

後継者育成

兵庫県立大学ビーム物理講座の場合

庄司 善彦*

Education of Graduate Student as an Accelerator Physicist at University of Hyogo

Yoshihiko SHOJI*

加速器科学の後継者育成というテーマで原稿依頼を受け、兵庫県立大ビーム物理講座の現状について書く事にした。平田氏（1巻2号）や小方氏（1巻3号）らの高い視点に立った評論に対して私の拙文は個人的、つまり「教育現場で私自身がどのように教育をしているか」という内容で、細かい話が多い。私はこの4月に初めての修士卒業生を送り出したばかりであって、実績、経験、能力の全てが不足しており、教育については試行錯誤中である事を断っておく。まずは、思いついた事から書いていこう。

ある本によれば、一流派を立てた剣豪はその技をそのまま弟子に伝える事は出来ないそうである。その剣法は彼の体型や能力と密接に関係しており、体型の違う弟子が真似ても強くなれない。さて、私自身が持つ大学院教育のイメージだが、それは体系的なカリキュラムに従った講義ではない。弟子は師匠の技を伝えるのではなく、独自の技をもって強くなるべきである。従って、加速器講座を修了した大学院生が加速器研究者になる必要は無いと考えている。こういった意味で、私個人は加速器分野の後継者育成に熱心とは言えないかもしれない。

1. 兵庫県立大学ビーム物理講座の周辺組織

兵庫県立大学（以下、県立大）は2004年に姫路工業大学（以下、姫工大）など県立3大学が合併して出来た新しい大学である、といっても、研究上は姫工大時代から大きな変化は無い。姫工大時代からの附置研究所が高度産業科学技術研究所（以下、高度研）であり、1.5 GeV放射光用電子蓄積リング「ニュースバル」を運用している。ニュースバルはSPring-8の1 GeV線形加速器を入射器としており、SPring-8施設内の1区画に設置されている。一方、研究所本部は

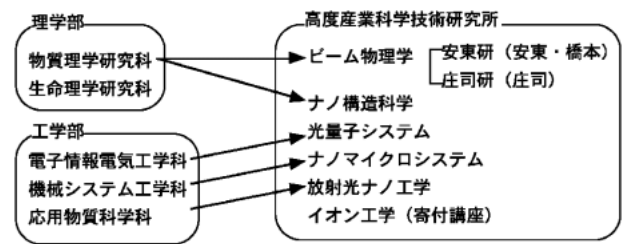


図1 兵庫県立大学ビーム物理講座の概略組織図

SPring-8から約2キロ離れた兵庫県の先端科学技術支援センター内にある。

図1はビーム物理講座周辺の概略組織図である。実際は学部と大学院は名前が違うなど面倒だが、そこは適当に省いた。高度研の常勤教官は5講座15名で、それに1寄付講座の2名が加わる。大学所属の技官はおらず、JASRI（SPring-8）から電気・機械設備と放射線安全管理の技術員が派遣されている。加速器やビームラインの面倒は教官が見ており、加速器担当はビーム物理講座の3人（教授：安東愛之輔，助教授：庄司善彦，助手：橋本智）である。このクラスの放射光施設としては貧弱な体制だが、改善の見込みは皆無に近い。

ニュースバルの他に750 keV線形加速器自由電子レーザー「LEENA」があり、量子システム講座（教授：望月孝晏，助教授：宮本修治，助手：天野壮）が研究に使っている。同講座は蓄積リングFELも研究しているので、広い意味での加速器研究講座と言える。しかし教官のバックグラウンドはレーザー工学であり、加速器研究という意識は無いようだ。Photocathode electron gunを研究して学位を取得した学生がいるが、彼の就職先は加速器関連ではなく、同講座

* 兵庫県立大学 University of Hyogo
(E-mail: shoji@lasti.u-hyogo.ac.jp)

の主要研究テーマの一つであるレーザープラズマ X 線源に関連した企業である。

2. 学生受け入れ状況

当初、高度研は姫工大の学部から独立しており、工学部所属の大学院生を委託される形で少数の学生を受け入れていた。ビーム物理講座も 2000 年に工学部から博士課程後期の社会人学生 1 名を受け入れている。その後 2002 年度から 3 講座が工学部、2 講座が理学部に分属し、正式な学生受け入れを開始した。

