

人工股関節の設計と試作

－ 統合型CADシステムの活用 －

ポリテクカレッジ高知
(高知職業能力開発短期大学校)

亀山 寛司*

1. はじめに

高知県内A社から、人工股関節ステム部分(図1)のNCデータ作成について援助依頼を受けた。運動機能を担う人工骨は、剛性や強度を与える役割を果たしており、機械工学を学ぶ者にとっては興味をひかれる生体組織の1つである。そこで、人工股関節の構造を理解するために統合型3次元CADシステム(UG)等を活用して、事業内援助でモデリング、NCデータ作成を支援した。

その後、卒業研究によりA社提供の図面を基礎に、CADシステムを活用し、人工股関節ステム部分のモデリング・等高線加工用データの作成・加工・静的応力解析・図面化を行い設計し、モデル品を製作した。なお設計の基礎として重要な生体構造、具備すべき要件等については、高知医大整形外科より指導、助言を受けた。本研究により、CADシステムが発展期待される骨のデザインに有効に利用できることを示した。なお、研究展開の過程でCADシステム利用技術の習得、人間と機械の関係など、多くの貴重なものを学んだことについても報告する。

2. 人工骨について

骨が折れた場合やひびが入った場合、添え木を当てて静かにしていれば元に戻るが、お年寄りや子ど

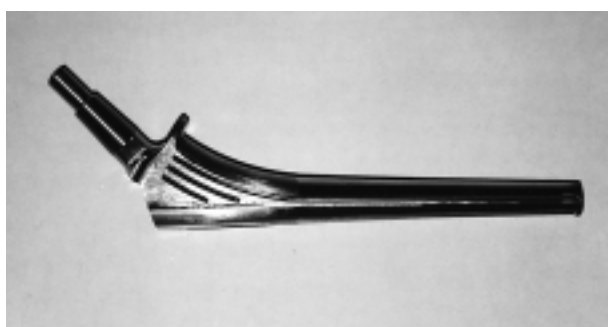


図1 人工股関節

もをたくさん産んだ女性などは、回復しないことがある。また、骨が細かく砕けてしまったときは回復しない。そんなときに使われるのが人工骨である。そのほかに人が老化するにつれてかかる関節炎という病気がある。関節炎は、悪化した関節部分を除去して人工関節と入れ替えることによってのみ治すことができる。

股関節への人工関節の移植は1897年までさかのぼるが、当時は困難な危険を伴う手術であった。しかし現在では整形外科手術としてルーチン化したものになっている。日本では毎年約1万8000件の股関節移植手術が行われており、全世界では約50万件にも達している。運動機能を担う人工骨は、剛性や強度を与える役割を果たさなければならない。移植材料としての必要条件是厳しく、

- ・大きな荷重を受けても曲がってはならない。
- ・股関節の使用のたびごとに荷重が変動するので、高サイクル疲労に耐えなければならない。
- ・体液は海水と同じくらい腐食性があるので、腐食、応力腐食、腐食疲労にも耐えなければなら

* 現ポリテクカレッジ大阪

ない。

- ・ 生体適合性がなければならない。
- ・ なるべく軽量であることが望ましい。

などがあり，これらを最も満たしてくれる材料はチタン合金である。次に ・ チタン合金の物性を示す。

- ・ 組成：Ti-6AL-4V
- ・ 密度：4.43E-6 (kg/m³)
- ・ 縦弾性係数：109 (GPa)
- ・ ポアソン比：0.28

・ チタン合金は，焼き入れ・焼き戻しをした高炭素鋼と同じぐらい強く，ステンレス鋼よりも体液中に侵されず，しかも鋼の半分の重さしかない。欠点は，弾性率が鋼の半分しかないことで，そのため荷重がかかるとしなりやすいが，断面形状を変えて剛性を持たせることにより克服できる。

