

<b>Title</b>	レーザー冷却と分子
<b>Author</b>	井上, 慎
<b>Citation</b>	Fabrica. 31 巻, p.2-11.
<b>Issue Date</b>	2019
<b>ISSN</b>	
<b>Type</b>	Departmental Bulletin Paper
<b>Textversion</b>	Publisher
<b>Publisher</b>	大阪市立大学工作技術センター
<b>Description</b>	

Placed on: Osaka City University Repository

## レーザー冷却と分子

井上 慎 (いのうえ しん)

所属：理学研究科 数物系専攻

専門分野：低温物性（レーザー冷却・気体のボース凝縮）

趣味：子供の質問に答えること



### 1. アインシュタインの考えたこと

自らの研究について、「一般新聞の科学欄程度の平易な文章でわかりやすく解説してください、できたら工作技術センターに関わる技術的側面があれば触れてください」との内容でご依頼をいただきました。文章には自信がありませんが、個人的な歴史も含めながら研究の紹介を試みようと思います。

私の専門分野はレーザーを使った物理の実験です。レーザーを使って原子の気体を冷やします。レーザーで原子を冷やせるところがそもそも不思議ですが、到達できる温度も半端ではありません。摂氏のマイナス 273 度から測った温度を「絶対温度」と呼び、必ず正の値になります。レーザー冷却を使うと、原子を絶対温度でゼロがいくつも並ぶくらい（例えば 0.000 1 度とか）まで冷やせます。冷えた気体を使って「超流動」とか「超伝導」とか「超」のつく不思議な現象を観測するのが我々の研究です。

気体を冷やすと何故「超」のつく不思議な現象が起こるのでしょうか。その裏には、アインシュタインが予言した、ボース・アインシュタイン凝縮、と呼ばれる現象が関係しています [文献 1]。1925 年、インドの物理学者ボース（図 1）の仮説を元に計算を進めたアインシュタインは、「気体を冷やしていくと、ある温度でほとんどの原子が一つの量子状態に入る」と予言しました。「量子状態」というのは耳慣れない言葉ですが、物質が示す微視的な状態のことです。ボース・アインシュタイン凝縮を起こすと多数の原子が全て同じように動くようになり、「超」のつく不思議な現象が次々と起こるはず、というのです。

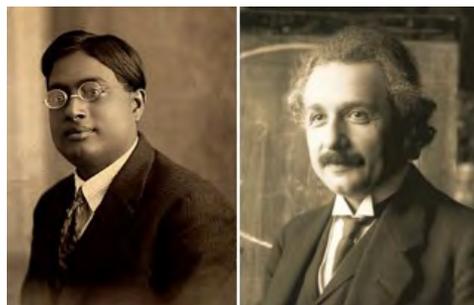


図 1 ボース博士（左）とアインシュタイン博士（右）

ここまで読んで、「そもそも気体を冷やしたら液体や固体になるでしょう?」と思った人は鋭い人です。実際、長い間「たくさんの原子を用意して、絶対零度付近まで冷却すると必ず固体になります。ヘリウムだけが例外で、液体にとどまります」と言われていました。しかし、アインシュタインは、「気体を冷やすと液体や固体になるのは原子間の相互作用のせいであり、物質の本質ではない」と考えました。そして彼は「理想気体」と呼ばれる、「相互作用しない原子からなる気体」の振る舞いを考えました。彼は「相互作用が無視できたと仮定して、気体を冷やしたらどうなるだろう」と考えたのです。(こういうところがアインシュタインの独特なところ)そしてボースの仮説を使いながら計算を進めた結果、彼は全ての原子が同じように運動するという、摩訶不思議な現象「ボース・アインシュタイン凝縮」を導き出しました。

