

平成17年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな（ローマ字）		ASAHI KOICHIRO					
①研究代表者 氏名		旭 耕一郎		②所属研究機関・ 部局・職			
				東京工業大学・大学院理工学研究 科・教授			
③研究 課題 名	和文	新型核スピンメーザーによる ^{129}Xe の電気双極子モーメントの超高感度探索					
	英文	Ultrahigh-Sensitivity Search for an Electric Dipole Moment of a ^{129}Xe atom by Means of Nuclear Spin Maser with Artificial Feedback					
④研究経費		平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	総合計
17年度以降は内約額 金額単位：千円		21,500	17,200	13,700	14,400	9,200	76,000
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名		所属研究機関・部局・職		現在の専門		役割分担（研究実施計画に対する分担事項）	
旭 耕一郎		東京工業大学・大学院理工 学研究科・教授		原子核物理実験		計画立案、全体設計	
吉見 彰洋		（独）理化学研究所・応用 原子核物理研究室・研究員		原子核物理実験		核スピンメーザー、スピン歳差検出、ガラス セル、磁場制御	
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>超低磁場で働く独自のメカニズムによる（人工フィードバック型）核スピンメーザーを開発、^{129}Xeの永久電気双極子モーメント（EDM）を、現在の実験的上限である $\alpha(^{129}\text{Xe}) < 4 \times 10^{-27} \text{ ecm}$ の2桁下の領域まで探索する。</p> <p>素粒子の標準模型を超える理論として現在最も有望視されている超対称性理論では（仮定するパラメータの値にもよるが）$\alpha(^{129}\text{Xe}) = 10^{-27} - 10^{-28} \text{ ecm}$ の領域に^{129}XeのEDMの値が予言されている。一方、標準模型では 10^{-31} ecm 以下と極めて小さく、実験にはかからない。したがって本研究によって有限の$\alpha(^{129}\text{Xe})$が見出されれば、標準模型を超える物理があることの動かぬ証拠となる。</p> <p>このように^{129}XeのEDM測定の実験精度は重要なレベルに達しており、あと1-2桁の感度向上の意味するところは極めて大きい。これを実現するために、従来の方法（すなわち、単に自由スピン歳差を追跡する方法、および従来型メーザーを用いる方法）は限界に来ている。そこで、本研究は、申請者らの発案による人工フィードバック機構に基づく核スピンメーザー発振を採用する。このため、まず高均一度の低磁場を生成し、超低磁場での核スピンメーザー発振を実現させる。これにより磁場の変動の絶対値を画期的に小さく抑えることが可能となる。また、この低磁場ではじめて可能となる新しい高精度磁場計測法を開発する。次にEDMによる歳差周波数シフトを与えるための電場印加技術を確認する。さらに、磁場変動等による偽の効果を打ち消すための計測手法を検討・実現する。これを土台として超高感度EDM検出装置を構築し、EDM探索実験を実施する。</p>							

⑦これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

有限のXe原子EDMを見出すためには高度に安定化された核スピンの歳差周波数測定装置を実現することが重要である。そのため我々のグループではレーザーポンピング法により大きく偏極したXe原子核スピンの歳差をmGレベルの低磁場において半永久的に維持する核スピンメーザーを開発した。この新型スピンメーザーをEDM測定に応用するために、まず環境磁場のさらなる遮蔽、ソレノイド磁場の安定度の向上、高精度の磁場計測装置の開発を進めた。

平成15年度

環境磁場とその変動が精密実験に及ぼす影響を抑えるために、高性能の磁気シールドの設計・製作を行なった。材質は以前と同様、透磁率が高いパーマロイを用い、形状は円筒型で長さとの比率を以前の2.8から増やして4.0に設定した。この比率が小さいと両端の口から磁力線が侵入して遮蔽率を下げ、大きすぎる場合は軸方向のパーマロイ中を円筒軸方向に走る磁力線が円筒内部に漏れる量が増えて遮蔽率を下げる要因になると考えられている。最外円筒の長さを160cm、直径を40cmに設計して、全部で4層の円筒シールドを設計した。磁場計算コードPOISSONを用いて見積もった遮蔽率は軸方向で 10^{-4} 、垂直方向で 10^{-6} である。実際に製作したパーマロイシールド(図1)の消磁を行なった後、フラックスゲート磁力計で内部空間の残留磁場を測定した結果、中心付近で軸方向で $40\mu\text{G}$ 、垂直方向で $20\mu\text{G}$ が得られ、 10^{-4} の遮蔽率が達成されていることがわかった。また(後出の)磁力計の開発に着手した。低磁場におけるRb原子の磁気光学回転効果を測定するもので、外部共振器レーザー、磁気光学回転の検出系およびRb参照セルの整備を行なった。

