

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247037

研究課題名(和文) FNALドレル・ヤン実験SeaQuestによる陽子のクォーク反クォーク構造の研究

研究課題名(英文) Study of quark-antiquark structure of the proton by Drell-Yan experiment  
SeaQuest at FNAL

研究代表者

柴田 利明 (Shibata, Toshi-Aki)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：80251601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,120,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、陽子の中の反クォークのフレーバー非対称性を、アメリカ・フェルミ国立加速器研究所におけるドレル・ヤン実験SeaQuestによって測定した。磁気スペクトロメータを実験グループで製作し、120 GeV 陽子ビームを用いてドレル・ヤン反応を起こし、終状態のミュオン対を測定した。本研究期間の最終年に、実験のビームタイムを完了することができた。すでに約50%のデータを解析しており、国際会議で発表している。測定した全領域において、陽子の中の反ダウクォークは反アップクォークよりも多く、反クォークのフレーバー非対称性が従来よりも一層顕著となった。

研究成果の概要(英文)：We measured the flavor asymmetry of anti-quarks in the proton by Drell-Yan experiment SeaQuest at Fermi Accelerator Laboratory. We built a magnetic spectrometer and muon pair from Drell-Yan process was measured using the 120 GeV proton beam. We were able to complete the data-taking of the experiment by the final year of this KAKENHI project. About 50% of the data were already analysed. The result was presented at international conferences. In all the measured region, the amount of anti-down quarks is larger than that of anti-up quarks, which gave further evidence for flavor asymmetry of the sea quarks.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：反クォーク フレーバー非対称性 陽子 海クォーク ドレル・ヤン過程 陽子ビーム フェルミ国立加速器研究所 陽子スピンのパズル

### 1. 研究開始当初の背景

本研究の開始前には、高エネルギーのミュオン散乱で反クォークのフレーバー非対称性が発見された実験1つと、陽子ビームによるドレル・ヤン反応の実験2つがあった。ミュオン散乱は、本研究の研究代表者が参加した CERN の NMC 実験で、この実験により、陽子内では反ダウンクォークの方が反アップクォークよりも多いことが明らかとなった。これは構造関数を Bjorken  $x$  についての積分した結果から得られた結論である。

その後、CERN とフェルミ国立加速器研究所(FNAL)の陽子ビームを用いたドレル・ヤン反応で、いずれも反ダウンクォークの方が反アップクォークより多いという結果が、Bjorken  $x$  の関数として得られている。

量子色力学(QCD)は、色電荷を反応の結合定数としているが、色電荷はクォークのフレーバーに依らない、という考えによってQCDは設計されているので、このフレーバー非対称の現象をどのように説明できるか、陽子内の多体効果で説明できるか、は QCD の根幹に関わる問題である。

FNAL における以前のドレル・ヤン実験の結果では、Bjorken  $x$  の 0.2 の近傍では、反ダウンクォークと反アップクォークの比は 1.7 程度であるが、 $x$ が増加するとこの比は減少し、比の測定の中央値が 1.0 より小さくなっているが、統計誤差が大きいため実際に 1.0 より小さくなるかどうかについて結論が出ていない。この問題は今回の実験の動機の一つとなっている。

本研究に先立つ科研費基盤研究(A)(2009-2012)により実験装置の建設とテストビームタイムが完了し、今回の科研費によって実際のデータ取得が始まることになった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、陽子ビームと陽子標的および重陽子標的のドレル・ヤン反応によって、核子内の反ダウンクォークと反アップクォークの非対称度、すなわち両者の数の比を従来よりも広い Bjorken  $x$  の領域で測定することにある。

新しく建設した磁気スペクトロメータは、測定の立体角が大きく、Bjorken  $x$  を 0.58 まで拡張することができる。以前の FNAL での実験は 800 GeV の陽子ビームを用いたのに対し、今回は 120 GeV であるため、反応断面積が大きいという特長がある。

この実験では、同時にドレル・ヤン反応の角度分布も測定する。それにより、反クォークが持つ軌道角運動量についての研究を行う。

陽子のスピン構造は、「陽子スピンのパズル」として様々な実験手法で研究されてきた。その端緒は、CERN のミュオン散乱実験 EMC で、陽子スピンに対するクォークスピ

ンの寄与がたいへん小さいことが明らかになったことにある。

陽子スピンのパズルに関して、反クォーク、ないしは海クォークの軌道角運動量がどの程度、陽子スピンに寄与しているかは重要な問題であり、本実験のデータを用いてこの課題に取り組む。

