

宇宙で開く折り紙構造 ～膜面展開構造物の活用～

東京科学大学（旧・東京工業大学） 工学院機械系 教授 坂本 啓

■はじめに

宇宙軌道上の構造物はほぼ0G環境下であり、特に無人の宇宙システムにおいては構造に作用する荷重は極めて微小であるため、宇宙構造物は地球上のものと異なる発想に基づき構築されてきた¹⁾。中でも膜やケーブルといった張力を受け持つ構造要素からなる宇宙構造物が特徴的である。太陽電池アレーや平面アンテナなど、面積が大きいほど性能が向上する構造物が求められる一方で、現状の宇宙開発においては、構造はロケット先端部の限られた容積内に一度収納することが求められる。膜などの張力部材は梁、板、トラスなどの曲げを受け持つ構造要素よりも薄く、軽く、さらに密に畳み得るため、近い将来の多様な宇宙ミッションで活用が検討されている。

膜などの張力部材は圧縮力をほとんど受け持たないため、軌道上での展開後に張力を導入し幾何剛性により構造を安定化させる。この張力導入の方法は大まかに3通りに分類できる。第1は張力に対応する圧縮部材を有する構造物で、本稿ではこの例をOrigamiSatにより示す。第2は圧縮部材は持たないが自分でそれに対応する構造物で、例えばスピンによる遠心力や、気体の封入による内圧を利用する。圧縮部材の代わりに、スピンさせるホイール、スラスタや、気体発生装置を持つ。スピン展開型の代表例として、2010年打上げの小型ソーラー電力セイル実証機IKAROS²⁾がある。第3は、太陽輻射圧や重力傾斜トルクなど宇宙での微小外力を用いて数十km級の巨大構造を実現させるもので、太陽発電衛星等の将来システムが構想されている。本稿では第1および第2の種類の膜面構造物の宇宙実証例を共有しながら、宇宙膜面構造物の特徴と課題を説明し、将来の展望を述べる。

■宇宙実証を通じた技術開発

宇宙膜面展開構造物を地上で試作した例は数多いが、実際に宇宙で実証した例はまだ少ない。2010年に打ち上げられた300kgの小型衛星IKAROSは、14m×14mの正方形膜の展開に成功した²⁾。スラスタを用いて衛星全体をスピンさせ、遠心力により膜を展開し展張形状を維持する。膜に作用する太陽輻射圧によって衛星を加速させ、世界初のソーラーセイルとなった。IKAROSの開発においては、地上では実スケールで展開実験を行うことが大気および重力の影響で現実的ではないことから、複数の数値構造解析手法を組み合わせた設計検討が行われた³⁾。軌道上の荷重環境にあっては厚さ7.5μmのポリイミド膜の曲げ剛性が無視できず、平面度が想定より低くなるなど、多くの新しい知見が打ち上げ後に得られた。

IKAROSでの開発過程で顕在化した複数の課題の解決を目指し、著者の研究グループは、図1に示す4kg衛星（3Uキューブサットと呼ばれる規格、10cm×10cm×34cm）OrigamiSat-1を開発した。図1

