

## 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、ガスの電子増幅率、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、ここからは単体の 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。

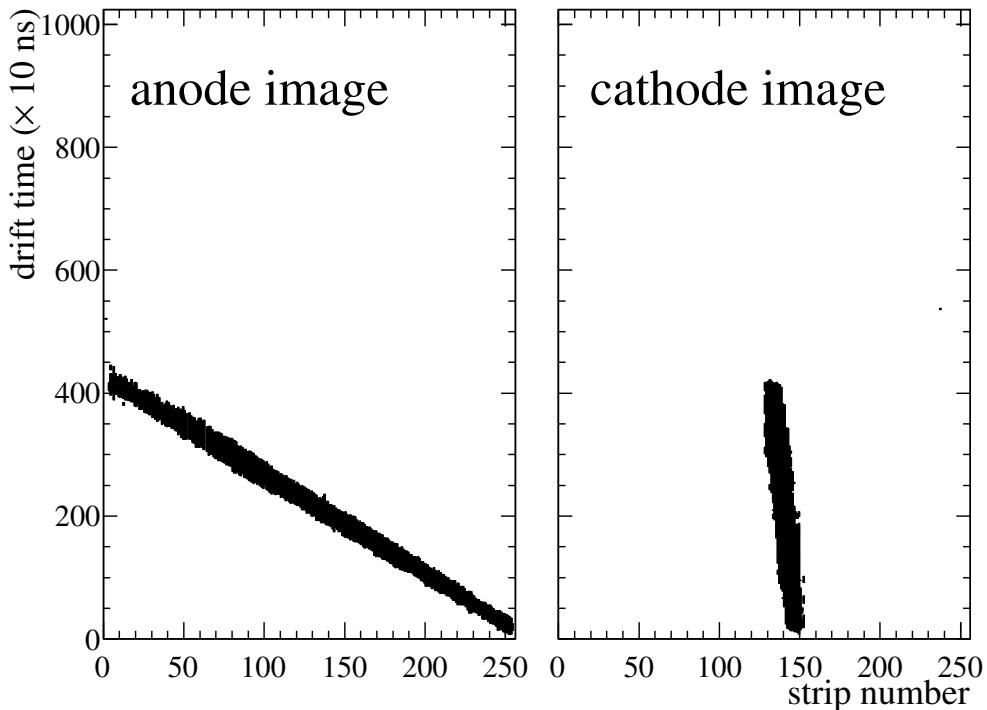


図1.1:  $\alpha$ 線源で測定したトラックの一例。検出ガスは iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + H<sub>2</sub> (9) を用いた。

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 ( $\text{mm/ns}$ )
$\text{CH}_4$	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  $0^\circ$  と 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。 $30^\circ$  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、

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

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

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。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 のオペレート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。 $\text{CH}_4$  のみ  $50 \text{ hPa}$  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。不純物のドリフトスピードへの影響は付録??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 ( $N_e$ ) と増幅後に  $\mu$ -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

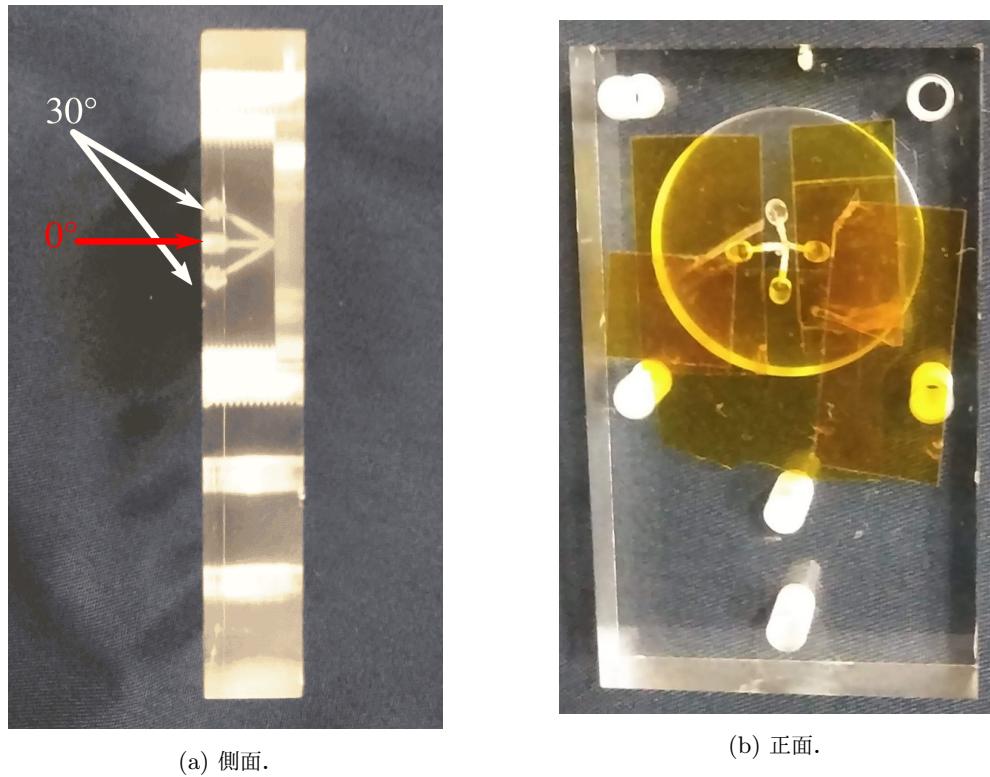


図 1.2: 線源コリメータ. 中央に  $0^\circ$ , 上下左右に  $30^\circ$  の穴が開いている.  $0^\circ$  の穴と 1 つの  $30^\circ$  の穴を除いてカプトンテープで塞ぐことで, 余計な  $\alpha$  線が出ないようにしている.

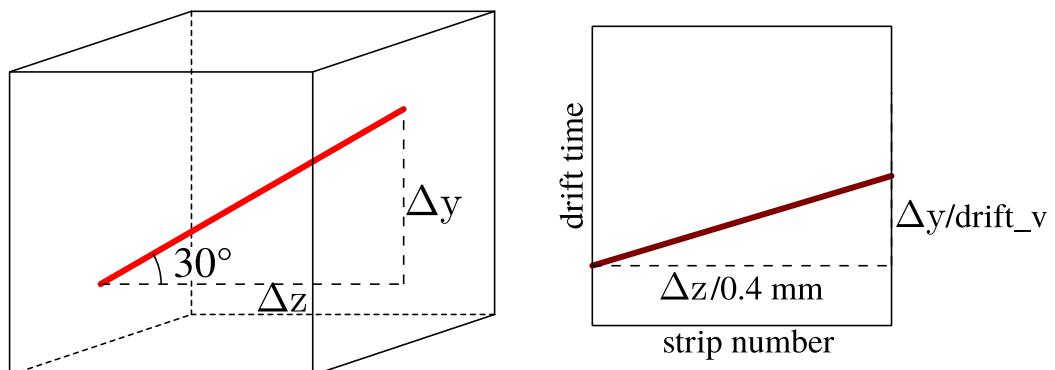


図 1.3:  $30^\circ$  に方向を限定した  $\alpha$  線 (左) と取得される画像データ (右) のイメージ.

