

ファブリカ 第31号

目次

巻 頭 言

- サイエンスを市場へ 1
医学研究科長 大畑 建治 (おおはた けんじ)

研 究 ノ ー ト

- レーザー冷却と分子 2
理学研究科 井上 慎 (いのうえ しん)
- 土木鋼構造物における高力ボルト摩擦接合技術の今後 12
工学研究科 山口 隆司 (やまぐち たかし)

談 話 室

- 技術と人のつながり 29
理学研究科 三枝 栄子 (みえだ えいこ)
- 常温且つ常圧でダイヤモンドと異種材料の直接接合技術 33
工学研究科 梁 剣波 (りょう けんぼ)
- ヒトの心と体を測る – 人工気候室における実験を通して 37
生活科学研究科 岡田 明 (おかだ あきら)

利用者からの報告

- 日本酒酒器セット (徳利・お猪口) 41
文学部 表現・表象文化論演習Ⅱ履修生
- テラヘルツ光渦発生用螺旋型位相板の作製 42
工学研究科 青石 宗一郎 (あおいし そういちろう)
- アルギン酸ビーズ作製用のガラス管 44
工学研究科 下芝 佑弥 (しもしば ゆうや)

バッフル可変型の連続振動バッフル晶析装置	45
工学研究科 柳田 凌人 (やなぎた りょうと)	
<u>技 術 ノ ー ト</u>	
シリコンゴム栓の穴あけ	46
研究支援課 中原 啓晃 (なかはら ひろあき)	
<u>資 料</u>	
工作技術センター利用状況	50
工作技術センターの主な設備	51
機械工作部門機械配置図	56
ガラス工作部門機器配置図	57
報告	58
工作技術センター利用者委員名簿	62
工作技術センター職員名簿	63

巻頭言

サイエンスを市場へ

医学研究科長 大畑 建治 (おおはた けんじ)



所属：医学研究科 脳神経外科学教室

専門分野：頭蓋底外科、脊椎脊髄外科、脳血管外科

趣味：ゴルフ、瞑想

医学研究科長としての4年間も残り3ヶ月になり、おそらくこの寄稿が研究科長としての最後の原稿になるはずです。脳神経外科医として40年間仕事をしていますが、自分自身の経験から様々な特許と医療機器を開発してきました。私の製品は国内のみならず海外でも販売されています。初めて国際特許を獲得し製品化したのは、頭蓋骨固定用のチタン製ミニプレートです。ドイツの耳鼻咽喉科に留学していた時に下顎骨折を固定するチタン製のミニプレートを知り、帰国後に頭蓋骨用に使いました。しかし、頭皮には厚すぎるのが分かり、より薄くしかも頭突にも耐える丈夫なプレートをチタン合金で開発し、デザインも自分で行いました。この話をアメリカのベンチャー企業に売り込み、彼らと共同で1997年に全米特許(Des. 369659等)を申請し、製品化しました。大ヒットしましたが、5年後には大企業に買収され、その大企業は私の製品ではなく、彼らのオリジナルを作成し、私の製品はマーケットから消えることになりました。大企業がM&Aでベンチャー企業の全てを買い取り、新たな事業を展開する典型的にパターンです。もし、私自身で起業していれば私は億万長者になっていたかもしれない、などと酒の肴にすることがあります。科学者にベンチャー企業を作るノウハウを教えてくる組織や支援するシステムはあるに違いありませんが、研究者が労なくこのような担当者と接触できるように、身近にあることが必要です。そうすれば、大阪市立大学のサイエンスはさらに発展するに違いありません。

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、できれば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。

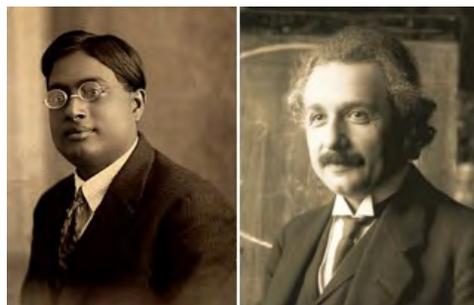


図 1 ボース博士（左）とアインシュタイン博士（右）

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ですよ。）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)?

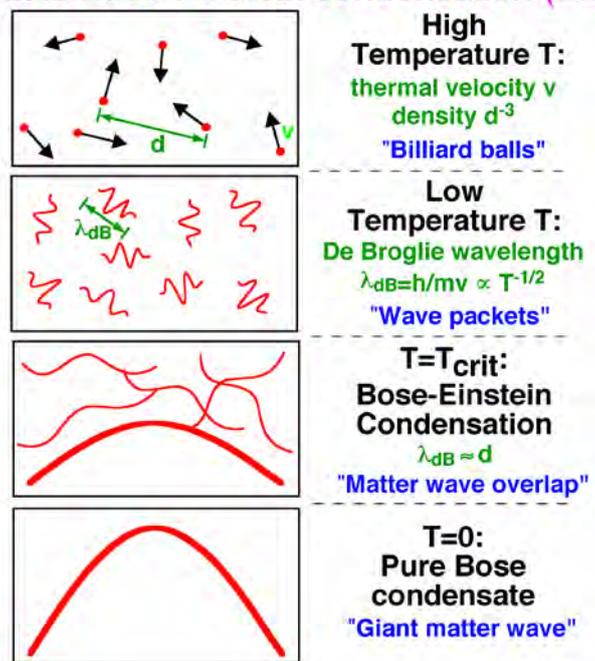


図2 ボース・アインシュタイン凝縮とは何かを説明するのに MIT のケタレー教授（後述）が使用していたスライド。（https://www.rle.mit.edu/cua_pub/ketterle_group/Nice_pics.htm より）

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(λ_{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、冷えるなどという事は起こりません。

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。

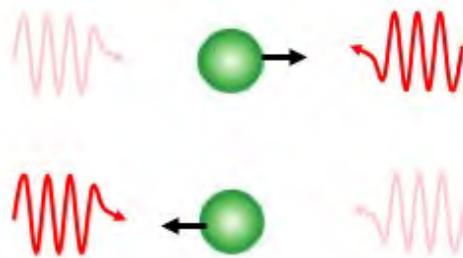


図3 レーザー冷却のために、共鳴より低い周波数の光を両側から照射する。ドップラー効果により、原子は対向するビームからより強い力を受け減速する。

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。

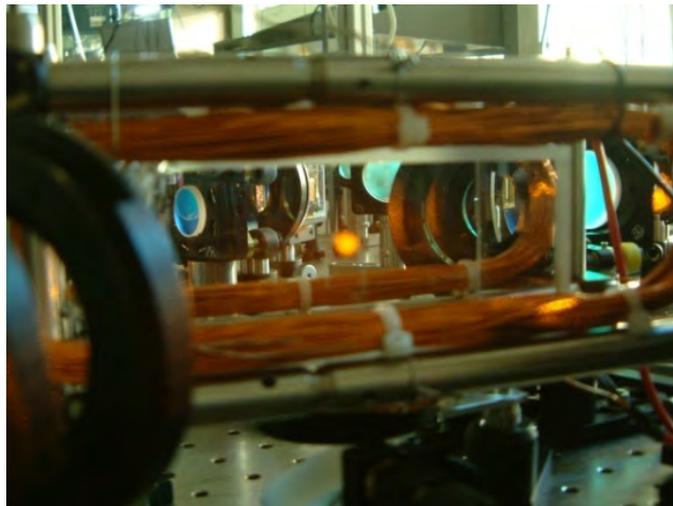


図4 レーザー冷却されたカリウム原子。原子数は約 10^8 個、温度は絶対温度で 300 マイクロケルビン程度。セルの高さは約 35mm.

