

JAERI-Research

96-026



定常磁場計測用センサー

1996年6月

関谷 譲・森 活春・小栗 滋・菊池 満

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

本レポートは、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、お申し越してください。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。

This report is 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, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 原子力資料サービス

定常磁場計測用センサー

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部

関谷 譲・森 活春・小栗 滋  
菊池 満

(1996年5月8日受理)

定常磁場の測定用センサーとして電流が磁場中で受ける力を測定するタイプのセンサーを試作し、プラズマ放電を利用してその特性を調べた。本タイプは原理的に長時間測定でのドリフトがなくかつ中性子照射による損傷にも強いことが予想され、定常トカマク炉での制御用磁場測定に使用できる可能性がある。

プラズマ放電を利用した測定結果から、実際のトカマク放電における磁場測定で問題の無いことを確認した。本センサーは約2時間の長時間測定においてもドリフトがなく、定常磁場測定に有効であった。また、ディスラプションのような10ms程度の高速変動にも追従でき、さらに、センサーに流す電流を制御することで、広範囲の磁場測定が可能であることを確認した。

Magnetic Sensor for Steady State Tokamak

Yuzuru NEYATANI, Katsuharu MORI, Shigeru OGURI  
and Mitsuru KIKUCHI

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

(Received May 8, 1996)

A new type of magnetic sensor has been developed for the measurement of steady state magnetic fields without DC-drift such as integration circuit. The electromagnetic force induced to the current which leads to the sensor was used for the measurement. For the high frequency component which exceeds higher than the vibration frequency of sensor, pick-up coil was used through the high pass filter.

From the results using tokamak discharges, this sensor can measure the magnetic field in the tokamak discharge. During  $\sim 2$  hours measurement, no DC drift was observed. The sensor can respond  $\sim 10$ ms of fast change of magnetic field during disruptions. We confirm the extension of measured range to control the current which leads to the sensor.

Keywords: Magnetic Sensor, Magnetic Field, DC Drift, Diagnostics, Tokamak

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 測定原理 .....	1
3. 機器構成 .....	2
4. 信号合成方法 .....	3
5. センサーの測定範囲, 精度 .....	4
6. 磁場試験結果 .....	5
6.1 試験条件 .....	5
6.2 結 果 .....	6
7. 考 察 .....	7
7.1 環境条件による影響について .....	7
7.2 注意点および今後の課題 .....	8
8. まとめ .....	8
謝 辞 .....	9
参考文献 .....	9

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Principle of Measurement .....	1
3. Composition of Sensor .....	2
4. Signal Arrangement .....	3
5. Measured Range and Accuracy .....	4
6. Results .....	5
6.1 Set Up for Measurement .....	5
6.2 Results .....	6
7. Discussion .....	7
7.1 Effect of Environments .....	7
7.2 Attainable Point and Future Issues .....	8
8. Conclusion .....	8
Acknowledgement .....	9
References .....	9

## 1. はじめに

将来の定常トカマクではプラズマ電流および位置形状制御のために、定常磁場を精度良く測定することが不可欠である。従来の大部分のトカマクでは、放電時間が20～30秒以下と比較的短いため、ピックアップコイルにより検出した磁場の変動成分を積分して、プラズマ周辺部の絶対磁場を求めている。しかし、この通常使用している積分タイプのセンサーは、積分時間の増大とともに主に回路系のドリフトによる誤差が累積する。超伝導トカマク「TRIAM」では制御用磁場計測にホール素子を使用して、世界で初めて1時間放電を達成した[1]。しかし、D-T核融合炉では、ホール素子を用いた定常磁場測定は、中性子による素子の劣化が問題となり、実用性が現在のところ確認されていない。このため、ITERでは回転/振動プローブや光ファイバー中の偏光を利用したセンサー等種々のセンサーが提案されている[2]が、駆動部分の機械的信頼性や耐中性子性等の問題を全てクリアした提案がなく、現在のところ確実に測定できる見通しは立っていない。一方、定常炉の磁場センサーの新しい候補として、磁場中の電流が受けるトルクを測定するタイプのセンサーが提案されている[3]。本論文では、ドリフトの問題がなく、中性子にも強いタイプのセンサーとして、この新しい提案に基づくセンサーを試作し、その磁場中での特性を評価した。

## 2. 測定原理

本磁場センサーは電流が磁場中で受ける力を測定することで、その印加磁場を求めるものである。回転軸で支持されたコイル（以下センシングコイルと呼ぶ）に直流電流を流すと、コイル面内で回転軸に直角な方向の磁場が加わったときにコイルを軸の周りに回転させるような電磁力が発生する。この電磁トルクはその印加磁場に比例するので、ロードセル（荷重計）を用いて測定した結果から加えられた磁場強度が求められる。この磁場センサーの特徴としては、以下のものが上げられる。

- (1) ベースのドリフトが原理的にないため、長時間計測における誤差の累積がない。
- (2) プラズマに近接して配置する電磁力の検出部分は機械的なシステムのため、材料そのもの中性子による損傷が問題となるレベル以下では中性子による影響が小さい。
- (3) 駆動部分が少なく、唯一の回転部分もその移動範囲が小さくかつ速度はプラズマ電流の変化率や移動速度程度で緩やか（定常炉では秒のオーダー）である。従って、駆動部分の信頼性が高い。
- (4) 1方向の磁場成分のみを測定する。その方向は、センシングコイルのコイルリング面内でコイルの回転軸に垂直な方向である。

このような電磁力を測定する方式では、センサーの機械的振動が出力にそのまま重畳される。また、センシングコイルの慣性のためその固有振動数（今回の例では～4 Hz）以上の速い応答特性は得られない。そこで、機械振動の成分を除去するため、センシングコイルからの信号はローパスフィルタを用いて低周波成分のみを取り出している。また、センシングコイルの固有振動数以上のMHD等による変動

## 1. はじめに

将来の定常トカマクではプラズマ電流および位置形状制御のために、定常磁場を精度良く測定することが不可欠である。従来の大部分のトカマクでは、放電時間が20~30秒以下と比較的短いため、ピックアップコイルにより検出した磁場の変動成分を積分して、プラズマ周辺部の絶対磁場を求めている。しかし、この通常使用している積分タイプのセンサーは、積分時間の増大とともに主に回路系のドリフトによる誤差が累積する。超伝導トカマク「TRIAM」では制御用磁場計測にホール素子を使用して、世界で初めて1時間放電を達成した[1]。しかし、D-T核融合炉では、ホール素子を用いた定常磁場測定は、中性子による素子の劣化が問題となり、実用性が現在のところ確認されていない。このため、ITERでは回転/振動プローブや光ファイバー中の偏光を利用したセンサー等種々のセンサーが提案されている[2]が、駆動部分の機械的信頼性や耐中性子性等の問題を全てクリアした提案がなく、現在のところ確実に測定できる見通しは立っていない。一方、定常炉の磁場センサーの新しい候補として、磁場中の電流が受けるトルクを測定するタイプのセンサーが提案されている[3]。本論文では、ドリフトの問題がなく、中性子にも強いタイプのセンサーとして、この新しい提案に基づくセンサーを試作し、その磁場中での特性を評価した。

## 2. 測定原理

本磁場センサーは電流が磁場中で受ける力を測定することで、その印加磁場を求めるものである。回転軸で支持されたコイル（以下センシングコイルと呼ぶ）に直流電流を流すと、コイル面内で回転軸に直角な方向の磁場が加わったときにコイルを軸の周りに回転させるような電磁力が発生する。この電磁トルクはその印加磁場に比例するので、ロードセル（荷重計）を用いて測定した結果から加えられた磁場強度が求められる。この磁場センサーの特徴としては、以下のものが上げられる。

- (1) ベースのドリフトが原理的にないため、長時間計測における誤差の累積がない。
- (2) プラズマに近接して配置する電磁力の検出部分は機械的なシステムのため、材料そのものの中性子による損傷が問題となるレベル以下では中性子による影響が小さい。
- (3) 駆動部分が少なく、唯一の回転部分もその移動範囲が小さくかつ速度はプラズマ電流の変化率や移動速度程度で緩やか（定常炉では秒のオーダー）である。従って、駆動部分の信頼性が高い。
- (4) 1方向の磁場成分のみを測定する。その方向は、センシングコイルのコイルリング面内でコイルの回転軸に垂直な方向である。

このような電磁力を測定する方式では、センサーの機械的振動が出力にそのまま重畳される。また、センシングコイルの慣性のためその固有振動数（今回の例では~4 Hz）以上の速い応答特性は得られない。そこで、機械振動の成分を除去するため、センシングコイルからの信号はローパスフィルタを用いて低周波成分のみを取り出している。また、センシングコイルの固有振動数以上のMHD等による変動

成分の測定には従来型のピックアップコイルの積分信号を利用することとした。この際、積分信号にはDC成分が不要であるため、積分後にハイパスフィルタを通すことで長時間測定に於けるドリフトの問題は回避できる。この両者を合成することで、DCからピックアップコイルの周波数特性で制限される高周波領域まで連続的な測定でき、プラズマ電流の立ち上げ時や垂直位置不安定性の制御等に対応が可能となる。まとめると、

- (1) センシングコイル : 定常磁場成分及びセンシングコイルの固有振動数以下の低周波成分の測定
- (2) ピックアップコイル : センシングコイルの固有振動数以上の高周波成分の測定

となる。

このような構造のセンサーでは、センシングコイルとロードセルの組み合わせによる測定トルク限界は以下の要因で決まる。

最小測定範囲：コイルの回転軸の摩擦

最大測定範囲：選択したロードセルの最大定格トルク

磁場の測定範囲は上記要因とセンシングコイルに流す電流値に依存するので、この電流値を適当な値に制御することで、測定磁場のダイナミックレンジを広げることが可能となる。

### 3. 機器構成

本センサーの測定回路を含めた概略機器構成を図1に示す。図中でプラズマ近傍に据え付ける部分はAで示した部分である。

定常磁場測定用のセンシングコイル、センシングコイル用電流源、ロードセルおよびその出力の電圧変換用トランスミッタ及び変動磁場補正用のピックアップコイルより構成される。センシングコイルは回転軸を有し、その軸を含む平面にコイルを巻いたもので、軸の回りのトリクによって回転できるように軸受けで支えられている。ロードセルはセンシングコイルの回転力をその力に比例した電気出力に変換する部分で、市販品を用いた。このロードセルによる力の測定原理を図2(a)に示す。ロードセルに力(荷重)Fが加わると、ロードセル内の1対の抵抗線が伸縮する。線材の抵抗は、その長さに比例するため、予め適度な張力で張られた抵抗線の抵抗は外力による伸縮によってその抵抗が変化する(変化量DR)。この抵抗線は図2(b)のようなブリッジ回路の一部を構成しており、図のAB端に定電圧を印加しておくことによりCD端に抵抗変化量DRに比例した出力電圧が得られる。抵抗線の材質は、Ni-Cu合金で、定格20gfのロードセルの性能は、抵抗値Rは約270W、F=20g印加時の抵抗変化量DRは約1W、そのときの伸縮量は約0.4mmである。トランスミッタはロードセルに電圧を供給し、またロードセルからの出力をプリアンプを介して電圧として出力する回路である。センシングコイル用電流源はセンシングコイルに電流を流すために定電流回路である。これらの主な性能を表1にまとめる。センサーの主要部分の組図を図3に示す。

また、測定回路としては、センシングコイルからの信号処理用ローパスフィルタ、ピックアップコイル用積分器及びハイパスフィルタ、センシングコイルに電流を流す電流測定用アンプ並びにそれらの信



成分の測定には従来型のピックアップコイルの積分信号を利用することとした。この際、積分信号にはDC成分が不要であるため、積分後にハイパスフィルタを通すことで長時間測定に於けるドリフトの問題は回避できる。この両者を合成することで、DCからピックアップコイルの周波数特性で制限される高周波領域まで連続的な測定でき、プラズマ電流の立ち上げ時や垂直位置不安定性の制御等に対応が可能となる。まとめると、

- (1) センシングコイル : 定常磁場成分及びセンシングコイルの固有振動数以下の低周波成分の測定
- (2) ピックアップコイル : センシングコイルの固有振動数以上の高周波成分の測定

