講義「先端材料科学」

— 一つの試み —

小 川 恵 一*

1. はじめに

科学技術は新素材あるいはプロセス[†]技術の発見によって大きなブレークスルーが起こる。人類の歴史が石器、青銅器、鉄器、シリコンと、各時代に広く使われた材料によって分類されるのはそのためであろう。材料科学の最前線は文明の最前線でもある。

先端科学技術が材料に求める条件は高性能、多様を極める。その背景となる学問分野も物理、化学は勿論のこと生物学(例えば生体材料)、経済学、果ては環境倫理学⁽¹⁾も巻き込む。「先端材料科学」の求めているものが good old days の冶金学の単なる延長上にないことだけは明らかである。それでは私たちは「先端材料科学」をどのように組み立て、教えられるのだろうか? 将来、先端材料を扱うことになる学生に、いかなる視点のもとで、どの程度の範囲の項目を、どの程度のレベルにまで教育すればいいのだろうか?

先端材料の研究開発を進めるためには、当然のことながら先端科学技術を駆使しなければならない。超高真空技術、先端的分析機器、原子・分子スケール制御、コンピュータ制御などなどである。材料も金属、セラミックス、半導体、有機物、果ては生体物質そのものまでも扱わなければならない。参加すべき学会も、金属学会、物理学会、応用物理学会、化学会、…と切りがない。

学部4年間の教育で、先端科学技術をそこそこまで体得させ、学会での先端的情報をそこそこまで把握させるようにすることは可能だろうか。この無理難題に対する、私のささ

やかな試みを以下に報告する。

2. 「先端材料科学」——私の試み

(1) 対象とする学生と講義の構成

私は横浜市立大学に移って3年と少々しかたっていない。それまでは、科学技術庁金属材料技術研究所で22年間、材料の基礎研究に従事してきた。その経験とその間に知り合うことのできた多くの先輩、友人諸氏の助けとが本講義に投資できる私の資本である。

本学には工学部がない。文理学部の中に文科と理科があり、理科(物理、数学、化学、生物)の学生数は約120人/年である。その理科と医学部進学課程の学生に講義「先端材料科学」を行っている。「先端材料科学」は選択科目で、学年には制限がない。半年で完結する。主な聴講者は物理専攻の2年生で、40名程度である。

本講義の advanced course として、本学大学院修士課程の学生に「物質創製特論Ⅰ」、東京工業大学、大学院修士課程の学生に「特殊材料特論」(平成3年度～5年度)を講義している。しかしながら、ここでは主として学部学生向けの「先端材料科学」を扱う。

まず、先端材料科学(Aとする)をその背後にある物理(Bとする)にしたがって、系統的に並べることから始める。

A. 先端材料科学

- a) オゾンホール、地球温暖化、省資源・省エネルギー、開いた系・閉じた系、リサイクル
- b) 原子・分子操作

* 横浜市立大学教授; 大学院総合理科学研究科(〒236 横浜市金沢区瀬戸22-2)

A Lecture Note on Advanced Materials; Keiichi Ogawa (Graduate School of Integrated Science, Yokohama City University, Yokohama)
Keywords: lecture note, advanced materials, ozone hole, optical fiber, reflection high energy electron diffraction (RHEED)

1994年5月9日受理

† process: a series of actions or operations conducting to an end (Webster's seventh new collegiate dictionary)

- c) RHEED 振動, MBE のコンピュータシミュレーション
- d) 複合材料, AFM
- e) 発光ダイオード(LED), DRAM(メモリ素子)
- f) 光ファイバー, フォトン STM, レーザー
- g) Fe-Nd-B, マグネティック, 磁気テープ, フロッピーディスク(カバーをはぎ取り中身をみせたもの)
- h) 高温超伝導体

B. 背後にある物理

- a) 光エネルギーと原子, 分子
- b) 原子
- c) 結晶
- d) 強度
- e) バンド構造
- f) 光学的性質
- g) 磁気的性質
- h) 超伝導

(2) 講義内容の要約

(a) オゾンホールなど

オゾンホールの形成過程や地球温暖化に関わる原子, 分子の光吸収過程は絶好の先端材料科学入門となる。

成層圏における O_2 分子の光化学分解過程, O_3 の形成過程, O_3 の光吸収過程について述べる。O 原子の濃度は紫外線の強い成層圏上部で大きく, これに対して O_2 分子の濃度は高度が低いほど大きくなる。したがって, O 原子と O_2 分子の濃度の積は下部成層圏で最大となり, そこでオゾン層が形成される。

