

機関番号：12601
 研究種目：特定領域研究
 研究期間：2004～2009
 課題番号：16081205
 研究課題名（和文） ミュー粒子稀崩壊探索実験 MEG で迫る超対称性大統一理論
 研究課題名（英文） Exploring Supersymmetric Grand Unified Theories by Rare Muon Decay Search Experiment MEG
 研究代表者
 森 俊則（MORI TOSHINORI）
 東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授
 研究者番号：90220011

研究成果の概要（和文）：これまでにない優れた性能を持つ粒子測定器を建設・完成させ、それにより世界最高の実験感度を達成して、超対称性大統一理論やニュートリノ振動から予想されるミュー粒子稀崩壊事象の探索を行った。残念ながら発見には至らなかったが、今後さらに大量のデータを取得することにより、超対称性大統一理論などの新しい素粒子理論の実験検証が期待できる。

研究成果の概要（英文）：With the unprecedentedly high performance particle detectors, we achieved world's highest experimental sensitivity and searched for rare muon decays which are expected to occur by Supersymmetric Grand Unified Theories and neutrino oscillations. Although they were not yet discovered, most stringent experimental test of the new particle theories will be possible by continuing the experiment and taking more data.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	83,900,000	0	83,900,000
2005年度	106,700,000	0	106,700,000
2006年度	62,600,000	0	62,600,000
2007年度	48,700,000	0	48,700,000
2008年度	50,100,000	0	50,100,000
2009年度	37,200,000	0	37,200,000
総計	389,200,000	0	389,200,000

研究分野：素粒子物理学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子実験・国際協力・ミュー粒子・超対称性・大統一理論

1. 研究開始当初の背景

1997年頃より、早くから $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験の重要性を認識した本領域研究者の働きかけにより、世界各国の研究者と共同で国際研究会を開いて実験の検討を行ってきた。1998年には、このような実験に最適なミュー粒子ビームを持つPSI研究所に実験のLetter of Intentを提出し、本領域研究者が考案したこれまでにない巧妙で優れた実験装置がPSI研究計画委員会において高く評価され、実験の提案に早急に進むよう強く推薦された。この頃より、ニュートリノ振動の証拠が次第に確

かなものとなり、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験の重要性・緊急性が国際的に高まった。そこで1999年に実験を提案し、PSI研究計画委員会により即座に承認された。

その後、実験の実施に向けて、高頻度の陽電子測定を可能とする磁場勾配を持った特殊な超伝導ソレノイド電磁石COBRAと、エネルギー・位置および時間分解能に優れた新しいタイプの液体キセノンガンマ線検出器の開発を進めた。キセノン検出器はプロトタイプを製作して、産総研・電子蓄積リングでのレーザー逆コンプトン散乱による高エネルギー

ギーガンマ線を使った試験や、京大化研の低エネルギー電子ビームを用いた試験などを行って開発を進め、最終的に PSI において中性 π 中間子からの単色光ガンマ線による試験によってほぼ期待通りの性能が得られることを確認した。COBRA 電磁石については製作が終了し、PSI のビームラインに設置した。これにより、2004 年度から本研究により、本格的に実験装置の建設を行って、実験の実施を目指すことになった。

2. 研究の目的

本研究は、独創的で優れた実験装置を完成させて、標準理論では起こり得ないミュー粒子崩壊 $\mu \rightarrow e\gamma$ を、力の大統一やニュートリノ質量から期待される分岐比まで探索し、超対称性の存在を通して超高エネルギーの物理に迫ろうとするものである。

本研究の研究者が提案した実験 MEG (Mu-E-Gamma) は、新しく考案した独創的な実験装置によって、 10^{-12} – 10^{-14} という極微の分岐比まで測定することが可能となっている。実験に必要な大強度 DC ミュー粒子ビームを持つスイス Paul Scherrer Institut (PSI 研究所) において既に実施が承認されており、スイス・イタリア・ロシア・アメリカの共同研究者が加わった国際共同実験として、本研究の研究者の主導により実験装置の開発が進められてきた。日本グループは実験の成否の鍵を握る主要検出器要素である液体キセノン検出器および陽電子スペクトロメータ超伝導電磁石 COBRA を担当している。

本研究では、実験装置の製作・設置、ならびにデータ収集・解析を行い、この国際共同実験 MEG を実施して、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 反応の発見・測定を目指す。

