

KEKにおける”その場”挿入光源磁場分布測定器開発の現状

PRESENT STATUS OF “IN-SITU” ID MAGNETIC FIELD MEASUREMENT SYSTEM DEVELOPMENT AT KEK

阿達 正浩^{#, A,B)}, 土屋 公央^{A,B)}, 塩屋 達郎^{A)}, 江口 柊^{A)}, 加藤 龍好^{A,B)}

Masahiro Adachi^{#, A,B)}, Kimichika Tsuchiya^{A,B)}, Tatsuro Shioya^{A)}, Shu Eguchi^{A)}, Ryukou Kato^{A,B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

Abstract

Low-emittance 3-GeV “KEK-LS” [1,2,3] rings have been designed at KEK. KEK-LS’s low emittance permits undulators to produce extremely high brightness light ranging from VUV to X-ray. Brightness of undulator light strongly depends on the phase error of its periodic magnetic field [4]. Then a precise magnetic field adjustment is required in order to prevent the reduction of the light source performance. Generally, the adjustment is performed by the conventional field measurement system equipped with hole-probes on a huge stone table. But, for the in-vacuum undulator, the measurement must be performed without the vacuum chamber in order to access the field from the air side. Then the additional phase error caused by reattaching the chamber is not negligible for the low emittance rings. Therefore, some groups have developed measurement systems available for the direct field measurement inside the chamber [5,6]. We have started R&D on such compact measurement system. Our system is compacted and stabilized by utilizing the rigid metal beam of the undulator frame instead of the stone table. In this paper, we report the present status of the measurement system development.

1. はじめに

今日のシンクロトロン光源加速器では、アンジュレータと呼ばれる装置を用いて生成した高輝度光をユーザー実験に供与している。ユーザー実験では、高輝度光をプローブとして使い、物質が持つ様々な機能を探っている[7]。

シンクロトロン光の強さを表す指標の一つである輝度は、

$$\mathfrak{B} = \frac{\mathfrak{F}}{4\pi^2 \Sigma_x \Sigma_y \Sigma_{x'} \Sigma_{y'}} \quad (1)$$

と、光の全光束 \mathfrak{F} を、光の位置拡がり $\Sigma_{x,y}$ および角度拡がり $\Sigma_{x'},\Sigma_{y'}$ で割った量で表される[8]。ここで、 $\Sigma_{x,y}$ および $\Sigma_{x'},\Sigma_{y'}$ は、回折限界光の位置拡がり σ_r および角度拡がり $\sigma_{r'}$ を用いて、

$$\begin{aligned} \Sigma_{x,y} &= \sqrt{\sigma_{x,y}^2 + \sigma_r^2}, \\ \Sigma_{x',y'} &= \sqrt{\sigma_{x',y'}^2 + \sigma_{r'}^2}, \\ \sigma_{x,y} &= \sqrt{\beta_{x,y} \varepsilon_{x,y} + \left(\eta_{x,y} \frac{\sigma_E}{E}\right)^2}, \\ \sigma_{x',y'} &= \sqrt{\left(1 + \alpha_{x,y}^2\right) \varepsilon_{x,y} / \beta_{x,y} + \left(\eta'_{x,y} \frac{\sigma_E}{E}\right)^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $\alpha_{x,y}$ と $\beta_{x,y}$ はそれぞれツイスパラメータであり、 $\eta_{x,y}$ はエネルギー分散、 σ_E/E はエネルギー拡がりである。式から、輝度が電子ビームのエミッタンス $\varepsilon_{x,y}$ に強く依存することがわかる。

