

SELENE計画の目指す統合サイエンス ：月の科学

並木則行¹, 岩田隆浩², 大竹真紀子², 荒井朋子³, 杉原孝充⁴,
山口靖⁵, 山路敦⁶, 中村良介⁷, 荒木博志⁸

1. SELENE統合サイエンス

JAXAの大型月探査機SELENEの打ち上げが2007年夏期に予定されている。搭載される15の観測機器ハードウェア（表1）の開発は終了し、今後は月の“統合サイエンス”というソフトウェアの開発を進めなければならない。SELENEは日本初の本格的な月探査である[1, 2]が、ほぼ同時期に中国の嫦娥計画、アメリカのLunar Reconnaissance Orbiter (LRO) 計画、インドのChandrayaan計画と4カ国の探査機が月を目指す。21世紀の宇宙探査は国際協力と競争の微妙な平衡を維持しなければならない。その中でSELENEの特色は規模の大きさと観測機器の多様性にある。中国、アメリカ、インドの探査機は将来月利用を強く意識している。このためこれらの探査機は観測精度の差こそあれ同種の観測装置を搭載しているのに対して、科学探査を主目的とするSELENEにはレーダサウンダ(LRS)やプラズマ計測器(PACE)、月裏側重力場計測用中継器(RSAT)、VLBI電波源(VRAD)など日本独自の観測機器が搭載されている。こうしたSELENE独特の利点を生かして大きな科学的成果を上げるためには各観測機器が固有の科学目標を個別に達成するだけでは不十分で、複数の観測機器のデータを総合して月の科学、月からの科学、月の環境という大目標[1, 2]に

至るアルゴリズムが重要になる。SELENEプロジェクトではこうした考え方を「統合サイエンス」と呼んでいる。

SELENE計画において当初から討議・審査されてきたのは観測装置の開発と各観測機器チームが個々の科学成果を達成するまでのデータ解析である。統合サイエンスはプロジェクト研究員個人々の努力に委ねられている。何故ならば、統合サイエンスが目指しているのは、SELENE計画がもたらすであろう新たな知見と洞察に基づいて月の科学、月からの科学、月の環境に新分野を開拓することだからである。統合サイエンスのゴールを予見することは難しい。しかしながら、このことは統合サイエンスがSELENE計画の副次的な成果であることを意味しているわけではない。むしろ我々は統合サイエンスこそSELENEのもっとも重要な科学的成果であり、従来の日本の宇宙科学プロジェクトに見逃されがちであった果実と考えている。観測機器開発の合間をぬって続いてきた統合サイエンスをSELENE打ち上げに向けて加速させなければならない。

2. 統合サイエンスの方法論

我々はSELENEプロジェクトメンバーを中心に統合サイエンスWGとサイエンス小研究会を開催し、また国内外の学会講演会を通して月の科学に関する統合サイエンスの進め方について議論を重ねてきた（表2）。これらの研究会で初めに議論されたのはSELENE統合サイエンスの方法論である。何故ならば、上に述

1. 九州大学 理学研究院
2. 宇宙航空研究開発機構
3. 国立極地研究所
4. 海洋研究開発機構地球深部探査センター
5. 名古屋大学 大学院環境学研究科
6. 京都大学 理学研究科
7. 産業技術総合研究所
8. 自然科学研究機構 国立天文台

べたようにSELENE観測開始以前に統合サイエンスへの明確な道筋を予見することは困難だからである。また、SELENEプロジェクトメンバー内でもそれぞれの研究者ごとに統合サイエンスについて独自のイメージを抱いているはずである。とはいえ、観測データの解析が始まってからPI(主研究者)やCo-I(共同研究者)の間で議論を始めたのでは他国の月探査に後れをとってしまう。予め観測機器グループを横断する組織を作り、統合サイエンスの研究に必要なリソースと観測データが確保されるように準備しておかなければなら

い。従って、統合サイエンスへの道程の要所要所を押さえながら、各ステップでの自由度を確保できるような研究戦略が我々には必要なのである。つまりここで我々が議論している「統合サイエンス」とはSELENEの科学目標であると同時に、それに至る方法論をも意味している。

統合サイエンスは、以下の四段階に分けて進められる(図1)。本稿ではSELENE計画の三大目標のうち「月の科学」への貢献を目指している。SELENE搭載の観測機器の中で特に月の内部構造や進化に強く関連しているのは、図1の最上段に並んだ8グループ、10の観測機器である。

