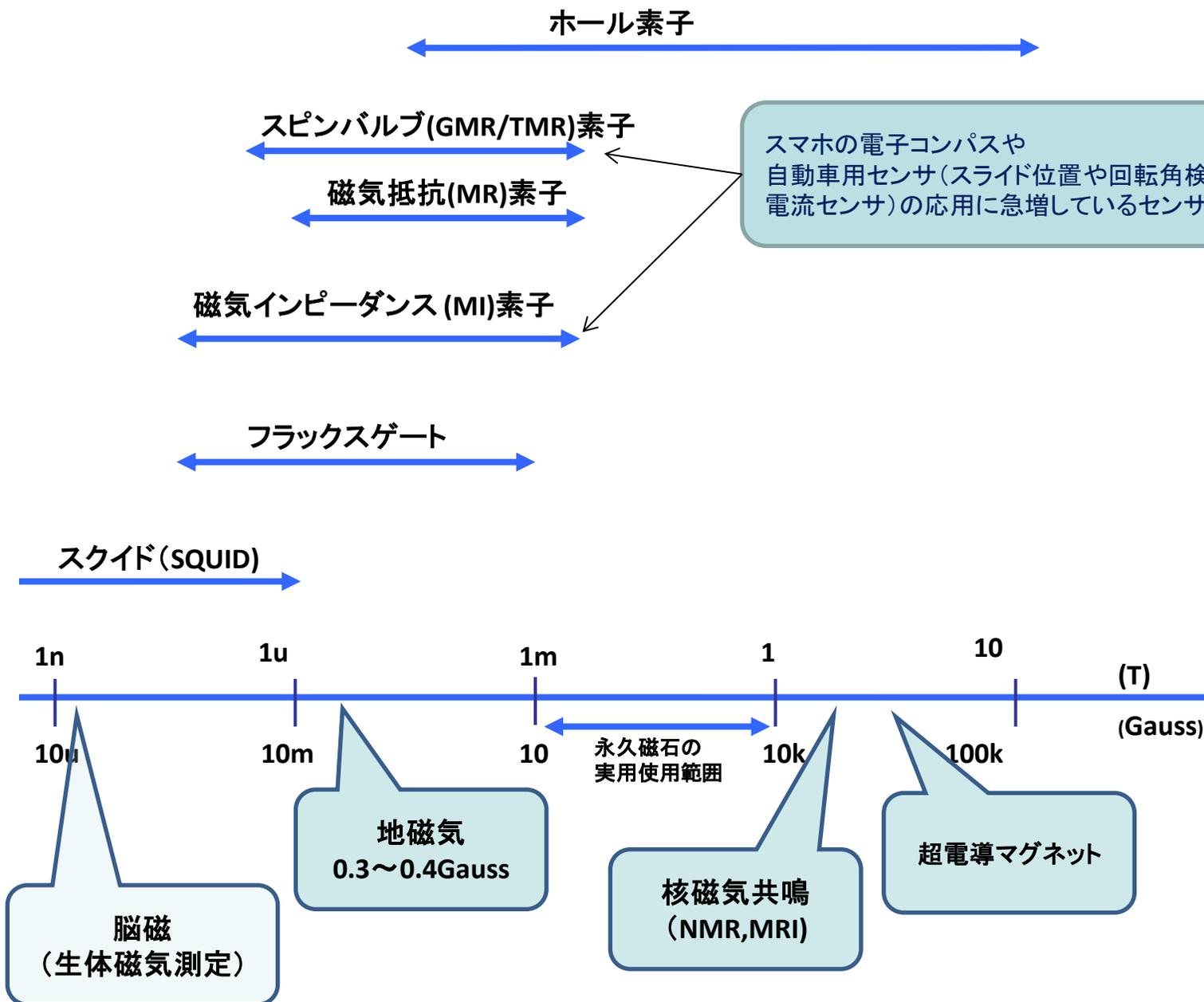


名古屋市工業技術研究所 「磁気エネルギー利用技術に関連した 磁気計測とその応用」

高速応答ガウスメータと交流磁界計測への応用

有限会社パワーテック



求められる磁気測定器の特性

- 1) 磁界測定範囲(広いダイナミックレンジ)
- 2) 磁界の分布測定(狭い空間での磁束密度測定)
- 3) 磁気ベクトルの検出正確さ(磁界の発生方向)
- 4) 静磁場から交流磁場の測定
- 5) 値の再現性とローノイズ化
- 6) 故障しにくいシンプルな構造

実用的な磁気センサーの種類

分類	種類	測定範囲	温度係数	周波数特性	特徴	感度	用途
MR素子	強磁性体型AMR	1 μ ~10mT (10m~100Gauss)	-0.35%/°C	数MHz	感度が高い 極性判別が不可	10mT程度で3%程度の抵抗変化	磁気スイッチ 磁気コンパス
	半導体型MR(InSb)	0.05m~4T (0.5~40kGauss)	-2%/°C	数MHz	ダイナミックレンジ広い 極性判別が不可	0.4T以下200%程度/0.4T超え600%程度	磁気スイッチ
ホール素子	GaAs(ガリウム砒素)	0.05m~10T (0.5~100kGauss)	-0.06%/°C	数MHz	ダイナミックレンジ広い 極性判別が可	60mV at Ib=1mA B=50mT	磁気スイッチ 磁気計測
	InSb(インジウムアンチモン)	0.05m~3T (0.5~30kGauss)	-2%/°C	数十KHz		60mV at Ib=1mA B=50mT	磁気スイッチ 磁気計測
	InAs(インジウム砒素)	0.05m~3T (0.5~30kGauss)	-0.2%/°C	数十KHz		30mV at Ib=5mA B=50mT	磁気スイッチ 磁気計測

強磁性体型MR素子

MR効果は

$$R_m = R_0 \cdot \Delta R \cdot \sin^2 \theta$$

R_0 (無磁界時の抵抗値) ΔR (磁界印加時の抵抗変化量)

θ (磁界印加角度)

で表せます。

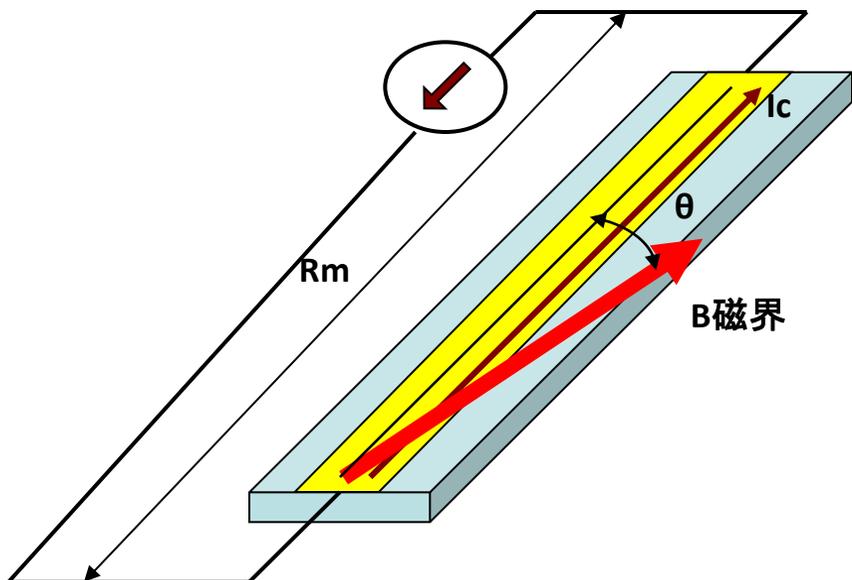


図2《磁界強度と抵抗値変化率》

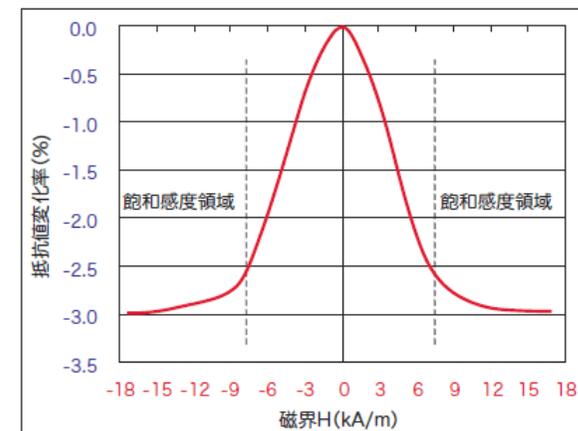


図2のように無磁界中から抵抗値変化は最大で約3%となります。抵抗値変化量(ΔR)が、近似的に

$$\Delta R \propto H^2 \quad \dots (1)$$

の式で表すことができる領域外を飽和感度領域と呼び、その領域において、ある磁界強度以上になると3%の抵抗値変化は変わりません。また $f(H) = f(H)$ ですから、

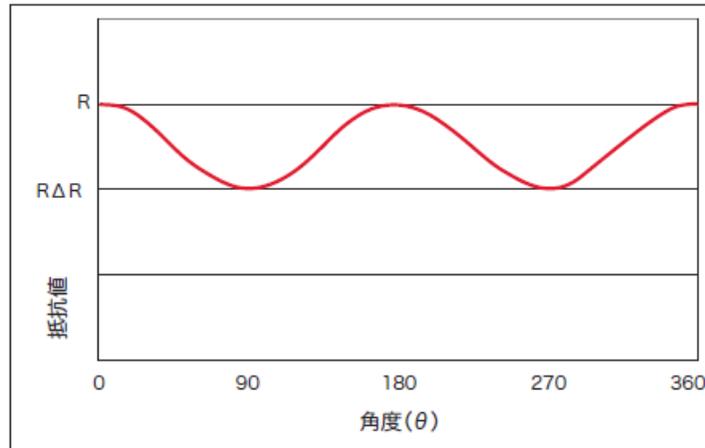
N極からS極の方向、S極からN極の方向の判別はできません。

*②

強磁性体型MR素子とはSiやガラス基板上にNiFeやNiCo等の強磁性材料を主成分とする薄膜で構成されています。

薄膜の特定方向の面内磁場を受ける事により抵抗値が変化します。

図4《磁界方向と抵抗値》



抵抗値変化量(ΔR)は、電流方向と磁界の方向が垂直(θ=90°、270°)の時に最大となり、電流方向と磁界の方向が平行(θ=0°、180°)の時に最小となります。抵抗値は、電流方向と磁界方向の角度成分として変化します。

$$R = R_0 \Delta R \sin^2 \theta \quad \dots(2)$$

の式で表すことができます。

R₀ : 無磁界中の薄膜強磁性金属の抵抗値

ΔR : 抵抗値変化量

θ : 磁界方向を示す角度

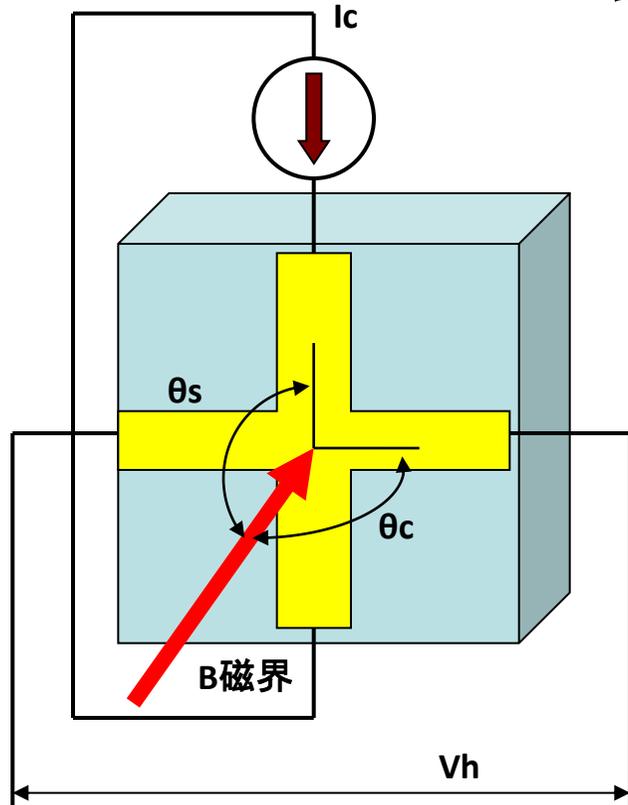
飽和感度領域以上であれば、ΔRは定数になり、磁界の強弱には影響しないこととなります。

* ②

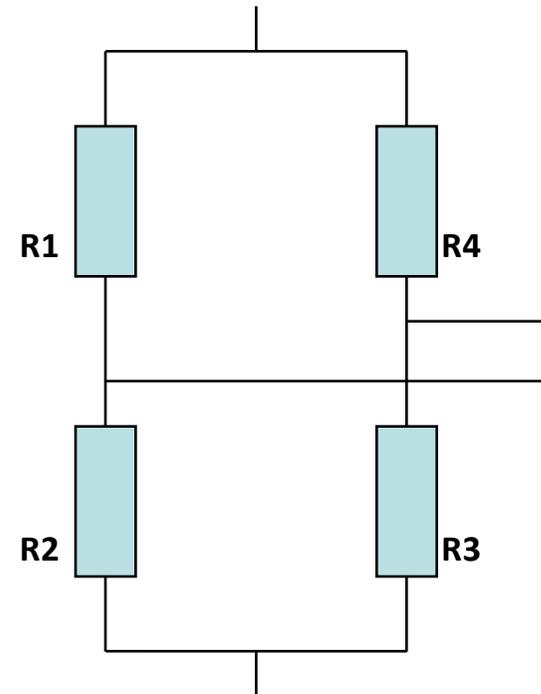
ホール素子

ホール効果は
 $V_h = k \cdot I_c \cdot B \cdot \cos\theta$
 で表せます。

k は積感度(磁界に対する変化率)



