ラピッド・プロトタイピングによる 3 次元 CAD モデルの実体化演習とその教育効果*

The Subject of Turning a Three-dimensional CAD Model into Molding Model
by Using A Rapid Prototyping System and Its Effect on Education

及 川 和 広^{※1} 村 上 存^{※1}
Kazuhiro OIKAWA Tamotsu MURAKAMI

機械設計・製図関連演習の一テーマとして、3次元CADによって作成したソリッドモデルを、ラピッド・プロトタイピングシステムを用いて造形する、学部3年生向けの課題を実施した。課題設定、スタッフの仕事量、コストなどを事前に定量的データに基づいて検討し、限られた期間で90名強の受講者に対して効果的な演習の実施が可能であることを示した。さらに、造形されたモデルの造形形式、モデルの対象、CAD編集時間、学生によるアンケート結果などから本課題の教育効果について検討を行なった。

キーワード：機械設計・製図、3次元CAD、ラピッド・プロトタイピング、教育効果

A subject for a third grade students that turning three-dimensional CAD models into the molding model by using a rapid prototyping system was enforced as a theme of the machine design and drawing practice. Subject's contents, staff's workload and cost were examined in advance based on the quantitative data. As a result, the practice could be carried out effectively toward 90 students in the limited period. An examination has been discussed about the effect of this subject from the classification of the modeling method, the reference object for the models, the editing time when CAD was used and a questionnaire result by the students.

Keywords : Machine design and Drawing, Three-dimensional CAD, Rapid prototyping, Effect of education

1. はじめに

現在実用化されているほとんどのラピッド・プロトタイピング(Rapid Prototyping ; RP)システムでは、3次元モデルを等高線で分割した薄層を材料で満たし、順に積み重ねることで造形を行なう。この方式によると、造形可能な形状の制約が大幅に緩和されるため、従来の工作機械による加工では困難または不可能な、部品が最初から組み合わせられた状態の造形や、入れ子のような構造を分割せずに一括して造形することが可能である。

著者らは、RPシステムが有する、従来の工作機械と異なるこれらの特徴に着目し、産業機械工学科の学部3年生を対象として実施していた、3次元CADによるソリッドモデル作成演習に、1999年度からRPシステムによるABS樹脂製モデル製作演習を導入した。「モノづくり」の機会が少ない学生にとって、自身が作成した3次元モデルがコンピュータ画面の中から実際に手に取ることのできる物体として実体化されるという経

験は、新鮮な驚きであり、3次元CADが画像の表示を目的とするCGとは異なり、モノづくりのツールであるという位置づけを明確にする意味でも有効であると考えている。

本稿では、導入の経過、演習の概要およびその教育効果について報告する。

2. 教育用 RP システムの導入

2. 1 RP システム導入の経過

東京大学工学部 産業機械工学科では、学部3年生後半で、「3次元CAD」、「CAM」、「エンジン分解・製図」、「スターリングエンジン設計・製作」などをテーマにした演習を実施しており、学期末には各演習テーマにかんする学生の感想をアンケートにとり、演習内容を検討するための資料としている。RPシステム導入以前において、「3次元CAD」の評価は低下する傾向にあった。アンケートの設定および集計が大まかなものであることから、あくまでも推測であるが、原因として、3次元形状を画面上でレンダリング表示などによってリアルに視覚化するという内容は、コンピ

※平成14年2月5日受付 ※1東京大学 大学院工学系研究科

ユーザ性能の向上によって、学生個人のコンピュータやゲーム機で簡単に実現可能になり、陳腐化していたこと、加工・実体化を前提にしないモデリングでは、CGとの違いが明確でないことが考えられた。

そこで、著者らはCADモデルの作成とRPシステムによる造形を連携することで学生が意欲的に取り組める課題設定が可能な教育内容に改めることを計画し、数年の準備段階を経て[1]～[2]、1999年度より「3次元CAD+RP」として実施している[3]～[4]。

