

## 第 1 章

# シミュレーション

### 1.1 各種パラメータの測定

??節で考えた各ガスについて、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  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(1) + \text{H}_2(9)$  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  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  を除いた 5 種類で考えていく。これはディフュージョン係数が大きいことと圧力が低く安定した TPC の動作が難しいと予測されるためである。

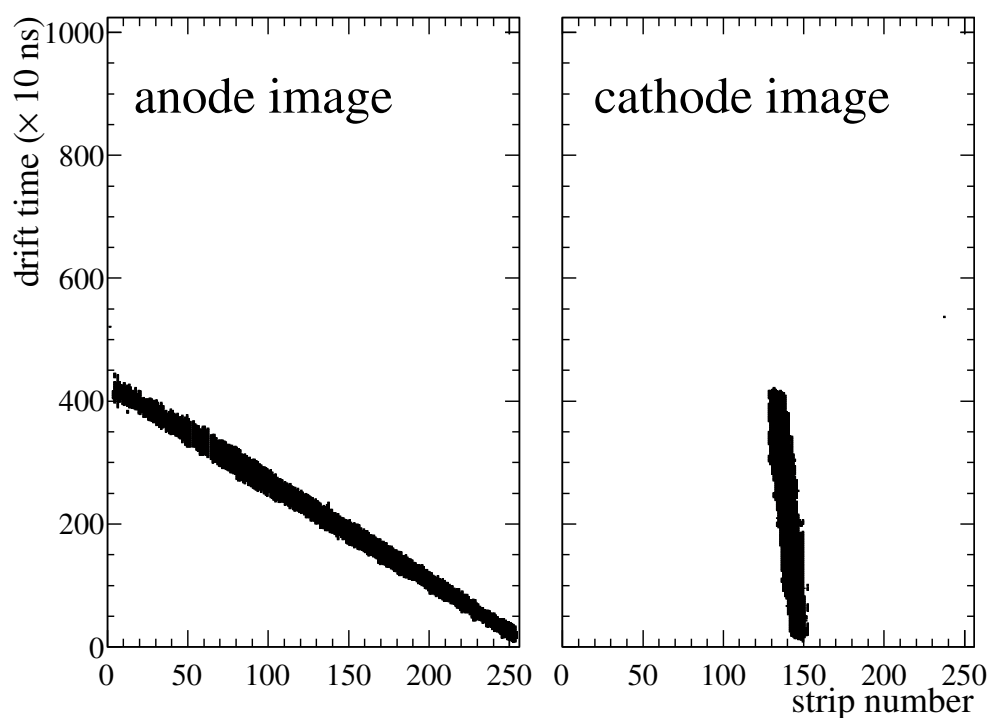


図 1.1:  $\alpha$  線源のトラック。検出ガスは  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(1) + \text{H}_2(9)$  を用いた。

