

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20340053

研究課題名（和文）素粒子の世代の起源と大統一理論

研究課題名（英文）

Origin of Generations of Elementary Particles and Grand Unified Theories

研究代表者

九後 太一（KUGO TAICHI）

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：00115833

研究成果の概要（和文）：クォークとレプトン間の対照的な階層的世代間混合構造をヒントとして、標準模型を超えたところに想定される素粒子の大統一理論を探究することを目的として、（1）全国にまたがる研究代表者・分担者達がそれぞれの分担課題を個別に研究して研究成果を上げた。（2）また、毎年一回宿泊型 Summer Institute を企画・組織し、この研究分野の研究者を全国的にかつ有機的に組織し、実り多い共同研究・研究協力を推進することができた。

研究成果の概要（英文）：This project aims to build Unified Theories of Elementary Particles which are expected to exist beyond the Standard Model, taking the sharp contrast of hierarchical generation mixing structures between quarks and leptons as its important clue. (1) The members of this project have individually produced their own good results. (2) They also successfully organized Summer Institute once a year which provided the researchers in this area in Japan as well as in East Asia with chances to make fruitful collaborations.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2009 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：数物系科学

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（理論）

## 1. 研究開始当初の背景

1990 年代の後半にはわが国のスーパーカミオカンデの実験によって、大気ニュートリノや太陽ニュートリノでニュートリノ振動が発見され、さらに驚くべきことにレプトンセクターでの世代間混合がクォークセクターとは対照的に大変大きいことがわかった。

これを受けて、素粒子の複合模型の理論で

世界をリードしてきた我が国から素粒子統一理論を出すためには、この研究分野の研究者を全国的にかつ有機的に組織して、実り多い共同研究・研究協力を推進することが必要であるとして、坂東昌子氏は 1995 年以来毎年 Summer Institute を組織してきた。これに協力して九後は、2000-2003 年度に特定領域研究 A(2)「ニュートリノ振動をめぐる理論

的諸問題」、2004-2007 年度に基盤研究(B)「余次元世界と素粒子統一理論」の科研費を受けて、研究分担者たちと共同してこの Summer Institute を毎年開催して来た。この流れの中で Summer Institute での研究討論を契機にした共同研究が多く行われるようになった。また韓国や台湾からの参加者も増え、現象論分野のアジアの Summer Institute という側面も出てきていた。

## 2. 研究の目的

ニュートリノ振動が明らかにしたクォークとレプトンの対照的な世代階層混合構造をヒントとして、標準模型を超えたところに想定される素粒子の大統一理論を探究することを目的とする。

この目的に向けて全国にまたがる研究分担者達がそれぞれの分担課題を個別に研究すると共に、毎年一回宿泊型 Summer Institute を企画・組織し、この研究分野の研究者を全国的にかつ有機的に組織し、実り多い共同研究・研究協力を推進するための核とする。

## 3. 研究の方法

(1) 京都、金沢、名古屋、新潟など全国に散らばる研究分担者達を核にして、それぞれの大学・研究所で、その周りの研究者・ポストドク・大学院生らと、この研究課題「素粒子の世代の起源と大統一理論」に関するそれぞれのアプローチの研究を遂行する。また、研究分担者が課題としている個別テーマについて、ごく少人数で討論する研究会合を、物理学会の機会や、代表者のいる基礎物理学研究所を中心に随時開催する。

(2) その成果を踏まえ、年一回の Summer Institute を代表者・分担者・連携研究者を中心に企画・組織し、開催する。ここでは、一週間程度の泊まり込みで、世界の第一線の研究者の講義・講演や参加者間の徹底した研究討論を通して、各テーマを横断する研究情報を交換し、既にある共同研究はさらに深いものとし、新しい共同研究はその契機を作る。

