

## 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、シミュレーションの基準となる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スピード、ガス増幅率、トラックの幅を測定した。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。これはディフュージョン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。

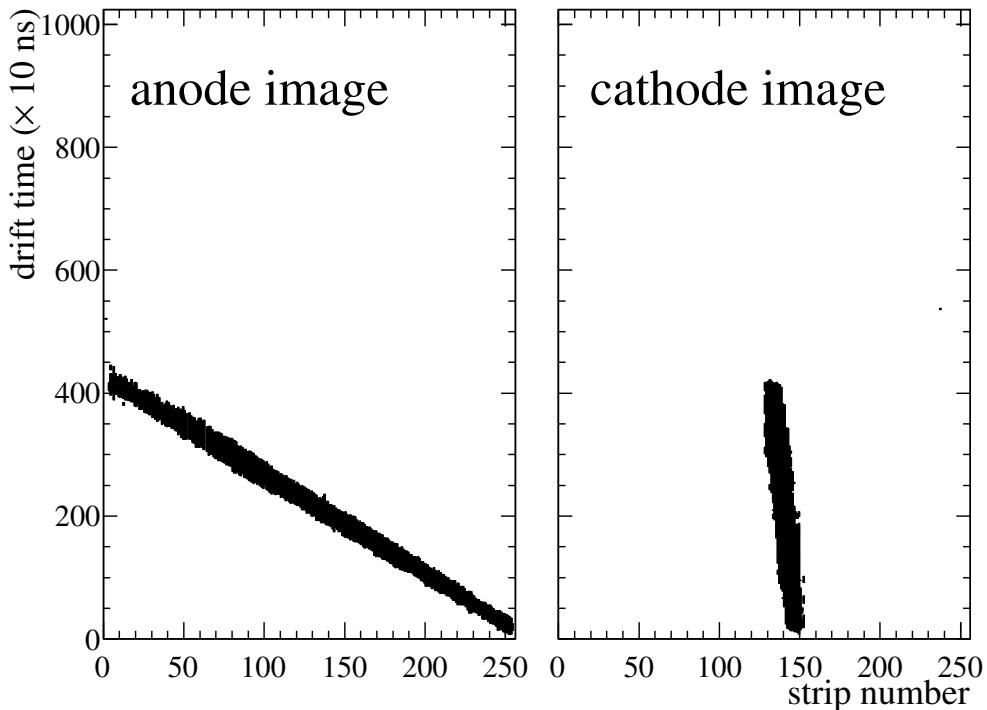


図1.1:  $\alpha$ 線源で測定したトラックの一例。検出ガスは iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + H<sub>2</sub> (9) を用いた。

表 1.1: 実測したドリフトスピードと Magboltz で求めたドリフトスピードの比較。

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

### 1.1.1 ドリフトスピード

電子のドリフトスピードを線源によって得られるトラックから求める。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  $0^\circ$ , 4つの  $30^\circ$  の穴が開いている。このコリメータを用いることで  $\alpha$  線を  $0^\circ$  と  $30^\circ$  の方向に限定することができる。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  $\Delta t \text{ ns}$ , ドリフトスピードを  $v_{\text{drift}} \text{ mm ns}^{-1}$  とすると,

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

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

式 (1.1, 1.2, 1.3) より

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

とドリフトスピードが求まる。

$\alpha$  線源を用いて測定したドリフトスピードと Magboltz で求めた値を表 1.1 に示す。 $\alpha$  線源を用いて測定したドリフトスピードと Magboltz を用いて計算したドリフトスピードがおおよそ一致していることが分かる。CH<sub>4</sub> は実測と Magboltz による計算値とがずれているが、検出ガスに含まれる水分の影響が考えられる。CH<sub>4</sub> 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。

### 1.1.2 電子增幅率

電圧パラメータを変更させたときの增幅率の変化を測定した。增幅率は荷電粒子が検出ガス中を通過した際に発生する電子数 ( $N_e$ ) 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。 $N_e$  は検出ガス中の荷電粒子のエネルギー損失と検出ガスの W 値から求める。 $N'_e$  は  $\mu$ -PIC で収集した電荷から求める。詳しい計算方法について以下で述べる。

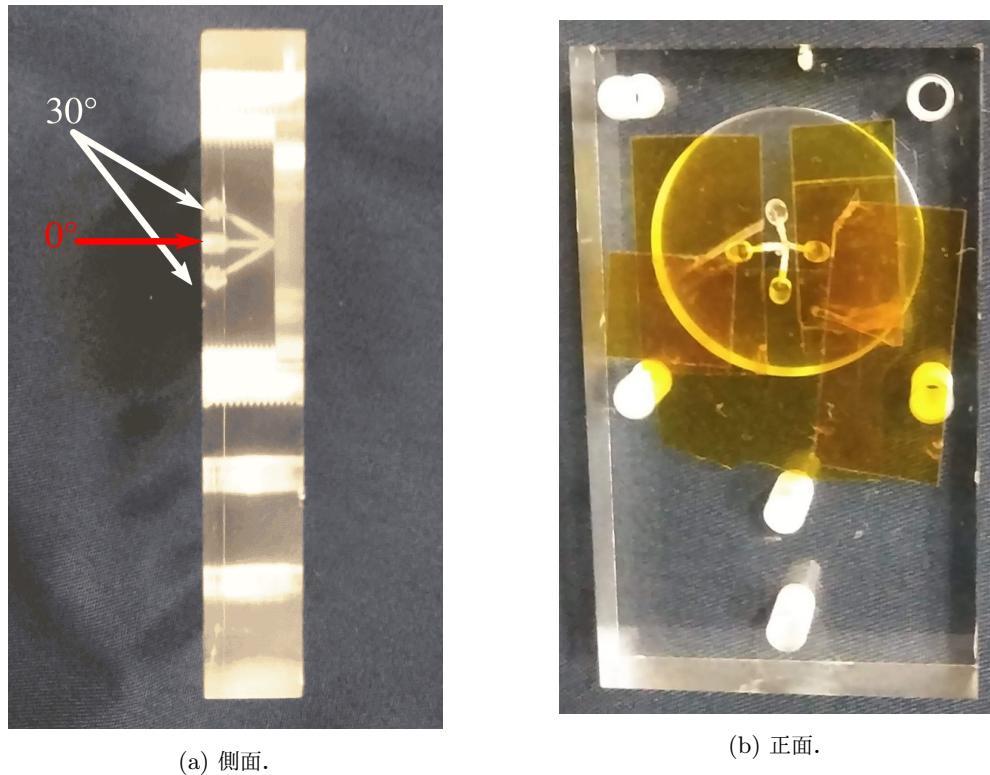


図 1.2: 線源コリメータ. 中央に  $0^\circ$ , 上下左右に  $30^\circ$  の穴が開いている.  $0^\circ$  の穴と 1 つの  $30^\circ$  の穴を除いてカプトンテープで塞ぐことで, 余計な  $\alpha$  線が出ないようにしている.