### What is Bose-Einstein condensation (BEC)?

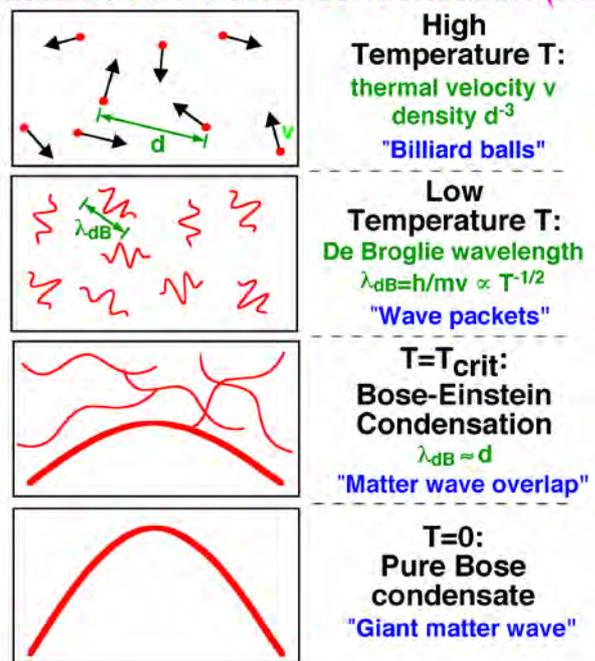


図2 ボース・アインシュタイン凝縮とは何かを説明するのに MIT のケタレー教授（後述）が使用していたスライド。(https://www.rle.mit.edu/cua\_pub/ketterle\_group/Nice\_pics.htm より)

ボース・アインシュタイン凝縮(もしくはボース凝縮)とは何かを、4枚の絵で説明したのが図2です。ボース博士が仮定した性質を持つ粒子(ボース粒子)からなる気体を箱に閉じ込め、冷却し始めたと仮定します。高い温度では、気体中の原子は小さな球が飛んでいるものと解釈して全く問題ありません(一番上の絵)。それぞれの原子は好き勝手な速度で飛行し、たまに他の原子と衝突して飛ぶ向きを変えます。温度が低くなってくるとそれぞれの原子の持つ量子力学的な広がりが無視できなくなります(上から2枚目)。粒子の広がり「ドブロイ波長( $\lambda_{dB}$ )」と呼ばれ、温度の平方根に反比例して大きくなります。ドブロイ波長が大きくなり、原子間の平均距離  $d$  と等しくなると、相転移が起こり、たくさんの粒子が基底状態と呼ばれる一つの波の状態を共有するようになります(上から3枚目)。この状態を「ボース・

アインシュタイン凝縮（ボース凝縮）」と呼びます。さらに冷やすとほとんど全部の粒子がボース・アインシュタイン凝縮体に入ります（4枚目）。ボース・アインシュタイン凝縮体は波の性質を持つので、抵抗を受けることなく動きます。この現象を「ボース凝縮体は超流動を示す」と表現します。

では理想気体を冷やして得られるという、「ボース・アインシュタイン凝縮体」は理想の世界にしかない、現実とは無関係の現象なのでしょうか？ここで「相互作用が無視できる」という条件の解釈が問題になってきます。通常、原子間の相互作用には特徴的な距離があります。もし、気体の密度を非常に薄くして、原子同士が遠く離れるようにしたらどうでしょう？原子間相互作用は事実上、無視できそうに思えます。すなわち、密度の低い気体を用意して、十分冷却すればボース・アインシュタイン凝縮を実現できるかも、と考えられたのです。

密度の低い気体を用意して、冷却すれば良いだけなら、すぐにも実験で確かめられそうな気がします。しかし実際に気体でボース・アインシュタイン凝縮が実現するまで、約70年の月日が必要でした。その主な理由が、ボース・アインシュタイン凝縮を実現する温度の低さにあります。典型的な実験パラメーターを代入すると、絶対温度で0.000 000 1度まで冷却することが必要、などといったことになってしまいます。このような温度は実験で実現不可能、と思うのも無理のないことです。

しかし1980年代に状況が劇的に変わりました。レーザー冷却の登場です。冷凍機を使って徐々にエネルギーを取り除くのではなく、原子の運動状態を直接制御してしまおうというレーザー冷却は多大な成功を収めました。レーザー冷却の成功によってボース・アインシュタイン凝縮への道が大きく開かれたのです。

## 2. レーザー冷却とは

ではここで、レーザー冷却とは何か説明しましょう。光はエネルギーを持つので、普通、光を当てると物の温度は上がります。身の回りの物質にレーザーを当てて、冷えるなどということは起こりません。