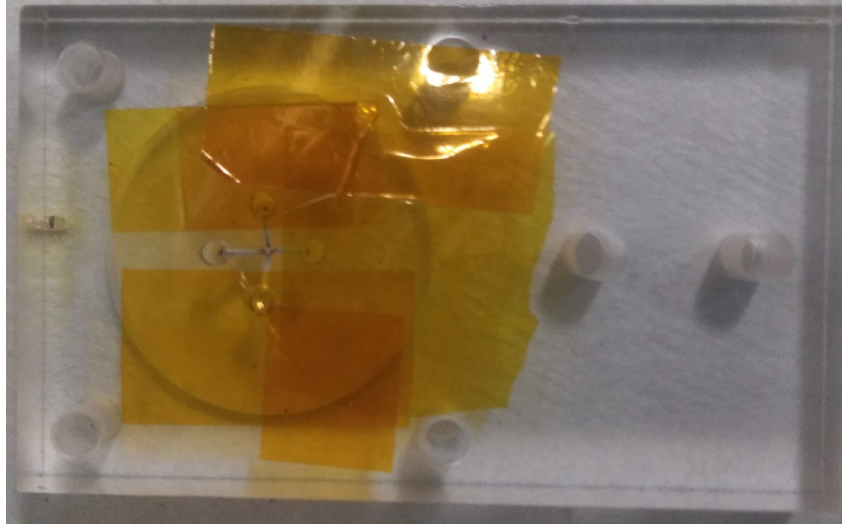


図 1.2: 線源コリメータ。中央に  $0^\circ$ 、上下左右に  $30^\circ$  の穴が開いている。

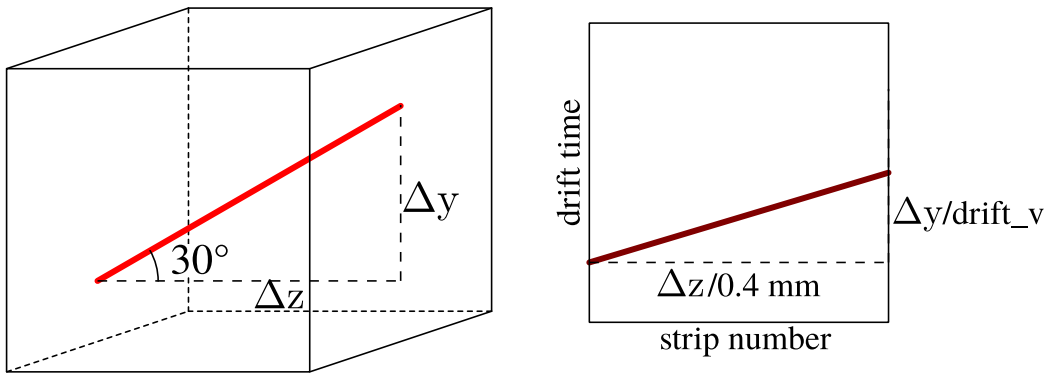


図 1.3:  $30^\circ$  に方向を限定した  $\alpha$  線 (左) と取得される画像データ (右) のイメージ。

### 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  $\Delta y$ 、それと垂直な方向に  $\Delta z$  移動するとき、

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

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  $\Delta t$ 、ドリフトスピードを  $drift\_v$  とすると、

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

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

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 (V/mm)	実測 (mm/ns)	Magboltz (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

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を 12.8 mm 進んだ時のものである。

gas	W (eV)	energy loss (MeV)	$N_e$
CH <sub>4</sub>	29.1	0.0565	$1.94 \times 10^3$
CH <sub>4</sub> (3) + H <sub>2</sub> (7)	34.2	0.0534	$1.56 \times 10^3$
CH <sub>4</sub> (4) + He(7)	39.2	0.0593	$1.51 \times 10^3$
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + H <sub>2</sub> (9)	35.4	0.0620	$1.75 \times 10^3$
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + He(9)	44.0	0.0580	$1.32 \times 10^3$

式 (1.1, 1.2, 1.3) より

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

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 とがずれているが、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 電子増幅率

電圧パラメータを変更させたときの増幅率の変化を測定した。増幅率を計算するために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 ( $N_e$ ) と増幅後に  $\mu$ -PIC によって収集された電子数 ( $N'_e$ ) の比を取る。 $N_e$  はガス中での荷電粒子のエネルギー損失とガスの 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。

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。測定に用いた  $\alpha$  線源からは平均 4.2 MeV の  $\alpha$  粒子が出ていることが他の測定によりわかっている。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。

$\mu$ -PIC からの信号波形は 32 strips まとめて図??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

表 1.3: 各ガスの電子増幅率。

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(7)	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

表 1.4: 各ガスのトラックの幅。

gas	トラックの幅 (×10 ns)
CH <sub>4</sub>	91.1
CH <sub>4</sub> (3) + H <sub>2</sub> (7)	42.3
CH <sub>4</sub> (4) + He(7)	62.5
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + H <sub>2</sub> (9)	35.4
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + He(9)	54.9

信号は読み出し回路内部で 800 倍に増幅され、入力インピーダンス 50  $\Omega$  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、背景事象と識別できなくなる。 $0^\circ$  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 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には相関がある。ディフュージョン係数、トラックの幅ともに 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 [?] 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、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。

