

「かぐや」月レーダサウンダが見た月の海

著者	小林 敬生, 加藤 雄人, 熊本 篤志, 小野 高幸
雑誌名	SENAC : 東北大学大型計算機センター広報
巻	45
号	3
ページ	1-8
発行年	2012-07
URL	http://hdl.handle.net/10097/00124687

[共同研究成果]

「かぐや」月レーダサウンダが見た月の海

小林敬生¹⁾ 加藤雄人²⁾ 熊本篤志²⁾ 小野高幸²⁾¹⁾ 韓国地質資源研究院 国土地質研究本部 地質調査研究室²⁾ 東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻

1. はじめに

日本の月探査機「かぐや」は2007年9月14日に宇宙航空研究開発機構（JAXA）種子島宇宙センターから打ち上げられ、同年11月に月周回軌道上での観測を開始、2009年6月11日の制御落下による運用終了時まで1年7ヶ月にわたり15の搭載機器による全球規模の各種科学観測を行った[1]。月レーダサウンダ（Lunar Radar Sounder: LRS）は15の搭載機器のひとつで、月の地下構造探査を主要観測目標とする短波（5MHz）レーダである[2]。LRSは1972年のアポロ17号によるレーダ探査実験（Apollo Lunar Sounder Experiment）[3]以来35年振りの、そして史上初の全球規模の月レーダ探査を実現した。LRSは月の表面が平坦な「海」と呼ばれる領域の多地点で地下のレーダ反射信号をとらえることに成功し、この結果は初期成果として発表された[4]。「かぐや」の運用終了後、取得された大量のLRSデータは空間分解能と微弱な地下反射信号のS/N（信号対雑音比）を改善するため合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar: SAR）処理を施され[5]新たなデータセット、LRS SARデータとして生まれ変わった。大量のLRSデータにSAR処理を施す作業は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で行なった。SXでのデータ処理については、すでにこのSENAC誌上で紹介したとおりである[6]。LRS SARデータは月科学におけるLRSデータ利用の出発点である。本稿では、LRS SARデータを解析して明らかになった月の海領域の様相について紹介したい。

2. LRS SAR データ

LRSは高度100kmの極軌道を周回しながら月全面をカバーするように観測を行なった。全観測期間を通じて行なった観測（レーダパルス送信）の総数は1億を超え、平均すると月面上の600m四方毎にLRS観測（レーダパルス送信）がひとつなされたことに相当する。LRSの空間分解能は軌道方向に600m（合成開口長5kmの場合）、軌道直交方向は5kmで、レンジ（深さ）方向は150mである。レンジ分解能は真空中の値である。地下では、地下媒質（岩石）の誘電率の値に依存してこの値の1/2~1/3程度の値になる。

LRS SARデータを構成する個々の要素データは信号値対レンジ（探知距離）の1次元配列データである。図1は典型的な観測例についてそれを図示したものである。軌道上の各観測点に対応して図1に示されるような1次元配列データがひとつ得られる。

