

JAERI-M
87-100

JFT-2Mトカマクでの多チャンネル
平衡磁場信号積分法

1987年7月

森 雅博

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。
入手の問合わせは、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）で複写による実費頒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, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

JFT-2Mトカマクでの多チャンネル平衡磁場信号積分法

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

森 雅 博

(1987年6月22日受理)

JFT-2Mトカマクでは、多チャンネルの平衡磁場測定用磁気プローブ信号をデータ処理用計算機に収集し、これを数値積分して磁場を求める方法を採用している。この時、評価精度を向上させるために、受動フィルタ回路を用いて信号を整形し数値的に補正する方法、および測定信号に三角波を重畳させる方法を合せ用いて誤差を約1/10に低減することに成功し、実用に耐える性能を得る事ができたので、これについて報告する。

Integration of Multi-Channel Magnetic Signals
in the JFT-2M

Masahiro MORI

Department of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 22, 1987)

Multi-channel magnetic data measured by pick-up coils have been collected with data acquisition system in order to determine plasma equilibrium parameters in the JFT-2M, and such data are integrated numerically. Passive filter and superposition of 50Hz triangular wave on measured signals are successful to reduce error which comes from digital errors. In this paper these system and their performance are described.

Keywords: Pick-up Coil, Equilibrium, JFT-2M, Integrate, Digital Error, Superposition of Triangular Wave, Passive Filter

目 次

1. 序 論	1
2. オフセット誤差改善策	1
3. 磁気信号計測系の構成	2
4. 性能評価	4
5. 結 論	5
謝 辞	5
参考文献	5

CONTENTS

1. Introduction	1
2. New methods on reduction of offset error	1
3. System of magnetic measurements	2
4. Performance of the system	4
5. Conclusion	5
Acknowledgments	5
References	5

1. 序 論

トカマクを代表とする磁場閉じ込め実験装置のプラズマ平衡量計測において、磁場分布の測定は重要な手段である。放電時間の長パルス化に伴い、測定時間の増加が促進されており、計算機による大量データの管理、および処理が必要不可欠となってきた。磁場測定のセンサーとしては、ピックアップコイル等磁場の時間微分を検出する物が一般的であり、これらの信号から磁場を割出すには積分操作を行う必要がある。この積分操作を実行するには2通りの方法があり、第1はアナログ回路に積分回路を組み込みその結果をADコンバータを通して計算機に伝えるもの、第2は積分操作を計算機で数値的に行うものである。前者は処理時間が速く、サンプリング誤差、ディジタル誤差等が小さくなり精度はアナログ積分回路で決る反面、入力信号が許容レベルを越えているか等の管理が難しい、アナログ積分器が必要なためにコスト高になる等の欠点がある。したがってJFT-2M(1)では、遅れの小さい実時間処理が必要となるプラズマ制御にはアナログ積分器を用い、放電後のデータ処理に用いる多チャンネル大量の信号には数値積分法を採用することとした。

積分を行う場合常に問題になるのがオフセット誤差である。これは数値積分法だけではなく、アナログ回路によって積分を行う場合にも言えることで、測定時間が長くなって来ればくるほど重要な問題になってくる。もちろんアナログ回路部の直線性を上げる事も重要であるが、両者がうまくかみあって初めて満足できる精度を達成できる。現在普通に市販されているアナログ積分器の入力換算のオフセット電圧は約 $100\mu\text{V}$ 程度であり、オフセット誤差をこの程度まで小さくできれば数値積分による方法が有利になってくる。しかし、市販されているADコンバータを使用して取込んだデータを単に数値積分しただけではデジタル化のビット単位に相当するオフセット誤差(例えば約 2.5mV)が入ってしまう。これではこれらの磁場データを用いてプラズマの特性量を求めても、数10%程度の誤差を含んだ値しか求めることができない。JFT-2Mでは、数値的に積分する場合のオフセット誤差を低下するために、受動フィルタを用いることおよび信号に 50Hz の三角波又は正弦波を重畳することを行い、満足すべき性能を得た。以下これらの方法の詳細とその性能について記す。

2. オフセット誤差改善策

2.1 受動フィルタによる精度の向上

入力信号にオフセット(V_{off})がある場合、これによる時間 t の積分値誤差は $V_{\text{off}} \cdot t$ で与えられる。一方トカマクからでてくる磁気信号はプラズマ電流の立上がり立ち下がり時に大きな出力があり、その他の時間帯では非常に小さな出力しか出さない。この磁気信号をモデル化したものがFig.1に示されている。このモデル信号の積分値は立ち下がり直前の時刻 t では

1. 序 論

トカマクを代表とする磁場閉じ込め実験装置のプラズマ平衡量計測において、磁場分布の測定は重要な手段である。放電時間の長パルス化に伴い、測定時間の増加が促進されており、計算機による大量データの管理、および処理が必要不可欠となってきた。磁場測定のセンサーとしては、ピックアップコイル等磁場の時間微分を検出する物が一般的であり、これらの信号から磁場を割出すには積分操作を行う必要がある。この積分操作を実行するには2通りの方法があり、第1はアナログ回路に積分回路を組込みその結果をADコンバータを通して計算機に伝えるもの、第2は積分操作を計算機で数値的に行うものである。前者は処理時間が速く、サンプリング誤差、ディジタル誤差等が小さくなり精度はアナログ積分回路で決める反面、入力信号が許容レベルを越えているか等の管理が難しい、アナログ積分器が必要なためにコスト高になる等の欠点がある。したがってJFT-2M(1)では、遅れの小さい実時間処理が必要となるプラズマ制御にはアナログ積分器を用い、放電後のデータ処理に用いる多チャンネル大量の信号には数値積分法を採用することとした。

積分を行う場合常に問題になるのがオフセット誤差である。これは数値積分法だけではなく、アナログ回路によって積分を行う場合にも言えることで、測定時間が長くなって来ればくるほど重要な問題になってくる。もちろんアナログ回路部の直線性を上げる事も重要であるが、両者がうまくかみあって初めて満足できる精度を達成できる。現在普通に市販されているアナログ積分器の入力換算のオフセット電圧は約 $100\mu\text{V}$ 程度であり、オフセット誤差をこの程度まで小さくできれば数値積分による方法が有利になってくる。しかし、市販されているADコンバータを使用して取込んだデータを単に数値積分しただけではデジタル化のビット単位に相当するオフセット誤差(例えば約 2.5mV)が入ってしまう。これではこれらの磁場データを用いてプラズマの特性量を求めても、数10%程度の誤差を含んだ値しか求めることができない。JFT-2Mでは、数値的に積分する場合のオフセット誤差を低下するために、受動フィルタを用いることおよび信号に 50Hz の三角波又は正弦波を重畳することを行い、満足すべき性能を得た。以下これらの方法の詳細とその性能について記す。

2. オフセット誤差改善策

2.1 受動フィルタによる精度の向上

入力信号にオフセット(V_{off})がある場合、これによる時間 t の積分値誤差は $V_{\text{off}} \cdot t$ で与えられる。一方トカマクからでてくる磁気信号はプラズマ電流の立上がり立ち下がり時に大きな出力があり、その他の時間帯では非常に小さな出力しか出さない。この磁気信号をモデル化したものがFig.1に示されている。このモデル信号の積分値は立ち下がり直前の時刻 t では

