

構造力学の理解を深める補助教材の開発とその効果について

The Educational Effects of Teaching and Learning Tools for Structural Mechanics

中山 晴幸
日本大学理工学部

Abstract: Structural Mechanics is a very important subject in the civil engineering field. However, it is difficult to understand for students who are studying it for the very first time. In this study, teaching and learning tools were developed and applied in a Structural Mechanics 1 course. Three types of tools were introduced to the students: 1) a self-learning pad for Shearing Force Diagram (SFD) and Bending Moment Diagram (BMD), 2) the web-based SFD, BMD, Mohr's circle and statically indeterminate beams learning pages developed by Java and 3) a self-testing website developed by PHP. It was confirmed that the academic performances of the students were improved by using the tools. A self-learning pad has been used effectively to create images of the SFD and BMD. The Java site was used to verify the result of the calculation, and the self-test site was used effectively to overcome their weak part.

Keywords: Web-based Teaching and learning tools, Self-testing website, Shearing Force Diagram, Bending Moment Diagram

1. はじめに

構造力学は社会基盤工学の重要な科目の一つであるが、初めて学ぶ学生にとっては難しい科目である。本学科における構造力学（2単位）は、2年次後期の選択必修科目で約100名が受講している。1年次後期と2年次前期には、それぞれ基礎力学、が必修科目として設置されている。学生は基礎的な力学について学習した後、構造力学へと進む。

構造力学は実際の構造物への力学的展開とその解法を学ぶ科目である。学習目標は、構造力学に関する問題を解決できる能力を養うことである。しかし、2009年度にカリキュラムが変更となり、それまでの年間授業から後期半期へ変更、授業スピードはこれまでの約2倍となった。このような事情から授業内容の理解を深めるために、自己学習用パッドとICTを活用した補助教材の開発を進めてき

た。本論文は、補助教材の開発とその効果について検討を加えたものである。

2. 補助教材の開発

初めて構造力学を学ぶ学生が混乱する問題として挙げられるのは、座標系の使い分けである。構造力学の問題を解くためには、数種類の座標系を目的に応じて使い分けなければならない。例えつり合い方程式や微分方程式を解けたとしても、せん断力図（以下SFDと称す）や曲げモーメント図（以下BMDと称す）を描く際に間違える学生が多い。その対策として、以下の補助教材を開発した。

(1) 自己学習用パッド

SFDやBMDに関して、荷重とSFDおよびBMDイメージとの関係を分かりやすくすることを目的にA5サイズの手にとって理解を助ける自己学習用パッド（図1）を開発した^[1]。これにより、学生ははりに荷重が作用すると、どのようなせん断力、曲げモーメン

Haruyuki Nakayama
Nihon University
E-mail:nakayama.haruyuki@nihon-u.ac.jp

トが生じるのかをその正負を含めて体感して理解し、SFDやBMDをイメージしやすくなった。

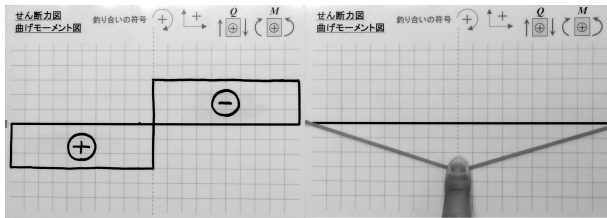


図1 自己学習用パッド

(2) ICT活用による補助教材

授業時間が半減した2009年度からICTを活用した補助教材を開発し、授業で利用した。その内容は以下のとおりである。

Javaを利用した補助教材

上記(1)に示した補助教材を使用するだけでは、構造物に複数の荷重が作用した場合のSFDやBMDを確認することはなかなか難しい。そのため、ホームページ上で様々な構造物に対して複数の荷重が作用した場合の各支点の反力およびSFDやBMDを確認できるサイトを構築して学生に公開した^[2]。その主な内容は、以下のとおりである。

(ア) 棒材

集中荷重や等分布荷重の作用位置や大きさをスライダーで変化させることにより、反力、軸力、軸応力、ひずみ、変位を確認できる。

(イ) 単純ばり、片持ばり、ゲルバーばり

集中荷重、等分布荷重、モーメント荷重の作用位置や大きさを変化させることによる、反力、SFD、BMD、たわみ、たわみ角の変化を確認できる。

(ウ) モールの応力円

モールの応力円の大きさ、位置と微小要素の応力状態、主応力とその方向とその大きさを確認できる。

(エ) 不静定ばり

不静定ばり解法のメカニズムについて、

たわみやたわみ角を利用する変形適合条件による解法を説明するためのサイトである。生じているたわみやたわみ角がゼロになるように、不静定となった原因の未知支点反力を変化させ、たわみやたわみ角をゼロとすることで、未知の支点反力を変形適合条件による不静定問題の解決方法を体感できる。

