

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19340056

研究課題名（和文） 二光子過程断面積の高統計測定による中間子の性質・構造の解明

研究課題名（英文） Study of meson properties and structures through high-statistics measurement of cross sections in two-photon production

研究代表者

渡邊 靖志 (WATANABE YASUSHI)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：40126199

研究成果の概要（和文）： Bファクトリー実験 Belle に於いて、二光子過程に依る中間子対生成反応、 $\gamma\gamma\rightarrow\pi^+\pi^-$ ,  $\pi^0\pi^0$ ,  $\pi^0\eta$ ,  $\eta\eta$  の微分断面積を測定し、その解析を行った。これらのデータは従来の実験の2-3桁上の高統計データであり、これに匹敵する精度としては世界で唯一のものである。これらのデータの解析により、低エネルギー領域では、謎の多いスカラー中間子の構造や性質の解明等への重要な手掛かりを得た。また、高エネルギー領域では、強い力の理論、量子色力学の高エネルギー極限の非包含的過程での予言の定量的な検証がはじめて可能となった。

研究成果の概要（英文）： We have measured and analyzed differential cross sections of two-photon production of meson pairs:  $\gamma\gamma\rightarrow\pi^+\pi^-$ ,  $\pi^0\pi^0$ ,  $\pi^0\eta$  and  $\eta\eta$  at B-factory experiment, Belle. These data are of two to three orders of magnitude higher statistics than previous experiments and of only ones presently available with this level of statistics in the world. These data would shed light to properties and structures of hitherto mysterious low mass scalar mesons in the low energy region. Furthermore, they provide direct mean to check predictions on exclusive processes from QCD (Quantum Chromodynamics, theory of strong interaction) in the high energy region.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2008年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2009年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：素粒子物理学実験

科研費の分科・細目：数物系科学・物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理(4301)

キーワード：二光子過程，スカラー中間子の性質と構造，量子色力学，Bファクトリー実験，強い相互作用の真空，高統計の断面積のデータ，中間子対生成反応，共鳴粒子

## 1. 研究開始当初の背景

(1) Bファクトリー実験(ちくぼのKEKB加速器、Belle粒子検出器)は、CP非保存(物質・反物質間の微妙な対称性の破れ)の研究を主目的として1999年にデータ取得を開始した。その目的のためには、従来の2桁以上高い輝度(ルミノシティ)が必要であり、その主目的以外の物理でも質の高いデータを提供し続けることになった。

(2) とくに、二光子過程の中間子対生成反応の研究では、なぜか好敵手のBaBar実験(米国カリフォルニア州、SLAC研究所 PEP-II 加速器、BaBar 測定器)からはほとんど論文が出ず、Belle 実験の独壇場となっていて、世界で唯一の高統計データを提供してきている。

(3) これらのデータは、低エネルギー領域では、謎の多いスカラー中間子の構造や性質の解明等への重要な手掛かりを与える。また、高エネルギー領域では、強い力の理論、量子色力学の高エネルギー極限での非包含的過程での予言の定量的な検証がはじめて可能となる。

## 2. 研究の目的

(1) 中間子の性質・構造、とくに低質量( $\sim 1\text{GeV}/c^2$ 以下)のスカラー中間子の存否、性質を圧倒的な高統計の二光子過程生成データを取得・解析し、詳細な振幅解析を行って明らかにする。

(2) 具体的には、Belle実験のデータを用いて、解析の可能性が示された $\gamma\gamma\rightarrow\pi^0\pi^0, \pi^0\eta, \eta\eta$ という、終状態粒子が全て中性粒子である過程(終状態がすべて光子の崩壊モード)について微分断面積の測定を行う。とくに $\pi^0\pi^0$ 過程の低質量領域( $<1\text{GeV}/c^2$ )のバックグラウンドを低減するカットを考案し、できるだけ低質量まで高統計の微分断面積を測定する。終状態粒子が全て中性粒子である過程は、 $\gamma\gamma\rightarrow\pi^+\pi^-$ 等の荷電対生成反応と比較して、測定可能な重心系の角度領域が広いという特徴があり、結果的に振幅解析への感度がより高い。これは、光子の運動量測定にエンドキヤップ検出器も使用できることによる。

