

偏極解析スーパーミラーアナライザー用ステージの開発

総合科学研究機構(CROSS) 中性子科学センター,^A 東京大学 物性研究所

森川利明, 大石一城, 中島多朗^A

Development of stage mechanism for polarization analyzer using supermirrors

Neutron Science and Technology Center, Comprehensive Research Organization for Science and Society (CROSS)

^AISSP, University of Tokyo

Toshiaki Morikawa, Kazuki Ohishi, Taro Nakajima^A

e-mail: t_morikawa@cross.or.jp

Published online: 20 December 2024

要約

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 物質・生命科学実験施設 (MLF) 内のビームラインである中性子小角・広角散乱装置 (BL15 大観) では、非偏極の中性子ビームを用いた実験に加えて、偏極中性子ビームを用いて試料の磁気構造を解析する偏極解析実験も行われている。試料で磁気散乱された中性子のスピン状態を観測するために BL15 では ³He スピンフィルターを用いた偏極子の開発が行われてきた。本レポートでは、マグネットと共存し、偏極率の高い偏極解析を可能にする中性子スーパーミラーを用いた偏極解析アナライザー用ステージの開発について述べる。ただし、中性子スーパーミラーを用いたアナライザーはカバーする立体角が小さいことから、BL15 の観測可能エリアを全てカバーするのではなく、試料からの磁気散乱角度に合わせアナライザーを配置する必要がある。そこで任意の磁気散乱を解析するため、偏極解析アナライザー駆動部の手動ステージを段階的に自動ステージ化することを行った。本装置による偏極解析の高度化により得られた実験の効率化についても述べる。

Abstract

In the Small- and Wide-Angle Neutron Scattering Instrument (BL15 "TAIKAN") at the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), in addition to experiments using unpolarized neutron beams, polarization analysis experiments are also conducted to analyze the magnetic structure of samples. A polarization analysis using ³He spin filter has been developed at BL15. To implement polarization analysis using supermirrors, which is suitable for polarization neutron experiment with magnets, we developed a stage for the polarization analysis analyzer. However, due to the small size of the analyzer using supermirrors, it does not cover the entire observable area of BL15, and the analyzer needs to be positioned according to the magnetic scattering angle from the sample. To overcome this issue, we also converted the manual stages of the drive unit to automatic ones, which allows us to study magnetic signal at arbitral Q.

Keywords

偏極解析、アナライザー、コリメーター、polarization analysis、analyzer、collimator

1. はじめに

中性子の特色を活かした実験手法の一つに、偏極中性子ビームを用いた磁気構造解析がある。中性子小角・広角散乱装置 (BL15 大観) では、非偏極中性子ビームに加え、偏極中性子を試料に照射することが可能である[1, 2]。カイラル磁性体における実験では、BL15 の偏極中性子ビームを用いて、カイラルらせん磁気構造が右巻きか左巻きかの判別実験が行われてきた[3]。また、動的核偏極法を用いて、水素の位置情報や、水素の凝集・分散状態を抽出する実験も行われている[4]。これらの実験は、試料に入射される中性子のスピンの偏極していることで完結する一方、多くの磁性体試料の磁気構造を決定するためには、散乱された中性子のスピンの反転するかどうかを判別することが重要となる。これまで、BL15 では ^3He スピンフィルターをアナライザーとして用いた偏極解析実験により、非干渉性散乱の効果を排除する装置開発が行われてきた[5]が、この ^3He スピンフィルターは、均一磁場中に保持する必要があるため、超伝導磁石などを用いた磁性体の実験には適さない。この問題を解決するには、アナライザーとして中性子スーパーミラー (以下、スーパーミラー) を用いた偏極解析実験環境の整備を行う必要があった。また、図 1 に示すように、スーパーミラーの断面積は $30\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 程度であるため、BL15 の検出器で検出可能な範囲を全てカバーできない。そこでまず第 1 段階として、特定の方向の磁気散乱を偏極解析するための偏極解析システムを CROSS 開発課題を用いて開発してきた[6]。本レポートでは、スーパーミラーをアナライザーとして用いた偏極解析アナライザー用ステージ (以下、偏極解析ステージ) の開発と、そのステージを特定の磁気散乱の位置に遠隔操作で移動するための自動化について報告する。

