特集「月惑星探査の来たる10年:第二段階のまとめ」 月・惑星着陸探査用元素分析装置: レーザ誘起絶縁破壊分光装置(LIBS) 石橋高¹, 亀田 真吾², 荒井 朋子¹, 和田 浩二¹, 小林 正規¹, 竝木 則行¹, 千秋 博紀¹, 大野 宗祐¹, 長 勇一郎³, 杉田 精司⁴, 松井 孝典¹

2012年7月4日受領, 2012年7月27日受理.

(要旨) レーザ誘起絶縁破壊分光装置(Laser-Induced Breakdown Spectrometer; LIBS)は、測定対象試料上 にパルスレーザを照射し、試料の一部をプラズマ化し、プラズマからの発光を分光分析することで、試料に 含まれる元素の定量を行う元素分析装置である。LIBS はこれまでの惑星探査に用いられてきた元素分析装 置には無い数々の長所を持ち、着陸月・惑星探査における次世代の元素分析装置として期待されている。特 に、遠隔性を持ち、迅速な測定が可能であることから、ローバ探査においてその性能が発揮される。LIBSは、 原理的に軽元素を含むほぼすべての元素測定が可能な汎用的な元素分析装置であるため、様々な天体におけ る多様な科学目標に対して使用が可能である。現在、日本の次期月探査計画SELENE-2のローバへの搭載を 目指して月探査用のLIBS(LIB-S2)を開発中である。LIBSの開発においては、定量正確度の向上、適切な光 学系の開発、小型軽量化などの課題があるが、LIB-S2の開発について課題の説明と現状の報告を行う。

1.背景

月・惑星の固体系探査は、一般に周回衛星によるリ モートセンシング、着陸機とローバによるその場観察、 サンプルリターン、有人探査の段階を経て進められる。 今後の月・惑星探査は各国ともサンプルリターンの段 階へと移行してゆくと考えられる。しかし、これまで のリモートセンシングによる月・惑星探査では、太陽 系の各天体が複雑多様な表層組成を示しており、「ど こからでも良いからサンプルを持ち帰ればその天体の 起源や進化がわかる」というほど単純なサンプルリタ ーンはあり得ないことを明確に示している。従来の惑 星探査の経験から、複数点への着陸によるその場観測 の必要性と、着陸地点の地質を理解することの重要性 が強く指摘されている。

- 3. 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻
- 4. 東京大学新領域創成科学研究科複雑理工学専攻

従って、サンプルリターンの前段階としての着陸地 質探査は必須であり、その場合ローバを使った広範囲 の移動能力が不可欠である。その際に、個々の試料分 析に時間を要してしまってはローバの移動能力を活か せない.ローバの進むべき興味深い地点の選定を迅速 に行うために、遠隔分析が可能で効率的な元素分析機 器の搭載が望まれる。また、サンプルリターンを行う 際にも、採集する適切な試料を短時間で探索する必要 があり、やはり効率的な元素分析装置が必須である。 我々が「来たる10年の月・惑星探査」第二段階パネル の個別観測機器提案に提案した、レーザ誘起絶縁破壊 分光装置(Laser-Induced Breakdown Spectrometer; LIBS)は、上記のような着陸月・惑星探査に適した元 素分析装置である。

2. LIBSの概要

LIBSは、月・惑星着陸探査における次世代の元素 分析装置として期待されている。1960年代のレーザ

^{1.} 千葉工業大学惑星探査研究センター

^{2.} 立教大学理学部物理学科

ko.ishibashi@perc.it-chiba.ac.jp







図1:LIBS の測定原理の模式図.

開発以来, LIBSは地上においては様々な分野で試料 の定性および定量分析に用いられてきた[e.g. 1-3]. 2011年11月に打ち上げられた米国の火星探査ローバ である Mars Science Laboratory (MSL)には化学分析 パッケージ ChemCam として LIBS が搭載されており. これが宇宙における初のLIBSの使用となる予定であ る[4].



