実習教材としての楽器製作のCAE教材への展開

A Development of the CAE Teaching Materials from Making a Musical Instrument as the Practical Work

塚本 公秀^{※1}
Kimihide TSUKAMOTO

大 淵 慶 史^{※2}
Yoshifumi OHBUCHI

坂 本 英 俊^{※3}
Hidetoshi SAKAMOTO

Recently, the acquisition of the basic knowledge of engineering and the creative ability development on engineering design becomes important for students of the college of technology or university. Therefore, making more efficient education materials for not only the lecture but also the practical work is more important problem for teacher. The author have presented making violin as a one of effective materials for lower grade student on the practical work. In this subject, a student can understand the most important concept on design that the difference of shape, material and process decide its quality. In this research, a digital model of the violin is produced using 3D-CAD, and the stress and strain of one are analyzed by Finite Element Method. The results promote the student's understanding about the structure of violin body, and give some information while making violin. For example, the student can understand that the maximum stress part tends to break easily before making violin. As a result, student well understands the effectiveness of Computer Aided Engineering on the design process and have a chance to study the simulation technology.

Keywords : Manufacturing Technology, Learning Tool, Creative Engineering, Creativity education, Computer Aided Engineering

キーワード : ものづくり, 教材, 創造性教育, CAE

1. はじめに

現在大学や高専では、基礎力と創造性の育成に加えて、ものづくりを総合的に経験できる、優れた実習教育教材の開発に迫られている。著者らはこの実習教材の一つとして木製楽器を対象とした実習プログラムの開発を行ってきた。木工は金属に比べて加工時間が短くてすむため、規定の時間内でもものづくりにおける設計・製作・評価の全行程が体験できる。また、形状を工夫することで高価な工具や特殊な加工機械を必要としないなどの利点がある。さらに楽器製作は低学年生にとって興味を惹くテーマでもある。そこで、楽器の形状、材料および製作工程の違いが楽器の音色に与える影響について工学的に考察できる教材の提案を行ってきた¹⁾。

ところで最近の生産方式は製品化の時間短縮のためにCAE (Computer Aided Engineering) 技術を用いている。近年のデジタルエンジニアリングの急速な進

歩により、試作、実験に替えてコンピュータを用いたシミュレーションを行い、従来のように試作品の計測・評価により設計の修正や変更を行う工程を省いている。多くの教育機関でCAD/CAM設備を導入し、3次元CADを用いたデジタルモデルの製作実習、CAMによる加工用のNCデータを作成し、マシニングセンタでの加工実習などを行っている。さらに高学年の工学実験などでは運動解析や応力、熱解析など多様なシミュレーションを取り入れている。しかし3次元CAD実習をCAMと結びつけ、低学年の実習に導入していても、高学年でのシミュレーション実験、生産システムの講義との統合的な教材としては活用されていない。

本報では低学年の実習としての楽器製作教材を高学年での学習との統合的な教材として展開させ、製作実習の副教材としてバイオリンのデジタルモデルを製作した。さらに調弦時に各弦に作用する張力を引張試験器を用いて求め、この値を用いてFEM解析を行い、張弦時のバイオリン各部の応力分布を求めた²⁾。このシミュレーション結果をバイオリン製作時に有効に活用する方法を提示し、材料力学の導入学習と動機付けに有効であることを確認した。

2012年12月25日受付

※1 鹿児島工業高等専門学校

※2 熊本大学工学部附属革新ものづくり教育センター

※3 熊本大学大学院自然科学研究科

2. バイオリンのデジタルモデルの製作

バイオリンのデジタルモデルの構築方法について述べる。まず、バイオリンを構成する部品の外形を採寸した。図1に示すように、市販のキットバイオリンの表板を実測した。表板を縦横方向に10mm間隔に分割し、交点での板の底面から高さをハイトゲージで測定して表板表面の座標のデータを得た。図2に測定値から求めた各断面の二次元座標を示す。さらに、各交点の厚みをシックネスゲージで測定し、両データを用いて表板の3次元座標を採取し、この座標を3D-CADへ入力した。本開発で使用した3D-CADはソリッド系のSolid Worksである³⁾。図3に表板の外形の採寸取再現図を示すが、これらの計測データを元に3次元座標として3D-CADでロフト処理を施し、表板の曲面を得た。同様に、側板、ネック、テールピース、駒等全ての部品をデジタルモデルとして再現し、全部品を合致させてバイオリンを再現した。図4に木のテクスチャマッピングを施してシェーディングしたバイオリンのデジタルモデルを示す。