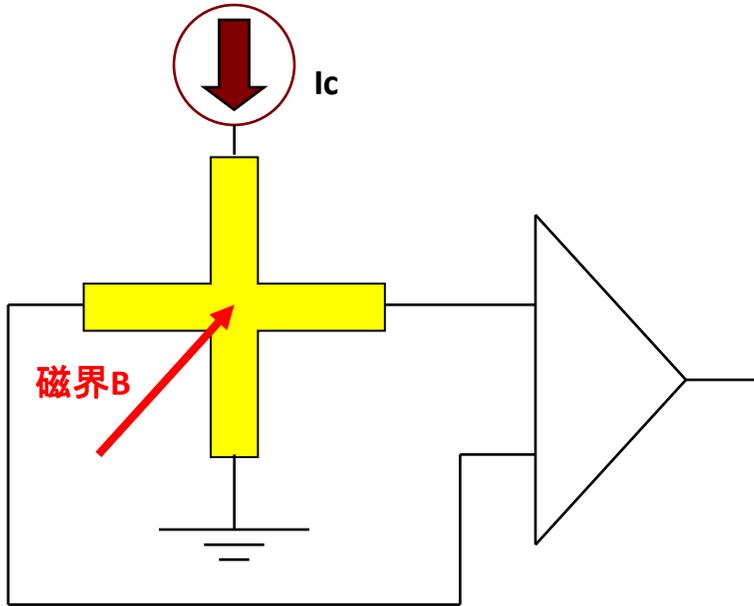
ホール素子の電気的な等価回路は
 抵抗ブリッジと成る。



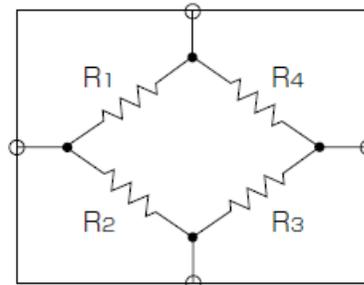
ホール素子とは GaAs, InSb, InAs等の薄膜パターンです。
 十文字パターンに対し駆動電流 I_c を通電し 基板に対して垂直方向の磁界
 を印加する事により十文字パターンの反対方向に起電圧が発生する現象です。
 駆動電流と磁界の強度に比例して出力は増加します。

ホール効果(HallEffect)は
 1879年 米 物理学者 Edwin Hall

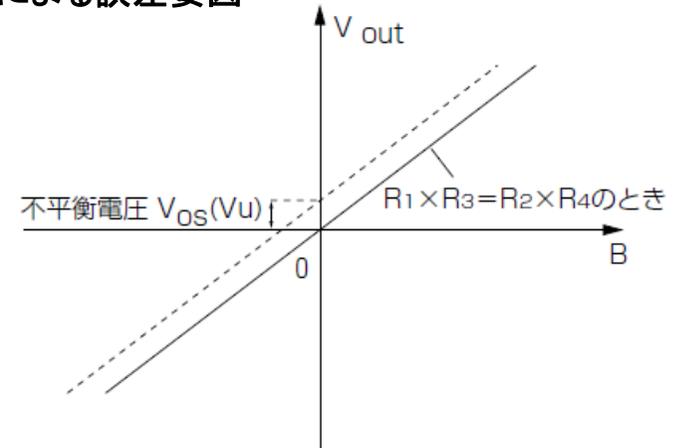
ホール素子とアンプの一般的な回路構成



不平衡電圧と温度ドリフトによる誤差要因



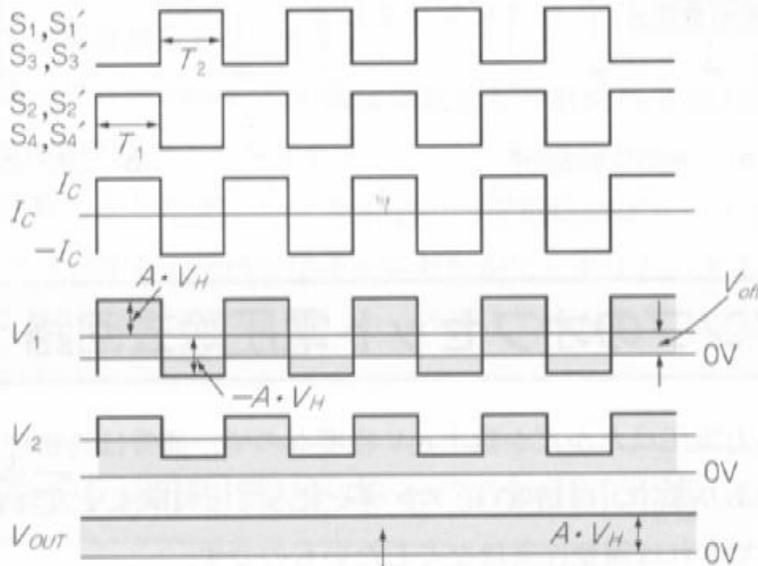
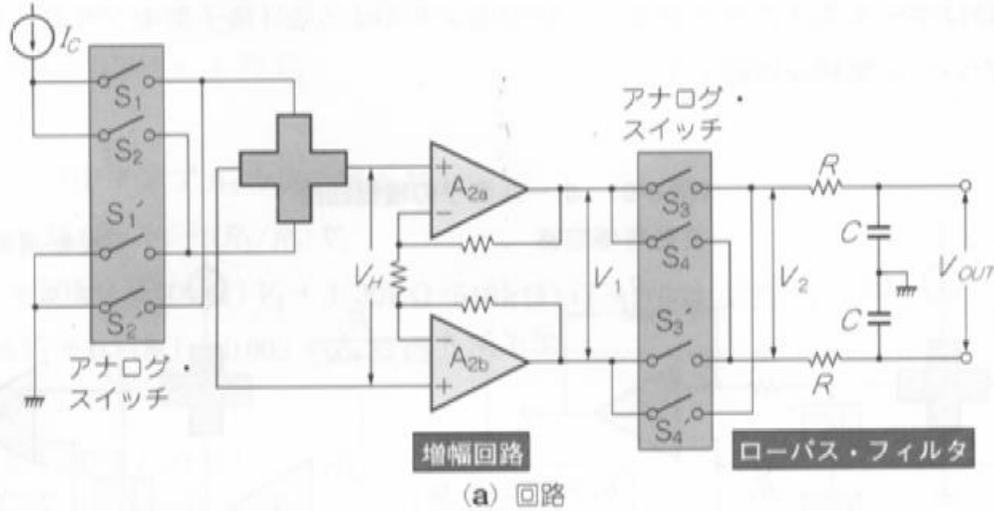
(Fig.1) ホール素子等価回路
Equivalent Circuit



(Fig.2) 出力電圧—磁束密度
Vout-B

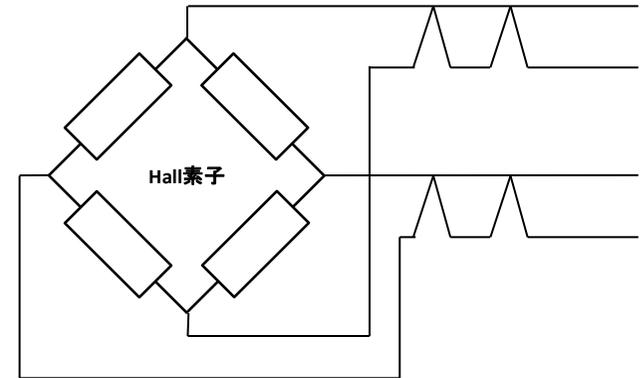
交流駆動方式による改善方法を紹介

〈図8-10〉 オフセット電圧の除去回路

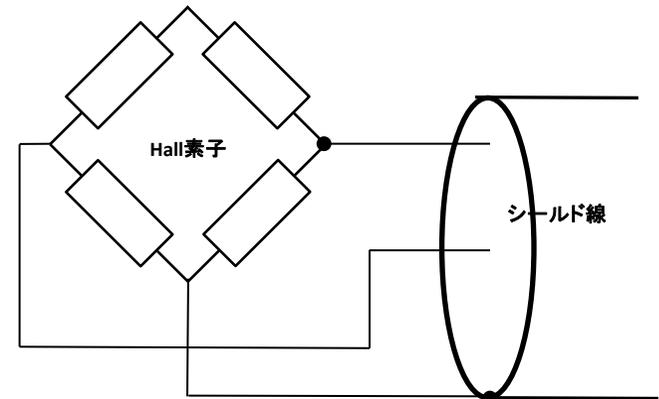


(b) 各部の波形

標準的なセンサ配線



ADSの3線式センサ配線



*③

ガウスメーターとしての構成図(HGM-3000P)



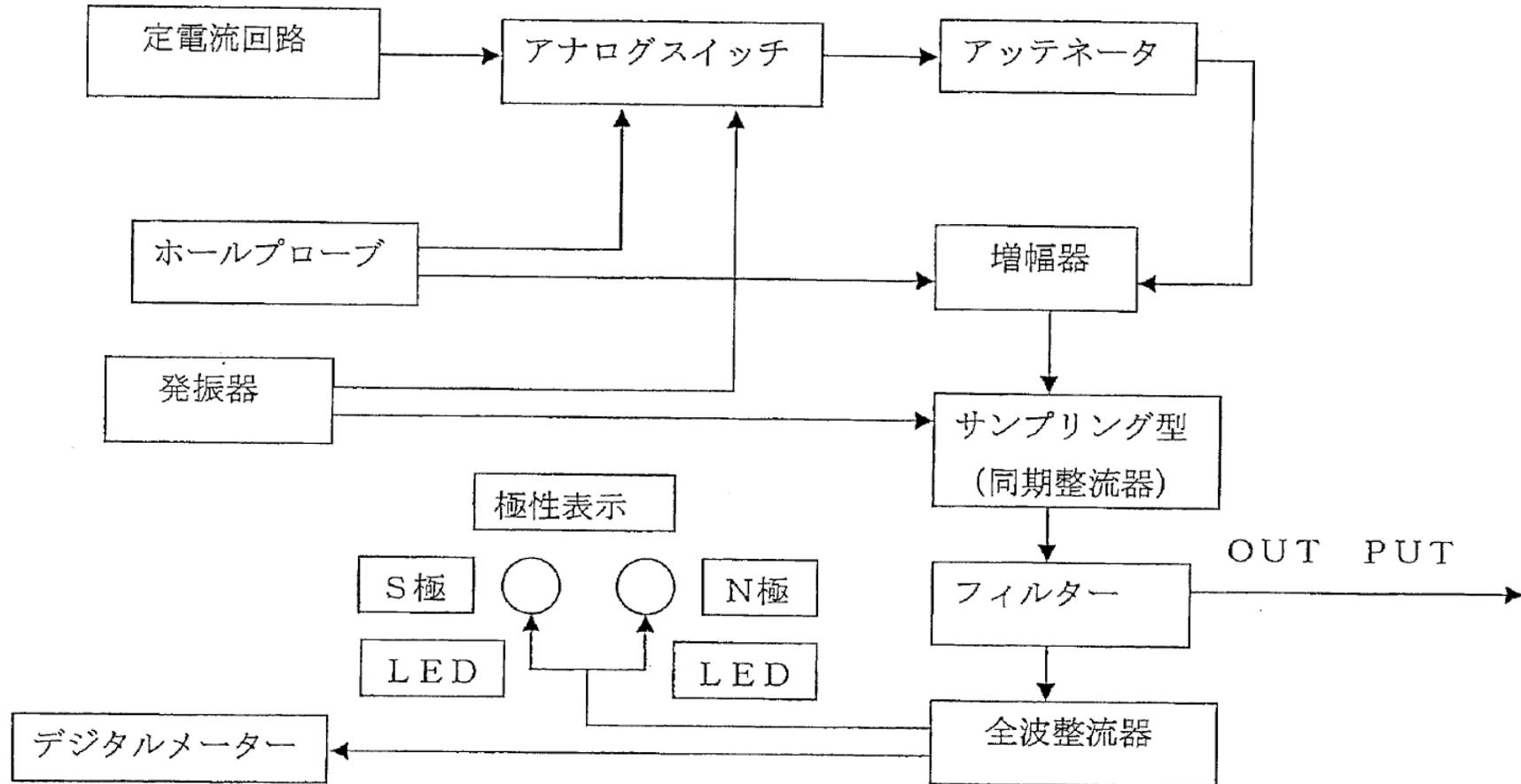
ADS

ガウスメーターのエーデーエス

Powertech Ltd.

Magnet Design & Measurement

<http://www.powertech.jp/>





ADS

ガウスメーターのエーデーエス

Powertech Ltd.

