



じつきょう

数学資料

No. 61

超小型衛星への挑戦と宇宙工学を支える数学

東京大学大学院工学系研究科 中須賀真一

私は大学で超小型衛星の研究開発に携わっている。どれくらい「超小型」か、というと、重量でいうと30kgまで、サイズでも50cm立方までである。昨今の衛星が、たとえば月に行った「かぐや」が3トン、地球の写真を撮る「だいち」が4トン、いずれもプレハブの家並みの大きさであることに比べると100分の1以下の「超小型」である。私は、この小さい衛星に大きな力と将来性が秘められていると考えている。

超小型衛星の狙いは、これまでの莫大なコストと長い開発期間のかかる宇宙開発・利用に見られる高い「しきい」を徹底的に下げ、新しい宇宙利用の道とプレーヤーを呼び込むこと。現在の高コストの衛星では、利用者はほとんど国ばかりで、その利用法も通信・放送・測位・地球観測・宇宙科学など、非常に限定的であり、まだまだ宇宙の潜在的能力を十分に活用しているとはいえない。その結果、産業化も進んでいない。超小型衛星の大きな特徴は、コストが中・大型衛星の1機数百億円に対し、1機1～2億円、開発期間も通

常の4～5年に対し、1～2年ほどと極端に「安く、早い」こと。もちろん中・大型衛星と同じレベルの機能（たとえば同じ分解能）は期待できないが、この「しきい」の爆発的な低下が新しい利用法を生むことが期待できるのである。たとえば、低コスト・超軽量の衛星を多数機打ち上げ軌道上に適切に配置することで、中・大型衛星でも1機では実現できない同一地域の高頻度の観測やステレオ視等の特長ある観測方法を実現できる。「数で勝負」というわけである。また、費用と開発期間の「しきい」が根本的に下がることにより、従来、宇宙に全く見向きをしなかった個人・大学・研究機関・企業・自治体等から新しい利用プレーヤー・利用法を生み、「マイ衛星」「パーソナル衛星」のコンセプトが生まれる。特定のものを見る地球観測、GIS、測量、航路の安全監視等の分野で新規ユーザを拡大したり、自分専用の観測器を持った宇宙科学研究者の研究を躍進させたり、教育衛星が子どもたちの理科・社会教育をより身近で楽しいものに変化させたりするだろう。まさに、メインフレームからパソコンへのダウン・サイジング、

も く じ

論説

超小型衛星への挑戦と宇宙工学を支える数学… 1

報告

平成22年度入試を振り返って… 4

特集

学習指導要領解説書から予想される整数問題… 8

特集

大学入試にみる整数問題… 10

学校紹介

大阪府立大手前高等学校… 12

100円ショップの

商品を活かした数学教育用教材… 15

ワンポイント教材

「整数の性質」の指導上の留意点… 16

コスト破壊やインターネット普及が、ユーザの爆発的広がりとともに新しい利用法の創造をもたらしたコンピュータの歴史を衛星の世界で再現しようというわけである。

もう一つの超小型衛星の重要な特徴は、大学学生の宇宙教育、もの作りの教育にとって抜群の題材であること。宇宙工学においては、ミッション（衛星の仕事）を考え出し、それを実現する衛星の設計・製作・試験・改修、そして打ち上げ運用して結果を解析する一連のプロセスをすべて経験して初めて教育は完結する。さらに超小型衛星は、決められた予算や期間の中で確実にものづくりを完成させるチームワークやプロジェクトマネジメントの格好の題材ともなる。

私のいる東京大学の研究室では、このような目標を持って、1999年ごろより超小型衛星の研究開発を進めてきた。最初に手がけたのは350mLのジュース缶サイズの衛星で、その名の通り「CanSat」。通常は5年以上もかかる宇宙プロジェクトの1サイクルを1年以内に経験させ、物作りにおいて何が大事かを実践的に鍛錬することが目的の「教育プログラム」である。基礎訓練で力をつけた学生が、チームを組んでいよいよ宇宙に打ち上げる衛星CubeSat XI-IV(サイフォー)の開発に取りかかったのが2000年であった。技術的なトラブルはもちろんのこと、打ち上げロケットや周波数のアレンジなど、さまざまな障害を工夫と執念で乗り越え、2003年6月にロシアのロケットで我々の手作りの世界最小衛星は宇宙に打ちあがった。10cm立方、1kgの小さな衛星には、研究室の20名ほどの学生の夢と情熱と不眠不休の2年が凝縮されている。当初は、大学の、しかも学生の手では衛星なんかできないだろうと揶揄されたが、打ち上げられた衛星は2010年の現在も高度800kmの宇宙空間で7年を超えて健康に動作し続けている。

その後、2機目の衛星XI-V(サイファイブ)が

2005年10月、やはりロシアのロケットでの打ち上げに成功したが、この衛星には宇宙機関で開発した太陽電池が搭載され、現在も宇宙空間で実験を続けている。超小型衛星はこのような新しい技術を迅速に試す格好の場なのである。3号機のPRISMは、30mの地上分解能を目指すリモートセンシング衛星である。2009年1月に、初めて日本のロケット(H-IIA)で打ち上げていただける機会を得て、現在まで順調に飛行し、30m分解能の地上の写真撮影にも成功した。現在は国立天文台とともに、星の正確な三次元地図を作るNano-JASMINEという天文衛星を開発中であり、2011年にブラジルから打ち上げる予定である。2010年3月からは、日本の多くの大学、中小企業と連携して、世界一の超小型衛星大国を目指した大規模な研究プロジェクトを進行中である。

