［共同研究成果］

「かぐや」月レーダーサウンダ：FDTD アンテナシミュレーション及びキルヒホッフ近似月面観測シミュレーション

―　観測データ平均処理過程で生じた Bragg 共鳴干渉　―

小林敬生
韓国地質資源研究院

月レーダサウンダ（LRS）は我国随一の月探査機である「かぐや」に搭載された HF(5MHz)レーダで、月の地下構造探査を主目的としていた。今回、未検出の大深度地下レーダ反射信号の検出を目的として LRS 観測データの処理を進めていたところ、「かぐや」直下点方向基準約 24 度の斜め方向、すなわち月面入射角約 24 度地点付近からの表面散乱波の信号増大現象が見つかった。当初、この信号増大の原因は長さ 30m の LRS アンテナに対して空間非対称的に配置された大きさ 3m×7m の太陽電池パドルの影響で生じた LRS 放射パターンの歪みにある、と考えて FDTD シミュレーションによる LRS の月面照射強度分布に対する太陽電池パドルの影響評価をしてみたが、その結果はこの仮説を強く支持するものではなかった。結局、信号増大の真の原因は平均処理の過程で生じる Bragg 散乱型の干渉現象であるとの可能性が浮上してきて、その仮説を証明するためキルヒホッフ近似による LRS の月面散乱波観測のシミュレーションを行い、さらに実観測データと同じくデータの平均処理をして表面散乱波の信号強度増大の再現に成功した。

1.　はじめに

「かぐや」は 2007 年 9 月に打ち上げられて以来 2009 年 6 月まで運用された我が国随一の月探査機である[1]。「かぐや」には 15 もの科学ミッションが搭載され、月面上空 100 kmの高度で周回する極軌道から総合的な月科学探査が行われた。月レーダサウンダ（Lunar Radar Sounder: LRS）はそれら搭載ミッションのひとつで、月の地下構造探査を主目的とする HF(5 MHz)レーダである。送受信アンテナは端間長 30 m のダイポールアンテナである。パルス繰り返し周波数は 20 Hz で、周回軌道に沿って距離 75 m 毎に観測が行われた。

LRS に先行する月地下のレーダ探査は 1972 年、アポロ計画最後のミッションであるアポロ 17 号に搭載された ALSE(Apollo Lunar Sounder Experiment) [2]が唯一無二のものである。LRS の観測では ALSE が観測した地下深度 1 kmからのレーダ反射信号[3]の再検出も期待されていた。しかし、現在に至るまで LRS データの研究で ALSE が観測した大深度地下反射信号と同等の地下反射信号を検出したとの報告は未だない。我々は、この謎を解くべく LRS 観測データの再処理を進めていた。

一般に公開されている LRS 観測データ[4]には大きく分けて水平方向の空間分解能向上を目的として合成開口処理を施したデータと未処理のレーダ波形データの 2 種類がある。合成開口処理を施した LRS のデータはパルス繰り返し周波数が 20 Hz と低いため空間分解能の向上と引き換えにドップラエリアシング(Doppler Aliasing: DA)ノイズの影響を受けるようになる。このため、大深度地下からの微弱な反射信号は DA ノイズにマスクされて検出できなくなる可能性がある。本研究では、この DA ノイズを回避するために単純な波形データの重ね合わせ平均化処理で月面散乱波の強度を抑制して微弱な大深度地下反射信号の検出を試みていた。

そうしたところ、みかけ深度 8～11 kmという大深度に相当するレンジ領域で受信データ強度の増大が見つかった。これがもし地下からの信号であるなら、この大深度地下境界面は非常に粗い面であることになる。しかし、奇妙なことにこの信号強度が増大するレンジ領域は軌道高度とと

もに変化することが分かってきた。観測軌道高度の変化に従って深さが変わる地下境界面などあり得ない。さらに調べてみると、信号強度増大が見られるレンジ領域は平均月面を基準として定義するLRSパルスの入射角が約24度の領域に相当する月面領域であることが分かった。特定の方向の信号強度が増大する現象はレーダの放射パターンに歪みがあるとする説明がもっとも簡単である。LRSの場合その放射パターンの歪みを引き起こす原因としては、「かぐや」本体と、特に空間非対称的に配置されている太陽電池パドルの影響が有力な候補として考えられる。本研究ではこれを確認するため、「かぐや」本体と太陽電池パドルをモデル化して実スケールのLRSアンテナシミュレーションを行ない、月面のLRSパルス照射強度分布を計算した。

