^{特集「初期太陽系物質科学の最前線」} **局所分析法の最先端 一超高感度極微量質量分析システムの開発**-江端新吾¹,石原盛男¹,公文代康介¹,身深亮², 内野喜一郎²,圦本尚義³

2010年7月12日受領, 2010年11月12日受理.

(要旨)本研究では,これまでにない性能を持った質量分析システムの開発を行なっている. 同システムでは, フェムト秒レーザーを用いたポストイオン化技術が採用され,従来と比べて100倍の感度向上が確認された. また,質量分解能は21,000以上であることが確認され,さらに空間分解能40nmのイメージングが実現された. これらのことから,本システムを用いることによって,サンプルリターンミッションによって持ち帰られた 貴重なサンプルを超高感度,超高質量分解能,超高空間分解能で分析することが可能になると期待される.

1. はじめに

2010年6月14日小惑星探査機「はやぶさ」が無事地 球に帰還し,小惑星サンプルの分析が現実のものとな りつつある.これまでに行なわれたサンプルリターン ミッションは,初期太陽系物質科学に多数の新知見を もたらした [e.g. 1, 2].「はやぶさ」計画においても大 きな成果が期待されている.しかし,持ち帰られる試 料は極微量であり,詳細に分析するには微小領域を高 感度で分析可能な装置が必要である.

現在,二次イオン質量分析計(SIMS)は微小領域の 高感度分析法として広く知られている.宇宙試料の分 析においても非常に有用な分析手法であり,これまで 多くの有益な結果が得られている[e.g. 3-5]. SIMSは 試料のイオン化に一次イオンビームを用いる.一次イ オンビームを試料表面に照射すると,試料を構成する 原子がたたき出される(スパッタリング).スパッタさ れた試料の一部はイオン化(二次イオン)しており,こ れらを質量分析することで試料の分析が行われる.し かしながら,SIMSでの二次イオン化効率は非常に低 い (< ~1%)ことが知られており,一般的にスパッタ

1. 大阪大学大学院 理学研究科 2. 九州大学大学院 総合理工学研究院 3. 北海道大学大学院 理学研究院 ebashin@mass. phys. sci. osaka-u. ac. jp された粒子のうち99%以上が中性粒子である.この 中性粒子が検出できればさらなる感度の向上が望め, リターンサンプルのような極微量しかない試料の分析 に有効であると考えられる.

このSIMSの限界を補完する手法として、二次中性 粒子質量分析法(SNMS)が開発された。SNMSは、一 次イオンビームによってスパッタされた中性粒子をポ ストイオン化し、質量分析する方法である. この手法 は、SIMSの欠点の一つであるマトリックス効果の軽 減が可能という利点を併せ持つ、ポストイオン化には、 電子を用いる方法(e-gas SNMS, e-beam SNMS [e.g. 6]) やレーザーを用いる方法(Laser SNMS [e.g. 7]) があ る. Laser SNMSでは、電子を用いる手法と比較して 高感度化が実現しやすい. レーザーによるポストイオ ン化を用いたLaser SNMSには、レーザーの波長に共 鳴する特定の元素をイオン化する共鳴型[e.g. 8]と高 出力レーザーを照射することにより、多光子吸収イオ ン化を起こす非共鳴型[e.g. 9, 10]の2種類のタイプが 存在する、しかし、共鳴型では検出できる粒子種が特 定の元素のみとなる欠点があり,非共鳴型では,すべ ての元素がポストイオン化される可能性はあるが、そ れを実現するには高いレーザーパワー密度を必要とし、 レーザー光源が巨大なものとなる問題があった.

本研究では、フェムト秒レーザーを光源に用いるこ

とにより、コンパクトで高感度の非共鳴型Laser SNMSの実現を図っている.局所分析システムとする ため、高い空間分解能を持つ液体Gaイオン源を用い、 多重周回飛行時間型質量分析計も組み合わせて高質量 分解能も達成しようとしている.本論文では、このよ うな「超高感度極微量質量分析システム」の開発の現 状について報告すると共に、今後の展望について述べ る.

