

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：13902  
 研究種目：基盤研究(C) (一般)  
 研究期間：2016～2019  
 課題番号：16K05378  
 研究課題名(和文)原子核乾板デジタルアーカイブス計画 - 過去の宇宙線・加速器実験データの共有・公開  
  
 研究課題名(英文)Digital Archives for Nuclear Emulsion Data - Archives of past experiments in Cosmic-ray and Accelerator physics -  
  
 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) 3,600,000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。この計画の最初の試みとして、日共同気球実験RUNJOBの1997年フライトの全ての原子核乾板に対して、HTSでの原子核乾板飛跡情報の読み出しを完了することができた。また、得られたデータを使い、これまで不可能であった原子核乾板のいわゆるミニマムバイアス解析の試みを始め、加えて、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2000m<sup>2</sup>に到達しつつある。これら過去の実験では、実際に読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で読出し、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もある。

研究成果の概要(英文)：Digital archives for nuclear emulsion data of past experiments, such as in cosmic-ray and accelerator physics, had been studied. Nuclear emulsion is a tracking device with excellent spatial resolution of sub-micron accuracy and have been playing an important role in physics. We are succeeding to develop fast read-out systems for tracks in emulsion and our latest system (HTS) is achieving a speed of 2000m<sup>2</sup>/year. It is almost equivalent to those of emulsion plates used in the past experiments, in those emulsion plates, analyzed fraction of surface was quite limited, probably less than 1%, due to lack of analysis power and the rest was left un-analyzed. HTS could provide us enough read-out power to analyze all tracks recorded in them. As a first trial, we chose RUNJOB (RUSSIA NIPPON JOINT Balloon program) experiment. All emulsion plates of 1997 flight had been read-out and minimum bias analysis was tried. Those archived data was also used for educational purposes for students.

研究分野：素粒子・原子核物理学実験

キーワード：エマルジョン 原子核乾板 アーカイブス データ共有 宇宙線 加速器

## 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。その解析は、顕微鏡で行うために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 $\sim 1\text{m}^2$ の読出速度、年間読出し面積にして約 $2000\text{m}^2$ を実現する。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: $\nu_\tau$ 検出実験DONUT:約 $100\text{m}^2$ 、ニュートリノ振動実験CHORUS:約 $400\text{m}^2$ 、RUNJOB実験:約 $120\text{m}^2$ 、JACEE実験:約 $900\text{m}^2$ )。

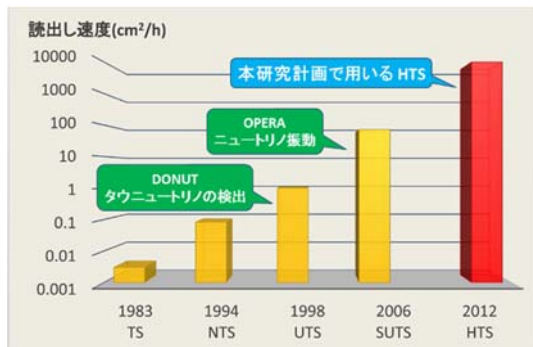


図1 原子核乾板飛跡自動読取り装置の発展

これら過去の実験の解析では、当時の原子核乾板解析能力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 $\mu$ 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の大きな核などに絞り込んでの解析を行っており、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活用したに過ぎない。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来ていない。これに対してHTSを用いれば、乾板の全面を読み出し、

## 2. 研究の目的

これまで、平成26・27年の挑戦的萌芽研究(代表:中村光廣)において、主にRUNJOB乾板を使い、このアーカイブス計画の予備的研究を進めてきた。RUNJOBでは、他の過去の実験同様に手製の乾板を使用しており、乳剤層の歪み(ディストーション)や厚さのばらつきが大きく、HTSでの自動読出しの障害になり得る懸念があったが、これをクリアできる目処が立ち(図2)、システムティックなデジタルデータ化を試みるべき段階に到達したと考えている。

そこで、本研究計画では、(1)HTSによるRUNJOB乾板のシステムティックな飛跡情報読出しとデジタルデータ化を進め、公開を前提としたデータ共有システムの構築を行う。(2)このRUNJOB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を行う。(3)DONUT、EMU09、NA34-emulsion乾板のデジタルデータ化を試みる。の3点を目的とし、アーカイブスの運用に必要なソフトウェアの開発・改良もあわせて行った。

