

## 解説

## 人工衛星部品の特徴と製造方法について

† 仙北谷英貴\*

## Characteristics and Manufacturing Processes of Parts of Satellites

by

† Hideki Sembokuya\*

(Received Nov.8, 2016; Accepted Nov. 9, 2016)

## 要 約

人工衛星を構成する部品には、外装部品、電子部品、構造部品などがある。これらは少量生産であり、宇宙空間という特殊な環境で使用されるため、部品の形状や製造方法は一般的な工業製品とは大きく異なっている。本稿では、人工衛星部品の特徴を概説し、それらを製造するための代表的な加工方法について解説した。

キーワード：人工衛星、部品、加工

## 1. はじめに

人工衛星は特定の目的のため宇宙で働く装置である。宇宙空間という特殊な環境、要求される高度な性能、修理が困難など、一般的な工業製品とは異なる特徴をもっている。このため、人工衛星を構成する部品も、独特な設計思想や工法によって生産されている。先端材料の研究者の中には宇宙に関連したテーマをお持ちの方も多いと思われるが、実際の人工衛星やその部品を目にする機会は少ないのではないだろうか。そこで本稿では、人工衛星部品の種類、特徴、製造方法などについて解説する。

## 2. 人工衛星の全体像

最初に、人工衛星の全体像について述べる。これまでに打ち上げられた人工衛星は全世界で約 7000 機（うち約 2% が日本製）、その約半数が現在も周回中で、稼働中のものは 1000 機程度と推測されている。

人工衛星の設計寿命は数年～15 年程度である。人工衛星は姿勢を制御するためにガスジェットを噴射するスラスタ

を備えているが、その燃料が尽きて寿命を迎える場合が多い。静止衛星のように高高度（36,000km）の衛星は 10～15 年程度の場合が多いが、低空を周回する衛星ほど燃料の消費が早く、寿命が短い傾向がある（数年～5 年）。低空では頻りに地球の影になるために電氣的にも厳しい条件となるうえ、種々の物質が存在して物理的・化学的環境も厳しい。特に問題になるのが原子状酸素（AO：Atomic Oxygen）である<sup>1)</sup>。原子状酸素とは、酸素分子が紫外線で分解され（ $O_2 \rightarrow O + O$ ）、酸素原子(O)の状態で大気中存在しているもので、高度 200～600km の範囲では大気の主成分となる（国際宇宙ステーションは高度 400km）。AO は化学的に極めて攻撃的な性質を持ち、人工衛星に対し高速（秒速 7.4km）で衝突するため、非常に厳しい環境となっている。

人工衛星の大きさはさまざまで、小さいものとキューブサットと呼ばれる 10cm 立方・1kg の衛星がある。大きなものでは、宇宙ステーション補給機「こうのとり」が国産では最大級で、直径 4.4m で長さは 10m、自重 10.5 トンに 6 トンの積荷を載せて運ぶことができる。明確な定義はないが、100kg 以下のものを超小型衛星、100～500kg を小型、500～1,500kg を中型、1,500kg 以上のものを大型衛星と呼ぶ場合もある。大きさによって製作方法も若干異なるが、本稿では 500kg 以上の中型規模の人工衛星について述べることに

平成 28 年 11 月 8 日受付

\* 株式会社仙北谷：神奈川県横浜市戸塚区東俣野町 41  
Sembokuya Corporation: 41, Higashimatano, Totsuka-ku,  
Yokohama, Kanagawa 245-0065, Japan

†：連絡先/Corresponding author

する。小惑星探査機「はやぶさ」はおおよそ 1.5m 立方・510kg なので、これより大型のものと思って頂ければよいだろう。

ここで、非常に大雑把に重量単価を自動車、航空機と比較してみる。自動車は約 1 トンで価格は 100 万円程度である。計算すると 1kg=1000 円となる。大型旅客機は 100 トンで 100 億円程度であり、1kg=10 万円である。人工衛星は幅が広いが、1 トンで 100 億円程度とすると 1kg=1000 万円である。この計算だと人工衛星の重量単価は純金よりも高く、大型旅客機の 100 倍、自動車の 1 万倍となっている。ここで言いたいことは、人工衛星に課せられた目的がそれだけ難しく、目的達成のためには高価な素材や手間のかかる製造方法を選択できる、ということである。

