

機関番号： 13201

研究種目： 若手研究 (B)

研究期間： 2009 ~ 2010

課題番号： 21740300

研究課題名 (和文) マイクロ波トラップへの極低温分子気体の連続ローディング

研究課題名 (英文) Continuous loading of ultracold molecular gases to a microwave trap

研究代表者

榎本 勝成 (ENOMOTO KATSUNARI)

富山大学・理工学研究部 (理学)・准教授

研究者番号： 50452090

研究成果の概要 (和文)： 本研究では、極低温分子気体を実現するため、空洞共振器中で増強されたマイクロ波定在波を用いて、分子の並進運動を操作する研究を行った。分子の減速や捕捉を行う前段階として、分子ビームにレンズのように働くマイクロ波分子集束器の開発を行い、低速アンモニア分子の集束を実演した。また、マイクロ波の増強率を大幅に改善するために、超電導マイクロ波共振器の開発を行い、 $10^5$ 以上の高いQ値の共振器を実現した。

研究成果の概要 (英文)： We have pursued how to control the translational motion of molecules by using a standing wave of microwave enhanced in a resonator. As the first step, before performing deceleration and trap, we have realized a microwave molecular focuser which acts like a lens for light. A slow ammonia beam was used for that experiment. We have also developed superconducting resonators to greatly enhance the microwave field. We have realized a high quality factor of more than  $10^5$  for those resonators.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 物理学 ・ 原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード： 低温分子、マイクロ波、共振器

## 1. 研究開始当初の背景

近年の希薄原子気体を用いた量子縮退の研究に代表されるように、原子のレーザー冷却技術は原子物理学の分野だけにとどまらず幅広い分野に強いインパクトを与え、冷却原子気体の研究は急速な勢いで発展した。もし、原子気体と同様に分子気体が冷却できた場合、分子は多くの内部自由度を有し、極性分子は永久電気双極子モーメントを持つた

め、冷却分子集団には冷却原子以上に豊富な物理現象が期待される。しかしながら、分子には振動・回転の自由度があり閉じた電子遷移が存在しないため、レーザー冷却とは異なる冷却方法を開発しなければならないという難点がある。

冷却分子の生成方法として、レーザー冷却された原子気体から光会合やフェッシュバッハ共鳴を用いて冷却分子を生成する方法

が開発されているが、この方法では非常に限定された種類の分子しか生成できない。これに対し、分子を直接冷却する方法も 1990 年代後半から盛んに研究が行われていた。こうした直接冷却の手法は、未だ 1 mK 程度の温度領域までしか到達できていないが、多原子分子を含む多種多様な分子を冷却できる。後者の方法としては、低温ヘリウムガスとの衝突で分子を冷却して磁気トラップに導入するバッファガス冷却法や、静電場を分子の位置にあわせてスイッチして分子を減速させるシュタルク減速法、静電場を用いて低速分子を選択的に抽出する静電シュタルクガイドなどが挙げられる。

本研究に密接に関連する、マイクロ波を用いて分子を操作する手法は、まず Yale 大学の DeMille らによって分子の捕捉のアイデアが提案され、次に我々によって分子の減速のアイデアが示されていた。これらを受け、Yale 大学や Fritz-Haber-Institute などの著名な研究グループがマイクロ波による分子運動の操作の実現に向け、研究に着手していた。

## 2. 研究の目的

アーンショーの定理により、静電場は真空中に電場の極大点を持つことはできないが、マイクロ波などの電磁波は極大点を持つことができる。このため、マイクロ波を用いることによって、電場が強い所ほどエネルギーが小さくなる状態 (High field seeking (HFS) 状態) にある分子を効率よく減速・捕捉することができる」と期待されている。

本研究の目的は、マイクロ波を用いた分子の並進運動の制御方法を確立し、高い位相空間密度をもつ極低温分子気体をマイクロ波トラップ中に生成することであった。手順としては、まず低温ヘリウムガスとの衝突によって予備冷却した低温分子ビームを用い、静電ガイドを用いてその中のさらに低速の分子を選択して高真空領域に導入する。ガイドの先端にはマイクロ波トラップを用意し、静電ガイドを通過してきた分子がマイクロ波トラップの領域に入ってきた時に、光ポンピングにより分子をトラップ可能な状態に遷移させる。この手順により、マイクロ波トラップに連続的に極低温分子を蓄積させて、高い位相空間密度を持つ極低温分子気体を得る、というものであった。