	測定時間	遠隔性 (>1m)	測定元素	空間 分解能	放射線源	定量 正確度	備考
LIBS	数秒~数分	あり(レー ザ出力に 依存し, ChemCam では最大7 m)	ほぼすべての 元素(特にア ルカリやアル カリ土類元素 の感度が良 い)	数十μm ~ 数百μm	不必要(レ ーザを使 用)	数wt%	測定時間が短 く遠隔性があ るが,定量正 確度はやや低 い
APXS(a粒 子X線分光 計)	数時間~数 日	なし	ほぼすべての 元素(H以外)	>1 cm	必要(放射 性同位元 素)	0.1 wt%	正確度は高い が,測定時間 が長く遠隔性 もない
XRF(蛍光 X線分析装 置)	数時間(簡 易分析なら 数分)	あり(能動 的放射線源 が必要で, 長い測定時 間がかか る)	軽元素は測定 できず, アル カリ元素(K, Na)の感度も 悪い	最小で100 μm程度(能 動的放射線 源が必要)	必要(短時 間での測 定,高空間 分解能を必 要とする場 合)	サブwt% ~ 数wt%	軽元素の測定 ができず測定 時間も長い
y 線 分光計	数時間(放 射性元素), 数日(それ 以外の元 素)	なし	放射性元素 (K, Thなど) に強いがNa, Mg, Caなど の検出に問題 あり	数十cm ~ 数m(数十 cmへの近接 でも)	不必要(放 射性元素の 自然崩壊, または宇宙 線を使用)	ppmオーダ ー (放射性 元素)	放射性元素の 測定に強い が,それ以外 の元素の測定 には向かない

表1:LIBSと他の元素分析装置の比較(着陸機搭載時の現実的リソースを前提としている).

2.1 LIBSの測定原理

LIBSでは、パルスレーザ光を測定対象試料上に集 光し、その一部を蒸発・プラズマ化する、プラズマ中 で励起された原子やイオンは時間の経過に伴い脱励起 して最終的には基底状態に戻るが、その過程において、 脱励起前後のエネルギー差に応じた波長の電磁波(紫 外~近赤外光)を放出する、それを分光測定し、試料 中に含まれている元素の輝線スペクトルを取得する (図1)、輝線の位置は各元素に固有であり、輝線の強 度は元素濃度に相関があるため、スペクトルを解析す ることで試料の定性および含まれる元素の定量が可能 である[e.g., 1-3].

2.2 LIBSの特徴

LIBSは、これまで惑星探査に用いられてきた元素 分析装置にはない数々の長所を持つ、表1に、着陸惑 星探査に用いられる他の元素分析装置とLIBSとの比 較を示す. LIBSには、短時間でのデータ取得、遠隔 分析可能,軽元素を含むほぼすべての元素を測定可能, 高空間分解能などの特徴がある[3,5].また、試料が ダストや酸化皮膜などに覆われていても、レーザ照射 による除去が可能である。一方で、LIBSは従来の元 素分析装置に比べて定量正確度にやや欠けるという問 題もある[6]. しかし、スペクトル解析手法の改善に より、この問題は克服されつつある[7,8](これについ ては4.1節で述べる). これらの特徴により、LIBSは, 広範囲に渡る多数の試料の迅速な分析が可能である. 特にローバ探査においては、ローバの進むべき興味深 い地点の選定を行うナビゲータとしての役割も担うこ とが可能であり、これはこれまでの元素分析装置には なかった大きな特徴である.

2.3 LIBSの構成例

通常、観測機器を着陸機・ローバへ搭載する場合、 重量などのリソースには厳しい制限が課せられる. LIBSは汎用的な元素分析装置であるが、観測目的に 合わせて機能の特化・簡易化を行うことが重要である. 以下に、代表的なLIBSの構成例を示す.

(1) 測定距離可変遠隔LIBS(図2)

測定距離可変の望遠鏡を用いてレーザ光の測定対象 上への集光およびプラズマ光の分光計への集光を行う. 測定可能距離は望遠鏡の口径,レーザの強度,検出器 の感度などに依存するが,惑星探査機搭載LIBSの場合, 現実的には10 m程度までの遠隔測定が可能である. 例えば,前述のChemCamでは7 mまでの測定が可能 である(2.4節参照).着陸機・ローバを移動すること なく周囲の複数試料の迅速な測定が可能であり, LIBSの利点を十二分に活用できる構成である.ただし, この構成では,測定距離を変えるための光学系の駆動 機構,遠方へのレーザ光の集光や遠方からのプラズマ 発光の集光のための大きな口径の望遠鏡や高強度のレ ーザが必要であるため,測定距離を長くするほど重量・ サイズは増加する傾向にある.