人工衛星を構成する装置を大別すると、ミッション機器とバス機器に分類される。ミッション機器は、個々の人工衛星のミッション（目的）に合わせて設計製作された機器で、例えば、小惑星探査機「はやぶさ」では小惑星のサンプルを採取する機器であり、準天頂衛星「みちびき」では測位機器がこれに該当する。バス機器は、どの人工衛星にも必要な共通の装置で、構造系、電源系、推進系などに分類される。バス機器は衛星ごとに新規で設計される場合もあるが、品質安定や納期短縮、コストダウンの目的で共通化されることが多く、例えば日本の二大人工衛星メーカーの三菱電機株式会社（以下、三菱電機）では DS2000、日本電気株式会社（以下、NEC）では NEXTAR と呼ばれる標準衛星バスが開発・実用化されている<sup>2)</sup>。

人工衛星メーカーでは、発注者の要求仕様を満足するように設計を行う。宇宙空間という特殊な環境で高度な機能を発揮する必要があり、工夫を凝らした設計が行われる。設計は、推進系や光学系などのユニットごとに行われ、構成部品の設計に落とし込まれる。人工衛星 1 機の設計図は数万枚、部品点数にすると数十万個に及ぶ。部品の設計図が確定すると加工を行うことになるが、部品レベルになると中小企業を含めた部品メーカーが加工する場合もある。

身の回りの工業製品を見て頂くと、ほとんどのものが「型」を使って部品を加工している。プラスチックであれば射出成形、金属であればプレス加工やダイカスト成形などである。これらは量産に適した方法であるが、人工衛星部品は少量のため、どちらかというところ「型」を作るのと同じような方法で作られる。最新の機械と職人技で作る芸術品と言った趣である。典型的な少量多品種の製品であるため、中小企業が得意とする分野と言える。次章では部品ごとの特徴について説明する。

### 3. 人工衛星部品

#### 3.1 外装部品

テレビニュースなどで人工衛星が映し出されると、最初に目に付くのは、外側を覆っている金色のフィルムではないだろうか。これは、サーマルブランケットと呼ばれる耐熱・断熱材であり、ポリイミドのフィルムにアルミニウムを蒸着したものもある<sup>2)</sup>。金色に見えるのはアルミニウムの薄膜がポリイミドの褐色を透過しているため、金めっきをしているわけではない（黒いフィルムもある）。通常、このフィルムは多層構造で、断熱性をより向上させるため、フィルムの中にポリエステル繊維でできたメッシュを挟んで糸で縫い合わせている。また、サーマルブランケットを人工衛星の形に合うように加工するのは手作業で、ミシン等を使って縫製される<sup>3)</sup>。人工衛星にサーマルブランケットを固定するのはマジックテープである（「マジックテープ」は(株)クラレの登録商標）。宇宙空間では太陽の当たる面と当たらない面で 200℃以上の温度差が生じるため、サーマルブランケットで人工衛星を覆って温度環境を整える。

人工衛星にとって熱の問題は重要で、内部で発生する熱を逃がすのも「ファンを回して冷却」というわけにはいかない。冷却は OSR（Optical Solar Reflector）と呼ばれるガラス製の部品を衛星外壁に貼り付けた放熱面によって行う。OSR は外からの太陽光は反射し、内部からの熱を赤外線放射することによって冷却する。衛星各部で発生した熱を等温化して放熱面に伝達するのはヒートパイプと呼ばれるアルミニウム製の部品によって行われる。ヒートパイプの内部には媒体としてアンモニアが封じ込められており、蒸発と凝縮によって熱輸送を行う。近年は人工衛星が大型化しており、格子状に組んだヒートパイプをアルミニウムのハニカムサンドイッチパネル内に埋設する方法が採用されている。

#### 3.2 電気・電子部品

人工衛星は多くの電子機器の集合体であり、各機器の内部には基板にはんだ付けされた半導体製品が満載されている。これらの電子機器は少量でかつ不良が許されないため、はんだ付け作業は特別な資格をもった職人によって行われる。一定以上の視力も必要である。組立作業にも細かい規程があり、1 本 1 本の電線の処理方法から、何本か束ねる場合の結束方法まで決められている。接着剤を使用する場合、高温環境での硬化の促進や軟化、低温環境での脆化、真空環境による脱ガスなどが起こるので注意を要する。特に脱ガスは、接着剤以外の高分子材料でも発生し、自身の特性を変化させるだけでなく、発生したアウトガスが周囲の光学部品や電子デバイスなどに付着して悪影響を及ぼす。このため、材料のアウトガス特性を管理しており、影響の

小さい材料が採用される。

人工衛星の内部の機器はケーブルで接続されるが、電線を束にしたワイヤーハーネスが多用される。日常生活ではパソコンの内部などにワイヤーハーネスを見ることができ、人工衛星用のものはオーダーメイドの手作りで製造されており、重要な部品のひとつである。ワイヤーハーネスなどのケーブル類は、人工衛星1機に数万本も使用され、全体の質量の約10%にも及ぶ。