## 3. 研究の方法

### (1) マイクロ波による減速・捕捉の原理

電気双極子モーメント  $\mu$  を有する極性分子は電場  $E$  と相互作用を行い、古典的には  $U = -\mu \cdot E$  のポテンシャルエネルギーを得る。量子論的には、交流電場の周波数が回転遷移周波数 (典型的にマイクロ波領域) に近い場合、1 次のシュタルクシフトと呼ばれる大きいポテンシャルエネルギーが得られる。これにより、交流電場の周波数が回転遷移周波数より小さい場合、回転基底状態にある分子は電場が強い所へ引きつけられる。強い交流電場を得るためには共振器を用いればよく、空洞共振器に共鳴したマイクロ波を導入し、共振器内で発生した強い定在波と極性分子の相互作用を利用することで、分子の並進運動の操作を行うことができる。共振器内で発生する交流電場  $E$  は、共振器の Q 値  $Q$  と入力パワー  $P$  に対し、 $|E| \propto \sqrt{PQ}$  の関係があり、高い Q 値を持つ共振器の使用が望ましい。本研究では主に円筒型空洞共振器を利用しているが、その共振モードの中で特に重要なのは  $TE_{11}$  モードであり、このモードでは円筒の中心軸上に電場の極大が来るため、共振器内を飛行する分子は中心軸に向かって閉じ込められるようなポテンシャルを感じる。これにより、軸に平行に共振器を通過した分子ビームは、凸レンズを通過した光のように集束される。また、分子が定在波の腹の所に来た瞬間に定在波を発生させ、節の所に来た瞬間に定在波を消すことで、分子はポテンシャルの上り坂だけを感じ続け、減速される。そして最終的に定在波の腹に分子集団を捕捉することができる。このように、マイクロ波定在波を用いて多種多様な分子の並進運動の操作を行うことができる。

### (2) 目的に向けた研究の手順

本研究は目的の実現に向け、低温ヘリウムバッファガス冷却による低温分子ビームの作成、マイクロ波空洞共振器の開発と分子の並進運動制御の実験、静電シュタルクガイドの作成、トラップ用ファブリーペロー型マイクロ波共振器の作成の 4 つについて、並行して研究を進めた。いずれの項目についても一定の進展は得られたが、論文として発表に至ったのは空洞共振器の開発と、並進運動制御の研究であった。次の節では、主にこの 2 点についての成果を示し、それ以外の項目に

ついても現状について簡潔に記す。

#### 4. 研究成果

##### (1) 分子集束の実演

この並進運動制御の第一歩として、ドイツの Fritz-Haber-Institute の G. Meijer 教授らとの共同研究で、分子集束の実験を行った。Meijer 教授は静電場を用いて極性分子を減速するシュタルク減速法を開発した、低温分子研究の第一人者である。そのシュタルク減速器を用いてあらかじめ 20 m/s 程度まで速度を遅くしたアンモニア分子を使い、マイクロ波分子運動制御の原理実証実験を行った。実験装置を図 1 に示す。シュタルク減速器の先には全長 12 cm の銅製の円筒型空洞共振器が取り付けられ、その両端に直径 3 mm の穴があけられている。実験にはアンモニア分子の反転遷移の周波数に近い約 24 GHz のマイクロ波を用いているが、この穴はその波長よりも十分小さいため、共振器の高い Q 値 (約 5000) を保持しつつ、分子を共振器内に通すことができる。共振器内に突き出た針状のアンテナより最大 3 W のマイクロ波が導入され、TE<sub>112</sub> モードの定在波が立てられている。この時の電場の最大値は 1.5 kV/cm、ポテンシャルエネルギーは温度換算で 10 mK 程度になる。この定在波により、アンモニア分子は中心軸の方へと引き寄せられる力を受け、分子ビームは集束される。共振器の出口の先にはイオン化用のパルスレーザーが通っており、分子ビームの集束の効果はイオン計数の増大によって確認される。得られた実験結果はモンテカルロシミュレーションによる理論結果とよい一致を示し、期待通りの集束が行えていることを確認した (図 2)。

