修士学位論文

到来方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験における 陰イオン3次元飛跡検出器用読み出し回路の開発

2018年3月9日

専攻名物理学専攻学籍番号164s112s氏名中澤 美季

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

概要

宇宙の謎の1つである暗黒物質は、様々な観測からその存在を示唆されているものの未だ直接検出されていない。多くの実験が直接探索を行うなかで、到来方向に感度を持った手法は従来の季節変動の観測に比べてより確度の高い証拠が得られると期待されている。NEWAGE(NEw generation WIMP search with an Advanced Gaseous tracker Experiment) は到来方向に感度を持った暗黒物質直接探索実験であり、3次元飛跡検出器 μ TPC を用いている。到来方向に感度を持った手法では世界最高感度を有しているが、従来型の直接探索には未だ及ばず、更なる感度向上が求められている。現在の感度を制限しているのは先行研究より μ -PIC に含まれる U/Th 系列の崩壊由来の α 線であることが分かっている。NEWAGE では有効体積カットによるバックグラウンドの特定・除去を目指して、陰イオンガス 3次元飛跡検出器 (Negative Ion micro Time Projection Chamber:NI μ TPC) を開発している。

NI μ TPC の開発に伴い、読み出し回路の開発も必要である。NI μ TPC 用読み出し回路として要求される条件は、NI μ TPC で使用する SF₆ ガスの特性に由来する特徴的な信号波形から制限される。時定数が大きく、ダイナミックレンジが大きいという条件を満たす ASIC("LTARS2016_K01") をKEK と共同開発で製作し、性能評価を行った。LTARS2016_K01 には 2 つの回路 (MT 回路、TK 回路) が搭載されており、いずれも設計段階でのシミュレーションと実測を比較した。主に時定数、ゲイン、ダイナミックレンジ、等価雑音電荷 (Equivalent Noise Charge:ENC) の 4 つの測定項目について評価している。MT 回路に関してはほとんどの試験項目で要請値を達成しており、達成できなかった項目に関しても要請値を見直すことで実用上問題がないことが確認された。一方、TK 回路に関しては要請値を達成できていない項目がいくつかあった。次回製作では、原因だと考えられるトランジスタ性能の改善により、要請値達成を目指す。さらに、NI μ TPC との接続試験も行い、200 μ m ピッチのストリップからの信号を読み出すことに成功し、

今回製作した LTARS2016_K01 が $\mu \mathrm{TPC}$ の読み出しとして動作することが 確認された。

目次

| 第1章 | 暗黒 | 物質 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |
|---------------------------|--------|------|-----------------|-------------------|-----|------------------|---|----|----|------------------|-----|-----|----|---------|----|----|----|---|-----|-----|---|----|
| 1.1 | 暗黒 | 物質 | の存 | 在 | | | • | | | | | | | | | | | | | | | 1 |
| 1.1. | .1 | 銀河 | の回 | 転曲 | 線 | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| 1.1. | .2 | 重力 | レン | ズ効 | 果 | | | | | | | | | | | | • | | | | | 3 |
| 1.1. | .3 | 宇宙 | マイ | クロ | コ波 | 背 | 景 | 放身 | 討 | (C | OSI | nic | N | Лic | ro | wa | ve | Ι | Bao | ck- | - | |
| | | grou | nd:C | CMB | 8). | | | | | | | | | | | | • | | | | | 5 |
| 1.2 | 暗黒 | 物質 | の候 | 補粒 | 子 | | | | | | | | | | | | • | | | | | 6 |
| 1.2. | .1 | MAG | СНО | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 7 |
| 1.2. | .2 | ニュ | ート | リノ | | | | | | | | | | | | | | | | | | 7 |
| 1.2. | .3 | WIN | IPs | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 8 |
| 1.2. | .4 | アク | シオ | ン | | | • | | | | | | | | | | | | | | | 10 |
| <i>m</i> 0 x − | n 女 EE | ᄔ | 1m + | =- | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 物質 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 11 |
| 2.1 | | 探索 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.1. | | エネ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 11 |
| 2.1. | .2 | 散乱 | 断面 | 積 | | | • | | • | | • | | • | | • | • | • | | • | • | • | 13 |
| 2.1. | .3 | 暗黒 | 物質 | の信 | 号 | | | | • | | | | | | | • | • | | | | • | 18 |
| 2.2 | 直接 | 探索 | 実験 | | | | • | | • | | • | | | | • | | • | | | | | 22 |
| 2.3 | 間接 | 探索 | 実験 | | | | • | | • | | | | | | | | • | | | | | 24 |
| 2.4 | 加速 | 器実 | 験 . | | | | • | | | | | | | | • | | • | | | | | 27 |
| 第3章 | 취꾸 | 方向 | 1-辰 | 帝 た | は~ | → □ 立 | 里 | から | 丘池 | = ± | 也 | 赤豆 | ₽₽ | | | | | | | | | 28 |
| | | | | | | - | | - | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.1 | | ·検出 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 28 |
| 3.2 | | IFT. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 29 |
| 3.3 | | MAC | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 30 |
| 3.4 | | WAG | | | | | • | | • | | • | | • | | • | • | • | | • | • | • | 31 |
| 3 / | 1 | NEV | VAC | \mathbf{F}_{-0} | 3b' | | | | | | | | | | | | | | | | | 31 |

| 3.4. | .2 データ取得システム | 33 |
|------|---|----|
| 3.4. | .3 NEWAGE における暗黒物質探索 | 35 |
| 3.4. | .4 バックグラウンド | 36 |
| 第4章 | NI μ TPC 用 ASIC の開発と性能評価 | 38 |
| 4.1 | 陰イオンガス 3 次元飛跡検出器 (Negative Ion micro Time | |
| | Projection Chamber: $NI\mu TPC$) | 38 |
| 4.1. | .1 陰イオン TPC(Negative Ion Time Projection Cham- | |
| | ber:NITPC) | 38 |
| 4.1. | | 41 |
| 4.2 | LTARS2014 | 42 |
| 4.3 | LTARS2016_K01 | 43 |
| 4.4 | LTARS2016_K01 MT 回路 | 47 |
| 4.4. | | 47 |
| 4.4. | | 48 |
| 4.5 | LTARS2016_K01 TK 回路 | 63 |
| 4.5. | | 63 |
| 4.5. | | 66 |
| 4.6 | .2 TOSINZOUVZ E/MV /C TK 日間の日間 | 79 |
| 4.0 | 日1A1tの2010_1t01 とカバス四部ペパスの原列の大・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 13 |
| 第5章 | 議論と今後の展望 | 85 |
| 5.1 | 議論 | 85 |
| 5.1. | .1 ENC 要請値 | 85 |
| 5.1. | | 86 |
| 5.2 | 今後の展望 | 87 |
| 第6章 | ····································· | 90 |
| | | |
| 付録 | | 92 |
| 付録 A | 回路図とレイアウト図 | 92 |

| A.1 | TOSHIZOU | 92 |
|-----|------------|-----|
| A.2 | TOSHIZOUv2 | 108 |

第1章 暗黑物質

暗黒物質 (Dark Matter) とは、様々な宇宙観測により存在が予言されている未知の物質の名称で、宇宙の謎の1つである。名称の一部である「暗黒」という形容は、光や X 線、赤外線などの電磁波では観測できない特徴を示している。最新の宇宙観測で明らかになった宇宙のエネルギー組成から、既知の物質は宇宙の構成要素の内わずか 4.9% にすぎず、宇宙を構成する 26.8% は暗黒物質、68.3% が暗黒エネルギーであると考えられている (図 1.1[1])。暗黒物質は素粒子標準理論の枠組みを超えた粒子である可能性が高く、その正体解明のために近年世界各国で暗黒物質に関する研究が進められている。

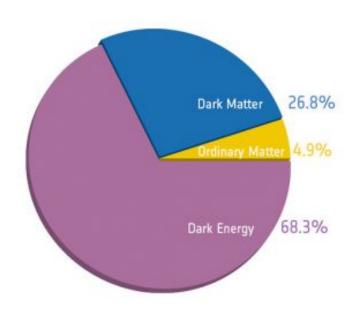


図 1.1 宇宙のエネルギー組成図 [1]

1.1 暗黒物質の存在

暗黒物質は、1933 年に Fritz Zwicky によって提唱された [2]。Zwicky はかみのけ座銀河団の観測から銀河団全体の質量を見積もった。銀河の運動速度から見積もった銀河団の総質量が、光学的に観測された銀河の星の総質量

の数百倍の質量になったことから、光学的に観測することが不可能な物質「暗黒物質」の存在を提唱した。それ以来、様々な宇宙観測により暗黒物質の存在を示唆する証拠が得られている。以下ではそれらの証拠のうち代表的なものをいくつか紹介する。

1.1.1 銀河の回転曲線

1970年代には、アメリカの天文学者 Vera Rubin によって銀河のガスの回転速度が観測された [3]。その結果、銀河中心から離れたところまで回転速度が変わらないことが観測された。銀河の中心から距離rにおける回転速度 $v_{\rm cir}(r)$ はケプラーの法則に従い、

$$\frac{v_{\rm cir}(r)^2}{r} = G\frac{M(r)}{r^2} \tag{1.1}$$

と表される。ここで、G は万有引力定数、M(r) は r より内側の銀河の質量である。銀河はディスクと呼ばれる円盤部分に対して、バルジと呼ばれる中心部分が非常に明るく、光学的に観測される物質のみで構成されているならば、質量をもった星は銀河中心に集中していると考えられる。このことより円盤部分では M(r) はほぼ一定となり、式 1.1 より $v_{\rm cir}(r)$ は $r^{-1/2}$ に比例して減少すると予想できる。しかし図 1.2 に示した観測結果からは円盤部分における回転速度がバルジから十分に離れた $20\,{\rm kpc}$ 程度まで一定であることが分かる [4]。この矛盾を説明するには、光学的に観測不可能な質量をもった物質の存在が必要不可欠であり、銀河スケールでの暗黒物質の存在の証拠となっている。

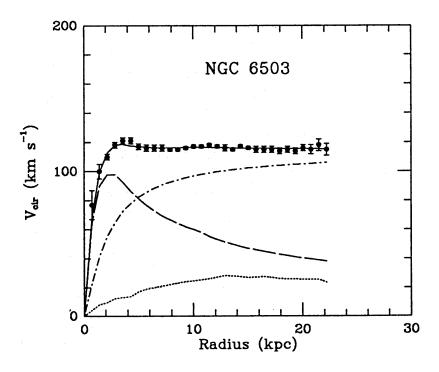


図 1.2 渦巻銀河 NGC6503 の回転曲線。縦軸が銀河の回転速度、横軸は銀河中心からの距離。黒点は観測値。破線と点線はそれぞれディスク、ガスからの寄与で、一点鎖線はハロー暗黒物質の寄与であり、実線はそれらの和を示す。[4]

1.1.2 重カレンズ効果

宇宙に存在する重力源の影響で光の経路が曲げられる現象を、重力レンズ効果という。重力レンズ効果は強い重力レンズ効果と弱い重力レンズ効果の2つに分類される。図 1.3 では、強い重力レンズ効果を受けて、重力源の背後にある銀河が弓状に変形したり、複数の像、あるいはリング状に見えたりしている。

弱い重力レンズ効果は、背景の銀河の歪みを統計的に観測することで質量分布を知ることができる効果である。

重力レンズ効果を用いた暗黒物質の観測に弾丸銀河団衝突の観測がある。 銀河団「1E 0657-56」の衝突観測の結果を図 1.4 に示す [6]。図 1.4 左図が マゼラン望遠鏡を用いた可視光による観測結果、図 1.4 右図は X 線天文衛星 チャンドラを用いた X 線での観測結果である。左右の図に共通して描かれ

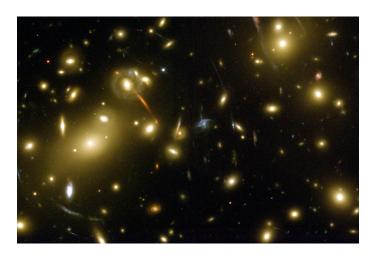


図 1.3 銀河団 Abell2218[5]。ハッブル宇宙望遠鏡による観測写真。前方にある重力源により光の経路が曲げられ、重力源の背後が弓状に変形している。

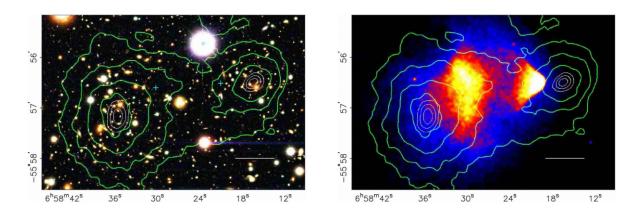


図 1.4 1E 0657-56 領域の観測結果 [6] 左図の画像は可視光による銀河の分布、緑の等高線は弱い重力レンズによって求めた質量の分布、右図のカラースケールは X 線観測による高温プラズマの分布を示す。

ている緑線は重力レンズ効果によって推定された質量分布を示している。高温プラズマガスによる X 線の強度分布は衝突点付近に強く観測され、質量分布と異なっている。このことから、電磁相互作用をする高温プラズマガスよりも反応率の低い物質が存在すると考えられ、これが銀河団スケールでの暗黒物質の存在の証拠である。

1.1.3 宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background:CMB)

現在の宇宙論における標準的なモデルとして Λ -CDM モデルが知られている。 Λ -CDM モデルとは Cold Dark Matter(CDM) の存在を仮定し、宇宙項 Λ を含んだビッグバン宇宙モデルのことで、式 1.2 のように表される。

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \left\{ \frac{\Omega_{\rm m}}{a^3} + \frac{\Omega_{\rm r}}{a^4} + \Omega_{\Lambda} - \frac{\Omega_{\rm k}}{a^2} \right\}$$
(1.2)

 Λ -CDM モデルでは宇宙を占めるエネルギーはマター、放射、ダークエネルギーから成り、エネルギー密度を臨界密度 $\rho_{\rm c}\left(=\frac{3c^2H_0^2}{8\pi G}\right)$ で割ることにより無次元化された量で議論する。これらは宇宙論パラメータと呼ばれ、式 1.2中ではそれぞれ $\Omega_{\rm m}$, $\Omega_{\rm r}$, Ω_{Λ} と表している。a は宇宙のサイズを表すスケールファクタ、 H_0 はハッブル定数、 $\Omega_{\rm k}$ は宇宙の曲率を表すパラメータで、式 1.2 は規格化されたフリードマン方程式である。また、宇宙初期 (赤方偏移 $z\sim10^4$) での放射優勢から物質優勢に移り変わった後では $\Omega_{\rm r}$ は $\Omega_{\rm m}$ と比較して無視できるほど小さい。この微分方程式を解くことで、宇宙の収縮や膨張、宇宙が平坦か否か、ビッグバン存在の有無といった宇宙発展の様子を求めることができ、宇宙発展の様子が宇宙論パラメータに依存していることが分かる。

宇宙論パラメータは宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測によって決定できる。CMB とは全天球上でほぼ等方的に観測される電磁波のことで、ビッグバン直後の宇宙が冷えて電気的中性になり光が直進できるようになったとき (宇宙の晴れ上がり) の電磁波の波長が引き延ばされて観測されるものである。宇宙の晴れ上がり時の密度揺らぎによって CMB にはわずかな非一様性が存在する。最近では Planck 衛星によって CMB の温度揺らぎが測定されている [7]。図 1.5 は Planck 衛星による CMB 観測結果で、上図は角度パワースペクトル、下図は測定値と Λ CDM モデルを用いたフィット曲線との差分を表している。角度パワースペクトルの最初のピークの位置は宇宙が平坦であることを示している。2番目と3番目のピークの相対値はダークマター密度 $\Omega_{\rm d}=\rho_{\rm d}/\rho_{\rm c}$ がバリオン密度 $\Omega_{\rm b}$ より5倍大きいこ

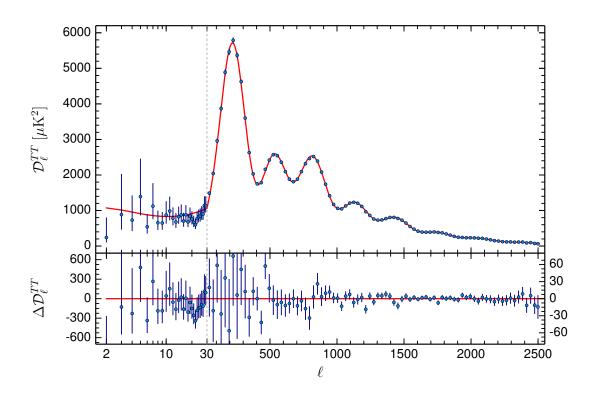


図 1.5 上図は Planck 衛星によって観測された CMB の角度パワースペクトル。青点が測定値。赤線が Λ CDM モデルを用いたフィット曲線。下図は測定値とモデルとの差分 [7]。

とを示している。また、 Λ CDM 宇宙モデルとのフィットにより、暗黒物質を含む全ての物質密度が $\Omega_{\rm m}h^2=0.1415\pm0.0019$ 、バリオンの物質密度が $\Omega_{\rm b}h^2=0.02226\pm0.00023$ と得られる。この観測結果はビッグバン元素合成モデル (Big Bang Nucleosythesis:BBN) によって推測されたバリオン密度 $0.019 \leq \Omega_{\rm b}h^2 \leq 0.024$ と一致しており、これは宇宙スケールでの暗黒物質の存在を示す証拠となる。

1.2 暗黒物質の候補粒子

前節で述べたように、宇宙の様々なスケールでの暗黒物質の存在が知られている。暗黒物質の候補として、これまでに多種多様な粒子が提案されている。この節では観測によって棄却された候補から現在有力視されている未知の素粒子まで、代表的なものを紹介する。

1.2.1 MACHO

Massive Compact Halo Object(MACHO) は非常に暗くて観測が難しい 天体の総称である。MACHO の候補として、褐色矮星、惑星、中性子星、 白色矮星、ブラックホールなどが挙げられ、観測されない重力源はこれら の質量だと考えられた。暗い天体がある光源の前を通り過ぎるとき、重力 レンズ効果により背景の光が明るくなる。実際にこうした効果が観測さ れ、MACHO[8]、EROS[9] といった実験によって定量的な観測を行った結 果、MACHO は暗黒物質を説明する質量には満たないことが分かった。ま た、BBN から考えられるバリオンの密度が非常に小さく、バリオンである MACHO が暗黒物質の主成分にはなりえないという説とも無矛盾である。

1.2.2 ニュートリノ

暗黒物質はその運動によって熱い暗黒物質 (Hot Dark Matter) と、冷たい暗黒物質 (Cold Dark Matter) の2つに分類される。熱い暗黒物質は宇宙初期に相対論的な運動エネルギーを持っていたもの、冷たい暗黒物質は宇宙初期に非相対論的な運動エネルギーを持っていたものとして分類している。ニュートリノは熱い暗黒物質の候補である。スーパーカミオカンデによるニュートリノ振動の観測からニュートリノが質量をもつことが分かっている[10]。しかし、この観測結果から得られたニュートリノの残存量は暗黒物質を説明するのに満たないことが分かった[11]。また、ニュートリノの質量が非常に小さいことから、宇宙初期でニュートリノは高速に近い速度を持っていたと考えられる。相対論的でかつ高速で運動をする粒子が暗黒物質である場合、暗黒物質の密度揺らぎが存在しなくなり、現在観測されているような宇宙の大規模構造を説明できないことから、ニュートリノは暗黒物質の主要な候補ではないとされている。

1.2.3 WIMPs

Weakly Interacting Massive Particles(WIMPs)[12] とは相互作用が弱く質量の大きい粒子の総称である。WIMP を作ることができる理論は複数存在する。特に標準理論を超える理論として有力視される超対称性理論(Supersymmetry:SUSY)からも支持されており、暗黒物質の有力な候補と考えられている。SUSY は標準理論の粒子とスピンが 1/2 だけ違う超対称性粒子 (SUSY 粒子)が存在するという理論である。標準理論に対してSUSY に基づいた最小限の拡張を行った理論を Minimum Supersymmetric extension of the Standard Model(MSSM)と呼び、表 1.1 に示すようなSUSY 粒子が導入される。

また、SUSY 粒子と標準理論の粒子の反応は R パリティーによって決められ、B をバリオン数、L をレプトン数、S をスピンとして、式 1.3 で表される。

$$R = (-1)^{3B+L+2S} (1.3)$$

標準理論の粒子の R パリティーは 1 に、SUSY 粒子の R パリティーは -1 になる。反応の前後で R パリティーが保存することから、SUSY 粒子の中で最も軽い粒子 (LSP:Lightest Supersymmetric Particles) はそれ以上崩壊せず安定に存在することができ、特に電気的に中性なものは暗黒物質の有力な候補となり得る。ニュートラリーノは、電荷を帯びていないフォティーノ $(\tilde{\gamma})$ 、 Z^0 のパートナーであるジーノ (\tilde{Z}) 、中性ヒッグスボソンのパートナーであるヒグシーノ $(\tilde{H}_1, \tilde{H}_2)$ もしくはこれら 4 つの混合状態のことを指す。最も軽いニュートラリーノ $(\tilde{\chi}_1^0 \equiv \chi)$ は、フォティーノ $(\tilde{\gamma})$ 、ズィーノ (\tilde{Z}) 、ヒグシーノ $(\tilde{H}_1, \tilde{H}_2)$ の混合状態の中で質量固有値が最小になるものである。フォティーノはビーノ (\tilde{B}) とウィーノ (\tilde{W}_3) を用いて

$$\tilde{\gamma} = \cos \theta_{\rm W} \tilde{B} + \sin \theta_{\rm W} \tilde{W}_3 \tilde{Z} = -\sin \theta_{\rm W} \tilde{B} + \cos \theta_{\rm W} \tilde{W}_3$$
 (1.4)

表 1.1 MSSM で導入される超対称性粒子

| | 標準理論の粒子 | | SUSY 粒子 | | | | | | |
|------------------------|---------|-----|--|----------|-----|--|--|--|--|
| 記号 | 名称 | スピン | 記号 | 名称 | スピン | | | | |
| q = u, c, t | アップクォーク | 1/2 | $\tilde{q}_u^1, \cdots \tilde{q}_u^6$ | アップスクォーク | 0 | | | | |
| q=d,s,b | ダウンクォーク | 1/2 | $\tilde{q}_d^1, \cdots \tilde{q}_d^6$ | ダウンスクォーク | 0 | | | | |
| $l=e,\mu,\tau$ | レプトン | 1/2 | $\tilde{l}_6, \cdots \tilde{l}_6$ | スレプトン | 0 | | | | |
| $ u_e, u_\mu, u_	au$ | ニュートリノ | 1/2 | $\tilde{ u}_1, \tilde{ u}_2, \tilde{ u}_3$ | スニュートリノ | 0 | | | | |
| | | | | | | | | | |
| g | グルーオン | 1 | $	ilde{g}$ | グルイーノ | 1/2 | | | | |
| W^\pm | W ボソン | 1 | $\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_2^{\pm}$ | チャージーノ | 1/2 | | | | |
| H^\pm | 荷電ヒッグス | 0 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| γ | 光子 | 1 | $\tilde{\chi}_1^0, \cdots \tilde{\chi}_4^0$ | ニュートラリーノ | 1/2 | | | | |
| Z^0 | Ζボソン | 1 | | | | | | | |
| h^0 | 軽ヒッグス | 0 | | | | | | | |
| H^0 | 重ヒッグス | 0 | | | | | | | |
| A^0 | 擬ヒッグス | 0 | | | | | | | |

と表せるので、最も軽いニュートラリーノ χ は

$$\chi = a_1 \tilde{B} + a_2 \tilde{W}_3 + a_3 \tilde{H}_1 + a_4 \tilde{H}_2 \tag{1.5}$$

と表すことができる。SUSY 粒子の質量は大きく、ニュートラリーノの質量も大きいと考えられる。質量が大きい故に運動は遅いと考えられ、CDM の性質に合致している。

1.2.4 アクシオン

ニュートラリーノと同様、暗黒物質の最有力候補とされているのがアクシオン [12] である。アクシオンは強い相互作用での CP 対称性問題を、標準理論の拡張を最小限にして説明できるように導入された粒子である。プリマコフ効果と呼ばれる特殊な性質を持ち、強磁場中において光子に変換され、磁場の影響が強いほどプリマコフ効果は強くなる。この性質を利用してアクシオンを観測するプロジェクト Axion Dark Matter eXperiment(ADMX) も観測を行っているが、現在までのところ未発見である。ニュートラリーノと対照的なのは質量が小さいことであるが、アクシオンは他の粒子と相互作用しないため宇宙初期に誕生したときから速度はほぼ 0 だったと考えることもでき、冷たい暗黒物質の候補となりうる。

第2章 暗黒物質探索実験

暗黒物質はその存在を示す証拠は多くあるにも関わらず未だその正体は不明である。世界中の研究グループが様々な方法で暗黒物質探索を行っているが、その手法は「直接探索実験」、「間接探索実験」、「加速器実験」の大きく3つに分類される。本章では、これらの実験について直接探索実験を中心にして、概説する。

2.1 直接探索手法

2.1.1 エネルギースペクトル

暗黒物質直接探索では、暗黒物質と原子核の弾性散乱によって原子核に与えられたエネルギーを測定する。測定されたエネルギースペクトルと期待されるエネルギースペクトルを比較することで、暗黒物質の質量と散乱断面積を求めることができる。期待される典型的なエネルギースペクトルは、Rを単位質量当たりの反応率、 E_R を標的原子核が受ける反跳エネルギー、 R_0 を総係数率として以下の式で表される。

$$\frac{dR}{dE_{\rm R}} = \frac{R_0}{E_0 r} e^{-E_{\rm R}/E_0 r} \tag{2.1}$$

期待されるエネルギースペクトルは図 2.1 になる。

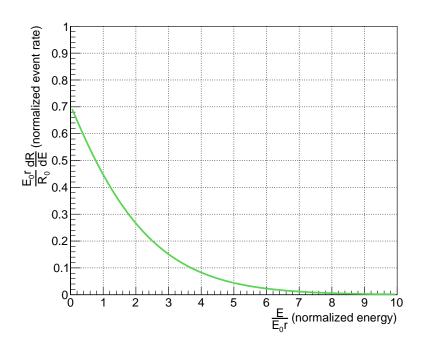


図 2.1 暗黒物質と弾性散乱した原子核の規格化されたエネルギースペクトル [13]

ここで、 E_0 は速度 v_0 の暗黒物質が持つ運動エネルギー

$$E_0 = \frac{1}{2} M_D v_0^2 \tag{2.2}$$

r は暗黒物質の質量を $M_{
m D}$ 、標的原子核の質量を $M_{
m N}$ としたときの無次元量の運動学パラメータ

$$r = \frac{4M_{\rm D}M_{\rm N}}{(M_{\rm D} + M_{\rm N})^2},$$
 (2.3)

である。 $v_{
m E}=0$ 、 $v_{
m esc}=\infty$ のとき、事象数 $R_0[/kg/day]$ は

$$R_0 = \frac{2}{\pi^{1/2}} \frac{N_{\rm A}}{A} \frac{\rho_{\rm D}}{M_{\rm D}} \sigma_0 v_0 \tag{2.4}$$

$$= \frac{361}{M_{\rm D}M_{\rm N}} \left(\frac{\sigma_0}{1\,\mathrm{pb}}\right) \left(\frac{\rho_{\rm D}}{0.3\,\mathrm{GeV/c^2/cm^3}}\right) \left(\frac{v_0}{220\,\mathrm{km/s}}\right), \quad (2.5)$$

となる。ここで $\rho_{\rm D}$ は暗黒物質の質量密度、 $M_{\rm D}$ は暗黒物質の質量、 $M_{\rm N}(=0.932A)$ は標的原子核の質量である。また 2.5 式は $\sigma_0=1\,{\rm pb}$ 、、 $v_0=220\,{\rm km/s}$ 、 $\rho_{\rm D}=0.3\,{\rm GeV/c^2/cm^3}$ で規格化している。

