

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月20日現在

機関番号：11301

研究種目：特別推進研究

研究期間：2007～2011

課題番号：19002003

研究課題名（和文） 光子ビームによるクォーク核物理の研究

研究課題名（英文） Quark Nuclear Physics with a Photon Beam

研究代表者

清水 肇 (SHIMIZU HAJIME)

東北大学・電子光理学研究センター・教授

研究者番号：20178982

研究成果の概要（和文）：本研究期間の最終段階で東日本大震災に遭遇し、現時点では本研究の目的達成には至っていないが、現在までに得られた研究成果について報告する。当初予定の大型ガンマ線検出器（FOREST）建設や標的システム、データ収集系の開発は完了し、これを用いた実験で得られたデータの解析を進め、目的達成を目指している。 $\eta$ メソン光生成反応に関する基本的なデータ取得と共に、 $\omega$ メソン生成閾値領域の詳細なデータに現れているように、これまでとは質の違うデータも得られている。また、次世代の大型検出器 BGOegg の建設は、震災をくぐり抜けてようやく完了した。BGOegg は SPring-8 への移設を終え、稼働を始めた。

研究成果の概要（英文）：We have not achieved our aims in this project because of immeasurable damage suffered from the East Japan Earthquake that took place at the end of FY2010. This is a progress report on the project up to date. We constructed a large detector system, FOREST, and developed a novel target system and a fast data-acquisition system to reach our goals. We obtained so far an excellent data set with a fine energy step in the threshold region of  $\omega$  photoproduction as well as the basic data for single  $\eta$  production. A next generation  $4\pi$  EM calorimeter, BGOegg, was completed, moved to SPring-8, and started operation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	52,800,000	15,840,000	68,640,000
2008年度	86,900,000	26,070,000	112,970,000
2009年度	90,700,000	27,210,000	117,910,000
2010年度	91,700,000	27,510,000	119,210,000
2011年度	19,400,000	5,820,000	25,220,000
総計	341,500,000	102,450,000	443,950,000

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：クォーク核物理、カイラル対称性、ペンタクォークバリオン

## 1. 研究開始当初の背景

私たちは、SPring-8/LEPS で発見した5つのクォークで構成されるペンタクォークバリオン $\Theta^+$ とは別のペンタクォークバリオンの候補を東北大学電子光理学研究センターの光子ビームを用いた実験で見つけた。それ

は、ストレンジネスを露わに含まない幅の狭いバリオン共鳴  $N^*(1670)$  である。

## 2. 研究の目的

光子ビームを用いて幅の狭いバリオン共鳴  $N^*(1670)$  の素性を明らかにし、ペンタク

オークバリオンに関する研究を深めると共に、光子ビームによる特徴的なクォーク核物理の研究を推し進め、原子核を形成するクォークの謎に迫る。

### 3. 研究の方法

まず、既存のガンマ線検出器を組み合わせて大立体角電磁カロリメータ FOREST を建設し、これを用いて、バリオン共鳴  $N^*(1670)$  の崩壊によって放出される  $\eta$  メソンの測定を行う。また、このメソン光生成反応実験の使用に耐える固体/液体水素・重水素標的を新たに開発する。更に、FOREST のための高速データ収集システムを開発する。

$N^*(1670)$  は、 $\pi^0$  メソンとも結合すると予想されるので、 $\pi$  チャンネルのデータもとる。これらのチャンネルでは、これまで複数の  $\pi^0$  によるバックグラウンドが大きな問題となっていた。FOREST のエネルギー分解能は良くはないが全立体角を覆っているので、 $\pi^0$  及び  $\eta$  チャンネルのデータはこれまでとは比べものにならない程 S/N 比がよくなる筈である。また、重水素のみならず水素標的を用いて  $\eta$  メソン光生成反応の詳細なデータをとり、このバリオン共鳴と陽子との結合の強さについても調べる。

全立体角を覆う電磁カロリメータの利点を活用して、光生成反応で作られたメソンの崩壊終状態に  $\pi^0$  が含まれるような場合の事象を重点的に研究することができる。例えば、 $\omega$  メソンは  $\pi^0\gamma$  ( $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$ ) を電磁カロリメータで捉えればよいが、FOREST のエネルギー分解能が悪いので、 $\pi^0\gamma$  では  $\omega$  メソンを同定することができない。しかし、FOREST 前方検出器で陽子のエネルギーを精度良く測定すれば同定できる。このときは、 $\omega \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$  チャンネルを用いてバックグラウンドを減らすことができる。また、 $\pi^0$  が検出できるので多重  $\pi$  事象を捉えることができる。

