■ 研究紹介

ILCの検出器

東北大学理学研究科物理学専攻

石川明正

akimasa@epx.phys.tohoku.ac.jp

信州大学理学部

小寺克茂

cottera@azusa.shinshu-u.ac.jp

九州大学理学研究院物理学部門

末原 大幹,吉岡 瑞樹

suehara@phys.kyushu-u.ac.jp, yoshioka@phys.kyushu-u.ac.jp

Université Libre de Bruxelles - IIHE

与那嶺亮

ryo.yonamine@ulb.ac.be

2014年(平成26年)5月22日

1 はじめに

国際リニアコライダー計画 (International Linear Collider: ILC)の検出器詳細設計書 (Detailed Baseline Document: DBD)[1] が加速器の技術設計書とともに 2012 年末に完成し、2013年6月に公開された。ILCの物理 については前号の高エネルギーニュースに研究紹介記事 [2] が掲載されているので、本稿では ILC の検出器につ いて解説する。2004年にリニアコライダー加速器の基 本技術が超伝導加速空洞に決定されてから, ILC 計画は 急速に進展してきた。当時、検出器コンセプトは4つあ り,2006年には検出器骨子書,2007年には検出器コン セプト報告書が各検出器コンセプト検討チームにより作 成された。現在は ILD[3], SiD という 2 つの検出器コン セプトが提案されており, push-pull 方式で一つの衝突 点を共有する予定である。なお, ILD は 2007 年当時ア ジア主導の GLD と欧州主導の LDC が統合したもので ある。SiD は一貫して北米主導のもとで検討を行ってい る。ILCにおける検出器は、加速器の性能を最大限に発 揮するために従来の電子・陽電子コライダーで用いられ ていた検出器性能を大きく凌ぐ必要がある:

- W と Z の不変質量を分離できるだけの高いジェットエネルギー分解能: σ/E_{jet} ≤ 30%/√E_{jet}(GeV)
- ジェットのフレーバーを高い効率で同定するための 優れた impact parameter 分解能:

 $\sigma \leq 5 \oplus 10/p\beta \sin^{3/2}\theta \ (\mu m)$

・特にヒッグス反跳質量測定のために必要な荷電粒 子に対する高い運動量分解能: $\sigma/p_t^2 \leq 5 \times 10^{-5}$ (GeV/c)⁻¹

ILD, SiD ともに上記性能を満たすために先進的なテ クノロジーの高精細センサーを搭載した検出器となっ ている。日本グループはおもに ILD 検出器コンセプト に関する開発研究を行っているので、以下では ILD 検 出器についての詳細を述べる。ILD 検出器は円筒形の 汎用検出器になっている。図1に ILD 検出器の完成イ メージ図を示す。ILD 検出器の主要3検出器は、崩壊点 検出器(VTX)として高精細かつ低物質量のピクセル検 出器,飛跡検出器として高分解能かつ低物質量の Time Projection Chamber (TPC),高精細センサーを備えた サンプリングカロリメータ [電磁カロリメータ (ECAL) とハドロンカロリメータ (HCAL)] が検討されている。 図2からこれら主要検出器の大まかな大きさと配置を 把握していただきたい。HCAL は ECAL の外側から 1mの厚みで存在し、その外側に 3.5 T ソレノイド磁 石、ミューオン検出器兼リターンヨークがつづく。高い ジェットエネルギー分解能を達成するため、事象再構成 には Particle Flow Algorithm (PFA)[4] と呼ばれる手 法を用いる。これは、ジェット中の各粒子のエネルギー を,荷電粒子は飛跡検出器で,中性粒子はカロリメータ で「重複なく」測定するという方法であり、これにより



図 1: ILD 検出器の完成イメージ図。



図 2: (color online) モンテカルロシミュレーションによるイ ベントディスプレイ。

ジェットエネルギーの大幅な向上が期待される。図2に はモンテカルロシミュレーションによるイベントが表示 されている。荷電粒子はPFAによりカロリメータ中の シャワーと飛跡検出器のトラックが対応づけられ(図中 の各色に対応),この場合はトラックの曲率からエネル ギーが測定される。トラックが対応しないシャワーのエ ネルギーはカロリメータで測定される。PFAにおいて 重要なことはジェット中の各粒子の同定・分離であり, このために3次元的に高精細な検出器が必須となる。以 下の各節では崩壊点検出器,飛跡検出器,カロリメータ の主要3検出器の詳細について,日本グループの活動を 交えて述べる。なお,これらの組み合わせによる ILD 検出器の性能が先に述べた条件を達成していることはシ ミュレーションで確認されている。