3. 研究の方法

本研究は 6 年の計画とし、実験装置を製作・完成した後実験を開始して、世界最高感度の達成を目指す。実験と平行してデータ解析を進め、逐次その結果によりその後の実験の方針を決め、必要な改善を機動的に行う。新しい結果が出たときには、総括班を通して領域全体で検討を行い、常に領域内の他研究班からのフィードバックを得るようにする。実験はスイス PSI 研究所で行われるので、実験の準備・遂行に当たるため、数名のスタッフ・ポスドクおよび学生が常に PSI に滞在する。

森は実験の代表者として、海外共同研究者も含め、実験全体の指揮を取り、統括する。本研究の研究者は主に、陽電子スペクトロメータ電磁石、キセノン検出器、ミュー粒子ビームとターゲット、オフライン解析システムを担当する。陽電子飛跡検出器、陽電子飛行時間カウンター、トリガー、データ収集シ

テムなどは、海外の共同研究者の担当であり、森の指揮の下緊密に連絡を取り合い、スムーズな実験の遂行を目指す。物理データ解析は、全員で分担して行う。

測定器の較正はこの実験の成否を握っており、長期間にわたる実験を通して定期的に較正を行ってデータの質を常に監視する。キセノン検出器の較正には、低エネルギー π^- ビームを液体水素ターゲットで止め、 $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ 反応により π^0 から出るガンマ線を用いる。このため一方のガンマ線をタグする結晶シンチレータ検出器とその駆動装置も本研究の研究者が製作・担当する。

4. 研究成果

本研究では、これまでにない独創的で性能の優れた粒子測定器 (図 1) を建設して、過去の実験を超える感度を持って、超対称大統一理論やニュートリノ振動から予想される $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を探索した。MEG 実験装置は 2007 年度に完成し、2008 年度からの本格的な物理実験でこれまでに世界最高の実験感度に到達した。実験からは毎年新しい物理データによる解析結果を出しており、当初の目的は十分達成できたと考えられる。残念ながらまだ $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊は発見されていないが、今後も実験感度を改善しつつ実験を継続して、厳しく超対称大統一理論の検証を行っていく。MEG 実験は、2004 年度より実験装置の建設を開始し、2005 年度にはミュー粒子ビームラインを完成させた。これと平行して 2006 年度にかけて液体キセノン測定器用光電子増倍管約 1000 本の低温性能試験を行った。

