

領域番号：466
領域略称名：フレーバー物理

平成22年度科学研究費補助金
特定領域研究 研究状況報告書

「フレーバー物理の新展開」

(領域設定期間)

平成18年度 ～ 平成23年度

領域代表者 大阪大学・大学院理学研究科・教授・山中 卓

目次

1	研究領域の概要	3
2	研究領域の設定目的	3
3	研究領域内の研究の年度ごとの進展状況及びこれまでの主な研究成果	3
4	研究領域の研究組織と各研究項目の連携状況	4
5	研究費の使用状況	7
6	研究成果公表の状況	7
7	総括班評価者による評価の状況	14
8	研究領域の研究を推進する上での問題点と対応策	15
9	今後の研究領域の推進方策	15

1 研究領域の概要

物質を構成する素粒子は、クォークと、電子やニュートリノなどのレプトンであるが、これらは、弱い相互作用によりその種類（フレーバー）を変える。フレーバー間の混合は複雑な構造を持ち、素粒子の標準理論によっても未だに理解されていない。一方、標準理論を超える超対称性などの理論は、フレーバー混合に新しい要素を加えることが知られている。

本領域では世界最大級の強度のビームを使う実験により s, b, t クォークの崩壊の精密測定を行い、また $\nu_\mu \rightarrow \nu_e, \nu_\tau$ などのニュートリノ振動の発見をめざすとともに、これらの実験結果を理論面から解析する。フレーバーが変化する現象の多角的な研究により、フレーバーの構造の解明と標準理論を超える物理を追求する。

このために、5つの実験の計画研究 (A01~A05)、および一つの理論の計画研究 (A06) を設定している。さらに2007年度からは公募研究を行い、分野の裾野を広げた。

2 研究領域の設定目的

実験の面からは、クォークとレプトン両者のフレーバー混合の過程を、世界最先端の加速器・測定技術を用いて精密測定する。具体的には、クォークのフレーバー混合については、現在建設中の J-PARC 大強度陽子加速器を用いた K 中間子の研究、KEK の電子・陽電子衝突実験による B 中間子の研究、米国 Fermilab の陽子・反陽子衝突実験によるトップ (t) クォークや B 中間子の研究を行う。また、ニュートリノのフレーバー混合については、J-PARC からスーパーカミオカンデにミュオンニュートリノを発射し、電子ニュートリノへの振動の発見、およびヨーロッパの CERN 研究所からイタリアのグラン・サッソーにミュオンニュートリノを発射し、タウニュートリノへの振動の観測を目指す。

理論の面からは、上記の実験で得られる結果や LHC 加速器から出てくる新たな結果を踏まえ、フレーバー構造の統一的理解と標準理論を越える物理の寄与について研究し、実験にも示唆を与える。

3 研究領域内の研究の年度ごとの進展状況及びこれまでの主な研究成果

クォークのフレーバー物理の実験

A01: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊から探るフレーバー混合と新しい物理では、高性能の K_L ビームラインを J-PARC に建設し、ビームの性能試験を行った。(2006-2009) また、2010年5月からの建設に備え、CsI 結晶を用いた電磁カロリメータの準備を行った。

A02: B ファクトリーにおける B とタウフレーバー物理の研究では、 $B \rightarrow \tau \nu$ 崩壊を世界で初めて発見(2006)し、荷電ヒッグス粒子の質量に制限を与えた。また、 $B \rightarrow \eta' K^0$ の解析(2006)によって、 $b \rightarrow s$ クォーク遷移において初めて CP 非保存現象を測定することに成功した。 $B^0 \rightarrow K_S \pi^0 \pi^0$ 過程における CP 非対称度の測定(2007)や、 $B \rightarrow \pi l \nu, \rho l \nu, D^* \tau \nu$ 崩壊の分岐比測定(2007-2009) などから、小林・益川行列を含む標準理論をより一層高い精度で確認した。

A03: 陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップとボトム・フレーバーの物理では、 B_s 中間子振動の初観測に成功し、小林益川混合行列の $|V_{ts}/V_{td}|$ 成分を 4 % の精度で決定した。 B_s 中間子の稀崩壊モード $B_s \rightarrow K^+K^-$, $B_s \rightarrow K\pi$, $B_s \rightarrow D_s K$ (2007), $B_s \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$ (2009) や、ボトムクォークを含むバリオン Σ_b と Ξ_b (2007) を初めて観測した。 $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ の崩壊モードで CP 対称性の破れの大きさを表す位相 β_s が、標準理論の予言値から 1.8σ ずれていることを観測した。(2008) トップフレーバーの物理では、2008 年度に、単一トップクォーク生成の観測に成功し、小林益川混合行列の V_{tb} 成分を 14 % の精度で決定した。

レプトンのフレーバー物理の実験

A04: 大強度ニュートリノビームを使ったニュートリノフレーバー振動の研究では、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動を観測するための施設、装置の研究開発、建設を行った (2006–2008)。2009 年 4 月には陽子ビームを標的に当ててニュートリノの生成を確認し、12 月にはほぼ全ての測定器が稼働しはじめた。2010 年 1 月から物理のためのデータ収集を開始し、2 月 24 日にはスーパーカミオカンデにて、J-PARC で生成したニュートリノの反応を初めて観測した。

