

SELENE 計画 月レーダサウンダによる月高地領域地下構造探査と 合成開口レーダ解析の計算機シミュレーション

東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻
小林 敬生 小野 高幸 大家 寛

はじめに

現在、我が国では SELENE 計画と名づけられた大型の月探査計画が 2004 年の探査機打ち上げを目指して進められている。SELENE 計画では 2 トン・クラスの飛翔体に合計 14 の科学ミッションが搭載され、月面のみならず月周辺環境や月地下をも総合的に探査する。最新の技術を利用して得られる詳細なデータは、月科学に飛躍的な進歩をもたらすものと期待されている。

搭載ミッションのひとつに我々東北大学のグループが参加する月レーダサウンダ (Lunar Radar Sounder : LRS) がある。LRS は HF 帯電波を利用したレーダであり、通常のレーダと同様反射エコーの受信遅れ時間によって反射体までのレンジ (距離) を決定するが、SELENE 計画においては、月地下からの反射エコーを検出して月の地下構造を探査し月の誕生・進化の研究に資することを主目的としている。LRS のレーダ方式は FMCW (周波数変調連続波) 方式であり、送信波はその周波数が 4 MHz から 6 MHz まで 200 μ sec で直線的に掃引されたパルスとして送信される。LRS のレンジ (距離) 分解能は受信波のパルス圧縮処理後、真空中で 75m となる。送受信アンテナは tip-to-tip 30 m のダイポールアンテナで、送信出力は 800W である。計画では月面上空高度 100km の極軌道で 1 年間をかけて全球を観測する予定で、軌道上からの観測における最大探知深度は表面下 5 km を予測している。

月地下を伝播する LRS 送信パルスは強い減衰を受けるため地下反射エコーは非常に微弱なものとなる。一方、月表面は決して滑らかな面ではないため様々な方向、レンジからの表面反射波が微弱な地下反射エコーに重畳して受信される。そのため、LRS による地下探査の成否は、地下反射エコーの表面反射波に対する S/N をいかに改善して両者の分離・識別を行なうかにかかってくることになる。

我々はこの問題を観測データのデータ解析段階で解決するため、前年度までに東北大学大型計算機センターのスーパーコンピュータを利用して LRS 観測を模擬するシミュレーションコードを開発し、観測シミュレーションの結果を基に LRS 観測データの解析手法の研究開発を進めてきた^[1]。本稿では、前年度に引き続いて進められた LRS 観測シミュレーションで新たに得られた知見、すなわち月高地クレータ密集領域における LRS 観測地下構造探査のデータ解析手法と LRS 観測データを用いた合成開口レーダ解析手法について紹介する。

1. 高地領域における LRS 地下構造探査シミュレーション

1.1 高地領域の LRS 観測

高地領域は無数のクレータが密集する山岳地帯で、その面積は月面全体の 80%強を占める。密集するクレータが作る表面地形は複雑な様相を呈し、LRS 観測では様々な地点のクレータ斜面、特に LRS 送信パルスの正面反射条件が成立しやすいクレータ内壁斜面や、強い回折波が発生しやすい鋭い稜線などから強い表面反射波が返ってきて、地下反射エコーの検出を困難にすることが予想される。クレータ分布が飽和している領域では表面の凹凸が大きい

め、直下点地下反射エコーを広い領域にわたってコヒーレント信号と見なし続けることはできなくなる。その場合、海領域の LRS 観測データ解析で有効な手法であった波形データ重ね合わせ手法¹⁾は地下反射エコーの S/N を改善する万能手段とはなり得ない。

ところで、高地領域の岩石と海領域の岩石は組成が異なる。高地領域の岩石はハンレイ岩質斜長岩が大部分を占めるが、海領域の岩石は玄武岩であり、斜長岩は玄武岩と比べて FeO と TiO₂ の含有率が低いという特徴がある²⁾。この特徴は誘電率の値に反映され、FeO と TiO₂ の含有率が低い高地領域の岩石の誘電率はその虚部の値が小さい³⁾。このため、海領域に比べ高地領域では地下における LRS パルスの減衰が小さいことになる。因みに中心周波数が 5MHz の LRS パルスの地下減衰 A[dB]は地下伝播距離を L[km]、地下物質の比誘電率の値を $\epsilon_r + i\epsilon_i$ とすると

$$A = -8L \cdot 100 \frac{\epsilon_i}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ [dB]}$$

である。このため、高地領域の観測では、海領域のデータ解析に有効であった波形データの重ね合わせ処理による効果が期待できない場合でも、地下反射エコーの受信時の強度が直下点周辺部表面反射エコーに匹敵する強度を持てば、A スコープデータ（後述 1.3 参照）を時系列データとして並べた B スキャンディスプレイ（後述 1.3 参照）上で目視により地下反射エコーのエコーパターンを検出できる可能性がある。我々はこの可能性を検討するため、高地領域における LRS 連続観測のシミュレーションを行った。

