

# 中性子電気双極子モーメント測定のための 加速器施設内の環境磁場補償システムの開発

## Development of an Ambient Magnetic Field Compensation System in an Accelerator Facility for the Neutron Electric Dipole Moment Measurement

所属機関：大阪大学                      代表研究者氏名：樋口 嵩  
研究期間：2021年10月20日～2022年7月31日  
滞在研究機関： TRIUMF, 4004 Wesbrook Mall, Vancouver BC V6T 2A3, Canada  
共同研究者等： Dr. Beatrice Franke

The purpose of this research project is to develop an essential component of an experiment to measure a neutron electric dipole moment (nEDM), which is being developed by the international TUCAN (TRIUMF Ultra-Cold Advanced Neutron) collaboration. The nEDM is closely related to searches for origins of matter-antimatter asymmetry of the universe, and its search has significant impacts in the field of particle physics and cosmology. The nEDM measurement at the target precision requires an extremely stable magnetic field in the apparatus. One challenge in achieving the required magnetic field stability is a strong background magnetic field in the accelerator facility, which could possibly saturate a magnetically shielded room made with mumetal and reduce its shielding performance. To solve this problem, the author is developing a system consists of fluxgate magnetometers and a set of coils which counteract the background field and prevent the saturation of the magnetic shield. During the period supported by the Oversea Research Support of the Yamada Science Foundation, a basic design based on electromagnetic simulations was completed, and on-site measurements were performed to characterize shifts of magnetic fields by operational conditions of neighboring experiments.

### 研究背景

現在の素粒子物理学の最も重要な課題のひとつに宇宙の物質と反物質の間の非対称性の問題がある。現在の宇宙は、反物質よりも物質が圧倒的に優勢に存在するがその起源は完全には解明されていない。物質優勢の創成のシナリオにおいて、CP対称性（C：荷電、P：パリティ）の破れが重要な役割を果たすと考えられているが、素粒子の標準模型のCP対称性の破れは、観測されている物質優勢を説明するには遥かに足りない。そこで、標準模型を超えたCP対称性の破れの起源の探索が行われており、そこで重要な役割を果たすのが、中性子の電気双極子モーメント（Neutron Electric Dipole Moment, nEDM）探索である。有限のnEDMは時間反転（T）対称性を破り、CPT定理

を仮定するとこれはCP対称性の破れと等価であるため、nEDMの上限値の精密測定によって高感度でCP対称性の破れを探索できる。現在のnEDMの上限値は、 $1.8 \times 10^{-26} \text{ ecm}$  (90% C.L.) [1]であり、超対称性理論などの有力な標準模型を超える理論モデルによれば、あと数桁の精度向上で有限のnEDMが観測される可能性が示唆されている。そのため、nEDM測定は、標準模型を超える理論の検証としても有用である。nEDM測定実験には、物質容器に蓄積可能な超低エネルギー（運動エネルギー $\leq 300 \text{ neV}$ ）の中性子、超冷中性子（Ultra-Cold Neutrons, UCN）が用いられるが、実験に用いることのできるUCN数がnEDMの測定精度を統計的に制限している。

著者が所属する TUCAN (TRIUMF Ultra-Cold Advanced Neutron) 国際共同研究チームでは、現在カナダ・バンクーバーの TRIUMF 研究所に建設中の超流動ヘリウムを用いたスーパーサーマル UCN 生成法による加速器駆動型高強度 UCN 源 [2] を用いることで、現在の上限値よりも一桁高い統計精度の nEDM 測定を行うことを目指している。本研究は、このための nEDM 測定装置の一部である、環境磁場補償システムの開発に関わるものである。

