

第1章

シミュレーションによるトラックの再現

1.1 α 線源を用いた測定

??節で考えた各検出ガスについて、実際に α 線源から放出される α 粒子のトラックを測定した。また、それらのデータから各ガスにおけるドリフト速度、ガスの電子増幅率、トラックの幅を決定した。測定には ^{241}Am の α 線源を用いた。図 1.1 に α 線源のトラックの一例を示す。図 1.1 では検出ガスに 100 hPa の iso-C₄H₁₀ (1) + H₂ (9) を用いた。??節では 6 種類の候補を考えたが、ここからは単体の iso-C₄H₁₀ を除いた 5 種類について考えていく。これは単体の iso-C₄H₁₀ を検出ガスに用いた場合に、拡散係数が大きくトラックが太くなると予測されることと、圧力が 15 hPa と低く安定した TPC の動作が難しいと予測されるためである。

1.1.1 ドリフト速度の測定

電子のドリフト速度を線源によって得られるトラックから実測する。測定には図 1.2 のような線源コリメータを用いる。このコリメータはアクリルで作られており、1 つの 0° と 4 つの 30° の穴が設けられている。このコリメータを用いることで α 線の放出方向を 0° と 30° の方向に限定することができる。30° 方向の α 線は図 1.3 の右のようにドリフト方向に Δy mm、それと垂直な方向に Δz mm 移動するとき、

$$\Delta y = \tan(30^\circ) \times \Delta z \quad (1.1)$$

となる。MAIKo TPC で取得したトラックの横方向の変分を $\Delta strip$ 、縦方向の変分を Δt ns、ドリフト速度を v_{drift} mm ns⁻¹ とすると、

$$\frac{\Delta z}{0.4 \text{ mm}} = \Delta strip \quad (1.2)$$

$$\frac{\Delta y}{v_{\text{drift}}} = \Delta t \quad (1.3)$$

という関係にある。式 (1.1), (1.2), (1.3) より

$$v_{\text{drift}} = \frac{\tan(30^\circ) \times \Delta strip \times 0.4 \text{ mm}}{\Delta t} \quad (1.4)$$

とドリフト速度が決定される。

α 線源を用いて測定したドリフト速度と Magboltz で計算した値を表 1.1 に示す。 α 線源を用いて測定したドリフト速度と Magboltz を用いて計算したドリフト速度が概ね一致していることが分かる。ここで、

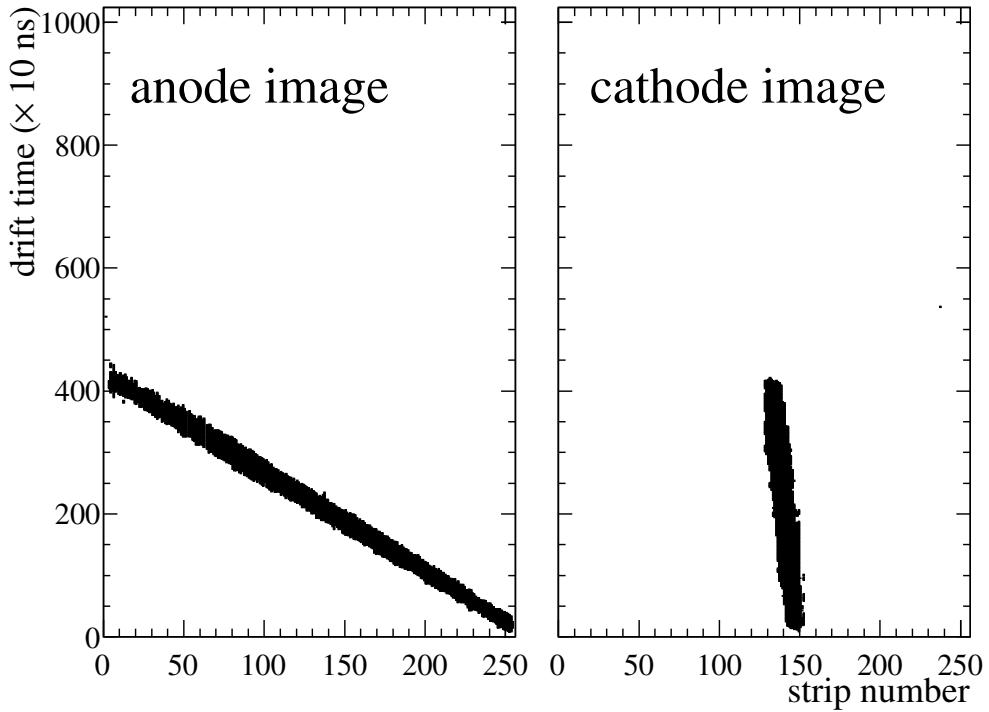


図 1.1: α 粒子を測定したトラックの一例. 検出ガスには iso-C₄H₁₀ (1) + H₂ (9) を用いた.

表 1.1: 実測したドリフト速度と Magboltz を用いて計算したドリフト速度の比較.

gas	ドリフト電場 (V mm^{-1})	実測値 (mm ns^{-1})	計算値 (mm/ns)
CH ₄	0.429	0.0126	0.0145
CH ₄ (3) + H ₂ (7)	4.32	0.0140	0.0140
CH ₄ (4) + He (6)	1.89	0.0135	0.0140
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + H ₂ (9)	6.82	0.0137	0.0140
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + He (9)	3.29	0.0139	0.0141

Magboltz の計算値が 0.014 mm ns^{-1} となっていないのは、MAIKo TPC の実際の運用を簡単にするために設定電圧を切りの良い値にしたためである。CH₄ は実測と Magboltz による計算値に不一致が見られるが、CH₄ のみ 50 hPa とその他のガスと比較して圧力が半分であるため、不純物、特に水分の影響を強く受けていいると考えられる。水分のドリフト速度へ与える影響は付録??で述べる。

1.1.2 電子増幅率

GEM および μ -PIC による電子の増幅率を測定した。増幅率は荷電粒子が検出ガス中を通過した際に発生させた電子数 (N_e) と增幅後に μ -PIC によって収集された電子数 (N'_e) から求めることができる。 N_e は検出ガス中での荷電粒子のエネルギー損失と検出ガスの W 値 (1 つの電子対の生成に必要なエネルギー) から

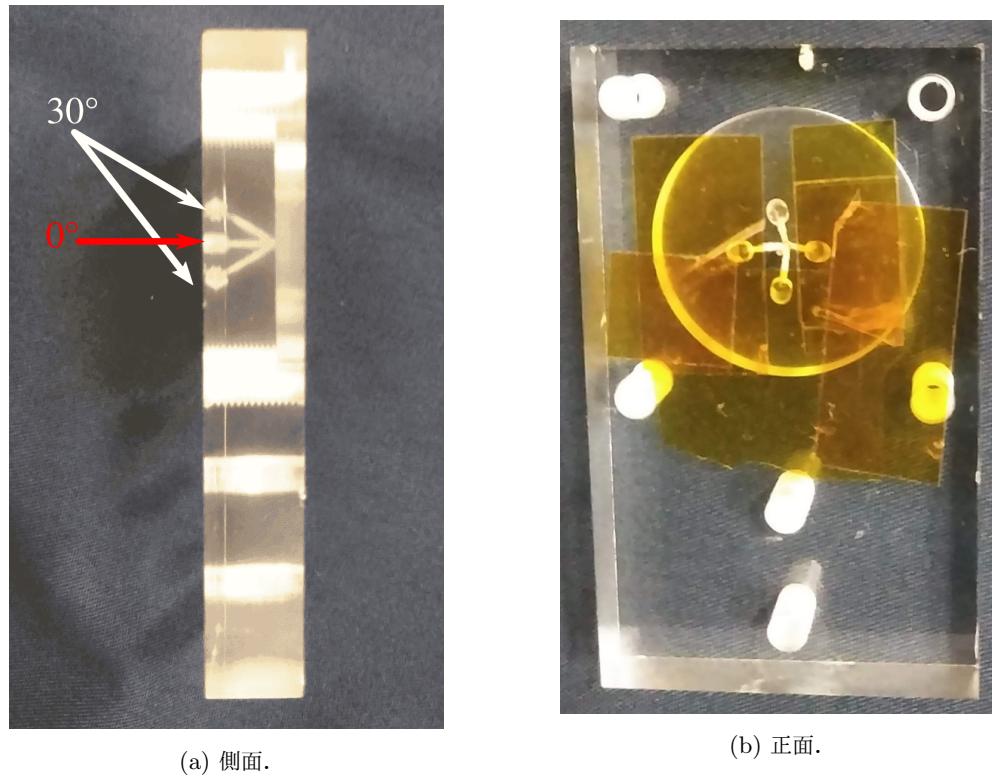


図 1.2: 線源コリメータ. 中央に 0° , 上下左右に 30° の穴が設けられている. 0° の穴と 1 つの 30° の穴を除いてカプトンテープで封じることにより, α 先の放出方向を限定している.