以下では、まず、問題となった大深度地下レンジでの信号強度増大の現象を提示し、次いでFDTD(Finite Difference Time Domain)シミュレーションによるLRSパルスの月面照射強度分布の計算結果を示す。このシミュレーションによって、実は、太陽電池パドルの影響は無視できるほど小さいことが明らかになる。次に、現象の原因としてLRSデータ平均の過程で生じるBragg共鳴型の干渉が考えられることを示し、Kirchhoff近似に基づく月面散乱モデルによるLRS観測シミュレーションでその現象の再現をして本稿を終える。

2.　「かぐや」月レーダサウンダによる観測

LRSの波形データ（未処理データ）は複素データである。図1左図はその波形データの強度データを表示したもので、縦軸がレンジで横軸はLRS観測位置の月面地理緯度を示す。ゼロレンジは便宜的に表面エコーの位置に合わせており、深さ方向を正値として表示している。軌道高度は90 km、軌道経度は58.5°で、「危機の海」と呼ばれる領域を観測したものである。図1右図は左図と同じデータで50パルスの連続する観測データの平均を計算してからその強度データを表示したものである。この平均処理のおかげで全体的にイメージのコントラスが向上し、浅い地下に見える層構造が見やすくなっていることがわかる。問題の信号強度増大は図1右図の深さレンジが8〜11 kmの領域ではっきりと認められる。

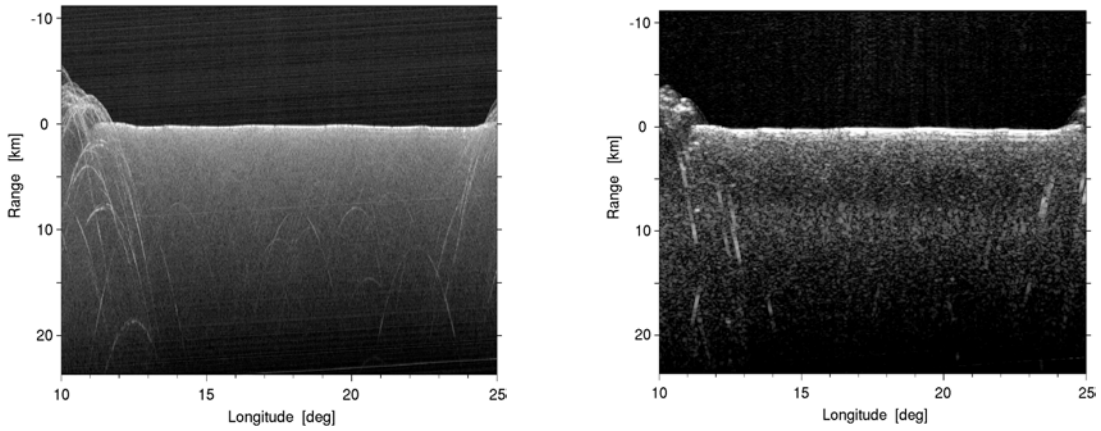

図1　LRS観測データ平均処理の効果：単一パルス観測データの強度表示（左）と連続する50パルス観測データの平均値の強度表示（右）。平均処理をするとレンジ8〜11 kmの信号強度増大が現れる。

図 2 は図 1 の右図、左図それぞれの緯度 14 度から 21.5 度までの 3000 個のデータの平均をプロットしたもので、信号強度をレンジの代わりに表面地形を考えない標準月面への LRS パルスの入射角に対応付けて表示している。単一パルスのデータでは信号強度が月面入射角の関数として単調に減少しているが、50 パルス移動平均処理を施したデータでは、入射角約 24 度で信号強度の明確なピークが現れている。この入射角 24 度のピークは他の領域、異なる軌道高度の観測でも共通して認められた。

観測領域、観測軌道高度に関係なく常に同じ入射角の領域に現れる信号強度増大現象の原因としてまず考えられることは LRS アンテナの放射パターンの歪みである。実際、「かぐや」には空間対称性を著しく欠いた位置に 3m×7m の大きさの太陽電池パドルが設置されている。この太陽電池パドルが反射板として動作して LRS アンテナの放射パターンに影響を与えることは可能性として十分に考えられる。この影響を定量的に評価するために実スケールの LRS アンテナの FDTD シミュレーションを行った。

