

二次イオン分析法 (SIMS) を用いた 惑星探査方法の基礎開発実験

佐々木進*、矢守章*、河島信樹*、三浦保範**、太田正廣***、米田哲也***

1. はじめに

太陽系起源の研究には、惑星探査機による小惑星、惑星、月の直接探査が決定的な役割を果たすことは論をまたない。最近のロケット打ち上げ能力の急速な増大を考慮すれば、21世紀には現在よりもはるかに惑星探査の機会が多くなると考えられる。探査機を利用した直接探査では、画像による地形などの構造探査とともに組成探査が天体起源を知る上で重要である。天体の組成探査の方法としては、天体の一部を採取して地上に持帰り分析するサンプルリターン方式と飛翔体に搭載した組成分析器によるその場分析の二つの考え方がある。サンプルリターン方式は地上の大型分析装置による精密分析が可能であるが、リソースの制約から1回のミッションで複数の天体に着陸して試料を採取することは困難であり、また持帰ることのできる試料は量的に限られたものとなる。一方、その場分析の場合、リソースの制約から地上で行なわれているような精密分析は望めないが、対象天体の選びかた、軌道の取りかた、運用の方法により複数の天体及び単一の天体でも複数の場所を探査することが可能である。またテレメーターで送られて来る分析データを参考にして更に別の分析計画をたてそれをコマンドで実行することができる。多くの小惑星の基本組成さえ確定できていない初步段階では、精密さは犠牲にしても主要成分の分析をできるだけ多くの天体で、また単一の天体でもできるだけ広い領域で行なう方が太陽系起源の研究では望ましいと言える。比較的小規模の装置で実施できる固体表面分析方法のひとつとして、探査機から惑星表面にイオンビームを照射し、固体表面から飛散する二次イオンを分析してその構成物質を知る方法がある [Sagdeev et al., 1985; 佐々木 他、1987]。この方法は、二次イオン分析法 (Secondary Ion Mass Spectroscopy; SIMS) として、地上での固体分析方法としては既に実用化され、固体表面分析システムとして広く利用されている。月面試料や隕石の分析においても、

* 宇宙科学研究所、 ** 山口大学、 *** 東京都立大学

溶融分析と比較して、局所的な部分分析が可能であるという利点を持っており、形成プロセスの議論ができることから、有力な研究方法のひとつとして SIMS が使用されるようになってきた〔三浦、1987〕。SIMS は、他の類似の固体表面分析方法と比較して、次のような特徴をもっている。

- 1) 元素の同位体分析が可能である
- 2) 深さ方向を含めた三次元分析が可能である
- 3) 質量分解能が高く、水素を含む全元素に対し検出感度が高い
- 4) 探査機搭載機器として小型軽量化がはかれる。

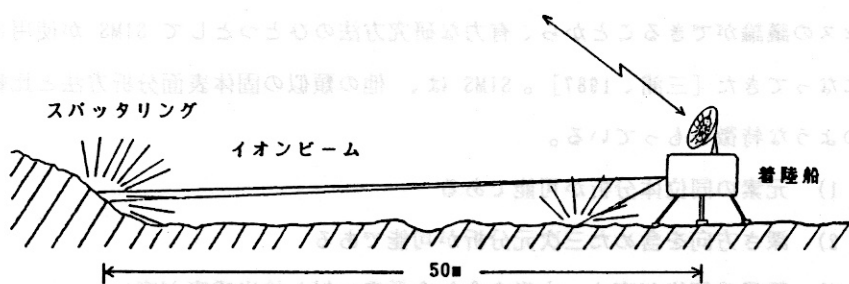
この方法は探査機が固体惑星に着陸した場合は勿論、イオンビームの出力が充分大きければフライバイでも固体惑星の遠隔探査が原理的には可能である。実際 1988 年 7 月に打ち上げられたソ連のフォボス計画では、ミッションは達成されなかったが、表土のレーザー光線による蒸発分析（リマ実験）とともに、表土の同位体分析を行なうため、クリプトンイオンビームを用いた二次イオン分析（ジオン実験）が計画されていた。地上装置として確立している二次イオン分析法では、イオンソース及び二次イオン分析器と試料とは近接しており、その間の距離は、ミリメートルオーダーである。この方法を探査機による惑星表面探査に応用するためには、装置と試料が数メートルから数十メートル以上離れた場合でも、二次イオン分析（遠隔 SIMS）が可能であることを実証する必要がある。本報告では、昭和 62 年度から 3 年間にわたり実施した遠隔 SIMS の原理の検証、SIMS 自体の基礎研究、及び SIMS を惑星探査に応用するための具体的方法を明らかにするための実験的研究の結果について述べる。

