

構造力学教育ソフトウェアの開発

DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL SOFTWARE FOR STRUCTURAL MECHANICS

脇田直弥 *1 日比野陽 *1
早瀬友晴 *2 市之瀬敏勝 *3

Naoya WAKITA ———*1 You HIBINO ———*1
Tomoharu HAYASE —*2 Toshikatsu ICHINOSE —*3

キーワード:
教育ソフトウェア, 構造力学, コンピュータ, 授業, 入門, 視覚化

Keywords:
Educational software, Structural mechanics, Computer, Lecture, Introduction, Visualization

Computer software for structural mechanics was developed to improve education of structural mechanics. A new lecture style was proposed using this software and accompanying manuals. This software visualizes mechanics including bending moment, axial or shear force and so on. Each student can easily understand these concepts through virtual experiment on computer changing the location or the magnitude of force as if he or she was loading forces on a real structure. Results of questionnaire proved that this software is effective for studying structural mechanics.

1 はじめに

現在, 学生の意識の変化やコンピュータの普及により, 建築構造教育の改善が重要な問題となっている。例えば, 日本建築学会は, 2002 年度大会(北陸)において, 「建築構造教育の新たな試みと方向性」について研究懇談会を開催し, この問題について積極的に取り組んでいる。また, 南らは, アンケート調査を行い, 建築構造力学教育の現状と将来的課題について報告している¹⁾。この報告では, 建築構造力学教育の改善点として, 「模型製作, 実験等により視覚的, 体験的に学習法を考える」, 「基本原理, 講義内容を分かりやすく説明する」, 「コンピュータの利用」などが挙げられている。また, 構造力学に興味のない学生も多く, 学生に興味を抱かせることも重要になっている。

このような背景から, 多くの人によって新しい構造力学教育の試みが行われている。例えば, 模型実験を用いてより直感的に学生に構造力学を教える手法が提案されている²⁾⁻⁴⁾。また, コンピュータの発展と共にコンピュータソフトウェアを使用した教育手法も提案されてきている⁵⁾⁻⁸⁾。しかし, 構造力学の初等教育に対応したコンピュータソフトウェアは少なく, また, そのソフトウェアを使用した授業方法まで提案されている場合は少ない。

そこで, 本稿では, 構造力学を初めて学ぶ学生を対象としたコンピュータソフトウェアを開発し, そのソフトウェアに合わせた授業方法を提案する。また, 実際に名古屋工業大学で本ソフトウェアを使用した授業を試行し, 簡単なアンケート調査を行い, 本ソフトウェア及び授業方法の有効性を示す。

2 本ソフトウェアの特徴

本ソフトウェアは, Web サイト^{*1}に公開されたプログラムとそのプ

ログラムに即したテキストで構成されており, 本ソフトウェアは主に構造力学の授業で使用し, 構造力学の基礎的な学習を行うことを目的に開発した。そこで, 本ソフトウェアには入門的なものとするために以下の特徴を持たせた。

2.1 仮想的な簡易実験・力学の視覚化

構造力学を初めて学ぶ学生に力学を実感させながら, 構造力学を教える手法として構造実験が考えられる。しかし, 構造実験は手間や費用がかかるため, 構造力学全体にわたって常に構造実験を行うことは難しい。

そこで, 本プログラムでは, 学生がコンピュータ上で簡単に実験を行うことができるようにした。また, 部材・荷重条件等をリアルタイムで変更できるようにし, 使用者が力学をより実感して, 構造力学を学べられるようにした。

また, 仮想実験を行うことで, 曲げモーメントや軸力等, 目に見えない概念を視覚化した。例えば, 曲げモーメントに対しては曲がる作用を, 軸力に対しては伸縮する作用を変形で表現し, 簡単に構造力学の力の概念を理解できるようにした。

2.2 Java™ で開発・小規模化

現在, 我々が調査した構造力学教育に使用するソフトウェアは高度で複雑なものや, 特定の学生にしか公開していないもの, コンピュータにダウンロードしなければ使用できないものが多い。

そこで, 本プログラムでは, 多くの学生に気軽に使用してもらうための, 分かりやすく簡単なインターフェースを採用した。例えば, 学生が行うべき初期設定を最小限にし, 1 つ 1 つのプログラムを小規模にした。また, プログラムを Java™ 言語で開発することで, インターネットへの接続環境があれば, Web サイト^{*1}にアクセスし, どのコン

*1 名古屋工業大学大学院工学研究科 博士前期課程
(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

*2 新日鉄ソリューションズ株式会社 工修

*3 名古屋工業大学 教授・工博

*1 Graduate Student, Nagoya Institute of Technology

*2 NS Solutions Corporation, M. Eng.

