

宇宙でアンテナをつくる

—大きな構造物を実現する技術の研究開発—

東海大学 工学部 航空宇宙学科 航空宇宙学専攻 角田博明

第1部 アンテナの大形化と鏡面精度

通信のみならず電波天文や観測のために使われる搭載アンテナは、周波数が低いと波長が大きくなり構造寸法が大きくなる。宇宙に運ぶためには折り畳み式にすることが多く、構造物としての設計の重要性が増してくる。

アンテナの代表的な性能である利得は、大形の反射鏡と組み合わせる（反射鏡アンテナ）ことで、容易に向上させることができる。しかし、それは電氣的な観点からで、宇宙で使う反射鏡を構造物として大形化するというのは容易なことではない。したがって、理想的なアンテナを宇宙で実現するには、電氣的な観点と構造的な視点の両面からのアプローチが重要となる。本稿では、人工衛星や宇宙機に搭載するアンテナを対象に、これまでに研究開発されてきた搭載アンテナに関連する構造技術を中心に考察する。

移動体を対象とした静止衛星で使われているLバンド（0.39～1.55 GHz）やSバンド（1.55～3.9 GHz）の周波数では、搭載アンテナ用に5 m～10数メートルのメッシュ反射鏡が使われている。それよりも周波数が大きなKuバンド（10.9～18 GHz）では、2～3.5 m程度の複合材料やハニカムサンドイッチパネルなどの軽構造材料で作った反射鏡が数多く開発されている。これはちょうど、ロケットのフェアリングに収納しやすいサイズでもあり、放送衛星での需要も相俟って広く普及した。これより高い周波数、例えばKaバンド（18～36 GHz）用のアンテナでも、同様な軽構造材料を使った反射鏡が実用化されている。一方、電波天文衛星に搭載する観測用のアンテナでは、弱い電波を多く集める必要があるため、利得の増大を目指したより大きな反射鏡が必要になる。

より大きな反射鏡にする必要がある、と言っても周波数により反射鏡に求められる鏡面精度は異なる。アンテナの用途により決まる電氣性能から、反射鏡の構造物としての精度要求が示される。例えば、サービスエリアを複数のビームでカバーする通信衛星では、あるビームの利得のほかに周囲への電波の漏れのレベルが規定されたり、放送衛星では地形に合わせたビーム形状の実現などが重要になる。通信衛星では衛星での受信と送信で近い周波数を使うことが多いので、電氣的な干渉を避けることも必要になる。それに対して、電波天文衛星では、前述した大形化に加えて周波数に応じた精度の確保という相反する条件が課せられる。

第2部 三つの世代のアンテナ様式

第1世代（1980年代～）ヒンジを使った跳ね上げや伸展マストを使った反射鏡の展開

大形化と鏡面精度の確保という相反する条件を共に満足させることは難しいけれども、そのハードルを越えないと宇宙で使えるアンテナを手にはできない。そこで、電気と構造の協調設計という視点でこれまでの衛星搭載用のアンテナの研究開発を振り返ってみたい。

電気と構造が比較的協調して設計しやすかったのが、KuバンドやKaバンドの通信衛星用のアンテナである。もちろん、熱構造設計技術、指向方向制御技術、複合材料技術、軽量化技術などがあって実現できたのであるが、電気性能を満たすために、様々な要因ごとに誤差を配分し設計上の約束ごとを決めて、それを元に電気と構造が協調して設計を進めてきた。それで成り立ったのが、第1世代のアンテナであり、この延長線上に跳ね上げ式の反射鏡があり、最も数多く作られた衛星搭載用の反射鏡でもある。日本でも技術試験衛星で、開口径約3.5 mの反射鏡を三分割し、全体の跳ね上げ展開に加えて鏡面の両サイドの展開（ウィング展開）も行なって、ロケットの衛星収納スペースに収めることに成功している。

電波天文衛星用に開発された開口径約8 mの反射鏡では、放射状に伸びる6本の伸展マストでケーブルを介して柔らかな金属メッシュで作られた反射鏡を広げるように展開していた。この伸展マストは、展開完了時にメッシュを支持しているケーブルに十分な張力を与えて鏡面の形状と精度が達成できるように設計されており、性能を満足させるための電気設計と展開構造の工夫が奏効して観測ミッションの達成に導いていた。

この第1世代では、展開構造や伸展構造も比較的シンプルであり、様々な技術上の工夫はあったものの電気性能への影響を評価しつつ、電気と構造が協調して設計されていたと考えられる。

