

令和 5 年 5 月 14 日現在

機関番号：13902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03885

研究課題名(和文)原子核乾板デジタルアーカイブス計画—RUNJOB公開とDONUTへの挑戦

研究課題名(英文)Digital Archives for Nuclear Emulsion Data

研究代表者

児玉 康一 (Kodama, Koichi)

愛知教育大学・教育学部・教授

研究者番号：70211901

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：過去・現在・未来の気球実験や加速器実験の原子核乾板を最新の自動飛跡読取装置により読み取り、記録されている全飛跡・全反応をデジタルデータ化し共有する、原子核乾板デジタルアーカイブス計画を進めた。我々が開発してきた原子核乾板飛跡読取装置(HTS)はそれが可能な能力を実現しつつある。タウニュートリノの荷電カレント反応を原子核乾板中に捉える事に世界で初めて成功した加速器実験DONUTのモジュール#1の全ての原子核乾板の読み出しと、気球実験JACEEの南極周回フライトの一部の原子核乾板の読み出しを完了する事ができた。また得られたデータを使い、大学院生や学部生の教育目的での活用も試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子核乾板はサブミクロンの3次元位置分解能を持つ素粒子検出器であり、タウニュートリノの研究などにおいて大きな役割を果たしてきたが、その解析は、顕微鏡を使う時間と手間のかかるものであった。我々はこの解析の自動化を進め、現行の装置HTSは、過去の加速器・気球実験での総乾板面積にほぼ匹敵する、年間読出し面積2000m²に到達しつつある。これら過去の実験では、実際に読み出した乾板面積は全体の1%に満たず、記録された膨大な飛跡情報のごく一部を活用したに過ぎない。本研究は、これら過去の実験の乾板に記録された全飛跡をHTSで読み出して共有し、原子核乾板のミニマムバイアス解析を行おうとする世界初の試みである。

研究成果の概要(英文)：Digital archives for nuclear emulsion data of past physics experiments were studied. Nuclear emulsion is a tracking device with excellent spatial resolution of sub-micron and have been playing an important role in physics. We are succeeding to develop fast read-out system for tracks in emulsion and its latest version (HTS) is achieving a speed of 2000m²/year. In past experiments, a quite limited fraction of emulsion volume (probably <1%) had been analyzed due to lack of analysis power and the rest was left un-analyzed. HTS could provide us enough power to analyze all tracks recorded in them. DONUT is an experiment that had been succeeded to observe tau neutrino charged current interactions for the first time in the world. Module #1 of DONUT was successfully read out and it will be a part of our archives. A part of JACEE-13's emulsion plates, exposed in Antarctic circumpolar flight, was also read out. Those archived data could be used for educational purposes for students.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：エマルジョン 原子核乾板 アーカイブス 宇宙線 気球実験 加速器実験 ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

原子核乾板はサブミクロンの3次元位置分解能を持つ飛跡検出器であり、タウニュートリノの研究などにおいて大きな役割を果たしてきた。その解析は、元来、顕微鏡下の目視で行うため、時間と手間のかかるものであったが、我々はその自動化を推進してきた(図1)。開発中であった次世代機 (HTS: Hyper Track Selector) では、毎時 $\sim 1\text{m}^2$ の読み出し速度、年間読み出し面積にして約 2000m^2 を実現するに至っている。これはOPERA実験以前の加速器実験や気球実験の総乾板面積にほぼ匹敵する(例: 検出実験DONUT: 約 100m^2 、ニュートリノ振動実験CHORUS: 約 400m^2 、RUNJOB実験: 約 120m^2 、JACEE実験: 約 900m^2)。

