

実験と観測で解き明かす中性子星の核物質 C01班

新しいSi CMOSハイブリッド検出器と 電子飛跡のDeep Learningによる再構成

斉藤 新也 （立教大学, 宇宙科学研究所(~2014年)）

高橋忠幸, 渡辺伸, 池田博一, 米田浩基 （宇宙科学研究所）

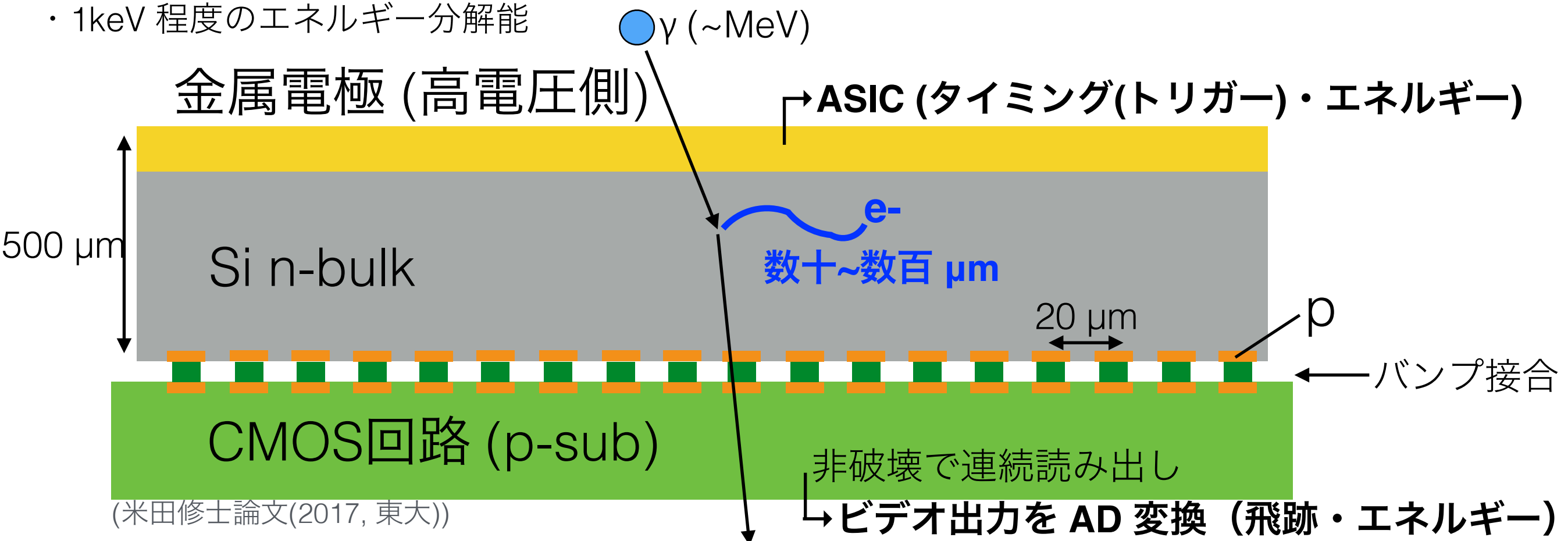
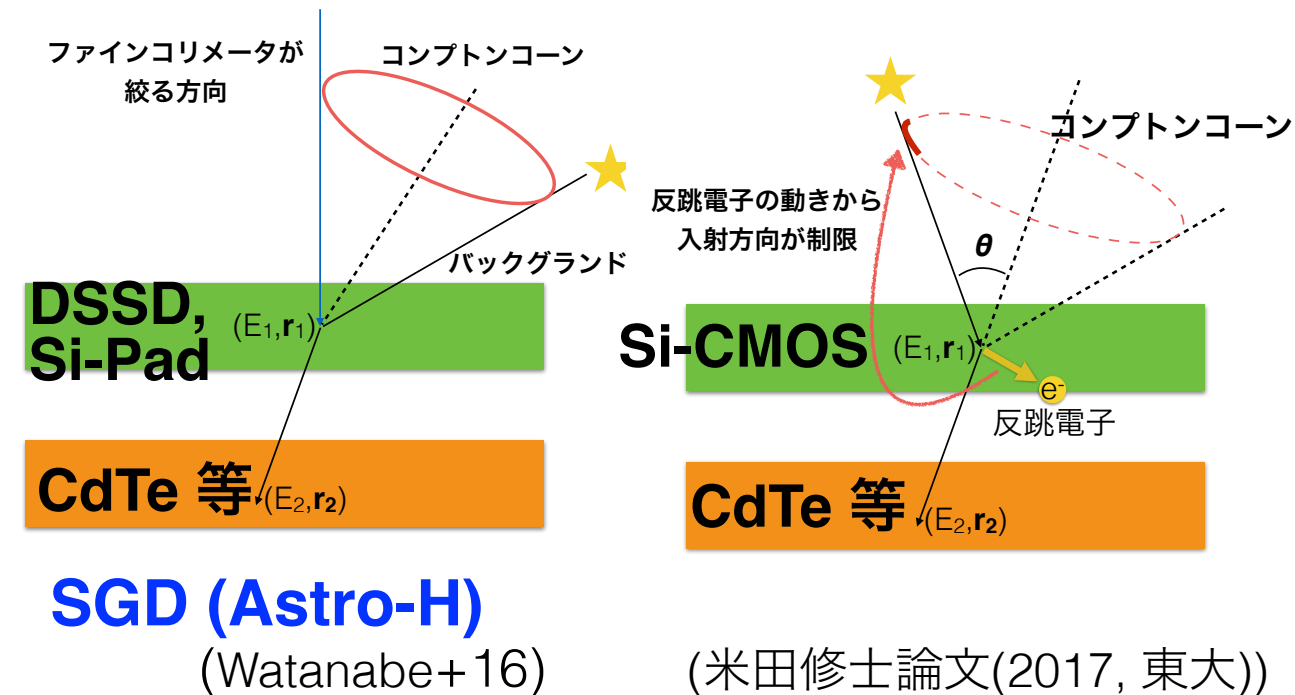
Si-CMOS 検出器

MeV ガンマ線観測

コンプトン散乱が支配的相互作用
電子追跡型コンプトンカメラによる感度向上

Si-CMOS検出器の開発

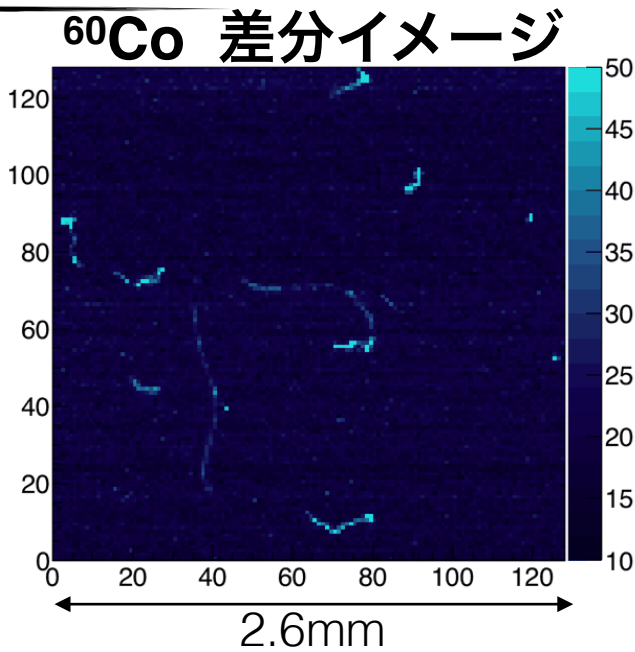
- ・ 20 μm ピッチ CMOS 回路
(コンプトン散乱時の反跳電子の飛跡追跡)
- ・ 数 us の時間分解能 (同時計数)
- ・ 1keV 程度のエネルギー分解能



