 $\theta$  の組合せについて、定常温度分布および過渡応答の計算を行い、純デジタル計算による結果をもとに定量的な比較を行った。この結果、

i) 定常空間温度分布の計算では本モデルの場合、表4にあげたように  $\Delta t = 5$  秒、 $n = 128$ 、 $\theta = 1$  のとき、理論計算値との誤差が1次出口温度(376.8℃)で0.5℃、2次出口温度(467.8℃)で-2.2℃となり、それぞれ0.13%、0.47%となる。CSDT法では定常空間温度分布のみを計算する場合には  $\Delta t$  を小さくする必要がなく、計算式からいっても  $\Delta t$  を大きくとる方が有利であることは4.1でのべたとおりである。たゞし、定常値に達するまでの分布については正確な値は得られない。分布の計算精度は連続波形を不連続波形としてデジタルメモリーに記憶するという手順をふむため、波形再現の観点から分割数である  $n$  の大きさに左右されることはすぐに想像が付き、ハイブリッド計算機を使用する場合、総合精度を0.5%以上希望すると中点近似の波形処理を施しても  $n = 100$  以上必要となる。本モデルの分布は比較的直線に近いにもかかわらず  $n = 128$  をとっている。変化の激しい波形ではこれ以上の値を必要とすることがわかる。

ii) 過渡応答については当然  $\Delta t$  が大きく影響し、本モデルの場合、 $\Delta t = 0.5$  秒、 $n = 128$ 、 $\theta = 1$  とし、1次、2次入口温度をそれぞれ100℃ステップ状に上下させ4種類の計算結果を得た。その結果を純デジタル計算と比較し、過渡状態で最大5℃、定常状態では1次側で最大1℃、2次側で最大0.5℃が誤差を生じた。本モデルの時定数は約100秒であり、 $\Delta t = 0.5$  秒で十分と思われるがステップ状の変化では過渡期で大きな誤差を生じることに注意を要する。次に、 $\theta$  を変化させた場合その影響はほとんどなく、これは  $\Delta t$  が比較的小さくとられている結果と考えられる。

このほか、連立方程式を解くときCSDT法では各方程式をシリアルに解く方法が一般的であるが、ここではパラレル計算方式をとり入れ、時間短縮が計れるとともに十分な精度で解き得ることがわかった。この様に、CSDT法の長所短所が純デジタル計算方式と比較しながらかなり定量的に把握することができ、今後の原子力プラントシミュレーションのために多くの重要な知見を得た。

## 謝 辞

本研究のため、ハイブリッド計算機システムの使用にあたり、原子炉制御研究室・渡辺光一氏に多くの協力を戴き、また、結果の検討にあたっては同研究室島崎潤也氏及び動燃事業団井爪昭忠氏から適切な助言をいただき深く感謝致します。

筆者のうち、工藤は原子炉研修所高級課程研修中にこの研究に参加した。研修中多くの便宜をはかって戴いた原子炉研修所各位、研修派遣について御配慮戴いた九州大学長谷川修、大田正男両教授に厚く御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

1. 島崎潤也ほか：ハイブリッド計算機による分布定数系のシミュレーション法，JAERI-M 5733，1974年6月
2. R. Vichnevetsky : Application of Hybrid Computers to the Integration of Partial Differential Equations of the First and Second Order, IFIP Congress 68 August 5-10 1968.
3. R. Vichnevetsky : Error Analysis in the Computer Simulation of Dynamic Systems : Variational Aspects of the Problem: IEEE Transaction on Electronic Computers, Vol. EC-16, No 4, August 1967.

## 謝 辞

本研究のため、ハイブリッド計算機システムの使用にあたり、原子炉制御研究室・渡辺光一氏に多くの協力を戴き、また、結果の検討にあたっては同研究室島崎潤也氏及び動燃事業団井爪昭忠氏から適切な助言をいただき深く感謝致します。

筆者のうち、工藤は原子炉研修所高級課程研修中にこの研究に参加した。研修中多くの便宜をはかって戴いた原子炉研修所各位、研修派遣について御配慮戴いた九州大学長谷川修、大田正男両教授に厚く御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

1. 島崎潤也ほか：ハイブリッド計算機による分布定数系のシミュレーション法，JAERI-M 5733，1974年6月
2. R. Vichnevetsky : Application of Hybrid Computers to the Integration of Partial Differential Equations of the First and Second Order, IFIP Congress 68 August 5-10 1968.
3. R. Vichnevetsky : Error Analysis in the Computer Simulation of Dynamic Systems : Variational Aspects of the Problem : IEEE Transaction on Electronic Computers, Vol. EC-16, No 4, August 1967.



## 付録-A 精度比較のためのデジタル計算(定常空間温度分布)

定常空間温度分布はもとの式(21)~(23)において時間変化の項を0とおいた連立常微分方程式を解いて得られる。すなわち

$$\frac{dx_1}{du_1} = -C_1(x_1 - x_m) \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{dx_2}{du_2} = -C_2(x_2 - x_m) \quad (\text{A.2})$$

$$x_m = C_3 T_1 + C_4 T_2 \quad (\text{A.3})$$

ここに

$$C_1 = \frac{H_1}{v_1}, \quad C_2 = \frac{H_2}{v_2}, \quad C_3 = \frac{H_{m1}}{H_{m1} + H_{m2}}, \quad C_4 = \frac{H_{m2}}{H_{m1} + H_{m2}}$$

(A.1)~(A.3)は $z = x_1 - x_2$ なる置換により容易に解ける。

$$x_{10} = x_1(0, t), \quad x_{20} = x_2(0, t)$$

$$C_5 = C_1 \cdot C_4, \quad C_6 = C_2 \cdot C_3$$

$$x_0 = x_{10} + \frac{C_5(x_{10} - x_{20})}{C_6 e^{(C_6 - C_5)L} - C_5}$$

$$A = x_0 - x_{10}, \quad B = (x_0 - x_{20}) e^{-(C_6 - C_5)L}$$

とすれば

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_0 - A e^{(C_6 - C_5)u} \\ x_2 &= x_0 - B e^{(C_6 - C_5)u} \\ x_m &= \frac{H_{m1} x_1 + H_{m2} x_2}{H_{m1} + H_{m2}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.4})$$

が得られる。ここで $u$ は $u_1$ と同方向にとっている。(A.4)は $u$ の任意の値(0~L)について計算することができ、それらを結ぶ曲線が定常温度分布を表わす。デジタル計算機で(A.4)を計算した結果を図A.1~図A.5に示す。これは手計算も可能である。