2. 2 造形装置

本演習のために導入した造形装置（米国Stratasys社製FDM-8000）は、溶融積層法を採用した、ABS樹脂系のプラスチックを加熱・溶融してノズルから押し出し、ノズル移動（X-Y軸）およびテーブル昇降（Z軸）を繰り返すことによって、積層造形する装置であり（図1）、教育用として使用する観点からは、以下の特徴を有する。

- (1) 周囲を汚す可能性のある液状材料や粉体材料を用いず、また造形物洗浄用の有機溶剤や仕上げのための紫外光源などを用いないため、安全であり、設置場所を選ばない。
- (2) ABS樹脂系のプラスチックを材料として使用するので、ねじを切るなどして、形状の確認だけでなく実際に使用する部品を製作できる。
- (3) 装置および造形の費用が比較的安価である。
- (4) 造形精度、解像度が、教育用としては十分な性能である（本装置の場合、造形最小幅0.6(mm)、最小厚0.18(mm)）。
- (5) 操作が簡便であり、造形開始後は、夜間や休日でも無人運転が可能である。

これらの特徴は、限られた教育スタッフで多数の学生の教育を行なうのに適している。

図1 造形装置の造形方式[5]

3. 「3次元CAD+RP」の演習内容

3. 1 演習日程および時間構成

以降においては、受講者数および課題設定が異なる1999年度を除き、現在の形式となった2000年度以降

の内容について説明する。

演習の受講者は、産業機械工学科学部3年生と機械工学科の学部3年生を合わせた90名強である。これを1グループ12名～14名、全8グループに分け、各グループにつき3時間×3回、計9時間を割り当て、演習を行っている。演習内容と時間は次の通りである。

- (1) 3次元CADによるソリッド・モデリングの基礎を理解する。
- (2) 規定課題を通して、3次元CADソフトウェア（AutoCAD R14J）によるソリッド・モデリングの基本的操作を習得する。なお、学生は3年前半に同ソフトウェアの2次元作図機能を用いた図面作成を行っており、基本的な操作方法は習得済みである（(1)～(2)合わせて2時間）。
- (3) 3次元CADにより自由課題のモデルを作成する。
- (4) 作成したモデルをレンダリング表示し、画像ファイルとして出力する。
- (5) 作成したモデルを、RPのための標準的データ形式であるSTL（STereo Lithography）ファイルとして出力する。
- (6) ホームページ掲載用のhtml形式ファイルを作成する（(3)～(6)合わせて6時間）。
- (7) STLデータを用いて、積層造形データを作成する（造形機付属のソフトウェアによる）。
- (8) 造形装置を起動し、造形データを転送して、造形を行なう。以後の造形は全自動で行なわれる（(7)～(8)合わせて1時間）。
- (9) 完成した造形物を装置から取り出す（1作品あたり0.2時間）。
- (10) 不要なサポート材などを取り除き、作品を仕上げる。

(1)～(6)は、学生各自がソフトウェアの操作を行なう。(7)～(8)では、教育スタッフ1名が学生の作品のうち、1つを例に造形データの作成、データ転送、造形開始を行なって見せ、造形の様子を観察させながら要点を説明した時点で、演習としては解散する。その後、教育スタッフが残りの作品について順次(7)～(9)を行ない、完成した作品は掲示で学生を呼び出し手渡す。その後、(10)は学生各自が行なう。

演習終了後、発表会を行ない、各自が工夫した点や感想などを述べさせる。また、完成した作品および画像データは、学生のコメント付で当学科のホームページ上で公開している。

3. 2 教育スタッフ

上記の内容に対して、以下の教育スタッフを割り当てた。

- (1) 教員2名（週の前半組に属するグループ×1名、後半組に属するグループ×1名）：(1)～(8)に

おける学生への説明，質問受付（9時間）。

- (2) TA (Teaching Assistant, 大学院生) 1名：(2)～(6)における質問受付（6時間），(7)～(8)における造形データ作成および造形開始（1作品0.5時間），(9)における造形物取り出し（1作品0.2時間）。

