

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

パソコンによる JIPP T-IIU
プラズマの平衡位置フィードバック制御

核融合科学研究所 都 築 哲 哉
東 井 和 夫
大同工業大学 松 浦 清 剛

(1990年12月26日受理)

NIFS-MEMO-1

1991年4月

RESEARCH REPORT
NIFS-MEMO Series

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. This document is intended for information only and for future publication in a journal after some rearrangements of its contents.

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to the Research Information Center, National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan.

パソコンによる J I P P T - II U

プラズマの平衡位置フィードバック制御

核融合科学研究所

都築哲哉

東井和夫

大同工業大学

松浦清剛

Feedback Control of Plasma Equilibrium
with Control System Aided by Personal Computer
on the JIPP T-IIU Tokamak

T. Tsuzuki, K. Toi, and K. Matsuura^{*2}

National Institute for Fusion Science,
Nagoya 464-01, Japan

*Daido Institute of Technology,
Nagoya 457, Japan

Abstract

A feedback control system aided by a personal computer is developed to maintain plasma position on the required position in the JIPP T-IIU tokamak. The personal computer enables to adjust various control parameters easily. In this control system, a control demand for driving the power supply of feedback controlled vertical field coils is composed to be proportional to a total plasma current. This system has been successfully employed throughout the discharge where the plasma current substantially changes from zero to hundreds of kiloamperes, because the feedback control can be done, being independent of the plasma current. The analysis of this feedback control system taken into account of digital sampling agrees well with the experimental results.

Keywords: JIPP T-IIU, personal computer, position control, PID control,
Bode diagram, transfer function, Basic program, assembler program

§ 1 はじめに

J I P P T - I I U は約 15 年前に建設されたトカマク型実験装置である。概要を表 1 と F i g . 1 に示す。プラズマの平衡はプラズマに直交する垂直磁場 ($B_v = B_{vf} + B_{vd}$) で維持されており、位置制御は B_{vf} をリアルタイムで制御することによって行われる。 B_{vf} コイルは真空容器外側でトーラス赤道面に対して上下対称の位置に 4 カ所設置され、主半径方向の内側及び外側のコイルに逆方向で同じ電流が流れるように接続されており、オーミック系とは回路的に結合がなく、従ってプラズマの位置制御を独立にすることが出来る。 B_{vd} は B_{vf} に対して準定常的に加えられる垂直磁場である。

建設当初は、その当時の最新鋭の制御用コンピュータを用い⁽¹⁾、⁽²⁾、又後にアナログ回路が併用されてきたが、この間パソコンの出現、その後の急速な技術的な進歩があり、操作性に優れ手軽に扱えるようになってきたため、この部分をパソコンに置き換え、ここでは、富士通 (株) 製 FM-16 β を使用した。

§ 2 制御のための基本公式

真空容器は導体であるため、磁場が真空容器内にしみ込むのには、表皮効果の影響で一定の有限の時間 (スキントイム) τ_k が必要である。表皮効果がないものとしたときの容器内の垂直磁場を $B_{vf} + B_{vd}$ 、プラズマ電流を I_p 、真空容器の中心に対するプラズマ中心の主半径方向の変位を Δ とすると、プラズマの主半径方向の移動を表す方程式は次のように表される⁽³⁾。

$$\frac{d I_p (\Delta - \Delta_0)}{d t} = \frac{4 \pi b^2}{\tau_k \mu_0} (B_{\perp 0} - B_{vf} - B_{vd} - \gamma I_p) \quad (1)$$

通常の条件下では、 I_p 及び Δ_0 の微分は無視され、この式の近似式は

$$\frac{d \Delta}{d t} = \frac{4 \pi b^2}{\tau_k \mu_0 I_p} (B_{\perp 0} - B_{vf} - B_{vd} - \gamma I_p) \quad (2)$$

となる。ここで μ_0 は真空中の透磁率、 b は真空容器の小半径、 γ は I_p の発生するポロイダル磁場への鉄心の影響を表す係数であり、磁場 $B_{\perp 0}$ 及び変位 Δ_0 はそれぞれ次のように表される⁽³⁾。

$$B_{\perp 0} = \frac{\mu_0 I_p}{4 \pi R} \left(1 \ln \frac{8 R}{a} + \beta_p + \frac{1}{2} - \frac{3}{2} \right) \quad (3)$$

$$\Delta_0 = \frac{d}{2 R} \left[1 \ln \frac{b}{a} + \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right) \left(\beta_p + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (4)$$

前者は主半径 R の位置に平衡を保つに必要な垂直磁場であり、後者は真空容器が完全導体とした時の Δ となる。ここで a はプラズマの小半径であり、 β_p 、 l_1 はプラズマの圧力及び電流分布を表すパラメータである。

Δ の算出方法については次の評価式 (準定常) ⁽³⁾ を用いた。 s_{out} 及び s_{in} をプラズマ電流のみによる主半径方向での外側及び内側のポロイダル磁場に比例する信号とし d を真空容器の中心からの距離とすると次式で表される。

$$\Delta = d \frac{s_{out} - s_{in}}{s_{out} + s_{in}} + \frac{2\pi a^2}{\mu_0} \frac{B_v}{I_p} - \frac{2\pi (d^2 + 2a^2) r}{\mu_0} + \frac{d^2 + a^2}{2R} \ln \frac{8R}{d} - \frac{a^2}{2R} \left(1 - \ln \frac{d}{a}\right) \quad (5)$$

(1) 式中の B_{vf} は電源への指令信号に対してフィードバックコイルが発生する応答磁場であって、指令信号を B_{con} とすると次式で表すことができる。

$$\frac{dB_{vf}}{dt} + \frac{B_{vf}}{\tau_r} = \frac{B_{con}}{\tau_r} \quad (6)$$

ここで τ_r は垂直磁場コイルの応答時間である。

以上 (1) 又は (2)、及び (6) 式が制御の設計・解析に際して用いた方程式である。

§ 3 制御式と制御特性

プラズマ電流 I_p は通常のプラズマ実験が対象とする時間範囲内では、ゆるやかな変化量であるが、放電初期から考慮すると制御の対象とするこの範囲で相当大きく変化する量である。このため、制御式を $B_{con} \propto I_p$ の形にして、この式と (2)、(3) 及び (6) 式から I_p を消去した式は目標値 Δ_r に対する Δ の常数系の微分方程式となり、制御特性に直接的な影響をなくすることができる。また、(2) 式の左辺の項で $B_{\perp 0} - B_{vd} - \gamma I_p$ は近似的に予想可能な量であってこれに対してフィードフォワード制御で対応し、フィードバック制御の部分については P I D 方式の制御を行うと制御式は次のようになる。偏差を E とすると、

$$E = \Delta - \Delta_r \quad (7)$$

$$B_{con} = I_p \left[C_1 + C_2 \frac{dI_p}{I_p dt} + C_3 E + C_4 \frac{dE}{dt} + C_5 \int E dt \right] \quad (8)$$

ここで括弧中の最初の二項はフィードフォワードに対応した項であって、前者 ($I_p \cdot C_1$) が $B_{\perp 0} - B_{vd} - \gamma I_p$ に対応し、後者 ($I_p \cdot C_2 \cdot dI_p / I_p dt$) は電流が急変した場合

の調節用、残り三項はそれぞれ比例項（P）、微分項（D）、積分項（I）及び $C_1 \sim C_5$ は制御常数あり、 Δ は（5）式より求める。

この制御式は差分化され計算機上でデジタル的に計算される部分で、アナログ系とはA/D及びD/A変換器のインターフェースを介して結合されている。このような場合には、数学的な手法として離散系として取り扱うZ変換が適しているが、サンプリング周期をTとして $\omega_c = \pi/T$ と置くと $\omega \ll \omega_c$ の領域の現象では、ラプラス変換とZ変換は一致するが $\omega \approx \omega_c$ の領域ではくい違いが生じる。このため、まず最初に見通しのよいラプラス変換で解析し、次にZ変換で解析を行い、両者の比較を行う、最後に、微分方程式を時間領域で直接解くシュミレーションによって解析を行う。

ラプラス変換；（2）、（6）、（8）式をラプラス変換する。ラプラス変換量をチルド付き文字で表し、sをラプラス変換域の独立変数とすれば各式は次式で示される。

$$\tilde{B}_{con} = I_p [C_1/s + C_2 \tilde{F} + (C_3 + C_4 s + C_5/s) \tilde{E}] \quad (9)$$

$$\tilde{B}_{vf} = \frac{\tilde{B}_{con}}{\tau_r (s + 1/\tau_r)} \quad (10)$$

$$\tilde{\Delta} = \frac{k_1}{I_p s} \left[\frac{k_2}{s} I_p - \tilde{B}_{vf} \right] \quad (11)$$

（8）式の変換の際、右辺の括弧全体に掛かる I_p は常数とし取扱い、第二項の $C_2 \cdot d I_p / I_p dt$ は $C_2 \tilde{F}$ で表している。（2）式の変換については、右辺 $= k_1 (k_2 I_p - B_{vf}) / I_p$ の形にして k_1 、 k_2 を常数として取り扱っており次式で表される。

$$k_1 = \frac{4 \pi b^2}{\mu_0 \tau_k} \quad (12)$$

$$k_2 = k_2^* - \gamma - B_{vd} / I_p \quad (13)$$

ここで k_2^* は

$$k_2^* = \frac{\mu_0}{4 \pi R} \left(1 n \frac{8 R}{a} + \beta_p + \frac{1_1}{2} - \frac{3}{2} \right) \quad (14)$$

まずこれらの伝達関数を用いて開ループの入力Eと出力 Δ の関係を求めると、

$$\tilde{\Delta} = \frac{k_1 k_2}{s^2} - \frac{k_1 (C_1 + C_2 s)}{\tau_r s^2 (s + 1/\tau_r)} - \tilde{G}_0 \tilde{E} \quad (15)$$

となり、 G_0 は開ループ伝達関数と呼ばれるもので次のように表される。

$$\tilde{G}_0 = \frac{k_1 (C_4 s^2 + C_3 s + C_5)}{\tau_r s^2 (s + 1/\tau_r)} \quad (16)$$

次に(7)のラプラス変換と(15)式より $\tilde{\Delta}_r$ と $\tilde{\Delta}$ の関係を求めると次のようになる。

$$\tilde{\Delta} = \frac{\tilde{G}_0}{1 + \tilde{G}_0} \Delta_r + \frac{k_1}{s^2 (1 + \tilde{G}_0)} \left[k_2 - \frac{(C_1 + C_2 s \tilde{F})}{\tau_r (s + 1/\tau_r)} \right] \quad (17)$$

この式で第一項は閉ループ伝達関数と呼ばれるものであり、第二項は $\tilde{\Delta}_r$ と無関係な量で外乱に相当するものであって、 C_1, C_2 を適当に選ぶことにより小さく出来る。また、この式で制御式(9)式の右辺全体に I_p がかかっていることにより、この制御系は常数系となって I_p の大きさが制御特性に影響を与えないことが解る。以上の結果より本制御系をブロックダイアグラムで示すとFig. 2となる。

次にこれらの式を用いて制御特性で重要な定常偏差及び安定性の検討をする。

定常偏差： 偏差Eは次の式で表される。

$$E = \frac{-1}{1 + \tilde{G}_0} \tilde{\Delta}_r + \frac{1}{s^2 (1 + \tilde{G}_0)} k_1 \left[k_2 - \frac{(C_1 + C_2 s \tilde{F})}{\tau_r (s + 1/\tau_r)} \right] \quad (18)$$