開発の経緯

2013年以降、宇宙科学研究所を中心に、浜松ホトニクスと共同で開発を進めてきた。

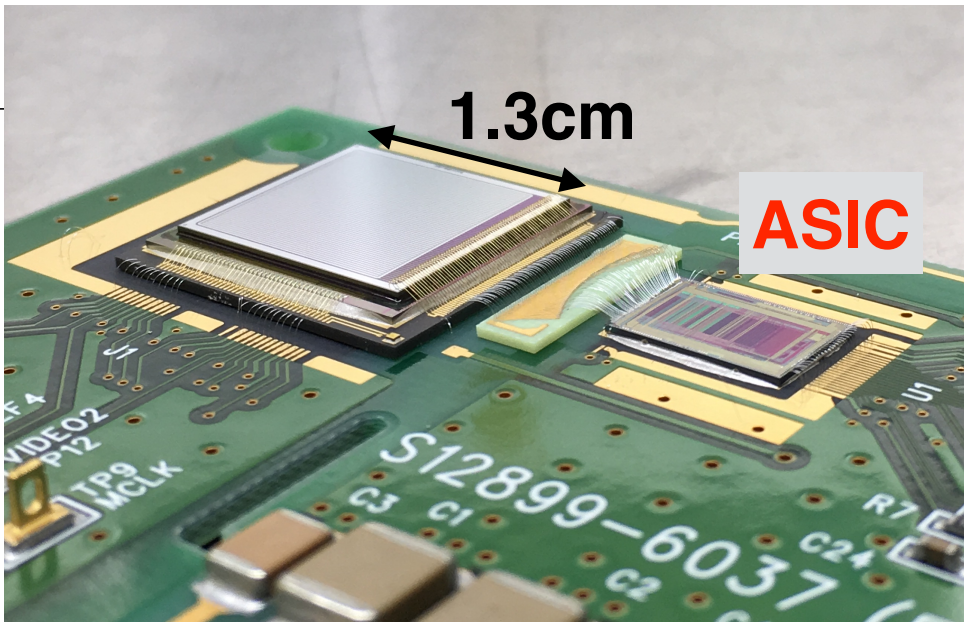
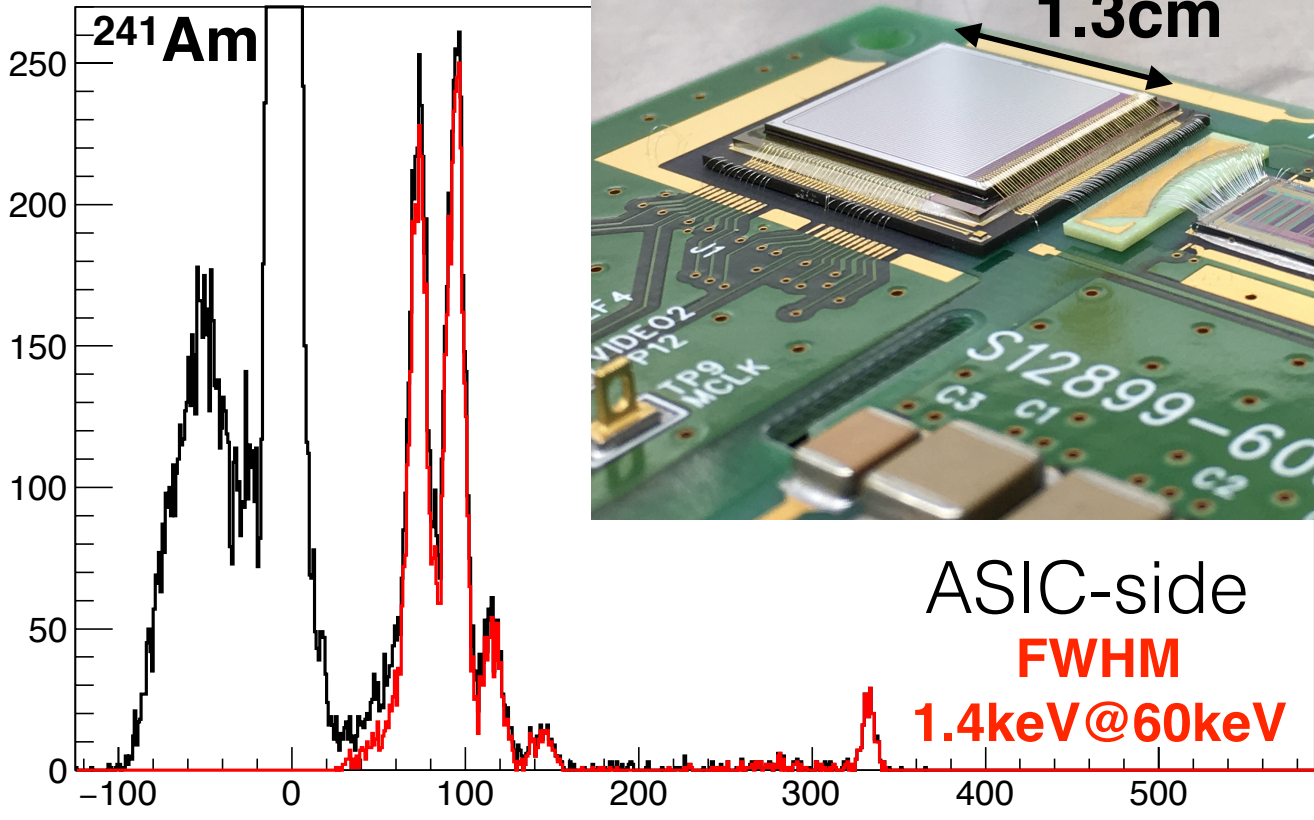
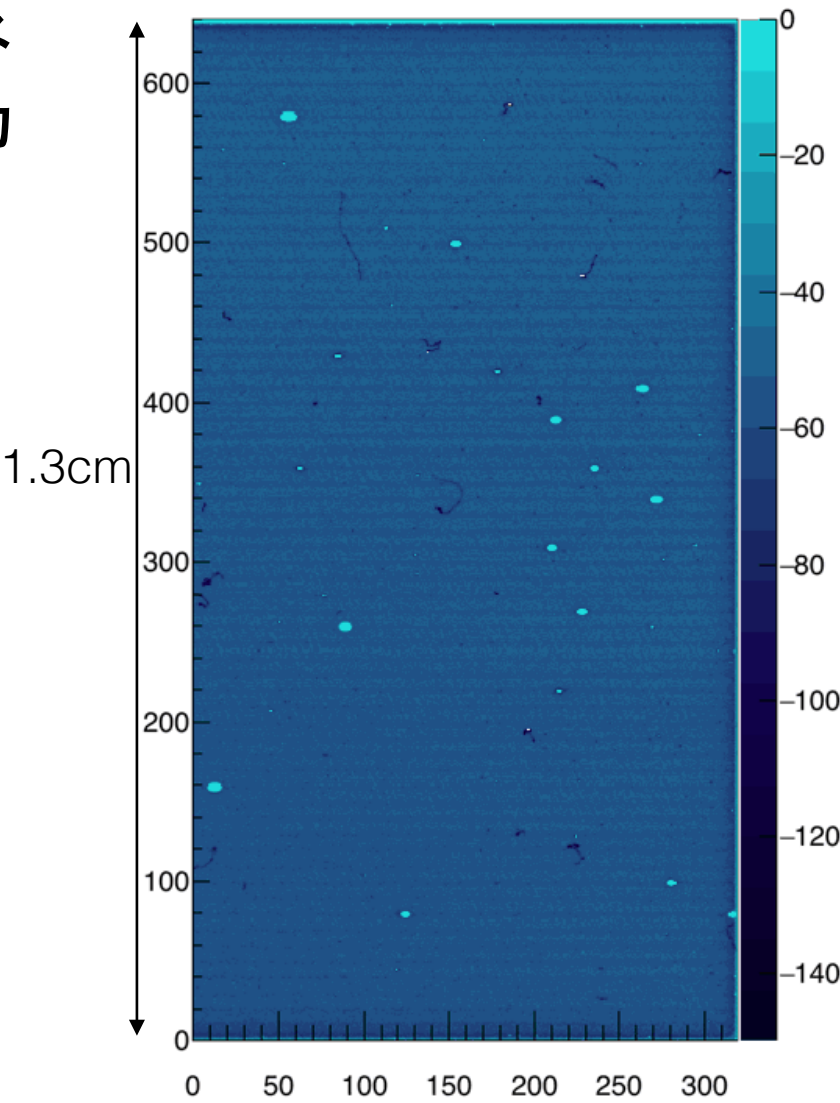
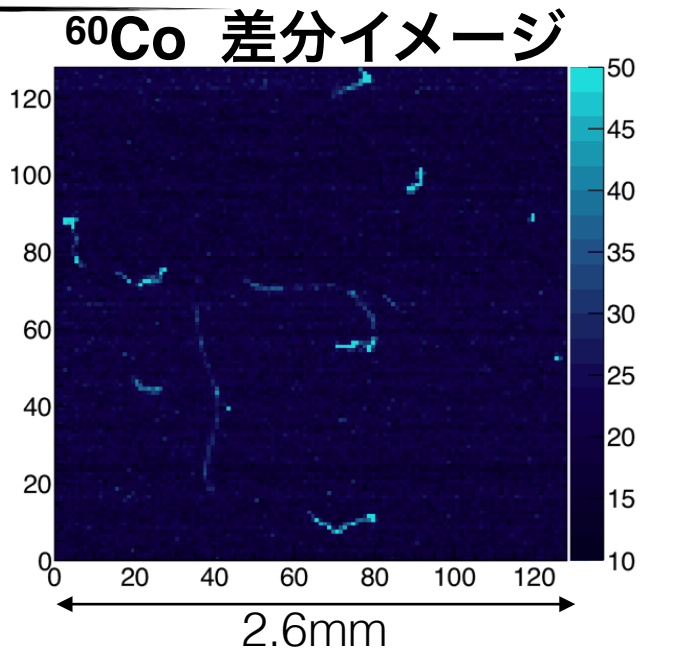
	サイズ	変換効率	電極構造	結果
2014	128 x 128 (2.6mm x 2.6mm)	2μV/e	共通電極	電子の飛跡取得に成功
2015	640 x 512 (1.3cm x 1cm)	1μV/e	共通電極	OK