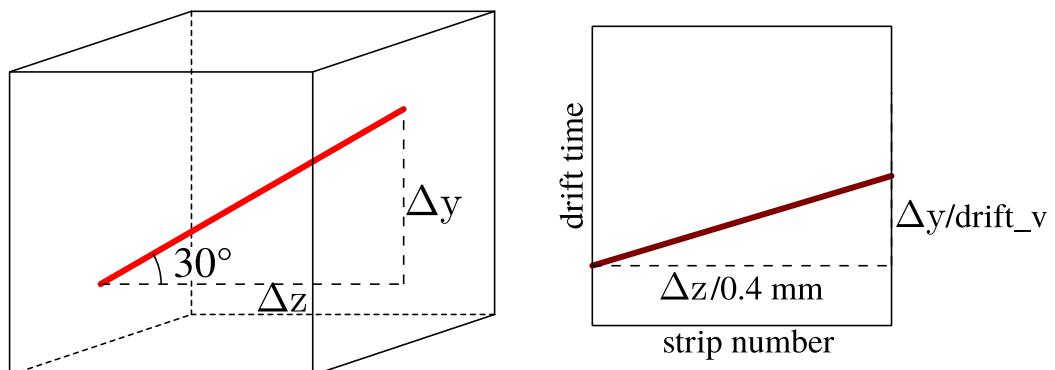


図 1.3:  $30^\circ$  に方向を限定した  $\alpha$  線 (左) と取得される画像データ (右) のイメージ.

表 1.2: 検出ガスの W 値 [?, ?] とエネルギー損失と  $N_e$ . エネルギー損失は荷電粒子がガス中を 12.8 mm 進んだ時のものである.

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

検出ガス中で荷電粒子がエネルギーを落とすと, 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 値で割ることで  $N_e$  が求まる. 各ガスのエネルギー損失と W 値 [?, ?] を表 1.2 に示す. <sup>241</sup>Am からは 5.4 MeV の  $\alpha$  線が放出される. 測定に用いた  $\alpha$  線源は activity 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, 線源中でエネルギーを落としてしまう. 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 であることが他の測定によりわかっている. 本測定では 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, 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) で求めることができる.  $e$  は電荷素量である.

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

各ガスの増幅率を表 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.

### 1.1.3 幅

本実験の目的である 3 $\alpha$  に崩壊するイベントではトラックが太いと複数のトラックを区別できなくなり, トラックの抽出を正しくできなくなる. 0° の  $\alpha$  粒子によるトラックで幅を測定した. 図 1.4 に示すように, ト

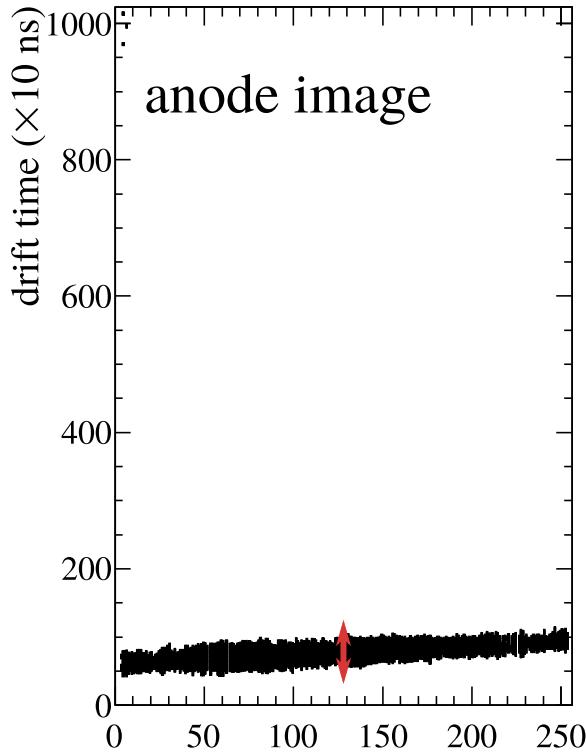


図 1.4: ト ラックの幅の決定方法のイメージ。ト ラックの幅は有感領域の中央である anode strip 128 ch の clock 方向の幅を用いる。

表 1.4: 各検出ガスでのト ラックの幅。

gas	ト ラックの幅 ( $\times 10 \text{ ns}$ )
$\text{CH}_4$	91.1
$\text{CH}_4$ (3) + $\text{H}_2$ (7)	42.3
$\text{CH}_4$ (4) + He (6)	62.5
iso- $\text{C}_4\text{H}_{10}$ (1) + $\text{H}_2$ (9)	35.4
iso- $\text{C}_4\text{H}_{10}$ (1) + He (9)	54.9

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 ラックの幅を表 1.4, 図 1.5 に示す。図 1.5 から分かるようにト ラックの幅とディフュージョン係数には相関がある。ディフュージョン係数、ト ラックの幅とともに iso- $\text{C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{H}_2$  (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再現した。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 fixed