### 3.3 構造部品（金属材料）

人工衛星の主構造の一例を模式的に図1に示す<sup>3)</sup>。この他に、中央部が円筒形をした構造などがある。主構造材料としては、アルミニウムや炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が使用され、ハニカムサンドイッチパネルが用いられることが多い。CFRPについては後述する。

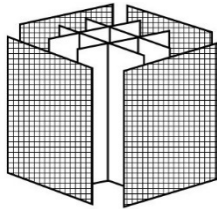


図1 人工衛星の主構造の例<sup>3)</sup>

主構造の中には、電源ユニットなど各種のユニットが格納されている。ユニットはシェル構造やフレーム構造をしており、それらの構造材料としてはアルミニウムを中心にチタン、ステンレス等が使用される。例えば自動車では、最も好んで使用される構造材料は鉄である。主な理由は強度の高さと価格の安さであろう。人工衛星では軽量性が重視されるため、アルミニウムが多用される。より強度が必要な部品には、チタンやステンレスなどが使用される。

アルミニウムやチタンなどの金属部品は、棒材や板材（圧延材）から旋盤加工や切削加工、放電加工などによって製作される。コンピュータ制御のNC工作機械であるNC旋盤、マシニングセンタ、ワイヤカット放電加工機などが使用されることが多いが、汎用工作機械も活躍する。自動車部品を製作する場合には、数ヶ月かけて工法を決め、あとは自動的な流れ作業となるが、人工衛星部品では数量が少ないためにそのような作り方は適さない。多くの部品メーカーは工程ごとに絶対にミスをしたくない、あるいはミスしてもリカバーできるような工夫をして部品を製作している。

NC工作機械で部品を加工する場合、CADデータを入力し、CAD/CAMで加工用の機械座標データを出力する。これを機械に転送して、CADデータ通りになるように切削加工する。人工衛星部品は軽量化のため薄肉構造の場合が多

く、素材の大半は切粉になってしまう。近年では5軸マシニングセンタのように多軸の機械が幅広く利用されており、材料をいろいろな角度から加工することができるため、形状の自由度は高くなっている。

放電加工は、電極から発生する火花で金属を溶融して加工する方法で、 $\phi 0.2\text{mm}$ 程度の金属ワイヤを電極線として使用して金属材料を切断するのがワイヤカット放電加工である。簡単に言うと、電熱線で発泡スチロールを切るイメージである。放電加工は加工速度が遅いため、一般的な部品加工に使用されることは少ないが<sup>4)</sup>、高精度薄肉加工や少量加工に適しており、人工衛星部品の加工では頻繁に使用される。

打ち上げ前の人工衛星は地上では大気圧だが、打ち上げ後4分ほどでフェアリングと呼ばれるカバーが分離して真空中に露出する。このとき、部品の内部に残っている空気が急激に膨張して部品が破裂することのないように、各部品には通気穴が設けられている。通気穴の位置は、空気が穏やかに抜けるように、空気の通り道まで考慮して決められている。このような通気穴を加工する場合には、型彫放電加工という方法が最適である。型彫放電加工は、電極を作製して金属製品を溶融する方法で、斜め穴や壁の裏側など、切削では加工できないところでも高精度に加工できる。人工衛星部品では機能が優先されるために加工にある程度時間をかけることができ、放電加工が活躍する工業製品である。

1992年に打ち上げられた地球資源衛星「ふよう1号」において、摺動部で発生した摩耗片が無重力のため落下せず浮遊し、軸受に混入してモーターが故障した事例があった<sup>5)</sup>。このような不具合を回避するため、あらゆる金属部品は慎重に仕上加工が行われ、異物などを丁寧に除去する。必要に応じて顕微鏡を使用し、自作の仕上工具なども使用して手作業で行う。図2に作業風景の写真を示す。熟練工による職人の技が人工衛星という最先端技術を支えている。



図2 仕上作業風景と自作工具（右上）

### 3.4 構造部品 (複合材料)

アルミニウムと同様に構造材料として多用されるのが CFRP である。剛性部材の場合には特に有用で、ハニカムコアを使用したサンドイッチパネルとして利用される場合も多い。CFRP は軽量かつ高剛性で、繊維の方向性を利用すればテーラリング性 (強度が必要な場所や方向のみ強化する) が発揮できる。人工衛星用途の場合にはプリプレグ (炭素繊維に樹脂を含浸させたシート状のもの) を積層してオートクレーブ (内部を高温高压にできる容器) で成形される場合が多い。オートクレーブ成形は炭素繊維の含有率を高くかつ空洞欠陥を少なくできるが、大型装置が必要で高コストになりやすい。そこで最近では真空含浸成形 (VaRTM = バータム) 法が注目されている。VaRTM 法は、繊維をフィルムで包んだ状態で内部を真空にし、樹脂を含浸・硬化させて FRP にする方法で、安価に大型の構造物を成形できる。中小企業にも参入しやすい工法と言える。