(3) これらの結果を振幅解析することによって、低質量領域( $<1.5\text{GeV}$ )の振幅の振る舞いを決定し、 $\sigma$ 中間子等のスカラー粒子の存否等について決定的な結果を出す。強調すべきは、既に解析済みの $\pi^+\pi^-$ のデータにさらに $\pi^0\pi^0, \pi^0\eta, \eta\eta$ の高統計のデータが加わることによりアイソスピンが0, 1, 2の成分の振幅を完全に決定でき

ることである。振幅解析は今のところ $1.4\text{GeV}/c^2$ 以上には適用できない。しかしながら、角運動量が2より大きい成分をパラメトライズすることによってこれを $2\text{GeV}/c^2$ 領域まで解析範囲を広げ、その領域での共鳴状態の存否、性質・構造を解明する。

(4) 高エネルギー領域( $W > 2.4\text{GeV}$ )での高統計の $\gamma\gamma\rightarrow\pi^0\pi^0, \pi^0\eta, \eta\eta$ のデータは量子色力学(QCD)の高エネルギー極限での予言との定量的な比較を可能にする。

具体的には、重心系での角分布とQCD極限予言値 $\sin^4\theta^*$ との比較、積分断面積の $W$ のべき乗( $W^m$ )依存性の有無、および、そのべき(n)の値、さらに、そこでの $\pi^0\eta, \eta\eta$ と $\pi^0\pi^0$ との断面積の比を求め、定量的にQCD等の予言と比較する。

## 3. 研究の方法

(1) まずは、解析が終わったばかりの $\gamma\gamma\rightarrow\pi^+\pi^-$ の結果を振幅解析に入力し、高精度の振幅の決定結果を論文としてまとめる。それと並行して、 $\gamma\gamma\rightarrow\pi^0\pi^0, \pi^0\eta, \eta\eta$ の解析を進める。まずは光子のエネルギーカット等を工夫して $\pi^0\pi^0$ の低質量領域のバックグラウンドを減らす努力をする。

(2)  $\gamma\gamma\rightarrow\pi^0\pi^0, \pi^0\eta, \eta\eta$ の解析の第一の問題点は、データがraw dataのままであり、skim(目的の事象だけ選び出し再構成すること)されていないことである。そこで、我々は独自にraw dataから荷電粒子の軌跡のない(少ない)事象を選び出し、そこに、2個以上の光子、あるいは1個以上の $\pi^0$ が存在する場合にデータを蓄積する、こうして得られるNeutral Skimを最終的に $393\text{fb}^{-1}$ の取得データについて構築する。

(3) このNeutral Skimのデータから順次 $\gamma\gamma\rightarrow\pi^0\pi^0, \pi^0\eta, \eta\eta$ のデータを解析して高統計の微分断面積を測定し解析して、その結果を論文として発表する。計算機システムはskimmingの目処が立ち次第 $\pi^0\pi^0, \pi^0\eta, \eta\eta$ のモンテカルロシミュレーションデータ生成に駆使する。

## 4. 研究成果

(1) 図1に積分ルミノシティ $223\text{fb}^{-1}$ の $\gamma\gamma\rightarrow\pi^0\pi^0$ の積分断面積、図2にいくつかのエネルギービンでの微分断面積を示す。従来の実験(Crystal Ball)の約2000倍の統計量の威力が分かる。以前Belleが測定した $\gamma\gamma\rightarrow\pi^+\pi^-$ のデータと $\gamma\gamma\rightarrow\pi^0\pi^0$ のデータはアイソスピン依存性が異なって互いに相補的である。さらに前者の微分断面積が