表1 SELENE搭載機器

元素分布	蛍光X線分光計	XRS
	ガンマ線分光計	GRS
鉱物分布	マルチバンドイメージャ	MI
	スペクトルプロファイラ	SP
地形・表層構造	地形カメラ	TC
	月レーダサウンダー	LRS
	レーザ高度計	LALT
月面と地球の環境	月磁場観測装置	LMAG
	粒子線計測器	CPS
	プラズマ観測器	PACE
	電波科学	RS
	プラズマイメージャ	UPI
映像	高精細映像取得システム	HDTV
月の重力分布	リレー衛星中継器	RSAT
	衛星電波源	VRAD

(I) 表面のmap(地質図or GIS)の作成

すでに月の地質図は存在する[e. g., 3, 4, 5, 6]. しかし、作成者ごとに区分はまちまちである。また、アメリカの月探査機Clementine, Lunar Prospectorの観測により元素map, 鉱物mapも存在する[7, 8.]. それでも未だに決定版地質図には至っていない。その理由は、月では物質境界が曖昧なためと考えられる。月面では形成以来無数の衝突によって、表層の物質が水平方向に輸送・拡散されている。そ

表2 統合サイエンスについての検討経緯

平成17年度	10月31日	SELENE計画 第1回統合サイエンスWG
	11月26日	第6回サイエンス小研究会
	3月30日	第2回統合サイエンスWG(第7回サイエンス小研究会)
平成18年度	4月28日	第3回統合サイエンスWG(第8回サイエンス小研究会)
	5月18日	地球惑星科学関連連合大会カウントダウン月探査セッション
	6月27日	第4回統合サイエンスWG(第9回サイエンス小研究会)
	7月20-22日	COSPAR2006 The Moon: Recent Results, Science, Future Robotic and Human Exploration
	7月23-27日	8th ILEWG Conference
	10月6日	第5回統合サイエンスWG(第10回サイエンス小研究会)
	10月18日	日本惑星科学会秋期講演会
	11月14-15日	国立天文台RISE研究会

これはアポロ宇宙飛行士が持ち帰った角礫岩の鏡下観察からも伺うことが出来る。曖昧な物質境界は、しかしながら、必ずしも地質区分が不確定であることを意味している訳ではない。例えばImbrium盆地の溶岩流は地上の望遠鏡からも末端の崖を認識することができる。そこで、我々は元素map (XRS, GRS) や鉱物map (SP, MI) だけにたよらず、微地形や地下構造についての新しいデータを積極的に利用して境界を定めることが月地質図を更新する鍵であると考え、LRS, レーザ高度計 (LALT), TCの活躍が期待される。

(II) 3次元構造の定量化

鉛直構造は深さ数kmまでの浅い構造と、数十kmにおよぶ深い構造に分けて考える。浅い地下構造の解明はLRS の成果そのものであり、海の玄武岩溶岩の層序や断層・褶曲の地下構造を明らかにすることが期待される。さらに小クレーターを使ってMI/SPデータで検証することができる。可能ならば層序毎の鉱物相を同定したい。深い地下構造の解明では、上部地殻～下部地殻～上部マントルがターゲットである。まず定性的な層構造（鉛直方向の鉱物分布）をMI/SPで同定する。層厚は重力場データ (RSAT, VRAD) で定量化し、与えられた構造を電気伝導度 (LMAG) と比較、

検証を行う。

(III) 個別のtopicを共同研究

SELENE計画発足当時の検討報告書[1]には各観測機器グループで様々なtopicが上げられている。これらのtopicの中から、複数の観測機器グループが関心を持ち、且つ、最近の月科学の進展を考慮して「月の起源と進化」に関してもっともインパクトがあるテーマを選択する。この段階まではSELENEの科学成果としてある程度まで達成可能であるし、我々の義務として達成しなければならない。第7～9回のSELENE小研究会では、この段階のtopicとして、どのようなテーマを選択するかについて議論を重ねてきた。その内容については次章で詳述する。

(IV) より上位のサイエンス

(月の起源と進化の研究)

(III) まですでに十分な成果が上がれば、統合サイエンスはより上位の科学へレベルアップすることになる。例えば、月のバルク組成、二分性、マグマオーシャンの分化・進化、月の熱史などなどである。最終的には月の起源と進化を解明することがSELENE計画の目標である。しかし、こうしたレベルアップのためには

