

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22540284

研究課題名(和文)次世代加速器を用いた新相互作用の最適観測量解析

研究課題名(英文)Optimal-observable analyses of possible new interactions via next-generation accelerators

研究代表者

日置 善郎 (Hioki, Zenro)

徳島大学・大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部・教授

研究者番号：90173129

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：ハドロン加速器でのトップクォーク生成崩壊過程を通じ、標準模型を超える新相互作用の存在可能性を探った。我々は、まず、Tevatron, LHC の両データの統合でトップ-グルオン結合の解析精度が飛躍的に向上することを示した。次に、終状態レプトンの運動量分布を導き、そこに最適観測量解析法を適用して非標準トップ結合測定で期待される統計精度を評価した。更に、レプトン角分布への脱結合定理の制約を避ける為にはレプトン横運動量切断の導入が有効であることを見出した。また、ミュオン加速器におけるトップ-ヒッグス結合の検出可能性についても解析した。以上の成果をまとめた論文は、既に合計50回以上引用されている。

研究成果の概要(英文)：We have studied possible new interactions beyond the standard model through top-quark productions/decays at hadron colliders. We first showed that we can achieve high precision in analyzing general top-gluon couplings by combining the data from Tevatron and LHC. We then derived the final-lepton momentum distribution, and thereby estimated the expected statistical uncertainties in measuring non-standard top-coupling parameters through the optimal-observable-analysis procedure. We moreover found that introducing a lepton-transverse-momentum cut is quite effective in order to avoid a constraint from the decoupling theorem. We also studied a possibility of detecting general top-Higgs couplings at a muon collider. We have published several papers on those results, which so far have been cited more than fifty times altogether.

研究分野：数物系科学

キーワード：素粒子現象論 トップクォーク ハドロン加速器 新相互作用 最適観測量解析

1. 研究開始当初の背景

トップクォークおよびヒッグスボソンの性質解明は、素粒子標準模型の最終的確立のためにも、更にその背後に潜むであろうより根源的な物理を探る上でも極めて重要な研究課題である。トップクォークの発見を遅らせそしてその性質解明を難しくしているのは 174 GeV という大きな質量だが、同時に、電弱スケール(約 250 GeV)と同サイズという、この巨大な質量は、我々に「トップクォークは標準模型を超える世界への窓口になっているのではないか」との期待も抱かせる。また、ヒッグスボソンは自発的対称性の破れやヒッグス機構を引き起こす正に主役であり、その諸性質が明らかになれば素粒子世界の理解が一気に進むことは明らかである。従って、これらの研究は極めて重要な意義を持つが、特に、両者に関する直接的なデータを与えてくれると期待される超大型加速器 LHC (Large Hadron Collider) が稼働を始める直前の 2010 年は、その現象論的な研究を進める絶好の機会であった。

代表者の日置は、それまで特に国際線型衝突型加速器 ILC (International Linear Collider) 計画に注目し、ワルシャワ大学の B. Grzadkowski と共に電子陽電子反応におけるトップクォーク生成・崩壊を通してトップクォークの異常結合を探る方法を研究してきた。その過程で、トップの崩壊生成物である終状態荷電レプトンの運動量分布の解析がトップ異常結合の中の CP 非保存項の検出に有効であることを示し、更に、レプトンの角分布は(仮にトップクォーク崩壊相互作用の中に異常項があろうとも)主にトップクォーク生成相互作用のみに依存するという新しい定理(脱結合定理)を見出した。

また、分担者である大熊は、自らの修士論文研究を通じて日置の研究に合流し、その後、ヒッグスボソンも中間状態に關与する光子光子衝突過程およびミュオン衝突過程で

のトップクォーク生成・崩壊の現象論的研究を進めると同時に、博士論文のテーマとして陽子反陽子反応を扱っており、従ってハドロン反応研究の経験も持っていた。このように、今回のプロジェクトに取り組む上で、我々には基礎的な準備が整っていたと言える。

