

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：82118

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25109006

研究課題名(和文)高輝度加速器実験のための素粒子イメージング

研究課題名(英文)Imaging of particles in high luminosity accelerator experiments

研究代表者

坪山 透(Tsuboyama, Toru)

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：80188622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 102,940,000円

研究成果の概要(和文)：SOI技術を用いたモノリシックPixelセンサー(SOIPIX)の開発を行った。2種類のセンサーFPIXとSOFISTを設計・製造し放射線照射とビーム試験で評価した。

(a) 二重SOI・LDD変更等の新技術で、1 MGyまでの放射線耐性が達成可能であることを示した。

(b) ビーム試験で(1) FPIX2センサー(ピクセルサイズ8 μ m \times 8 μ m)を用い、空間分解能0.7 μ mを得た(素粒子検出器としては世界最高)。(2) SOIFST2センサーを用い、ピクセルごとに集積した時間測定機能をの時間分解能を2 μ 秒を得た。粒子の通過位置・時間の同時測定機能を持つセンサーを世界に先駆けて実証した。

研究成果の概要(英文)：We have developed the monolithic pixel sensors, SOIPIX, for the high-energy accelerator experiments based on the SOI CMOS technology. After the basic studies, the FPIX and SOFIST sensors were produced and their performances were evaluated as follows:

(a) With a 120 GeV proton beam at FNAL, US, (1) the world highest spatial resolution of 0.7 μ m was obtained for the pixel size of 8 μ m \times 8 μ m, FPIX2. (2) With the SOFIST1 and SOFIST2 sensors, designed for studying the spatial resolution and hit-time resolution, we obtained the position resolution of 1.7 μ m for the 20 μ m \times 20 μ m pixel size and a hit time resolution of 2 μ sec, respectively. (b) The FPIX3 pixel sensor, adopting the double-SOI and modified LDD technologies, responded to the IR light even after 1 MGy irradiation.

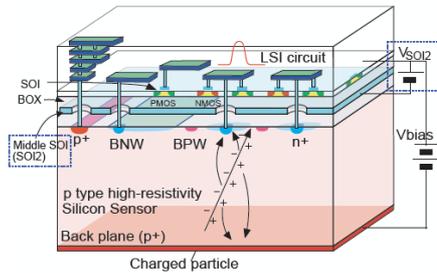
Based on these results, we produced an SOI pixel sensor with the 3D integration technology. The chip will satisfy the requirements of the ILC vertex detector. The study of this sensor will be continued.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：素粒子物理学実験 半導体デバイス SOI CMOS技術 ピクセルセンサー 放射線耐性 高位置分解能
高時間分解能 3次元積層技術

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、SOI 技術に基づきピクセルセンサーを構築する開発(SOIPIX)を平成17年に開始した。SOI(Silicon On Insulator)はシリコンウエファに酸化膜をもうけ、その上にCMOS回路を作るCMOS技術である。元々は高性能LSIを作るための技術だが、シリコンウエファを放射線センサとし、発生する電荷をCMOS回路で処理することで、モノシリック検出器を作ることができる。センサー部と回路部が密に結合されているため、高い信号雑音比を保ちつつ、ピクセル微細化・高機能化が可能である。本科研費を開始した時期には、電荷積分型センサーの実用化が始まったものの、ILC(国際リニアコライダー) LHC(大型ハドロンコライダー) SKEKB(スーパーKEKB)などの最先端の高エネルギー加速器実験に必要な、高速読み出し・高い放射線耐性を持た



せることができなかった。また、加速器実験で用いるためには、実験に応じた読み出し方式をセンサーに組み込む必要があった。

2. 研究の目的

こうした背景から、本科研費では、最先端加速器実験で使用可能な、位置並び時間分解能と放射線耐性を持つセンサーを開発することになった。特に、平成25年頃から使用可能になった二重SOI(DSOI)ウエファを使用し、ピクセルセンサーの高機能化を目指すことになった。