$V_0 \cdot \tau$ であたえられる。従ってオフセットによる誤差の比率は

$$V_{\text{off}} \cdot t / V_0 \cdot \tau$$

で与えられる。次に述べる三角波重畳法のように特別なことをしなければいくらドリフトなどの小さな回路を用いても V_{off} はビット誤差で決り、12ビットのA/Dコンバータを使って両極性の信号を測定する場合 V_{off} / V_0 を $1/2000$ 以下にすることはできない。JFT-2Mの場合 t は約一秒、立上がり時間が 100 ms の速さまでであるとすれば、誤差は約 $1/200$ 程度となる。実際には入力電圧をA/Dコンバータの入力可能最大電圧に一致させることは困難であるし、ディスラプションなどによってもっと速い現象が発生した場合にも測定可能とするための余裕を取ると数%~10%程度の誤差となってしまう。特性の分かったフィルタを用いて発生最大電圧を低くしておき、積分した結果にフィルタの特性を考慮した補正を加えてやれば誤差をこれより小さくできる可能性がある。

JFT-2Mではフィルタ回路としては、フィルタ特性が簡単で、過大入力があっても飽和特性のない抵抗とコンデンサによる受動回路を採用した。Fig. 2 に等価回路を示す。

入力と出力の関係は

$$\int V_{\text{Fin}} dt = \int V_{\text{Fout}} dt + RC \cdot V_{\text{Fout}} \quad (1)$$

であり、RCを精度良く評価することができれば積分精度を上げることができる。

2.2 三角波重畳法

入力信号値が零の場合のA/Dコンバータ入力値（すなわちオフセット値）をビット単位以下の精度で求めるために、入力信号に微小振幅 (V_m) の三角波または正弦波を重畳する。この時のA/Dコンバータの入力波形と出力波形をFig. 3に示す。オフセット電圧 (V_{off}) が僅かにプラスであれば上のビット値を示している時間が長くなる。従って、測定信号が零で、使用しているアンプ等のドリフトが小さく、サンプリング周期が重畳波周期に比べて十分に速い場合には、A/Dコンバータ出力の時間平均で入力値（すなわちオフセット値）をビット単位以下の精度で求めることができる。平均を取る時間は重畳波の周期の整数倍であることが必要である。また重畳波は測定信号を汚すことになるので、 V_{off} が精度良く求まる範囲で V_m はできるだけ小さいほうが良い。

3. 磁気信号計測系の構成

Fig. 4 に磁気信号計測系の構成を示す。磁気的信号は平衡型ツイスト線によってプラズマ監視現場盤に運ばれる。プラズマ監視現場盤のなかにはこの信号を受取る受動フィルタ、絶縁アンプ、トランジェントレコーダ、等が収められている。JFT-2Mのデータ処理用計算機システム(2)へはCAMMACの光ファイバー serial highway を使ってデータが送られる。したがって cammacのcrate電源、crate controller、等がプラズマ監視現場盤に収められている。これらの信号伝送系構成要素はICRF加熱装置から発生する高周波ノイズから信号を守るために磁気セ

$V_0 \cdot \tau$ であたえられる。従ってオフセットによる誤差の比率は

$$V_{\text{off}} \cdot t / V_0 \cdot \tau$$

で与えられる。次に述べる三角波重畳法のように特別なことをしなければいくらドリフトなどの小さな回路を用いても V_{off} はビット誤差で決り、12ビットのA/Dコンバータを使って両極性の信号を測定する場合 V_{off} / V_0 を $1/2000$ 以下にすることはできない。JFT-2Mの場合 t は約一秒、立上がり時間が 100 ms の速さまでであるとすれば、誤差は約 $1/200$ 程度となる。実際には入力電圧をA/Dコンバータの入力可能最大電圧に一致させることは困難であるし、ディスラプションなどによってもっと速い現象が発生した場合にも測定可能とするための余裕を取ると数%~10%程度の誤差となってしまう。特性の分かったフィルタを用いて発生最大電圧を低くしておき、積分した結果にフィルタの特性を考慮した補正を加えてやれば誤差をこれより小さくできる可能性がある。

JFT-2Mではフィルタ回路としては、フィルタ特性が簡単で、過大入力があっても飽和特性のない抵抗とコンデンサによる受動回路を採用した。Fig. 2 に等価回路を示す。

入力と出力の関係は

$$\int V_{\text{Fin}} dt = \int V_{\text{Fout}} dt + RC \cdot V_{\text{Fout}} \quad (1)$$

であり、RCを精度良く評価することができれば積分精度を上げることができる。

2.2 三角波重畳法

入力信号値が零の場合のA/Dコンバータ入力値（すなわちオフセット値）をビット単位以下の精度で求めるために、入力信号に微小振幅 (V_m) の三角波または正弦波を重畳する。この時のA/Dコンバータの入力波形と出力波形をFig. 3に示す。オフセット電圧 (V_{off}) が僅かにプラスであれば上のビット値を示している時間が長くなる。従って、測定信号が零で、使用しているアンプ等のドリフトが小さく、サンプリング周期が重畳波周期に比べて十分に速い場合には、A/Dコンバータ出力の時間平均で入力値（すなわちオフセット値）をビット単位以下の精度で求めることができる。平均を取る時間は重畳波の周期の整数倍であることが必要である。また重畳波は測定信号を汚すことになるので、 V_{off} が精度良く求まる範囲で V_m はできるだけ小さいほうが良い。

3. 磁気信号計測系の構成

Fig. 4 に磁気信号計測系の構成を示す。磁気的信号は平衡型ツイスト線によってプラズマ監視現場盤に運ばれる。プラズマ監視現場盤のなかにはこの信号を受取る受動フィルタ、絶縁アンプ、トランジェントレコーダ、等が収められている。JFT-2Mのデータ処理用計算機システム(2)へはCAMMACの光ファイバー serial high way を使ってデータが送られる。したがって cammacのcrate電源, crate controller, 等がプラズマ監視現場盤に収められている。これらの信号伝送系構成要素はICRF加熱装置から発生する高周波ノイズから信号を守るために磁気セ

ンサーも含めてシールドの中に置かれている。以下に各構成要素の詳細を記す。

(1) 信号伝送部

信号伝送用の電線は、シールドつきツイストペア線 (RG128-U) を用いた。線の長さは30m～50mである。またこれらのツイスト線は何本かをまとめて、銅のメッシュを持つフレキシブルチューブの中に収められ、高周波ノイズからシールドされている。

(2) 受動フィルタ

Fig. 5 の回路図に示すような受動フィルタを設計し、製作した。フィルタの時定数は1ms, 10ms, 100msと切替可能になっている。2チャンネルのフィルタ回路を1ユニットとし、12ユニットがJIS標準ラックに取り付けできる収納パネルに挿入される。この様な収納パネルが2台、合計48チャンネルで構成されている。各ユニットは収納パネルから電氣的に絶縁されている。数10MHzのICRF加熱の電磁ノイズを防ぐためのフィルター素子がいくつか用いてある。

本回路の抵抗値はデジタルマルチメータ (タケダ理研 TR6841) を用いて測定した。またコンデンサ容量はRLCメータを用いて測定した。Table 1 に測定結果を記す。時定数評価にあたっては、このフィルタ回路の抵抗値の他にセンサー自体の抵抗値も必要である。測定したセンサーの抵抗値をTable 2 に示す。

