

[共同研究成果]

スーパーコンピュータ SX と月探査

—「かぐや」による月地下構造探査—

小林敬生¹⁾ 小野高幸²⁾

¹⁾韓国地質資源研究院 ²⁾東北大学大学院地球物理学専攻

1. はじめに

2007年9月14日、日本の月探査機 SELENE が無事打ち上げられ「かぐや」と名付けられた。「かぐや」は月の全球探査を実現するため極軌道を周回しており搭載された15の科学観測機器をつかって月の起源・進化の解明にせまるべく観測を続けている^[1]。

搭載機器のひとつに我々のグループが担当している月レーダサウンダ(Lunar Radar Sounder: LRS)^[2]がある。LRSは高度100kmの周回軌道から月の地下構造を観測するレーダである。観測中心周波数は短波(HF)帯の5MHzであり長さ30mの直交1対のダイポールアンテナでレーダパルスの送受信を行なう。最大探知深度は5kmと見積もられている。

「かぐや」打ち上げ前のLRSの開発には東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX が深く関わってきた。そして現在進められているLRSのデータ解析でも SX が重要な役割を果たしている。本稿ではLRSの月地下構造探査研究におけるスーパーコンピュータ SX の役割について紹介する。

2. SX による LRS 観測シミュレーション

月・惑星探査機に搭載される機器は搭載前に試験を行ない、機器性能の確認とデータ取得に関わる一連の作業の確認を行なう。そして地上試験で得られたデータを利用してデータの処理・解析プログラムの開発を進める。LRSもその例外ではない。しかし、LRSの場合レーダ送受信機単体の試験はできるが、長さ30mのアンテナを展開して実際にレーダパルスを発射する観測試験をすることは不可能であった。そのままでは実際の観測が始まって観測データが届くまで、データ処理・解析プログラムの有効な開発ができなくなってしまう。この問題を解決するために我々はLRSの月地下構造探査の観測を精密に模擬するシミュレーションコードを開発することにした。

シミュレーションではシミュレーション空間内に数値的に模擬月面を構築し、その100km上空の軌道に沿って「かぐや」を移動させながらLRS観測を行なった^[3]。観測データは1次処理を施してB-scan画像と呼ばれるものに編集する。B-scan画像とはレーダエコーを返すターゲットまでのレンジを縦軸にとり、横軸にレーダの移動距離をとったものでエコー強度をカラーコードで表したものである。図1はシミュレーションによって得られた「かぐや」LRS観測模擬データのB-scan画像と実観測で得られたB-scan画像の比較である。どちらもクレータ地形が卓越した高地領域を観測したものであるが、SXによるシミュレーションが実観測を非常によく模擬していることが分かる。図中に見える無数の引っ掻き傷のような双曲線模様は表面のクレータからの反射波によるものでLRSとクレータとの相対位置が「かぐや」の軌道運動によって変化することにより生じるパターンである。

現在実観測データの解析に使っている解析データの基礎は「かぐや」打ち上げ前、シミュレーションによって得られた模擬観測データを使って開発された。このシミュレーションは原理的に大きなメモリ空間が要求されるもので現実的な時間内に計算を終えるためにはスーパーコンピュータの利用が不可欠であった。