2. 研究課題

本研究では遠隔 SIMS を応用した3種類の探査ミッションを想定している（図1）。

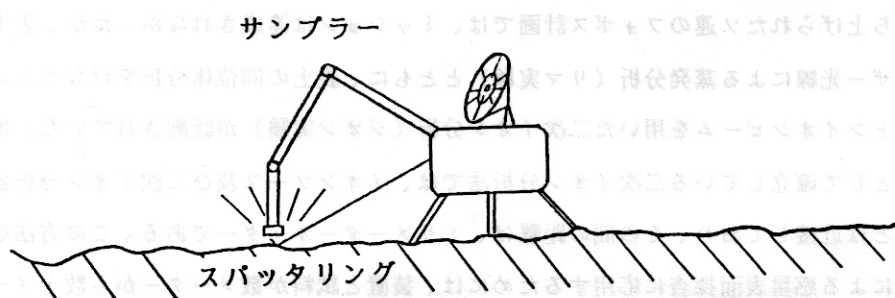
SIMS をこれらの探査ミッションに応用するためには、以下の課題について研究する必要がある。

- (1) 遠隔 SIMS の原理を検証する。一次イオンのスパッタリングによって生成される二次イオンが消滅することなく数 μ mから数十 μ m自由拡散することを実験的に確認する。さらに、遠隔 SIMS においても通常の近接 SIMS と同様な分析能力が維持されることを明らかにする。



(a) 着陸またはランデブーによる衛星、小惑星の複数、広範囲探査

サンプルリターン着陸船



(b) サンプルリターンミッションでのサンプル対象の選定



(c) 月探査など有人探査でのハンディな簡易探査手段

図1 本研究で想定している3種の探査形態

- (2) SIMS 自体の基礎研究として、二次イオン発生時間の時間依存性、コンタミネーションの影響を評価する。
- (3) SIMS を惑星探査に应用するための具体的な方法を明かにする。ハードウェア面では必要なイオンビームソースの加速電圧、ビーム電流、イオン種及び二次イオン分析器の感度を定める。ソフトウェア面では、SIMS データベースの蓄積とスペクトルのパターン認識による対象試料の推定ロジックを確立する。

3. 実験装置

実験装置は、イオンビームソース、試料ターゲット、二次イオン検出器から構成される。本実験で用いたイオンビームソース及び二次イオン分析器の性能は、以下のとおりである。