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だが、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、そうっつつなげ、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す。

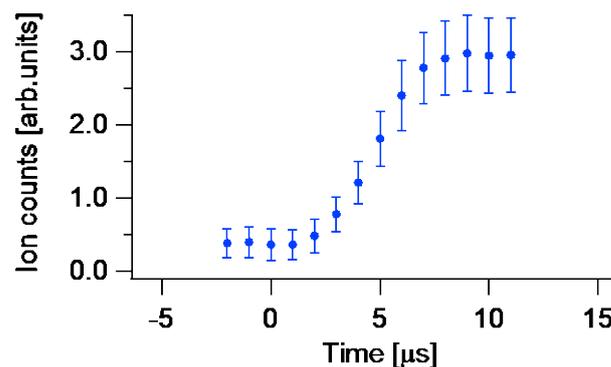


図 6 観測された「ガッチリくっついた」冷却 KRb 分子の信号。イオン化して観測している。

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。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。

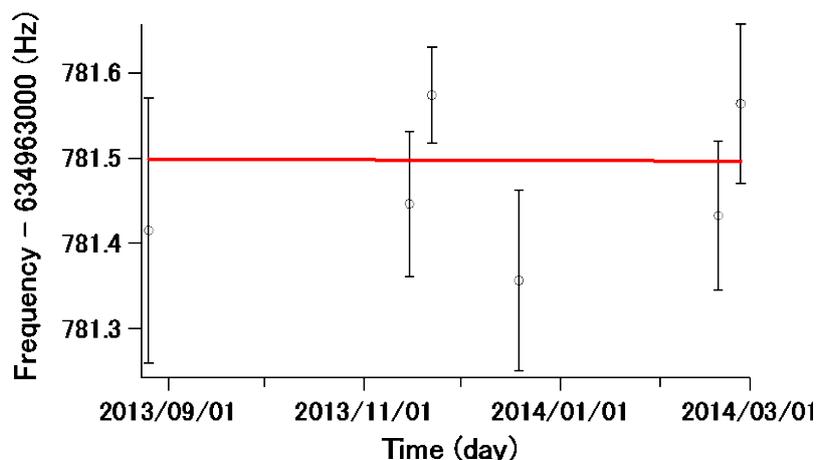


図7 測定した遷移周波数の時間変化。測定精度の範囲内で変化は検出されなかった。

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、気持ちよく作ってくださいました。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。

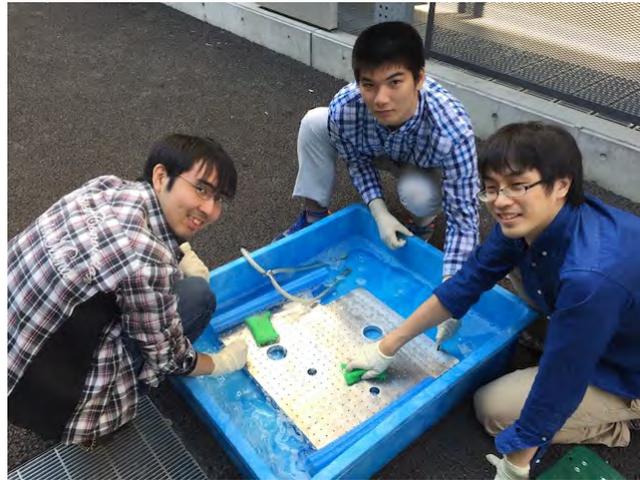


図8 工作センターで作成していただいた特注ブレッドボードの洗浄作業。左から二村さん（大学院生）、長谷さん（大学院生）、加藤さん（特任助教）

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).

土木鋼構造物における高力ボルト摩擦

接合技術の今後

山口 隆司 (やまぐち たかし)



所属：工学研究科 都市系専攻

専門分野：橋梁工学・鋼構造学

趣味：乗り物をみること

1. はじめに

皆さんがよく目にする橋ですが、橋は専門用語では橋梁と呼ばれ、主に鋼材で作られる鋼橋と鉄筋コンクリートで作られるコンクリート橋に分類されます。また、橋は、建築分野ではなく、土木工学分野に分類され、土木工学の専門家が扱っています。私の専門は、主として鋼橋を対象とした橋梁工学ですが、その中でも、高力ボルトなどに代表される機械式部材接合技術です。鋼橋は、工場内でいくつかのブロックに分けて製作され、それを架橋位置に運び、それらを現場で接合します。その現場において部材を接合する技術として、高力ボルト接合があります。現場において部材を接合する技術には、その他、溶接があります。溶接は鋼材の化学変化を利用しており、化学式接合に分類されます。高力ボルト接合は、その荷重伝達メカニズムの違いから、高力ボルト摩擦接合、高力ボルト支圧接合、そして高力ボルト引張接合に分類されます。これら高力ボルト接合の中では、施工性もよく、荷重伝達メカニズムが明解な高力ボルト摩擦接合が最も一般的であり、現場接合の大半を占めます。

本稿では、この高力ボルト摩擦接合について、その概要と現状の技術を紹介した後、私たちの研究グループで開発した新しい高力ボルト摩擦接合技術を紹介します。この新接合技術の開発にあたっては、工作センターの皆様にもご支援いただきました。そして、最後に、この技術の今後の展開について述べたいと思います。

2. 高力ボルト摩擦接合

鋼橋における高力ボルト摩擦接合の例を図1に示します。図1(a)が鋼橋における現場接合部であり、部材（母板）と部材（母板）を連結板という添板と高力ボルトを使って接合しています。図1(b)が高力ボルト摩擦接合の模式図です。高力ボルト摩擦接合における荷重伝達メカニズムですが、図の両側に引張力が作用した場合、引張力は高力ボルトを締付けることによって母板に生じた材間圧縮力によって生じた摩擦力を介し、母板から連結板に伝達されます。この材間圧縮力によって摩擦力が生じるという点が高力ボルト摩擦接合の荷重伝達に

おける重要な点です。すなわち、材間圧縮力が高いほど摩擦力は大きくなります。大きな力で連結板と母板をしっかりと密着させればさせるほど大きな作用力に耐えることができます。そのため、高力ボルト摩擦接合では、大きな力で締め付けることのできる高力ボルトを用いています。高力ボルトの例を図2に示します。左右で締め付け機構が異なりますが、いずれも同じ性能を有しています。鋼橋では、呼び径と呼ばれる軸平行部径が22mmのもの一般に使います。高力ボルトの強度は1,000MPaが多く使われます。一般的に使用されているボルトは普通ボルトと呼ばれ、その強度は多くが400MPaです。高力ボルトに高い軸力が入られることは材間圧縮力が大きくなることを意味しますが、ボルトの締め付けにあたっては、軸力を直接測ることは難しいことから、回転トルクを計り、それによって締め付けを制御します。この回転トルクによって締め付けを制御できる点も高力ボルト摩擦接合の利点であり、締め付け管理が容易とされています。このように、鋼部材の現場接合方法として、経済性、信頼性の観点から高力ボルト摩擦接合が広く利用されています。

しかし、図3に示すように高力ボルト接合部はボルトヘッドやナットが部材から突出し、さらにはそのねじ部において形状が凹凸形状であり、防食のために施される塗装の塗膜厚が一般部より薄くなりがちです。したがって、雨水滞留などによる塗膜の劣化など防食機能の低下が生じやすくなります。実際、鋼橋を見ると部材そのもの部位ではなく、部材と部材が連結されている連結部において、図4のような腐食が生じていることが多くあります。このように、高力ボルト摩擦接合は現場接合技術としては、経済性・信頼性に優れるのですが、その耐久性の確保には課題がありました。