(2) 測定距離固定近接LIBS(図3)

光学系の測定距離は固定し、ロボットアームに搭載 したプローブ部を移動することで測定を行う(図3a). ロボットアームの届く範囲は探査機の規模にもよるが 一般的に狭い(アームの根本から1m程度).しかし. レーザの集光スポット径は、基本的に集光距離に比例 して減少可能であるので、低レーザ出力でも高いレー ザ強度(単位面積あたりのパワー)を得ることができる. また、望遠鏡の口径も測定距離に比例して減少可能で ある. また光学系の駆動機構も必要ない. これらの理 由により小型軽量化が可能である。 さらに、レーザ光 及びプラズマ光を光ファイバーで転送する構成も考え られる(図3b). 転送可能なレーザ光の強度には上限 があるが、ロボットアーム先端への搭載は簡易な光学 系のみであり、ロボットアーム搭載部分の大幅な軽量 化が可能である、これらの構成では、測定対象物への 接近精度は、ローバの移動性能とロボットアームの駆 動性能に大きく依存する.

2.4 海外における惑星探査用LIBSの開発 状況

現在,海外においてもそれぞれ特徴の異なるLIBS の開発が進められている.

(1) ChemCam

LANL(アメリカ)とCESR(フランス)が共同開発した,火星探査用LIBS. 2011年11月に打ち上げられた NASAの火星探査ローバMars Science Laboratory (MSL)に搭載されている.測定距離可変の遠隔LIBS (1.5から7mの遠隔測定が可能)であり、レーザと光 学系と望遠顕微カメラをローバ上部に1メートルほど 突き出たマストユニット先端部に、分光計とデータ処 理部と電源をローバ本体に搭載している.レーザの出 力は17 mJ,分光器の観測波長範囲は240-850 nm, 重量は9.3 kg. 遠隔顕微カメラも備えており,測定点 の画像取得が可能である.高性能だが重量も大きく, 巨大ローバである MSL 以外への搭載は難しい.

(2) LIBS(正式名称不明)

LEOS(インド)が開発中の,月探査用LIBS. Chandrayaan-2のローバに搭載予定の測定距離固定近接LIBS. 詳細は不明だが,ローバの下腹部に搭載してローバ直下の地面の測定を行う.重量は1kg程度と軽量だが,ローバ直下のみの測定では,達成可能な科学的成果は限定的なものとなる.

(3) Mini-LIBS

DLR(ドイツ)が開発中のLIBS. もともとはESAの 火星探査機ExoMarsのローバへの搭載を目指して開 発を進めていたもので、レーザや分光計などの主要部 は完成している(レーザ出力2.8 mJ, エシェル分光器 を使用). 近接LIBSであり、レーザヘッドと光学系か らなるプローブをロボットアームに搭載し、ローバの 近隣の測定を想定している. レーザと分光計の重量は 1 kg程度だが、その他に光学系や観測環境に合わせ た温度調整機構などが追加で必要となる. 現在のとこ ろ、探査機への具体的な搭載予定は公表されていない.

3. LIBSによる科学目標

LIBSは、原理的にはほぼすべての元素測定が可能 な汎用的な元素分析装置であるため、様々な天体にお ける多様な着陸地点の科学目標に対して適用可能であ る.以下では、適用例として日本の火星着陸探査と月 着陸探査においてLIBSグループが提唱している代表 的な科学目標を紹介する.

3.1 火星着陸探査

(1) 火星の気候進化の解明(堆積岩地域への着陸)

火星の気候進化過程を解明するためには、二酸化炭 素や水の行方、および表層の酸化還元状態や酸性度と いった表層環境の変遷を明らかにする必要がある.こ れまでに行われた軌道からのリモートセンシング探査 結果によれば、含水鉱物や赤鉄鉱・硫酸塩岩・炭酸塩 岩が火星表面に存在することが明らかになっている [e.g., 9]. そのため、過去には火星表面に大量の水が存 在していたはずであり,現在でも地表面下の水や氷の 存在が示唆されている.また,そのような堆積岩の存 在から,表層の酸性度や酸化還元状態の変遷について も示唆が得られている.炭酸塩岩や硫酸塩岩などの形 成地域および形成順序を知ることは,表層環境の酸化 還元状態や酸性度の変遷,表層水の行方および大気中 の二酸化炭素の行方を知るうえで欠かせない[e.g., 10]. LIBSを用いて堆積岩の組成および分布(層序)を測定 することにより,大気組成進化および水・二酸化炭素 の行方への制約を得ることができる.そのためには, 岩石中の主要元素Si, Ti, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K に加え て,SやHを数wt%以下の正確度で定量する必要があ る.