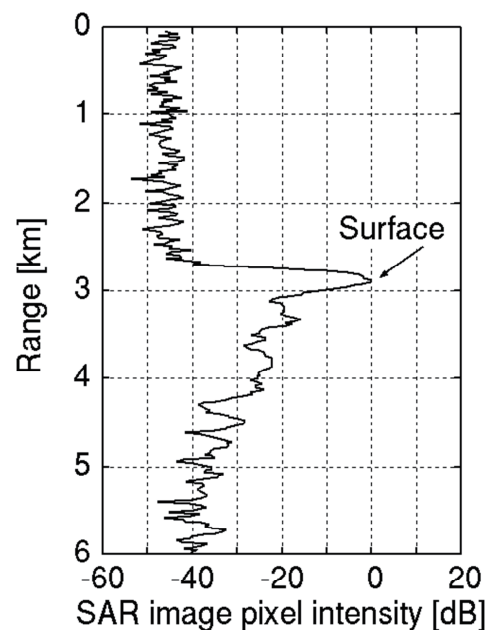


図1. LRS受信データ（1パルス）例。

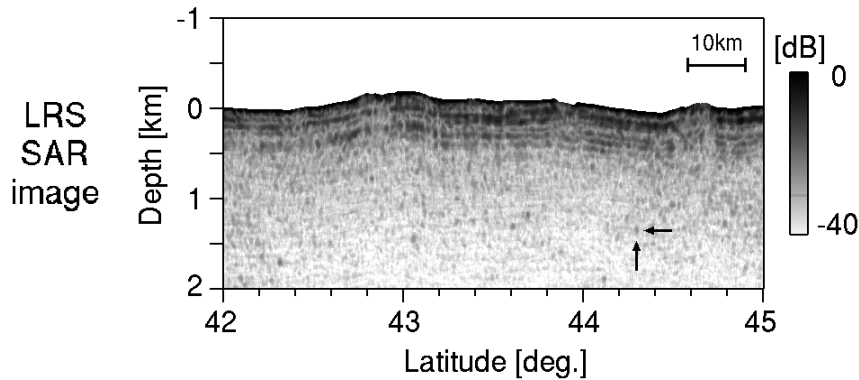


図2. LRS SAR データによる月地下断面画像の例。縦軸に示す深さは地下媒質の比誘電率を6.25と仮定した場合の値。

図1では、任意のレンジを基準としてレンジ値を定義している。観測領域の月面が平坦な場合、信号の最大値はかぐや直下点からの表面反射波のものである。図1では、レンジ2.9kmに直下点表面が見つかったことになる。図では、この表面反射波に続いて弱い強度の信号が受信されているが、これら表面レンジより遠くからやってくる反射波は地下反射面からのものであると考えられる。これらの小ピークは対応する深さにおける地下反射面（地層境界面）の存在を示唆するが、図1のデータだけでは地下の地層境界面からの反射波なのか、表面の同レンジ地点からの斜め反射波なのかははっきりしない。地下反射波と同定するためには、図1のデータを観測経路に沿ってならべて図2のような地下断面イメージを作って地下の層構造を確認し、さらに表面の光学画像データから地下反射波と紛らわしい斜め反射波を返すような地形がないことを確認する必要がある。

図1に示すよう、個々のLRS SAR要素データには月直下点表面反射波信号と直下点地下反射波信号が含まれ、それに表面斜め反射波信号が重畳している。表面が平坦な海領域では、表面斜め反射波信号は直下点地下反射波信号に比べ十分微弱であることがわかって来た。つまり、任意の深さの地下イメージを表面反射の誤認の恐れなく構成することができるということである。以下では、LRSの電波で「見た」月の表面および地下の様相を紹介する。

3. 表面

月の表面（図3）は大別して2種類の地形領域に分類できる。ひとつは、「海」と呼ばれる領域で、過去の火山活動で噴出した溶岩に満たされてできた平坦な地形領域である。肉眼（可視光）では暗く見えるが、これはこの溶岩（玄武岩）の色による。もうひとつは、「高地」と呼ばれる領域で望遠鏡で見るとクレータに覆われた起伏の激しい地形領域であることがわかる。「高地」は明るく見えるが、これは高地の岩石に多く含まれる斜長石が白いためである。「海」は月面全体の2割程度の表面を覆う。月の裏側はほぼ全面「高地」である。東北アジアの国々では、「海」の暗い部分をうさぎの姿に見立てて、月にいるうさぎの話を語ってきた。

LRSデータから表面反射波だけを取り出し、それを画像ピクセル情報として軌道情報に従って月面座標の当該点に置いて行けばLRSの月面反射波強度マップができる。これは、言わばLRSの電波で「見た」月表面イメージである。図4は地球から見える月の表側の大部分を含む、南北方向南緯40度から北緯70度、東西方向西経90度から東経100度の範囲のLRSによる「月表面イメージ」である。図の「明るさ」は月面のLRS反射波強度を表しており、その相対強度はグレイス