このような研究分野に関しては、国外では、幾つかのグループが精力的な研究を進めており我々と競争関係にあった。他方、国内においては、素粒子物理学に関わる多くの研究者、特に大学院生を含む若手研究者は、数学的な興味からか超弦理論、M理論、余次元理論といった純理論的テーマに関する研究を行っており、自然科学の一つの原点である現象論的な研究は盛んとは言えない状況にあった。

2. 研究の目的

トップクォークやヒッグスボソンは標準模型の枠内で記述可能なのか、或いはそれを超える非標準的な結合が存在するのかという問題の解明を目指して、その相互作用(結合型)を効果的かつ高精度で決定する方法を探る。我々が目的とするのは、具体的な模型の検証ではなく、標準模型を超える物理(相互作用)としてどのような形が許されるのかを出来る限り一般的かつ定量的に調べることである。

例えば、陽子(反)陽子衝突において直接得られるデータは、トップ-グルオン結合、トップ-Wボソン結合などに関するものである。これらの相互作用を模型に依存しない最も一般的な共変形で表し、そこに含まれるパラメータ(形状因子)を効率よく決定する方法を探っていき、標準模型の背後に存在するであろう基本理論の形を決めていくために必要な情報を蓄積することが目標である。

3. 研究の方法

上記のように、我々は、具体的な模型に依存しない一般的な枠組みで新相互作用を出

来る限り定量的に調べることを目指す。但し、ここで「一般的な」の意味については注意が必要である。電子陽電子反応におけるトップクォーク対生成・崩壊の場合は、その有効振幅に対して最も一般的な共変形を書き下すことができた。この過程でも結合する粒子の運動量を引数とする幾つかの形状因子を扱うことになるが、この場合の運動量は、一定値をとる外線粒子の運動量で完全に固定されるお蔭で「定数パラメータ」として扱う事が可能である。これに対して、陽子（反）陽子反応の場合には、トップクォークを対生成させる一つの過程としてグルオン-グルオン衝突（ t および u -チャンネルでの仮想トップ交換）があり、この場合にはトップクォークが仮想的であるため関与する形状因子を定数として扱う事が出来ないのである。

そこで、我々は光子光子衝突で使った戦略と同じものを活用することとした。それは、「標準模型の背後には」というエネルギースケールで特徴付けられる基本理論があり、

以下の世界は $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ という対称性に従う有効相互作用で記述される」という Buchmuller-Wyler の枠組みの採用である。ここで現れる有効相互作用は、やはり或る意味で非常に客観的な一般的相互作用であり、「その係数をどの程度の精度で決定することが可能か明らかにすること」を主要課題とした訳である。

このような基本的枠組みの中で具体的に陽子（反）陽子反応等におけるトップクォーク対生成・崩壊過程の計算を行い、終状態に現れる荷電レプトンの運動量分布を未知パラメータの関数として表す。この過程には、有効相互作用の一つとしてトップクォーク-グルオンやトップクォーク-ヒッグス結合も寄与するため、この分布はヒッグスボソンの寄与も含むことになり、我々が目指す情報も引き出せると期待できる。但し、始状態としてクォーク-反クォークとグルオン-グルオン

の2種類があるということは、それだけ多くのパラメータを同時に処理しなければならないということであり、そこから如何に有効な情報を引き出すかについては注意深い考察が必要となる。

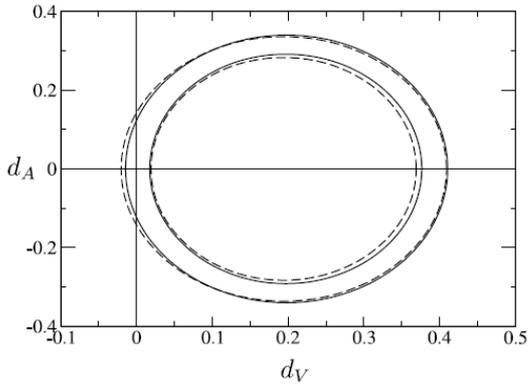
我々が注目したのは、電子陽電子衝突の場合と同じくトップクォークの崩壊で生まれる電子およびミューオンである。通常のクォークの場合には生成された直後にそれを含むハドロンの直ちに構成される。このハドロン化反応は本質的に非摂動的過程であり、これによって、生成されたクォークが持っていた様々な情報は薄められてしまう。ところが、トップクォークの場合には、その巨大な質量の為にハドロン化の前に崩壊現象が起こり、その結果としてトップクォークが持っていた生成・崩壊情報がそのまま終状態の荷電レプトン（電子、ミューオン）に引き継がれる。従って、その終状態荷電レプトンのエネルギー分布や角度分布を調べることにより、トップクォーク生成・崩壊過程の詳しい情報を得ることが出来るのである。また、前述の通りトップクォーク生成にヒッグスボソンも寄与するため、ヒッグスボソン相互作用についての情報も得ることが出来るはずである。

