

第五回惑星探査データ解析実習会報告

桂木洋光（名大・環境）

I. はじめに

本稿は標記実習会の参加報告として記されたものであり、報告者が実習会で習得した（と思いついでいる）ことがまとめられている。実習の内容は（少なくとも報告者にとっては）簡単ではなく、本稿の所々には勘違いや理解の浅さからくる誤り等があると思われる。また、本文や図に説明不足な箇所等もあるかもしれないが、本稿は論文や技術報告等の類でないのでご容赦願いたい。Web 上で公開されることが前提のようなので、不特定少数の方の目に触れることがあるかもしれないが、その際は上記事情を考慮して頂けると幸いである。

最初に言い訳を述べたところで、実習会で実際に学んだこと等を以下にまとめる。まずはかぐやから得られたデータの概要とそれを解析するに必要なツール（このツールの習得が本実習会の目的）を概説し、さらに解析例（演習）におまけを付け、最後に全体のまとめを行う。

II. かぐやからのデータと解析ツール

かぐやでは様々な種類のデータが得られたはずであるが、本実習では特に地形と重力のデータにフォーカスされていた。

II-I. 重力場と GEODYN II

まずは月のまわりを回っていたかぐやは月の重力の他にも地球やその他の天体の重力や太陽からの輻射圧などをうけて時々刻々とその軌道は変化していた。制御のためにもその軌道を精度良く計算することは重要な課題であり、そのためのツールが GEODYN II であった。実習では、GEODYN II に初期軌道要素やその他の条件を入力して軌道の生成や決定の体験を行った。

一方で、かぐやの軌道に影響を与えると思われる要素を十分に考慮して更にそれから予想される軌道からのズレを見積もることが出来れば、それは月の重力場モデルの影響であると考えられる。すなわち、かぐやの軌道の変化を捉えることにより月の重力場が GEODYN II から逆算的に分かることとなる。

では、かぐやの軌道要素をどのように決定するのか？まず地球からかぐやへ基準信号を送り反射を受け取る。するとその往復時間とドップラーシフトにより視線方向の距離と速度が分かる。この計測を多数回（多時間、多地点）行い得られたデータから軌道要素を推定することとなる。この結果から重力場モデルを算出するという手順になる。かぐやが月の裏面に行った場合は直接送受信できなくなるので、リレー衛星を用いた 4 ウェイドップラーなどの技術を用い

た（それにより裏面の重力場精度を大きく上げられた）ことも実習中では紹介された。

次のポイントは、この軌道変化から重力場をどのように表現するのが良いか、という点になる。一般に**かぐや**が月から遠いところを回る場合は月の重力場の微細構造などほとんど効かず、月を質点（もしくは球）と思って良い軌道が実現されることが予想される。一方で表面に近付けば近付くほど、局所的な重力場の構造により軌道は大きく変化させられ得る。このような事情を鑑みて、重力場成分を球面調和展開してその係数で重力場を評価することが良さそうに想像される。低次の成分は大まかなゆがみのようなものを表し、より遠くを回る衛星等まで影響を及ぼし易いが、高次の成分は（重力場の微細構造に相当し）近付かないとその影響は極めて小さい（実習では実際に数式を用いて分かり易く解説されていたが、ここでは数式は割愛する）。

II-II. 地形データ

一方で月の表面地形は比較的シンプルな方法で計測されたようである。**かぐや**から月面へレーザー光を送りその反射光を受信し、その経過時間から月表面までの距離を算出する手法が用いられたとのことであった。極めてシンプルな距離測定の原理だが、表面地形を実際に構成するためには、**かぐや**が（月の重心から）どの位置にいるかを同時に決める必要がある。これは軌道の決定に依っているはずであり、実は表面形状（**かぐや**で得られる他のデータも？）は軌道データ（すなわち重力データ）と独立ではないように思われた。具体的な精度等の議論は実習中ではあまり理解できなかったが、それはまた別の（制御工学的？）問題かとも思われる。