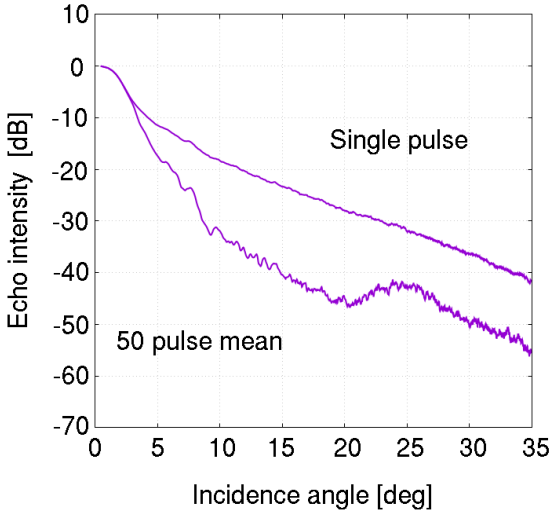

図 2.　図 1 の信号強度データの平均値のプロット。図 1 左図、右図それぞれ 3000 個のデータの平均をレンジではなく表面入射角に対応付けて表示。

3.　LRS アンテナの FDTD シミュレーション

FDTD (Finite Difference Time Domain)法は、電場・磁場の定義点それぞれを空間的に重なることなく互い違いに配置して Maxell 方程式を差分法で解くもので、代表的な電磁波伝搬・散乱のシミュレーション手法である[5]。本研究では、LRS の送受信アンテナである長さ 30 m のダイポールアンテナを Thin-wire model [5,6]を適用してモデル化した。大きさが 2m×2m×4m の「かぐや」筐体は完全導体の板で作られた同サイズの中空直方体の箱でモデル化し、太陽電池パドルは同様に 3m×7m の完全導体板でモデル化した。完全導体板は板を構成するグリッド点の電場を常に強制的に 0 とすることで実現する。LRS ダイポールアンテナの給電点はアンテナ中央部にあり、それは「かぐや」筐体の内部に位置する。「かぐや」筐体には 20 cm 四方の穴をあけてそこにアンテナエレメントを通した。

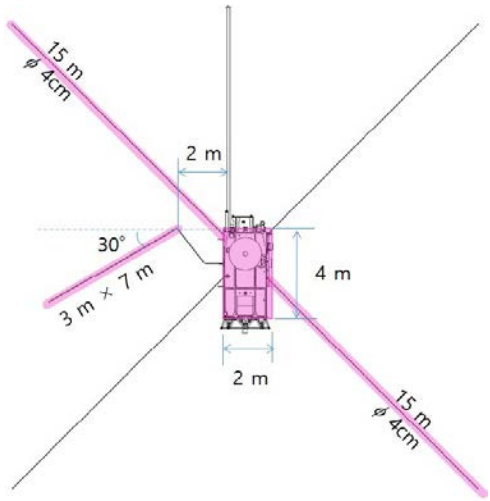

図 3.　「かぐや」見取り図。シミュレーションでモデル化したアンテナ、「かぐや」筐体、太陽電池パドルをマゼンタ色で表示した。[8]の図を一部加工して使用。

LRS は 2 本のダイポールアンテナを直交させて直交交差偏波の受信もできるよう設計されたが、実際の運用では大部分単一のアンテナを送受信アンテナとして観測を行った。本稿のシミュレーションでは観測で使われたアンテナのみをシミュレーションでモデル化し、もう一方の直交アンテナは無視した。図 3 にシミュレーションでモデル化したアンテナ、「かぐや」筐体、太陽電池パドルとそれぞれのサイズと位置関係を示す。

本研究がこのシミュレーションで明らかにしたいことは、「かぐや」筐体と太陽電池パドルが月面入射角 24 度付近の LRS パルスの強度にどのような影響を与えるか、である。月面に入射する LRS パルスの電磁場を知るためには LRS アンテナを励振しながら、図 3 の「かぐや」LRS モデル全体を包み込む仮想的な直方体表面上で Green 関数を介した電磁場の積分（Stratton-Chu 積分）を行なう（Near-to-Far Field Transformation[6]）。シミュレーションでは、上空 90 kmに位置する「かぐや」LRS が送信するレーダパルスの月面における入射強度の分布を計算した。

3.1　30m ダイポールアンテナ単体

まず初めにレファレンスケースとして、LRS アンテナのみのシミュレーションを行った。LRS 実機のアンテナエレメントは Be-Cu バイメタルリボンを丸めて作った直径 1.25 cm長さ 15 m の中空エレメントである。実際にシミュレーションをしてみると直径 1.25 cmの Thin-wire アンテナモデルは数値的に不安定で使い物にならなかったので、数値不安定が起きなかった最も細い直径 4.0cm の Thin-wire アンテナモデルを使ってシミュレーションを進めることにした。シミュレーション実装の都合上、アンテナの方向を x 方向とし、月面は xy 平面としている。LRS 直下点を xy 座標原点として、x、y それぞれの方向±100 kmの範囲で月面入射 LRS パルス強度分布を求めた。

