

次世代大口径光検出器の開発

東京大学大学院 理学系研究科

阿部 利徳, 相原 博昭

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

田中 真伸

浜松ホトニクス株式会社 電子管事業部

河合 克彦, 久嶋 浩之, 須山 本比呂

2009年(平成21年)11月20日

本稿では、次世代大口径光検出器 Hybrid Avalanche Photo-Detector(HAPD)とその読み出し回路の開発、およびその性能について紹介します。

1. 開発の背景と目的

われわれは、次世代大口径光検出器 HAPD とその読み出し回路の開発を、東京大学、KEK、浜松ホトニクスの共同で行っています[1,2,3]。HAPD は、次世代メガトン級ニュートリノ検出器用の光検出器として開発されています。メガトン級ニュートリノ検出器を用いた実験は、日本、アメリカ、ヨーロッパのそれぞれで検討が進んでいます。これらの実験、たとえば、日本で検討されている Hyper Kamiokande 実験では、ニュートリノ検出器が既存の Super Kamiokande 実験の約 20 倍の大きさとなり、必要な光検出器の数は数十万になります。非常に多数の光検出器が必要なため、既存の光電子増倍管よりも大量生産がしやすく、品質管理に優れた大口径光検出器の開発が不可欠です。さらに、非常に少ない信号を確実に測定するために、単一光子を検出できることが要求されます。われわれは、この光検出器として、HAPD を開発しました。HAPD は、半導体光検出器技術である Avalanche Diode(AD)と光電子増倍管技術、さらに、半導体エレクトロニクス技術を融合することによって可能となる、従来の光電子増倍管より優れた時間分解能、短い読み出し時間、優れた波高分解能を有する光検出器です。さらに、製造過程の簡素化により、光電子増倍管よりも低価格で大型の光検出器を実現できる可能性を持っています。この素晴らしい可能性を持った光検出器を、有効光電径 13 インチ以上、ゲイン 10 万以上、時間分解能 1 ナノ秒以下、高い単一光子検出効率を目指して開発を進めてきました。

本稿では、まず HAPD の動作原理について説明し、なぜ HAPD は光電子増倍管よりも優れた特性を持ち、安価に大

量生産を行う可能性があるのかを説明します。次に、HAPD の開発について説明し、開発された HAPD の性能(ゲイン、波高分解能、時間分解能など)について述べます。さらに、読み出し回路の開発について説明し、HAPD と読み出し回路の接続試験の結果について紹介します。最後に、まとめと今後の展望について述べます。

2. HAPD 動作原理

HAPD は、前述したように、半導体光検出技術 AD と光電子増倍管技術を融合することによって可能となる、従来の光電子増倍管より優れた時間分解能、短い読み出し時間、優れた波高分解能を有する光検出器です。図 1 に HAPD の動作原理を示します。光電面から飛び出た光電子が、光電面と AD 間の電位差(10~20kV)で加速され、エネルギーを得たのち、AD に飛び込みます。ここで光電子はエネルギーを失い、その結果、電子・ホール対を生成します。20kV の電位差による加速で、光電子 1 個当たりおよそ 4,500 個の電子・ホール対が生成されます。さらに、AD のアバランシェゲインによりおよそ 30 倍のゲインが得られ、最終的に、約 10^5 の増幅度になり、単一光子からの信号検出が可能となります。この動作原理から、HAPD に以下の特徴が予想されます。

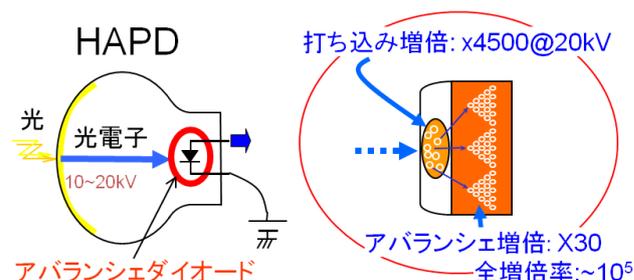


図 1 HAPD 動作原理

1. 優れた波高分解能と単一光子検出

初段のゲインの統計的ふるつきは波高分解能に影響を与えます。HAPDの初段のゲインは4,500と、従来型光電子増倍管のゲイン10より格段に大きく、HAPDの初段のゲインに対するその統計的ふるつきの効果($1/\sqrt{4500}$)は光電子増倍管($1/\sqrt{10}$)に比べてとて小さくなり、光電子増倍管に比べて優れた波高分解能が期待できます。波高分解能がよくなることにより信号とノイズの分離がよくなり、大口径の光検出器にもかかわらず、単一光子からの検出が可能になることが期待されます。

