

JAERI-M

85-108

強制冷凍型超電導コイル安定性解析コード

「ALPHE II」

1985年8月

山口 方土*・多田 栄介・斉藤 博一**・島本 進

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日青工業株式会社

強制冷凍型超電導コイル安定性解析コード
「ALPHEⅡ」

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部
山口 方土*・多田 栄介・斉藤 博一**・島本 進

(1985年6月28日受理)

超臨界圧ヘリウムによる強制冷凍方式は、超電導コイルの機械的強度及び絶縁性能の観点から浸漬冷凍方式よりも優れており、核融合炉用大型超電導コイルに必要な冷凍方式である。強制冷凍方式においては、コイルの安定性基準を確立することが急務となっている。本報告は、強制冷凍型超電導コイルの熱的安定性を理論的に解析する計算コード「ALPHEⅡ」に関するものであり、本計算コードにより、コイルの安定性特性を定量的に把握することができる。

* 核融合特別研究生(九州大学工学部)

** 日本ソフトウェア開発院

Stability Analysis Code "ALPHE II" for Forced-cooled Superconducting Coils

Masahito YAMAGUCHI*, Eisuke TADA, Hirokazu SAITOU**
and Susumu SHIMAMOTO

Department of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment, JAERI

(Received June 28, 1985)

The forced-cooled superconducting magnet system has excellent performances from view point of high voltage insulation and mechanical rigidity in winding package. Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) has been developing the forced-cooled technology in parallel with the pool-cooled technology with saturated liquid helium.

In order to establish the stability criterion of the forced-cooled coil and to investigate transient behavior of supercritical helium in the forced-cooled conductor, JAERI has developed a stability analysis code "ALPHE II". This analysis code can theoretically give the stability characteristics including supercritical helium behavior when thermal disturbance is applied to the coil.

This report describes basic equations and instruction manual of the analysis code.

Keywords: Stability Margine, Supercritical Helium, Forced-cooled Coil, Superconducting Coil, Fusion, Computer Code Manual

* Visting student from Kyusyu University

** Nippon Software Company Limited.

目 次

記号表

| | | |
|------|----------|----|
| 1. | はじめに | 1 |
| 2. | 解析モデル | 1 |
| 3. | 解析基礎式 | 1 |
| 3.1 | 定常計算 | 1 |
| 3.2 | 非定常計算 | 2 |
| 3.3 | 管摩擦係数 | 3 |
| 3.4 | 熱伝達係数 | 3 |
| 3.5 | ヘリウム物性値 | 3 |
| 3.6 | 導体物性値 | 3 |
| 4. | 計算手法 | 4 |
| 4.1 | 定常計算 | 4 |
| 4.2 | 非定常計算 | 4 |
| 5. | データ入力方法 | 6 |
| 6. | 計算結果出力 | 8 |
| 6.1 | 入力データ | 8 |
| 6.2 | ヘリウム物性値 | 8 |
| 6.3 | 導体物性値 | 9 |
| 6.4 | 微係数 | 9 |
| 7. | プログラムの構成 | 9 |
| 8. | 図形出力 | 10 |
| 9. | 使用例 | 11 |
| 9.1 | JCL | 11 |
| 9.2 | 計算条件 | 11 |
| 9.3 | 計算結果 | 12 |
| 謝 辞 | | 12 |
| 参考文献 | | 12 |

Contents

| | |
|---------------------------------|----|
| Symbol | |
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Analysis model | 1 |
| 3. Basic equation | 1 |
| 3.1 steady state calculation | 1 |
| 3.2 Transient state calculation | 2 |
| 3.3 friction factor | 3 |
| 3.4 heat transfer coefficient | 3 |
| 3.5 helium property | 3 |
| 3.6 superconductor property | 3 |
| 4. Calculation procedure | 4 |
| 4.1 steady state calculation | 4 |
| 4.2 transient state calculation | 4 |
| 5. Input data | 6 |
| 6. Calculation results | 8 |
| 6.1 input data list | 8 |
| 6.2 helium behavior | 8 |
| 6.3 superconductor behavior | 9 |
| 6.4 differential coefficient | 9 |
| 7. Program construction | 9 |
| 8. Graphic output | 10 |
| 9. Calculation example | 11 |
| 9.1 control card | 11 |
| 9.2 calculation conditions | 11 |
| 9.3 calculation results | 12 |
| Acknowledgement | 12 |
| References | 12 |

記号表

| | |
|----------------|-------------------------------|
| x | 流路入口からNODE点までの距離 (cm) |
| Δx | NODE長さ (cm) |
| l | 流路長さ (cm) |
| h | エンタルピ (J/g) |
| Q_B | 定常侵入熱 (W) |
| \dot{m} | 質量流量 (g/s) |
| P | 圧力 (atm) |
| D_h | 水力直径 (cm) |
| f | 管摩擦係数 |
| ρ_{He} | ヘリウム密度 (g/cm ³) |
| u | 流速 (cm/s) |
| t | 時間 (sec) |
| T_{He} | ヘリウム温度 (K) |
| λ_{He} | ヘリウム熱伝導率 (W/cm K) |
| Q_{Hin} | ヘリウムへの入熱 (W/cm ²) |
| ρ_w | 導体密度 (g/cm ³) |
| C_w | 導体比熱 (J/g K) |
| T_w | 導体温度 (K) |
| I | 通電電流 (A) |
| A_c | 導体断面積 (cm ²) |
| r | 導体比抵抗 ($\Omega \cdot cm$) |
| λ_w | 導体熱伝導率 (W/cm K) |
| Q_{Win} | 導体への入熱 (W/cm ²) |
| Re | レイノルズ数 |
| Pr | プラントル数 |
| α | 熱伝達係数 (W/cm ² K) |
| Δt | タイムステップ (sec) |

1. は じ め に

強制冷凍型超電導コイルを設計する際の重要な問題として安定性が挙げられる。すなわち、超電導コイルは、熱的外乱に対して常電導に転移しないか、もし転移しても超電導に回復することが必要となる。

本報告は、この様な強制冷凍型超電導コイルの熱的安定性を理論的に解析するために開発した計算コード「ALPHEⅡ」に関するものである。本計算コードは、熱的外乱が超電導コイルの一部あるいは全体に渡って加わった場合の超電導コイルの長さ方向の導体温度、発生電圧、冷媒温度、冷媒圧力及び冷媒速度分布を各時間ステップ毎に計算することができる。冷媒の圧力及び速度分布の時間変化は、実験での測定は困難であるので冷媒の挙動を把握するのに有効である。

また、本計算コードにおける計算モデルは、一般的なものを使用しており、強制冷凍型超電導コイルの多くのタイプに適用できるものとなっている。熱的外乱についても、現実の超電導コイルが遭遇すると思われる現象を想定して、いくつかのバリエーションを持たせている。

尚、本計算コードには、専用のグラフィック出力コード「ALPHEⅡG」が付属しており、これを用いることによりALPHEⅡによる結果がより把握しやすいものとなっている。

2. 解 析 モ デ ル

解析モデルとしては、ヘリウム流路のみの場合、あるいはヘリウム流路および導体を考慮に入れた場合の2通りであり、いずれの場合も図1に示す様に一次元モデルとして取扱う。

3. 解 析 基 礎 式

3.1 定 常 計 算

非定常計算の初期値として与えられた入口条件より、定常状態における導体及びヘリウムの温度分布及び圧力分布を求める。定常状態においては、導体とヘリウムは等しい温度分布を示していると仮定する。すなわち、導体とヘリウムの間には熱移動がないとしている。全長に渡る外部からの定常熱侵入熱を Q_B とすると、NODE i におけるエンタルピ h_i は、エネルギーの式より次式で表わされる。

$$h_i = h_{i-1} + Q_B \cdot \Delta x_i / (\dot{m} l) \quad (3.1)$$

また、圧力は、運動量の式より次式で表わされる。

1. は じ め に

強制冷凍型超電導コイルを設計する際の重要な問題として安定性が挙げられる。すなわち、超電導コイルは、熱的外乱に対して常電導に転移しないか、もし転移しても超電導に回復することが必要となる。

本報告は、この様な強制冷凍型超電導コイルの熱的安定性を理論的に解析するために開発した計算コード「ALPHEⅡ」に関するものである。本計算コードは、熱的外乱が超電導コイルの一部あるいは全体に渡って加わった場合の超電導コイルの長さ方向の導体温度、発生電圧、冷媒温度、冷媒圧力及び冷媒速度分布を各時間ステップ毎に計算することができる。冷媒の圧力及び速度分布の時間変化は、実験での測定は困難であるので冷媒の挙動を把握するのに有効である。

また、本計算コードにおける計算モデルは、一般的なものを使用しており、強制冷凍型超電導コイルの多くのタイプに適用できるものとなっている。熱的外乱についても、現実の超電導コイルが遭遇すると思われる現象を想定して、いくつかのバリエーションを持たせている。

尚、本計算コードには、専用のグラフィック出力コード「ALPHEⅡG」が付属しており、これを用いることによりALPHEⅡによる結果がより把握しやすいものとなっている。

2. 解 析 モ デ ル

解析モデルとしては、ヘリウム流路のみの場合、あるいはヘリウム流路および導体を考慮に入れた場合の2通りであり、いずれの場合も図1に示す様に一次元モデルとして取扱う。

3. 解 析 基 礎 式

3.1 定 常 計 算

非定常計算の初期値として与えられた入口条件より、定常状態における導体及びヘリウムの温度分布及び圧力分布を求める。定常状態においては、導体とヘリウムは等しい温度分布を示していると仮定する。すなわち、導体とヘリウムの間には熱移動がないとしている。全長に渡る外部からの定常熱侵入熱を Q_B とすると、NODE i におけるエンタルピ h_i は、エネルギーの式より次式で表わされる。

$$h_i = h_{i-1} + Q_B \cdot \Delta x_i / (\dot{m} \ell) \quad (3.1)$$

また、圧力は、運動量の式より次式で表わされる。

1. は じ め に

強制冷凍型超電導コイルを設計する際の重要な問題として安定性が挙げられる。すなわち、超電導コイルは、熱的外乱に対して常電導に転移しないか、もし転移しても超電導に回復することが必要となる。

本報告は、この様な強制冷凍型超電導コイルの熱的安定性を理論的に解析するために開発した計算コード「ALPHEⅡ」に関するものである。本計算コードは、熱的外乱が超電導コイルの一部あるいは全体に渡って加わった場合の超電導コイルの長さ方向の導体温度、発生電圧、冷媒温度、冷媒圧力及び冷媒速度分布を各時間ステップ毎に計算することができる。冷媒の圧力及び速度分布の時間変化は、実験での測定は困難であるので冷媒の挙動を把握するのに有効である。