しかし、原子はちょっと様相が違います。まず、原子は特定の波長の光しか吸収しない、という特殊な性質があります。その波長は原子によって決まっています。ナトリウムなら黄色の光（波長589nmの光）しか吸収しません。分光器でナトリウムの発光スペクトルを見ると、非常に鋭いスペクトルを示します。

次に、物質は光から力を受けます。この力は微々たるものなので、通常、皆さんが感じとることはできません。しかし原子は軽いので、力を質量で割って加速度にすると、意外に大きな値になります。例えばナトリウム原子に黄色い光を当てると、原子の感じる加速度は重力加速度の10,000倍にもなります。従ってレーザーで原子を「押す」ことは可能ということになります。

ここまで聞くと、すぐにもレーザーを原子に当てれば好きなことができそうな気もしますが、ことはそこまで単純ではありません。原子を加速したいならば、レーザーを当てっぱなしにすれば良さそうですが、冷却するには原子から運動エネルギーを奪わなければなりません。

ん。すなわち、原子を減速する必要があります。しかし減速するには、原子の運動方向を確認し、逆側からレーザーを当てる必要があります。気体中には原子がたくさんいますから、一つ一つ原子の速度を測定し、反対側から光を当てるのはかなりの難事業です。これでは現実的な実現の目処が立ちません。

そこで活躍するのがドップラー効果です。ドップラー効果とは物体の運動方向によって、波の周波数が違って見える現象です。波源に向かって運動すれば、単位時間あたりに受け取る波面の数が増えるので、波の周波数が本来より高く感じられます。反対に波源から遠ざかるように運動すれば、波の周波数は下がって見えます。この違いを利用してレーザー冷却を実現することができます。

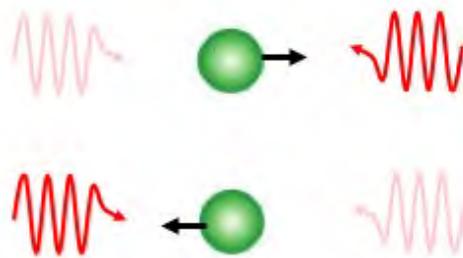


図3 レーザー冷却のために、共鳴より低い周波数の光を両側から照射する。ドップラー効果により、原子は対向するビームからより強い力を受け減速する。

具体的にどのようにするか説明しましょう。原子気体を用意し、左右からレーザー光を当てます(図3)。この時、光の周波数を、原子が最もよく吸収する周波数からわずかに低い周波数にセットしておきます。原子は左右のレーザーから光を吸収し、右からも左からも力を受けます。しかし同じ大きさの力で押されるので力は釣り合っており、原子は止まったままです。

次に、原子が他の原子に衝突されて突き飛ばされ、右側に動き始めたとしましょう。原子には右側からも左側からも光が当たっています。どちらの光からも力を受けますが、今回はちょっと様相が違います。原子は右側に動いているので、右から来る光の周波数は本来より高く感じます。元々、光の周波数は原子が最もよく吸収する周波数より低く設定されていたので、右側からくるレーザーが原子を押す力は強くなります。一方、左から来るレーザーに関しては逆のことが起こります。光の周波数は元々低く設定されていた上に、追いかけてくる光の周波数はさらに低く感じられるので、左からくる光が原子に与える力は極めて弱くなります。その結果、原子は右から来るレーザーに押し寄せ、減速します。

衝突によって、原子が反対向きに、すなわち左に突き飛ばされたとしても全く同じことが起こります。ドップラー効果によって、原子は対向するレーザー光からの力を大きく受け、減速します。結局、原子にとっては「止まっているのが一番！」ということになります。原子が止まる、とはどういうことでしょうか？原子の運動エネルギーがゼロになる、すなわち原子の温度が絶対零度になる、ということに他なりません。レーザーによる原子の絶対零度

