

大学における加速器科学教育

小方 厚*

Undergraduate Accelerator Education

Atsushi OGATA*

前号の平田論文のタイトルが「加速器科学における大学院教育」だったので、前後をひっくり返してタイトルとさせていただいた。博士課程後期における教育は論じられる機会が多いので、ここでは学部教育と博士課程前期（修士課程）に焦点をあてる。私の属する大学には放射光施設があるが、学部学生が特にこの施設を意識しているとは思えない。従って本稿の記述は一般的にどこの大学にもある程度当てはまると考える。

1. 学部教育と大学院教育

私の属する研究科（先端物質科学研究科）は理学部と工学部からピックアップした研究室を集めて作った独立大学院であるが、教員は学部教育も行うことになっている。学部側からは学部教育という労働を教員に等分配するため、大学院側からすれば卒論というかたちで大学院に、もっと直裁に言えば自分の研究室に進学する学生を確保するためである。教員が理学部で授業をするか、工学部で授業をするかで、大学院にやってくる学生が決まる。私の研究室「ビーム物理研究室」のスタッフ（小方 厚・岡本宏巳・伊藤清一）は理学部物理科学科に授業を持っているので、物理科学科の学部学生が当研究室で卒業研究を行う。そのうちの何人かが大学院に進学する。

研究科は「理工の融合」を謳っているが、工学部の学生が理学部系の研究室に進学した例はないしその逆もない。教員が学生を「囲い込む」ことがひとつの原因だが、学生も「囲い込まれる」ことに安住しているようだ。この囲い込み・込まれ現象はもっと大きいスケールでも見られる現象で、ウチからよその大学の大学院に進学する/よその大学からウチの大学院に進学してくるといふ例はきわめて少ない。

企業側は、学部卒業生はむかしの高卒、修士修了生はむかしの大卒と位置づけているようだ。したがって修士課程（博士課程前期）に進学する学生は多いが、博士課程後期まで進学する奇様な学生はすくない。平田論文にあるように、博士号を取っても未来があるとは思えないからである。博士課程後期の大学院学生の定員を充足するのは困難、あるいは不可能となりつつある。大卒後および修士課程終了後の就職先は、大学で学んだこと・研究したこととはほとんどの場合無関係で、最も多いのはいわゆるSE（コンピュータのシステム・エンジニア）である。

というわけで加速器とその周辺で飯を食うことになりそうなのは、「ビーム物理学」研究室および素粒子原子核実験に関連する研究室の博士課程後期修了者で、大学全体で数人/年である。それでも10年20年と蓄積すればある種の人脈ができあがる。ただしこれも大学の法人化に伴い、どうなるか先が見えない。いままでは教員がひとり抜ければ、その席を同じ分野で埋めることは自明であったが、このルールは消えそう。大学の経営が優先され、言い換えれば華々しく「産学協同」が出来そうな分野が優先されるのは目に見えている。加速器関係の研究室がどれだけ生き残りに耐えるか、不安なものがある。

2. 学部における加速器の授業

理学部と工学部では学部教育のカリキュラムに対する考え方に違いがある。理学部は「狭く深く」、工学部は「広く浅く」をめざしているようだ。従って加速器関係の授業は、大学院はともかく理学系の学部教育には存在しない（例外は大阪大学理学部物理学科の磯山悟朗氏担当の「放射光物理学」である）。どこの大学の物理学科でも、加速器は素粒子とか原子核とかの

* 広島大学大学院先端物質科学研究科 AdSM, Hiroshima University
(E-mail: ogata@hiroshima-u.ac.jp)

科目中で紹介される程度であろう。これに対し工学部の旧原子力工学・原子核工学系の学科のいくつかには、加速器の授業科目が存在する。すぐ後で京都大学の例を詳しく紹介するが、他にも東京大学工学部システム創成学科の「エネルギービーム応用工学」（門信一郎・上坂 充両氏の担当）、北海道大学工学部原子工学科「加速器応用工学」（澤村貞史氏担当）などがある。隣接する放射光分野の学部の講義には、上記阪大の「放射光物理学」の他、立命館大学電子光情報工学科の佐々木 誠、山田 廣成、井上 信 3 氏の担当による「放射光工学」がある。