II-III. 解析ツール

かぐやで得られた重力場と地形のデータを用いて、月についての理解を深めるためには解析が必要となる。その解析ツールへのイントロダクションが本実習の主目的であった。用いたツールは GMT と SHTOOL であった。

II-III-I. GMT

これは地図データ等を解析描画するためのツールであった。地球や月などの形は球に近く、その解析や描画には一般に様々な技術が必要になる。GMT はそれらがまとめられている非常に強力なツールであるということが感じ取られた。もちろん実習では限られた機能のデモを行う程度のことしか出来ていないが、その奥深さと「使いこなすと手放せないくらい便利なのだろう」とは感じさせられた。

II-III-II. SHTOOL

これは球面調和係数のデータについての解析ツールであった。球面調和展開は上述のようにポリシーとして分かり易い側面も持つが、得られた係数だけ見ても直感的に様々な議論を行うことが難しい。そのために、このようなツールは必要となる。こちらも GMT 同様、サンプ

ルを眺めて僅かに変更を加えてお試しをする，という程度のことしか行えなかったが，研究等の現場では必要不可欠なツールなのだろうということは想像された。

Ⅲ. 解析例（演習）

実習ではいくつかの準備的課題をこなした後に，地形と重力場の球面調和展開係数データを用いて月の地殻厚を推定する課題が出された。SHTOOL を用いて月の地形および重力場データからブーゲー重力異常を見積もり，いくつかの仮定のもとで月の地殻厚を求める。実際には SHTOOL の examples に火星について同様の操作をするサンプルがあり，それを僅かに改変した上でデータとしてかぐやで得られたデータを用いることにより月の地殻厚を求める作業であった。この操作により求められた結果は GMT で表示できるようにグリッドデータに変換され（これにも SHTOOL を用いる），結果を GMT で表示・解析して結果を吟味して議論することが課題の目標であった。

残念ながら，実際の演習では多くの箇所で躓いたり理解が不足していたりしたために十分な結果・議論まで到達することが出来なかった。入力データとして，実習で指定されていた RISE 公開データの地形と重力の球面調和展開係数データを用い，SHTOOL の examples にある MarsCrustalThickness のプログラムを用いて，モホ面の深さを計算するにとどまった。特にフィルタの意味等について十分に理解出来ていなかった（未だ理解出来てない...?）ために，得られた結果の解釈等は極めて貧弱であった。得られた結果の例(モホ面の深さ)を図 1,2 に示す。用いたパラメータは図 1,2 ともに地殻密度 2800 kg/m^3 ，マントル密度 3660 kg/m^3 ，70 次までの球面調和展開係数を用い，最小地殻厚を 10 km，グリッド間隔を 1 度とした。変更したパラメータとしては，図 1 では，（下方接続の?）フィルタとして 10 次の係数が半分の寄与になるように?（振幅最小で??）計算した結果を示し，図 2 では同様フィルタで 40 次で半減としたものを示した。図からはフィルタの次数を上げることにより，高次の項を取り入れるので，より微細な構造が見えることが分かる。この辺りの内容の議論は他グループでは整理されてきちんと発表されていたので，それらの報告を参照するのが良いかと思われる。