また、本計算コードにおける計算モデルは、一般的なものを使用しており、強制冷凍型超電導コイルの多くのタイプに適用できるものとなっている。熱的外乱についても、現実の超電導コイルが遭遇すると思われる現象を想定して、いくつかのバリエーションを持たせている。

尚、本計算コードには、専用のグラフィック出力コード「ALPHEⅡG」が付属しており、これを用いることによりALPHEⅡによる結果がより把握しやすいものとなっている。

2. 解 析 モ デ ル

解析モデルとしては、ヘリウム流路のみの場合、あるいはヘリウム流路および導体を考慮に入れた場合の2通りであり、いずれの場合も図1に示す様に一次元モデルとして取扱う。

3. 解 析 基 礎 式

3.1 定常計算

非定常計算の初期値として与えられた入口条件より、定常状態における導体及びヘリウムの温度分布及び圧力分布を求める。定常状態においては、導体とヘリウムは等しい温度分布を示していると仮定する。すなわち、導体とヘリウムの間には熱移動がないとしている。全長に渡る外部からの定常熱侵入熱を Q_B とすると、NODE i におけるエンタルピ h_i は、エネルギーの式より次式で表わされる。

$$h_i = h_{i-1} + Q_B \cdot \Delta x_i / (\dot{m} l) \quad (3.1)$$

また、圧力は、運動量の式より次式で表わされる。

$$P_i = P_{i-1} - \Delta x_{i-1} \frac{D_h}{2} f_{i-1} \rho_{i-1} u_{i-1}^2 \quad (3.2)$$

ここで、 f は、管摩擦係数である。管摩擦係数については、3.3で述べる。他の物性値については、圧力とエンタルピより、ヘリウム物性プログラムを用いて求める。

尚、本報告書にて使用する記号の意味は、巻頭の記号表を参照のこと。

3.2 非定常計算

非定常計算の基礎式となるのはヘリウムに関する連続、運動量、エネルギーの式及び導体に関するエネルギーの式である。これらの式は、すべて一次元変物性非定常の式となる。これらの式を以下に示す。

(連続の式)

$$\frac{\partial \rho_{\text{He}}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{He}} u) = 0 \quad (3.3)$$

(運動量の式)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{\text{He}} u) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{He}} u \cdot u) = -\frac{dP}{dx} + F \quad (3.4)$$

(ヘリウムのエネルギーの式)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{\text{He}} H) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{He}} u \cdot u) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{He}} \frac{\partial T_{\text{He}}}{\partial x} \right) + Q_\alpha + Q_{\text{Hin}} \quad (3.5)$$

(導体のエネルギーの式)

$$\rho_w \frac{\partial}{\partial t} (C_w T_w) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) - Q_\alpha + Q_{\text{joul}} + Q_{\text{Win}} \quad (3.6)$$

ここで、

$$F = -\frac{f}{2D_h} \rho_{\text{He}} u |u| \quad : \quad \text{摩擦 力}$$

$$Q_\alpha = 4\alpha (T_w - T_{\text{He}})/D_h \quad : \quad \text{ヘリウムと導体間の熱伝達量}$$

$$H = h + \frac{1}{2} u^2 \quad : \quad \text{ヘリウムの全エネルギー}$$

$$Q_{\text{joul}} = \left(\frac{I}{A_0} \right)^2 r \quad : \quad \text{ジュール発熱}$$

である。ヘリウムについては、(3.3)～(3.5)式、また、導体においては、(3.6)式を各

NODE 毎に解く。

3.3 管摩擦係数

管摩擦係数 f は、レイノルズ数 Re の関数として次式で与えられるものとする。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = a \ln(Re \sqrt{f}) + b \quad (3.7)$$

a 及び b の値は、計算モデルの形状及び表面粗さなどにより入力で与えるものとする。

3.4 熱伝達係数

熱伝達係数 α は、過渡熱伝達を考慮して、以下の様に時間領域毎に求めるものとする。

$$(t \leq 1 \mu s)$$

この範囲では、Kapitza 抵抗が支配的となるので Snyder の実験式より

$$\alpha_k = 200 (T_W^4 - T_{He}^4) / (T_W - T_{He}) \quad (3.8)$$

$$(t > 1 \mu s)$$

10 msec 程度までは、層流境界層への熱拡散が支配的となるので、W.G. Steward の式¹⁾より、

$$\alpha_t = \sqrt{\pi \lambda_{He} \rho_{He} C_p / t} \quad (3.9)$$

更に、それ以上の時間においては、定常熱伝達の領域となり

$$\alpha_s = \frac{\lambda_{He}}{D_h} 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3.10)$$

より求める。 α_t から α_s へは、連続的に移行する様に、 $\alpha_t < \alpha_s$ となった時点で $\alpha = \alpha_s$ とする。

3.5 ヘリウム物性値

ヘリウムの物性値に関しては、温度と圧力よりヘリウム物性プログラムを用いて SUBROUTINE または FUNCTION 形式で直接呼び出して求めている。

3.6 導体物性値

3.6.1 熱伝導率

熱伝導率は、温度の関数として次式で与えられる。

$$\lambda_w = a T_w^b \quad (3.11)$$

a及びbの値は、入力データで与えるものとする。

3.6.2 比熱

比熱は、温度の関数として次式で与えられる。

$$C_w = a_1 T_w^{b_1} + a_2 T_w^{b_2} \quad (3.12)$$

a_1 , a_2 , b_1 , b_2 の値は、入力データで与えるものとする。

3.6.3 比抵抗

比抵抗は、入力として、分流温度 T_s 、臨界温度 T_{cr} 、及び臨界温度における比抵抗 r_{cr} を与え、

$$\begin{aligned} T_w < T_s \text{ のとき} & \quad r = 0 \\ T_s \leq T_w < T_{cr} \text{ のとき} & \quad r = \frac{r_{cr} - r_s}{T_{cr} - T_s} (T_w - T_s) + r_s \\ T_w \geq T_{cr} \text{ のとき} & \quad r = r_{cr} \end{aligned} \quad (3.13)$$

によって求める。

4. 計算手法

4.1 定常計算

計算モードがINITIALの時、非定常計算の初期値を求めるために以下に述べる定常計算を行う。

- ① 入力データにより、入口(NODE番号0)における密度等のヘリウム物性値を求める。
- ② (3.1)式より各NODEにおけるエンタルピを求める。
- ③ (3.2)式より各NODEにおける圧力を求める。
- ④ エンタルピと圧力より各NODEにおけるヘリウム物性値を求める。
- ⑤ ヘリウムの温度と導体の温度を等しいものとして、導体各NODEにおける物性値を求める。

4.2 非定常計算

4.2.1 計算式

(3.3)～(3.6)式の微分方程式を解くにあたり陽解法を用いる。すなわち、計算に必要な物性値は、すべて1タイムステップ前の値を用いる。これにより、(3.3)～(3.6)式は、下

$$\lambda_w = a T_w^b \quad (3.11)$$

a及びbの値は、入力データで与えるものとする。

3.6.2 比 熱

比熱は、温度の関数として次式で与えられる。

$$C_w = a_1 T_w^{b_1} + a_2 T_w^{b_2} \quad (3.12)$$

a_1 , a_2 , b_1 , b_2 の値は、入力データで与えるものとする。

3.6.3 比 抵 抗

比抵抗は、入力として、分流温度 T_s 、臨界温度 T_{cr} 、及び臨界温度における比抵抗 r_{cr} を与え、

$$\begin{aligned} T_w < T_s \text{ のとき} & \quad r = 0 \\ T_s \leq T_w < T_{cr} \text{ のとき} & \quad r = \frac{r_{cr} - r_s}{T_{cr} - T_s} (T_w - T_s) + r_s \\ T_w \geq T_{cr} \text{ のとき} & \quad r = r_{cr} \end{aligned} \quad (3.13)$$

によって求める。

4. 計 算 手 法

4.1 定常計算

計算モードがINITIALの時、非定常計算の初期値を求めるために以下に述べる定常計算を行う。

- ① 入力データにより、入口(NODE番号0)における密度等のヘリウム物性値を求める。
- ② (3.1)式より各NODEにおけるエンタルピを求める。
- ③ (3.2)式より各NODEにおける圧力を求める。
- ④ エンタルピと圧力より各NODEにおけるヘリウム物性値を求める。
- ⑤ ヘリウムの温度と導体の温度を等しいものとして、導体各NODEにおける物性値を求める。

4.2 非定常計算

4.2.1 計 算 式

(3.3)～(3.6)式の微分方程式を解くにあたり陽解法を用いる。すなわち、計算に必要な物性値は、すべて1タイムステップ前の値を用いる。これにより、(3.3)～(3.6)式は、下

記の様に、それぞれ独立に解くことができる。

$$(\rho_{\text{He}})_{t+\Delta t}^i = (\rho_{\text{He}})_t^i - \Delta t \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{He}} u)_t^i \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} (\rho_{\text{He}} u)_{t+\Delta t}^i &= (\rho_{\text{He}} u)_t^i - \Delta t \left[u \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{He}} u) + (\rho_{\text{He}} u) \frac{\partial u}{\partial x} \right. \\ &\quad \left. + \frac{dP}{dx} - F \right]_t^i \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} (\rho_{\text{He}} H)_{t+\Delta t}^i &= (\rho_{\text{He}} H)_t^i + \Delta t \left[H \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{He}} u) + (\rho_{\text{He}} u) \frac{\partial H}{\partial x} \right. \\ &\quad \left. + \lambda_{\text{He}} \frac{\partial^2 T_{\text{He}}}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda_{\text{He}}}{\partial x} \frac{\partial T_{\text{He}}}{\partial x} + Q_{\alpha} + Q_{\text{Hin}} \right]_t^i \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} (T_{\text{W}})_{t+\Delta t}^i &= (T_{\text{W}})_t^i + \Delta t \left[\lambda_{\text{W}} \frac{\partial^2 T_{\text{W}}}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda_{\text{W}}}{\partial x} \frac{\partial T_{\text{W}}}{\partial x} \right. \\ &\quad \left. - Q_{\alpha} + Q_{\text{joul}} + Q_{\text{Win}} \right]_t^i / \left[\rho_{\text{W}} \left(C_{\text{W}} + T_{\text{W}} \frac{\partial C_{\text{W}}}{\partial T_{\text{W}}} \right) \right]_t^i \end{aligned} \quad (4.4)$$

