1.現在までの進捗状況および達成度（文中に6の公表の番号を書いて、証拠を示す）

［平山・立花分］

低温凝縮表面に低エネルギー電子・真空紫外光・低エネルギー多価イオンを入射した際に脱離する粒子の観測を行った。

希ガス固体に低エネルギー多価イオンを入射し，多価イオンの持つポテンシャルエネルギーによる脱離イオンの観測を行った。新しい絶対値測定方法を開発することにより，精度の高い絶対脱離収率の測定に成功した。固体Ne, Arを標的とした実験では，ポテンシャルエネルギーによる脱離の寄与が明確に示された。この実験結果は既存の脱離モデルでは説明することができず，中性原子の脱離に伴ってイオンが脱離する，という新しいモデルを提唱し，そのモデルを使うことによって我々の実験結果を再現することに成功した。[論文1][学会6]

2015年度に，より低エネルギー多価イオン衝撃による固体表面との相互作用実験の実現を目指して多価イオンビームラインを改造し，以前に比べて低エネルギーでの実験が可能となった。このビームラインを用いて，今までの脱離粒子観測に加え反射イオン測定システムを組み込んだ。このシステムを用いて脱離イオン・反射イオンの同時計測を行い，固体へ付与される多価イオンのポテンシャルエネルギーが脱離過程に及ぼす影響を明らかにすることが可能となる。限在このシステムの動作チェック中であり，2017年度には物理測定を開始できる。

希ガス固体を標的とした電子衝撃実験では，励起原子の脱離収率の入射電子エネルギー依存性を詳細に測定することにより，Ne固体内で一時的な負イオン共鳴状態が生成し，その過程が励起原子の脱離に大きな寄与をすることを発見した[論文2，学会2]。特に，希ガス固体表面から負イオンが脱離していることを強く示唆される実験結果を得ている。宇宙空間における極低温環境での電子のエネルギー消費についての基礎的知見を与えることが期待される。

　希ガスクラスターを標的とした実験では，混合クラスタービーム生成装置を整備し，予備的実験を開始した。現状得られている結果では，クラスター内で同種原子が凝集して，殻構造を持ったクラスターが生成されることを示唆している結果が得られている。

　また，固体表面からのイオンの脱離機構の解明を目指して，低エネルギー陽電子衝撃による脱離イオンの観測実験も行っている。今研究においてTiO2表面に入射した陽電子が酸素原子の特定の軌道と対消滅することが発見された［論文３，４，特に優れた研究成果１，２］。

[小泉分]

当研究グループでは宇宙プラズマの中で多価イオンの関与する原子過程の研究を中心に、宇宙空間での分子生成に重要な低エネルギーイオン-分子反応の研究、および実験技術開発として高感度MCPの開発を行っている。

　多価イオンの原子過程では電荷移行反応断面積の絶対値測定を目指した。イオンの価数が高くなるほどイオン量は減少するので、１５年度に装置を改造し、エネルギー選別器を通さないで断面積絶対値が測定できるように測定系を改造した。１６年度は太陽風の中に存在するC,N,O原子の多価イオンの関与する反応を測定するため、イオン源に二酸化炭素を導入し、C,O原子の多価イオンの生成量を調べた。この結果O5+イオンでも十分測定できることがわかった。２〜５keVのO5+とArの間の１電子および２電子移行に関する断面積を測定し、理論的にも矛盾のない結果を得ている。

　低エネルギーイオン-分子反応の研究では比較的大きな分子の移動度を測定している。このような分子イオンでは、通常は点電荷と近似されるイオンの大きさを考慮しなければならないことがわかった（論文５、６）。イオンの大きさを系統的に変えて、イオンの大きさと移動度の関係を調べている。またイオンの構造異性体で移動度の違いが出ることを明確にした（学会７）。これはイオン移動度質量分析法の基礎過程として重要である。

　高感度MCPの開発ではMCP入射口にテーパーをつけて開口率100%のT-MCPを特注しその絶対検出効率、およびその入射角依存性を測定した。その結果、T-MCPは100keV近くの入射エネルギーにならないと検出効率が100%にならないことが判明した（論文４,学会10, 11, 14, 15）。そこでテーパー部分の二次電子放出効率を上げるためテーパー部にMgOをコートしたCT-MCPを製作し、その検出効率、入射角依存性を測定した。その結果CT-MCPは10keV程度の入射エネルギーで検出効率100%になることがわかった（学会8）。

