

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成28年6月12日現在

機関番号：11301

研究種目：特別推進研究

研究期間：2011～2015

課題番号：23000002

研究課題名(和文) ILCのための最先端測定器の国際的新展開

研究課題名(英文) A global research and development program of a state-of-the-art detector system for ILC

研究代表者

山本 均 (YAMAMOTO, Hitoshi)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：00333782

交付決定額(研究期間全体)(直接経費)：431,900,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の素粒子研究施設、国際リニアコライダー(ILC)が世界規模で推進されるなか、この研究計画は日本のグループが中核となって高精細測定器概念に基づいた最先端測定器を開発することでILCのための測定器開発のイニシアティブを取り、ILC実現に向けてこの測定器グループが原動力となった国際的新展開をもたらすことを目的とする。3つの中核的測定器要素、すなわち、反応点検出器、主飛跡検出器、およびカロリメータに焦点をおいて必要な要素技術を開発するとともに、その潜在能力を最大限に活かすソフトウェアを開発しそれを用いた測定器全体の最適化を行った。その成果は国際的に広く認識され、2013年にリニアコライダーの国際組織が再編された際には、われわれは国際リニアコライダーの推進において確固としたイニシアティブを確立した。

研究成果の概要(英文)：A next-generation particle physics research facility, the International Linear Collider (ILC), is currently being planned at a global scale. This research program aimed to establish international initiative in research and development of a state-of-the-art detector for the ILC. We based our approach on an innovative detector concept using high-granularity detector systems. It was executed within an international framework with the Japanese group as its core. This effort resulted in bringing forth a new global picture in the effort to realize the ILC driven by the Japanese detector group. Focusing on the three central detector subsystems; namely, vertex detector, main tracking detector, and calorimeter, we have developed necessary detector components and performed optimization of the whole detector system by developing software to maximally utilize the potentials of those detector components. These achievements were globally recognized, and when the international organization was re-organized in 2013, we have established firm initiative in the international endeavor for the ILC.

研究分野：数物系科学

分科：物理学

細目：素粒子・原子核・宇宙論・宇宙物理

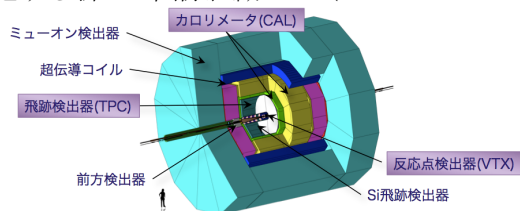
キーワード：

電子陽電子衝突器、  
国際リニアコライダー、  
コライダー測定器、  
ヒッグス粒子、  
国際研究者交流、多国籍

## 1. 研究開始当初の背景

現在の素粒子物理学の「標準理論」では、全ての素粒子の質量はヒッグス粒子が引き起こす「真空の対称性の破れ」によって生成されたと考えられている。さらに標準理論を超える新しい物理がこれまでの素粒子研究および最新の宇宙観測から予見されている。2012年、LHC(ジュネーブ郊外にある陽子衝突器)とそこに設置されている最先端測定器によって、本研究開始時には未発見であったヒッグス粒子が発見された。これにより、ヒッグス粒子の精密測定とその背後にある根源的な物理法則の解明が最重要課題となり、素粒子物理学の新しい時代の幕が開いた。

国際リニアコライダー(ILC)はまさにその新時代をリードするために計画されてきた。ILCはヒッグス粒子の精密測定において今後高度化される究極のLHC数10基に相当する精度を持ち、LHCでの発見が困難な新粒子も見つけることができる。2012年末に国際共同設計チームにより技術設計報告書が完成し、2013年春にはリニアコライダーを推進する新しい国際組織LCC(Linear Collider



Collaboration)が発足した。日本政府による正式な国内誘致検討とあいまって、ILC計画実現への動きはますます高まっている。

## 2. 研究の目的

現在LHCでは標準理論を超える現象の兆候が幾つか報告されているが、それらを含め今後見つかるかもしれない兆候のなかには確認されて新発見となるものがある可能性がある。その場合、ヒッグス粒子その他の精密測定によって背後の新しい物理をあぶり出すことがますます重要になり、また、LHCでの新発見に関連した粒子がILCにおいて初めて見つかる可能性もある。