$\tilde{\Delta}_r$ をステップファンクション($\tilde{\Delta}_r = 1/s$)として $t = \infty$ とした時の偏差(定常偏差)を E_∞ とし最終値の定理を使用して表すと、第一項の閉ループによる通常の定常偏差は零となり、第二項の外乱のみ残り次式となる。

$$E_\infty = \lim_{s \rightarrow 0} s E = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{C_3 + C_5/s} (k_2 - C_1) \quad (19)$$

積分項の制御パラメータ $C_5 \neq 0$ とすると外乱の如何にかかわらず定常偏差は零となるが、 $C_5 = 0$ とすると、

$$E_\infty = \frac{1}{C_3} (k_2 - C_1) \quad (20)$$

と表され外乱に相当する定常偏差が残る。制御式に積分項を入れたのは、外乱による定常偏差を零にするためであるが、これによって応答性が悪くなり、又安定性に対する余裕がなくなるから気を付けなければならない。従って、プラズマ電流 I_p を急変させて、それに対するプラズマの諸量の変化を調べる物理実験⁽⁴⁾などのように応答性が問題になる場合フ

ードフォワードのパラメータを適切に選び、積分項の制御パラメータを小さくする必要
がある。

安定性： 安定であるためには、(17)式の極の全ての実数が負でなければならない。
第二項をみると、 $s=0$ も極にみえるが、 \tilde{G}_0 のカ所に(16)式を代入してみると打ち消
し合い $s=0$ は極にならないことがわかる。従って、第一項と共通の $1+\tilde{G}_0=0$ (特性方
程式)の根の実数の正負
を調べればこの制御系の安定性がわかる。まず、 $C_5=0$ とするとこの式と(16)式より

$$\tau_r s^2 + (1+k_1 C_4) s + k_1 C_3 = 0 \quad (21)$$

となり、この根は

$$s = \frac{-(1+k_1 C_4) \pm \{(1+k_1 C_4)^2 - 4 \tau_r k_1 C_3\}^{1/2}}{2 \tau_r} \quad (22)$$

となる。この式の実数部は C_3 及び C_4 の値如何にかかわらず常に負であるためこの制御系
は安定となる。 $C_5 \neq 0$ とすると(21)式の代わりに次のようになる。

$$\tau_r s^3 + (k_1 C_4 + 1) s^2 + k_1 C_3 s + k_1 C_5 = 0 \quad (23)$$

この式の係数が全て正であるため、フルヴィッツの安定判別方を用いることが可能でその
安定条件は次式で表わされる。

$$C_3 (k_1 C_4 + 1) - \tau_r C_5 > 0 \quad (24)$$

この式をみると、たとえパラメータの試行設定値で不安定な場合でも比例項及び微分項を
大きくすることにより安定化することが解る。

以上がラプラス変換にもとづく解析である。

ラプラス変換とZ変換： 実際計算機上では、サンプリングされた信号をデジタル的に
処理し、制御式は差分で与えられる。また、垂直磁場 コイルの電源にはSCRを用いてお
り、SCRの入力に対して、転流周期間は出力電圧が一定の階段波で線形の近似が可能で
ある。このような場合の解析には、サンプリング時のみ着目したZ変換がラプラス変換の
代わりに用いられる。ここでは解析の都合上、転流周期とサンプリング周期がTで同期し
ていると仮定し、外乱の部分を省略した伝達式のみを記すと次のようになる。制御式(8)
式のZ変換された伝達式 $G_c(z)$ とすると、 z をZ変換域の独立変数とすると、

$$G_c(z) = I_p \left(C_3 + C_4 \frac{z-1}{z} + C_5 \frac{z}{z-1} \right) \quad (25)$$

SCR電源及びプラズマ部分の伝達式(10)、(11)式を上記述べた条件を用いて書き換え、それぞれを \tilde{G}_s 、 \tilde{G}_p とすると、

$$\tilde{G}_s = \frac{1 - \exp(-Ts)}{s} \frac{1}{\tau_r (s + 1/\tau_r)} \quad (26)$$

$$\tilde{G}_p = \frac{1}{s I_p} \quad (27)$$

従ってZ[式]をその式のZ変換とすると $\tilde{G}_s \cdot \tilde{G}_p$ のZ変換は次のように表される。

$$\begin{aligned} Z(\tilde{G}_s \cdot \tilde{G}_p) &= Z \left[\frac{1 - \exp(-Ts)}{s} \frac{1}{\tau_r (s + 1/\tau_r)} \frac{k_1}{s I_p} \right] \\ &= \frac{k_1}{I_p \tau_r} \frac{z-1}{z} Z \left[\frac{1}{s^2 (s + 1/\tau_r)} \right] \\ &= \frac{k_1}{I_p} \left[\frac{T}{z-1} - \frac{\tau_r (1 - \exp(-T/\tau_r))}{z - \exp(-T/\tau_r)} \right] \end{aligned} \quad (28)$$

従って開ループ伝達関数 $G_0(z)$ は

$$\begin{aligned} G_0(z) &= \tau_r k_1 \left(C_3 + C_4 \frac{z-1}{z} + C_5 \frac{z}{z-1} \right) \\ &\quad \times \left(\frac{T/\tau_r}{z-1} - \frac{1 - \exp(-T/\tau_r)}{z - \exp(-T/\tau_r)} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

閉ループ伝達関数 $W(z)$ は

$$W(z) = \frac{G_0(z)}{1 + G_0(z)} \quad (30)$$

と表される。Fig. 3は C_3 (比例項)以外零とした場合の(16)式及び(29)式のボード線図で、ラプラス変換(連続系)とZ変換(離散系)を比較したグラフである。曲線A、Bはラプラス変換の場合で、それぞれAは遅れなしと仮定、Bはサンプリングタイムの半分に相当する $T/2$ だけ遅れが生じると仮定して求めた曲線である。当然のことながらゲイン(Gain)特性はAとBとで完全に一致する。CはZ変換の場合で角周波数(Angular Freq.) ω が $0 \sim \omega_c (= \pi/T)$ の範囲で意味を持つ。この例では、この範囲で ω_c の近くを除いてかなりの精度でBとCとが一致している。離散系で取り扱った場合、ゲイ

ン1以上で位相 (Phase) 遅れが180度以上となって不安定になる場合が生じ、安定の限界を求めようとした時、(29)式かあるいは(16) $\times \exp(-sT/2)$ の近似式より求める必要がある。

シュミレーション； 今までの解析では I_p 及び $\beta_p + 1_1/2$ が一定であるとして処理してきたが実際はそうではなく、特に放電初期の I_p の立ち上がり部では制御に大きな外乱を与えらると思われる。そのため(1)式にもとづいて直接微分方程式を解くシュミレーションコードを作成した。

このコードの要旨はあるサンプリング時に1ステップ前に得たデータにもとづいて(5)、(8)式より指令信号 B_{con} を求め、サンプリング周期間 B_{con} が一定として状態式(1)、(6)式をルンゲグッタ法で求めてステップを進める方法を取った。その結果はFig. 4であって、 I_p 及び $\beta_p + 1_1/2 - 1 (\equiv \lambda)$ は通常の実験時のデータを用い、サンプリング周期はSCRの転流周期に合わせて、60Hz 6相全波整流に相当する1.39msにした。制御パラメータは、それぞれ $C_1 = 3.2$ 、 $C_2 = 1.8 \times 10^{-3}$ 、 $C_3 = 0.32$ 、 $C_4 = 2.2 \times 10^{-4}$ 、 $C_5 = 2.8$ と設定し、 Δ_r は矩形波にした。図から解るようにこの制御パラメータでは応答が少しオーバーシュート気味である。 I_p 及び λ の急激な変化という外乱の影響が Δ に明瞭に現れている。この影響は放電初期の I_p の立ち上がり部で特に大きく、一方 λ の変化に対応するものは許容範囲内である。

§4 制御系の構成

JIPP T-IIUトカマクに於ける通常の実験では、3分~5分ごとにプラズマ(継続時間約0.5s)を発生させる。この3~5分間に前の放電結果を考察し、それにもとづいて次のショットの目標値及び制御パラメータの変更を行う必要があるので操作性が重要である。また、本JIPP T-IIU装置には磁場系、オーミック系及び加熱系として大電力機器が用いられており、これらが強い電磁的ノイズ源となっている。この状況のもとで信頼性、制御特性及び操作性の優れた制御系を構成するため次の諸点を考慮した。

- ①制御特性の観点より、制御ルーチンのサンプリングタイムは真空容器のスキントイム(約5ms)より十分速い必要があり、速さの上限であるSCR電源の転流の周期(1.39ms)よりも速いことを目標にした。
- ②操作性をよくするため、目標波形の設定にはグラフィック機能を使用し、コマンドはメニュー方式を取り、データの保存機能をもたせた。
- ③デバッグのしやすいプログラムとした。
- ④電磁的ノイズが考慮されていないパソコンをノイズ環境下で使用するため、耐ノイズ対策を十分考慮した。

これらの具体的な方法は次節以降で詳述する。

4.1 ハードウェアの構成

Fig. 5はハードウェアの構成であり、点線内の部分が今回組み立てたもので、5CHの制御信号からなる。位置検出用信号(s_{out} 、 s_{in})として磁気プローブを用いている。又、 B_{vf} 、 B_{vd} はそれぞれのコイルに供給する電流 I_{vf} 、 I_{vd} に比例する量であるため、これらの電流を、プラズマ電流 I_p も同様であるが、ロゴスキコイルを用いて測定している。これらの信号はアナログ式の積分器で積分される。絶縁アンプ→A/D変換器→CPU→D/A変換器→絶縁アンプの組合せは一般的に用いられている。絶縁アンプを用いる理由はアースのループを切ることにより、コモンモードのノイズをカットするためであって、我々の場合實際上重要である。

絶縁アンプ部；J-I P P T-II U装置では、加熱系としてMWクラスの高周波発振機を用いているので、1MHz以上の高周波成分のノイズを落とす必要がある。このため、アンプに用いられている絶縁アンプ用集積回路は絶縁性のよさを示す入力と出力側間の静電容量の十分小さいアナログデバイス社製のAD210を選んだ。なおこれは3ポート（入力部、アンプ部、出力部）がそれぞれ絶縁されている。これの代表特性を表2に示す。

A/D、D/A変換器、スタート用I/Oカード及びパソコン；5CHが入力信号として使用されており、A/D変換に要する時間を小さくするため、我々は速い変換器である関東電子社のKE16B-202のカードを選んだ。これの主な仕様を表3(a)に示す。入力電圧は-5V~+5Vであり、シングルエンド入力に設定して使用した。D/A変換器については、同じメーカーのKE16B-204のカードを選んだ。これの主な仕様を表3(b)に示す。出力電圧を-5V~+5Vに設定して使用した。スタート用I/Oカードには、耐ノイズ性のため、光結合タイプのエルムデータ社製のデジタルI/Oカードを使用した。これの主な仕様を表3(c)に示す。

これらのカードはFM-16β本体のオプションスロットに装着し、A/D及びD/A変換器と絶縁アンプ部の接続に関しては、フラットケーブルではなくシールド付き多心ケーブルで一對ごと撚線してあるものを用いた。配線については、信号はコモン線でまとめるのではなくチャンネルごとに対にして接続し、このシールドはパソコンのケースに確実に接続することにより誘導を受けにくいようにした。

4.2 ソフトウェアについて

ここでは、フローチャート及びこれにもとづいたプログラムについて説明する。

4.2.1 フローチャート

Fig. 6は本制御系プログラムの基本フローチャートである。プログラムをスタートさせた後、前もって処理可能な基本処理ルーチン（方程式の係数の計算、ユーザパラメータの読み取り、データ転送等）を行い、メニュー選択画面に入る。ここでは、プログラムをスキャンさせソフトウェアで設けたタイマがタイムアップするまでメニューコマンドが受付状態になり、目標値設定等必要な処理を行う。タイムアップの時点でスタートパルス