## 研究目的

実験による nEDM 測定原理は、電磁場中における蓄積された UCN の歳差周波数測定に基づく。中性子の磁気モーメントと nEDM をそれぞれ  $\mu_n, d_n$  とすると、電場  $\vec{E}$ 、磁場  $\vec{B}$  中での中性子のスピン歳差周波数は、電場と磁場が平行 ( $\uparrow\uparrow$ ) および反平行 ( $\uparrow\downarrow$ ) の場合について、それぞれ以下のように表される。

$$\omega_{\uparrow\uparrow} = (2\mu_n|\vec{B}| + 2d_n|\vec{E}|)/\hbar$$

$$\omega_{\uparrow\downarrow} = (2\mu_n|\vec{B}| - 2d_n|\vec{E}|)/\hbar$$

2つの場合の周波数差から nEDM が

$$d_n = \hbar(\omega_{\uparrow\uparrow} - \omega_{\uparrow\downarrow})/(4|\vec{E}|)$$

によって求められる。上記ではサイクル間の磁場が等しいと仮定しているが、実際には、UCN が感じる測定サイクルごとの磁場変動が測定精度を制限する。目標としている精度で nEDM を測定するためには、サイクルごとの磁場変動を 10 pT 未満に抑えることが要求される。この極めて安定した磁場環境を作り出すために、高い磁化率をもつミューメタル製の磁気シールドを使用する。TUCAN 共同実験が現在製作している磁気シールドルーム (Magnetically Shielded Room, MSR) は、4 層のミューメタルからなり、最外層が約 3.5 m × 3.5 m × 3.5 m のサイズである。有限要素法による静磁場シミュレーションによれば、典型的な外部磁場変動 150 nT を 10 pT オーダーに抑制することができる見込みである。ただし、ここで、MSR を運用するうえで、実験装置が設置される環境に由来する大きな課題がある。TUCAN 実験の装置が置かれる、TRIUMF の Meson Hall という施設には、サイクロトロン加速器の漏れ磁場に主に由来する最大で約 370  $\mu$ T の強い背景磁場が存在する。このような強い磁場は、ミューメタルを飽和させてしまう恐れがため、この環境磁場を打ち消す磁場を作りだし、

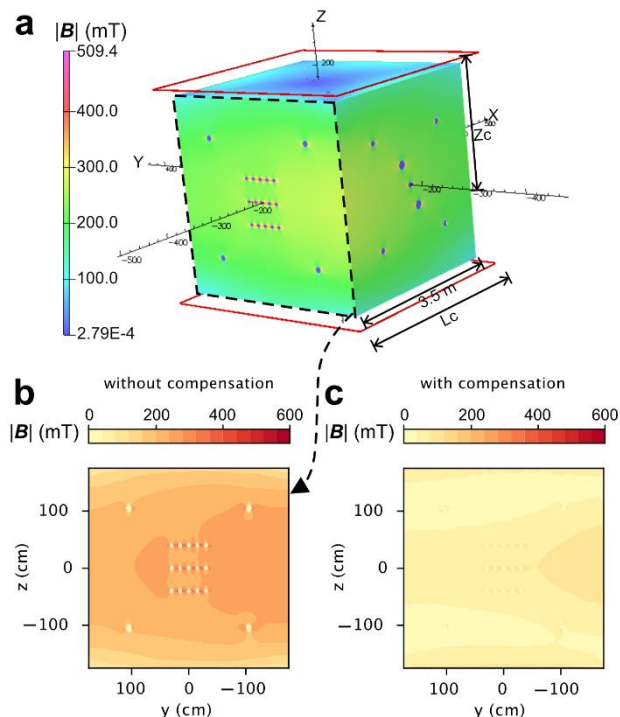


図 1 有限要素法による背景磁場と補償コイルの磁場シミュレーションの結果。(a) 測定結果から再現した背景磁場中に置かれた MSR。補償コイルに電流を印可しない場合の最外層ミューメタルの面内磁束密度分布を示す。(b,c) MSR 最外層のうち 1 面の面内磁束密度分布。補償コイルなしの場合(b)と補償コイルに 1000 アンペアターンを印可した場合(c)を示す。補償コイルなしでは最大約 500 mT の面内磁束密度が、コイル電流を印可することで約半分未満に低減される[3]。

