

SACLA 真空封止アンジュレータ磁場測定用薄型ホールプローブの開発 DEVELOPMENT OF THIN HALL PROBES FOR FIELD MEASUREMENT OF SACLA IN-VACUUM UNDULATORS

長谷川照晃^{#, A)}, 田中隆次^{A)}, 鏡畑暁裕^{B)}
Teruaki Hasegawa^{#, A)}, Takashi Tanaka^{A)}, Akihiro Kagamihata^{B)}
^{A)} RIKEN SPring-8 Center
^{B)} JASRI

Abstract

In SACLA, the minimum gap of the undulator is planned to be narrowed from 3.5 mm to 2.5 mm in order to upgrade the laser performance. It is expected that the laser pulse energy is enhanced and the wavelength tunability is expanded without changing the electron beam energy. In order to close the gap less than 2.5 mm in the near future for further upgrade, it is required to miniaturize the hall probe. For this reason, a one-dimensional thin hall probe with the thickness of 0.5 mm was developed. Using this probe, the magnetic field of the in-vacuum undulator for SACLA was measured at the gap below 4.0 mm. The standard deviation of the phase error estimated with the measured field distribution at the gap of 4.0 mm was found to be 5.4 degrees which is close to 5.7 degrees estimated with the standard hall probe currently used for the undulator field measurement at SPring-8. Although this result shows that the developed hall probe reproduces the measurement with the existing probe, we have found that the reproducibility was not perfect at the gap of 3.5 mm. The reason for this discrepancy may possibly be attributable to that the hall-voltage offset was not adequately compensated.

1. はじめに

SACLA や SPring-8 等で標準的に利用されている真空封止アンジュレータは、磁場周期の短縮化を可能にし、X 線領域におけるレーザー発振や高輝度光の発生に必要な電子ビームのエネルギーを低減するという大きな長所を有する。一方で、従来の石定盤に基づく磁場測定手法を適用できないという欠点が存在する。この問題を克服するため、新たな磁場測定システム(SAFALI)を開発し、これを用いて磁石列の脱着による影響や、長期運転後の永久磁石減磁などによる磁場性能の変化を監視するとともに、必要に応じて磁場の再調整を行っている。現在、使用している磁場センサーは、ホール効果を利用した厚さ 1 mm の半導体素子であり、素子自体の傾斜や、磁石列インピーダンス軽減のためにこれを覆う銅フォイルの浮きによる空間的制限から、測定できる最少ギャップは 3 mm 程度に留まっている。

SACLA では、その光源性能を高めるため、真空封止アンジュレータのさらなる狭ギャップ化を計画している。運用する磁石列ギャップの最小値を現状の 3.5 mm から 2.5 mm まで狭くすることにより、レーザーパルスエネルギーの増強と同一ビームエネルギーでの可変波長の広帯域化が見込まれる。将来的に、最小ギャップ 2.5 mm 以下も視野に入れた場合、SAFALI システムの高精度化とともにホールプローブの薄型化が必須となる。そこで、厚さ 0.5 mm の薄型ホールプローブを開発した。

本稿では、新たに採用したホール素子の特性と新規に開発した薄型ホールプローブについて紹介する

とともに、これを用いた磁場測定の結果について報告する。

2. 磁場測定システム SAFALI

磁場測定システム SAFALI (Self Aligned Field Analyzer with Laser Instrumentation)^[1]を上から見た概略図を図 1 に示す。真空槽に納められた長さ 5 m の磁石列側近に 1 本のレールを配置する。これは水平垂直方向に稼働する 2 軸のリニアステージにより、4 箇所保持される。この上でホールプローブ台車をアンジュレータ軸に沿って移動し、磁場を測定する。このとき、レールの撓みや歪みで生じるホールプローブの位置変動 (1 mm 程度) を補正するため、レーザーを使用する。ホールプローブに取り付けたアイリスに向かって端部からレーザーを照射し、ここで切り取られたレーザースポットの重心位置を反対側に設置した 2 次元光位置検出器 (PSD) で測定する。観測した位置変動は、リニアステージでフィードバック補正することにより、ホールプローブ

