

SELENE 搭載 α 線検出器データ処理と ラドン α 線強度分布マップ解像度の改善

木下克之^{*1}, 野口冬馬^{*1}, 伊藤真之^{*1}, 高島 健^{*2}, 三谷烈史^{*2},
柏木利介^{*3}, 奥野祥二^{*3}, 西村 純^{*2}

Data Processing of the Alpha-Ray Detector onboard SELENE and Improvement of the Resolution of Radon α -Particle Intensity Map

Katsuyuki KINOSHITA^{*1}, Toma NOGUCHI^{*1}, Masayuki ITOH^{*1}, Takeshi TAKASHIMA^{*2},
Takefumi MITANI^{*2}, Toshisuke KASHIWAGI^{*3}, Shoji OKUNO^{*3}, Jun NISHIMURA^{*2}

Abstract

Alpha-ray detector (ARD) onboard SELENE was designed for detecting α -particles emitted by ^{222}Rn emanated on the lunar surface and its descendent nuclear species ^{210}Po . Distribution and variation of radon gas measured by the α -particle signal is expected to provide information on the subsurface uranium distribution, crustal structures including faults, and behavior of the thin atmosphere of the moon. In this paper, we describe the flow of ARD data processing and a method to derive the α -particle intensity distribution utilizing the angular response of the detector which is applied to the radon α -particle observations for the first time. The method improves the resolution of the α -particle intensity map and enables detailed comparison with the geographical features of the lunar surface.

Keywords: Moon, Radon α -particle, Data processing, SELENE

概要

月周回探査衛星 SELENE に搭載された α 線検出器 (ARD : Alpha-Ray Detector) は月面から放出される ^{222}Rn およびその崩壊過程で生じる ^{210}Po から放射される α 線を観測し, 月表層下のウラニウムの分布および断層などの地殻構造, 月の希薄大気の状態等に関する情報を得ることを目的とする. 本論文では, ARD のデータ処理の流れと, 角度応答関数を考慮した月面の α 線強度分布の導出方法について紹介する. この方法は月ラドン α 線観測データの解析では始めて用いられるもので, α 線強度分布マップの解像度を向上し, 月地形等の詳細な比較を可能とする.

^{*1} 神戸大学大学院 人間発達環境学研究科 (Graduate School of Human Development and Environment, Kobe University)

^{*2} 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系 (Department of Solar System Sciences, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS))

^{*3} 神奈川大学工学部 (Department of Engineering, Kanagawa University)

1 はじめに

月周回探査衛星 SELENE (SELEnological and ENgineering Explorer) は 2007 年 9 月に JAXA により打ち上げられ、2009 年 6 月にミッションを終えた。SELENE には 14 種類の科学観測機器とハイビジョンカメラが搭載された^{1), 2)}。本論文では、粒子線検出器サブシステムに位置づけられる α 線検出器 ARD (Alpha-Ray Detector) のデータ処理の流れと、角度応答関数を考慮した月面の α 線強度分布の導出方法について紹介する。現在、種々の観測機器のデータは JAXA の SELENE データアーカイブ³⁾を通じて公開されている。ARD データも公開に向けた準備を進めている。

2 月のラドン α 線と SELENE/ARD の概要

2.1 月ラドン α 線観測

月面から放出されたラドンの α 線検出の可能性は、1966 年に Kraner 他により初めて指摘された⁴⁾。 ^{222}Rn は ^{238}U 崩壊系列に含まれるため、その崩壊によって放出される α 線はウランウム分布の指標となる。 ^{222}Rn は半減期 3.8 日で崩壊し、5.490 MeV の α 線を放出する。 ^{222}Rn は α 崩壊後、何段階かの壊変を経て ^{210}Po へと至る。 ^{222}Rn から ^{210}Po へと至る時間スケールは、中間核種である ^{210}Pb の半減期 22.3 年によって支配される。 ^{210}Po は半減期 138 日で 5.305 MeV の α 線を放出する。すなわち ^{222}Rn α 線の検出は観測前 1 週間程度のラドンガスの放出、 ^{210}Po α 線の検出は過去数十年程度のガス放出の累積を反映する。月面の ^{222}Rn および ^{210}Po α 線を観測することで、月面から月面下のウランウム分布、月面*4 のガス放出箇所と関連する断層等の地殻構造、月希薄大気の動態等に関する情報が得られると期待される。