3. 研究の方法

A. 放射線耐性の研究

CMOS回路の放射線からの影響は主に酸化膜中に蓄積する正電荷に起因する。その影響を軽減するために、(A1) DSOI ウエファを採用し、追加シリコン層(SOI2)に負電圧を加えることで酸化膜中の正電荷の影響を相殺し、MOSFET 閾値の変動を緩和する。(A2) MOSFETの不純物濃度を調整(LDD 変更)して、照射による相互コンダクタンス (gm) 低下を軽減する。(A3) DSOI に高電圧パルスを加えて、酸化膜中の電荷をトンネル効果により軽減させる、などの方法が考えられる。本研究ではこうした方法を組み合わせることで放射線耐性向上を目指した。

B. ピクセルセンサーの高機能化

高エネルギー加速器実験に必要な(B1)ピクセルの微細化と位置分解能、(B2)高輝度実験に耐えるよう、ピクセルごとに時間分解能を持たせる。(B3)読み出し回路の高度化のための3D積層技術の確立。という三つの開発項目を中

心に研究を進めた。

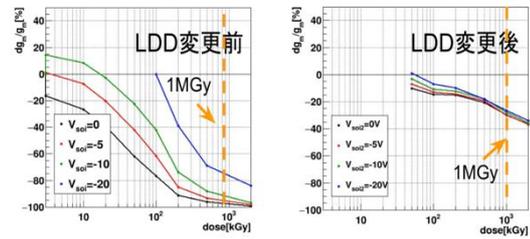
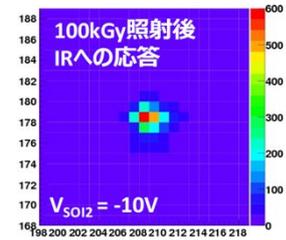
4. 研究成果

平成 25-26 年度

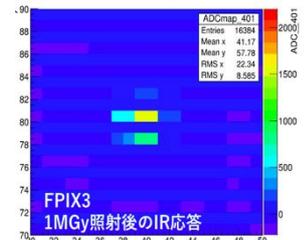
は、DSOI を用いた放射線耐性の基礎研究とピクセルセンサーの構成・概念設計を行った。放射線耐性に関し

ては、(A1) SOI2 に電圧を加えながら MOSFET の特性を測定した。その結果、MOSFET の動作特性は SOI2 の電圧の制御により 1000 kGy の照射後も回復できることがわかった。またピクセルセンサーの応答も 100 kGy の照射までは回復することが明らかになった[論文-8,9]。(B1)に関しては、ILCでの応用を考慮して、位置分解能 3 μm 、時間分解能 0.6 μsec の性能を持つセンサーを目標モデルとして、概念設計を開始した。ILC でのバックグラウンドを考慮すると、ピクセルごとに 2-4 の電荷と時間データを保持するメモリーが必要であることがわかった。平成 26 年には位置分解能評価のためのピクセルセンサー SO-FIST1 を設計製造した[論文-6]。

平成 27 年-29 年度はこうして得られた知見に基づいて、ピクセルセンサーの高度化を行な



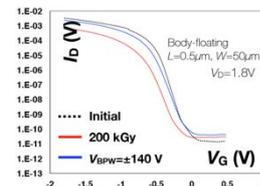
った。放射線耐性に関しては、(A2)ゲート酸化膜中に蓄積する電荷の影響を軽減するため、LDD のパラメータを変更することで 1 MGy 照射後の MOSFET の gm 低下を低減可能であることを確認した。この技術に基づいて作られた FPIX3



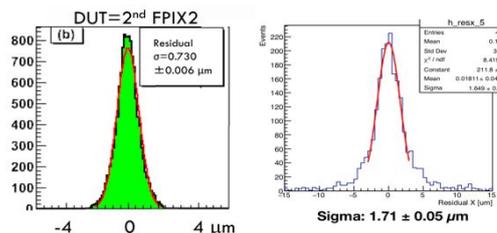
は 1 MGy 照射後も赤外線レーザー信号を観測できることを示した[論文-9]。