Magnet Design & Measurement

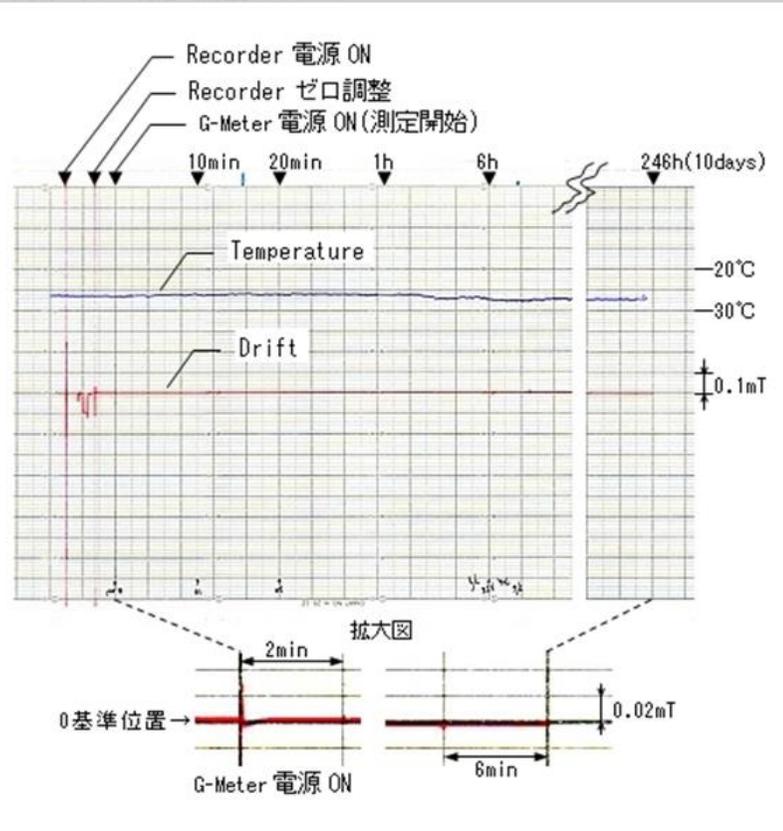
<http://www.powertech.jp/>

オフセットドリフトの安定性と値の再現性

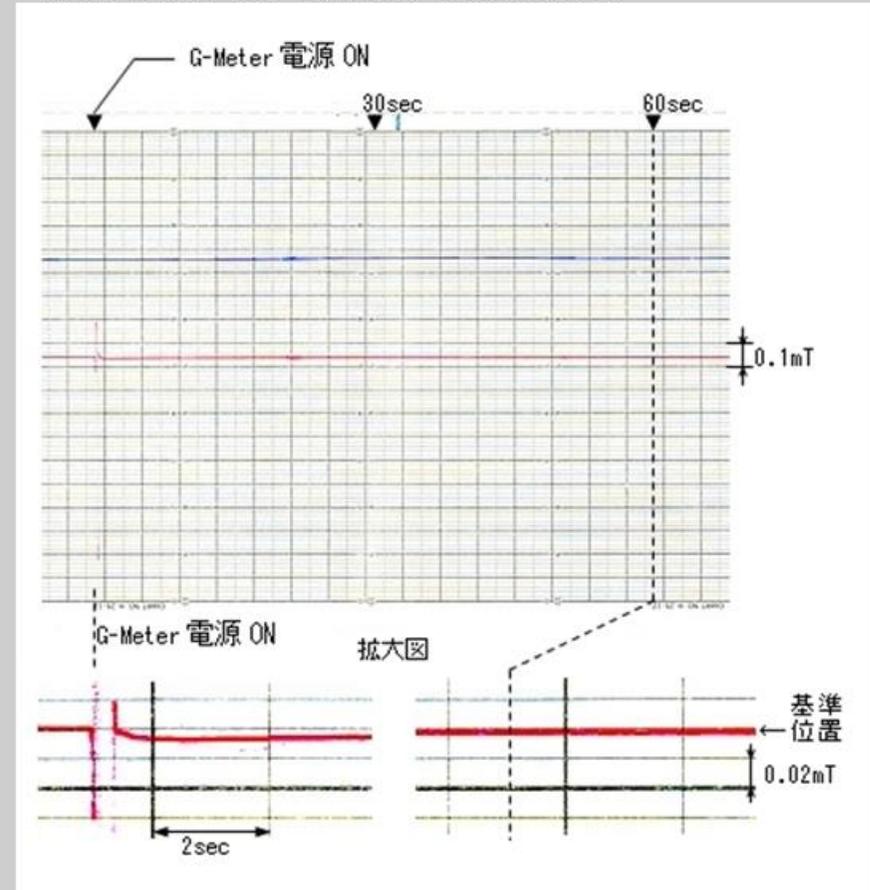
ゼロドリフト特性

多極の磁界分布を正しく測定するには、センサであるホール素子の小型化が必要になります。このホール素子（センシングデバイス）の微細化により、素子から出力される信号自体も非常に微小な信号となります。このような微小信号を増幅し安定した信号として取り出すためにはドリフト特性の優れた回路構成が必要になります。弊社のガウスメーターは、独自のスイッチング励磁技術により経年変化にも優れた長期のゼロドリフト特性を実現しております。

長期ドリフト特性 (測定レンジ20mT)



電源投入直後のゼロレベル復帰特性 (測定レンジ20mT)



ガウスメーターの電源を入れてから60数秒間の0レベル復帰特性です。

* エーデーエスHPより抜粋

オフセットドリフトの優れた特性を紹介
値の安定性と再現性を紹介

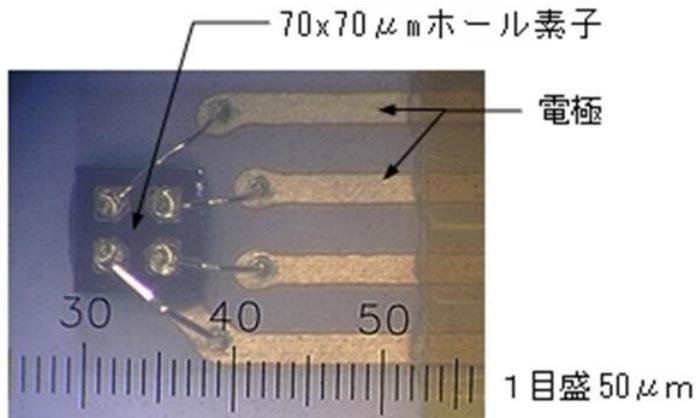
ホール素子の磁界検出部の大きさを示す。

感磁面積として

- 1) □165um 過去の製品(現在は生産終了)
- 2) □70um 汎用(システム組込等)
- 3) □30um 微小領域及び強磁場リニアリティー良好
- 4) □10um 超微小領域

検出対象物により 感磁面積の大きさは影響を与えます。
 なぜならば 感磁面に入力された磁界を面積で割った値が
 磁束密度として検出される為 分極面積が小さいほど
 影響大 値が小さく表示されてしまう。

3軸(三次元角型)プローブ用のホール素子顕微鏡写真

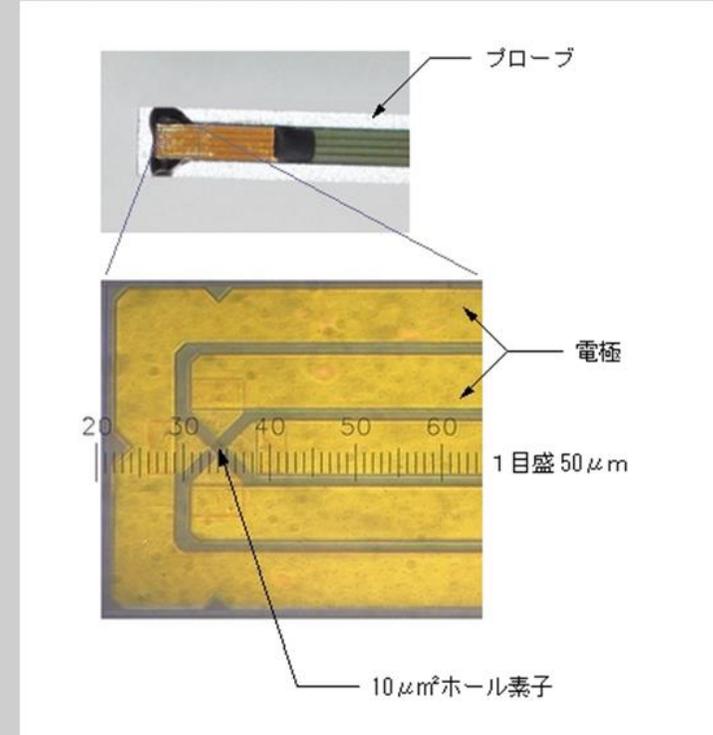


* エーデーエスHPより抜粋

微小磁界の測定

微小磁界を測定するには、ホール素子プローブの感磁部との距離をより小さく(理想的には0に)することが重要となります。弊社のプローブには、この距離を0.7 μmまで接近させて計れるタイプのものがあります。
 このプローブ素子の感磁部は完全に絶縁されていますので測定試料に接触しても測定ができます。また、感磁部面積が従来のもの(70 μm²平方メートル)に対して10 μm²平方メートル(面積比で1/49)と小さく、測定が困難であった超多極マグネットの微小磁界分布も測定可能になりました。

プローブセンサー部のホール素子顕微鏡写真



多極の磁界分布を測定するとき、使用プローブの感磁部面積が磁極の密度より小さくなければ分布を正しく評価測定することができません。この微小感磁センサーなら磁界の分布をより正確に測定することができます。この微小感磁センサーから正確な磁気量を取り出すために、光ノイズや誘導磁界ノイズを低減したHGM-7100型やHGM-7300型のガウスメーターを使用してください。

* エーデーエスHPより抜粋

代表的なプローブ



ADS

ガウスメーターのエーデーエス

Powertech Ltd.

Magnet Design & Measurement

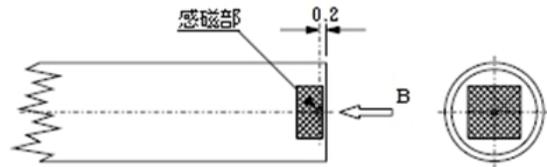
<http://www.powertech.jp/>

A-1/A-1S



PDF A-1寸法図表示

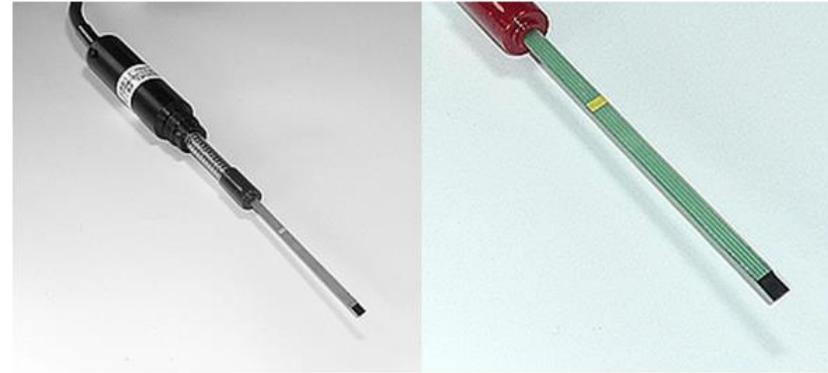
《センサー感磁部の位置》



主な仕様項目	A-1	A-1S
主用途	汎用	システム計測用
ホール素子	GaAs	
素子数	1個	
測定範囲	0~3T	
使用温度範囲	-20~+60℃	
感磁面積	0.07mm × 0.07mm	
素子取付部材質	ガラスエポキシ樹脂	
軸径	φ5	
軸材質	Cu (銅)	
取手部材質	アセタール樹脂	取手部なし
ケーブル長さ	2m (標準)	

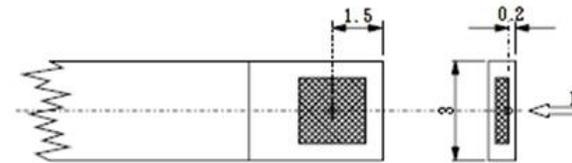
* エーデーエスHPより抜粋

FS-3



PDF FS-3L寸法図表示

《センサー感磁部の位置》

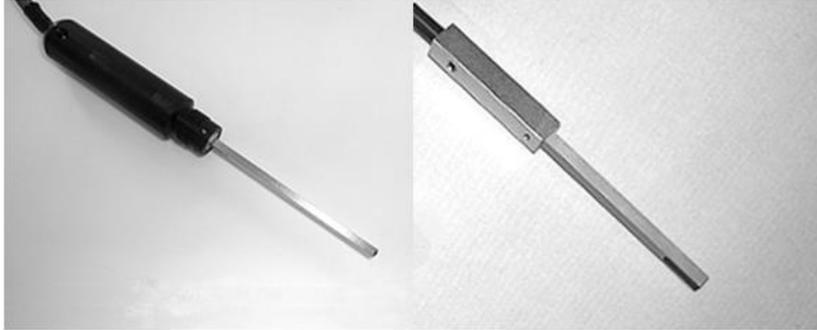


主な仕様項目	FS-3(L)
主用途	汎用
ホール素子	GaAs
素子数	1個
測定範囲	0~3T
使用温度範囲	-20~+60℃
感磁面積	0.07mm × 0.07mm
素子取付部材質	ガラスエポキシ樹脂
先端部寸法	0.75t x 3mm
軸材質・形状	Bs (真鍮)・フレキシブル (L付はストレート) タイプ
取手部材質	アセタール樹脂
ケーブル長さ	2m (標準)

* エーデーエスHPより抜粋

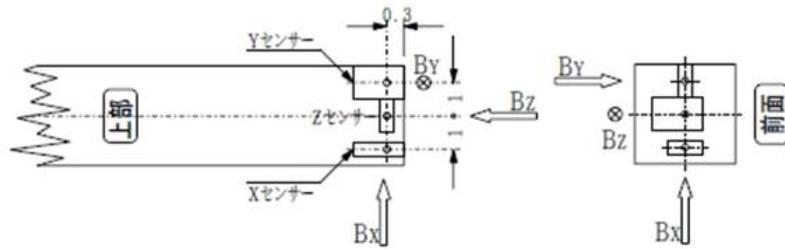
3次元プローブと測定装置

TS-3 / TS-5 / TS-10



[PDF TS-3寸法図表示](#)

《センサー感磁部の位置》



主な仕様項目	TS-3	TS-5	TS-10
主用途	三次元計測用		
ホール素子	GaAs		
素子数	3個		
測定範囲	0~3T		
使用温度範囲	-20~+80℃		
感磁面積	0.07mm × 0.07mm		
素子取付部材質	Bs (真鍮)		
先端部寸法	□3mm	□5mm	□10mm
軸材質	Bs (真鍮)		
取手部材質	アセタール樹脂かBs (真鍮)		取手部なし
ケーブル長さ	2m (標準)		