(2) 火星の気候進化の解明(火山岩地域への着陸)

火星の気候進化過程を理解するためには、表層環境 の変遷を明らかにするだけでは不十分である、火星大 気は火星内部からの脱ガスによって形成されるであろ うし、表層の酸化還元状態と火星内部の酸化還元状態 は強く結び付いているはずである.この点に関して. 近年、後期ノアキス紀から前期ヘスペリア紀にかけて の大規模な火成活動、特に二酸化炭素や二酸化硫黄の 脱ガスが火星表層の酸化還元状態を急変させ、気候進 化に支配的影響を与えたという仮説が提唱されている [11]. 火星気候進化を解明するためには気候システム そのもの理解に加えて、システムへの流入・流出をコ ントロールする火成活動と散逸メカニズムの究明も重 要である.したがって、火星内部の活動状態とその変 遷を理解することが重要となる。LIBSにより火成岩 の元素組成を測定することで、上記のような火星の気 候進化上の謎解明への手がかりを得ることができる. これを達成するには、岩石の主成分Si, Al, Fe, Mg, Ca. Naを数wt%以下の正確度で測定することが必須 である. さらには、副成分 Ti, Cr, Mn, K, P, Ni や揮発 性成分Sなどについても測定できることが望ましい.

3.2 月着陸探査

(1) 月地殻の起源解明(高地への着陸)

アポロ探査以降, Feに富む輝石を含む斜長岩 (ferroan anorthosite; FAN)が全球地殻を構成する岩 石として考えられ、その仮定に基づき月地殻の起源(マ グマオーシャンモデル)が議論されてきた. しかしそ の後の月隕石より Mgに富むカンラン石を含む斜長岩



図4: (a)カンラン石の主要元素濃度推定結果.(b)斜長石の主要濃度推定結果.主要元素濃度(wt%)とカンラン石のMg#,斜 長石のAn値について,PLS 回帰法による推定値を真値(エネルギー分散型X線分析で測定)に対してプロットしている. それぞれ、○は天然の鉱物試料、□は粉末成形圧縮試料.元素濃度に関して±2 wt%の誤差範囲を点線で示してある. 試料の物性が異なるにもかかわらず、どちらの試料も同等に良い正確度で濃度推定できている.

(magnesian anorthosite; MAN)が発見され[12], 月地 殻の岩石組成が均質ではないことが示唆されるように なった[e.g., 13]. MANもマグマオーシャンの結晶化 で形成されたならば, マグマオーシャン組成は地球の マントル組成やコンドライト組成に比べてはるかに高 いアルミニウム組成を持たなければならない[13]. そ の場合, 従来のマグマオーシャンモデルの見直しが必 要となり, 月の組成や月の初期進化の描像は大きく変 わることになる. LIBSにより, 月地殻岩石中の斜長 石および斜長石と共存する苦鉄質鉱物の元素組成を測 定することで, 斜長岩質地殻の岩石種や化学組成を決 定し, 月地殻起源解明の手掛かりを得ることができる. (2) 月バルクのアルカリ元素濃度決定(PKT地域への

着陸)

月の斜長石の大部分は、地球の斜長石に比べて難揮 発性元素であるCaに富み揮発性元素であるNaに乏し いと考えられている[e.g., 14]. これは、月が揮発性元 素に乏しいと考えられる根拠の一つである.一方、月 表面側の西半球にあるPKT(Procellarum KREEP Terrane)と呼ばれる地域には、アルカリ元素や非適 合元素が濃集していることが知られている.この地域 には月初期に形成されたマグマオーシャンの最終残渣 と関連する物質が露出していると考えられている[e.g., 15]. この地域に分布するアルカリに富む岩石の分布 と組成は、月起源の議論にとって重要な制約となる「月 全体の揮発性元素濃度」を推定する鍵となる.LIBSに よりPKT地域のアルカリ元素(特にKとNa)の濃度を 測定することで、月全体の揮発性元素濃度決定の手が かりを得ることができる。

(3) 月のマントル組成の推定(海への着陸)

