



機械学習を用いたTA実験最高エネルギー 宇宙線の核種の推定

大阪公立大学 宇宙線物理学研究室
遠藤康平

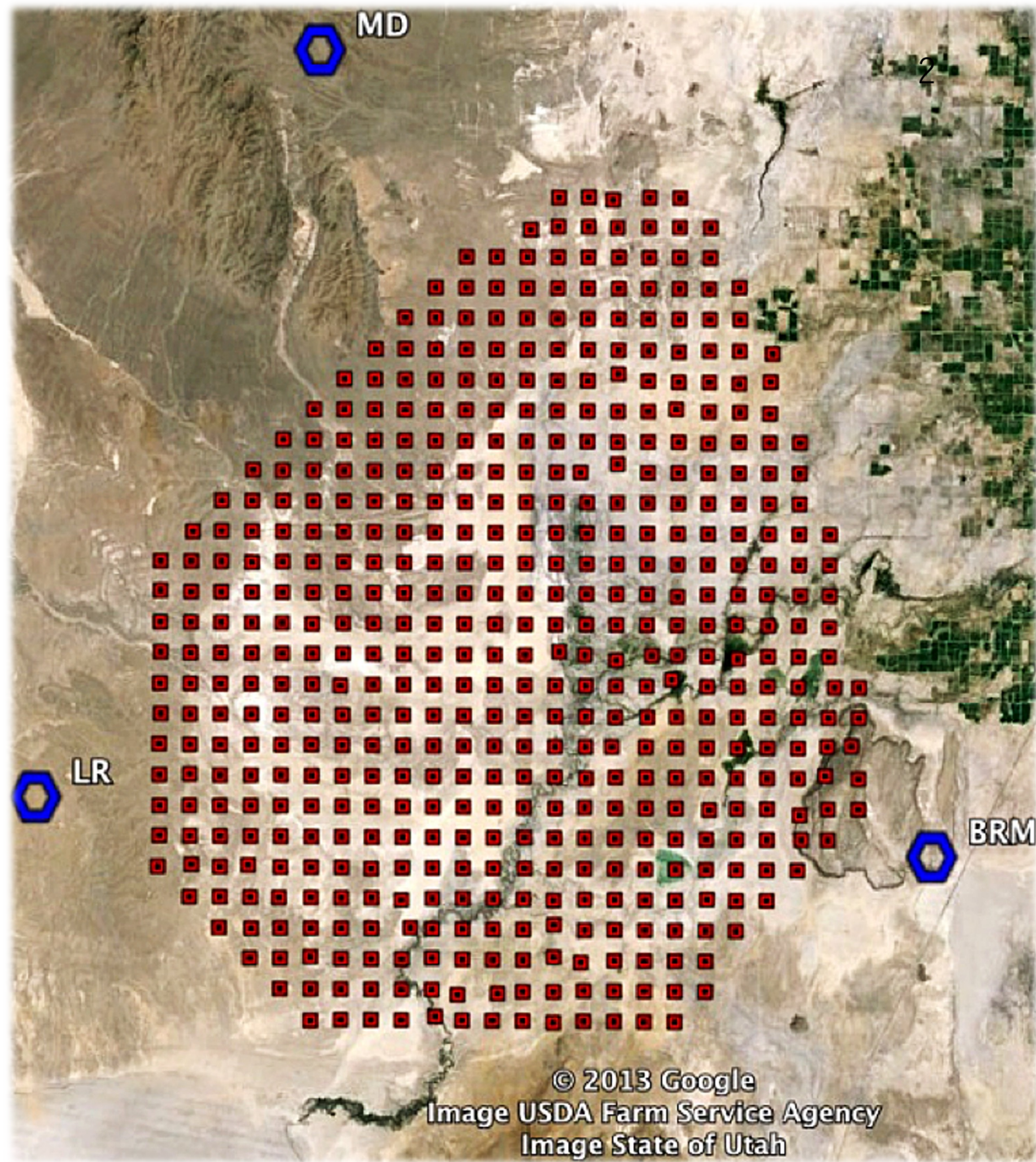
Telescope Array実験

1 EeV (10^{18} eV) 以上の**超高エネルギー宇宙線の観測**が目的

アメリカ、ユタ州

標高約1400 m

- 約500台の地表検出器 (SD) アレイ (約700 km²)
- ⬡ 大気蛍光望遠鏡 (FD) ステーション (3カ所)
- ⬡ ハイブリッド解析



地表検出器 (SD) アレイ

- SD (Surface Detector)

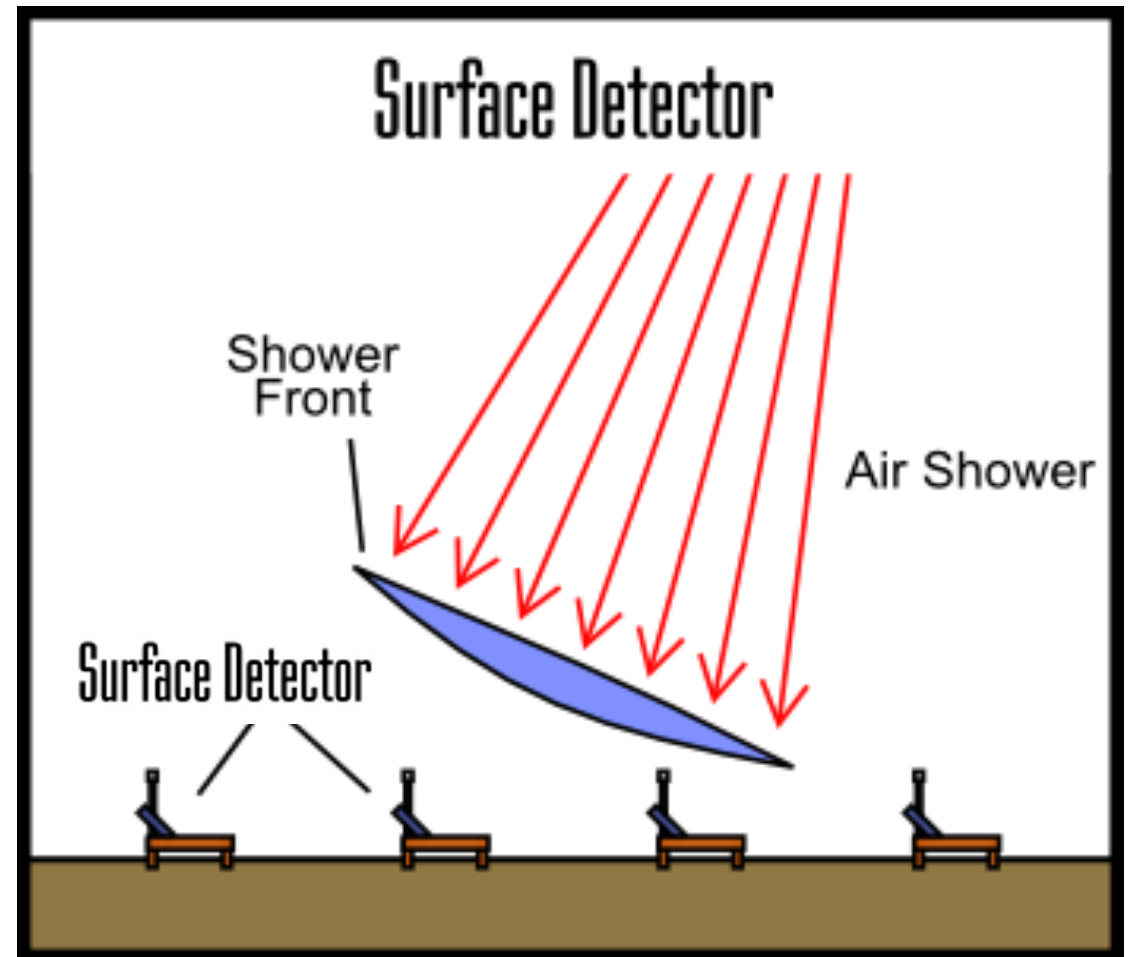
荷電粒子が入射

→シンチレータが発光

→発光量と到来時刻を記録

SDごとの発光量や到来時刻差

→**宇宙線のエネルギー、到来方向**
などを決定



アマテラス粒子

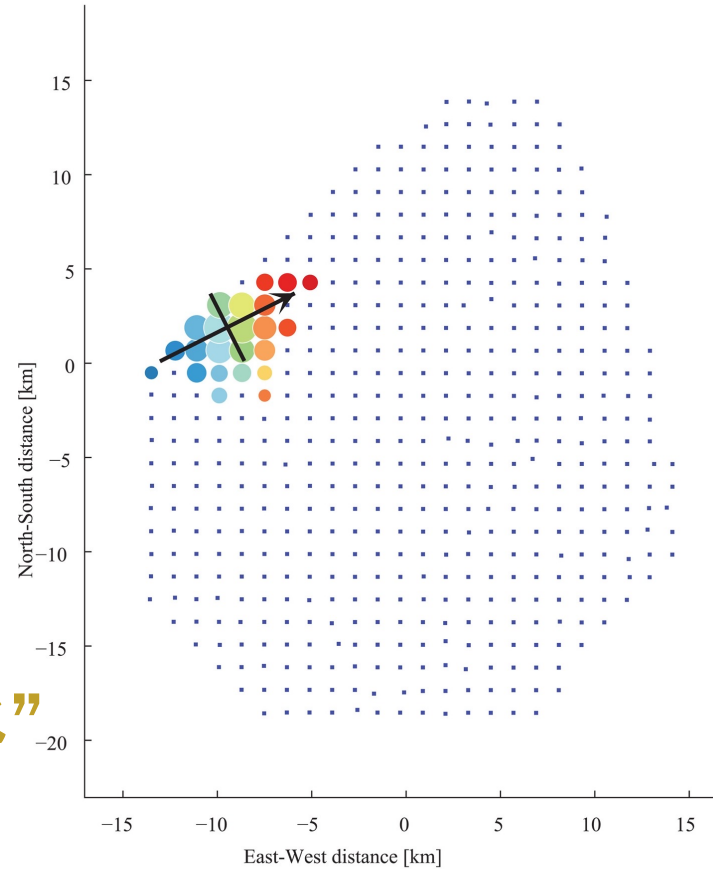
2021年5月27日

TA実験史上最高となる
244 EeVのエネルギーを
持った宇宙線

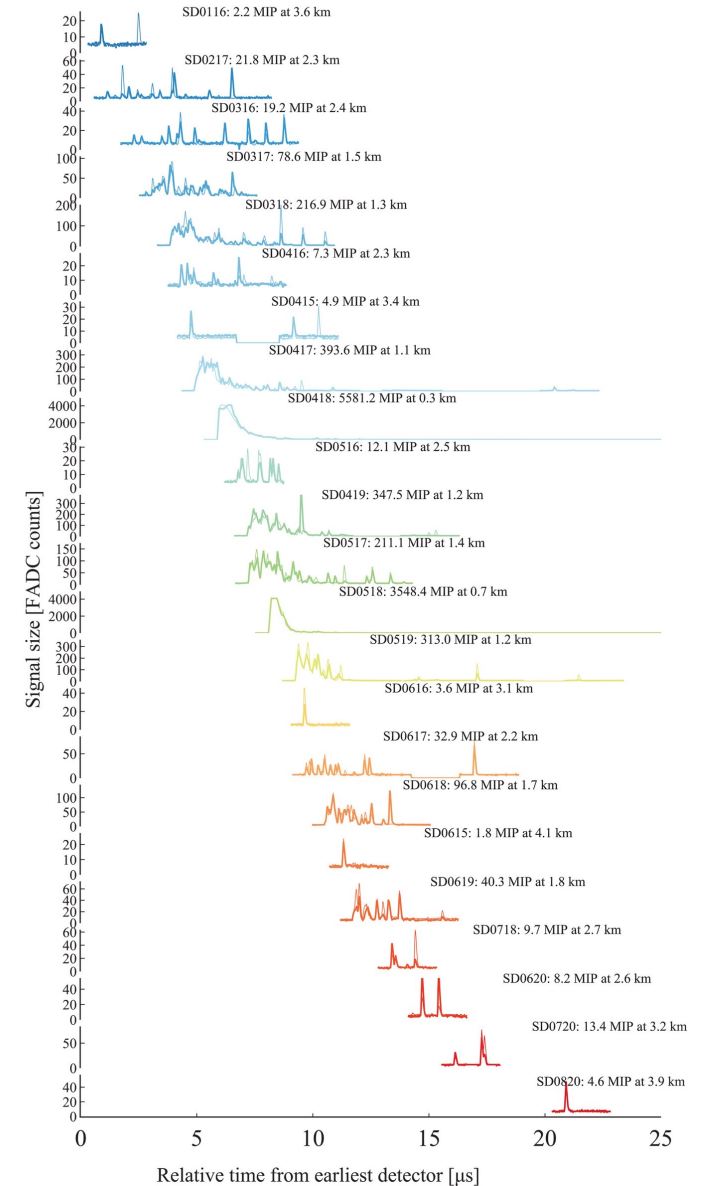
宇宙線起源探査の“道しるべ”