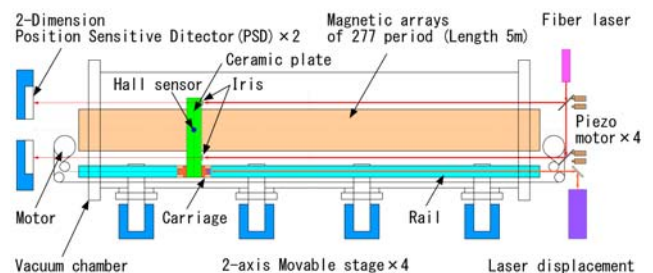


図 1: SAFALI システムを上から見た概略図

[#] hasegawa@spring8.or.jp

ブの磁場中心からの位置変動を 50 μm 以内に抑制する。同時にホールプローブのアンジュレータ軸方向の位置は、干渉計型レーザー測長計により測定する。

3. ホール素子と薄型ホールプローブ

3.1 ホール素子

SAFALI のプローブとして使用しているホール素子 A と新たに採用したホール素子 B (HG-0711, 旭化成エレクトロニクス社^[2]) の特性を表 1 に示す。周期が短く、磁場勾配の高いアンジュレータの局所磁場を正確に測定するためには、素子のアクティブエリアが小さくなければならない。これら 2 種類の素子のアクティブエリアは、 $\square 50 \mu\text{m}$ と $\square 100 \mu\text{m}$ で、素子 B は少し大きなサイズではあるが、あとで示すように必要な精度で磁場を測定することができた。また、薄いプローブの製作するためには、素子サイズが小さい方が良い。素子 B は現在、入手可能な最も小さいホール素子である。そのほか、素子 B を選定した理由として、国内産で入手が容易であることが挙げられる。半導体の種類は、素子 A が InSb、素子 B は GaAs である。

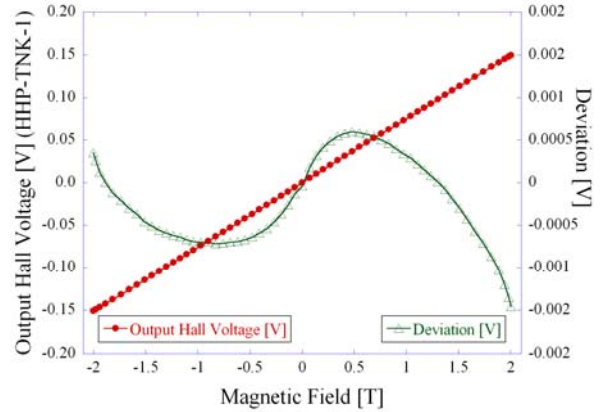
制御電流 10 mA で定電流駆動した場合の素子 A のホール電圧と直線性（線形近似からの偏差）を図 2(a)に示す。横軸は、核磁気共鳴 (NMR) 法で測定した磁場 B、縦軸左はその時に発生したホール電圧、縦軸右は偏差電圧である。このグラフの傾きから求めた素子 A のホール係数は、73.3 mV/T であった。この素子の直線性は磁場 2 T まで 3.3 %以下であった。一方、素子 B の特性を図 2(b)に示す。同様に素子 B のホール係数は、1723.5 mV/T であり、素子 A に比べて約 23 倍大きい。直線性は 3.2 %と素子 A と同程度であった。

図 2(c)に磁場 1 T と 2 T を素子に印加した場合のホール電圧の温度特性を示す。通常、磁場測定は室温で行うが、クライオアンジュレータの場合は約 -150 $^{\circ}\text{C}$ まで冷却して測定する。磁場が 2 T のとき、-150 $^{\circ}\text{C}$ から 30 $^{\circ}\text{C}$ の使用温度範囲で、素子 A の温度

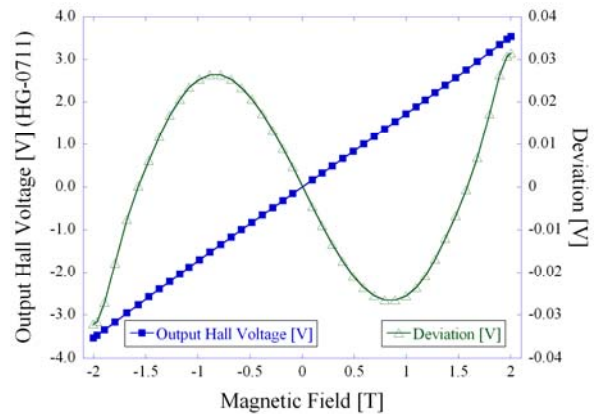
表 1: ホール素子の特性

項目	素子 A (HHP-TNK-1)	素子 B (HG-0711)
半導体の種類	InSb	GaAs
ホール係数	75.4 mV/T	1752 mV/T
入力抵抗	33 Ω	750 Ω
出力抵抗	32 Ω	750 Ω
直線性 (磁場<2T)	< 3.3 %	< 3.2 %
温度係数(-150~30 $^{\circ}\text{C}$)	3.2 %/180K	11.4 %/180K
サイズ	2.0 \times 1.0 \times 0.5 mm	1.2 \times 0.5 \times 0.3 mm
アクティブエリア	$\square 50 \mu\text{m}$	$\square 100 \mu\text{m}$