開発の経緯

2013年以降、宇宙科学研究所を中心に、浜松ホトニクスと共同で開発を進めてきた。

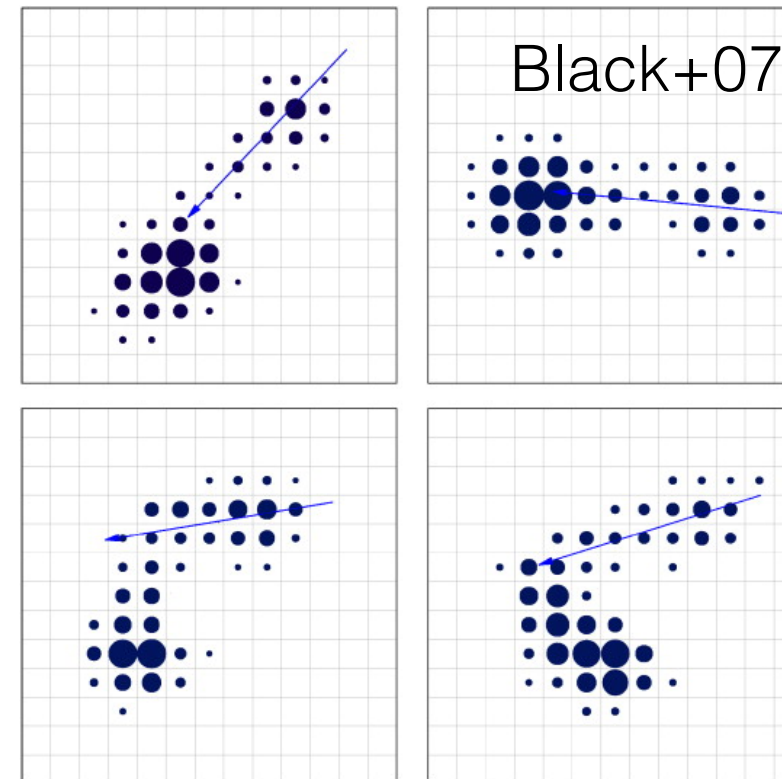
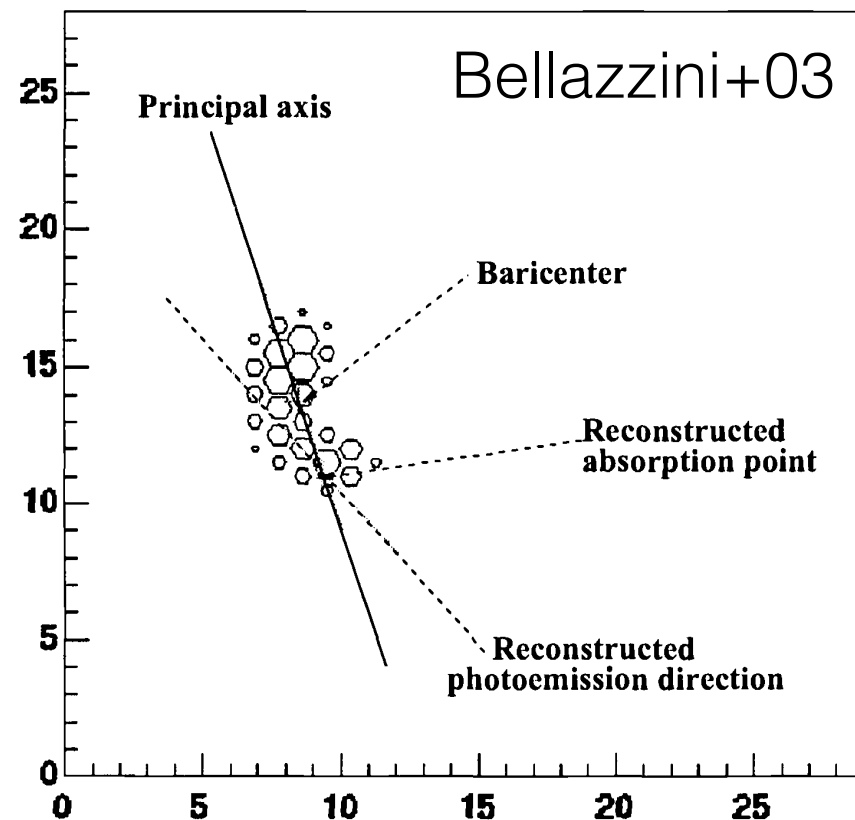
	サイズ	変換効率	電極構造	結果
2014	128 x 128 (2.6mm x 2.6mm)	2μV/e	共通電極	電子の飛跡取得に成功
2015	640 x 512 (1.3cm x 1cm)	1μV/e	共通電極	OK
2016	640 x 640 (1.3cm x 1.3cm)	4μV/e	電極分割 (ストリップ & ピクセル)	飛跡・タイミング・エネルギーの同時測定に成功



