

講義と演習の連携による効果的授業の試み

— 物性工学と演習 —

明石 義人¹⁾

はじめに

材料物理工学科は、学科のカリキュラムの編成に当たり、重要な科目については講義と演習を組みあわせ、しかも講義と演習を一人の担当者が実施することで、学生が重要な科目をしっかりと修得できるよう計画した。筆者はそのような科目の一つである物性工学と演習を数年間にわたって担当してきた。最初の授業に先立ち、物性に関する演習の教科書を種々検討してみたが、本学科の学生の状況と授業の内容に合致する適切な演習書を見つけることはできなかった。そこで、従来の演習の教科書に囚われず、講義の進展と学生の理解の状況に基づいて、授業内容の理解を促す演習課題を様々に工夫し、改善を重ね、筆者としては納得できる授業内容に到達した。ここに報告し、皆様の批判に供したい。

教科書についてまず検討し、沖憲典・江口鉄男共著、金属物性学の基礎（内田老鶴圃刊）を選んだ。「金属」と銘打ってあるが、内容は材料の物性をはじめ勉強しようとする学生を対象として、内容を精選し、簡潔な記述に心がけられていることから、筆者の授業の教科書として適切だと判断した。授業を通し学生が学習し、理解できる内容に更に絞り、教科書の内容の一部を割愛した。また、演習課題を考えるに当たり、授業を理解した上での応用問題を対象とするのではなく、学生が授業の内容に興味を持ち、演習を通して授業の内容について理解を深めてくれることを期待した。

最初に、講義の内容と演習の内容を要約して示し、講義と演習の連携がどのように図られているかを明らかにする。次の節で、演習課題の狙いと実施状況について記述し、授業内容の理解を促す演習課題をどのように工夫したかを明らかにする。最後に、学生の筆者の授業への評価に基づいて授業内容や授業方法を評価し、まとめを述べる。

1 講義・演習の授業計画

講義1 授業の紹介、物性物理学とはどのような科目か

最初の講義において、シラバスを配布し、講義と演習の構成と狙い、授業の進め方、及び成績評価の仕方等について説明する。また、本学科の物性関係の講義リストと、それぞれの講義が取り扱う内容の関連性について説明する。更に、物性物理学はどのような科目であるかを、「原子より構成される物質の姿」、「或る現象を物性の観点から考える」、「化学反応を物性の観点から考える」、及び「物質にはそれぞれ固有の構造がある」のテーマの下で概説する。（R. P. Feynman, Six Easy Pieces, Perseus BooksのAtoms in Motionに基づく）

演習1 周期表に基づいて、結晶構造と融点について考えてみよう

【教材】主な元素の結晶構造の表（電子物性工学、青木昌治著、コロナ社）、元素の融点及び沸点の表（理科年表）、元素記号のみ記入した周期表2枚

【作業】一枚の周期表に元素の結晶構造を各自で記号化して書き込む。もう一枚の周期表に元素の融点を書き込む。

【課題】周期表と結晶構造について考察せよ。周期表と融点について考察せよ。結晶構造と融点の関係について考察せよ。

講義2 ボーアの原子模型

教科書 p 1 ~ p 7 : 水素原子のモデルについて説明を行い、モデルに基づく原子半径と電子エネルギーの式を導出する。

1) 工学部

演習 2 周期表に基づいて、密度、原子量、結晶構造を比較し、比熱について考えてみよう

【総括】結晶構造と融点の関係についての学生の意見の要約を配布し、それに対するコメントを述べる。

【教材】元素の密度の表(理科年表)、元素の比熱の表(理科年表)、元素記号のみ記入した周期表 2枚

【作業】一枚の周期表に元素の密度を書き込む。もう一枚の周期表に元素の比熱を書き込む。

【課題】元素の密度と原子量の関係について考察せよ。元素の密度と結晶構造の関係について考察せよ。周期表と比熱について考察せよ。

電子配置の類似性と物性の類似性について紹介する。遷移金属元素の電子配置について概説する。

演習 4 ボーアの原子モデルに基づいて原子半径を計算してみよう

【講義】教科書に基づき、電子の「 n 番目の軌道半径」と最外殻電子配置の表の数字の関係について復習する。原子サイズは最外殻電子の軌道半径とし、原子直径の測定値として、主な元素の結晶構造の表(電子物性工学、青木昌治著、コロナ社)の最近接原子間距離を採用する旨説明する。

