

超高速原子核乾板自動飛跡読取装置の開発とその応用

Research and Development of fully automated Nuclear Emulsion read-out system and its applications

中野 敏行

Toshiyuki NAKANO

原子核乾板は、放射線の飛跡をサブミクロンの位置精度で三次元的に記録する放射線飛跡検出器である。本研究では、原子核乾板に写った高エネルギーの放射線の飛跡を自動で認識し読み出す装置の開発・実用化を行い、さらにその高速化を推し進めている。開発の主目的は、素粒子物理学の最先端研究での原子核乾板の活用であったが、結果として、火山や原子炉などの大型構造物の内部構造を、その物体を透過してくる宇宙線ミュオン粒子をとらえることによって探る、ミュオン粒子ラジオグラフィーの分野で大きな役割を果たすことができるものへと発展しつつある。

Nuclear Emulsion is a radiation detector, which has three dimensional position resolution of sub-micron. In this research, research and development of an automated emulsion read-out system has been carrying out in order to realize automatic recognition of straightly aligned grains along high-energy particles recorded three-dimensionally in the Nuclear Emulsion layers. The developed systems have been used in the research of elementary particle physics. Also we tried their application to Muon radiography of volcanoes and nuclear reactor and succeeded to investigate the inner structure of them. This is also the first time in the world.

はじめに

原子核乾板は、写真フィルムの技術を用いて三次元的に放射線の飛跡を記録することができる放射線飛跡検出器である(図1)。その歴史は古く、日本人の木下季吉氏が英国留学中に α 線が写真乾板に飛跡として写ることを発見して以降、1950年代に主に欧州で発展し、 π 中間子(湯川粒子)の発見などで活躍したが、記録されている飛跡が3次元でサブミクロンの位置情報を持つことから、人間の判断を必要とし時間と手間がかかり、電気的な計測装置の普及と共に次第に使われなくなっていた。日本では、その解像力を生かし、1970年代に入ってもチャーム粒子などの短寿命の素粒子研究に活用されていたが、やはり解析は顕微鏡による目視測定であり、解析できる素粒子反応の数に限界が来ており、より稀な現象の観測は困難になっていた。この事態を打開すべく1970年代中頃に丹

羽公雄氏(名古屋大学名誉教授)により、人間の目視測定を支援する半自動解析装置が発明された。また、原子核乾板中の高エネルギー粒子の飛跡を自動的に認識するアルゴリズムを提案し、1983年に全自動飛跡読取装置の

