

# 重イオンビームを用いた基礎・応用研究

百田 佐多生\* 佐竹 信一\*\* 谷口 淳\*\*

金澤 光隆\*\*\* 北川 敦志\*\*\* 佐藤 真二\*\*\*

(受領日：2010年4月24日)

\* 高知工科大学システム工学群

〒 782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

\*\* 東京理科大学基礎工学部電子応用工学科

〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641

\*\*\* 放射線医学総合研究所

〒 263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

E-mail: \*momota.sadao@kochi-tech.ac.jp

要約：重イオンビームは、幅広い分野で興味深い研究対象であり、同時に強力なツールでもある。1 MeV 以下の低エネルギーの重イオンビームは、その照射効果に関する知見にもとづいて加工・改質を行うために利用されている。物質との反応性に富む多価重イオンビームは、近年のイオン生成技術の発展によって基礎研究から工業分野への応用が可能な状況になってきた。高知工科大学に建設した多価重イオンビーム照射装置を用いて、多価イオンの照射効果とその応用に関する研究を行った。一方、核子当たり 100 MeV 以上の高エネルギーの重イオンビームは、原子・原子核など微細な世界を研究するためのプローブとして利用されている。高エネルギー重イオンビームに特有な原子核反応である入射核破碎過程の反応メカニズムを解明するために、放射線医学総合研究所の HIMAC 加速器施設で実験研究を行った。

## 1. はじめに

重イオンビームは、幅広い分野で研究対象あるいはツールとして利用されている。重イオンビームによって引き起こされる現象は多岐にわたり、その運動エネルギーや照射条件によって様相が大きく変化する。

エネルギーが 1MeV 以下の重イオンビームに関しては基礎研究が進んでおり、その照射効果を利用した加工や改質プロセスといった技術が実用化されている<sup>(1)</sup>。ナノテクノロジーの分野では、加工・改質サイズの細密化が進んでいる一方で、特に MEMS の分野などでは材料により高度な機能を付与するため表面方向に加えて深さ方向にも複雑な形状を形成することが求められている。近年のイオンビーム生成技術の進展により、原子から多数の電子をはぎ取ることのできる多価イオン源がコンパクトになり製品化されるようになった。

多価重イオンは通常の加工・改質に利用される 1 価のイオンに比較して高い反応性を持つ。筆者たちは高知工科大学に建設した多価重イオンビーム照射装置<sup>(2)</sup>を利用して、多価イオンの照射効果とその応用に向けた研究を行ってきた。

エネルギーが核子あたり 100 MeV 以上の重イオンビームに関しては、装置が巨大で高価であることから、主に原子・原子核などの基礎研究に供されてきた。最近では、この基礎研究によって蓄積された知見に基づいて、重イオンビームを用いたガン治療など、実用化に向けた取り組み<sup>(3)</sup>が始まっている。また、理化学研究所の RI ビームファクトリーなど幅広い応用を見据えて建設された施設が稼働を始めている。筆者たちは核子あたり 100MeV~300MeV の重イオンビームを用いて、原子核反応のメカニズムの研究を行ってきた。この研究は原子核反応の解明に寄与するのみなら

ず、宇宙放射線が人工衛星やその乗組員に及ぼす影響を推定する際にも必要な核データとしての役割を果たす。

本報では、多価重イオンビームを用いた照射効果に関する研究と、核反応メカニズムに関する研究の結果を報告する。

## 2. 1 MeV 以下の多価重イオンビームを用いた研究

高知工科大学に建設された多価重イオンビーム照射装置では、PANTECHNIK 社の ECR イオン源である NANOGAN を用いて多価重イオンを生成している。この装置を用いると、Ar であれば 9 価までのイオンを 100 kV の電圧で加速してビーム化することができる。9 価の Ar イオンは、1 価の Ar イオンの約 100 倍となる 1 keV という大きなポテンシャルエネルギーを運動エネルギーに加えて有する。この多価イオンが物質に照射されると、ポテンシャルエネルギーが被照射物質に付与され、特異な照射効果を引き起こす<sup>(4)</sup>。この多価イオン特有の照射効果に関する研究は、実験・理論の両面から進められているもの発展途上であり、応用を意識した開発研究は進んでいないという現状である。