【課題】5つの元素について、原子半径を計算せよ。原子半径の計算値と測定値を比較し、考察せよ。

講義 3 原子模型と輝線スペクトルと電子軌道

教科書 p 8 ~ p 12 : ボーアの仮定に基づく水素原子のスペクトルの計算と輝線スペクトルの関係を概説する。電子軌道とそれを記述する量子数の関係及び電子軌道の構造について概説する。

演習 3 ボーアの原子模型において、なぜ万有引力を考慮しないか

【総括】元素の原子量と密度の関係についての学生の意見の要約を配布し、それに対するコメントを述べる。密度の分布と結晶構造の関係についての学生の意見の要約を配布し、それに対するコメントを述べる。

【課題】ボーアの原子模型に基づいて、水素原子の電子と原子核の間の、万有引力及びクーロン引力を計算せよ。ボーアはなぜ万有引力を考慮しないか理由を述べよ。

【教材】教科書の万有引力のページ、クーロンの法則のページ、物理定数表(いずれも物理学基礎、原康夫著、学術図書出版社)

講義 4 元素周期表と属の特徴

教科書 p 12 ~ p 20 : 多電子原子の電子構造を外殻電子配置の表に対応させて概説する。幾つかの属について、

講義 5 結晶構造の表現法

教科書 p 25 ~ p 31 : 結晶格子の概念と回折法、及び空間格子と単位胞について概説し、代表的な単位胞を例示する。単位胞内の原子の記述法について述べる。

演習 5 結晶面の、ミラー指数による表記法を学習する

【講義】結晶面の定義を行い、ミラー指数による表記法を、具体的なマニュアルに従って概説する。(教科書 p 39 ~ p 45、カリティ、X線回折要論、アグネ社)

【課題】2次元格子の格子面 5題、3次元格子の格子面 5題を解け。

講義 6 原子の配列と充填率

教科書 p 31 ~ p 36 : 代表的な単位胞について、格子定数と最近接原子間間隔の関係を求め、原子充填率を求める。CsCl 型構造、NaCl 型構造について説明する。

演習 6 結晶方位の、ミラー指数による表記法を学習する

【講義】結晶方位の定義を行い、ミラー指数による表記法を、具体的なマニュアルに従って概説する。(教科書 p 39 ~ p 45、カリティ、X

線回折要論、アグネ社)

【課題】 3次元格子の格子方位8題を解け。結晶面(2題)を図示せよ。結晶方位(2題)を図示せよ。立方晶における同一指数を持つ結晶面と結晶方位の関係を図示し、説明せよ。

講義7 結晶格子によるX線の回折

教科書 p 45～p 50、p 53: 結晶によるX線の回折について概説し、結晶構造因子について述べる。代表的な単位胞について、結晶構造因子を計算し、観察されない回折のあることを指摘する。これに基づき、結晶の型が識別できることを例示により説明する。

演習7 結晶構造因子を計算してみよう

【講義】 NaCl型構造及びダイヤモンド構造が、2つの面心立方格子の組み合わせにより構成されていることを説明する。2つの面心格子の間の関係を具体的に図並びに数字で示す。計算の概要が、教科書 p 108～p 112に記載されていることの紹介をする。

【課題】 NaCl型構造の結晶構造因子を具体的に計算せよ。ダイヤモンド構造の結晶構造因子を具体的に計算せよ。

講義8 原子間結合力と結晶の結合

教科書 p 57～p 66: ポテンシャルによる原子間結合力の表現とその理解の仕方について概説する。結晶の結合について、結合における電子の働きに注目して、典型的な結合形態について概説する。