2 崩壊点検出器

2.1 崩壊点検出器の概要

ILC 崩壊点検出器の主な目的はbクォーク、cクォーク を識別し、軽い u,d,s クォークとグルーオンから分離す ることである。bハドロン, cハドロンはそれぞれ 1.5 ps, 0.4 ps 程度の寿命を持つため、生成点 (一次反応点) から 数百 μm から数 mm 飛んだ後に崩壊する。また、崩壊 $ab \rightarrow c \rightarrow s$ のように起こるため、 $b \rho \pi - \rho \tilde{\nu} \pi \gamma h$ は一次反応点,二次崩壊点 $(b \rightarrow c)$,三次崩壊点 $(c \rightarrow s)$ の3つの崩壊点を持ち、 c クォークジェットは二つの崩 壊点, u,d,s クォークジェットとグルーオンジェットは一 つの崩壊点しか持たない。つまり、ジェット中の荷電粒 子の飛跡を精密に測定・外挿し、一次・二次・三次崩壊 点を検出できればクォーク識別が可能となる。特筆すべ きは反応点情報を用いた高品質な c クォーク識別はク リーンな環境のレプトンコライダーでのみ可能であり, c クォークの湯川結合の測定を可能にする。クォーク識 別をするために ILC 崩壊点検出器に要求される主な性 能は①位置分解能が3μm以下,②多重クーロン散乱を 抑えるために1層あたりの物質量が0.15 X₀以下,③ 最内層の半径が1.6 cm, ④占有率が数%以下である。他 の実験と比較し厳しい要求であるが, ILC 崩壊点検出器 の放射線環境は1 kGy/year, $10^{11}n_{eq}/cm^2/year$ とハド ロンコライダーと比較しクリーンであるため、放射線耐 性や占有率をそれほど気にせずに検出器の分解能を上げ ることを開発項目にできる。崩壊点検出器の構造を図3 に示す。一見3層のように見えるが、2層を一組とした ダブレットが3層あるため、計6層からなる。最内層の 半径は 1.6 cm であり $|\cos \theta| < 0.96$ をカバーし、最外 層の半径は 6.0 cm であり $|\cos \theta| < 0.90 をカバーする。$



図 3: 崩壊点検出器の構造。

2.2 崩壊点検出器のセンサーテクノロジー

上記の要求を満たすべくピクセル崩壊点検出器の開 発が世界中で行われている。代表的なものはフランス の MIMOSA/AROM (CMOS センサー),ドイツが主の DEPleted Field Effect Transistor (DEPFET), アメリ カの Chronopixel (CMOS センサー),そして日本の Fine Pixel CCD (FPCCD) である。すべてのテクノロジーで 1layer の厚さは 50 µm 程度と低物質量である。ILC は 1312(または 2625) の電子・陽電子バンチが 1 ms のトレ インを形成し、トレインが5Hzで衝突するビーム構造で ある。トレイン間の199 ms はビーム衝突が起こらない。 このようなビーム構造で占有率を十分小さい値に抑える ために2つの読み出し方法が考えだされた。1つ目は比 較的大きなピクセルを用いるが、ビーム衝突の1msの間 に10回から100回程度データを読み出して占有率を下 げる方法で, MIMOSA/AROM や DEPFET が採用し ている。2つ目は非常に小さなピクセルを用い、ビーム 衝突中はヒットを格納しビームが衝突しない199 ms に データを転送する方法で、ChronopixelやFPCCD が採 用している。前者はトレイン間に読み出し回路の電源を オフにする Power pulsing を用い消費電力を下げること が可能であり、後者は高エネルギー電子・陽電子ビーム 起因の EMI ノイズが読み出し中に乗らないという長所 がある。MIMOSA/AROM は Brookheaven の STAR 実 験および CERN の ALICE 実験, DEPFET は KEK の Belle II 実験に採用され、また CCD は CERN の NA32 実験や SLAC の SLD 実験 [5] で活躍した。

