

# 湯川結合の階層構造を導き出す機構と 超対称性の破れ

(研究課題番号 14540256)

平成14年度～平成15年度  
科学研究費補助金 (基盤研究 (C) (2))

研究成果報告書

平成16年5月

研究代表者 小林 達夫  
(京都大学大学院理学研究科助手)

京都大学図書



1040945919

附属図書館

# 湯川結合の階層構造を導き出す機構と 超対称性の破れ

(研究課題番号 14540256)

平成14年度～平成15年度  
科学研究費補助金 (基盤研究 (C) (2))

研究成果報告書

平成16年5月

研究代表者 小林 達夫  
(京都大学大学院理学研究科助手)

## はしがき

この研究派、平成14年度から平成15年度までの2年間にわたる文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（C）（2）、研究課題番号14540256）を得て行われた。ここに報告するその間の研究成果は、以下の研究者との共同研究に負うところが多い。これらの諸氏に謝意を表したい。尚、所属は（最新）論文作成当時の所属を記す。

安倍 博之 K.S. Babu	広島大学大学院理学研究科 Department of Physics, Oklahoma State University
Kiwoon Choi	Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)
Stefan Groot Nibbelink	Department of Physics and Astronomy, University of Victoria
桧垣徹太郎 Mark Hillenbach	京都大学大学院理学研究科 Physics Institute, Bonn University
川村嘉春 Do Young Kim	信州大学大学院理学研究科 Department of Physics, KAIST
Ian-Woo Kim	Department of Physics, KAIST
久保治輔 Oleg Lebedev	金沢大学大学院自然科学研究科 Centre of Physics, University of Sussex
丸信人 中野博章	東京大学大学院理学研究科 新潟大学大学院理学研究科
野口達也 Stuart Raby	京都大学大学院理学研究科 Department of Physics, Ohio State University
瀬戸治	Institute of Physics, National Chiao Tung University
寺尾治彦 Martin G.A. Walter	金沢大学大学院自然科学研究科 Physics Institute, Bonn University
吉岡興一 Ren-Jie Zhang	東北大学大学院理学研究科 Michigan Center for Theoretical Physics, Randall Laboratory, University of Michigan

研究組織

研究代表者： 小林達夫（京都大学大学院理学研究科助手）

交付決定額（配分額） (金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成14年度	700	0	700
平成15年度	600	0	600
総計	1300	0	1300

## 研究発表

### (1) 原著論文

1. T. Kobayashi, H. Nakano and H. Terao,  
“Yukawa Hierarchy Transfer from Superconformal Sector and Degenerate Sfermion Masses”,  
Phys. Rev. **D65** (2002) 015006.
2. T. Kobayashi and H. Terao,  
“More about Kaluza-Klein Regularization”,  
Prog. Theor. Phys. **107** (2002) 785.
3. T. Kobayashi, H. Nakano, T. Noguchi and H. Terao,  
“Sfermion Mass Degeneracy, Superconformal Dynamics and Supersymmetric Grand Unified Theories”,  
Phys. Rev. **D66** (2002) 095011.
4. T. Kobayashi, N. Maru and K. Yoshioka,  
“4D construction of bulk supersymmetry breaking”,  
Eur. Phys. J. C **29** (2003) 277-284.
5. T. Kobayashi, H. Nakano, T. Noguchi and H. Terao,  
“Yukawa Hierarchy Transfer Based on Superconformal Dynamics and Geometrical Realization in String Models”,  
JHEP **0302** (2003) 022.
6. H. Abe, T. Kobayashi, N. Maru and K. Yoshioka,  
“Field localization in warped gauge theories”,  
Phys. Rev. **D67** (2003) 045019.
7. H. Abe, T. Higaki and T. Kobayashi,  
“Wave-function profile and SUSY breaking in 5D model with Fayet-Iliopoulos term” ,