(3) 絶縁アンプ

NF回路設計ブロック社製絶縁アンプP-53Sを使用している。このアンプは外部から1つの信号を受けて測定信号に加算できるようになっている。アンプの性能は数値積分の誤差に直接影響を与える。以下に重要な性能を列挙する。

適性入力電圧	±10 V
非直線性	+1%
ノイズ	2mV rms 以下

(4) トランジェントレコーダ

Lecroy社製32ch12ビットトランジェントレコーダLC8212A, およびメモリーモジュール8200を使用。32ch使用時に、1ch当たり1024時刻点のサンプリングができる。入力可能電圧は±5Vであるので、1ビットの分解能は約2.4mVである。

(5) クロックジェネレータ

サンプリング時間を決めるクロックジェネレータにはプログラムによって周波数を変更できるLecroy社製LC8501を使用。JFT-2Mでは通常1kHzのサンプリングで使用している。

(6) 数値積分法

台形則による数値積分を採用した。

(7) ファンクションジェネレータ

WAVETEK社製ファンクションジェネレータ (MODEL 22) を用いた。本ジェネレータには発振周波数のスタビライザが内蔵されている。

各チャンネルのゲインは、絶縁アンプからトランジェントレコーダの取込みまで一括して、基準DC電源 (菊水電子MODEL101) とデジタル電圧計を用いて校正した。結果をTable 3 に示す。

4. 性能評価

Fig. 6 に性能評価に用いた測定系の構成を示す。

4.1 オフセット評価誤差の重畳波振幅依存性

入力電圧を零にして、重畳正弦波の振幅によってオフセット評価誤差の影響がどのように変化するのかを調べた。

Fig. 7 には周波数 50 Hz , 振幅 2mVrms の正弦波を加えた時の数値積分前のデータと積分後のデータを第 1 ch から第 4 ch について示したものである。オフセット電圧を評価するためには、はじめの 20msec 間 21 点のデータを平均し、生の値から差し引いている。また同図はこれらのデータを数値積分した結果も示してある。どの信号も時間的にはほぼ直線的に変化しており、ch 1 の場合 1 sec 後に約 150 μ V の誤差を持っている。したがってこの ch のオフセット評価誤差は入力換算で 150 μ V となり、アナログ積分器とほぼ同程度の性能が得られている。また重畳波の積分結果である 50 Hz の振動も見られる。直線の変化からゆっくりとした周波数で離れているのは、アナログ回路の持つ数分の 1 Hz から数 Hz 帯のノイズによる。ノイズの大きなアンプを使用するとこの低周波ノイズが大きくなって、これによって積分結果の精度が決ってしまうようになる。現在の回路系では、絶縁アンプ、ファンクションジェネレータ、およびトランジェントレコーダが、この低周波ノイズの原因と考えられる。したがってこれらのアナログ回路の低周波特性を改善することによって、更に良い精度を期待することができる。

Fig. 8 はオフセット電圧評価誤差の入力換算値と重畳波の振幅の関係を示したものである。入力換算値としては、最大値を与えるチャンネルの値を採っている。重畳波振幅がビット単位を越えており、かつ 50 Hz の重畳波による出力波形の変形が大きくならぬように、2mVrms を採用した。

4.2 オフセット評価誤差の重畳波周波数依存性

Table 4 はオフセット電圧評価誤差の入力換算値と重畳波の周波数の関係を示したものである。重畳波振幅は 2mVrms である。50 Hz , 100 Hz , 200 Hz ではあまり大きな差はないが、この方法が電圧を時間に変換して測定していることから、周期に比べてサンプリング時間の短い 50 Hz を採用した。

4.3 受動フィルター回路採用の場合の積分精度

入力波形として立上がりの速いステップ関数状の波形を用いた。積分値の傾きを入力信号を直接数値積分したものと比較すればこの測定法の積分精度が求まる。入力信号はトランジェン

トレコーダの ch 1 に入れ、フィルタの出力信号は ch 2 に入れた。サンプリング周期は 1 msec であり、フィルター回路の時定数は 100 msec である。測定の結果、誤差は 0.2 % 以下であった。Fig. 9 は入力波形がステップ状に変化する近傍を時間を拡大して表示したものである。この図にはフィルタの入力波形を直接数値積分したもの、フィルタの出力波形、およびフィルタの出力波形を数値積分したものが示されている。入力信号はサンプリング点 a と b との間で急瞬に立上っている。

この立上がり時刻はフィルタの出力波形を b 点から逆に外挿してやれば求まる。フィルター回路を用いない方法では台形則で数値積分を行うため、速い信号変化が反映されず、積分結果が下駄を履く格好になる。ところが、フィルターを用いる方法では速い信号の積分は主にフィルターが受け持つので、速い信号に対する精度の向上がはかれている。

5. 結 論

JFT-2M において、デジタル積分法を基本とした多チャンネル磁場測定系を設計、製作した。受動フィルタ回路の採用、及び三角波重畳法などにより、実用に耐える性能を得ることができた。現在、JFT-2M ではこの方式にて測定した磁場データをデータ解析に用いている。

謝 辞

このシステムを完成するまでに核融合研究部プラズマ実験研究室の河上知秀、荘司昭朗、松田俊明、高田晋諸氏には貴重な助言をいただいたことを感謝する。また船橋昭昌プラズマ実験研究室長、核融合研究部、田中裕二次長、田中正俊部長、苫米地顕那珂研究所長、森茂副理事長のバックアップに感謝する。

参考文献

- (1) 荘司昭朗, 小田島和男, 森雅博, 他: JAERI-M 83-194(1983)
- (2) 松田俊明, 的場徹, 森雅博, 他: 日本原子力学会誌掲載予定, JFT-2M トカマクにおけるデータ処理システムの開発

トレコーダの ch 1 に入れ、フィルタの出力信号は ch 2 に入れた。サンプリング周期は 1 msec であり、フィルタ回路の時定数は 100 msec である。測定の結果、誤差は 0.2 % 以下であった。Fig. 9 は入力波形がステップ状に変化する近傍を時間を拡大して表示したものである。この図にはフィルタの入力波形を直接数値積分したもの、フィルタの出力波形、およびフィルタの出力波形を数値積分したものが示されている。入力信号はサンプリング点 a と b との間で急瞬に立上っている。

この立上がり時刻はフィルタの出力波形を b 点から逆に外挿してやれば求まる。フィルタ回路を用いない方法では台形則で数値積分を行うため、速い信号変化が反映されず、積分結果が下駄を履く格好になる。ところが、フィルタを用いる方法では速い信号の積分は主にフィルタが受け持つので、速い信号に対する精度の向上がはかれている。

5. 結 論

JFT-2M において、デジタル積分法を基本とした多チャンネル磁場測定系を設計、製作した。受動フィルタ回路の採用、及び三角波重畳法などにより、実用に耐える性能を得ることができた。現在、JFT-2M ではこの方式にて測定した磁場データをデータ解析に用いている。

謝 辞

このシステムを完成するまでに核融合研究部プラズマ実験研究室の河上知秀、荘司昭朗、松田俊明、高田晋諸氏には貴重な助言をいただいたことを感謝する。また船橋昭昌プラズマ実験研究室長、核融合研究部、田中裕二次長、田中正俊部長、苫米地顕那珂研究所長、森茂副理事長のバックアップに感謝する。