2. 優れた時間分解能と低価格化, 品質管理

HAPDは、電子増倍部に光電子増倍管のようなダイノードチェーンを用いた構造ではなく、内部構造が単純な半導体電子打ち込み技術を用いています。このことは、ダイノードチェーンに見られる二次電子軌道長のばらつきが原理的に存在せず、Transit Time Spread(TTS)を小さくできることを意味します。ADの応答は非常に速いので、TTSが小さいだけでなく、信号の読み出し時間も短くすることができ、優れた時間分解能が期待できます。また、真空容器の中はほとんど光電面と半導体素子だけといった単純な構成になるため、製造技術、製造材料の観点から優れた量産性が期待でき、その結果、低価格で高性能、品質管理の容易な光検出器が実現できる可能性を持っています。

3. 光電子増倍管より低いゲイン

HAPDで採用している半導体電子打ち込み型のゲインは約 10^5 ですが、光電子増倍管のゲインはおよそ 10^7 です。HAPDのゲインは光電子増倍管と比べて100倍違います。このために、HAPD用読み出し回路の開発が不可欠です。

次の章でHAPDの開発について述べます。

3. 大口径 HAPD の開発

われわれは、有効光電面径13インチ以上、時間分解能1ナノ秒、高い単一光子検出効率、ゲイン 10^5 以上を持つ光検出器の実現を目標として、HAPDを開発してきました。前章で説明したように、HAPDは光電子増倍管と半導体の技術を使い、動作原理自体はとて簡単です。しかし、目標を満足するHAPDを開発するには、解決しなくてはならないさまざまな研究項目があります。次節で各研究項目について説明します。

3.1 開発の研究項目

目標とする性能を持つHAPDを開発するためには、技術的に解決しなくてはならない以下の研究項目がありました。

1. 13インチという大口径の有感領域(光電面)を持つ光検出器を優れた時間特性で動作させるために、光電面からAvalanche Diode(AD)へ効率よく一様に最短距離で光電子を集めるための電場設計

高い時間分解能を得るには、注意深い有効光電面の設定や電場の設計による、光電子の光電面からADまでの到達時間のばらつきの最小化が不可欠です。

2. 大面積, 低静電容量, 高ゲインのADの開発

ADの面積が大きいほど、光電子の収集の効率が上がります。ただし、面積を大きくすると、静電容量の増加からノイズを増やすことになりかねません。したがって、面積を増やすと同時に空乏層の厚さも増やして、静電容量の増加を防ぐ必要があります。低静電容量型大面積ADの作製は本開発のカギです。

3. 高耐電圧の確立

大口径HAPDを水中で使用するには、光電面をグラウンドADを+20kVの高電圧とする必要があります。まず、20kVの高電圧面とグラウンドの間に、安定した絶縁方法を確立しないといけません。さらに、アンプの入力はグラウンドですから、ADとアンプ入力部は高耐圧のコンデンサーで分離する必要があります。

4. ADの真空中への封じ込めと光電面の活性化

光電面は真空が破れると酸化し、光電面としての機能を失います。したがって、ADをガラスバルブの中に入れ、真空に引き、その後光電面の活性化を行う必要があります。このとき、アルカリ金属蒸着などによるADへの障害を防ぐ必要があります。

5. ガラスバルブの高耐水圧化

スーパーカミオカンデの事故からも想像されるように、メガトン級の水チェレンコフ検出器用のHAPDについては、ガラスバルブの高耐水圧設計に十分配慮する必要があります。構造解析とともに、試作品による耐圧試験を繰り返す必要があります。

6. バックエンド回路の開発

HAPDのゲインは光電子増倍管の $1/100$ と低く、HAPD用の読み出し回路の開発が必要です。低いゲインをカバーし、かつ、HAPDの特徴である高波高分解能、高時間分解能を満たすような読み出し回路の開発を行わなくてはなりません。