ビーム物理講座は理学部物質物理学研究科の協力講座¹となり、毎年「最多で 2 名」の学生を受け入れている。協力講座の受け入れ学生定員は通常の講座より少なく、しかも大学院進学希望者という条件が付く。物質物理学研究科外から受験して入学した院生に対しては、人数制限が無いが、実績も無い。ビーム物理の教官は学部講義を持たないので、学部学生への知名度が低く、学生確保には不利な状況にある。実際に初年度の所属希望学生はゼロであった。次年度（2003 年度）は 4 回生 2 名が配属され、共に大学院に進学して修士で就職した。2004 年度も 2 名配属だったが、1 名は大学院入試に失敗して学部卒で就職し、大学院に進学したもう 1 名は現在 M2 で就職が決まっている。2005 年度も 2 名で共に進学し、現在 M1 である。2006 年度は希望学生が無く、配属ゼロである。これまでの受け入れ学生総数は僅か 7 名ということになる。学生受け入れ枠が小さいので学生数が不安定になる一方で、密度の濃い教育が可能である。

3. 研究環境

研究活動の場は必然的にニュースバル蓄積リングとなる。ニュースバルは 1.5 GeV 中規模放射光リングであり、この規模のシンクロトロンを比較的自由に使える点は、加速器を学ぼうとする学生にとって大きなメリットである。事実「大きな装置を使える」といった理由で配属を希望した学生が(サンプル数の割には)多かった。

更に大きなメリットは、SPring-8 に隣接というより部分的に一体化している点にある。細分化された加速器の専門技術分野を教官 3 人でカバーする事は不可能であり、SPring-8 の専門家集団のサポートが不可欠である。

第 3 に、研究を主要業務とする研究所で教育を行う点である。以下は東大核研の常駐大学院生であった当時の森田浩介氏（現・理研前任研究員）が後輩（庄司）に言った言葉だが、「研究所では世界の風を頬に受けている実感がある」という事である。これも若い大学院生にとって貴重な経験であろう。

第 4 に、高度研が小規模である点を挙げる。少なくとも助教間風通しが良く、異分野の研究者との共同作業を行い易い環境である。

実は作年度から講座を「安東研」と「庄司研」に分け、配属された学生に所属を選ばせるようにしている。教官数わずか 3 名の講座を 2 分割する意義だが、「安東研」と「庄司研」では研究テーマの志向が異なるだけでなく、学生の教育方針も違う。次章で庄司研の方針を説明する。

4. 庄司研の方針

これまでの号に掲載された評論にある通り、現在の日本は大学院生に博士課程後期進学を強く勧める状況にない。例え進学しても加速器研究者として就職できる可能性は小さい。従って庄司研の教育は、将来は非加速器分野に就職する事を想定している。勿論加速器研究者として育てば嬉しいが、それには拘らない。

このような考え方に至った原因は私自身の経歴にもあるだろう。私の学位論文テーマは加速器との関係が薄く、そこで得た知識はあまり役立っていない。多くの加速器研究者と同様に、私が加速器の勉強を始めたのはこの世界に入ってから、つまり就職後である。私は原子核研究所の大学院生であったが、思い出すのも恥ずかしい大馬鹿であった。当時の実質的指導教官は大島隆義助手（現・名大教授）であり、どの分野にも通ずる基本的な研究姿勢を教えようとして下さったと思う。氏の努力にも関わらず私は馬鹿のままだったが、後から効く教育というものもあるのである。現在では、大学院生時代に受けた教育が私を支えていると感じている。

もう一步進めて言えば、加速器研究者にとって最も重要なのは加速器の勉強ではないだろう。Beam instability について議論できても、電磁誘導についてとんちんかんな理解では困る。笑い事ではなく、このようなケースが実際にあるのだ。重要なのは、加速器以前の、研究者としての基本または基礎である。