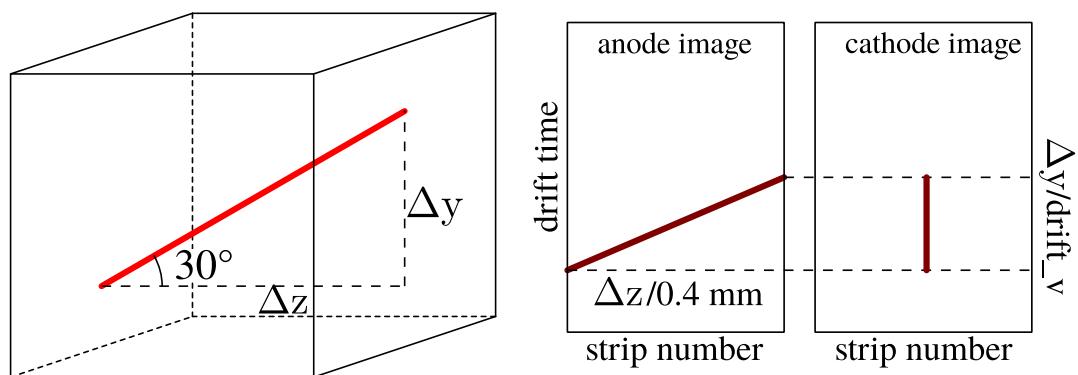


図 1.3: 30° に方向を限定した α 線 (左) と取得される画像データ (右) のイメージ.

表 1.2: 検出ガスの W 値 [?, ?] とエネルギー損失と N_e . エネルギー損失は 4.2 MeV の α 粒子がガス中を 12.8 mm 進んだ時の値である.

gas	W 値 (eV)	energy loss (keV)	N_e
CH ₄	29.1	56.5	1.94×10^3
CH ₄ (3) + H ₂ (7)	34.2	53.4	1.56×10^3
CH ₄ (4) + He (6)	39.2	59.3	1.51×10^3
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + H ₂ (9)	35.4	62.0	1.75×10^3
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + He (9)	44.0	58.0	1.32×10^3

表 1.3: 各検出ガスの電子增幅率.

gas	増幅率 (倍)
CH ₄	700
CH ₄ (3) + H ₂ (7)	354
CH ₄ (4) + He (6)	322
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + H ₂ (9)	272
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + He (9)	392

求める. N'_e は μ -PIC で収集した電荷から求める. 検出ガス中で荷電粒子がエネルギーを損失すると, W 値あたり平均 1 個の電子を電離する. そのため, 荷電粒子のエネルギー損失を W 値で除することで N_e が求まる. 各検出ガスにおけるエネルギー損失と W 値 [?, ?] を表 1.2 に示す. 本研究ではでは ²⁴¹Am からの α 線を用いて測定を行った. ²⁴¹Am からは 5.48 MeV の α 線が放出される. 今回の測定に用いた α 線源は線量を大きくするために, 多くの ²⁴¹Am が線源に含まれている. そのため, 物質厚が大きくなっている, α 線が放出される前に線源中でエネルギーを損失してしまう. この線源から出ている α 粒子の持つエネルギーが平均 4.2 MeV であることが過去の測定により確認している. 今回の測定では 0° 方向に放出された α 線を用いて測定した. エネルギー損失は 4.2 MeV の α 粒子が μ -PIC 32 strip 分の距離 (12.8 mm) で落とすエネルギーを示している. この距離で発生した電子が μ -PIC の 32 strips で収集される.

32 strips まとめた μ -PIC からの信号波形は図 ?? のような FADC 情報として取得している. この信号波形を時間で積分することによって 32 strips で収集した電荷量を計算することができる. μ -PIC で取得した電気信号は読み出し回路内部で 800 倍に增幅され, FADC の入力インピーダンス 50 Ω で電流値を電圧値に変換して取得している. よって, 式 (1.5) で μ -PIC で収集した電荷量を得ることができる. e は電気素量である.

$$N'_e = \frac{\int V(t)dt}{50 \times 800 \times e} \quad (1.5)$$

各検出ガスの增幅率と電子の収集効率を畳み込んだ値を表 1.3 に示す. ここでは, GEM と μ -PIC の両方による增幅率となっている. また, 測定時の GEM や μ -PIC に印加した電圧を表 1.4 に示す.

表 1.4: 電子増幅率を測定した際の電圧設定. GEM のうち grid 側を GEMt, μ -PIC 側を GEMb とする.

gas	plate (V)	grid (V)	GEMt (V)	GEMb (V)	μ -PIC (V)
CH ₄	-1370	-1290	-560	-150	175
CH ₄ (3) + H ₂ (7)	-2105	-1500	-620	-250	420
CH ₄ (4) + He (6)	-1465	-1200	-600	-250	400
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + H ₂ (9)	-2255	-1300	-600	-250	400
iso-C ₄ H ₁₀ (1) + He (9)	-1430	-970	-600	-250	300

1.1.3 トラックの幅

本実験の目的である 3α に崩壊するイベントでは観測されるトラックが太いと複数のトラックの区別が難しくなり、トラックを正しく抽出できなくなる。そこで、 0° の α 粒子によるトラックの幅を測定した。図 1.4 に示すように、トラックの幅には anode strip 128 ch 目の clock 方向の幅を用いる。このようにして決定したトラックの幅と Magboltz を用いて計算した運動方向に対して垂直方向の拡散係数を図 1.5 に示す。図 1.5 から分かるようにトラックの幅と拡散係数には正の相関がある。拡散係数、トラックの幅とともに iso-C₄H₁₀ (1) + H₂ (9) が最も小さいことが分かる。

1.2 シミュレーションによる線源データの再現

MAIKo TPC から得られるトラックを Garfield++ [?] と Magboltz [?], SRIM [?] を用いたシミュレーションにより MAIKo TPC で測定されるトラックの再現を試みた。シミュレーションでは、ドリフト電場、W 値、電子増幅率、検出ガスの密度を固定した上で、最もよく測定結果を再現する信号の閾値を探査した。電子増幅率は α 線源を用いた測定値を用いた。シミュレーションは以下の手順で行った。

1. トラックを生成する荷電粒子のエネルギー、運動量を決定し、Garfield++ の SrimTrack に登録する。
2. SrimTrack によりトラックの周囲に電子を生成する。
3. 電子を Magboltz で求めたドリフト速度と拡散係数に基づき読み出し領域へドリフトさせる。
4. 電子のドリフト時間を信号処理回路の応答関数で畳み込む。すなわち、読み出し領域に到達した電子 1 つにつき図 1.6 に示すような電気信号を各 strip の信号波形に加算する。
5. 設定した信号波形の閾値に基づき、信号波形を白黒画像に変換し anode image と cathode image を生成する。