このように豊富な情報を保持する終状態荷電レプトンのエネルギー・角分布に対して最適観測量解析法を適用し、有効相互作用の係数として導入された未知パラメータの観測で期待される統計精度を評価していく。このような計算は、逆に必要な加速器の積分ルミノシティ情報として実験サイドに提供することも可能であり、理論-実験の相互協力の一つの形となることも期待される。

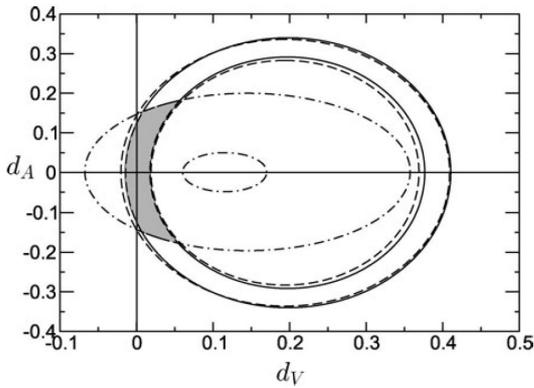
4. 研究成果

(1) 非標準トップクォーク-グルオン結合の探索

我々は、2009年に発表した論文において、「非標準トップクォーク-グルオン結合を表



す二つのパラメータ d_V (Chromomagnetic dipole moment), d_A (Chromoelectric dipole moment) は, 当時 Tevatron から出されていた最高精度のトップ対生成断面積データを用いても上図が示すように強くは制限されない(二つの実線・点線曲線に挟まれた部分が許される領域)ことを示し, 同時に, 間もなく得られるであろう LHC のデータを含めれば, これまでに得られていなかった極めて強い制限が得られるであろうことを指摘した. この予言は見事に的中し, 下図(灰色領域)が示すように両パラメータに対する制限は飛躍的に向上した.



[論文] ~

[発表] ~ , ~ , ~

(2) 終状態レプトン運動量分布と最適観測量解析

我々は, 非標準トップクォーク-Wボソン結合の探索を行うためにトップの半レプトン崩壊で生まれる荷電レプトンを用いる解析に進み, まず, 終状態レプトンの3次元運動量分布を解析的に与える詳細な式を導出

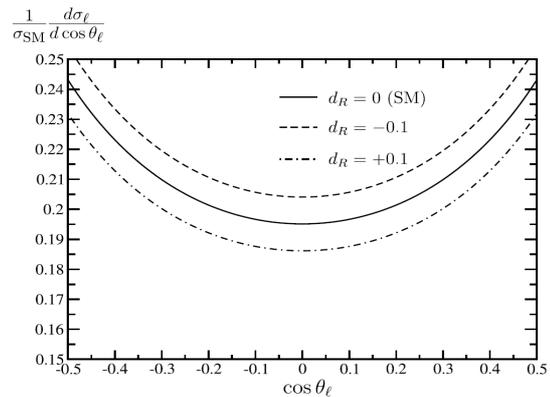
した. 次に, この式を用いてトップの生成崩壊過程に關与する可能性のある非標準相互作用パラメータ d_R の測定で期待できる統計精度の評価を行った. そこにおいて, トップ-グルオン結合も含めた全てのパラメータを同時に決定しようとする計算結果が不安定になることを見出し, 他の解析結果も併用することの重要性を指摘した.