となる。

このような構造のセンサーでは、センシングコイルとロードセルの組み合わせによる測定トルク限界は以下の要因で決まる。

最小測定範囲：コイルの回転軸の摩擦

最大測定範囲：選択したロードセルの最大定格トルク

磁場の測定範囲は上記要因とセンシングコイルに流す電流値に依存するので、この電流値を適当な値に制御することで、測定磁場のダイナミックレンジを広げることが可能となる。

### 3. 機器構成

本センサーの測定回路を含めた概略機器構成を図1に示す。図中でプラズマ近傍に据え付ける部分はAで示した部分である。

定常磁場測定用のセンシングコイル、センシングコイル用電流源、ロードセルおよびその出力の電圧変換用トランスミッタ及び変動磁場補正用のピックアップコイルより構成される。センシングコイルは回転軸を有し、その軸を含む平面にコイルを巻いたもので、軸の回りのトリクによって回転できるよう軸受けで支えられている。ロードセルはセンシングコイルの回転力をその力に比例した電気出力に変換する部分で、市販品を用いた。このロードセルによる力の測定原理を図2(a)に示す。ロードセルに力(荷重)Fが加わると、ロードセル内の1対の抵抗線が伸縮する。線材の抵抗は、その長さに比例するため、予め適度な張力で張られた抵抗線の抵抗は外力による伸縮によってその抵抗が変化する(変化量DR)。この抵抗線は図2(b)のようなブリッジ回路の一部を構成しており、図のAB端に定電圧を印加しておくことによりCD端に抵抗変化量DRに比例した出力電圧が得られる。抵抗線の材質は、Ni-Cu合金で、定格20gfのロードセルの性能は、抵抗値Rは約270W、F=20g印加時の抵抗変化量DRは約1W、そのときの伸縮量は約0.4mmである。トランスミッタはロードセルに電圧を供給し、またロードセルからの出力をプリアンプを介して電圧として出力する回路である。センシングコイル用電流源はセンシングコイルに電流を流すために定電流回路である。これらの主な性能を表1にまとめる。センサーの主要部分の組図を図3に示す。

また、測定回路としては、センシングコイルからの信号処理用ローパスフィルタ、ピックアップコイル用積分器及びハイパスフィルタ、センシングコイルに電流を流す電流測定用アンプ並びにそれらの信

号合成回路から構成される。

## 4. 信号合成方法

次に、前述した信号の合成によって実際の磁場が測定できることを示す。信号合成のブロック図を図4に示す。ロードセルからの出力電圧は、

$$V_L = C \cdot F = C \cdot n \cdot I_s \cdot B \cdot L \quad (1)$$

- $B$  : 磁気プローブ位置での測定磁場成分 (測定対象) (T)  
 $I_s$  : センシングコイルに流す電流値 (A)  
 $n$  : センシングコイルのターン数  
 $L$  : センシングコイルの測定磁場に直角方向の長さ (m)  
 $F$  : センシングコイルに働く電磁力 (N)

となる。ここでCはセンシングコイルの力をロードセルに伝達する構造に関連した比例定数である。ローパスフィルタを介した出力は、次式で表わされる。

$$V_{LL} = G_2 \frac{R_f}{R_{sL}} \frac{1}{j\omega\tau_L + 1} V_L \quad (2)$$

- $G_2$  : ローパスフィルタのゲイン  
 $R_f$  : 帰還抵抗  
 $R_{sL}$  : 入力抵抗  
 $\tau_L$  : ローパスフィルタの時定数

ロードセルの変換ゲイン $\alpha$ は、センシングコイルおよびロードセルの構造で決まり、センシングコイルに基準電流 $I_{s0}$ を流したときに次式で表わされる。

$$\alpha B = CF = C \cdot n \cdot I_{s0} \cdot B \cdot L$$

従って、任意の電流 $I_s$ を流したときのロードセルの出力は $V_{LL} = \alpha (I_s/I_{s0}) \cdot B$ となり、 $I_s \cdot B$ に比例する。このため、実際の磁場を求めるには $I_s$ で規格化する必要がある。

この結果と式(1)、(2)を組み合わせると、センシングコイル+ロードセルによる測定磁場は、

$$B_{LL} = \frac{V_{LL}}{G_3 I_s} = G_2 \frac{R_f}{R_{sL}} \frac{1}{j\omega\tau_L + 1} \frac{\alpha}{G_3 I_s} B \quad (3)$$

号合成回路から構成される。

## 4. 信号合成方法

次に、前述した信号の合成によって実際の磁場が測定できることを示す。信号合成のブロック図を図4に示す。ロードセルからの出力電圧は、

$$V_L = C \cdot F = C \cdot n \cdot I_s \cdot B \cdot L \quad (1)$$

- $B$  : 磁気プローブ位置での測定磁場成分 (測定対象) (T)  
 $I_s$  : センシングコイルに流す電流値 (A)  
 $n$  : センシングコイルのターン数  
 $L$  : センシングコイルの測定磁場に直角方向の長さ (m)  
 $F$  : センシングコイルに働く電磁力 (N)

となる。ここでCはセンシングコイルの力をロードセルに伝達する構造に関連した比例定数である。ローパスフィルタを介した出力は、次式で表わされる。

$$V_{LL} = G_2 \frac{R_f}{R_{sL}} \frac{1}{j\omega\tau_L + 1} V_L \quad (2)$$

- $G_2$  : ローパスフィルタのゲイン  
 $R_f$  : 帰還抵抗  
 $R_{sL}$  : 入力抵抗  
 $\tau_L$  : ローパスフィルタの時定数

ロードセルの変換ゲイン $\alpha$ は、センシングコイルおよびロードセルの構造で決まり、センシングコイルに基準電流 $I_{s0}$ を流したときに次式で表わされる。

$$\alpha B = CF = C \cdot n \cdot I_{s0} \cdot B \cdot L$$

従って、任意の電流 $I_s$ を流したときのロードセルの出力は $V_L = \alpha (I_s/I_{s0}) \cdot B$ となり、 $I_s \cdot B$ に比例する。このため、実際の磁場を求めるには $I_s$ で規格化する必要がある。

この結果と式(1)、(2)を組み合わせると、センシングコイル+ロードセルによる測定磁場は、

$$B_{LL} = \frac{V_{LL}}{G_3 r I_s} = G_2 \frac{R_f}{R_{sL}} \frac{1}{j\omega\tau_L + 1} \frac{\alpha}{G_3 r I_s} B \quad (3)$$

$r$  :  $I_s$  計測用シャント抵抗値 (W)

$G_3$  : 調整用アンプゲイン

となる。

一方、ピックアップコイルの出力は、磁場変動の強度に比例し、

$$V_{pH} = \frac{d\Phi}{dt} = NS \frac{dB}{dt} \quad (4)$$

NS : ピックアップコイルの錯交面積

となる。この信号の積分+ハイパスフィルタ通過後の出力は、

$$B_{pH} = G_1 \cdot \frac{j\omega\tau_H}{j\omega\tau_H + 1} \int V_{pH} dt = G_1 \frac{NS}{\tau_d} \cdot \frac{j\omega\tau_H}{j\omega\tau_H + 1} B \quad (5)$$

$G_1$  : アンプゲイン

$\tau_H$  : ハイパスフィルタの時定数

$\tau_d$  : 積分時定数

で表わされる。

従って、合成された最終的な出力は、

$$B_{ps} = B_{pH} + B_{LL} = G_1 \frac{NS}{\tau_d} \cdot \frac{j\omega\tau_L}{j\omega\tau_L + 1} B + G_2 \frac{R_f}{R_{sL}} \cdot \frac{\alpha}{G_3 r I_s} \cdot \frac{1}{j\omega\tau_H + 1} B \quad (6)$$

となる。ここで、

$$\tau_L = \tau_H, \quad G_1 \frac{NS}{\tau_d} = G_2 \frac{R_f}{R_{sL}} \cdot \frac{\alpha}{G_3 r I_s}$$

となるように、フィルタの時定数および  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  のゲイン調整を行えば、 $B_{ps} = B$  となり、プローブ位置での磁場が測定できる。

## 5. センサーの測定範囲、精度

センサー自身の測定感度及びその直線性を調べるために、磁場校正装置を用いて予備検査を行った。磁場校正装置の主要諸元を表2にまとめる。本装置は中心部分で0~600G程度の定常磁場を発生させることができる。実際に発生した磁場強度はホール素子で測定した。 $I_s = 0.1A$  の場合のロードセルの出力の磁場依存性を図5にまとめる。図では磁場の方向を変えた場合の2ケースを表している。両者でのセンシングコイルとロードセルに加わる力の向きを図6に示す。この結果から、磁場強度が<400Gの範

$r$  :  $I_s$  計測用シャント抵抗値 (W)  
 $G_3$  : 調整用アンプゲイン

となる。

一方、ピックアップコイルの出力は、磁場変動の強度に比例し、

$$V_{pH} = \frac{d\Phi}{dt} = NS \frac{dB}{dt} \quad (4)$$

NS : ピックアップコイルの錯交面積

となる。この信号の積分+ハイパスフィルタ通過後の出力は、

$$B_{pH} = G_1 \cdot \frac{j\omega\tau_H}{j\omega\tau_H + 1} \int V_{pH} dt = G_1 \frac{NS}{\tau_d} \cdot \frac{j\omega\tau_H}{j\omega\tau_H + 1} B \quad (5)$$

$G_1$  : アンプゲイン

$\tau_H$  : ハイパスフィルタの時定数

$\tau_d$  : 積分時定数

で表わされる。

従って、合成された最終的な出力は、

$$B_{ps} = B_{pH} + B_{LL} = G_1 \frac{NS}{\tau_d} \cdot \frac{j\omega\tau_L}{j\omega\tau_L + 1} B + G_2 \frac{R_f}{R_{sL}} \cdot \frac{\alpha}{G_3 r I_s} \cdot \frac{1}{j\omega\tau_H + 1} B \quad (6)$$

となる。ここで、

$$\tau_L = \tau_H, \quad G_1 \frac{NS}{\tau_d} = G_2 \frac{R_f}{R_{sL}} \cdot \frac{\alpha}{G_3 r I_s}$$

となるように、フィルタの時定数および  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  のゲイン調整を行えば、 $B_{ps} = B$  となり、プローブ位置での磁場が測定できる。

## 5. センサーの測定範囲、精度

センサー自身の測定感度及びその直線性を調べるために、磁場校正装置を用いて予備検査を行った。磁場校正装置の主要諸元を表2にまとめる。本装置は中心部分で0~600G程度の定常磁場を発生させることができる。実際に発生した磁場強度はホール素子で測定した。 $I_s = 0.1A$  の場合のロードセルの出力の磁場依存性を図5にまとめる。図では磁場の方向を変えた場合の2ケースを表している。両者でのセンシングコイルとロードセルに加わる力の向きを図6に示す。この結果から、磁場強度が < 400G の範

囲では測定精度3%（磁場およびセンシングコイルに流す電流測定の精度で決まっている）の範囲内で出力のリニアリティがあることを確認した。一方、磁場の向きを逆転させた場合に、係数Cの値が異なる。これは力のロードセルへの伝達に方向性があることを示している。今回制作したセンサーは力の伝達にアームを用いているため、図7の様に力の方向によってロードセルに加わる力点が変わったためと考えられる。従って、現在の構造では交流磁場に対しては特定の方向の磁場測定で誤差が大きくなる。0Gまでの外挿では図6のケース1（以下正方向と呼ぶ）の場合で $\sim 0.014\text{V}$ 、ケース2（以下逆方向と呼ぶ）の場合で $\sim 0.047\text{V}$ のオフセットが見られる。ここでは比較のため、逆方向の出力の符号を正方向の合わせている。この原因は、センシングコイルの回転軸の摩擦によるものと思われる。この摩擦力を低減することが最小検出感度の改善に繋がる。

この試験結果から、磁場に対する出力はオフセットリニアの次式で表される。

$$V_{\text{out}} = CB + D \quad \begin{array}{l} \text{正方向: } C=0.00724 \text{ (V/G)}, D=-0.014 \text{ (V)} \\ \text{逆方向: } C=0.00806 \text{ (V/G)}, D=-0.047 \text{ (V)} \end{array} \quad (7)$$