* エーデーエスHPより抜粋

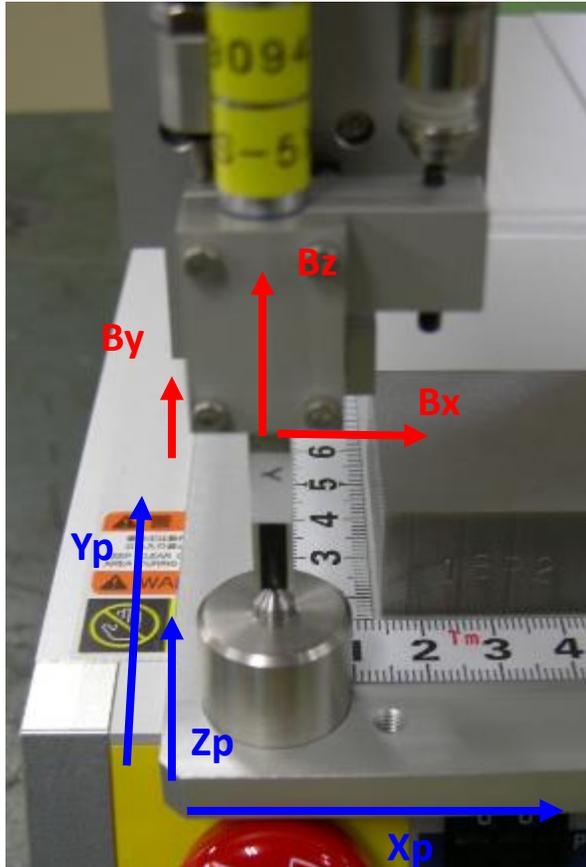
3次元マグネットアナライザ



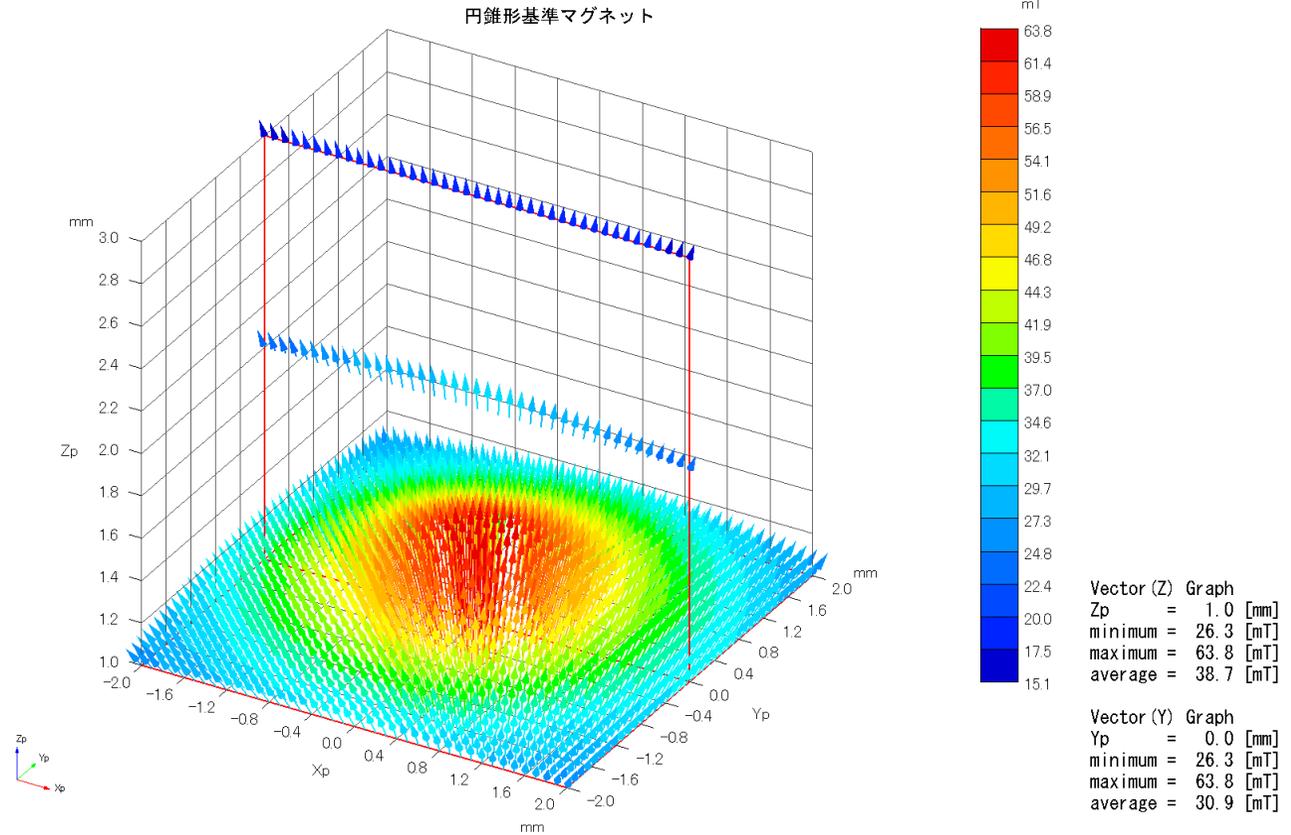
3次元マグネットアナライザ用基準マグネットの磁界分布

Hallプローブ内部センサーの検出中心位置を確認し
位置補正を行う為の基準マグネットと成ります。

円錐形基準マグネットの磁界分布



ベクトル表示

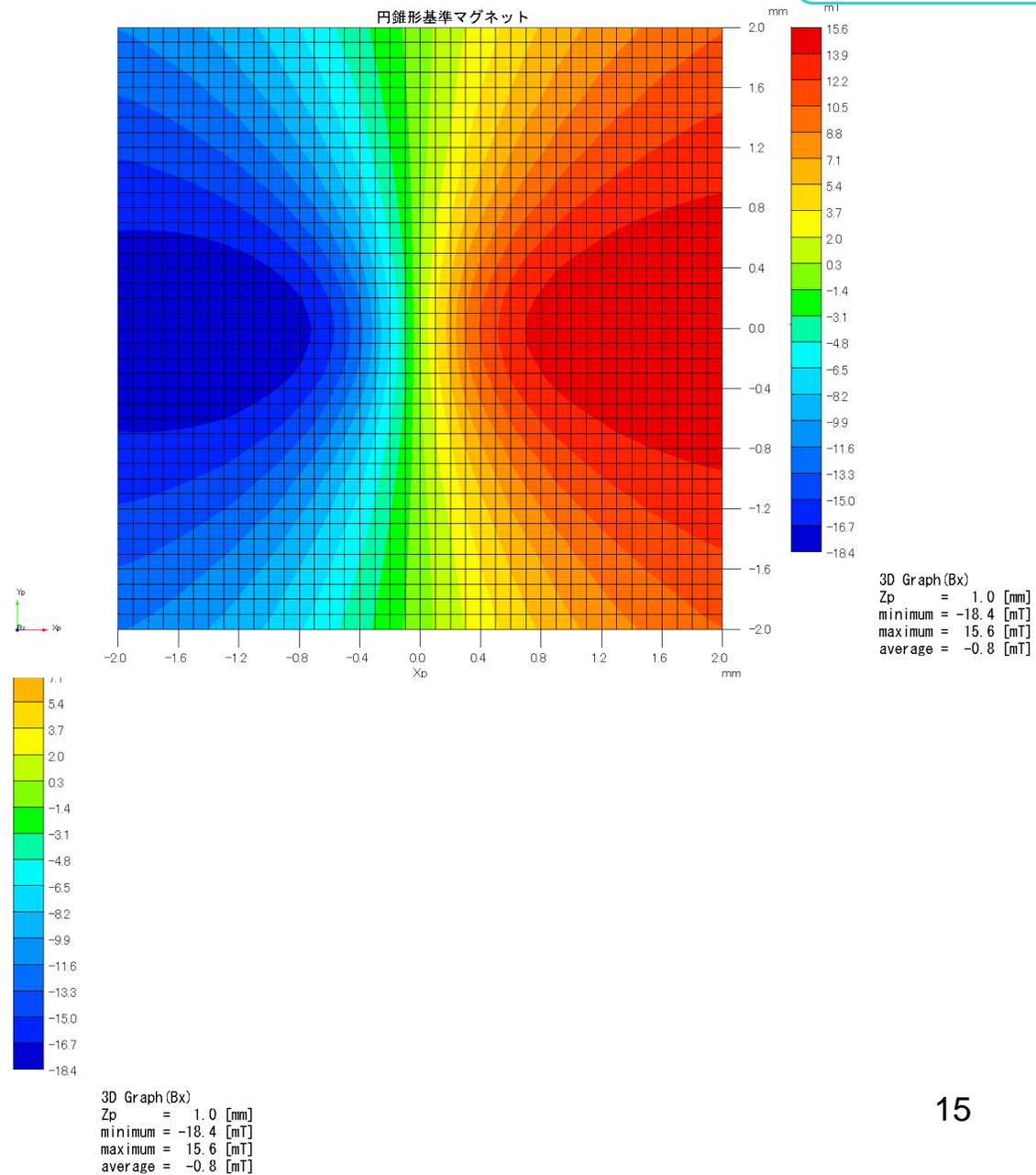
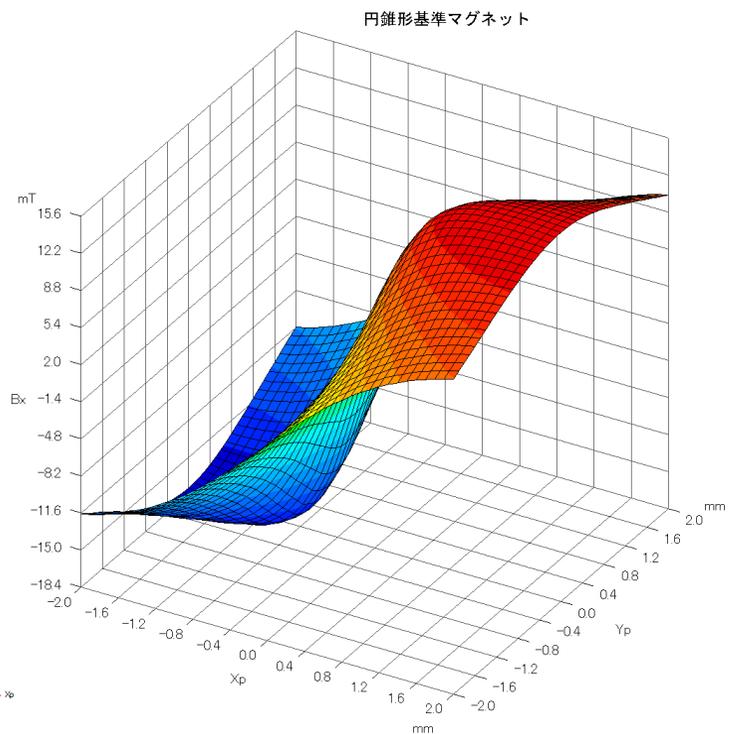


Bx成分 3Dグラフ表示



ADS
 ガウスメートルのエーデーエス

Powertech Ltd.
 Magnet Design & Measurement
<http://www.powertech.jp/>

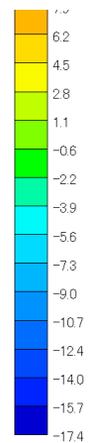
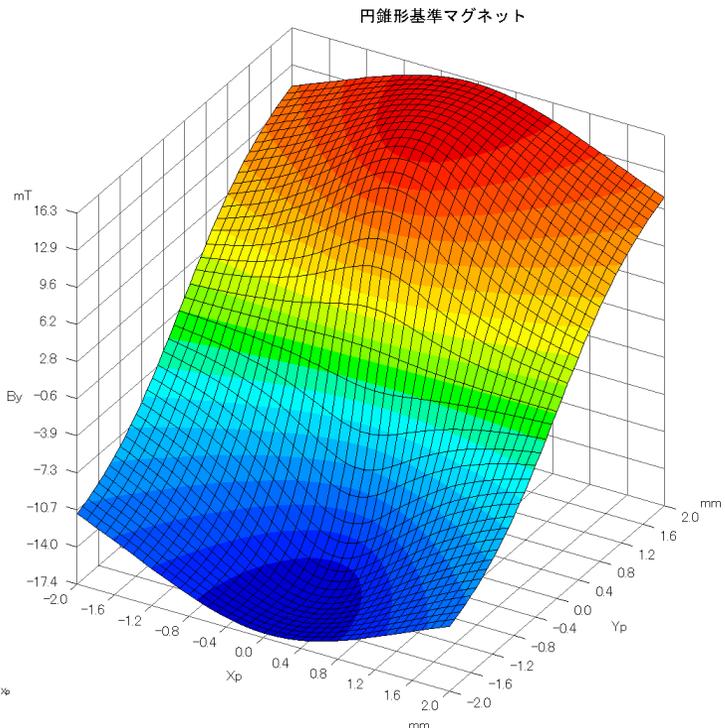


By成分 3Dグラフ表示

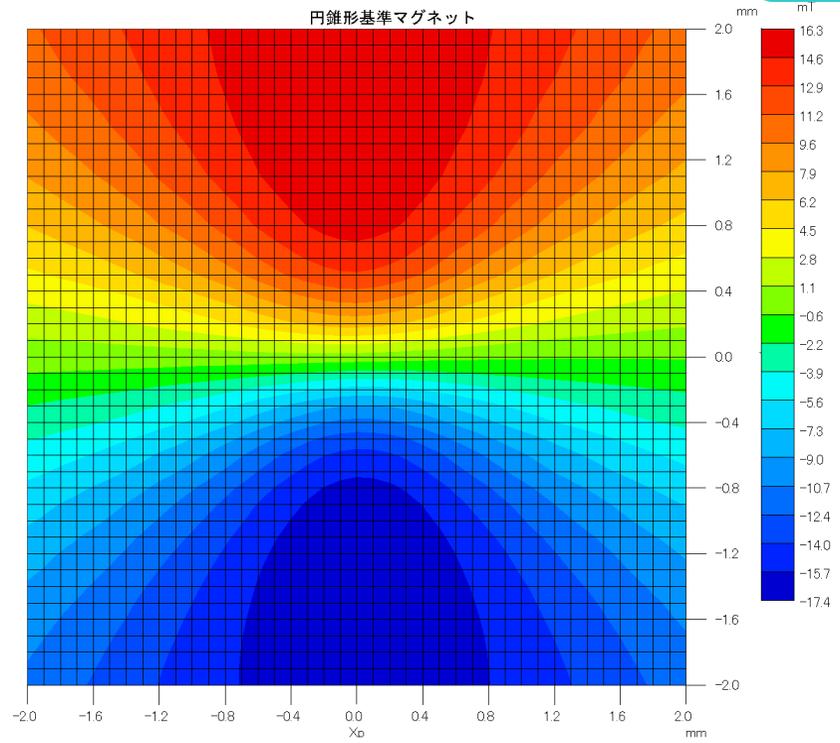


ADS
 ガウスメートルのエーデーエス

Powertech Ltd.
 Magnet Design & Measurement
<http://www.powertech.jp/>



3D Graph(By)
 Zp = 1.0 [mm]
 minimum = -17.4 [mT]
 maximum = 16.3 [mT]
 average = -0.3 [mT]



