

# 第5回惑星探査データ解析実習会レポート

東京大学理学部 B4 小池みずほ

## 1. はじめに

月は常に同じ面を私たちに向けて回っている。これは月の自転周期と公転周期が地球の重力場の影響でロックされているためであり、裏側は表側とは異なる様相を示している。裏側は未だに分からないことが多く、特に周回衛星による直接観測ができない重力場の推定は困難であった。探査機かぐやが2機の子衛星を利用して裏側の重力測定に成功し、月内部構造の理解は飛躍的に前進した。本実習では、かぐやが得た月の地形・重力場情報を用いて、地殻厚を推定し、表層の地形や密度条件と内部構造との対応について考察した。

## 2. 衛星軌道決定

### 2-1. GEODYN II

衛星軌道決定には、中心天体の重力に加えて、他天体の潮汐力や太陽の輻射圧等を考慮する必要があるため、複雑な計算が要求される。GEODYN IIは周回衛星の軌道予測や軌道決定、測地パラメーターの推定などに有効な計算ツールである。また、かぐやの軌道変化をGEODYN IIで計算することで、月重力場モデルが作成された。今回は衛星軌道推定／軌道決定の計算例を実際にプログラムを動かしながら体験した。なお、GEODYN IIは天文台の計算機にあるため、各自天文台サーバーにログインしての実習となった。

プログラムのスクリプトは長く入力パラメーターも多岐にわっており、時間的制約・自身の勉強不足のために十分な理解に及ばなかった。しかし、他天体の重力等を考慮しない推定結果と考慮した推定結果を比較すると大きく異なり、初期軌道要素の与え方次第では数日で衛星が落ちることもあるので、軌道推定の難しさを実感した。

### 3. 地形・重力データの解析

#### 3-1. RISE データアーカイブ

かぐやの観測から得られた月の形状・重力のデータは、国立天文台の RISE 月探査プロジェクトにより公開されている。このデータは、学術研究・教育活動を目的とする場合には自由に利用することが出来る。かぐやの高い空間分解能により、月表面の形状は球面調和展開で 359 次まで展開されている。また、重力の直接測定が困難な月裏側についても、2 機の子衛星を利用した 4-way ドップラー観測で、かつてない程詳細な重力データを得ている。重力場についても 100 次以上の球面調和展開が行われているが、高次項を含めると発散しやすくなるため、現実の重力計算に用いられるのは 70 次程度までである。

本実習では、RISE データアーカイブの月形状係数、重力係数を利用して、地形図の作成、重力異常の計算等を行った。

#### 3-2. 解析ツール

本実習では、かぐやのデータを目的に応じて解析し、結果を視覚化するためのツールとして、SHTOOLS と GMT を用いた。

天体表面の計算を行うには、関数を球面調和展開する必要がある。SHTOOLS はこの球面調和関数の計算を行うプログラムである。天体(月等)の定数等の基礎情報や、データの読み込み・処理に必要な計算が `fortran95` の書式でサブルーチンとして予め組み込まれているので、使用者は目的に応じたサブルーチンを呼んでデータ処理を行うことで、必要な解析を行うことが出来る。

GMT は地形図データの可視化のためのソフトである。様々なコマンドとオプションを用いて描画するため、慣れない初心者には煩雑に感じられたが、詳細な指定ができ自由度が高いため、議論したい点に応じた地図の描画が可能になる。

### 4. 演習課題

#### 4-1. GMT & SHTOOLS 実習

解析ツールの基礎的な使用を実践にて学ぶために、GMT を用いて、地表面／モホ面グリッドデータからの地形図の作成、任意の側線に沿った断面図の作成等を行った。また、SHTOOLS に予め入っている幾つかのプログラムを参照し