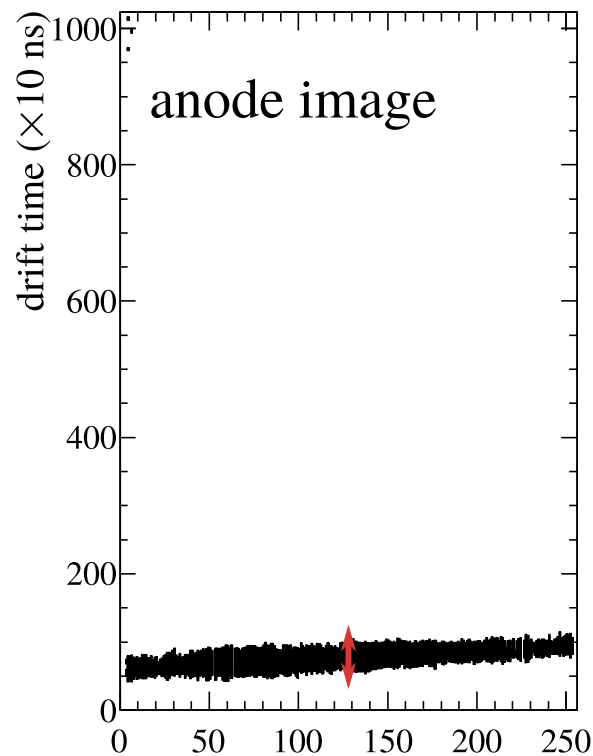


図 1.4: トラックの幅。トラックの幅は有感領域の中央である anode strip 128 ch の clock 方向の幅を用いる。

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 の信号波形に追加する。
5. 設定した閾値により、信号波形を TOT に変換する。

TOT の閾値は 0.1 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を比較を図 1.7, 1.8, 1.9, 1.10, 1.11 に示す。 $\alpha$  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。

### 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 Hoyle 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. Hoyle 状態の  $^{12}\text{C}$  を  $\alpha$  粒子と  $^8\text{Be}$  に位相空間で一様に崩壊させる。
3.  $^8\text{Be}$  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 3 つの  $\alpha$  粒子を元にトラックを生成する。生成したトラックを図 1.12, 1.13, 1.14,