3 . 統合型 3 次元CADによる設計製作

3.1 ステム部分のモデリング / CAD

3次元形状をコンピュータで表現することをモデリングといい，表現される物体をモデルという。3次元形状処理では物体の形状をデータとして入力で

きるのので，複雑な形状を持つ金型設計の分野や，外観，色などを視覚的にとらえる必要があるデザイン分野などでは，実物を扱う感覚で設計できる3次元形状処理が必要となる。ステムのモデリングは，まずA社提供の図面（図2（寸法は公表できないため削除））をもとに，サーフェスとソリッドモデリング手法で形状を生成した。できる限りソリッドモデリングを用いたが，図3に示す形状は1つのフィレット面に3つ以上の曲面が関係し，稜線が1点（a部）に収束しているのので，ソリッドモデルでは，手に負えなかった。そこでサーフェスモデルを併用し

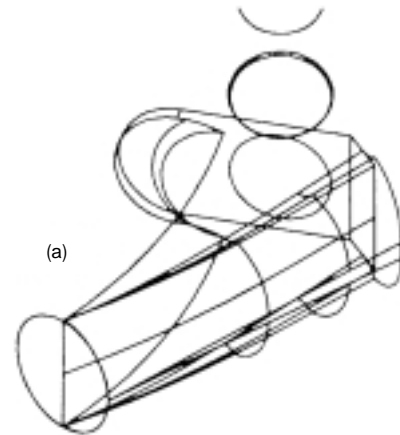


図3 稜線収束部

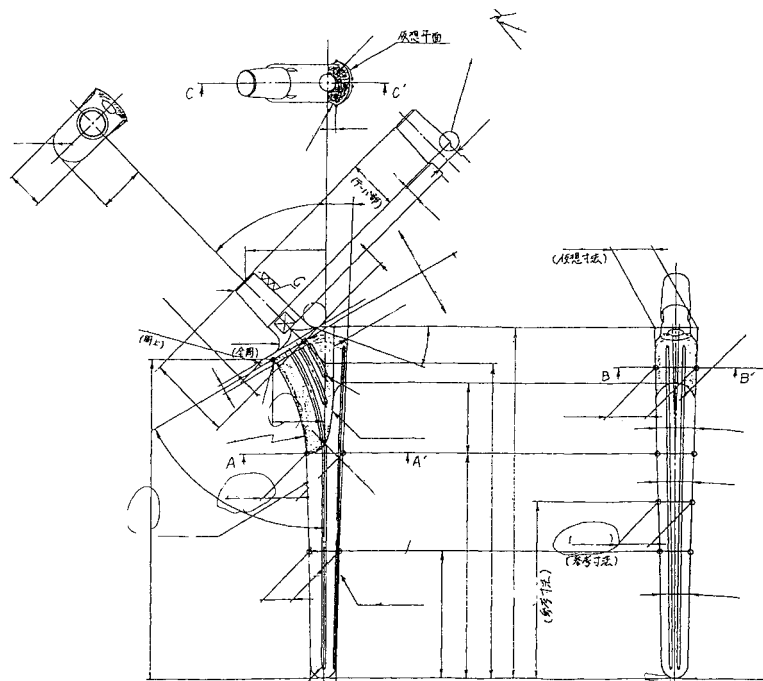


図2 ステムの提供図面

た。その後ソリッド化に置き換えようとしたが収束点でエラーが生じたため、ソリッドモデル許容値を0.02としモデリングを行った。

3次元CADでは、曲面の詳細な形を表現でき曲面の精度が飛躍的に向上する。モデリングが完成すると図4に示すように、図面とレンダリング処理をした。あいまいな箇所（b部）が明確に表現されている。

3.2 加工/CAM

本研究では3次元形状を利用し、NCデータを作成した。鋳造・溶体化処理されたチタン合金を超硬合金K10材種でボールエンドミルにて切削加工を試みた。加工条件は、企業から指定された条件をCAMに入力した。切削温度を下げる方法を、切削条件、工具の形状の両面から考えていくことが大切である。荒加工は、負荷変動の少ない等高線加工を用い、仕上げ加工には図5に示す等高線加工と、図