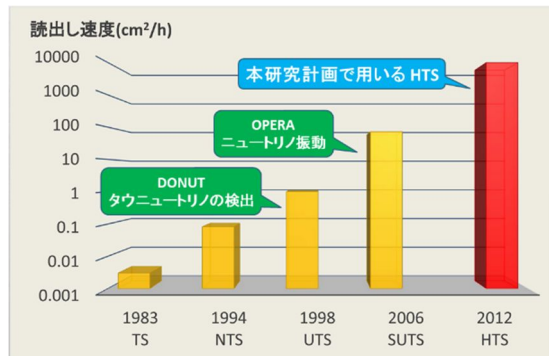


図1 原子核乾板飛跡自動読み取り装置の発展

これら過去の実験の解析においては、当時の原子核乾板解析速度の弱さを補うために、解析する反応数を絞り込む必要があった。加速器実験の場合はシンチファイバー検出器などの位置検出器や μ 粒子トリガーなどの併設カウンターにより、また気球実験の場合はX線フィルムなどを用いてTeV級の高エネルギー電磁シャワーがついているイベントやZの大きな原子核などに絞り込んでの解析を行ってきており、実際に読み出された乾板は全体積の1%に満たず、記録された膨大な飛跡情報のごく一部を読み出し利用したに過ぎない。また加速器実験の場合はカウンターが再構成に失敗する様な複雑な反応は解析の対象とはできていない。これに対してHTSを用いれば、乾板の全面を読み出し、記録されている全ての飛跡・反応を解析の対象とすることが可能となる。つまり、いわゆる原子核乾板のミニマムバイアス解析を世界で初めて実現できるようになる。

2. 研究の目的

本研究は、過去の実験で使用した原子核乾板に記録されている全ての飛跡・事象をHTSで読み出し、そのデータを共有する仕組み(原子核乾板デジタルアーカイブ)の構築を目指す。これまで、挑戦的萌芽研究(2014-2015、中村光廣、児玉康一、市村雅一)において、気球実験RUNJOBの乾板を使い、HTSで読み出す際の問題点の検討とその解決に向けた予備研究を行い、基盤研究(C)(2016-2019、16K05378)においてRUNJOBの1997年フライト2ブロック計約80枚(総面積 16m^2)の乾板のHTSによる飛跡情報の読み出しを完了する事ができた(図2)。

これらの成果を踏まえ、本研究計画では、まずDONUT実験乾板の読み出しに挑戦した。DONUT実験^[1]はフェルミ研究所テバトロン加速器からの800GeV陽子を使った唯一のビームダンプ実験であり、タウニュートリノの荷電カレント反応を世界で初めて原子核乾板中に捉える事に成功した実験である。また、JACEE実験^[2]南極周回フライト(JACEE13)のチェンバーのうち名古屋大学で保管されている最上流部の一部プレートの読み出しも行った。JACEEは高エネルギー宇宙線の観測を目的とした実験であるが、南極は地磁気緯度が高く、比較的エネルギーの低い宇宙線も地球に入射することができる。高エネルギー事象の解析には邪魔な存在であるこれら低エネルギー事象(反陽子や反重陽子の消滅事象等)の解析も可能になると考えての事である。なお、これら読み出した飛跡データ(RUNJOB、JACEE、DONUT)の公開を前提としたデータ共有システムの構築、共有データを用いての博士、修士、学部4年次の卒業論文など、データの活用事例の蓄積、アーカイブの運用に必要なソフトウェアの開発・改良にもあわせて取り組んだ。

3. 研究の方法

本研究では、最新の原子核乾板飛跡読み出し装置HTSを用いてDONUT、JACEE乾板の飛跡データの読み出しを行った。読み出し作業と並行して、読み出した飛跡データのオフライン処理ソフトウェアの機能強化、特に大面積データを一括して扱うための処理手法には未確立の部分もあった為、これらの開発も行った。HTSを使った飛跡データの読み出し、オフライン処理ソフ

これら過去の実験の解析においては、当時の原子核乾板解析速度の弱さを補うために、解析する反応数を絞り込む必要があった。加速器実験の場合はシンチファイバー検出器などの位置検出器や μ 粒子トリガーなどの併設カウンターにより、また気球実験の場合はX線フィルムなどを用いてTeV級の高エネルギー電磁シャワーがついているイベントやZの大きな原子核などに絞り込んでの解析を行ってきており、実際に読み出された乾板は全体積の1%に満たず、記録された膨大な飛跡情報のごく一部を読み出し利用したに過ぎない。また加速器実験の場合はカウンターが再

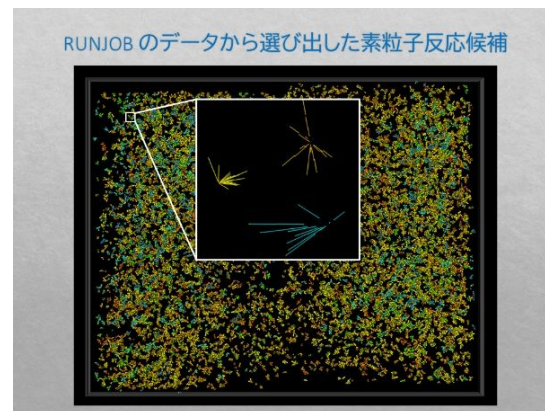


図2 RUNJOB 1997年フライト1ブロックのターゲット層(1mm厚の鉄板と原子核乾板が交互に計14組積層されている)での飛跡データから選び出した鉄板中での衝突反応候補のCG画像。多くは一次宇宙線起因と思われる。乾板サイズは50cm

