

「名もない」展開型宇宙アンテナの進化

慶應義塾大学

三次 仁

はじめに

宇宙に大きなアンテナがあると便利なんだ、という話を知ったのは、私がまだ学生だった 1980 年代です。ちょうど 30 年前の 1982 年に NASA が開催した Large Space Antenna Technology という会議 (NASA CP-2269) の講演集に、大口径宇宙アンテナを利用した移動通信システム、衛星音声放送、Space VLBI など様々なアプリケーションが掲載されていて、図書館でわくわくしながら読んだ記憶があります。当時は米国でも、たかだか地上モデルでしかなかった大口径宇宙アンテナが、30 年経った今、きく 8 号など実機として軌道上にあることは、スゴイ技術革新だったといえます。この技術開発に関われたことを誇りに思います。今回、Space Japan Review に寄稿する機会を得たので、私が見て、経験してきた展開型宇宙アンテナの進化について少し語ろうと思います。

展開型アンテナ黎明期

私は 1987 年に NTT に入社し、かなりのわがままを貫いて研究所 (以下、通研) の衛星通信研究部で研究を始めました。そこで取り組んだテーマが学生の時に図書館で見っていた大口径アンテナ搭載の通信衛星システムでした。その時、すでに宇宙科学研究所 (ISAS)、日本飛行機、NTT で共同開発した 6 本の展開マストとケーブルネットワークを用いた展開型反射鏡のコンセプトモデルができており (図 1)、それを評価することから始めました。

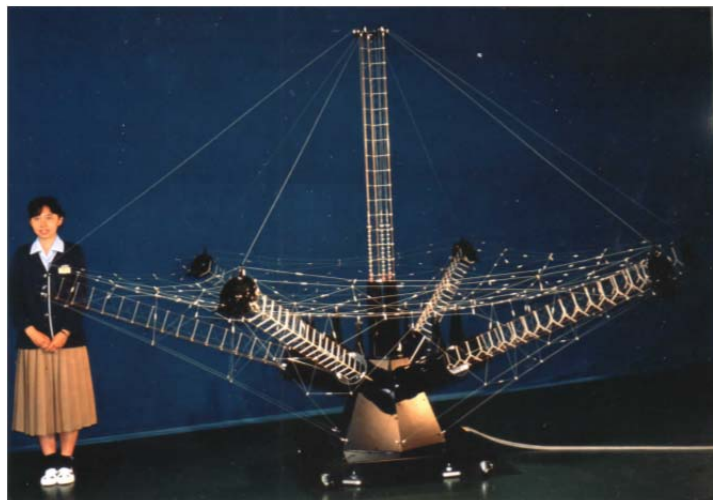


図 1 初期の展開アンテナモデル

展開マストによって提供される空間的な固定点間にケーブルネットワークを用いて3次元のアンテナ鏡面を作り出していくため、ケーブルネットワークは力のバランスを保ちつつ、所望の形状を作り出すことが必要です。従来の構造物設計は形状ありきで力のバランスを考えますから用いることができません。そこでケーブルネットワークの解析方法を開発し、ケーブルの長さ、剛性、つなぎ方がどのように鏡面形状に影響を与えるか、Fortran で自作したプログラムをメインフレームコンピュータで動かして計算していました。その結果、ケーブルネットワークが複雑になると長さなどの誤差により鏡面精度が劣化してしまうこと、力のバランスと形状を同時に満足するためには、静定条件以上にケーブル数を増やすことが必要なこと、ケーブルが緩むと急速に鏡面精度が劣化するので、ケーブルが緩まないようにケーブルを伸ばして使うこと、などがわかってきました。またマスト構造では大型化することは座屈荷重のために不利であることや、地上確認試験や開発を考えると、複数の独立したモジュールを組み合わせで反射鏡を構成することが良いのではないかと考えるようになりました。