受付可能状態になり、スタートパルスによって制御ルーチンが走り実時間で位置制御をおこなう。この後、データ転送を行い、制御結果及び制御に関するデータをグラフィック表示して、メニューコマンド受付状態に戻る。この状態では、スタートパルスは受付不可となりミストリガーによる誤動作を少なくしている。

ユーザーパラメータ変更については、プログラムの走行点がメニュー選択画面領域にある時には、ブレークキーで、制御ルーチン入口部ではエスケープキーでプログラムを停止させ、ベーシックのコマンドレベルに戻してプログラムリスト上で変更する。再度ランコマンドでプログラムを走らせた場合、ベーシックの変数がリセットされるためデータ転送「ベーシック 機械語領域」を行い必要なデータを確保している。

4.2.2 プログラム

速さが要求されない主プログラムはベーシックで作成し、速さを必要とする制御ルーチン、目標波形の設定ルーチン及びデータ転送ルーチン等についてはアセンブラを用いた。FM-16β上では、FBASICが使用されている。このベーシック言語で可能なインタープリンタ方式及びコンパイラ方式のうち、我々のシステムでは使用上便利なインタープリンタ方式を基本としている。そのためアセンブラとの結合方式については、コンパイラ方式のようにリンクしてEXEファイルの形にして実行するのではなく、プログラム立ちあげ時にアセンブラ領域を確保するため、ベーシックのCLEAR文を用いてベーシックで使用するメモリの上限を下げ、アセンブラプログラムをこの領域にロードして、実行時にCALL命令文を用いて使用する。この命令文実行時にスタックセグメント上に復帰アドレス及び引き数のアドレスが積まれ、アセンブラのRET文(FAR RET)でベーシックに戻る。

メモリマップをFig. 7に示す。制御中のデータはベーシック領域のデータバッファ部分に取り込み、制御終了時点でデータラム領域に転送する。この領域はユーザ使用可能な上限まで設けてある。SGM、SGB、SGDはそれぞれのデータに対応させたセグメントベースアドレスである。

実際このプログラムでは、制御、操作性及びプログラムの見やすさの観点に立ち次の点が考慮されている。

- ①処理過程を基本機能に分解しそれぞれのモジュール化に心がけた。ベーシック側のサブルーチンでは、ローカル変数及びグローバル変数は一定の規則に従って分類し、アセンブラ側では、主プログラム中にINCLUDE文を置いてモジュールを結合させた。
- ②アセンブラの先頭にジャンプベクターテーブルを作成して、それぞれのモジュールに分歧し、これをベーシック側で「DEFSEG=SGM C=N CALL C(A(0))」の形で呼びプログラムを見やすくした。
- ③引き数の渡し方については、引き数の数が多いため、ベーシック側で配列を取り、この先頭アドレスのみをVAPTR関数で読み取りアセンブラ側にその先頭アドレスのみを渡す配列の形で引き渡す方法をとった。
- ④モジュールの先頭にオフセット値で示された引き数テーブルを作成した。
- ⑤プログラム中の計算の単位には、通常実験時に使用している電流；kA、磁場；Gau

ss、変位；cmを用いた。

⑥ 常数に関する計算は、ベーシック側で全て行った後アセンブラ側へ引渡し、実時間制御中にアセンブラ側で行われる計算量の軽減をはかった。

⑦ アセンブラ側では、16ビットの整数演算が行われるため、「 $常数 * 2^n$ 」(nは整数)の形にしてこの常数を適当な大きさにしてアセンブラ側に引き渡し、計算の途中にnの分を戻す手法を用いた。これによってオーバフロー、アンダフローをふせいだ。

アセンブラをベーシック側で使用できるようにするため、マクロアセンブラを通常の手続きでCOMファイルに変換した後アプリケーションソフトを利用して、ベーシックのLOADM及びCALL文で使用できるCOMファイルに変換している。実際使用する観点に立ち多くの処理ルーチンが設けられ、プログラムの大きさはベーシック側で40KB、アセンブラ側のソースリストで60KBと大きなものとなった。

§ 5 操作方法

Fig. 8は操作フローチャートである。操作は①立ち上げ、②メニューコマンド操作、③ユーザパラメータ設定及び④立ち下げにわけられる。しかし通常の運転ではリターンキー及びPF-3キーのみでグラフ及びメニュー選択画面までプログラムは進み、タイムアップをもって制御待ちの状態になる。

5.1 立ち上げ

電源を投入した後、①上側ドライブユニットに制御用プログラムのフロッピーディスク、下側ドライブユニットにデータセーブ用フロッピーディスクをセットする。もしロムベーシックが立ち上がってしまったならばリセットスイッチを押して起動しなおす。②オペレーションパラメータがプログラムリストの形で表示されベーシックのレディモードになる。必要に応じてパラメータを変更する(変更方法については5.3章で詳述)③PF-3キーを押す。④実験名及びその番号が表示され、変更がなければリターンキーを押す。番号に変更があれば表示のあと番号を入れてリターンキーを押す。⑤メニュー選択画面が表示される。

5.2 メニューコマンド操作方法

Fig. 9はメニュー選択画面である。コマンドメニューは1行で2ページにわたっており前ページをRMENU、後ページをMENUと呼ぶ。タイマの待ち時間表示はカウントダウン方式で設定値の少し前にタイムアップになりWaitと表示され、トリガ待ちの状態になる。この状態ではコマンドの受付は不可能となる。

5.2.1 機能及び操作方法

コマンド選択方法は、左右のカーソル移動キーでコマンドを選択した後リターンキーを押す。上/下のカーソル移動キーは左端/右端にそれぞれカーソルが移動する。コマンドの種類として次のものがあるが、機能及び操作の説明については制御に直接関係したものに限る。

[コマンドの種類]

```
RMENU ; start, test, mode, set, modify, Rsave
        , Rload, file, list, time,
        last, para, scope
MENU ; current, next, Dsave, dump, copy, note
        , letter, timer, call, refer
```

[RMENUのコマンド]

start ; タイムアップと同じ状態になる。

mode ; この版ではサポートされていない。

set ; プラズマ位置の目標波形の設定、このコマンドが選択されると、設定画面に十字印のカーソルが表示される。このカーソルを設定したい位置に移動させリターンキーを押すと前の設定した位置と直線で接続され、これを順番に進めて行き、時間軸の終了点(400ms)目標波形の設定は完了する。なおカーソルの位置は X=***、Y=***と表示される。カーソルの1ステップの移動量はテンキーを押すことにより変えることが出来る。

modify ; プラズマの位置の目標波形変更、リターンキーをおすことによりカーソルが現在の設定波形の設定点を順番にトレースしてゆく。設定をを変更したい個所だけカーソルを移動させ、リターンキーを押すとこの点が新しい設定点となる。これを順番に行うことにより目標波形を変更することが出来る。

Rsave ; 目標波形のセーブ。このコマンドを選択すると画面下側に「file : bbbb」の問い合わせが表示され、「bbbb」部にファイル名を入れリターンキーを押す。ファイル名は8文字以内。

Rload ; 目標波形のロード。

file ; データファイルのリストアップ。

list ; 設定波形の設定点が16進数でダンプされる。

time ; タイマの設定値の変更及び待ち時間の調整。このコマンドを選択すると「<mm:sec or sec>time= 」と表示されカーソルのカ所に設定値をいれてリターンキーを押す、その後右側に「time= 」と表示され時刻に狂いがあった場合、調整時間をカーソルの位置に入れる。リターンキーを押した時点でこの調整時刻よりカウントする。変更がなければそのままリターンキーをおす。

last ; 一つ前のデータを表示。

para ; 問い合わせに従ってプラズマの半径及び制御のゲインを変更する

scope ; MENUコマンドへ移る。

「MENUコマンド」

`current` ; RMENUコマンドへ移る。
`next` ; `start`と同じ、`DISPLAY=1`ならばセーブされた次のデータを表示。
`Dsave` ; 制御データのセーブ。ファイル名は現在の実験名及び実験番号
`dump` ; 上でセーブしたデータをロードしダンプする。
`copy` ; ハードコピー。
`note` ; 省略。
`letter` ; 簡単なワープロ機能。
`timer` ; `time`と同じ。
`call` ; RAMメモリ中にあるデータの再表示。
`refer` ; RMENUコマンドへ移る。

5.3 ユーザパラメータテーブルとその設定方法

パラメータは共通のものどうしプログラムリスト中に7組のテーブルにまとめてあり、それぞれのテーブル(表5-表10、PF-10は省略)の表示は表4に示すようにPFキーに割り当ててある。従ってパラメータの変更が必要な場合、プログラムが走行状態であるならばブレークキーでプログラムを停止させ、必要なテーブルをPFキーで表示させベーシックプログラムリストの変更と同じ手順で行う。テーブルに用いているフラグは「0」はNO、「1」はYESを意味する。

5.4 立ち下げ

①ブレークキー/エスケープキーをおす。②ユーザパラメータに変更があって、セーブの必要がある場合「SAVE "FEEDBACK.BAS"」をおこなう。③コマンド「SYSTEM」を入れる。④フロッピィデスクをぬく。⑤電源を切る。

§6 制御の実例

ここでは本制御系を実験に適用した実験結果と先に述べた解析結果を比較する。

6.1 実験結果

実際のプラズマ発生時において、従来のアナログ制御系から本制御系に移行する際、まず、従来の制御系でプラズマ制御を行い、本制御系に必要な信号のみを取り込んだ。次に、本制御系の制御パラメータを調整して、従来の制御系の出力とほぼ同じ出力になった時点で本制御系に切り換えた。なおサンプリングタイムの測定結果は約0.8msであった。

次に制御実験例について述べる。Fig. 10は $\Delta_r=0$ として主に積分項の効果を調べたものである。

(a) は積分項ない場合で制御パラメータの設定値は

$$C_1=1.29, C_2=9 \times 10^{-4}, C_3=0.45, C_4=3.6 \times 10^{-4}, C_5=0$$

(b) は積分項がある場合で

$C_1=1.55$ 、 $C_2=9 \times 10^{-4}$ 、 $C_3=0.32$ 、 $C_4=0$ 、 $C_5=92$ である。両方とも時刻約170–270msの間高周波による加熱をおこなっている。(a)の場合、 I_p の立ち上がり部で大きく外側へ変位した後、一定の値(0.5cm)に落ち着くが、加熱している間は β_p の上昇により、偏差が1cm弱と大きくなっている。立ち上がり部については、 C_2 の値を適当に選ぶことによりある程度偏差を小さくすることが出来る。時刻150msのところでは、定常偏差と考えてよく(20)式が使用出来るので、 $I_p=160$ kA、 $B_{va}=104$ G、及びJIPPT-IIUの通常のプラズマでは $\beta_p \approx 0.5$ 、 $1_1 \approx 1.5$ から得られた $k_2 \approx 1.72$ などの値を代入すると $E_\infty \approx 0.95$ cmとなり実際のデータとほぼ一致する。(b)の場合は、 I_p の立ち上がり部では偏差が正負に大きく変動するものの、その後放電中及び加熱中ほぼ偏差が零となっている。

Fig. 11は、目標値 Δ_r を放電途中で矩形状に変化させて応答特性を調べた例である。

(a)は微分項がない場合で制御パラメータの設定値は

$$C_1=4.5, C_2=9.0 \times 10^{-4}, C_3=0.32, C_4=0, C_5=92$$

(b)は微分項がある場合で制御パラメータの設定は

$C_1=4.5$ 、 $C_2=9.0 \times 10^{-4}$ 、 $C_3=0.32$ 、 $C_4=2.1 \times 10^{-4}$ 、 $C_5=92$ である。微分項を利かすことにより I_p の立ち上がり部の変動が小さくなり目標値に対する追従がよくなり応答性が改善されていることが解る。