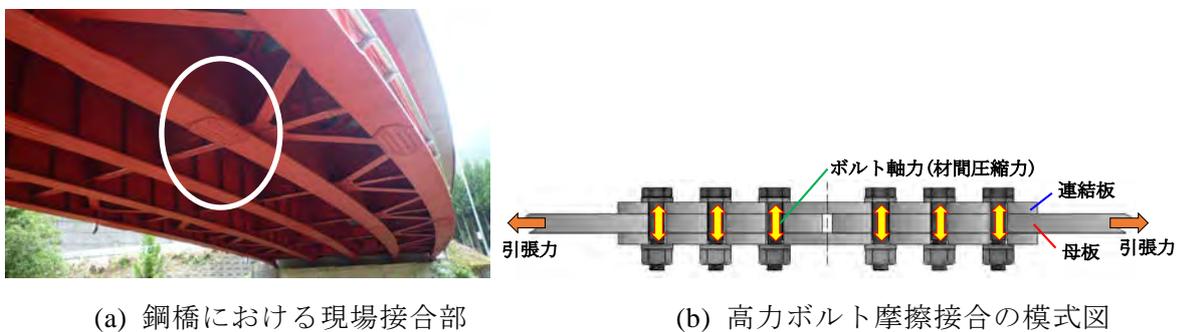
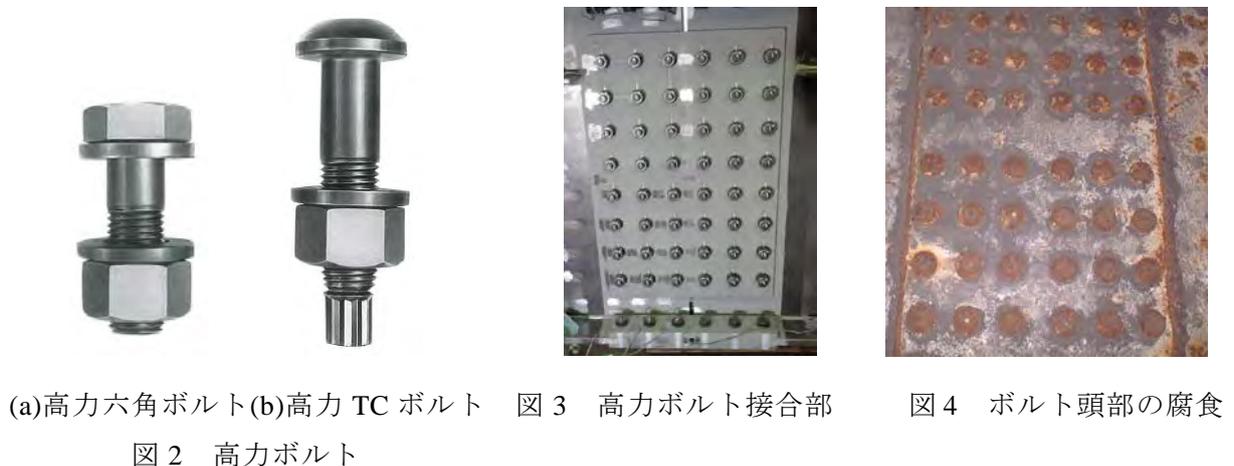


図1 鋼橋における高力ボルト摩擦接合



(a)高力六角ボルト(b)高力 TC ボルト

図3 高力ボルト接合部

図4 ボルト頭部の腐食

図2 高力ボルト

3. 皿型高力ボルトの開発

3. 1 背景および開発した皿型高力ボルト

高力ボルト摩擦接合には、先に述べた課題の他に、図5に示すように適用場所によっては、その突出が維持管理上、問題となる場合があります。これは、この上に舗装を敷設して、そこを車両が通行する部位で、ここを鋼床版デッキプレートの現場接合部と呼んでいます。そこに高力ボルト接合を用いる場合、連結板の厚みに加えボルトヘッドが突出することからアスファルト舗装厚が減少し、この部分の舗装の劣化が生じやすいこと、さらには、アスファルト舗装を打ち換える際にあやまってボルトの頭部を壊してしまわないよう、特別な配慮が必要となり、施工性の低下につながっていました。

そこで、これらの課題を解決するため、私たちの研究グループではボルト頭部の形状が平滑な「皿型ボルト」を適用した高力ボルト摩擦接合を考えました。開発した皿型ボルトを図6に示します。皿型ボルトを用いることで、ボルト頭部が接合部から突出せず、図7のように、塗装面は平坦となり十分な塗膜厚が確保されます。そのため、塗装による防食上の弱点部がなくなり、防食の耐久性や舗装の耐久性能の向上が期待されます。さらに、接合部表面の凹凸感が排除され、表面がフラットとなり、一般部との連続性を損なわず、景観性も向上します。

皿型高力ボルト摩擦接合を実現するためには、高力ボルトを代用できる皿型高力ボルトを開発する必要があります。皿型の開き角度の適切な設定と皿型高力ボルト摩擦接合継手を対象とした設計法の確立が鍵となりました。皿型の開き角度は、ボルト自身の塑性化が抑えられ、長期にボルトの軸力を一定に維持可能できるかという観点から90度に設定するとともにその首下部のR形状も決めました。結果的に、支圧接合用高力ボルトの開き角度である70度より大きくなっています。

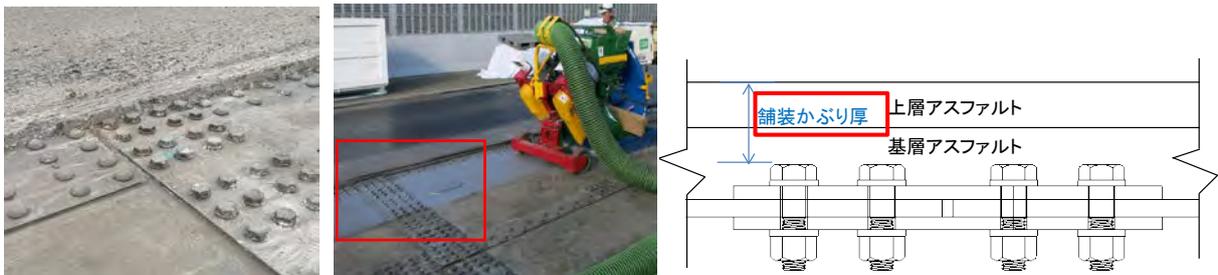


図5 鋼床版デッキプレート接合部の高力六角ボルト



図6 皿型高力ボルト

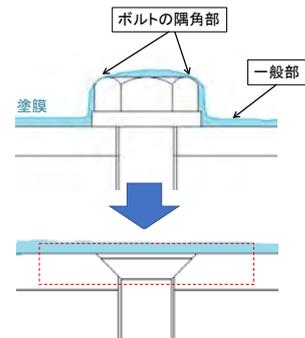


図7 ボルトの塗装状況

3. 2 すべり挙動とすべり耐力

高力ボルト摩擦接合では、高力ボルトによって締付けられた母板と連結板の間に生じる材間圧縮力による摩擦力に引張力が到達するまで、両者の間にすべりは見られません。しかし、それを超えると両者の間にずれが生じるようになり、この現象をすべりと呼び、そのときの作用力の大きさをすべり耐力と呼んでいます。したがって、皿型高力ボルト摩擦接合においてもそのすべり耐力を求めることは重要で、基準となる高力ボルト摩擦接合のそれよりもどの程度高いのか、もしくは低いのかという点についてしっかりと検討し、具体的に提示する必要があります。

皿型高力ボルトを用いる場合、通常の高力ボルトを用いる場合と比較してすべり耐力は約10%低下することがわかりました¹⁾。これは通常の高力ボルトに比べ、引張力作用下において、皿型高力ボルトの形状からボルトの落ち込みが発生しやすいこと、さらには、図8に示すように、ボルト締付け時に連結板ぎぐり部においても高い応力が発生し、引張力作用下において局所的な降伏が早期に発生することなどから、ボルト軸力の低下が大きくなり、その結果、材間圧縮力が減少し、すべり耐力も低下します。

有限要素解析によって得られた、ボルト軸力導入時、引張力作用時（すべり時 P_s 含む）の Mises 応力コンターを図9に示します。応力コンターにおける灰色部分が降伏応力を超えていることを示しており、ボルト軸力導入完了時に着目すると、ボルト首下に該当する連結板のぎぐり部周辺で降伏していることがわかります。また、同図(b)では引張力 ($P_s/2$ 時) により、載荷側 (図中左側) の Mises 応力が低下しています。同図(c)のすべり発生時では載荷側の塑性域が増加しています。このようにすべりが発生することで、載荷側の連結板が母板と皿頭によって押さえられ連結板の局部降伏が進展します。

以上のように、皿型高力ボルト摩擦接合では、連結板ぎぐり部の応力状態がそのすべり挙動に与える影響は大きく、適用できる連結板の最低板厚を設定し、すべり耐力の過度な低下をもたらさないよう、適用できる最低の連結板厚を12mmとしました。