また、T2K 実験の感度をさらに高めるため、CERN の NA61 実験においてパイ中間子の絶対微分生成断面積を精密に測定し、フェルミ研 E954 実験 SciBooNE で T2K 実験に必要なニュートリノ反応断面積を測定した。

A05: タウニュートリノの直接検出によるニュートリノフレーバーの研究では、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動を観測するための検出器の建設を行い、2008 年 7 月よりニュートリノビームの本格的照射を開始した。2008 年度は検出可能領域内に 2008 年度、2009 年度で計約 4000 反応を蓄積し、既に約 1600 反応を原子核乾板中に検出した。タウニュートリノ反応の最初の候補を 1 例検出し、そのセミナーを行うとともに論文として投稿した (2010 年 6 月)。

A02 では、B ファクトリーを用いてタウレプトン対を大量に生成し、 $\tau \rightarrow \mu\gamma, e\gamma, \ell\eta, \tau \rightarrow \ell\ell\ell$ などレプトン数の保存則を破る崩壊を探索して標準理論の高精度検証を行なった。(2006) さらに、 $\tau \rightarrow \phi K\nu$ 崩壊を $(4.1 \pm 0.4) \times 10^{-5}$ の崩壊分岐比で発見した。(2006)

フレーバー物理の理論

A06: フレーバー混合における標準理論を超える物理の理論的研究では、超対称理論、余剰次元理論、宇宙論のそれぞれについて多くの新しい知見を得た。例えば、超対称模型に関しては、フレーバーを変える中性カレントによるトップクォークの崩壊および LHC での生成の計算を系統的に行なった (2007)。また超対称標準理論における崩壊過程 $b \rightarrow s\gamma$ を調べた (2007)。さらに超対称 SU(5) 大統一理論において、 B_s のフレーバー混合及びレプトンフレーバーの破れを調べた (2008)。さらに $\mu \rightarrow e$ レプトンフレーバー転換過程を複数の核で観測することにより背後の物理を区別する精度を評価した (2009)。

以上のように、幅広く多角的にクォークとレプトンのフレーバー物理に取り組み、分野の発展に貢献した。

4 研究領域の研究組織と各研究項目の連携状況

研究組織は、計画研究については 2009 年 7 月現在の構成を示し、公募研究については今までの研究代表者を示す。

A01: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊から探るフレーバー混合と新しい物理

研究代表者 山中 卓 (大阪大学理学研究科)

研究分担者 小松原健 (KEK 素粒子原子核研究所)、南篠創 (京都大学理学研究科)、田島靖久 (山形大学学術情報基盤センター)、鈴木史郎 (佐賀大学理工学部)

公募研究研究代表者 野村正 (京都大学理学研究科)

A02: B ファクトリーにおける B とタウフレーバー物理の研究

研究代表者 大島 隆義 (名古屋大学理学研究科)

研究分担者 居波賢二 (名古屋大学理学研究科)

公募研究研究代表者 羽澄昌史 (KEK 素粒子原子核研究所)、石野宏和 (東京工業大学理学研究科)、宮林謙吉 (奈良女子大学理学部)、田島 治 (KEK 素粒子原子核研究所)、樋口岳雄 (KEK 素粒子原子核研究所)、田内一弥 (KEK 素粒子原子核研究所)

A03: 陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップとボトム・フレーバーの物理

研究代表者 金 信弘 (筑波大学数理物質科学研究科)

研究分担者 受川史彦 (筑波大学数理物質科学研究科)、原 和彦 (筑波大学数理物質科学研究科)、武内勇司 (筑波大学数理物質科学研究科)、

公募研究研究代表者 山本和弘 (大阪市立大学理学系)、寄田和弘 (大阪市立大学理学系)

A04: 大強度ニュートリノビームを使ったニュートリノフレーバー振動の研究

研究代表者 西川 公一郎 (KEK 素粒子原子核研究所)

研究分担者 中家剛 (京都大学理学研究科)、小林隆 (KEK 素粒子原子核研究所)

公募研究研究代表者 市川温子 (KEK 素粒子原子核研究所)、坂下 健 (KEK 素粒子原子核研究所)、山本和弘 (大阪市立大学理学系)、中平 武 (KEK 素粒子原子核研究所)、福田善之 (宮城教育大教育学部)、関谷洋之 (KEK 素粒子原子核研究所)

A05: タウニュートリノの直接検出によるニュートリノフレーバーの研究

研究代表者 中村光廣 (名古屋大学理学研究科)
(2009 年度までは丹羽 公雄 (名古屋大学理学研究科))

公募研究研究代表者 中平 武 (KEK 素粒子原子核研究所)、

A06: フレーバー混合における標準理論を超える物理の理論的研究

研究代表者 日笠健一 (東北大学理学研究科)

研究分担者 山口昌弘 (東北大学理学研究科)、北野龍一郎 (東北大学理学研究科)、山田洋一 (東北大学理学研究科)、諸井健夫 (東京大学理学系研究科)、棚橋誠治 (名古屋大学理学研究科)、戸部和弘 (名古屋大学理学研究科)、奥村健一 (九州大学理学研究院)