α 線源を用いた場合のシミュレーションと測定の比較を以下に示す。図 1.7 は 50 hPa の CH₄ におけるトラック、図 1.8 は 100 hPa の CH₄ (3) + H₂ (7) におけるトラック、図 1.9 は 100 hPa の CH₄ (4) + He (6) におけるトラック、図 1.10 は 100 hPa の iso-C₄H₁₀ (1) + H₂ (9) におけるトラック、図 1.11 は 100 hPa の iso-C₄H₁₀ (1) + He (9) におけるトラックである。これらの α 線は図 1.3 のように有感領域を貫通している。信号の閾値を 0.1 mV とすると、それぞれの検出ガスでの α 線源によるトラックを、シミュレーションで再現できる。

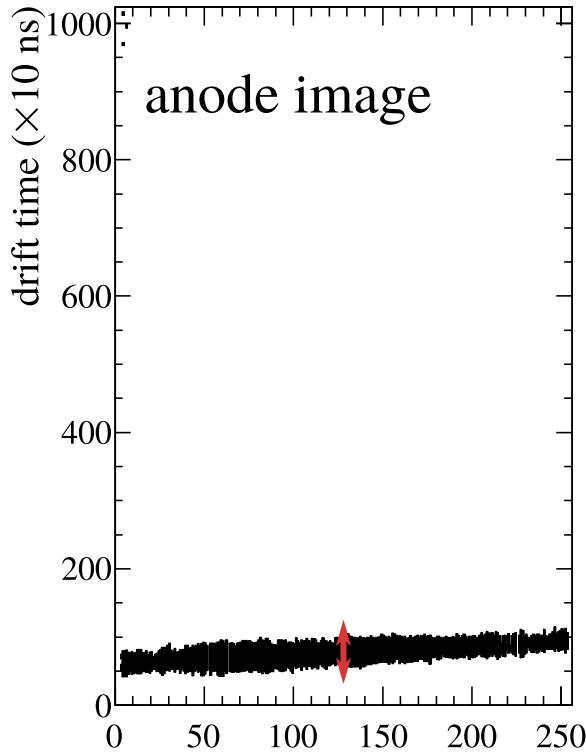


図 1.4: トラックの幅の決定方法のイメージ. トラックの幅は有感領域の中央である anode strip 128 ch の clock 方向の幅を用いる.

α 線源から放出される α 粒子のエネルギーは平均 4.2 MeV である. 一方で, 本研究で検出を目指している 0_2^+ 状態からの崩壊 α 粒子のエネルギーは数百 keV である. そこで, α 線源の前に 15 μm のカプトン膜を設置することで α 粒子のエネルギーを減衰させ, 低エネルギー α 粒子での測定を行った. α 粒子のエネルギーは有感領域と線源の間にある検出ガスによってさらに低下し TPC の有感領域では約 1 MeV となる. 低エネルギー α 粒子のトラックを図 1.12 [CH₄ (50 hPa)], 1.13 [CH₄ (3) + H₂ (7) (100 hPa)], 1.14 [CH₄ (4)+He (6) (100 hPa)], 1.15 [iso-C₄H₁₀ (1)+H₂ (9) (100 hPa)], 1.16 [iso-C₄H₁₀ (1)+He (9) (100 hPa)] に示す. コリメータによって α 線の方向を 30° に制限したため, 斜めのトラックとなっている. シミュレーションでは有感領域の横から 500 keV の α 粒子を入射させた. これらの α 粒子は MAIKo TPC の有感領域中で停止している. α 線源から放出されるエネルギーに広がりがあるため, エネルギーを完全に一致できていないが, トラックの太さの傾向は再現できている.

1.3 トリプルアルファ反応のシミュレーション

α 線源から放出される α 粒子のトラックを再現することができたので, 同じ設定で $^{12}\text{C}(n, n')3\alpha$ 反応をシミュレーションによって生成した. このシミュレーションでは以下のように 3 つの α 粒子を生成した.

1. ^{12}C を 14 MeV の中性子との非弾性散乱により 0_2^+ 状態に励起させる. この際, 重心系で一様な散乱角

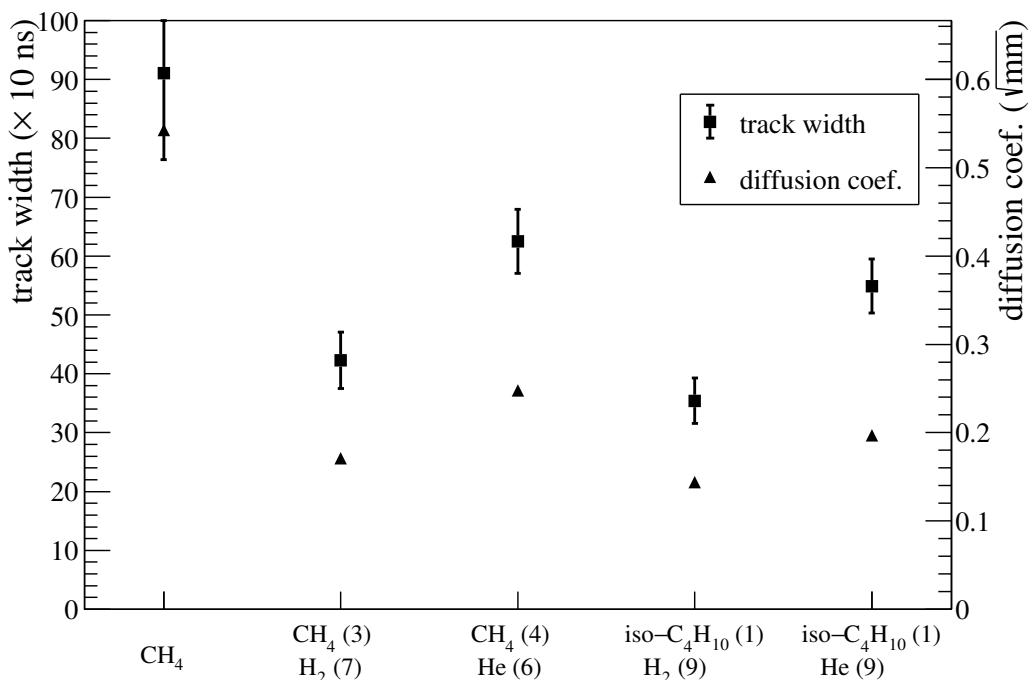
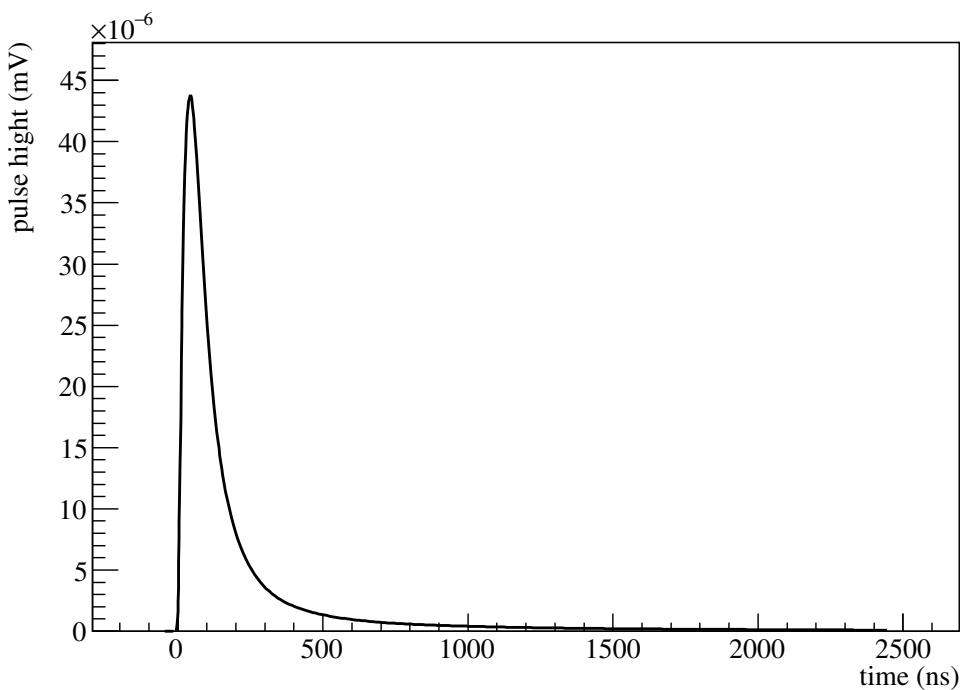
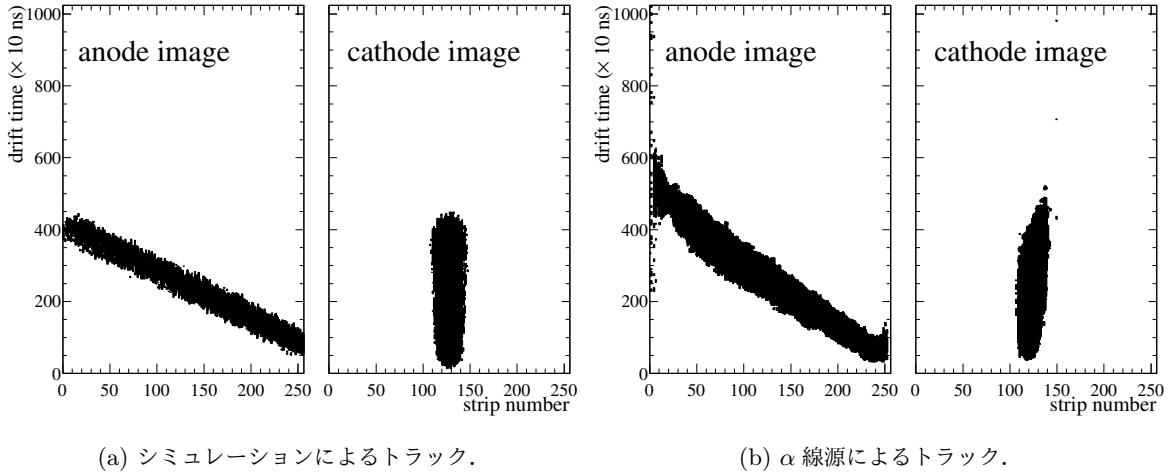
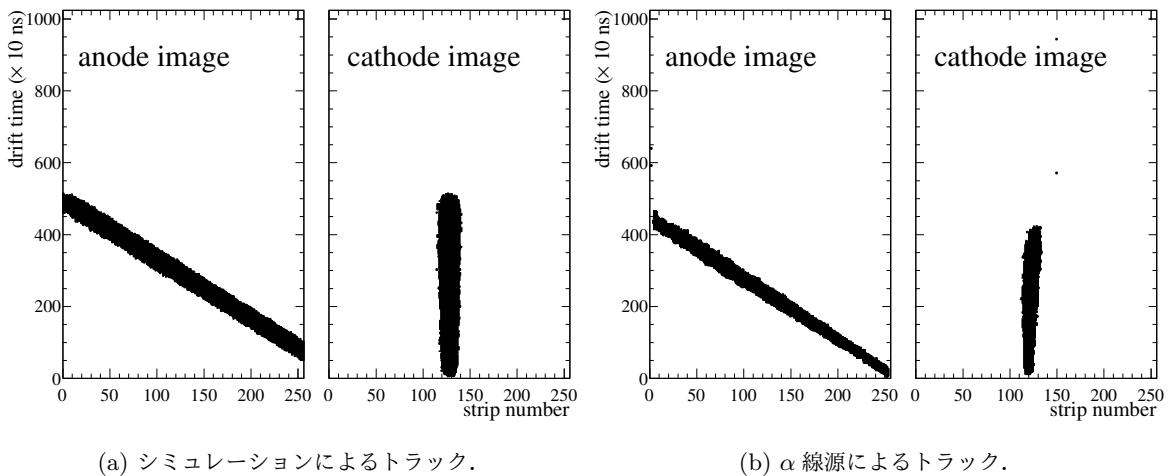