革新的測定器概念 International Large Detector (ILD) は、測定器内部の反応で起こるシャワー現象の二次粒子を一つ一つ分離し、荷電粒子は飛跡検出器、中性粒子はカロリメータの情報を選択的に用いることで、素粒子反応の一次生成物であるクォークやレプトン、光子等の基本粒子の持つエネルギー・運動量をこれまでにない精度で測定するという「新しい概念に基づいた素粒子検出器」である

この研究では、高精細の要素技術と測定器全体の最適化を行って実際の測定器の工学設計への道筋を定め、この成果を基盤に世界の参加研究機関によるILC測定器コラボレーションの形成において日本が主導権を握ることを目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 反応点検出器: bクォーク、cクォークを、それらを含む粒子の崩壊点が生成点から100 $\mu\text{m}$ 程度離れていることを用いて同定する。必要な位置分解能は、高精細CCD(FPCCD)技術を用いて画素サイズで5 $\mu\text{m}$ 程度(面積でLHCの1000分の1)、厚さ50 $\mu\text{m}$ (物質質量でLHCの10分の1)とすることにより達成する。実機と同程度のチップサイズを持つ約1cm $\times$ 6cmのFPCCDプロトタイプセンサーとその読み出し集積回路の開発する。

(2) 飛跡検出器: 荷電粒子の主飛跡検出器としてTime Projection Chamber(TPC)を用い、物質質量で従来の6分の1、位置分解能で10分の1とすることでLHCに比べ10分の1の運動量分解能を得る。この各点の位置分解能は、従来のワイヤを用いた電子増幅の代わりに、日本が得意とする技術のGas Electron Multiplier(GEM)を用いることによって達成し、さらに陽イオンの逆流を防ぐゲート装置を開発する。

(3) カロリメータ: 従来の200倍にも至る超高精細な電磁カロリメータを、シリコン(Si)センサーと短冊形(ストリップ)シンチレータ(Sci)を組み合わせたハイブリッド構造を持つ新システムにより、コストを抑えつつ実現する。シリコン半導体センサーの特性試験を通しセンサー仕様を決め、ハイブリッド構造を最適化するとともに、読み出しエレクトロニクス開発、構造体を含めた全体設計を行う。実機大量生産のための工業化も視野に入れる。ハドロンカロリメータでは、ストリップ構造で電磁シャワーとハドロンシャワーを分離し分解能を改善する。

(4) 測定器最適化: 測定器の全体最適化に最重要なクォークエネルギー測定とクォーク種同定に重点をおいて解析手法を完成させる。次にこれを物理解析に適用して、物理への感度が最大になるように反応点測定器、飛跡検出器、カロリメータ、衝突点領域の分割度・配置・サイズおよび内部構成の最適化を行う。

(5) 荷電粒子飛跡再構成: 磁場の歪みや荷電粒子がシグナルを残す様々な形状の測定器要素に対応するためのカルマンフィルター汎用飛跡再構成プログラムの設計と実装を行いILD測定器へ応用する。また実験で問題となりうる陽イオンや非一様磁場による飛跡歪みを評価し補正法を定式化する。

(6) ソフトウェア: 不感領域やケーブル、ビームによる背景事象を組み込んだ現実的な測定器シミュレータを作成するとともに解析ソフトを開発することで測定器最適化に資する。国際協力によって研究を進めるための

GRID を整備充実し、ILD 測定器の国際解析体制を確立する。

(7) 測定器インテグレーション：測定器全体の機械構造を設計し、実機を地下空洞で組み立て設置する方法を策定する。これには現地への測定器要素の搬送や地表での作業検討も含む。