*3 Prof., Nagoya Institute of Technology, Dr.Eng.

コンピュータでもプログラムをダウンロードせずにブラウザで使えるようにした。

2.3 テキストとの連携

プログラム単体では、構造力学の教育内容を全て教えることは難しく、データを入力すると解答のみ表示されるプログラムでは、学生が計算方法を理解することは難しい。

そこで、本ソフトウェアは、授業で教育者の講義を受けながらの使用を前提とし、より効率的に授業を行うために本プログラムに即したテキストをWebサイト^{*1}上に公開している(図1)。なお、この授業では、通常とは異なった構造力学の学習プランを用いる。これについては次項で説明する。

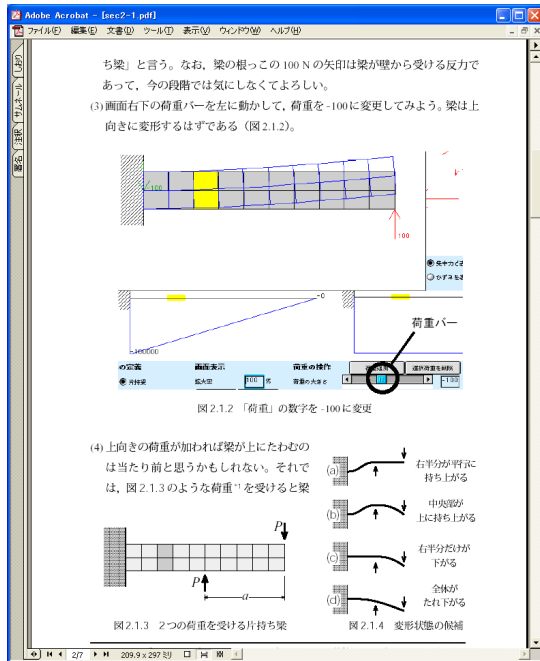


図1: テキスト表示画面

3 新しい構造力学の学習プラン

従来の構造力学の授業は手計算のための解法テクニックに重点が置かれており、学生が構造力学の概念を直感的に把握していない場合が多い。例えば、構造力学を学んだ学生でも部材に生じる曲げモーメントの値を求めることはできるが、どのような変形が生じるのかについてはイメージできない状況に陥ることがある。

また、近年コンピュータの目覚ましい発展と共に構造計算の手法も変化してきたため、従来の教育手法では対応できない部分が生じている。すなわち、これからの建築を学ぶ学生は、構造計算する手順だけではなく、コンピュータが行った構造計算の結果を評価できる力と、構造力学の本質の理解が必要となってくると考えられる。

そこで、本稿では、計算手順だけではなく、構造力学の本質を理解させるために、力について教える際に同時に変形も示すことを提案する。この方式で構造力学を教える利点を以下に示す。

- ・力の作用を視覚的に目で見ることができる。
- ・実際の物体を意識させることができる。
- ・曲げモーメント、軸力、せん断力、変形の関係を明確にできる。

また、本ソフトウェアはこの提案に基づいて開発している。

しかし、上記の方法で概念を理解しただけでは、しっかりした知識の定着は期待できない。そこでやはり学生に実際に手計算で演習をさ

せることも、理解を促進させるために重要だと考えられる。また、本ソフトウェアでの学習はあくまでも仮想的なものであるため、本ソフトウェアと平行して模型実験を行うと、より効果的な学習を行うことができる。ここで、以下に新しい構造力学の学習プランを提案する。

- (1) 変形を意識させることで行う概念理解・計算手法の修得
- (2) 手計算による演習
- (3) 模型実験による確認

4 各プログラムの詳細

現在、プログラムは6種類である。本項では各プログラムの詳細について説明する。

4.1 トラス入門プログラム

トラス入門プログラムは、トラスについて仮想的な載荷実験を行い、軸力と変形、変位を表示する。本プログラムの機能と特徴について以下に示す。

- (1) 部材の構成、種類の異なるトラスが8種類ある(図2)。実行したいトラスをクリックするとそのトラスに対応した実行画面が表示される(図3)。
- (2) 実行画面では、トラスの軸力、変形図、示力図などを表示する。
- (3) 実行画面では、各節点をドラッグすることで、外力を加えることができ、ドラッグに合わせて連続的にトラスの変形状態を表示する。(図3の右側の列)
- (4) 各節点回りの部材を切断することで、その部材に生じる軸力を示す。(図3の真中の列)
- (5) 各節点での力の釣合いを表示するために、各節点における示力図を示す。(図3の右側の列)
- (6) 部材の強度を応力度で設定でき、その強度に達すると部材の色が変化する。