$|\cos \theta^*| < 0.6$  までしかカバーしないのに対し、後者では  $|\cos \theta^*| < 0.8$  までをカバーしていて振幅解析の部分波の弁別により高い感度をもつ。

低エネルギー側は、0.7 GeV までカバーされている。これより低いエネルギーでは、ビームバックグラウンドからの光子のヒットが急速に増大し、かつ、信号の断面積は小さいので、十分な精度で測定することが出来なかった。また、高エネルギー側については、図2には示されていないが(図6で参照されている)、4.0 GeV まで測定を行い、(4)で述べるようなQCDの予言との比較を行った。

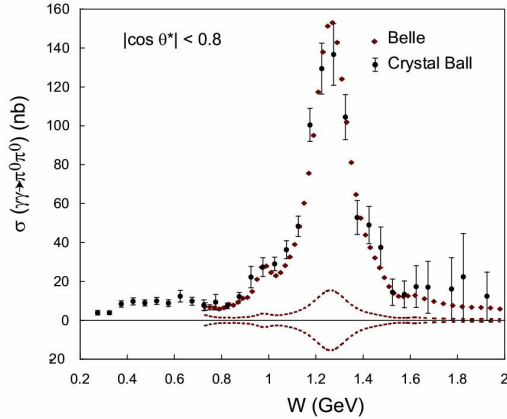


図1  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$  の積分断面積

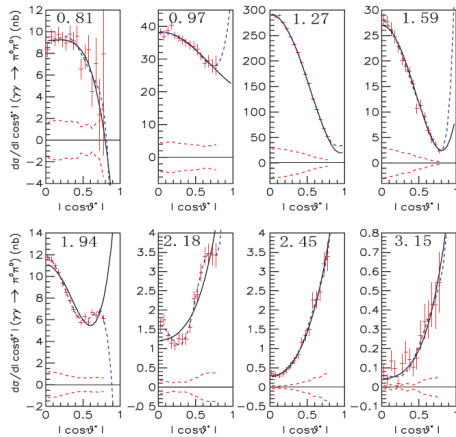


図2 いくつかのエネルギービン(単位: GeV)での  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$  の微分断面積。黒の実線と点線はフィット結果, 赤の点線は系統誤差。

(2) Belle の  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$  と  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$  のデータを振幅解析のプログラムに加えて解析したアイソスピンが0の成分の結果を図3に示す。  $D_2$  波はきれいな反時計回りの円を描き,  $f_2(1270)$  中間子共鳴がきれいに見えてい

る。これに対し S 波はより複雑な動きをしているが。  $\sigma$  中間子,  $f_0(980)$  中間子,  $f_0(1300)$  中間子? の共鳴の影響が見えていると思われる。振幅解析から  $f_0(980)$  中間子の二光子幅を求めると

$\Gamma_{\gamma\gamma} = 100 - 540$  eV という値が得られた。これは  $f_0(980)$  が通常の up や down-quark の対ではなく, 4-quark state であることと矛盾しない。

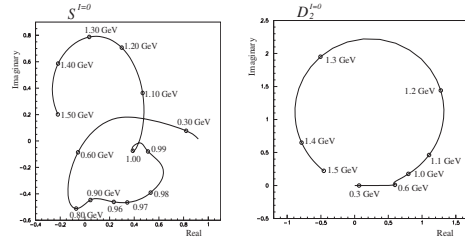


図3 振幅解析の Argand 図(縦軸が振幅の虚数部分, 横軸は実数部分)。左が I=0 成分の S 波, 右が I=0 成分の  $D_2$  波

これらの結果は振幅解析の第一人者で知られる M. Pennington 教授との共同研究によって得られたものであるが, 教授が超多忙になって未だ投稿論文となっていないのが惜しまれる。

(3) 次に, 積分ルミノシティ  $223 \text{ fb}^{-1}$  の全中性終状態の skimmed data を解析して,  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\eta$  の積分断面積(図4)および微分断面積を求めた。I=1 の正パリティの中間子,  $a_0(980)$ ,  $a_2(1370)$  がきれいに見えている。

