

## 第1章

# シミュレーションによるトラックの再現

### 1.1 $\alpha$ 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  $\alpha$  線源から放出される  $\alpha$  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  $^{241}\text{Am}$  の  $\alpha$  線源を用いた。図 1.1 に  $\alpha$  線源のトラックの一例を示す。図 1.1 では検出ガスに iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + H<sub>2</sub> (9) を用いた。??節では 6 種類の候補を考えたが、ここからは单体の iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> を除いた 5 種類について考えていく。これは单体の iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 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。

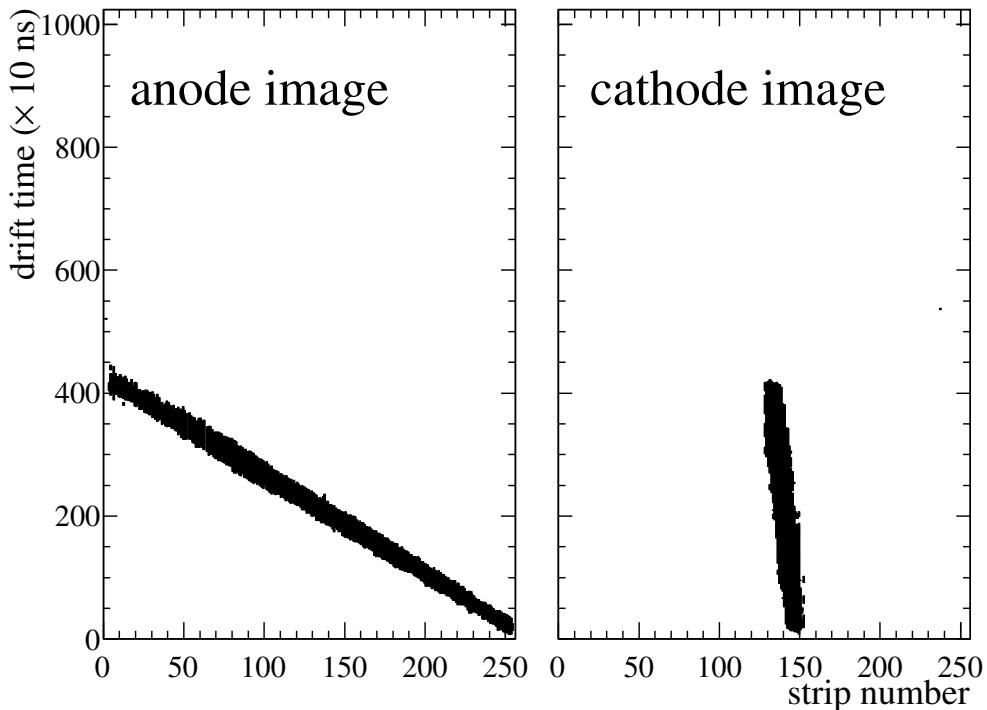


図 1.1:  $\alpha$  粒子を測定したトラックの一例。検出ガスには iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + H<sub>2</sub> (9) を用いた。

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 ( $V \text{ mm}^{-1}$ )	実測値 ( $\text{mm ns}^{-1}$ )	計算値 ( $\text{mm/ns}$ )
$\text{CH}_4$	0.429	0.0126	0.0145
$\text{CH}_4$ (3) + $\text{H}_2$ (7)	4.32	0.0140	0.0140
$\text{CH}_4$ (4) + $\text{He}$ (6)	1.89	0.0135	0.0140
iso- $\text{C}_4\text{H}_{10}$ (1) + $\text{H}_2$ (9)	6.82	0.0137	0.0140
iso- $\text{C}_4\text{H}_{10}$ (1) + $\text{He}$ (9)	3.29	0.0139	0.0141

### 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  $0^\circ$  と 4 つの  $30^\circ$  の穴が設けられている。このコリメータを用いることで  $\alpha$  線の放出方向を  $0^\circ$  と  $30^\circ$  の方向に限定することができる。 $30^\circ$  方向の  $\alpha$  線は図 1.3 の右のようにドリフト方向に  $\Delta y \text{ mm}$ 、それと垂直な方向に  $\Delta z \text{ mm}$  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  $\Delta t \text{ ns}$ 、ドリフト速度を  $v_{\text{drift}} \text{ mm ns}^{-1}$  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。

$\alpha$  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。 $\alpha$  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、Magboltz の計算値が  $0.014 \text{ mm ns}^{-1}$  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。 $\text{CH}_4$  は実測と Magboltz による計算値に不一致が見られるが、検出ガスに含まれる水分の影響が疑われる。 $\text{CH}_4$  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、不純物の影響が大きく出ていると考えられる。不純物のドリフト速度への影響は付録??で述べる。

### 1.1.2 電子増幅率

各部の電圧に対する電子増幅率の依存性を測定した。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  $\mu$ -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) から求め

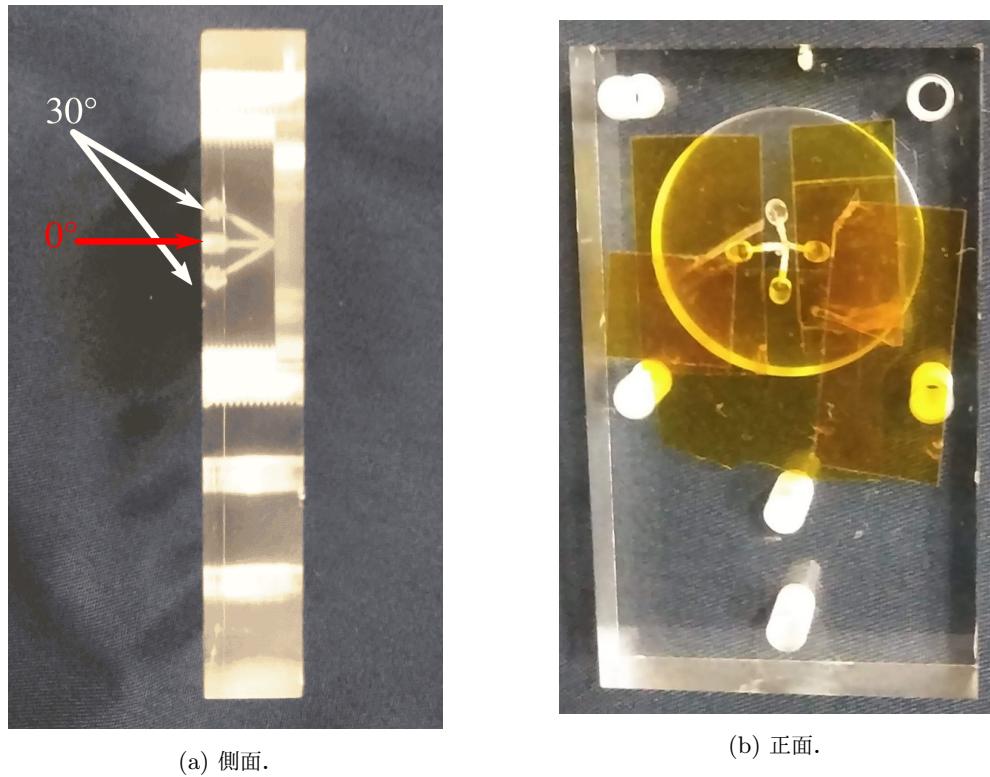


図 1.2: 線源コリメータ. 中央に  $0^\circ$ , 上下左右に  $30^\circ$  の穴が設けられている.  $0^\circ$  の穴と 1 つの  $30^\circ$  の穴を除いてカプトンテープで封じることにより,  $\alpha$  先の放出方向を限定している.