イオンビームソース

生成方式

カウフマン型イオン銃

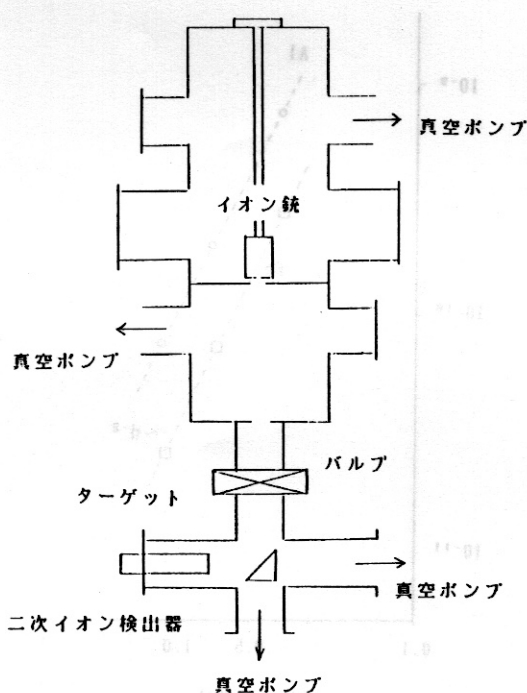


図2 実験装置

ビームエネルギー	1.5keV 最大、主として 1keV で運用
ビーム電流	50mA 最大、主として 3mA で運用 (イオンソース出口で) 1 μ A (試料面で)
ビーム径	30mm (イオンソース出口で) 6mm (試料面で)
使用ガス	アルゴン、酸素、キセノン、クリプトン
背景真空度	2 $\times 10^{-4}$ Torr (イオンソースチャンバー) 3 $\times 10^{-6}$ Torr (試料チャンバー)
中和器	タングステンフィラメント
二次イオン分析器	
方式	4 重極型分析管 エネルギーフィルター付き
計測範囲	1-200M 以上
分解能	2M50% 以上
最高感度	1 $\times 10^{-13}$ Torr (ガス分析モードで)

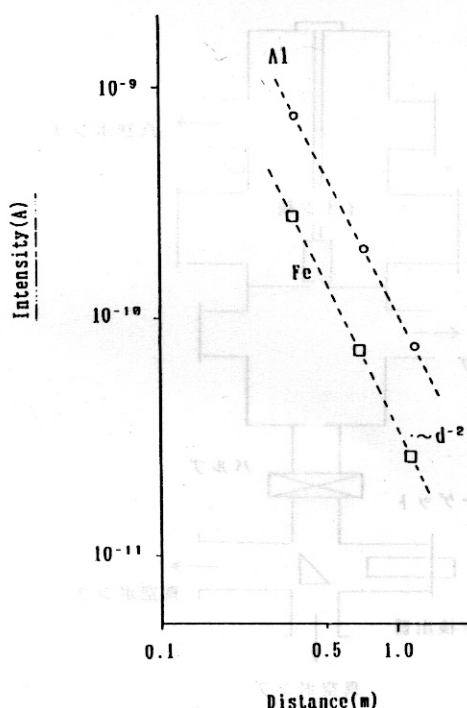


図3 二次イオン検出量の距離依存性

4. 実験結果

(i) 距離スケージング

アルゴンビームを用いアルミ及び鉄をターゲットとして、試料と分析器との距離を、37cm, 72cm, 118cm と変化させ二次イオン検出量の距離依存性を取得した。イオンビームは試料面法線に対し 60 度で入射させ入射方向に対し 90 度方向にイオン分析器を配置して計測を行なった。当初二次イオン収量の距離依存は、必ずしも二次イオンの自由拡散を仮定した距離逆二乗則に合致しなかったが、二次イオン伝搬チャンバーを磁気シールドし地球磁場の影響を除去することにより距離逆二乗則が正確に成立することを確認した。図3に最終的に得られた実験結果を示す。これによりイオンビームソースの性能と二次イオン分析器の感度が決まれば探査可能範囲を推定することができるようになった。

