

後継者育成

サマーチャレンジ 2008 演習 8 「超伝導材と超伝導高周波加速空洞」を担当して

齋藤 健治*1・古田 史生*2

Report on the Experimental Exercise No. 8 「Superconductors and Superconducting Radio Frequency Accelerating Cavities」 in the Summer Challenge 2008

Kenji SAITO*1 and Fumio FURUTA*2

1. サマーチャレンジ

今年もサマーチャレンジで暑い夏が飛び去った。今、その開放感に一息ついている。サマーチャレンジは、昨年からはじめ、今回で2回目である^{1,2)}。KEK主催で、全国の大学の先生方の情熱的支援による原子核・素粒子・宇宙・加速器の集中講義・実験講座である。主として大学学部3年生を対象として、例年8月中旬から下旬にかけ9日間の日程で行っている。日本全国の大学から応募者を募り、80~90人の学生を自推内容や男女のバランス等色々な条件を考慮に入れて選抜する。倍率は今のところ2倍程度である。参加者は、理学部・工学部等の広い分野にまたがっている。理工系学生の啓蒙、原子核・素粒子分野の大学院生の確保に狙いがある。

学生はこの期間 KEK つくばキャンパス内の学生宿舎に寝泊りし、J-PARC の見学を除けば KEK に缶詰状態になる。講座期間中、午前中はこの分野の有名講師陣による講義、午後は13個(H20年度)の演習課題に分かれて、一演習課題当たり6人程度で実験する。その合間に KEKB, J-PARC の加速器施設や KEK の放射光施設の見学が織り込まれている。最終日には、各演習課題の発表会を行い、優秀グループには賞が与えられる。参加学生全員に、“将来の博士号”として、“演習終了書”が渡される。

講義は朝9時から始まり、午後は夕方6時まで実験、休みなしのハードスケジュールである。実験グループによっては夕方6時に切り上げられず、夜中あるいは明け方までやる場合もある。演習を担当する



図1 サマーチャレンジ2008演習8の参加者。右から、松田(立命大・情報工学・情報コミュニケーション・3年)、TAの許斐(名大・物理・M2)、広田(お茶大・理・物理3年)、講師の古田(KEK)、中川(電通大・電気通信・量子理工・3年)、高木(横国大・工・知能物理・3年)、寺田(東大・理・物理3年)、講師の齋藤(KEK)

教官やティーチングアシスタント(TA)もへとへとになる。我々は5人の学生の参加で、演習課題8の「ニオブ材と超伝導高周波加速空洞」を担当した。図1は、今年の参加メンバーである。

2. 加速器の実験演習課題の設定

実験演習は、大学の先生方が学部でやっている実験を持ち込まれることが多い。実験器具の移動や環境の違いからそれはそれで多くの苦労があるようである。素粒子実験テーマの典型例は、地球に降り注ぐミュー粒子の検出とその寿命測定である。その他に粒子・光

*1,*2 高エネルギー加速器研究機構(KEK), 加速器研究施設
High Energy Accelerator Research Organization(KEK), Accelerator Lab.

検出器に関わる実験が多い。

しかし、加速器分野で学部3年生を対象にした実験演習を設定するのは、それほど容易でない。特に超伝導に限ると難しい。3年生の夏までにどれ程の専門科目が習得されているだろう。自分の学部時代を思うと、加速器で必要な交流の電磁気学はこれからだろうし、ほとんどやらない大学もある。量子力学もしかりである。学生の力量と講座の期間を考えるとテーマは極めて限られる。一方、我々の研究開発の先端に触れさせ、研究の楽しさを共有させてやりたい、また KEK でしかできないような実験をさせたいなど色々な欲が生じる。

加速器の演習では例えば、「空洞の RF 設計とその RF 特性の測定」がお手頃かも知れない。Maxwell 方程式から出発してピルボックス空洞を設計させる。そこで必要なのは水素原子の Schrödinger 方程式を解く手法と Bessel 関数くらいで、学生はすでに物理数学で勉強しているだろう。ピルボックス空洞を設計させた後、前もって製作しておいた常伝導ピルボックス空洞をネットワークアナライザを使って測定させ、共鳴周波数や加速モードの Q 値を求めさせる。また、高調波を測定させ、モノポールやダイポールのポーラリゼーションを見させる。そして理論と測定結果を比較し、Maxwell 方程式が空洞電磁設計に如何に有効かを会得・感動させる。

