

機械工学科における 3D-CAD 教育方法に関する研究

石塚 和則* 高下 智行* 荒井 誠** 宮澤 武**

A Study of 3D-CAD Educational Method for Department of Mechanical Engineering

Kazunori ISHITSUKA Tomoyuki KOUGE Makoto ARAI Takeshi MIYAZAWA

Abstract - This paper describes a learning method of 3D-CAD educational method for department of Mechanical Engineering. This year in Information Processing Center, 3D-CAD system has been introduced and new CAD educational method is practicing for Mechanical Engineering. We developed the system of new 3D-CAD education. The learning contents are studied until the assembly models from the part models, on the assumption that students completed the basic learning of machine design. In the paper, we mention about some developed teaching materials and show the applicability of the proposed methodology. And for next steps, discusses about the some applications for mechanical design education.

Key words: 3D-CAD(3 Dimensional Computer Aided Design), Educational method

1. はじめに

従来、機械工学分野では、基礎技術教育として設計製図教育が行われてきたが、その教育的効果に対する疑問が提言されてきた。また、コンピュータ利用技術の急速な発展にともない、生産現場では2次元主体であったCADも、設計要素や生産情報を付加できる3次元への変遷を遂げている。

本校機械工学科では、コンピュータ化による設計環境の変化に即応しつつ、学生の基礎学力向上のために、以前からCAD教育を推進してきた。平成14年度末の情報処理センター演習室のコンピュータ更新に伴い、本格的な3D-CADシステムが導入された。それにより、今年度から新しいCAD教育を実践している。その内容は、機械設計製図の基礎を履修していることを前提に、部品モデル作成から、部品組み立てによるデザインモデルの構築まで含む。さらに、学年進行の中で、構造検証や機構ダイナミック、熱応力等の力学的解析に関する設計最適化のための設計検証を学習する教育

展開も計画中である。

本研究では、3D-CADによる設計教育手法の提案と、開発した教材について報告する。

2. 平成14年度までのカリキュラム

平成14年度までは、1,2学年での設計製図において、3角法やJIS製図通則など基本的な製図の要素を理解していることを前提に、3学年ではAutoCAD LTによる2次元CADを、4学年ではCGソフトウェアによる3次元モデリングについて学習している(表1)。これらは、それぞれCAD、CGソフトウェアの操作方法の習得を目的としており、開発したHTML形式の教材を用いて、実習を行ってきた。平成14年度に実施されたCAD授業に関する授業評価アンケートの内容(抜粋)を表2に、評価平均値を図1に示す。図中の折れ

表1. 機械設計製図とCADの実施時間

	1年	2年	3年	4年	5年
機械設計製図	2	2	2		
CAD			1(後)	1(前)	1(前)

(前),(後):前期後期の半期にまとめ、2時間として実施

* 釧路高専技術室

** 釧路高専機械工学科

表2. 授業評価アンケートの内容

1	授業中よく質問や発言をした
2	シラバスを参考にした
3	板書や図表は分かりやすかった
4	授業は良く工夫されていた
5	質問しやすい雰囲気があった
6	先生の熱意が感じられた
7	授業内容の理解度はどのくらいか
8	授業内容のレベルは適切だった
9	授業を受けて良かった
10	テキストは授業の理解に役立った

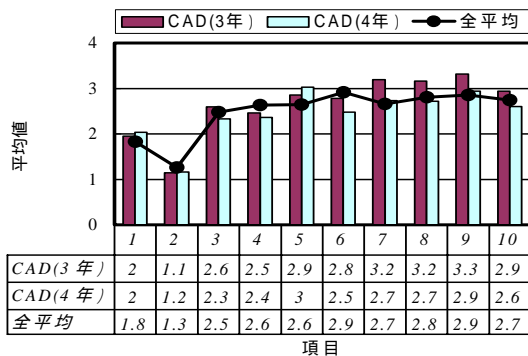


図1. 授業評価アンケート

線グラフは全教科平均である。ほぼ平均的な評価を受けているが、自由記述では、教材での解説が一部難解との指摘があり、改善を図っている。

3. 3次元 CAD の教育内容

昨年度末に導入された 3D-CAD システム⁽¹⁾⁽²⁾は、ミッドレンジに位置する Pro/Engineer 2001⁽³⁾で、パラメトリック機能を持つフィーチャベースモデリングによる CAD システムである。そのため、単位形状(フィーチャー)を組み合わせてモデリングを行う 3 次元 CAD の概念は、従来からの 2 次元での製図による操作方法と大きく異なるために、その教授方法は、以下の点を考慮しなければならない。