以上を8グループに対して実施するために要する仕事量は，教員36（人・時間），大学院生102.6（人・時間，2001年度の場合）となる。

3. 3 課題の設定

規定課題としては，学部3年前半の設計・製図課題である油圧シリンダのロッドカバを対象として，ソリッド・モデルを作成する。

学生各自が設計，製作する自由課題については，特に対象を限定していない。しかし，導入した造形機の性能から，1作品の造形には数時間～十数時間を要するため，90名強の作品を造形するためには造形物の大きさなどについて適切な制限を設ける必要がある。初年度の実績をもとに，2000年度からは以下の条件を設定している。

- (1) 作品の分担：1名1作品でも，複数名による共同作品でもよい。
- (2) 造形作品のサイズ：1名が作成するモデルサイズは，全体を50(mm)×50(mm)×50(mm)の範囲に収めるか，正味体積を40(cm³)以内とするか，いずれかとする。

3. 4 RPによる造形可能条件の提示

3次元CADのモデルとしては，どのような形状，構造も設計可能であるが，RPにより確実に造形できるための条件として，学生には事前に次の指示を与えた。

- (1) RPにおける積層造形では，通常の機械加工よりも，造形可能な形状，構造の制限は少ない。例えば，部品単体のみでなく，複数の部品が組み合わさった，可動部を有するようなアセンブリ構造も製作可能である。
- (2) 確実に造形が行われるように，薄肉部や細棒部分でも，寸法（厚さ，直径など）が3(mm)以上あるようにする（ただし端部は除く）。
- (3) 造形ソフトウェアにより，サポートが自動的に挿入される。形状によっては，取り外しが不可能な部分にサポートが挿入されることもあるので，よく考えること。
- (4) 同一形状でも，造形の積層方向によって，造形の可否，強度，所要時間，サポートの有無が異なる。適切な形状，積層方向を考えること。

上記に加えて，組立や可動が実現できるかどうかの定量的情報を与えるために，CADの形状データにおける軸径10(mm)で造形した軸ゲージ，および形状データにおける穴径9(mm)から12(mm)まで0.2(mm)刻

みで造形した穴ゲージを準備した。軸ゲージ，穴ゲージともに，積層方向による誤差を考慮して，3種類の積層方向（軸に対して水平，垂直，45度の方向に積層）で造形した計6種類を用意した。

4. 演習結果および考察

4. 1 造形方法による分類

学生が製作した自由課題作品について，造形方法によって部品単体あるいは複数部品が組み立てられた状態での造形（「一体造形」）と，複数部品を分離状態での造形（「分離造形」）の2種類に分類し，さらに，それぞれについて可動部（穴とピンによるリンクや鎖状の接合などで実現される）の有無で分類した（表1）。

造形条件の制限を緩和した2000年度以降，「分離造形，可動部あり」の作品（関節ロボット，車輪部が回転する自動車モデルなど）の割合が増えているが，年度を通じて造形方法の傾向に大きな変化はなく，「一体造形，可動部なし」（写真立て，カメラや建造物のミニチュアなど）を選択した学生の割合が，4種類のうちで最も多い。図2は，「分離造形，可動部あり」の作例であり，図3は，「一体造形，可動部あり」の作例である。

表1 自由課題作品の造形方法による分類

造形方法 可動部の有無	一体造形		分離造形	
	あり	なし	あり	なし
1999年度 44名	10名 (22.7%)	25名 (56.8%)	2名 (4.6%)	7名 (15.9%)
2000年度 96名	12名 (12.5%)	41名 (42.7%)	24名 (25%)	19名 (19.8%)
2001年度 78名	11名 (14.1%)	40名 (51.3%)	18名 (23.1%)	9名 (11.5%)

