

理学研究科での加速器に関わる研究と教育

浜 広幸*

Education and Research Work for Accelerator and Related Fields in a School of Science

Hiroyuki HAMA*

1. はじめに

今日、加速器を用いる科学研究は非常に広範な分野で展開されていると思うが、加速器あるいはビームそのものを研究対象とする共通認識は、欧米に比べてかなり低いレベルにあるのではないかと、個人的な印象を常々持っている。国内には小規模の加速器が非常に数多くあり、ある意味では科学を学ぶ者にとって身近とも言えるこの装置であるにも拘らず、例えばレーザー科学のような賑わいのある研究対象として扱われていない。

大学、それも理学部あるいは理学研究科における加速器科学あるいはビーム物理の教育を考えるたびに、もう8年も経つが、総合研究大学院大学（総研大）平田光司氏や高エネルギー加速器研究機構（KEK）鎌田進氏等のお声掛けによって葉山で開かれた研究会「古典多体系の物理」に筆者も末席を占めさせて頂いた事を思い出す。この他にも平田氏等は「装置物理」という新たな研究分野の創出を話題として何度か研究会を開かれていた。当時この「装置」というものはいかなるものであるか、頭に「大型」が付くのではないかなど議論があったように覚えているが、即ち加速器、核融合炉、天体（電波）望遠鏡あるいは重力波測定装置などを融合して、「装置」そのものに内包されている共通学問はなんだろうか、等を探る話し合いであった。こういった話題が総研大で行なわれたのには大きな理由がある。つまりKEKの加速器、天文台の望遠鏡や重力波測定装置、核融合研の大型ヘリカル装置など、いわゆる研究主体の総研大メンバーである機関であったからこそ、学問として装置を見直す動機付けが意味を持っていたし、また興味深かったからである。このような新しい科学分野を創出して行こう

とする考え方は、当時非常に魅力的でもあり、東北大に赴任したばかりの筆者にとっては大変気になる話題であった。

2. 加速器と「装置物理」

加速器で行なう基礎科学も応用科学も沢山ある。原子核反応を起こすために運動エネルギー1 MeVの山を越えたところで、加速器は一つの時代の到来を見たことは言うまでもない。加速器はどんどん巨大化して、ILCに見られるようにそのエネルギーフロンティアはまだ膨張していると言ってもよい。また、第3世代放射光源と言われる電子ストレージリングは低エミッタンス化のために、かつては考えられないほど大きな周長を持つようになった。このような“先端科学を支える先端加速器”と基本的に大学は無縁である。もはや一大学が運営できるような加速器施設ではなくなってきている。しかし、それはそれで何も悪いことではない。巨大科学を箱庭的に捉える方がどこか変であるし、複数の研究機関あるいは国家間の協力無くして先端科学の進展はない。また、なにもそのような体制は巨大科学でなくてもすでに国際的な協力関係の枠組みは当たり前のように作り上げられている。この科学をめぐる環境変化の中で、国内の大学に数多い陳腐な古い加速器で行なわれる科学はもはやどこにもなく、言ってみれば維持するだけのお荷物に近い存在に成ってきているのかもしれない。

こういった状況での加速器科学研究は、いきおいプロジェクト指向の技術開発研究的なものに偏りがちになると考えられる。つまるところそれまでにない新しい特質を持ったビームを生成しなければ、加速器の目的に到達できないわけで、それには技術的な課題が大抵に場合山積みの中から始まることが多いからだ。筆

* 東北大学大学院理学研究科 Tohoku University School of Science
(E-mail: hama@lms.tohoku.ac.jp)