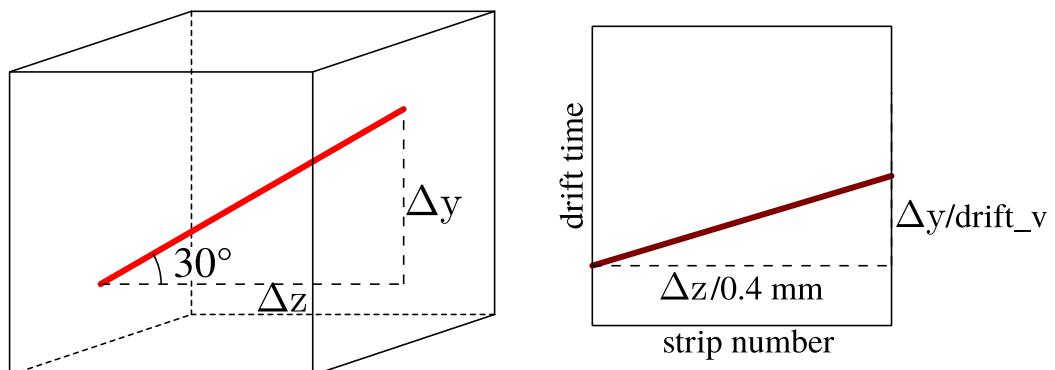


図 1.3:  $30^\circ$  に方向を限定した  $\alpha$  線 (左) と取得される画像データ (右) のイメージ.

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  $\alpha$  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 <sub>4</sub>	29.1	56.5	$1.94 \times 10^3$
CH <sub>4</sub> (3) + H <sub>2</sub> (7)	34.2	53.4	$1.56 \times 10^3$
CH <sub>4</sub> (4) + He (6)	39.2	59.3	$1.51 \times 10^3$
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + H <sub>2</sub> (9)	35.4	62.0	$1.75 \times 10^3$
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + He (9)	44.0	58.0	$1.32 \times 10^3$

表 1.3: 各検出ガスの電子増幅率.

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

る.  $N'_e$  は  $\mu$ -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. <sup>241</sup>Am からは 5.48 MeV の  $\alpha$  線が放出される. 今回の測定に用いた  $\alpha$  線源は線量を大きくするために, 多くの <sup>241</sup>Am 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,  $\alpha$  線が放出される前に線源内でエネルギーを損失してしまう. この線源から出ている  $\alpha$  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° 方向の  $\alpha$  線を用いて測定した. エネルギー損失は 4.2 MeV の  $\alpha$  粒子が  $\mu$ -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  $\mu$ -PIC の 32 strips で収集される.

32 strips まとめた  $\mu$ -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.  $\mu$ -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  $\mu$ -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.

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

各検出ガスの増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  $\mu$ -PIC の両方による増幅率となっている.

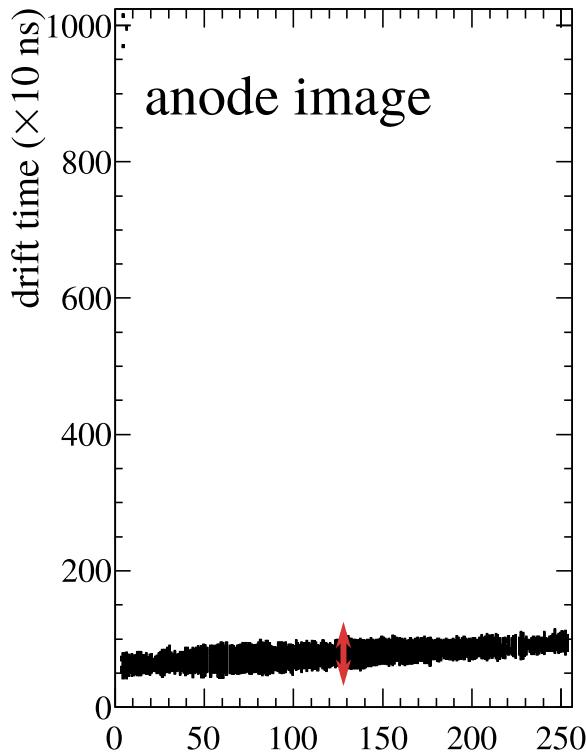


図 1.4: ト ラックの幅の決定方法のイメージ. ト ラックの幅は有感領域の中央である anode strip 128 ch の clock 方向の幅を用いる.

### 1.1.3 ト ラックの幅

本実験の目的である  $3\alpha$  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,  $0^\circ$  の  $\alpha$  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相関がある. 拡散係数, ト ラックの幅とともに iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + H<sub>2</sub> (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 TOT の閾値を探査した. 電子増幅率は  $\alpha$  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.

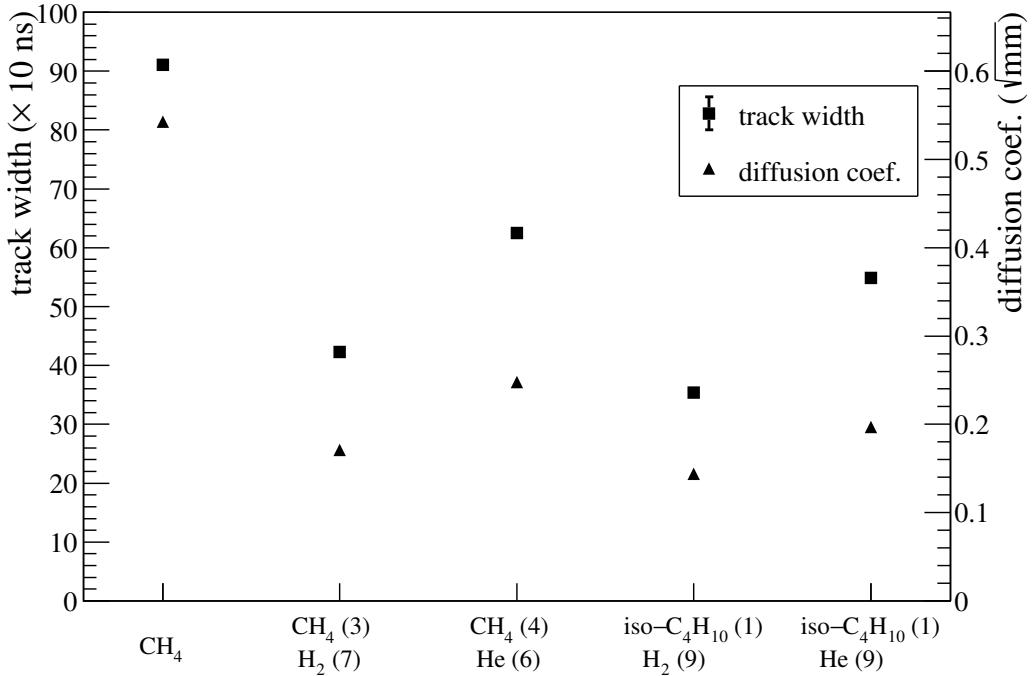


図 1.5: Magboltz で計算した拡散係数と実測によるトラックの幅.