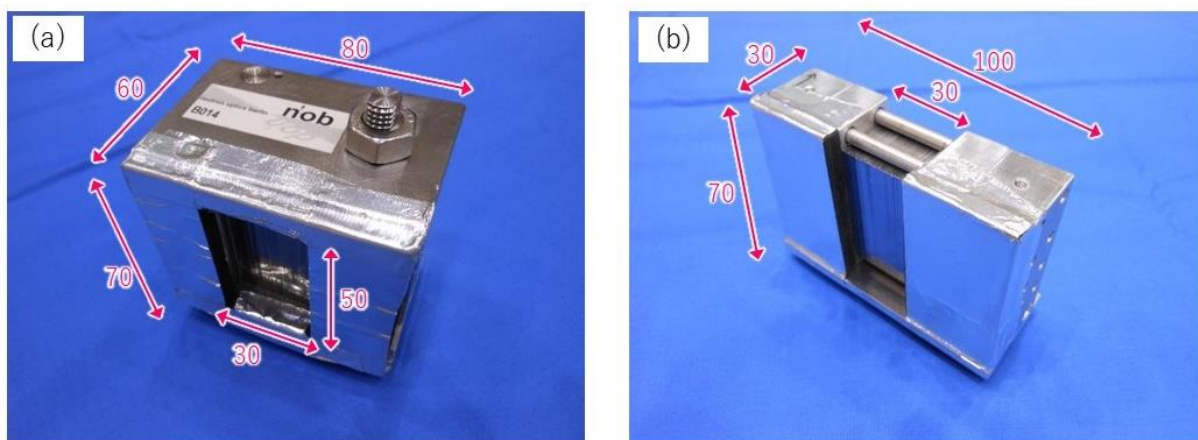


図 1. (a)中性子スピンを検極するためのアナライザー。
(b)平行な中性子ビームを透過するためのコリメーター (図中寸法単位: mm)。

2. 設計について

2.1 設置スペースの確認

偏極解析ステージを設置する場所は、試料ステージ上の試料と真空散乱槽との間となる (図 2(a))。真空散乱槽へ中性子が入射する面には板厚の薄いアルミ窓が取り付けられており、そのアルミ窓を保護するための防護壁が設けられている。防護壁は実験中、ピットと呼ばれる下方のエリアへ収納される構造となっているため、試料ステージ周辺は床面が掘り込まれた造りになっており、偏極解析ステージを固定できる面積が小さい。しかし、試料ステージのベースプレートに、M12 のねじ穴が設け

られていることから、偏極解析ステージの設置には、このねじ穴を利用することとした。また、防護壁が移動するスペースにも十分な配慮が必要であることを確認した(図 2(b)(c))。