への冷却の誕生です。そしてたくさんの原子がほとんど絶対零度まで冷却されれば、ボース・アインシュタイン凝縮も実現されるはずです。

実際のレーザー冷却は図4のようなガラスセルの中で行われます。中央に赤く光って見えるのが、レーザー冷却されたカリウム原子からの発光です。冷却された原子の数は1億個程度。これらの原子はレーザー冷却によって、速度が1秒に30cm (0.3m/s)ぐらいにまで遅くなっています。室温での原子の速度は音速(300m/s)くらいですから、レーザー冷却によって原子の速度は約1/1,000になったと言えます。エネルギーは速度の自乗に比例しますから、温度は室温の約1/1,000,000 すなわち0.0003ケルビンになったと言えるわけです。

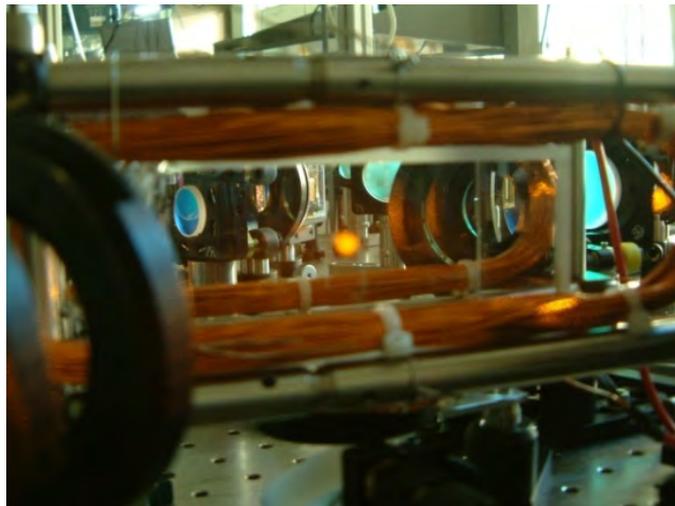


図4 レーザー冷却されたカリウム原子。原子数は約  $10^8$  個、温度は絶対温度で 300 マイクロケルビン程度。セルの高さは約 35mm.

ではこれでボース・アインシュタイン凝縮は得られたのでしょうか？ボース凝縮の転移温度は  $0.0000001$  度、とかだったので、さらに3桁以上冷やす必要があります。この方法の開発をめぐって、1990年代にアメリカの大学を中心に世界で熾烈な競争が行われました。蒸発冷却という、いわば「原子を捨てながら、残った原子をさらに冷やす」という方法をレーザー冷却と上手に組み合わせることで、1995年5月にコロラド大学のグループがルビジウム原子で[文献2]、10月にはMITのグループがナトリウム原子で[文献3]、ボース凝縮体の観測に成功しました。実験を成功させたコロラド大学のエリック・コーネル教授、カール・ワイマン教授、及びMITのケタレー教授はいずれも2001年のノーベル物理学賞を受賞しています。

筆者はMITがボース凝縮を達成した翌年の1996年から2001年まで、MITに留学してケタレー教授のグループで実験をする機会に恵まれました。グループもドイツ人の先生を筆頭にアメリカ人、ユダヤ系アメリカ人、インド人、インド系アメリカ人など国際色豊かなチームで、大変楽しませてもらいました(図5)。徹夜で実験をしては、明け方、雪の中を車でチームメンバーを家まで送って行っていたのは良い思い出です。MITはボース凝縮実現のレースでコロラド大学に僅差で負けてしまったため、仮にボース凝縮がノーベル賞の対象となっても、コロラド大学の2人の先生だけがもらうのか、ケタレー先生も「ほぼ同時」と思っても

らえるのか、微妙でした。我々は「さらに成果を積み上げて、ケタレー先生にもノーベル賞を取ってもらおう！」とチーム一丸となって頑張っていました。この時の仲間とは今でも国際学会で顔を合わせると話に花が咲きます。



図5 当時のMITチーム（1999年ごろ）。右端がケタレー教授。右から2番目が筆者。

### 3. 冷却原子をつなげて分子を作ろう！

さて、私はと言いますと、コロラド大学とカリフォルニア大学バークレー校でポスドクを2回やった後、2005年に東大に職を得て日本に帰ってきました。新しく実験室を立ち上げるに際して、どのような実験をするか悩みました。ノーベル賞を取った指導教官（ケタレー教授）と同じことをやっても負けるのが目に見えています。悩んだ結果、原子ではなく、分子に狙いを定めました。冷却したイオンや原子は実現されているけれど、冷却した分子はそんなに研究されていない。未開拓な分野ほどチャンスがあると信じて飛び込むことにしました。

