応用

小型天文衛星「Nano-JASMINE」—観測データの取得から利活用まで—

酒匂信匡（東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻）
山田良透（京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻）

位置天文データ解析の概要

♦ 位置天文学とは

位置天文学とは，星の天球上の位置と運動を精密に測定する天文学の一分野である．19 世紀までは，天文学といえば位置天文学であった．量子力学や相対性理論の発展により 20 世紀は天体の分光観測や，ブラックホールなどの相対論的な天文現象が注目された．しかし，ESA（ヨーロッパ宇宙機関）が 1989 年に打ち上げた Hipparcos 衛星で，地上観測では大気の揺らぎなどで限界があった位置天文学の観測の精度が飛躍的に向上し，位置天文学の可能性が再び注目されるようになった．2013 年 12 月には，ESA が Hipparcos の後継である Gaia 衛星を打ち上げ，10 億個の星の地図が書ける革命的な時代に突入した．本稿で紹介する，打ち上げを控えた Nano-JASMINE 衛星は，そのような画期的なスペース位置天文観測を，今注目されている超小型衛星の技術を用いて実現しようという試みである．

古くは，位置天文学は星の見える方向から地球上での自分の位置を知るための，航海術として発展した．今では，位置だけでなくその天球上の運動を詳細に観測する．星は，地球が太陽の周りを公転することによる見かけの楕円運動と，星自身が銀河系内を自由に運動する等速直線運動の合成運動として，**図 -1** のような螺旋運動をする．等速直線運動の部分を固有運動（2 成分），楕円運動の長半径（1 成分）を年周視差と言い，ある定めた時刻での楕円の中心（2 成分）と合わせた 5 成分を星の位置天文パラメータと言い，時々刻々の星の位置の観測からこれを解くことが位置天文学の役割である．楕円運動は，その長半径・短半径の比と楕円運動のフェーズが星の天球上の位置で決まるので，パラメータは長半径しかない．この長半径は地球（厳密には太陽系重心）から星までの距離の逆数である．すなわち，位置天文学は唯一天体までの距離を直接測れる方法である．距離を知ることは，天体の見かけの明るさやエネルギー流束から実際の値を知るために重要だが，直接的に距離が測れる星は地球近傍のごく少数の星に限られており，遠方の天体の距離はこれまでさまざまな経験則の積み重ねで推定してきた．Hipparcos 衛星や Nano-JASMINE 衛星では地球から 300 光年，Gaia 衛星や Nano-JASMINE の後に計画されている小型・中型の JASMINE 衛星では 3 万光年までは，経験則の積み重ねではなく，直接的な幾何学で距離を決めることができるようになる．これにより，近い将来は銀河系の太陽に近い側の半分程度の領域では，星の距離が直接幾何学的に測られ，天の川銀河の 3 次元地図が描かれることになる．

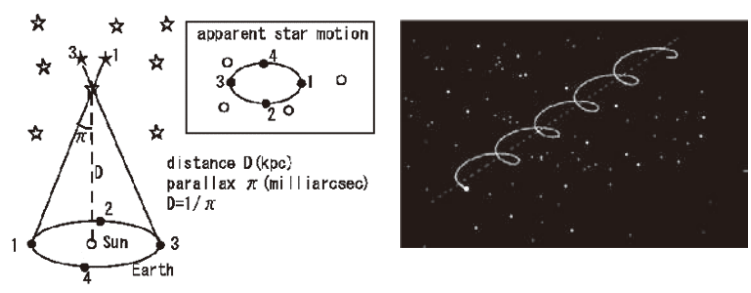

図 -1　天球上の星の運動

♦ 位置天文学のデータ解析

位置天文学のデータは，時々刻々の星の写真である．写真の星像から，望遠鏡により作られる点源の回折像に精密にfitting することで，星の中心を回折像の解像度の 1/100 以下の精度で決める．星の中心位置の時々刻々の変化を，先ほどの 5 つのパラメータで表される天球上の星の運動モデルに当てはめ，星の運動を解く．ただし，望遠鏡自身も熱や振動で歪んでいるかもしれないので，これをモデル化して解く．そもそも測定されるのは星同士の相対位置に過ぎないので，衛星の姿勢などをモデル化し，星の運動モデルと同時に解くことで，相対的な距離測定の結果から天球全体の位置を推定する．つまり，星の運動，装置の変形，衛星の運動を含む巨大なシステム同定問題なのである．