［亀田分］

月惑星着陸探査においてその場放射年代測定を実現するために、レーザ誘起絶縁破壊分光(LIBS)でカリウムの量を測定し、質量分析計でアルゴンの量を測定する手法の技術開発を進めた。まず実験室レベルでの技術実証を完了し（論文Cho+2016）、引き続いて装置の小型化など、リソース制約の厳しい着陸探査に必要な技術開発を進めた。着陸探査用ローバの開発を進めている慶應大工学部石上研と協力し、開発中の小型ローバに搭載可能な大きさ、取り付け方法等を検討し、その場年代測定装置の開発を行った。2016年11月には伊豆大島裏砂漠においてフィールド実験を行い、小型ローバに搭載できる~20kgの観測装置によって年代測定を行えることが実証できた。並行して、採取試料を設置する真空槽の開発を進めた。特に真空封止部が主要な開発項目となった。アルゴン定量実験においては、金属シールが用いられるが、一回で使い切りとなり、大きな締め付けトルクが必要となるため、小型探査機で利用することは困難である。一方で、フッ素ゴムを用いたシールは必要トルクが小さく、複数回の使用が可能であるものの、低温で真空が破れることが分かっており、また金属シールに比べて到達真空度が低いという問題が想定された。本研究では、近年になって開発された低温耐性のあるフッ素ゴムを使い、差動排気によって十分な真空度を得られることが確認された。

2.問題点とその克服方法

［平山・立花］

　多価イオン・希ガス固体表面衝突実験において，予備実験の結果，反射イオンの価数分布測定の分解能が不十分であることが明らかとなった。これは入射イオン・反射イオンそれぞれにコリメーターを装着することで解決可能と考えている。電子衝撃実験においては，より詳細な情報を得るために入射電子強度の増強が必要であることがわかった。現在行っている電子銃の改造により，信号強度を10倍程度増強できる予定である。

[小泉]

多価イオンの電荷移行反応の研究が計画より遅れている。C,N,O多価イオンを入射粒子とし、標的としてはHe,H2などを用いたいが断面積が小さいため、うまく測定ができていない。また二酸化炭素ガスではC3+とO4+が質量分析では同じ位置にきてしまい区別できない。

イオン源ガスを工夫する必要がある。

［亀田］

2014年にJAXA火星着陸技術実証WGにおいて年代測定装置の提案を行ったが残念ながら不採択となった。現時点で日本が火星表面に着陸する計画は予定されておらず、実現するとしても2020年代後半になると考えられる。この時期での提案も見据えつつ、海外の年代測定チームと協力し、特にNASAの小型計画での実現を目指し、主にNASA Marshall Space Flight Centerのチームと議論を続けている。

3.今後の研究方針

［平山分］

　多価イオン・希ガス固体衝突実験において，反射イオン・脱離イオンの同時計測実験を開始する。この結果より，今までは運動量交換による脱離に隠されていたポテンシャルエネルギーによる脱離下底の直接観測が可能になると期待している。電子衝撃脱離実験においては，希ガス固体から負イオンが脱離していることを直接確認する手法を確立し，新しい脱離の発見を目指す。希ガスクラスターを標的とした実験では，混合クラスターを標的として，クラスターの特定の位置に吸着した異種原子を標的とした観測を開始する。

［亀田］

伊豆大島のフィールド実験では一定の成果が得られているが、実際には搭載した装置の重量はローバの積載可能重量とほぼ等しく、より小型化しなければ実際の探査計画は実現できない。今年度にはより小型で高出力のレーザが納品される予定であり、来年度にはより小型の質量分析計を使い、また、伊豆大島実験で識別された問題（取り付け方法の簡便化など）を克服し、より小型軽量な装置を実現し、将来計画への提案準備を進める。

4.特に優れた研究成果（表彰、新聞記事、プレス発表等）

1. 立花隆行，日本陽電子科学会2015年度奨励賞受賞

2. 立花隆行，平山孝人，長嶋泰之（東京理科大学教授），プレス発表（2014年5月）。立教大学・東京理科大学共同。日刊工業新聞，日経産業新聞他に掲載。

5.研究成果の副次的効果（特許出願や、計画に無かった良い結果）

6.成果の公表(2014, 2015, 2016年度の物)

【雑誌】

1. K. Ban, M, Akiwa, T. Tachibana and T. Hirayama, in preparation.
2. M. Anzai, H. Sawa, T. Tachibana and T. Hirayama, in preparation.
3. Comparative study of ion desorption from clean and contaminated TiO2(110) surfaces by slow positron impacts, T. Tachibana, T. Hirayama, and Y. Nagashima, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology 13, (2015) 261.
4. Positron-annihilation-induced ion desorption from TiO2(110), T. Tachibana, T. Hirayama, and Y. Nagashima, Phys. Rev. B89, (2014) 201409(R).
5. Absolute detection efficiency of a tapered microchannel plate for Ne+ ions, S. Matoba, G.Ishikawa, S. Moriya, K. Takahashi, T. Koizumi, and H. Shiromaru, Rev. Sci. Instrum. **85** (2014) 086105.　DOI: 10.1063/1.4891727
6. Mobilities of Li+- (2-butanol)n (*n*= 1-2) ions in He gas, K. Takaya, M.Nakahara, Y. Hasegawa, T. Koizumi, K. Takahashi, S. Matoba, H. Tanuma, J. Phys.: Conference Series. **635** (2015) 032087.
7. Mobilities of polyatomic molecular ions in He gas, Kazunari Takaya, Yuya Hasegawa, Tetsuo Koizumi and Hajime Tanuma, Int. J. Ion Mobil. Spec. **19** (2016) 183-187. DOI 10.1007/s12127-016-0204-5.