以上の補助教材は受講者限定で閲覧可能なサイト上に展開し、自己学習時に確認しやすく工夫した。図2には単純ばりへ等分布荷重とモーメント荷重の複数荷重が作用した例を示した。このように荷重が複雑に作用すると、SFDやBMDの形状も複雑になる。1次式での直線的变化に加えて、途中で2次式となるため曲線形状(凸の方向)など初めて学ぶ学生にとっては難しい判断が必要となる。

このサイトは、学生が釣り合い方程式とせん断力および曲げモーメントの関係式を解いた後に、SFD、BMDを描く際に参考となる。

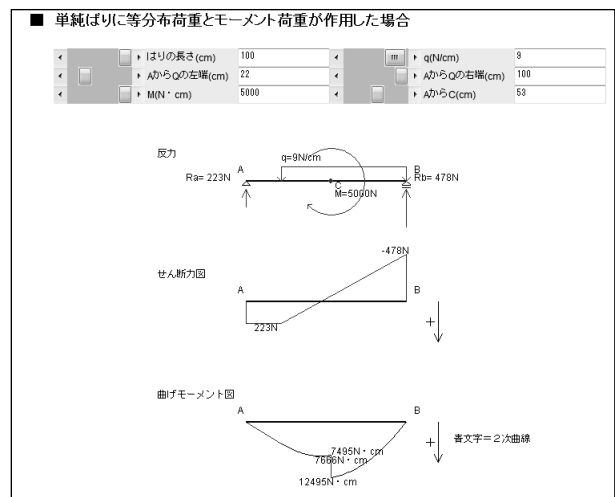


図2 単純ばりに等分布荷重とモーメント荷重が作用した場合の例

PHPを利用した自己学習サイト

PHPとデータベースを組み合わせで構築した小テスト解答システムにより、各自の学習効果を学生自身が確認することができる自己学習サイトを構築した。

学生が自己学習した小テストの結果によっては、関連する補助教材へのリンクを示

して再学習の必要性を学習者へ伝えることができる。各学生の学習データは利用した日時、結果などがデータベースに記録されて、どの分野が苦手であるか、その苦手分野を克服できたかなどが分かるようになっていいる。さらに、アクセスした日時や解答した問題数などは、本科目の管理用ホームページ上に自動的に掲載されるため、各受講生の小テスト実施の状況が一目で確認できる。

このシステムのために用意した小テストの基本問題数は約600問で、反力を求める問題からラーメン構造やゲルバーばりなど構造物の種類も多岐に亘っている。また、荷重の種類も集中荷重から分布荷重、モーメント荷重など様々で、600×バリエーションがあるため、用意した問題数は十分な数を確保している。

3. 補助教材導入効果の確認

初めて構造力学を学んだ2年生を対象に補助教材導入効果の確認を行った。以下のデータには再修生を含んではいない。

(1) 自己学習用パッドの効果

自己学習用パッドは、BMDについては荷重を手で加えるとそれに応じたBMDイメージが形作られるため、簡単で分かりやすい。集中荷重、等分布荷重、モーメント荷重にも対応しているため、初めての学生にも座標系の混乱を生じさせることが少なく、符号の間違いも気づきやすい。SFDについては、簡単なルールで線を描く必要があるため、演習の授業ではそのことを多く質問された。しかし、これを使うことで釣り合い方程式からSFDおよびBMDの関係式への橋渡しツールとして大きな効果があることを確認できた。