公募研究代表者 久野純治 (東京大学宇宙線研究所)、谷本盛光 (新潟大学自然科学系)、久保治輔 (金沢大学自然科学系)、前川展祐 (名古屋大学理学系)、窪田高弘 (大阪大学理学研究科)、細谷 裕 (大阪大学理学研究科)、両角卓也 (広島大学理学系)、佐藤 丈 (埼玉大学理工学研究科)、菊川芳夫 (東京大学総合文化研究科)、大野木哲也 (京都大学基礎物研)、波場直之 (大阪大学理学研究科)、荻原 薫 (KEK 素粒子原子核研究所)、末松大二郎 (金沢大学数物科学系)、進藤哲央 (工学院大工学部)、清 裕一郎 (KEK 素粒子原子核研究所)

X00: 総括班

研究代表者 山中 卓 (大阪大学理学研究科)

研究分担者 大島隆義 (名古屋大学理学研究科)、金信弘 (筑波大学数理物質科学研究科)、西川公一郎 (KEK 素粒子原子核研究所)、中村光廣 (名古屋大学理学研究科)、日笠健一 (東北大学理学研究科)、中家剛 (京都大学理学研究科)

各研究項目の連携状況

クォークのフレーバー物理については、 $b \rightarrow s$ 、 $b \rightarrow c$ クォーク遷移は B 中間子を用いて A02 と A03 が、 $t \rightarrow d$ については A02 と A03 に加えて、K 中間子を用いて A01 が、 t クォークについては t を直接生成できる A03 が研究を行っている。また、レプトンのフレーバー物理については、A04 が $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動、A05 が $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動の実験を行っており、 τ レプトンについては A02 が研究を行っている。さらに、A06 がこれらの実験を含み幅広く、フレーバー物理の理論的な研究を行っている。

これら各計画研究間の連携を深め、物理の情報交換を促し、フレーバー物理の根幹に総合的にアプローチできるよう、毎年総括班のメンバーの持ち回りで「特定領域フレーバー物理の新展開」研究会を開いている。2007 年は 3 月に京都、2008 年は 2 月に仙台市、2009 年は 3 月に愛知県額田郡、2010 年は 2 月に茨城県大洗町で開催した。毎回約 50~80 名が参加し、20~40 件の多岐にわたる発表が行われ、実験グループや理論の違いを越えて専門的な質疑が行われた。特に 2009 年度は、J-PARC の始動 (A01、A04 班)、OPERA 実験 (A05) のデータ蓄積、Belle 実験 (A02 班) の積分ルミノシティ $1ab^{-1}$ 達成、CDF 実験の Higgs 粒子探索 (A03 班)、標準理論を超えた物理理論の探索 (A06 班) と最新の成果と物理結果が目白押しで、2010 年研究会は 3 日間開催で総勢 80 名の参加者が集う大盛況となった。また、最終日に大学院生が企画、司会、講演する「学生セッション」を設け、若手の活発な質疑・応答が行われた。また、総括班メンバーによる打ち合わせも定期的に行っている。

A02: 測定器開発について、共通する要素技術開発に関する情報交流を研究会などを通して行っている。

5 研究費の使用状況

A01: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊から探るフレーバー混合と新しい物理では、ビームラインのコリメータの製造、波形記録用の電子回路の開発と試験、電磁カロリメータ用の高電圧電源の開発と製造、電磁カロリメータに用いる CsI 結晶と光電子増倍管の試験とカロリメータの建設、ガンマ線検出器の開発、特任研究員の雇用に用いた。

A02: B ファクトリーにおける B とタウフレーバー物理の研究では、本研究費は主に測定器開発に使用している。測定器開発の中で光検出器の開発は時間がかかる事項であるが、集中的に使用することによって、短期間に効率よく開発サイクルを進めることができている。その他、国際ワークショップ開催のためにも研究費を使用した。

A03: 陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップとボトム・フレーバーの物理では、解析計算機およびデータストレージ用ディスクを購入して物理解析に有効に使用した。またこれらの計算機システムを活用してデータ収集システムの研究を進展させた。研究費によって研究員を雇用し、ボトムフレーバー物理の解析を進展させた。

A04: 大強度ニュートリノビームを使ったニュートリノフレーバー振動の研究では、KEK が主に高品質大強度ビームの安定供給実現のための装置 (陽子ビームモニター、パイ中間子生成のためのグラフィット標的、電磁ホーン、ビームラインのデータ収集システムなど)、京都大学がビームの質を高精度で測定するための装置 (ミューオンモニター、生成直後のニュートリノ検出器など) を担当し、研究開発、製作、設置等を本研究費を用いて進めた。

A05: タウニュートリノの直接検出によるニュートリノフレーバーの研究では、初期の経費の大半は原子核フィルムであるが、照射開始後は解析関係ならびにイタリアとの往復旅費が大きな割合を占めている。また解析装置の 24 時間体制での運用のために研究費の一部を充てている。

A06: フレーバー混合における標準理論を超える物理の理論的研究では、若手研究者を研究費により助教として雇用し、計画研究の推進に大きく寄与している。平成 19 年 4 月から戸部和弘 (現名古屋大准教授)、20 年 4 月から奥村健一 (現九州大助教) を採用したが、両名は現在研究分担者として研究に参加している。その後 21 年 7 月から 22 年 3 月まで郡和範 (現 KEK 助教)、22 年 4 月より野村大輔を雇用している。

X00: 総括班の費用により、毎年 2 月もしくは 3 月に本特定領域の研究会を開催し、会場費、参加旅費の補助を行った。また、フレーバー物理に関連した国際会議の開催を後援し、国内外での国際会議・研究会への若手研究者の参加の補助、海外での情報調査旅費、海外からの研究者の招聘などを行っている。

6 研究成果公表の状況

主な論文等を以下に抜粋する。

1. “Experimental Study of the Decay $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ”, J.K. Ahn, T.K. Komatsubara, H. Nanjo, S. Suzuki, Y. Tajima, T. Yamanaka, *H. Morii *et al.*, Phys. Rev. D **81**, 072004 (2010).