そのため、電子蓄積リングはより低いエミッタンスを目指して開発される。

KEKのPhoton Factoryは電子エネルギー2.5 GeV、エミッタンス35 nm rad、蓄積電流450 mAのPFリングと、6.5 GeV、283 nm rad、60 mAのPF-ARの2つのリングを有し、1982年より日本で初めての放射光利用施設として稼働している。現在KEKでは、次期リング型光源KEK放射光(KEK-LS)(仮称)計画を進めている。これまでに、エネルギー3 GeV、ラティスエミッタンス132.5 pm radの20セルHybrid Multi-Bend Achromat (HMBA)ラティス[1,2]、HMBAラティスを改良して挿入光源によるエミッタンスの上昇を低減あるいは解消した2種類のDQBAラティス案[3]の設計・提案してきた。KEK-LSリングには、18箇所5.6 mの長直線部と、20箇所1.2 mの短直線部に挿入光源が設置可能であり、これらに加えて20箇所の偏向電磁石からも放射光を取り出すことが可能である。このように多数の放射光取り出し点を設けることで、現在稼働中のPFリングおよびPF-ARで展開されている広範なサイエンスをKEK-LSで展開するとともにさらに進展することを目指している。

現在我々のグループでは、KEK-LSのビーム性能を活かすための、挿入光源に関する要素技術開発を進めている。

KEK-LSリングは、設計蓄積電流500 mAにおいて、パンチ内電子散乱(IBS)により水平エミッタンス314.7 pm rad、垂直エミッタンス8 pm radまで上昇すると見込まれる[1,2,3]。エミッタンスの上昇は、式(1)、(2)にしたがって輝度の低下を招く。そこで、KEK-LS計画では、高調波空洞を使ってIBS効果を抑制し、輝度低下を抑制することを検討している。

[#] masahiro.adachi@kek.jp

このような輝度の低下は様々な要因でおこりうるものであり、後述するように、アンジュレータ磁石列の位相誤差によっても輝度低下が生じる。特に真空封止アンジュレータ (IVU)[9]では、磁石列に使用する磁石の数が非常に多く、さらに、実験では高い次数の光も使用されるため、位相誤差による輝度低下が他の光源装置に比べて顕著に現れる。本稿では、KEK-LS の挿入光源の磁石列調整において必要となるホールプローブ磁場測定器システムの開発に関してその現状を報告する。本磁場測定器は位相誤差を低減するために必須な要素技術である。

2. 磁石列の一般的な調整手法

PF リングおよび PF-AR に設置するアンジュレータは、Figure 1 に示すような一般的なホールプローブ磁場測定システム[10]を用いて磁石列を調整した後、リングに設置される。

図に示すように、一般的な測定システムは長大な石定盤の上にリニアガイドを固定し、リニアガイドをレールとした可動ステージの上にホールプローブを取り付けている。システムはアンジュレータと離れて設置され、腕を伸ばしてホール素子が磁石列磁場にアクセスする。そのため、真空容器内に磁石列が取り付けられている IVU などの磁石列の磁場分布を測定することはできない。したがって、IVU の磁石列調整は、真空容器を取り外した架台に磁石列のみを取り付けて実施する。その後、調整済みの磁石列を架台から一旦取り外し、真空容器を架台に組み付けた後、磁石列を真空容器内に取り付け、その後、リングに設置される。

いくつかのグループではその場磁場測定システム[5,6]が開発され、このような架台からの磁石列の取り外し・取り付け作業などによって位相誤差が増すことも報告されている[11]。このような中、我々も KEK-LS に向けて新たな磁場測定システムの開発を開始した。

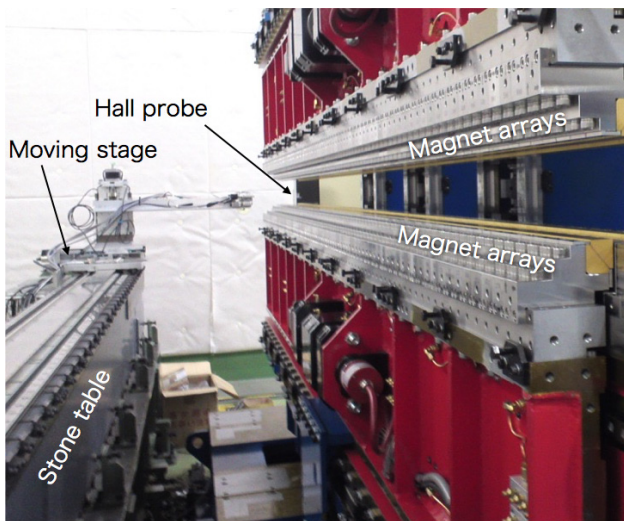


Figure 1: Conventional hall-probe magnetic measurement system.