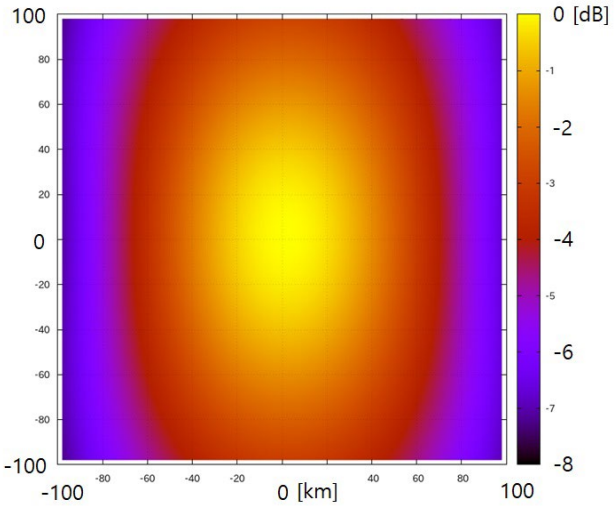

図4.　LRS アンテナ単体シミュレーションによる月面入射パルス強度分布。「かぐや」の高度は 90 kmで、直下点位置がこの図の座標原点。LRS アンテナの軸方向は x 方向。アンテナ単体のシミュレーションなので入射パルス強度分布に特異な異方性は見られない。

シミュレーション結果を図 4 に示す。「かぐや」直下点で入射 LRS パルス強度を基準値 0 dB としている。単純なダイポールアンテナのシミュレーションなので、月面での入射パルス強度は x、y それぞれの方向についてきれいな対称性を示す結果となっている。以下では、この結果を基準として「かぐや」筐体の影響、太陽電池パドルの影響を見ていく。

3.2　30m ダイポールアンテナ＋「かぐや」筐体

次に、LRS アンテナに「かぐや」筐体を加えたモデルでシミュレーションを行なった。「かぐや」筐体の長軸方向は図 3 に見られるとおり、LRS アンテナの軸方向に対して 45 度の角度を成しており全体としての空間対称性は失われている。そのため、月面入射パルス強度分布にも図 4 で見られた空間対称性が崩れることが予想される。

図 5 はシミュレーションの結果であるが、左図は月面入射パルス強度の分布を図 4 と同様の様式で示したもので、右図は左図の結果と図 4 の結果の差分を示したものである。見た目には図 4 と図 5 左図の区別がつかないが、図 5 右図を見ればその理由は明らかである。差が 0.1 mdB にも満たないためである。月面入射パルス強度の差分の分布を見ると、x 軸に対して - 45 度方向の方向性が認められ、確かに「かぐや」筐体の影響がないわけではないことが分かる。しかし、0.1 mdB にも満たない差は実質差は無いと判断しても良いだろう。