### 2.1 Si 中に生成される格子欠陥

イオンビームの照射によって結晶中に導入される格子欠陥は、加工や改質の基本となる現象である。イオンの価数が照射された Si 結晶中での格子欠陥生成に及ぼす影響を測定するために、筆者らは Ar イオンビームを Si 結晶に照射し、結晶中に生成された格子欠陥の深さ分布を測定した<sup>(5)</sup>。

Si の  $\langle 100 \rangle$  面に 6 価と 9 価の Ar イオンビーム

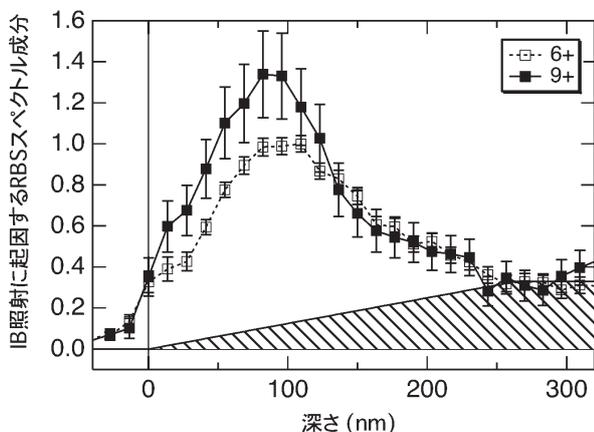


図 1 : シリコン結晶中に生成された格子欠陥の深さ分布<sup>(5)</sup> 斜線部分は、de-channeled 成分が格子位置の Si によって散乱された効果に対応する。

ムをいずれも 100 keV でほぼ等量照射し、結晶表面に欠陥を導入した。この欠陥の深さ分布を測定するために、RBS-channeling 法<sup>(6)</sup>を利用してスペクトルを観測した。観測された RBS-channeling スペクトルから Ar イオンの照射に起因する部分を抽出し、価数による変化に注目した(図 1)。その結果、欠陥生成が多価イオンの照射によって促進され、この効果が表面付近で顕著であることが示唆された。

### 2.2 Ar ビームによる Si 表面の隆起現象

イオンビーム照射によって Si 中に生成された格子欠陥は結晶のアモルファス化を誘起し、体積変化の原因となることが分かっている。この現象をより詳細に観測するために、1 価の Ar イオンを Si 結晶に照射し、表面の形状変化と照射量の関係を測定した<sup>(7)</sup>。図 2 のように、Si 表面は隆起し、その高さは Ar イオンの照射量とともに増加することが分かった。このように照射量が少ない領域では、スパッタリング過程による切削効果よりもアモルファス化による膨張効果が優勢であることを示している。この実験結果は、分子動力学にもとづく微視的計算で良く再現することができた。今後は、多価の Ar イオンを用いて同様な測定を行い、2.1 で観測された多価効果と関連づける予定である。

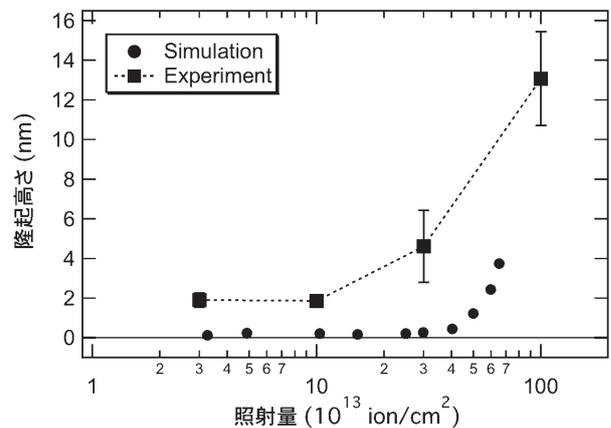


図 2 : Ar イオンの照射量と Si の隆起高さの関係<sup>(7)</sup>

### 2.3 Ar ビームによる銀薄膜のスパッタリング

今までの研究で、多価イオンが持つポテンシャルエネルギーは、主に表面付近の狭い領域で付与されることが分かってきた。スパッタリングは表面数 nm の領域で起こる現象で、多価イオン効果を観測するのに適している。