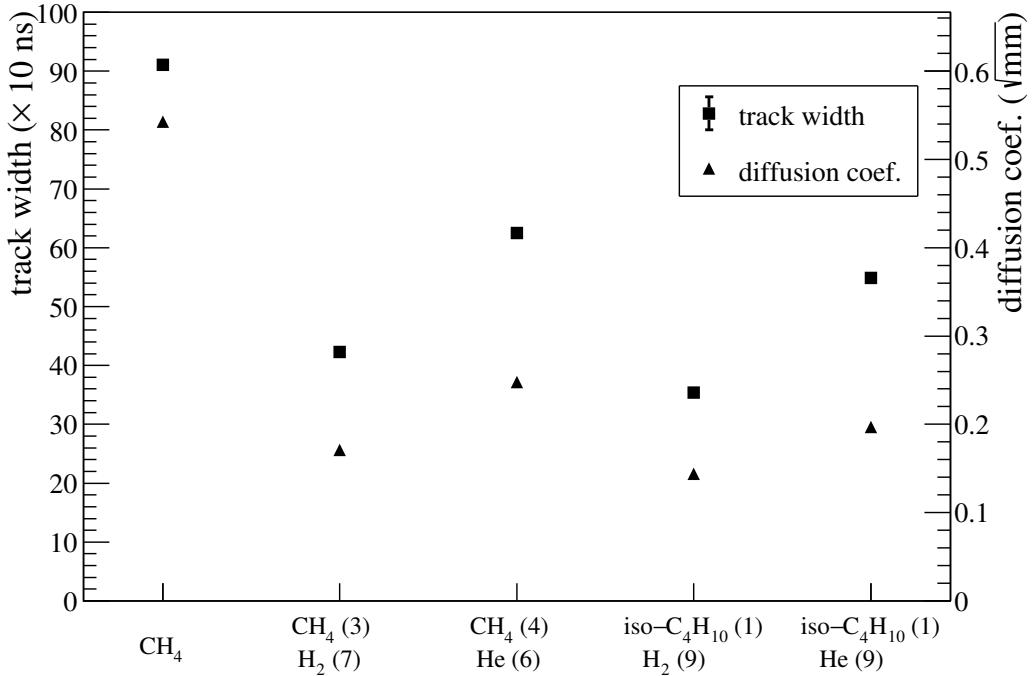


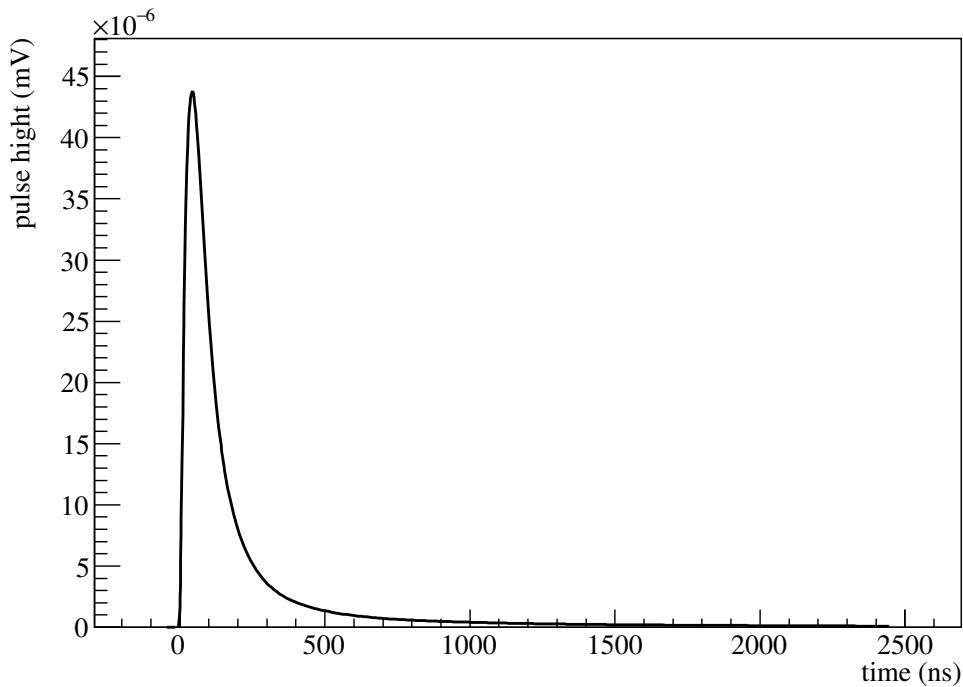
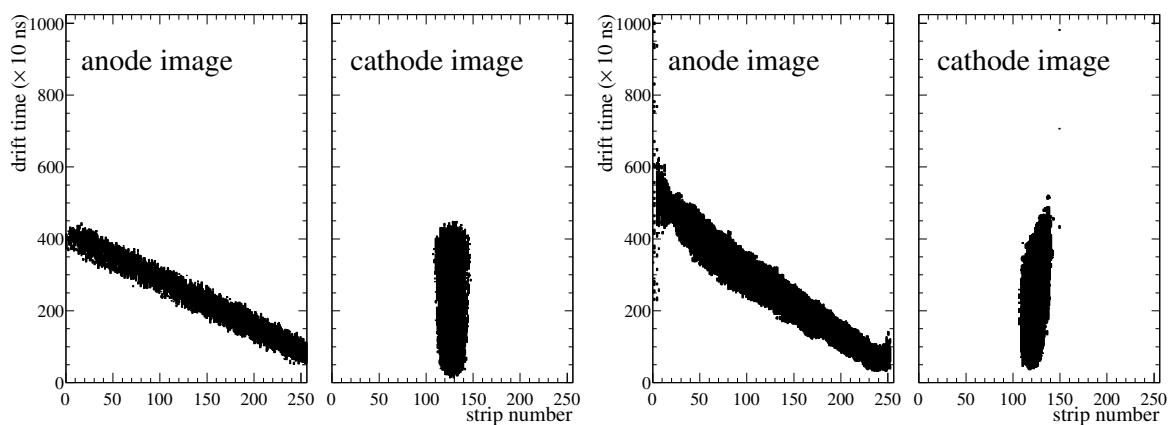
図 1.5: Magboltz で求めたディフージョン係数と実測によるトラックの幅.

parameters, TOT の閾値を free parameter とした. シミュレーションは以下のような手順で行った.

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 で求めたドリフトスピード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 にある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 を作る.

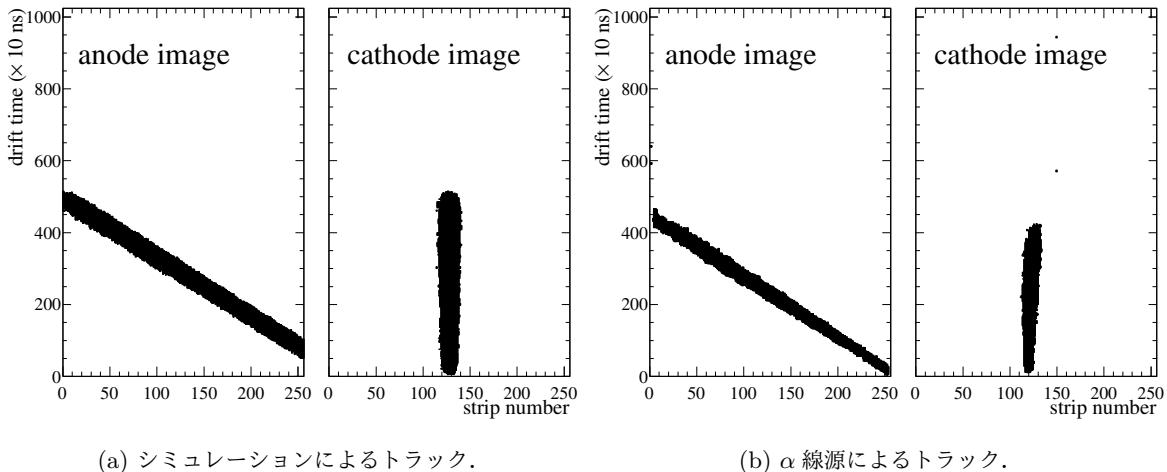
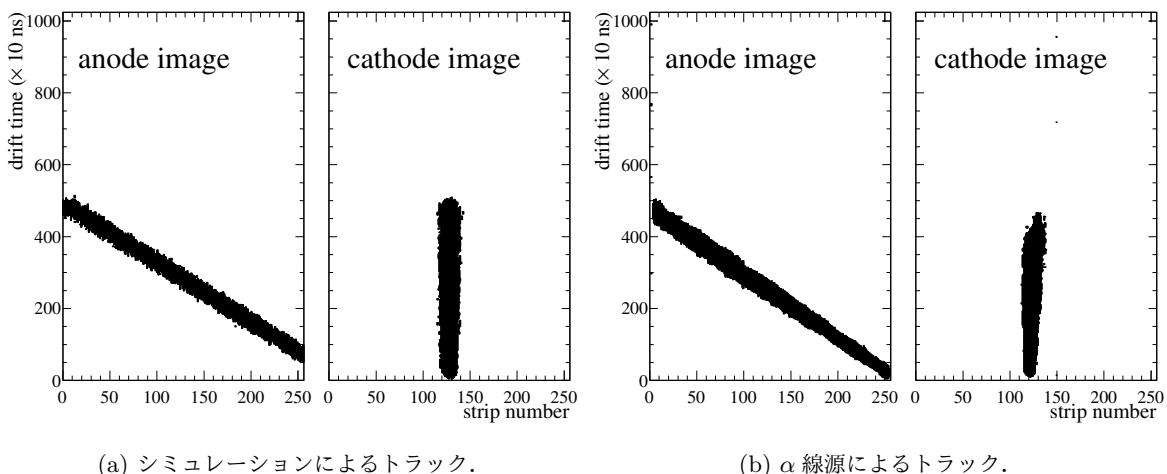
TOT の閾値は  $0.1 \text{ mV}$  とした.  $\alpha$  線源を用いた場合のシミュレーションと測定の比較を図 1.7, 1.8, 1.9, 1.10, 1.11 に示す. それぞれの検出ガスでの  $\alpha$  線源によるトラックを, シミュレーションで再現できていることが分かる.