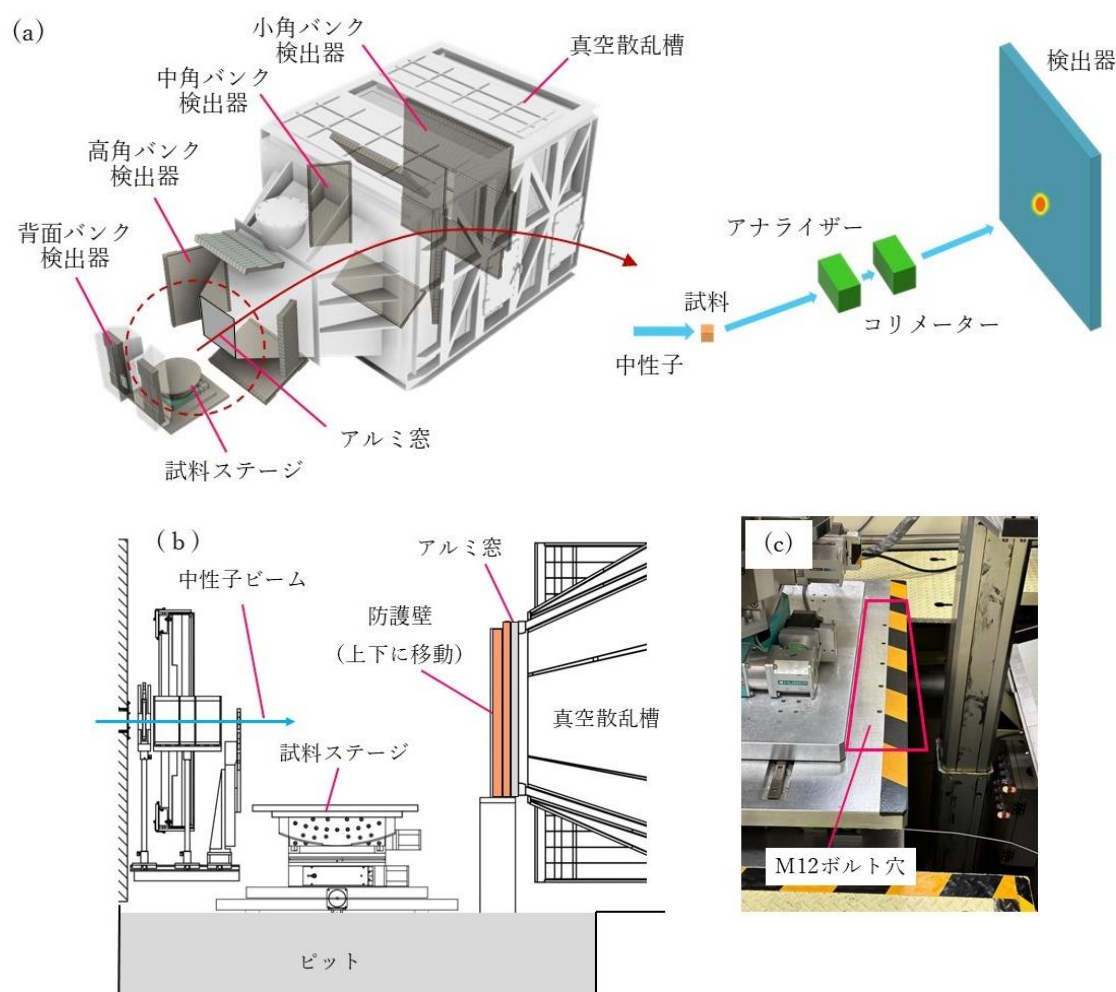


図 2. (a)BL15 の検出器配置と偏極解析の概要図。

(b)試料ステージ周辺の構造（側面から見た図）。

(c)偏極解析ステージを設置する試料ステージ下流側のスペース。

2.2 試料環境機器との距離の確認

偏極解析では測定試料に磁場を印加するため、BL15 の試料環境機器である 4 T 超伝導磁石及びヘルムホルツコイルが使用されることを想定して検討した。図 3(a)で示すように、試料位置から真空散乱槽のアルミ窓までの距離は約 750 mm である。図 3(b)は試料ステージに 4 T 超伝導磁石を設置した様子である。水平方向の磁場を印加するコイル配置のため、機器本体から真空散乱槽までに十分なスペースがある。一方、図 3(c)に示すヘルムホルツコイルは任意の方向に磁場を印加するコイル配置であることから、外径が試料ステージ直径とほぼ同じであり、真空散乱槽までのスペースは 260 mm である。

以上のことから、偏極解析ステージは、試料ステージからアルミ窓防護壁の間の約 260 mm のスペースに設置すると共に、駆動範囲をこの範囲に収めるように設計する必要がある。

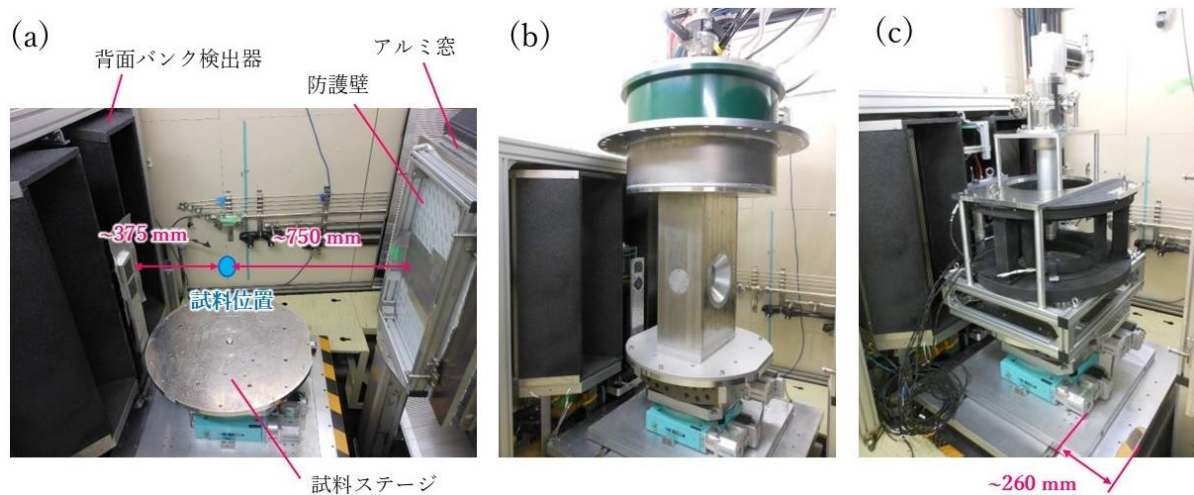


図 3. (a)BL15 試料ステージ周辺の様子。BL15 試料ステージに設置した
(b)4 T 超伝導磁石及び(c)ヘルムホルツコイル。

2.3 移動範囲の確認

図 2(a)に示すように BL15 には、透過散乱を検出するため散乱角度（バンク）別に小角バンク、中角バンク、高角バンクの検出器がある。図 4 に示すように、初回の設計では検出エリアを小角バンクから中角バンクに限定し、そのバンクをカバーする移動範囲を、偏極解析ステージ設置位置中心線上で求めた。その結果、X 軸方向、Y 軸方向共に 337 mm が必要移動量の最小値となることが分かった。

