

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244082

研究課題名(和文) 固体表面で操る気体原子～表面分析を突破口として～

研究課題名(英文) Manipulation of gaseous atoms using solid surfaces: aiming at a breakthrough by introducing surface analysis techniques

研究代表者

畠山 温 (Hatakeyama, Atsushi)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70345073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,400,000円

研究成果の概要(和文)：レーザーを用いた精密計測や量子制御で重要なアルカリ気体原子を対象に、原子と表面の関連する現象の研究を行った。テーマは(1)光誘起原子脱離(2)原子スピンの緩和防止コーティング(3)表面における原子の運動誘起共鳴、の3つに大別され、いずれも従来の精密計測実験を改良しさらには革新を起こすことが期待される。この研究助成の元、表面科学的手法を導入して系統的にアルカリ原子気体と固体表面の相互作用の研究を進めることができ、新しい知見と独自の実験ノウハウが得られた。

研究成果の概要(英文)：We investigated some atom-surface phenomena involving gaseous alkali atoms, which are important atoms in precision measurement and quantum control experiments using lasers. Our research subjects are roughly divided into three categories: (1) Light-induced atom desorption; (2) Anti-spin-relaxation coatings for atoms; (3) Motion-induced resonance of atoms at surfaces. These subjects will improve and may even innovate in conventional precision measurements. Thanks to this funding, we were able to systematically investigate the interactions between alkali atomic gases and solid surfaces by introducing surface scientific techniques, and obtained some new knowledge and unique experimental know-how.

研究分野：原子物理学

キーワード：原子 表面 レーザー分光 レーザー冷却 スピン緩和防止コーティング 光誘起脱離 原子分光 磁気共鳴

## 1. 研究開始当初の背景

気体原子の精密分光と精密制御の研究分野で、気体原子と固体表面の相互作用の理解と制御は長い間重要な課題であり続けている。その理由は、相互作用が原子の精密計測に悪影響を及ぼすことがあるから、また、表面を巧みに利用すれば精密計測において革新を起こすことが期待できるから、である。この課題に取り組むにあたり、我々はこれまで行ってきた表面に関する独自の研究を通じて、当時、この分野で欠けていた方法論、すなわち超高真空槽内でのその場分析によるよく定義された表面を出発点とする実験を世界に先駆けて行うことが重要であると考え、研究をスタートした。

## 2. 研究の目的

表面状態の科学的な分析を突破口として、光ポンピング実験・レーザー冷却実験などの原子物理実験での長年の疑問を解決し、さらに、我々が提唱している表面の微細周期構造を使った原子の操作方法のさらなる発展を成し遂げる。具体的には、超高真空容器内でX線光電子分光などによるその場分析を行ってよく定義された固体表面を準備した上で、アルカリ原子の表面からの光誘起脱離・スピン緩和防止コーティング表面でのスピン緩和、という古くからの問題に取り組む。そこで得た知見を生かして、表面微細周期構造で引き起こす原子の共鳴遷移に基づいた新しい原子操作方法を研究する。

## 3. 研究の方法

まず、表面分析装置・試料準備室・レーザー冷却装置を備えた超高真空装置を製作する

そしてこの装置を用い、よく定義された表面において、アルカリ原子と表面との相互作用の素過程、具体的には、光誘起脱離現象、スピン緩和防止コーティング、冷却原子と表面の衝突過程、の研究を行う。

さらに上記で得た知見に基づき、ナノメートルオーダーの微細周期を持つ固体表面を利用しての運動誘起共鳴現象の研究、特に冷却原子の運動状態の操作の研究に取り組む。

## 4. 研究成果

まず、作製した主たる実験装置である表面分析用超高真空装置について概説した後、研究成果をテーマごとに述べる。テーマは(1)光誘起脱離現象、(2)スピン緩和防止コーティング、(3)運動誘起共鳴の3つのテーマに大別できる。

### 【表面分析用超高真空装置】

この装置のコンセプトは、アルカリ蒸気セル内壁を模した表面状態を作製しその場分析しながら、アルカリ原子の表面上あるいは表面近傍での振る舞いを観察できる、というものである。装置作製は自分たちで設計し、

個々の測定機器を吟味しながら組み立てた。これは、安価で使い勝手が良く将来の改良も容易にできる装置を作るためである。核となる分析装置はX線光電子分光(XPS)装置で、X線源と電子分光器で構成される。光電子分光用に磁気シールドするために真空槽はミュンヘン製である。試料表面のクリーニング、あるいは試料を削りながらの深さ方向のXPS測定ができるように、イオン銃を備え付けた。ガラス基板などの試料は試料準備槽からロードロック方式でトランスファーできるようにした。試料は温度制御可能である。さらに、試料に光誘起脱離測定のため光を照射できるように光学窓を複数取り付けてある。さらに、自作のアルカリ原子検出器により、脱離アルカリ原子を高感度に検出できる。