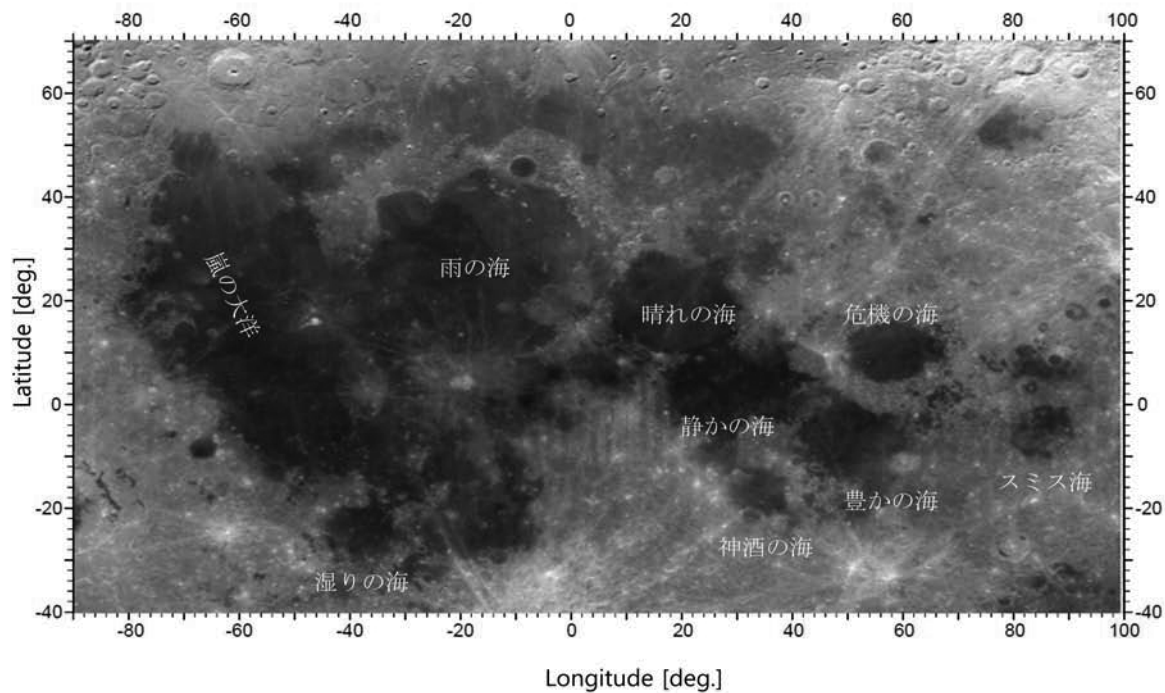


図 3. 月表側の可視光イメージ[7]。主な海の名前を図中に示す。

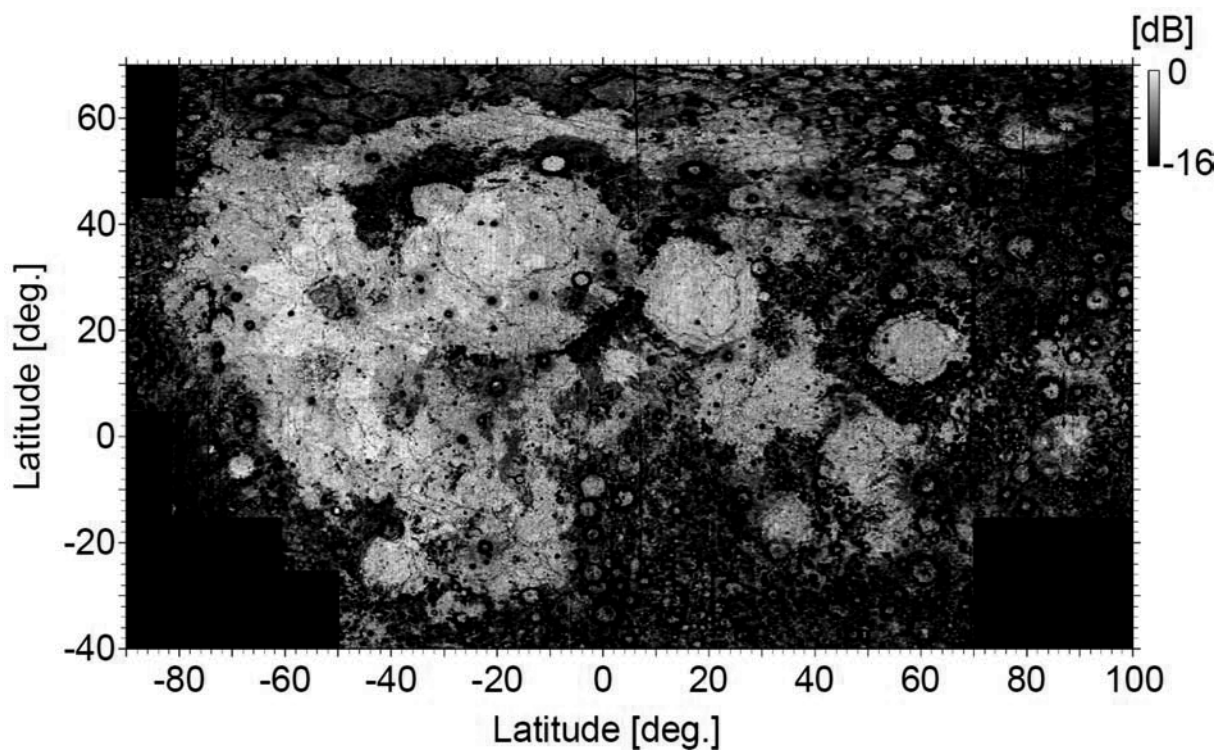


図 4. LRS SAR データによる月表側表面画像。

ケール（単位：dB）が示すとおりである。画像ピクセルのサイズは 0.1 度×0.1 度だが、これは赤道では 3km×3km に相当する。かぐやの観測軌道投影（フットプリントパス）は一様に月面をカバーしているわけではないので一部の領域でデータ欠損が生じている。データ欠損領域は近接データを線形補間して補った。そのため、空間分解能にむらが生じている。

LRS が見る月面（図 4）は我々が普段見慣れている月のイメージ（図 3）と明暗が逆転している。我々の目には暗く見える「海」が LRS には明るく見え、逆に、我々の目に明るく見える「高地」は LRS には暗く見えるのだ。これは、波長 60m の LRS の電波観測の場合、表面の物質の違いによる反射率の違いよりも表面の起伏の大小による散乱の影響の違いのほうが大きいためである。