

高等専門学校における材料力学教育

Education of the Strength of Materials in College of Technology

島 岡 三 義^{*1}

Mitsuyoshi SHIMAOKA

The Strength of Materials comprises not only mechanics of solids, which are not limited to elastic deformation, but also materials testing. Because the students who belong to the author's department have little knowledge about the materials' characteristics, they imagine that this subject is difficult. In this paper, it is discussed how to make the students understand the essential and some important points of this subject. For students in college of technology, the author points out that the lecture concentrating on the elastic deformation of solid members is most important and that the basic mathematics used in this subject must be explained once again early in this lesson.

Keywords : College of Technology, Strength of Materials, Lesson and Teaching Method

キーワード：工業高等専門学校，材料力学，授業・講義法

1. まえがき

材料力学では目に見えて実体のある物の変形を扱うが，部材内に生じる応力は目に見えないものである．また，材料力学が扱う変形量は目に見えぬ程度の範囲である．このように扱う対象が目に見えてははっきりしているのに，求めるものが応力やひずみなど目に見えない，頭の中でイメージするものになると学生は難しいと考えるようである．材料力学を学生に理解してもらうためにはどうしたらよいかを多くの材料力学教育者が教育方法を検討している^{1) - 4)}，解説書の出版も相次いでいる．筆者も所属する奈良工業高等専門学校電子制御工学科（以下「本校」，「本学科」と記す）で金属材料の引張試験や硬さ測定の工学実験を担当し，その結果を材料力学の授業で引用するなどして，学生の理解を助けるような教育改善に取り組んできた⁵⁾．しかし材料力学の授業時間数が少ないこともあって，未だ満足できる教育ができていない．

高等専門学校（以下「高専」と記す）ではいろいろな専門学科が存在し，それぞれの学科において材料力学の修得単位数も異なり，あるいはまた「機械工学概論」の一分野として材料力学を教育している場合もある．本報告では，材料力学を難しいと感じさせるものは何かを学生の目線に立って明らかにし，高専本科における材料力学をどのようにとらえ，どのような考え方で教えるべきかについて私見を述べ，材料力学教育の改善の一助になれば幸いと考える．

2. 材料力学の考え方の基盤と取り扱う事象

2. 1 材料力学の考え方の基盤

材料力学は固体の力学から材料試験，実験的応力解析法，計算力学までを含むが⁶⁾，本稿では狭義の材料力学を考える．すなわち，固体材料（部材）を「弾性体」と見なして変形，応力状態を論じ，その理論の基礎を弾性学（論）におくものである．原則的には部材の物性は等方的であり，応力とひずみに比例関係が認められる，いわゆる「フックの法則」が成立する範囲の変形，応力状態を考える．実際には応力とひずみに厳密な比例関係が存在しない材料は多く，フックの法則が成立する範囲も材料によって異なる．したがって，各種材料試験によって測定された「降伏点」や「耐力」をフックの法則の成立範囲とする．

部材は変形はするが，力のつりあい式とモーメントのつりあい式が構築できるとして，並進や回転運動を伴わないことから，部材を固定または支持する部分において反力や反モーメントが生じるとする．力のつりあい式とモーメントのつりあい式を構築して，この反力や反モーメントを求めることが問題解決の出発点になる．力のつりあい式とモーメントのつりあい式だけでは反力や反モーメントを特定できない「不静定」問題では，部材がどのような変形をするかを考えて，それを数式化する必要がある．