4.2.2 微係数

NODE i における $\frac{\partial u}{\partial x}$ 等の微係数は、以下に述べるように図式的に求める。

図2に示す様に、3点A, B, Cが与えられた場合、点Bにおける曲線ABCの接線を直線AB及びBCとのなす角がともに θ であるような直線DEで与え、直線DEの傾きを点Bにおける微係数とする。図2より、

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right)$$

$$\beta = (\alpha_1 + \alpha_2) / 2$$

$$\therefore \frac{dy}{dx} = \tan \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) \quad (4.5)$$

($\partial^2 y / \partial x^2$) の場合も $y = (\partial y / \partial x)$ として同様に考える。

4.2.3 境界条件

境界条件としては、次の2種類のどちらかを選ぶことができる。

(a) 境界値を固定する場合

境界値 (NODE 0, 及び $N+1$) を初期条件の値のまま保存する。

(b) 境界値を自由にする場合

この場合、流れの上流及び下流方向に仮想の NODE 点 -1 と $N+2$ を考える。NODE -1 と $N+2$ は、流路の入口及び出口から十分離れた距離にとり、ここでの値が常に保存されるものとする。したがって、NODE 0 における値は、NODE -1 と 1 における値を内挿して求めることができる。NODE $N+1$ の場合も同様である。尚、NODE -1 は、流路入口から上流方向に流路長さの分だけ離れた位置にあるものとし、NODE $N+2$ は、流路出口から下流方向に流路長さの分だけ離れた位置にあるものとする。図3に、(a)及び(b)の境界条件での境界値の求め方を示す。

4.2.4 平滑化処理

計算結果に計算手法による物理量の振動が発生し、計算に影響を及ぼすとき、計算点の平滑化処理を行う。平滑化処理の手段としては、節点追加方式の B-spline 平滑化式を用いる。B-spline 平滑化式は、科学計算用サブルーチンプログラム SSL-II 中にあるものを用いる。

4.2.5 計算手順

定常計算の結果またはリスタートファイルを初期条件として、以下の手順で非定常計算を行う。

- ① (4.1)式より各NODEにおけるヘリウムの密度を求める。
- ② (4.3)式より各NODEにおけるヘリウムの密度と全エネルギーの積を求める。
- ③ (4.4)式より各NODEにおける導体の温度を求める。
- ④ (4.2)式より各NODEにおけるヘリウムの質量流速を求める。
- ⑤ ①、②及び④より各NODEにおけるヘリウムのエンタルピを求める。
- ⑥ エンタルピ及び密度より各NODEにおけるヘリウムの物性値を求める。
- ⑦ 導体温度より導体の比熱、熱伝導率、及び比抵抗を求める。
- ⑧ 計算終了時間を越えていなければ、手順①より繰り返す。

5. データ入力方法

入力データの与え方としては、カラム1~10にキーワードを入力し、11カラム以降にデータをF10またはD15タイプで入力する。入力キーワードを以下に説明する。

4.2.3 境界条件

境界条件としては、次の2種類のどちらかを選ぶことができる。

(a) 境界値を固定する場合

境界値 (NODE 0, 及び $N+1$) を初期条件の値のまま保存する。

(b) 境界値を自由にする場合

この場合、流れの上流及び下流方向に仮想の NODE 点 -1 と $N+2$ を考える。NODE -1 と $N+2$ は、流路の入口及び出口から十分離れた距離にとり、ここでの値が常に保存されるものとする。したがって、NODE 0 における値は、NODE -1 と 1 における値を内挿して求めることができる。NODE $N+1$ の場合も同様である。尚、NODE -1 は、流路入口から上流方向に流路長さの分だけ離れた位置にあるものとし、NODE $N+2$ は、流路出口から下流方向に流路長さの分だけ離れた位置にあるものとする。図3に、(a)及び(b)の境界条件での境界値の求め方を示す。

4.2.4 平滑化処理

計算結果に計算手法による物理量の振動が発生し、計算に影響を及ぼすとき、計算点の平滑化処理を行う。平滑化処理の手段としては、節点追加方式の B-spline 平滑化式を用いる。B-spline 平滑化式は、科学計算用サブルーチンプログラム SSL-II 中にあるものを用いる。

4.2.5 計算手順

定常計算の結果またはリスタートファイルを初期条件として、以下の手順で非定常計算を行う。

- ① (4.1)式より各NODEにおけるヘリウムの密度を求める。
- ② (4.3)式より各NODEにおけるヘリウムの密度と全エネルギーの積を求める。
- ③ (4.4)式より各NODEにおける導体の温度を求める。
- ④ (4.2)式より各NODEにおけるヘリウムの質量流速を求める。
- ⑤ ①、②及び④より各NODEにおけるヘリウムのエンタルピを求める。
- ⑥ エンタルピ及び密度より各NODEにおけるヘリウムの物性値を求める。
- ⑦ 導体温度より導体の比熱、熱伝導率、及び比抵抗を求める。
- ⑧ 計算終了時間を越えていなければ、手順①より繰り返す。

5. データ入力方法

入力データの与え方としては、カラム1~10にキーワードを入力し、11カラム以降にデータをF10またはD15タイプで入力する。入力キーワードを以下に説明する。

| | | |
|-----------|---------|-------------------------------------|
| RUN-MODE | INITIAL | : 定常計算の後非定常計算を行なう |
| | RESTART | : リスタートファイルを初期値として非定常計算を行なう |
| CAL-MODE | 01 | : ヘリウムだけのモデル |
| | 02 | : ヘリウムと導体を考えたモデル, 熱はヘリウムへ入る |
| | 31 | : ヘリウムと導体を考えたモデル, 熱は導体へ入る (熱量指定) |
| | 32 | : ヘリウムと導体を考えたモデル, 熱は導体へ入る (温度指定) |
| PIN | | 入口圧力 (atm) |
| TIN | | 入口温度 (K) |
| MIN | | 質量速度 (g/s) |
| DH | | 水力直径 (cm) |
| AH | | 流路断面積 (cm ²) |
| LH. LW | | 流路長さ (cm) |
| QB | | 定常侵入熱 (W) |
| FCONST-1 | | 式(3.7)のaの値 |
| FCONST-2 | | 式(3.7)のbの値 |
| AW | | 導体断面積 (cm ²) |
| PE | | ペリメータ (cm) |
| IO | | 通電電流 (A) |
| DW | | 導体NODE点とヘリウム境界面との距離 (cm) |
| ROW | | 導体密度 (g/cm ³) |
| QH-WATT | | ヘリウム単位体積あたりの入熱 (W/cm ³) |
| QH-TIME | | ヘリウム入熱時間 (sec) |
| QC-WATT | | 導体単位体積あたりの入熱 (W/cm ³) |
| QC-TIME | | 導体入熱時間 (sec) |
| MAX-CPU | | CPU時間 (sec) |
| MAX-TIME | | 計算終了時間 (sec) |
| OUT-TIME | | 出力タイムステップ (sec) |
| DELT-TIME | | タイムステップ (sec) |

以上のデータはF10タイプで入力する

| | |
|-----------|---------------------------|
| RW-CONST | 式(3.11)のaの値 |
| RW-EXP | 式(3.11)のbの値 |
| CW-CONST1 | 式(3.12)のa ₁ の値 |
| CW-CONST2 | 式(3.12)のa ₂ の値 |
| CW-EXP1 | 式(3.12)のb ₁ の値 |
| CW-EXP2 | 式(3.12)のb ₂ の値 |

以上の値はD15タイプで入力する

| | | |
|-------------------------|----|---|
| RW-NO. | | 導体の比抵抗の入力データ数(12で入力) |
| | | 次の行から比抵抗(Ωcm)と温度(K)を同じ行にFree-Formatで入力する。 |
| QC-NO. ^{注1)} | | 導体への入熱NODE数(12で入力) |
| QH-NO. ^{注1)} | | ヘリウムへの入熱NODE数(12で入力) |
| MESH-NO. ^{注2)} | | NODE分割数(13で入力) |
| HI-FLAG | 0 | : 過渡熱伝達を考慮 |
| | 1 | : 定常熱伝達のみを考慮 |
| TW-NO. ^{注3)} | | MODE32のときの初期温度指定NODE数(12で入力) |
| BOUNDARY | 0 | : 平滑化処理, 両端固定 |
| | 1 | : 平滑化処理, 両端自由 |
| | 10 | : 平滑化処理なし, 両端固定 |
| | 11 | : 平滑化処理なし, 両端自由 |

注1) 次の行に入熱NODE番号を自由形式で入力する。

注2) 全NODE等分割にする場合は次の行に0.0D0を入力する。

不等分割にする場合は、次の行から、NODE 0からN+1までN+2個のNODE長さを10F 6.1で入力する。

注3) 次の行に温度指定NODE番号をさらに次の行に指定温度を自由形式で入力する。

6. 計算結果出力

出力としては、入力データのエコー出力、ヘリウム物性の出力、導体物性の出力及び微係数の出力がある。ヘリウム及び導体に関する出力は、まず定常計算の結果が出力され、以降出力タイムステップ毎に非定常計算による結果が出力される。微係数については、非定常計算時に出力タイムステップ毎に出力される。

6.1 入力データ

入力データ出力は、入力データが入力そのままの形式で出力される。

6.2 ヘリウム物性

ヘリウム物性については、各NODE毎にNODE番号、温度、圧力、密度、流速、ヘリウム単位体積あたりの入熱、エンタルピ、レイノルズ数、熱伝達係数、熱伝導率の順で出力される。

以上の値はD15タイプで入力する

| | | |
|-------------------------|----|---|
| RW-NO. | | 導体の比抵抗の入力データ数(I2で入力) |
| | | 次の行から比抵抗(Ωcm)と温度(K)を同じ行にFree-Formatで入力する。 |
| QC-NO. ^{注1)} | | 導体への入熱NODE数(I2で入力) |
| QH-NO. ^{注1)} | | ヘリウムへの入熱NODE数(I2で入力) |
| MESH-NO. ^{注2)} | | NODE分割数(I3で入力) |
| HI-FLAG | 0 | : 過渡熱伝達を考慮 |
| | 1 | : 定常熱伝達のみを考慮 |
| TW-NO. ^{注3)} | | MODE 32のときの初期温度指定NODE数(I2で入力) |
| BOUNDARY | 0 | : 平滑化处理, 両端固定 |
| | 1 | : 平滑化处理, 両端自由 |
| | 10 | : 平滑化处理なし, 両端固定 |
| | 11 | : 平滑化处理なし, 両端自由 |