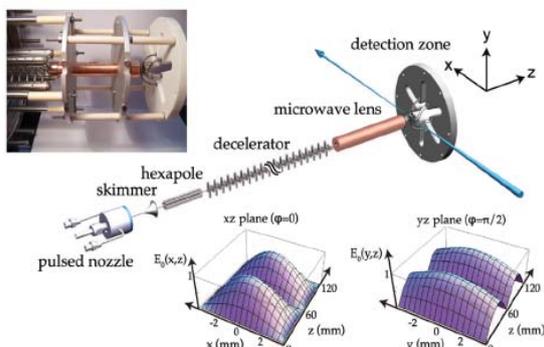


図 1 : 分子集束の実験装置図。左上に実際の写真、右下に共振器内の電場強度分布を示す。

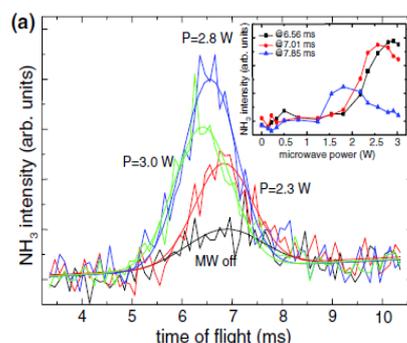


図 2 : 各マイクロ波強度に対するイオン計数の時間変化。右上にマイクロ波強度と信号強度の関係を示す。

##### (2) 超電導共振器の開発

次に、分子の並進運動の操作をより効率的に行うため、超電導マイクロ波共振器の開発を行った。前に示した通り、共振器内の電場の 2 乗は Q 値に比例するが、その Q 値は内壁の電気伝導率で制限される。銅製の共振器では典型的な Q 値の値は  $10^3$ - $10^4$  であるのに対し、超電導共振器では  $10^{10}$  の Q 値が可能である。このため、超電導共振器を用いることで、温度換算で 1 K 程度の深さのポテンシャルを作り出すことも十分可能であると期待される。

こちらの実験はカナダの British Columbia 大学の百瀬孝昌教授と W. Hardy 教授との共同研究として行った。まず全長約 12 cm の銅製の円筒型空洞共振器を作成し、内壁に鉛と錫の合金のメッキを施す。これにより、約 7 K でメッキ部分が超電導転移し、非常に高い Q 値が得られるようになる。このようにして作成した共振器を図 3 の様に液体ヘリウムクライオスタットの下に取り付け、共振器の Q 値を測定する実験を行った。共振器にあけた穴からループアンテナを挿入し、共振器とアンテナのカップリングが最適になるように挿入深さを調整し、マイクロ波の周波数を掃引しながら、共振器からの反射強度を測定した (図 4)。Q 値は共振周波数と共鳴線幅の比から求められるが、メッキを施す前の銅製共振器が室温で 5,000 程度の Q 値であったのに対し、メッキを施して 5 K まで温度を下げた超電導共振器では、約 300,000 の Q 値が得られた。また、分子ビームの集束の目的には、軸対称な電場分布を持つ TE<sub>01</sub> モードが好ましく、このモードに合わせた共振器についても作成して同様の実験を進めている。

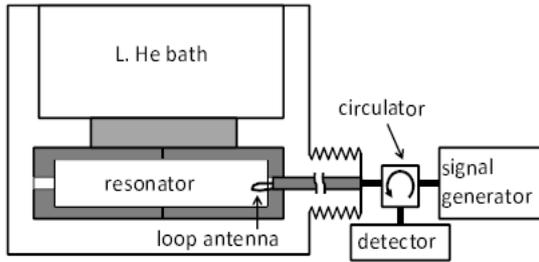


図 3 : 超電導共振器の Q 値測定の実験装置図。

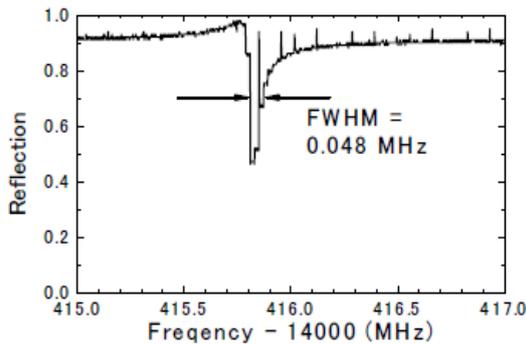


図 4 : 共振器からのマイクロ波の反射率と周波数の関係。

### (3) その他の進展

このマイクロ波を用いた分子の並進運動制御デバイスの開発・実演に加え、並行して分子の予備冷却のためのヘリウムバッファーガス冷却装置の開発を進めている。これは液体ヘリウム温度 (4 K) 程度まで冷えた金属セル中で希薄なヘリウムガスを衝突させて分子気体を冷却し、セルにあけた穴より噴出させてセルと同程度の温度の分子ビームを得るというものである。セル内に分子気体を生成する手段として、固体ターゲットにパルスレーザーを集光して照射し、瞬間的・局所的に気化させるレーザーアブレーションを用いる。現在までの所、ルビジウム原子を用いた実験を行い、原子ビーム生成量の評価を行っている。レーザーの吸収率の測定などの光学的手法により、セルから噴出する原子ビームの量は  $10^{10}$  個/パルス程度であると見積もられている。また、PbO 分子を同様の方法で生成し、406 nm の励起光を用いて光学的に検出する装置の作成を進めている。

