

?????????????????

横浜国立大学理工学部  
数物・電子情報系学科物理工学 EP  
学籍番号 1464239  
松下 昂平

2018年1月11日

# 目次

1	<b>ニュートリノの物理</b>	3
1.1	ニュートリノとは . . . . .	3
1.2	ニュートリノ振動 . . . . .	3
1.3	ニュートリノ振動のパラメータ . . . . .	4
1.4	CCQE 反応 . . . . .	4
2	<b>T2K 実験</b>	5
2.1	概要と目的 . . . . .	5
2.2	T2K 実験の検出器 . . . . .	7
3	<b>WAGASCI プロジェクト</b>	8
3.1	動機 . . . . .	8
3.2	WAGASCI 検出器の全体像 . . . . .	9
3.3	WAGASCI 検出器 . . . . .	10
3.4	Muon range detector (MRD) . . . . .	10
4	<b>光検出器とエレクトロニクス</b>	11
4.1	MPPC (Multi Pixel Photon Counter) . . . . .	11
4.2	エレクトロニクスと DAQ システム . . . . .	14
4.3	SPIROC2D . . . . .	15
4.4	Single MPPC Card . . . . .	19
5	<b>Single MPPC Card の性能評価</b>	20
5.1	評価すべき項目 . . . . .	20
5.2	Dark noise の測定 . . . . .	20
5.3	LED を用いた測定 . . . . .	20
5.4	Side MRD を用いた宇宙線試験 . . . . .	20

# 1 ニュートリノの物理

## 1.1 ニュートリノとは

ニュートリノは素粒子の一種で観測の難しさから”幽霊粒子”とも呼ばれる。1930 年にパウリによってニュートリノ仮説が提唱され、その 30 年後の 1960 年にライネスによって初めて観測された。このように観測するのに長い歳月を要した理由はニュートリノの性質による。ニュートリノは電荷を持たず、レプトンに属するため、4 つの基本的な相互作用のうち、弱い相互作用と重力相互作用のみする。現在もなおニュートリノに関して理解されてないことが多く、理論、実験の両方の面から盛んに研究が行われている。

## 1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノは 3 つの異なるフレーバーを持つ。それらは、電子ニュートリノ  $\nu_e$ 、ミュー・ニュートリノ  $\nu_\mu$ 、タウ・ニュートリノ  $\nu_\tau$  で各々のフレーバーに対応した反粒子が存在する。素粒子物理学においてほとんどすべての実験結果を説明する “標準理論” によればニュートリノの質量は 0 で、ニュートリノのフレーバーは変化しない。しかし、“ニュートリノ振動” という現象によってニュートリノは有限の質量を持ち、別のフレーバーに変化することがわかつてきただ。

ニュートリノ振動は量子力学的な現象である。ニュートリノの 3 つのフレーバー固有状態  $|\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle, |\nu_\tau\rangle$  は 3 つの質量固有状態  $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle, |\nu_3\rangle$  の重ね合わせによって記述される。ニュートリノの 3 つのフレーバー固有状態と 3 つの質量固有状態の関係は  $3 \times 3$  のユニタリー行列であるポンテコルボ・牧・中川・坂田行列  $U_{PMNS}$  によって関係づけられる。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

このポンテコルボ・牧・中川・坂田行列  $U_{PMNS}$  は一般的に 3 つの混合角  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$  と複素位相  $\delta$  で表される。

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$c_{ij} = \cos \theta_{ij}, s_{ij} = \sin \theta_{ij}$  である。この行列からわかるように 3 つの混合角に対応する 3 つのニュートリノ振動が存在する。

ここでは、2 つのフレーバー  $\nu_e$  と  $\nu_\mu$  のニュートリノ振動を考える。2 つの質量固有状態  $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle$  は自由粒子のハミルトニアン  $\hat{H}$  の定常状態で

$$\hat{H}|\nu_k\rangle = i\frac{\partial}{\partial t}|\nu_k\rangle = E_k|\nu_k\rangle \quad (k = 1, 2) \quad (4)$$

を満たす。エネルギー固有値  $E_k$  は運動量  $p$  とおくと  $E_k = \sqrt{p^2 + m_k^2}$  である。したがって、質量固有状態の時間発展は

$$|\nu_k(t)\rangle = |\nu_k\rangle e^{-iE_k t} \quad (k = 1, 2) \quad (5)$$

と表される。2つのフレーバー  $\nu_e$  と  $\nu_\mu$  のニュートリノ振動において、フレーバー固有状態と質量固有状態の関係は混合角  $\theta$  を用いて  $2 \times 2$  のユニタリー行列で表される。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$t = 0$ において運動量  $\mathbf{p}$  で生成された電子ニュートリノ  $\nu_e$  を考える。

$$|\psi(t=0)\rangle = |\nu_e\rangle = \cos \theta_{12} |\nu_1\rangle + \sin \theta_{12} |\nu_2\rangle \quad (7)$$

式(5)よりこの波動関数の時間発展は

$$|\psi(\mathbf{x}, t)\rangle = \cos \theta_{12} |\nu_1\rangle e^{-iE_1 t} + \sin \theta_{12} |\nu_2\rangle e^{-iE_2 t} \quad (8)$$

である。ニュートリノは相対論的に運動していると考えられるので、 $m_1, m_2 \ll p$  より

$$E_1 = \sqrt{p^2 + m_1^2} \approx p + \frac{m_1^2}{2p} = p + \frac{m_1^2 + m_2^2}{4p} - \frac{\Delta m_{21}^2}{4p} \quad (9)$$

$$E_2 = \sqrt{p^2 + m_2^2} \approx p + \frac{m_2^2}{2p} = p + \frac{m_1^2 + m_2^2}{4p} + \frac{\Delta m_{21}^2}{4p} \quad (10)$$

と書ける。ここで、 $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$  とおいた。これらを用いると  $t = 0$  で電子ニュートリノであった状態が飛行距離  $L (= t)$  で電子ニュートリノまたはミュー-ニュートリノとなる確率  $P(\nu_e \rightarrow \nu_e; L), P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu; L)$  は、

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e; L) = |\langle \nu_e | \psi(\mathbf{x}, t) \rangle|^2 = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2 L}{4E_\nu} \right) \quad (11)$$

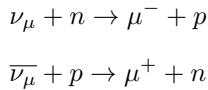
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu; L) = |\langle \nu_\mu | \psi(\mathbf{x}, t) \rangle|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2 L}{4E_\nu} \right) \quad (12)$$