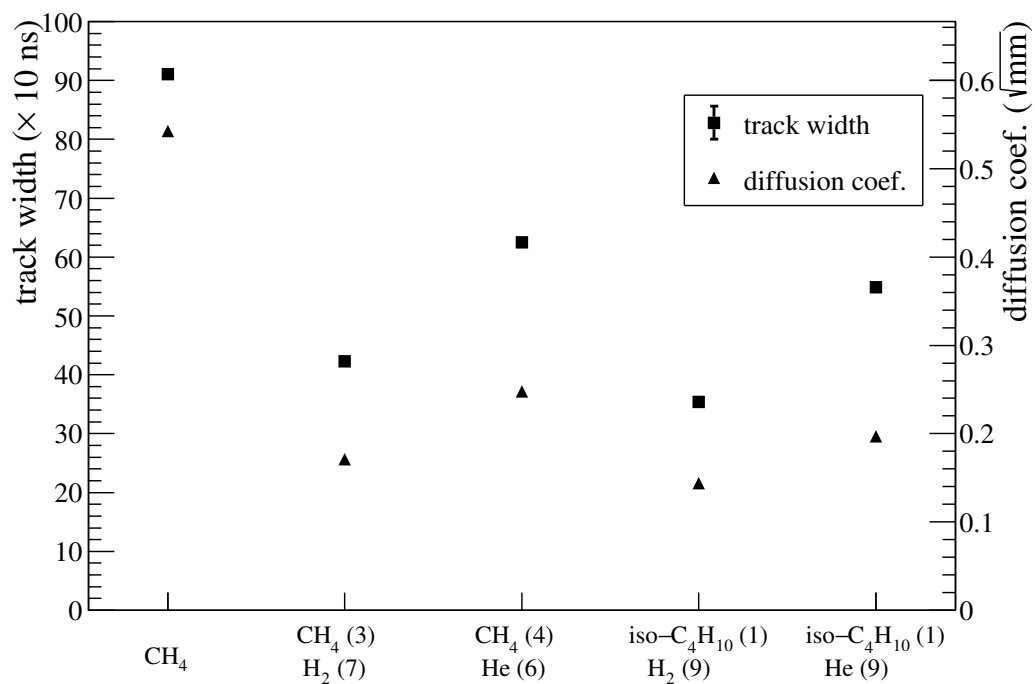


図 1.5: Magboltz で求めたディフージョン係数とトラックの幅。

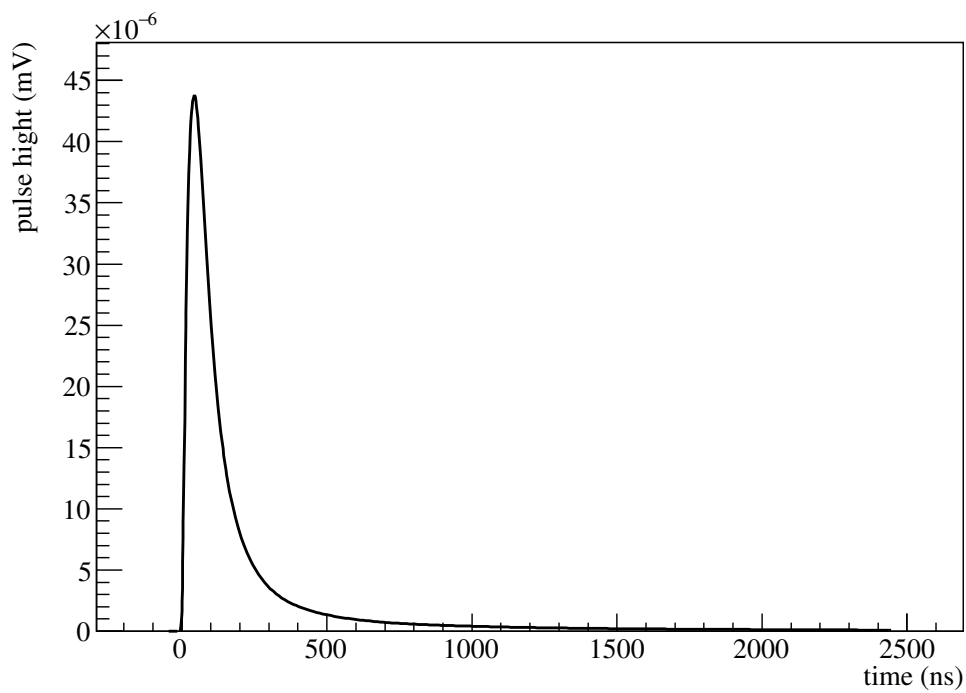
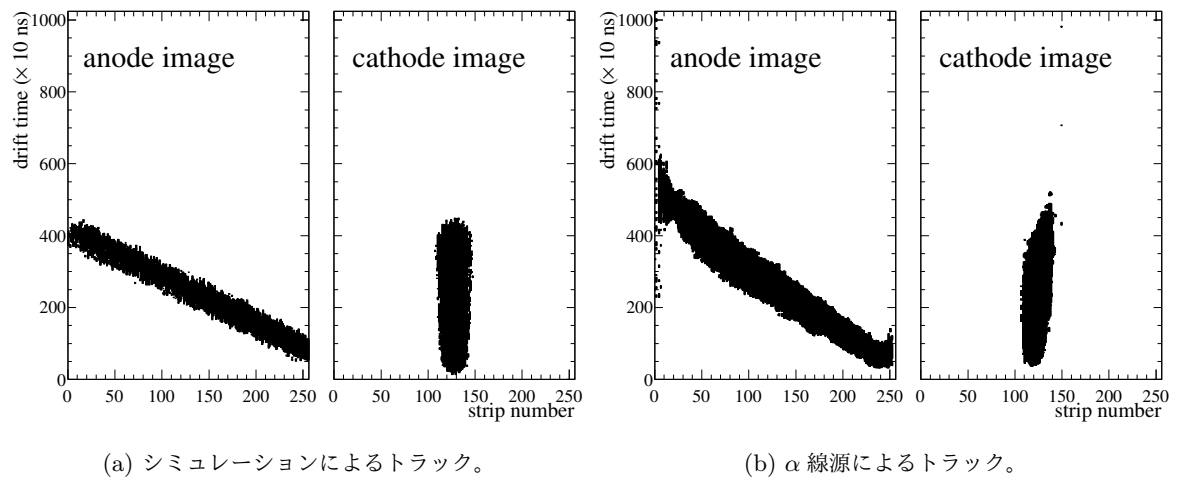