2. “Testing the CKM Model with Kaon Experiments”, E. Blucher, B. Winstein and *T. Yamanaka, Prog. Theo. Phys. **122**, 81 (2009).
3. “Search for a Light Pseudoscalar Particle in the Decay $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 X$ ”, *Y.C. Tung, T.K. Komatsubara, H. Nanjo, S. Suzuki, Y. Tajima, T. Yamanaka, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 051802 (2009).
4. “Search for the Decay $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ”, J.K. Ahn, *T. Sumida, T.K. Komatsubara, H. Nanjo, S. Suzuki, Y. Tajima, T. Yamanaka, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 201802 (2008).
5. “Barrel Photon Detector of the KEK $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Experiment”, *Y. Tajima, T.K. Komatsubara, T. Yamanaka, Nucl. Inst. Meth. A **592**, 261-272 (2008).
6. “First Search for $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ”, *J. Nix, T.K. Komatsubara, S. Suzuki, Y. Tajima, T. Yamanaka, *et al.*, Phys. Rev. D **76**, 011101(R)(2007).
7. “New Limit on the $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Decay Rate”, J.K. Ahn, T.K. Komatsubara, *K. Sakashita, T. Yamanaka, *et al.*, Phys. Rev. D **74**, 051105(R) (2006).
8. “Search for Lepton Flavor Violating tau Decays into Three Leptons with 719 million produced tau pairs”, *K. Hayasaka, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima, *et al.* (Belle collaboration), Phys. Lett. B **687**, 139 (2010).
9. “Search for Lepton Flavor and Lepton Number Violating tau Decays into a Lepton and Two Charged Mesons”, *Y. Miyazaki, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima, *et al.* (Belle collaboration), Phys. Lett. B **682**, 355 (2010).
10. “Precise measurement of hadronic tau-decays with an eta meson”, *K. Inami, T. Iijima, T. Ohshima, *et al.* (Belle collaboration), Phys. Lett. B **672**, 209 (2009).
11. “Search for Lepton-Flavor-Violating tau Decays into a Lepton and an $f_0(980)$ Meson”, *Y. Miyazaki, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima, *et al.* (Belle collaboration), Phys. Lett. B **672**, 317 (2009).
12. “New Search for $\tau \rightarrow \mu \gamma$ and $\tau \rightarrow e \gamma$ decays at Belle”, *K. Hayasaka, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima, *et al.* (Belle collaboration), Phys. Lett. B **666**, 16 (2008).
13. “Search for lepton-flavor-violating $\tau \rightarrow \ell V^0$ decays at Belle”, *Y. Nishio, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima, *et al.* (Belle collaboration), Phys. Lett. B **664**, 35 (2008).
14. “Search for Lepton Flavor Violating τ Decays into Three Leptons”, *Y. Miyazaki, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima, *et al.* (Belle collaboration), Phys. Lett. B **660**, 154 (2008).
15. “Cross-talk suppressed multi-anode MCP-PMT”, *K. Inami, T. Iijima, T. Ohshima, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **592**, 247 (2008).

16. “Observation of time-dependent CP violation in $B^0 \rightarrow \eta' K^0$ decays and improved measurements of CP asymmetries in $B^0 \rightarrow \phi K^0$, $B^0 \rightarrow K_s K_s K_s$ and $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ decays”, *K.-F. Chen, *K. Hara, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima, *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 98, 031802 (2007).
17. “Search for Lepton Flavor Violating τ^- Decays into $\ell^- \eta$, $\ell^- \eta'$ and $\ell^- \pi^0$ ”, *Y. Miyazaki, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima, *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Lett. B 648, 341 (2007).
18. “Measurement of branching fractions and q2 distributions for $B \rightarrow \pi \ell \nu$ and $B \rightarrow \rho \ell \nu$ Decays with $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ Decay Tagging”, *T. Hokuue, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima, *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Lett. B 648, 139 (2007).
19. “Evidence of the purely leptonic decay $B \rightarrow \tau \nu$ ”, *K. Ikado, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima, *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 97, 251802 (2006).
20. “Search for Lepton Flavor Violating τ^- Decays with a K_S^0 meson”, *Y. Miyazaki, T. Iijima, K. Inami, T. Ohshima, *et al.* (Belle Collaboration), Phys. Lett. B 639, 159 (2006).
21. “Observation of $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ oscillations”, A. Abulencia, *J. Kroll, K. Hara, S.H. Kim, K. Kondo, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 242003 (2006).
22. “Observation of $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$ and measurements of branching fractions of charmless two-body decays of B^0 and B_s^0 mesons in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ -TeV”, A. Abulencia, *G. Punzi, K. Hara, S.H. Kim, K. Kondo, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 211802 (2006).
23. “Measurement of the $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ oscillation frequency”, A. Abulencia, *J. Kroll, K. Hara, S.H. Kim, K. Kondo, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **97**, 062003 (2006).
24. “ B_s^0 中間子の粒子・反粒子振動の観測”, *受川史彦, 魚住 聖, 金 信弘, 日本物理学会誌 **62**, 249 (2007).
25. “First Observation of Heavy Baryons Σ_b and Σ_b^* ”, A. Aaltonen, *P. Maksimovic, K. Hara, S.H. Kim, K. Kondo, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **99**, 202001 (2007).
26. “First Observation of the Decay $B_s^0 \rightarrow D_s^- D_s^+$ and Measurement of Its Branching Ratio”, A. Abulencia, *C. Paus, K. Hara, S.H. Kim, K. Kondo, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **100**, 021803 (2008).
27. “テバトロン実験でヒッグス粒子にどこまで迫れるか”, *金 信弘, 増淵達也, 日本物理学会誌 **64**, 440 (2009).