- (1) 2 次元図面は、現在も生産工程の基礎となるものであるから、JIS 製図通則を理解することや検図能力育成に製図教育の力点がおかれている。
- (2) 3 次元 CAD システムでのモデリング手法を、そのまま用いることは、製図教育との連携がとりにくい。
- (3) 複雑な部品形状の場合、操作が煩雑になりやすく、効率のよいモデリング手順やアセンブリ機能を理解させる必要がある。
- (4) シミュレーションや解析、あるいは NC データ出力などを簡単に行うことができるが、これを検証できる能力が必要である。

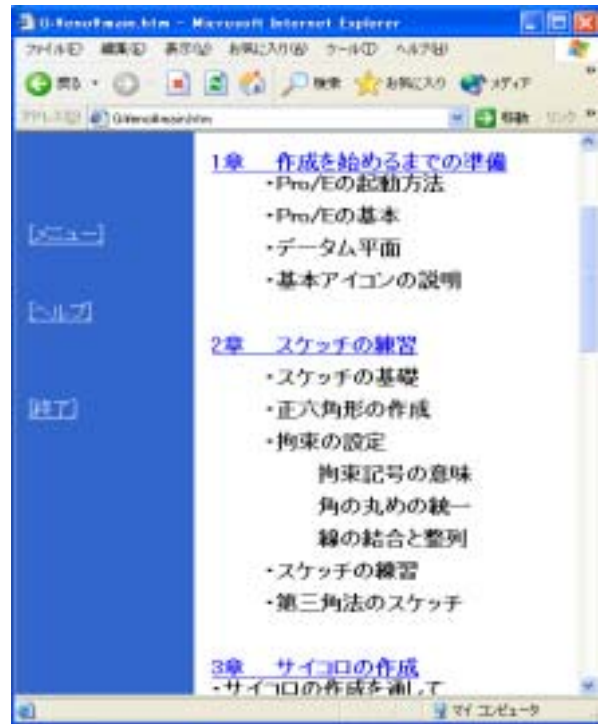


図2. HTML 教材

以上の事項を考慮して、システム設定から始まり、2次元イメージ処理が主体となる「スケッチ」操作を十分に体得することを前提にし、その後、部品モデリングやアセンブリ機能による組み立てができるまでを幾つかの段階に分けて、授業を進める。また、対象学年は、設計製図に関する基礎的な知識を習得した3学年後期からの導入とし、4,5学年で、その応用操作を習得することとした。

その目的に沿って、モデリング操作を習得するための HTML 教材を開発した。その教材の例示を図 2 に示す。また、最終的なアセンブリ課題例を図 3 に示す。

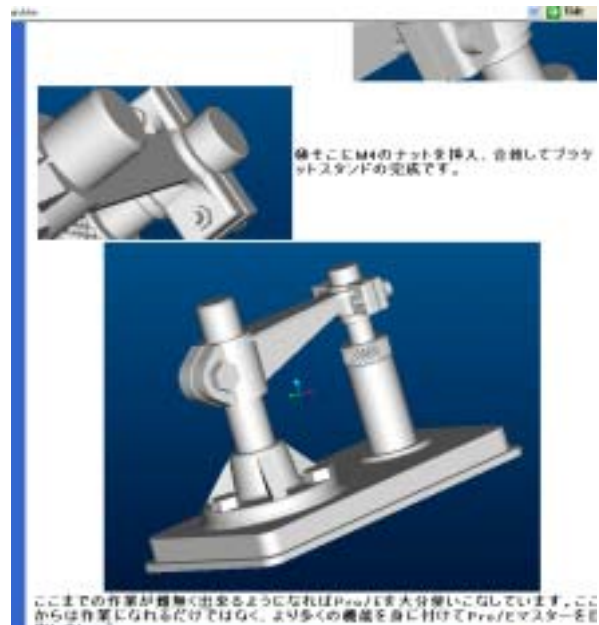


図3. アセンブリ課題例

4. Pro/MECHANICA について

Pro/Engineer では、Pro/MECHANICA⁽⁴⁾ と呼ばれる解析ソフトウェアが利用でき、3次元モデルに対して荷重による応力やひずみ、熱、および振動の解析が可能である。モデル作成者にとって、設計と解析が並行して行え、結果を即座に設計に反映できることから、設計時間が短縮でき、試作テストが簡略化できる。