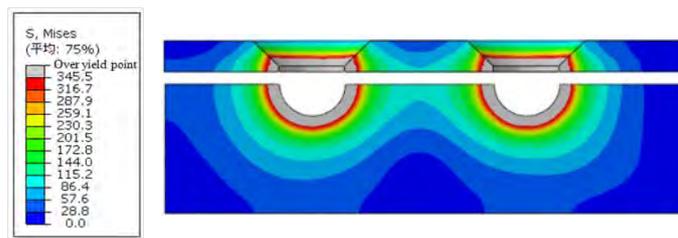
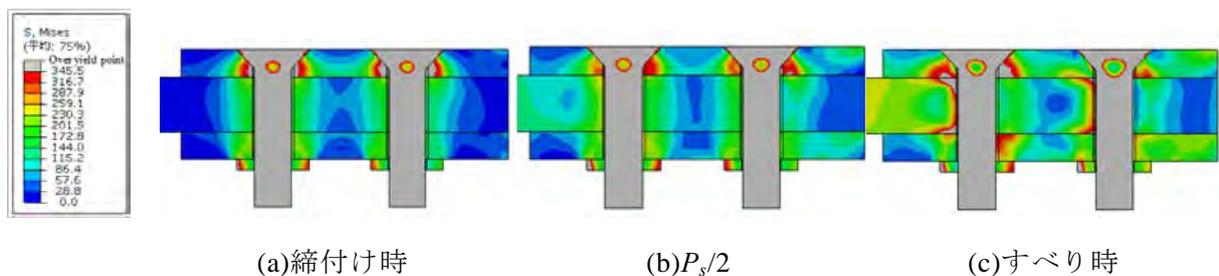


図8 連結板ぎぐり部の Mises 応力コンター (変形倍率 1 倍)



(a)締付け時 (b) $P_s/2$ (c)すべり時

図9 継手全体の Mises 応力コンター (変形倍率 1 倍)

3. 3 連結板ざぐり部深さの影響

連結板ざぐり部は図 10 に示すように、刃先角度 90° のドリルを使って製作されます。この時、ざぐり部の切削深さによって皿型ボルトの頭部は連結板表面から突出したり、落ち込んだりする可能性があります。そのため、実際のすべり挙動に大きく影響を与えない切削深さの許容範囲を明確にする必要があります。

そこで、私たちの研究グループでは、連結板ざぐり部の切削深さ h_c をパラメータとして、有限要素解析を行い、切削深さがすべり挙動に与える影響を調べました²⁾。その結果を図 8 に示します。図より、ざぐり部の切削深さが大きくなるにつれて、すべり係数は小さくなり、切削深さ $h_c=7.75$ の場合のすべり係数に対する、 $h_c=11.75$ の場合のすべり係数の低下率は約 9%となっています。なお、すべり係数とは、皿型高力ボルト摩擦接合継手に引張力を作用させ、すべりが発生した時の作用力の大きさ（すべり荷重）を皿型高力ボルトで接合面に導入された材間圧縮力の合力で除したものです。このとき、材間圧縮力とボルトの締付け軸力は等価となります。すべり係数は、厳密には違いますが、物理学における摩擦係数を表しています。

このようにすべり係数にピーク値が見られるのは、ざぐり部の切削深さが大きくなるにつれてざぐり部の降伏範囲が大きくなり、ボルトの落ち込みが大きくなるためと考えられます。一方、逆にざぐり部の切削深さが小さくなるにつれ、すべり耐力は向上しますが、連結板表面からボルト頭部が突出し、防食性の耐久性の低下が懸念されます。そのため、これらを勘案し、連結板のざぐり深さの許容範囲として、7.75mm から 9.75mm の範囲としました。

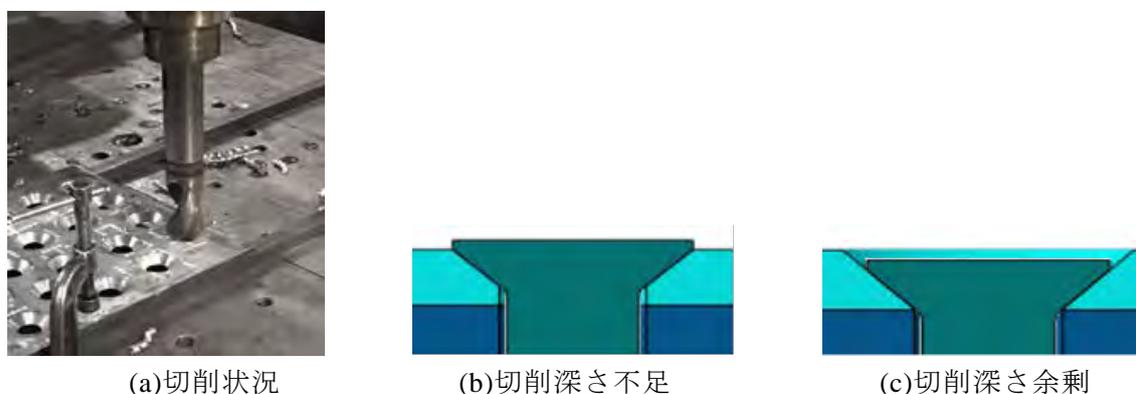


図 10 ざぐり部の製作方法と製作誤差

3. 4 すべり耐力の向上を可能とする皿型ボルトの形状改良

これまでの一連の検討では、皿型ボルトの開き角度とざぐり部の開き角度を同じとしていました。ざぐり部の開き角度を大きくすると連結板の純断面積の減少につながることから、ざぐり部の開き角度は大きすぎても問題です。一方、連結板ざぐり部の角度を一定とし、皿型ボルト頭部開き角度を変化させる場合、ボルト頭部とざぐり部の間にクリアランスが生じ、ボルト頭部とざぐり部の接触状況が変化します。この時、皿型高力ボルトの頭部とざぐり部の接触部が上方に移動します。そのため、ざぐり部の塑性変形が緩和され、すべり強度が向上すると考えられました。ただし、皿型ボルトの頭部開き角度を変化させることで、連結板表面からのボルト頭部の浮きや落ち込みが発生し、塗膜の劣化および舗装耐久性の低下も懸念されます。そこで、私たちの研究グループでは、連結板ざぐり部の開き角度を 90° と一定にし、皿型ボルトの頭部開き角度を 90° から 95° まで変化させたすべり試験およびその FEM 解析を行いました。その結果、皿型ボルトの頭部開き角度が大きくなるにつれて軸力低下が抑えられ、すべり係数が向上することを定量的に示すことができました。

ここで、すべり試験について説明します。すべり試験は、図 11 に示すような標準試験体（片側 1 行 2 列の高力ボルトで高力ボルト摩擦接合とする）をアムスラー型万能試験機で引張ります。試験では、載荷荷重、母板と連結板の相対変位、ボルト軸力を計測し、これらの計測データをもとに、すべり荷重を決定します。すべり荷重をボルト軸力で除すことにより、いわゆる摩擦係数、すべり係数を求めます。

ボルト軸力の測定ですが、ボルト軸並行部に図 12 に示すようにひずみゲージをはり、そのひずみ出力を軸力に換算して測定しています。軸並行部に貼り付けてひずみゲージのリード線を外に出す必要がありますが、ボルト頭部に 2mm ϕ の孔をドリルにて削孔しています。この孔は、なるべく小さな孔である方が頭部に与える断面欠損の影響が小さくなります。特に通常のボルトヘッドと異なる皿型高力ボルトの場合、その影響は顕著となります。私たちは、この削孔を工作センター様に依頼しており、そもそも 2mm の孔であること、高精度であることに対し、同じ分野の研究者、技術者からうらやましがられています。工作センター様の技術によって、私たちの研究が成り立っているといっても過言ではありません。