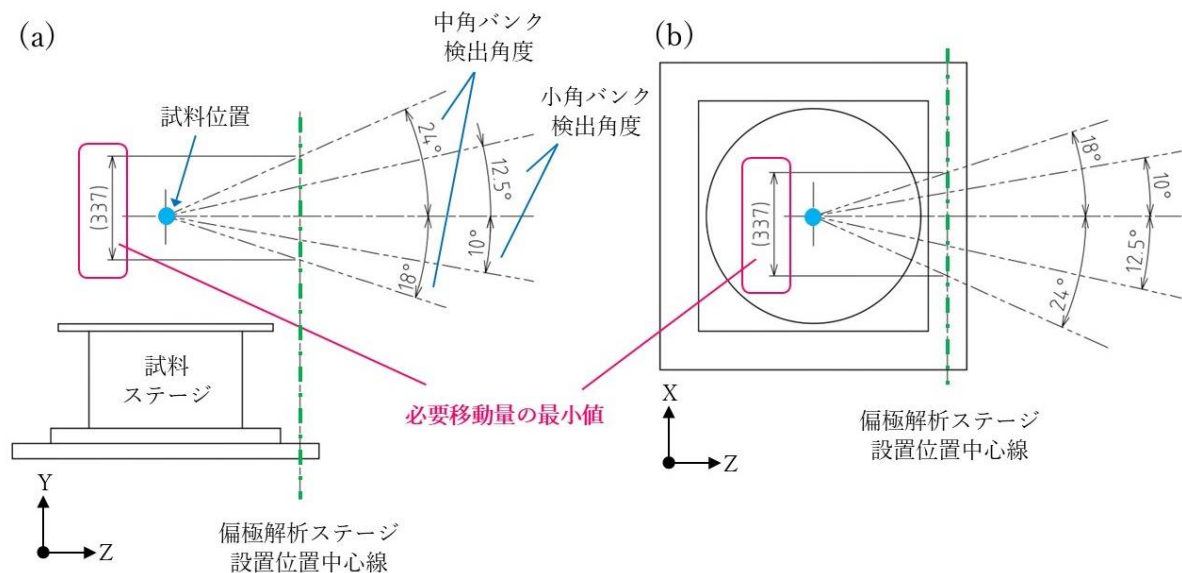


図 4. 偏極解析ステージ必要移動量の確認図。 (a)試料ステージ側面から見た場合。
(b)試料ステージ上面から見た場合。

2.4 駆動部の構成

偏極解析ステージの初回の設計として、表 1 に示すように、アナライザーとコリメーター各々の回転及び X 軸移動は自動ステージとし、それ以外は手動ステージとすることにした（図 5）。

表 1. 駆動部の仕様一覧

ステージの種類	駆動方法	メーカー、型式	
		アナライザー	コリメーター
回転	自動	①KOHZU製：RA07A-W01	①KOHZU製：RA07A-W01
X軸	自動	②KOHZU製：XA07A-L201	②KOHZU製：XA07A-L201
ゴニオ	手動	③シグマ光機製：GOHT-60A35B	
回転	手動	④シグマ光機製：KSPB-906M	
Y軸	手動	⑤ミスミ製：PKUL20-520-A-SCL-DP-IKM-LT	
X軸	手動	⑥ミスミ製：PKUE20-570-A-SCL-DP-WT	

