

This article was translated and reprinted with permission. Copyright©2015 The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All other rights reserved. Originally published as Debra Werner, "Reimagining satellite construction", Aerospace America, March 2015, www.aerospaceamerica.org.

衛星製造のイメージが変わる！

デブラ・ワーナー

衛星製造業者たちは、3-D プリンタで製作した金属部品を衛星に搭載しはじめている。やがて、このような積層造形加工の部品が、クリーンルームでロボットによって衛星に多数組み込まれる日が来るかもしれない。デブラ・ワーナーが、来るべき衛星製造の変革を展望する。

(翻訳担当：本誌編集特別顧問 植田剛夫)



サン・アントニオで開催された Defense Manufacturing Conference のロッキード・マーチン社ブースにて、ロボットアームが積層造形法で衛星モデルを製造中（ロッキード・マーチン社提供）

サン・アントニオで開催された Defense Manufacturing Conference でのロッキード・マーチン社のブースは、興味を感じて立ち寄る人で賑わった。プレキシガラスの箱の中で、1.8mほどの高さでオレンジ色のロボットが、炭素繊維強化ポリマー（CFRP）を1回に1層ずつ成形して、小さな玉を作っていたのである。数分のうちに、小型冷蔵庫の大きさの衛星モデルが形を現し始め、数時間で全工程が完了した。2台目のロボットは、製品に残った余分な材料を削り取り、レ

ーザートラッカを用いて加工品を検査し、最終製品の寸法測定を行っていた。

これがロッキード社の技術者たちの構想する、積層造形法とロボティクスの結合によって最終的に衛星を作る方法である。これは、次のように行われている現在の製法とは大きく異なるものだ。

クリーンな作業衣に身を固めた技術者や作業者たちが、遠方の副契約者で作られたり、内作されたりした構造部品をまず受領して組み立て始める。これら構造部品のごく一部（割合は増えつつあるが）は積層造形法で作られ始めているものの、業界用語でインテグレーションと称する、部品を衛星システムに組み上げる作業は、今でもほぼ全面的に人間の手作業によっている。これはまるで、偉大な彫刻がゆっくりと形をなすようなもので、もっとも工期の短いという商用通信衛星すら、完成まで2年から3年もかかるのである。

ロッキード社は、この全く新しい手法は、もはや遥か未来の夢ではないと主張する。衛星製造の革命は、構造体と、ひとまとめに「バス機器」と呼ばれる電源系、推進系、それに通信系からスタートするだろう。

「我々のゴールは、すべての衛星バスを今後4年のうちに積層造形法で作ることで、このゴールは前倒しにできるでしょう」と、ロッキード・マーチン社で先進製造法と材料の開発に専念する材料技術者のスレード・ガードナーは語っている。

ロッキード・マーチン社の技術者は、衛星搭載の先進的な光学機器やエレクトロニクスまでを、積層造形法で作ろうと計画しているわけではないが、彼等はターンテーブルの周囲を取り囲んだロボットたちが力を合わせて、推進系やアンテナを含む多くのサブシステムを搭載した、軽量衛星バスを製造している姿を思い描いているのだろう。「人手を使うのに意味がある場合にのみ、人間がペイロード機器やハーネスを組み込むことになるでしょう」とガードナーは言う。



（図左）SS/L社が3-Dプリンタで製造したチタン合金アンテナブラケット。（図右）の従来の機械加工による部品（0.4 kg）より重量が半分となった。（スペース・システムズ・ロラル社提供）

この可能性を予見しているのはロッキード・マーチン社だけではない。カリフォルニア州パロアルトのスペース・システムズ・ロラル社を始めとする他の衛星メーカーも、積層造形法により信頼度の高い衛星が、しかも将来はロボットによって製造できることを、顧客に納得させようと競っている。衛星製造業者がこの製造法で利益を上げられれば、通信衛星、偵察衛星、科学衛星の製造という、儲かるが競争の激しいマーケットでは、大きな強みになりうるのだ。

時は金であり、他社より早く衛星を製造することは原価低減の有力な手段であって、受注競争に勝つことにつながる。積層造形法によりコンポーネントの重量を減らせれば、技術者はより多くの機器を衛星に搭載することができるし、別の選択肢として顧客は、衛星の全重量を減らすことで、ロケット打ち上げ事業者が衛星の重量に応じて設定する費用の部分負担ですみ、打ち上げ費用を節約することができる。

従来の衛星コンポーネントでは、工作機械の性能や鋳造部品の細密度の限界、複数の部品を作って組み立てる必要性などのために、重量が増加してしまう事情があった。ものによっては、強度や熱絶縁のためでなく、単に製造上の都合や、部品を互いに結合する面を提供するのが目的で設計されたのである。この点積層造形法では、部品数を減らし、コンポーネントの設計を合理的にすることができる。