図5に製作したバイオリンのデジタルモデルをカットした内部構造を示す。バイオリン内部は表板にバスバーと呼ばれる補強と振動伝達のためのリブが接着されている。また、表板と裏板の間に魂柱と呼ばれる柱が挟み込まれている。魂柱は振動伝達要素として音色の調整上重要な部品である。バイオリンの4本の弦は、魂柱と駒の移動を防止するため、常時演奏が可能な程度の力で張られている。したがってバイオリン各部には、常に応力が作用している。

3. CAE技術を用いたバイオリンの応力解析

製作したバイオリンのモデルを用いて調弦時のバイオリン各部に作用する応力解析を試みた。まず調弦時のバイオリンの弦に作用する張力を図6に示す引張試験機を転用して実測した。バイオリン用の4種の弦を長さ320mmの間隔で引張試験機のチャックを用いて取り付ける。この距離はバイオリン上での駒とネックの間隔に相当する。その後実際に弦を弓で弾きながら、

調弦用のチューナを用いて各弦の所定の音程まで張りこの時の力を計測した。表1に結果を示す。高音程の弦ほど張力が大きくかけられている。合計242Nもの力がバイオリンに常時作用していることになる。木でできた2～3mmの板厚の胴部であるにもかかわらず、かなり大きい荷重が常時作用している。優れたバイオ

図2 表板の断面形状採取（一部）

図3 表板の外形状採取

図4 バイオリンのデジタルモデル

図5 バイオリンの内部構造

図1 バイオリン表板の計測

リンは数百年にもわたり使用されていることから、バイオリンの構造が力学的に優れた構造であることが再認識できる。

次に、求めた張力をデジタルモデルに作用させバイオリン各部の応力分布を求めた。CAEツールとして3D-CADのSolidWorksに統合されている汎用有限要素法解析システム(COSMOS Works)⁴⁾、ANSYS⁵⁾を用いた。FEM解析時にはバイオリンの駒部を固定してメッシュを自動生成させ、木材の一般的な弾性係数やポアソン比を用いて等方材料として応力分布を求めた。シミュレーション結果を図7に示す。解析結果より弦の両端の支持部に高い応力が作用していた。さらに表板と裏板では板と駒との接触部、魂柱との接触部分の応力が大きい。これは応力集中によるものであろう。またネックの取付け部分にも大きな応力が作用していることがわかる。

さらに、複雑な形状を持つ駒の応力分布も解析した。バイオリンの側板を固定して、各弦から受ける分力を計算で求め、駒と弦の接触点から下方に負荷した。得られた応力分布を図8に示す。同図(a)に示す伝統的な形状の駒では、駒上部の弦の荷重が足部まで及ぶ分布

となっている。しかし同図(b)の穴のない比較用の駒では弦の荷重は上部のみで、駒全体で荷重を受けていないことがわかる。駒に穴をあけることで弦からの荷重が駒全体に及ぶこととなり、弦の振動がより伝達しやすい構造になっていることが明らかとなった。両図共応力分布が左右非対称であるのは、弦の張力が小さいG線側では駒への荷重も小さいためと考えられる。単にバイオリン職人の意匠と思われる形状ではあるが、工学的な解析を行うことで、意味のあることが理解できる。

これらの解析は5年生の卒業研究として行った。研究を行った高学年の学生にも意義のあるものとなった。大学・高専の教育では機能設計が多いため、バイオリンのように自由曲線で構成された形状設計の機会は少ない。そこで本研究を通し学生は以下の項目について有効な学習ができた。(1)ソリッド系の3D-CADで意匠性のある高度な形状設計ができる。(2)3次元曲面からなる部品を、座標を結ぶことで構成したためロフト処理のような機械部品の作製では多く使わない技術も学習できる。(3)最近の生産現場におけるCAD/CAMシステムにより製品開発が行われていることをCAEツールを用いて疑似体験できる。(4)現物に基づいたデジタルモデル製作で、リバースエンジニアリングとして位置づけられている重要な技術の一端に触れることができる。