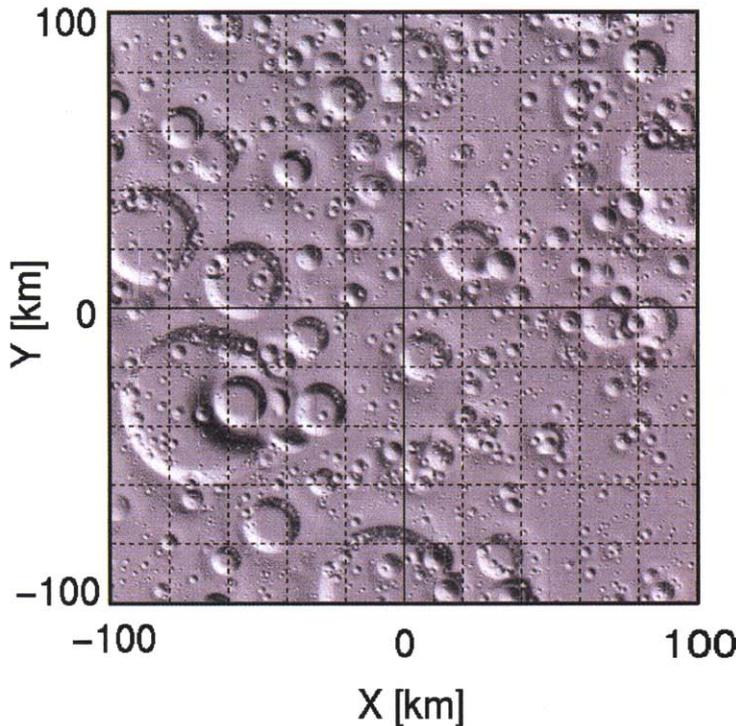


図1 高地領域クレータ地形

1.2 シミュレーション条件

シミュレーションの条件は現時点で計画されている LRS 観測条件に合わせて設定した。すなわち、LRS の送信パルスは 4MHz から 6MHz まで 200 μ sec で直線掃引し、送信出力は 800W、パルス繰り返し周波数は 20Hz とする。SELENE 衛星の軌道は月面平均面上空 100km である。月地下空間は上層・下層の 2 領域に分け、月地下物質の誘電率はこれまでの月の岩石の研究で得られた知見⁹⁾から判断して妥当であると考えられる値を選び、上層ではノミナル値 $\epsilon_1 = 4.0 + i0.02$ 、下層では $\epsilon_2 = 8.0 + i0.05$ とした。

直下点地下反射エコーはこれまでの研究¹⁾でその強度が地下境界面の粗さに依存しないことが分かっているの、計算時間節約のため地下境界面は滑らかな水平面とし、その深さは平均表面から 1250m とした。地下第 1 層の誘電率はその実部の大きさが 4.0 なので、地下境界面の見かけ深さは 2500m とする。

表面のクレータ地形は、モンテカルロ法により衝突クレータの生成を模擬して数値的に生成した。図 1 は本シミュレーションで扱った高地領域のクレータ地形である。最小半径 10m のクレータを 1km² 当たり 100 個の密度で発生させて作られた。クレータ分布の統計的性質は Baldwin(1964)¹⁰⁾に従い、クレータの幾何形状の統計的性質は Pike(1974)¹¹⁾に従うものとした。このような統計的性質を持つクレータは、その最小半径を 10m とすると、飽和密度が 1km² 当たり 200 個となるのがこれまでの検討で明らかとなっている⁶⁾。したがって、図 1 の地形はクレータ分布飽和前の地形ということになる。この地形の上空を SELENE が移動しながら 500 パルスの観測を行なう。観測中の移動距離は 40km である。

シミュレーションでは、一辺の長さ 10m の正方形を対角線で 2 分割して 1 メッシュとしている。したがって、図 1 の地形は 8 × 10⁸ 個のメッシュから構成されることとなる。これらのメッシュひとつひとつについて、電磁波 (複素ベクトル) の反射・屈折の問題を解くのである。このようなシミュレーションはスーパーコンピュータがあつて初めて可能である。

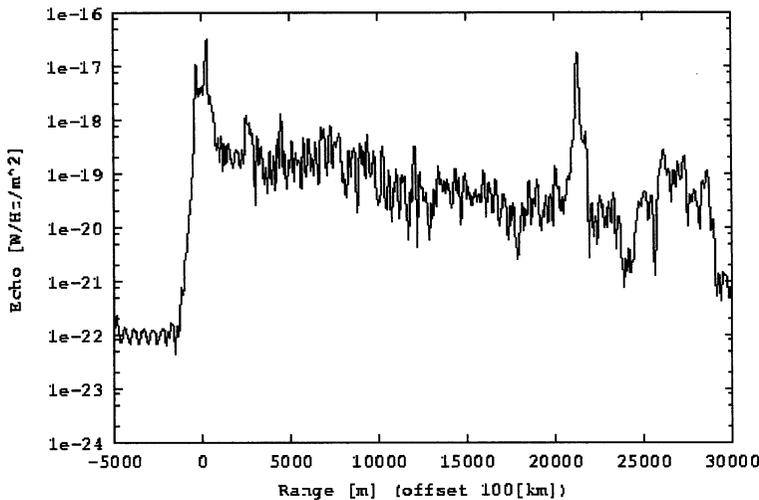


図2 高地クレータ密集領域の LRS 観測 A スコープ
 SELENE 直下点月面平均面までのレンジ (100km) を基準 (0レンジ) としている。

1.3 シミュレーション結果

LRSの観測結果はまず、A スコープと呼ばれるレンジ (距離) 対信号強度のプロット図で表される。図1の原点 (0, 0) 上空のLRS 観測で得られるA スコープを図2に示す。

