

Belle II CDC

KEK 素粒子原子核研究所

谷口 七重

nanae@post.kek.jp

2014年(平成26年)2月20日

1 はじめに

2014年1月14日に Belle II 中央飛跡検出器(CDC)のワイヤー張りに一区切りがついた。まだまだ多くの仕事が残っていることは言うまでもないが、一つの大きなマイルストーンを迎え、ここまでの CDC 建設を振り返ってみる。

2 Belle II 飛跡検出器

Belle II 実験における飛跡検出器の役割は、荷電粒子の運動量測定、トリガー信号を出すこと、および崩壊点の位置決定や中性粒子との分離のためにトラックの情報を得ることである。またエネルギー損失から、低い運動量領域での粒子識別の情報を提供する。KEKB 加速器の SuperKEKB 加速器へのアップグレードによるルミノシティ向上に伴い検出器バックグラウンドも大幅に増えるためレート耐性も要求される。ルミノシティに比例して増える物理プロセスはもちろん、ビームサイズを絞ることやビーム電流の増加によってビーム起因のバックグラウンドが激増する。Belle II 実験では飛跡検出器としてヘリウムベースのガスを用いたドリフトチェンバーを選択した。クエンチャーガスはエタンを用い、信号読み出しのためのセンスワイヤーと電場形成のためのフィールドワイヤーには、それぞれ直径 $30\mu\text{m}$ の金メッキタングステンと直径 $126\mu\text{m}$ のアルミニウムを使用する。これらは Belle CDC [1] を踏襲したものであるが、主な荷電粒子の運動量が $1\text{GeV}/c$ 以下であることを考慮すると、上述した全ての条件を満たす検出器としてこれ以上の解はない。

増大するバックグラウンドレートに対抗するために信号読み出しの電子学も刷新する。きちんと書くのと長くなるので簡単に述べる。高速のプリアンプ・波形整形の直後にデジタル化した信号をパイプラインで読み出すことで不感時間を短縮している。電子学をエンドプレートのすぐ後ろに配置し検出器内部から

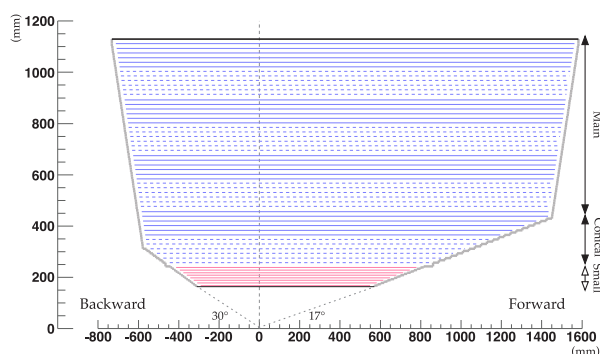


図 1: CDC の半断面図。実線と点線は、それぞれ z 軸に平行なワイヤーとステレオワイヤーを示す。最内層の 8 本(ピンク)はスモールセル部分。

電子学ハットまでの信号線の本数を抑えている。KEK 電子学グループの全面的な協力を得て開発を行ってきた。4つのバージョンのプロトタイプ製作と3度のビームテストなどを経て、2014年から実機の大量生産にこぎつけた。各種パーツおよび基板の放射線耐性試験や磁場中での動作試験もクリアしている。図 1 に CDC の半断面図を示す。CDC は円筒形をしており、円筒の中心軸方向にワイヤーが張られる。円筒の前後に蓋のようにある円板がエンドプレートで、ワイヤーの両端が固定される。エンドプレートは、スモール、コニカル、メインの3つの部分からなる。メイン部分は比較的平坦で、スモールとコニカルは17度から150度の角度をもつ円錐の形状をしている。スモールはコニカルおよびノーマルとセルのサイズが異なる。図 2 は Belle と Belle II の CDC のセンスワイヤーの配置を比較したもので、レバーアームが長くなり、またレイヤー数が増えたことも分かる。Belle II 検出器の構造からの要請で Belle CDC と比べると内半径および外半径がともに大きくなった。レバーアームが長くなったため運動量分解能の向上が見込める。チェンバーの内筒および外筒には、それぞれ 0.5mm 厚と 5mm 厚の CFRP を用いるなど徹底した軽量化を行っている。ワイヤーを固定す