図6 バイオリン弦の調律時の張力測定

表1 バイオリン弦の調律時の引張り荷重

弦	振動数 f (Hz)	弦長 L (mm)	張力 T (N)
G	196	328	50.50
D	294		51.20
A	440		66.65
E	660		74.00

図7 バイオリン各部に作用する応力分布のFEM解析結果

4. バイオリンの応力分布解析の実習教材への適用

バイオリンの製作実習の副教材としてこのシミュレーション結果を活用する例について述べる。学生達は製作前から楽器が衝撃に弱いものであることは常識的に認識している。また製作中バイオリンの表・裏板の加工を通して、板が厚さに対して面積が大きく、木目のために縦横で曲げ強度が極端に違うことも認識する。さらに組立時には板にひずみが生じるため正確な接着作業が困難であることも理解できる。従って組立時の接着の良否が製品の良否を左右することを自ら判断できる。しかしこれらの作業を通してバイオリンのどの部分が一番壊れやすいかについては、形状が複雑なために理解は困難である。

そこで実際に生じた過去の故障例を示し、シミュレーション技術の有効性を学習させる。実際に製作したバイオリン中、表裏の板をスギで製作した作品は、製作後に数ヶ月保存していたが、ネックと裏板の接着部に割れと剥がれが生じた。割れた様子の写真を図9に示す。同図にネックと裏板部分のFEM解析結果を示した。割れの部分の応力は周囲より高くなっている。

このようにシミュレーションの結果を製作実習時に学生に提示することで、(1)応力が高く生じている部分は壊れやすいという工学的な破損理由を考える端緒にできる、(2)低学年の学生にFEM解析のような工学的手法を用いることで破損の原因を教えることができる、(3)設計時に失敗事例の調査を行うことの意義の重要性をも学生に理解させることができる、(4)製作実習で学生は壊れやすい部分を予め知ることで、製作時にそれらの箇所を注意深く組み立てる必要があることを理解させることができる、などこの手法の有効性が示された。

5. 実習教材としての展開と学習効果

FEM解析によるシミュレーション結果を活用して学生の材料力学の導入学習に役立つことの検証を試みた。3年の学生を対象に試行した。試行時期は前期の終了時で、材料力学ではりの曲げの学習前である。この段階では学生は引張り・圧縮しか学習していないので、はりの曲げや部材内部の応力分布についての学習はしていない。

まず図5に示すバイオリンの構造を用いて発音機構を解説した。バイオリンが数ミリの薄板で空洞を持つ構造であり、弦が250Nもの力で常時張られたまま保管されることを説明した。加えて複雑な形状であるバイオリン内部の応力分布をSolidWorksでのシミュレーションによる結果で3次元表示で学生に示した。この分布を見て学生達は部材内部の複雑な応力の分布状態に驚いていた。単純な形状であれば材料力学の講義時に解析に求めることができるようになることを話して、後期への講義の導入教育とした。

(a) 伝統的な形状の駒 (b) 穴のない比較用の駒

図8 FEM解析で求めた市販の駒と穴のない単純化された駒との応力分布の比較

図9 学生の製作したバイオリンのネック部の剥がれ

バイオリン板の応力分布の結果を動機として、材料力学で学習予定であるはりの曲げの説明をした。はりを曲げる時には部分によって応力が異なることと、上部では引張応力、下部には圧縮応力が作用することである。続けて学生が過去に製作したバイオリンのネック部が接着力不足で剥がれた事例まで説明した。

この説明をした後、図10のような単純な片持ちばりの内部応力分布を考えさせた。バイオリンの応力分布図が濃淡で示されていたため、鉛筆で応力の大きさを濃淡で表現するように指示した。同図中に問題と回答例を示した。