以下の6つを考慮することで、詳細なエネルギースペクトルが計算されて いる。

- 検出器は地球上に置かれ、地球は太陽の周りを公転し、太陽系は銀河中を回転している。
- 原子核反跳される暗黒物質事象に対する検出効率は、バックグラウンドである電子反跳事象の検出効率と異なる。
- 複数の核種からなる検出器がある。
- 検出器のエネルギー分解能やエネルギー閾値がある。
- 期待される散乱断面積は、スピンに依存しない反応 (Spin-Independent:SI) とスピンに依存する反応 (Spin-Dependent:SD) によって変わる。
- 反跳エネルギーが原子核の核子構造の影響を受ける。

2.1.2 散乱断面積

暗黒物質と原子核の弾性散乱は、詳細にみると原子核中のクォークとの散乱である。暗黒物質とクォークの散乱では、図 2.2 に示すようにスピンに依存しない散乱 (Spin-Independent:SI) とスピンに依存した散乱 (Spin-Dependent:SD) のいずれかの反応を起こす。暗黒物質と原子核との SI による散乱断面積を $\sigma_{\chi-N}^{SI}$ 、SD による散乱断面積を $\sigma_{\chi-N}^{SD}$ とすると、暗黒物質と原子核の弾性散乱の散乱断面積は

$$\sigma_{\chi-N} = \sigma_{\chi-N}^{SI} + \sigma_{\chi-N}^{SD}$$
 (2.6)

と表せる。どちらの散乱断面積が大きいかは標的原子核によって異なり、 暗黒物質探索においてどちらの反応が有利かも不明である。以下ではそれぞ れの散乱について説明する。

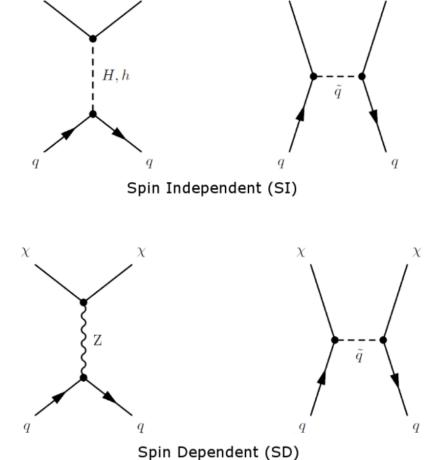


図 2.2 暗黒物質探索のファインマンダイアグラム。上図が SI で下図が SD。

• Spin-Independent(SI)

暗黒物質と原子核の SI による散乱断面積は

$$\sigma_{\chi-N}^{SI} = \frac{4\mu_{\chi-N}^2}{\pi} \left[Z f_p + (A - Z) f_n \right]^2$$
 (2.7)

と表せる。ここで、Z は原子番号、A は質量数、 $\mu_{\chi-N}$ は暗黒物質の質量 $M_{\rm D}$ と標的原子核 $M_{\rm N}$ の換算質量で

$$\mu_{\chi-N} = \frac{M_{\rm D} M_{\rm N}}{M_{\rm D} + M_{\rm N}} \tag{2.8}$$

である。また、 f_p 、 f_n はそれぞれ暗黒物質-陽子、暗黒物質-中性子の SI カップリングである。 $f_{T_q}^{(\mathrm{p})}\simeq f_{T_q}^{(\mathrm{n})}$ であるので、2.7 式から $\sigma_{\chi-\mathrm{N}}^{\mathrm{SI}}\propto \mu_{\chi-\mathrm{N}}^2A^2$ という関係がある。したがって、原子核に対する SI の散乱断面積は、陽子に対する SI の散乱断面積 $\sigma_{\chi-\mathrm{p}}^{\mathrm{SI}}$ を用いて

$$\sigma_{\chi-N}^{SI} = \sigma_{\chi-p}^{SI} \frac{\mu_{\chi-N}^2}{\mu_{\chi-p}^2} A^2$$
 (2.9)

と表される。2.9 式から SI においては標的原子核の質量数 A が大きいほど散乱断面積が大きくなることが分かる。そのため SI 反応においては A の大きい標的原子核を用いるほうが有利となる。図 2.3 に暗黒物質-陽子で規格化した標的原子核ごとの SI 反応の散乱断面積を示した。

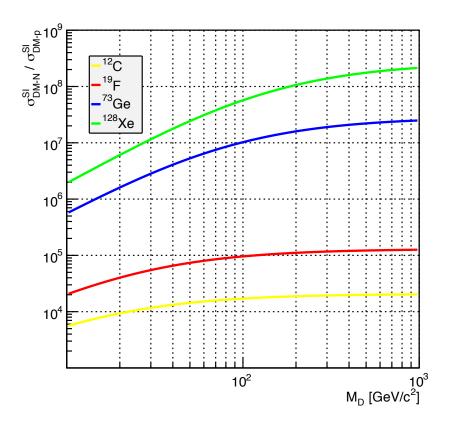


図 2.3 暗黒物質-陽子で規格化した標的原子核ごとの SI 反応の散乱断面積 [13]

• Spin Dependent(SD)

暗黒物質 r と原子核の SD による散乱断面積はフェルミカップリング定数 $G_F(=1.166\times 10^{-5}\,\mathrm{GeV}^{-2}(\hbar c)^3)$ を用いて以下のように表される。

$$\sigma_{\chi-N}^{SD} = \frac{32}{\pi} G_F^2 \mu_{\chi-N}^2 \left(a_p \langle S_p \rangle + a_n \langle S_n \rangle \right)^2 \frac{J+1}{J}$$
 (2.10)

ここで $\langle S_{\rm p} \rangle$ と $\langle S_{\rm n} \rangle$ は原子核中の陽子のスピンと中性子のスピンであり、J は原子核の全スピンである。係数 $a_{\rm p}$ と $a_{\rm n}$ は暗黒物質-原子核の SD カップリングで

$$a_{\rm p} = \sum_{q=\rm u,d,s} \frac{\alpha_{2q}}{\sqrt{2}G_{\rm F}} \Delta_q^{\rm (p)},$$
 (2.11)

$$a_{\rm n} = \sum_{q=\rm u,d,s} \frac{\alpha_{2q}}{\sqrt{2}G_{\rm F}} \Delta_q^{\rm (n)}$$
 (2.12)

と表される。ここで、 $\Delta_q^{(\mathrm{p})}$ と $\Delta_q^{(\mathrm{n})}$ はそれぞれ原子核中の陽子と中性子のスピンであり、

 $\Delta_{\rm u}^{(\rm p)}=\Delta_{\rm d}^{(\rm n)}=0.78\pm0.02,\ \Delta_{\rm d}^{(\rm p)}=\Delta_{\rm u}^{(\rm n)}=-0.48\pm0.02,\ \Delta_{\rm s}^{(\rm p)}=\Delta_{\rm s}^{(\rm n)}=-0.15\pm0.02$ である。ここで、Lande 因子 $\lambda=\frac{a_{\rm p}\langle S_{\rm p}\rangle+a_{\rm n}\langle S_{\rm n}\rangle}{J}$ を用いると原子核に対する SD の散乱断面積は、陽子に対する断面積 $\sigma_{\rm Y-p}^{\rm SD}$ を用いて

$$\sigma_{\chi-N}^{SD} = \sigma_{\chi-p}^{SD} \frac{\mu_{\chi-N}^2}{\mu_{\chi-p}^2} \frac{\lambda^2 J(J+1)}{0.75}$$
 (2.13)

と表される。SD 反応はスピンを持つ原子核に対してのみ起こり、 $\lambda^2 J(J+1)$ の大きい標的原子核のほうが SD 反応に対する散乱断面積が大きくなるため有利となる。表 2.1 に幾つかの核種に対する $\lambda^2 J(J+1)$ の値をまとめる [14]。また図 2.4、図 2.5 に標的原子核ごとの $\sigma_{\rm X-N}^{\rm SD}/\sigma_{\rm X-p}^{\rm SD}$ 、 $\sigma_{\rm X-N}^{\rm SD}/\sigma_{\rm X-n}^{\rm SD}$ を示す。

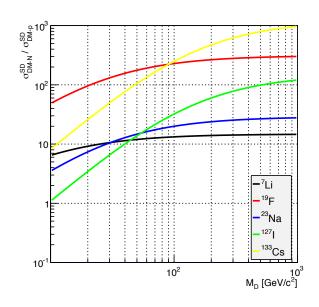


図 2.4 標的原子核ごとの $\sigma_{\chi-N}^{\rm SD}/\sigma_{\chi-p}^{\rm SD}$ 。横軸は暗黒物質 r質量。[13]

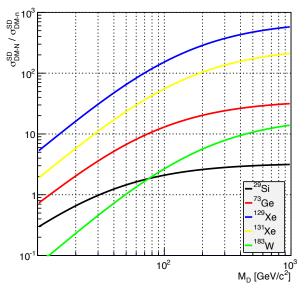


図 2.5 標的原子核ごとの $\sigma_{\chi-N}^{SD}/\sigma_{\chi-n}^{SD}$ 。横軸は暗黒物質質量。[13]

表 2.1 標的原子核ごとのスピン J、自然存在比、 $\lambda^2 J(J+1)$ の計算値 [14]。

| 元素 | J | 自然存在比 (%) | $\lambda^2 J(J+1)$ | スピンに寄与する核子 |
|---------------------|-----|--------------------|--------------------|------------|
| $^{1}\mathrm{H}$ | 1/2 | 100 | 0.750 | proton |
| $^7\mathrm{Li}$ | 3/2 | 92.5 | 0.244 | proton |
| ^{11}B | 3/2 | 80.1 | 0.112 | proton |
| $^{15}\mathrm{N}$ | 1/2 | 0.4 | 0.087 | proton |
| $^{19}\mathrm{F}$ | 1/2 | 100 | 0.647 | proton |
| 23 Na | 3/2 | 100 | 0.041 | proton |
| $^{127}\mathrm{I}$ | 5/2 | 100 | 0.007 | proton |
| $^{133}\mathrm{Cs}$ | 7/2 | 100 | 0.052 | proton |
| ³ He | 1/2 | 1.0×10^{-4} | 0.928 | neutron |
| ¹⁷ O | 5/2 | 0.0 | 0.342 | neutron |
| $^{29}\mathrm{Si}$ | 1/2 | 4.7 | 0.063 | neutron |
| 73 Ge | 9/2 | 7.8 | 0.065 | neutron |
| $^{129}\mathrm{Xe}$ | 1/2 | 26.4 | 0.124 | neutron |
| ¹³¹ Xe | 3/2 | 21.2 | 0.055 | neutron |
| $^{183}\mathrm{W}$ | 1/2 | 14.3 | 0.003 | neutron |

2.1.3 暗黒物質の信号

暗黒物質と弾性散乱した反跳原子核から得られるエネルギースペクトルは 図 2.1 に示す通り特徴のない指数関数の形状をしている。暗黒物質を検出するためには、バックグラウンドと区別できる暗黒物質特有の信号を観測する必要がある。暗黒物質特有の信号に「エネルギースペクトルの核種依存性」、「エネルギースペクトルの季節変動」、「暗黒物質の到来方向異方性」の 3 つが挙げられる。

• エネルギースペクトルの核種依存性

暗黒物質と原子核との散乱断面積は原子核の核種によって異なる。よって、予想されるエネルギースペクトル dR/dE_R も原子核の核種に依存して形状が変化する。図 2.6、図 2.7 はそれぞれ SI、SD 反応において、異なる標的原子核を用いたときの予想されるエネルギースペクトルである。ここで暗黒物質の質量は $M_D=100\,\mathrm{GeV/c^2}$ 、散乱断面積は $\sigma_{\chi-p}^\mathrm{SI}=1\times10^{-6}\,\mathrm{pb}$, $\sigma_{\chi-p}^\mathrm{SD}=1\,\mathrm{pb}$ とした。図 2.6、図 2.7 のように、エネルギースペクトルの核種依存性を検出すれば暗黒物質の証拠となり得る。しかし、バックグラウンドのエネルギースペクトルも核種依存があるため、この手法で高い有意性を得るのは困難である。

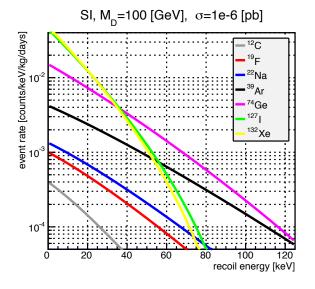


図 2.6 異なる標的原子核に対する、 SI 反応で予想されるエネルギースペクトル。暗黒物質質量は $M_\mathrm{D}=100\,\mathrm{GeV/c^2}$ 、散乱断面積は $\sigma_{\chi-\mathrm{p}}^{\mathrm{SI}}=1 imes10^{-6}\,\mathrm{pb}$ とした [13]。

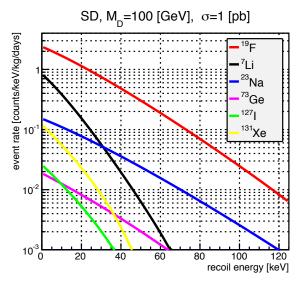


図 2.7 異なる標的原子核に対する、 SD 反応で予想されるエネルギースペクトル。暗黒物質質量は $M_{\mathrm{D}}=100\,\mathrm{GeV/c^2}$ 、散乱断面積は $\sigma_{\chi-\mathrm{p}}^{\mathrm{SD}}=1\,\mathrm{pb}$ とした [13]。

• エネルギースペクトルの季節変動

地球の公転により、銀河に対する地球の相対速度 $v_{\rm E}$ が変化することからエネルギースペクトルの季節変動が生じる。 $v_{\rm E}$ は 6 月 2 日に最大となり、12 月 4 日に最小となる。その変動率は 5% 程度である。図 2.8 は 6 月と 12 月で予想されるそれぞれのエネルギースペ

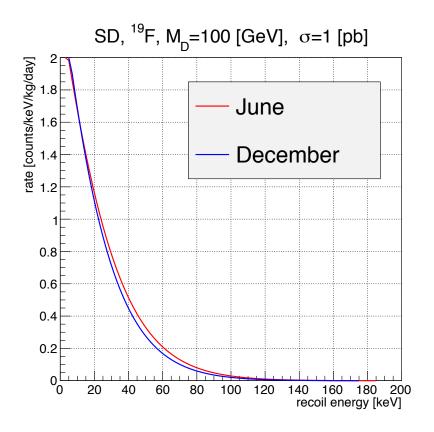


図 2.8 予想されるエネルギースペクトルの季節変化。標的原子核は 19 F、WIMP との反応は SD、 $M_{\rm D}=100\,{
m GeV/c^2}$ 、 $\sigma_{\rm \chi-p}^{\rm SD}=1\,{
m pb}$ とした [13]。

クトルである。ここで、標的原子核は 19 F、WIMP との反応は SD、 $M_{\rm D}=100\,{
m GeV}$ 、 $\sigma_{\chi-{
m p}}^{{
m SD}}=1\,{
m pb}$ を用いた。

この僅かな季節変動を検出するには、大質量検出器を用いた長時間観測で統計を貯めることで統計誤差を小さくし、非常に安定した環境で実験を行うことで系統誤差を低くする必要がある。

暗黒物質の到来方向異方性

エネルギースペクトルの季節変動が約 5% 程度であるのに対し、暗黒物質特有の信号としてより確実性の高いものとして到来方向異方性が挙げられる。これは、太陽系が銀河中を運動していることにより生じる「暗黒物質の風」の方向を測定することで、暗黒物質の検出の証拠とするものである。銀河系の中で運動をする太陽系の先には、はくちょう座が見えるため、暗黒物質の到来方向ははくちょう座の方向に

偏っているように見られる。はくちょう座の方向は一日を通して変化し、また一年を通しても変化するため、時刻や季節に依存した環境変化を打ち消すことができる。実験室系において、暗黒物質の弾性散乱による角度スペクトルは以下のように計算される [15]。

$$\frac{d^2R}{dE_{\rm R}d\cos\theta} \simeq \frac{1}{2} \frac{R_0}{E_0 r} \exp\left[-\frac{(v_{\rm E}\cos\theta - v_{\rm min})^2}{v_0^2}\right]$$
(2.14)

ここで θ はくちょう座の方向と原子核飛跡のなす角である。この角度と反跳エネルギーの関係を図 2.9 に示す。ここで、標的原子核は 19 F、WIMP との反応は SD、 $M_D=100\,\mathrm{GeV/c^2}$ 、 $\sigma_{\chi-p}^\mathrm{SD}=1\,\mathrm{pb}$ とした。図 2.9 の中から反跳エネルギーが $100-120\,\mathrm{keV}$ の事象を抽出すると、図 2.10 が得られる。バックグラウンド事象による $\cos\theta$ 分布は平坦になることが予想されるため、図 2.10 に示したような $\cos\theta=1$ のピークは暗黒物質存在の強い証拠となる。

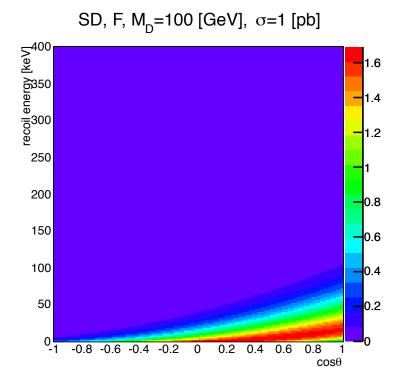


図 2.9 暗黒物質との弾性散乱による予想される角度スペクトル。 θ はくちょう座の方向と原子核飛跡のなす角、標的原子核は 19 F、暗黒物質との反応は SD 、 $M_{\mathrm{D}}=100\,\mathrm{GeV/c^2}$ 、 $\sigma_{\mathrm{X-p}}^{\mathrm{SD}}=1\,\mathrm{pb}$ とした。 [13]

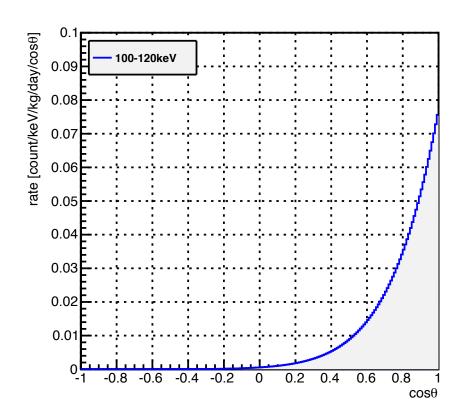


図 2.10 暗黒物質との弾性散乱による予想される $\cos \theta = 1$ 分布 (100 – 120 keV)。 θ はくちょう座の方向と原子核飛跡のなす角、標的原子核は 19 F、暗黒物質との反応は SD 、 $M_{\mathrm{D}} = 100\,\mathrm{GeV/c^2}$ 、 $\sigma_{\chi-\mathrm{p}}^{\mathrm{SD}} = 1\,\mathrm{pb}$ とした。[13]

2.2 直接探索実験

直接探索実験は地球上に設置した検出器を用いて、前節で述べたように検出器中の原子核が暗黒物質によって反跳されるエネルギーを観測する。直接探索実験での反跳エネルギー検出方法は様々で、光、熱、電荷あるいはそれらの組み合わせで検出する。直接探索実験は、反跳原子核のエネルギーのみを測定する「従来型の探索実験」と、さらに反跳飛跡を測定する「到来方向に感度を持つ探索実験」の2つに分類される。「到来方向に感度を持つ探索実験」に関しては次章で説明する。本章では「従来型の探索実験」に関して紹介していく。前節で述べたように、予想されるエネルギースペクトルは指数関数的な形状をしている。そのため、エネルギー閾値が低い方がより多く

の事象が期待され、検出されるエネルギー領域は典型的には 100 keV 以下である。また、暗黒物質と原子核の弾性散乱事象は非常に稀な事象なので、宇宙線起源のバックグラウンドを減らすために地下実験施設で直接探索実験が行われることが多い。さらに、効率よく統計を稼ぐために標的原子核の数を増やす、あるいは標的とする検出器の質量を大きくすることが重要となる。以上のような特徴をもった検出器を用いて多くの実験が行われている。

従来型暗黒物質直接探索実験では DAMA/NaI や DAMA/LIBRA という実験が暗黒物質発見を主張している。DAMA/NaI 及び DAMA/LIBRA は光を検出する固体シンチレータを検出器としている。DAMA/NaI では $100 \log$ の NaI シンチレータを使用して 7 年間の観測を行い、DAMA/LIBRA では $250 \log$ の NaI シンチレータを使用してさらに 7 年間の観測をしている。その観測結果が図 2.11 であり $2-6 \ker$ で 9.3σ の季節変動観測を主張している [16]。

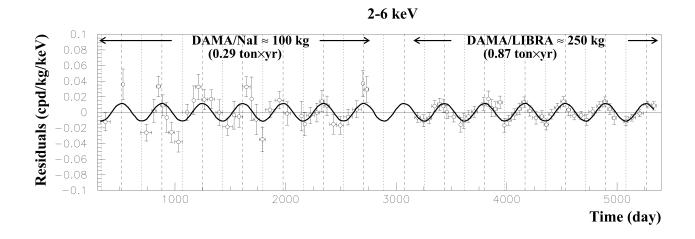


図 2.11 DAMA/LIBRA による 2-6 keV 領域での観測結果 [16]

しかし SuperCDMS や、LUX[17]、XENON1T[18] などが、矛盾する結果を報告していることから確実な暗黒物質発見には至っていない。従来型暗黒物質直接探索実験によって探索された SI 散乱断面積の制限曲線を図 2.12に、SD 散乱断面積の制限曲線を 2.13 に示す。

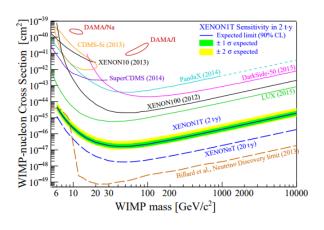


図 2.12 従来型暗黒物質直接探索実験によって探索された SI 散乱断面積の制限曲線。DAMA-LIBRA[16](赤) によって暗黒物質発見が示唆されている領域に他の実験による制限曲線が引かれ結果が矛盾している [18]。

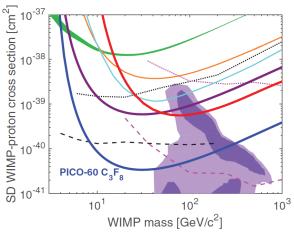


図 2.13 従来型暗黒物質直接探索実験によって探索された SD 散乱断面積の制限曲線 [19]。

2.3 間接探索実験

暗黒物質は重力相互作用によって、銀河中心や大質量天体の中心に捉えられる。暗黒物質の密度が大きいところでは、暗黒物質が対消滅して通常の物質になると考えられる。間接探索実験では暗黒物質由来の宇宙線を観測する。以下、検出される粒子種類に分類して議論する。

γ線

暗黒物質由来の γ 線は $\chi\chi \longrightarrow \gamma\gamma$, $\chi\chi \longrightarrow Z^0\gamma$ という反応で生じる。観測される γ 線は暗黒物質の質量に対応するピークと、ハドロンやレプトンを生成した際の連続成分からなると考えられる。2008 年に打ち上げられた $30\,\mathrm{MeV}\sim\!300\,\mathrm{GeV}$ の γ 線を観測できる Fermi 衛星の結果から $130\,\mathrm{GeV}$ 付近での γ 線超過が見られ、暗黒物質の信号であるという解釈が主張された。しかし、現在では $2000\,\mathrm{MeV}\sim\!500\,\mathrm{GeV}$ というさらに広範囲で観測が行われ、図 $2.14\,\mathrm{col}$ で示された最新の解析

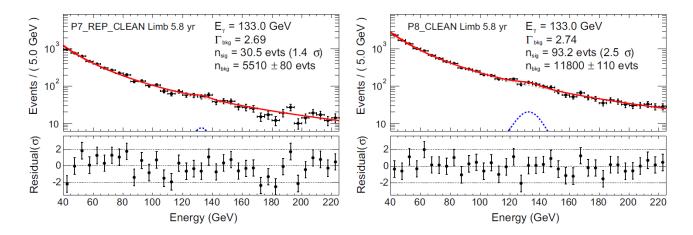


図 2.14 Fermi 衛星による観測結果。黒いプロットは 5.8 年分の観測点。 赤い実線がフィット。青い点線がデータのベストフィットである信号。灰 色の点線がバックグラウンドのベストフィット [20]。

結果では $130\,\mathrm{GeV}$ 付近での γ 線超過は統計的変動の範囲内であるとされた [20]。 $133\,\mathrm{GeV}$ 付近の 5.8 年分の γ 線観測データを図 2.14 に示す。

そのため、依然として暗黒物質の発見には至っていない。

反粒子

暗黒物質の対消滅では、粒子-反粒子対が多く生成される。これにより、宇宙線中の反粒子の超過は暗黒物質存在の間接的な証拠となる。 2011 年に ISS(国際宇宙ステーション) に設置された AMS-02 は電子-陽電子比を観測し、高エネルギーで陽電子の比率が増加するという結果を得た。図 2.15 に AMS-02 観測による 600 GeV 付近までの陽電子のフラックスを示す。数百 GeV でフラックスが減少しており、これは 1 TeV の暗黒物質モデルと一致する。しかし、パルサー由来の可能性も排除しきれていないのが現状である。

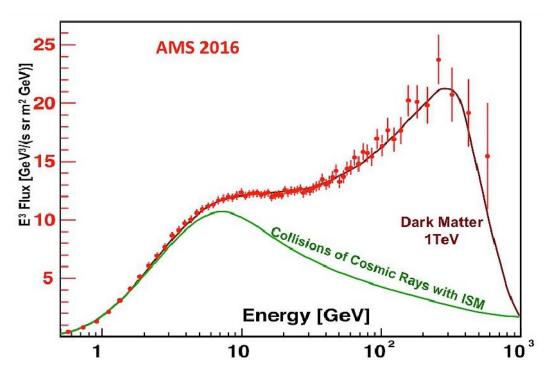


図 2.15 AMS-02 観測による陽電子のフラックス [21]

• ニュートリノ

暗黒物質の対消滅の終状態としてニュートリノが生成される。終状態のほとんどは二体崩壊であるため、生成されたニュートリノのエネルギーは暗黒物質質量の 1/2 程度の高いエネルギーを持つ。ニュートリノが他の物質とほとんど相互作用しないことから、 γ 線で観測できない地球や太陽といった重力場で捉われた暗黒物質からの対消滅を観測できる。太陽の構成元素が主に水素であることから暗黒物質は SD 反応によって太陽に捉われていると考えられる。従って、太陽からのニュートリノを観測することで SD 反応の散乱断面積に関して制限をつけることができる。神岡地下に建設された水チェレンコフ検出器を用いた Super-Kamiokande[22] や南極の氷中に設置されたチェレンコフ検出器を用いた IceCube[23] は太陽からの対消滅ニュートリノを観測することで SD 散乱断面積に制限をつけている。

2.4 加速器実験

加速器探索実験では、加速した通常の物質同士を衝突させ、暗黒物質を生成することによって暗黒物質探索を行う。暗黒物質は電磁相互作用をしないため、検出器では検出されず、エネルギーおよび運動量欠損として検出される。スイス・ジュネーブにある CERN(欧州原子核研究機構) のハドロン衝突型円形加速器である LHC(Large Hadron Colider) では最大エネルギー13~14 TeV で陽子同士を正面衝突させる。ATLAS は LHC を用いた実験である。ATLAS では暗黒物質と核子の散乱断面積に関して制限曲線がつけられ(図 2.16)、直接探索実験との比較もなされている [24]。また、電子陽電子衝突型線形加速器の ILC(International Linear Collider) が現在計画段階にある。ハドロン衝突よりもレプトン衝突は単純であるため、バックグラウンド事象が低く、暗黒物質が生成された場合にはより詳細なパラメータを求めることができると言われている。

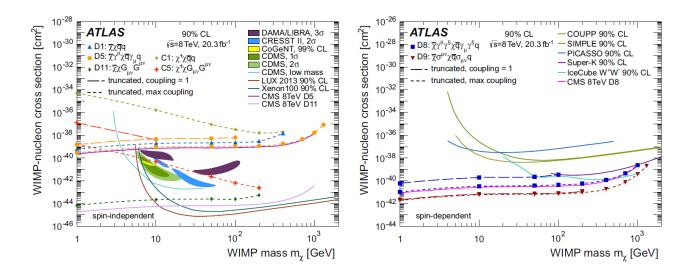


図 2.16 ATLAS における暗黒物質と核子の散乱断面積の制限曲線。左図は SI 散乱断面積、右図は SD 散乱断面積。図中には他の実験によって求められた制限も示されている [24]。