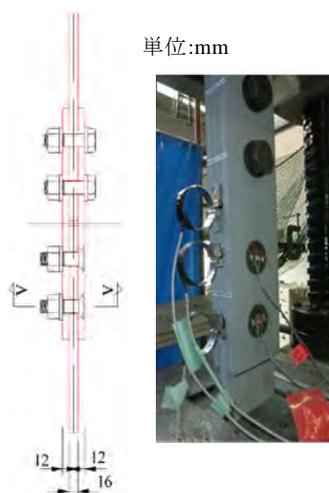


図 11 すべり試験体



図 12 皿ボルトの孔あけ状況とひずみゲージ張付け位置

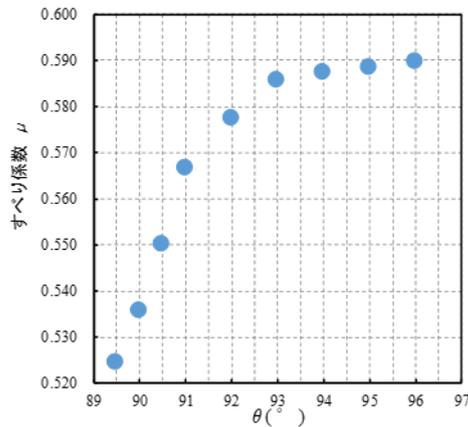


図 13 すべり係数と頭部開き角度の関係

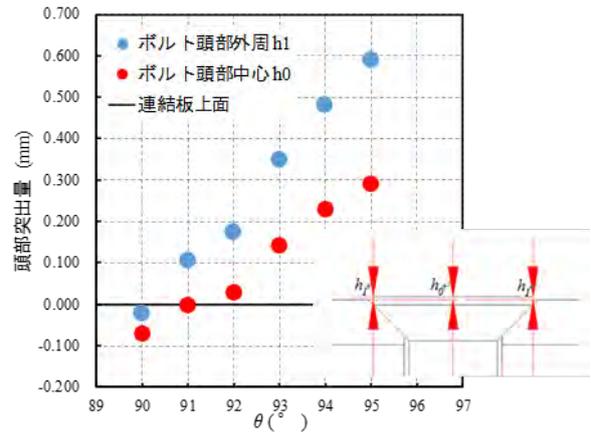
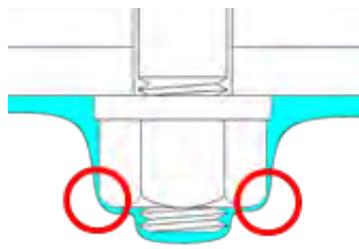


図 14 締付後の頭部突出量と開き角度の関係



(a) 塗膜厚の問題点



(b) 新形状ナットの提案

図 15 ナットの塗膜厚の改善

図 13 に連結板ざぐり部の開き角度を 90° と一定とし、皿型ボルトの頭部開き角度によるすべり係数の変化を示します。図より、頭部開き角度が 90° から 89.5° ですべり係数は約 2% 低下し、頭部開き角度が 90° 未満となる場合、すべり係数の低下が顕著となっています。また、頭部開き角度が 90° より大きい場合、すべり係数の増加率は 90° から 93° で 9.4%、 93° から 96° で 0.7% となり、角度が 93° になるまでのすべり係数の増加率が大きく、 93° 以降では増加率は小さくなっています。これは頭部開き角度が 93° より大きくなると、締付け時にボルト頭部の塑性変形が発生し、皿型ボルト頭部の落ち込みが大きくなるためです。

一方、皿型ボルト頭部開き角度が大きくなるにつれてボルト頭部が突出します。頭部開き角度と頭部突出量の関係を図 14 に示します。頭部開き角度が 93° の場合の突出量は、頭部外縁で 0.35mm 程度であり、塗膜厚と比較しても小さく、この角度とした場合でも塗膜厚の確保に与える影響は少ないと考えられます。

3. 5 皿型高力ボルトの今後の展開

皿型ボルト摩擦接合継手の鋼橋への適用に対し、私たちの研究グループでは、様々な検討を行い、鋼床版のデッキ継手など比較的板厚の薄い継手部に適用可能であるとの結論を導きました。今後は、一般的な高力ボルト摩擦接合継手の断面構成にも対応できるように、締め付け部材厚の大きな継手での性能検証、およびナット部の形状改良が必要であると考えています。

さらに、皿型高力ボルト採用の一番のメリットは腐食耐久性の向上ですが、頭部は連結板に埋め込まれ、平滑になることから、その目的は達せられていますが、図 15(a)に示すようにナット側は従来形状と同じであり、ナット側での問題改善には至っておらず、その形状改良が必要です。例えば、私たちの研究グループでは、従来形状ナットの角部を落とすことによるナットの応力状態の変化を有限要素解析により求めました。締付け時にナット部が破壊せず、かつ腐食耐久性を向上させる、図 15(b)に示すナットの新形状を提案しています³⁾。さらに、新形状ナットの力学性能と耐久性能を確認するためのボルト自体に対する試験、および継手すべり試験を行い、その形状が十分適用可能であることも示しました。

今後は、これまでの薄板への適用にとどまっていた段階から、より一般的な厚板への適用を検討する必要があります。ただし、皿型高力ボルト摩擦接合では、母板厚が厚くなればなるほど、弱点部である皿型ざぐり加工部の降伏が抑制されるので、その適用は十分可能と考えています。

4. 高力ボルト摩擦接合技術の今後の展開

本稿では、高力ボルト摩擦接合技術の今後の展開について、皿型ボルト摩擦接合の技術開発を例に紹介しました。読者諸氏が、鋼橋における技術開発の事例の一端を理解し、今後の展開について知っていただければ幸いです。

今後、我が国における、建設 50 年以上を超える鋼構造物の割合はいずれ 4 分 3 以上となることを考えると、既設鋼構造物の経年に伴う腐食や疲労亀裂に対する補修や補強、さらには、これらを解決するための抜本的な更新や改築も重要な技術課題となっています。特に、私が研究の対象としている鋼構造接合部は、そもそも構造が複雑であることや接合部における破壊は構造物の崩壊につながることから保守的に設計されてきました。しかし、その保守的な設計故、技術開発や研究の余地は多く残されていると言えます。

したがって、今後は、高力ボルトなどの締結材そのものの開発はもちろん、接合部の設計技術の合理化、高度化、施工技術、品質管理技術の向上、そして、健全度診断技術や長寿命化技術の開発などが求められ、その内容は非常に多岐にわたっています。これらの技術が開発され、確立されれば、高力ボルト接合部の小型化、高耐久化が可能となり、より多様な要求性能に柔軟に対応でき、鋼橋の工期短縮、品質向上、耐久性の向上に貢献すると考えられ、今後の展開が期待されるどころです。

[参考文献]

- [1]田畑晶子, 金治英貞, 黒野佳秀, 山口隆司: 皿型ボルトを用いた摩擦接合の継手特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.808-819, 2013.
- [2]郎宇, 山口隆司, 青木康素: 皿型ボルト摩擦接合継手のすべり挙動に影響する構造因子, 土木学会, 第 73 回年次学術講演会, I-188, 2018.8.
- [3]郎宇, 森山仁志, 山口隆司, 杉山裕樹: 腐食耐久性を向上した新形状高力ナットの開発に関する基礎的研究, 土木学会第 72 回学術講演会, I-622, pp.1243-1244, 2017.