3. 電子を Magboltz で求めたドリフト速度で読み出し領域へドリフトさせる.
4. 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. 設定した閾値により, 信号波形を TOT に変換し anode image と cathode image を生成する.

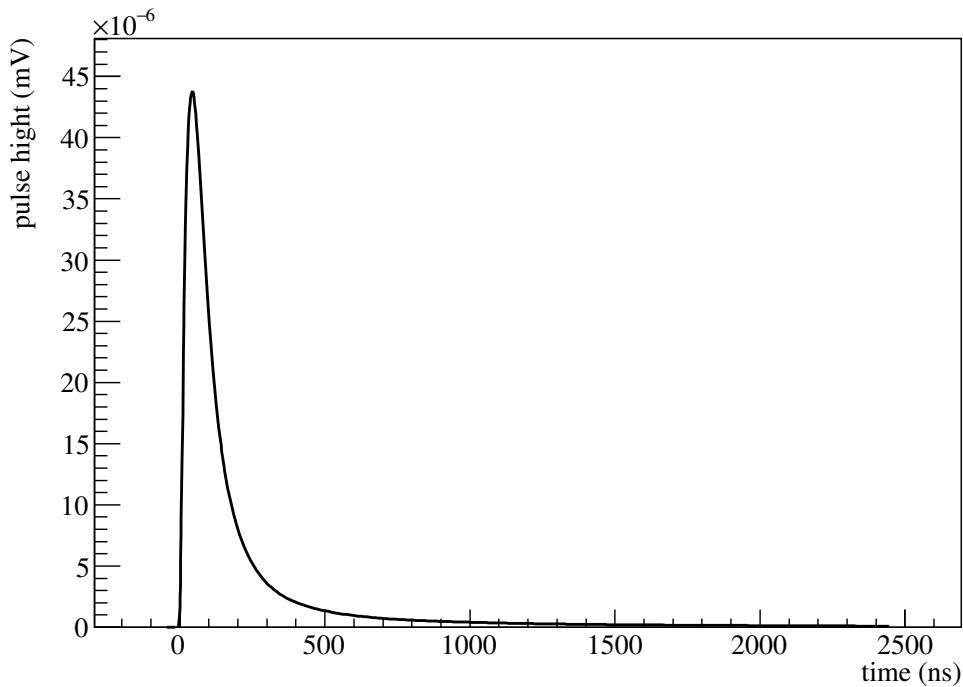
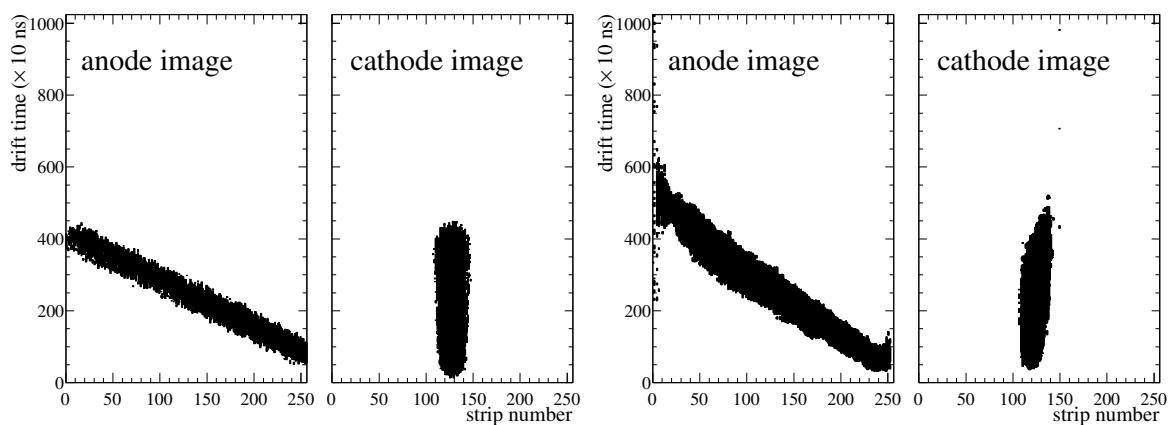
$\alpha$  線源を用いた場合のシミュレーションと測定の比較を図 1.7, 1.8, 1.9, 1.10, 1.11 に示す. TOT の閾値を 0.1 mV とすると, それぞれの検出ガスでの  $\alpha$  線源によるトラックを, シミュレーションで再現できる.

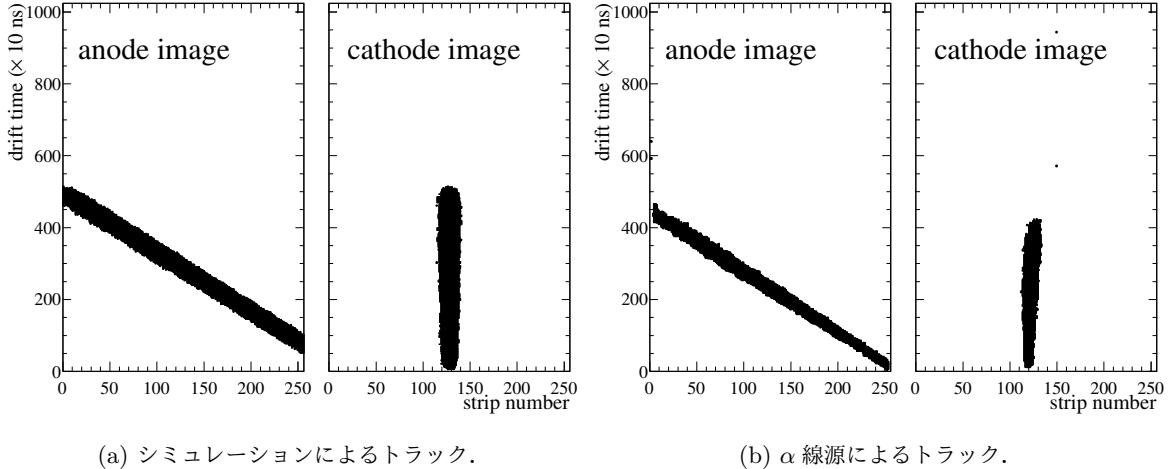
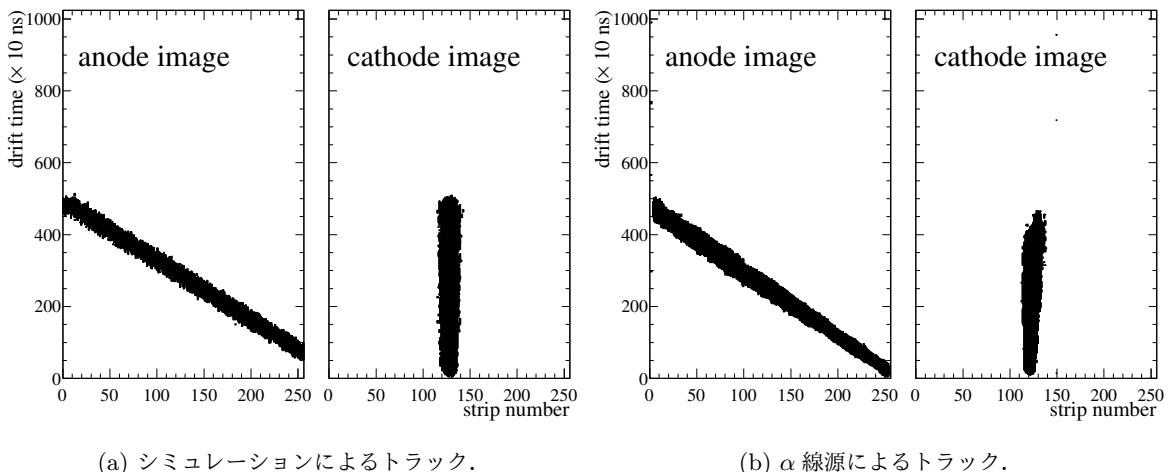
$\alpha$  線源から放出される  $\alpha$  粒子のエネルギーは平均 4.2 MeV である. 一方で, 本研究の目的である  $0_2^+$  状態からの崩壊  $\alpha$  粒子のエネルギーは数百 keV である. そこで,  $\alpha$  線源の前に 15  $\mu\text{m}$  のカプトンを設置することで低エネルギー  $\alpha$  粒子での測定を行った.  $\alpha$  粒子のエネルギーは有感領域と線源の間にある検出ガスによってさらに低下し約 1 MeV となる. 図 1.12, 1.13, 1.14, 1.15, 1.16 に示す. コリメータの 30° の穴を用いたため, 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  $\alpha$  粒子を入射させた.  $\alpha$  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