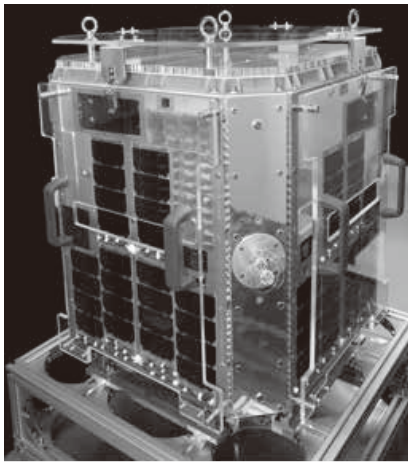

図 -2　Nano-JASMINE 衛星
〈本特集（p.652）にてカラー画像掲載〉

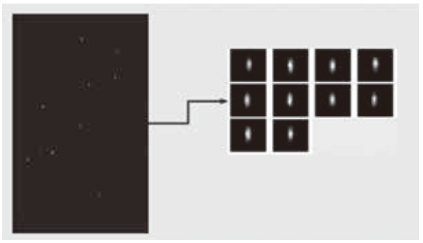

図 -3　星像の切り出し

情報科学の問題としては，この巨大なシステム同定問題をどう解くのか，ここに出てくる巨大な行列をどう作って，どう解くのかという技術である．そういう見方をすれば，その応用範囲は広範にわたるだろう．巨大というのは，Hipparcos や Nano-JASMINE 衛星では数千万の「観測」から数百万の「推定パラメータ」を解く，Gaia 衛星に至っては「観測」数が 1 兆のオーダ，「推定パラメータ」数が 100 億近い数になる．

巨大な行列をどう反転するのかという問題と，そもそも最小二乗法の正規行列をどう作るのかという 2 つの問題がある．さらには，その正規行列の元となる「モデル」をどうとるのかが，観測データから得られる成果を決めるために非常に重要である．

衛星内部の情報処理

♦ 衛星情報処理構造

Nano-JASMINE（**図 -2**）は，50㎝立方・35kgの小型の人工衛星である．CPU コアを複数実装した FPGA を 2 個連結した自作の計算機が衛星の頭脳である．この計算機にほかの機器が星形に接続されている．望遠鏡やセンサの情報はこの計算機に送られ，状況が解析された後に衛星の姿勢制御装置やヒーターが駆動される．中央集権型であるため，星の観測データから姿勢情報を引き出すなどの工夫がされている．取得データや演算結果は逐次記憶装置に保存され，地上との交信時にまとめて送信される．同時に地上からの指令もこの計算機が内容を解釈して接続されている装置を操作する．

♦ 星像情報

Nano-JASMINE は常時天球を舐めるように連続して星を撮影しているため，画像の情報量だけでも 1Mbps を超える．ところが，情報を地上に送信する際に必要となるエネルギーは衛星の大きさに依存しないため，発生電力が少ない小型衛星は大量データの伝送には不向きである．そこで，衛星内部で情報を加工して情報量を抑える工夫をしている．本衛星では，**図 -3** のように，星の像の周りの 5 × 9pixel 程度の小さな領域を切り出し，その時刻と位置をタグ付けして記憶装置に保存するための専用のハードウェアを開発した．また，地上に情報を送る場合は，明るい星から優先的に送信し，通信容量の余裕に応じて暗い星のデータを可能な限り送信する．現時点では切り出した星像をそのまま伝送しているが，主

成分分析などの画像圧縮により伝送量を増やすことも検討している．

地上局の情報処理

データを受信する地上局は**図 -4** の形で 3 局を用いる．東大局：衛星に指令を送り，衛星状態を受信する．水沢局：星の観測データを受信する．電波天文用受信設備を借用する．キルナ局：打ち上げ直後に高頻度で衛星と通信をするための海外局．