飛び込むといっても完全に手掛かりがないわけではありません。分子に注目する理由がありました。MITやコロラド大学での実験で、冷却した原子を冷えたまま「つなぐ」ことが可能なのでは？と思わせる実験結果を得ていました[文献4,5]。正確には、冷却原子を原子間距離が遠く離れた、いわば「太陽と地球」とか「地球と月」のような束縛状態にはできそう、という実験結果です。しかし束縛したとはいえそんなにゆるいつながり方では、他の分子がぶつかったら即座に壊れてしまいます。従って使い物になるようにするためには、どうにかしてその「緩く束縛した分子」を共有結合のような、「ガッチリ束縛した分子」に変換する必要があります。しかし当時はその手の理論の専門家に聞いても「大丈夫。できますよ！」という人と、「無理でしょう」という人に分かれて結論が出ない状況でした。

分からないならば実験で明らかにするしかありません。そのためには2種類の原子を冷却し、そうっとなつなげ、さらにそのままそうっ和本物の分子に変換するという大プロジェクトが始まりました。こんな大プロジェクトは一人の力では到底できません。当時の助教さん、ポスドク、大学院生が一丸となって取り組みました。予算も必要です。幸い、大型予算を獲得した理論の先生の協力を得て、スムーズなスタートを切ることができました。

苦節 5 年、とうとう 2010 年に、レーザー冷却したルビジウム(Rb)原子とカリウム(K)原子をもとに、がっちりくっついた冷却 KRb 分子の作成に成功しました[文献 6] (図 6)。全てがわかってみれば作り方は意外と簡単で、レーザー冷却したルビジウム原子とカリウム原子に光のパルス を 3 回照射するだけです。しかしその光の周波数を割り出すためには膨大な分光による解析がありました。この解析は困難を極めました。担当したのは博士課程の学生です。彼の努力は本当に見上げたものです。もちろん使う光の周波数も極限まで安定化しました。私は直接担当していませんが、毎日周波数が 10 桁目まで変わっていないことを確認してから実験を始めていたはずでした。

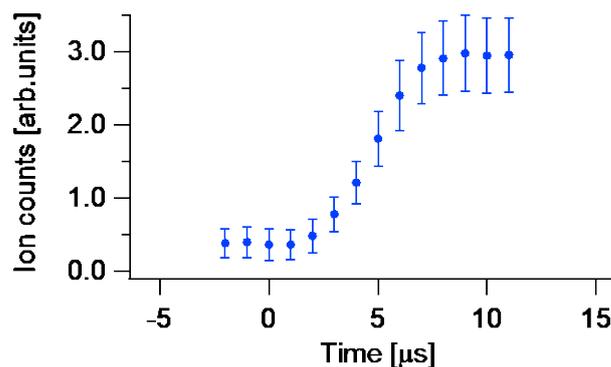


図 6 観測された「ガッチリくっついた」冷却 KRb 分子の信号。イオン化して観測している。

ではこうして得られた極低温の分子はどんな役に立つのでしょうか？実験している我々は原子や分子の気体の性質自体に興味があって毎日研究をしています。しかし、世間に対しては何の役に立つかも明らかにせねばなりません。実は実験を始めた時は壮大な計画があって、できた分子をたくさん並べて、新しい物質を作ろうとしていました。しかし分子の作り方が思ったより難しすぎて、一回の実験で平均 1 個しか冷却分子ができなかったのです。たくさん並べて新しい物質を作る夢は諦めなければなりませんでした。その代わりに注目したのは高精度の分光です。