図 1.5: Magboltz で計算した拡散係数と実測によるトラックの幅.

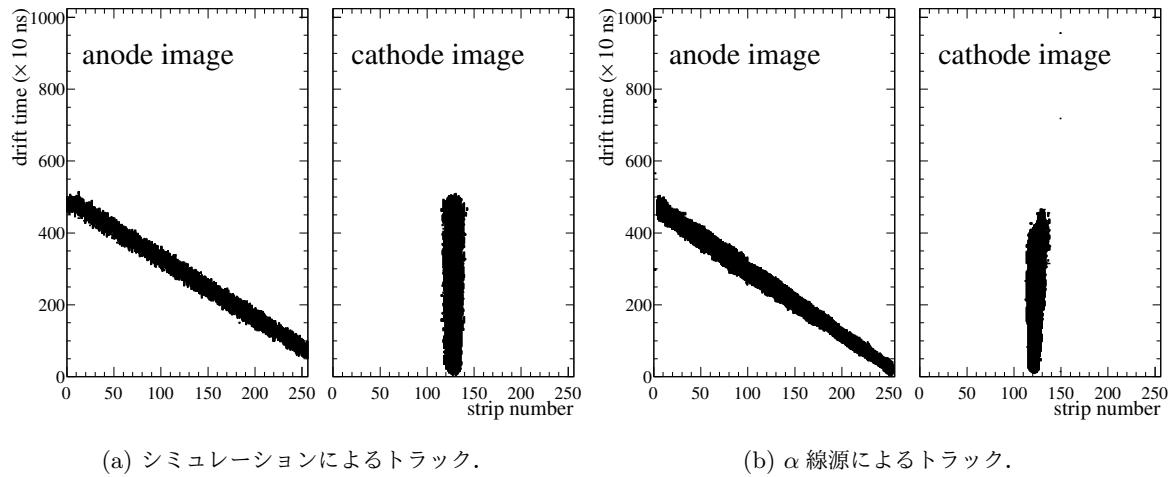
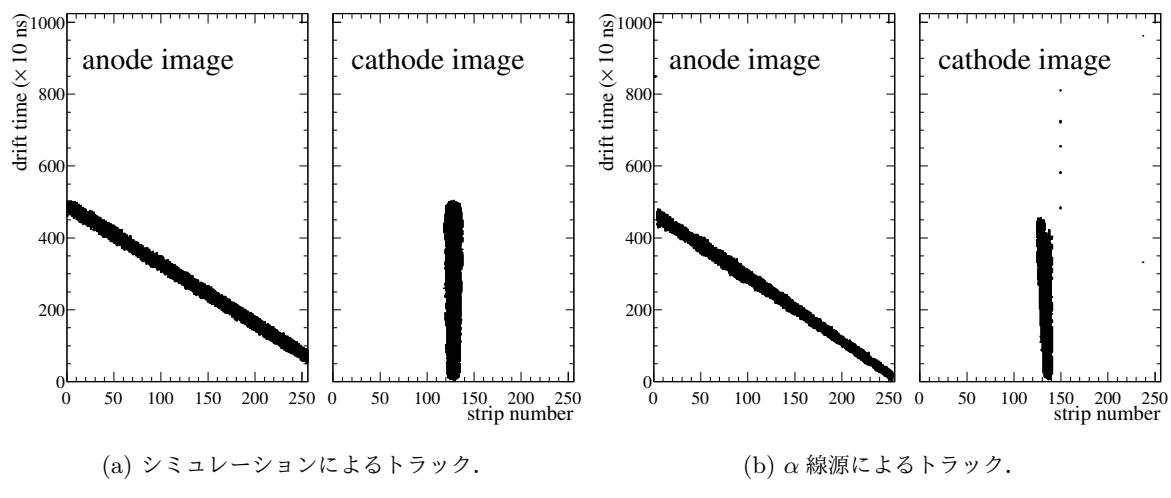
図 1.6: 1 電子が μ -PIC に到達した時に読み出される電気信号.