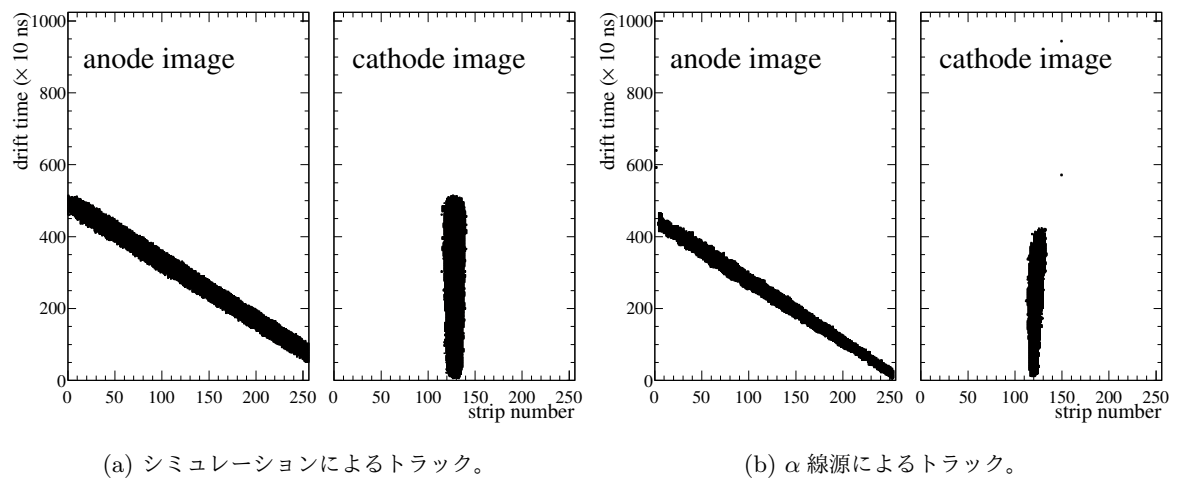
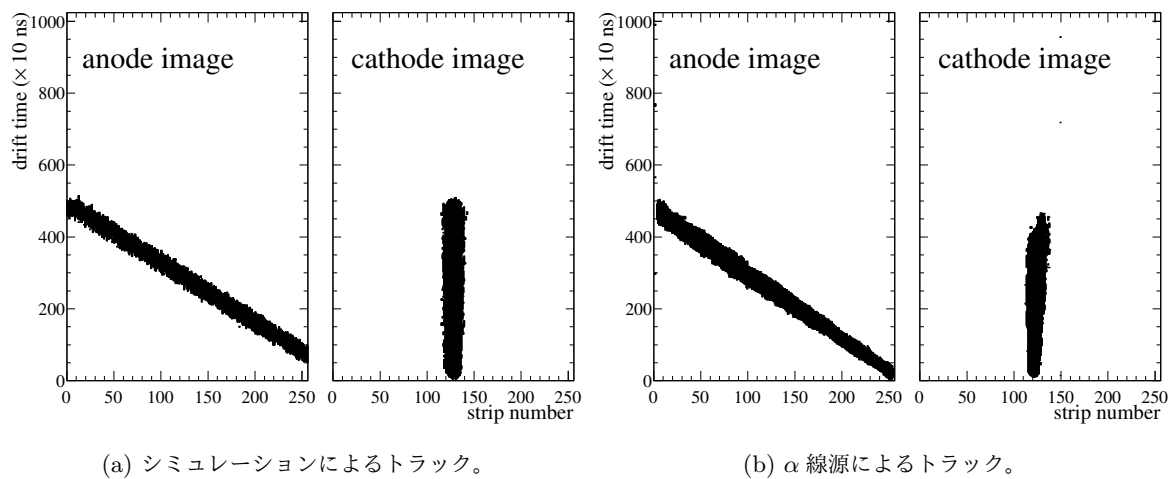
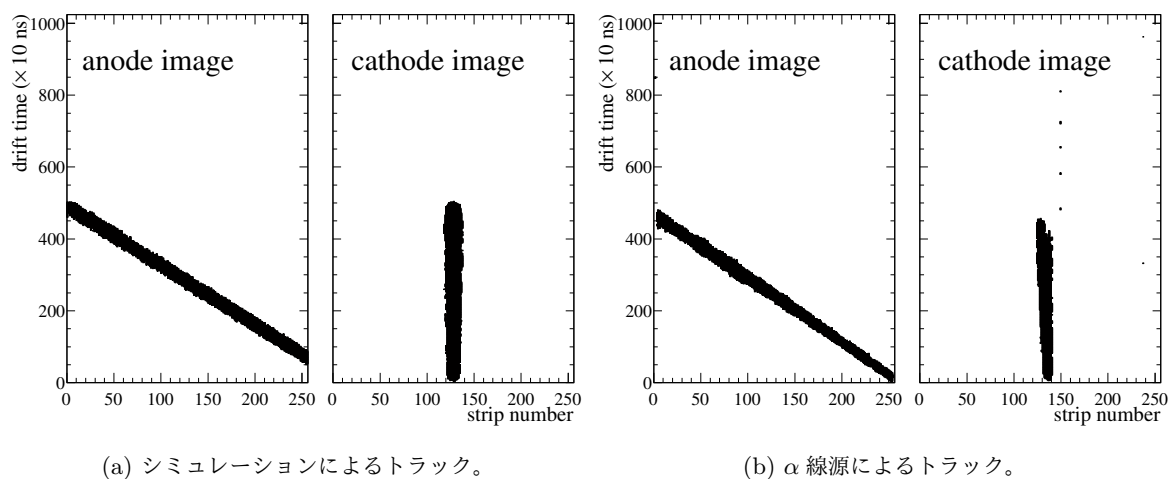