## 3. 研究の方法

本研究では、現在開発が進行している次世代読取装置HTSの本体/オンライン/オフライン処理系ハード/ファームウェアを活用して、主にオフライン解析のソフト部分:大面積データの取り扱い・処理手法・公開方法の確立などを、RUNJOB、DONUT、EMU09、NA34-emulsion乾板のデジタルデータ化を進めながら行う。これら実験の乾板を実際に読み出し、想定される規模でのデータの管理、飛跡の再構成などを行い、飛跡の検出効率、原子核乾板間のアラインメントの評価、既に検出され解析されている反応や飛跡情報の比較などを行いつつ、開発を進める。HTS関連ならびにDONUT、EMU09、NA32-emulsion実験の評価他については、見玉(愛教大)が、RUNJOB実験の評価に関しては市村(弘前大)が担当した。

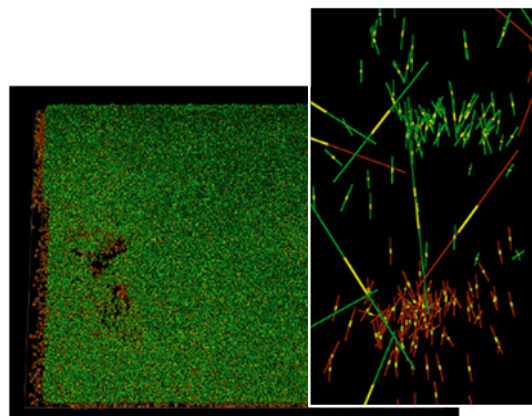


図2 HTSで読出したRUNJOB最下層乾板2枚(10cm角)を貫通する飛跡群。右上は中央付近(6mm角)を拡大した図。電磁シャワーと思われる飛跡群が見える。

#### 4. 研究成果

平成28年度から平成31年度までの(1年間の延長を含む)4年間の研究期間で、日ロ共同気球実験RUNJOBの1997年フライト2ブロック計約80枚(16m<sup>2</sup>)に対して、HTSによる原子核乾板飛跡情報の読み出しを完了することができた。このRUNJOB実験は、一次宇宙線の化学組成とエネルギーの測定を目的とし、日本とロシアの共同で、1995年から1997年の間に11回のフライトを行い、うち10回の成功を収めた気球実験である(図3、図4)。

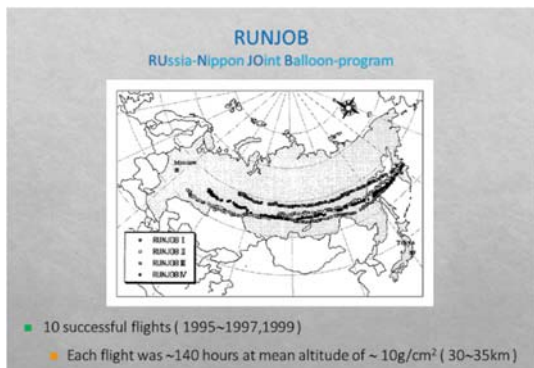


図3 RUNJOB気球実験のフライト経路

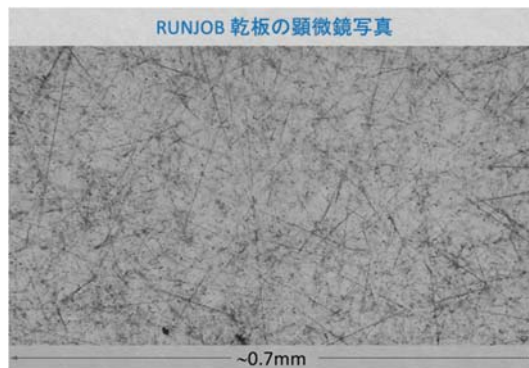


図4 RUNJOB乾板の顕微鏡写真

名古屋大学F研究室で開発を進めてきた、エマルジョンに記録された素粒子飛跡の自動読み出し装置の最新機HTSを使っての飛跡読み出しを行うためには、RUNJOBエマルジョンプレートの乳剤層を660ミクロン程度の厚みに膨らませるための膨潤処理が必要である。この膨潤処理を愛知教育大学で行いつつ、膨潤処理をしたエマルジョンプレートを名古屋大学に持ち込み、HTSでの飛跡全面読み出しを行う体制を構築し、愛知教育大学の大学院生と学部4年生を主力に読み出し作業を行った。最初の1ブロック(Aブロック)の読み出しでは、膨潤手順やHTSによる読み出しパラメータの決定など、手法の確立に時間が必要であったため、完了までには3年以上を要したが、2ブロック目(Bブロック)は1年以内に完了させることができた。これは、1ブロック目の処理で蓄積したノウハウを活かして、HTSを有効に活用できたためであると考えられる。