以上述べた技術的研究項目を一つ一つ解決し、HAPDの開発は進められました。

4. 大口径 HAPD の性能

前章にまとめた開発項目を解決し、開発された HAPD を図 2 に示します。以下に、確認された HAPD の性能について述べます。



図 2 13 インチ HAPD 試作機

4.1 打ち込みゲインとアバランシェゲイン

HAPD で単一光子から効率よく信号を測定するためには、全体のゲインが 10^5 は必要です。全体のゲインを決める打ち込みゲインとアバランシェゲインをそれぞれ測定しました。

図 3 に印加電圧の変化に対する打ち込みゲインの測定結果を示します。印加電圧 3.5kV までは光電子が AD 表面の不感層を通過することができず、有感領域に到達しません。光電子がいったんこの不感層を通過すると、印加電圧に比例した打ち込みゲインが得られ、印加電圧 20kV で約 4,500 の打ち込みゲインが得られています。

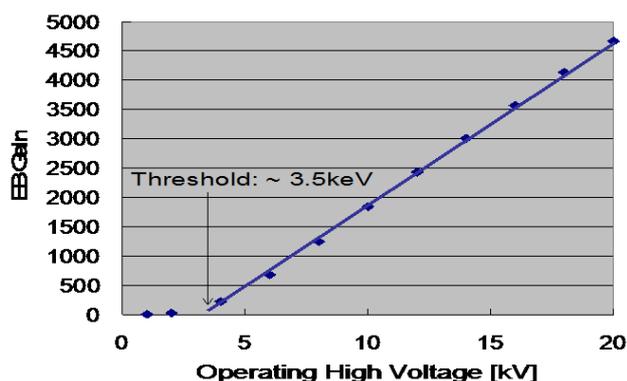


図 3 印加電圧の変化に対する打ち込みゲイン

次に、図 4 に AD のバイアス電圧に対するアバランシェゲインとリーク電流の測定結果を示します。図から、バイアス電圧 390V のときにアバランシェゲイン約 50 が得られているのがわかります。

これらの結果から、全ゲインとして 2×10^5 が得られていることがわかります。このことより、開発された HAPD は単一光子を十分検出できるゲインを持っていることがわか

ります。図 5 に HAPD の信号を示します。時間幅が約 10ns の高速な信号です。

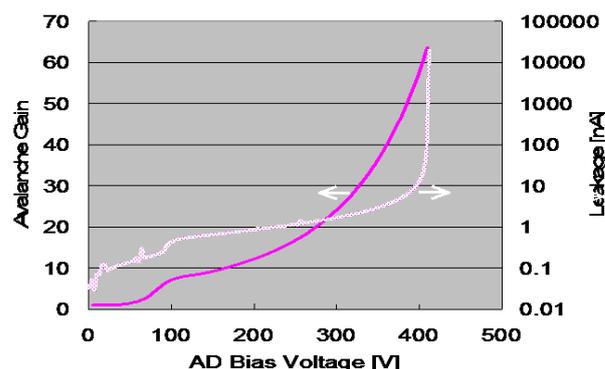


図 4 バイアス電圧に対するアバランシェゲイン(濃色線, 左目盛)とリーク電流(淡色線, 右目盛)

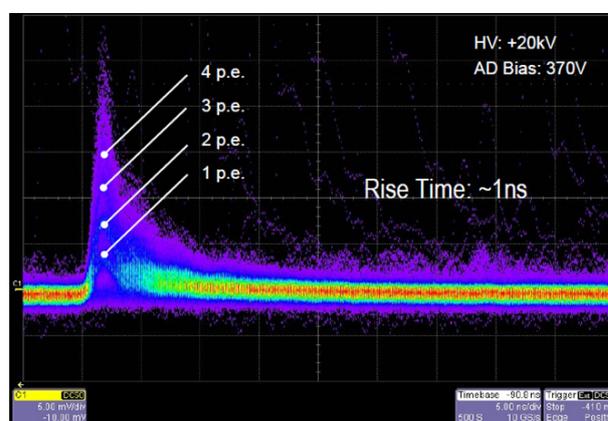


図 5 HAPD 信号波形

4.2 単一光電子での HAPD の性能

前節より、開発された HAPD は単一光子を測定するのに十分なゲインを持っていることがわかりました。そこで、物理測定を行う上で興味のある、単一光子での HAPD の性能(波高分解能, 時間分解能)を測定しました。