となる。ここで  $p = E_\nu$  と書き換えた。同様に計算をすることによって  $P(\nu_e \rightarrow \nu_e; L) = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu; L), P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu; L) = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e; L)$  が得られる。

### 1.3 ニュートリノ振動のパラメータ

### 1.4 CCQE 反応

ニュートリノは直接観測できないため、実験では検出器におけるニュートリノと核子（または原子核）の散乱によって生成する粒子を観測する。したがってニュートリノと核子（または原子核）との反応を正確に理解する必要性がある。後述の T2K 実験では、ニュートリノのエネルギー  $E_\nu$ =約 0.6GeV のミュー-ニュートリノビームが使用されている。このエネルギー領域で主要なニュートリノと核子間の反応は Charged current quasi elastic(CCQE) 反応である。



$n$  は中性子、 $p$  は陽子、 $\mu^- (\mu^+)$  は (反) ミューオンである。CCQE 反応は二体問題であり、シンプルなトポロジーであるため、出てくるミューオンの運動学を用いるだけでニュートリノのエネルギーの近似計算が可能

である。ニュートリノのエネルギーが十分大きく、標的核子が静止しているならば、ミューオンの運動量  $p_\mu$  およびニュートリノビームの方向に対するミューオンの角度  $\theta_\mu$  から、ニュートリノのエネルギーは

$$E_\nu = \frac{m_n E_\mu + \frac{1}{2}(m_p^2 - m_n^2 - m_\mu^2)}{m_n - E_\mu + p_\mu \cos \theta_\mu} \quad (13)$$

のように計算できる。 $m_n$  は中性子の質量、 $E_\mu$  はミューオンのエネルギー、 $m_p$  は陽子の質量、 $m_\mu$  はミューオンの質量である。このような理由から、このエネルギー領域の入射ニュートリノのエネルギーを知りたいとき、CCQE 反応はニュートリノ振動実験において広く使われる信号になる。

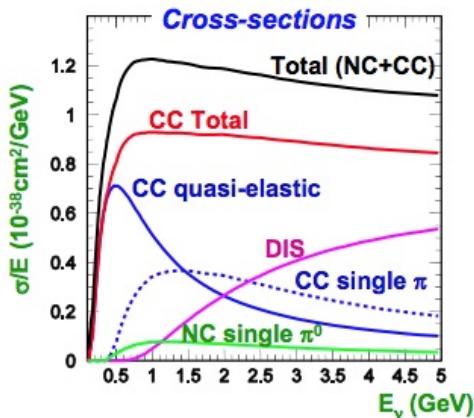


図 1 反応断面積 ( $E_\nu=0\sim 5\text{GeV}$ )

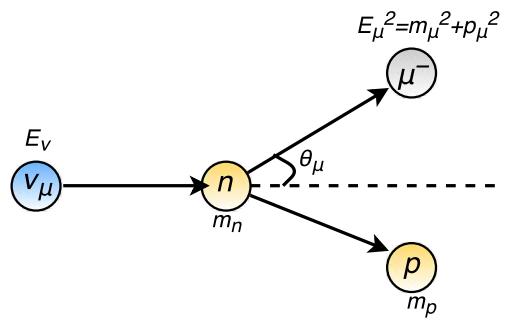


図 2 CCQE 反応

## 2 T2K 実験

### 2.1 概要と目的



図 3 T2K 実験 (1)

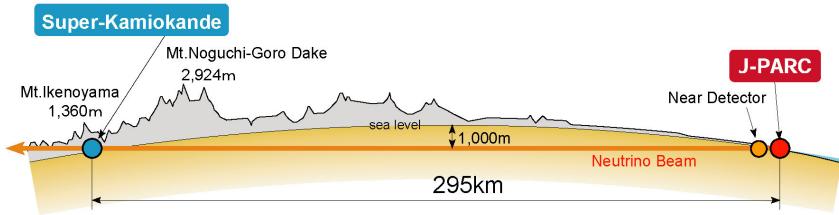


図4 T2K 実験(2)

T2K(Tokai to Kamioka) 実験は茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) で生成されたミューニュートリノビームを 295km 離れた岐阜県神岡町にある水チェレンコフ検出器、スーパーカミオカンデで観測する長基線ニュートリノ振動実験である。検出器にはスーパーカミオカンデの他に、ミューニュートリノビームが生成された位置から 280m のところに前置検出器群があり、双方を比較することによりニュートリノ振動のパラメータを測定することができる。

ミューニュートリノは、陽子ビームがグラファイト標的に衝突することによって生成されるパイ中間子がすぐに崩壊することによってつくられる。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

パイ中間子には正の電荷、負の電荷を持つものがあるが、磁場で偏向することによってスーパーカミオカンデの方向に向けて飛んでいくパイ中間子を選択することができる。このように T2K 実験ではミューオンニュートリノからなるビームと反ミューオンニュートリノからなるビームを選ぶことができ、両方のモードで測定を行うことができる。これにより、ニュートリノの粒子と反粒子の対称性 (CP 対称性) の破れを測定できる。また、ミューオンや反応や崩壊せずに残った陽子およびパイ中間子は標的とは別のグラファイト層でエネルギーを失って吸収されるが、ニュートリノはこれを通り抜けていく。

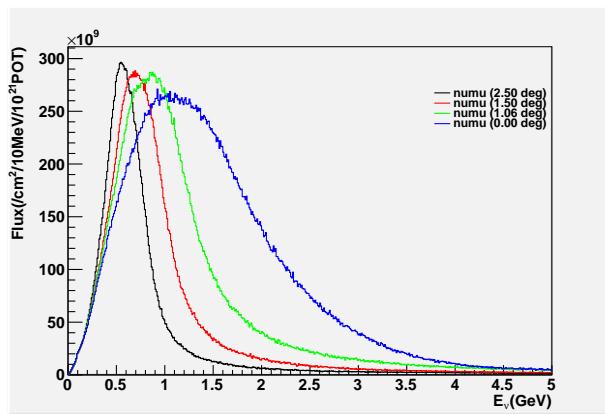


図5 ニュートリノフラックスのエネルギースペクトル

T2K 実験は世界で初めてのオファクシス・ニュートリノ実験である。オファクシス・ニュートリノ実験とは、ニュートリノのビームの方向 (パイ中間子の収束する方向) を検出器からはずすことによって行われるニュートリノ振動実験である。T2K 実験では、後述の ND280 検出器とスーパーカミオカンデがニュートリノ