係数Cの磁場 $\times$ 電流（センシングコイルの生じる電磁力に比例）による依存性を図7に示す。磁場またはセンシングコイルの電流（ $I_s$ ）が小さくなり発生するトルクが弱くなる領域では、測定誤差の増大とオフセットのため、原点からの傾きで定義される係数は値がずれてきている。従って、使用に際しては $B \cdot I_s > 10 \text{ (G} \cdot \text{A)}$ となるように $I_s$ を選択する必要がある。Dのオフセットは最小測定磁場を反映しており、正方向では約2 Gauss、逆方向では約6 Gaussである。軸受けの摩擦およびトルクの伝達構造に依存すると思われる。この時、想定されるトルクは各々 $\sim 24\text{mg}$ 、 $\sim 72\text{mg}$ である。ダイナミックレンジは、ロードセルの測定限界で決定されており、最大定格20gであるので正方向では800程度となる。測定精度を決める主なものは、

$$\begin{array}{ll} \text{ブリッジ回路の電源電圧} & : \pm 3\% \\ \text{ロードセルの温度特性} & : \pm 0.5\% / 10^\circ\text{C} \end{array}$$

で、主として回路の安定度で決まっている。従って、測定精度は安定化電源の使用や較正の充実で改善できるものとする。

## 6. 磁場試験結果

### 6. 1 試験条件

JT-60Uの実験放電を利用して、磁場センサーの動作試験を実施した。TFCコイル間に磁場センサーを設置し、トラス外向きの $B_r$ 成分の磁場に対して図6の正方向の力が加わるように磁場センサーを配置した。センサーの配置および据え付け位置を図8に示す。図では同時に代表的な放電による磁場のパターンを示す。センサーは真空容器と機械的に絶縁された架台に固定した。トランスミッタは磁場による誤動作を防止するために、センサーから約10m離れた漏洩磁場が $< 10 \text{ Gauss}$ の位置に設置した。センシングコイルに流す電流はトラスより約40m離れたトカマク本体とは別室から供給し、出力信号も同じ場所まで導いて、実験中でも測定条件の変更ができるように配慮した。

動作試験時に利用した代表的な放電条件はプラズマ電流（ $I_p$ ）1~2MA、真空容器中心でのトロイダ

囲では測定精度3%（磁場およびセンシングコイルに流す電流測定の精度で決まっている）の範囲内で出力のリニアリティがあることを確認した。一方、磁場の向きを逆転させた場合に、係数Cの値が異なる。これは力のロードセルへの伝達に方向性があることを示している。今回制作したセンサーは力の伝達にアームを用いているため、図7の様に力の方向によってロードセルに加わる力点が変わったためと考えられる。従って、現在の構造では交流磁場に対しては特定の方向の磁場測定で誤差が大きくなる。0Gまでの外挿では図6のケース1（以下正方向と呼ぶ）の場合で $\sim 0.014V$ 、ケース2（以下逆方向と呼ぶ）の場合で $\sim 0.047V$ のオフセットが見られる。ここでは比較のため、逆方向の出力の符号を正方向の合わせている。この原因は、センシングコイルの回転軸の摩擦によるものと思われる。この摩擦力を低減することが最小検出感度の改善に繋がる。

この試験結果から、磁場に対する出力はオフセットリニアの次式で表される。

$$V_{out} = CB + D \quad \begin{array}{l} \text{正方向: } C=0.00724 \text{ (V/G)}, D=-0.014 \text{ (V)} \\ \text{逆方向: } C=0.00806 \text{ (V/G)}, D=-0.047 \text{ (V)} \end{array} \quad (7)$$

係数Cの磁場 $\times$ 電流（センシングコイルの生じる電磁力に比例）による依存性を図7に示す。磁場またはセンシングコイルの電流（ $I_s$ ）が小さくなり発生するトルクが弱くなる領域では、測定誤差の増大とオフセットのため、原点からの傾きで定義される係数は値がずれてきている。従って、使用に際しては $B \cdot I_s > 10 \text{ (G} \cdot \text{A)}$ となるように $I_s$ を選択する必要がある。Dのオフセットは最小測定磁場を反映しており、正方向では約2 Gauss、逆方向では約6 Gaussである。軸受けの摩擦およびトルクの伝達構造に依存すると思われる。この時、想定されるトルクは各々 $\sim 24\text{mg}$ 、 $\sim 72\text{mg}$ である。ダイナミックレンジは、ロードセルの測定限界で決定されており、最大定格20gであるので正方向では800程度となる。測定精度を決める主なものは、

$$\begin{array}{ll} \text{ブリッジ回路の電源電圧} & : \pm 3\% \\ \text{ロードセルの温度特性} & : \pm 0.5\% / 10^\circ\text{C} \end{array}$$

で、主として回路の安定度で決まっている。従って、測定精度は安定化電源の使用や較正の充実で改善できるものとする。

## 6. 磁場試験結果

### 6. 1 試験条件

JT-60Uの実験放電を利用して、磁場センサーの動作試験を実施した。TFCコイル間に磁場センサーを設置し、トーラス外向きの $B_r$ 成分の磁場に対して図6の正方向の力が加わるように磁場センサーを配置した。センサーの配置および据え付け位置を図8に示す。図では同時に代表的な放電による磁場のパターンを示す。センサーは真空容器と機械的に絶縁された架台に固定した。トランスミッタは磁場による誤動作を防止するために、センサーから約10m離れた漏洩磁場が $< 10 \text{ Gauss}$ の位置に設置した。センシングコイルに流す電流はトーラスより約40m離れたトカマク本体とは別室から供給し、出力信号も同じ場所まで導いて、実験中でも測定条件の変更ができるように配慮した。

動作試験時に利用した代表的な放電条件はプラズマ電流（ $I_p$ ）1~2MA、真空容器中心でのトロイダ

ル磁場 ( $B_T^{3520}$ ) 3~4Tである。センサー設置場所で想定される磁場強度は $B_T \sim 1\text{-}2\text{T}$ 、 $B_R \sim 200\text{-}400\text{G}$ 、 $B_z \sim 200\text{-}600\text{G}$ 程度である。実験放電におけるトロイダルコイル、ポロイダルコイルおよびプラズマ電流の波形を図9(b)に示す。磁場生成のシーケンスは、プラズマ生成約25秒前からトロイダル磁場コイルに通電を開始する。その後、放電3秒前からプラズマ着火のためのFコイル(OHコイル)に通電を開始する。 $t=3.5$ 秒からダイバータ配位を形成するためにダイバータコイルに通電を開始し、同時にプラズマの垂直位置を維持するため水平磁場コイル電流(IH)が増大している。その後、約15秒の放電終了後トロイダル磁場を下げる。

また、測定位置での磁場強度を確認するために、ピックアップコイルの積分出力を利用して印加磁場を測定し、比較のために使用した。

## 6. 2 結果

1 通電周期での各コイルの出力とその合成出力並びに参照用のピックアップコイルの積分から求めた磁場変化の波形を図9(a)に示す。トロイダル磁場の通電開始から磁場出力が見られる。この出力は通電開始直前で約120Gである。これは、測定位置に於けるトロイダルコイルのリップル成分の $B_R$ 成分の影響と考えられる。実際に、このリップル磁場の強度は、測定位置での $B_T \sim 1\text{T}$ で約120Gと見積もられ、測定結果と矛盾しない。プラズマ着火後はプラズマおよびPFコイルの作る磁場の影響を合わせて測定している。センシングコイルの出力はフィルターの時定数(~4秒)の影響で実際の磁場変化に比べて鈍っている( $V_L$ )が、ピックアップコイルの出力と合成した波形(Bps)は、参照用の積分出力から得られた波形(Bp)とほぼ一致した。ここで、ドリフトの影響を低減するため、参照用のピックアップコイルの積分出力信号はプラズマ放電開始時( $t=0$ )から積分を開始している。このためトロイダル磁場の影響を受けていない。この値はプラズマ電流のフラットトップで~220Gである。図10はプラズマ放電中の拡大図である。時間変化はプラズマ電流の他、センサーの直近にある垂直磁場コイル(4秒付近)および水平磁場コイル(14秒付近)の電流の変化に対応していることが解る。図中の○は、プラズマ電流および4種類のポロイダルコイル電流からビオサバルの式で求めたセンサー位置での磁場を表している。ここでプラズマ電流は簡易平衡コード(FBIコード)で求めた6本のフィラメント電流で近似している。両者は測定精度および計算誤差の範囲内で一致した。この結果から、本磁場センサーがトカマクの複合磁場中に於いて磁場検出器として使用可能であることを確認した。特に、測定磁場より一桁大きなトロイダル磁場が加わるような条件でも回転軸の噛り等の動作不良による測定上の問題は見られなかった。

センシングコイルに流す電流( $I_s$ )の変動による効果を調べるために、通電中に $I_s$ を変化させ、その時の出力波形を前述の放電と比較した。図11にその放電での波形を示す。 $I_s$ が0.1~0.5Aまで不規則に変化しているにも関わらず、合成出力は磁場強度と良く一致している。この結果から、測定磁場の大きさに応じて $I_s$ の値を制御することによってダイナミックレンジの広いセンサーを制作できる見通しが得られた。具体的には、高磁場ではロードセルの出力範囲内となるように $I_s$ を低下させ、磁場が弱くなるに従って $I_s$ を最小検出電磁力以上を保つように増大させる。また、ロードセルの出力を一定に保つように電流のフィードバックをかけてそのときの電流値から磁場を求めることも考えられる。

次に、速い磁場変化に対する応答を調べるため、ディスラプション時の磁場の変化を調べた。図12はベレット入射によるディスラプション実験の電流消滅時の波形で、プラズマ電流は8.1秒で約10msの時間スケールで消滅している。その時の磁場センサーの合成出力は、ほぼプラズマ電流の消滅波形およ



びトロイダルコイル電流波形と同じ波形で変化し、ディスラプション時の10ms程度の早い変化にも十分追従できることが確認された。

また、本磁場センサーの特徴である長時間放電でのドリフトがないことを調べるため、112.5分の連続測定を行った。図13(a)はその全測定期間を通じた波形を示している。図中に見られるピークは各々約1.5秒間の1放電を表わしている。各ピークは放電のプラズマ電流の値によって異なっている。そのうちの測定期間終了間付近の放電の拡大波形を図13(b)に示す。この図から、測定開始から約9.2分後に行われた放電終了後に於いてもトロイダル磁場の消滅と共に出力はほぼ0に戻っており、問題となるレベルのドリフトは見られなかった。第一の放電から第二の放電の間を詳細に見ると $\sim 0.4G/1000s$ の極わずかな変動が見られたが、これは、 $I_s$ と $V_L$ の除算回路のアンプのドリフトによるもので、値が小さいこともあって実質的な問題はない。

## 7. 考察

### 7. 1 環境条件による影響について

本磁場センサーの使用に当たって、問題となる可能性のある項目について検討した。

#### 1) 温度変化による誤差

ロードセルの抵抗線自体は2本の抵抗の差を取っているので、この2本の温度が同一であれば温度による出力は生じない。また、抵抗線の引っぱりによる弾性定数の温度による変化は、温度変化が10度以内と予想されるので無視できる。

#### 2) 複合磁場による影響

他の磁場成分が存在する場合、特にコイルの回転軸と同方向の磁場は、センシングコイルの回転軸の前後にトルクを発生する。このトルクは、回転軸の摩擦を増大させるため、複合磁場中では、測定可能な電磁力の範囲が狭まる可能性がある。トロイダル磁場によるこのトルクは $B_T \sim 2T$ とすると、約80gである。この値は、軸受けが嚙る等の機能を損なう範囲ではない。

#### 3) センシングコイルの傾きによる誤差 (測定磁場と直角方向の磁場の影響)

センシングコイルが電磁力により回転すると、従来の測定磁場と直角方向の磁場成分による力の影響を受ける。この値は測定誤差となるため、図9の5秒の時 ( $B_R \sim 400G$ ,  $B_Z \sim -500G$ ) を例として誤差を評価した。センシングコイルが $\theta$ だけ傾いた時、測定対象磁場 $B_R$ の作る力は $B_R I_s N \cos\theta$ となる。ここで $N$ はセンシングコイルの巻き数である。一方、 $B_Z$ による力は $B_Z I_s N \sin\theta$ であり、力を相殺する方向に働く(図14)。 $\theta=1^\circ$ の時(ロードセルの変形量 $\sim 0.2mm$ )は、 $B_Z$ による力は $B_R$ による力の約2.2%である。この値は無視できないが、従来のプローブでの設置誤差( $1^\circ$ 程度)を考えると制御上は支障はないと思われる。