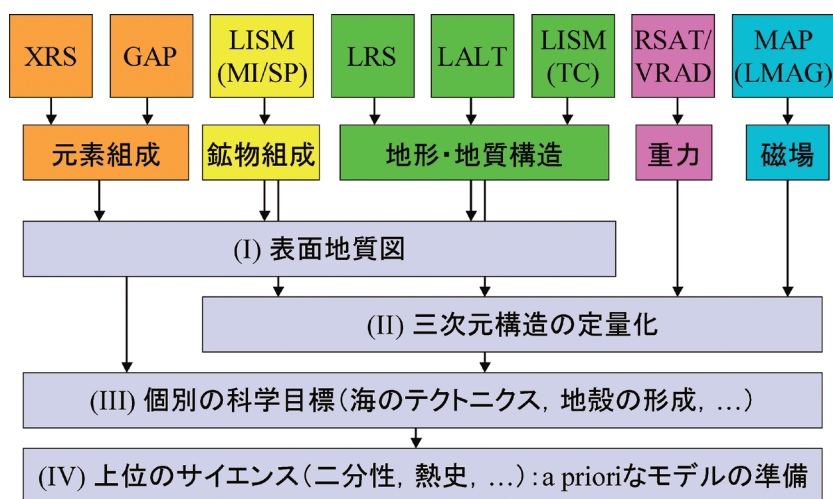


図1: 統合サイエンスの方法論

post-SELENE計画でもデータが全く欠けている、あるいは不十分でしかない側面が多々残されていることを我々は認識しなければならない。例えば月のバルク組成を決めるためには下部マントルの組成や、コア半径が、magma oceanの分化・進化を考えるためにはその深さが必要である。データ不足を補うためには推測や仮定、「惑星科学的常識」で補う必要がある。ア prioriなモデルを事前に提案し、広い観点からの批判・検討を募っていかなければならない。

3. 個別の科学目標の選定

2章で議論した手順を具体化するためには、研究対象地域を絞り込み、(I) や (II) の段階 (図1) で準備するmapにどのような情報を盛り込んでいく必要があるかを決めなければならない。そのために我々は段階 (III) から議論を始めて、(II), (I) へさかのぼるという方針を決めた。まず、第7, 8回SELENEサイエンス小研究会 (表2) では月科学の現状をレビューし、SELENE観測機器の特性を考慮して統合サイエンスが挑むべき中心課題は地殻の形成や海のテクトニクスと地下構造、極域探査であると結論づけた。さらに第9回SELENEサイエンス小研究会 (表2) において、ノミナル観測期間 (1年間) の終了後速やかに科学成果をまとめるという時間的制約、また、各観測機器グループがそれぞれの観測とデータ解析を進めながら同時に統合サイエンスの研究を行わなければならないという人的資源の制約を勘案して、以下のような4つのテーマを (III) の個別topicとして選定した。海のテクトニクス、地殻の形成、極域探査、そして多重リング盆地オリエンタルの地下構造である。第9回のSELENE小研究会では以上4つのテーマについて研究代表者を決め、それぞれの研究代表者が観測機器横断型の研究グループを組織して、(A) 観測対象地点の選定と、(B) 観測運用への要求をとりまとめて研究計画を作成することとした。本稿執筆時点でこのとりまとめを続けている最中である。

3.1 海のテクトニクス

海のテクトニクスを研究する第一の目的は既存のアポロ計画データと直接比較・検証することである。例えばMare SerenitatisやMare Crisiumはこれまでに数多くの研究があり、我々のマッピング技術を磨くために良い手本となる。またMare Serenitatisからはアポロ17号が、Mare Crisiumからはルナ24号がサンプルを地球に持ち帰っているため、段階 (II) で作成する断面図の検証が可能である。また両地域はアポロレーダサウンダの解析が行われた数少ない地域である[9]。SELENE LRSは同様の観測を月全球にわたって行う予定であるが、手始めにこの地域のデータ解析を行って、解析手法の最終調整を行う。