月面付近のラドン α 線は、Kraner らの提案から数年後に Apollo 計画において初めて検出された。1971 年に打ち上げられた Apollo 15 号、1972 年に打ち上げられた Apollo 16 号に α 線検出器 (APS: Alpha-Particle Spectrometer) が搭載され、その観測により、アリストアルコス・クレーター (Crater Aristarchus) や、月の海の周縁部でラドン α 線強度の増加が報告されている^{5), 6), 7), 8)}。ただし、検出された α 線強度は月面で地球表面と同程度のラドン放出があると仮定して計算した Kraner 他の予測の 1/500 程度であった。Apollo は月の赤道付近を周回する軌道を取っていたため観測は比較的低緯度領域に限られ、また観測期間も 10 日程度に留まった。その後、1998 年に打ち上げられた月探査衛星 Lunar Prospector にも APS が搭載され、再びラドン α 線観測が行なわれた。Lunar Prospector は極軌道を周回し 230 日程度にわたって月全球の観測を行なった^{9), 10)}。しかし、検出器サイズや宇宙線および太陽粒子によって制限されるデータの統計精度の限界から、 α 線強度分布マップの解像度は、月の赤道付近の緯度・経度で 10 度 (実距離で 300 km) 程度に留まり、月面の地形的特徴などとの詳細な比較は難しかった。

*4 ラドンの速度と月の重力係数から、放出されたラドンガスは数 km 程度のスケールハイトで月にトラップされていると考えられる。

2.2 SELENE/ARD

SELENE の ARD は Apollo および Lunar Prospector に継ぐ月面ラドン α 線観測システムである¹¹⁾。ARD は検出器有効面積が Apollo および Lunar Prospector の α 線検出器と比較して一桁以上大きく、観測の統計精度の向上が可能となる。また重ね合わせた検出器との反同時計数により、宇宙線によるバックグラウンドを大幅に減らし、観測精度を大きく向上することを計画した。

ARD は面積 $2.6 \times 2.6 \text{ cm}^2$ 、厚さ $100 \mu\text{m}$ の Si 半導体素子 48 個で構成され、検出器有効面積は 326 cm^2 である。4 素子を 1 ユニットとし、4 ユニットの信号が一括して処理される設計で、これをチャンネルと呼ぶ (図 1)。検出器の各素子にはコリメータが設置されており、視野角は約 45 度 (FWHM) 平方、SELENE の月面高度 100km に対して月面視野で約 150 km 平方に設定されている。



図 1 ARD 外観。Si 半導体素子 46 個で構成されており、全体で 326 cm^2 の有効面積を持つ。2×8 個の素子をユニット (チャンネル) として、出力信号はチャンネルごとにまとめて処理される (写真上側よりチャンネル 1, 2, 3)。

ARD 検出器前面には可視光を遮蔽するために、電子ビーム蒸着により Au/Ni が厚さ約 2500 \AA で付されている。また、検出器裏面には高エネルギー宇宙線バックグラウンドを除去するための反同時計数用検出器 (厚さ $450 \mu\text{m}$ の Si 半導体) が付置されている。さらに、これらの検出器とは別に、主として検出器-信号処理系の温度変化に伴うエネルギーゲインの変動などの較正を目的として、同等の検出器にエネルギー較正用の ^{241}Am 線源を付した Radiation Monitor (以下 RM と略記する) と呼ばれるユニットがシステム内に設置されている。

SELENE は高度 100 km の極軌道 (軌道傾斜角 90 度) をとり、周期約 2 時間で月を周回した。衛星は ARD が設置された面が常時月中心方向を指向するように姿勢制御されており、ARD は衛星直下の月面領域を南北方向に走査する形で観測する。月の自転に伴って軌道は月面に対して西方向に移動するため、約半月で全球の観測が可能となる。

SELENE の月周回軌道投入後、取得されたデータから、ARD には下記のような問題が生じていることが明らかになった。

- (1) 反同時計数機能の不具合
- (2) 検出器への光漏れ
- (3) 異なるチャンネル間の信号の干渉

これらの詳細については軌道上の機器較正とあわせて別途報告を予定しているが、ここではデータ処理と α 線強度分布の導出に関係する点について簡単に述べる。反同時計数機能に不具合が生じていることから、データ処理・解析にあたっては、反同時計数処理を行っていないデータを用い、4 節に述べる方法でバックグラウンドを推定して α 線シグナルを評価した。光漏れとチャンネル間の干渉については、それらの現象が生じて α 線シグナルの評価に影響を与えうる時間帯を除去する形で処理した。