第2世代（1990年代～）多数のヒンジを有する折り畳み構造で支持された反射鏡の展開

反射鏡の一層の大形化の流れの中で、金属メッシュを使った鏡面と折り畳み式の支持構造を組み合わせたメッシュ反射鏡が開発された。日本ではSバンドの技術試験衛星用として開口径約18 mのものが、米国ではLバンドの商用通信衛星用として開口径約12 mで2つの形式の反射鏡が開発された。この米国のメッシュ反射鏡の起源は1974年代頃まで遡り、試験用の通信衛星で使われたり、木星探査機に搭載されたりしていた。

日本の技術試験衛星では、日本列島を複数のビームでカバーし、一部で同一の周波数を使用するため、メッシュ鏡面には波長の約1/50である平均二乗誤差2.4 mmの精度が必要となった。この技術試験衛星ではまた、ビームの方向を電氣的に制御できるフェーズドアレーアンテナを給電部に採用していた。このため、給電部を反射鏡の焦点位置からやや反射鏡よりも設置する離焦点給電反射鏡アンテナとなっている。直接放射型フェーズドアレーアンテナほど広範囲にビームを振ることはできないが、対象エリア内でのビームの制御性を高めることができる。米国で開発さ

れたアンテナが固定ビームだったのに対して、給電部に制御機能を持たせることで、電気と構造の協調設計が図られていた。

第3世代（2000年代～）宇宙で仕上げて「つくる」という概念を取り入れた反射鏡

通信衛星に搭載する機器は、周波数とサービス形態、開発コストなどを総合的に勘案したものが使われるようになっていく。衛星の寿命に伴う置き換え需要も定常的にあるので、これまでに開発されたアンテナを、いわゆる”枯れた技術”として使うことはコスト削減の効果がある。一方、電波天文衛星に搭載されるアンテナは、観測周波数の上昇と利得の一層の向上から、より大きな反射鏡が必要になる。このような反射鏡には、大形化しながらも低コストに、また軽量化にもつながら技術が求められる。

用途が限られた技術に比べると、汎用技術は低コスト化への効果が大きい。そういう流れから1990年代頃に米国を中心に軽量化に有利な膜構造やインフレータブル構造技術の研究開発が数多く行われた。膜材料で作った袋状の構造物を気体の圧力で膨らませて展開させたり、その構造物で膜構造を張架支持したり、薄くて軽い膜材自体を宇宙で硬化させて耐久性を持たせるといった要素技術が研究された。これらは見方を変えると、地球上で設備を使って成形していた複合材を、宇宙で成形して完成させるということもできる。宇宙への輸送前に地球上でできる試験評価は限られたものにならざるを得ず、宇宙で展開させた後で最低限の調整と検査をして完成品を手にすることになる。

第3部 宇宙でアンテナをつくるには？

広い意味でアンテナや反射鏡に結びつく技術を振り返ってみると、例えば衛星通信が実用化される前の1960年頃に、米国でバルーン衛星を使って高度約1610kmでテレビの電波を反射させて中継するという実験が行われた。また、1996年にはやはり米国において、宇宙空間で約12 mのインフレータブル式パラボラ反射鏡の展開実験が行われた。展開途中でトラブルが発生したとはいえ、歴史に残る実験として記憶されている。日本でも2012年に、インフレータブル式アクチュエータを使った伸展マストの宇宙実験や膜材の硬化実験が、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」で行われた。パラボラ反射鏡に比べて折り畳みも展開もしやすい平面膜構造を使ったアンテナは、合成開口レーダー（SAR）などでは一般的な技術であり、電氣的な制御を前提に構造設計への要求条件を設定することができる。膜構造やインフレータブル構造については数多くの要素技術の研究開発が行われており、それぞれ異なる技術や規模ではあるが、「宇宙でアンテナを創る」ということに収斂していく途上の試みとして捉えることができる。

関連する自著の書籍・文献の紹介

- ・未来を拓く宇宙展開構造物－伸ばす、広げる、膨らませる－、コロナ社、新コロナシリーズ61、2015年7月。
 - ・宇宙インフレータブル構造技術－アンテナや反射鏡における調和のとれた設計への期待、－月や惑星へ活躍のフィールドをもとめて－（特集 超軽量宇宙展開構造物第3回、第4回）、日本航空宇宙学会誌、第65巻第1号、第2号、2017。
 - ・東海大学「航空宇宙学への招待」編集委員会編、航空宇宙学への招待、東海大学出版部、（分担執筆）2018年2月。
- 第9章 宇宙へのアクセスが切り開いた新たな世界 9.8 静止衛星による電波の中継 ほか