2. 超高感度極微量質量分析システム の開発

大阪大学に設置されている「超高感度極微量質量分 析システム」の写真と模式図を図1,2に示す.以下



図1: (a). 超高感度極微量質量分析システムの写真. 本システムは集束イオンビーム装置(FIB:右), 多重周回飛行時間 型質量分析計"MULTUM II"(左), フェムト秒レーザーで 構成されている. レーザーはFIB装置の裏側のガラス窓か ら入射される(図1b).



図1: (b). 超高感度極微量質量分析システムに用いたレーザー 光学系の写真. 図1aの裏側から撮影している. レーザー はIntegra-Cユニットから出射し, ミラーで3度反射させレ ンズで集光した後, ガラス窓を通してFIB装置内のスパッ タリングされた粒子に照射した. (図7の模式図を参照)

の各節において同システムの各部位について簡単に紹 介する.

2.1 高空間分解能 Ga-FIB 装置

Ga-FIB装置には、エスアイアイ・ナノテクノロジ ーのSMI3050MTを改良して用いた。液体金属イオン 源であるGaイオン源は他のイオン源に比べてビーム が絞りやすく、数ナノメートルオーダーのビーム径が 期待できる. Gaイオン源は一般的に二次イオン化効 率が低いことが知られているが、本システムにおいて はパルスレーザーによりポストイオン化を行うため、 ビーム径を絞ることに重きを置いている。本システム におけるイメージングにはGaイオンビームの特徴を 最大限生かすことが可能な走査型イメージングを採用 した. 走査型イメージングはビームを試料表面上に走 査させ、測定点をx方向にm点、v平面上にn点設定し m×n個のスペクトルを取得する方式である。 試料表 面上の各点で取得したスペクトルは、それぞれ独立に 保存し、得られた大量のスペクトルからあるm/zにつ いての強度分布を再構成する. イメージの各画素の最 小サイズはビーム径に依存している為、ビーム径を絞 ることにより超高空間分解能が実現可能となる。本装 置によって得られる二次電子像の空間分解能は30keV で4nmである.

ー次イオンは任意の時間(200-1000ns)でブランキン グし、スパッタリングをパルス的に行い飛行時間型質 量分析計に接続している.サンプルチャンバーの真空 度は~1.5×10⁵Paであった.サンプルステージを55 度傾斜させることによりスパッタ効率を向上しつつ質



図2: 超高感度極微量質量分析システムの模式図. Gaイオンビー ムを照射後,フェムト秒レーザーをスパッタされた粒子 に照射し,ポストイオン化を行なった.生成された二次 イオンはMULTUM IIによって質量分離され(図3を参照), MCP検出器で検出された. 量分析計に二次イオンを導入した.

2.2 フェムト秒レーザーによるポストイオン化

光によるイオン化では、一般的に1つあるいは複数 の光子を元素に吸収させることにより電離エネルギー を越えてイオン化する.共鳴多光子イオン化では、ま ず元素の基底準位からある励起準位へ、共鳴的に1光 子吸収をさせて励起する.その励起状態の寿命の間に、 さらに光子を吸収させてイオン化する.つまり段階的 多光子吸収でイオン化するものである.光強度が十分 強くなると、共鳴準位がなくともイオン化する非共鳴 多光子イオン化が起こる.全元素を非共鳴イオン化さ せようとすると、非常に大きなレーザーパワー密度が 必要となる.パルスレーザーのパワー密度Iは次の式 で求められる.

$I = \frac{E}{St}$

Eはパルスエネルギー, Sはビームスポットの断面積, tはレーザーパルスの時間幅である.ビームスポット の断面積を一定とすると,パワー密度を上げる為には パルス幅を短くするかあるいはパルスエネルギーを上 げる必要がある.

これまでのポストイオン化ではピコ秒レーザーが用 いられることもあったが、これでは全元素を非共鳴イ オン化するには至らなかった[e.g. 14]. さらにパルス 幅の短いフェムト秒レーザーを用いれば、より多くの 元素を非共鳴多光子イオン化によりほぼ100%イオン 化できる可能性があり、同時に元素間の感度差を軽減 することも期待される.また、波長のスペクトル幅が 広いことから多光子共鳴イオン化の効果も期待できる. 本システムでは、フェムト秒レーザーとして Quantronix社のIntegra-C 2.5を用いている. 同レー ザーは、コンパクトでありながらパルス当り2.5mIの 高出力を実現している. その繰り返し周波数は1kHz, 波長は786nm. パルス幅は120fsである. 同レーザー から出力されたビームは、レンズを用いた光学系(図 1b)により直径約100umのスポットに絞られ、サンプ ル表面から約100µm上部に照射される.