この研究を開始するために、スパッタリング率

を測定する手法を確立した。スパッタリング率が比較的大きい銀の薄膜に Ar ビームを照射し、照射後の薄膜の質量減少量を測定した<sup>(8)</sup>。図3のように、銀薄膜の質量減少量と照射量は線形の関係になり、スパッタリング率をその傾きとして求めることができた。

次に、イオンの価数がスパッタリング率に及ぼす影響を知るために、1 価から 9 価までの Ar イオンを銀薄膜に照射し、各価数におけるスパッタリング率を測定した<sup>(9)</sup>。この測定結果を 1 価のスパッタリング率で規格化すると図4のようになり、価数とともにスパッタリング率が増加する傾向が観測された。今回の測定では、誤差棒の長さに象徴されるように、測定結果に大きな不確定度が残ってしまった。この不確定度の主な原因は、1) 質量変化の測定精度と 2) 解析時に使用した補正処理の二点である。今後はこの2つの問題を解決することによって、より信頼度の高い測定を行う予定である。

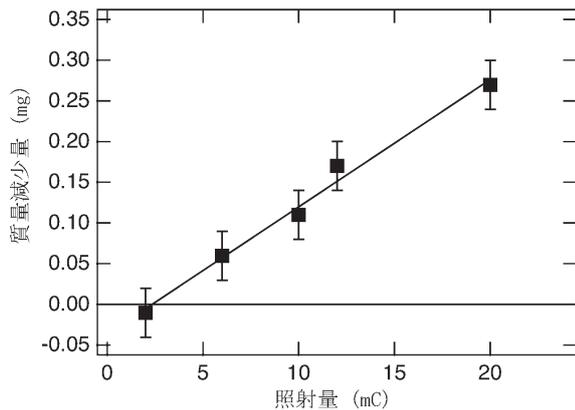


図3: Ar イオンの照射による銀薄膜の質量変化<sup>(8)</sup>

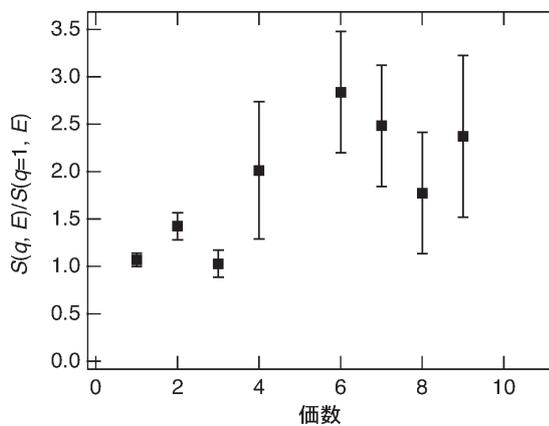


図4: 銀薄膜のスパッタリング率の価数依存性<sup>(9)</sup>

### 3. 核子あたり 100 MeV 以上の重イオンビームを用いた研究

核子あたり 100 MeV 以上の高エネルギー重イオンビームが物質中に入射すると、入射核破碎過程と呼ばれる原子核反応が起こる。この反応は自由な核子-核子衝突の重ね合わせとして記述できる直接反応過程で、反応によって生成される二次粒子をビームとして再利用できる特徴を持つ。近年では多様な同位体を含む二次ビームから特定の核種のみを分離し、工学的分野や医療・生物の分野に応用されるようになってきた。また、高エネルギー重イオンを成分として持つ宇宙放射線が、宇宙船やその乗組員に及ぼす影響を評価する上でも重要な反応過程である。筆者らは、核子あたり 100 ~ 300 MeV の重イオンビームを用いて、入射核破碎過程から生成される二次粒子の生成メカニズムを解明してきた。