注1) 次の行に入熱NODE番号を自由形式で入力する。

注2) 全NODE等分割にする場合は次の行に0.0D0を入力する。

不等分割にする場合は、次の行から、NODE 0からN+1までN+2個のNODE長さを10F6.1で入力する。

注3) 次の行に温度指定NODE番号をさらに次の行に指定温度を自由形式で入力する。

6. 計算結果出力

出力としては、入力データのエコー出力、ヘリウム物性の出力、導体物性の出力及び微係数の出力がある。ヘリウム及び導体に関する出力は、まず定常計算の結果が出力され、以降出力タイムステップ毎に非定常計算による結果が出力される。微係数については、非定常計算時に出力タイムステップ毎に出力される。

6.1 入力データ

入力データ出力は、入力データが入力そのままの形式で出力される。

6.2 ヘリウム物性

ヘリウム物性については、各NODE毎にNODE番号、温度、圧力、密度、流速、ヘリウム単位体積あたりの入熱、エンタルピ、レイノルズ数、熱伝達係数、熱伝導率の順で出力される。

6.3 導体物性

導体についても同様に、各 NODE 毎に、NODE 番号、温度、抵抗、ジュール発熱、導体単位体積あたりの入熱、熱伝導率、比熱、NODE 長さ、入口から NODE 点までの距離、ヘリウムへの伝熱量が出力される。

6.4 微係数

(3.3)～(3.6)式で使用されている各物理量の微分値が各 NODE 毎に出力される。出力されるのは、次の量である。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_{\text{He}} u), \frac{\partial H}{\partial x}, \frac{\partial T_{\text{He}}}{\partial x}, \frac{\partial \lambda_{\text{He}}}{\partial x}, \frac{\partial^2 T_{\text{He}}}{\partial x^2}, \frac{\partial T_{\text{W}}}{\partial x}, \frac{\partial \lambda_{\text{W}}}{\partial x}, \frac{\partial^2 T_{\text{W}}}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial x}$$

7. プログラムの構成

本計算コードは、メインプログラムと6個の副プログラムより構成される。各副プログラムは、互いに独立で、すべてメインプログラム中で直接呼び出される。以下に、メインプログラム及び各副プログラムの機能を説明する。

(1) MAIN

モジュールタイプ：メイン

機能：入力データにより定常及び非定常におけるタイムステップ毎のヘリウム及び導体の温度等を計算する。メインプログラムのフローチャートは、図4に示す通りである。

(2) F

モジュールタイプ：関数副プログラム

呼出形式：F(Re), Re:レイノルズ数

機能：与えられたReより(3.7)式を満足する摩擦係数fの値を2分法を用いて計算する。Fのフローチャートを図5に示す。

(3) TFUNDH

モジュールタイプ：関数副プログラム

呼出形式：TFUNDH(T, D, H)

機能：仮定された温度(T)を基にして、密度(D)及びエンタルピ(H)から、ヘリウム物性プログラムを用いてヘリウム温度を2分法によって計算する。

6.3 導体物性

導体についても同様に、各 NODE 毎に、NODE 番号、温度、抵抗、ジュール発熱、導体単位体積あたりの入熱、熱伝導率、比熱、NODE 長さ、入口から NODE 点までの距離、ヘリウムへの伝熱量が出力される。

6.4 微係数

(3.3)～(3.6)式で使用されている各物理量の微分値が各 NODE 毎に出力される。出力されるのは、次の量である。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_{\text{He}} u), \frac{\partial H}{\partial x}, \frac{\partial T_{\text{He}}}{\partial x}, \frac{\partial \lambda_{\text{He}}}{\partial x}, \frac{\partial^2 T_{\text{He}}}{\partial x^2}, \frac{\partial T_{\text{W}}}{\partial x}, \frac{\partial \lambda_{\text{W}}}{\partial x}, \frac{\partial^2 T_{\text{W}}}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial x}$$

7. プログラムの構成

本計算コードは、メインプログラムと6個の副プログラムより構成される。各副プログラムは、互いに独立で、すべてメインプログラム中で直接呼び出される。以下に、メインプログラム及び各副プログラムの機能を説明する。

(1) MAIN

モジュールタイプ：メイン

機能：入力データにより定常及び非定常におけるタイムステップ毎のヘリウム及び導体の温度等を計算する。メインプログラムのフローチャートは、図4に示す通りである。

(2) F

モジュールタイプ：関数副プログラム

呼出形式：F(Re), Re:レイノルズ数

機能：与えられたReより(3.7)式を満足する摩擦係数fの値を2分法を用いて計算する。Fのフローチャートを図5に示す。

(3) TFUNDH

モジュールタイプ：関数副プログラム

呼出形式：TFUNDH(T, D, H)

機能：仮定された温度(T)を基にして、密度(D)及びエンタルピ(H)から、ヘリウム物性プログラムを用いてヘリウム温度を2分法によって計算する。

フローチャートを図6に示す。

(4) DYDX

モジュールタイプ：サブルーチン

呼出形式：CALL DYDX (X, Y, N, DYDX, DDYDDX, LH, KIND)

機能：入口から NODE までの距離 (X), 微分すべき温度等の値 (Y),
NODE 分割数 (N), 流路長さ (LH), 微分すべき物理量の種類名
(KIND) を入力し, 与られた物理量の距離に関する 1 回微分 (DYDX)
及び 2 回微分 (DDYDDX) を計算する。フローチャートを図7に示す。

(5) SMOOTH

モジュールタイプ：サブルーチン

呼出形式：CALL SMOOTH (X, Y, N)

機能：入口から NODE 点までの距離 (X), 平滑すべき物理量の各 NODE に
おける値 (Y), 分割 NODE 数 (N) を入力し, 各 NODE における平
滑化された物理量を出力する。フローチャートを図8に示す。

(6) INPUT

モジュールタイプ：サブルーチン

呼出形式：CALL INPUT

機能：入力データの読み込み

(7) LPOUT

モジュールタイプ：サブルーチン

呼出形式：CALL LPOUT

機能：計算結果の出力

8. 図形出力

ALPHEIIによって計算された結果をグラフィック出力することができる。これは、ALPHEII専用グラフィック出力プログラムALPHEIIG (PLOT 2), ALPHEIIG (PLOTP), ALPHEIIG (PLOTA)によって行われる。ALPHEIIG (PLOT 2)は、計算結果をラインプリンタに出力するものであり、ALPHEIIG (PLOTP)及びALPHEIIG (PLOTA)は、テクトロの画面に出力するものである。ALPHEIIGでは、グラフィック用サブルーチンとしてARGUS-V4を使用している。テクトロの画面に出力するプログラムは、コマンドプロシジャ化されており、それぞれ、ALPHE2D及び、ALPHE3Dで実行することができる。尚、ALPHE2Dは、2次元出力及び、ALPHE3Dは、3次元出力を行う。

フローチャートを図6に示す。

(4) DYDX

モジュールタイプ：サブルーチン

呼出形式：CALL DYDX (X, Y, N, DYDX, DDYDDX, LH, KIND)

機能：入口から NODE までの距離 (X), 微分すべき温度等の値 (Y),
NODE 分割数 (N), 流路長さ (LH), 微分すべき物理量の種類名
(KIND) を入力し, 与られた物理量の距離に関する 1 回微分 (DYDX)
及び 2 回微分 (DDYDDX) を計算する。フローチャートを図7に示す。

(5) SMOOTH

モジュールタイプ：サブルーチン

呼出形式：CALL SMOOTH (X, Y, N)

機能：入口から NODE 点までの距離 (X), 平滑すべき物理量の各 NODE に
おける値 (Y), 分割 NODE 数 (N) を入力し, 各 NODE における平
滑化された物理量を出力する。フローチャートを図8に示す。

(6) INPUT

モジュールタイプ：サブルーチン

呼出形式：CALL INPUT

機能：入力データの読み込み

(7) LPOUT

モジュールタイプ：サブルーチン

呼出形式：CALL LPOUT

機能：計算結果の出力

8. 図形出力

ALPHEIIによって計算された結果をグラフィック出力することができる。これは、ALPHEII専用グラフィック出力プログラムALPHEIIG (PLOT 2), ALPHEIIG (PLOTP), ALPHEIIG (PLOTA)によって行われる。ALPHEIIG (PLOT 2)は、計算結果をラインプリンタに出力するものであり、ALPHEIIG (PLOTP)及びALPHEIIG (PLOTA)は、テクトロの画面に出力するものである。ALPHEIIGでは、グラフィック用サブルーチンとしてARGUS-V4を使用している。テクトロの画面に出力するプログラムは、コマンドプロシジャ化されており、それぞれ、ALPHE2D及び、ALPHE3Dで実行することができる。尚、ALPHE2Dは、2次元出力及び、ALPHE3Dは、3次元出力を行う。

9. 使 用 例

9.1 JCL

ALPHEII及びALPHEIIGのJCLを表1に示す。表1(a)及び(b)は、それぞれALPHEII及びALPHEIIGをバッチ処理する場合のJCLプログラムである。また、表1(c)及び(d)は、ALPHEIIGによるグラフィック出力をディスプレイ画面に出力するためのコマンドプロシジャである。

9.2 計算条件

(コイル諸元)

| | |
|-----------|--|
| 導体断面積(全体) | 7.87 cm ² |
| 導体断面積(銅) | 5.72 cm ² |
| ストランド直径 | 1.33 mm |
| ストランド本数 | 567本 |
| 通電電流値 | 50 kA |
| 臨界電流値 | 90 kA |
| 最大磁界 | 4 T |
| 直上抵抗 | $3.5 \times 10^{-8} \Omega \text{cm}$ (at 4 T) |
| 1流路長 | 150 m |
| ヘリウム断面積 | 5.60 cm ² |
| ペリメータ | 207.3 cm |
| 水力直径 | 0.11 cm |

(境界条件)

| | | |
|----|----------|-----------|
| 入口 | 温度 4.5 K | 圧力 10 atm |
| 出口 | 温度 5.0 K | |

出口圧力は、次式より求める。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0.87 \ln (\text{Re} \sqrt{f}) - 2.4$$

流量 50 g/s

(初期条件)

導体中央の50 cmの温度を20 Kとする。

以上の様な計算モデルの入力データ例を表2に示す。

9.3 計算結果

ALPHE II Gによる計算結果のグラフ出力例を図9～図13に示す。ヘリウムの流速及び圧力は、図10及び図11に示す様に、最初急激に変化するが、時間とともに導体長手方向に広がっていき、そのピーク値は、減衰していくことがわかる。圧力の伝播は、殆んど音速で生じている。また、導体の電圧は、図13に示す様に、最初減少するが、ある程度のところまで達すると逆に発生電圧が増加する。図12に示す導体の温度変化も同様に、一度減少するが時間がたつと増加していく。従って、この条件では、コイルは回復不可能なことが予想される。

謝 辞

本計算コードの作成にあたり御指導をいただきました九州大学工学部伊藤猛宏教授に深く感謝致します。

参考文献

- 1) W.G.Steward 「TRANSIENT HELIUM HEAT TRANSFER PHASE I - STATIC COOLANT」 Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 21 p. 863～874 (1978).