一般に、レーダの運用ではレーダアンテナからレーダパルスの反射体までの距離をレンジと定義しているが、本稿では、SELENE 衛星から月面平均面上の SELENE 衛星直下点までのレンジ (100km) を基準レンジ (0 レンジ) とする相対レンジを用いる。したがって、図2において、レンジ0m 付近に存在する非常に強い受信信号のピークはSELENE 直下点からの表面反射波ということになる。高地クレータ領域は表面の起伏が激しいためSELENE 直下点レンジ (最大ピークのレンジ) は0レンジからやや外れたレンジとなる。また、高地クレータ領域では1.1 で述べたように、さまざまなレンジから強い表面反射波が返ってきて A スコープ上に無数のピークを現出させる。地下反射エコーのピークはレンジ2500m付近に現れているが、他の無数のピークの中からこの地下反射エコーを識別することは不可能である。

次に、500パルスの観測で得られたすべてのA スコープデータからB スキャンディスプレイを作成する。B スキャンディスプレイはA スコープデータを時系列データとして並べた3次元データで、各レンジの受信信号強度をカラーコードで示すことによってその時間変化が一目で分かるようになっている (図3)。

さて、図3に示すB スキャンディスプレイでは大別以下の4種の反射信号が認められる。

- (i) 表面直下点反射エコー
- (ii) 強い表面反射波
- (iii) 弱い表面反射波
- (iv) 地下反射エコー

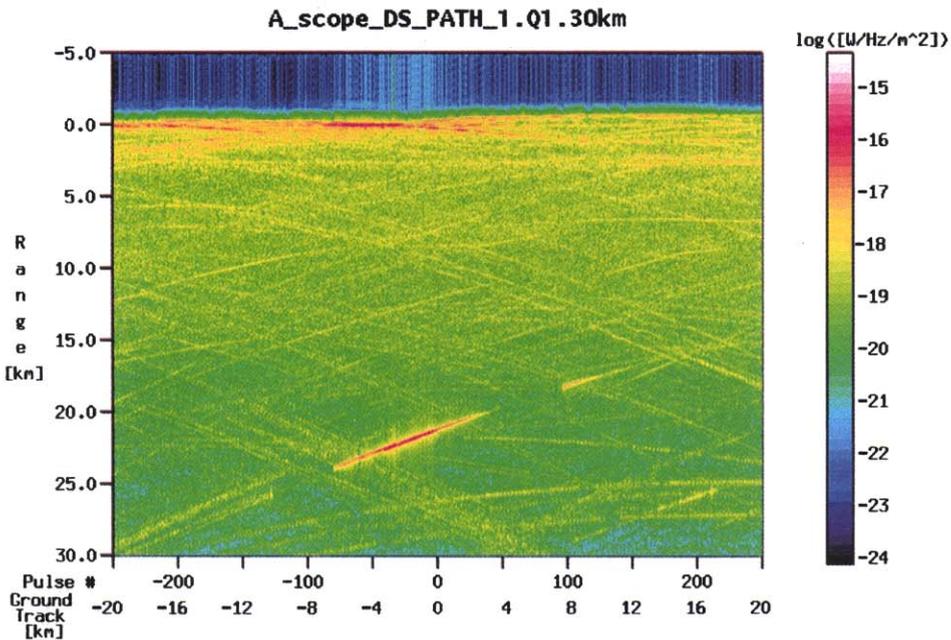


図3 高地クレータ密集領域のLRS 観測 B スキャンディスプレイ ($\epsilon_1 = 4.0 + i0.02$)

(i) はレンジ0m 付近に常時最も強い強度 (赤～黄) で現れている。(ii) はB スキャンディスプレイ上で緩やかな曲線パターンを描く比較的強い (黄～黄緑) エコーで、これは1.1 で言及したクレータからの表面反射波である。図上で曲線パターンを示すのは、SELENE の移動に従って反射源のレンジが変化するためである。(iii) は表面散乱波とも呼ばれるべきもので図では緑色で表示されており、ほぼすべてのレンジに認められる。そして、(iv) の地下反射エコーは、その (見かけ) レンジが 2500m 付近で時間的に変化することなく、図中周囲の強い表面反射波の間に見え隠れしながら続く水平な直線パターン (黄色) として認められる。

このように、地下反射エコーが場所によっては表面散乱波に隠されるほど弱くても、エコーがB スキャンディスプレイ上で示す直線的パターンを目視によって確認できれば、困難と考えられていた地下反射エコーの検出は高地クレータ密集領域においても可能であることが本シミュレーションにより確かめられた。しかし、図3のB スキャンディスプレイには他にも直線的パターンがいくつか認められる。データ解析の際には、地下反射エコーと紛らわしいこれらの表面反射波を識別する必要がある。そのためには得られたデータに対し合成開口レーダ処理を行いエコー反射源の位置を同定する、あるいは地形カメラの画像データで地下反射エコーと紛らわしいエコーを返す表面地形 (クレータや鋭い稜線を持つ山岳地形、溪谷など) の有無の確認をする必要がある。

