

平成23年 6月 7日現在

機関番号：13901

研究種目：学術創成研究費

研究期間：2006～2010

課題番号：18GS0206

研究課題名（和文）

タウ・レプトン物理の新展開

研究課題名（英文）

Evolution of Tau-lepton Physics

研究代表者：

大島 隆義 (OHSHIMA TAKAYOSHI)

名古屋大学・理学研究科・特任教授

研究者番号：00134651

研究成果の概要（和文）：

素粒子研究はすべての現象を矛盾なく説明する「標準理論」に至り、その背後に潜む未知の素粒子世界の探索が現在の研究最前線を構築する。本研究は世界最高の衝突強度を誇るわが国のBファクトリー実験においてタウ・レプトンの崩壊現象を前人未踏の高感度で精査し、この未知の素粒子世界を探索する。新しい素粒子物理の発見に向けて主導的かつ集中的に世界のタウ物理研究をリードし、推進する。

研究成果の概要（英文）：

Elementary particle physics has greatly progressed in building the Standard Model (SM) which is consistent with all observed phenomena so far. Researchers now focus on the search for New Physics World (NP) beyond the SM. Based on the world highest intense B factory, we intend to detect new phenomena by analyzing a yet-to-be obtained huge number of tau-data ever attempted, and in doing so, we hope that this ambitious project will be the catalyst in opening new windows to the world of physics.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-------------|-------------|-------------|
| 2006年度 | 78,700,000 | 23,610,000 | 102,310,000 |
| 2007年度 | 81,700,000 | 24,510,000 | 106,210,000 |
| 2008年度 | 81,000,000 | 24,300,000 | 105,300,000 |
| 2009年度 | 79,200,000 | 23,760,000 | 102,960,000 |
| 2010年度 | 70,800,000 | 21,240,000 | 92,040,000 |
| 総計 | 391,400,000 | 117,420,000 | 508,820,000 |

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、タウ・レプトン、レプトンフレーバ保存則、Bファクトリー、LHC-ATLAS、超対称性粒子、粒子識別装置、光検出器

1. 研究開始当初の背景

(1) 素粒子研究は、わが国研究者による「粒子・反粒子世界の非対称性の検証」(Bファクトリー)と「ニュートリノ振動の検出」(神岡実験など)により大きく前進した。前者は現在の素粒子像、いわゆる標準理論、の枠組みを構成する(クォーク属に関する)小林・益川理論を実験的に検証し、後者はレプトン属もクォー

ク属と同様な属構成を形成し、ニュートリノは有限な質量をもつことを確証した。この結果、標準理論の物理的機構が(ヒッグス粒子の存在検証を残し)確立した(図1)。

(2) つぎの課題は標準理論をもたらず深層の物理機構の追究であり、理論的には超対称性の素粒子世界の存在などが予測されている。この背後に潜む素粒子の発見やその新世界の存在

の検知が新たな研究の焦点であり、その可能性が高い世界最高の衝突強度を誇るわが国Bファクトリーでの先鋭的な探索研究が国際的にも強く要請されていた。



図1：標準理論とNew Physics世界の素粒子

(3) 本研究グループはタウ物理においてすでに世界的に高く評価される実力と実績を積み、かつ国内外の共同研究者を結ぶ独自の物理解析システムを構成する強力な国際共同研究組織である。

2. 研究の目的

この未知の物理 (New Physics) は最も重いレプトンであるタウ粒子に高い感度を持ち、その崩壊過程において標準理論では禁止されるレプトンフレーバという量子数の保存則を破る崩壊事象 (LFV) として現れる。本研究ではBファクトリー実験で世界最多量のタウ崩壊データを収集し、New Physics が予測される領域にまで探索を深化させることを主目的とする。具体的には、1億分の1の超高感度の達成を目指し、46の異なる崩壊様式を総体的に精査探究し、未知のLFV事象の検出に挑む。