「この技術を衛星全体に行き渡らせられれば、多くの場合衛星重量の 15%、時には 50%もの削減が可能になります」と、カナダ・ブリティッシュ・コロンビア州リッチモンドに本拠をおく MDA 社の子会社であり、商用通信衛星の世界最大の製造業者のひとつである Space Systems /Loral 社の新材料・構造技術部門長デレク・エディングーは語る。「これは顧客を真に惹きつけるものとなるでしょう。なぜなら、衛星重量を減らせれば、通信ペイロードや、衛星寿命を伸ばすための燃料を積み増すことができ、事業者が収入を増やせるからです」

注意深く前進

3-D プリント技術は重量・コスト減を約束しているものの、衛星製造業者は積層造形法の応用を、地上から宇宙へ移すのには相当慎重である。

2011 年に打ち上げられ、2016 年の木星とのランデブーを目指して飛行中である NASA の Juno ミッションは、チタン合金粉末を加工製品に成形する積層造形法の一つ、電子ビーム溶融法を用いてプリントした、4 個の導波管ブラケットを搭載した最初の実証機である。このプログラムの成功により、Juno の主契約者ロッキード・マーチン社が、積層造形法の適用を拡大し、高分子材料と金属の 3-D プリンティングで製造した機器を、コロラド、カリフォルニア、ルイジアナ、ミシシッピの各工場での製造に急遽拡大したのである。一方 MDA 社や Wolf Robotics 社などの納入業者は衛星組立用ロボットの開発完成に向けて努力中である。



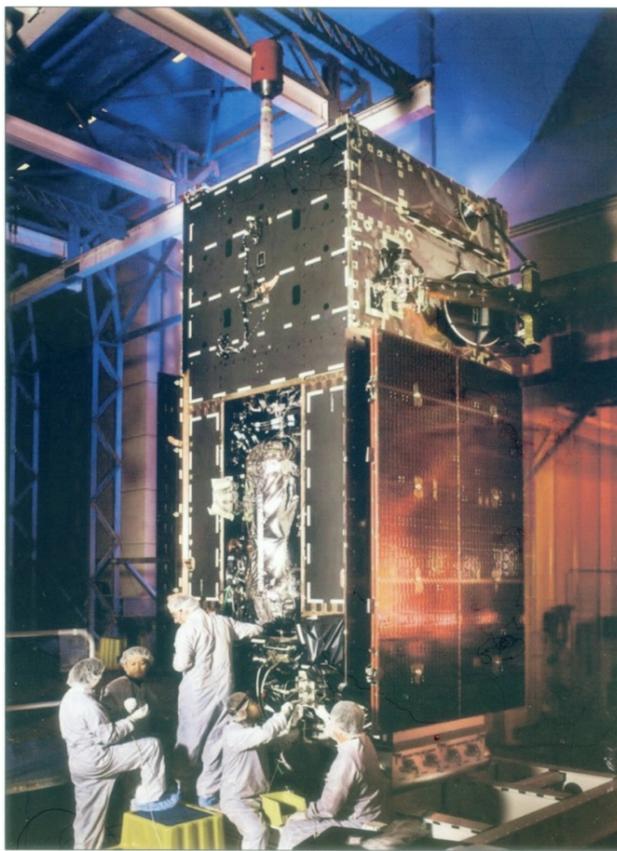
タレス・アレニア・スペース社が 3-D プリンタで製造した衛星ソーラーパネル用の展開機構プロトタイプ。
チタン合金製で従来の製法より部品数少なく重量は 1/5 (ヨーロッパ宇宙機関提供)

SS/L 社は積層造形法で作ったチタン合金部品を、今年後半に初めて宇宙へ送り出す準備を進めており、その後の殆どすべての衛星に 3-D プリンタで作った金属部品を搭載する予定である。

宇宙へ飛び立つことになっている最初の部品は、衛星の内部に交差する構造部材の両端の取付金具である。この部品は、とても複雑な形状には見えないが、衛星の顧客は何しろリスク嫌いなので、製造業者が積層造形法を信頼して、衛星の荷重負荷部品をこれで作ったということだけでも重要なことといえよう。SS/L 社はどの衛星がこの部品を搭載するのか、まだ発表していないが、経営陣は既に、これが 2015 年後半に打ち上げの静止通信衛星だと確認している。

商用通信衛星は製造と打ち上げに数億ドルもかかる。利益を生むためには、衛星オペレータは自分たちの衛星を、極限温度や危険な宇宙線環境のもとで、10 年以上正常に運用せねばならない。SS/L 社のプログラム管理担当上級副社長であるダヴィッド・バーンスタインによれば、衛星の顧客は普通、彼等の衛星に飛ばす実績のある部品だけを使うことを要求する。

衛星に新規のコンポーネントを採用する際のリスクを減ずるために、製造業者は広範な試験を行わねばならない。昨年ロッキード・マーチン社は、電子ビーム溶接と積層造形法の専門企業で、衛星用に新設計の大型推薬タンクシミュレータを製造した、シカゴの Sciaky Inc. 社と共同作業を行った。ロッキード・マーチン社は、このタンクを想定最大使用圧力にて 50 の異なった条件でまずテストし、次に想定最大圧力の 25%増しのレベルでさらに 12 回負荷した。最後に、タンクが破裂するまで負荷する破壊試験を行ったが、破壊圧力は想定最大圧力の 2 倍以上であった。「顧客はこのデータを喜んで見てくれて、製品を信頼してくれるようになるでしょう」とガードナーは言う。