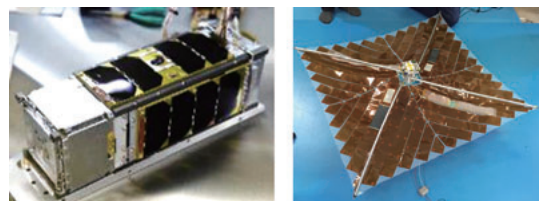


図1 3UキューブサットOrigamiSat-1の衛星全体（左）と搭載された多機能展開膜（右）

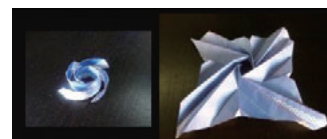


図2 OrigamiSat展開膜に活用している折り紙パターン

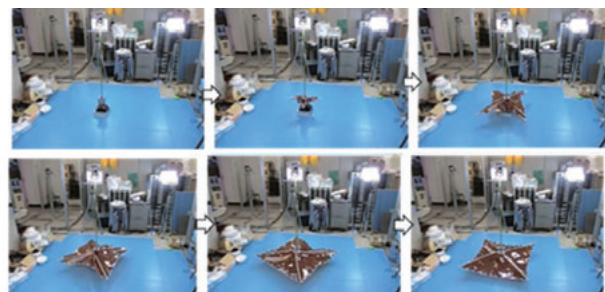


図3 OrigamiSat-1の地上展開実験(2017年4月東工大 古谷研究室にて実施)⁴⁾

右図に示す、1m×1mの「多機能展開膜」は打ち上げ時には衛星内10cm×10cm×8cmの容積に折り畳まれている。薄膜太陽電池を模擬したダミーデバイスをびっしり膜上に敷き詰めても、低容積に折り畳める折り紙パターンを採用した。図2に折り紙で模擬して示す。図3に示す通り、地上での展開実験により設計・製造を検証した。地上ではこの膜構造は自重を支えられないほど柔軟であるため、対角に配置した圧縮部材の先端を天井から釣り糸で懸架して実験を行った⁴⁾。OrigamiSat-1は2019年に打ち上げられたが、衛星の電源・通信の不具合により部分的なミッションのみの実施に留まった。それでも後述の通り、実機開発の過程で多様な知見が得られた。

■宇宙膜面展開構造物のライフサイクル

構造物は通常、使用時の形状と剛性・強度を主たる要求として設計するのに対し、宇宙展開構造物はもっと長期間にわたるシステムとしての「ライフサイクル」を考慮した設計が重要となる特徴がある。図4に一般的な宇宙展開構造物である展開式太陽電池パネルを一例としライフサイクルを図示する。このライフサイクルにおいて、膜面展開構造物では特に2つの顕著な変化（トランスフォーメーション）があり、設計はより挑戦的なものとなる。

●膜面展開構造物の形態変化

図4の「打上げ」フェーズでは構造は密に折り畳まれた形状で、ロケットの打ち上げ振動・衝撃が作用する。10G程度の加速度、2000Hz

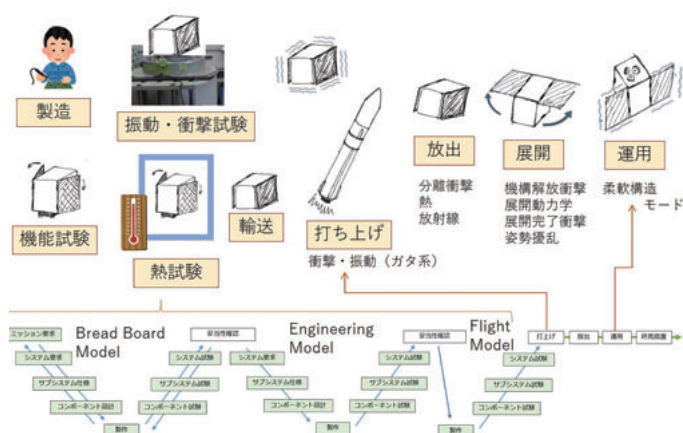


図4 宇宙展開構造物のシステムライフサイクル

以下の広帯域の振動励振に耐える剛な収納状態であることが求められる。一方で「展開」の際には、密に畳まれた状態から大面積の形態へ変容することが求められる。そして展開後「運用」時には、運用に支障のない剛性を維持することが求められる。OrigamiSat-1では上記の形態変容を実現するため、下記の3つの工夫を行った⁴⁾。(a) 図2に示す折り紙パターンを採用した。(b) 多機能展開膜は収納時に厚さが無視できず、ポリイミド膜だけで作成すると巻き付け収納時の内外の周長差により密に収納することができない。この事象はIKAROS開発過程で課題となった。OrigamiSat-1ではベース膜として平織物を使用し伸縮性を活用することで密な収納を実現した。(c) 膜の対角に配置した圧縮部材として、カーボン複合材円筒とスチール巻き尺2本を組み合わせた「ハイドブリッドブーム」を新たに開発した。これにより圧縮部材と膜を共に巻き付けて収納し、ねじりばね付きの蓋を四方に開放するだけで、ハイドブリッドブームに蓄えられた弾性エネルギーで構造全体を展開できた。