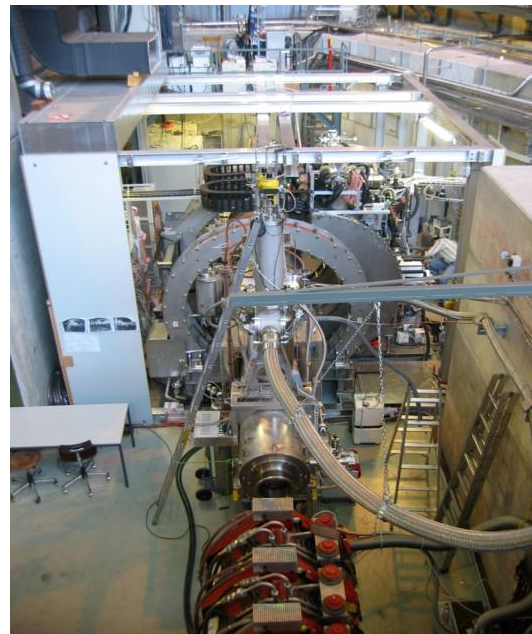


図1. MEG 実験装置の概観

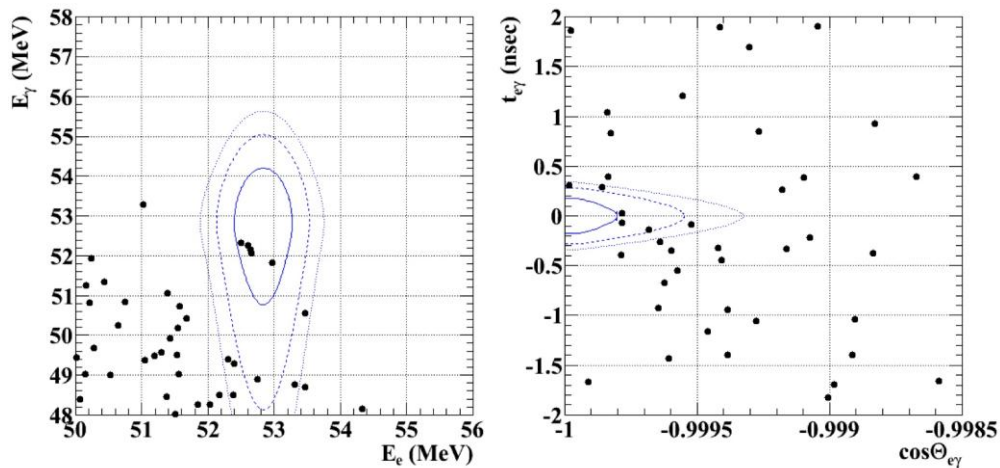


図2. 2009年データの $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊候補事象の分布

さらに 2006 年度後半にはビームラインを最終調整して、ドリフトチェンバーとタイミングカウンターの一部を COBRA 電磁石内に設置し、陽電子スペクトロメータの試験運転を実施してその性能評価を行った。2007 年度早々にはイタリアでの製作が遅れていた液体キセノン測定器用断熱真空容器が納品され、測定器の組み立てを行って真空・低温および純化システム等の試験を実施した後、年度後半には全実験装置を完成させた。そこで 2007 年暮れにはデータ収集用トリガー電子回路を調整して短期パイロット運転を行い、わずかながら初めてのデータ取得に成功した。トリガー頻度は期待通り 5Hz 程度であり、予想を超える大きなバックグラウンドはないことが確認された。並行して準備が進んでいたオフライン計算機とデータ解析ソフトウェアによりデータ解析を行い、実験装置の性能やバックグラウンド事象に関する知見を得た。

2008 年度は、パイロット運転で問題のあった測定器を修理・改良した後、夏の間測定器の較正実験を行い、その後 9 月半ばより本格的な物理データの収集を開始した。一部の測定器に問題があったため予定通りのデータ量は取得できなかったが、それでもそれまでの世界最高感度に匹敵する実験感度を達成し、その成果を 2009 年夏に Lepton-Photon 国際会議の招待講演で発表した。この成果はその後国際ジャーナル誌に出版した。

2009 年度は、他実験とビームラインを共有する等の事情により 2008 年度より実験期間が短かったが、測定器の問題を解決したことにより実験感度はずっと高くなり、以前の実験を 2 倍超える世界最高感度 6×10^{-12} を達成することに成功した。これによっていよいよ本研究の目的である人類未到の領域の探索を開始したことになる。2009 年度のデータは素早く解析を行い、その予備的結果を 2010 年 7 月の ICHEP 国際会議の招待講演で発表し

た。会議の総括では LHC と並んで会議のハイライトの一つと指摘され、国際的に期待と注目を集めた。その後系統誤差を改善してその最終結果を国際ジャーナル誌に投稿している。実験データから尤度解析で得られた $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊事象数の最適値は 3.0 であったが、事象数がゼロである確率は 90% の信頼領域内でありバックグラウンド事象の統計的なふらつきと考えると矛盾はない (図 2)。図 3 は $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊候補事象の一例である。ここから系統誤差も入れて、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊分岐比の上限値として、 1.5×10^{-11} (90% C.L.) が得られた。これは過去の実験で得られた上限値 1.2×10^{-11} に迫るものである。

なお、MEG 実験のために新たに考案・開発した測定器の開発研究に関しては高い評価を受けており、液体キセノンガンマ線測定器については、本領域研究者が 2005 年度文部科学大臣表彰科学技術賞、(財)高エネルギー加速器科学研究奨励会 2006 年度小柴賞を受賞した。COBRA 陽電子スペクトロメータに関しても 2009 年度小柴賞を受賞している。また、本研究を通して書かれた学位论文のうち 2 編がそれぞれ 2009 年と 2011 年の日本物理学会若手奨励賞を受賞した。