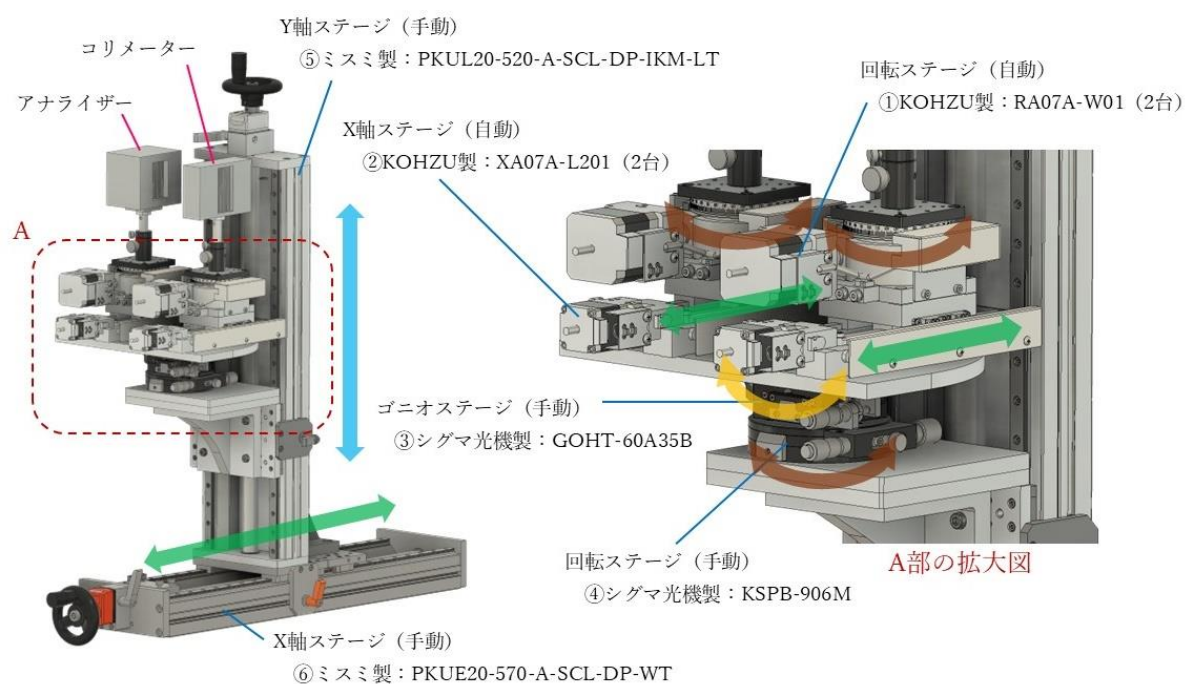


図 5. 偏極解析ステージの構造 (矢印は駆動の方向を表す)。

3. 実験での利用

図 6 に示した本ステージは CROSS 開発課題(2019C0006)で開発を行い[6]、最初の MLF 長期課題 (2017L0701) で実験に用いられた[7, 8]。例を示すと、単純な結晶構造を持つ EuAl_4 では、直径 3.5 nm の超高密度な磁気スキルミオンを生成していることを発見し、磁場や温度によって磁気スキルミオンの並び方が正方格子から菱形格子へと変化することを見出した[7]。また、異常ホール効果を示す EuAs では、ゼロ磁場下で、Eu のスピンモーメントが三角格子面に平行に配列しており、三角格子面内で隣接するスピンモーメントの間には反強磁性的な相関があることが分かった。このことから、磁気秩序温度以上において、面直方向に磁場を加えることでスピンが三角格子面から起き上がり、非共面的に並ぶようなスピン揺らぎの存在が示唆された[8]。

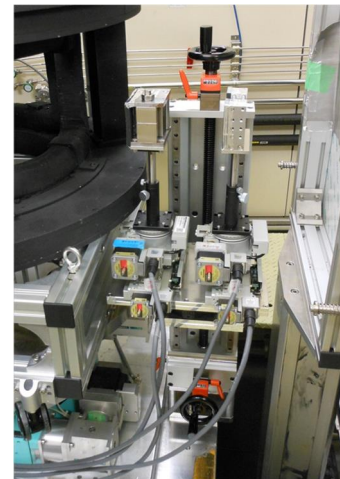


図 6. BL15 に設置された偏極解析ステージ。

上記のような成果が得られる一方、アナライザーを目的の位置に移動するためには、分光器室に入室して手動で位置を調整する必要があった。入室の際には、都度ビームを停止しなければならない。この課題を克服して実験効率を高めるため、手動ステージ部分の自動化が必要となった。

4. 偏極解析ステージの高度化

上記の結果をふまえて、図 5 に示した偏極解析ステージの高度化に着手した。具体的には、これまで手動であった偏極解析ステージ全体の X 軸方向の移動、及びアナライザーとコリメーター搭載ステージの回転を自動化し、分光器室内に入ることなく目的の位置と角度に移動できるようにした。また、高角バンクの散乱中性子もカバーするために、駆動範囲の拡大も併せて行った。