これらの結果を踏まえて通研で、宇宙構造研究計画という新しいプロジェクトを 1989 年に立ち上げ、1990 年の IAF で基本構想を発表しました。目標は国内を 10 ビーム(ビーム径 200km)でカバーする S バンド移動衛星通信システムとしました。このためには開口径 10m 反射鏡を鏡面精度 1mm 以下で構成する必要があります。H2 や Arian3 への搭載性や鏡面精度要求から直径 5m 程度のモジュールを 7 つ組み合わせることになりました。その時、書いた衛星のイメージが(図2)です。副反射鏡があったり、反射鏡が衛星構体の側面に取り付けられたりと今、考えるとおかしなところもありますが、送受アンテナ分離、F/Dの確保、クスタ給電と入社 2.3 年目にしてはよく書けていると思います。

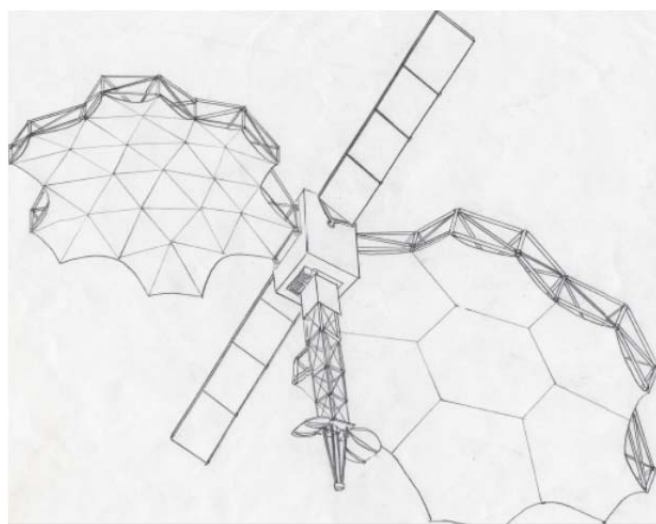


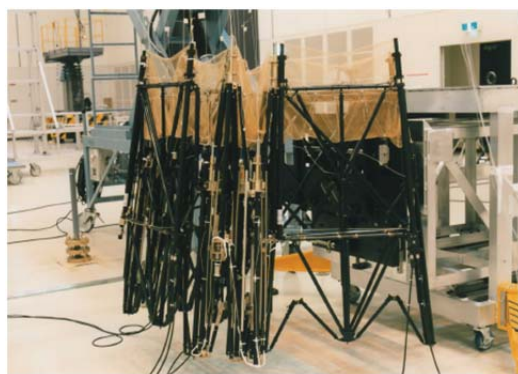
図 2 宇宙構造研究計画のために書いた通信衛星イメージ

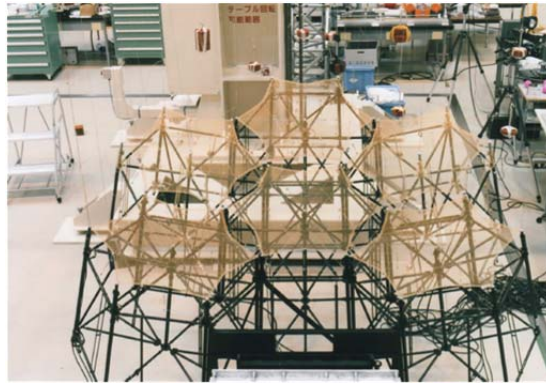
当時、大口径アンテナの研究開発は、Harris (Hoop Column, ラジアルリブ) や Lockheed (Wrap-rib) や宇宙通信基礎技術研究所 SCR (モジュール化フープフレーム, テトラリブ)で行わ

れていました。括弧内は各研究機関の構造形式の名称です。その多くはケーブルとメッシュ鏡面の張力材で反射鏡を構成し、展開可能な構造物で支持する形式でした。展開可能な構造物としてはフープやトラス構造など多くの構造形式が提案されていましたが、試作品でちゃんと地上試験展開できるのは傘構造やマスト構造に限定されていました。また地上試験でうまく展開できたとして、それが軌道上性能の何を検証したことになるのか、その道理を説明できる技術はありませんでした。傘構造やマスト構造では鏡面が大きくなった時のスケーラビリティがないことや、モジュール化が難しいと考えて、我々は展開トラス構造を選択しました。ESA ではガスで膨張させて展開するインフレイタブル反射鏡の研究開発を進めていました。インフレイタブル反射鏡は重量や収容体積を大幅に改善する可能性があったものの、地上でどうやって特性を確認するのかが潜在的に不安で、我々は検討対象外にしていました。実際は、どのようにアプローチすればよいのか分からなかった、というのが正直なところでした。