すなわち、「海」の表面は平坦なため鏡面反射がほぼ実現され LRS の観測では強い表面反射波が受信されるが、「高地」では表面の大きな起伏のために LRS のレーダパルスが強い散乱を受けて弱い反射波しか受信されないためである。高地領域の中でも、直径が 100km を越える大きなクレータは底が比較的平坦なため、明るく見えるものもある。

「海」の部分の詳細を見るとさまざまな様相が見えてくる。図 5 は「嵐の大洋」から「雨の海」西部を含む領域を拡大した図である。図 5 は電波で見た月面とはいえ、陰影に富む豊かな様相を呈している。まず、「海」の中にも明るい領域と暗い領域があることに気づく。我々の研究の結果、「海」の明るさはその表面を覆っている溶岩の流出年代と関係があることが分かってきた。暗い部分は溶岩の流出による表面形成時期が 30 億年以上前の古いもので、明るい部分は表面形成時期が 30 億年前から 15 億年前ころまでの比較的新しいものである。

赤線で囲まれた 3 つの領域は北から順に、リュンカー、アリストアルコス台地、マリウス丘陵と呼ばれており、いずれも火山性の地形である。リュンカーとアリストアルコス台地は周囲よりも暗く見えているが現時点でその理由をはっきりしていない。マリウス丘陵にはゴマ粒のような多数の黒点状のイメージが見られるがこれら一つ一つは個々の火山の溶岩ドームに対応する。