ここ数年は放射線医学総合研究所の HIMAC 加速器から供給される核子あたり 290 MeV の Ar, Kr ビームを用いて、二次粒子の生成率とその運動量分布を系統的に測定してきた<sup>(10)</sup>。破碎片 (二次粒子) のビーム方向の運動量 ( $P_L$ ) は、図5のように標的核との反応時に作用する相互作用によってわずかではあるが減速し、有限の広がりが生じている。減速効果 ( $-AP_L$ ) と破碎片の質量 ( $A_F$ ) の間には、図6のように明確な規則性が見いだされた。図5から分かるように、低運動量側の  $P_L$  分布の幅は、破碎片の種類によらず高運動量側に対して 20 ~ 30% 広がることが分かった。高運動量側の分布幅を Goldhaber 模型<sup>(11)</sup> で定義される規格化された分布幅  $\sigma_0$  に変換すると、図7のように破碎

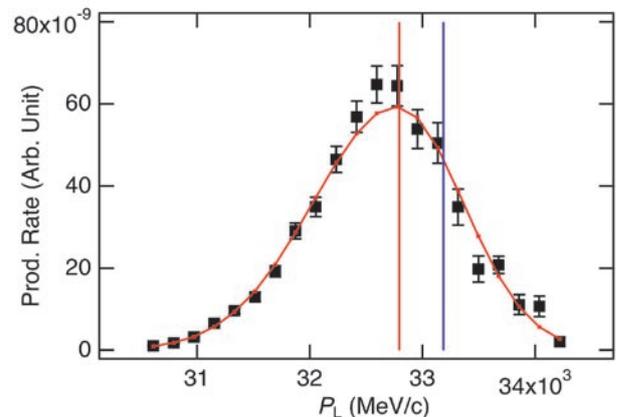


図5: Kr ビームから生成された  $^{43}\text{Ca}$  の運動量分布  
青線は一次ビームの速度、赤線は破碎片の分布中心を表す。

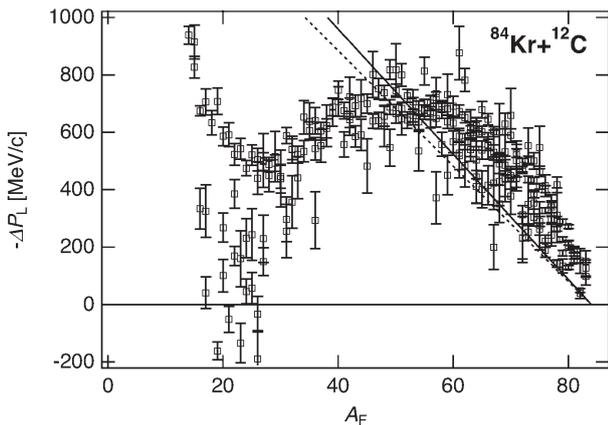


図 6:  $^{84}\text{Kr}+\text{C}$  反応で観測された破砕片の減速効果  
重い破砕片の減速効果は、Morrissey<sup>(12)</sup> (実線)  
や Kaufman<sup>(13)</sup> (点線) の系統性でほぼ説明でき  
る。