また、膨大なデータ量の利点を活かし、未検出の稀崩壊事象を測定し標準理論の高精度検証を遂行する。

3. 研究の方法

(1) タウ・レプトンによる探索

電子・陽電子衝突型加速器 (KEKB) での国際協力実験 (Belle) において~20億タウ崩壊データを収集し、グループ所有の高速コンピュータシステムをフル稼働させ、膨大な測定データの解析、モンテカルロ擬似事象の生成、背景事象の寄与や検出器の稼働特性の把握を行い、LFV探索と標準理論の精密検証を遂行する。特に、信号事象選別のための独創的な解析手法の確立に工夫する。

さらに、タウ研究からのNew Physics探索を広角的に遂行し、かつ一層の研究の展開を図るため、以下の2研究計画を並進させる。

(2) 最高エネルギーからの探索

最高エネルギーのLHC-ATLAS実験に従事し、

新粒子を生成してNew Physicsを直接に捕捉することを狙う。(1)では量子的中間状態(図2の点線枠内)においてレプトンフレーバ間の混合、いわゆる質量行列の非対角要素、を介して追究するのに対し、これは対角要素の測定に当たる。両研究は異なる切り口でNew Physicsを探求する有機的関係にある。

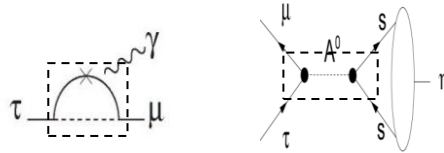


図2：New Physicsが関与する $\tau \rightarrow \mu \gamma$ (左) と $\tau \rightarrow \mu \eta$ (右) の素粒子像。

(3) 粒子種識別検出器 (TOP) の開発

New Physicsを目指し、50倍の衝突強度の次期実験 Belle-II の検討が進行中である。研究向上には統計精度とともに、測定器、特に、分離能の高い π/K 粒子種識別装置がかなめとなる。開発研究を積み重ねてきた新考案のTime-Of-Propagation (TOP) 測定に独創性をもつチェレンコフ・リングイメージ検出器 (識別能力 $>3\sigma$ ($p < 4 \text{ GeV}/c$)) の実機作成を目指したR&Dを実施する。高時間分解能光検出器の多チャンネル化、長寿命化ならびにプロトタイプ検出器の製作、性能評価に重点を置く。

4. 研究成果

(1) タウ物理

① New Physics探索

(論文1, 5-8, 11, 12, 14, 19, 21)

46のLFV崩壊様式を世界最高感度で探索するのに成功した。図3はタウ崩壊分岐比の上限値で達成探索感度に当たる(赤丸)。Bファクトリー以前のCLEO実験(黒丸)(感度 $\sim 10^{-6}$)と比較すると2桁、本研究当初からは1桁の感度の大幅更新である。New Physicsに大きく迫り国際的に期待された成果を挙げることができた。

タウレプトンのLFV崩壊分岐比の到達上限値(90%CL)

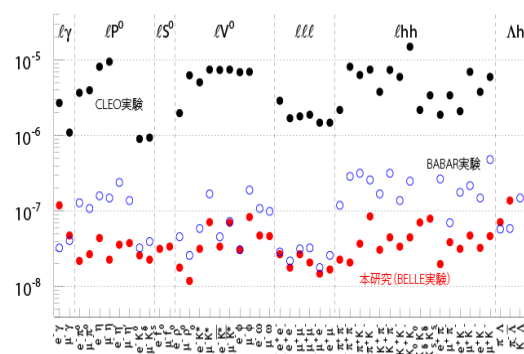


図3：本研究が到達したNew Physics探索感度を赤丸で示す。白丸は米国Bファクトリー実験の成果。

New Physicsの典型としての $\mu/e + \gamma$ 崩壊、

3-leptons 崩壊に加え、 $\mu e + \eta$ 崩壊などは本研究が集中的に開拓した測定対象である。計画通りのデータ量を収集し、目指す探索感度を達成できた。残念ながら、複数の理論モデルが予測する分岐比 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 領域には未知の現象は存在しなかった。この結果は New Physics の存在様式に拘束を課す貴重な知見を提供する (表 1、図 4)。