このように何をどう使ってシステムを構築するのか、つまり“方式”に関する判断は定量的な判断が難しく、特にミッションが特定されていない状況では研究者のセンスに依存すると言ってよいでしょう。モジュール構成は技術の汎用性という意味ではおそらくよかったのですが、プロダクトデザインとして、特定のミッションに対する最適性能という点では弱点にもなり得ると思います。

展開トラスはいろいろと試作した結果、1994年にメッシュ鏡面と結合して展開できる方式を作りました(図3)。この反射鏡は傘のように二次元的に展開収納するモジュールと、一次的に展開収納するモジュールの組み合わせで構成されており、衛星構体の側面に取り付けて打ち上げ時の固縛剛性を高めることができます。反射鏡の構造形式としてはよく考えてあったのですが、マルチビーム給電部を衛星構体に入れないと、給電・廃熱ができないこと、副反射鏡方式は損失が大きいためこれ以降は展開アームを使って反射鏡を構体から離す形式を採用することにしました。





三次元曲面を構成する展開トラスは部材数が数千本にもなり、冗長拘束を含むため弾性変形を伴わずに展開・収納の機構的な動きをさせることはできません。当時数百本ですら機構解析に弾性変形を含められる市販解析法はなかったので、弾性変形と機構運動を同時に扱うことができる数値解析法およびプログラム SPADE の開発をプロトタイプを試作と並行して進めていました。こうした設計・評価ツールは Muses-B (Halca), きく 8 号 (JAXA) の開発にも用いられ、我が国の宇宙開発にも貢献できたと思います。移動衛星通信サービスのビジネス規模を考えると我が国の宇宙開発への貢献が多少なりともあり、そして研究開発チームがやりたい、と言いつけたからこそ、NTT 内での研究開発が認められていたということが本当の姿だったのでしょう。

AstroMesh と STS-77 IAE の衝撃

解析方法の研究や、当時広がり始めていた Unix ワークステーションを用いたプログラム開発、そして MU300 を用いた無重力展開試験などの要素技術開発が順調に進んでいた 1995 年、当時衛星通信部長であった故・鮫島秀一博士に突然呼び出されて、見せられたのが Astromesh (図 3) の写真でした。そこには、確か直径 6m 程度の反射鏡プロトタイプが、何事もないように天井から吊されて鏡面測定されている実験でした。これは驚きでした。当時の通研の技術では、大型反射鏡を天井から吊るすことなど不可能です。展開動作はおろか、まず自重によって壊れてしまいます。「10m アンテナプロトタイプをすぐ作れ」、鮫島部長の指示により我々は 1996, 1997 年の研究計画を根本から見直して、世界トップスペックのハードウェアを試作することを目標にし、大口径反射鏡に加えてマルチビーム給電部の開発も並行して進めることにしました。

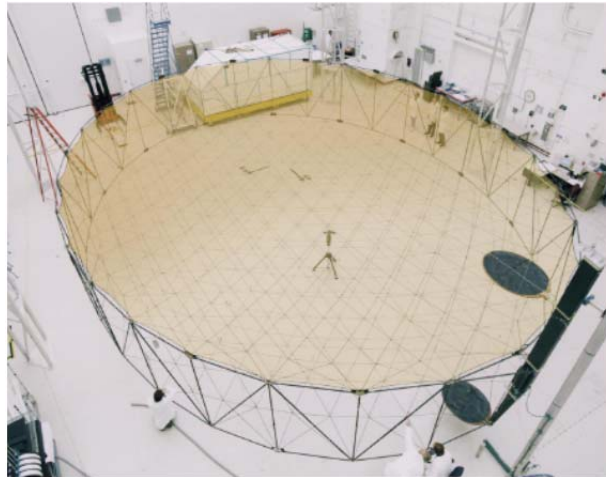


図 3 Mark W Thomson, “The Astromesh Deployable Reflector”, IMSC 99 より引用

もう一つ衝撃だったのは 1996 年に NASA が STS-77 で行った IAE (Inflatable Antenna Experiment)です。SPARTAN 衛星から 14m 直径のインフレータブル反射鏡を展開したのです (図 4)。

