

天文観測衛星の高精度制御

橋本樹明

総合研究大学院大学教授宇宙科学専攻／宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部教授

天文観測衛星にとって重要なのは、観測天体の方向に高精度で指向させるかである。2006年に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」では、これまでにない高精度の姿勢制御技術が開発された。

観測センサーを指向させるには

人工衛星を用いて天体の観測を行うためには、観測センサーの視野方向を目標天体へ向ける必要がある。一般には望遠鏡などは衛星に固定されているので、衛星自体の向き（「姿勢」と呼ぶ）を宇宙空間の所望の方向へ向けることになる。現在の人工衛星は、搭載姿勢センサーによって自身の現在の姿勢を計測し、搭載計算機により目標とする姿勢とのずれを計算、姿勢制御アクチュエーターを駆動して自動的に目標姿勢へ向けることができるようになってきている。そのため、観測者（衛星運用者）は「〇時〇分〇秒に△△の方向を向けよ」という指示（コマンド）を衛星に送るだけで、望む指向ができる（図1）。衛星の姿勢制御系に必要な機能として

は、(1) 指定した方向を高精度に指向する、(2) 指定した方向へできるだけ速く姿勢変更する、(3) 信頼性高く、かつ使い勝手がよく（できるだけ単純なコマンドで）実現すること、がある。これらは姿勢制御系単独で実現できるものではなく、衛星構造設計、熱設計、電力設計、あるいはデータ処理系、地上運用系との組み合わせで実現できるものであり、衛星システム全体としての最適化と多分野にわたる研究開発が必要である。本稿では、2006年9月23日に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」を例として、衛星の姿勢制御について紹介する。

「ひので」の姿勢制御系

「ひので」衛星は、可視光磁場望遠鏡、X線望遠鏡、極紫外分光撮像望遠鏡の3

つの観測装置を搭載している（図2）。衛星姿勢に関しては、表1のような非常に厳しい精度が求められている。特に1時間の変動が2秒角（0.0005deg）以内を満たすためには、高精度に衛星の姿勢を知る必要がある、超高精度太陽センサー（Ultra Fine Sun Sensor: UFSS）を開発した（図3）。これにより、衛星から見た太陽中心の方向が約1秒角の精度で検出できる。一方、望遠鏡視野方向（Z軸）回りの姿勢精度要求は高くないので、小型軽量な0.05deg精度の恒星センサーを搭載し、カノープス星の見える方向を検出する。天空上で方向がわかっている2つの天体（この場合、太陽とカノープス）が衛星から見てどの方向に見えるかがわかれば、衛星本体の姿勢が計算できる。

	X,Y軸回り	Z軸回り
絶対指向方向精度 (3σ)	20秒角	145秒角
1時間の姿勢変動 (3σ)	2秒角	145秒角
1分間の姿勢変動 (3σ)	1秒角	145秒角
10秒間の姿勢変動 (3σ)	0.3秒角	36秒角
(参考) SOTの焦点面での指向方向要求		
10秒間の変動	0.09秒角	—

表1 「ひので」の姿勢制御精度要求

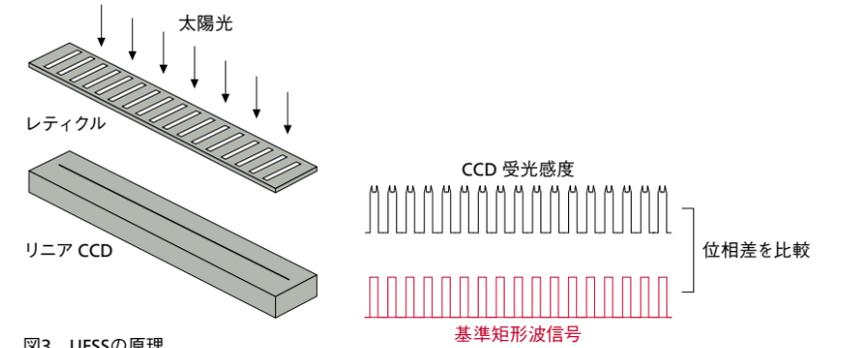


図3 UFSSの原理
UFSSは、リニアCCD検出素子の前面にレティクルと呼ばれるパターンが置かれ、そこを透過した太陽光の像と基準矩形波信号との位相差から太陽入射方向を高精度に検出する姿勢センサーである。

衛星は地球の周りを回っているため、地球の陰になり太陽や星が見えない時間帯が存在する。また、10秒間の姿勢変動が0.3秒角という要求を満たすためには、姿勢の変化を高精度に検出するセンサー、すなわち慣性基準装置（Inertial Reference Unit: IRU）が必要である。「ひので」のIRUは、機械式のジャイロスコプで構成されている。最近では光ファイバージャイロなどの非機械式ジャイロが登場し、中精度までの用途では置き換えられつつあるが、性能的にはまだ機械式のほうが優れている。IRUでは、姿勢の変化しかわからないこと、時間が経つと誤差が大きくなっていくこと（バイアスドリフトと言う）から、太陽センサー、恒星センサーなどと併用して使用されるのが通常である。

このように高精度な姿勢制御を実現するには、さらに衛星が地球を周回する運動、（地球とともに）太陽を公転する運動によって太陽や星の方向が曲がって見える（光行差、視差）効果を考慮する必要があり、搭載計算機ではこれらの補正計算も行っている。