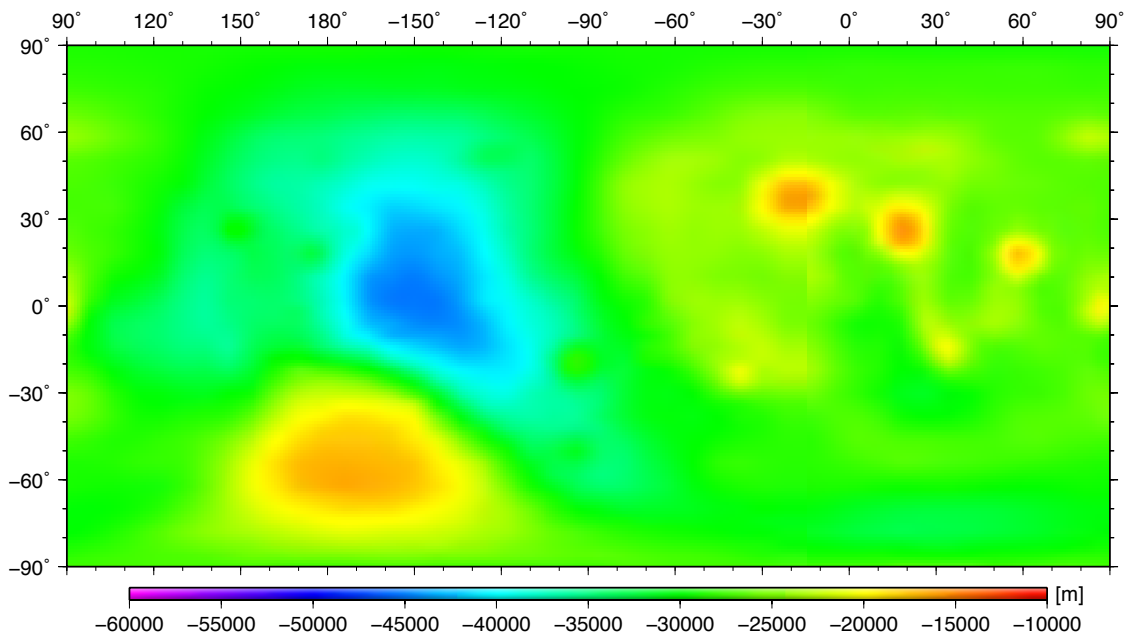


図 1 : かぐやで得られた地形と重力場データからえら得た月のモホ面深さ (フィルタ係数 10)

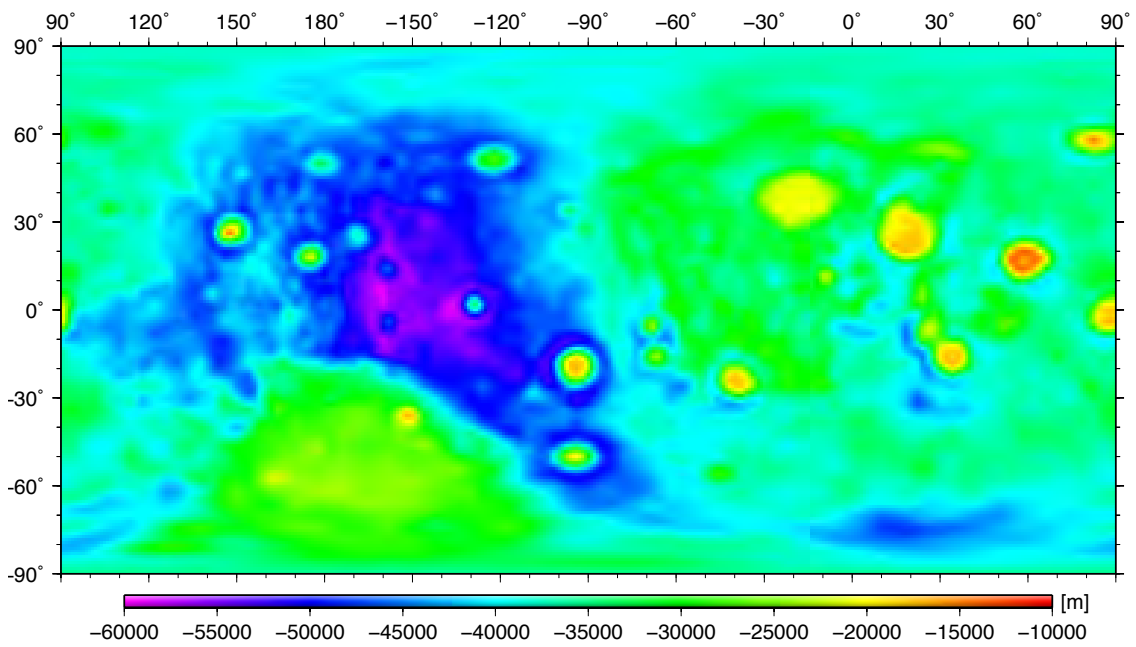


図 2 : かぐやで得られた地形と重力場データからえら得た月のモホ面深さ (フィルタ係数 40)