て、重力係数のデータからフリーエア／ブーゲー重力異常を計算し、GMT を用いて地形図として再構成することを試みた。

## 4.2.地殻厚の推定

### 重力異常

観測される重力と基準面での標準重力との差を重力異常と呼ぶ。基準面には、回転楕円体やジオイドが用いられる。

#### ・フリーエア重力異常

高度補正のみを行い、観測点から基準面までの物質の影響を考慮しない。一般に、地形補正された重力の観測値 $g_1$ を基準面での重力鉛直勾配 $\left(\frac{dg}{dz}\right)_{z=0}$ で補正したものと、正規重力 $\gamma$ との差

$$\Delta g_{Free} = g_1 + \left(\frac{dg}{dz}\right)_{z=0} * h - \gamma$$

をフリーエア異常と呼ぶ。

#### ・ブーゲー重力異常

観測点から基準面まで、平均的に密度 $\rho$ の岩石が存在すると仮定して、その重力を考慮している。ブーゲー重力異常は、地形補正を $\rho T$ として

$$\Delta g_B = \Delta g_{Free} - 2\pi G\rho h - \rho T$$

のように表せる。表層の岩石密度の仮定が正しいとき、ブーゲー重力異常は内部構造・密度変化を表していると言える。

天体の重力場係数が分かっているとき、地殻／マンツルの密度差、回転楕円体の長軸や扁平率等を仮定すれば、ブーゲー重力が得られる。さらに地殻厚の最小値を固定して、全球的な地殻厚を推定した。得られた球面調和関数の係数から、月近似球体上で展開したグリッドデータを作成し、GMTで描画し、モホ面の深さ／地殻厚を評価した。なお、重力異常を求める計算にはSHTOOLSのサンプルプログラムを改変したものを、球面調和関数からグリッドデータの作成には、講師の石原先生に公開して頂いたプログラムを利用している。

先述したように、かぐやの高い空間分解能と月裏側の重力場観測によって、高次の重力係数が得られている。より高次の項を計算に含めるほど詳細な地

形・重力異常の議論が可能になるという利点があるが、計算の収束が遅くなり発散しやすくなるというリスクもある。発散を回避するため、一般的に、高次項にフィルターをかけて振幅を押さえる等といった手法が用いられる。

高次項の寄与が実際にどの程度あり、どの程度の次数まで計算するべきかを考えるため、展開次数、フィルター条件等を様々に変えて地殻厚を求め、比較した。なお、地殻密度は  $2800\text{kg/m}^3$ (平均的な花崗岩密度)、マントル密度は  $3400\text{kg/m}^3$ (かんらん岩密度)でそれぞれ水平方向に一様と仮定し、最小地殻厚を  $60\text{km}$ 、月の長軸半径は  $1738\text{km}$  としている。

まず、フィルターなしで展開次数の上限( $n_{\text{max}}$ )のみを変化させて地殻厚を推定した。展開次数を 5 から 5 刻みで増加させ、iteration の上限を 1 万回としたところ、20 まで計算可能であった。以下の表は、計算に用いた最高次数、赤道半径  $1738\text{km}$  としたときの対応する空間スケール、およびその時の収束結果を表している。

n_max	空間スケール (km)	計算の収束 (iteration 回数)
5	$2.18 \times 10^3$	○(3 回)
10	$1.09 \times 10^3$	○(4 回)
15	$7.28 \times 10^2$	○(6 回)
20	$5.46 \times 10^2$	○(12 回)
25	$4.37 \times 10^2$	×
30	$3.64 \times 10^2$	×

(表 1 : 展開係数の最高次数と対応する水平スケール、および収束の結果)

図 1、図 2 はそれぞれ  $n_{\text{max}}=5, 20$  でのモホ面深さ推定の鳥瞰図で、表面の地形図(図 3-1)のクレーター分布に対応していることが伺える。