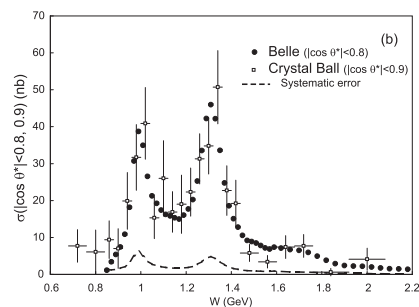


図4  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\eta$  積分断面積

(4) Belle 実験での高統計のおかげで, 高エネルギー領域での量子色力学(QCD) 予言の検証が可能になった。図5に角分布とQCDの項エネルギー極限での予言  $\sin^4 \theta^*$  依存性との比較を示す。データはQCD予言の依存性に近づいているように見える。図6には, 積分断面積のエネルギー(W)依存性を示す。  $\pi^0\pi^0$

と同様に、重心系エネルギーのべき乗で減少することを示し、 $\pi^0\pi^0$ との比も QCD 予言やハンドバッグ模型の予言と矛盾しない。

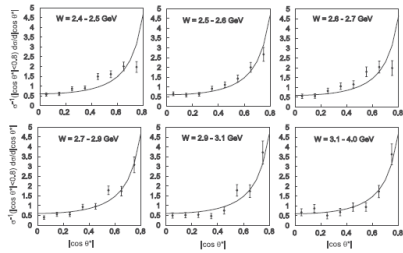


図 5  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\eta$  の角分布と QCD の QCD 予言  $\sin^{-4}\theta^*$  (実線) との比較

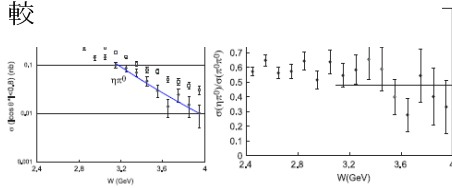


図 6  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$  (白丸),  $\pi^0\eta$  (黒丸) の積分断面積の W 依存性(左)。比( $\pi^0\eta/\pi^0\pi^0$ ) (右)。

(5) さらに統計を  $393 \text{ fb}^{-1}$  に増やし、 $\gamma\gamma \rightarrow \eta\eta$  の解析を行い、積分断面積(図 7)および微分断面積を求めた。これは世界初の測定である。 $f_2(1270)$  と  $f_2'(1525)$  他の構造がきれいに見えている。この過程に関して、他の過程と同様の解析を行なって投稿論文のドラフトが書かれた。現在、それをグループ内で校正中である。