以上が材料力学における問題解決の考え方の基盤と考えているが，これまでの教育経験から，特に不静定問題に四苦八苦している学生が多いようである．

2. 2 材料力学が取り扱う事象

筆者が教科書として採用してきた書籍など^{7) - 16)}を参考にすれば，取り扱う事象は以下に示すような内容

平成16年12月8日受付

*1 奈良工業高等専門学校電子制御工学科

になろう。

(1) 応力とひずみに関して

各種応力・ひずみの定義、応力－ひずみ線図、縦弾性係数や引張強さなどの機械的性質など

(2) 一軸引張りと圧縮に関して

断面一様な、あるいは断面が変化する棒、自重や遠心力などによる物体力を受ける棒、熱応力、不静定問題、簡単な骨組み構造など

(3) 棒のねじりに関して

断面二次極モーメント、ねじりの断面係数、円形断面棒、矩形断面棒、楕円断面棒、任意閉・開曲断面棒、コイルばねなど

(4) はり（梁）に関して

断面二次モーメント、断面係数、せん断力図と曲げモーメント図、曲げ応力、平等強さのはり、はりのたわみ、不静定はり、連続はり、面積モーメント法、曲がりはりなど

(5) 長柱の座屈に関して

オイラーの座屈理論、各種座屈に関する実験式など

(6) 弾性ひずみエネルギーに関して

引張・圧縮・曲げ・ねじり等のひずみエネルギー、マクスウェルの定理、カステリャノの定理、衝撃荷重による応力と変形など

(7) 組合せ応力に関して

3軸応力状態、平面応力・ひずみ状態、モールの応力・ひずみ円、内外圧を受ける薄肉円筒・厚肉円筒・薄肉球・厚肉球、弾性係数間の相互関係など

(8) 平板の曲げに関して

矩形板の曲げ、円板の曲げなど

(9) 構造力学に関して

静定・不静定トラス構造、ラーメン構造など

(10) 材料の破損形態に関して

応力集中、破損条件、クリープ、疲労、許容応力と安全率など

(11) 材料試験法に関して

静的強度試験法、衝撃試験法、硬さ試験法など

(12) 応力・ひずみ測定法に関して

ひずみゲージによる方法、光弾性測定法、X線応力測定法など

(1)～(9)までの内容は、応力－ひずみ線図、座屈の実験式関係を除けば材料の物性などを知らなくても理解できる内容で、(10)は材料の物性あるいはそれに関連するもの、(11)は材料物性の測定法、(12)は材料力学で扱う物理量の測定法である。

3. 材料力学の難しさ

3. 1 学生は材料力学を難しいと感じているか？

材料力学を学習している本校、本学科の4年生に対して行った授業アンケートで、「(材料力学の) 授業内容を十分理解できたか？」という質問に対する結果を

図1に示す。なお、アンケートでは質問に対する回答が積極的肯定から積極的否定まで4段階になっているが、本稿では肯定的か否定的かの2段階で表示することにし、以下のアンケート結果も同様の表示とする。大多数の学生はあまり理解しておらず、材料力学を難しいと感じていることがわかる。なお、このアンケートは年間授業時間数の75%程度消化した11月末～12月初め頃に採取されたもので、この時期は例年「はりの曲げ応力」や「はりのたわみ」を解説している時期である。つまり、「はりのせん断力図」や「はりの曲げモーメント図」を良く理解していない学生にとっては、その応用にあたる内容を学習している時期なので、最も難しいと感じる時期にあたっていたかも知れない。

平成9・10年度の学生の理解度がやや高いが、B5サイズで2分冊になっている、読みやすい専門書を教科書に採用したことが良かったかも知れない。ただし、この本はどのような事象においても座標系を固定していたので、数学的には統一がとれていたが、特に「はり」の問題では他の専門書と座標軸が逆になっていたので混乱を生じることになった。そこで、翌11年度は最新初版本を教科書に選定し直した。この本は材料力学の応用例についての解説があつて良かったものの、随所に間違いがあつたので学生の理解を助けることにはならなかったようである。12年度以降は「図解でわかる」という接頭語が付く本を教科書に選定したので、難しい表現が少なくなったことが理解力の上昇につながったと考えている。15年度に学生の理解度が極端に上昇しているのは、工学実験での結果を引用したり、学生の理解度に合わせた授業の進め方をしたことが主な原因と考えている。しかし、学生の理解度に合わせた授業の進め方をした結果、シラバスに記載した講義内容を消化できなかったもので、必ずしも筆者の教育方法が成功した訳ではない。16年度の学生