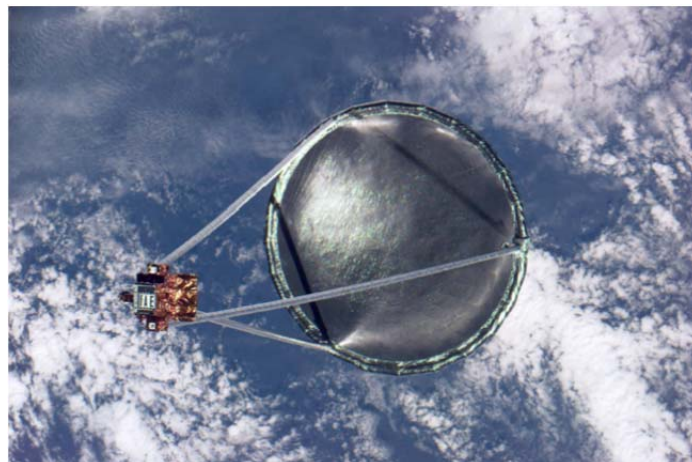


図 4 NASA Goddard Space Flight Center, Spartan 207/Inflatable Antenna Experiment Preliminary Mission Report, Feb, (1997)より引用

驚いたのは NASA がインフレータブル反射鏡を宇宙実証するまで検討していたことです。詳細なレポートを見ると、展開挙動がガス漏れによって予想とは異なり、また肝心の反射鏡部分も所定の鏡面精度を達成することができなかったようです。インフレータブル反射鏡がモノになるのであれば構造形式を根本的に見直すことになるため、真相がわかるにつれ安心したことは否めません。ライバルの失敗を喜んでいいようではいけないのですが…

7 モジュール試作

衛星搭載反射鏡のハードウェアスペックで最も重要なのは重量です。モジュール構造を結

合すると構造強度が高くなることを利用して、一つのモジュールをできる限り簡単、軽量にすることを追求した結果、立体的な傘構造を組み合わせることで球面を構成する方法を考案しました。前述の設計解析ツールを用いて、設計・シミュレーションを繰り返し、機構仕様を決めていきました。傘のように芯棒に取り付けたバネ力で展開する方式で検討していたのですが、これだけだと、どうしても収納状態からの展開力を生み出すことができません。そこで傘機構の根本に回転バネを取り付けて収納状態から展開状態まで十分な展開力が発生できるように工夫しました。また、4角リンクを利用した展開トラス上にケーブルネットワークを設置すると、ケーブルネットワークの構成によっては収納できない場合があります。これを避けるために取り付け部が伸縮する方式を考案しました。こうした工夫はすべて数値モデルを使ってシミュレーションで明らかにしました(図 5)。