半導体の洗浄用や冷房装置の冷媒として使われているフロン分子は大気中に放出されると数十年にわたって成層圏へ昇り続ける。成層圏ではフロンが紫外線の光化学反応により分解する。その分解生成物である酸化塩素 ClO が触媒となって O_3 は O_2 に分解する。1 個の ClO 分子は 1 万個の O_3 分子を壊す。オゾンホールのできるゆえんである。

地球の温度(〜300 K)は次のエネルギーバランス 1) と 2) により維持されている。すなわち, 1) 大気の「窓」といわれる波長領域 8〜12 μm の電磁波の形で宇宙の彼方へ逃げていくエネルギー(長波輻射)と, 2) 太陽からの入射エネルギー(短波輻射)と化石燃料の燃焼などによる人工的に発生する熱エネルギー。ところが, フロンや CO_2 は大気の「窓」といわれる波長領域で吸収断面積が最大である。大気中のフロンや CO_2 により吸収された輻射エネルギーの半分は再び地球に向け放射され, エネルギーバランスは地球の温度が上がる方向に移る。

環境問題の根幹に現在の生産体系が前提にしている、『限りない資源』と『限りない「捨て場」』とがある。この観点から先端材料を見直してみる。微細加工, CD, 光ファイバー(f参照)などは理に適った省資源型先端科学技術といえる。

今後の生産体系は当然のことながら次の 2 点を真正面から考慮しなければならない。1) 地球は物質的には閉じた系

である。2) 太陽エネルギーに関しては開いた系である。したがって, 物質系については完全にリサイクルしなければならない。

この理想的生産体系の 1 例が「木の葉」という工場であろう。葉は太陽光のうち赤と青の光をエネルギー源として, 光合成を行っている。赤と青の間の波長域にある不要な光, 緑は「廃棄光」として宇宙の彼方へ捨てている(不思議なことにこの「廃棄光」を見て私たちはきれいだと感じる)。物質系についてみると葉は CO_2 と H_2O を資源として, 澱粉やセルロースを合成する。秋がくれば葉は落ち, 年がたてば木自身も枯れる。生産物である澱粉やセルロースは勿論のこと, 木や葉の工場自体もやがて朽ち, 分解され, CO_2 や H_2O に戻る。物質系はリサイクルする。

(b) 原子分子操作

例えば Ni(111) 面上に Xe 原子を並べる Eigler らの実験⁽²⁾, Si 原子の移動を行った青野らの実験⁽³⁾を紹介した後に, 物質の原子構造や化学結合について述べる。

(c) RHEED 振動, MBE のコンピュータシミュレーション

RHEED 振動のビデオを見せたり, CD による He-Ne レーザーの回折現象のデモ (§5 参照)を行う。原子の周期的配列や, 逆格子, 回折現象に触れる。

コンピュータシミュレーションによる MBE 結晶成長過程のビデオを写し, 2 次元成長, 格子振動, 下地原子と成長薄膜原子間のミスフィットなどについて述べる。

(d) 複合材料, AFM

炭素繊維やガラスファイバーなどの素材, 釣竿やテニスラケット(中身の見える折れた釣竿や壊れたラケットがよい)などの実物を示した後に, 破壊, 応力集中, 複合則などについて述べる。

長方形のアルミホイル(長さ 4 mm, 幅 1 mm, 厚さ 15 μm , この厚さは家庭用アルミホイルの厚さに等しい)の曲げ変形によるバネ定数を計算し, その値が固体中の原子間(すなわち, 2 個の原子間)に働く力のバネ定数と同程度となることを示す。曲げ変形の柔らかさに驚くとともに, この柔らかさが AFM を可能にしたことを述べる⁽⁴⁾。幅 1 mm の細長いアルミホイルを学生に渡し, 曲げ変形の力を指で感じさせ(???), これが原子 1 個に働いている力であることを話す。