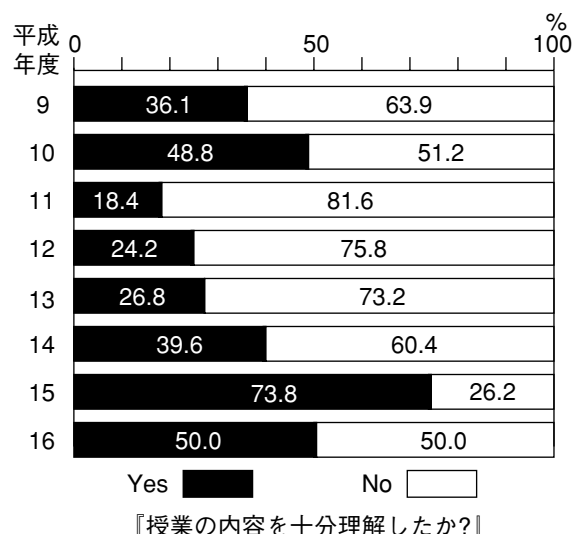


図1 授業の理解度に関する調査結果

には、永年考えていたことであるが、ノートをほとんど採らなくても良いように、また、こちらの説明に傾注できるように、例題や演習問題も含めて数式展開を詳細に記した資料（A4サイズで約150ページ）を配付した。16年度はアンケート結果を学生にフィードバックさせるために、例年より早い10月にアンケートが採取された。この時点では参考資料が学生の理解にまずまず役立っていたと思われる。

一方、物事を理解するにはそれに対して興味を持つことが大切である。材料力学に興味を持ったかという質問に対する回答は図2のようになっており、図1と見比べてみれば、興味を持てれば理解力が向上することを証明するような結果が得られている。16年度は授業中での小テストを、筆者としては初めての試みとして何度か実施したので、そのことが授業に対する興味を減退させたかも知れない。

また、学生は「これを勉強して将来何の役に立つのか？」という疑問をよく投げかけるが、講義で解説している内容が現実とどう関わっているかという具体例を示せなければ学生の興味はますます減退していくことになる。シラバスで示した講義予定を消化しようと思えば、現実との関わり具合を省略しがちになり、このジレンマからの脱却は容易ではない。

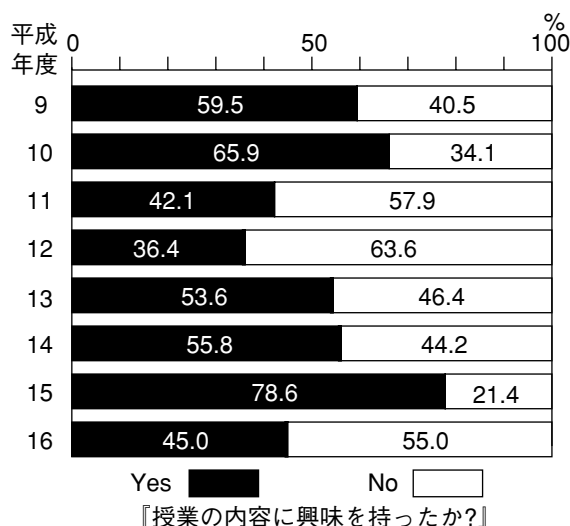


図2 授業への興味に関する調査結果

3. 2 なぜ材料力学を難しいと感じるか？

(1) 教員の力量不足

図2に示したように、学生が興味を持てないような授業してきたことも一因である。学生という聴衆者が毎年変わり、クラスの雰囲気も変わることから、学生に興味を抱かせるような授業を毎回実施していくことは至難の業である。そのような授業は、教える側の試行錯誤しながらの経験によって生み出されるものであり、容易に解決できそうにない課題ではある。

(2) 材料の性質についての理解あるいは解説不足

ほとんどの材料力学専門書では、延性材料、脆性材

料や軟鋼の典型的な「応力－ひずみ線図」を最初の方で解説している。この線図をもとに比例限度、弾性限度、耐力、引張強さ、極限強さ、破断強さ、降伏および降伏点、縦弾性係数などの専門用語の定義を解説することは良いとしても、この線図は弾性変形域を越えて塑性域や破断に至る過程まで示している。「延性」や「脆性」についての簡単な解説がなされていても、明らかに材料の物性、特に機械的性質についてある程度の知識を持っていることを前提にした解説の仕方であることが多い。また、「材料を引っ張れば伸びる」という最も基本的な特性の根本的な仕組み、すなわち変形のメカニズムをわかりやすく説明している材料力学専門書も見あたらない。「材料を引っ張れば伸びる」ということが実験事実であるからといって、その理由がわからない不快感が後々まで引きずってしまっている学生が多いのではないかと考えている。