Pro/MECHANICA に搭載されている解析機能「Structure⁽⁵⁾⁽⁶⁾」は、部品やアセンブリの応力解析、振動解析などの構造解析ができる。「Thermal」は、部品とアセンブリの温度分布や熱流束の計算を行う。

ここでは、Pro/MECHANICA 「Structure」「Thermal」を用いた解析の授業方法を考える。

4.1 Pro/MECHANICA の解析原理

Pro/MECHANICA は、構造解析に P 法有限要素法(P は「多項式」のこと)を用いる。これは、曲線で構成される変位関数を、2 つの一次関数といくつかの高次関数の和で表す方法である。最大次数は9次で、任意の次数に設定しての解析が可能である。

従来の有限要素法は解の精度向上のため、要素を小さく分割していくのに対して、P 法有限要素法は変位関数の次数を上げていく方法である。従来の有限要素法に比べると、粗い要素分割でも、比較的高い精度の解が得られる。したがって、要素分割の方法を知らない場合でも解析精度が保証でき、モデル形状を変える場合でも要素の再分割が不要なため、最適設計にも適していると言える。

さらに、変位や応力の収束具合を調べながら、精度が低い辺や面の変位関数の次数を、必要な精度が出るまで自動的に上げる方法である Adaptive P 法を用いていることから、後述する最小・最大次数および収束条件(%)の設定が、解に影響を及ぼす。

4.2 部品モデルを用いた解析の授業方法

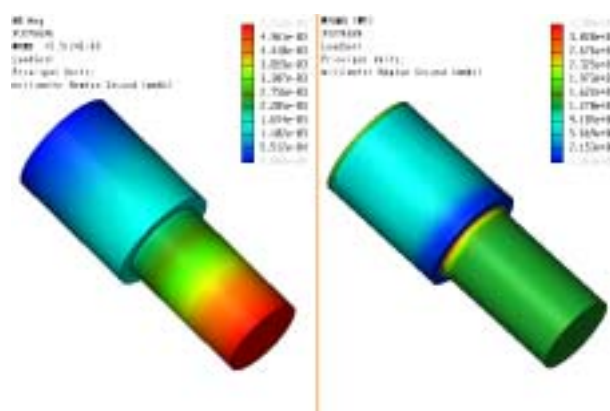
「Structure」を用いた、段付き丸棒の伸び⁽⁷⁾と応力⁽⁸⁾、片持ちはりの変位⁽¹⁰⁾とせん断力図、曲げモーメント図の導出⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、および温度分布の算出⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を学習するために、以下の手順に従った教材を考案した。

4.2.1 段付き丸棒の伸びと応力の計算

表3に示す段付き丸棒について、直径40mm側の端を固定し、直径30mm側の端に10kNの引張荷重を作用させた場合の伸びは、式(1)より5.37μmとなり、

表3. 段付き丸棒の構成要素

材質	小径部 (mm)		大径部 (mm)		ヤング率	ポアソン比
	直径	長さ	直径	長さ		
軟鋼	30	50	40	50	206	0.3



(1)伸び出力図 (2)応力出力図
図4. 段付き丸棒の結果出力図

応力は、式(2)より小径部で14.15MPa、大径部で7.96MPaとなる。一方「Structure」において、収束範囲は1%、最小次数は1次、最大次数は9次に設定し、伸びおよび応力の計算を実行する。

$$\delta = \frac{4P(bd_1^2 + ad_2^2)}{\pi E d_1^2 d_2^2} \dots (1)$$

(δ : 伸び、 P : 引張荷重、 E : ヤング率、 a : 大径部長さ、 b : 小径部長さ、 d_1 : 大径部直径、 d_2 : 小径部直径)

$$\sigma_1 = \frac{4P}{\pi d_1^2}, \sigma_2 = \frac{4P}{\pi d_2^2} \dots (2)$$

(σ_1 : 大径部応力、 σ_2 : 小径部応力)

「Structure」による出力結果の例を図4に示す。この結果から以下の点に注目し学習させる。

- (1) 伸び出力図からは小径部の先端に向かうにつれて、伸びが大きくなること。
- (2) 応力出力図からは小径部で応力が大きくなり、大径部で応力が小さくなることと、角部に応力集中が働いていること。