回答群1は出題側から正解と見なせる回答で、3年で学習するはりの応力計算の予習となったことを示す例である。23%の学生が出題者の意図をくみ取った回答をしている。次に回答群2は断面の上面で最大、下面で最小だと理解して、さらに周辺部への曲げ応力の影響を考えた回答群である。多少論理的に誤りがあるが、出題者の意図以上を考慮している。全く学習していない時点において、正答とみなせる回答が70%というのは、材料力学の予習としての効果が予見される。誤りであるが興味深い回答例を回答群3として示した。曲げでなく自重だけを考慮して静力学で学習した水槽の壁圧を連想したものと推測できる。別の例で

回答例

【結果】

被験者数 機械工学科 3 年生 43 名

回答群 1 断面の上面で最大, 下面で最小

10 名 (23%)

回答群 2 側面の影響まで考慮した

20 名 (47%)

回答群 3 その他

13 名 (30%)

正答者数 28 名 (65%)

図10 学生への質問と回答例

は、はり中心付近に負荷が高くなる分布を回答したものもある。このほかに応力分布が上面だけ（引張り応力のみ意識）か底面だけ（圧縮応力のみ意識）に作用しているとするものがあった。

さらにFEM解析によるシミュレーション結果を提示した材料力学の導入教育としての効果を以下により確認した。本論文に述べ授業を受けた3年生が材料力学を履修した後の5年生終了時に聞き取り調査を行った。この授業を覚えている学生の意見を集約すると、(1)材料力学の理解に役立ち、特に丸棒のねじりの学習でせん断応力の分布がイメージできた、はりの曲げで中立面がすぐに理解できた、(2)卒業研究でFEM解析のテーマを選ぶときに役に立った、(3)会社説明会で企業が設計にFEM解析を使っているという説明を聞いて、今行っている研究に実際使用して計算したいと思った、との意見があった。

この事後調査により、材料力学の導入に役立つことを確認した。

6. 結言

導入教育用のものづくり教材としてのバイオリン製作課題にCAE解析結果を用いて工学導入教育の展開

を図った。設計段階での力学的な考察を行うためにバイオリンのデジタルモデルを製作し、有限要素法による応力解析を行った。以下に実習課題にCAE解析を導入する効果をまとめる。

1. 3次元デジタルモデルの作成により、製作前のバイオリンの構造について理解を深めることができる。
2. 製品に作用する力とその作用力による各部の応力分布やひずみ分布を知ることができる。また、構造や形状によって応力分布が異なることをビジュアルに示すことができる。
3. CAE解析を事前に実施することで、実習製作製品の破損し易い箇所および強度設計に関する注意すべき箇所を製作・組立前にあらかじめ知ることができる。
4. 身近な楽器を用いて、材料力学におけるはりの曲げや応力集中について予習することができる。

材料力学では単純な形状の応力とひずみを公式を用いて解くことができる。しかし実際の複雑な形状では応力やひずみの分布を直接求めることができない。しかしながらCAEを用いると、それらが可視化でき、コンピューターシミュレーションの有効性を認識させることができる。

参 考 文 献

- 1) 塚本公秀, 他: 楽器製作を通した創造性教育の試み, 工学教育, 57-3, pp.28-33, 2009
- 2) 塚本公秀他: 楽器製作を通した創造性教育の試み(第3報)CAE教材としてのバイオリン製作, 平成21年度工学・工業教育研究講演会講演論文集, pp.366-367, 2009
- 3) アドドライブ編集: よくわかる3次元CADシステム実践SolidWorks, 日刊工業新聞社, 2008
- 4) 金田 徹: 3次元CAEツール[COSMOSシリーズ]によるSolidWorksアドオン解析ツール利用入門, 技術評論社, 2008
- 5) ANSYS Workbench Simulation 入門セミナー, サイバネットシステム株式会社, 2008

著 者 紹 介

塚本 公秀

熊本大学自然科学研究科卒業
鹿児島工業高等専門学校機械工学科 教授
専門分野 2005年まで機械加工の現象の研究。現在は工作に関する教材開発をおこなっている。
チェロの演奏が趣味。
所属学会 日本工学教育協会, 品質工学会, 日本実験力学会