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: 各検出ガスの電子增幅率.

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

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.

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. 各検出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, 線源内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  $\mu$ -PIC で収集した電荷量を求めることができる.  $e$  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  $\mu$ -PIC の両方による增幅率となっている.

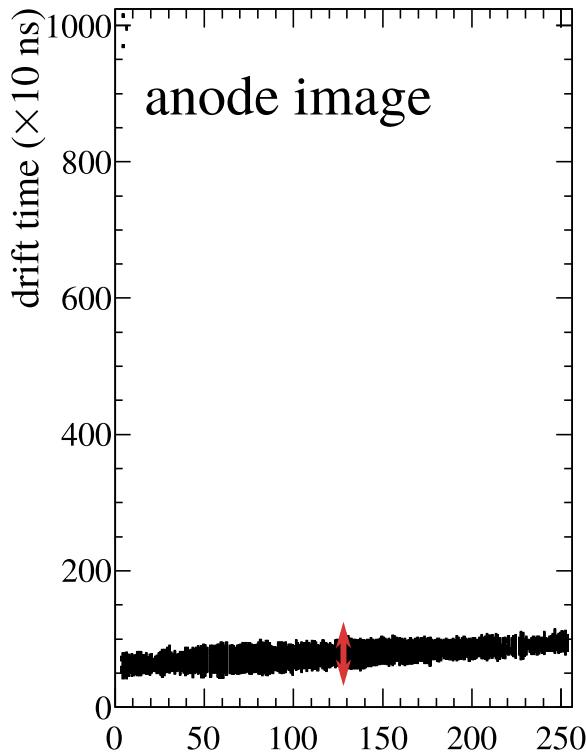


図 1.4: ト ラックの幅の決定方法のイメージ。ト ラックの幅は有感領域の中央である anode strip 128 ch の clock 方向の幅を用いる。

### 1.1.3 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 ラックの区別が難しくなり、ト ラックの抽出を正しくできなくなる。そこで、 $0^\circ$  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 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-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 parameters, TOT の閾値を free parameter とした。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 で求めたドリフトスピードで読み出し領域へドリフトさせる。

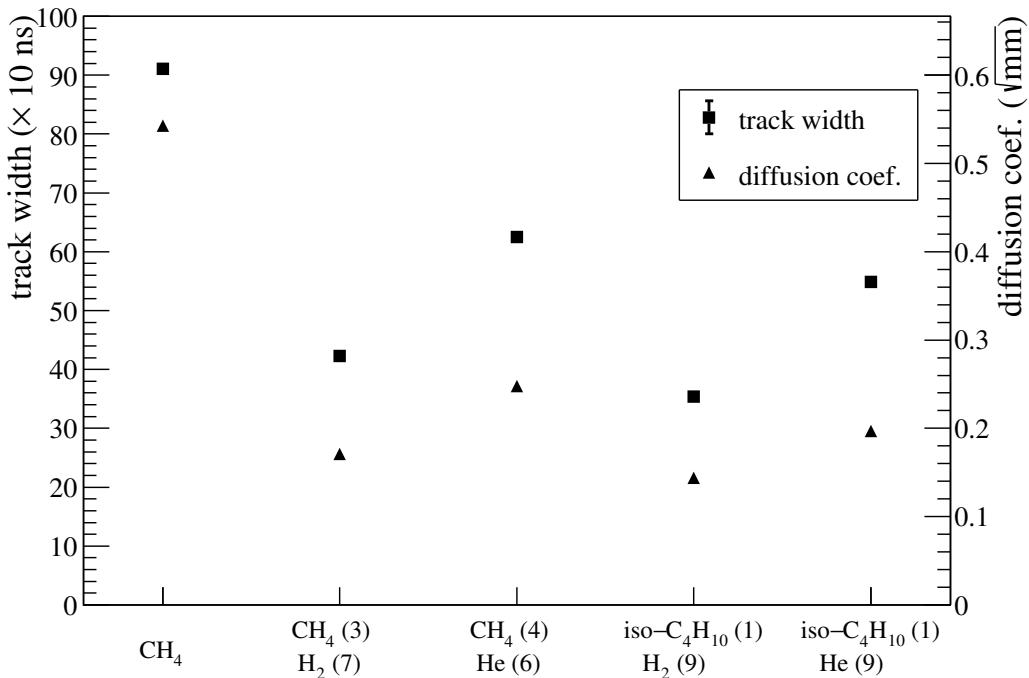


図 1.5: Magboltz で求めたディフージョン係数と実測によるトラックの幅.

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.