読み出した飛跡情報の再構成を行った後に、3枚以上のエマルジョンプレートを貫通する飛跡を使い、各プレートでの飛跡認識(検出)効率の評価を行った。現在の読み出し条件( $\text{pH} \geq 9$ )でも、飛跡の角度  $\tan \theta$  の値0.0~1.5の範囲で60~80%程度の認識効率を確保できているという結果を得ており、読み出した飛跡データを使っての物理分析には大きな問題はないと考えている(図5)。しかしながら、これまでにHTSでの飛跡読み出しの実績がある、GRAINE実験などの新しい原子核乾板に比較して、RUNJOB実験の乾板は、飛跡密度が高く、また、フライト中の振動や温度変化などにより、プレート同士が滑り、相対位置がズレていくスリップ現象(図6)など、過去の気球実験に特徴的な様相が見られる。そのため、それらに対処するための、より丁寧なデータ処理アルゴリズムが必要であった。

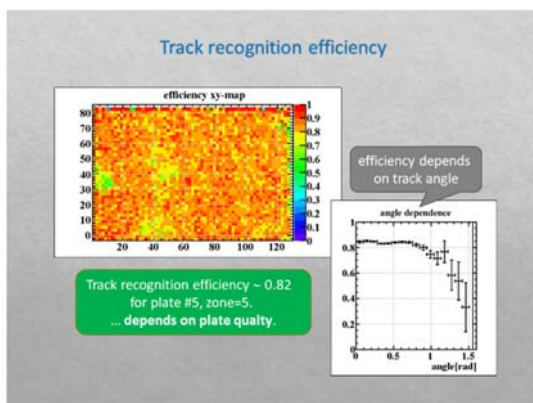


図5 飛跡検出効率の位置・角度依存性

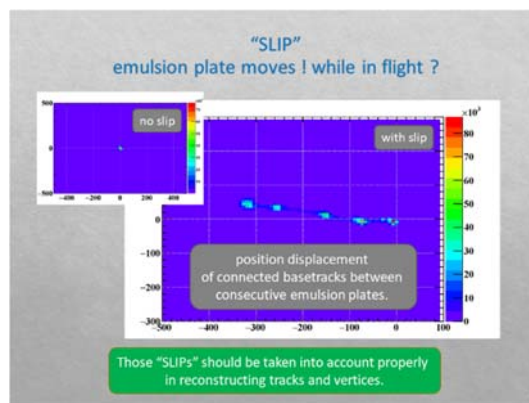


図6 RUNJOB乾板でのスリップの一例

Aブロックのデータに関しては、1枚のプレートを貫通するベーストラックの選び出し、ベーストラックを使ったプレート間の位置関係の再構成、プレート間でつながる飛跡対(リンクレット)の選び出しなど、基本的な処理は概ね完了しているため、まずは、愛知教育大学と弘前大学の間で、ネットワークを利用した試験的なデータ共有の仕組みを開設した。また、得られた飛跡データの質の理解と検証のために、鉄ターゲット中での宇宙線起因の衝突反応やそこからのガンマ線による電子シャワー候補の選び出しを進め、RUNJOB 実験の過去の解析で得られている既存データとの比較検討も始めつつある。この過程で、愛知教育大学と弘前大学での学部生・院生教育への活用も始めつつある(図7、図8)。

## Selected vertices/interactions in the target module

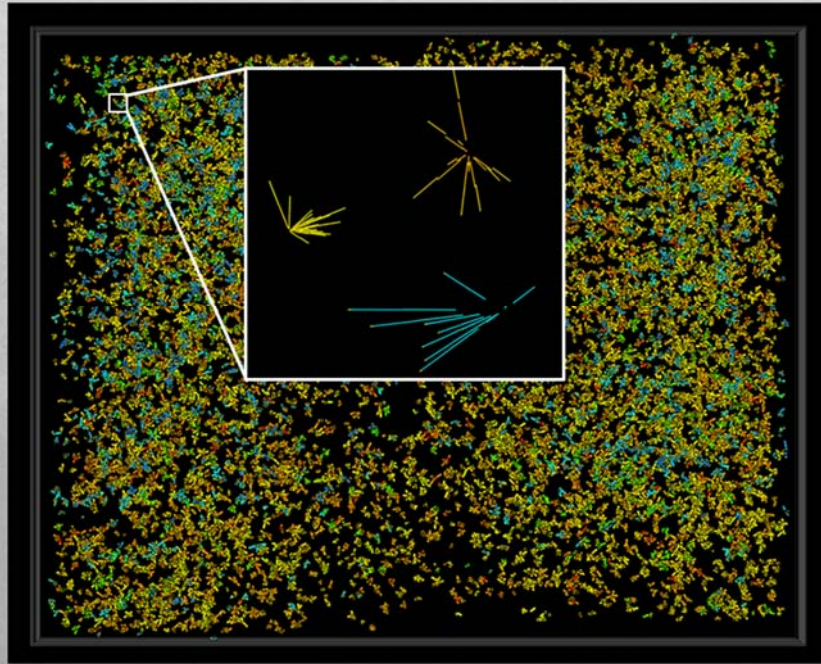


図7 RUNJOB1997年フライトの、Aブロックの一部である、ターゲットモジュール(1mm厚の鉄とエマルジョンプレートが交互に計14組積層された構造をしている)での飛跡データを使って選び出した、鉄標的中の衝突反応候補のCG画像。正確には、これら候補から放出されているエマルジョン飛跡を描画している。外側の白い枠はエマルジョンプレートの外形(50cm×40cm)を表す。多くは一次宇宙線によるものと予測されるが、詳細分析は今後の課題として残っている。