SDデータのみでは一般に
核種判別は難しい
→機械学習をためす

A Surface detector array of TA



B Date: 27 May 2021 Time: 10:35:56.474337 UTC 4

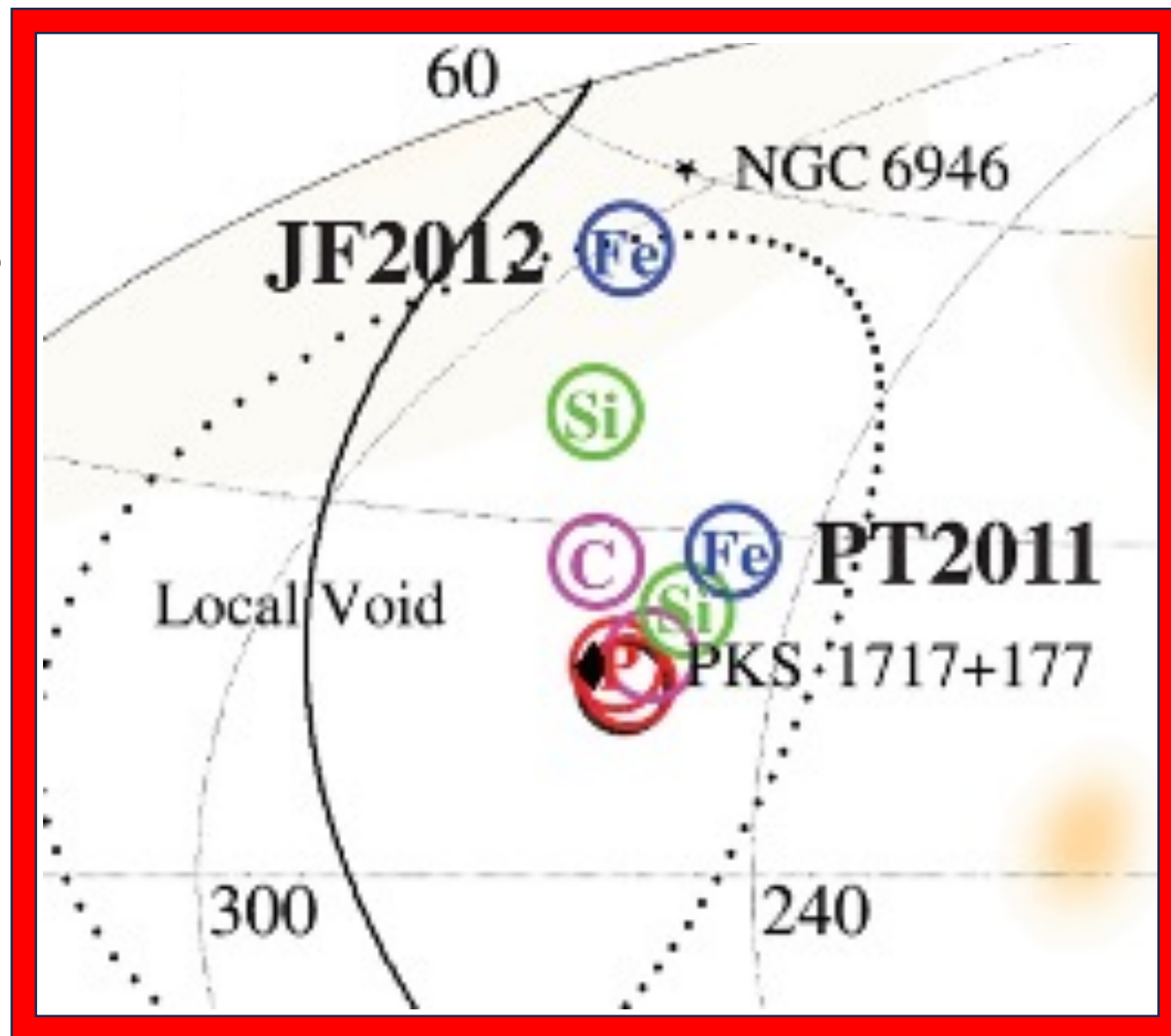
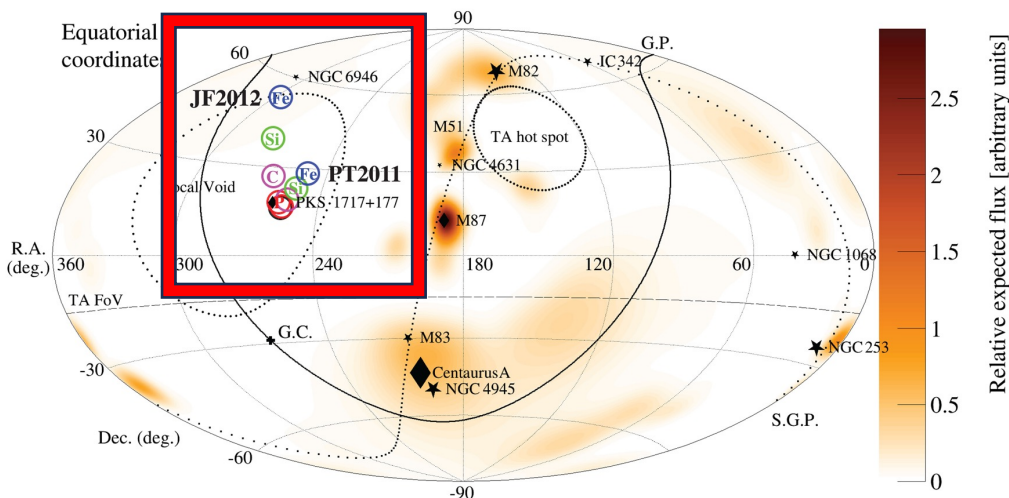