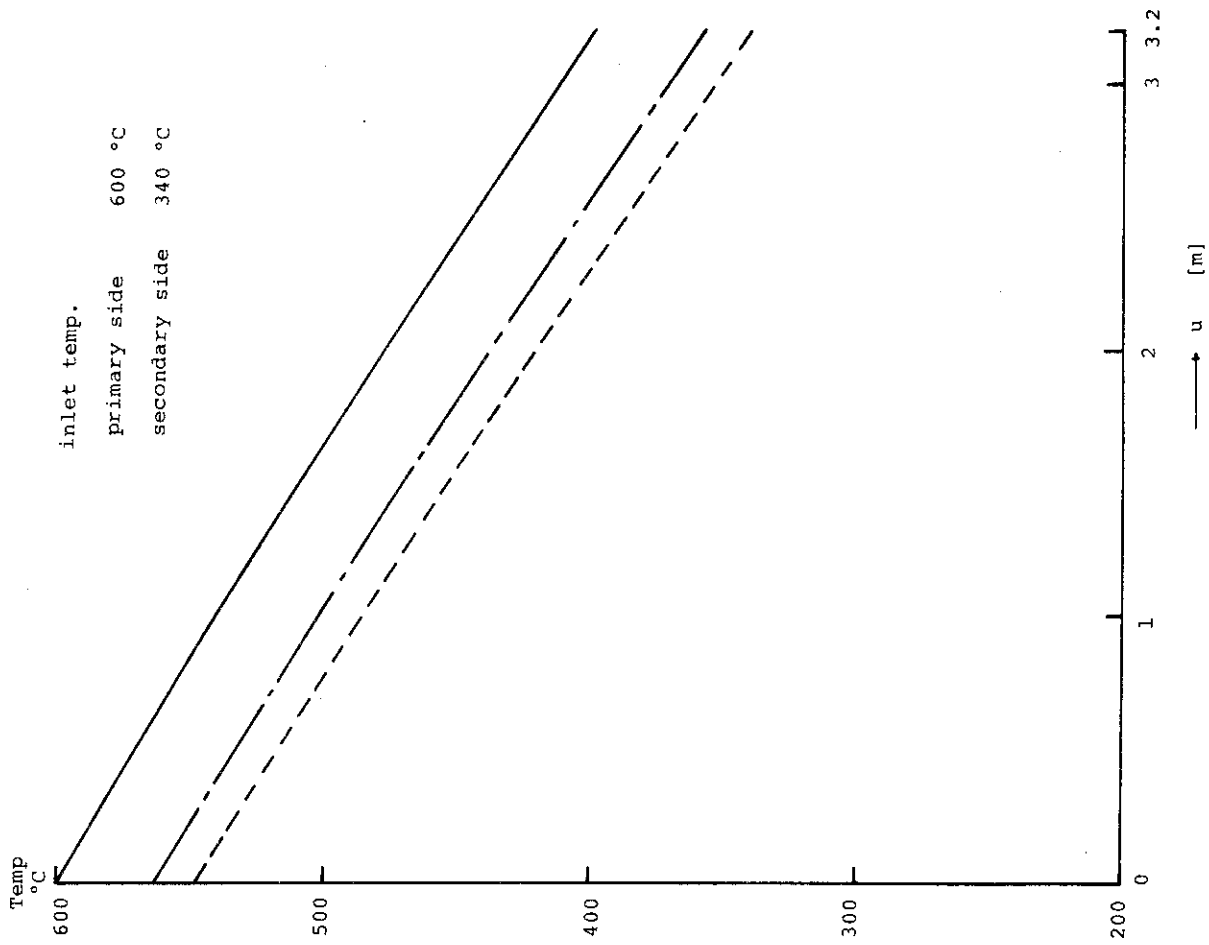


Fig. A.1

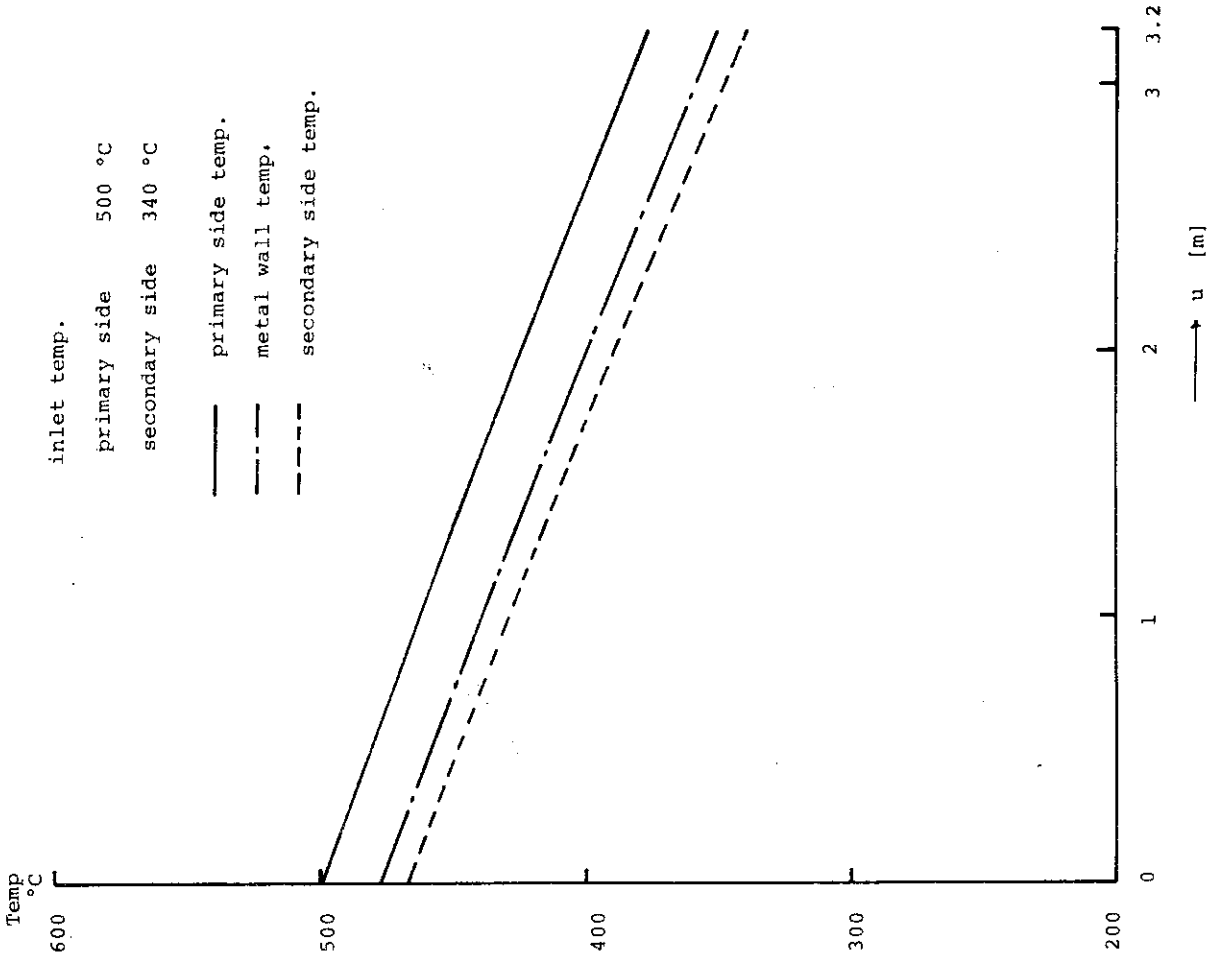


Fig. A.2

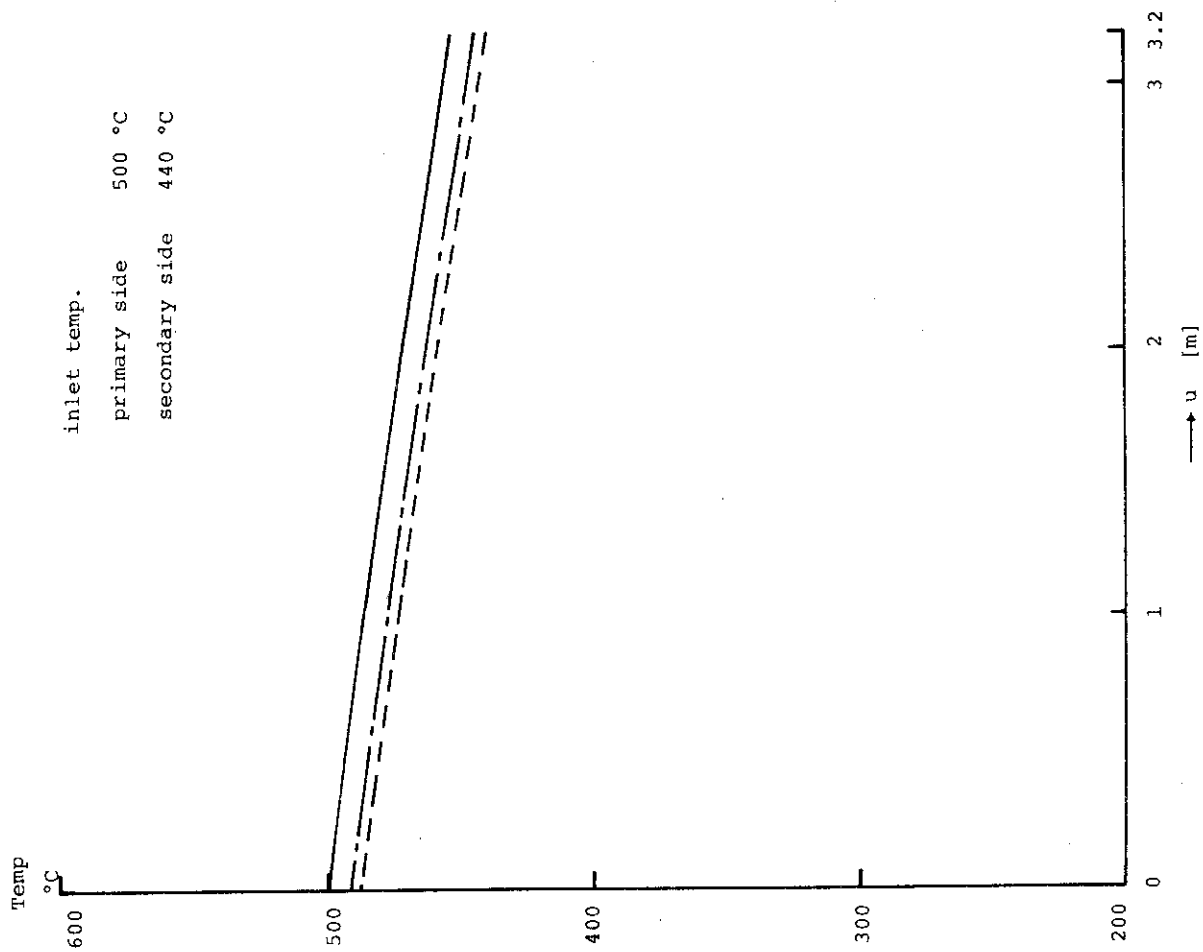


Fig. A.4

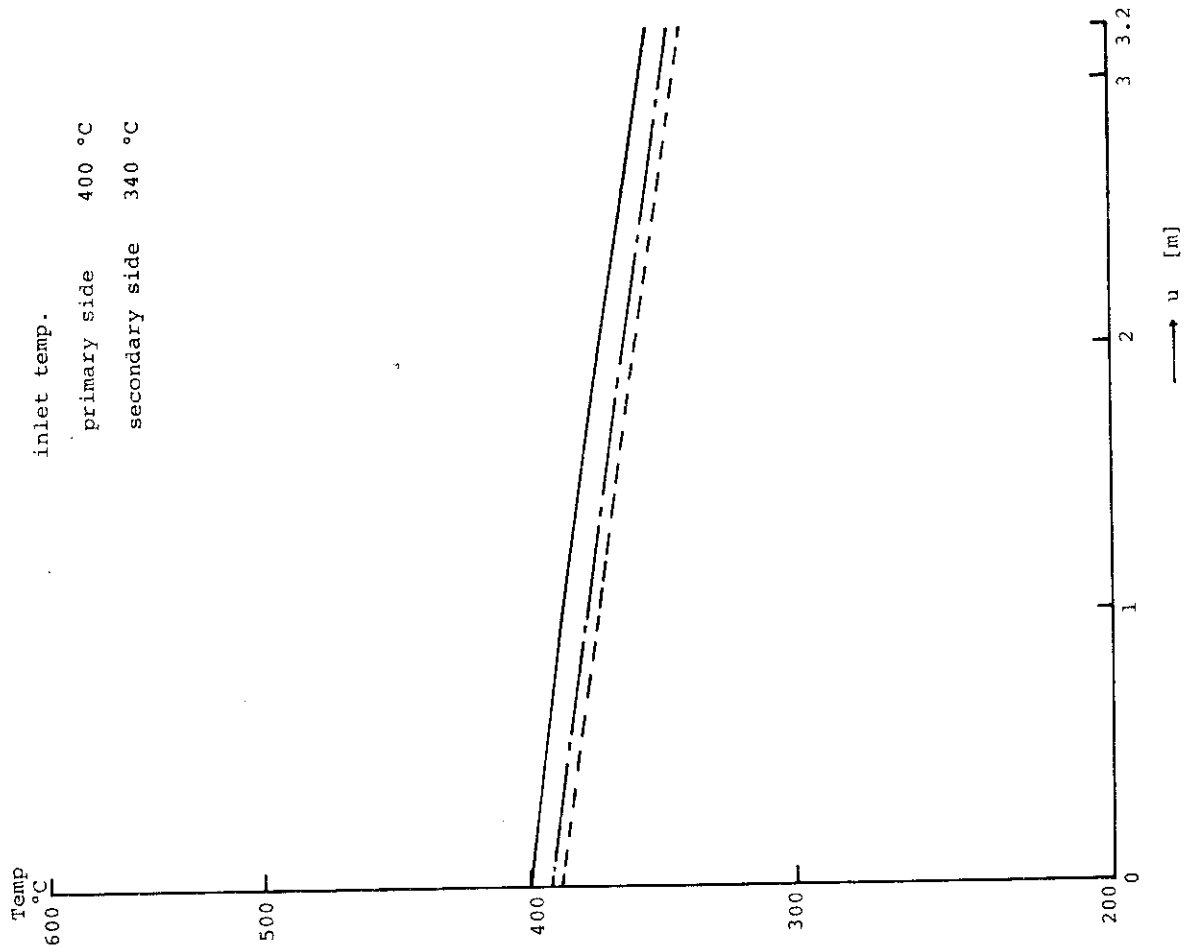


Fig. A.3

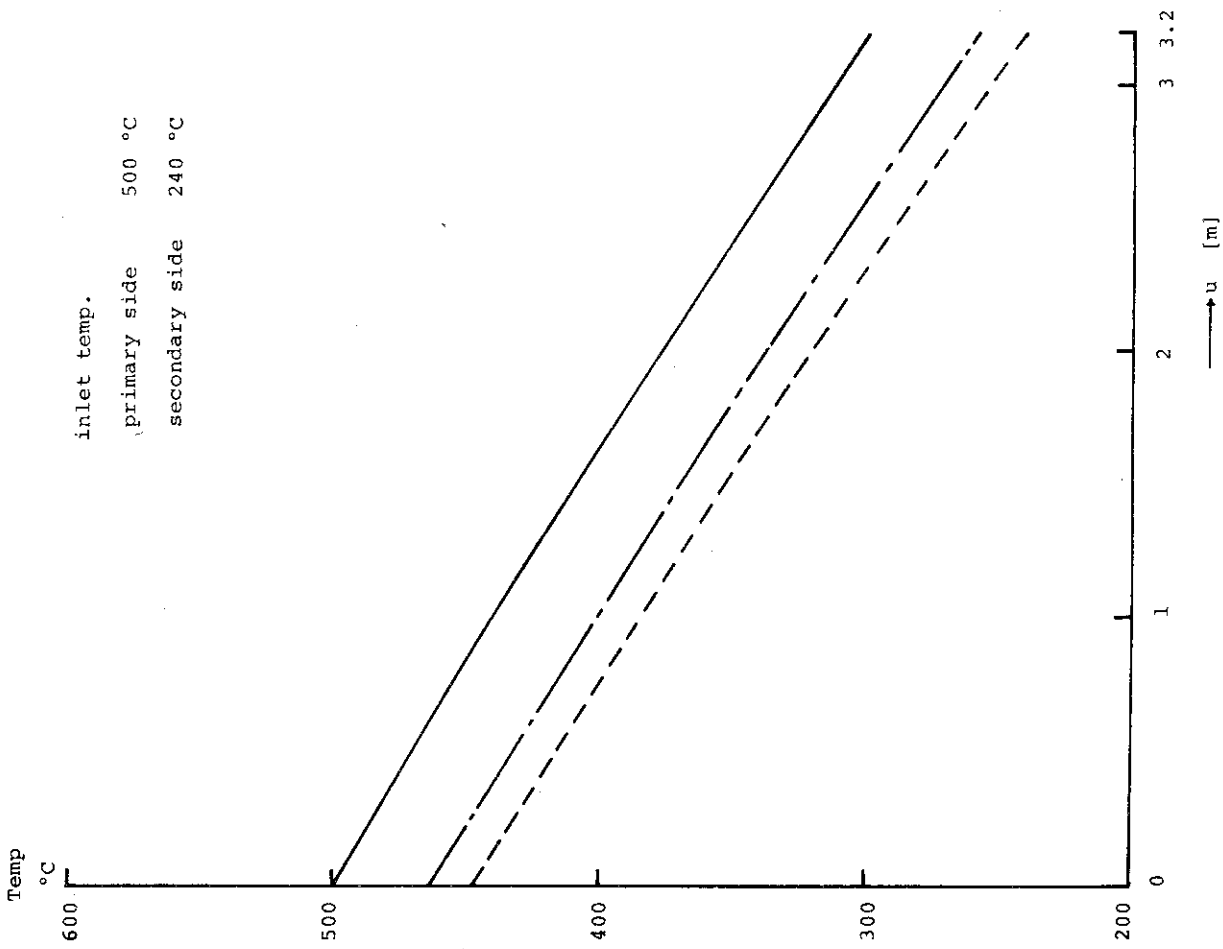


Fig. A.5

Fig. A Spatial Temperature Distribution

## 付録-B 精度比較のためのデジタル計算(過渡応答)

1次側または2次側流体の入口温度あるいは流量が時間的に変化するときの出口側の温度変化を求めるには、(21)~(23)を差分化して計算しなければならない。(21)~(23)を時間について前進差分、 $u_1$ または $u_2$ 軸について後進差分になおすと、

$$\frac{x_{1,j}^{i+1} - x_{1,j}^i}{\Delta t} + v_1 \frac{x_{1,j}^i - x_{1,j-1}^i}{\Delta u_1} = -H_1 (x_{1,j-1}^{i+1} - x_{m,j-1}^i) \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{x_{2,j}^{i+1} - x_{2,j}^i}{\Delta t} + v_2 \frac{x_{2,j}^i - x_{2,j-1}^i}{\Delta u_2} = -H_2 (x_{2,j-1}^{i+1} - x_{m,j-1}^{i+1}) \quad (\text{B.2})$$

$$\frac{x_{m,j}^{i+1} - x_{m,j}^i}{\Delta t} = H_1 (x_{1,j}^{i+1} - x_{m,j}^{i+1}) + H_2 (x_{2,j}^{i+1} - x_{m,j}^{i+1}) \quad (\text{B.3})$$

ただし  $x_{k,j}^i = x_k(i\Delta t, j\Delta u)$ ,  $k=1, 2, m$  (B.1)~(B.3)を用いれば、初期値が与えられたとき、 $x_1^{i+1}$ ,  $x_2^{i+1}$ ,  $x_m^{i+1}$ を計算することができる。ただしこのとき $x_1^{i+1}$ ,  $x_2^{i+1}$ を計算するのに $x_m^{i+1}$ が必要である。このため $x_m^{i+1}$ の値を(214)の外挿式を用いて計算する。 $x_m^{i+1}$ の値に対する $x_1^{i+1}$ ,  $x_2^{i+1}$ を求め、それに基づき(B.3)によって $x_m^{i+1}$ を再計算する。この値と外挿値が適当な誤差以内であれば $i$ を進めて次のステップに進むが、そうでないときはこの $x_m^{i+1}$ を用いて(B.1), (B.2)を再計算し、こうして $x_m^{i+1}$ が収束するまで同じステップで計算をくり返す。

このプログラムは井爪氏らが以前に作っていたものを、一部修正して用いた。

この計算中にも差分化するために必要なパラメータが出てきて、これが計算精度に影響する。このパラメータは $\Delta t$ ,  $\Delta u$ すなわち分割点数 $n$ および $x_m^{i+1}$ の計算の収束判定条件( $\epsilon$ とする)の3つである。これらのパラメータのいくつかの値の組合わせによる計算結果を表B1にまとめている。これは1次側入口温度が500℃から600℃にステップ状に変化した時の過渡応答を計算して、それが定常状態になった時の理論値(付録Aで計算)との比較を行なったものである。その結果次のようなことがわかった。

- 1) 定常状態における理論値との誤差は $\Delta t$ および $\Delta u$ が小さいほうが小さくなる。しかし誤差の絶対値はいずれも0.04℃より小さく、この限りではどの結果も十分な精度を持っている。