#### 4) センシングコイルとピックアップコイルの位置による誤差

両者の中心位置は一致していない。このため合成信号に誤差が生じる可能性がある。位置のずれは、 $z$ 方向に $-3.5cm$ である。位置のずれによる測定磁場の差は $5\sim 7Gauss$ で、リップルを除いた $B_R$ に対して $2\sim 3\%$ の誤差となる。この誤差はトロイダル方向に両コイルを並べるか同じ位置に同軸で設置することで低減できる。

びトロイダルコイル電流波形と同じ波形で変化し、ディスラプション時の10ms程度の早い変化にも十分追従できることが確認された。

また、本磁場センサーの特徴である長時間放電でのドリフトがないことを調べるため、112.5分の連続測定を行った。図13(a)はその全測定期間を通じた波形を示している。図中に見られるピークは各々約1.5秒間の1放電を表わしている。各ピークは放電のプラズマ電流の値によって異なっている。そのうちの測定期間終了間付近の放電の拡大波形を図13(b)に示す。この図から、測定開始から約9.2分後に行われた放電終了後に於いてもトロイダル磁場の消滅と共に出力はほぼ0に戻っており、問題となるレベルのドリフトは見られなかった。第一の放電から第二の放電の間を詳細に見ると $\sim 0.4\text{G}/1000\text{s}$ の極わずかな変動が見られたが、これは、 $I_s$ と $V_L$ の除算回路のアンプのドリフトによるもので、値が小さいこともあって実質的な問題はない。

## 7. 考察

### 7. 1 環境条件による影響について

本磁場センサーの使用に当たって、問題となる可能性のある項目について検討した。

#### 1) 温度変化による誤差

ロードセルの抵抗線自体は2本の抵抗の差を取っているので、この2本の温度が同一であれば温度による出力は生じない。また、抵抗線の引っぱりによる弾性定数の温度による変化は、温度変化が10度以内と予想されるので無視できる。

#### 2) 複合磁場による影響

他の磁場成分が存在する場合、特にコイルの回転軸と同方向の磁場は、センシングコイルの回転軸の前後にトルクを発生する。このトルクは、回転軸の摩擦を増大させるため、複合磁場中では、測定可能な電磁力の範囲が狭まる可能性がある。トロイダル磁場によるこのトルクは $B_T \sim 2\text{T}$ とすると、約80gである。この値は、軸受けが噛む等の機能を損なう範囲ではない。

#### 3) センシングコイルの傾きによる誤差 (測定磁場と直角方向の磁場の影響)

センシングコイルが電磁力により回転すると、従来の測定磁場と直角方向の磁場成分による力の影響を受ける。この値は測定誤差となるため、図9の5秒の時 ( $B_R \sim 400\text{G}$ ,  $B_Z \sim 500\text{G}$ ) を例として誤差を評価した。センシングコイルが $\theta$ だけ傾いた時、測定対象磁場 $B_R$ の作る力は $B_R I_s N \cos\theta$ となる。ここで $N$ はセンシングコイルの巻き数である。一方、 $B_Z$ による力は $B_Z I_s N \sin\theta$ であり、力を相殺する方向に働く(図14)。 $\theta=1^\circ$ の時(ロードセルの変形量 $\sim 0.2\text{mm}$ )は、 $B_Z$ による力は $B_R$ による力の約2.2%である。この値は無視できないが、従来のプローブでの設置誤差( $1^\circ$ 程度)を考えると制御上は支障はないと思われる。

#### 4) センシングコイルとピックアップコイルの位置による誤差

両者の中心位置は一致していない。このため合成信号に誤差が生じる可能性がある。位置のずれは、 $z$ 方向に $-3.5\text{cm}$ である。位置のずれによる測定磁場の差は $5\sim 7\text{Gauss}$ で、リップルを除いた $B_R$ に対して $2\sim 3\%$ の誤差となる。この誤差はトロイダル方向に両コイルを並べるか同じ位置に同軸で設置することで低減できる。

## 7. 2 注意点及び今後の課題

今回の試験を通じて、本磁場センサーの有効性が確認されたが、同時にいくつかの問題点も明らかになった。今後の改善のためにその問題点を以下にまとめる。

- 1) 据え付ける姿勢によってロードセルのゼロレベルがずれる。場合によっては測定範囲をオーバーし、測定不能となる。このため、センサーの取り付ける角度の相違によって、オフセットが異なり個々に調整する必要がある。
- 2) コイルとロードセルの接続方法（力の伝達構造）

磁場の向きによらずに、同じように力を伝達する接続機構の開発が必要で、力点の位置が力の方向によらず同一となる機構で且つ摩擦の少ない構造を検討する必要がある。

- 3) 機械的振動の効果

センサーを真空容器に設置する場合には真空容器の振動による駆動部分、接続部分の信頼性、耐久性の確認が必要である。また、振動によるオフセットの変動について確認する必要がある。

- 4) 耐熱温度

現在の構造では、センサーの耐熱温度はロードセルの使用温度範囲で決定されており、この値は0～50℃である。ベーキングを伴う真空容器に直接取り付ける場合を想定し、抵抗線の接続方法等の構造の高温仕様化が必要である。

- 5) センサーの小型化

制御に使用するためにはプラズマの周辺に複数のセンサーを取り付ける必要がある。また、同一位置で2方向のポロイダル磁場成分を測定することも要求される。このため、センサー自体を小型化することが不可欠である。

- 6) 合成回路の調整の簡素化、簡単な調整方法の確立

この試作品では、図4で示したように3種類のゲインおよびオフセット調整が必要で、そのため調整に時間を要する。前述の2)で示した件や初期には調整後の経時変動のチェックのための再調整等の必要性も考えられるため、簡単な調整方法を確立することが、実用に当たって不可欠である。

## 8. まとめ

定常磁場の測定用センサーとして電流が磁場中で受ける力を測定するタイプのセンサーを試作し、実際のプラズマ放電でその性能を確認した。本タイプは原理的に長時間測定でのドリフトがなく、定常炉での制御用磁場測定で使用できる可能性がある。信号はDCを含む低周波成分を電磁力測定から、センシングコイルの固有振動数以上のMHD等による変動成分の測定には従来型のピックアップコイルの積分信号から求め、両者を合成することで、DCから高周波領域まで連続的な測定を行うものである。

プラズマ放電による測定結果から、本センサーは約2時間の長時間測定に於いてもドリフトがなく、定常磁場測定に有効であることが確認された。また、ディスラプションのような10ms程度的高速変動にも追従できる。さらに、センシングコイルに流す電流を制御することで、広範囲の磁場測定が可能であることを確認した。

今回の試験を通じて、力の伝達構造、センサーの小型化や簡単な調整方法の確立等いくつかの課題があるが、定常磁場測定用のセンサーとして使用可能であるという見通しを得ることができた。

## 7. 2 注意点及び今後の課題

今回の試験を通じて、本磁場センサーの有効性が確認されたが、同時にいくつかの問題点も明らかになった。今後の改善のためにその問題点を以下にまとめる。

- 1) 据え付ける姿勢によってロードセルのゼロレベルがずれる。場合によっては測定範囲をオーバーし、測定不能となる。このため、センサーの取り付ける角度の相違によって、オフセットが異なり個々に調整する必要がある。
- 2) コイルとロードセルの接続方法（力の伝達構造）  
磁場の向きによらずに、同じように力を伝達する接続機構の開発が必要で、力点の位置が力の方向によらず同一となる機構で且つ摩擦の少ない構造を検討する必要がある。
- 3) 機械的振動の効果  
センサーを真空容器に設置する場合には真空容器の振動による駆動部分、接続部分の信頼性、耐久性の確認が必要である。また、振動によるオフセットの変動について確認する必要がある。
- 4) 耐熱温度  
現在の構造では、センサーの耐熱温度はロードセルの使用温度範囲で決定されており、この値は0～50℃である。ベーキングを伴う真空容器に直接取り付ける場合を想定し、抵抗線の接続方法等の構造の高温仕様化が必要である。
- 5) センサーの小型化  
制御に使用するためにはプラズマの周辺に複数のセンサーを取り付ける必要がある。また、同一位置で2方向のポロイダル磁場成分を測定することも要求される。このため、センサー自体を小型化することが不可欠である。
- 6) 合成回路の調整の簡素化、簡単な調整方法の確立  
この試作品では、図4で示したように3種類のゲインおよびオフセット調整が必要で、そのため調整に時間を要する。前述の2)で示した件や初期には調整後の経時変動のチェックのための再調整等の必要性も考えられるため、簡単な調整方法を確立することが、実用に当たって不可欠である。

## 8. まとめ

定常磁場の測定用センサーとして電流が磁場中で受ける力を測定するタイプのセンサーを試作し、実際のプラズマ放電でその性能を確認した。本タイプは原理的に長時間測定でのドリフトがなく、定常炉での制御用磁場測定で使用できる可能性がある。信号はDCを含む低周波成分を電磁力測定から、センシングコイルの固有振動数以上のMHD等による変動成分の測定には従来型のピックアップコイルの積分信号から求め、両者を合成することで、DCから高周波領域まで連続的な測定を行うものである。

プラズマ放電による測定結果から、本センサーは約2時間の長時間測定に於いてもドリフトがなく、定常磁場測定に有効であることが確認された。また、ディスラプションのような10ms程度の高速変動にも追従できる。さらに、センシングコイルに流す電流を制御することで、広範囲の磁場測定が可能であることを確認した。

今回の試験を通じて、力の伝達構造、センサーの小型化や簡単な調整方法の確立等いくつかの課題があるが、定常磁場測定用のセンサーとして使用可能であるという見通しを得ることができた。

## 謝 辞

本論文をまとめるに当り、測定精度等の検討で有意義な助言を与えて下さりまた測定に際して多大な御助力を頂いた(株)日立製作所日立研究所の原 重充氏、阿部充志氏、(株)日立製作所大みか工場の森山国夫氏に感謝の意を表します。また、測定場所の提供に便宜を図って頂いた日本原子力研究所核融合装置試験部JT-60第一試験室の栗原研一氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] S. Itoh, N. Hirai, Y. Nakamura et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1990 Vol.1 p.733 (Proc. 13th Int. Conf. Washington D.C., 1990), paper IAEA-CN-53/E-II-6
- [2] ITER Documentation Series, No.33 "ITER Diagnostics", IAEA vienna 1991, p.35.
- [3] 原 重充、阿部 充志、森山 国夫：プラズマ・核融合学会第12回秋季講演会予講集 1995年 P.85.

## 謝 辞

本論文をまとめるに当り、測定精度等の検討で有意義な助言を与えて下さりまた測定に際して多大な御助力を頂いた(株)日立製作所日立研究所の原 重充氏、阿部充志氏、(株)日立製作所大みか工場の森山国夫氏に感謝の意を表します。また、測定場所の提供に便宜を図って頂いた日本原子力研究所核融合装置試験部JT-60第一試験室の栗原研一氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] S. Itoh, N. Hirai, Y. Nakamura et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1990 Vol.1 p.733 (Proc. 13th Int. Conf. Washington D.C., 1990), paper IAEA-CN-53/E-II-6
- [2] ITER Documentation Series, No.33 "ITER Diagnostics", IAEA vienna 1991, p.35.
- [3] 原 重充、阿部 充志、森山 国夫：プラズマ・核融合学会第12回秋季講演会予講集 1995年 P.85.