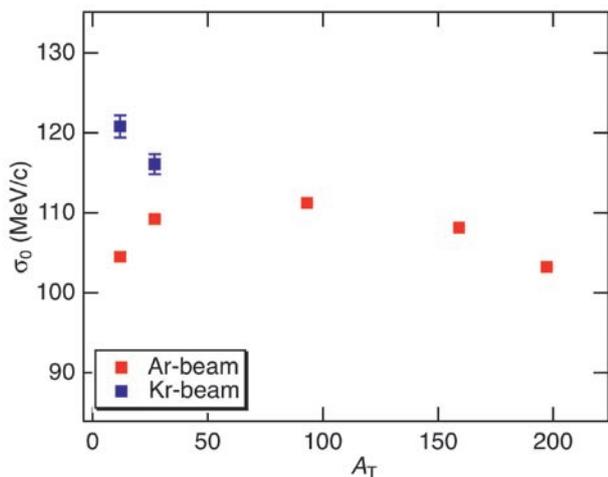


図 7: 規格化された破砕片の  $P_L$  分布の幅

片や標的によらずほぼ一定の値となり、Goldhaber 模型を支持する結果となった。

ビーム方向に対して横方向の運動量 ( $P_T$ ) 分布は、 $P_L$  分布よりも広がるのが実験結果から分かっており、これは標的との衝突時の軌道の広がりによるものとして理解されてきた<sup>(14)</sup>。重い標的核の場合は、このエネルギー領域においてもクーロン反発力によって軌道に偏向が生じることが予想できる。この予想を確認するために、Kr ビームを Al と Au 標的に照射して生成される破砕片の角度分布を測定した。一次ビームから陽子が 1 つはぎ取られて生成される  $^{83}\text{Br}$  の場合、図 8 のように Al 標的では前方のみにピークを持つ分布となるのに対して、Au 標的では前方からずれた位置にピークを持つ分布となった。解析の結果、このピークはおよそ 11 mrad に位置し、表面が接するクーロン散乱として古典的に計算した散

乱角度 14 mrad に近い値となった。

このようにして測定した破砕片の運動量分布を  $P_L$  と  $P_T$  に関して積分すると、各破砕片の生成断面積を得ることができる。生成断面積は破砕片の核構造を反映するとともに、破砕片を二次ビームとして利用する際にビーム強度を見積もるために必要な物理量である。

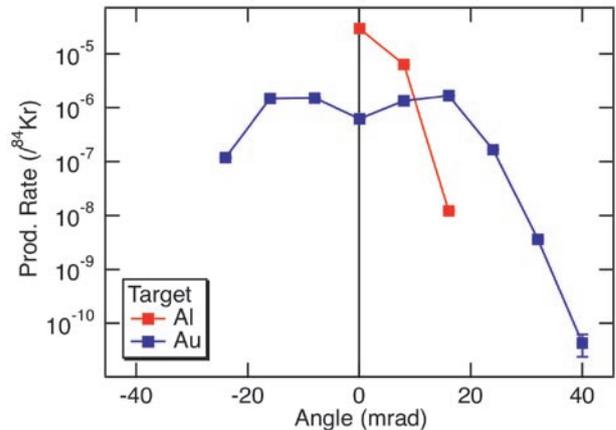


図 8:  $^{84}\text{Kr}$  から生成された  $^{83}\text{Br}$  の角度分布

#### 4. まとめ

今までの研究で、多価重イオンビームの照射効果に関して新たな知見が得られ、イオンビーム工学をさらに発展させる可能性が見えてきた。多価重イオンビームの応用を進めるためには、さらに基礎データの蓄積が必要である。これと同時に、より高強度の多価イオン源の開発が望まれる。

入射核破砕過程の生成物である破砕片の運動量分布を通して、核反応過程に関する理解が深まった。これらの測定結果は、今まで測定例が少なかった核子あたり 300 MeV 付近のエネルギー領域の核データとして広く利用されることが期待される。

#### 文献

- (1) 電気学会, "電子・イオンビーム工学", 第 7.3 章 pp.257-279, 1995.
- (2) S. Momota, Y. Nojiri, M. Saihara, et al., "First operation of ECR ion source at Kochi University of Technology" Rev. Sci. Instrum., vol.75, pp.1497-1498, 2004.
- (3) M. Kanazawa, A. Kitagawa, S. Kouda, et al., "Present status of secondary beam courses in HIMAC", Nucl. Phys. A, vol. 746, pp.393-396,