軟鉄線(直径〜0.6 mm)の上部降伏応力を指で感じる実験。軟鉄線を 15 cm ほどの長さに切り, 中央部 5 cm ほどを赤くなるまでブンゼンバーナーで加熱し, 空冷する。中央部に 1 cm 位の隙間をあけて, 軟鉄線に両親指をあてがいゆっくりと曲げると, 急に変形を始める応力がガクッと親指に感じる(あらかじめ熱処理した軟鉄線を学生に配り, 各自確かめさせる)。転位線がコットレル雰囲気から脱出する応力である。理想強度に対する降伏応力の低さを教える。

(e) LED, DRAM

透明なプラスチックに埋め込んである LED を発光させて, 電子・ホール再結合による発光現象をルーペで各自観察させる(赤, 橙, 緑などの LED は 1 個あたり数十円。東急

ハンズで購入可。LEDを発光させるために、順方向にいきなり電池の電圧、例えば9Vを加えると過電流が流れ、LEDは壊れる。制限電流用の抵抗、例えば300ΩをLEDと電池の間に噛ませる必要がある。).

数十個のDRAMが微細加工されているSiウエハの実物を示す。

バンド構造、直接遷移、間接遷移、pn接合などについて述べる。固体中の電子や空孔の運動についてはファインマン物理学Ⅳ(岩波)、第13章に極めてすぐれた記述がある。

青色半導体レーザーの材料科学的問題にも触れる⁽⁵⁾。

(f) 光ファイバー、フォトンSTM、レーザー

通信用光ファイバーの実物を回覧する。直径がわずか10μmのこの光ファイバー1本で1億回線の通話が可能になりつつある。光ファイバーの極端な透明性は日米無中継光通信を可能にしつつある。日本の電話の8割がすでに光ファイバーで送信されている。

光ファイバー用ガラスはなぜかくも光に対して透明か？(普通の窓ガラスは10cm程の厚さで光をほとんど減衰させてしまう。窓ガラスの破片を厚さに垂直な方向で眺めると、緑色(Feイオンによる)に薄暗く見えるのはよく経験する。)OH基を含まない純粋の石英ガラスでは、石英ガラスの原子振動により吸収される光子の最大振動数 ν_v と電子がエネルギーギャップ間の遷移を行う時に吸収する光子の最小振動数 $\nu_0(>\nu_v)$ との間に振動数の隙間、すなわち「窓」がある。この「窓」に相当する振動数範囲の光は透明となる。現在、光ファイバーによる光の減衰は究極の値に近い。最後まで残る減衰の原因はガラスの非晶質構造に起因する密度の揺らぎによる。この密度の揺らぎにより光はレーレイ散乱を受ける。

ガラスファイバーは全反射を利用して光をファイバー内に閉じ込めている。しかし、光は1波長程度の範囲内でファイバーから外側の空气中に漏れ、定在波がたっている(光子のトンネル効果。この漏れた光はエバネッセント波と呼ばれている。)。水の入ったコップとナイフの簡単な実験(図1)で光子のトンネル効果を確かめる⁽⁶⁾。水を入れたコップの内側を斜め上から眺めると、全反射によりコップは銀色に光っている。このコップの外側をナイフの刃の側面で押し付けると、ナイフにより反射されたエバネッセント波が直径0.2mm程の灰色のスポットとして観察される。すなわち、光子のトンネル効果を目で見たことになる。

光の波長より遥かに小さい径のガラスファイバーを用いて、エバネッセント波を引き出すことができる。さらに、ファイバーを走査すればエバネッセント波のコントラストを画像化することができる。これがフォトンSTMである。

光子のトンネル効果については、朝永振一郎、量子力学Ⅱ(みすず)、§36, 44に味わい深い記述がある。

α型アルミナ単結晶(透明)と深い赤色をしたルビー単結晶(α型アルミナ単結晶にCr³⁺を0.05モル%程度添加)を回覧する。不純物原子として入っているCrイオンのエネルギー準位を示し、反転分布について述べる。誘導放射、コヒーレント光、広がり極めて小さい光源(平行光線)としてのレー

図1 コップ(水が入っている)とナイフを用いた簡単な実験で、光のトンネル効果を見る⁽⁶⁾。

ザーについて述べる。

(g) Fe-Nd-B, マグクリップ, 磁気テープ

Fe-Nd-Bの永久磁石、フェライト系永久磁石(マグクリップなど)を渡し、鉄に対する吸引力の差を肌で感じさせる。Fe-Nd-Bの大きな吸引力の原因が主としてFe原子のスピンと大きな磁気異方性に由来することを述べる。