2.3 Fine Pixel CCD (FPCCD)

FPCCD はピクセルサイズを 5 μ m 角 (3~6laver は 10 µm 角) と非常に細かくすることで、チャンネル数を 増やし占有率を低く抑え, さらに高運動量領域でのイン パクトパラメータ分解能1 µm 以下を達成する。シミュ レーションによると $\sqrt{s} = 500$ GeV での最内層の占有率 は1.2%と十分小さい。総チャンネル数は約109と膨大 である。有感層の厚さは15 µm で全空乏化されており 電荷の拡散を防ぐ。前述の SLD 実験に用いられた CCD は 20 µm 角であるので、ピクセルサイズは 16 倍も高 精細である。現在までに 6 μm 角の FPCCD が開発さ れており, 8 μm 角まで動作確認をしている。図4は小 型プロトタイプチップで4つの領域にわかれており、上 から12,9.6,8,6 µm 角のピクセルが搭載されている。 CCD であるので pixel ごとに読み出し回路は搭載されて おらず, CCD の横にのみ読み出し回路が搭載されてお り,一つの読み出しチャンネルで 20000(横) × 128(縦) ピクセルを読み出す。トレイン中に放射線による電荷を 保持し、トレイン間に電荷をバケツリレーのように転送 していくことにより読み出す。そのため高速な ADC が 必要となる。電荷の転送はピクセル内のポテンシャル井 戸を電圧で制御し行う。放射線により 0.17eV と 0.42eV にトラップレベルが発生し電荷転送効率が悪化すること がわかっているため、−40 ℃まで冷やし電荷転送効率の 悪化を防ぐ。低物質量のクライオスタットは重要な開発 項目である。また、センサーの厚みは 50 µm と薄いた め、低物質量で安定な支持構造の開発も行わなくてはな らない。



図 4: FPCCD 小型プロトタイプチップ。

2.4 FPCCD 読み出し ASIC

読み出し ASIC に要求される性能は①データ読み出 し速度が 10 Mpixel/s 以上, ②ノイズレベル 30 電子以 下, ③消費電力 6 mW/ch である。消費電力を抑えるた めに電荷再配分型の逐次比較 ADC を用い,また読み出 し速度を達成するために 5 Mpixel/s の ADC を 2 つ並 列に用いた。ノイズを抑えるためにローパスフィルター と相関二重サンプリング回路を実装した。現在までに 3 回のチップ試作を行なっており,三次試作は TSMC 社 の 0.25 μm プロセスを用いてすべての問題点をクリア した。

2.5 研究体制

FPCCD は KEK, JAXA, 信州大学, 東北大学が開 発を行なっている。日本の研究機関しか参加していない が, メンバーにはインド, スペイン, ドイツ (過去にはベ ネズエラ)からの参加者がおり, ILC が国際的であるこ とを実感する。今後はビームテストによる電荷の拡散・ 位置分解能・検出効率の測定, 6 μ m 角 CCD の動作検 証, 5 μ m 角 CCD の開発を行ない, ILC 建設開始に向 けてセンサー技術の完成を目指す。

3 中央飛跡検出器

3.1 TPCの概要

ILD-TPC ではアルゴンを主体とする混合ガスを用い る。荷電粒子が通過すると、その飛跡に沿ってガスがイ オン化され、その際に生じる電子(以下,信号電子)を ビーム軸に沿った z 方向にドリフトさせ、エンドキャッ プ上(x,y 面)の検出器で読み出し、このx,y 面に投影さ れた飛跡を測定する。この情報と、ドリフト時間から得 られる z 情報とを合わせて飛跡の三次元再構成を行う。 TPC はこのドリフトの長さが特徴的であり、ILD-TPC の場合、およそ 2m にもなる。また、信号電子が微量 であるため、読み出しの際にはガス増幅(高電場をかけ たガス中での信号増幅)を必要とする。TPC の主な利 点は、