4.2.2 片持ちはりの変位、せん断力図導出

前述したように、P法では、多項式次数(以下、次数)が重要な意味を持つ。そこで、この次数の適正値を検証するため、図5に示す片持ちはり(鉄鋼: ヤング率206GPa、ポアソン比0.3)の変位について計算する。このはりの自由端に500Nの下向き荷重を作用さ

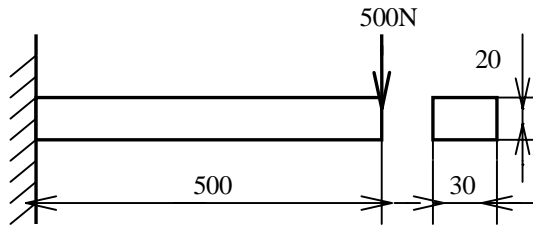


図5.片持ちはりのモデル図

表4.変位における最大次数と誤差の関係
(最小次数1次、収束1%)

最大次数	2~3	4	5	6	7	8	9
変位(mm)	3.874	5.005	5.037	5.040	5.042	5.043	5.044
誤差(%)	-23.4	-1.02	-0.40	-0.32	-0.28	-0.26	-0.25

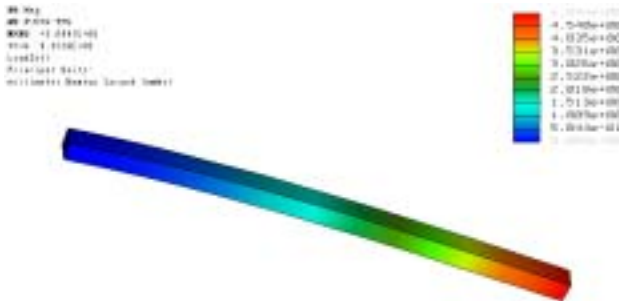


図6.片持ちはりの変位出力図(最大次数9次の場合)

せた場合の変位は、式(3)より5.057mmとなる。

$$\delta = \frac{4Wl^3}{Eb^3h^3} \dots\dots (3)$$

(δ : 変位、 W : 下向き荷重、 E : ヤング率、 l : はりの全長、 b : はりの幅、 h : はりの高さ)

この値と「Structure」での値とを比較し、誤差を求め、計算値に近い結果を得るための次数を求める。収束範囲は1%、最小次数は1次に固定し、最大次数を変化させて計算を行う。結果の一例を表4に、変位出力図を図6に示す。この設定条件では、最大次数が高次になるに従い、計算値に近づく。学生の演習では、その理由を考察させる。

次に、せん断力図および曲げモーメント図が、作成できることを学習させる(図7)。

以上のことから、座学での変位、せん断力図、曲げモーメント図の概念を視覚的に体験することができ、材料力学の理解を深めさせることが期待できる。

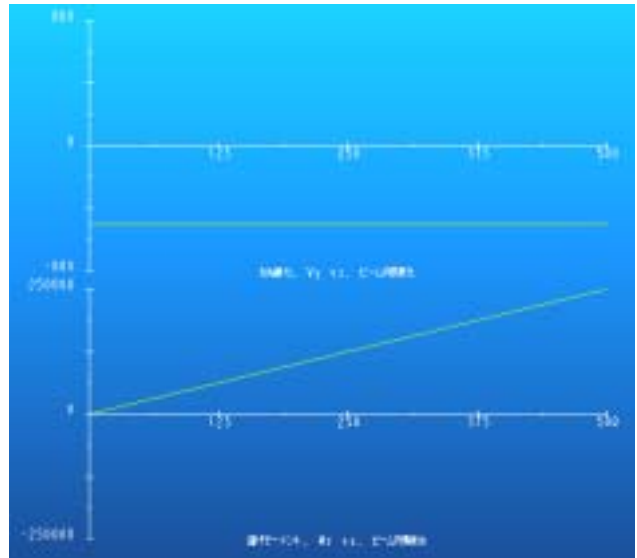


図7.片持ちはりのせん断力図と曲げモーメント図
(上段:せん断力図、下段:曲げモーメント図)

4.2.3 温度分布の算出

図8に示す部品モデル(鉄鋼)で、左側の穴に100の入熱があり、右側の穴を流水(熱伝達率10000W/m²K、雰囲気気温度10)にさらした場合の温度分布が、算出できることを学習させる(図8)。