演習8 原子間ポテンシャルの図を用いて熱膨張を考えてみよう

【総括】 NaCl型構造及びダイヤモンド構造の結晶構造因子の計算結果が何を示しているか、面心立方格子や体心立方格子の場合と比較しながら、要点を中心に概説する。

【講義】 絶対温度零度の場合の2つの原子の位置関係と温度が上昇した場合の2つの原子の位置関係について復習する。温度が上昇した場合の平均原子間隔は、第1近似として、

可能な原子間隔の平均値で表されることを指摘する。

【課題】 原子間ポテンシャルの図を用いて熱膨張を説明せよ。

講義9 弾性の原子論と固体中の弾性波の伝播

教科書 p 66～p 72: 原子間のポテンシャルの近似式に基づいて、弾性の原子論について概説し、ヤング率とポテンシャルの関係を導く。連続弾性体における、弾性波の伝播の波動方程式を求める。

演習9 バネモデルのポテンシャルと2原子間ポテンシャルを比べてみよう

【講義】 力が分かっているときのポテンシャルの求め方について復習する。

【課題】 バネモデルのポテンシャルを計算で求めよ。バネモデルのポテンシャルと2原子間ポテンシャルを、できるだけ重なるように一つの図に描け。バネモデルはどのような範囲で2原子間ポテンシャルを近似できるか述べよ。バネモデルのポテンシャルの式と2原子間ポテンシャルのテーラー展開式(教科書 p 66)を比較すると、どのようなことが言えるか。

講義10 一次元単純格子の振動

教科書 p 72～p 76: 一次元単純格子の仮定とモデルの提示、運動方程式を求める過程、運動方程式を解く過程、解の物理的な意味の解釈について、順次論述する。

演習10 2種類の原子を含む一次元格子の振動を解いてみよう

【講義】 2種類の原子を含む一次元格子のモデルについて、一次元単純格子との違いを明確にしながらい説明する。連立方程式が解を持つ条件について復習する。

【課題】 モデルに基づき運動方程式を立てよ。2種類の原子の振幅を未知数として、連立方程式が解を持つ条件を用いて、運動方程式が解を持つ条件を求めよ。

講義11 実験結果から見た比熱の特徴

教科書 p 81～p 87：比熱の定義と実験結果から見た比熱の特徴(教科書 p 83、図 4-1)について概説する。統計熱力学の復習をし、気体中の原子の平均エネルギーを計算し、気体の比熱を求める。

演習11 統計熱力学に基づいて、固体中の原子の平均エネルギーを計算しよう

【課題】与えられた固体中の原子のエネルギーを用い、積分を忠実に実行し、固体中の原子の平均エネルギー $\langle \epsilon \rangle$ を計算により求めよ。

講義12 固体比熱の古典論とアインシュタインの理論

教科書 p 87～p 89：固体比熱の古典論に基づいて、固体中の原子のエネルギーを求め、演習で求めた $\langle \epsilon \rangle$ より比熱を求め、教科書 p 83の図 4-1と比較する。古典論のモデルと比較しながら、アインシュタインのモデルについて説明する。

演習12 教科書の(4-17)式から(4-20)式を求めてみよう

【講義】計算過程の概要を説明する。等比級数の和の求め方、対数の微分等必要な数学について復習する。

【課題】等比級数の和 $Z(\beta)$ を求めよ。級数の項が十分大きいとして、求めた値の近似を求めよ。 $\log Z(\beta)$ を計算により求めよ。求めた結果を β により微分せよ。

講義13 固体比熱のアインシュタインの理論とデバイの理論

教科書 p 89～p 92：アインシュタインの理論に従って、前回の演習を辿りながら、比熱を求める。近似式を用いて、求めた式を簡単にし、教科書 p 83の図 4-1と比較する。デバイのモデルについて説明する。