次に、これまでになく精密なクォーク核物理の研究を推進するために、FOREST 設計・建設・運転・解析の経験を踏まえ、次期大型電磁カロリメータ BGOegg を建設し、エネルギー分解能、位置分解能及び立体角の向上を図る。

### 4. 研究成果

本研究期間の最終段階で東日本大震災に遭遇し、現時点では本研究の目的達成には至っていない。震災では、本研究の主な研究手段である加速器に甚大な被害を受け、加速器の一部は損壊した。また、多くの測定器も破損した。このため、研究センターの復旧には膨大な労力と時間を要し、今日までに2年以上の歳月を費やしている。(この間、地下加速器施設から搬出した放射線防護用コンクリートブロックは 500 個・千トンに及んだ。

損壊した加速器の撤去、及び放射化物の仕分け・ラベル・保管作業を行い、2 千点を超える放射化物を地下管理区域に整理した。) 現在、新たに導入した入射器を加え、ようやく加速器の再稼働が可能になりつつある。本報告書では、このような復旧作業の間隙を縫って進めた本研究の、今日までに得られた研究成果について報告したい。

#### (1) 電磁カロリメータ FOREST の建設

図1は、国内に散在するガンマ線検出器を寄せ集めて建設期間約3年を費やして予定通りに完成し、実験に使われた FOREST 検出器の震災前の姿である。(総重量 5t、地震で一部損壊のため、現在補修中。)



図1. 震災前の FOREST 検出器

#### (2) 個体/液体水素・重水素標的の開発

FOREST 検出器はビーム軸方向の軸対称性をもっているため、ビーム軸に沿って挿入するタイプの個体/液体水素・重水素標的を新たに開発する必要があった。数々の困難を乗り越え、最終的には長さ 1m、外径 65mmφ、2mm 厚の純アルミパイプを手作りし、これにより冷凍機から約 1m 離れた標的点で 4.7K を達成し、径 61mmφ、厚さ 40mm の安定した固体/液体水素・重水素標的を実現した。

#### (3) 高速データ収集システムの開発

FOREST 用に新たにデータ収集 (DAQ) システムを開発した。FOREST の建設は段階的に行われたので、そのような状況下で柔軟に対応する DAQ システムの構築が必要であった。そのために、DAQ システムをネットワーク分散型とした。データ収集、データ構築、データの記録をネットワーク上に分散した複数のプロセスで並行的に行うシステムである。このことにより、収集するデータ量が増加しても複数のサブシステムを用意することができ、また、サブシステムの追加が容易で DAQ システム全体

に大幅な変更を加える必要がなく、検出器の建設状況に応じて柔軟に対応することが可能となった。震災前の記録では、1事象あたり平均 2.6 kByte のデータに対して、データ収集速度が 2kHz のとき、データ収集効率は 76%であった。

(4) 今日までに得られたデータ

平成 22 年度より、データ解析モードに入り、現在までに得られたデータは、 $2.5 \times 10^9$  ベントである。図 2 は、2つの  $\gamma$  線のみが FOREST で検出された場

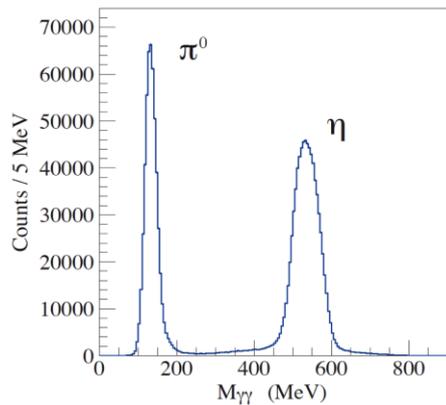


図 2. 2 光子不変質量分布

合の  $2\gamma$  不変質量分布である。ここでは欠損質量が陽子に対応する事象を選んでいる。 $\pi^0$  と  $\eta$  の間のバックグラウンドは著しく減少している。

陽子を標的とする  $\pi^0$  や  $\eta$  の光生成反応に関する基礎的なデータについては、標準的な結果が得られており、FOREST が正常に働いていることが確かめられ