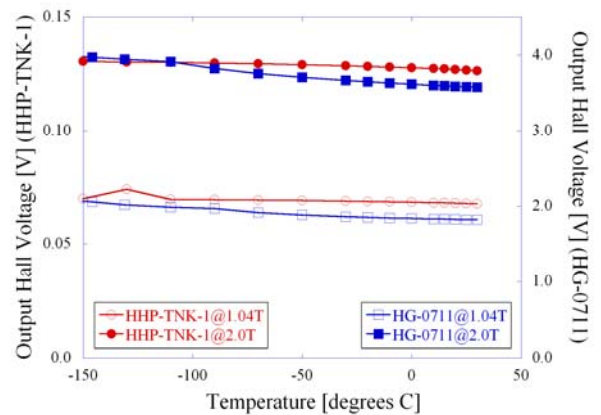
係数は 3.2 %/180K、素子 B は 11.4 %/180K であった。素子 B の温度係数は素子 A に比べて大きい、SPRING-8 では温度および磁場の 2 次元についてホール素子を較正しているため、このことが素子 B の利用性を制限するわけではない。



(a) 素子 A (HHP-TNK-1)のホール電圧と直線性



(b) 素子 B (HG-0711)のホール電圧と直線性

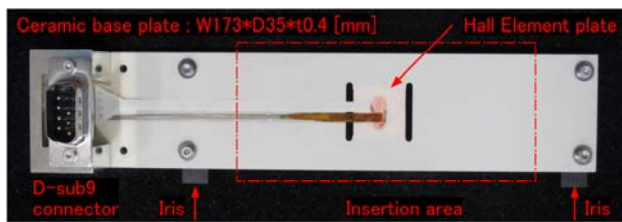


(c) 磁場 1 T と 2 T を印加した場合のホール電圧の温度特性

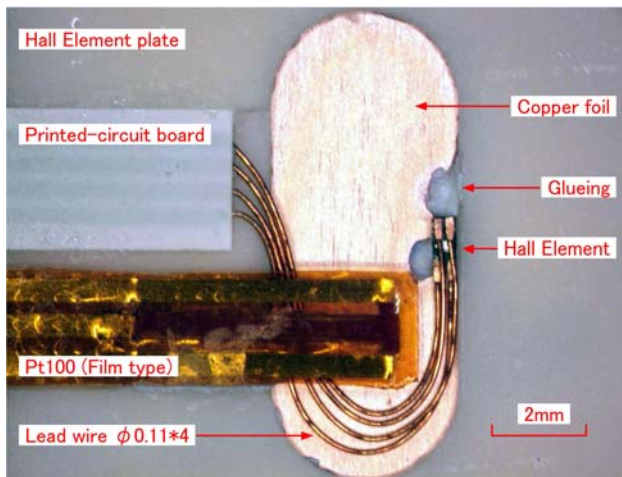
図 2: 2 種類のホール素子特性

3.2 薄型ホールプローブ

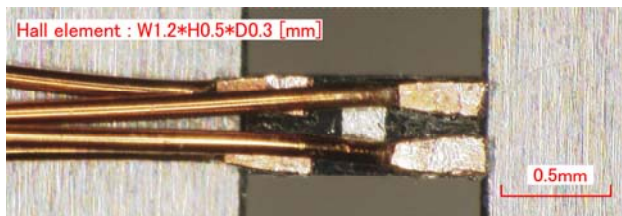
上述の素子 B を用いて、垂直磁場を測定する 1 次元薄型ホールプローブを開発した。完成したプローブの外観写真を図 3(a)に示す。ベースプレートは酸化アルミニウム Al_2O_3 で、厚さ 0.4 mm である。中央には素子を乗せる $\square 16$ mm の素子プレートがあり、ベースプレートと分割できる。これは、ホール素子を校正する過程で電磁石の磁極間に挿入するためである。実際の磁場測定では、ホール素子を中心として幅 90 mm の部分が上下にある磁石列に挟まれる。ギャップ 3.5 mm の場合、上下の隙間は約 1.5 mm である。素子の両サイドにはレーザーを切り出すアイリスを配置している。



(a) 外観写真



(b) ホール素子周辺



(c) ホール素子の写真

図 3: 1 次元薄型ホールプローブ

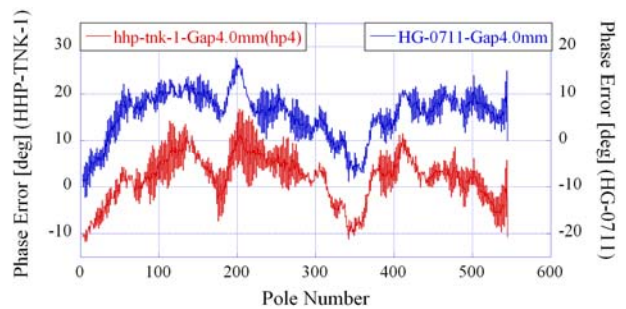
ホール素子周辺とホール素子を拡大した写真をそれぞれ図 3(b)と図 3(c)に示す。このプレートの長穴に素子を配置し、厚さ 35 μm の銅箔上にエポキシ系接着材を用いて固定した。プローブの最厚部は、この部分で 0.518 mm であった。素子には制御電流 10 mA を流すための電極とホール電圧を検出するため