3D Graph(By)
 Zp = 1.0 [mm]
 minimum = -17.4 [mT]
 maximum = 16.3 [mT]
 average = -0.3 [mT]

Bz成分 3Dグラフ表示



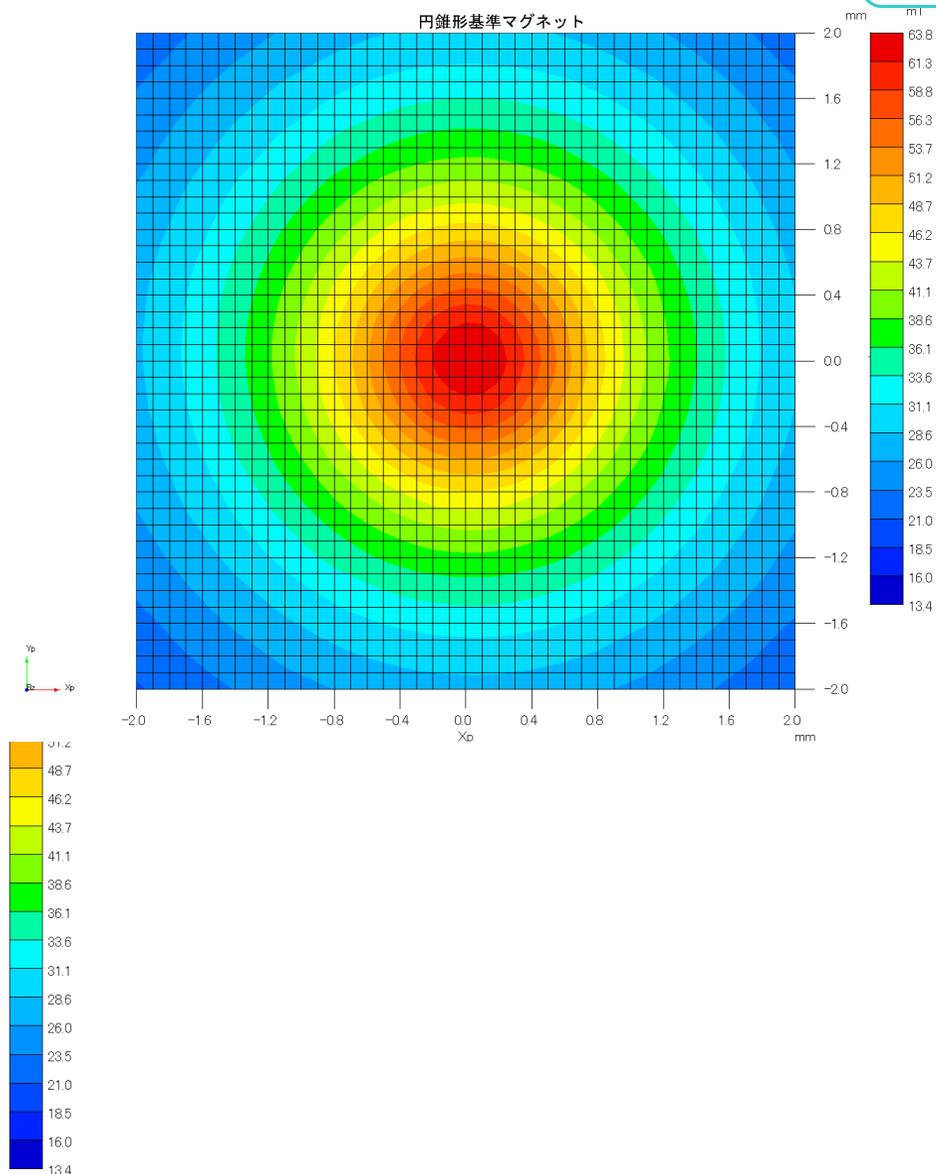
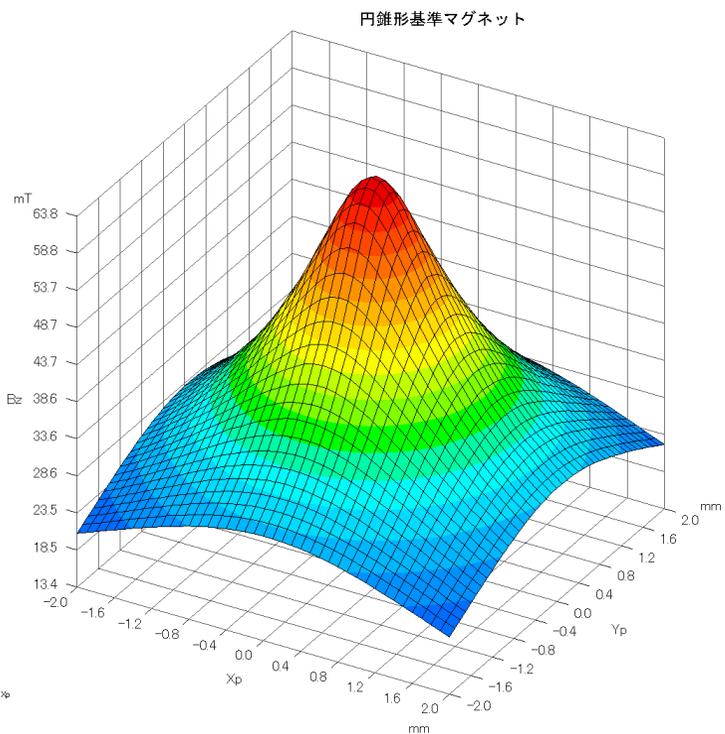
ADS

ガウスメーターのエーデーエス

Powertech Ltd.

Magnet Design & Measurement

<http://www.powertech.jp/>



Babs成分 3Dグラフ表示



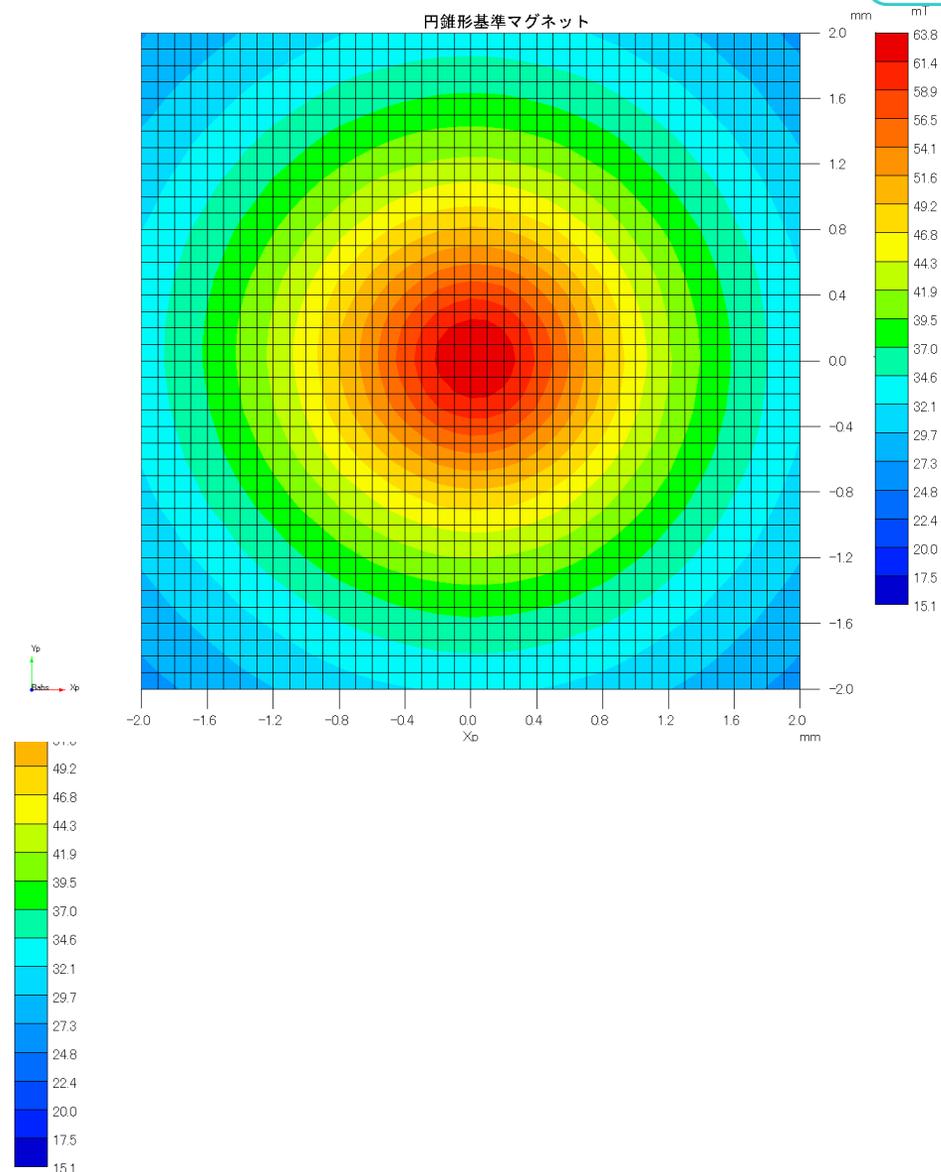
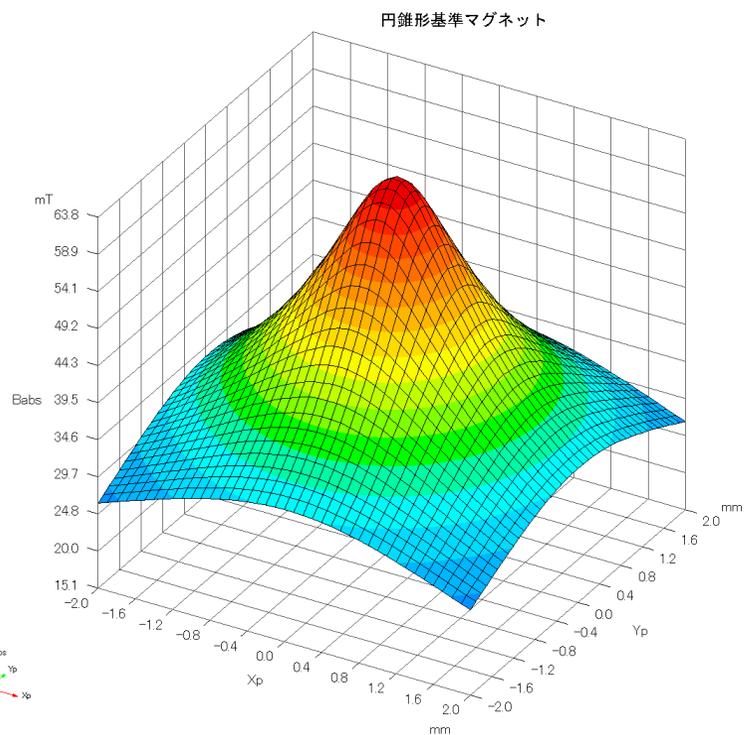
ADS

ガウスメーターのエーデーエス

Powertech Ltd.

Magnet Design & Measurement

<http://www.powertech.jp/>



身近なマグネットの磁界分布



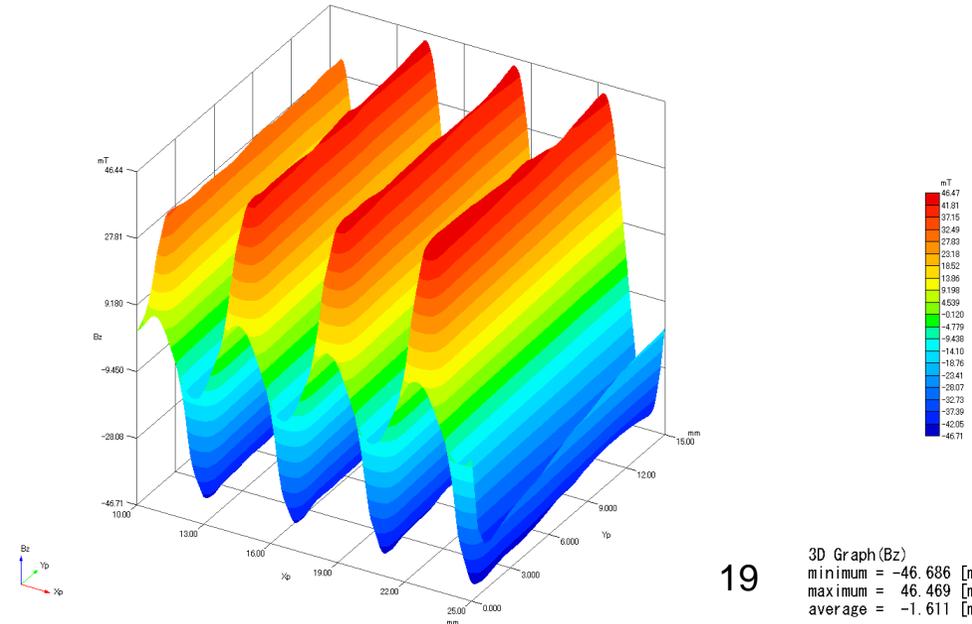
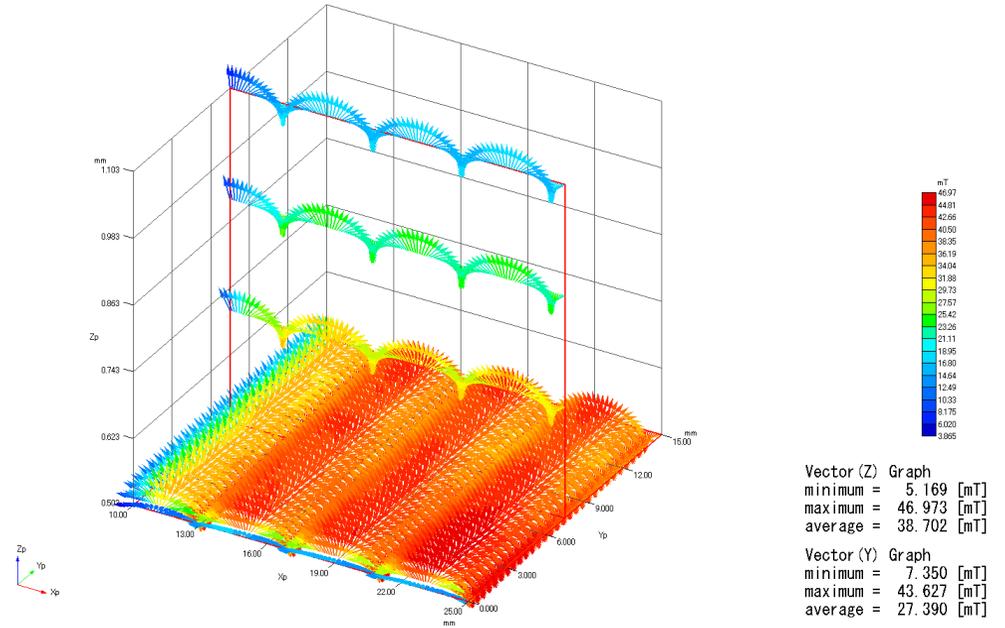
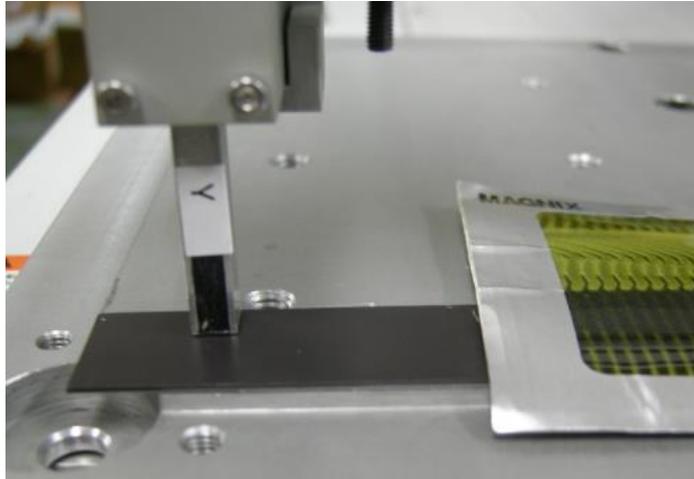
ADS