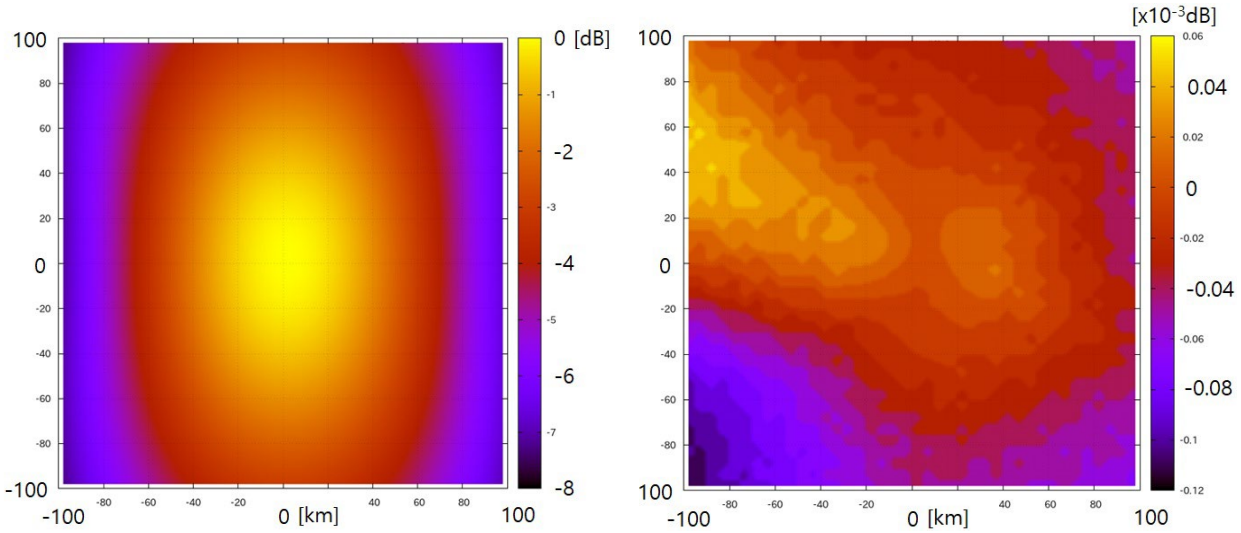

図 5. LRS アンテナ＋「かぐや」筐体モデルのシミュレーション結果：月面入射パルス強度分布（左）及び、それと図 4 の結果との差分（右）。差分の大きさが 0.1mdB にも満たないことから「かぐや」筐体の影響は無視してもよい、と判断できる。

3.3　30m ダイポールアンテナ＋「かぐや」筐体＋太陽電池パドル

最後に、上記モデルに太陽電池パネルをも加えたモデル（図 3）でシミュレーションを行った。図 6 にその結果を示す。この場合も月面入射パルス強度分布に見た目の違いは感じられない。実際、差分を見ても 0.1dB 未満の違いでしかない。LRS パルスの入射角度が 24 度になるのは「かぐや」直下点中心半径 45 kmの円周上であるが、特異な入射パルス強度の増大は認められない。つまり、本研究の当初の予想ははずれで、LRS データ平均処理で明らかになった受信信号の増大現象の原因は LRS アンテナの放射パターン異常ではなく、別にあるということである。

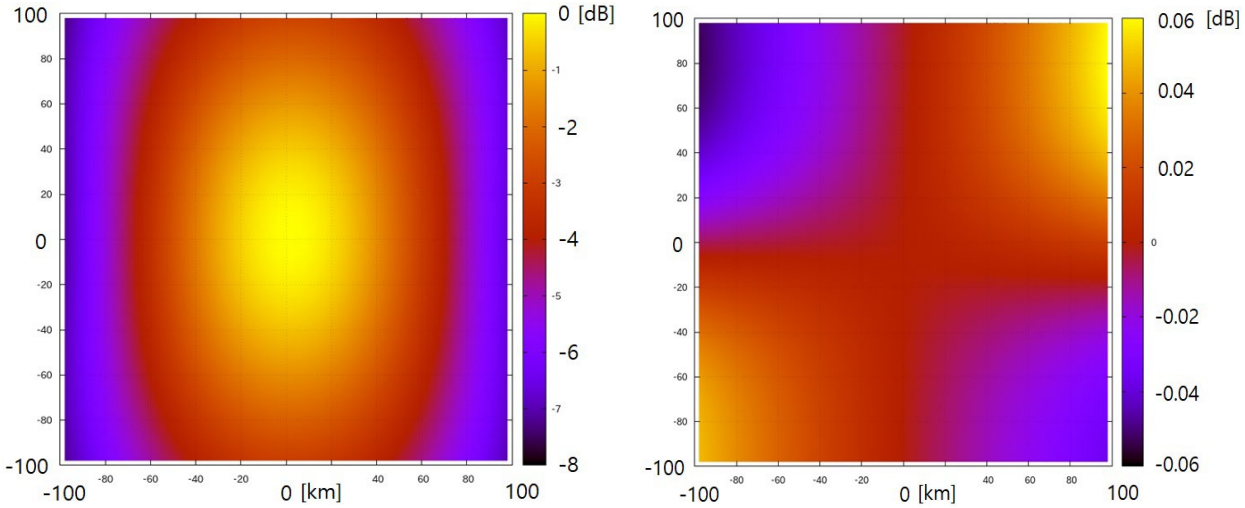

図 6. LRS アンテナ＋「かぐや」筐体モデル＋太陽電池パドルのシミュレーション結果：月面入射パルス強度分布（左）及び、それと図 4 の結果との差分（右）。差分の大きさが 0.1dB にも満たないことから太陽電池パドルの影響も無視できる、と判断できる。