| 理論モデル | $\tau \rightarrow \mu \gamma$ | $\tau \rightarrow \mu \mu \mu$ |
|------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| SM + ν mixing | 10^{-40} | 10^{-14} |
| SM + heavy Maj ν_R | 10^{-9} | 10^{-10} |
| Non-universal Z' | 10^{-9} | 10^{-8} |
| SUSY SO(10) | 10^{-8} | 10^{-10} |
| mSUGRA+seesaw | 10^{-7} | 10^{-9} |
| SUSY Higgs | 10^{-10} | 10^{-7} |

表 1: 理論モデルが予測する $\tau \rightarrow \mu \gamma$ ならびに $\tau \rightarrow \mu \mu \mu$ 崩壊の分岐比。モデルを排除する感度に迫った測定結果を赤枠で示す。

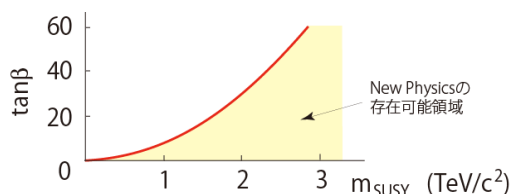


図 4: $\tau \rightarrow \mu \gamma$ 探索から New Physics (mSUGRA+seesaw model) への制約。曲線の左上を探索・排除した。

② 標準理論の精密検証

(論文 9, 13, 20)

タウ粒子のハドロニック崩壊を高精度で測定し既存のデータを更新、改訂し、さらに未検出の崩壊事象をも高い精度で評価し、標準理論を検証した。具体的な研究成果は、(a) η 中間子を含む $\tau \rightarrow K \eta \nu$, $K \pi^0 \eta \nu$, $\pi \pi^0 \eta \nu$, $\pi K s \eta \nu$, $K^* \eta \nu$ 崩壊でのカイラル摂動理論計算の妥当性の実証、(b) $\tau \rightarrow \phi K \nu$ 崩壊事象 (分岐比 $= 4 \times 10^{-5}$) の初めての検出、(c) $\tau \rightarrow \pi \pi^0 \nu$ の形状関数の高精度測定によるミューオン $g-2$ への高次ハドロニック効果への貴重なデータの供給、(d) $\tau \rightarrow \pi^- \eta \nu$, $\pi^- \omega \nu$ 崩壊における未検出のセカンドクラス・カレントの探索、(e) $\tau \rightarrow K \pi \nu$, $K K \pi \nu$, $\pi \pi \pi \nu$ 崩壊でのハドロン質量分布から未確定のベクトル・軸性ベクトル振幅の振舞いについての情報の抽出などである。

(2) LHC-ATLAS 実験

(論文 2, 3, 18)

担当の Thin Gap Chamber の稼働テスト、特性評価、陽子・陽子衝突点への設置作業、実験立ち上げ、そしてデータ収集に従事し、大規模国際協力実験において存在感のある

強力なチームの組織化に成功した。2010 年からの実験開始に伴い初期研究課題として、新物理に感度があり、確実な物理成果の抽出が期待できるトップクォーク物理に焦点を絞り、①終状態レプトン対事象によるトップ対生成断面積の測定、②同反応の W ボゾン・ヘリシティーの測定、③タウ粒子を終状態にもつトップ対生成断面積の測定、の物理研究を展開するに至った。図 5 に①の予備的結果であるが、人類はじめての最高エネルギー $\sqrt{s} = 7$ TeV での測定断面積を載せる。

