

材料試験を支援するシミュレーション教材の開発と指導過程の検討

林 丈晴* 海老原理徳** 山本利一***

*東京都立小金井工業高等学校

**東京学芸大学教育学部

***埼玉大学教育学部

1. 緒言

近年の工業技術の高度化，機械の複雑化などにより，同一材料による様々な試験条件での材料試験結果を用いる設計がなされている。例えば，高密度ポリエチレンやはんだ材は融点が低いため室温でさえひずみ速度依存性や温度依存性が著しく，このような材料を用いた製品の設計では，複数の引張速度や温度で引張試験を行い，その試験結果から材料の力学的特性をモデル化し，これを用いてCAE(Computer Aided Engineering)構造解析を行う⁽¹⁾⁻⁽³⁾。従って，工業高校の授業においても様々な試験条件で，材料試験を行うことは重要である。一方，工業高校の授業における材料試験では授業時間，コスト，試験施設，試験技術の問題から，様々な試験条件で材料試験を行い，学習することは困難である。従って，様々な試験条件による材料試験をシミュレートする教材を用いた授業実践が必要である。

実験・観察が困難な現象をシミュレートし，生徒の自然科学への理解を促進させるための教材の開発に関する研究は多くある。例えば，関向⁽⁴⁾は，地震という現象を実際に観察・観測するのが時間的・空間的に困難であるため，それを補うために様々な条件での地震波の広がりを視覚的にとらえることができるシミュレーション教材を開発した。稲垣ら⁽⁵⁾は，可視化と操作性に配慮した物理教育に用いるためのActionScriptによるシミュレーション教材を開発した。池口ら⁽⁶⁾は，LabVIEWを用いて，生徒がイメージすることが困難な物理の分野として波動を取り上げ，これを自由に操作ができ，授業で扱いやすいシミュレーション教材の開発を行った。しかし，様々な試験条件による材料試験をシミュレートする教材の開発に関する研究は見当たらない。

そこで本研究では，引張試験の温度依存性およびひずみ速度依存性を表すことが可能なシミュレーション教材を開発した。さらに，開発した教材を用いて工業高校生に対して，実験授業を行い学習効果を調べた。

2. 開発した教材

本研究では，材料パラメータの決定が容易で，引張試験の温度依存性およびひずみ速度依存性を表すことが可能な構成モデルを開発し，このアルゴリズムを汎用有限要素解析プログラムMARCに組み込み，シミュレーション教材を作成した。汎用有限要素解析プログラムMARCは，線形解析はもちろん様々な非線形要因を考慮した静的および動的な非線形解析，熱およびMulti-Physicsまで，幅広い解析ニーズに対応できる強力な非線形有限要素解析プログラムであり，航空宇宙・重工業・自動車・電機・電子・建設・医療関係をはじめとする様々な産業分野に貢献し⁽⁷⁾，多くのユーザーに用いられている。本研究でMARCを用いた理由は以下の通りである。

- 1) テキストファイルで解析入力ファイルの作成が可能のため，MARCが1台あれば，多くの生徒が同時に作業ができる。
- 2) 試験条件の入力が比較的容易である。
- 3) 任意の構成モデルを組み込むことができる汎用有限要素解析プログラムの中で安価である。

2.1 構成モデル

本構成モデルの非弾性ひずみ速度テンソル $\epsilon_{ij}^{\dot{}}$ は次式で表される。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^m = p(\dot{\varepsilon}) A (\Delta \sigma)^N \exp\left(-\frac{Q}{R\{(T-T_a)\kappa+T_a\}}\right) n_{ij} \quad (1)$$

ただし、 $\langle \rangle$ は Macaulay のカッコで $x < 0$ なら $\langle x \rangle = 0$ 、 $x \geq 0$ なら $\langle x \rangle = x$ である。 $\Delta \sigma$ は過応力、 n_{ij} は流れテンソル、 N 、 A 、 D 、 κ は材料定数、 Q は活性化エネルギー、 R は一般ガス定数、 T は絶対温度、 T_a 、 $\dot{\varepsilon}_a$ 基準温度、基準ひずみである。また、 $p(\dot{\varepsilon})$ はひずみ速度に依存する項であり次式で表す。

$$p(\dot{\varepsilon}) = \frac{\dot{\varepsilon} SL}{\text{Log}_{10}(\dot{\varepsilon} S) + L} \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{\dot{\varepsilon}_a} \quad (3)$$