4.3 設計関連科目の教育内容と授業計画

平成15年度の設計関連科目を表5に示す。学生は、機械設計製図を1学年から3学年で、工業力学を2学年で、機械設計法を3学年で、材料力学を3,4学年で、システム設計工学を4学年でそれぞれ学習する。これらの科目を通して、学生は簡単な構造解析を理解し、計算できる能力を修得している。

このような授業展開のため、Pro/MECHANICAを4学年で学習することは、関連科目での考え方や理論の理解促進につながるものと判断する。以上に述べた内容を、2週4時間で学習する。

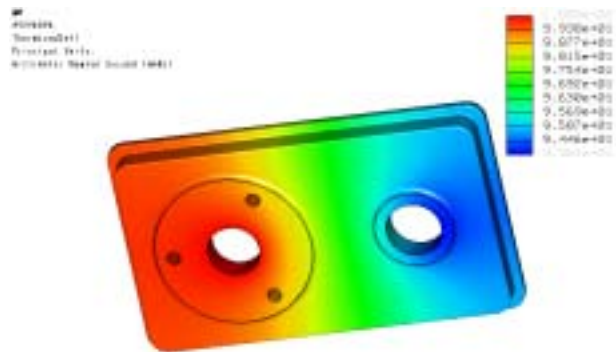


図8.温度分布図

表5. 設計関連科目の教育内容

学年	授業	時間数	内容
1	機械設計製図	2時間/週	製作図を正しく読み、図面を作成する基礎的な能力を養う
2	機械設計製図	2時間/週	1学年で学んだ基礎的な知識の応用図面を構想し、作成する能力を養う
	工業力学	2時間/週	力の作用および運動を理解させ、機械設計の基礎能力を養う
3	機械設計製図	2時間/週	立体図法を用いて、物体形状を正確に3次元的に把握する能力を養う
	機械設計法	2時間/週	機械要素についての基礎知識と設計の概念を養う
	材料力学	2時間/週	応力、ひずみ及び変形の内容を学ぶ事で安全な設計が出来る能力を養う
4	材料力学	2時間/週	材料力学の内容を発展させ、有限要素法も取り扱う
	システム設計工学	2時間/週	各種機構の運動の性質を理解し、応用できる能力を養う

5. Pro/ENGINEER による NC 加工

Pro/ENGINEER は、作成した部品モデルを NC 加工（マシニングセンタ、NC 旋盤）するために、必要なデータへ変換（NC ポストプロセス）する機能⁽¹⁵⁾と加工状態を見る加工シミュレーション機能を備えている。これらの機能を総称して Pro/ Manufacturing⁽¹⁶⁾という。

3次元部品モデルから直接的に NC 加工用データ⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾（Gコード）に変換⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾でき、加工シミュレーション機能により工具の経路を確認できることから、その部品モデルの加工性を検討できる。不具合があれば、部品モデルを変更するなど、加工上の制約等から設計を検証することが可能である。したがって、モデル作成者は、構想から製造の最終段階までを一連のものとして、設計に取り組むことができる。

5.1 部品モデルから NC 加工までの流れ

部品モデル設計から、NC 加工に必要な G コード出力までのフローチャートを、図9に示す。

(1) 製造モデルの作成

部品モデル(Part)と加工する原材料であるワークピース(Workpiece)を作成後、その2つを結合(Assemble)し、製造モデル(Mfg Model)を作成する(図10)。

(2) NC シーケンスの定義

「加工機械設定」で、加工方式(ミル、レース、軸数)加工原点を設定する。さらに使用するツールと取付具を指定し、これにより、ほぼ自動的に NC シーケンス/ツールパス(図11)が得られ、CL(Cutter Location)ファイルとして出力する。