(2) Javaサイトの導入効果

自己学習サイトの学習記録から、図3に示すように受講学生は単純ばりより片持ちば

り、集中荷重より分布荷重やモーメント荷重といった構造物種別や荷重条件に苦手意識を持っていることが分かった。

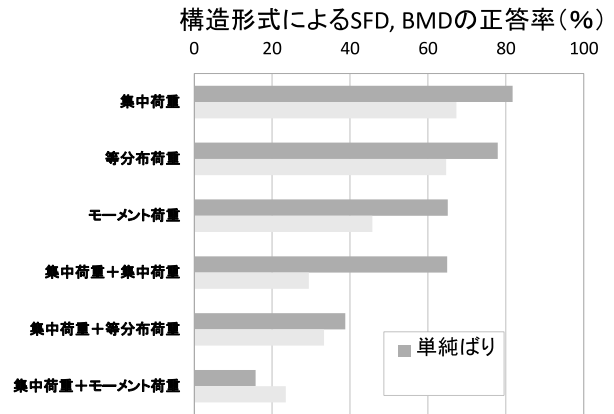


図3 構造物・荷重別の正答率

この図は、単純ばりと片持ちばりのSFDおよびBMDを合算した正答率を示している。正答率は単純ばりよりも片持ちばりの方が、またモーメント荷重や複数の荷重が作用した場合が他と比べて低いことが分かる。自己学習用パッドでは複雑な荷重条件には対応できない。その点、図2に示した例に代表されるJavaによる補助教材サイトは、複雑な荷重条件でも表現可能である。多くの学生は、複雑な荷重条件の問題を解いた数値結果を見直すためにJavaのサイトにアクセスするようで、このサイトが有効に利用されていることを確認した。

(3) 自己学習サイトの効果

2011年度に導入した自己学習サイトは、学生自らサイトに登録して学習する形式で、特に強制的に参加させてはいない。2年生の解答数はゼロから最大1,660回まで分布しており、平均解答数は72.5回である。

自己学習サイトで演習を重ねた学生の理解度は定期試験へ影響したのか、また、学習効果があったのかを確認するため、学習サイトにおける正答率と次項で説明する定期試験におけるSFDおよびBMDイメージ得点率を比較する散布図を図4に示した。その結果、自

己学習サイトでの正答率とSFDおよびBMDイメージ得点率の相関係数は約0.52となった。相関係数のt検定によると、危険率0.1%でこの相関は有意であると判断した。

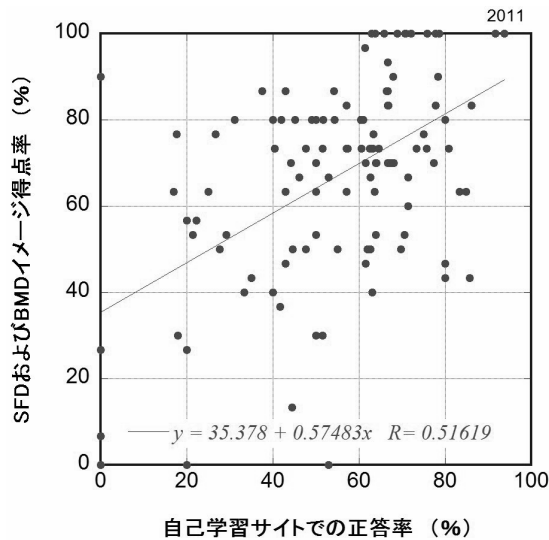


図4 自己学習正答率とイメージ得点率

自己学習サイトの学習内容は構造力学全般に亘るので、自己学習サイトの解答数と定期試験結果の関係を調べると相関係数が0.57となり、自己学習を進めた学生は定期試験でも良い成績を取ることが分かった。また、図5に示すように正答率と定期試験結果との比較を行うと、相関係数は0.69で相関があるとの結果が得られた。

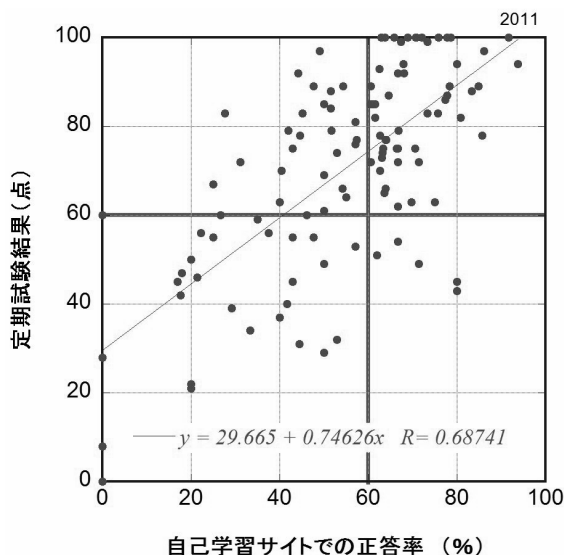


図5 自己学習正答率と定期試験結果

自己学習サイトで正答率60%以上を記録した学生グループの定期試験における合格率はグループ全体の92%に及ぶ57名であった。こ

れに対して、正答率60%未満の学生グループの合格率は約51%の28名で、明白な差となった。これは、自己学習サイトにおける演習が学生の理解度を高めた結果と考えられる。