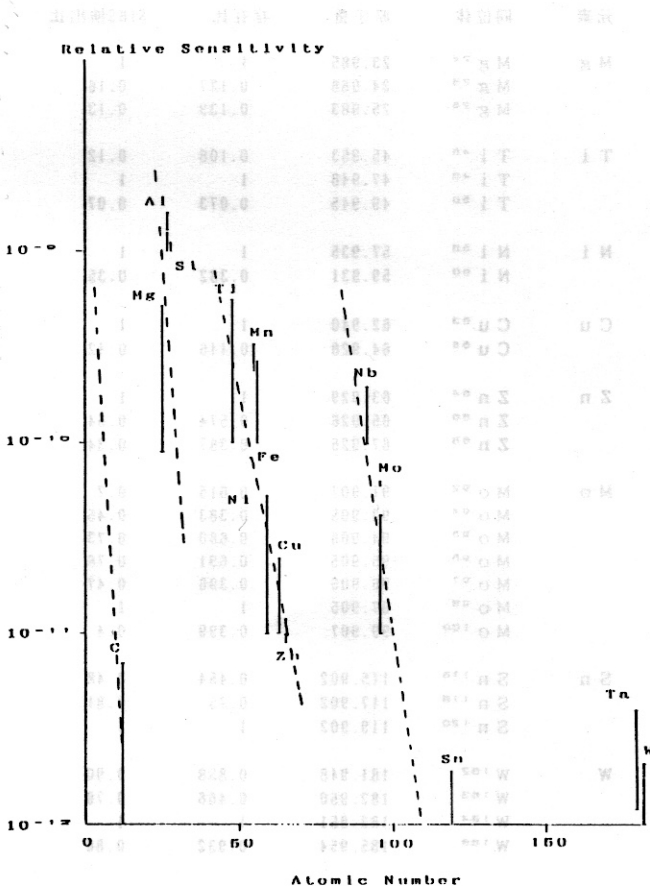


図4 元素の遠隔 SIMS 分析特性

(ii) 元素の分析特性

14 種類の元素の二次イオンデータを取得した。図4に示すように二次イオンの相対収量は、元素の電離ポテンシャルの周期律を反映し、照射面で局所熱平衡モデルが成立していることを示している。特性は近接 SIMS のものとほぼ一致し [Shimizu et al., 1974]、遠隔にした場合に現れる特別な分析上の問題点はないことが確認された。

(iii) 同位体元素分析

遠隔 SIMS の分析能力を調べるため 8 種類の同位体元素を分析し、収量率と存在率を比較した (表1)。タングステン以外は $\pm 10\%$ 以内の精度で収量率と存在率とは一致した。但し近接する同位体で存在比が 10% 以内のものについては、エネルギーフィルターの問題から現装置では分析ができていない。

元素	同位体	原子量	存在比	SIMS検出比
Mg	Mg ²⁴	23.985	1	1
	Mg ²⁵	24.986	0.127	0.16
	Mg ²⁶	25.983	0.139	0.13
Ti	Ti ⁴⁶	45.953	0.108	0.12
	Ti ⁴⁸	47.948	1	1
	Ti ⁵⁰	49.945	0.073	0.07
Ni	Ni ⁵⁸	57.935	1	1
	Ni ⁶⁰	59.931	0.382	0.35
Cu	Cu ⁶³	62.940	1	1
	Cu ⁶⁵	64.928	0.446	0.42
Zn	Zn ⁶⁴	63.929	1	1
	Zn ⁶⁶	65.926	0.574	0.54
	Zn ⁶⁸	67.925	0.387	0.34
Mo	Mo ⁹²	91.907	0.615	0.7
	Mo ⁹⁴	93.905	0.383	0.45
	Mo ⁹⁵	94.906	0.660	0.73
	Mo ⁹⁶	95.905	0.691	0.78
	Mo ⁹⁷	96.906	0.396	0.47
	Mo ⁹⁸	97.905	1	1
	Mo ¹⁰⁰	99.907	0.399	0.4
Sn	Sn ¹¹⁶	115.902	0.454	0.48
	Sn ¹¹⁸	117.902	0.75	0.81
	Sn ¹²⁰	119.902	1	1
W	W ¹⁸²	181.948	0.858	0.90
	W ¹⁸³	182.950	0.466	0.76
	W ¹⁸⁴	183.951	1	1
	W ¹⁸⁶	185.954	0.932	0.86

表1 同位体の遠隔 SIMS 分析結果

(iv) 一次イオン種の検討

ターゲットによっては二次イオン生成効率が時間とともに大きく変化する場合がある。一次イオンとしてアルゴン、酸素、クリプトン、キセノンについて二次イオン生成量の時間変化を調べた結果、時間変化、ビームオンオフ時の変化が少ない点から酸素が最も望ましいとの結果が得られた。