磁気テープは記録密度を上げるため、針状微結晶(軸方向の大きさは~0.5μm)をテープの長手方向に揃えたものである。反磁場係数、ヒステリシス現象などに触れる。

(h) 高温超伝導体

商用NbTi単芯線、多芯線、Nb₃Sn多芯線の現物を示す(いまでは低温超伝導体と呼ばれている)。QMG法で作製したY系高温超伝導体ブロックも回覧する。ホログラフィーによる磁束量子線の写真を示す⁽⁷⁾。この写真は超伝導現象に親しみを感じさせるためにもぜひ紹介したい。第一種超伝導体、第二種超伝導体、コヒーレント長、高温超伝導体、CuO₂面、ホールドーピング、電子ドーピング、磁束線のピン止め、臨界電流について述べる。

磁束線のピン止め効果(マイスナー効果ではない!)により高温超伝導体は磁気浮上する。この磁気浮上効果を撮影したビデオを見せる(このビデオはいわき明星大学の卒業研究として作製されたものである。).

超伝導状態にある対電子(クーパー対)はコヒーレントな状態にあることを述べる。コヒーレントは多体効果に特有の概念である。超伝導マグネットの場合、数kmもの長さの超伝導線が巻かれているが、その始端と終端の電子状態はお互いにコヒーレントな状態にある。超伝導状態とコヒーレントな光であるレーザー光との類似性を指摘する。

3. 魅力ある講義にするために

(a) 材料科学の古典的概念は先端材料にその応用例を見つける。

1. 電子の殻構造: 金属マイクロクラスターとマジック数⁽⁸⁾
2. 核形成・成長過程: カーボンナノチューブ⁽⁹⁾
: MBEの薄膜成長過程
3. 応力集中: マイクロクラックのサイズと複

合材料用繊維強化材線径との関係

4. 曲 げ 変 形 : AFM 用カンチレバー

5. バ ッ ク リ ン グ : Bi 系高温超伝導体の変調構造
: Si(001)表面の2×1構造

6. 平 行 光 線 : レーザー光のコヒーレント性

7. 電 気 抵 抗 ゼ ロ : 対電子のコヒーレントな状態

(b) 学会や社会で話題となっているトピックスを教材にする。

オゾンホール, フロン, 地球温暖化, 走査型トンネル顕微鏡(STM), RHEED 振動, AFM, 青色光半導体レーザー, 光ファイバー, フォトン STM, 強相関電子系など。

(c) インパクトの大きい研究成果を取り上げる。

例えば, 銅(111)表面上の電子波の直接観察⁽¹⁰⁾, W 探針の先端部と Ni 表面原子間で Xe 原子 1 個をやり取りすることによる電流のスイッチ作用(原子スイッチ)⁽¹¹⁾, Si 原子の原子操作⁽³⁾などである。

(d) ビジュアルに訴える。

OHP を活用する。学術雑誌などの表紙にある, 学問的にも意味のあるカラー写真はなるべくカラーの OHP シートにする。写真屋に作ってもらいと, 1 枚1000円程度する。普通のカラーコピー機で OHP シートを作ると色素が光を吸収するので, 黒ずんで見える。OHP シートの情報量は板書に比べて格段に多いので, 学生には OHP シートのコピーを渡す。

学会などで illuminating な OHP シートに出会ったときには, そのコピーをお願いする(ただし, 乱発しないこと)。

ビデオを活用する。ビデオは研究者が研究用や教育用に作ったものを利用する。本講義では, MBE (§ 2. (2)(c)), RHEED 振動 (§ 2. (2)(c)), 高温超伝導体 (§ 2. (2)(h)) のビデオを使用している。

(e) 講義と実物とを結び付ける。

現代社会では「生活の場」と「もの作りの場」とが遊離する傾向にある。学生に実物を見せるとその効果は想像以上に大きい。一昔前までは家の近くで, 大工が仕事をし, ブリキやが半田ごてを使い, 鍛冶やがグラインダーで火花を飛ばしていた。

講義では複合材料用炭素繊維, LED, LSI, 光ファイバー, 光通信用半導体レーザー, ルビーの単結晶, 永久磁石 Fe-Nd-B, Y 系高温超伝導体焼結体などを回覧している。