反跳電子の散乱方向ベクトルの決定

従来の飛跡解析（主にガス検出器によるX線偏光測定）：

飛跡の重心等の情報から解析的に始点を割り出し、始点近傍を直線フィット。



問題点：

始点が判別困難な複雑な軌跡には適用できず。

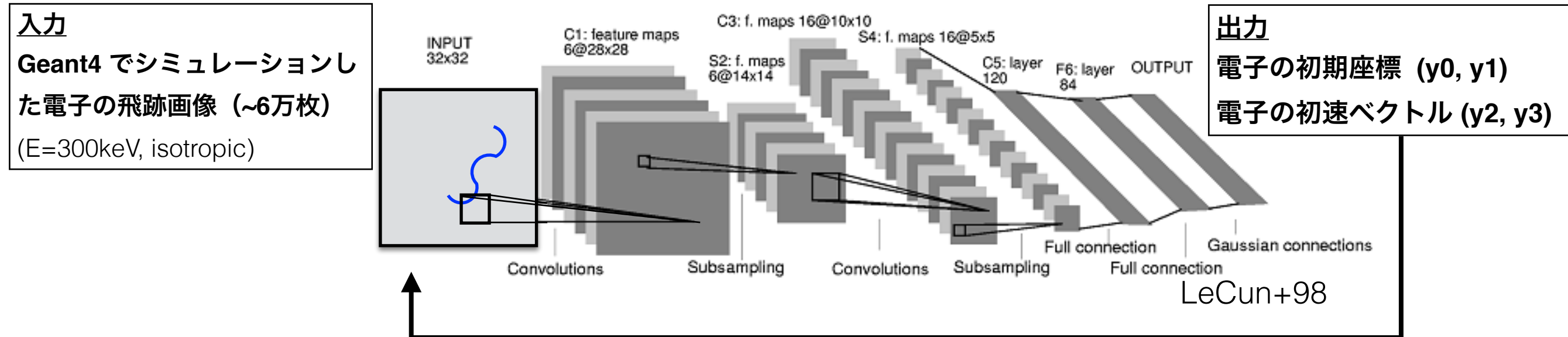
（Si-CMOSの場合、ガスに比べて飛跡が短くなる + 飛跡の二次元情報のみ）

新たな手法として、 Deep Learning を用いた飛跡解析アルゴリズムを構築

Deep Learning を用いた飛跡解析

Step1. ニューラルネットワークの学習

畳み込みニューラルネットワークの概念図



1. 出力(y) と実際の電子の初期座標・初速ベクトル(t) の二乗和 (損失関数 L) を計算

1→2 を、 L が収束するまで繰り返す

$$L = \frac{1}{2} \sum_k (t_k - y_k)^2$$

2. 損失関数 L を最小化するように、ネットワークのパラメータ W を調整

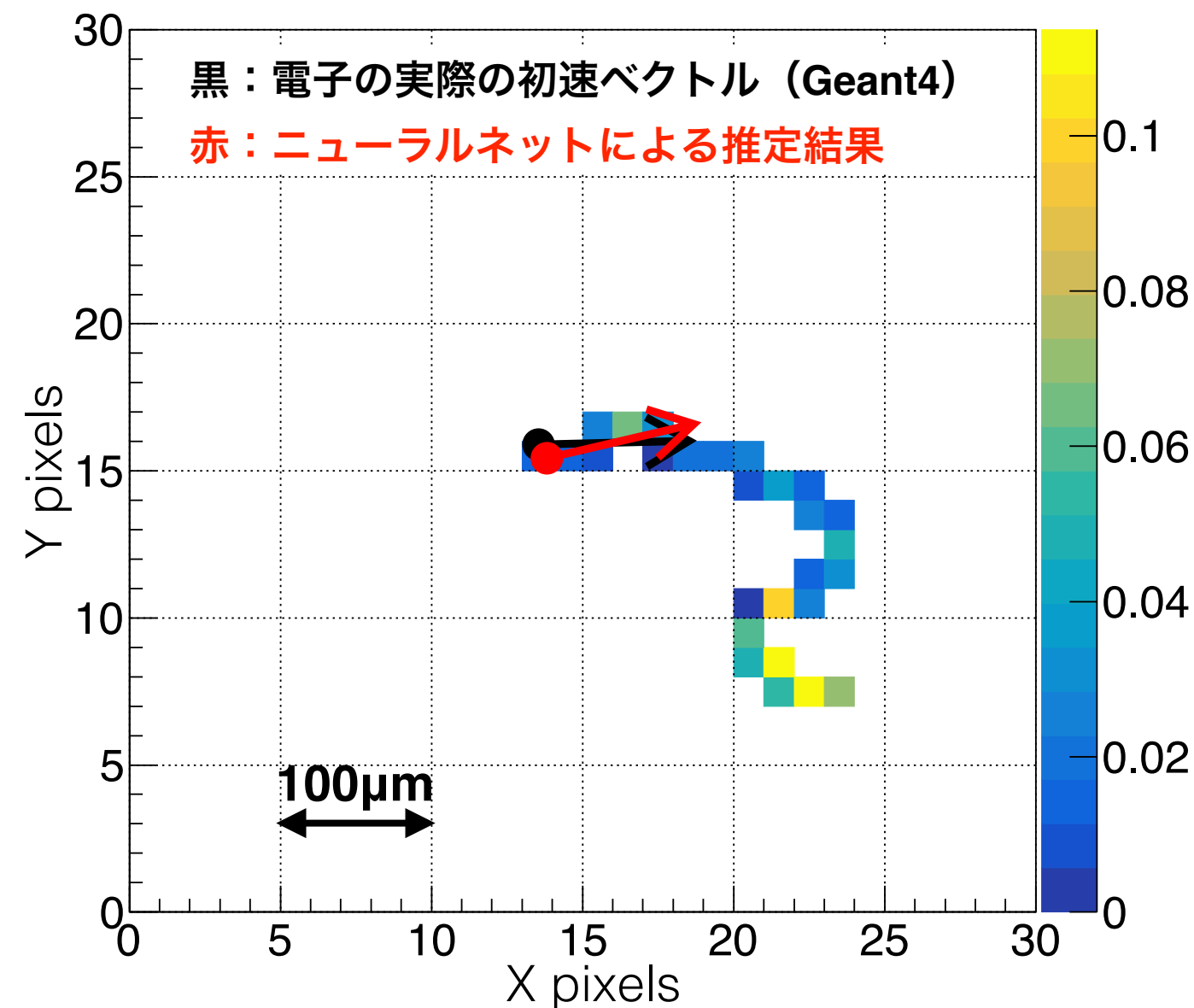
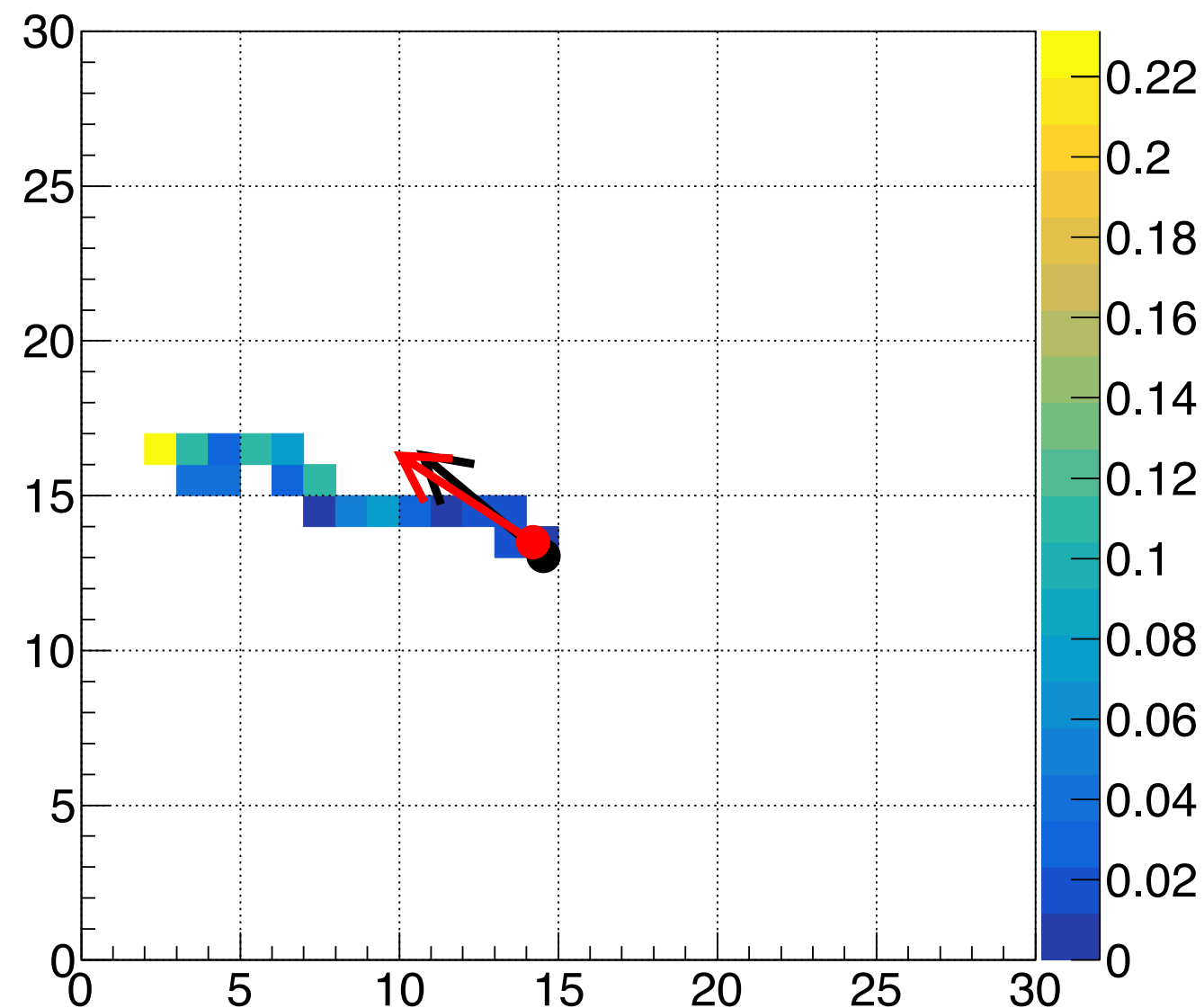
$$W \leftarrow W - \eta \frac{\partial L}{\partial W}$$