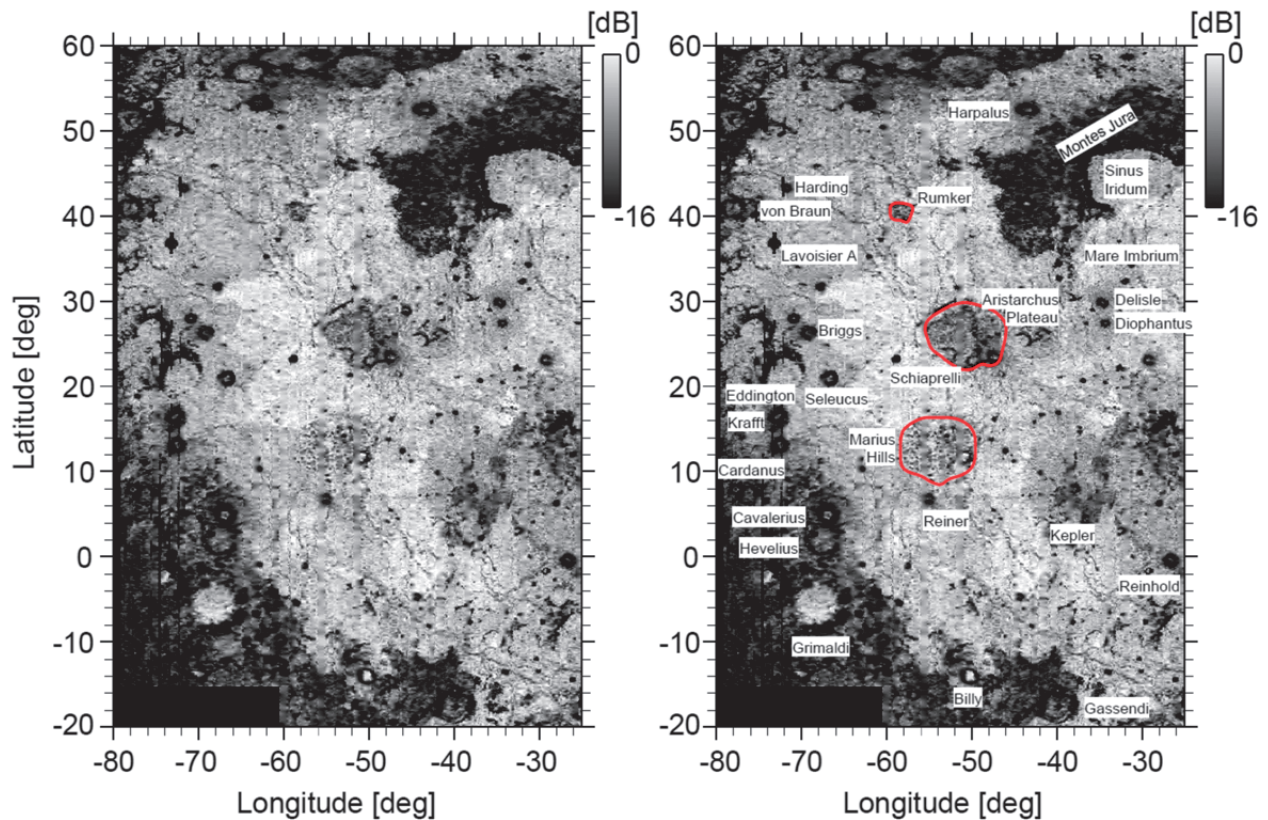


図 5. LRS SAR データによる月表側表面画像、「嵐の大洋」領域拡大図。右図は左図に代表的な地形、クレータ等の名称を表示したもの。

図5（左）では多数の黒く丸いイメージが「海」のあちらこちらに認められる。同図（右）に示すように、これらの黒丸イメージは直径数十キロメートルのクレータである。直径がさらに小さいクレータは黒い点のイメージとして認められる。これら、クレータが黒く見えるのは、クレータのふちから外に広がる斜面がクレータの生成（隕石衝突）時に放出された瓦礫（イジェクタ）が積もってできた起伏の激しい斜面なので、入射する LRS レーダパルスが強い散乱を受けて反射波の受信強度が著しく低下するためである。

図5では、ひも状の暗い構造も見られる。これは、リンクルリッジと呼ばれる地形に対応している。リンクルリッジは「海」を満たした溶岩が冷えて固まるときに起きる溶岩全体の体積収縮に伴って生じたと考えられている。リンクルリッジは幅が数キロメートルから 10 キロメートル程度、長さは数百キロメートルにおよぶ。起伏があり周囲からの高さは数百メートル程度である。暗く見えるのはリッジの起伏による幾何学的な要因によるものとも考えられるが、リッジの表面から十数メートル程度の浅い部分の空隙率が大きいことによる強い散乱・吸収効果も否定できない。