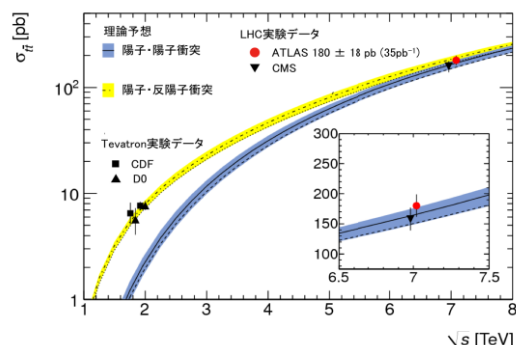


図 5: トップ対生成断面積測定値の \sqrt{s} 依存性 (予備的結果)。赤丸が本研究成果を含む ATLAS 実験測定値。理論予想と良い一致を示す。

これらは TeV 領域における標準理論の蓋然性の検証であり、同時にデータ量の蓄積ともない New Physics を GeV から TeV の広いエネルギースケールに及び探索するものである。

(3) TOP カウンターの開発研究

(論文 10, 15-17)

石英輻射体からのチェレンコフ光を輻射体内で全反射させ、輻射体片端までの伝搬時間 (TOP) とそこでの位置の二次元測定によって、粒子種により異なるチェレンコフ角を識別する。この光検出器であるマイクロチャンネルプレート・高電子増倍管 (MCP-PMT) は単光子検出、時間分解能 $= 50$ ピコ秒、光電面の量子効率 $\geq 20\%$ の性能を有し、 25×25 mm² の表面断面積に 4×4 の読み出しチャンネルを装着し、Belle-II の高ルミノシティ下で 3-5 年以上の長寿命が求められる。長期にわたる企業との共同開発により満足すべき MCP-PMT の生産に成功した。最大の困難は寿命劣化の原因追求とその対策にあり、試行錯誤を繰り返した。二次電子が生ずる陽イオン、中性ガスによる光電面の劣化が原因であって、これらに対し光電面を保護するように PMT の内部構造を改造、その結果ほぼ 10 年の実験環境下 ($1-2C/cm^2$) で使用できるものを実現した。図 6 に量子効率の (光照射量に対応する) 出力電荷量に対する変化を示す。

実機サイズ ($45cm^{\square} \times 100cm^{\square} \times 2cm^{\square}$) の石英

輻射体と石英焦点鏡の作成を行い、プロトタイプ機を作成し、ビームテストを実施した。チェレンコフ光量やTOPなど基本特性を測定し、モンテカルロ・シミュレーションと比較検討を行い焦点鏡による時間分解能の改善効果も確認し、次段の実機作成と Belle-II 測定器への組み込み構造の検討へ前進した。

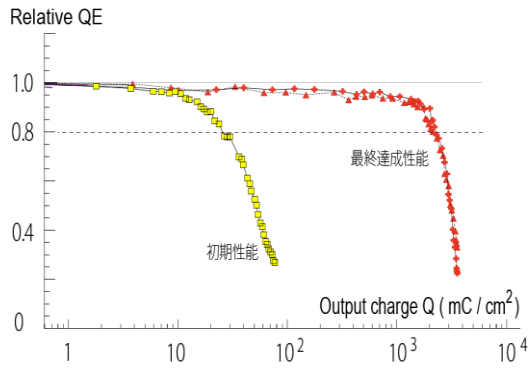


図6：量子効率の照射量による変化。量子効率寿命の改良結果であり、黄色が改良前の初期性能、赤色が最終達成性能を示す。

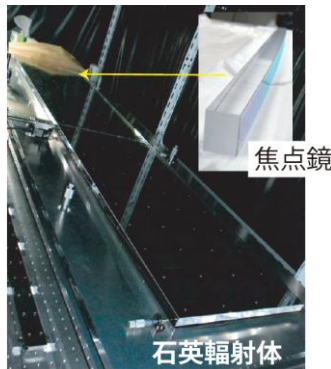


図7：作成中の石英輻射体と焦点鏡。石英板2枚と焦点鏡が接着されている。

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)

(注) Belle 実験は約 330 名、ATLAS 実験は約 3000 名の共同研究者で組織されている。数と順番は省略。以下には研究代表者、分担者が主執筆者の役割を果たした論文のみを挙げる。

[雑誌論文] (計 77 件)

1. Y. Miyazaki, T. Ohshima, H. Hayahii, K. Inami et al. (Belle collaboration), accepted to Phys. Lett. B. “Search for Lepton-Flavor-Violating τ Decays into a Lepton and a Vector Meson” (査読有).
2. M. Tomoto 他 (ATLAS collaboration), “Commissioning of the ATLAS Muon Spectrometer with Cosmic Rays”, EPJC 70 (2010) 875, (査読有).