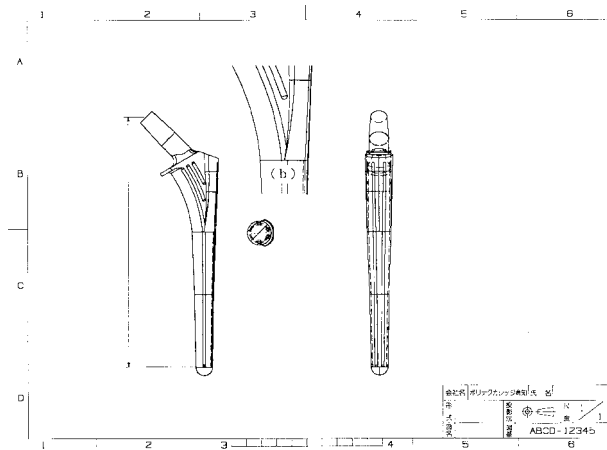
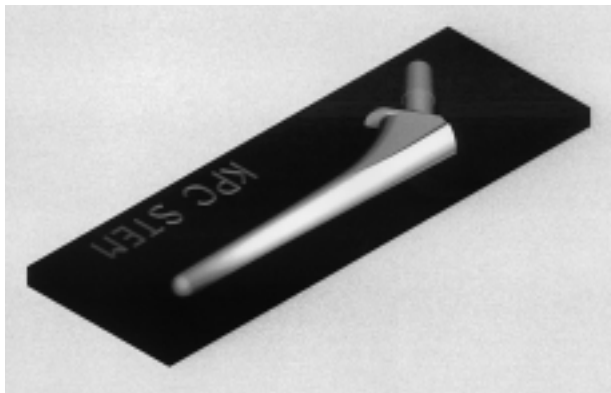


図4 図面とレンダリング処理



6に示すならい加工のNCデータを作成後、マシニングセンタよりDNC運転で試作した。試作は、モデリングワックスを用い、ブロック形状から切削加工を行った。企業においては旋削後、正面フライスで余肉を取り除き、図7に示す治具・取り付け具の生産設計を行い、一面を加工し、反転させる工程設計でステムを仕上げている。その後、テーパ部を除

