

# 学位論文

## 原子核乾板の超高速自動飛跡読み取り装置 HTS

吉本 雅浩 <sup>\*1</sup>

最終更新 2018 年 2 月 9 日

<sup>\*1</sup> yoshimoto@flab.phys.nagoya-u.ac.jp

## 要旨

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記録できる 3 次元飛跡検出器である。原子核乾板は Powell らによる  $\pi$  中間子の発見、丹生らによるチャーム粒子の発見などで素粒子物理学に貢献してきた。近年ではタウニュートリノを発見した DONuT 実験やニュートリノ振動  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  をアピアランスモードで発見した OPERA 実験で用いられた。これらの発見は、名古屋大学における自動読み取り装置の発明と高速化が重要な役割を果たした。

原子核乾板の用途は素粒子物理学にとどまらず、ガンマ線天体の精密観測を目指す気球搭載型宇宙ガンマ線望遠鏡計画 GRAINE や、短寿命粒子や低エネルギー粒子に着目したニュートリノ実験、大型構造物を透視する宇宙線ミュオンラジオグラフィへと拡大を見せており、読み取り装置に要求される性能は OPERA 実験で用いられた S-UTS の二桁上の 1000 平米になる。この読み取り能力を持つ次世代の原子核乾板自動飛跡読み取り装置 Hyper track selector (HTS) の開発を始めた。

HTS は従来比 600 倍の視野面積を持つ対物レンズと、それをカバーするため 72 個の 2M ピクセルの撮像素子で構成されるモザイクカメラ、36 台の解析用コンピュータ、原子核乾板を三次元的に移動させるためのステージで構成される。これらの全デバイスを統括するためのソフトウェアを設計し、協調して読み取りを行うシステムを構築した。HTS は 5 mm×5 mm の視野面積をサブミクロンの位置精度を持ちながら複数の撮像素子で並列に飛跡を読み取ることが要となる。そこで、各撮像素子で読み取られる飛跡情報をサブミクロン精度で一つの座標系に統合する手法を開発した。さらに、撮像素子の位置の経時変化を補正するために、実際の飛跡を用いて動的に補正する手法を開発した。また、飛跡認識に用いるソフトウェアの改良と GPU の発展に伴い飛跡の認識角度空間が拡大したため、入射角の大きい飛跡で発生する偽飛跡を除去する手法の開発を行った。

開発した HTS で GRAINE の 2015 年フライトの原子核乾板の読み出しを行い、その実データを用いて、入射角  $\tan \theta < 1.6$  の角度領域で 97% 以上の検出効率と、 $\tan \theta < 0.1$  で 2.5 mrad の角度精度を達成し、実用に十分な性能を有していることを実証した。また飛跡の絶対角度に対する、ステージの位置の不定性や平面性、光軸の傾きの影響を評価し、その補正を行い、角度精度の向上を実現した。またステージを移動する際に発生する振動を打ち消すためのカウンターステージの応答特性を評価し、読み取り速度を最大化する制御方法を実現した。その結果、1% の検出効率の損失を許容すれば、 $4700 \text{ cm}^2/\text{h}/\text{layer}$  での読み取りが可能であることを示した。これは、S-UTS の 70 倍の速度であり、2 年で 1000 平米の原子核乾板の読み取りが可能になった。GRAINE 計画やニュートリノ実験、宇宙線ミュオンラジオグラフィなどの次期計画で必要とされる読み取り速度を達成した。

# 目次

第 1 章	序章	6
1.1	原子核乾板とその特徴 . . . . .	6
1.2	原子核乾板の物理学における歴史 . . . . .	8
1.2.1	手動読み取りの時代 . . . . .	8
1.2.2	半自動ステージの導入 . . . . .	10
1.2.3	全自動飛跡読み取り装置の発明と高速化 . . . . .	12
1.2.4	OPERA 実験 . . . . .	14
1.3	原子核乾板の全面解析 . . . . .	17
1.4	原子核乾板による宇宙ガンマ線精密観測 . . . . .	19
1.4.1	ガンマ線天文学 . . . . .	19
1.4.2	ガンマ線天文学の課題 . . . . .	19
1.4.3	大口径原子核乾板ガンマ線望遠鏡 . . . . .	22
1.5	宇宙線ミュオンラジオグラフィ . . . . .	23
1.6	超高速自動飛跡読み取り装置 HTS . . . . .	27
第 2 章	HTS のシステム	29
2.1	光学系: 対物レンズと照明系 . . . . .	29
2.2	カメラ . . . . .	32
2.3	XYZ 軸ステージ . . . . .	32
2.3.1	XY 軸ステージ . . . . .	32
2.3.2	Z 軸ステージ . . . . .	34
2.3.3	各軸のまとめ . . . . .	35
2.4	コンピュータ群 . . . . .	35
2.4.1	コンピュータの構成 . . . . .	35
2.4.2	ネットワークの構成 . . . . .	37
2.4.3	ソフトウェア構成 . . . . .	37
2.5	画像処理と飛跡認識 . . . . .	38
2.5.1	画像処理 . . . . .	38

2.5.2	画像処理ステップ 1	39
2.5.3	画像処理ステップ 2	40
2.5.4	画像取得の成否判定	40
2.5.5	飛跡認識	42
2.5.6	飛跡のクラスタリング	42
2.5.7	処理の並列化	43
<b>第 3 章</b>	<b>HTS のための開発</b>	<b>45</b>
3.1	大角度飛跡への対応	45
3.1.1	Radial-Lateral 成分	45
3.1.2	Radial クラスタリング	46
3.2	像の歪みとその補正	46
3.2.1	像の歪みの原因	47
3.2.2	歪みの補正手法	48
3.2.3	原子核乾板中のグレインを用いたセンサ座標系の測定	49
3.2.4	読み取った飛跡を用いた精密なセンサ座標系の測定	51
3.3	ステージのチューニング	52
3.3.1	振動の評価	53
3.3.2	結果	54
3.3.3	考察	54
<b>第 4 章</b>	<b>読み取り性能の評価</b>	<b>56</b>
4.1	飛跡再構成	57
4.2	ベーストラックの検出効率	57
4.3	角度精度の評価	58
4.4	速度と検出効率	61
4.4.1	Track selector シリーズとの比較	62
<b>第 5 章</b>	<b>GRAINE-2015 フライトへの適用</b>	<b>65</b>
5.1	GRAINE-2015 フライトまでの経緯	65
5.2	GRAINE プロジェクトための開発と評価	65
5.2.1	バックラッシュの測定	66
5.2.2	光軸の傾き測定	68
5.2.3	ステージの平面性測定	69
5.3	GRAINE-2015 フライト乾板の読み取り	70
<b>第 6 章</b>	<b>今後の展望とまとめ</b>	<b>74</b>

---

6.1	ニュートリノ・原子核散乱精密測定 . . . . .	74
6.2	$\nu_\tau$ の研究 . . . . .	75
6.2.1	DsTau 実験 . . . . .	75
6.2.2	SHiP 実験 . . . . .	76
6.3	宇宙線ミュオンラジオグラフィ . . . . .	77
6.4	HTS のさらなる高速化 . . . . .	79
6.5	まとめ . . . . .	81
参考文献		83
付録 A	HTS の予約・管理システム	94
付録 B	光源の検討	95
付録 C	Y 軸ステージの改良	97
付録 D	実効的な被写界深度の測定	99
付録 E	センサアライメント計算のためのソースコード	102

# 第 1 章

## 序章

### 1.1 原子核乾板とその特徴

荷電粒子の飛跡を記録できる放射線飛跡検出器には、霧箱、泡箱、ガスの電離とを使ったガス検出器、シンチレータの発光を使ったシンチレーションファイバー検出器、半導体のバンドギャップを使った半導体検出器、固体の荷電粒子による損傷を使った固体飛跡検出器がある。原子核乾板は臭化銀のバンドギャップを使った半導体検出器とも言えるが、直接電氣的・光学的な読み出しをせず、化学的な増幅を行った後で光学顕微鏡で読み出しを行うため、一般には半導体検出器とはされず、原子核乾板 (エマルション) という分野を構成している。

原子核乾板は臭化銀を主としたサブミクロンサイズのハロゲン化銀結晶がゼラチンを主とするバインダー中に分散した構造をしており、ハロゲン化銀の結晶一つ一つが荷電粒子に対し感度がある。臭化銀は半導体なので、荷電粒子がハロゲン化銀結晶を通り電離したり光が当たったりすると電子正孔対を生成する。その電子の一部は結晶の表面まで移動し、臭化銀の銀イオンを還元し潜像核と呼ばれる微小な金属銀を作る。この潜像核は直接観察できないため、化学的に大きくするために現像工程を行う。現像工程ではまず現像主薬の還元作用により潜像核を核としながらハロゲン化銀を還元し金属銀の塊 (グレインと呼ぶ) を作る。次に定着液によって金属銀を保持しながら残ったハロゲン化銀結晶を溶かし出し、ゼラチン中にグレインだけを残す。グレインの三次元位置は光学顕微鏡を用いて読み取られる。

エマルションの最大の特徴はその高い空間分解能である。原理的な空間分解能はハロゲン化銀結晶のサイズが決めている。他の飛跡検出器では空間分解能を悪化させる要因としてクロストークや拡散などが挙げられるが、エマルションの場合は状況が異なる。エマルション中のハロゲン化銀結晶は絶縁体のゼラチンに包まれているため電子正孔対由来の電子が隣の結晶に移動することはない。また、現像主薬がハロゲン化銀を金属銀に還元する際はゼラチンの高分子が壁となり、元々ハロゲン化銀結晶のあった位置にグレインが成長

する。これらの作用により、原子核乾板は荷電粒子の飛跡を結晶サイズとほぼ同等の空間分解能でグレインの点列として保持することができる。標準的な原子核乾板であるハロゲン化銀結晶の平均結晶直径が 200 nm のとき、44 nm が原理的な空間分解能となる。

原子核乾板にはいくつかの制約が存在する。原子核乾板は飛跡がいつ通ったかを記録することはできず、乾板を製造してから現像するまで、または飛跡を消すりフレッシュ処理を行ってから現像するまでの間に通った全ての荷電粒子<sup>\*1</sup>を記録する。もう一つの制約は乾板の変形である。原子核乾板は製造時に約 10 倍の水を含む状態 (原子核乳剤と呼ばれる) で塗布され、乾燥によって 1/10 の体積に収縮する。その後、照射を経て現像工程で水溶液に入れた際は約 3 倍程度に膨張し、定着工程と乾燥によって照射時の約半分の体積になる (シュリンクと呼ばれる)。これらの工程で、飛跡に歪み (ディストーション) が発生することが知られている。エマルジョンに含まれるゼラチンには吸湿性があるため、塗布し乾燥した後の乾板は周辺の湿度によって密度が変化し、さらに定着し乾燥した後の乾板も周辺の湿度によって体積が変化する。エマルジョンで精密なエネルギー測定や角度測定を行う際は、このディストーションやシュリンクを読み取った飛跡を用いて定量的に補正することとなる。

他のリアルタイム読み出しが可能な飛跡検出器は、読み出し装置の体積やチャンネル数の制約により大型化と高空間分解能を両立することが難しい。一方、エマルジョンはハロゲン化銀結晶が占める体積率は約 50%<sup>\*2</sup>で、このときハロゲン化銀結晶の数密度は  $10^{14}/\text{cm}^3$  に達する。最小電離粒子 (minimum ionizing particle = MIP) が通ったとき、貫通した結晶数に対し現像される結晶数の割合 (感度) は約 10% で、25–50 個/ $100\text{ }\mu\text{m}^3$  になる。荷電粒子と無関係に発生するグレインはフォグと呼ばれ、その密度は  $(10\text{ }\mu\text{m})^3$  あたり 1–10 個<sup>\*4</sup>で、単位を揃えると  $10^{9-10}/\text{cm}^3$  になる。エマルジョンは時間情報を持たないため、ランダムに発生するフォグと放射線由来のグレインは飛跡は、形状の違いによって区別することになる。

エマルジョンの高い分解能を生かすためには、読み取りに用いる光学顕微鏡にも同等の空間分解能がなければならない。1  $\mu\text{m}^3$  ごとに 1 Byte の情報量で読み取ったとすると、エマルジョンの記録密度は 1 TB/ $\text{cm}^3$  に達する。エマルジョンの体積が 100 リットルの実験では情報量は 100 PB に達し、このデータの中から目的とする飛跡の情報を選び出さなければならない。現像後のエマルジョンは適切な環境下で長期保管ができるものの現実的な読み取り時間には実験毎に上限がある。

次章では、原子核乾板の略歴とこの膨大な情報量を物理実験で実用可能にするための技

<sup>\*1</sup> 最小電離粒子に感度を持たない乾板も実在するが、本論文では扱わない。

<sup>\*2</sup> OPERA フィルムは 30%、GRAINE-2015 乾板は 55% など、用途に応じて体積率は調整が可能である。

<sup>\*3</sup> この値は grain density (GD) と呼ばれ、ハロゲン化銀結晶が占める体積率や現像処方等に依るが、ハイパー核探索用乾板は 25 個/ $100\text{ }\mu\text{m}$ 、OPERA 乾板は 36 個/ $100\text{ }\mu\text{m}$ 、GRAINE-2015 乾板は 50 個/ $100\text{ }\mu\text{m}$  などがある。

<sup>\*4</sup> この値は fog density (FD) と呼ばれる。

術的な発明と開発、そしてエマルションによる発見の歴史を述べる。

## 1.2 原子核乾板の物理学における歴史

### 1.2.1 手動読み取りの時代

1910年、木下がアルファ線の飛跡を原子核乾板で観察できることを確認し [1]、原子核乾板による放射線飛跡検出の時代を切り開いた。図 1.1 は木下らが観察したアルファ線飛跡の顕微鏡写真であり、飛跡をグレインの点列として捉えている。1940年代には Powell らが原子核乾板の感度向上に取り組み、電子線を飛跡として記録できる乾板の開発に成功した [2]。また、宇宙線観測を行う中で、1947年に  $\pi \rightarrow \mu$  事象を検出した [3](図 1.2)。この発見により、湯川理論から予想され、また坂田らが提唱した 2 中間子論が正しいと実証された。その後の原子核乾板を使った宇宙線研究で、3 個の  $\pi$  中間子に崩壊するもの、 $\mu + \nu$  に崩壊するもの (いずれも後の  $K$  中間子) なども見つかった。1960年代には、サイクロトロンやシンクロトロンの発達により  $\pi$  中間子や  $K$  中間子は加速器によって容易に作られるようになった。ハイペロンや  $K$  中間子は寿命が  $10^{-8}$ – $10^{-10}$  s で数 cm から数 m の飛程で崩壊するため、エマルションの高分解能は不要となり泡箱やガス検出器に取って替わられた。

一方、加速器を持てなかった日本とソ連では当時の加速器では手の届かなかった高エネルギー粒子による中間子多重発生現象の研究が進められた。高エネルギー粒子による反応は、エマルションの一つの乳剤層で完結させるのではなく、垂直方向に貫通する飛跡を重ねた複数の乾板で検出する手法が採られるようになった。原子核乾板の間に別の物質を挟むことによって、標的質量を稼いだり、ガンマ線のカスケードシャワーを見ることのできる emulsion cloud chamber (ECC)(図 1.3 右) が開発された [5]。

従来まで用いられてきた乳剤層だけで構成されるペリクル<sup>\*5</sup>ではバインダーとなるゼラチンが変形しマクロな位置情報が変化してしまう問題があった。そこで、飛跡の位置や角度を精密に記録するために、プラスチックフィルムをベース材にしてその両面に乳剤層を

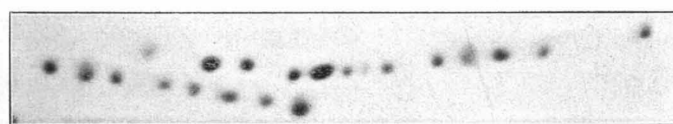


Fig. 8.

図 1.1: エマルションに記録されたアルファ線の顕微鏡写真。横向きに走る点列がアルファ線。[4]

<sup>\*5</sup> 原子核乾板の原料となる原子核乳剤をガラスに塗布し、乾燥させて数 100  $\mu\text{m}$  厚にし、剥がして乳剤層のみにしたもの。

作り、形状保持をプラスチックフィルムに任せることでこの問題を解決した原子核乾板が作られた。乳剤層の中だけで認識した飛跡(マイクロトラック)の角度精度はディストーションの影響で数 10 mrad になってしまうに対し、数 100  $\mu\text{m}$  のベース材\*6 を用いることで、両面の乳剤層にある飛跡のプラスチックベース側の端点同士を接続して作られる飛跡(ベーストラック)の角度精度は 1 mrad となり、角度精度を大幅に向上させることに成功した。

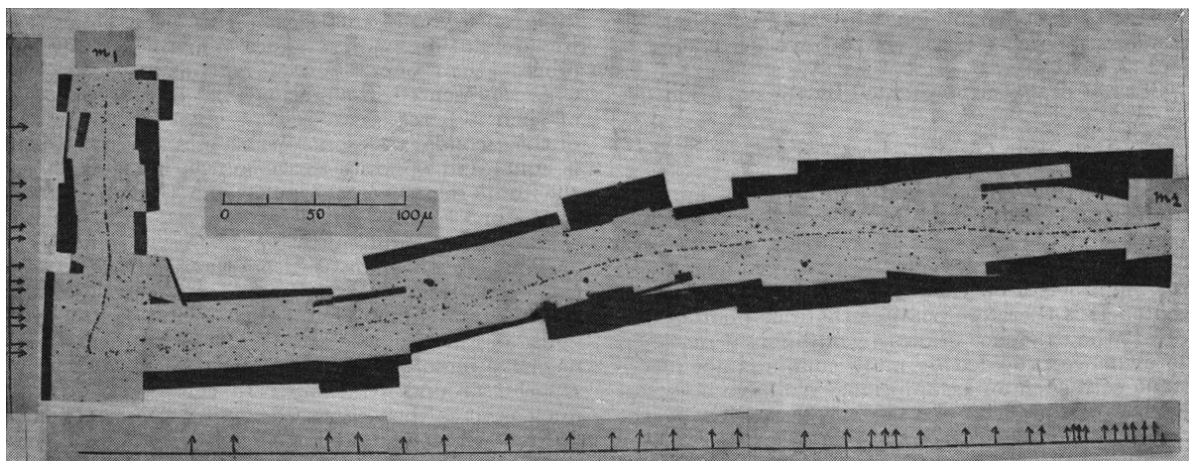


図 1.2: エマルジョンに記録された  $\pi \rightarrow \mu$  事象の顕微鏡写真。左上から左下への飛跡 ( $m_1$ ) が  $\pi$  中間子で、左下から右側への飛跡 ( $m_2$ ) が  $\mu$  粒子 [3]

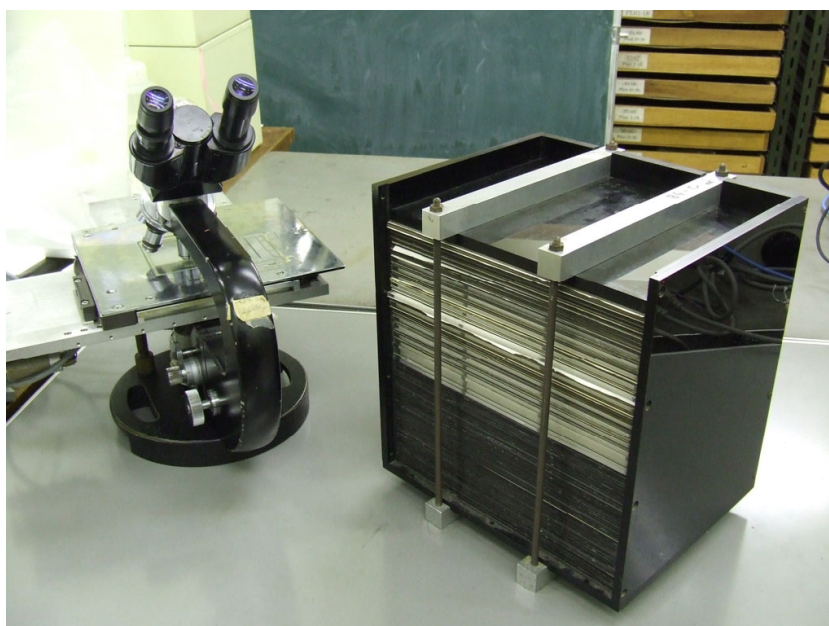


図 1.3: X 粒子を観測した ECC(20 cm×25 cm×25 cm)(右) と、解析に用いた手動顕微鏡(左)

\*6 当時富士フイルムが開発したベース材の厚みは 800  $\mu\text{m}$

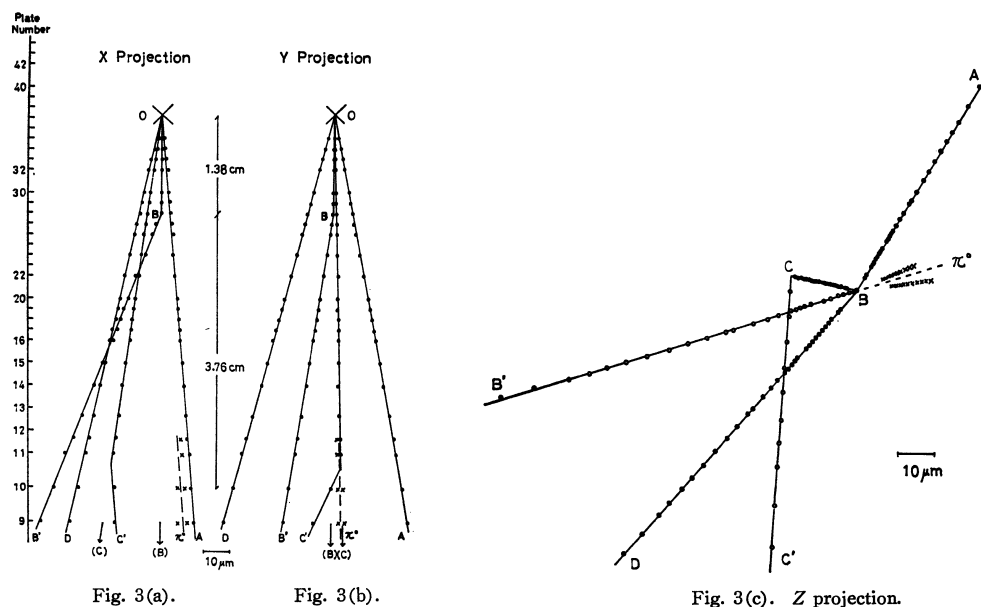


図 1.4: ECC に記録された X 粒子崩壊事象 [6]

原子核乾板からの飛跡の読み取りは、手動顕微鏡 (図 1.3 左) を使って人が目視で行っていた。約  $100\ \mu\text{m}$  四方の顕微鏡の視野から飛跡を探し、接眼マイクロメータの方眼目盛で位置を読み取り、方眼紙に書き写すというもので、1 本あたり約 1 分かかった。飛跡密度が  $10^4$  本/ $\text{cm}^2$  とすると、1 時間で  $\mathcal{O}(0.01)\ \text{cm}^2$  を読み取りできる。高エネルギー宇宙線はフラックスが少なく、 $100\ \text{cm}^2$  に  $\mathcal{O}(1)$  本程度の高エネルギー反応を合理的な時間で探し飛跡の測定を行うため、下流に設置した X 線フィルムに記録されたシャワーの位置情報を用いて探索範囲を絞った。これは、原子核乾板と X 線フィルムのハイブリッド実験 (複合実験) である。

この検出器を用いた実験の中で、1971 年に丹生らは宇宙線の飛跡から X 粒子事象を発見した [6](図 1.4)。1974 年に  $J/\Psi$  (チャームクォークと反チャームクォークの束縛状態) の発見され [7, 8]、1975 年に X 粒子の寿命が報告された (図 1.5)。この X 粒子は後にチャームクォークを含む D 中間子と呼ばれるもので、チャーム粒子の研究は加速器の主要な研究テーマになった。チャーム粒子の寿命は  $10^{-13}$ – $10^{-12}$  s と非常に短いため、検出にはエマルジョンや解像度を高めた泡箱が使われるようになった。

### 1.2.2 半自動ステージの導入

加速器実験に原子核乾板を導入するためには大量の事象を解析する必要があり、技術的進歩が不可欠となった。技術的進歩の一つはエマルジョンとカウンターとのハイブリッド法の採用である。高い空間分解能を持つエマルジョンと、粒子識別や運動量測定を容易に行うことのできるカウンターを組み合わせることで、興味事象をエマルジョンの読み取り

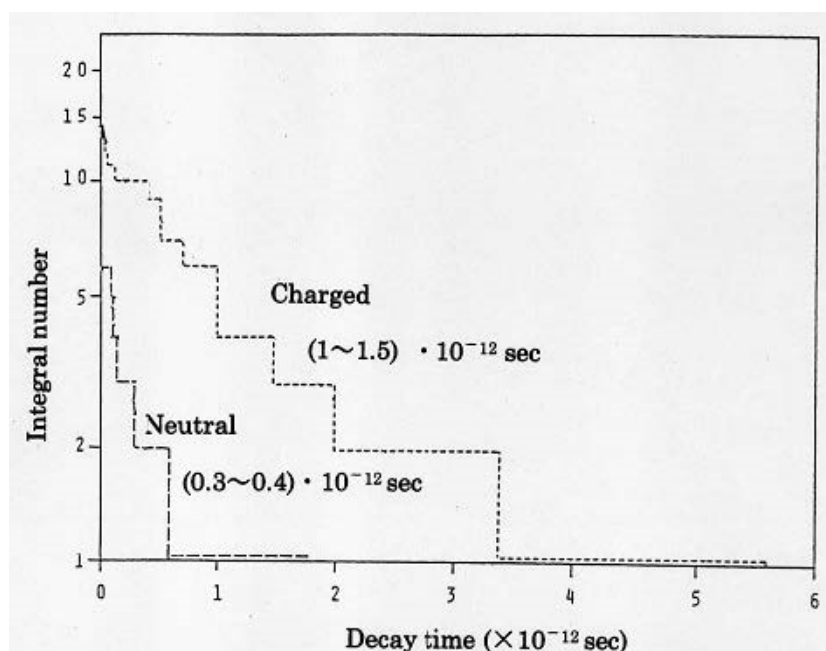


図 1.5: X 粒子の寿命の測定 [9]

前に選別することが可能となった。その際、カウンターにより数  $10\text{--}100\ \mu\text{m}$  の位置精度で記録した興味事象の粒子をエマルジョンに高い信頼性で接続する必要がある。エマルジョン側で一意的に飛跡を決定するため反応と無関係な飛跡を減らす必要があり、最下流の乾板は一定期間ごとに交換する changeable sheet (CS) 方式が開発された [10]。この CS 乾板に飛跡を接続できれば、乾板同士は高い位置分解能により反応点に向かって飛跡を追いつ上げることは容易となる。

もう一つの技術的進歩は読み取り手法の改善である。1971 年には手動による飛跡の探索と測定を補助するためにリニアエンコーダとモータを搭載し乾板を指定した座標に自動で動かすことのできる自動ステージが開発された。ビデオカメラを用いて顕微鏡画像をディスプレイ上に表示するとともに、飛跡の予測角度ベクトル等をあわせて表示し、人が認識した飛跡の位置や角度の測定を補助する装置もできた。これらは半自動ステージと呼ばれる。接眼マイクロメータと方眼紙を用いた飛跡の記録作業は、ディスプレイを見ながらのマウスやキーボードによるコンピュータ入力に取って代わられ、数 10 倍速くなった ( $0.1\text{--}1\ \text{cm}^2/\text{h}/\text{layer}$ )。

1978 年よりチャーム粒子の寿命測定を主目的とした E531 実験が米国 FNAL で始まった。E531 実験はエマルジョンとドリフトチェンバーのハイブリッド実験で [11]、前述の半自動ステージ補助を受けながら、3886 例のニュートリノ反応を解析し、 $D^0$ 、 $D^\pm$ 、 $\Lambda_c$ 、 $D_s$ (当時の  $F$ ) の寿命が測定された [12, 13, 14]。E531 実験は、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  振動の上限 [15, 16] も副産物とした与えた。

エマルジョンはハドロンの物理でも用いられるようになった。WA75 実験はビューティ

クォークを含む中間子の探索を目的とし 1983 年よりスイス CERN の 400 GeV の陽子ビームや 350 GeV の  $\pi$  ビームを ECC に照射した。ビームスポットが小さいハドロンビームをエマルシヨンの全面に均一に照射するために、エマルシオンをビームスポットに対して移動させることのできる、ターゲットムーバーと呼ばれる精密ステージが開発された。生成頻度の低いビューティ事象をミュー粒子スペクトロメーターで濃縮し、SSD 飛跡検出器を中継して ECC の反応点まで追跡し、数 mm の飛程で崩壊するビューティ粒子対事象を探索した [17]。E653 実験は、ヘビークォークを含む粒子の研究のため、1985 年より米国 FNAL の 800 GeV の陽子、650 GeV の  $\pi^-$  を ECC にターゲットムーバーを用いて照射した [18]。ビューティ粒子の対生成事象を 9 対得て、 $B^0$  及び  $B^\pm$  の寿命 [19]、 $D_s$  生成率と崩壊定数  $f_{D_s}$  を得た [20]。E176 実験は、ダブルハイパー核 (ストレンジクォークを 2 個含む原子核の総称) の存在や  $H$  ダイバリオン ( $uuddss$  の 6 個のクォークから構成される粒子) の存在を確認するため、1988 年より KEK PS 加速器からの  $K^-$  ビームを厚型エマルシオンの積層構造にターゲットムーバーを用いて照射した。カウンターを使って  $K^-p \rightarrow K^+\Xi^-$  反応を選び出し、下流に設置したシリコンストリップ検出器 (SSD) から  $K^+$  を追い上げ反応点を見つけ、さらに  $\Xi^-$  を追い下げて乾板中の原子核に吸収された点を見つけた。E176 実験では 1 例のダブルハイパー核候補を発見した [21]。<sup>\*7</sup>

### 1.2.3 全自動飛跡読み取り装置の発明と高速化

エマルシオンによるチャーム実験やハドロン実験が行われる中で、さらなる解析手法の高速化のため、1974 年に丹羽らは原子核乾板の断層映像を重ね合わせることによって目的の角度を持った飛跡をコンピュータにより自動で探し出す手法 [25] を発表した<sup>\*8</sup>。この手法は後に Track selector と呼ばれ、主に乾板を貫通する高運動量の荷電粒子の飛跡を読み取ることができる。アルゴリズムは三次元的な直線検出であり、図 1.6 のように顕微鏡画像を二値化し、ある角度の飛跡が垂直になるようにシフトさせ、画像を足しあわせ、飛跡らしさを Pulse height として得る。メモリ上の画像データの移動と積算という単純な計算を繰り返すことにより、乾板を貫通した様々な角度の飛跡を検出することができる。当時のコンピュータ技術ではこのアイデアの実現が困難であったが、高密度半導体メモリの登場により、1983 年には飛跡の自動認識機能を持った全自動読み取り装置 Track selector

<sup>\*7</sup> ダブルハイパー核を探索する実験は、主検出器として厚みが 500  $\mu\text{m}$  の乳剤層をプラスチックベースの両面に塗布した厚型乾板を用いており、ニュートリノ実験などで用いられた 50  $\mu\text{m}$  程度の乳剤層を持つ薄型乾板とは異なる解析手法が必要であった。読み取り装置の飛跡認識や飛跡追跡に関しては、名古屋大学で開発される Track selector シリーズと異なる歴史を歩むことになった。1999 年には E176 実験の統計量を 10 倍にした KEK-PS E373 実験が行われ、ダブルハイパー核  ${}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He}$  を発見し [22]、 $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用は弱い引力相互作用であることを示した。その後さらに統計量を 10 倍にした J-PARC E07 実験 [23, 24] へと繋がっている。

<sup>\*8</sup> プロシーディングス中で述べられている手法は、角度のついた飛跡を異なる焦点面で二つのカメラで観察し、得られた二つの画像を比較し重ね合わせ、目的の方向にずらしてコインシデンスを取ることで、ある角度を持つ飛跡や飛跡群を選び出すことができるというアイデアである。

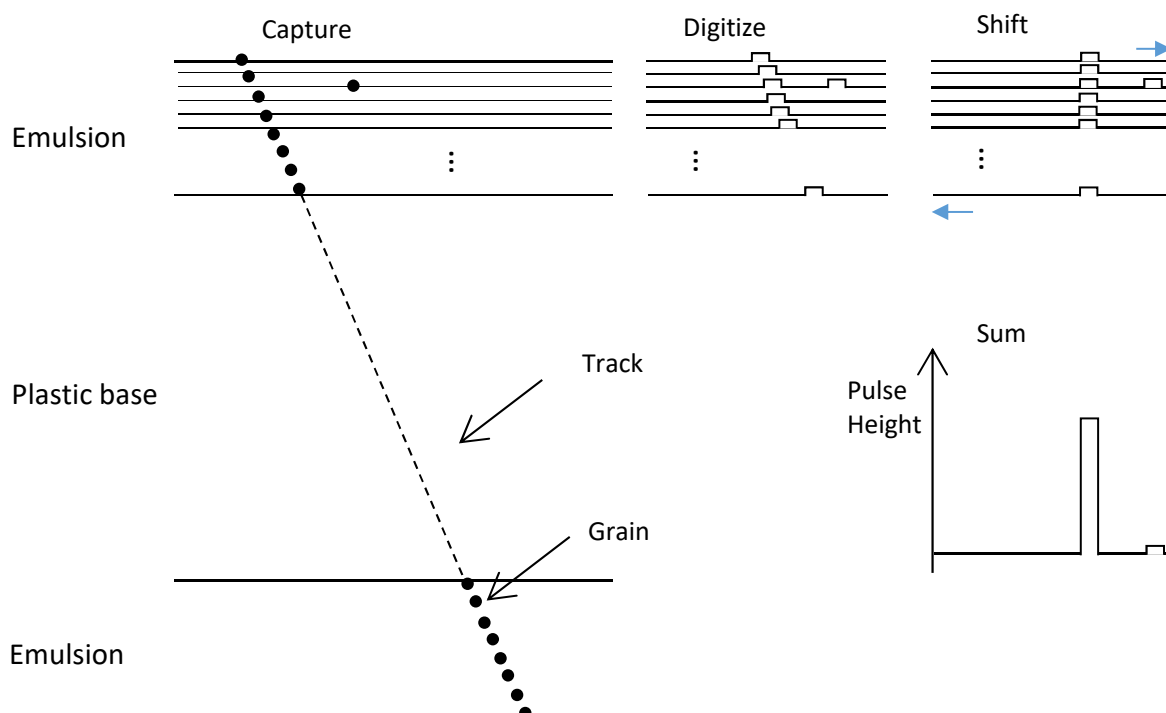


図 1.6: Track selector による飛跡認識手法。二値化し、ある角度の飛跡が垂直になるようにシフトし、足し、飛跡らしさを Pulse height として得る。

(TS) [26](図 1.7) が実現した<sup>\*9</sup>。

エマルションによる実験がチャームやハドロンの物理から、ニュートリノの物理へと移る中で Track Selector の高速化は年々進められ、1994 年には改良型 Track selector(New track selector = NTS) が開発された [27]。NTS による読み取り速度は、特定の角度の飛跡を探索する場合に人の飛跡認識速度を超え、全自動読み取り装置が実験に本格的に導入されるようになった (読み取り速度は後述する UTS の探索角度空間換算で  $0.082 \text{ cm}^2/\text{h}/\text{layer}$ )。

この技術的進歩の恩恵を受けた実験は CHORUS 実験と DONuT 実験である。CHORUS 実験はニュートリノの質量の有無を検証するため 1994 年より CERN でニュートリノビームをエマルション-カウンターハイブリッド検出器に照射した。タウニュートリノの質量が 1–100 eV であれば暗黒物質候補になることから、ニュートリノの質量をニュートリノ振動現象を用いて測定を試みた。CHORUS 実験のカウンターは fiber tracker で [28]、fiber tracker から最下流の CS への予測位置精度は  $\sim 200 \mu\text{m}$  で約 1 mm 四方の領域からある角度の飛跡を探索する必要があった。NTS の導入により、数十万例のニュートリノ反応候補の解析を現実的な時間で行うことができた。

1996 年にはさらなる解析速度の高速化に向けた開発が始まり、FPGA を用いて飛跡

<sup>\*9</sup> 飛跡認識手法としての Track selector と区別するため、システムとしての Track selector は TS と略する。



図 1.7: 全自動読み取り装置。左の装置が三鷹光器の大型ステージで、右側の机の下の左の箱がステージ制御用の DOMS、右の箱が飛跡認識のための Track selector

認識をさらに高速化した Ultra track selector (UTS) が 1998 年より稼働を開始した。外観と飛跡認識のための FPGA ボードを図 1.8 に示す。角度  $\theta$  を乾板平面に垂直な軸からの角度と定義すると、UTS では反応点付近の  $\tan \theta < 0.6$  の飛跡の読み出しが行われた。特定の角度の飛跡や反応点を仮定した飛跡の探索だけでなく、角度を指定しない探索 (general angle scan) においても人が探索するより高速になった (読み取り速度は  $1 \text{ cm}^2/\text{h}/\text{layer}$ )。ここで読み出された飛跡をフィルム間で接続し、元の飛跡情報に再構成するための NETSCAN と呼ばれる解析手法が開発された [29](図 1.9)。CHORUS 実験のニュートリノ反応点の再構成で活躍し、40 万を超えるニュートリノイベントを読み取り、タウニュートリノは 1 例も見つからなかったものの、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  のニュートリノ振動パラメータ領域を更新した [30, 31]。

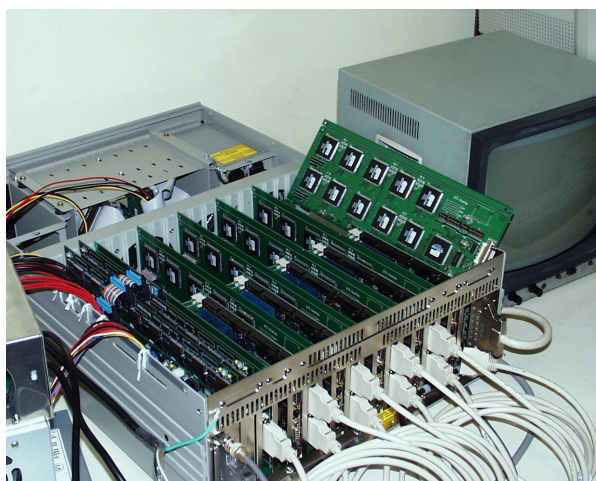
DONuT 実験はエマルジョン検出器がタウニュートリノを検出できることを実証するため 1997 年より FNAL でタウニュートリノを含むニュートリノビームをエマルジョン-カウンターハイブリッド検出器に照射した [32]。エマルジョンは ECC を主とし、カウンターは fiber tracker を用いた。UTS の開発で様々な角度の飛跡を読み取れるようになったため、カウンターの位置精度や角度精度の悪さを読み取り装置により補うことができたようになった。DONuT 実験は計 9 例のタウニュートリノ反応の検出し [33]、ECC がタウニュートリノを検出可能であることを示した。