#### 4. 研究成果

(1) 反応点検出器：FPCCD センサーの開発に関しては、一つのチップ上に  $12\mu\text{m}$ 、 $9.6\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ 、 $6\mu\text{m}$  の 4 種の異なるピクセルサイズを持った、小型のプロトタイプを製作した。 $6\mu\text{m}$  と  $8\mu\text{m}$  のピクセルは転送効率などの課題が残ったが、その他の 2 つのチャンネルからは期待通りの信号が得られた。 $12\text{mm}\times 64\text{mm}$  の大型の FPCCD センサーを開発し、 $50\mu\text{m}$  まで薄型化したセンサーの開発も行った。FPCCD からの信号を処理する読み出し ASIC を開発し、消費電力、読み出し速度、ノイズ性能等、十分満足できる結果が得られた。センサーと組み合わせた実機として消費電力、読み出し速度、ノイズ性能等で十分な性能が得られることが明らかとなった。フロントエンド以降の回路の開発は未着手に終わったが、予定より 1 年早く大型で薄型の FPCCD センサーの開発に成功した。

(2) 飛跡検出器：主として LCTPC 国際研究グループの枠組みで研究を進めた。従来型 GEM 読み出し端部検出器モジュールのビーム試験を行った。安定なモジュール運転を実現し、当グループが開発した理論的位置分解能公式によく一致する優れた位置分解能を確認したことは当研究の大きな成果である。

電子透過度の高い GEM 陽イオンゲートの開発は GEM 穴径を大きくする ( $140\mu\text{m}$ ) 方向に発想を転換し、非熱的レーザー加工、化学的プロセスおよびその併用によって製作し、磁場中 (現時点では 1 T) での試験では 80% 程度と十分な電子透過率が得られた。これは MPGD 読み出し飛跡検出の応用において先駆的な結果である。

GEM 搭載構造、高電圧供給、マイクロ放電等の弱点を克服し簡素化する設計と試験を進めた。なお、NIKHEF の協力を得て製作した 2 相 CO<sub>2</sub> 冷却循環装置は DESY のビーム試験エリアに設置し、最初の初歩的なモジュール冷却試験に使用した。DESY に設置された LCTPC の大型プロトタイプ試験設備は、近年、LHC や BELLE-II、J-Lab 等の測定器試験にも利用されるようになった。

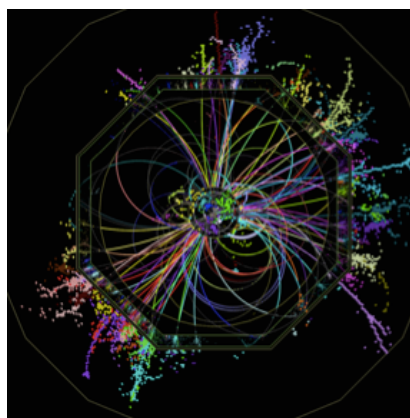
(3) カロリメータ：主として国際共同研究 CALICE の枠組みでの活動として進めてきた。

Si 電磁カロリメータ：シリコンパッドとタングステンを用いた電磁カロリメータの大量測定を念頭に、シリコン半導体センサーの暗電流および全容量を自動測定できる基礎

特性システムを構築した。赤外線レーザーシステムを構築し、ガードリング構造の差異によるクロストークを評価した。読み出し回路はフランスの OMEGA 研究所で製作された ASIC を評価し、実機と同様の構造を持つ電磁カロリメータ試作機を作製してドイツ電子シンクロトロン研究所の電子ビームを用いて 2 回のテストビーム試験を行った。

Sci カロリメータ：ストリップシンチレータを用いた電磁カロリメータ (SciECAL) のビーム試験をおこない、十分な性能理解と補正方法が確立した。シンチレータストリップと光センサーおよび電子回路を一体化したシステムを製作し、ビーム環境での試験を行った。この一体化システムは今後の測定器デザインに大きな変革をもたらす可能性がある。シンチレータ読みだしとシリコン読みだしを組み合わせたハイブリッド電磁カロリメータの最適化の可能性をシミュレーションにより示した。