[論文] , ,

[発表] ~ ,

(3) 終状態レプトン角分布と脱結合定理

終状態レプトンの分析のうち, 角分布に対しては, 日置らが以前に発見していた脱結合定理の制約があり, 崩壊過程相互作用のパラメータ (d_R) 測定にはレプトン角分布が使えないという問題があった. そこで, この制約を回避するためにレプトン分布に横運動量カットを導入することを提案し, 実際に, 下図に示すように角分布に崩壊パラメータ依存性が回復することを示した. また, このような制限付き角分布に最適観測量解析を適用してパラメータ d_V, d_A, d_R の測定精度を予測した.



[論文]

[発表] ~

(4) ミューオンコライダーにおける非標準トップクォーク-ヒッグスボソン結合の解析

将来実現される可能性のあるミューオン加速器(コライダー)におけるトップクォーク対生成に着目し, その過程において偏極ビ

ームを利用すれば非標準トップクォーク-ヒッグスボソン結合の解析が可能であることを示した。これは、任意個数の(非標準的)ヒッグスボソンが存在するような場合にも適用可能である。LHCが14 TeVにアップグレードされ再稼働を始めればヒッグスボソンに関するデータも飛躍的に増加することが見込まれるので、それに基づいての解析精度の向上も大いに期待できる。

[発表]

以上の研究成果は数編の論文にまとめられ主要な国際誌に公表されており、中でも欧文論文 ~ は、これまでに合計 50 回以上引用されている(高エネルギー物理学データベース INSPIRE に依る集計)。また、これらの成果は、国内での学会・研究会のみならず幾つかの国際会議においても口頭発表された。

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 6 件)

日置 善郎, 大熊 一正, Final charged-lepton angular distribution and possible anomalous top-quark couplings in $pp \rightarrow ttX \rightarrow \ell^+ X'$, Physics Letters B736 (2014), 1 – 5 (査読有).
DOI: 10.1016/j.physletb.2014.07.001

日置 善郎, 大熊 一正, Latest constraint on non-standard top-gluon couplings at hadron colliders and its future prospect, Physical Review D88 (2013), [017503-1] – [017503-4] (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevD.88.017503

日置 善郎, 大熊 一正, Optimal-observable analysis of possible non-standard top-quark couplings in $pp \rightarrow ttX \rightarrow \ell^+ X'$, Physics Letters B716 (2012), 310 – 315 (査読有).
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.08.035

日置 善郎, 大熊 一正, Exploring anomalous top-quark interactions via the final lepton in tt productions/decays at hadron colliders, Physical Re-

view D83 (2011), [114045-1] – [114045-11] (査読有).
DOI: 10.1103/PhysRevD.83.114045

日置 善郎, 大熊 一正, Addendum to: Search for anomalous top-gluon couplings at LHC revisited, The European Physical Journal C71 (2011), [1535-1] – [1535-2] (査読有).
DOI: 10.1140/epjc/s10052-010-1535-8

日置 善郎, 大熊 一正, パarton衝突でのトップクォーク対生成・崩壊における終状態レプトン運動量分布と非標準トップ相互作用, 徳島大学総合科学部紀要 自然科学研究 24 (2010), 33 – 46 (査読有).
<http://web.ias.tokushima-u.ac.jp/bulletin/nat/nat24-4-3.pdf>

[学会発表](計 18 件)

大熊 一正, 日置 善郎, LHCでのトップクォーク生成・崩壊で生じるレプトンの角度分布解析, 日本物理学会 2015 年次大会, 2015 年 3 月 24 日, 早稲田大学(東京都・新宿区).

日置 善郎, 大熊 一正, LHC 実験でのトップ生成・崩壊におけるレプトン角分布と脱結合定理, 素粒子論グループ四国地区セミナー, 2014 年 12 月 14 日, 新居浜高専(愛媛県・新居浜市).

大熊 一正, 日置 善郎, トップクォーク崩壊によって生じるレプトンの角度分布から探る非標準トップクォーク相互作用, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 20 日, 佐賀大学(佐賀県・佐賀市).

大熊 一正, 日置 善郎, 非標準トップクォーク-グルーオン結合に対する Tevatron 及び LHC 実験からの制限付け, 素粒子論グループ四国地区セミナー, 2013 年 12 月 14 日, 徳島大学(徳島県・徳島市).