ただし、 $\dot{\varepsilon}$ はひずみ速度、 L は材料定数である。 $\Delta \sigma$ には、移動硬化を支配する背応力を内部変数として組み込み次式で表す。

$$\Delta \sigma = \sqrt{\frac{3}{2}(s_{ij} - \alpha_{ij}') : (s_{ij} - \alpha_{ij}')} - \sigma_0 \quad (4)$$

ここで σ_0 は初期降伏曲面の半径、 s_{ij} は偏差応力テンソル、 α_{ij}' は偏差背応力テンソルである。背応力の発展式としては次式で表される Armstrong-Frederick 則⁽⁸⁾を用いた。

$$d\alpha_{ij} = \frac{2}{3} C d\varepsilon_{ij}^m - \beta \alpha_{ij} \overline{d\varepsilon^m} \quad (5)$$

ただし、 $d\alpha_{ij}$ は背応力増分テンソル、 α_{ij} は背応力テンソル、 C 、 β は材料定数、 $d\varepsilon_{ij}^m$ は非弾性ひずみ増分テンソル、 $\overline{d\varepsilon^m}$ は相当非弾性ひずみ増分であり式(6)で表される。

$$\overline{d\varepsilon^m} = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij}^m : d\varepsilon_{ij}^m} \quad (6)$$

2.2 本シミュレーション教材の使用法

教師はあらかじめ、試験片の形状、および材料定数、初期温度の情報を入力しておく。生徒の解析入力ファイル作成に当たっては、図 1 に示すように○で囲まれている部分の数値を変更することにより、試験の温度を変更できる。従って、有限要素解析に詳しくない生徒でも、解析入力ファイルの作成は可能である。生徒は作成した解析入力ファイルを、フロッピーディスク等で、MARC がインストールされているパソコンにコピーし、作成した解析入力ファイルを MARC に投入することにより解析を実行できる。本教材を用いたシミュレーション結果例を図 2 に示す。