図 6 に単一光子での波高分布を示します。信号がノイズからきれいに分離されているのがわかります。単一光子での波高分解能として 24% が測定されました。

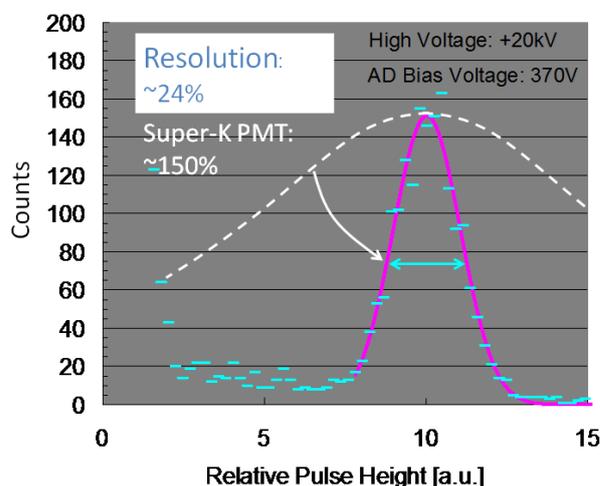


図 6 単一光子事象での HAPD の波高分布

次に、単一光子での時間分解能を測定しました。測定結果を図7に示します。得られた時間分解能は190ps(σ)となりました。

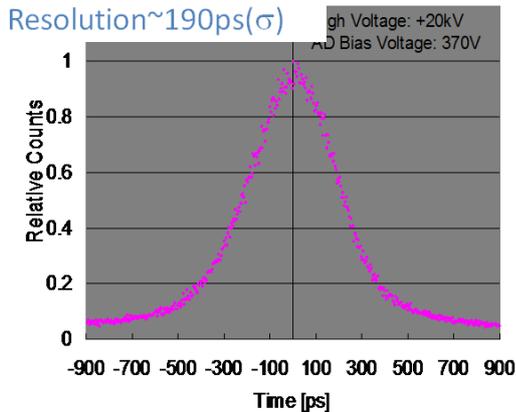


図7 単一光子事象での HAPD の時間分解能

以上の HAPD の単一光子での性能はいずれも光電子増倍管の技術の延長からは得ることのできない優れた性能です。

4.3 HAPD 性能の光電面依存性

開発項目で述べたように、有効光電面径が13インチと大きいので、HAPDは光が光電面上のどの位置に入射しても一様な性能を持たないといけません。われわれは、開発された HAPD について、ゲインの一様性と光が入射してから到達するまでの時間(Cathode Transit Time Difference: CTTD)について測定しました。まず、ゲインについて測定しました。ゲインのばらつきは光電面全体にわたって2%以内と、単一光電子の波高分解能24%に比べて、十分小さいことがわかりました。また、CTTDも測定しました。図8に測定結果を示します。光電面の中心と、中心から70度傾いた位置に光を入射したときの CTTD が一番大きく、約500psです。これは目標としていた1nsの時間分解能より十分小さい値です。

HAPDの収集効率をシミュレーションにより求めました。結果、印加電圧15kV以上で収集効率が95%以上となることがわかりました。大口径の光電子増倍管はダイノード

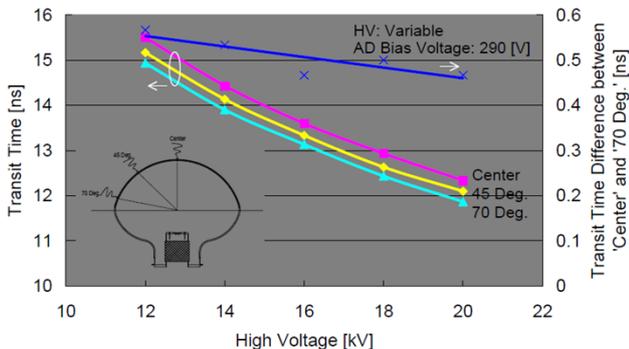


図8 印加電圧とレーザー光0度入射、45度入射、70度入射での光電子のカソード移動時間(下3本、左目盛)、カソード移動時間の違い(CTTD)の最大値(上1本、右目盛)

チェーンがアコーディオン型をしていることから、光電面上の ϕ 方向に収集効率の非一様性が見られます。このため、大口径の光電子増倍管での収集効率は70%となります。HAPDは、その動作原理より、光電面上の ϕ 方向でも収集効率は一樣になります。このために、量子効率は光電子増倍管と同じでも、収集効率では約30%のアドバンテージがあります。