トウェアの機能強化と読み出した飛跡データの処理、DONUT 実験データの評価については児玉（愛教大）が、RUNJOB、JACEE 実験データの評価に関しては市村（弘前大）が担当した。

4. 研究成果

DONUT 実験はフェルミ研究所テバトロン加速器からの 800GeV 陽子を使った唯一のビームダンブ実験であり、タウニュートリノの荷電カレント反応を世界で初めて原子核乾板中に捉える事に成功した実験である。本研究では DONUT 実験のエマルションモジュールの中で蓄積されたニュートリノ反応数の期待値が最多（236 反応）であるモジュール#1 の読み出しを行った。

このモジュールは 200 ミクロン厚ベースの両面に 100 ミクロン厚のエマルション乳剤を塗布した乾板を使っている。現像処理で厚みが半分ほどになる乳剤を使用していた事もあり、現在の乳剤厚は 50 ミクロン程であった。これは HTS での読み出しが可能なギリギリの厚さであり、できれば RUNJOB 乾板同様に膨潤処理を行いたかったが、この処理により乾板の端から乳剤層の剥離が始まる事が危惧されたため、膨潤処理無での読み出しとした。エマルションプレートを HTS に固定するための治具を改良し、読み出し区画（HTS で 1 回に読み出せるのは 13cm × 9cm に制限される）の交換にかかる時間を短縮するなどの工夫を重ね、このモジュールのプレート全 48 枚中、状態が悪く読み出し不可と判断した最下流の 2 枚を除く、46 枚の読み出しを完了する事ができた。

読み出したデータの処理に関しては、プレート内飛跡（ベーストラック）の再構成（図 3）、ベーストラックを使ったプレート間相対位置の再構成（図 4）、隣接するプレート対の間でつながるベーストラックの組（リンクレット）の作成までは完了している。リンクレットからモジュール全体での飛跡（チェーン）を再構成する処理に関しては、使用可能メモリ量の制限（256Gbyte でも不足する）に対応するためのコード修正が必要であり、今しばらく時間が必要である。飛跡（ベーストラック）認識効率の角度依存性を図 5 に示す。tan < 0.2 の範囲では 0.9 と十分な認識効率であるが、角度が大きくなるにつれて認識効率の急激な低下が見られる。この認識効率の低下に関しては、読み出した飛跡の多くがニュートリノビームに伴うミュオン粒子であり、これらが乾板表面に垂直に入射しているために、プレート間のビーム軸方向の相対位置再構成に問題が生じている可能性が高いが、結論は出せていない。

JACEE 実験南極周回フライト (JACEE13) のチェンバーのうち名古屋大学で保管されていた最上流部の一部プレートの読み出し、読み出した飛跡データのオフライン処理に関しては、データの規模が $20\text{cm} \times 25\text{cm} \times 11\text{plates}$ と DONUT 実験データに比較して小規模である事もあり、順調に完了させる事ができている。また、このデータを使いデータで選び出したバーテックス (反応点候補) を顕微鏡視野下のエマルジョン飛跡と対応付けして同定する試みを、学部4年次の卒業研究のテーマとして行った。選び出したバーテックスのごく一部 (10例ほど) ではあるが、飛跡の相対位置と相対角度を頼りに同定できる事を実証できた。これにより、興味ある事象 (例えば反陽子の対消滅事象) を緩やかな条件で選び出し、目視観察でより詳細な分析をして、目的の事象にたどり着くといった事が可能となる。

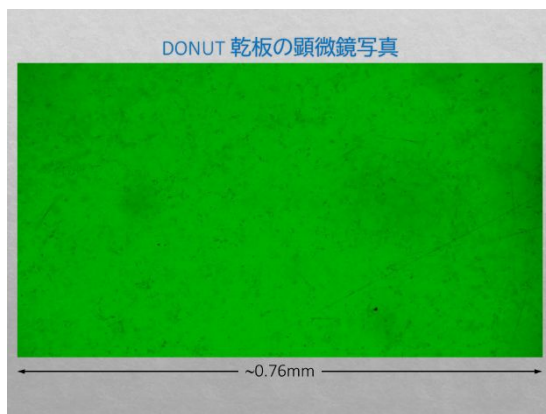


図3 DONUT 乾板の顕微鏡写真。記録されている荷電粒子の多くはニュートリノビームに伴うミュオン粒子であり、乾板表面に対して垂直に入射している為目立たない。図7に示す JACEE 乾板とは様相が異なる。