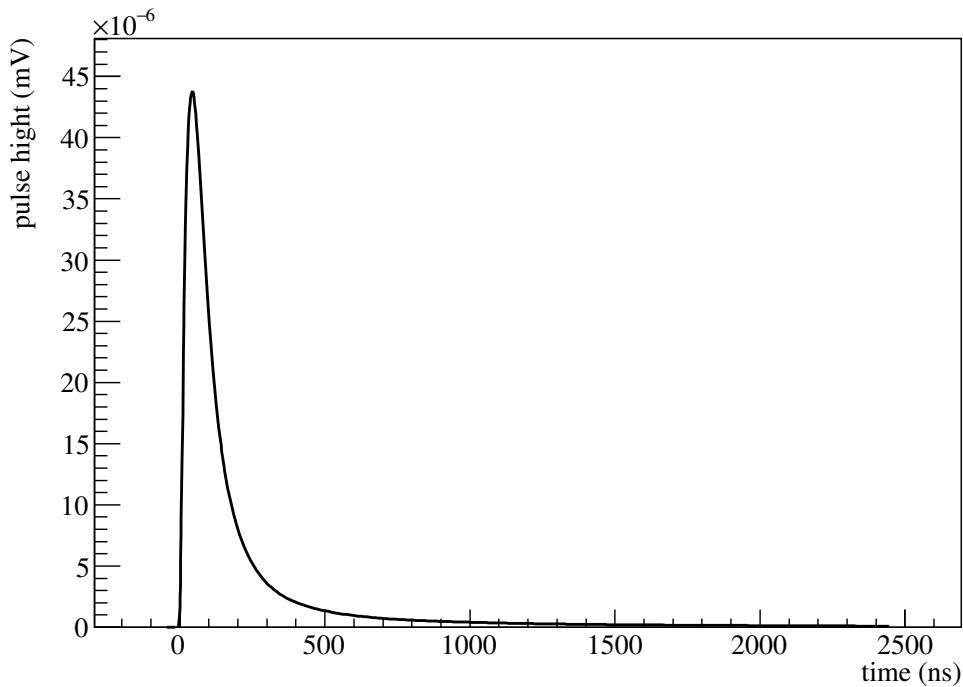
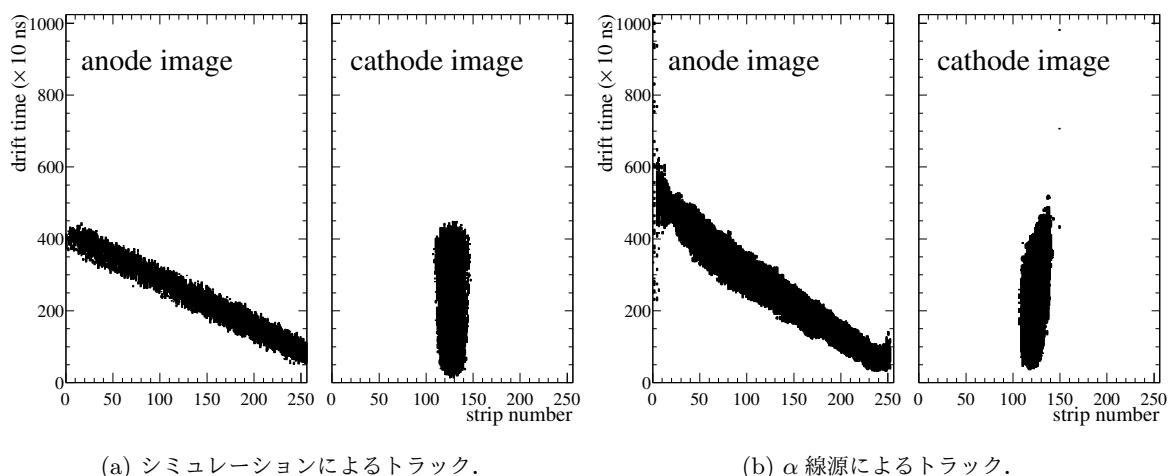
$\alpha$  線源を用いた場合のシミュレーションと測定の比較を図 1.7, 1.8, 1.9, 1.10, 1.11 に示す. TOT の閾値を  $0.1 \text{ mV}$  とすると, それぞれの検出ガスでの  $\alpha$  線源によるトラックを, シミュレーションで再現できる.

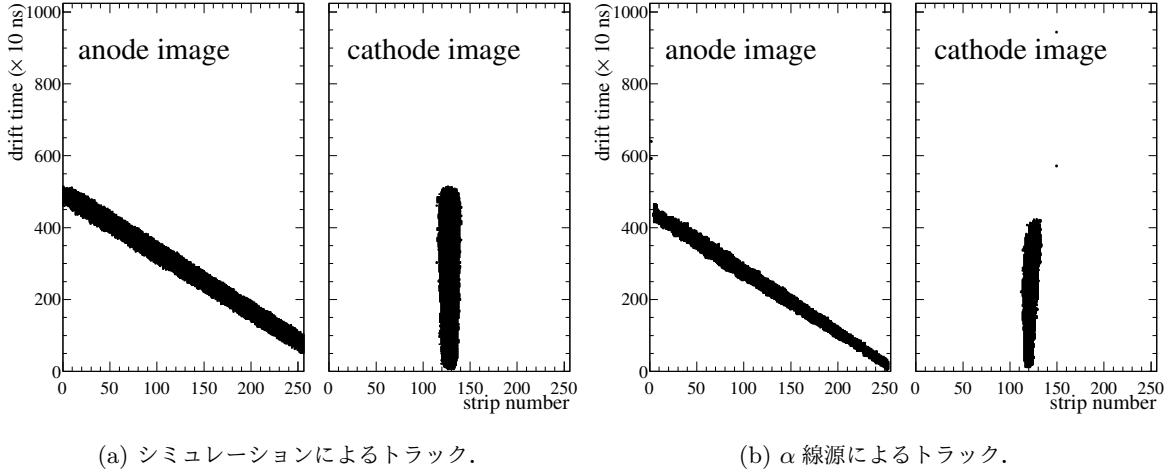
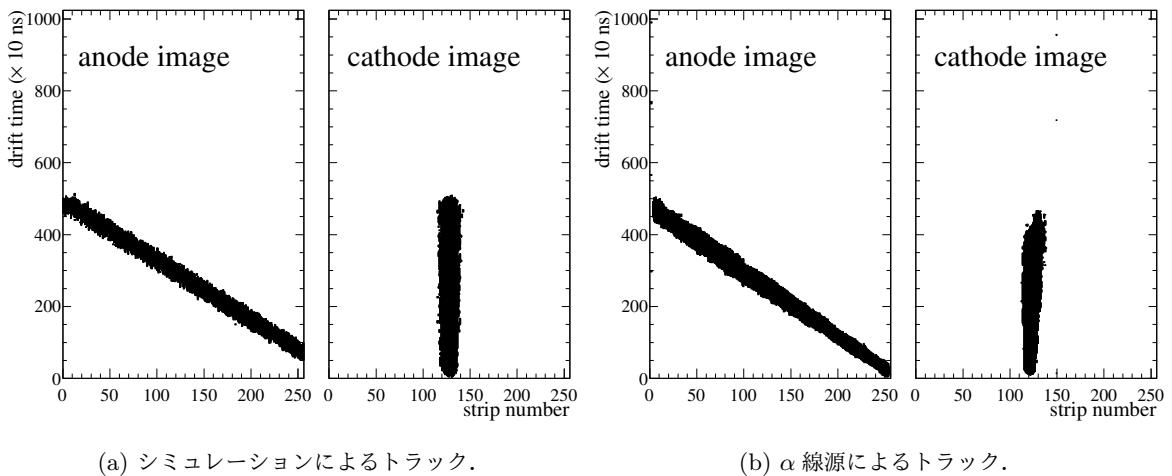
$\alpha$  線源から放出される  $\alpha$  粒子のエネルギーは  $4.2 \text{ MeV}$  であるが, 実際に測定する  $\alpha$  粒子のエネルギーは数百 keV である. そこで,  $\alpha$  線源の前に  $15 \mu\text{m}$  のカプトンを挟むことで  $\alpha$  粒子のエネルギーを落として測定を行った. 有感領域と線源の間にある検出ガスによってエネルギーを落とし約  $1 \text{ MeV}$  となる. 図 1.12, 1.13, 1.14, 1.15, 1.16 に示す. コリメータの  $30^\circ$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