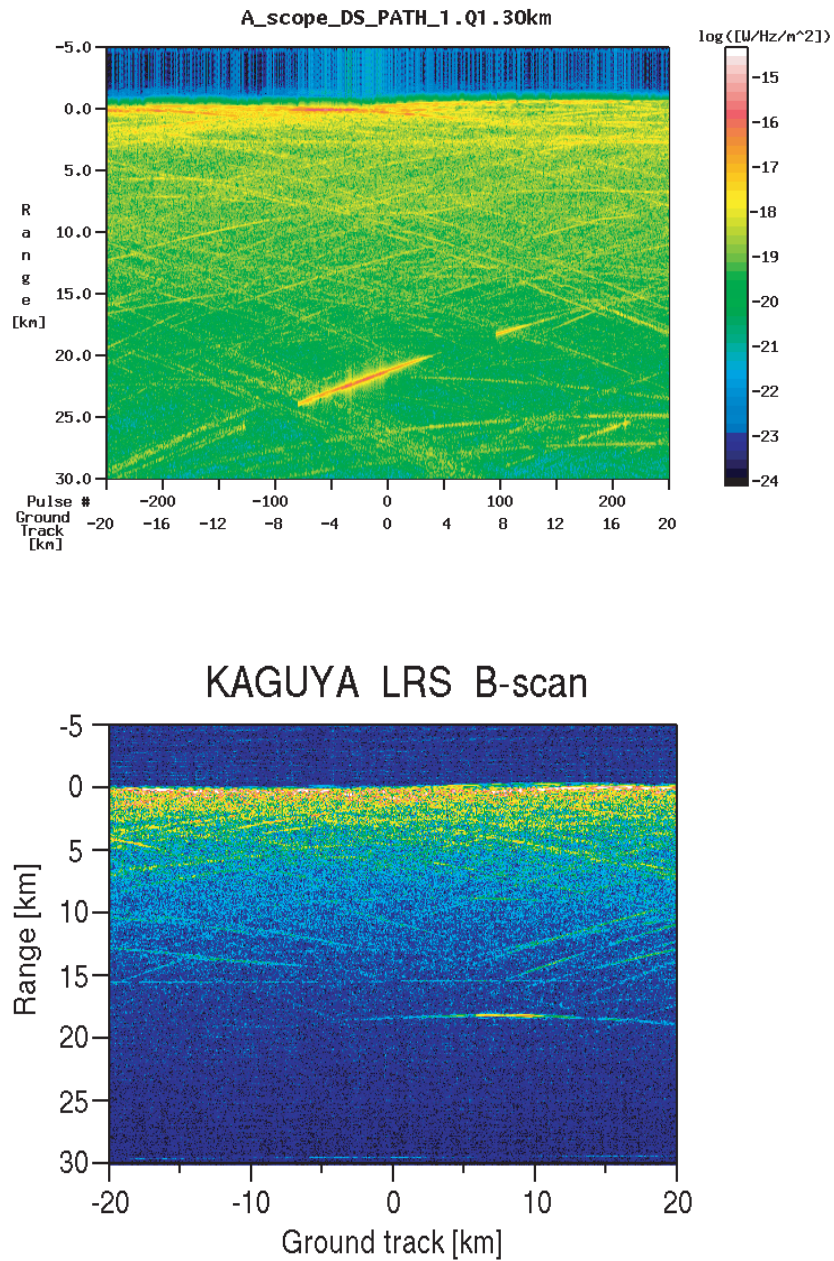


図1 LRS B-scan 図の SX シミュレーション結果 (上) と「かぐや」実観測データ (下) の比較. 受信信号強度を表すカラーコードは共通. 無数の曲線パターンは月表面のクレータからの反射によるものである. 実観測データでは遠距離からのエコーがシミュレーション結果に比べて弱い. これは実際のクレータ地形がシミュレーションで作られたクレータ地形よりもなだらかなため, 表面からの後方散乱波強度が弱いことによる. 下図のデータは「虹の入り江」南西部の月面西経 42 度, 北緯 38 度付近の観測で得られたものである.

3. SXによるLRS観測データの合成開口処理

3.1 B-scan画像による地下エコーの検出

LRSデータの解析はこれまでB-scan画像を解析することにより行なわれている。B-scan画像に現れるレーダエコーのパターンを分析して地下構造を調べていくのである。地下からのレーダエコーは地下伝搬中に強く減衰するため実際のデータ解析の現場ではまずそれを検出することが重要である。

地下エコーの検出作業は目視で行なわれる。検出をできるだけ容易にするための平均処理や強調処理などの前処理はなされるものの、最終的な検出作業は目視による確認である。図2に観測で得られたB-scan画像を示す。このデータは2007年11月21日に「雨の海」を観測して得られたものである。ランダムな表面クラッタを抑圧するため10パルスの平均をとっている。図2を見ると、まず緯度38度から39度までの間、深さ数百mまでの地下の浅いところに表面と平行に走る微かな地下エコーの存在が認められる。また緯度39.5度から40度までの間には数百mまでの深さにこれも微かではあるが複数の地下エコーの存在も認められる。