第3章 到来方向に感度を持つ暗黒物質直接探索 実験

2.1.3 節でも述べたように、地球の公転による暗黒物質のエネルギースペクトル変動率よりも、太陽系の運動により生じる「暗黒物質の風」の非対称性が大きく、暗黒物質存在のより強力な証拠となる。到来方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験では、ガス検出器を使用することが多い。本章ではガス検出器の原理について説明した後、ガス検出器を用いて行われている到来方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験である DRIFT[25]、MIMAC[26] を紹介する。その後本論文の回路開発の目的である NEWAGE について説明する。

3.1 ガス検出器

反跳原子核のもつエネルギーが 100 keV のとき、典型的な飛跡長は 1 気圧のガス中で 1 mm 以下となる。そのため、多くの到来方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験で低圧ガスを用いたガス検出器 TPC(Time Projection Chanver) が使用される。中でも MPGD(Micro-Patterned Gaseous Detector) と組み合わて用いるものは μ TPC と呼ばれる。図 3.1 に μ TPC の概念図を示す。

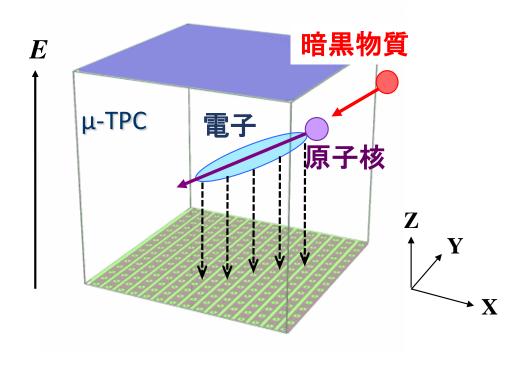


図 3.1 µTPC の概念図

暗黒物質との弾性散乱によって反跳した荷電粒子がガス中を通過すると、原子や分子をイオン化し、エネルギー損失量に比例した電子-イオン対を生成する。これにより生成された 1 次電子は TPC 内部の電場によりドリフトされ、読み出し面に設置された MPGD で飛跡の 2 次元情報 (X,Y) が検出される。また、電子のドリフト速度と時間情報を用いることで Z 方向の座標がわかるため、3 次元の飛跡情報を得ることができる。電子のドリフト速度はガスの種類や P(E,D)/E(電場) に依存するものの数 $cm/\mu s$ 程度である。

3.2 DRIFT

DRIFT はイギリスの地下にある実験施設 STFC Boulby Underground Science Facility で行われている実験である [25]。最も古くからガス検出器を用いた暗黒物質直接探索実験を行っている。最近では DRIFT-IId と呼ばれる $100\times100\times100$ cm³ の検出容積を持つ TPC に $CS_2:CF_4:O_2=30:10:1$ Torr の混合ガスを用いて測定をしている。読み出しに 2mm ピッチ

のワイヤーで構成された MWPC(Multi Wire Proportional Counter) を用いている。MWPC のワイヤーは 8 チャンネルおきにまとめられ、Cremat CR-111 という CSA(Charge Sensitive Amplifer) をプリアンプに用いてワイヤー付近で増加された電荷を電圧に変換する。その後 Cremat CR-200 によって $4\mu s$ の時定数に波形を整形してデータを取得している。DRIFT 実験では、ワイヤーピッチが 2mm と粗いため XY 方向の方向感度は十分でなく、方向感度に関連した情報としては、Z 方向の一次元に関して、前後判定の実証のみが行われているのみである [25]。

3.3 MIMAC

MIMAC[26] は 2007 年にフランスの Laboratorie de Physique Subatomique et de Cosmologie で開始された到来方向に感度を持つ暗黒物 質直接探索プロジェクトである。IRFU、IRSN、CCPM、清華大学が共同 で行っている。2012 年にはフランス地下にある実験施設 Modane underground laboratory に検出器が設置された。MIMAC 検出器は MPGD の一 種である MICROMEGAS(Micro-MEsh GAseous Structure) を読み出しに もつ μ TPC である。検出体積は $10 \times 10 \times 25 \text{ cm}^3$ で $CF_4: CHF_3: C_4H_{10} =$ 70:28:2 Torr のガスを使用している。読み出しには、MIMAC 検出器用に 開発された ASIC(Application specific integrated circuit)(BiCMOS-SiGe $0.35\,\mu\mathrm{m}$) と呼ばれる IC チップを使用している。この ASIC は S/N 比拡大 のために PMOS 入力トランジスタ、低ノイズチャージプリアンプを使用し ている。低エネルギーの $300\,\mathrm{eV}\sim80\,\mathrm{keV}$ に対応する信号の測定精度をよく するため、増幅率が大きいアンプと、 α 粒子検出のために $\sim 1\,\mathrm{MeV}$ に対応 する信号のための増幅率が小さいアンプを通した2つの出力がある。2つの 増幅率の比は 12.5 である。時定数は $200 \, \mathrm{ns}$ で設計され、サンプリングレー トは 40 MHz のものを使用している [27]。

3.4 NEWAGE

NEWAGE(NEw general WIMP search with an Advanced Gaseous tracker Experiment) は、二次元画像飛跡検出器 μ -PIC(micro PIxel Chamber) を読み出しとした 3 次元ガス飛跡検出器 μ TPC を使用して、到来方向に感度を持つ暗黒物質探索を行う実験である。使用している検出器はNEWAGE-0.3b' と呼ばれる μ TPC で 2013 年から日本の神岡地下でデータを取得し、WIMP-陽子の SD 反応における制限曲線を更新している。

3.4.1 NEWAGE-0.3b'

NEWAGE-0.3b' は $30.72 \times 30.72 \,\mathrm{cm}^2$ の検出器面積を持つ二次元画像飛跡検出器 μ -PIC(図 3.2) と中間増幅器 GEM、 $41 \,\mathrm{cm}$ のドリフト領域で構成された μ TPC である。NEWAGE-0.3b' 装置の外観を図 3.3 に、装置の概念図を図 3.4 に示す。

 μ -PIC はプリント基板加工技術を用いて作られた検出器で、ガス増幅及び電荷読み出しに用いられる。プリント基板加工技術の利点は、安価で大型の検出器が製作可能なことであり、大質量の検出器を必要とする暗黒物質探索実験にとって好都合である。 μ -PIC は輪切りにした比例計数管を縦横に配置した電極構造をしている。ピクセル間隔は $400\mu\mathrm{m}$ なので、WIMP との弾性散乱によって生じる数 mm 程度の短い飛跡の方向を捉えることができる。アノード、カソードがそれぞれ縦横でつながっており、ストリップ読み出しでデータを収集する。 μ -PIC は低圧ガス中での動作が不安定になる傾向があるため、必要なガス増幅率を得るための補助増幅器として GEM を用いている。GEM は厚さ $100\mu\mathrm{m}$ の液晶ポリマーの両面に厚さ $5\mu\mathrm{m}$ の銅電極が融着されており、このシートに $140\mu\mathrm{m}$ ピッチで直径 $70\mu\mathrm{m}$ の穴が空いた構造をしている。NEWAGE- $0.3\mathrm{b}$ では図 3.4 に示す通り μ -PIC と GEM を $5\,\mathrm{m}$ の間隔で配置している。ドリフト電場は PEEK 板に $1\,\mathrm{cm}$ 間隔で配置されたワイヤーを抵抗チェーンでつなげたドリフトケージによって形成される。真

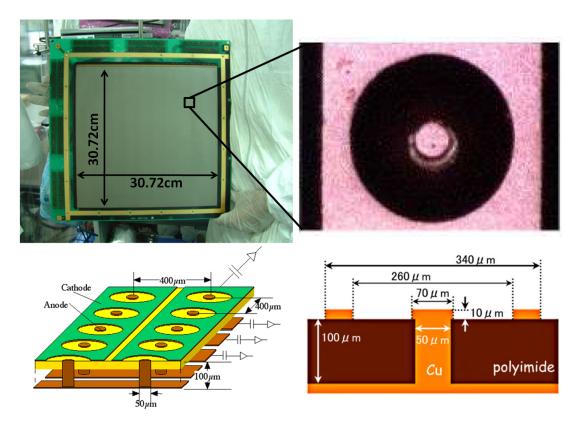


図 3.2 左上図は μ -PIC の写真、右上図は μ -PIC の 1 ピクセル拡大写真、左下図は μ -PIC 模式図、右下図は μ -PIC の構造の模式図。 [14]

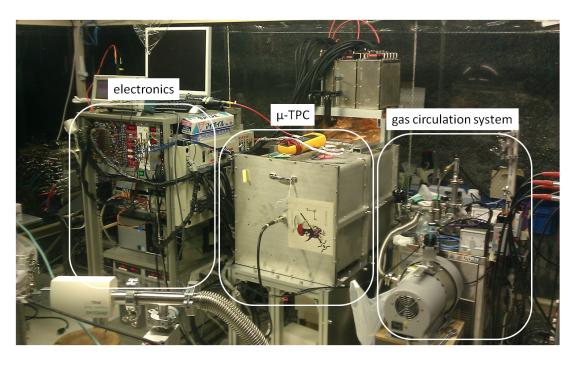


図 3.3 NEWAGE-0.3b' 装置の外観 [14]

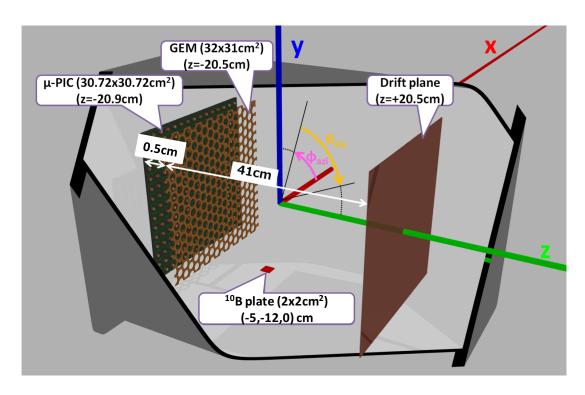


図 3.4 NEWAGE-0.3b' 装置の概念図 [14]

空容器内には暗黒物質の標的となるガスが満たされており、NEWAGE では電子拡散が小さく SD 反応における散乱断面積が比較的大きい F を有することから CF_4 ガスを 70Torr で用いている。

3.4.2 データ取得システム

 μ -PIC で読み出された信号は図 3.5 に示すデータ取得 (Data AcQuisition:DAQ) システムで処理される。 μ -PIC のアノード、カソードそれぞれ 765 本のストリップからの信号が読み出し基板によって真空容器外に引き出される。読み出し基板には 680pF のカップリングコンデンサと保護抵抗が 実装されており、その後 ASD(Amplifier-Shaper-Discriminator) で処理される。ASD は ATLAS の Thin Gap Chamber(TGC) 用に KEK で開発されたものを使用しており、1 枚の ASD ボードには 16 個のチップが実装されている [28]。ASD チップはプリアンプ (0.8V/pC)、シェイパー、ディスクリミネーターで構成されている [29]。プリアンプの電荷積分時間は 16ns、シェイパーの電荷積分時間は $10ns\sim100ns$ のものが使用されている。ASD での処

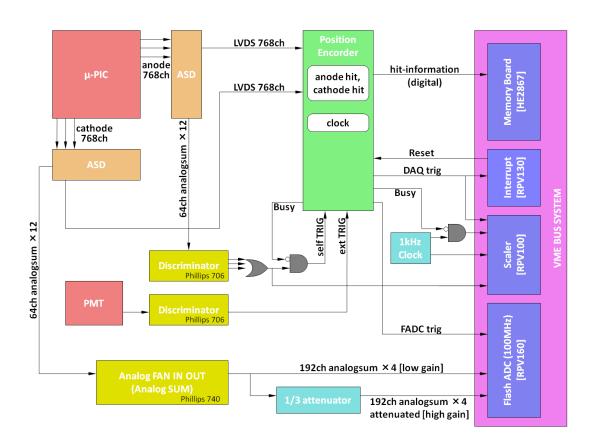
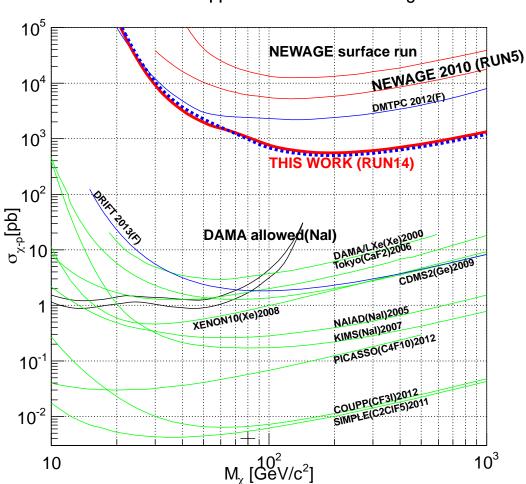


図 3.5 DAQ システムの概念図 [29]

理後は複数のストリップ信号を足し合わせた波形を残す「電荷情報(図 3.5 中 analogsum)」と情報を二値化して残す「飛跡情報(図 3.5 中 LVDS)」が記録される。「電荷情報」はカソード側 ASD のアナログ出力 192 本の波形を足し合わせた合計 4 チャンネルの波形をそれぞれ 100MHz の Flash ADC(FADC)を用いて記録する。FADC 波形は縦軸 ADC 値、横軸 clock[10ns] で表されるため、波形の面積が電荷量となる。「飛跡情報」の取得するパラメータは位置と全ヒットストリップの ToT(Time Over Threshold) である。ToT はその波形が閾値を超えている継続時間のことで、閾値を超えた部分の信号の立ち上がりと立下りのクロックが記録される。エネルギー損失が大きいと ToT も大きくなる。

3.4.3 NEWAGE における暗黒物質探索

NEWAGE-0.3b'は 2013 年から観測を行っている。そのうちの 0.327kg・days のデータから得られた観測結果を図 3.6 に示す。赤線が方向に感度を持つ手法を用いた結果、青色の点線は従来型のエネルギースペクトルを用いた観測結果である。細い赤線は先行機 NEWAGE-0.3a を用いて行った地上での測定結果および神岡地下での測定結果である。2013 年の観測で WIMP-陽子の SD 反応における制限曲線を更新し、到来方向に感度を持つ探索手法では世界最高感度を得た [30](図 3.6 中 THIS WORK(RUN14))。しかし、現在の検出感度では暗黒物質の存在が示唆されている領域 (DAMA 領域:図 3.6 中 DAMA allowed) や、従来型の検出器の感度には届いておらず、更なる感度向上が求められている。



SD 90% C.L. upper limits and allowed region

図 3.6 NEWAGE における暗黒物質探索結果。横軸は WIMP 質量、縦軸は WIMP と陽子の SD 反応における散乱断面積。「THIS WORK(RUN14)」が 2013 年の観測による制限曲線 [30]。

3.4.4 バックグラウンド

現在の NEWAGE 検出器の感度を制限しているのはバックグラウンド事象であり、それらの理解・低減が必須である。図 3.7 に NEWAGE 検出器とバックグラウンドの候補を模式的に示す。A は環境放射線事象、B はガス中のラドンから発生した α 線事象、C は μ -PIC に含まれる放射性不純物である、ウランやトリウム (U/Th) 系列崩壊由来の α 線事象を表す。 μ -PIC に含まれる U/Th の含有量の HPGe 検出器での測定などの詳細な研究の結果、

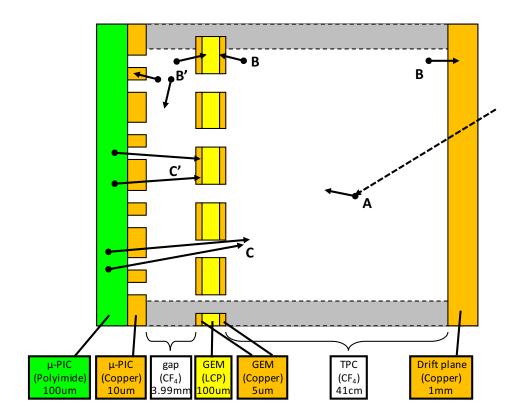


図 3.7 NEWAGE-0.3b' で考えられるバックグラウンド事象。A は環境放射線事象、B はガス中のラドンから発生した α 線事象、C は μ -PIC に含まれる U/Th 系列の崩壊由来の α 線事象を表す。また、B'、C' は GEM と μ -PIC の間で起きた「gap 事象」、A、B、C は通常の TPC 事象を表している [13]。

NEWAGE における主なバックグラウンドが μ -PIC に含まれる U/Th 放射性物質崩壊由来の α 線であると理解された [13]。これらの結果、NEWAGE の感度向上のためには、 μ -PIC から放出される α 線事象を低減することが必要であるということが判明、重要な課題となっている。

第 4 章 $NI\mu$ TPC 用 ASIC の開発と性能評価

4.1 陰イオンガス 3 次元飛跡検出器 (Negative Ion micro Time Projection Chamber: NIµTPC)

第 3.4.4章で議論した通り、NEWAGE における主なバックグラウンドは μ -PIC に含まれる 238 U/ 232 Th 系列崩壊由来の α 線である。したがって、感 度向上のために μ -PIC 由来の α 線の除去が求められる。これには、 μ -PIC に含まれる不純物を低減する方法と、有効体積カットを行う方法の 2 種類のアプローチがある。これらの 2 つのアプローチは、それぞれ独立に感度向上に寄与するため、NEWAGE としては双方を同時に進めている。前者に関しては 238 U/ 232 Th の含有量の少ない材料を用いた「低 $\alpha\mu$ -PIC」を製作 [13][31]、2017 年 11 月に NEWAGE-0.3b' に導入して暗黒物質探索実験を行っている。現在 NEWAGE で開発中の、陰イオンガスを μ TPC(詳細は 3.1) に応用した検出器である Negative Ion micro Time Projection Chamber(NI μ TPC) では、後者のアプローチから μ -PIC 由来の α 線を特定・除去することを目指している。NI μ TPC は、 μ -PIC 由来の α 線のみでなく、ドリフト面からの α 線の特定・除去にも有用であることが示されており [25]、低 $\alpha\mu$ -PIC の開発と同時に進めることは重要である。

4.1.1 陰イオン TPC(Negative Ion Time Projection Chamber:NITPC)

陰イオンガスを使用した TPC(NITPC) では、拡散効果を抑制できることが 2000 年に C.J.Martoff によって報告されている [32]。NITPC では、反跳電子によって電離された一次電子は電気陰性度の高い分子 (陰イオンガス)により捕獲され、陰イオンとなる。NITPC でドリフトされるのは、電子ではなく質量がはるかに大きい陰イオンであるため、ドリフト中の散乱による拡散が小さくなる。このため、同じ距離のドリフトに対して位置分解能および角度分解能の向上が期待できる。観点を変えると、位置分解能・角度分解能を保ったまま長くドリフトさせることが可能になり、暗黒物質探索検出器

として重要である大容積化を可能とする。

さらに、近年の NITPC を用いた観測では以下に述べる「マイノリティ チャージ検出」という手法による有効体積カットが可能になった。通常 NITPC で生成される陰イオンは 1 種類であるが、ガスによっては複数の陰 イオンが生成されることがある。これら複数の陰イオンの中には、質量の違 いのために速度が違うイオン種が存在することがある。こうしたイオンの ドリフト速度の違いは、検出面への到達時間の差として現れるため、検出 時間差を測定することでドリフト距離を知ることができる。一般に、主と して生成される陰イオン種に対して、副次的に生成されるこうしたイオン 種は、電荷量が少なく、マイノリティチャージと呼ばれる。N.S.Phan らは $20 \, \mathrm{Torr} \,$ の $\mathrm{SF}_6 \,$ ガスの中でマイノリティチャージが生成されることを報告し た [33]。図 4.1 に観測された SF_6 のマイノリティチャージを示す。 $2000 \,\mu s$ と $2200 \,\mu s$ の間に見られる小さいピークがマイノリティチャージ、 $2200 \,\mu s$ と $2400 \,\mu s$ の間にみられる大きいピークがメインチャージである。マイノリ ティチャージの大きさはガスの種類、圧力、純度、ドリフト電場などに依存 する。N.S.Phan らの測定はこうした様々なパラメータを最適化した状態で の測定である。こうした状況下において、SF₆ ガス中で生成されるマイノリ ティチャージの信号の大きさはメインチャージの3%程度であることが報告 されている。

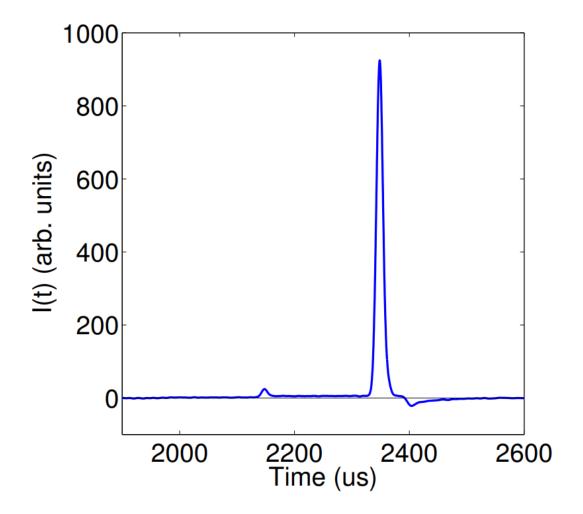


図 $4.1~\mathrm{SF_6}$ ガスを用いたマイノリティチャージの観測。ガス気圧は $20\mathrm{Torr}$ 。ドリフト電場: $1029\mathrm{V/cm}$ 、ドリフト距離: $58\mathrm{cm}[33]$

マイノリティチャージとメインピークの時間差から式 4.1 を用いて Z 方向の絶対位置を計算することができる。

$$z = (t_a - t_b) \frac{v_a v_b}{v_b - v_a} \tag{4.1}$$

ここでは 2 種類の陰イオン a、b についてそれぞれの検出時刻を t_a 、 t_b 、ドリフト速度を v_a 、 v_b としている。この手法を用いることでドリフト距離を求め、有効体積カットに用いることができる。有効体積カットによって、バックグラウンドの特定・除去能力が向上する。

ここまでに述べた NITPC の利点をまとめる。

- 陰イオンがドリフトするため拡散が小さく、検出器容積を大きくする ことができる。
- マイノリティチャージ観測により有効体積カットができる。

これらの利点から NITPC は暗黒物質探索実験にとって魅力的であり、研究が進められている。

4.1.2 NEWGAE における NIμTPC 開発

前節で述べたように NITPC は非常に魅力的な検出器であるが、実用化 している DRIFT 実験では多線式比例計数管を用いており、十分な飛跡検 出力を有した測定を行えていない。こうした状況の下、我々は NITPC に MPGD を導入した NI_μTPC を提案、開発を進めている [34]。MPGD の位 置分解能は 100 μm 程度であるので、原理的には 100 μm 程度の位置分解能 での飛跡検出が可能になる。マイノリティチャージの観測によって μ -PIC 由来の α 線を特定・除去することにより検出感度向上も期待できる。バック グラウンド低減による高感度向上及び検出器の大容量化のために NEWAGE では NIμTPC の開発を進めている。。使用ガスはマイノリティチャージ観測 実績がある SF₆ ガスを選択している。これは不燃性、無毒、無揮発である SF₆ ガスの特性が安全性に関して要請の厳しい地下実験での使用に適してい ることと、暗黒物質との散乱断面積が大きい ¹⁹F 原子核が多く含まれている ことなどが挙げられる。さらに N.S.Phan らによって報告された SF_6 のマ イノリティチャージ観測は 20Torr で行われており、低圧でも十分なガスゲ インを達成していることが実証されているため、飛跡検出向上も期待できる [33]。NEWAGE では SF₆ ガスを用いた μ -PIC+GEM システムで 20Torr で 1800 程度のガスゲイン、3 次元飛跡検出にも成功し、 $130\,\mu\mathrm{m}$ という 2 次元位置分解能を実証するなど NI_µTPC の開発が精力的に進められている $[34]_{\circ}$

表 4.1 LTARS2014 の性能

| 等価雑音電荷 (Equivalent Noise Charge:ENC) | 6000(1fC)@300pF |
|--------------------------------------|-----------------------|
| ダイナミックレンジ | -60fC∼70fC |
| ゲイン | $11.4 \mathrm{mV/fC}$ |
| 時定数 | $1 \mu \mathrm{s}$ |

4.2 LTARS2014

NI μ TPC 開発の課題の 1 つに、読み出し回路の開発がある。それは、陰イオンのドリフト速度(数 10^{-2} cm/ μ s)が電子のドリフト速度(数 cm/ μ s)に比べて 2 桁遅いことから、電子ドリフトを想定し加速器実験での高レート耐性も考慮された従来の読み出し回路では電荷収集時間が短すぎて十分な信号電圧を得ることができないためである [28]。また、MPGD を検出器として用いているため、多チャンネルに対応した(30 cm 角の MPGD を $400\,\mu$ m ピッチのストリップ読み出しをすると $1500\,$ チャンネルとなる)小面積で多チャンネルを処理可能な ASIC(Application Specified Integrated Circuit) と呼ばれる IC チップを使用するのが実用的である。現在 NEWAGE で開発が行われている NI μ TPC は、KEK のエレクトロニクスシステムグループによって開発された液体アルゴン TPC(LArTPC) 用のアナログ・デジタルボードを読み出しに使用している。アナログボードには ASIC("LTARS2014") が搭載されている。LTARS2014 の性能を表 4.1 に示す。デジタルボードは、ASIC の出力波形をデジタル化し、ネットワークを経由して計算機から取得可能にする。

従来の読み出し回路の時定数は 16ns であるのに対し、LTARS2014 は時定数が 1μ s と長い。しかし、4.3 節で述べるように SF_6 ガスを用いた検出器の読み出し回路としては、 1μ s でも十分ではない。また、マイノリティチャージはメインチャージの約 3% 程度で、これを電気ノイズ ENC に対して十分大きい信号対雑音比 (S/N) で測定する必要がある。表 4.1 に示す

LTARS2014では、ENC とダイナミックレンジの比が 60 倍で、決まった電荷量の検出器信号に対しても十分とは言えない。実際には検出器からの信号の電荷量に対してもある程度のダイナミックレンジが必要とされるため、ダイナミックレンジの拡大は重要な開発要素となる。また、LTARS2014では ENC に関して、検出器容量依存性がシミュレーション値に比べて大きいという性能評価がされており、300pF の検出器容量で使用する NEWAGE としては、ENC の低減も課題である。このことから、LTARS2014 を基にして、NI μ TPC に対応した読み出し回路の開発を進めることとした。新たに開発する読み出し回路で要請される性能のうち、LTARS2014 に対する主な改良点は以下の 2 つである。

- 陰イオンのドリフト速度に対応した時定数の遅い回路
- マイノリティチャージとメインチャージの同時検出のためのダイナ ミックレンジ

これらの条件を満たす ASIC("LTARS2016_K01") を KEK と共同開発した。

4.3 LTARS2016_K01

NI μ TPC 用の読み出し回路として LTARS2016_K01 という ASIC を製作した。動作実績のある LTARS2014 を改良するという方針のもと、液体アルゴン開発グループと共同で開発を進めた。SF $_6$ ガス 20Torr 中で μ -PIC+GEM システムを用いて得られたガスゲインを基にして、見積もった要請値を表 4.2 に示す。 μ -PIC のストリップで検出される電荷量は、ストリップに落とされたエネルギー E_d 、W 値 W、電荷素量 e、ガスゲイン G を用いて式 4.2 で表される。

$$Q = \frac{E_d}{W} \cdot e \cdot G \tag{4.2}$$

物質中でのイオンの挙動を計算するシミュレーションソフト SRIM によって得られた、SF₆ ガス 20Torr 中で 200 keV の 19 F 原子核が μ -PIC の 1