3. KEK-LS の真空封止アンジュレータ

KEK-LS の標準的な光源装置の一つとして、磁場周

期 20 mm、周期数 250 の IVU を提案している[1-3]。長さ 5 m にも及ぶ長尺の磁石列を調整するためには、測定システムに高い安定性が求められる。

なお、磁石列に使われる磁石の数は約 2000 個もの膨大な数になる。そのため、磁石をランダムな配列で取り付け後に磁石列調整を行った場合、調整には膨大な時間が必要となることが予想される。そのような問題を回避する手法として、KEK では数値的アニーリング法を応用した初期磁石配列の最適化法を開発し、実際にこれを使用して良好な結果を得ている[10]。したがって、調整は現実的な時間内に完了すると考えている。

さて、輝度の低下率(位相誤差 0 度の場合)に対する輝度の比)は以下の式を用いて計算される[4]:

$$R = \exp(-n^2\sigma_\phi^2) \quad (3)$$

ここで、 n は放射光の次数、 σ_ϕ は磁石列磁場と光の位相誤差の rms 値である。

Figure 2 に、 R を 0.95 から 0.3 まで変化させた場合に、各放射光次数に対して必要となる位相誤差の変化を示す。図から、次数が高くなるにつれ、輝度の低下を抑えるためにはより小さい位相誤差が必要となることがわかる。例えば、3 度程度の位相誤差に調整できた場合、輝度は 5 次光で 10%程度、9 次光では 20%程度、13 次光では 40%程度まで低下する。

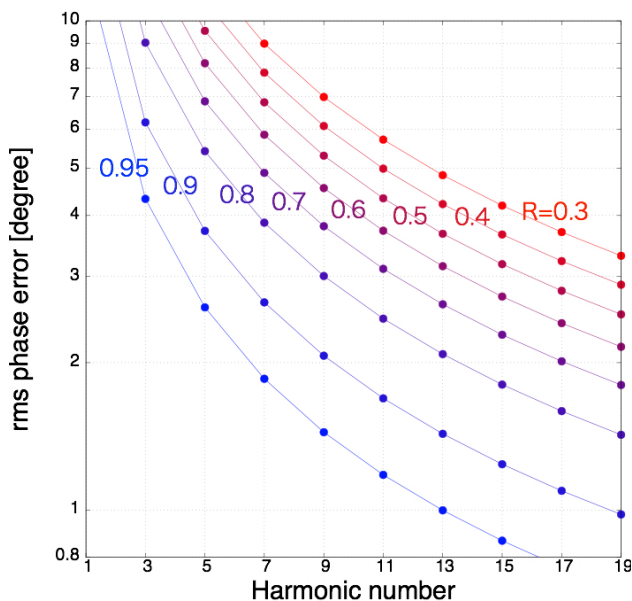
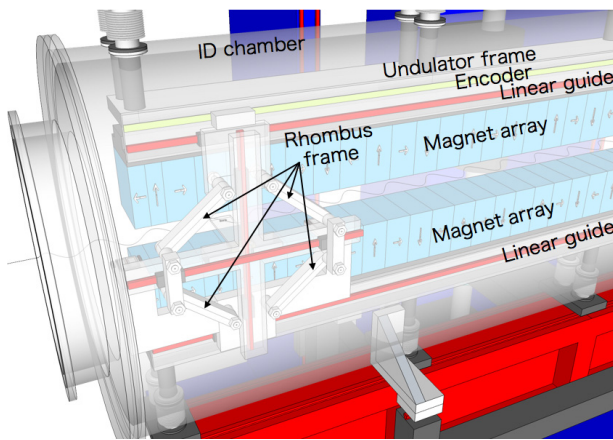


Figure 2: Reduction factor contour lines in the plane of harmonic number and rms phase error.