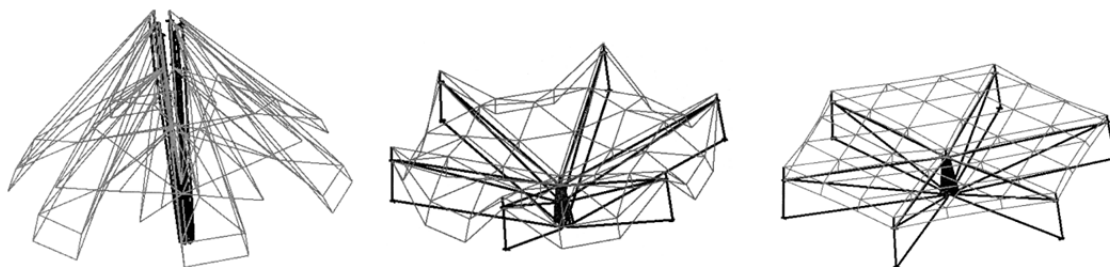


図 5 185 本の弾性梁と 150 本ケーブルを用いた展開シミュレーション

1997 年 12 月には対角 4.8m のモジュールを 3 つ結合した試験(図 6)、1998 年 8 月にはさらに 4 つ加えて 7 モジュール(直径 13m(開口径 10m), 重量 140kg)の展開試験を成功させました(図 7)。実験場所は通研の衛星研究棟のクリーンルームで天井高が 20m 程度あります。ちょっと写真でわかりにくいのですが、天井裏に特殊なつり下げ装置を設置し、つり下げケーブルで反射鏡を浮かせた状態で展開を行っています。

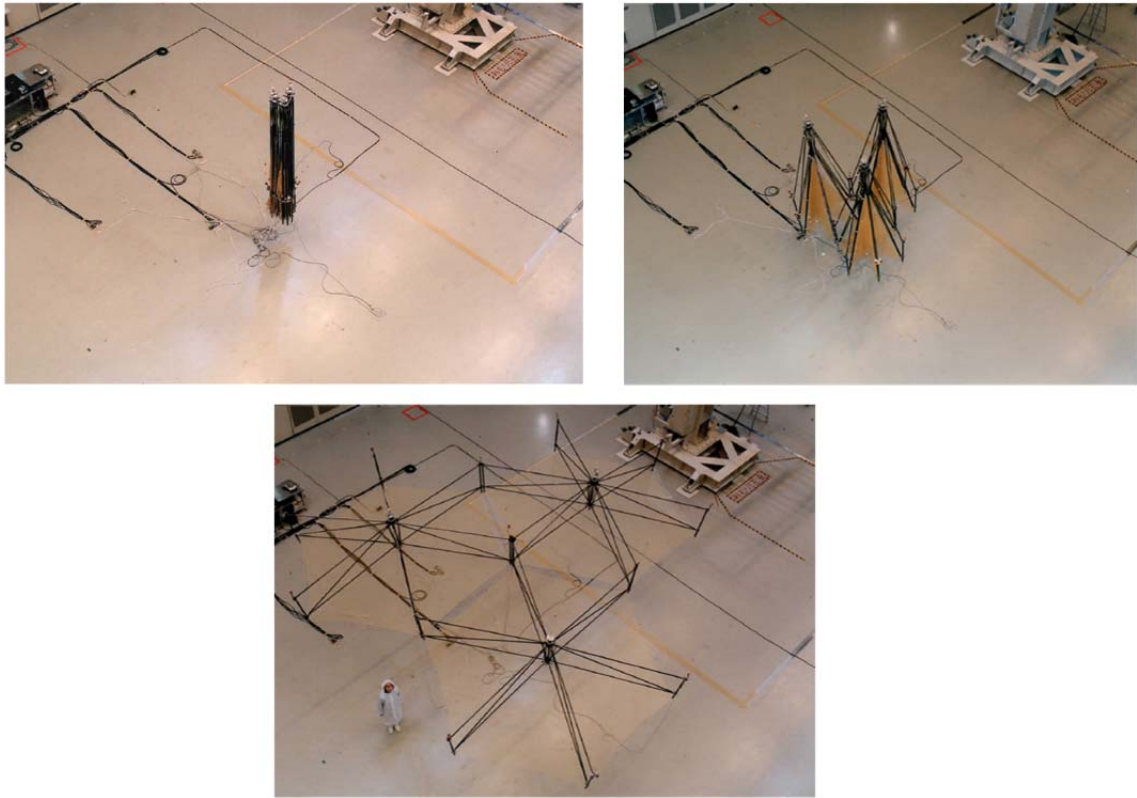


図 6 3 モジュール展開試験(1997 年 12 月)