本プログラムは、力のつりあいの表示と共に、軸力の作用を部材の伸縮で視覚化しており、トラスの入門として使用できる。

4.2 トラス解析プログラム

トラス解析プログラム(図4)は学生が作成した様々な形のトラスを解析し、その部材に生じる軸力と各節点の変形を表示する。本プログラムの機能と特徴について以下に示す。

- (1) マウスのみでグリッドにあわせて部材を作成できる。
- (2) 任意の節点に、支点と力を設定することができる。
- (3) 部材に生じる軸力を強弱に合わせてサーモグラフィのように表示し、変形も表示する。

本プログラムの使用により、トラス全体の力の流れと変形を直感的に理解することができる。

4.3 梁の仮想曲げ実験プログラム

梁の仮想曲げ実験プログラム(図5)は構造力学の基本である、片持ち梁(図5-a)と単純梁(図5-b)を仮想的に実験できる。本プログラムの機能と特徴について以下に示す。

- (1) 線材ではなく二次元的な梁の変形図を表示する。
- (2) 荷重の位置、大きさ、数をマウスだけで連続的に変更できる。
- (3) はりの変形状態、曲げモーメント図、せん断力図を表示し、荷重を変更すると、すべての情報が画面上で連続的に変化する。
- (4) 図5-aで丸で示したはりの一部である微小領域の変形状態・応力・ひずみ分布を拡大表示できる。

(5) 梁を仮想的に切断でき、その断面に生じるせん断力、曲げモーメントを表示する。(図6)