#### 1.2.4 OPERA 実験

Kamiokande グループや Super Kamiokande グループが示したニュートリノ振動に決着を付けるためには、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  のアピアランスモードでの検証が不可欠とされた。これら



(a) 読み取り装置群



(b) 飛跡認識用 FPGA ボード

図 1.8: Ultra track selector (UTS)

の実験が示唆するニュートリノ振動パラメータ領域を探索するには、長基線によるニュートリノ振動実験が必要であり、CHORUS 実験のグループを中心として長基線ニュートリノ振動実験 (OPERA 実験) が提案され承認された [34]。2008 年より  $\nu_\tau$  を含まないニュートリノビームを CERN の CNGS で生成し、732 km 離れたイタリアのグランサッソ研究所の地下に設置された OPERA 検出器へ照射した。OPERA の主検出器には、 $12.5 \times 10 \text{ cm}^2$  の乾板 57 枚と 1 mm 厚の鉛板 56 枚を交互に重ねた ECC と、ECC の下流側に 2 枚の CS を貼り付けたブリック (図 1.10) を約 15 万個、総重量にして 1.2 キロトンの標的を用いた。

OPERA 検出器はその巨大さゆえ、CHORUS 実験や DONuT 実験などと比べてカウンターの位置精度が数 10 分の 1 にならざるをえなかった。エマルジョンへの接続精度は 2.4 cm であり、ニュートリノ反応からの飛跡を乾板上でミリメートルの精度で決定していた CHORUS 実験や DONuT 実験などと比べて  $\mathcal{O}(1000)$  倍広い面積の読み取りが必要になった。CS で飛跡が見つかった後は、CS から ECC の最下流の乾板に飛跡を接続し、ECC 中で飛跡を追跡しニュートリノ反応点にたどり着いた後はニュートリノ反応点周

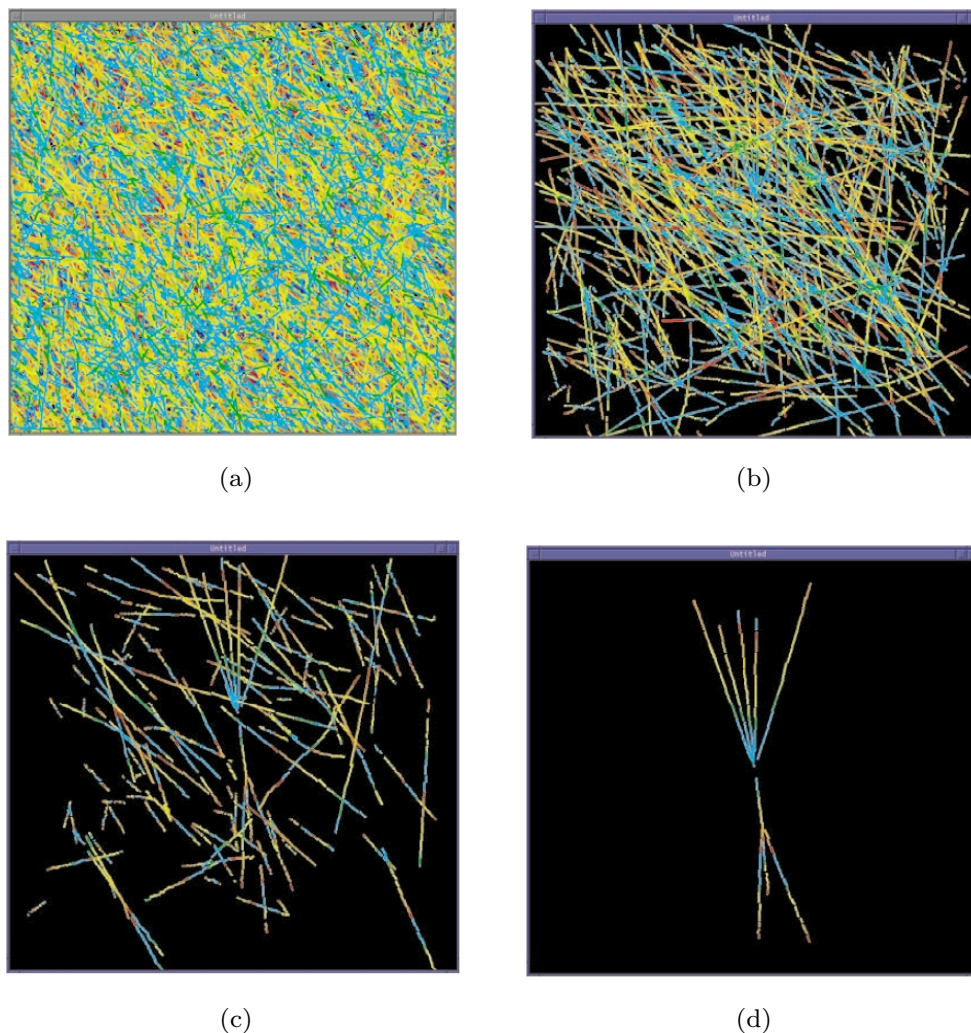


図 1.9: NETSCAN 法の概要。読み取った 3mm 四方 10 枚の全飛跡 (a)。貫通飛跡を除去 (b)。低エネルギー飛跡を除去 (c)。Vertex を組む飛跡を選びだしたもの (d)。

辺の  $1\text{ cm}^2 \times 15$  枚を読み取った。CS と ECC の読み取り面積を合わせても取り出したブリックの全乾板面積の 1 パーセント程度であるが、CHORUS 実験や DONuT 実験に比べ 2 桁多い年間 10 平米の読み取りが必要となった。この読み取りを実現すべく、2006 年には毎年 10 平米/system を達成する Super-ultra track selector (S-UTS) が開発された [36]。S-UTS の外観と駆動方法の概念図を図 1.11 に示す。UTS では隣の視野へ移動する時ステージを加減速するため振動が発生した。この振動により繰り返し周波数は 5 view/s に制限されていた。S-UTS では、重い X 軸ステージを等速で動かしながら 2 個のピエゾ素子で軽い対物レンズを斜めに動かし、X 軸ステージの移動をキャンセルするように断層映像を連続で取り込む手法を開発した。これにより停止と移動を繰り返すステップ動作が除去され振動によるボトルネックを克服した。3000 fps の高フレームレートカメラを採用し、最終的に 1 秒間に断層映像を取り込むことができる回数である繰り返し周波数 50 view/s

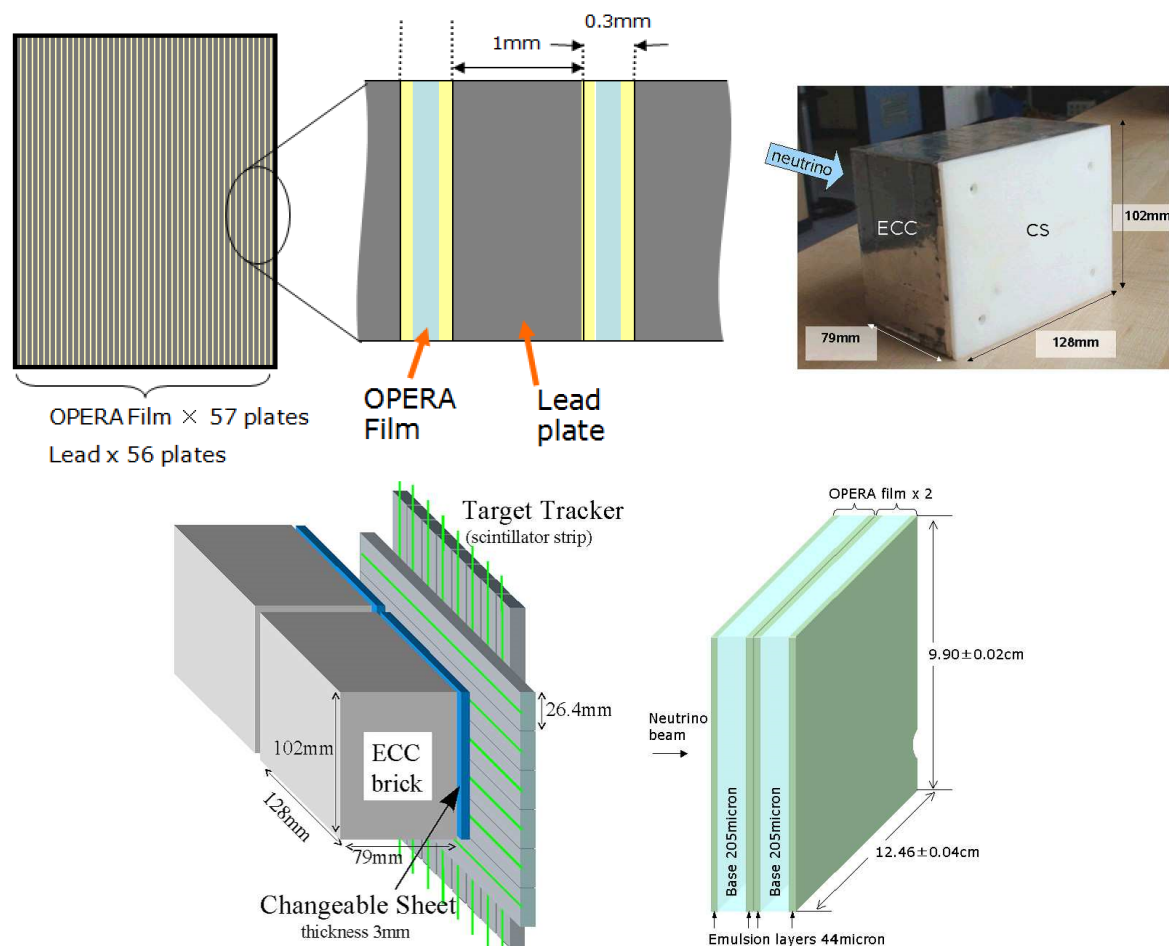


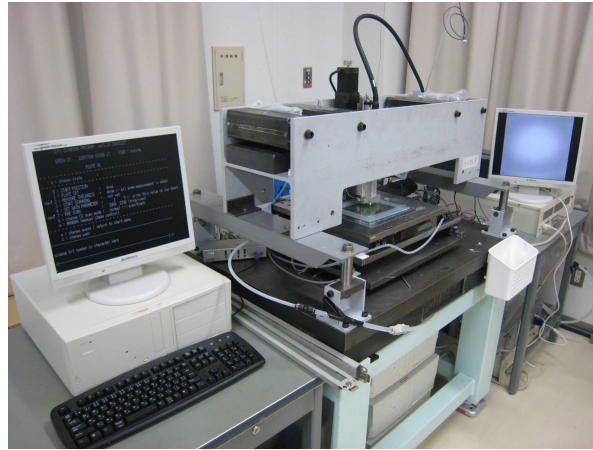
図 1.10: OPERA 実験のニュートリノ検出部である ECC と CS によるブリック [35]

となり、読み取り速度は  $72 \text{ cm}^2/\text{h}/\text{layer}$  を達成した。ヨーロッパでも  $20 \text{ cm}^2/\text{h}/\text{layer}$  の読み取り速度を持つシステム (European scanning system = ESS) が開発された [37]。

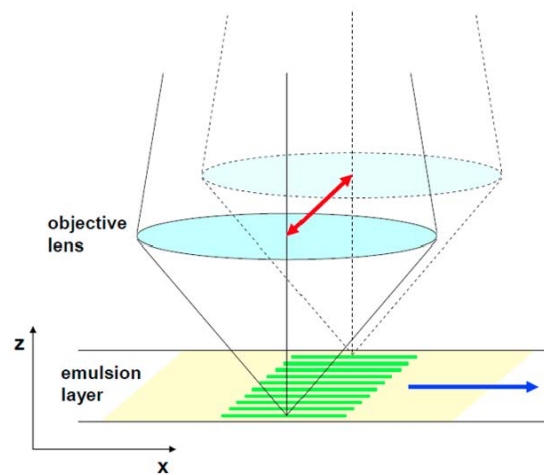
OPERA 検出器の全ブリックのうち、取り出されて現像された数は約 10% で、そのうち読み出された面積は約 1% であるが、10 年に渡る解析で約 100 平米のエマルションが読み出され、再構成されたニュートリノイベント数は 5408 個に達した [38]。この中から 5 イベントの  $\nu_\tau$  事象を検出し、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  振動をアピアランスモードで発見した [39, 40, 38]。

### 1.3 原子核乾板の全面解析

S-UTS の実現による読み取り速度の高速化は、カウンターに束縛されない原子核乾板単体での解析の可能性を開いた。2006 年には宇宙線ミュオンラジオグラフィ (詳細は 1.5) での火山の内部構造の調査が行われ、また気球フライトではエマルションに時間分解能を付与するためのシフター機構の発明が行われた。2011 年には宇宙ガンマ線観測 (詳細は 1.4) を目的とした初フライトが行われた。



(a) S-UTS の外観



(b) 対物レンズとエマルシヨンの駆動方法

図 1.11: Super-ultra track selector (S-UTS)

これまでのエマルション実験は、読み取り速度の制約からハイブリッド法で用いられるカウンターなどの他の検出器がトリガーできるイベントに解析対象が限られていた。エマルションが潜在的に記録できる情報量はトリガーによって活用された情報量に比べはるかに多く、読み取り速度が向上する中でカウンターの制約を受けないエマルションの全面読み取り前提とした実験へと発想の転換が行われた。次章から、全面読み取りを前提とした実験として初期に試みられた宇宙ガンマ線観測と宇宙線ミュオンラジオグラフィについて述べる。

## 1.4 原子核乾板による宇宙ガンマ線精密観測

### 1.4.1 ガンマ線天文学

1912 年より Hess や Kolhörster によって宇宙線の観測が行われて以降、宇宙線研究は宇宙線の起源を含めた宇宙の構造や天体現象の解明だけでなく、前述した原子核物理学や素粒子物理学における発見を促してきた。

1950 年代には、早川 [41]、Morrison[42] によってガンマ線天文学が提案された。荷電粒子は宇宙を伝搬してくる際に星間磁場によってその進路が曲げられてしまうが、電磁波はその影響を受ける事なく地球にまで直進する。ガンマ線は高エネルギー宇宙線陽子が星間物質と衝突してできる中性パイ中間子の崩壊 (式 1.1) や、主に高エネルギー電子による放射 (シンクロトロン放射、制動放射、逆コンプトン散乱) によって発生し、高エネルギーガンマ線はこれらの高エネルギー現象の直接的なプローブとなる。

$$p(\text{宇宙線陽子}) + p(\text{星間物質}) \rightarrow \pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (1.1)$$

天体からのガンマ線は OSO-3 衛星 (1967 年) によって初めて捉えられ [43]、その後、SAS-2 衛星 (1972 年) によって銀河面からのガンマ線が観測され、いくつかのガンマ線天体を発見した [44]。COS-B 衛星 (1975 年) は GeV 領域のガンマ線を銀河面を中心に広く観測を行い、22 個のガンマ線天体を報告した。これらの衛星観測によりガンマ線天文学は大いに進歩した。

数 10MeV 以上のガンマ線は物質との相互作用において電子対生成が支配的となり、数 100 GeV 以下のガンマ線は入射ガンマ線を電子-陽電子対に変え、飛跡とエネルギーを測定することにより検出できる。

電子-陽電子対の検出はごく初期に原子核乾板が用いられたのを除くとスパークチェンバー<sup>\*10</sup>が CGRO 衛星 (1991 年) の EGRET 検出器まで用いられた。しかし放電による不感時間が長く、電極間の間隔を狭くするのが困難で入射粒子に対する視野 (立体角) に制限があった。これを克服するため AGILE 衛星 [45] の Gamma-Ray Imaging Detector (GRID) 検出器や Fermi 衛星の Large Area Telescope (LAT) 検出器 [46] では加速器実験で発展が進んだシリコンストリップ検出器が導入された。

### 1.4.2 ガンマ線天文学の課題

AGILE 衛星の GRID 検出器や Fermi 衛星の LAT 検出器によって、ガンマ線観測が急速に発展した。CGRO-EGRET と Fermi-LAT の比較を図 1.1 に示す。Fermi-LAT では

---

<sup>\*10</sup> 1959 年に福井崇二・宮本重徳によって発明

	CGRO/EGRET	Fermi/LAT
検出エネルギー範囲	30 MeV–10 MeV	20 MeV–300 GeV
有効面積 (ピーク)	1500 cm <sup>2</sup>	9000 cm <sup>2</sup>
視野 (立体角)	0.5 sr	2.4 sr
角度分解能 @ 100 MeV	5.8°	6.0°
@ 1 GeV	1.7°	0.9°
不感時間	100 ms	26.5 μs

表 1.1: CGRO 衛星 EGRET 検出器と Fermi 衛星 LAT 検出器の比較

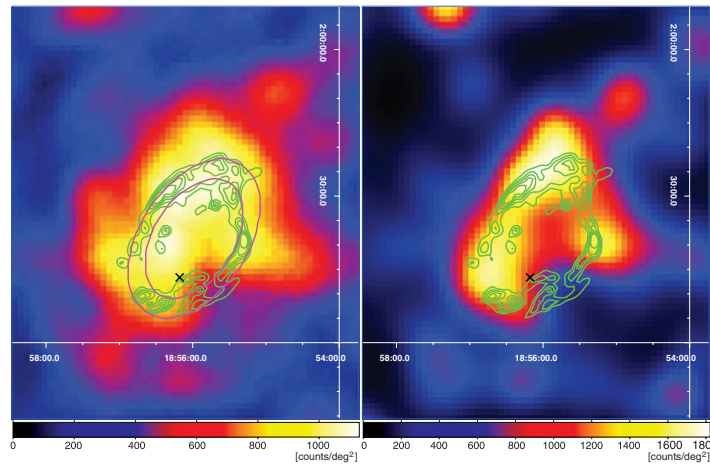


図 1.12: Fermi-LAT による超新星残骸 W44 領域の (2–10 GeV) イメージング。左はカウントマップで、右は逆畳み込み後。緑色の等高線は Spitzer 衛星による 4.5 μm の赤外線強度分布 [48]

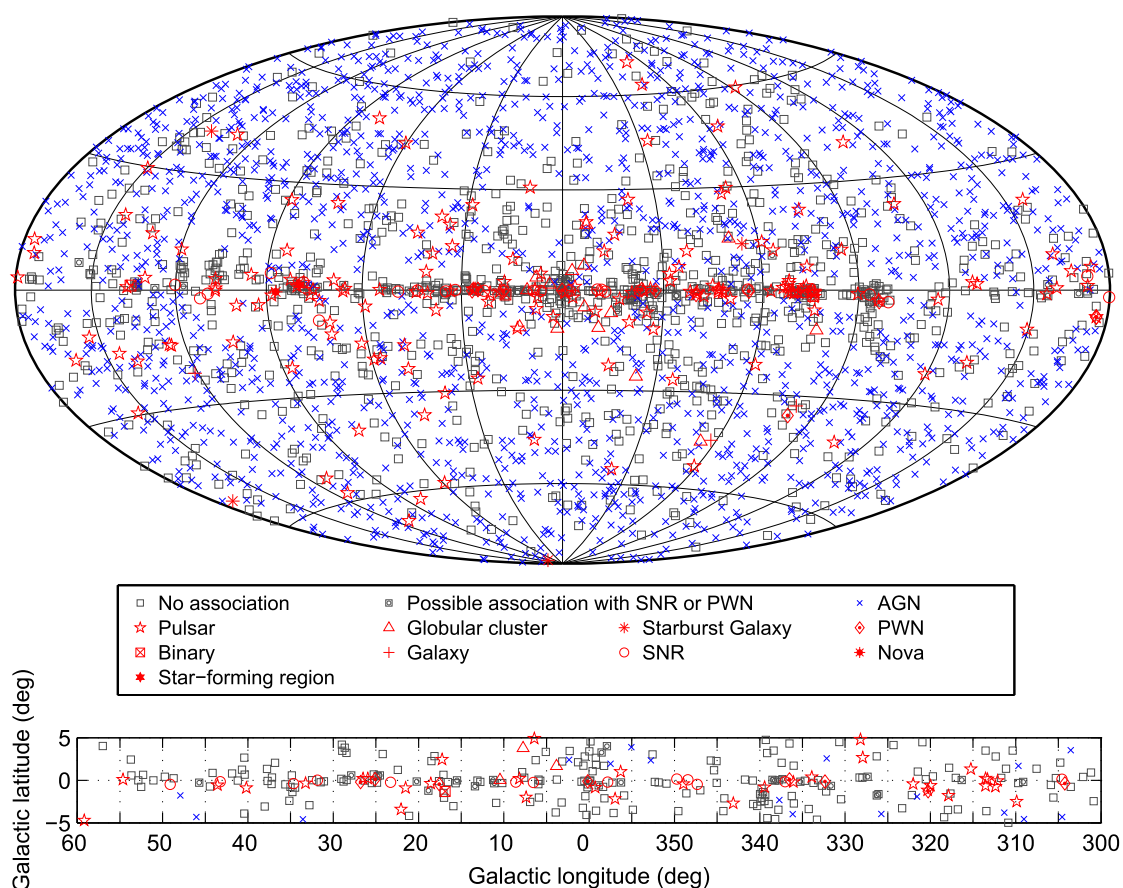
不感時間は短くなり、視野や有効面積も広がった。Fermi 衛星は 3033 個のガンマ線源を発見するなど大きな成果を挙げた [47]。一方で、未だに課題も残されている。

### イメージング観測

Fermi-LAT による、W44 領域の付近のイメージング結果を図 1.12 に示す。検出器の点広がりやを考慮した逆畳み込みにより、空間的な構造が捉えられつつある。空間分解能を向上させることで、より直接的な空間構造に迫り、他波長の観測との比較が可能になる。

### ガンマ線点源の観測

Fermi-LAT は図 1.13 に示すとおり、3033 個のガンマ線源を発見したが、既知の天体と対応のつかない未同定天体 (図中の No association) の数は 1010 個 (30%) ある。特に銀河面付近は未同定天体の割合が多く、これは Fermi-LAT の Point spread function (PSF) に比べてガンマ線源が密集していることが要因として挙げられる。角度分解能が向上すれ



**Figure 15.** Full sky map (top) and blow-up of the inner Galactic region (bottom) showing sources by source class (see Table 6). All AGN classes are plotted with the same symbol for simplicity.

図 1.13: Fermi 衛星によるガンマ線源の全天マップ (上) と銀河中心領域 (下)[47]

ば PSF が小さくなり、銀河中心領域で個々の天体の分離が期待できる。

### エネルギースペクトル観測

Fermi-LAT による W44 のエネルギースペクトル結果を図 1.14 に示す。観測範囲において  $\pi^0$  起源の放射モデルと一致しているが、 $\pi^0$  起源の特徴的な 200 MeV 以下の落ち込みを捉えることができれば、決定的な証拠になる。Fermi-LAT での 200 MeV 以下の角度分解能が悪く、銀河面からの拡散ガンマ線や他の天体からのガンマ線による不定性が大きい。角度分解能を向上させれば、これらの不定性を抑えた観測が可能になる。

### 偏光観測

高エネルギー天体の放射機構や磁場構造の解明には、偏光観測が有効である。しかし、約 10 MeV 以上のエネルギーにおける偏光観測は難しく統計量が必要でありこれまで実現していない。

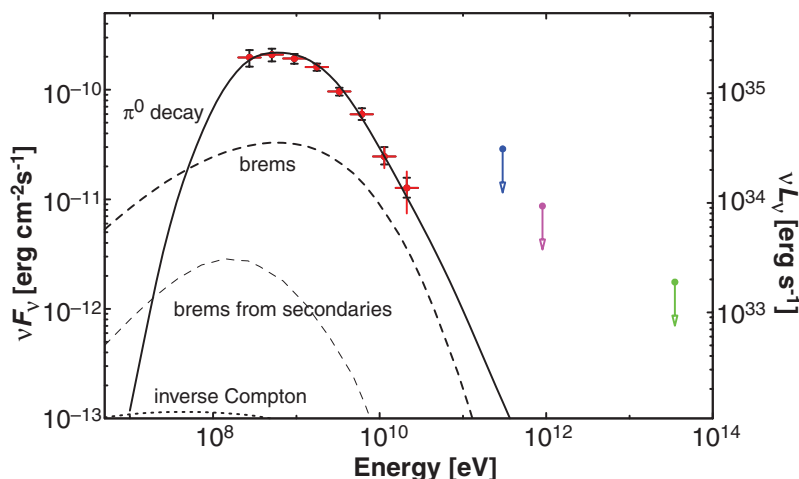


図 1.14: Fermi-LAT による超新星残骸 W44 領域の (0.2–30 GeV) エネルギースペクトル分布。赤点がフェルミの結果 [48]

### 1.4.3 大口径原子核乾板ガンマ線望遠鏡

原子核乾板が加速器実験で用いられる中、ECC を気球に搭載した一次宇宙線観測<sup>\*11</sup>が 2000 年代まで継続して行われてきた。2004 年には Micro Segment Chamber(MSC)[52] を用いた宇宙線電子観測も行われた。MSC を用いたフライトでは、重ねた原子核乾板の相対位置を時間ごとに変えることで飛跡の乾板ごとの位置ずれから時間情報を得ることのできるシフターと呼ばれる機構が初めて導入された。消費電力やペイロード重量の制約が大きい気球フライトでカウンターを使わず低電力で原子核乾板に時間分解能を与えるきっかけとなった。

読み取り装置の高速化に伴い大口径エマルジョン検出器の全面読み取りが現実的となり、原子核乾板望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画 Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion (GRAINE) が、ガンマ線天体を Fermi-LAT より 1 桁高い角度分解能でイメージングすることを目的として立ち上げられた。ガンマ線の対生成反応は原子核乾板により図 1.15 のような顕微鏡写真として観察でき、ガンマ線の到来方向を 1 GeV 領域で 1.7 mrad(=0.1°) の精度で測定することが可能である。Fermi-LAT と比較し立体角で 2 桁近く優れた解像度の天体イメージングデータが得られる (表 1.2、図 1.16) と期待される。また、GeV ガンマ線に対する偏光感度を持っていることも特徴の一つである [53]。

原子核乾板は使用後回収し現像する必要があるため、気球フライトにより観測を行う。原子核乾板自身には時間分解能がないため、それぞれの飛跡に時間情報を付加するタイム

<sup>\*11</sup> JACEE 実験や RUNJOB 実験では高エネルギー原子核-原子核反応の直接測定 [49] や一次宇宙線の組成やエネルギースペクトル測定 [50, 51]

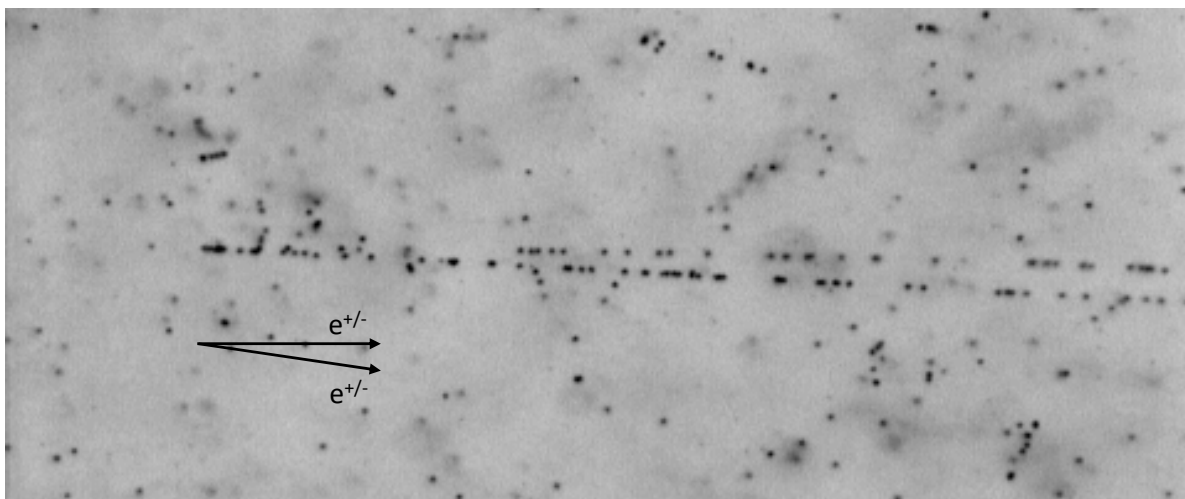


図 1.15: 原子核乾板の顕微鏡写真 (横幅は約 100  $\mu\text{m}$ )。左側から入射したガンマ線が対生成反応し、電子-陽電子の 2 本の飛跡が記録されている。

	Fermi-LAT	GRAINE
角度分解能@ 100 MeV	105 mrad( $6.0^\circ$ )	17 mrad( $1.0^\circ$ )
@ 1 GeV	16 mrad( $0.90^\circ$ )	1.7 mrad( $0.10^\circ$ )
有効面積 (ピーク)	9000 $\text{cm}^2$	10 $\text{m}^2$ (計画)
検出エネルギー範囲	20 MeV–300 MeV	10 MeV–100 GeV
偏光感度	無	有
不感時間	26.5 $\mu\text{s}$	無

表 1.2: 原子核乾板望遠鏡の基本性能と Fermi-LAT との比較

スタンプ手法を用いる [54]。スターカメラによる気球の姿勢情報と組み合わせることで、ガンマ線の天頂に対する到来方向を決定することができる。科学観測においては、口径 10 平米 (原子核乾板の総面積で 1000 平米) のフライトを 10 回行うことで、銀河中心付近で Fermi-LAT を超える感度を達成することが期待される (図 1.17)。

この科学観測を実現するには、フライトごとに 1000 平米の原子核乾板を読み取る必要がある。OPERA 実験で用いられた S-UTS では、1 年間に読み取り可能な面積は 10 平米であり、現実的な時間で読み取りを行うためには、二桁の読み取り速度の向上 (1 年で 1000 平米規模) が必須である。

## 1.5 宇宙線ミュオンラジオグラフィ

宇宙線ミュオンラジオグラフィは一次宇宙線が大気と反応してできるミュオンを用い、未知の物質を通ったときのミュオンの吸収率を測定し、その間の物質量を推定する

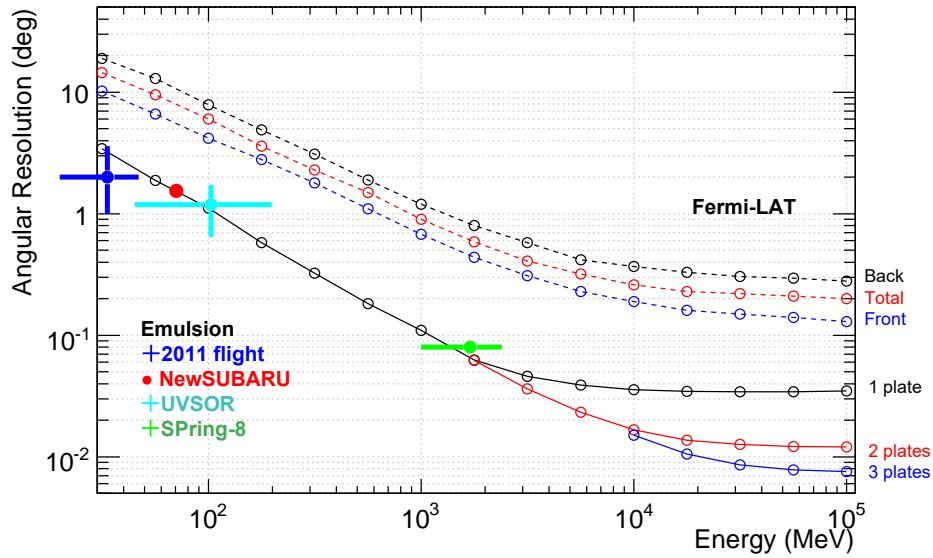


図 1.16: Fermi-LAT と Emulsion のガンマ線に対する角度分解能のエネルギー依存性。高エネルギー側ではエマルジョンフィルムの枚数を増やすと角度分解能は改善する

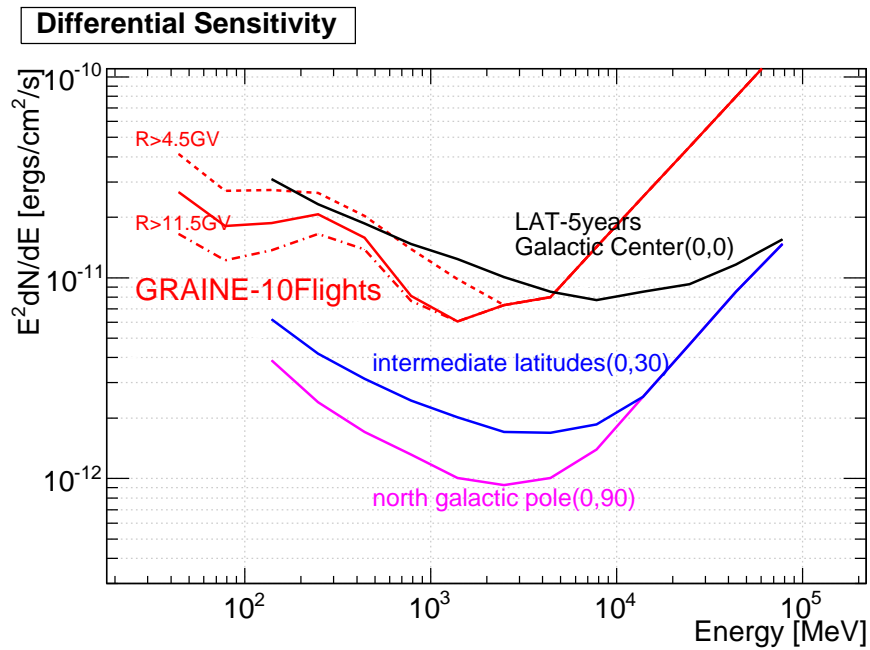


図 1.17: Fermi-LAT の 5 年間の観測と、GRAINE の 10 フライトによる観測の微分感度曲線。GRAINE のバックグラウンドはそれぞれ 4.5 GV(点線)、11.5 GV(実線) のカットオフリジディティ [55]

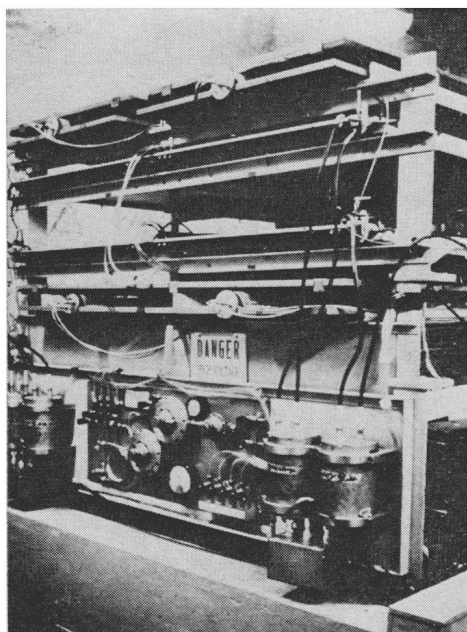


図 1.18: ピラミッド内に設置されたスパークチェンバー [57]

観測手法である\*<sup>12</sup>。対象は異なるが原理は X 線撮影と同じである。1955 年にトンネル上部の物質を推定する目的で原理が提唱された [56]。1960 年代に Alvarez らがエジプトの大ピラミッドの内部構造の透視を試みた。Alvarez らは数ヶ月に渡り 4 平米のスパークチェンバー (図 1.18) を用いて調査を行ったものの隠された部屋を見つけることができなかった [57]。

2000 年代に原子核乾板による火山の内部観測 [58, 59] が行われ、浅間山の内部密度分布 (図 1.19) や、昭和新山の内部密度分布 (図 1.20) の情報を得ることで、宇宙線ミュオンラジオグラフィが実用的な技術であることが実証された。

宇宙線ミュオンラジオグラフィは一次宇宙線由来のミュオンをビーム源としており、加速器実験などのようにビーム強度の向上は望めず、観測量は検出器の表面積と照射時間の積となる。より厚い構造物を調査するにはミュオンの吸収率が高くなるためより多くの観測量を必要とする。さらに検出器からの到来角ごとの物質量を精密に推定するために、相応の視野角と角度精度を持った飛跡検出器が必須である。

地上のミュオンの強度に対し、水換算で 100 メートル厚の物質下でのミュオンの強度は約  $1/20$ 、1000 メートル厚下で約  $1/4000$ 、2000 メートル厚下で  $1/40000$  となる (図 1.21)。観測角度空間を  $\Omega(\text{sr})$ 、観測角度空間内の角度分解数を  $B$ 、各角度空間あたりに射影した物質質量 (厚みが既知の場合は密度など) の決定精度を  $E$ 、ミュオンの強度を  $I(\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1})$ 、観測時間を  $T(\text{s})$  とすると、観測に必要な検出器の表面積  $A(\text{cm}^2)$  は

\*<sup>12</sup> ミュオンが重い物質により散乱されることを用いた散乱型ミュオンラジオグラフィもあるがエマルジョンによる観測は現実的ではないため本論文では吸収率を用いた透過型ミュオンラジオグラフィのみ扱う。

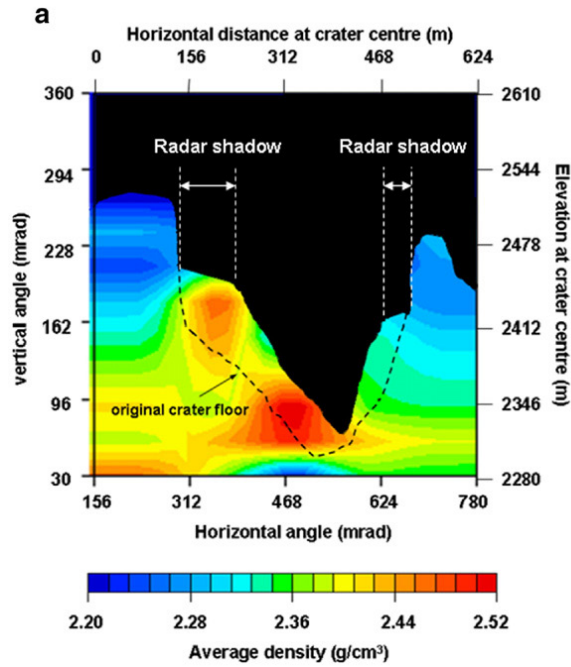


図 1.19: 宇宙線ミュオンラジオグラフィによる浅間山の密度分布 [58]