参考文献

- (1) 荘司昭朗, 小田島和男, 森雅博, 他: JAERI-M 83-194(1983)
- (2) 松田俊明, 的場徹, 森雅博, 他: 日本原子力学会誌掲載予定, JFT-2M トカマクにおけるデータ処理システムの開発

トレコーダの ch 1 に入れ、フィルタの出力信号は ch 2 に入れた。サンプリング周期は 1 msec であり、フィルタ回路の時定数は 100 msec である。測定の結果、誤差は 0.2 % 以下であった。Fig. 9 は入力波形がステップ状に変化する近傍を時間を拡大して表示したものである。この図にはフィルタの入力波形を直接数値積分したもの、フィルタの出力波形、およびフィルタの出力波形を数値積分したものが示されている。入力信号はサンプリング点 a と b との間で急瞬に立上っている。

この立上がり時刻はフィルタの出力波形を b 点から逆に外挿してやれば求まる。フィルタ回路を用いない方法では台形則で数値積分を行うため、速い信号変化が反映されず、積分結果が下駄を履く格好になる。ところが、フィルタを用いる方法では速い信号の積分は主にフィルタが受け持つので、速い信号に対する精度の向上がはかれている。

5. 結 論

JFT-2M において、デジタル積分法を基本とした多チャンネル磁場測定系を設計、製作した。受動フィルタ回路の採用、及び三角波重畳法などにより、実用に耐える性能を得ることができた。現在、JFT-2M ではこの方式にて測定した磁場データをデータ解析に用いている。

謝 辞

このシステムを完成するまでに核融合研究部プラズマ実験研究室の河上知秀、荘司昭朗、松田俊明、高田晋諸氏には貴重な助言をいただいたことを感謝する。また船橋昭昌プラズマ実験研究室長、核融合研究部、田中裕二次長、田中正俊部長、苫米地顕那珂研究所長、森茂副理事長のバックアップに感謝する。

参考文献

- (1) 荘司昭朗, 小田島和男, 森雅博, 他: JAERI-M 83-194(1983)
- (2) 松田俊明, 的場徹, 森雅博, 他: 日本原子力学会誌掲載予定, JFT-2M トカマクにおけるデータ処理システムの開発

トレコーダの ch 1 に入れ、フィルタの出力信号は ch 2 に入れた。サンプリング周期は 1 msec であり、フィルタ回路の時定数は 100 msec である。測定の結果、誤差は 0.2 % 以下であった。Fig. 9 は入力波形がステップ状に変化する近傍を時間を拡大して表示したものである。この図にはフィルタの入力波形を直接数値積分したもの、フィルタの出力波形、およびフィルタの出力波形を数値積分したものが示されている。入力信号はサンプリング点 a と b との間で急瞬に立上っている。

この立上がり時刻はフィルタの出力波形を b 点から逆に外挿してやれば求まる。フィルタ回路を用いない方法では台形則で数値積分を行うため、速い信号変化が反映されず、積分結果が下駄を履く格好になる。ところが、フィルタを用いる方法では速い信号の積分は主にフィルタが受け持つので、速い信号に対する精度の向上がはかかれている。

5. 結 論

JFT-2M において、デジタル積分法を基本とした多チャンネル磁場測定系を設計、製作した。受動フィルタ回路の採用、及び三角波重畳法などにより、実用に耐える性能を得ることができた。現在、JFT-2M ではこの方式にて測定した磁場データをデータ解析に用いている。

謝 辞

このシステムを完成するまでに核融合研究部プラズマ実験研究室の河上知秀、荘司昭朗、松田俊明、高田晋諸氏には貴重な助言をいただいたことを感謝する。また船橋昭昌プラズマ実験研究室長、核融合研究部、田中裕二次長、田中正俊部長、苫米地顕那珂研究所長、森茂副理事長のバックアップに感謝する。

参考文献

- (1) 荘司昭朗, 小田島和男, 森雅博, 他: JAERI-M 83-194(1983)
- (2) 松田俊明, 的場徹, 森雅博, 他: 日本原子力学会誌掲載予定, JFT-2M トカマクにおけるデータ処理システムの開発

Table 1 受動フィルタの低抗と容量

ch名	抵抗(kΩ)	容量(μF)	容量(μF)	容量(μF)	ch名	抵抗(kΩ)	容量(μF)	容量(μF)	容量(μF)
1 / 上	9.996	0.974	4.70	10.40	13 / 上	9.997	0.953	4.70	10.40
/ 下	9.994	0.971	4.73	10.42	/ 下	10.000	0.971	4.71	10.43
2 / 上	9.997	0.981	4.72	10.70	14 / 上	9.998	0.970	4.74	10.38
/ 下	9.998	1.002	4.76	10.27	/ 下	9.998	0.993	4.72	10.74
3 / 上	9.993	1.006	4.76	10.57	15 / 上	9.997	0.993	4.70	10.30
/ 下	9.996	0.987	4.74	10.44	/ 下	9.995	0.996	4.71	10.52
4 / 上	9.998	1.003	4.75	10.53	16 / 上	9.992	0.971	4.70	10.65
/ 下	9.998	0.969	4.70	10.35	/ 下	10.000	0.981	4.71	10.38
5 / 上	9.997	0.984	4.75	10.40	17 / 上	9.998	0.959	4.71	10.37
/ 下	9.998	0.981	4.72	10.49	/ 下	9.996	0.992	4.71	10.27
6 / 上	9.993	0.993	4.71	10.21	18 / 上	9.999	0.989	4.69	10.30
/ 下	10.001	0.990	4.73	10.73	/ 下	9.992	1.002	4.72	10.53
7 / 上	10.007	0.995	4.70	10.38	19 / 上	9.995	0.978	4.75	10.37
/ 下	10.004	0.999	4.70	10.57	/ 下	9.996	0.972	4.71	10.52
8 / 上	10.005	0.979	4.73	10.65	20 / 上	9.999	1.007	4.72	10.41
/ 下	10.006	0.975	4.70	10.44	/ 下	9.996	0.963	4.72	10.48
9 / 上	10.005	0.981	4.71	10.45	21 / 上	9.997	0.996	4.71	10.38
/ 下	10.002	0.989	4.74	10.62	/ 下	9.997	0.994	4.72	10.47
10 / 上	10.002	0.965	4.72	10.67	22 / 上	9.997	1.006	4.71	10.46
/ 下	10.004	0.988	4.75	10.64	/ 下	9.996	0.996	4.72	10.42
11 / 上	10.002	0.960	4.71	10.39	23 / 上	9.996	0.992	4.72	10.32
/ 下	10.008	0.980	4.71	10.26	/ 下	9.997	0.985	4.71	10.61
12 / 上	10.004	0.996	4.71	10.34	24 / 上	9.992	0.965	4.69	10.14
/ 下	10.003	0.969	4.73	10.36	/ 下	10.001	0.973	4.73	10.28

1985年6月20日 測定

Table 2 研究センターの低抗値

信号名	低抗値(Ω)	信号名	低抗値(Ω)
Bp2-1	409.4	SD1-1	4.27
Bp2-2	407.6	SD1-2	3.76
Bp2-3	406.9	SD1-3	3.84
Bp2-4	409.4	SD1-4	3.59
Bp2-5	409.4	SD1-5	導通無し
Bp2-6	410.7	SD1-6	3.70
Bp2-7	411.2	SD1-7	3.59
Bp2-8	410.0	SD1-8	3.53
Bp2-9	409.6	SD2-1	4.07
Bp2-10	409.6	SD2-2	3.88
Bp2-11	408.7	SD2-3	4.13
Bp2-12	407.3	SD2-4	3.72
Bp2-13	418.8	SD2-5	4.15
Bp2-14	408.1	SD2-6	3.98
Bp2-15	405.9	SD2-7	導通無し
Bp2-16	405.9	SD2-8	導通無し
Bp2-17	404.9		
Bp2-18	411.5		
Bp2-19	408.5		
Bp2-20	407.9		
Bp2-21	401.7		
Bp2-22	404.4		
Bp2-23	405.8		
Bp2-24	400.9		