平成16年度

一様性の高い低磁場を生成するソレノイドコイルを設計・製作し、そのコイルに供給する安定化定電流源の製作を行った。市販されている安定化電流源の安定度は 10^{-4} が最高で、これによって $1\mu\text{G}$ の静磁場の揺らぎが生じていた。新しく製作した電流源では基準電圧源に低ノイズバッテリーを使用することで、低周波数のノイズを減少させて長時間の磁場変動を抑えることを目指した。メーザー実験で用いる3mAの電流を流した際の電流値の変動を高精度電流計で測定し、 10^{-6} の安定度を達成していることを確認できた(図2)。これは磁場の揺らぎに換算して10nGのオーダーである。また、これと並行して磁場を感度良くモニターする磁力計の開発をすすめた。磁場の変動に伴う歳差周波数の変化がつくる見かけの効果を除去するため、非線形磁気光学効果を用いて磁場変動を精密に感知することを目指している。Rb原子気体を通過する直線偏光レーザー光の偏光面の回転を検出することで、磁場の大きさを測定するものである。これに必要な外部共振器レーザーの波長安定化、光学偏光面の回転の検出を含め、装置の構築を行った。その結果、レーザーの発振波長がPID制御により $\sim 10^{-4}\text{nm}$ 内に安定化され、磁場測定が可能となった。現在得られている精度 $\sim 10\mu\text{G}$ はまだ不十分であるが、今後試料セルの内壁にコーティングを施してRbのスピン緩和時間を伸ばすことにより、大幅な改善が見込まれる。