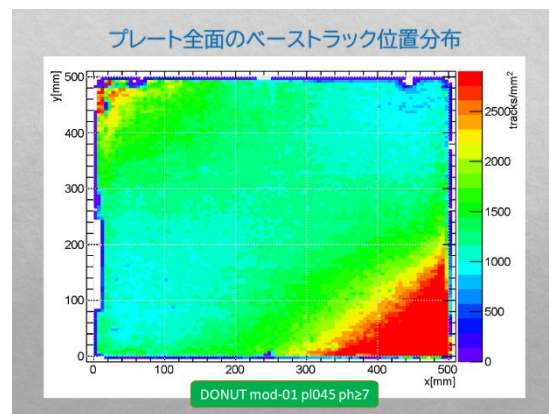


図4 1枚の DONUT 乾板から読み出した飛跡 (ベーストラック) の位置分布。乾板サイズは $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ であり、右下にニュートリノビームに伴うミュオン粒子が集中している。

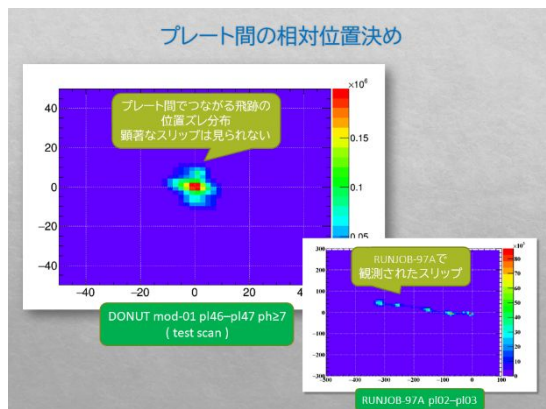


図5 隣接する2枚の DONUT 乾板間の相対的な位置決め)後の、乾板間でつながる飛跡間の位置ズレ分布。RUNJOB 乾板で見られた様な、乾板間の顕著なスリップ (図の右下) は見られない。

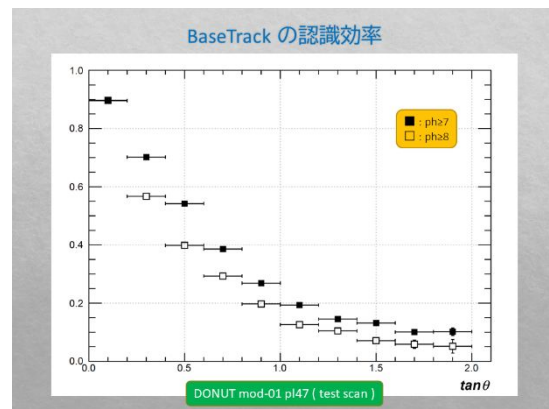


図6 DONUT 乾板での飛跡 (ベーストラック) 認識効率の角度依存性。 $\tan \theta < 0.2$ では 0.9 と十分な認識効率であるが、角度が大きくなるにつれて認識効率が急激に低下する様に見える。

5 . Reference

- [1] Physics Letters B504(2001)218-224
 [2] The Astrophysical Journal, 502:278-283, 1998