者にとって近い分野での最新の加速器プロジェクトの中に自己増幅型 X 線自由電子レーザー (SASE-XFEL) がある。FEL の研究者の間でも 2000 年以前は SASE-XFEL は殆ど机上の空論に近いものと見られていた。というのもエミッタンスやピーク電流が当時のそれらに比べ桁違いの高品位ビームが要求されていたからである。しかしながらハードウェアとしての興味をそこに映してみると、極めてチャレンジングであったことも事実であった。このような大プロジェクトに参画して行く中で、ある部分を支える加速器技術の研究を行なう事は大学に置いても可能であると、多分多くの方は思われであろう。例えば素粒子実験の研究室が検出器やビーム診断装置を開発研究するのに近いスタイルと考えるのではないだろうか。実際そういうことはあり得るのかもしれないが、現実には加速器研究を標榜する研究室では、そのようなスタイルで行なう加速器そのものの研究として認識される事は稀であると思う。そのプロジェクトの利用実験分野の研究室であれば、必然性を持ってその研究活動が受け入れられるのは、かつて原子核物理学者達が自らサイクロトロンを作ったりしたようなことが当たり前であったような時代を皆が良く知っていて、加速器そのものに物理を見いだす事は一般的には極めて難解であるように見受けられるのが現状である。例えば筆者の研究室で XFEL 用リナックのビーム診断装置を開発研究しようとした時、研究活動の認識度はともかく、仮にそれで学位論文を書いた場合、研究のモチベーションとして XFEL の利用研究が必ず質問される事に成る。例えば数百フェムト秒のバンチ長の密度分布を測定しようとしたとする。なぜそれが研究課題になるのか、という問いにたいして、FEL 発振のしきい値をピーク電流が越えているか知るためである、という答えは、一見正しい返答のように見えるが、その裏側にある、なぜ XFEL を必要とするのか、という陰の問いには答えていない。

この例はあまり分かりやすすくないかもしれない。しかし、もう少しおつきあいして頂ければ、多分何となく感じて頂けるものがあると信じて続けよう。素粒子研究室でバンチ診断を開発研究した場合、例えば、ヒッグスが見えるから、とか、ダークマターが分かるとか (本当にバンチ長測定と直結するか知らぬが)、ひとつ飛びした答えを最後に用意できる。しかし、加速器研究室では XFEL のユーザーではないから、FEL 発振するか否か、というテーゼ以上の答えを容易に準備できない。アプリケーションユーザーでなくては加速器科学を研究分野にすることはできない、などとい

うとんでもない見聞の話はあり得ないのだが、利用実験に直截的に連結できない加速器科学の学位論文はディフェンスが非常にやっかいであることも現実の問題としてあるのだ、ということを理解してもらえらうか。

このようなことが冒頭に挙げたエピソードの「装置物理」という研究分野の創出が、非常に意味を持つのではないかと思う大きな理由である。筆者の「装置物理」のイメージでは、ハードウェアだけではなく、例えば加速器のビーム軌道解析と天体の運行あるいはプラズマ中の粒子の輸送などのように相通ずる課題も、「装置物理」の一面であると考えている。装置そのものが研究命題になりうるか否かという問いかけは大学、しかも研究科に所属する我々にはとっては常に反芻する、あるいは反芻させられる問題なのである。それは単に学位論文の攻防に耐えることだけでなく、学生に対しても「何が面白いのか」を如何に示す事ができるか、という課題にも関わるのではないかと思う。

講義や研究室でよく学生に言うことは「加速器は人間が作り出したものだが、その中は自然そのものである」ということである。大分昔の事だが、核研 ES で実験をされていた原子核物理を専門とされる方との会話中で、東北大核理研の電子シンクロトロンについて筆者が「加速器が勘定通りにできていれば、あなたがたの欲しいビームを作り出せるだろう」と言ったところ、その方は加速器が図面寸法通りにできていないことが普通にあるのか? とひどく怪訝な顔で私に質問したことがあった。むろん私の言う勘定とは、ビーム動力学についての事であったのだが、そのように受け止められる事はなかった。これも考えてみれば「装置物理」という学問分野の概念が欠落しているから、現れるべきして現れた質問である。

「装置物理」という言葉が果たして我々の直面する問題を解決するに相応しいか否かは明確に言及できないが、大型小型を問わず、少なくとも人間の作り出す装置の中で繰り広げられる事象は、人の手で常に制御されている訳ではなく、不完全なコントロール下で現れる思いも因らぬ現象が多々あることは間違いのないと思っている。

3. 加速器とビーム物理学

筆者が「Beam Physicist」という言葉を初めて聞いたのは 20 年近くも前の 1989 年、米国のある原子核物理研究を中心とする加速器施設でのことであった。その頃筆者自身も原子核物理用の加速器は原子核屋が作るものだと思い込んでいたので、Beam Physics と

いう分野があることにはかなり驚いた記憶がある。

昨今、関係者のご尽力で日本物理学会において「ビーム物理」と言う新領域が誕生して、加速器のビームのみならずプラズマ更にはレーザーなどの光も含め、「ビーム」を学問対象とする分野が育ち始めた。「ビーム物理」は加速器から見るとビーム動力学あるいは軌道解析が最も近いものであろうが、それに囚われず従来の多くの分野を横断的に結合する広範な学問であろうと筆者は考えている。米国で初めて聞いた Beam Physics はこれと同一のものではないのかもしれないが、当時すでに加速器が科学分野として独り立ちした基盤があったことは間違いない。