(4) 定期試験による得点率の推移

カリキュラムを変更した2009年度前後の状況、すなわち、補助教材の本格的導入前後の教育効果を客観的に判断するために、以前より毎回定期試験で出題していた問題の結果を利用した。それは、「はりについて複数の荷重が作用した場合、計算の必要はないが、SFD、BMDを正負やゼロの位置および直線や曲線の次数を示して正確に描きなさい」という問題である。はりの種類と荷重条件の差によるSFD、BMDイメージを確認する問題で、問題の傾向は同じであるが、問題そのものは毎回異なる。この問題は毎回3種類のはりについて出題しており、定期試験の点数配分は100点満点中30点である。

補助教材導入前の2007年度と2011年度の結果について30点配分を得点率として百分率で表した得点率分布結果を図6に示した。また、2007年度から2011年度までの得点率の推移を箱ひげ図として図7に示した。

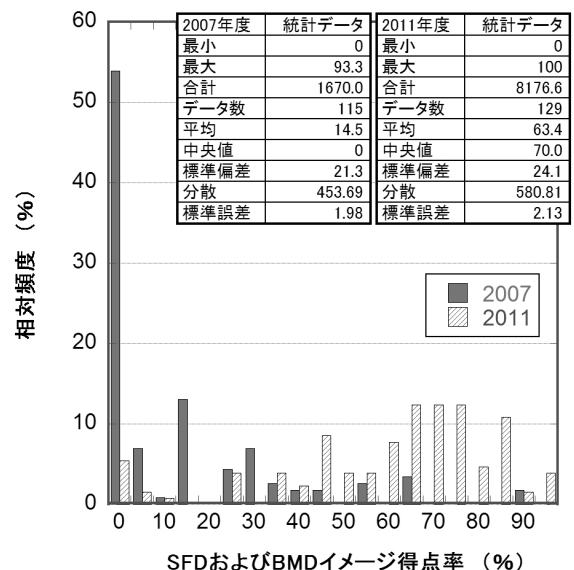


図6 2007年度と2011年度の得点率分布

これまででは、単にSFD、BMDのイメージを描くこの問題に手をつける学生は少なく、

多くの学生は、時間がかかる計算問題を解くことに専念する傾向があった。2007年度も受験者115名中62名が未解答のため得点率0%で、53名が解答したものの中央値は0%、得点率の平均は約14.5%であった。

2008年度に初期の自己学習用パッドを導入した。この補助教材は各学生には配布しなかったものの、SFDやBMDをイメージできるように授業中頻りにデモンストレーションを実施した。その結果、これまで多くの学生が手を付けなかったこの問題に対して図を描く学生が多く見られ、平均得点率は約42%と格段に上昇して得点率の分布形状がフラットとなった。この自己学習用パッドによりSFDやBMDのイメージがし易くなったと考えられる。

2009年度はこれまでの年間授業から後期授業へと授業時間が半減した年度である。この年度からは、A5サイズの自己学習用パッドを各学生に配布を開始し、手元に置いて確認できるようにした。また、ICT活用のJavaで構築した補助教材サイトをホームページ上に導入した年度でもある。その結果、授業時間が半減したにもかかわらず、この問題の得点率は格段に上昇して、多くの学生が解答するようになった。平均得点率も50%となり、得点分布形状も2008年度に類似した結果となった。

2010年度には、複合荷重条件も確認できるJavaによる補助教材を公開した。その結果、SFDおよびBMDイメージ図をすべての受講生が解き、間違える学生（得点率がゼロ）が皆無となった。

2011年度には学生各自が自由意志で利用可能な自己学習サイトを公開し、理解度が低い場合には補助教材のページへリンクできるようにした。この自己学習サイトには2年生受講者129名中117名がアクセスした。しかし、この年度のSFDおよびBMDイメージ図の結果は、図7に示すように、前年度にはいなかった得点率ゼロの学生が存在する結果となった。

この図に示した箱の上端は75%の第3四分位、下端は25%の第1四分位、塗りつぶした丸は中央値、ひげの両端はそれぞれ外れ値を除く最大、最小値を表している。さらに*および+は外れ値を示している。また、白丸は平均値で、各年度の平均値を破線で結んでいる。