$\alpha$  線源から放出される  $\alpha$  粒子のエネルギーは  $4.2 \text{ MeV}$  であるが, 実際に測定する  $\alpha$  粒子のエネルギーは数百 keV である. そこで,  $\alpha$  線源の前に  $15 \mu\text{m}$  のカプトンを挟むことで  $\alpha$  粒子のエネルギーを落として測定を行った. カプトンと有感領域と線源の間にある検出ガスによってエネルギーを落とし約  $1 \text{ MeV}$  となる. 図 1.12, 1.13, 1.14, 1.15, 1.16 に示す. コリメータの  $30^\circ$  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  $500 \text{ keV}$  の  $\alpha$  粒子を飛ばした. エネルギーを完全に合わせていないが, トラックの太さを再現できている.

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.

(a) シミュレーションによるトラック.

(b)  $\alpha$  線源によるトラック.図 1.7:  $\alpha$  粒子のトラック ( $\text{CH}_4$  の場合).

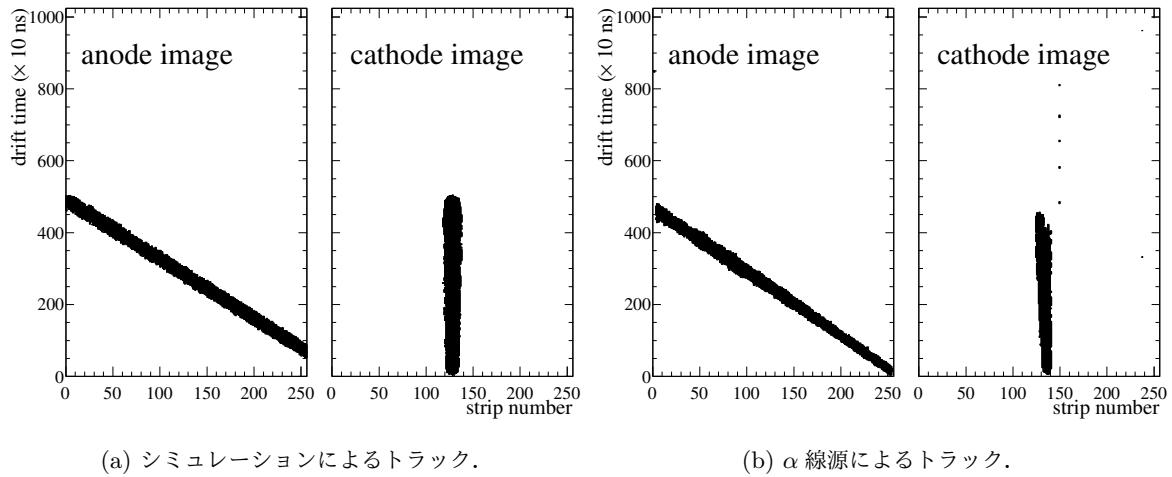
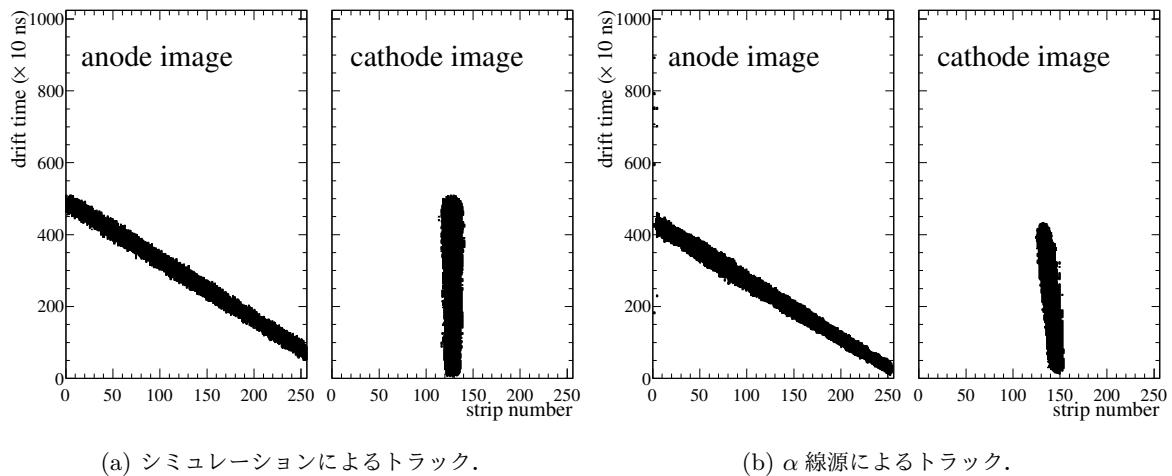
図 1.8:  $\alpha$  粒子のトラック ( $\text{CH}_4$  (3) +  $\text{H}_2$  (7) の場合).図 1.9:  $\alpha$  粒子のトラック ( $\text{CH}_4$  (4) +  $\text{He}$  (6) の場合).

### 1.3 トリプルアルファ反応のシミュレーション

$\alpha$  線源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う。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。