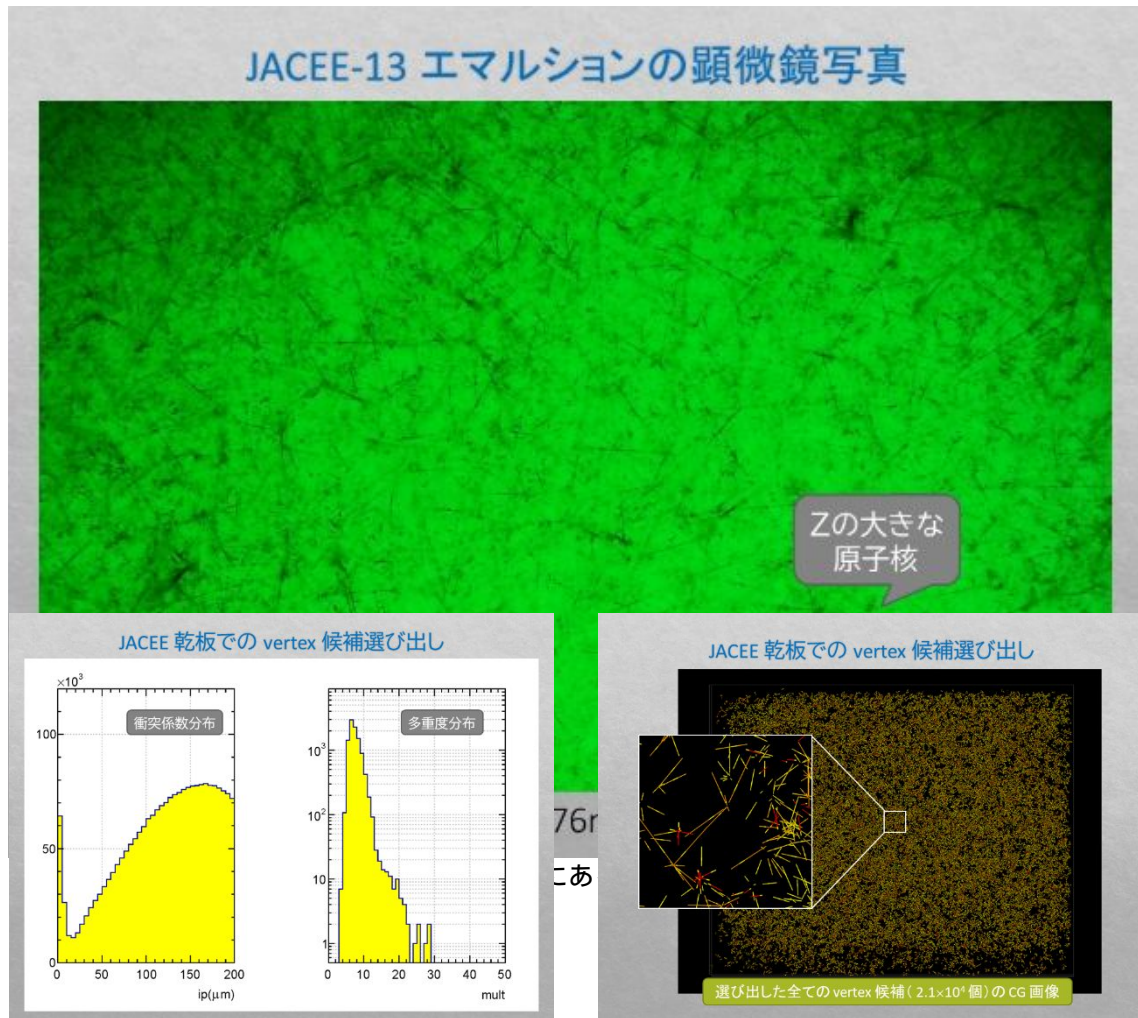


図8 JACEE 乾板でのバーテックス候補の選び出し。衝突係数の小さな ($< 10 \mu\text{m}$) ベーストラックの集団を各乾板上で選び出す。左図は衝突係数分布であり、右は選び出した集団の多重度分布である。

図9 選び出したバーテックス候補のCG画像。乾板サイズは $25 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 児玉康一、市村雅一、中村光廣
2. 発表標題 原子核乾板デジタルアーカイブス計画 - DONUT データの紹介 -
3. 学会等名 日本写真学会オンライン年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 児玉康一、市村雅一、中村光廣
2. 発表標題 原子核乾板デジタルアーカイブス計画の紹介 - 過去のエマルションデータの共有と教育目的での利用 -
3. 学会等名 第11回小型衛星の科学教育利用を考える会（オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 児玉康一、市村雅一、中村光廣
2. 発表標題 原子核乾板デジタルアーカイブス計画 - JACEEデータの紹介 -
3. 学会等名 日本写真学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神谷剛宏，児玉康一，市村雅一，中村光廣
2. 発表標題 原子核乾板デジタルアーカイブス計画 - RUNJOBデータの紹介 -
3. 学会等名 2019 年度日本写真学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Kodama, Takenori Kamiya, Masakatsu Ichimura, Mitsuhiro Nakamura
2. 発表標題 Digital Archives for Nuclear Emulsion Data - Data in past experiments in Cosmic-ray and Accelerator physics -
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Kodama, Masakatsu Ichimura, Mitsuhiro Nakamura
2. 発表標題 Digital Archives for Nuclear Emulsion Data - Data in past experiments in Cosmic-ray and Accelerator physics -
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	市村 雅一 (Masakatsu Ichimura) (20232415)	弘前大学・理工学研究科・教授 (11101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------