研究の目的

軽い原子核 (陽子) → ほぼ直進
 重い原子核 (鉄) → 曲げられる

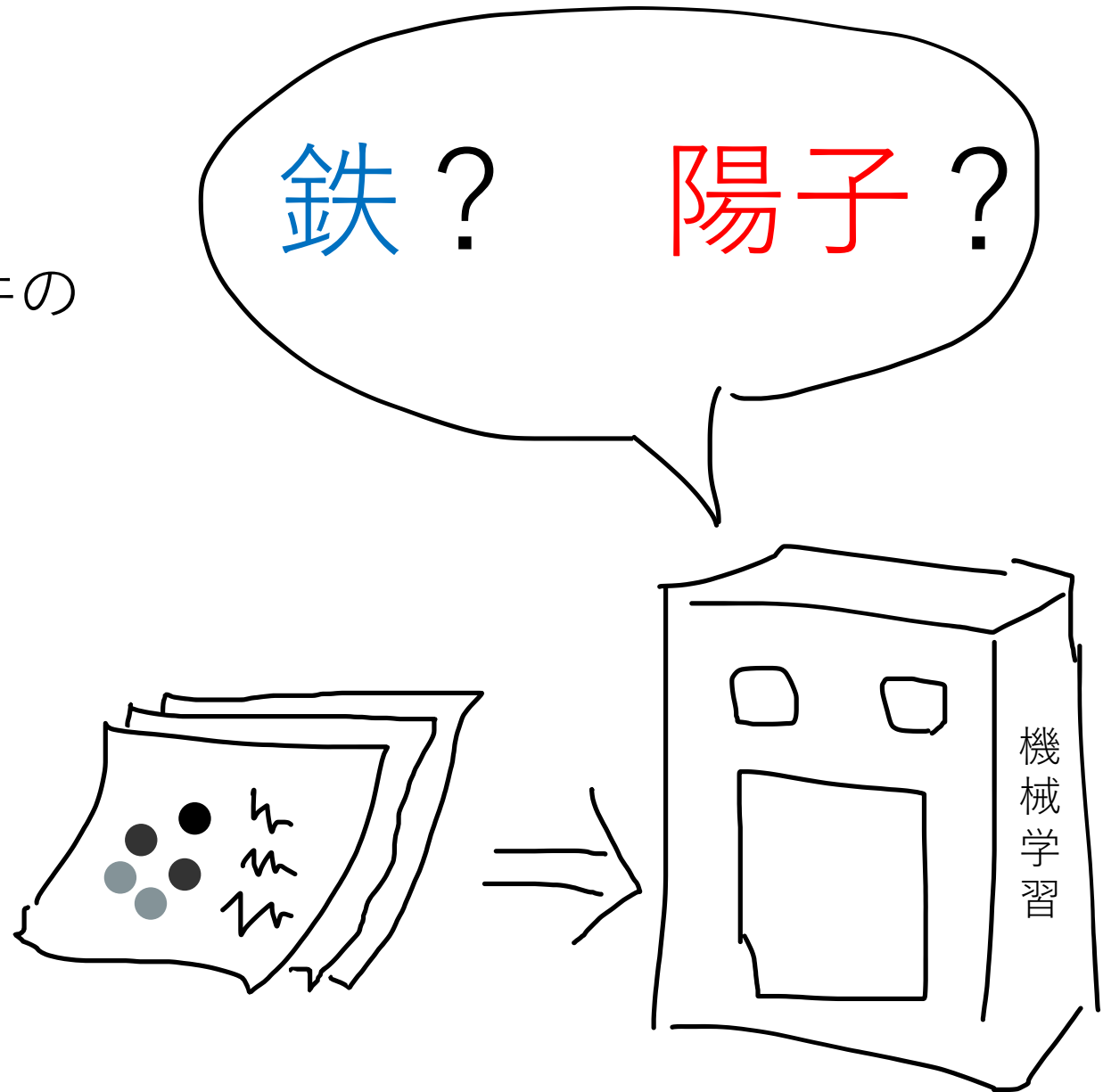


アマテラス粒子は？



研究概要

- ① MCシミュレーションで同じ条件のイベントを生成
- ② イベントの情報→画像
- ③ 核種が**鉄**と**陽子**どちらかを判定



学習対象の画像の準備

- シャワー生成と検出器シミュレーション

核種（鉄、陽子）、相互作用モデル、エネルギー、到来方向、シャワー中心を設定し計400イベント

MCシミュレーション

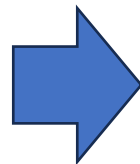
核種

相互作用モデル	鉄	陽子
EPOSLHC	100	100
QGSJETII04	100	100
合計	200	200

再構成後

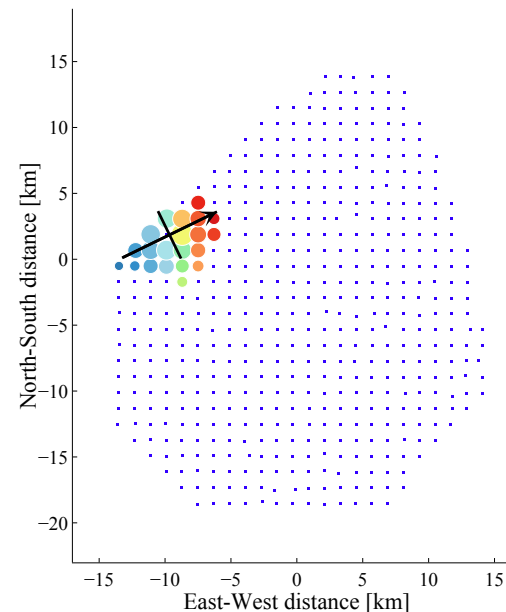
核種

相互作用モデル	鉄	陽子
EPOSLHC	88	79
QGSJETII04	92	85
合計	180	164



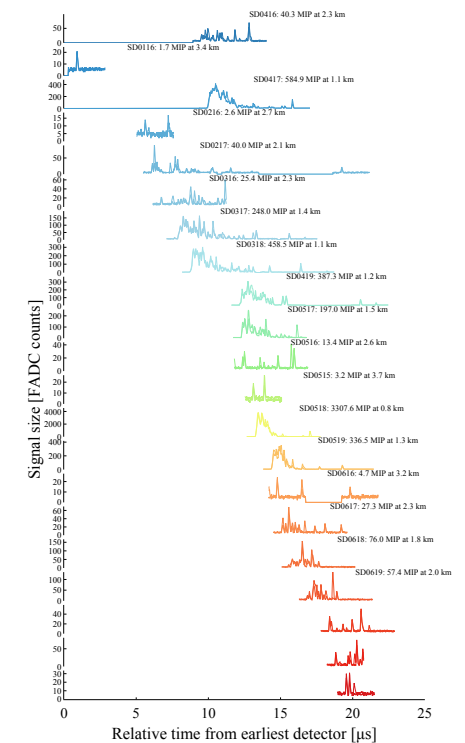
イベントディスプレイ

(A) Surface detector array of TA



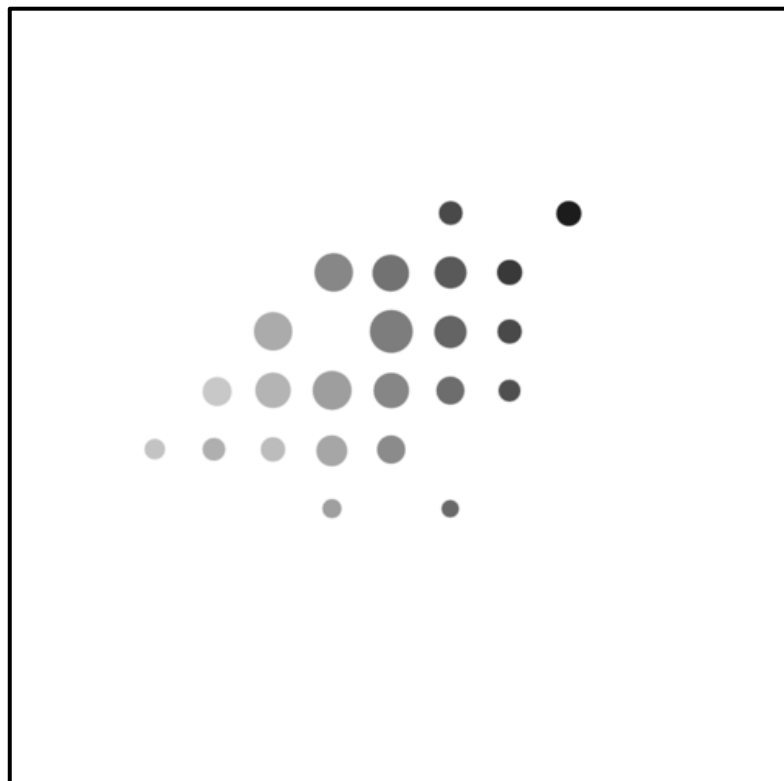
波形情報

(B) Date: 2021 May 27 Time: 10:34:55.801028 UTC