28. “Search for the Rare Decays $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- K^+$, $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- K^{*0}(892)$, and $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \phi$ ”, A. Abulencia, *S. Farrington, K. Hara, S.H. Kim, K. Kondo, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. **D79** , 011104(R) (2009).
29. “Observation of Electroweak Single Top Quark Production”, A. Aaltonen, *T.Junk, K. Hara, S.H. Kim, K. Kondo, Y. Takeuchi, F. Ukegawa, *et al.*, The CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **103**, 092002 (2009).
30. “Development and study of the multi pixel photon counter”, *S. Gomi, M. Taguchi, T. Nakaya, M. Yokoyama *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A581 (2007) 427-432.
31. “Scintillator counters with multi-pixel avalanche photodiode readout for the ND280 detector of the T2K experiment”, *O. Mineev, T. Nakaya, T. Nobuhara, M. Taguchi, M. Yokoyama *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A577 (2007) 540-551.
32. “Tests of muon monitor detectors for the T2K experiment”, *H. Kubo, K. Matsuoka, T. Nakaya, M. Yokoyama *et al.*, Beam Science and Technology (2007).
33. “R&D of MPPC for T2K experiment”, *S. Gomi, T. Nakaya, M. Yokoyama, H. Kawamuko *et al.*, Proceedings of International Workshop on new photon-detectors (PD07), PoS(PD07) 019.
34. “Development of Readout Electronics for MPPC ”, *S. Gomi *et al.*, Proceedings of International Workshop on new photon-detectors (PD07), PoS(PD07) 046.
35. “Fiber Connector for MPPC”, *H. Kawamuko, T. Nakaya, K. Nitta, M. Yokoyama *et al.*, Proceedings of International Workshop on new photon-detectors (PD07), PoS(PD07) 043.
36. “Neutrino and Other Beam-Lines at J-PARC”, *T.Ishida, In Proc. of PAC07: The 22nd Particle Accelerator Conference, TUXKI03N Albuquerque, New Mexico, USA, June 25-19, 2007.
37. “Neutrino Physics”, *T. Kobayashi (KEK, Tsukuba), In the Proceedings of Particle Accelerator Conference (PAC 07), Albuquerque, New Mexico, 25-29 Jun 2007, pp 3835.
38. “Application of Hamamatsu MPPC to T2K Neutrino Detectors”, *M. Yokoyama, T. Nakaya, S. Gomi, A. Minamino, N. Nagai, K. Nitta, D. Orme, M. Otani *et al.*, Proceedings of 5th International Conference on New Developments in Photodetection (NDIP08).
39. “Mass production test of Hamamatsu MPPC for T2K neutrino oscillation experiment”, *M. Yokoyama, T. Nakaya, S. Gomi, M. Minamino, N. Nagai, K. Nitta, D. Orme, M. Otani *et al.*, Proceedings of 5th International Conference on New Developments in Photodetection (NDIP08).