分子は電子の運動の他に、原子核の振動や回転など多彩な自由度があるので、分光測定を行うと非常に複雑なスペクトルを示します。その際、同じ分子を測定しているなら、昨年測定したスペクトルと今年測定したスペクトルは全く同じであると期待する人がほとんどでしょう。しかし果たして、それは当然でしょうか。宇宙は誕生してからまだ 137 億年しか経っていないし、今も膨張しています。素粒子が自発的対称性の破れで質量を得たのが 137 億年前ならば、その時決まった質量の値が今は全く揺らいでいないはず、と誰が断言できるでしょうか。実際、研究者の中には「物理定数はわずかに揺らいでいるはずで、それはダークエネルギーと関係がある」との仮説を唱える者もいます。理論の真偽は我々にはわかりませんが、物理定数の揺らぎならば高精度の分光で検出できるかもしれません。

我々は物理定数の一つ、電子と陽子の質量比に狙いを定めました。陽子の質量は原子核の質量に直結しますから、電子・陽子質量比が揺らいだら、電子と原子核の質量比も変わり、分子のスペクトルに大きな影響が出るはずでした。我々は KRb 分子のスペクトルを詳細に解析

し、もし電子・陽子質量比が変化した場合、その影響が1万倍に増幅されて現れる遷移を見つけ出しました。そこで冷却 KRb 分子を用意し、その遷移周波数の精密測定を行いました。

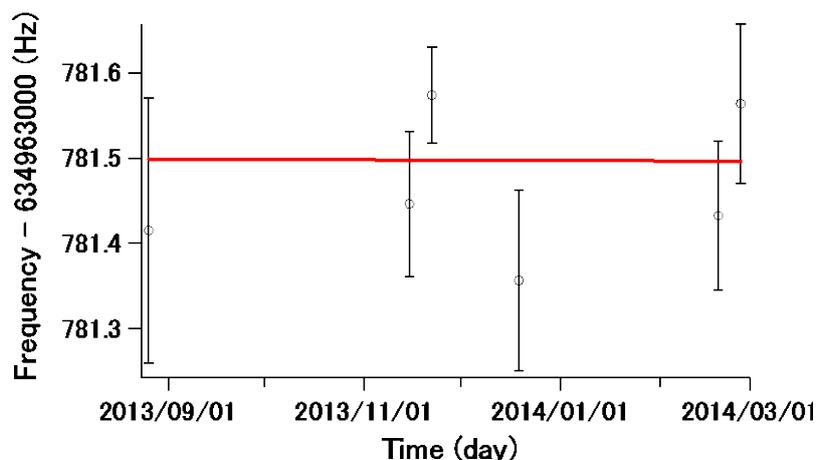


図7 測定した遷移周波数の時間変化。測定精度の範囲内で変化は検出されなかった。

我々は間隔を開けて同じスペクトルを観測し、遷移の周波数に変化がないか調べました。結果は、一年に換算して10桁の精度でスペクトルに変化がない、というものでした[文献7](図7)。先ほどの1万倍の係数を考慮すると、我々の実験結果から、電子陽子質量比は一年にわたって14桁の精度で不変だった、ということが出来ます。この結果は従来の常温の分子を用いた実験結果に比べて精度が5倍改善していました。この結果は昨年 *Nature Communications* 誌に発表されました。

#### 4. これから

これらの実験と工作センターの関わりについて少し述べておきましょう。筆者は2016年に東大から大阪市大に実験室を移転しましたが、その時にいくつか実験装置の改良を試みました。冷却原子や分子の実験において、振動の除去は非常に重要です。東大ではイメージングに使われるカメラの土台の板が狭く、厚さも限られていたのが不満でした。引っ越しを機に設計をしておいて、ずっと分厚い板にすることにしました。作成を工作センターに依頼したところ、気持ちよく作っていただきました。光学定盤の上で使用する前に、研究室総出で板を洗剤で洗ったのは良い思い出です(図8)。今ではその板は無事インストールされ、光学素子で埋め尽くされています。他にもレーザー冷却用の半導体レーザーの細かな部品や、電磁石を冷やす配管部品など、細かな要望にも毎回対応していただき、頭が下がります。