4.　LRS の月面散乱波観測シミュレーション

上述、FDTD シミュレーションの結果、太陽電池パドルが LRS の月面照射強度に与える影響は無視できるほど小さいことが分かった。では、観測データの平均処理後に現れる大深度レンジ散乱波の強度増大の原因は何なのか？結論を明らかにすると、それはデータの平均処理過程で生じる Bragg 共鳴干渉である。以下では、まず Bragg 共鳴干渉について説明する。次いで点源微小ダイポールで LRS アンテナをモデル化した Kirchhoff 近似表面散乱シミュレーションて図 1 の LRS 観測を模擬して、同じく観測データの平均処理の過程における月面入射角 24 度近辺の大深度レンジでの表面散乱波強度の増大が再現できることを示す。

4.1　Bragg 共鳴

Bragg 散乱はよく知られている通り原子・分子の結晶解析で利用される現象である。一律の間隔で原子が規則正しく並んでいる結晶格子表面に遠距離から格子間隔スケールと同程度の波長の X 線（電磁波）を入射すると、X 線波長、格子間隔、入射角と散乱角が共鳴条件を満足するとき強い散乱 X 線が観測される現象である。本研究では、この Bragg 共鳴現象が LRS 観測データの平均処理過程で起きているのではないか、と考えた。

LRS は月面高度 H(80~120 km)の軌道からサウンダ観測を行なう（図 7）。LRS のパルス繰り返し周波数は 20 Hz なので、この軌道では LRS が観測を行なう度に約 75m 移動することになる。このとき第 n 番目の観測でレンジ R_n に観測されたあるターゲットの信号は次の第 $n+1$ 番目の観測ではレンジ R_{n+1} に観測されたることになるが、二つの観測のレンジ差が LRS の波長（中心周波数 5 MHz に対応する波長は 60 m）の半分である場合これら二つの観測で受信されるこのターゲットの信号の位相差はちょうど波長一つ分になる（レーダパルスはアンテナと月面との間を往復するため）。そして、観測データを足し合わせる平均処理の過程でお互い強め合う信号の重ね合わせが実現することになり、すなわち Bragg 共鳴条件が生じることになる。

LRS の軌道上の観測点間隔 l とレンジ差 ΔR が分かれば、このような Bragg 共鳴条件を満足する月面表面散乱の入射角 θ が図 7 を参照して

$$\Delta R = l \sin\theta$$

を満足する θ として求めることができる。上式に具体的な数値、すなわち

$$\Delta R = 30\ \mathrm{m}, \quad l = 75\ \mathrm{m}$$

を代入して入射角 θ を求めれば、

$$\theta = 23.58\ \text{度}$$

を得る。これは図 2 の結果と十分整合的である。もし、この Bragg 共鳴モデルによる図 2 の現象の説明が 妥当ならシミュレーションで現象を再現できるはずである。次節では、図 1 で示した観測データを得た領域の LRS 観測シミュレーションを行ない、現象の再現を確認する。

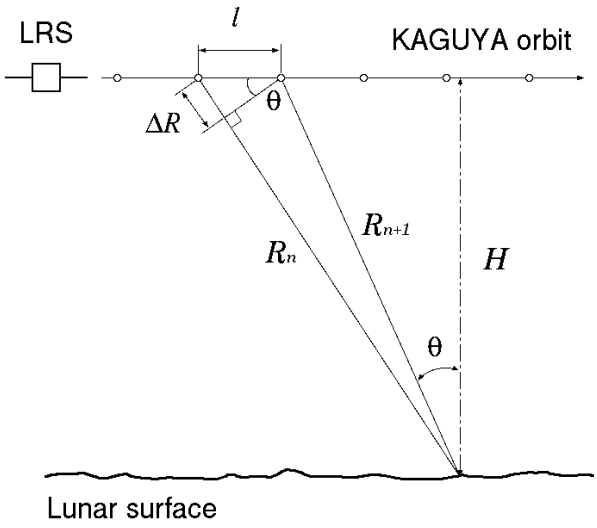

図 7．LRS 観測の概念図。

4.2 Kirchhoff 近似表面散乱シミュレーション

Kirchhoff 近似法は広がりを持つ面（ランダム面等）による電磁波（や音波）の散乱現象を解析する手法のひとつである。Kirchhoff 近似では解析の対象とする散乱面に入射する波を局所的に平面波と見なし、また入射地点の面を局所的にその接平面で近似し Fresnel 反射モデルを適用して入射地点における反射波の電磁場を定義する。そして、この手続きを解析対象である面全体で行ったうえで Green 関数を介した積分を実行してこの面から発生する散乱波が作り出す遠地点での電磁場を計算する[9]。