表1 センサーの主要諸元

センシングコイル	有効面積	~9 cm <sup>2</sup>
	ターン数	220 ターン
	固有振動数	4 Hz
ロードセル	定格	20 g
	応答周波数	210 Hz
	温度補償範囲	0~50 °C
トランスミッタ	定格容量	±20 g
	定格変位	±0.4 mm
	ブリッジ電圧	DC10 V ±3%
	出力	±10V
	周波数応答	10 Hz
	非直線性	0.01% (FS)
電流源	容量	242 W
	電流	0.3 A
ピックアップコイル	ターン数	260 ターン
	寸法	13 <sup>H</sup> x 35 <sup>W</sup> x 40 <sup>L</sup> mm
	カットオフ周波数	~280 kHz <sup>1)</sup>

1) : 接続ケーブルの静電容量 C~1.2x10<sup>-9</sup> (F)とした。

表2 磁場校正装置の主要性能

外形寸法	2000L x 1200W x 1200H
発生磁場 (定常)	0~600 Gauss (中心)
コイル電流	0~1000 A
構成	<p>磁場発生コイル</p> <p>中心</p> <p>内径 580mm</p> <p>500 mm</p>



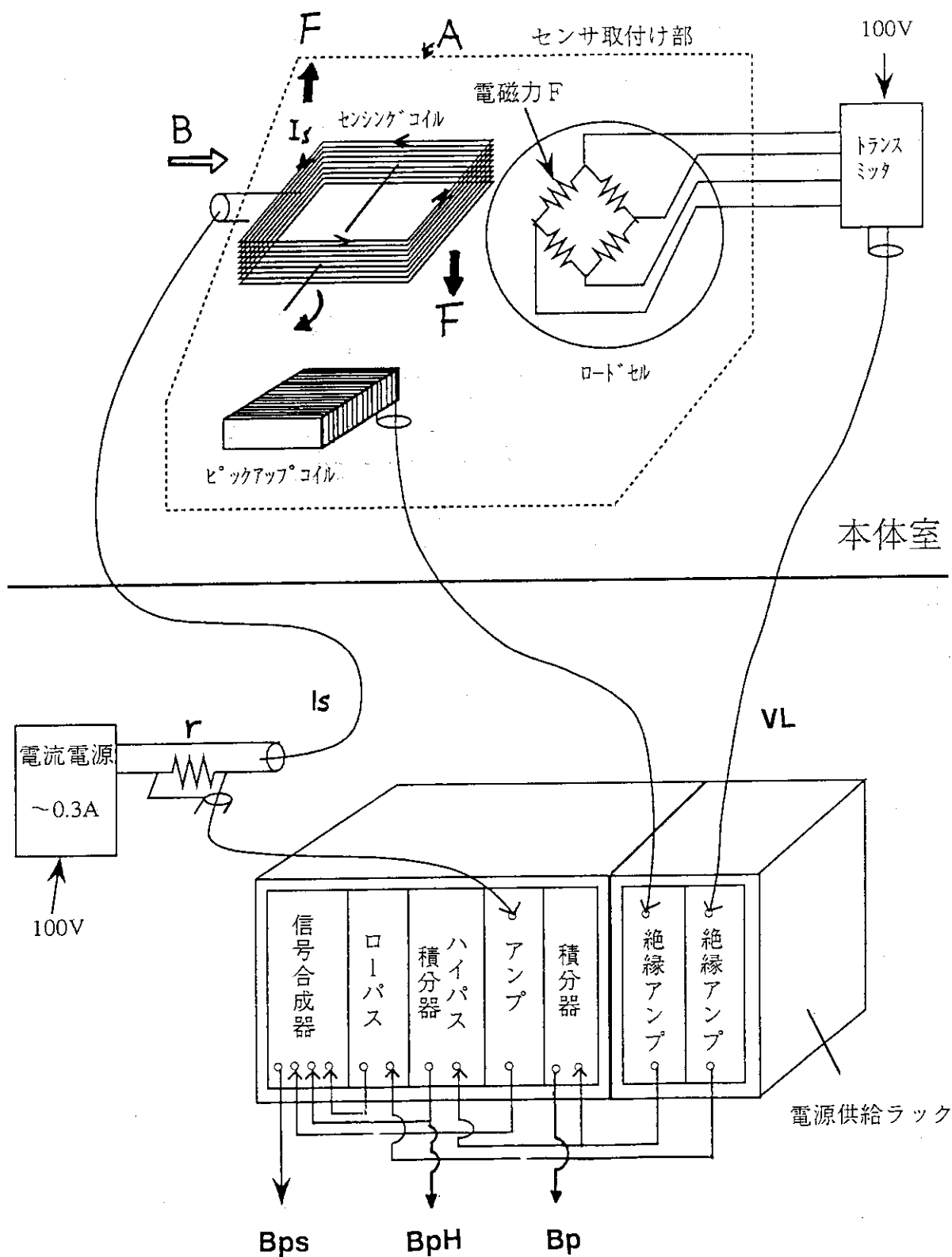
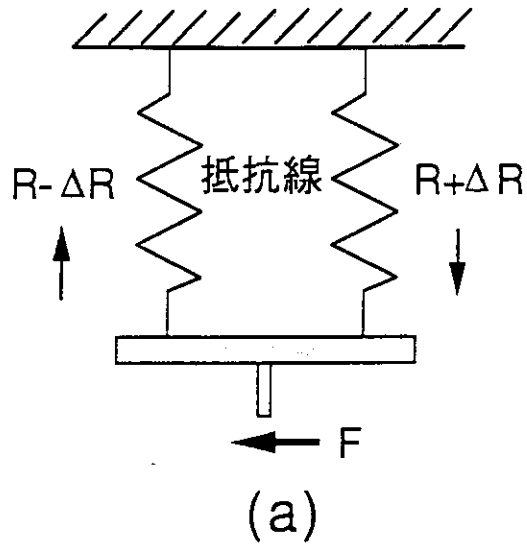
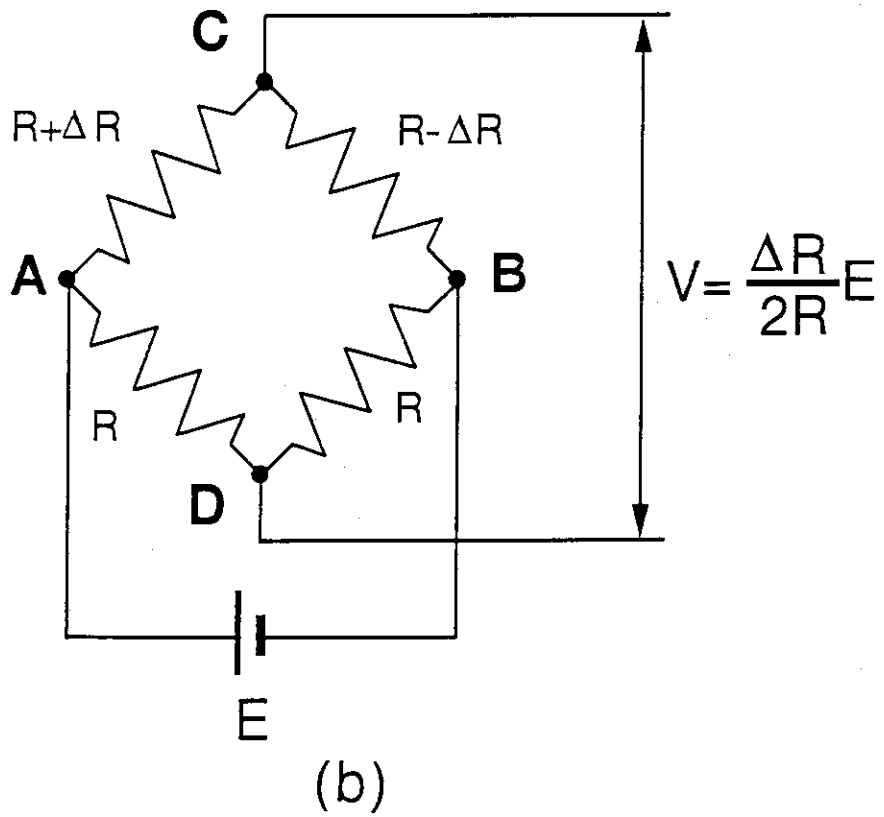


図1 機器構成図



(a) 力による抵抗変化の原理



(b) ブリッジ回路による出力測定の実理

図2 ロードセルの測定原理

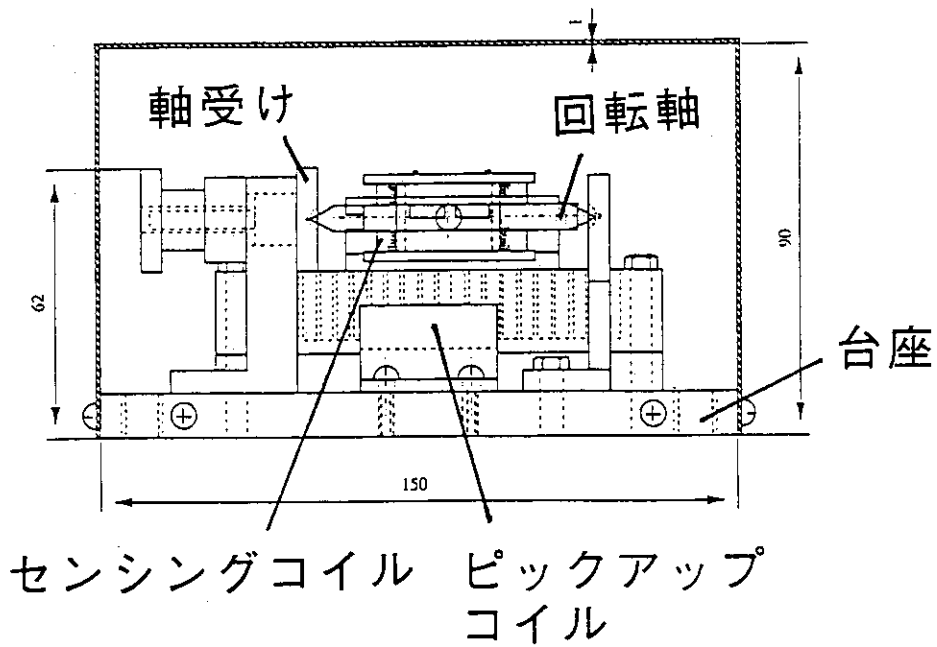
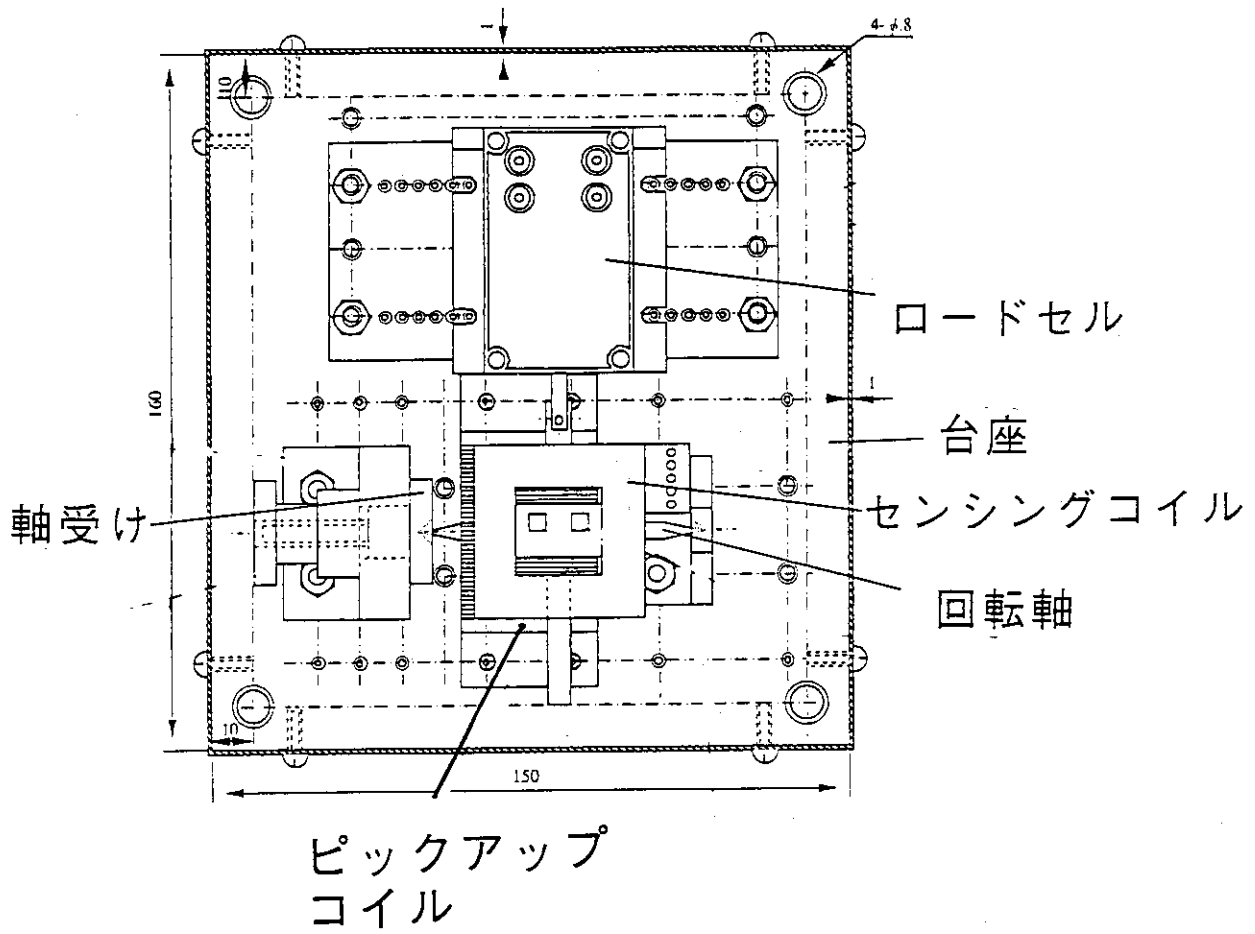