また、「力学」と言えば「運動」を連想させるが、前述したように「材料力学」では外力と部材内での内力とのつりあいと、任意点まわりのモーメントのつりあいが取れていることを前提にしているので、部材は運動しないことになっている。伸縮、ずれやたわみなどの大きさを問題にするが、弾性限度を超えた応力が作用する状態や破断に言及することも多く、その時には延性材料か脆性材料かという、材料固有の性質が大きく関係することを述べねばならない。材料力学専門書には、数値解を求めるために必要な縦弾性係数、ポアソン比、降伏点や引張強さなどの物性値が示されていることが多いが、材料の詳しい説明はほとんどない。したがって、材料物性についての知識が乏しい学生には、初めのうち、材料力学が「力学」なのか「物性論」なのか判然としないところがあって、材料力学を難しいと感じさせているのではないかと考えられる。

(3) 数量的に明確に区分できない物性用語の存在

「延性」、「脆性」や「剛性」などの「言葉としての定義」は存在しても、数量的に明確に区分できない物性用語が多いことを指摘しておきたい。材料に生じる応力が許容応力を越えて破断する状況を実際に演じて見せるときには学生は大きな興味を示す。授業で使っているチョークを引っ張ると断面変形がほとんどないまま破断するが、軟鋼は破断部がくびれて破断する（工学実験で破断部の詳細を走査型電子顕微鏡で確認させている）。この破断形態の違いに対する最も単純明快な説明は「軟鋼は延性材料でチョークは脆性材料だから」ということになる。しかし、この説明は「延性」と「脆性」の明確な区分を定義できていない現状においては十分なものではない。

一方、「流体力学」でもある程度個々の流体の物性の理解は必要であるが、「粘性流体の力学」、「圧縮性流体の力学」、「稀薄気体の力学」などのように、流体の性質別による理論の構築がなされている。しかし、

材料力学では「延性材料の力学」とか「脆性材料の力学」というような分け方はしていない。これは「延性」と「脆性」を明確に区分できず、物性値でもないの、理論式に組み込めないからである。機械的性質が数値で表現できて、理論式に組み込めるものは弾性係数とポアソン比くらいであろう。数値表現できて相対評価しかできないものであれば、それは初学者を混乱に陥れるとともに、もやもやとした気分を堆積させ、材料力学を「材料の性質を良く知らないで困る、何となく割り切れない学問」と思わせて、結局は「材料力学は難しい」と感じさせているとも思われる。

(4) 学生の数学力不足

本学科では4年次に材料力学を開講しているが、材料力学に必要な数学は3年次までにほとんど履修し終えている（少なくともシラバスの上では）。数学を学習しているときには理解したつもりでも、時間が経てば忘れてしまうものであり、思い出すのに時間のかかる学生が実は多い。材料力学の授業で説明していることと現実問題との絡みを解説することで、材料力学への興味付けがなされたり、今授業で説明していることを理解できずにいる不快感を一時的に回避できたとしても、数学の展開に話題が移った段階で学生の興味は薄れ、材料力学を難しいと感じてしまうのではないかと筆者は考えている。

4. 材料力学教育上省略可能な事項

4. 1 材料物性に関する知識

前記2.2節の(10)が材料力学が取り扱う事象に含まれているのは、材料の機械的性質を理解していると、材料力学で登場する縦弾性係数などの数値の量的感覚がつかめ、応力などの数値解の妥当性を実感できるメリットがあるためと考えられる。将来、部材等の強度設計業務に携わる場合を想定すれば、このようなメリットは非常に重要なことである。しかし、材料の性質を科学的にかつ統一的に整理・予測することが困難な現状にあることから、材料の性質を単純明快に解説することは容易ではない。本学科においては2年次に「材料・加工学（2単位）」を開講しているが、世の中に存在する材料とその用途を解説するのが精一杯で、材料物性論まで手が回らない状態である。

物理で学習する「質点・質点系の力学」や「剛体の力学」では、実在しない理想化された物体を対象にしているので、物体の性質を考慮する必要がない。そこで、剛体ではなく、実在する物体に近い『フックの法則に則って変形する物体の力学』として材料力学をとらえることにするならば、材料物性に関する知識は必ずしも必要ではないと言える（フックの法則の成立範囲内では、延性材料なのか脆性材料なのかを考慮する必要はないはず）。このことは学ぶ側の負担を軽くすると考えられる。