(v) 隕石、地球岩石の二次イオン分析

隕石試料については、隕鉄3種、石鉄3種、炭素質3種、ユークライト1種、地球試料として、非結晶3種、長石4種、泥質物3種、その他3種の二次イオン分析を行なった [Miura et al., 1989]。表2に ^{14}Si を基準とした二次イオンの相対検出強度を示す。二次イオン分析法を惑星探査に応用するためには、探査対象の惑星表面に存在する可能性のある物質について予め二次イオンスペクトルを取得しておき、探査データと比較する（スペクトルパターンの比較）ことにより、表面物質を同定するというアプローチが必要であり、今後更に多くの試料について二次イオン分析データを取得しデータベース化することを予定している。また、太陽風による固体表面変成の研究の立場から一部の材料については、二次イオン特性の取得と同時に分光分析も行った [Yokota et al., 1989]。

相対検出強度	≥ 10	2~10	2~1	1~0.5
ガラス				
デクタイト		Na, K, Ca	N, Al, H ₂	C, Fe
隕石	Na	H ₂ , O, Na, Al, S, K, Ca	H	C, Mg
煎岐岩		H ₂ , O, Na, Al, S, K, Ca	C, N	Sc
隕鉄				
Gibeon隕鉄		O	N, S, H ₂	Na, Al, K, Fe
Odessa隕鉄		H ₂ , O, Al, S, K	N, Na, Fe, F	C, Ca, Cr, Mn
政司隕鉄				N, O, Na, Al, K, Fe
仁保石質			Na, Mg	H ₂ , O, Al, K
Imilac石鉄	Na	K	Hg	O, Al, S, Ca, Fe
Murchison		Na, K	H ₂ , O	Al, Sc
Murchison I Type		H ₂ , O, Na, K	Al, S	N, Br, Fe
Allal hills		H ₂ , O, Na, Al, K, Ca	N, S	C, Mg
長石				
アノーサイト	Na	H ₂ , O, Al, K	C, N, S, Ca	Cr, Fe
ユークライト	Na	H ₂ , O, S, K, Al	N, Ca	C, Fe
ラブラドライト		H ₂ , O, Al, K	N, S	Na
マイクロクリン	Na, Ca	H ₂ , O, S, K, Fe	C, Al	N, Mg
アルバイト	Na	K	O, Al, S	H ₂ , N
泥質				
北海道K-T				Na
デンマークK-T			Fe	N, O, Na, K
デンマークK-T2		Na, Fe	K, Ca	O, Al, S, Ge
その他				
コランダム	Al	S	H ₂ , Na	N, C, N, K, Fe
石英				Al, Sc, Fe
スライドガラス				K

表2 隕石、地球岩石の遠隔 SIMS 分析結果

表3 惑星探査機搭載用遠隔 SIMS 装置の概念設計結果

目標性能

システム性能	50 mまでの遠隔SIMS分析
データレイト	1.2 kbps
総重量	15.9 kg
電力	80 Watt
イオンビーム源	作動ガス
	ガス流量
	イオンビーム
	運用
イオン検出器	ガスリザーバー
	運用時間
	運用モード
	分析器
	検出器
	コレクター開口

サブシステム重量

イオンビーム装置	7.0 kg
イオンガン	2.0 kg
イオン銃電源	3.0
ガスリザーバー	2.0
質量分析器	5.4 kg
分析器	1.0
RF電源	1.4
電源	3.0
制御、データ処理部	2.0
構体	1.5
合計	15.9 kg

上記エスティメイトは、イオン銃については現存のものを参考とし、質量分析器については現在製作中のSFU環境計測器の質量分析器を参考にした。

5. 搭載機器概念設計

実験で得られた結果を基に惑星探査機搭載機器としての概念設計を行った。表3に目標性能と概念設計結果を示す。探査機周辺 50m までの探査が可能で運用時間 1000 分をガイドラインとして設計した。イオンビームの放出はパルスで行うことを前提としている。重量評価は、イオンビームソースについては現在使用中のものを軽量化して応用するものとし、イオン分析器については現在開発中の Space Flyer Unit 搭載用質量分析器を参考とした。一次イオン種としてここでは二次イオン発生率の時間変化が少ない酸素を想定しているが、その場合イオンソースの電極材の消耗が激しく、実際の搭載にあたっては寿命と分析精度のトレードオフとなる。