図3 定常磁場センサー組み立て図

センシングコイルの下にピックアップコイルを設置

信号処理ブロック図

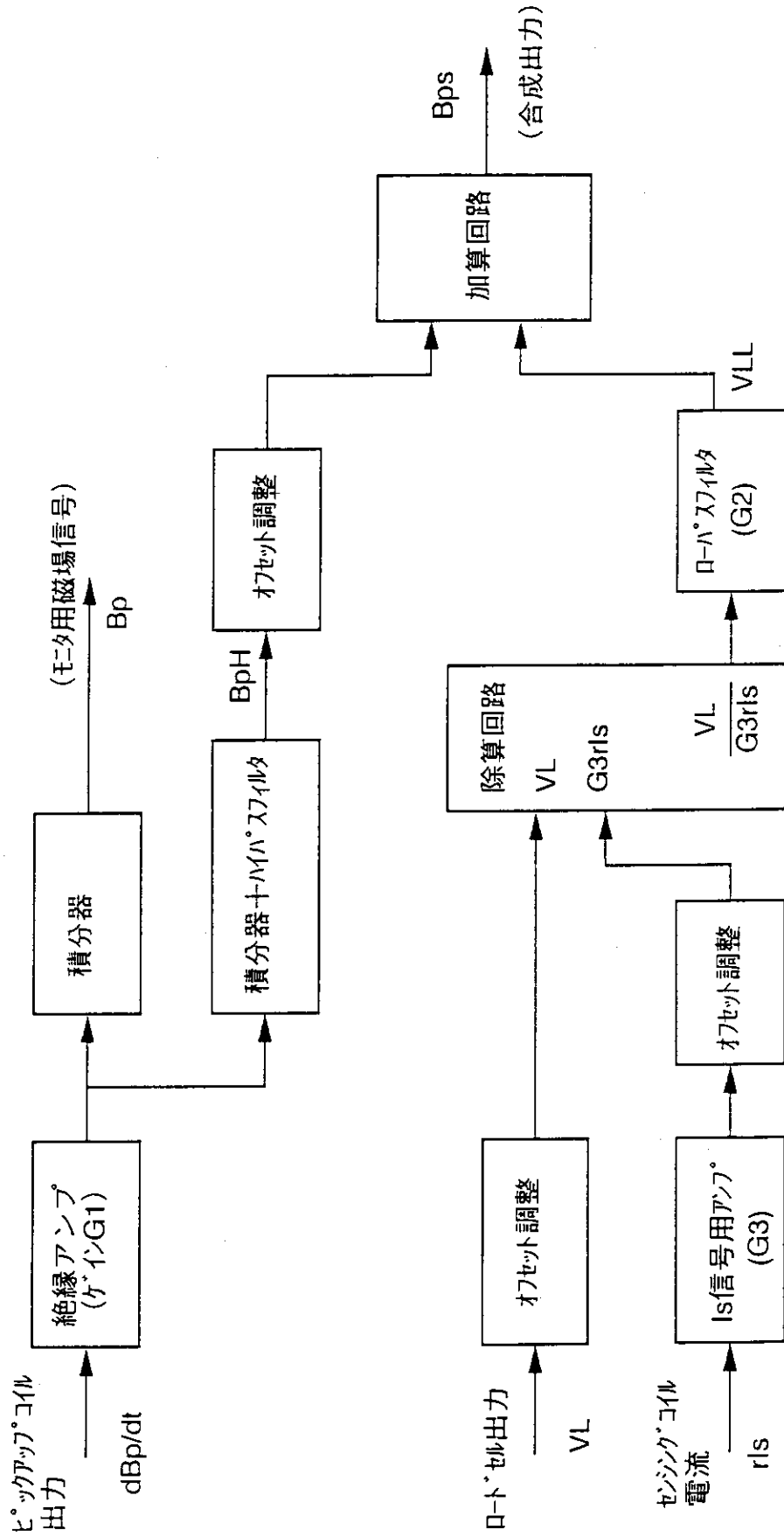


図4 信号処理ブロック図

各信号はそれぞれオフセット調整を行い、磁場のないときに出力が0となるように調整する。

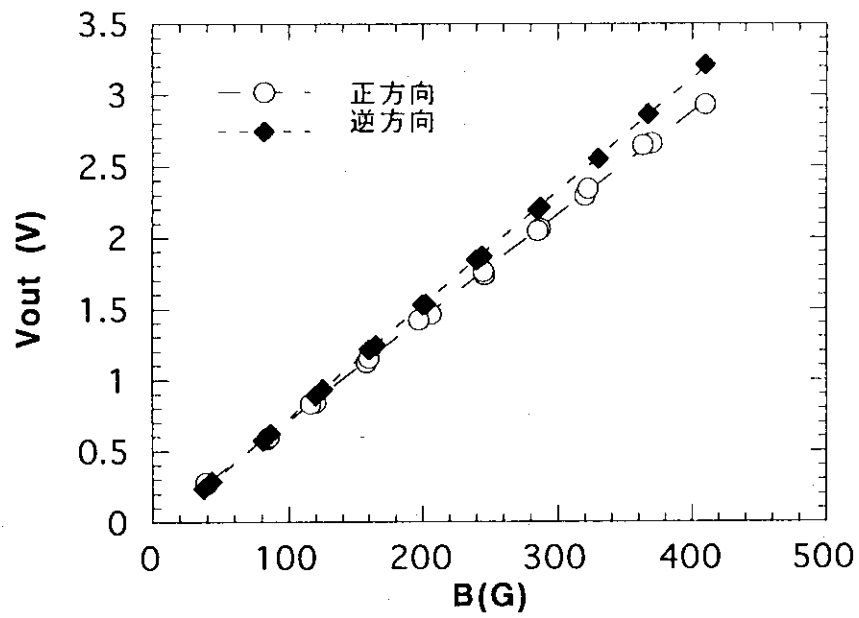


図5 定常出力の磁場依存性

出力のリニアリティを確認。磁場の向きによって傾きが異なる。

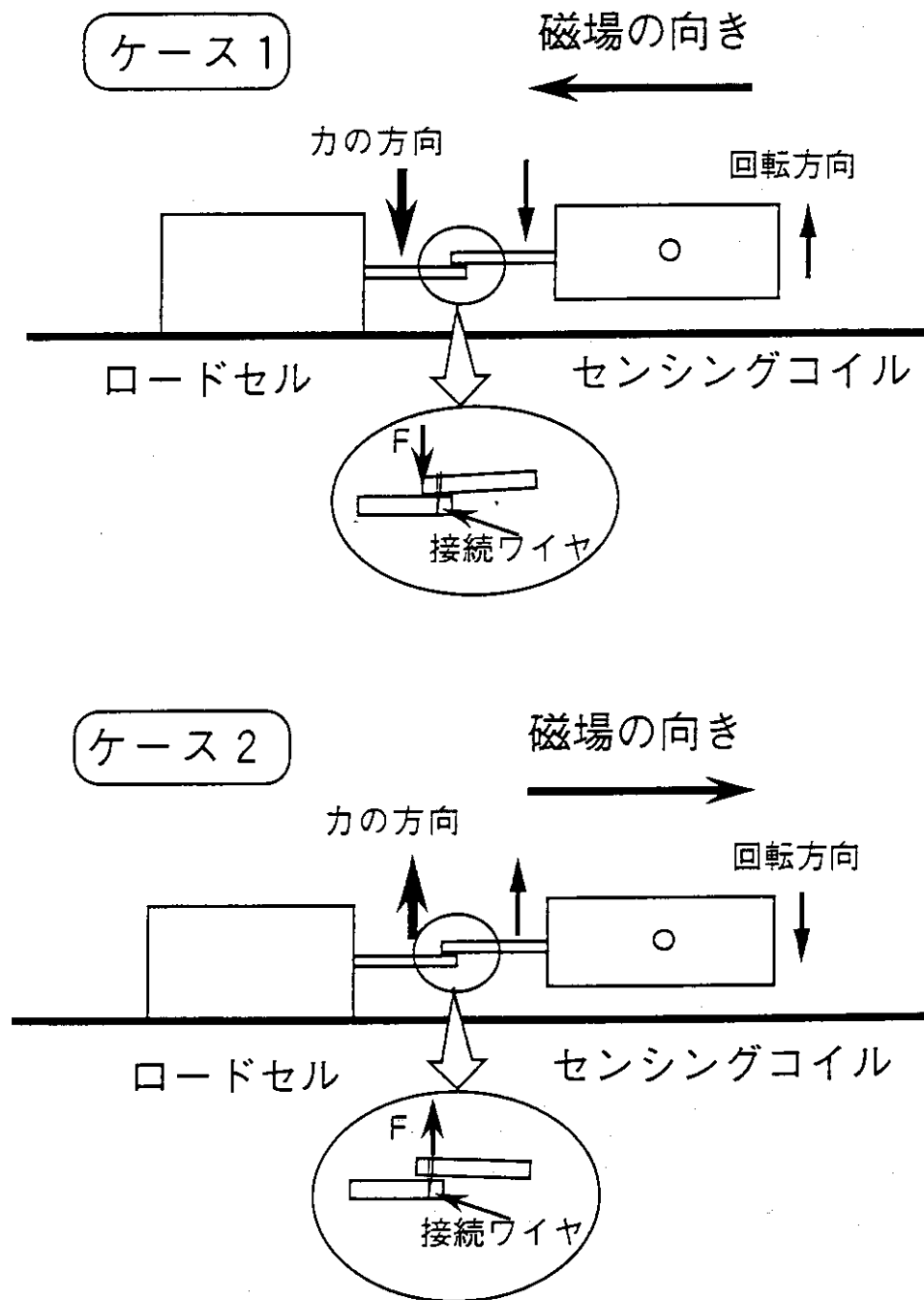


図6 磁場の向きによる力の伝達方向  
 センシングコイルとロードセルの力の伝達は、磁場の向きによって異なる。

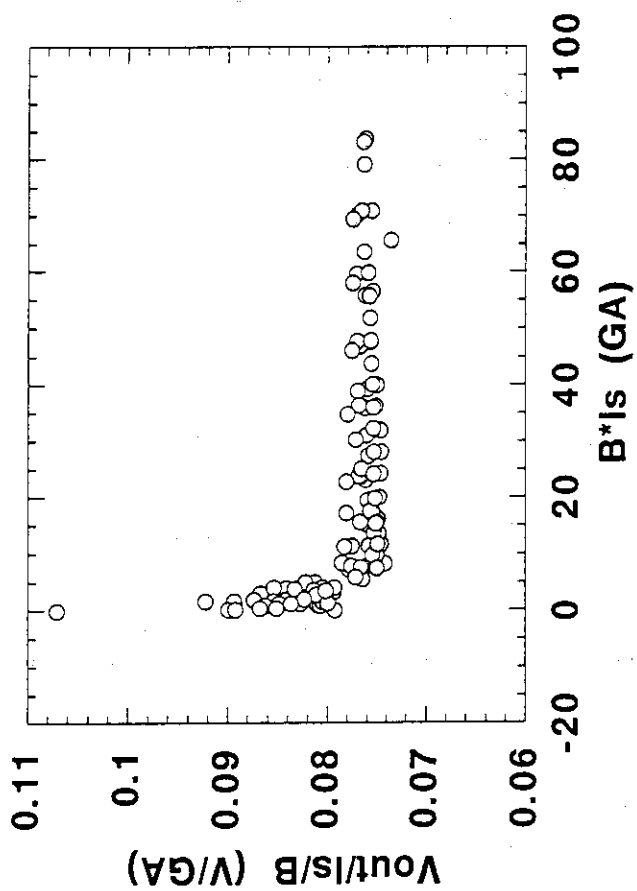


図7 磁場一出力変換係数の電磁力による依存性

磁場一出力変換変換係数の  $B \cdot I_s$  に関する依存性。電磁力が小さくなると比例関係が崩れてくる。測定には、 $B \cdot I_s > 10$  (G·A) で得られる以上の電磁力が必要である。