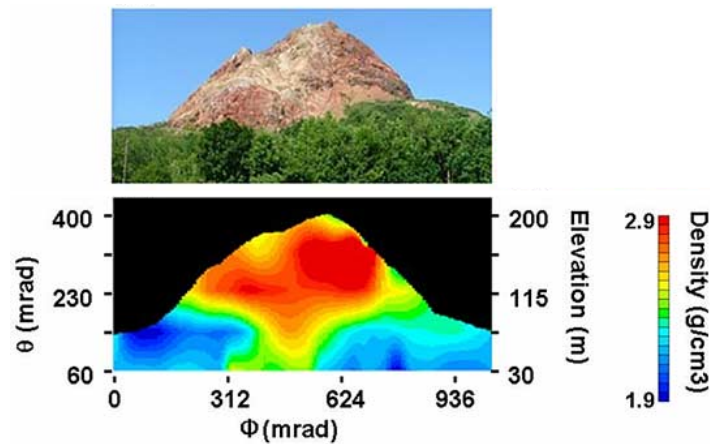


図 1.20: 宇宙線ミュオンラジオグラフィによる昭和新山の密度分布 [59]

式 1.2 で表される。

$$A = \frac{B}{I \Omega E^2 T}. \quad (1.2)$$

天頂角が大きくなるとミュオンのフラックスは小さくなるが一様であると仮定している。半頂角 30 度を観測角度空間とし、10 mrad の角度分解能で 5% の密度の決定精度を要求し、観測対象の真下に 1 ヶ月間検出器を設置した場合の観測に必要な検出器の表面積は地上レベルで 0.05 平米、水 100 メートル厚で 1.3 平米、1000 メートル厚で 300 平米、2000 メートル厚で 2400 平米となる。

エマルションはスケーラビリティがあるため検出器の表面積を増やしやすく、面積あたりのコストパフォーマンスが良く、さらにコンパクトで電源不要であることから設置場所

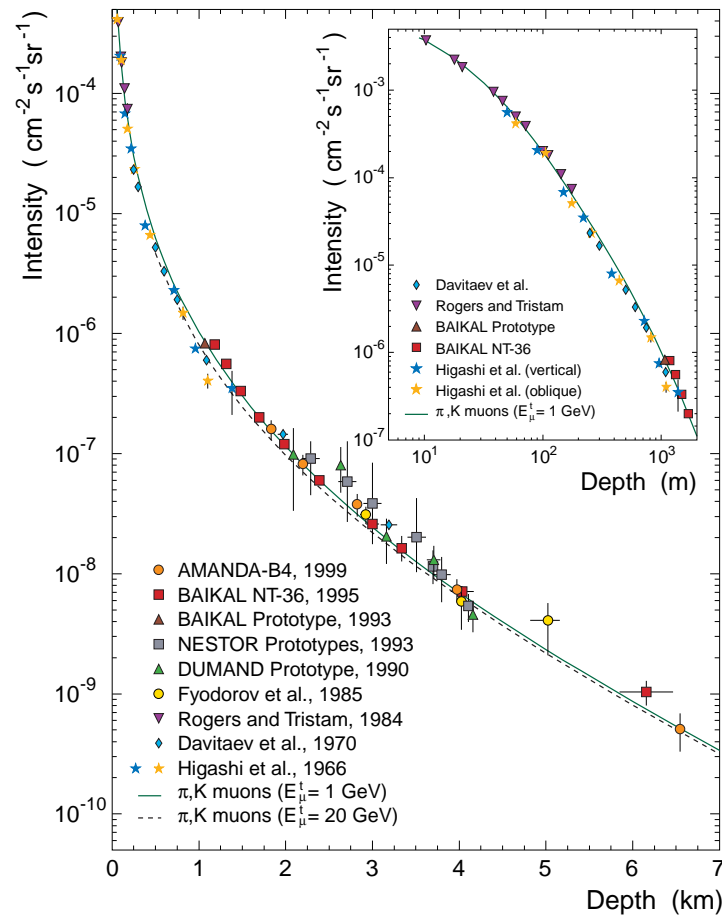


図 1.21: 水深に対するミューオンの強度 [60]

への制約が少ない。シンチレータ検出器と合わせて宇宙線ミューオンラジオグラフィ用の検出器として有望である。

原子核乾板の検出器の表面積は飛跡読み取り装置の読み取り速度と比例関係にある。特に、火山などの厚い構造物を観測する場合や、多地点で観測することによるトモグラフィ(断層映像法)を行う場合、対象の時間変化を観測する場合など、スケーラビリティを生かした観測には高速な読み取り装置が不可欠となる。

## 1.6 超高速自動飛跡読み取り装置 HTS

名古屋大学では原子核乾板の自動飛跡読み取り装置を世界で初めて実用化し、その開発を継続して行ってきた。図 1.22 に自動飛跡読み取り装置の概要を示す。高速化のためにはステージ、対物レンズ、カメラ、処理コンピュータの各性能をバランス良く向上させる必要がある。

2006 年より運用を開始した S-UTS のさらに 2 桁上の速度向上を目指すために、繰り返し周波数をさらに一桁上向上させたと仮定する。繰り返し周波数 500 view/s を実現する

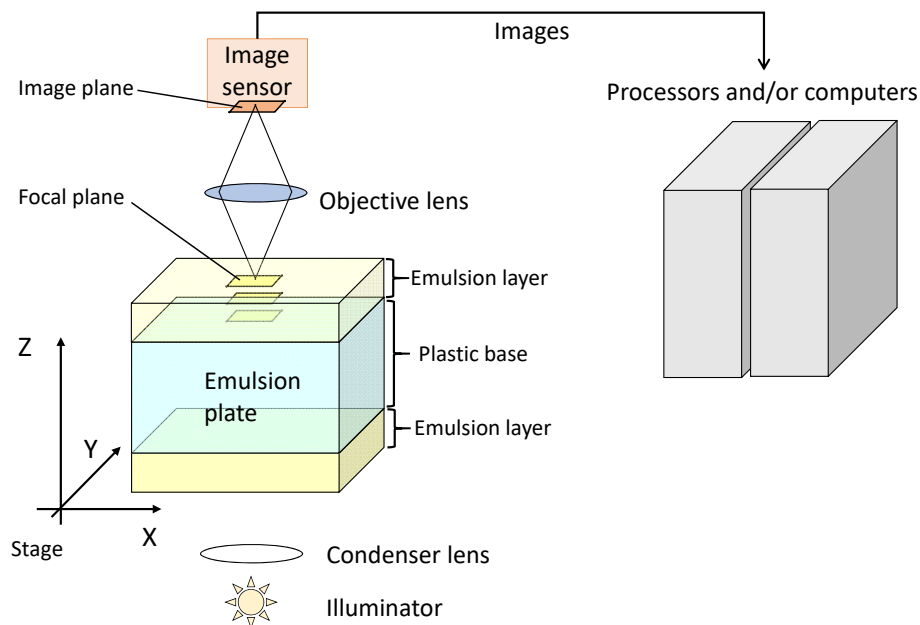


図 1.22: 原子核乾板全自動読み取り装置の概要

ためには、 $100 \text{ m/s}^2$  の加速度が必要になり、これを実現可能なアクチュエータは存在しない。そこで、繰り返し周波数を向上させるのではなく、視野サイズ (field of view = FOV) を大きくすることにした。

2010 年にこのコンセプトを実現できる従来比 600 倍で 5.1 mm 四方の FOV を持つ特注の対物レンズを開発し、素粒子宇宙起源研究機構 (KMI) の予算により導入した。宇宙線ミュオンラジオグラフィの技術開発を行うため、2011 年 10 月からの科学技術振興機構 (JST) 先端計測分析技術・機器開発プログラムに採択され、特注のカメラや飛跡認識用コンピュータの購入の見通しも立った。従来装置の 100 倍の読み取り速度をもち、年 1000 平米の読み取りが可能な Hyper track selector (HTS) を構成するハードウェアは揃うことになった。

## 第 2 章

# HTS のシステム

はじめに図 2.1 に HTS の画像を示す。それぞれ特注の対物レンズ、カメラ、XYZ 軸ステージ、コンピュータ群である。

### 2.1 光学系: 対物レンズと照明系

HTS の光学系、すなわち対物レンズ、照明系とビームスプリッターは KONICA MINOLTA Inc. と設計、製造した。主な仕様と従来装置との比較を表 2.1 に、対物レンズとビームスプリッターを図 2.2 に、照明用のコンデンサレンズを図 2.3 に示す。

対物レンズの視野面積 (FOV) は  $5.1 \times 5.1 \text{ mm}^2$  で、倍率は 12.1 倍、作動距離 (working

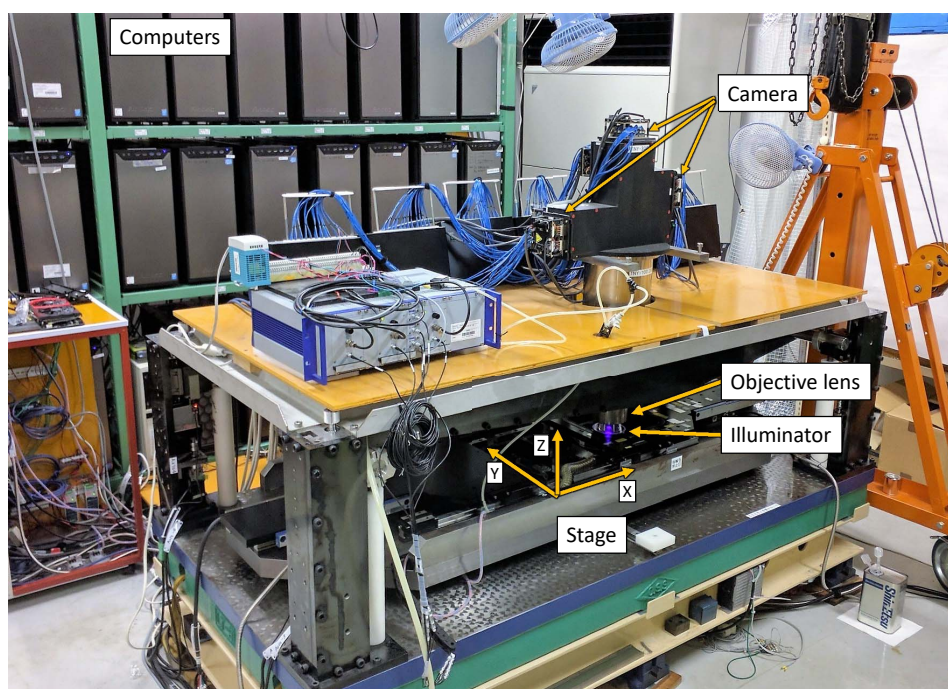


図 2.1: Hyper track selector (HTS)

	S-UTS	HTS
Objective lens		
Manufacture	TIYODA	KONICA MINOLTA
Magnification	35×	12.1×
Numerical aperture	0.85	0.65
Optimum wavelength	Green (550 nm)	Blue (436 nm)
Working distance	1.1 mm	1.5 mm
Optical resolution	390 nm	410 nm
Depth of field	1.5 $\mu\text{m}$	2.1 $\mu\text{m}$
Field of view	0.230×0.228 mm <sup>2</sup>	5.1×5.1 mm <sup>2</sup>
Illuminator		
Condenser NA	0.85	0.66
Light source	Hg-Xe lamp	Hg-Xe lamp
Filter	Green filter	436±10 nm

表 2.1: S-UTS [36] と HTS の対物レンズと照明系の仕様の比較。被写界深度 (depth of field) は  $\delta z = 2 \frac{\lambda}{\text{NA}^2}$  と定義した。

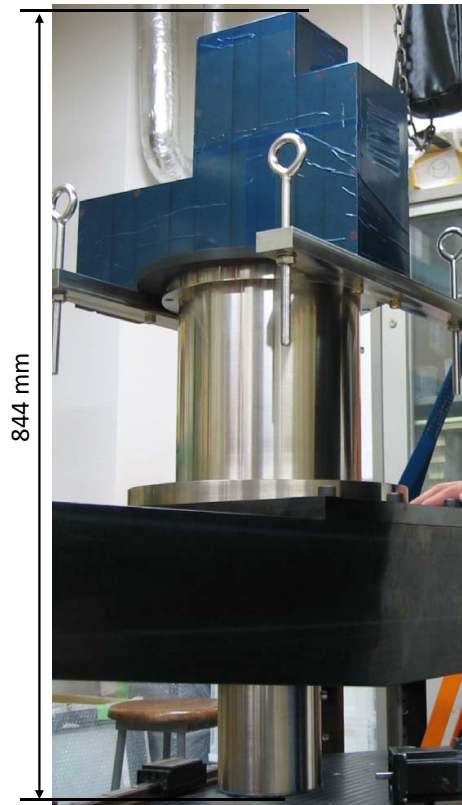


図 2.2: 対物レンズとビームスプリッター

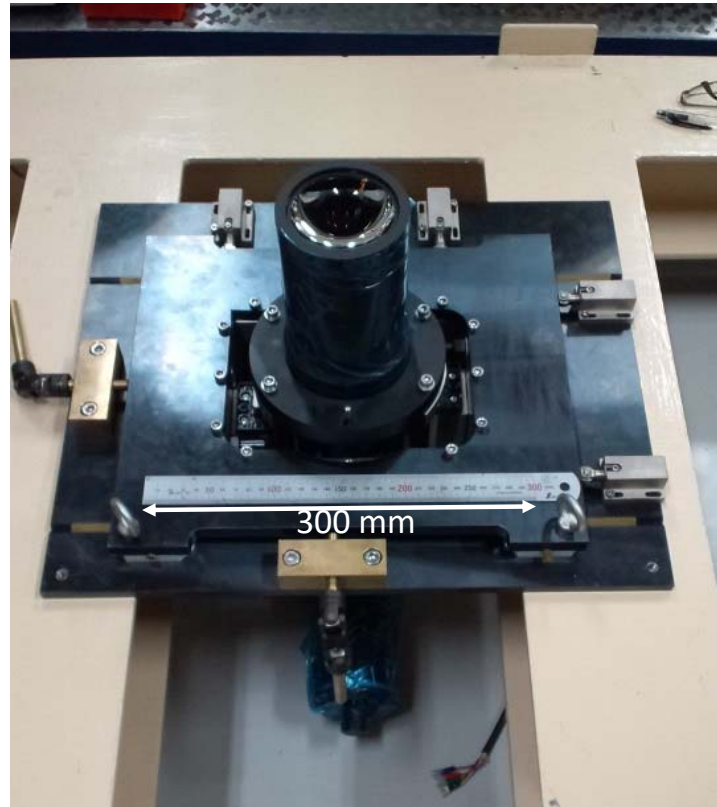


図 2.3: 照明系のためのコンデンサレンズ

distance = WD) は 1.5 mm である。

対物レンズの視野面積は読み取り速度を 100 倍にするため、従来装置 S-UTS と比較し約 600 倍とした\*1。繰り返し周波数が S-UTS の 1/5 になると仮定している。倍率についてはカメラの節で合わせて述べる。作動距離は過去の実験で用いられた 1 mm 厚の厚型乾板でも読み取りが可能ないように 1 mm 以上になるように設計した。レンズと物体までの屈折率を一致させるために屈折率 1.505 の光学イメージジョンオイルを対物レンズと原子核乾板の間に満たす必要がある。

従来機の対物レンズの FOV が  $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$  で開口数 (NA) は 0.85 であるのに対し、HTS の広視野対物レンズは価格を抑えるため NA を 0.65 にした。低い NA でも水平分解能を維持するため、照明光の波長を従来機の 550 nm ではなく、436 nm にした。波長 400 nm より短い光は乾板を透過せずかつイメージセンサの量子効率が低くなるため用いることが難しい。水平分解能はレーリーの基準 ( $\delta x = 0.61 \frac{\lambda}{\text{NA}}$ ) によると 410 nm となる。これは、従来機の 390 nm とほぼ同等である。

光源は高輝度を得るために水銀キセノンランプの g 線を用いた。バンドパスフィルタは  $436 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$  (FWHM) を用い対物レンズの色収差を無視できるようにした。

NA が小さくなったため、被写界深度 (depth of field = DOV) は  $\delta z = 2 \frac{\lambda}{\text{NA}^2}$  によると

\*1 重複して読み取る領域を考慮しない場合 500 倍

Image sensor	S-UTS	HTS
Product name	MEMCAMfx RX-6 custom	CMV2000
Image sensor	CMOS	CMOS
Resolution	512 × 508 pixels	2048 × 1088 pixels
Framerate	3000 fps	300 fps
Pixel pitch	16 $\mu\text{m}$ × 16 $\mu\text{m}$	5.5 $\mu\text{m}$ × 5.5 $\mu\text{m}$
Electronic shutter	Available	Available

表 2.2: S-UTS [36] と HTS のイメージセンサの仕様の比較

2.1  $\mu\text{m}$  となり、従来機より 1.5 倍広がった。そのため原子核乾板の乳剤層の最適な厚みは従来機よりも厚くなった。

## 2.2 カメラ

HTS は 72 個のイメージセンサを用いた。1 個のセンサの主な仕様と従来機との比較を表 2.2 に示す。センサのピクセルのピッチは 5.5  $\mu\text{m}$  で、対物レンズの倍率 12.1 倍を考慮すると物体側で 0.45  $\mu\text{m}$  に相当する。対物レンズの倍率とセンサのピクセルピッチを合わせて、水平方向の回折限界 (水平分解能) である 0.41  $\mu\text{m}$  とほぼ同じになるようにした。

12 個のイメージセンサを図 2.4 のようにモザイク状に配置した。このモザイクカメラモジュール 6 個を図 2.5 のようにビームスプリッターによって分けられた 6 つの結像面に取り付けた。このセンサはそれぞれ FOV の異なる場所を見るようにずらして配置した。イメージセンサはそれぞれ独立に飛跡を探索するため、イメージセンサの境界付近にある飛跡の検出を損失させないために隣のセンサで 50  $\mu\text{m}$  以上のオーバーラップを確保した。

イメージセンサのフレームレートは 300 fps であり、これは従来機と比べて 10 倍低い。全センサの画像転送量は 48 GB/s で従来機の 60 倍に達した。

## 2.3 XYZ 軸ステージ

### 2.3.1 XY 軸ステージ

原子核乾板を読み取る際の主たる可動部である XY ステージは、2×1 m<sup>2</sup>、重量約 700 キログラムの定盤の上設置した。それぞれの軸のストロークは、設計当時の標準的な乾板である OPERA フィルムの 125×100 mm<sup>2</sup> を読み取れるように設計した。

X 軸は読み取り時に主に動く軸であり、ストロークは 130 mm とした。X 軸は高速に移動させるため、アクチュエータは約 35 キログラムの X 軸ステージを 20 ms で 5 mm

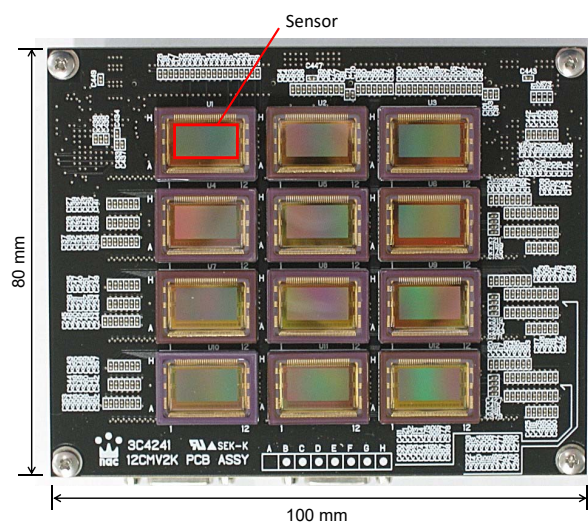


図 2.4: モザイクカメラユニットの写真。12 個のイメージセンサが 1 個のカメラユニットに搭載されている。太い赤い枠はセンサの感度のある部分を示す

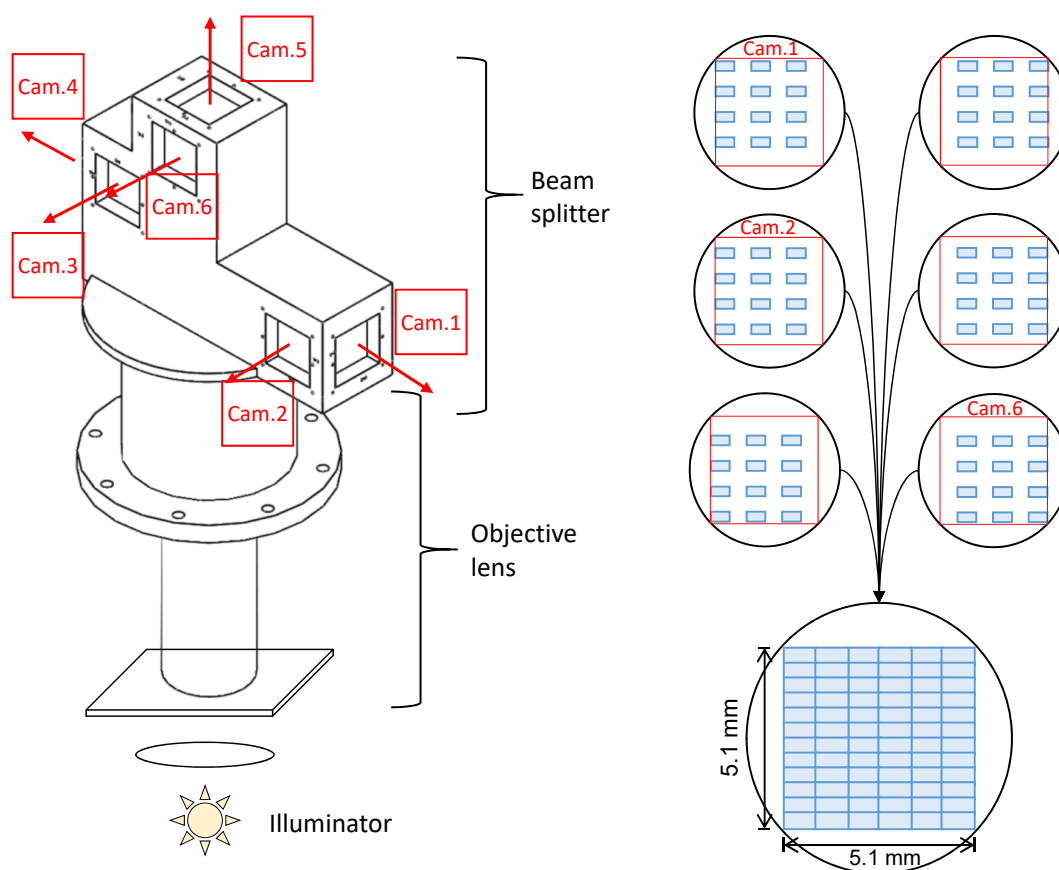


図 2.5: 6 個の窓をもつビームスプリッターのスケッチ (左)、6 個のモザイクカメラユニットで構成された FOV (右)。

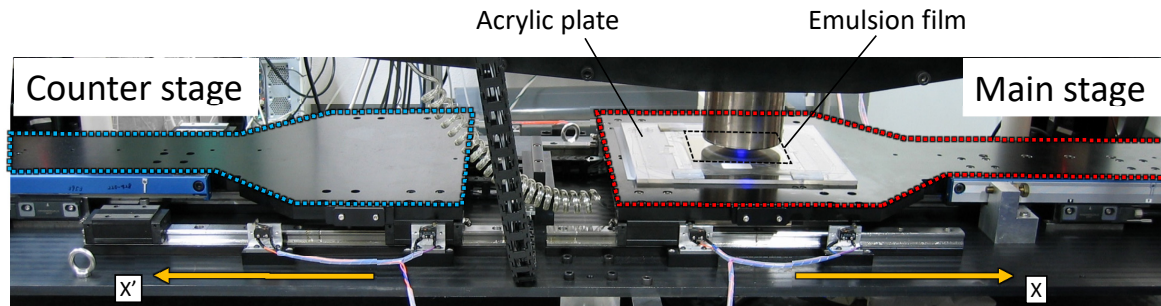


図 2.6: X-axis ステージ。メインステージとカウンターステージが同一直線上に配置され、重心移動を打ち消すために反対方向に移動する

移動させるトルクを持つリニアモーター<sup>\*2</sup>を採用した。カウンターステージを図 2.6 のように対称に配置した。カウンターステージはメインステージが移動したときに対称に動くことでステージ全体の重心移動を減らし振動を抑える役割がある。今回、加速度は  $5000 \text{ mm/s}^2$ 、最高速度は  $100 \text{ mm/s}$  を採用した。制動時間を考慮しない場合  $5 \text{ mm}$  の移動に  $70 \text{ ms}$  かかる。

Y 軸のステージのストロークは  $100 \text{ mm}$  であり、ロータリーモーターとボールスクリュウで動かした。移動する頻度は X 軸ステージの  $1/50$  以下なので、加速度や最高速度は X 軸よりも低い加速度は  $100 \text{ mm/s}^2$ 、最高速度は  $5 \text{ mm/s}$  を採用した。制動時間を考慮しない場合  $5 \text{ mm}$  の移動に  $1.1 \text{ s}$  かかる。

リニアエンコーダを X 軸のメインとカウンターステージにそれぞれ 1 個、Y 軸に 1 個取り付けた。モータの出力トルクはこのエンコーダの位置をフィードバックして変化した。

### 2.3.2 Z 軸ステージ

Z 軸は光学系の光軸方向であり、Z 軸ステージは、レンズを動かすための粗動と、断層映像を撮るときにフィルムを精密に動かすための微動の 2 つの異なるアクチュエータを採用した。

粗動 Z 軸は対物レンズとビームスプリッターとそれらの支持体を動かし、ベースを挟んだ異なる乳剤層を移動したりフィルムを交換したりするときに対物レンズを待避位置に移動させる時に用いる。駆動は 4 個のロータリーエンコーダ付き回転式モータとボールネジで行った。最高速度は  $0.5 \text{ mm/s}$  で、加速度は  $20 \text{ mm/s}^2$  と設定した。

対物レンズの重量は支持体等を含めると計  $200 \text{ kg}$  となり、これを頻繁にかつ高い繰り返し周波数で動かすことは現実的ではない。そこで piezo 素子を用いた微動 piezo Z 軸により乾板とその支持体を動かすことにした。この微動 piezo Z 軸は典型的に  $50\text{--}100 \mu\text{m}$  厚

<sup>\*2</sup> 固定子は安川電機の SGLGM-90504A、コイルは同社の SGLGW-90A535A

	X 軸駆動	Y 軸駆動	粗動 Z 軸	微動ピエゾ Z 軸
最高速度 (mm/s)	100	5	0.5	
加速度 (mm/s <sup>2</sup> )	5000	100	20	
ストローク (mm)	130	100	20	1.0

表 2.3: 各軸のパラメータ一覧

の乳剤層の断層映像を取得するために用いる。乾板はそれ自身の剛性は低いため、5 mm 厚の亚克力板やガラス板の上に載せセロハンテープや真空で固定した。この板を真空溝のついたアルミ製ステージ (0.8 kg) に載せて固定し、このステージを 3 個のピエゾ素子\*<sup>3</sup> で駆動した。ピエゾ素子にはリニアエンコーダがついており位置をフィードバックしている。ピエゾ素子は駆動方向 (Z 軸) と垂直な方向 (XY 平面) に対する剛性が低いため剛性を高めるために、板バネで補強した。

### 2.3.3 各軸のまとめ

各軸のパラメータ一覧を表 2.3 にまとめた。読み取り速度への寄与は X 軸の駆動パラメータが最も多いため、Y 軸駆動及び粗動 Z 軸駆動についてのパラメータは検出効率を落とさないようにのみ調整を行った。

## 2.4 コンピュータ群

### 2.4.1 コンピュータの構成

コンピュータ構成を図 2.7 で示す。HTS は 1 台のメインコンピュータ、1 台のストレージコンピュータ、36 台の飛跡認識用コンピュータで構成している。メインコンピュータはモーションコントローラーとピエゾコントローラを通してステージの制御を行うコンピュータである。72 個のイメージセンサから出力される画像は、飛跡認識用コンピュータに搭載されたセンサコントローラで受け取り、同コンピュータ内に搭載された GPU ボード (NVIDIA GeForce GTX680 かそれ以上) で画像処理や飛跡認識を行った。2 個のセンサコントローラと 2 個の GPU ボードを 1 台の飛跡認識用コンピュータに搭載したため、センサの数は 72 個に対して飛跡認識用コンピュータは 36 台となった。飛跡認識用コンピュータが 1 台でも故障した場合センサの配置から読み取り速度は半分になる。飛跡認識用コンピュータの数を減らすことによりシステム全体の故障率を下げる事ができた。

\*<sup>3</sup> ピエゾ素子は PI 社の P-602.8。ストロークは 1 mm で共振周波数は 150 Hz

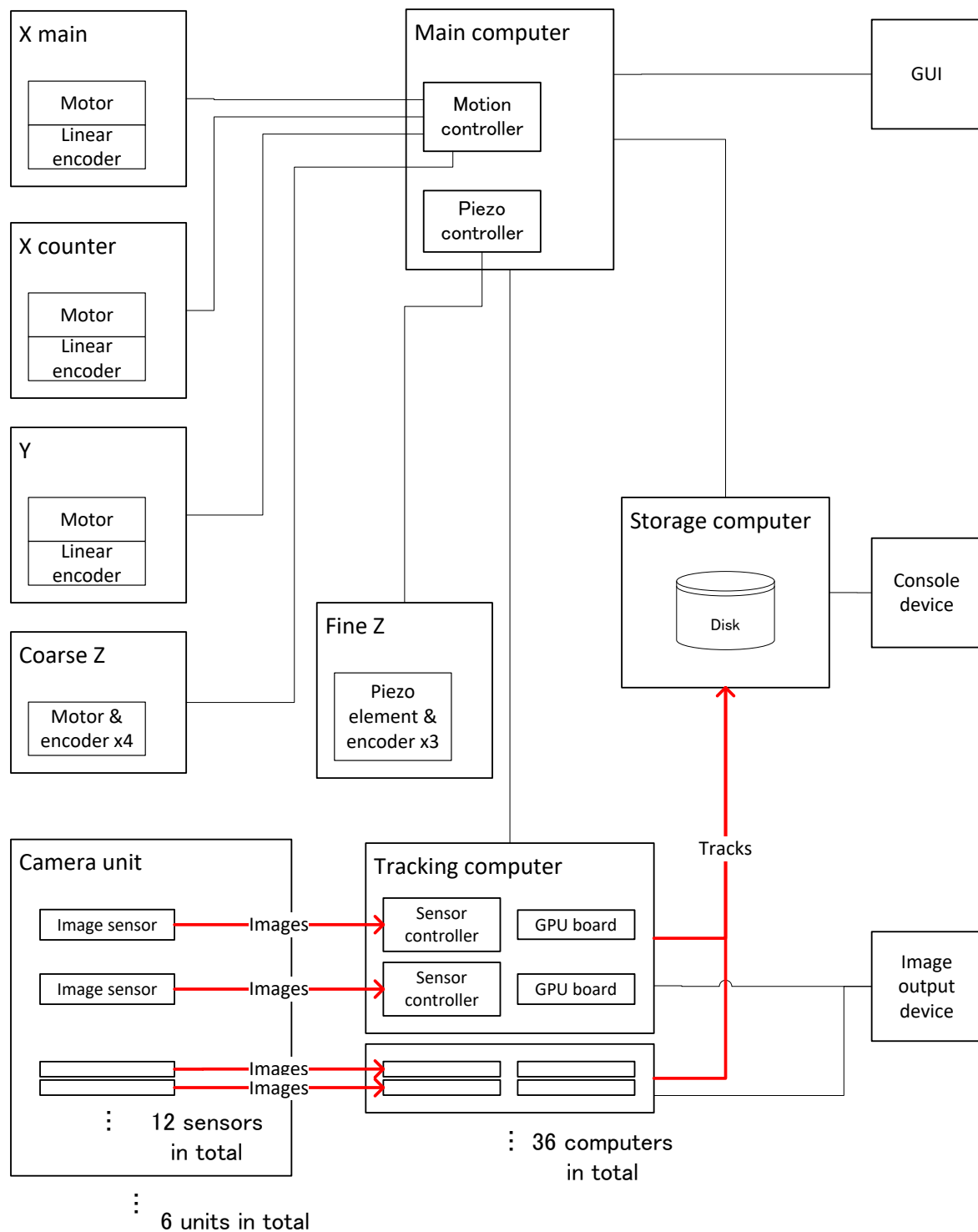


図 2.7: HTS のハードウェア構成

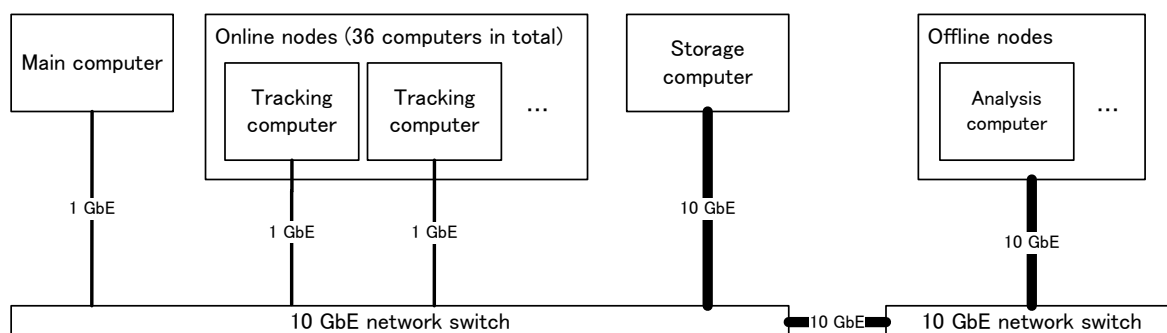


図 2.8: HTS のネットワーク構成

### 2.4.2 ネットワークの構成

コンピュータのネットワーク構成を図 2.8 に示す。全てのコンピュータは互いに通信するためにイーサネット接続した。メインコンピュータは飛跡認識用コンピュータにセンサの画像取得や、飛跡認識の処理のタイミングを送信し、飛跡認識用コンピュータから認識されたグレイ数などのフィードバック情報を受け取る。タイミング情報を可能な限り速く送受信するため、これらのコンピュータ間にあるスイッチングハブの数は 1 個とした。

認識された飛跡データは飛跡認識用コンピュータからストレージコンピュータに転送する。ストレージコンピュータは 36 台の飛跡認識用コンピュータからのデータを同時に受け取るため、10 GbE で接続した。ストレージコンピュータにデータが蓄積された後、オフライン解析用コンピュータが飛跡を再構成する。これらの解析用コンピュータもストレージコンピュータからデータを転送するために 10 GbE で接続した。

### 2.4.3 ソフトウェア構成

ソフトウェア構成を図 2.9 に示す。HTS の全ての制御をメインコンピュータの 1 つの端末で行うことができるシステムにした。

読み取り全体を統括するスキャンマネージャ、ステージの制御を行うステージマネージャとピエゾマネージャ、各センサのシャッタースピードを独立に制御するシャッタースピードマネージャが、メインコンピュータ上で動かした。飛跡認識用コンピュータは、画像処理や飛跡認識を行うための飛跡認識プログラム、センサコントローラから常に画像を読み取り、スキャンマネージャから受け取ったタイミングに撮像した画像を飛跡認識プログラムに渡すセンサマネージャが動作させた。飛跡認識プログラムで用いられる画像データはセンサマネージャからプロセス間通信が可能な共有メモリを通して転送した。

ステージを駆動したり撮像したりするタイミングはスキャンマネージャに一括して管理させた。センサマネージャは 300 fps で出力される画像を、スキャンマネージャから届い

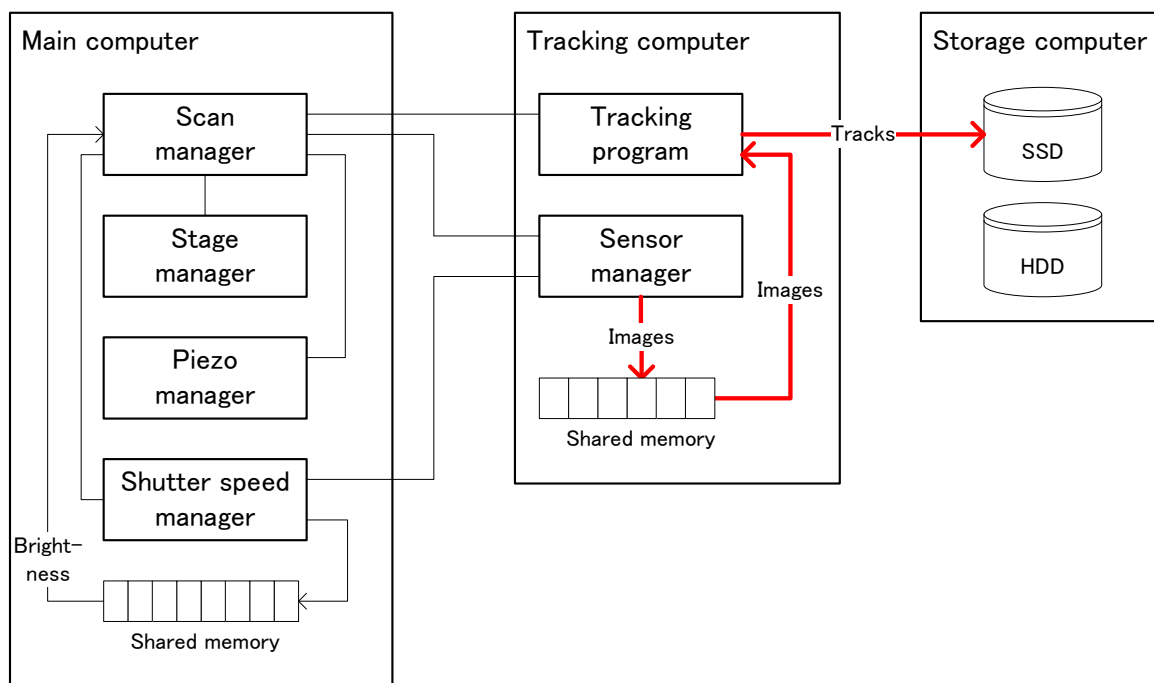


図 2.9: HTS のソフトウェア構成

た時間を基準に共有メモリにコピーする。各センサのクロックは同期していないため、タイミング信号が到着してから画像を取得するまでの時間の不定性は1フレーム分の3.3 ms (=1/300 fps) がある。スキャンマネージャが72個のセンサマネージャにタイミングを送る際の、1個目から72個目までの時間差は約1 ms であり、1フレーム分のずれからくる不定性より小さい。

