

機関番号：82118

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2009

課題番号：16081210

研究課題名（和文） アトラス実験での精密測定と標準理論を越えた物理の研究

研究課題名（英文） Precise measurement with the ATLAS detector and research on physics beyond the standard model

研究代表者

岩崎 博行 (IWASAKI HIROYUKI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：40151724

研究成果の概要（和文）：

日本チームが当初より設計から製作まで責任担当してきた ATLAS 測定器のシリコン飛跡検出器、および前後方ミュオントリガー系を完成させ、成功裏に運転している。また ATLAS の研究者と共同で開発してきたデータ収集系にも大きな貢献をすることができた。2008年のLHC加速器事故などがあり安定的な物理実験は当初予定よりも遅れ、平成22年までの1年間の繰越となったが、実験開始からは ATLAS 全体の見事な国際協力が行われ、多くの物理成果が上げられた。重心系 7 TeV でのトップクォークと W/Z の生成断面積の測定、QCD ジェットの形状研究などは本研究での成果である。

研究成果の概要（英文）：

We constructed and have been successfully operating the semiconductor tracking detector in the barrel region and the muon trigger system in the forward region of the ATLAS detector, for which the Japanese group are responsible from the beginning of their designs. We also made substantial contribution to the data-taking system in collaboration with the ATLAS researchers. Start-up of the stable physics experiment was delayed due mainly to the LHC incident in 2008. It caused our research period to be extended by one year to 2010 Japanese fiscal year. But thanks to the excellent ATLAS collaboration, we have already got fruitful physics results. Examples are measurement of production cross sections for top-quark, W and Z bosons, and study of QCD jet shapes at 7 TeV center-of-mass energy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	1,500,000	0	1,500,000
2005年度	39,400,000	0	39,400,000
2006年度	48,600,000	0	48,600,000
2007年度	52,700,000	0	52,700,000
2008年度	52,900,000	0	52,900,000
2009年度	53,300,000	0	53,300,000
総計	248,400,000	0	248,400,000

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：素粒子実験、国際協力実験、標準理論、ハドロンコライダー

1. 研究開始当初の背景
高エネルギー物理学においては、いわゆる

「標準理論」がゆるぎない理論として確立している。この理論のなかで唯一確認されてい

ないのが質量の起源を担うヒッグス粒子である。また、電磁力・弱い力・強い力の3つ力が約10の16乗GeV付近で統一されるという予想があり、標準理論を越えた超対称性粒子の存在が示唆されている。そのうちの最も軽い中性粒子は宇宙に満ちているダークマターの有力な候補である。標準理論を超えた物理の予言は超対称性の存在以外にもクォークの内部構造、自発的対称性の破れを引き起こすフェルミオン複合粒子、新しい重いベクターボゾン、空間が3次元以上ありその余次元に付随した粒子、などなど多岐に渡っている。これらの現象は標準理論からの小さなズレとなって現れると予想される。14 TeVの陽子・陽子衝突実験でこれら新現象の一端を見つけることが期待されている。

2. 研究の目的

本計画研究では14 TeVの陽子・陽子衝突実験を行うATLAS測定器を完成し、標準理論のより精密な検証と新しい物理による微小な効果の検出を目指す。特にトップクォークとベクターボゾン(W、Z)の生成反応の観測を高精度で行う。これらの粒子の質量を精密に測定することにより、ヒッグス粒子の質量の予測範囲を狭めることが出来る。また多くの新粒子発見において大きなバックグラウンド事象となるQVDジェットの反応の測定も重要である。標準理論を超えた物理現象は標準理論からの小さなズレとなって現れると予想されるが、そのためには標準理論の予言する現象を正確に理解しておく必要がある。

3. 研究の方法

測定器関係では、日本チームが当初より設計から製作まで参加担当してきたシリコン飛跡検出器、および前後方ミュオントリガー系の組立・据付・試運転を行い装置が適正に動くことを確認する。またATLASの研究者と共同で開発してきたデータ収集系の整備を行う。初期の基本動作確認後から実験開始までは宇宙線を用いた総合試験を行い、動作状況の確認、各検出器位置の調査を行う。ビーム衝突開始直後からは衝突反応からくる粒子を用いて、運転の最適条件を確立する。事象の収集が進む段階では、トリガー系やデータ収集系の機能確認・確立を行う。また衝突事象からの基本的な解析の流れを確立する。平行してアトラス標準のデータ解析枠組みに精通し、標準理論の検証実施にそなえる。