(A3) に関連しては、SOI を用いた評価でウエファに $\pm 140 \text{ V}$ のパルスを印加す

ることで 1kGy までの照射損傷が補償できることを示した[論文 3]。さらに DSOI を用いた研究では SOI2 に $\pm 140 \text{ V}$ のパルスを印加することで、200 kGy 照射後の PMOS の動作点変化が回復できることを示した。



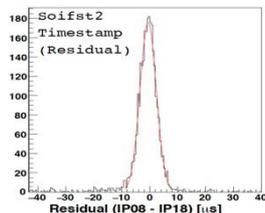
(B1)ピクセルセンサー開発においては 2017 年 2 月と 2018 年 2 月に米国 FNAL 研究所でビーム試験を行い、SOIPIX センサーの性能を評価した。2017 年 2 月の実験では、ピクセルサイズ $8\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$ の FPIX2 センサーと $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ の SOFIST1 センサーを用い、それぞれ $0.7\ \mu\text{m}$, $1.7\ \mu\text{m}$ という位置分解能を得た。



これは SOIPIX の高い信号/雑音比によるもので、特に $0.7\ \mu\text{m}$ は素粒子用軌跡測定器としては世界最高の位置分解能である[その他：プレスリリース]。

2018 年 2 月のビーム試験では (B2) 時間測定機能を持つ SOFIST2 の評価を行った。データ解析は継続中であるが、約 $2\ \mu\text{s}$ の時間分解能が確認されている[論文 8]最終目標には至っていないが、他のピクセルセンサーと比較しても、

10 倍以上のバックグラウンド除去が可能で、この方式の優位さを示すものである。



平成 29 年度には DSOI を用いて、位置・時間を同時に測定する SOFIST3・SOFIST4 ならびに高位置分解能を特徴とする FPIX4 の製造を行い、評価を開始した。これらのセンサーは LDD 変更を行い、SOI2 電圧をトランジスタの種類に応じて変えることもできるため、さらに高い放射線耐性が期待できる。SOFIST4 は (B3) の 3D 積層技術に基づき設計されたものであり、ピクセルセンサーの性能を高度化するための鍵となる試作となる [論文 3]。

研究計画で述べたように、SOIPIX の評価は科研費終了後も継続して行う予定である。

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 9 件)

[1] K. Hara, W. Aoyagi, S. Endo, H. Yamauchi, R. Abe, S. Iwanami, S. Honda, T. Tsuboyama, Y. Arai, I. Kurachi, T. Miyoshi, M. Yamada, “Radiation hardness of silicon-on-insulator pixel device”, to be published in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 査読有り。

[2] S. Ono, M. Yamada, Y. Arai, M. Togawa, T. Tsuboyama, I. Kurachi, Y. Ikegami, K. Hara, T. Li, A. Ishikawa, “Development of

a monolithic pixel sensor based on SOI technology for the ILC vertex detector”, to be published in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 査読有り。

[3] T. Tsuboyama, S. Ono, M. Yamada, Y. Arai, M. Togawa, I. Kurachi, Y. Ikegami, K. Hara, A. Ishikawa, M. Ikebe, M. Motoyoshi, “R&D status of SOI based pixel detector with 3D stacking readout”, to be published in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 査読有り。

[4] M. Yamada, S. Ono, T. Tsuboyama, Y. Arai, J. Haba, Y. Ikegami, I. Kurachi, M. Togawa, T. Mori, W. Aoyagi, S. Endo, K. Hara, S. Honda, D. Sekigawa, “Development of monolithic pixel detector with SOI technology for the ILC vertex detector”, Journal of Instrumentation D13(2018) C01037-C01037, 査読有り。

DOI: 10.1088/1748-0221/13/01/C01037

[5] S. Ono, M. Yamada, T. Tsuboyama, Y. Arai, I. Kurachi, M. Togawa, T. Mori, “A monolithic pixel sensor with fine space-time resolution based on silicon-on-insulator technology for the ILC vertex detector”, Proceedings of science, 055, 2017, 査読有り。