### (1) 光誘起脱離現象

まず、光誘起脱離現象の比較的定量的な状況把握、すなわち、表面アルカリ原子密度や脱離レートの測定を、従来の我々の研究を引き継いで行った。その結果、レーザー冷却実験で用いられるような超高真空アルカリ蒸気セル中で典型的と推測される値を見積もることができた。

さらに上述の表面分析装置をフルに使い、ガラス基板に堆積させたアルカリ金属原子の光誘起脱離現象の研究を進めた。これまでの研究で問題だった表面状態の不確かさが、X線光電子分光を使ったその場表面分析により大幅に低減された。その結果、光誘起脱離は、熱脱離が起こりやすい状況で、しかも2種類の異なる状況で起こっていることを示唆する実験結果が得られた。これを受け、原子堆積量依存性、温度依存性、光波長依存性、光強度依存性を詳細に調べることにより、2種類の脱離の存在を明白にすることができた。

その後、レーザー冷却実験への応用で重要な、室温以上の温度の堆積密度の低い条件で、ガラス基板とアルカリ金属原子の結合状態をさらに詳しく調べた。そして、石英とパイレックスガラスにおいて、アルカリ金属原子の結合状態が異なることを見いだした。この結果と光誘起脱離現象との関係を明確にしていくことが今後重要である。

### (2) スピン緩和防止コーティング

アルカリ気体原子のスピン緩和防止コーティングの研究を、上述のX線光電子分光装置などを使った表面分析と、スピン緩和時間測定を組み合わせて行った。従来よく用いられているパラフィンコーティングに加え、新規の材料も含めてさまざまな種類のコーティングを試験した。特にパラフィンについては、成膜・表面分析・緩和防止性能評価を多数の試料に対して系統的に行い、コーティング被覆率の重要性、ライブニングとよばれるアニーリング過程の効果、コーティング表面での不純物酸素の存在、などを明らかにした。

上記の成果に加え、従来から用いられている封じきられたパラフィンコーティングセル内で、アルカリ金属蒸気とパラフィンとの化学反応によると思われるバックグラウンドガスの存在を発見した。このバックグラウンドガスの密度はアルカリ原子との衝突を無視できないほど高く、原子時計などの精密計測への影響がありうるが、これまで見逃されていた重要な事実である。

### (3)運動誘起共鳴

表面微細周期構造と原子の相互作用で引き起こされる共鳴遷移(運動誘起共鳴)を利用した原子操作法の研究を、2つの系で行った。

1つめの系は、透過型の周期構造物と原子の相互作用を利用するものである。周期構造物としては、微細加工した透過型回折格子に強磁性体を蒸着したものを使った。具体的には、面内磁化と垂直磁化の両方が可能なCoCoO磁性薄膜を、周期300 $\mu$ mの回折格子に蒸着したものである。実験の結果、面内磁化と垂直磁化で原子の共鳴スペクトルが著しく異なることを見出した。理論計算と比較し解析することにより本質を理解することができた。これらの成果により、さらに周期を微細化していく今後の実験の見通しが立ったといえる。

もう1つの系は、透明磁性薄膜の周期磁化と原子の相互作用を利用するものである。薄膜が透明である利点は、光による原子ミラーとよばれる原子操作を組み合わせられることにある。固体表面において光による原子ミラーを起こしつつ運動誘起共鳴を発生させる研究はこれまでなく、実験は難しかったが、最終的に、透明磁性体表面での原子ミラーの実証に成功し、今後の研究につなげることができた。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計6件)

[1]Kotaro Kushida, Toshihiro Niwano, Takemasa Moriya, Tomohito Shimizu, Kazuki Meguro, Hideki Nakazawa and Atsushi Hatakeyama,

“Relaxation of Cs atomic polarization at surface coatings characterized by X-ray photoelectron spectroscopy”,  
Jpn. J. Appl. Phys. 54, 066401 (2015). 査読有  
DOI:10.7567/JJAP.54.066401

[2]K. Kitagami, K. Hosumi, K. Goto, and A. Hatakeyama,

“Quantitative measurements of light-induced desorption of rubidium atoms from quartz substrates”,

Phys. Rev. A 85, 062901 (2012). 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevA.85.062901

〔学会発表〕(計31件)