最近、我々は冷却分子から冷却原子の研究に再び軸足を移しています。冷却分子の作成するためにルビジウムのボース凝縮体とカリウムのボース凝縮体の扱いに慣れたので、今度はその2つを混ぜ、その振る舞いを研究しています。冷却原子が3個集まってできる特殊な3体状態の性質を明らかにすることに成功しました[文献8]。また、ボース凝縮体を混ぜたらどのように相分離するか観測するプロジェクトも進めています。2種のボース凝縮体を混ぜている人はあまりいないので、独創的な実験ができるかも、と期待に胸を膨らませているとこ

ろです。実験室見学も可能な限り対応しますので興味持たれた方は是非ご連絡ください。

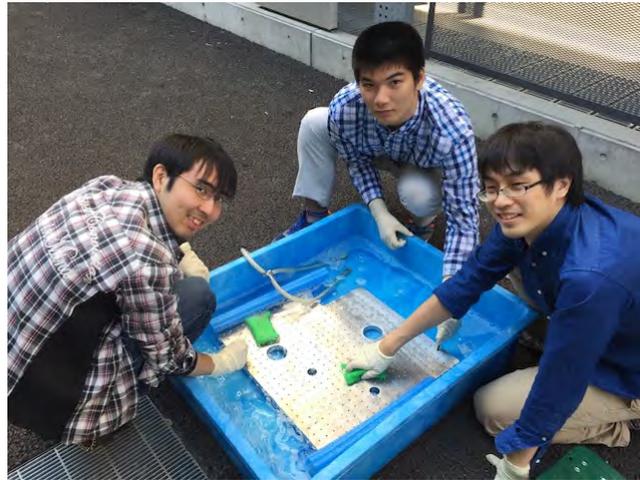


図8 工作センターで作成していただいた特注ブレッドボードの洗浄作業。左から二村さん（大学院生）、長谷さん（大学院生）、加藤さん（特任助教）

最後に本文の途中でも述べましたが、ここに紹介した実験を可能にしてくれた岸本哲夫博士（現電通大准教授）、小林淳博士（現京都大学特定准教授）、相川清隆博士（現東工大准教授）、加藤宏平博士（現大阪市立大学特任助教）、福原武博士（現理化学研究所ユニットリーダー）、赤松大輔博士（現産総研主任研究員）、及び歴代の大学院生、学部生の皆さんに心より感謝申し上げます。また ERATO プロジェクトでご支援いただいた東京大学の上田正仁教授、さらに現在様々な形で支援いただいている本学理学研究科物理学科の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 上田正仁 “レーザー冷却された中性原子気体の Bose-Einstein 凝縮”. 日本物理学会誌 **53**: 663 (1998).
- [2] M.H. Anderson *et al.*, “Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor” *Science* **269**, 198 (1995).
- [3] K.B. Davis, *et al.*, “Bose-Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms” *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3969 (1995).
- [4] S. Inouye, M.R. Andrews, J. Stenger, H.-J. Miesner, D.M. Stamper-Kurn, and W.Ketterle, "Observation of Feshbach resonances in a Bose-Einstein condensate" *Nature* **392**, 151 (1998).
- [5] S. Inouye, J. Goldwin, M.L. Olsen, C. Ticknor, J.L. Bohn, and D.S. Jin, "Observation of heteronuclear Feshbach resonances in a Mixture of Bosons and Fermions" *Phys. Rev. Lett.* **93**, 183201 (2004)
- [6] K. Aikawa, D. Akamatsu, M. Hayashi, K. Oasa, J. Kobayashi, P. Naidon, T. Kishimoto, M. Ueda, and S. Inouye, "Coherent Transfer of Photoassociated Molecules into the Rovibrational Ground State" *Phys. Rev. Lett.* **105**, 203001 (2010).
- [7] J. Kobayashi, A. Ogino and S. Inouye, “Measurement of the variation of electron-to-proton mass ratio using ultracold molecules produced from laser-cooled atoms” *Nature Communications* **10**, 3771 (2019).
- [8] K. Kato, Yujun Wang, J. Kobayashi, P. S. Julienne and S. Inouye, "Isotopic shift of atom-dimer Efimov resonances in K-Rb mixtures: Critical effect of multichannel Feshbach physics" *Phys. Rev. Lett.* **118**, 163401 (2017).