最後に、「ジュラ山脈 (Montes Jura)」を見てみよう。ジュラ山脈は図5の図中右上の部分に広がるひととき暗い部分である。ここは、溶岩に埋もれることなく残った古い高地であるので、月の海が生じる前の隕石重爆撃を受けてクレータで飽和した古い地形を呈している。その起伏の激しい表面のため LRS レーダパルスは強い散乱を受け、結果としてジュラ山脈全体が非常に暗く見えている。ジュラ山脈の東側に大きな入り江のような地形があるが、これは直径 260km の衝突クレータで「虹の入り江 (Sinus Iridum)」と呼ばれている。虹の入り江には「雨の海」からの溶岩が流入して内側を満たしており、これが入り江を形づくっている。虹の入り江は 2014 年に計画されている中国の「嫦娥 3 号」の着陸地点の候補地に選ばれている。

4. 地下

LRS による「海」領域の観測ではあちらこちらで地下の層構造を示すデータが得られた[4]。合成開口処理を施す前はその層構造も 2 層程度までしか認められていなかったが、処理後のデータではさらに多層の構造がよりはっきりと認められるようになった。図6は LRS データの合成開口処理によって実現された代表的な地下構造可視化の例を示している。層構造を示す地下反射波は従来火山活動に伴って流出した溶岩が作り出した溶岩層の境界からの反射波であると考えられてきたが、我々は、それが、単純な溶岩層境界面ではなく、過去の火山活動休止期に隕石衝突によって粉碎された溶岩層表面に作られたレゴリス層からの反射波であると考えている。単純な溶岩層境界面からの反射だけでは 3 層以上の多層地下構造の反射波強度をうまく説明できなくなるからである。この考え方で図6を見ると、月の「海」領域における過去の火山活動は領域毎に異なる休止期を伴う活動度で生じてきたことが分かる。

さて、これら検出された地下反射波はどのような分布をしているのだろうか。図7は LRS SAR データの見かけ深さ 300m から 1200m までのデータを深さ毎に正規化してデータのダイナミックレンジをそろえた後、さらに深さ方向に積分して作った地下反射波検出分布図である。図中、白く見える領域が特にはっきりと地下反射波が検出された領域であり、暗く見える部分は地下反射波を識別することができなかった領域であることを示す。LRS データの初期解析では月面表面物質の二酸化チタン (TiO₂) 含有量と LRS の地下反射波検出との間に逆相関の関係があることが見つかったが[7]、S/N が向上した LRS SAR データによる図7を見ると当初見られたほどにはその逆相関関係は強そうには見えない。今後、定量的な再解析が必要である。