Fig. 12は微分項 C_4 及び積分項 C_5 をショット毎に変化させて制御系の安定性を調べた例である。

(a)の制御パラメータの設定値は

$$C_1=2.1, C_2=3.6 \times 10^{-4}, C_3=0.32, C_4=1.1 \times 10^{-4}, C_5=184$$

(b)は $C_4=0$ とした場合でその他の制御パラメータ同図(a)の場合と同じである。

(b)がより不安定であり(24)式の傾向に沿っている。なお(b)の場合、 B_{vf} コイル通電に際し、トラス部で大きな振動音が発生し、 B_{vf} 磁場コイル系の損傷が心配された。

次の例として、Fig. 13に示す I_p を急減させた場合の制御例で(a)はパソコン画面であり、(b)はデータ処理系で求められた図であって、制御は順調に行われていることが解る。Fig. 14は $\lambda (= \beta_p + 1_1 / 2 - 1)$ が放電途中でかなり大きく変化する場合であり、設定波形 Δ_r を放電中 $\Delta_r=0$ に設定してあるにもかかわらず、このように一方的に変位の大きい側へずれてゆく場合があるが、(5)式の第2項の常数補正をすることにより対処出来た。

一般的な傾向としては、フィードバック項に相当する制御パラメータ C_3 、 C_4 、 C_5 の値が適切に選択されていたならば、予知項に相当する制御パラメータ C_1 、 C_2 の値が最適よりずれていても實際上制御特性は問題とならなかった。しかしながら大気開放後の立ち上げ時で、真空壁の状態(ウォールコンディショニング)がまだよくない場合、 C_1 を出来るだけプラズマの平衡に近い値を選び C_5 の値を通常の時より少し低めに選ぶとディスラプションの生ずる率が下がった。

誘導に対しては初期調整期間中、NBI装置の高電圧付加時に於ける絶縁破壊から生じた誘導障害によって度々ミストリガ及びプログラムの暴走等の誤動作が発生したが、シールド及びアースを確実にすることにより防ぐことが出来た。

6.2 実験と理論解析との比較

以上の実例と解析結果について比較する。Fig. 15はZ変換で求めた安定性限界付近の開ループ伝達関数(28)式のボデ線図及び閉ループ伝達(29)式の周波数応答特性である。A、B、Cはそれぞれ次の制御パラメータに対応した曲線である。

$$\begin{aligned} \text{即ち、A: } C_3 &= 0.32, C_4 = 0, & C_5 &= 0, \\ \text{B: } C_3 &= 0.32, C_4 = 0, & C_5 &= 28, \\ \text{C: } C_3 &= 0.32, C_4 = 2.2 \times 10^{-4}, & C_5 &= 28 \end{aligned}$$

である。Bの場合、安定に対するゲイン余裕及び位相余裕がほとんどない状態であるがこれに微分項をいれることによりゲイン余裕が約12.5db及び位相余裕が約22.5°生じた。この結果はFig. 12の例の傾向と同じであるが安定の限界については、実際よりも解析例の方が制御パラメータの範囲が狭い。この実験と解析結果との不一致の主な理由は解析の都合上SCR電源の転流周期とサンプリング周期を同じにしたためと、SCR電源のゲインは線形ではなく制御角 α とすれば $\cos(\alpha)$ の関係を含むためと考えられる。

閉ループ伝達関数の周波数応答特性に於て、ゲインが1以上になる割合が矩形波入力に対する応答出力のオーバシュートの指標なり、このグラフから解るように積分項いれることにより大きくなり、微分項いれることによりこれが改善されており、Fig. 11の例はこの傾向に沿っている。

§3のシュミレーションの項で示したFig. 4の制御パラメータは上のCの例と同じである。放電初期の I_p の立ち上がり部では Δ は大きく外側へ変位しているが、制御パラメータ及び Δ_r の調整だけでは I_p 立ち上がり時の Δ を5cm以内にはすることは不可能である。その結果 $C_5 \neq 0$ とすると、内側へ反転する現象生じ、これは実例と同じで初期の積分の影響がこの時点まで残ったためと思われる。

§7 まとめ

制御用コンピュータと異なりパソコンを用いる事により、安価で取扱い易い制御システムが構築でき、現在1年有余にわたって順調に働いている。本制御システムの特徴をまとめると次のようになる。

- ①制御式(8)式を用いることにより本制御システムは近似的には常数形となり、 I_p の大きさによって制御特性に直接を受けないシステムにすることができた。
- ②1ステップの制御時間(0.8ms)をSCRの転流周期(1.39ms)よりも小さくする事ができた。しかしながらこれと同期を取っていないため、タイミングによって位相の1部で位相制御がかからなくなり、制御特性が損なわれている可能性がある。
- ③誘導障害については、加熱用高周波発信機のノイズは問題にはならなかったが、NB Iの絶縁破壊時に発生するサージによって度々誤動作が生じた。アース及びシールド確実にすることにより防ぐことができた。

④操作性については、十分満足するものが得られた。

⑤制御特性の解析結果については大筋で実際と一致し設計の指針及びパラメータの最適化に役だった。

謝辞

本制御系開発にあたって、当初より御協力、御支援いただいた足立圭三助教授に心より謝意を表します。本制御系の実験を行うにあたっては、浜田泰司教授を初めNTXグループの皆様に貴重な実験時間を割いていただいたことを、また適切なコメントいただいたことに対して心より謝意を表します。

参考文献

- 1) K. Toi, K. Sakurai, S. Itoh, K. Matsuura, S. Tanahashi: Jpn. J. Appl. Phys. 19(1980)2457.
- 2) K. Sakurai, S. Tanahashi: Jpn. J. Phys. 19(1980)1533.
- 3) V. S. Mukhovatov, V. D. Shafranov: Nucl. Fusion 11(1971)605.
- 4) K. Toi, et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (in Proc. 13th IAEA Conf. Washinton, 1990)

表1 JIPPT-IIU主要パラメータ

主半径 (R)		91 cm
プラズマ小径 (a)		23 cm
プラズマ電流 (I _p)		320 kA (最大)
トロイダル場		3 T (最大)
真空容器	半径 (b)	40 cm
	スキントイム (τ _k)	5 ms
鉄心	最大磁束	1.2 V·s
	プラズマ電流のポロイダル効果 (γ)	1.1 × 10 ⁻⁷ H/m
位置制御SCR電源	出力	2.6 MW
	立ち上がり (τ _r)	5 ms
	相数	6相 (転流周期; 1.39 ms)
位置検出磁気プローブ位置 (d)		29 cm (真空容器中心からの距離)

表2 AD210の代表特性 (絶縁アンプ用集積回路)

電圧利得		1~1000
最大電圧		±10V
入力抵抗	線間モード	10 ¹² Ω
	コモンモード	5GΩ/5pF
周波数帯域		20kHz
最大出力電圧/電流		15V/5mA

表3 各カード仕様

(a) KE16B-202 (A/D変換器)

(b) KE16B-204 (D/A変換器)

(c) KE16B-102 (デジタルI/O)

(a)	入力電圧	0V~+1V、0V~+5V -5V~+5V、-5V~+5V
	入力点数	シングルエンド信号 16CH 差動信号 8CH
	分解能	12ビット
	精度	±2LSB
	A/D変換時間	10μsec
(b)	出力電圧	0V~+1V、0V~+5V 0V~+10V、-5V~+5V
	出力点数	2CH
	出力電流	±10mA
	分解能	12ビット
	精度	±1LSB
	D/A変換時間	10μsec
	スルーレート	10V/μsec
(c)	入出力点数	各8CH
	外部電源	12V~24V
	結合方式	光
	パルス幅	170μsec

表4 PFキー/パラメータテーブル

PFキー	1	5	6
パラメータ	e q u a t i o n	o p e r a t i n	c h a n n e l
PFキー	7	8	9
パラメータ	g r a p h	r e f 1	r e f 2
PFキー	10		
パラメータ	P T, o t h e r		

表5 equation パラメータテーブル
方程式の係数、制御パラメータ及び校正値。

```

1890 '<coeff>: k1=-1/2*(d*d+2*a*a)*gamma+(d*d+a*a)/2/R*log(8*R/d)-a*a/2/R*(1-log
(d/a): k2=d/sr(2): k3=-a*a/2: <xp(0)=k1, xp(1)=k2, xp(2)=k3>
1900 '<delta>: D1=k1+k2*(S1-S2)/(S1+S2)+k3*(rt*Bf+Bd)/lp1
1910 '<out>: Bc1=lp1*gain*[c1+c2*(lp1-lp2)/lp1+c3*(d1-r1)+c4*(d1-d2-r1+r2)
+c5*((d1-r1)/2+d2-r2)]+abc*Bc2+apn*Pn+apr*Pr
1920 '----- coefficient (HO=&h800) -----
1930 R!=93: A!=23: D!=29: RT!=.203*5: GANMA!=1.1: DELTAM!=10 '(unit:cm)
1940 C1!=2500: C2!=1000: C3!=250: C4!=200: C5!=50
1950 ABC!=0: APN!=-0: APR!=0!: GAIN!=1/2: SBIT1=2: SBIT2=2
1960 'S-min lp-min T-adjust &h/delta-max &h/kA &h/gauss
1970 SL!=10: lL!=10: TEQ!=133: HD!=HO/DELTAM!: HA!=HO/754: HB!=HO/6555*5
1980 *EQCOEF '----- coefficient arrange -----
1990 Z0=(A!*A!+D!*D!)/2/R!*LOG(8*R!/D!): Z1=A!*A!/2/R!*(1-LOG(D!/A!))
2000 Z2=(D!*D!+2*A!*A!)*GANMA!/2/100
2010 ' xp(i)
2020 XP(0)=(Z0-Z1-Z2)*HD!: XP(1)=D!/SQR(2)*HD!: XP(2)=-A!*A!/2*HD!*HA!/HB!/100
2025 XP(2)=.7*XP(2)
2030 XP(3)=C1!: XP(4)=C2!: XP(5)=C3!/HD!: XP(6)=C4!/HD!: XP(7)=C5!/HD!
2040 XP(8)=ABC!: XP(9)=APN!: XP(10)=APR!: XP(11)=GAIN!*HB!/HA!/183.1: XP(12)=RT!