- 2) パラメータの組合わせによっては過渡応答中の値に不自然な振動が生じることがある。これらの乱れの原因については島崎らが詳しく検討しているが波形のくずれのpositiveな伝播によるものではないかと思われる<sup>1)</sup>。傾向としては $n$ が少いほうが振動が生じやすく、 $\Delta u$ が同じときは $\Delta t$ が小さいほうが振幅は大きくなる。従って計算の精度を上げるためには $\Delta t$ と $\Delta u$ の両方を小さくしていく必要がある。
- 3) 計算中にアルゴリズム上収束が $\epsilon$ より大きい値に止まり、それより改善されないことが起こる。このときはその値のまま次のステップに進んでいるが、 $\Delta t$ と $\Delta u$ が小さいほどこれが起こりにくい。このため各デジタル計算の結果を比較すると応答の立上がりの急な部分で計算値の違いが大きくなっている。この差は最大で1.35℃でありこのように大きい差が出るのは数秒間だけであり、応答の他の部分における差はほとんど0.1℃以下である。

以上のことから2)で述べた不自然な応答が起らない範囲で $\Delta t$ と $\Delta u$ を十分小さくとしたパラメータの組合わせを選び、以後これをハイブリッド計算との比較に用いる。実際には $\Delta t = 0.25 \text{ sec}$ ,  $\Delta u = 0.625 \text{ cm}$  ( $n = 512$ 点),  $\epsilon = 0.00025$ を選んだ。この組合わせによる各種のステップ応答を図B1～図B4に示す。これらは1次側または2次側の入口温度を定格値より $100^\circ\text{C}$ ステップ的に上昇又は下降させたときの応答であり、いずれも上の曲線が2次側出口温度、下が1次側出口温度である。

Table B.1 Step Response

no.	$\Delta t$ sec	n no.of points	$\epsilon$	outlet temperature		Max. $\epsilon$ °C
				primary °C	secondary °C	
theoretical value				399.80	547.58	—
digital computation						
1	2.0	32	0.002	399.80	547.59	1.13
2	"	64	"	399.68 ~ .95	547.58 ~ .59	0.81
3	"	128	"	399.77 ~ .82	547.58	0.58
4	"	256	"	399.81 ~ .83	547.60	0.41
5	"	512	"	399.82 ~ .84	547.62	0.27
6	1.0	32	0.001	399.80	547.59	0.69
7	"	64	"	399.80	547.58 ~ .59	0.50
8	"	128	"	399.72 ~ .88	547.59	0.35
9	"	256	"	399.81 ~ .83	547.61	0.25
10	"	512	"	399.82 ~ .83	547.62	0.18
11	0.5	32	0.0005	399.80	547.58	0.42
12	"	64	"	399.80	547.58	0.30
13	"	128	"	399.81	547.59	0.21
14	"	256	"	399.78 ~ .87	547.60	0.51
15	"	512	"	399.82 ~ .83	547.61	0.11
16	0.25	32	0.00025	399.80	547.58	0.23
17	"	64	"	399.80	547.58	0.17
18	"	128	"	399.80	547.59	0.12
19	"	256	"	399.81	547.60	0.084
20	"	512	"	399.78 ~ .85	547.61	0.0596
21	0.10	32	0.0001	399.80	547.58	0.101
22	"	64	"	399.80	547.59	0.073
23	"	128	"	399.80	547.58	0.052
24	"	256	"	399.81	547.59	0.037
25	"	512	"	399.83	547.62	0.026
26	0.05	32	0.00005	399.80	547.58	0.051
27	"	64	"	399.80	547.58	0.038
28	"	128	"	399.80	547.58	0.027
29	"	256	"	399.80	547.58	0.019
30	"	512	"	399.81	547.60	0.013