4. 研究成果

(1) シリコン半導体飛跡検出器の完成と運転

LHCでは過去に例のない高度な放射線環境(2×10^{14} 1-MeV中性子相当/cm²)が予想され、また測定器の規模は約60平方メートルと過去の約1桁上を行く規模である。これらの要求に耐えうるシリコンセンサーの開発・製造、およびシリコン測定器開発・製造を成功裏に成し遂げ、その成果を論文としてまとめた。

2006年2月にはシリコン検出器をストロー型飛跡検出器に組み込み、その内部飛跡測定器全体も2008年8月にアトラス測定器に組み込まれた。数百万チャンネルに及ぶ、シリコン測定器他の内部飛跡測定器の数年に渡る稼働・校正を精密に行い、本格的な陽子・陽子衝突の実データ収集を行った。



図1 2006年2月CERNにて日本グループの設計製作による組み立て装置を用い、TRT検出器内にSCT検出器を組み込むことに成功

これらの成果として、シリコン測定器ほかの内部飛跡測定器を主要とした物理事象の解析から、実データに依る陽子・陽子衝突重心系900 GeVエネルギーにおける荷電粒子の多重度分布を測定した。

(2) ミューオン・トリガーとデータ収集系の完成と運転

① ミューオン・レベル1・トリガー

アトラス前後方ミュオン・レベル1・トリガー用の電子回路モジュールは、2005年から宇宙線を用いてデータ収集を行い、検出器、回路モジュール及びケーブル結線の動作確認を行った。これと並行してトリガー検出器用のデータ収集ソフトウェア及び検出器パラメータ設定用データベースの開発を行った。2007年にはトリガー検出器系およびインフラ整備もほぼ終え、宇宙線によるトリガー信号をアトラス測定器全体に提供するという本番実験に即した運転を行った。その後、実験開始に備え検出器調整やオンラインモニターなどのソフトウェア開発を行い、2008年9月には初のLHC加速器による衝突イベントの検出を無事に行うことが出来た。検出器系の調整作業を続け、LHC加速器ビーム衝突実験開始時には正しいタイミングでレベル1・トリガーを出力することが出来た。2010年4月からの本格的な実験開始後も検出器性能のモニター及び調整を行っている。

② レベル2・トリガー

LHC 運転開始前は、シミュレーション事象や宇宙線事象を用いて最終調整を行った。予想されるトリガー頻度などのパフォーマンスの評価と、論理の最適化を行った。また、カルマンフィルター原理を用いて複雑な磁場も考慮に入れて飛跡の再構成を行う新しいレベル2・トリガーの開発を進めた。LHC 運転開始後は実データを使った性能評価を行った。運動量分解能やトリガー効率を求め、予想より分解能が思わしくなかった一部領域では閾値を調整するなどして対応した。

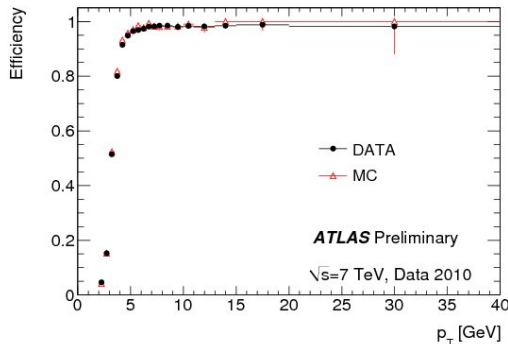


図2 レベル1に対してのレベル2・ミュオン・トリガー効率のミュオンの横運動量(p_T)依存性。レベル2のカットは $p_T > 4$ GeV のミュオンを残すように設定。