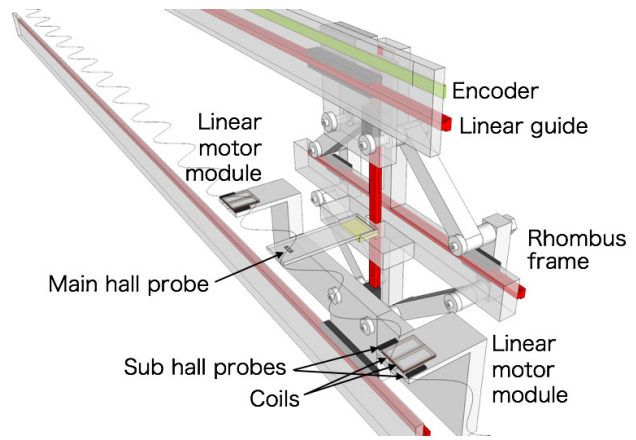
4. 新磁場測定システム

Figure 3(a)および(b)に、現在開発中の磁場測定システムの概要を示す。新システムは挿入光源架台の高剛性梁に取り付けた 2 本のリニアガイドをレールとして、その上に菱形のフレームを乗せた可動ステージを乗せ、フレームの中心にメイン・ホールプローブを支持する。可動ステージには 2 台のリニアモーター・モジュールを取り付け、ステージを駆動する。以下に、システムの特徴を示す。

- 2 本のリニアガイドは直接アンジュレータ架台を構



(a) overview (perspective drawing)



(b) detail

Figure 3: Schematics of developing measurement system.

成する高剛性の梁に取り付けるため、長距離に渡って安定性が確保できる。磁石列間距離の変更(ギャップ変更)操作に対して、菱形フレームは機械的にホールプローブの位置を垂直方向に固定するため、ギャップ変更にもなうホールプローブ位置調整が不要となる。

- リニアモーター・モジュールを 2 台使用することで磁石列の端から端まで測定することが可能となる。
- 1 台のリニアモーター・モジュールに組み込んだサブ・ホールプローブにより、コイルの極性を自動的に切り替えて、挿入光源の磁石列を利用して駆動するため、リニアモーターのための専用の磁石列等を必要としない。

挿入光源の磁石列間最短距離(最小ギャップ)は、長直線部・短直線部ともに 4mm と見込んでいる。メイン・プローブとして、Figure 4 に示す薄型の SENISE 製ホールプローブ S をホルダー PHS-H に組み込んだものを調達した。ホルダーを含めた厚みは 1.5mm 程度であり、KEK-LS の挿入光源の磁場分布を測定可能である。

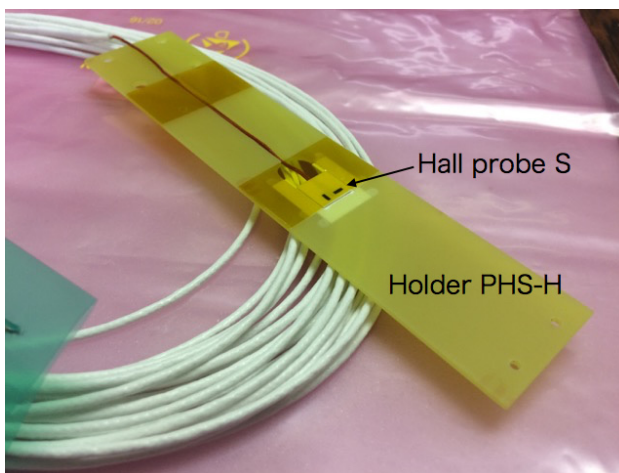


Figure 4: SENIS thin hall probe.