技術と人のつながり

三枝 栄子 (みえだ えいこ)

所属：理学研究科 物質分子系専攻

専門分野：分子認識化学、有機元素化学、材料科学

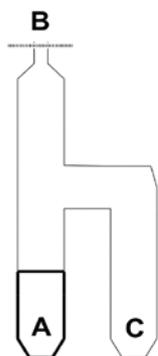
趣味：旅行



私は2018年10月に本学理学研究科講師として着任いたしました。早速、本稿執筆の機会をいただきましたので、自己紹介を兼ねて、これまでの経験で工作技術センターや分析センターの方々にお世話になったことについて紹介したいと思います。

私はこれまで、企業や研究機関などいくつかの組織に所属し、化学研究に携わってきました。主な研究対象として、有機機能材料、有機-無機ハイブリッド材料、半導体材料などを取り扱ってきました。学生時代は有機合成化学の研究室に所属し、特に、リンやケイ素、さらにはゲルマニウム、スズといった、周期表の下に位置する高周期典型元素の新規な結合様式をもつ化合物をターゲットとした研究を進めてきました。これらは、空気中の酸素や水に対して非常に反応性が高く、一般的に実験室の実験台で合成・単離することは困難な物質です。そのような物質を取り扱うためには、不活性ガスで置換された箱型装置である、グローブボックスを使用します。私が所属するグループでも、大型グローブボックス3台が常時フル稼働していました。しかし、化合物同定のため、機器測定や物性評価を行うためには、グローブボックスから持ち出すためにガラス管などに封じることが必要でした。このような実験の性質上、ガラス工作はほぼ必須で習得しなければなりません。たとえば、NMR測定には、直径5 mmのNMRチューブに入れた溶液サンプルを脱気封管します。まず、NMRチューブにスリをジョイントし、コックを付けられるように加工しておきます。グローブボックス中でサンプルを入れ、溶媒を液体窒素で凍結、ポンプで脱気し、凍った状態で焼き切ります。(ここでピンホールができると、空気が濃縮されて大変危険!)現在は技術が進歩し、J.Young のテフロン製グリスレスコックが付いたチューブや、スクリュキャップが付いたものが購入できるようになり、非常に安全で簡単になりました。脱水溶媒の準備も、今はカラムを通して脱水できる装置が市販されていますが、当時は、金属カリウムをフラスコ内壁にミラー蒸着させ、蒸留した溶媒を作用させて「超脱水溶媒」を作製していました。この作業で溶媒をトランスファー(たとえば、溶媒が入ったフラスコAと空のフラスコBをコック付きブリッジでつないでおき、真空下で温度差を利用して溶媒をAからBに移す方法)で移す容器の作製や、100 mLほどの溶媒を凍結脱気封管する技術など、研究室で伝統的に受け継がれてきた手法を先輩方から教わったことは、今となっては貴重な経験であったと思います。

構造解析において力強いツールのひとつである単結晶 X 線構造解析ですが、不安定化学種を扱う上では結晶成長から測定に至るまで不活性雰囲気下で行うことが必要であり、空気に触れないよう単結晶を育成するために、図 1 のような h 字管を用いていました。真空下で封じ切っているため溶媒量や温度をコントロールすることが容易であり、安定な化合物に対しても有用な方法であると思います。

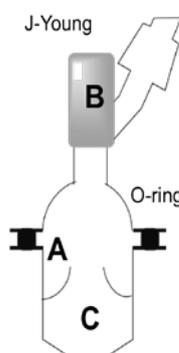


<使い方>

- B 部分には、ガラススリや J-Young コックなどサンプル導入できる部品を付けておく
- A にサンプルの飽和溶液を入れる
- B 部分のコックを閉じ、A 部分を凍結脱気し脱気しながら B を焼き切る（脱気封管）
- 封管を冷凍庫などで冷やす
気液平衡で溶媒のみ C へ移るので、A が濃縮され結晶析出
- A の液体部分をデカンテーションで C に移し、A 部分を割って結晶を取り出す

図 1 単結晶育成グッズ h 字管

また、不活性ガスまたは真空下での作業をどうすればより簡便に、安全に実験を進めることができるか研究室スタッフとあれこれ考え、基本操作の習得と技術向上を目指し、実際にガラス加工の工場に出向いて基本的な加工操作を教えていただいたこともありました。そんな中、同じように不安定化学種を扱う研究室とのつながりから、名古屋大学のガラス工作室に所属する野田敏昭さん、夏目秀子さんに出会う機会がありました。我々が日常困っている操作に対して様々なアイデアを形にいただき、学生ながら非常に驚き感動したことを覚えています。他大学からの相談にも関わらず、容赦ない真剣なディスカッションを交わしてください、私が在籍している間にもたくさんの特製ガラス器具を作製していただきました。ここで、特によく使用していた、市販品は存在しないであろう技術の結晶をいくつか紹介したいと思います。



<使い方>

- A の棚にサンプル粉末を入れる
- B 部分から、シリンジを用いて C の底に溶媒を入れる
- C を凍らせて、B 部分より脱気。減圧のまま Young コックを閉じる。C 部分の溶媒を融かす
- C 部分を温め、還流させる。壁をつたって A 部分を浸しながら、微量の粉末を溶かし、超希薄溶液が棚からこぼれて C 底部に落ちる。C 底部はすぐ飽和になり単結晶が成長。

図 2 単結晶育成グッズ 溶けにくい化合物の結晶作製用



高価な試薬や貴重なサンプルなど、少量の液体を脱水・精製したいときに重宝します。

<使い方>

- ・ チューリップ型の受けに氷水を入れ、中の管を冷却する
- ・ 下のスリに液体を入れたナスフラスコをつけて加熱還流すると、1~2mL 程度が三角形のフラスコの底に付いている“くぼみ”にたまる

上のスリにバルーンを付ければ不活性ガス雰囲気
置換でき、真空ポンプをつなげれば減圧蒸留もできる

図 3 ミクロ蒸留装置



フランジの部分で2つのパーツに分かれます。
試薬精製も反応物精製にも使えます。

<使い方>

- ・ チューリップ型の受けに氷水を入れ、中の管を冷却する
 - ・ 下のスリに液体を入れたナスフラスコをつけて加熱還流すると、1~2mL 程度が三角形のフラスコの底に付いている“くぼみ”にたまる
- 上のスリにバルーンを付ければ不活性ガス雰囲気
置換できる。

真空ポンプをつなげれば減圧蒸留もできる。

図 4 昇華精製装置 (左：使用例、右：パーツに分解した図)

有機合成試薬の中にも、空气中で分解、重合、発火するなど取扱いが非常に難しい試薬がたくさんありますが、ちょっとした工夫でハンドリングしやすくなります。適切な道具を適切な場所で使うことができ、研究スピードの大幅アップにつながりました。私の場合は、自分の所属にガラス工作室がなかったため、他大学の組織にお世話になりましたが、本学では工作センターが学内組織として整っており、とても良い研究環境に恵まれていると感じます。早速、着任してすぐ実験器具を揃えるためのご相談に伺い、カラムやコックなどをオーダーメイドで作製いただきました。ご対応いただきありがとうございました。

半導体デバイスプロセス研究チームで材料開発を担当していた当時は、「産総研ナノプロセシング施設 (NPF)」という共同利用施設を活用していました。半導体業界は、我々化学屋さんからみると特殊な環境にあり、加工技術がデバイス性能の限界を決めているといっても過言ではありません。デバイス作製の多段階プロセスで特殊装置を必要とするため、すべての

装置を各々で持つことができず、特にシリコン系 LSI はウエハサイズが限られており標準的な装置仕様が決まっています。試験用の小型装置が当施設に揃えられており、大学や研究所の研究者だけでなく、メーカ技術者も利用していました。各装置はスペシャリストが専任で管理しており、私は主にフォトリソグラフィの技術支援を受けていました。微細パターンのマスク作製や、脆くて重い、取り扱い難い特殊基板へのパターンニングなど、難易度の高いサンプル作製にも対応していただき、スムーズに研究を推進することができました。

前職では、共同利用施設の利用者であった私が、今度は立上げに加わることとなりました。学内組織であった「機器分析センター」の外部開放に際して、学外からの支援・連携を受け、また学内外の技術職員の方々の協力を得てようやく形にすることができました。その中で特に、装置や設備に対する自然災害への対策を優先的に実施できたことは、学生やユーザの安全面からも非常に助かりました。任期中、熊本大学を訪問する機会があり、2016年の熊本地震について被災地にある大学スタッフから話を聞くことができ、実際に被害があった建屋の実験室を見学する機会をいただきました。外壁が剥がれ、館内廊下や壁に亀裂があり、依然と残る生々しい爪跡を目の当たりにして、掛ける言葉も見つからなかったことを覚えています。テレビなどの報道でも、熊本城の大きく崩れた石垣が揺れの凄まじさを物語っていました。その2年後、2018年に起きた大阪府北部地震は、関西広域で被害があった記憶に新しい災害のひとつです。どこでも身近に天災が起こる可能性があることを改めて再認識すべきだと思いました。当センターにおいても、精密機器の耐震対策、ボンベの再配置・固定化、実験台の固定など、技術職員の方々に大変お世話になり対策を講じることができました。本学の実験室では、すでにボンベ固定などの対策は行われていましたが、実験室の整理整頓がいざというときの逃げ道を確保することになりますので、この経験を活かして学生への安全教育ができればと思います。