2.3 多重周回飛行時間型質量分析計 "MULTUM"

飛行時間型質量分析法(time-of-flight mass spectro-

metry; TOF-MS)は、1946年にStephensにより紹介 され、1970年代以降のパルス計測技術の進歩により、 さまざまな分野で有用な質量分析法として利用される 様になってきている。その特徴は主に次の3つに集約 される。(1)原理上測定できる質量範囲は無限である。 (2)1回のイオン化現象から完全なマススペクトルが 得られ、その所要時間は一般的に数十ミリ秒以内であ る。(3)非常に高い透過率を持つので高感度が達成さ れる。

原理は至ってシンプルであるので以下簡単に説明す る.一定の加速電圧Vで加速されたイオン(質量m, 価数z)が.飛行距離Lを飛行した場合の飛行時間Tは、

$$T = L \sqrt{\frac{m}{2zeV}}$$

となる. ここで、eは素電荷である. したがって、飛 行時間を測定することにより、イオンの質量電荷比 m/zを測定することが出来る. 質量分解能 $m/\Delta m$ は、 飛行時間スペクトルのピーク幅 ΔT (すなわち、到着 時間の広がり. 飛行時間型の場合、通常半値幅をと る.)と



図3: MULTUM Iの模式図. リニアモードの場合,イオンは Inputから導入され, 直進し, Outputから出射される. 多 重周回モードの場合,イオンはSector Iから順番にSector IVまで8の字の軌道を進む. TOF-MSの質量分解能は飛 行時間,すなわち飛行距離に比例するが,この多重周回 TOF-MSは同一軌道を多重周回させる事で高い質量分解能 を得ることができる.また完全時間・空間収束を満たすイ オン光学系を持つため,多重周回させることによる質量分 解能・感度の低下が抑えられる.

$\frac{m}{\Delta m} = \frac{T}{2\Delta T}$

の関係にあり、ピーク幅 Δt を小さくする(広がらない ようにする)か、または飛行時間*T*をのばす(飛行距離 を伸ばす)ようにすれば質量分解能を向上させること が可能である.

本システムの質量分析部には多重周回飛行時間型質 量分析計"MULTUM II"が装備されている.1998年 に大阪大学で開発された多重周回飛行時間型質量分析 計は同一軌道を何度も周回させることにより飛行時間 をのばし(図3),小型の装置であるにも関わらず,高 質量分解能化を実現した.その1号機である MULTUM Linear plusは35万という質量分解能を達 成した[15].2号機である'MULTUM II'は1200回周 回(飛行距離1500m)させることにより,質量分解能 250,000を達成した[16].高確度の同位体分析を可能に する為には近接する同位体スペクトルを完全に分離す ることが必要であり,本システムに装備された MULTUM II はそれを実現可能にする重要な質量分 析計となっている.

2.4 データ取得システムおよび制御プログラム

二次イオンはマイクロチャンネルプレート(MCP) によって検出され(図2),デジタルオシロスコープ (Wave Runner 104MXi, LeCroy; maximum sampling rate: 10GS/s)によって集録される.イオン源,引き込 み電極, MULTUMのセクター電極 I (射出口), \mathbb{N} (導 入口)に印加する電圧およびデジタルオシロスコープ のトリガーは、デジタルパターンジェネレーター (Model 555 pulse generator, Berkeley Nucleonics, CA, USA)によってタイミングを制御した.