40. “Development of the Muon Beam Monitor for the T2K Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment”, *H. Kubo, 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conf. Record.
41. “Design and Construction of INGRID Neutrino Beam Monitor for T2K Neutrino Experiment”, *M. Otani, 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record.
42. “Development of Multi-Pixel Photon Counters for T2K Long Baseline Neutrino Experiment”, *A. Minamino, 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record.
43. “Neutrino Facility at J-PARC: Construction Status and Future Prospect”, *T. Ishida, NuBeam08: Workshop on Neutrinos and Beams May 5–7, ‘08 Darjeeling, West Bengal, India.
44. “A Possible Future Long Baseline Neutrino and Nucleon Decay Experiment with a 100 kton Liquid Argon TPC at Okinoshima using the J-PARC Neutrino Facility”, A. Badertscher, *T. Hasegawa, T. Kobayashi, A. Marchionni, A. Meregaglia, T. Maruyama, K. Nishikawa, A. Rubbia (Zurich, ETH, KEK, Tsukuba and Tsukuba Univ. Tech.), Plenary talk at 4th International Workshop on Nuclear and Particle Physics at J-PARC (NP08), Mito, Ibaraki, Japan , 5-7 Mar 2008.
45. “Search for charged current coherent pion production on carbon in a few-GeV neutrino beam”, K. Hiraide, T. Nakaya, M. Yokoyama *et al.*, Phys. Rev. D78, 112004 (2008).
46. “Fine-Frained neutrino detector for the T2K neutrino oscillation experiment”, *K. Ieki for T2K FGD group, A. Murakami for T2K INGRID group, Proceedings of the 12th Vienna Conference on Instrumentation (VCI2010), in press.
47. “Photodetectors R&D for cost effective PMs, MPPC”, *T. Nakaya, , Proceedings of European Strategy for Future Neutrino Physics, in press.
48. “T2K near detector FGD construction and DAQ test”, *K. Ieki for T2K FGD group, T. Nakaya, M. Yokoyama, , Proceedings of XXIX PHYSICS IN COLLISION (PIC09), in press.
49. “New results from the FNAL SciBooNE neutrino experiment”, *T. Nakaya for the SciBooNE collaboration, Proceedings of FOURTEENTH LOMONOSOV CONFERENCE ON ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS, in press.
50. “Status of the T2K long baseline neutrino oscillation experiment”, *A.K. Ichikawa for T2K collaboration, J.Phys.Conf.Ser.203:012104,2010 (Proceedings of the eleventh international conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, TAUP2009).

51. “The First Large Application of MPPC: T2K Neutrino Beam Monitor INGRID”, *M. Otani, Proceedings of International Workshop on New Photon Detectors (PD09), in press.
52. “MPPC for T2K Fine-Frained Detector”, *K. Ieki for T2K FGD group, Proceedings of International Workshop on New Photon Detectors (PD09), in press.
53. “Development and production of the ionization chamber for the T2K muon monitor”, *K. Matsuoka, A. Ichikawa, H. Kubo, T. Maruyama, A. Murakami, T. Nakaya and M. Yokoyama, , Nucl. Instrum. Meth., in press (TIPP09 proceedings).
54. “Design and construction of INGRID neutrino beam monitor for T2K neutrino experiment”, *M. Otani, N. Nagai, D. Orme, A. Minamino, K. Nitta, M. Yokoyama, A.K. Ichikawa, T. Nakaya et al., Nucl. Instrum. Meth., in press (TIPP09 proceedings).
55. “Status of the T2K experiment”, *M. Shibata for the T2K collaboration, 14th Lomonosov conference on elementary particle physics, Moscow, 2009年8月20日.
56. “いよいよ始まった T2K 実験”, *柴田政宏 for the T2K collaboration, 日本物理学会 2009 年秋季大会 企画講演、甲南大学、2009 年 9 月 11 日.
57. “T2K 実験における陽子ビーム強度の測定”, *柴田政宏 他 T2K ビームライングループ, 日本物理学会 2009 年秋季大会、甲南大学、2009 年 9 月 13 日.
58. “T2K 実験の現状”, *柴田政宏 for the T2K collaboration, 第 23 回宇宙ニュートリノ研究会、東大宇宙線研、2010 年 2 月 9 日.
59. “Measurement of inclusive neutral current pi0 production on carbon in a few-GeV neutrino beam”, Y. Kurimoto, T. Nakaya, M. Yokoyama et al., Phys. Rev. D81, 033004 (2010).
60. “Long-term characteristics of nuclear emulsion”, N. Naganawa, K. Kuwabara, JINST **5**, P02006 (2010).
61. “The analysis of interface emulsion detector for the OPERA experiment in JAPAN scanning facility”, T. Fukuda, K. Morishima, T. Nakano, et al., JINST **5**, P04009 (2010).
62. “Measurement of the atmospheric muon charge ratio with the OPERA detector”, M. Agafonova, K. Niwa, M. Nakamura, et al., OPERA Collaboration, Eur.Phys.J. **C67**,25-37 (2010).
63. “The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam”, R. Acquafredda, *F. Terranova, K. Niwa, M. Nakamura et al., Opera Collaboration, JINST. **4**, P04018 (2009).