### 3. 研究の方法

SeaQuest (E906) は日本、アメリカ、台湾の国際共同実験である。

研究の方法としては、陽子ビームと核子標的によるドレル・ヤン反応を用い、終状態のミュオン対を磁気スペクトロメータで測定する方法を用いた。したがって、FNAL の 120 GeV 陽子ビームと、陽子(液体水素)、重陽子(液体重水素)の標的、および磁気スペクトロメータが主要な実験要素である。陽子ビームは、FNAL の Main Injector から引き出されたビームである。

磁気スペクトロメータは、2つの電磁石と4つの飛跡検出器群から成っている。これらはステーション1, 2, 3, 4と称している。ステーション1, 2, 3はプラスチックシンチレータのホドスコープとドリフトチェンバーから成っている。それぞれのドリフトチェンバーは6層の構造を持っており、ミュオンの飛跡を測定し、電磁石の磁場と組み合わせ運動量を決定する。

ステーション4は、ミュオン識別のための鉄の壁の後にあり、ホドスコープとプロポーションナルチューブから成っている。

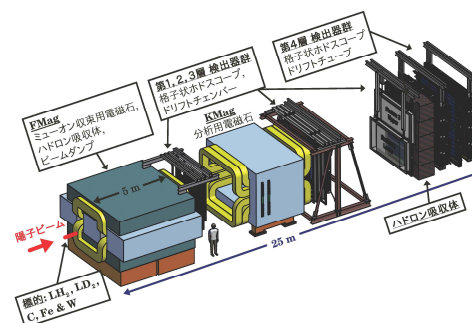
日本グループは、新規に日本で製作したステーション3のドリフトチェンバーの組み込み、テスト、運転を中心として、ドリフトチェンバー全体で主要な役割を担当した。

このようにして完成した磁気スペクトロメータを前方に配置し、ビーム陽子内のクォークと、標的核子内の反クォークが対消滅するイベント(事象)を運動学的に選択できるようにした。

### 4. 研究成果

本科研費の期間中は、加速器のビームタイムを得てほぼ常時データ取得を進め、最終年までにデータ取得を完了することができた。

図に示す磁気スペクトロメータは順調に稼動し、設計どおりの性能を維持することが



できた。ドリフトチェンバーの運転に際しては、検出効率と位置分解能を高く保つために、様々な工夫をして必要な性能を確保した。

データ解析では、研究分担者の中野が、実験グループ全体でただ1人のデータ解析コーディネーターになり、データ解析全体に主要な役割を果たした。

データ解析は、まず各ステーションにおいて荷電粒子のトラッキングをまず行い、次いでステーション間でそれらをつなぎ、標的の位置に外挿して標的で発生した event であることを確認する。このような解析ソフトウェアが確立し、大量のデータを効率よく解析できるようになった。

SeaQuest は、全体のデータの約 50% を解析した現段階で、中間発表をすることを決め、日本の大学院生がその最初の発表を物理学の会議で行った。

その結果は、測定を行った全領域、すなわち Bjorken  $x$  が 0.1 から 0.58 までの領域で反ダウクォークが反アップクォークより多いということを示している。これにより、陽子の中の反クォークのフレーバー非対称性が一層顕著になった。現在、残りの約 50% のデータの解析を進めており、論文として発表するように準備している。このフレーバー非対称性については、東工大の博士論文が 2 篇完成し、大学院生が主要な役割を果たした。

ドレル・ヤン反応の角度分布についても、修士論文が 2 篇完成し、それを元に、全データの解析を進めている。

## 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 9 件)

- 1) 中野健一, 柴田利明, 永井慧, "ドレル・ヤン実験 SeaQuest による陽子内反クォークのフレーバー非対称度  $d\text{-}\bar{u}(x)/u\text{-}\bar{d}(x)$  の測定", 原子核研究 62-2, pp. 52-63 (2018), 査読有
- 2) 中野健一, 澤田真也, 宮地義之, "フェルミ研ドレル・ヤン実験 SeaQuest の現状 陽子内の反クォーク分布のフレーバー非対称性", 高エネルギー物理学研究者会議, 高エネルギーニューズ 34-2, 81 (2015), 査読有
- 3) Shiuan-Hal Shiu, Jinyuan Wu, Randall Evan McClellan, Ting-Hua Chang, Wen-Chen Chang, Yen-Chu Chen, Ron Gilman, Kenichi Nakano, Jen-Chieh Peng, Su-Yin Wang, "FPGA-based Trigger System for the Fermilab SeaQuest Experiment", Nucl. Instrum. Meth. A802, 82 (2015), 査読有
- 4) K. Nakano for E906/SeaQuest Collaboration, "Measurement of Boer-Mulders Function via Drell-Yan