3 ARD のデータ処理

本節では、ARD のデータ処理の流れについて述べる。図 2 にその概要を示した。

ARD テレメトリーデータは 1 秒単位のフレームとしてまとめられており、フレーム内には、衛星時刻、当該フレームに対応する時間に検出された ARD のイベント情報、および RM のイベント情報が含まれる。このうち、ARD のイベント情報は、イベント検出時の 3 チャンネルごとの、出力パルスハイトおよび反同時計数フラッグの情報から成る。また、RM のイベント情報は出力パルスハイトから成る。ARD データ処理の第一段階としては、初期処理が施されたテレメトリーデータから、ARD のイベントリストを格納したイベントファイルと RM のイベントリストを格納したイベントファイルを生成する。このイベントファイルでは、イベントごとに、1 秒を単位として時刻情報が付加されている。イベントファイルには、CERN (欧州加速器研究機構) で開発され、粒子物理学および高エネルギー宇宙物理学の衛星観測などの分野で広く利用されているデータ解析フレームワーク ROOT のファイル形式を用いた。

次に、ARD イベントファイルに対して、衛星軌道情報を参照して、イベントごとに検出時の視野中心の座標 (衛星直下の経度、緯度) を付加する。その際、NAIF (The Navigation and Ancillary Information Facility) による SPICE ツールを利用している。

較正用線源 ^{241}Am の α 線による信号出力を含む RM のデータは、ARD のエネルギーゲインの変動に対する補正に利用する。ARD のエネルギーゲイン G_{ARD} は主として ARD を含む粒子線検出器の信号処理回路 GPE の温度 T_{GPE} と相関している。ただし、両者の関係には観測時期による変化が見られることから、GPE の温度変動に応じて観測をいくつかの期間に分割し、それらの時期ごとに T_{GPE} と G_{ARD} の関数関係 $G_{ARD}(T_{GPE})$ を決定した。これを用いて ARD イベントファイルのイベントごとのパルスハイト値をエネルギー値に換算し、その情報をイベントファイルに追記する。エネルギーゲインの温度依存性とその補正に関する詳細は、別途 ARD の軌道上の性能と較正に関する論文で報告する。なお、ARD 検出器および GPE の温度などのデータは SELENE 衛星の House Keeping データに含まれており、ARD の解析に必要な House Keeping 情報のみを抽出したファイルを別に作成している。

次に、上記のイベントファイルを用いて、光漏れなどが生じ解析に適さない時間帯を同定し、それらを除外することにより、最終的に科学解析に供するイベントファイルを生成する。