## Selected showers in the calorimeter module

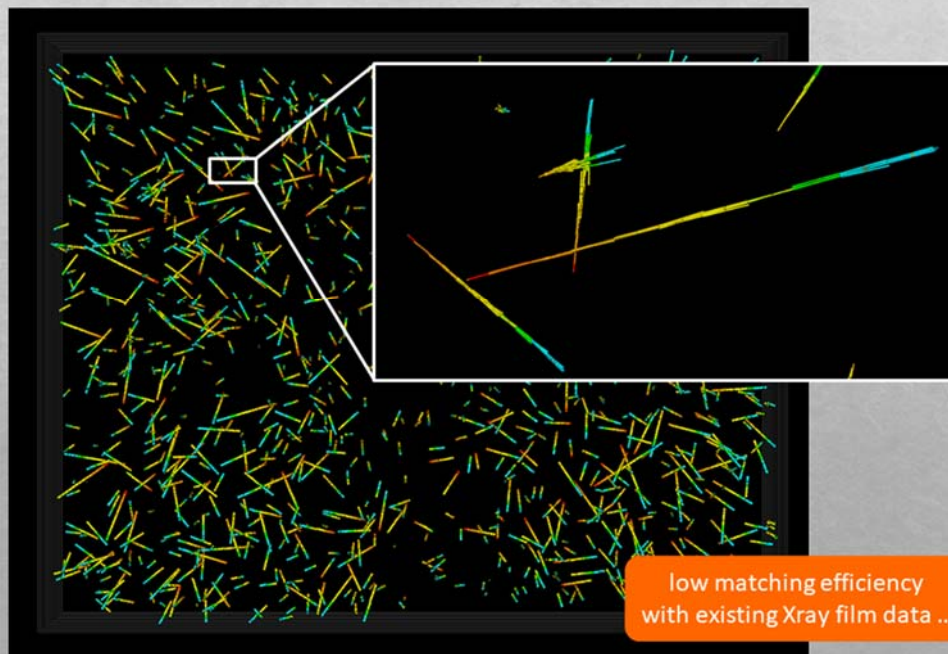


図8 RUNJOB1997年フライトの、Aブロックの一部である、カロリメータモジュール(2mm厚の鉛とエマルジョンプレートが交互に計12組積層された構造をしている)での飛跡データを使って選び出した、電磁シャワー候補のCG画像。正確には、これら候補に関わるエマルジョン飛跡を描画している。外側の白い枠は図7と同じ。RUNJOBの過去の解析データとの比較で一致率が低い問題がある。候補の選び方が最適化されていないためであると予測されるが、この点も今後の課題として残っている。

Bブロックのデータ処理に関しては、基本的には問題なく進められると考えているが、まだ公開できるまでには至っていない。データ処理の速度は、基本的な処理には概ね問題ないが、その後の様々な観点からのトライ・アンド・エラーを繰り返しながらの分析には未だ不十分である。そのため、10倍程度のデータ処理の高速化を実現するためのソフト開発とハード整備を行いながら、並行して、Bブロックの基本処理も進める予定である。また、現在のデータ共有の手法に関しても、よりデータ利用に適したものに更新していく必要性を痛感しており、本研究計画終了後も継続して取り組む予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kodama Koichi, Kamiya Takehiro, Ichimura Masakatsu, Nakamura Mitsuhiro	4. 巻 208
2. 論文標題 Digital Archives for Nuclear Emulsion Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 13003 ~ 13003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1051/epjconf/201920813003">https://doi.org/10.1051/epjconf/201920813003</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Koichi Kodama, Takehiro Kamiya, Masakatsu Ichimura, Mitsuhiro Nakamura
2. 発表標題 Digital Archives for Nuclear Emulsion Data - past experiments in cosmic-ray and accelerator physics -
3. 学会等名 20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 児玉康一, 神谷剛宏, 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 - 過去の宇宙線・加速器実験データの共有・公開 -
3. 学会等名 日本写真学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018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 日本写真学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Kodama, Takehiro 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 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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  (Ichimura Masakatsu)  (20232415)	弘前大学・理工学研究科・准教授    (11101)	
研究分担者	中村 光廣  (Nakamura Mitsuhiro)  (90183889)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授    (13901)	