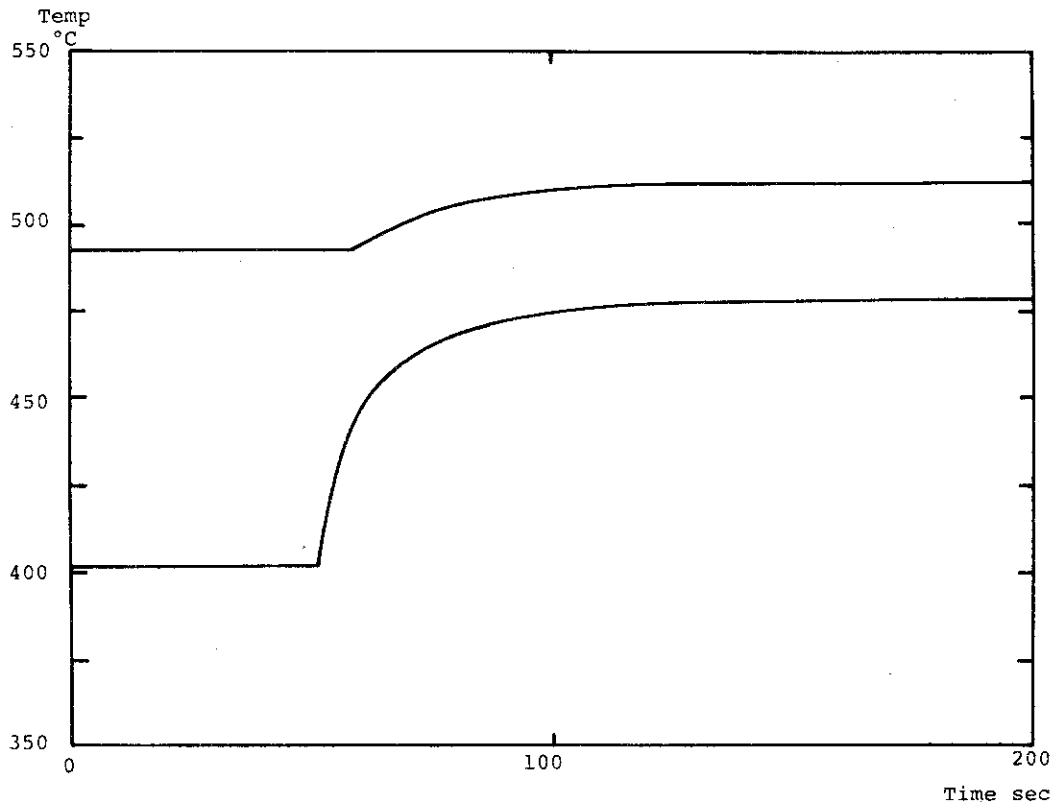


Fig. B.1

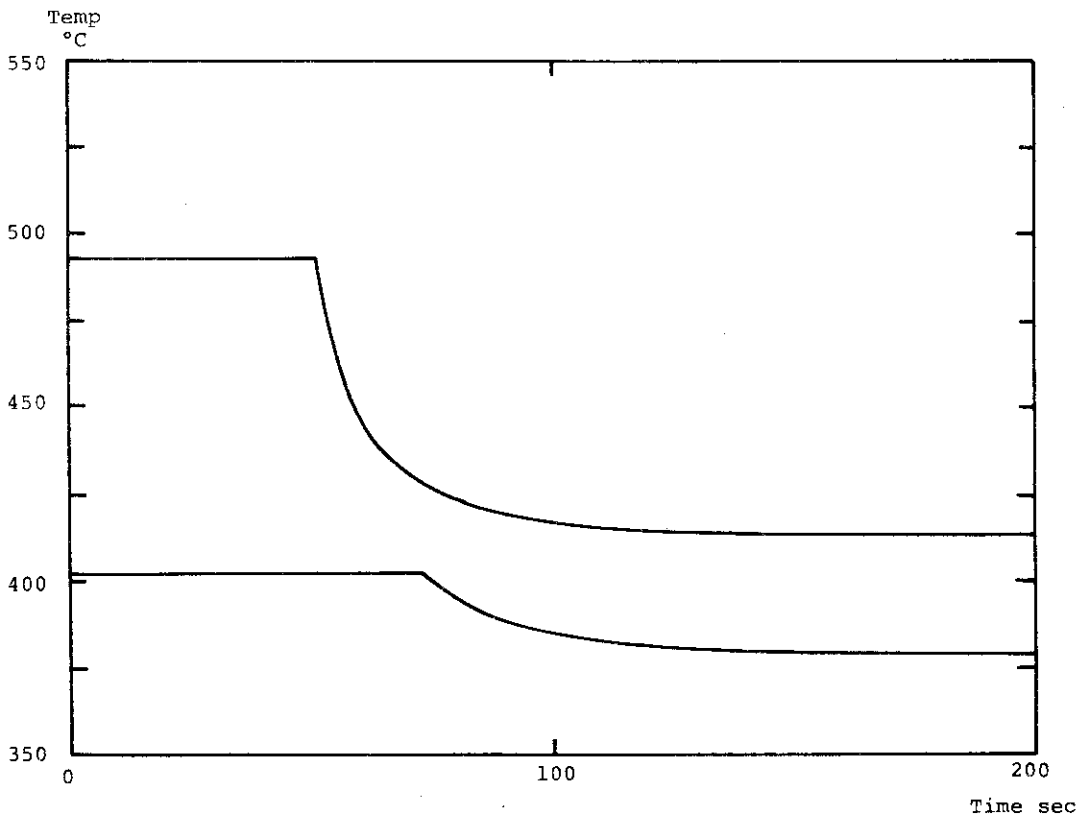


Fig. B.2



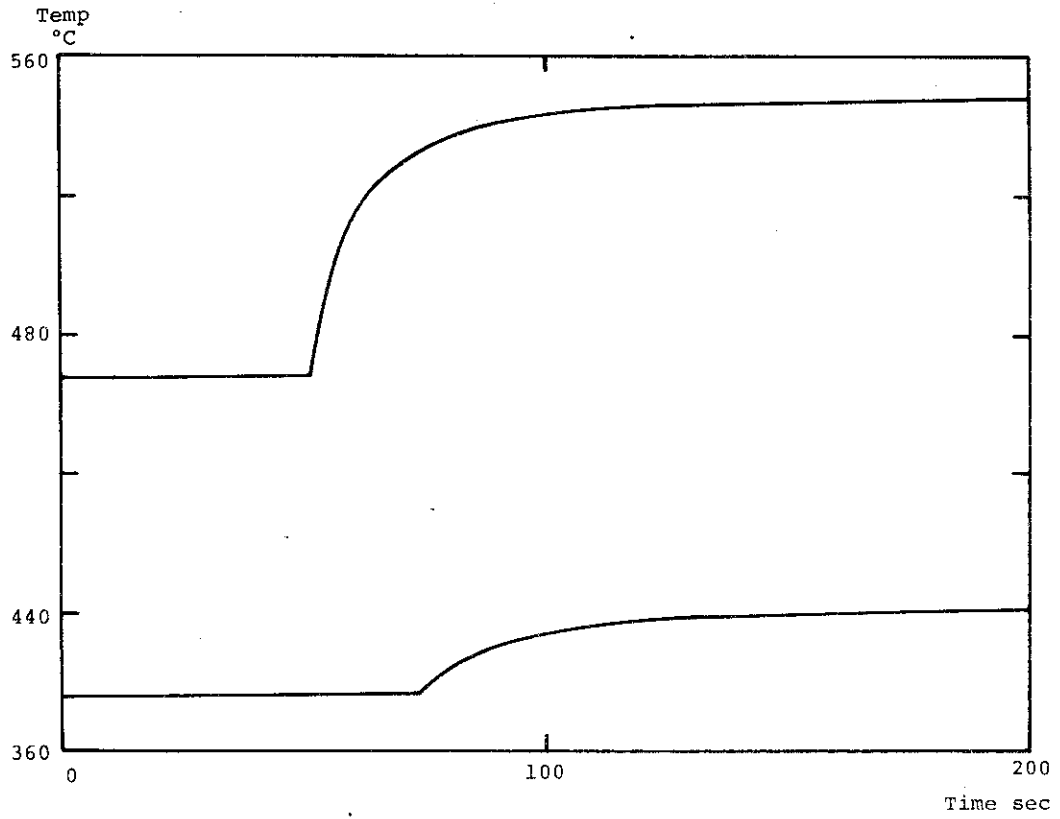


Fig. B.3

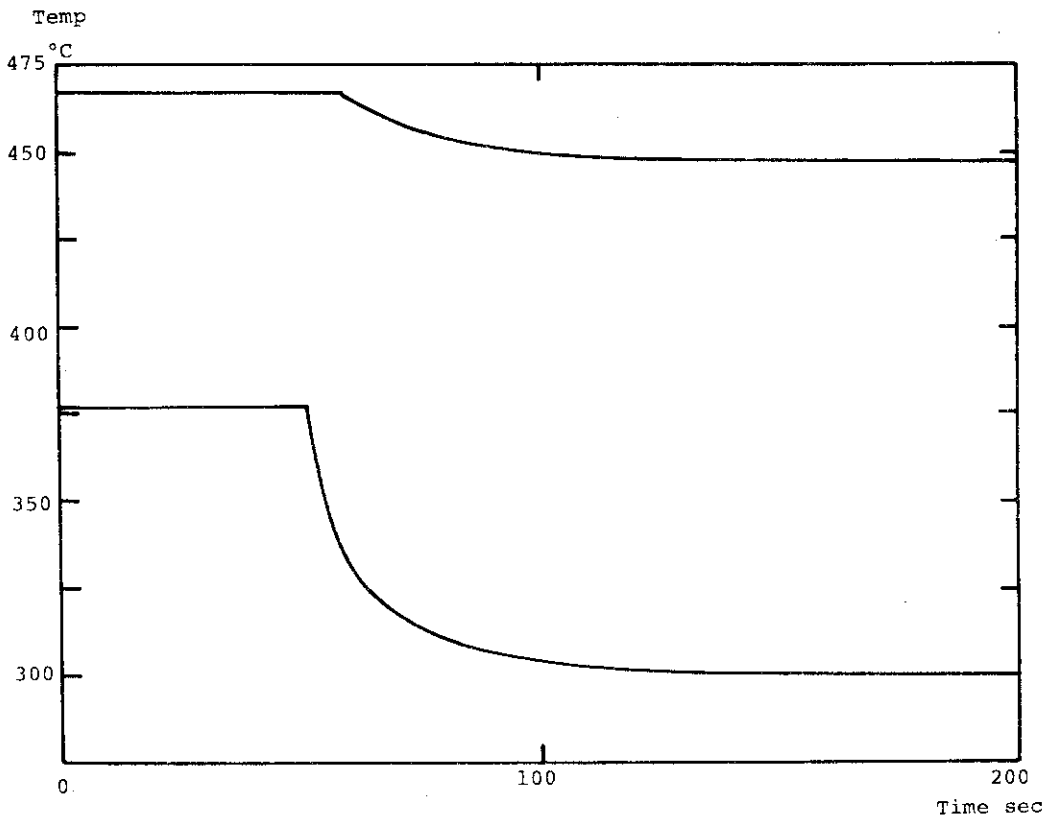


Fig. B.4

Fig. B Step Response

## 付録-C デジタル計算のプログラム

付録Bに述べたデジタル計算のプログラムを示す。このほかに結果をCRT又はプロッタに出力するサブルーチンがあるが、ここでは省略している。

入力データの形式は次のとおりである。

カード番号	入力形式	データ番号	デ - タ	
1	4F125	1	1次側入口温度	℃
		2	2 "	
		3	1次側流量	%
		4	2 "	
2	3F125	1	計算打ち切り時間	sec
		2	時間刻み巾	sec
		3	計算結果出力間隔	sec
3	1F125	1	軸方向分割数 ( $\leq 520$ ) 点	
4	1F125	1	収束判定条件	℃/sec
5	ブランクカード			

## SOURCE LIST

```

C4 K D STEADY AND TRANSIENT IHX
C4 K D BY A. IZUME
C4 K D 1967-6-27
C4 K D MODIFIED BY H. USUI
C4 K D 1975-11-12
C4 K D MODIFIED BY N. KUDO
C4 K D 1976-04-05
C4 K D
C4 K D
COMMON /Z/ NT,NX,SAMPL,CONT,DT,SE,CRI
COMMON TA,TB,INO
COMMON /P/ T(1200),TX(1200)
DIMENSION TH(520,2),TM(520,2),TC(520,2),CTM(520,2),TS(520)
INTEGER CONT

C
C
1 READ(5,2,END=999) TH1,TC1,WH,WC,TMAX,CT,SAMP,CE,CRJ,CONT,ITEL,
1 NB,IPLOT
IF(CT.NE.0.) DT=CT
IF(CE.NE.0.) SE=CE
IF(SAMP.NE.0.) SAMPL=SAMP
CRJ=CRJ*DT
IF(CRJ.NE.0) CRI=CRJ
IF(NB.EQ.0) NB=2
IF(ITEL.EQ.0) ITEL=1000
2 FORMAT(1H ,4F12.0/1H ,3F12.0/1H ,2(F12.0/),5I5 )
WRITE(6,600) TH1,TC1,WH,WC,DT,SE,CRI,CONT,SAMPL,TMAX
600 FORMAT(1H1/10X,'PRIMARY TEMP ' ,F12.5/
1 10X,'2NDARY TEMP ' ,F12.5/
2 10X,'PERCENT FLOW1 ' ,F12.5/
3 10X,'PERCENT FLOW2 ' ,F12.5/
4 10X,'TIME MESH2 ' ,F12.5/
5 10X,'SECTION NUMBER ' ,F12.5/
6 10X,'CRITERION DATE ' ,E12.5/
7 10X,'CONTROL COMAND ' ,I12 /
8 10X,'SAMPLE PERIODD ' ,F12.5/
9 10X,'TIME OF CALL. ' ,F12.5//)
4 CONTINUE
M=SE+1.1
NX=SE+1.1
MN=M-1
IF(CONT) 100,101,102
101 GO TO 1

C
C
100 CONTINUE
DTH=(TH1-TC1)/SE
TH(1,1)=TH1
TH(1,2)=TH1
TM(1,1)=TH1
TM(1,2)=TH1
TC(M,1)=TC1
TC(M,2)=TC1

C
C
DO 3 I=2,M
N=M+1-I
TH(I,1)=TH(I-1,1)-DTH