るエンドプレートには10mm厚のアルミニウムを使用する。Belleでは粒子がエンドプレートを通る際に path length が角度依存性を持たないような形状をとっていたが、Belle II ではたわみがより小さくなる形状を選んだ。エンドプレートに CFRP を使うことも検討したが、長期間張力がかかることで繊維の切断箇所からの内部剥離による破損の可能性があることや、多数の穴加工によるダストの除去が困難で放電の原因になること、穴加工の位置精度を出すことが難しいなどの理由からアルミニウムを採用した。

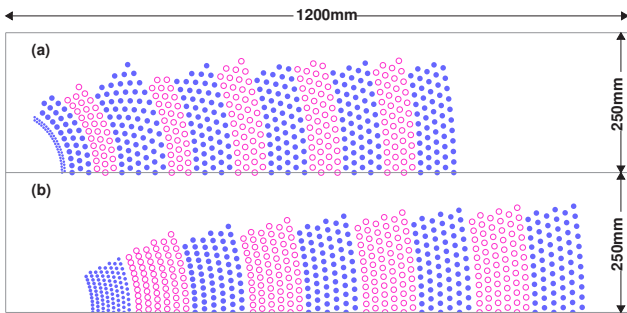


図 2: センスワイヤーの配置の比較。ドットとオープンドットは、それぞれ z 軸に平行なワイヤーとステレオワイヤーを示す。((a) Belle CDC, (b) Belle II CDC)

3 CDC 設計

ワイヤーの本数は、センスワイヤーが14336本、フィールドワイヤーが42240本あり、ワイヤーの張力を決める際は、総張力によるエンドプレートのたわみとワイヤーのたわみ(重力サグ)による位置分解能への影響を考慮した。ワイヤーは重力によってたわむので、ワイヤーの半径方向の位置は、z 軸方向依存性をもつ。重力サグを小さくするには張力を大きくすればいいが、そうすると総張力が大きくなり、エンドプレートが大きく変形したり、構造体が耐えられる限界を超えてしまう。センスワイヤーとフィールドワイヤーで重力サグの量を同じにすれば、相対的な距離は位置に依存せず位置分解能への影響はない。Belle CDC では、重力サグが同じになるように張力が設定されていたが、そのまま適用するとワイヤーの本数が増えたせいで総張力が2倍近くになってしまう。安全のため総張力4トン程度を目標にして、数の多いフィールドワイヤーの張力を減らすことにした。重力サグの影響が最も大きく見られるのは、粒子の入射方向に対して垂直に重力がかかる場合である。その際、センスワイヤーはセルの中心からずれるため電場が変化し、本来の荷電粒子の通過位置とドリフト時間の対応関係からずれが生じ位置分解能が悪化する。重力サグによる位置分解能への影響をシミュレーションによって調べ

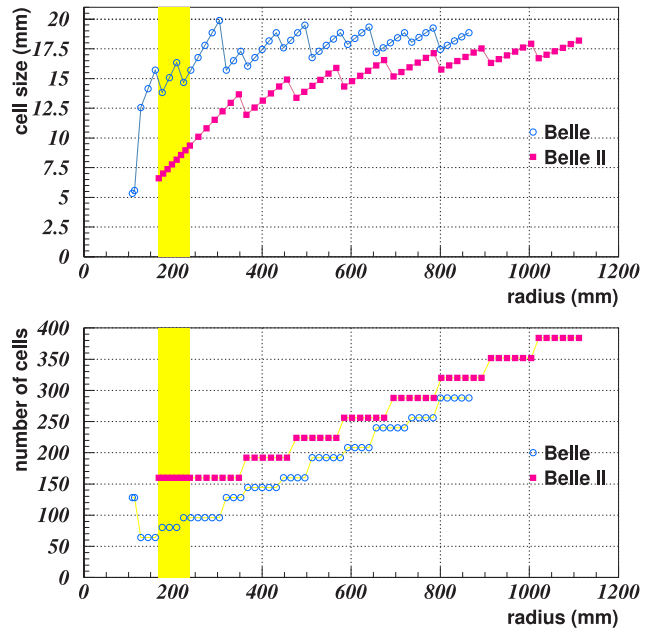


図 3: セル構造の比較。丸と四角はそれぞれ Belle と Belle II を示す。(上: ϕ 方向のセルサイズ, 下: ϕ 方向のセル数)