ビームの中心軸から  $2.5^\circ$  離れた方向にある。図 5 はオファクシス角が  $2.5^\circ$ ,  $1.5^\circ$ ,  $1.06^\circ$ ,  $0^\circ$  のミューニュートリノビームのニュートリノフラックスのエネルギースペクトルである。ビームのオファクシス成分は中心軸よりもエネルギースペクトルに幅が狭いピークをもつ。これによりニュートリノ振動の確率を最大になるようエネルギースペクトルを調整することができる。

## 2.2 T2K 実験の検出器



図 6 ND280



図 7 INGRID (垂直モジュール)



図 8 INGRID (水平モジュール)

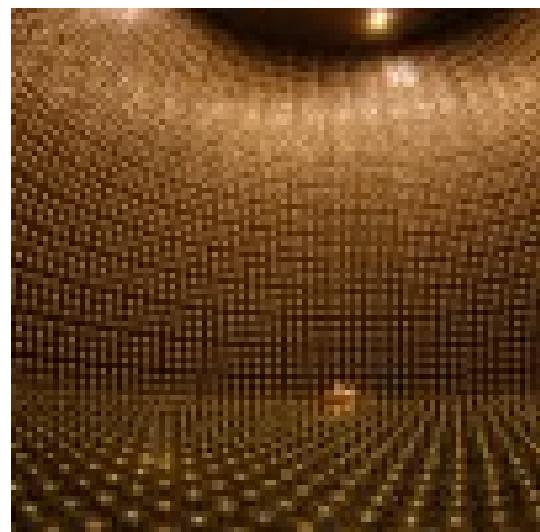


図 9 スーパーカミオカンデ

- ND280 (図 6)

ND280 は神岡の方向（オファクシス）に置かれている前置検出器である。ここでは、ニュートリノ振動が起こる前のビーム中のミューニュートリノの数を測定する。つまり、ニュートリノ振動がないと仮定した場合に後置検出器であるスーパーカミオカンデで観測されるミューニュートリノの個数を予測するのに使われる。また、大型の二極電磁石を採用しているため、荷電粒子の電荷および運動量の決定が可能である。

- INGRID (図 7, 図 8)

INGRID はニュートリノビームの中心軸上に置かれている前置検出器である。ビームの方向と強度の確認をするのに使用される。検出器は鉄ターゲット層とシンチレータ層のサンドウィッチ構造になっており、ニュートリノが鉄と反応することによって生成された荷電粒子がシンチレータを通過し、このとき出てくるシンチレーション光を測定する。

- スーパーカミオカンデ (図 9)

スーパーカミオカンデはビームが生成される東海村の J-PARC から 295km 離れた神岡の地下 1000 m に設置している後置検出器である。直径 39.3m、高さ 41.4 m の円筒形のステンレス製の水タンクその壁面に設置された光電子増倍管からなる。水タンクは内水槽と外水槽の二層式で、5 万トンの超純水で満たされる。東海村から到達したニュートリノのいくらかは水と反応する。ミューニュートリノとの反応では多くはミューオン、電子ニュートリノとの反応では多くは電子が生成される。これによって生成されたミューオン及び電子は内水槽の水中でチレンコフ光を発し、内向きにつけられた光電子増倍管がそれをとらえる。チレンコフ光の円錐状の放射はリングとして検出され、ミューオンは輪郭がはつきりとしたリング、電子は輪郭がぼやけたリングを生成する。これによってミューニュートリノまたは電子ニュートリノが反応したのかを区別できる。また外水槽はニュートリノと宇宙線ミューオンを区別し、ノイズを減らす役割がある。

### 3 WAGASCI プロジェクト

#### 3.1 動機

T2K 実験ではオファクシスの前置検出器 ND280 によってニュートリノ反応断面積とニュートリノフラックスの不定性がかなり抑えられている。しかし、スーパーカミオカンデでは標的が水 ( $H_2O$ )、ND280 では標的がプラスチックシンチレータ ( $CH$ ) であるため、標的原子核に依存するニュートリノ反応断面積の系統誤差が生じてしまう。さらなる高統計での測定を行うためにはこの誤差の削減が必須である。ニュートリノ反応のモデルでは標的原子核による依存性は小さいと予想されているが、これまでのところこの予想は測定によって確かめられていない。もし  $H_2O$  と  $CH$  の反応断面積比が精密に測定されれば、標的原子核に依存するニュートリノ反応断面積の不定性が削減される。WAGASCI プロジェクトでは三次元格子構造を持つ新型ニュートリノ検出器“WAGASCI 検出器”を製作し、これを用いて 3 % 以内の精度で  $H_2O$  と  $CH$  の反応断面積比を測定する。

### 3.2 WAGASCI 検出器の全体像

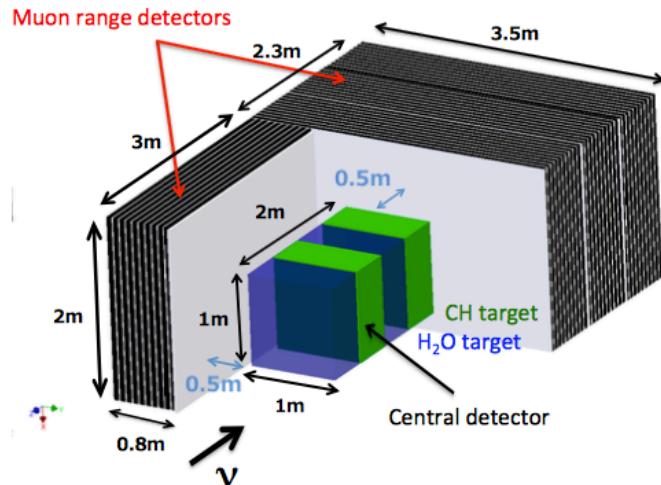


図 10 WAGASCI 検出器の全体図

図 10 は WAGASCI 検出器の全体図である。WAGASCI 検出器は T2K 実験の前置検出器が置かれている施設内で、ビームの中心軸から  $1.6^\circ$  のオフアクシスの位置に設置される。この位置では ND280 のニュートリノ フラックスと似た分布が期待される。図 10 の中心に設置されている WAGASCI 検出器にはニュートリノ の標的である  $H_2O$  と  $CH$  の層が計 4 層ある。ニュートリノ 反応によって生じた荷電粒子がシンチレータに当たり、発生したシンチレーション光は波長変換ファイバーによって集められ、半導体光検出器 MPPC によって検出される。WAGASCI 検出器の周りの両側面とビームの下流側に 3 台の Muon range detector(MRD) が設置される。MRD は鉄の層とプラスチックシンチレータの層からなり、鉄の層を貫通するミューオンの数を数えることによりニュートリノ 反応によって発生したミューオンの情報が得られる。