1985年6月20日 測定

Table 4 オフセット誤差の重畳波周波数依存性

重畳波周波数	入力換算値
50 Hz	0.2 mV
100 Hz	0.3 mV
200 Hz	0.2 mV

ただし、重畳波振幅は2mVrms

Table 3 本測定系の測定ゲイン

チャネル番号	gain(X1)	gain(X2)	gain(X5)	gain(X10)
1	1.0001	2.000	5.001	9.997
2	0.9984	1.997	4.993	9.982
3	0.9995	1.999	4.997	9.992
4	0.9990	1.998	4.996	9.991
5	0.9985	1.997	4.994	9.987
6	0.9994	1.998	4.996	9.991
7	0.9970	1.994	4.986	9.974
8	0.9985	1.997	4.992	9.983
9	0.9994	1.998	4.999	9.995
10	0.9984	1.996	4.991	9.981
11	0.9979	1.996	4.991	9.981
12	0.9983	1.997	4.992	9.985
13	0.9986	1.997	4.994	9.987
14	0.9981	1.996	4.991	9.978
15	0.9979	1.996	4.990	9.979
16	0.9995	1.999	4.998	9.997
17	0.9984	1.997	4.993	9.985
18	0.9979	1.996	4.990	9.977
19	0.9990	1.998	4.995	9.990
20	0.9978	1.995	4.998	9.977
21	0.9989	1.998	4.995	9.988
22	0.9974	1.995	4.988	9.977
23	0.9980	1.996	4.990	9.980
24	0.9989	1.998	4.994	9.984
25	0.9986	1.997	4.994	9.987
26	0.9989	1.998	4.994	9.985
27	0.9989	1.997	4.995	9.988
28	0.9971	1.994	4.986	9.971
29	0.9980	1.996	4.990	9.980
30	0.9984	1.996	4.993	9.988
31	0.9985	1.997	4.994	9.986
32	0.9975	1.995	4.987	9.972