③ トリガーマニューアの策定

物理解析や検出器の較正に必要なデータを収集するためのトリガー論理(「トリガーマニューア」)のミュオンに関する部分を策定した。LHC が徐々に衝突輝度を上げるにつれて、こういったトリガーでデータを取得してこういった物理や検出器の較正などに活かすのが最適かの戦略作りを行い、実際、それに従ってデータ取得を行った。また、実際にオンラインで使用されるトリガー論理(ソフトウェアプログラムとして記述される)も作成した。

④ データ収集系

2004~2006 年度は各測定器で得られたイベントフラグメントを一つのイベントに組み立てるイベントビルドシステムに着目し、スイス、および、イタリアのグループと共同でパーシャルイベントビルドの機能を現状のシステムに組み込んだ。これにより、データ収集システムのうち、測定器のキャリブレーションやデバッグを効率よく実行することが可能になった。2007~2009 年度にはデータ収集システムのモニタリングツールの開発を行った。特に、データフローの中心的役割を担うイベントビルドシステム部のデー

タの流れを可視化することが出来た。本可視化システムにより、イベントビルドシステムの全体の状況が瞬時に分かるようになった。2010年4月からの本格的な実験開始後はデータ収集システムの運転と性能評価、その向上および維持を行った。

(3) 精密測定と標準模型を超えた物理の研究

実験開始から順調にデータ収集を行い、精密測定による TeV エネルギー領域での標準模型の検証を行った。1年間のデータで既に多くの検証をすることが出来た。今のところ標準模型の予想からのずれは見つかっていないが、もし見つければ新しい物理の扉を開くことに繋がる。以下にトップクォークの生成、ベクターボゾン(W, Z)の物理、および QCD ジェットの物理に関しての解析結果を概観する。

① トップクォークの研究

重心系のエネルギー 7 TeV での陽子・陽子衝突におけるトップクォーク対生成断面積を初めて測定した。イベントのトポロジーとしては、1) 電子かミュオンが1個で、大きな横エネルギー損失があり、少なくとも4個のジェットがあるものと、2) 電子かミュオンが2個で、大きな横エネルギー損失があり、少なくとも2個のジェットがあるものを選んだ。データは積分ルミノシティ 2.9 pb^{-1} までのものを使用し、1) のトポロジーとして 37 イベント候補が、2) のトポロジーとして 9 イベント候補が観測された。これらの候補イベント数もバックグラウンド・イベント数もエラーの範囲で標準模型の予想と一致し、インクルーシブ生成断面積として

$$\sigma_{it} = 145 \pm 31^{+42}_{-27} \text{ pb}$$

が得られた。

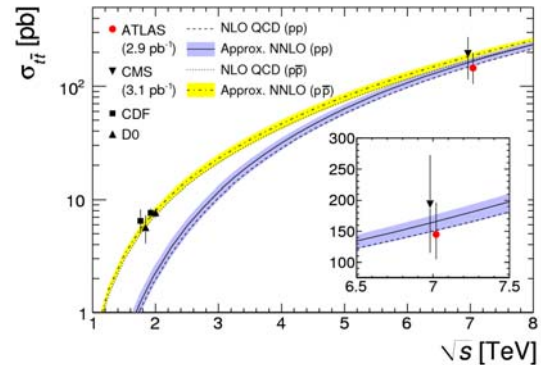


図3 トップクォーク対生成断面積の重心系エネルギー依存性。テバトロン(陽子・反陽子衝突)での CDF と D0 による測定値と LHC(陽子・陽子衝突)における CMS の値も載せてある。曲線は標準模型からの予想値。

② ベクターボゾン(W, Z)の物理
 重心系のエネルギー 7 TeV での陽子・陽子
 衝突における W と Z の生成断面積を初めて
 測定した。

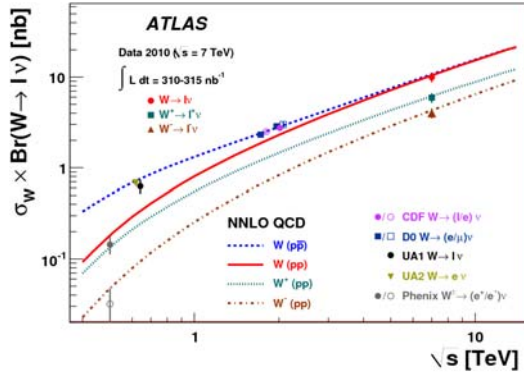


図4 W⁺, W⁻ とその和に対する $\sigma_W \times \text{Br}(W \rightarrow l\nu)$ の重心系エネルギー依存性。曲線は NNLO QCD 計算値。