```

表6 operation パラメータテーブル

運転に直接関係したパラメータテーブル。DSAVE及びDISPLAYはそれぞれショットごとのデータセーブ、セーブデータの表示の有無のフラグであり、後者については制御ルーチンに入らない。

```

2640 PT$="PT-1" 'PT-name
2650 'SIMU:1=no-A/D;d=0,2=no-A/D,4=no-cal,8=cal-Test,16=control-Test,32=basic
2660 'size Dclear Tdummy simu-value simulat
2670 SZ=2: DCL=0: TDUMY=0: SVAL=&HA00: SIMU=0

```

```

2680 'display repeat index X-step T/div(ms) timer T-idle data-size
2690 DPLAY=0: REP=1: IDX=1: STPX=1: TDIV=100: TI=240: TID=10: NDATA=660
2700 'Dsave hcopy rs232c buffer data-drive PT-drive Exp-name
2710 DSAVE=0: COPY=0: NET=0: RAM=1: DDRV$="1:": PDRV$="0:": NAM$="FD"
2720 'note note$
2730 PNOT=1: NT$="position control"

```

表7 channelパラメータテーブル

```

2070 *PRIS '-----reference 1 (channel: R=reference D=reference)-----
2390 ' chan figure color level gain%
2400 K=1:N(K)=1: F(K)=1: Q(K)=4: L(K)=4: G(K)=100 'S1
2410 K=2:N(K)=1: F(K)=1: Q(K)=6: L(K)=0: G(K)=100 'S2
2420 K=3:N(K)=1: F(K)=2: Q(K)=4: L(K)=5: G(K)=100 'Ip
2430 K=4:N(K)=1: F(K)=3: Q(K)=6: L(K)=0: G(K)=100 'Bvd
2440 K=5:N(K)=1: F(K)=3: Q(K)=4: L(K)=4: G(K)=100 'Bvf
2450 'K=6:N(K)=1: F(K)=4: Q(K)=6: L(K)=0: G(K)=100 'Pnbi
2455 K=6:N(K)=1: F(K)=4: Q(K)=6: L(K)=0: G(K)=-100 'Pnbi
2460 K=7:N(K)=1: F(K)=4: Q(K)=4: L(K)=4: G(K)=100 'Prf
2470 K=8:N(K)=0: F(K)=4: Q(K)=6: L(K)=0: G(K)=100

```

表8 graphパラメータテーブル

```

2500 'Nfig Nindex line-style color line-length(X,Y)
2510 NFM=4: NIM=4: ZAX=&H1111: AQ=4: LMX=0: LMY=0
2520 ' X-right% X-left% Y-upper% Y-lower% Y-div scale(X,Y:bit1,2)
2530 K=1:RDX(K)=30: LX(K)=260:UY(K)=40: DY(K)=280:DV(K)=5: SC(K)=3
2540 K=2:RDX(K)=275:LX(K)=505:UY(K)=40: DY(K)=280:DV(K)=5: SC(K)=1
2550 K=3:RDX(K)=520:LX(K)=750:UY(K)=40: DY(K)=280:DV(K)=5: SC(K)=1
2560 K=4:RDX(K)=765:LX(K)=995:UY(K)=40: DY(K)=280:DV(K)=5: SC(K)=1
2570 ' X-index% Y-index% color index-chr$
2580 K=1:IX(K)=180:IY(K)=50: IQ(K)=4: IX$(K)="probe"
2590 K=2:IX(K)=425:IY(K)=50: IQ(K)=5: IX$(K)="Ib"
2600 K=3:IX(K)=670:IY(K)=50: IQ(K)=6: IX$(K)="Bd, Bf"
2610 K=4:IX(K)=915:IY(K)=50: IQ(K)=7: IX$(K)="Pn, Pr"

```

表9 ref 1パラメータテーブル

```

2080 '<reference>
2090 'fig-N Gcolor Lcenter Lcolor Tadvance inv-out D/A-out(V)
2100 FR(0)=0:RQ(0)=4:RC(0)=1:RCQ(0)=6:TAD(0)=0:VI(0)=1:YG(0)=10'out(+5,-5V)
2110 '<reserve>
2120 '<data display>
2130 'Nfig inverse gain% color Y-level data-step channel
2140 FD(0)=0:DIV(0)=0:DG(0)=100:DQ(0)=6:DLV(0)=-2:PS(0)=4: DN(0)=3 'Ip
2150 FD(1)=0:DIV(1)=0:DG(1)=100:DQ(1)=5:DLV(1)=-1:PS(1)=4: DN(1)=9 'M-ref

```

```

2160 FD(2)=0:DIV(2)=0:DG(2)=100:DQ(2)=2:DLV(2)=1: PS(2)=2: DN(2)=10'del
ta
2170 FD(3)=0:DIV(3)=0:DG(3)=50: DQ(3)=7:DLV(3)=0: PS(3)=2: DN(3)=11'out
2180 'Yexpand X-right X-width Y-upper Y-width
2190 EX(0)=1:RR(0)=40:RX(0)=950:RU(0)=320:RY(0)=500
2200 'Y-div Y-mark-max val-step mark-step T-end T-begin
2210 DIY(0)=10:YV(0)=500: SY(0)=100:SMY(0)=1:TL(0)=400:TB(0)=TADV
2220 ' index (X,Y) color chr$-main chr$-sub
2230 RIX(0)=880:RIY(0)=330:RIQ(0)=4:RF$(0)="position":RF$(1)=" rate "
2240 RIX(1)=880:RIY(1)=380:RIQ(1)=2:RF$(2)="delta":RF$(3)=" rate "
2250 RIX(2)=880:RIY(2)=430:RIQ(2)=7:RF$(4)="V-out":RF$(5)=" V "

```

表10 ref2パラメータテーブル

```

2280 'refer data fer-fig indx coeffi(equ)
2290 NREF=1: DFM=4: RFIG=1: RINDX=3: NPARA=20
2300 'N-D/A N-seg N-point
2310 NDA=1: RSG=3: REFNP=500
2320 'inv-out end-voltage T-ope. Tadvance rive<ref>
2330 DAINV=0: VEND=&H800: TD=520: TADV=100: RDRV$="1:"
2340 'Qedit Qa

```

Figure Caption

Fig. 1 JIPP T-II U断面図

Fig. 2 制御系ブロックダイアグラム

Δ : プラズマの変位、

Δ_r : 変位の目標地、

F : $dI_p / I_p dt$ のラプラス変換

Fig. 3 開ループ伝達関数のボード線図

A : ラプラス変換の場合、

B : $T/2$ の遅れで近似したラプラス変換、

C : Z変換の場合、 ω の適用範囲 $0 \sim \pi/T$ ($=\omega_c$)

Fig. 4 シュミレーション波形

τ_I : I_p の立ち上がり時間 (100ms)、

τ : λ の立ち上がり時間 (25ms)

Fig. 5 制御系構成図

Fig. 6 プログラムのフローチャート

Fig. 7 メモリマップ

Fig. 8 操作フローチャート

Fig. 9 操作画面

横軸 : 時間 (ms)

縦軸 : 変位 (cm/div), その他 (任意)

Fig. 10 制御の実例 I (積分項の効果)

制御実際時のパソコンの波形

(a) 積分項がない場合、

(b) 積分項がある場合

Fig. 11 制御の実例 II (微分項の効果)

(a) 積分項有り、微分項無しの場合

(b) 積分項、微分項有りの場合

Fig. 12. 制御の実例 III (安定な限界)

(a) 安定な場合、(b) 安定な限界

Fig. 13. 制御の実例 IV (I_p 急変)

(a) パソコン画面、(b) データ処理系

Fig. 14 制御の実例 V (悪い制御例)