Step2. 学習済みニューラルネットワークによる推定

トレーニングデータと異なるデータセットを入力とし、汎化能力を検証。

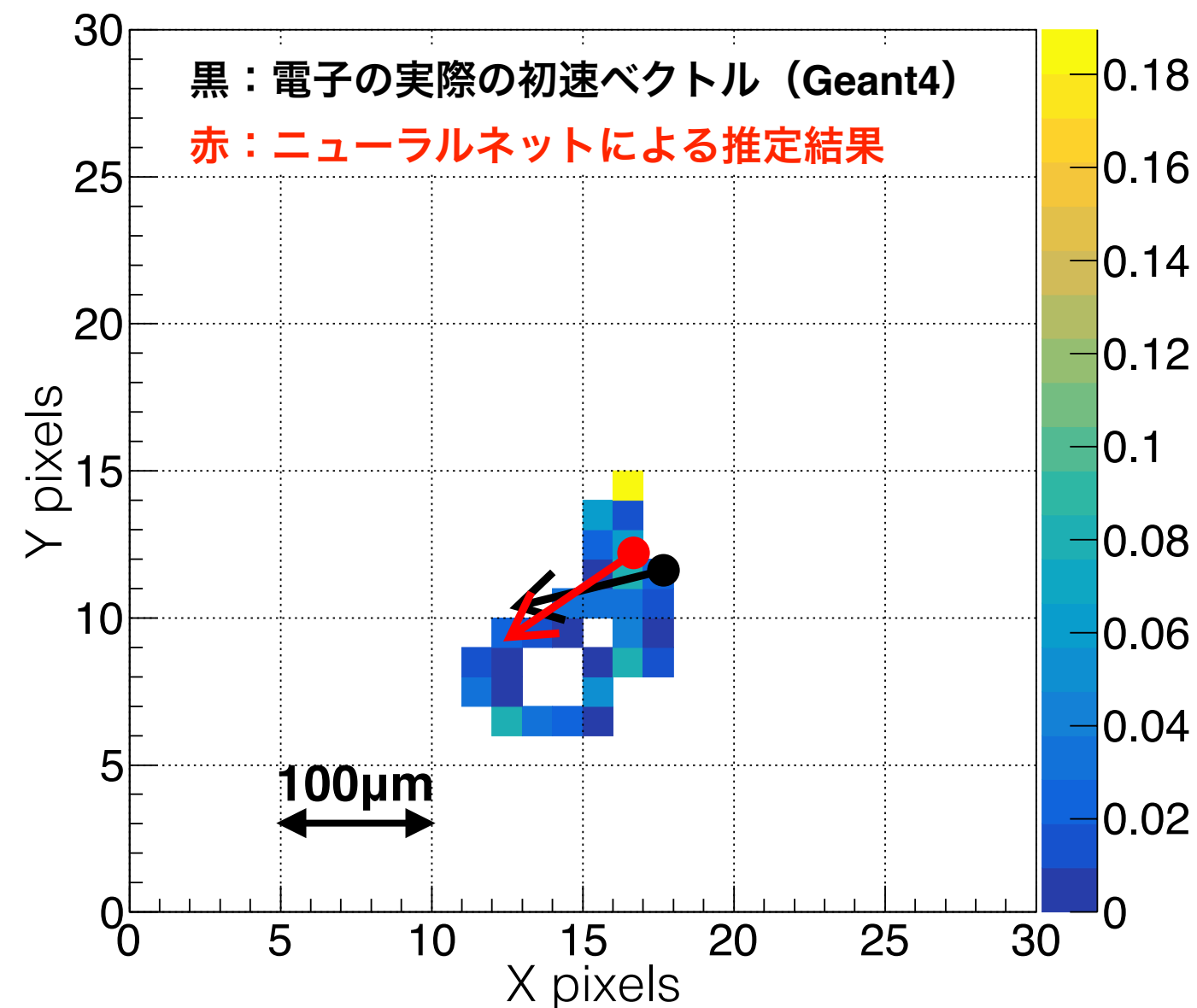
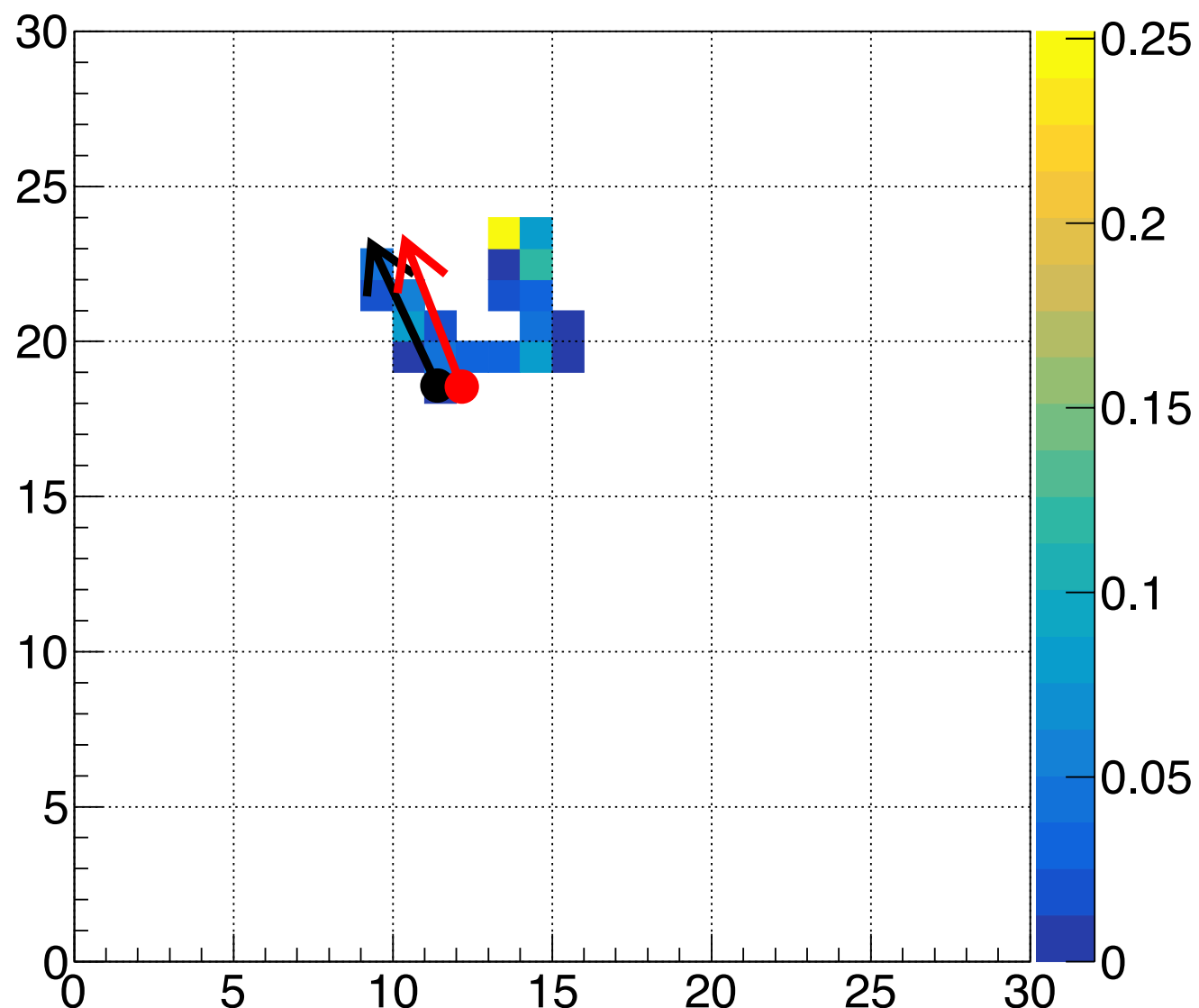
単純な飛跡の場合

- ・ 電子の反応位置・初速ベクトルともに正しく推定している。