4.1 X 軸ステージの自動化

ステージ全体を X 軸方向に移動させる X 軸ステージは、一軸ユニット（ミスミ製：KUB1210S-760-150-SC14-C）とモーター（オリエンタルモーター製：5 相ステッピングモーター PKE569AC）を用いて自動化した。手動のときの X 軸ステージのストロークは 570 mm であったが、高角バンクもカバーするため、自動化した際にストローク長を 760 mm にして移動範囲を延長した。

4.2 回転ステージの自動化

図 5 中の④に示した回転ステージを、手動回転ステージ（シグマ光機製：KSPB-906M）から、自動回転ステージ（KOHZU 製：RA10A-W01）に変更した。

図 5 に示した偏極解析ステージでは、アナライザー及びコリメーター自体の駆動に採用した自動 X 軸ステージ（KOHZU 製：XA07A-L201）、自動回転ステージ（KOHZU 製：RA07A-L201）の大きさと荷重の問題から、偏極解析ステージの回転中心とアナライザーの回転中心を同一軸上に設計することができなかった。このため、回転ステージを自動化するのに併せて、偏極解析ステージの回転中心とアナライザーの回転中心を同一軸上に合わせるための構造変更も行った。

高度化後の駆動部仕様を表 2 に示す。また、偏極解析ステージの構造を図 7 に示す。

表 2. 高度化後の駆動部仕様一覧

ステージの種類	駆動方法	メーカー、型式	
		アナライザー	コリメーター
回転	自動	①KOHZU製：RA07A-W01	⑦KOHZU製：RA04A-W01
X軸	自動	②KOHZU製：XA07A-L201	②KOHZU製：XA07A-L201
回転	自動	⑧KOHZU製：RA10A-W01	
Y軸	手動	⑤ミスミ製：PKUL20-520-A-SCL-DP-IKM-LT	
X軸	自動	⑨ミスミ製：KUB1210S-760-150-SC14-C1	