大熊 一正, 日置 善郎, Constraints on nonstandard top-gluon couplings from the Tevatron, LHC7 and LHC8, 国際会議「PASCOS 2013: 19th International Symposium on Particles, Strings, and Cosmology」, 2013 年 11 月 21 日, Taipei (台湾).
<http://indico.cern.ch/event/282414/session/28/material/slides/0?contribId=224>

大熊 一正, 日置 善郎, ハドロンコライダーによる非標準トップ-グルーオン結合の制限, 日本物理学会 2013 年次大会, 2013 年 3 月 29 日, 広島大学(広島県・広島市).

大熊 一正, 日置 善郎, Probing non-standard top-quark couplings via optimal-observable analyses at LHC, 国際会議「Hadron Collider Physics Symposium 2012」, 2012年11月13日, 京都大学(京都府・京都市).
DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20134917010>

大熊 一正, 日置 善郎, LHCにおける非標準トップクォーク結合の最適観測量解析, 日本物理学会 2012 秋季大会, 2012年9月13日, 京都産業大学(京都府・京都市).

日置 善郎, 大熊 一正, 有効ラグランジアンの非標準トップクォーク相互作用の解析, 京大基礎物理学研究所研究会「素粒子物理学の進展 2012」, 2012年7月19日 京都大学(京都府・京都市).

大熊 一正, 日置 善郎, Tevatron と LHC によるトップクォーク-グルーオン結合の拡張制限, 日本物理学会 2012 年次大会, 2012年3月27日, 関西学院大学(兵庫県・西宮市).

日置 善郎, 大熊 一正, Studying anomalous top-gluon interactions at hadron colliders, 国際会議「German-Japanese Workshop: Modern Trends in Quantum Chromodynamics」, 2011年10月4日, Zeuthen (ドイツ).
<https://indico.desy.de/getFile.py/access?contribId=10&resId=0&materialId=slides&confId=4727>

大熊 一正, 日置 善郎, ハドロンコライダーにおける非標準トップクォーク相互作用の観測可能性, 日本物理学会 2011 秋季大会, 2011年9月19日, 弘前大学(青森県・弘前市).

日置 善郎, 大熊 一正, Model-independent study of neutral Higgs sector via $t\bar{t}$ productions at muon colliders, 国際会議「Scalars 2011」, 2011年8月27日, Warsaw (ポーランド).
http://scalars.fuw.edu.pl/tl_files/scalars2011/talks/Hioki.pdf

日置 善郎, 大熊 一正, Studying anomalous top-gluon couplings at Tevatron /LHC, 国際会議「Portoroz 2011: The Role of Heavy Fermions in Fundamental Physics」, 2011年4月12日, Portoroz (スロヴェニア).
<http://indico.cern.ch/event/116810/session/6/contribution/5/material/slides/0.pdf>

日置 善郎, 大熊 一正, ハドロンコライダーで探るトップクォーク相互作用の拡張とその制限, 京大基礎物理学研究所研究会「素粒子物理学の進展 2011」, 2011年3月9日, 京都大学(京都府・京都市).

大熊 一正, 日置 善郎, Tevatron と LHC から探るトップ-グルーオン結合の拡張とその制限付け, 素粒子論グループ四国地区セミナー, 2010年12月26日, 徳島大学(徳島県・徳島市).

藤井 健司, 石破 利彦, 大熊 一正, 日置 善郎, 非標準トップ-グルーオン結合を通じてのシングルトップ生成 - グルーオン-グルーオン衝突の場合 -, 素粒子論グループ四国地区セミナー, 2010年12月25日, 徳島大学(徳島県・徳島市).

大熊 一正, 日置 善郎, ハドロン衝突におけるトップの半レプトン崩壊と非標準相互作用, 日本物理学会 2010 秋季大会, 2010年9月11日, 九州工業大学(福岡県・北九州市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日置 善郎 (HIOKI, Zenro)
徳島大学・大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部・教授
研究者番号: 90173129

(2) 研究分担者

大熊 一正 (OHKUMA, Kazumasa)
岡山理科大学・工学部・准教授
研究者番号: 80367507