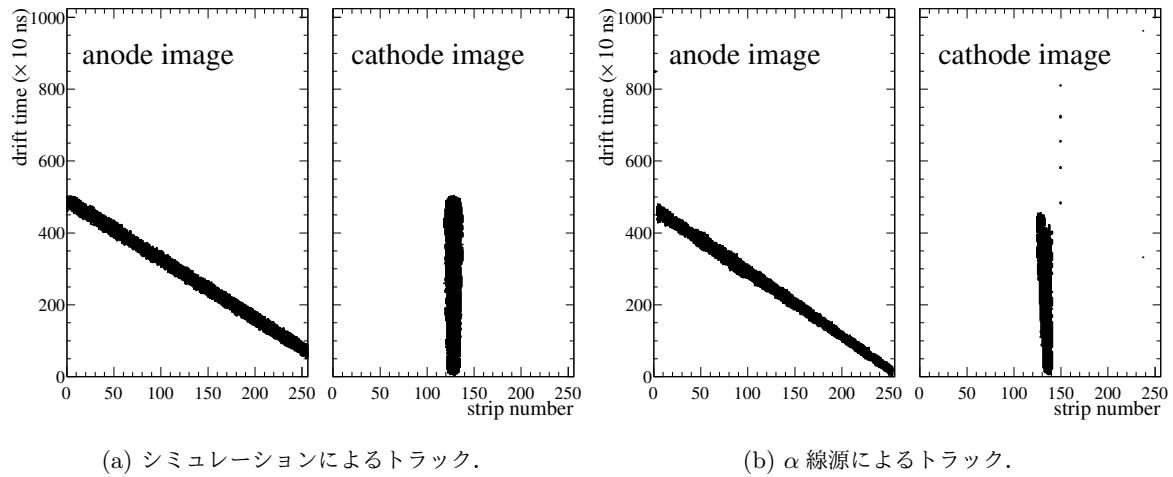
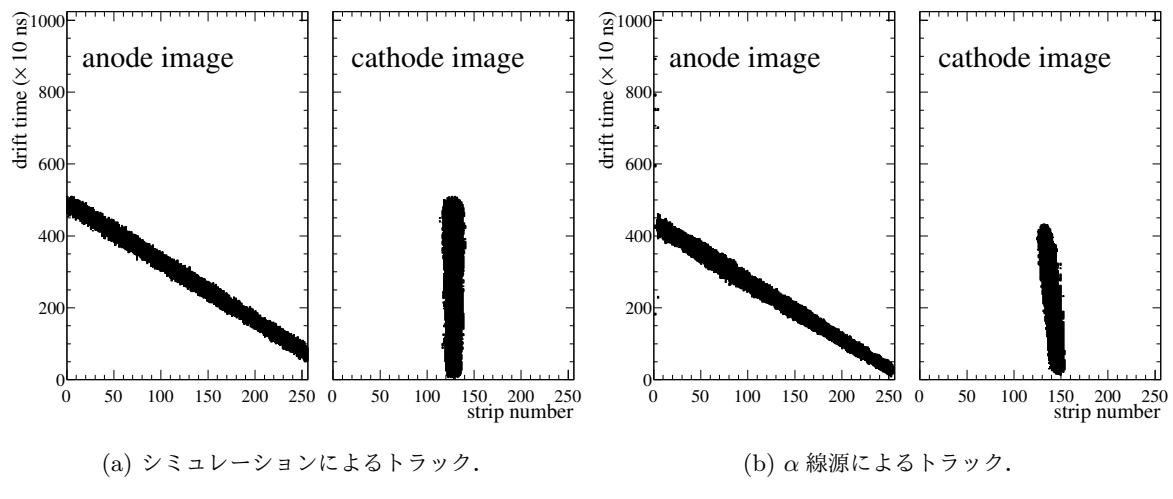
1.  $^{12}\text{C}$  が  $14 \text{ MeV}$  の中性子との散乱により  $0_2^+$  状態に励起させる. この際, 重心系で一様な散乱角で散乱させる.
2.  $^{12}\text{C}(0_2^+)$  を  $\alpha$  粒子と  $^8\text{Be}$  に位相空間で一様に崩壊させる.
3. 崩壊してできた  $^8\text{Be}$  を 2 つの  $\alpha$  粒子に位相空間で一様に崩壊させる.

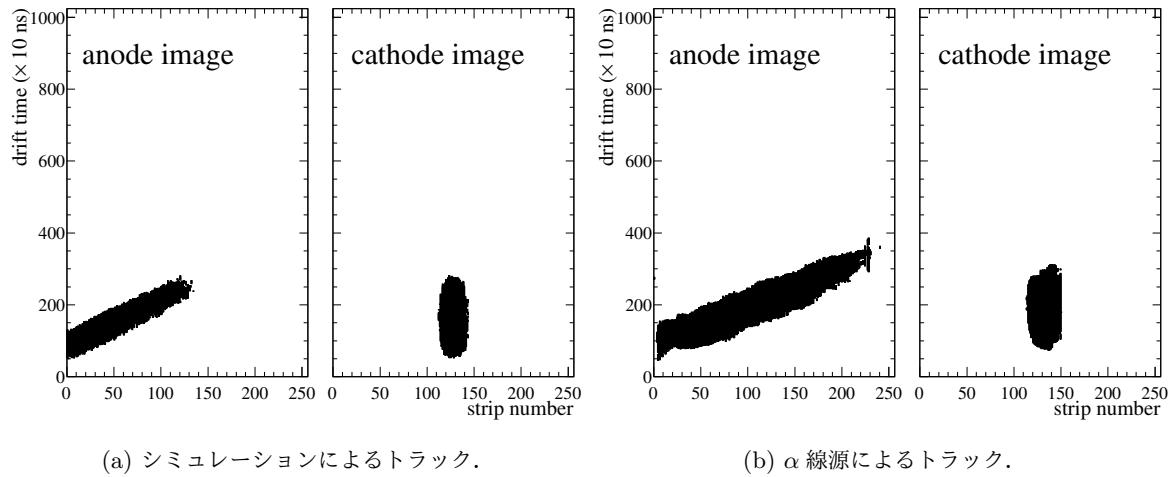
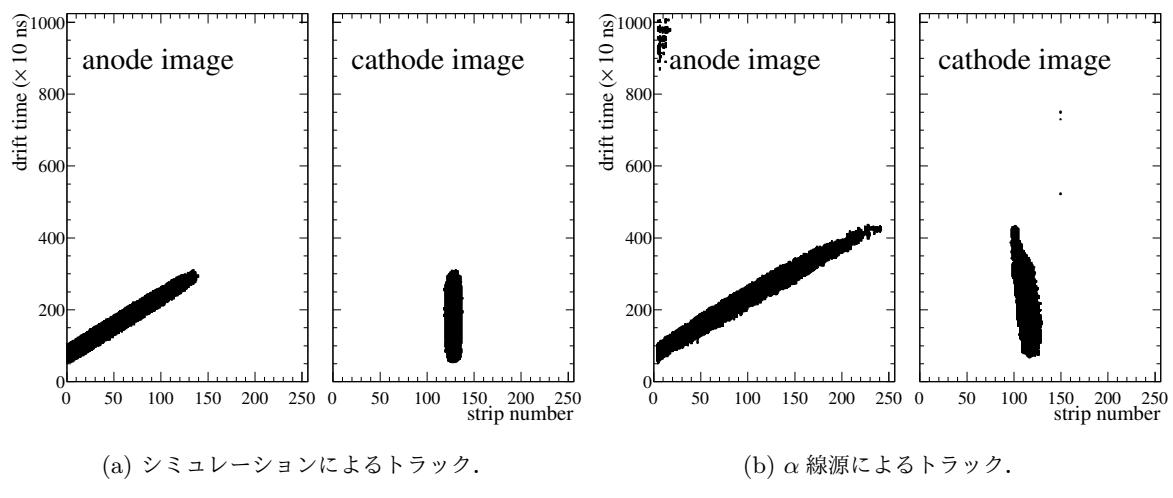
図 1.6: 1 電子が  $\mu$ -PIC に到達した時に読み出される電気信号.図 1.7:  $\alpha$  粒子のトラック (CH<sub>4</sub> の場合).