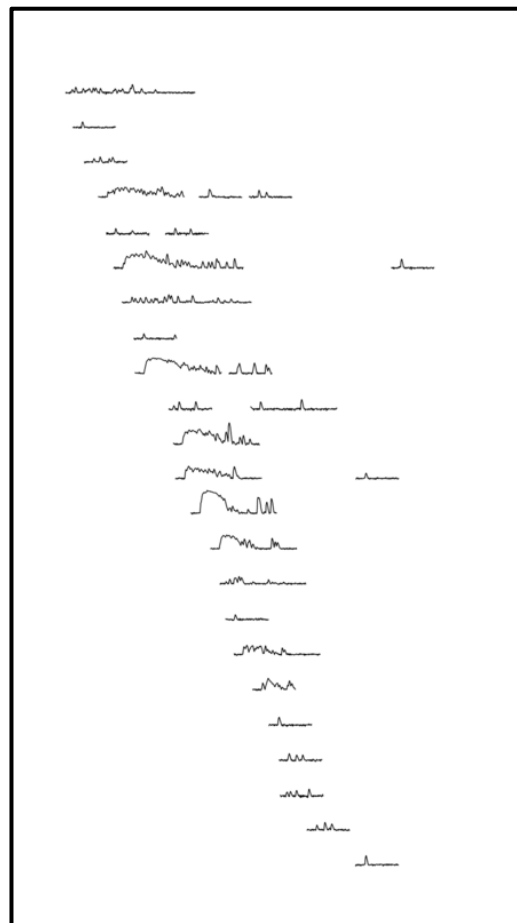


学習対象の画像の準備

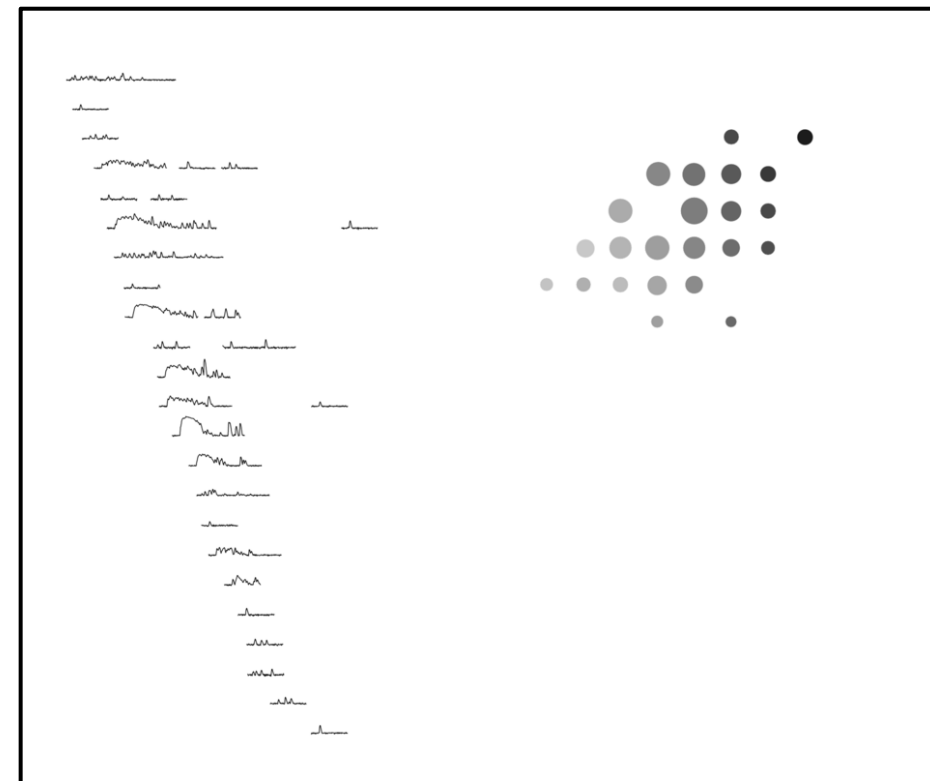
1. イベントディスプレイのみ



2. 波形情報のみ



3. 二つ合わせたもの



機械学習による核種の推定

- 機械学習モデル

ライブラリ：Keras

最適化アルゴリズム：Adam

損失関数：交差エントロピー誤差

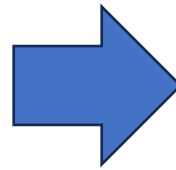
CNNで鉄か陽子かを判定する

Epoch数：15

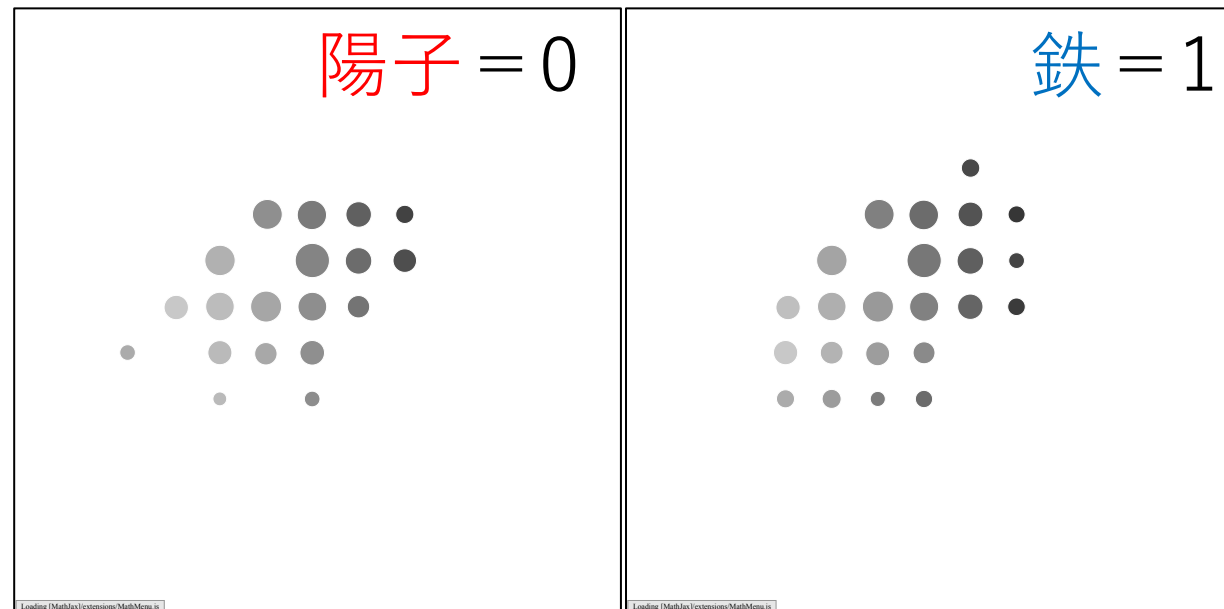
- データセット

鉄と陽子それぞれ164イベント

学習：検証：テスト = 6：2：2

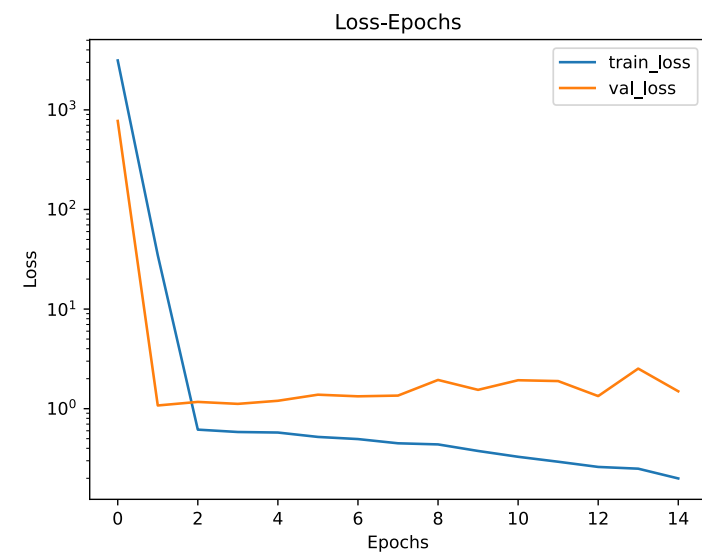
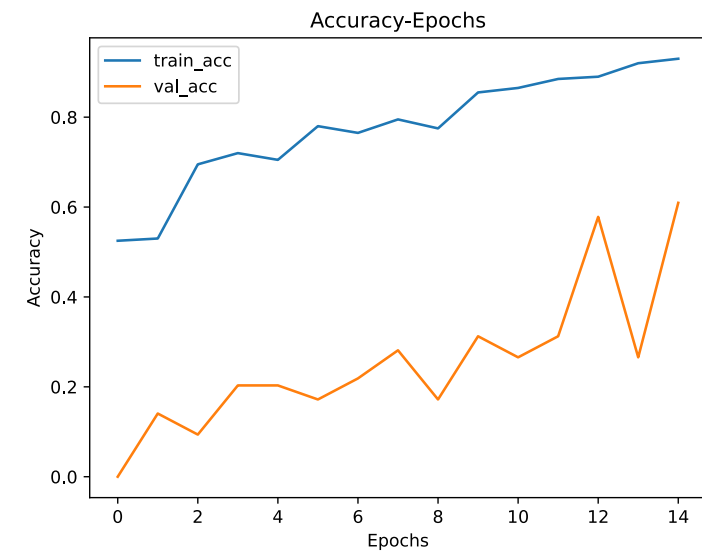
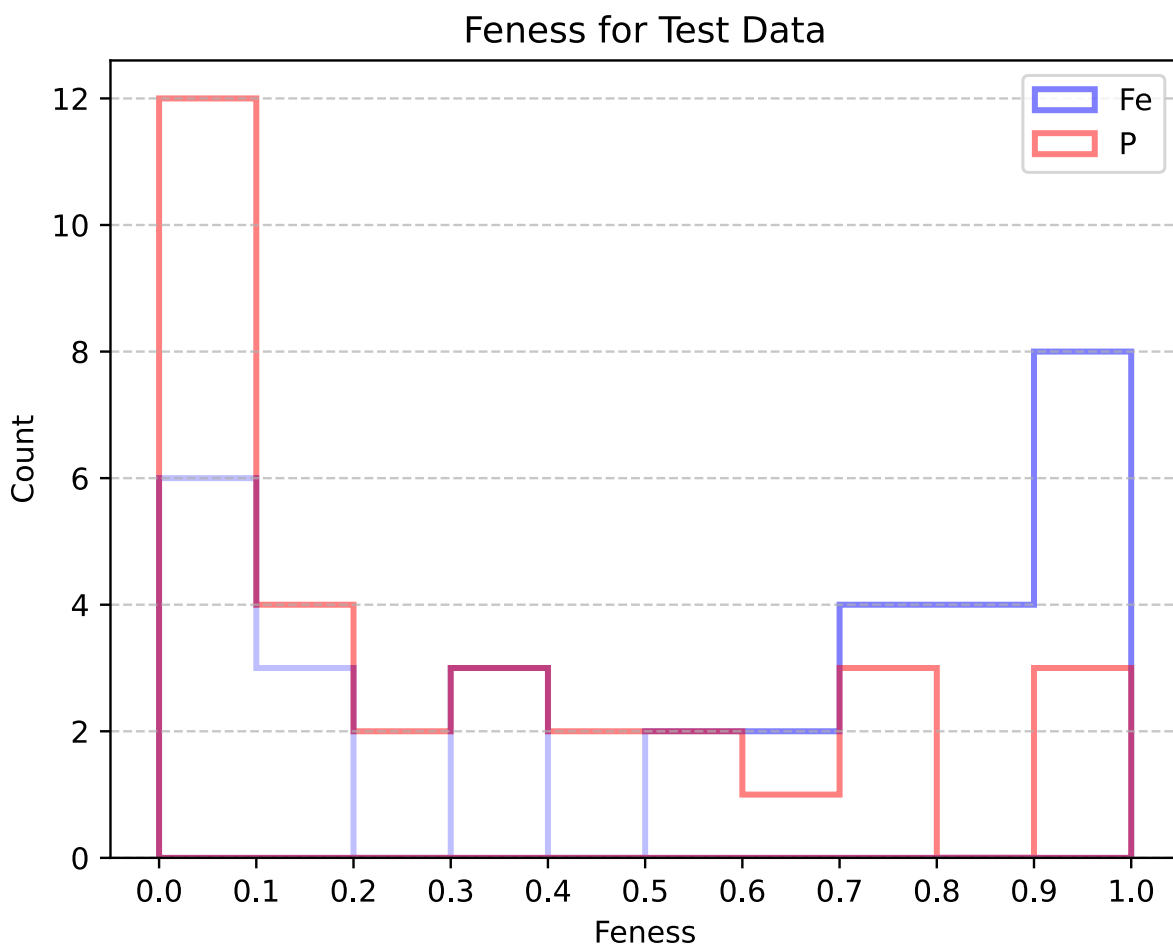


0から1の値を返す



結果 1. イベントディスプレイのみ

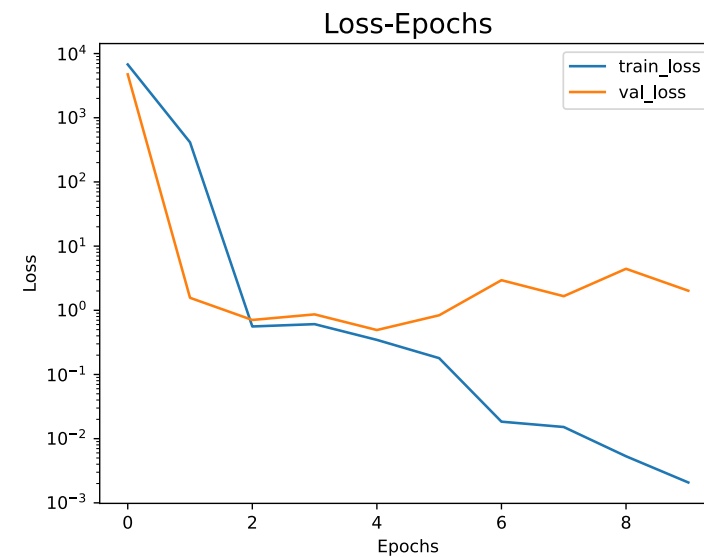
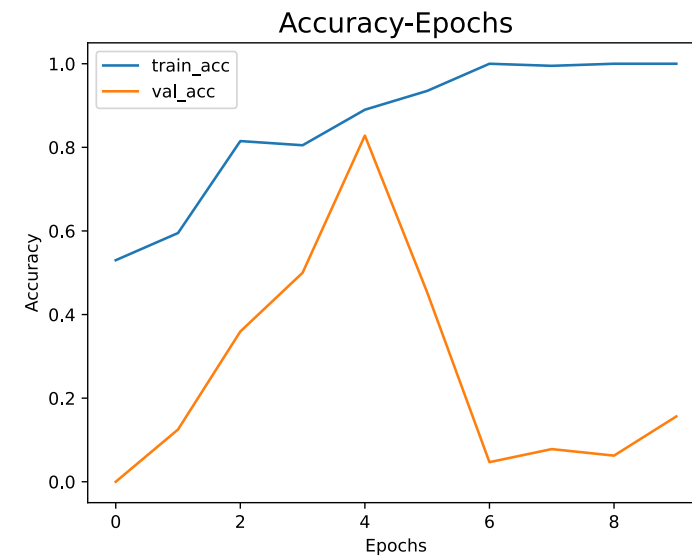
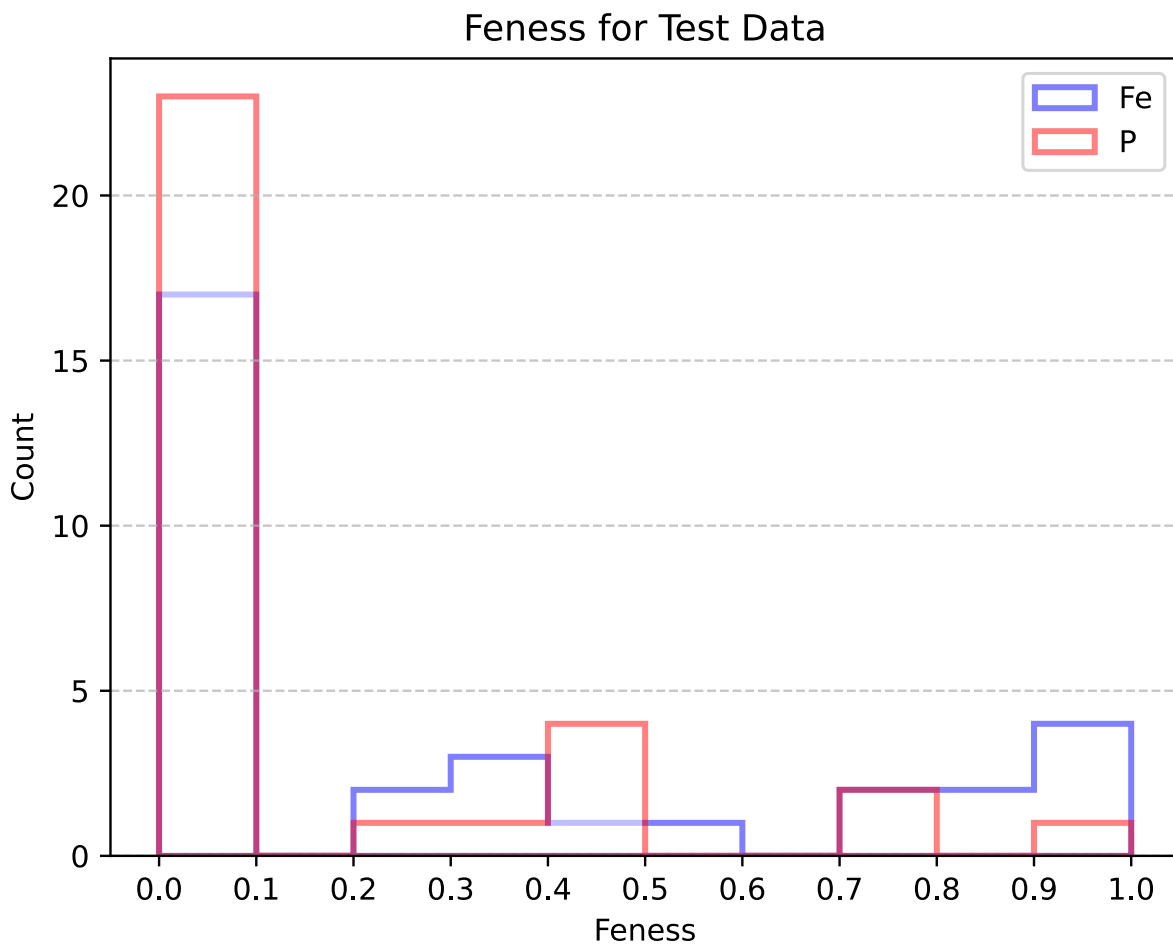
アマテラス粒子の鉄らしさ：0.002