私自身は理学系の「狭く深く」主義にはいささか疑問を持っている。言い過ぎかも知れないが、理学系教員の中には工学系教員にある種の優越感をお持ちの方がおられ、カリキュラムはノーベル物理学賞受賞者を輩出することを目指しているかのようである。しかし修士課程までの学生の大半の就職後の職種は SE である。私の学生時代に比べれば、教員ははるかに教育熱心で、学生もはるかに真面目に勉強しているが、社会の要請とずれている。もっとも社会が大学に何を期待しているのかはよく分からない。何も期待していないのかも知れない。

閑話休題。これは京都大学工学部物理工学科の柴田裕実氏による「加速器工学」のシラバス (syllabus, 細目にわたる講義予定; 今ではどの大学でもシラバスをネットで公表することが常識となりつつある) である。受講者は主にエネルギー理工学コースの 4 年生で、このコースには原子核工学サブコースとエネルギー応用工学サブコースがある。

1. はじめに (1 回)

加速器工学全般に関わる基本事項を理解する。(加速粒子の種類、加速器の種類ならびにマクスウェル方程式や運動方程式などの基本方程式)

2. 高電圧型加速器 (2 回)

高電圧型加速器について高電圧の発生原理と特徴ならびに性能について理解する。(コッククロフト・ワルトン型加速器などの高電圧整流型加速器、ヴェンデグラフ型加速器などの静電加速器)

3. 線形加速器 (2 回)

線形加速器について加速の原理、高周波の発生方式、位相の安定、粒子の集束などを理解する。(アルバレ型線形加速器、ディスク装荷型線形加速器、高周波四重極加速器)

4. 円形加速器 (4 回)

磁石を併用した円形加速器について加速の原理、ベータトロン振動、シンクロトロン振動、弱集束、強集束などに

ついて理解する。(サイクロトロン、ベータトロン、シンクロトロン)

5. 加速器周辺技術 (5 回)

加速器の周辺技術について () 内の事項を理解する (イオン源の動作原理と特徴, イオン幾何光学, 荷電粒子の電磁場による偏向, 集束, 分離, 真空に関して, 気体の基本的性質, 超高真空装置と真空度測定)。

すでに述べたように、大卒で加速器分野に就職する学生はほとんどいない。学部学生は、なにか物理の原理に基づいて精妙に作動する装置の一例を詳しく学び、それを別な形で将来役に立てることができればよい。そう考えると、単なる電磁気学の応用ではなく、相対論や解析力学や真空技術やエレクトロニクスが出てくるこの「加速器工学」は、学部学生にとってなかなか良い授業である。

問題は学生にとって加速器が身近な存在ではないことであろう。私自身は KEK から大学に移ったが、加速器は遠い存在になったとしみじみ感じている。教員である私がそうなのだから、学生にとっては自分とは関係ない装置である。柴田氏は授業に先立って学生にアンケート調査を行っておられるので、氏のお許しのもとでその要旨をご紹介します。なお、学生は高校の物理でサイクロトロン、ベータトロン等という単語は聞いたことがあり、履修者の一部である原子核工学サブコースの学生は、3 年生の学生実験 (選択必修) のテーマの中で 1.7 MV タンデム加速器を用いたラザフォード後方散乱の実験を行っているとのことである。

設問は次の 6 項目であった。

- (1) 「加速器」という言葉に対して何を思い浮かべますか。
- (2) 「加速器」に関して知識がある場合、どのような種類の加速器を連想しますか。知っているだけ種類をあげて下さい。また、特別 (特殊) な加速器を知っている場合、世界のどこにあるのか述べて下さい。
- (3) 「加速器」は自分にとって身近なもの、日常的なものと思えますか。思う、あるいは思わない場合もそれはどうしてですか。
- (4) 「加速器」はどんなところ、あるいはどんなことをするのに用いられていると思えますか。
- (5) 「加速器」は皆の役に立っていると思えますか。もし役に立っているとすれば、どういう風に役立っていると思えますか。
- (6) 「加速器」と呼ばれるものが日本にはどの位の数あると思えますか。ちなみに京大にある加速器を知っていますか。