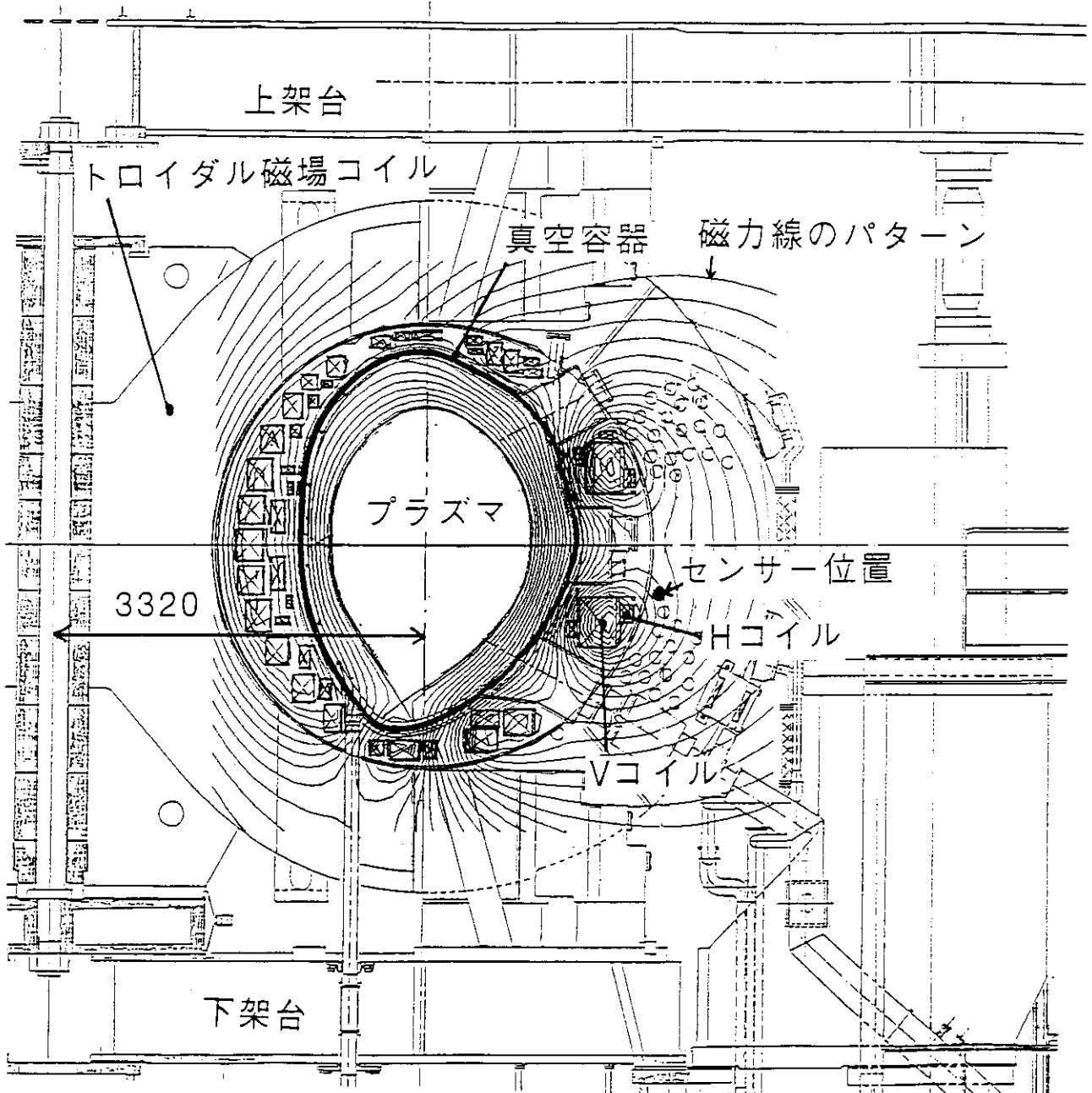


図8 センサーの据え付け位置

トロイダル磁場コイルの内側 ( $R=5215\text{mm}$ ) でトラス水平図  $Z=-460\text{mm}$  の位置 (●の位置)。センサーは  $B_R$  を測定する方向に配置。典型的な放電における磁場のパターンから測定位置では  $B_R < B_z$  となる。垂直 (Vコイル) および水平磁場コイル (Hコイル) に接近しているで、これらの電流変化の影響が大きい。



S25359.DAT

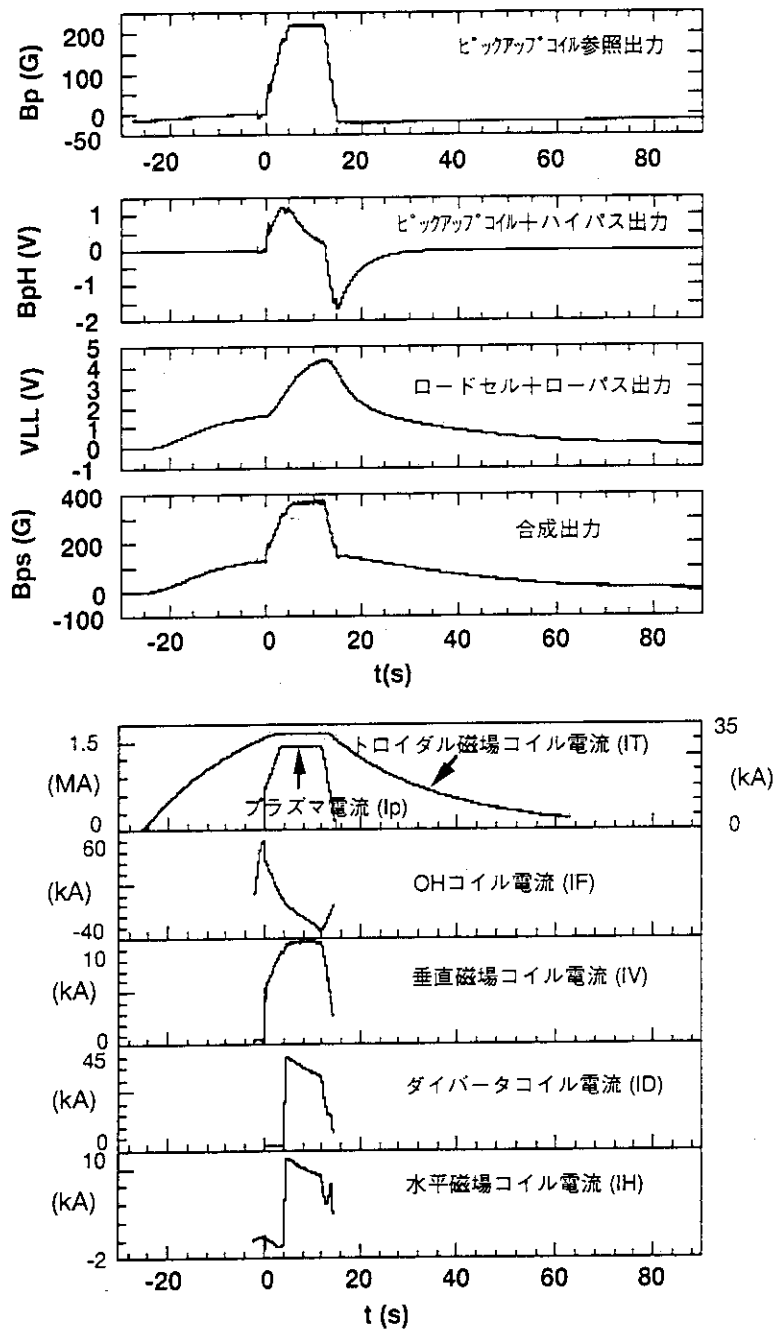


図9 プラズマ放電における磁場測定結果

- (a) 一番上の欄は測定位置での磁場を従来の磁場変化の積分より求めたもの ( $B_p$ ) で、 $t=0$ 秒より積分を開始している。2番目の波形からロードセルの低周波成分 ( $V_{LL}$ )、ピックアップコイルの高周波成分 ( $B_{pH}$ ) 及びその合成出力 ( $B_{ps}$ ) を示す。ロードセルおよび合成出力には、トロイダルコイルに通電開始と同時にリップル成分と思われる出力が見られる。
- (b) プラズマの放電波形。放電開始25秒前からトロイダル磁場コイルに通電 ( $I_T$ ) 開始する。プラズマ着火のため3秒からOHコイル電流を立ち上げ ( $I_F$ )、プラズマ着火後 $I_p$ に比例して垂直、水平位置制御のためVおよびHコイルの電流を制御する。さらに、 $t=3.5$ 秒よりダイバータコイルに通電してダイバータ配位を形成する。

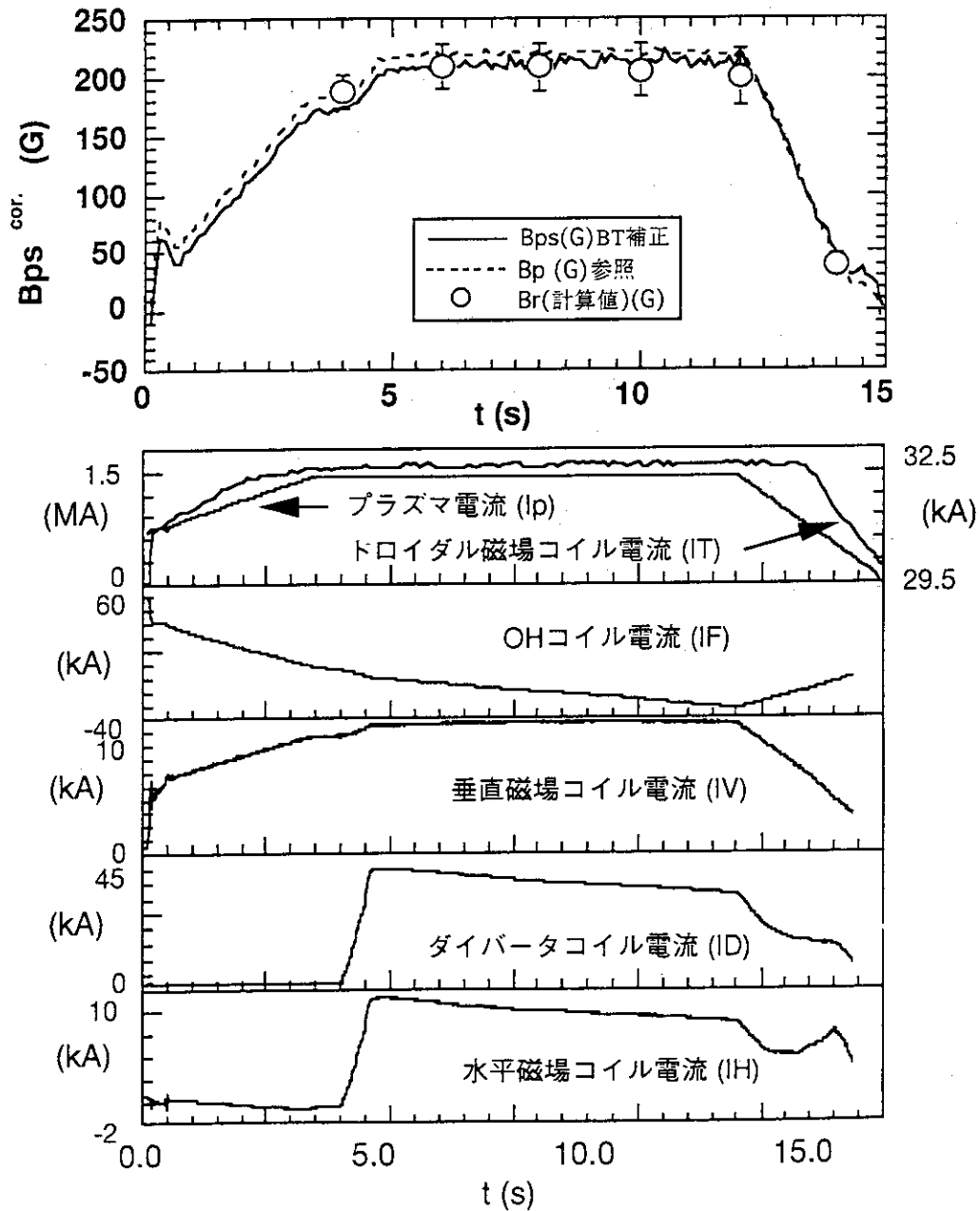


図10 プラズマ放電における磁場測定結果の拡大図

合成信号 ( $B_{ps}$ ) の拡大図でトロイダル磁場の影響を差し引いた値を示す。図の○は、ビオサーバル法により求めた測定位置での磁場を示す。また、点線は、ピックアップコイルで測定したセンサー位置での磁場強度を示す。