本システムにおける制御プログラムのタイミングチ ャートを図4に示す.本システムではレーザーの繰り 返しレートをマスタトリガとした.レーザーがポスト イオン化領域に到達するタイミングを逆算し,一次イ オンビームを任意のパルス幅で照射した(図4a).続 いてスパッタされた粒子をレーザーによってポストイ オン化し(図4b),生成した二次イオンは引き込み電 極によって任意のタイミング(1.5µs後以降に調整)で 質量分析部に導入された(図4c).飛行時間型質量分 析計のt=0はこのタイミングとなる(図4d).二次イ オンを多重周回させない場合(Linear mode)は,セク ター電極は常にOFFにしておく.多重周回させる場 合(Multi-turn mode),セクター電極Iには周回数に 応じたタイミングで電圧印加を行い,セクター電極I には取得する質量範囲にタイミングを調整した.

3. 超高感度極微量質量分析システム の性能

3.1 ポストイオン化によるイオン化効率の上昇 について

各種試料を用いレーザー照射による二次イオンシグ



図4: 本システムにおける制御プログラムのタイミングチャート. (a) 一次イオンビームの照射タイミングとパルス幅,(b) フェムト秒レーザーの照射タイミング,(c) 飛行時間型質量分析計への二次イオン導入タイミング,(d) 取得された TOFスペクトル例.効果的にポストイオン化を行う為にはマスタトリガであるレーザー照射タイミングとの同期が最 も重要である.(a),(b) とのタイミング,(a),(c) とのタイミングを調整することによりマススペクトルの強度と質 量分解能を決定した.



図5: Ag^{*}の信号.(a)レーザー照射しないTOF-SIMSモード.(b)レーザー照射したSNMSモード.(b) のスペクトル強度は(a)に比べて100倍増加した.また,レーザー照射した場合,Ag^{*}のクラスター イオンも検出された.このことは通常は中性であったクラスターイオンでもレーザー照射によ りイオン化されることを示している.



図6: Si^{*}の信号. (a) レーザー照射しないTOF-SIMSモード. (b) レーザー照射したSNMSモード. (b) のスペクトル強度は (a) に比べて10倍増加した. Agの場合と比較して信号の増加率は低い.

ナルの増加を観測した. 一次イオン加速エネルギーは 30keV, 一次イオン電流は12nA, 一次イオンビーム 径は $\leq 1 \mu m$, 一次イオンパケット幅は~500nsであった. 照射レーザー強度は1.8mJ/pulse, 繰り返し周波数は 1kHz, 照射レーザーパワー密度は~8×10¹³ W/cm²で あった. デジタルオシロスコープで1,000回の飛行時 間測定を加算平均し, TOFスペクトルを取得した. 多重周回させない,直線モード(飛行距離: 0.8m)で測定し,その際の質量分解能は~100-500であった. 分析試料はC, Mg, Al, Si, Fe, Cu, Pd, Ag, Pt, Auのプレートを用いた.分析前に各種試料の酸化膜を除去するため,数分間プレスパッタを行なった.

ポストイオン化することにより、すべての試料でシ グナルの増加を確認できた.図5にAgのポストイオ



図7: レーザー光学系の模式図.レーザーパワー密度を変化させ る為,ミラーの間にガラス板をハの字型に挿入している. ガラス板の角度を変化させたり,取り除いたりによりパ ワーを調節できる.

ン化、図6にSiのポストイオン化のデータを示す. AgにおいてはこれまでのTOF-SIMSの信号と比較し て約100倍の信号増加を示し、Siのデータは10倍の増 加を示した.この結果は非共鳴多光子イオン化により 超高感度化が実現されたことを示している.また、レ ーザー照射した場合、Ag2⁺のクラスターイオンも検 出された(図5).このことは通常は中性であった分子 イオンでもレーザー照射によりイオン化されることを 示している.AgとSiでは10~100倍といった元素に よる感度差があることも確認できた.このことから, レーザーパワー密度が一定の場合、元素によってイオ ン化効率が大きく異なっていることが推測できる.そ こで、レーザーエネルギーを変化させ、全ての元素が 飽和するパワー密度を探索した.