結果

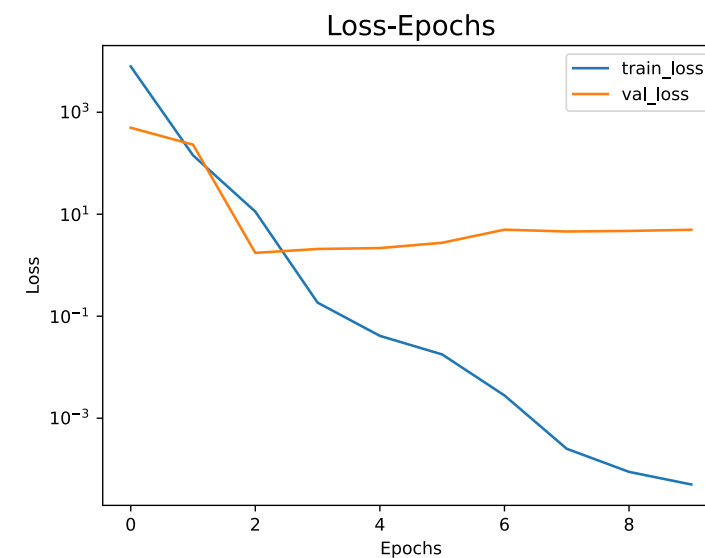
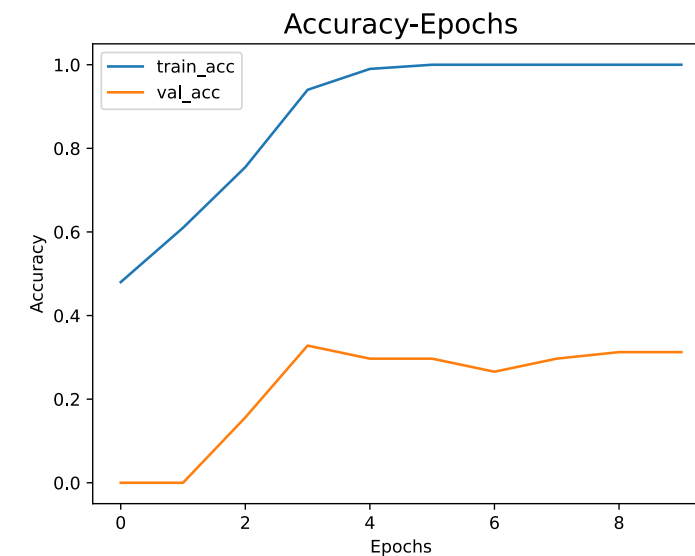
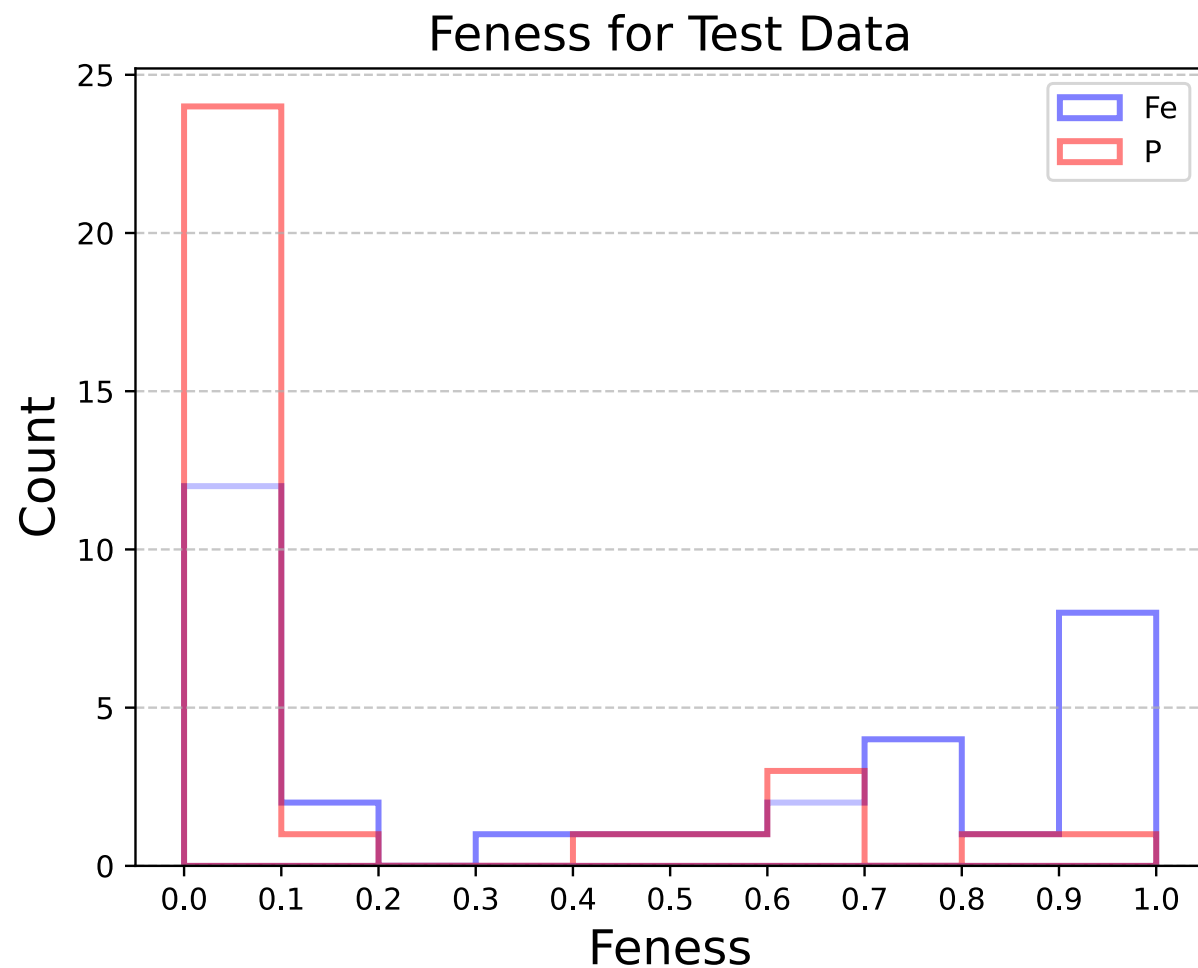
2.波形情報のみ

アマテラス粒子の鉄らしさ：0.02



結果 3. イベントディスプレイ + 波形情報

アマテラス粒子の鉄らしさ：0.11



結果

アマテラス粒子に対する結果は3つとも「陽子らしい」

学習用データでの正確性→**高**

検証用データ

テストデータでの正確性→**低**

・原因

少数のイベント→学習の偏り

基本的なモデル→学習不足や過学習

アマテラス粒子に対する結果

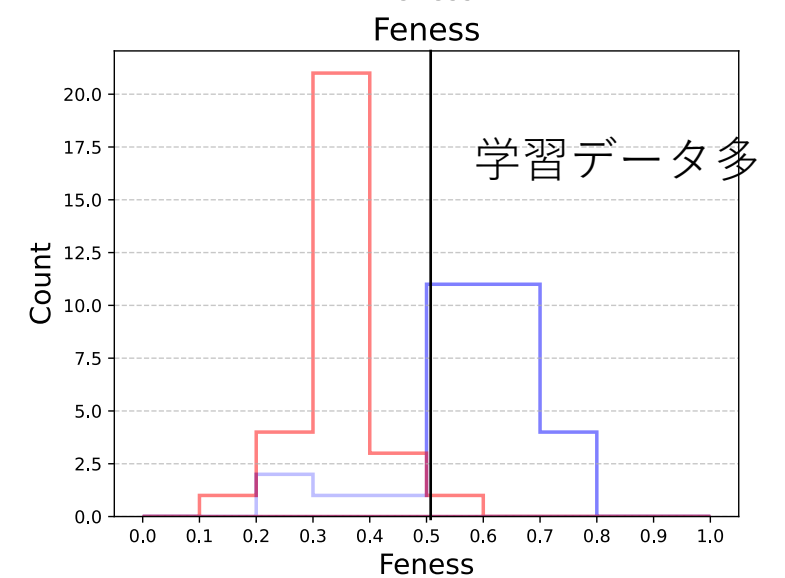
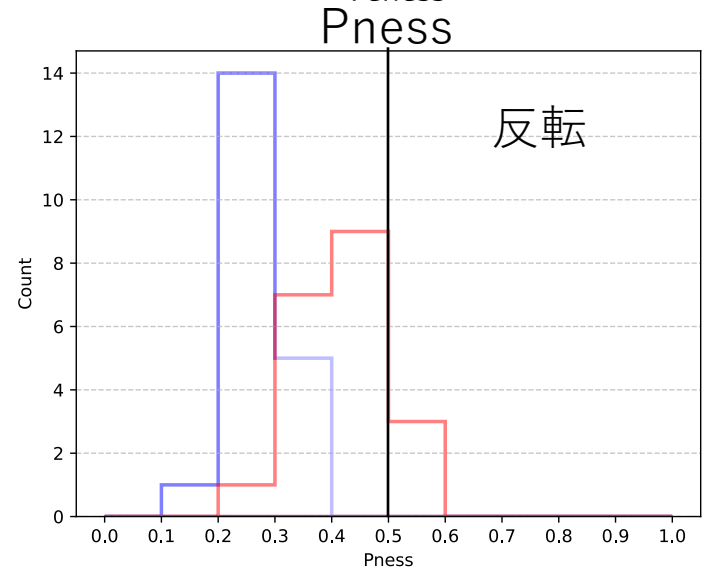
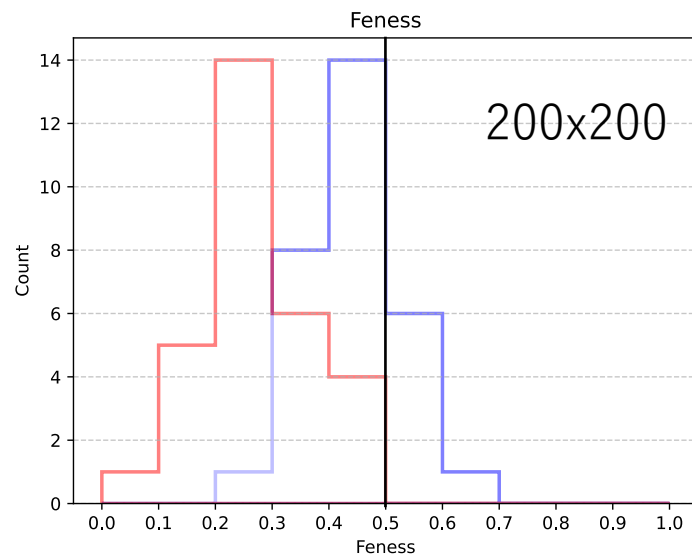
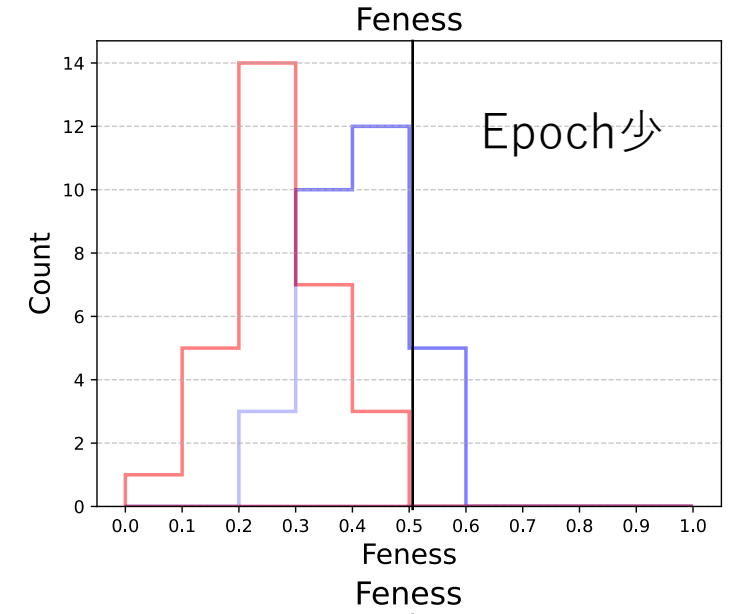
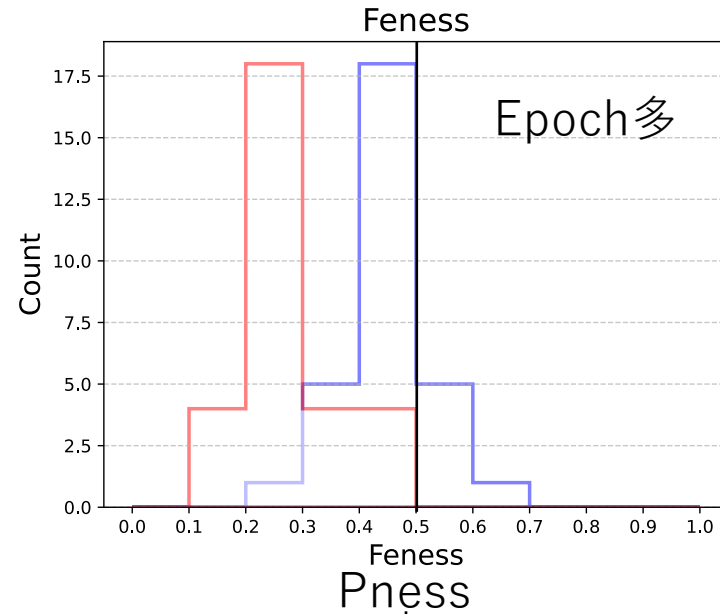
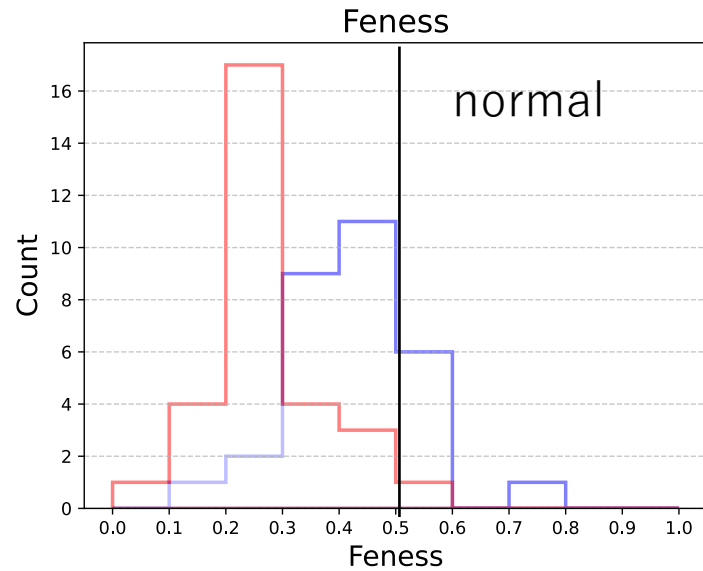
学習対象	鉄らしさ
1. イベントディスプレイ	0.002
2. 波形情報	0.02
3. 二つ合わせたもの	0.11