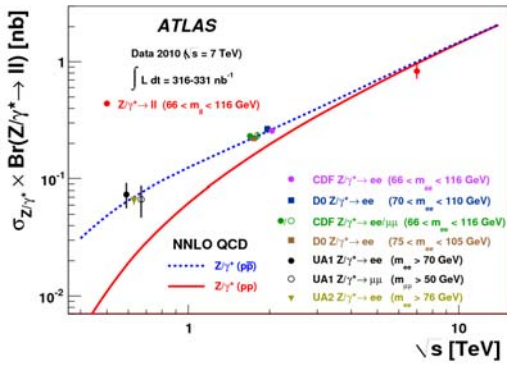


図5 $\sigma_{Z/\gamma^*} \times \text{Br}(Z/\gamma^* \rightarrow ll)$ の重心系エネルギー
 依存性。曲線は NNLO QCD 計算値。

どちらもイベントトポロジーとしてはレプトン（電子かミューオン）に崩壊するモードを調べた。使用したデータは積分ルミノシティ 約 320 nb⁻¹ までのもので、 $W \rightarrow l\nu$ として

$$\sigma_W^{\text{tot}} \times \text{Br}(W \rightarrow l\nu) = 9.96 \pm 0.23(\text{stat}) \pm 0.50(\text{syst}) \pm 1.10(\text{lumi}) \text{ nb}$$

$Z/\gamma^* \rightarrow ll$ として

$$\sigma_{Z/\gamma^*}^{\text{tot}} \times \text{Br}(Z/\gamma^* \rightarrow ll) = 0.82 \pm 0.06(\text{stat}) \pm 0.05(\text{syst}) \pm 0.09(\text{lumi}) \text{ nb}$$

を測定した。

③ QCD ジェット

重心系のエネルギー 7 TeV での陽子・陽子衝突におけるジェット断面積を初めて測定した。データは積分ルミノシティ 17 nb⁻¹ までのものを使用し、ジェット同定のアルゴリズムとしては anti-k_t を用いた。測定での主な不定性はジェットのエネルギースケールで、横運動量が 60 GeV 以上のジェットで 7% 以内である。インクルーシブ・ジェット生成断面積とジェット対生成断面積の測定値は NLO QCD の予想値と測定値の範囲内で一致し、新しいキネマテック領域でも理論が有効であることが確認された。

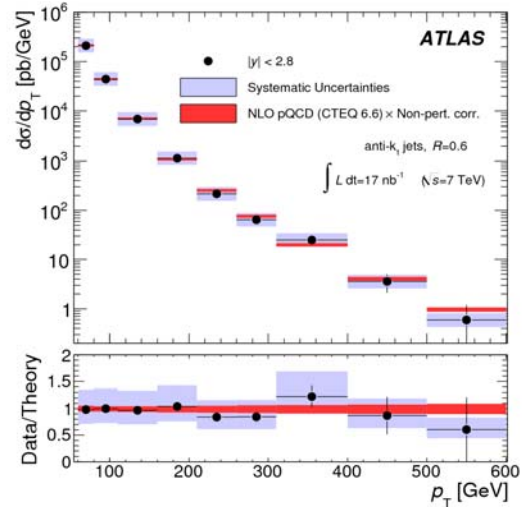


図6 インクルーシブ・ジェット生成断面積をその横運動量の関数としてプロットしたもの。ラビディティは 2.8 以内。

LHC のキネマテック領域でも QCD の計算がジェット対のデータを十分に再現することから、ジェット対に崩壊する新粒子探索も行った。もしそのような新粒子があれば、ジェット対の不変質量分布にピークが見えるはずである。データは積分ルミノシティ 315 nb⁻¹ までのものを使用した。残念ながら測定結果にはそのようなピークは見られず、生成断面積の上限値が設定された。励起クォーク (q^*) は 95% コンフィデンスレベルで、