Fig. 15 制御パラメータに対する開ループ (a) 及び閉ループ (b) のボード線図

A : $C_3=0.32, C_4=0, C_5=0$

B : $C_3=0.32, C_4=0, C_5=28$

C : $C_3=0.32, C_4=2.2 \times 10^{-4}, C_5=28$

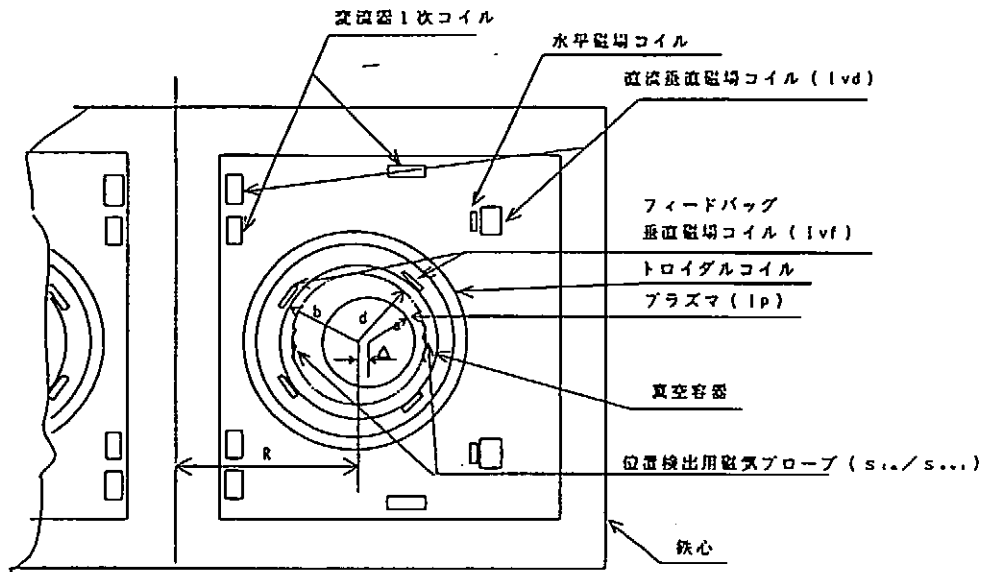


Fig. 1 JIPP T-IIU

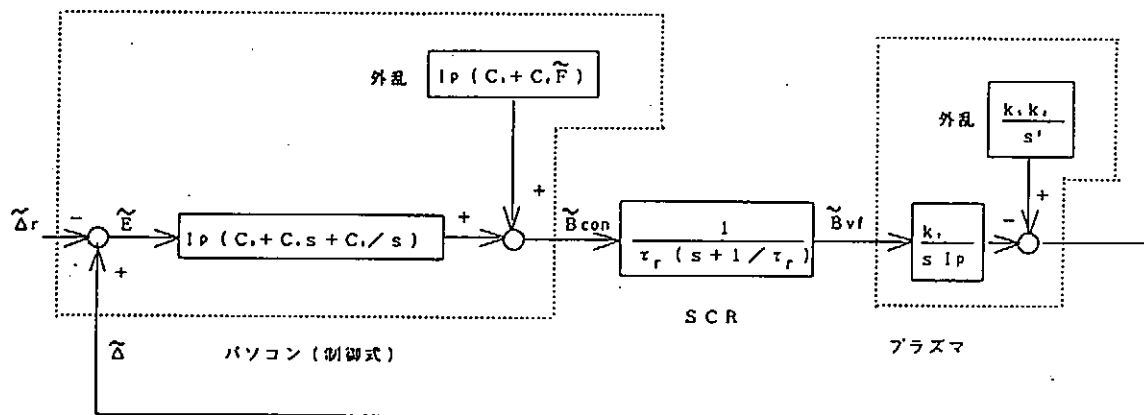


Fig. 2 制御系ブロックダイアグラム

\tilde{F} : $d I_p / I_p dt$ のラプラス変換

$\tilde{\Delta}$: プラズマの変位、 Δr : 変位の目標値

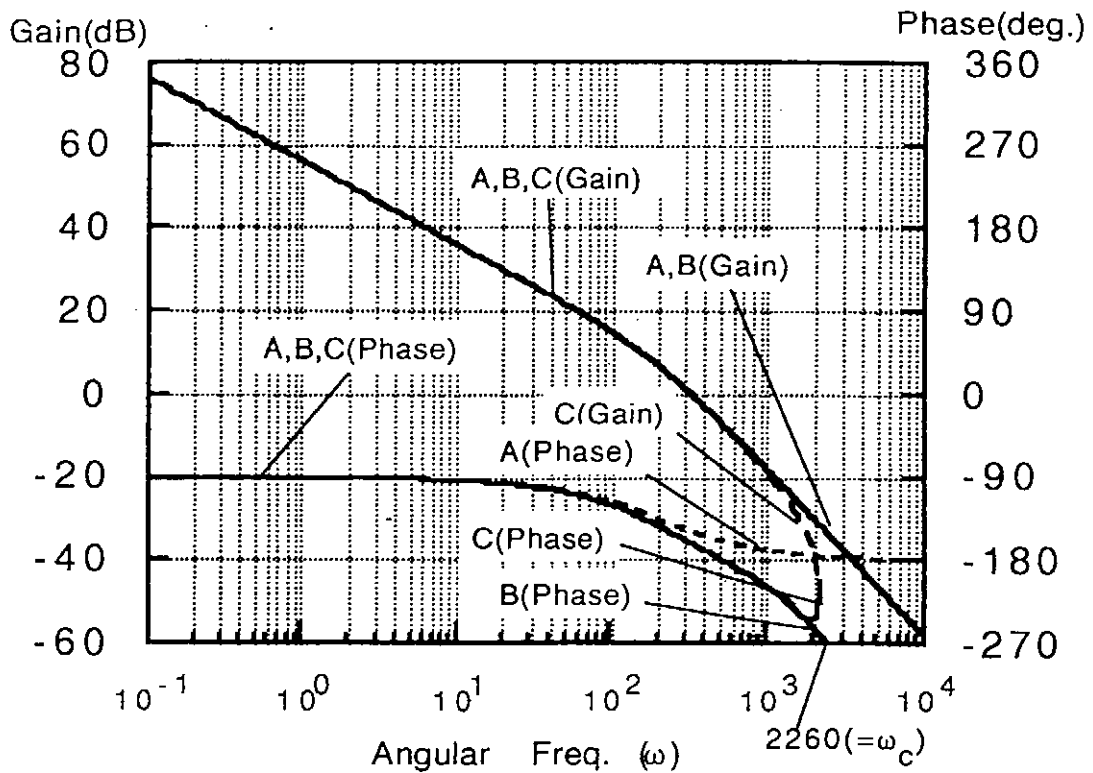


Fig. 3 開ループ伝達関数のボード線図

A: ラプラス変換の場合、

B: $T/2$ の遅れで近似したラプラス変換、

C: Z変換の場合、 ω の適用範囲 $0 \sim \pi/T (= \omega_c)$

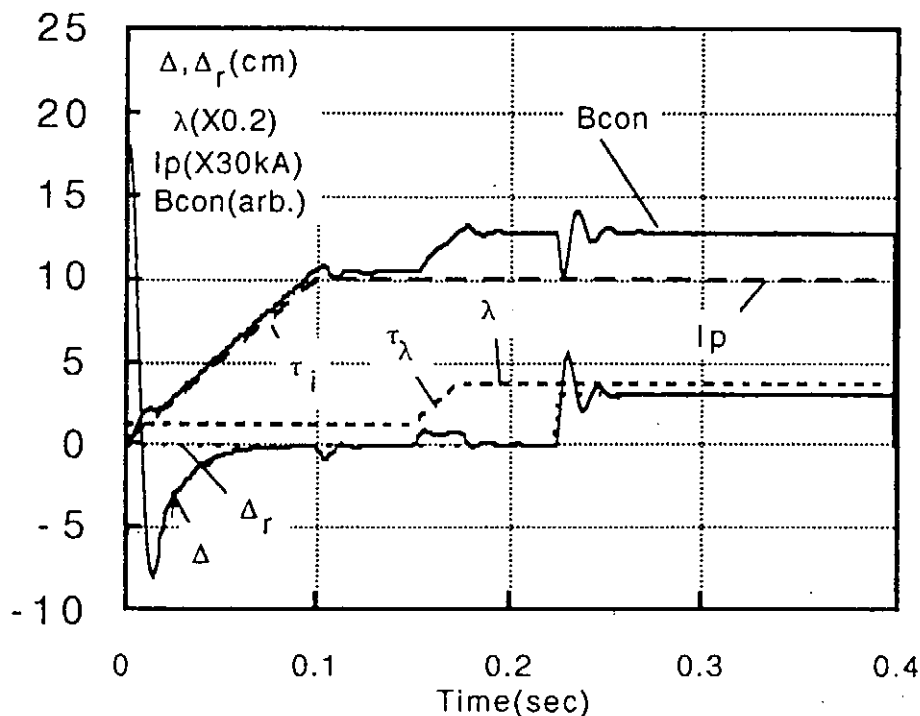


Fig. 4 シュミレーション波形

τ_I : I_p の立ち上がり時間 (100ms)、

τ : λ の立ち上がり時間 (25ms)