3. M. Tomoto 他 (ATLAS collaboration), “Measurement of the top quark-pair production cross section with ATLAS in pp collision” at $\sqrt{s}=7$ TeV”, accepted by EPJC, (査読有).
4. T. Jinno, T. Mori, T. Ohshima, Y. Arita, K. Inami, et al. “Lifetime-Extended MCP-PMT”, Nucl. Instrum. Meth. A 629: 111-117(2011), (査読有) (8名中, 3番目と5番目).
5. K. Hayasaka, K. Inami, Y. Miyazaki, T. Ohshima, H. Hayahii, et al. (Belle collaboration), “Updated Search for Lepton Flavor Violating tau Decays into Three Leptons with 710 Million Produced $\tau^+\tau^-$ Paris”, Phys. Lett. B687, 139 (2010), (査読有).
6. Y. Miyazaki, T. Ohshima, H. Hayahii, K. Inami, et al. (Belle collaboration), “Search for Lepton Flavor Violating τ Decays into lK^0 s and lK^0sK^0 s”, Phys. Lett. B692, 4 (2010), (査読有).
7. Y. Miyazaki T. Ohshima, H. Hayahii, K. Inami, et al. (Belle collaboration), “Search for Lepton-Flavor-Violating τ Decays into a Lepton and an $f_0(980)$ Meson” Phys. Lett. B 672, 317 (2009), (査読有).
8. Y. Miyazaki, T. Ohshima, H. Hayahii, K. Inami, et al. (Belle collaboration), “Search for Lepton Flavor Violating τ Decays into one Lepton and Two Charged Mesons”, Phys. Lett. B682, 355 (2009) (査読有)
9. K. Inami, T. Ohshima, K. Kaji, H. Hayashii, et al. (Belle collaboration), “Precise measurement of hadronic τ -decays with an η meson”, Phys. Lett. B672, 209 (2009) (査読有)
10. K. Inami, T. Mori, T. Ohshima, et al, “Photomultiplier tubes with three MCPs.” Nucl. Instrum. Meth. A598: 160-162, (2009), (査読有) (14人中、6番目と11番目)
11. Y. Miyazaki, T. Ohshima, H. Hayahii, K. Inami, et al. (Belle collaboration), “Search for Lepton Flavor Violating τ Decays into Three Leptons” Phys. Lett. B 660, 154 (2008) (査読有)
12. Y. Nishio, K. Inami, T. Ohshima, H. Hayashii, et al. (Belle collaboration), “Search for lepton-flavor-violating $\tau \rightarrow 1 \nu 0$ decays at Belle”, Phys. Lett. B 664, 35 (2008), (査読有)
13. M. Fujikawa, H. Hayashii, T. Ohshima, S. I. Eidelman, K. Inami, et al. (Belle collaboration), “High-Statistics Study

of the $\tau \rightarrow \pi \pi^0 \nu$ Decay”, Phys. Rev. D 78, 072006 (2008), (査読有)