衛星と地上局は時間にして 1 日のうち延べ 1 時間弱しか通信することができない．この間に前回の通信後の観測データを伝送する．毎回まずは東大でデータを処理する．データの誤りや抜けは運用時に機械的に衛星へ再送命令が送られているがデータが一通り揃ったことを人間が確認の上，衛星機能ごとの担当者が主にその回の受信データを用いて衛星の状態を解析する．姿勢・軌道・温度情報などと星の画像情報が時系列的に並べられデータベースに収納される．このデータを共同研究相手である天文学者に渡し，最終的には 2 年分以上の全観測データをまとめて，次章で説明するより詳細なデータ解析が行われる．結果は位置天文カタログとして一般に公開される．

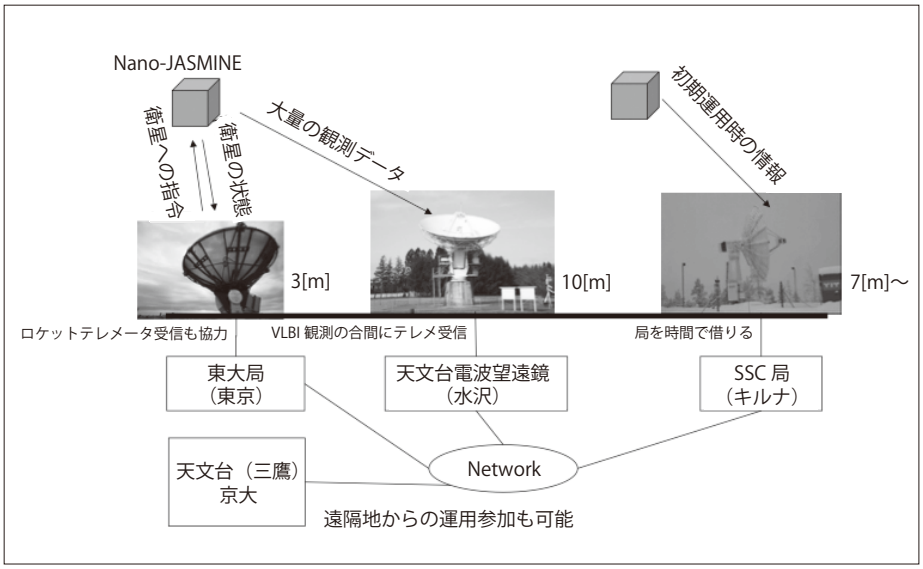

図 -4　地上局構成

モデルと位置天文解析

♦ 位置天文学におけるモデル

位置天文学のデータ解析は，巨大なシステム同定問題であり，最小二乗法で解かれることを説明した．**図 -5** のように，推定パラメータを引数とし，観測量を左辺値とする関係式 f および g を立て，観測量から逆問題を最小二乗で解いて，推定パラメータを得る．本稿の読者は情報科学の専門家であり誤解はないと思うが，この衛星を開発している天文学者も衛星工学者も，最小二乗法で物理現象を解いていると勘違いしてしまうことがある．そこで，データ解析担当者は，チームの中で「皆さんが解いているのはモデルであって，物理そのものではない」と繰り返し念を押すようにしている．もちろんモデルをたてる背景には理解したい物理現象があるわけだが，現象をモデルにする方法はユニークではない．異なるモデルをたてれば，異なる結果・物理状態が，最小二乗法の「最適解」として得られることもある．モデルが現象を十分表していない場合，「モデル化誤差」が発生し，これが正しくない物理状態を誤って「最適解」であると判断してしまう主な原因である．

そこで，衛星を打ち上げる前に，十分に起こり得る物理現象を解析し，十分な表現力のあるモデルを見つけておくことが肝要である．位置天文学で特に重要なのは，衛星の姿勢変化を説明するモデルである．すでに，地磁気の擾乱に対しては応答解析を行っており，システム同定モデルである ARMA（Auto Regression Moving Average）モデルを用いると，衛星の実姿勢と最適モデルとの残差が白色雑音になることが確かめられた．Hipparcos 衛星では，サイズ 1mm 程度以下，数ミリグラム程度以下の多数の宇宙ゴミが衛星に衝突して，衛星の運動則を不連続的に変化させて