図1：4層のパーマロイ磁気シールド

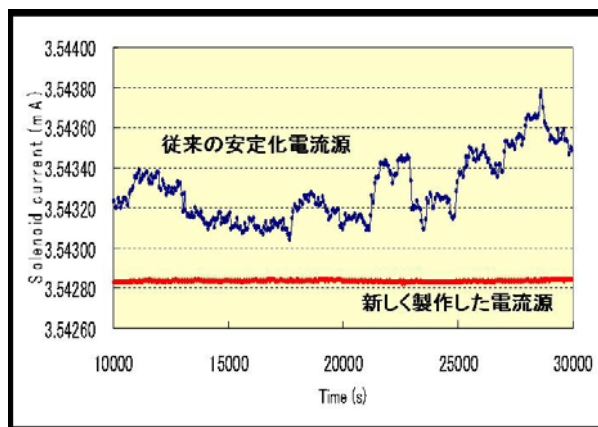


図2：ソレノイドコイルの電流安定度測定

⑧特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

- 本研究は外部フィードバックによる核スピンメーザー発振という独自の手法を、原子のEDMの探索に応用するものであり、その要点は、本手法によるスピンメーザーが従来のものに比べて格段に低い磁場のもとで発振可能なことにある。このことによって、通常のEDM実験において主要な誤差要因となる、磁場の時間変動の絶対値を大幅に減らすことができると期待される。また同時に、その低磁場のために、最近出現した原理に基づく高感度の磁場計測法を組み入れることが可能になっている。図3に核スピンメーザーの実験セットアップを示す。これを用いて得られたメーザー発振周波数の幅の観測時間に対する依存性を図4に示す。観測時間を長くしていくと周波数決定誤差は時間の $3/2$ 乗に半比例して減少していくことがわかり、本研究の当初の予測に一致する結果となった。なお、図では 1000 秒以降で精度が頭打ちになっている。これは同時に測定したコイル電源の電流揺らぎの大きさから予測される周波数幅と一致した。こうして、当面の目標の精度 ($|\Delta|d| < 10^{-28}$ ecm, or $\Delta\nu < 1$ nHz) を目指して (1)観測時間を2桁長くする(約1日)、同時に(2)磁場の変動を現在の3桁下まで抑えるまたは精密モニターする、という明確な指針が得られた意義は大きい。
- 非線形磁気光学効果に基づく磁場測定装置の構築に成功した。この方法は D. Budker らによって 1998 年に提唱された、低磁場 (数十 mG 以下) で威力を発揮する高感度磁場計測法で、その後彼ら自身によって磁力計が構築されているが、本研究で重要となる長時間安定性についての配慮・検討はなされていなかった。本研究では装置の組み立てを完了し (図5)、磁気光学回転スペクトラムを得ている (図6に例を示す)。これらのデータから、磁力計としての長時間安定性にはレーザー波長の安定性が最も重要であることがわかり、これに向けて PID 制御の改良を進めている。また感度は現在 $10\mu\text{G}$ にとどまっているが、セル内壁のコーティングによって pG の感度まで改善できると見積もられる。
- 低い磁場をソレノイドで安定して生成するための、高精度電流源を開発した。これは一般の安定化電源に比べて長時間の電流ドリフトを小さく抑えられ、 10^2 秒間平均で 5nA 、磁場に換算すると 10nG レベルの揺らぎであることを確認している。これにより、磁力計を導入してEDM測定の際の磁場計測ならびに磁場安定化機構を正確に働かせることが可能となる。
- 最近、原子EDMの理論的再検討がなされ、原子のEDMには (Schiffの定理からの予想に反して) その原子核を構成する核子のEDMが殆ど抑制を受けずに現れる、との可能性が指摘された。議論はまだ流動的な段階と見られるが、これに基づく、超対称性理論の与えるXe原子EDMは $10^{-27}\sim 10^{-28}$ ecm 領域に相当し、Xe原子EDM実験の意義はさらに著しく高まることとなる。