(f) 簡単な実験をして, 物理現象を身近かに感じさせる。実験材料も身近かなものを選ぶ。例えば § 2. (2)(c) で述べた CD とレーザー光による回折実験は RHEED の物理現象と完全に平行である (§ 5. 参照)。その他に, AFM のカンチレバー (§ 2. (2)(d)), 軟鉄線の降伏応力 (§ 2. (2)(d)), 光子のトンネル効果 (§ 2. (2)(f)) の実験を取り上げた。

4. 新着雑誌と啓蒙書の活用

今回の教材は次の新着雑誌から採用したものが多い。

a) Nature

b) Physics Today

c) Physical Review Letters

d) 物理学会誌

e) 応用物理

f) 日経サイエンス

g) MRS Bulletin

近年, 日本の啓蒙図書の中にもすぐれたものがある。啓蒙図書は何よりも自分自身の視野を広げてくれる。学問的にみてもすぐれた, 分かりやすい物理現象の説明に出会うことがある。例えば次の図書からは学ぶことが多かった。いずれも, 学生の小遣いで買える程度であり, 副読本としてもすぐれている。

a) 島崎達夫, 地球の守護神成層圏オゾン, 講談社(ブルーバックス)

b) 加藤尚武, 環境倫理学のすすめ, 丸善ライブラリー

c) 福田 博, 複合材料入門, 大月書店

d) 川副博司, 西沢紘一, ニューガラス入門, 工業調査会

e) 大越孝敬, 光ファイバー通信, 岩波新書

f) 大塚泰一郎, 超伝導の世界, 講談社(ブルーバックス)

g) 大島泰郎, 宇宙生物学と ET 探査, 朝日文庫

5. OHP シートの例——CD とレーザー光

OHP シートの例として, CD による He-Ne レーザー光の回折現象 (§ 2. (2)(b)) で使用しているものを示す(図 2, 3)。まず CD の拡大写真⁽¹²⁾を示す(図 2)。図 2 の左上から右下に向かって細長い凹み(ピット)が直線状に走っているのが見られる(トラック)。ピットの長さには 9 種類ある。トラックとトラックとの間隔は $1.6 \mu\text{m}$ と規格化されている。

直線状に並んでいるピットの列を原子列と見なす。トラックとトラックとの間隔は原子列の間隔と見なす。ピットは表面にしか存在していないから, この見かけ上の原子列は文字どおり 1 原子層の厚さである。CD は入射角が数度の RHEED の場合に近い。

トラックとトラックとの間隔を a とし, He-Ne レーザー光(波長 $\lambda \sim 0.6 \mu\text{m}$) が角 θ_1 で入射し, 角 θ_2 で反射する場合を図 3 に示す。二つの入射光線 A_1, A_2 とそれぞれの反射光線 C_1, C_2 を考える。光線 A_1, D_1, C_1 と光線 A_2, D_2, C_2 の光路差を計算し, 両光線が強めあう条件を図 3 の下に記す。RHEED と比べやすいように, この回折条件を変形した式がその右側に書いてある(四角い囲みの中)。この式で, $n=0$ はいわゆる鏡面反射に相当する。 $n=1$ は 1 次の回折線である。ここで, CD と He-Ne レーザー(教育用の He-Ne レーザー発振器は 8.6 万円程度で購入可。島津, モデル GLG5005S)を用いて実験する。入射角 30° のとき, 反射角 60° 付近に明るい 1 次の反射が観察される。教室を暗くすればもっと高次の反射($n=2, 3$)まで観察可能である。反射角が大きくなると, 回折光は天井に写る。このデモ実験から得たデータ, すなわち, $n=1, \theta_1=30^\circ, \theta_2=60^\circ, \lambda=0.6 \mu\text{m}$ を先程の回折条件の式に代入すると, $a=1.6 \mu\text{m}$ と計算される。この計算が図 3 の左側に示してある。 $a=1.6 \mu\text{m}$ は CD

ピットの長さ：線速度 1.25 m/s の場合
 0.87 μm, 1.16 μm, 1.45 μm, 1.74 μm, 2.02 μm,
 2.31 μm, 2.60 μm, 2.89 μm, 3.18 μm.