第二の目的は月の海の火成活動とテクトニクスの変遷を解明し、熱史に制約を与えることである。このためにはまず溶岩流の層序や鉱物の水平・鉛直分布、広域応力場の変遷を体系化して、海の地質図 (図2) を更新する必要がある。LRS, TC, LALTデータを用いて地質区分境界を推定し、元素map (XRS, GRS) や鉱物map (SP, MI) をもとに海の玄武岩の噴出量と組成、その時代変化を解明する。これまで玄武岩溶岩の厚さはDeHon [11]がクレーター内部のアルベドから推定しているが、SELENEではLRSデータを使って高解像度・高精度に決定できると期待される。研究対象地域は月の全ての海であるが、他に較べて研究が遅れているEratosthenian期の海や詳細がまだ十分に理解されていないcryptomareについては今後議論を深めていく必要があるであろう。

テクトニクスの変遷は地形と重力の相関から求められるリソスフェアの有効弾性厚の地域・時間変化から推定することができる。また、LRSのデータ解析に地形 (TC, LALT) や組成変化 (MI, SP, XRS, GRS), 重力異常 (RSAT, VRAD) を取り込むことによって玄武岩溶岩の堆積とリンクリッジ、グラー

ベン, 盆地沈降の相対年代を決定することができるかもしれない。

後述するように月のProcellarum KREEP Terrane (PKT) には熱源となる放射性元素が濃集していることがLunar Prospectorの観測から明らかにされている。この地域にマグマオーシャン最終残液が集中したと考える研究もある[12]。PKTとその他の地域の熱史を比較することは大変興味深い。

3.2 地殻の形成

Jolliff ら [13] は Clementine の鉱物 map と Lunar Prospector の元素 map をもとに, 月面地質の三大区分を提唱している。第一は上述のPKTである。この地域はFeとThなどの液層濃集元素に富んだマフィックな組成によって特徴づけられ, マントル起源のマグマが地殻物質を取り込んで多様な火成活動を示していると考えられる。第二はSouth-Pole Aitken Terrane (SPAT) である。この地域の岩石はPKT同様にFeに富んだマフィックな組成であるが, PKTほどThが濃集していない。Clementineのマルチスペクトル画像では下部地殻や上部マントルの物質がところどころ顔を出しているように見えるが, 無数の衝突により

地殻の混合・拡散が起きているようである。第三はFeldspathic Highlands Terrane (FHT) である。ここは主に斜長岩からなる地殻であり, マグマオーシャンから析出した原始地殻の可能性が示唆されている。我々はSELENEの元素map・鉱物mapからこれらの三大区分を検証し, 地表と地下の構造探査データと併せて境界を確定する。そして, 原始地殻は唯一の核を芯にして同心円上に成長したのか, あるいは複数の核が独立に成長し合体したのかという両極端のモデルを評価し, グローバルマグマオーシャンの存在や地殻の二分性の原因を考察する。

第10回サイエンス小研究会(表2)ではPKT地域の研究課題として(a) Th等濃集地域の化学・鉱物組成・岩石種探査, (b) Th, K, REE, P等の垂直・水平方向分布探査, (c) PKT産のMgに富む岩石の分布・産状・組成の探査, が提案された。その目的はKREEP成分の起源の解明すること, PKT固有のMgに富む岩石の詳細分布と化学/鉱物組成を明らかにすること, そしてアポロサンプルと比較して岩石種の特定することである。

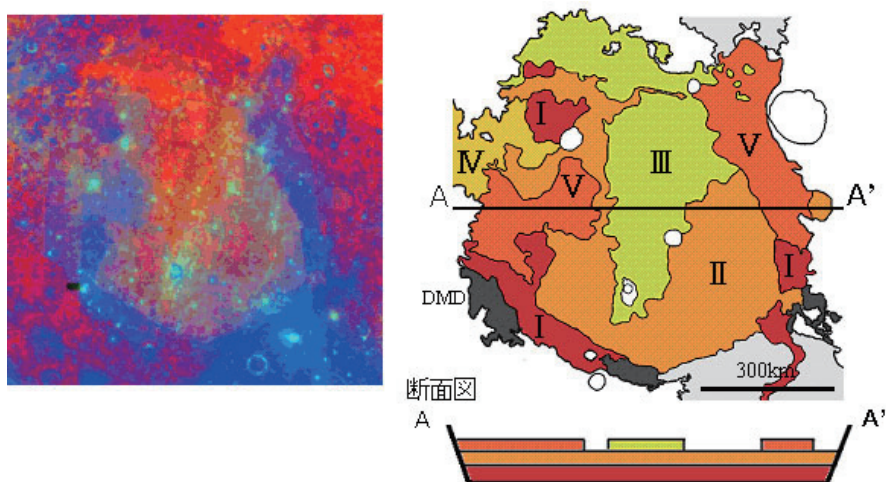


図2: Mare Serenitatisの地質図。左側はClementineデータによる比演算画像であり, Ti量とFe量を表している。右上は, 左の比演算画像をもとに作成した地質図。右下はA-A'線に沿った断面の模式図である[10]。