(6)の前半の質問に対して学生が回答した台数は最小2台、20-30台がふたり、100-500台6人、1000台ひとり、あとは「わからない」であった。この質問に回答することは本誌の読者にとっても困難かも知れない。原子力委員会研究開発専門部会 第1回加速器検討会(2001年12月)における資料「日本の原子力研究と大学における加速器」(井上 信, データの出典は日本アイソトープ協会の統計表とのこと)によれば, 法的に放射線発生装置として監督官庁が把握している加速器は, 2001年3月現在で1100台を越えており, その8割近くは医療用, 特に放射線治療用の小型の電子線形加速器は700台を越えている。PET用のRIを作るための小型のサイクロトロンは数十台である(注:現時点では百台を超えて更に増えつつある)。教育機関の加速器は58台, 研究機関の加速器は163台となっている。また, 田川精一「ビーム利用の広がりとその経済効果」(KURRI-KR-68 京大原子炉2001)は, エネルギー3 MeV以下の日本の工業用電子加速器の台数は1998年の時点で300台弱とし, 電線被覆・発泡・熱収縮・タイヤ・放射線硬化などが用途にあげられている。

さて, 最初に戻って(1)から回答を眺めると, 「加速器」という言葉で思い浮かべることは実にばらばらだ。強いて言えば電磁気で荷電粒子を加速するという原理らしきもの, 巨大で高価というイメージ, 材料開発・癌治療・元素分析などの用途などが共通している。(2)で加速器として名前が挙がった第1位はサイクロトロン(6/16), 2位はSpring8(5/16), 加速器の種類と分類(たとえば円形加速器/線型加速器)と加速器の固有名詞(Spring-8, KEK-Bなど)は当然混乱している。(3)については16回答のうち15までが「身近なものとは思わない」であった。(4)の用途については材料開発, 癌治療といった回答が多い。「寿命の短い粒子を加速させて粒子の寿命を延ばして医療分野等で必要な時に用いる。粒子を加速, 衝突させてより小さい素粒子を作り, 物質や宇宙の起源を理解しようとする(原文のまま)」「相対論の時間のゆがみを測るのに用いられたとか聞いた」「反粒子を生成して粒子とぶつける」あたりが, 純粋な物理利用に対するイメージらしい。「どんなところ」に対しては「いなか」という回答が2例で, 兵庫の山の中・茨城県などが田舎の例として挙げられた。(5)で「役立っていると思うか」ときかれれば「思う」と答えるが, 具体的には分からない。「実用面…半導体を作る, 病院でのチリョウに使う, 物性…素粒子, 宇宙物理…夢を与える?(原文のまま)」あたりが最も良くできた回答か

も知れない。

「加速器工学」が学生にとっては抽象的な領域であることがわかる。KEKで私は, 加速器は高エネルギー物理学研究のためと認識していたが, (特に工学部の)学生にとっては加速器と高エネルギー物理学の結びつきはゆるい。

3. 加速器を主題とするゼミと卒論

広島大学の大学の理学部物理科学科では4年生は研究室に配属され, 卒業研究をして卒業論文を書く。学部で加速器関係の授業がなくても, 卒論の学生を受け入れる例は, 例えば兵庫県立大学大学院物質理学研究科の協力講座である「ビーム物理学」(所属:高度産業科学技術研究所)など, かなり多いのではないだろうか。うちの大学では研究室側は, 配属を希望する学生を成績順に受け入れ可能な人数まで採る。あぶれた学生は人気がない研究室にまわされる(この配属方法は毎年問題になる)。「ビーム物理研究室」はまだ7年の歴史しかないが, まあまあ人気がある方だ。