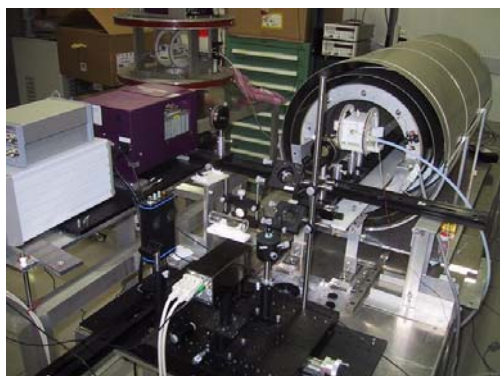


図3：核スピンメーザー装置

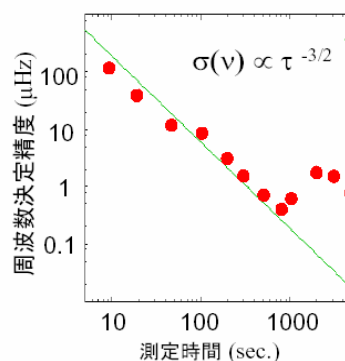


図4：メーザー周波数決定精度



図5：磁力計のための光学系

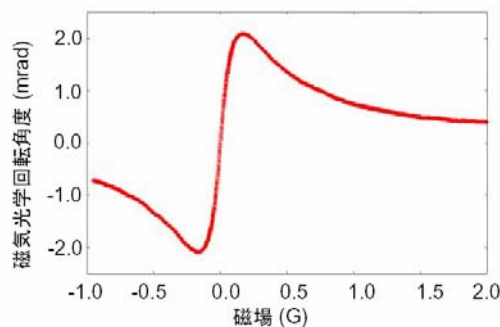


図6：Rb原子中での磁気光学回転スペクトラム

⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

誌上発表

- 1) A. Yoshimi, K. Asahi, S. Emori : “Nuclear spin maser and atomic electric dipole moment of ^{129}Xe ”, Czech. J. Phys. 53 (2003) Suppl. B227-233.
- 2) A. Yoshimi, K. Asahi, S. Emori, M. Tsukui, and S. Oshima, “Nuclear spin maser oscillation of ^{129}Xe by means of optical-detection feedback”, Hyperfine Int., (in press).
 - 3) A. Yoshimi, K. Asahi, S. Emori, M. Uchida, and S. Oshima, “Low-frequency nuclear spin maser and search for atomic EDM of ^{129}Xe ”, AIP Conf. Proc., (in press).
 - 4) A. Yoshimi, K. Asahi, S. Emori, and M. Tsukui: “Design of 4-layer magnetic shield for spin maser experiment”, RIKEN Accel. Prog. Rep. 37 (2004) 160.
- 5) A. Yoshimi, K. Asahi, S. Emori, M. Uchida, and S. Oshima: “Magneto-optical rotation effect in Rb for EDM experiment”, RIKEN Accel. Prog. Rep. 38 (2005) (in press).
- 6) A. Yoshimi, H. Ueno, W. Sato, H. Watanabe, Y. Kobayashi, J. Murata, H. Miyoshi, K. Shimada, and K. Asahi: “Study on the transient field at very high velocities for the g-factor measurement of excited states in unstable nuclei”, Nucl. Phys. A 738 (2004) 519-522.
- 7) 「中性子スピンメーザー：電気双極子能率の高感度探索への可能性」、旭 耕一郎、日本中性子科学会誌「波紋」14, 68-70 (2004).

国際会議等

- 1) A. Yoshimi, K. Asahi, S. Emori, M. Tsukui, and S. Oshima: “Spin maser of ^{129}Xe nuclei at low magnetic field by optical spin detection”, International Conference on Laser Probing (LAP2004), Argonne, USA, October 2004.
- 2) A. Yoshimi, K. Asahi, S. Emori, M. Tsukui, and S. Oshima: “Low-frequency nuclear spin maser and search for atomic EDM of ^{129}Xe ”, 16th International spin physics symposium (SPIN2004), Trieste, Italy, October 2004.
- 3) A. Yoshimi, K. Asahi, S. Emori, and M. Tsukui: “Nuclear spin maser oscillation of ^{129}Xe by means of optical-detection feedback”, XIII International Conference on Hyperfine Interactions, Bonn, Germany, August 2004.
- 4) K. Asahi, A. Yoshimi, S. Emori, M. Tsukui, K. Sakai: “Nuclear spin maser with novel masing mechanism: A route for ultrahigh-sensitive detection of an EDM in ^{129}Xe atom”, International Nuclear Physics Conference (INPC2004), Goeteborg, Sweden, June 2004.
- 5) A. Yoshimi, K. Asahi, S. Emori, M. Tsukui: “Nuclear spin maser with a novel masing mechanism and its application to the search for an atomic EDM in ^{129}Xe ”, Spin and Quantum Structure in Hadrons Nuclei and Atoms, Tokyo Institute of Technology, February 2004.
- 6) A. Yoshimi and K. Asahi, “Nuclear spin oscillator and search for atomic EDM of ^{129}Xe ”, Advanced study institute “Symmetries and Spin” (Praha-Spin-2003), Prague, July 2003.

国内会議

- 1) 吉見 彰洋: 「Xe 原子 EDM 探索実験について」、ミニシンポジウム「電気双極子モーメントと対称性」、東工大、2005年3月18日。
- 2) 吉見 彰洋: “Planned experimental search for an EDM in ^{129}Xe atom”、日大シンポジウム on EDM in atomic systems、日大、2004年10月9日。
- 3) 吉見 彰洋、旭 耕一郎、江守 昭憲、津久井 正人: 「希ガス元素 ^{129}Xe のレーザー核偏極と核スピン歳差の精密制御」、宇宙空間原子分子過程研究会「偏極・配向による原子分子過程の制御」、JAXA、2004年1月6-7日。
- 4) 吉見 彰洋: 「 ^{129}Xe 核スピンメーザーと原子EDM探索」、日本物理学会 2003年秋季大会/実験核物理シンポジウム、宮崎、2003年9月9-12日。