張力を決定した。フィールドワイヤーの径を小さくすれば、同じ張力で重力サグを小さくすることができるが、ワイヤー表面が高電場になると絶縁物が付着し放電しやすくなるため (Malter effect [2]) 細いワイヤーは用いなかった。図 3 は Belle と Belle II で、CDC の ϕ 方向のセルサイズとセル数を半径毎に比較したものである。 ϕ 方向のセルの分割を細かくすることで、空間的に細分化されるだけでなく最大ドリフト時間が短くなり、ワイヤーのヒットレートとオキュパンシーを減らすことができる。また、高いヒットレートが予想される最内層の8層(スモールセル部)は ϕ 方向と半径方向それぞれが外側のノーマルセルの半分程度のサイズとなっている。図 4 に Belle II CDC のスモールセルとノーマルセルの大きさの比較を示す。セルの形状は Belle と同様の扇形である。

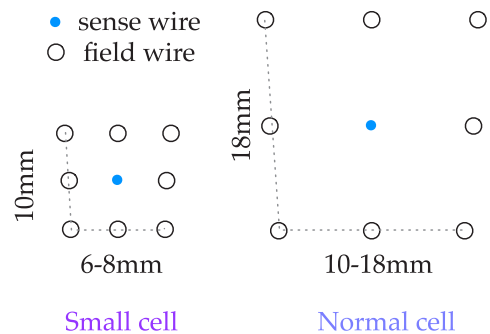


図 4: Belle II CDC のスモールセルとノーマルセルの大きさの比較。

ところで、半径方向のセルサイズはコンカルの最内層からメインの最外層までの距離をレイヤー数で割った数で決まるが、実はエンドプレート上で半径方向のワイヤー位置は等間隔になっているわけではない。CDCは z 軸と平行な6本のセンスワイヤーと、これに対してプラスとマイナスの角度を持った6本ずつのステレオワイヤーが交互に現れる構造となっているので、層の境界ではワイヤー間の距離が z 軸方向の位置依存性を持つ。ステレオ角が大きいほど z 軸方向の位置分解能が向上するが、ワイヤー間の距離の変化に伴ってゲインが変動し dE/dx 分解能が悪化するため、ゲイン変動を許容範囲内に保ちつつステレオ角を最適化した。

4 製作加工

前述したようにエンドプレートはスモール、コンカル、メインの3つの部分からなる。スモールとコンカルは、17度から150度の角度をもつ円錐の形状をしている。エンドプレートの加工において穴の位置精度は $50\mu\text{m}$ 以下が要求されるので、KEK工作センターの協力を得て加工の手順や工具の選定などを行い、実際にカットピースを製作し穴位置の設計値からのずれやその傾向などを調べた。実機では片面56576個の非常に多くの穴が加工される。加工を請け負った工場によると多数の穴をあけることはよくあるが精度を要求されることはまずないようだ。図5は工場で穴加工を終えて仮組みをした前方のエンドプレートの写真である。メイン部の加工を始めた後、作業中に震災が起り高萩にある工場はずいぶん揺れたそうだが、大きなダメージはなかったようで加工を続けてくれた。加工中に余震に遭い、片方のメイン部の数層が $100\mu\text{m}$ 程度ずれ測量でも確認できた。このずれは初期値として考慮しソフトウェア上で補正する。