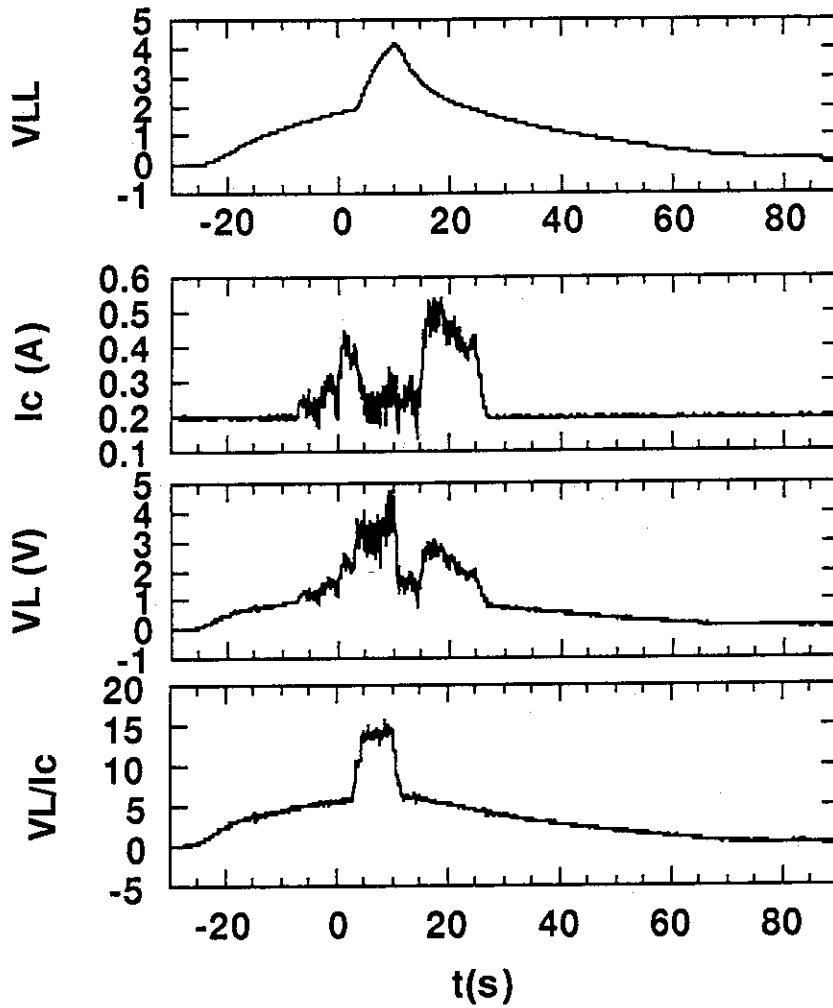


図11 センシングコイル電流 ( $I_s$ ) の変化による出力

通電中に変化させた  $I_s$  の波形とその時のロードセルの出力 ( $V_L$ )。ローパスフィルターの前の徐算信号 ( $V_L/I_s$ ) は  $I_s$  によらず外部磁場を反映している。

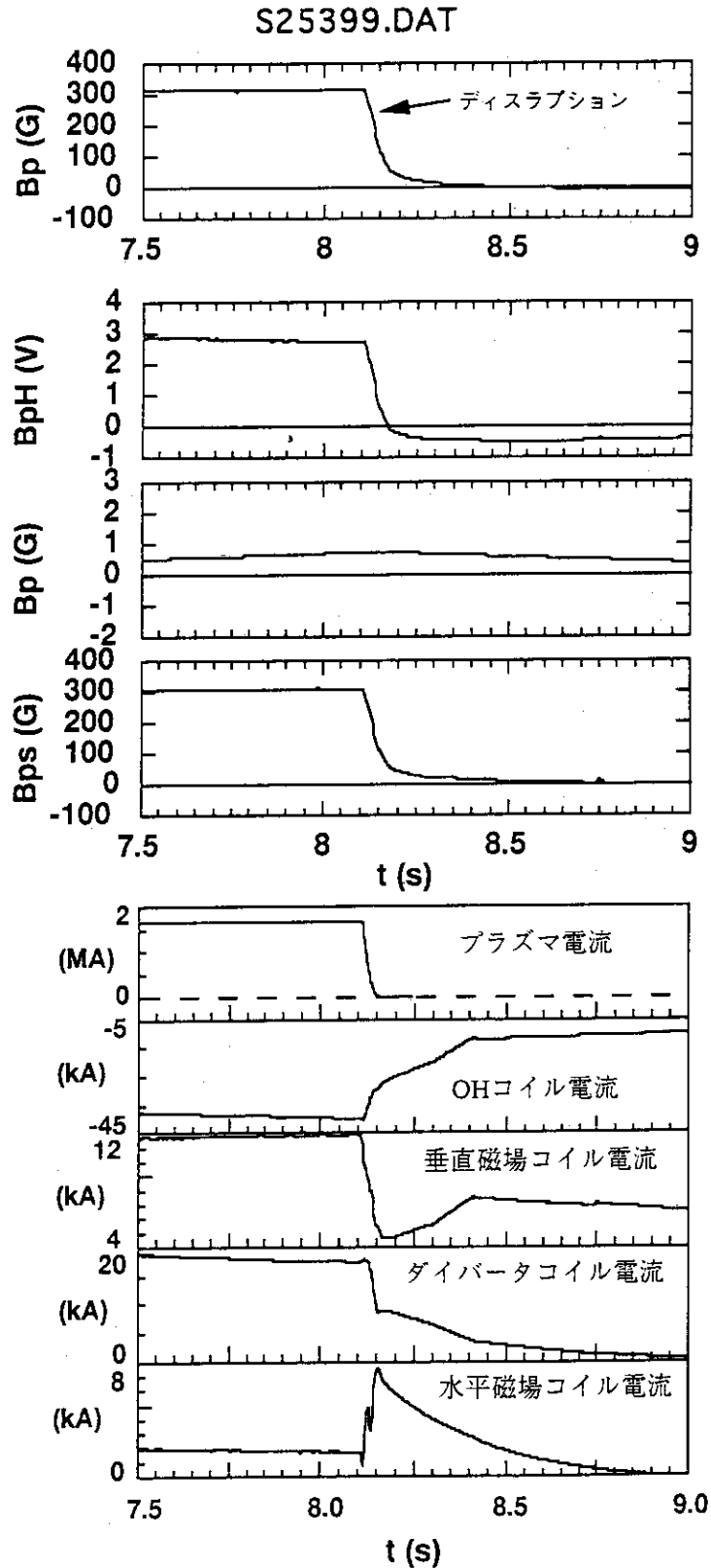


図12 ディスラプション時の応答特性

プラズマは約10msで消滅。測定磁場はプラズマ電流 ( $I_p$ ) とポロイダルコイル電流の波形に追随して変化。

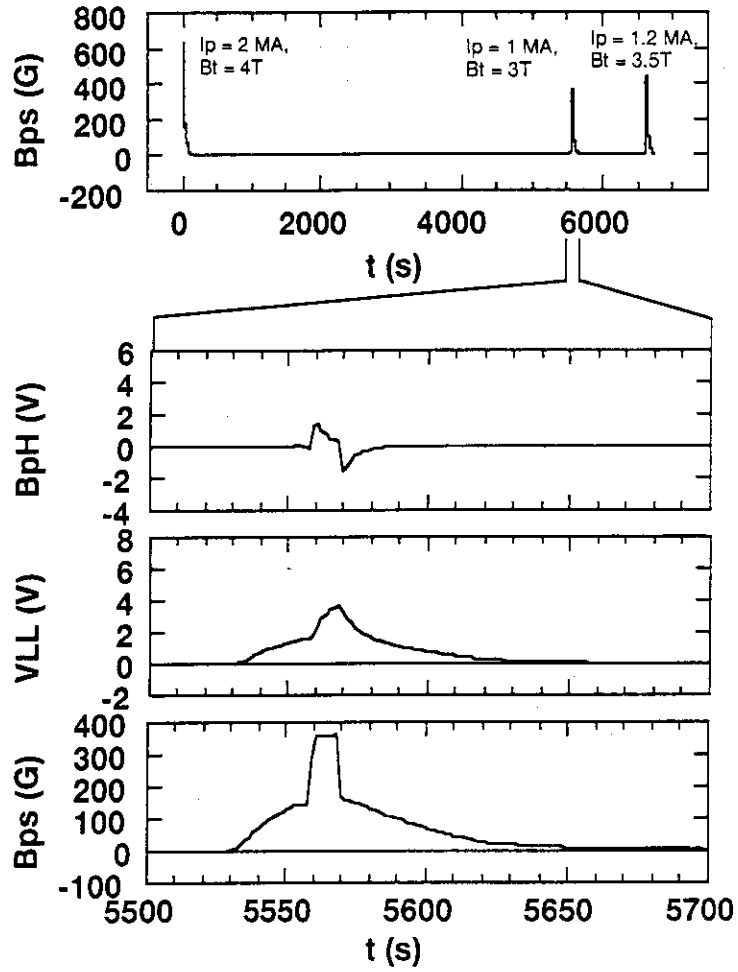


図13 長時間測定波形

112.5分の測定波形。長時間測定後でも放電終了後に出力が0になっており、ドリフトがないことを確認した。

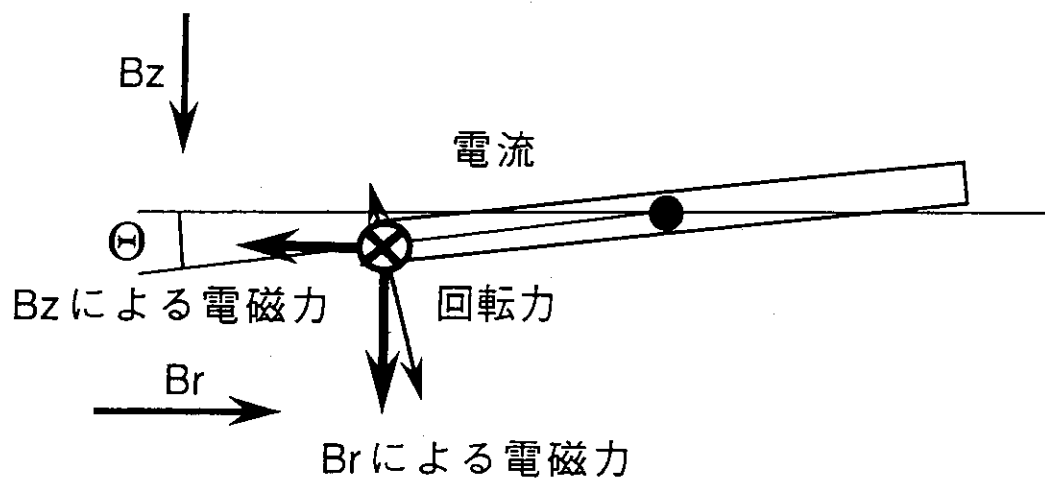


図14 コイルの傾きにより受ける力

コイルが回転することにより、測定対象の磁場成分 ( $B_r$ ) と垂直な磁場 ( $B_z$ ) の影響を受ける。