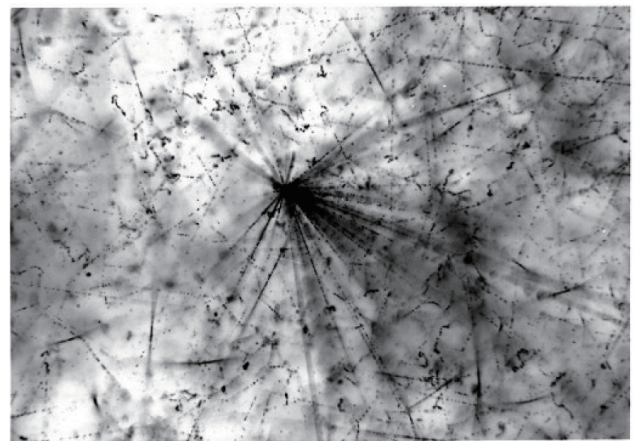


図1 原子核乾板に記録された飛跡の顕微鏡画像
長辺がおよそ200 μm 。中央で高エネルギー重イオンビームが原子核と衝突し、核破碎反応を起こしていることが解る。

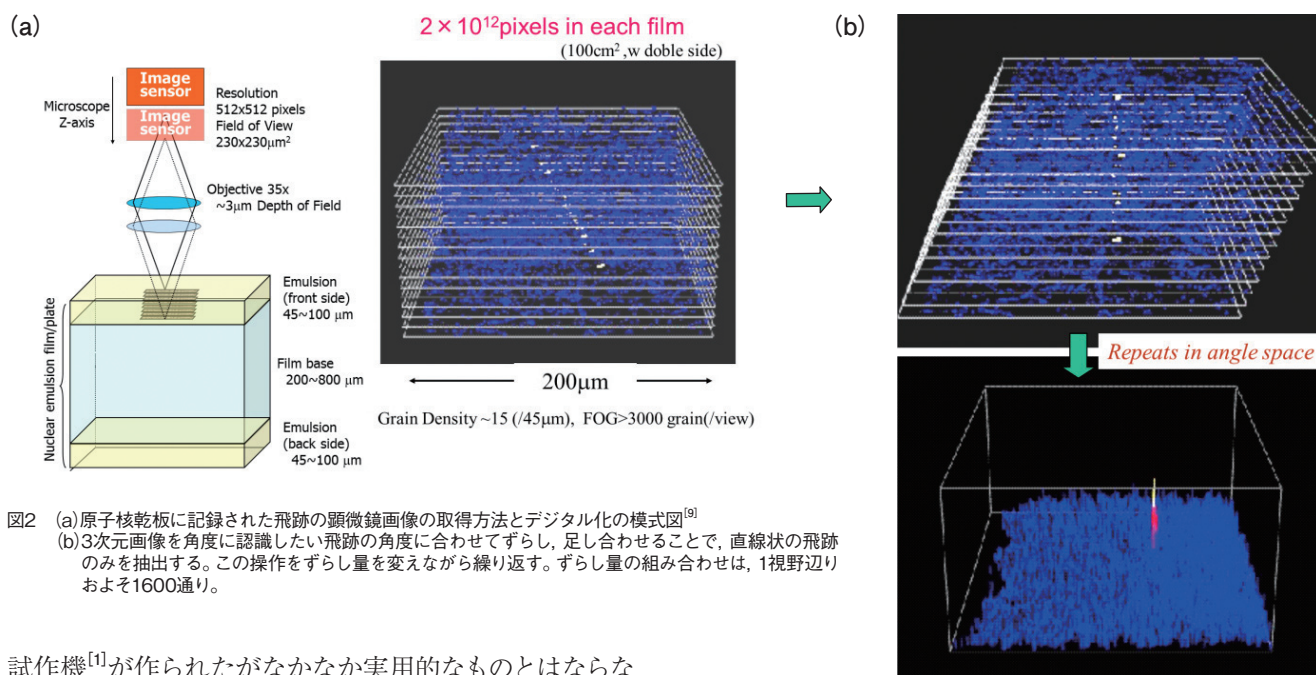


図2 (a)原子核乾板に記録された飛跡の顕微鏡画像の取得方法とデジタル化の模式図^[9]
(b)3次元画像を角度に認識したい飛跡の角度に合わせてずらし、足し合わせることで、直線状の飛跡のみを抽出する。この操作をずらし量を変えながら繰り返す。ずらし量の組み合わせは、1視野辺りおよそ1600通り。

試作機^[1]が作られたがなかなか実用的なものとはならなかった。

1990年代に入ると、ニュートリノが質量を持つかどうか注目され、質量が0でなければ起こりうるニュートリノ振動現象の検出が重要な課題となった。ニュートリノ振動現象の一つである、ミューニュートリノからタウニュートリノへの振動の直接検出^[2]には、サブミクロンの分解を持つ原子核乾板が唯一といって良い検出器であった。また、測定自動化が必須であったことから、著者は同研究室において、全自動飛跡読取装置の開発を開始し実用化した。素粒子実験の大規模化に伴い、今日までに、ほぼ4年で10倍の高速化を実現してきており、現在最高速の装置(コードネームSUTS)は、1時間で72平方センチの原子核乾板を読み出すことができる。さらに、現在開発中の装置(HTS)はその百倍の速度を目指すものであり、実用化の暁には、火山や熔鉱炉等の構造物の日単位の変化をとらえたり、3次元の映像を合理的な時間で把握したりすることも可能となる。

原子核乾板に記録された素粒子飛跡認識の原理

素粒子実験で使用される原子核乾板の構造は、プラスチックフィルムのベースの両面に厚さ45 μmから100 μm程度の原子核乳剤が塗布されたものである。乳剤層に記録された放射線の一部の高エネルギー荷電粒子の飛跡は、直線上に並んだサブミクロンサイズの銀粒子の連なりとなって現像される。これらを自動認識するために、顕

微鏡の焦点面(ピントが合う範囲は3ミクロン程度)をずらしながら断層映像を取得し二値化する(図2(a))。取得した二値化画像を、目的とする角度で並ぶ銀粒子が垂直に並ぶようにずらし、さらに垂直方向に足し合わせると、この角度に並ぶ銀粒子からなる飛跡は、高い波高を示し、閾値を越えたことを検知することによって、その位置が認識できる(図2(b))。またずらした量からは飛跡の角度が認識できる。さらに波高やその広がりから、この飛跡の濃さの情報、すなわち電荷の大きさ等によるエネルギー損失の違いを認識できる。