の電極があり、ここへの配線は外径 0.11 のエナメル線をはんだ付けした。磁石列の外側にある D-sub コネクタまでは、液晶ポリマー台座に銅箔導線を貼りつけた厚さ 80 μm のプリント基板を使用した。さらに素子近傍の温度を測るため、フィルム式測温抵抗体を配置している。これらの信号はベースプレートに用意した深さ 200 μm の溝を通して取り出す。

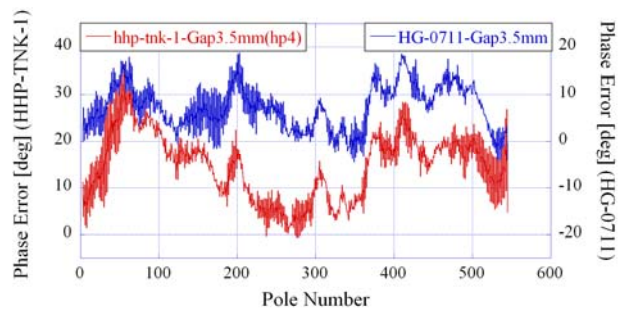
4. 磁場測定による評価

2013 年夏にインストールする SACLA アンジュレタを測定対象として、従来型プローブと新規に開発したプローブの比較評価を行った。先述した 0.5 mm 薄型プローブを用いた磁場測定では、素子を固定した銅箔に生じる渦電流の影響で、プローブの位置変動が通常より大きかった。このため、素子プレートを銅箔セラミックから厚さ 1 mm のエポキシ基板に変更したプローブを使用した。測定結果を図 6 に示す。評価は SAFALI システムを用いて、ギャップ 4.0 mm と 3.5 mm の 2 つの条件で行った。

図 4(a)はギャップ 4.0 mm の測定結果で、横軸は磁極数、縦軸左に素子 A、縦軸右に素子 B の位相誤差を示す。位相誤差の標準偏差は、素子 A を使用した場合で 5.7 deg.、素子 B の場合は 5.4 deg.で、その微細構造もおおむね一致しており、この条件においては、素子 B がアンジュレタの磁場測定に十分適用できることを示している。一方ギャップ 3.5 mm においては、図 4(b)に測定結果を示すように、位相誤差の標準偏差は、素子 A が 7.5 deg.で、素子 B は 5.1 deg.であり、完全には一致していない。この理由は、測定系の誤差のほかにプローブの交換に



(a): ギャップ 4.0 mm の測定結果



(b): ギャップ 3.5 mm の測定結果

図 4: 位相誤差で表わした磁場性能の比較

よる測定位置のずれや磁場積分によるホール電圧のオフセット補正を行っていないことがあげられる。今後、これらを考慮した測定と評価を行う必要がある。いずれの測定も温度変動は 1 °C 以内で、温度による影響はほとんどない。

5. まとめ

真空封止アンジュレータの狭ギャップ化を見据え、厚さ 0.5 mm の 1 次元薄型ホールプローブを開発した。これを用いて測定したアンジュレータ磁場分布から評価した位相誤差は、従来のプローブと同等の値を示しており、本プローブを用いてギャップ 2.5 mm 以下の狭ギャップ条件でも磁場測定ができる見通しを得た。一方、ギャップ 3.5 mm における測定では、ホール電圧のオフセットに起因すると思われる測定誤差により、従来の測定を完全には再現しなかった。今後、これを考慮して評価を行う必要がある。また、ギャップ 2.5 mm 以下の条件でも磁場を測定し、これに基づく磁場の調整効果を確認する予定である。

プローブについては、水平・垂直磁場を測定するために素子を追加して 2 次元化を図り、さらに、素子温度をより正確に測るために、温度センサーの小型化と配置の変更を行う。

6. 謝辞

薄型ホールプローブを開発するにあたり、旭化成エレクトロニクス株式会社より、ホール素子をご提供いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T. Tanaka, et al., "In-situ Undulator Field Measurement with the SAFALI System", Proceedings of the 29th Free Electron Laser Conference, Novosibirsk, Aug. 26-31, 2007
- [2] <http://www.akm.com/>