### 3.3 WAGASCI 検出器

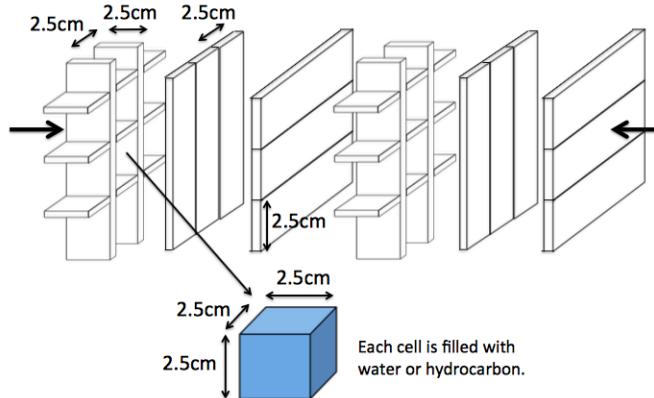


図 11 WAGASCI 検出器の内部

図 11 は図 10 において中心に設置されている WAGASCI 検出器のデザインである。WAGASCI 検出器の大きさは縦横が  $100\text{cm} \times 100\text{cm}$ 、ビームと平行な方向に  $200\text{cm}$  である。ニュートリノの標的である  $H_2O$  と  $CH$  はそれぞれ  $1\text{t}$  ほどである。図 11 のように検出器の内部はプラスチックシンチレータが三次元格子状に組まれており、その内側は標的である  $H_2O$  または  $CH$  で満たされている。ニュートリノは  $H_2O$  および  $CH$  の水素や酸素、炭素原子と反応をすると荷電粒子が生成される。このニュートリノ反応はプラスチックシンチレータを通過する荷電粒子の飛跡を検出することによって同定される。プラスチックシンチレータは三次元構造をしているため、荷電粒子に対して  $4\pi$  方向のアクセプタンスをもつ事ができる。さらに、ビーム方向にシンチレータの間隔が  $2.5\text{ cm}$  あるので、ニュートリノ反応によって生じた飛程が比較的短い陽子や荷電パイオニアの飛跡も再構成できる可能性がある。またプラスチックシンチレータとニュートリノの反応はバックグラウンドになるため、WAGASCI 検出器で用いられるプラスチックシンチレータは  $0.3\text{cm}$  の薄型のものを使用している。

### 3.4 Muon range detector (MRD)

WAGASCI 検出器の両側に設置される MRD を SideMRD、下流側に設置される MRD を BabyMind と呼んでいる。今年度、横浜国立大学で 2 台の SideMRD が建設された。本論文のメイントピックはこの SideMRD で初めて使用されるエレクトロニクス”Single MPPC Card” の性能評価およびその結果である。そこで再び SideMRD について触れる。

## 4 光検出器とエレクトロニクス

### 4.1 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)

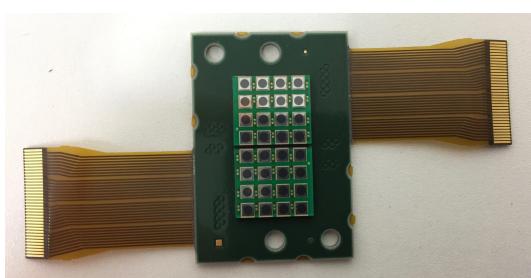


図 12 MPPC アレイタイプ

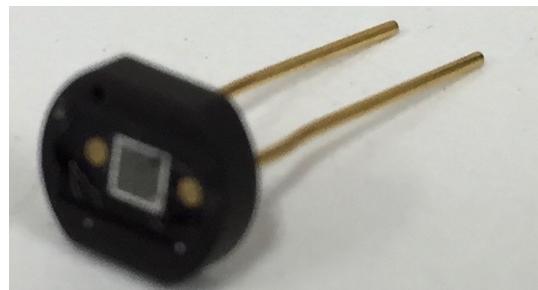


図 13 MPPC シングルタイプ

MPPC(Multi Pixel Photon Counter) は、浜松ホトニクス製の PPD(Pixelated Photon Detector) で、ピクセル化された APD(Avalanche Photo Dyode) をガイガーモードで動作させ、各ピクセルの信号の和を並列に読み出すタイプの半導体光検出器である。WAGASCI 検出器ではアレイタイプ(図 12)、MRD ではシングルタイプの MPPC(図 13) が使用される。アレイタイプは 32ch 分の MPPC が一つの基板上にのっている。MPPC は小ささ、光電子増倍管に並ぶゲインと光子検出効率、磁場に対する耐性、高いコストパフォーマンス、70V 程度の電圧で動作するなどの長所がある。

#### 4.1.1 APD(Avalanche Photo Dyode)

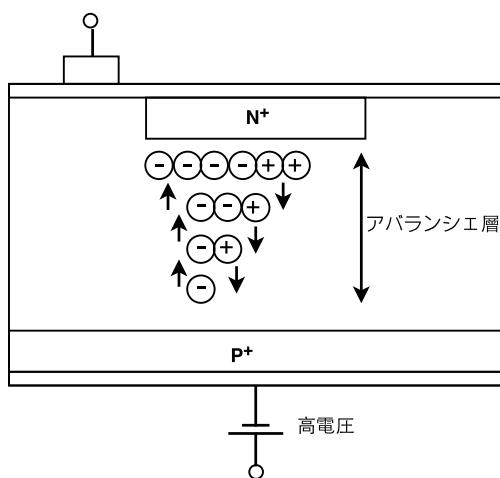


図 14 アバランシェ増倍

フォトダイオードにバンドギャップ以上のエネルギーをもつ光が入射すると、電子と正孔の対が生成される。PN接合に逆電圧が印加されると電子と正孔の対のうち、電子は $N^+$ 側へ、正孔は $P^+$ 側へ移動する。これらのキャリアの移動する速さは電場の大きさに比例して大きくなるが、電場がある一定の大きさを上回ると結晶格子との散乱頻度が増加し、速さが一定の値に飽和する。さらに電場が大きくなると結晶格子との衝突を免れたキャリアが大きなエネルギーを持つようになり、これらのキャリアが結晶格子と衝突し、新たな電子と正孔の対が生成される。この新しい電子と正孔の対がまた新たに電子と正孔の対を連鎖的に発生させる。この現象はアバランシェ増倍と呼ばれる。またアバランシェ増倍が生じる領域をアバランシェ層と呼ぶ。電子と正孔では電子がより増倍に大きく寄与することから、MPPCでは電子がアバランシェ層に入りやすい構造を適用している。