以上述べてきたように、私はこれまで様々な場所で多岐に渡る技術支援を受ける機会に恵まれてきました。技術者と研究者が交流できる場は、お互いの技術力向上に留まらず、世界を広げることにもつながり非常に有意義であると実感しています。これまでの人脈を大事にしつつ、これからの新たな出会いに期待して、今後とも積極的に相談させていただきますのでどうぞよろしく願いいたします。

常温且つ常圧でダイヤモンドと 異種材料の直接接合技術

梁 剣波 (りょう けんぼ)

所属：工学研究科電子情報系専攻

専門分野：パワーエレクトロニクス分野

趣味：映画鑑賞



1. はじめに

ダイヤモンドは炭素の同素体で、 sp^3 混成軌道の共有結合により強固に結合しているために鉱物中に最も硬く、宝石や研磨材として利用されている。また、熱伝導性、光学特性、化学的安定性等に優れた特性を持ち、炭化シリコン (SiC) や窒化ガリウム (GaN) などの半導体材料より更に優れた物性を有する新しい半導体材料である。SiC、GaN に続く次世代デバイスを創出する機能性材料として注目されている。ダイヤモンドは高温高压法、熱フィラメント CVD (Chemical Vapor Deposition: 化学気相成長) 法やマイクロ波 CVD 法により工業的に合成され、そのサイズは 1 cm 角程度が限界とされる。加圧設備の大型化や合成に使用する下地基板等の制限による半導体デバイスの製造ラインに必要な大口径ダイヤモンドの合成は極めて困難です。

ダイヤモンドと Si 基板を一体化することが実現できれば、ダイヤモンドデバイス研究開発加速が期待できる。また、動作中の半導体デバイスを流れる電流とバイアス電圧の積 (消費電力) に応じて発熱が起こり (ジュール熱)、素子温度が周辺よりも高くなる。素子の最高性能は動作時の素子温度により制限される。素子の熱抵抗を下げる (発生する熱を逃がしやすくする) ことにより、同一の電力消費に対して素子温度が上がりにくくなる。その結果、より高出力での動作、信頼性の向上が期待される。結晶性の良いダイヤモンドと半導体素子を直接 (間に何も挟まずに) 接合できれば大きなブレークスルーとなる。

我々は、常温直接接合法の一種である表面活性化接合 (Surface Activated Bonding (SAB)) 法を用いて様々な半導体材料、金属を接合し、タンデム太陽電池や厚膜金属電極への応用可能性を検討してきた。SAB 法の原理を図 1 に示

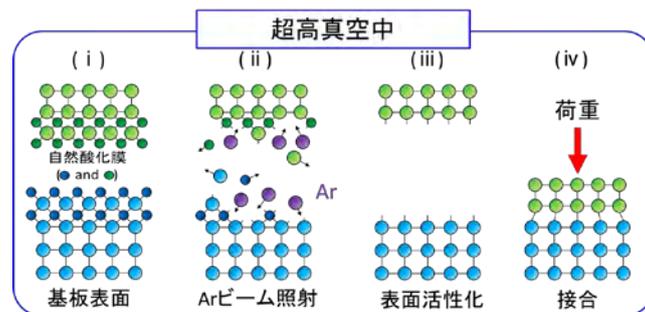


図 1 表面活性化接合法の原理

す。高真空中で加速された Ar 原子等のビームを照射することにより試料表面の自然酸化膜を削り取る。直後に接合試料表面を常温で密着・加圧する。結晶構造、格子定数、熱膨張係数が異なる材料同士でも接合することができる（異種材料接合）。本稿では、我々のグループで進めている典型的な半導体材料である Si、典型的な金属材料である Al とダイヤモンドの接合の検討状況を紹介します、ダイヤモンド異種材料接合研究の将来を展望する。

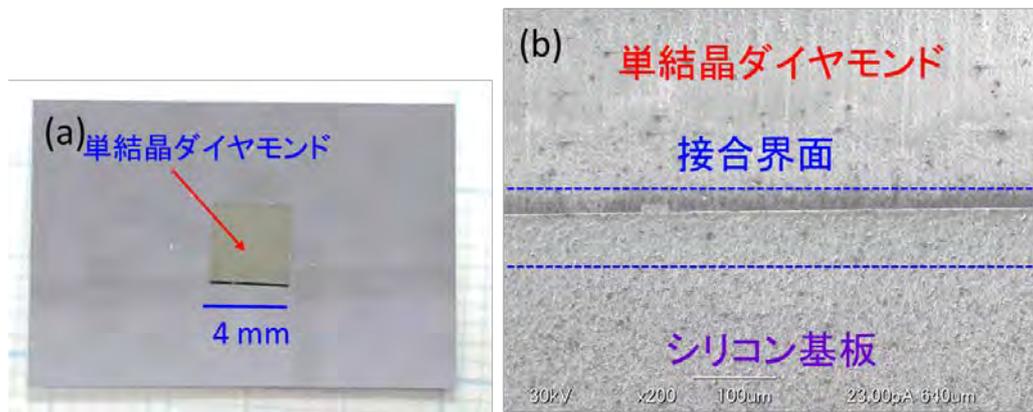


図 2 接合試料の全体像(a)と接合界面の走査型電子顕微鏡像(b)

2. ダイヤモンド/Si 直接接合^{1,2)}

我々は 4mm 角の高温高压合成 (High Pressure High Temperature (HPHT)) 単結晶ダイヤモンドの表面を研磨し、Si (100) 基板との接合を形成した。ダイヤモンド表面の凹凸の指標である平均表面粗さ (Average Roughness (Ra)) は研磨前で 4.1 nm、研磨後で 0.8 nm である。Si 基板の Ra は 0.3 nm である。接合試料の全体像及び接合界面の走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy (SEM)) 像を図 2 (a) 及び 2 (b) に示す。SAB 法により接合を形成するためには、経験的に接合試料表面の Ra が 1 nm 以下である必要がある。ダイヤモンド単結晶表面の Ra をそれよりも小さな値とすることにより、良好な (ギャップの無い) 直接接合が実現されている。

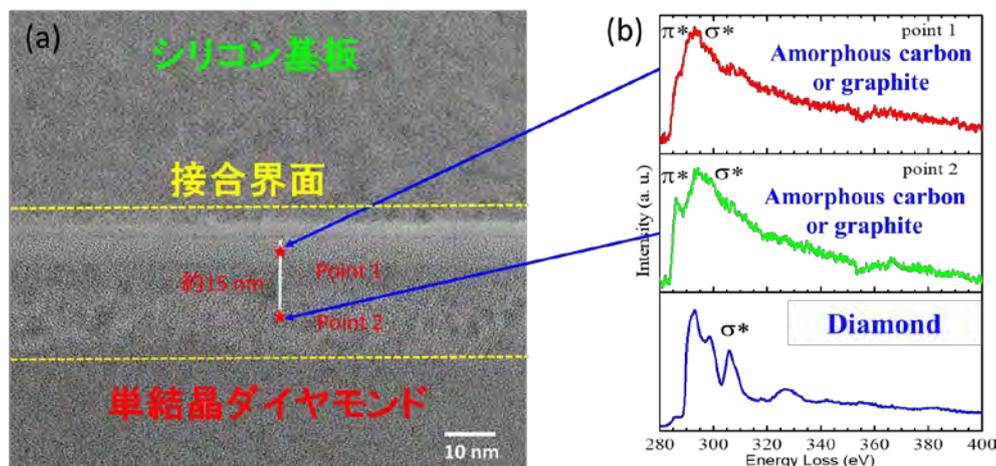


図 3 ダイヤモンド/Si 接合界面の断面 TEM 像(a)と界面付近の電子エネルギー損失分光信号(b)