- Prog. Theor. Phys. **109** (2003) 809–830.
8. T. Kobayashi, H. Nakano, H. Terao and K. Yoshioka,  
"Flavor violation in supersymmetric theories with gauged flavor symmetries",  
Prog. Theor. Phys. **110** (2003) 247-267.
  9. K.S. Babu, T. Kobayashi and J. Kubo,  
"Finite Theories and the SUSY Flavor Problem",  
Phys. Rev. **D67** (2003) 075018.
  10. T. Kobayashi, J. Kubo and H. Terao,  
"Exact  $S_3$  symmetry solving the supersymmetric flavor problem",  
Phys. Lett. **B 568** (2003) 83-91.
  11. T. Kobayashi and O. Lebedev,  
"Heterotic Yukawa couplings and continuous Wilson lines",  
Phys. Lett. **B 566** (2003) 164–170.
  12. T. Higaki and T. Kobayashi,  
"Twisted Moduli Stabilization in Type I String Models",  
Phys. Rev. **D 68** (2003) 046006.
  13. T. Kobayashi and O. Lebedev,  
"Heterotic string backgrounds and CP violation",  
Phys. Lett. **B 565** (2003) 193–200.
  14. K. Choi, D.Y. Kim, I.-W. Kim and T. Kobayashi,  
"Supersymmetry Breaking in Warped Geometry",  
Euro. Phys. J. C に掲載決定.

15. T. Kobayashi and O. Seto,  
“Dilaton and Moduli Fields in D-term Inflation”,  
Phys. Rev. **D69** (2004) 023510.
16. S. Groot Nibbelink, M. Hillenbach, T. Kobayashi and M.G.A. Walter,  
“Localization of Heterotic Anomalies on Various Hyper Surfaces of  $T^6/Z_4$ ”,  
Phys. Rev. **D69** (2004) 046001.
17. T. Higaki, Y. Kawamura, T. Kobayashi and H. Nakano,  
“Anomalous U(1) D-term Contribution in Type I String Models”,  
Phys. Rev. D **D69** (2004) 086004.
18. T. Higaki, Y. Kawamura, T. Kobayashi and H. Nakano,  
“Non-perturbative Kähler Potential, Dilaton Stabilization and Fayet-Iliopoulos Term”,  
Phys. Lett. **B582** (2004) 257–262.

参考のため、以下の投稿中の論文も記す。

1. T. Higaki, T. Kobayashi and O. Seto,  
“D-term inflation and nonperturbative Kähler potential of dilaton”.
2. T. Kobayashi, S. Raby and R.-J. Zhang,  
“Constructing 5d orbifold grand unified theories from heterotic strings”.
3. T. Kobayashi and H. Terao,  
“Suppressed supersymmetry breaking terms in the Higgs sector”.

## (2) 国際会議講演

1. T. Kobayashi,  
“Superconformal dynamics and SUSY flavor problem”,  
in the Proceedings of SUSY'02, Hamburg, Germany, 17-23 June,  
2002
2. T. Kobayashi,  
“Yukawa hierarchy transfer through superconformal dynamics in  
string-inspired extra dimensional models”  
in the Proceedings of the first international conference on string  
phenomenology, Oxford, UK, 6-11, July, 2002
3. T. Kobayashi,  
“SUSY flavor problem, warp geometry and conformal dynamics”,  
at the Planck 03 conference, Madrid, Spain, May, 2003.
4. T. Kobayashi,  
“Phenomenological Aspects of Twisted Moduli”  
in the Proceedings of the second international conference on string  
phenomenology, Durham, UK, July 29– August 4, 2003



### (3) 日本物理学会、国内研究会等での講演

1. “Superconformal dynamics and SUSY flavor problem”,  
日本物理学会, September 2002.
2. “SUSY flavor problem, warp geometry and conformal dynamics”,  
日本物理学会, September 2003.
3. T. Kobayashi,  
“SUSY breaking in warped geometry, superconformal dynamics and  
SUSY flavor problem”  
in the Proceedings of the Workshop on Extra dimension and Braneworld,  
Kyoto, Japan, Jan. 2003,  
(素粒子論研究)
4. T. Kobayashi,  
“SUSY flavor problem, warp geometry and superconformal dynam-  
ics”  
in the Proceedings of the Workshop on Progress in Particle Physics,  
Kyoto, Japan, Jan 22–25, 2003,  
(素粒子論研究 108 F63-F64) .