本プログラムでは図5-bに示ような分布荷重を再現することができるため、分布荷重におけるモーメント図やせん断力図の関係についても理解できる。

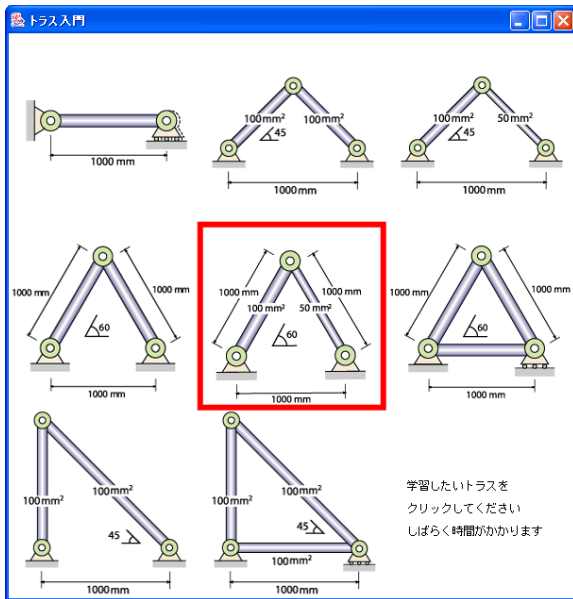


図2: トラスの選択画面

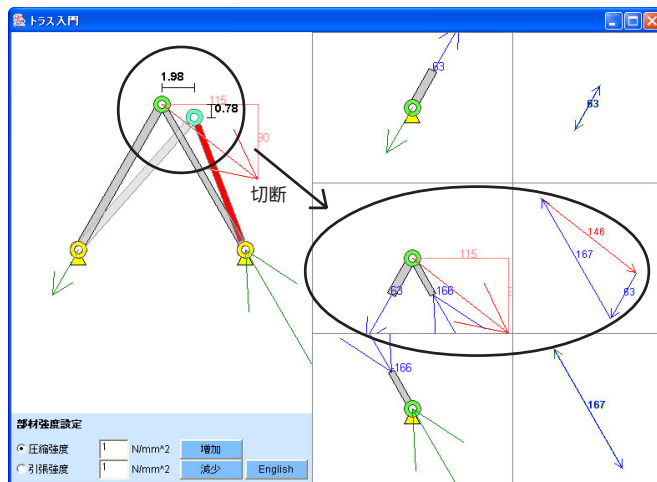


図3: トラス入門プログラム実行画面

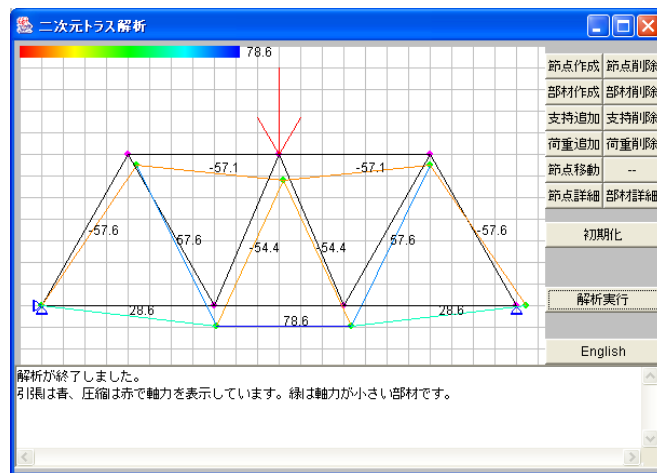
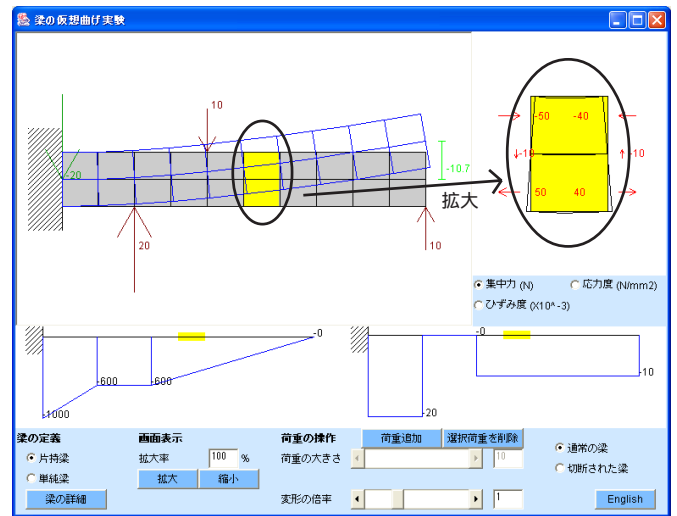


図4: トラス解析プログラム実行画面

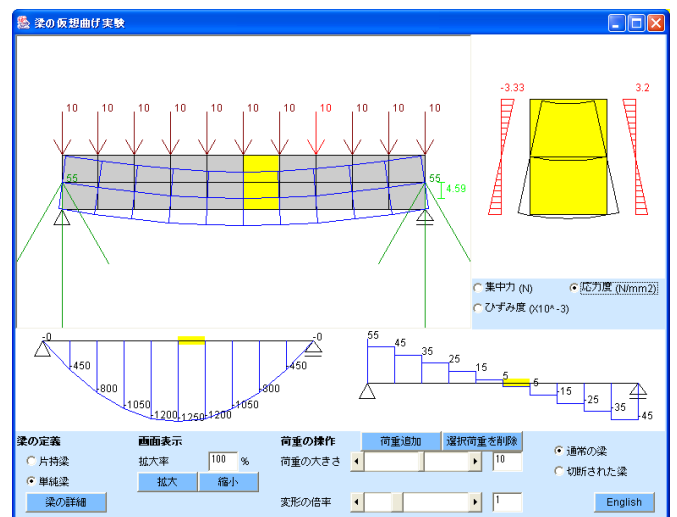
4.4 断面二次モーメントプログラム

本プログラムでは直感的には理解しづらい断面二次モーメントについて視覚的に学習することができる。本プログラムの機能と特徴について以下に示す。