9.3 計算結果

ALPHE II Gによる計算結果のグラフ出力例を図9～図13に示す。ヘリウムの流速及び圧力は、図10及び図11に示す様に、最初急激に変化するが、時間とともに導体長手方向に広がっていき、そのピーク値は、減衰していくことがわかる。圧力の伝播は、殆んど音速で生じている。また、導体の電圧は、図13に示す様に、最初減少するが、ある程度のところまで達すると逆に発生電圧が増加する。図12に示す導体の温度変化も同様に、一度減少するが時間がたつと増加していく。従って、この条件では、コイルは回復不可能なことが予想される。

謝 辞

本計算コードの作成にあたり御指導をいただきました九州大学工学部伊藤猛宏教授に深く感謝致します。

参考文献

- 1) W.G.Steward 「TRANSIENT HELIUM HEAT TRANSFER PHASE I - STATIC COOLANT」 Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 21 p. 863～874 (1978).

9.3 計算結果

ALPHE II Gによる計算結果のグラフ出力例を図9～図13に示す。ヘリウムの流速及び圧力は、図10及び図11に示す様に、最初急激に変化するが、時間とともに導体長手方向に広がっていき、そのピーク値は、減衰していくことがわかる。圧力の伝播は、殆んど音速で生じている。また、導体の電圧は、図13に示す様に、最初減少するが、ある程度のところまで達すると逆に発生電圧が増加する。図12に示す導体の温度変化も同様に、一度減少するが時間がたつと増加していく。従って、この条件では、コイルは回復不可能なことが予想される。

謝 辞

本計算コードの作成にあたり御指導をいただきました九州大学工学部伊藤猛宏教授に深く感謝致します。

参考文献

- 1) W.G.Steward 「TRANSIENT HELIUM HEAT TRANSFER PHASE I - STATIC COOLANT」 Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 21 p. 863～874 (1978).