$\alpha$  線源から放出される  $\alpha$  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  $^{12}\text{C}(n, n')3\alpha$  のシミュレーションを行った. このシミュレーションでは以下のように 3 つの  $\alpha$  粒子を生成した.

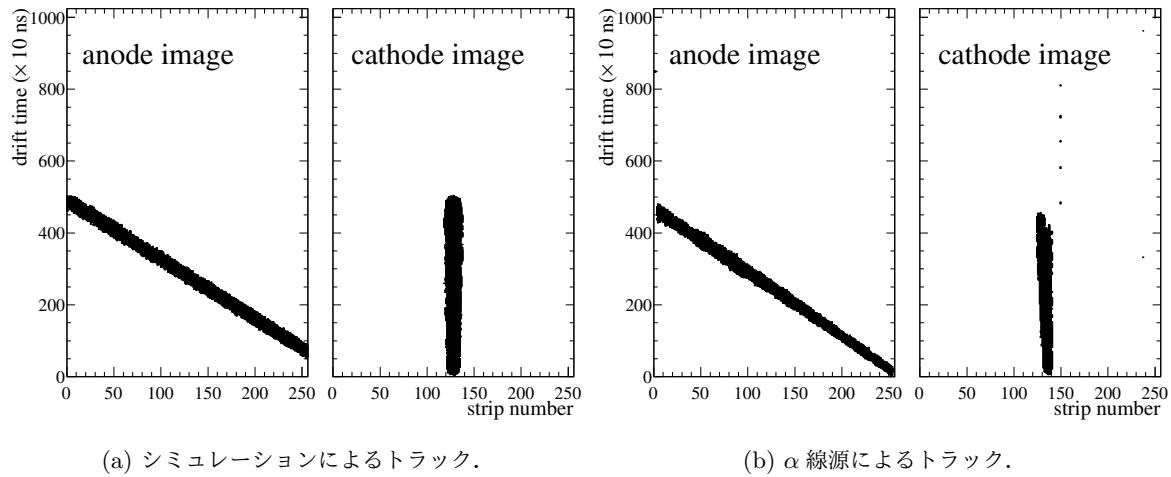
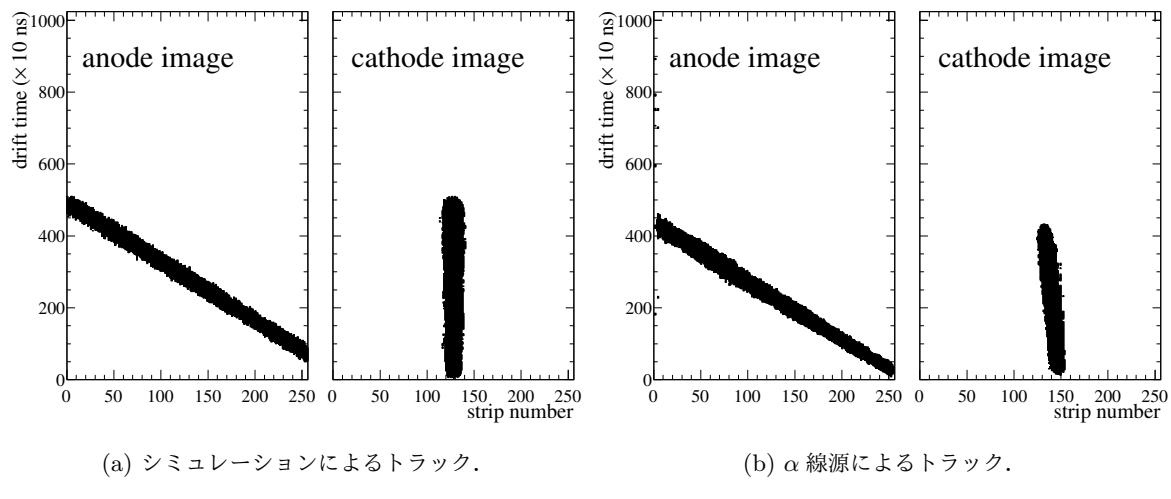
1.  $^{12}\text{C}$  を 14 MeV の中性子との散乱により  $0_2^+$  状態に励起させる. この際, 重心系で一様な散乱角で散乱させる.