3.2 レーザーエネルギー依存性

各種試料(金属及びSi)を用い、二次イオンシグナル 強度のレーザーパワー密度依存性を観測した.一次イ オン加速エネルギーは30keV、一次イオン電流は12



図8: 10種類の元素 (C, Mg, Al, Si, Fe, Cu, Pd, Ag, Pt and Au) における飽和特性. 全ての元素が~7×10¹³ W/cm²以上の パワー密度で飽和していることがわかる.

nA, 一次イオンビーム径は≤1µm, 一次イオンパケ ット幅は~1µsであった. レーザー径は固定し(~140 µm), 光路上に光学基板(ガラス)を設置し, 基板角度 を変えて光の入射角を変化させることで透過レーザー 強度を変化させた(図7). デジタルオシロスコープで 1,000回の飛行時間測定(直線モード)を加算平均し, TOFスペクトルを取得した.

本実験の結果を図8に示す.全ての試料は~7× 10¹³ W/cm²以上で飽和していることがわかった.この 結果は、フェムト秒レーザーが照射された領域におい て、全ての元素が100%イオン化されたことを示して いる.Au, Cu, Fe, Mg, Al, Pt, Pd, Agの感度差は1桁 以内におさまった.以上の結果はこれまでのSIMS分 析における元素間のイオン化効率のばらつき[e.g. 17, 18]の軽減に成功したことを示している.

しかし, SiとCは2桁の感度差がまだ存在している. この原因の一つとして以下のことが考えられる.図8 はイオン化された原子の強度について議論しており, 原子は完全にイオン化していることを示している.し かし,スパッタされる粒子は,原子だけではなく分子 やクラスターとしても存在している.レーザーによる ポストイオン化の際,分子やクラスターのフラグメン ト化が起こり,中性粒子が生成されるのであれば,ト ータルのイオン化効率は減衰することになる.SiとC は共有結合結晶であるので,スパッタされた際に分子 やクラスターとして飛び出す可能性が高いと考えられる.この感度差はスパッタされた際の原子/分子+クラスター比に起因していると考えられる.

3.3 質量分解能

Pd(パラジウムプレート)を試料としてMULTUM を周回させた場合の質量分解能を確認した. 一次イオ ン加速エネルギーは30keV, 一次イオン電流は12nA, 一次イオンビーム径は≤1 µm. 一次イオンパケット幅 は~500nsであった。照射レーザー強度は1.8mI/pulse. 照射レーザーパワー密度は~8×10¹³W/cm²として実 験を行なった、デジタルオシロスコープで1.000回の 飛行時間測定を加算平均し, TOFスペクトルを取得 した. 図9はPdプレートを試料として測定したTOF スペクトルを示している. 直線モード(飛行距離: 0.8m)での質量分解能 m/ Δ m は 500 (FWHM) であった. 10 周回させた場合(飛行距離:13.8m). 質量分解能 m/ △mは7,500(FWHM)まで向上した. この結果より. 数十周ほど周回させることで代表的な干渉・妨害イオ ンを分離できる質量分解能が得られることが分かった. 本システムではこれまで質量分解能21,000(500周回) を確認している[12]. Okumura et al. (2005) [16]によ ると、500周回で質量分解能が100.000以上達成され ており本システムはその性能に達していない、多重周

回飛行時間型質量分析計において質量分解能を決定す る最も重要な要因はセクター電極の電源の安定性であ る.電源の安定性は様々な要因によるノイズによって おり,電源回路の改良,設置環境および調整次第でさ らなる高質量分解能を達成できると考えられる.

3.4 質量イメージング

試料にSiとSiO₂のパターンで構成される半導体を 用いて,元素イメージの取得を試みた.m/z=14,28, 29,44,56の元素イメージを100×100ピクセルで取得 した.一次イオン加速エネルギーは30keV,一次イオ ン電流は7nA,一次イオンビーム径は100nm,一次 イオンパケット幅は~500nsであった.移動ステップ は187.5nm/stepで各ピクセル当たり10ショット照射 した.照射レーザー強度は1.8mJ/pulse,繰り返し周 波数は1kHz,照射レーザーパワー密度は~8×10¹³ W/cm²であった.直線モードで飛行時間測定し,測 定時間は約15分であった.