具体的には2008年の Summer Institute は、台湾の Chi-Tou で、2009、2010、2011 の3年は、富士吉田で開催した。

## 4. 研究成果

ここでは、先ず、研究代表者、研究分担者が本研究計画の下で得た具体的な研究成果を順に述べる。そして最後の(7)で、本科学研究費のもう一つの主たる目的である Summer Institute の4回の開催について述べる。

(1) 九後は、3世代クォーク・レプトンが現れる起源として、クォーク・レプトンを、超

対称な理論で例外群  $E_7$  や  $E_8$  などが自発的に破れた時に出る南部-Goldstone 超多重項と考えるシナリオを昔、柳田勉氏と提案した。この有効理論である超対称非線形表現を超重力理論に無矛盾に結合させる方法を一つ提案し、また、このシナリオでクォーク・レプトンの質量階層性を出すべく、超対称非線形表現においてあらわな対称性の破れ項として南部-Goldstone 超多重項に湯川結合項を入れる方法を研究した。さらに定数の超ポテンシャル項を持つ超重力理論は宇宙項が0になっている限り超対称性が自発的に破れていることを証明した。

これとは別に、超対称弦の場の理論において長年の懸案であったゲージ固定の問題に取り組み、いわゆる描像変換演算子のカーネルの存在の下で正しい量子化に導くゲージ固定条件を同定した。また、 $N=8$  超重力理論が有限理論である可能性に関連して、南部・Goldstone 粒子であるスカラー粒子が一つ出る振幅は全て低エネルギー極限で消えることを証明した。

(2) 谷本は、世代離散対称性によってクォークとレプトンの世代構造とともに、超対称性粒子スクォークとスレプトンの世代構造を明らかにすることを目指した。その主な成果を以下に列挙する。

i) 非可換離散対称性である  $A_4$  をニュートリノのフレーバーに適用し、ニュートリノフレーバー混合角  $\theta_{13}$  が理論的に大きくなることを示した。

ii)  $S_4$  世代対称性によって、ニュートリノの大きなフレーバー混合と関連づけてクォークのフレーバー混合 (Cabbibo 角) を導出することに成功した。

iii)  $S_4$  世代対称性によってスクォークの世代混合を決定し、B 中間子の CP 対称性の破れにおける超対称性粒子の寄与を予言した。

折しも、ニュートリノ振動の新しいデータが発表されるとともに、LHC b における CP 対称性の破れに関するデータは次々と発表されつつある。このような状況下で、谷本のこれまでの成果に注目が集まり、2012年ドイツのドルトムントでのフレーバー対称性の国際会議 (FLASY12)、2012年9月イタリアのトリエステにおけるニュートリノ質量の国際会議 (BENE 2012) で招待講演を行うことになっている。

(3) 久保は、有限群  $Q_6$  に基づくフレーバー対称性を導入した超対称モデルにおいて、FCNC (電荷は変えないが素粒子の種類が変わる) 反応や CP の破れを定量的に評価することを行ない、暗黒物質の質量と中性子の電気双極子モーメントが、B 中間子による CP の破れの大きさと密接に関連していることを見いだ

し、LHCb で検証可能であることを示した。また、輻射補正によってニュートリノ質量を生成する超対称模型の枠組みで、最小標準超対称模型では現実的な暗黒物質が存在できるパラメータ領域は非常に狭いにもかかわらず、この模型ではその領域が大幅に広がるということを見いだした。

(4) 前川の研究で最も大きな成果は、世代対称性を持つ  $E_6$  大統一理論において CP 対称性を自発的に破ることにより、超対称性 CP 問題を解決しつつ、小林-益川位相を導出することができることを示したことである。ここでは、これまでの模型では、観測値を再現するためには、パラメータ間の相殺が必要だった、アップクォークの質量や  $V_{ub}$  の値が相殺なしに再現できる。これは非自明なことでこの模型のボーナスである。さらに、世代対称性を持つ  $E_6$  大統一理論と相性が良いスフェルミオンの質量スペクトラム（スクォークの中でストップのみ軽いスペクトラムで、ある意味予言といってもよい）では、一般に新しいタイプの CP 問題が生じるが、その問題も非自明に解けることは特筆に値する。最近、LHC で超対称性事象が見つからないことに関連してこの質量スペクトラムは多くの人に関心を持ち模型を構築しているが、この新しいタイプの CP 問題が解けている模型は皆無である。この仕事は LHC の結果が出る前なので、価値は大きいと考える。