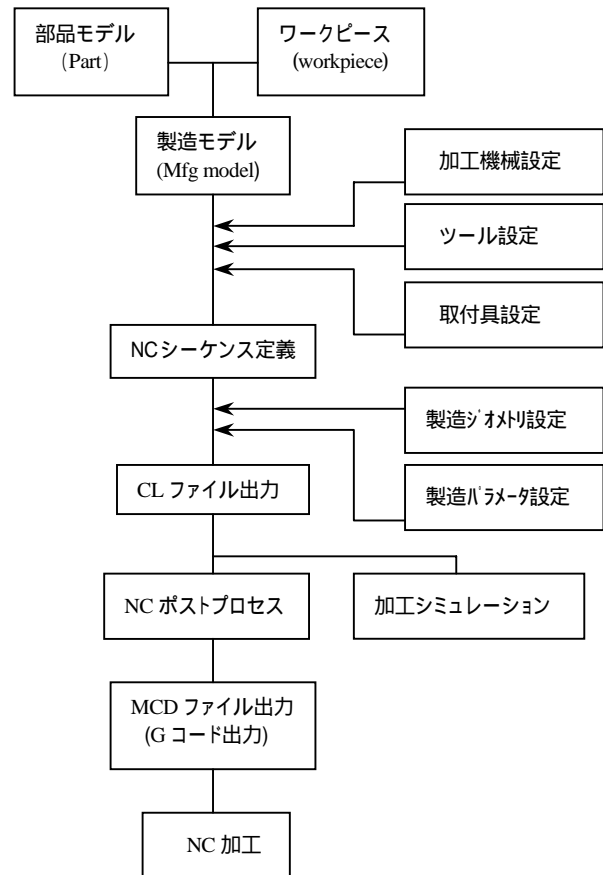


図9. NC 加工のフローチャート

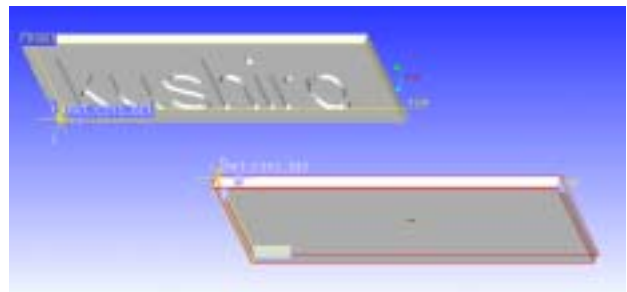


図10. 部品モデルとワークピースの結合
(左上:部品モデル 右下:ワークピース)

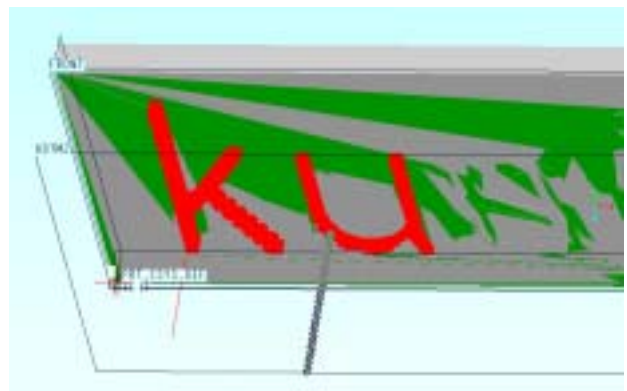


図11. 製造モデル上に作成されたツールパス
(赤:ツールパス 白:部品モデル 緑:ワークピース)

(3) NC ポストプロセスから加工

作成された CL ファイルは、「G-POST™ ポストプロセッサ」により、NC ポストプロセス⁽²¹⁾ ⁽²²⁾され、NC 加工機械に必要な MCD (Machine Control Data) ファイル/G コードとして出力され、部品モデルが加工可能となる。一例として、図 4 に示した段付き丸棒と図 11 に示したネームプレートにおける G コードを、図 12 に示す。

ポストプロセッサは、旋盤用に FUNUC15 シリーズ用をはじめ 9 種類、ミル用に FUNUC16 シリーズ用をはじめ 10 種類、タレットパンチプレス用 3 種類、およびレーザ加工機用 2 種類など、計 24 種類のコントローラ用が用意されている。

学生は自ら作成した部品モデルから G コードを出力し、NC 加工すれば、完成したものとして手に取り、実感できる。

5.2 加工シミュレーション

実際の加工においては、取付具 (バイス、チャック等の治具) 工具フォルダや工具の形状が工具の経路に影響を及ぼす。したがって、製造モデル上でツールパスが作成したとしても、そのまま加工に用いることはできない。加工機械の破損を防止するために、カッターケーションと工具経路から、工具が、取付具やフォルダと互いに干渉しないことを確かめる必要がある。G コードが自動作成される場合、この検証は重要である。Pro/ENGINEER ではこのための加工シミュレーション機能 (VERICUT™) が備わっている。

VERICUT⁽²³⁾は、ソリッドモデルによるシェードシミュレーションにより、リアルな干渉検証が行える。シミュレーション中に干渉の可能性がある場合、それをハイライトで表示する。図 13 に VERICUT によるシミュレーションの一例を示す。