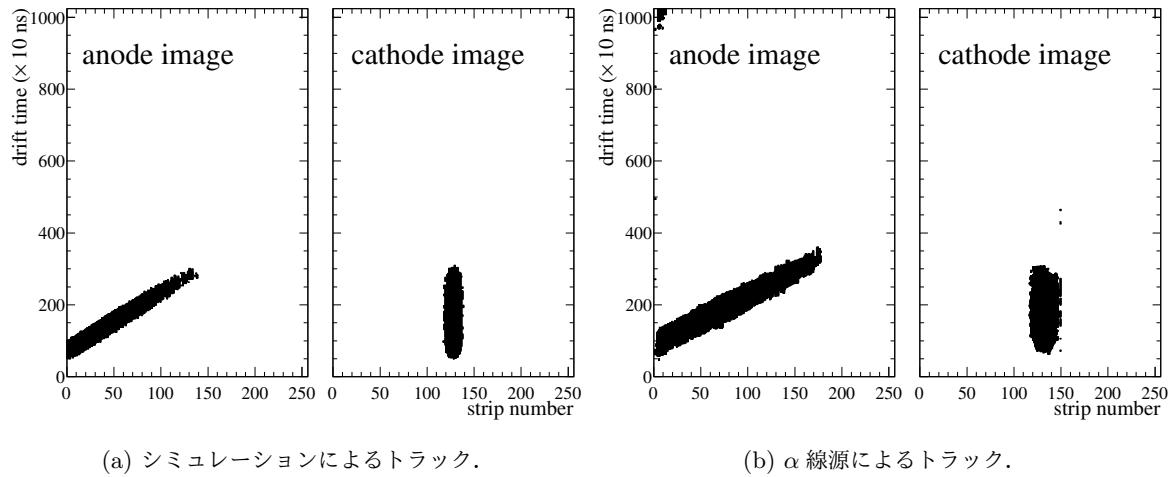
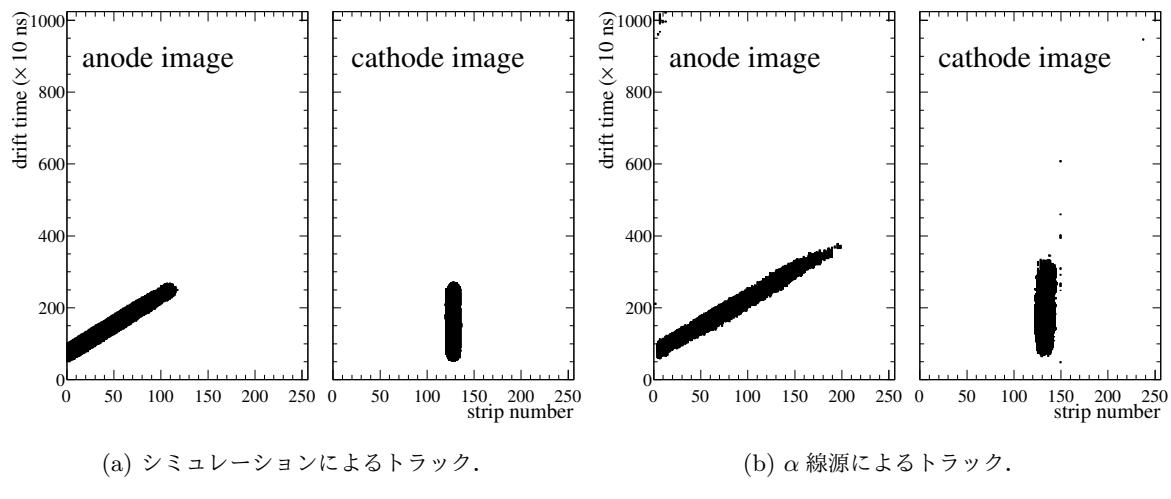
図 1.8:  $\alpha$  粒子のトラック ( $\text{CH}_4$  (3) +  $\text{H}_2$  (7) の場合).図 1.9:  $\alpha$  粒子のトラック ( $\text{CH}_4$  (4) +  $\text{He}$  (6) の場合).

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 にそのような例を示す。

図 1.10:  $\alpha$  粒子のトラック ( $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{H}_2$  (9) の場合).図 1.11:  $\alpha$  粒子のトラック ( $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) + He (9) の場合).

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).