MSR の性能の低減を防ぐシステムを開発するのが本研究の目的である。

## 研究経過

これまでに、装置が設置される予定のエリアにおける 3 次元磁場測定を行い、背景磁場の空間分布を取得した。また、背景磁場をダイポール場で近似することによって有限要素法によるシミュレーションに組み込み、シンプルな構造のコイルの組み合わせによってミューメタルを飽和磁束密度 (0.7 T) よりも十分小さく保つことができることを示した(図 1)[3]。

これらの研究経過を踏まえ、山田科学振興財団の長期間派遣援助期間中に、TRIUMF に長期滞在し、環境磁場補償システムの基本仕様を確定させ、現地のエンジニアらの協力のもと、詳細設計を行

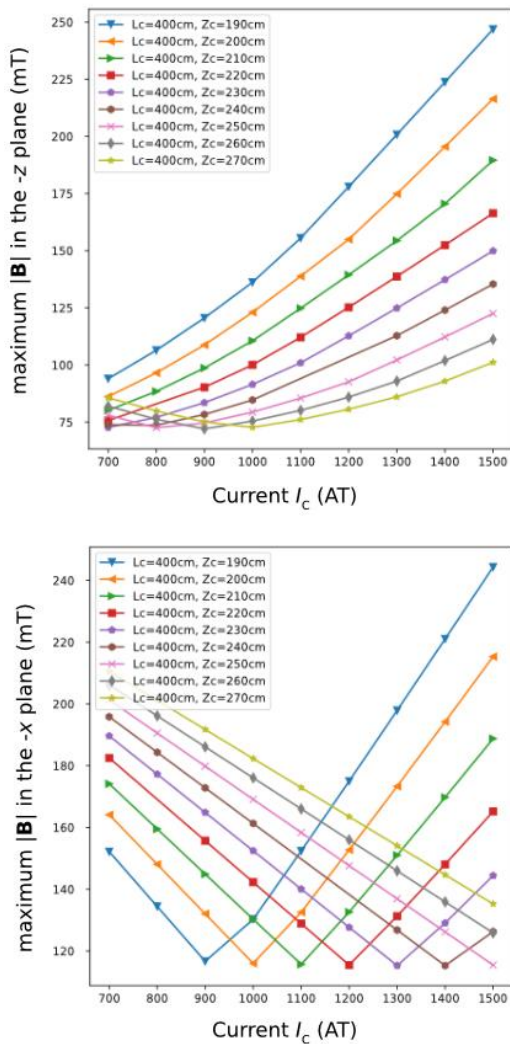


図 2 有限要素法シミュレーションによる、補償コイルの位置と印可する電流量(アンペア-ターン(AT))を変化させたときの MSR 最外層の底面(上)と側面(下)に発生する最大磁束密度の変化。計算の簡便化のため、MSR の穴がないモデルを使用して計算している。この場合、最大磁束密度を約 200 mT 未満に抑えることを目標にしていたが、1000 AT 程度の電流量に対して、幅広いパラメーター領域で目標とする磁束の補償が達成できることが分かる[4]。

った。さらに、実験施設内での他の実験グループの電磁石励磁による TUCAN 実験エリアでの磁場変動の影響の詳細な測定を行った。

### 基本仕様の確定と詳細設計

まず、TRIUMF の計算リソースを活用し、補償コイルの位置・形状や印可電流に対する補償性能の依存性の詳細を検討した(図 2) [4]。

コイルの製作方法について TRIUMF

の別の施設に設置されている補償コイル[5]を参考にしつつ、本システムに適した組み立て・配線方法などを考案した。これらの設計方針を仕様書にまとめ[6]、それをもとに TRIUMF エンジニアらと詳細設計を進めている。図 3 に現時点(2022 年 8 月)での環境磁場補償システムの詳細図を示す。