4.4 長時間安定性

HAPDは、半導体電子打ち込み型で動作するために、長時間にわたり信号を検出したときに、ゲインが劣化する可能性があります。HAPDの長時間安定性を調べました。HAPDに900時間連続して光を入射し、出力信号に変化がないかどうかを測定しました。入射光量は900時間でT2K実験の2KM測定器が20年間に測定する光量と同じになるように設定しました。結果は図9に示した通りで、HAPDにゲインの劣化は見られませんでした。

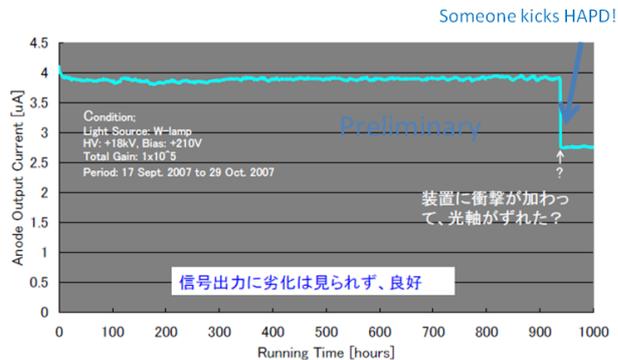


図9 HAPDの長時間安定性試験

4.4 耐水圧

水チェレンコフ検出器で使用するため、HAPDは高い耐水圧性を持たなくてはなりません。構造解析により高耐水圧性を持つように開発されたガラスバルブを専用の機器にとりつけ、耐高水圧試験を行いました(図10)。結果は、ガラスバルブが0.65MPa以上の耐水圧を持つことが確認されました。

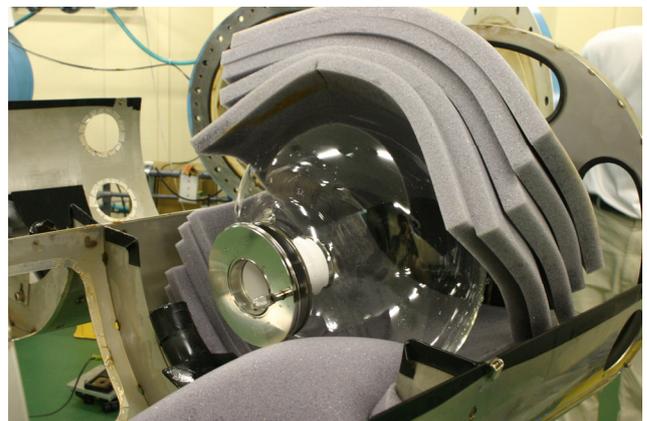


図10 HAPD耐水圧試験

4.6 光電子増倍管との性能の比較

表 1 に 13 インチの HAPD と光電子増倍管の性能, 20 インチ光電子増倍管の性能をまとめて示します。HAPD は単一光子の信号での時間分解能において約 7 倍, 波高分解能で約 3 倍の性能を示しています。

表 1 HAPD と光電子増倍管の性能比較

パラメータ	13inchHAPD	13inchPMT	20inchPMT
時間分解能 (1P.E.)	190 ps	1400 ps	2300 ps
波高分解能 (1P.E.)	24%	70%	150%
ダイナミックレンジ	3000 P.E.	1000 P.E.	1000 P.E.
量子効率	20%	20%	20%
収集効率	97%	70%	70%
消費電力	≪ 700 mW	700 mW	700 mW
ゲイン	10^5	10^7	10^7

以上のように HAPD は, 光電子増倍管と比べて優れた性能を持っていますが, ゲインは 1/100 です。このために, HAPD 用の読み出し回路の開発が不可欠であり, 次章で議論することになります。

5. HAPD 用読み出し回路の開発

前章で示したように, HAPD は光電子増倍管と比べて非常に優れた性能を持っていますが, ゲインは 1/100 と低いため, HAPD 用の読み出し回路の開発が必要です。HAPD の利点は高時間分解能と高波高分解能が同時に両立することであり, 後段の読み出し回路も両立可能でなくてはなりません。この実現手法として, 信号波形を高速でサンプリングしデジタル信号処理により信号成分を抽出する方法を採用しました。以下に読み出し回路について説明します。