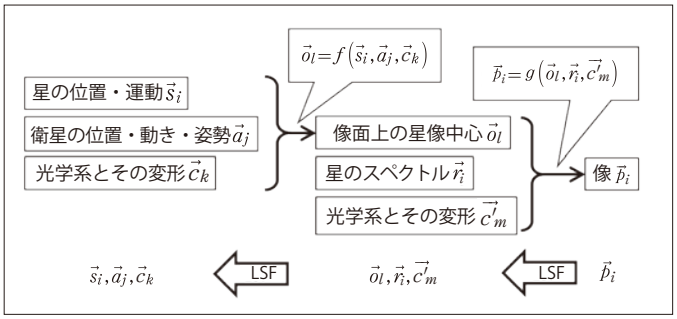

図 -5　Nano-JASMINE データ解析のイメージ

いることが，観測データの解析から分かっている．Nano-JASMINE は非常に軽量の超小型衛星であり，近地球軌道を飛行するので，宇宙ゴミの影響は大型の衛星より大きいことが予想される．宇宙ゴミ衝突に対する姿勢系の応答を調べておくことは，打ち上げまでの課題である．

♦ モデル駆動技術

ところで，位置天文解析の巨大な最小二乗問題を解くために，Nano-JASMINE 衛星では Gaia 衛星用に作られた解析ソフトウェア AGIS（Astrometric Global Iterative Solution）を使うことにしている．このソフトウェアには，姿勢モデルとして姿勢 quaternion の区分的 Spline，軌道モデルとしては位置の時系列のチェビシェフ多項式展開，星の運動としては導入部で説明した 5 パラメータの運動モデルを仮定している．像面のゆがみや星の色，放射線による星像中心位置のずれのモデルは，多項式で後から組み込めるようになっている．また，原理的には姿勢モデルも非常に大きなプログラムを書き換えることで変更可能ではあるが，現実的には難しい．

AGIS にはすでに 15 年の歴史がある．その中でようやく今のモデルでの検証を済ませ，出てきた結果が妥当であると期待できることを確認した．もし我々が別のモデルを使おうとするなら，モデルそのものだけでなく，ソフトウェアへの組込みの妥当性の検証に多大な時間を要する．Hipparcos 衛星の初期のカタログ（1997 年出版）と，2007 年に出版された「新解析」とでは姿勢モデルが異なる．AGIS はこの新解析のモデルをベースにしている．計算規模が大きく，姿勢モデルを変更するのに 5 年以上を要している．1 つのモデルに 5 年とか 10 年を要するのだから，多数のモデルを比較検討することは容易ではない．

そこで，我々は Gaia 衛星用の解析システムを Nano-JASMINE 用に整備することと並行して，モデル駆動技術の開発を，IT 企業とともに進めている．「モデル」を柔軟に入れ替えられ，モデルの入れ替えに多くのコストがかからず，バグが混入しにくいシステムの構築を目標とする．もしこのシステムがうまく動くようになれば，Nano-JASMINE の姿勢モデルも今の区分的 Spline モデルだけでなく，AR モデル（自己回帰モデル，時系列で時刻 t_i の値が t_{i-1}，t_{i-2}‥に依存するモデル）や ARMA モデル（自己回帰・移動平均モデル）などさまざまなシステム同定モデルを比較検討し，最適なものを選ぶことで，同じデータでもより高精度な結果を得ることが可能となる．

最後に，この衛星は宇宙機関ではなく大学の，それも大学院の学生を中心とした，また理学部と工学部が共同開発した衛星として，跳ね上がる一方のスペースミッションのコストを下げ，さまざまな分野のサイエンスのスペースへの敷居を下げ，衛星の新しい方向性を示すものとして，国内外から注目されている．データ解析にウエイトを置くことは，衛星のコストダウンにとってキーとなる．ここに情報科学の知見が入ってくれば，鬼に金棒である．

（2015 年 3 月 31 日受付）

酒匂信匡 ■ sako@space.t.u-tokyo.ac.jp

2003 年東京大学工学系研究科博士課程卒業，2003 年宇宙開発事業団，2005 年東京大学工学系研究科助手，2010 年信州大学准教授，2013 年よりキヤノン電子宇宙技術研究所 他．

山田良透 ■ yamada@amesh.org

1986 年京都大学大学院理学研究科卒業，1990 年同大学院博士課程中退，1990 年より同大学院助手，助教．