IV. おまけ

さて、ここまでで実習で学んだ内容と演習の概要の報告を終えたが、実は個人的には月（やその他の天体の）表面地形に興味がある。本実習の GMT の課題の中で地形の任意断面の取得なども行った。講師側ではその技術を使って演習課題で求めた地殻厚の断面等の議論まで期待するとの思惑もあったようだが、残念ながら力不足で到底そこまで到達出来なかった。しかし一方で、地形の任意の断面図を取得出来ると、その表面のフラクタル解析が容易に行える。報告者はかつて地球の山脈地形のフラクタル性を解析した経験があり、この断面図取得の習得により、フラクタル解析の手法を月面へも応用できるメドが立ったことはとても有り難かった。これだけでも実習に参加したご利益は十二分にあったと思っている。最後に、適当な断面で得られたら地形の断面図（図 3）、その月地図上の測線（図 4）、および高さ高さ相関関数の計算結果（図 5）を参考まで付けておく。

その解析手法の詳細等はここでは深入りしないが、概要は以下の通りとなる。高さ高さ相関関数は、位置 x での高さ $h(x)$ のデータに関して $C(x) = \langle |h(x'+x) - h(x')| \rangle x'$ と定義される量であり、 $C(x) \sim x^H$ となった場合の H がハースト指数として自己アフィン性を評価する量となる。実際にえられた $C(x)$ のデータからは $H=1/2$ に近い傾向がみられる。また所々データに落ち込むところがあるのはクレーターの構造（もしくは間隔）を反映しているようにも見える。更に系統的な解析を行うことにより、面白い解析が出来るかもしれないが、それは正に今後の課題である。

V. 最後に（まとめ）

今回の実習を通して、かぐやのデータをどのように解析・表示すれば良いかのきっかけは十分に与えて頂いた。これらのツールは今後もそれほど一般のニーズが高まるとも思えないので、GUI が整備されてユーザーフレンドリーな I/F となるというような可能性はまずないだろう。すると今のようにコマンドやオプションと悪戦苦闘するスタイルで頑張らないといけなわけだが、そのようなツールをゼロからドキュメントだけに頼って自学自習するのは余りに敷居が高いことである。今回のようにその筋のエキスパートにより簡単な入門手ほどきが受けられたことは、大いに有り難かった。

講師の松本、石原両先生の細部に至るまでの準備には大変感謝しつつ、両先生の期待通りの達成度に至れず申し訳なくも思っている。また、「将来の惑星探査を担う人材の育成」という本講習会の目的に合致するかも分からない者も受け入れて頂いた世話人の皆様、春秋に富むタレント揃いであった他の若い受講生の皆様、全ての方々へ感謝して報告を終える。

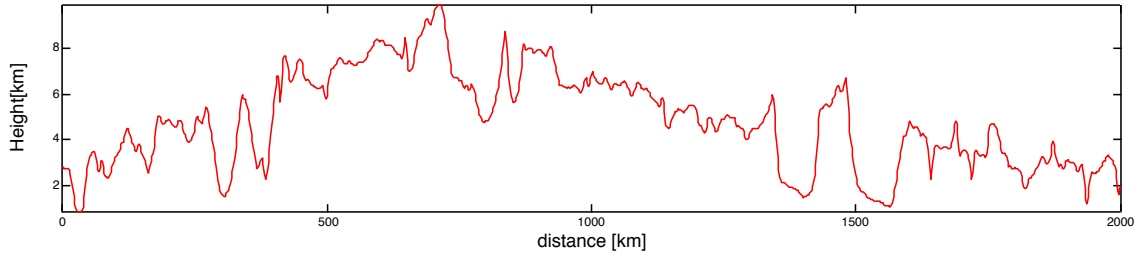


図 3 : 月表面地形のある断面図 (場所は図 4 を参照)