ガウスメーターのエーデーエス

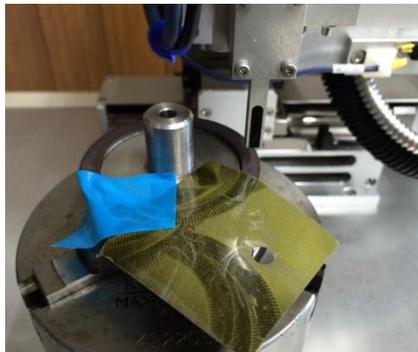
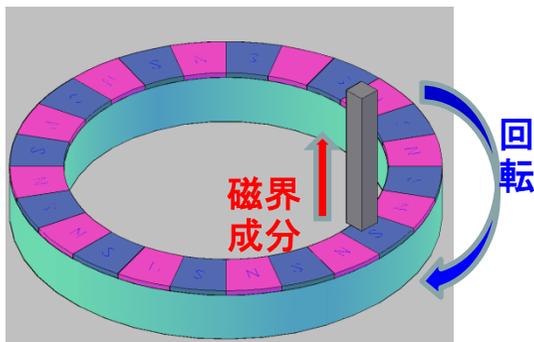
Powertech Ltd.

Magnet Design & Measurement

<http://www.powertech.jp/>



パルサーリングの測定イメージ



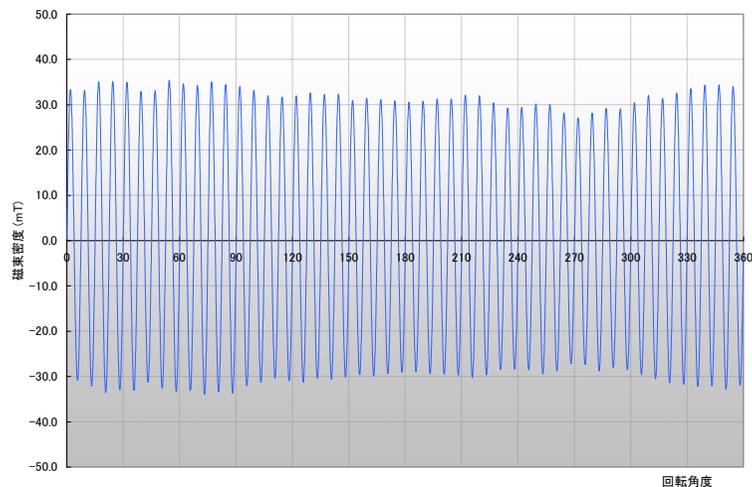
評価結果を表示

試験成績書

測定番号	96P_Sample_1
------	--------------

極数(ペア)	48
測定半径	32.000 mm
ギャップ	1.000 mm
測定レンジ	50.0 mT
オフセット	---

	N 極	S 極
最大ピーク	35.476 mT	34.073 mT
最小ピーク	27.152 mT	27.256 mT
平均ピーク	32.086 mT	30.760 mT
最大単一ピッチ差	0.33 %	0.48 %
最小単一ピッチ差	-0.29 %	-0.45 %
単一ピッチバラツキ	0.63 %	0.93 %
累積ピッチ誤差	1.53 %	
最大デューティ	51.21 %	
最小デューティ	50.21 %	
デューティバラツキ	1.00 %	





ADS

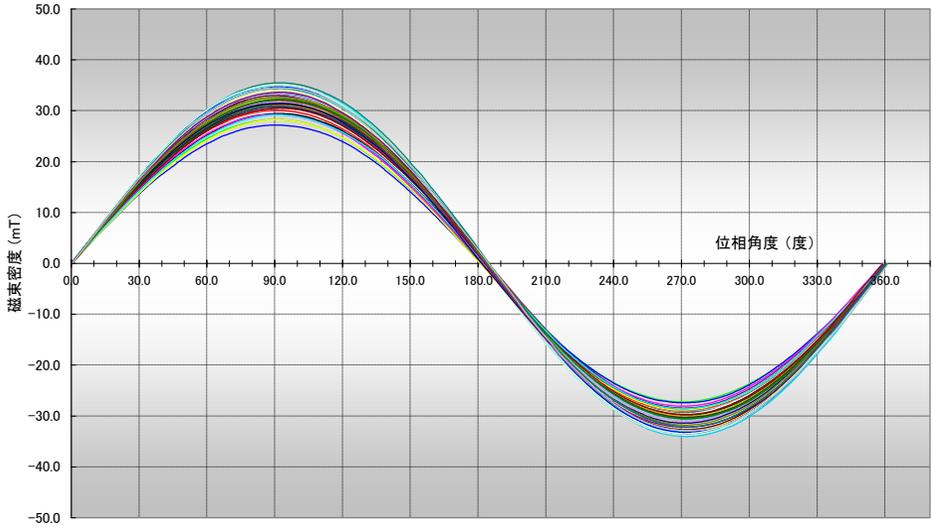
ガウスメーターのエーデーエス

Powertech Ltd.

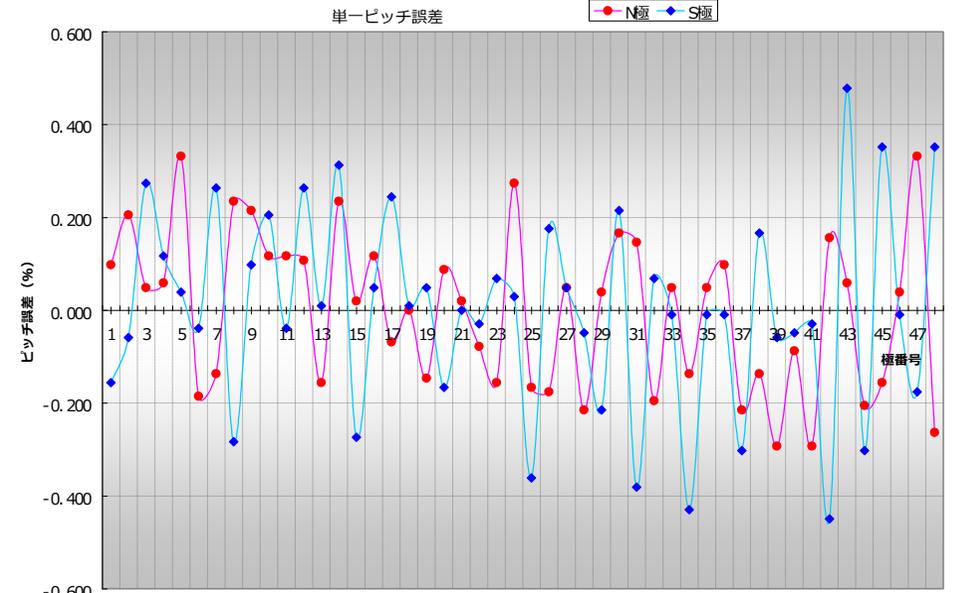
Magnet Design & Measurement

<http://www.powertech.jp/>

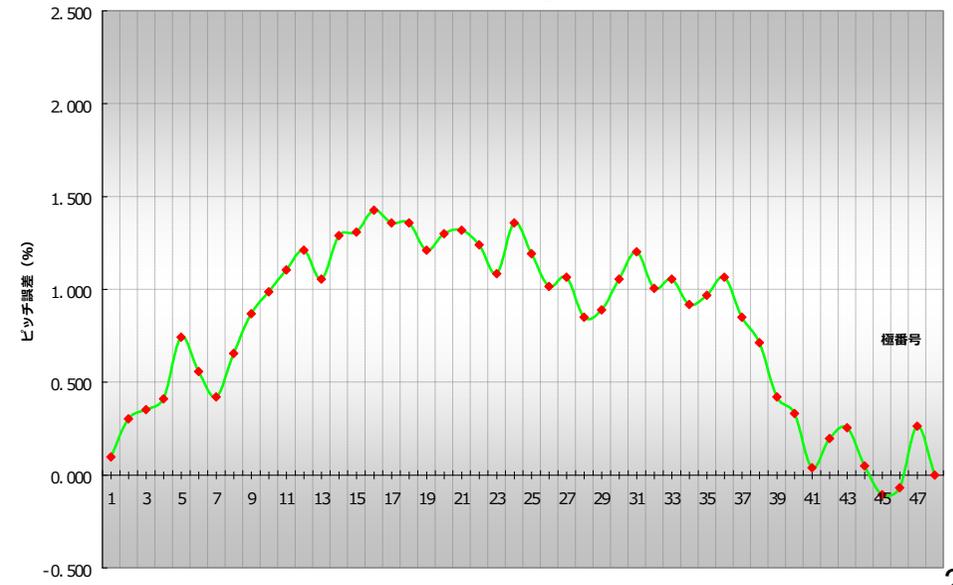
各種波形グラフ



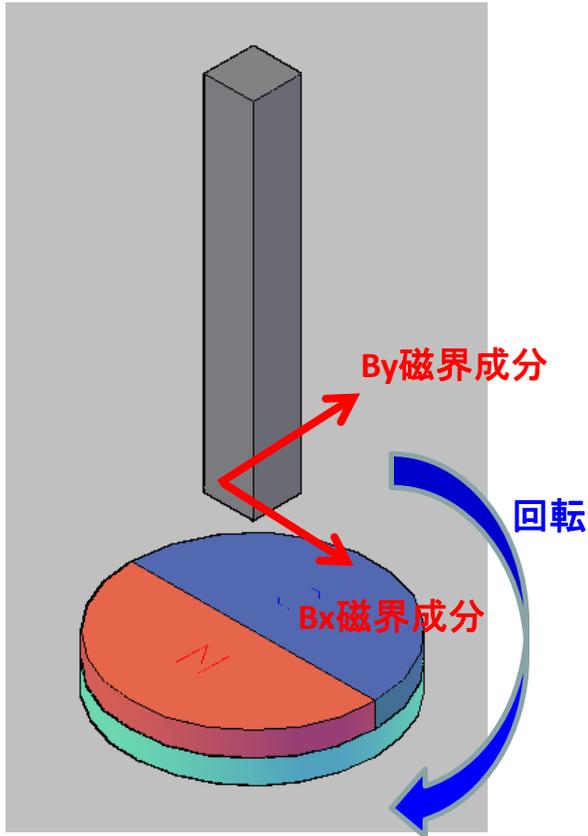
単一ピッチ誤差



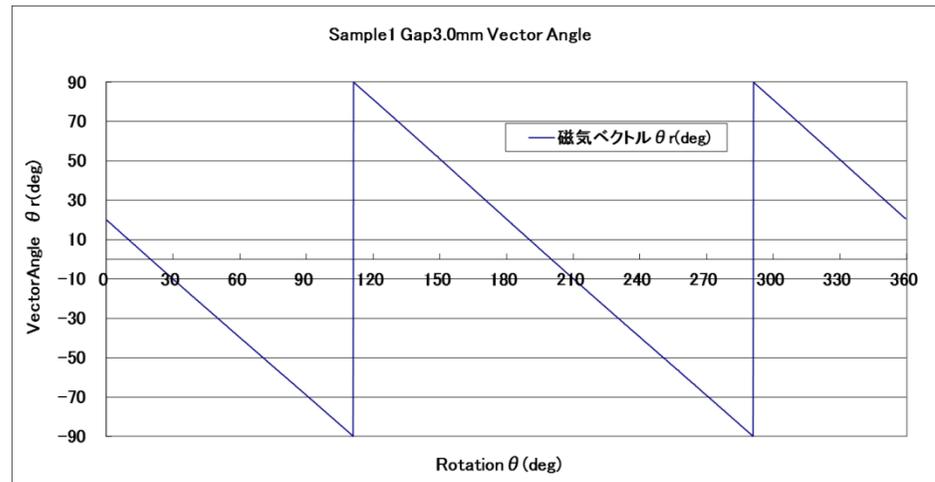
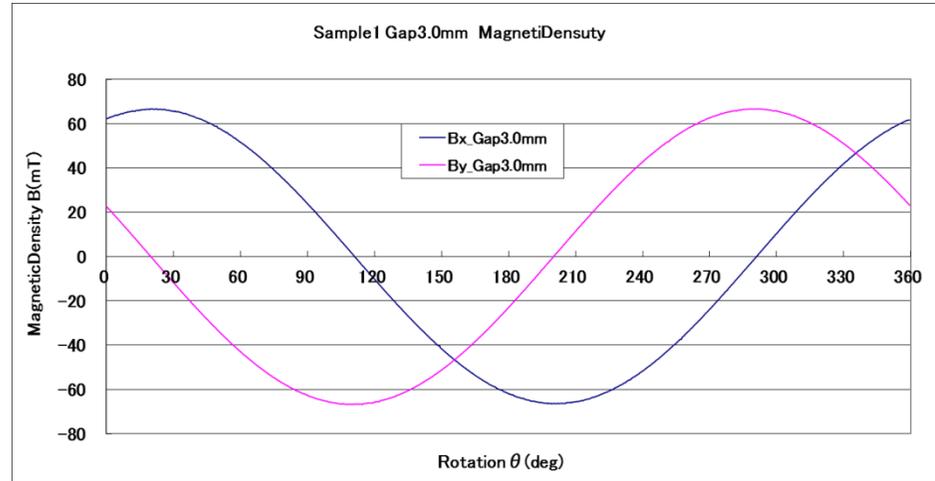
累積ピッチ誤差