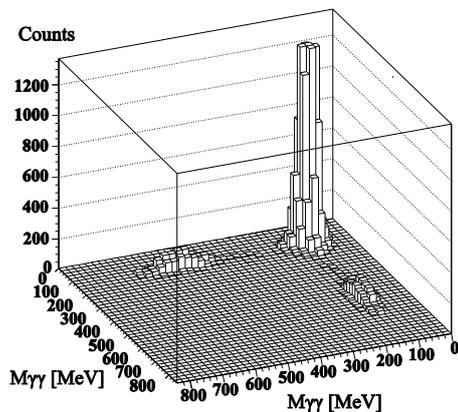


図 3. 4 光子事象。

ている。図 3 は、FOREST 実験で得られた 4 つの  $\gamma$  線の同時測定による事象の

3 次元プロットである。鋭いピークは  $\pi^0\pi^0$ 、小さい山は  $\pi^0\eta$  事象を示す。このデータから閾値近傍の  $\pi^0\eta$  事象を同定し、バリオンのカイラル対称性に関する議論を進めている。現時点では、理論の予想とは全く異なる結果を得ている。閾値近傍の共鳴の影響を実験・理論の両面から抑えて行く必要がある。

検出器 FOREST をうまく使うことによってこれまでのデータとは質の異なるデータが得られている。図 4 はその一

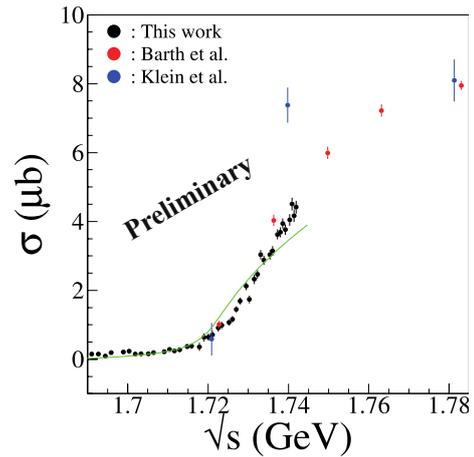


図 4.  $\omega$  メソン光生成全断面積

例で、閾値近傍のメソンの光生成全断面積を表している。これまでのデータは、図の赤と青で示されている。本研究で得られたこの FOREST データにより初めて  $\omega$ -N の散乱長を吟味することができるようになった。

FOREST は、多重  $\pi$  メソンの光生成反応の測定においても威力を発揮している。陽子を標的とする多重  $\pi$  メソン光生成反応 ( $\gamma p \rightarrow \pi^+ \pi^+ n$ ) のこれまでのデータは 800 MeV 以下に限られており、

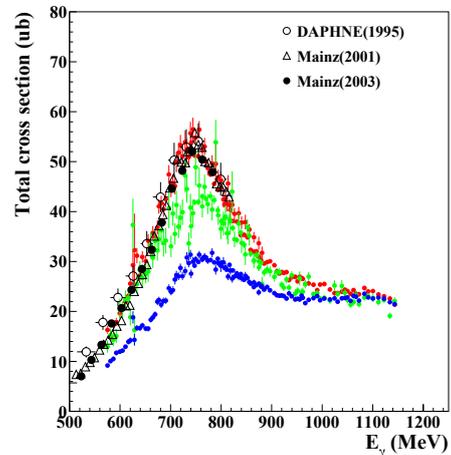


図 5. 多重  $\pi$  メソン光生成反応全断面積

図 5 の赤丸は FOREST 実験で得られたデータである。青、及び緑は重水素中の陽子、及び中性子を標的とする多重  $\pi$  メソン光生成反応のデータであり、全く新しいデータである。

これらのデータの解析を進め、クォーク核物理の飛躍的発展を目指している。なお、あらゆる準備研究は、「解析ノート」に随時まとめられている。今日までに積み上げられた解析ノートは No. 323 を数え、10 編ずつ適宜印刷製本して誰もが使えるようになっている。現時点で、No.299 までの 30 冊が製本されている。

(5) 電磁カロリメータ BGOegg の建設

BGOegg とは、1320 本の BGO 単結晶シンチレーション検出器（単結晶総重量約 2t）を組み込んだ全立体角を覆うガンマ線検出器のことである。震災前に、電子光物理学研究センターの陽電子ビームを用いてその一部からなるプロトタイプ検出器のエネルギー分解能を測定し、オーバーオール分解能 1.3%@1GeV、及び位置分解能 3.1mm@1GeV という結果を得た。これは、GeV 領域のガンマ線検出器の分解能としては世界最高レベルにランクされるものである。図 6 は BGOegg を SPring-8/LEPS2 ビームライ