- ・ 始点 (interaction point) と 終点 (Bragg ピーク) を間違えることは殆ど無い。

img1671**img3215**

複雑な飛跡の場合

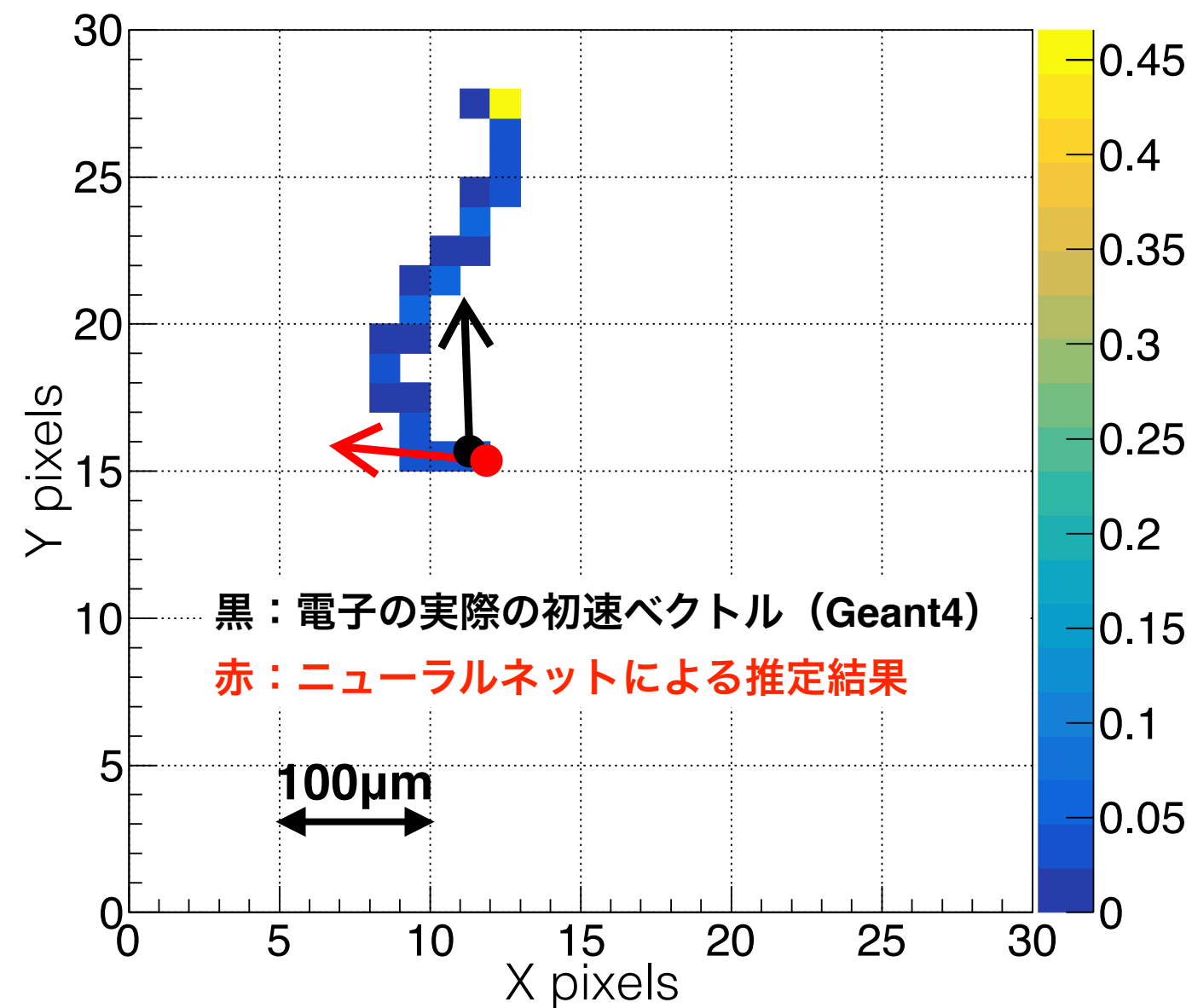
- 人が見ても反応位置・初速ベクトルの判断が困難で、かつ従来の飛跡解析アルゴリズム (e.g. moment analysis) が機能しないケースでも、ある程度正しく推定できている。