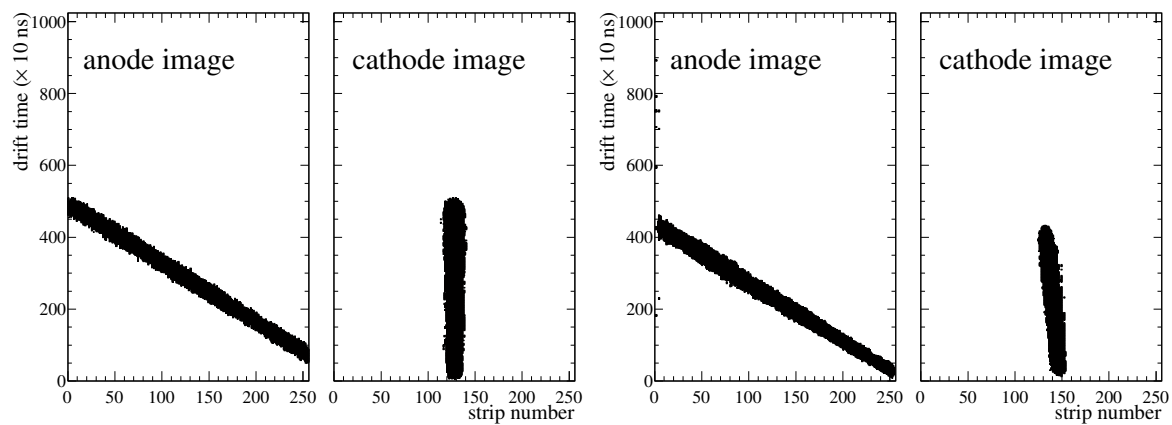
図 1.6: 1 電子が  $\mu$ -PIC に到達した時に読み出される電気信号。