$$0.30 < m_{q^*} < 1.26 \text{ TeV}$$

の質量範囲が排除された。

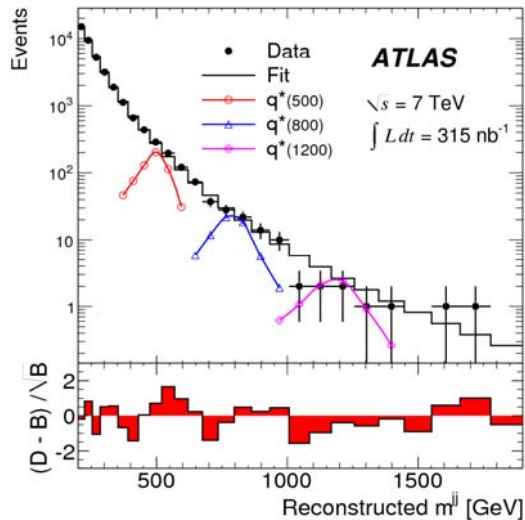


図7 ジェット対の不変質量分布。黒丸が測定データ、ヒストグラムは NLO QCD バックグラウンドの予想値を数式化した値。3つの山型曲線は質量が 500, 800, 1200 GeV の励起クォークがある場合の値を示している。下側の図はデータからバックグラウンドを差し引いたものを、バックグラウンドの誤差で規格化した値を示している

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)

[雑誌論文] (計 41 件)

[1] Measurement of the top quark-pair production cross section with ATLAS in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV, ATLAS Collaboration (G. Aad, Y. Arai, Y. Hasegawa, Y. Ikegami, H. Iwasaki, O. Jinnouchi, Y. Nagasaka, I. Nakano, O. Sasaki, M. Shimojima, R. Takashima, S. Terada, J. Tojo, M. Tomoto, S. Tsuno, F. Ukegawa, et al. 総著者数 3038 人) Euro. Phys. Journal C 71 (2011) 1577, 査読有.

[2] Measurement of the $W \rightarrow l\nu$ and $Z/\gamma^* \rightarrow ll$ production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector, ATLAS Collaboration (G. Aad, Y. Arai, Y. Hasegawa, Y. Ikegami, H. Iwasaki, O. Jinnouchi, Y. Nagasaka, I. Nakano, O. Sasaki, M. Shimojima, R. Takashima, S. Terada, J. Tojo, M. Tomoto, S. Tsuno, F. Ukegawa, et al. 総著者数 3179 人) Journal of High Energy Physics 12 (2010) 060, 査読有.

[3] Measurement of inclusive jet and dijet cross sections in proton-proton

collisions at 7 TeV centre-of-mass energy with the ATLAS detector, ATLAS Collaboration (G. Aad, Y. Arai, Y. Hasegawa, Y. Ikegami, H. Iwasaki, O. Jinnouchi, Y. Nagasaka, I. Nakano, O. Sasaki, M. Shimojima, R. Takashima, S. Terada, J. Tojo, M. Tomoto, S. Tsuno, F. Ukegawa, et al. 総著者数 2595 人), Euro. Phys. Journal C 71 (2011) 1512, 査読有. [4] Search for New Particles in Two-Jet Final States in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector at the LHC, ATLAS Collaboration (G. Aad, Y. Arai, Y. Hasegawa, Y. Ikegami, H. Iwasaki, O. Jinnouchi, Y. Nagasaka, I. Nakano, O. Sasaki, M. Shimojima, R. Takashima, S. Terada, J. Tojo, M. Tomoto, S. Tsuno, F. Ukegawa, et al. 総著者数 3172 人), Phys. Rev. Lett. 105, 161801 (2010), 査読有. [5] The ATLAS Inner Detector commissioning and calibration, ATLAS Collaboration (G. Aad, Y. Arai, Y. Hasegawa, Y. Ikegami, H. Iwasaki, O. Jinnouchi, Y. Nagasaka, I. Nakano, O. Sasaki, M. Shimojima, R. Takashima, S. Terada, J. Tojo, M. Tomoto, S. Tsuno, F. Ukegawa, et al. 総著者数 2592 人), Euro. Phys. Journal C 70 (2010) 787, 査読有.