(1) クリックで任意の断面形状を作成することが可能。



a: 片持ち梁



b: 単純梁

図5: 梁の仮想曲げ実験プログラム実行画面

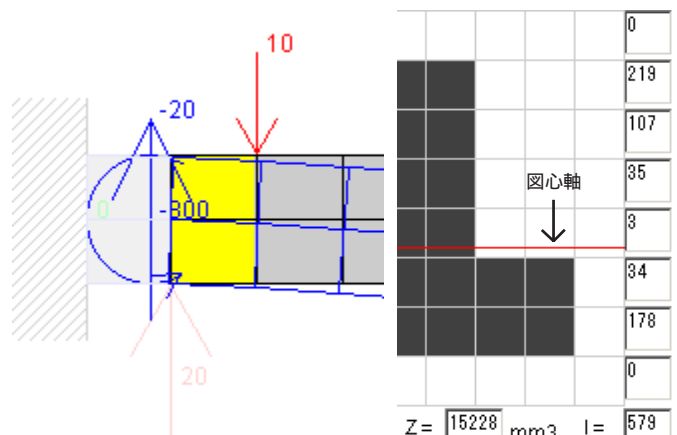


図6: 梁の切断状態

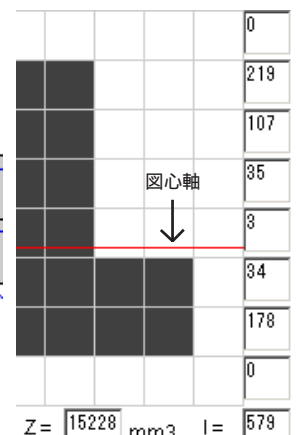


図7: 断面二次モーメントの表示

- (2) 断面二次モーメント, 断面係数, および図心軸の位置を表示する。
- (3) 各水平グリッド行における断面二次モーメントの寄与分を表示する (図7)。
- (4) クリックで部材を作成することにより, 図心軸が移動する。
- (5) 作成した断面に生じる応力を表示できる。また, その断面に加える曲げモーメントも変更することができる。