図 1.7:  $\text{CH}_4$  の場合。図 1.8:  $\text{CH}_4(3) + \text{H}_2(7)$  の場合。

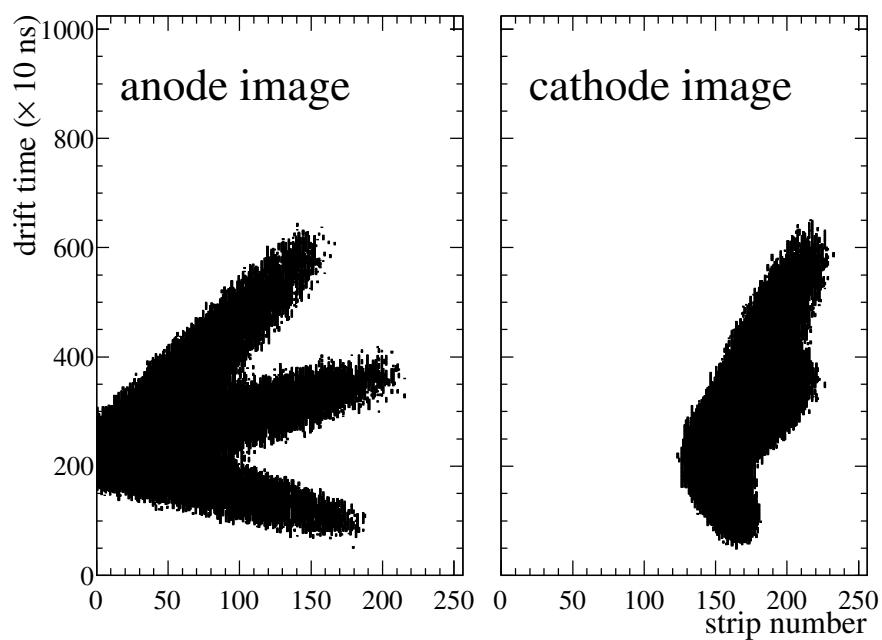
1.15, 1.16 に示す。

図 1.9:  $\text{CH}_4(4) + \text{He}(6)$  の場合。図 1.10:  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(1) + \text{H}_2(9)$  の場合。





(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 1.11:  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(1) + \text{He}(9)$  の場合。図 1.12:  $\text{CH}_4$  の場合。