ストリップに落とす最小エネルギーは 8 keV 程度である。 SF_6 の W 値は $34.0\,\mathrm{eV}[35]$ で、ガスゲインを 1000 とすると μ -PIC の 1 ストリップで検出 される最小電荷量が $80\,\mathrm{fC}$ と求まる。マイノリティチャージはメインチャージの約 3% なので検出すべき最小信号は $2.4\,\mathrm{fC}$ となる。このように、 SF_6 ガスではマイノリティチャージがメインチャージに比べ非常に小さくなるため、どちらも検出しようとすると非常に広いダイナミックレンジが必要となる。これら 2 種類の信号を 1 つの同じ増幅率で読み出すことは現実的でないため、マイノリティピーク用には High Gain(以下 HG と表記)、メインピーク用には Low Gain(以下 LG と表記) の回路をそれぞれ用意することを想定して要請値をまとめている。ENC に関しては最小入力電荷を S/N=10 で読み出すことを要請している。

時定数 (本論文では信号の立ち上がりからピークまでの時間を「時定数」と表記する。) の要請値決定のために電荷収集効率の時定数依存性を測定した。図 4.2 に示したように、CSA 後段に設置された微分回路のコンデンサを変えることにより時定数 τ を変化させた。時定数が変わることにより電荷収集時間も変わる。ドリフト空間で生成される陰イオンの電荷を十分収集できる時定数 τ を求めるために 55 Fe を用いて 20Torr の SF_6 を用いた μ -PIC からの信号の大きさの τ 依存性を測定した。CSA には Cremat CR-110 を使用し、 $\tau=9.4\,\mu\mathrm{s}$ 、 $7\,\mu\mathrm{s}$ 、 $4.7\,\mu\mathrm{s}$ 、 $2.4\,\mu\mathrm{s}$ 、 $1\,\mu\mathrm{s}$ について測定を行った。結果の図 4.3 からは電荷を十分収集できた時の波高値が $50\,\mathrm{mV}$ であることが分かる。そこからの損失が 5% 以内までは許容できるとして時定数を $4\,\mu\mathrm{s}$ とした。

今回の LTARS2016_K01 の開発は LArTPC との共同開発ということもあるため、時定数に関しては LArTPC からの要請である $1\,\mu s$ と NI μ TPC からの要請である $4\,\mu s$ を選択できるようにしている。簡単のために、本論文では時定数 $1\,\mu s$ を「fast」、 $4\,\mu s$ を「slow」と表現する。検出器容量は $30\times30\,\mathrm{cm}^2$ の μ -PIC を想定して $300\,\mathrm{pF}$ とした。

こうして作られた要請値が表 4.2 である。こうした要請値のもと、LTARS2016_K01 を設計した。広ダイナミックレンジの要請が、設計にとって大きな課題となると考えられたため、LTARS2016_K01 は設計思想の違う

表 4.2 LTARS2016_K01 の要請値一覧

| | High Gain | Low Gain | |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| | (マイノリティピーク) | (メインピーク) | |
| 最小信号 | 3fC | 100fC | |
| ENC | <2000(0.3fC) | $<6.4 \times 10^4 (10 \text{fC})$ | |
| ダイナミックレンジ | -80fC~80fC | -1600fC~1600fC | |
| ゲイン | $10 \mathrm{mV/fC}$ | $0.5 \mathrm{mV/fC}$ | |
| 時定数 | 4μs:NIμTPC 用 / 1μs:LArTPC 用 | | |
| 検出器容量 | 300pF | | |

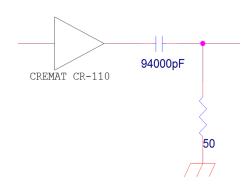


図 4.2 時定数決定試験のための微分同路。

「MT 回路」と「TK 回路」の 2 種類の回路を搭載することとした。MT 回路は LTARS2014 の回路のゲインおよび時定数を表 4.2 に従って改良するという設計方針とした。MT 回路のブロックダイヤグラムを図 4.4 に示す。LTARS2014 で実績のあるアンプを初段に構え、後段に HG 用と LG 用の 2 種類のアンプを用意した。1 つの入力に対して HG、LG の 2 つの出力をもつ。また、時定数は切り替え可能になっている。MT 回路の設計、性能評価については 4.4 節で述べる。TK 回路のブロックダイヤグラムを図 4.5 に示す。ゲインがダイナミックに切り替わる仕様が特徴である。また、時定数も切り替え可能になっている。TK 回路の設計、性能評価については 4.5 節で述べる。

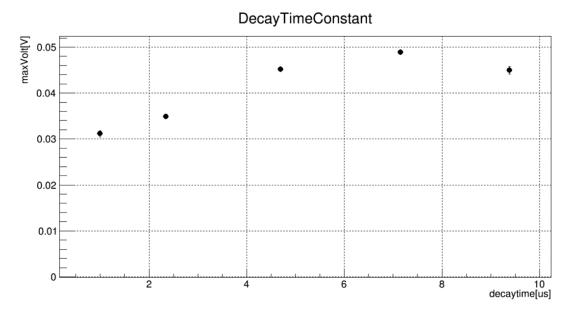


図 4.3 信号の大きさの時定数依存性。縦軸は波高の平均値。横軸は時定数。線源は 55 Fe を使用した。

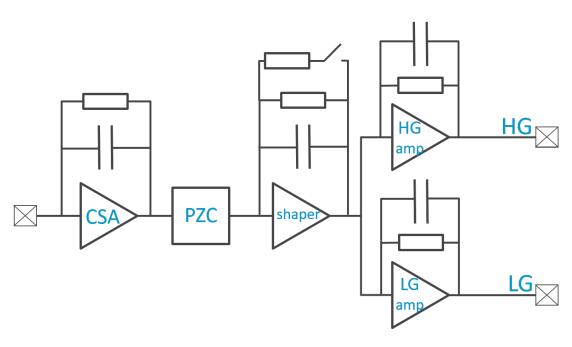


図 4.4 MT 回路の概念図

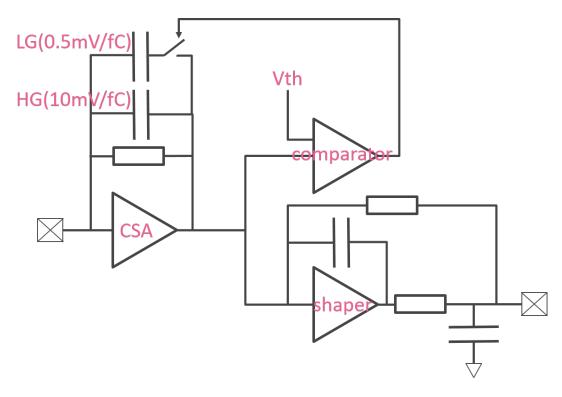


図 4.5 TK 回路の概念図

4.4 LTARS2016_K01 MT 回路

4.4.1 MT 回路の設計

MT 回路の 1 チャンネルの回路図を図 4.6 に示す。LTARS2014 で実績のあるアンプ (図 4.6 中 PRC2BGN) を初段に構え、ポール・ゼロ消去 (PZC) 回路と 2 段目の整形回路 (図 4.6 中 OPNI2S1) の後段に、HG 用のアンプ (図 4.6 中 AS_HG_TPCFE_1_6pCv2) と LG 用のアンプ (図 4.6 中 AS_LG_TPCFE_1_6pCv2) が接続され、1 つの入力に対して 2 つの波形を同時に出力できるようにしている。また、時定数は PZC 回路と二段目の波形整形回路の抵抗をスイッチで切り替えることによって slow と fast を選択できるようにしている。こうして設計された MT 回路に対して、回路シミュレーションを行った。設計段階のシミュレーションで slow 設定で-50 fC 入力したときの HG 出力波形を図 4.7 に示す。この時の出力波形の波高値は-425 mV/fC、時定数は 6.59 μ s であった。ゲインは要請値 $10 \, \text{mV/fC}$ よ

りも小さいが 20% の範囲内に収まっているので要請値を満たしているとする。時定数に関しても要請値 $4\mu s$ に比べて時定数が長くなるのは実用上の問題ではないので要請値以上が出ていれば要請値達成とする。また、図 4.8 に $8 \log 2$ に $8 \log 2$ 倍である。設計段階でこれ以上のノイズ低減は現実的でなく、詳細は節 $8 \log 2$ に $8 \log 2$

実際に製作した LTARS2016_K01 の写真が図 4.9 である。テクノロジーのまとめは表 4.10 に示す通りである。チップサイズは $5\,\mathrm{mm}\times 5\,\mathrm{mm}$ で、「MT 回路」及び「TK 回路」の 2 種類の別々な回路アーキテクチャを用いて増幅回路を構成している。設計は cadence 社の IC6.1.6 を用いて行い、schematic シミュレーションからチップレイアウトに至るまで我々自身の手で行った。図 4.9 横方向中央付近に回路が配置されており、上部 (図 4.9 中浅葱色枠内) に位置するのが MT 回路である。(図 4.9 中ピンク色枠内) 下部に位置する TK 回路については 4.5 節で述べる。それぞれ $8\mathrm{ch}$ ずつ搭載されている。

4.4.2 TOSHIZOU を用いた MT 回路の性能評価

LTARS2016_K01 を性能評価するためのプリント基板 (Printed Circuit Board:PCB) を設計した。設計は cadence 社の OrCAD を用いて行い、レイアウトは外注した。性能評価のために製作した PCB は"testboad"、"TOSHIZOU"、"TOSHIZOUv2" の全 3 種類で、段階的に基板の修正を行った。本論文に関係の深い TOSHIZOU、および TOSHIZOUv2 の詳細な回路図とレイアウト図は付録 A に記載している。

MT 回路の性能評価には TOSHIZOU を使用した。図 4.11 に実際の写真、図 4.12、図 4.13、図 4.14、図 4.15 に回路図の一部を載せている。 TOSHIZOU の中心 (「誠」の文字がレイアウトされている箇所) より少し左側に今回製作された ASIC(LTARS2016_K01) が実装されている (図 4.11 及び図 4.14 中緑枠部分)。 TOSHIZOU では、LTARS2016_K01 の実装方法として、ASIC と PCB を直接ワイヤーボンディングする方法を選択した。一般に用いられ

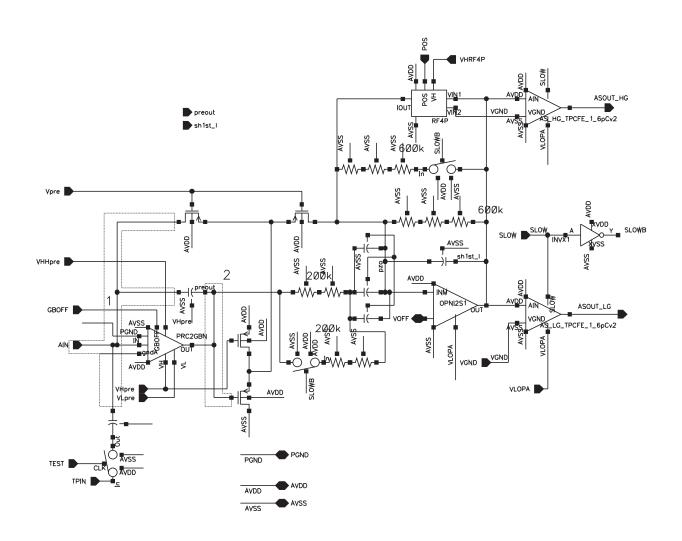


図 4.6 MT 回路 回路図

ている、パッケージした ASIC を PCB 基板にはんだ実装する方法と比較して、PCB と ASIC 間の配線経路が短くなるため、ノイズの低減を期待できる設計となっている。KEK にあるマニュアルボンダーを用いた我々自身による実装を予定していたため、基板の空きスペースに練習用パッドを配置した (図 4.11 中黄枠部分)。実際は ASIC 側のボンディングパッドサイズ

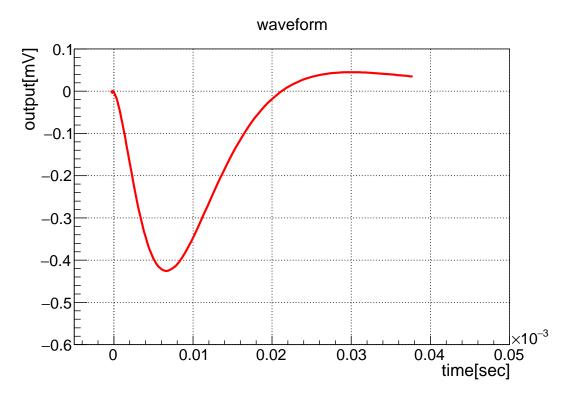


図 4.7 設計段階のシミュレーションによる波形。 HG 出力の出力波形 (slow,Cdet=300 pF,input=50 fC)

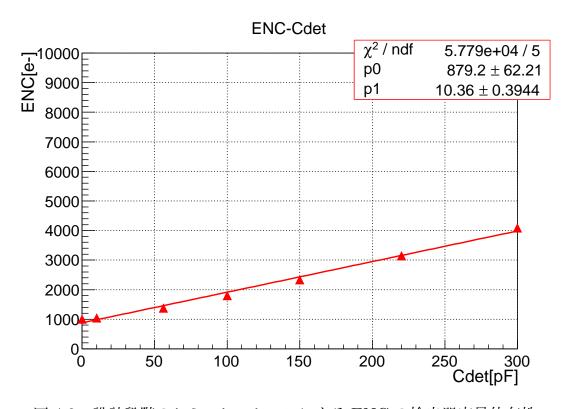


図 4.8 設計段階のシミュレーションによる ENC の検出器容量依存性。

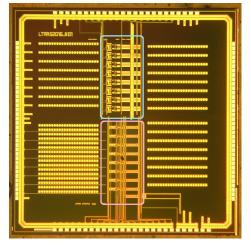


図 4.9 LTARS2016_K01 のチップ写真

図 4.10 チップ製作に用いた CMOS テクノロジーまとめ

| プロセス | silterra $0.18\mu\mathrm{m}$ CMOS | |
|------|-----------------------------------|--|
| 電源電圧 | ±0.9V | |
| メタル層 | 6層 | |
| その他 | deep N-well | |
| | High Value Resistor | |

 $86 \, \mu \text{m} \times 60 \, \mu \text{m}$ に対してボンディング後のワイヤーとパッドとの接続面積が 50μm とほぼ同程度であることと、パッド直近のメタル配線とのショートを 避けるためにパッド内にボンディングのワイヤーを収めきる必要があり、マ ニュアルボンダーでの実装は断念し専門の業者に依頼した。ASIC への信号 入力部分 (図 4.11 中オレンジ枠部分) では図 4.12 中 IOMT0 が信号入力線 を示しており、C66 が 1pF のカップリングコンデンサで 51Ω の R37 が保護 抵抗になっている。また、性能評価のために検出器容量を模すコンデンサと して C63 を実装できるようにしている。さらに放電が起こりやすいガス検 出器を想定して保護ダイオードも実装している (図 4.13)。図 4.12 中 IMT0 と図 4.13 中 IMT0 が一致し、MT0 から ASIC に信号が入力される。MT 回 路に関する入力チャンネル数は $8 \mathrm{ch}$ 、出力チャンネル数は HG 出力 $8 \mathrm{ch} + \mathrm{LG}$ 出力 8ch である (図 4.11 中紫枠部分)。ASIC の各バイアスパラメータを調 整できるよう、可変抵抗を実装している。MT 回路制御のための可変抵抗は ASIC より上側 (図 4.11 及び図 4.14 中青枠部分) に配置し、配線が短くなる よう設計した。抵抗値は設計時のシミュレーション最適値付近を供給できる ように実装している。テストパルスやクロックの入力部分は測定セットアッ プを考慮して、LEMO 端子 (図 4.11 及び図 4.14 中赤枠部分) を選択した。 SOY(SOY は (株)Bee Beans Technologies によって生産されたデジタル回 路で、SiTPC を利用したネットワーク通信を簡単に利用できる様に設計さ

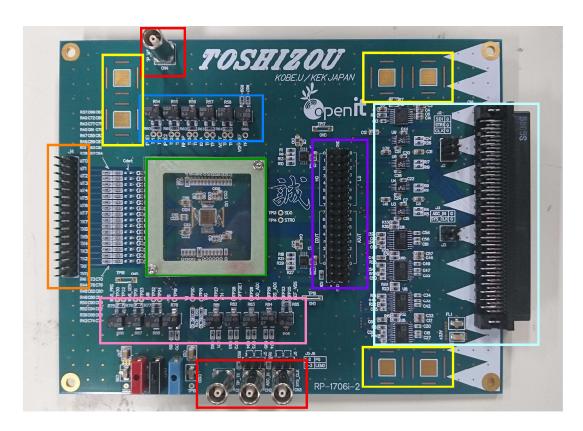


図 4.11 MT 回路の性能評価に用いた TOSHIZOU。基板中央 (「誠」の文字がレイアウトされている箇所) 左寄りの緑枠の部分に LTARS2016_K01 が搭載されている。

れたもの。) と呼ばれるデジタルボードから ASIC 制御を行うために、デジタル回路との接続部分 (図 4.11 中水色枠部分) では、LTARS2016_K01 の基準電圧 (-0.9V/+0.9V) と SOY の基準電圧 (0/+3.3V) を変換するレベルシフターを配置している (図 4.15)。

LTARS2016_K01 には外部から電圧や電流を供給して制御できるパラメータがいくつかある。MT 回路における制御パラメータ一覧を表 4.3、表 4.4 に示す。表 4.3 は可変抵抗や外部設定電圧によって調整できるパラメータを示す。表中の「設計値」は設計段階でのシミュレーションにおける最適値である。実測と比較する際はパラメータに実測値を入力してシミュレーションした。表 4.4 はデジタル回路を使用して制御するパラメータの一覧である。

TOSHIZOU を用いた MT 回路の性能評価試験セットアップの写真を図 4.16 に、概略図を図 4.17 に示す。

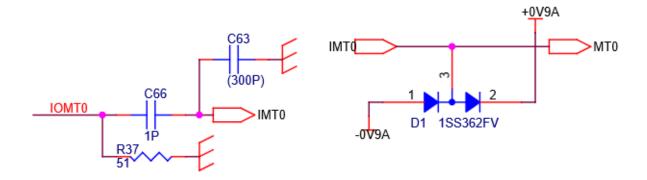


図 4.12 TOSHIZOU 回路図の信号 入力部分。() での表記は未実装。

図 4.13 TOSHIZOU 回路図の信号 入力部分。放電対策として保護ダイ オードを施している。

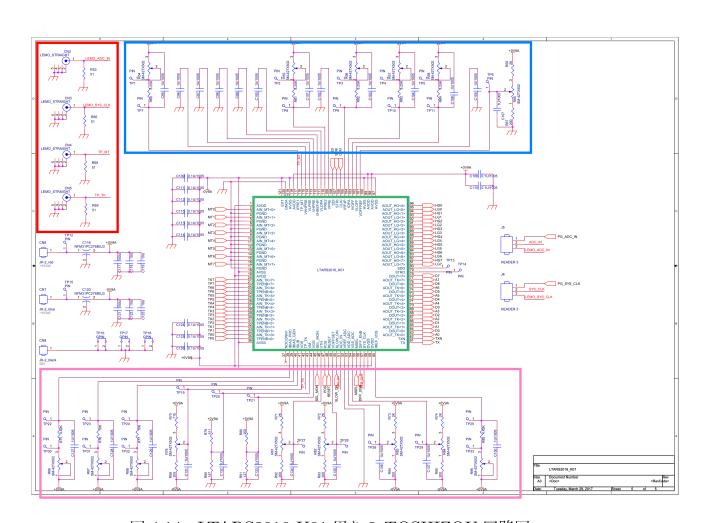


図 4.14 LTARS2016_K01 周りの TOSHIZOU 回路図。

電圧レベル変換(max 3.3V - min 0V -> max +0.9V - min -0.9V)

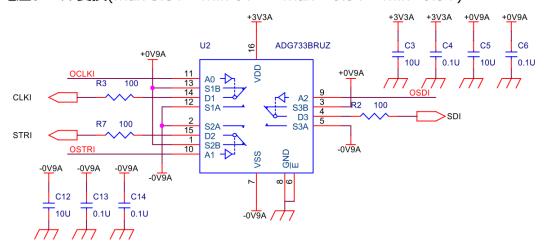


図 4.15 TOSHIZOU 回路図。SOY から TOSHIZOU へ信号を入力する際の電圧レベル変換部分

表 4.3 可変抵抗あるいは外部設定電圧で制御できる MT 回路パラメーター覧。設計値は設計段階でのシミュレーション最適値、実測値は実測のために最適化された値。

| | 設計値 | 実測値 | 説明 |
|-------|---------------------|---------------------|--------|
| IPRE1 | $300 \mu\mathrm{A}$ | $300 \mu\mathrm{A}$ | バイアス電流 |
| IPRE2 | $100\mu\mathrm{A}$ | $100 \mu\mathrm{A}$ | バイアス電流 |
| IRF4P | 100 nA | 994 nA | バイアス電流 |
| IVOFF | $300 \mu\mathrm{A}$ | $300 \mu\mathrm{A}$ | バイアス電流 |

表 4.4 デジタル回路を使用して制御する MT 回路パラメータ一覧

| | +0.9V | -0.9V | 説明 |
|--------|------------------|------------------|----------|
| mtpos | 正 | 負 | 極性 |
| mtslow | $4\mu\mathrm{s}$ | $1\mu\mathrm{s}$ | 時定数 |
| mttest | ON | OFF | テストパルス入力 |

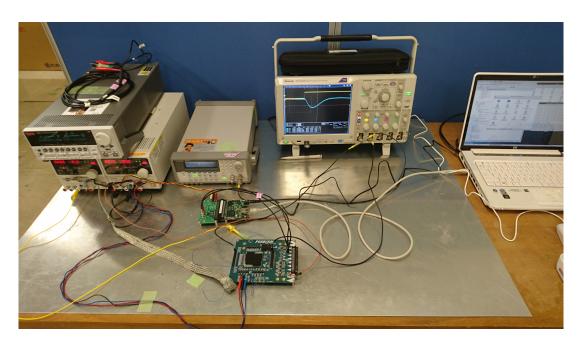


図 4.16 MT 回路試験のセットアップ

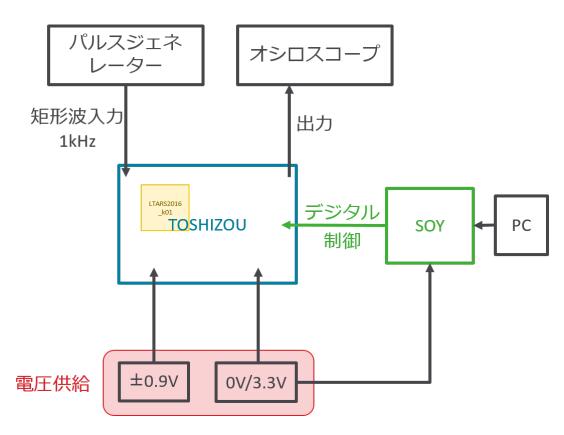


図 4.17 MT 回路試験のセットアップ概略図

表 4.4 に示したパラメータ制御のためにデジタル回路として SOY を使用

した。今回は SOY ボードをパターンジェネレータとして使用し、PC からの制御はこの SOY から TOSHIZOU ヘデータを送信した。パルスジェネレーター (agilent 33250A) から TOSHIZOU の信号入力ピンへ矩形波を入力すると、TOSHIZOU のカップリングコンデンサ 1pF によって電荷となり LTARS2016_K01 に入力される。出力ピンからオシロスコープにつないで出力波形を測定した。

まず、slow 設定 (時定数 $4\mu s$) とし、検出器容量として 300pF を実装、-50fCの信号を入力したときの HG の出力波形を測定した。波形を設計値と比較し た結果が図 4.18 である。実測値は波高値- $512\,\mathrm{mV}$ 、時定数 $5.4\,\mu\mathrm{s}$ であった。 それに対してシミュレーション値は波高値が $-426\,\mathrm{mV}$ 、時定数 $6.7\,\mu\mathrm{s}$ であっ た。実測値の方がシミュレーションよりもゲインが高く時定数が短い結果と なった。いずれも設計値と実測値には 20% 程の差がある。時定数とゲイン の不一致に関しては、トランジスタ性能、容量値、抵抗値の設計と製作品と の違いが挙げられる。トランジスタの性能のばらつきに関してはコーナーパ ラメータシミュレーションを行うことで典型的な性能のトランジスタを含 め5種類の性能について評価することができる。コーナーパラメータシミュ レーションの結果ゲインは $393\,\mathrm{mV}\sim426\,\mathrm{mV}$ 、時定数は $6.7\,\mu\mathrm{s}\sim7.0\,\mu\mathrm{s}$ のば らつきを持つことが判明した。この結果から設計値と実測値の違いはトラン ジスタの性能のばらつきのみでは説明できないことが分かり、容量値及び抵 抗値の製造ばらつきが影響していると推測できる。一般的に CMOS プロセ スでは容量をメタルと絶縁体のサンドイッチ構造で形成するため、メタルの エッチングによって 20% 程度は容易にモデルとずれる可能性がある。帰還 容量と抵抗値をそれぞれ C、R で表すと整形回路の時定数 τ は $\tau = CR$ 、ゲ インは $\propto \frac{1}{1+i\omega CR}$ で表される。容量が設計値よりも小さいと仮定すると、整 形回路の τ が小さくなり、後段のシェイパー出力の時定数もそれに伴って短 くなると同時にゲインは大きくなるため、実測の状況と一致し、これで説明 ができる。つまり波高値及び時定数の 20% 程度のずれは製作精度の範囲内 だと判断できる。検出器側の読み出しとして使用する上でも、時定数が長い ほど十分に電荷を収集できるため問題ない結果だと言える。

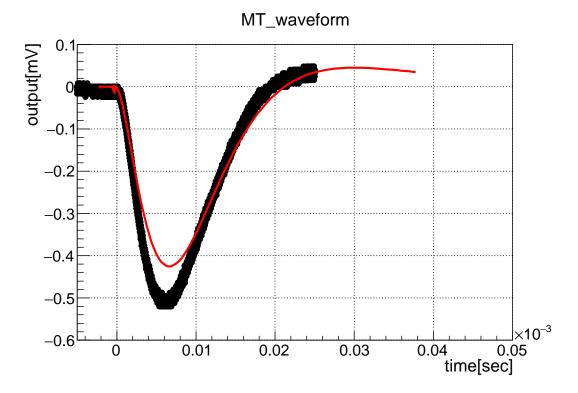


図 4.18 MT 回路 HG 出力の出力波形 $(slow, Cdet=300 \, pF, input=50 \, fC)$,黒点が測定値、赤線はシミュレーション波形。

slow 設定での HG 出力のゲインの検出器容量依存の結果を図 4.19 に示す。黒点が測定値、赤三角がシミュレーション値である。

ゲインの検出器容量依存は少なく、 $300\,\mathrm{pF}$ の検出器容量で要請値のゲイン $10\,\mathrm{mV/fC}$ を達成していることを確認した。検出器容量 $300\,\mathrm{pF}$ における HG、LG、slow、fast 各条件におけるゲインカーブを図 4.20、図 4.21、図 4.22、図 4.23 に示す。各図の下側は線形性の指標として測定値/フィット直線の値 (測定値の線形性が取れている部分で直線フィットしたもの) で計算した ratio を表示している。今回はこれが 10% 以内を線形領域と定義した。 10% という値は検出器側のガスゲインの位置依存性によるエネルギー分解能が $20\pm5\%[14]$ に比べて十分に小さい値として定義した。