本プログラムをH型鋼に用いた場合の実行画面を図8-a, bに示す。図8-a, bの右側の応力度分布を比較することで, H型鋼断面の強軸・弱軸の違いを認識し, 断面二次モーメントと応力度分布の関係を理解できる。

4.5 静定構造物プログラム

本プログラムでは種々の静定構造物を学習することができる。以下に示す3種類のプログラムを開発した。

- ・折れ曲がった片持ち梁 (図9)
- ・ピン・ローラ支持のラーメン構造物 (図10)
- ・3ピン構造物 (図11)

本プログラムの機能と特徴について以下に示す。

- (1) 構造物に加える外力を連続的に変化させることができる。
- (2) 変形状態, 曲げモーメント図, せん断力図を同時に表示し, 荷重を変更すると, すべての情報が画面上で連続的に変化する。

本プログラムでは, 変形図を示すことで, 剛節やピンについて視覚的に理解することができる。なお, 本プログラムは構造力学の基本について学習した学生を対象としており, 梁は線材で表示している。

4.6 モールの円プログラム

モールの円プログラムはモールの応力円 (図12) とモールのひずみ円 (図13) を視覚的に表示する。本プログラムの機能と特徴を以下に

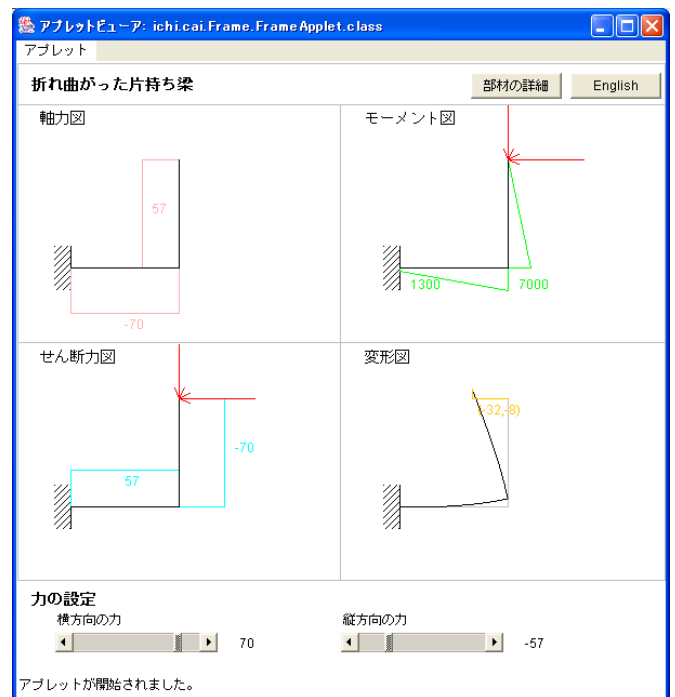


図9: 折れ曲がった片持ち梁プログラム実行画面

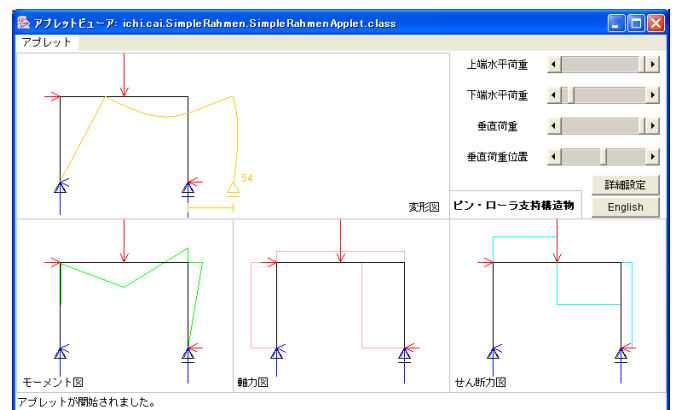


図10: ピン・ローラ支持ラーメン構造物プログラム実行画面

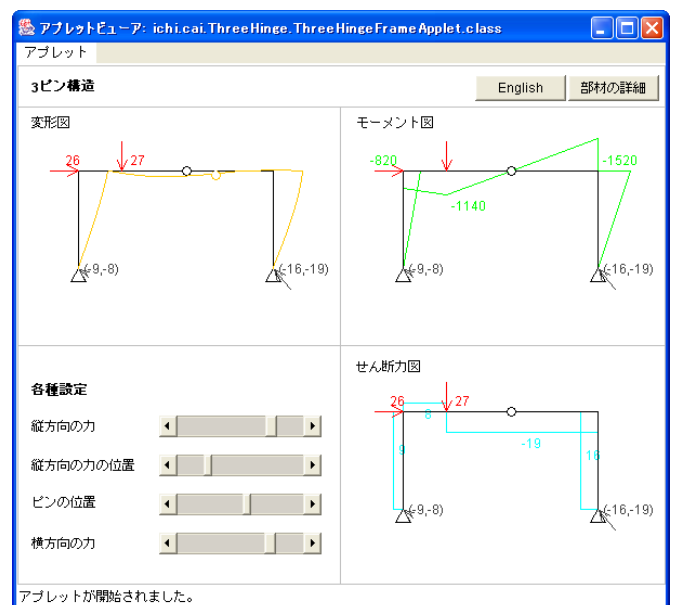
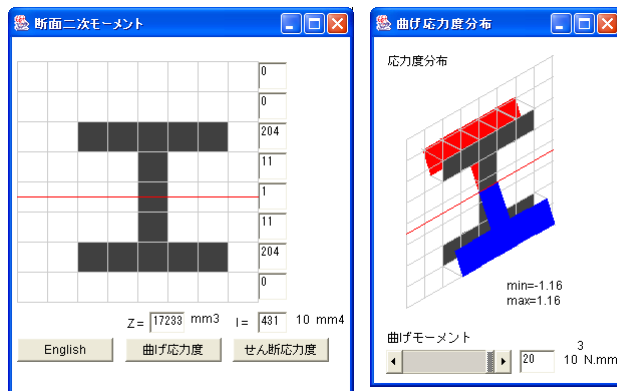
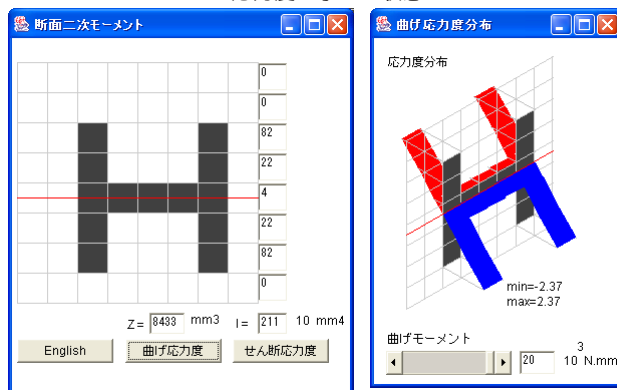


図11: 3ピン構造物プログラム実行画面



a: 応力度の小さい状態



b: 応力度の大きい状態

図8: 断面二次モーメントプログラム実行画面

示す。

- (1) 応力度は矢印で、ひずみ度は変形で表示することで、応力、ひずみ状態を視覚化する。
- (2) 設定した応力、ひずみ状態に対応したモール円を図示する。
- (3) マウスの操作により、座標を自由に回転させることができる。
- (4) 主応力、主ひずみを表示する。

5 本ソフトウェアを使用した授業方法

名古屋工業大学で実際に行った、本ソフトウェアを使用した授業の一例を以下に示す。

5.1 理論学習のための使用

実際の名古屋工業大学での構造力学の授業風景を図14に示す。この授業は学生が1人1台与えられたコンピュータ上で本ソフトウェアを使用しながら、教師の講義を聞くという授業形態をとる。つまり、理論を教える講義と平行してソフトウェアで(仮想的な)実験を行う。これは、通常の実験を行う授業のように理論を教えた後に実験を行うものとは異なり、より理論的に実験を理解することができる。また、この授業ではコンピュータ操作の苦手な学生の補助としてティーチングアシスタント(以下TA)を配置した。なお、学生がコンピュータに