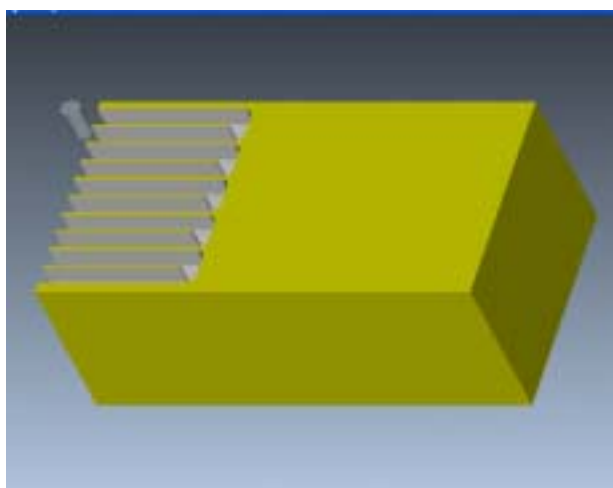
これによって、学生が加工を行う場合には、実機での確認の前に、シミュレーション検証ができる。

```
N5 G71
N10 (/ MFG8-19-1)
N15 G0 G17 G99
N20 G90 G94
N25 S1000 M03
N30 G0 Z6.375
N35 X25.55 Y0.
N40 G1 X23.45 F3.
N45 Z-43.5
N50 X25.526
N55 G0 Z6.375
.
```

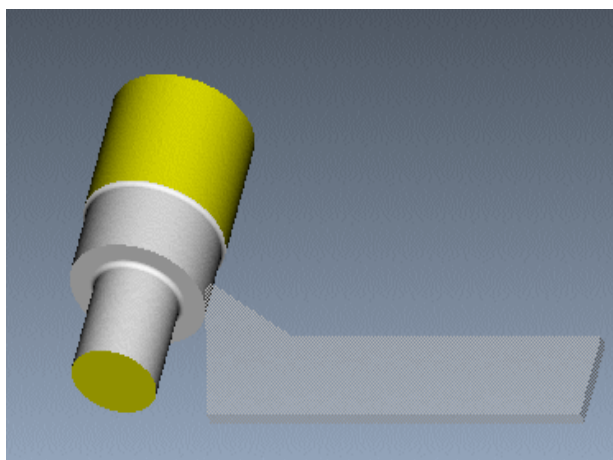
```
N5 (/ MFG5-30-2)
N10 G0 G17 G99
N15 G90 G94
N20 G0 G49
N25 T1 M06
N30 S1000 M03
N35 G0 G43 Z30. H1
N40 X-15.4141 Y18.
N45 Z1.
N50 G1 Z-.5 F60.
N55 X117.5658
.
```

(1) 図 4 の段付き丸棒 (2) 図 11 のネームプレート

図 12. 部品モデルから作成した G コードの例



(1) ミーリング型



(2) 旋盤型

図 13. VERICUT によるシミュレーション

5.3 NC 関連科目の教育内容と授業計画

平成 14 年度の NC 教育を、表 6 に示す。授業内容変更にもともなう暫定的なものであるが、2 学年から 5 学年においてマシニングセンタ・NC 旋盤に関する NC プログラミングとその操作についての授業が行われている。使用する NC 加工機械の緒元を、表 7 に示す。

前述した一連の CAD 操作を行うためには、NC 加工の概念として、NC 加工の種類、プログラム原点や加工原点、および使用工具に関する知識を修得している必要がある。

NC 教育と 1、2 学年の工作実習における汎用機械 (縦フライス、普通旋盤) を用いた加工体験の結果、4 学年で行う 3D-CAD による G コードの自動作成、NC 加工シミュレーションについてのスムーズな修得が見込まれる。

したがって、「部品モデルから G コードの出力」、 「加工シミュレーション」、及び「実際の加工」、それぞれの授業に 1 週 2 時間を要し、合計 3 週 6 時間の授業を行うこととする。

表6 . NC 関連科目の教育内容

学年	授業	時間数	内容
2	工作実習 (後期)	3 時間/週 × 3 週	卓上型 NC 旋盤(プログラミング)、 モデリングマシン(ネームプレート製作)
3	工学実験	3 時間/週 × 4 週	マシニングセンタ(エンドミル加工、 オスメスはめ合わせ、穴あけ)
4	工学実験 (後期)	3 時間/週 × 2 週	NC 旋盤 (ネジ、ミゾ、テーパ加工)
5	生産システム 工学(前期)	2 時間/週 × 4 週	マシニングセンタ(フェースミル、エンドミル加工、 面取、テーパ加工、穴あけ)