## 2.5 画像処理と飛跡認識

標準的な設定では、焦点面を変えながら22枚の断層画像を撮影した。22枚の画像のうち、16枚を乳剤層を撮影するため、他の6枚は予備画像(マージン画像)である。典型的な乳剤の厚みは60  $\mu\text{m}$  なので、撮影する画像の間隔は4  $\mu\text{m}$  になる。

### 2.5.1 画像処理

撮影した画像は2ステップの画像処理によってグレイを1、背景を0になるよう二値化する。画像処理はGPUで行い、実装は画像処理ライブラリ OpenCV library (version 2.4)\*<sup>4</sup>を用いた。

\*<sup>4</sup> インテルが開発・公開しているオープンソースのコンピュータビジョン向けライブラリ。BSD ライセンス

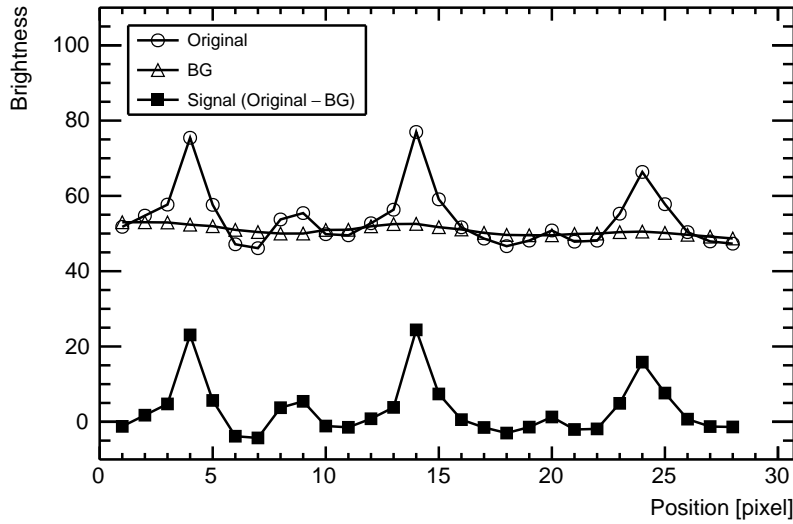


図 2.10: 画像処理によってシグナル (グレイン) の画像を選ぶ処理。Original はある画像上に並ぶグレインの直線上の輝度値である。式 2.1 の手法で低周波成分を取り出した背景画像の輝度値が BG である。Signal をオリジナルから BG を引くことにより、グレインがピークとして得られた。

### 2.5.2 画像処理ステップ 1

最初のステップは、画像から焦点の合ったグレインを選び出すことである。まず画像をローパスフィルタに通し、ぼけた画像を作る。典型的なグレインのサイズはセンサの 1 ピクセル ( $0.45 \mu\text{m}$ ) 程度である。そこで、カットオフ周波数を  $1/(10 \text{ pixels})$  程度とした。このバックグラウンドのピクセル  $(x, y)$  における輝度値を  $B_{BG}(x, y)$  とし、 $N \times N$  ピクセルのカーネル  $K$  を用いて式 2.1 のように計算した。

$$B_{BG} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N B_{Original}(x+i, y+j) \cdot K(i, j). \quad (2.1)$$

今回、カットオフ周波数は  $1/(12.5 \text{ pixels})$  とし、カーネルのサイズは  $15 \times 15$  ピクセルとした。図 2.10 のように、ぼかした画像を元画像から引くことにより、高い周波数成分を持つ画像が図 2.11 のように得られた。最後に、閾値処理を行うことで、グレインだけが 1 の値を持つ二値化画像を得ることができた。この二値化画像の 1 の値のピクセルの数をグレイン数 (number of grains = NOG) と定義した。ここで得た NOG は、計算終了後すぐにスキャンコントローラーにフィードバックされ、全てのセンサからの情報を集計し、乳剤層を撮像できたかどうかの判定を行い、できた場合はすぐに次の視野にステージを移動する。NOG を計算するのに必要な最小限の画像処理が画像処理ステップ 1 である。

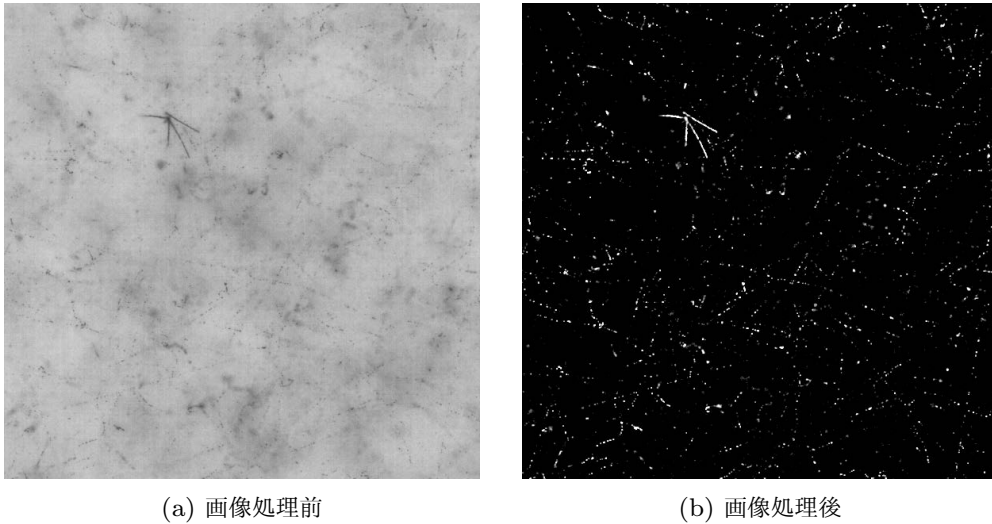


図 2.11: 画像処理前と処理後の画像。背景の周波数の低い濃淡を消した。

### 2.5.3 画像処理ステップ 2

ステップ 1 で画像の平面方向 (XY 軸方向) でグレインを残す画像処理を行った。ステップ 2 では、さらに隣り合う画像 (Z 軸方向) からより焦点の合ったグレインを残す処理を行った。この処理は、ステップ 1 の閾値処理を行う前のある画像に対して隣接する画像 2 枚をつかって式 2.2 のように行った。

$$B'_k = B_k - \frac{a}{2} (B_{k-1} + B_{k+1}). \quad (2.2)$$

ここで、定数  $a$  はグレインの像の Z 軸方向の広がり幅が画像間の距離 ( $4 \mu\text{m}$ ) よりも小さくなるように調整し、 $-0.3$  という値を得た。これらの処理のあと閾値処理を行い二値化された画像を得た。

残ったグレインのサイズが約 1 ピクセルのとき、後述の飛跡認識アルゴリズムの探索角度ピッチである 3 ピクセルよりも小さく、ピッチの隙間に入った角度の飛跡はこのアルゴリズムで検出し損なう。そこで  $2 \times 2$  または  $3 \times 3$  の膨張処理を図 2.12 のように行った。GRAINE-2015 フライト乾板で SN 比を改善するよう閾値処理や膨張処理のパラメータを調整した結果、 $2 \times 2$  の膨張処理を採用した。

### 2.5.4 画像取得の成否判定

HTS は次の視野に移動する前に、乳剤層の画像を取得できているかどうかの判断をさせた。もし、取得に失敗したままやり直しをしなければ、5 mm 四方の領域で検出効率が下がりその後の解析に大きな影響を与えるからである。標準の設定では 22 枚の画像を撮影

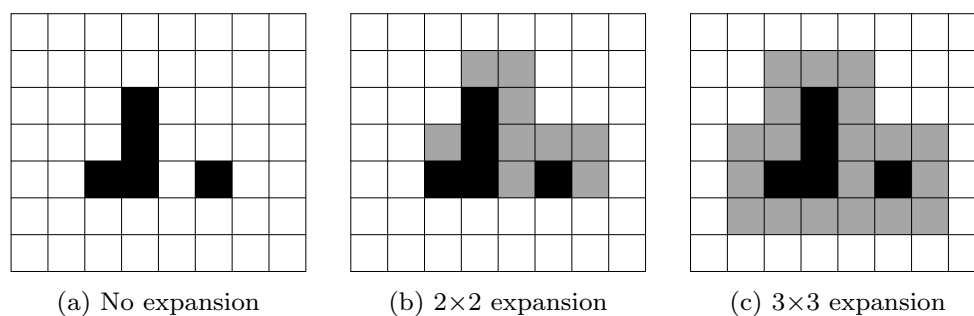


図 2.12: 膨張処理の概要図。元のピクセルを黒、拡大されたピクセルを灰色で示す。

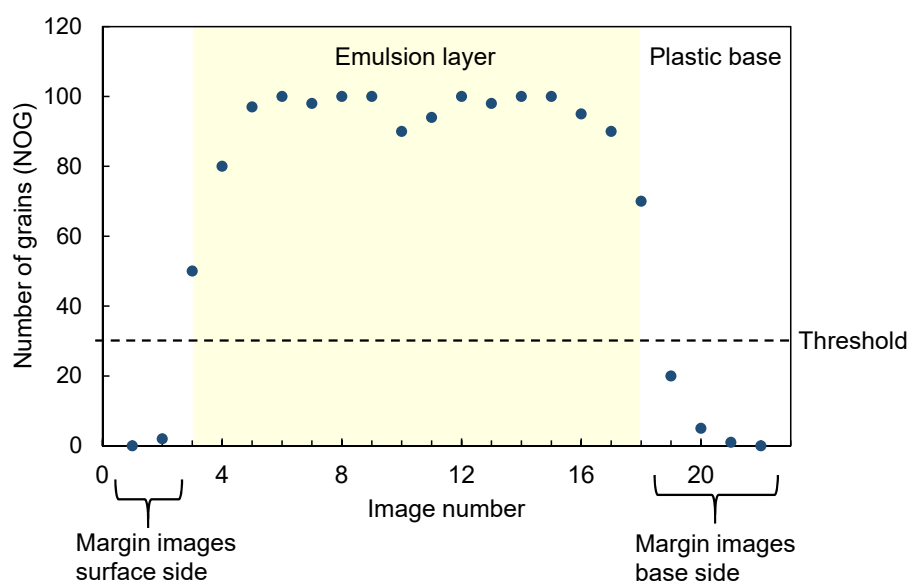


図 2.13: 断層画像の中から乳剤層を特定する方法

しそのうち連続する 16 枚を飛跡認識に用い残りの 6 枚の画像をマージン画像として撮影した。

画像の取得が成功したかの判定は画像処理のステップ 1 で計算した NOG を用いた。ある画像の NOG がある閾値以上であれば、その画像は乳剤層を撮影していると判断した(図 2.13)。

各センサの Z 軸の位置は最大のセンサと最少のセンサで約  $8\ \mu\text{m}$ (2 枚分) ずれている。すなわち、マージン画像の平均値は 1 枚以上になれば全てのセンサで乳剤層を認識しているといえる。各センサのマージン画像の平均値が 1 未満であれば撮影をやりなおし 1 以上 1.5 未満であれば次の視野で Z 軸の場所を修正した。このようにしてやり直しの回数を最小限にしつつ乳剤層の取り損ないを最小にした。

### 2.5.5 飛跡認識

16 枚の断層画像を通り抜けた直線に並んだグレインは、1.2 で述べたような Track selector という手法で検出する。二値化した画像を、ある角度の飛跡が画像に対して垂直になるように X 方向及び Y 方向にシフトさせて、垂直方向に足す。この足した値は、Pulse height (PH) と呼ばれ、飛跡らしさの指標となる。この処理を角度 (すなわちシフト量) を変えながら必要な角度空間を繰り返す。最初の画像と 16 枚目の画像との相対シフト量は 3 ピクセル ( $1.35 \mu\text{m}$ ) ごとで、これは S-UTS の飛跡認識と同じにした。標準設定においては X 方向と Y 方向に独立に  $\pm 180$  ピクセル ( $\pm 81 \mu\text{m}$ ) 以内のシフト量を計算した。これは  $60 \mu\text{m}$  厚の乳剤層で  $\pm 53$  度に相当する。読み取り速度が遅くなるが最大で  $\pm 360$  ピクセル ( $\pm 162 \mu\text{m}$ ) まで計算が可能である。これは  $\pm 70$  度に相当する。S-UTS の時は標準で  $\pm 60$  ピクセルまで探索し乳剤厚  $45 \mu\text{m}$  を考慮したときの探索角度区間は  $\pm 34$  度に比べて HTS では標準設定でも角度空間で 2.4 倍以上の角度範囲を探索できるようになった。

HTS は当初の計画に比べ GPU の技術進歩とそれに応じたソフトウェア開発が進んだため飛跡の探索角度範囲が広がった。このソフトウェア開発は HTS を実現するためのキーテクノロジーであり駒谷氏の論文で詳細に述べられる。

### 2.5.6 飛跡のクラスタリング

PH で閾値処理を行ったあと角度と位置空間でクラスタリングを行った。1 本の飛跡が位置・角度空間に広がって Track selector で検出されるからである。元々 1 本の飛跡が複数本出力された飛跡はゴースト飛跡と呼ばれる。図 2.14 のように、ほぼ同じ場所で似た角度の飛跡を 1 本化するクラスタリング処理を行った。クラスタリングの処理は CPU で行い、駒谷氏が高速化を行った。

位置空間のクラスタリングは典型的な値として最大の PH を持つ飛跡を中心として 11 ピクセル ( $5.0 \mu\text{m}$ ) 四方である。また角度空間は同様に 1 層目から 16 層目までのシフト量で 7 ピクセル ( $3.2 \mu\text{m}$ ) 四方であり、乳剤厚が  $60 \mu\text{m}$  のときは 3 度 ( $50 \text{ mrad}$ ) に相当する。

最初に角度が同じで位置に近いゴースト飛跡についてクラスタリングを行った。この時  $PH_{vol}$  が式 2.3 のように計算できる。

$$PH_{vol}(x, y) = \sum_{i=-5}^5 \sum_{j=-5}^5 (PH(x+i, y+j) - ph') \quad (2.3)$$

閾値処理を行った後の PH の最小値を  $ph' + 1$  とし、近傍で最大の PH を持つ位置の座標を  $(x, y)$  とした。PH<sub>vol</sub> は飛跡の位置空間及び PH 空間の広がり之和に相当し電離損失

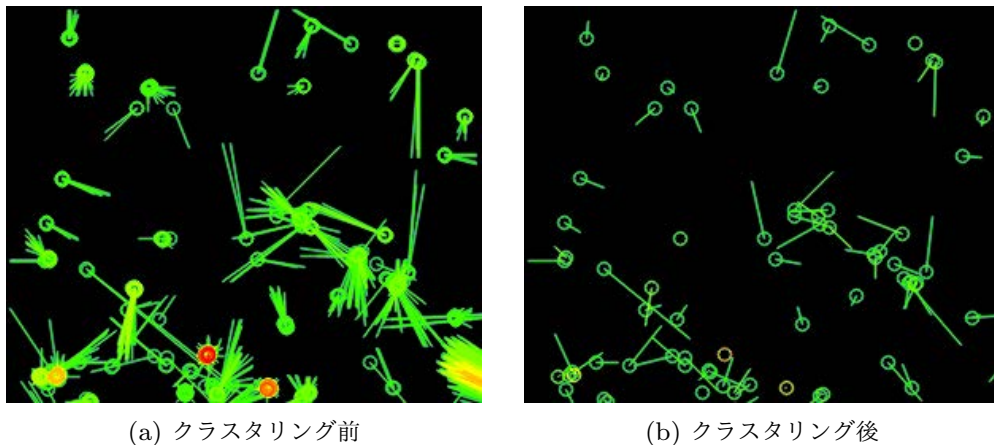


図 2.14: クラスタリング処理による飛跡の 1 本化。丸が飛跡の始点で矢印が角度のベクトルに相当する。

と相関がある [61]。画像処理で  $1/(12.5\text{pixel})$  のカットオフ周波数で低周波成分は除去しているため画像処理で残るグレインの大きさには上限がある。そのため測定可能な電離損失にも上限がある。クラスタリング後の飛跡の位置は  $PH(x+i, y+j) - ph'$  の値で加重平均を取った。

次に  $PHvol$  が最大となる飛跡を中心に角度空間と位置空間で 2 回目のクラスタリングを行った。位置及び角度は  $PHvol$  の値で加重平均として求めた。

これらの 2 段階のクラスタリングにより、 $PH$ 、 $PHvol$ 、平均位置  $(x, y)$ 、平均角度  $(ax, ay)$  が出力され、このマイクロトラックと呼ぶ。マイクロトラックは 4.1 で述べる飛跡再構成で用いる。角度の大きい飛跡については主に飛跡の進行方向にゴースト飛跡が発生し、これは上記のクラスタリングでは消すことができない。同一センサや同一視野内のゴースト飛跡はこの処理によって 1 本化されるが、異なるセンサや異なる視野の飛跡は消されない。そのため全ての飛跡に対して再度クラスタリングを行う。この手法は 3.1.2 で詳細に述べる。

### 2.5.7 処理の並列化

HTS で行う全処理のタイムチャートを図 2.15 に示す。判定の時間を除き、ステージ、カメラ、飛跡認識用コンピュータは並列に動かした。しかし、72 個全てのイメージセンサに付随する画像処理からの NOG 情報を受け取るところで同期が発生する。画像取得の成否判定に約 1 ms 程度かかる。HTS で用いた GPU は各プロセスを並列に実行することができないため、“Image processing step2” 及び “Track recognition” は逐次処理される。一方で、CPU で行う “Track clustering” は並列処理が可能である。しかし、ストレージサーバーは並列化していないため、飛跡本数が増えると “Data storing” で遅延が発生す

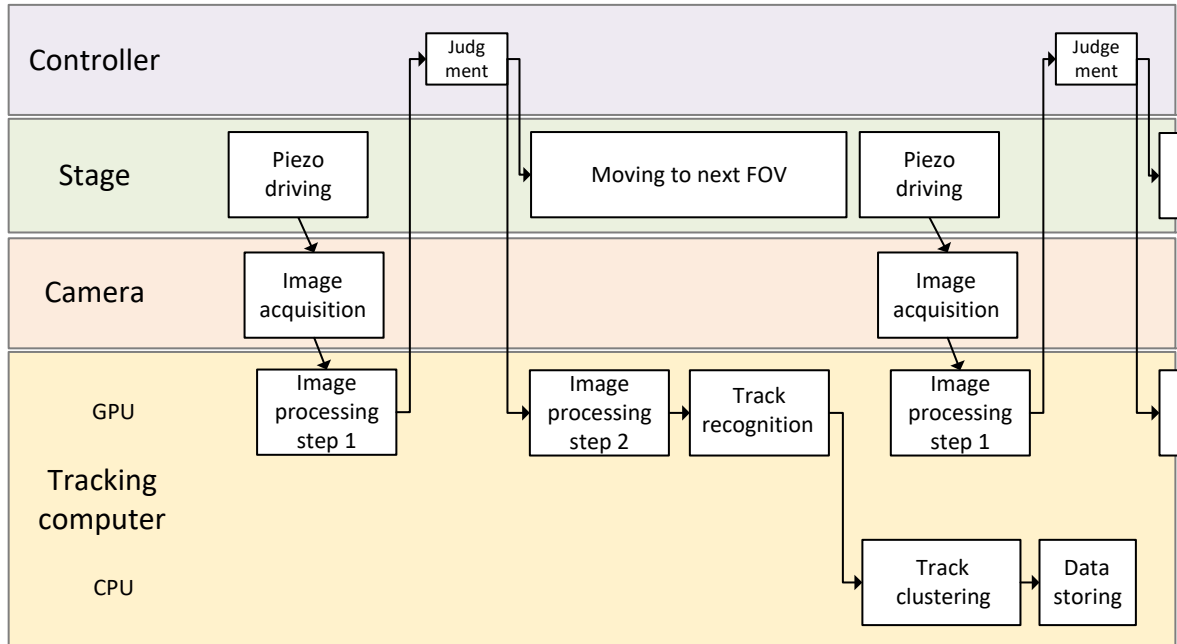


図 2.15: 各デバイスの活動のタイムチャート。各部分の長さは実際の時間と比例しない。

ることがある。読み取り速度を維持する場合は、画像処理の閾値や飛跡認識の  $PH$  の閾値を上げて、出力する飛跡本数を減らす必要がある。

## 第 3 章

# HTS のための開発

### 3.1 大角度飛跡への対応

2.5.5 で述べた通り、HTS は S-UTS に比べてマイクロトラックを認識できる角度空間が  $\pm 31$  度 ( $\tan \theta < 0.6$ ) から  $\pm 53$  度 ( $\tan \theta < 1.35$ ) に増えた。そのため、従来のクラスタリング手法で角度の大きい飛跡のゴースト飛跡を消せない事象が発生した。

#### 3.1.1 Radial-Lateral 成分

原子核乾板で読み取った飛跡の角度  $\theta$  は乾板平面に対する垂線からの角度である。これは、乾板平面を XY 平面としたとき、認識した飛跡ベクトルの各成分 ( $dx, dy, dz$ ) を用いて次のように定義される。

$$\begin{aligned} ax &= \tan \theta_x = \frac{dx}{dz} \\ ay &= \tan \theta_y = \frac{dy}{dz} \\ \tan \theta &= (\tan^2 \theta_x + \tan^2 \theta_y)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{3.1}$$

しかし、ゴースト飛跡や後述する角度精度を考えると、飛跡の進行方向と進行方向に対して垂直な方向では挙動が異なる。そこで、角度を図 3.1 のように radial 成分と lateral 成分に分解した。単一の飛跡に対しては、lateral 成分は常に 0 となる。また、radial 軸は飛跡を XY 平面に射影したときの飛跡と水平方向とし、lateral 軸は垂直方向とした。

理想的な条件において、Lateral 方向の角度精度 ( $\sigma_{lateral}$ ) は水平分解能  $\delta x$  と相関があり角度依存性はない。Radial 方向の角度精度 ( $\sigma_{radial}$ ) は水平分解能  $\delta x$  と被写界深度  $\delta z$  と相関がある。それぞれ、式 3.2 の角度依存性を持つ。

$$\begin{aligned} \sigma(\tan \theta_{lateral}) &\propto \delta x \\ \sigma(\tan \theta_{radial}) &\propto \sqrt{(\delta x)^2 + (\delta z \times \tan \theta)^2} \end{aligned} \tag{3.2}$$

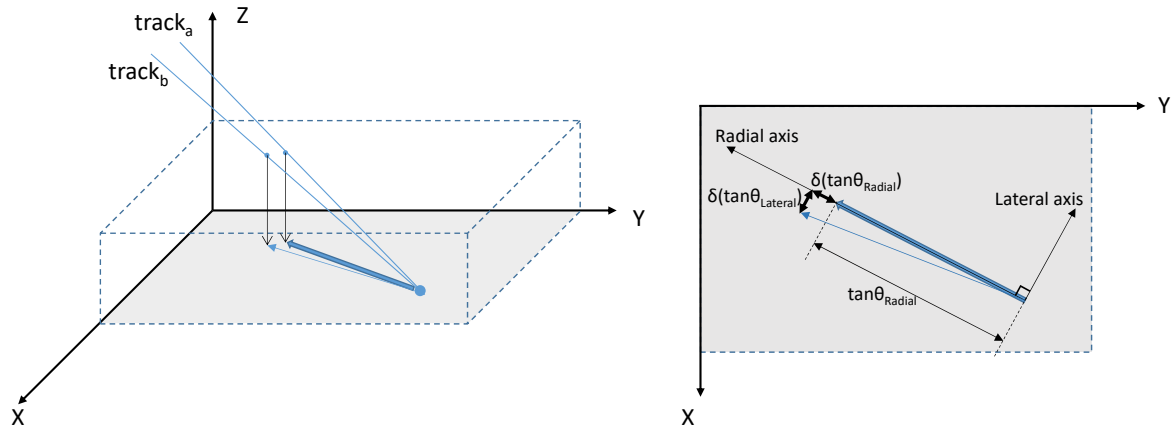


図 3.1: 2 本の異なる角度の飛跡に対する “radial-lateral” 成分の定義

Radial 方向の角度精度は、角度が大きくなるにつれて被写界深度の項が効いて大きくなる。そのため、特に角度の大きい飛跡において飛跡の角度の精度を評価する際は、radial 成分と lateral 成分で区別しなければならない。

### 3.1.2 Radial クラスタリング

ゴースト飛跡については 2.5.6 で述べたが、ここでのゴースト飛跡のクラスタリング処理は角度  $(ax, ay)$  に対して行った。しかし、角度の大きい飛跡は、radial 空間の角度の誤差は角度に依存して大きくなるため、radial-lateral 座標系に変換した位置ずれ、角度ずれでクラスタリングを行う必要がある。

それぞれの角度空間でのクラスタリングの値の最適値を求めるために、読み取ったマイクロトラックの飛跡の位置、角度が近い飛跡を選び、 $PH$  及び  $PhVol$  が最大の飛跡に対する、radial-lateral 座標系での位置ずれ、角度ずれを計算した。結果を図 3.2 で示す。水平に伸びる赤線は従来のクラスタリング条件を表し、radial 方向での折れ線が今回新しく導入したクラスタリングの条件である。この赤い折れ線以下の飛跡は同じ飛跡由来であるとしてクラスタリングを行った。これを Radial クラスタリングと呼ぶ。

HTS のあるセンサでのクラスタリング前後の飛跡を図 3.3 に示す。矢印の始点は飛跡の位置、向きと大きさは飛跡の角度を表している。Radial クラスタリング前は飛跡の進行方向に複数の飛跡が存在したが、Radial クラスタリング後は 1 本化された。

## 3.2 像の歪みとその補正

原子核乾板読み取り装置では、センサ上のピクセル座標  $(x, y)$  をステージの  $XY$  軸のリニアエンコーダを基準としたステージ座標  $(X, Y)$  に変換する必要がある。HTS は原子核乾板読み取り装置として初めて複数のセンサによる並列読み出しを採用したので、HTS に

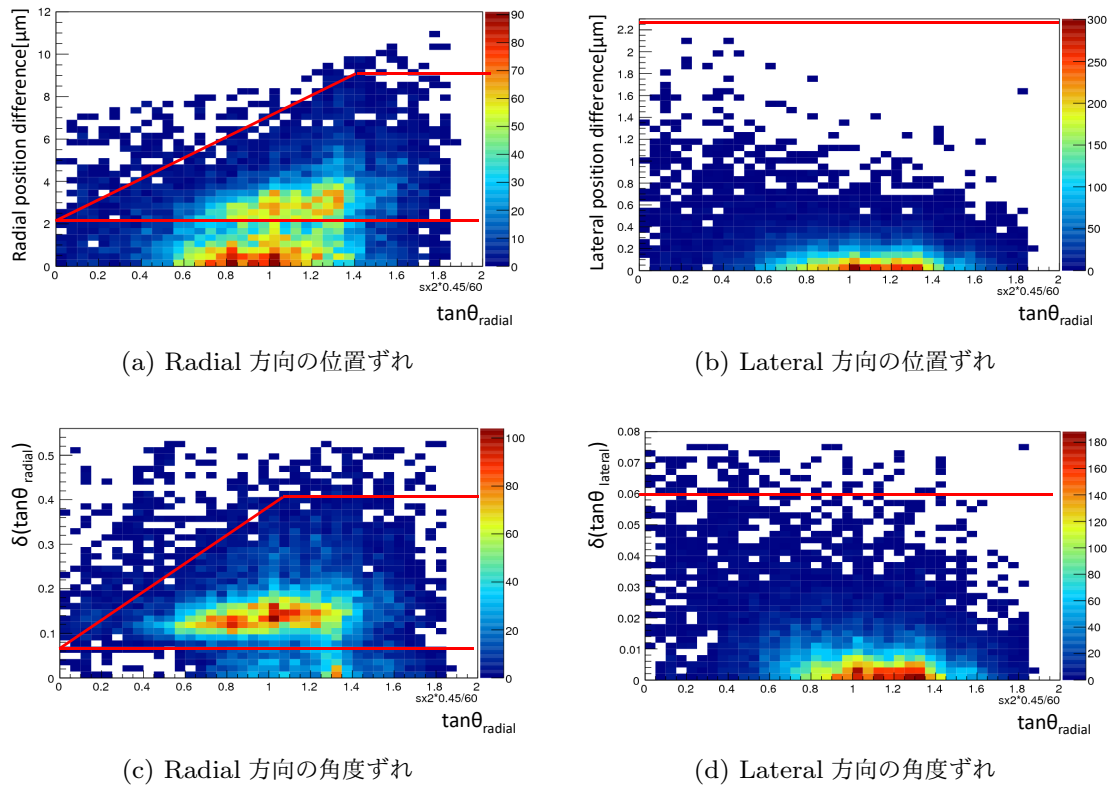
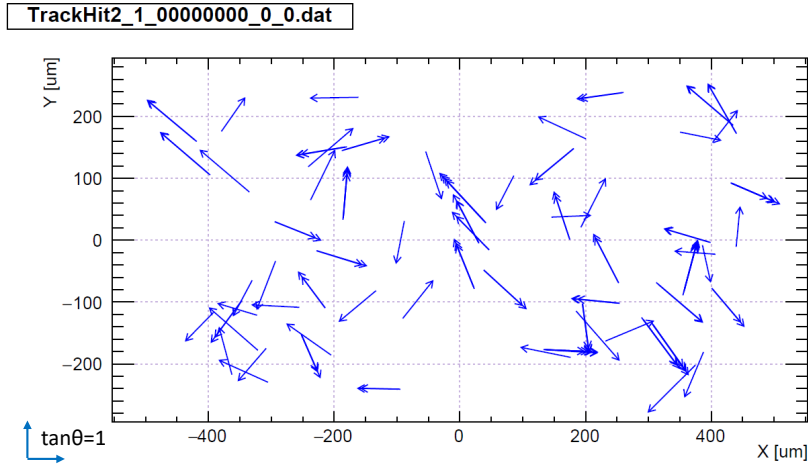


図 3.2: Radial-lateral 座標系のゴースト飛跡の角度依存性と、Radial クラスティングの閾値

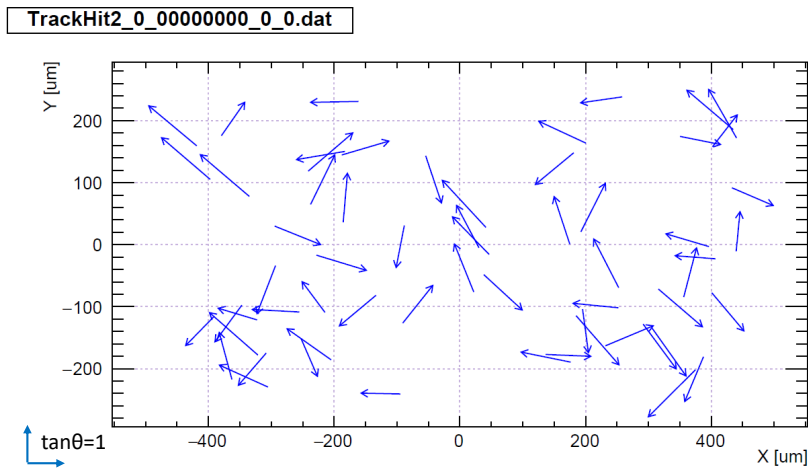
搭載された 72 個のイメージセンサの座標系を一つの座標系に統合するシステム開発は、HTS を成立させる上で重要な課題である。

### 3.2.1 像の歪みの原因

対物レンズには様々な収差が存在する。HTS の対物レンズでは単色光でも現れる歪曲収差 (radial distortion) と像面湾曲 (field curvature) が主に影響する。像面湾曲は焦点面を平面としたときに結像面が平面にならず、光軸方向にたわむ現象で、飛跡の Z 軸方向の位置ずれを引き起こす。2.5.2 の画像処理と 2.5.4 の画像取得を成功したかの判定において、マージン画像と NOG を用いた乳剤層の認識アルゴリズムにより約  $2 \mu\text{m}$  の精度で補正した。歪曲収差は対物レンズの視野 (FOV) の中央と端で倍率が異なることに起因し、焦点面の図形が結像面で変形する現象である。飛跡の XY 軸方向の位置ずれを引き起こすため、補正が必要である。HTS はビームスプリッターにより結像面を 6 面作っており、それぞれの結像面で発生する歪みもある。いずれもローカルな歪みは少なくグローバルな歪みが主成分であり、HTS が採用した 72 個のセンサによる分割読み出しによって補正が可能である。



(a) クラスタリング前



(b) クラスタリング後

図 3.3: Radial クラスタリング前後の飛跡 ( $\tan \theta > 0.6$ )

### 3.2.2 歪みの補正手法

それぞれのセンサに XY 軸方向のアフィン変換パラメータと Z 軸方向の変位を与えることにより、グローバルに発生する像の歪みやセンサの配置のずれは補正した。

アフィン変換は、一次変換で表すことの出来る拡大縮小、回転、変形と平行移動の組み合わせである。センサ座標系  $(x, y)$  をステージ座標系  $(X, Y)$  に変換するには、アフィン変換パラメータ  $(a, b, c, d, p, q)$ 、センサ番号  $i$ 、ステージのエンコード座標  $(E_X, E_Y)$  を用いて次のよう表すことができる。

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_i \\ q_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_X \\ E_Y \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

ここで、アフィン変換パラメータの  $a, b, c, d$  は拡大縮小、回転と変形の項であり、 $p, q$  は

平行移動の項である。HTS においては、 $p, q$  はあるセンサを基準とした相対位置とした。 $Z$  軸方向の補正は、センサごとに  $Z$  軸方向の変位のスカラー量  $dz_i$  を与えた。

### 3.2.3 原子核乾板中のグレインを用いたセンサ座標系の測定

各センサのアフィン変換パラメータと  $Z$  軸方向の変位を求めるため、原子核乾板に含まれている実際のグレインを用いたセンサアライメント手法を開発した。

アフィン変換パラメータの計算は次のように行った。最初に、ステージを  $X$  方向及び  $Y$  方向に移動し、エンコーダの移動量 ( $\delta E_X, \delta E_Y$ ) とセンサ上のグレインの移動量 ( $\delta x, \delta y$ ) の組を測定し、 $(p, q) = (0, 0)$  とし、 $a_i, b_i, c_i, d_i$  を求めた。

次に、あるステージの位置 ( $E_{X1}, E_{Y1}$ ) にいるときの全センサで観察可能な領域のグレインの位置カタログを作成した。あるセンサでステージを動かしながら他のセンサが観察した視野のグレインの位置カタログを作成した。それぞれのグレインカタログは、先に求めた  $a_i, b_i, c_i, d_i$  を使ってピクセル座標系をステージ座標系に変換した座標である。

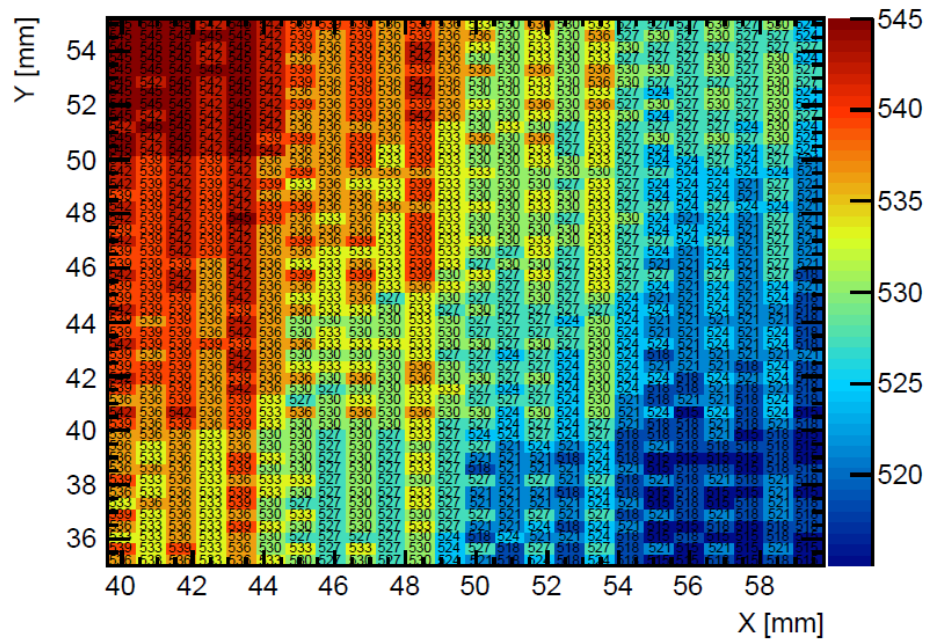
最後に、両カタログの位置を比較することで、各センサのアフィン変換パラメータの平行移動量  $p_i, q_i$  を求めた。

アフィン変換パラメータを求めると同時に、グレインの  $Z$  軸位置座標を比較することで、あるセンサに対する変位を求めた。図 3.4 に各センサで認識した乳剤層とプラスチックベース層との境界の  $Z$  軸座標を示す。図 3.4(a) はセンサの  $Z$  座標を補正前、図 3.4(b) は補正後を示す。(a) ではセンサの高さの違いによって、 $6 \times 12$  (横  $\times$  縦) 一組で構成されるセンサの配置に依存するパターンが強く見えていたが、補正後は弱くなった。

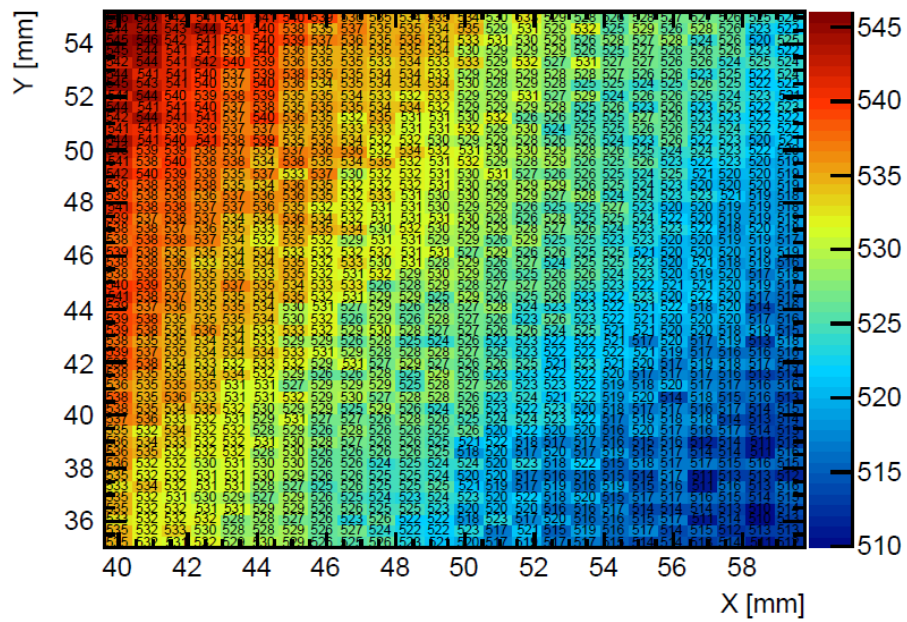
グレインの位置は、乾板を張り直した場合はもちろんのこと、ステージの温度変化などにより変化するため、数 10 分以内に測定し終わることが望ましい。

アフィン変換パラメータから倍率を  $mag = \frac{1}{2} (\sqrt{a^2 + b^2} + \sqrt{c^2 + d^2})$  と定義すると、各センサの倍率の平均値は  $0.4545 \mu\text{m}/\text{pixel}$  となった。倍率が最少のセンサを 1 とし、それに対する各センサの倍率の比を図 3.5 に示す。各センサが観察する領域と図 3.5 中の場所を対応させた。最少のセンサに比べて最大のセンサは 0.39% 倍率が大きくなった。この 2 個のセンサの距離は 3 mm であり、この間の変化率が一樣だとすると FOV の中央から角までの倍率の違いは 0.234% に相当する。光学系が一樣な歪曲収差を持っていた場合、全ての FOV を一つのアフィン変換パラメータで変換すると、実際の座標と歪曲収差をアフィン変換した座標との残差は RMS で  $2 \mu\text{m}$  になるが、72 個のセンサで分割し 72 個のアフィンパラメータを与えることにより、残差の RMS は  $0.1 \mu\text{m}$  未満になった<sup>\*1</sup>。

<sup>\*1</sup> 5 mm 四方の FOV を一つのアフィン変換パラメータで説明しようとした時の座標の残差の RMS は  $1.7 \mu\text{m}$ 、2.5 mm 四方の時は  $0.43 \mu\text{m}$  で、視野面積に比例して小さくなる。HTS のセンサ 1 個が担当する領域は約  $1 \times 0.5 \text{ mm}$  であり、残差は  $0.1 \mu\text{m}$  未満となる

**FineZ Layer 0**

(a) X-axis

**FineZW/DZ Layer 0**

(b) Y-axis

図 3.4: Z 方向の飛跡の位置分布.