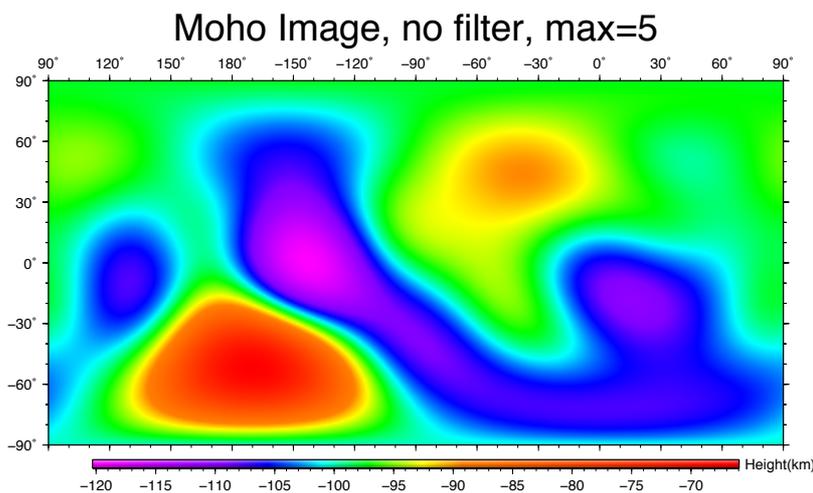


図 1  
最高次数 5 での全球的なモホ面形状。

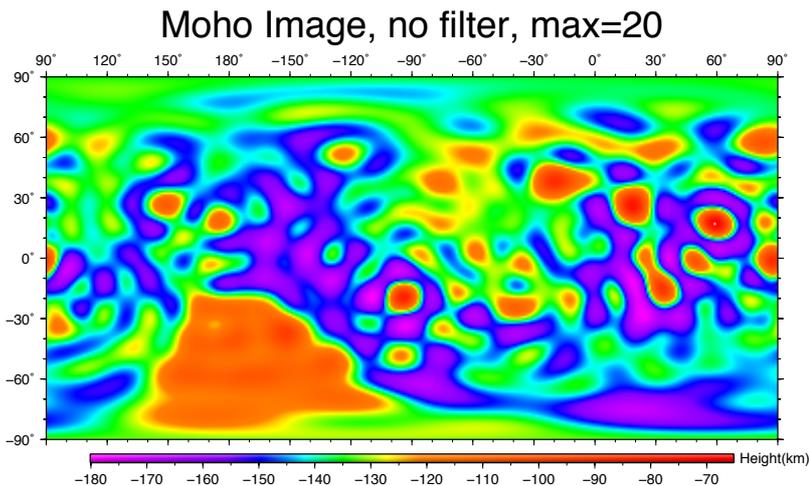


図 2  
最高次数 20 でのモホ面形状。

次に、高次項の振幅を押さえるフィルターを用いた。パワースペクトルの相対値が 1/2 となる次数を  $n_{half}$  とし、 $n_{half}$  と展開次数の上限  $n_{max}$  を変化させて、iteration の上限を 1 万回として結果を比較した。また、高い次数の計算では、局所的な地殻の薄い地形も見られると考えると、最小地殻厚は 10km とした。

$n_{max}$	空間スケール(km)	$n_{half}$	最小地殻厚 (km)	収束
30	$3.64 \times 10^2$	20	60	○
30	$3.64 \times 10^2$	30	60	×
30	$2.73 \times 10^2$	30	10	○
40	$2.73 \times 10^2$	30	10	○
50	$2.18 \times 10^2$	30	10	○
60	$1.82 \times 10^2$	30	10	○
60	$1.82 \times 10^2$	40	10	○
70	$1.56 \times 10^2$	40	10	○
70	$1.56 \times 10^2$	50	10	×

(表 2 : 最高次数とフィルターの半値の次数、および最小地殻厚、収束の結果)

また、重力異常から推定されるモホ面と地表面の地形図を任意の側線に沿って切った断面図が下の図であり、クレーター中央部などでモホ面が盛り上がり、地殻が薄くなっていることが確認される。