```

```

TH(1,2)=TH(I-1,2)-DTH
TM(I,1)=TM(I-1,1)-DTH
TM(I,2)=TM(I-1,2)-DTH
TC(N,1)=TC(N+1,1)+DTH
3 TC(N,2)=TC(N+1,2)+DTH
C
C
102 VH=0.14
VC=0.51
GH=822.0
GM=7800.0
GC=850.0
UH=0.963
UC=2.584
SSH=500.2
SSC=441.0
ELEG=3.2
CH=0.31
CM=0.138
CC=0.31
AH=2.656
AM=0.191
AC=0.68
C
C
FH=VH*AH
FC=VC*AC
WHB=GH*GH*WH/100.0
WCB=FC*GC*WC/100.0
DX=ELEG/SE
SH=SSH/ELEG
SC=SSC/ELEG
C
C
COUNTS=0.
J=0
NCA=0
CRIMAX=0.0
WRTIME=SAMPL
C
C
TH(1,2)=TH1
TC(M,2)=TC1
WCD2=2.0*WHB*CH*DT
CAGD2=2.0*CH*AH*GH*DX
USDD=UH*SH*DX*DT
A1=(WCD2+CAGD2-USDD)/(WCD2+CAGD2+USDD)
A2=(WCD2-CAGD2-USDD)/(WCD2+CAGD2+USDD)
A3=(WCD2-CAGD2+USDD)/(WCD2+CAGD2+USDD)
A4=USDD*2/(WCD2+CAGD2+USDD)
CAGM2=2.0*CM*AM*GM
USDH=UH*SH*DT
USDC=UC*SC*DT
A5=(CAGM2-USDH-USDC)/(CAGM2+USDH+USDC)
A6=USDH/(2.0*(CAGM2+USDH+USDC))
A7=USDC/(2.0*(CAGM2+USDH+USDC))
AGCDC2=2.0*AC*GC*CC*DX
WCDC2=2.0*WCB*CC*DT
USDDC=UC*SC*DX*DT
A8=(AGCDC2-WCDC2-USDDC)/(AGCDC2+WCDC2+USDDC)
A9=(AGCDC2+WCDC2-USDDC)/(AGCDC2+WCDC2+USDDC)
A10=(AGCDC2-WCDC2+USDDC)/(AGCDC2+WCDC2+USDDC)
A11=(2.0*USDDC)/(AGCDC2+WCDC2+USDDC)
WRITE(6,11) A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A11
11 FORMAT(1H0,6E15.5)
89 IF(CONT.NE.1) GO TO 92

```

```

NN=0
COUNT=0.0
HH=UH*SH/(CH*AH*GH)
HC=UC*SC/(CC*AC*GC)
HMH=UH*SH/(CM*AM*GM)
HMC=UC*SC/(CM*AM*GM)
CA=HH/(VH*WH*0.01)
CB=HC/(VC*WC*0.01)
CMH=HMH/(HMH+HMC)
CMC=HMC/(HMH+HMC)
C=CB*CMH-CA*CMC
S=TH1+CA*CMC*(TH1-TC1)/(CB*CMH*EXP(C*ELEG)-CA*CMC)
HH=S-TH1
HC=(S-TC1)*EXP(-C*ELEG)
DO 95 I=1,M
X=FLOAT(I-1)*DX
TH(I,1)=S-HH*EXP(X*C)
TH(I,2)=TH(I,1)
TC(I,1)=S-HC*EXP(C*X)
TC(I,2)=TC(I,1)
TM(I,1)=CMH*TH(I,1)+CMC*TC(I,1)
TM(I,2)=TM(I,1)
95 CONTINUE
GO TO 57
C
C
92 CONTINUE
NC=0
CRIMAX=0.0
C
C
90 NN=0
ITELA=ITEL
CALL GRTIMR(60000.0,IERR)
RTMA=10000.0
NA=0
C
C
54 DO 31 I=1,MN
TH(I+1,2)=A1*TH(I,1)+A2*TH(I,2)-A3*TH(I+1,1)+A4*(TM(I,1)+TM(I,2))
IK=M-I
31 TC(IK,2)=A8*TC(IK,1)+A9*TC(IK+1,1)-A10*TC(IK+1,2)+A11*(TM(IK,2)+
1 TM(IK,1))
IF(CONT) 32,33,34
33 GO TO 1
32 DO 7 I=1,MN
7 TM(I,1)=TM(I,2)
34 DO 8 I=1,MN
TM(I,2)=A5*TM(I,1)+A6*(TH(I,1)+TH(I,2)+TH(I+1,1)+TH(I+1,2))+
1 A7*(TC(I,1)+TC(I,2)+TC(I+1,1)+TC(I+1,2))
8 CONTINUE
IF(CONT) 42,43,44
43 GO TO 1
42 DO 6 I=2,M
6 TH(I,1)=TH(I,2)
DO 9 I=1,MN
9 TC(I,1)=TC(I,2)
C
C
44 NN=NN+1
SAMTM=0.0
DO 50 I=1,MN
SAMTM=SAMTM+(TM(I,1)-TM(I,2))*(TM(I,1)-TM(I,2))
50 CONTINUE
RTM=SQRT(SAMTM)/(SE+1.0)
VAL=RTM

```

```

C
  IF(CRI-RTM) 51,56,56
C
C
51 IF(NN*GE*ITELA) GO TO 52
C
45 CONTINUE
  IF(RTMA.EQ.RTM) NA=NA+1
  RTMA=RTM
  IF(NA.LT.NB) GO TO 53
52 IF(RTM.GT.CRIMAX) CRIMAX=RTM
  NC=NC+1
  WRITE(6,35) RTM,NN
35 FORMAT(1H ,5X,'CRI IS CHANGED TO ',E12.5,I10 )
  GO TO 56
C
C
36 WRITE(6,49) NN,RTM
49 FORMAT(1H ,10X,'NOT CONVERGE ',I10,E12.5 /)
  NA=0
53 GO TO 54
C
C
56 CONTINUE
  IF(CONT) 57,58,59
58 GO TO 1
C
C
57 CONTINUE
68 WRITE(6,60) NN,COUNT
  WRITE(6,61) (TH(I,2),I=1,M)
  WRITE(6,61) (TC(I,2),I=1,M)
  NT=0
  TIME=0.
  NNS=0
60 FORMAT(1H0,I10,F12.1)
61 FORMAT(1H0,50(8F10.2/))
C
C
59 CONTINUE
  IF(J.NE.0.OR.NT.NE.0) GO TO 83
  WRITE(6,74) NT,TIME,NNS,COUNTS,NCA,CRIMAX
83 CONTINUE
  J=J+1
  TIME=FLOAT(J)*DT
  DO 80 I=1,M
80 TH(I,1)=TH(I,2)
  DO 81 I=1,MN
81 TM(I,1)=TM(I,2)
  DO 82 I=1,M
82 TC(I,1)=TC(I,2)
  IF(TIME-WRTIME) 90,55,55
C
C
55 WRTIME=WRTIME+SAMPL
  NT=NT+1
  TIM =FLOAT(NT)*SAMPL
  WRITE(6,73) NT,TIM ,NN,COUNT,NC,CRIMAX,TH1,TC1,
  C TH(M,1),TC(1,1),TM(M,1),TM(1,1)
74 FORMAT(1H0,' NT TIME SEC ITEL SEC CRI VALUE TA IN
  1 TB IN TA OUT TB OUT '/
  2 I6,F8.1,I5,F7.1,I5,E10.4,2X,6F9.2 )
73 FORMAT(1H ,15,F8.1,I5,F7.1,I5,E10.4,2X,6F9.2 )
  IF(TIME-TMAX) 92,200,200
C
C

```

```
200 CONTINUE  
    GO TO 1  
999 STOP  
    47 FORMAT(15)  
    46 FORMAT(1H , 'ITERATION OVER' 110,E12.5 /)  
    END
```

## 付録-D ハイブリッド計算のプログラム

本報告で用いたCSDT法による計算のアナログ回路とデジタル計算の変数との対応，入力データの形式，デジタル計算プログラムを示す。

図D1はアナログ回路とデジタルプログラム中の変数との対応である。

入力データの形式は次のとおりである。

カード番号	入力形式	データ番号	データ
1	6F125, I1		このカードは計算結果をCRTに出力させるときに，プロットの横，縦軸を指定する。CRTを用いないときはこのカードは不要である。
		1	横座標の左端の値 m, sec
		2	横座標の右端の値 "
		3	横座標の刻み巾 "
		4	縦座標の下端の値 °C
		5	縦座標の上端の値 "
		6	縦座標の刻み巾 "
		7	0 : $X_1, X_2$ を出力する 1 : $X_1, X_2, X_m$ を出力する
2	6F125	1	1次側流速 m/sec
		2	2 " "
		3	$H_1$ の値 1/sec
		4	$H_2$ " "
		5	$H_{m1}$ " "
		6	$H_{m2}$ " "
3	F125	1	$\theta$
4	2F125	1	計算時間 sec
		2	時刻刻み巾 $\Delta t$ "
5	2F125	1	熱交換器軸長 L m
		2	軸方向刻み巾 $L/n$ "
6	3F125		スケールファクタ
		1	軸方向 sec/m
		2	温度 ( $x_1, x_2$ ) MU/°C
		3	温度 ( $S_1, S_2$ ) "
7	3F120		温度基準値
		1	$x_1$ °C
		2	$x_2$ "
		3	$x_m$ "



カード番号	入力形式	データ番号	デ - タ
8	I 6	1	LPへの出力間隔 ( $\Delta t$ の整数倍で与える)
9	2I 6, 5F125		刻み $\Delta t$ ごとの入口温度の時間変化を与える。(必要なだけ入れる)
		1	1~500 1次側入口温度 °C
			501~1000 2 " "
		2	1~500 1次側入口温度 "
			501~1000 2 " "
終り	I 6	1	10000 データカードの終りを示す