原子核乾板の飛跡読み取りの高速化

開発初期には0.003 cm²/hであった読み取り速度は、3世代目には1 cm²/hに達するに至ったが、原子核乾板100万枚を使用するOPERA*1実験^[3]では20 cm²/hを必要とした。飛跡読み取りには焦点面の異なった画像を複数撮影する必要があることから、従来は原子核乾板をセットした載物台を視野毎に静止させて撮影する必要があり、高速な撮像素子を使用したとしても、その撮影時間よりも載物台の移動及び整定時間が支配的になってしまうことが問題となった。例えば、実効視野の大きさ200 μm平方程度で、載物台の移動と整定時間に100 msかかったとすると、撮影に要する時間が十分短いと仮定しても14 cm²/hが読み取り速度の限界となる。著者は、この制限を回避するために載物台を視野毎に静止させず、図3に示すように載物台を水平方向には連続的に駆動しながら

ら、同時に厚み方向に焦点面を変化させて撮影する方法を考案した。高速な piezo素子により対物レンズを乾板面の垂直方向に駆動し焦点面を移動させ、同時に水平方向にも対物レンズを駆動できる piezo素子を備えた。撮影時には、対物レンズを載物台との相対速度が一致するように同期させ駆動し、画像のブレと視野の移動による位置ずれを防ぐ。その結果、載物台の機械的な時定数を越えた、高速な3次元原子核乾板画像撮影が可能になった。撮像素子には3000 fps (frames per second)での撮影が可能なものを採用し、1視野あたり16枚の画像撮影を最大60視野/秒で行うことができる。

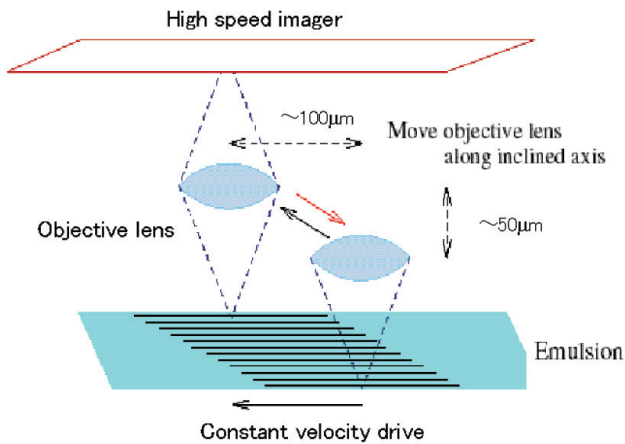


図3 載物台を連続駆動しながら、静止した顕微鏡画像を撮影する手法^[9]
対物レンズは piezoアクチュエーターによりサブミクロン精度で同期制御する。

このように撮影した3次元画像から、前述の飛跡認識を実時間で実行するため、前処理にあたる2次元画像からのグレイスケール抽出には、汎用フィルタLSIとFPGA *2、飛跡認識のための画像の足し合わせ処理は、FPGAによるハードウェア処理を採用した。専用に開発したFPGAボードは、XILINX社製FPGAを11個搭載したものとなってお

り、FPGA間は通常の平行バスによる接続以外にも、20レーンのMGTをリング状に接続し、廉価なスピードグレードのFPGAを使用した場合でも、3.2 Gbyte/sでのFPGA間通信を可能にした(図4)。この専用ボードに前述のアルゴリズムを実装した結果、同時に20種類の独立した角度の足し合わせ処理が可能となり、毎秒約12万通りの角度についての飛跡認識が可能になった。

*1: Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus
写真乳剤飛跡検出装置によるニュートリノ振動検証プロジェクト
*2: Field-Programmable Gate Array