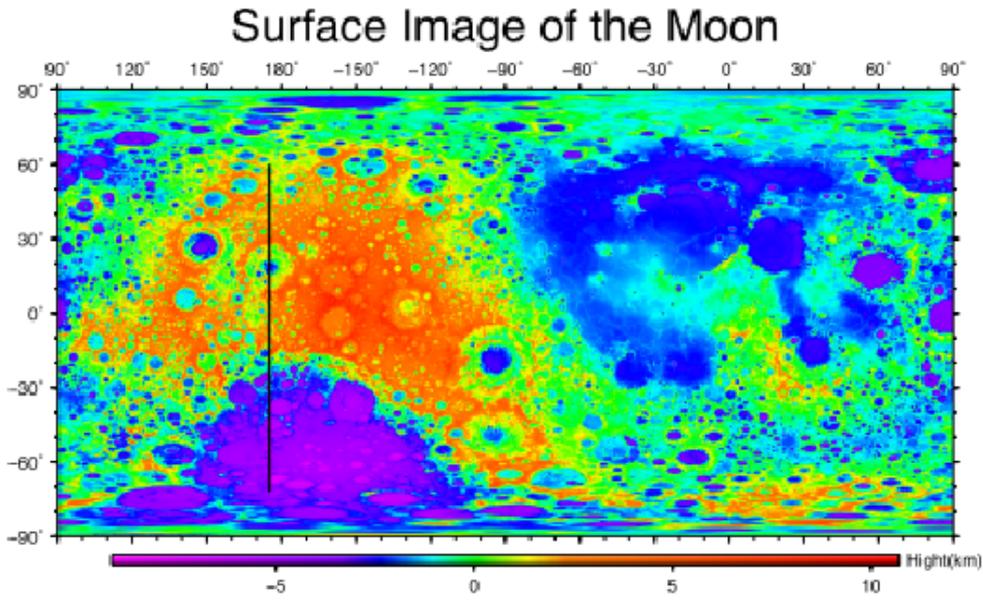


図 3-1  
表面地形(正距円筒図法)