- バレル部にフロントエンド読み出し回路(以下,FE 回路)が不要で、物質量を大幅に低減できる。ガス 検出器の中でも、構造物が少なく物質量が小さい。
- 2. 一飛跡当たりの測定点が大きい (200 点以上)。堅牢 な飛跡再構成と dE/dx 測定による粒子識別を実現。
- 3. 信号収集のために TPC 内かける電場 (以下,ドリ フト電場)と,運動量測定のための磁場がほぼ平行。 ドリフト中の信号電子の拡散が抑えられ,長距離ド リフトでも高位置分解能 (100 µm 以下) が達成可 能。これは, ILD の運動量分解能目標を満たす。

一方で、長距離ドリフトさせると、電場や磁場の歪み の影響を受けやすいという欠点もある。たとえば電場の 歪みは、TPCの構造的な精度だけでなく、イオンバッ クフロー(以下、イオンBF)と呼ばれる、ガス増幅過程 で生じる無数のイオンがドリフト領域に逆流することに よっても生じるので、しっかりとした対策が必要になる。

3.2 キーテクノロジー

3.2.1 MPGD

ワイヤーによるガス増幅機構 (MWPC) は、これまで の素粒子実験において優れた実績をもつ。しかしなが ら、ILD-TPC で MWPC 読み出しを用いると、3.5 T という高磁場がかけられるため、ローレンツカにより信 号電子群が広げられる影響が大きく、位置分解能と飛跡 分離能を致命的に悪化させる。一方で、微細構造をもっ たガス増幅機構 (MPGD)[6] を用いると、ローレンツカ の影響を小さく抑えることができ、さらには、頑丈なサ ポートフレームが不要となるので、物質量・不感領域を 減らすことができる。MPGD の中でも、ILD-TPC で は、GEM や Micromegas に 1×6 mm² 程度の大きさの



図 5: ILD-TPC 用に試作されたワイヤーゲート (a) と Scienergy 製 GEM 型ゲート全体 (b)・拡大写真 (c), (d) は Fujikura 製試作 GEM 型ゲート拡大写真。

読み出し電極を組み合わせる方法が有力である。また, アップグレードを見据えたピクセル読み出しの研究開発 も行われている。

3.2.2 ゲート機構

イオンBFを防ぐために、ビームに合わせて電子やイ オンの通過・遮蔽をコントロールする仕組みをゲートと 呼ぶ。すでにワイヤーを用いたゲート機構が確立され ているが、ワイヤーを張るための頑丈なフレームが必要 で、不感領域が大きい。そのため、GEMの構造をもっ たゲート機構に強く期待が寄せられている。このGEM 型ゲートの開発では、信号電子の透過効率を最大化す ることが課題である。図5は、ILD-TPC用の試作ワイ ヤーゲートとGEM 型ゲートである。

3.3 研究体制

3.3.1 LCTPC コラボレーション

大型試験機 (以下,LP1)の制作と,ビーム試験施設 (DESY)の整備が国際協力のもとで進められた [7]。LP1 の制作を通して,実機建設に向けた技術の問題点を洗い 出すこと,実機に即した測定環境を構築することが目的 である。読み出し検出器 (MPGD+読み出し電極) は一 式のモジュールとなっており,LP1では,様々な試験モ ジュールに組み替えることができる (図 6)。隣り合うモ ジュール境界に生じる電場の歪みなど,より実機に即し た性能評価が可能である。モジュールに関して,日本を 含むアジアグループ,ドイツの DESY グループや Bonn 大学,フランスの Saclay グループなどがそれぞれ異なる 設計思想に基づき,試験モジュールを制作し,性能評価 を行っている。その他,フィールドケージ開発は DESY



図 6: LP1 の内部 (左)。奥に7つのダミーモジュール,側面 にはドリフト電場を形成するストリップが並ぶ。実際のビー ムテストのイベントディスプレイ (右)。



図 7: 両脇のフレームがない GEM モジュール (左) と境界の 電場の歪みを調べるためのテストベンチ (右)。

グループ,軽量エンドプレート開発はアメリカの Cornell 大学,DAQ・FE 回路開発はスウェーデンの Lund 大学, CERN,日本が中心となって進めている。