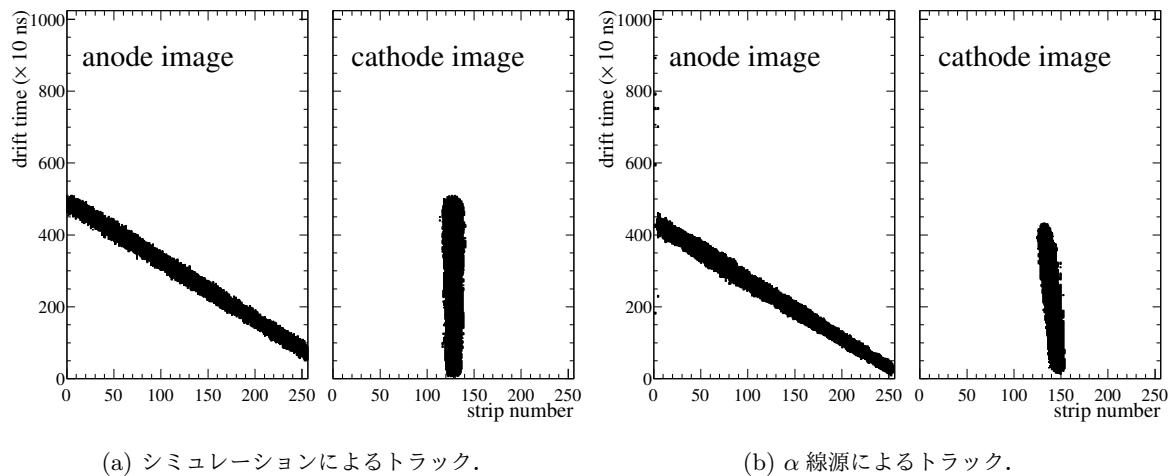
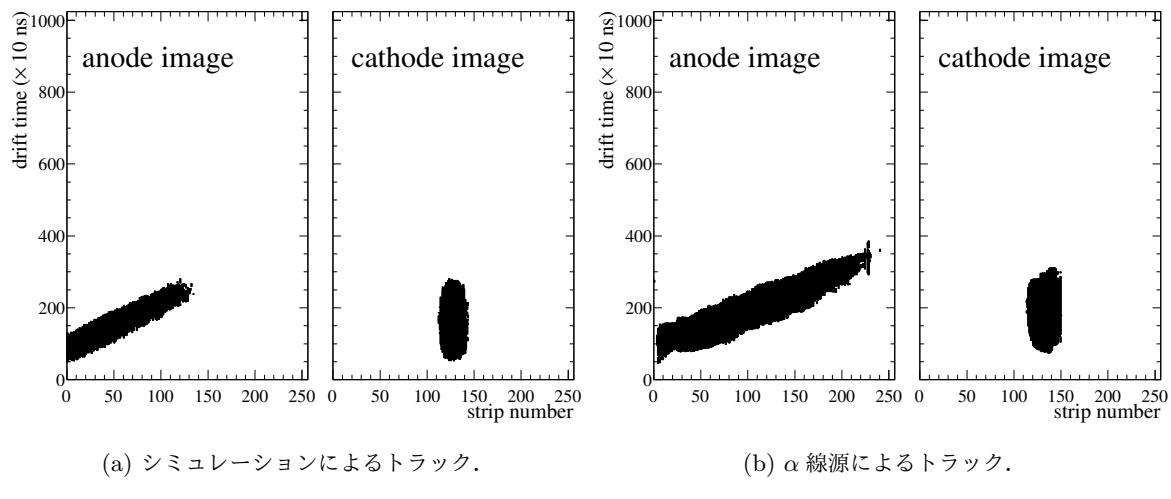
図 1.7: α 粒子のトラック (CH_4 の場合).図 1.8: α 粒子のトラック (CH_4 (3) + H_2 (7) の場合).

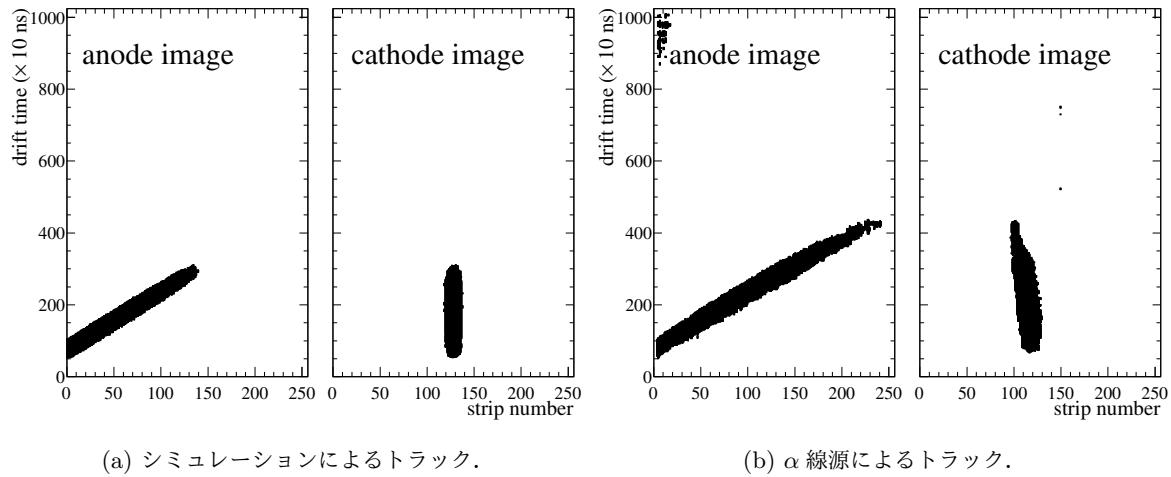
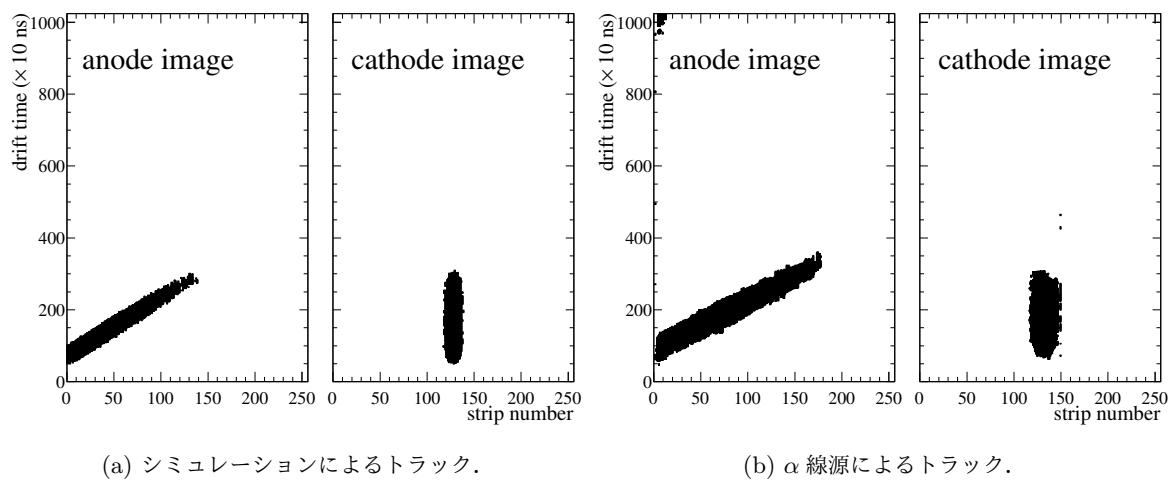
で散乱させる。