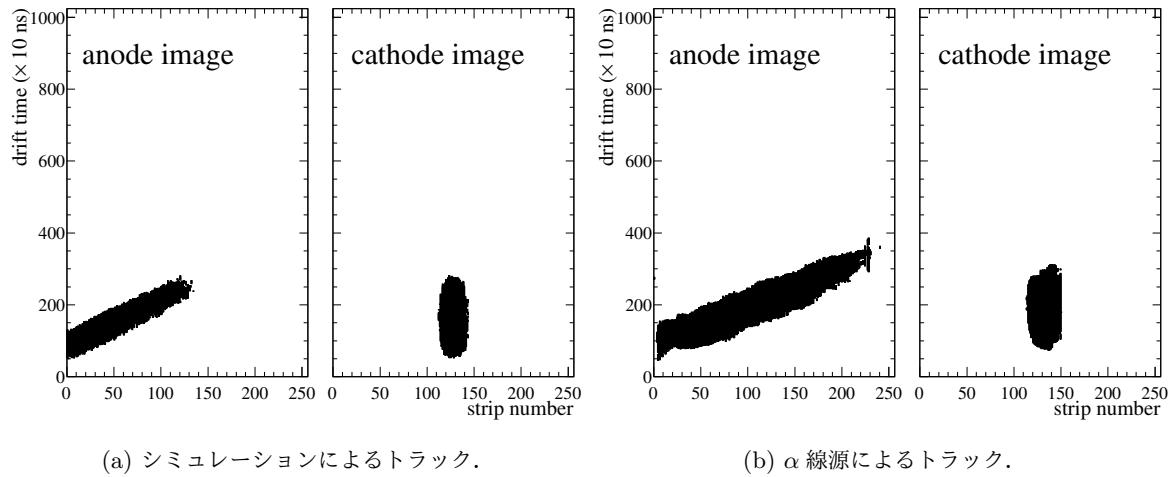
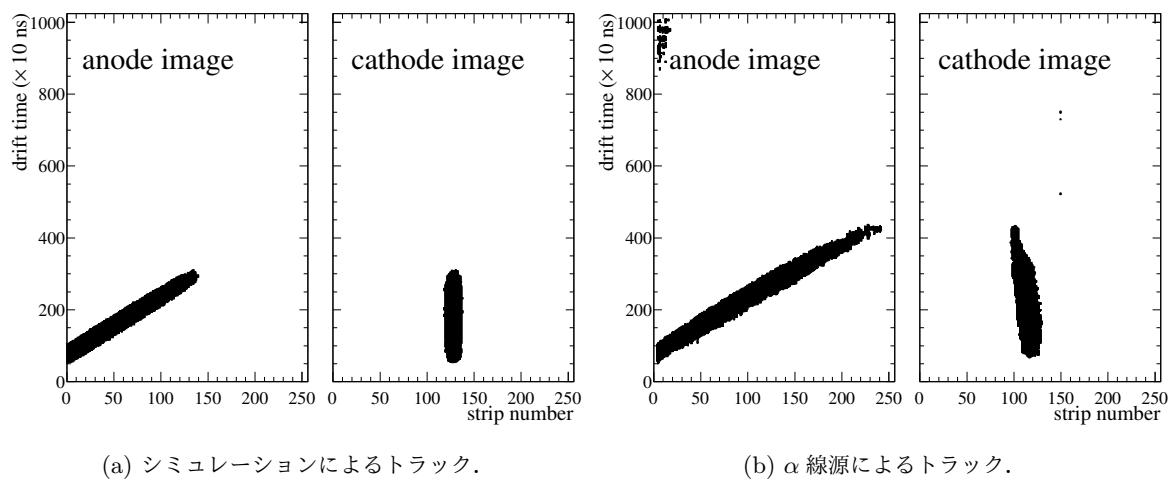
1.  $^{12}\text{C}$  が 14 MeV の中性子との散乱により  $0_2^+$  状態に励起させる。この際、重心系で一様な散乱角で散乱させる。
2.  $^{12}\text{C}(0_2^+)$  を  $\alpha$  粒子と  $^8\text{Be}$  に位相空間で一様に崩壊させる。
3. 崩壊してきた  $^8\text{Be}$  を 2 つの  $\alpha$  粒子に位相空間で一様に崩壊させる。

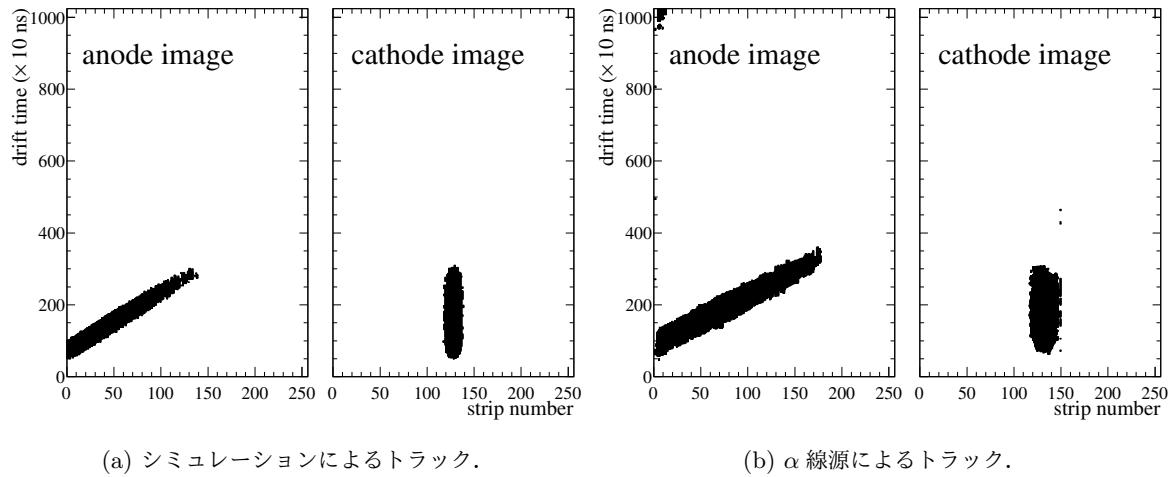
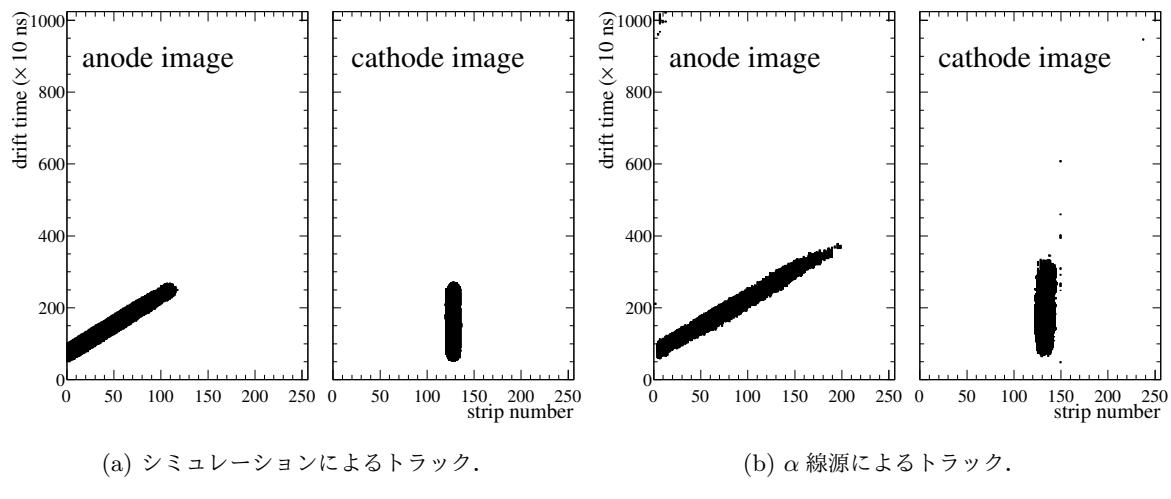
このようにして生成した  $\alpha$  粒子のトラックを生成する。トラックの生成方法は前節で述べた通りである。生

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).