3.3.2 日本グループの活動

これまでには、MPGD 読み出し TPC の位置分解能 公式の開発, TPC 性能のガス組成依存性に関する基礎 的研究, イオン BF による位置分解能への寄与の見積も り, GEM 型ゲートに関するシミュレーションとハード ウェア開発など, ILD-TPC 開発を支える基礎研究の中 心的役割を果たしている [8]。

日本グループが推進する検出器モジュールのコンセプ トは、隣合うモジュールの境界に生じる不感領域を最小 化することである (図 7)。このコンセプトの実現には、 信号透過率の高い GEM 型ゲートの開発が鍵となる。高 密度化した FE 回路の冷却も重要な課題であり、低消費 電力化のための Power pulsing や冷却構造の検討として シミュレーションを進めているほか、KEK 測定器開発 室の2相 CO₂ 冷却システムを活かし、実機に即した試 験ボードの作成、試験を行っている。そして、非一様磁 場中での飛跡再構成アルゴリズムなど、ソフトウェア開 発の面でも重要な活躍をしている。 4 カロリメータ

4.1 カロリメータの概要

カロリメータは PFA の性能を左右する最重要測定器 の一つであり、ILC のカロリメータは PFA の性能を最も 発揮できるよう設計されている。PFA において、ジェッ トエネルギー分解能は、カロリメータ自身のエネルギー 分解能に加え PFA によるジェット中の粒子分離能に左 右される (図 8)。粒子分離能を上げるにはカロリメータ の細分化が必要であり、そのため ILC のカロリメータ は横方向、縦方向とも微細に分割されたサンプリングカ ロリメータとなっている。



図 8: ILD 検出器による PFA を用いたジェットエネルギー分 解能 [4]。Perfect pattern recognition はカロリメータ自体の 分解能の寄与を示し, Quadrature difference は粒子のマッチ ング失敗に起因する成分を示す。

カロリメータは電磁シャワーを測定する ECAL と主 にハドロンシャワーを測定する HCAL およびビーム軸 方向をカバーする FCAL(本稿では触れない) に分かれ る。ECAL は高密度かつコンパクトな電磁シャワーに対 応するため微細分割が要求され, HCAL は長いハドロ ン相互作用長のため大きな体積が必要とされる。ECAL の基本設計は30層のタングステン吸収層とセンサー層 の組からなり、センサー層のオプションとして、1)シリ コンセンサー,2)シンチレータとピクセル化光子検出 器(PPD)[9],3)両者のハイブリッド構造が研究されて いる。吸収体は前方が薄く後方が厚い構造で、合計24 放射長となる。HCALは48層の鉄の吸収体(合計6ハ ドロン相互作用長) と1 cm または3 cm 角のセンサー より成る。センサーとしては、シンチレータと PPD に よるもの、ガス増幅によるもの (RPC, micromegas な ど) が提案されている。ILC カロリメータの開発, ビー ムテストは 17ヶ国 57 機関 (うち日本から4機関) が参 加する CALICE (Calorimeter for ILC) コラボレーショ ン [10] により推進されている。

4.2 シリコン ECAL (SiECAL)

SiECAL は正方形のセルを並べたシリコンパッドを敷 き詰めたものをセンサー層とするカロリメータで、現在 パッドの厚みは 325 μ m, セルサイズは 5 × 5 mm² が基 本デザインとなっている。30層の ECAL 全体では現在 の ILD の大きさでは約1億セルとなる。このような多 数のチャンネルを持つカロリメータは過去に例がなく, ILC 測定器の大きな特徴である。シリコンセルおよび パッドを図9に示す。シリコンパッドはn型半導体のバ ルク部分とp型(p+型)のセル部分およびインシュレー タ,メタル電極から成っている。セル部分とメタル電極 は多数のピンで接続されている。電極間には120 V (現 在の仕様)の逆バイアス電圧がかけられ、全空乏化状態 で動作する。セル間の不感領域は10 µm とセルサイズ の5mmに比べ十分小さい。センサーのリークカレン トや静電容量の電圧依存性は仕様とよく一致しており 均一な性能が得られている [11]。図 10 は SiECAL の層