## 研究成果

本研究計画の目的は、以下の通りでした。

Quark, Lepton の質量、混合角の起源を探ることは、現在の素粒子論の中で重要な課題の1つです。これまで湯川結合の現実的な階層構造を導く様々な機構が考案されてきました。一方、超対称性は Higgs 粒子の質量への量子補正に関する階層問題の解決策とし最も有力視されていて、100GeV ~ 数 TeV に Quark, Lepton の超対称粒子 (sfermion) が近い将来の実験で見つかるかと期待されています。Quark, Lepton の湯川結合に現実的な階層構造を導くような機構は、一般にそれらの超対称粒子にも何らかの影響を与えるはずで、たとえば、それぞれの機構に特有の超対称粒子の質量のパターン等があれば、将来の実験で検証することが可能でしょう。様々な湯川結合の構造を導く機構でどのような超対称粒子の質量、結合のパターンを導くか、そしてその研究で超対称粒子の将来の発見とその詳しい性質の測定により湯川結合の起源を探ることが、研究目標です。

超対称粒子が直接発見されていない現在でさえも、すでにその質量のパターン等には、flavor changing neutral current (FCNC) などから大きな制限がついています。第1、第2世代の超対称粒子が十分軽ければその質量間に、かなりの縮退を要求します。これが、超対称模型の flavor 問題です。このような超対称模型の flavor 問題を考慮しながら、様々な湯川結合の階層構造を導き出す機構とその超対称粒子の質量等への影響を調べていくことが、この研究計画の目的でした。この目的に基づき以下のような研究を行いました。

### 1.

Nelson-Strassler は、最近、湯川結合の階層性を導き出す新しい機構を提案しました。そこでは、超対称標準模型のセクターのほかに、超共形赤外固定点をもつ SC セクターが仮定されています。この SC セクターが我々の Quark, Lepton に大きな anomalous dimensions を生成し、湯川結合の階層性を導き出すというシナリオです。一旦、湯川結合の階層性が導かれたあとで SC セクターは、decouple し、後は普通の超対称標準模型の繰り込み群のもとで変化していきます。

超共形赤外固定点は、これだけでなく超対称性の破れの項に関しても、興味深い性質を持っています。それは、(はじめて Karch-Kobayashi-Kubo-

Zoupanos '98 で超対称 QCD に関して示され、) Kobayashi-Terao '01 で一般的に示されたことですが、超対称粒子の質量を SC セクターでコントロールすることができます。つまり、SC セクターが結合している最中は、超対称粒子の質量が、非常に suppress されます。そして、SC セクターが decouple した後では、特に第 1、第 2 世代では、gaugino 質量のみからの flavor によらない量子補正を受けます。従って、第 1、第 2 世代の超対称粒子の質量を縮退させることが原理的に可能です。

超対称模型の flavor 問題の解決の試みとしては、これまでは flavor に依らない超対称性の破れの伝達機構を考えるということが主でした。つまり、どのような湯川結合の階層性を導き出す機構であろうとも、特別な超対称性の破れの伝達機構を考えることで解決させてきました。一方、SC セクターを用いる方法は、全く逆の発想で、どのような超対称性の破れであっても、どのような破れの項の初期値が与えられても、湯川結合の階層性を導き出す SC セクターによってそれをコントロールできるということです。このことは、全く新しく独創的なアイデアだと思います。

そこで、Kobayashi-Nakano-Noguchi-Terao '02 では、Kobayashi-Terao '01 で行った超対称粒子の質量の縮退度の解析を再評価し、更に GUT の場合の計算へ拡張しました。さらに、この超対称粒子の質量の縮退度を改善するためには、結合している SC セクターにより生成される anomalous dimension を世代間で同じにすることです。しかし、そのような場合、もともとの Nelson-Strassler のシナリオでは、世代間で異なる湯川結合を導きだすことができません。Kobayashi-Nakano-Terao '02 では、SC セクターとの結合の初期値を世代間で変えることで、世代間に湯川結合の階層構造を出すシナリオを提案しました。また、Kobayashi-Nakano-Noguchi-Terao '03 では、SC セクターのゲージ結合の初期値を世代間で変えることで、世代間に湯川結合の階層構造を出すシナリオを提案しました。