「ビーム物理」は先に話題とした「装置物理」とはもちろん同一ではなく、また志す方向性も異なると認識はしているが、理学研究科で加速器を扱う研究室にとっては、双方を「我々の物理」と言う事ができるのではないかと思う。もちろんこの2つの分野に厳格な定義を与える事は困難であり、また意味のあることでもないだろう。しかしこの2つの研究分野は、我々にとって大きなキーワードであり、よその分野に対して掲げる看板としてはかなり分かり易く、研究の目的を端的にイメージできる分野名称であることは間違いない。つまり加速器やビームに関わる研究を一定の学問の枠組みで閉じることが出来る（閉塞的になるという意味ではない）。このことはとても重要であることは、先に挙げた学位論文のディフェンスを思い浮かべて頂ければご理解いただけるのではないだろうか。

なぜこれほどまでに自分のツラにこだわるのか、と言えば、やはり加速器はメーカーが作る道具であり、その道具は寸法通りに出来ていけば動く、と思込んでいる研究者がかなり多くを占めているというところにもある。リングにおけるビームダイナミクスの難解さや光とビームの相互作用の複雑さ、それら自身ですでに基礎物理であることを端的に伝えるに値する分野の呼称を必要としていた事は間違いないことだと思っている。また、加速器はそれらを内包する単なる箱モノではなく、複雑な現象を制御しようとする物性物理であるということだ。

4. いかにか3年生の講義を取るか

それでは具体的な大学院生の教育などに話を移そう。

多くの方がご存知のように約10年前から国立大学の多くは大学院重点化政策に則り、教育・研究システムやその評価体制が大きく様変わりしてきた。積算校費を学部生ではなく大学院生の員数で勘定するというのが、簡略に説明する内容変化だ。従って大学院の定

員は東北大学理学研究科を例にとると旧来の倍になった。物理学専攻では学部生定員より修士定員の方が多い。

おそらく殆どの方が想像するように、大学院生が増えてアクティビティが上昇したわけではなく、この「改革」は大学院生の基本的な物理素養レベルの落ち込みを招いたにすぎない。大学院入試で成績の良い者だけを採用すればよい、と思われる方もおられようが、どっこい定員充足率が予算配分の評価対象であるから、大学院重点化は見方に依れば自分の首をしっかりと豆結びで締め上げたことになったと言ってよい。

学生はやはり流行に敏感であるし、ある種の夢を感じて大学院進学を希望する者が多い。物理専攻に属する筆者の経験では、圧倒的にニュートリノ科学と宇宙物理が人気を博している。これは揺るぎない事実で、特に他大学から受験に来る学生諸君の第1希望は殆どがこれらである。もちろん、それを専門とする研究室が全員を採用する訳ではないので、第2希望、第3希望と面接で辿りながら採用を決定する。これとは別に人気と関係なく特定の研究室を最初から第1希望にすることが次に多い。つまりこれは4年生で配属された研究室で、そのままそこに進学希望するケースである。このケースは一定のレベルに達した学生を確保するのに最も確かな道である。4年生のうちに研究室の教育も出来るし、学生の長所短所もほぼ理解しておくことができ、いわば即戦力をリポートなしに得られるわけだ。

このことはどの研究室も良く知っている。従って4年生の研究室配属時に自分のところを選択するような手だてをとるのが、戦略上最も大切な部分となる。ここで敗北を喫すると大学院試験でプービー賞に近く、しかも第3、4希望でやっと当該研究室の名を書くような学生を否応無く選択する事になる。誤解を避けるために書いておくと、けっしてそのような学生が常にダメ学生ではない。試験の成績など（自分を顧みたとしても）臭食らえである。

いずれにせよ、つまるところ4年生を確保することが天王山であるから、その時点で強い武器をもたない研究室は結局いつまでたっても理想にはほど遠い状況に明け暮れるのである。勝ち組負け組の格差社会はここにも存在する。では、どのようにして学生を引っ張るか？ 講義である。

3年次の講義を担当する事は、研究室をアピールする絶好のチャンスだからである。しかし講義担当で争奪戦が繰り広げられると思われる方もおられるかもしれないが、実はそんなことは殆どない。いかにしても