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選んで示した。

生成されたイベントの中には 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 に示す。

図 1.12: 低エネルギー  $\alpha$  粒子のトラック ( $\text{CH}_4$  の場合).図 1.13: 低エネルギー  $\alpha$  粒子のトラック ( $\text{CH}_4$  (3) +  $\text{H}_2$  (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).

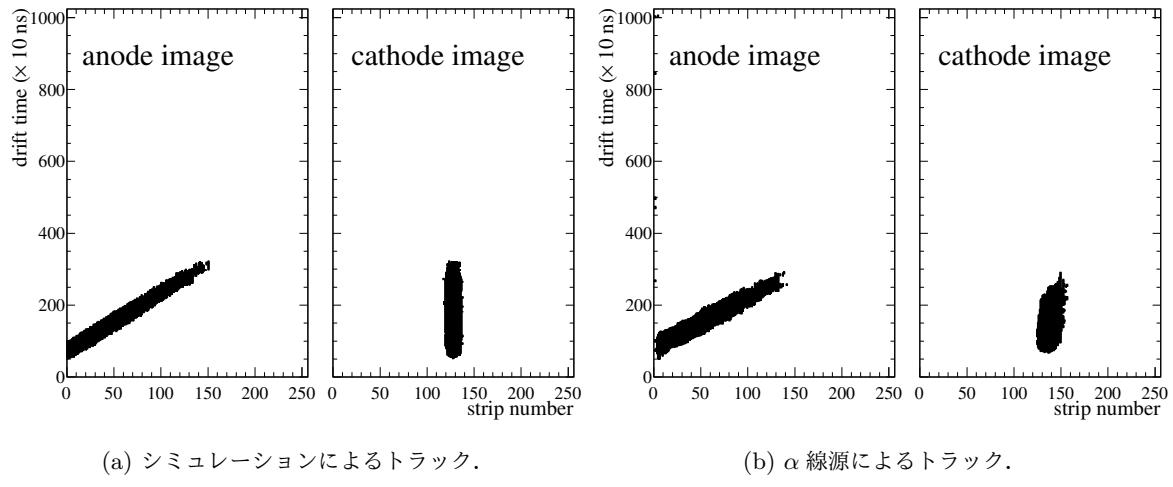


図 1.16: 低エネルギー  $\alpha$  粒子のトラック (iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + He (9) の場合).

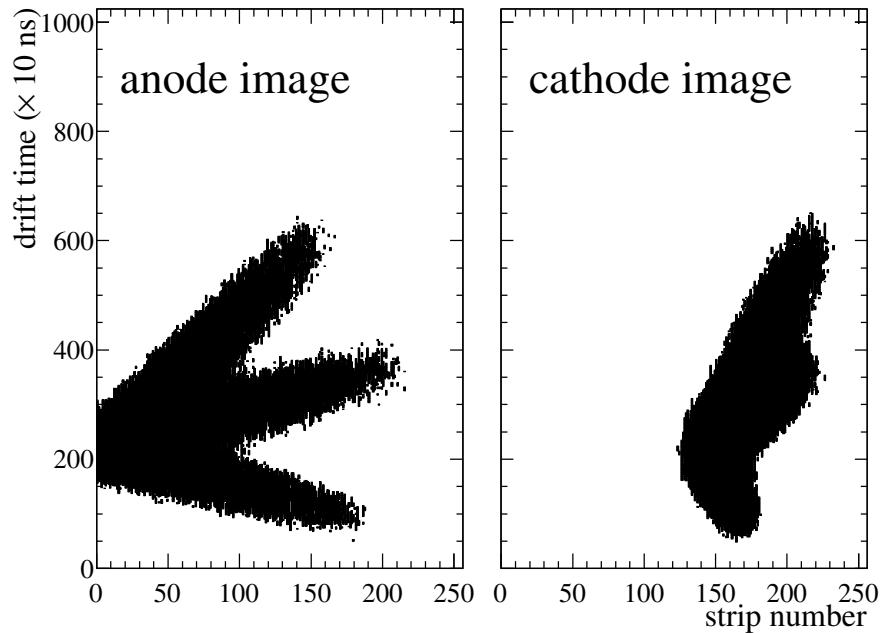
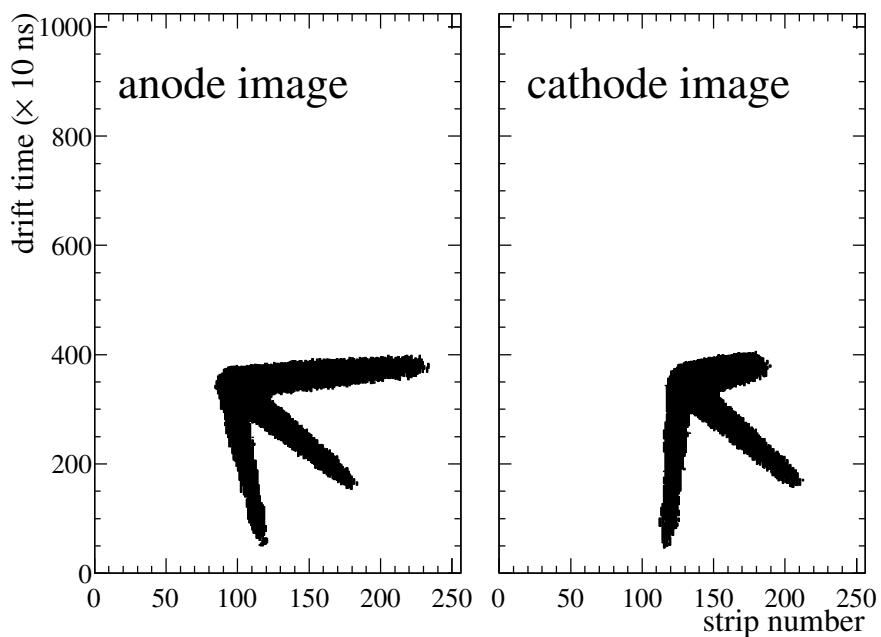
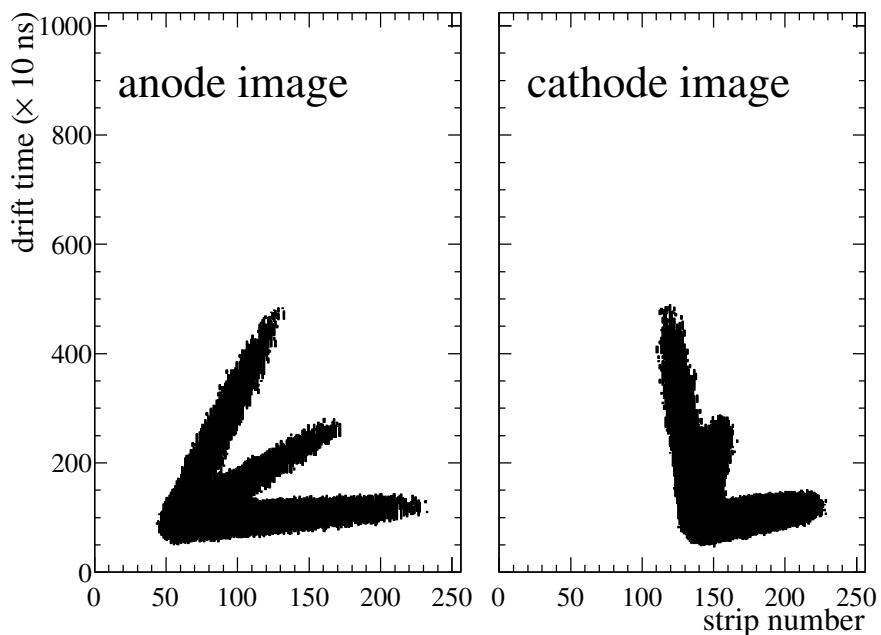


図 1.17: 3 $\alpha$  のシミュレーション画像 (CH<sub>4</sub> の場合).