4. 2 テンソル解析と変分法に関する知識

材料力学では、材料が強いのか弱いのか、あるいは材料にどれだけの負荷が作用しているかを、「応力」で比較している。図3に示すように、引張荷重、 P 、を垂直断面の断面積、 A 、で除した値が垂直応力、 σ_0 、である。しかし、傾斜した断面については垂直分力、 F_1 、と面に沿う分力、 F_2 、が作用することになるから、その断面には垂直応力、 σ 、とせん断応力、 τ 、が生じることになる。つまり、応力はどのような面に作用して、どの方向を向いているかを明確にしないと正確に記述、あるいは伝達できないもので、力が「ベクトル量」であるのに対し、応力は「テンソル量」ということになる。高専の低学年の学生でも「力の分配や力の合成」は理解できるし、また、図3も理解できる。しかし、軸方向力だけが作用しているのに、なぜ傾斜した断面のことを考える必要があるのかということの意味（たとえば部材の引張・曲げ・ねじりの破断部の形状に関係する）がよくわからない学生が多いようである。このことが理解できなくては前節2.2の(7)の組合せ応力は理解できないことになる。また、テンソル解析が理解できなくては応力の本質を理解することができないということにもなるが、高専4年生にとってはテンソル解析は難解すぎ、テンソル解析を用いないことにするのが望ましいと考える。その代わりに、モールの応力円を描けるようにしていけば、応力の本質を感じ取ることができるようになるであろう。

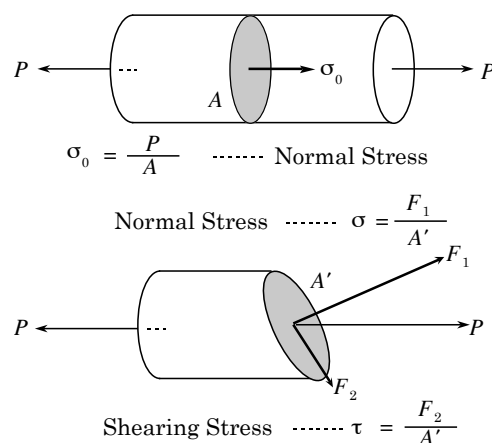


図3 一軸引張力を受ける棒材に作用する応力

また、前節2.2の(6)に示したマクスウェルの定理やカスティリアノの定理は「変分法」の知識を必要とするが、変分法は微分・積分学を基礎におくものである。高専の専門学科にもよるが、3年または4年から材料力学を学び始めることが多いことを考えれば、この変分法にも触れない方が望ましいと考える。

5. 材料力学教育上不可欠なこと

5. 1 材料力学の重要性を認識させる

材料力学は実体ある物の形状を美しくする、表現を

変えれば、バランスの取れた形状に作り上げるために必要な学問であると筆者は考えている。学生には「バランスの取れた形状」にしていこうという意欲はあっても、その作業はきわめて「感覚的」であり、出来上がった形状や寸法に対する材料力学的な根拠を欠いているか、稀薄である場合が多い。このような姿勢では、将来、設計業務を遂行していくような場合、顧客や上司を説得し、かつまた満足させることはできないであろう。実際、図4に示す授業アンケートの結果では、学生の授業への取り組みは決して積極的とは言えない状況になっている。それは、図5に示したアンケート結果からわかる通り、材料力学を学ぶ意義や授業の目的を学生に十分周知できていないからでもあると言える。材料が破損して大事故が発生し、部材の設計ミスが原因である場合には、材料力学がものづくりにはきわめて重要な学問であることを知らしめてくれる。良い例とは言えないが、学生にこのような事例を通じて材料力学の意義を良く認識させれば、材料力学を学ぶ意欲も高まると思う。