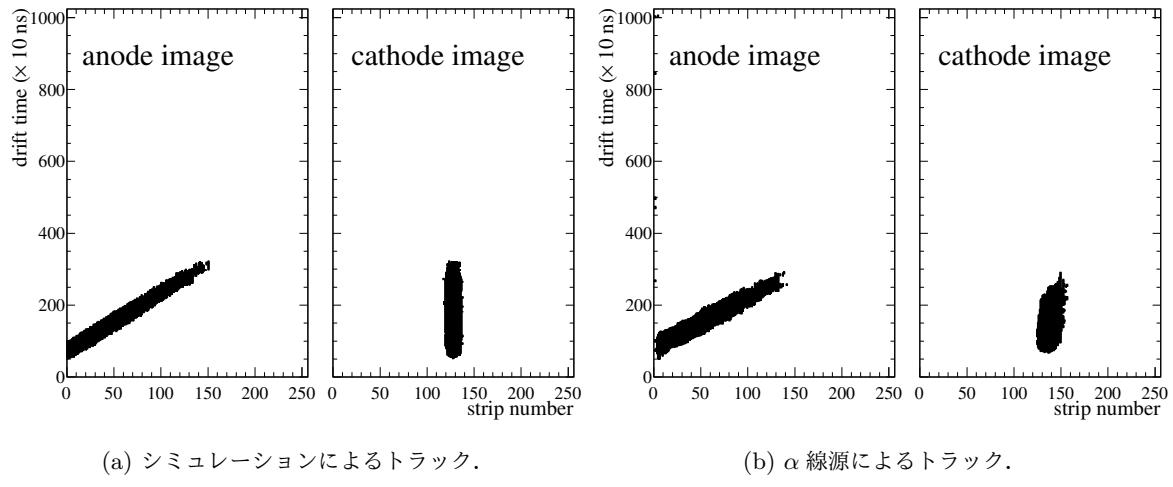


図 1.16: 低エネルギー  $\alpha$  粒子のトラック (iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + He (9) の場合).

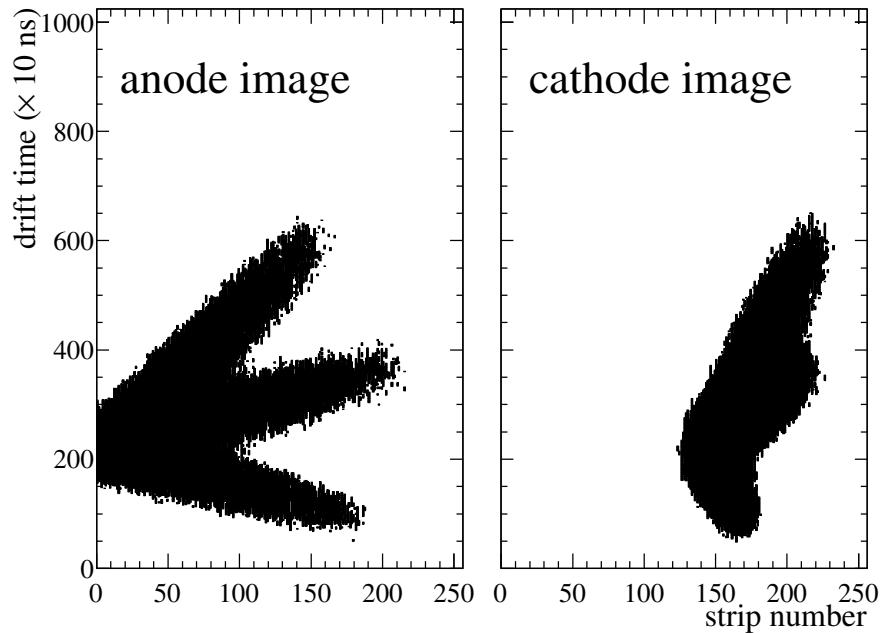
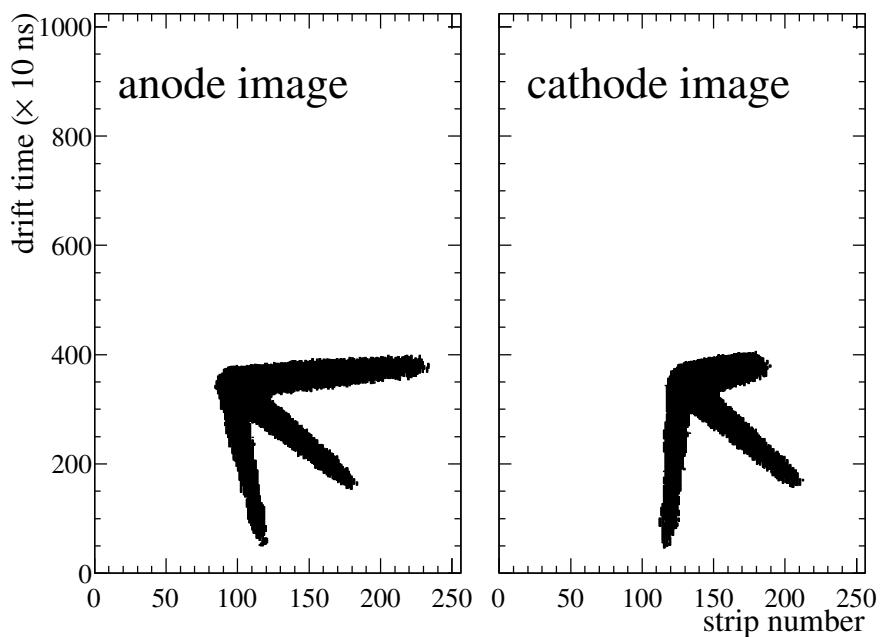
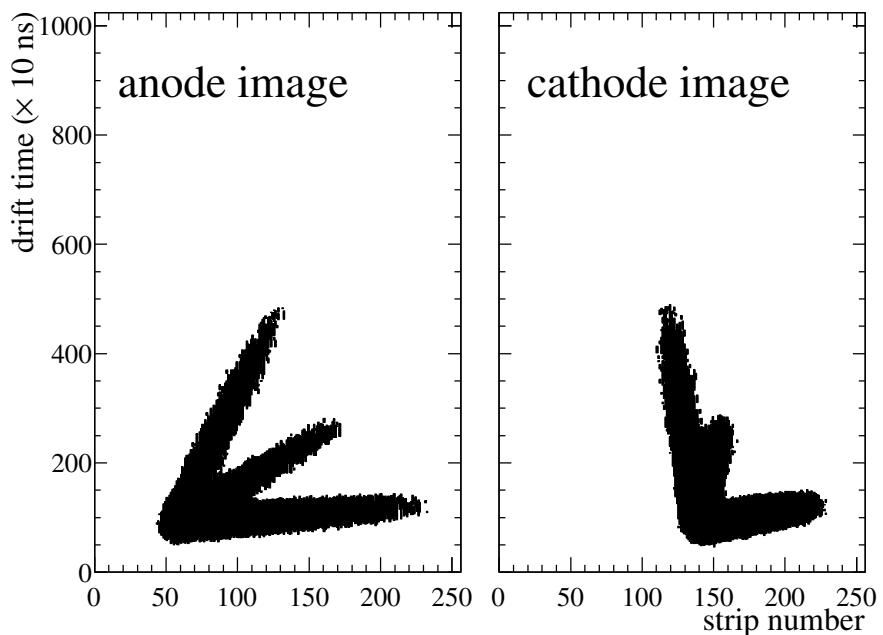


図 1.17: 3 $\alpha$  のシミュレーション画像 (CH<sub>4</sub> の場合).

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).