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) + He (6) の場合).

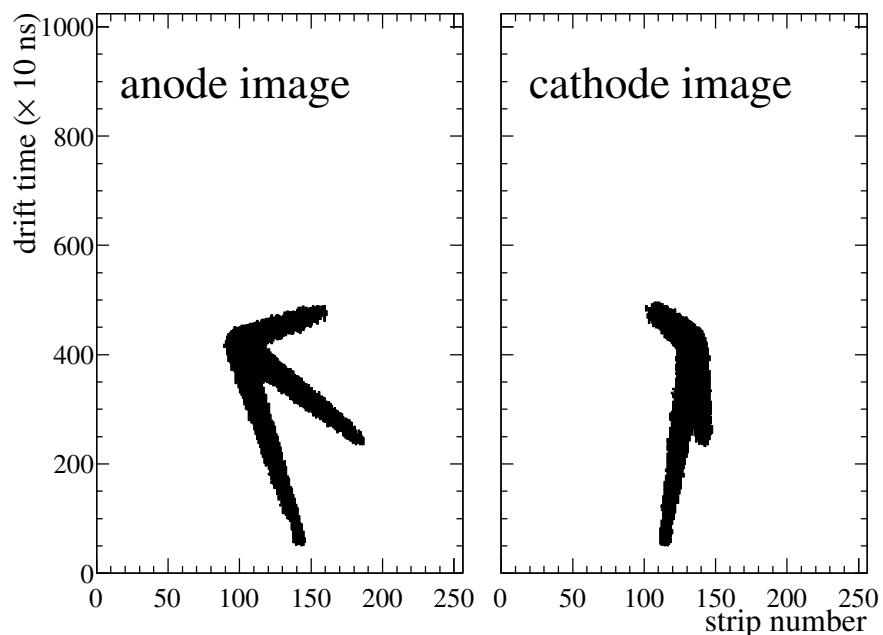


図 1.20:  $3\alpha$  のシミュレーション画像 ( $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{H}_2$  (9) の場合).

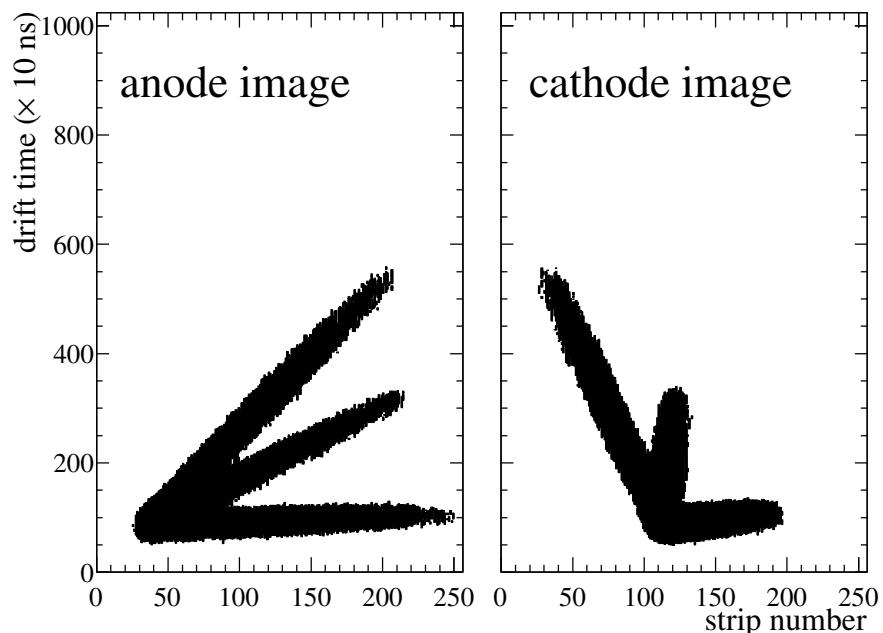


図 1.21:  $3\alpha$  のシミュレーション画像 ( $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{He}$  (9) の場合).

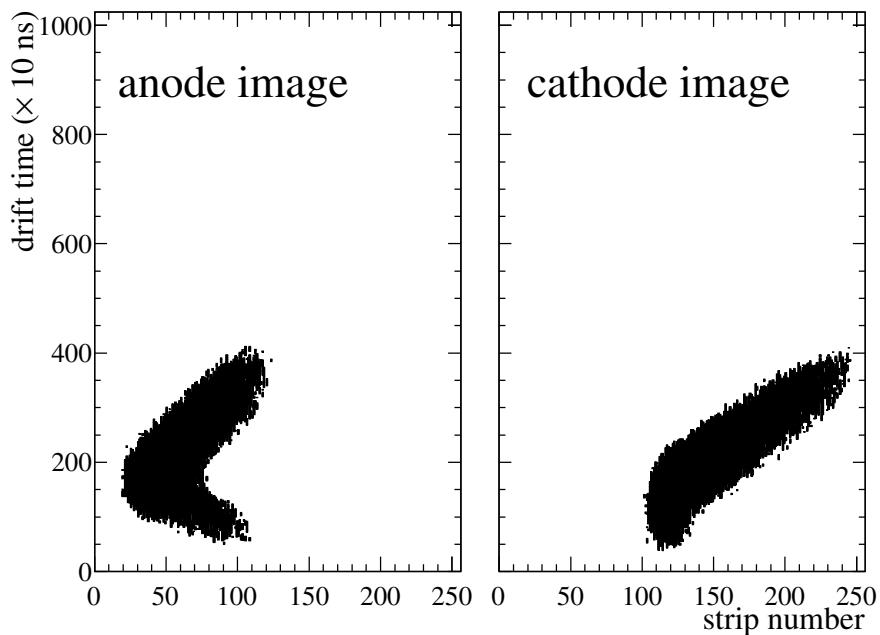


図 1.22: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 ( $\text{CH}_4$  の場合).

