

製造コスト評価に基づく超小型衛星構体の設計法

Design Method of Pico-Satellite Structure Based on Evaluation of Fabrication Cost

指導教授 宮崎 康行

M3005 狩野 真紀

1. はじめに

近年の宇宙開発の進展に伴い、人工衛星など、宇宙空間での動作を求められる構造物の設計・開発が盛んになってきた。その中でも超小型人工衛星は、そのコストや構造の面で比較的制作しやすく、大学や民間企業においても、盛んに開発が進められてきた。

人工衛星の開発において、「要求にあった構造体の設計」は、重要な要素のひとつである。中でも、超小型人工衛星はロケット側の要求が定められているため、衛星のミッションに必要なパーツが搭載できる容積を確保したまま、ロケット側の要求を満たすような設計が必要になり、結果として、何度も設計変更を行う必要がある。

そうした設計変更を行う必要が出た場合、何度も試作機を作り直すことはできないため、現在は修正した構造体を解析ソフトに入力し、質量中心や慣性モーメントなどが要求内に収まっているかを確かめた後、製造を依頼するという手法を取ることが多い。しかし、この手法の場合、構造体の製造コストに関しては、設計者の感覚に頼っている場合が多く、具体的な製造コストは、工場に図面を送り、見積もりを依頼した段階で初めて分かる場合が大半である。すると、構造修正を行い、解析ソフトで特性を確認した後、見積もりを依頼したら、予想以上に製造コストがかかることが分かり、再設計を行う必要が出てくるかもしれない。その場合、開発が遅れ、全体のスケジュールも遅れることになる。もし、修正を行う際に、設計者がだいたいどの製造コストを予想できれば、より効率的な設計ができると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、超小型人工衛星の構造部分に関する製造コストの算出という目的を掲げている。従来、製造コストの算出は、大学などの研究機関ではなく、工場などの製造を行う側が、自社の工場で製造する商品に対して行う物で、どの工場も見積もり時には必ずコスト計算を行っている。「商品の製造コスト削減に関する研究」という名目なら、ほとんどの製造側は、この研究を行っているだろう。だが、それらの研究は「自社の場合」がほとんどで、何処に製造を依頼するかも決まっていないような状態の設計者には、参考にならないものがほとんどである。

今回行う研究では、ある条件を限定した特定のモデルに対して製造コストの算出を行うプログラムを開発し、その結果を元にコスト削減に関する考察を行う。この研究を行うことで、製造コストを念頭に置いた設計を可能にし、設計から見積もりへの手間を減らすことができ、作業の効率化へ繋げることができる。

同時に、超小型人工衛星の設計時に、今回開発した製造コスト算出プログラムを、どのように適用すればよいかを考察し、今後の超小型人工衛星の開発に繋げていく。

3. 製造コストの決定方法

3.1 製造に必要な要素

研究の目的である「製造コストの算出」を行うためには、工場側が、どのような要素を考慮して、製造コストを算出するかを知る必要がある。文献[1]及び、工場関係者に伺い、工場側は一般的に次の様な要素をもとに、コストを算出することがわかった。

(A) 材料費

原材料などの物品の消費によって発生する原価

例) 原料費 (素材費)、購入部品費、工業消耗品費、消耗工具備品費

(B) 労務費

労働力などの労働用役の消費によって発生する原価

例) 賃金、給料、従業員賞与手当、退職給与引当金繰入額、福利費等

(C) 経費

材料費・労務費以外の消費によって発生する原価

例) 外注加工費 (一部を他の工場に依頼した場合)、減価償却費、電力代、水道代、輸送代等

この製造原価を要素ごとに計算、あるいは経験から算出し、結果を合計したものが、最終的な見積額になる。

これらの要素の中で、原料費や消耗品代は依頼する製品の外形から、最大外形寸法や切削時間を計算すれば導くことができる。賃金等も、平均賃金を例に取れば算出できる。その一方、福利費や水道代等は工場ごとに異なるため、例を上げることは不可能である。つまり、計算できる要素と計算不可な要素が存在するということである。

こうした結果を踏まえて、製造原価において、設計側が前もって算出できそうな要素と、計算に必要な値をまとめると、以下ようになる。

Table 1 製造原価算出に必要な値 (切削加工)

原材料費	完成品の最大外形寸法
消耗品 (ドリル)	切削時間, ドリルの諸元
賃金	切削時間, 平均賃金
電気代 (切削機)	切削時間, 切削機の諸元, 電気代
輸送費	工場の場所, 完成品の最大外形寸法

3.2 精度と製造原価の関係

超小型人工衛星の構造部分は、それなりの精度が求められる。そのため、その図面内には多くの幾何公差、寸法公差、表面粗さが指示され、工場側はその図面のとおりに製造することが求められる。