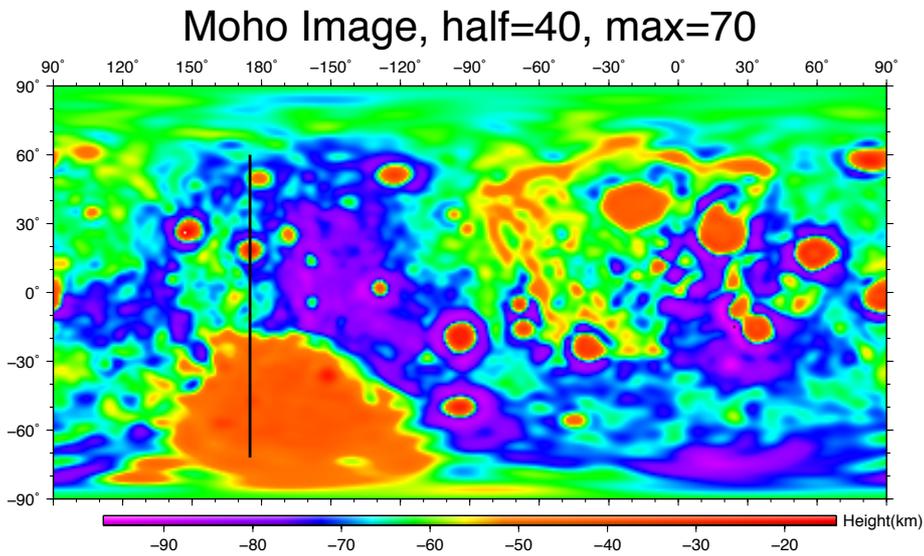


図 4-2  
最高次数 70、半植次数 40 でのモホ面形状

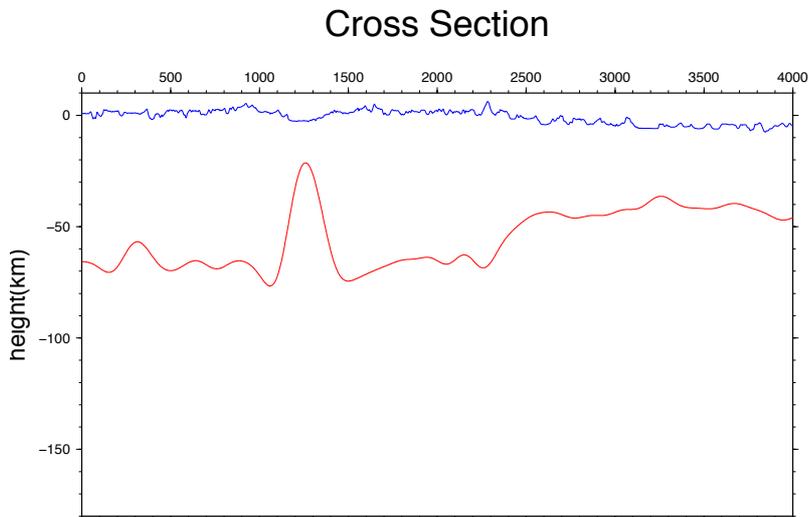


図 5-3  
側線(3-1,3-2 の黒実線)に沿った地表とモホ面の断面図

## 5. まとめと考察

月周回衛星の軌道変化の情報から月の重力場モデルが作られる。今回の実習課題では、地殻とマントルの密度差等を仮定してブーゲー重力異常を求め、地殻厚を推定した。今回の条件では、最高で 40 次で半値となるフィルター、70 次までの重力係数を用いた展開が可能であり、数 100m の空間スケールで地殻厚を議論できることが示唆された。なお、今回は地殻密度を水平一様と仮定しているが、実際に月表層の一部は海の玄武岩に覆われており、より正確な推定には水平方向の密度変化も考慮する必要がある。

## 6. 最後に

今回の実習では当初予定されていた課題をすべて達成することが出来ず、事前準備段階からの自分の勉強不足を反省している。しかし、かぐやの観測データを、実際に利用されている解析ツールを用いて解析するという貴重な経験が出来たことはとても有意義であった。

今回の主題であった地形・重力データの処理は、計算プログラムや描画ツールが複雑で、これらのツールに不慣れな者には難易度が高かったが、十分な理解があれば非常に面白いテーマになると思われる。かぐやの得た高分解能・全球的な月の情報から、今後の更なる解析と考察によって月の理解が深まると期待されることが期待される。このように注目が高まっている月探査データの解析に触れる機会を今回頂けて、非常に勉強になった。

講師の石原先生、松本先生、世話人のみなさまには、実習の3日間だけでなく、準備からアフターフォローまで迅速・丁寧に対応して頂き、大変お世話になった。この場を借りてお礼申し上げたい。ありがとうございました。



# 第5回月惑星探査データ解析実習会

会津大学コンピュータ理工学部 B3 中島秀穂

## 1. はじめに

月は常に地球に同じ面を向けて回っている。表側と裏側では地形、構造がまったく異なるが、周回衛星による裏側の観測が困難であるため、重力場などの情報が少なかった。2007年に打ち上げられた月周回衛星かぐやは、この問題を2機の子衛星を用いる事で解決し、多くのデータを取得した。これによって構造をより詳細に知る事が可能となった。

本実習では、かぐやの取得した地形、重力場のデータを用い、月の軌道予測、および地殻厚の推定を行った。

## 2. 衛星軌道決定

### 2.1. 手法

衛星軌道予測のために、GEODYN II を利用した。NASA/Goddard Space Flight Center が開発したツールであり、1985年から運用されている。かぐやの月重力場モデルの生成にも使用されており、軌道予測、軌道決定のほかにも、重力場係数、観測局位置などの多くの測地パラメータの推定に対して有効である。

実習においては、月重力の球場成分のみを考慮し、太陽や他の惑星の重力を無視、太陽輻射圧も0とし、軌道予測、決定を行った。また、実際のデータを用いて軌道予測と軌道決定を行い、オーバーラップ期間の軌道の差を求め、軌道予測の場合と軌道決定の場合の違いを見る。

### 2.2. 結果

100次までの係数を考慮した場合と、10次までの係数のみを考慮した場合の衛星軌道予測を行い、墜落するまでに要する期間を求めた。それぞれの場合について要した時間は、11日22時間37分と、12日14時間21分であった。低次項のみを用いた場合でも落ちるまでの日時に大きな影響はなかった。

軌道決定の場合の差は  $0.172215D+00$   $0.111710D+01$   $0.586384D+01$

0.597178D+01(rad, alo, cro, total) [m], 軌道予測の場合の差は,  
0.651509D+01 0.255757D+02 0.240442D+02 0.357027D+02(rad, alo,  
cro, total) [m]となった. こちらについても, 双方の差は小さくなった.

### 3. 地形・重力場データを用いた解析

#### 3.1. 手法

実習の際, かぐやによって取得された月形状・重力場データを利用した. これらのデータは国立天文台の RISE 月探査プロジェクトによって公開されており, 研究・教育活動目的で自由に利用する事が可能である.