1.4 波形データ重ねあわせの効果

次に伝播損失のより大きな地下物質について同様なシミュレーションを行った。シミュレーション条件は地下第1層の地下物質誘電率を $\epsilon_1 = 4.0 + i0.03$ (誘電率虚部の大きさが前項の場合の1.5倍) とした以外すべて前項のシミュレーション条件と同じである。このシミュレーションでは、地下における大きな伝播損失のため、地下反射エコーが十分なS/Nを表面散乱波に対して持ち得ず、したがってB スキャンディスプレイ上でももはや確認することは不可能である (図4)。しかし、観測中、地下反射エコーのコヒーレント性が保たれていれば、海領域の観測データ処理で行なったように¹¹⁾、波形データの重ね合わせによって相対的に表面散乱波強度を抑え地下反射エコーのS/Nを上げることができる。そこで、今度はこの波形データ重ね合わせ法の有効性を検討した。

図5は11回の観測で得られた11パルス分の波形データ重ね合わせ平均化 (図4における波形データの時間軸方向への11パルス移動平均) によるB スキャンディスプレイである。レンジ範囲 - 5km から 12.5km までを拡大して表示してある。このB スキャンディスプレイでは、全体に表面散乱波のレベルが減少し、このため見かけレンジ2.5km に地下反射エコーの直線的パターンが確認できる。すなわち、波形データ重ね合わせ処理が有効であることが示される。しかし、重ね合わせの波形データの数を増やしていくと地下反射エコーのコヒーレンス性が崩れてしまうために地下反射エコーのS/Nが減少して、B スキャンディスプレイ上でも地下反射エコーのパターンを確認することが不可能になってしまうことも解析を進めることにより確認された。

このように、地下反射エコーのコヒーレント性が保たれる範囲での波形データ重ね合わせ処理は地下反射エコーのS/Nの改善に有効であり、その検出可能性を増大させるが、海領域のLRS観測と異なり、高地領域のLRS観測では地下反射エコーのコヒーレント性が保たれる範囲に一定の限界があることが本シミュレーションにより明らかとなった。

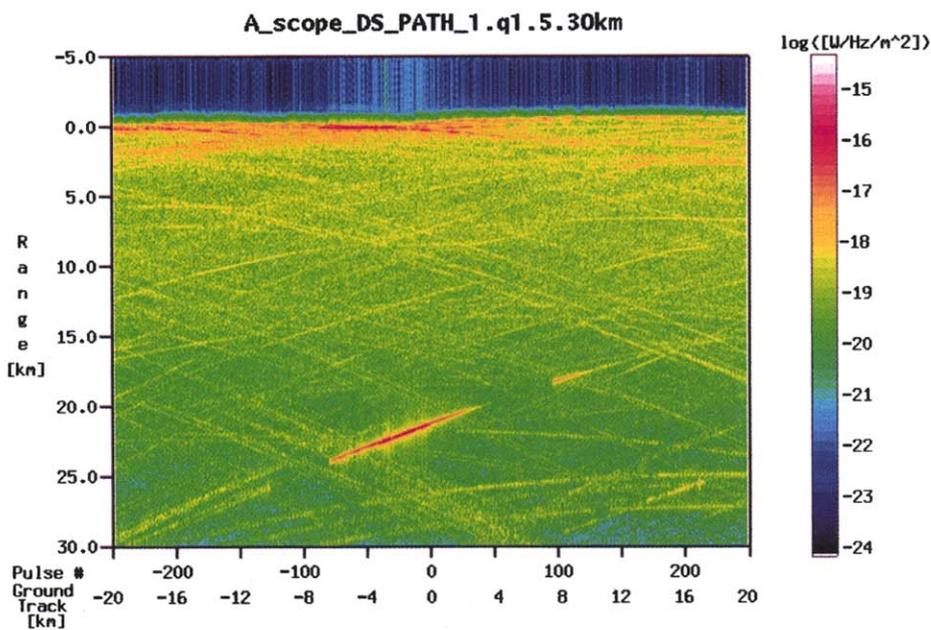


図4 高地クレータ密集領域のLRS観測 B スキャンディスプレイ ($\epsilon_1 = 4.0 + i0.03$)