#### 4.1.2 ガイガーモードとフォトンカウンティング

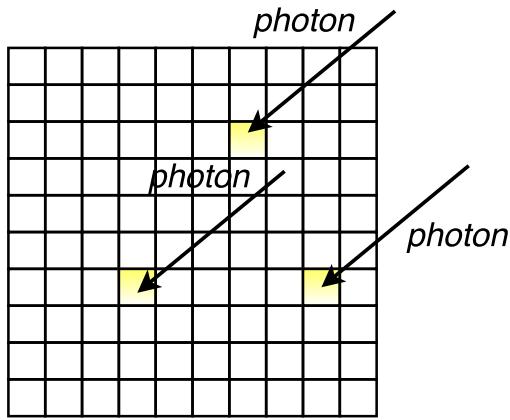


図 15 MPPC によるフォトンカウンティング

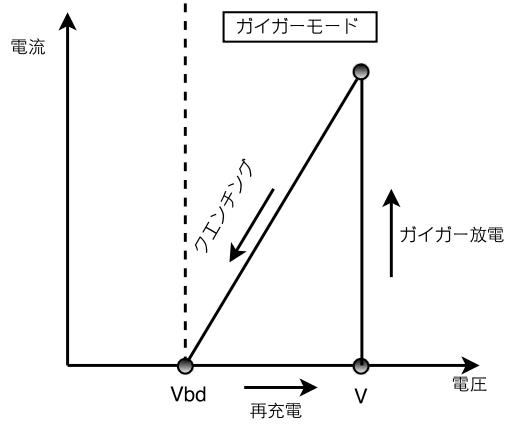


図 16 MPPC の信号形成のサイクル

MPPC は正方形のシリコンチップに微小なガイガーモード APD ピクセルが多数、並列にしきつめられた構成である。ガイガーモードとは、降伏電圧  $V_{bd}$  より大きい逆電圧を印加するとアバランシェ増倍がデバイス全体に広がることによって電子が雪崩増幅され、入射光子の数と比例しなくなる状態である。ガイガーモードにおいて MPPC のピクセルに光子が入射すると電子が雪崩増幅を起こす。その後、このピクセルには電流が流れ、直列に繋げられたクエンチング抵抗によって電圧降下が起こり、雪崩増幅は終息する。1つのピクセルからの出力電荷  $Q_{pix}$  は1つのピクセルのキャパシタンス  $C$ 、印加している電圧  $V$ 、降伏電圧  $V_{bd}$  とすると、

$$Q_{pix} = C(V - V_{bd}) \quad (14)$$

で表される。MPPC では受光面を多数の微小なピクセルに分割し、全ピクセルの出力電荷の和を出力信号としている。各ピクセルの特性はそろえられているため、印加電圧が一様であれば、MPPC からの出力は  $N$  個のピクセルで電子雪崩が起きた場合、

$$Q = \sum Q_i = NQ_{pix} \quad (15)$$

となり、雪崩を起こしたピクセルの数に比例する。この電荷を記録することによって光子の計数が可能になる。

#### 4.1.3 ダークノイズ

MPPC では光によって生成されたキャリア以外の要因によってパルスが発生する事がある。これをダークノイズと呼ぶ。ダークノイズの主な原因は熱励起による電子が電子雪崩を起こすことであると考えられている。このように熱的に発生したキャリアも一定の信号に増幅され、これは入射フォトンによる信号と区別ができない。ゆえに、ダークノイズは検出誤差の原因である。ノイズの大きさは 1 光電子相当 (= 1p.e.) が主であるが、後述のピクセル間クロストークやアフターパルスの影響によって 2p.e. 以上のも存在する。1 秒あたりのダークノイズの数をノイズレート  $A[Hz]$  と定義する。一般に PPD では、高いゲインおよび光子検出効率と引き換えに室温で高いノイズレートを持つ。MPPC では、ノイズ源となる不純物準位の中間準位や局所的に高電圧の領域の存在を取り除いた結果他の PPD に比べてかなり低いノイズレートを達成している。

#### 4.1.4 クロストーク

あるピクセルで電子雪崩が生じると、その雪崩中で赤外波長の光子が発生し、周囲のピクセルに伝搬することで別の雪崩を引き起こすことがある。この現象をクロストークと呼ぶ。クロストークが起こると MPPC の出力が実際に検出されるべき光電子数相当よりも大きくなってしまう。クロストークが起こる確率は温度にはそれほど依存せず、印加している電圧  $V$  と降伏電圧  $V_{bd}$  の差 ( $V - V_{bd}$ ) に比例することがわかっている。典型的なクロストークの確率は 0.1~0.2 程度で、この分だけ MPPC の出力が水増しされていると言えることができる。

#### 4.1.5 アフターパルス

MPPC の増幅領域内に結晶の格子欠陥が存在する。ピクセル内でアバランシェ増倍をする過程でこの格子欠陥に雪崩電子が捕獲され、一定時間後に再放出されることがある。再放出された雪崩電子がアバランシェ増倍を起こす現象をアフターパルスと呼ぶ。入射フォトンによるパルスとアフターパルスはその形状からは区別ができない。