(a) CADモデル

(b) 完成モデル(組立状態)

図2 手錠

(a) CADモデル

(b) 完成モデル

図3 風車

4. 2 CADモデルの作成困難度と作成時間との関係

本演習の自由課題では、対象を限定していないため、比較的簡単に作成したと思われる作品から、かなり苦労して作成したと思われる作品まで様々であった。本演習で使用している3次元CADでは、あらかじめ用意されている基本立体をそのまま使う、立体同士の配置が規則的、といったモデルは完成形状が複雑であっても比較的短時間で作成できるが、自動車のボディをイメージしてモデル化するような場合は、試行錯誤を何度も繰り返す必要があるため、完成形状が単純であっても作成には長時間を要する。これらの特徴から、自由課題作品をCADモデルの作成困難度で分類し、CADモデルの作成時間との関係を調査した。

CADモデルの作成困難度は、前述の通り、完成形状の複雑さのみから客観的に分類することは困難であるため、本演習で使用している3次元CADの特徴を熟知している著者らの一人が、完成形状の表示画像のみの観察から、次の3段階に分類することとした。

- (1) - : 簡単に作成可能であり困難度小。
- (2) + : かなりの試行錯誤が必要で困難度大。
- (3) 0 : - と + の中間で標準的。困難度中。

CADモデルの作成時間については、データ収集が可能な、作品のCADデータに自動的に保持される編集時間(3次元CADを使用して、CADモデルを作成した作業時間の合計で、1秒単位で記録される)から算出した。これらを昇順に並べ、25パーセンタイル未満(-で表す)、75パーセンタイル超(+で表す)およびその中間(0で表す)の3段階に分類した。“0”、の分類には全作品の50%が存在することになり、標準的時間でモデルが完成したことを示す。編集時間“-”は標準よりも短時間で、“+”は標準よりも長時間であったことを示す。

以上により、各年度の自由課題作品を分類した3×3分割表を表2に示す。各項目間には、95%水準で有意に差があった。表中、頻度数に続く括弧内の数値は、調整済み残差の値を示し、特徴的な項目(調整済み残差の性質からその値の絶対値が2以上の項目は特徴的な個所とみなしてよい)については、網掛けして示している。例えば、2000年度において、困難度が小(-)の作品は、作成時間も標準以下(-)であり、困難度が大(+)の作品で編集時間が短い(-)ケースは無かったと解釈できる。

年度による特徴項目の比較では、2001年度では2000年度よりも手間と時間をかけて(作成時間(+), 困難度(0, +))モデルを作成した学生が多かったと解釈できる。実際に、2001年度の作品では、対象を殻状にモデリングすることで体積制限の範囲内で全体寸法を大きくする工夫や、対象の選定がユニークな

表2 作成困難度と編集時間による3×3分割表

2000年度 (96名)		作成困難度		
		-	0	+
編集時間*	-	2 (2.4)	23 (1.1)	0 (-2.2)
	0	0 (-1.4)	40 (-0.1)	7 (0.7)
	+	0 (-0.8)	19 (-1.0)	5 (1.4)
※ (-) < (0 : 4.7時間~9.2時間) < (+)				

2001年度 (78名)		作成困難度		
		-	0	+
編集時間*	-	2 (0.4)	18 (1.6)	0 (-2.2)
	0	3 (0.1)	32 (1.5)	3 (-1.8)
	+	1 (-0.5)	10 (-3.3)	9 (4.3)
※ (-) < (0 : 8.7時間~15.0時間) < (+)				

作例が2000年度の作品と比較して多く見受けられた。また、2001年度における作成時間は平均12.3時間であり、2000年度における作成時間は平均7.1時間であり、5.2時間の差がある。

このような傾向が現れた理由については推測の域をでないが、以下が可能性として考えられる。

- (1) 教育スタッフが2000年度の経験を踏まえて、学生に対し適切な指導を行なった。
- (2) ホームページで公開されている2000年度の作品を見た学生が、これと違う作品を製作しようとした。