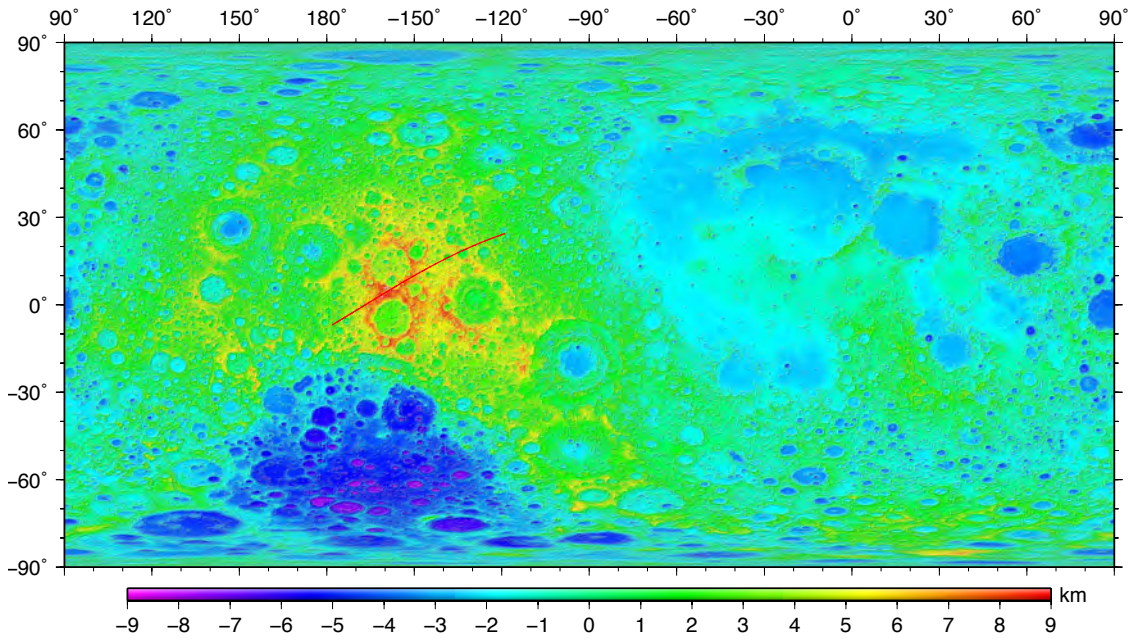


図 4 : 月の表面地形データと図 3 断面の測線 (赤線)

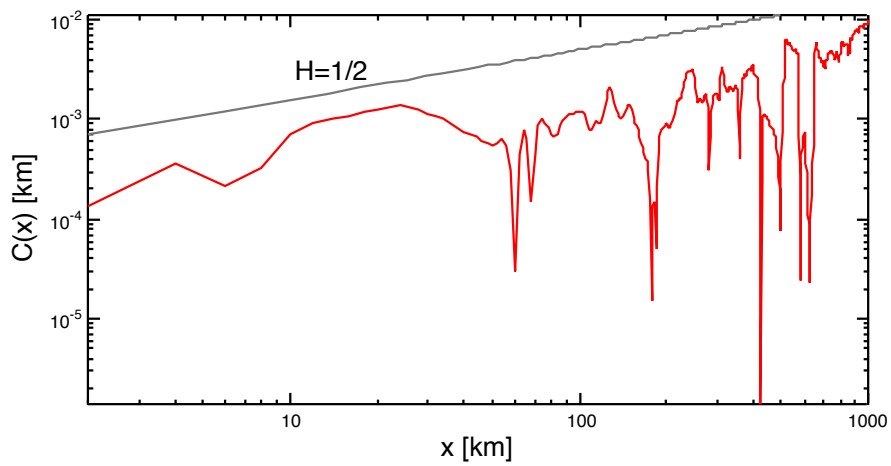


図 5 : 図 3 のデータから計算された高さ高さ相関関数