図5: 前方のエンドプレート。スモール、コンカル、メインの3つの部分が組み上げられている。

エンドプレートの加工と並行してCFRPシリンダーの加工が進められていた。シリンダーのガスボリューム側に $100\mu\text{m}$ のアルミシートを貼付けた後、アルミのサポートリングを装着しエンドプレートの取り付けが順調に行われた。高萩の工場を訪れ、前後のエンドプレートの回転や並行を調べる測量を行い大きな問題がないことを確認した。

5 ワイヤー張り

5.1 準備

2012年冬の天気の良い日に、工場からKEKへCDCが輸送され、富士実験棟B4のクリーンルーム前に仮置きされた。アルミ0.5mm厚の仮のシリンダーを内層にとりつけ、内側の検出器などによる荷重を想定した試験を行った。82kgの重りに対して、荷重のかかるCDC内側の変形は $200\mu\text{m}$ 程度であり構造計算の結果とおおむね一致した。

機械加工後に工場にて表面は洗浄されているが、穴には細かいアルミ粉や工作油などの汚れが残っていてワイヤーに付着すると放電の要因になるので出来るだけ取り除かなくてはいけない。実際綿棒でこすってみると黒っぽい汚れが付着していた。穴の一つ一つを綿棒とアルコールで拭き掃除を行った。穴は片面だけで56576個あり、エンドプレートの厚みは10mmあるため、それなりに大変な作業だった。最初用意していた綿棒は直径に対して細いものだったので、直径3.19mmのマーカを持って、直径にちょうど合う綿棒を探して色々な店舗を回った。何件目かで見つけた綿棒がぴったり合い作業のスピードは上がったと思う。作業終了後、チェンバーの内側の細かいほこりやごみなどを取り除きクリーンルームへ移動する工程に移った。横おきしてあるチェンバーをクリーンルーム内に運び、サポート構造の中で縦に配置する(図6)。ベアリングによってチェンバーを容易に周方向に回転することができる。

ワイヤーは最外層から張り始めるのだが、ワイヤーを張っていくにつれ全体の張力が大きくなっていき、エンドプレートがたわんで2つのエンドプレート間の距離が短くなるので最初に張ったワイヤーからどんどんゆるんでいってしまう。それを防ぐために、想定される全張力を前もってかけてエンドプレートをたわませておき、ワイヤーが張られるに従って事前にかけて張力をゆるめていく。136本のステンレスのバーを用いて上下のエンドプレートを固定し、スプリングで順番に締め付けて張力をかけていった。プリストレスバーによって3.7トンの張力をかけたところ、エンドプレートの変形は上下合わせて4.5mmとなった。つまり上下のエンドプレート間



図 6: クリーンルーム内の CDC

の距離が 4.5mm 近づいたことになる。構造計算による結果と比べて 20% 大きな変形となったが、これは外側の検出器の要請により後方のエンドプレートの構造を変えたことで平坦な部分が増えたためだと考えられる。ワイヤーをゆるませないためには、4.5mm 変形した状態を保持すればいいので、エンドプレートのたわみは 4 箇所のダイヤルゲージによって常時モニターし、プリストレスを取り外す前後で長尺による直接測定も行った。図 7 はエンドプレートのダイヤルゲージの変化と総張力の推移である。張力の増減に対してエンドプレート間の距離が変化しているのが分かる。およそ一年を通して、エンドプレートのたわみは 0.2mm 程度にコントロール出来ており、これは 5% の張力の変動に相当する。