アブソリュートエンコーダーローターの測定イメージ



評価結果を表示



ガウスメートル測定時のまとめ

ホール素子の優れた特徴を利用して

微細な磁界分布を測定する上で大切な事は

- 1) 磁界の発生源の大きさと素子の検出部の大きさが適正か
- 2) 発生源の磁界ベクトルと測定素子の方向が一致しているか
- 3) ギャップを一定に保って正しく測定が出来ているか(ギャップは磁気振幅に対し支配的な値です)
- 4) 環境温度は適正であり検出素子の温度係数を考慮する必要が無いか
- 5) 発生源の周波数と磁界強度に対し適正な計測レンジや帯域をカバーできているか

最新動向として

広帯域ガウスメーターの特性紹介

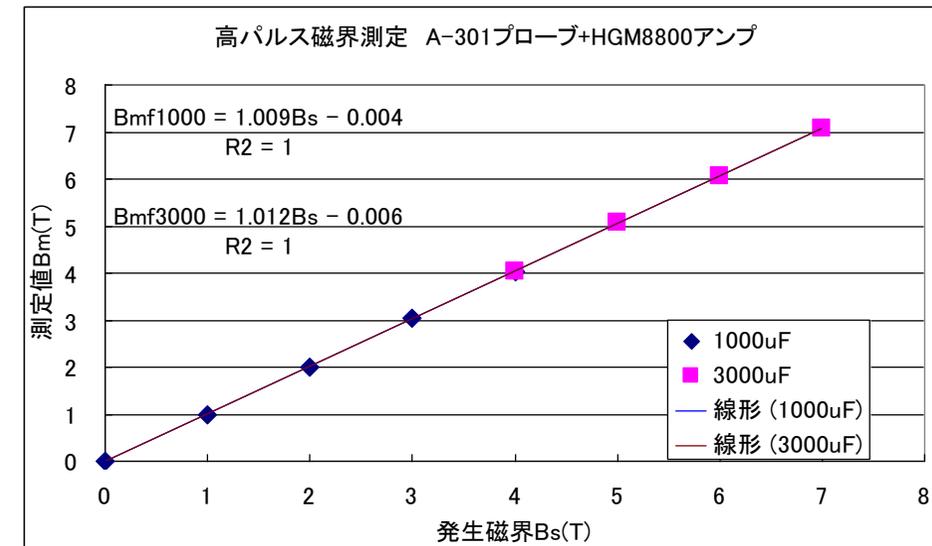
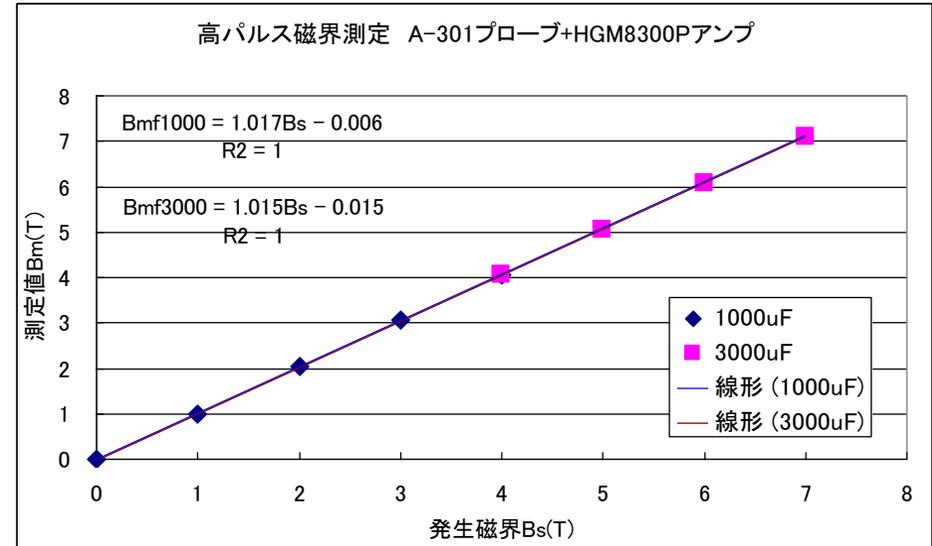
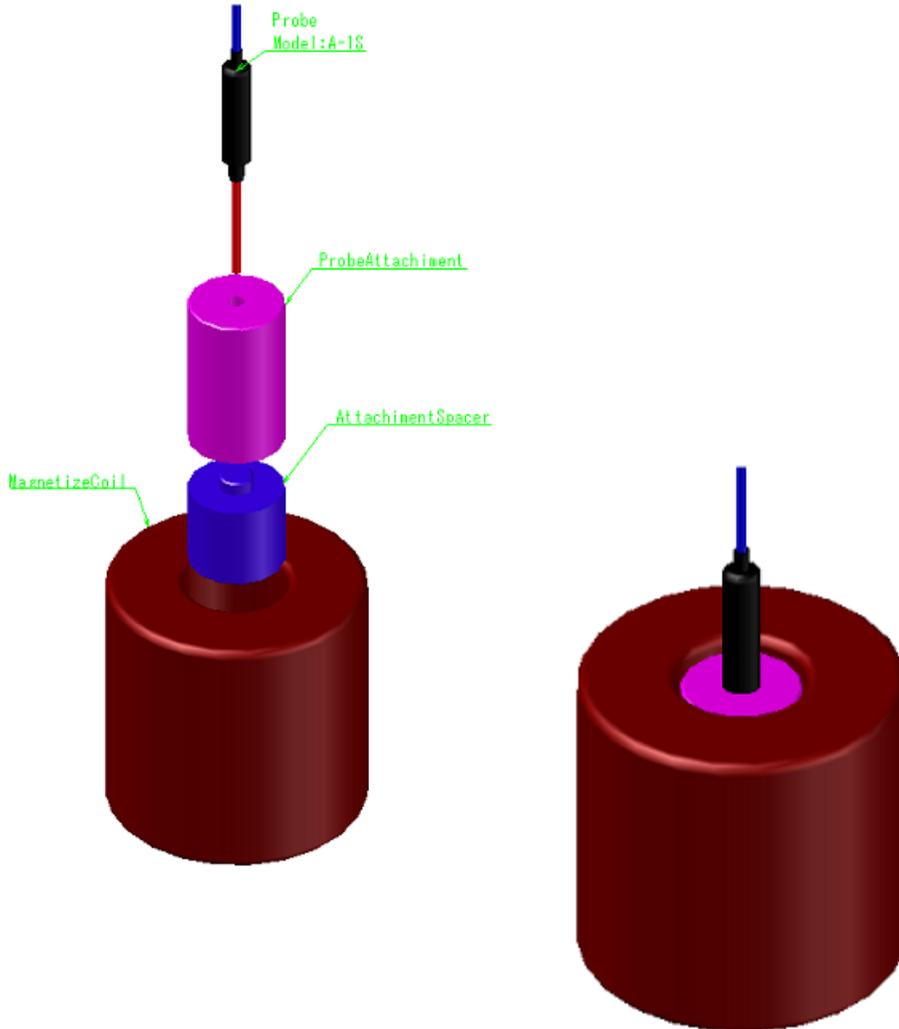
従来に比べ測定周波数の広帯域化の開発を進めています。
近年の需要に伴い

例えばEV等で使用されるマグネットの高BHmax化に伴い
着磁工程時に十分に着磁磁界が発生出来ているか実測する場面が見られます。
最新動向として着磁時のパルス磁界ピークを目安を3.5T程度としており
従来の測定では正確に測定が出来ませんでした。現在は ~7T程度まで
直線性を保って再現性のある測定が可能と成りました。

また、インバーター駆動回路における チョークインダクターの漏洩磁界を測定する場面においては
通常は 15~25kHz程度ですが 高調波成分を評価する事も要望としては見られます。

この様な場面に合わせ ~10kHz仕様 ~50kHz仕様 ~100kHz仕様 と目的に応じて最適化された
回路を準備しています。

広帯域ガウスメーターのパルス測定特性紹介



高周波磁場測定要望と対応経緯

温熱治療(ハイパーサーミア)に使用する

高周波磁場発生装置の磁場モニターの要望 ~100mT 100kHz~300kHzを発生する

最初は強力な電磁誘導によりHall素子から放電が起こり

Hall素子の使用を断念しサーチコイル式に変更して対応した

しかし、コイル式は周波数の変動に対し出力振幅が対数的に変化してしまい

磁場と周波数の関係を容易に観測する事が難しかった

そのため、Hall素子式で高周波に対応できる方法を検討する動機付けと成った

それまでは、磁場測定においては 永久磁石が発生する静磁場が主力であり
交流磁場はモーターやトランスからの漏れ磁場を観測する目的の為、50~120Hz程度

その後は パワエレの発展により インバーター回路が普及し

スイッチング周波数のベースキャリアが 10~25kHzの観測が増加

例えば太陽光発電システムに使用される商用電源発生用パワーコンディショナー

漏れ磁場や内部のチョークインダクタの漏れ磁場を評価

HEVやEV駆動用のインバーターモジュールに於いても同様の評価と

特に自動車用はバスラインに2000A程度の電流が通電される為

漏れ磁場の影響を評価する必要が重要

日本初のハイパーサーミア装置(～8MHz) 1984年



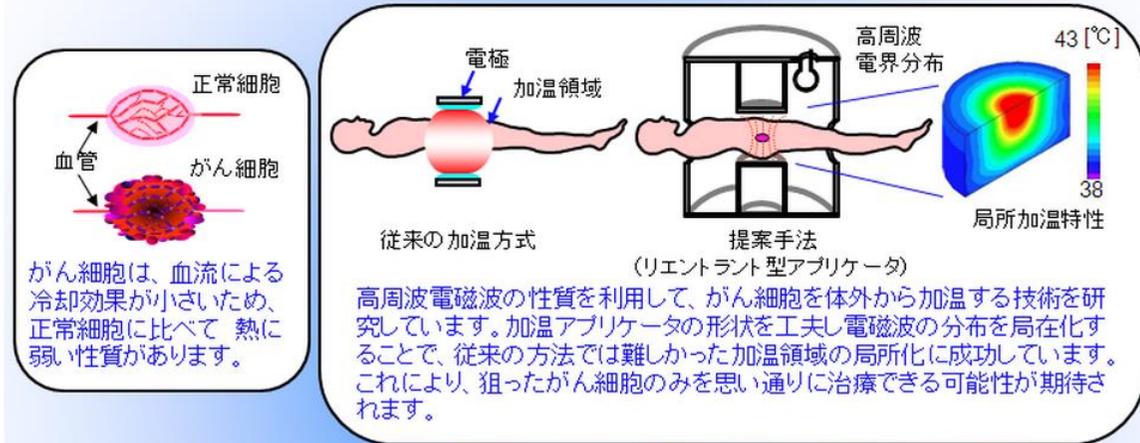
写真 1 サーマトロン-RF8

* ④

高周波電磁波コイルの発生磁界の分布と磁気振幅と磁気ベクトルを評価

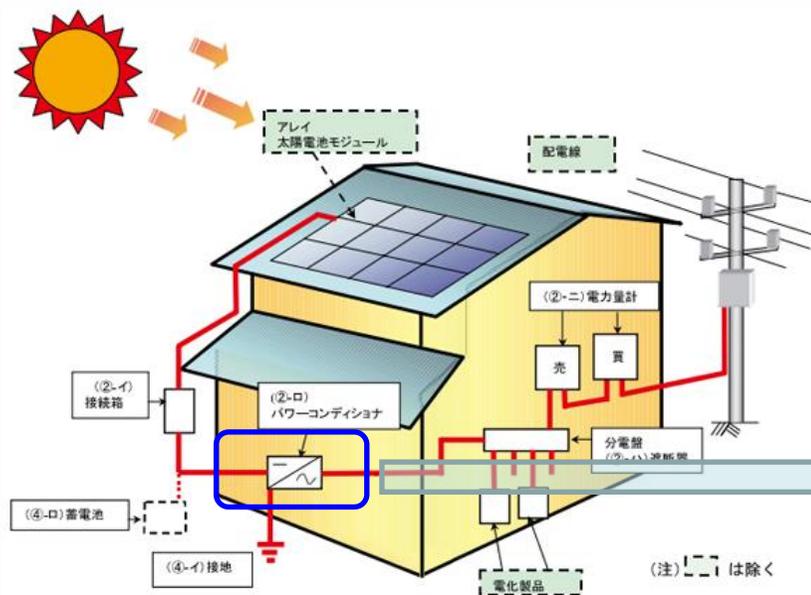
『がんの温熱治療(ハイパーサーミア)システムの研究』

患者さんのQOL(quality of life: 生活の質)に優れたがん治療システムの研究を行っています。



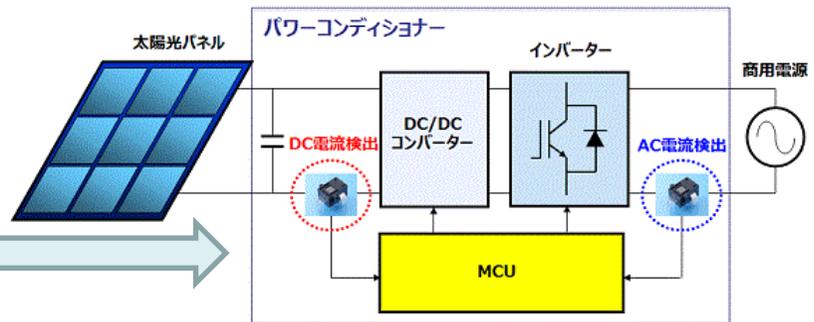
加熱アプリーケータを回転することで、より焦点化された電界分布が得られると考えています。これにより、頭頸部等に発生した早期のがんを治療できる可能性があります。