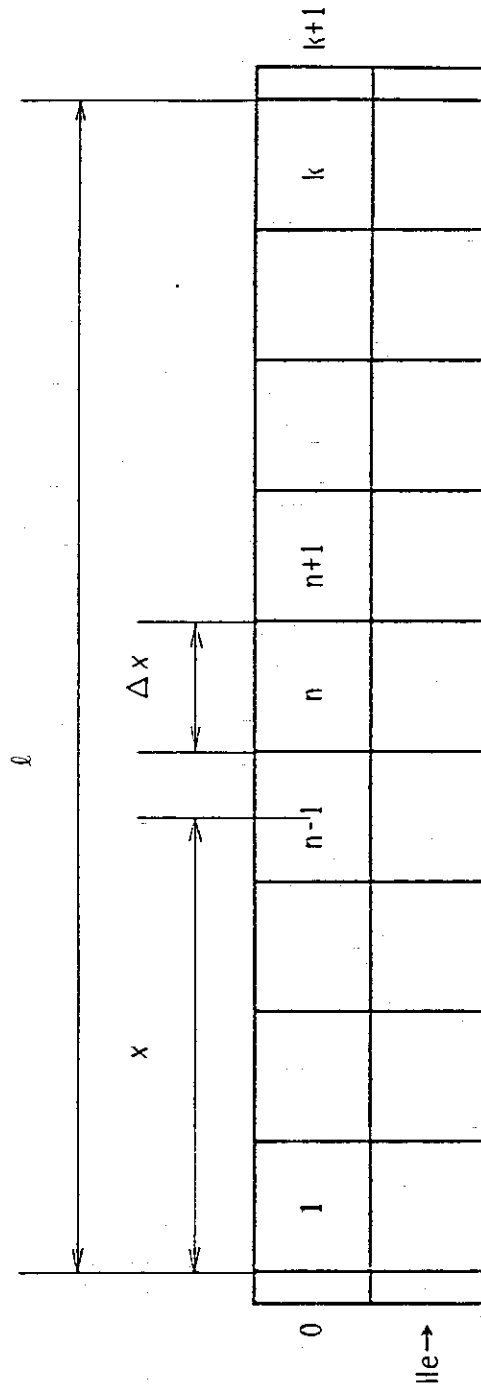


図 1 計算モデル

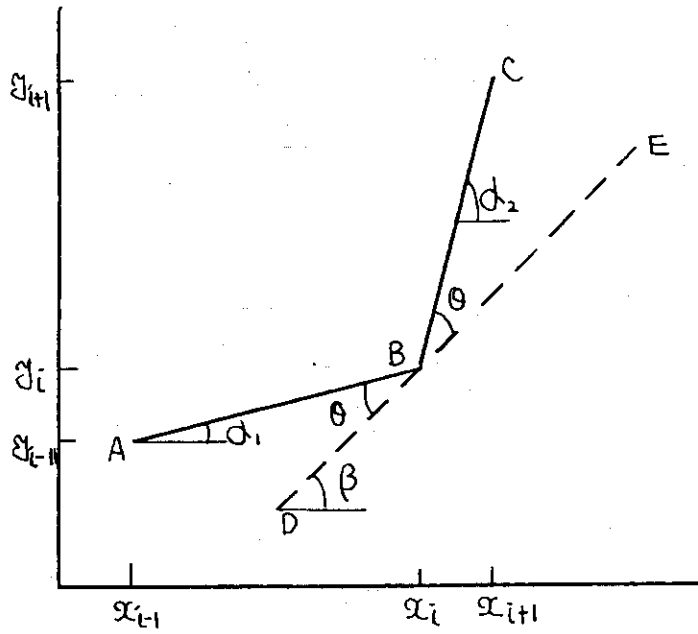


図2 微係数の求め方

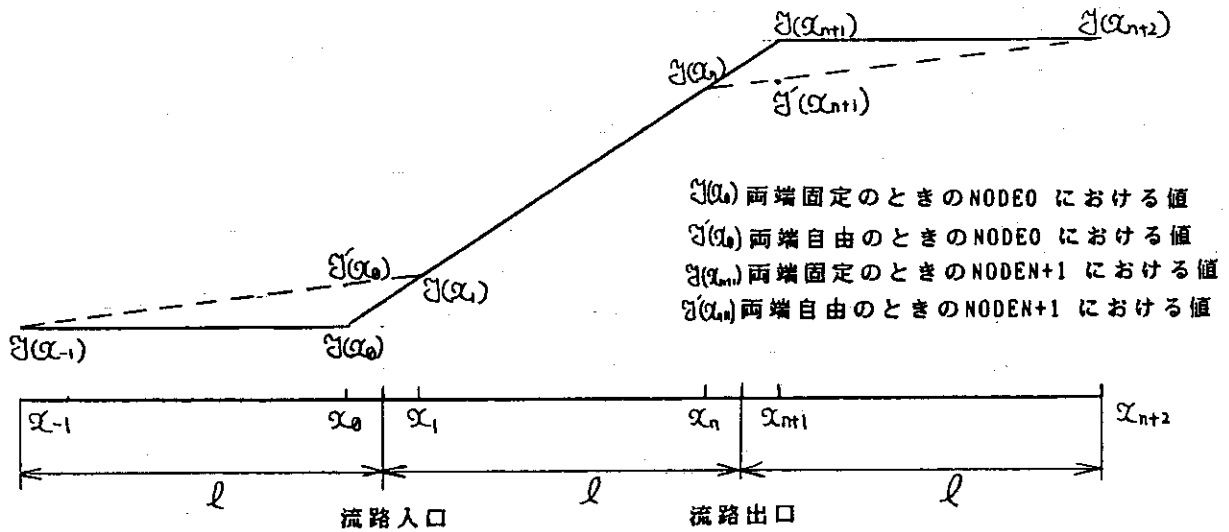


図3 境界条件

MAIN

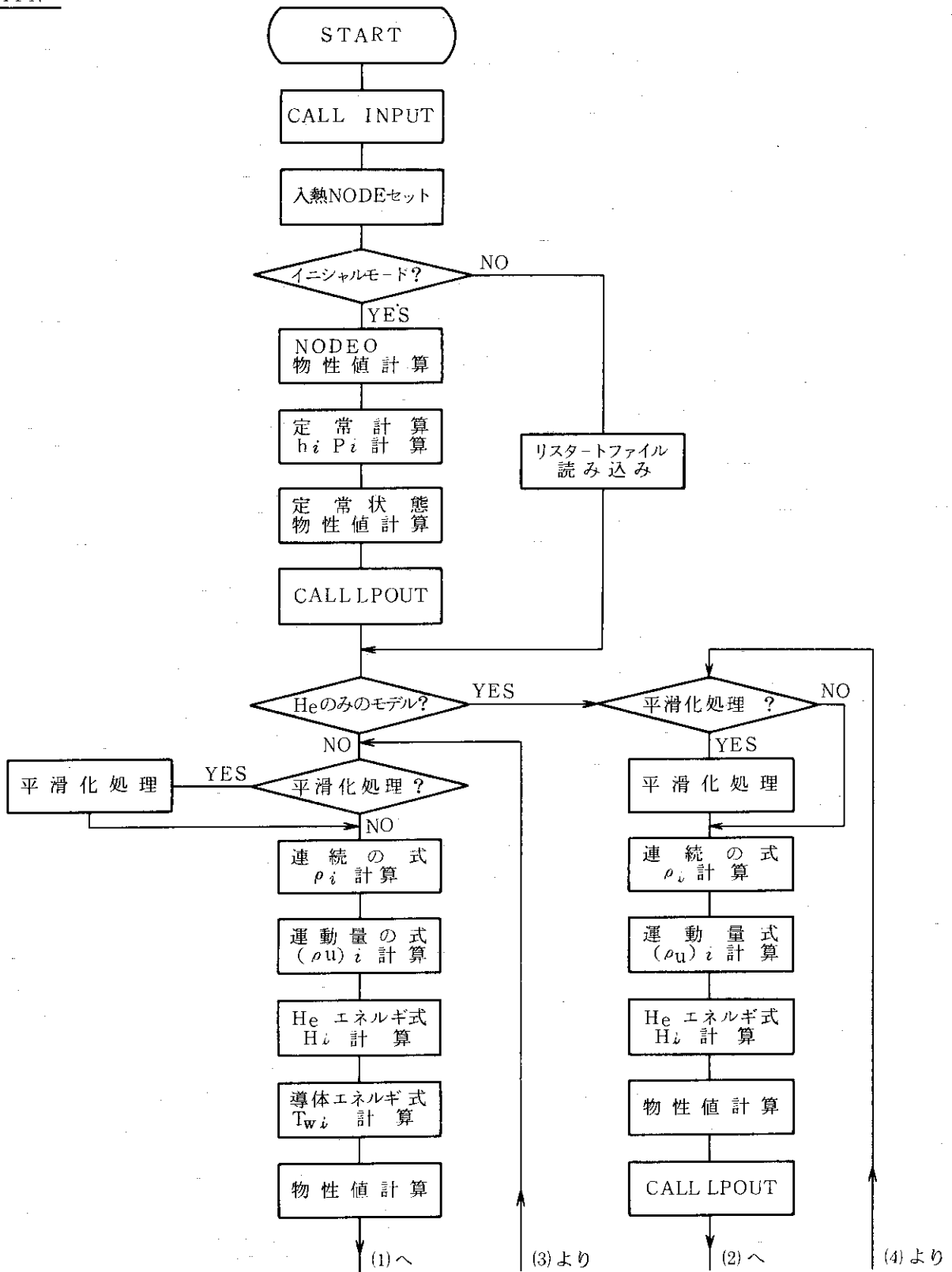


図4 メインプログラム・フローチャート

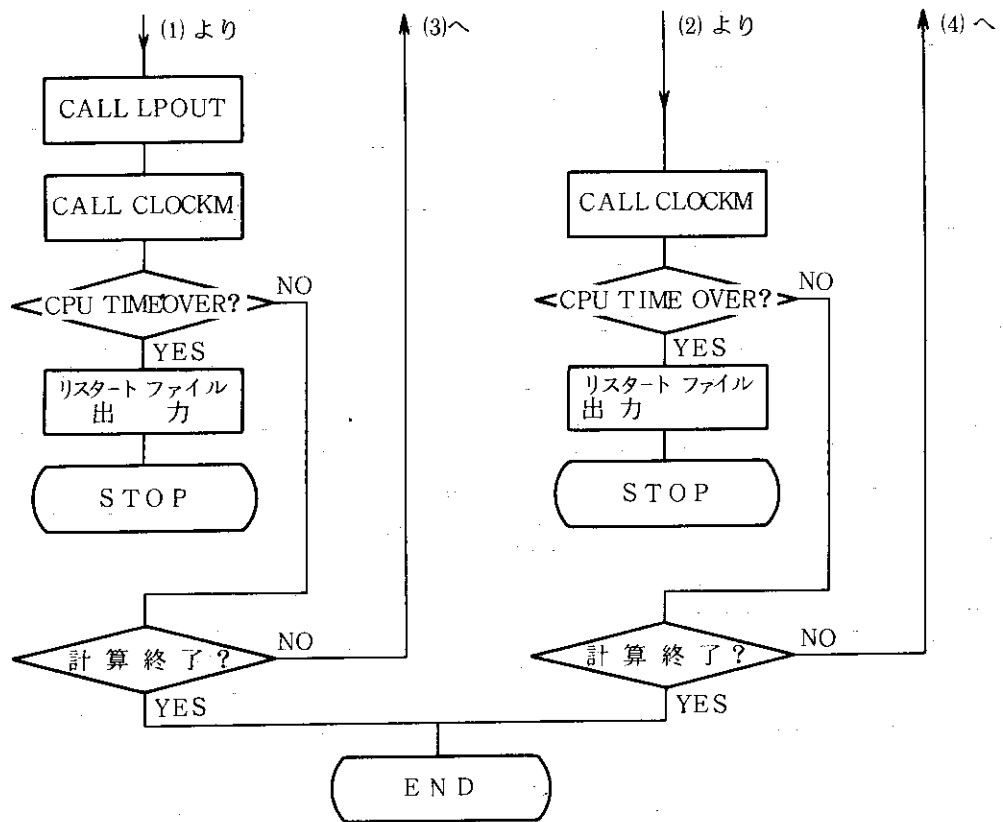


図4 (続き)