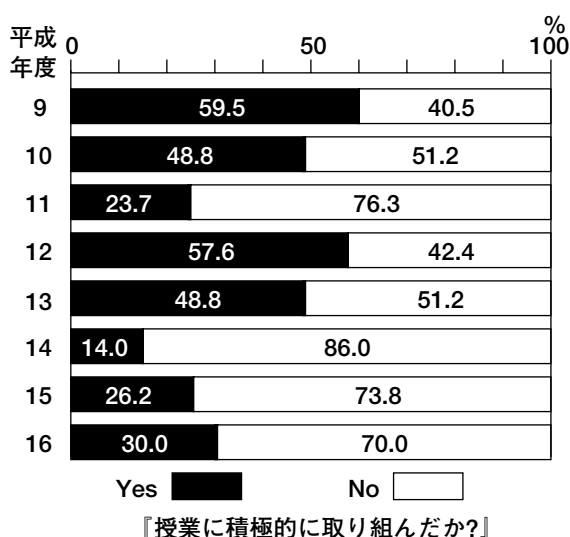


図4 授業への取り組みに関する調査結果

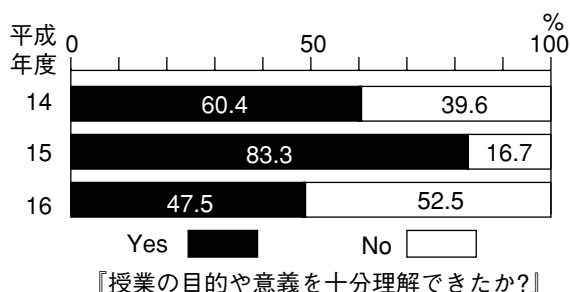


図5 授業の意義・目的の理解度に関する調査結果

5. 2 材料力学の勉強の仕方の改善

高専本科レベルの材料力学で良く使用する数学は代数・幾何学、微分・積分学および簡単な線形常微分方程式ぐらいである。内容は決して高度なものではないと思っているが、また本校、本学科だけかも知れないが、解を導くための数式展開についていけない、ある

いはついていくのに非常に時間のかかる学生が増えていくように思われる。材料力学は現象を数式で記述して結果を導くこと、およびその過程を理解することを本旨とする学問であると筆者は考えているので、「公式化」して暗記しようとする勉強の仕方は間違いだと考えている。また、説明を聞くことよりも板書されたものをすべてノートに書き取ることが教室内での勉強だと勘違いしている学生が多いし、さらには、ノート筆記が遅いために説明を聞く余裕のない学生も多い。このような勉強の仕方でも多くの演習問題を解いたとしても、その問題は理解できても未知の問題については解決のきっかけさえつかめない事態に陥ったり、「問題の解き方」を理解しようとはしなくなる可能性が非常に高くなる。つまり、予習はともかくとして復習すらまともにしなくなることになる。図6に「この授業（材料力学）の予習・復習を十分したか?」という授業アンケートの結果を示すが、授業以外で自主的に勉強している学生が如何に少ないかがわかる。このような状況は「材料力学」に限ったことではないだけに一層深刻である。まずは「丸暗記」しようというような勉強の仕方を正すことが重要な課題と言えよう。

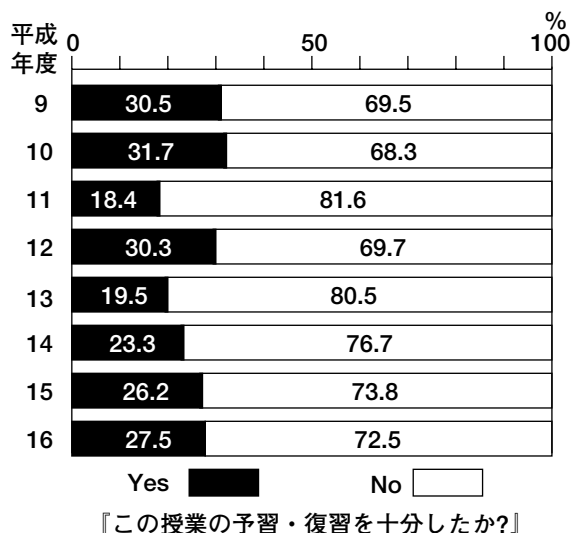


図6 材料力学の予習・復習に関する調査結果

5. 3 材料力学で使用する数学の再教育と数学教育担当教員との連携

習いたての数学が理解できたとしても、それを何かに応用して使っていかなければ忘れてしまうものである。解を導くための数式展開についていけないということは、忘れたことをすぐに思い出せないか、理解していたつもりが理解していなかったことを意味する。材料力学に関係する数学を付録としてまとめた書籍も少ないが、巻頭に載せている書籍には出会ったことがない。「断面二次極モーメント」、「断面二次モーメント」や「図心の定義」などの数学が例外的に「棒のねじり」や「はりの曲げ」で解説されている程度であろう。大切なことは最初に述べるべきだとすれば、道具