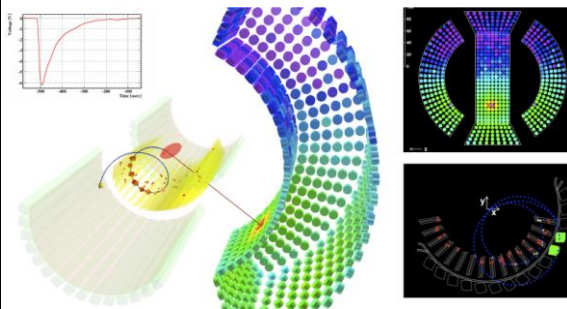


図3. 実験で測定された $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊候補事象の例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- [1] “A limit for the $\mu \rightarrow e \gamma$ decay from the MEG experiment”, T. Mori, S. Mihara, W. Ootani, T. Iwamoto, H. Nishiguchi, T. Haruyama, A. Maki, *et al.*, (69 名、アルファベット順) Nucl. Phys. B834 (2010) 1-12.
- [2] MEG experiment at the Paul Scherrer Institute, S. Mihara, Nuclear Physics A844:150c-154c, 2010
- [3] Performance of liquid xenon gamma ray detector for MEG, R. Sawada, Nucl. Instrum. Meth. A623:258-260, 2010
- [4] Gamma ray reconstruction with liquid xenon calorimeter for the MEG experiment, Y. Uchiyama, Nucl. Instrum. Meth. A617:118-119, 2010
- [5] System overview of liquid xenon calorimeter for the MEG experiment, T. Iwamoto, Nucl. Instrum. Meth. A617:92-95, 2010
- [6] $\mu \rightarrow e \gamma$ - MEG, R. Sawada, R. Sawada, AIP Conf. Proc. 1182:714-717, 2009
- [7] Lepton Flavour Violating Muon Decay at MEG, H. Nishiguchi, Heavy Quarks and Leptons 2008(arXiv:0905.2012[hep-ex])
- [8] Development of a large volume zero boil-off liquid xenon storage system for muon rare decay experiment (MEG), T. Iwamoto, R. Sawada, T. Haruyama*, S. Mihara, T. Doke, Y. Hisamatsu, K. Kasami, A. Maki, T. Mori, H. Natori, H. Nishiguchi, Y. Nishimura, W. Ootani, K. Terasawa, Y. Uchiyama, S. Yamada, Cryogenics, 2009, Vol.49, issue 6, 254-258
- [9] “Charged Lepton Flavor Violation Experiments”, W.J. Marciano, T. Mori and J.M. Roney, Annual Review of Nuclear and Particle Science **58** (2008) 315-341.
- [10] “MEG - The Experiment to Search for $\mu \rightarrow e \gamma$ ”, T. Mori, Nuclear Physics B - Proceedings Supplements 169 (2007) 166-173.
- [11] “Development of a Method for LXe Purification Using a Cryogenic Centrifugal Pump”, S. Mihara, T. Haruyama, T. Iwamoto, Y. Uchiyama, W. Ootani, K. Kasami, R. Sawada, K. Terasawa, T. Doke, H. Natori, H. Nishiguchi, A. Maki, T. Mori and S. Yamada, Cryogenics 46 (2006) 688-693.
- [12] “Liquid xenon scintillation calorimetry and Xe optical properties”, Baldini, A.; Bemporad, C.; Cei, F.; Doke, T.; Grassi, M.; Haruyama, T.; Mihara, S.; Mori, T.; Nicolo, D.; Nishiguchi, H.; Ootani, W.; Ozone, K.; Papa, A.; Pazzi, R.; Sawada, R.; Sergiampietri, F.; Signorelli*, G.; Suzuki, S.; Terasawa, K., IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation **13** (2006) 547-555.
- [13] “A radioactive point-source lattice for calibrating and monitoring the LXe calorimeter of the MEG experiment”, A. Baldini, C. Bemporad*, F. Ceia, S. Dussoni, F. Gatti, M. Grassi, T. Haruyama, Y. Hisamatsu, T. Iwamoto, S. Mihara, T. Mori, D. Nicolo, H. Nishiguchi, W. Ootani, A. Papa, R. Pazzi, R. Sawada, F. Sergiampietri, G. Signorelli, R. Valle and S. Yamada, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A565** (2006) 589-598.
- [14] “Absorption of scintillation light in a 100L LXe γ -ray detector and expected detector performance”, A. Baldini, C. Bemporad, F. Cei, T. Doke, M. Grassi, A.A. Grebenuk, D.N. Grigoriev, T. Haruyama, K. Kasami, J. Kikuchi, A. Maki, T. Mashimo, S. Mihara, T. Mitsuhashi, T. Mori, D. Nicolo, H. Nishiguchi, W. Ootani, K. Ozone*, A. Papa, R. Pazzi, S. Ritt, R. Sawada, F. Sergiampietri, G. Signorelli, S. Suzuki, K. Terasawa, M. Yamashita, S. Yamashita, T. Yoshimura and Yu. Yuri, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A545** (2005) 753-764.
- [15] “Search for the Lepton Flavor Violating Decay $\mu \rightarrow e \gamma$ in the MEG Experiment”, S. Yamada, Nuclear Physics B - Proceedings Supplements 144 (2005) 185-188.
- [16] “Performance of a Prototype of LXe Scintillation Detector System for PET”, F. Nishikido, T. Doke, J. Kikuchi, T. Mori, K. Takizawa and M. Yamamoto, Japanese Journal of Applied Physics **43 - 2** (2004) 779-784.
- [17] “Development of a LXe photon detector - towards the search for a muon rare decay