5.1 読み出し回路概要

前述したように, われわれは HAPD 用の読み出し回路として, 高速波形サンプリングとデジタル信号処理を行う方法を採用しました[4]。この方法はノイズの中から信号成分を効率的に抽出することができます。このため, HAPD のゲインが光電子増倍管の 1/100 であることを十分カバーすることが期待されています。図 11 に HAPD 用読み出し回路の概略を示します。読み出し回路はプリアンプ, 高速波形サンプルを行うアナログ部とデジタル信号処理とデータ出力用イーサネットをコントロールするデジタル部からなります。以下, 各部分について説明します。

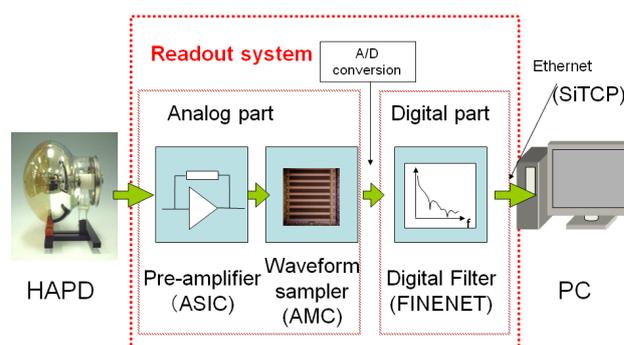


図 11 HAPD 読み出し回路概略

5.2 プリアンプ

プリアンプは HAPD で検出された信号(電荷量)を増幅し電圧に変換する役目を持っています。HAPD のゲインが光電子増倍管の 1/100 であるために, プリアンプは低ノイズでなくてはなりません。プリアンプは, 立ち上がり数ナノ秒という HAPD からの速いパルスについて, 数千電子程度のノイズを目指します。開発には, 大量生産による IC 部品の低価格化を行うために, ASIC を用いました。開発されたプリアンプのイントリンジックノイズは 検出器容量 40 pF で, 3400 ENC となりました。このことにより, 理想的な環境では, このプリアンプを使用した時の HAPD の信号の S/N は, HAPD 自体のノイズが無視できるとすれば, HAPD のゲインが 10^5 なので, $S/N=10^5/3400 \cong 30$ となり, 十分単一光子を検出できます。

5.3 アナログメモリーセル(AMC)

この節では高速サンプリングを実現するアナログメモリーセル(AMC)について説明します。HAPD の信号は高速であるので, サンプリング周波数 GHz の高速波形サンプリングが必要です。サンプリング周波数 GHz の Flash ADC は消費電力が 1 チャンネル当たり数 W と大きく, 大量の HAPD を使用する実験では問題となることが予想されます。そこで, われわれは, 高速波形サンプリングが可能で低消費電力を実現できる IC, AMC を新たに開発しました。AMC は, 図 12 に示すように, 信号をアナログパイプライン(Switched Capacitor Array[5]を使ったアナログメモリー)に蓄えます。サンプリング間隔は各パイプライン間の遅延バッファにより制御され, 数 GHz の波形サンプリングが可能です。蓄えられた信号はゆっくり読み出され(1~10 MHz), ADC によりデジタル信号に変換します。AMC を使用する利点としては, (1) 波形サンプリングに高速のクロックを使用していないので, 消費電力が小さい, (2) 分解能が高い, (3) 高速クロックがいらないので設計が容易, といったことがあります。

開発された AMC でサンプリング点でのノイズレベルを測定したところ, 0.7 mV を達成していました。入力電圧に

対する出力電圧の直線性の測定から 2V の入力ダイナミックレンジがあることが確認され、AMC は 11bits の分解能を持つことがわかりました。サンプリング間隔の時間も測定され、約 800ps と目標としていた GHz のサンプリングを達成しています。AMC の消費電力は 72mW ，AMC の出力をデジタル化するための ADC は 160mW と測定されました。AMC と既存の 1GHz の Flash ADC との比較を表 2 に示します。AMC は既存のサンプリング周波数 1GHz の Flash ADC に比べて低消費電力、高分解能であることがわかります。現在、さらなる AMC の性能の向上を目指して開発が進められています。