SUTSの基本性能

約100 cm²のOPERA FILM^[4]をSUTS^[5]で読み取った例を(図5(a))に示す。このように、厚さ0.3 mmのフィルム状の原子核乾板1枚からでも、通過した荷電粒子の位置と角度を得ることができる。前述の飛跡認識の原理より、片面の乳剤層のみでも飛跡の角度を測定でき、その精度は、12-15 mrad程度が得られている。一方で、原子核乾板には支持体両面に独立した乳剤層を持つことから、両面で認識・読み取った飛跡の位置ずれから角度が算出できる。OPERA FILMの支持体の厚さは200 μmであり、乳剤層よりも厚いため、乳剤層のみで測定した角度よりも精度が良い。この角度測定精度の再現性を評価するため、同一の飛跡を2回測定した結果の差を(図5(b))に示す。これは、両面塗布乾板を用いた場合に得られる角度測定の再現性を示すだけでなく、片面における飛跡の位置分解能が推定でき、X軸方向がσ=0.37 μm、Y軸方向がσ=0.21 μmに相当する。重要な性能指標として飛跡検出効率が挙げられるが、原子核乾板に記録された宇宙線の

飛跡を読み取りにより評価したものを(図5(c))に示す。OPERA FILM 4枚(乳剤層8面)を重ねた検出器に宇宙線を照射し、現像後に読み取りを行う。中間部の1枚を除いた3枚で検出できた、すなわち4枚を確実に貫通した飛跡を参照飛跡とし、読み取っていない一枚における位置を推定する。同乾板をSUTSで読み取り、推定した位置に、正しく飛跡を見つけることができるかどうかで検出効率を求めた。使用したSUTSは、有効視野サイズ200 μm平方、最大読み取り速度72 cm²/hである。検出効率の算出

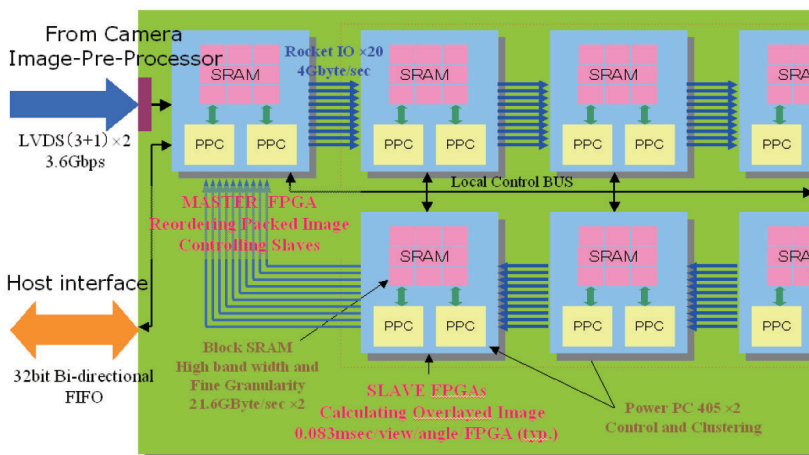


図4 本研究のために開発したFPGAボードのブロックダイアグラム^[9]

には、原子核乾板の支持体を鉋んだ両面の乳剤層を独立に読み取り、両面共検出できた飛跡のみを使用している。通常使用する角度領域では、概ね95%を達成しており、十分な検出効率を持つことが解った。

ミュオンラジオグラフィーへの応用

素粒子実験以外での展開例として、東京大学地震研究所の田中宏幸氏らと行った、宇宙線ミュオン粒子の透過密度をとらえることにより、火山の内部構造を調べる研究が挙げられる^[6]。自然放射能の一種である宇宙線に含まれるミュオン粒子は、緯度等に依存するものの、ほぼ一定量が大气上層部で発生し、常に地上に降り注いでいる。またミュオン粒子は透過力が強いものの、物質を通過するとエネルギーを失って減衰する。この減衰量を測定することで、対象の内部を推定する手法がミュオンラジオグラフィーであり、古くはAlvarezらによる、ピラミッドの探索が有名である^[7]。原子核乾板は、電源不用かつコンパクトであることから、ミュオン粒子の検出器としても優れているが、従来は読み取りに膨大な時間がかかることから、このような用途には使うことが出来なかった。

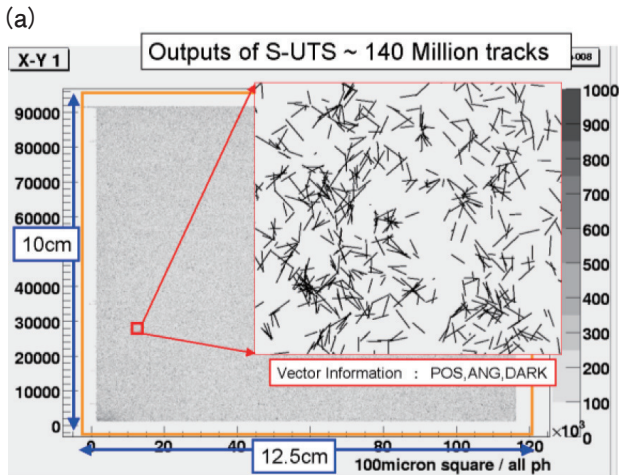


図5 (a) SUTSによる原子核乾板の読取り例^[9]
読み出された飛跡はそれぞれ位置、角度、濃度の情報を持つ。記録された飛跡の多くは自然放射能に由来する低エネルギー電子である。