- 2004.
- (4) J.-P. Briand, G. Giardino, G. Borsoni, et al., "The interaction of slow highly charged ions on surfaces (invited)" *Rev. Sci. Instr.*, vol.71, pp. 627-630, 2000.
- (5) S. Momota, K. Nishimura, Y. Nojiri, et al., "Analysis of Si crystal irradiated by highly-charged Ar ions using RBS-channeling technique" *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, vol.267, pp.1412-1414, 2009.
- (6) L.C. Feldman, J.W. Mayer, S.T. Picraux, "Materials analysis by ion channeling", 1982.
- (7) S. Satake, S. Momota, S. Yamashina, et al., "Surface deformation of Ar<sup>+</sup> ion collision process via molecular dynamics simulation with comparison to experiment" *J. Appl. Phys.*, vol.106, 044910, 2009.
- (8) 柏原正樹, 大井一喜, 豊永拓也, 百田佐多生, 野尻洋一, 2010年度精密工学会春季大会学術講演会講演予稿集, O61 pp1079-1080, Mar. 2010年.
- (9) 百田佐多生, 柏原正樹, 大井一喜, 豊永拓也, 野尻洋一, 2010年度精密工学会春季大会学術講演会講演予稿集, O62 pp1081-1082, Mar. 2010年.
- (10) S. Momota, M. Kanazawa, A. Kitagawa, S. Sato, "Shift and width of momentum distribution of projectile-like fragments produced at 290MeV/u", 3rd Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, BL.00009, Oct. 2009.
- (11) A. S. Goldhaber, "Statistical models of fragmentation processes", *Phys. Lett. B*53, pp. 306-308, 1974.
- (12) D.J. Morrissey, "Systematics of momentum distributions from reactions with relativistic ions", *Phys. Rev. C* vol.39, pp. 460-470, 1989.
- (13) S.B. Kaufman, M.S. Freedman, D.J. Henderson, et al., "Momentum transfer to the target in peripheral collisions of relativistic heavy ions", *Phys. Rev. C* vol.26, pp. 2694-2697, 1982.
- (14) K. Van Bibber, D.L. Hendrie, D.K. Scott, et al., "Evidence for orbital dispersion in the fragmentation of 160 at 90 and 120 MeV/Nucleon", *Phys. Rev. Lett.*, vol.43, pp. 840-844, 1979.

# Basic and applied research by using heavy ion beams

**Sadao Momota<sup>\*</sup>, Shin-ichi Satake<sup>\*\*</sup>, Jun Taniguch<sup>\*\*</sup>,**

**Mitsutaka Kanazawa<sup>\*\*\*</sup>, Atsushi Kitagawa<sup>\*\*\*</sup>, and Shinji Sato<sup>\*\*\*</sup>**

(Received : April 24th, 2010)

<sup>\*</sup>School of Environmental Science and Engineering, Kochi University of Technology  
185 Miyano-kuchi, Tosayamada, Kami City, Kochi 782-8502

<sup>\*\*</sup>Department of Applied Electronics, Tokyo University of Science  
2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510 Japan

<sup>\*\*\*</sup>National Institute of Radiological Sciences  
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, Chiba, 263-8555 Japan

E-mail: [\\*momota.sadao@kochi-tech.ac.jp](mailto:*momota.sadao@kochi-tech.ac.jp)

**Abstract:** Heavy ion (HI) beams are interesting research objects and also powerful tools in the wide range of fields. HI beams with low energies  $E < 1$  MeV were applied to fabrication and modification of materials by using their irradiation effects. Owing to the development of the technique to produce ion beams, it becomes possible to apply highly-charged HI beams to industrial applications. We have performed investigations on irradiation effects and their industrial applications, by using the highly-charged HI beam facility built in KUT. In order to reveal the nature of microscopic objects, such as atom or nucleus, HI beams with high energies  $E > 100$  MeV/u were applied. We have also performed experimental studies on reaction mechanism of projectile fragmentation process at HIMAC accelerator facility in NIRS.