また、分子を高真空領域に導入するための静電シュタルクガイドの作成も進めている。これは S 字に曲げられた四重極電極に高電圧をかけ、静電場を用いて電極間の分子を電極

に沿って移動させる装置である。現在、室温のアンモニア分子を用いて分子のガイドを試す実験が進行中である。

また、マイクロ波トラップに用いる共振器として、光学的アクセスの良いファブリー・ペロー型共振器を開発している。試作品として銅板を曲げて作成した共振器を用いて Q 値を評価し、約 5000 程度の Q 値が得られている。

これ以外にも、低温低速分子の応用として、電子の永久電気双極子モーメントの測定という素粒子実験に利用することを計画し、実験装置を立ち上げている最中である。

### 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 2 件)

- ① H. Odashima, S. Merz, K. Enomoto, M. Schnell, and G. Meijer, “Microwave Lens for Polar Molecules” *Physical Review Letters* **104**, 253001 (2010)
- ② K. Enomoto, Y. Moriwaki, W. Hardy, O. Nourbakhsh, P. Djuricauin, and T. Momose, “Control of translational motion of polar molecules by using superconducting microwave resonators” *Proceedings of 4<sup>th</sup> International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2010*, 56-59 (2010)

〔学会発表〕 (計 9 件)

- ① 鍛田雄介、小川俊輔、野口拓、小林かおり、松島房和、森脇喜紀、榎本勝成 「マイクロ波を用いた分子ビームのコリメーション」 第 9 回分子分光研究会 (富山大) 2009 年 5 月 16 日
- ② 野口拓、溝端宏徳、長谷川博史、榎本勝成、小林かおり、松島房和、森脇喜紀 「分子のヘリウムバッファーガス冷却装置の開発」 日本物理学会北陸支部 (金沢大) 2009 年 12 月 5 日
- ③ 溝端宏徳、鈴木伸明、長谷川尚紀、野口拓、祐安伸佳、常本真嗣、森脇喜紀、榎本勝成 「四重極速度セレクターの設計と電場解析」

日本物理学会北陸支部（金沢大）

2009年12月5日

④榎本勝成

「電子のEDMの測定に向けた低速低温分子ビームの開発」

Fundamental Physics Using Atoms 2010

（大阪大）2010年8月9日

⑤小田島仁司、S. Merz、榎本勝成、M. Schnell、G. Meijer

「マイクロ波による極性分子の運動制御」

日本物理学会 2010年度秋季大会

（大阪府立大）2010年9月23日

⑥東川優理奈、鈴木伸明、溝端宏徳、長谷川尚紀、森脇喜紀、松島房和、榎本勝成、小林かおり

「405nm帯のレーザーの開発」

日本物理学会北陸支部（富山大）

2010年11月27日

⑦長谷川博史、野口拓、平崎雄祐、小林かおり、松島房和、森脇喜紀、榎本勝成

「BaFとYbF分子のレーザー冷却の可能性」

日本物理学会北陸支部（富山大）

2010年11月27日

⑧榎本勝成

「マイクロ波を用いた低温極性分子ビームの操作」

量子エレクトロニクス研究会（上智大学 軽井沢セミナーハウス）2010年12月17日

⑨榎本勝成、森脇喜紀、丸山良明、W. Hardy、O. Nourbakhsh、P. Djuricauin、百瀬孝昌

「極性分子気体の並進運動の操作のための超電導マイクロ波共振器の開発」

日本物理学会第66回年次大会（新潟大）

2011年3月

〔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〕

ホームページ等

<http://www.sci.u-toyama.ac.jp/phys/4ken/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

榎本 勝成 (ENOMOTO KATSUNARI)

富山大学・理工学研究部（理学）・准教授

研究者番号：50452090

(2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者

森脇 喜紀 (MORIWAKI YOSHIKI)

富山大学・理工学研究部・教授

研究者番号：90270470

松島 房和 (MATSUSHIMA FUSAKAZU)

富山大学・理工学研究部・教授

研究者番号：40142236

小林 かおり (KOBAYASHI KAORI)

富山大学・理工学研究部・准教授

研究者番号：80397166