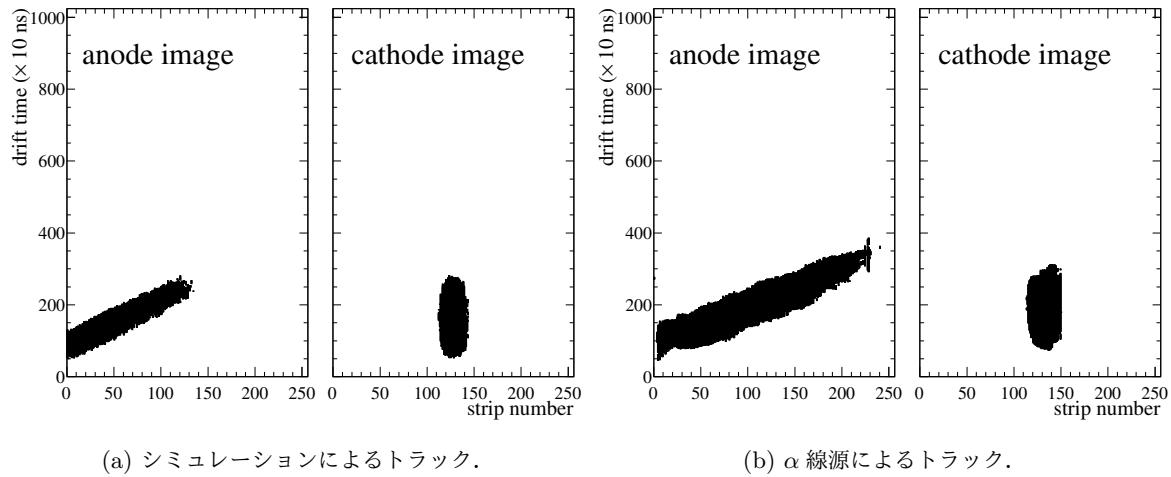
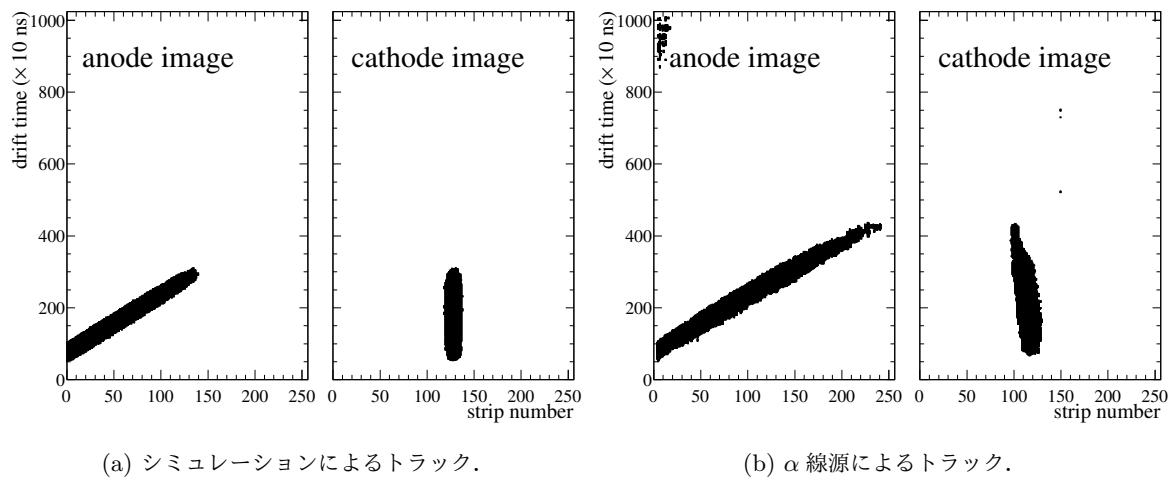
図 1.6: 1 電子が  $\mu$ -PIC に到達した時に読み出される電気信号.図 1.7:  $\alpha$  粒子のトラック ( $\text{CH}_4$  の場合).

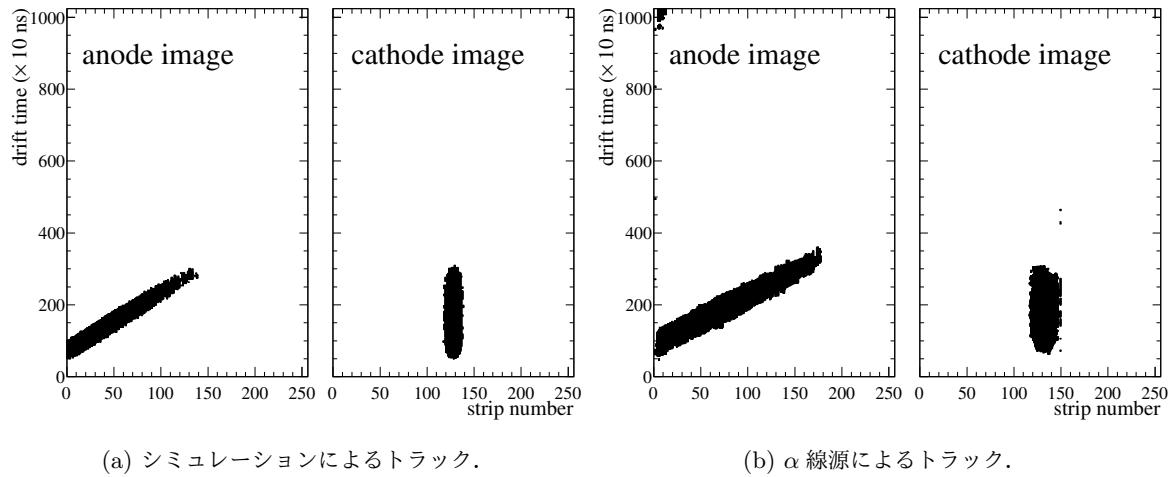
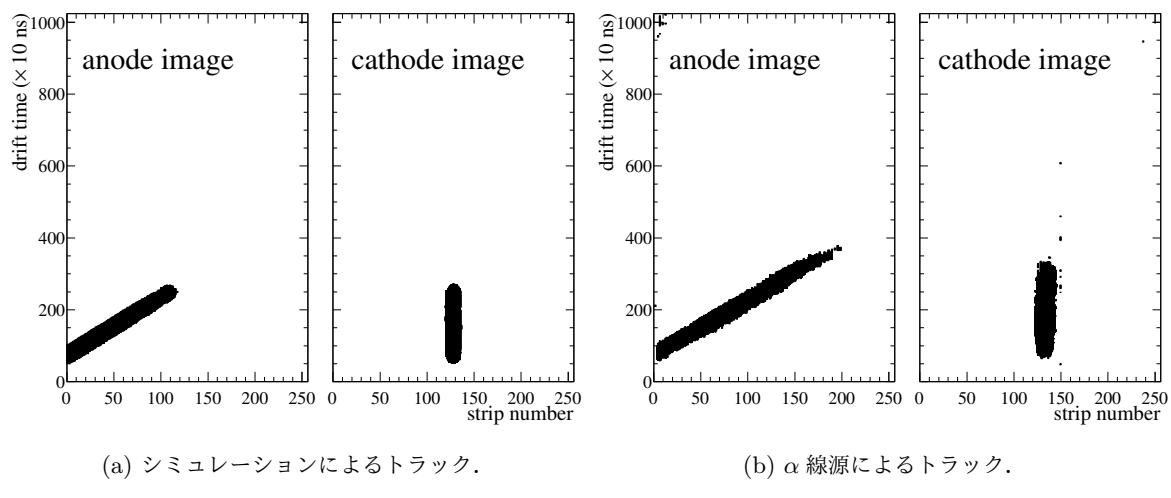
図 1.8:  $\alpha$  粒子のトラック ( $\text{CH}_4$  (3) +  $\text{H}_2$  (7) の場合).図 1.9:  $\alpha$  粒子のトラック [ $\text{CH}_4$  (4) +  $\text{He}$  (6) の場合].

2.  $^{12}\text{C}(0_2^+)$  を  $\alpha$  粒子と  $^8\text{Be}$  に位相空間で一様に崩壊させる。
3. 崩壊してできた  $^8\text{Be}$  を 2 つの  $\alpha$  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  $\alpha$  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。生成したトラックを図 1.17, 1.18, 1.19, 1.20, 1.21 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  $\alpha$  粒子のエネルギーと放出角度によっては、3 本のトラックを確認できないイベントも含まれている。図 1.22, 1.23, 1.24, 1.25, 1.26 に 2 本しかトラックを確認できないイベントを示す。

図 1.10:  $\alpha$  粒子のトラック [iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + H<sub>2</sub> (9) の場合].図 1.11:  $\alpha$  粒子のトラック [iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + He (9) の場合].