各質量で得られたイメージを図10に示す.二次電 子像における明るい領域はSi, 暗い領域はSiO₂に対 応している. *m/z*= 14, 28, 29, 56のイメージはSiの分 布と対応しており, *m/z*= 44のイメーはSiO₂に対応し ている.以上のことから,本システムにおいて元素に 対応した質量イメージングが可能であることが示され



図9: 本システムにおける質量分解能の評価. Pdの6つの安定同位体 (m=102, 104, 105, 106, 108, 110)を用いて評価した. (a) リニアモードでの測定(飛行距離は0.8m). 質量分解能は500 (FWHM). (b) 多重周回モードでの測定(10 周回:飛行距離は13.8m). 質量分解能は7500 (FWHM). 多重周回させることによって質量分解能が向上していることがわかる.



図10:本システムを用いて取得した半導体のSiの二次電子像 (SEI)と二次イオン像.SEI像におけるスケールバーは 5µm.各二次イオン像も同様のスケールで取得した.m/ z=44のイメージはm/z=14,28,29,56と反転したイメー ジになっていることから、本システムによって組成を反 映した元素イメージを取得できることが示された.





図11: 一次イオン電流を~100pAにした時の空間分解能の評価. (a)評価用半導体(Siの基板上にCuの層を付加したもの)の二次電子像.スケールバーは2µm. (b) (a)の領域のCu⁺イメージ.イメージは100x100pixelsで取得した. (c)Cu⁺イメージにおける白線内の強度プロファイル.空間分解能はCuとSiの境界部で評価した.強度プロファイルの16-84%のライン(点線)から空間分解能は150nmと評価した.

た.

次に、照射ー次イオンビームの電流量を変化させ、 イメージングにおける空間分解能を評価した. 試料は Si基板上にCu微細パターンを配置した評価用試料を 用いた. 一次イオン加速エネルギーは30keV, 一次イ オン電流は~100pA, ~10pAについて比較した. 一 次イオンパケット幅は~500nsであった. 周回数は1周, レーザー径は~150 μ mであった. 一次イオン電流が~ 100pAの際は、測定領域(7.5 μ m × 7.5 μ m)を100× 100pixelに分割し、各pixelで50回の飛行時間測定を 加算平均してデータ取得した. 測定時間は~30minで あった. 一次イオン電流が~10pAの際には、測定領 域(0.75 μ m × 0.75 μ m)を100×100pixelに分割し、各 pixelにおいて30回の飛行時間測定を加算平均した. 測定時間は~30minであった.

ー次イオン電流が~100pAの際, Cu⁺イメージの空 間分解能は150nmであった(図11). 一次イオン電流





図12: 一次イオン電流を~10pAにした時の空間分解能の評価.
(a) 評価用半導体(Siの基板上にCuの層を付加した基板)の二次電子像.スケールバーは1µm.
(b) (a) の領域のCu⁺イメージ.イメージは100x100pixelsで取得した.イメージの横幅は0.75µm.
(c) Cu⁺イメージにおける白線内の強度プロファイル.空間分解能は40nmであった.

が~10pAの際, Cu⁺イメージの空間分解能は40nmで あった(図12). これはTOF-SIMSの世界最高空間分 解能と同等であった[19].

一次イオン電流が~10pAの場合,FIBのスペック からビーム径は14nmであることから40nmという空 間分解能は予想される空間分解能に達していない. こ のような結果となった理由は次の3点が考えられる。 1つ目は一次イオンビームのドリフトである. ドリフ トには様々な要因が考えられるので容易には判断でき ないが、分析室の振動の除去、磁場の遮蔽等対策をさ らに行なうことが必要だと考えられる。2つ目にはイ オンビーム照射による表面形状の変化である。今回用 いた試料は空間分解能を簡単に評価できるような単純 なものである. エッジ部分の削られ方次第では. それ がイメージのボケにつながると考えられる.3つ目に はスパッタされた物質の試料への再付着である。この 効果も2つ目の理由と同様にイメージをボケさせる要 因となると考えられる. 以上の問題を解決することで 更なる空間分解能の向上が期待できる.

4. 今後の展望

以上述べたように、極微量な試料を超高感度で分析 することが可能になりつつある.しかし、依然元素に よる感度差は残っており、レーザーによるポストイオ ン化についてはその機構は完全に解明されたわけでは ない.また、リターンサンプルの詳細分析においては、 更なる空間分解能の向上が必要である.したがって、 性能向上の余地がまだまだあると考えられる.