SPAT地域の研究課題は (d) SPA盆地の化学・鉱物組成・岩石種・地形探査, (e) クレータ壁や底の化学・鉱物組成探査, (f) Th等の熱源元素分布と岩石種との相関の探査, (g) 裏側玄武岩(cryptomareを含む)組成探査, である。目的はサンプルのないSPATでの地殻形成を明らかにすることであり, 上部及び下部地殻組成や表裏のマグマ活動の相違を解明することにある。

最後にFHT地域の研究課題は(はずり) (h) Mg/Fe比の分布を調べることである。従来月の地殻はアポロサンプルに含まれる斜長岩に代表されるようなFeに富む組成 (Ferroan Anorthosite) であると信じられてきた。しかし, 近年の月隕石の分析はMgに富む組成 (Magnesian Anorthosite) が月面の裏側地域に存在していることを示唆している[14, 15, 16]。Mg/Fe比はマグマオーシャン分化の指標である。FHTに限らずMg/Fe比の分布測定はマグマオーシャンからの地殻形成過程の解明に大きく貢献するはずである。また表・裏の非対称性や地殻の水平方向組成分布, 斜長岩地殻の岩石種 (下部地殻混入度合) を解明することも重要な目標である。そして最終的にはMg/Fe比の分布を他の地形・地下構造・重力異常・磁気異常データとつぎあわせて (図3), 誕生直後の月の姿を明らかにする。

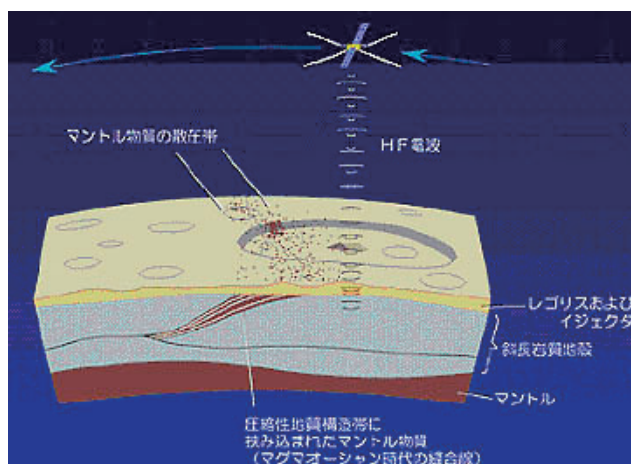


図3: FHT 地殻形成に関する統合サイエンスの模式図。

3.3 極域探査

月の極域を探査する科学的な意義は水の存在を確認することである。Lunar Prospectorの中性子計測は極域に水が存在していることを示唆している[17]。この観測結果をSELENEで確認することは原始地球-月系の揮発性物質の起源に関わる重要な問題である。月の水が内部起源であれ外部起源であれ, 月の誕生や地球の海・生命の起源に対する重大な制約条件となる。内部起源の場合, 水はジャイアントインパクトをなんらかの形で生き延びたことになる。一方, 彗星や原始的な小惑星が外部から月に水をもたらしたとすると, その存在量は, こうした天体のフラックスや月の自転軸/軌道の安定性に依存しているはずである。

SELENEによる極域探査の第一の目標はSPとGRSの観測から地表と地中の水 (水素) を発見することである。特にGRSによる輝線の検知は水素存在の直接的な証拠となり[18], 我々の知見は中性子観測から大きく前進することになる。高エネルギー宇宙線によって励起される中性子や γ 線の観測では, 表面よりも深いところに存在する水素を検知することができるが, その空間分解能は数十kmでしかない。またガンマ線の観測だけでは, 水素が太陽風によってもたらされた単