図 1.12: 低エネルギー  $\alpha$  粒子のトラック [CH<sub>4</sub> の場合].図 1.13: 低エネルギー  $\alpha$  粒子のトラック [CH<sub>4</sub> (3) + H<sub>2</sub> (7) の場合].

図 1.14: 低エネルギー  $\alpha$  粒子のトラック [ $\text{CH}_4$  (4) + He (6) の場合].図 1.15: 低エネルギー  $\alpha$  粒子のトラック [iso- $\text{C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{H}_2$  (9) の場合].

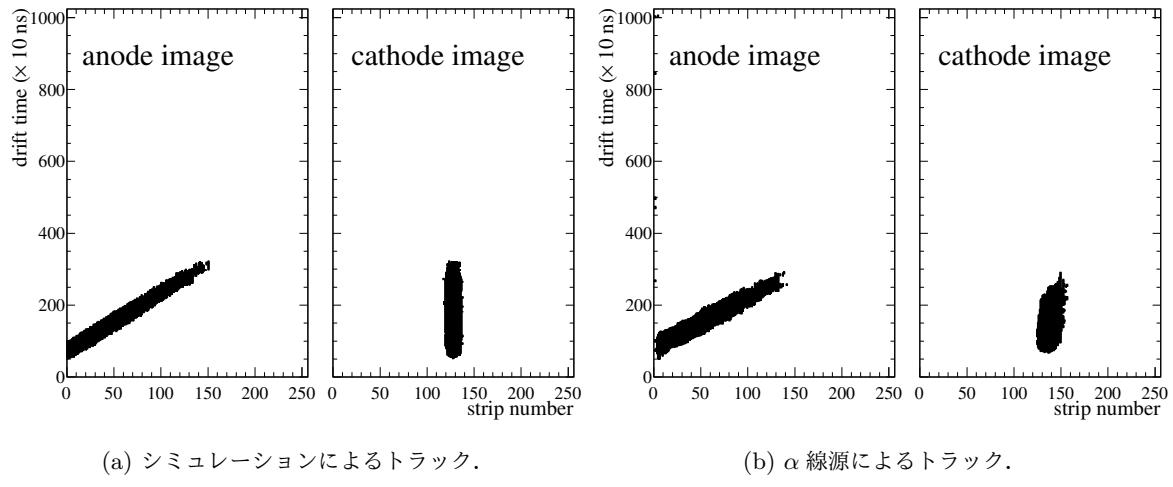


図 1.16: 低エネルギー  $\alpha$  粒子のトラック [iso- $C_4H_{10}$  (1) + He (9) の場合].

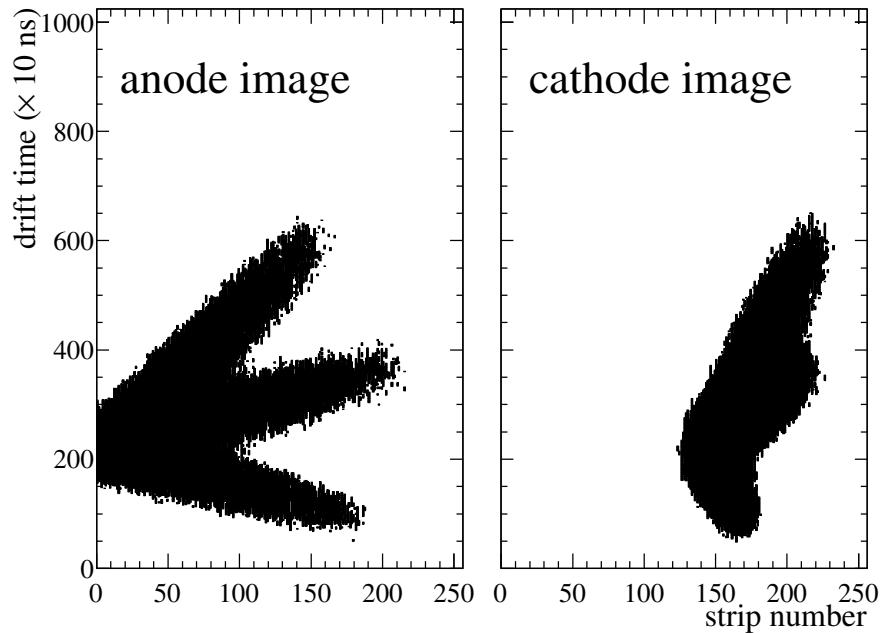
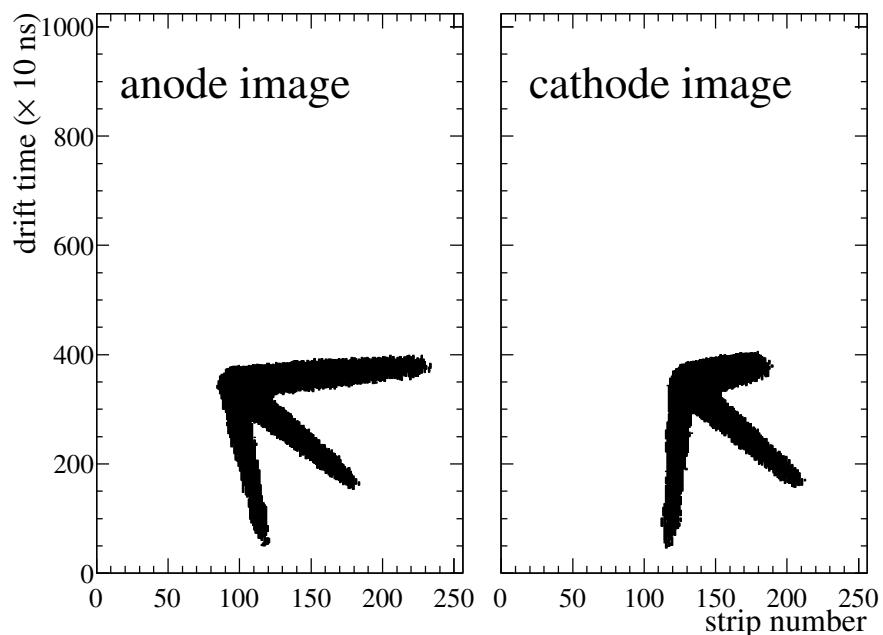
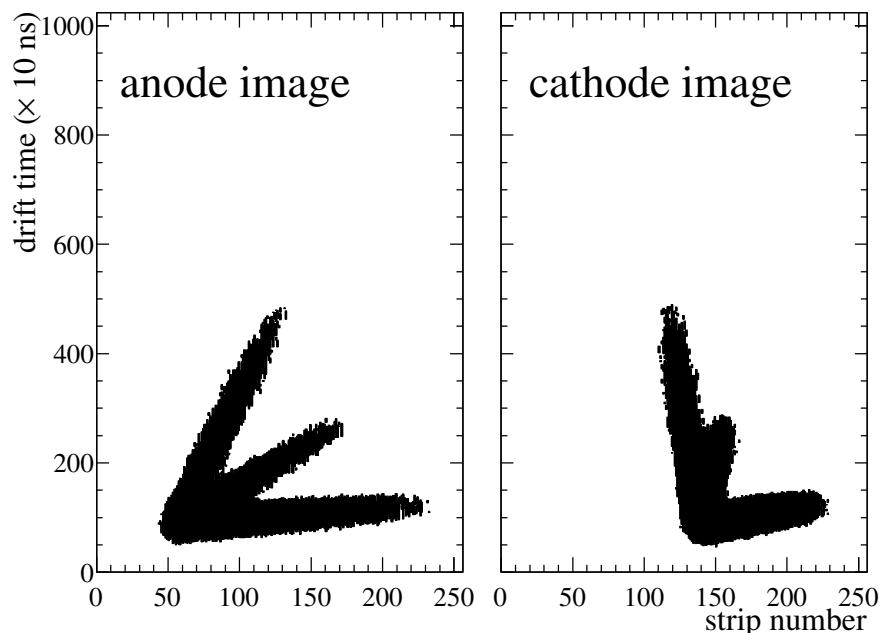


図 1.17:  $3\alpha$  のシミュレーション画像 [ $CH_4$  の場合].