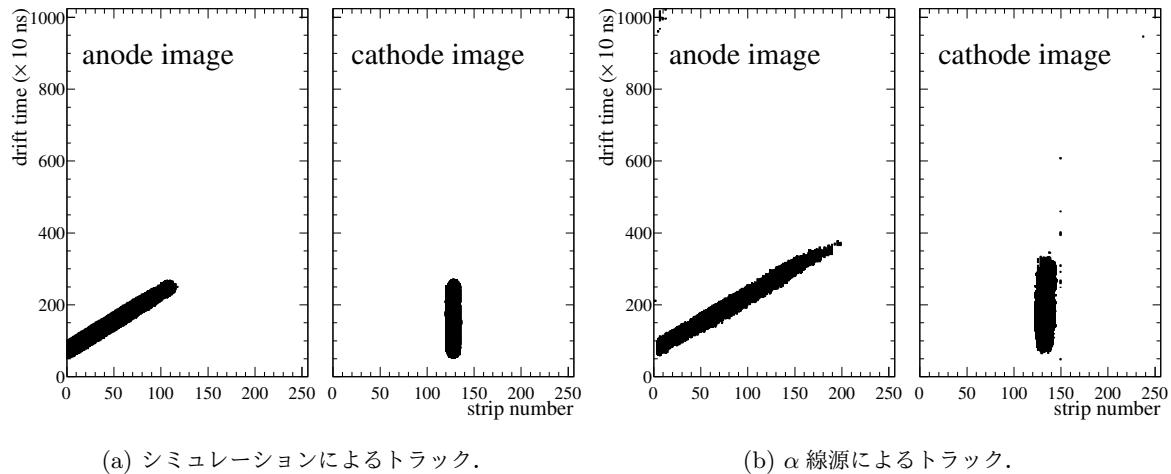
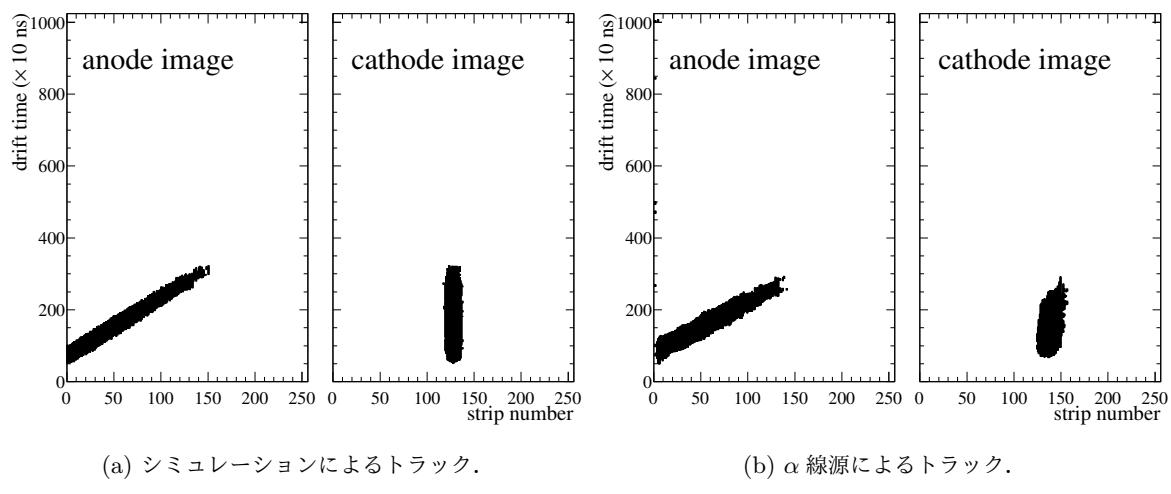
2. $^{12}\text{C}(0_2^+)$ を α 粒子と ^8Be に位相空間で一様に崩壊させる。
3. 崩壊してできた ^8Be を 2 つの α 粒子へ位相空間で一様に崩壊させる。

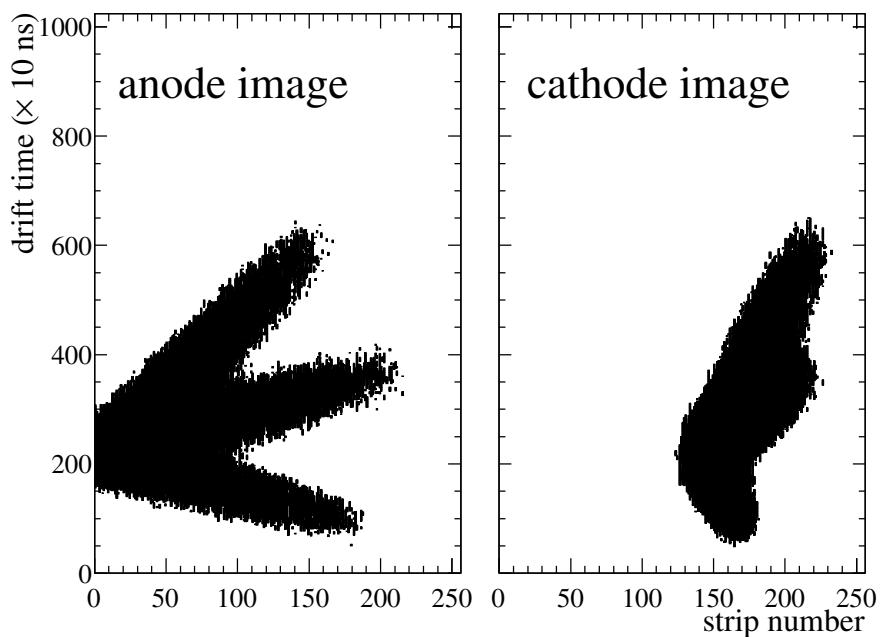
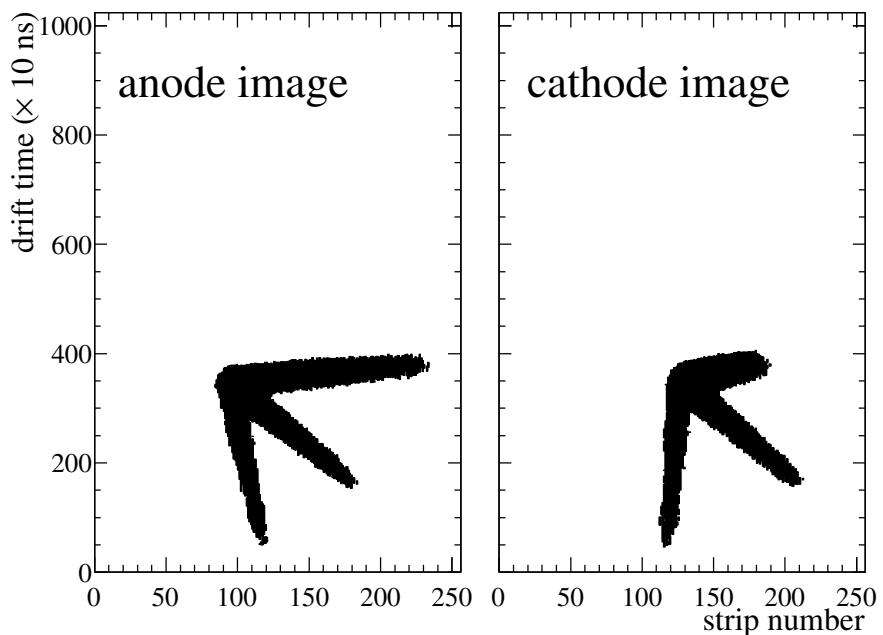
このようにして得た α 粒子のトラックを生成する。トラックの生成方法は前節で述べた通りである。生成したトラックの例を図 1.17 [CH_4 (50 hPa)], 1.18 [CH_4 (100 hPa)], 1.19 [CH_4 (100 hPa)], 1.20 [iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9) (100 hPa)], 1.21 [iso- C_4H_{10} (1) + He (9) (100 hPa)] に示す。ここでは、3 つのトラックを確認できたイベントを示した。生成されたイベントの中には α 粒子のエネルギーと放出角度によっては、3 本のトラックを個別に確認できないイベントも含まれている。図 1.22 [CH_4 (50 hPa)], 1.23 [CH_4 (3) + H_2 (7) (100 hPa)], 1.24 [CH_4 (4) + He (6) (100 hPa)], 1.25 [iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9) (100 hPa)], 1.26 [iso- C_4H_{10} (1) + He (9) (100 hPa)] に 2 本しかトラックを確認できないイベントの例を示す。

図 1.9: α 粒子のトラック [CH_4 (4) + He (6) の場合].図 1.10: α 粒子のトラック [iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9) の場合].