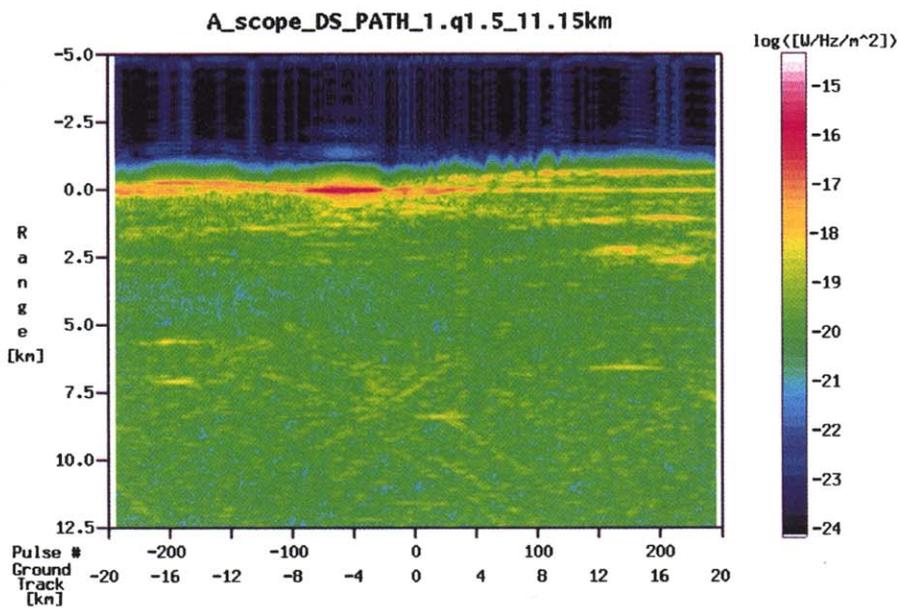


図5 11 観測波形データ重ね合わせ平均化による高地クレータ密集領域のLRS観測 B スキャンディスプレイ ($\epsilon_1 = 4.0 + i0.03$)

2. LRS による合成開口レーダ解析

2.1 LRS 合成開口レーダ解析の原理

LRS 観測データに対し合成開口レーダ (SAR) 処理を行なう目的は、上述したように、地下反射エコーと紛らわしい表面反射エコーの表面反射源の位置を特定することにある。

LRS 観測データで合成開口レーダ処理を行なうに当たっては、解決すべき問題が2つ存在する。ひとつは、ドップラ周波数の検出であり、もうひとつは決定されるターゲット位置に SELENE 進行方向に関する左右の任意性が生じる問題である。以下、この2つの問題点を解決し合成開口レーダ処理により月表面反射源位置を決定する方法について述べる。

まず合成開口レーダ処理を行なうためには、観測データからドップラ信号成分を検出する必要があるが、SELENE LRS が受信する表面反射波のドップラ周波数は最大でも 30Hz 程度なので、パルス長 200 μ 秒の LRS 観測では1パルスの観測データからドップラ信号を検出することは不可能である。これは SELENE からは1パルスの照射時間中月面上の反射源が静止して見えることに対応する (200 μ 秒間の SELENE の移動量は 32cm)。しかし、軌道上を移動しながら観測を続ける SELENE からは、各パルス送信時刻における月面反射源の SELENE に対する位置変化が各反射波成分の位相の変化として検知される。この位相の変化はドップラ変位に起因するものであり、この位相の時間変化率が実はドップラ周波数である。この位相の変化量の大きさは反射波の到来方向すなわち反射源位置に依存する。地下反射エコーと紛らわしいレンジ (～数 km) からの表面反射波の場合、SELENE 進行方向からの反射波ではその大きさは LRS パルスの各送信時刻 (20 msec) で最大 π rad 程度であり、SELENE 進行方向直角方向からの反射波でそれは 0 rad となる。各反射波成分の位相は各レンジビンの FFT 複素データの偏角として求まる。

図6は SELENE がターゲットに最接近する前後での観測の模式図を示したものである。この図ではターゲットが SELENE 軌道の左側に位置しているが、以下の議論はターゲットが SELENE 軌道の右側に位置している場合でも全く同様に成り立つ、すなわちターゲット位置に左右の区別がつかないことに注意されたい。さて、図中、SELENE は直線軌道上を速さ v で進み、点 O でターゲットに最接近する。このターゲット最接近レンジを R とする。

任意時刻における SELENE の位置 $\lambda(t)$ は、点 O 通過時刻を基準時刻 $t = 0$ として

$$\lambda(t) = vt$$

のように表わされる。そして、SELENE とターゲット、点 O が作る角を θ とすると、 $|\theta| \ll 1$ なら

$$\theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta = \frac{l(t)}{R} = \frac{vt}{R}$$

の近似が成り立つ。したがって、SELENE の送信パルスの中心周波数を ω_0 とするとターゲットからのドップラ周波数 ω_{Dop} は

$$\omega_{\text{Dop}}(t) = \frac{2v \sin \theta}{c} \cdot \omega_0 \approx \left(\frac{2v^2 \omega_0}{cR} \right) t \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表わされる (c は光速)。これは t の 1 次関数であり、得られるドップラ信号がリニア FM 信号であることを示している。この信号は SELENE 進行方向に関する左右の任意性を別とすると SELENE 軌道上に指定された点 O とターゲットの位置 (最接近レンジ R) によって

一意に決まるので、合成開口レーダ処理を行なうことによってターゲットの位置を決定することは、得られた観測データからこのFM信号を検出する処理を行なうことと同値であるということになる。

LRS合成開口レーダ処理では、観測月面の平均面上に仮想ポイントターゲットを置き(1)をレファレンス信号周波数としてこのターゲットから返される信号を含むデータとの相関をとって反射源の有無を調べる。SENEC進行方向の空間分解能 $\Delta\lambda$ はこのレファレンス信号の自己相関関数の中央ピーク半値幅から導かれ