項目	到達点	課題
1. 遠隔SIMSの原理の検証		
距離逆二乗則の検証	1.2mまで確認	超大型チェンバーで実証
多数の元素の分析特性	14種類で確認	
同位体の分析	8種類で確認	エネルギーフィルター工夫
2. SIMS自体の基礎研究		
時間依存性(メカニズム)原因究明	事例収集	遠隔探査に応用するための
	原因同定できず	対策(データ処理、補正)
コンタミネーションの影響評価	事例収集	遠隔探査に応用するための
	原因同定できず	対策(データ処理、補正)
3. SIMSを惑星探査に応用するための具体的な方法を明らかにする。		
必要なイオン銃の仕様	ほぼ規定できた	パルス方式検討
必要なイオン分析器の仕様	ほぼ規定できた	大面積イオンコレクター開発
組成の推定ロジック	基礎データ22種類	ソフトウェア作成
	推定の考え方検討	

表4 研究目標に対する到達度と今後の課題

6. まとめと今後の課題

3年間にわたる基礎開発実験によりSIMSを惑星表面組成探査に応用するための見通しが得られ、実験データを基に惑星探査機搭載機器としての概念設計を行った。今後の主な課題は、概念設計を基にプロトモデルを製作し、更に大型のスペースチェンバーで性能確認を行うこと及び対象物の組成を推定するために必要なSIMSデータベースの構築とスペクトルパターンからの推定ロジックを開発することである。以下に当初かかった研究目標に対する本研究の到達度と今後の具体的な課題を表に示す。

参 考 文 献

- Miura, Y., Sasaki, S., Kawashima, N., Yamori, A. and Ohta, M. 1989. Remote Secondary Ion Spectroscopic(Remote SIMS) Data of Terrestrial, Synthetic and Extraterrestrial Materials, ISAS Res. Note 410.
- Sagdeev, R. Z., Managadze, G. G., Shutyaev, I. Yu., Szego, K., and Timofeev, P. P. 1985, Methods of remote surface chemical analysis for asteroid missions,

Adv. Space Res., 5, pp.111-120.

- Shimizu, R., Ishitani, T. and Ueshima, Y. 1974. Fundamental studies on quantitative analysis in ion probe microanalyzer, JJAP 13, pp.249-255.
- Yokota, T., Ohta, M., Sasaki, S., Yamori, A. and Kawashima, N. 1989. Optical Study for the Irradiation Influences of Oxygen Ion Beam on the Space Use Materials, ISAS Res. Note 422.
- 三浦保範 1987 月面試料と南極の隕石 応用物理学会結晶工学分科会年末講演会資料
- 太田正廣、横井頌、三浦保範、矢守章、佐々木進、河島信樹 1989 イオンビームを用いた月表面遠隔探査装置の基礎開発 日本機械学会第67期全国大会講演会講演概要集 pp415.
- 太田正廣、中村博、三浦保範、矢守章、佐々木進、河島信樹 1989 イオンビームを用いた月表面遠隔探査装置の基礎開発(2) 日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集 pp52.
- 佐々木進、矢守章、河島信樹 1987 イオンビームを用いた固体惑星探査の基礎研究 第8回太陽系科学シンポジウム講演集

参考文献

- Miyata, Y., Sasaki, S., Yamori, A. and Ohta, M. 1989. Remote Secondary Ion Spectroscopic(Remote SIMS) Data of Terrestrial, Synthetic and Extraterrestrial Materials. ISAS Res. Note 410.
- Sagdeev, R. Z., Managadze, G. G., Shulyayev, I. Yu., Zeebe, E. and Tsvetkov, V. I. 1982. Methods of remote surface chemical analysis for asteroid exploration.