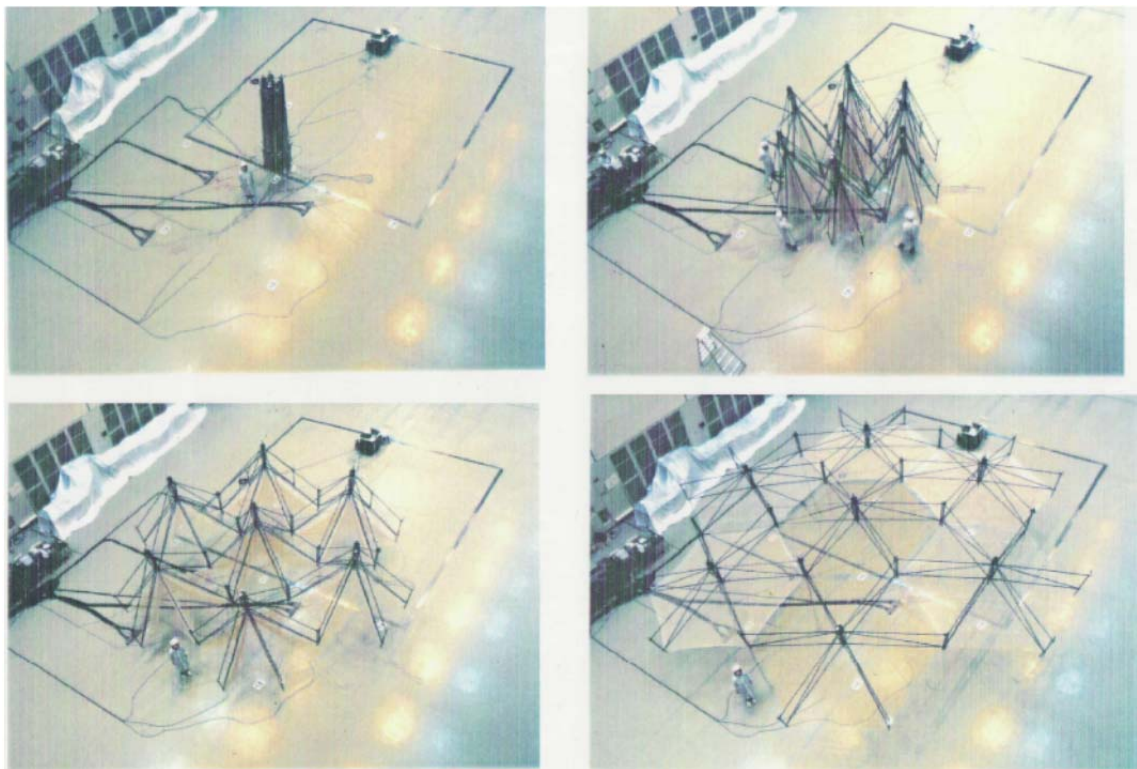


図 7 7 モジュール展開試験(1998 年 8 月)

この反射鏡は、展開状態を初期に設計し、機構解析でちゃんと展開状態から収納できるのかを詳細に設計していました。つり下げ装置の影響も含めてシミュレーションを行い、マージンは十分にあることを確認していたのですが、展開状態から収納させていく段階で、部材が破壊するのではないかと、とてもひやひやしたことを覚えています。

展開型宇宙アンテナを作るために

30年前にはできなかった展開型アンテナが我が国で製造できるようになった理由は、構造形式を絞りこんで、性能・機能や製造法、試験法を継続的に改善してきたから、と私は思います。先にも述べたように構造形式(コンセプト)を並べてどちらがよいか○×を客観的につけることは大変困難です。私も1989年につくった社内レポートで以下のように展開構造を評価して展開トラスを選択していますが、全く、我田引水だったと今は思います。

	軽量	収納効率	剛性	構造精度	モジュール化
展開トラス	○	○	○	○	○
フープカラム	○	○	△	△	×
展開リブ	○	○	△	△	×
テングニティ	○	○	△	△	○