Process by SeaQuest Experiment at Fermilab", Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser., 40, 1660041 (2016), 査読無

- 5) K. Nakano, Y. Goto, Y. Kunisada, Y. Miyachi, S. Miyasaka, K. Nagai, S. Nara, S. Sawada, T.-A. Shibata, S. Tamamushi for the E906/SeaQuest Collaboration, "Measurement of anti-quark flavor asymmetry in the proton at SeaQuest", RIKEN Accel. Prog. Rep., Vol. 50, p. 118 (2017), 査読有
- 6) K. Nagai, Y. Goto, Y. Kunisada, Y. Miyachi, S. Miyasaka, K. Nakano, S. Nara, S. Sawada, T.-A. Shibata and S. Tamamushi, "Progress of Drell-Yan experiment by SeaQuest at Fermilab", RIKEN Accel. Prog. Rep., Vol. 49, p. 114 (2016), 査読有
- 7) K. Nagai, Y. Goto, Y. Miyachi, S. Miyasaka, K. Nakano, S. Nara, S. Sawada and T.-A. Shibata, "Progress in probing flavor asymmetry of antiquarks in protons in the E906/SeaQuest experiment at Fermilab", RIKEN Accel. Prog. Rep., Vol. 48, p. 123 (2015), 査読有
- 8) S. Miyasaka, Y. Goto, Y. Miyachi, K. Nagai, K. Nakano, S. Obata, F. Sanftl, S. Sawada and T.-A. Shibata, "Probing flavor asymmetry of antiquarks of the proton in the E906/SeaQuest experiment", RIKEN Accel. Prog. Rep., Vol. 47, p. 97 (2014), 査読有
- 9) S. Miyasaka, "Probing Flavor Asymmetry of Anti-quarks in Proton by Drell-Yan Experiment SeaQuest at Fermilab", Proceedings of Science (Hadron 2013), SISSA, 156 (2013), 査読無

[学会発表](計 26 件)

- 1) 中野健一, 後藤雄二, 澤田真也, 澤田崇広, 柴田利明, 永井慧, 宮地義之, 他 SeaQuest collaboration, "FNAL ドレル・ヤン実験 SeaQuest による陽子内の反クォークフレーバー非対称度の測定", 日本物理学会 第 73 回年次大会, 2018
- 2) 柴田利明, 後藤雄二, 澤田真也, 澤田崇広, 中野健一, 永井慧, 宮地義之, 他 E1039 collaboration, "FNAL における偏極ドレルヤン実験の計画", 日本物理学会 第 73 回年次大会, 2018
- 3) Kenichi Nakano, "DY: Most Recent Results and Open Issues", XIV International Workshop on Hadron Structure and Spectroscopy: IWHSS 2017, 2018
- 4) 永井慧, 国定恭史, 後藤雄二, 澤田真也, 澤田崇広, 柴田利明, 玉虫傑, 中野健一, 宮地義之, 他 SeaQuest collaboration,