この論文の執筆当初には一見問題に見えたニュートリノ質量行列に関しても、その後、実は問題ないことがわかり、最も有望な大統一理論であると思われる。実際に、最近のニュートリノ質量行列に関する論文に対して、レフェリーが審査レポートで “its phenomenological consideration could be taken seriously by the community” とコメントする等、徐々にこの模型の有望さが理解されつつある。ニュートリノに関しては、 $E_6$  大統一理論でも自然な大統一理論でも大きい  $\theta_{13}$  が予言されており、自然な  $E_6$  大統一理論を考えると大きい  $\theta_{13}$  は、まず、堅い予言の一つであるが、その予言が今年の 2 月になって Daya Bay により確認されたことは、我々の模型にとっては、進歩である。

(5) 小林は、超弦理論から標準模型を導出するのに有望と思われるオービフォルド上のヘテロ型弦理論と背景磁場をもつブレーン模型から導かれる 4 次元低エネルギー有効理論の研究を行なった。特に、離散対称性を調べ、特定の非可換離散フレーバー対称性が現れることを示した。さらのこのような離散対称性のアノマリーの構造を解析し、そのアノマリーに普遍的な関係式が成り立つことを示した。

これらの研究成果は国内外から興味をもたれ、様々な国際会議等で招待講演を行なった。今後は得られた結果をクォークやレプトンの質量行列の研究や陽子崩壊の研究などに応用する予定である。

さらに、離散群についてまとめたレビュー的論文 [Ishimori, et.al, Prog. Theor. Supplement No.183 (2010) 1] は、離散群を素粒子論の模型構築に応用しようとする研究者の間で高い評価を受けている。

(6) 寺尾は、素粒子の標準理論を超える物理、または超対称大統一理論に関わる場の量子論的課題について、繰り込み群の視点から以下の研究を行った。

先ず  $N = 1$  超対称ゲージ理論について、Duality cascade と呼ばれる現象を起こすスケール不変な一連のゲージ理論における超対称性の破れの特性についてくりこみ群を用いて明らかにし、またソフトな破れのある超対称 QCD でのスケール不変性とカイラル対称性の自発的破れとの関係について考察した。

また、複合ヒッグス模型の可能性として昨今精力的に研究されている多フレーバー QCD について、そのベータ関数をウィルソン流のくりこみ群を応用して近似的ではあるが非摂動的に評価した。これにより、フレーバー数と共にスケール不変な理論から自発的破れを起こす理論に連続的に移行する過程を初めて具体的に明らかにすることができた。さらに、近似の改善を行い、クォーク質量の異常次元、スケーリング則等の物理量について評価し、SU(3)QCD や SU(2)QCD の計算機シミュレーションによる結果との比較を行った。

これらの結果についてはくりこみ群の研究者のみならず、格子ゲージ理論や複合ヒッグス模型の研究者からも注目され、2 つの国際会議で招待講演をおこなった。稼働中の LHC でのヒッグス粒子探索と関係してこの課題はさらなる解明が求められ、また大いに期待されている。

(7) 最後にこの 4 年間に開催した 4 回の Summer Institute について、外形的なことを報告しておく。そのプログラムや講演記録に関しては、下の 5. [その他] に URL を記載したホームページにアクセスされたい。

① 第 14 回「Summer Institute 2008」は、2008 年 8 月 10-17 日の 8 日間、台湾の Chi-Tou で開催。国立台湾大学 (NTU) の Wei-Shu Hou 氏が代表世話人で、日本からの参加者のとりまとめ世話人は久保治輔氏。日本からの 55 名を含め、韓国・台湾・中国、欧米から、延べ 139 名の参加。