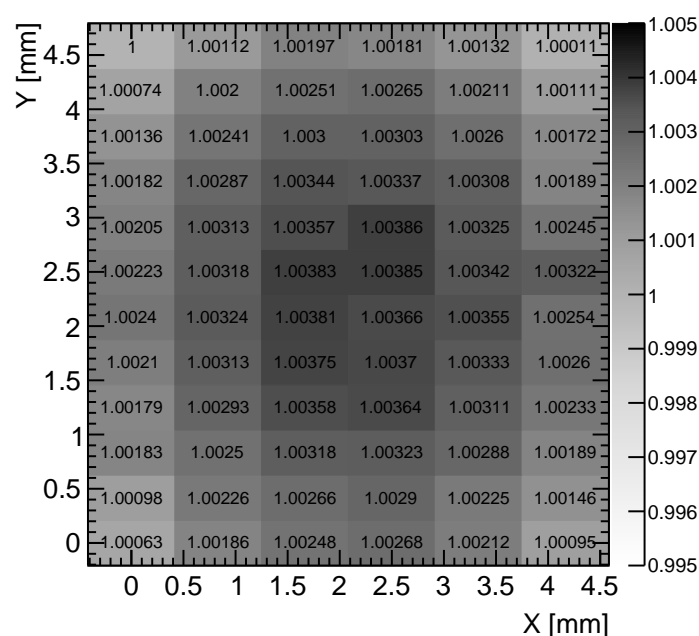


図 3.5: 各センサの倍率。最少の値は最も左上のセンサで、これを 1 とした。

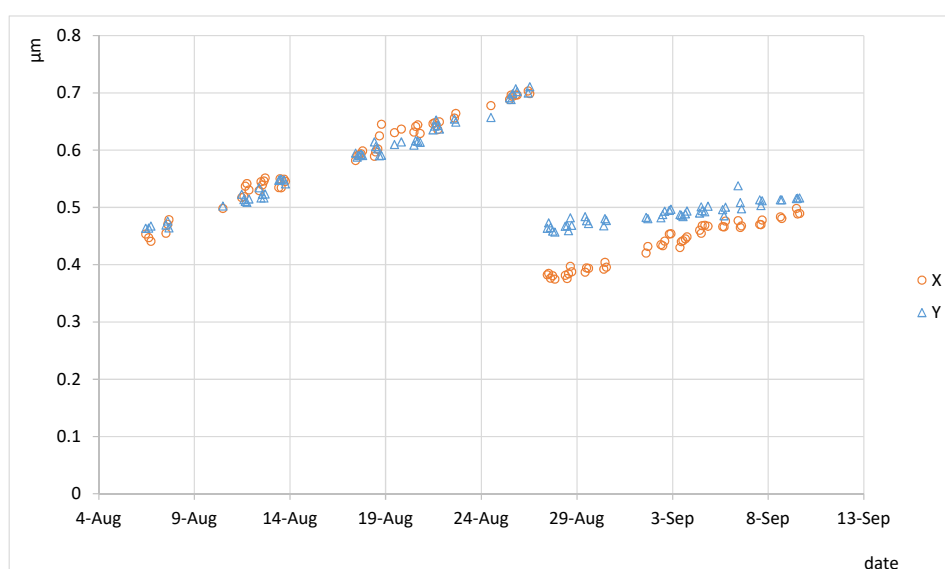


図 3.6: あるセンサの基準センサに対する相対位置ずれの時間変化。8 月 26 日の読み取り終了後に再測定を行ったため、その前後で不連続になっている。

### 3.2.4 読み取った飛跡を用いた精密なセンサ座標系の測定

このアフィンパラメータは、カメラの治具やビームスプリッターの経年劣化や熱的な膨張により変化しうる。後述する手法により測定したあるセンサの相対位置の時間変化を図 3.6 に示す。1 ヶ月で約  $0.3 \mu\text{m}$  の位置ずれが発生した<sup>\*2</sup>。

一つのセンサが観察する視野のうち、27% の領域は隣り合うセンサでも観察している。センサの位置が変化すると、一本の飛跡が複数の場所で検出される。さらに、クラスタリングで1本化したとしても、どちらを残すかによって飛跡の位置精度に不定性が生じる。センサの位置変化は徐々に起こり、読み取り毎に前述の手法で校正するには時間がかかりすぎるため、実際に読み取った飛跡を用いた校正手法を開発した。

1 個のセンサの位置が変化したとき、周辺のセンサとの相対的な位置変化量 (ベクトル) を求めることで、その変化量を求めることができる。しかし、多くのセンサの位置が変化したとき、全てのセンサの位置変化を求めることは単純な計算では不可能である。そこで次の計算方法を採用した。

まず、全てのセンサと隣 (上下左右) のセンサで認識された同じ飛跡を使って、センサ間の相対的な位置ずれ量 ( $D_1, D_2, D_3, D_4$ ) を求めた。この計算には、乾板に記録された垂直に近い飛跡 ( $\tan \theta < 0.01$ ) を用いた。ここで、センサの番号を  $i$  とし、各センサの尤もらしい位置変化量を  $P_i$  とすると、各センサを  $P_i$  で補正したときの残差  $\sigma$  は式 3.4 のように定義できる。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{72} \sum_{j=1}^4 (D_{ij} - P_i)^2 \quad (3.4)$$

このとき、 $P_0 = 0$  とすると、 $P_i$  は解析的に求めることができる。解法は付録 E に載せた。X 成分及び Y 成分はそれぞれ独立に求めた。

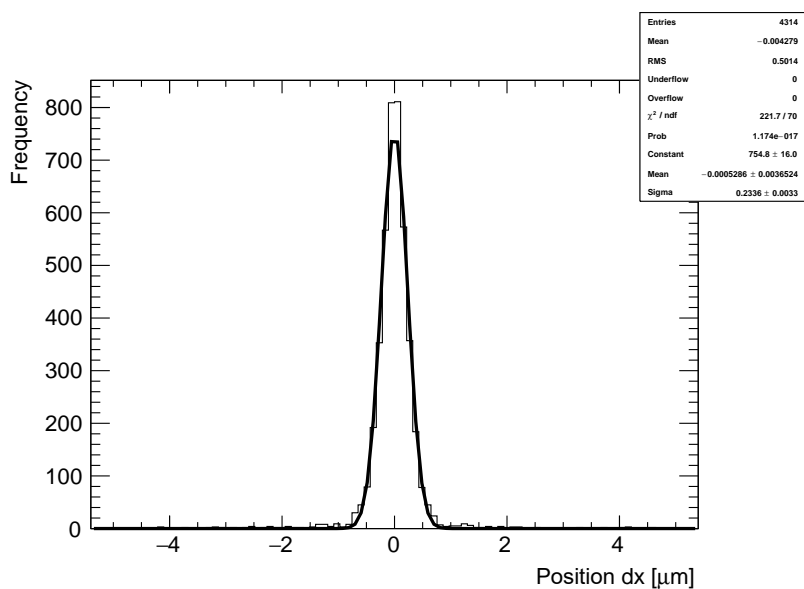
この補正を行った後、隣り合うセンサで同時に読み取った飛跡の位置ずれ量を図 3.7 のように得た。ここで、 $dx$  及び  $dy$  の 1 シグマはそれぞれ  $0.23 \mu\text{m}$  及び  $0.26 \mu\text{m}$  となり、異なるセンサにおいても、この位置精度で飛跡認識できることを示した。

### 3.3 ステージのチューニング

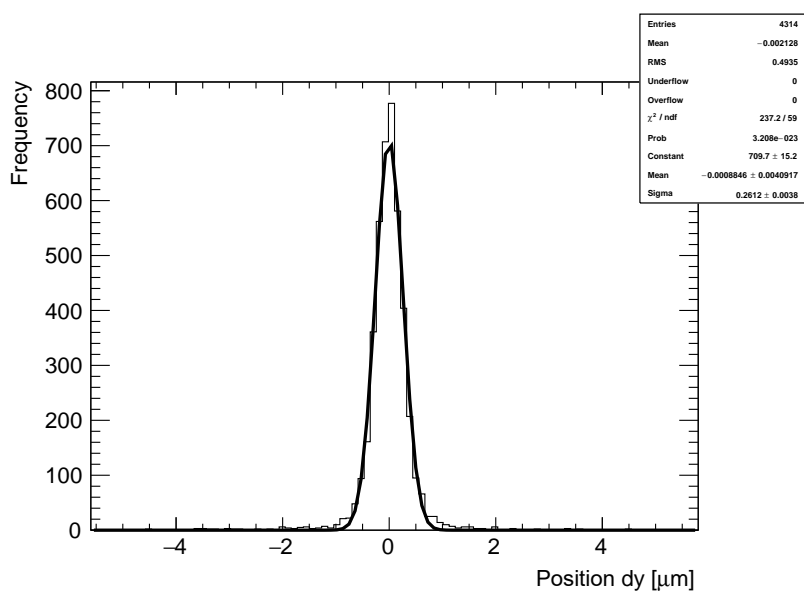
HTS はフィルムを読み取るために移動と停止を繰り返すステップ駆動を採用した。同じステップ駆動を採用した UTS と比較しても、隣の視野への移動量は 1 桁以上大きく  $5 \text{ mm}$  となる。UTS より速く駆動しなければ、駆動時間がボトルネックになるが、速く駆動するためには大きな加速度が必要となり、振動が発生しやすくなる。ステージを移動させた後に残る振動が起きているのに撮像を開始すればグレインの像のぼけてしまい、画像処理でグレインが認識できなくなり、飛跡認識で Pulse height が減り、最終的に検出効率が落ちてしまう。

---

\*2 HTS のビームスプリッタの 6 個の窓のうち、3 個の治具は 3D プリンタでアクリル系の UV 硬化樹脂 (KEYENCE 社の AR-M2) を用いて製作し、残り 3 個は鉄鋼材 (SS400) で製作した。鉄製の窓に設置したセンサ同士の位置ずれは少なく、この位置ずれはアクリル系樹脂の治具形状の経時変化によると考えられる。



(a) X-axis



(b) Y-axis

図 3.7: 2つの隣り合うセンサのオーバーラップ領域で同時に認識した飛跡の位置ずれ分布

### 3.3.1 振動の評価

振動を評価するために、X 軸のリニアエンコーダの座標値が目標に到達してから 30 枚の画像 (= 0.1 s) を Z 軸を移動させずに撮像した。画像に記録されたグレインの位置を用いて、連続するフレーム間 (= 0.0033 s) の位置の差を測定した。

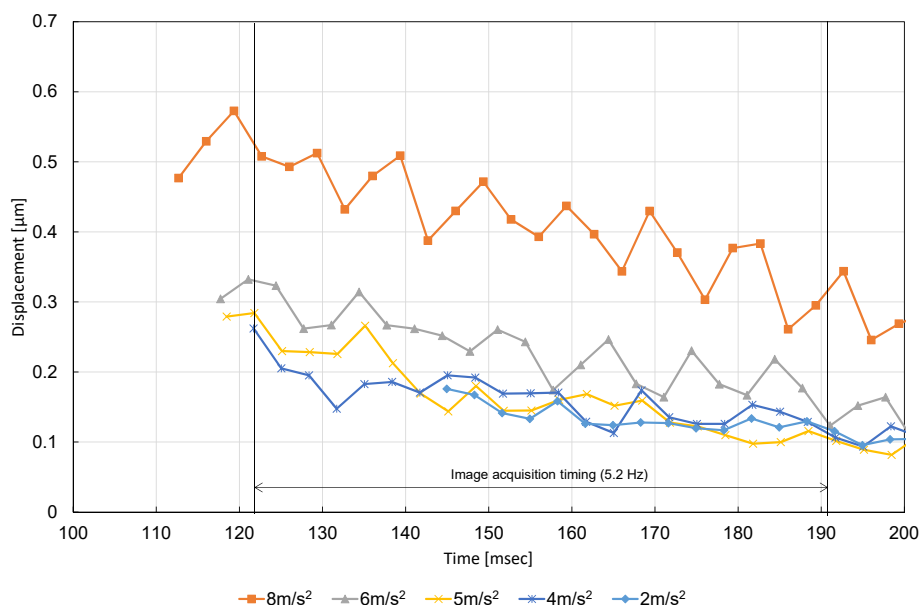


図 3.8: 加速度を変えたときのカウンタステージの影響。

### 3.3.2 結果

まず、速度を 100 mm/s に固定して、加速度を  $1.0\text{--}10\text{m/s}^2$  に変えながら測定した。結果を図 3.8 に示す。カウンタステージは、メインステージとリニアエンコーダで得た位置が対称になるように同期させて動かした。加速度が  $8\text{ m/s}^2$  のときは明らかに振動量が大きいことがわかった。また、加速度が  $6\text{ m/s}^2$  と  $5\text{ m/s}^2$  を比べても、120 msec から 190 msec までの振動量は  $5\text{ m/s}^2$  よりも大きかった。一方で、 $4\text{ m/s}^2$  以下にしても有意な差は見られなかった。そこで、加速度については  $5\text{ m/s}^2$  を採用した。

次に、カウンタステージの駆動ありとなしの差について評価した。この結果を図 3.9 に示す。カウンタステージの駆動をしたほうが、振動の量は有意に減っていることが分かった。

### 3.3.3 考察

今回、カウンタステージとメインステージは座標値が同じになるように加減速を行った。すなわち、メインステージとカウンタステージの加速度は同じである。カウンタステージとメインステージの質量が同じで、重心位置や駆動軸が対称であるという仮定が成り立てば、振動が発生しないことが期待された。しかし、加速度を上げると振動量が大きくなったことから、これらの仮定は成り立たなかった。

設計当初は、メインステージとカウンタステージの質量をほぼ同じにしたが、メインステージは照明のためのコンデンサレンズの駆動域を確保する必要があるため、カウ

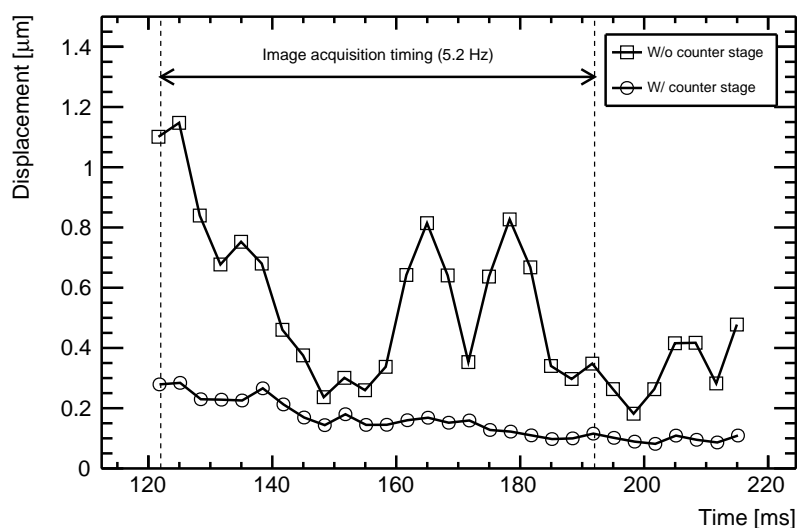


図 3.9: カウンターステージの影響。丸と四角はそれぞれカウンターステージの駆動のあり、なしをそれぞれ表す。

ターステージと同じ形状にはなっていない。また、piezoステージを取り付けた際の設計変更などで、重量の変化もあった。さらに、乾板や乾板を支える 5 mm 厚の亚克力板の重量は考慮されておらず、乾板の読み取り位置が変わることでこの亚克力板の位置も変わるため重心位置も移動した。X 軸ステージは 3 個のリニアガイドで下の Y 軸のステージと繋がっているが、このリニアガイドの摩擦係数も同じではない。

これらを考慮すると、HTS のカウンターステージを改良するならば、メインステージと座標値を同じにする駆動方法ではなく、振動を減らすことのできる加速度比で駆動する必要がある。また、重心位置を調整するために、カウンターステージは互いに独立して加減速ができる 2 軸以上が必要である。

## 第 4 章

# 読み取り性能の評価

HTS の性能評価を GRAINE プロジェクトの 2015 年フライト (GRAINE-2015 フライト) で用いた原子核乾板 [62] を使って行った。ここでは HTS の評価に必要な情報のみに触れ、GRAINE-2015 フライトの検出器の全体像については 5.2 で述べる。

OPERA フィルムと GRAINE-2015 フライト原子核乾板の諸元を表 4.1 で示す。GRAINE-2015 フライト原子核乾板の GD は、OPERA 実験で使われた OPERA フィルムより高いので高い検出効率が期待できる。一方、塗布や乾燥をクリーン環境下で行っていないため微粒子の降着や泡の発生により発生する不感領域が存在する。この不感領域は検出効率を下げる。

GRAINE-2015 フライト原子核乾板は、フライト時の乳剤層の厚みは  $70\ \mu\text{m}$  で、現像処理後の膨潤処理によって読み取り時の乳剤層の厚みが  $60\ \mu\text{m}$  以上になるように調整した。

GRAINE-2015 フライトでは、原子核乾板は地上に 8.5 日間置き、全フライト期間は 14.4 時間だった。一定高度を維持するレベルフライトの高度は 37.2 km で、その期間は 11.5 時間だった [63]。

	OPERA フィルム	GRAINE 乾板 <sup>*1</sup>
塗布手法	機械	手作業
AgBr の体積占有率	0.31	0.55
Grain density (/100 $\mu\text{m}$ )	36	50
ベースフィルム厚 ( $\mu\text{m}$ )	200	180
照射時の乳剤厚 ( $\mu\text{m}$ )	50	70

表 4.1: OPERA フィルム [36] と GRAINE-2015 フライト乾板 [62] の諸元

<sup>\*1</sup> GRAINE-2015 フライトのコンバータ部で用いられた、通称「高銀乳剤」を使った乾板。タイムスタンパー部とカロリメータ部は AgBr の体積占有率が 44% の「中銀乳剤」を用いた。OPERA フィルムの原料は「低銀乳剤」と分類される。

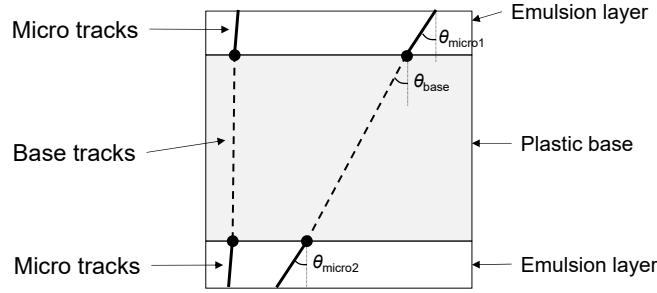


図 4.1: マイクロトラックとベーストラックの定義

HTS で GRAINE-2015 フライトで用いたコンバータ部とシフター部の全ての原子核乾板の読み取った。HTS の評価では、コンバータ部のユニット 3 の最下流の 3 枚 (No. 1-3) のフィルムの中央  $117 \text{ cm}^2$  を用いて行った。

## 4.1 飛跡再構成

乾板を貫通した飛跡は、図 4.1 のように、プラスチックベースを挟んだ 2 つの乳剤層にそれぞれマイクロトラックを残す。2 本のマイクロトラックのプラスチックベース側の端点同士を結んだ飛跡をベーストラックという。

乳剤中のマイクロトラックの角度  $\vec{ma}$  は、乳剤を構成するゼラチンの歪みや伸び縮みによって、飛跡が記録された時点から読み取りまでの過程で変化する。この変化量は、ベーストラックの角度や位置が変わらないことを仮定し一次の項のみを考慮すると、厚みの変化である shrink factor ( $shr$ ) と角度の変化量のベクトルである distortion vector ( $\vec{dist}$ ) を用いて式 4.1 のように表される。

$$\vec{ma}' = shr \cdot \vec{ma} + \vec{dist} \quad (4.1)$$

GRAINE-2015 フライト原子核乾板は、この shrink factor と distortion vector は 3 mm 四方の区間ごとに、2 mm 間隔で、生成されるベーストラックの本数が最も多くなるように算出した。

GRAINE-2015 フライトのコンバータ部は 100 枚の乾板を互いの相対位置がフライト中にずれないようにした。ベーストラック同士を接続する際は、図 4.2 中のベーストラックの角度ずれや位置ずれが小さくなるように、隣接する乾板の相対位置や回転、角度を補正し、元の乾板を貫通した飛跡を再構成した。

## 4.2 ベーストラックの検出効率

フィルム (No. 2) における飛跡の検出効率を評価するため、評価するフィルムを挟むフィルム (No. 1 と No. 3) を使い No. 2 を貫通する飛跡を再構成した。この予測された

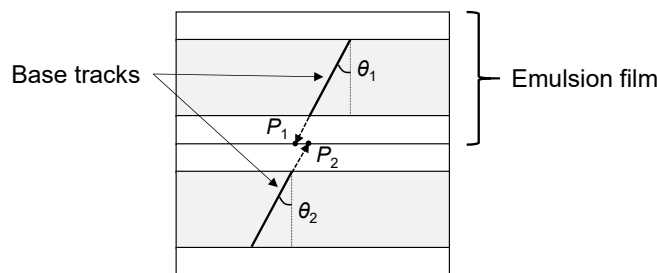


図 4.2: ベーストラック同士の接続と、ベーストラック同士の位置ずれ  $|P_1 - P_2|$  と角度ずれ  $|\tan \theta_1 - \tan \theta_2|$  の定義

飛跡の本数に対する、No. 2 で見つかった飛跡の本数をベーストラックの検出効率と定義した。

ベーストラックの検出効率の角度依存性を図 4.3 に示す。検出効率は角度空間  $\tan \theta < 1.6$  で 97% 以上だった。角度空間  $\tan \theta < 0.2$  の検出効率は  $\tan \theta > 0.6$  の角度空間より約 1% 高かった。この理由を考察するために、Pulse height (PH) の平均値の角度依存性を図 4.4 に示す。検出効率は PH の平均値と相関があった。PH は全ての角度である閾値以上の飛跡を残しており、大きな角度の飛跡のうち 1% は PH が閾値よりも低く測定されるものがあると考えられる。3 つの角度空間  $0.0 < \tan \theta < 0.1$ 、 $0.2 < \tan \theta < 0.3$  及び  $0.9 < \tan \theta < 1.0$  における PH 分布を図 4.5 に示す。それぞれの PH の平均値は 31.2、28.5、25.4 となった。

PH が小さい角度で大きい理由は被写界深度に由来していると考えられる。2 個のグレインが Z 軸方向に並んだときグレインの像は互いに強調され本来映るべきではない画像にグレインの像が映ることがある。この結果 PH は小さい角度で大きくなったと考えられる。角度の小さい飛跡で 1% の不検出が発生している理由は乾板の不感領域に由来すると考えられる。

### 4.3 角度精度の評価

マイクロトラックの角度精度は、ベーストラックとマイクロトラックの角度差と定義した。ベーストラックの角度精度は、評価するフィルムのベーストラックと隣のフィルムのベーストラックとの角度差と定義した。1 本のベーストラックにつく精度はここで示す値の  $(1/\sqrt{2})$  になる。また、角度は 3.1.2 で述べたように radial 成分、lateral 成分に分離した。

マイクロトラックのベーストラックの角度  $\tan \theta$  に対する角度精度を図 4.6、ベーストラックの角度精度を図 4.7 にそれぞれ示す。また、従来装置である S-UTS と HTS の角度精度の比較を表 4.2 に示す。S-UTS と HTS の角度精度は、異なる乾板で評価を行っているため、直接比較は難しい。S-UTS の評価には 150 GeV/c の  $\mu^-$  ビームを照射した乾板

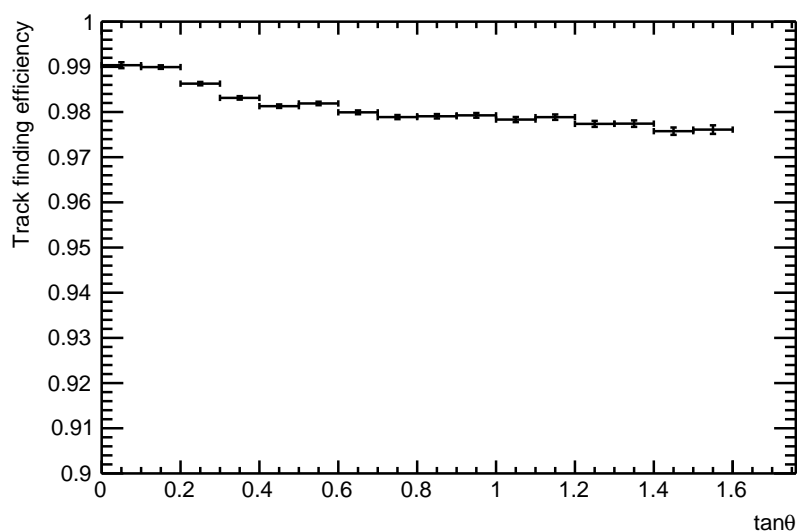


図 4.3: ベーストラックの飛跡検出効率の角度依存性

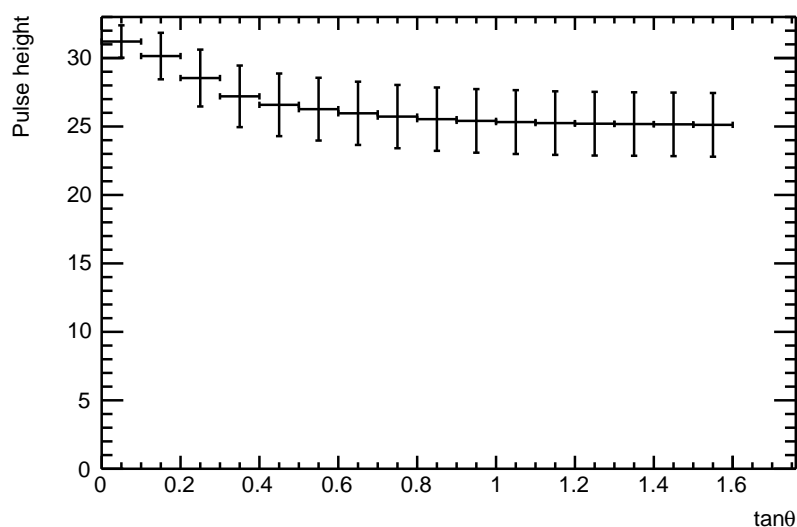


図 4.4: ベーストラックの平均 PH の角度依存性。PH のエラーは分布の標準偏差。

を用いているが、HTS の評価には GRAINE-2015 フライトの上空の宇宙線成分が主である。ただし、4 枚の乾板のベーストラックの角度を用いて散乱の小さい飛跡を選んでおり低エネルギー成分の効果は限定的である。

HTS でマイクロトラックの角度精度が高い理由は、HTS で用いた乾板の方が GD が高いことが主な理由であると考えられる。GRAINE-2015 用乾板は垂直な飛跡の平均グレイン数は 35 個であるが、OPERA フィルムは 18 個であり約 2 倍の差がある。マイクロトラックを構成するグレイン数が多いことがマイクロトラックの角度精度に効いたと考えら

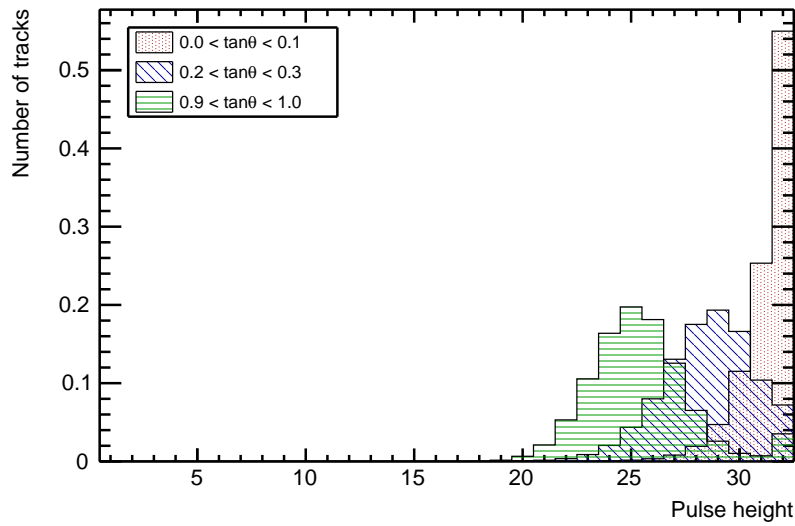


図 4.5:  $0.0 < \tan \theta < 0.1$ 、 $0.2 < \tan \theta < 0.3$  および  $0.9 < \tan \theta < 1.0$  のベーストラックに対する PH 分布

	Anguler range	S-UTS	HTS
Micro track	$\tan \theta < 0.1$	13	7
	$0.4 < \tan \theta < 0.5$	23	11
Base track	$\tan \theta < 0.1$	2.5	2.5
	$0.4 < \tan \theta < 0.5$	4.2	5.4

表 4.2: S-UTS [36] と HTS のマイクロトラックの角度精度とベーストラックの角度精度。

れる。

一方、角度の大きい飛跡でベーストラックの角度精度が悪いのは、式 3.2 から被写界深度である  $\delta z$  が HTS の方が大きいことが一つの理由である。S-UTS では画像の間隔は  $3 \mu\text{m}$  に対し、HTS では  $4 \mu\text{m}$  でありこの差も影響する。HTS では複数のセンサを用いているが、それぞれのセンサのクロックは同期していないため、撮像コマンドを発行してから実際に撮影するまでのタイミングには撮影間隔分の誤差を持っている。

これらの影響から、大きな角度でのベーストラックの角度精度が S-UTS よりも悪くなっていると考えられる。撮影間隔を密にしたり、より精度よく撮像時間を決定することで、これらの問題は解決できると考えられる。

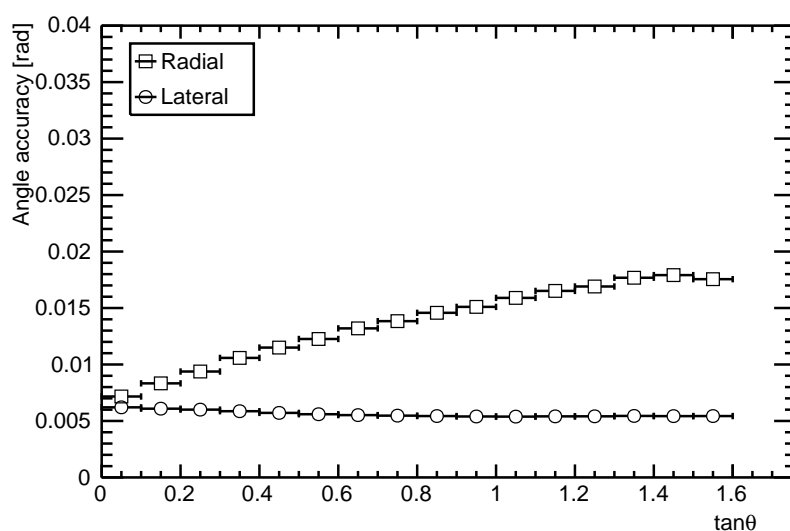


図 4.6: マイクロトラックの角度に対する角度精度

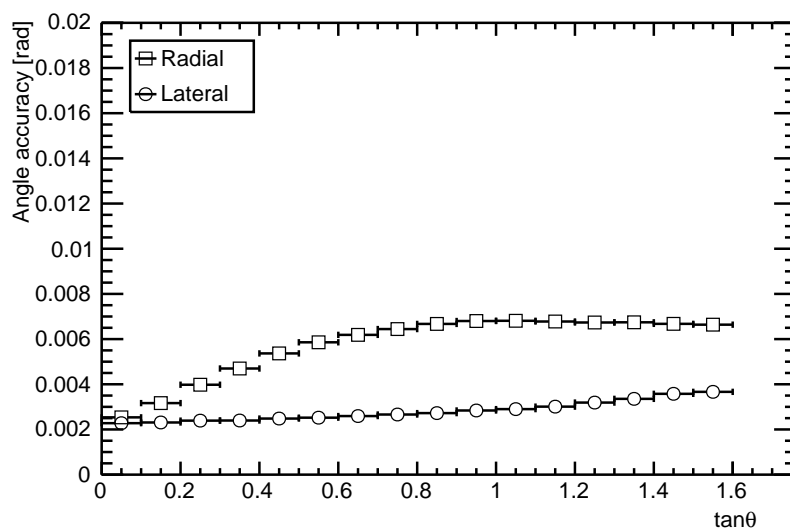


図 4.7: ベーストラックの角度に対する角度精度

## 4.4 速度と検出効率

これまでの評価は、1 秒間に FOV を読み取ることのできる視野数 (= 繰り返し周波数) を 4.2 view/s として行った。これは読み取り速度で  $3800 \text{ cm}^2/\text{h}/\text{layer}$  に相当する。

繰り返し周波数を 4 view/s から 5.5 view/s まで変化させたときのベーストラックの検出効率を評価した。読み取り速度は、図 3.9 の撮像タイミングを変えることで変化した。X 軸ステージの最大速度や加速度は変化させなかった。

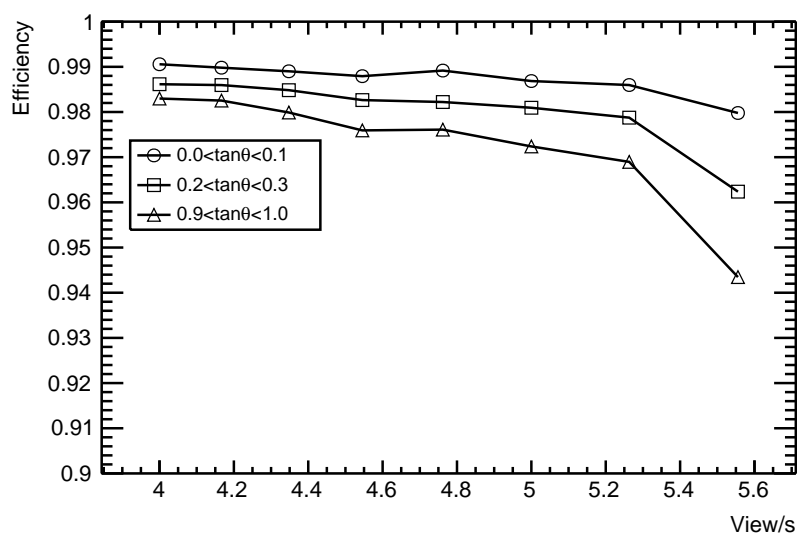


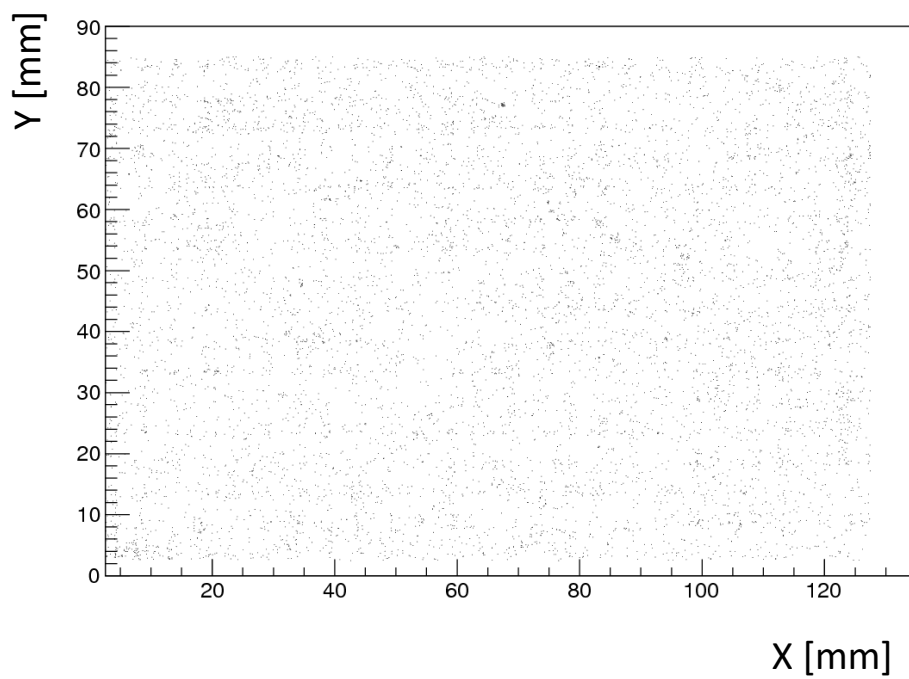
図 4.8: 読み取り速度に対する飛跡検出効率の依存性。5.2 view/s は  $4700 \text{ cm}^2/\text{h}/\text{layer}$  に相当する。