【図書】

【学会発表】

1. H. Sawa, M. Anzai, T. Konishi, T. Tachibana and T. Hirayama, 32th European Conference on Surface Science (ECOSS32) (Grenoble, France, September 2016).

2. T. Hirayama, 77th IUVSTA Workshop on Surface Processes, Gas Dynamics, and Vacuum Technology of Cryogenic Vacuum Systems (Fuefuki-city, Yamanashi, Japan, August 2016). (Invited Talk)

3. T. Tachibana, L. Chiari, M. Nagira, T. Hirayama and Y. Nagashima, International Conference on Positron Annihilation (ICPA-17) (Wuhan, China, September 2015).

4. K. Ban, M. Akiwa, A. Sumita, Y. Nidaira, Y. Kuwabara, T. Tachibana and T. Hirayama, 24th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2015) (Toledo, Spain, July 2015).

5. Positron-annihilation-induced ion desorption from TiO2(110), T. Tachibana, T. Hirayama, and Y. Nagashima, 7th International Symposiumu on Surface Science (ISSS-7) (Matsue, Japan, November 2014).

6. K. Ban, M. Akiwa, T. Tachibana and T. Hirayama, 17th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI-2014) (San Carlos de Bariloche, Argentina, September 2014). [Selected Topic]

小泉分（学会発表）

7. 長谷川優也、高谷一成、小泉哲夫

He,Ne気体中における分子イオンC3H7O+構造異性体の移動度

　　一般講演

原子衝突学会第４１回年会　富山（富山大学）2016年12月

8. 的場史朗、岡嶋将司、森屋穰、小泉哲夫、城丸春夫、高橋果林

コーティングテーパー型マイクロチャンネルプレートのイオン検出効率

　　一般講演

原子衝突学会第４１回年会　富山（富山大学）2016年12月

9. 高谷一成，中原明思，長谷川優也，小泉哲夫，的場史朗，小島隆夫，田沼肇

Li+ -(2-butanol)n (n=1-3)のヘリウム中における移動度測定

一般講演

日本物理学会第70回年次大会 東京(早稲田大学) 2015年3月

10. 的場史朗, 山田圭介, 千葉敦也, 鳴海一雅, 齋藤勇一, 石川学, 加藤遼也, 上野和樹, 小泉哲夫, 城丸春夫, 高橋果林

一般講演

高開口率テーパー型マイクロチャンネルプレートのイオン検出効率測定

日本物理学会第70回年次大会 東京(早稲田大学) 2015年3月23日

11. 加藤遼也，上野和樹，石川学，的場史朗，高橋果林，城丸春夫，小泉哲夫

高開口率テーパー型マイクロチャンネルプレート検出効率のイオン入射角依存性

一般講演

日本物理学会第70回年次大会 東京(早稲田大学) 2015年3月23日

12. 高谷一成, 羽賀友音, 小泉哲夫, 的場史朗, 小島隆夫, 田沼肇

ヘリウム中におけるクラスターイオンの移動度測定とMOBCALによる理論計算

一般講演

2015年物理学会秋季大会（2015.9.16-19 関西大）

13. K. Takaya, M. Nakahara, Y. Hasegawa, T. Koizumi, K. Takahashi, S. Matoba, H. Tanuma

Mobilities of Li+-(2-butanol)n(n=1-2) ions in He gas

一般公演

XXIX International Conference of Photonic, Electronic, and Atomic Collisions

(22-28 July 2015 Toledo)

14. Shiro Matoba, Kazumasa Narumi, Yuichi Saitoh, Keisuke Yamada, Atsuya Chiba, Ryoya Kato, Kazuki Ueno, Karin Takahashi, Tetsuo Koizumi, and Haruo Shiromaru

一般講演

Detection efficiencies of a tapered microchannel plate with high open-area-ratio

11th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics

仙台(東北大学) 2014年10月6日

15. 的場史朗, 石川学, 高橋果林, 小泉哲夫, 城丸春夫

一般講演
テーパー型マイクロチャンネルプレートの絶対検出効率測定

第61 回応用物理学会春季学術講演会

相模原(青山学院大学) 2014年3月20日

7.その他研究成果等(6で書いたもの以外で、研究成果や企業との連携実施等)