高精度なパーツの制作が求められた場合、各要素に以下のような影響が生まれることになる。

- ・加工時間（切削時間）の増加
- ・検査時間の増加
- ・必要なパーツの購入（ドリルや潤滑油など）

通常より高精度のパーツを製造する場合、工場側は、主に経験から、どの程度手間を増やす必要があるのかを考慮して計算を行い、製造原価を決定する。

3.3 納期と製造原価の関係

納期を依頼者が指定してきた場合、工場側は以下のことを考慮する必要がある。

- ・他の製造作業との兼ね合い
- ・残業の必要性

特に、大型機械（切削機械など）を用いて製造を行う場合、必然的に順番待ちをすることになる。機械が空くのを待った結果、作業が夜間にまで及んだりした場合、労働者の残業手当はもちろん、夜間に工場を動かすための費用（光熱費等）もかかることになる。このことを踏まえて、工場側は製造原価を決定する。

3.4 まとめ

以上のように、製造コストを算出するためには、工場ごとに大きく異なる部分も存在するため、算出が不可能な要素も存在するものの、Table.1 において得られた、算出に必要な値を代入し、結果を合計すれば、設計の目安になるような、製造コストの算出は十分可能である。

4. 特定モデルの製造コストの算出

4.1 算出プログラムのモデリング

本研究の目的である「超小型人工衛星の製造コストの算出」を行うにあたり、プログラミングを用意するため、以下に示すようなモデル化の仮定を行う。

4.1.1. 完成品のモデリング

以下の2種類の金属板を製造する場合を考える

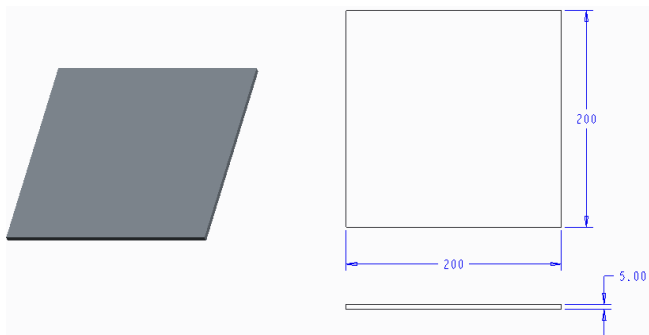


Fig.1 金属板モデル1

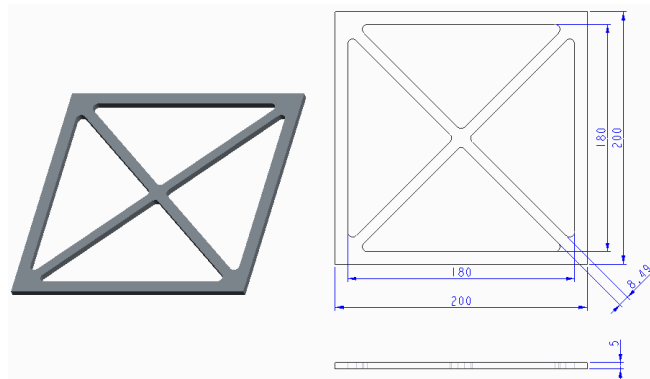


Fig.2 金属板モデル2

- ・ Fig.1 は 200×200×5 の金属板である。
- ・ Fig.2 は Fig.1 の板材にトラス構造をつけたものである。
- ・表面粗さは、3.2Ra とする。
- ・幾何公差は平面度公差のみを考え、値は0.05 とする。
- ・立型マシニングセンタでの切削で製造できるものとする。

4.1.2 原材料のモデリング

平面度について、一定の精度を得るため、原材料の寸法は、完成品の最大外形寸法に対して、x, y 軸方向に+200mm, z 軸方向に+10mm の値を加工に必要な体積とする。つまり加工前の原材料のサイズは、この値以上のサイズの金属となる。また、材質についてはA7075 材とする

Fig.1 Fig.2 に示すような板材を切削する場合、材料として用意するアルミニウム板とその価格は以下ようになる。

Table.2 原材料の諸元

材質	A7075
外形 [mm]	400×400×15
販売価格 [円]	18250

4.1.3 加工機のモデル

加工は、立形マシニングセンタを用いる。加工可能最大寸法は、x 500× y 500× z 50 以上とし、アルミニウム合金が精度 0.1mm 以下で加工可能なものを選択する。以下にその諸元を示す。

Table.3 切削加工機の諸元

メーカー	大阪機工
商品名	VM53R
各軸移動量 (x × y × z) [mm]	1050 × 530 × 510
早送り速度 (x y 軸) [mm/min]	30000
早送り速度 (z 軸) [mm/min]	20000
主軸回転速度 [min ⁻¹]	6000