図 1.18:  $3\alpha$  のシミュレーション画像 [ $\text{CH}_4$  (3) +  $\text{H}_2$  (7) の場合].図 1.19:  $3\alpha$  のシミュレーション画像 [ $\text{CH}_4$  (4) +  $\text{He}$  (6) の場合].

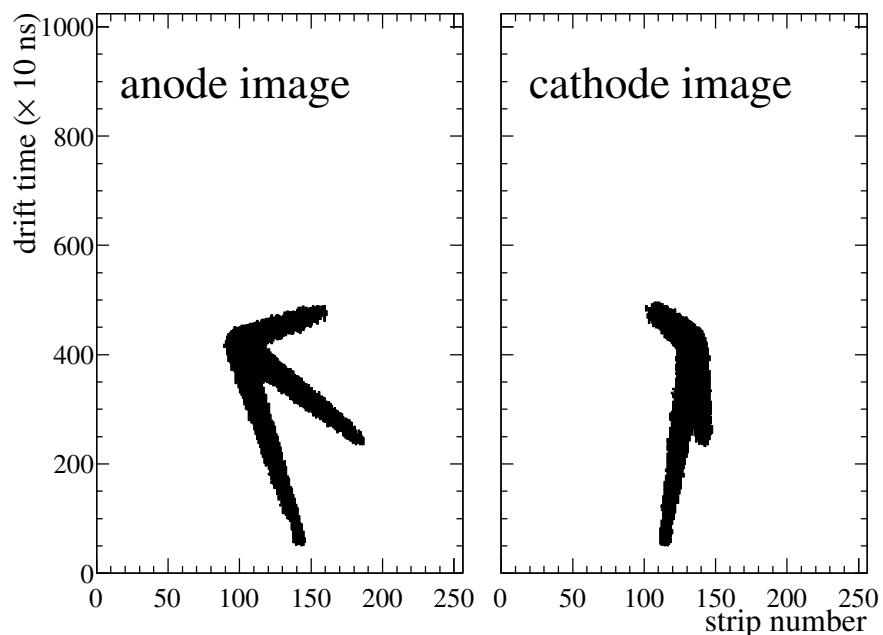


図 1.20:  $3\alpha$  のシミュレーション画像 [iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + H<sub>2</sub> (9) の場合].

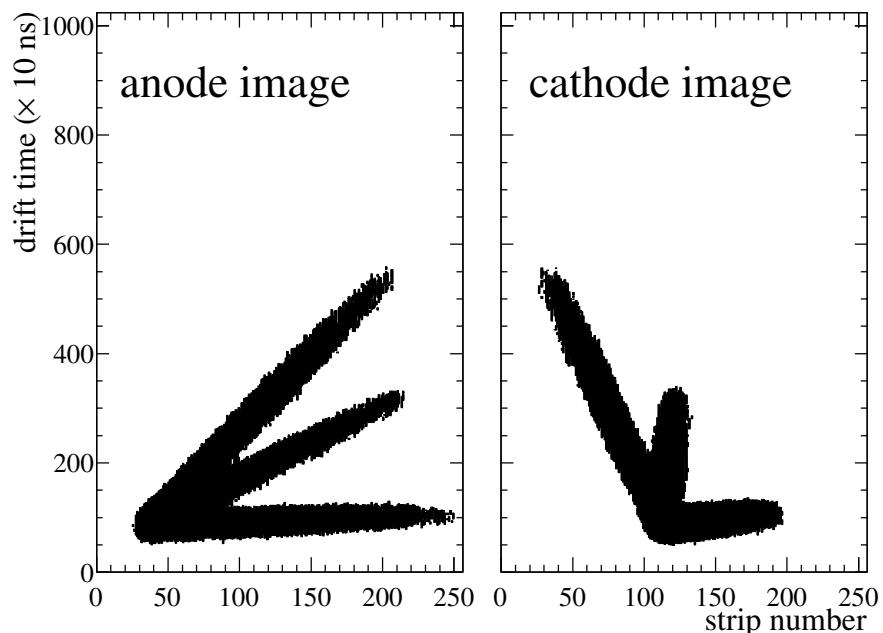


図 1.21:  $3\alpha$  のシミュレーション画像 [iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + He (9) の場合].

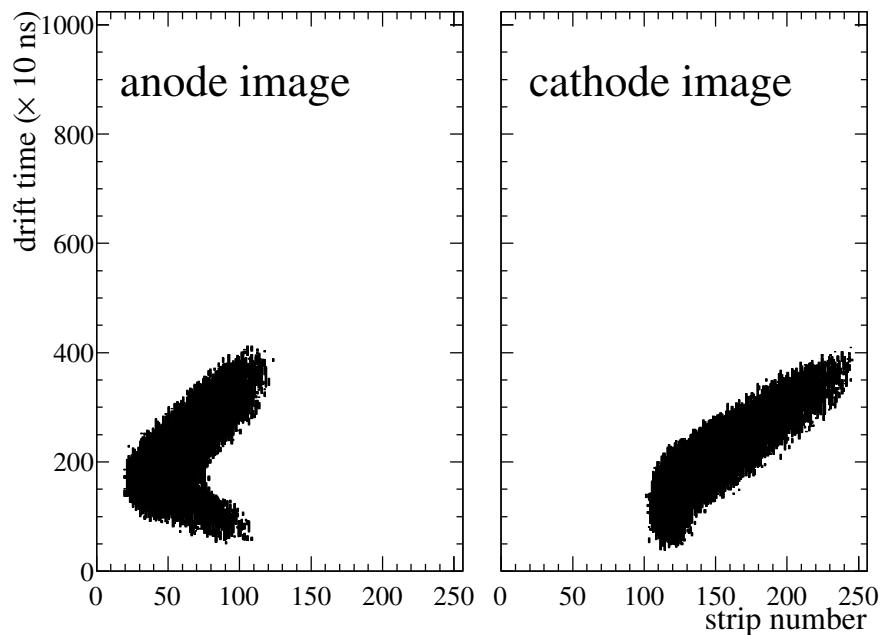


図 1.22: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 [CH<sub>4</sub> の場合].