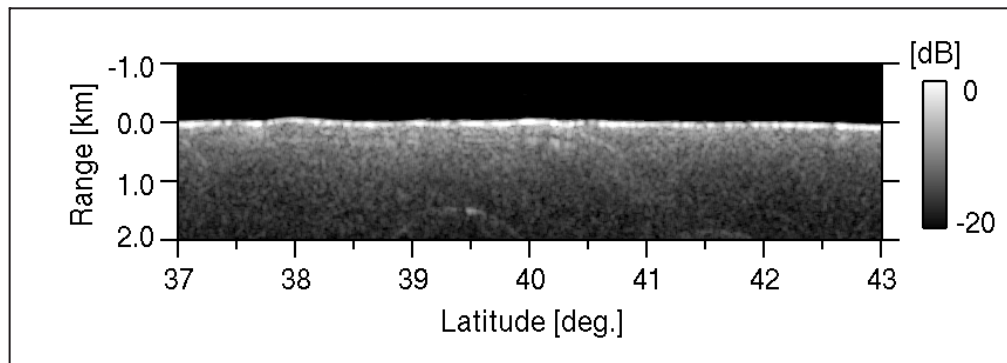


図2 「かぐや」LRS観測で得られたB-scan図。観測領域は「雨の海」北部。

3.2 SAR解析による地下可視化

LRSは機器本体のノイズレベルが銀河背雑音レベルよりも低く抑えられた高性能のレーダシステムである。データの質としては現在望みうる最高の観測を実現している。それにもかかわらず、われわれの目標である地下エコーが元来弱い反射である上に地下伝搬中に著しい減衰を受けるため、実際のエコー検出作業は図2から容易に想像される通りなかなか大変な作業である。われわれはこの状況を改善するために合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) のアルゴリズム^[4]をLRSデータに適用して「かぐや」軌道直下点深さ方向の地下構造画像再構成を試みることにした。

SARは地球観測では広く利用されており惑星探査でも「マゼラン」^[5]による金星表面撮像や「カッシーニ」^[6]による土星の衛星タイタンの表面撮像で活躍している。これらのSARはすべて指向性アンテナを用いたマイクロ波レーダによる「表面撮像」を目的としている。われわれが試みるLRS-SARは無指向性アンテナ (ダイポールアンテナ) を用いた短波帯レーダサウンダによる「地下構造可視化」であるという点でまったく新しい試みである。

通常、合成開口レーダではレーダ本体とともに「SARプロセッサ」と呼ばれるSAR信号処理に特化したハードウェアを作製して信号処理を行なう。しかし、LRSは「SARプロセッサ」を装備していないためソフトウェアでそれを代替させる必要がある。ところが「SARプロセッサ」アルゴ

リズムをそのままソフト化すればよいのかというところではない。LRS-SARにはこれまでのマイクロ波 SAR と決定的に違う点がひとつある。それは可視化目標物が地下に存在しているという点である。つまり媒質の不連続（真空と地下媒質）と媒質境界面（月面）での電波の屈折を考慮しなければならないという点である。そのため、LRS-SAR アルゴリズムでは、まず表面を検出しそれから深さ方向に順次 SAR 処理を行なうこととした。このため、アルゴリズムは複雑になったが、おかげで表面直下点の地形が精度よく検出されることとなり地下構造の直観的把握の手助けが得られることとなった。

図3に図2のLRSデータにSAR処理を施した結果を示す。両図を比較するとSAR処理の結果、地下構造の視認性が明らかに向上したことがわかる。特に図2では明白ではなかった微細構造、さらに図2では検知できなかった緯度41°～41.5°の地下構造がSAR処理により浮かび上がってきたことに注目したい。

SARアルゴリズムの最大の利点は衛星の運動方向の空間分解能が著しく向上する点にある。このおかげで厚い雲の下に隠されていた金星やタイタンの表面があたかも光学写真を見るかのごとく「見える」ようになったのである。SARアルゴリズムにはもうひとつ大きな利点がある。それは、可視化される目標物からの信号だけが強調され、目標物信号に重畳して受信されるクラッタやノイズのレベルが抑圧されるという点である。これは、SARアルゴリズムの原理が「予測される」目標物からの信号（参照信号）と観測データとの相関処理であることによる。すなわち、参照信号と同じ形をした目標物エコーが相関処理により強調され、参照信号と無相関なクラッタやノイズは相関処理のため抑圧されるのである。このおかげで地下エコーは強調される一方で地下エコーと重畳して受信される表面クラッタは抑圧され、図3に見られる通りコントラストが改善されて地下エコーの視認性が向上するのである。