Space-Based Infrared System 衛星のインテグレーション作業中のロッキード・マーチン社エンジニア。
近い将来、3-D プリントとロボットにより衛星組立に要する時間と人員が大幅減の見込み（ロッキード・マーチン社提供）

時間、コスト、重量の節約

衛星の顧客は、積層造形法が約束する種々の節減効果について、熱心に知りたがっている。一般に、この方法は金属部品の製造コストを半分に下げ、製作時間を 80% 下げる、とガードナーは語る。

多くの場合、メーカーは積層造形法によって、いくつかの別の部品を単一ユニットに結合させる複雑な設計を、プリントして作ることができる。部品の総数を減らすことは、そのままコスト、スケジュール、重量の削減につながる。「部品数が少なければ、材料も、組み立て工数も、コンポーネント総数もすべて少なくなります」とガードナーは言う。「各コンポーネントごとに、この見地からの技術判断、試験、および検査が必要なのです」

過去 10 年の間、衛星メーカーは 3-D プリント製の部品を地上機器用に用いてきた。SS/L 社では、プラスチック高分子材料を、衛星コンポーネントを所定の位置に固定し締結する治具や、組み立て中のコンポーネントを保持するためのスタンドなど、作業者が種々の作業に使う複雑な治具類の成形に使っている。最終部品の入着を待たなくとも、作業者は仮の結合用部品を使って、ハーネスのレイアウトを決めたり、その他の組み立て作業ができるようになった。

3-D プリントが出現する以前には、メーカーでは同様のタイプの専用治具類を、アルミ合金の機械加工で作っていた。これには数か月かかることも多かったが、積層造形法ならば設計に 1 週間、プリントに数日ですんでしまう。

「衛星製造治具への応用では、積層造形法が“かくれた英雄”なのです」と、エディングーは言う。「コストとスケジュールの節減だけでなく、我々は従来よりずっと複雑な衛星を作れるようになったのですから」

一例として SS/L 社の Ka バンドデータ衛星は、地上の小型アンテナへの送信用に高出力のビームを持ち、数千の部品から構成される RF ペイロードを搭載している。これほど複雑なペイロードは、3-D プリンティングなどの最新製造技術なしには実現しなかつただろう、とエディングーは述べる。昨年 SS/L 社はさらに、搭載モータや光学レンズ保護用の熱シールドおよび軽量ブラケットの製造に、3-D プリンタを使用し始めた。「我々は、過去にアルミの機械加工やファイバグラスで作っていた複雑な部品を、ずっと早く、安く作ることができます」と、エディングーは言う。



Stratays Direct 社の 3-D プリンタは、熱可塑性樹脂 ULTEM9085 (はじめ多種の材料で製品を作ることができる。Formosat-7 衛星のアンテナ保持機構はこの設備で作られた。(Stratays 社提供)

技術者は、新部品について耐力の決定など所要の特性を決めるには、ソフトウェアによればよい。そして、コンパクトで軽量の形状で所要の力に耐えるよう、コンポーネントを設計するわけである。

今やプリント部品は、部品製造工場から衛星製造メーカーに移りはじめ、供給業者は用途や複雑さが急速に拡大していくだろうと予想する。

「我々自身が、今からほんの5年から2年前には、今後どうなっていくのか見当もつかなかったのです」と、3-D プリントと製造システムを作るミネアポリスの Stratasys Direct Manufacturing 社の航空宇宙・防衛部門・戦略計画マネジャーのジョエル・スミスは回想する。

2012年3月に Stratasys Direct 社は、米国・台湾共同にて天気予報精度改善のため、小型衛星クラス搭載の GPS 電波掩蔽システムを用いた衛星プロジェクト向けの、アンテナ保持機構 30 個の製造計画を NASA JPL と共同にて開始した。GPS 電波掩蔽システムは、GPS 信号が大気を通過する割合を測定することにより、温度と水蒸気量を計測しようとするものである。台湾の Formosat-7 衛星のクラスは、2016年に6個、2018年に6個打ち上げの予定だが、米国担当の COSMIC-2 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate-2 の略称) 機器を搭載する予定である。この衛星は、「衛星の外側に初めて積層造形部品を搭載したもの」と、Stratasys Direct 社の副社長ジム・バーテルは言う。

Stratasys Direct 社は、金属と同等の強度を持ちながら軽量の ULTEM9085 という高強度の熱可塑性樹脂を使って、2基のフェーズドアレイ・アンテナを 12 機の衛星それぞれに搭載するための、取付機構を製作している。この材料は商用航空機にも使われ、FAA の耐焰、耐煙、耐酸の要求に適合した。NASA はこの 3-D プリント部品を紫外線放射シールド用塗料で塗装する計画である。

このミッションは技術的に大胆なものだが、大きな見返りがありそうだ、とバーテルは言う。「もし衛星の外殻に搭載しても大丈夫な部品を作ることができれば、他のどの位置にでも搭載できますから」 ◆