## 2.

最近研究されている AdS/CFT 対応は、上述のような SCFT をもつ模型は、Randall-Sundrum のような余剰次元が warp 背景幾何上での超重重力理論で記述できることを示唆しています。従って、余剰次元サイドで SC セクターによる湯川結合の階層構造の導出や超対称性の破れの項のコントロールが可能な模型が再現されるはずですが、SC セクターを利用するシナリオでは、強結合の理論なので完全に解析することが無理な部分もでてきます。一方で、AdS サイドでの理論では、同様の結果が幾何学的な構造で導けるので、弱結合で解析をすることができます。このような

目的で、Choi-Kim-Kim-Kobayashi '04 では、AdS background での模型について、bulk mass parameter により quark, Higgs 場等の zero-mode profile が指数関数的になり、そのために湯川結合の階層構造が導けるようなシナリオを考察しました。さて、SCセクターのシナリオ同様、このような模型での超対称粒子の質量の振る舞いが重要なわけですが、Radion の F-term が dominant な超対称性の破れの場合は、指数関数的に局所化してる mode に対しては、超対称性の破れは、suppress した値で現れるので、まさに SCセクターを使った場合と同様に、超対称粒子の質量の初期値は、非常に小さく与えられます。従って、gaugino 質量からの量子補正を考慮すれば、低エネルギーで第 1、第 2 世代の間で十分縮退した sfermion の質量をえることができます。さらにこの模型の場合は、いわゆる A-term についても、確実な計算ができて、FCNC の実験バウンドを満たすくらいは、A-term の縮退を起こせることを示しました。

また、Abe-Higaki-Kobayashi '03 では、Fayet-Iliopoulos 項がある場合の 5次元模型の zero-mode や higher modes の profile を系統的に調べました。超対称性が破れていない場合は、AdS background 模型のように U(1) charge に依存した指数関数的な profile をもつ zero mode を得ました。一方、超対称性が破れている場合には、Gaussian profile をもつ zero-mode が得られました。これらの U(1) charge に依存した zero mode の profile を利用して、AdS background 模型のときと同様に湯川結合の階層構造を導くことが可能です。

最近、余剰次元のもつ Kaluza-Klein modes 等の性質を再現するような 4次元模型が研究されています。それは、deconstruction と呼ばれていて、5次元目を格子化したような模型です。Abe-Kobayashi-Maru-Yoshioka '03 で AdS background 上の模型を deconstruct する 4次元模型を作りました。そして、余剰次元方向に対する zero mode の profile 的なものを解析し、その性質を起源として、湯川結合の階層構造を導くような模型を与えました。更に、Kobayashi-Maru-Yoshioka '03 では、radion による超対称性の破れ等に対応する deconstruction の模型を解析しました。

### 3.

これまで、湯川結合の階層性を導くシナリオとして、もっともよく考えられてきたのは、U(1) 対称性を使った Froggatt-Nielson 機構です。特に、弦理論では、anomalous U(1) が現れます。この anomaly 自体は、4次元 Green-Schwarz 機構で相殺されますが、それに関連して Fayet-Iliopoulos 項が現れ、そのことは Planck スケールよりも、少し低いエネルギースケール

ルを導くのに好都合で、このような anomalous U(1) が Froggatt-Nielsen 機構によく応用されます。さて、このような Froggatt-Nielsen 機構を利用して、湯川結合の階層構造を導出するようなシナリオにおいて、どのような超対称性粒子の質量のパターンができるかを調べることは、重要です。実際には、U(1) symmetry がゲージ対称性である場合には、その U(1) charge に比例したような D-term contribution と呼ばれるものが sfermion の質量に現れることは、以前から知られています。とくに、Heterotic string 模型においては、anomalous U(1) の anomaly を相殺する Green-Schwarz 機構には、dilaton が寄与し、従って、その Fayet-Iliopoulos 項に dilaton 依存性が現れます。その依存性を考慮して、dilaton/moduli の F-term が超対称性の破れに寄与する場合に、D-term contribution を計算したのが、Kawamura-Kobayashi '96 でした。一方で、異なる string 理論では、異なる mode が Green-Schwarz 機構に関与します。たとえば、orbifold 上の type I string 模型では、twisted moduli がその役目を果たします。この twisted moduli は、Kahler potential 等の性質も dilaton と異なるので、type I string 模型の場合、異なる性質の D-term contribution が現れる可能性があります。Higaki-Kawamura-Kobayashi-Nakano '04 では、このような目的で、type I string 模型での D-term contribution を計算しました。実際に、その性質は、heterotic string 模型と異なり、たとえば、D-term contribution が、無視できるくらい小さくなるような場合もありました。この結果は、FCNC の観点から重要です。