シリコンパッドとタングステンを用いた電磁カロリメータの技術は LHC や RHIC での実験の測定器アップグレードに用いられる予定である。また、Sci カロリメータのために開発された半導体光センサーに関しては、本研究に必要な性能を満たす光半導体の開発から生まれた製品群が存在する。その医療機器分野での採用が決まっており大きな波及効果を既に得ている。



(4) 測定器最適化：主として、ILD 測定器概念国際研究グループの活動として行って来た。測定器最適化の根幹となるクォークの種類同定法とエネルギーの測定法を組み合わせた新しい再構成法を最新の詳細測定器モデルを取り入れたプログラムを開発し実際のヒッグス自己結合定数の測定などに応用した (上図)。これらの解析ソフトウェアはパッケージ化され、CLIC (CERN で計画中の 2-ビーム加速方式のリニアコライダー) の物理解析でも使用されている。

(5) 荷電粒子飛跡再構成：現実に即した複雑な測定座標形状と非均一磁場に対応する汎用カルマン・フィルターの設計/実装を完了した。これは ILD 以外の様々な飛跡検出器へと広く応用可能な成果であり、LCTPC 測定器

開発コラボレーションによるビーム試験のデータ解析や CLIC の測定器開発研究においても利用されている。

(6) ソフトウェア：この研究活動は国際組織 LCC (Linear Collider Collaboration) のもと、ILD 以外にも 米国を中心とした SiD 測定器概念グループおよび CLIC グループと協力しながら進めてきた。ビーム起因のバックグラウンド、冷却パイプ、電気回路、支持構造物なども含めた現実的な測定器シミュレータを作成し、国際協力で GRID を活用した国際解析体制を確立した。

(7) 測定器インテグレーション：この研究活動は国際組織 LCC (Linear Collider Collaboration) のもと、国際組織及び地域の自治体と協力しながら進めてきた。地下実験室での測定器の組立と必要なスペースの検討を行い必要な空間を特定し、また測定器の超伝導ソレノイドコイル用の液体ヘリウムの冷却システムの配置について検討を進めた。その結果は ILC の技術設計書に掲載されている。

以上のような成果は国際的に認識され、平成 25 年にリニアコライダの国際組織が再編された際には、この研究の代表である山本が物理測定器の担当ディレクターに選ばれ、杉本が国際測定器グループ ILD の共同代表となった。また、平成 27 年度には川越が ILD の時期副代表となることが決まった。その他にも、ILD の executive board にはこの研究グループから多くのメンバー参画するに至った。

#### 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 42 件)

1. “Tau lepton reconstruction at collider experiments using impact parameters”, D. Jeans, 査読有, Nucl. Instr. Meth., A810 51-58, 2016, DOI: 10.1016/j.nima.2015.11.030

2. “A study of the measurement precision of the Higgs boson decaying into tau pairs at the ILC”, S. Kawada, K. Fujii, T. Suehara, T. Takahashi and T. Tanabe, 査読有, Eur. Phys. J., C75 No12 617-627, 2015, DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3854-2

3. “LCFIPlus: A Framework for Jet Analyses in Linear Collider Studies”, T. Tanabe and T. Suehara, 査読有, Nucl. Instrum. Meth., A808 109-116, 2015, DOI: 10.1016/j.nima.2015.11.054

4. “A novel strip energy splitting algorithm for the fine granular readout of a scintillator strip electromagnetic calorimeter”, K. Kotera, D. Jeans, A. Miyamoto, T. Takeshita, 査読有, Nucl. Instr. Meth., A789 158-164, 2015, DOI: 10.1016/j.nima.2015.06.030

5. “Shower development of particles with momenta from 15 GeV to 150 GeV in the CALICE scintillator-tungsten hadronic calorimeter”, The CALICE Collaboration: B. Bobchenko, … K. Kawagoe (45 番目) … (員数 181), 査読有, J. of Instr., 10 12006-12041, 2015, DOI: 10.1088/1748-0221/10/12/P12006