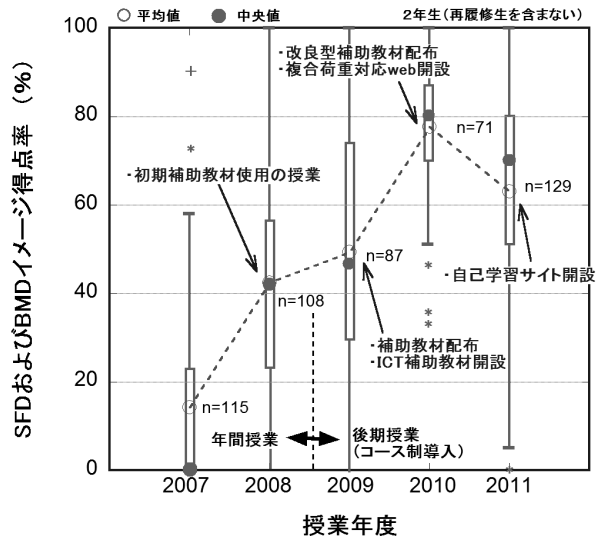


図7 補助教材導入前後における平均得点率の推移（箱ひげ図）

多くの学生がSFDおよびBMDイメージ図の描画を避けていた2007年度以前は、得点率の中央値がゼロとなるような結果であったが、補助教材を導入したことにより、中央値が上昇し徐々にその効果が現れてきた様子が分かる。2010年度にはこの問題を避けた学生はゼロとなり、得点率の中央値および平均値が80%に近づいてきた。ICTを利用したJavaサイト補助教材導入後の2010年度および2011年度を比較すると、2011年度の平均得点率が低くなっている。これは残念ながら図6に示すように、得点率10%以下の学生が10名存在したことが原因と考えられる。これら10名のうち、5名は自己学習サイト未登録者で、残りの5名は登録したものの、アクセスは1～2回で正答率は20%以下であった。補助教材を充実させても学習に対するモチベーションを維持しなければ理解度が進まないことが問題点として現れている。モチベーションをどのように保つかが今後の課題である。

4. 学生による補助教材の評価

本補助教材を利用した学生を対象にWeb上でアンケートを実施し、132名から有効な回答を得られた。

学生からは、配布した自己学習用パッドについて、「図のイメージができるようになった」、「素早く確認できて便利」、「イメージがすぐできるので符号の間違いに気づきやすい」といったコメントが多く寄せられていた。しかし、この補助教材のSFDに関しては、使い方が分からないという意見が9%（12名）存在した。BMDはゴムバンドを移動させて結果が即座に得られるが、SFDはホワイトボードマーカーで描く必要があるためと考えられる。

Javaによる補助教材については、「予習復習に確認できるので便利」、「理解しやすくなった」、「荷重の位置や大きさなどを自由に設定できて計算結果と比較しやすい」などのコメントがあった。

自己学習サイトでは、「問題数が多く様々な対応ができた」、「間違ったときに解答を見ても分からなかったが、リンクでJavaのサイトに行けて再確認ができた」などがあつた。

図8は補助教材全体について評価の結果を示している。図のように、ほぼ80%が「非常に良い、あるいは良い」と評価しており、受講学生の評価が高いことが分かった。

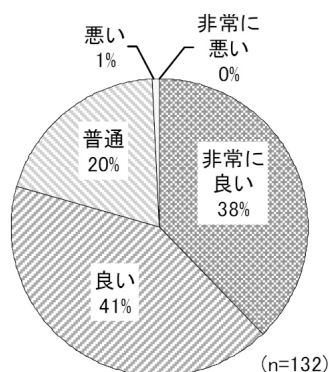


図8 補助教材全体の評価

5. まとめ

数種類の座標系を用いて解く必要がある構造力学は、一步間違えると解りにくくなる可能性がある。しかし、自己学習用パッドやICTを活用した補助教材を用いることにより、授業と連携して理解度を高められることを確認した。以上の結果をまとめると次のようになる。

自己学習用パッドは、SFDおよびBMDイメージを容易にするとともに、座標系に関する間違いを減少させる効果があつた。

ICT活用のJavaによる補助教材により、複雑な荷重条件下での問題に対する理解度が高まつた。

自己学習サイトは、学生が自身の理解度を確認できるとともに、不得意分野の確認と学習に役立つことを確認した。

自己学習サイトにおける正答率が高い学生は、定期試験の合格率も高いことを確認した。

授業時間が半減したにもかかわらず、これら補助教材の導入によって、学生の理解度を上げることができた。

謝辞

今回のシステム構築に当たり、当時学部学生であつた浦越智広氏、大学院生であつた近藤一宏氏他の協力があつたことを記して感謝します。また、授業を共に担当している同僚の峯岸邦夫氏の協力に感謝します。

参考文献および関連URL

- [1] 中山晴幸, 近藤一宏: せん断力図・曲げモーメント図に関する補助教材とその教育効果について. 日本工学教育研究会, CD-ROM, 2011.
- [2] 日本大学理工学部社会交通工学科構造力学 ホームページ <http://www.trpt.cst.nihon-u.ac.jp/sm1/>