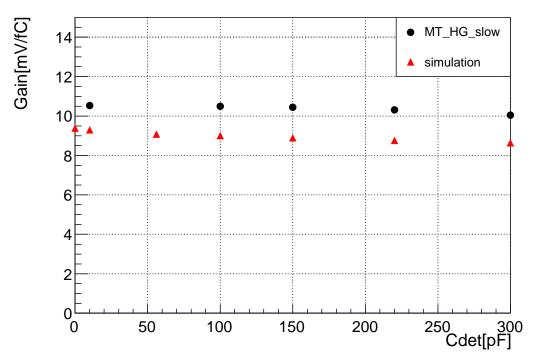


図 4.19 MT 回路 slow 設定での HG 出力のゲインの検出器容量依存性。 黒が測定値、赤がシミュレーション。

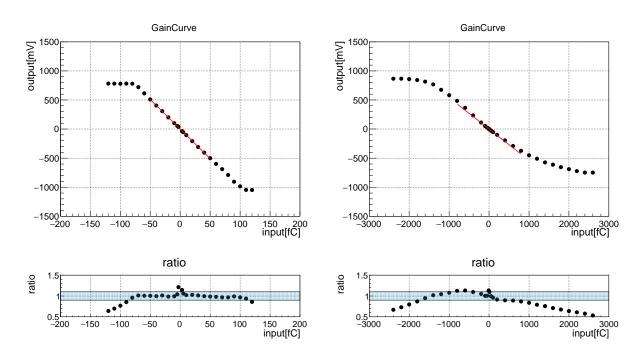
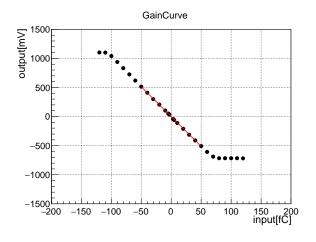
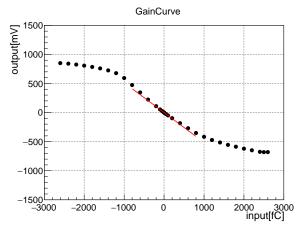
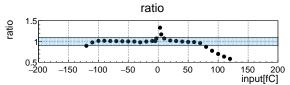


図 4.20 MT 回路 HG/slow のゲインカーブ Cdet=300 pF 得られたゲインは $10.17\pm0.04\,\mathrm{mV/fC}$ (要請値: $10\,\mathrm{mV/fC}$)

図 4.21 MT 回路 LG/slow のゲインカーブ Cdet=300 pF 得られたゲインは $0.54\pm0.02\,\mathrm{mV/fC}$ (要請値: $0.5\,\mathrm{mV/fC}$)







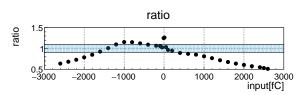
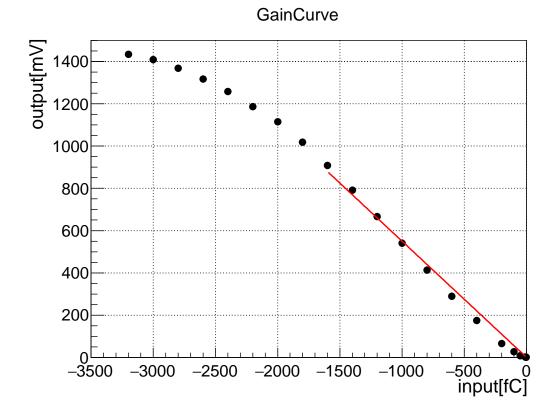


図 4.22 MT 回路 HG/fast のゲインカーブ $Cdet=300\,pF$ 得られたゲインは $10.26\pm0.05\,mV/fC$ (要請値: $10\,mV/fC$)

図 4.23 MT 回路 LG/fast のゲインカーブ Cdet=300 pF 得られたゲインは $0.51\pm0.02\,\mathrm{mV/fC}$ (要請値: $0.5\,\mathrm{mV/fC}$)



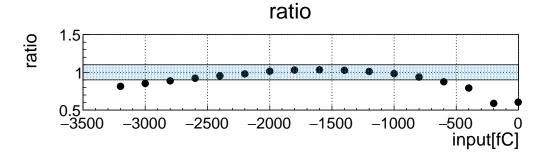


図 4.24 MT 回路 LG/slow のゲインカーブ Cdet=300 pF 片側極性に して得られたゲインは $0.55\pm0.01\,\mathrm{mV/fC}$ (要請値: $0.5\,\mathrm{mV/fC}$)。ダイナミックレンジも確保した。

ゲインの測定結果は HG/slow で $10.17\pm0.04\,mV/fC$ (要請値: $10\,mV/fC$)、LG/slow で $0.54\pm0.02\,mV/fC$ (要 請 値: $0.5\,mV/fC$)、HG/fast で $10.26\pm0.05\,mV/fC$ (要請値: $10\,mV/fC$)、LG/fast で $0.51\pm0.02\,mV/fC$ (要請値: $0.5\,mV/fC$) であり、いずれも要請値が達成できている。また、slow、fast 共に HG では 10% 以内の線形性でダイナミックレンジの要請

値-80fC~80fC を達成できている。一方で LG で 10% 以内の線形性が確認されたのは-1600fC~800fC(要請値:-1600fC~1600fC) であった。それぞれの測定の入力電荷が 0 付近で、ratio が $\pm 10\%$ から大きくずれているのは計算の原理上少しのずれを小さな値で割ったことによって ratio が大きく現れるためであり、実際の残差が大きいのではないため、問題ない。この測定により、HG では要請値 -80fC ~ 80 fC を満たしているが、LG では-1600fC~1600fCの要請値を満たしていないという結果になった。LGのダイナミックレンジに関しては、ガス検出器と接続して使用する際には、特定の使用条件での信号極性は正電荷もしくは負電荷に定まることから、信号のオフセット電圧を調整し、片側極性にすることでダイナミックレンジを確保することを考えた。この結果、図 4.24 に示す通り、2600fC のダイナミックレンジが確保されることを確認した。絶対値で 1600fC のダイナミックレンジが確保されることを確認した。絶対値で 1600fC のダイナミックレンジの達成が確認され、LG に関してもダイナミックレンジを確保できていると判断できる。

ENC の検出器容量依存を図 4.25 に示す。ENC はテストパルスなどの入力のない状況 (ノイズ) での電圧値の分布を描き、その標準偏差をゲインで割ったものを電子数に変換している。

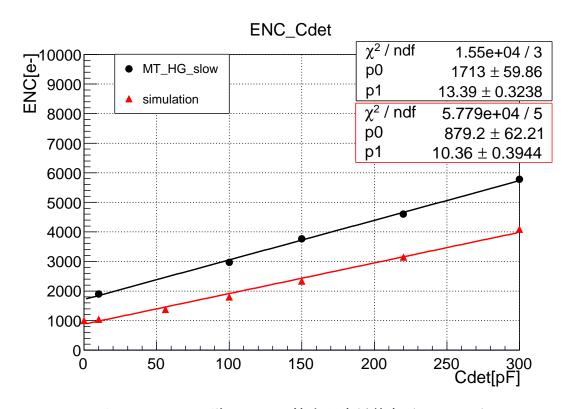


図 4.25 MT 回路 ENC の検出器容量依存 (HG,slow)

前回の LTARS2014 では ENC-Cdet の傾きがシミュレーション値とかけ離れており(設計値 5.9/pF に対して実測値 17/pF)、議論する段階まで到達していなかったが、LTARS2016_K01 の ENC-Cdet の傾き (13.39/pF) は LTARS2014 のときと比較して設計値 (10.36/pF) に近づいた。これはASIC のレイアウトを抜本的に変更し、容量や抵抗の影響を小さくするように配線を短くする改良を行った結果だと考えられ、今回の設計が有効であることが確認された。実測値と設計値の検出器容量 0pF に対する ENC 値の差に関しては TOSHIZOU のレイアウトやチップレイアウトによる配線容量が原因だと考えられる。チップのレイアウトに関しては回路のサイズに比べてチップ面積が大きく、チップ中央に配置された回路までの配線(図 4.9 で左右両辺から中央に伸びている 40 本の直線)が長いことなどが次回の改善点として挙げられる。実際の検出では S/N が 5 倍でもよく、シミュレーション値程度のノイズは実装に関して問題ないことが言える (詳細な議論は 5.1.1 節で述べる)。また、今回ダイナミックレンジを大きく確保するために、前回

と比べて初段/2 段目のゲインを下げる必要があったため、ノイズレベルを十分に下げることができなかった。一般的に信号処理回路では初段のゲインが S/N を決定づけるため、4.5 で後述するように、ゲインをダイナミックに切り替えることができれば初段のゲインを十分に確保できるため、要請値を満たすことも可能である。

4.5 LTARS2016_K01 TK 回路

4.5.1 TK 回路の設計

TK 回路は多チャンネル化を想定し、1 つの入力に対して 1 つの 出力を持つよう、メインチャージとマイノリティチャージの信号に 対して増幅回路のゲインがダイナミックに切り替わるように設計し た。TK 回路のブロックダイヤグラムを図 4.26 に示す。電荷増幅器 (CSA:図 4.26 中 CSA_DynSW_V2_pos) の後段にシェイパー (図 4.26 中 CR_RC_DynSW_CR_RC)、バッファー (図 4.26 中 ABUF_NEG) と続いて 出力につながる。TK 回路はゲインの切り替えをダイナミックに行うのが 特徴である。図 4.26 中上部にある $COMP2_{L}V3$ がゲイン切り替えのための コンパレータである。ゲイン切り替え部分の回路図を図 4.27 に示した。通 常はマイノリティピークを検出できるように HG モードで設定されている が、CSAの出力はバッファを介してコンパレータによって閾値と比較され、 波高値が大きい場合には CSA の帰還容量のスイッチを ON にすることで CSA 出力が LG モードに切り替わる設計である。こうして設計した TK 回 路を slow 設定とし、-50fC の信号を入力したときの HG のシェイパー出力 と CSA 出力のシミュレーション波形を図 4.28 に示す。CSA は十分に速く 立ち上がり、シェーパーの出力は要請値に近い $4.3 \mu s$ となっていることがわ かる。

設計段階でのシミュレーションによる ENC の検出器容量依存性を図 4.29 に示す。検出器容量 $300\,\mathrm{pF}$ における ENC が 6500 程度と要請値を超える値となっている。詳細な議論は 5.1.1 節に後述するが ENC の許容値は検出器

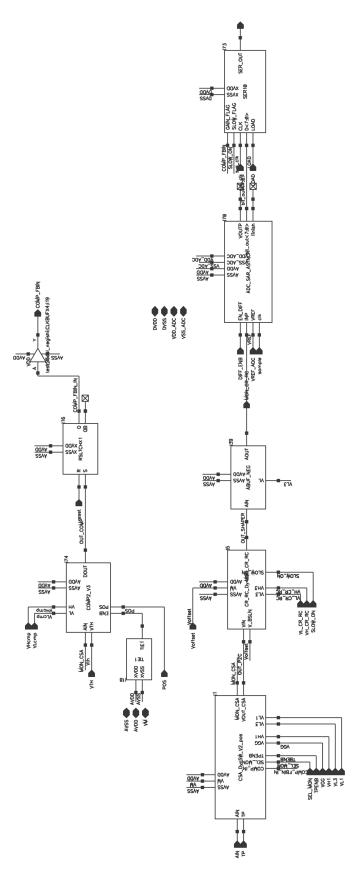


図 4.26 TK 回路 全体図

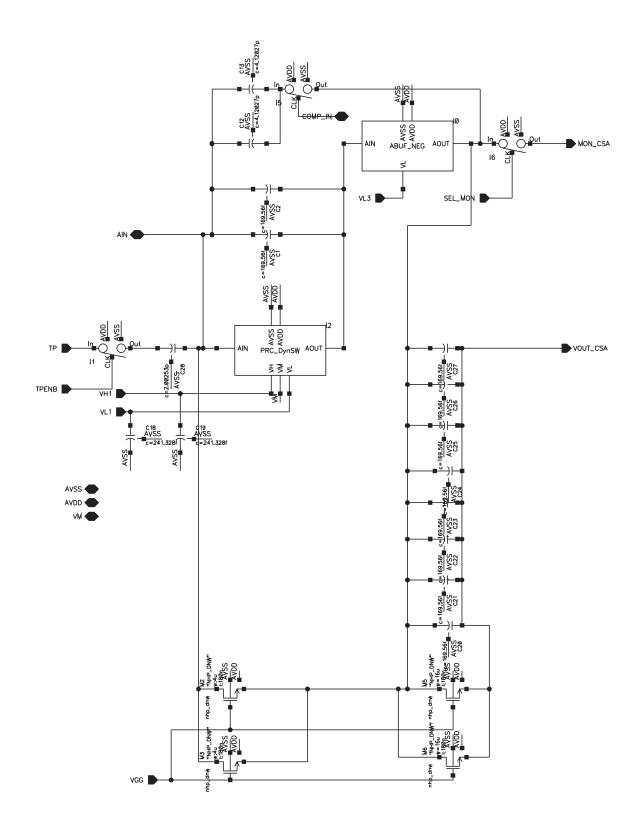


図 4.27 TK 回路 ゲイン切り替え部分の回路図

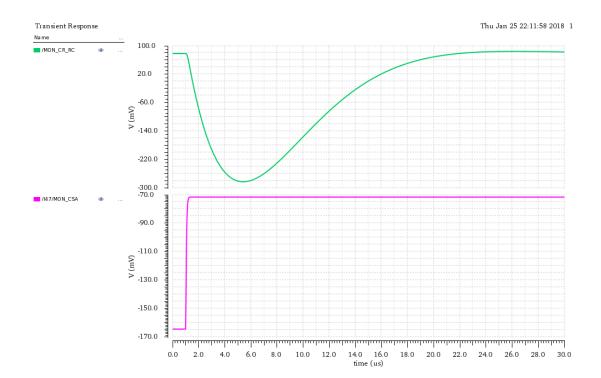


図 4.28 TK 回路に slow 設定で-50 fC の信号を入力したときの HG のシミュレーション波形。上段の緑線がシェイパー出力。下段のピンク線が CSA 出力。

容量 $300 \,\mathrm{pF}$ で $4000 \,\mathrm{t}$ なのでこれはチップのレイアウトなど次回に向けて修正する必要がある。

4.5.2 TOSHIZOUv2 を用いた TK 回路の性能評価

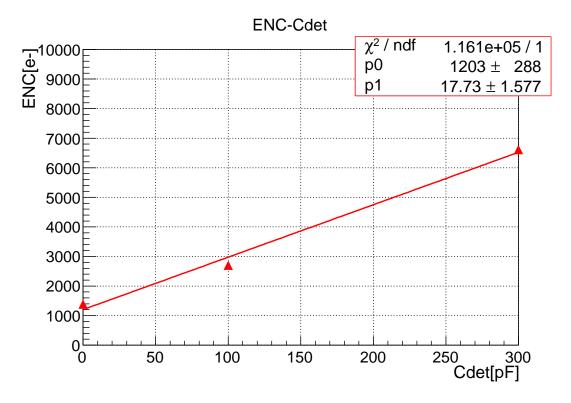


図 4.29 TK 回路の設計段階のシミュレーションによる ENC の検出器容量依存性。

も配置し、入力部分の配線を広くとるレイアウトにした(図 4.30 中オレンジ枠部分)。裏面実装が可能になったのは ASIC をパッケージ化したことによる恩恵である。また、アナログ電源とデジタル電源のグランドを分離することにより、ノイズの影響を少なくするように設計した(図 4.30 中ピンク枠部分)。TOSHIZOUv2 を用いた評価試験ではデジタル信号出力を読み出す可能性も考え、ASIC 制御のために使用するデジタルボードを SOY から GN-1078-3 に変更した。これに伴い、接続コネクタなども変更した(図 4.30 中水色枠部分)。GN-1078-3 は Kalliope(KEK Advanced Linear and Logic-board Integrated Optical detectors for Positron and Electron)で開発されたデジタル回路で今回はこれをパターンジェネレータとして使用した。出力部分は、TK 回路のアナログ出力にオペアンプを実装することで、多チャンネル入力を持つデジタルボードへの接続を可能にした(図 4.30 中紫枠部分)。

TK 回路の制御パラメータの中で、可変抵抗あるいは外部設定電圧で調整

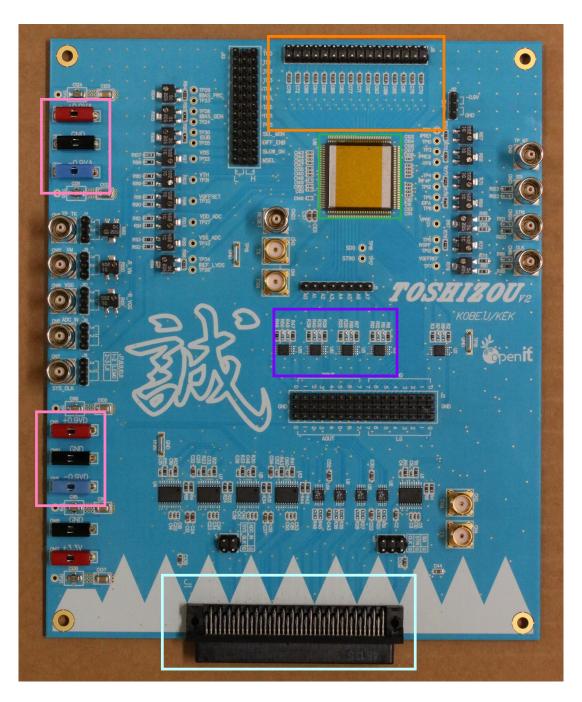


図 4.30 TK 回路の評価に用いた TOSHIZOUv2。基板中央上部の緑枠の部分に、パッケージ化された LTARS2016_K01 が搭載されている。

表 4.5 可変抵抗あるいは外部設定電圧で調整できる TK 回路パラメーター覧。理想値は設計段階でのシミュレーション最適値。測定中の変動があるものは†で表記している。

| | 設計値 | 実測値 | 説明 |
|-----------|--------------------|--------------------|-------------------|
| IBAS_RPC | $200\mu\mathrm{A}$ | $69\mu\mathrm{A}$ | バイアス電流 |
| IBAS_GEN | $65\mu\mathrm{A}$ | $44\mu\mathrm{A}$ | バイアス電流 |
| ISUB | $50\mu\mathrm{A}$ | $40\mu\mathrm{A}$ | バイアス電流 |
| VOS | 0V | 0.001V | LVDS のコモンモード電圧 |
| VTH | 540mV | † | ゲイン切り替えのスレッショルド電圧 |
| VOFFSET | 0.48V | † | ベースラインオフセット電圧 |
| VDD_ADC | 0.9V | 0.898V | ADC に与える電圧 |
| VSS_ADC | -0.9V | -0.907V | ADC に与える電圧 |
| IREF_LVDS | $140\mu\mathrm{A}$ | $140\mu\mathrm{A}$ | LVDS 用アナログ電流 |
| VM | 0.2V | 0.77V⋆ | トランジスタに与える電圧 |
| VGG | -0.55V | 0.35V ⋆ | トランジスタに与える電圧 |

できるものを一覧として表 4.5 に示す。表にはパラメータの設計値、実測値、説明を載せている。設計値というのは設計段階でのシミュレーション最適値であり、実測と比較する際のシミュレーションでは設計値を使用した。VTH、VOFFSET は測定中に随時変更しているため表では†で表記した。*のついた VM、VGG に関しては後ほど説明する。

デジタル回路あるいはジャンパーピンによって制御できる TK 回路のパラメータを表 4.6 に示す。

TOSHIZOUv2 を用いた TK 回路の性能評価測定のセットアップを図 4.31 に示す。TOSHIZOUv2 に LTARS2016_K01 の動作電圧 ± 0.9 V とデジタル 回路との電圧変換用に 0V/+3.3V を供給している。表 4.6 に示したパラメータ制御は全てジャンパーピンで行えるためデジタル回路は使用していない。パルスジェネレーター (agilent 33250A) から TOSHIZOUv2 の信号入力ピ

表 4.6 ジャンパーピンによって制御できる TK 回路のパラメータ一覧。

| | +0.9V | -0.9V | 説明 |
|----------|-------------------|--------------------|-----------|
| TP0 | LEMO から | JPから | テストパルス入力 |
| SEL_MON | ON | OFF | CSA 出力 |
| POS | 正 | 負 | コンパレータの極性 |
| SLOW_ON | $4\mu \mathrm{s}$ | $1 \mu \mathrm{s}$ | 時定数 |
| MSEL | コンパレータ出力 | ADC 出力 | DOUT 出力 |
| DIFF_ENB | 差動 | シングル | ADC |

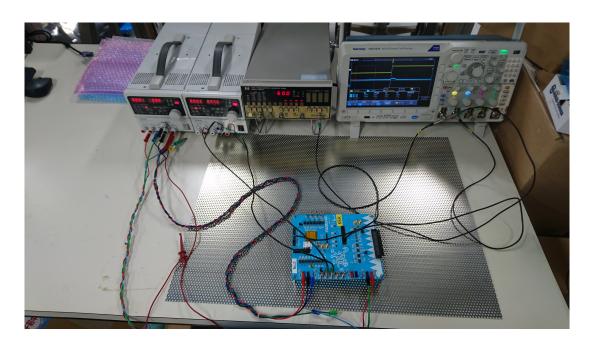


図 4.31 TK 回路試験のセットアップ

ンへ矩形波を入力すると、TOSHIZOUv2の入力に実装したカップリングコンデンサ 1pF によって電荷となり、 $LTARS2016_K01$ に入力される。出力ピンをオシロスコープに接続して出力波形を測定した。VM および VGG に与える電圧は LEMO コネクターから供給した。VM 及び VGG に与えた具体的な電圧に関しての詳細は後述する。

TK 回路性能評価の第一項目として、TK 回路の特徴であるゲインのダイナミック切り替えの動作確認を行った。ゲイン切り替えの設定スレッショル

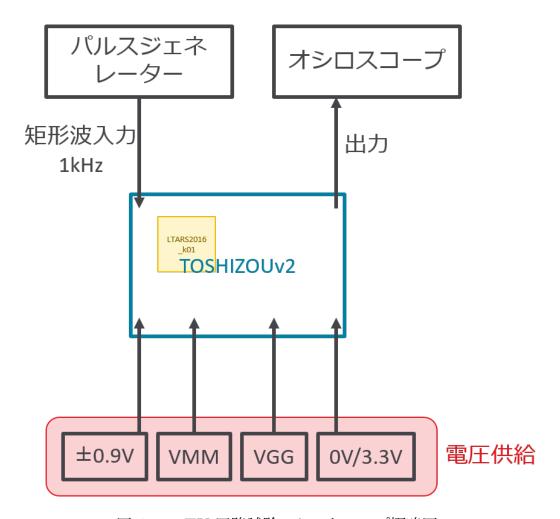


図 4.32 TK 回路試験のセットアップ概略図

ドを 100fC 付近に設定して測定したときの波形を図 4.33 と 4.34 に示す。黄色が入力信号、青が出力信号、緑が COMP_FBIN 信号である。HG モードでは COMP_FBIN 信号は出力されず、LG モードになると COMP_FBIN 信号が出力される。

図 4.33 は 90fC を入力した時の波形である。COMP_FBIN の信号が出力されていないので HG モードで動作しており、出力波高値は 550mV である。この時のゲインは 6.1 mV/fC で、設計値の 10 mV/fC 通りではないが HG モードで動作している。図 4.34 は 100fC を入力した時の波形である。COMP_FBIN の信号が出力されているので LG モードで動作していることが確認され、出力波高値は 50mV と小さくなっている。この時のゲインは 0.5 mV/fC で設計値 0.5 mV/fC と一致している。このように切り替えのス



図 4.33 TK 回路の入力電荷 $90\,\mathrm{fC}$ での動作の様子。 $550\,\mathrm{mV}$ の出力が確認された。 COMP_FBIN (緑) が出力されていないので HG モードで動作していることが確認できる。

図 4.34 TK 回路の入力電荷 $100 \, \mathrm{fC}$ での動作の様子。 $50 \, \mathrm{mV}$ の出力が確認された。 COMP_FBIN (緑) が出力されているので LG モードで動作していることが確認できる。

レッショルドの値を超えるとそれまでの HG モードから LG モードに切り替わる様子が確認された。これにより、今回初の試みであったゲインのダイナミック切り替えが設計通りに動作することが確認され、設計の基本思想が実証された。

次にゲイン測定を行った。設計通りの性能を確認するため、設計値通り VM を 0.2V、VGG を-0.55V に設定して測定した。検出器容量を 0pF、10pF、56pF、300pF と変化させて、-50 fC の入力電荷に対する出力波高を測定した。結果を図 4.35 に示す。検出器容量 300pF ではノイズのために信号が観測できなかったため、波高値は 0 として点を打っている。図 4.35 から、実測値は設計値とくらべてゲインが $1/2\sim1/3$ 程度であることが分かる。また、ゲインの検出器容量依存も設計値と比較して大きいことが分かった。この結果に関して、原因は電荷増幅器の初段トランジスタのトランスコンダクタンスが小さいことであると推定できる。詳細な議論は 5.1.2 節で行う。

電荷増幅器の初段トランジスタの性能が原因で設計通りの動作をしていないと仮定すると、トランジスタに電流を流しトランスコンダクタンス g_m の値を大きい状態に近い状況とすることで本来の挙動に近づけると予想でき

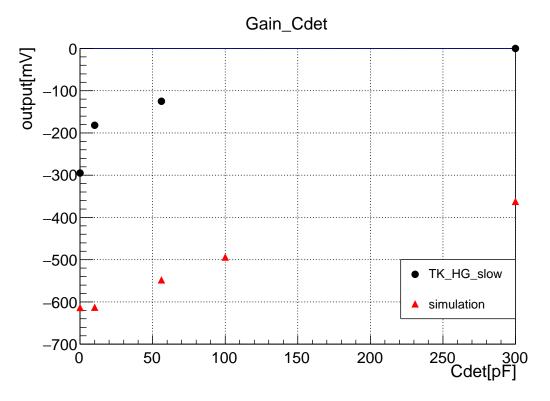


図 4.35 TK 回路を設計通りのバイアス電流で動作させた場合の出力波高の検出器容量依存 (HG,slow,-50fC 入力)

る。そこで、電荷増幅器の初段トランジスタに与える電圧パラメータ (VM) を変化させてゲインおよび ENC を測定した。図 4.36 にゲインの VM 依存、図 4.37 に ENC の VM 依存を示す。ここで、入力電荷は $\pm 30 {\rm fC}$ とした。

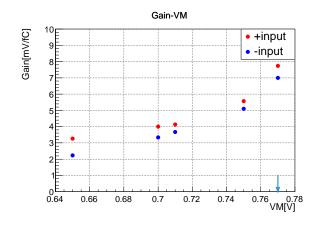


図 4.36 ゲインの VM 値依存 (in-put=30 mV,HG,slow,Cdet=300 pF)

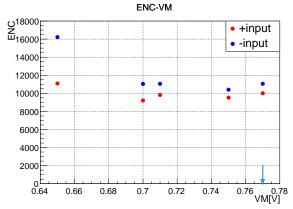


図 4.37 ENC の VM 値依存 (in-put=30 mV,HG,slow,Cdet=300 pF)

VM の値を大きくするにつれてトランジスタに流れる電流が大きくなりトランスコンダクタンスも大きくなり、正常な動作に近くなったと考えられる。0.78V 以上では出力波形が見えなくなった。また図 4.37 では 0.7V 以上の範囲では ENC がフラットに落ち着くことが分かる。ゲインと ENC 両者の VM 依存から考えて、0.77V を VM の最適値とした (図中で浅葱色の矢印で示す)。本測定では測定誤差に関して考慮していないため議論の余地はあるが、それぞれの電圧依存の傾向による上記議論には大きな影響を与えないと考えられる。VM 値の設計値からの変更に伴い、VGG も変動が必要となる。VGG もトランジスタに与える電圧値である。VM=0.77V に設定した状態で ± 30 fC の信号を入力し、ゲインおよび ENC の VGG 依存を求め、それぞれ図 4.38 および図 4.39 に示した。

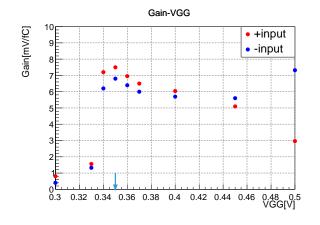


図 4.38 ゲインの VGG 値依存 (input=30 fC,HG,slow,Cdet=300 pF)

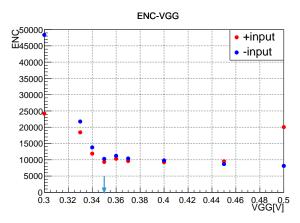


図 4.39 ENC の VGG 値依存 (input=30 fC,HG,slow,Cdet=300 pF)