5. 初期教育

研究室に配属されたばかりの 4 年生にはノートを一冊支給し、ログノートの重要性和書き方を伝えてお

¹ 高度研所属講座の理学部内での位置づけとして作った言葉らしい。因みに寄付講座は、教官給与も含めた費用が民間企業等からの寄付で賄われている講座。

く。これは実験屋のイロハの「イ」なので大変重要なのだが、この教育手法は大島氏のマネである。

私は理学部の放射線取扱主任として従事者教育も行っているのですが、ついでに触れておく。まずは技術的知識を与えた上で、以下を強調している。

- (1) 放射線事故を起こすとどんな社会的制裁が待っているかを伝える。
- (2) ルールを守る責任は従事者個人にあると伝える。法定教育を受けて従事者になったら「学生だから」といった甘えは許されないといい渡す。現実には必ずしもそうではないが、そんな事は言わない。
- (3) 電気や、クレーンなど、危険を伴う作業についての注意も与えておく。同じ感電事故でも管理区域の外と中では事務的対応部分が異なる事を伝える。

やや精神論的だが、事故原因の大半は専門知識不足ではなく、ルールに対する無知無関心とルール違反である。安全上必要な知識は、講習後に行う試験で確認する。不合格では困るので、合格するまで再試験を繰り返している。

6. 講義プログラム

県立大の学部には加速器を教える講義は無い。大学院で初めて前期に私の「放射光用電子蓄積リング論」、後期に安東教授の「ビーム物理学」が始まる。講義やゼミは安東研と共同で行っている。私の講義シラバスを以下に示す。

講義目的：放射光用電子蓄積リングの軌道理論について講義する。ビーム物理専攻の学生を対象とするが、放射光利用分野の学生でも必要な電子蓄積リングの知識が修得できる。

授業計画：1. シンクロトロン構成要素/2. 電磁石と軌道方程式/3. Liouville's theorem/4. 遷移行行列と Twiss parameter/5. エミッタンスと保存量/6. COD/7. 分散関数と3次元遷移行行列/8. チューンシフトとストップバンド/9. FODO ラティスと DBA ラティス/10. RF 加速空洞/11. シンクロトロン振動と RF バケット/12. ベータトロン共鳴/13. クロマティシティー/14. 放射励起と放射減衰 (transverse)/15. 放射励起と放射減衰 (longitudinal)/16. ビーム寿命/

私の講義が加速器以外の学生も対象としているのは、開講された時点ではビーム物理学の学生数がゼロであったからである。内容は「入門」だが、大学院の講義

として相応しくないとの事で上記のタイトルになった。その後もシラバスは変えずに、ビーム物理講座の新入4回生にも受講させている。学部の単位にはならないが、大学院に進めば無条件で単位を与える約束である。講義テキストは、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。講義では適当に飛ばしたり(陽子シンクロトロン部分など)付け加えたりして(寿命部分など)使わせていただいている。テキストには豊富な「問い」が用意されているが、ほぼ全てを宿題としてレポートで解答を提出させ、添削して返却する。学生にはかなり負担の様子だが、実行させている。放射光利用系の学生も少数だが受講している(レポートを提出しなくても単位は与える)。これで、4回生の夏休み前に基礎知識が身に付く。

この講義をしっかりとこなせば、修士レベルには十分というのが私の考えである。勿論これ以上の加速器理論が不要という意味では無い。基礎がしっかりしていれば、必要になった時に学んでも十分間に合うという考えだ。実際に、加速器学会所属の研究者の多くが高度な不安定性理論を理解している訳ではないだろう。

私の講義が無い後期は、本来は学部で修了しておくべき基礎的な内容をレクチャーする事がある。困った事に物理実験の常識の多くについて学生達は教育を受けていないからだ。全学年を対象とするので講義テーマは毎年変え、その都度必要となった項目を取り上げる。これは、必要性が理解できないと本気で覚えることは難しいからである。これまで取り上げたのは、「統計学」中心極限定理は知らなくとも、 χ^2 を知らないのではデータ解析ができない。

「高周波」高周波ケーブルのインピーダンスくらいは理解して欲しい。反射を完全に理解すれば、RF空洞のビームローディング計算に必要なのは等価回路だけである。

などである。学生が独自に輪講すれば良いのだが、実現できていない。学生だけでは鍵となる概念をつかみにくく効率が悪いという事もあるが、通常の大学院講義の他に安東研のゼミも受けているので、学生に余裕が無いという事情がある。