## 4.2 エレクトロニクスと DAQ システム

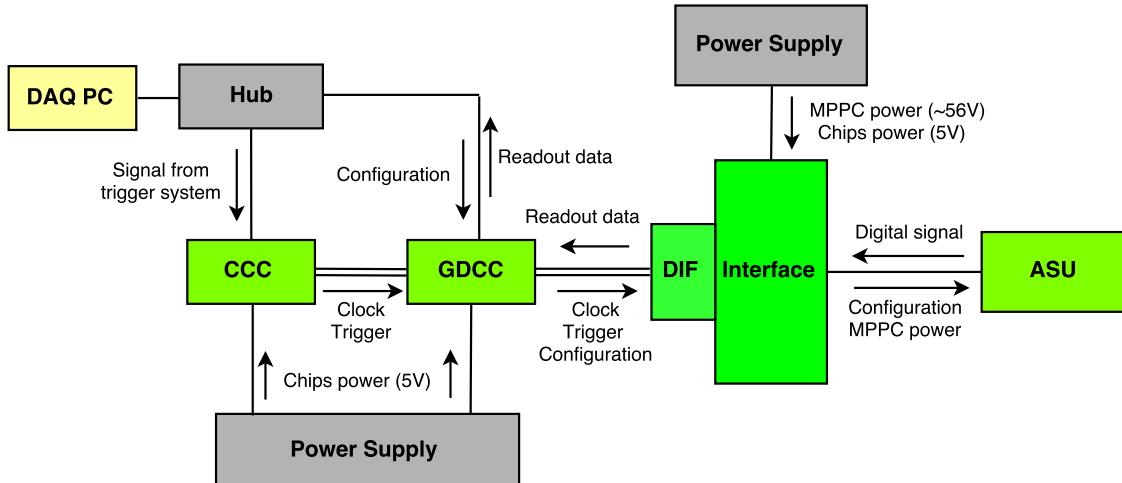


図 17 WAGASCI DAQ system

WAGASCI の DAQ システムで使用される主なエレクトロニクスは以下の通りである。

- **ASU (Active Sensor Unit)**

ASU 上には SPIROC という ASIC がマウントされており、MPPC からの信号を SPROC 用いて読み出す。50 ピンのフラットケーブルを使用することで他の ASU、Interface と接続される。

- **Interface**

Interface は 1 つの DIF と最大 4 つの ASU と接続可能である。DIF と ASU との間で信号を並列に送る。MPPC へ電圧供給はこの基板を通じて行われる。また、DIF 上の FPGA および ASU 上の SPIROC2D への電圧供給もこの基板を通じて行われる。

- **DIF (Detector Interface)**

DIF は SPIROC2D を操作する FPGA をもつ。PC からの DAQ の信号と configuration data を SPIROC に送り、Interface を通じて SPIROC2D から応答信号と出力データを受け取る。

- **GDCC (Giga Data Concentrator Card) / CCC (Clock and Control Card)**

GDCC は PC と DIF の間の信号伝達としてのみ働く FPGA を持つ。対応するファームウェアに書き換えたとき、GDCC は CCC モードとして機能する。CCC は GDCC に clock 信号と fast control を送る。

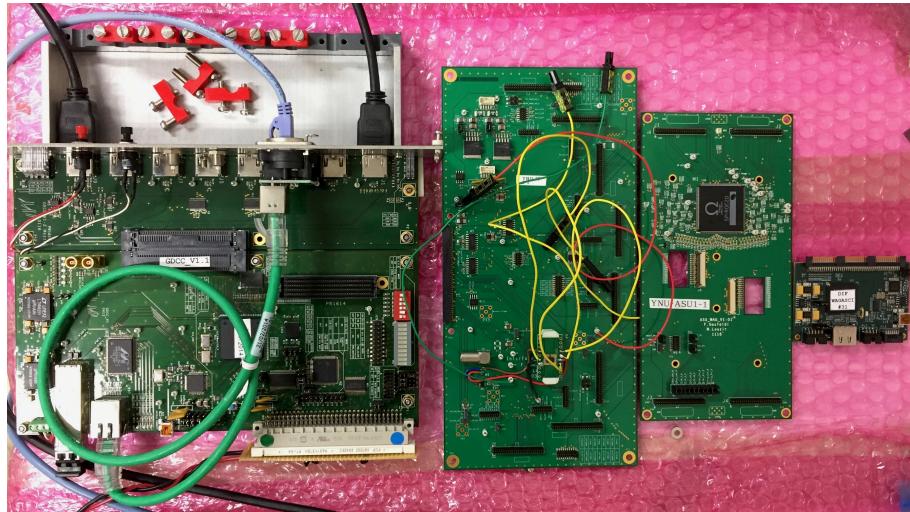


図 18 エレクトロニクス

図 18 の左から GDCC/CCC,Interface,ASU,DIF である。

### 4.3 SPIROC2D



図 19 ASU と SPIROC2D

SPIROC(SiPM Integrated Read Out Chip) はフランスの OMEGA 社によって開発された、SiPM からの信号を読み取るとても繊細なフロントエンドエレクトロニクスである。ILC のハドロンカロリメータのプロトタイプ用に開発された。SPIROC は large dynamic range, low noise, low consumption, high precision, large number of readout channels と言った要請を満たすように発展してきた。ASU にマウントされている SPIROC 2 D はその最新版である。SPIROC はセルフトリガー、ゲインの異なる 2 つのアンプ、36channel が搭載された ASIC で、channel ごとに 1p.e. から 2000p.e. の幅広い範囲の電荷情報と 100ps 単位の精密な時間情報を測定することができる。channel ごとに 16 個のアナログメモリを持ち、電荷情報と時間情報が蓄えられる。12-bit Wilkinson ADC によってそのアナログ情報はデジタル化され、それらのデータは 4kbytes RAM で蓄えられる。その後 SPIROC のデジタルパートによって管理され、DAQPC に転送される。