学習モデルの評価

- 「1.イベントディスプレイのみ」について、設定を変えて学習プログラムを複数作り比較

	Epoch数	ピクセル数	データの割合	読み込む順番
通常	15	400x400	6 : 2 : 2	P→Fe
Epoch多	20	400x400	6 : 2 : 2	P→Fe
Epoch少	10	400x400	6 : 2 : 2	P→Fe
200x200	15	200x200	6 : 2 : 2	P→Fe
トレーニング データ多	15	400x400	8 : 1 : 1	P→Fe
順番を反転	15	400x400	6 : 2 : 2	Fe→P

結果 テストデータの平均値（学習回数：30回）



結果

- テストデータの比較
 - 全体的にP側に寄っている
 - 学習データを読み込む順番を逆にするとFe側に寄る
 - 学習データを増やすと偏りが落ち着く
- 原因
 - 学習データの読み込み方
 - データの数が少ない

まとめ

高エネルギー宇宙線の**核種**はその起源を探る上で非常に重要

TA実験史上最高エネルギーを持つ宇宙線「アマテラス粒子」についてMCシミュレーションと**機械学習**を用いて核種の推定を行った

3つとも「**陽子**らしい」と判定されたが、判定の正確性は低い

今後やること

「学習させるイベント数を増やす」

「数値データを用いた機械学習」

「学習プログラムの改良」

ばっくあっぷい

ライブラリ：Keras

最適化アルゴリズム：Adam

損失関数：交差エントロピー誤差

結果

アマテラス粒子に対する結果

学習対象	鉄らしさ
1. イベントディスプレイ	0.359
2. 波形情報	0.007
3. 二つ合わせたもの	0.837

0なら陽子、1なら鉄

結果

アマテラス粒子に対する結果

学習対象	鉄らしさ
1. イベントディスプレイ	0.002
2. 波形情報	0.02
3. 二つ合わせたもの	0.11

0なら陽子、1なら鉄

ヒットした検出器について (ディスプレイ用)

描
く
の
に
使
っ
た
テ
キ
ス
ト
デ
ー
タ

```
tmp_eventta.txt
20210527 103455.968637 0215 -12296.300 -1709.319 75.836 0.96863358 4.2597 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 3591.354684 26.880589 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0216 -12294.472 -507.799 109.169 0.96863068 32.6895 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 2709.135732 15.123654 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0217 -12229.768 664.768 174.639 0.96863158 33.1907 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 2057.634272 -2.216008 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0315 -11096.685 -1711.113 66.412 0.96863508 5.5984 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 3327.208805 41.626870 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0316 -11095.009 -509.594 84.625 0.96863281 18.9080 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 2261.900892 32.288788 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0317 -11093.347 690.825 110.181 0.96863322 189.0013 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 1351.458664 12.236672 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0318 -11091.652 1889.029 115.021 0.96863430 454.7856 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 1111.542080 -29.541113 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0415 -9896.202 -1712.723 51.144 0.96863831 1.9703 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 3347.608472 60.016596 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0416 -9899.035 -537.851 56.318 0.96863494 28.6696 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 2220.334366 58.349356 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0417 -9893.181 689.207 66.422 0.96863542 606.9376 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 1045.113059 53.417348 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0419 -9860.838 3086.677 79.741 0.96863786 351.7230 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 1262.019104 -109.390588 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0515 -8694.872 -1714.150 43.542 0.96864002 3.4035 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 3644.635085 79.067993 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0516 -8693.542 -512.634 49.234 0.96863684 14.1586 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 2537.430475 86.508535 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0517 -8690.492 686.663 57.132 0.96863782 238.5902 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 1504.771753 104.820528 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0518 -8690.896 1887.082 68.298 0.96863877 3148.0116 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 860.670695 156.980546 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0519 -8702.531 3071.973 80.991 0.96863990 308.0119 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 1356.385240 -155.254732 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0617 -7490.396 685.418 50.032 0.96864059 50.5706 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 2322.131556 126.004122 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0618 -7489.260 1876.948 56.203 0.96864120 81.8284 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 1848.171264 154.683887 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0619 -7486.386 3084.029 64.926 0.96864233 40.6351 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 2023.287023 -177.026386 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0620 -7483.517 4292.228 77.199 0.96864351 4.6921 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 2734.046005 -158.616587 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0717 -6289.440 684.357 42.807 0.96864480 3.7256 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 3237.889146 134.789474 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0718 -6286.752 1884.767 47.497 0.96864386 2.3153 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 2837.210385 154.306178 3.927806848e-07
20210527 103455.968637 0719 -6286.654 3086.296 55.198 0.96864530 3.2232 38.92 206.76 -9697.177 1821.291 3.0108e+20 2.80746 2875.921113 173.590329 3.927806848e-07
```

検出器ごとの詳細 (波形用)

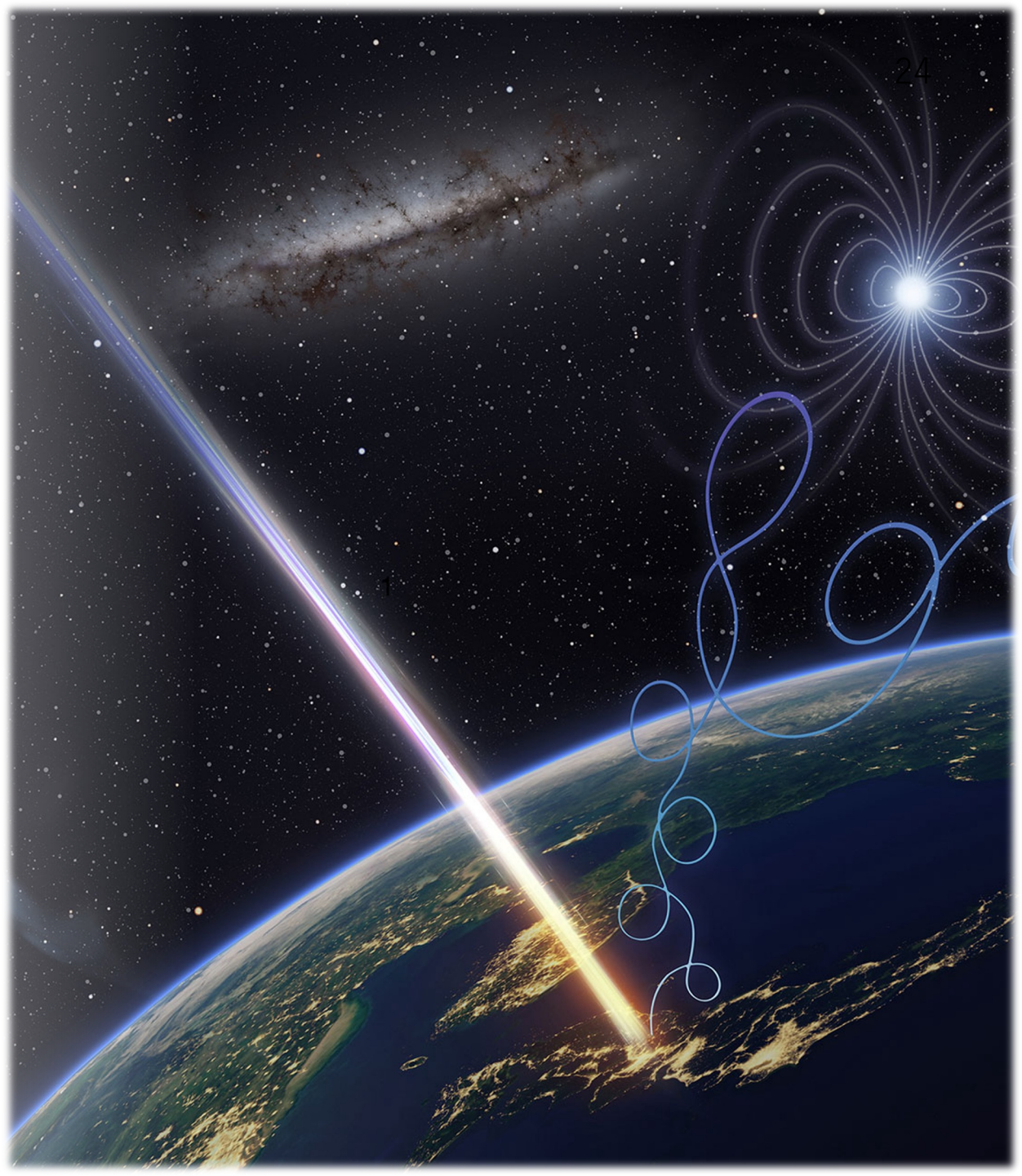
```
wf - less 0415.dat - 188x24
20210527 103455.968637 415 0 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968638.760000 5 5 5.000000 5.000000 5.000000 5.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 1 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968638.780000 6 6 11.000000 11.000000 11.000000 11.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 2 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968638.800000 6 4 17.000000 15.000000 17.000000 15.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 3 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968638.820000 5 3 22.000000 18.000000 22.000000 18.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 4 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968638.840000 6 2 28.000000 20.000000 28.000000 20.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 5 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968638.860000 5 3 33.000000 23.000000 33.000000 23.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 6 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968638.880000 6 4 39.000000 27.000000 39.000000 27.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 7 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968638.900000 6 3 45.000000 30.000000 45.000000 30.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 8 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968638.920000 6 5 51.000000 35.000000 51.000000 35.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 9 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968638.940000 7 2 58.000000 37.000000 58.000000 37.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 10 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968638.960000 6 3 64.000000 40.000000 64.000000 40.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 11 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968638.980000 6 3 70.000000 43.000000 70.000000 43.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 12 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968639.000000 6 3 76.000000 46.000000 76.000000 46.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 13 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968639.020000 5 3 81.000000 49.000000 81.000000 49.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 14 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968639.040000 6 8 87.000000 57.000000 87.000000 57.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 15 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968639.060000 5 12 92.000000 69.000000 92.000000 69.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 16 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968639.080000 6 14 98.000000 83.000000 98.000000 83.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 17 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968639.100000 8 11 106.000000 94.000000 106.000000 94.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 18 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968639.120000 7 10 113.000000 104.000000 113.000000 104.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 19 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968639.140000 5 7 118.000000 111.000000 118.000000 111.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 20 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968639.160000 6 4 124.000000 115.000000 124.000000 115.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 21 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968639.180000 6 5 130.000000 120.000000 130.000000 120.000000 0.000000
20210527 103455.968637 415 22 0.000000 0.000000 48431938 50000000 968639.200000 4 4 134.000000 124.000000 134.000000 124.000000 0.000000
```