成形された CFRP 積層板は切削や接着などの 2 次加工が行われる。CFRP は切削の難しい材料で、毛羽立ちや層間はく離が発生しやすく、工具の摩耗も顕著である。加えて、切削油が層間や繊維/樹脂界面に浸入し強度低下や寸法不良の原因となるため、ドライ環境で加工することが多い。これにより加工条件は一層とシビアになり、粉塵が発生して人体や機械に悪影響を与える。加工条件や粉塵対策は、各社が知恵を絞って改善を進めている。

太陽電池パドルも CFRP 等で作られている。何枚かのパネルにバネを付けて折りたたんだ状態にして爆発ボルト (分離ボルト) で固定されている。宇宙空間で爆発ボルトを作動させ、バネの力で太陽電池パドルを開く。これは最も確実かつ軽量な方法であるが、発生衝撃が大きいので、低衝撃なものが開発できれば有用である。

### 3.5 切削以外の製法による金属部品

少量品の場合、板金加工は有力な工法であり、電気電子機器のケース等として利用されている。板金加工では溶接が多用される場合が多いが、人工衛星ではロケット打ち上げ時の加速度と振動、加えて宇宙空間での温度変化と温度分布に耐える必要があるため、溶接は難易度の高い技術のようである。

鋳造品は人工衛星部品としては、あまり使用されないようである。これは、製造するのに型が必要なために 1~2 個の生産ではコスト高になることと、内部欠陥 (鋳巣=微小空洞) を避けるのが難しいことなどが要因で、一般的には切削加工が選ばれるようである。鋳造は形状の自由度が高いなどの長所も多く、地上テスト用部品としてアルミニウムの鋳造品が使用される場合がある。人工衛星は大型化の

傾向があるが、部品サイズが大きいほど鋳造が有利となる。内部欠陥は CT スキャンなどの非破壊検査である程度発見できるので、今後、実機への応用も広がるかも知れない。

近年、AM (Additive Manufacturing) 技術を金属に応用した、いわゆる金属 3D プリンタの進歩が目覚ましい。以前はやや苦手としていたアルミニウムやチタンの造形品質も向上し、人工衛星部品への応用が期待されている。現在の構造部品の多くは切削加工で作られているため、切削に適した形状になるように設計されている。金属 3D プリンタは造形の自由度が非常に高いが、造形しやすい形状は切削加工と大きく異なる。このため、現在の製品を金属 3D プリンタで作っただけでは大きな効果は得られにくい。個々の部品を設計する際には、例えば固有振動数を解析してロケット打ち上げ時の共振を防ぐ工夫がされている場合もあり<sup>6)</sup> 形状の変更は容易ではないが、例えばトポロジー最適化<sup>7)</sup> のように既存の概念に捕らわれないデザインの中に金属 3D プリンタの能力を最大限に発揮させる形状が含まれている可能性がある。そのような形状の部品を製作することができれば、大幅な軽量化や高性能化、低コスト化が見込めるため、今後の展開が期待される場所である。

## 4. おわりに

人工衛星部品の特徴と製造方法について概説した。ややべールに包まれている感のある人工衛星をより身近に感じて頂ければ望外の喜びである。なお、本稿では人工衛星や部品の写真等を掲載しなかったため、以下のホームページや成書<sup>2,3,6)</sup>をご参照頂きたい。

○ファン! ファン! JAXA! <http://fanfun.jaxa.jp/>

○三菱電機「人工衛星のひみつ」, 「DSPACE」

<http://www.mitsubishielectric.co.jp/society/space/himitsu>

○NEC「宇宙ソリューション」, 「宙への挑戦」

<http://jpn.nec.com/solution/space>

## 参考文献

- 1) 木本雄吾, 宮崎英治, 石澤淳一郎, 島村, 宏之, J. Vacuum Soc. Japan, **52**, 475 (2009)
- 2) JAXA: 日本の宇宙産業「宇宙を開く産業を開く」, **1**, 23, 77 など全般参照 (2010)
- 3) NEC「人工衛星」プロジェクトチーム: 人工衛星の”なぜ”を科学する, 65, 71 など全般参照 (2013)
- 4) 仙北谷英貴, 型技術, **29**, 36 (2014)
- 5) 岩田敏彰, H13 年度 JSUP 宇宙環境利用の展望, 76 (2002)
- 6) マイナビ: 人工衛星のしくみ事典, **2**, 111 (2014)
- 7) 増尾大慈, 材料の科学と工学, **53**, 112 (2016)