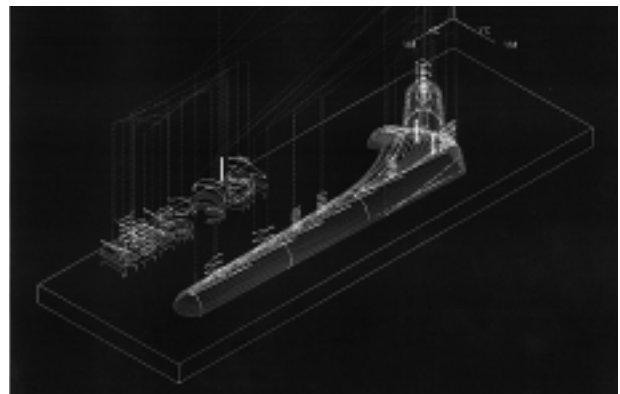


図5 等高線加工と平坦部最適化パス

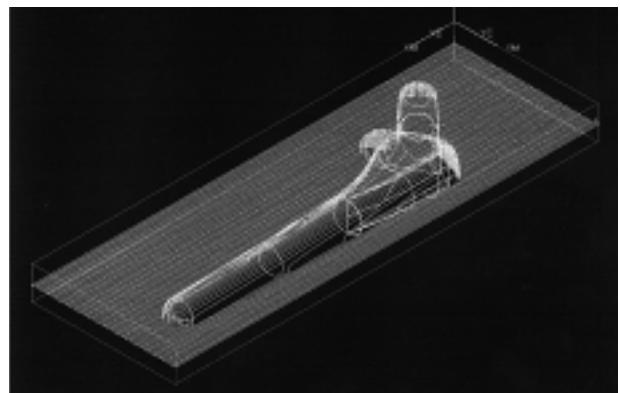


図6 ならい加工



図7 生産設計・現場の知恵

きバフ研磨後，ガラスビーズでブラスト処理を行っている。スクラッチ傷は細菌が体内で発生しやすいので細心の注意が必要である。8本の溝加工は，ドライブ曲線を使用した。

3.3 ステム部分の固定・解析 / CAE

研究開発部門における構造解析，シミュレーションなどをCAE（コンピュータによるエンジニアリング支援）という。CAEはモデラー，プリプロセッサ，ソルバーおよびポストプロセッサの4つの機能で構成される。

まず幾何学的モデルを作成する。形状モデルがコンピュータ内に作られると重力，体積，慣性モーメントなどの情報を求めることができる。

次にプリプロセッサで，解析の準備をする。プリプロセッサでは，解析の際に必要な拘束条件（大きさ，位置，方向，種類など）を画面上に従って定義する。

解析のためのデータが定義されると，数値解析処理を行う。この解析プログラムをソルバーという。

この解析結果をわかりやすく表示するのがポストプロセッサである。ソルバーで解析した結果を，変位図や応力図など利用者にわかりやすい形に加工して出力する。単なる静的な変位のみならず，動作のシミュレーションなどの動的変位，分布も表示可能

である。

有限要素法の考え方としては解析対象領域を有銀要素と呼ばれる領域に分割し，各要素は互いにその境界上に節点の変位とそれに対応する反力の関係を理論的に求め，バネの強さとして定義する。そして，要素節点の変位に関する力のつり合い方程式をエネルギー原理から導く。

人工股関節を骨に固定する方法は，臨床上重要な問題である。研究では，ステムの底部・溝部などを，大腿骨のどの部分と骨セメントにより取り付ければよいか解析を試みた。骨芽細胞（骨の細胞）の成長（2ヵ月ほど）により人工骨と固定できるが，ゆるみが少しでもあるとその隙間に繊維芽細胞（人体の細胞）が育ち，人工骨の固定ができなくなってしまう。また，年をとってくると骨が薄くなりゆるんでしまうことがある。骨セメントが，ステムの溝部に注入できているかどうかは，犬などに実際に人工骨を入れてみて，骨を割ってみないとわからない。実験検証を行い解析結果と比較し，信頼性を確かめなければならない。

本研究では，ステムの拘束条件として底部を固定し，図8に示す力を加えた。通常体重60kgに対し歩行時には体重の約3倍の力がかかるといわれている。そこで16度の方向に180kgの荷重を加えた。解析は内蔵ソルバーのGFEMAを用いて静的線形解析

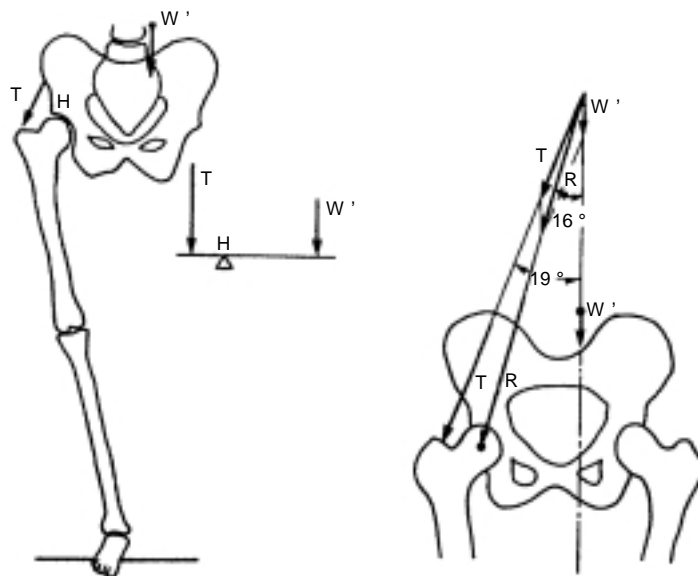
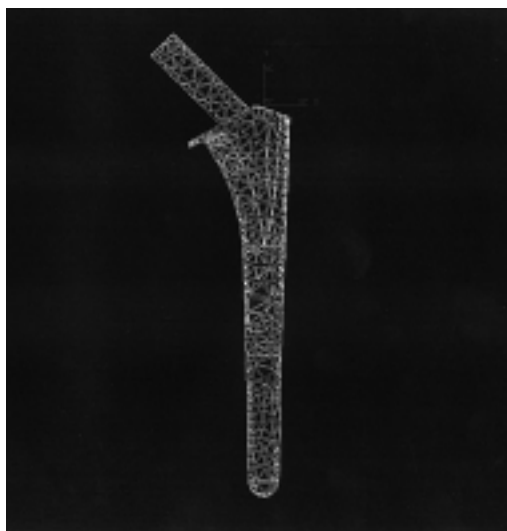