② 第 15 回「Summer Institute 2009」は、

2009年8月13-20日の8日間、富士吉田の人材開発センター富士研修所で開催。富山大学が主担当校となり栗本猛氏が代表世話人。参加者は、日本から52名、韓国・台湾・中国、欧米から14名、計66名。

③ 第16回「Summer Institute 2010」は2010年8月12-19日の8日間、富士吉田の人材開発センター富士研修所で開催。新潟大学が主担当校で中野博章氏が代表世話人。参加者は、日本から71名、韓国・台湾・中国から16名、欧米から8名、計95名。

④ 17回「Summer Institute 2011」は2011年8月12-18日の7日間、富士吉田の人材開発センター富士研修所で開催。金沢大学が主担当校となり分担者久保が代表世話人。日本から57名、韓国・台湾・中国から5名、欧米から5名、計67名の参加を得た。

#### 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64件) 全て査読有

① M. Kohriki, T. Kugo and H. Kunitomo, “Gauge Fixing of Modified Cubic Open Superstring Field Theory”, Prog. Theor. Phys. 127 (2012) 243-270  
[DOI : 10.1143/PTP.127.243]

② A. Hayakawa, Y. Shimizu, M. Tanimoto and K. Yamamoto, “Squark flavor mixing and CP asymmetry of neutral B mesons at LHCb”, Phys. Lett. B 710 (2012) 446-453  
[DOI:10.1016/j.physletb.2012.03.020]

③ M. Aoki, J. Kubo, T. Okawa and H. Takano, “Impact of Inert Higgsino Dark Matter”, Phys. Letters B707 (2012) 107-115  
[DOI:10.1016/j.physletb.2011.12.012]

④ Izawa, K.-I., T. Kugo and T. T. Yanagida, “Gravitational Supersymmetry Breaking”, Prog. Theor. Phys. 125 (2011) 261 - 264  
[DOI : 10.1143/PTP.125.261]

⑤ H. Ishimori, Y. Shimizu, M. Tanimoto and A. Watanabe, “Neutrino masses and mixing from S<sub>4</sub> flavor twisting”, Phys. Rev. D 83 (2011) 033004(1-11)  
[DOI:10.1103/PhysRevD.83.033004]

⑥ K. S. Babu, K. Kawashima and J. Kubo, “Variations on the Supersymmetric Q<sub>6</sub> Model of Flavor”, Phys. Rev. D83 (2011) 095008(1-11)  
[DOI:10.1103/PhysRevD.83.095008]

⑦ Y. Kaburaki, K. Konya, J. Kubo and A. Lenz, “Triangle Relation of Dark Matter, EDM and CP Violation in B<sup>0</sup> Mixing in a Supersymmetric Q<sub>6</sub> Model”, Phys. Rev. D84 (2011) 016007(1-12)  
[DOI:10.1103/PhysRevD.84.016007]

⑧ Y. Kusafuka and H. Terao, “Fixed point merger in the SU(N) gauge beta functions”, Phys. Rev. D 84 (2011) 125006(1-17)  
[DOI:10.1103/PhysRevD.84.125006]

⑨ T. Kugo and T. T. Yanagida, “Coupling Supersymmetric Nonlinear Sigma Models to Supergravity”, Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 555 -- 565  
[DOI : 10.1143/PTP.124.555]

⑩ H. Ishimori, T. Kobayashi, H. Ohki, H. Okada, Y. Shimizu and M. Tanimoto, “Non-Abelian Discrete Symmetries in Particle Physics”, Prog. Theor. Phys. Supplement No.183 (2010) 1-163.  
[DOI:10.1143/PTPS.183.1]