●開発過程での要求の変化

膜構造の形態が変化するのは、「打ち上げ」「展開」「運用」それぞれのフェーズで構造に求められる要求（特に容積、支えるべき荷重）が劇的に変化するからである。加えて、膜構造においては特に「打ち上げ」以前においても、厳しい要求が課せられる特徴がある。すなわち、地上で「製造」でき、各種の「試験」による検証ができること、である。宇宙展開構造の張力部材はわずかな力で変形する材料を用いながら寸法は大きく、地上での精度良い製造が困難である。展開の検証は図3のように重力補償を用いて試験するか、あるいはIKAROSのように数値解析を駆使するなど、創意工夫が求められる。

精度が良い製造が難しい課題を踏まえ、著者らは現在OrigamiSat-2を開発し、図5に示す膜面フレクトアレーアンテナの宇宙実証を目指している⁵⁾。この膜アンテナはある程度非平面であることを敢えて許容し、膜の面積化で利得劣化を補う。将来的には電氣的に構造の非平面さを打ち消す適応型膜アンテナを構想している。

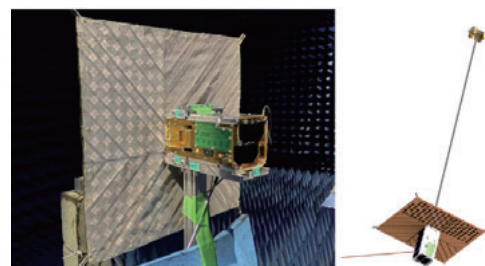


図5 5mmの間隙を持つ2層構造で膜面アンテナを実証するOrigamiSat-2

■課題と今後の展望：おわりに

膜面展開構造をさらに多機能化し、膜面上にフェーズドアレー無線機を搭載する構想⁶⁾も魅力的である。しかし膜をより多機能にすることで、これまで以上の要求が課せられる。例えば、これまではアルミ筐体内に保護されていた半導体部品が、宇宙空間に暴露された膜上に搭載されても機能すること。薄型的大型構造は熱容量が小さい一方、太陽からの熱の入射量は大きく、陰側の放熱量も大きくなるため温度が極端に上下してしまうが、それでも膜面上デバイスの温度が動作温度内に維持されること。システムズエンジニアリングの考え方に基づき、いま一度、宇宙構造物が担ってきた機能を丁寧に分解し、従来と異なる設計解を導く活動が重要となっている。

その新たな設計解の中には、軌道上ロボットによる構造物の自動組み立て、軌道上3Dプリンタ等による構造部材の宇宙での製造、という新しいアプローチが活用されてくるだろう。このような新たな設計は、小型衛星を用いて宇宙実証実験を反復し、構造物システムとしての成立性を確認しながら少しずつ改善を繰り返す手法でこそ開発され得るだろう。海から陸へ上がった生物が、世代を重ねて新たな形質を獲得していったように、宇宙実証の反復からこそ新たな宇宙システムが実現する。1957年のスプートニクからわずか67年、宇宙構造物の進化はまだ始まったばかりである。

参考文献

- 1) 名取, 「宇宙構造物工学の概要」, 土木学会論文集, No. 410, 1989.
- 2) Sawada, et al., Journal of Space Technology and Science, Vol. 27, No. 1, 2013.
- 3) Sakamoto, et al., Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 48, No. 5, 2011.
- 4) Ikeya, et al., Acta Astronautica, Vol. 173, 2020.
- 5) Nakayama, et al., Proc. of Small Satellite Conference, SSC23-WVIII-03, 2023.
- 6) Shirane, et al., Proc. of Small Satellite Conference, SSC21-WKIV-07, 2021.



さかもと・ひろく

大阪府出身。東京大学にて修士号（航空宇宙工学）、米国コロラド大学ボルダー校にて博士号（Ph.D., Aerospace Engineering Sciences）取得。小型衛星を用いて宇宙実証を行いながら宇宙構造物工学の研究に取り組む。認定NPO法人 大学宇宙工学コンソーシアム理事長。アメリカ航空宇宙学会アソシエイト・フェロー。日本機械学会、日本航空宇宙学会 正会員。