64. “Study of the effects induced by lead on the emulsion films of the OPERA experiment”, A. Anokhina, *L.Patrizii, N.Naganawa, K.Niwa, M.Nakamura *et al.*, Opera Collaboration, JINST. **3**, P07002 (2008).
65. “Emulsion sheet doublets as interface trackers for the OPERA experiment”, A. Anokhina, *A.Ariga, K.Niwa, M.Nakamura *et al.*, Opera Collaboration, JINST. **3**, P07005 (2008).
66. “Final tau-neutrino results from the DONuT experiment”, K. Kodama, *T.Furukawa, K.Niwa, M.Nakamura *et al.*, DONUT Collaboration, Phys.Rev. **D78**, 052002 (2008).
67. “Final results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillation from the CHORUS experiment”, E.Eskut, *O.Sato, K.Niwa, M.Nakamura *et al.*, CHORUS Collaboration, Nucl.Phys. **B793**, 326-343 (2008).
68. “Experimental constraints on supersymmetric top-charm partner flavor mixing and implications for top-quark flavor changing neutral current processes”, J. Cao, G. Eilam, K. Hikasa, and J.M. Yang, Phys. Rev. D **74**, 031701 (2006).
69. “One-loop corrections to the S and T parameters in a three site higgsless model”, S. Matsuzaki, R. S. Chivukula, E. H. Simmons, and M. Tanabashi, Phys. Rev. D **75**, 073002 (2007).
70. “Cosmological constraints on gravitino LSP scenario with sneutrino NLSP”, T. Kanzaki, M. Kawasaki, K. Kohri, and T. Moroi, Phys. Rev. D **75**, 025011 (2007).
71. “ $b \rightarrow s\nu\bar{\nu}$ in the MSSM: implication of $b \rightarrow s\gamma$ at large $\tan\beta$ ”, Y. Yamada, Phys. Rev. D **77**, 014025 (2008).
72. “Cosmology of gravitino LSP scenario with right-handed sneutrino NLSP”, K. Ishiwata, S. Matsumoto, and T. Moroi, Phys. Rev. D **77**, 035004 (2008).
73. “Flavor and CP conserving moduli mediated SUSY breaking in flux compactification”, K. Choi, K. S. Jeong, and K. Okumura, Journal of High Energy Physics **0807**, 047 (2008).
74. “Testing the littlest Higgs model with T-parity at the Large Hadron Collider”, S. Matsumoto, T. Moroi, and K. Tobe, Phys. Rev. D **78**, 055018 (2008).
75. “Does the three site Higgsless model survive the electroweak precision tests at loop?”, T. Abe, S. Matsuzaki, and M. Tanabashi, Phys. Rev. D **78**, 055020 (2008).
76. “Sflavor mixing map viewed from a high scale in supersymmetric SU(5)”, P. Ko, J. Park, and M. Yamaguchi, Journal of High Energy Physics **0811**, 051 (2008).
77. “Model discriminating power of $\mu \rightarrow e$ conversion in nuclei”, V. Cirigliano, R. Kitano, Y. Okada, and P. Tuzon, Physical Review D **80**, 013002 (2009).

論文発表以外にも、研究者に対する直接的な情報の発信も行った。

まず、小林益川行列の測定に関する国際ワークショップ CKM 2006 - "4th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle" ¹ を 2006 年 12 月 12-16 日に名古屋大学で開催し、約 200 名の参加者を集め、そこでは活発かつ詳細な議論が行なわれた。

2007 年 11 月 12 日には研究会「SuperKEKB が拓く物理」² を東京秋葉原にて開催し、新たな SuperKEKB 実験について、特に若い学生を相手に教育活動を行った。

2008 年 1 月 24(木),25(金) に名古屋大学にて、3rd International Workshop on Nuclear Emulsion Techniques (国際エマルションワークショップ) ³ を開催し、原子核素粒子物理、放射線計測、写真工学など幅広い分野を横断し、原子核乾板 (Nuclear Emulsion) の最新技術とその展望について議論した (参加者は国内より約 40 名、国外より約 40 名)。その発表の中から日本写真学会誌で 2 号にわたり特集記事を組みその成果の広報活動を行った。

国際会議 KAON09 ⁴ を 2009 年 6 月 9-12 日に筑波で開催し、K 中間子に関する実験と理論に関する発表と議論を行った。(参加者は国内 34 名、海外 35 名)

また、International Workshop on New Photon Detectors - PD07 ⁵ を 2007 年 6 月 24-29 日に神戸大において、PD09 ⁶ を 2009 年 6 月 24-26 日に信州大において開催し、実験の横断して共通な最新の光検出器についての発表と議論を行った。参加者数は、PD07 が国内から 66 名と海外から 33 名、PD09 が国内 37 名と海外 19 名。

7 総括班評価者による評価の状況

総括班評価者は特に置いていないが、毎年の研究会の時に以下のように評価を受けている。2007 年は長島順清大阪大学名誉教授と杉本章二郎 KEK 教授、2008 年は齋藤直人 KEK 教授、2009 年はフェルミ国立加速器研究所の Herman White 教授と Regina Rameika 教授を特定領域研究会に招待し、評価を頂いた。また、2010 年は研究計画班のメンバーが相互にレビューを行い、お互いの研究の評価を行った (レビューワーは小松原、野村、笹尾、奥沢、横山、田島、中家、日笠)。研究状況に関して、「全ての計画研究にわたって非常にアクティビティが高く、且つ成功している。また若い研究者の活躍も抜き出ており、将来に対する発展が多いに期待できる。」という評価を頂いている。

以下は、外部且つ外国人研究者である Herman White 氏から得られた評価の抜粋である。

Based on these reports and discussions, I would conclude that the presented physics program was very active and successful, with significant expectations of substantial physics in the future. Nearly all of the presenters and many of the participants were younger scientists, and this indicated to me a very vibrant and healthy current program and as important, the promise for a well trained population of Particle Physicists for future experiments and exploration, in Japan and the world.