14. K. Hayasaka, T. Ohshima, H. Hayahii, K. Inami, et al. (The Belle collaboration), “New Search for $\tau \rightarrow \mu \gamma$ and $\tau \rightarrow e \gamma$ decays at Belle”, Phys. Lett. B 666, 16 (2008), (査読有)
15. K. Inami, T. Ohshima et al. “Cross-talk suppressed multi-anode MCP-PMT”, Nucl. Instrum. Meth. A592: 247-253 (2008), (査読有) (16人中、1番目、14番目)
16. M. Starić, K. Inami et al., “Likelihood Analysis of patterns in a time-of-Propagation (TOP) counter” Nucl. Instrum. Meth. A595:252-255, (2008), (査読有) (4人中、2番目)
17. K. Inami, “Development of TOP counter for Super B factory” Nucl. Instrum. Meth. A595:96-99, (2008), (査読有)
18. M. Tomoto 他 (ATLAS collaboration), “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”, JINST 3 S08003 (2008), (査読有)
19. Y. Miyazaki, T. Ohshima, H. Hayahii, K. Inami, et al. (Belle collaboration), “Search for Lepton Flavor Violating τ Decays into $l\eta$, $l\eta'$ and $l\pi^0$ ”, Phys. Lett. B 648, 341 (2007), (査読有)
20. K. Inami, T. Ohshima, H. Hayahii, et al. (Belle Collaboration), “First Observation of the Decay $\tau \rightarrow \phi K \nu$ ”, Phys. Lett. B 643, 5 (2006), (査読有)
21. Y. Miyazaki, T. Ohshima, H. Hayahii, K. Inami, et al. (Belle Collaboration), “Search for lepton flavor violating tau decays with a Ks meson”, Phys. Lett. B 639, 159 (2006), (査読有)

[学会発表] (計 84 件)

1. K. Hayasaka, “Tau physics at Belle”, Symposium on Prospects in the Physics of Discrete Symmetries, 2010/12/6-11, Rome, Italy
2. T. Mori, “Performance Test of TOP Counter Prototype”, WORKSHOP ON TIMING DETECTORS 2010/11/29-12/1, Krakow, Poland
3. T. Mori, “TOP counter prototype R&D”, IEEE Nuclear Science Symposium 2011/10/30-11/6, Knoxville, TN, USA
4. K. Inami, “Updated search for lepton-flavor-violating tau decays at Belle”, The 11th International Workshop on Tau-Lepton Physics (TAU2010), 2010/9/13-17, Manchester, UK
5. M. Bischofberger, “Search for CP violation in tau lepton decays at Belle”,

- (TAU2010), 2010/9/13-17, Manchester, UK
6. K. Hayasaka “Search for lepton flavour violating tau decay and lepton-number violation B decay at Belle”, 35th International Conference on High Energy Physics, 2010/7/21-28, Paris, France
7. K. Hayasaka, “Recent tau decay results at B factories”, 22nd Rencontres de Blois, 2010/7/15-20, Blois, France
8. Y. Miyazaki, “Lepton Flavor Violation at B Factories”, Flavor Physics and CV Violation 2010 2010/5/25-29, Torino, Italy,
9. K. Inami “Development of time of propagation counters”, 7th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors 2010/5/3-7, Cassis, Provence, France
10. M. Bischofberger, “Rare decays of tau lepton at Belle”, 6th International Workshop On e^+e^- Collisions From Phi To Psi 2009/10/13-16, Beijing, China
11. Y. Takahashi, “ATLAS Muon Spectrometer, Status and Performance”, International Conference on Advanced Technology and Particle Physics, 2009/10/5-9, Como Italy
12. K. Inami, “Rare τ decays from B factory”, The 12th International Conference on B-Physics at Hadron Machines 2009/9/7-11, Heidelberg, Germany
13. H. Hayahii, “Recent Belle results on the hadronic decays of tau lepton”, 3rd International Conference on Hadron Structure '09, 2009/8/30 - 9/3, 2009, Tatranska Strba, Slovak Republic,
14. K. Hayasaka, “Second-class current in $\tau \rightarrow \pi \eta \nu$ analysis and measurement of $\tau \rightarrow h'h''h'''$ from Belle” 2009 Europhysics Conference on High Energy Physics: HEP 2009 (EPS-HEP 2009) 2009/7/16-22, Krakow, Poland
15. Y. Miyazaki, “Search for Lepton Flavor Violation in τ Decays at Belle Experiment”, EPS-HEP 2009
16. K. Hayasaka “Search for LFV at B factories”, Symposium on Prospects in the Physics of Discrete Symmetries, 2008/12/11-16, IFIC, Valencia, Spain
17. K. Inami, “Tests of MCP-PMT for the TOP counter”, Workshop on timing detectors: Medical and Particle Physics applications, 2008/10/15-16, Lyon, France
18. Y. Miyazaki “Search for Lepton Flavor Violating τ decays at Belle”, 10th