6. “Physics at the  $e^+e^-$  linear collider”, G. Moortgat-Pick, … K. Fujii (5 番目) … K. Kawagoe (35 番目) … H. Yamamoto (70 番目) … (員数 70), 査読有, Eur. Phys. J., C75 371-551, 2015, DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3511-9

7. “Spatial Resolutions of GEM TPC: A novel theoretical formula and its comparison to latest beam test data”, R. Yonamine, K. Fujii, T. Fusayasu, P. Gros, Y. Kato, S. Kawada, M. Kobayashi, T. Matsuda, O. Nitoh, A. Sugiyama, T. Takahashi, J. Tian, T. Watanabe, 査読有, JINST, 9 C03002, 2014, DOI: 10.1088/1748-0221/9/03/C03002

8. “Kalman-filter-based track fitting in non-uniform magnetic field with segment-wise helical track model”, B. Li, K. Fujii, Y. Gao, 査読有, Comp. Phys. Comm., 185 p754-p761, 2014, DOI: 10.1088/1748-0221/9/03/C03002

9. “Construction and performance of a silicon photomultiplier/extruded scintillator tail-catcher and muon-tracker”, C. Adloff … K. Kawagoe (85 番目) … T. Takeshita (167 番目) … (員数 167), 査読有, JINST, 7 P04015, 2012, DOI: 10.1088/1748-0221/5/05/P05004

[学会発表] (国際会議のみ：計 232 件)

1. ‘ILC Project - Physics and Status’, H. Yamamoto, KIAS Workshop, 2015/11/13, Seoul, Korea

2. ‘Strip Scintillator CAL in PFA’, K. Kotera, LCWS2015, 2015/11/4. Whistler, Canada

3. ‘Status of strip scintillator ECAL and HCAL’, T. Takeshita, LCWS2015,

2015/11/4, Whistler, Canada

4. 'Impact of ILD Optimization on the TPC', J. Tian, ALCW 2015, 2015/4/20, KEK, Japan

5. 'Higgs e+e- Future Facilities', K. Fujii, APS April 2013 Meeting, 2013/4/14, Denver, Colorado, USA

6. 'The ILD detector concept for the ILC', T. Tanabe, The 36th International Conference for High Energy Physics, 2012/7/4, Melbourne, Australia

7. 'Physics at the ILC', K. Kawagoe, The 3rd LC Forum, 2012/2/7, DESY, Germany

8. 'Innovative technologies for detectors for future colliders', H. Yamamoto, The 10th ICFA seminar on Future Perspectives on Particle Physics, 2011/10/8, CERN, Switzerland

9. 'Detectors for Future Colliders', H. Yamamoto, Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011, 2011/6/14, CERN, Switzerland

[その他]

ホームページ等

<http://ilc-epx.phys.tohoku.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 均 (Yamamoto, Hitoshi)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：00333782

### (2) 研究分担者

山下 了 (Yamashtia, Satoru)  
東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任教授  
研究者番号：60272465

藤井 恵介 (Fujii, Keisuke)  
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・准教授  
研究者番号：30181308

宮本 彰也 (Miyamoto, Akiya)  
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・准教授  
研究者番号：50174206

杉本 康博 (Sugimoto, Yasuhiro)  
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・講師

研究者番号：70196757

杉山 晃 (Sugiyama, Akira)  
佐賀大学・理工学部・教授  
研究者番号：80187674

竹下 徹 (Takeshita, Tohru)  
信州大学・理学部・教授  
研究者番号：70154995

川越 清以 (Kawagoe, Kiyotomo)  
九州大学・理学研究院・教授  
研究者番号：40183785

佐貫 智行 (Sanuki, Tomoyuki)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：70323491

### (3) 連携研究者

池田 博一 (Ikeda, Hirokazu)  
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙探査工学系・教授  
研究者番号：10132680

新井 康夫 (Arai, Yasuo)  
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：90167990

長嶺 忠 (Nagamine, Tadashi)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：30212111

田内 利明 (Tauchi, Toshiaki)  
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・准教授  
研究者番号：20154726