しかし、超伝導空洞の開発研究を専門にしている我々には、これでは物足りないのである。もう少し自然現象の面白さとそのダイナミクスに感動させたい。その意味では、この演習例で常伝導空洞を超伝導空洞に置換えるのが理想的である。しかし、演習時間が実質 29 時間しかなく、空洞の低温性能試験を含めると時間が少なすぎる。また、内容が多すぎて学生の消化不良が心配される。

2.1 ニオブ材の RRR の測定

色々悩んだあげく、学生には我々が日頃超伝導空洞製作に使っているニオブ材で超伝導現象を体験させると同時に、超伝導空洞を製作する場合の材料の選び方を理解する演習プログラムを設定した。具体的には、ニオブサンプルの残留抵抗比 (RRR) を測定させ、ニオブ材の純度を評価させる。式(1)に示すように RRR は 300 K でのニオブの電気抵抗と超伝導臨界温度 ($T_c=9.25$ K) 直上での電気抵抗の比で定義され、材料中に含まれる不純物の濃度 $w(i)$ に逆比例する。(1)では C_i は水素、炭素、窒素、酸素などニオブ中の不純物濃度の RRR への重みを表す。

$$RRR = \frac{R(300\text{ K})}{R(\sim 9.5\text{ K})} = \frac{C_H}{w(H)} + \frac{C_C}{w(C)} + \frac{C_N}{w(N)} + \frac{C_O}{w(O)} + \quad (1)$$

超伝導空洞の性能を保証するには、高純度材を使う必要があり、現状では $RRR > 200$ のニオブ材が使われている。

RRR の測定ではサンプルを一度超伝導状態にした後、ヒーターでサンプルを温めて超伝導が破れたところでの電気抵抗を測る。抵抗の測定は4端子法であり、特別難しいことはない。サンプルを液体ヘリウムで冷やし、ヒーターで超伝導状態を破ることを何度もやらせられるので、学生には超伝導状態の“熱的転移”を体験させることが出来る。この DC 抵抗零の観察は、高温超伝導の学生実験で最近の学生には珍しくないことかも知れないが、これは超伝導現象の一つの重要な定義である。測定サンプルについては、材料に興味を抱かせるためにニオブ (第2種超伝導体) の多結晶 (従来からの材料)、巨大結晶、単結晶の3種類、タンタル (第1種超伝導体, $T_c=4.5$ K) を選定した。ニオブのサンプルでは最近、巨大結晶ニオブインゴットが会社レベルで製造可能になったので、まずそのインゴットをスライスして板材を作り、そこからいくつかの結晶をまたぐようにサンプル (巨大結晶サンプル) を切り出した。また、その巨大結晶の一部から単結晶サンプルを切り出した。

2.2 超伝導磁化曲線の測定

もう一つの実験は、超伝導状態での磁化を測定し、マイスナー効果を体験させることである。これは、電磁誘導の実験である。外部磁場の上昇と共にサンプルに巻きつけたピックアップコイルにどんな出力波形が発生するか予想させ、また、超伝導が破れた時ピックアップコイルに発生する電圧が、測定限界よりも十分大きな出力を発生するために必要なコイルの巻き数を計算させ、実際にコイルを巻かせる。実験ではこのピックアップコイル出力を積分計に入れて、外部磁場の上昇時間毎に積分出力をロガーに取り込み、そのデータをパソコンで各自解析して磁化曲線を求め、下部臨界磁場 (H_{c1})、上部臨界磁場 (H_{c2})、さらにはその磁化曲線を積分して熱力学的臨界磁場 (H_c) を求める。まさに、テキストに書かれている超伝導入門コースである。液体ヘリウムでサンプルを $8\sim 2$ K まで冷やして、 H_{c1} , H_{c2} , H_c の温度依存性を求めさせる。

ここまでは、純粋に物性実験演習である。超伝導空洞と結びつけるために彼らの実験で得られた H_{c2} と

Hc から Abrikosov の第二種超伝導体の理論³⁾と講師齋藤の仮説⁴⁾である“フラックス核生成説”を使って、その材料で超伝導空洞を作った場合の最大加速電界を予想させる。この齋藤の仮説とやらは怪しげであるが、一応 ILC の 50 MV/m 空洞の開発でベースと成っている仮説で、我々の研究では実証されたと考えている⁵⁾。