我々は現在,日本電子と共同で「超高感度極微量質 量分析システム」の新型機の開発に着手している.新 型機では,一次イオンビームのスポットサイズを4 nmに押さえることにより,空間分解能の向上が期待 できる.また,新たに40fsという超短パルスレーザー を採用し,100%イオン化可能な強度を保ったままビ ームスポットの断面積を広くすることによって,マト リックス効果の低減,ポストイオン化効率の向上を目 指している.

本研究により開発される新システムを用いることで, サンプルリターンミッションによって持ち帰られた貴 重なサンプルを超高感度,超高質量分解能,超高空間 分解能で分析し,初期太陽系物質科学に多くの新知見 をもたらすことが期待される. リターンサンプルの他 にも例えばプレソーラー粒子のように非常に微小な粒 子(典型的には<1µm)の局所分析にも応用できる. プ レソーラー粒子の年代測定を行うことが可能になれば 太陽系だけでなく,銀河系形成に至るまでの年代を決 定できるかもしれない. また,10nmを切るような超 微小粒子の存在も予言されており[20],本システムを 用いたイメージングにより発見できるかもしれない.

このように非常に優れた性能を持っており将来性の あるシステムであるが、未だ開発途上であり分析には かなりの専門的知識と技術を要する. はやぶさ2が地 球に帰還する頃には新システムにより多くの実験デー タが得られており、更に改良され簡便に使用可能とな るはずである. 本システムは固体微粒子分析を通じて 環境科学、半導体工学に、細胞などの生体試料分析を 通じて医学、薬学にそのまま適用可能であり、他分野 においても大きな貢献が期待される. 惑星科学に留ま らず、本システムを応用できる新しい研究を多く提案 することができれば、「超高感度極微量質量分析シス テム」の更なる発展の近道になるであろう.

謝 辞

本研究を進めるにあたって日本学術振興会マイクロ ビームアナリシス第141委員会の皆様には多大なご助 力をいただいた.また,投稿原稿に有意義なコメント をして頂いた査読者の永島一秀博士,本記事の執筆機 会を与えて頂いた橘省吾博士に感謝する.本研究は文 部科学省日本学術振興会科学研究費補助金学術創成研 究費 (No. 16GS0214)の助成を受けたものである.

参考文献

- [1] McKeegan, K. et al. (2009) LPSC. XL, Abstract #2494.
- [2] Brownlee, D. et al. (2006) Science, 314, 1711–1716.
- [3] Yurimoto, H. et al., (1998) Science, 282, 1874.
- [4] Itoh, S. et al., (2003) Nature, 423, 728-731
- [5] Nagashima, K. et al., (2004) Nature, 248, 921-924.
- [6] Oechsner, H. and Gerhard, W. (1972) Phys. Lett., 40A, 211.
- [7] Becker, C. and Gillen, K. (1984) Anal. Chem., 56, 1671.

- [8] Shichi, H. et al (2003) Appl. Surf. Sci. 203–204, 228–234.
- [9] A. Wucher et al. (1998) Rapid Commun. Mass Spectrom., 12, 1241–1245.
- [10] He, C. and Becker, C. (1999) J. Appl. Phys. 86, 3463–3468.
- [11] Ishihara, M. et al. (2010) Surface and Interface Analysis, 42, 1598–1602.
- [12] Kumondai, K. et al. (2006), ASMS LVI., proceeding A062517.
- [13] Mibuka, R. et al. (2008) Applied Surface Science 255, 1595-1598.
- [14] Lompre, L. et al. (1976) Phys. Rev. Lett., 36, 949-952
- [15] Toyoda, M. et al. (2003) J. Mass. Spectrum., 38, 1125-1142.
- [16] Okumura, D. et al. (2005) Eur. J. Mass. Spectrum. 11, 261-266.
- [17] Benninghoven, A. (1973) Surf. Sci., 35, 427-457.
- [18] Storms, H. (1977) Anal. Chem., 49, 2023-2030.
- [19] Sakamoto, T. et al. (2008) Applied Surface Science 255, 1617-1620.
- [20] Kozasa et al. (1991) Astron. Astrophys., 249, 474-482.