img1559**img3222**

正しく推定できないケース

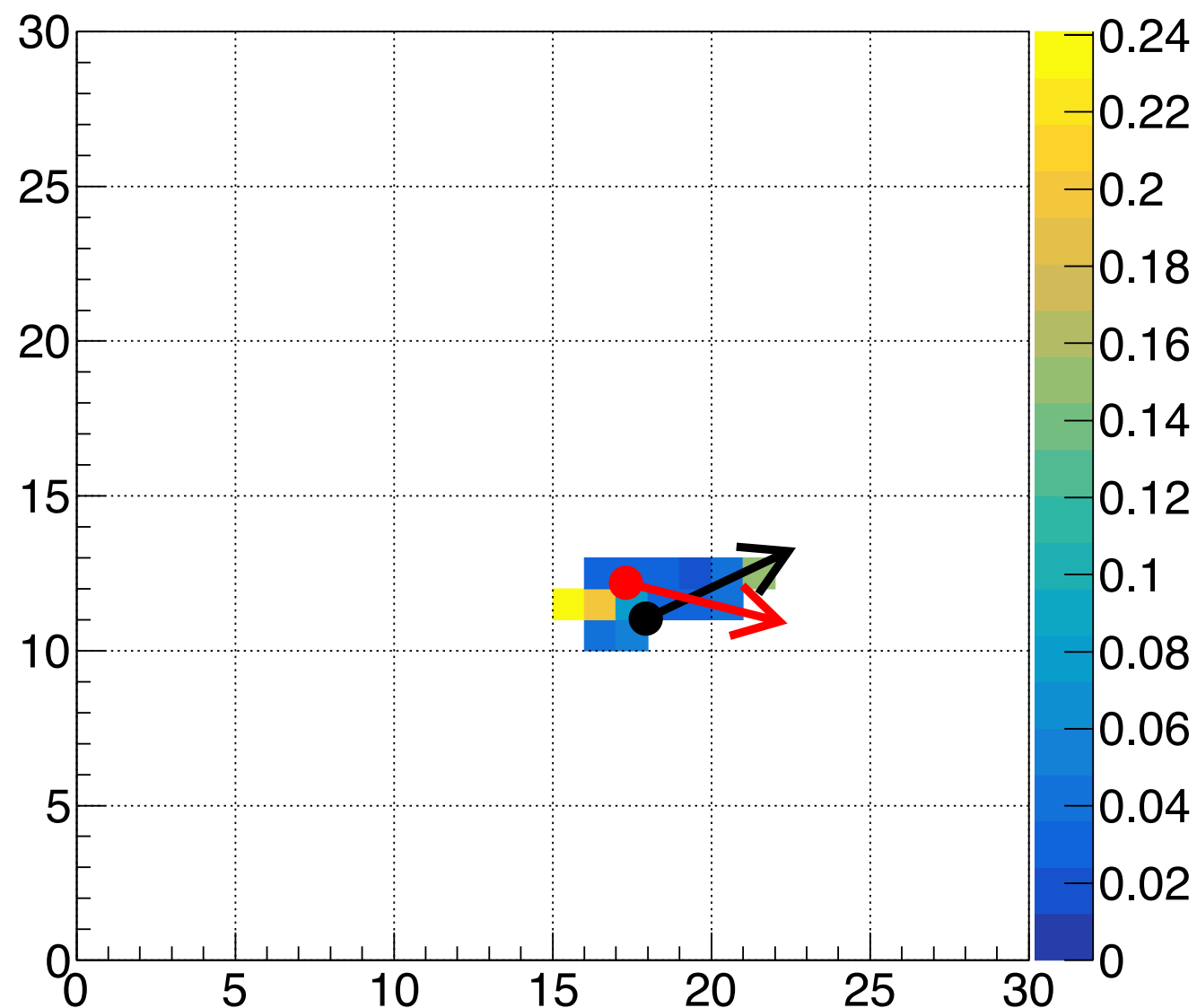
始点近傍で大角度散乱する場合

img556



xy面に投影した軌跡が何重にも重なる場合

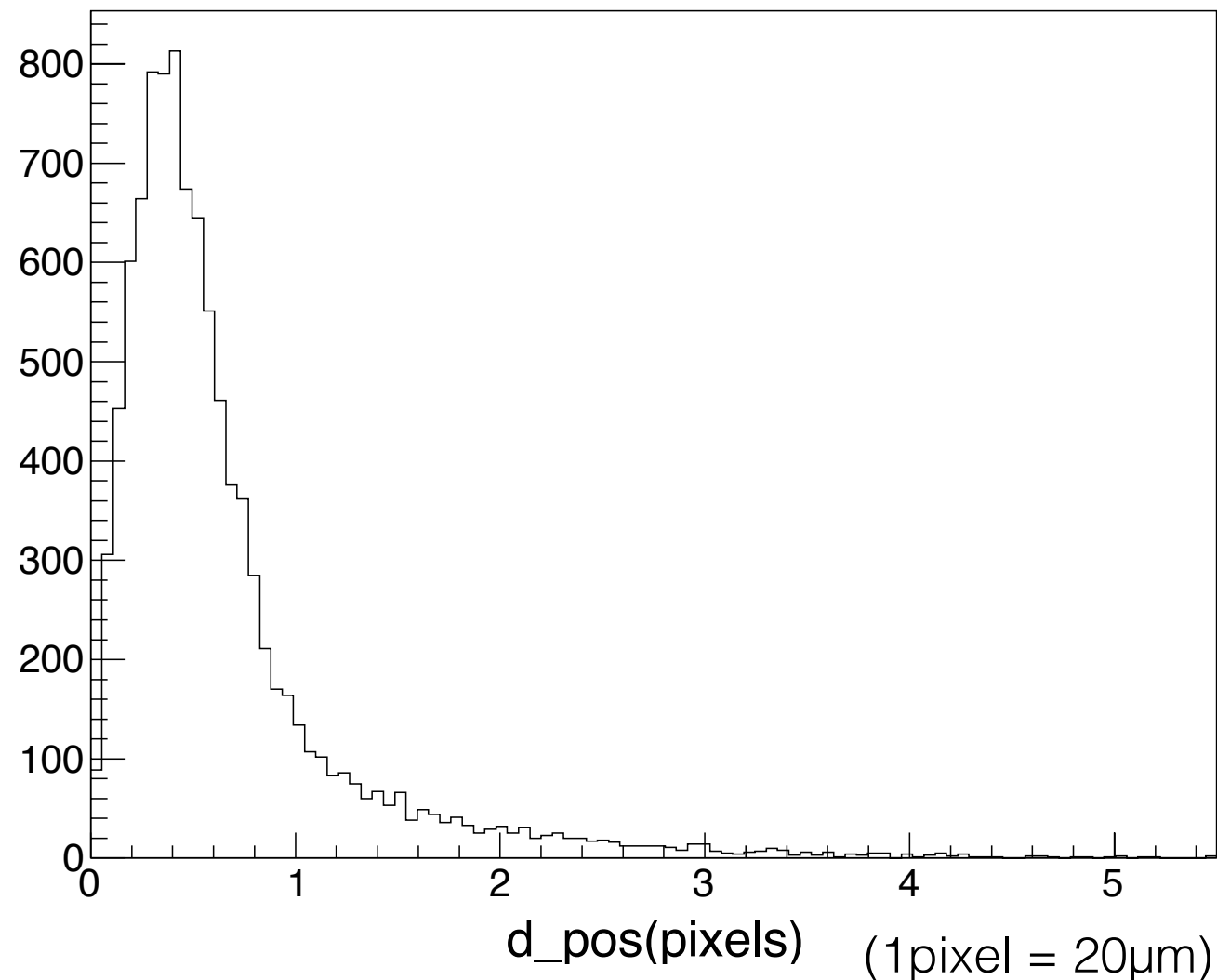
img659



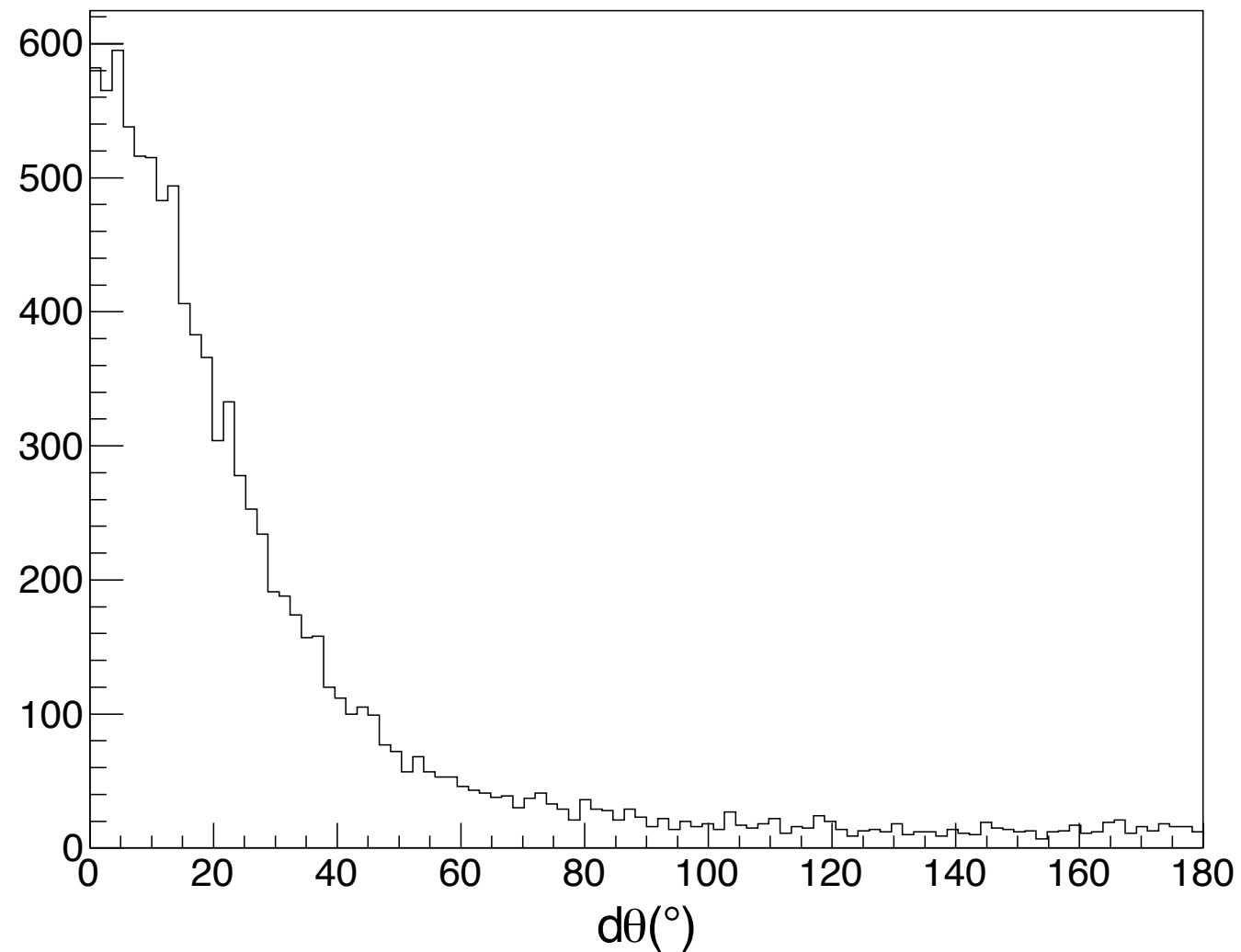
パラメータの推定精度

- 始点の位置を 1 ピクセル ($20\mu\text{m}$) 以下の精度で推定できている。
→始点と Bragg ピークを間違えることはほとんどない。
- 散乱方向の推定精度は $\sim 30^\circ$ 程度。

始点位置の決定精度



散乱方向の決定精度



まとめ

- 電子追跡型コンプトンカメラのための、Si-CMOS センサを開発している。電子の飛跡・タイミング・エネルギーの同時取得に成功し、コンプトンカメラとして動作させる準備が整った。
- コンプトン再構成の鍵を握る Si-CMOS センサ中の電子の散乱方向を決定するために、deep learning による飛跡の解析手法を構築した。Geant4 ベースで性能を検証し、複雑な飛跡の場合でも再構成できることを示した。
- 今後は、電子追跡型コンプトンカメラのプロトタイプを製作。および、実験データに基づく飛跡再構成を検討する（シミュレーション&実測）。