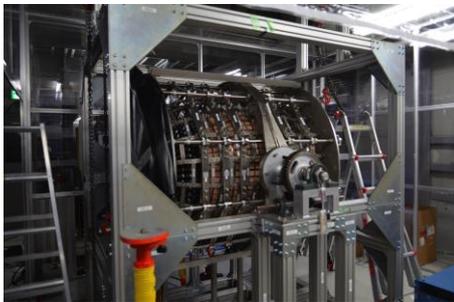


図 6. BGOegg@SPring-8/LEPS2

ンに設置したときの写真である。BGOegg は 2012 年 11 月までにその建設（1320 本の BGO 単結晶検出器の装着）を終え、2012 年 12 月に電子光物理学研究センターから SPring-8 に移設し、LEPS2 ビームライン上に設置された。私たちは、大阪大学核物理研究センターと共同して、2013 年 1 月下旬に行われた LEPS2 ビームラインのコミッションングを成功裏に完了させた。引き続き、2 月上旬には調整中の BGOegg の一部を用いて LEPS2 ビームによって生成された  $\pi^0$  メソンを検出することに成功した。図 7 は、2013 年 2 月 2 日に得られたデータで、鋭いピークは  $\pi^0$  メソンに対応

している。

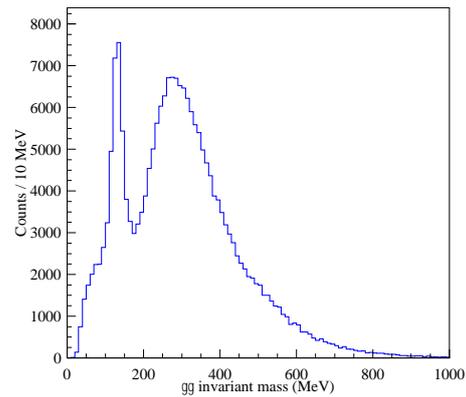


図 7. BGOegg が捉えた  $\pi^0$  メソン

今後、データ解析を推し進め、本研究の目的を達成すると共に、研究場所を SPring-8/LEPS2 に移動し、GeV 領域で世界最高のエネルギー分解能をもつ BGOegg 検出器と世界最高性能を誇る偏極レーザー電子光ビームとを組み合わせることによってこれまでに実現できなかった未踏領域のクォーク核物理研究を推進する。

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  $\pi^0$  and  $\eta$  photoproduction on the deuteron at ELPH, Tohoku University, T.Ishikawa(1/35), H.Fujimura(2/35), J.Kasagi(9/35), M.Miyabe(14/35), H.Shimizu(26/35), H.Yamazaki(33/35) et al., 査読有  
DOI: 10.1007/s00601-013-0676-3 (2013).
- ② Study for  $\omega$ -N interaction through  $\omega$  photoproduction near the threshold, R.Hashimoto, H.Fujimura(2/35), T.Ishikawa(6/35), J.Kasagi(9/35), M.Miyabe(14/35), H.Shimizu(26/35), H.Yamazaki(33/35), et al., 査読有  
DOI: 10.1007/s00601-013-0658-5 (2013).
- ③ A detailed test of a BSO calorimeter with 100—800 MeV positrons, T.Ishikawa(1/18), H.Fujimura(2/18), J.Kasagi(5/18), H.Shimizu(12/18), H.Yamazaki(17/18), et al., 査読有  
Nucl. Instr. Meth. A694 (2012) 348.
- ④ Spin-density matrix elements for  $\gamma p \rightarrow K^* \Sigma^+$  at  $E_\gamma = 1.85\text{—}3.0$  GeV with evidence for the  $\kappa(800)$  meson exchange, S.H.Hwang, H.Fujimura(10/43),