#### 4.

上述のように一般に、U(1) gauge symmetry を使った場合の Froggatt-Nielsen 機構においては、sfermion の質量への D-term contributions は、FCNC の観点から危険な効果で可能ならこのような D-term contribution を suppress するような機構を考えておくべきでしょう。Kobayashi-Nakano-Terao-Yoshioka '03 では、高次元模型、および、SC セクターのあるような模型において、このような D-term contribution の suppression が可能であることを示しました。しかし、たとえ sfermion の質量への D-term contribution が suppress することができたとしても Froggatt-Nielsen 機構に使う U(1) gauge symmetry の U(1) charge に依存する gaugino mass からの量子補正は、FCNC のような sfermion の質量のかなりの縮退度を要求するような場合には、重要であることを示しました。

5.

flavor の構造を理解するのに discrete 対称性を仮定することは、これまでしばしばなされてきました。たとえば、 $S_3$  対称性を flavor 対称性として仮定することは、これまで多くの模型でなされてきました。しかし、これらの模型では高エネルギーで  $S_3$  対称性をすでに破り、現実的な湯川結合を導いています。最近、Kubo, et. al. は、Higgs セクターも  $S_3$  対称性の non-trivial な表現になるように拡張して、低エネルギーまで  $S_3$  対称性が残るような模型を提案しました。それに続いて、Kobayashi-Kubo-Terao '03 では、そのような模型を超対称性があるように拡張しました。そして、とくに sfermion の質量や A-term の構造について調べました。結果として  $S_3$  対称性のために、FCNC プロセスへの超対称粒子の寄与が、実験バウンドを満たす程度に十分 suppress されていることを示しました。

関連する discrete な対称性を仮定する模型としては、Babu-Kobayashi-Kubo '03 では、SU(5) GUT 模型において、すべてのベータ関数がゼロになるような finite 理論で、尚且つ discrete 対称性をもつ模型での超対称性の破れの項の縮退の様子を調べました。finite 理論においては、超対称性の破れの項の間にある特定の関係式が与えられ、更に discrete 対称性を課すことで、A-term と sfermion の質量を完全に縮退が起ります。

6.

このような場の理論的な湯川結合のみならず、もちろん弦理論のようなより基本的な理論から湯川結合を計算することは重要です。たとえば、orbifold 上の fixed point に localize したような twisted string 間の湯川結合は、一部分の moduli 依存性については計算されていて、その moduli 等を適当にとることで suppress された湯川結合も導けることが知られています。Kobayashi-Lebedev '03 では、さらに多くの moduli (たとえば、Continuous Wilson line moduli) 依存性などを計算しました。さらに CP の破れに注目し、湯川結合セクターにおいて、物理的な CP の破れに寄与するのは Kahler moduli の虚数部分のみであることを示しました。他の虚数部分はききません。

このように moduli の値を湯川結合が現実な値を導き出すように何らなの機構で決定することは、弦理論の枠組みで重要です。このことは、湯川結合の値に限ったことではなく、弦理論においては、有効場の理論のすべての結合定数は、moduli の真空期待値に依存した形で与えられます。従って、これらの値の決定機構は非常に重要です。湯川結合とは、直接

は関係しませんが、その他の論文では様々は moduli の真空期待値の決定の機構やその宇宙論での意味合い、更に他の弦理論の性質や高次元理論の性質等を解析しました。