- "SeaQuest 実験による Drell-Yan 反応を用いた陽子内のフレーバー非対称度測定の進展", 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017
- 5) Kenichi Nakano, "Recent progress on flavor asymmetry of anti-quarks in the proton by Drell-Yan experiment at SeaQuest", 第 10 回 高エネルギー QCD・核子構造 勉強会, 2016
- 6) 中野健一, "SeaQuest 実験によるドレル-ヤン反応を用いた核子内フレーバー非対称度の測定結果", 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016
- 7) Kenichi Nakano, "Drell-Yan experiment at Fermilab", Workshop on hadron tomography, 2016
- 8) Kei Nagai, "Measurement of Antiquark Flavor Asymmetry in the Proton by the Drell-Yan Experiment SeaQuest at Fermilab", The 14th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU2016), 2016
- 9) Arun Tadepalli, Kei Nagai, Ron Gilman, Kenichi Nakano on behalf of the SeaQuest Collaboration, "Flavor Asymmetry in the Nucleon Sea", 49th Annual Fermilab Users Meeting, 2016
- 10) 藤井勇紀, 柴田利明, 中野健一, "SeaQuest 実験による 120 GeV 陽子ビームを用いたドレル-ヤン反応", 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016
- 11) Kenichi Nakano, "TMD in Drell-Yan Experiments at Fermilab", The 10th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics (PacSpin2015), 2015
- 12) 中野健一, 後藤雄二, 眞田壘, 澤田真也, 柴田利明, 永井慧, 奈良旬平, 宮坂翔, 宮地義之, 他 SeaQuest collaboration, "FNAL-SeaQuest 実験におけるドレル-ヤン反応を用いた原子核効果の測定", 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015
- 13) 奈良旬平, 後藤雄二, 眞田壘, 澤田真也, 柴田利明, 永井慧, 中野健一, 宮坂翔, 宮地義之, 他 SeaQuest collaboration, "SeaQuest 実験 Run-3 での飛跡検出器の性能評価", 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015
- 14) K. Nagai for E906/SeaQuest Experiment, "Measurement of Anti-quark Flavor Asymmetry in the Proton at E906/SeaQuest Experiment", 48th Annual Fermilab Users Meeting, 2015
- 15) 宮坂翔, 後藤雄二, 眞田壘, 澤田真也, Florian Sanftl, 柴田利明, 永井慧, 中野健一, 奈良旬平, 宮地義之, 他 SeaQuest Collaboration, "SeaQuest 実験の Drell-Yan 反応を用いた陽子内の sea クォークのフレーバー非対称度の研究", 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015
- 16) K. Nakano for E906/SeaQuest Collaboration, "Measurement of Boer-Mulders Function via Drell-Yan Process by SeaQuest Experiment at Fermilab", SPIN 2014, 2014
- 17) Kei Nagai, E906/SeaQuest Collaboration, "Performance of Drift Chambers for E906/SeaQuest Drell-Yan Experiment at Fermilab", Fourth Joint Meeting of DNP of APS and JPS, 2014
- 18) Yoshiyuki Miyachi, "Opportunities with polarized beam & target", Fourth Joint Meeting of DNP of APS and JPS, 2014
- 19) Shinya Sawada, "Nucleon structure physics at Fermilab and J-PARC", Fourth Joint Meeting of DNP of APS and JPS, 2014
- 20) Kenichi Nakano, "Experimental study with Drell-Yan process", 日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014
- 21) 永井慧, 小畑滋希, 後藤雄二, 澤田真也, Florian Sanftl, 柴田利明, 中野健一, 宮地義之, 他 SeaQuest Collaboration, "SeaQuest の本実験ビームタイムのスタートと実験の進行状況 I", 日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014
- 22) 宮坂翔, 小畑滋希, 後藤雄二, 澤田真也, Florian Sanftl, 柴田利明, 永井慧, 中野健一, 宮地義之, 他 SeaQuest Collaboration, "SeaQuest の本実験ビームタイムのスタートと実験の進行状況 II", 日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014
- 23) K. Nakano, "Status of Physics Run of Fermilab SeaQuest Experiment", Meeting on High-energy hadron physics at J-PARC, 2014
- 24) S. Miyasaka, "Probing Flavor Asymmetry of Anti-quarks in Proton by Drell-Yan Experiment SeaQuest at Fermilab", Hadron 2013, 2013
- 25) 澤田真也, 小畑滋希, 後藤雄二, Florian Sanftl, 柴田利明, 永井慧, 中野健一, 宮坂翔, 宮地義之, 他 SeaQuest Collaboration, "フェルミ研 SeaQuest 実験のコミッションング結果と今後の実験計画", 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013
- 26) 中野健一, 後藤雄二, 澤田真也, 柴田利明, 宮地義之, Alexander Klein, Xiaodong Jiang, Paul Reimer, Wolfgang Lorenzon, 他偏極 Drell-Yan 実験メンバー, "フェルミ研での偏極標的と偏極ビームを用いたドレル・ヤン反応の実験

計画", 日本物理学会 2013 年秋季大会,  
2013

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柴田 利明 (SHIBATA TOSHIKI)  
東京工業大学・理学院・教授  
研究者番号：80251601

### (2) 研究分担者

中野 健一 (NAKANO KENICHI)  
東京工業大学・理学院・助教  
研究者番号：20525779

後藤 雄二 (GOTO YUJI)  
理化学研究所・仁科加速器研究センター・  
前任研究員  
研究者番号：00360545

宮地 義之 (MIYACHI YOSHIYUKI)  
山形大学・理学部・准教授  
研究者番号：50334511

澤田 真也 (SAWADA SHINYA)  
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：70311123

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

宮坂 翔 (MIYASAKA SHYO)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・大学  
院学生

永井 慧 (NAGAI KEI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・大学  
院学生