[1]関口直太, 畠山温  
「パラフィンコーティングセル内の残留ガスの測定」  
日本物理学会第70回年次大会(2015/3/24, 早稲田大学(東京都新宿区))

[2]田島良一, 齋藤麻理, 畠山温,  
「透明磁性ガーネット薄膜表面での磁気原子ミラーと光原子ミラーの観測」  
日本物理学会第70回年次大会(2015/3/24, 早稲田大学(東京都新宿区))

[3]R. Kumagai, T. Ikeno and A. Hatakeyama  
“Characterization of glass surfaces exposed to alkali-metal vapor for the study of light-induced atomic desorption”,  
The 7th International Symposium on Surface Science (2014/11/06, くにびきメッセ(松江市))

[4]T. Niwano, K. Kushida, T. Moriya, K. Sato, H. Usui, H. Nakazawa and A. Hatakeyama,  
“Anti-relaxation coatings for polarized cesium vapor”,  
The 7th International Symposium on Surface Science (2014/11/06, くにびきメッセ(松江市))

[5]R. Tajima, R. Kiyosawa, and A. Hatakeyama  
“Observation of Optical and Magnetic Atom Mirror on a Magnetic Garnet Thin Film Surface”  
11th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (2014/10/08, 東北大学(仙台市))

[6]K. Kusida, T. Moriya, T. Niwano, T. Shimizu, H. Nakazawa, A. Hatakeyama  
“Relaxation of Cs atomic polarization at surface coatings characterized by x-ray photoelectron spectroscopy”  
International Conference on Atomic Physics 2014 (2014/8/5, ワシントンDC(米国))

[7]N. Sekiguchi, A. Hatakeyama  
“Time-resolved measurement of velocity-changing collisions in paraffin-coated alkali vapor cells”  
International Conference on Atomic Physics 2014 (2014/8/5, ワシントンDC(米国))

[8]A. Hatakeyama, K. Goto  
“Resonance transition in atoms passing through a magnetic grating”  
International Conference on Atomic Physics 2014 (2014/8/4, ワシントン DC (米国))

[9]K. Kushida, T. Moriya, T. Niwano, A. Hatakeyama, H. Nakazawa  
“Measurement of spin-relaxation times for antirelaxation coatings characterized by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)”  
Fundamental Physics Using Atoms 2014 (2014/3/14, 日本科学未来館(東京江東区))

[10]N. Sekiguchi, A. Hatakeyama  
“Velocity Distribution of Spin-Polarized Rubidium Atoms in a Paraffin Coated Cell”  
Fundamental Physics Using Atoms 2014 (2014/3/14, 日本科学未来館(東京江東区))

[11]R. Tajima, R. Kiyosawa, A. Hatakeyama  
“Magnetic Resonance Transition of Rubidium Atoms Reflected by an Atom Mirror near a Surface of a Transparent Magnetic Thin Film”  
Fundamental Physics Using Atoms 2014 (2014/3/14, 日本科学未来館(東京江東区))

[12]A. Hatakeyama, T. Ikeno, H. Ogawa, R. Kumagai  
“Dependence of Light-Induced Desorption of Rb Atoms on Surface Conditions”  
Fundamental Physics Using Atoms 2014 (2014/3/14, 日本科学未来館(東京江東区))

[13]A. Hatakeyama  
“Manipulating gaseous atoms with a surface”  
The 10th Japanese-German Frontiers of Science Symposium (2013/11/1, 京都プライトンホテル(京都市))

[14]K. Goto, A. Hatakeyama  
“Magnetic Resonance Transition of Rubidium Atoms Passing Through a Magnetic Transmission Grating”  
The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS (2013/7/17, 幕張メッセ(千葉市))

[15]A. Hatakeyama  
“Okorokov Effect in a Magnetic Lattice for a Slow Atomic Beam”  
25th International Conference on Atomic Collisions in Solids (2012/10/22, 京都大学(京都市))

[16]K. Kato, A. Hatakeyama

“Light-Induced desorption of alkali-metal atoms”  
Fundamental Physics Using Atoms 2012 (2012/9/29, 東北大学(仙台市))

[17]畠山 温  
“静周期場中の運動による原子の共鳴遷移”  
原子衝突学会第37回年会 (2012/7/28, 電気通信大学(東京都調布市))

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕  
研究室ホームページ  
<http://amo.lab.tuat.ac.jp>  
において,雑誌論文プレプリント,卒業論文,修士論文などの文献を公開し,情報発信している。

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

畠山 温 (HATAKEYAMA, Atsushi)  
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 70345073