独成分なのか, 水の中に入っているのかは区別できない。一方, もし永久影表面に存在する水を光学センサーで検知できれば, 水素の存在形態を特定し, 数百mスケールで将来の直接探査域を絞りこむことが可能となる。広いダイナミックレンジと高い感度を併せ持つSPでは, 近傍の日照域からの二次散乱光によって永久影表面を十分なSNで観測することができる[19]。可視域での水の反射率は岩石よりも高いが, 赤外域では岩石よりも暗くなる。SPの永久影サーベイによって, こうした特徴的なスペクトルを示す領域を特定できれば, 表面に存在する水を捉えたことにな

る。

第二の目標はTCとMIのデータを使って永久影/永久日照領域を特定し、LALTデータとLRSの合成開口レーダ解析によって永久影中の地形図を作ることである。月の自転軸はわずかながら傾いているため、季節によって太陽高度が変化する。クレメンタイン衛星に搭載されていたカメラの観測は、北半球の夏に相当する2ヶ月間分しかないので、この季節変動が追えていない。また Smart-Iに搭載されたカメラでは、北極側の観測ができておらず、空間分解能もTC/MIよりもずっと低い。TCおよびMIによる継続的なマッピングと、LALT/LRSのようなアクティブセンサーによる永久影中の地形の探査によって、はじめて極域の詳細な全体像が明らかになるだろう。

極域探査には工学的・政策的な意義も大きい。氷(水素)は月面上で人間が長期間滞在するための重要な資源であり、将来的には推進材としても利用できる。また温度が安定しており、定期的に太陽光発電を行なえる永久日照領域は、観測基地や有人拠点の有力な建設候補地点である。月面基地建設はNASAの新宇宙政策の核であり、国際宇宙ステーション後の最大国際協力プロジェクトとなる可能性が高い。極域探査の統合サイエンスはSELENE直後に打ち上げを予定されているLROとの国際協力/競争の中心課題になるであろう。

3.4 多重リング盆地オリエンタールの地下構造

月では18個の多重リング盆地が同定されているが、オリエンタール盆地は形成年代がもっとも新しい。つまりオリエンタール盆地は形成初期の形態にもっとも近い。このため、オリエンタール盆地の研究は18個の多重リング盆地の中でもっとも重要と考えられている[20]。

オリエンタール盆地は西経95°に位置し、月の表側・裏側境界にある。通常のレンジ・レンジレート計測で

は月の表側にある衛星の視線方向の運動だけが検知される。このため、衛星重力の方向と視線方向が直交する表側・裏側境界では重力観測の精度が低い。また、月裏側の重力場は計測できない。一方、SELENE搭載のVRADは地上の干渉計で位相差を検知するので、視線方向と直交する運動に感度を持つ。またリレー衛星に搭載されるRSATは裏側を周回中の主衛星からの測距信号を地球に中継し、世界で初めて月裏側重力場の直接計測を可能にする。これらの観測により、SELENEではオリエンタール盆地の重力異常測定データが大きく向上すると期待されている[21]。

多重リングを同定し起源を解明するために、第一に詳細な地質図が必要である。SELENEにはX線(XRS)と γ 線(GRS)の検出器が搭載されており、Mg, Al, Ca, Fe, Ti, K, Th, Uなどの元素の存在度をマッピングする事ができる。特に重要と考えられるのは高地のMg/Fe比と海のTi含有量および希元素濃度である。第二に、地質図の作成において形態学が重要な情報である。オリエンタール盆地周辺の地質図は複数提唱されているが、大まかには、smooth plains, fractured plains, knobby deposits, textured depositsに分類されている。これらの分類名称が示すように、オリエンタール盆地の地質区分は形態が決め手となっている。TCは前方視と後方視の二方向の撮像を行い、月全体のDigital Elevation Model (DEM)を作成する。TCよりも水平解像度は落ちるが、LALTも地形データを収集する。こちらは鉛直方向の精度が高いので、ポイントポイントでTCのDEMを補正することができる。

第三にLRSのデータ解析から深さ数kmまでの浅部地下構造を明らかにし、表面地形と合わせて、地形断面図を描く。LRSは地中の境界面を感度よく検知することができる。いくつかのリング構造起源モデルが提唱するように、リングが同心円上の断層系であるとする、レーダの強い反射エコーが観測されるはずである。また、LRSによって盆地中央のインパクトメルト