図 1.11: α 粒子のトラック [iso-C₄H₁₀ (1) + He (9) の場合].図 1.12: 低エネルギー α 粒子のトラック [CH₄ の場合].

図 1.13: 低エネルギー α 粒子のトラック [CH_4 (3) + H_2 (7) の場合].図 1.14: 低エネルギー α 粒子のトラック [CH_4 (4) + He (6) の場合].

図 1.15: 低エネルギー α 粒子のトラック [iso-C₄H₁₀ (1) + H₂ (9) の場合].図 1.16: 低エネルギー α 粒子のトラック [iso-C₄H₁₀ (1) + He (9) の場合].

図 1.17: 3α のシミュレーション画像 [CH₄ の場合].図 1.18: 3α のシミュレーション画像 [CH₄ (3) + H₂ (7) の場合].

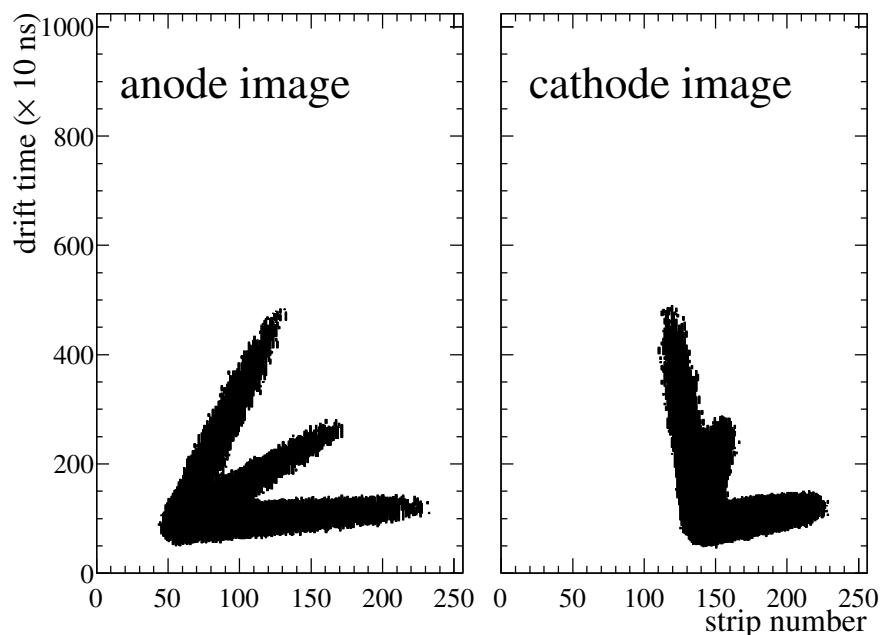


図 1.19: 3α のシミュレーション画像 [CH_4 (4) + He (6) の場合].

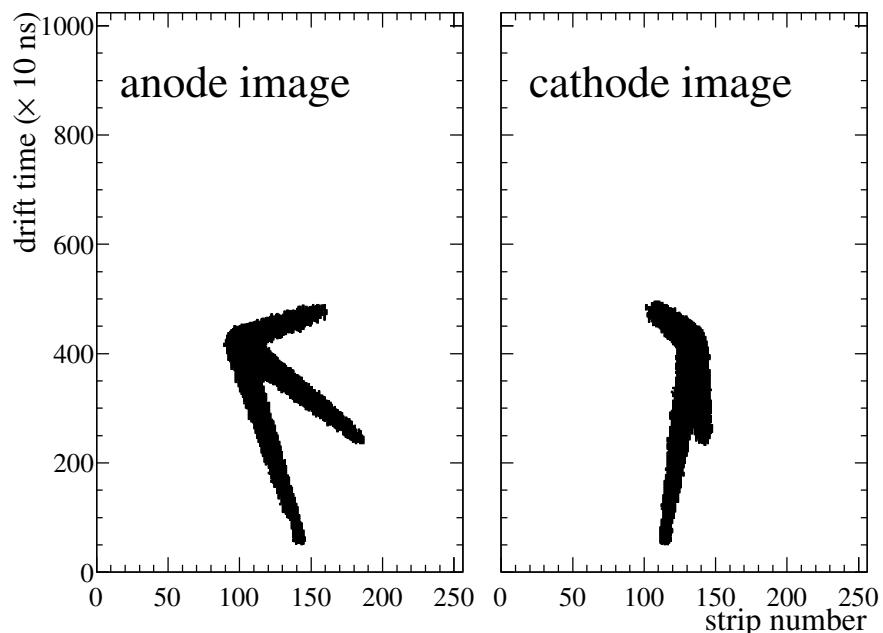
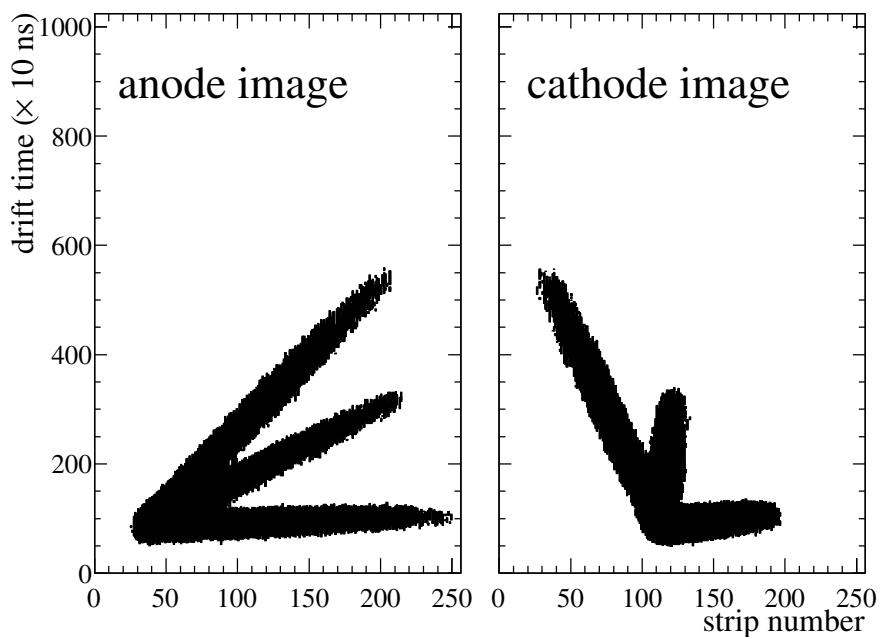
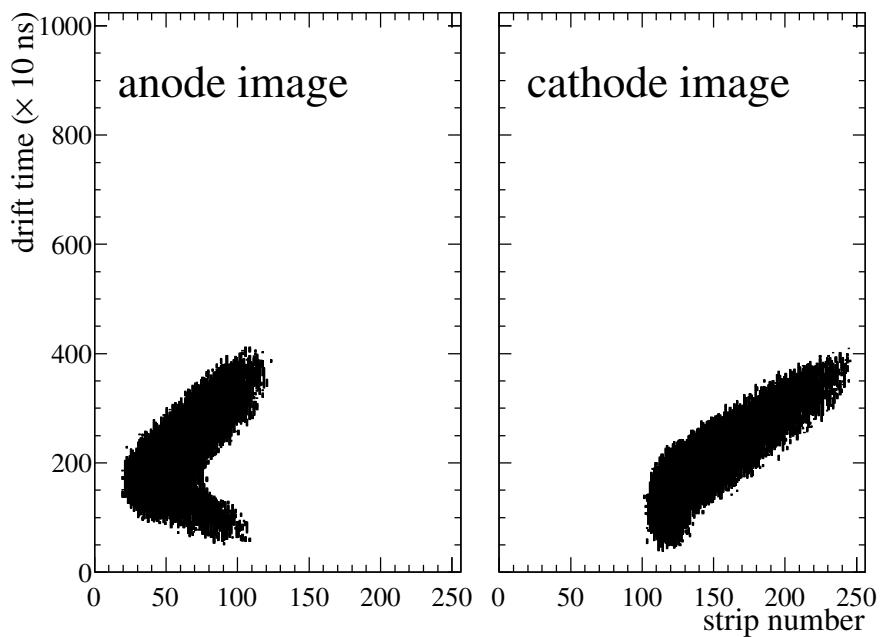


図 1.20: 3α のシミュレーション画像 [iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9) の場合].