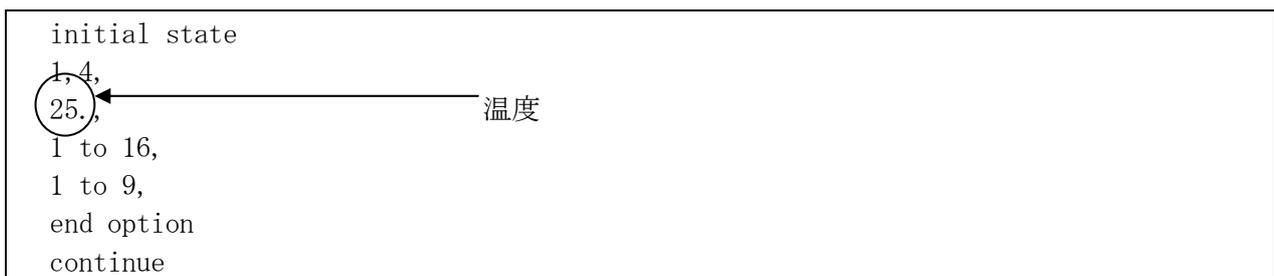


図 1 解析入力データの一部

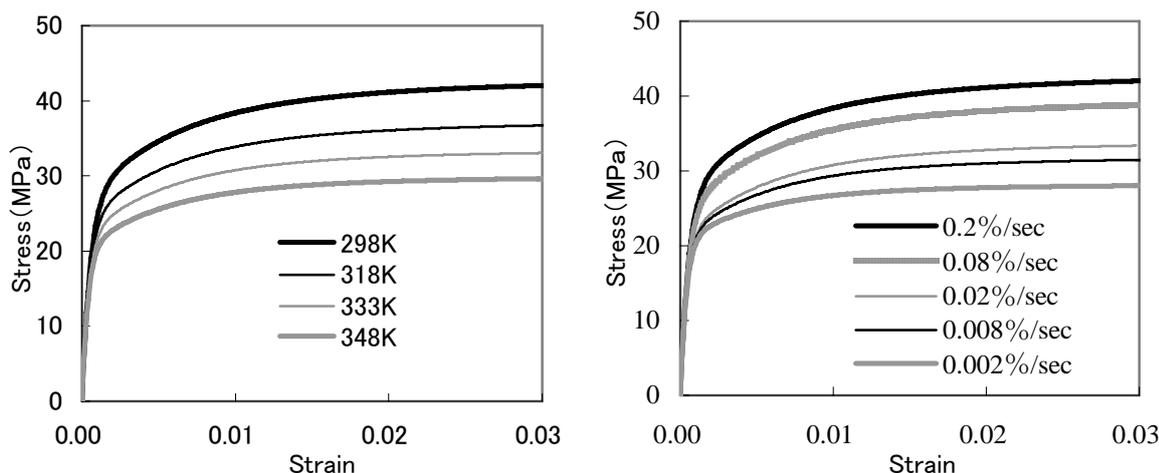


図 2 本教材による引張試験のシミュレーション結果例

3. 実験授業

3.1 調査対象

対象生徒は定時制課程機械科 3 年生(7 名)の生徒である。対象生徒が 4 年間で履修する専門科目は、表 1 の通りである。実習科目である「工業技術基礎」「機械実習」は共に表 2 に示すように 3 班編成でローテーションにより各項目を学習する。材料試験は 3 年の「機械実習」で学習する。この時点では、機械設計・機械工作共にまだ学習しておらず、設計に関してはほぼ知識のない生徒が対象である。

3.2 実験授業の流れ

実験授業は、1 回 4 時間の授業を 2 回担当した。最初に引張試験を行うにあたり必要な知識を得るための講義を行う。具体的には、「使用する 4 号試験片の形状等」「丸棒における垂直応力の求め方」「弾性域と塑性域」「一般的な軟鋼の応力ひずみ曲線と各点の意味」「機材の使い方」の講義を行い、従来工業高校で行われてきた単一条件での引張試験を行った後に本シミュレーション教材を使用する形で行う。具体的な指導過程は表 3 に示す通りである。

3.3 学習効果の判定方法

実験授業における学習効果の測定要素を「応力分布の理解」「知識の定着」「試験条件の理解」「傾向の理解」とした。「応力分布の理解」は試験片にかかる応力分布を理解度、「知識の定着」は引張試験結果から引張強さおよび縦弾性係数を読み取る能力、「試験条件の理解」は同一材料による引張試験結果は、温度および引張速度によって異なることに対する理解度、「傾向の理解」は異なった温度での試験結果はどのような傾向になるか予想する能力を指す。これら要素に対して、表 4 に示すように 2 つの設問からなるアンケート調査を、授業前、引張試験を行いデータを処理した後（以後、引張試験後と記す）、開発した教材の使用後に行った。

アンケート結果の処理は、「理解している」を 5 点、「だいたい理解している」を 4 点、「どちらとも言えない」を 3 点、「あまり理解していない」を 2 点、「まったく理解していない」を 1 点と点数化し、各要素の 2 つの設問の合計点を要素の得点とした。

表 1 教育課程

	1 学 年	2 学 年	3 学 年	4 学 年
工業技術基礎	4			
機械実習		4	4	
機械製図		2	2	2
工業数理基礎	2			
情報技術基礎			2	
課題研究				4
機械工作				2
機械設計			2	2

表 2 実習内訳

	項目 1	項目 2	項目 3
工業技術基礎 (1年)	溶接	手仕上げ	旋盤
機械実習 (2年)	フライス盤	旋盤	鋳造
機械実習 (3年)	材料試験	NC	パソコン

表 3 学習指導案

	指導の流れ	備考
第 1 回 目	<ul style="list-style-type: none"> ・ 本時の目標「引張試験の段取り」 ・ アンケート調査① ・ 引張試験の基礎 <p>①使用する 4 号試験片の形状等を説明する。</p> <p>②以下の式による丸棒における垂直応力の求め方。 $\sigma = F/A$ ただし、σ (MPa) は応力、$F(N)$ は垂直荷重、A (mm²) である。この式を用いて、断面積が小さければ、応力が大きくなることを説明する。</p> <p>③弾性域と塑性域をフックの法則より説明する。</p> <p>④教科書を用いて一般的な軟鋼の応力ひずみ曲線と各点の意味を説明する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 熱処理 (焼きなまし) <p>①電気炉の使用法を説明する。</p> <p>②熱処理を行わせる。</p>	<p>機械工作, 機械設計ではまだ学習していないことに留意する。</p> <p>熱処理中は, 先に行った「引張試験の基礎」の内容をレポートとしてまとめさせる。</p>
第 2 回 目	<ul style="list-style-type: none"> ・ 本時の目標「引張試験とシミュレーション教材の使用」 ・ 引張試験機の使用法とデータの取得法を説明する。 ・ 引張試験を実施させる。 ・ 引張試験のデータを処理させる。 <p>試験結果から、「引張強さ」「比例限度」を求めさせる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ アンケート調査② ・ 引張試験のシミュレーションおよびそのデータ処理を行わせる。 <p>①開発したシミュレーション教材の使用法を説明する。</p> <p>②教師が温度および引張速度を変えた場合の引張試験のシミュレーションを行い, 結果を見せる。</p> <p>③開発したシミュレーションプログラムを用いて引張試験中の応力分布を生徒に見せる。</p> <p>④生徒に任意の 3 種類の温度で引張試験のシミュレーションを行わせ, その結果をまとめさせ, 「引張強さ」「比例限度」を求めさせる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ アンケート調査③ 	<p>シミュレーション教材の使用は 2 人 1 組</p>