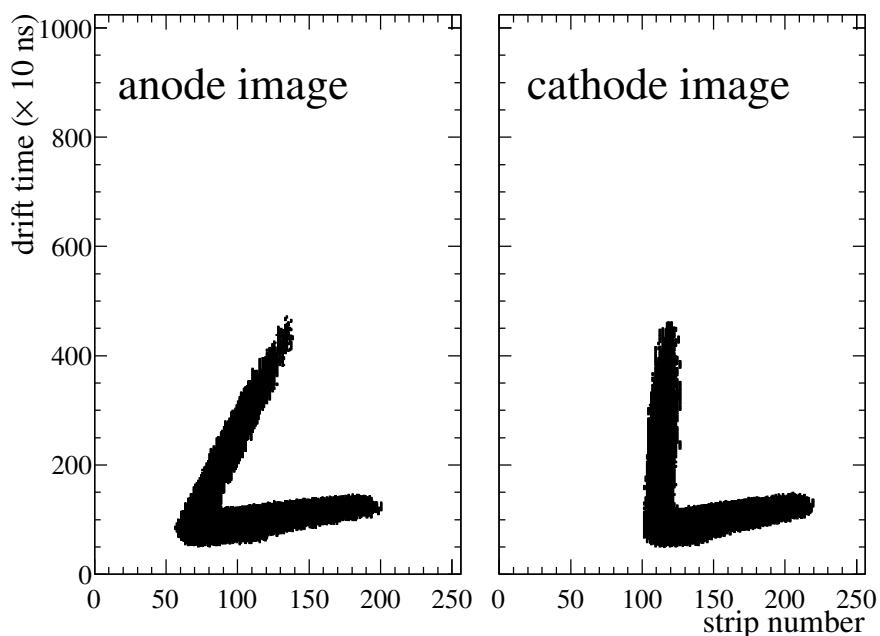


図 1.23: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 ( $\text{CH}_4$  (3) +  $\text{H}_2$  (7) の場合).

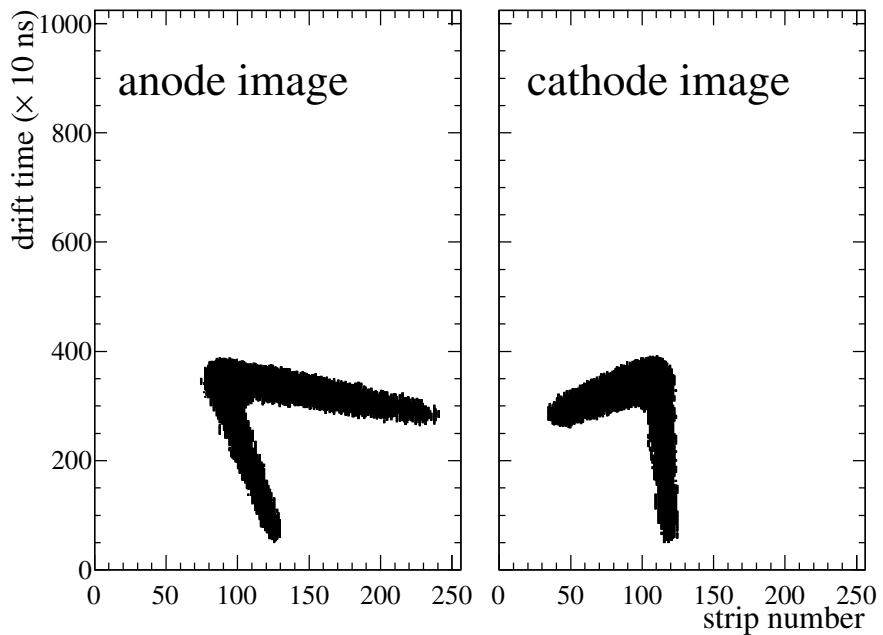


図 1.24: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 ( $\text{CH}_4$  (4) + He (6) の場合).

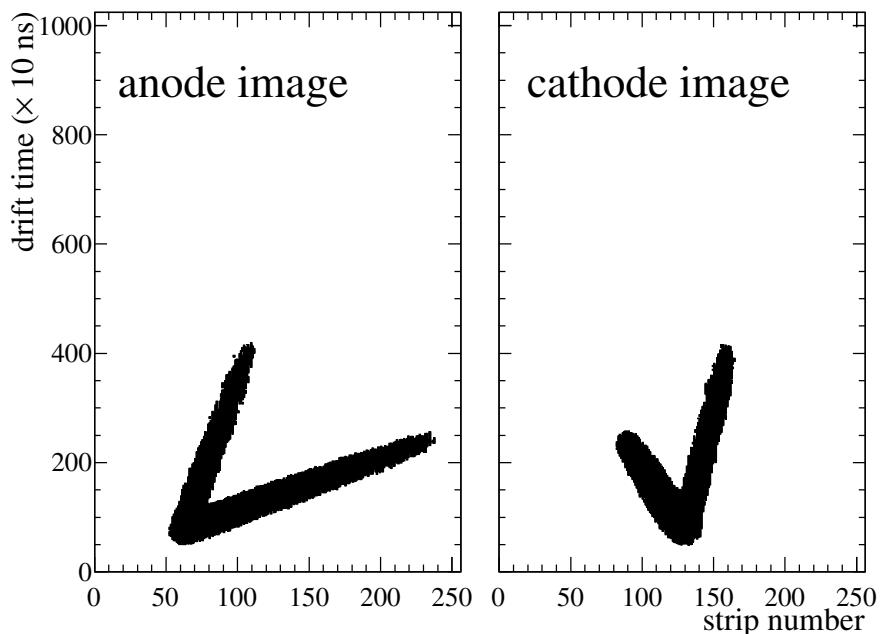


図 1.25: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 ( $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{H}_2$  (9) の場合).

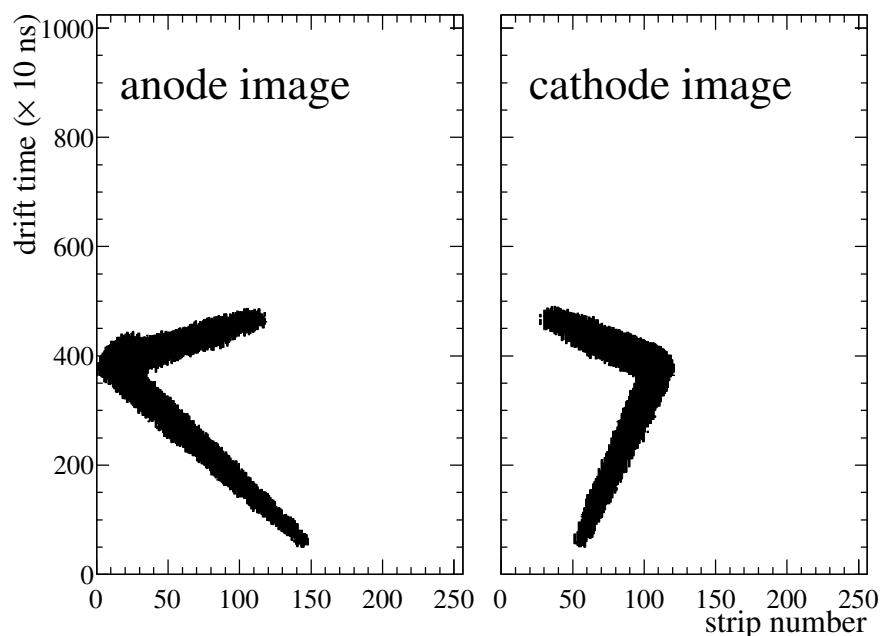


図 1.26: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 ( $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) + He (9) の場合).