また、若手の活躍に関しても高い評価を受けている。

¹<http://ckm2006.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/>

²<http://superb.kek.jp/skekb-ja/>

³<http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/workshop/2008/>

⁴<http://kaon09.kek.jp/>

⁵<http://www-conf.kek.jp/PD07/>

⁶<http://www-conf.kek.jp/PD09/>

8 研究領域の研究を推進する上での問題点と対応策

A05: タウニュートリノの直接検出によるニュートリノフレーバーの研究では、研究代表者丹羽公雄氏の退職に当たり、主に健康上の理由から、2010年度より代表者の交代を行った。連携研究者を強化することにより、研究の推進に問題は無い。

また、中間評価に係る意見を受け、次のように対応している。

- 「領域全体としての最終到達目標を改めて見直し、明確化するべきである。強力な理論研究課題がまとめ役となって、各研究課題の連携を強化するとともに…」
総括班会議において領域の目標およびその後の展開について協議を進めている。また、理論研究がフレーバー物理全体を見渡し、各計画研究の連携を計っている。具体的には、 τ, B などのフレーバーを変える過程の新しい実験結果を用いて、超対称性などの標準模型を超える物理のいくつかのシナリオに関してどのような知見が得られるかの理論的な解析を行っている。
- 「共同研究者を評価者にするのではなく、国内外から外部評価者を入れる必要がある。」
本領域では、これまで長島順清大阪大学名誉教授、杉本章二郎 KEK 教授、齋藤直人 KEK 教授、Herman White 米国フェルミ国立加速器研究所教授、Regina Rameika フェルミ国立加速器研究所教授を特定領域研究会に招待し、国内外から有意義な外部評価を頂いた。なお、これらの評価者はいずれも共同研究者ではない。
- 「研究領域としての広報活動をもっと進める必要がある。」
広報活動に関して、領域全体のホームページを一層充実させ、フレーバー物理のアウトリーチにつながる情報公開を促進するよう更新中である。

9 今後の研究領域の推進方策

A01: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊から探るフレーバー混合と新しい物理では、CsI電磁カロリメータの建設を進め、2010年10月よりビームを用いてカロリメータの試験を行う。2011年度は残りの測定器の建設を行い、秋からのビームで実験装置全体の動作試験を行い、その後最初のデータ収集を目指す。

A02: BファクトリーにおけるBとタウフレーバー物理の研究では、KEKB/Belle実験により蓄積した 1000fb^{-1} のデータを用い、引き続き物理解析を行なう。B物理では、 $B \rightarrow \tau \nu, D^{(*)} \tau \nu$ 崩壊測定のためさらなる高精度化を計り、新しい物理検出を目指す。タウ物理では、全データを用いたレプトン数を破る崩壊モードの探索を継続して進め、さらに探索感度を上げる。また、 s クォークを含むハドロン崩壊の探索において、標準理論の高精度検証と未検出反応事象の測定を行う。さらに、理論研究者と協力して新しい物理のパラメータの評価を行なう。検出器開発では、次期超ルミノシティー Belle-II 実験の粒子識別装置として計画されるまでに進展した TOP カウンターのさらなる性能向上を目指して、要となる光検出器の光電面改良など、試作を継続する。

A03: 陽子反陽子衝突実験 CDF によるトップとボトム・フレーバーの物理では、当初、2009年末にデータ収集を終了する予定であったが、2年間延長して2011年末までデータ収集することになった。これによって2011年末までに、積算ルミノシティー 10fb^{-1} 相当

のデータが蓄積される。これは現在までに解析したデータ量の約 2.5 倍に相当する。これらの全データを解析することによって、トップクォークの単一生成断面積の測定精度を 70 %程度あげることができ、小林益川混合行列の V_{tb} 成分を 5 %の精度で決定することができる。また、ボトムクォークフレーバーについては、 B_s 中間子の崩壊における CP 対称性の破れの初観測を目指している。

A04: 大強度ニュートリノビームを使ったニュートリノフレーバー振動の研究では、2010 年 6 月までデータ収集を続ける。2010 年 7 月–10 月の夏季定期メンテナンス期間では、さらにビームラインの高安定高信頼化を図るため、遠隔保守機構の試験、電磁ホーンの電源の更新、試験などの作業を行う。その後、ニュートリノ振動測定を再開し、2011 年 6 月までの間に 7 カ月程度の連続運転を行う。2010 年中には、2010 年夏までのデータを用いて、最初の物理結果を発表することを目指す。また、さらに実験感度の向上を目指し、CERN の NA61 実験において、標的からのハドロン生成分布の精密測定を継続、ビーム大強度化のための研究開発、前置検出器 INGRID への機能追加、高感度検出器の開発を行う。

A05: タウニュートリノの直接検出によるニュートリノフレーバーの研究では、2010 年度はニュートリノ強度を強化する試験が行なわれる予定であり、2011 年度はさらに高強度での照射を行なうことが可能となる。2010 年度までの反応でのタウニュートリノの期待値は 3 から 4 反応程度であり、ニュートリノ振動に関して明確な結果を出すことが可能となる。

A06: フレーバー混合における標準理論を超える物理の理論的研究では、今までに進めてきた研究をさらに発展させるとともに、実験家との連携を緊密にして最新結果を反映させる。

X00: 総括班では、若手の研究活動を支援、活性化するために、若手の国際研究会での発表を補助し、毎年の特定期域研究会で、若手中心の企画・講演を増やすよう努める。また、各計画班の成果を有機的につなげるため、特定期域のホームページを充実させ、最新の物理結果を積極的にホームページで公表する。更に、一般に向けて素粒子物理学の成果をやさしく伝えるために、やはりホームページを整備しアウトリーチを充実させる。