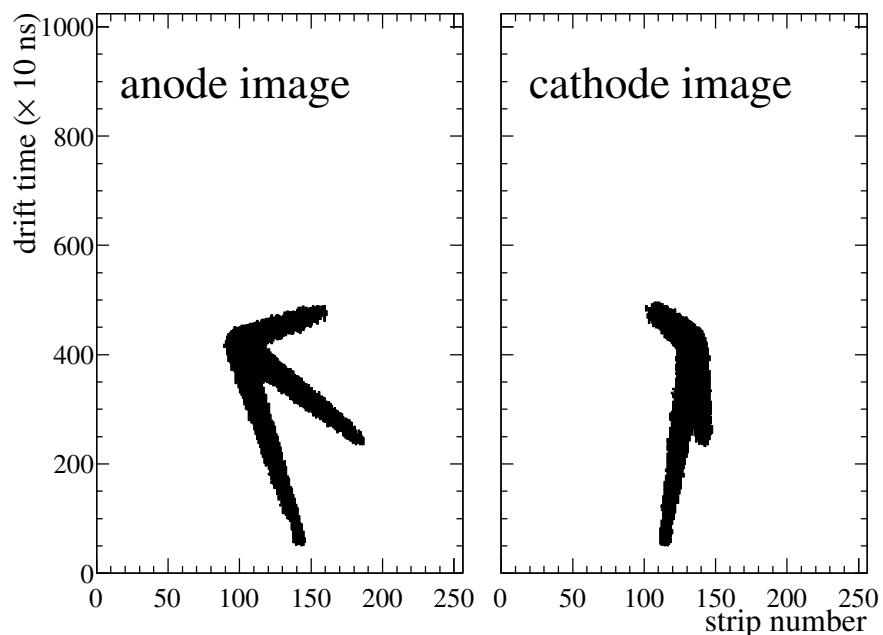


図 1.20:  $3\alpha$  のシミュレーション画像 ( $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{H}_2$  (9) の場合).

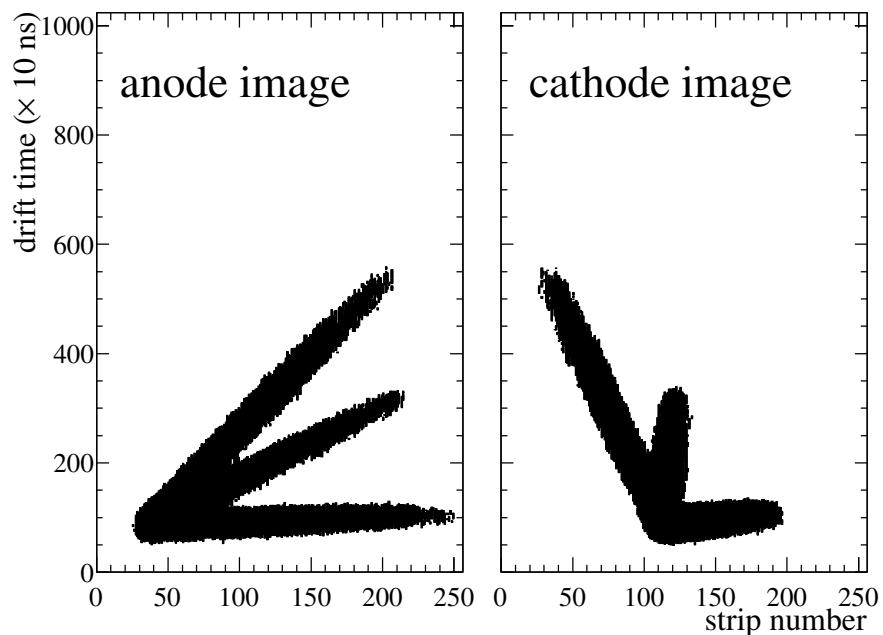


図 1.21:  $3\alpha$  のシミュレーション画像 ( $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{He}$  (9) の場合).

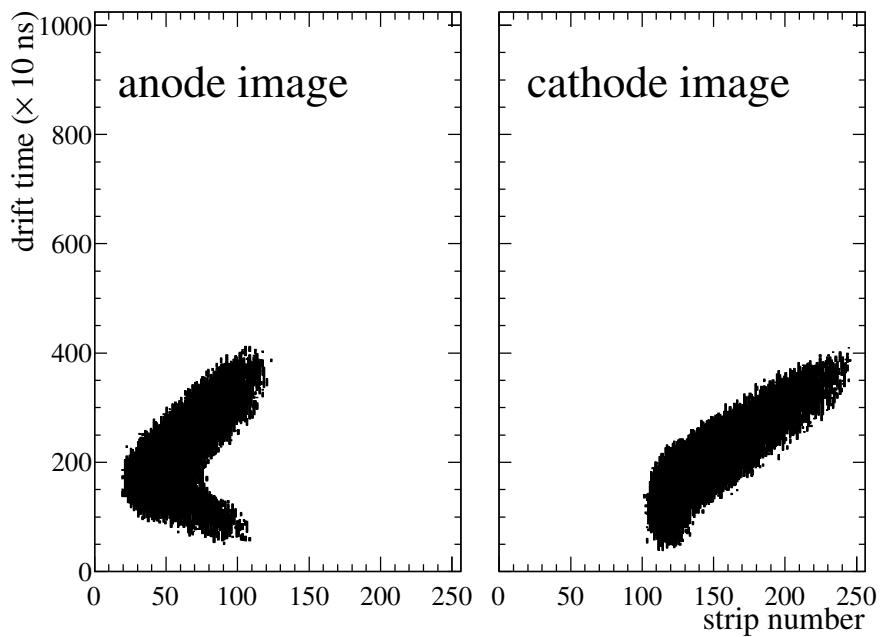


図 1.22: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 ( $\text{CH}_4$  の場合).

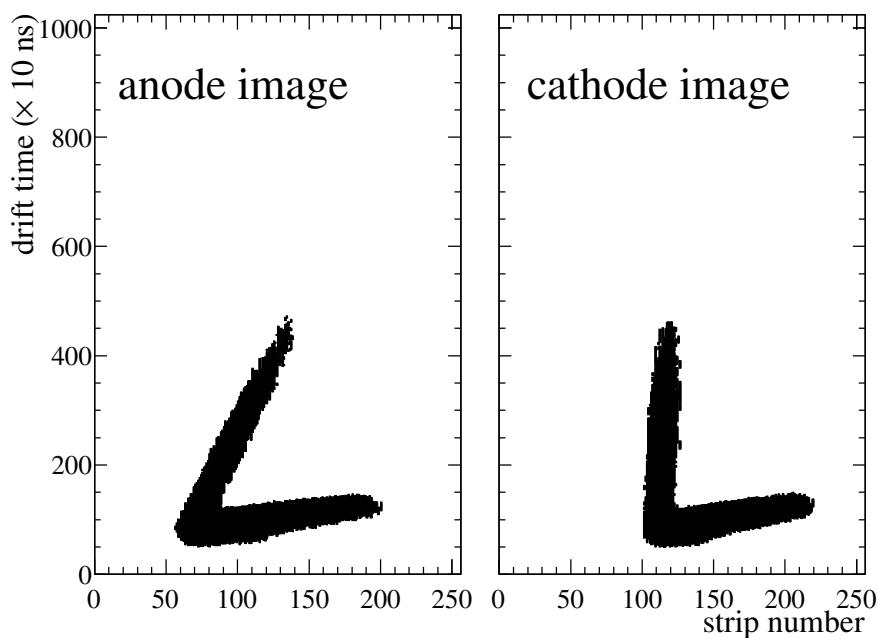


図 1.23: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 ( $\text{CH}_4$  (3) +  $\text{H}_2$  (7) の場合).