※太字で示した部分が新たに自動化したステージ。

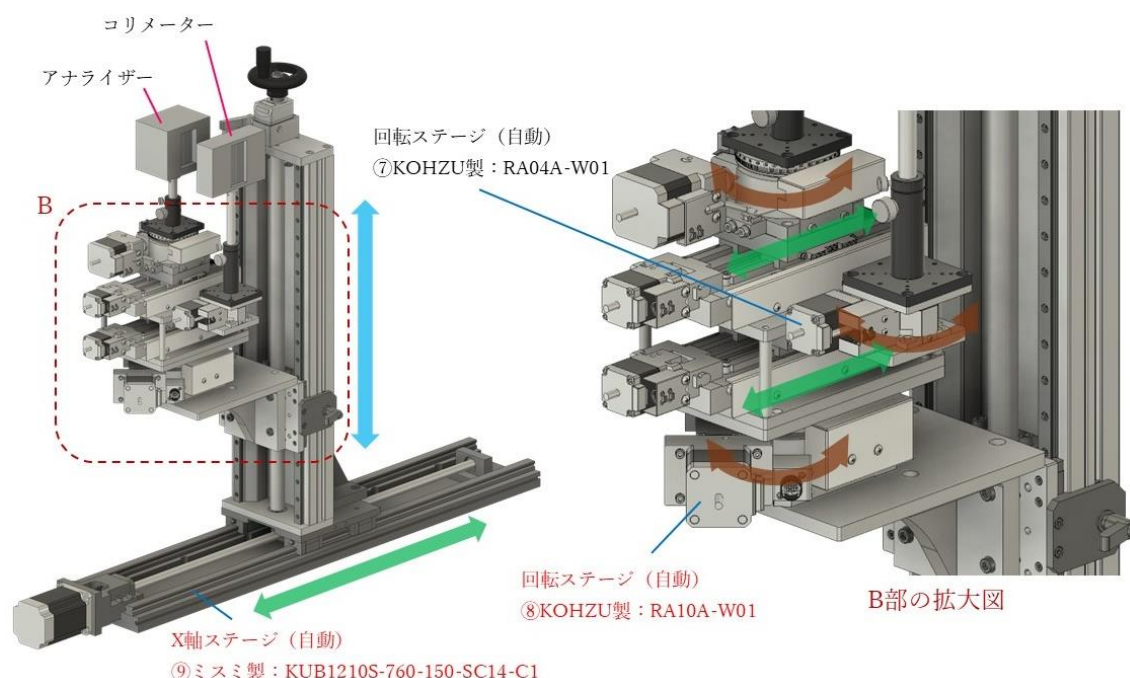


図 7. 高度化した偏極解析ステージの構造。

4.3 モータードライバー制御方法の改良

BL15 のビームライン上流光学機器や、試料環境機器のモーター駆動制御は、ツジ電子製のステッピングモーターコントローラー (ツジコン) をコントローラーとして、デバイス制御プログラム (IROHA2) [9] でパルス値制御している。これに対し、偏極解析アナライザーの自動ステージ (X 軸、回転) は KOHZU 製の物を採用しているため、専用の KOHZU 製モーターコントローラー (2 軸マスターモーターコントローラー ARIES、及び 2 軸スレーブモーターコントローラー LINX) とモータードライバー (2 軸ドライバーボックス TITAN-A II) を使用して制御していた。この際、機器の位置制御は ARIES に接続した PC で行うため、BL15 の測定プログラムに組み込んでいなかった。

そこで、ツジコンに対応した TITAN-A II 接続用ケーブルを製作し、ツジコンを介して KOHZU 製自動ステージを制御できるように改良した。これにより、他の試料環境機器等と同様、偏極解析ステージも IROHA2 のスクリプトを用いた制御が可能となった。

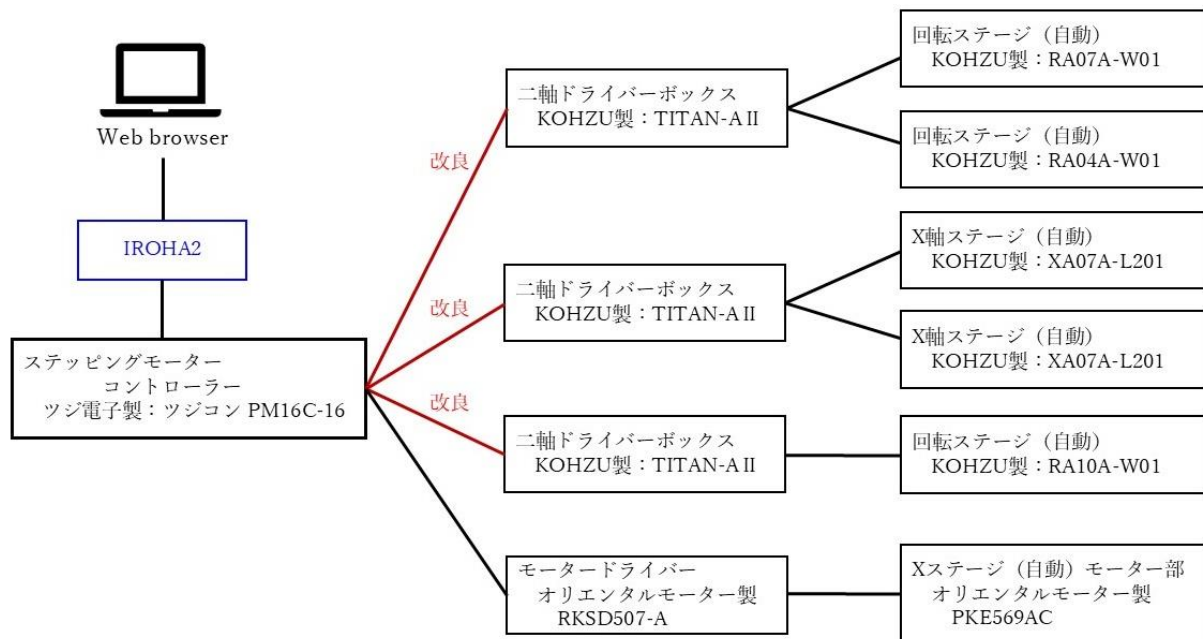


図 8. 自動ステージ制御系統図。

4.4 実験での利用

高度化後の偏極解析ステージを用いて、MLF 長期課題（課題番号：2022L0301）実験が実施された。図 9 に示すように、パルスマグネットを用いた測定にも偏極解析ステージが活用されている。偏極解析ステージの高度化により、アナライザーの駆動範囲が大きくなったため、初回の設計ではカバーできていなかった高角バンク検出器に観測される磁気散乱の偏極解析にも活用された。