図6(a)は、昭和新山の方角に向けて設置し宇宙線を約3ヶ月照射した原子核乾板の飛跡をSUTSにより、読み取って得られた昭和新山の宇宙線写真である。図中の点々

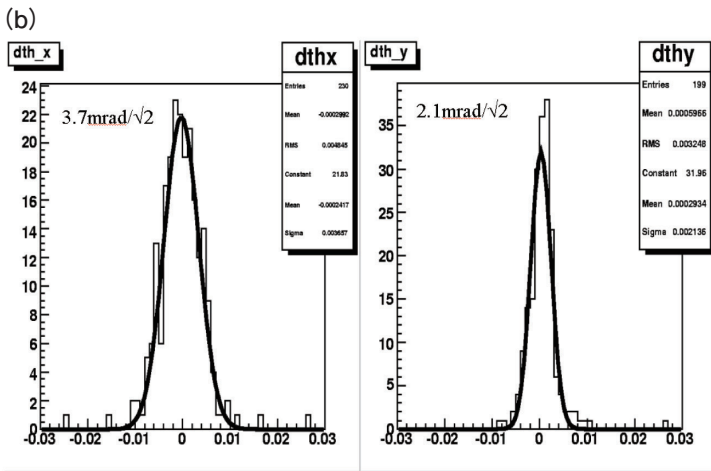


図5 (b) 飛跡読み取りの角度再現精度^[9]

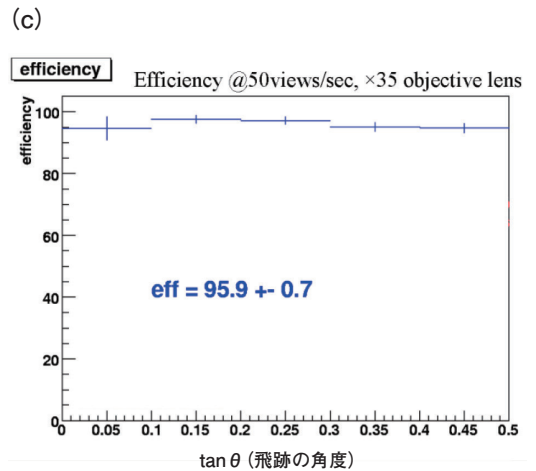


図5 (c) SUTSによる飛跡検出(認識)効率^[9]

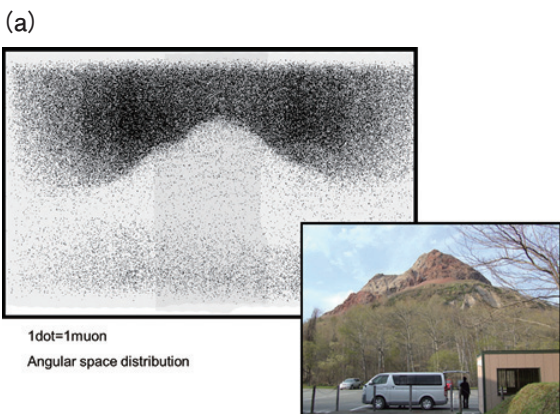


図6 (a) 宇宙線ミュオン粒子による昭和新山の撮影像。右下は検出器を設置したプレハブ

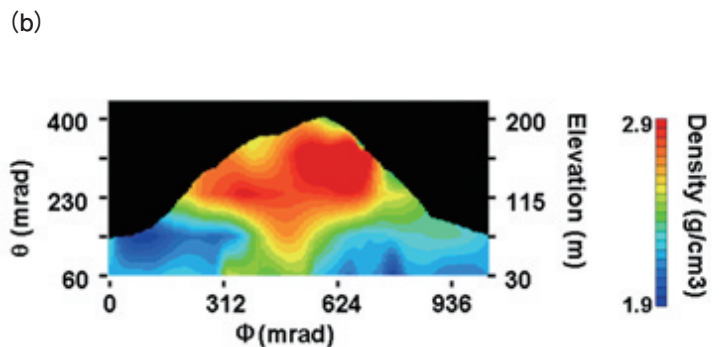


図6 (b) 宇宙線ミュオン粒子の量と測量による外形から密度に変換した例^[8]