DOI: 10.22323/1.287.0055

[6] S. Ono, M. Togawa, R. Tsuji, T. Mori, M. Yamada, Y. Arai, T. Tsuboyama, K. Hanagaki, “Development of a pixel sensor with fine space-time resolution based on SOI technology for the ILC vertex detector”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 845(2017) 139-142, 査読有り。

DOI: 10.1016/j.nima.2016.04.119

[7] M. Yamada, Y. Arai, Y. Fujita, R. Hamasaki, Y. Ikegami, I. Kurachi, T. Miyoshi, R. Nishimura, K. Tsuchi, T. Tsuboyama, “Compensation for radiation damage of SOI pixel detector via tunneling”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 831(2016) 309-314, 査読有り。

DOI: 10.1016/j.nima.2016.04.110

[8] M. Asano, D. Sekigawa, K. Hara, W. Aoyagi, S. Honda, N. Tobita, Y. Arai, T. Miyoshi, I. Kurachi, T. Tsuboyama, M. Yamada, “Characteristics of nonirradiated and irradiated double SOI integration type pixel sensor”, Nuclear Instruments

and Methods in Physics Research A 831(2016) 315-321, 査読有り.

DOI: 10.1016/j.nima.2016.03.095

[9] S. Honda, K. Hara, K. Tsuchida, M. Asano, N. Tobita, T. Maeda, Y. Arai, T. Miyoshi, T. Tsuru, M. Ohno, N. Miura, H. Kasai, M. Okihara, "Total Ionization Damage Compensations in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensors", PoS(TIPP2014)039, July 2015, 査読有り.
DOI: 10.22323/1.213.0039

[学会発表](計 47 件)

[1] K. Hara, Development of Silicon-on-Insulator Pixel Devices, Inaugural Symposium of the Tomonaga Center of the History of the Universe University of Tsukuba, 2018 Mar 26-27

[2] K. Hara, Recent Developments of Silicon-on-Insulator Pixel Devices, 26th International Workshop on Vertex Detectors, Las Caldas (スペイン), 2017 Sep. 10-15.

[3] K. Hara, Radiation hardness of Silicon-on-Insulator Pixel Devices, 11th Hiroshima Conference on Semiconductor Tracking Detectors and SOIPIXEL2017, OIST, 沖縄科学技術大学院大学, 2017 Dec 10-15.

[4] S. Ono, Development of a monolithic pixel sensor based on SOI technology for the ILC vertex detector, 11th Hiroshima Conference on Semiconductor Tracking Detectors and SOIPIXEL2017, OIST, 沖縄科学技術大学院大学, 2017 Dec 10-15.

[5] M. Togawa, 素粒子実験における SOI を用いた半導体検出器, 日本物理学会第 72 回年次大会 (企画講演) 宇都宮大学 2017 年 9 月 12-13 日

[6] A. Ishikawa, Summary of Vertex Tracking Sim Reco, International Workshop on Future Linear Collider, Strasbourg (フランス) 27 Oct. 2017.

[7] S. Ono, ILC 実験用 SOI ピクセル検出器: SOFIST の開発と今後について, 第 8 回新学術領域研究会 宮崎大学, 2017 Jun 29-30

[8] S. Endo, 高エネルギービーム試験による SOI ピクセル検出器 FPIX2 の評価, 第 8 回新学術領域研究会 宮崎大学, 2017 Jun 29-30

[9] H. Yamauchi, 電荷積分型 SOI ピクセル検出器 FPIX2 のクロストーク評価, 第 8 回新

学術領域研究会 宮崎大学, 2017 Jun 29-30

[10] K. Hara, FNAL ビーム実験 FPIX2, 第 8 回新学術領域研究会 宮崎大学, 2017 June 29-30

[11] K. Hara, Fine Pixel Detector FPIX Developed Based on SOI Technology, International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics, 北京, May 22-26 2017