センススイッチの機能を以下に示す。

センススイッチ番号	機 能
A	OFF
B	OFF
C	OFF
D	計算シーケンス制御 ON 積分1回ごとに停止する(続行させるにはキーボードでRETURNを押す) OFF 連続して計算する
E	LP出力制御 ON 空間温度分布を出力する OFF 過渡応答を出力する
F	LP出力制御 ON LP出力を行なわない OFF LP出力する
G	CRT出力制御 ON CRT出力なし OFF CRTに計算結果をプロットする。このときは入力カードNo 1が必要である。

ハイブリッド計算プログラムは次のとおりである。

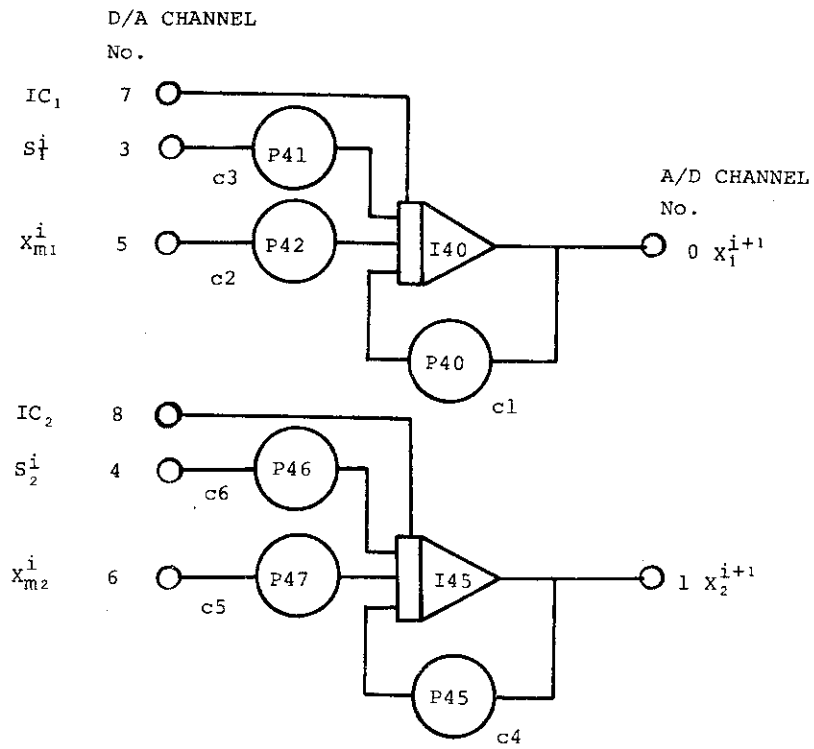


Fig. D.1

```

C4 K D
C4 K D SERIAL INTEGRATION OF FIRST ORDER PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATION
C4 K D 1975 AUGUST IBM029 CODE
C4 K D CODED BY K. KUDO
C4 K D
C4 K D
C4**8 DECLARATION OF VARIABLES *****
C4 K D
COMMON /P/T1T(500),T2T(500),T1X(500),T2X(500),TMX(500),
CV1,V2,H1,H2,HM1,HM2,S,T,DT,X,DX,AX,AT,AS,T10,T20,TM0,
C X1(500),X2(500),XM(500),S1(500),S2(500),SM(500),
C C(19),DIN(4),DOUT(8)
COMMON /Z/NT,NX,IDTIME,ITIME,ITEL,
C ILP(5),ICRT(5),IXY(5),IPEN(5)
LOGICAL SENSW
C
C
1 CONTINUE
IN=0
IF(.NOT.SENSW(4)) GO TO 2
READ(2,15) IN
15 FORMAT(I1)
2 CONTINUE
IF(IN.EQ.0) GO TO 4
3 IF(SENSW(8)) GO TO 4
IF(IN.EQ.4) GO TO 6
IN=0
CALL PLOT(TA,TB,INO)
IF(IN.EQ.3) GO TO 5
C
C DIGITAL KEISAN PLOT
C
IF(IN.NE.2) GO TO 4
CALL CRPLOT (INO)
GO TO 1
C
5 IN=2
CALL PLOT(TA,TB,INO)
GO TO 1
C
6 IN=1
CALL CRPLOT(INO)
C
4 CONTINUE
CALL CLEAR
C
C**** INPUT OF PARAMETERS *****
C
CALL INPUT1
CALL INPUT2
C
C**** CALCULATION AND CHECK OF PARAMETERS *****
C
CALL PARAM
C

```

```

C****  CALCULATION OF INITIAL VALUES  ****
C
      TA=T1X(NX)
      TB=T2X(1)
      CALL IVAL
      IF(SENSW(1)) GO TO 1
C
C****  ANALOG PART INITIALIZE  ****
C
      CALL SET
C
C****  INTEGRATION START  ****
C
      1000 CALL START
C
C****  OUTPUT CONTROL  ****
C
C
C****  CONTROL OF ITERATION  ****
C
      ITEL=ITEL+1
      CALL OUTPUT(0)
      CALL ITER
      IF(IOTIME.NE.=1) GO TO 1000
C
C
C      OWARI
C
      IF(.NOT.SENSW(8)) GO TO 30
      WRITE(1,10) ITEL
      10 FORMAT(1H0,21H*****STOP***** ITEL=      ,13)
      GO TO 1
      30 CONTINUE
      CALL PLOT(TA,TB,INO)
      GO TO 1
      20 CONTINUE
      STOP
      END

      SUBROUTINE CLEAR
C****  MEMORY CLEAR  ****
C
      COMMON /P/A(5548)
      COMMON /Z/IA(25)
C
      DO 10 I=1,5548
      A(I)=0.
      10 CONTINUE
      DO 20 I=1,25
      IA(I)=0
      20 CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

SUBROUTINE INPUT1
C**** INPUT OF PARAMETERS
C
COMMON /P/ A(2500),B(17)
COMMON /Z/ IA(4),ITEL,IB(4)
LOGICAL SENSW
C
READ(6,1) B,IB
IA(1)=IFIX(B(8)/B(9)+0.1)
IA(2)=IFIX(B(10)/B(11)+1.1)
1 FORMAT(6F12.0/F12.0/2(2F12.0/),2(3F12.0/),4I6)
IF(IB(2).EQ.1) RETURN
IF(SENSW(6)) RETURN
WRITE(16,2)
2 FORMAT(1H1,35H ----- VALUE OF PARAMETERS ----- )
CALL PRINT(2)
CALL PRINT(5)
CALL PRINT(6)
RETURN
END

SUBROUTINE INPUT2
C**** INPUT OF INITIAL VALUES *****
C
COMMON/P/A(2511)
COMMON /Z/IA(25)
LOGICAL SENSW
DIMENSION DATA(5)
C
IF(SENSW(6)) GO TO 50
IF(IA(7).EQ.1) GO TO 50
WRITE(16,51)
51 FORMAT(1H0,35H ----- INIAL VALUE CARDS ----- //)
50 CONTINUE
100 READ(6,1) I1,I2,(DATA(I),I=1,5)
IF(SENSW(6)) GO TO 55
IF(IA(7).EQ.1) GO TO 55
WRITE(16,52) I1,I2,(DATA(I),I=1,5)
52 FORMAT(1H ,1X,2I8,5F12.4)
55 CONTINUE
1. FORMAT(2I6,5F12.0)
IF(I1.EQ.10000) GO TO 200
IF(I1.EQ.0.AND.I2.EQ.0) GO TO 102
IF(I1.NE.0.AND.I2.EQ.0) GO TO 104
IF(I1.NE.0.AND.I2.NE.0) GO TO 106
CALL ERROR(10,1)
GO TO 104
C
102 DO 103 I=1,5
J=J+1
A(J)=DATA(I)
103 CONTINUE
GO TO 100

```

```

C
104 J=I1-1
    GO TO 102
C
106 DO 107 J=I1,I2
    A(J)=DATA(1)
107 CONTINUE
    GO TO 100
C
200 CONTINUE
    IF(SENSW(3)) GO TO 250
    X=0.
    K=IA(2)
    DO 210 I=1,K
    Y=EXP(0.0416*X)
    J=I+1000
    A(J)=1365.0-865.0*Y
    J=J+1500
    A(J)=1365.0-897.2*Y
    J=I+2000
    A(J)=0.2971*A(I+1000)+0.7029*A(I+1500)
    X=X+A(2511)
210 CONTINUE
250 CONTINUE
    IF(IA(7).LE.1) RETURN
    IF(SENSW(6)) RETURN
    WRITE(16,2)
2  FORMAT(1H0, 27H ----- INITIAL VALUES ----- )
    CALL PRINT(1)
    RETURN
    END

```

```

SUBROUTINE PARAM
C**** CALCULATION AND CHECK OF PARAMETERS ****
C
COMMON /P/ T1T(500),T2T(500),T1X(500),T2X(500),TMX(500),
CV1,V2,H1,H2,HM1,HM2,S,T,DT,X,DX,AX,AT,AS,T10,T20,TM0,
C      X1(500),X2(500),XM(500),S1(500),S2(500),SM(500),
C      C(19),DIN(4),DOUT(8)
COMMON /Z/ NT,NX,IDTIME,ITIME,IA,IB,IC
COMMON /Q/ C7,C8,C9,C10,C11,C12
LOGICAL SENSW
C
C(1)=(1.+DT*S*H1)/(AX*S+V1*DT)
C(2)=H1/(AX*V1)
C(3)=AT/(AX*S+V1*DT*AS)
C(4)=(1.+DT*S*H2)/(AX*S+V2*DT)
C(5)=H2/(AX*V2)
C(6)=AT/(AX*S+V2*DT*AS)
C(7)=AS/(S*AT)
C(8)=(1.-S)/S
C(9)=AS*DT*H1*(T10-TM0)
C(10)=AS/(S*AT)