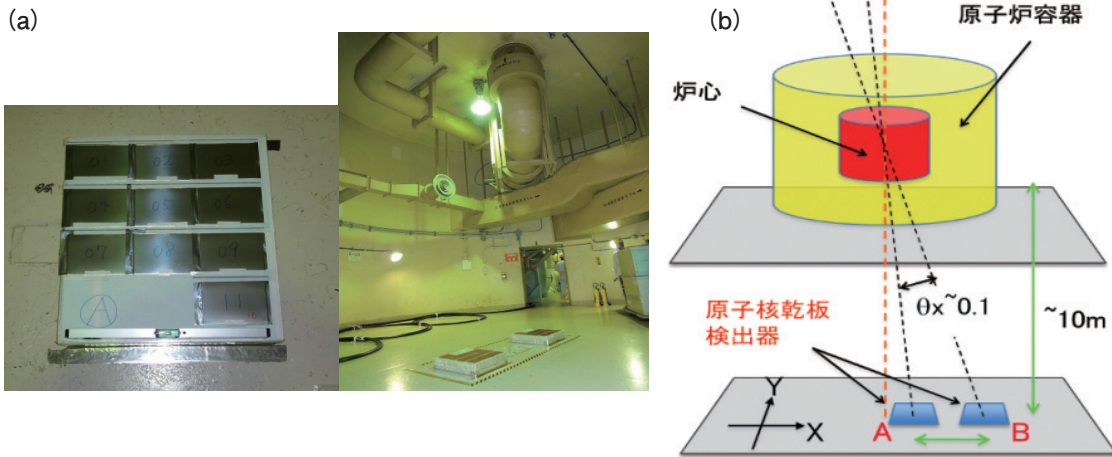


図7 (a)左写真は設置した原子核乾板
11パックを1組としたものを2セット使用した。右写真は原子炉直下での設置状況。
(b)設置場所と原子炉の位置関係の模式図(図引用：Newton 2012年4月 P.11 FOCUSより)

一つが宇宙線一つ一つに対応している。この宇宙線による写真は、飛跡情報を角度空間に投影したもので、横軸が宇宙線の入射方位角、縦軸が入射仰角を表している。火山の影がわかるが、影の中にも宇宙線が来ていることが読み取れる。影の中での宇宙線の減衰量から、火山の物質質量(密度×厚さ)がわかり、また厚さは測量により精度良くわかるため、火山の密度構造を求めることができた。(図6(b))^[8]

次に示す例は、人工の構造物である原子炉の内部状態を把握する可能性を検討したものである。その試験として茨城県にある高速実験炉「常陽」での撮像試験を、名古屋大学工学部、ならびに日本原子力開発研究機構の協力を得て行った。「常陽」はナトリウム冷却タイプの原子炉であるが、ナトリウムの密度はほぼ水と同じであり、物質分布としては、商業用炉に比べて炉心のサイズが十分の一以下である。図7(a)に原子核乾板の設置状況の写真を示す。原子核乾板の設置場所は、高速実験炉「常陽」の直下で炉心から約10 mのところである。設置した原子核乾板は(a)左図の写真に示すようなものを一つのセットとして、A、B二つのセットを約1 m離して設置した(図7(b))。一つのセットは11個の原子核乾板のパックからなり、一つのパックには、面積125 cm²のフィルムを3枚重ねて真空梱包されている。照射期間は21日間であった。自動飛跡読取装置で記録された飛跡を読み取り、飛跡の飛来方向情報をプロットしたものが図7(c)である。左はAの位置のもので炉心のほぼ真下、右はBのものでAから1 mほど外しておいたものである。図中では赤いほど宇宙線がたくさん飛来しており、物質の量が少ないことを示している。