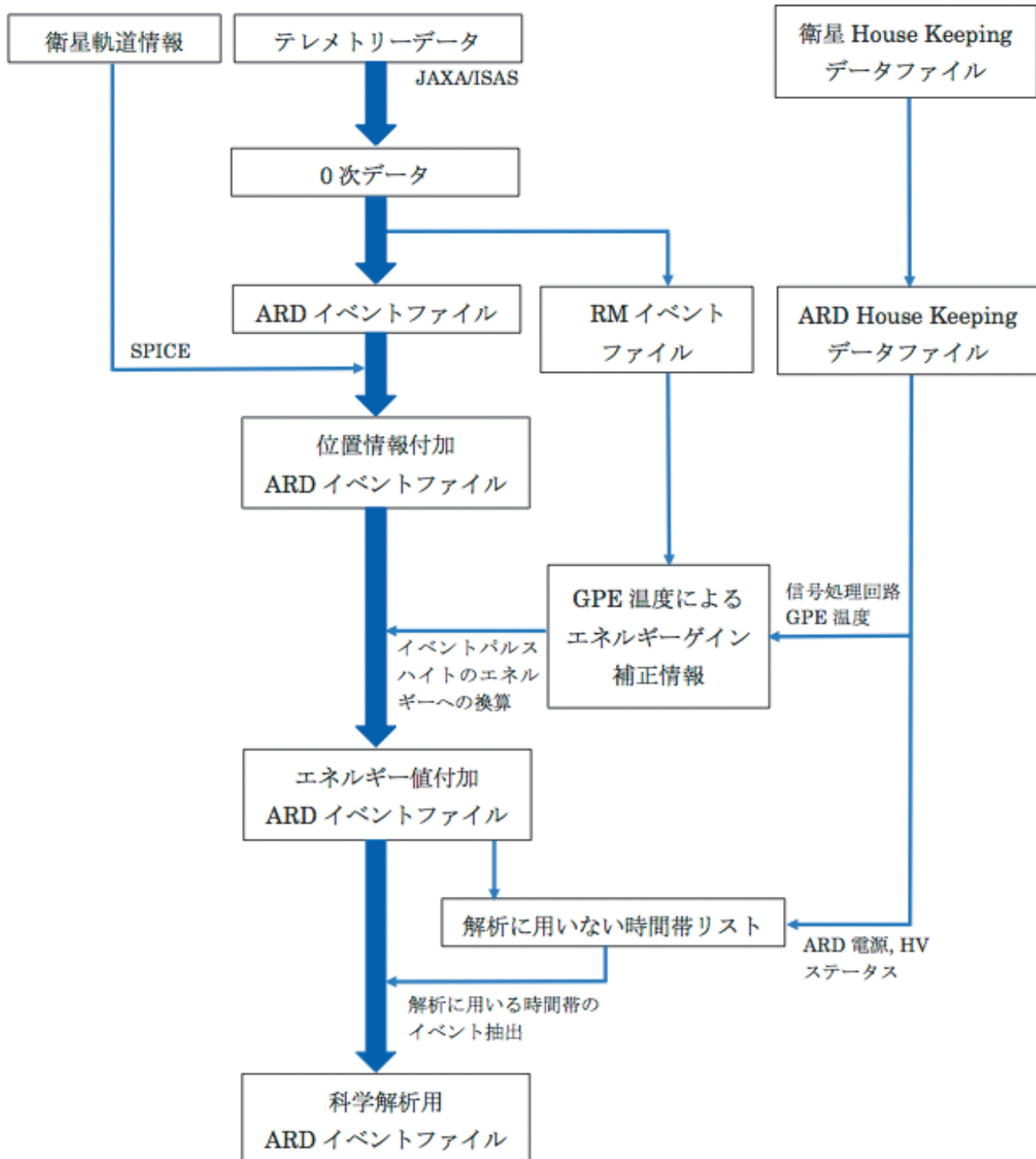


図 2 ARD のデータ処理の流れ（詳細は本文を参照）。

4 検出器角度応答を反映した α 線強度分布の導出

Apollo および Lunar Prospector の過去の観測・データ解析においては、 α 線がイベント検出時の観測視野中心で発生したものと近似し、これを月面上に設定したピクセルで集積する形で α 線強度分布が報告されている。ピクセルサイズは、赤道付近において、Apollo の場合で経度 20 度×緯度 10 度（実距離で約 600 km

×300 km), Lunar Prospector の場合で経度 10 度×緯度 15 度 (実距離で約 300 km×450 km) となっている。この方法では、得られる強度分布図の解像度が、角度応答によって決まる検出器本来の位置分解能より低くなるほか、月面上に設定したピクセルのサイズ程度以下の広がりをもった α 線発生源が、複数のピクセルにわたって観測される場合、その有意性が実際より低く表示・評価される可能性がある。これに対して、検出器の角度応答の情報を利用する次に示す方法で、検出器本来の解像度を持つ強度分布図を作成することができる。このような方法は X 線天文学などの分野では既に用いられているが、月面ラドン α 線観測データへの適用はこれまでなされていなかった。

ARD では、測定対象である α 線の飛程に対してコリメータおよび検出器の厚さは十分に厚いので、検出器の α 線に対する角度応答は、コリメータおよび検出器入射窓の幾何学的形状で決まる。以下に述べる解析手続きにおいては、コリメータおよび検出器の幾何学的形状から計算した角度応答関数を用いている。コリメータの高さは 30mm, 内壁は一辺 31mm の正方形で、検出器の α 線入射窓はそれと中心を共有する一辺 26mm の正方形である。 α 線入射窓がコリメータ内壁より 2.5mm 内側に位置することにより、視野中心部での角度応答関数の角度依存性が滑らかになっている。