図8 片足起立時に股関節に加わる力

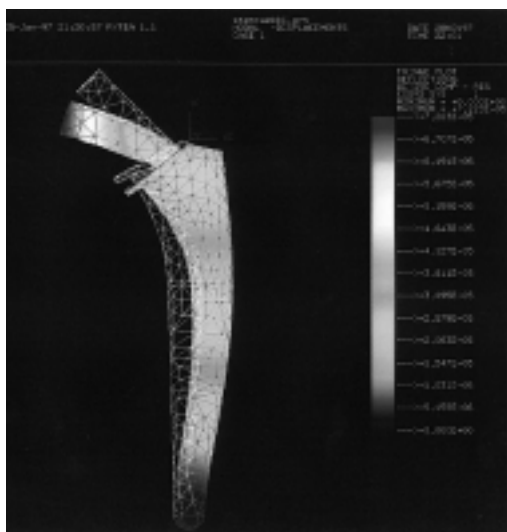
を行った。有限要素は、自動メッシュ四面体要素を使用した。節点数は3180、四面体要素は1680であった。図9にCAEの処理の流れと解析例を示す。

モデリング 3次元形状作成



プリプロセッサ 解析準備

ソルバー 解析実行



ポストプロセッサ 結果表示

図9 CAEの処理の流れ

4.まとめ

統合型3次元CADシステムを利用して、設計と同時に製造方法の検討も行うコンカレントエンジニアリングにより試作した。CAD/CAM/CAEの各プロセスで、単にデータ互換性があればよいのではなく、利用に耐えうるだけの質の高い形状データを作り、利用するのに必要な条件をすべて満たさなければならない。中間ファイルでのデータ受け渡しでは、100%の互換性はないので、流用できなくなるデータは何か調べる必要がある。われわれは、「質の高い形状データ」を頭の中のイメージからいかに作成するかという作業に慣れていなかったため、何度もトライアルアンドエラーを繰り返した。また、学生は3次元CADシステムを使いこなすためには、立体製図・加工技術・専門学科などの基礎がしっかり身につけていないと信頼の高いデータ入力をCADシステムに反映できないことがよく理解できた。卒研での研究成果は、事業所に出向き報告をしている。人工股関節のステムを試作し、統合型3次元CADシステムが、発展期待される骨の設計に有効に利用できることを示した。研究展開の過程で人間と機械の関係など、多くの貴重なものを学べた。われわれの学問的成果はまだ検討すべき点も多いが、近い将来、福祉に貢献できれば幸せである。現在は、月産300本を親会社から受注生産している。

おわりに、本研究を進めるにあたり、貴重な助言をいただきました高知医科大学整形外科学教室の皆様方に深謝いたします。

参考文献

- 1) CAEとCAM, 技報堂出版.
- 2) 現代CAD解体新書, 富士通九州システムエンジニアリング.
- 3) 笹田 直, 塚本行男, 馬淵清資: 産業図書.