FUNCTION F

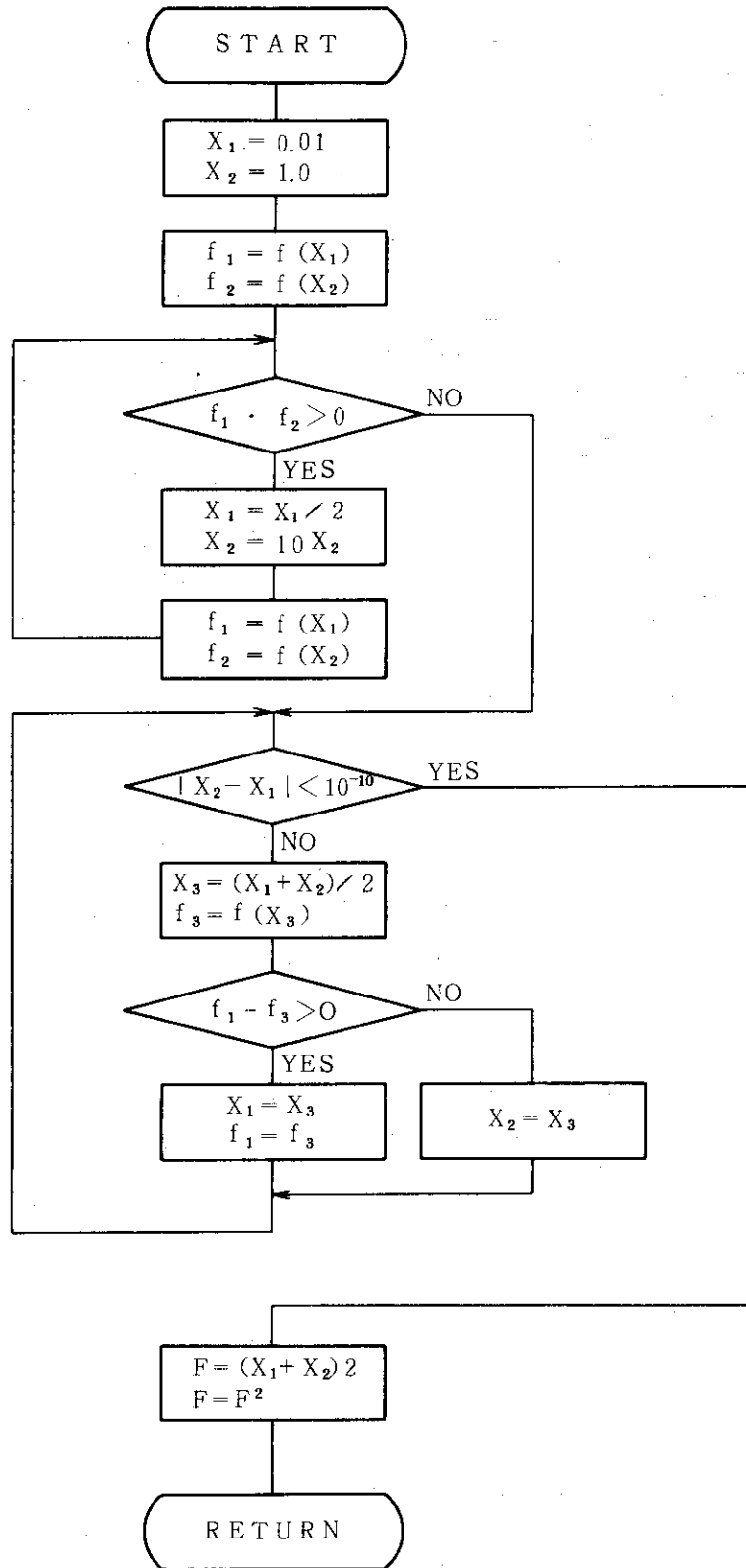


図5 関数副プログラム F のフローチャート

FUNCTION TFUNDH

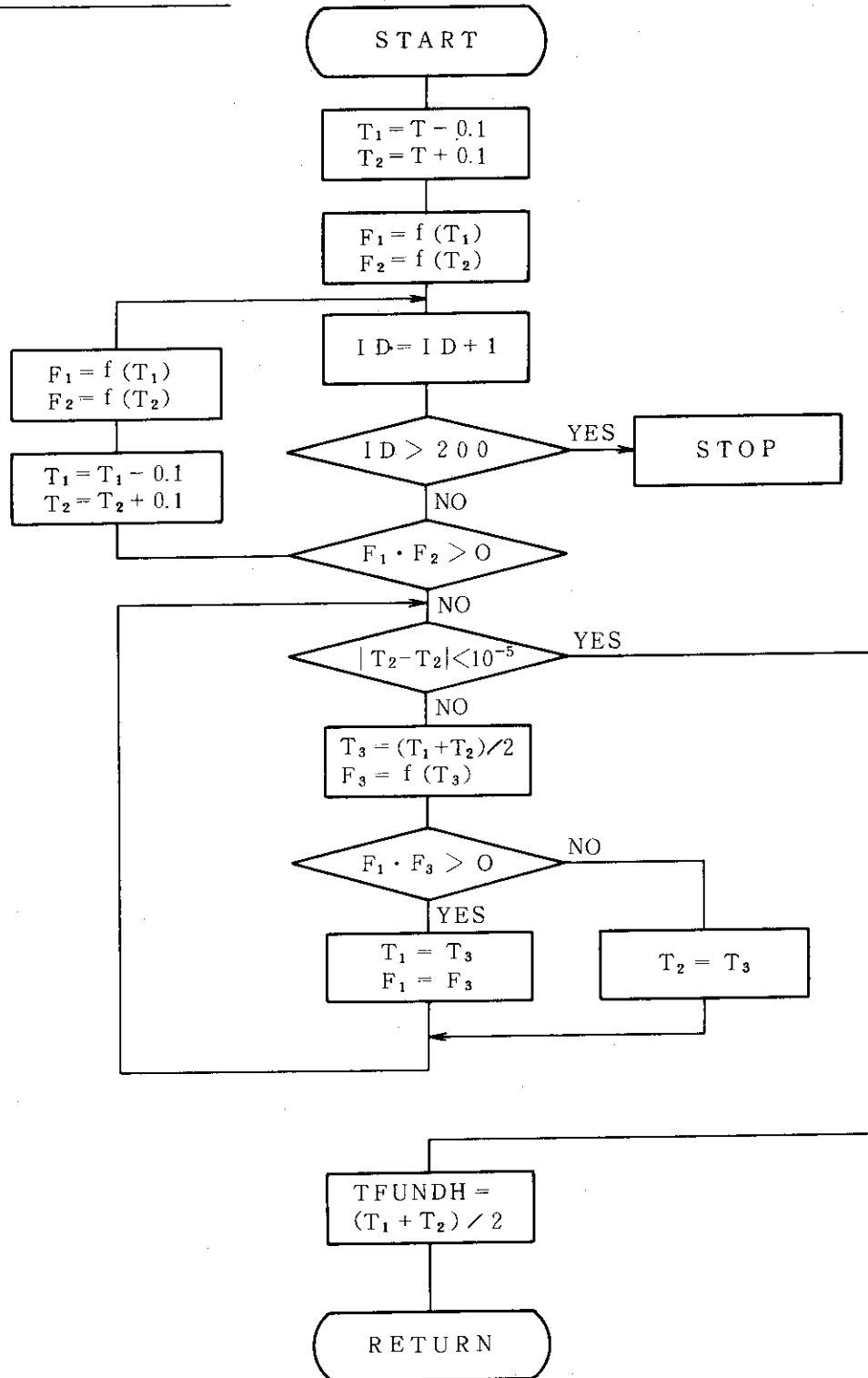


図6 関数副プログラム TFUNDH のフローチャート

SUBROUTINE DYDX

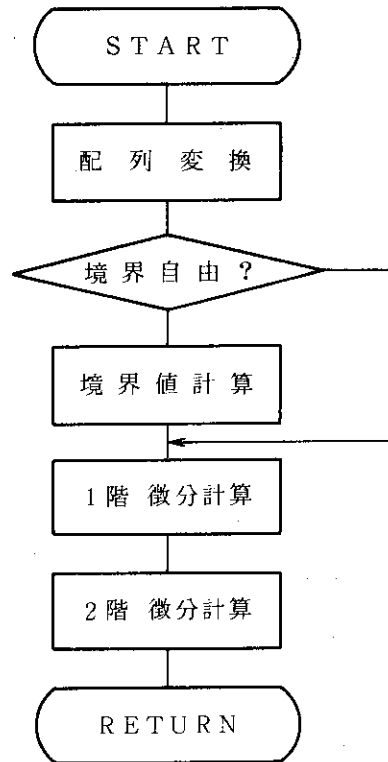


図7 サブルーチン DYDXのフローチャート

SUBROUTINE SMOOTH

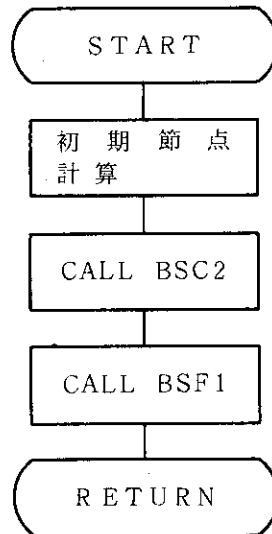


図8 サブルーチン SMOOTHのフローチャート

表1 ALPHE II JCL

(a) ALPHE-II JCLプログラム

```

00000100 //JCLG JOB
00000200 // EXEC JCLG
00000300 //SYSIN DD DATA,DLM='++'
00000400 // JUSER 95753486,TA.KATO,0035.01
00000500 T.7 W.4 C.4 P.0 I.4 SRP
00000600 OPTP PASSWORD= ,NOTIFY=J3486,CLASS=4
00000700 //*
00000800 //ALPHEC EXEC FORT77VP,SO=J9023.ALPHE3
00000900 //ALPHEL EXEC LKED77,PRVLIB='J3325.HEVP',SSLC=SSL2VP
00001000 //ALPHEV EXEC SYSA
00001100 //ALPHE2 EXEC GOA,OBSSIZE=137
00001200 //* (データ入力ファイル)
00001300 //SYSIN DD DSN=J9023.ALPHE2.DATA(STTA2),DISP=SHR
00001410 //FT66F001 DD DSN=J3486.RESTART.DATA,DISP=SHR (リスタートファイル)
00001500 //FT77F001 DD DSN=J3486.GRAPHA.DATA,DISP=SHR
00001600 ++ (グラフ出力ファイル)
00001700 //

```

(b) ALPHE-III JCLプログラム

```

00000100 //JCLG JOB
00000200 // EXEC JCLG
00000300 //SYSIN DD DATA,DLM='++'
00000400 // JUSER 95753486,TA.KATO,0035.01
00000500 T.4 W.1 I.3 C.4 P.0 GRP
00000600 OPTP PASSWORD=
00000700 //*
00000800 //* *****
00000900 //* ***** GROUT *****
00001000 //* *****
00001100 //*
00001200 //FORT77 EXEC FORT77,SO='J3325.ALPHE2G',B='ELM(PLOT2)'
00001700 //LINK EXEC LKED77,PRVLIB='J2636.ARGLIBV4',GRLIB=PNL,
00001800 // MOD='50,20,1'
00001900 //RUN EXEC GO
00002000 // EXPAND GRNLP,SYSOUE=E
00002100 // EXPAND DISKTO,DDN=FT55F001,DSN='J3486.GRAPHC.DATA'
00002700 30 (グラフ出力ファイル)
00002710 -40 入力データ
00002720 1
00002800 ++
00002900 //

```

(c) ALPHE3D コマンドプロシジャ

```

00000010 PROC 1 DSN
00000020 GLOBAL A B C D E F G
00000030 .ARGUS TSSMAC('TSSMAC.CLIST') LOAD(ALPHE3DG) LMOD(ARGUS) -
00000040 DSN1('&DSNN') DD1(FT55)
00000050 EXIT

```

(d) ALPHE2D コマンドプロシジャ

```

00000010 PROC 1 DSN
00000020 CONTROL NOFLUSH NOMSG NOLIST
00000030 GLOBAL A,B,C,D,E,F,G
00000060 .PTSID
00000070 ALLOC F(FT06F001) DUMMY
00000080 ALLOC DA(&DSN) F(FT55F001) SHR REU
00000090 CALL ALPHE2DG.LOAD
00000100 FREE F(FT55F001)
00000110 ALLOC DA(*) F(FT06F001) REUSE
00000120 EXIT

```

表 2 入力データ例

```

*****
* INPUT DATA LIST *
*****
1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
1  RUN-MODE INITIAL
2  CAL-MODE 32
3  PIN +9.2373400
4  TIN +4.8287400
5  MIN +50.000000
6  DH +0.1100000
7  AH +5.6000000
8  LH.LW +1500.0000
9  GB +0.7850000
10 F-CONST1 +0.8700000
11 F-CONST2 -2.4000000
12 AW +5.7200000
13 PE +207.30000
14 IO +50000.000
15 DW +0.1330000
16 ROW +8.9000000
17 QH-WATT +0.0000000
18 QH-TIME +0.0000000
19 QC-WATT +0.0000000
20 QC-TIME +0.00000-0
21 MAX-CPU +1200.0000
22 MAX-TIME +1.0000-0
23 OUT-TIME +1.0000-03
24 DELT-TIME +2.0000-05
25 CW-CONST1 +0.108000000-04
26 CW-CONST2 +0.748000000-06
27 CW-EXP1 +1.000000000+00
28 CW-EXP2 +3.000000000+00
29 RW-CONST +0.767700000+00
30 RW-EXP +0.880000000+00
31 RW-NO. 03
32 0.0 5.592
33 3.4740-08 7.303
34 3.4740-08 1.00+12
35 QC-NO. 00
36 QH-NO. 00
37 MESH-NO. 060
38 0.000
39 HI-FLAG 000
40 TW-NO. 02
41 30,31
42 20.DO,20.DO
43 BOUNDARY 11
.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
*** INPUT DATA END ***