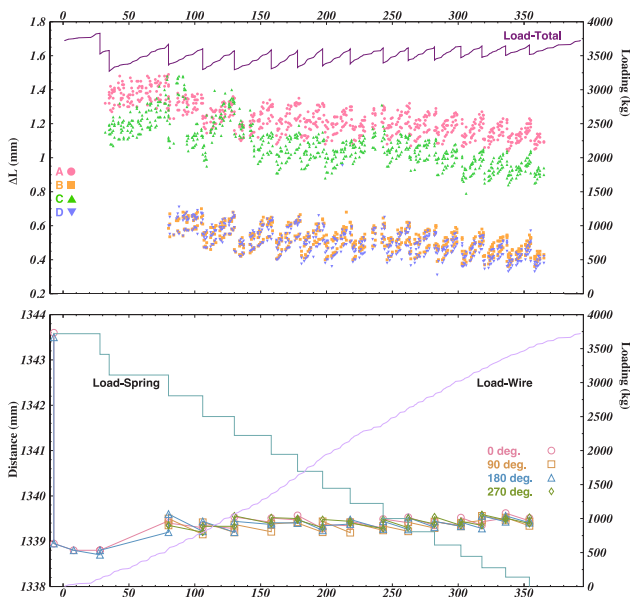


図 7: 上: 総張力 (計算値) とたわみの相対値の推移。下: スプリングとワイヤーによる張力の寄与 (計算値) とエンドプレート間の距離の推移。

ワイヤーの巻かれたボビンが電動の回転軸にとりつけられており、先端に小さな重りをつけて上からたらししていく。導体部分の直径 1.6mm のアルミニウムのピンと絶縁体のノリル樹脂で構成されたフィードスルーを通し、ピンをかしめてワイヤーを固定する。これらの工程を上と下の作業場で息を合わせて行っていく。ワイヤーをかしめる工具はエアカッターを改造したもので、先端のカッターの部分を押着用の構造に取り替えてある。ガスの圧力を調整することで、ワイヤーを切ることなく常に一定の力でかしめることができる。ワイヤーの固定方法は、おそらくはんだか圧着のどちらかだと考えられる。はんだを用いる利点は、抜けにくいことや、やり直しが可能である点、圧着の利点は、作業が比較的容易なため出来映えの個人差が小さく、一回一回の作業のばらつきも少ないことだと思う。エンドプレートとのコンタクトにおいて、基板などに直接はんだづけする場合はピッチを細かくでき、面に対する設置の位置精度が出せる。一方、フィードスルーを用いる場合は、ワイヤーの位置精度を出すのが難しく、またスペースも限られる。スモールセルでは、スペースの点からフィールドワイヤーにはノリル部分のないアルミピンのみのフィードスルーを用いている。直径 3.19mm の筒状のノリルの中を通るワイヤーの位置を決めているのは、直径 1.6mm の円板の中心に穴が開いたブッシュと呼ばれる部品である。センスワイヤーを通すブッシュには直径 80 μ m、フィールドワイヤーのブッシュには直径 200 μ m の穴が開いている。この小さい部品に、さらに小さな穴を精度よく加工するのは技術的に非常に難しく、時計部品の製作のノウハウを持っていた林栄精機だからこそ出来たのだそうだ。

5.2 毎日の作業

ワイヤー張りは林栄精機の方々によって日中行われ、夕方以降は研究者による張力測定がある。張力測定の前には、ワイヤー同士のからみがないか、接着剤が一周にわたってフィードスルーについているか、フィードスルーが奥まで差し込まれているか、ワイヤーが正しくかしめられているかなどを目視によって確認する。磁場中にあるワイヤーに交流電流を流して、ローレンツ力によってワイヤーを振動させ基本振動における共振周波数を求めることで張力を測定する。張力測定は 30 分で 80~100 本程度のペースで行われた。図 8 は一日あたりに張ったワイヤーの本数の推移と、張り終えたワイヤーの総数の推移をプロットしたものである。作業を開始した頃の一日 100 本が精一杯であったが、慣れてくると 200 本前後で推移していった。一日の最多本数は 374 本であった。17 度の傾斜があるコンカル部分に入ったあたり (320 日頃) から、作業がどんどん難しくなるため進度が多少

落ちていた。この頃は足場を変更し、ほぼチェンバーの中に入った状態での作業となり、最後の数レイヤーは自分の足元よりも下に手をのびさなくてはならなかった。並行して行っていたスモールセル部分のワイヤー張りは2013年の夏頃に終わることができ、仮の外筒を取り付けた後、ガスリークチェックや高圧の印加試験を経てプロトタイプのエレクトロニクスを用いて宇宙線データの取得を続けた。図9はワイヤーを張り終えたスモールセル部分の写真である。