(1) 角度応答を考慮した有効カウント数の算出

ARD の α 線検出イベントに対して、その α 線の月面上の発生位置 (x, y) の確率密度分布 $f(x, y)$ が、検出器の角度応答関数に基づいて与えられる (図 3)。ここで x, y はそれぞれ、ARD の月面上の視野中心に対する経度、緯度方向の相対座標とする。月面上に検出器の視野より十分小さいピクセル (i, j) を設定し、ピクセル中心の月面位置座標を (X_i, Y_j) とする。 α 線シグナルが期待されるエネルギー範囲の全イベントに対してこの確率密度分布を加算し、ピクセルあたりの有効カウント数 $C_{eff}(i, j)$ を算出する。

$$C_{eff}(i, j) = \sum_{n=1}^N f(X_i - X(n), Y_j - Y(n)) \Delta S_{i,j}$$

ここで、 $(X(n), Y(n))$ は、 n 番目のイベント検出時の検出器視野中心の月面位置座標、 $\Delta S_{i,j}$ は月面上のピクセル (i, j) の面積を表す。

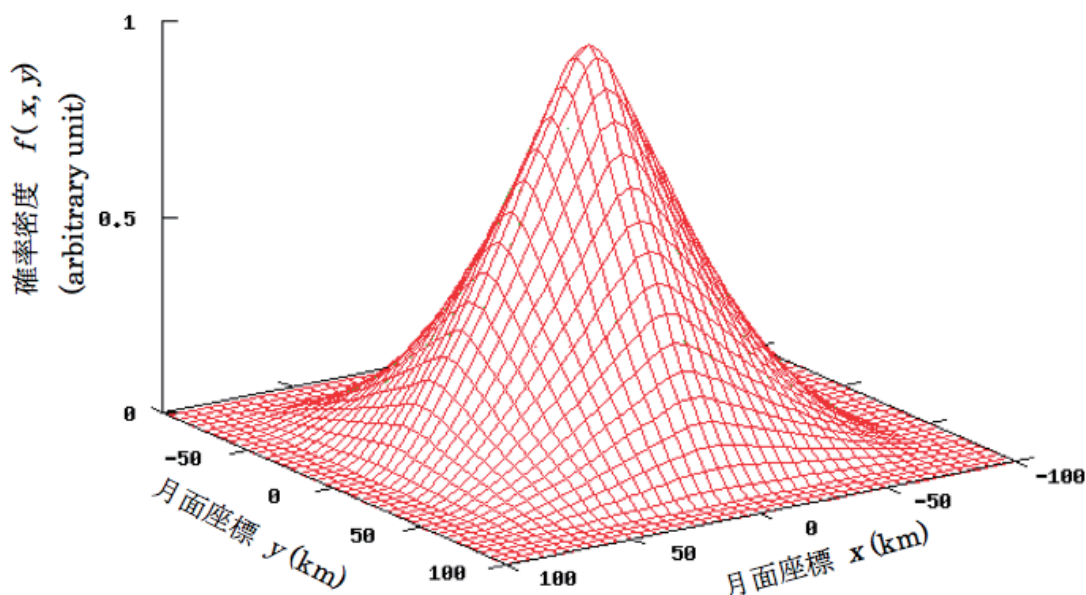


図3 ARDに α 線が検出された場合の、月面上視野内の α 線発生位置の確率密度分布 $f(x, y)$ 。ここでの月面座標は、観測視野中心（衛星直下）を座標の原点とし、緯線、経線方向をそれぞれ x 軸, y 軸とした。

(2) 角度応答を考慮した有効観測時間の補正

月面上に設定したピクセルごとに、その地点が ARD 視野に含まれている時間に角度応答関数の値を乗じた有効観測時間を算出する。

$$T(i, j) = \sum_{k=1}^K f(X_i - X(t_k), Y_j - Y(t_k)) \Delta t$$

ここで、 Δt は観測時間積算のための時間単位（1秒）、 t_k は各時間単位の時刻とする。

ピクセルごとに(1)で求めた有効カウント数を有効観測時間で割り、各ピクセルの有効計数率 $CR_{eff}(i, j)$ を算出する。

$$CR_{eff}(i, j) = \frac{C_{eff}(i, j)}{T(i, j)}$$

(3) バックグラウンドの評価と差し引き

バックグラウンドの計数率を推定して、有効計数率から差し引くことで、月面上の α 線強度分布を推定することができる。バックグラウンドの推定値は、ARD検出器のエネルギー分解能を考慮して、 α 線シグナルが期待される領域を除いたエネルギー範囲を用いてバックグラウンドのスペクトルをモデルフィットし、得られたモデルから着目する α 線エネルギーバンドにおけるバックグラウンド計数率を算出する。バックグラウンドの評価・差し引きを含む具体的な解析方法の詳細は、別途科学解析に関する論文で報告する。