図 9: 左) シリコンセルの模式図。右) 評価用 5.5 mm 角シリ コンパッド。

構造 (Slab) を示している。SiECAL では1層のタング ステン吸収体と2層のセンサー・エレクトロニクスを パッケージ化したものを Slab とし、タングステン構造 体(兼吸収体)の間に挟み込んで層構造を形成する。セン サーのピクセル側は PCB と導電性接着剤で接続されて いる。PCBにはSKIROCというASICが搭載されてい る。SKIROCはILCシリコンカロリメータのためにフ ランスの OMEGA グループ [12] で開発されているもの で、1枚のチップで64チャンネルの読み出しを行うこと ができる。SKIROCにはプリアンプ・高速シェーパー(ト リガー用)および2種類のゲインを持つ低速シェーパー, ADC および 15 チャンネルのアナログメモリが含まれて おり,1トレイン(1ms)間に各チップで発生したトリガ とそれに対する各セルの ADC 値を保存し、トレイン間 (199 ms) に読み出しを行う。電力は Power pulsing 機構 によりデータ収集・読み出しに必要な時間のみ供給され る。我々はILCと同様の層構造とエレクトロニクスを備 えた SiECAL technological prototype を製作し, 2012 年,13年に10パッド分のセンサーおよび回路を用いて DESY にてビームテストを行い (図 11), 電子のトラック や MIP 信号を収集することに成功した。power pulsing



図 10: SiECAL の層構造。

運転の実証も行った。今後 ASIC や PCB の改良を行った後,より大規模な試験を行う。SiECAL 自体の性能に



図 11: DESY にてビームテストが行われた SiECAL technological prototype。

ついては,2007年および2008年に30層を用いたビーム テストを CERN および Fermilab で行った。本ビームテ ストは1 cm×1 cmのセルサイズかつ変換・読み出し回 路は層の外にある physics prototype を用いて行われた。 本プロトタイプはパッド間のギャップが大きい構造だが, ギャップ部分を除いた性能としては、6-45GeVの電子ビー ムに対して $(16.53 \pm 0.14 \pm 0.50)$ %/ $\sqrt{E(\text{GeV})} + (1.07 \pm 0.50)$ %/ 0.07±0.10)%, (誤差の第一項は統計誤差, 第二項は系 統誤差,以下同じ), 4-20 GeV の陽電子ビームに対して $(16.67 \pm 0.30 \pm 0.44)\%/\sqrt{E(\text{GeV})} + (1.75 \pm 0.24 \pm 0.39)\%$ (preliminary)のエネルギー分解能が得られた [13]。ILD のための SiECAL の開発はフランスの LLR, LAL など, 九州大学、東京大学により進められている。日本グルー プは特にビームテストの解析やシミュレーションによる 最適化,シリコンセンサーの基礎特性解析で貢献してお り、今後 DAQ や構造の最適化についても研究を進めて いく予定である。

4.3 シンチレータ ECAL (ScECAL)

ScECAL では、 $45 \times 5 \text{ mm}^2$ の小さな短冊形プラステ ィックシンチレータを層毎に直行させて配置する。各シ ンチレータの発光を現行 2.45 × 1.9 × 0.85 mm³ のパッ ケージに封入された 1 × 1 mm 有感面積の PPD で読み 出す。利点は、1) チャンネル数を一桁減らすことができ る、2) プラスティックシンチレータの柔軟性が、温度変化、移動時の工学耐性に富んだ検出器の作成を可能とする、3)時間分解能が~1ns、4)磁場の影響を受けない、などである。図12左)に、一枚のタングステン吸収層を挟んだ2枚の検出層と、右)にシンチレータとPPDの一例を示す。全体の構造は SiECAL とほぼ同じである。



図 12: 左) ScECAL 二層。右) シンチレータと PPD。

4.3.1 基本性能

ScECALの特徴は、短冊形シンチレータを用いてその幅相当の正方分割度を引き出すことであり、strip splitting algorithm (SSA) と呼ばれる方法をすでに 確立している [14]。この方法をPFAアルゴリズムと併 用した場合の 100 GeV ジェットのエネルギー分解 能を短冊セル長の関数として図 13 左に示す。セル 幅を 5 mm 、厚さを 1 mmに固定してのシミュレー ション結果である。セル長を 60 mm に伸ばして も、ジェットエネルギー分解能はよく保たれている。 また、図 13 右は45×5 mm² や正方セルScECALの、 45 GeV - 250 GeV ジェットのエネルギー分解能であ り、SSA を使った場合の 45×5 mm² ScECALは、同 じセル面積を持つ 15 × 15 mm² の場合より明らか によく、5×5 mm² ScECALからの劣化はわずか 0.2% である。さらに、短冊層を一層毎に10 × 10 mm²の