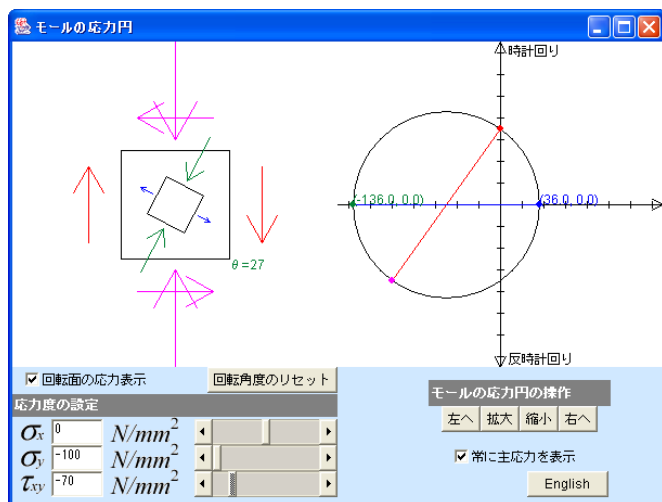


図 12: モールの応力円プログラム実行画面

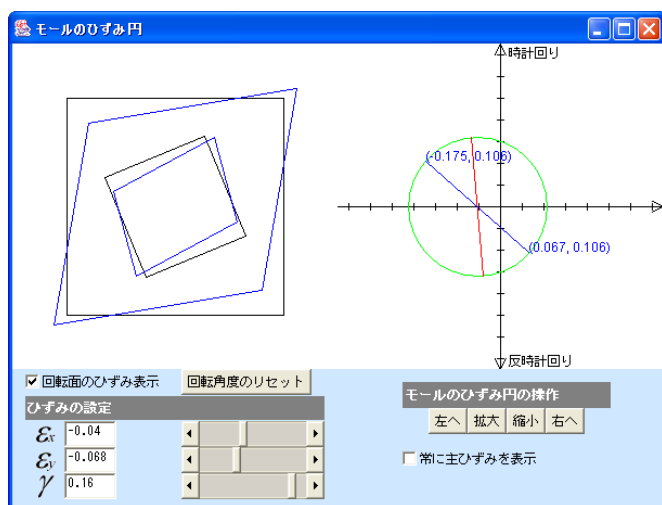


図 13: モールのひずみ円プログラム実行画面

慣れるまで時間がかかるため、第1回目の授業では、できるだけ多くのTAが必要である。この授業では図1で示したテキストを利用した。

本ソフトウェアを使用した授業(授業環境1)での「面白かった点」についての自由回答の結果を表2に示す。この回答から、多くの学生が、荷重の変化による部材の変形や各応力図の変化を見られる点を評価している。また、自分の思い通りに操作できる点がいちとして、多くの学生も多かった。このことから、本ソフトウェアを使用した授業方法は、学生自らコンピュータ上の仮想実験を行うことができるという点が評価されているといえる。

5.2 演習で使用

5.1項で説明した授業で理解した事柄をより確かなものにするため、



図 14: 構造力学の授業風景

表 1: 授業環境 1

実施場所	名古屋工業大学	岐阜高専
対象学年	学部3年生	高専4年生
実施日 (参加人数)	2001/05/11 (46) 2001/05/18 (61) 2001/06/01 (35)	2001/07/13 (40)
実施時間	10:30-12:00	12:50-14:20
有効回答数	30	39
ソフトウェア	梁の仮想曲げ実験	梁の仮想曲げ実験
TA人数(人)	3	2

表 2: 面白かった点についてのアンケート結果

理由	人数
荷重の変化による部材の変形、モーメント図の変形、せん断力図の変化が見れること	40
自分の思い通りの荷重をかけることができる	13
手計算ではできなかった計算ができるようになった	10
理解しやすい	7
イメージしやすい	6
図が動く	6

表 3: 授業環境 2

実施場所	名古屋工業大学	名古屋工業大学
対象学年	学部1年生	学部3年生
実施日 (参加人数)	2002/05/23 (64)	2002/05/31 (60)
実施時間	10:30-12:00	10:30-12:00
有効回答数	64	60
ソフトウェア	梁の仮想曲げ実験	梁の仮想曲げ実験
TA人数(人)	2	1

本ソフトウェアを用いた構造力学の演習を行った。以下に、本ソフトウェアを使用した演習の手順を示す。また、その時の授業環境を表3に示す。

- (1) 学生にソフトウェアを使用せず小テストを行う。
- (2) ソフトウェアを使用して、学生自身が問題の答え合わせをする。
- (3) 確認のためにもう一度小テストを行う。

この方法での演習を行うことにより、学生は自ら計算する力とソフトウェアを自主的に動かすことにより様々な問題への応用力を身に付けることができる。

本ソフトウェアを使用した授業（授業環境2）で行った片持ち梁の小テストの結果を図15に示す。図15では縦軸に小テストの平均正解率を、横軸に問題項目を示している。ただし、ソフトウェア使用前、使用後のテストでは難易度が同程度の、異なる問題を出题した。図14から、ほぼ全て項目で成績の上昇が見られるため、本ソフトウェアの演習での使用は、構造力学を理解する上で効果的であるといえる。

5.3 使用結果を設計行為で確認

ソフトウェアを使用した授業はあくまでも仮想的な実験であるため、本ソフトウェアと平行して模型実験を行うと、より効果的な学習を行うことができる。提案する模型実験の手順を以下に示す。