図4に、上記の方法による月全球の ^{210}Po α 線強度分布図の作成過程を示した。

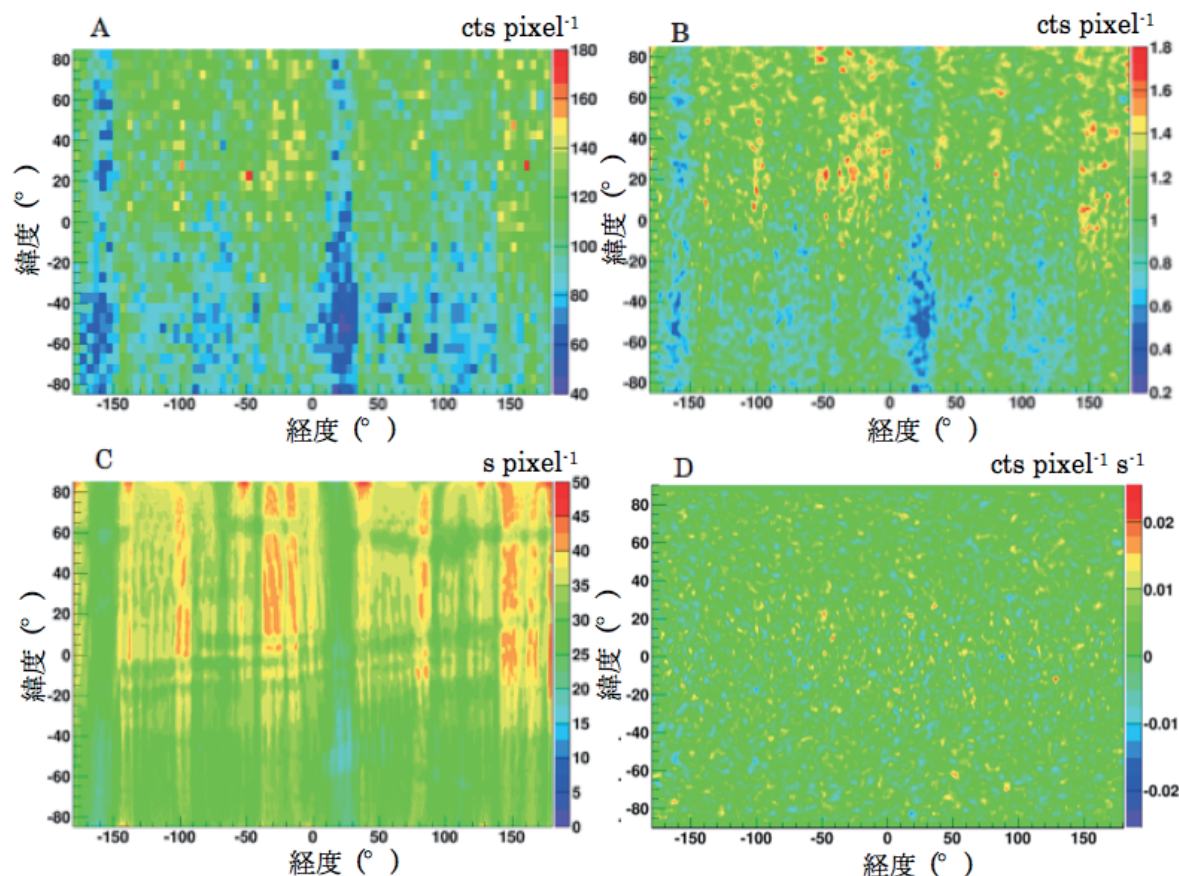


図4 検出器角度応答を反映した月全球の ^{210}Po α 線強度分布導出過程. 2008年1月から6月の有効観測データから抽出した, ^{210}Po α 線エネルギーバンド (5.2-5.4 MeV) のチャンネル1 (108 cm²) で観測したイベントに基づく. A: 月面に検出器視野と同程度のピクセル (5度平方) を設定し, α 線が検出時の視野中心で発生したと近似して集積したカウント数 (counts pixel⁻¹). B: 各イベントに対して, 検出器角度応答に基づいて月面視野内の α 線発生位置の確率密度分布を算出し, 月面に視野の1/10程度のピクセル (0.5度平方) を設定して集積した有効カウント数 (counts pixel⁻¹) 分布. C: Bのピクセルに対する, 角度応答を考慮した有効観測時間 (s pixel⁻¹) 分布. D: B, Cから算出した各ピクセルの有効計数率からバックグラウンドを差し引いた α 線強度 (counts s⁻¹pixel⁻¹) 分布 (バックグラウンドの評価方法については本文参照).

科学解析にあたっては, 上記の方法で導出した全球の α 線有効計数率分布に対してスライディング・ウィンドウのアルゴリズムを適用し, 一定の有意水準を超える α 線シグナルが見られる箇所を同定し, 科学的検討を行なうという手続きをとる (詳細は別途科学解析論文に報告する). 