### 4.3.1 SPIROC2D のアナログパート

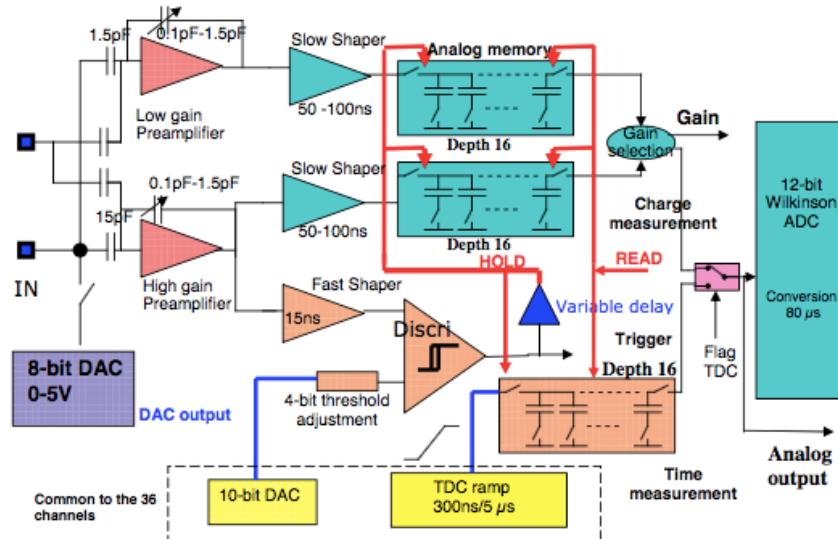


図 20 SPIROC のアナログパート

図 20 は SPIROC のある一つの channel 内においてアナログ情報の処理が行われるところのブロック図である。アナログパートには channel ごとにそれぞれ input DAC が搭載され、SiPM に印加する high voltage を channel ごとに最大 5.0V 調節でき、ゲインを合わせることが可能になる。入ってきた信号はまず 2 つのゲインの異なるアンプによって増幅される。その後 Fast shaper と Discriminator からなるトリガーラインと、2 つの Slow shaper と 2 つの 16-depth Switched Capacitor Array(SCA) のラインに分かれる。トリガーラインではまず、high gain preamp によって増幅された信号が fast shaper によって 15ns の shaping time で波形が形成される。その後全チャンネルで共通の threshold の値を信号が越えると、出力される。この threshold の値は 10-bit DAC によって決められる。また、Slow shaper と SCA からなるラインでは、25ns から 175ns の shaping time で波形が形成される。その後、トラック & ホールド回路によって Slow shaper の電圧値が記録される。2 つの 16-depth SCA には電荷情報および時間情報のアナログ値が保存される。

### 4.3.2 SPIROC2D のデジタルパート

SPIROC の信号読み出しの過程には次のようなステップがある。

- Acquisition phase
- Conversion phase
- Readout phase
- Idle phase

Acquisition phase では、bunch crossing train の間、データの収集が行われる。threshold を超える信号が来ると、電荷情報がアナログメモリへ、時間情報がアナログメモリとデジタルメモリへ保存される。次の bunch

crossing が来ると再びトリガーが自動的にセットされる。Conversion phase では、SCA に蓄えられたアナログ値がデジタル変換される。SCA に蓄えられた 36(=channel 数) の電荷情報と時間情報が column ごとに変換されなければならない。このことは、32 回（アナログメモリの column の数、電荷情報と時間情報で 16 回ずつ）の AD 変換を意味する。変換されたデータはメインメモリである RAM に入る。変換が終わると SCA に再びデータが蓄えられ、また新しい変換が始まる。Readout phase では、SPIROC が外部から token を受け取ると、RAM に保存されたデータがシリアルリンクで読み出される。Idle phase は上記の操作が終了した後に、電力消費を抑える phase である。

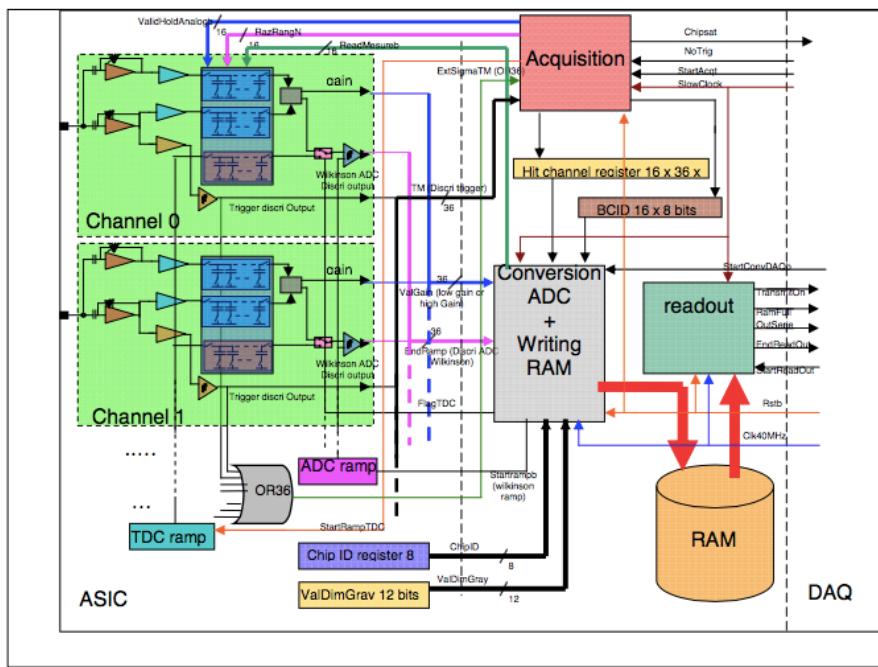


図 21 SPIROC のデータ読み出しまでの全体像

#### 4.3.3 Link between DAQ and SPIROC

上記の digital part での 4 つの phase は以下の信号によって操作される。

- DAQ から SPIROC への信号  
Start acquisition, Start conversion, Start readout, Reset, Clock
- SPIROC から DAQ への信号  
Chip saturation, End readout

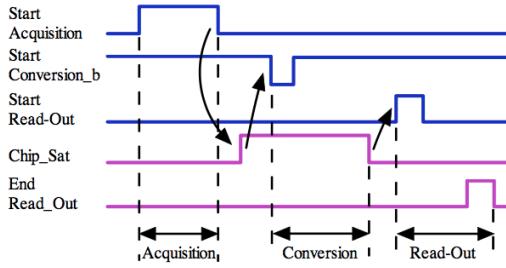


図 22 Acquisition phase の間に 16column が埋まらない場合

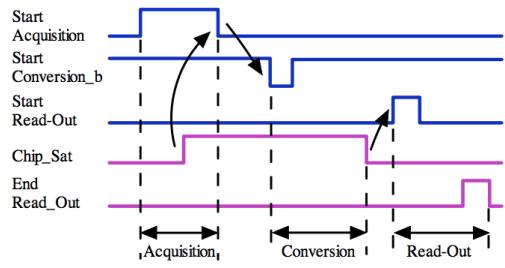


図 23 Acquisition phase の間に 16column がすべて埋まる場合

これらの信号が以下の順序によって処理される。

#### 1. Reset

すべての digital part が Idle phase にリセットされる。

#### 2. Start acquisition

Start acquisition signal の rising edge によって Acquisition phase が開始される。この信号の間、Acquisition phase が保たれる。この信号の falling edge によって Acquisition phase が終了する。