表7 . NC 加工機械緒元

NC 加工機械 (軸数)	マシニングセンタ (3 軸)	NC 旋盤 (2 軸)
メーカー	滝澤鉄工所 製	
型式	MAC-V40	TX-10G
NC コントローラ	FANUC 21M	FANUC 18TA
移動量	X 650 mm Y 410 mm Z 460 mm	X 105 mm Z 315 mm
能力・容量	テーブル寸法 900 × 410 mm 最大積載 300 kg	センター 間距離 450mm 最大振り 400mm
その他	工具収納 20 本	工具取付本数 8 本

6 . まとめ

本論文は、本格的な3D-CADシステムの導入に伴い、その教育方法について提案した。さらに開発したモデリング教材を紹介するとともに、今後の教育展開について述べた。その結果を次のようにまとめた。

- (1) 3D-CADシステムの学習は、他科目の関連から3学年に導入することが妥当である。
- (2) 3学年では、設計製図の基礎を充分習得したとの前提で、モデリングを主として学習する。
- (3) 4学年では、3D-CADシステムの概念を十分に理解した上で、設計解析の確認のために用いる。
- (4) 生産技術関連では、NC加工を想定した学習モデルを作成し、これを既存の実験実習に組み込む。今後は、すでに開発した教材をもとに、これらの教育教材の開発を推進する予定である。

また、このような3D-CADシステムの教育的な有効活用は、限られたカリキュラム内では、多くの困難を伴う。しかしながら、モデリング手法の習得や解析結果の評価能力は、コンピュータ関連技術が進展するにつれ、機械系技術者に要求される大きな要素であることは否めない。このような環境の中で、実践的技術育成を目指す高専では、より教育効果の高い教育方法の確立が望まれるため、今後も新しい教育手法を提案する予定である。

参考文献

- (1) 太田幹郎, Pro/ENGINEERの基礎から応用へ, (2001), 山海堂
- (2) David S. Kelley, Pro/ENGINEER 2001 Instructor, (2002), Mc Graw Hill
- (3) Pro/ENGINEER, On-line manual, (2001), PTC
- (4) Pro/MECHANICA, On-line manual, (2001), PTC
- (5) Roger Toogood, PRO/MECHANICA Tutorial Structure Release 2001-Integrated Mode, (2001), SDC PUBLICATIONS
- (6) Kuang-Hua Chang, PRO/MECHANICA Motion Mechanism Design and Analysis Release 2001, (2001), SDC PUBLICATIONS
- (7) 齊藤渥 他, 詳解材料力学演習(上), (1983), pp252-253, 共立出版
- (8) 村上敬宣, 材料力学, (1994), pp144, 森北出版
- (9) 小山信次 他, はじめての材料力学, (1997), pp9, 森北出版
- (10) 山本外次 他, 最新機械製図改訂版, (1990), pp289, 科学書籍出版
- (11) Yves Gagnon, PRO/MECHANICA 2001 STRUCTURE : ELEMENTS AND APPLICATIONS Integrated Mode, (2001), pp23-49, SDC PUBLICATIONS
- (12) 高橋幸伯 他, 基礎材料力学, (1998), 培風館
- (13) MSC/NASTRAN for Windows 日本語版 Version 4.0 クイックスタートガイド, (1994), 日本エムエスシー
- (14) 岡垣理 他, 伝熱工学, (1998), 森北出版
- (15) Louis Gary Lamit, Pro/ENGINEER 2000i², (2001), Thomson Corporation
- (16) Paul E. Funk, et al., A Pro/Manufacturing Tutorial, (2001), Schroff Development Corporation
- (17) 機械及び装置の制御 座標系及び運動の記号, (JIS B6310), (1998), (財)日本規格協会
- (18) プログラムフォーマット及びアドレスワードの定義 第2部: 準備機能 G 及び補助機能 M のコード, (JIS B6315-2), (1998), (財)日本規格協会
- (19) FANUC, Series 18 旋盤系用 取扱説明書, (1991), FANUC
- (20) FANUC, Series 21-MB 取扱説明書, (1996), FANUC
- (21) G-POST™, On-line manual, (2001), Intercim Corporation
- (22) Open File Generator, On-line manual, (2001), Intercim Corporation
- (23) VERICUT™, On-line manual, (2001), CGTech Corporation