理学部で深く狭い教育を受けた4年生は, プラズマもレーザーも知らない。マックスウェルの方程式は(知識として)知っていても, インピーダンスとなるとお手上げで, オームの法則も高校で教わって以来ほとんど更新されていない。加速器に対する認識は, 上記京大の学生以下であろう。このような状況で, ゼミ形式で加速器に関連する勉強を始めることになる。最初の年度は教員(当時の言葉では教官)が4年生のゼミの面倒を見たが, いまではM1の学生が4年生の面倒を見ることが慣例となっている。最初はM1の学生に4年生のときに書いた卒論を新4年生に説明させる。このとき卒論のテーマの指針も与える。その後のゼミの大部分の時間は2本立てで, まとまったプラズマの本と加速器の本を読むことと, 卒論テーマと関連がありそうな論文を読むことにあてている。プラズマの本は私の興味がプラズマ加速にあるためもあるが, ビームを一成分プラズマとみなすことが出来ると考えるためでもある。夏休みまでは, 進学組は大学院の入試の受験勉強, 就職組は就職活動, さらに, できの悪い学生は取りこぼした単位の確保に忙しく, 卒業研究はおちおちやっつけられない。もっぱらこのゼミが研究との接点になる。

テキストとして英語のもの

- S. Humphries, Jr. "Charged Particle Beams" Wiley (1990).
- F. Chen "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion" Plenum (2nd edition 1984).

等を使ったこともある。しかし Chen の本は邦訳が存在するから、学生はこれを図書で借りてきてアンチョコにする。いっばう邦訳がないと遅々として進まず、ゼミというより英文和訳教室になってしまう。そのため最近はおっぱら日本語のテキストを使用している。ただし英語の勉強も目的のひとつと割り切れば、Chen の英語はとても良いと思う。

いちばんお世話になったのは

- 神谷幸秀「加速器の原理—シンクロトロンおよびストレージリング—」OHO' 84

である。神谷氏がお若いときに書かれたため、記述が若々しく、読者が親しみと共感が持てるようだ。前述の柴田氏は講義の参考書として

- 亀井 亨, 木原元央「加速器科学」丸善 (1993)。

をあげておられる。日本語の唯一の加速器の本であるから、大学院の講義でもあちこちで使われている。しかしこの本には多くの学生がとまどいを感じるらしい。彼らは A だから B であり、B だから C である…という直線論法の本に慣れている。いっばうこの本の構成は直線的ではなく螺旋的で、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow \dots A' \rightarrow B' \rightarrow C'$ という感じである。もちろんこの構成は必然性があることなのだが、ゼミで用いるよりも講義のサブテキストとして用いる方が適していると思う。

プラズマの本としては、前述の Chen の本の他に

- R. O. Dendy, 粥川・奥沢・青木訳 “Plasma Dynamics (プラズマダイナミクス)” Oxford Univ. Press (1990) 講談社 (1996)。

も使った。またハミルトン-ラグランジェ力学と特殊相対論の立場から書かれた

- 長谷川晃「基礎原理にもとづく工科大の電磁気学」岩波 (1995)。

を読んだこともある。また岩波講座：物理の世界に入っているものは、薄くて最後までたどり着けるところがよい。実際に使用したのは

- 平田光司「加速器とビームの物理」

- 高原文郎「天体高エネルギー現象」

の 2 冊であるが、

- 高部英明「さまざまなプラズマ」

もトピックスが要領よく広範に及んでおり、教員が補足説明をするという前提で使ってみたい本である。

研究室開設時は、教員も経験したことがないことを卒論のテーマとした。このときのテーマ、CR39 によるイオン種とエネルギーの同定、レーザーによるガスジェットの高電離などは現在のわれわれの研究室における基礎技術となっている。思えばこのころは面白かつ

た。現在では、大学院学生に与えているテーマから派生したものうち、なるべく短期間で結論が出そうなものを卒業論文のテーマとしている。ある年度の題目だけ書いてみると「高強度レーザーの薄膜照射によるイオン生成 (2 名)」「ビーム結晶化のラティス依存性」, 「バッファガスによるポルトラップ中のイオンの冷却」, 「カルシウムイオン冷却用レーザー共振器の開発」といったところだ。2 名とあるのはふたりの学生に同じテーマで協力させたものである。過去の実験では、パルス高をテスターで計ろうとする学生がいたりして、おもしろい。簡単な装置を作らせようとしたら、まず学生が段ボールと糊でモデルを作ったので、感心したこともある。