角度ごと、速度ごとの検出効率を図 4.8 にそれぞれ示す。検出効率は速度が上がるにつれて下がった。例えば、角度空間  $0.9 < \tan \theta < 1.0$  で 1 パーセントの検出効率の減少を許容するならば、読み取り速度 5.2 view/s すなわち  $4700 \text{ cm}^2/\text{h}/\text{layer}$  での読み取りが可能である。

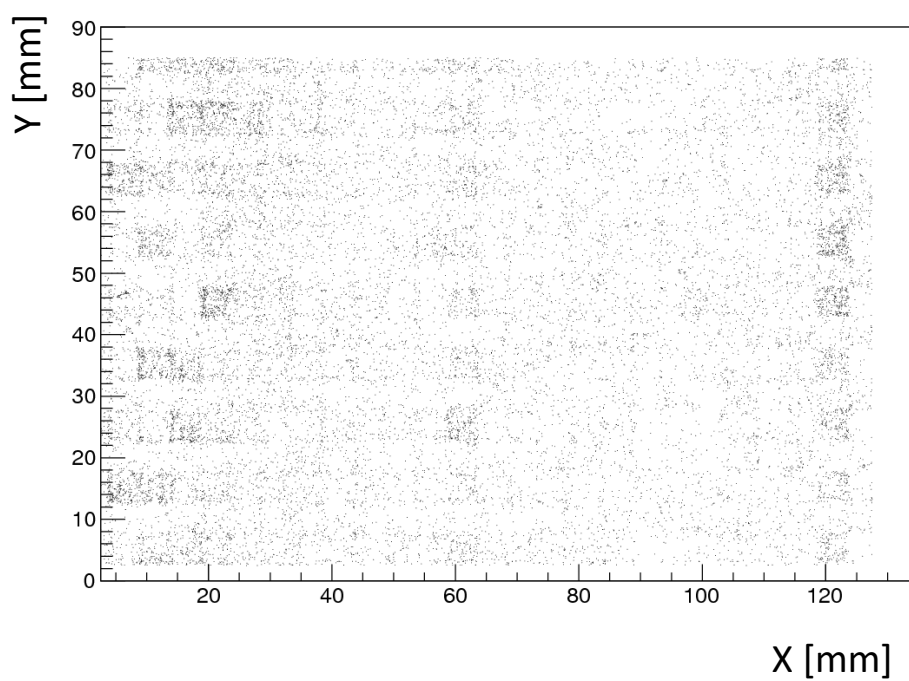
4 view/s と 5 view/s の各条件で検出できなかった飛跡の位置分布を図 4.9 にそれぞれ示す。両方の条件で検出できなかった飛跡は、それぞれの分布から除外した。5 view/s で検出できなかった飛跡の位置分布は、一部に偏っている。これは、撮り始め側のマージン画像が少なく、解析に用いた画像が振動の影響を受けているからである。

#### 4.4.1 Track selector シリーズとの比較

図 4.10 は Track selector シリーズの読み取り速度を示す。UTS と S-UTS の読み取り角度空間は  $\tan \theta < 0.6$  であった。TS と NTS の読み取り速度は UTS の読み取り角度空間に変換した。HTS の読み取り角度空間は  $\tan \theta < 1.35$  で、かつ S-UTS の 70 倍の読み取り速度を達成した。



(a) 4 view/s



(b) 5 view/s

図 4.9: 検出できなかった飛跡の位置分布。4 view/s と 5 view/s で測定し、両方の条件で検出できなかった飛跡は互いの分布から除去した。

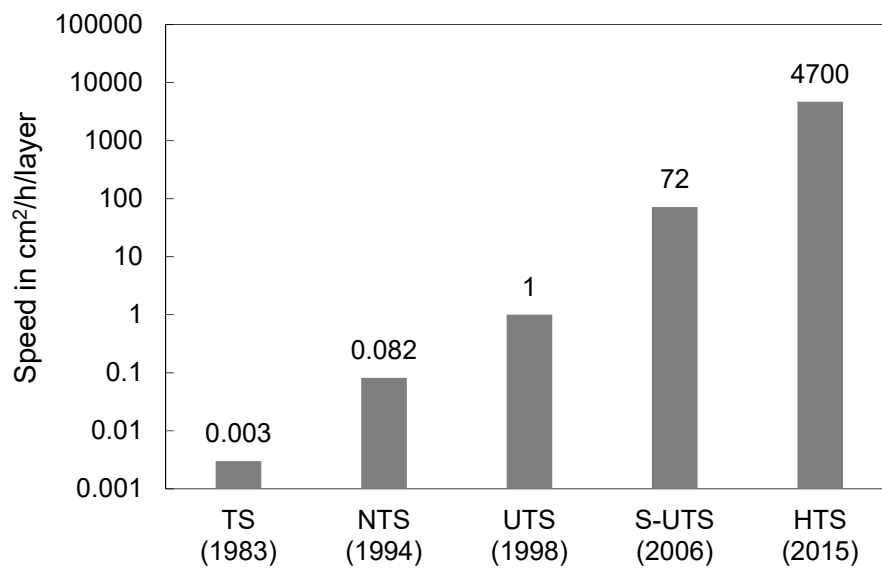


図 4.10: Track selector シリーズの読み取り速度の発展。ここでの速度は乳剤層ごとの速度である。TS と NTS の速度は UTS の読み取り角度空間と同じ時の速度である。

## 第 5 章

# GRAINE-2015 フライトへの適用

### 5.1 GRAINE-2015 フライトまでの経緯

GRAINE プロジェクトは、2011 年 6 月、JAXA の気球実験に採択され、望遠鏡 1 号機 (口径面積  $125 \text{ cm}^2$ ) によるテクニカルフライトを実施した。ガンマ線のコンバーター部は OPERA 実験で用いられた OPERA フィルムと  $50 \mu\text{m}$  の銅箔のサンドイッチ構造を採用した。北海道の大樹町航空宇宙実験場において、高度  $34.7 \text{ km}$  での水平浮遊 1.6 時間の気球観測および観測機回収に成功した。得られたフライトデータを解析し、(1) 多段シフターによるタイムスタンプ法により気球高度でサブ秒の時間分解能を得ることの実証 (2) ガンマ線検出+タイムスタンプ+イベント到来時の姿勢決定によりガンマ線到来方向を天球座標へマッピングする一連の流れの確立 (3) 観測のバックグラウンドである大気ガンマ線フラックスの実測を行い、実験コンセプトが気球環境において実現可能であることを確かめた [64, 65]。この成功を受け JAXA の国外気球実験に採択され、2015 年 5 月に望遠鏡 2 号機 (口径面積  $3780 \text{ cm}^2$ ) によるフライトを実施した。

### 5.2 GRAINE プロジェクトための開発と評価

GRAINE-2015 フライトで用いたガンマ線原子核乾板望遠鏡の構造を図 5.1 に示す。コンバーター部は 100 枚のエマルションフィルムだけの積層構造となっており、入射したガンマ線を検出する。タイムスタンプは記録された飛跡に対して時間情報を与え、ガンマ線の到来時間を決定する。この到来時間と気球の姿勢情報を用いることで、ガンマ線の到来方向を天球に対して決定することができる。カロリメータではガンマ線のエネルギー測定を行う。コンバーター部は手作業で塗布したエマルションフィルム 100 枚を重ねて真空パックしたもので、凹凸の蓄積により平面性は補償されていない。そのため、アライメント用の乾板を平面性が補償されたハニカム板の両側に貼り付け、検出器の最上部に設置した。

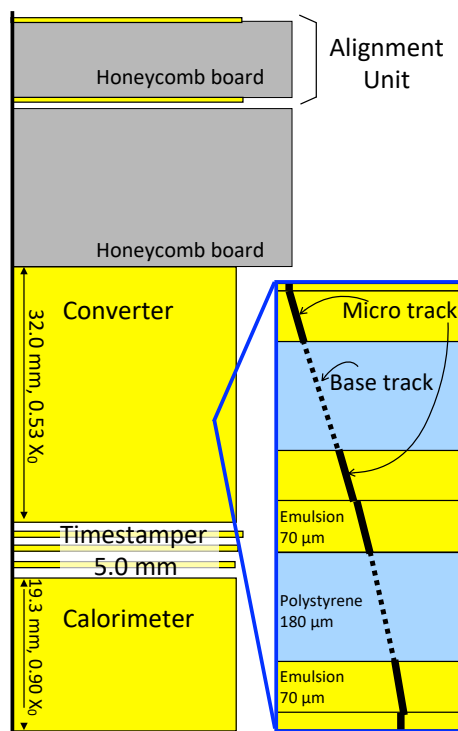


図 5.1: GRAINE-2015 フライトのエマルジョンチェンバー構造 (側面図)

ガンマ線の検出部であるコンバータ部は、ベーストラックの検出効率を最大化するため 4.2 view/s の読み取り速度で行った。コンバータ部は高運動量の宇宙線の飛跡を用いてアライメント用フィルムに対する角度の補正を行うことができるが、アライメント用フィルムはその絶対角度が重要となる。そこで、絶対角度に影響を与えるステージのバックラッシュについて評価、光軸の傾きの測定、ステージの平面性の測定を行った。

### 5.2.1 バックラッシュの測定

GRAINE-2015 フライト乾板を読み取った際の HTS の読み取りは、レンズ側の乳剤層を読み取る際の駆動方向とステージ側の乳剤層を読み取る際の駆動方向が異なる。HTS では、ステージの移動距離をなるべく減らすために、図 5.2(a) のような駆動方法を取った。奇数行を読み取る際はレンズ側の乳剤層は Y 軸を正方向に動かすが、ステージ側は Y 軸を負方向に動かした。この向きの違いにより、ステージの真の位置とリニアエンコーダで読み取った位置がずれる現象 (=バックラッシュ) が発生した。

ステージの移動距離を増やせば、読み取り速度は遅くなるがバックラッシュを発生させない駆動方法が可能である。その際の読み取り方向は図 5.2(b) の通りである。Y 軸を一切動かさずに、レンズ面、ステージ面の乳剤層を X 軸に対しても同じ方向にステージを動かしながら撮像した。

それぞれの読み取り手法で、各行ごとのバックラッシュを、その行と次の行で認識され

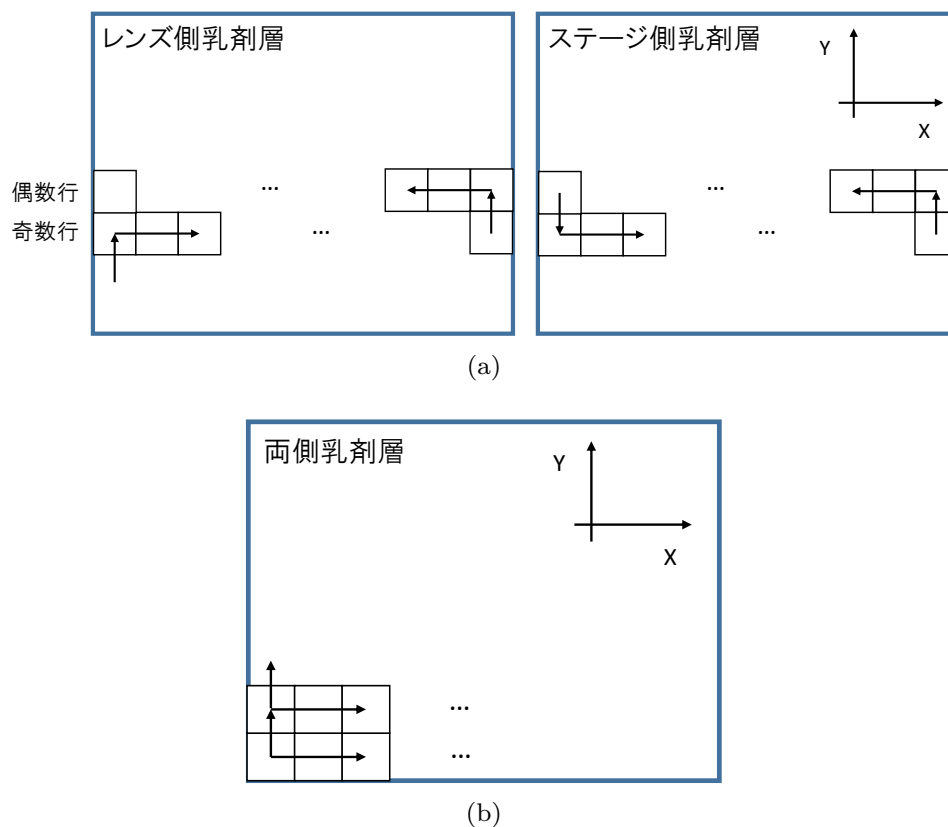
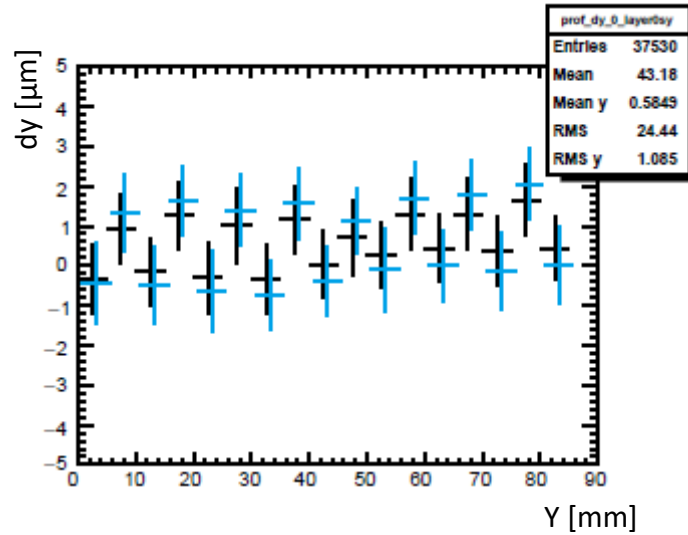


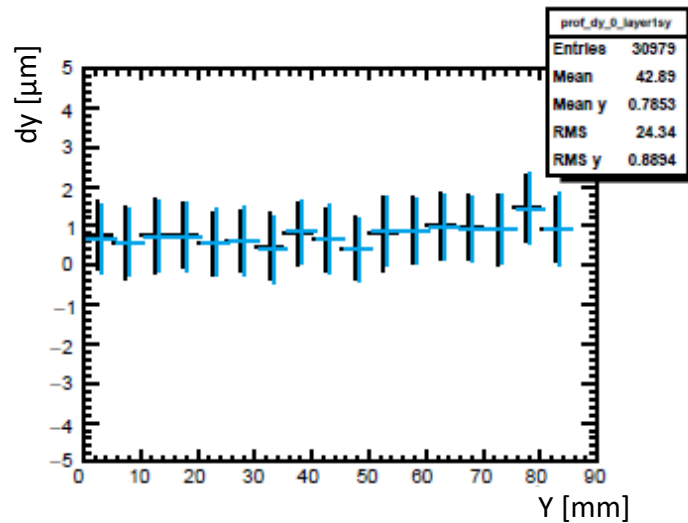
図 5.2: ステージの駆動方向。図中の四角は HTS の FOV(5 mm 四方) を表し、矢印はその視野に移動する際のステージの移動方向を示す。(a) コンバータ部の読み取り方法。奇数行にステージを移動する際の駆動方向がレンズ面とステージ面で逆。(b) シフターフィルム及びアライメントフィルムの読み取り方法。レンズ側とステージ側の視野で駆動方向が同じ。

た同じ飛跡の位置ずれとして、レンズ側およびステージ側の乳剤層でそれぞれ測定した。図 5.3 に結果を示す。Y 軸の駆動方向が偶数行と奇数行で異なる場合は、バックラッシュによって  $0.5 \mu\text{m}$  の位置ずれが発生した。一方で、Y 軸を動かさずに各乳剤層を撮影した場合はそのずれは  $0.1 \mu\text{m}$  以下に抑えられた。

GRAINE-2015 フライト乾板のベース厚は約  $180 \mu\text{m}$  なので、 $0.5 \mu\text{m}$  の位置ずれによって約  $3 \text{ mrad}$  の角度ずれが発生する。これは、目標とする  $1 \text{ GeV}$  領域の角度精度  $1.7 \text{ mrad}$  に比べて無視できない。そこで、アライメントフィルムとシフターフィルムの読み取りは、図 5.2(b) の駆動方法を採用した。さらに、アライメント用のフィルムは、X 軸ステージの移動時の最高速度を  $10 \text{ mm/s}$  にし、X 軸ステージの速度変化量を減らした。



(a)



(b)

図 5.3: Y 軸のステージ位置に対するの位置ずれ量。黒線がレンズ側、青線がステージ側の乳剤層の結果。(a) 図 5.2(a) の駆動方法、(b) 図 5.2(b) の駆動方法

### 5.2.2 光軸の傾き測定

GRAINE-2015 フライトのアライメントフィルムの角度を測定するには、HTS が認識する角度がどれだけ真の角度とずれているのかを知る必要がある。このずれは主に光軸のステージ平面に対する傾きに起因する。この光軸の傾きを測定には次の手法を採った。あるフィルムの飛跡の真の角度を  $A_0$  とし、光軸の傾きを  $A_{shift}$  とする。そのときの測定量は  $A_0 + A_{shift}$  となる。フィルムを 180 度回転させると、真の角度は  $-A_0$  となるが、光軸の傾きは変わらないため、測定量は  $-A_0 + A_{shift}$  となる。よって、 $A_{shift}$  を求めるた

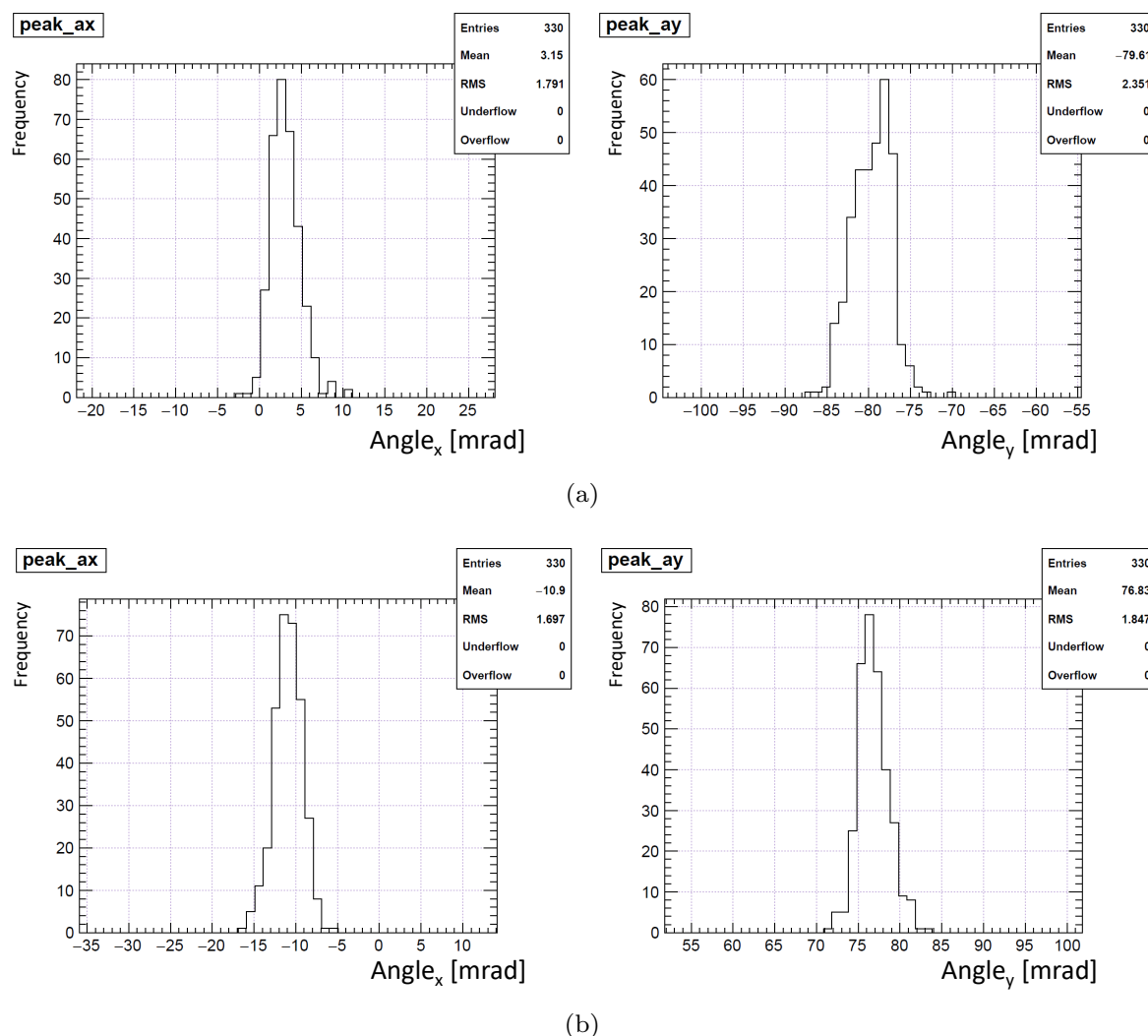


図 5.4: 5 mm 四方のビームの角度。左が AX、右が AY。(a) 回転しない (0 度回転)、(b) 180 度回転

めには、0 度と 180 度で測定した飛跡の角度の和を 2 で割ればよい。

J-PARC の T2K 用ビームラインのミュオンビームダンプで並行にミュオンを照射した乾板を用い、光軸の傾きを測定した。5 mm 四方ごとにビームの角度の中心を決定し、0 度と 180 度回転の各区画のビームの角度は図 5.4 のようになった。この平均値と標準偏差を用い、光軸の傾きは X 方向で  $-3.9 \pm 1.5$  mrad、Y 方向で  $-1.4 \pm 1.2$  mrad と求まった。

### 5.2.3 ステージの平面性測定

HTS のステージの平面性は角度精度に影響を与える。そこで、ステージの平面性について調査を行った。ステージの平面性は乳剤厚が一様であると仮定し、ステージ側の乳剤層とベースの境界の Z 座標を XY 空間で 5 mm 間隔で測定した。さらに、ある視野と 5 mm

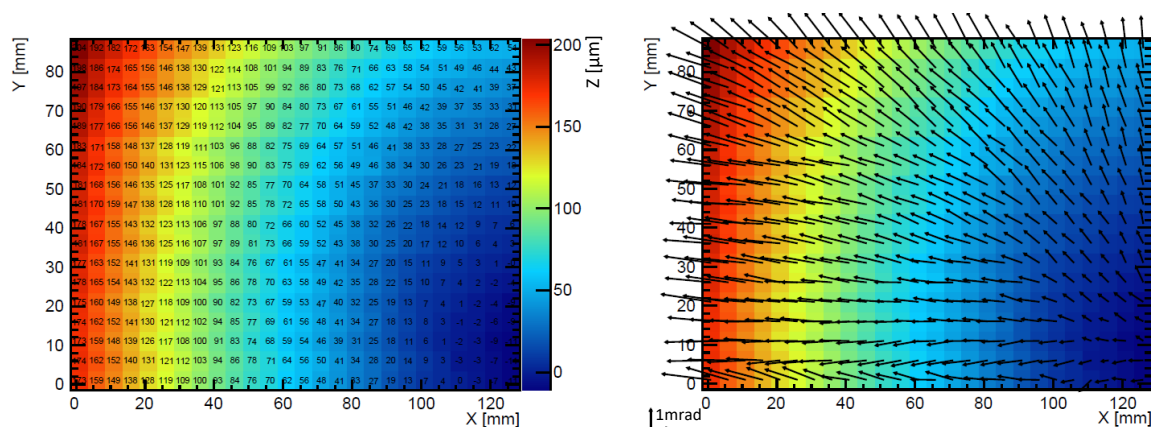


図 5.5: 5 mm ごとの Z 座標 (左) と勾配ベクトル (右)

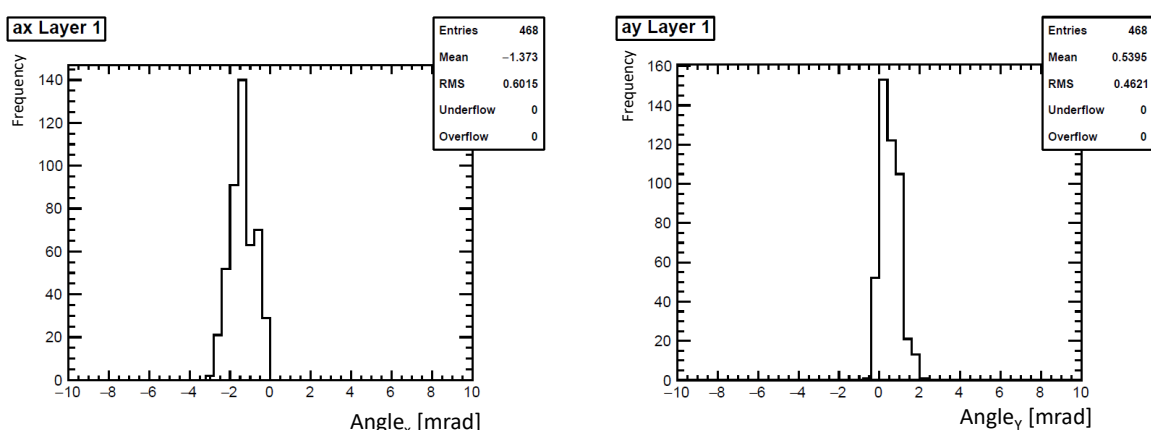


図 5.6: 勾配のベクトルの大きさ分布

離れた隣の視野の Z 座標を用いて傾きを求めた。

結果を図 5.5 と図 5.6 に示す。ベクトルの大きさ分布の標準偏差は X 軸方向で 0.6 mrad、Y 軸方向で 0.5 mrad となり、目標とする角度決定精度 1.7 mrad よりも小さいことが分かった。ただし、エマルジョンを貼り付けるアクリル板の厚みには仕様上数 100  $\mu\text{m}$  の誤差があり、また真空チャックをした際に変形するため、実際の環境で測定し必要に応じて補正を行う必要がある。

### 5.3 GRAINE-2015 フライト乾板の読み取り

コンバータ部の 4 ユニット各 100 枚、計 400 枚のエマルジョンフィルム、総面積 40 平米の読み取りを 3 ヶ月で行った (図 5.7)。途中で傾きが変化しているのは、読み取りソフトウェアの更新により読み取り速度が向上したことによる。読み取り開始時より 2015 年 12 月後半の読み取り速度に到達していた場合、約 2 ヶ月で読み取りを完了できたことになる。GRAINE-2015 フィルムの読み取りは 1 日 10 時間のマシンタイムを使っており、全

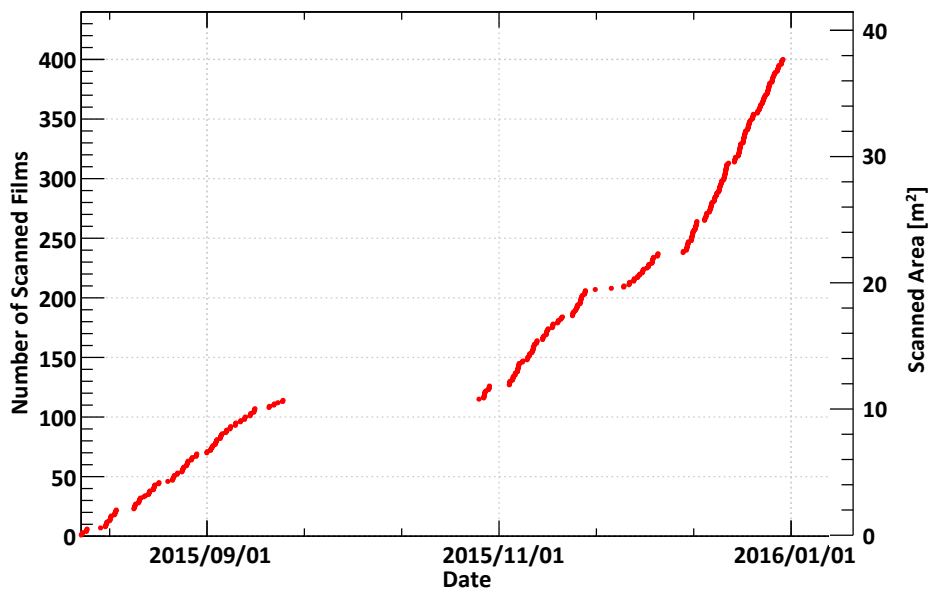


図 5.7: GRAINE-2015 フライト乾板の読み取り

てのマシントimeを活用すれば 500 平米/年の読み取り速度に相当する。

ユニット 3 の飛跡検出効率を図 5.8 に示す。検出効率は各角度空間で 97% 以上を達成した。一部検出効率が落ちているのは乾板の現像後の膨潤処理の不具合によるものである。同様にフィルムごとのベーストラック飛跡の角度精度を図 5.9 に示す。膨潤処理の不具合で角度精度が悪化しているものを除き、全てのフィルムで角度精度が出ていることが分かった。この結果、GRAINE-2015 フライト解析において HTS は十分なデータを提供できたといえる。

HTS は GRAINE-2015 フライトの全 40 平米の乾板の読み取りを行ったが、エマルジョン本体、姿勢決定のためのスターカメラ、シフターの駆動装置の不調により Vela パルサーからのガンマ線の高解像度イメージングに必要な統計量は蓄積できなかった。しかし、約 100 万ガンマ線イベントを再構成し、気球の放球プレート (金属板) を用いたイメージングの実証に成功した [66](図 5.10)。

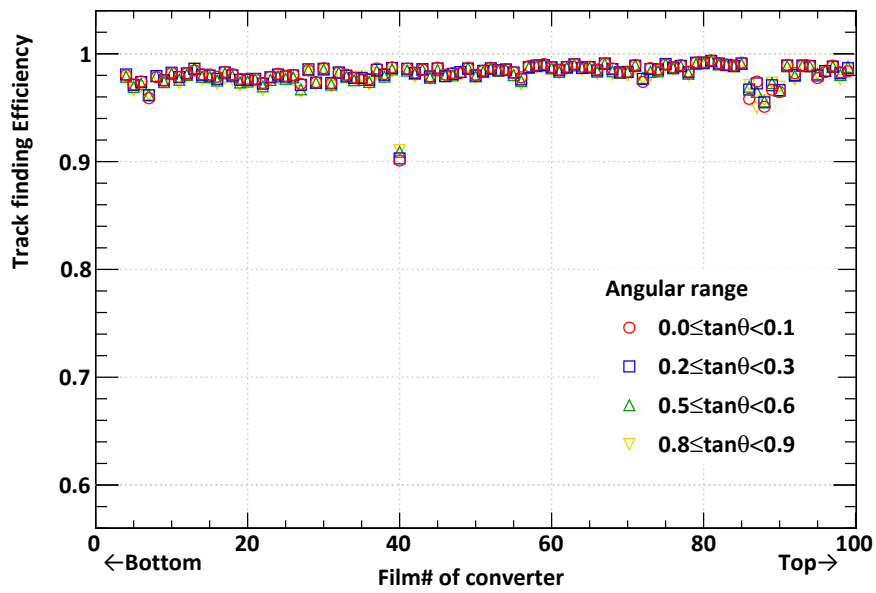


図 5.8: コンバータ部の各フィルムごとの飛跡検出効率 (ユニット 3)

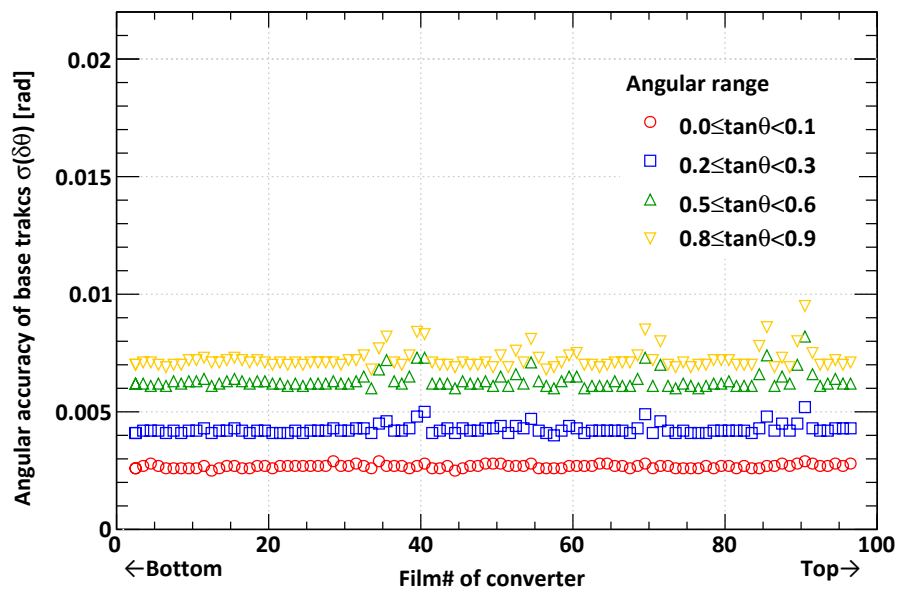


図 5.9: コンバータ部の各フィルムごとのベーストラック飛跡の角度精度

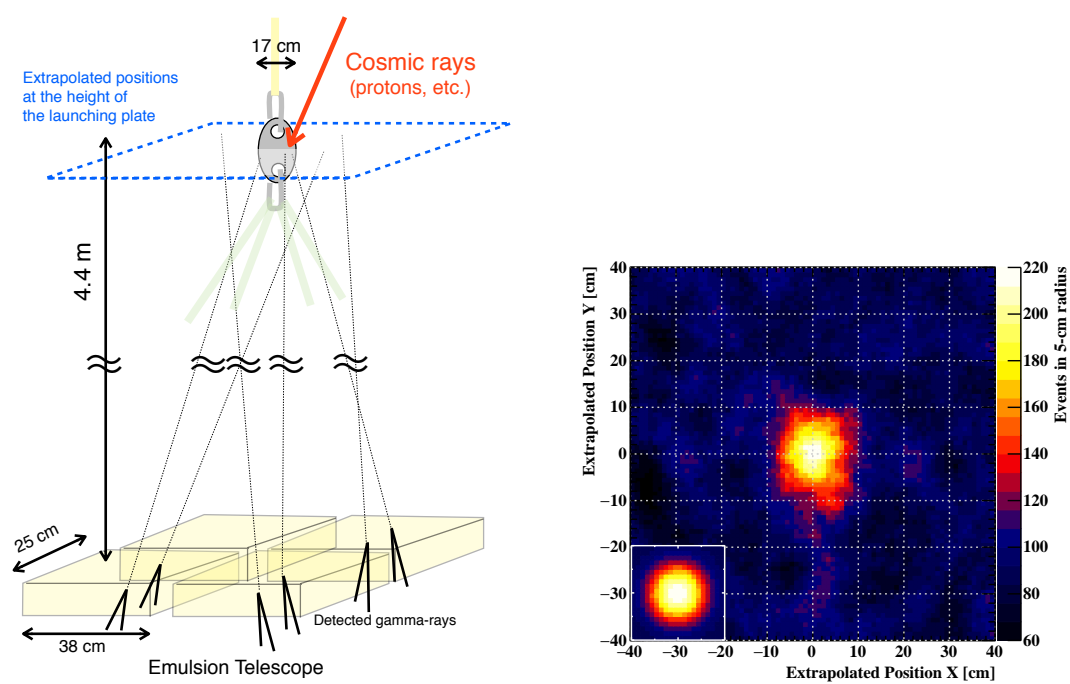


図 5.10: 放球プレートとエマルシヨンの位置関係 (左) と、再構成したガンマ線を放球プレートの位置に外挿したときの位置分布 (右の中央) と、シミュレーションによる像 (右の左下)[66]

## 第 6 章

# 今後の展望とまとめ

この章では、前述した GRAINE 計画以外の、HTS の利用を前提とした実験・プロジェクトを挙げる。また、HTS のさらなる高速化の可能性についても述べる。

### 6.1 ニュートリノ・原子核散乱精密測定

1998 年以後、ニュートリノの性質の解明は主にニュートリノのフレーバー間の振動現象を観測することによって行われてきた。Super Kamiokande による大気ニュートリノ振動の観測によりニュートリノ振動が発見され、二つの質量差、3 つの混合角の精密測定がなされた。T2K による測定値は原子炉反電子ニュートリノの振動現象の観測より大きく、レプトンセクターにおける CP 対称性の破れがある可能性を示唆している。T2K 実験による CP 対称性の検証のためには、統計数を増やすと同時に、系統誤差の低減が必須である。系統誤差の主な項としては、ニュートリノ・原子核散乱の不定性が挙げられる。

観測に用いる数 100 MeV–数 GeV のニュートリノ反応には、荷電レプトンと核子を放出する charged current quasi-elastic (CCQE) 反応、 $\pi$  粒子を 1 個生成する  $1\pi$  反応がある。振動解析では主に CCQE 反応を用いるが、この反応を理解するための  $1\pi$  反応や 2 核子散乱がバックグラウンドとなり、これらの精密測定が行われた実験はない。

原子核乾板はニュートリノ反応から出てくる全ての荷電粒子を検出することが可能で、低エネルギーニュートリノ反応の詳細な実験データを提供する。その特長を生かし、水や鉄におけるニュートリノ反応を原子核乾板で精密測定する NINJA 実験が計画されている。反応標的質量は数 100 kg であり、原子核乾板の総面積は数 100 平米規模となる。将来的にはさらにスケールアップをすることで、第四のニュートリノ (ステライルニュートリノ) の探索も目指している。

2014 年よりテスト実験 (当時は J-PARC T60 実験) を実施し、本実験の実現性を実証してきた [67]。テスト実験で見つけたニュートリノ反応候補を図 6.1 に示す。HTS によって読み取り速度が向上したため、OPERA 実験以前のようにカウンターを用いて興味事象を