- (1) 本ソフトウェアを使用して理論を勉強する。
- (2) 構造物を設計し、設計した構造物を作成する。
- (3) 構造物を破壊する。

ここで名古屋工業大学で行った発泡スチロール梁の強度実験コンテストの様子を図16に示す。この模型実験は、「一定の大きさのステンボードから1mの間隔に掛けることができる梁を作成し、その梁の真中におもりを吊るし、その強度を競う」ものである。この模型実験で重要なことは、学生に設計させることである。設計を行うことで、学生は計算する力と構造物から変形を予測する力を身につけることができる。また、設計した強度で構造物が破壊することを確認することは、力学を実感させるだけでなく、構造力学の重要性を再認識するの

にも役に立つと考えられる。

しかし、実際に模型実験を行うことは、手間や費用の負担がかかり、学習進度も遅くなるため、半期に1度程度が望ましいと考えられる。また、発泡スチロールの強度コンテストの他に様々な実験を行ったが、発泡スチロールの強度コンテストのような設計の自由度が大きい実験に学生は喜ぶが、設計の難易度が高いためか、学習効果が薄い場合が多かった。むしろ、制限の多い実験、すなわち作成物の形が決まってい寸法だけを各自が決めるような実験の方が学習には効果的である。



図16: 発泡スチロール梁の強度実験コンテスト

6 まとめ

建築構造教育の問題解決方法として、梁の曲げ仮想実験プログラムをはじめとする構造力学教育ソフトウェアを6種類開発し、その使用方法の提案を行った。本ソフトウェアを使用した授業は、仮想的な実験を取り入れた授業であり、構造力学の理解を深める上で有効である。

謝辞

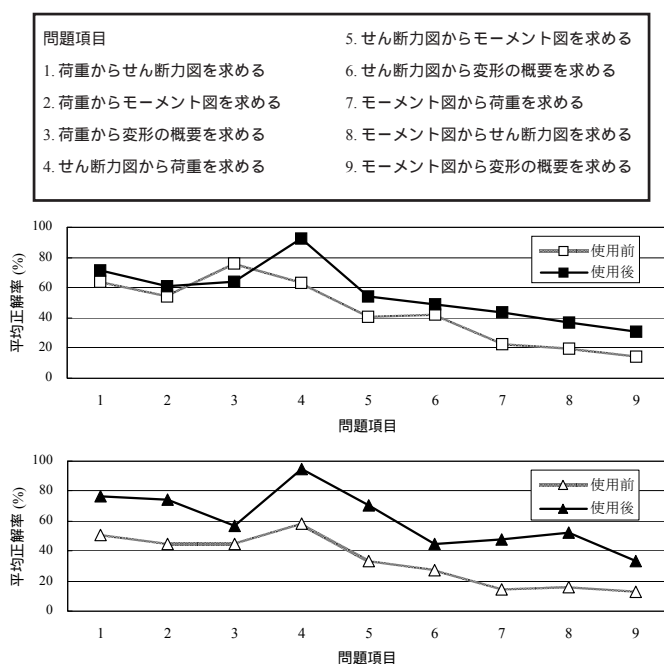
本研究の一部は、平成14-16年度文部科学省（萌芽的研究、課題番号14655196、代表者：市之瀬敬勝）により行なわれた。また、本研究を進めるにあたり岐阜工業高等専門学校柴田良一助教授にアンケートの御協力を頂いた。ここに深く感謝いたします。

注

*1 本ソフトウェアのURLは、<http://archi2.ace.nitech.ac.jp/ichi2/>である。

参考文献

- 1) 南宏一ら：建築構造力学教育の現状と将来的課題に関する調査研究，日本建築学会技術報告集 第11号，pp.105-110，2000.12
- 2) 日本建築学会：構造入門教材 ちからとカタチ，日本建築学会，2000.3
- 3) 福井實，大野治代，神農悠聖：構造教育に用いた教材模型 - その1 -，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.789-790，2001.9
- 4) 小椋紀行：構造用教育模型の効果に関する研究，日本建築学会東海支部研究報告集 第40号，pp.145-148，2002.2
- 5) 谷本陽一，横井友幸：建築力学教育におけるパソコンの利用可能性（1），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.471-472，1999.9
- 6) 芥川真一，笠原敏志：視覚的に力学を体感するためのリアルタイム有限要素法解析プログラムの開発，工学教育，vol.48，No.5，pp.26-32，2000.9
- 7) 加藤ひとみ，村田賢：コンピュータを用いた構造力学教育用モデルの構築，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.781-782，2001.9
- 8) 山田弘人，村田賢，加藤ひとみ：CAIシステムの構築及び力学教育モデルの開発，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.785-786，2001.9



上: 学部1年生 下: 学部3年生
図15: 片持ち梁の小テストの結果