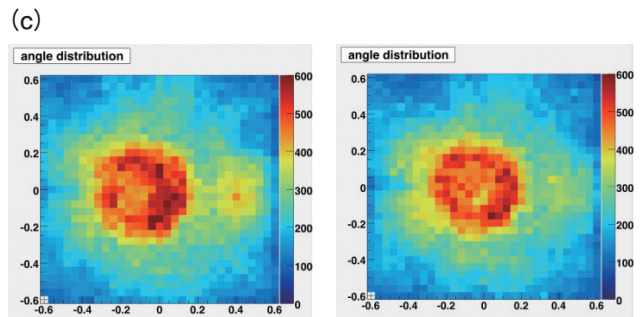


図7 (c)左が原子炉直下に設置したセットAで測定した宇宙線量の角分布。
右が約1 m離れた場所に設置したセットBで測定したものの。

両図の赤い円形の部分は、ナトリウムの満たされた格納容器を示しており密度の低い部分を示している。格納容器内にある炉心の影は、左図ではそのほぼ中央、右図では左に少しそれて、宇宙線の数が減った領域として明瞭に認識できることがわかる。そのずれ具合は、原子核乾板をずらしておいたことにより期待される炉心の影のずれと一致しており、確かに炉心をとらえていることがわかる。また格納容器の右側の領域に物質量の少ない領域が見えるなど細かな構造も見えてきており、現在設計図上の物質分布との比較を行っている。商業用原子炉の炉心であれば、常陽に比べて直径で倍以上、厚みで3倍程度であることから、よりコントラストの高い映像がとれるものと期待される。

おわりに

現在開発中の次世代機HTSは、SUTSの600倍の視野サイズとする事で、0.9 m²/h程度の原子核乾板に記録された飛跡を読み出すことができる。これは、次期計画として予定されている応用研究、火山や熔鋳炉の内部状態の日

変化や三次元構造を解明するためのプロジェクト, 原子核乾板を用いて行う宇宙の暗黒物質の探索, 気球搭載型の高精度 γ 線望遠鏡計画の要請にほぼ答えるものとなっている。技術的な問題がまだ多数潜在していると思われるが, これまでの企業・共同研究者との協力関係をさらに発展させてこれらを克服し, 数年内の本格的実用化を目指したい。

謝辞

本研究は, 名古屋大学名誉教授, 丹羽公雄氏, 同基本粒子研究室及び全学技術センターの共同研究者の協力の下に行われました。またその他関係機関の方々にも深く感謝いたします。

参考文献

- [1] K.Hoshino et al., Proc. of International Cosmic ray Sympo. of High Energy Phenomena. Tokyo (1974) **149**.
S.Aoki et al., "The Fully Automated Emulsion Analysis System.", *Nucl. Instr. and Meth.*, **B 51** (1990) 466
- [2] [CHORUS Collaboration], E. Eskut et al., "Final results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillation from the CHORUS experiment.", *Nucl.Phys.* **B793**: 326-343, 2008
- [3] [OPERA Collaboration], M. Guler et al., "OPERA: An appearance experiment to search for $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations in the CNGS beam. Experimental proposal.", CERN-SPSC-2000-028, CERN-SPSC-P-318, LNGS-P25-00, Jul 2000.
- [4] T. Nakamura et al., "The OPERA film: New nuclear emulsion for large-scale, high-precision experiments.", *Nucl. Instrum. Meth.* **A556**: 80-86, 2006
- [5] K. Morishima, T. Nakano (Nagoya U.), "Development of a new automatic nuclear emulsion scanning system, S-UTS, with continuous 3D tomographic image read-out." *JINST* **5** (2010) P04011
- [6] Tanaka, H.K.M., T. Nakano, S. Takahashi, J. Yoshida, and K. Niwa, "Development of an emulsion imaging system for cosmic-ray muon radiography to explore the internal structure of a volcano, Mt. Asama", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors, and Associated Equipment A*, Vol. **575**, No.3, pp. 489-497, June, 2007.
- [7] Luis W. Alvarez et al. "Search for Hidden Chambers in the Pyramids", *Science, New Series*, Vol **167**, Issue 3919 (Feb.6,1970), 832-839.
- [8] H. K. M. Tanaka, T. Nakano, S. Takahashi, J. Yoshida, H. Ohshima, T. Maekawa, H. Watanabe, K. Niwa, "Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons: The structure beneath Showa-Shinzan Lava Dome, Japan", *Geophysical Research Letters*, Vol. **34**, L22311, 5 PP., 2007, doi:10.1029/2007GL031389
- [9] 図引用 中野敏行, 森島邦博 日本写真学会誌2008年71巻4号229-233



中野 敏行

Toshiyuki NAKANO

名古屋大学大学院 理学研究科
助教
博士(理学)