侵略し難い既得権があるからである。最近は大学も学生にそっぽをむかれぬようにカリキュラムに工夫を凝らしたり異色の講義を用意したりするが、本質は変わっていない。また物理学を学ぼうとする学生に必要な3年次に学ぶような基礎学問はそれほど急激に変化しないから、例えば「ビーム物理学」という講座を開講しようとしても、入り込むスケジュールはどこにもあいてはいない。実際のところ東北大理学研究科では大学院の講義ですら「ビーム物理学特論」はまだ開講できていない。筆者の所属する原子核理学研究施設(核理研)は理学研究科の付属研究施設であることから、なおさら本体の研究科から遠ざけられており(地理的にも!), 3年次の講義を強奪するほどの勢力を持たず、やっと獲れた講義は4年の後期(!)であったりする。余談であるが、その4年次後期にビーム光学のさわりを講義した事があるが、聴講してくれた学生諸君は天文学科や地球物理あるいは物性の学生で、加速器に身近な原子核実験や素粒子実験の学生が一人も居なかった。また中には3年の時にこの講義を聴いていたら研究室選びを考え直したろう、という学生が何人か居たことも事実であった。

如何に加速器の教育を考えようとも、講義も無ければ研究室に学生を迎え入れることすら極めて難しい状況にあり、学生がどう育って行くかという予断できない重要な事柄について、サイコロさえ振ることができないような苦々しさを感じてきた。加速器の歴史は既に長く、教科書さえ沢山存在し、多くの実験的研究に用いられてきたにも関わらず、学問として理学研究科に受け入れられるには、まだ長い時間を必要としているのではないかと、とやや悲観的な心境にあることもまた事実である。

5. 大学における共同利用加速器と教育

大型加速器を保有する研究機関における加速器にかかわる学生教育にも多くの課題があろうが、一般に大学の共同利用加速器は更に深刻な問題を抱えている。もちろんそれは研究教育資金である。新設されたばかりの施設はともかく(といっても数は多くない)、大抵はかなり以前に設置された老朽施設であって運転経費はもちろん維持費も殆どない状態で共同利用実験にビームを供さなくてはならない。核理研の場合は学内共同利用の運営ということになっており、正式な共同利用さえ認められていないにもかかわらず、学外からの申請も受け付けている。電子リナックはすでに建設されてから40年も経ており、つい先頃までコミッションングステージのように感じられていた1.2 GeV

シンクロトロンももう10年を経た。いきおい故障頻度は高くなる。しかし我々のデューティは、講義の職務を軽くして頂いている(!)かわりに、このマシンを常に運転し続けなければならないことだ。最近はできるだけ避けているが、かつては筆者の研究室の教員と学生が故障を直しオペレータも勤めていた。このような毎日を教育現場の活動と言ってしまうと、多分それで良いのかもしれない。加速器を直に操作し、構成する機器を修理したり調整したりする。極めて現実的な教育である。問題はそれらの加速器が今日の先端のものとはほど遠いということである。

このような不満を加速器の原理を違えるものでないという理由で贅沢である、あるいは実質的に後継者育成にハードウェアの善し悪しは障害でない、としても良い。それはそれなりの根拠を持っているだろう。しかし、ものには程度というものがある。4極磁石の無いリナック、6極磁石の無いリング、高々70 mAでブレイクアップの起きるリナック、5 mAでヘッドテールが起きるリング。確かに勉強にはなるが、こうあるべき姿、を絶対に見る事が出来ない加速器を用いて学ぶには限界がある。6極を入れればよいではないか、というような話は全く通用しないリングや研究予算である。普通の科研費でなんとかなるような話ではない。

ある他大学のやはり古いリナックを利用しに行ったユーザーが、ダクトと同じ径のビームが出てきた、と驚いていたことを聞いたことがあるが、このように加速器として中途半端以下である施設が日本には存在するのだ。そしてその一つが核理研である。このような加速器が研究室の私的なものであれば、時間をかけてでもなんらかの措置をして行くだらうし、またそれが研究教育を含むことになるだろうが、共同利用であればそれも適わない。すべてのユーザーが最先端のビームを利用したいわけではないし、また単純に強度のみを要求するケースが核理研ではよく見られる(核理研リナックは300 Hzで動作するので、ピーク電流は低くとも平均電流は比較的高い)。原子核実験に至ってはカウンターの能力限界から強度すら必要としないこともある。こうなると研究教育のために目前にある加速器をアップグレードするような事が殆ど出来ない状況に陥る。もちろん活動資金にも大きく依存するわけだが、先に記したように、その方面では大学はもっと暗い。