安東研はゼミ(単位外のレクチャー)に熱心で、マシンスタディーに優先するという考えである。主として4回生とM1を対象にしており、内容は以下である。

「計算機の基礎」：4回生を対象に橋本助手が担当し、LabViewが使えるまでにしている。

「ビームモニター」：4回生を対象に橋本助手が担当。

CAS や総研大のテキスト等を使用。

「ビーム物理演習」：4 回生を対象に安東教授が担当。

独自の講義ノートを使用している。

「The Physics of Electron Storage Rings (M. Sands)」：M1 を対象に橋本助手が担当。

「ビーム物理」：M1 を対象に安東教授が担当。独自の講義ノートや総研大のテキスト等を使用。内容は Coupled bunch instability, 高周波加速等だが、年度によって内容が異なる。

「光源論」：M1 を対象に橋本が担当。必ずしも毎年行うわけではない。

「ビーム不安定性」：M2 を対象に安東が担当。必ずしも毎年行うわけではない。

7. 研究現場での教育

ハードの技術開発は既存の製品を組み合わせる程度で、マシンスタディーが研究の中心となる。これほどでも同じだと思うが、学生にも理解可能で、しかも短期的な成果が期待できるテーマを選ぶ。更に注意しているのは、学生に研究内容だけでなく、その意義と世界の研究の中での位置づけ、将来の見通し、などをしっかり説明しておく事である。結果として、学生が「これは先生の論文ではなく、自分の論文だ」と胸を張って言える事を目指している。

研究の中心となるマシンスタディーは、庄司研の人数が少ないので全員で行う事が多い。期限のある仕事を抱えた学生はスタディーから外して専念させる場合もある。スタディーの責任者となる学生がグループ共有のログブックを管理し、実験プラン作成から始まって、データの記録、解析からスタディーレポート作成まで責任をもって行う。また、データや解析結果は共有ハードディスクにコピーする。一回のスタディーに対して毎回スタディーレポートを書く事が原則である。勿論、私が担当者としてログブックを管理するテーマもある。ここで、更に実験の心得などを教え込む。例えば、「実験の成果は、準備段階で決まる」とか、「同じ実験をそのまま 2 度繰り返しても意味が無い」などは計画の段階で繰り返し言う事になる。

研究室の人数が少ない為に、どうしても一人の学生は数件のテーマに関与し、そのうち 1 件以上に責任を持たされる。数件の中には研究とは呼べないテーマもある。レーザートラッカーを使ったリングのアライメント、NEG 活性化に伴う真空作業、RF ローレベル系の組み替えと較正、混雑した信号ケーブルの整理と配線表づくり、といった雑作業である。これらも可能な限り学生に任せる。私一人では出来ない作業も

彼らの助けで終わらせる事ができるし、教育的意義も大きいと考えている。

さてテーマ内容だが、これまでの学生による研究発表実績を表 1 に示す。庄司研のテーマは線形加速器やアンジュレーター絡みが多く、所謂リングのビーム物理からは外れぎみである。また、共著者には SPring-8 のメンバーや高度研の放射光利用系の教官が多数入っている。これらの交流の最大の効果は、学生が研究室の狭い視野から解放される事だと考えている。例えば、SPring-8 の線形グループ、RF グループ、モニターグループ、理研や高度研の挿入光源グループ等々、には学生が直接質問を持っていく。皆さん親切で丁寧に対応してくださり、社交辞令ではなく感謝しっぱなしである。学生は質問への解答だけでなく、SPring-8 スタッフの対応自体にも感激して帰って来る。

先に研究テーマの意義の説明を重視していると書いた。庄司研のテーマは一見ばらばらなので、これらのテーマ間に有機的関連があることを認識させないと、学生は混乱してしまう。更に学生がオーバーロードになる恐れがあるので、原則として週に 1 回ミーティングを開き、各人の作業進行状況をチェックしている。ここでは、研究上のアドバイスだけでなく、複数の作業の優先順位を決めたり、作業を別の学生又は私自身に移す事もある。ミーティングの目的は学生の管理ではなく、学生に自己管理を学ばせる事なので、常に学生に発言を求めるように心掛けている。