1985年7月31日 測定

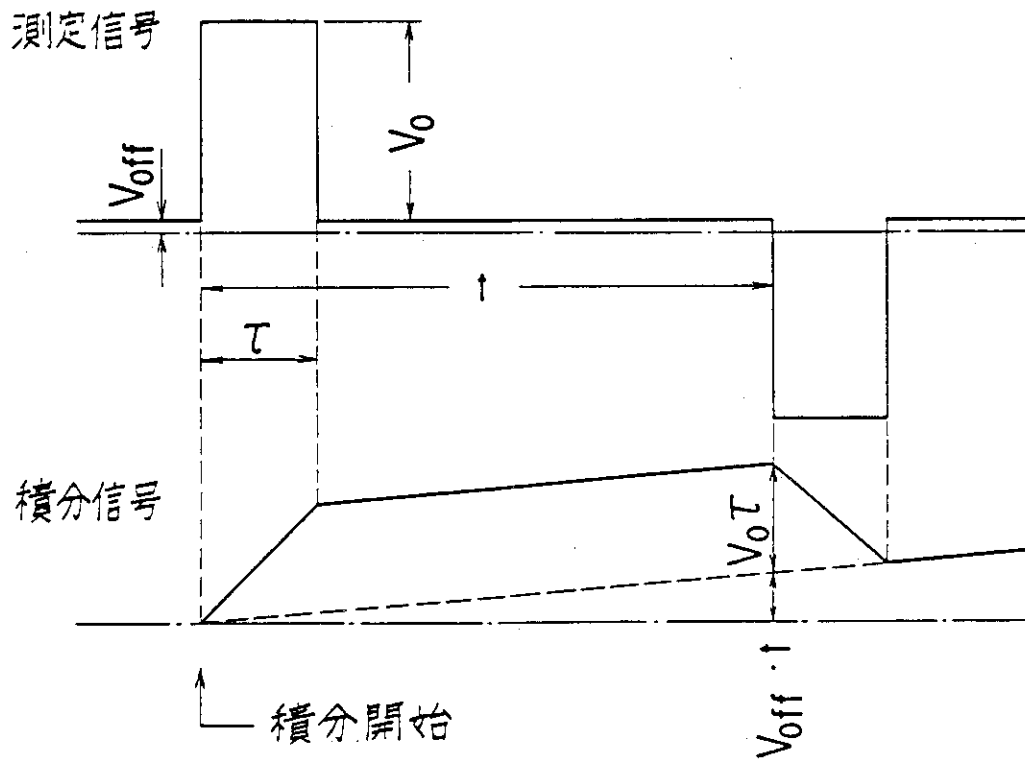


Fig. 1 磁気センサー信号のモデル波形とその積分波形

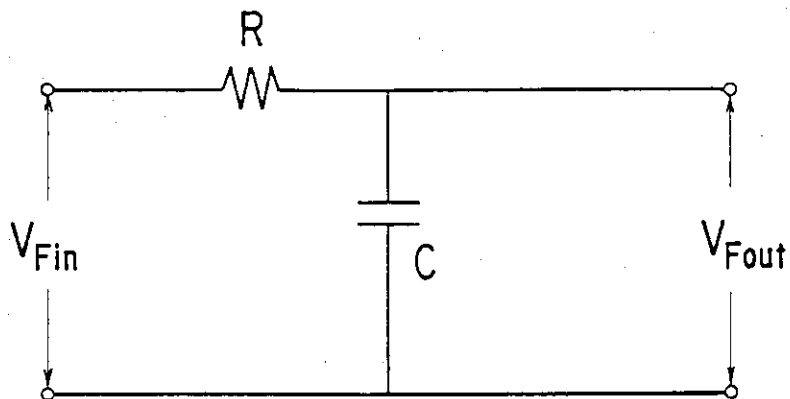


Fig. 2 受動フィルタの等価回路

V_{Fin} は入力電圧, V_{Fout} は出力電圧, RおよびCは低抗値とコンデンサー容量である。

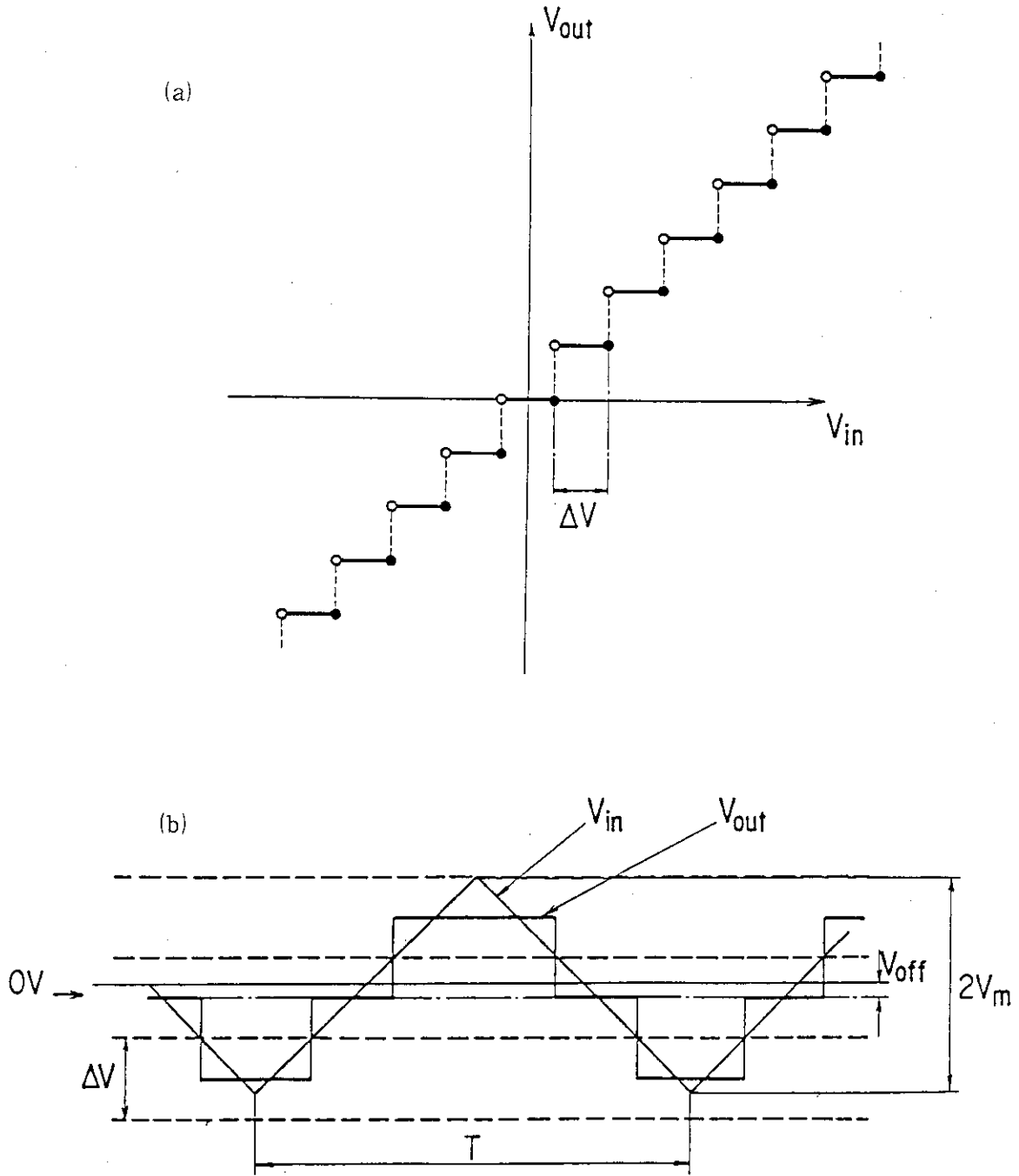
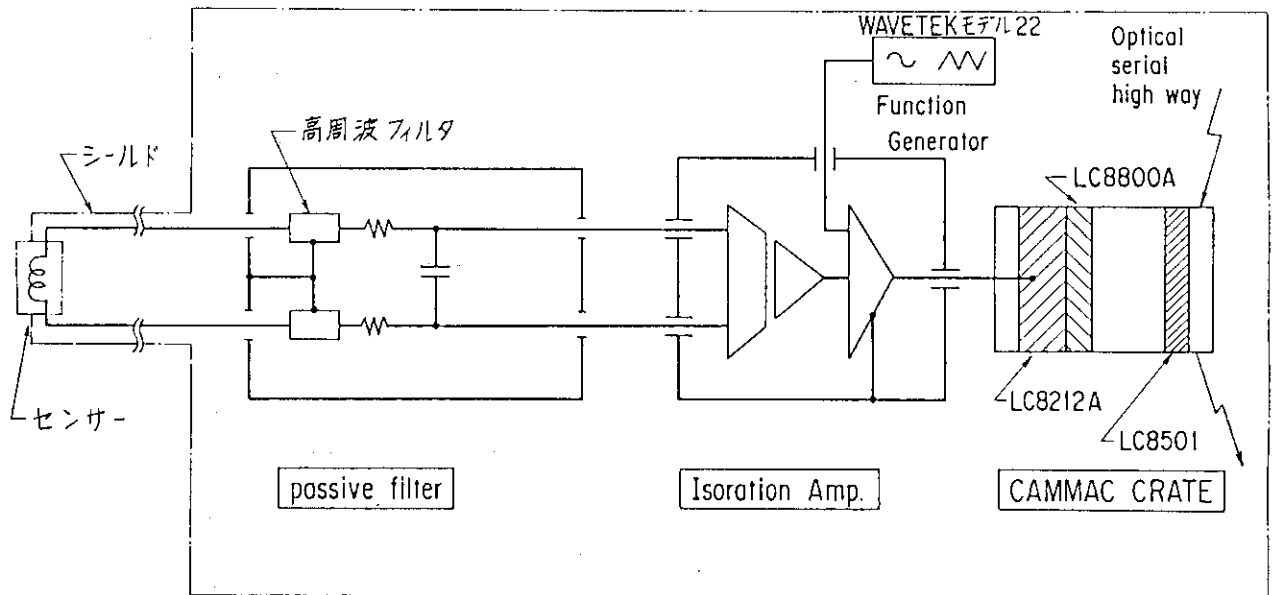


Fig. 3 三角波重畳法の原理説明図

Fig. 3(a) はADコンバータの入出力関係を示したものである。 V_{in} が入力、 V_{out} が出力、 ΔV はビット単位である。Fig. 3(b)は周期 T 、振幅 V_m の三角波を重畳した時の入出力波形を示したものである。出力デジタル値を平均すれば入力オフセット値 V_{off} をビット単位以下の精度で求めることができる。