図 4.38 では VGG=0.35V 付近でゲインが最大となっている。0.34V より低い電圧値ではトランジスタが正常に動かず出力が出ないと考えられる。また図 4.39 から 0.35V 以上では ENC がほぼフラットになることが分かる。ゲインと ENC のどちらを考慮しても良い値であることから、0.35V が VGGの最適値であるとした (図中に浅葱色の矢印で示す)。本測定では測定誤差を考慮していないが、それぞれの電圧依存の傾向による上記議論には大きな影響を与えないと考えられる。

VM=0.77V、VGG=0.35V を最適値として、再度ゲインの検出器容量依

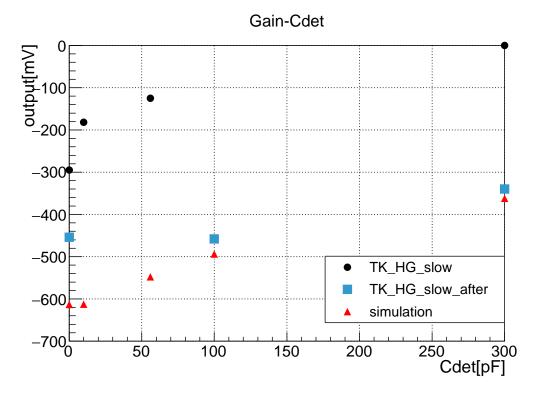


図 4.40 TK 回路 波高値の (HG,slow,input=-50fC), 黒が VM,VGG 最適化前の測定値、浅葱色が VM,VGG 最適化後の測定値、赤はシミュレーション。

存を測定した。図 4.40 に-50 fC の入力に対する slow モードでの HG 出力電圧の検出器容量依存を示す。比較のために最適化前の測定値と設計値も載せている。黒点は VM、VGG 最適化前の測定値、浅葱色の四角で示したのがVM、VGG 最適化後の測定値、赤色の三角で示したのが設計値である。

図 4.40 のとおり、VM、VGG の最適化によってゲインを設計値に近づけることに成功し、検出器容量依存も可能な限り抑えることができた。先述の議論の通り、設計通りのトランジスタ性能が得られていないことが原因であると判断、以降の測定は最適化された条件で行うこととした。

最適化した VGG、VM の下、検出器容量 300pF としたときの、-50fC 入力信号に対する出力波形を図 4.41 に示す。黒線が実測した波形で、赤線がシミュレーションの波形である。シミュレーションのパラメータは設計値を使用している。VM,VGG を最適化したものの波高値の実測値は設計値より小さい。時定数に関しても、要請値 4μ s から大きくずれて 11μ s 程度である。

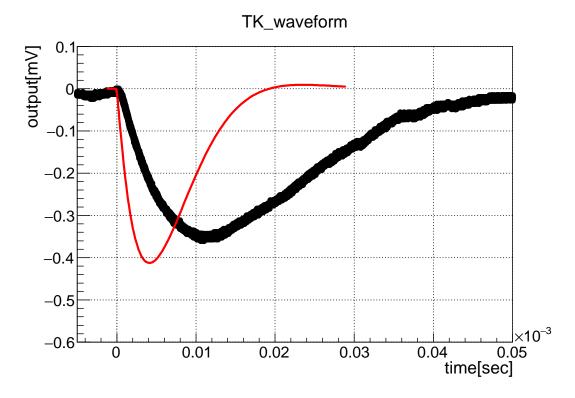


図 4.41 TK 回路 波形 (HG,slow,Cdet=300pF,input=50fC), 黒点が測定値、赤線はシミュレーション。

この値に関して5.1.2節で詳細な議論を行う。

VM、VGG を最適化した状態で、検出器容量 $300\,\mathrm{pF}$ でゲインカーブの測定を行った。VM= $0.77\mathrm{V}$ 、VGG= $0.35\mathrm{V}$ で測定したときのゲインカーブを検出器の動作条件を HG/LG、fast/slow と変化させた 4 条件で取得したときのゲインカーブを図 $4.42\sim4.45$ に示す。

VM、VGG を最適化した状態での、ゲインの測定結果は HG/slow で $7.19\pm0.13\,\text{mV/fC}$ (要請値: $10\,\text{mV/fC}$ 、LG/slow で $0.51\pm0.00\,\text{mV/fC}$ (要請値: $0.5\,\text{mV/fC}$)、HG/fast で $7.47\pm0.08\,\text{mV/fC}$ (要請値: $10\,\text{mV/fC}$)、LG/fast で $0.50\pm0.00\,\text{mV/fC}$ (要請値: $0.5\,\text{mV/fC}$) で、HG に関しては要請値を達成できなかった。ダイナミックレンジに関しては HG では- $80\,\text{fC}$ ~ $80\,\text{fC}$ に対して 10% 以内の線形性が確認され、要請値の- $80\,\text{fC}$ ~ $80\,\text{fC}$ を達成したが、LG では- $1200\,\text{fC}$ ~ $1200\,\text{fC}$ という結果になり要請値の- $1600\,\text{fC}$ ~ $1600\,\text{fC}$ は達成はできなかった。しかし、MT 回路と同様片側極性にすることで LG

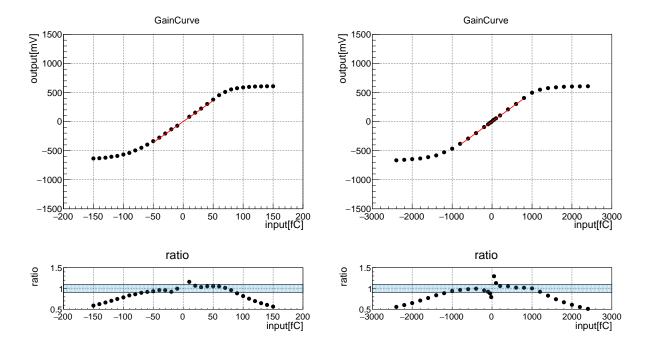


図 4.42 TK 回路 HG/slow のゲインカーブ Cdet= $300\,\mathrm{pF}$ 得られたゲインは $7.19\pm0.13\,\mathrm{mV/fC}$ (要請値: $10\,\mathrm{mV/fC}$)

図 4.43 TK 回路 LG/slow のゲインカーブ Cdet= $300\,\mathrm{pF}$ 得られたゲインは $0.51\pm0.00\,\mathrm{mV/fC}$ (要請値: $0.5\,\mathrm{mV/fC}$)

に関しても 1600fC のダイナミックレンジが確保できると考えられ、ダイナミックレンジに関しては要請値を達成できる可能性は十分にあると結論づける。

ENC の検出器容量依存について測定結果と設計値の比較を図 4.46 に示す。測定はシミュレーションに比べて非常に大きな検出器容量依存があるという結果となった。これも電荷増幅器の初段トランジスタの性能による影響だと考えられる (詳細な議論は 5.1.2 で後述)。検出器容量 300pF に関してはシミュレーションによる設計値の時点で 6600 で要請値を満たしていない。ENC=6000 は最初の信号に対して S/N が 3 倍程度ということになる。検出器の読み出しを行うためには S/N が 5 倍程度が限度であるためそこまでノイズレベルを落とす必要がある。詳細は 5.1.1 節で議論。これに関してはASCI レイアウトの見直しなど次回作に向けて設計を修正する必要がある。

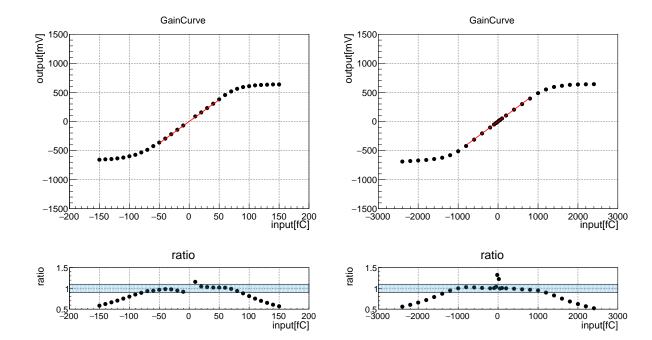


図 4.44 TK 回路 HG/fast のゲインカーブ Cdet=300 pF 得られたゲインは $7.47\pm0.08\,\mathrm{mV/fC}$ (要請値: $10\,\mathrm{mV/fC}$)

図 4.45 TK 回路 LG/fast のゲインカーブ Cdet=300 pF 得られたゲインは $0.50\pm0.00\,\mathrm{mV/fC}$ (要請値: $0.5\,\mathrm{mV/fC}$)

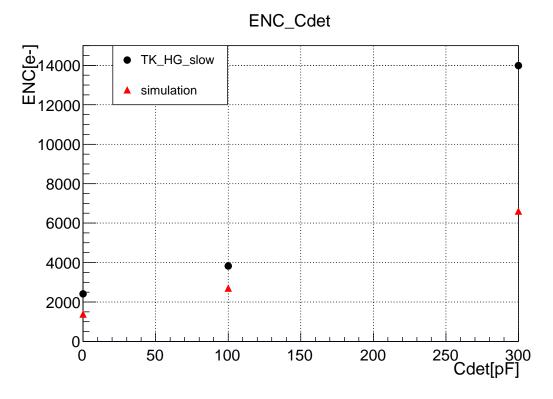


図 4.46 TK 回路 ENC の検出器容量依存 (HG,slow)

4.6 LTARS2016_K01 とガス検出器の接続試験

NI μ TPC の読み出しに用いるという本回路システムの目的の確認のために、TOSHIZOUv2 を検出器に接続して陰イオンガス中の α 線の飛跡を観測する実験を米国 BOSTON にある Wellseley 大学にて行った。Wellseley 大学で使用されている「:neta:」と呼ばれる、Micromegas を読み出しにもつTPC を用いた。この実験では、設計値に近い性能が得られている MT 回路を用いた。Micromegas は増幅ギャップ 256 μ m、検出領域 10×10 cm²、ピッチ間隔は 200μ m の 2 次元電荷読み出しが可能なものを使用している。読み出しストリップの上部には放電対策のために抵抗ストリップが施してある。ストリップ間の基材の厚みは $50\,\mu$ m である。線源に 210 Po を使用し、検出器内部に配置した。測定セットアップの様子を図 4.47 に、概略図を図 4.48 に示す。図 4.48 でピンクと浅葱色の矢印で示しているように軸を定義した。また、Micromegas の構造を含めた測定セットアップの側面図を図 4.49 に示す。

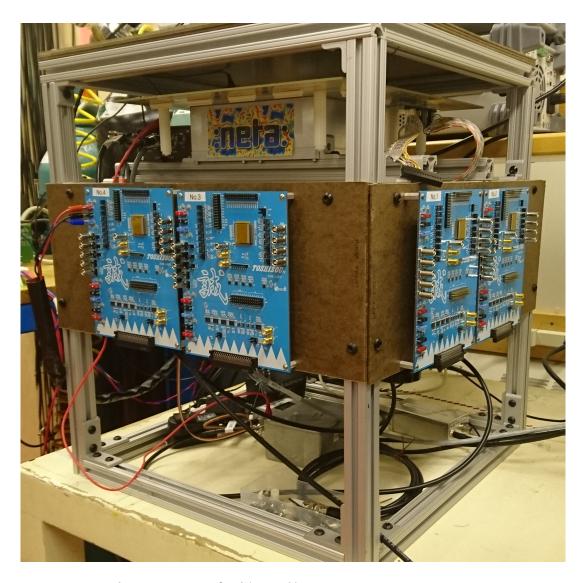


図 4.47 測定セットアップの様子。検出器:neta:に 4 枚の TOSHIZOUv2 を接続して試験した。

TOSHIZOUv2 のパラメータ設定は MT 回路の試験を行った表 4.3 の「実測値」の通りで、時定数は slow で動作させた。検出器に接続したときのノイズレベルは波高のピーク to ピークで HG 出力が $80\,\mathrm{mV}$ 、LG 出力が $8\,\mathrm{mV}$ 程度であった。波形の digitizer のサンプリング周波数は $2.5\mathrm{MHz}$ でダイナミックレンジは 0-2V もしくは -2V-2V。 TOSHIZOUv2 で得られた波形の一例を図 4.50 に示す。ここでは HG の信号のみを表示している。下図は上図のピーク付近の横軸を拡大したものになっている。左側は Xstrip の波形を示し、下から上に +X 軸方向のストリップ順にオフセットをつけて示

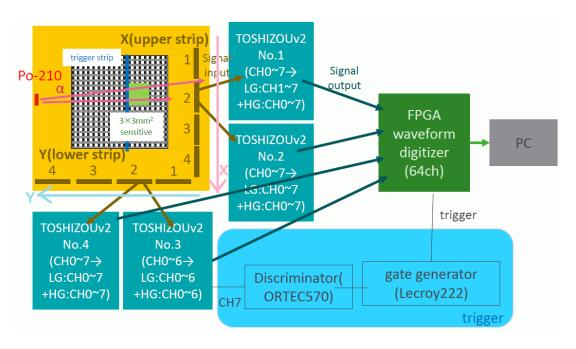


図 4.48 測定セットアップの概略図

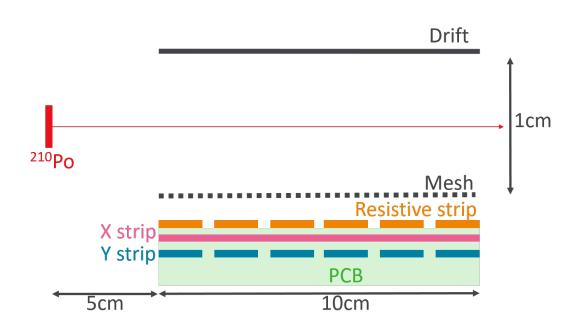


図 4.49 Micromegas の構造を含めた測定セットアップの図。線源はちょうどドリフト方向の中心になるよう高さ 0.5cm のところに配置した。

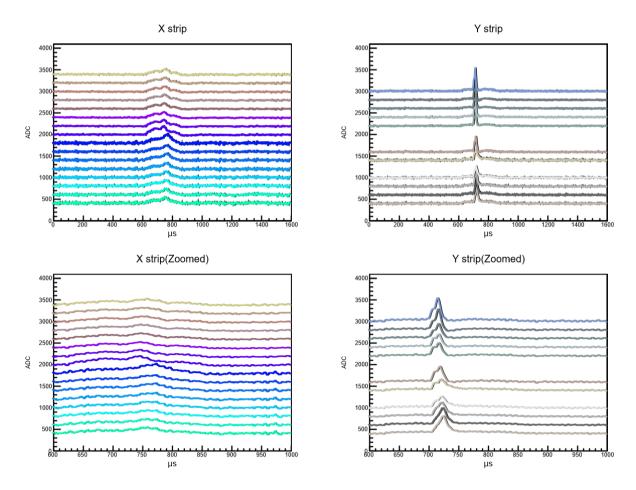
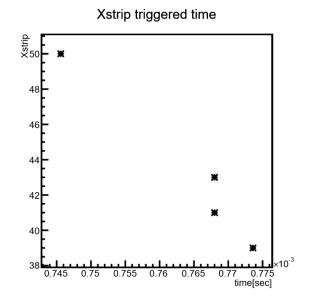


図 4.50 各チャンネルの波形。左が X strip、右が Y strip。下図はそれぞれのピーク付近を拡大した図。

している。右側は Y strip の波形を示し、下から上に -Y 軸方向のストリップを順にオフセットをつけて示している。X strip、Y strip ともに、マイクロメガス直下の高抵抗電極で電子が検出される際の誘導電荷として、正の信号が読み出されている。 α 線の飛跡と直交する Y strip に対しては、全てのストリップを横切るようにトリガーがかけられており、すべてのストリップから典型的な TPC 信号が読み出されている。一方、 α 線の飛跡と平行な X stripに関しては、一部のストリップのみから信号が読み出されることが期待されたが、実際には高抵抗ストリップ上の電荷の伝播に伴ってほとんどすべてのストリップから信号が確認された。

波形情報を解析するために、それぞれのストリップに閾値を設け、ヒットした時間をプロットしたものを図 4.51 に示す。この図から Y strip では



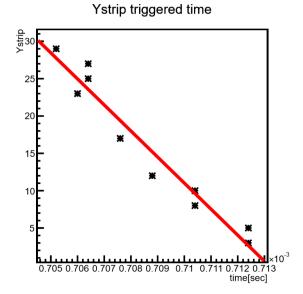


図 4.51 信号ヒットの時間とストリップナンバーを示す図。縦軸はストリップナンバー。横軸は時間。

TPC 特有の、飛跡方向に沿って各ストリップで出る信号に時間差がある様子が見られる。

X strip で見られた電荷伝播は放電対策の抵抗ストリップが原因で起こる現象である。図 4.52 に抵抗ストリップに沿った電荷伝播によって X strip で拡散が起こる仕組みを示す。

図 4.52 のようにある点に電荷が到達したとき、抵抗ストリップに沿って電荷が拡散する。抵抗ストリップと垂直な方向では (今回の実験では X 方向) では拡散した電荷が各ストリップで順に読み出されていくので V 字のように広がっていく飛跡が見える。抵抗ストリップをもつ Micromegas ではこのような電荷伝播の様子が見られる [36]。この効果により X 方向の飛跡が定まらないため今回の結果では 3 次元飛跡の再構成は出来なかった。今回の測定では Micromegas の構造上の問題から定量的な評価ができなかったが、LTARS2016_K01 で TPC に接続しデータを読み出すことが可能であると実証された。 1strip の電荷を十分なゲインで読み出せることも確認でき、 $200~\mu m$ ピッチでの読み出しに成功したことは $NI\mu$ TPC の読み出しとして使用可能であることが原理的に示された。

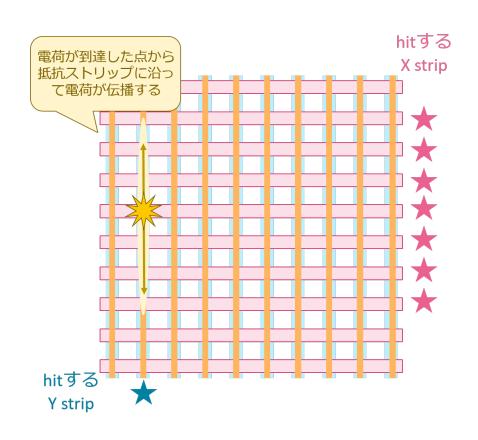


図 4.52 抵抗ストリップに沿った電荷伝播によって X strip で拡散が起こる仕組み

第5章 議論と今後の展望

5.1 議論

5.1.1 ENC 要請値

MT 回路、TK 回路共に、検出器容量 300 pF のシミュレーション値自体 が要請値 $(2000 e^-)$ を満たしていない (設計の段階で要請値を満たしていな い) ことに関しては、現実的な回路設計と独立に要請値を設定したことが原 因であると考える (図 $4.8(4000 e^-)$ 及び図 $4.29(6500 e^-)$)。本来独立である べき物理的な要請値と、技術的に「妥当」な設計値にある程度の差が生じて いることは、「正しい」傾向であるが、次回以降の製作に向けての議論は必要 である。ここで、要請値を決定する際に想定した $\mathrm{S/N}$ が 10 倍であるという 条件が、必要以上に安全を見た数値であることに着目、この値を再検討する。 要請値の S/N を仮に 5 倍とした場合、ENC はノイズ電圧値分布の標準偏 差 σ であることを考えると 5σ =99.9999% となる。波形取得として $10 \mathrm{MHz}$ のサンプリングを仮定すると、信号レベルのノイズとして 10 Hz 程度で最小 電荷信号程度のノイズが1ストリップに乗ることになる。実際の測定では、 複数ストリップにまたがる信号を検出することから、1 ストリップ当たりの 10Hz のノイズは許容の範囲内となる。したがって、要請値 10 倍としていた S/N は、5 倍に見直すことができ、ENC の要請値は $4000e^-$ と再設定するこ とができる。こうして再設定した要請値で評価を行うと、MT 回路のノイズ は実用上問題ないと判断できる。TK 回路に関してはS/N が3 倍程度なの で $3\sigma=99.73\%$ となる。最小電荷信号程度のノイズが1ストリップに乗るの は 2.7×10^4 Hz 程度となる。このノイズレートは実用的ではないため、TK 回路に関しては ENC の値を新たに設定した要請値 $(4000e^-)$ まで下げた設 計にすることが次回作への課題である。

5.1.2 TK 回路トランジスタ性能

TK 回路では、設計値のパラメータで動作すると実測値のゲインが設計値 に比べて $1/2\sim1/3$ 程度になることと (図 4.35)、ゲインの検出器容量依存が 設計値と比較して大きいこと (図 4.46)、時定数が設計値よりも長いこと (図 4.41) という大きな問題があった。原因は電荷増幅器の初段トランジスタのトランスコンダクタンスが小さいことであると推定できる。

電荷増幅器 (CSA) の帰還容量を C_f とし、増幅回路のオープンループゲインを A とすると、CSA の入力端から見たインピーダンスは、容量性でその容量はミラー効果によって $C_f(1+A)$ のように見える。したがって検出器容量を C_{det} とすると、検出器に発生した電荷のうち

$$\frac{C_f(1+A)}{C_{det} + C_f(1+A)} \tag{5.1}$$

が CSA によって有効に活用されることになる。ここで増幅回路の初段のトランスコンダクタンスを g_m 、増幅回路の出力抵抗を r_0 とすると、

$$A = g_m \times r_0 \tag{5.2}$$

と書ける。 g_m が大きい場合は CSA のゲインは検出器容量に依存せず、 \sim 1 となるが、 g_m が小さい場合は、実効的に CSA に入力される電荷の割合が容量依存を含むようになり、 C_{det} が増えるにつれて S/N が悪くなる。これによりゲインの検出器容量依存が大きいことも説明できる。

時定数の実測値は、要請値 $4\mu s$ から大きくずれて $11\mu s$ 程度であった。電荷増幅器 (CSA) の立ち上がり時間 t_r は式 5.3 で表せる。

$$t_r = \frac{C_{det}}{g_m} + \frac{C_L}{\mu_0 g_m} \tag{5.3}$$

ここで $\mu_0 = \frac{C_f}{C_f + C_d et}$ であり、 C_L は CSA の出力の負荷である。 g_m が十分に大きい場合は t_r が小さくなり CSA は図 4.28 に示す通り急峻な立ち上がりを示すが、 g_m が小さい場合は CSA の立ち上がり時間が大きくなる。こ

れにより shaper 出力波形の時定数がシミュレーションよりも大きくなると推測される。これは、ゲインが出ない原因とも一致する。時定数の測定結果も、増幅回路の初段トランジスタのトランスコンダクタンス g_m が小さいという仮定によって説明が可能であり、VGG、VM の最適化の結果からの g_m の値に関する議論の傍証となっている。本回路を正常に動作させるためには g_m をさらに大きくする必要があるが、そのためには動作パラメータの最適化のみでの対応は限界であり、ハードウェア的な改良が必要である。具体的には増幅回路の初段に使われているトランジスタを pmos から一般的にトランスコンダクタンスが大きいとされる nmos に変更するなどの改善策があげられる。

5.2 今後の展望

LTARS2016_K01 の性能評価から得られた結果では達成できていない要請がいくつかあった。その原因の1つとして、現実的な設計を考慮せず厳しい要請を課していたことなどが明らかになった。この結果と議論を踏まえて新たに設定した、次回作に向けた要請値を表 5.1 にまとめる。

表 5.1 ASIC 次回作の要請値一覧

| | High Gain(マイノリティピーク) | (リティピーク) | Low Gain(> | Low Gain(メインピーク) |
|-----------|---------------------------------------|----------------------------------|---|-----------------------------------|
| | LTARS2016_K01 | 次回作 | LTARS2016_K01 | 次回作 |
| 最小信号 | 3fC | 3fC | 100 fC | 100 fC |
| ENC | <2000(0.3 fC) | 4000(0.6 fC) | $<6.4 \times 10^4 (10 \text{fC})$ | $<\!1.3\times10^5(20\mathrm{fC})$ |
| ダイナミックレンジ | $-80 \mathrm{fC} \sim 80 \mathrm{fC}$ | -80 fC, 80 fC | $-1600 \mathrm{fC} \sim 1600 \mathrm{fC}$ | -1600 fC, 1600 fC |
| ゲイン | $10\mathrm{mV/fC}$ | $10\mathrm{mV/fC}$ | $0.5\mathrm{mV/fC}$ | $0.5\mathrm{mV/fC}$ |
| 時定数 | $4\mu\mathrm{s}/~1\mu\mathrm{s}$ | $4\mu\mathrm{s}/~1\mu\mathrm{s}$ | $4\mu\mathrm{s}/~1\mu\mathrm{s}$ | $4\mu\mathrm{s}/~1\mu\mathrm{s}$ |
| 検出器容量 | $300\mathrm{pF}$ | $300\mathrm{pF}$ | $300\mathrm{pF}$ | $300\mathrm{pF}$ |

ENC は HG で 4000、LG で 1.3×10^5 に要請値を見直した。これは現実的な設計条件を考慮し、S/N を 5 倍として見積もって得られた値である。また、ダイナミックレンジに関しては μ -PIC からの信号はアノードからは負電荷、カソードからは正電荷が読み出されるため、極性は正負両方が必要であるものの、接続状況に応じて正負どちらかに設定することで対応可能であるため、HG では 80fC または-80fC、LG では 1600fC または-1600fC があれば良いとした。

LTARS2016_K01のMT回路に関しては、ENC要請値見直しによってすべての要請値を達成できることになり、現状の回路で暗黒物質検出器の読み出しとして使用可能である。LTARS2016_K01のTK回路に関してはシミュレーション段階でのENCを要請値まで減少させ、トランジスタの性能を改善することで、次回の試作で実用レベルのチップ完成が期待できる。

要請値を満たした LTARS2016_K01 を $NI\mu$ TPC に実装することで、マイノリティチャージを観測しながら、 100μ m 程度の位置分解能での読み出しをはじめて実現することが可能となる。マイノリティチャージの観測により有効体積カットが可能となり、検出感度を大幅に更新することができる。本研究で開発した回路を完成させ、量産することで、NEWAGE の現状の検出器の感度を向上させるとともに、大型化による将来的な感度向上への道筋を開くことになる。

第6章 結論

方向に感度を持つ暗黒物質探索実験の感度向上を目指すための検出器である陰イオンマイクロ $TPC(NI\mu TPC)$ 用読み出し回路として、LTARS2016_K01 を KEK と共同開発した。LTARS2016_K01 は 2 種類の回路 (MT 回路、TK 回路) が搭載された ASIC である。本研究では評価基板 TOSHIZOU、TOSHIZOUv2 を用いて LTARS2016_K01 の性能評価を行った。主に行った性能評価は時定数 (ここでは立ち上がりからピークまでの時間として定義する)、ゲイン、ダイナミックレンジ、ENC(Equivalent Noise Charge) の測定である。

MT 回路に関して時定数は 6μ s 程度であった。要請値 4μ s よりも長いが設計値のシミュレーションと比較して 20% 程度で一致しており、検出器側の観点からすれば長い時定数であればより十分に電荷を収集することができるため問題ないと考えられる結果となった。ゲインに関しては検出器容量依存も少なく、 $HG(Hgih\ Gain)$ 出力で $10.05\pm0.04\ mV/fC(slow)$ 、 $LG(Low\ Gain)$ 出力で $0.54\pm0.01\ mV/fC(slow)$ という測定結果を得られた。HG のダイナミックレンジは、10% 以内の線形性で要請値- $80\ fC\sim80\ fC$ を達成しており、LG に関しても片側極性にすることで- $2400\ fC\sim0$ のダイナミックレンジが得られた。 $NI\mu$ TPC の読み出しとしては片側極性で使用することは現実的であるため $1600\ fC$ の要請値を達成したと言える。ENC に関しては、検出器容量がない状態での ENC が設計値よりも実測値の方が大きかった。これは、ECB レイアウトやチップレイアウトによるものであると考えられ、今後の製作ではこれらを踏まえた設計が必要となる。ENC の検出器容量依存は前作の EC ないまった。 会認していることが確認された。

TK 回路に関しては特徴であるゲインのダイナミック切り替えが設計通り に動作することが確認され、設計の基本思想が実証された。シミュレーショ ンによる設計値と比較してゲインが小さく、検出器容量依存が大きいという