月の海の玄武岩は、月マントルが部分溶融し月面に 噴出したものであると考えられている。 アポロ試料の 玄武岩組成に基づき、月マントルの化学組成や融解深 度. さらにはマグマオーシャン深度が推定されている. 月の玄武岩は地球の玄武岩に比べてFeに富んでおり, これは月のマントル組成や部分溶解度に起因すると理 解されてきた.しかし,近年の月隕石の分析から,海 の玄武岩質マグマは噴出後にさらに結晶分化を起こし. 玄武岩流上部にはFeが下部にはMgが濃集している 可能性が指摘されている[16]. したがって、海の玄武 岩のバルク組成はこれまでに考えられていたよりも Mgに富む可能性がある、これ以外にも、火山岩中の 鉱物のMg#は、月のマグマオーシャンの結晶化、玄 武岩ソースの起源の決定,低圧下での結晶分化の評価 など様々な問題を解決する糸口となる、LIBSにより、 例えば玄武岩流が崩れた崖などに露出している鉱物の 垂直組成分布および元素組成を調べることにより、マ ントル組成や溶融深度などの玄武岩起源の正しい議論 が可能となる.

4. 課題と現状および今後の予定

LIBSの開発にとって大きな課題が3つある.1つ目 は定量正確度の向上,2つ目は適切な光学系の開発, 3つ目は小型軽量化である.現在,我々は日本の次期 月探査計画SELENE-2のローバへの搭載を目指した 測定距離可変遠隔LIBS(LIB-S2)を開発中である.こ こではLIB-S2に関する課題とその対策について述べ る.

4.1 定量正確度の向上

一般的にLIBSによる元素の検出限界は、多くの元 素について数から数百ppmオーダーであると言われ ている[e.g., 1]. 一方で, 定量の正確度については, 「マ トリックス効果 | と呼ばれる現象により大幅に低下す ることが知られており[e.g. 6]. 元素定量装置として のLIBSの実用化に向けては、この問題の解決が最大 の焦点となっている、測定対象の物性が異なるとレー ザとの相互作用が異なり、測定されるスペクトルが影 響を受ける、試料中の元素濃度と観測される輝線強度 は、基本的には線形に対応するはずであるが、マトリ ックス効果が生じると線形性が保たれなくなり、結果 的に定量正確度の低下を招く.しかし近年,多変量解 析手法を用いた解決法が提唱されている. LIBSスペ クトルの解析にpartial least squares(PLS)回帰法を 用いることで、ある程度マトリックス効果の影響を排 除できる可能性が示されている[7]. PLS回帰法では、 スペクトルデータから、元素濃度と相関の良い情報の みを抽出し、その部分だけを用いて重回帰分析を行う [e.g., 17]. 具体的には、観測量(分光器の各チャネルの カウント値)の線形結合の中で、参照試料(濃度既知試 料)の計測値(試料の元素濃度)と最も共相関が大きい ものを探し出す. この線形結合式を推定式(回帰モデ ル)として用い. 観測値(分光器のカウント値)から未 知の試料の推定値(元素濃度)を得る. この手法を用い た我々の最近の研究により、月の主要鉱物中の主要元 素に関しては、マトリックス効果を生じるような試料 に対しても絶対誤差約1 wt%以下を達成できること が確認されており(図4),これは科学要求を十分に満 たす正確度である[8]. また、PLS回帰法を用いれば、 輝線の分離ができないほどの低波長分解能であっても、 主要元素に関しては、定量正確度がほとんど低下しない事も判明した[18].これにより、分光器の大幅な軽量化が可能となった(4.3節参照).

PLS回帰法を用いるには、回帰モデル作成のための 参照試料が必要である.もし参照試料の組成範囲や物 理的性質に偏りがあると(粉末成形圧縮試料しか用い ないなど)、定量正確度は低下する.また、測定スポ ットが複数の鉱物にまたがった場合は、鉱物単位の参 照試料だけでは対応することができない.したがって、 参照試料として鉱物の混合試料を準備する必要がある. 測定対象試料ごとに適切な元素組成範囲および物理的 性質を持つ参照試料を揃えることが高い正確度を達成 の鍵であり、今後さらに試料の充実を図る予定である.

4.2 光学系の開発

LIBSの主要要素は、レーザ、分光計、光学系である. このうち、レーザと分光計は、すでに宇宙実績のある ものが数多く存在する.LIBSの大きな魅力は遠隔分 析が可能な点であるが、その開発の難しさから、現在 のところ遠隔LIBS用の光学系の開発は前述の ChemCam以外には行われていない.しかも ChemCamの光学系は、光軸中心を副鏡が遮蔽するこ とによる大幅な効率低下など、設計上問題がある事が わかっている.また、ChemCamは重量が9.3 kgもあ るため、MSLのような大型探査でしか使用すること ができない.したがって、LIBSを日本の目指す小型 から中型の探査機に搭載するには、小型軽量LIBS用 の適切な光学系を独自に開発することが必須である.