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda R}{2L}$$

となる。ただし、 λ は送信パルスの中心周波数 ω_0 における波長であり、 L はSENECがターゲットからの反射波を受信している間に移動する距離で、これが合成開口レーダの合成アンテナ開口長となる。実際の観測ではこの L は10km程度と見積もられる。SENECのアンテナ長は30mであるから、この合成アンテナ開口長は実アンテナ長の300倍以上の大きさをもつこととなる。そして、これによって得られるSENEC進行方向の空間分解能は約300mとなる。

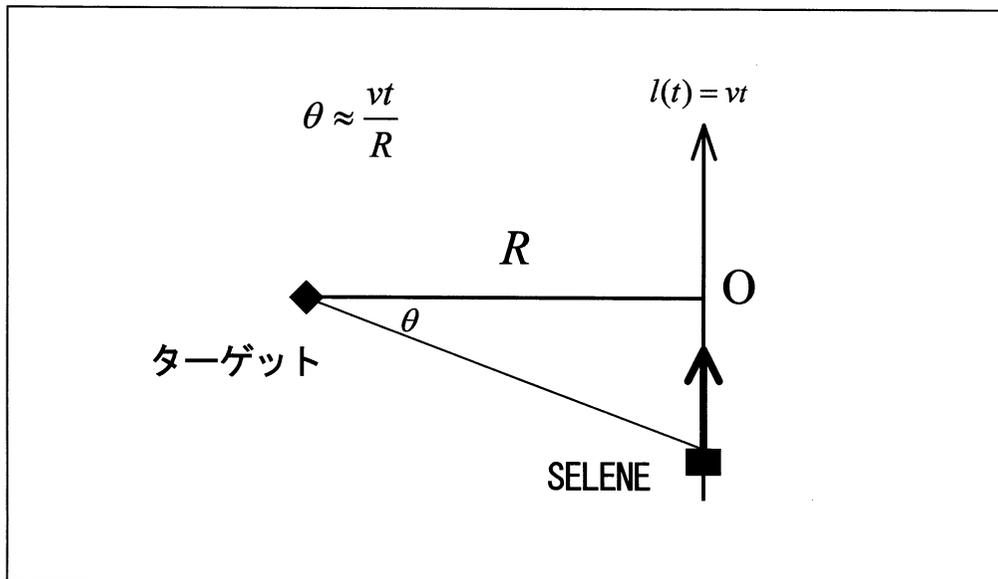


図6 SENEC と反射源との幾何関係

このようにして決定された月面上のターゲット位置には、しかし、SENEC進行方向に関する左右の任意性が残されている。これはLRSのレーダビームがダイポールアンテナによるビームであるため、月面上のビーム照射領域がSENEC直下点を中心にほぼ一様に広がっていることによる。

この、ターゲット位置の左右の任意性を取り除くためには複数のパスによる観測の相関をとる(図7)。そのためには、まず月面平均面上に固定した座標でターゲットの位置を定義し、

第nパスの観測による月面反射源分布を $T_n(x, y)$ とする。この $T_n(x, y)$ にはSELENE進行方向に関する反射源位置の左右の任意性がまだ残されている。そこで、それを取り除くために積相関

$$T(x, y) = \left[\prod_{n=1}^N T_n(x, y) \right]^{\frac{1}{N}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