```

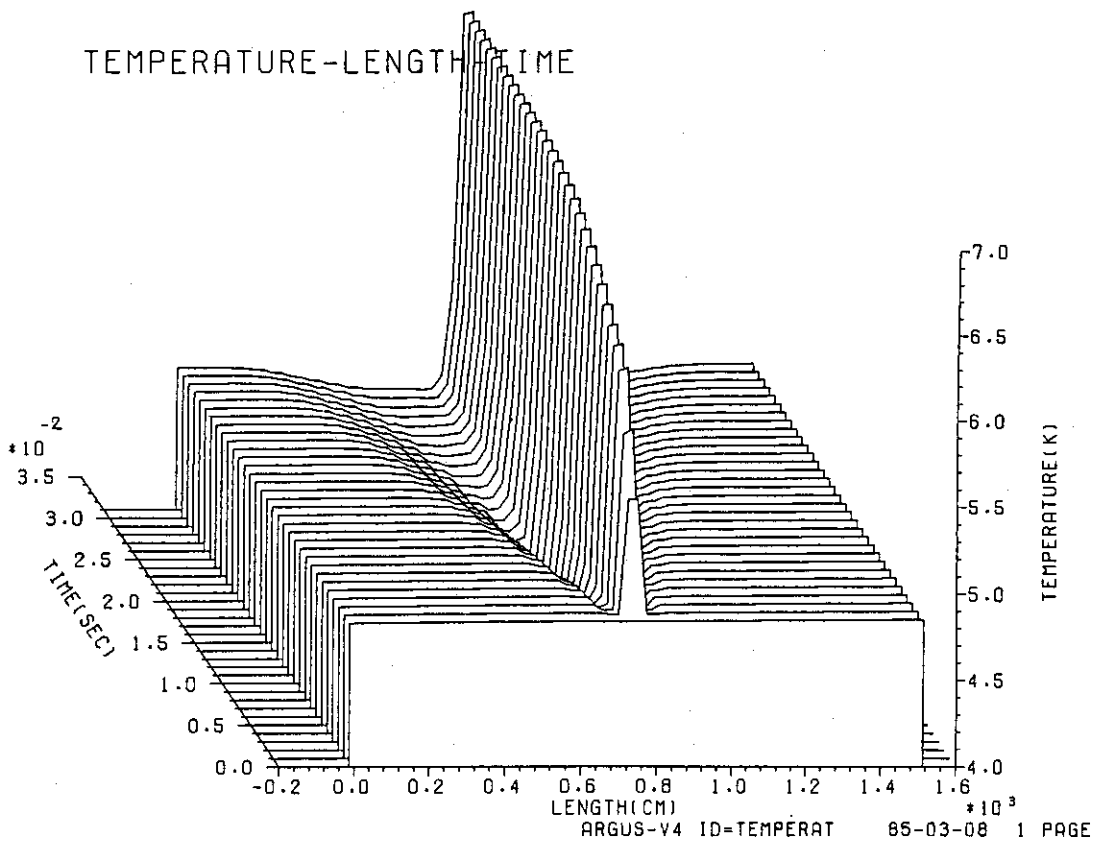


図9 ヘリウム温度変化

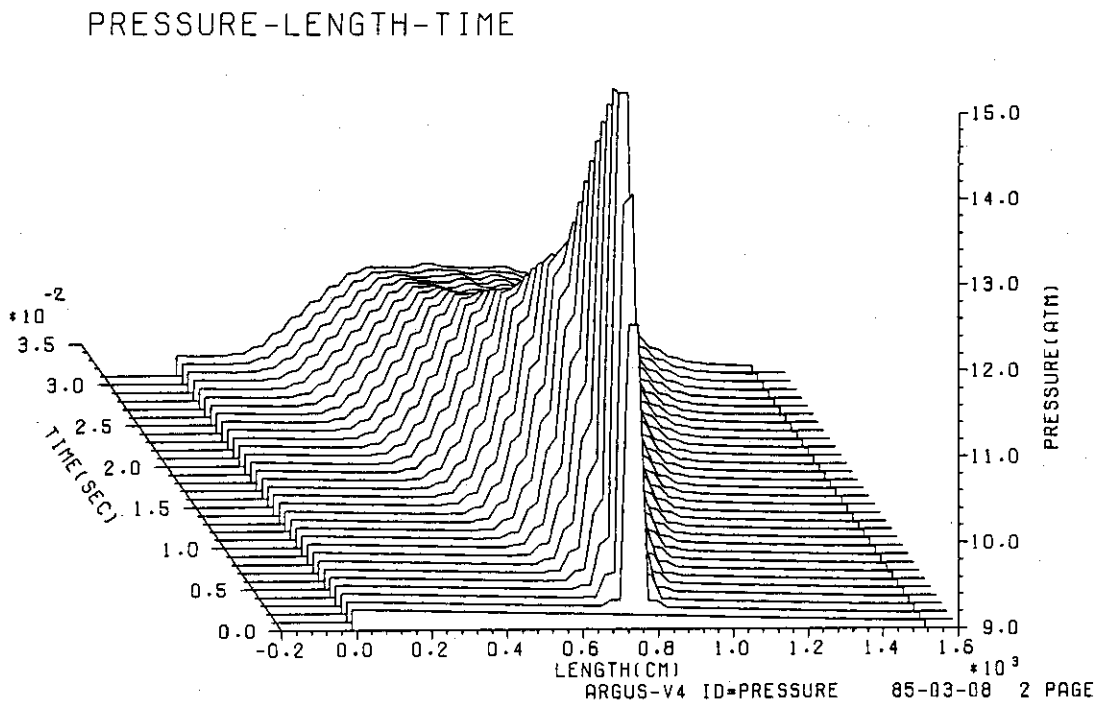


図10 ヘリウム圧力変化

SPEED-LENGTH-TIME

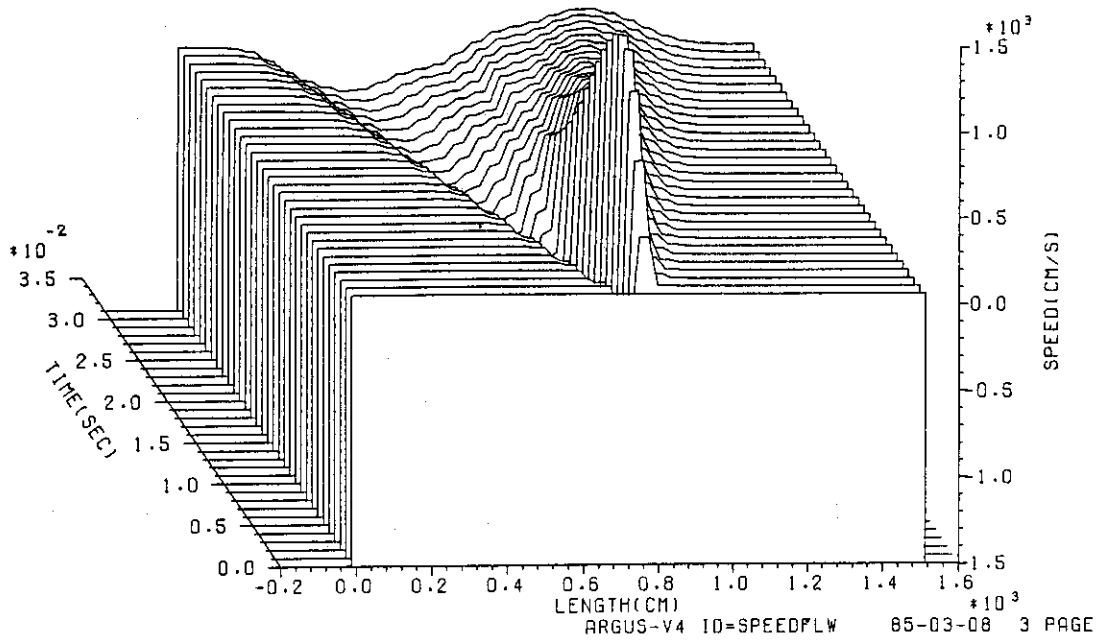


図11 ヘリウム速度変化

TEMP. COND-LNGTH-TIME

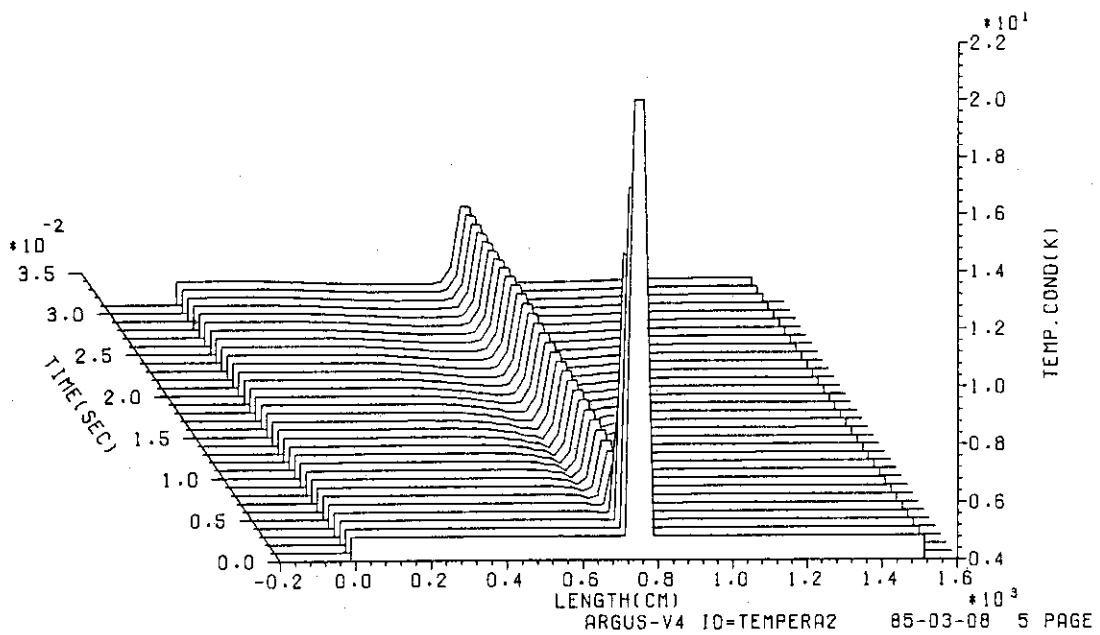


図12 導体温度変化

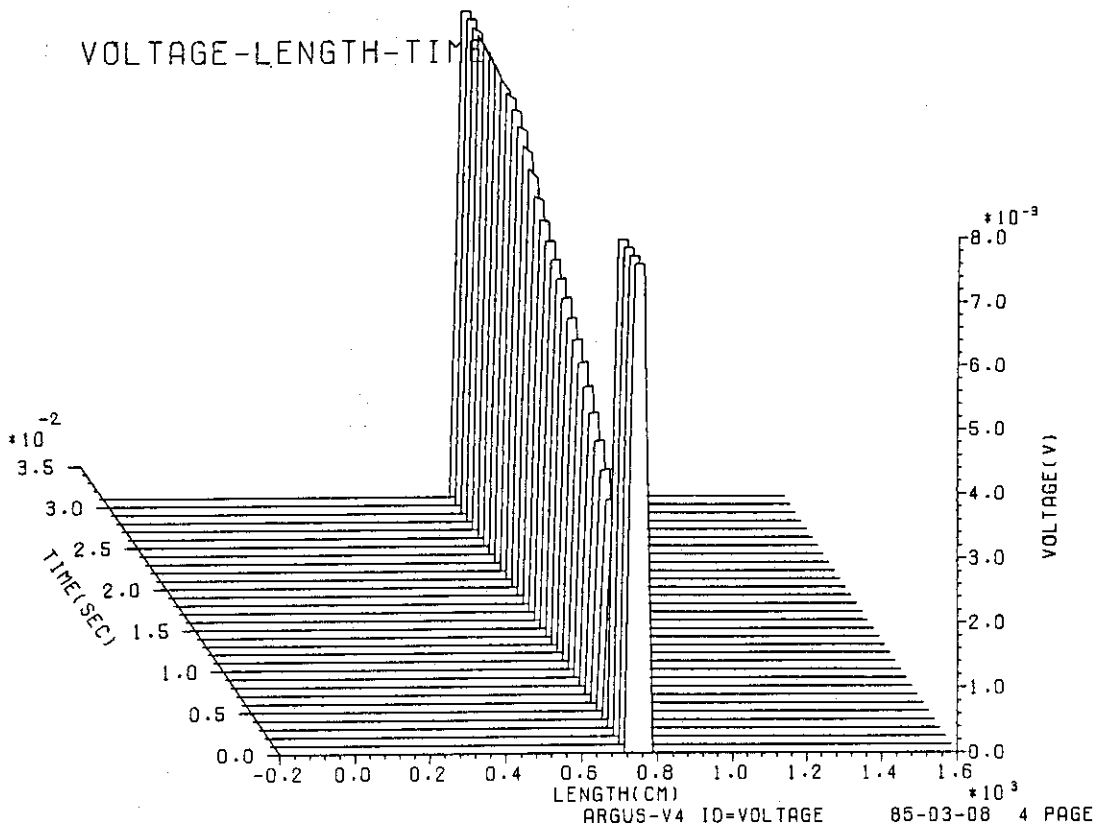


図13 導体電圧変化