また, 解析ツールとして SHTOOLS および Generic Mapping Tools(GMT)を用いた. SHTOOLS は, 天体表面についての計算を行うために必要となる, 球面調和関数の計算を行うためのライブラリである. 今回は Fortran95 からサブルーチンを呼び出して使用した. GMT は, データを地形図, 重力異常図, 断面図などとして表示, 出力するためのツールである. コマンドライン上で実行されるが, 手間を減らすため, シェルスクリプトとして記述, 実行した. それぞれのコマンドに豊富なオプションを持ち, 適切に指定する事で非常にわかりやすい図を出力する事ができる.

本実習では, かぐやの取得したデータを用いて, 月の地形図を作成, 出力した.

### 3.2. 結果

前述したツールを用いて出力した月の地形図を以下に示す。

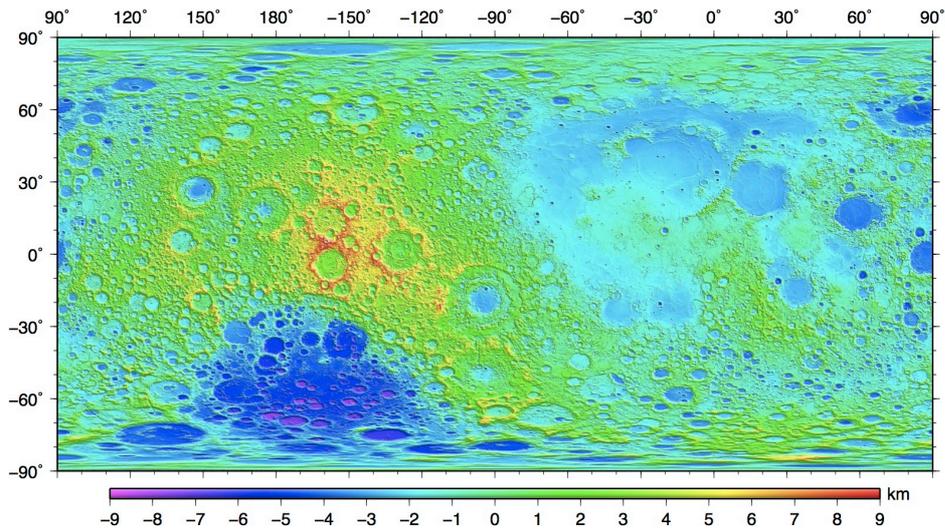


図 6 月の地形図

このように、視認性に優れた図を作成する事が出来た。

## 4. 演習課題

### 4.1. 課題内容

密度コントラストや拘束条件を変更した時、推測される地殻厚(モホ面形状)がどのように変化するかを議論する。

内部の構造は、密度の仮定の正しい場合のブーゲー重力異常により表される。重力異常とは基準面での重力値と観測された重力値の差であり、Free-air 重力異常と、ブーゲー重力異常の二つがある。Free-air 重力異常は基準面から観測点までの高さを補正したもので、その間に物質は存在しない物として考える。ブーゲー重力異常は基準面上に存在する物質の影響を取り除いた上で、基準面よりも下の質量以上も反映したものである。今回は重力場係数がわかっているため、あとは地殻とマンツルの密度差、回転楕円体の扁平率を仮定する事で求める事ができる。地殻厚