本研究では、「かぐや」デジタル地形モデルデータ[4]を利用して、図 1 の観測データを取得した「危機の海」の表面地形をシミュレーション空間内に再現する。そして、その表面の上空高度 90 kmの軌道から LRS 観測を行う。軌道は東経 58.5 度の経線に沿った南北方向軌道で、 観測は軌道に沿って 75m 毎に行なう。LRS は点源の微小ダイポールでモデル化し、「かぐや」本体、太陽電池パドルは無視する。

図 8 に微小ダイポール LRS アンテナによる月面照射強度分布（左図）および FDTD ダイポールアンテナモデルによる月面照射強度分布（図 4）との差（右図）を示す。図 8 左図を図 4 を比較すれば明らかであるが、両者はよく似ている。しかし、両者の差は大きいところでは 1dB にも及び太陽電池パドルが作り出す差（図 6 右）よりも大きいことが分かる。このことから、もし、これから行なうシミュレーションの結果でも、実観測結果と同様の平均処理後に見られる入射角 24 度での散乱波強度増大が確認されれば、実観測における高々0.1dB 未満の太陽電池パネルの影響は無視できると結論できる。

シミュレーションの結果を初めに紹介した LRS 観測結果と同じ形式で図 9 に示す。図 1 に示す LRS の実観測データと同様、このシミュレーションでも平均処理を適用すると深さレンジ 8～11 kmのところで信号強度の増大が現れている。このシミュレーションでは、地下の電波伝搬・散乱は扱っていないので、図 1 右図と同様の深さレンジ 8～11 kmで見られる散乱波強度の増大は地下散乱波の強度増大ではなく月面散乱波の強度増大であることがこれで証明される。最後に、図 2 と同様の形式で散乱波強度と LRS パルスの月面入射角との関係を図 10 に示す。図 10 では、実際の観測データの処理結果と同じく、移動平均処理を適用したデータで信号強度増大現象が出現し、さらにそのピークが生じる LRS パルス月面入射角が～23.6 度であることも確認できる。LRS 観測データの平均処理で現れた信号強度増大の原因は処理の過程で生じる Bragg 共鳴型の干渉だったのである。