図2 CDの信号源ピット。ピットは直線状に並んで見える。このピット列はトラックと呼ばれる。トラックとトラック間の距離は1.6 μm⁽¹²⁾。

図3 光線A₁, D₁, C₁と光線A₂, D₂, C₂との光路差の計算。詳しくは本文参照。

の規格化されたトラック間の距離に等しい。

これから後、板書で図3の四角で囲んだ式の図解をする(図4)。CDの表面に対応して、水平方向に1本の太い直線を引く。それに垂直に、間隔が1/aの平行線を引く。太い水平線と平行線との交点を一つ選び、Oとする。原点Oから入射方向とは正反対方向に直線を引き、Oから測って距離が1/λのところをCとする。Cを中心に半径が1/λの円を描く。この円と縦方向の平行線との交点に向け、中心Cから線を引き(一般に複数本ある、図4の場合5本)。この線と平行な方向にレーザー光の回折が観察される。入射方向とレーザー光の波長λが与えられると、図4で与えられる回折線方向(n=0, 1, 2, 3, 4)は図3で四角で囲んだ回折条件の式を満足する。これは容易に確かめられる。

図4をRHEEDと対応させてみよう。図4の水平方向の線は結晶表面に平行で、かつ最表面の原子列に垂直である。この水平線に垂直に引いてある平行線は原子列に対応した逆格子線(ロッドという)である。逆格子点でなく、線であるのは厚さが1原子層の原子列だからである。C点を中心とし

図4 CDの回折条件。縦方向の平行線(n0と指数づけられている。ただし、n=-6, -5, -4, ..., 0, 1, 2)はロッドと呼ばれている。図の詳しい説明は本文参照。

た円はエワルト球(円)である。

CDは今の学生にとって大変身近な持ち物である。レーザー光とCDを使ったこの実験は大変評判がよい。この実験で学生の興味を引きつけているうちに、逆格子、エワルト球、RHEEDを教えることになる。

6. おわりに

§2.(2)で述べた講義内容をカバーするには半期の講義は短かすぎる。そこで、時間をかけて話す話題と軽く話す話題とに分け、時間不足を切り抜けている。その分け方は年々変え、講義のマンネリ化を避けている。

新着雑誌や学会発表などでインパクトの大きい成果に出会ったときはそれを積極的に取り入れている。

「先端材料科学」のダイジェスト版を本年4月、総合科目9『科学・技術・社会』(主として新入生(全学)向き)で話した。総合科目9は約半数が外来講師で毎回講師が変わるオムニバス風の講義である。私の講義は初回で、90分1回限りである。あとに続く遺伝子操作、ロケット、…の前座にあたる。そのときのアウトラインを次に示す。

総合科目9『科学・技術・社会』

§1 21世紀の科学技術の見通し

§2 CD, 光ファイバー, 原子・分子操作

§3 オゾンホール

§4 環境倫理学

§5 Communication with Extra-Terrestrial Intelligence: 文明を探す方程式

§6 新入生諸君への宇宙からのmessage—まとめに代えて

200部用意したレズメはすべて無くなった。噂に聞いている

た私語や居眠りはほとんど無かった。聴講者の内、約150人の学生が大学で用意した感想カードを記入してくれた。そのうち、3つをここに記す。

学生 A(人間・社会学科 1 学年)

私は文系の学生なので科学技術に関する話を聞く機会があまりないので今日のコンパクトディスクなどの話しはとてもおもしろかったです。今の世の中は使い方は分かっているけどどうしてそうなるのか分からないことが多すぎると思います。そういうことをすべて知るのは無理だと思うけど、少しでも知ることができればいいと思ってこの授業をとったので、今日の分子の話など、とても勉強になりました。またオゾン層の危険についてはよく聞くけれど、オゾンじたいについてこれほど、くわしく教えてもらったのははじめてで、これもおもしろかったです。

学生 B(化学 1 学年)

今まで“光ファイバー”というものは名前だけしか知りませんでした。でも今日の授業で、とても進んだ技術のものだということ、そしてそれでいて環境にやさしいということを知りました。科学技術が進むと環境が破壊されてしまうと考えていましたが、このように技術が進んでも自然にやさしいものがこの先つくられれば(考えられれば?)世の中が便利になっても地球の寿命が短くなることはないと思います。

学生 C(経営学科 1 学年)

科学は私の知らない所でどんどん進歩し、新しい発見をしていたことに本当に驚きました。“知らない”“興味がない”ということが自分の視野をせばめ、そして地球の危機にも無頓着でいることに、反省しました。これからは、もっと科学の勉強をして、地球市民として一歩でも地球を救えるよう努力したいと思います。