プラズマ監視現場盤

Fig. 4 磁気信号計測系構成図

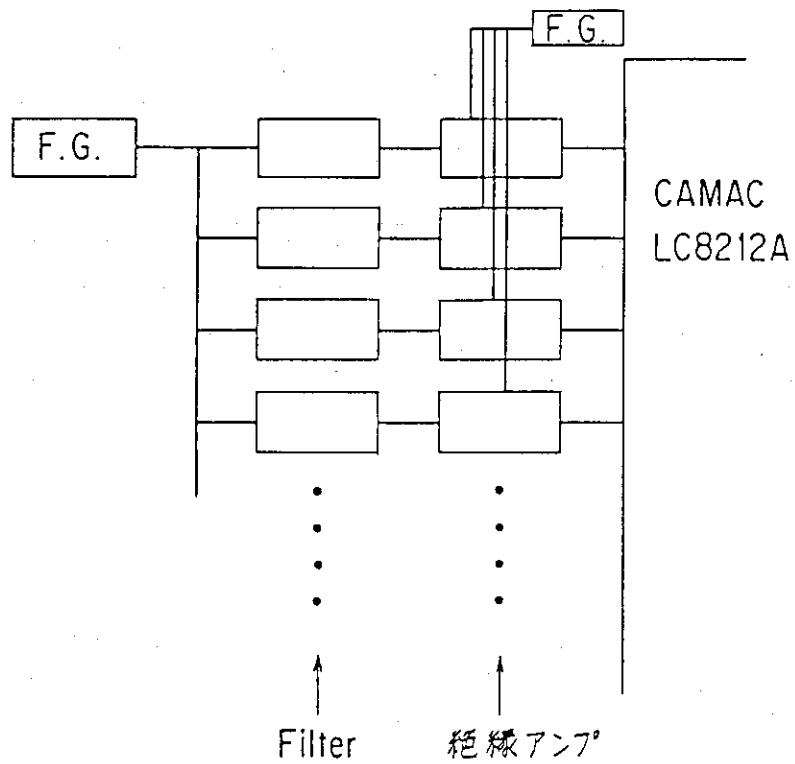


Fig. 6 性能評価試験系の構成

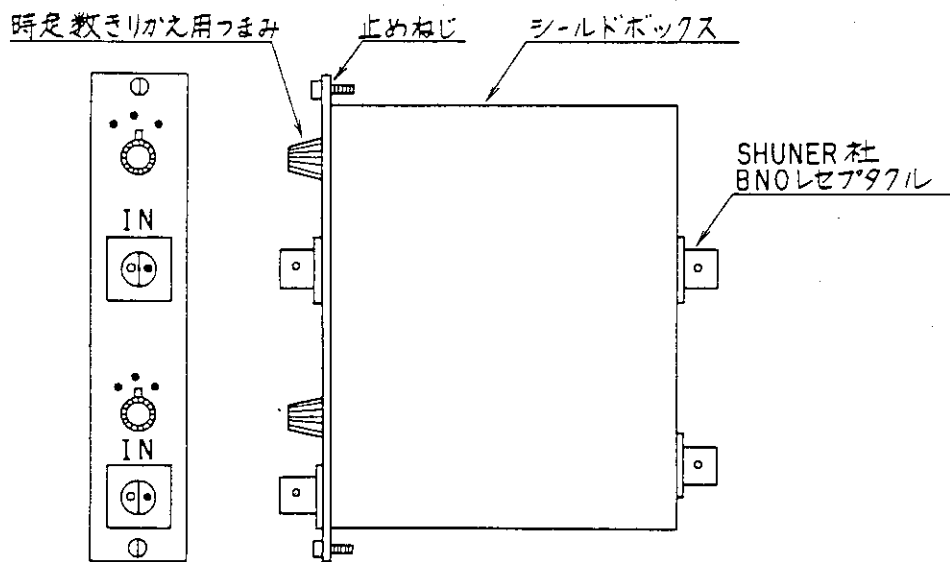
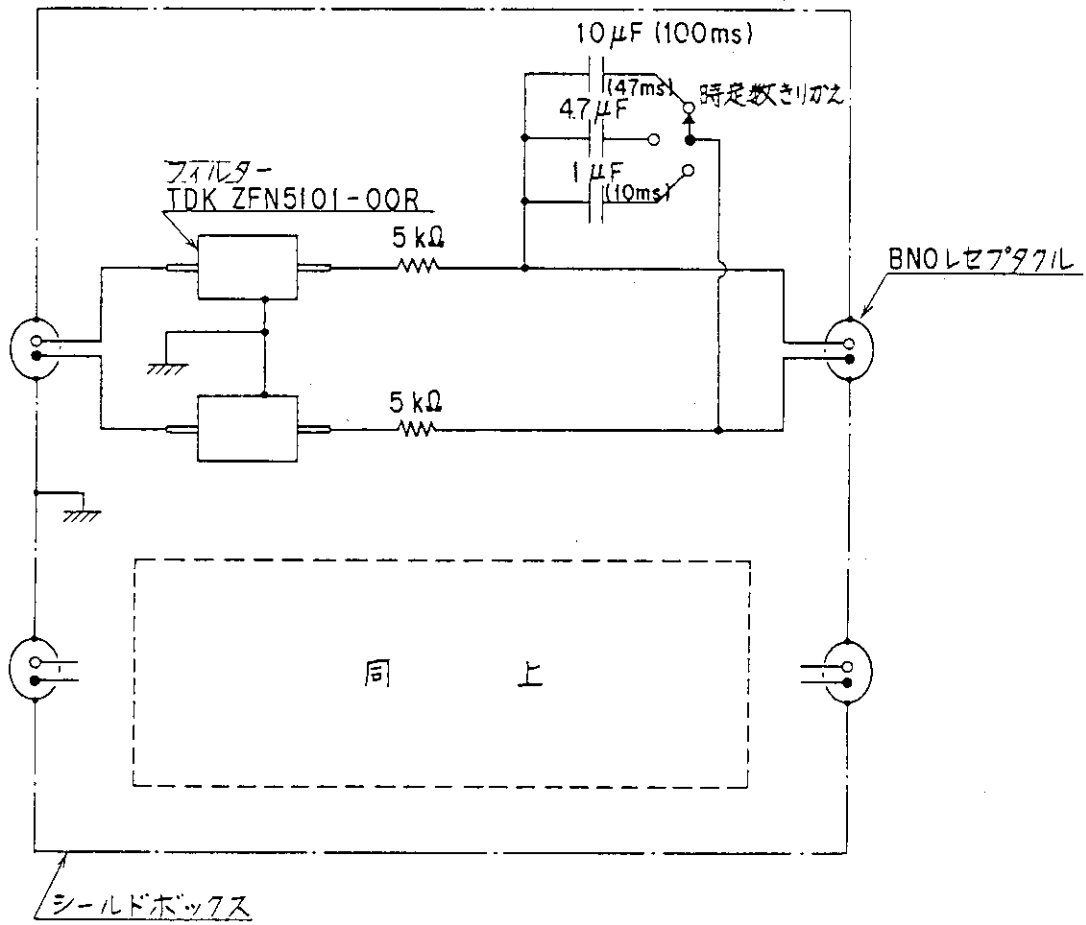