- mode at PSI”, S. Mihara, T. Doke, T. Haruyama, K. Kasami, A. Maki, T. Mitsunashi, T. Mori, H. Nishiguchi, W. Ootani, K. Ozone, R. Sawada, S. Suzuki, K. Terasawa, T. Yoshimura, *Cryogenics* 44 (2004) 223-228.
- [18] “R&D work on a liquid-xenon photon detector for MEG experiment at PSI”, S. Mihara, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 518 (2004) 45-48
- [19] “Development of a Thin-wall Superconducting Magnet for the Positron Spectrometer in the MEG Experiment”, W. Ootani, W. Odashima, S. Kimura, T. Kobayashi, Y. Makida, T. Mitsunashi, S. Mizumaki, R. Ruber and A. Yamamoto, *IEEE in Transactions on Applied Superconductivity* 14 (2004) 568 - 571.
- [学会発表] (計 77 件)
- [1] “Analysis of the MEG experiment to search for $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ decays, R. Sawada, 35th International Conference on High Energy Physics, 22-28 July 2010, Paris, France
- [2] Performance of the MEG detector to search for $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ decays at PSI, T. Iwamoto, 35th International Conference on High Energy Physics, 22-28 July, 2010, Palais des Congres, Paris, France
- [3] Performance of liquid xenon gamma ray detector for MEG, R. Sawada, *Technology and Instrumentation in Particle Physics 2009* in Tsukuba, Japan (TIPP09), 14 March 2009
- [4] “Performance of the Liquid Xenon Detector for the MEG experiment”, Y. Nishimura, 12th Vienna Conference on Instrumentation, 15–20 February 2010, Vienna, Austria
- [5] “Rare Muon Decays and EDM”, T. Mori, XXIV International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, Aug. 17th-22nd, 2009, Hamburg, Germany
- [6] “MEG Experiment at Paul Scherrer Institute”, S. Mihara, 4th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics, June 2-5, 2009, Taipei, Taiwan
- [7] “ $\mu \rightarrow e \gamma$ – MEG”, R. Sawada, 10th Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics, May 26th-31st, 2009, California, U.S.
- [8] “Gamma ray reconstruction with liquid xenon calorimeter for the MEG experiment”, Y. Uchiyama, 11th Pisa meeting on advanced detectors, May 24th-30th, 2009, Isola d’Elba, Italy
- [9] “System overview of liquid xenon calorimeter for the MEG experiment”, T. Iwamoto, 11th Pisa meeting on advanced detectors, May 24th-30th, 2009, Isola d’Elba, Italy
- [10] “Lepton Flavor Violating Muon decay at MEG,” *Heavy Quarks and Leptons 2008*, H. Nishiguchi, June 6th, 2008, Melbourne, Australia
- [11] “MEG: The $\mu \rightarrow e \gamma$ Experiment”, T. Mori, The 4th International Workshop on Nuclear and Particle Physics at J-PARC (NP08), Mito Ibaraki Japan, March 2008.
- [12] “Performance of a liquid xenon calorimeter cryogenic system for the MEG experiment”, T. Haruyama, *Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Material Conference (CEC/ICMC 2007)*, Chattanooga, Tennessee, U.S.A., July 2007.
- [13] “Status of the MEG experiment”, A. Maki, NuFact07, Okayama Japan, August 2007.
- [14] “Liquid Xenon Gamma Ray Detector for MEG”, R. Sawada, The 11th Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria, February, 2007.
- [15] “The MEG Positron Spectrometer”, H. Nishiguchi, The 11th Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria, February, 2007.
- [16] “Lepton Flavor search for Violation in $\mu \rightarrow e \gamma$ ”, W. Ootani, *Supersymmetry in 2010's*, Sapporo, Japan, June, 2007.
- [17] “Low Energy Muon Experiments”, T. Mori, The Eighth International Workshop on Neutrino Factories, Superbeams and Betabeams, Irvine, U.S.A., August, 2006
- [18] “MEG: Search for Lepton Flavor Violation Decay $\mu \rightarrow e \gamma$ ”, Y. Hisamatsu, *International School of Subnuclear Physics (Erice Summer School 2006)*, Erice-Sicily, Italy,