⑪ H. Ishimori, Y. Shimizu and M. Tanimoto, “S<sub>4</sub> Flavor Symmetry of Quarks and Leptons in SU(5) GUT”, Prog. Theor. Phys. 121, (2009) 769-787  
[DOI : 10.1143/PTP.121.769]

⑫ M. Ishiduki, S.-G. Kim, N. Maekawa and K. Sakurai, “Spontaneous CP violation in E<sub>6</sub> SUSY GUT with SU(2) flavor and anomalous U(1) symmetries”, Phys. Rev. D 80 (2009) 115011(1-13)  
[DOI:10.1103/PhysRevD.80.115011]

⑬ Sung-Gi Kim, N. Maekawa, K. I. Nagao, M. M. Nojiri and K. Sakurai, “LHC signature of supersymmetric models with non-universal sfermion masses”, JHEP 0910 (2009) 005(0-35)  
[DOI:10.1088/1126-6708/2009/10/005]

⑭ H. Abe, K. S. Choi, T. Kobayashi and H. Ohki, “Non-Abelian Discrete Flavor Symmetries from Magnetized/Intersecting Brane Models”, Nucl. Phys. B820 (2009) 317-333  
[DOI:10.1016/j.nuclphysb.2009.05.024]

⑮ H. Abe, T. Higaki, T. Kobayashi, K. Ohta, Y. Omura and H. Terao “Duality cascade of softly broken supersymmetric theories”, Phys. Rev. D 79 (2009) 045003(1-11)  
[DOI:10.1103/PhysRevD.79.045003]

⑩ T. Araki, T. Kobayashi, J. Kubo, S. Ramos-Sanchez, M. Ratz and P.K.S. Vaudrevange, “(Non-)Abelian discrete anomalies”, Nucl. Phys. B805 (2008) 124-147  
[DOI:10.1016/j.nuclphysb.2008.07.005]

[学会発表] (計 39 件)

① 寺尾 治彦、 “Non-perturbative beta functions and conformality lost in gauge theories”、KMI Workshop on “Conformality in Strong Coupling Gauge Theories at LHC and Lattice” (SCGT12Mini)、2012 年 3 月 20 日、名古屋大学

② 前川 展祐、 “Natural GUT and the Cosmology”、YITP International Workshop on “Grand Unified Theories” (GUT2012)、2012 年 3 月 16 日、京都大学

③ 九後 太一、 “String field theories”、YITP international workshop on “String Field Theory and Related Aspects” (SFT2010)、2010 年 10 月 18 日、京都大学

④ 谷本 盛光、「ニュートリノ物理の現在と将来 (特別講演)」、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 12 日、甲南大学 (神戸市)

⑤ 小林 達夫、「String (moduli) phenomenology (特別講演)」、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 28 日、立教大学

[その他]

2008 年から 2011 年の各年開催の Summer Institute のプログラム・参加者・講演プレゼンファイルなどはそれぞれ以下の URL のホームページにある：

SI2011:

<http://wwwhep.s.kanazawa-u.ac.jp/SI2011/>

SI2010:

<http://muse.sc.niigata-u.ac.jp/SI2010/>

SI2009:

<http://k2.sci.u-toyama.ac.jp/SI2009/>

SI2008:

<http://phys.cts.ntu.edu.tw/si2008/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

九後 太一 (KUGO TAICHI)  
京都大学・基礎物理学研究所・教授  
研究者番号：00115833

### (2) 研究分担者

谷本 盛光 (TANIMOTO MORIMITSU)

新潟大学・理学部・教授

研究者番号：90108366

久保 治輔 (KUBO JISUKE)

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：40211213

寺尾 治彦 (TERAO HARUHIKO)

奈良女子大学・理学部・教授

研究者番号：40192653

小林 達夫 (KOBAYASHI TATSUO)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：60322153

前川 展祐 (MAEKAWA NOBUHIRO)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：40273429

### (3) 連携研究者

坂東 昌子 (BANDO MASAKO)

愛知大学・法学部・名誉教授

研究者番号：20025365