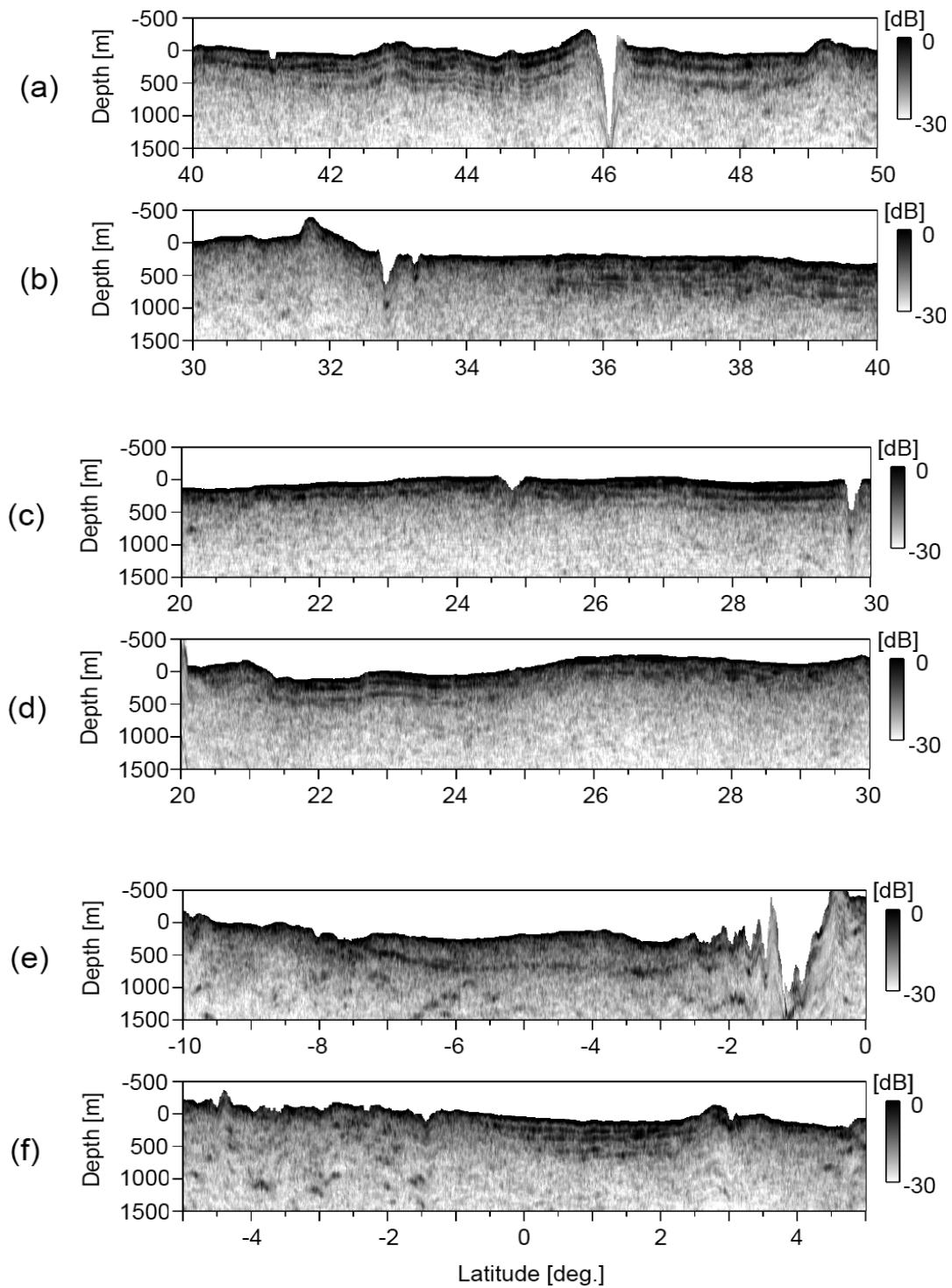


図6. さまざまな領域のLRS地下断面画像。(a)嵐の大洋(西経68.1度)、(b)雨の海(西経8.9度)、(c)晴れの海(東経20.9度)、(d)危機の海(東経59.0度)、(e)神酒の海(東経37.7度)、(f)スミス海(東経87.6度)。縦軸に示す深さは地下媒質の比誘電率を6.25と仮定した値。一部著しく画像が乱れている部分があるが、これは信号処理上の問題で生じたもので、実際の地形を表すものではない。