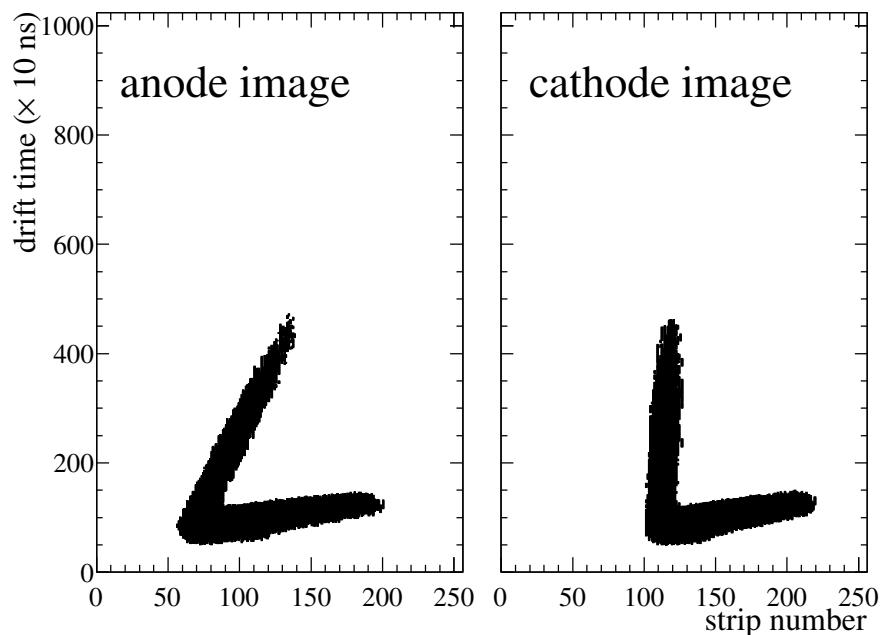


図 1.23: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 [CH<sub>4</sub> (3) + H<sub>2</sub> (7) の場合].

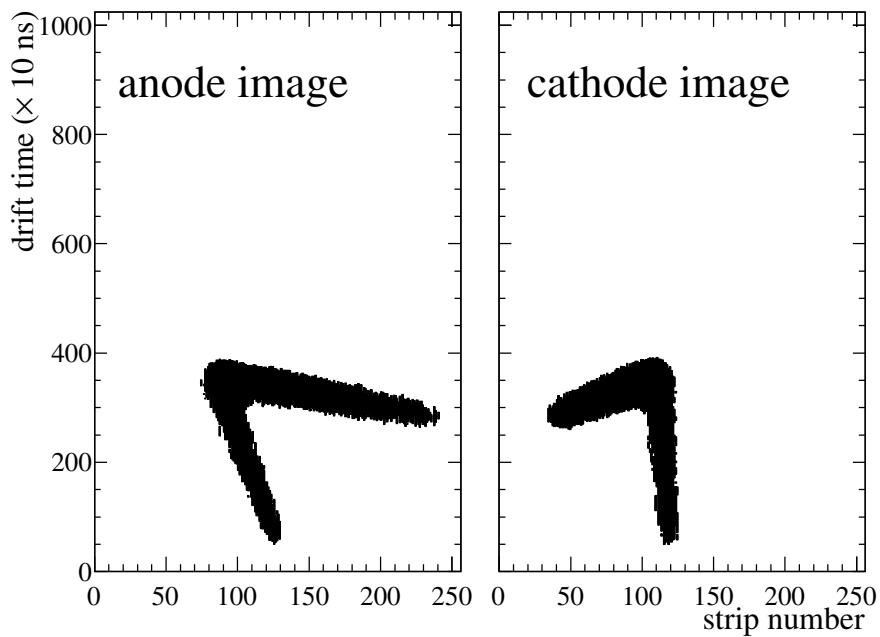


図 1.24: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 [ $\text{CH}_4$  (4) + He (6) の場合].

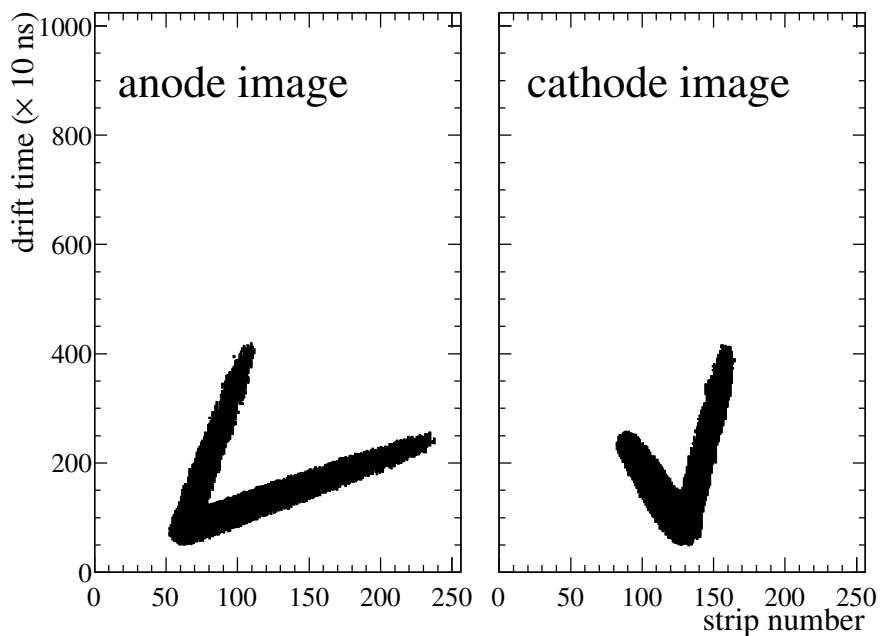


図 1.25: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 [iso- $\text{C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{H}_2$  (9) の場合].

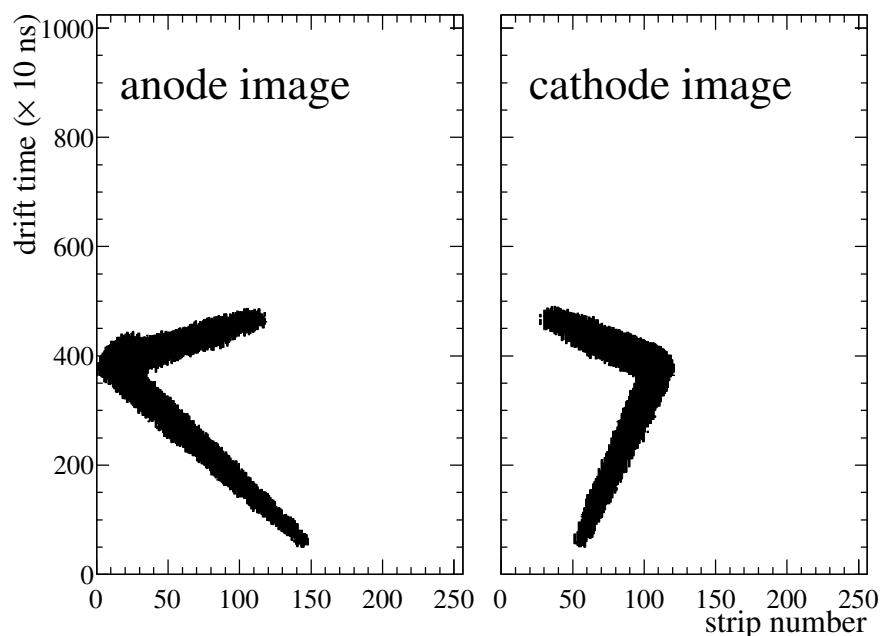


図 1.26: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 [iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + He (9) の場合].