LIB-S2ではその方針に従って開発を行っており, 測定距離可変望遠鏡の光学設計はすでに完了し,今後 は光学系の試作試験用モデル(BBM)作製へと移行す る予定である.また,望遠鏡の副鏡を動かすための小 型ピエゾステージの開発も行っている.ピエゾ素子の 弱点である強度を増すための改良は完了し,今後振動 試験,耐久試験,熱真空試験など各種試験を行う予定 である.

4.3 小型軽量化

惑星探査機に搭載する観測機器は、常に小型軽量化 を求められる.当初,LIB-S2はChemCam方式の望遠 鏡の搭載を予定していた.ChemCamの測定対象距離 は1.5から7 mと長いが、その分大口径の望遠鏡(*φ* 110 mm)を使用しており、9.3 kgという重量化の一因 となっている. 我々はLIBS 試作機のローバへの搭載 試験などを通じて、LIBSの小距離の遠隔性とローバ の機動力を合わせることで十分にその性能を発揮でき ると判断し、測定距離を1から1.5mと短縮することで、 望遠鏡口径を小さくした(φ40 mm). レーザは, ChemCam に使用しているものと同じレーザの提供を 受ける予定であったが、測定距離の短縮により必要と なるレーザ出力も小さくなるため、レーザの小型化も 可能となった.また、分光計はExoMarsのラマン分 光計に用いる分光計の提供を受ける予定であったが. PLS回帰法の使用により、低波長分解能でも高い正確 度で主要元素を定量できることが判明したため、仕様 を変更し、軽量化することになった。当初のLIB-S2 の見積もり重量は7.5 kgであったが、これらの軽量化 により、現時点では3.5 kg程度を目標として検討を進 めている.

5. まとめ

LIBSは、遠隔性を持つ迅速な測定が可能な元素分 析装置であり、これからの着陸月・惑星探査における 元素分析装置として期待される。汎用的な元素分析装 置であるLIBSはさまざまな科学目標に対して使用可 能であり、目的に応じた構成を取ることで小型軽量化 も可能である。現在は、主にSELENE-2への搭載を目 指して月探査用のLIBSを開発中であるが、他の天体 上での使用も視野に入れて開発を進めてゆく予定であ る。

謝 辞

有益な数多くのコメントおよび修正箇所の指摘を頂 きました査読者の平田岳史博士および中村智樹博士に 感謝いたします.

参考文献

- Cremers, D. A. and Radziemski, L. J., 2006, Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (West Sussex: Wiley).
- [2] Singh, J. P. and Thakur, S. N. (eds), 2007, Laser-

Induced Breakdown Spectroscopy (Amsterdam: Elsevier).

- [3] Miziolek, A. W. et al. (eds), 2006, Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) (Cambridge: Cambridge University Press).
- [4] Maurice, S. et al., 2005, Lunar and Planetary Science XXXVI, Abstract #1735.
- [5] Knight, A. K. et al., 2000, Applied Spectroscopy 54, 331.
- [6] Sallé, et al., 2006, Spectrochimica Acta Part B 61, 301.
- [7] Clegg, S. M. et al., 2009, Spectrochimica Acta Part B 64, 79.
- [8] Ishibashi, K. et al., 2012, Lunar and Planetary Science XLIII, Abstract #1786.
- [9] Bell, J. (eds), 2008, The Martian Surface (Cambridge: Cambridge University Press).
- [10] Dromart, G. et al., 2007, Geology 35, 363.
- [11] Bibring, J.-P. et al., 2005, Science 307, 1576.
- [12] Takeda, H. et al., 2006, Earth Planet. Sci. Lett. 247, 171.
- [13] Arai, T. et al., 2008, Earth Planets Space 60, 433.
- [14] Heiken, G. H. et al. (eds), 1991, Lunar Source Book (Cambridge: Cambridge University Press).
- [15] Jollif, B. L. et al., 2003, Geochim. Cosmochim. Acta 67, 4857.
- [16] Arai, T. et al., 2010, Geochim. Cosmochim. Acta 74, 2231.
- [17] Varmuza, K. and Filzmoser, P., 2008, Introduction to Multivariate Statistical Analysis in Chemometrics (Boca Raton: CRC Press).
- [18] Ishibashi, K. et al., 2010, Lunar and Planetary Science XLI, Abstract #1719.