さて、自己紹介が長くなったが、このような衛星開発をはじめとした宇宙工学と数学は切っても切れない関係である。数学の一つの素晴らしい能力、それは、現実の世界の動きをモデル化し、未来の挙動を正確に予測してくれることである。とくに役立っているところは何かと聞かれたら、それは間違いなく「軌道力学」の世界。地球を回る人工衛星は主として地球からの重力を受けて動作し、その挙動は非常に簡単な微分方程式で記述できる。ある時刻における初期条件(3次元の位置と速度の合計6個の情報)を与え、方程式を積分することにより、未来のある時刻における位置と速度を予測することができる。この「予測」がないと、たとえば、衛星と通信しようとしても、いつ、どちらに向かって電波を出してよいか分からない、衛星からの電波のドップラーシフトの量も計算できない。衛星は宇宙で迷子になってしまう。まさに、数学さまざまである。

軌道の持つ自由度は6個、つまり、6個のパラメータ、たとえば、初期条件の位置と速度を指定することにより軌道は一意に定まる。しかし、その6自由度の与え方はこれだけでなくともかまわず、

通常は軌道の向きや形状がそこからすぐ推測できるような「6要素」と呼ばれる量で記述する。そして、ありがたいことに、アメリカの空軍が管理する NORAD という衛星監視システムが地球軌道上のすべての衛星について「勝手に」レーダーで位置や速度を計測して、「勝手に」その軌道情報をホームページに記載してくれている (Two Line Elements : TLE と呼ばれる)。我々はその6要素を使うことで、任意の時刻の我々の衛星の位置や速度を正確に計算できるようになっている。これは、大変ありがたい「おせっかい」である。

私のいる航空宇宙工学科では、大学3年生のときにそのような軌道論の基礎を勉強する。「中心天体に向かう重力=衛星の質量×加速度ベクトル」という非常に単純な微分方程式を変形していくことにより、角運動量保存則、エネルギー保存則をはじめさまざまな保存則が導かれ、軌道の様子が次第に明らかになっていく過程は、学生にとって非常にエキサイティングである。(とあってほしいと私が願っているだけかもしれないが。) 最後には円錐曲線の式が出てきて、その1つのパラメータ(離心率)が1を境にして、楕円(1未満)、放物線(1)、双曲線(1より大)と変化する様子はまったく見事だと、少なくとも学生の頃の私は感動した。そういえば、大学生のころ、私はなぜ万有引力は距離の二乗に反比例するのか、という疑問を持ち、「それは物質のできた初期のころには、距離のN乗(Nは2だけではない)に反比例するさまざまな力があつたが、正確に「2」乗に反比例する力のみ、2物体の安定な距離の関係が得られるので、その力だけが生き残った」という2乗自然淘汰説なる妄想(?)を考え出して、シミュレーションして検証などしたが、結局玉砕したという思い出もあつた。これは失敗に帰したが、力学、電磁気学、熱力学など、数学と現実の

世界の関係を考察するのがとても楽しかったことを覚えている。

2010年6月、宇宙探査機はやぶさが帰ってきて、日本は久々に宇宙の話題に沸き返った。地球と太陽の距離(1天文単位)が 1.5×10^8 km。その倍ほどにも離れた小惑星「イトカワ」からのサンプルを持ち帰るべく、はるかな旅を経て、このはやぶさを見事に地球まで連れて帰ってきたのが、まさに軌道力学の研究成果である。地球、太陽をはじめとする天体からの重力、太陽から来る光子の力である太陽風、衛星のロケット推進の力とその誤差など、運動に影響を与えるさまざまな力を正確にモデル化し、軌道計算するソフトを作る。それを駆使して事前に十分な軌道計画をたてるが、実際にはモデル化誤差や故障等のせいでの通りにはいかない。計画と現実の差は、地上から衛星を電波で追いかけることにより判明する。それがわかったら、今度はどのタイミングでどの方向にどれだけの力を加えればこの差を小さくできるかを、必要な燃料が最小になるように計画する「誘導」という作業を実施する。逆問題である。はやぶさの場合は、姿勢制御機器や推進機の故障が誘導をはるかに難しくした。電波の往復で10~30分かかかるやりとりを衛星と地上局間で実施しながら、数年にわたって少しずつ少しずつ確かめながら軌道を変えて、満身創痍のはやぶさを地球まで誘導してきた帰還劇は、まさに技術者の執念というしかない。2010年6月13日、はやぶさは地球再突入。本体は燃え尽きたが、サンプルが入っているかもしれないカプセルは無事にオーストラリアの砂漠にパラシュートで着陸した。その着陸地点の予定位置からのずれは、わずか1km。日本の宇宙開発の技術力の高さを証明したと同時に、私が強く感じたことが一つあつた。それは、「数学は嘘をつかない」。