測定結果が得られた。これは、電荷増幅器の初段トランジスタの性能が影響 していると考えられる。トランジスタ性能を最大限活かすパラメータを実測 によって決定し、性能評価を行った。時定数は要請値 4 μs からは大きくず れて $11 \mu s$ 程度であったが VM、VGG を最適化したものの実測されたゲイ ンは HG で 7.05±0.07 mV/fC(slow) および LG で 0.49±0.00 mV/fC(slow) で、HG に関しては要請値を(HG で 10mV/fC、LG0.5mV/fC)達成でき なかった。ダイナミックレンジに関しては HG では 10% 以内の線形性で要 請値-80 fC~80 fC を達成しているが、LG は実測値-1000 fC~1000 fC で要請 値-1600 fC~1600 fC は達成できなかった。しかし、MT 回路と同様片側極 性にすることで LG に関してもダイナミックレンジが確保されると予想で きる。ENC の検出器容量依存は、シミュレーション値よりも大きい結果と なった。時定数、ゲイン、ENC で設計通りの性能が得られず、要請値を満 たせなかった原因は、全て初段のトランジスタの性能によるものだと考えら れる。次回作に向けては、pmos トランジスタの代わりにトランスコンダク タンスの大きい nmos トランジスタを使用することで改善ができると予想さ れる。

 $NI\mu TPC$ の読み出しとして、MT 回路は ENC の要請値修正を踏まえると、実用レベルに達していると結論づけることができる。TK 回路は要請値を達成していない項目が多かったが、原因はトランジスタの性能によるものだと考えられる。シミュレーション段階で要請値を満たしていなかった ENC に関してはレイアウトの見直し等が必要になるが、それ以外はトランジスタ性能を改善すれば要請値を達成し得る可能性は十分にあり、次回作で実用レベルに達することが現実的な結果となった。

また、ガス検出器との接続試験の結果、 $200\,\mu\mathrm{m}$ ピッチでの読み出しに成功し、 $\mathrm{NI}\mu\mathrm{TPC}$ の読み出しとして使用可能であることが原理的に示された。

付録 A 回路図とレイアウト図

A.1 TOSHIZOU

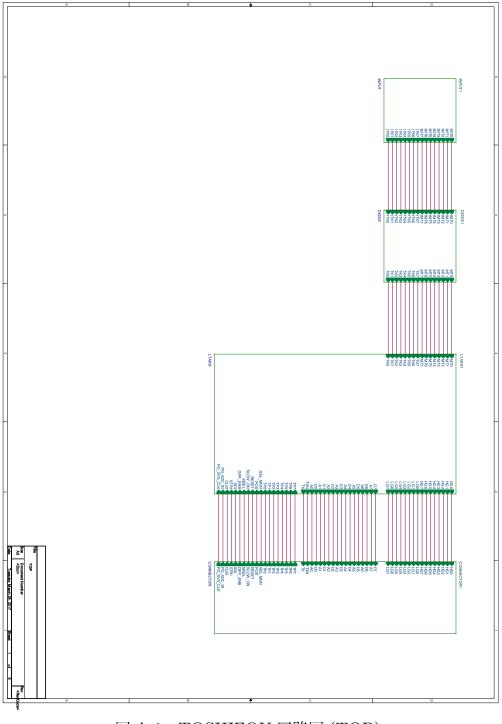


図 A.1 TOSHIZOU 回路図 (TOP)

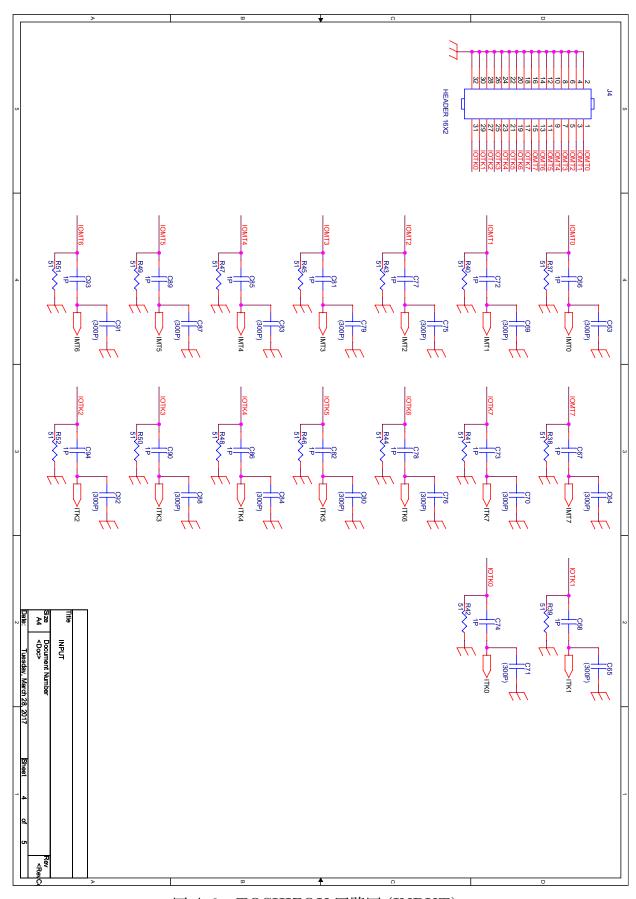


図 A.2 TOSHIZOU 回路図 (INPUT)

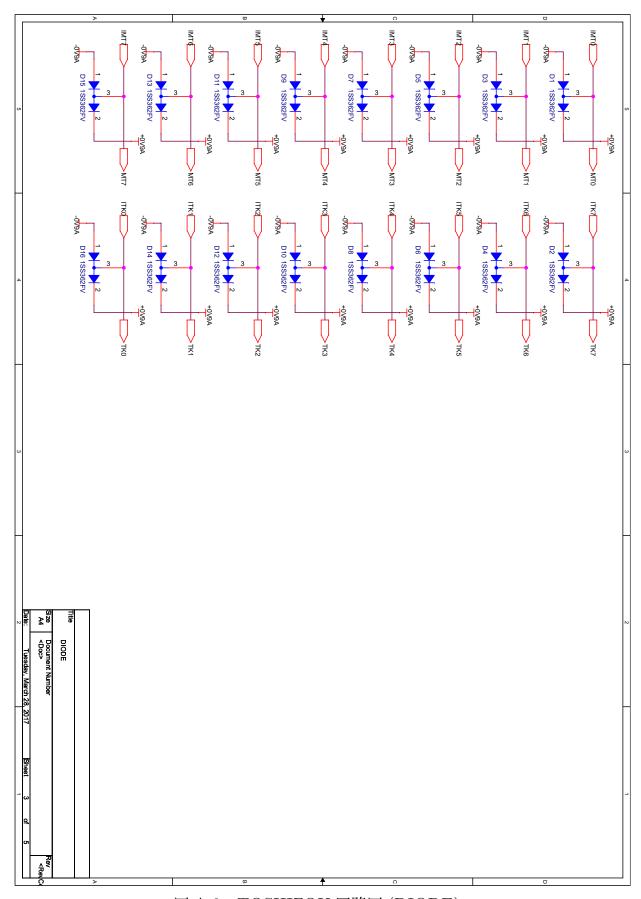


図 A.3 TOSHIZOU 回路図 (DIODE)

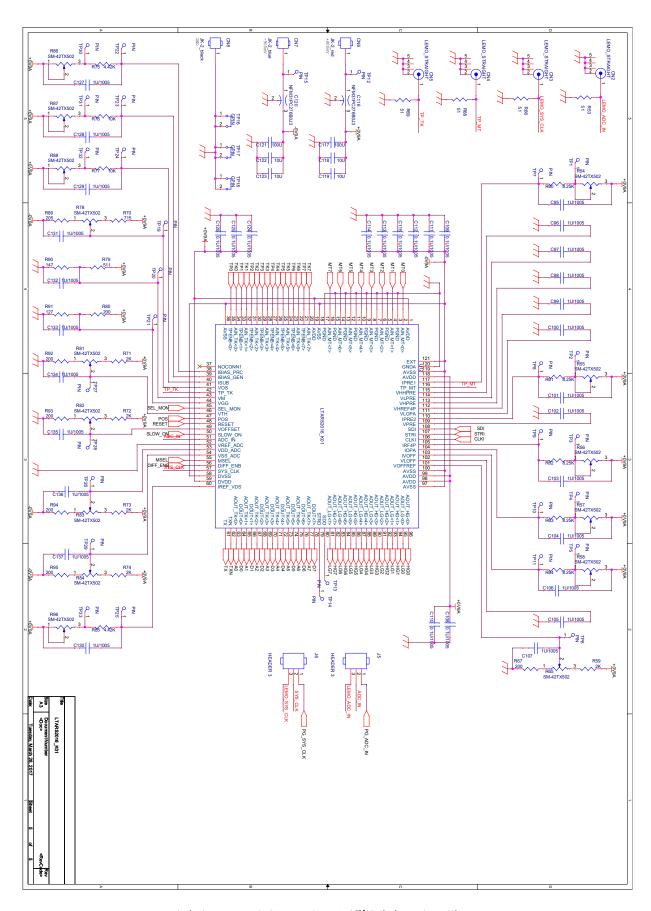


図 A.4 TOSHIZOU 回路図 (LTARS)

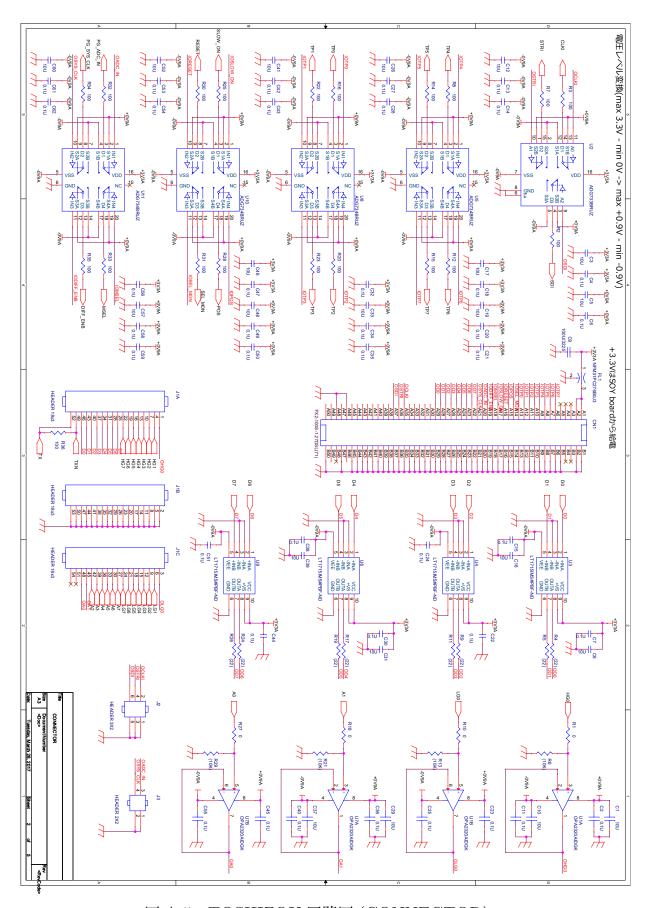


図 A.5 TOSHIZOU 回路図 (CONNECTOR)

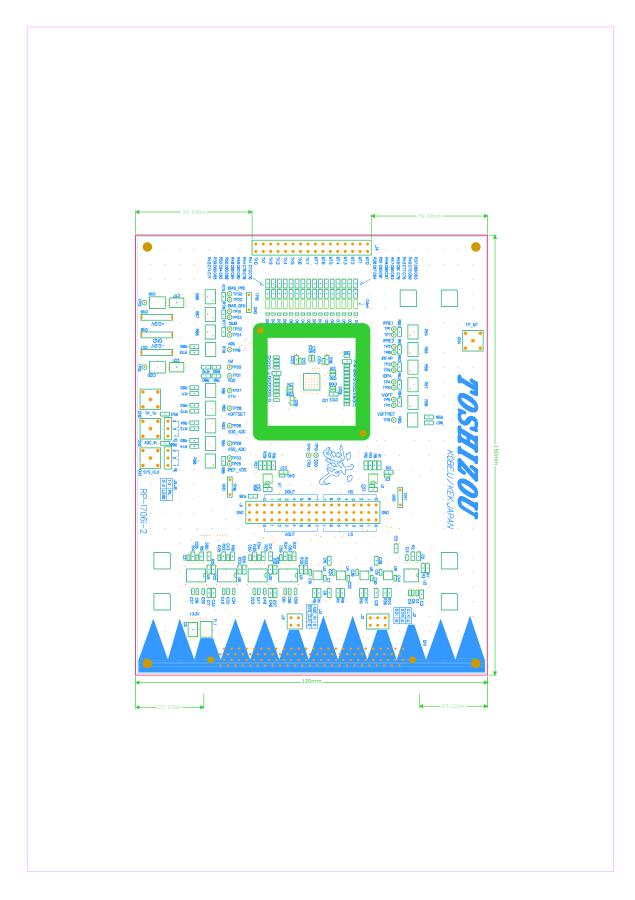


図 A.6 TOSHIZOU レイアウト

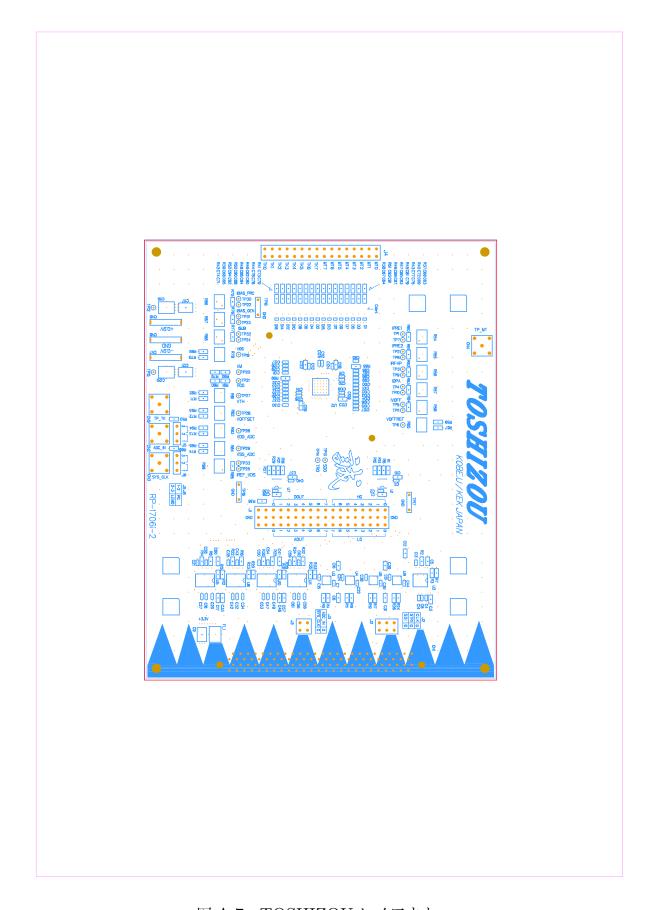


図 A.7 TOSHIZOU レイアウト

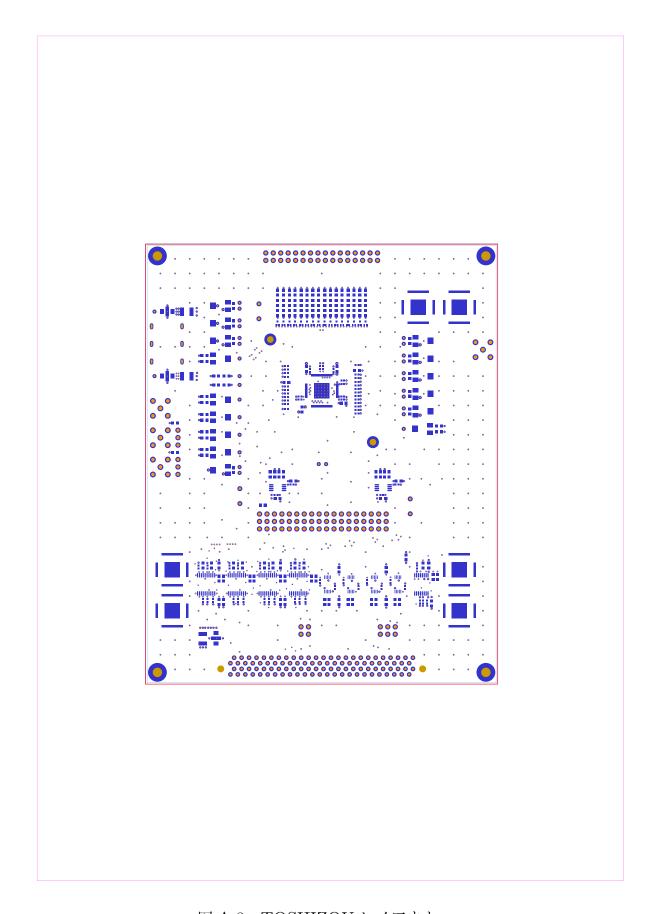


図 A.8 TOSHIZOU レイアウト

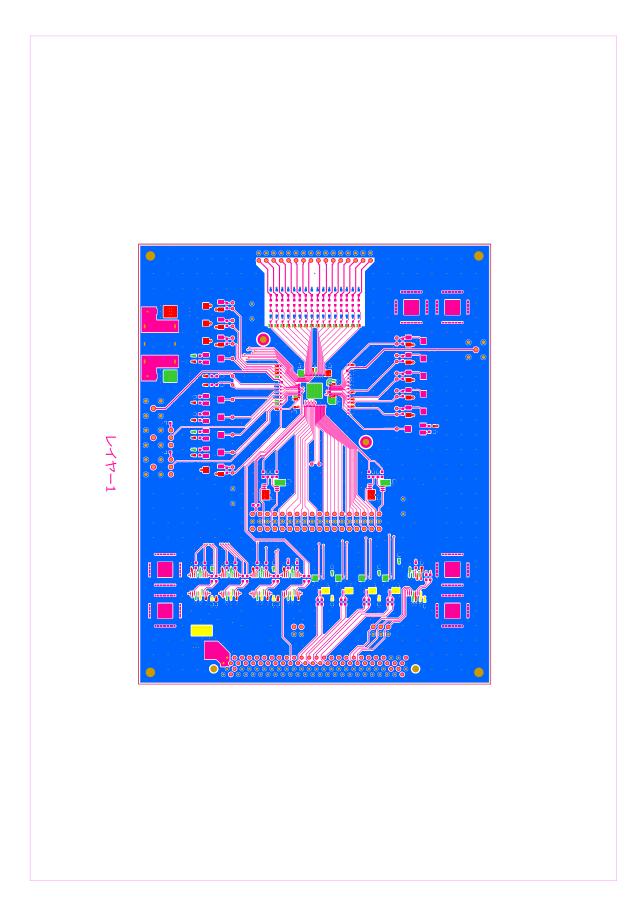


図 A.9 TOSHIZOU レイアウト (レイヤー 1)

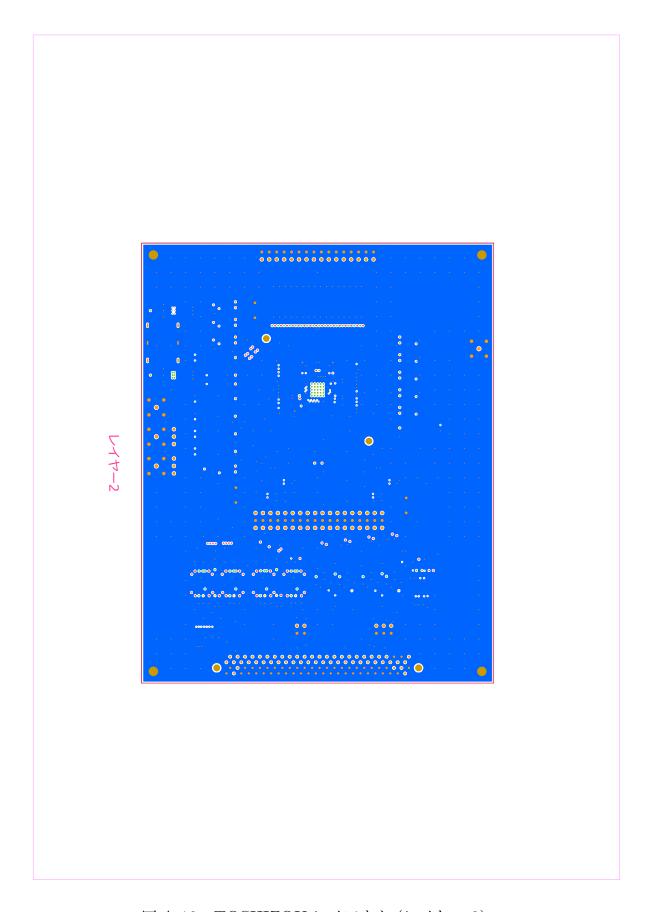


図 A.10 TOSHIZOU レイアウト (レイヤー 2)

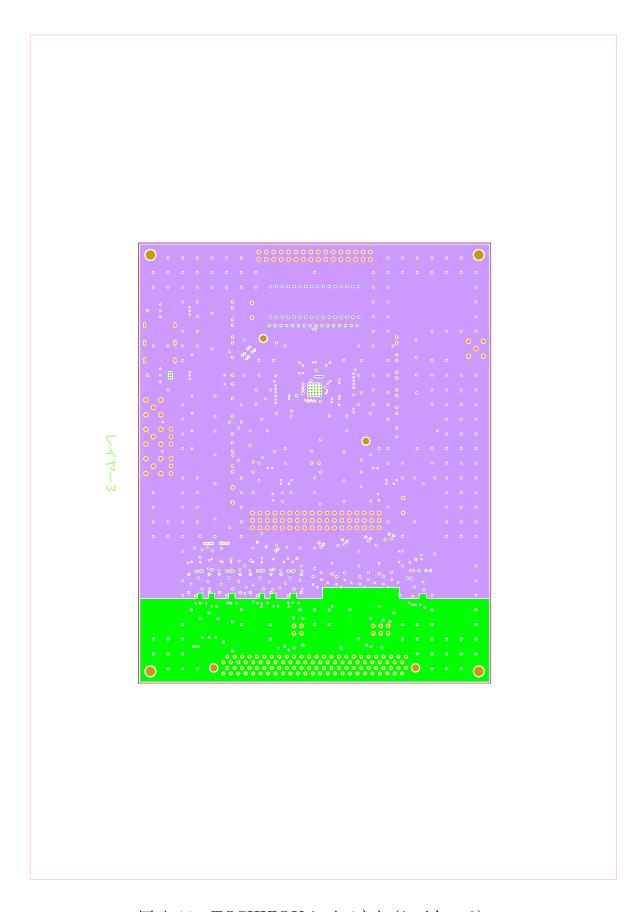
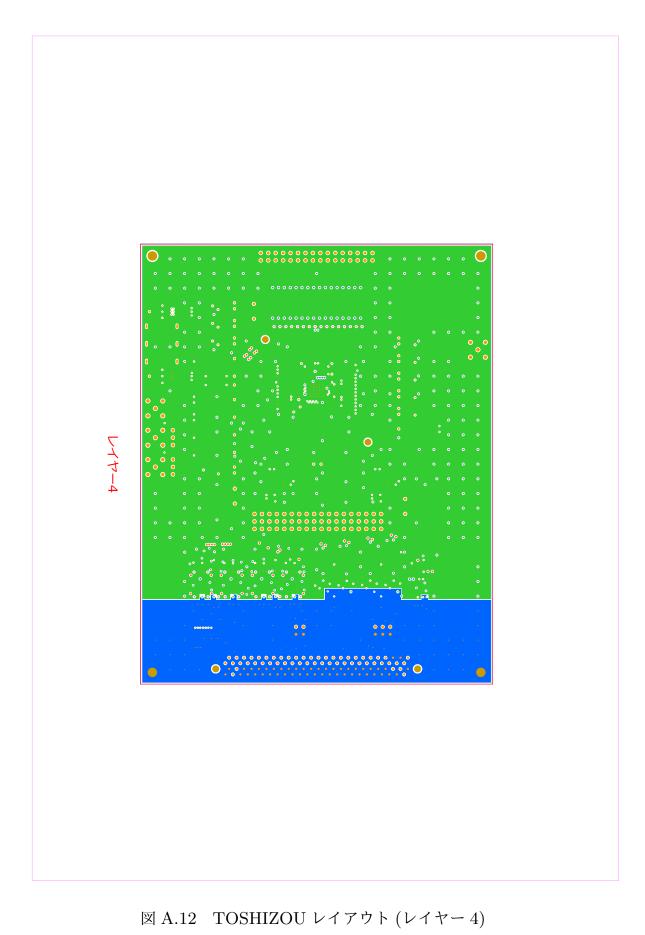


図 A.11 TOSHIZOU レイアウト (レイヤー 3)



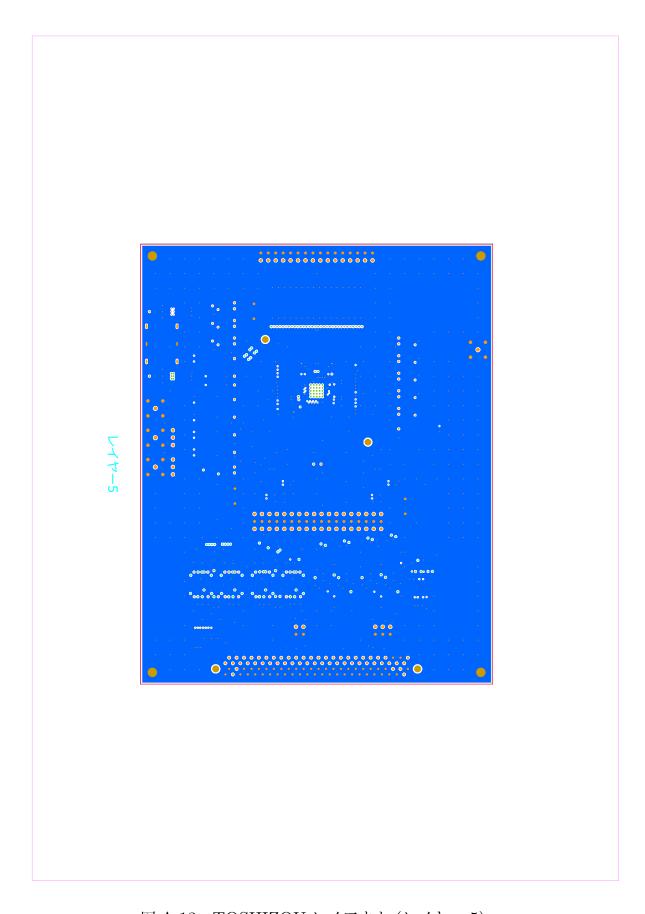


図 A.13 TOSHIZOU レイアウト (レイヤー 5)

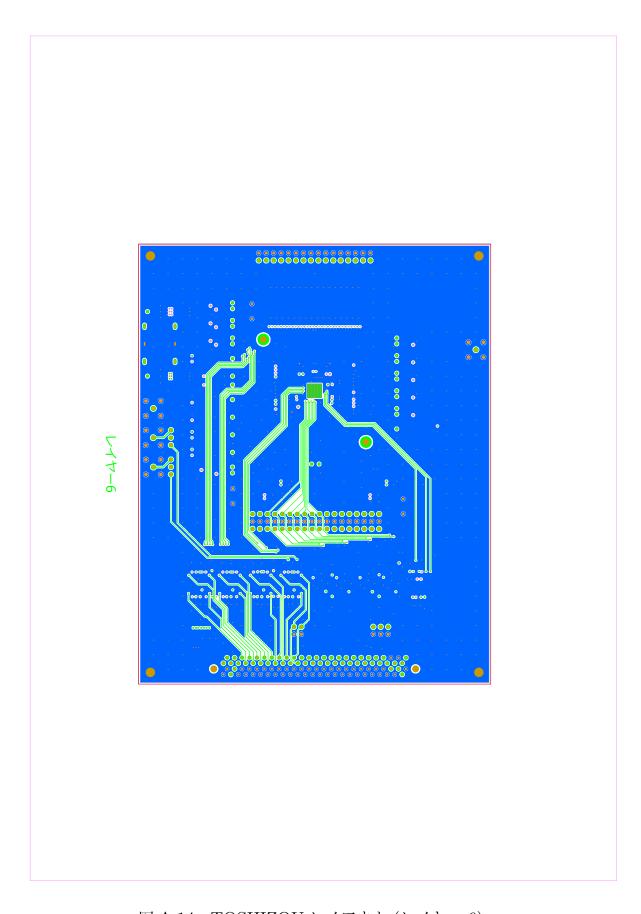


図 A.14 TOSHIZOU レイアウト (レイヤー 6)