3. 演習風景と実験結果

我々が作った講義ノートを使って、古田 (KEK, COE) が実験講義を担当し、その後実験作業に入った。低温実験では冷却中などに待ち時間が多いのでその合間に、加速器一般、ニオブ材料の製法、超伝導空洞の設計・製法、超伝導空洞性能を制限する物理現象やその克服のための対策、表面処理法などの補足講義を齋藤が担当した。図 2 は演習中の一般的風景である。図 3 は、実験演習で出された演習問題を学生達が議論しながら解いている様子である。

3.1 RRR の測定

図 4 は、RRR 測定のサンプルを切り出した多結晶ニオブ板と最近製作可能になった巨大結晶のニオブ板

である。ILC 超伝導空洞製作用のニオブ板材である。板の直径は共に 270 mm、板厚は 2.8 mm である。図 5 (左) は RRR 測定サンプルに 300 V の電圧をかけて、サンプルに細い銅線の電流端子を溶着してる様子を示す。右の写真は 4 端子の溶着後、絶縁テープを巻いた RRR サンプルである。

図 6 は、8 個のサンプルを直列に繋ぎ、 ± 1 A の直流電流を流し、4 端子法で常温での抵抗値を測定した後、液体ヘリウムで 4.2 K まで冷やし、サンプルをヒータで温めて超伝導状態を破って、超伝導臨界温度直上での電気抵抗を測っている様子である。図 7 はそ

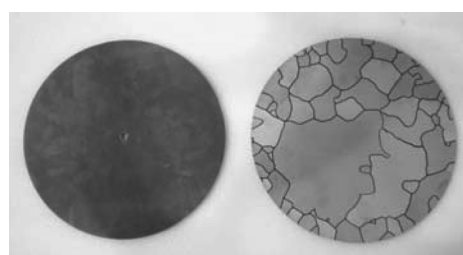


図 4 RRR 測定に使った多結晶 (左), 巨大結晶 (右) のニオブ板



図 2 実験演習中の一般的様子。場所は KEK AR 東第 2 実験棟である



図 3 実験演習講義で出された演習問題を学生達が議論しながら解いている様子



図 5 ポイント溶接器で RRR 測定サンプルに銅線を溶着している様子



図 6 RRR 測定の様子。超伝導転移を観察している

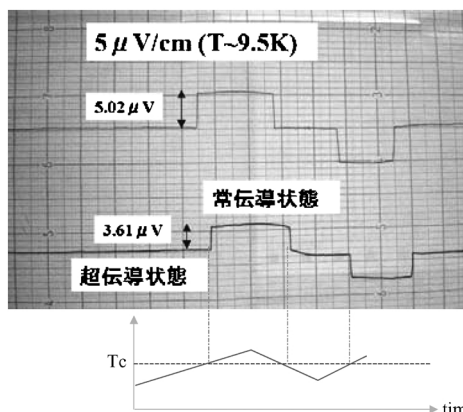


図7 超伝導臨界温度直上での電気抵抗の測定．ヒータでサンプルを暖めて超伝導を破る．超伝導が破れるとヒータを止めて、しばらく待っているとサンプルは回りの熱アンカーで冷やされて再び超伝導状態になる



図8 超伝導磁化測定用コイルとコイル巻き．上下のコイル線の巻き方向が互いに逆になっている以外は、同じである．上部の空芯コイルによりサンプルとコイルの隙間の効果をキャンセルして真の磁化が測定できる

の時のレコーダー出力で、図6に写っている学生は超伝導状態をOn/Offすることで超伝導転移を観察している．図6では、この現象を真剣に観察する学生の横顔が印象的である．

3.2 超伝導磁化曲線の測定

RRRの測定に引き続いて演習第3日目から超伝導磁化測定に移った．図8は磁化測定用のピックアップコイルとそのコイル巻きの様子である． $8\phi \times 250$ mmのガラスの試験管に0.2 mmの銅線を互いに50 mm離して、夫々約300 mm幅で逆巻きに250ターン巻き、直列に繋ぎ5 mm幅、2.8 mm厚、長さ150 mmのサンプルに試験管ごとかぶせる．サンプル上部の空芯コイルは、サンプルとコイルの隙間から発生する誘導起電圧をキャンセルし、真の磁化を測るためのものである．図9は、完成した超伝導磁化測定サンプル