図 13: SSA を使った場合と使っていない場合のジェットエネ ルギー分解能のシンチレータ長さ依存性, 左) と,各種シンチ レータ形状によるジェットのエネルギー分解能,右). alt_{10} は 一層おきに $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 正方タイル層に置き換えたモデル。

正方セルに置き換えた場合,ジェットエネルギー分 解能は $5 \times 5 \text{ mm}^2 \text{ScECAL}$ の場合とほとんど遜色が なくなる。単粒子に対するエネルギー分解能につい ては $180 \times 180 \text{ mm}^2$, 30 層,合計 2160 の $45 \times 10 \times$ 3 mm セル各々を PPD (1 mm² に1600 ピクセル) で読み出すプロトタイプを作成し, Fermilab で2-32 GeVの 電子ビームに対する性能試験を行った。統 計項が (12.8±0.1(stat.)±0.4(syst.))/ $\sqrt{E(\text{GeV})}$,定数 項が (1.0±0.1(stat.)^{+0.5}_{-1.0}(syst.))% であり,期待通り の性能を示した。また,直線性もよく,直線フィットか らの最大のずれは 1.6±0.7%である [15]。

4.3.2 ILD への実装に向けたプロトタイプ

センサーの読み出しからデジタル化までの機能を一 ボードにおさめて層間に埋め込む設計は、ScECALに とっても必須である。2013年にはこのために開発した 基板2層のプロトタイプについてビームテストを行っ た。図14左)は一層の基板と、基板をコントロールす るインターフェース群の写真である。180×180mm²の この基板には4個のASIC (SPIROC2, Omega)が搭載 され、それぞれのASIC は 36 チャンネルからの信号を 増幅し、ディジタル化して、インターフェースに送り出 す。この基板の裏に並ぶ144のシンチレータは各々が 反射フィルムで覆われており、それによって適度な光量 と光量の位置一様性、光クロストークの抑制を保ってい る。図14右は3GeVの電子ビームに対するSSAによ る5×5mm²細分割の様子である。



図 14: 4 つの ASIC を搭載した基板,左)と, 5×5mm²分 割された 3 GeV 電子シャワー断面のエネルギー分布,右)。

4.3.3 開発とその展望

ScECAL の開発には、信州大学、東京大学、筑波 大学、日本歯科大学、韓国から慶北大学が参加してい る.現在のPPDは各層に垂直配置され、その厚みが幅 ~0.9mmのデッドスペースをつくる。これをなくすた めに、PPDをシンチレータの下面に装着するデザイン を最近考案し、実験室ではその性能を確認した。2012 年、浜松ホトニクス株式会社は1×1mm²に10,000 ピ クセルを持つPPDを開発し、PPD 特有の飽和現象を解 決に近づけた。今後の一年間はこのような最近の発展を 含む詳細なデザインの最適化を行い、その後マスプロダ クションの研究をより本格化する。