### 実験施設内での他グループの電磁石励磁による磁場変動の詳細測定

TUCAN 実験が設置される TRIUMF Meson Hall には、他にも複数の実験設備がある。そのうち、主に強い磁場を発生させるのはミュオンスピン共鳴( $\mu$ SR)実験のための超伝導、または常伝導電磁石である。本研究期間中に、これらの  $\mu$ SR 実験装置の電磁石の励磁による TUCAN 実験エリアでの磁場の変動を詳細に測定した。図 4 に Meson Hall の概観図を示す。今回の測定の主目的は、図中の M15、M20 とよばれる実験エリアの 3 つの電磁石によって図中の UCN エリアに発生する磁場の特徴づけである。また、数年以内に M9 エリアに 4T の超伝導磁石の新規導入が計画されている。これらの電磁石は、運転される時間スケールによっては、必ずしも TUCAN の EDM 測定に大きく影響を与え

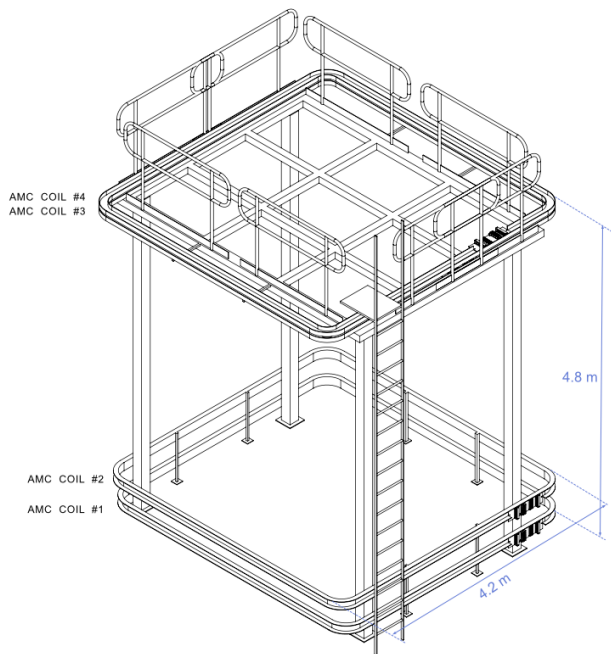


図 3 環境磁場補償システムの設計詳細図。補償コイルは、AMC COIL #1 から#4 と示された 4 つのケーブルトレイに AWG8 のケーブルそれぞれ 20 本を収納。使用予定電流は 25 A。