図9 完成した超伝導磁化測定測定サンプル



図10 超伝導磁化特性の測定風景．学生達が、実験前にデータの測定方法を講師の古田より教わっている．

である．サンプルは、超伝導コイルに内に挿入するための銅製フランジに固定されている．

サンプルを外部磁場励起用の超伝導コイルの中にセットし、液体ヘリウムで8 K~2 Kまで0.5 K毎に細かな温度区切りで冷却し、超伝導の磁化曲線を測定した．図10は、超伝導磁化曲線の測定の様子である．学生達は実験の事前に講師の古田からデータの取り方を教わっている．図11は、TAの許斐(名古屋大学、M2)のアシストの下に、各人に割り当てられたデータをパソコンで解析して、超伝導の磁化曲線、またそれを積分してHcを計算している風景である．今回の実験で学生達が測定した超伝導磁化曲線を第2種超伝導体であるニオブ(図12)と第1種超伝導体のタンタル(図13)について示す．超伝導の磁化曲線は図の中で共に赤線で示されている．青い線は外部磁場である．測定温度は共に3 Kである．タンタルは第1種超伝導体なのでHcの所でもっとシャープに磁氣的遷移が起きるはずであるが、今回のサンプルは不純物が多いためか、あるいは材料がよく焼きなまされていないためにtype-II likeの磁化曲線が測定された．



図11 データ解析の様子。TAの許斐（名大・物理・M2）のアシストの下に、各人割り当てられたデータをパソコンで解析している

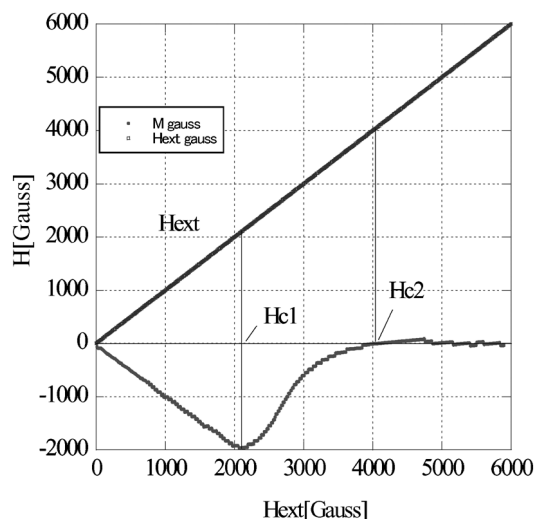


図12 3 K で測定したニオブの超伝導磁化曲線

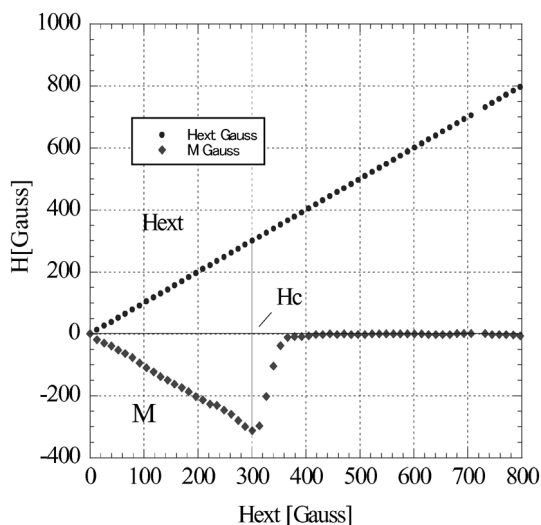


図13 3 K で測定したタンタルの超伝導磁化曲線

4. 演習実験の実際

実験は1人のTAが5人の学生に混じり、二人一組都合3チームで行った。演習実験は、プログラムのスケジュール上、初日8月19日は、1時間半しか割り当てがなく、実験講義のみに終わった。2日目、3日目はそれぞれ3時間の割り当てで、2日目はRRRのサンプル作りで、夜9時頃まで作業した。3日目はRRRの測定を行い、夜11時ころまで頑張った。4日目は4時間半の割り当てで、超伝導の磁化測定サンプル作りに進む予定であったが、RRRの解析が進んでおらず、半分の時間をそれに回さざるを得なくなった。残りを磁化測定用のピックアップコイル作り当てた。夜中まで作業した。

