

レーザーイオン化ナノ質量分析計(LIMAS)の多重周回飛行時間型質量分析計の評価

Evaluation for multi-turn time of flight mass spectrum of laser ionization mass nanoscope

*殿谷 梓¹、馬上 謙一¹、糸瀬 悟²、石原 盛男³、内野 喜一郎⁴、塚本 尚義¹*Azusa Tono¹, Ken-ichi Bajo¹, Satoru Itose², Morio Ishihara³, Kiichiro Uchino⁴, Hisayoshi Yurimoto¹

1.北海道大学理学研究院、2.日本電子株式会社、3.大阪大学理学研究科、4.九州大学総合理工学研究院

1.Earth and Planetary System Science Department of Natural History Sciences Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.JEOL Ltd, 3.Department of Physics, Osaka University, 4.Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

はじめに：レーザーイオン化ナノ質量分析計 (LIMAS) は、原子のトンネルイオン化を利用したスパッタ中性粒子質量分析計 (SNMS) である。この装置は、サンプルリターンミッション (はやぶさミッション (JAXA) や Genesis ミッション (NASA)) により収集された地球外物質中に含まれる太陽風起源粒子を測定するために開発された (Bajo et al., 2015)。LIMASは、液体ガリウムイオン源、ナノメートルスケールの領域をスパッタするための収差補正システム、スパッタ粒子をトンネルイオン化させるためのフェムト秒レーザーシステム、質量分離のための多重周回飛行時間型質量分析計 (MULTUM II) からなる (Ebata et al., 2012)。我々は、イオン導入光学系と MULTUM II で決定される LIMAS の質量分解能とイオン透過性を評価した。

実験手順：最初に、イオン導入光学系のイオン軌道のシミュレーションを行い、その後、各レンズの最良値を決めるための実験を行い、イオン導入光学系の最良パラメータを設定した (L1 レンズが -700 V, L2 レンズが -3300 V。1 段階目と 2 段階目のアインツェルレンズがそれぞれ -1260 V と -2700 V)。その後、²⁴Mg²⁺ イオンをもちい、LIMAS の質量分解能とイオン透過性を評価した。各周回の取得データは 1000 ショット分のデータを積算平均したデータである。最終的に、Si イオンの深さ方向分析から、LIMAS の各周回のユースフルイールドを見積もった。スパッタされたクレーター体積は、レーザー顕微鏡により測定した。

結果と考察：飛行時間型質量分析計の質量分解能は、飛行時間 "t" とイオンパケットの幅 "Δt" によって決定される ($R = t/2\Delta t$)。実験の結果、LIMAS の質量分解能は飛行時間 1000 μs (200 周) まで増加した。しかし、1000 μs 以降は、周回増加に比例して FWHM が増加するため、質量分解能が飽和状態になった ($R = \sim 10^5$)。FWHM の増加は、周回増加にともない、イオンパケットの到達時間のズレが大きくなったことにより生じたものであった。イオンパケットの到達時間のズレの要因として、1) イオン導入光学系内への引き込みのタイミングのズレ (Δt_{L1})、2) 加速電圧のゆらぎ (ΔU)、3) MULTUM II 内のセクター電極電圧のゆらぎ (ΔE) の 3 つがある。

この中で、飛行時間増加に伴って FWHM を変化させる因子は、 ΔU と ΔE である。実際に、電極電圧のゆらぎの実測を行った結果、 ΔE に 5 ppm のゆらぎがあることが明らかとなった。これは、質量分解能が飽和状態となった値 ($R = 10^5$) に相当する。したがって、MULTUM II 内のセクター電極電圧のゆらぎが FWHM の増加の主な要因であると考えられる。これらのゆらぎの影響を補正するために、我々は新しい質量スペクトル取得法を開発した。この新しい補正法により、FWHM は周回数にかかわらず一定となり、質量分解能は理論通りに増加した。その結果、1000 周 (飛行距離 1312 m) 時に 620,000 の質量分解能を達成した。

LIMAS のイオン透過性は 20 周を境に 2 つに分けられ、20 周までの LIMAS のイオン透過性は、60-70 % まで減衰した。20 周以降は、1 周あたりのイオン透過性が一定となった (99.96 %)。

LIMAS のユースフルイールドを見積もった結果、Si イオン 30 周 ($R = 17,000$) で 3×10^{-3} 、1000 周 ($R = 620,000$) で 2×10^{-3} となった。この値は、Cameca ims 6f の UY である 7×10^{-3} ($R = 4,000$) と同等の結果を示した (Hervig, et al 2006)。

キーワード：SNMS、TOF、レーザートンネルイオン化、質量分解能、イオン透過性、ユースフルイールド

Keywords: SNMS, TOF, laser tunneling-ionization, mass-resolving power, ion transmittance, useful yield