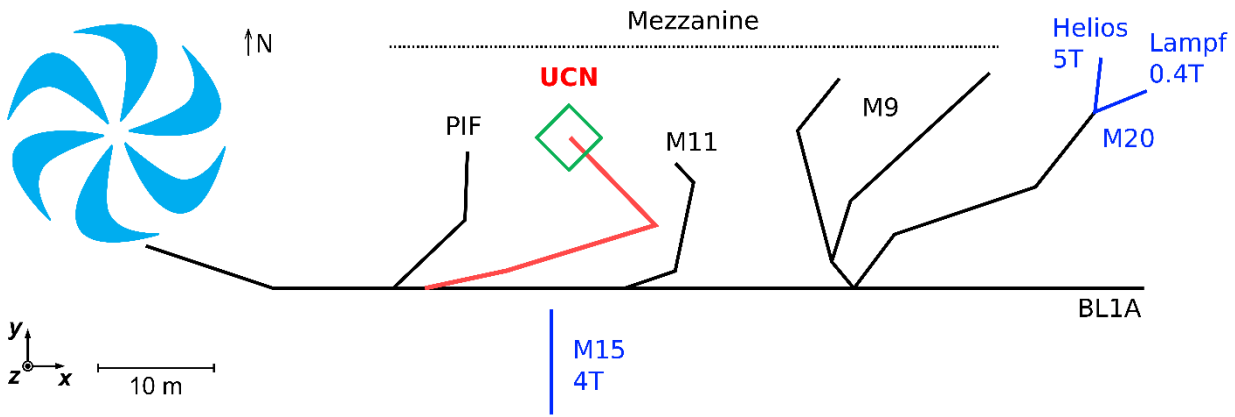


図 4 TRIUMF Meson Hall 実験エリア図。今回の測定の主目的は M15 と M20 エリアに位置する、図中に M15、Helios、Lampf と示されている電磁石（それぞれ 4, 5, 0.4 T の最大印可磁場）の励磁による、TUCAN 実験エリア（図中 UCN エリア）での影響を評価することであった。参考文献[4]より改変して掲載。

るものではないが、将来的にこれらを動的に補償するコイルを設計する場合に備え、今回、既存のそれぞれの電磁石の作り出す磁場の特徴づけるための測定を行った。それぞれの電磁石を段階的に励磁し、それを TUCAN エリアに置かれた複数の磁束計によって同時測定することにより、それぞれの電磁石について、最大磁場印可時の TUCAN エリアでの磁場、電磁石の中心磁場と TUCAN エリアでの測定磁場の比例係数、TUCAN エリアでの磁場の最大勾配を評価した。結果を図 5 に示す。これらの電磁石は、最大で約 600 nT の水平成分をもつ、比較的一様な磁場を TUCAN エリアに作り出すことが明らかになった。

将来的にこれらの電磁石によって生じる磁場変動を動的に補償する場合は、今回の結果に基づいて、補償用コイルを設計することができる。

### 総括と展望

TUCAN 国際共同チームでは、かつてない高精度での中性子電気双極子モーメント測定実験を計画しており、そのために要求される極めて安定した磁場を作り出すために必要な TRIUMF の加速器施設内の環境磁場補償システムを開発している。本研究期間中に、要求される補償性能を満たす装置の基本設計を行った上で、TRIUMF のエンジニアらの協力を得て、詳細設計の大部分を終えることができた。この先、2022 年度中に環境磁場補償システムの詳細設計を完了し、2023 年度中に製作と試験を行う予定である。また、将来的な必要に備えて当該施設の他の実験設備の運転による磁場の変動の影響の詳細な測定を行い、これらの電磁石

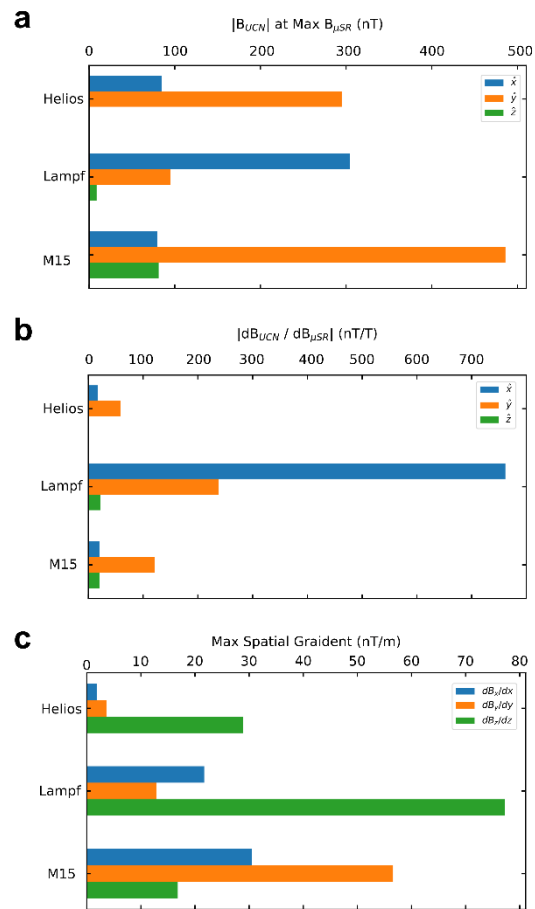


図 6 TRIUMF Meson Hall での  $\mu$ SR 装置電磁石の定の結果。それぞれの電磁石を単独で段階的に励磁し、その際に発生する磁場を TUCAN 実験エリア（図 4 UCN エリア）に置かれた複数の磁束計によって測定することで、UCN エリアでの最大磁場(a)、UCN エリアと電磁石中心磁場の比例係数(b)、UCN エリア磁場の最大勾配(c)を評価した。座標軸の定義については図 4 を参照。参考文献[4]より改変して掲載。