として使用する数学も真っ先に復習的に解説することが、材料力学を理解させる上できわめて重要なことと考える。

一方、近年改正された中学校新指導要録では学習内容が大幅に削減されており、本校の低学年の数学担当教員は、現在の授業時間では従前の講義内容を消化できないと指摘している。つまり、専門科目で必要とする数学は、専門科目担当教員が教育しないといけないう事態に至り、肝心の専門教育が十分でなくなる恐れが生じ、専門教育が十分なされているという高専の評価を著しく損なうことになるだろうと警告している。本学では各専門科目で使用している数学を調査し、低学年の段階でより効果的な数学教育を実施するための改善策を鋭意検討中である。今後は「一般」、「専門」の領域・所属の別なく、全教員が相互に連携して教育方法を検討していくことが急務であると考えている。

6. あとがき

奈良高専電子制御工学科で授業時間が少ない材料力学（2単位）の講義を担当してきた経験から、材料力学教育の難しさ、少ない授業時間でも可能な高専本科レベルの材料力学のとらえ方や教育方法について検討した。以下にまとめを記す。

- （1） 学生に材料力学を学ぶ意義・重要性をまず最初に十分理解させる。
- （2） 実在する物体に近い『フックの法則に則って変形する物体の力学』として材料力学をとらえる。このことによって、いまだ十分に体系化されておらず、個別に論じざるを得ない材料の物性を論外におき、学生が抱くであろう材料物性に関する知識不足の不安感を取り除いてやる。
- （3） 材料力学で使用する数学を、たとえ再度の解説になろうとも最初に解説し、学生に十分理解させる。
- （4） 材料物性と関連する事象（たとえば3.2節の（10）～（12）に示したような事象）は、機械工学科では可能かも知れないが、非機械系学科では無理して解説しない。すなわち、そのような事象の解説は高専専攻科や大学3年次編入以後の教育の場に譲ることにして、このようなコンセンサスを高専・大学および産業界で確認する。

16年度の学生には前述した膨大な資料を配付して講義に臨んでいる。筆者の意に反して相も変わらず必死になってノートを取る学生がいるし、詳細な解答例をほしがる一方で、配布したような膨大な資料はありがたくないと思っている学生もいる。役立っているのは資料をまとめた筆者だけということにならないよう、また、「材料力学は難しくない」と学生に思わせられるよう教育改善を継続していくつもりである。

参 考 文 献

- 1) 辻 知章：卓上実験を併用した材料力学教育，工学教育，49－5（2001），52－57
- 2) 浅野照雄，皆田 理，伊藤秀敏，岩井 哲：座学に実験とコンピュータシミュレーションを導入した構造力学教育，工学教育，49－6（2001），31－37
- 3) 市之瀬敏勝：構造力学教育における仮想実験と卓上実験の役割，工学教育，50－3（2002），109－114
- 4) 林 貞男：材料力学における演習ノート授業，工学教育，51－1（2003），136－139
- 5) 島岡三義：奈良高専電子制御工学科における材料力学教育の改善に向けて，平成15年度工学・工業教育研究講演会講演論文集（2003），23－26
- 6) 日本機械学会（編）：機械工学便覧A4材料力学，日本機械学会（1984）
- 7) 中沢 一，小泉 堯：固体の力学，養賢堂（1974）
- 8) 中原一郎：材料力学（上・下），養賢堂（1977）
- 9) 斉藤 渥，平井憲雄：詳解材料力学演習（上・下），共立出版（1977）
- 10) 飯田宗四郎：材料力学入門，朝倉書店（1987）
- 11) 山田嘉昭，奥村秀人：新材料力学（上・下），培風館（1995）
- 12) 材料力学教育研究会（編）：新形式材料力学の学び方・解き方，共立出版（1998）
- 13) 有光 隆：図解でわかるはじめての材料力学，技術評論社（1999）
- 14) 武藤陸治，黒崎 茂，岡崎正和，新津 靖：例題と演習で学ぶ材料力学，朝倉書店（2000）
- 15) 有光 隆：これならわかる図解でやさしい入門材料力学，技術評論社（2002）
- 16) 渥美 光，伊藤勝悦：やさしく学べる材料力学，森北出版（2003）

著 者 紹 介



島岡 三義

1983年 長岡技術科学大学大学院工学研究科
修士課程修了
1983年 奈良工業高等専門学校機械工学科助手
1991年 同校電子制御工学科講師
現 在 同校電子制御工学科教授
博士（工学）
伝熱工学，材料製造プロセス，材料
力学に関する教育・研究に従事