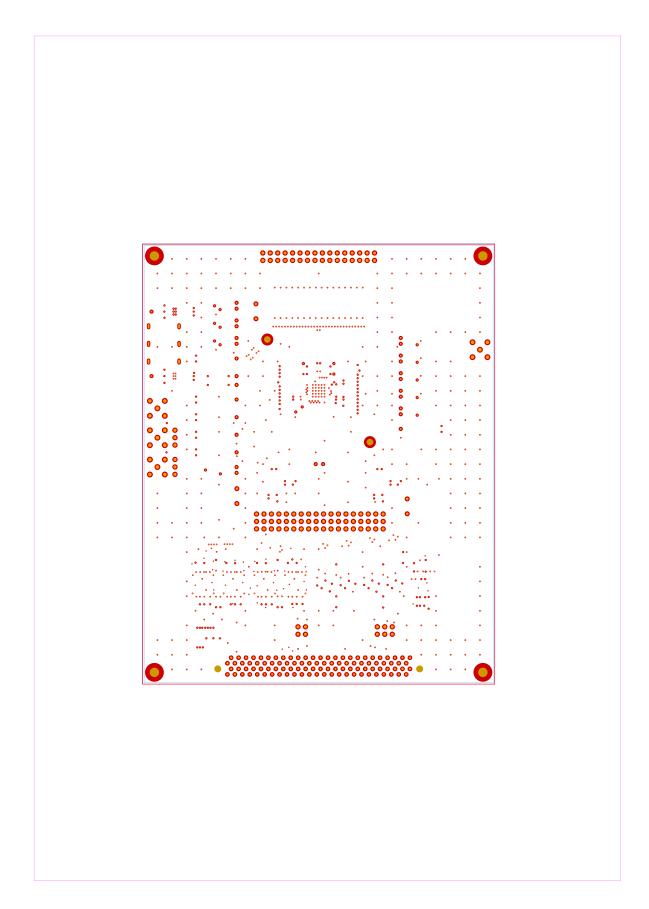


図 A.15 TOSHIZOU レイアウト

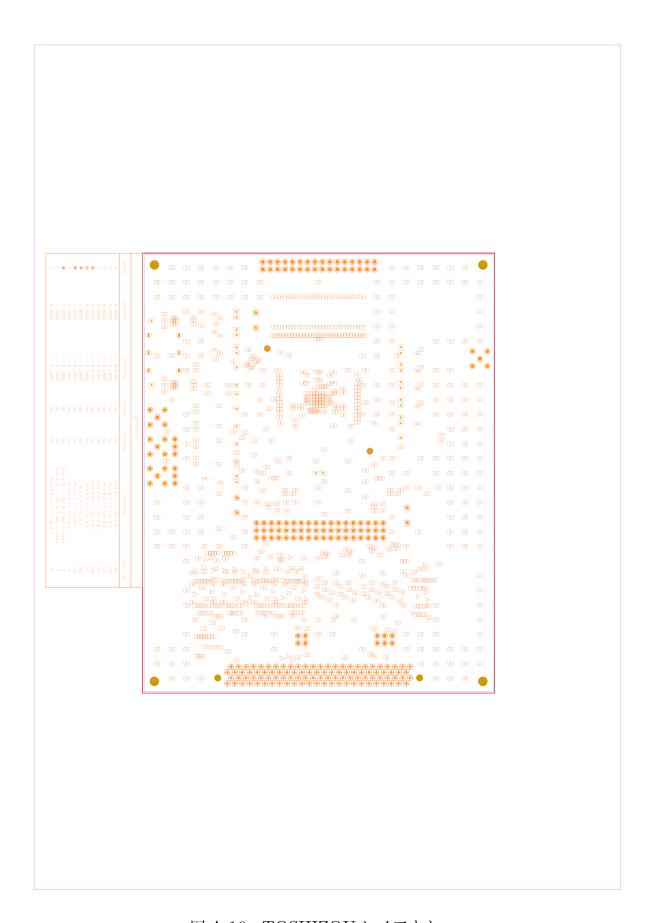


図 A.16 TOSHIZOU レイアウト

A.2 TOSHIZOUv2

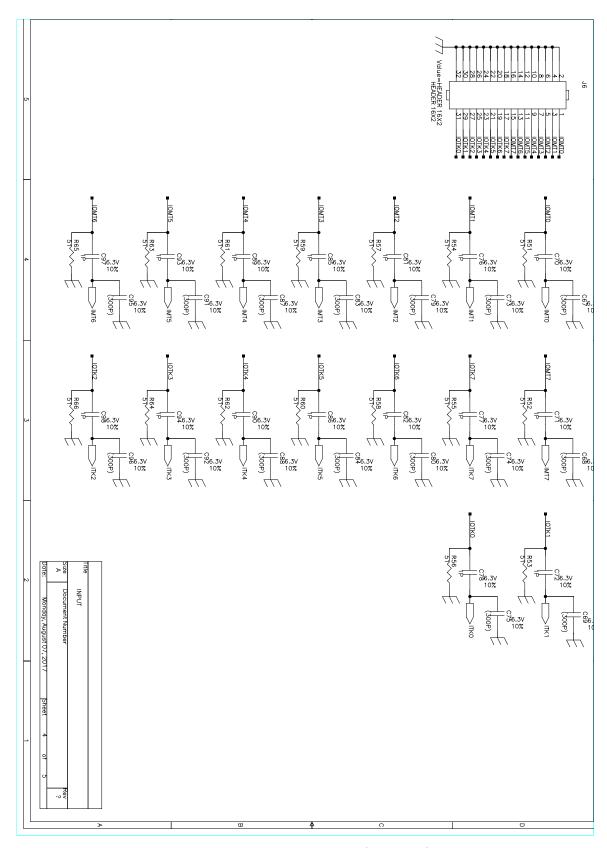
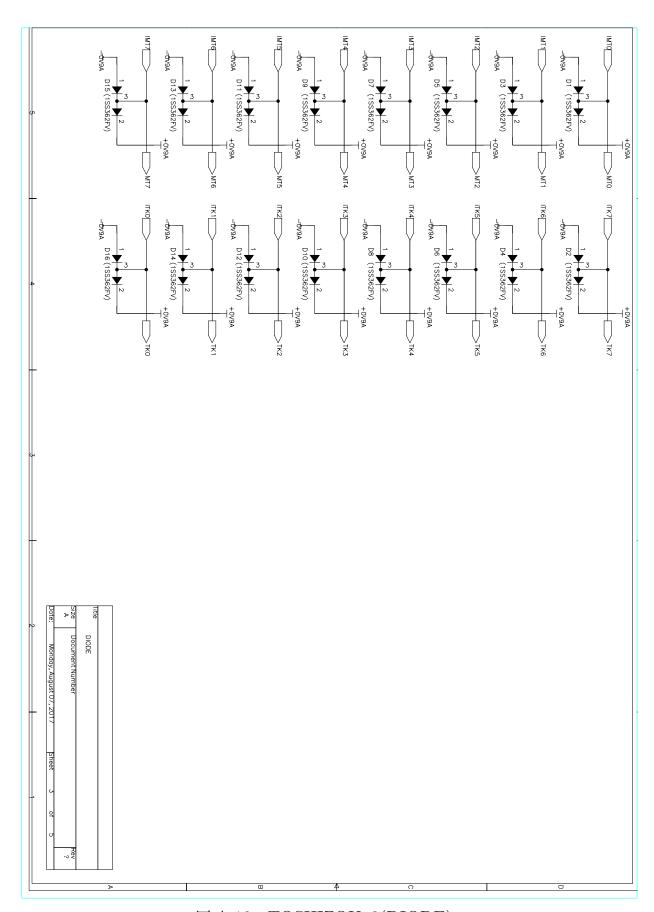


図 A.17 TOSHIZOUv2(INPUT)



☒ A.18 TOSHIZOUv2(DIODE)

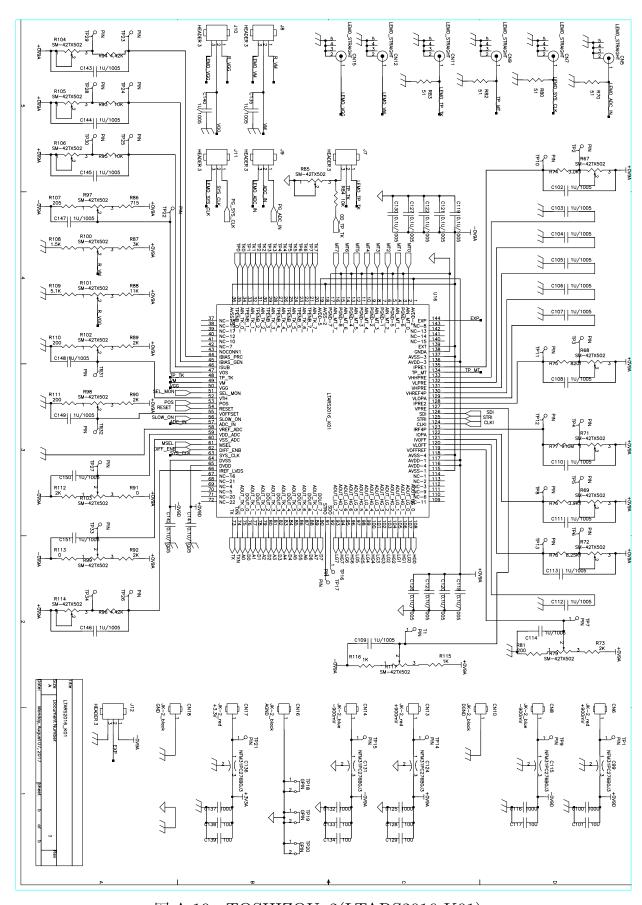


図 A.19 TOSHIZOUv2(LTARS2016_K01)

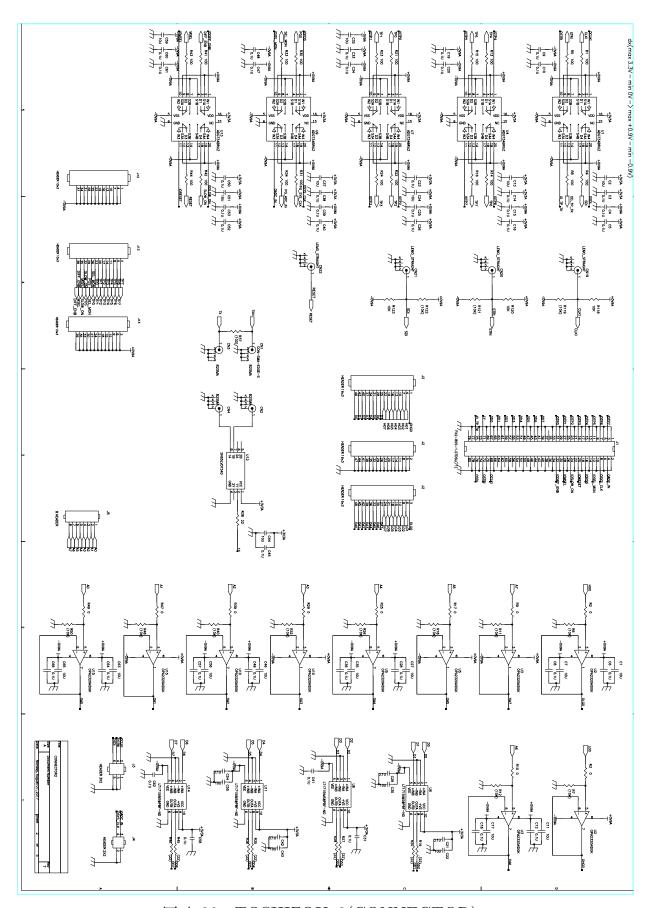


図 A.20 TOSHIZOUv2(CONNECTOR)

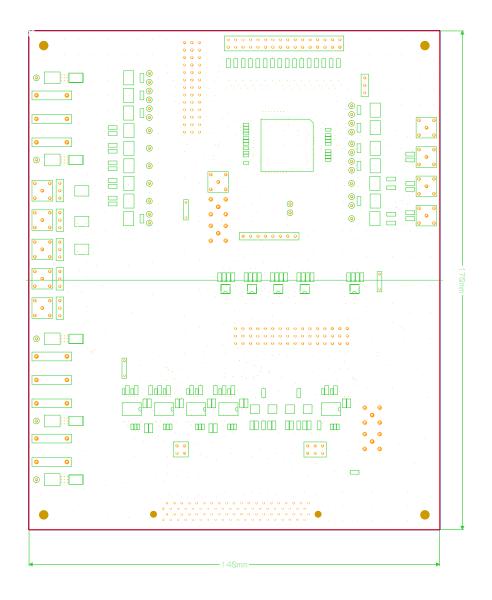


図 A.21 TOSHIZOUv2 レイアウト

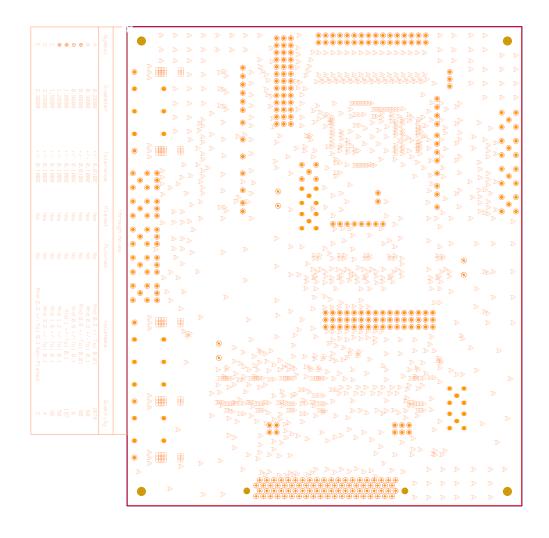


図 A.22 TOSHIZOUv2 レイアウト

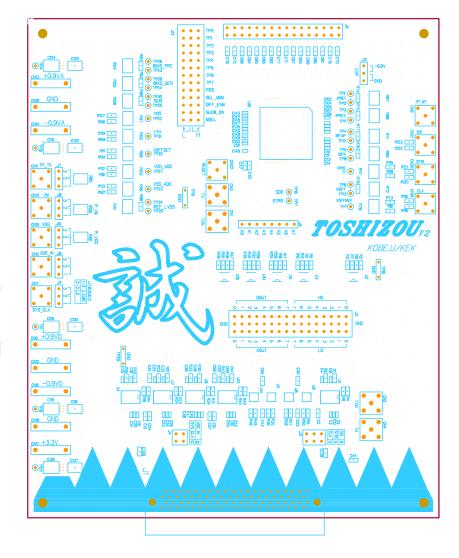


図 A.23 TOSHIZOUv2 レイアウト (SILKT)

図 A.24 TOSHIZOUv2 レイアウト (L1MASK)

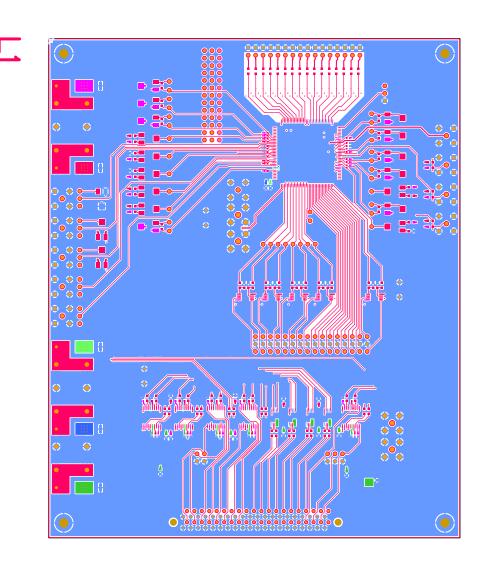


図 A.25 TOSHIZOUv2 レイアウト (レイヤー 1)

図 A.26 TOSHIZOUv2 レイアウト (レイヤー 2)

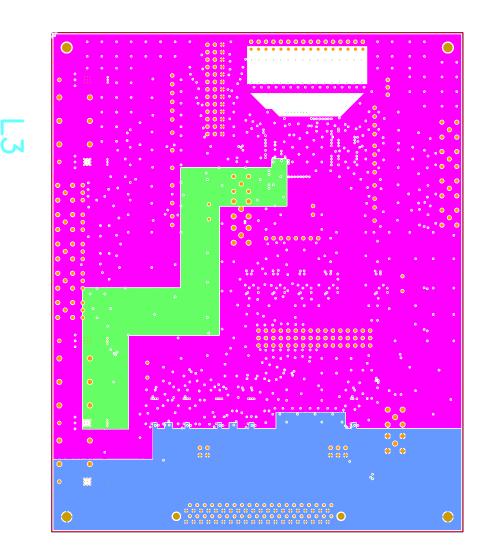
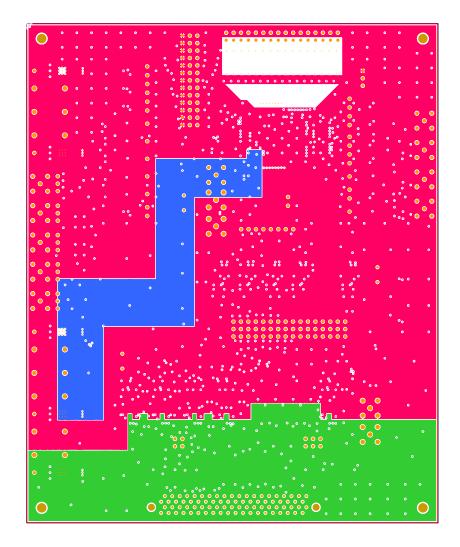


図 A.27 TOSHIZOUv2 レイアウト (レイヤー 3)





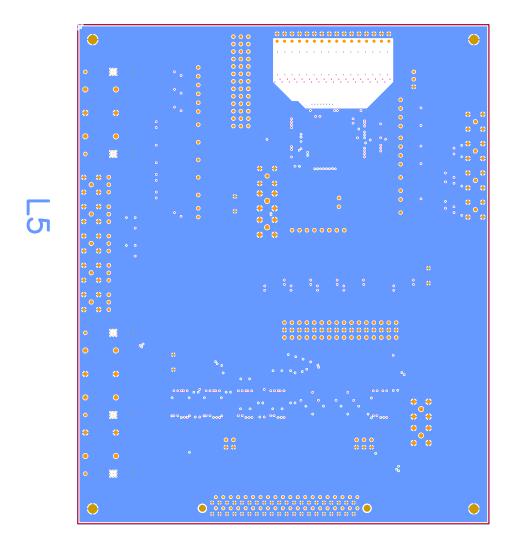


図 A.29 TOSHIZOUv2 レイアウト (レイヤー 5)

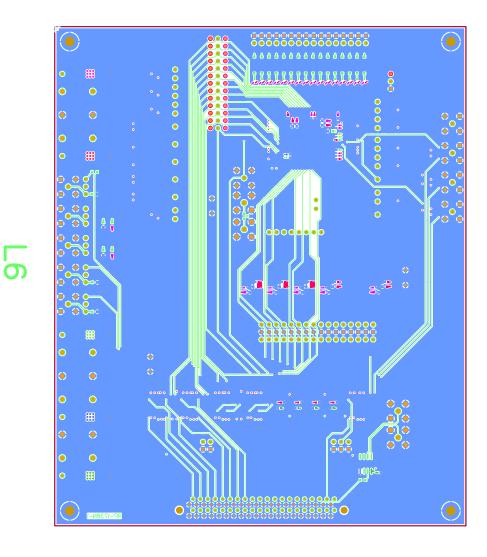


図 A.30 TOSHIZOUv2 レイアウト (レイヤー 6)

L6 MASI

図 A.31 TOSHIZOUv2 レイアウト (L6MASK)



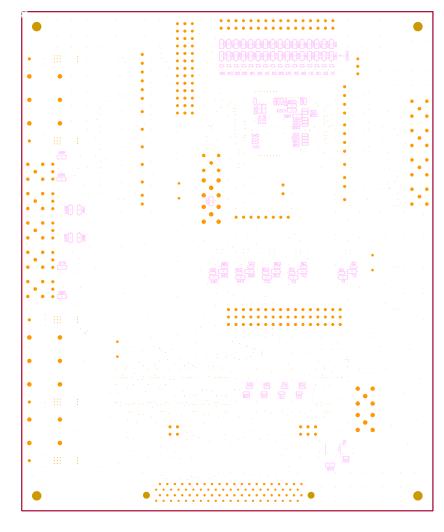


図 A.32 TOSHIZOUv2 レイアウト (SILKB)

謝辞

修士論文を執筆するにあたりお世話になった皆様に感謝いたします。

特に指導教員の身内賢太朗様には本当にお世話になりました。修士論文執筆や発表練習の際 にはお忙しい中にも関わらず遅くまで本当に親身にご指導頂きました。研究に関しては常に暖 かく見守っていただき、行き詰った際には的確なタイミングでアドバイスを頂きました。やり たいことをのびのびとできる環境であったことに心から感謝しています。学会を含む研究会や 研究施設、海外など様々な場所を訪れる機会も快く与えて頂きました。出張をきっかけに多く の人に出会い、修士に進まなければできなかったであろう多くのことを経験出来ました。研究 以外でもその生き方や人柄に触れて学んだ事も多くありました。本当にお世話になりました。 NEWAGE の一員として研究出来た事も光栄でした。中村輝石様、趣味を全力で追求している 輝石さんから聞く話はどれも楽しそうでワクワクしました。ミーティングでのアドバイスや、 論文を参考にさせて頂く事も多く、研究においてもお世話になりました。伊藤博士様、一緒に研 究が出来たのはとても短い期間でしたが研究や発表に関して優しくアドバイスを頂き、ありが とうございました。矢ヶ部遼太様には気さくに話しかけて頂きました。九州でも変わらず元気 でいて下さい。橋本お兄ちゃん。雑談から、研究の話まで。よく話しました。1番絡みの多い 先輩でした。お兄ちゃん大好きです。先輩の池田智法様。1番よく研究の質問をさせていただ きました。本当にお世話になりました。石浦宏尚様。共に海外で研究しましたね。心づよかっ たです。進学後もご活躍を期待しています。本当に、NEWAGE の皆様ありがとう。出張の際 は田中真伸様や坂下健様をはじめ多くの高エネルギー加速器研究機構の皆様にお世話になりま した。岸下徹一様はお忙しいにもかかわらず、基礎から丁寧な指導をして頂きました。庄子正 剛様。はんだ付け等多くの技術を教わりボンディングの難さを共有できる唯一の人です。根岸 久様や業者の皆様のお蔭で浅葱色の基板が出来、レイアウトにも私の拘りが反映され満足して います。基板のデザインモチーフである土方歳三様にも感謝の意を伝えさせて頂きます。小学 校 4 年生の時に存在を知って以来 14 年間大好きな貴方の名前を基板につける事が出来て本当 に光栄です。お蔭で研究も捗り函館の墓前での宣言通り論文を書き終えられました。ありがと うございます。神戸大学粒子物理学研究室の皆様にもとてもお世話になりました。お酒が大好 きな藏重久弥様。コロキや授業以外でも研究に関するアドバイスを頂きました。ダイエット成 功した竹内康雄様。最初のコロキで丁寧に SK について指導して頂きました。山崎祐司様がす る海外や娘さんの話。いつも研究室メンバーでいく昼食時の楽しみでした。越智敦彦様はよく 研究の質問をしました。いつもお忙しい中でも一緒に考えて頂きました。前田順平様とは院生 部屋でよく話をしました。ノロケ話がたくさん聞けて楽しかったです。鈴木州様、清水志真様、 おかだ勝吾様、矢野孝臣様、川出健太郎様ありがとうございました。先輩の山根様、陳様、長谷 川様、木戸様、そして同期の、阿部さん、小川君、竹田君、若宮君、又吉君、お世話になりま した。後輩の皆に先輩らしい事は、ぜんぜん出来ませんでしたが、同じ研究室で過ごせて楽し かったです。有難うございました。東北大学の細川佳志様。研究会の飲み会などで、神戸をは なれてからも気にかけて頂きました。Open-It の皆さま。上野一樹様と庄子さんには修論の成 功を祈るドーナツを贈って頂きました。安田浩昌くん。KEK 出張の度に何かと邪魔をしに行 きましたがお蔭で楽しい出張生活でした。ありがと。名古屋の F 研や、早稲田の ANKOK の 皆様にもお世話になりました。藤田黎様には卒業しているにも関わらず暗黒物質の理論の話や ROOT の書き方など質問攻めにしていました。お仕事でお疲れの中、理解の遅い私に合わせて 根気よく教えて頂き、本当に感謝しています。最後に、心配しながらも私のやりたいように研 究生活を送らせてくれた家族に。ありがとう。

参考文献

- [1] P. A. R. Ade et al., Astronomy & Astrophysics **571**, A16 (2014).
- [2] F. Zwicky, The Astrophysical Journal 86, 217 (1937).
- [3] V. C. Rubin and J. Ford, W. Kent, The Astrophysical Journal 159, 379 (1970).
- [4] R. H. Begeman, K. G.; Broeils, A. H.; Sanders, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **249**, 523 (1991).
- [5] http://hubblesite.org/image/1116/news/18-gravitational-lensing.
- [6] D. Clowe et al., The Astrophysical Journal 648, L109 (2006).
- [7] P. A. R. Ade et al., Astronomy & Astrophysics **594**, A13 (2016).
- [8] C. Alcock et al., The Astrophysical Journal 542, 281 (2000).
- [9] P. Tisserand et al., Astronomy & Astrophysics 469, 387 (2007).
- [10] Y. Fukuda et al., Physical Review Letters 81, 1562 (1998).
- [11] G. L. Fogli, E. Lisi, and A. Marrone, Physical Review D 63, 053008 (2001).
- [12] C. Patrignani et al., Chinese Physics C 40, 686/1778 (2016).
- [13] 橋本隆, 修士論文, PhD thesis, 神戸大学, 2016.
- [14] K. Nakamura, (2014).
- [15] D. N. Spergel, Physical Review D **37**, 1353 (1988).
- [16] R. Bernabei et al., Journal of Physics: Conference Series **375**, 012002 (2012).
- [17] D. S. Akerib et al., Physical Review Letters 118, 021303 (2017).
- [18] E. Aprile *et al.*, The European Physical Journal C 77, 881 (2017), 1708.07051.
- [19] C. Amole et al., Physical Review Letters 118, 251301 (2017).
- [20] M. Ackermann et al., Physical Review D 91, 122002 (2015).
- [21] The First Five years of AMS on the International Space Station The,

2011.

- [22] S. Desai et al., Physical Review D **70**, 083523 (2004).
- [23] M. G. Aartsen et al., Physical Review Letters 110, 131302 (2013).
- [24] ATLAS Collaboration, European Physical Journal C **75** (2015).
- [25] J. Battat *et al.*, Physics of the Dark Universe **9-10**, 1 (2015).
- [26] Q. Riffard et al., Journal of Instrumentation 12 (2015).
- [27] J. P. Richer *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **620**, 470 (2010).
- [28] ATLAS TGC Collaboration, internal note (1999).
- [29] 中村輝石, 修士論文, PhD thesis, 京都大学, 2011.
- [30] K. Nakamura *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics **2015**, 43F01 (2015).
- [31] T. Hashimoto *et al.*, arXiv.org, e-Print Archive, Physics , 1 (2017), 1707.09744.
- [32] C. Martoff, D. Snowden-Ifft, T. Ohnuki, N. Spooner, and M. Lehner, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 440, 355 (2000).
- [33] N. Phan et al., Journal of Instrumentation 12, P02012 (2017).
- [34] 池田智法, 修士論文, PhD thesis, 神戸大学, 2017.
- [35] I. Lopes, H. Hilmert, and W. F. Schmidt, Journal of Physics D: Applied Physics 19, L107 (1986).
- [36] 長谷川大晃, 修士論文, PhD thesis, 神戸大学, 2017.