[6] Charged-particle multiplicities in pp interactions at $\sqrt{s} = 900$ GeV measured with the ATLAS detector at the LHC, ATLAS Collaboration (G. Aad, Y. Arai, Y. Hasegawa, Y. Ikegami, H. Iwasaki, O. Jinnouchi, Y. Nagasaka, I. Nakano, O. Sasaki, M. Shimojima, R. Takashima, S. Terada, J. Tojo, M. Tomoto, S. Tsuno, F. Ukegawa, et al. 総著者数 3222 人), Phys. Lett. B 688 (2010) 21, 査読有.

[7] The ATLAS Level-1 Trigger: Status of the System and First Results from Cosmic-Ray Data, G. Aielli, Y. Hasagawa, H. Iwasaki, O. Sasaki et al. 総著者数 171 人, Nucl. Instr. Meth. A 581 (2007) 476, 査読有.

[8] The barrel modules of the ATLAS semiconductor tracker, A. Abdesselam, Y. Ikegami, I. Nakano, S. Terada, et al. 総著者数 255 人, Nucl. Instr. Meth. A 568 (2006) 642, 査読有.

[学会発表] (計 39 件)

[1] The ATLAS tau trigger, S. Tsuno, 2009

IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Orlando, Florida, USA, October 25-31, 2009.

[2] ATLAS Muon Spectrometer -Status and Performance, Y. Takahashi, 11th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics, Villa Olmo, Como, Italy, October 5-9, 2009

[3] Precise Timing Adjustment for ATLAS Levell Endcap Muon Trigger System, Y. Suzuki, Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (twepp-09), Paris, France, September 21-25, 2009.

[4] Status of the ATLAS experiment, M. Tomoto, Joint session of Physics Society of Japan and Korean Physical Society (韓国物理学会 日韓合同セッション), Daejeon, Korea (大田、韓国), April 23, 2009

[5] Commissioning of the ATLAS detector with Cosmic-rays and Single-Beams, M. Ishino, Rencontres de Moriond, QCD and High Energy Interactions, La Thuile, Italy, March 14-21, 2009

[6] The first few fb⁻¹: Potential for observing SUSY and Higgs, S. Tsuno, Rencontres de Moriond, Electroweak Session, La Thuile, Italy, March 1-8, 2008

[7] Status of LHC and ATLAS, H. Iwasaki, Conference on Supersymmetry in 2010's, Sapporo, Japan, June 20-22, 2007

[8] Search for Long-lived Particles at ATLAS, O. Jinnouchi, Conference on Supersymmetry in 2010's, Sapporo, Japan, June 20-22, 2007

[その他]

ホームページ等

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/tokutei/>

<http://atlas.kek.jp/>

<http://atlas.kek.jp/research/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩崎 博行 (IWASAKI HIROYUKI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：40151724

(2) 研究分担者

佐々木 修 (SASAKI OSAMU)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：30178636

新井 康夫 (ARAI YASUO)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：90167990

寺田 進 (TERADA SUSUMU)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師

研究者番号：70172096

池上 陽一 (IKEGAMI YOICHI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：20222862

東城 順治 (TOJO JUNJI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：70360592

津野 総司 (TSUNO SOSHI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：30451834

(3) 連携研究者

陣内 修 (JINNOUCHI OSAMU)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50360566

中野 逸夫 (NAKANO ITSUO)

岡山大学・理学部・教授

研究者番号：90133024

高嶋 隆一 (TAKASHIMA RYUICHI)

京都教育大学・教育学部・准教授

研究者番号：60163200

受川 史彦 (UKEGAWA FUMIHIKO)

筑波大学・数理工学科学研究所・教授

研究者番号：10312795

戸本 誠 (TOMOTO MAKOTO)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80432235

長谷川 庸司 (HASEGAWA YOJI)

信州大学・理学部・准教授

研究者番号：70324225

長坂 康史 (NAGASAKA YASUSHI)

広島工業大学・情報学部・教授

研究者番号：20299655

下島 真 (SHIMOJIMA MAKOTO)

長崎総合科学大学・情報学部・教授

研究者番号：80302347