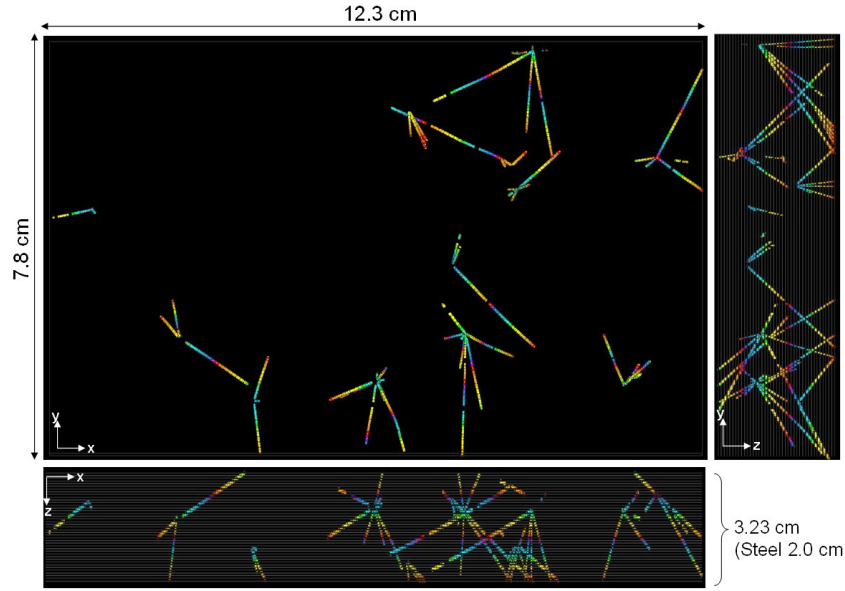


図 6.1: J-PARC T60 実験で見つかったニュートリノ反応候補 [67]

選ぶことはせず、照射した全ての乾板を読み取り、飛跡の幾何学情報からニュートリノ反応を再構成した。

## 6.2 $\nu_\tau$ の研究

### 6.2.1 DsTau 実験

レプトン普遍性は素粒子論の標準模型における基本的な仮定である。DsTau プロジェクト [68] は、 $\nu_e$  や  $\nu_\mu$  に比べてこれまで十分な精度で測定されていない  $\nu_\tau$  の CC 反応断面積 (図 6.2) の前提条件となる陽子ビームからのタウニュートリノ生成反応についての研究を行っている。

タウニュートリノの生成源である  $D_s$  中間子は、高エネルギー陽子と原子核との反応から、 $D_s \rightarrow \tau \rightarrow X$  という kink が 2 回ある特徴的な崩壊様式 (図 6.3) によって検出できる。数 mrad の kink を測定でき、数 mm のチャーム粒子対を同定できる検出器はエマルション以外にない。主検出部としてエマルション検出器の口径が 4.6 平米で、上流に陽子反応標的としてタングステンを用い、プラスチックとエマルションの ECC を採用する。エマルションの総面積は約 500 平米となる。

このエマルションの全面積読み取りは HTS により現実的になった。HTS が  $D_s \rightarrow \tau \rightarrow X$  候補を選び出した後は、より高い解像度を持った顕微鏡を用いて飛跡の角度を精密に測定する。

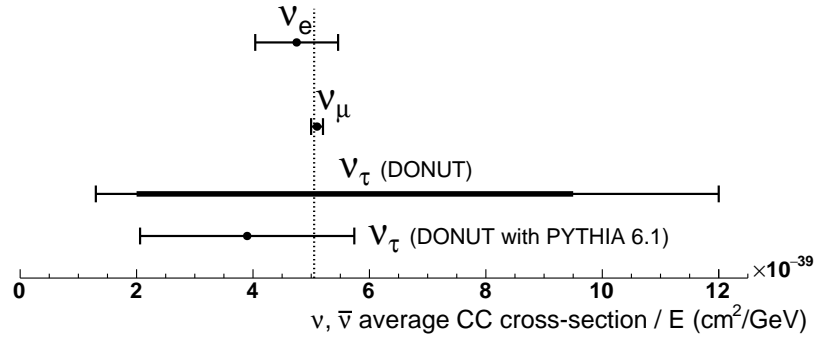


図 6.2: 3 世代の平均ニュートリノ CC 反応断面積。 $\nu_e$  と  $\nu_\mu$  に比べて  $\nu_\tau$  は誤差が大きい [68]

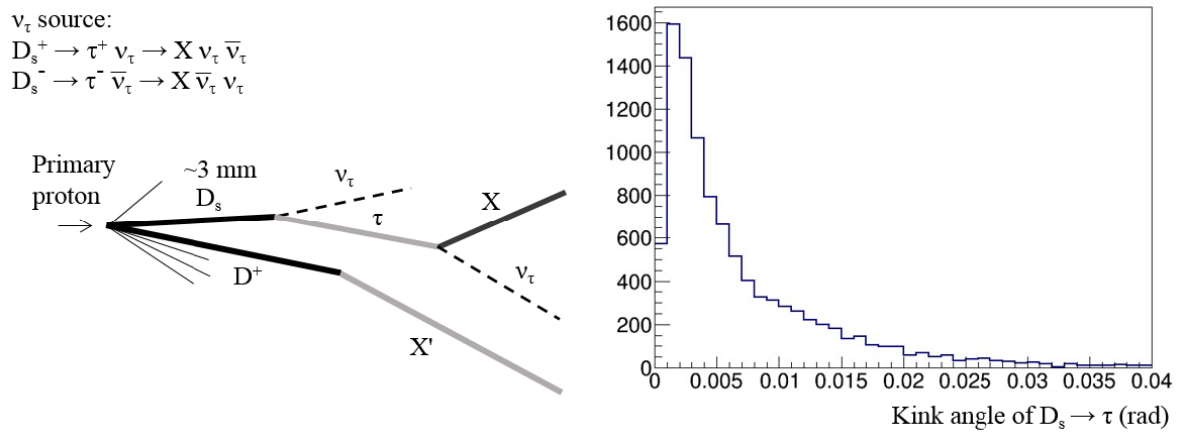


図 6.3:  $D_s \rightarrow \tau \rightarrow X$  事象の様式 (左)。シミュレーションによる  $D_s \rightarrow \tau$  の kink 角分布 (右)。[68]

### 6.2.2 SHiP 実験

DONuT 実験で初めてタウニュートリノの検出に成功して以来、DONuT 実験で 9 例、OPERA 実験で 5 例の計 14 例のタウニュートリノ反応を原子核乾板によって検出した。しかし、タウニュートリノの性質を詳しく調べるためにはこの事象数では不十分である。そこでタウニュートリノ反応を数多く検出し、その性質を詳細にしらべるために SHiP 実験が CERN で計画されている [69]。この計画では、3500 例以上のタウニュートリノ反応事象を検出することにより、タウニュートリノの反応断面積や基本性質を研究する。

これまで検出したタウニュートリノ反応は、タウ粒子の崩壊からのミュー粒子の電荷を決定できた 1 例を除き、正ニュートリノと反ニュートリノの識別ができていない。正ニュートリノと反ニュートリノの性質の違いを調べるため、反応からの粒子の電荷を区別できる compact emulsion spectrometer (CES) という構造 [70] を併用する (図 6.4)。2015 年のプロポーザル時点では、2026 年からの全照射期間で 10 回の交換を行い総面積

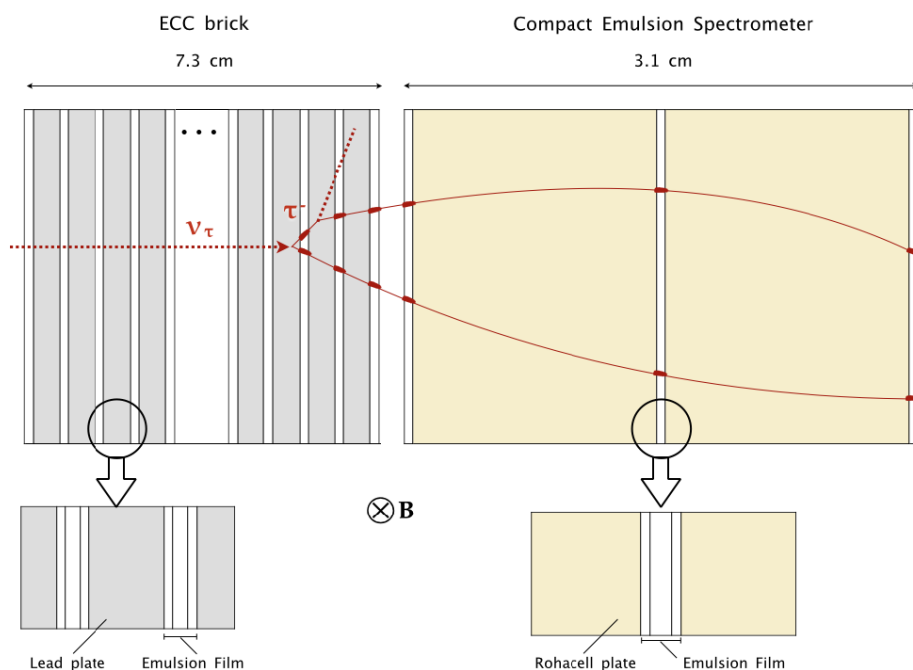


図 6.4: SHiP のエマルションニュートリノ検出器。ニュートリノ反応を起こす ECC(左)と、電荷を測定するための compact emulsion spectrometer (CES)(右)。このニュートリノ検出器を一様磁場下に置く。[69]

8700 平米のエマルションを用いる計画である。HTS が実現したことでこれを数台用意すれば SHiP 実験で用いられる乾板の全面読み取りも可能である。

### 6.3 宇宙線ミュオンラジオグラフィ

2011 年の東日本大震災をきっかけとして福島第一原子力発電所事故が発生し、原子炉の内部調査が社会的な要求となった。原子炉の炉心の状態を観測するために宇宙線ミュオンラジオグラフィを用いた原子炉の調査が行われた [71]。検出器はシンチレータ検出器や原子核乾板が使われた。原子核乾板による観測では表面積 0.15 平米の検出器を周辺環境の放射線量が高く長期間の照射が難しかったため 5 回程度交換した。照射した乾板 (総面積数平米) は S-UTS を用いて読み取られ、2 号機の原子炉内で炉心溶融が起きていることを示した (図 6.5 [72])。

原子炉の調査の報道を契機として、エジプト大ピラミッドの再調査が検討され、2015 年から原子核乾板による観測が行われた。この観測で用いられた乾板は数 10 平米に達し、S-UTS での読み取りは現実的ではなく、HTS で読み取りが行われた。HTS が読み取ったデータによる解析の結果、未知の空洞の証拠を発見した [73](図 6.6)。

宇宙線ミュオンラジオグラフィは、宇宙素粒子実験の技術を応用した学際的な研究となり、地球科学分野では、火山や氷河 [74] などの調査が行われている。プラント関係では

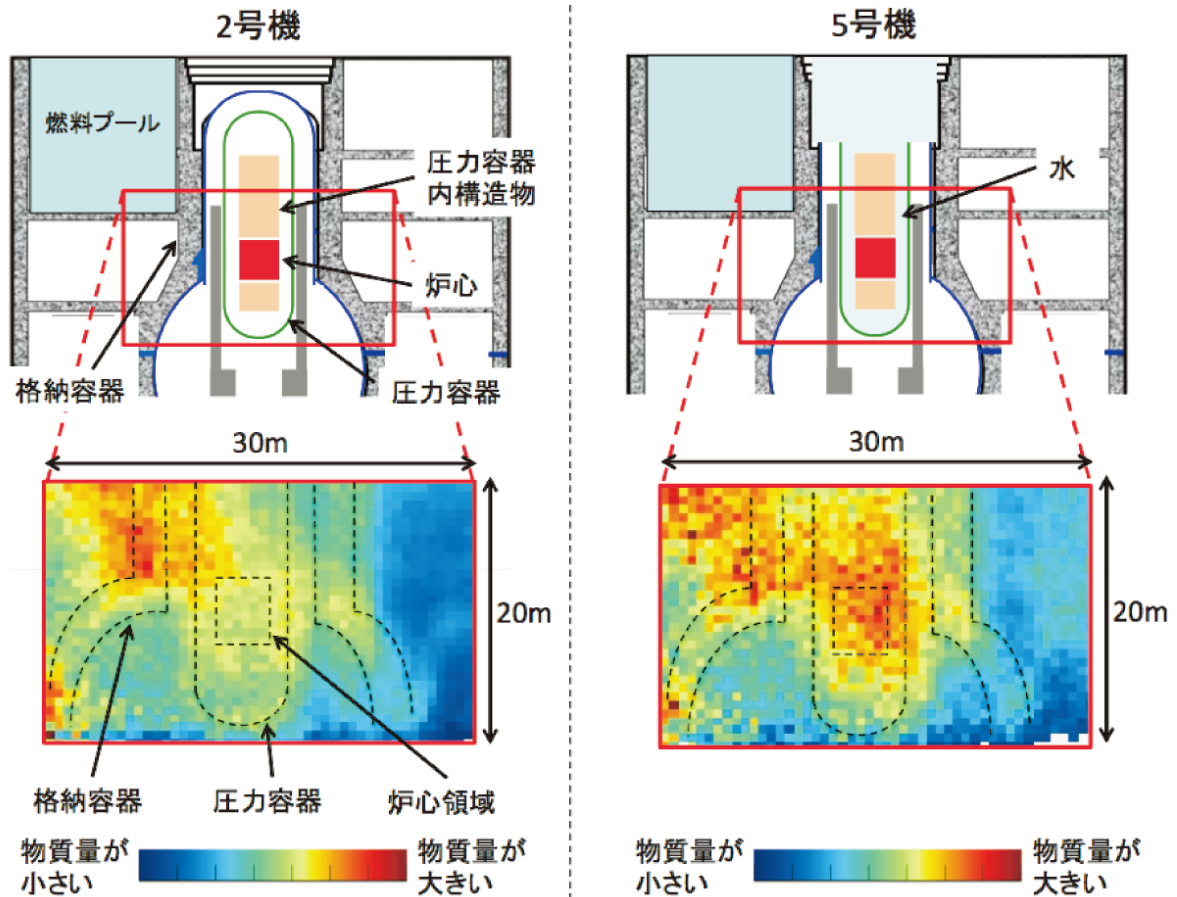


図 6.5: 宇宙線ミュオンラジオグラフィによる福島第一原子力発電所の 2 号機と健全な 5 号機の物質量の比較 [72]

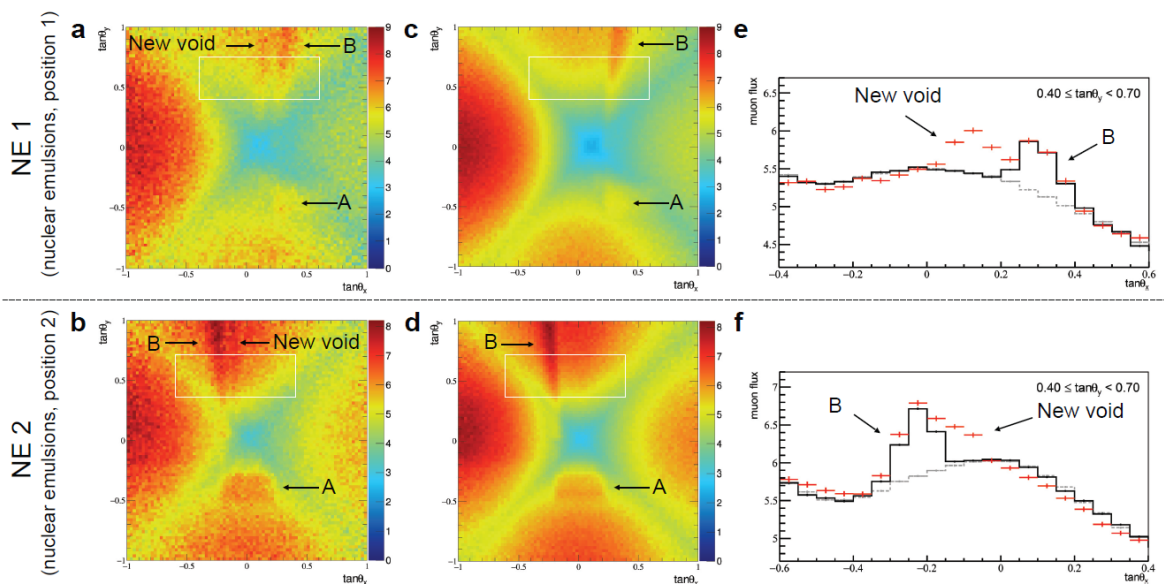


図 6.6: エジプトの大ピラミッドのエマルジョンによる内部調査の結果。 [73]



図 6.7: ピラミッド内に設置された原子核乾板 (左) とシンチレーターホドスコープ (右)

製鉄所や原子力発電所、考古学分野では古墳やピラミッドなどが観測対象として挙げられる。いずれも、今まで既存の技術では困難であったか直接内部を調査することがが困難であった場所である。

図 6.7 はピラミッド観測で用いられた原子核乾板とシンチレーター検出器であるが、原子核乾板は電源が不要で体積も小さくコンパクトに設置できる。今後、互いの検出器の長所を生かした様々な観測が進められていくだろう。

## 6.4 HTS のさらなる高速化

HTS の読み取り速度は  $4700 \text{ cm}^2/\text{h}/\text{layer}$  を達成した。これは 24 時間体制で読み取りを行った場合、1 年で 500 平米のエマルジョンの読み取りが可能である。しかし、ここまで挙げた実験やプロジェクトが実現していくと、本論文で開発した 1 台の HTS だけでは全ての乾板の読み取りを行うことはできない。HTS と同様に広視野対物レンズを持つ読み取り装置を、複数台用意する必要がある。

1.6 で述べた通り、読み取り速度を向上させるためには二つの方向性があり、繰り返し周波数の向上と視野面積を広げることである。HTS は 2 番目の手法を採用し視野面積を広げることで読み取り速度を向上させた。同様のコンセプトでさらに速度向上を目指すとき、ビームスプリッターの商材の入手性の問題からさらに視野面積の広い対物レンズを作成するよりも繰り返し周波数の向上させたほうがコスト面で有利である。

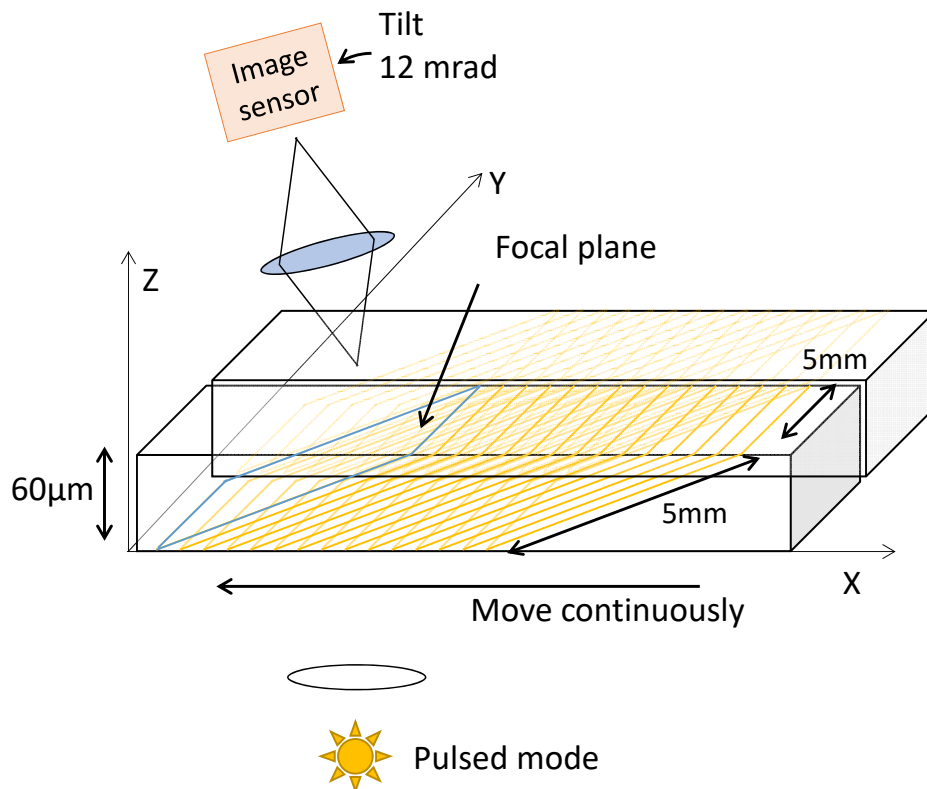


図 6.8: HTS を斜光光学系にし連続駆動にする案

HTS では振動を抑えるためにカウンターステージを採用したが、元々の設計値である 10 view/s ( $9000 \text{ cm}^2/\text{h}/\text{layer} = 1000 \text{ 平米}/\text{年}$ ) を達成できなかった。これはステップ駆動による振動をカウンターステージでも消しきれなかったことが原因である。ステップ駆動を無くし連続駆動にする斜め光学系のアイデアを図 6.8 に示す。対物レンズを乳剤層の厚み分だけ傾け、X 軸を定速で動かすことで乳剤層の断層映像を取得する。HTS の FOV は 5 mm 四方であり、乳剤層分傾けたとしてもわずか 12 mrad(0.7 度) である。X 軸方向に 100 mm/s で動かすため、像のブレを  $0.2 \mu\text{m}$  以下に抑えるためには高輝度パルス光源が必要である。連続駆動を採用することにより、約 3 倍の速度向上が可能である。

HTS の読み取り速度は向上したものの、1 度に読み取り可能な最大面積は  $130 \text{ cm}^2$  であり、約 4 分に 1 度の読み取り領域の移動を必要とする。この移動にかかる時間は読み取りにかかる時間に比べて無視できず、解決にはフィルム交換の自動化やより広い面積を一度に読み取りできるステージの開発が必要である。ただし、従来のステージ機構では X 軸の折り返しが発生しそこで発生する加速度は無視できない。これをなくすためには斜め光学系を採用し、かつコンパクトディスク (CD) の情報を読み取るように乾板を円運動させたり、乾板を長いシートにし磁気テープのように連続的に読み取っていく方法が考えられる。

## 6.5 まとめ

荷電粒子の飛跡をサブミクロンの空間分解能で記録できる原子核乾板は、名古屋大学における自動飛跡読み取り装置の発明と高速化により、タウニュートリノの発見やニュートリノ振動の検証に貢献してきた。飛跡検出器として最高の空間分解能を持つ原子核乾板の特徴を生かし、ガンマ線天体を精密観測するための気球搭載型宇宙ガンマ線望遠鏡計画 GRAINE や、原子核乾板による宇宙線ミュオンラジオグラフィが推進されている。これらの観測には 1000 平米規模の乾板の読み取りを必要とし、従来装置である S-UTS に比べて 2 桁高い要求となる。これを実現可能な Hyper track selector (HTS) を開発した。

HTS は従来比 600 倍の視野面積を持つ対物レンズと、それをカバーする 72 個のイメージセンサで構成される。高速な読み取りを実現するためのシステムと、サブミクロン精度で読み取りを可能にするイメージセンサのアライメント校正手法を開発した。GRAINE-2015 フライト乾板の実データを用いた解析で、検出効率は 97% 以上、角度精度は  $\tan \theta < 0.1$  で 2.5 mrad を達成した。振動を打ち消すためのカウンターステージの有効性を示し、実用可能な読み取り速度は  $4700 \text{ cm}^2/\text{h}/\text{layer}$  に達し、従来装置の 70 倍を達成した。500 平米/年の読み取りが可能になり、例えば GRAINE 計画で要求される 1 フライト 1000 平米を 2 年で読み取りが可能になった。

HTS は 2015 年 8 月より運用を開始し、GRAINE-2015 フライトをはじめとし、ニュートリノ実験、宇宙線ミュオンラジオグラフィなどの各実験で用いられた乾板を読み取り、その面積は 2017 年末で 150 平米を超えた。OPERA 実験で日欧の研究室で約 10 年に渡って読み取った乾板の総面積を 2 年で超えたことになる。今後も、HTS は原子核乾板による放射線測定において欠くことのできない重要なツールとなるだろう。

## 謝辞

本論文をまとめるにあたって、中村光廣教授、中野敏行先生には有益な助言および指導をいただきました。最新の自動飛跡読み取り装置が実現し、性能が発揮できるのも、これまで各世代の Track selector の実現に携わってきたみなさんの研究と、原子核乾板の製造をした GRAINE-2015 フライト準備時の若手メンバーみなさんのおかげです。F 研の皆様や、HTS と関連する実験のコラボレータの皆様にも、多くの助言、協力をいただきました。HTS の開発、製作には、装置開発室の河合利秀氏らの協力と助言いただきました。駒谷良輔氏にはソフトウェアに関する協力と助言をいただきました。久木田真吾氏には数学的な支援をいただきました。物理学教室の事務の皆様には、長きにわたり色々とお世話になりました。最後に、これまで支援してくれた家族にもこの場を借りて感謝します。

## 参考文献

- [1] S. Kinoshita. The photographic action of the  $\alpha$ -particles emitted from radio-active substances. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, Vol. 83, No. 564, pp. 432–453, 1910.
- [2] C. F. Powell, et al. A new photographic emulsion for the detection of fast charged particles. *Journal of Scientific Instruments*, Vol. 23, No. 5, p. 102, 1946.
- [3] C.M.G. Lattes, et al. Processes involving charged mesons. *Nature*, Vol. 159, pp. 694–697, 1947.
- [4] S. Kinoshita and H Ikeuti. The tracks of the  $\alpha$  particles in sensitive photographic films. *Proceedings of the Tokyo Mathematico-Physical Society. 2nd Series*, Vol. 7, No. 19, pp. 360–365, 1914.
- [5] M.F. Kaplon, et al. The energy spectrum of primary cosmic radiation. *Physical Review*, Vol. 85, No. 2, p. 295, 1952.
- [6] K. Niu, et al. A possible decay in flight of a new type particle. *Prog. Theor. Phys.*, Vol. 46, No. 5, pp. 1644–1646, 1971.
- [7] J.J. Aubert, et al. Experimental observation of a heavy particle j. *Physical Review Letters*, Vol. 33, No. 23, p. 1404, 1974.
- [8] J.E. Augustin, et al. Discovery of a narrow resonance in  $e^+ e^-$  annihilation. *Physical Review Letters*, Vol. 33, No. 23, p. 1406, 1974.
- [9] K. Hoshino, et al. On the X Particles Observed in the Cosmic Ray Jet Showers. *Conf. Proc.*, Vol. C750815V7, pp. 2442–2447, 1975.
- [10] H. Fuchi, et al. Detection Method Of Neutrino Interaction In The Vertical Emulsion Target Of Hybrid Apparatus. *J. Phys. Soc. Jap.*, Vol. 47, pp. 687–694, 1979.
- [11] N. Ushida, et al. Experimental details on lifetime measurements of neutrino-produced charmed particles in a tagged emulsion spectrometer. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A224, No. 1-2, pp. 50–64, 1984.
- [12] N. Ushida, et al. Measurement of the  $D^0$  Lifetime. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 45, pp. 1049–1052, 1980.

- [13] N. Ushida, et al. New Results for the Lifetimes of the  $D^\pm$ ,  $F^\pm$ , and  $\Lambda_c^+$  Particles. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 51, pp. 2362–2365, 1983.
- [14] N. Ushida, et al. Lifetime of  $D^0$  Charmed Meson Produced in Neutrino Interactions. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 56, pp. 1771–1774, 1986.
- [15] N. Ushida, et al. Upper Limits to  $\nu_\mu$ - $\nu_\tau$  Oscillation and  $\nu_\mu$ - $\tau$  Coupling. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 47, pp. 1694–1697, 1981.
- [16] N. Ushida, et al. Limits to  $\nu_\mu$ ,  $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$  Oscillations and  $\nu_\mu$ ,  $\nu_e \rightarrow \tau^-$  Direct Coupling. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 57, pp. 2897–2900, 1986.
- [17] S. Aoki, et al. A hybrid experiment to search for beauty particles. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A274, No. 1-2, pp. 64–78, 1989.
- [18] K. Kodama, et al. Hybrid emulsion spectrometer for the detection of hadronically produced heavy flavor states. FNAL-653 experiment. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A289, pp. 146–167, 1990.
- [19] K. Kodama, et al. Measurement of the lifetimes of charged and neutral beauty hadrons. *Prog. Theor. Phys.*, Vol. 89, No. 3, pp. 679–696, 1993.
- [20] K. Kodama, et al. Measurement of  $B(D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$   $B(D_s^+ \rightarrow \varphi \mu^+ \nu_\mu)$  and determination of the decay constant  $f_{D_s}$ . *Phys. Lett.*, Vol. B382, pp. 299–304, 1996.
- [21] S. Aoki, et al. Direct observation of sequential weak decay of a double hypernucleus. *Prog. Theor. Phys.*, Vol. 85, No. 6, pp. 1287–1298, 1991.
- [22] H. Takahashi, et al. Observation of a  ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$  double hypernucleus. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 87, No. 21, p. 212502, 2001.
- [23] K. Imai, et al. P07: Systematic study of double strangeness system with an emulsion-counter hybrid method. In *Proposals for the 1st PAC meeting*, 2006.
- [24] K. Nakazawa. Experimental study of the interaction between two lambda hyperons. *Few-Body Systems*, Vol. 54, No. 7-10, p. 1279, 2013.
- [25] K. Niwa, et al. Auto scanning and measuring system for the emulsion chamber. In *the proceedings of the International Cosmic ray Symposium of High Energy Phenomena, Tokyo*, p. 149, 1974.
- [26] S. Aoki, et al. The Fully Automated Emulsion Analysis System. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. B51, pp. 466–472, 1990.
- [27] T. Nakano. *Automatic analysis of nuclear emulsion*. PhD thesis, Nagoya University, Japan, 1997.
- [28] E. Eskut, et al. The CHORUS experiment to search for  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  oscillation. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A401, pp. 7–44, 1997.
- [29] K. Kodama, et al. Detection and analysis of tau neutrino interactions in DONUT emulsion target. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A493, pp. 45–66, 2002.

- 
- [30] E. Eskut, et al. New results from a search for  $\nu/\mu \rightarrow \nu/\tau$  and  $\nu/e \rightarrow \nu/\tau$  oscillation. *Phys. Lett.*, Vol. B497, pp. 8–22, 2001.
  - [31] E. Eskut, et al. Final results on  $\nu(\mu) \rightarrow \nu(\tau)$  oscillation from the CHORUS experiment. *Nucl. Phys.*, Vol. B793, pp. 326–343, 2008.
  - [32] K. Kodama, et al. Observation of tau neutrino interactions. *Phys. Lett.*, Vol. B504, pp. 218–224, 2001.
  - [33] K. Kodama, et al. Final tau-neutrino results from the DONuT experiment. *Phys. Rev.*, Vol. D78, No. 5, p. 052002, 2008.
  - [34] M. Guler, et al. OPERA: An appearance experiment to search for  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  oscillations in the CNGS beam. Experimental proposal. 2000.
  - [35] R. Acquafredda, et al. The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam. *JINST*, Vol. 4, p. P04018, 2009.
  - [36] K. Morishima and T. Nakano. Development of a new automatic nuclear emulsion scanning system, S-UTS, with continuous 3D tomographic image read-out. *JINST*, Vol. 5, p. P04011, 2010.
  - [37] N. Armenise, et al. High-speed particle tracking in nuclear emulsion by last-generation automatic microscopes. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A551, pp. 261–270, 2005.
  - [38] N. Agafonova, et al. Discovery of  $\tau$  Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 115, No. 12, p. 121802, 2015.
  - [39] N. Agafonova, et al. Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment. *PTEP*, Vol. 2014, No. 10, p. 101C01, 2014.
  - [40] N. Agafonova, et al. Evidence for  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment. *Phys. Rev.*, Vol. D89, No. 5, p. 051102, 2014.
  - [41] S. Hayakawa, et al. Propagation of the cosmic radiation through interstellar space. *Progress of Theoretical Physics*, Vol. 8, No. 5, pp. 571–572, 1952.
  - [42] P. Morrison. On gamma-ray astronomy. *Il Nuovo Cimento (1955-1965)*, Vol. 7, No. 6, pp. 858–865, 1958.
  - [43] W. L. Kraushaar, et al. High-Energy Cosmic Gamma-Ray Observations from the OSO-3 Satellite. *The Astrophysical Journal*, Vol. 177, p. 341, November 1972.
  - [44] D. J. Thompson, et al. Final SAS-2 gamma-ray results on sources in the galactic anticenter region. *The Astrophysical Journal*, Vol. 213, pp. 252–262, April 1977.
  - [45] M. Tavani, et al. The agile mission. *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 502, No. 3, pp. 995–1013, 2009.
  - [46] WB Atwood, et al. The large area telescope on the fermi gamma-ray space

- telescope mission. *The Astrophysical Journal*, Vol. 697, No. 2, p. 1071, 2009.
- [47] F. Acero, et al. Fermi large area telescope third source catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 218, No. 2, p. 23, 2015.
  - [48] A. A. Abdo, et al. Gamma-ray emission from the shell of supernova remnant w44 revealed by the fermi lat. *Science*, Vol. 327, No. 5969, pp. 1103–1106, 2010.
  - [49] T. H. Burnett, et al. Extremely high multiplicities in high-energy nucleus-nucleus collisions. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 50, No. 26, p. 2062, 1983.
  - [50] K. Asakimori, et al. Cosmic-ray proton and helium spectra: results from the JACEE experiment. *The Astrophysical Journal*, Vol. 502, No. 1, p. 278, 1998.
  - [51] V. A. Derbina, et al. Cosmic-ray spectra and composition in the energy range of 10-1000 TeV per particle obtained by the RUNJOB experiment. *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 628, No. 1, p. L41, 2005.
  - [52] K. Kodama, et al. A Micro Segment Chamber for the cosmic-ray balloon experiment. *Advances in Space Research*, Vol. 37, No. 11, pp. 2120–2124, 2006.
  - [53] K. Ozaki, et al. Demonstration of polarization sensitivity of emulsion-based pair conversion telescope for cosmic gamma-ray polarimetry. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A833, pp. 165–168, 2016.
  - [54] S. Takahashi, et al. Time stamp technique using a nuclear emulsion multi-stage shifter for gamma-ray telescope. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A620, No. 2, pp. 192–195, 2010.
  - [55] H. Rokujo. *Development of Emulsion Telescope for Precise Gamma-ray Source Observations and Its Application to Balloon-borne Experiment GRAINE*. PhD thesis, Kobe University, Japan, 2012.
  - [56] E.P. George. Cosmic rays measure overburden of tunnel. *Commonwealth Engineer*, Vol. 1955, p. 455457, 1955.
  - [57] L. W. Alvarez, et al. Search for hidden chambers in the pyramids. *Science*, Vol. 167, No. 3919, pp. 832–839, 1970.
  - [58] HKM Tanaka, et al. High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of mt. asama, japan. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 263, No. 1, pp. 104–113, 2007.
  - [59] HKM Tanaka, et al. Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons: The structure beneath showa-shinzan lava dome, japan. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, No. 22, 2007.
  - [60] E.V. Bugaev, et al. Atmospheric muon flux at sea level, underground and underwater. *Phys. Rev.*, Vol. D58, p. 054001, 1998.

- 
- [61] T. Toshito, et al. Charge identification of highly ionizing particles in desensitized nuclear emulsion using high speed read-out system. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A556, pp. 482–489, 2006.
- [62] K. Ozaki, et al. Development of new-type nuclear emulsion for a balloon-borne emulsion gamma-ray telescope experiment. *JINST*, Vol. 10, No. 12, p. P12018, 2015.
- [63] S. Takahashi, et al. GRAINE 2015, a balloon-borne emulsion  $\gamma$ -ray telescope experiment in Australia. *PTEP*, Vol. 2016, No. 7, p. 073F01, 2016.
- [64] H. Rokujo, et al. Multi-stage shifter for subsecond time resolution of emulsion gamma-ray telescopes. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A701, pp. 127–132, 2013.
- [65] S. Takahashi, et al. GRAINE project: The first balloon-borne, emulsion gamma-ray telescope experiment. *PTEP*, Vol. 2015, No. 4, p. 043H01, 2015.
- [66] H. Rokujo, et al. First demonstration of gamma-ray imaging using balloon-borne emulsion telescope. *Submitted to PTEP (arXiv:1711.01544)*, 2017.
- [67] T. Fukuda, et al. First neutrino event detection with nuclear emulsion at J-PARC neutrino beamline. *PTEP*, Vol. 2017, No. 6, p. 063C02, 2017.
- [68] S. Aoki, et al. Study of tau-neutrino production at the CERN SPS. 2017.
- [69] M. Anelli, et al. A facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS. 2015.
- [70] C. Fukushima, M. Kimura, S. Ogawa, H. Shibuya, G. Takahashi, K. Kodama, T. Hara, and S. Mikado. A thin emulsion spectrometer using a compact permanent magnet. *Nucl. Instrum. Meth.*, Vol. A592, pp. 56–62, 2008.
- [71] K. Morishima, et al. First demonstration of cosmic ray muon radiography of reactor cores with nuclear emulsions based on an automated high-speed scanning technology. *Radiation Detectors and Their Uses*, p. 30, 2012.
- [72] K. Morishima. Cosmic-ray imaging of fukushima daiichi nuclear power plant. *Journal of The Society of Photographic Science and Technology of Japan*, Vol. 79, No. 1, pp. 42–47, 2016.
- [73] K. Morishima, et al. Discovery of a big void in khufu’s pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature*, p. nature24647, 2017.
- [74] R. Nishiyama, et al. First measurement of ice-bedrock interface of alpine glaciers by cosmic muon radiography. *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, No. 12, 2017.