先端科学技術を身近かに感じさせることの重要性がこの3人の感想カードからも身にしみて感じさせられる。弾性論、量子論、統計力学、固体物理、…を学んだ後でなければ先端科学技術は分からないというのでは、理系の学生でさえも息切れがしてしまう。教育内容や方法についてもっと大胆な試行錯誤を試みるべきだろう。材料を含めた先端科学技術はそれに値するだけの豊かな内容を備えているものと思われる。

MBE のビデオは小口多美夫(敬称略、以下同様)、寺倉清之、富士通、RHEED 振動は小口信行、磁気浮上は田沼静一から提供を受けた。複合材料用繊維は塩田一路、集積回路(DRAM)の乗った Si ウエハは東芝、光ファイバーと通信用半導体レーザー素子は藤本正友、Fe-Nd-B は東芝、超伝導線材は古河電工、ルビー単結晶はアースジュエリーから提供を受けた。ガラスの物性については多くを川副博司から教示を受けた。ここに記して感謝する。

文 献

(1) 加藤尚武：環境倫理学のすすめ，丸善，(1991)。

- (2) D. M. Eigler and E. K. Schweizer: *Nature*, **344**(1990), 524.
- (3) 青野正和，他：応用物理，**61**(1992)，1264.
- (4) D. Ruger and P. Hansma: *Physics Today*, Oct., (1990), 23.
- (5) 藤田茂夫：電子情報通信学会誌，**76**(1993)，833.
- (6) H. A. Pohl: *Quantum Mechanics for Science and Engineering*, Prentice-Hall, (1967).
- (7) A. Tonomura: *Adv. in Phys.*, **41**(1992)，59.
- (8) M. L. Cohen, W. D. Knight: *Physics Today*, Dec., (1990), 42.
- (9) G. G. Tibbetts: *J. Cryst. Growth*, **66**(1984)，632.
- (10) M. F. Crommie *et al.*: *Nature*, **363**(1993)，524.
- (11) D. M. Eigler *et al.*: *Nature*, **352**(1991)，600.
- (12) 中島平太郎，小川博司：コンパクトディスク読本，オーム，(1988)。

付 録

§ 2.(1)の講義の構成，§ 6のおわりに，を書きながら感ずることがあった。ここにそれを記す。私たちは好むと好まざるとにかかわらず，先端科学技術の中で生活をしている。基礎科学をある程度理解してから先端科学技術を理解する，これはオーソドックスな学び方であろう。しかし，私たちの社会では専門家といえども理解する前に，先端科学技術の世話にならざるを得ない面がある。むしろ，理解している部分は僅かで，大部分はその原理すら知らないと言ええる。では先端科学技術はどのようにして学んだらよいのだろうか。

この状況は一昔前の日本人(私を含む)が英語を学んだ状況に似ていると思う。英語圏の生きた文化が既にある。それを学ぶのに，英単語，熟語，文法，文芸作品と順を追って学ぶ。途中で息切れがしそうであるのに，これを堪え忍んだでしょう。さあ，あなたは英語を理解しましたよ，それではアメリカの留学先へ手紙を書いて下さいと言われて，当惑された経験のお持ちのかたは多いだろう。たとえ英語で手紙を書く形式を知っていたとしても，である。

お久しぶりですね，お元気ですか，と私はいう。やあ，何とかやっています，And you? と相手は応じる。単語としては and も you もみな知っている，でもこの And you? がなかなか出てこない。

アメリカの空港について，友人が迎えにきてくれた。友人が「さぞ，お疲れでしょう，荷物を持ちましょう」と言って，さっさと荷物を運びだしてくれた。「重いでしょう，私も少しは持ちます。」というとき，相手は No problem. と応じる。

今日は日曜日なのに，空港まで迎えにきてくれて大変助かりました，どうも有り難う。というとき，相手は With pleasure. と応じる。

「英単語，熟語，文法，文芸作品」の代わりに「And you? No problem. With pleasure.」を武器に英語圏の生きた文化に接する方法もあるのではないか。意外にも，その方が英語圏の文化を深い所まで理解させてくれるのではないか。そして，その方がより creative で，productive で，そうして何よりもより enjoyable ではないだろうか。先端科学技術にも「And you? No problem. With pleasure.」タイプのアプローチが沢山隠されているような気がする。いかがだろうか。