[12] S. Ono, A monolithic pixel sensor with fine space-time resolution based on SOI technology for the ILC vertex detector, International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics, 北京, May 22-26 2017

[13] M. Yamada, Development of a Monolithic Pixel Detector with SOI Technology for the ILC Vertex Detector, 19th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, Krakow(ポーランド), 2017 年 7 月 2-6 日

[14] M. Yamada, Development of Vertex Detector for ILC, FJPPL satellite meeting, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, Strasbourg(フランス), 9 May 2017

[15] Akimasa Ishikawa, Activities for Vertex Detector Developments in Japan, 2017 Americas Workshop on Linear Colliders, SLAC California, June. 2017.

[16] T. Tsuboyama, R&D status of pixel sensors based on SOI technology, Annual ILC detector meeting, KEK, 2017 年 4 月

[17] 山田 美帆, SOI 技術を用いた ILC 実験用モノリシック型ピクセル検出器の開発, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017 年 3 月 17-20 日

[18] 小野 峻, ILC バーテックス検出器に向けた高精度位置・時間分解能 SOI センサーの開発, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017 年 3 月 17-20 日

[19] M. Yamada, Development of a Monolithic Pixel Detector with SOI Technology for ILC Vertex Detector, OIST Mini Symposium, 沖縄科学技術大学院大学, 2017 年 4 月

[20] 関川 大介, 高精細 SOI ピクセル検出器 FPIX2 のビーム試験, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017 年 3 月 17-20 日

[21] 青柳 航, 放射線耐性の向上に向けた SOI ピクセル検出器の開発と評価, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017 年 3 月 17-20 日

[22] 山田 美帆, SOI 技術を用いた ILC 実験用モノリシック型ピクセル検出器の開発, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017 年 3 月 17-20 日

[23] 小野 峻, ILC バーテックス検出器に向けた高精度位置・時間分解能 SOI ピクセルセンサー開発, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017 年 3 月 17-20 日

[24] 青柳 航, 2 層埋込酸化膜 SOI 素子における TID 補償の系統的評価 II, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21-24 日

[25] 関川 大介, 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の粒子線応答, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21-24 日

[26] S. Ono, A monolithic pixel sensor with fine space-time resolution based on silicon-on-insulator technology for the ILC vertex detector, VERTEX 2016 conference, La Biodola, Isola d'Elba, Elba(イタリア), 2016 年 9 月 25-30 日

[27] M. Yamada, Development of a monolithic pixel detector with SOI technology for ILC vertex detector, Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, Karlsruhe University, 2016 年 9 月 26-30 日

[28] M. Togawa, SOI pixel detector for ILC SOFIST, ILC Detector Study Kickoff Meeting, KEK, 2016 年 6 月 18 日

[29] 青柳 航, 2 層埋込酸化膜 SOI 素子における TID 補償の系統的評価, 日本物理学会 71 年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日

[30] 関川 大介, 高エネルギー実験にむけた 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の放射線耐性評価, 日本物理学会 71 年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日

[31] T. Mori, ILC のためのセンサー SOFIST の動作試験, 日本物理学会 71 年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日

[32] 小野 峻, ILC バーテックス検出器に向けた SOI ピクセルセンサーの開発, 日本物理学会 71 年次大会, 東北学院大学, 2016 年

3 月 21 日

[33] K. Hara, Development of Fine Pixel Detector for HEP Experiments Based on Innovative Double SOI Technology, IEEE Nuclear Science Symposium, San Diego (米国), 2015 年 10 月 31 日-11 月 7 日

[34] M. Asano, Characteristics of non-irradiated and irradiated double SOI integration type pixel sensors, 10th International Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking detectors, Xi'an China, 2015 年 9 月 25-29 日

[35] 関川 大介, 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器のクロストーク特性評価, 日本物理学 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月 25-28 日