- International Workshop on Tau Lepton Physics (TAU08), 2008/9/22-25, Novosibirsk, Russia
19. H. Hayashii "Measurement of the 2π spectral function in the decay $\tau \rightarrow \pi\pi^0\nu_\tau$ and the contribution to the muon anomalous magnetic moment $a_\mu(2\pi)$ " TAU08
 20. Y. Usuki, "Precise measurement of $BR(\tau \rightarrow K^{*0}(892)K-\nu_\tau)$, $M_{K^{*0}(892)}$ and $\Gamma_{K^{*0}(892)}$ from Belle", TAU08
 21. K. Inami, "Hadronic Tau Decays at Belle", 34th International Conference on High Energy Physics, 2008/7/30-8/6, Philadelphia, PA, USA
 22. K. Inami, "Experimental review of lepton-flavor-violating tau decays", International Workshop On e^+e^- Collisions From Phi To Psi (PHIPSI08) 2008/4/7-10, Laboratori Nazionali di Frascati, Italy
 23. H. Hayashii, "Results on tau spectral function in the $\tau \rightarrow \pi\pi^0\nu_\tau$ decays", PHIPSI08
 24. Y. Usuki, "Study of $\tau \rightarrow K^{*0}(892)K-\nu_\tau$ and $\tau \rightarrow \eta X \nu_\tau$ decays at Belle", PHIPSI08
 25. Y. Okumura, "The Commissioning status and results of ATLAS Level1 Endcap Muon Trigger System", Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, 2008/9/15-19, Naxos, Greece
 26. K. Inami, "Timing properties of MCP-PMT", Workshop on timing detectors 2007/3/8-9, Paris, France
 27. K. Inami, "Development of TOP counter for Super B factory", 6th International Workshop On Ring Imaging Cherenkov Counters, 2007/10/15-20, Trieste, Italy
 28. T. Sugimoto, "The 1st Result of Global Commissioning of the ATLAS Endcap Muon Trigger System in ATLAS Cavern", Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, 2007/9/3-7, Prague, Czech Republic
 29. M. Tomoto, "Rare decays in ATLAS and CMS", Workshop on the CKM Unitarity Triangle, 2006/12/12-16, 2006, Nagoya, Japan
 30. T. Ohshima, "Study of LFV in tau Decay at Belle", International Workshop on Tau-Lepton Physics (Tau06), 2006/9/19-22, Pisa, Italy
 31. T. Ohshima "Measurement of $\tau \rightarrow \phi K \nu_\tau$ branching fraction", Tau06
 32. K. Hayasaka, "Search of lepton flavor violation at B factories", International Conference of High Energy Physics 2006/7/27-8/2, Moscow, Russia
 33. Y. Miyazaki, "Lepton Flavor Violation

- tau and Leptonic B Decays at the B factories", Conference of Intersection Particle and Nuclear Physics, 2006/5/30-6/3, Puerto Rico, USA
34. K. Inami, "Time of Flight measurement with MCP-PMT", In the Proceedings of International Symposium on Detector Development for Particle, Astroparticle and Synchrotron Radiation Experiments 2006/4/3 - 6, SLAC, USA

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計 0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

[その他]

<http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/public/sousei/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大島 隆義 (OHSHIMA TAKAYOSHI)
 名古屋大学・大学院理学研究科・特任教授
 研究者番号：00134651

(2) 研究分担者

林井 久樹 (HAYASHII HISAKI)
 奈良女子大学・理学部・教授
 研究者番号：50180980

戸本 誠 (TOMOTO MAKOTO)
 名古屋大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号：80432235

居波 賢二 (INAMI KENJI)
 名古屋大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号：50372529