8. 学生の研究発表

学生には積極的に発表させ、M2 では複数の発表ができるように指導している。勿論、発表の多さが就職などに有利に働く点も考慮しての事である。通常一つの研究テーマの中には必ず副次的な課題があって、それをも解決している。この副次的課題も、独立した研究発表として纏めさせる。発表として纏める頃には、数編の英文の引用文献を読む事になる。最初の 1~2 編は私が与え、後は自分で検索させる。しっかりした journal paper より conference proceedings が多いのが悩ましいところである。M2 の成果目標は journal paper だが、在学中に accept されるようにスケジュールを組む。卒業後ではレビューとのやりとりを経験できないし、奨学金返還免除申請に使えないからである。学生発表に限らず、庄司研では成果発表から逆算して様々なスケジュールを決める事が多い。

ここで表 1 の研究発表実績に戻って頂きたい。学生が筆頭著者となっている発表と論文に限定し、卒論、修論も省いてある。大学の偏差値は高くないが、優秀

表 1 兵庫県立大学ビーム物理講座所属学生の研究発表実績

発表年	学生名(学年)	雑誌 または 学会	論文または発表タイトル	
2002	福田義博(D3)	原子核研究 Vol. 47, No. 3, pp. 19-28	ニュースバルのビームサイズ測定に関する研究	
	福田義博(D3)	Nucl. Instr. & Meth. A485, pp. 805-810	Skew quadrupole field and dispersion in newSUBARU	
2003				
2004	久尾信太郎(B4)	日本物理学会	NewSUBARU における放射光干渉計を用いたビーム診断	
	松原貴裕(B4)	日本物理学会	NewSUBARU 蓄積リングの1次のモーメンタムコンパクションファクターの測定	
	松原貴裕(M1)	加速器学会・リニアック研究会	ニュースバル蓄積リングのストリークカメラを用いた線形加速器ビームパラメータの計測	
2005	久岡義典(M1)	加速器学会・リニアック研究会	ニュースバルにおける電子ビーム軌道の変動	
	(安東研)	(庄司研)		
	久尾信太郎(M2)	加速器学会・リニアック研究会	ニュースバルにおける792 MHz RF 空洞の HOM による不安定性の観測	
	久尾信太郎(M2)	加速器学会・リニアック研究会	NewSUBARU における放射光干渉計を用いたビーム診断	
		松原貴裕(M2)	加速器学会・リニアック研究会	蓄積リングのストリークカメラを用いた線形加速器ビームのエネルギー分布の計測
		松原貴裕(M2)	加速器学会・リニアック研究会	モーメンタムコンパクションファクター計測の新技术
		松原貴裕(M2)	加速器学会・リニアック研究会	ニュースバル偏向電磁石ビームラインの光学系確認と再調整
2006		三井貴之(B4)	日本物理学会	NewSUBARU におけるパルスセプトラムの漏れ磁場分布の補償
		久岡義典(M1)	日本物理学会	NewSUBARU における 11 m 長尺アンジュレータのスキュー四極成分の補正とビームを用いた確認
	久尾信太郎(M2)		日本物理学会	ニュースバルにおける RF 空洞の 792 MHz HOM による Transverse Coupled Bunch Instability の観測
		松原貴裕(M2)	Phys. Rev. ST-AB Vol. 9, 042801	Bunch-by-bunch linac beam energy profile diagnostics using storage ring phase rotation and synchrotron radiation
		松原貴裕(卒)	SRI 2006	Confirmation and readjustment of beam line optics using SHADOW
		松原貴裕(卒)	SRI 2006	Circulation of short and intense electron bunch in NewSUBARU storage ring (口頭発表だったので、代理で庄司が発表)
		久岡義典(M2)	SRI 2006	Beam Based Confirmation of Skew-Quadrupole Field Correction in 10.8 m Long Undulator (highest poster presentation award 受賞)
	久尾信太郎(卒)		EPAC 2006	Transverse Coupled Bunch Instability Driven by 792-MHz HOM in NewSUBARU Electron Storage Ring
	増田貴士(M1)		加速器学会・リニアック研究会	NewSUBARU における Ion Trapping 現象及び電子ビーム寿命の評価
		三井貴之(M1)	加速器学会・リニアック研究会	NewSUBARU におけるパルスセプトラム電磁石の漏洩磁場の測定
		久岡義典(M2)	加速器学会・リニアック研究会	10.8 m 長尺アンジュレータのスキュー四極成分の補正とビームベースの確認
		久岡義典(M2)	加速器学会・リニアック研究会	真空外 10.8 m 長尺アンジュレータ用真空チャンバーの調整による最小ギャップの改善