4.4 ILD のハドロンカロリメータ

ILD-HCAL では1mのHCAL 厚に対して,48 層分割, 各層に20mmの鉄吸収層を使う。鉄は他の重金属よりも ハドロン相互作用長と放射長との比が小さく ($\lambda_I/X_0 =$ 9.5), ハドロンシャワー中で電磁相互作用する成分の観 測も適度に可能とする。センサー層には二つのコンセプ トがある。一つは ScECAL と同様,プラスティックシン チレータを PPD で読み出す。ただしシンチレータの形 状は $30 \times 30 \times 3 \text{ mm}^3$ タイルである。一方,ガス検出器 を用いて分割度を 10×10 mm² まで小さくし、この粒度 のバイナリー情報からハドロンシャワーを再構築すると いうディジタルハドロンカロリメータ (DHCAL) のコン セプトがある。しかし、30-40 GeV 以上の粒子エネル ギーになると粒子数の飽和が避けられないため、そのエ ネルギーサイズを3段階(2ビット)まで弁別するHCAL がILD-HCALのもう一方の候補である。前者をアナロ グハドロンカロリメータ (AHCAL) [16] 後者をセミデジ タルハドロンカロリメータ (SDHCAL) [17] と呼ぶ。ま た、 $30 \times 30 \,\mathrm{mm^2}$ と同面積の $90 \times 10 \,\mathrm{mm^2}$ のシンチレー タとSSA による 10 × 10 mm² 分割の Strip AHCAL の 研究も始まっている.ここではAHCALの開発状況のみ を報告する。AHCAL グループは $1 \times 1 \text{ m}^2 \times 38$ 層のプ ロトタイプを作成し、CERN と Fermilab でその基本性 能を実証した。ハドロンシャワーのエネルギー分解能を 高めることの難しさは、その中でハドロン反応と電磁相 互作用が同時におこり, それらの反応で検出層に落とす エネルギー比に違いがあり、さらにはその混合比がイベ ント毎に揺らぐことから来る。AHCALでは電磁相互作 用の場合にエネルギー密度が高くなることを利用して, セル毎にハドロン反応らしさと電磁相互作用らしさを決 めるか、もしくはクラスター全体のセルエネルギーの分 布により 電磁相互作用率を決めて校正を行い、単純に エネルギー和を取った場合に比べて、20% ほどよいエ ネルギー分解能 $45\%/\sqrt{E_{\text{beam}}(\text{GeV})}(\pi^{\pm}, 10-80 \,\text{GeV})$ を得ている [18]。この技術には検出器が微細分割されて いることが重要であり、PFA のみならず、単粒子に対 する性能にとっても微細分割が大切となっている例であ る。AHCAL と ScECAL の読み出し技術はほとんど共通 しており、2014年の秋には、AHCAL 30 層, ScECAL 4層のプロトタイプによる共同テストビーム実験を予定 している。

5 最後に

ILC 検出器の開発は世界的に行われているが、本稿で 示したように日本グループの貢献はとても大きい。ILC 建設が決定した後も現在と同等以上の力で、検出器開発 そして建設を推進しなくてはならない。そのためには, 若手研究者や数年以内に博士号を取る学生などの活きの いい世代がリーダーシップを発揮することが重要だと感 じる。世界最高のコライダー検出器開発に興味を持って いる方はこの重要な機会を逃さずに是非参加していただ きたい。

参考文献

- T. Behnke *et al.*, "The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 4: Detectors," arXiv:1306.6329 [physics.ins-det]
- [2] 田辺友彦,「ILC の物理」,高エネルギーニュース 32-4 (2014)
- [3] http://ilcild.org
- M.A. Thomson, Nucl. Instrum. Meth. A611, 25 (2009), J.S. Marshall, M.A. Thomson, Proceedings of CHEF2013, arXiv:1308.4537v1
- [5] K. Abe *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A400, 287 (1997)
- [6] http://www.kek.jp/en/Research/AAT/DTP/MPGD/
- [7] LCTPC collaboration, http://www.lctpc.org
- [8] ILC TPC R&D at Asia, http://www-hep.phys.saga-u.ac.jp/ILC-TPC/
- [9] 生出秀行,音野瑛俊,山下了, 日本物理学会誌,66, No.1, 20-28 (2011)
- [10] https://twiki.cern.ch
 /twiki/bin/view/CALICE/WebHome
- [11] T.Tomita et al., Proc. LCWS13, arXiv:1403.7953v1
- [12] http://omega.in2p3.fr/
- [13] C. Adloff *et al.*, Nucl. NIM, A608, 372 (2009), CALICE collaboration, CALICE analysis note 046
- [14] K. Kotera et al., arXiv:1405.4456
- [15] CALICE collaboration, CALICE analysis note 016b
- [16] C. Adloff et al., 2010, JINST, 5, P05004
- [17] C. Adloff et al., NIM, A729, 90 (2013)
- [18] C. Adloff et al., 2012, JINST, 7, P09017