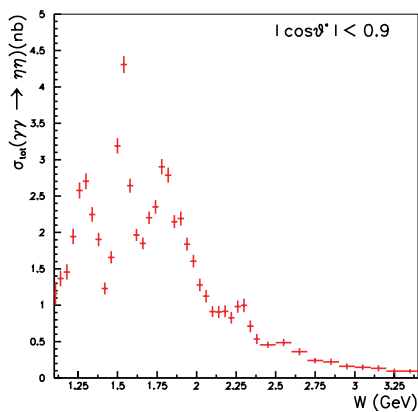


図 7  $\gamma\gamma \rightarrow \eta\eta$  の積分断面積

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① S. Uehara(1 番目), Y. Watanabe(110 番目) *et al.* (全 118 名). Observation of a charmonium-like enhancement in the  $\gamma\gamma \rightarrow \omega J/\psi$  process, Phys. Rev. Lett. 104, 092001 (2010) (査読あり).
- ② S. Uehara(1 番目), Y. Watanabe(2 番目), *et al.* (全 116 名). High-statistics study of  $\eta\pi^0$  production in two-photon collisions, Phys. Rev. D 80 032001 (2009) (査読あり).
- ③ S. Uehara(1 番目), Y. Watanabe(2 番目) *et al.* (全 104 名). High statistics study of neutral-pion pair production in two-photon collisions, Phys. Rev. D 79, 062009 (2009) (査読あり).
- ④ S. Uehara(1 番目), Y. Watanabe(2 番目) *et al.* (全 131 名). High statistics measurement of neutral-pion pair production in two-photon collisions, Phys. Rev. D 78, 062004 (2009) (査読あり).
- ⑤ M. Pennington, T. Mori, S. Uehara and Y. Watanabe, Amplitude analysis of high statistics results on  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$  and two-photon width of isoscalar mesons, Eur. Phys. Rev. J. C 58 1-18 (2008) (査読あり).
- ⑥ T. Mori(1 番目), S. Uehara(2 番目), Y. Watanabe(3 番目) *et al.* (全 158 名). High Statistics Measurement of the Cross Section of  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$  Production, J. Phys. Soc. Jpn, 76, 074102 (2007) (査読あり).

[学会発表] (計 11 件)

- ① 上原貞治, 二光子過程における  $\eta$  中間子対生成反応の測定, 日本物理学会, 2010 年 3 月 23 日, 岡山大学.
- ② 中澤秀介, 渡邊靖志, 上原貞治, Recent two-photon results at Belle, Lake Louise Winter Institute, 2010 年 2 月 15-20 日, Alberta, カナダ.
- ③ 上原貞治, Review of recent results on XYZ from Belle and BaBar, 13th International Conference on Hadron Spectroscopy (HADRON 2009), 2009 年 11 月 30 日-12 月 4 日, Tallahassee, フロリダ州立大学, アメリカ合衆国.
- ④ 中澤秀介, 渡邊靖志, 上原貞治, Measurement of two-photon processes, International Workshop on  $e^+e^-$  collisions from Phi to Psi (PhiPsi09), 2009 年 10 月 13-16 日, 高能研究所, 北京, 中国.
- ⑤ 渡邊靖志, Two photon collisions at Belle and low mass mesons, ハドロンの

構造と相互作用2009, 2009年8月24-25日, 東京家政大学.

- ⑥ 渡邊靖志, 高統計二光子過程パイ中間子生成断面積測定による振幅解析, 2009年3月28日, 日本物理学会, 立教大学.
- ⑦ 上原貞治, Charmonium production in two-photon processes at Belle, International Workshop on Heavy Quarkonia 2008 (QWG 6), 2008年12月2-5日, 奈良女子大学.
- ⑧ J. Dalseno, 渡邊靖志、上原貞治, High-statistics measurement of neutral pion-pair production in two-photon collisions, ポスターセッション, 34th International Conference on High Energy Physics (ICHEP08), 2008年7月30日-8月5日, Philadelphia, PA, アメリカ合衆国.
- ⑨ 上原貞治, H Study of exotic hadrons with electron-positron and two-photon collisions at Belle, Challenge to New Exotic Hadrons, 2008年7月30-31日, 大阪大学核物理研究センター.
- ⑩ 中澤秀介、渡邊靖志、上原貞治、**Review of 2-photon results from BELLE, International Workshop on e+e- collisions from Phi to Psi (PhiPsi08)**, 2008年4月4-10日, Laboratori Nazionali di Frascati, イタリア.
- ⑪ 上原貞治, Study of  $\pi\pi$  production in two-photon collisions at Belle, PHOTON2007, 2007年7月9-13日, パリ第4大学, フランス.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡邊 靖志 (WATANABE YASUSHI)  
神奈川大学・工学部・教授  
研究者番号: 40126199

### (2) 研究分担者

上原 貞治 (UEHATA SADA HARU)  
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: 70176626

### (3) 研究協力者

PENNINGTON MIKE  
Durham University, Department of  
Physics, Professor, イギリス  
中澤 秀介 (NAKAZAWA HIDEYUKI)  
National Central University, Dept. of  
Physics, Taiwan, Research associate