宇宙線

宇宙空間を飛び交う高エネルギーの
原子核や放射線

磁場の影響で運動方向が曲げられる
高エネルギーほど曲げられにくい

到来頻度はエネルギーの3乗に比例し
て低下

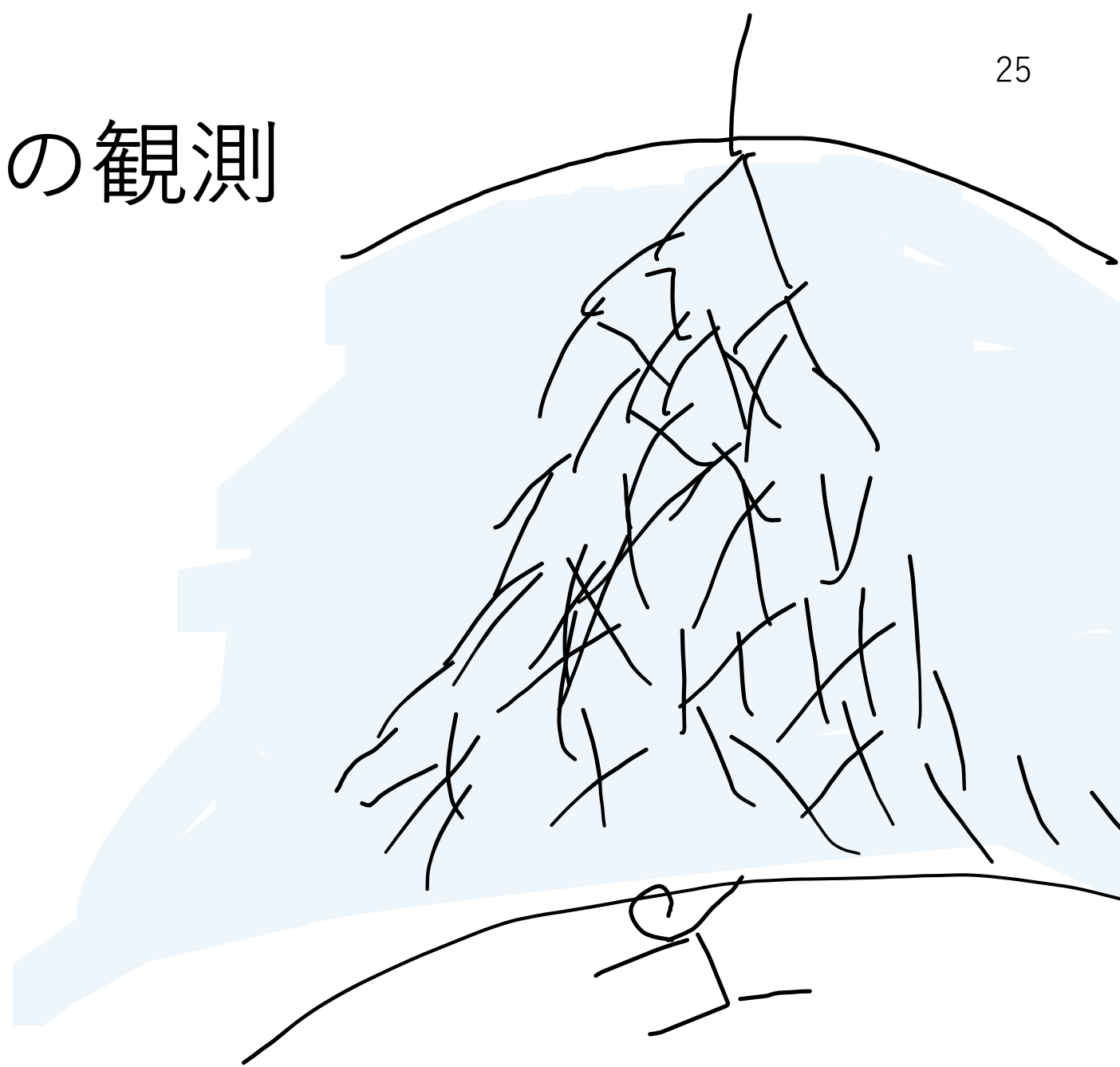


空気シャワーとその観測

宇宙線と大気粒子との相互作用
による空気シャワーの生成

シャワーの観測 = 宇宙線の観測

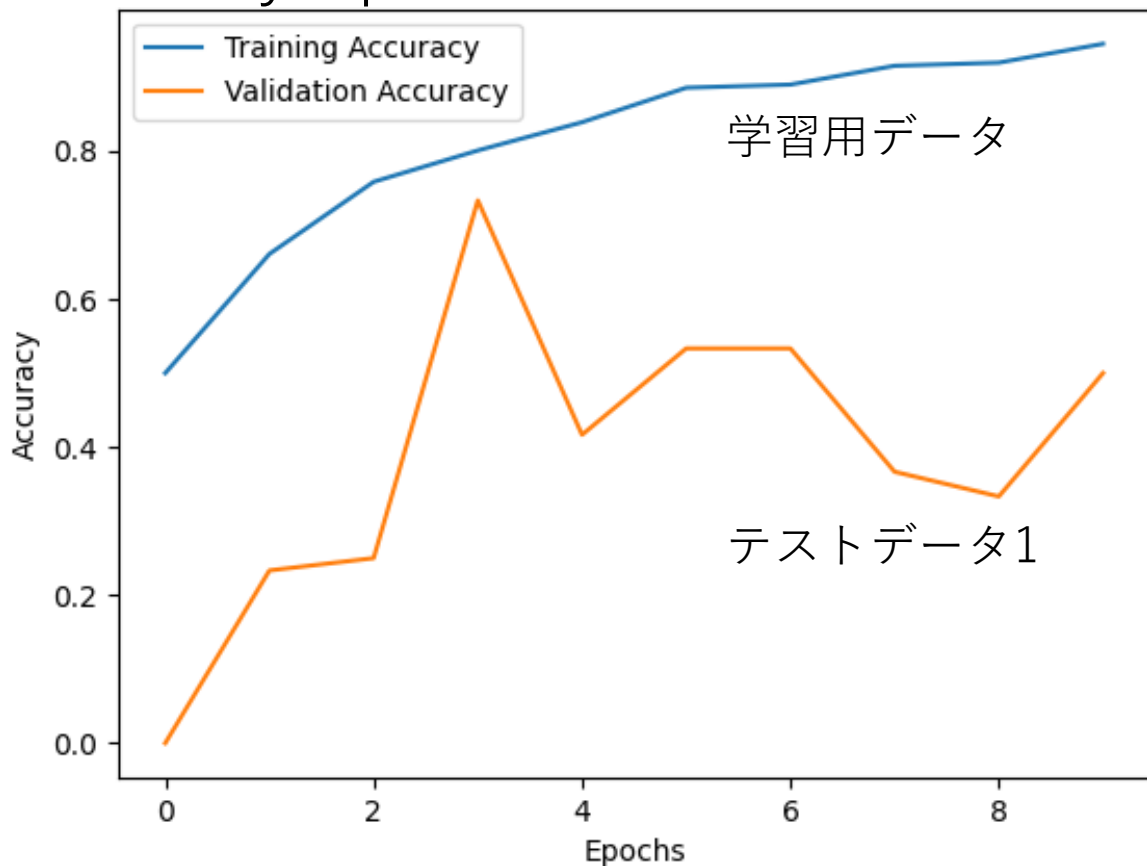
高エネルギー宇宙線は到来頻度
が低く、**広い観測範囲**が必要



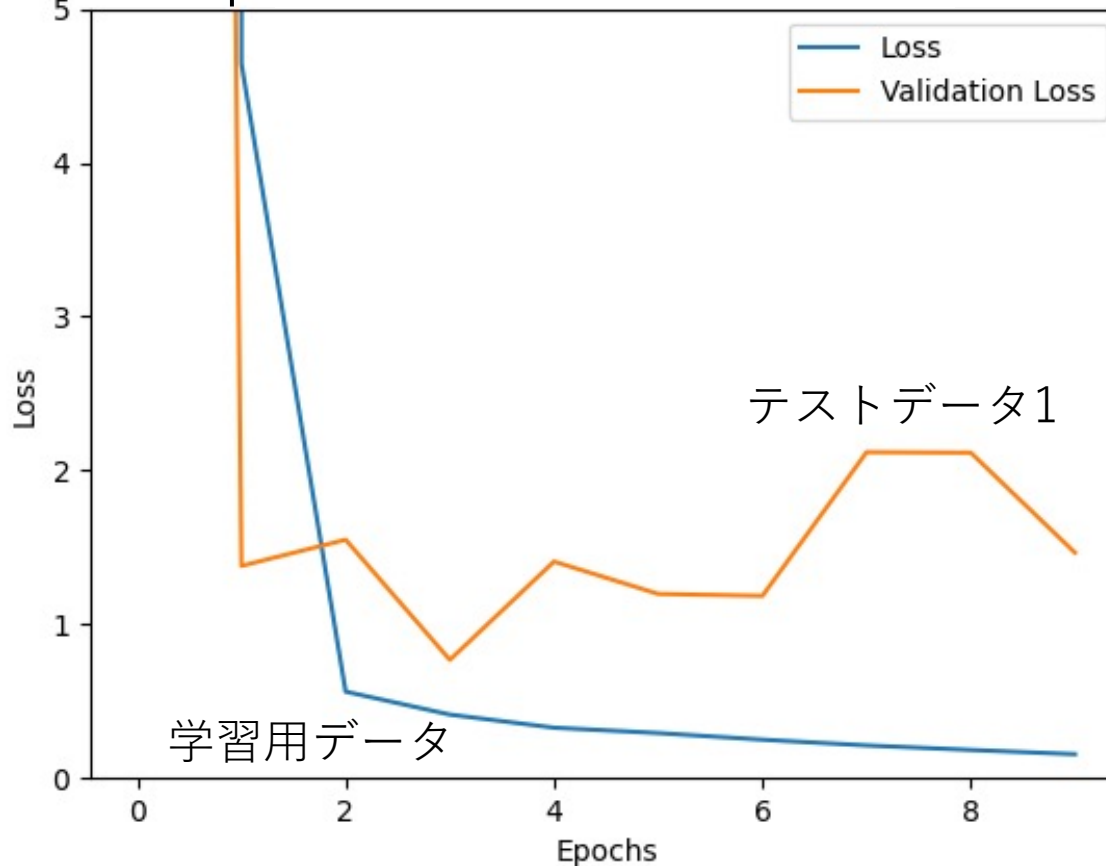
結果

1. イベントディスプレイのみ

Accuracy-Epochs



Loss-Epochs



テストデータ2 (学習後)