作成困難度を著者の経験に基づいて分類していること、CADモデル作成時間が、対象を決定するまでの時間などを含んでいないことから一般的な議論はできないが、本分類によって、作品の特徴づけ、および年度ごとの作品の傾向の違いを把握することができた。

4. 3 造形にかんする定量的データ

自由課題作品を造形するのに要した時間の合計、1名あたりの作品を造形するのに必要とした平均費用ならびに平均造形時間を表3に示す。造形時間は造形データに基づいて造形機付属のソフトウェアにより計算される予想造形時間であり、実際の造形時間と約±10%の誤差で一致することを確認している。また、平均材料費は、モデル材料、サポート材料ともに、1巻800(m)の価格を12万円として算出している。

表3 造形コストと造形時間

	2000年度 (96名)	2001年度 (78名)
全 造 形 時 間	633.2時間	457.4時間
1名あたり平均材料費	2,410円	2,108円
1名あたり平均造形時間	6.6時間	5.9時間

4. 4 学生によるアンケート結果

本演習に対する学生による5段階評価（5点：面白い・ためになる，3点：普通，1点：つまらない・理解できない）の平均を，図4に示す。

RPを導入した1999年度以降，学生の評価は向上しており，この意味においてはRP導入が有効であったと考えている。

図4 学生による評価の平均の推移

5. まとめ

本稿では，著者らの学科において，90名強の学生に対して，3次元CAD教育にRPシステムによる製作を導入した際の考慮点，結果などについて述べた。

本演習の別テーマではマシニングセンタや放電加工機による加工演習も実施しているが，3次元CADとは連動しておらず，いずれも各加工法の特徴を体験させる，入門レベルの演習である。RPを含め，これら入門レベルの課題に引き続き，3次元CADを機械設計および製造の有効な道具として使いこなすための教育が必要であると考えている。

2002年度からは，従来のCADソフトウェアをミッドレンジ版3次元CADに変更して，学部3年前半に3次元作図機能を用いたモデル作成を実施する予定であり，これに合わせて従来のテーマを拡充することが検討中である。

謝 辞

学生アンケートの実施およびデータ集計は，東京大学 大学院工学系研究科産業機械工学専攻の中尾政之教授，鈴木健司講師によるものである。ここに深謝致したい。

参 考 文 献

- [1] 村上存：光造形法を用いた設計教育，日本機械学会第5回設計工学・システム部門講演会講演論文集 [No.95-24]，4，(1995)
- [2] 村上存：設計教育と光造形法，日本機械学会モノづくり未来論コンファレンス [No.96-33] ラピッドプロトタイピングの動向と最新技術，29，(1996)
- [3] 村上存，及川和広，根本俊雄，中島尚正：CAD教育へのラピッド・プロトタイピングの導入，日本設計工学会平成12年度春季研究発表講演会講演論文集，75，(2000)
- [4] 及川和広，村上存，中島尚正：3次元CAD教育へのラピッド・プロトタイピングの導入：日本工学教育協会平成13年度工学・工業教育研究講演会講演論文集，271，(2001)
- [5] 丸紅ソリューション株式会社：FDM Rapid Prototyping System カタログ，(1998)

著 者 紹 介

及川 和広（おいかわ かずひろ）
1983年 東京大学工学部機械工学科技官
1989年 東京理科大学工学部2部卒業
（電気工学）
現 在 東京大学 工学部 産業機械工学科
技術専門職員

村上 存（むらかみ たもつ）
1989年 東京大学大学院博士課程修了（工博）
同工学部助手，講師，助教授，米
国マサチューセッツ工科大学機械
工学科客員研究員（1990年）を経て
現 在 東京大学 大学院工学系研究科 助教
授（産業機械工学専攻）
勤務先所在地
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1