5日目（8月23日）は東海ツアーで学生は全日見学に行き、学生には悪いが講師陣は休みを取った。6日目は、多結晶ニオブサンプルの磁化測定を行った。磁化測定結果がばらつき、またデータ解析に予想外の時間がかかった。我々は、昨年度の経験でデータ解析を少し甘く見ていた。昨年度は学生の中に自前のパソコンでどんどん解析を進める牽引者がいたために大いにはかどったが、今年の学生のキャラクターは少し違った。磁化測定結果がばらつく理由としてサンプルの表面欠陥の存在を疑い、その除去のために翌日750°Cで3時間の真空熱処理を工作センターで行い、再測定したが結果は変わらなかった。7日目は第1種超伝導体のタンタルの超伝導磁化を測定した。結局、発表には6日目に測定した多結晶ニオブと7日目に測定したタンタルの結果を使ってまとめることにした。8日は、発表原稿作り、発表練習で徹夜し、学生は勿論、若い講師陣（古田、許斐）は一睡も出来ない事態になった。講師の齋藤は体力の限界を感じ、夜中の2時には帰ってしまった。このように実際に演習実験では、学生のキャラクターやこちらの準備不備などで予定が狂い、あたふたすることや連日連夜の作業が続いて疲れ切って、その後1週間ほどは何もしたくない状態に陥る。9日間休みなしでこのプログラムに参加した学生もさぞかし大変だったと思う。

5. 参加学生の感想

我々の課題演習に参加した学生から感想を聞いた。「サマーチャレンジに参加して同僚の大切さを感じた」、「先生が熱かった」、「仲間が大切やで」、「実験は疲れると感じた、ちょっとニオブが好きになった」、「不思議と穏やかな気持ちになりました」などの感想が寄せられた。実験での人との協調性の重要性は学ん

でくれたようである。また、講師陣の情熱は伝わったかと思う。学生の本音を言えば、ハードな実験スケジュールに大層疲れたようである。

6. サマーチャレンジの大学院進学効果

サマーチャレンジプログラムが学生の進路にどう影響しているか、プログラムに参加する者として非常に興味がある。2008年の原子核・素粒子実験・加速器専攻の東大大学院入試では、2次口述受験生の20%弱が昨年サマーチャレンジを専攻動機にあげている。この受験生の中には、加速器専攻を希望する者は居なかったが、サマーチャレンジが大学院進学者の原子核・素粒子物理実験選択に大きな影響を与えていること窺える。他大学の調査にも興味をそそられる。

今回の我々の演習課題は物性向けである。事実、昨年は将来超伝導物性研究を希望する学生が多かった。我々のような実験演習では物性分野に学生を逃がしてしまった可能性が大きい。大学院の受験者を加速器専攻に向けるにはサマーチャレンジの加速実験演習内容の再考が必要である。もっと加速器を中心にした演習課題の設定が必要かもしれない。また、もっと多くの

加速器の実験演習が必要かと思う。来年度、もっと多くの加速器教官のサマーチャレンジ参加を期待して筆を置く。

参考文献

- 1) <http://ksc.kek.jp/>
サマーチャレンジ編集委員会：第1回大学生のための素粒子・原子核スクール「サマーチャレンジ」～究極の物質像に挑む～2007
- 2) サマーチャレンジ編集委員会：第2回大学生のための素粒子・原子核スクール「サマーチャレンジ」～究極の物質像に挑む～2008
- 3) A. Abrikosov, “On the Magnetic Properties of Superconductors of the Second Group” *Soviet Phys, JETP*, **5** (6), pp. 331–358, 1957.
- 4) K. Saito, “Theoretical Critical Field in RF Application”, Proceedings of the 11th Workshop on RF Superconductivity, 8–12, September 2003, Lubek/Trademunde, pp. 1–16.
- 5) F. Furuta *et al.*, “Experimental Comparison at KEK of High Gradient Performance of Different Single Cell Superconducting Cavity Designs”, Proc. of EPAC2006, Edinburg, UK, 26–30 June 2006, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e06/PAPERS/MOPLS084.PDF>