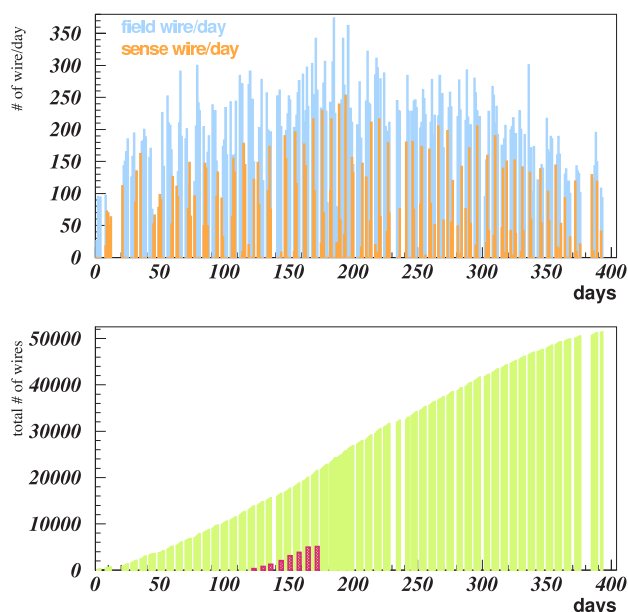


図8: 上: 一日あたりに張られたワイヤーの本数の推移。淡いグラフ(水色)と濃いグラフ(橙)はそれぞれフィールドワイヤーとセンスワイヤーを示す。下: 張り終えたワイヤーの総数の推移。太いバークラフ(紅)はスモールセル部分のワイヤー張りの進捗を示している。

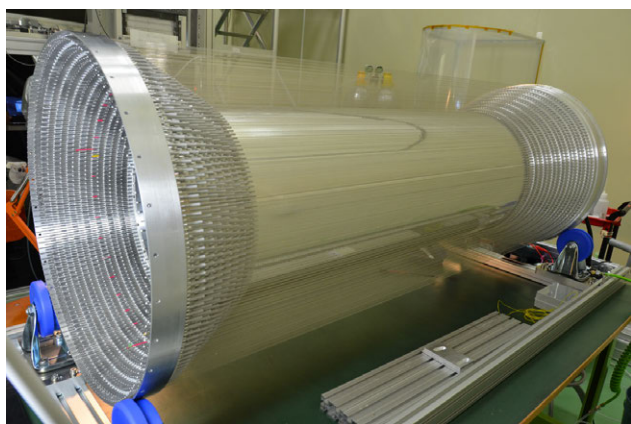


図9: ワイヤーを張り終えたスモールセル部分

5.3 様々な問題

ワイヤー張りは2012年12月18日から始まり2014年1月14日に最後の一本を張り終えた。その期間に起こった色々な問題を紹介したいと思う。ある時期にワイヤー同士がからむことが頻発したことがあった。比較的太いフィールドワイヤーは、残り少なくなってくるとポビンに巻かれる曲率半径が小さくなり、ワイヤーにくせがついてカールしてしまい、上からたらず際に外側に張られたワイヤーとからみやすくなったのだと考えられる。そこでポビンに残るワイヤーの量が少なくなってくると、それ以上は使わず新しい物に取り替えることにした。センスワイヤーでは、ポビンへの巻きが強すぎる箇所ワイヤーが引っかかり、ワイヤー先端の重りが振れることで周囲のワイヤーにからんでいたため、ワイヤーをスムーズに送れるようポビンに巻き直した。外側のワイヤーとからんだ場合、特に ϕ 方向の分割が同じレイヤー間では目視で確認するのが困難なため張力測定でも見落としていた。実際に、既に張り終わった外側のレイヤー間で導通を調べてみると特定のレイヤー間でからんでいるワイヤーが多く見つかった。この頃から張力測定に加えてレイヤー間での導通チェックを行うことにした。またワイヤー張りが進み、作業するレイヤーが内側に移行していく中でフィードスルーの押し込み不足が起こった。作業するレイヤーが手元から離れていくのでエンドプレートに押し込みにくくなり、1~2mmの隙間が開いてしまった。最後までこの状態であれば正しい張力でワイヤーは張られているが、後にケーブルを取り付ける際などに、フィードスルーが押し込まれると張力は半分以下かほとんどなくなってしまう。目視でのチェックに加えて、一日張り終えた後にフィードスルーを再度押し込むことになった。内側にワイヤーがあると張り直しが難しいため、その日張られたワイヤーは必ず翌日まで張力測定を行う必要があったのでシフトには毎日2名が必要であった。一年間、シフト表を埋めることが小さな悩みの種でもあったが、総作業日数266日に対して国内外から40数名の研究者が協力してくれた。実際にはもっと多くの人々のサポートがあったことを忘れない。“Stringers”の皆さんとのチームで無事に56576本のワイヤーを張り終えることが出来た。