#### 3. Chip saturation

次の 2 つのパターンがある。

- Acquisition phase の間に 16column が埋まらない場合 (図 22) : Acquisition phase が終了した後、SPIROC から Chip saturation signal が出る。その信号によって Start conversion signal が出て、Conversion phase が開始される。
- Acquisition phase の間に 16column がすべて埋まる場合 (図 23) : SCA のアナログメモリがすべて埋まったタイミングで SPIROC から Chip saturation signal が出る。その信号によって Acquisition phase が終了し、Conversion phase が開始される。

#### 4. Start conversion

#### 5. Start readout

Chip saturation signal のトレーリングエッジで Conversion phase が終了する。その後、Start readout signal で Readout phase が開始される。

#### 6. End readout

#### 4.3.4 10-bit DAC Discriminator の問題

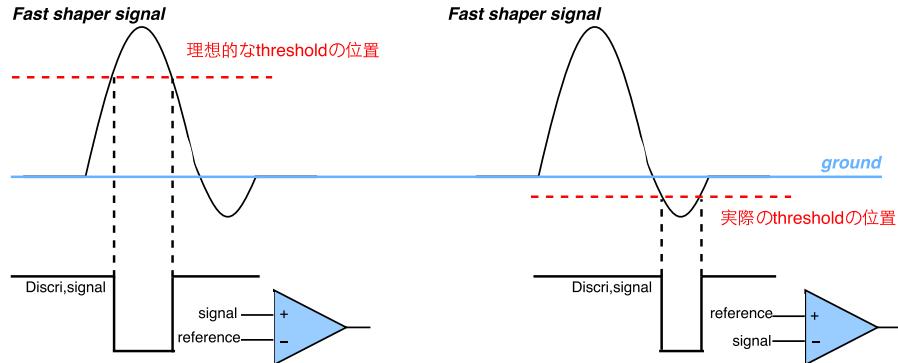


図 24 10-bit DAC Discriminator の問題

アナログパートにおいて threshold の位置を決めるのが 10-bit DAC である。しかし、SPIROC の 10-bit DAC Discriminator ではコンパレータが signal と基準電圧で逆になってしまっている。そのため、図 24 の左のように threshold の位置が ground よりも上に設定されるのが理想的であるが、実際には図 24 の右のように threshold の位置が ground よりも下に設定される。つまり、信号はこの threshold の位置を下回ったものが output される。これにより ground 付近のノイズに敏感になってしまふ。したがって、1p.e,2p.e. などの小さな信号からトリガーが可能であるか、テストをする必要がある。

#### 4.3.5 Gain Select の問題

#### 4.4 Single MPPC Card

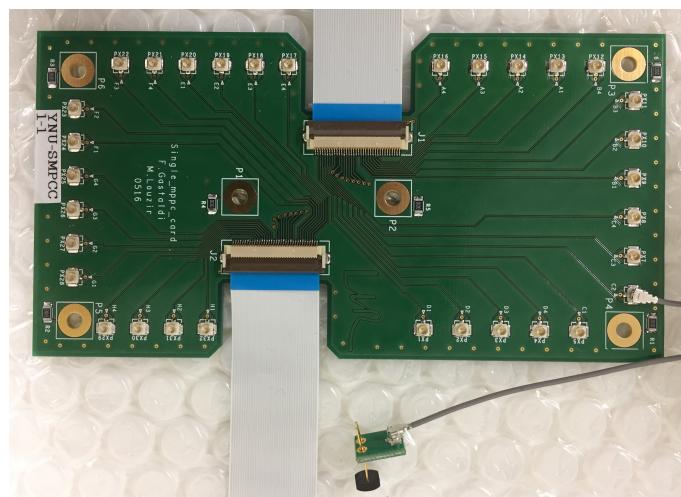


図 25 Single MPPC Card とシングルタイプの MPPC

Single MPPC Card はシングルタイプの MPPC と ASU 間を接続するための基板で、Single MPPC Card から伸びる同軸ケーブルによりシングルタイプの MPPC と接続される。このケーブルにより高い自由度が

実現される。しかし、この長いケーブルにより高いエレキノイズが予想される。1枚の Single MPPC Card につき最大 32ch の MPPC が使用できる。これらの MPPC は自由に取り換えができるため、特性の揃った MPPC を選択し、使用することができる。

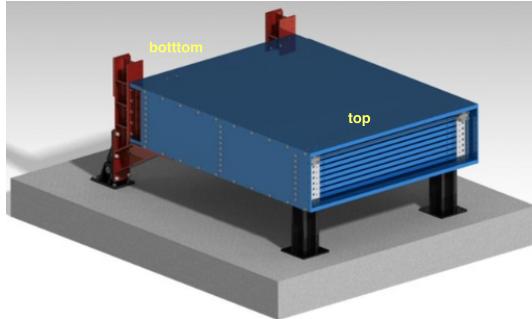


図 26 SideMRD (横に倒した状態)

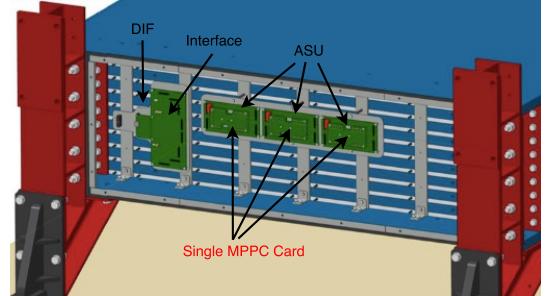


図 27 SideMRD と Single MPPC Card (bottom module)

Side MRD では 1 台につき、計 6 枚 (top module で 3 枚、bottom module で 3 枚) が使用される。この基板は Side MRD で初めて使用されるため、これまで WAGASCI で使用してきたアレイ型の MPPC と同様の動作が可能であるか。次章では、その性能評価の結果について述べる。

## 5 Single MPPC Card の性能評価

### 5.1 評価すべき項目

#### 5.2 Dark noise の測定

##### 5.2.1 測定のセットアップ

##### 5.2.2 Noise rate

##### 5.2.3 threshold の違いによる ADC 分布

##### 5.2.4 pedestal の位置および MPPC の Gain のバラつき

#### 5.3 LED を用いた測定

##### 5.3.1 測定のセットアップ

#### 5.4 Side MRD を用いた宇宙線試験

##### 5.4.1 測定のセットアップ