4. 実験授業結果および考察

「応力分布の理解」「知識の定着」「試験条件の理解」「傾向の理解」の各要素に関して、実施時期を主要因として分散分析を行った。その結果、すべての項目に対して、1%水準で有意差が見られた。(順に $F_{(2,18)}=20.6$, $F_{(2,18)}=18.5$, $F_{(2,18)}=15.2$, $F_{(2,18)}=26.2$, $p<.01$)。そこで、各要素に関して時期を要因として、LSD法を用いた多重比較を行った。各項目の平均得点と分散分析結果を表 5 に示す。

「応力分布の理解」について授業前、引張試験後、教材使用後における平均得点は、2.9 点、7.1 点、7.7 点であった。LSD 法を用いた多重比較の結果、授業前と引張試験後に 1%水準で有意差が見られた ($MSe=2.40$, $p<.01$) が、引張試験後とシミュレーション後に有意差は見られなかった。引張試験前の授業で、どのように応力が集中するか説明したため、授業前と引張試験後に大幅な変化があったと考えられる。

「知識の定着」について授業前、引張試験後、教材使用後における平均得点は、2.7 点、6.1 点、8.3 点であった。LSD 法を用いた多重比較の結果、授業前と引張試験後に 1%水準で有意差が見られた ($MSe=2.98$, $p<.01$) が、引張試験後とシミュレーション後に 5%水準で有意差が見られた ($MSe=2.98$, $p<.05$)。即ち、引張試験を行いデータを処理することにより、知識は定着するが、さらに本教材を用いてシミュレーションを行うことにより、本教材により繰り返し学習ができ、より知識が定着することが言える。また、少ない試験片で知識を定着させることができたため、コスト削減にもなった。

「試験条件の理解」について授業前、引張試験後、教材使用後における平均得点は、3.1 点、6.4 点、7.7 点であった。LSD 法を用いた多重比較の結果、授業前と引張試験後に 1%水準で有意差が見られた ($MSe=2.73$, $p<.01$) が、引張試験後とシミュレーション後に有意差は見られない。これは、授業前は引張試験自体のイメージがわからないため、試験条件による試験結果の違いがあるかないかを考えることすらできないのに対し、実際に引張試験を体験することにより、引張試験のイメージがわき、生徒が試験結果は変わるであろうと推測したからであると考えられる。

「傾向の理解」について授業前、引張試験後、教材使用後における平均得点は、2.9 点、4.1 点、8.1 点であった。LSD 法を用いた多重比較の結果、授業前と引張試験後に有意差は見られないが、引張試験後とシミュレーション後に 1%水準で有意差が見られた ($MSe=2.03$, $p<.01$)。実際に引張試験をやった結果を出すだけでは、傾向を予想することができないことを示している。一方で、本教材を用いることにより、試験結果の傾向を予想する力を上げることができると示された。

授業前から引張試験後にかけて、有意差がみられるのは、「応力分布の理解」「知識の定着」「試験条件の理解」であり、従来の引張試験の授業でもこれらの 3 つの要素は、身につけることができたが、「傾向の理解」を身につけることはできなかった。また、「試験条件の理解」に有意差が見られ、「傾向の理解」に有意差が見られないことに着目すれば、従来の引張試験の授業により、試験条件により試験結果が変わることは何となく理解できるが、具体的にどのように変わるかまで理解できないことを示唆している。

引張試験後から教材使用後にかけて有意差が見られたのは「知識の定着」「傾向の理解」である。本教材を引張試験後に使用することにより、繰り返し学習が可能となったため、知識が定着し、従来の引張試験では補い切れなかった、試験結果が条件により具体的にどのように変わるかを理解できた。

表 4 アンケート内容 (5 段階)