演習13 教科書の(4-23)式に対し、近似計算を行ってみよう

【講義】近似計算の概要を説明する。

【課題】(4-23)式の変数は何か。近似はどの関数に適用するか。高温の場合、教科書の不等式の意味を考えよ。途中の式の導出をせよ。近似を実施するには、テーラー展開の第何項までを用いればよいか。低温の場合の近似は、計算上どんな意味を持つのか。

講義14 固体比熱のデバイの理論

教科書 p 91～p 94：デバイの理論に従って比熱を求める。前回の演習を辿りながら、近似を行い、求めた式を簡単にし、教科書 p 83の図 4-1と比較する。

演習14 講義の内容について、質問に答えます

演習は特に行わないで、学生から質問のあった内容について、改めて説明を行う。

2 演習課題の狙いと実施状況

演習1及び演習2では、表に基づいて周期表に書き込むことにより、元素に親しみながら幾つかの物性値を認識し、学生自らが何かを読み取ってくれることを期待した。学生は表を完成させ、気づいたことを文章にまとめた。彼らの文章から、代表例をまとめて配布し、それぞれの例についてコメントを行い、学生の理解を一步深める糧とした。代表例には、良い理解を示す内容も、誤った理解を示す内容も含まれ、総括の際の生きた教材となった。

演習3は簡単な計算であるが、学生が必要な情報を、準備した教材から自分で集める点に特徴がある。結果は一目瞭然であるが、万有引力とクーロン引力の大きさの違いを自分で実感することが大切だと考えた。学生の反応はいまひとつであるが、目的は達したと考えている。

演習4は、ボーアの原子模型に基づいて原子の大きさを計算し、原子が球状であると仮定して実験よりも求めた原子の大きさを比較させた。学生は比較させるからには、計算値と実験値が一致するに違いないという先入観を持っていたようで、比較してみると合わないのが大変戸惑っていた。

演習5と演習6のミラー指数による結晶面及び結晶方位の表記法は、講義より演習を通して理解することが大

事だと考え、演習の時間にマニュアルに従って指導した。結晶面と結晶方位を続けて教えると混乱する恐れがあると考え、2日に分けて演習を行った。間違いやすい点は、レポート結果を示し、具体的に再度指導した。

演習7は結晶構造因子を具体的に計算する課題とした。教科書に計算の概略が書かれているので、途中の計算を詳細に行うことを指示した。2つの課題の少なくとも1つは全員計算できた。計算結果の解釈については、次の時間の初めに講義した。

演習8は、原子間ポテンシャルの図を用いて、結晶の熱膨張について考える課題とした。考えるに当たって必要なことについて講義した後、課題を与え、解答を提出させた。次の時間の初めに、解答例に基づいてコメントした。

演習9では、フックの法則に基づくポテンシャル・エネルギーを計算させ、図並びに式を通し、これを2原子間ポテンシャルと比較させた。どのような条件で両ポテンシャルが一致するか考えさせることを通して、学生が物理的モデルと近似の関係を理解することを期待した。

演習10において、2種類の原子よりなる一次元格子の振動問題について、教科書に従って、モデルを立て、運動方程式を立て、方程式を解くことを求めた。3つの過程を十分意識して記述するよう求めたが、定期試験の結果から判断すると、特にモデルを立てる過程の理解が不十分であり、指導法について今後一層の工夫が必要だと考えている。

演習11では、統計熱力学に基づいて固体の原子の平均エネルギーを計算させた。単純ではあるが、忍耐を要する計算を実行することを通して、計算を忍耐強く実施する習慣を身につけてほしいと考え、このような課題を設けた。定期試験の結果から判断すると、多くの学生は習慣を身につけたが、そうではない学生もいた。

演習12では、教科書の式について、段階を追ってフォローする課題を出した。計算過程に必要な数学について、はじめに講義した。レポートから判断すると、ほとんどの学生は課題をこなした。