の最小値は計算時に仮定した値とした。

本実習では、前述のようにして月全球の地殻厚を推定し、求められた球面調和関数よりグリッドデータを作成，GMTで描画を行った。

#### 4.2. 結果

かぐやのデータを用いて求めた月のモホ面形状を以下に示す。

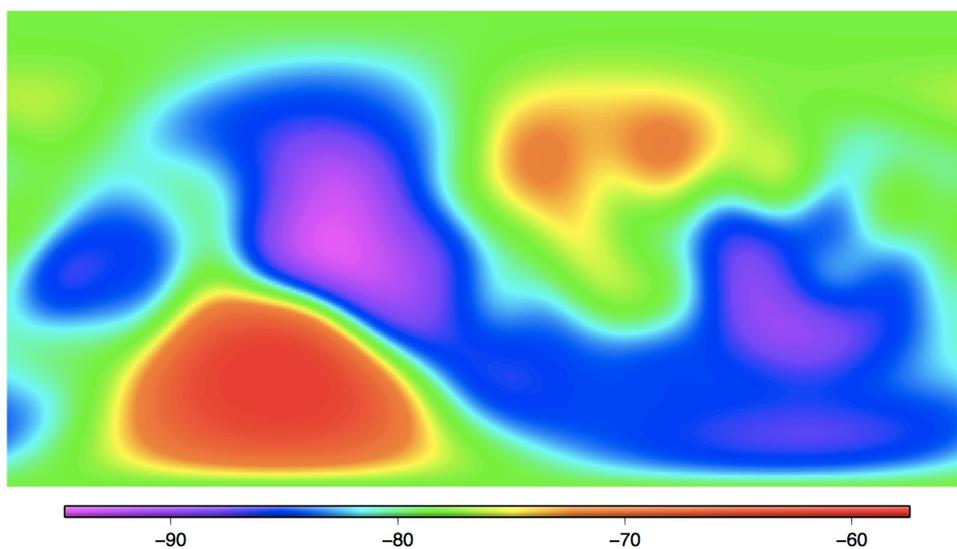


図 7 最高次数 10 次でのモホ面形状

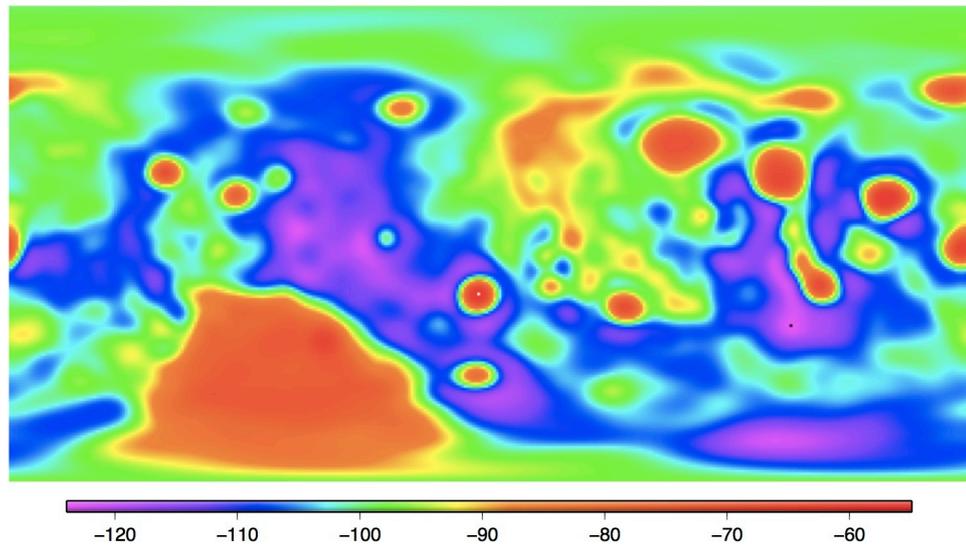


図 8 最高次数 70 次でのモホ面形状

## 5. 考察

本実習の課題ではかぐやの取得したデータを用い、地殻とマンツルの密度差を仮定してブーゲー重力異常を求めることで地殻厚を推測した。結果の図からわかる通り、高次の係数を考慮する事で、より詳細な形状を推測する事が出来る。だが、おおまかな形状は低次の係数によって決定されるため、低次の係数による影響が大きいという事が出来る。

今回は二つあるうちの片方のフィルタのみしか用いていないため、今後、もう一つのフィルタを用いた推定も行い、その差についても考察したい。

## 6. 最後に

本実習を通して、解析手法だけでなく、基礎的な知識を学ぶ事もできた。ツールやライブラリの使用については、事前の準備不足もあり、まだまだ不十分であると感じている。だが、このような手法での解析を体験する事ができ、非常に有意義であった。だが、課題を順調にこなす事ができず、結果的にいくつかの課題を行う事ができず残念だった。これらの課題については、今後、自主的に行っていこうと思う。

本実習にあたり準備、ご指導くださった講師の方々、誠にありがとうございました。