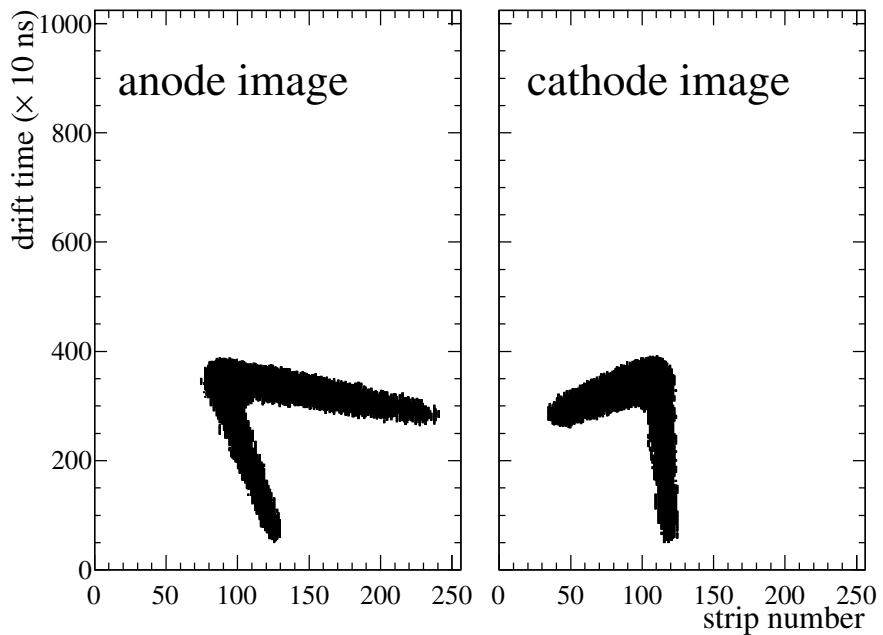


図 1.24: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 ( $\text{CH}_4$  (4) + He (6) の場合).

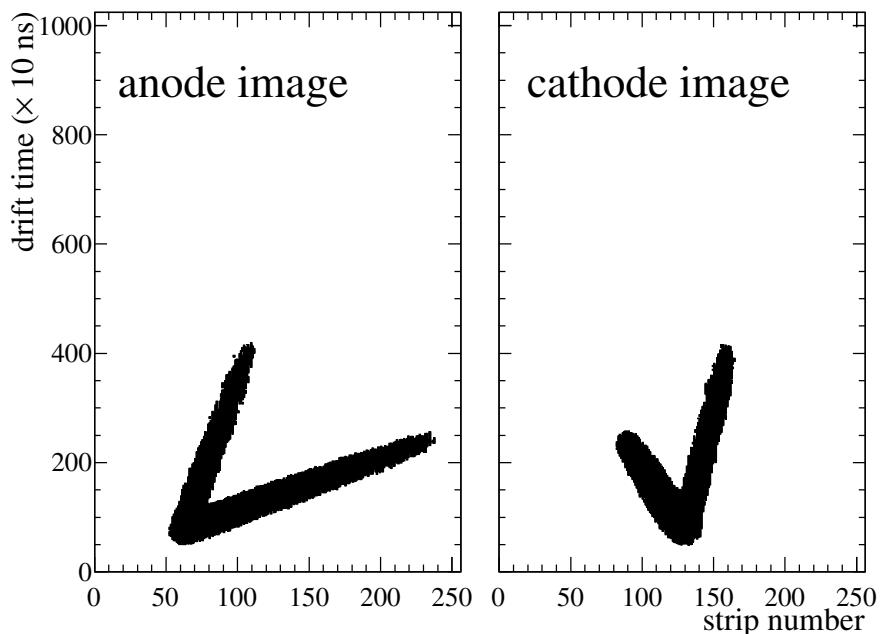


図 1.25: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 ( $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{H}_2$  (9) の場合).

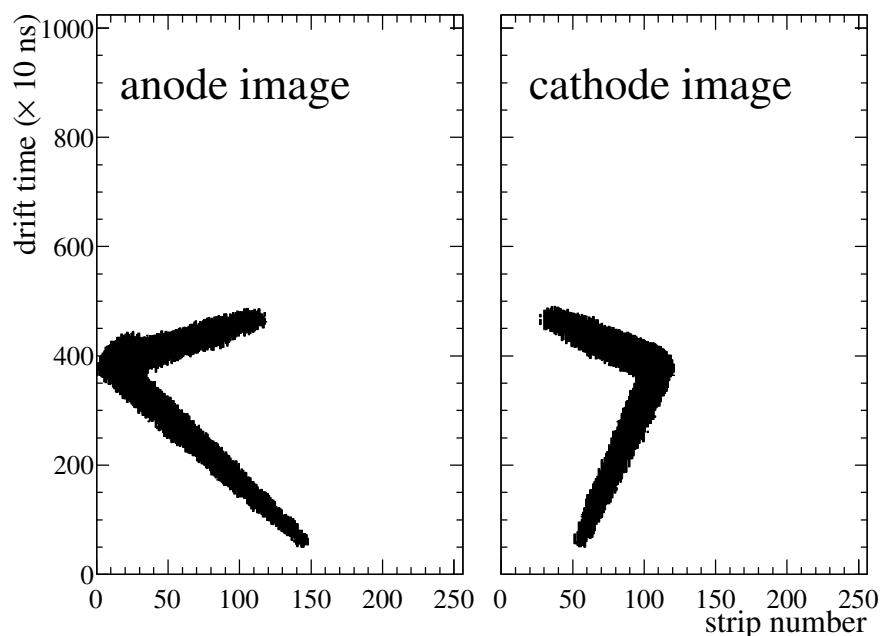


図 1.26: 2 本しかトラックを確認できないイベントの画像 ( $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) + He (9) の場合).