をとり、月面反射源の分布を決定する。次節ではこの相関処理を単純地形の観測に適用する。

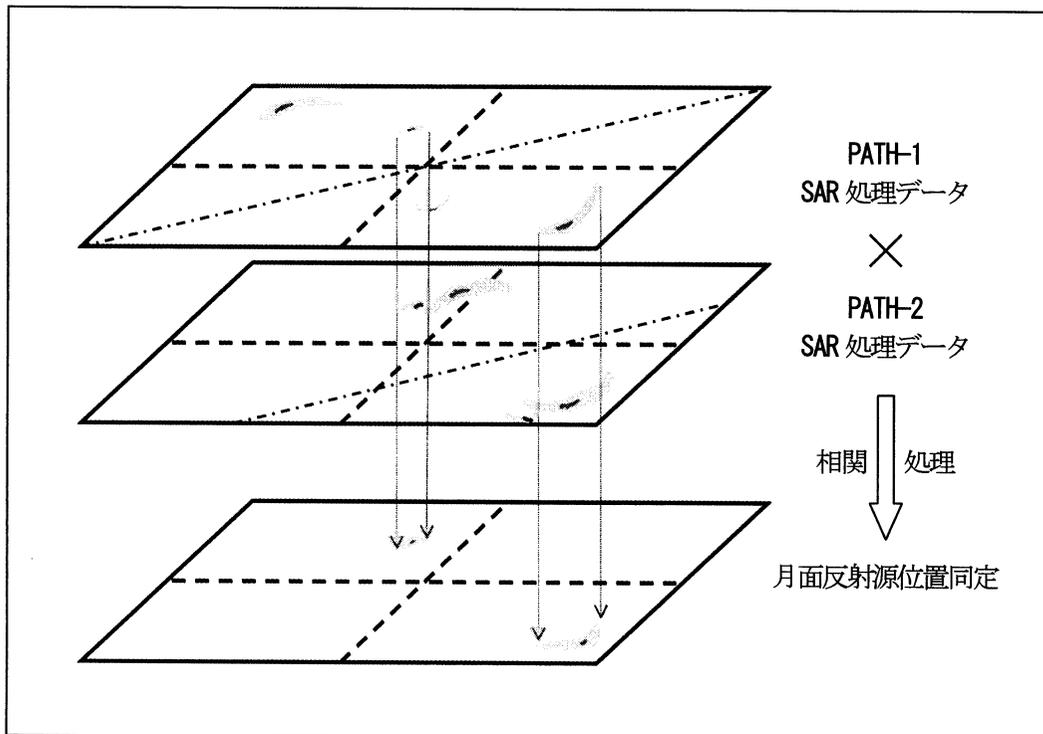


図7 左右の任意性を除去するための相関処理 (概念図)

2.2 単純地形のLRS観測

以上のLRS合成開口レーダ解析手法の有効性を確認するため、単純な地形によるLRS観測のシミュレーションを行なった。地形以外のシミュレーション条件は前節のシミュレーションと同様である。ただし、地下反射エコーのシミュレーションは行なっていない。シミュレーション地形とSELENEのパスは図8に示す通りで、完全平面の月面に3つのクレータA(リム直径5km)、B(リム直径5km)、C(リム直径1km)を配置し、3つのパスで観測を行なう。図中、各パスにおいて太線で示した部分が観測シミュレーションを行なった部分で、観測中のSELENEの移動距離は40kmである。それぞれのパスについて500パルスの観測を行なった。

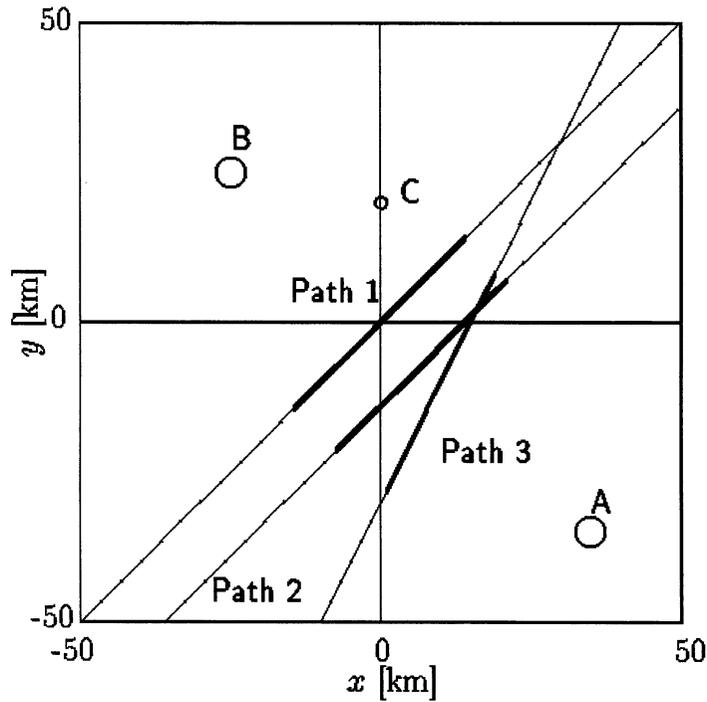


図8 単純地形モデル。丸はクレータリムを表す。

2.3 単純地形のLRS 合成開口レーダ解析

図9にパス1の観測データのB スキャンディスプレイを示す。図にはA、B、Cの各クレータからの強い反射エコーがSELENE 直下点反射エコー (レンジ0km) とともに連続したパターンを描いていることがはっきりと見てとれる。背景に規則的なパターンが現れているがこれはシミュレーション平面を構成する規則的なメッシュの並びに起因するもので、滑らかな連続面を有限の大きさのメッシュに分割する際に生じる一種の量子化誤差である。ディスプレイのグレイスケールがログスケールであるために目立つものとなっているが、本シミュレーションの結果に影響を与えるものではない。また、レンジ25km 以遠に2本の直線パターンを描くエコーが見られるが、これらはシミュレーション平面の境界線 (端) からの回折エコーである。

次に、3つのパスの観測データに対し合成開口レーダ処理を実行し(2)に従い3パスの観測の積相関をとった。図10にクレータBの付近の反射源分布の拡大図をクレータリムの輪郭線(点線円)と共に示す。予想通りクレータ内壁部分に強い反射源が存在していることがわかる。これにより、LRS 観測データに対し、合成開口レーダ解析手法を適用して表面反射源の位置を特定することが、確かに可能であることが示された。