```

```

C(11)=C(8)
C(12)=AS*DT*H2*(TM0-T20)
C(13)=DT*S*HM1/(1,+DT*S*(HM1+HM2))
C(14)=DT*S*HM2/(1,+DT*S*(HM1+HM2))
C(15)=AT/(AS*(1,+DT*S*(HM1+HM2)))
C(16)=AS*(1,+DT*(1,+S)*(HM1+HM2))/AT
C(17)=AS*DT*(1,-S)*HM1/AT
C(18)=AS*DT*(1,-S)*HM2/AT
C(19)=AS*DT*(HM1*T10+HM2*T20-(HM1+HM2)*TM0)
C7=C(7)
C8=C(8)
C9=C(9)
C10=C(10)
C11=C(11)
C12=C(12)
C
IF(IC,EQ,1) GO TO 30
IF(SENSW(6)) GO TO 30
WRITE(16,1)
1 FORMAT(1H0, 32H ----- VALUE OF CONSTANTS ----- )
CALL PRINT(4)
C
C**** CONSTANT CHECK ****
C
30 DO 40 I=1,6
J=I
31 V=C(I)
IF(V,LE,10.) GO TO 32
CALL ERROR(22,J)
WRITE(1,10) I,C(I)
10 FORMAT(1H0,4H C(,I2,3H)=,F9.4)
IF(SENSW(1)) GO TO 40
32 CONTINUE
IF(.NOT,SENSW(2)) GO TO 33
IF(V,LE,1.0.AND,V,GE,0.0) GO TO 40
IF(SENSW(8)) CALL ERROR(20,J)
33 CONTINUE
C(I)=C(I)/10.
40 CONTINUE
C
IF(IC,EQ,1) GO TO 5
IF(SENSW(6)) GO TO 5
WRITE(16,2)
2 FORMAT(1H0, 33H ----- VALUE OF VARIABLES ----- )
CALL PRINT(4)
5 IF(.NOT,SENSW(2)) RETURN
READ(2,20) I
20 FORMAT(I1)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE IVAL
C*****  CALCULATION OF INITIAL VALUES *****
C
COMMON /P/ T1T(500),T2T(500),T1X(500),T2X(500),TMX(500),
CV1,V2,H1,H2,HM1,HM2,S,T,DT,X,DX,AX,AT,AS,T10,T20,TM0,
C      X1(500),X2(500),XM(500),S1(500),S2(500),SM(500),
C      C(19),DIN(4),DOOUT(8)
COMMON /Z/ NT,NX,IA(10)
COMMON /Q/ C7,C8,C9,C10,C11,C12
LOGICAL SENSW
C
DO 50 I=1,NT
IF(I.GT.500) GO TO 50
T1T(I)=AT*(T1T(I)-T10)
T2T(I)=AT*(T2T(I)-T20)
50 CONTINUE
DO 60 I=1,NX
T1X(I)=AT*(T1X(I)-T10)
X1(I)=T1X(I)
T2X(I)=AT*(T2X(I)-T20)
X2(I)=T2X(I)
S1(I)=(X1(I)+C7-C9)/(1.+C8)
S2(I)=(X2(I)+C10-C12)/(1.+C11)
TMX(I)=AT*(TMX(I)-TM0)
XM(I)=TMX(I)
SM(I)= XM(I)*C(16)+X1(I)*C(17)+X2(I)*C(18)+C(19)
60 CONTINUE
X1(1)=T1T(1)
X2(NX)=T2T(1)
IF(IA(6).EQ.0) GO TO 52
WRITE(10,1)
1 FORMAT(1H0, 38H ----- SCALED VALUE OF VARIABLES --- )
CALL PRINT(1)
C
C*****  SCALED VALUE CHECK *****
2
52 CONTINUE
DO 61 I=1,NT
IF(I.GT.500) GO TO 61
V=ABS(T1T(I))
W=ABS(T2T(I))
IF(V.LE.1.0.AND.W.LE.1.0) GO TO 61
J=I
CALL ERROR(30,J)
61 CONTINUE
DO 70 I=1,NX
V=ABS(X1(I))
W=ABS(X2(I))
Y=ABS(XM(I))
IF(V.LE.1.0.AND.W.LE.1.0.AND.Y.LE.1.0) GO TO 70
J=I
CALL ERROR(40,J)
70 CONTINUE
IA(3)=0
IA(8)=0
CALL OUTPUT(0)

```



```

NXJ=NX-1
DO 75 I=1,NXJ
  J=NX-I+1
  X1(J)=(T1X(J)+T1X(J+1))/2.
  S1(J)=(S1(J)+S1(J+1))/2.
  XM(J)=(TMX(J)+TMX(J+1))/2.
  X2(I)=(T2X(I)+T2X(I+1))/2.
  S2(I)=(S2(I)+S2(I+1))/2.
75 CONTINUE
DOUT(1)=-S1(2)
DOUT(2)=-S2(NX+1)
DOUT(3)=-XM(2)
DOUT(4)=-XM(NX)
DOUT(5)=-X1(1)
DOUT(6)=-X2(NX)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE SET
C**** INITIAL SET OF ANALOG COMPUTER *****
C
COMMON /P/ A(2500),B(7),E(7),D(3),
C          X1(500),X2(500),XM(500),S1(500),S2(500),SM(500),
C          C(19),DIN(4),DOUT(8)
COMMON /Z/ NT,NX,IDTIME,ITIME,ITEL,ILP(5),ICRT(5),IXY(5),IPEN(5)
LOGICAL SW1
DIMENSION PQ(12)
DATA PQ( 1)/4HP040/
DATA PQ( 2)/4HP042/
DATA PQ( 3)/4HP041/
DATA PQ( 4)/4HP045/
DATA PQ( 5)/4HP047/
DATA PQ( 6)/4HP046/
DATA PQ( 7)/4HP071/
DATA PQ( 8)/4HP072/
DATA PQ( 9)/4HP070/
DATA PQ(10)/4HP076/
DATA PQ(11)/4HP077/
DATA PQ(12)/4HP075/
C
C
IERR=0
CALL QSHYIN(IERR,681,681)
CALL QSC(0,IERR)
CALL QSC(1,IERR)
CALL QSSP(IERR)
CALL QSRUN(IERR)
IF(IERR.EQ.1) GO TO 10
CALL ERROR(50,IERR)
10 DO 20 I=1,6
  CALL QWPR(PQ(I),C(I),IERR)
  IF(IERR.EQ.1) GO TO 20
  IF(C(I).EQ.0..OR.C(I).EQ.1.) GO TO 20
  J=60+I
  CALL ERROR(J,IERR)
20 CONTINUE
  CALL QRSLL(1,SW1,IE)
30 CALL QRSLL(1,SW1,IE)
  IF(SW1) GO TO 30
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE START
C**** INTEGRATION START
C
COMMON /P/ A(2500),B(7),E(7),D(3),
C          X1(500),X2(500),XM(500),S1(500),S2(500),SM(500),
C          C(19),DIN(4),DOUT(8)
COMMON /Z/ NT,NX,IDTIME,ITIME,ITEL
LOGICAL SENSW1,SENSW2,SENSW3,L0
C
CALL QWBDAR(DOUT,3,6,IERR)
C*** CHECK VALUE OUTPUT
CALL QWBDAR(DOUT,15,6,IERR)
CALL QSTDA
C
CALL QRSL(1,SENSW1,IERR)
10 CALL QRSL(1,SENSW1,IERR)
IF(SENSW1) GO TO 10
CALL QSIC(IERR)
CALL QSDLY(3)
J=2
K=NX-1
L=J+1
M=K-1
IDTIME=0
C
C ***** OPERATION START *****
C
CALL QRSL(0,L0,IERR)
18 CALL QRSL(0,L0,IERR)
IF(.NOT.L0) GO TO 18
CALL QSOP(IERR)
50 CONTINUE
IF(J,GE,NX) GO TO 20
DOUT(1)=S1(L)
DOUT(2)=S2(M)
DOUT(3)=XM(L)
DOUT(4)=XM(K)
CALL QWBDAR(DOUT,3,4,IERR)
CALL QWBDAR(DOUT,15,4,IERR)
20 CALL QRSL(0,L0,IERR)
30 CALL QRSL(0,L0,IERR)
IF(.NOT.L0) GO TO 30
CALL QSTDA
CALL QRBADR(DIN,0,2,IERR)
X1(J)=DIN(1)
X2(K)=DIN(2)
DO 35 I=1,2
XX=ABS(DIN(I))
IF(XX,GE,0.999) IDTIME=IDTIME+1
35 CONTINUE
IF(J,GE,NX) GO TO 100
K=NX-J
J=J+1
L=J+1
M=K-1
GO TO 50

```

```
C
C
C ***** INTEGRATION STOP *****
C
100 CALL QSM(IERR)
   DO 103 I=2,NX
     S1(I)=C(7)*X1(I)-C(8)*S1(I)+C(9)
     S2(I-1)=C(10)*X2(I-1)-C(11)*S2(I-1)+C(12)
     XX=ABS(S1(I))
     IF(XX.LE,0.999) GO TO 101
     IDTIME=IDTIME+1
     S1(I)=SIGN(0.999,S1(I))
101  XX=ABS(S2(I-1))
     IF(XX.LE,0.999) GO TO 103
     IDTIME=IDTIME+1
     S2(I)=SIGN(0.999,S2(I))
103  CONTINUE
102  DO 104 I=1,NX
     XM(I)=C(13)*X1(I)+C(14)*X2(I)+C(15)*SM(I)
     SM(I)=C(16)*XM(I)+C(17)*X1(I)+C(18)*X2(I)+C(19)
     XX=ABS(XM(I))
     IF(XX.LE,0.999) GO TO 104
     IDTIME=IDTIME+1
     XM(I)=SIGN(0.999,XM(I))
104  CONTINUE
     RETURN
     END

SUBROUTINE ITER
C***** ITERATION CONTROL
C
COMMON /P/ T1T(500),T2T(500),A(1500),B(17) ,
C          X1(500),X2(500),XM(500),S1(500),S2(500),SM(500),
C          C(19),DIN(4),DOUT(8)
COMMON /Z/ NT,NX,IDTIME,ITIME,ITEL
COMMON /Q/ C7,C8,C9,C10,C11,C12
LOGICAL SENSW3,SENSW

C
C NEXT STEP PREPARATION
C
X1NX=X1(NX)
X21=X2(1)
30  CONTINUE
   NXJ=NX-1
   DO 25 I=1,NXJ
     J=NX-I+1
     X1(J)=(X1(J)+X1(J-1))/2.
     X2(I)=(X2(I)+X2(I+1))/2.
     S1(J)=(S1(J)+S1(J-1))/2.
     S2(I)=(S2(I)+S2(I+1))/2.
     XM(J)=(XM(J)+XM(J-1))/2.
25  CONTINUE
```

```

IF(ITEL,GE,500) GO TO 26
X1(1)=Y1T(ITEL)
X2(NX)=T2T(ITEL)
T1T(ITEL)=X1NX/B(13)+B(15)
T2T(ITEL)=X21/B(13)+B(16)
GO TO 29
C
26 X1(1)=T1T(500)
X2(NX)=T2T(500)
IF(SENSW(5)) GO TO 29
IF(ITEL,GT,1249) GO TO 29
A(ITEL=499)=X1NX/B(13)+B(15)
A(ITEL+251)=X21/B(13)+B(16)
C
29 CONTINUE
CALL QRSL(3,SENSW3,IERR)
CALL QRSL(3,SENSW3,IERR)
IF(SENSW3) GO TO 5
IF(ITEL,LT,NT) GO TO 1
5 CONTINUE
IDTIME=-1
NT=ITEL
RETURN
C
1 CONTINUE
S1(1)=C7*X1(1)-C8*S1(1)-C9
S2(NX)=C10*X2(NX)-C11*S2(NX)+C12
E=ABS(S1(1))
IF(E,LE,0.999) GO TO 10
IERR=1
S1(1)=SIGN(0.999,S1(1))
CALL ERROR(81,IERR)
10 E=ABS(S2(NX))
IF(E,LE,0.999) GO TO 20
S2(NX)=SIGN(0.999,S2(NX))
IERR=2
CALL ERROR(82,IERR)
20 CONTINUE
C
DOUT(1)=-S1(2)
DOUT(2)=-S2(NX-1)
DOUT(3)=-XM(2)
DOUT(4)=-XM(NX)
DOUT(5)=-X1(1)
DOUT(6)=-X2(NX)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE OUTPUT(K)
C**** OUTPUT FOR LP XY PEN CRT
C
COMMON /P/ A(2500),B(7),T,DT,X,DX,AX,AT,AS,T10,T20,TM0,
C          X1(500),X2(500),XM(500),S1(500),S2(500),SM(500),
C          C(19),DIN(4),DOUT(8)
COMMON /Z/ NT,NX,ITIME,ITIME,ITEL,
C          ILP(5),ICRT(5),IXY(5),IPEN(5)
DIMENSION D(6)
LOGICAL SENSW2,SENSW3
LOGICAL SENSW

C
CALL QRSL(2,SENSW2,IERR)
CALL QRSL(2,SENSW2,IERR)
IF(ITEL,GE,ILP(5)) GO TO 5
IF(SENSW2) GO TO 10
GO TO 50
5 ILP(5)=ILP(5)+ILP(1)
IF(SENSW2) GO TO 10
IF(SENSW(6)) GO TO 50
10 CONTINUE
TIMER=FLOAT(ITEL )*DT
TIMEM=FLOAT(ITEL )+AX*X
IF(SENSW(5)) GO TO 28
IF(TIMER,NE.0.) GO TO 26
WRITE(16,23)
23 FORMAT(1H0/76H ITEL TIME TIMEM 1 =IN 1 = OUT 2 = IN 2
" = OUT M = IN M = OUT )
ITIME=1
26 CONTINUE
D(1)=X1(1)/AT+T10
D(2)=X1(NX)/AT+T10
D(3)=X2(NX)/AT+T20
D(4)=X2(1)/AT+T20
D(5)=XM(1)/AT+TM0
D(6)=XM(NX)/AT+TM0
IF(SENSW(7)) GO TO 33
WRITE(16,24) ITEL,TIMER,TIMEM,(D(I),I=1,6)
24 FORMAT(1H ,I4,2F8.1,6F9.2)
GO TO 25
33 WRITE(16,34) ITEL,TIMER,TIMEM,(D(I),I=1,6)
34 FORMAT(1H ,I4,2F8.1,6F9.1)
GO TO 25
28 CONTINUE

C
WRITE(16,21) ITEL,TIMER,TIMEM
21 FORMAT(1H0, 9H STEP = I3, 9H TIME = . 2F10.4 )
DO 20 I=1,NX
J=I+1000
A(J)=X1(I)/AT+T10
J=I+1500
A(J)=X2(I)/AT+T20
J=I+2000
A(J)=XM(I)/AT+TM0
20 CONTINUE
CALL PRINT(7)