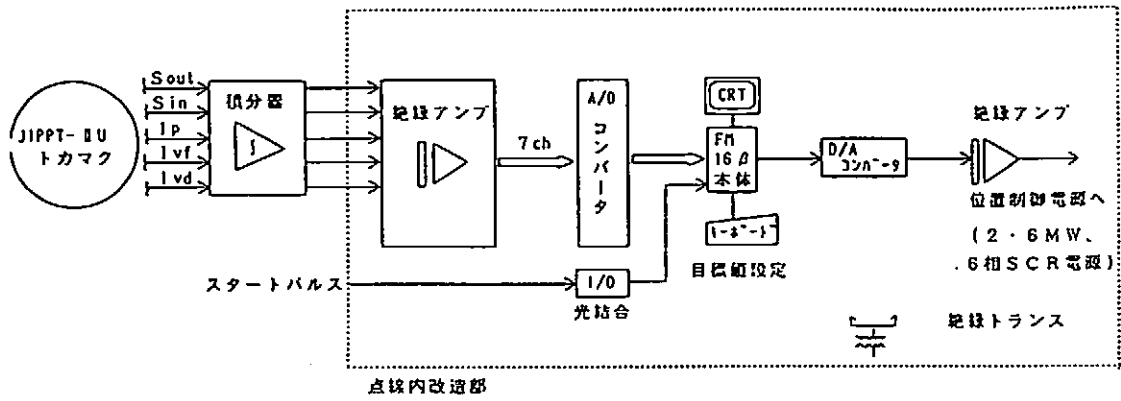


Fig. 5 制御系構成図

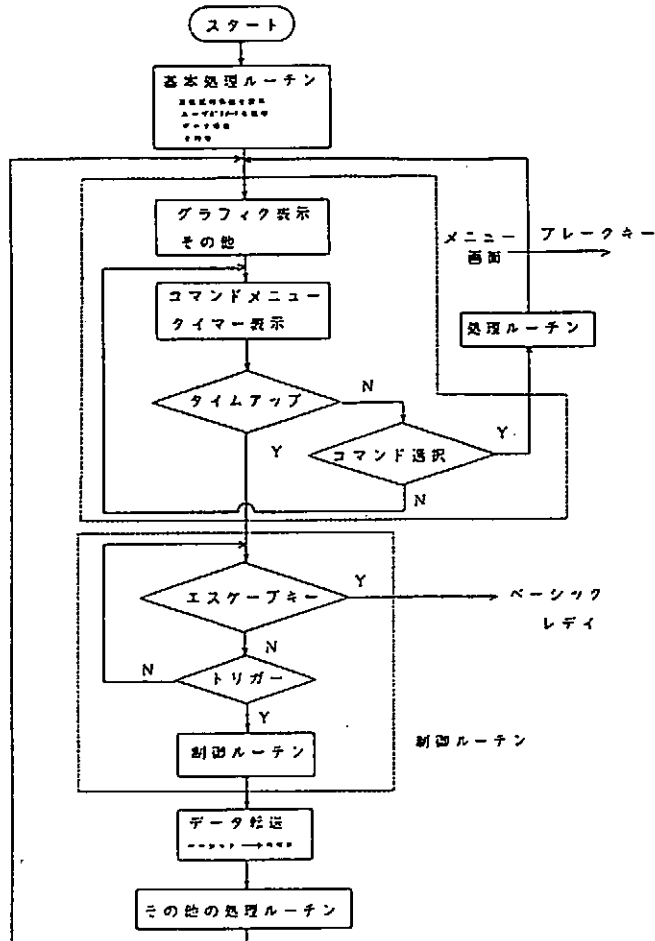


Fig. 6 プログラムのフローチャート

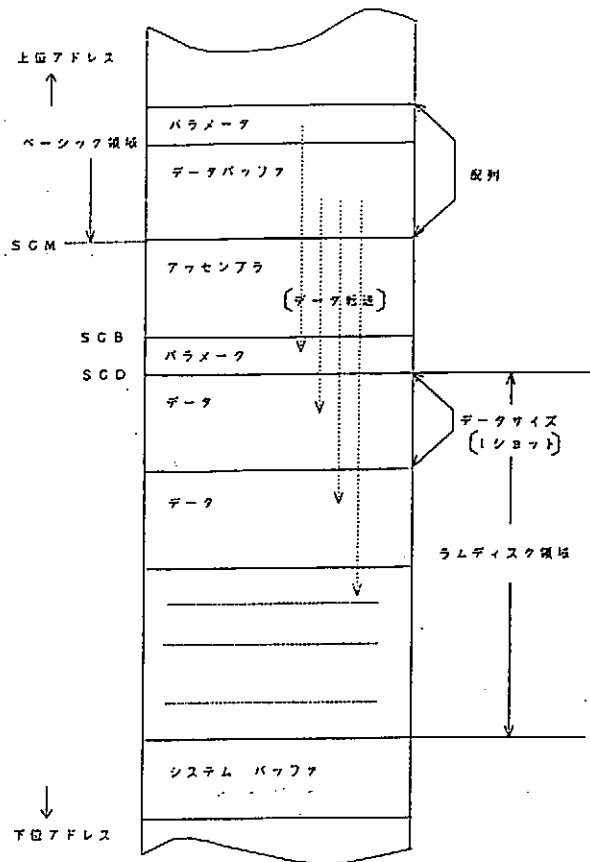


Fig. 7 メモリマップ

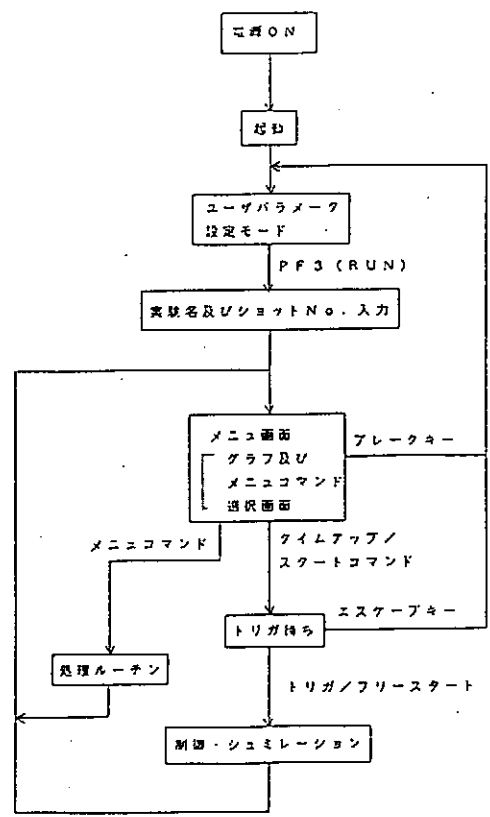


Fig. 8 操作フローチャート

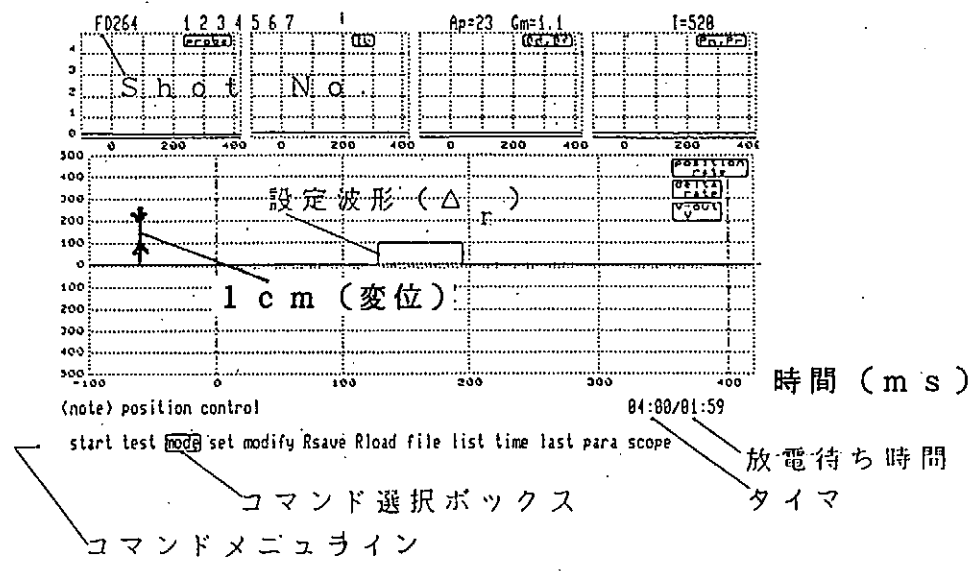
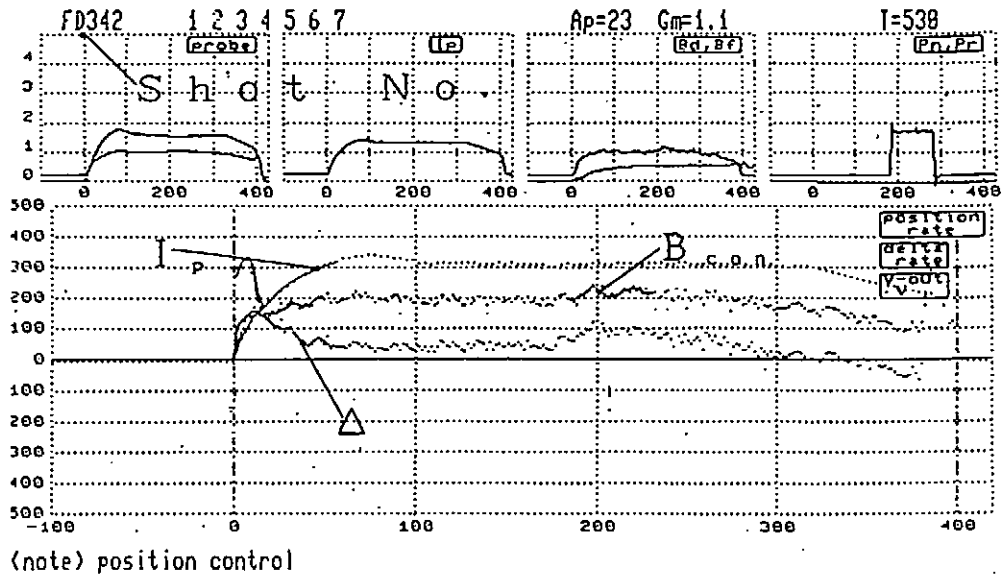
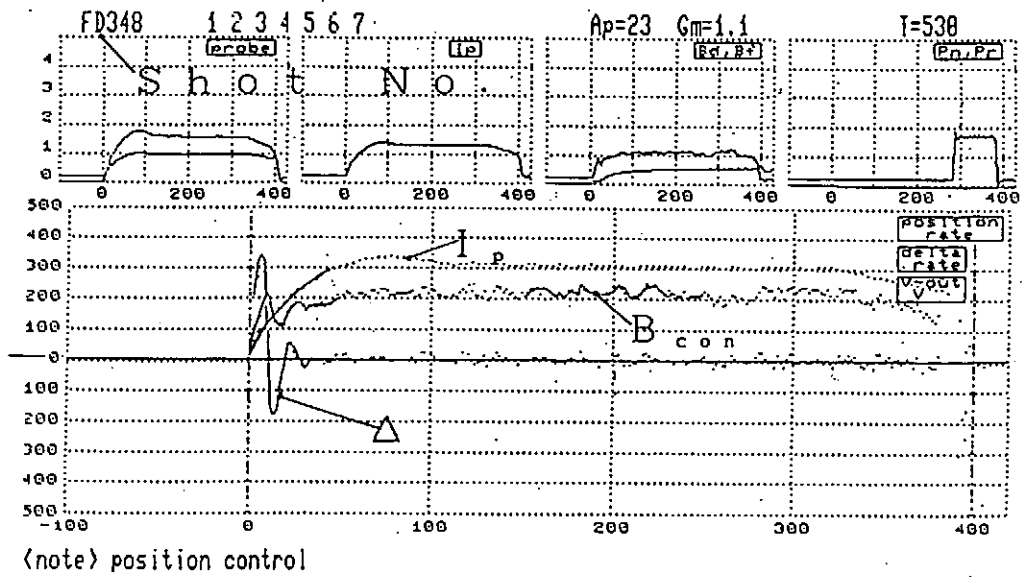


Fig. 9 操作画面
 横軸：時間 (ms)
 縦軸：変位 (cm/div) , その他 (任意)



(a)

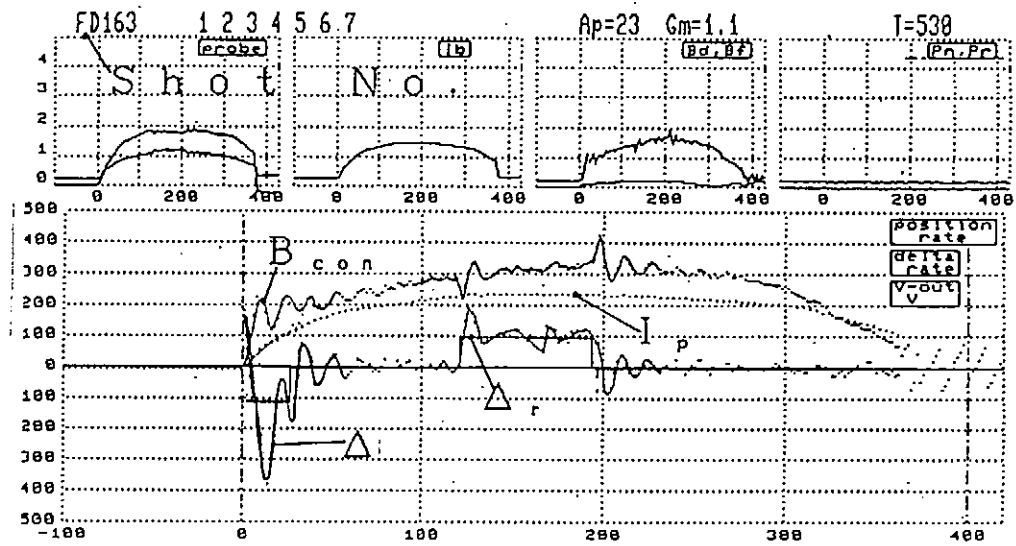


(b)

Fig. 10 制御の実例 I (積分項の効果)

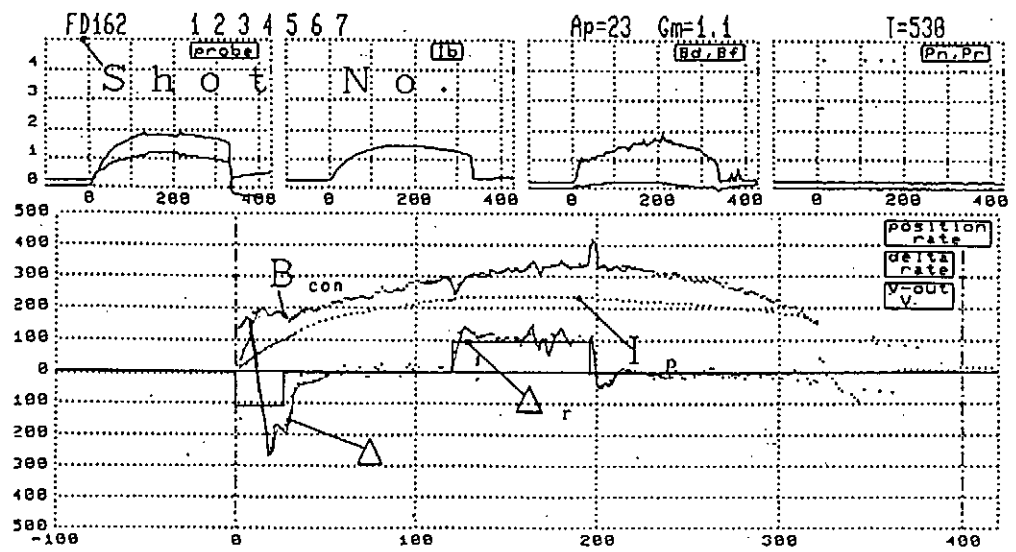
制御実際時のパソコンの波形

- (a) 積分項がない場合、
- (b) 積分項がある場合



(note) position control

(a)



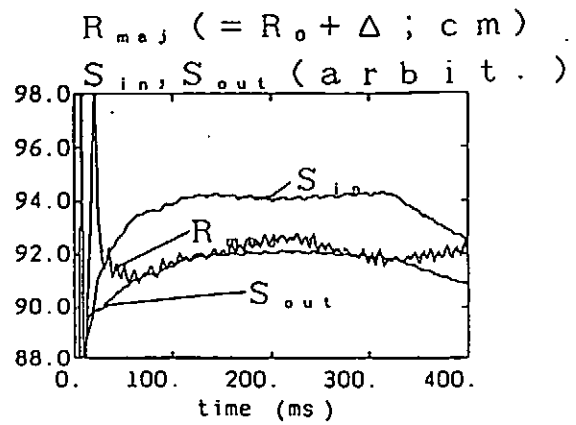
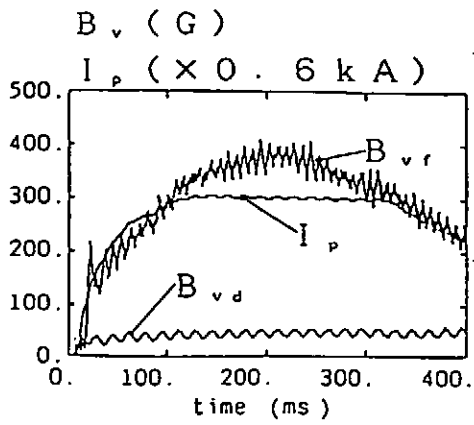
(note) position control

(b)

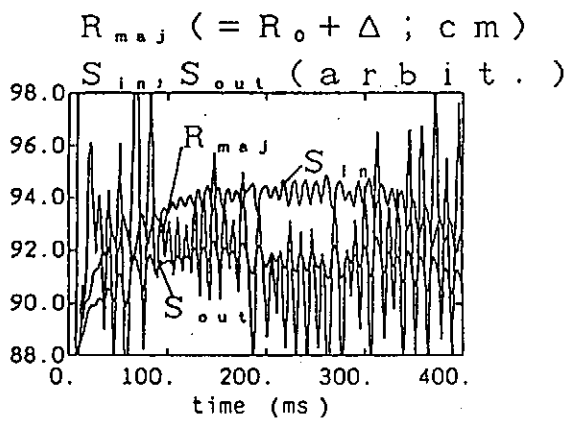
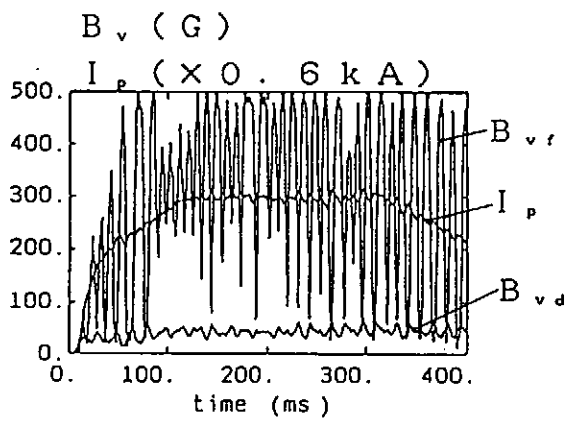
Fig. 11 制御の実例Ⅱ (微分項の効果)