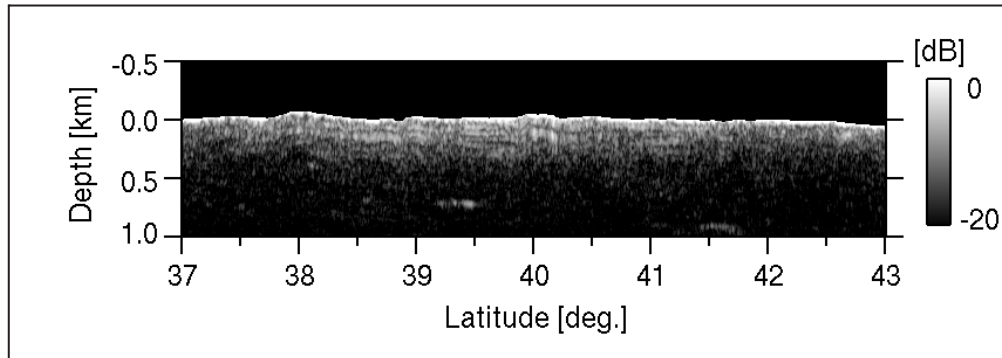


図3 図2の観測データのSAR処理画像。地下エコーの視認性が向上している。

3.3 SXによるデータ処理

当初LRSデータの処理はPCでも十分こなせるものと考えられてきた。図1に示したB-scan処理だけならこれは正しい。しかし、SARアルゴリズムの開発を進めてみるとSAR処理をPC上で現実的な時間で終わらせることは無理であることがわかった。図2のデータから図3のデータを得るのに要する処理時間はPCで15分程度である。SAR処理を待っているデータは各観測データセットの大きさが図2のデータの数倍程度（図2では緯度7度分の範囲が示されているが通常データセットは20～25度分の範囲をカバーする）、そしてこれまでに選ばれた月面の探査解析領域をカバーする観測（パス）数は3000を超える。PCで処理を行なう場合メモリの制限が厳しいので観測データを小分けにしてSAR処理をした後データの編集を行なうという作業も必要となる。

このため必要な処理時間はさらに膨らむ。PCでのSARアルゴリズム開発を離れてからはSXにあわせて最適化されるようアルゴリズムにかなり手を入れたので単純な比較はできないが、体感速度としてはSXにおけるSAR処理速度はPCにおけるその数十倍から100倍程度はあるように思える。律速段階となっているのはデータの読み書きである。読み込むLRS観測データは通常300MB程度で書き出すSARデータは100～150MBである。

4. むすび

スーパーコンピュータSXを利用した月探査衛星「かぐや」の地下探査レーダLRSの観測データの解析についてこれまでSXが「かぐや」計画の中で果たしてきた役割の簡単な紹介とともにSXを利用した最新の観測データの処理について紹介した。東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータSXは大学の研究の場で主にシミュレーションなどの数値解析・数値計算で活用されているが、本稿で紹介したように大量の自然観測のデータの高度処理・解析においても重要な役割を果たす。SXによるLRSデータの直下点地下構造SAR解析は着々と進んでいる。今後はこのSAR解析が終了した後、側方視のSAR解析^[7]を行なうことを検討している。LRSで見える「表面」は光で見える「表面」よりも少し深いところであることがこれまでのデータ解析でわかってきた。このことから光とは異なる「表面」の様相が現れることが期待される。解析で明らかになる地下構造情報から月の進化の歴史を再構成することがこのLRS観測研究の最終的な目標である。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただいた。

参考文献

- [1] http://www.selene.jaxa.jp/index_j.htm
- [2] Ono et al., Instrument and observation target of the Lunar Radar Sounder (LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft, *Earth, Planets and Space*, vol.60, pp. 321-332, 2008
- [3] 小林 他, SELENE 計画 月レーダサウンダによる月地下構造探査の計算機シミュレーション, *SENAC*, vol.32, 1999
- [4] Curlander and McDonough, *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*, Wiley: New York, 1991
- [5] W. T. K., Johnson, Magellan imaging radar mission to Venus, *Proc. IEEE*, vol.79, pp.777-790, 1991
- [6] Elachi et al., Cassini Titan radar mapping, *Proc. IEEE*, vo.79, pp.867-880, 1991
- [7] Kobayashi and Ono, SAR/InSAR observation by an HF sounder, *J.Geophys.Res.*, doi:10.1029/2005JE002576, 2007