例えば学部学生の物理実験に加速器実習のようなテーマがあれば、多分それには古ぼけた加速器でもなんとか対応でき、学生にもなにかしらのインパクトを

与える事もできよう。そのような使い道をしておられる大学加速器施設もあるのではないかと思います。しかし、大学院の博士論文はもちろん修士論文すらそのための研究をこのような加速器の上で展開しようとしても、非常に困難なことになる。博士論文においては基本的に新しい知見を要求される訳で、その意味では扱う加速器がまず一定のレベルに達していなければ、手が付けられない。マシンがあるだけ、ビームがあるだけでした、というご意見もあるかもしれないが、かえってそれが障害になることも多い。せっかく研究室にやってきた学生を KEK などの大規模加速器施設に派遣しなくては博士論文ができない、というような危機的状況に殆どの大学加速器施設は陥っているのではないだろうか。

6. マシINSTAディ専用加速器？

もう 15 年近くも前だが、ドイツのドルトムト大学の加速器施設を訪れた事がある。当時ドルトムト大学では加速器科学専攻の学生が蓄積リング FEL を利用ターゲットとした加速器システム（前段入射器から、シンクロトロン、蓄積リングそしてアンジュレータまで）を建設していた。この DELTA（Dortmunder ElekTronenspeicherring-Anlage）と呼ばれるリングは、当時殆どすべてを学生の手作りで建設していた。あの頃、筆者の記憶に依れば DELTA は英語で Dortmund Electron Test Accelerator だと聞いていた。当時はまだ蓄積リング FEL は短波長 FEL の最も有望な光源として脚光を浴びていた。学生は皆熱心にそして加速器づくりを楽しんでいた。そのマシンは完成すれば様々な加速器科学の研究に用いられるだろうと、言っていたことを思い出す。DELTA ではその後なんとか FEL 発振は叶ったものの、運営は見直され現在は放射光リングとしての機能を最優先で運転されている。筆者にとってはやや残念な結末であった。当時 DELTAこそ大学の研究室に相応しい加速器だと思ったからだ。利用があって初めて加速器は使命を果たせる事を否定はしないが、この世に一台、いや何台かは加速器科学のための加速器があってもよいのではないか？ そういう自問自答がそのころから続いている。今日ではそれに近いものがないわけではない。Duke 大学の蓄積リング、BNL の ATF や SDL それに KEK の ATF もそれに近い性格がある。またある目的のために作られる加速器のプロトタイプなども、加速器科学に特化したものと言えるだろう。しかし

ずれにせよ、加速器として全体のシステムが機能するようなものはあまりにお金がかかる。やはり大学の研究室では大型加速器の傍らで一部分を開発研究しているのが、身分に相応しいのであろうか。

7. おわりに

読み返すと、あまり夢の無い話ばかりを連ねた文章に成ってしまった気もするが、国立大学の法人化以降、大型予算が殆ど期待できなくなってきたこともあり、ますます加速器科学の状況は厳しいことを認めざるを得ない。加速器関連研究分野が KEK あるいは SPring-8 等の研究機関でますます発展することを期待すると同時に、理学研究科においても一定の学問レベルを維持すべきことはもちろん、何らかの手段によって進化させなければならない。昨今は評価、評価で、評価をするのに忙しくて研究する暇がないようなある意味馬鹿げた研究教育環境であるが、加速器学会や物理学会のビーム物理分科という学生の発表の場ができたことは、非常に頼もしいことであるし、これをきちんと活用して行くのも大切な努力である。また最近では学生も海外の国際会議に出かける事が珍しくなくなってきており、それらでの発表機会もまた重要である。これらは学生の育成だけでなく加速器に関わる科学分野の底上げにも繋がることは間違いない。何よりもこの分野の研究活動が、(多角的に見て) 楽しいと思える機会・場を繰り広げて行く事が我々の重要な仕事の一つである。

評価、評価の時代では、廻り続けなければならない。いったん止まってしまえば、もう再び動き出す契機を与えられる事が殆どない。東北大核理研は先駆けて高エネルギーマシンを建設し、電子散乱や光子反応で見る原子核物理の華やかな時代に回転してきた。それ自身は誇れる事であったろうが、現在は惰性の回転力はすでに乏しく、止まりかけている状態と思っている。誰のせい、という事ではなく、時代のもたらした変化、摩擦力なのだと思う。

自力で再度角速度を得られるか、筆者は正直なところ皆目分かってはいないのだが、今日も研究室の学生は LaB₆-DC 電子銃のビームエミッタンスを測定し、RF 電子銃の電場分布を測定している。あとは我々に発芽させられるだけの堆肥や栄養素を持っているかどうか、という問題が残るだけだ。