- ・消費電力は45kVA とする。

- ・エンドミルには切削と研磨のため次の3種類を用いる

Table.4 エンドミルの諸元

メーカー 品番 種類	AERO-ETL エンドミル	オーエスジー CA-RG-EDL エンドミル	AERO-ETS ラジラス エンドミル
用途	切削	切削	研磨
外形	16	8	25
切削速度1 [mm/nim]	2100	1200	1200
切削速度2 [mm/nim]	1200	—	—
価格 [円]	37500	13200	47600

- ・エンドミルの寿命は200分とする
- ・加工に必要な体積（完成品の最大外形寸法に対して、x y 軸方向に+200mm, z 軸方向に+10mmの値）は完成品の部分を残して、全て端材として切削してしまうものとする。

4.1.4 切削手順のモデリング

制作手順は、以下の工程で仕上げるものとする。Fig.3 に切削手順を図で示す。円柱の部分はドリル。赤い部分は削っている面である。

- ① 平面度公差が0.05を満たすように、削っていく。
- ② 中心に、完成品が出てきたら、完成品の外周をなぞるように切削する。この時、①の速度より遅い切削速度になるように設定する。
- ③ ①②で使用したドリルより経が小さいドリルに持ち替えて、外周を削る。
- ④ ②と③をくり返し、最後まで削り切る。
- ⑤ 表面粗さを整える

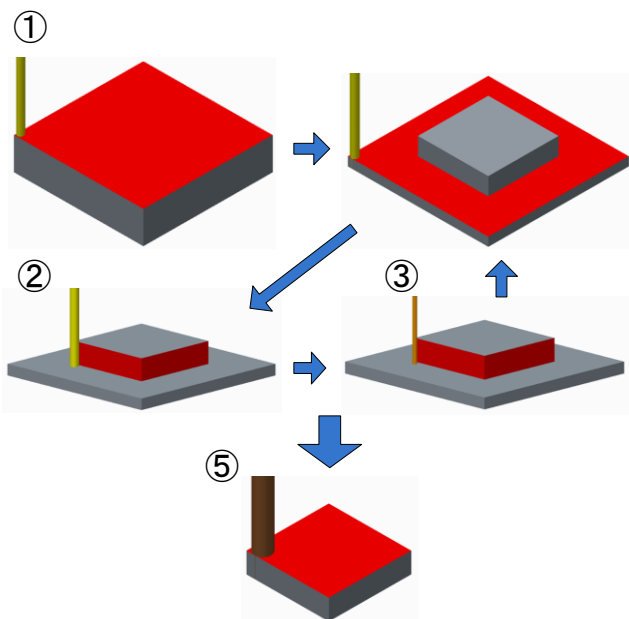


Fig.3 制作手順

また、①時のドリルの動き Fig.4 に示す。赤線部分を移動しているときは切削し、青線の部分を移動しているときは、材料から100mmは離れている。

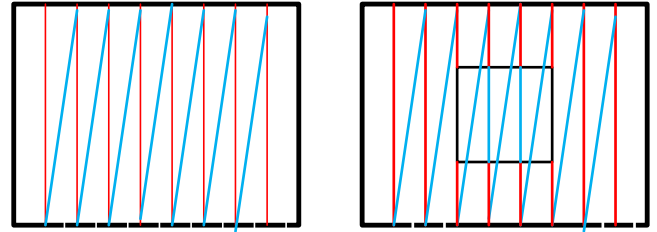


Fig.4 ドリルの動き

(左: 全面削る場合 右: 中央に製造品を残す場合)

4.1.5 その他のモデル

- ・潤滑油の使用料は考慮しない
- ・労働者の賃金（時給）は、残業代を含めた平均給料を、平均労働時間で除した値を使用する
- ・電気代は千葉県の電気料金を使用する
- ・水道代は考慮しない
- ・輸送は、関東圏内に限って行われるものとする。

Table.5 計算に必要な要素

平均賃金 [時給]	1950
電気代 [円/kWh]	29.05
輸送代 [円]	1296

- ・切削機械のkVAを0.75で除した値をkWとして扱う

4.2 プログラミングの概要

製作コストは、MATLABを用いたプログラミングによって算出する。Table.1に示したような各要素を計算し合計することで、コストの算出が可能である。3.1でモデリングした諸元を当てはめることで、Fig.1 Fig.2に示した製造品の製造コストを算出することができるが、そのためには、切削時間を計算する必要がある。結果として、開発すべき算出プログラムは

- ① 完成品の形状と材料費を入力する
- ② 切削加工機やドリルの諸元や輸送費等、金額に関わる値を入力する。
- ③ ①②の値をもとに切削時間を計算する
- ④ 切削時間から要素ごとの金額を産出し、合計する