図5に, 例として雨の海東端付近 (西経10° - 東経10°, 北緯15° - 35°) の領域について, Apollo, Lunar Prospectorの解析と同様の方法で作成された ^{210}Po α 線強度分布図 (A) と, 上に述べた方法で検出器の角度応答を反映して作成した強度分布図 (B) を比較のために示した. いずれも, 上述の方法で観測時間分布に関する補正とバックグラウンドの評価・差し引きを行なっている. 検出器の角度応答を考慮しない従来の解析方法では, 月面における空間分解能は α 線検出イベント集積のピクセルサイズによって決まるが, 仮にピクセルサイズを検出器視野の大き

さ程度とした場合、150km 程度となる（図 5-A）．これに対して、角度応答を反映した場合、月面上の空間分解能は約 80km となる（図 5-B）．角度応答を反映した有効計数率分布に対するスライディング・ウィンドウによるサーチでは、図 5-B に見られる 2 つの顕著なピークが 3σ 程度の有意性で検出された．北側の東西に伸びるピークについては、図 5-A ではシグナルが複数のピクセルに分割されているために有意性が低い印象を与える．図 5-C には、同領域の可視光画像に角度応答を反映した α 線強度分布を重ね合わせて示した．科学的な議論は別論文に譲るが、 α 線強度分布図の解像度の向上により、月地形との詳細な比較が可能となっていることがわかる．月面において ^{222}Rn が熱速度で放出され、その後、弾道運動と月面での反射を繰り返しながら、 α 崩壊に至るまで拡散すると仮定すると、 ^{222}Rn および ^{210}Po の月面での広がり数百 km 程度と見積もられるが、Apollo 15 の観測結果は、その広がりがこの予想より小さく、150km 程度以下であることを示唆している．実際、SELENE/ARD の観測と角度応答を考慮した解析から、これを裏付ける結果が得られた．