6 現状と今後の展望

ワイヤー張りの最後が見えてきた頃から、センスワイヤーの張力の再測定を並行して行ってきた。2月中旬に再測定を終え、ワイヤーの張り直しやガスシールの作業も進んでいる。4月にスモールセル部分を本体(メインとコニカル)へインストールする予定で、その後もガス

リークチェックや 11 万箇所を超えるケーブルの取り付け、高圧試験など地道な作業が続いていく。スモールセル部には仮の外筒が取り付けられ、ガスリークチェックの後、高圧試験が続けられている。図 10 は最終版となったエレクトロニクスで取得した宇宙線データである。ドリフト時間の幅は 100nsec 程度で、セルのサイズに対して期待通りの値が得られている。現在は、スモールセル上半球 8 層のみの読み出しだが、夏以降には全体を筑波実験棟へ移し、大量生産を終えたエレクトロニクスを順次取り付け宇宙線データを取る予定である。56 層のきれいなトラックが拜めることを期待している。

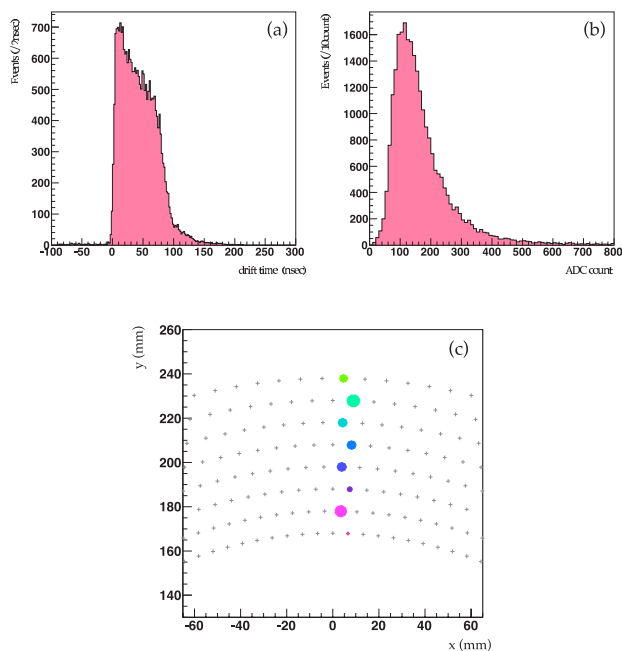


図 10: スモールセル部の宇宙線データ。(a) ドリフト時間, (b) エネルギー損失, (c) ヒットマップ (円の大きさはドリフト距離を表す)。

7 おわりに

Belle II CDC がそうであったように、このような大型で一点物の検出器を作る機会は 10 数年に一度だけ巡ってくるものではないだろうか。ドリフトチェンバーは長い歴史があり、よく理解された検出器ではあるが、まるで楽器のように人間の手が非常によく入った検出器で、こんなことまで気にするのかという印象をしばしば受けた。筆者にとって大型のワイヤーチェンバーに携わるのは最初で最後かもしれないが、この稀な機会をつかめたことは幸運に思う。建設は道半ばであるが、たくさんのマイルストーンを一つずつ越えて検出器の性能を最大限に引き出していきたい。

参考文献

- [1] S. Uno, Nucl. Instr. Meth. A **379**, 421 (1996).
- [2] L. Malter, Phys. Rev. **50**, 48 (1936).