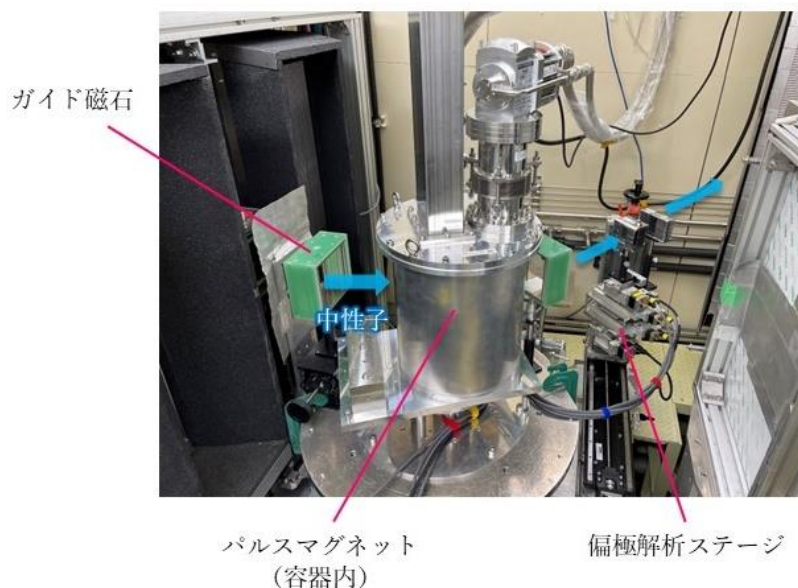


図 9. パルスマグネットと共に利用される偏極解析ステージ。

5. まとめと今後の展開

BL15 の偏極解析実験で用いるスーパーミラーアナライザー用偏極解析ステージを開発した。また、測定効率、実験精度を高めるため、手動ステージ部分を自動ステージへ高度化し、モータードライバー制御方法も改良した。本システムを用いた実験結果の詳細は、文献[6]を参照いただきたい。この偏極解析ステージは CROSS 開発課題及び 2 回の MLF 長期課題で活用されてきたが、BL15 試料環境機器として一般課題実験にも供していく。更なる高度化として、今後は仰角に対するアナライザーとコリメーターの位置関係の制御方法を検討していく。

Acknowledgement

本装置を用いた実験は、J-PARC MLF の長期課題（課題番号 2017L0701、2022L0301）、CROSS 開発課題（課題番号 2019C0006）で実施されました。また、装置製作の一部は JSPS 科研費 JP17H02815、JP19H01856 の助成を受けたものです。

References

- [1] S. Takata, J. Suzuki, T. Shinohara, T. Oku, T. Tominaga, K. Ohishi, H. Iwase, T. Nakatani, Y. Inamura, T. Ito, K. Suzuya, K. Aizawa, M. Arai, T. Otomo, and M. Sugiyama, JPS Conf. Proc. **8**, 036020 (2015)
- [2] J-PARC MLF, BL15 大観 試料環境・機器詳細情報,
https://mlfinfo.jp/doc/bl15/BL15_sample_environment.pdf
- [3] Y. Kousaka, N. Ikeda, T. Ogura, T. Yoshii, J. Akimitsu, K. Ohishi, J. Suzuki, H. Hirai, M. Miyagawa, S. Nishihara, K. Inoue, J. Kishine, JPS Conf. Proc. **2** 010205/1-6 (2014)
- [4] D. Miura, T. Kumada, Y. Sekine, R. Motokawa, H. Nakagawa, Y. Oba, T. Ohhara, S. Takata, K. Hiroi, T. Morikawa, Y. Kawamura, K. Ohishi, J. Suzuki, Y. Miyauchi, T. Iwata, J. Appl. Cryst. **54** 454-460 (2021)
- [5] T. Okudaira, Y. Ueda, K. Hiroi, R. Motokawa, Y. Inamura, S. Takata, T. Oku, J. Suzuki, S. Takahashi, H. Endo, H. Iwase, J. Appl. Cryst. **54** 1-9 (2021)
- [6] T. Morikawa, K. Ohishi, K. Hiroi, Y. Kawamura, S. Takata, J. Suzuki, and T. Nakajima, JPS Conf. Proc. **41** 011012 (2024)
- [7] R. Takagi, N. Matsuyama, V. Ukleev, L. Yu, J.S. White, S. Francoual, J.R.L. Mardegan, K. Kaneko, K. Ohishi, Y. Ōnuki, T. Arima, Y. Tokura, T. Nakajima, S. Seki, Nat. Commun. **13** 1472 (2022)
- [8] M. Uchida, S. Sato, H. Ishizuka, R. Kurihara, T. Nakajima, Y. Nakazawa, M. Ohno, M. Kriener, A. Miyake, K. Ohishi, T. Morikawa, M. S. Bahramy, T. Arima, M. Tokunaga, N. Nagaosa, M. Kawasaki, Sci. Adv. **7** ab15381 (2021)
- [9] <https://mlfinfo.jp/groups/comp/ja/iroha2.html>