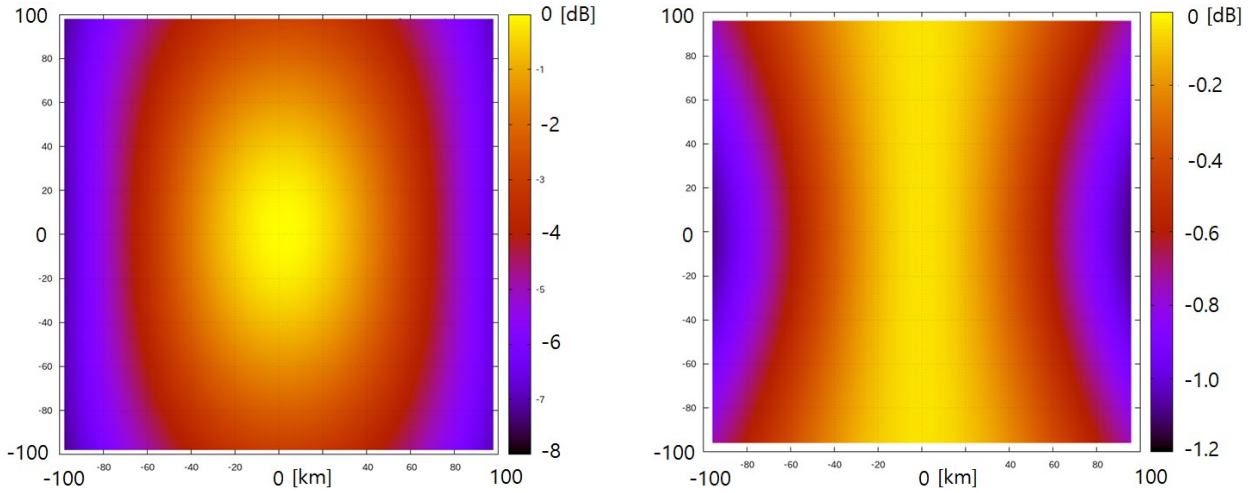

図 8．点源微小ダイポールアンテナモデルによる LRS パルスの月面照射強度分布

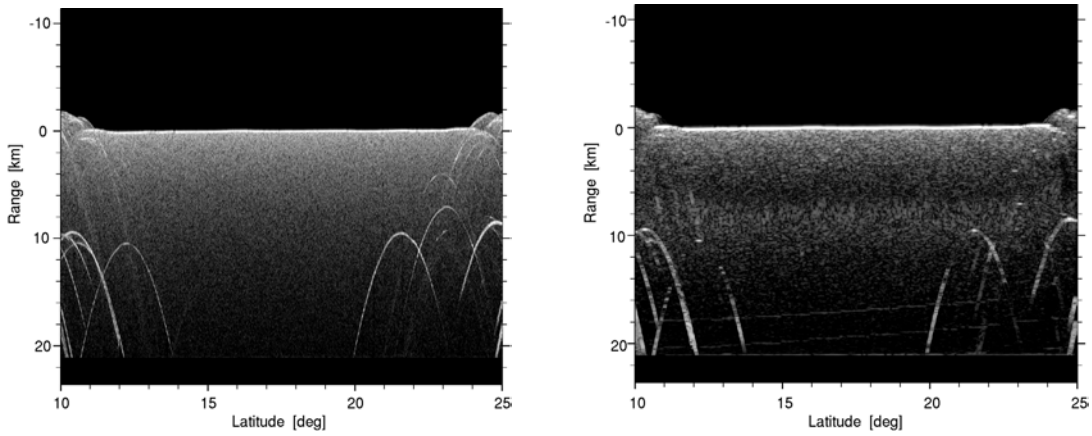

図 9.　LRS 観測シミュレーション結果データの平均処理の効果：単一パルス観測データの強度表示（左）と連続する 50 パルス観測データの平均値の強度表示（右）。平均処理をすると実観測データ（図 2）と同じく深さレンジ 10 km前後で信号強度増大が現れる。

5.　結び

月探査機「かぐや」に搭載された月レーダサウンダ LRS のデータの研究で出会った奇妙な信号強度増大現象の謎を解くために行なった 2 種類のシミュレーションを紹介した。両シミュレーションとも AOBA-S の潤沢な計算資源があって初めて可能となる大規模なシミュレーションである。波長 60 m の LRS は実機の測定実験が不可能であり、実験を代替するものがシミュレーションであるが、これも PC では非力すぎて不可能であった。これからも AOBA-S を活用して研究を進めていきたい。

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。シミュレーションコードのコンパイル・実行に当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。

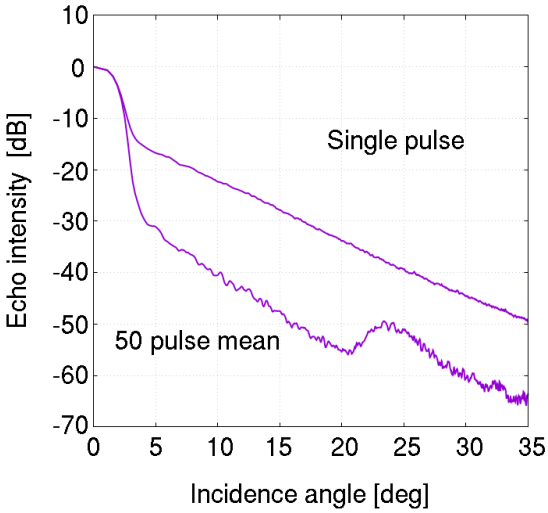

図 10.　図 9 の信号強度データの平均値のプロット。図 2 同様、図 9 左図、右図それぞれ 3000 個のデータの平均をレンジではなく表面入射角に対応付けて表示。

参考文献

[1] Ono, T. et al., Lunar Radar Sounder Observations of Subsurface Layeres under the Nearside Maria of the Moon, Sicence, vol. 323, pp. 909 – 912, 2009.
[2] Porcello, L. J., et al, The Apollo Lunar Sounder Radar System, *Proc. of the IEEE*, vol. 62, No. 6, pp. 769 – 783, 1974.
[3] Peeples, W. J., et al, Orbital Radar Evidence for Lunar Subsurface Layering in Maria Serenitatis and Crisium, J. Geophys. Res., vol. 83, No. B7, pp. 3459 – 3468, 1978.
[4] かぐやデータアーカイブ, https://darts.isas.jaxa.jp/planet/pdap/selene/index.html.ja

[5] Toflove, A. and S. C. Hagness, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method - 3rd Ed., Artech House, 2005.
[6] Mäkinen, R. M., et al, An Improved Thin-Wire Model for FDTD, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, No. 5, pp. 1245 - 1255, 2002.
[7] Umashankar, K. R., et al, Calculation and experimental validation of induced currents on coupled wires in an arbitrary shaped cavity, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 35, pp. 1248 – 1257, 1987.
[8] http://www.jana.or.jp/denko/data/21_1_3.pdf
[9] Ogilvy, J. A., Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces, Institute of Physics Publishing, 1991.