# 図目次

1.1	エマルシオンに記録されたアルファ線の顕微鏡写真。横向きに走る点列がアルファ線。[4] . . . . .	8
1.2	エマルシオンに記録された $\pi \rightarrow \mu$ 事象の顕微鏡写真。左上から左下への飛跡 ( $m_1$ ) が $\pi$ 中間子で、左下から右側への飛跡 ( $m_2$ ) が $\mu$ 粒子 [3] . . .	9
1.3	X 粒子を観測した ECC(20 cm×25 cm×25 cm)(右) と、解析に用いた手動顕微鏡 (左) . . . . .	9
1.4	ECC に記録された X 粒子崩壊事象 [6] . . . . .	10
1.5	X 粒子の寿命の測定 [9] . . . . .	11
1.6	Track selector による飛跡認識手法。二値化し、ある角度の飛跡が垂直になるようにシフトし、足し、飛跡らしさを Pulse height として得る。 . .	13
1.7	全自動読み取り装置。左の装置が三鷹光器の大型ステージで、右側の机の下の左の箱がステージ制御用の DOMS、右の箱が飛跡認識のための Track selector . . . . .	14
1.8	Ultra track selector (UTS) . . . . .	15
1.9	NETSCAN 法の概要。読み取った 3mm 四方 10 枚の全飛跡 (a)。貫通飛跡を除去 (b)。低エネルギー飛跡を除去 (c)。Vertex を組む飛跡を選びだしたもの (d)。 . . . .	16
1.10	OPERA 実験のニュートリノ検出部である ECC と CS によるブリック [35] .	17
1.11	Super-ultra track selector (S-UTS) . . . . .	18
1.12	Fermi-LAT による超新星残骸 W44 領域の (2–10 GeV) イメージング。左はカウントマップで、右は逆畳み込み後。緑色の等高線は Spitzer 衛星による 4.5 $\mu\text{m}$ の赤外線強度分布 [48] . . . . .	20
1.13	Fermi 衛星によるガンマ線源の全天マップ (上) と銀河中心領域 (下)[47] .	21
1.14	Fermi-LAT による超新星残骸 W44 領域の (0.2–30 GeV) エネルギースペクトル分布。赤点がフェルミの結果 [48] . . . . .	22
1.15	原子核乾板の顕微鏡写真 (横幅は約 100 $\mu\text{m}$ )。左側から入射したガンマ線が対生成反応し、電子-陽電子の 2 本の飛跡が記録されている。 . . . .	23

1.16	Fermi-LAT と Emulsion のガンマ線に対する角度分解能のエネルギー依存性。高エネルギー側ではエマルジョンフィルムの枚数を増やすと角度分解能は改善する . . . . .	24
1.17	Fermi-LAT の 5 年間の観測と、GRAINE の 10 フライトによる観測の微分感度曲線。GRAINE のバックグラウンドはそれぞれ 4.5 GV(点線)、11.5 GV(実線) のカットオフリジディティ [55] . . . . .	24
1.18	ピラミッド内に設置されたスパークチェンバー [57] . . . . .	25
1.19	宇宙線ミュオンラジオグラフィによる浅間山の密度分布 [58] . . . . .	26
1.20	宇宙線ミュオンラジオグラフィによる昭和新山の密度分布 [59] . . . . .	26
1.21	水深に対するミュオンの強度 [60] . . . . .	27
1.22	原子核乾板全自動読み取り装置の概要 . . . . .	28
2.1	Hyper track selector (HTS) . . . . .	29
2.2	対物レンズとビームスプリッター . . . . .	30
2.3	照明系のためのコンデンサレンズ . . . . .	31
2.4	モザイクカメラユニットの写真。12 個のイメージセンサが 1 個のカメラユニットに搭載されている。太い赤い枠はセンサの感度のある部分を示す . . . . .	33
2.5	6 個の窓をもつビームスプリッターのスケッチ (左)、6 個のモザイクカメラユニットで構成された FOV(右)。 . . . .	33
2.6	X-axis ステージ。メインステージとカウンターステージが同一直線上に配置され、重心移動を打ち消すために反対方向に移動する . . . . .	34
2.7	HTS のハードウェア構成 . . . . .	36
2.8	HTS のネットワーク構成 . . . . .	37
2.9	HTS のソフトウェア構成 . . . . .	38
2.10	画像処理によってシグナル (グレイン) の画像を選ぶ処理。Original はある画像上に並ぶグレインの直線上の輝度値である。式 2.1 の手法で低周波成分を取り出した背景画像の輝度値が BG である。Signal をオリジナルから BG を引くことにより、グレインがピークとして得られた。 . . . .	39
2.11	画像処理前と処理後の画像。背景の周波数の低い濃淡を消した。 . . . .	40
2.12	膨張処理の概要図。元のピクセルを黒、拡大されたピクセルを灰色で示す。 . . . .	41
2.13	断層画像の中から乳剤層を特定する方法 . . . . .	41
2.14	クラスタリング処理による飛跡の 1 本化。丸が飛跡の始点で矢印が角度のベクトルに相当する。 . . . .	43
2.15	各デバイスの活動のタイムチャート。各部分の長さは実際の時間と比例しない。 . . . .	44

3.1	2本の異なる角度の飛跡に対する“radial-lateral”成分の定義 . . . . .	46
3.2	Radial-lateral 座標系のゴースト飛跡の角度依存性と、Radial クラスタリングの閾値 . . . . .	47
3.3	Radial クラスタリング前後の飛跡 ( $\tan \theta > 0.6$ ) . . . . .	48
3.4	Z 方向の飛跡の位置分布. . . . .	50
3.5	各センサの倍率。最少の値は最も左上のセンサで、これを 1 とした。 . .	51
3.6	あるセンサの基準センサに対する相対位置ずれの時間変化。8 月 26 日の読み取り終了後に再測定を行ったため、その前後で不連続になっている。 . .	51
3.7	2つの隣り合うセンサのオーバーラップ領域で同時に認識した飛跡の位置ずれ分布 . . . . .	53
3.8	加速度を変えたときのカウンターステージの影響。 . . . .	54
3.9	カウンターステージの影響。丸と四角はそれぞれカウンターステージの駆動のあり、なしをそれぞれ表す。 . . . .	55
4.1	マイクロトラックとベーストラックの定義 . . . . .	57
4.2	ベーストラック同士の接続と、ベーストラック同士の位置ずれ $ P_1 - P_2 $ と角度ずれ $ \tan \theta_1 - \tan \theta_2 $ の定義 . . . . .	58
4.3	ベーストラックの飛跡検出効率の角度依存性 . . . . .	59
4.4	ベーストラックの平均 PH の角度依存性。PH のエラーは分布の標準偏差。 . . . .	59
4.5	$0.0 < \tan \theta < 0.1$ 、 $0.2 < \tan \theta < 0.3$ および $0.9 < \tan \theta < 1.0$ のベーストラックに対する PH 分布 . . . . .	60
4.6	マイクロトラックの角度に対する角度精度 . . . . .	61
4.7	ベーストラックの角度に対する角度精度 . . . . .	61
4.8	読み取り速度に対する飛跡検出効率の依存性。5.2 view/s は $4700 \text{ cm}^2/\text{h}/\text{layer}$ に相当する。 . . . .	62
4.9	検出できなかった飛跡の位置分布。4 view/s と 5 view/s で測定し、両方の条件で検出できなかった飛跡は互いの分布から除去した。 . . . .	63
4.10	Track selector シリーズの読み取り速度の発展。ここでの速度は乳剤層ごとの速度である。TS と NTS の速度は UTS の読み取り角度空間と同じ時の速度である。 . . . .	64
5.1	GRAINE-2015 フライトのエマルジョンチェンバー構造 (側面図) . . . .	66

5.2	ステージの駆動方向。図中の四角は HTS の FOV(5 mm 四方) を表し、矢印はその視野に移動する際のステージの移動方向を示す。(a) コンバータ部の読み取り方法。奇数行にステージを移動する際の駆動方向がレンズ面とステージ面で逆。(b) シフターフィルム及びアライメントフィルムの読み取り方法。レンズ側とステージ側の視野で駆動方向が同じ。 . . .	67
5.3	Y 軸のステージ位置に対するの位置ずれ量。黒線がレンズ側、青線がステージ側の乳剤層の結果。(a) 図 5.2(a) の駆動方法、(b) 図 5.2(b) の駆動方法 . . . . .	68
5.4	5 mm 四方のビームの角度。左が AX、右が AY。(a) 回転しない (0 度回転)、(b)180 度回転 . . . . .	69
5.5	5 mm ごとの Z 座標 (左) と勾配ベクトル (右) . . . . .	70
5.6	勾配のベクトルの大きさ分布 . . . . .	70
5.7	GRAINE-2015 フライト乾板の読み取り . . . . .	71
5.8	コンバータ部の各フィルムごとの飛跡検出効率 (ユニット 3) . . . . .	72
5.9	コンバータ部の各フィルムごとのベーストラック飛跡の角度精度 . . . . .	72
5.10	放球プレートとエマルシヨンの位置関係 (左) と、再構成したガンマ線を放球プレートの位置に外挿したときの位置分布 (右の中央) と、シミュレーションによる像 (右の左下)[66] . . . . .	73
6.1	J-PARC T60 実験で見つかったニュートリノ反応候補 [67] . . . . .	75
6.2	3 世代の平均ニュートリノ CC 反応断面積。 $\nu_e$ と $\nu_\mu$ に比べて $\nu_\tau$ は誤差が大きい [68] . . . . .	76
6.3	$D_s \rightarrow \tau \rightarrow X$ 事象の様式 (左)。シミュレーションによる $D_s \rightarrow \tau$ の kink 角分布 (右)。[68] . . . . .	76
6.4	SHiP のエマルシオンニュートリノ検出器。ニュートリノ反応を起こす ECC(左) と、電荷を測定するための compact emulsion spectrometer (CES)(右)。このニュートリノ検出器を一様磁場下に置く。[69] . . . . .	77
6.5	宇宙線ミューオンラジオグラフィによる福島第一原子力発電所の 2 号機と健全な 5 号機の物質量の比較 [72] . . . . .	78
6.6	エジプトの大ピラミッドのエマルシオンによる内部調査の結果。[73] . . .	78
6.7	ピラミッド内に設置された原子核乾板 (左) とシンチレーターホドスコープ (右) . . . . .	79
6.8	HTS を斜光光学系にし連続駆動にする案 . . . . .	80
A.1	HTS の予約及び読み取り結果のカレンダー。赤四角が予約、緑四角が実際にスキャンを行った時間に相当する。 . . . .	94

B.1	CMOS イメージセンサの QE。CMV2000 のデータシートより . . . . .	95
B.2	原子核乾板の透過率 . . . . .	96
C.1	改良前の Y 軸ステージ . . . . .	97
C.2	改良後の Y 軸ステージ . . . . .	98
D.1	画像処理ステップ 2 の閾値と $a$ を変えたときの各グレインの実効的な DOF。凡例はカットオフ周波数、閾値、 $a$ の値の順。 . . . . .	100
D.2	画像処理ステップ 2 の閾値を変えたときの各グレインの実効的な DOF。 凡例はカットオフ周波数、閾値、 $a$ の値を示す . . . . .	101

# 表目次

1.1	CGRO 衛星 EGRET 検出器と Fermi 衛星 LAT 検出器の比較 . . . . .	20
1.2	原子核乾板望遠鏡の基本性能と Fermi-LAT との比較 . . . . .	23
2.1	S-UTS [36] と HTS の対物レンズと照明系の仕様の比較。被写界深度 (depth of field) は $\delta z = 2 \frac{\lambda}{NA^2}$ と定義した。 . . . .	30
2.2	S-UTS [36] と HTS のイメージセンサの仕様の比較 . . . . .	32
2.3	各軸のパラメーター一覧 . . . . .	35
4.1	OPERA フィルム [36] と GRAINE-2015 フライト乾板 [62] の諸元 . . .	56
4.2	S-UTS [36] と HTS のマイクロトラックの角度精度とベーストラックの 角度精度。 . . . .	60
E.1	. . . . .	102

## 付録 A

# HTS の予約・管理システム

HTS は研究室内外の実験グループが共同で利用する装置である。そのため、学外者であっても円滑に予約及びスキャン状況の把握するため、情報共有が可能なウェブサービスのカレンダーを用いた。前の週に予約を集計し調整した後カレンダーに記入し、実際に読み取りを行った時間をカレンダーに自動的に記録することで、予約と読み取り実施状況が一目で展望出来るシステムになった。

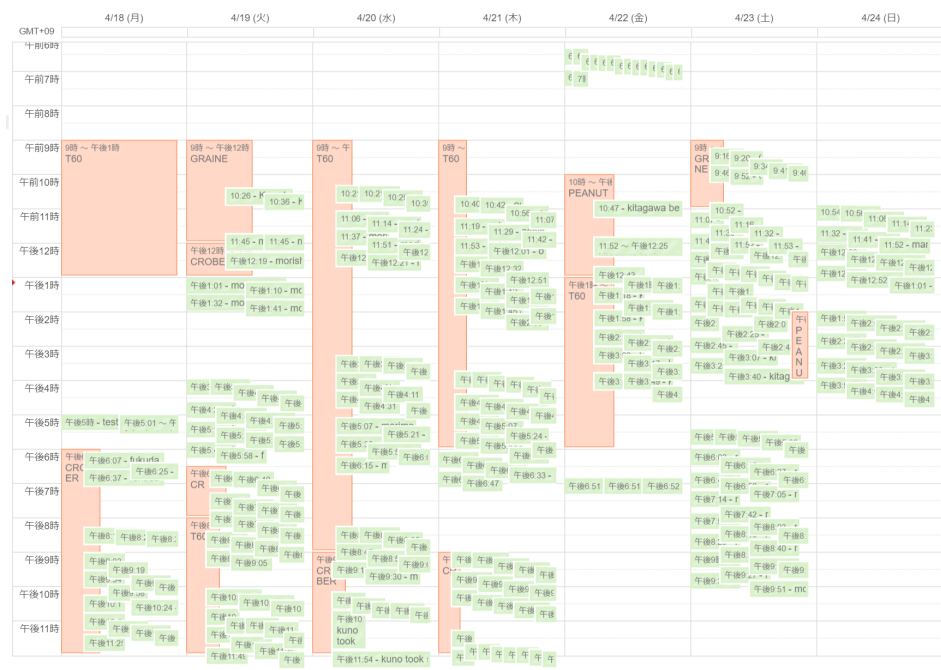


図 A.1: HTS の予約及び読み取り結果のカレンダー。赤四角が予約、緑四角が実際にスキャンを行った時間に相当する。

## 付録 B

# 光源の検討

典型的な CMOS センサの Quantum efficiency(QE) として、HTS で用いた CMOS センサの QE を図 B.1 に示す。QE が最大となるのは光の波長が 500 nm から 600 nm であり、それより長くても短くても QE は低くなる。例えば、波長 400 nm では、QE は最大の約半分になっている。

現像後の乾板の透過率を図 B.2 に示す。OPERA フィルムを例に挙げると、500–600 nm でピークとなり約 73%、波長が 400 nm で約 55% である。これらを考慮すると、400 nm の波長での読み取りは 2.7 倍の光量を必要とする。HTS では水銀キセノンランプの g 線である波長 436 nm を用いた。これ以上短波長にすることは、イメージセンサやフィルムの透過率から現実的ではない。

乳剤層の厚みが片側で 100  $\mu\text{m}$  を大きく超える厚型乳剤の読み取りは、現状の光源では光量が足りないため読み取りを行うことは難しい。

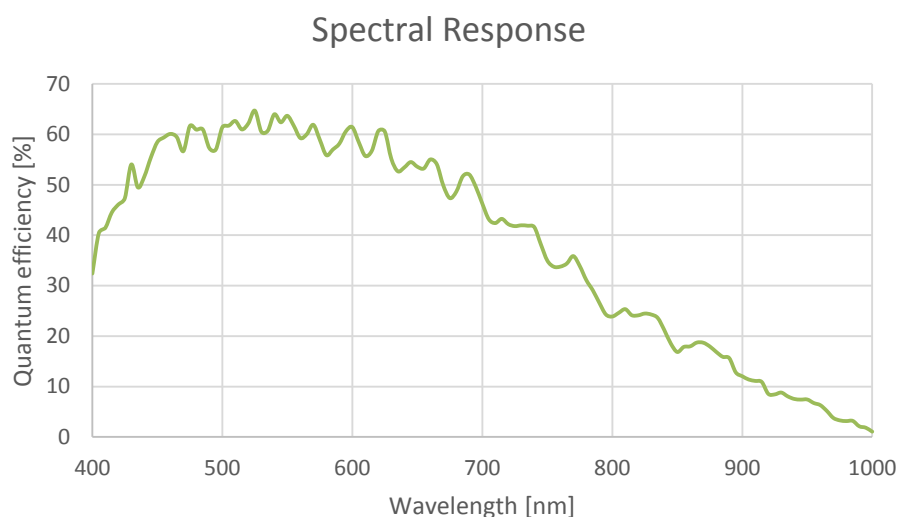


図 B.1: CMOS イメージセンサの QE。CMV2000 のデータシートより

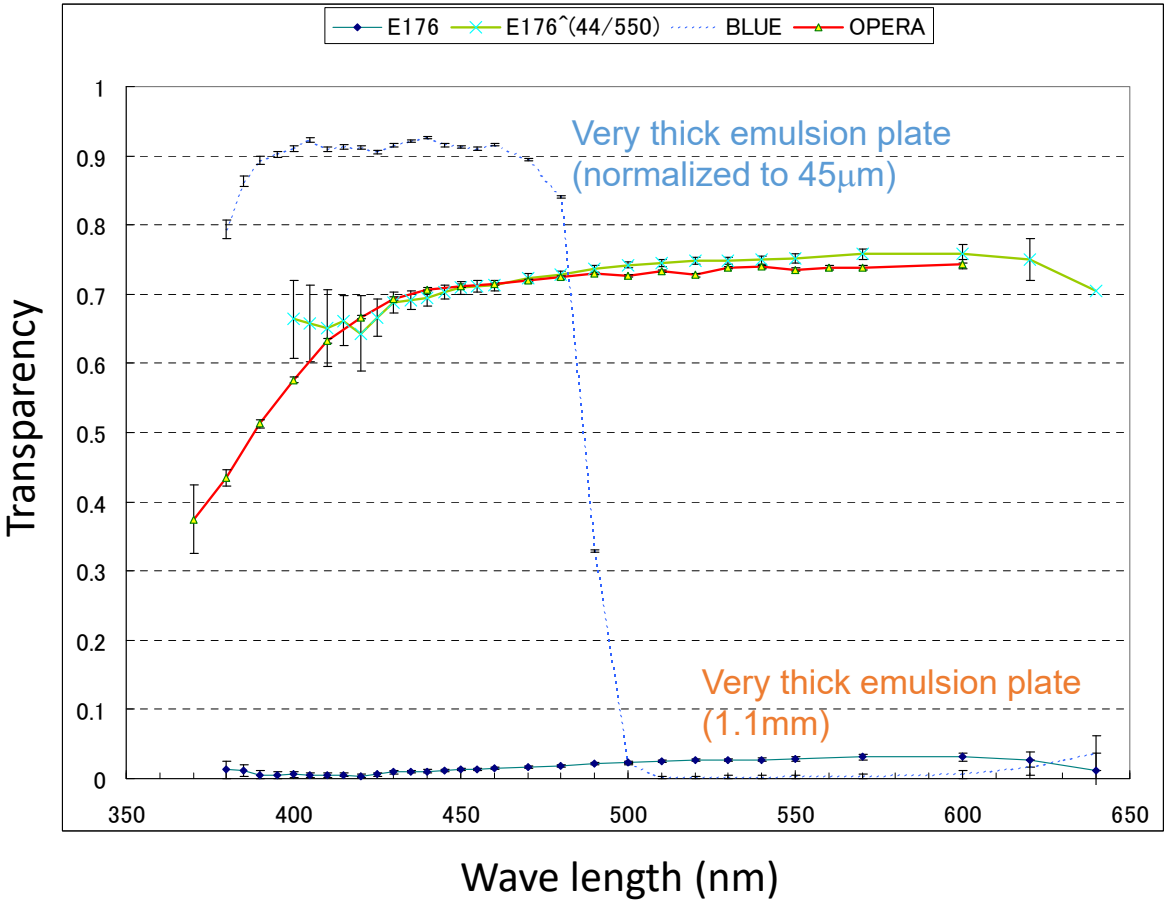


図 B.2: 原子核乾板の透過率

## 付録 C

# Y 軸ステージの改良

Y 軸ステージは当初図 C.1 のような 12 mm 厚の 1 枚の鋼板を使っていた。しかし、鋼板の剛性が足りず X 軸ステージを駆動する際に振動が発生していた。この鋼板自身が数 10 view/s の固有振動数を持っていたためである。そこで、剛性を高め、固有振動数を数 100 view/s にした Y 軸ステージを作成し、実装した C.2。

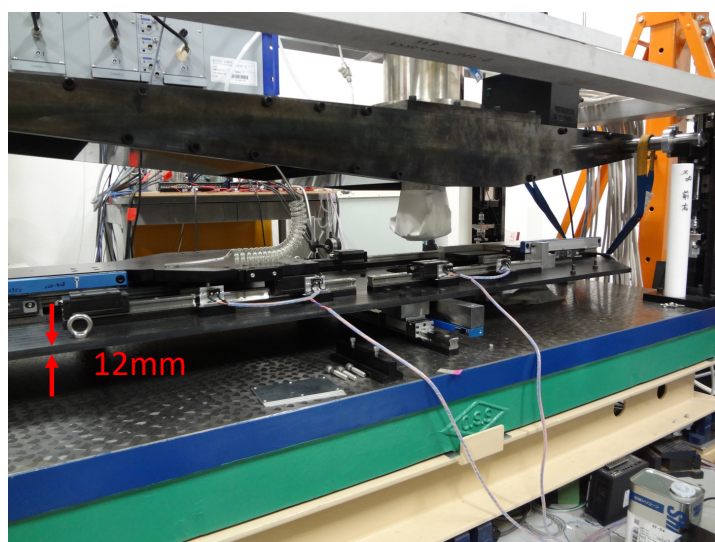


図 C.1: 改良前の Y 軸ステージ

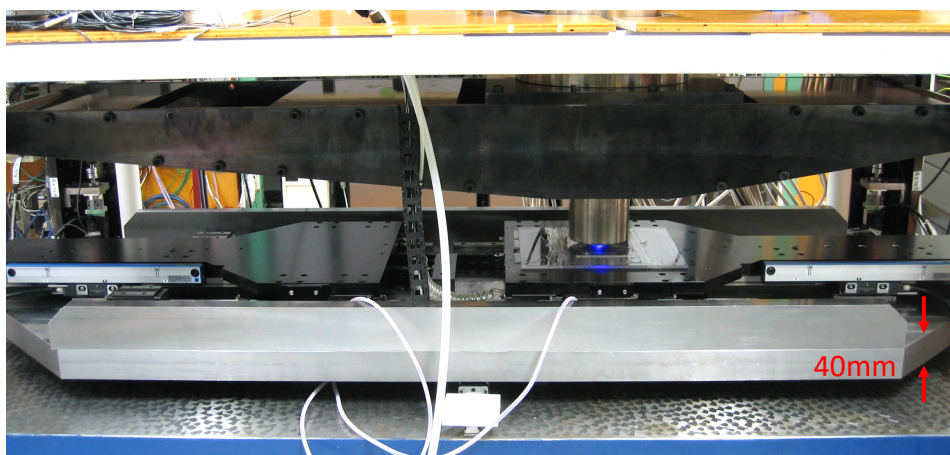


図 C.2: 改良後の Y 軸ステージ

## 付録 D

# 実効的な被写界深度の測定

GRAINE-2015 用乳剤を薄く塗布した乾板を用い、グレインを観察したときの光軸方向の像の広がり (ボケ) を測定した。画像処理ステップ 1 におけるカットオフ周波数を  $0.08 (=1/(12.5 \text{ pixel}))$  に固定し、画像処理ステップ 2 における  $a$  を 0 から -0.3 まで変化させた。また最終的に得られる画像の NOG が同じになるように、ステップ 2 における閾値を変化させた。Z 軸方向の撮影間隔は  $0.5 \mu\text{m}$  とし、上記の画像処理を行った後、グレインが現れてから消えるまでの距離を実効的な被写界深度と定義した。

図 D.1 に結果を示す。 $0.5 \mu\text{m}$  でピークが出ているのは、tiny fog と呼ばれる小さいグレインや、センサの電氣的なノイズ成分であると考えられる。このピークは、読み取り時においてシグナルを構成する主成分ではないため無視した。DOF のピークは  $a = 0$  のときは  $4.5 \mu\text{m}$  で、 $a = -0.3$  のときは  $4.0 \mu\text{m}$  となった。これは、 $a$  を小さくすることで、光軸方向にハイパスフィルタをかけることに相当していることが示された。また、 $a$  を変化させることで、実効的な被写界深度を  $4.0 \mu\text{m}$  から  $4.5 \mu\text{m}$  に変化できることも示された。

HTS で読み取りを行うときに撮影する間隔を  $4 \mu\text{m}$  未満 (乳剤厚にして  $60 \mu\text{m}$  未満) にすると、同じグレインを複数の画像で認識してしまう。S-UTS は乳剤厚が  $45 \mu\text{m}$  で最適化されており、それに比べると 1.3 倍広い。この比は対物レンズの被写界深度 ( $\delta z$ ) の比である 1.4 倍と矛盾はない。

次に、 $a = -0.3$  で固定したとき、画像処理ステップ 2 の閾値を下げたときの実効的な被写界深度の変化を測定した。図 D.2 に結果を示す。閾値を 17 から 14 まで下げても、実効的な被写界深度は  $4 \mu\text{m}$  でピークをもつが、さらに閾値を下げると DOF の高い成分が増えた。さらに、 $4 \mu\text{m}$  以下の成分も増えたのは、本来写るべきではない tiny fog の寄与が増えてきたことが原因であると考えられる。このような条件で読み取りを行った場合、無関係な tiny fog が飛跡認識に悪影響を与えることが想定される。

本評価は GRAINE-2015 フライトで用いた乾板や現像条件での結果であり、グレインのサイズが変わったり、FD が変わることで画像全体のコントラストが変わったりすることが考えられる。最適な閾値は各実験で探す必要がある。

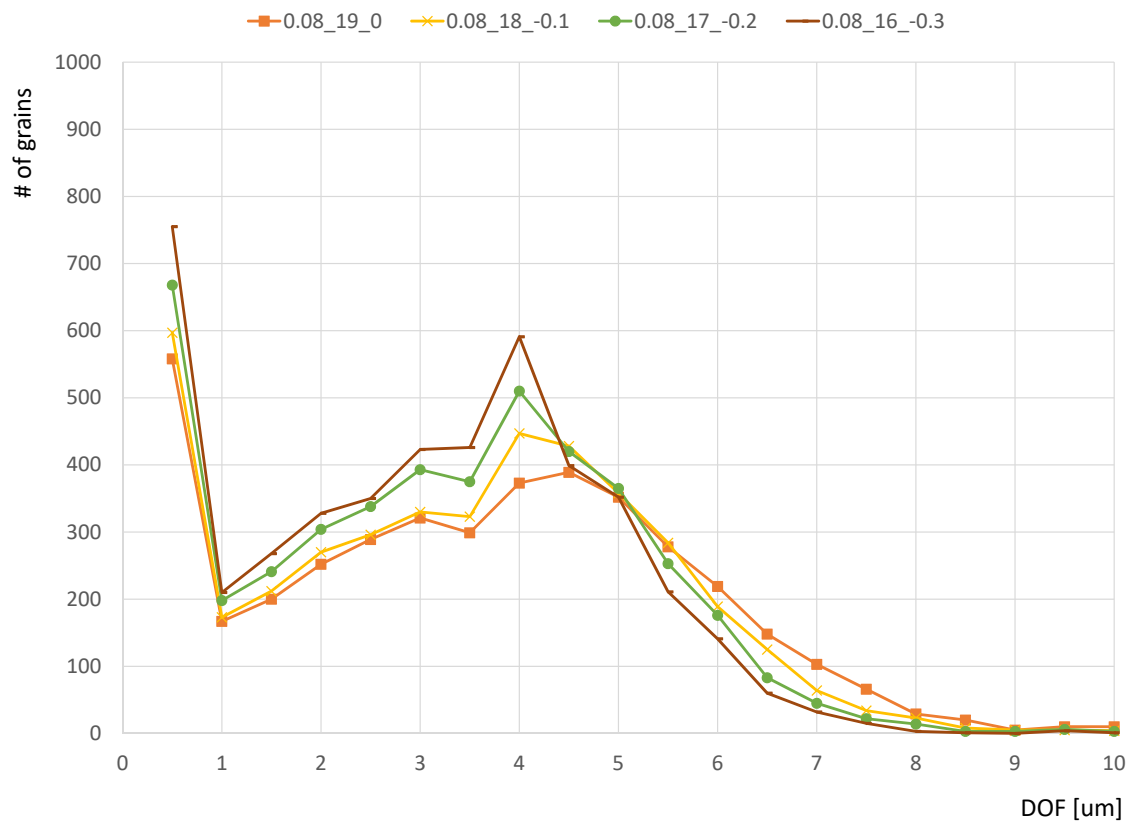


図 D.1: 画像処理ステップ 2 の閾値と  $a$  を変えたときの各グレインの実効的な DOF。凡例はカットオフ周波数、閾値、 $a$  の値の順。

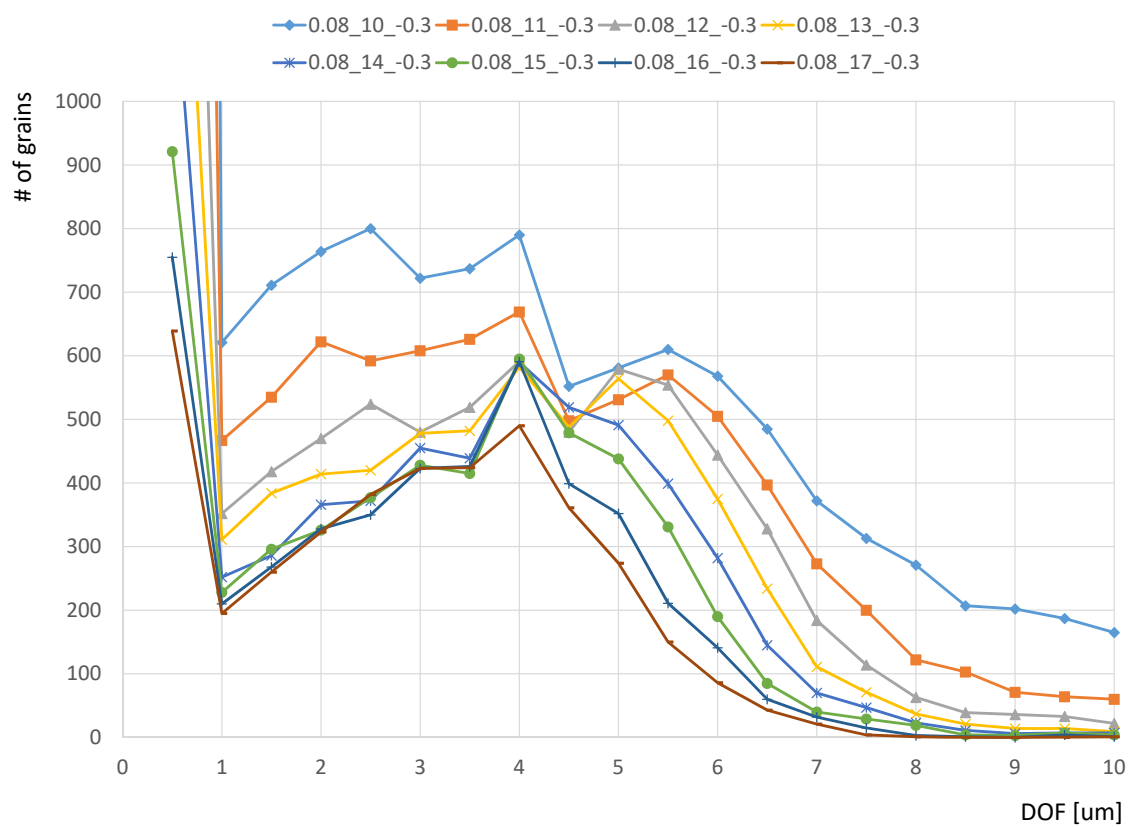


図 D.2: 画像処理ステップ 2 の閾値を変えたときの各グレインの実効的な DOF。凡例はカットオフ周波数、閾値、 $a$  の値を示す

## 付録 E

# センサアライメント計算のための ソースコード

3.2.4 で用いたセンサのアライメントで式 3.4 で  $\sigma$  が最小になる  $P_i$  の値は解析的に求まる。ただし自明ではないため久木田氏が解いた計算式を C++ で実装したソースコードを載せる。行列計算のため OpenCV library (version 2 系) を用いた。

具体例を示すため、表 E.1 のように  $3 \times 4$  でセンサの配列があったとする。二重線の中が一つの視野を表す。センサ番号は表 E.1 内の  $x$  の添え字のように定義する。隣り合うセンサにはオーバーラップ領域があり、かつ視野同士は繋がっているため、例えば 0 番目のセンサから見ると、1 番目、3 番目、2 番目、9 番目のセンサで同じ飛跡を観測でき、相対関係を実測値として得ることができる。2 番目と 9 番目は異なるステージ座標位置を使っているため、ステージの非直線性の影響を受ける。

$x_{11}$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_9$
$x_2$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_0$
$x_5$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_3$
$x_8$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_6$
$x_{11}$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_9$
$x_2$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_0$

表 E.1

各センサはアフィンパラメータを持っており、そのパラメータが正しいセンサの位置を表していれば、異なるセンサで認識した飛跡の位置は一致するが、間違っていれば相対的な位置ずれ量が検出される。センサの数  $\times 4$  の相対ずれ量を得るが、組み合わせから独立なパラメータはその半分である。実際の飛跡を用いているため、測定誤差があり、式 3.4 の  $\sigma$  の値が最小になるように、各センサに対する位置変化量  $P_i$  を計算する。

実例を含む main 関数をソースコード 1 に、実装部分の calc 関数をソースコード 2 に示す。

まずソースコード 1 を見て欲しい。ここでは  $12 \times 12$  行列の `cv::Mat delta` を定義している。`delta` は相対位置ずれ量  $D_{ij}$  を代入する行列である。例えば、0 番目のセンサに対して 1 番目のセンサの位置ずれが  $-2$  のときは、ソースコード 1 の 12 行目のように記述し、同時に 1 番目のセンサに対する 0 番目のセンサの位置ずれとして 13 行目のように記述する。ソースコード 1 では一部を省略したが、24 行記述する。

その後、calc 関数の戻り値として、最もらしい位置変化量  $P_i$  を `std::vector<double> vec` として得る。`vec[i]` が  $i$  番目のセンサの位置変化量である。この値を X 軸方向と Y 軸方向に対して独立に計算して、アフィンパラメータ (式 3.3) の平行移動量  $(p_i, q_i)$  から引くことで、平行移動に関しての補正を行うことができる。

ソースコード 2 の実装部分は、3 行以上かつ 3 列以上の任意のセンサ配列において成立する。

```

1  #define _USE_MATH_DEFINES
2  #include <cmath>
3  #include <vector>
4  #include <complex>
5  #include <opencv2/opencv.hpp>
6  int main() {
7      int nx = 3;
8      int ny = 4;
9
10     cv::Mat delta = cv::Mat(cv::Size(nx*ny, nx*ny), CV_64F);
11
12     delta.at<double>(cv::Point(0, 1)) = -2;
13     delta.at<double>(cv::Point(1, 0)) = 2;
14     delta.at<double>(cv::Point(0, 2)) = 1;
15     delta.at<double>(cv::Point(2, 0)) = -1;
16     //以下省略
17
18     auto vec = calc(nx, ny, delta);
19 }
```

ソースコード 1: センサアライメント計算のための main 関数

```

1  //nx は列数、ny は行数
2  std::vector<double> calc(int nx, int ny, cv::Mat delta) {
3      int sensors = nx * ny;
4      auto size = cv::Size(sensors, sensors);
5
6      std::vector<double> X;
7      X.resize(sensors);
8      for (int i0 = 0; i0 < sensors; i0++) {
9          for (int i1 = 0; i1 < sensors; i1++) {
10             X.at(i0) += delta.at<double>(cv::Point(i1, i0));
```

```

11     }
12     }
13
14     std::vector<double> lambda;
15     lambda.resize(sensors);
16     for (int iy = 0; iy < ny; iy++) {
17         for (int ix = 0; ix < nx; ix++) {
18             lambda.at(ix + iy * nx)
19                 = 4.0 - 2.0 * (cos(2.0 * M_PI*ix / nx) + cos(2.0 * M_PI*iy / ny));
20         }
21     }
22
23     cv::Mat u = cv::Mat_<std::complex<double>>(size, std::complex<double>(0, 0));
24     for (int iy0 = 0; iy0 < ny; iy0++) {
25         for (int ix0 = 0; ix0 < nx; ix0++) {
26             for (int iy1 = 0; iy1 < ny; iy1++) {
27                 for (int ix1 = 0; ix1 < nx; ix1++) {
28                     u.at<std::complex<double>>(cv::Point(ix0 + iy0 * nx, ix1 + iy1 * nx)) =
29                         std::complex<double>(
30                             cos(2.0 * M_PI*(ix1*ix0 / double(nx) + iy1 * iy0 / double(ny)))
31                             / sqrt(double(sensors)),
32                             sin(2.0 * M_PI*(ix1*ix0 / double(nx) + iy1 * iy0 / double(ny)))
33                             / sqrt(double(sensors)));
34                 }
35             }
36         }
37     }
38
39     cv::Mat U = u.t();
40     for (int l = 0; l < U.rows; l++) {
41         for (int k = 0; k < U.cols; k++) {
42             U.at<std::complex<double>>(cv::Point(k, l))
43                 = conj(U.at<std::complex<double>>(cv::Point(k, l)));
44         }
45     }
46
47     double alpha = 0;
48     for (int i0 = 0; i0 < sensors; i0++) {
49         if (i0 == 0) { continue; }
50         double d = 0;
51         for (int i1 = 0; i1 < sensors; i1++) {
52             d += u.at<std::complex<double>>(cv::Point(i0, i1)).real() * X.at(i1);
53         }
54         alpha += d / lambda.at(i0);
55     }
56     alpha /= X.at(0);
57
58     cv::Mat V = cv::Mat_<std::complex<double>>(size, std::complex<double>(0, 0));
59     for (int i0 = 0; i0 < sensors; i0++) {
60         if (i0 == 0) { V.at<std::complex<double>>(cv::Point(0, 0)) = -alpha; }
61         else {
62             for (int i1 = 0; i1 < sensors; i1++) {

```

```
63         V.at<std::complex<double>>(cv::Point(i1, i0))
64         = u.at<std::complex<double>>(cv::Point(i1, i0)) / lambda.at(i0);
65     }
66 }
67 }
68
69 std::vector<std::complex<double>> x;
70 x.resize(sensors);
71 cv::Mat UV = U * V;
72 std::vector<double> vec;
73 vec.resize(sensors);
74 for (int i0 = 0; i0 < sensors; i0++) {
75     for (int i1 = 0; i1 < sensors; i1++) {
76         x.at(i0) += UV.at<std::complex<double>>(cv::Point(i1, i0))*X.at(i1);
77     }
78     vec.at(i0) = x.at(i0).real();
79 }
80 return vec;
81 }
```

ソースコード 2: センサアライメント計算のための calc 関数