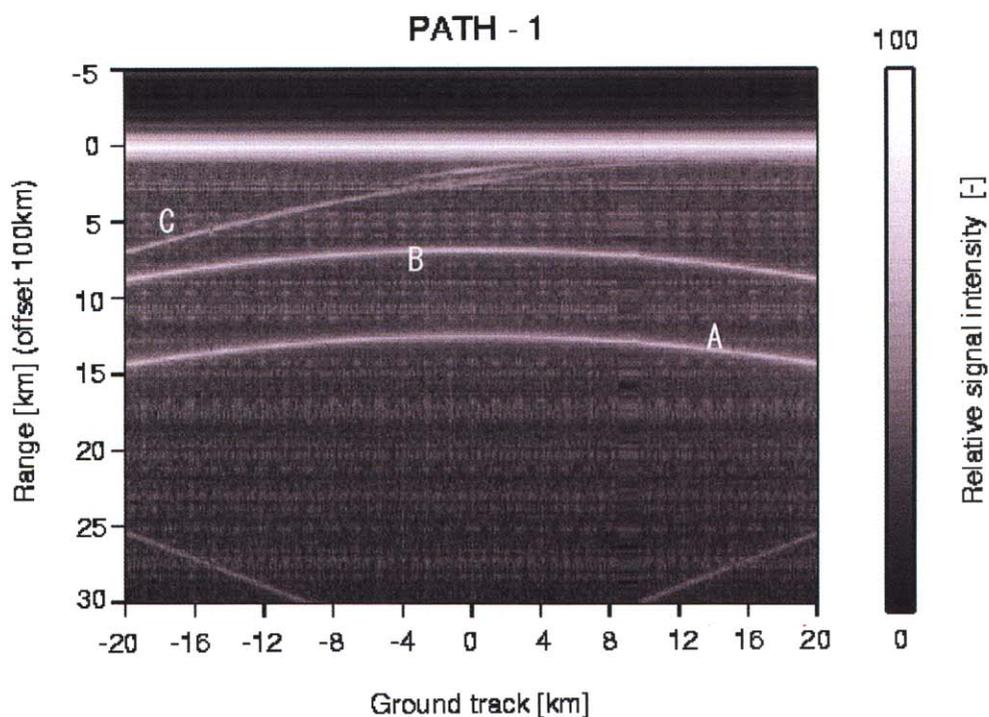


図9 Path 1におけるLRS観測より得られたBスキャンディスプレイ

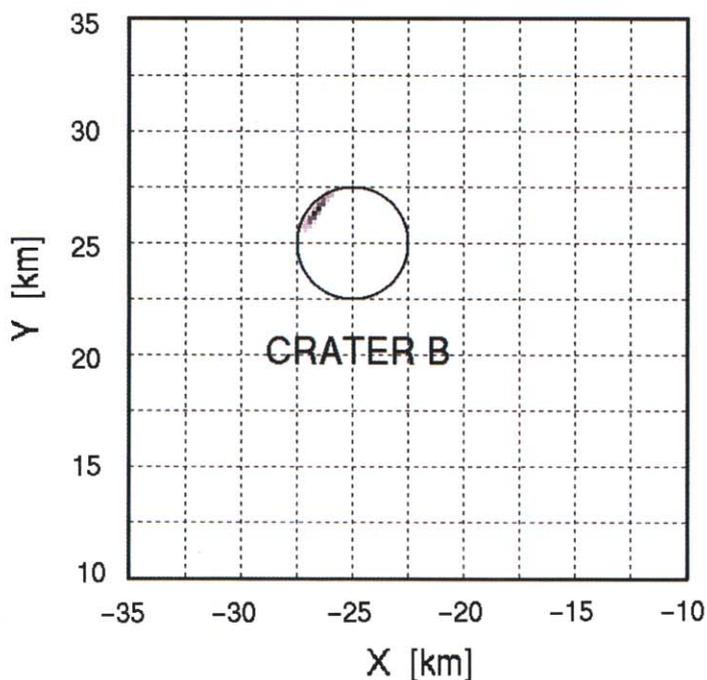


図10 合成開口レーダ解析によるクレータBエコー反射源位置

まとめ

コンピュータシミュレーションにより、高地クレータ密集領域における LRS 地下探査について地下反射エコー検出の可能性の検討を行ない、高地クレータ密集領域の観測では、A スコープデータを時系列データとして並べた B スキャンディスプレイ上でエコーのパターンを調べることで地下エコーの検出が可能であることを示した。また、LRS 観測データの合成開口レーダ解析の可能性についても検討し、単純地形を用いた LRS 観測シミュレーションによりその有効性を確認した。今後は、現実的な地形を用いたシミュレーションによって、LRS 観測データの合成開口レーダ解析の有効性を確認する必要がある。

謝辞

本研究は平成 11 年度東北大学大型計算機センター共同研究として行われた。本研究のシミュレーションにおけるスーパーコンピュータ用アルゴリズムの開発に当たっては同センターの有益な指導と援助を受けた。この場を借りて感謝したい。

参考文献

- [1] 小林、小野、大家 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, No2, 11-22, 1999
- [2] 周藤賢治・午来正夫、地殻・マントル構成物質、共立出版社、1997
- [3] Heiken, Vaniman, and French, ed.. Lunar Sourcebook, Cambridge University Press, Cambridge, 1991
- [4] Baldwin, R. A. Lunar Crater Counts *The Astronomical Journal*, vol. 69, no. 5, 377-392, 1964
- [5] Pike, R. J. Depth/diameter relations of fresh lunar craters: revision from spacecraft data, *Geophysical Research Letters* vol. 1, no. 7, 1974
- [6] 小林、大家、小野 SELENE 月レーダサウンダ観測シミュレーションと月面地形評価、第 21 回太陽系科学シンポジウム、予稿集、101-104, 1999