な学生が入ってきており、量的にも質的にも誇れる実績だと自負している。昨年度の M2 は在学中に Phys. Rev. ST-AB に論文を通し（この上に別テーマで修論を書いた）、今年度の M2 は国際会議でポスター賞を受賞している。

9. 安東研の方針

ここまでは主として庄司研の状況を述べてきたが、ここで安東研の方針についても触れておく。庄司研が現場主義的であるのに対して、安東研は「ビーム物理

講座はビーム物理学を学ぶ場である」という考えのようだ。

具体的に言うと、安東教授の講義はやや高度なビーム物理で、「重心系と実験室系」から始まり、「非線形運動」、「不安定性」、「ビーム冷却」に及んでいる。ここには示さないが、1巻3号の小方氏の評論にシラバスが掲載されているので御覧頂きたい。内容が高度なのは、前期に庄司の講義がある事とは関係なく、大学院レベルの「ビーム物理」を意識した為である。また、ゼミなどによる座学への力の入れ方は先に述べたとおりである。

学生の研究テーマにしても、安東研は storage ring の beam instability というビーム物理らしいテーマを採用しており、発表の共著者もビーム物理講座のメンバーである。様々な雑作業についても庄司研とは逆で、学生の動員を意識的に控えている。更にログブックの扱いや考え方、スタディーレポートの位置付けに至るまで、庄司研とは大きく違う。

安東研と庄司研の思想は両極端に近いかもしれない。この思想の差は、こちらは正しくこちらは誤りといった種類のものではないだろう。講座分割は効率的では無いが、異なる2つの立場が並立している状態が正常で、より安定だと考えることもできる。

10. 就職先

小方先生によれば、広島大学はシステムエンジニアが多いという事だが、県立大は学部卒の1名が情報関係へ就職した他は様々である。最初の社会人学生（博士）は SPring-8 の運転業務等を請け負う SES（スプリングエイトサービス）に再就職して SCSS のビームラインで働いている。初年度の修士2名は重機メーカーと計測器メーカーに就職し、現 M2 の就職内定先は医療機器関連である。重機に就職した学生は加速器部門を希望したらしいが、もっと利益の出易い

部門に配属されるらしい。

11. 終わりに

ここまで、庄司研がうまく回転しているかのように書いたが、勿論そんな事は無いし、綻びも多い。かなりエラそうな事も書いてあり、自分でも驚いている。実情は毎日が崖っぷちの自転車操業なので、長期間継続させる事に無理があるとも感じている。一方で、来年度は否応無く方針転換を迫られるかもしれない。現在、夜間の線形加速器からのビーム供給は R&D 用という理由で課金対象にならず、マシンスタディーに使い放題である。しかし、来年度は交渉相手が JASRI から理研に換わるので、スタディー時間が制限される可能性がある。

私が学生をうまく育てているように読めたら、それも誤解である。私が面倒を見た優秀な学生は元々優秀であって、私が教育したから優秀になったのでは無い。これは実感である。確かに、日々の研究活動の中で学生が成長していくのは見えるが、学生を最も成長させたのは就職活動である。これは小方氏も書いていたが、理学部に推薦入学は無いので、自力で会社を訪問して様々な経験をして戻って来る。大学院生に限るが、就職活動を終えた時の学生は皮剥けたというより、人間が出すオーラが変わった印象だった（3人しか見ていないが）。我々教官が行う教育に限界を感じる時だが、後で効く教育もあると信じて力を尽くすだけである。

情けない締めくくりになったが、これも経験が浅いためと楽観的に考えて頂きたい。最初に「試行錯誤中」と書いた意味が御理解頂けたらどうか。最後になったが、関係者が少ない為に、記述内容中で個人名の特定を避けることは不可能であった。ご迷惑をおかけする事があるやもしれず、先にお詫びさせて頂く。