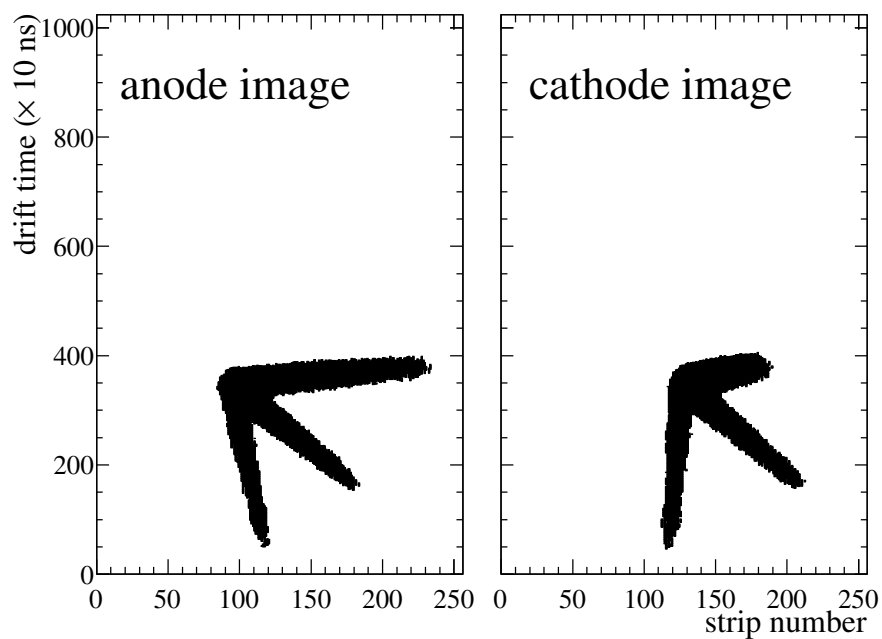


図 1.13:  $\text{CH}_4(3) + \text{H}_2(7)$  の場合。

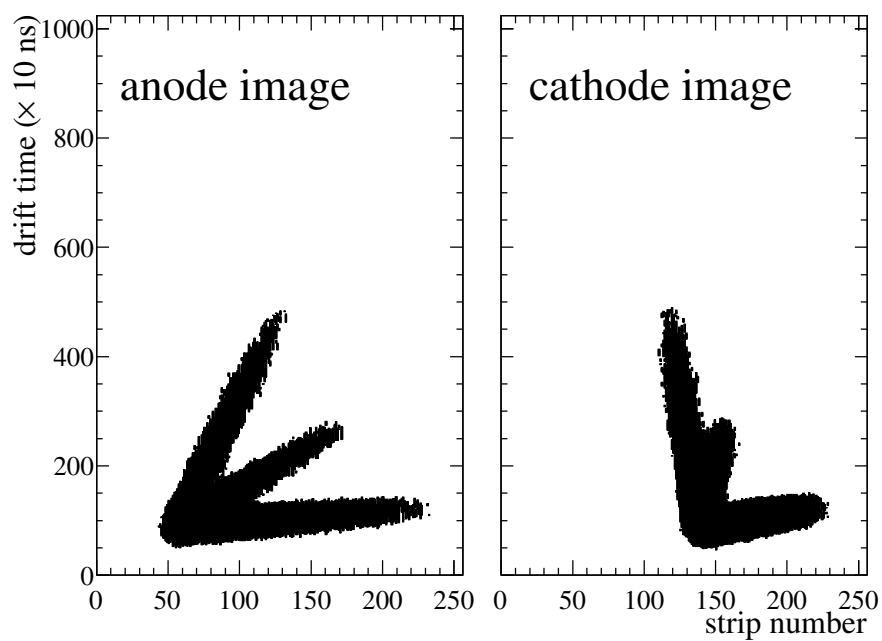
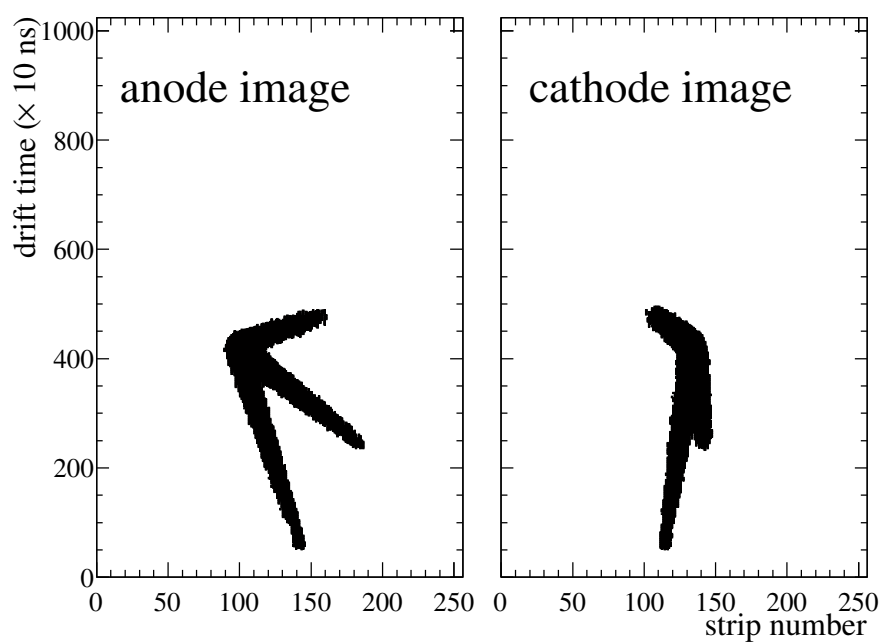
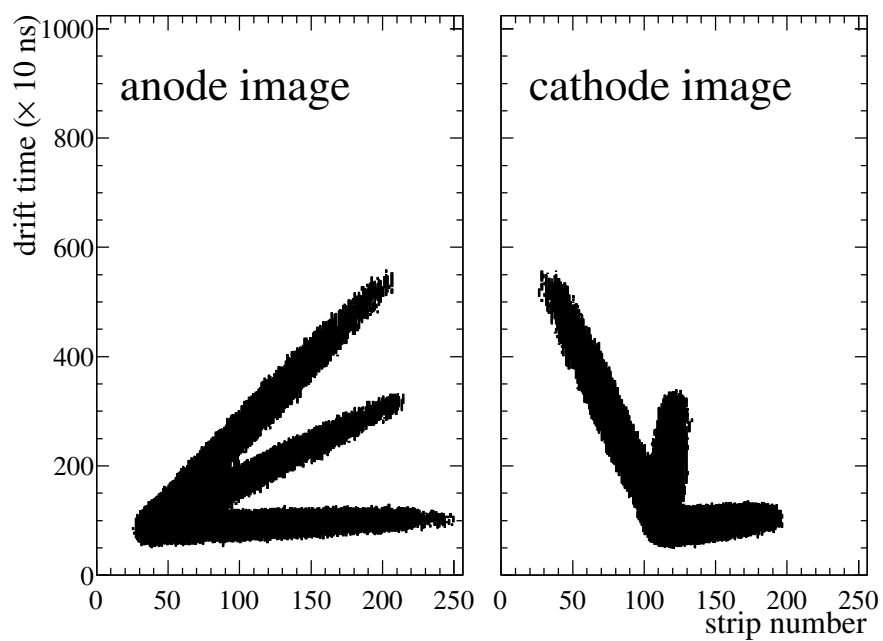


図 1.14:  $\text{CH}_4(4) + \text{He}(6)$  の場合。

図 1.15:  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(1) + \text{H}_2(9)$  の場合。図 1.16:  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}(1) + \text{He}$  の場合。