演習13では、教科書の式について、近似計算をフォローし、学生が近似計算になじむことを期待した。レポートを見て、不十分な点については、次の時間に詳しく説明を行った。

最後の演習の時間は、この授業の内容に対する学生からの質問に答える時間に当てた。残念ながら、学生からの質問は散発的で、質問者も限られた。

3 学生による授業評価の分析

「授業改善に関する学生によるアンケート」を学部指定の調査用紙を用いて実施した。学生自身の授業取り組みの自己評価3項目(a項目)、授業内容の評価3項目、授業方法の評価4項目、全体的感想2項目の指定項目の他に、3つの評価項目を独自に追加して実施した。追加項目は「①授業の内容と演習の内容の関連は良かった」、「②演習を行い、授業の内容が良く理解できた」及び「③演習の指導は分かりやすかった」である。

追加項目に対する学生の評価を中心に、学生による評価について分析を行った。4段階評価で、①について、評価2が1人、②について、評価2が9人、③について、評価2が7人、評価1が2人いた。これらの学生が自己評価a項目や他の評価項目にどのような評価を行っているか、調査した。これらの評価を行った学生グループの評価結果をグループAとし、比較のためにその他の学生の評価結果をグループBとし、両者を比較した。

表1に示すように、自己評価a項目のポイント合計を計算し、両グループを比較した。グループAについては、②について評価2をつけた学生、③について評価2及び評価1をつけた学生に、更に区分して示した。いずれにしても、グループAの学生の自己評価が低いことが分かる。

表1 自己評価a項目のポイント合計による比較

合計	グループA			グループB
	②に評価2	③に評価2	③に評価1	
12	*			***
11				*****
10		**	*	*****
9	*	**		***
8	**	**		*****
7	**	**	*	**
6	*	*		
5	**			
4				

表2に、その他の評価項目について両グループの学生が評価2及び評価1をつけている数の積算を示す。グループBの学生に較べ、グループAの学生が、私の授業に対し不満、ないしは低い評価を表明していることがはっきりと分かる。最も評価の低い項目8は「授業担当者の話し方は明瞭で聞き取りやすかった」であり、グループAの学生からも一部低い評価を得たが、グループBの学生の大部分から低い評価を得た。

理解できる授業になっていると判断される。今後は、学習に取り組む姿勢に問題のある学生への対応や、学生の授業評価で指摘された事項の改善に努めたいと考えている。

本報告は、特別教育研究経費の教材開発プロジェクト経費の援助を得て実施した、教材開発の一環としてまとめたものである。更に詳しい教材は別に編集して公表する。工学部FD委員会をはじめとする関係各位に深く感謝する。

表2 その他の評価項目についての比較

項目番号	グループA	グループB
4	***	
5	*****	**
6	*****#	**
7	*****	*
8	*****#####	**#
9	*****###	*
10	***#	*
11	*****#	
12	*****###	

*は評価2を表し、#は評価1を表す

以上の分析により、「演習が理解できなかった」や「演習の指導が良くない」と評価した学生は、自分の授業に取り組む姿勢についての自己評価も低く、授業内容や授業方法等についても、低い評価を与えていることが分かる。学生の評価に基づいて改善の努力は必要であると考えますが、学生の低い評価の原因は、授業内容や授業方法にあるのではなく、むしろ学生自身の学習に取り組む姿勢にあると考える。同じ授業を受けた他の学生は、授業に取り組む姿勢が高く、授業内容や授業方法に対して、おおむね良い評価を与えていることから、この判断は支持される。

まとめ

従来の演習の教科書に囚われず、講義の進展と学生の理解の状況に基づいて、授業内容の理解を促す演習課題を様々な工夫し、改善を重ねてきた成果を要約することができた。その中で、講義と演習の連携の状況を示し、演習課題の狙いと実施状況について報告した。更に、学生の授業評価に基づいて、授業内容や授業方法を評価した結果、学生自身の学習に取り組む姿勢ができていれば、