- August-September, 2006.
- [19] "Liquid Xenon Gamma Ray Detector for MEG", R. Sawada, The Eighth International Workshop on Neutrino Factories, Superbeams and Betabeams, Irvine, U.S.A., August, 2006.
- [20] "The MEG Positron Spectrometer", H. Nishiguchi, The 10th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors (IPRD06), Siena, Italy, October, 2006.
- [21] "Performance of the Liquid Xenon Scintillation Detector for the MEG Experiment", W. Ootani, IEEE NSS/MIC 2006, San Diego, U.S.A., October-November, 2006.
- [22] "Liquid Xenon Calorimetry at the MEG Experiment", S. Mihara, The CHIPP Workshop on Neutrino Physics, Bern University, Switzerland, October, 2006.
- [23] "Liquid Xenon Detector for the MEG Experiment", T. Iwamoto, The 1^{0th} Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors (IPRD06), Siena, Italy, October, 2006.
- [24] "Lepton Flavor Violating Decays - Review & Outlook", T. Mori, The Fourth Flavor Physics and CP Violation Conference, Vancouver, Canada, April, 2006.
- [25] "Development of Photomultiplier for MEG liquid xenon gamma ray detector", Y. Hisamatsu, XeSAT 2005, Tokyo, Japan, March, 2005
- [26] "The MEG experiment at PSI: search for LFV Decay $\mu \rightarrow e\gamma$ ", R. Sawada, International Conference "Discoveries of Higgs and Supersymmetry to Pioneer Particle Physics in the 21st Century", Tokyo, Japan, November, 2005.
- [27] "Performance of the Liquid Xenon Scintillation Detector for the MEG Experiment at PSI", W. Ootani, Applications of Rare Gas Xenon to Science And Technology, Tokyo, Japan, March, 2005.
- [28] "Lepton Flavour Violation - Status and Prospects", T. Mori, The Workshop on the Interplay of Flavour and Collider Physics "Flavour in the Era of the LHC," Geneva, Switzerland, November, 2005.
- [29] "Liquid Xenon Scintillation Detector for

the MEG Experiment", T. Iwamoto, IEEE NSS/MIC 2004, Rome, Italy, October, 2004.

〔その他〕
ホームページ等
http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~mori/higgssusy_meg.html
<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/mori/>
<http://meg.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 俊則 (MORI TOSHINORI)
東京大学・素粒子物理国際研究センター・教授
研究者番号：90220011

(2) 研究分担者

大谷 航 (OOTANI WATARU)
東京大学・素粒子物理国際研究センター・准教授
研究者番号：30311335
岩本 敏幸 (IWAMOTO TOSHIYUKI)
東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教
研究者番号：20376700

(3) 連携研究者

真木 晶弘 (MAKI AKIHIRO)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・名誉教授
研究者番号：40044755
春山 富義 (HARUYAMA TOMIYOSHI)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号：90181031
三原 智 (MIHARA SATOSHI)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号：80292837
西口 創 (NISHIGUCHI HAJIME)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号：10534810
寺沢 和洋 (TERASAWA KAZUHIRO)
慶應義塾大学・医学部・助教
研究者番号：10329138
澤田 龍 (SAWADA RYU)
東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任研究員
研究者番号：00541947