```

```

IF(ILP(3),EQ,0) GO TO 25
WRITE(16,22)
22 FORMAT(1H0,25H          SCALED VARIABLES          )
CALL PRINT(3)
25 CONTINUE
IF(ILP(4),NE,0) GO TO 50
IF(.NOT,SENSW(5)) GO TO 50
J1=NX+1000
J2=1500+NX
D1=(A(1001)-A(J1))/FLOAT(NX-1)
D2=(A(1501)-A(J2))/FLOAT(NX-1)
I1=0
I2=0
J=NX-2
DO 30 I=2,J
J1=I+1000
J2=I+1001
J3=I+1500
J4=I+1501
XX=(A(1001)-D1*FLOAT(I-1)-A(J1))*(A(1001)-D1*FLOAT(I)-A(J2))
YY=(A(1501)-D2*FLOAT(I-1)-A(J3))*(A(1501)-D2*FLOAT(I)-A(J4))
IF(XX.LT,0.) I1=I1+1
IF(YY.LT,0.) I2=I2+1
30 CONTINUE
IF(I1,NE,0.OR,I2,NE,0) GO TO 40
WRITE(16,32)
32 FORMAT(1H ,70X,6HSEIJYD )
GO TO 50
40 WRITE(16,42)I1,I2
42 FORMAT(1H0,10X,20H***** SHINDO ***** ,2I6)
GO TO 50
50 IF(ILP(4),NE,0) GO TO 60
IF(IDTIME,EQ,0) GO TO 60
WRITE(16,55) ITEL,IDTIME
55 FORMAT(1H0,5X,40H----- SCALE OVER ----- ITEL= ,2I5)
CALL ERROR(80,IDTIME)
60 CONTINUE
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE PRINT(N)
C**** LP OUTPUT ROUTINE ---PARAMETERS *****
C
COMMON /P/ A(2500),B(17),C(3000),D(19)
COMMON /Z/ IA(4),ITEL,IB(4)
LOGICAL SENSW
C
GO TO (10,20,30,40,50,60,70),N
C
10 DO 12 I=1,501,500
   K=IA(1)+I-1
   WRITE(16,90) (A(J),J=I,K)
12 CONTINUE
70 DO 14 I=1001,2001,500
   K=IA(2)+I-1
   IF(SENSW(7)) GO TO 72
   WRITE(16,73) (A(J),J=I,K)
   GO TO 14
72 WRITE(16,94) (A(J),J=I,K)
73 FORMAT(1H /100(5X,5F12.2/))
14 CONTINUE
   GO TO 100
C
20 WRITE(16,90) B
   GO TO 100
C
30 DO 32 I=1,2501,500
   K=IA(2)+I-1
   WRITE(6,90) (C(J),J=I,K)
32 CONTINUE
   GO TO 100
C
40 WRITE(16,90) D
   GO TO 100
C
50 WRITE(16,92) IA(1),IA(2)
   GO TO 100
C
60 WRITE(16,92) IB
   GO TO 100
C
90 FORMAT(1H /100(5X,5F12.4/))
92 FORMAT(1H /10(5X,10I6/))
94 FORMAT(1H /100(5X,5F12.1/))
100 RETURN
END

```

```

      SUBROUTINE ERROR(INO,IERR)
C**** ERROR DISPLAY ROUTINE
      COMMON /P/ A(2500),B(7),T,DT,X,DX,AX,AT,AS,T10,T20,TM0,
C           X1(500),X2(500),XM(500),S1(500),S2(500),SM(500),
C           C(19),DIN(4),DOU(8)
      COMMON /Z/ NT,NX,IDTIME,ITIME,ITEL,
C           ILP(5),ICRT(5),IXY(5),IPEN(5)
      WRITE(1,10) INO,IERR
10  FORMAT(1H0/20H**** ERROR *** INO=  ,I3,8H IERR=  ,I2)
      IF(INO.EQ.20) RETURN
      READ(2,20) INI
20  FORMAT(I1)
      IERR=0
      IF(INO.GE.80) GO TO 40
      IF(INI.EQ.0) RETURN
      WRITE(1,30)
30  FORMAT(1H0///// 35H***** CALCULATION INTERRUPTED ***** )
      STOP
40  CONTINUE
      IF(INI.EQ.0) RETURN
      IF( INI.EQ.1) STOP
      TIMER=FLOAT(ITEL)*DT
      TIMEM=FLOAT(ITEL)*AX*X
      DO 45 I=1,NX
      J=I+1000
      A(J)=X1(I)/AT+T10
      J=I+1500
      A(J)=X2(I)/AT+T20
      J=I+2000
      A(J)=XM(I)/AT+TM0
45  CONTINUE
C
      WRITE(16,21) ITEL,TIMER,TIMEM
21  FORMAT(1H0, 9H STEP = I4,9H TIME =  , 2F10,1)
      CALL PRINT(7)
      WRITE(16,42)
42  FORMAT(1H0,25H ---- SCALED VARIABLES - )
      CALL PRINT(3)
      IF(INI.EQ.2) RETURN
      IF(INI.EQ.3) STOP
      END

```



```

SUBROUTINE PLOT(TA, TB, INO)
COMMON /P/T(1000), TX(1500), A(7), B, DT, X, DX, AX, AT, AS, T10, T20, TM0,
C      XA(500), XB(500), XM(500)
COMMON /Z/NT, NX
LOGICAL SENSW
IF(INO.NE.0) GO TO 100
READ(6,10) X1,X2,XD,Y1,Y2,YD,ITM
10 FORMAT(6F12.5,I1)
CALL BEGIN(9600,1)
CALL ERASE
XL=X2-X1
YL=Y2-Y1
:FACT=1000.0/XL
YFACT=750.0/YL
XLR=-XL
YLR=-YL
CALL SCALE(XFACT,YFACT,1020.0,770.0)
CALL AXIS(XLR,YLR,XL,YL,XD,YD,1,1)
CALL SCALE(XFACT,YFACT,20.0,20.0)
CALL AXIS(0.,0.,XL,YL,XD,YD,1,1)
CALL VECTOR
INO=1
RETURN
C
100 MARK=10
IF(INO.EQ.1) MARK=0
IF(INO.EQ.2) MARK=1
IF(INO.EQ.3) MARK=4
IF(INO.EQ.4) MARK=5
IF(INO.EQ.5) MARK=6
IF(INO.EQ.6) MARK=2
IF(INO.EQ.7) MARK=3
IF(SENSW(5)) GO TO 200
C
C
C      KATO 00TO
IF(NT.GT.1249) NT=1249
TK=TA-Y1
CALL TPL0T(X1,TK,0,0)
DO 130 J=1,2
X=0,
X3=XD
C
DO 120 I=1,NT
X=X+DT
K=I+J*500-500
L=I+J*750-1249
IF(I.LE.499) TK=T(K)-Y1
IF(I.GE.500) TK=TX(L)-Y1
IF(X.GT.X2) GO TO 125
IF(X.GE.X3) GO TO 122
CALL TPL0T(X,TK,1,0)
GO TO 120
122 CALL TPL0T(X,TK,1,MARK)
X3=X3+XD
120 CONTINUE

```

```

125 TK=TB-Y1
    CALL TPLOT(X1,TK,0,0)
130 CONTINUE
    GO TO 300
C
C   TEIJO UOTO
C
200 L=500
    IF(ITM,NE,0) L=1000
    DO 210 I=1,NX
        TX(I)=XA(I)/AT+T10
        J=I+500
        TX(J)=XB(I)/AT+T20
        J=I+1000
        TX(J)=XM(I)/AT+TM0
210 CONTINUE
    DO 220 J=0,L,500
        X=0.
        X3=X0
        K=J+1
        TX(K)=TX(K)+Y1
        CALL TPLOT(X1,TX(K),0,0)
        DO 220 I=2,NX
            X=X+DX*100.0
            K=J+I
            TX(K)=TX(K)+Y1
            IF(X,GT,X2) GO TO 220
            IF(X,GE,X3) GO TO 222
            CALL TPLOT(X,TX(K),1,0)
            GO TO 220
222 CALL TPLOT(X,TX(K),1,MARK)
        X3=X3+X0
220 CONTINUE
C
300 INO=INO+1
    RETURN
    END

```

```

SUBROUTINE CRPLOT (INO)
C
C   CARD DATA READ AND PLOT
C
COMMON /P/T1T(500),T2T(2000),DT
COMMON /Z/NT
READ(6,6) TA,TB,DT,NT
6 FORMAT(3F12.0,I6)
IF(DT.EQ.0.) DT=1.
IF(NT.EQ.0) NT=200
READ(6,7) (T1T(I),I=1,NT),(T2T(I),I=1,NT)
7 FORMAT(10F7.0)
DO 8 I=1,NT
    IF(T1T(I).EQ.0.) T1T(I)=T1T(I-1)
    IF(T1T(I).LT.1.) T1T(I)=T1T(I)+FLOAT(IFIX(T1T(I-1)))
    IF(T2T(I).EQ.0.) T2T(I)=T2T(I-1)
    IF(T2T(I).LT.1.) T2T(I)=T2T(I)+FLOAT(IFIX(T2T(I-1)))
8 CONTINUE
CALL PLOT(TA,TB,INO)
RETURN
END

```