(a) 積分項有り、微分項無しの場合

(b) 積分項、微分項有りの場合



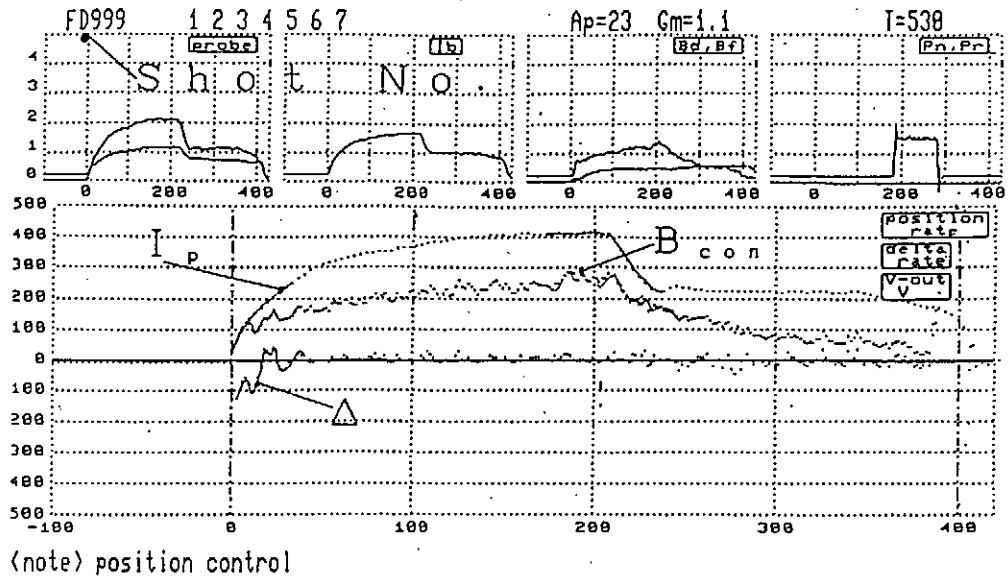
(a)



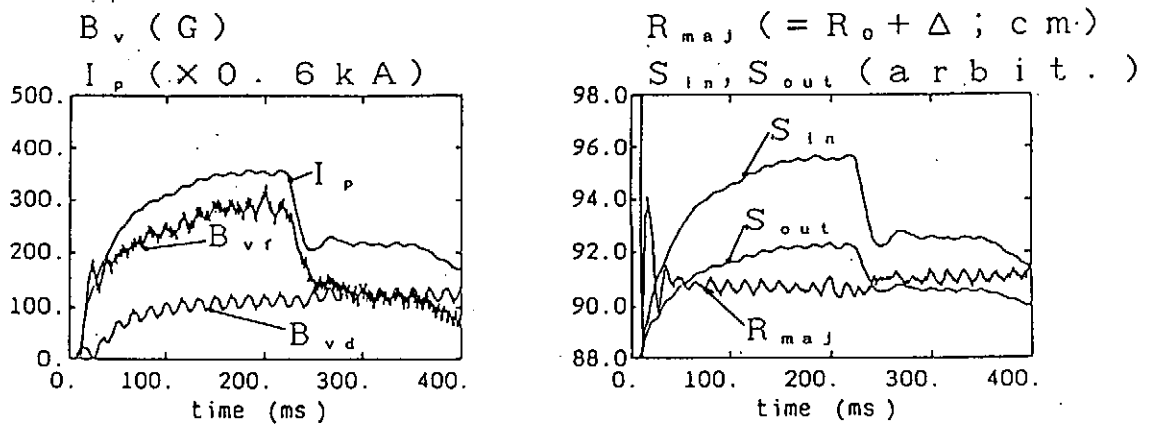
(b)

Fig 12. 制御の実例III (安定な限界)

(a) 安定な場合、(b) 安定な限界



(a)



(b)

Fig 13. 制御の実例Ⅳ (I,急変)

(a) パソコン画面、(b) データ処理系

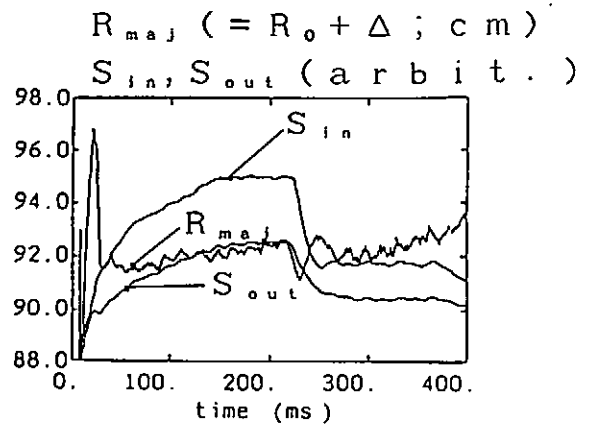
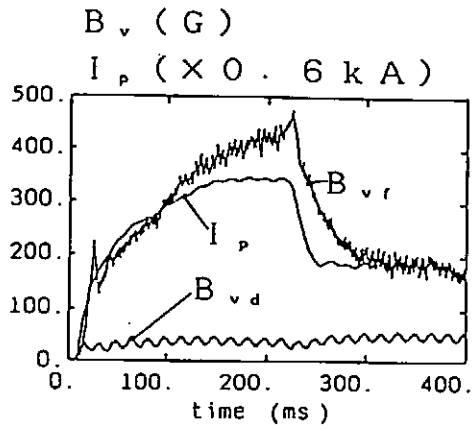
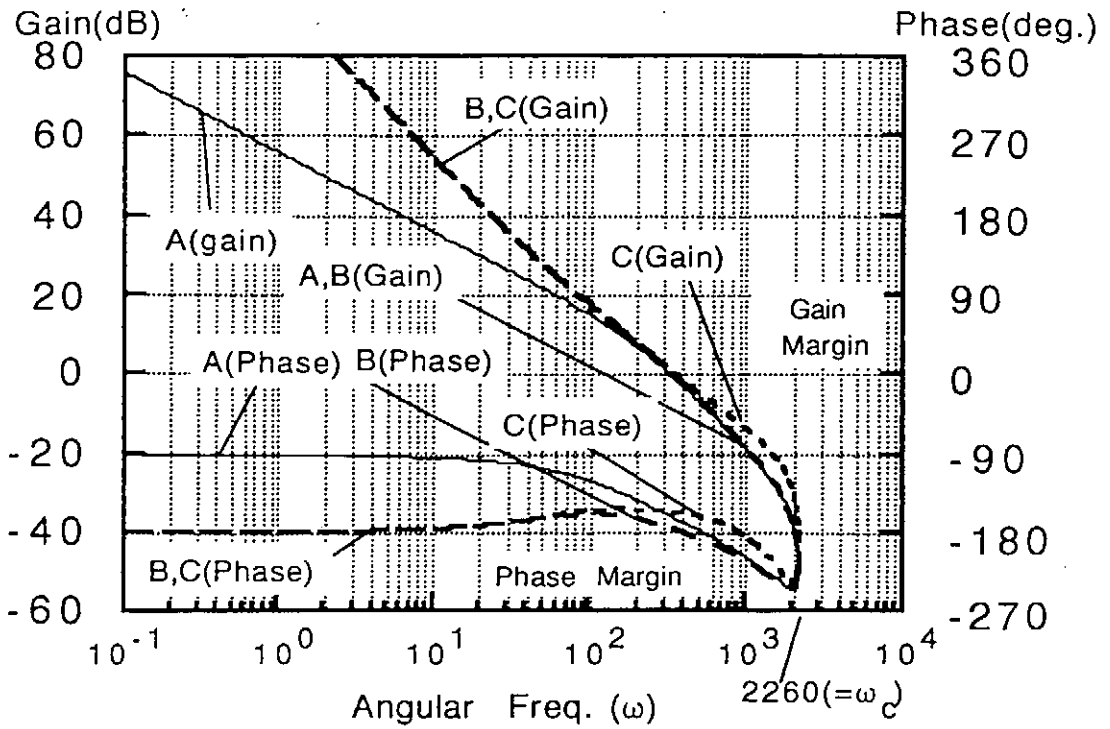
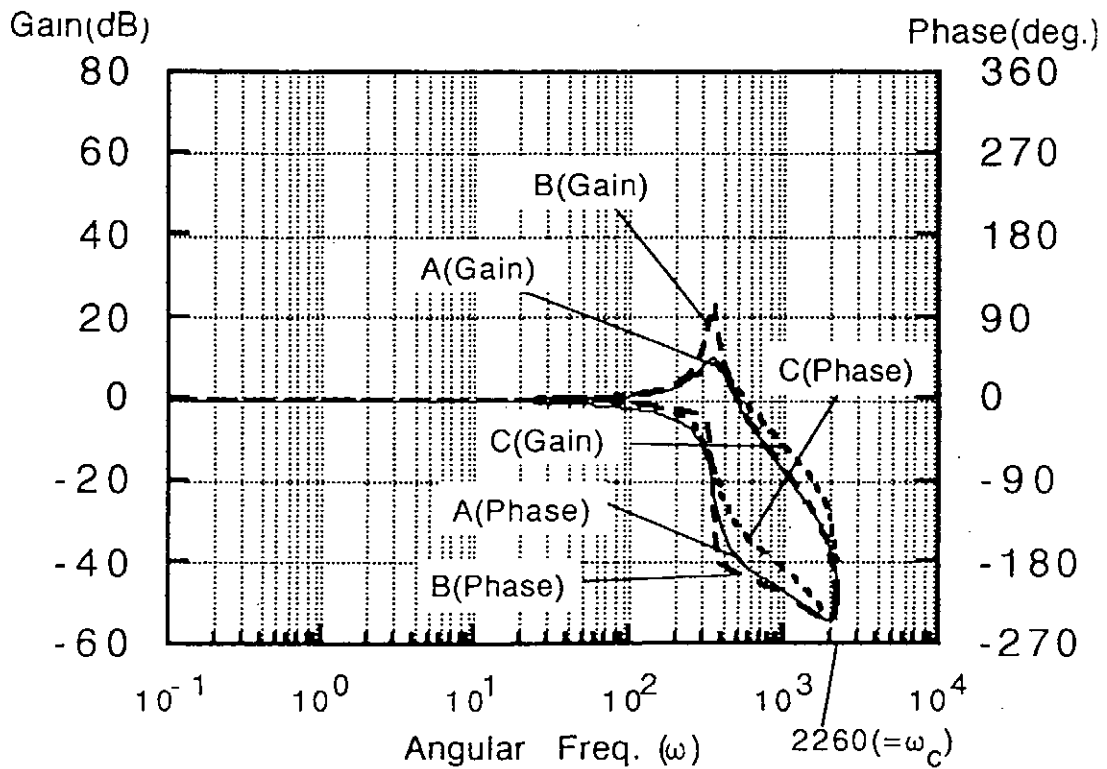


Fig. 14 制御の実例IV (悪い制御例)



(a)



(b)

Fig. 15 制御パラメータに対する開ループ (a) 及び閉ループ (b) のボード線図

A: $C_3=0.32, C_4=0, C_5=0$

B: $C_3=0.32, C_4=0, C_5=28$

C: $C_3=0.32, C_4=2.2 \times 10^{-4}, C_5=28$