が TUCAN 実験エリアに作り出す磁場の基本的な情報を得た。この情報は、将来これらの磁場変動が TUCAN の測定に影響する場合に、補償コイルを設計するために使用することができる。

## 参考文献

- [1] C. Abel et al., Phys. Rev. Lett. **124**, 081803 (2020).
- [2] Y. Masuda et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 134801 (2012).
- [3] T. Higuchi on behalf of the TUCAN collaboration, EPJ Web. Conf. **262**, 01015 (2022).
- [4] The TUCAN collaboration, "Status Update on the nEDM Experiment at TRIUMF", TRIUMF (2022).
- [5] E. Guetre et al., "E-Hall Helmholtz Coils for E-linac", DR P0104-19, TRIUMF (2014).
- [6] T. Higuchi and K. Hatanaka, "P407 Static Ambient Magnetic Field Control Subsystem Requirements", Document-159421, TRIUMF (2022).

## 研究発表

### 口頭発表

1. 樋口嵩, the TUCAN collaboration, 「高強度超冷中性子源による中性子 EDM 探索にむけて」, RCNP 研究会 研究用原子炉を用いた原子核素粒子物理学 2022 年 5 月 31 日
2. 樋口嵩, 「中性子 EDM 測定による CP 対称性の破れの探索」, RCNP での次期計画検討会 2021 年 9 月 27 日
3. Takashi Higuchi, the TUCAN collaboration, "Prospects towards a neutron EDM measurement with an advanced ultracold neutron source at TRIUMF", International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (EXA 2021) 2021 年 9 月 16 日
4. Takashi Higuchi, La collaboration TUCAN, "Recherche du moment dipolaire électrique du neutron avec une source intense de neutrons ultra-

froids", Les 6es Rencontres des chercheurs francophones du Kansai (RCFK2021) 2021 年 9 月 4 日

5. 樋口嵩, TUCAN collaboration, 「TRIUMF における中性子 EDM 測定のための磁場関連実験要素の開発状況」, 日本物理学会第 76 回年次大会 2021 年 3 月 12 日
6. Takashi Higuchi, the TUCAN collaboration, "Prospects towards a neutron EDM measurement with an advanced ultracold neutron source at TRIUMF", International Workshop on Searches for a Neutron Electric Dipole Moment (nEDM2021) 2021 年 2 月 15 日
7. Takashi Higuchi, the TUCAN collaboration, "Towards a neutron electric dipole moment measurement with an advanced ultracold neutron source at TRIUMF", 原子衝突学会 第 45 回年会 2020 年 12 月 8 日
8. 樋口嵩, TUCAN collaboration, 「中性子 EDM 実験のための磁場関連実験要素の開発」, 日本物理学会 2020 年秋季大会 2020 年 9 月 14 日

### 誌上発表

1. R. Matsumiya et al. (TUCAN Collaboration), "The Precision nEDM Measurement with UltraCold Neutrons at TRIUMF", JPS Conference Proceedings (in press) [arXiv: [2207.09880](https://arxiv.org/abs/2207.09880)] (2022).
2. T. Higuchi on behalf of the TUCAN collaboration, "Prospects for a neutron EDM measurement with an advanced ultracold neutron source at TRIUMF", EPJ Web of Conferences **262**, 01015 (2022).
3. M. McCrea on behalf of the TUCAN Collaboration, "The TUCAN Neutron Electric Dipole Moment Experiment", Proceedings of Science (PANIC2021) **380**, 459 (2022).