- T.Ishikawa(16/43), M.Miyabe(23/43), et al., 査読有  
Phys. Rev. Lett.108, 092001 (2012).
- ⑤ Near-threshold  $\Lambda(1520)$  production by the  $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda(1520)$  reaction at forward  $K^+$  angles, H.Kohri, H.Fujimura(10/59), T.Ishikawa(17/59), M.Miyabe(29/59), H.Shimizu(47/59) et al., 査読有  
Phys. Rev. Lett.104, 172001 (2010).
- ⑥ The second GeV tagged photon beamline at ELPH, T.Ishikawa(1/27), H.Fujimura(2/27), J.Kasagi(5/27), H.Shimizu(20/27), H.Yamazaki(25/27), et al., 査読有  
Nucl. Instr. Meth. A622 (2010) 1-10.
- ⑦ Measurement of spin-density matrix elements for  $\phi$ -meson photoproduction from protons and deuterons near threshold, W.C.Chang, H.Fujimura(8/56), T.Ishikawa(16/56), M.Miyabe(26/56), H.Shimizu(40/56), et al., 査読有  
Phys. Rev. C82, 015205 (2010).
- ⑧  $\eta$  photo-production on the deuteron at LNS, Tohoku University, T.Ishikawa, Int. J. Mod. Phys. E 19, 2393 (2010).
- ⑨ Measurement of the incoherent  $\gamma d \rightarrow \phi p n$  photoproduction near threshold, W.C.Chang, M.Miyabe(2/55), H.Fujimura(10/55), T.Ishikawa(18/55), H.Shimizu(42/55), et al., 査読有  
Phys. Lett. B684 (2010) 6-10.
- ⑩ Energy calibration of tagged photons by the  $d(\gamma, \pi^- pp)$  reaction, H.Y.Han, T.Ishikawa(7/26), H.Shimizu(19/26), H.Yamazaki(26/26) et al., 査読有  
Chi. Phys. C34, 35 (2010).

[学会発表] (計 83 件)

- ① H.Shimizu, “Experiments at ELPH/Sendai before and after the disaster”, 14th International Workshop on the Physics of Excited Nucleons, May 29, 2013, Peniscola, Valencia, Spain.
- ② H.Shimizu, “Physics programs at ELPH-Tohoku”, International School for Strangeness Nuclear Physics, Feb.20, 2013, Sendai.
- ③ M.Miyabe, “Recent results from LEPS and ELPH”, the 8th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, Oct.16, 2012, Beijing, China.
- ④ T.Ishikawa, “Baryon resonances studied via  $\eta$  and  $\pi^0$  photoproduction”, ECT\* Workshop on Strange Hadronic Matter, Sep.28, 2011, Trento, Italy.
- ⑤ H.Shimizu, “Quark nuclear physics

with a photon beam at Elphs Lab”, N-N Interaction and the Nuclear Many-Body Problem, Nov.23, 2010, Tata Institute, Mumbai, India.

- ⑥ H.Shimizu, “Nuclear science at Tohoku University with an electron-photon beam”, International Symposium on Nuclear Physics in Asia, Oct.14, 2010, Beihang University, Beijing, China.
- ⑦ H.Shimizu, “University-based accelerator facilities for quark nuclear physics at Sendai”, The first ANPhA Symposium, Jan.18, 2010, J-PARC, Tokai.
- ⑧ H.Shimizu, “Photoproduction of  $\eta\pi^0$  on the deuteron at 1 GeV”, International Workshop on Narrow Nucleon Resonances, Jun.8, 2009, Edinburgh, England.
- ⑨ T.Ishikawa, “Meson photoproduction experiments with FOREST at LNS”, Korean Physical Society Meeting, Oct.18, 2007, Seogwipo, Korea.
- ⑩ H.Shimizu, “ $N^*(1670)$  observed at LNS, Sendai”, 11th International Workshop on the Physics of Excited Nucleons, Sep.6, 2007, Bonn, Germany.

[その他]

ホームページ等

<http://www.lns.tohoku.ac.jp/~hadron/forest.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

清水 肇 (SHIMIZU HAJIME)

東北大学・電子光理学研究センター・教授  
研究者番号：20178982

### (2) 研究分担者

石川 貴嗣 (ISHIKAWA TAKATSUGU)

東北大学・電子光理学研究センター・助教  
研究者番号：40400220

山崎 寛仁 (YAMAZAKI HIROHITO)

東北大学・電子光理学研究センター・助教  
研究者番号：90260413

宮部 学 (MIYABE MANABU)

東北大学・電子光理学研究センター・助教  
研究者番号：10613672

笠木 治郎太 (KASAGI JIROUTA)

東北大学・名誉教授  
研究者番号：10016181

### (3) 連携研究者

藤村 寿子 (FUJIMURA HISAKO)

和歌山県立医科大学・講師

研究者番号：90378589