[36] 小野 峻, ILC 用バーテックス検出器に向けた SOI ピクセルセンサーの開発, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月 25 日-28 日

[37] M. Asano, Characteristics of Non-Irradiated and Irradiated Double SOI Integration Type Sensor, International Workshop on SOI Pixel Detector, 東北大学, 2015 年 6 月 3 日-6 日

[38] S. Honda, TID-Effect Compensation and Sensor-Circuit Cross-Talk Suppression in Double-SOI Devices, International Workshop on SOI Pixel Detector, 東北大学, 2015 年 6 月 3-6 日

[39] N. Tobita, Compensation for TID Damage in SOI Pixel Devices, International Workshop on SOI Pixel Detector, 東北大学, 2015 年 6 月 3-6 日

[40] S. Ono, SOI pixel sensor for the ILC vertex detector, International Workshop on SOI Pixel Detector, 東北大学, 2015 年 6 月 3-6 日

[41] 本多 俊介, 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の TID 放射線耐性の評価 (IV), 2015 年 日本物理学会春季大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月 21-24 日

[42] 浅野 麻莉, 高エネルギー実験のための 2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の特性評価 (II), 2015 年 日本物理学会春季大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月 21-24 日

[43] 飛田 尚志, SOI ピクセル検出器の放射

線損傷による回路特性の変動の評価 (),
2015 年 日本物理学会春季大会, 早稲田大学,
2015 年 3 月 21-24 日

[44] 浅野 麻莉, 高エネルギー実験のための
2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル
検出器の特性評価, 2014 年 日本物理学会秋
季大会, 佐賀大学, 2014 年 9 月 18-21 日

[45] 飛田尚志, SOI ピクセル検出器の放射線
損傷による回路特性の変動の評価, 2014 年
日本物理学会秋季大会, 佐賀大学, 2014 年 9
月 18-21 日

[46] K Hara, Ionization Damage Effects in
Double Silicon-on-Insulator Devices,
IEEE2013 TNS, Soule, Korea, 2013 年 10 月
31 日

[47] 本多 俊介, 2 層埋込酸化膜構造をもつ
SOI ピクセル検出器の TID 放射線耐性の評価
(III), 2013 年 日本物理学会秋季大会, 高
知大学, 2013 年 9 月 23 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://soipix.jp> 新学術科研費全般に
関する情報発信ページ(2018 年 5 月にページ
確認)

<http://rd.kek.jp/project/soi> SOIPIX グ
ループ全体の開発情報ページ(2018 年 5 月に
ページ確認)

[https://wiki.kek.jp/display/soigroup/S
O1+group+Home](https://wiki.kek.jp/display/soigroup/SO1+group+Home) 本研究班に関する開発情報
(2018 年 5 月にページ確認)

プレスリリース

“世界最高精度の放射線測定センサーを開
発”

[https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/
2017/06/23/pressrelease20170623.pdf](https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/2017/06/23/pressrelease20170623.pdf)

(KEK)

[http://www.tsukuba.ac.jp/attention-rese
arch/p201706231400.html](http://www.tsukuba.ac.jp/attention-research/p201706231400.html) (筑波大)

(2018 年 5 月にページ確認)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪山 透 (TSUBOYAMA, Toru)

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: 80188622

(2) 研究分担者

原 和彦 (HARA, Kazuhiko)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号: 20218613

池上 陽一 (IKEGAMI, Youichi)

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: 20222862

石川 明正 (ISHIKAWA, Akimasa)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号: 40452833

外川 学 (TOGAWA, Manabu)

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: 50455359

幅 淳二 (HABA, Junji)

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: 60180923

(3) 連携研究者

花垣 和則 (HANAGAKI, Kazunori)

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: 40448072

田窪 洋介 (TAKUBO, Yousuke)

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: 50423124

(4) 研究協力者

小野 峻 (ONO, Shun)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・研究員

研究者番号: 60603157

山田 美帆 (YAMADA, Miho)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・研究員

研究者番号: 60603157