Fig. 5 受動フィルタの回路図およびその外観

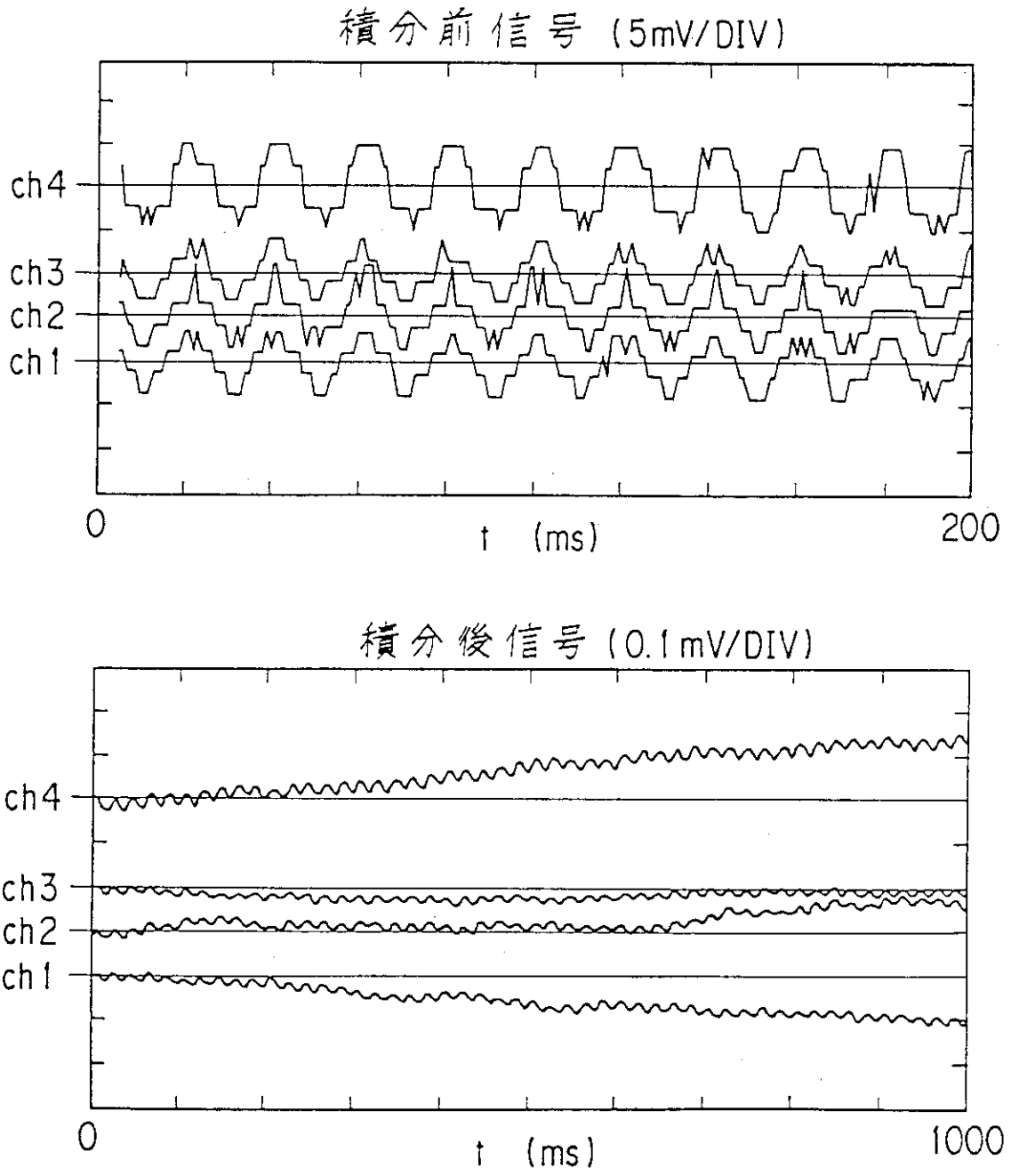


Fig. 7 三角波重畳法によるオフセット誤差評価

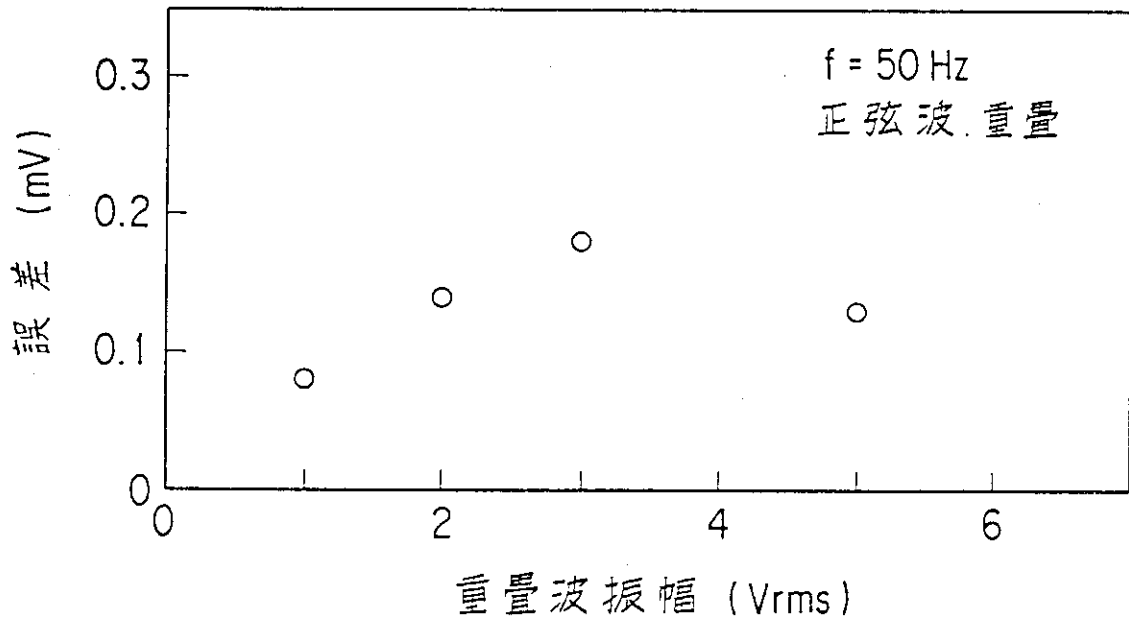


Fig. 8 重畳波振幅とオフセット誤差の関係
 重畳波は50 Hzの正弦波で、初めの20 msec 21点のデータを用いてオフセット値の評価を行った場合である。

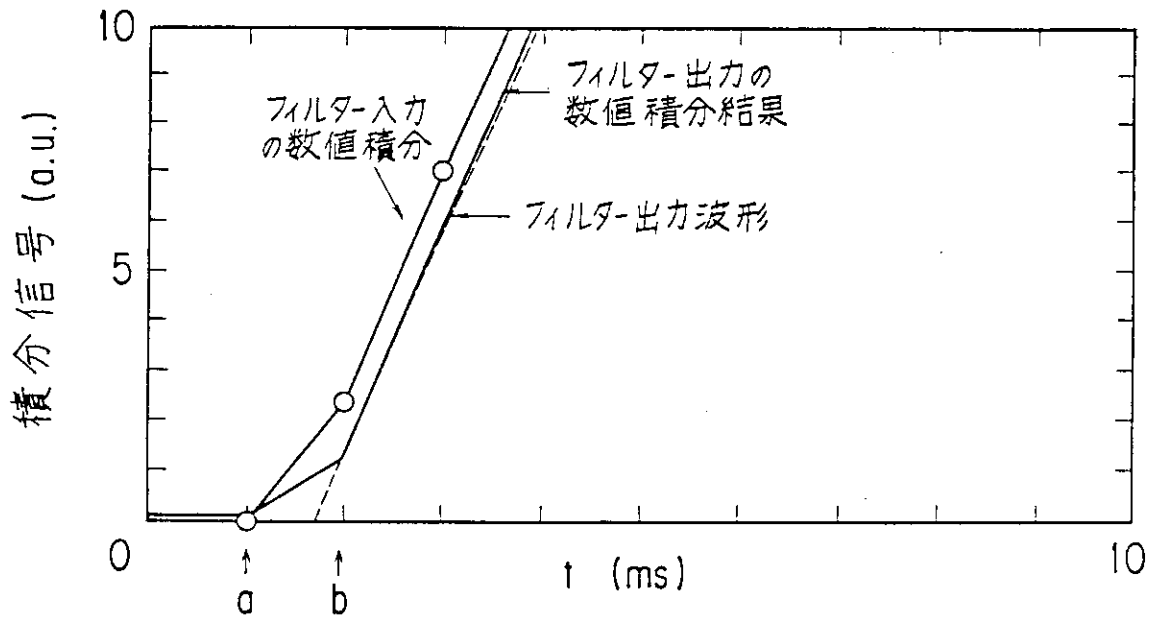


Fig. 9 受動フィルタによる応答特性の改善