現実には 4 年生の指導のかなりの部分を大学院学生に負っている。これは当研究室だけではなく、またビームあるいは加速器という領域にかかわらず、どの研究室でも同じであろう。最後の卒業研究の発表はポスター形式で行い、指導教官以外と他領域の教員のふたりが採点するルールである。他領域の教員にも分かるように、自分の研究を説明できるはずなのだが、現実にはかなりお寒い結果になる。

4. 博士課程前期 (修士課程)

私の研究室 (ビーム物理研究室) の例では、卒業論文を書いた学生の 55% が博士課程前期 (修士課程) に進学している。こうして進学した学生の過半数は博士課程後期に進学することなく就職する。私の研究室では (2005 年 3 月修了見込まで含めて) 5 年間で 13 人の学生が博士課程前期を修了する。うち博士課程後期進学は 6 人で、残る 7 人のうち 6 人までが SE を職業とする結果となった。残る 1 人は自動車製造会社技術部勤務である。ここではこれらの就職組について記述する。

博士課程前期に進学すればゆっくり研究できるかという、そうはいかない。うちの研究科では 10 程度の講義の単位を取る必要がある。早く言えば、やたらに授業が多くて、そのほとんどが加速器ともビームとも関係ない。私の学生時代には学期末に適当なレポートを提出すれば単位がもらえたが、昨今は学生を授業に参加させることが奨励される結果、教師は学生を鞭撻しなければならない。学生は毎週レポートの締め切りに追いまかれる。

つぎは就職活動である。工学系の研究科では指導教官が大学院生の就職先を決める例も多いと聞かすが、理学系の研究科の教員にはそのためのコネも人脈もないので、学生が自分で開拓しなければならない (私的見

解だが、学生の自立性を養うという点ではこの方が良い。学生は広島を起点に東京・大阪・福岡あたりを飛びまわり、精神的にも不安定になる。それやこれやで学生が修士論文に専念できるのは半年ないし1年にすぎない。

博士課程前期ともなると、どの大学でも加速器を専門とする教員がいる研究科ではそれなりの講義が開設される。どの教員も、加速器の常識を教えることと、自分自身の研究（興味）の紹介とのバランスに苦心するようだ。広島大学にも「ビーム物理学」と称する講義があり、私と岡本宏巳氏が担当しているが、シラバス中のビームの集団不安定性、空間電荷効果、プラズマトラップ、レーザー・ビーム・プラズマの相互作用などの単語に教員の指向があらわれている。以下は兵庫県立大学物質理学研究科の安東愛之輔氏の講義のシラバスである。

1. ビーム重心系と実験室系：相対論的力学の復習
2. ビームを特徴づける物理量：エミッタンスと温度
3. ビームを有限領域に閉じ込める方法
4. 円形加速器中での単一粒子の運動と不安定性
 - 4-1 横方向運動 ベータatron振動
 - 4-2 縦方向運動 シンクロtron振動
5. 非線形運動の特徴
6. 決定論的運動からの不規則運動の発現
7. ビームの集団効果
 - 7-1 自ら作り出す電磁場とビーム不安定性
 - 7-2 インピーダンスとその発生源
8. ビームの振る舞いの検知と制御
ビームの診断とフィードバック
9. ビーム冷却
 - 9-1 フィードバックから超高性能ビーム達成へ
 - 9-2 冷却されたビームの性質 配列化と結晶化
10. ビームの生成 イオン源紹介
11. ビームの応用

上記科目は「ビーム物理学」と題されている。大阪大学理学研究科の佐藤健次氏担当の「加速器物理学」のシラバスはもっと加速器という装置よりに見える。

1. 日本の加速器と世界の加速、及び、加速器の基本構成とその利用（サイクロtron（直流装置）とシンクロtron（パルス装置））
2. ローレンツ力とマクスウェル方程式（電場による加速、運動方程式の一般的表式、電磁ポテンシャル）
3. 高周波加速空洞と伝送線路の原理（空洞共振器、半