よっぽどの誤解に基づく構造形式は別にして、構造形式の限界性能は詳細設計しないと分かりませんし、詳細設計には試作を含めて膨大な開発期間とコストがかかります。上の表でテングニティを構造精度や剛性の面から削除していますが、その延長線上にはAstromeshのように構造材と鏡面を同時に作る優れた形式があったのです。展開型宇宙アンテナのように開発期間もコストもかかるが、宇宙科学、資源探査、通信衛星など様々な宇宙プロジェクトでキーとなるプロダクトは国家的にリソースを集中してしっかりと国際競争力をつけるまで育てる必要があります。我が国の展開型宇宙アンテナは、打ち上げ実績もあり世界をリードする性能まで育てているのですから、新しい方式によそ見をすることなく今後も是非、継続して研究開発を続けて頂きたいと思います。

あまり注目されることはありませんが、各種の数学モデルを作るソフトウェアも大きな貢献をしたと思っています。O OCD(Object Oriented Coordinate Designer)と呼ばれる、衛星搭載アンテナ統合設計システムです。衛星搭載アンテナは、打ち上げ時等の構造強度に加え、軌道上での熱環境、電気性能などを評価する必要があります。従来、これらの設計解析ツールはばらばらに存在するため、構造モデル、電気モデルなどが別々に維持管理されていました。O OCD では部材やサブコンポーネント、それぞれをオブジェクトと見なして、そのオブジェクトに各種解析ツール毎のモデル作成メソッドを組み込みました。これにより O OCD のモデル一つで、各種の計算モデルを維持・管理できます。従来、機械モデルと電気モデルを開発途中

で同期させることは大変困難でしたが、OOC方式ではそれを簡単に実現できます。やった事のない人には数学モデルを作ることのどこが大変なのかイメージがわからないかもしれませんが、展開アンテナの部材数は数百本から数千本で、それが展開した状態で所望の形状になるようにそれぞれの部材の長さや角度を決めねばなりません。コンピュータによる設計(CAD)がなければ設計することは不可能です。OOCは設計者を利用ターゲットにしており、設計の柔軟性を高めるためC++でモデルを記述する必要があるため、我々のプロジェクトの中でも使いこなすことができる研究者はあまり増えませんでした。しかし1996年頃に衛星設計におけるオブジェクト指向プログラミングの有効性を主張したことは先見の明と言えるでしょうし、OOCが無ければ、頻繁な設計変更を各種解析につなげることもできなかったと思います。

アライアンスの模索

1995年にはNASDAでETS-8計画が立ち上がり、SCRを継承したASCの提案するヘキサリンク方式での第一次試作が進行していました。国の施策と、通研の方向性を整合させないと、製造メーカに不要な消耗戦を強いることとなります。NASDA、ASC、通研は継続的な人事交流をしていたので、長期的なビジョン共有を行うこともできました。結果、ETS-8の反射鏡は我々の試作品の延長として開発されるようになりました。研究マネジメントがうまく機能していたと思います。個別技術では、結果的にはうまくいきませんでした。1996年にAstro Researchと通研で共同研究スキームを作ろうと画策したこともあります。解析ツールに関しては、技術的には競合となる海外の解析ソフト会社に共同開発を持ちかけたこともあります。通研としては市場から所望の性能の装置やソフトウェアを調達でき、そこに開発した技術が活かされればよかったです。相手からすると競合からの共同開発提案ということで戸惑わせたようです。こうした交渉は研究者が提供技術の販路もカタログも価格もなく行っていたので、やや無茶だったことは否めません。

おわりに

私は通研の先輩研究者に”技術に名前をつけるな”と言われました。名前をつけるとその技術は通研に属するようになって、製造メーカや他の研究機関で使いにくくなるからだ、ということでした。私達の進めていた展開型宇宙アンテナ技術を、ただの構造機能であるモジュール型とだけ称していたのはこのためです。Muses-B やきく8号の実機に搭載され、基本技術はN-Starシリーズで実用衛星にも活かされ、現在も開発が進められているのは、「名もない」技術に徹していたからなのかもしれません。■