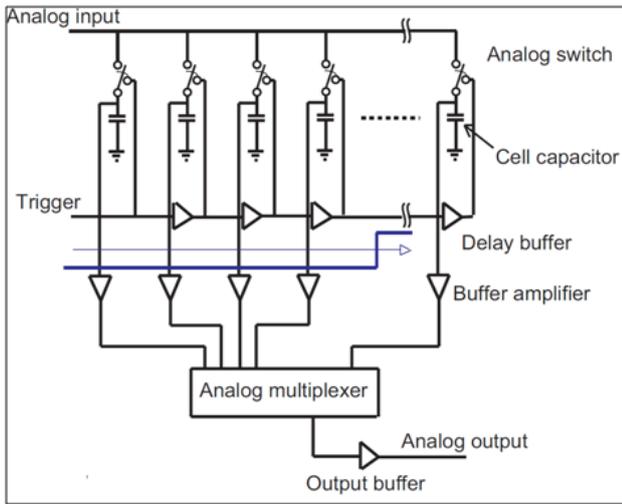


図 12 AMC 動作概略

表 2 AMC と既存 Flash ADC の性能比較

パラメータ	AMC (+slow ADC)	Flash ADC (ADC081000)
サンプリング周期	~ 1GHz	~ 1GHz
電源電圧	+5 V	+1.9 V
チャンネル当たりの消費電力	72 mW (+160 mW ADC)	1.45 W
分解能	> 10 bits	8 bits

5.4 デジタル回路

デジタル回路部は、(1)高速波形サンプリングされた信号にデジタル信号処理を行い、信号成分を抽出する、(2)抽出された信号成分の波高情報と時間情報を、イーサネットを使用して出力する、という二つの機能が求められます。この機能を持った読み出し回路(FINENET)を作成しました。FINENETはVME 6Uの大きさで、デジタル信号処理とイーサネットコントロール専用それぞれFPGAを計2個搭載しています。図 13 に示すように、高速波形サンプリングを行う AMC を搭載した読み出し基板を FINENET の上に搭載する仕様となっています。イーサネット出力には SiTCP 技術[6,7,8,9]を使用しました。

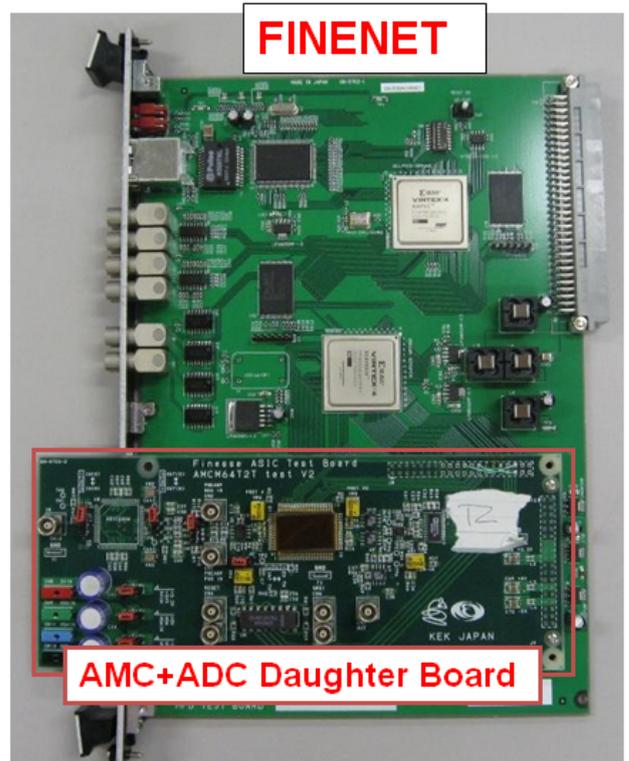


図 13 HAPD 用読み出し回路(デジタル信号処理用 FINENET とアナログ信号処理用読み出し基板)

5.5 組み込み試験

HAPD に開発された読み出し回路を接続し、組み込み試験を行いました(図 14)。結果は図 15 に示すように、大口径光検出器でありながら、6 光電子までの波高分離が測定されました。時間分解能は単一光電子信号で 200ps を得ました。これらはいずれも目標としていた性能を満足しています。