衛星の姿勢を動かすアクチュエーターは、モーメントムホイール（Momentum Wheel: MW）と呼ばれる「はずみ車」を使用する。角運動量保存の法則から、回転する円盤を加速すれば衛星は反対方向に回り始める。したがって、3台以上のMWを搭載してその回転数を加減速することにより、衛星を任意の方向に向けること（X、Y、Z 3軸回りの姿勢制御）が可

能である。「ひので」の場合、1台が故障しても姿勢制御が継続できるように4台のMWを搭載している。実際の宇宙空間では、地球重力場の傾斜や太陽光の光子が当たることによる圧力で、衛星には回転力（トルク）が働く。これは姿勢制御誤差の要因になるとともに、トルクによっては、衛星全体の角運動量が増え続ける（あるいは減り続ける）ことが起こる。MWによる姿勢制御は、MWと衛星との間で角運動量を交換しているにすぎないので、これらの外乱トルクに対して衛星姿勢を止め続けられれば、MWの回転数はどんどん増加する（あるいは減少する）ことになり、動作可能な限界に達してしまう。そこで、磁気トルカと呼ばれる電磁石を搭載し、地磁場との相互作用により適切なトルクを発生させて、衛星全体の角運動量を既定範囲内に収めるように制御則が組まれている。

さらなる高精度指向のために

衛星本体の姿勢制御は、諸々の制約から0.1Hz程度の応答が限界であり、振動擾乱などのより高周波の外乱に対しては別の対策が必要である。衛星搭載機器の振動を抑えるため、可動部があるMW、IRU、あるいは観測望遠鏡の可動フィルターについては、その回転バランスを精密にとり、緩衝材により衛星本体へ振動が伝わらないようにする、などの工夫が必要である。

「ひので」の可視光磁場望遠鏡は、観測センサーの焦点面にあるコリレーシヨ

ントラッカーにより太陽表面の模様（粒状斑）を追尾し、画像がぶれないように反射鏡の傾きを制御して観測画像の像安定を図っている。また、観測センサーと姿勢センサーの間の取り付け構造が熱歪みなどにより変形すると指向誤差になるので、温度差が付かないような熱設計、変形しない一体構造などの工夫も必要である。

このように、極限の指向精度を達成するためには、姿勢制御技術のみならず衛星システムとしての諸々の高度な技術が必要であり、理学と工学の連携により第一級の観測が実現できると言える。

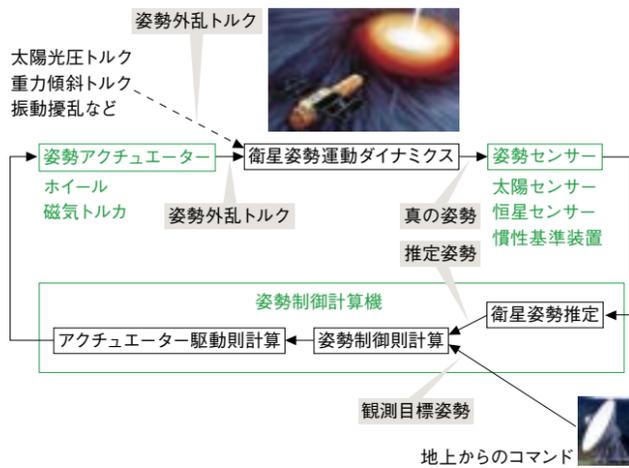


図1 衛星姿勢制御の原理

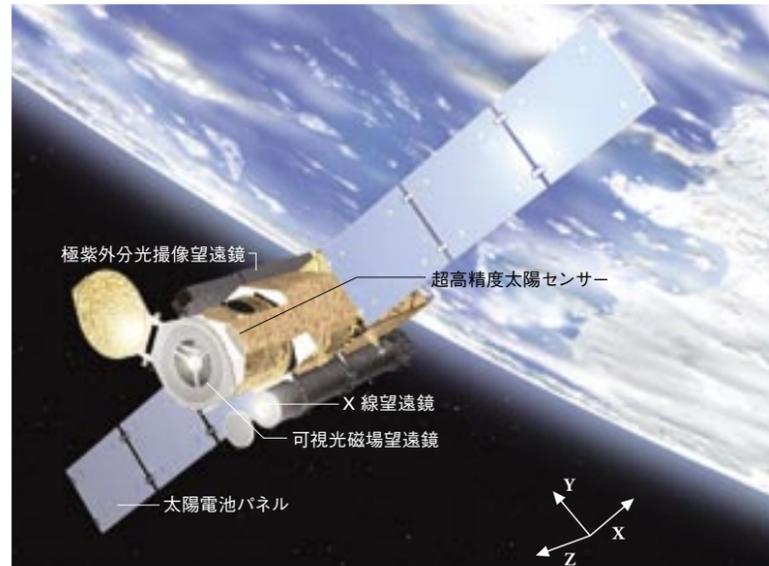


図2 「ひので」の観測センサーと座標系



橋本樹明（はしもと・たつあき）
私は電車などの動くものが好きで、大学院では電気工学を専攻し、新幹線のモーター制御の研究をした。1990年、宇宙科学研究所（現在の宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部）に入所。以来、人工衛星の姿勢制御に関する研究・開発・教育に従事している。宇宙工学の魅力は、その研究対象のみならず、優れた科学者とともに仕事ができることだと思う。