の層序と厚さ、その変形様式が解明されれば多重リングの起源に強い制約を与えることになる。

多重リング盆地のもう一つの問題は衝突時の掘削サイズエジェクタの分布である。この点に関しては下部地殻から上部マントルまでの深部地下構造が決め手となる。そのためにはRSAT, VRADの重力異常データやLMAGの磁気異常データが有効である。重力データは地形データ (LALT) ととの相関を波長ごとに調べることによって盆地周辺の地殻の厚さやモホ面の深さ、マントルの隆起を定量化することができる。推定された地下構造は、フォワードインバージョンの手法で磁気異常と比較・検証を行う。また元素分布mapと鉱物分布mapはオリエンタル盆地形成に伴う放出物についての手がかりを与える。もしLRSデータ解析によってエジェクタ層厚を決めることができれば、エジェクタ体積の推定値の精度を格段に上げることが可能となる。

4. 統合サイエンスの今後

以上にSELENE統合サイエンスの検討状況を概観してきたが、今後は (i) 研究対象地域の絞り込み, (ii) アプリオリモデルの構築, (iii) 科学要求の観測運用への反映, (iv) 観測結果のキャリブレーション, (v) 異観測データ間の相互検証, (vi) ファーストレポートの作成, (vii) 低高度ミッション運用, を考慮してスケジュールを立てていかなければならない。同時に各観測機器グループから代表メンバーを集めて、統合サイエンスのための研究体制を組織することがこれからの課題である。統合サイエンスは難しいテーマであるが、科学的意義の高い仕事であるのは言うまでもない。それぞれのtopicに興味があり、研究計画に参加を希望される読者は本稿の共著者と各PIに連絡していただきたい。

最後に統合サイエンスの思想についてふれておきた

い。「様々な観測データを統合する」という表現を使うと、複雑な数値計算プログラムに観測データ・解析結果を代入してシミュレーションするやり方を想像される方も多いかもしれない。しかし、我々がSELENEの統合サイエンスで目標にしているものは、シミュレーション計算のもととなる物理モデルそのものである。言い換えれば、SELENEの観測により、現在の物理モデルを変更せざるを得ないような新しい発見を我々は期待しているのである。それに見合うだけの準備をしっかりと進めていきたい。

謝辞

統合サイエンスはもとより、SELENE計画はプロジェクトに関わる全ての研究者と技術者、スタッフの献身的な努力に支えられている。ささやかながら、この場を借りて謝意を表したい。

参考文献

- [1] 大型月探査ワーキンググループ, 1995, 大型月探査検討報告書, 宇宙科学研究所.
- [2] Kato, M. et al., 2006, LPSC XXXVII, 1233 (abstr.).
- [3] Pieters, C. M., 1978, Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th, 2825.
- [4] Whitford-Stark, J. L. and Head, J. W., 1980, J. Geophys. Res. 85, 6579.
- [5] Wilhelms, D. et al., 1987, The Geologic History of the Moon.
- [6] Hiesinger, H., R. et al., 2000, J. Geophys. Res. 105, 29239.
- [7] Lawrence, D. J. et al., 1998, Science 281, 1484.
- [8] Lucey, P. G. et al., 1998, J. Geophys. Res. 103, 3679.
- [9] Peeples, W. J., et al., 1978, J. Geophys. Res. 83, 3459.

- [10] Kodama, S. and Yamaguchi, Y., 2003, Meteor. Planet. Sci., 38, 1461.
- [11] DeHon, R. A., 1979, Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th, 2935.
- [12] Wieczorek, M. A., and Phillips, R. A., 2000, J. Geophys. Res. 105, 20,417.
- [13] Jolliff, B. J. et al., 2000, J. Geophys. Res. 105, 4197.
- [14] Takeda, H. et al., 2006, Earth Planet. Sci. Lett. 247, 171.
- [15] Korotev, R. L., 2006, LPSC XXXVII, 1402 (abstr.).
- [16] Lucey, P. G. and Cahill, J., 2006, LPSC XXXVII, 1660 (abstr.).
- [17] Lawrence, D. J. et al., 2006, J. Geophys. Res. 111, E08001.
- [18] Berezhnoy1, A. A. et al., 2004, LPSC XXXV, 1210 (abstr.).
- [19] McConnochie, T. H. et al., 2002, Icarus 156, 335.
- [20] Spudis, P. D., 1993, The Geology of Multi-Ring Impact Basins.
- [21] Namiki, N. et al., 1999, Advanced Space Res. 23, 1817.