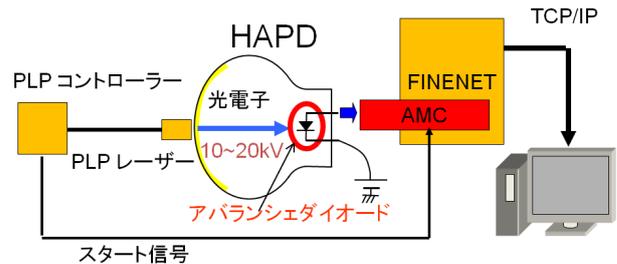


図 14 HAPD システムテスト設定

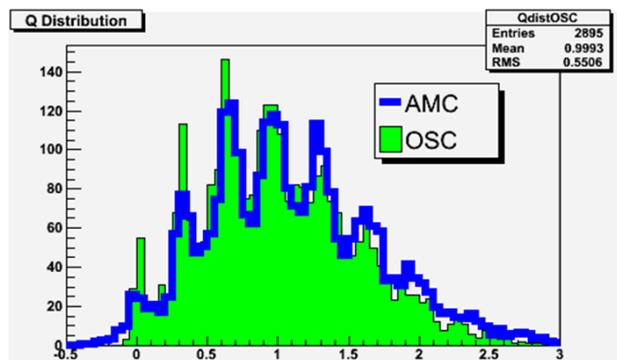


図 15 HAPD システムテスト波高分布(実線：HAPD 用読み出し回路、ヒストグラム：比較用読み出し回路)

6. まとめと今後

われわれは次世代大口径光検出器 HAPD とその読み出し回路を開発しました。数々の問題点を解決し、大口径 HAPD の開発に成功しました。開発された HAPD は単一光電子で、波高分解能 24% , 時間分解能 200ps(σ) を達成しています。目標としていた有効光電面径 13 インチ以上、ゲイン 10 万以上、時間分解能 1 ナノ秒以下、高い単一光子検出効率を達成しました。HAPD 用読み出し回路の開発も行い、高速波形サンプリングとデジタル信号処理を行う読み出し回路を開発しました。特に、新しい IC、AMC を開発し、高速波形サンプリング(GHz)と低消費電力(72mW), 高分解能(11bits)を実現していることを確認しました。HAPD と開発された読み出し回路の接続試験は、目標としていた性能を十分満足しました。

今までの開発により、HAPD の原理の検証、性能面での光電子増倍管に対する優位性が証明されました。今後は、製品化のための開発が中心となります。その一つに、デジタル HAPD があります。デジタル HAPD は、HAPD に電源ケーブルとネットワークケーブルを接続するだけで、デジタル信号が簡単に得られる光検出器です(図 16)。読み出し回路、高圧電源を HAPD の後ろに搭載するため、小型化の開発を進めています。また、8 インチ径の HAPD の開発も進めています。これはメガトン級水チェレンコフ検出器以外のニュートリノ実験での、大口径 HAPD の使用を目指しています。現在、2012 年春に HAPD を製品化する予定です。

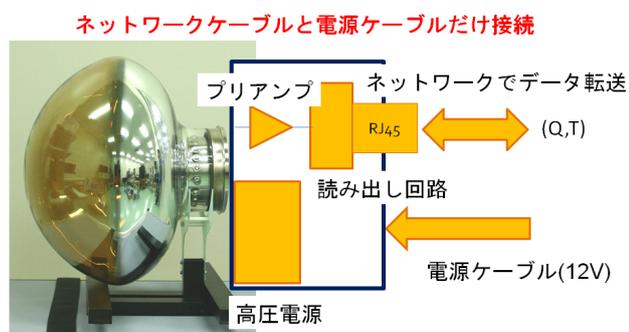


図 16 デジタル HAPD 概念図

参考文献

- [1] K. Kawai, Doctoral Thesis, The Graduate University for Advanced Studies, June 2007.
- [2] Y. Kawai *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **579**, 42 (2007).
- [3] H. Nakayama *et al.*, Nucl. Instrum. Meth., A **567**, 172 (2006).
- [4] T. Abe *et al.*, IEEE Nuclear Science Symposium 2007 Conference Record, pp.2373-2376.
- [5] S. A. Kleinfelder, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 37, no. 3, June 1990.
- [6] T. Uchida, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 37, no. 3, June 1990.
- [7] T. Uchida and M. Tanaka, IEEE Nuclear Science Symposium 2006 Conference Record, pp.1411-1414.
- [8] T. Uchida, IEEE Nuclear Science Symposium 2007 Conference Record, pp. 309-315.
- [9] T. Uchida, IEEE Transactions on Nuclear Science, **55**, pp.1631-1637 (2008).