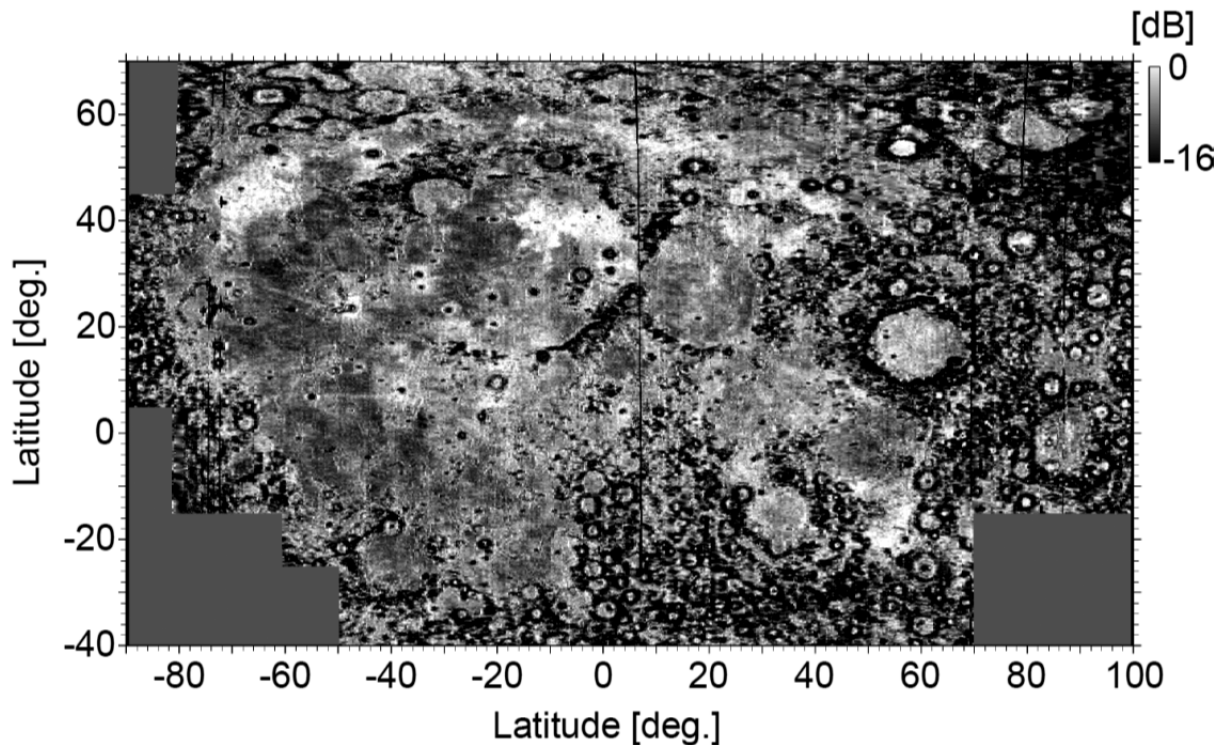


図7. LRS 地下反射波検出分布図。みかけ深さ 300m から 1200m までの観測データを積分。表示範囲は図3に同じ。

5. むすび

本稿では、これまでに明らかになった「かぐや」月レーダサウンダの観測による月の様相の一部を紹介した。地球上からは、LRS の観測周波数、5MHz による月のレーダ観測は電離層の遮蔽効果のために不可能である。これは宇宙空間からしかできない観測である。この、かぐや LRS の観測・データ処理は東北大学が率いる観測グループによって進められてきた。データの SAR 処理が終了した現在、本格的なデータの解析と研究が進行中である。研究の今後が楽しみである。

謝辞

本研究は、韓国地質資源研究院基本研究事業「地球・惑星進化追跡源泉技術開発」の中で行なわれた。本研究における大量のデータ処理は、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] M. Kato, S. Sasaki, Y. Takizawa, and the Kaguya project team, The Kaguya Mission Overview, Space Sci. Rev., 2010, DOI 10.1007/s11214-010-9678-3
- [2] T. Ono et al., The Lunar Radar Sounder (LRS) Onboard the KAGUYA (SELENE) Spacecraft, Space Sci. Rev., 2010, DOI 10.1007/s11214-010-9673-8
- [3] R. J. Phillips et al., Apollo Lunar Sounder Experiment, APOLLO 17 Preliminary Science Report ch. 22, NASA, 1973

- [4] T. Ono et al., Lunar Radar Sounder Observations of subsurface layers under the nearside maria of the Moon, *Science*, 2009, DOI: 10.1126/science.1165988
- [5] T. Kobayashi et al., Synthetic Aperture Radar processing of Kaguya Lunar Radar Sounder data for lunar subsurface imaging, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2171349
- [6] 小林敬生 小野高幸、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——、*SENAC*, Vol. 42, pp.101-105, 2009
- [7] <http://www.google.com/moon/>
- [8] A. Pommerol et al., Detectability of subsurface interfaces in lunar maria by the LRS/SELENE sounding radar: Influence of mineralogical composition, *Gephys. Res. Lett.*, 2010, DOI: 10.1029/2009GL041681