測定要素	測定要素に対する設問 1	測定要素に対する設問 2
応力分布の理解	試験片の評点区間に応力が集中していることを理解していますか。	応力の分布をイメージできますか。
試験結果の処理力	試験結果から引張強さを読み取る方法を理解していますか。	試験結果から比例限度を読み取る方法を理解していますか。
試験条件の理解	試験温度によって試験結果が異なることを理解していますか。	引張速度によって試験結果が異なることを理解していますか。
傾向の理解	試験温度が上昇すれば引張強さがどうなるか傾向を理解していますか。	試験温度が上昇すれば応力ひずみ曲線がどうなるか傾向を理解していますか。

表 5 生徒の学習効果

	A 平均点	AB 差	B 平均点	BC 差	C 平均点	F 値	MSe
応力分布の理解	2.9	4.2**	7.1	0.6	7.7	20.6**	2.40
知識の定着	2.7	3.4**	6.1	2.2*	8.3	18.5**	2.98
試験条件の理解	3.0	3.4**	6.4	1.3	7.7	15.2**	2.73
傾向の理解	2.9	1.2	4.1	4.0**	8.1	26.2**	2.03

A: 授業前 B: 引張試験後 C: 教材使用後

**: $p < 0.01$ *: $p < 0.05$

5. まとめ

引張試験の温度依存性およびひずみ速度依存性を表すことが可能なシミュレーション教材を開発した。さらに、開発した教材を引張試験後に用いた場合の実験授業を行い、「応力分布の理解」「知識の定着」「試験条件の理解」「傾向の理解」の各要素に対して生徒の変化を測定した。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) 「応力分布の理解」「知識の定着」「試験条件の理解」「傾向の理解」の各要素に関して、実施時期を主要因として分散分析を行った結果、すべての項目に対して、1%水準で有意差が見られた。
- (2) 授業前から引張試験後にかけて、有意差が見られたのは、「応力分布の理解」「知識の定着」「試験条件の理解」であり、従来の引張試験の授業でもこれらの3つの要素は、身につけることができるが、「傾向の理解」を身につけることはできない。
- (3) 引張試験後から教材使用後にかけて、有意差が見られたのは、「知識の定着」「傾向の理解」である。本教材を引張試験後に使用することにより、生徒は繰り返し学習が可能となったため、知識が定着し、また、試験結果が試験条件により具体的にどのように変わるかを理解できた。
- (4) 数多くの試験を行わなくてよいためコスト節約になった。また、試験の段取りを省略できたため、時間を短縮できた。

6. 今後の課題

本研究では、本教材を引張試験後に用いた場合の生徒の変化を測定した。その結果測定要素によっては、引張試験の実施により生徒の理解が高いレベルまで到達した。従って、本教材により、「応力分布の理解」「試験条件の理解」の要素を伸ばすことができるかを検討することができなかった。本教材の効果を明らかにするために、引張試験前に本教材を用いた場合の生徒の変化を調べる必要があり、今後の課題としたい。

参考文献

- (1) 佐野村幸夫, 水野衛, 高密度ポリエチレンの粘塑性構成式, 日本強度学会誌, Vol.38, No1, 2004, pp7-13.
- (2) 高橋浩之, 川上崇他, Sn-Ag 系および Sn-Cu 系鉛フリーはんだの機械的特性評価, MES2001, 2001, pp51-54.
- (3) 大口健一, 佐々木克彦, 野々山裕芝, 田上道弘, 塑性・クリープ分離法の鉛フリーはんだへの適用, 日本機械学会論文集 (A 編), 69 巻 682 号, 2003, pp20-27.
- (4) 関向正俊, 理科におけるマルチメディアとネットワークを活用した教材の開発に関する研究 (第 2 報), 岩手県立総合教育センター教育研究, Vol. 157, 2001, pp305-320.
- (5) 稲垣知宏, 他 7 名, シミュレーションを用いた物理教育, 計算工学講演会論文集, Vol.9, 2004, pp721-724
- (6) 池口良太, 内山哲治, LabVIEW を用いた波動シミュレーションの教材開発と授業実践, 宮城教育大学 情報処理センター年報, No16, 2009, C-1-C-6
- (7) エムエスシーソフトウェア (株) ホームページ:
<http://www.mscsoftware.co.jp/products/marc/index.php>
- (8) Armstrong, P. J., and Fredrick, C. O., A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect, *1966CEGB Report RD/B/N731*.