という、一連の流れを満たす必要がある。

4.2.1 切削時間について

切削時間はFig.4に示すドリルの移動経路とTable.3,4の諸元を使って計算する。次にその手順を示す。

- ① 材料と完成品の寸法を入力
- ② 材料を座標ごとに細かく切り分け、削る場所と残す場所を定める
- ③ Fig.4に従ってドリルの動きを計算し、削っている距離とドリルを浮かせて移動している距離を計算する。
- ④ Table.4のドリル速度から切削時間を計算する。

4.3 結果と考察

4.2 に記したプログラムを製作し実行した結果、次の結果が得られた

Table.6 計算結果

	Fig.1	Fig.2
切削時間 [sec]	3504	4925
算出加工コスト [円]	32585	36181
材料費と輸送費を除いた 算出加工コスト	11743	15339

この結果を工場関係者に伝えたところ、切削時間は真の値に近いが、材料費と輸送費を除いた算出加工コストは、この値の 1.3~1.5 倍はかかるという話を伺った。その原因としては、2.1 に示したような「工場ごとに大きく変化し、算出が不可能な部分」が作用していると考えられる。

これらの不確定要素は、工場側の影響を大きく受けるため、設計側の視点だけでは、予想が付きづらい。しかし同時に設計側の要求に左右されにくい部分でもある。限りなく真に近い製造コストを算出するためには、この結果は不十分で、多くの課題をもつが、設計を行う際や設計変更が生じた際の目安にする程度なら、設計の効率化という点において、非常に役立っていると考えられる。

例えば、最初に Fig.1 の状態だったが、質的な問題から Fig.2 の状態に設計変更した場合を想定すると、設計変更を行う前と後で、切削時間は 1.41 倍、製造コストは 1.11 倍になっている事がわかる。設計者はこの上がり幅を見て、設計が妥当なものであるかを考えることができる。

5 超小型人工衛星の構体設計への応用

超小型人工衛星の構体設計には、以下のことを念頭に置いた設計を行う必要がある。

- ・ロケット側の要求を満たすこと
- ・ミッションを行うために必要な機器を搭載できること
- ・それなりの精度を持つこと
- ・製造コストを抑えること

特に精度に関しては、可動部の正常な動作に関わるので、慎重な設計が求められるが、2.2 に示したようにコストが上昇してしまうため、コストの目安を算出できることは重要である。

5.1 解析ソフトとの併用

3 において、モデル化した製造品の加工コストを算出したが、このプログラムと解析ソフトの結果を組み合わせることで、製造コストを一定に保ったまま、形状の変更を行い、特性値を修正することが可能になる。

解析ソフトと加工コスト算出を踏まえた設計ができる環境があれば、超小型人工衛星に設計において、試験機を制作し実験した結果、値が基準値に収まらなかった場合でも、構体のどの箇所を再設計すれば、コストを最小限に抑えた修正を行うことができる。

5.2. 今後の展望

4.1 において解析ソフトとの併用の有用性を述べたが、最終的に、解析ソフトのプログラムを、今回の開発した製造コスト算出プログラムに組み込んでしまうことで、超小型人工衛星の半自動化された外形修正プログラムを製作することができる。もし組み込むことが出来た場合、

- ① 設計した製造品の外形を入力
- ② 物理特性などの基準値を入力
- ③ 内部の解析ソフトが特性値を産出し、基準値に収まっているかを判定
- ④ 収まっていなかった場合、修正案をいくつか作成(修正が必要なものが部品単体であれば、厚さの調整、凹凸位置の変更、面取りくり抜き等、を行ったと仮定し、再び解析を行う。結果が基準内に収まっていれば、その形状修正を修正案のひとつとして採用する。衛星全体に修正が必要な場合は、部品のごとの修正に加えて、取り付け位置の変更も考慮する。)
- ⑤ 修正案の中から、コストの変動率が最も少ないものを採用し、入力した外形寸法に反映

という手順で、外形修正時の半自動化が可能になり、設計時の手間を大幅に削減できると考えている。

6.おわりに

今回の研究では、完全な加工コストの算出は出来なかったが、設計を行う上で、目安になるようなものは算出できた。この結果を他の解析ソフト併用することで、製造コストと物理特性のバランスの取れた設計を行えるため、効率的な作業を行うことができる。

今後は、算出できなかった不確定要素の部分をひとつでも多く算出できるようにし、結果を真の値に近づけると共に、物理特性の解析プログラムの組み込みを目指す。

7. 参考文献

- [1] よせだあつこ：簿記教科書 パブプロ流でみんな合格 日商簿記 2 級 工業簿記 テキスト&問題集 (EXAMPRESS), 翔泳社, 2013
- [2] 伊藤勝夫：絵とき「NC 旋盤プログラミング」基礎のきそ Mechanical Engineering Series, 日刊工業新聞社, 2012
- [3] 上坂吉則：MATLAB プログラミング入門 [改訂版], 星雲社, 2011