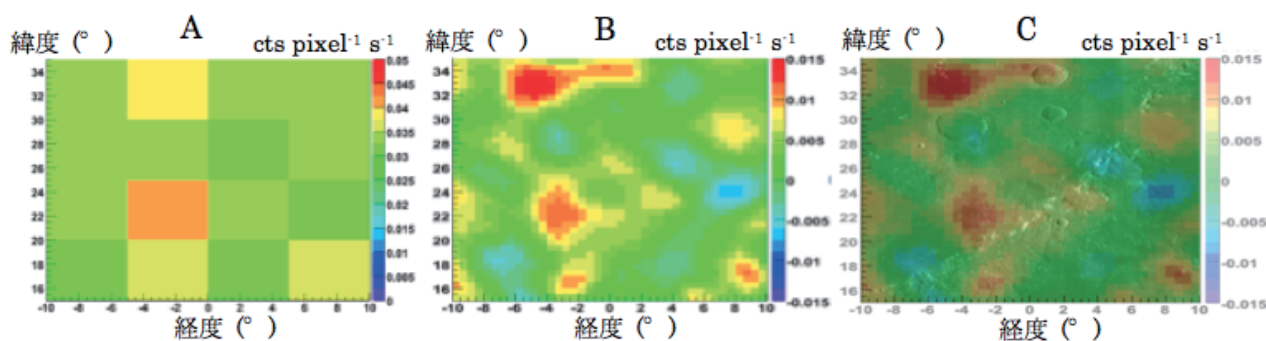


図 5 雨の海東端領域（西経 10° - 東経 10°，北緯 15° - 35°）の ^{210}Po α 線強度分布図の比較．A：月面に視野と同程度のピクセルを設定し、 α 線が検出時の視野中心で発生したと近似する従来の方法で作成した強度分布図（ピクセルサイズは 5 度平方）．バックグラウンドは、本文中に示した方法で評価し、差し引いた．B：検出器角度応答を反映した強度分布図（ピクセルサイズは 0.5 度平方）．C：B の強度分布と可視光画像を重ねた図．

5 まとめ

SELENE に搭載された搭載 α 線検出器 ARD は、Apollo および Lunar Prospector による過去のラドン α 線検出器を一桁以上回る大面積等の特徴を活かし、 α 線をプローブとして月の表層から表層下のウランウムの分布、ガス放出箇所、断層・亀裂等の地殻構造などに関する情報を提供する．ARD には、月周回軌道投入後、光漏れ等いくつかの問題が生じていることが明らかになったが、適切なデータ選択等により、これらの影響を除いて科学解析を行なう手続きが確立した．本論文では、これを含む ARD のデータ処理の流れと、角度応答関数を考慮した月面の α 線強度分布の導出方法について紹介した．角度応答関数を考慮した月面の α 線強度分布の導出は、月のラドン α 線観測データの解析には初めて適用される方法で、Apollo および Lunar Prospector による過去の観測・解析と比較して、詳細な地形とラドン α 線強度分布との比較が可能となった．ARD の観測データは、2014 年度中を目処として、SELENE データアーカイブを通じた公開に向けた準備を

進めている。

謝辞

衛星の開発、運用を行なわれた SELENE プロジェクトの各位と、本論文の著者以外の ARD チームメンバーに心からの謝意を表する。

参考文献

- 1) M. Kato, S. Sasaki, K. Tanaka, Y. Iijima, Y. Takizawa, The Japanese lunar mission SELENE: Science goals and present status, *Advances in Space Research*, 42, 2008, pp.294-300
- 2) M. Kato, S. Sasaki, Y. Takizawa, The Kaguya Mission Overview, *Space Sci Rev*, 154, 2010, pp.3-19
- 3) <http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html.ja>
- 4) H. W. Kraner, G. L. Schroeder, G. Davidson, et al., Radioactivity of the Lunar Surface, *Science*, Vol. 152, No. 3726, 1966, pp.1235-1236
- 5) P. Gorenstein, P. Bjorkholm, Alpha-Particle Spectrometer Experiment, Apollo 15 Preliminary Science Report, 1972, pp.18-1-18-7
- 6) P. Gorenstein, P. Bjorkholm, Detection of Radon Emanation from the Crater Aristarchus by the Apollo 15 Alpha Particle Spectrometer, *Science*, Vol. 179, No. 4075, 1973, pp.792-794
- 7) P. Bjorkholm, L. Golub, P. Gorenstein, Detection of a Nonuniform Distribution of Polonium-210 on the Moon with the Apollo 16 Alpha Particle Spectrometer, *Science*, Vol. 180, No. 4089, 1973, pp.957-959
- 8) P. Gorenstein, L. Golub, P. Bjorkholm, Detection of Radon Emission at the Edges of Lunar Maria with the Apollo Alpha-Particle Spectrometer, *Science*, Vol. 183, No. 4123, 1974, pp.411-413
- 9) W. Feldman, K. Ahola, B. Barraclough, et al., Gamma-Ray, Neutron, and Alpha-Particle Spectrometers for the lunar Prospector mission, *JGR*, Vol. 109, 2004, E07S06
- 10) S. Lawson, W. Feldman, D. Lawrence, et al., Recent outgassing from the lunar surface : The Lunar Prospector Alpha Particle Spectrometer, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, 2005, E09009
- 11) J. Nishimura, T. Kashiwagi, T. Takashima, et al., Radon alpha-ray detector onboard lunar mission SELENE, *Advanced in Space Research*, Vol. 37, 2006, pp.34-37