* ⑤



* ⑥

•太陽光パワーコンディショナーなど



DC電流検出
- MPPT制御*
- 過電流検出

AC電流検出
- インバーター制御
- 過電流検出
- 発電量計測

* MPPT制御 (Maximum Power Point Tracking: 最大電力点追従):
太陽光パネルの発電効率が常に最大となるように、電圧・電流値を制御する制御方法。

* ⑦

電流センサでどこに使っているの？



ADS

ガウスメーターのエーデーエス

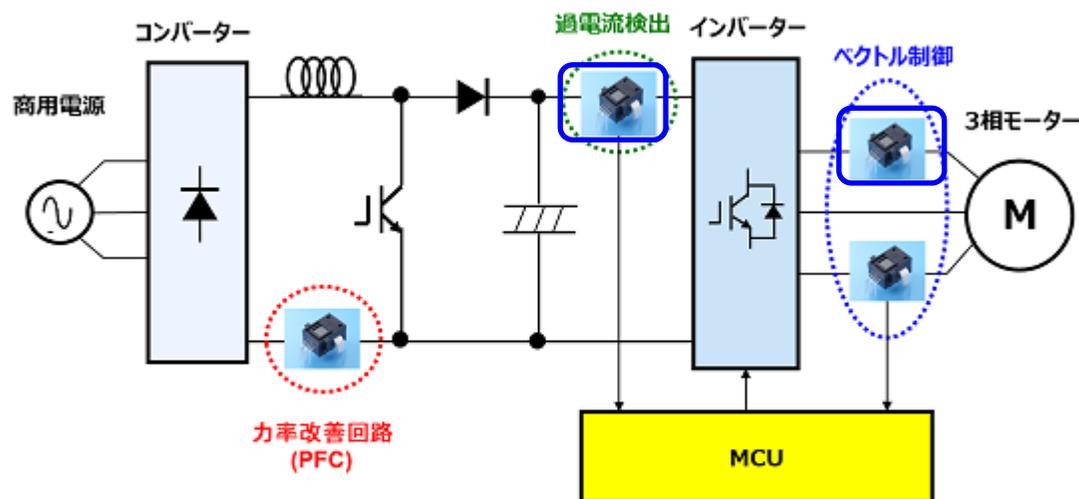
Powertech Ltd.

Magnet Design & Measurement

<http://www.powertech.jp/>

直流電流センサは 1~2000Aのダイナミックレンジと高い特を要求されている
機器の保護と省電力化やバッテリーの電流監視等に使用する

•エアコンや産業機械用インバーター制御



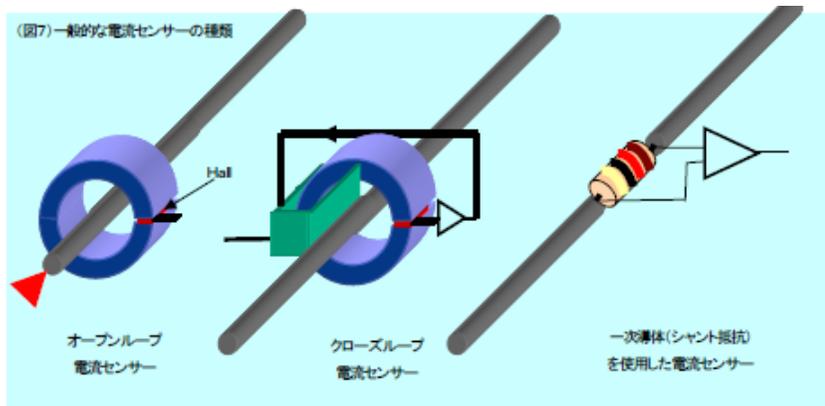
力率改善回路(PFC): インバーター因による商用電源側の波形歪みの低減、力率改善

ベクトル制御: モーター電流を制御システムにフィードバックし、変換効率向上

過電流検出: 安全対策、トランジスタ保護

* ⑦

コア付電流センサーからコアレスバスバー電流センサーへ

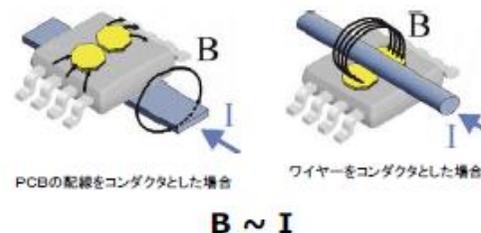


* ⑨

「IMC®を使用したコアレスのオープンループ電流センサー」

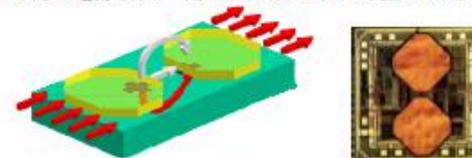
IMC®を使用したホールICはチップと平行な磁束を検出できるため、電流センサーとしても使用することが可能です。このデバイスは、その構造からPCBのパターン上に（または電線の下側に）ICを配置するだけで、コアレスのオープンループ電流センサーとして機能することができます（図9）。

IMC® 電流センサー「MLX91205」



(図9) IMC電流センサー

これらの電流センサー用IMC®ホールICは図10のような構造になっています。



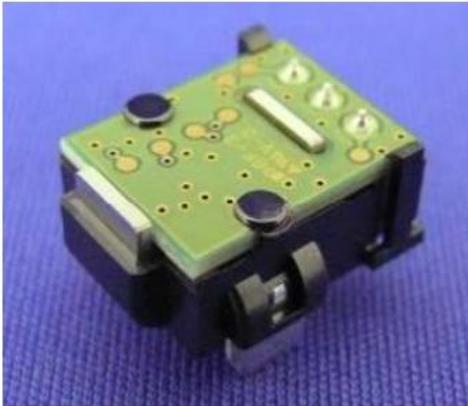
(図10) IMC電流センサーの構造

この場合、コアレスと呼んでいますが、実際にはIC内部のコンセントレータが磁気コアの働きをしています。この例ではコンセントレータは八角形をしています。この形状を楔形などに変えることによって物理的に磁束を集中させてコア自体の磁気ゲインを上げることも可能です。また、このIMC®のコアは一般のオープンループ電流センサーのコアで問題となる非直線性とヒステリシスが非常に小さく（図11）、オープンループ回路構成でクローズループに匹敵する性能を可能にしています。

Hall素子と磁気コンセントレータを使用した構成で工夫されている

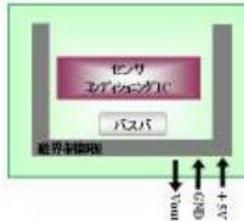


GMR素子を使用した構成で外乱を防ぐ工夫がされている。

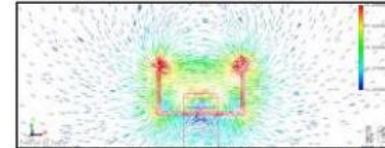


電流によって生じる磁界(磁束)を磁気抵抗素子で検出します。磁気抵抗素子は、磁気センサとコンディショニングICがワンパッケージ化されており、バスバ(一次電流路)上に配置されています。また、磁気抵抗素子およびバスバを囲むように磁界制御板を配置した構成となります。

磁気抵抗素子には、磁界制御板で集磁された磁界が発生するため、高感度な出力となります。また、一次電流で発生する磁界と関係のない外部磁界は、磁界制御板で減衰されるため、出力誤差を低減することが可能です。



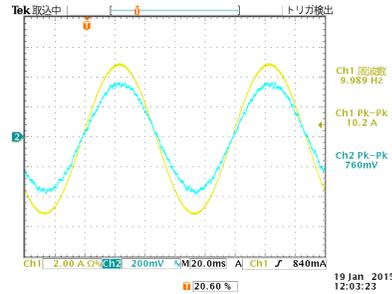
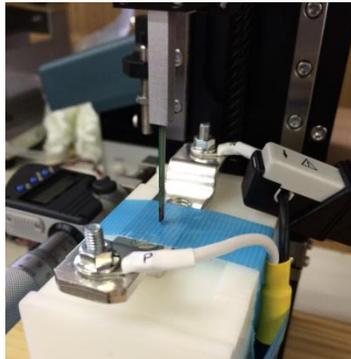
【図1】AGD製電流センサの検出原理



【図2】一次電流による磁界(シミュレーション結果)

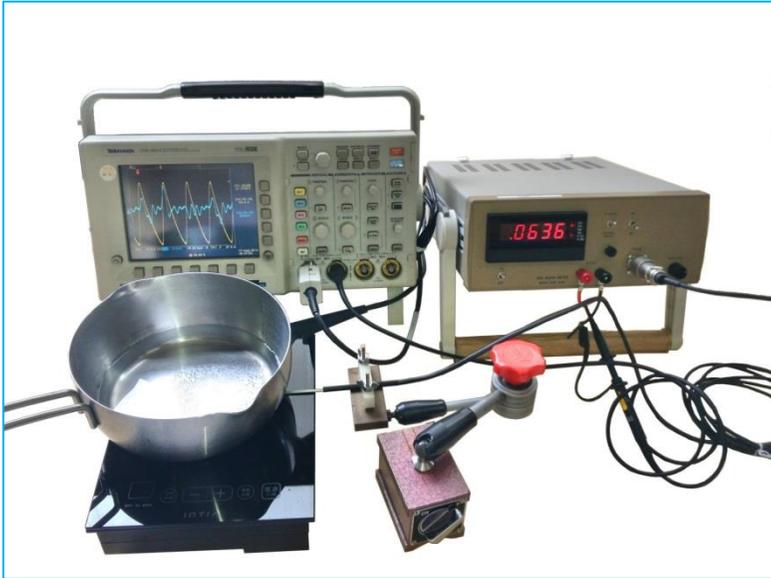
* ⑧

バスバーと電流による磁界観測

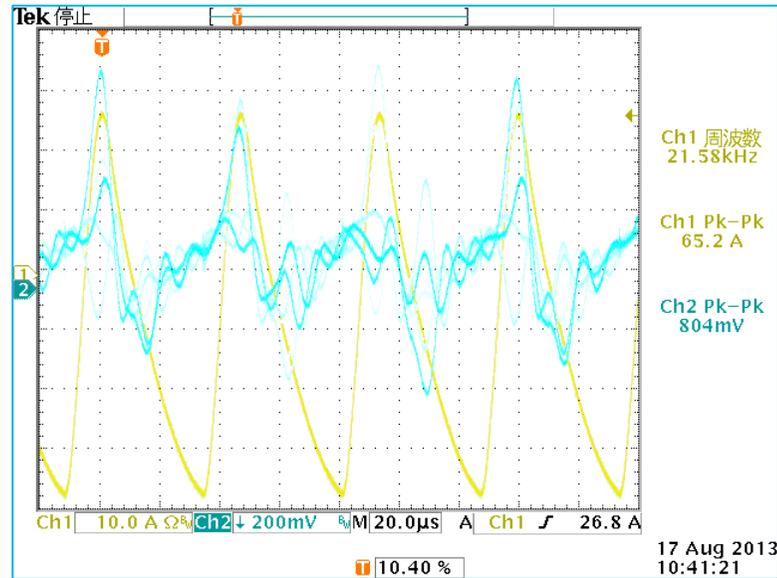


バスバ電流 2A/DIV
発生磁界 0.08mT/DIV





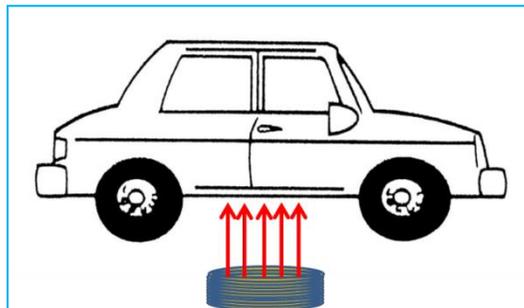
測定例：電磁調理器の漏れ磁場測定



■ コイル電流 10A/DIV
■ 発生磁場 20mT/DIV

測定波形

応用範囲として



非接触給電

参考文献

- 旭化成エレクトロニクス株式会社 ホール素子の使い方 * ①
浜松光電株式会社 MRセンサーの動作原理 * ②
センサー活用141の実践ノウハウ 松井邦彦 著 CQ出版社 * ③
センサー応用回路の設計・製作 松井邦彦 著 CQ出版社
(株)イーデーエス [http://:www.ad-s.co.jp](http://www.ad-s.co.jp)
京都大学&山本ビニター * ④
明治大学 工学部 石原研究室 * ⑤
太陽光発電協会JPEA * ⑥
旭化成 電流センサーカタログ * ⑦
AGDコアレス電流センサカタログ * ⑧
MELEXIS HallIC動作原理より * ⑨