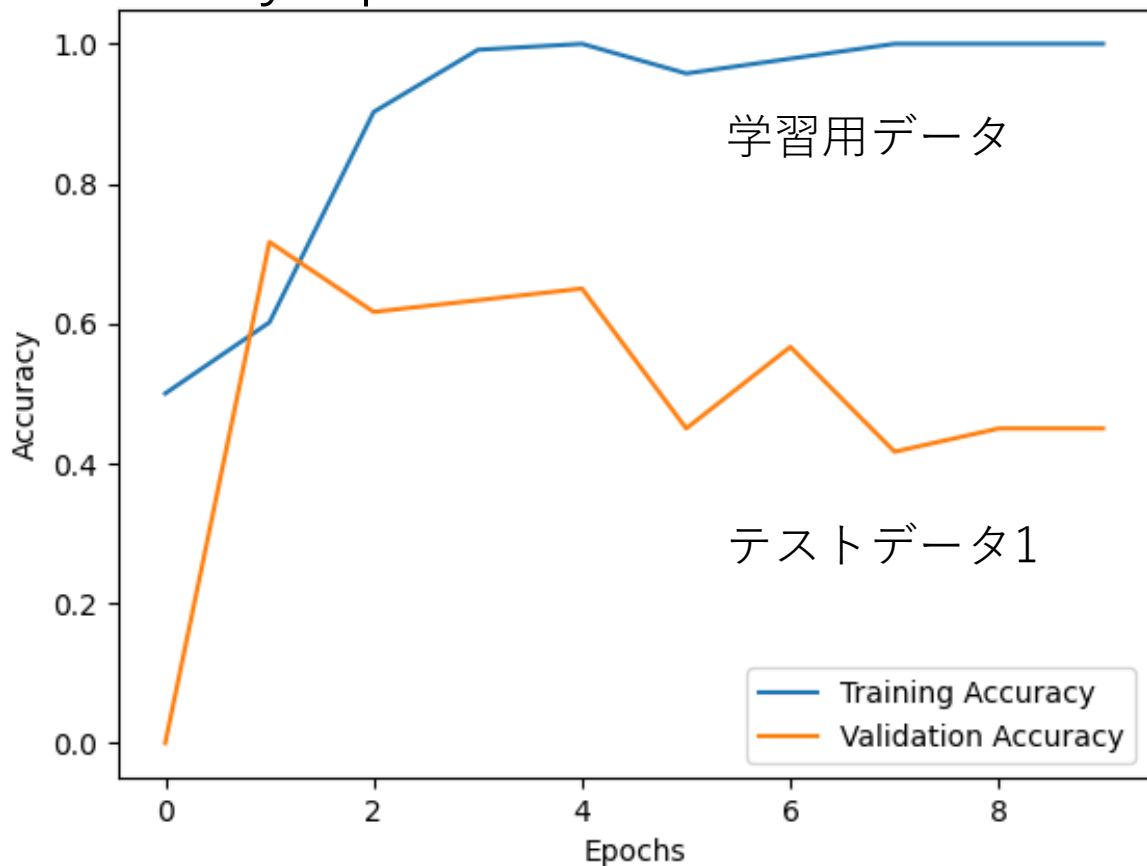
Accuracy : 0.69

Loss : 1.01

結果

2.波形情報のみ

Accuracy-Epochs



Accuracy : 正しく判定できたか

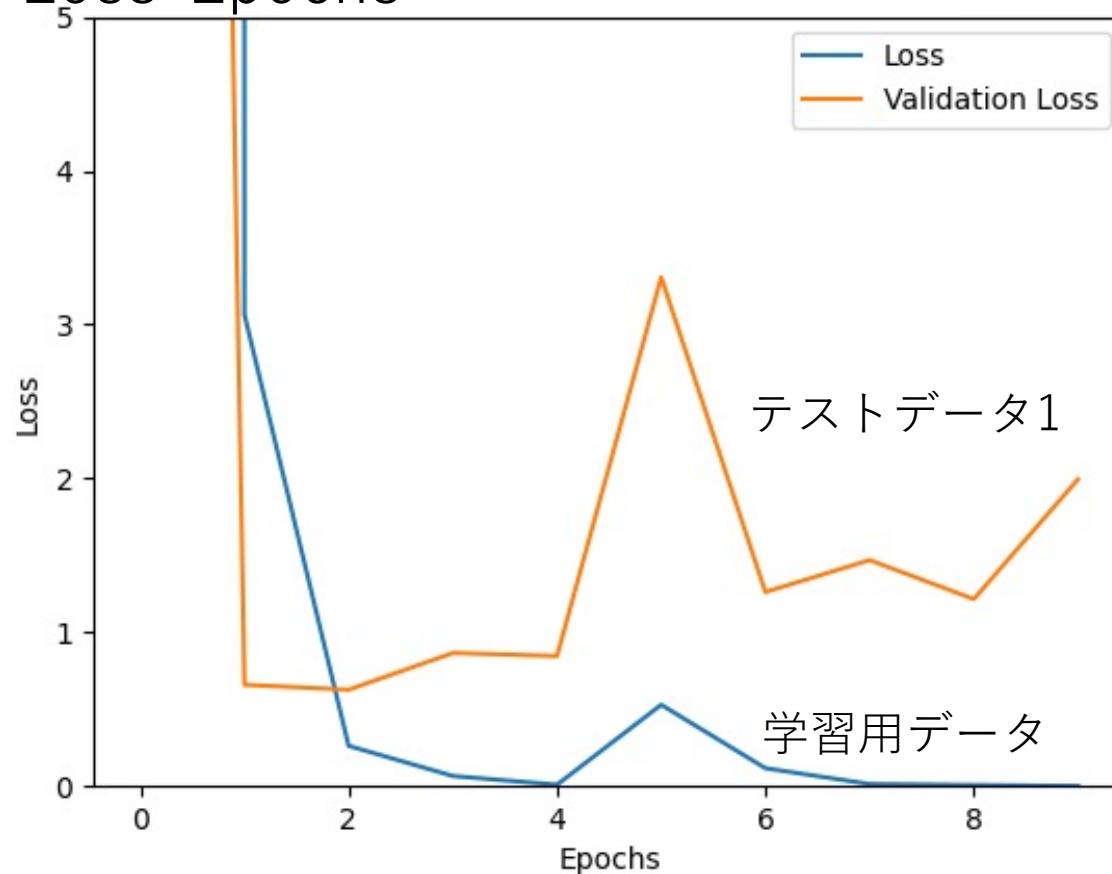
Loss : 損失関数による理想値との差

テストデータ2 (学習後)

Accuracy : 0.59

Loss : 1.68

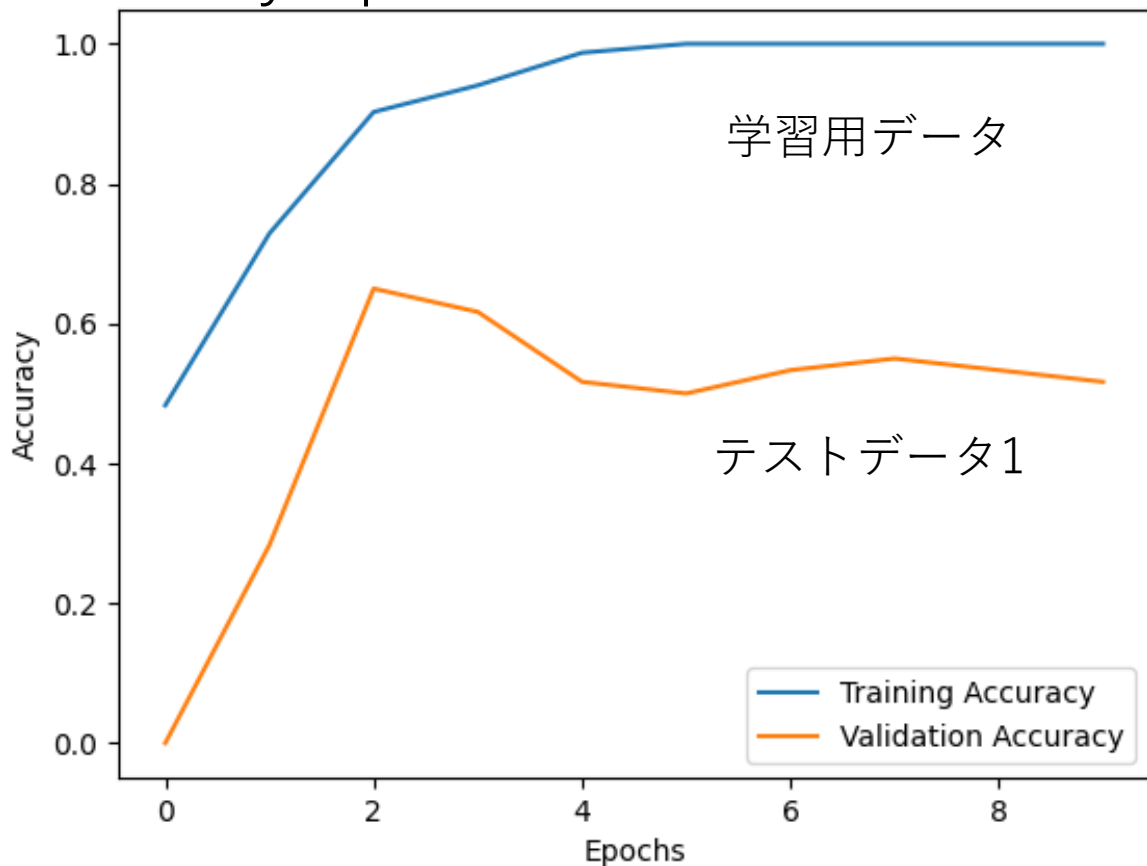
Loss-Epochs



結果

3.合わせたもの

Accuracy-Epochs



Accuracy : 正しく判定した割合

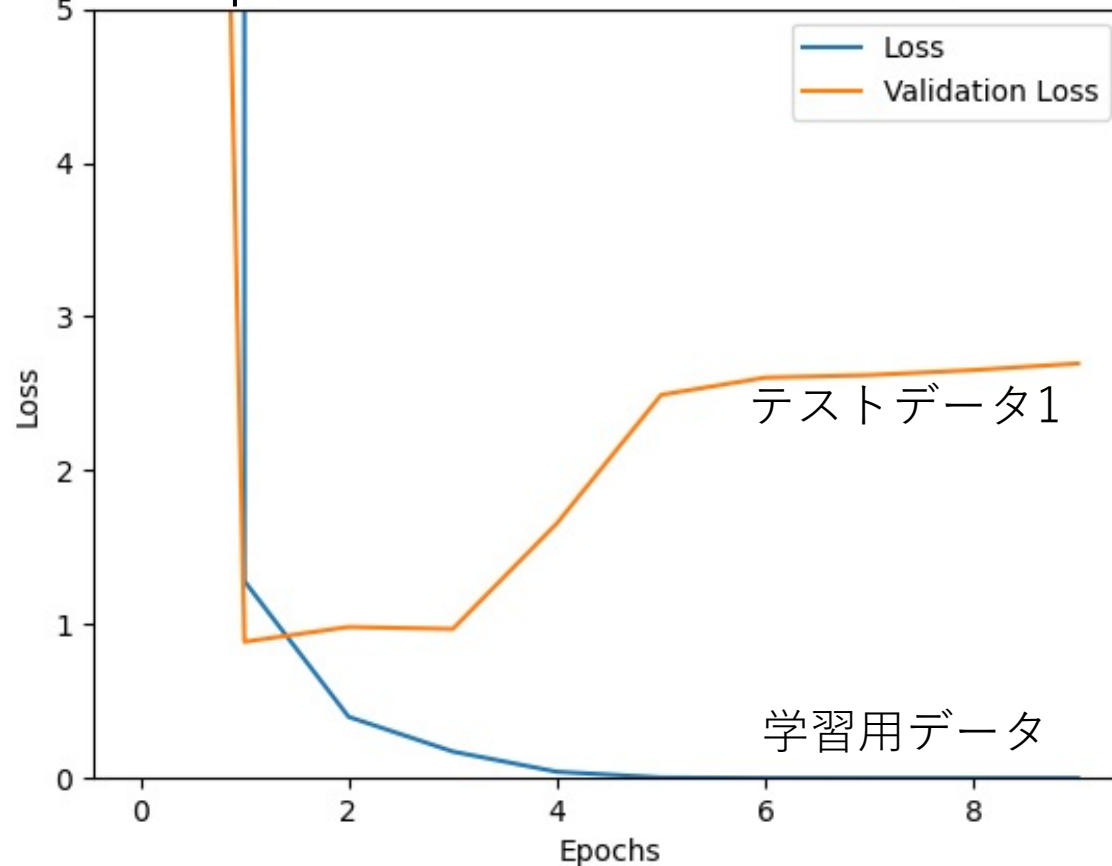
Loss : 損失関数による理想値との差

テストデータ2 (学習後)

Accuracy : 0.63

Loss : 1.73

Loss-Epochs



図の調整

機械学習で使いやすいように
情報を簡潔にする。

学習効率を考え、画像のサイ
ズも調整する。