5. 開発の現状

Figure 5 に示すように、測定システムを試作し、テストベンチとして作製した小型アンジュレータに取り付け、試験動作を行った。小型アンジュレータは、大気型アンジュレータであり、ギャップ変更機能を備えている。システム全体の取り回しを容易に見ることができる。

動作試験として、Figure 5 の挿入図内に示すように菱形フレームに 1 個のリニアモーター・試作モジュールを取り付け、リニアモーター駆動によりステージを動かすことに成功した。現在、測定システムの平行度や平坦度などの測定を試みている。

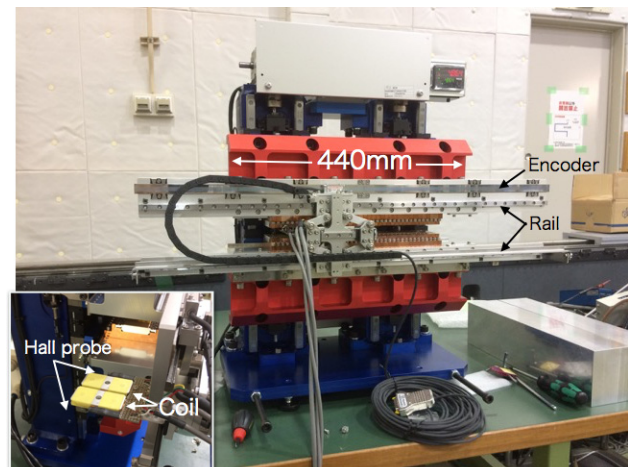


Figure 5: Test machine.

6. 今後の展開

今後、メイン・ホールプローブを取り付け、リニアモーター駆動による磁場分布測定を行う予定である。

測定システムは Figure 5 に示すような大気型アンジュレータや IVU いずれにも対応できるように設計を進めているが、まずは大気開放された IVU の真空容器内での磁場分布測定が目標となる。その後、部品の真空対応を

進め、真空引きした IVU 真空容器内での磁場測定を目指すことになる。システムの真空対応が完了すれば、将来的には冷却型永久磁石アンジュレータ(Cryogenic permanent magnet undulator)[12]などの次世代型アンジュレータ開発においても磁場分布を直接測定可能な手法になるものと期待している。

参考文献

- [1] K. Harada *et al.*, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, Busan Korea, pp. 3521-3253 (2016).
- [2] KEK-LS CDR ver.1.1;
http://www2.kek.jp/imss/notice/assets/2017/05/22/KEKLS_CDR_170522.pdf
- [3] K. Harada *et al.*, Proc. of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, pp.2675-2677 (2017).
- [4] R. P. Walker, Phys. Rev. ST Accl. Beams, vol. 16 p. 010704 (2013).
- [5] T. Tanaka *et al.*, Phys. Rev. ST Accl. Beams, vol. 12 p. 120702 (2009).
- [6] M. Musardo *et al.*, Proc. of IPAC2015, Richmond, USA, p.1693 (2015).
- [7] D. Attwood *et al.*, Science, vol. 228 pp. 1265-1272 (1985).
- [8] K.-J. Kim, AIP Conf. Proc., vol. 184 p. 565 (1989).
- [9] S. Yamamoto *et al.*, Rev. Sci. Instrum., vol. 60 p.400 (1992).
- [10] K. Tsuchiya *et al.*, Rev. of Sci. Instrum., vol. 86 p.043305 (2015).
- [11] C.-K. Yang *et al.*, IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, vol. 24 p. 9001205 (2014).
- [12] T. Hara *et al.*, Phys. Rev. ST Accl. Beams., vol. 7 p. 050702 (2004).