図 1.21: 3α のシミュレーション画像 [iso-C₄H₁₀ (1) + He (9) の場合].図 1.22: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 [CH₄ の場合].

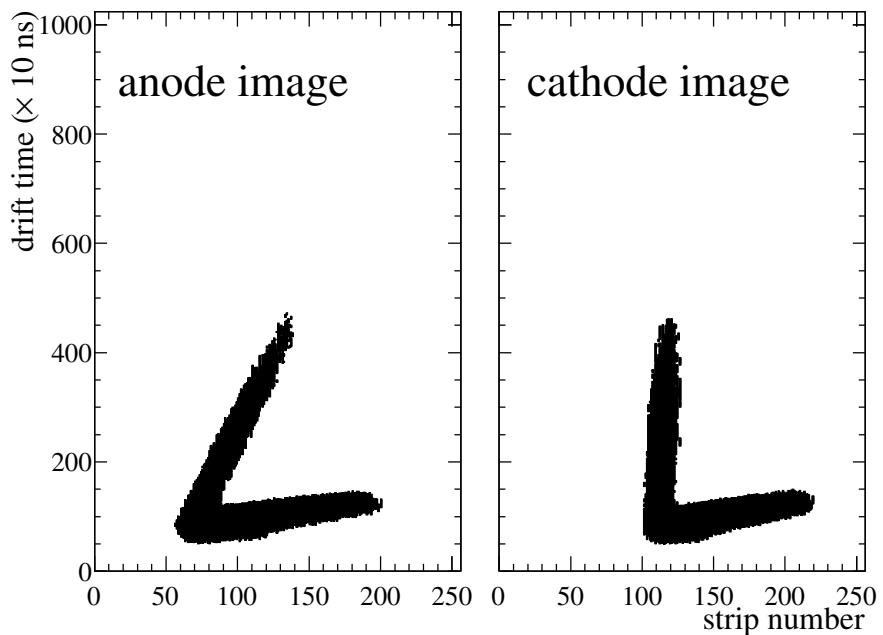


図 1.23: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 [CH_4 (3) + H_2 (7) の場合].

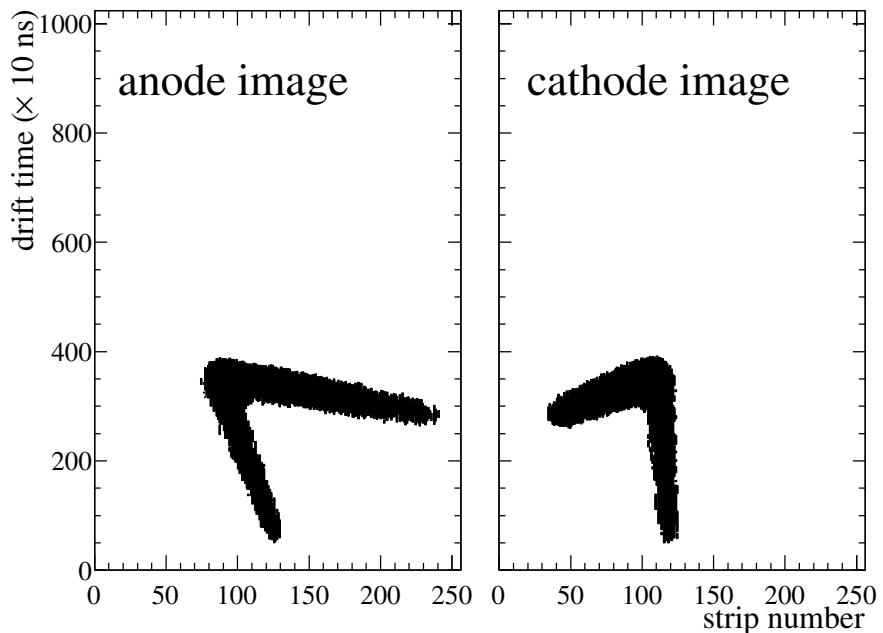


図 1.24: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 [CH_4 (4) + He (6) の場合].

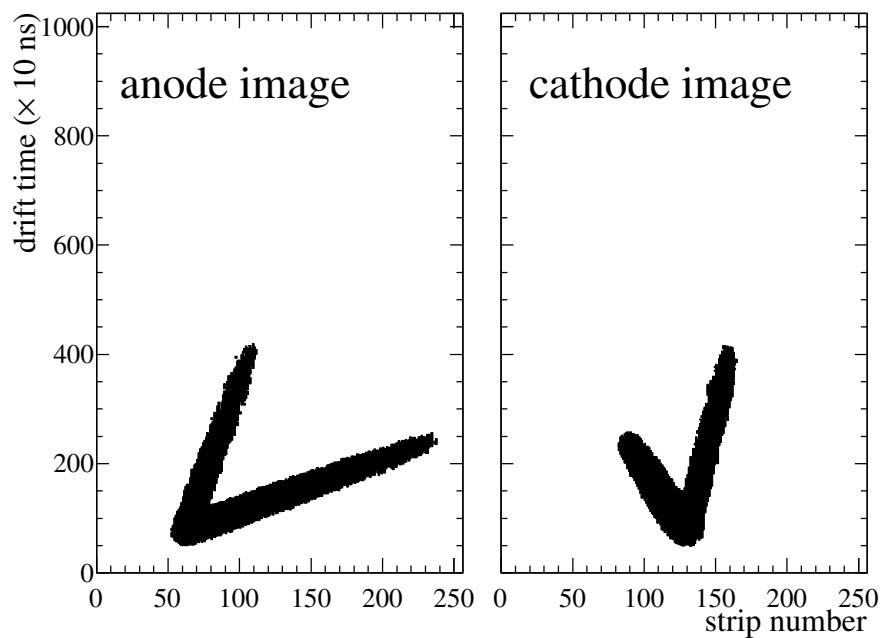


図 1.25: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 [$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (1) + H_2 (9) の場合].

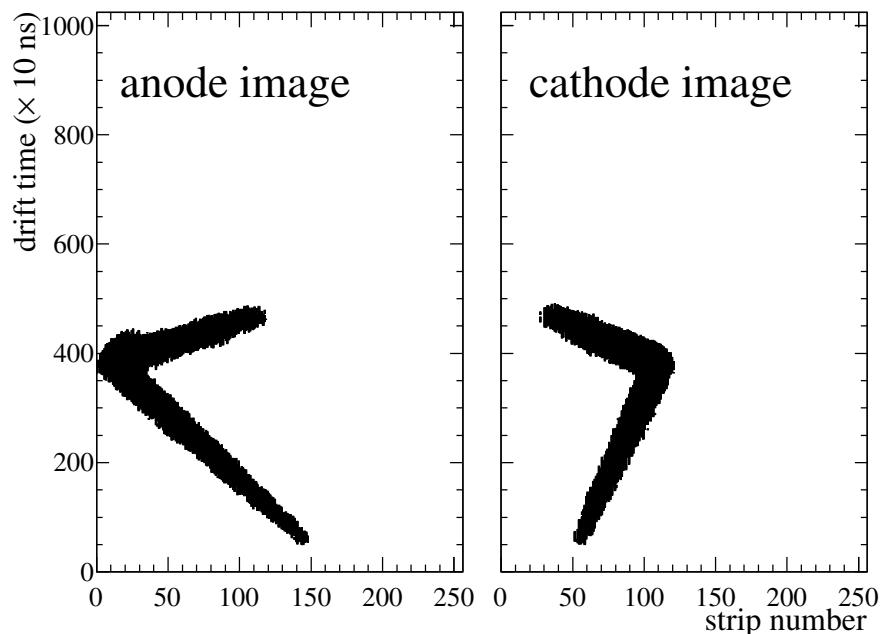


図 1.26: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 [$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (1) + He (9) の場合].