- 同軸共振器、伝送線路のインピーダンス整合)
4. 電磁石の原理（双極電磁石、四極電磁石、強磁性体のヒステリシス特性）
5. シンクロtronの六大原理の発明と発見の歴史と種々の加速器（高周波共鳴加速、磁場による偏向、一定周回軌道上での加速、ベータatron振動、位相安定性、強集束）
6. 蓄積貯蔵型加速器の発明以降（コライダー、シンクロtron放射光源、ビーム冷却、大強度ビーム）
7. 一様磁場やサイクロtron磁場や磁気鏡磁場の下での粒子の運動（水平面内での集束、垂直面内での集束、磁気能率の断熱不変性）
8. 磁場の下での粒子の運動の変換行列による表現（漂流空間、セクター偏向磁場、四極磁場、斜め入射）
9. 変換行列の組み合わせと近似（薄肉レンズ近似、矩形偏向磁場、二連四極磁場）
10. ベータatron振動とリュービルの定理、及び強集束（円形加速器の変換行列の周期性、位相空間、交番磁場勾配集束）
11. 諸量のずれによるベータatron振動の変化（ヒルの方程式、フロケの定理、閉軌道の歪み、チューンシフト、共鳴、分散関数）
12. 非線形力を用いたビームの取り出し（六極磁場による三次共鳴、セパトリックスと安定及び不安定領域）
13. 非線形力に周期的摂動を加えたときに生じるカオス現象（セパトリックスのストカスティックな層による消滅、円写像）
14. 高周波加速におけるシンクロtron振動による位相安定性（波乗り加速、シンクロナス位相の回りの振動による位相安定性）
15. シンクロtron振動におけるリュービルの定理と断熱不変性（ハミルトニアン形式、位相空間、作用変数）

全国的に眺めると、放射光関連はもちろん、広島大学工学研究科の静間清・遠藤 暁両氏による「イオンビーム工学特論」など、ビーム応用に重点を置いた講義もかなり多い。さらに東北大学工学研究科量子エネルギー専攻では馬場護氏による「加速器保健物理学」というユニークな講義も開設される。

修士論文のテーマは、当研究室の場合はすでに述べた卒業論文のテーマと大同小異である。途中である程度の成果が上がれば（なかなか上がらないが…）、学会で発表させたいのだが、障害となるのは学会費・学会参加費・旅費である。とくに就職が決まっている学生は、学会費の支払いを嫌がるし、教員としても無理強いはできない。この点でビーム物理研究会は発表の

場として恰好である。

私の所属する研究科の方針として、英文で論文を書くことを奨励しているのので、就職する学生に限り英文で書くことを義務づけてみた。「就職後大学院で勉強したことが役立つかどうかはわからないが、英文で長い論文を書いたという経験は絶対に役立つ」と言ったら、学生はすなおに納得したようである。実際に役立っているかどうかはわからないが、書いたことで自信は持てたようだ。このために生じた教員側の負担については思い出したくない。博士課程前期で就職した学生の論文も、教員が書き直してなるべく論文誌に投稿するようにしている。なかにはけっこう評判の良いものもある。残念ながら、論文誌が刊行される頃には、主著者は修士論文のことなどすっかり忘れていて

5. おわりに

「加速器工学」と言おうと「ビーム物理」と言おうと、なんと言っても研究人口・就業人口が少ない。大

学はこの特殊分野と世間との架け橋みたいなもの…と言いたいのだが、多くの修士課程の学生は、この分野に2-3歩足を踏み入れただけで、またべつな橋を渡ってどこかへ行ってしまう。この原稿をご依頼いただいた趣旨は「後継者育成」であった。しかし教育したにもかかわらず後継してくれない学生について書くことになってしまった（かく言う私も大学で教育していただいたことはあまり役立っていないので、ぼやいても仕方がない）。大学で「ビーム物理学」という看板を出している研究室の内情の一部を雰囲気として感じていただければ幸いである。なお私の研究室には博士課程後期の学生も5人いて、水準に達した研究を進めており、社会に出た後も加速器に関連する分野で活躍してくれそうであることを、付け加えたい。

資料をご提供いただいた柴田裕実氏、安東愛之輔氏に感謝します。その他のデータはほとんどウェブからダウンロードしました。