接合界面の透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscopy (TEM)) 像及び界面付近のダイヤモンド層中 2 か所(図中 Point1、2 の位置)の電子エネルギー損失分光 (Electron Energy-Loss Spectroscopy (EELS)) 信号を図 3 に示す。界面から十分離れたダイヤモンド結晶内部からの EELS 信号も併せて示す。接合界面から十分離れた位置においては、EELS 信号は主に C の σ 軌道の電子に由来している。一方、界面付近の EELS 信号では σ 軌道、 π 軌道の寄与がともに観測される。Ar 原子ビーム照射の前後でダイヤモンド単結晶表面の C1s 軌道の X 線光電子分光 (X-ray Photoemission Spectroscopy (XPS)) 測定を行い、Ar 原子ビーム照射により、C の sp^2 軌道からの信号強度が増加していることを確認している。

以上により、表面活性化処理によってダイヤモンド単結晶表面が一部アモルファス化し、常温で Si 基板との接合が実現したものと考えられる。更に我々は接合試料の熱処理を行い、ダイヤモンドと Si の間に $1.8 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ もの熱膨張係数差があるにもかかわらず (ダイヤモンドの熱膨張係数: $0.8 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 、Si の熱膨張係数 $2.6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)、接合界面が少なくとも 1000°C の熱処理に耐えることを見出している。

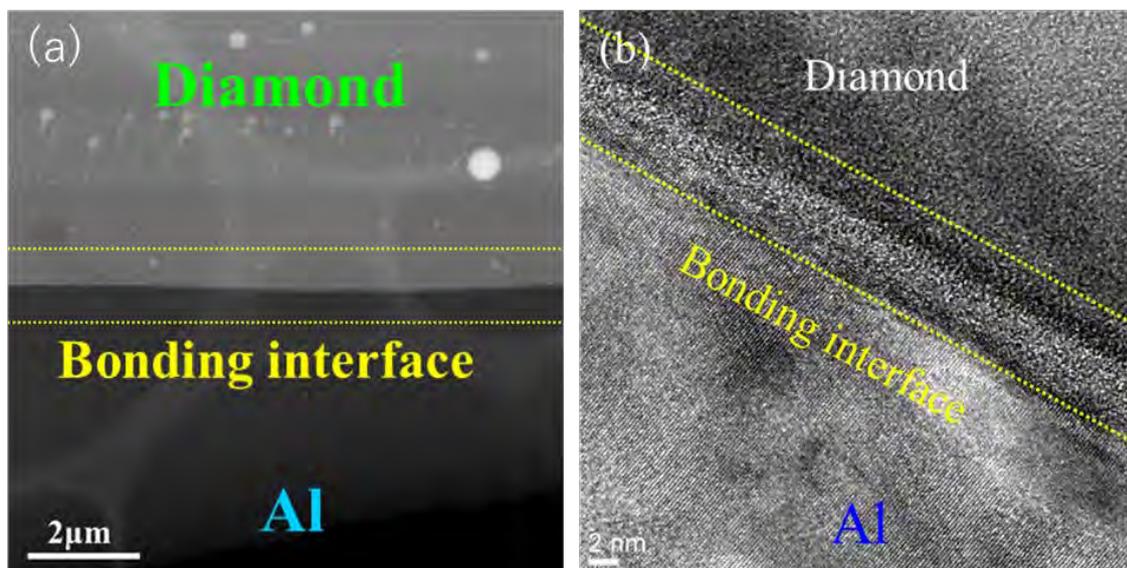


図 4 多結晶ダイヤモンド/Al 接合界面の低倍率 (a) と高倍率 (b) TEM 像

3. ダイヤモンド/Al 直接接合^{2,3)}

多結晶ダイヤモンド基板と Al 板 ($R_a > 70 \text{ nm}$) を SAB 法を用いて接合した。接合試料の SEM 像及び TEM 像を図 4 (a) 及び 4 (b) に示す。Al の R_a は 1 nm を大きく上回っているものの、良好な接合が形成されている。Al が半導体材料と比較してソフトであり、接合時に表面凹凸の影響が吸収されているためと考えられる。ダイヤモンド/Al 接合についても耐熱性を評価した。Al の融点に近い 600°C までの耐熱性を確認している。

4. ダイヤモンドと異種材料接合による電気デバイスへの応用展望

Si 基板上にダイヤモンドを直接接合し、かつ接合界面が 1000°C 以上の耐熱温度を有することが明らかとなった。これにより、Si 基板に接合されたダイヤモンド単結晶上の素子形成が可能となる。将来は、図 5 (a) に示すような、高出力・高周波動作するダイヤモンド FET と制御用の Si LSI を同一の Si 基板上に形成した小型・高密度集積モジュールの実現が期待される。現在、Si 基板に接合されたダイヤモンド単結晶上の素子用ダイヤモンド結晶成長、素子作製の検討を進めている。

更に、「ダイヤモンドと半導体直接接合」「ダイヤモンドと金属の直接接合」の 2 つの成果を組み合わせることにより、例えば図 5 (b) に示すような、ダイヤモンドを放熱基板とするパワー半導体モジュールの実現が可能と思われる。

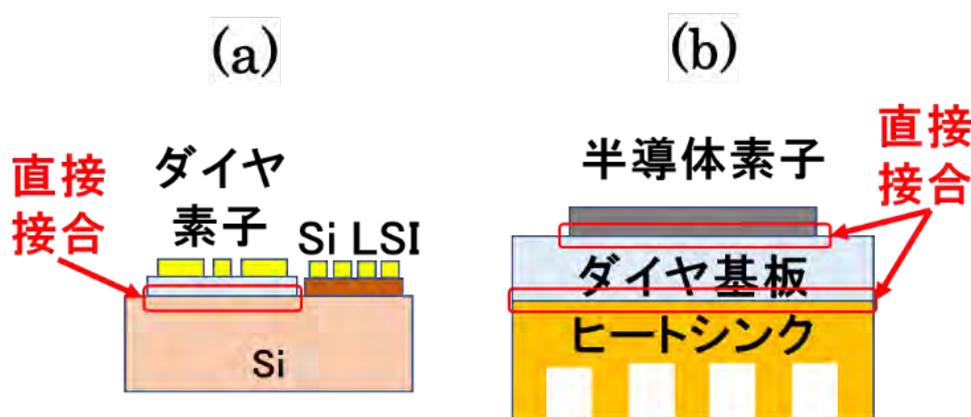


図 5 ダイヤモンド直接接合により実現が期待される (a)ダイヤモンド素子と Si LSI の高密度集積モジュール、(b)ダイヤモンドを放熱基板とする低熱抵抗・高出力モジュール。

現時点では、ダイヤモンドの小片と Si 基板の接合に成功した段階である（ダイヤモンドの面積 < Si 基板の面積）。今後、ダイヤモンドを放熱基板とするモジュール構造の実現に向けて、半導体素子と素子よりも大面積のダイヤモンドとの直接接合の検討、接合用の大面積ダイヤモンド基板の開発を行う必要がある。このように異種材料接合技術、ダイヤモンドの材料技術、素子技術が融合することにより、エレクトロニクスに新たな展開が生まれることが期待される。

[参考文献]

- [1] J. Liang, S. Masuya, M. Kasu, and N. Shigekawa: “Realization of direct bonding of single crystal diamond and Si substrates”, Appl. Phys. Lett., vol. 110, no. 11, pp. 111603-1-111603-4 (2017).
- [2] 重川 直輝、梁 剣波、ニューダイヤモンドフォーラム、vol.34, no. 4, pp. 3-5 (2018).
- [3] J. Liang, S. Yamajo, M. Kuball, and N. Shigekawa, “Room-Temperature Direct Bonding of Diamond to Aluminum”, presented in The 12th International New Diamond and Nano Carbons Conference (NDNC 2018), A1.03 (2018).

ヒトの心と体を測る

—人工気候室における実験を通して

岡田 明 (おかだ あきら)



所属：生活科学研究科 居住環境学講座

専門分野：人間工学

趣味：旅行，登山，スキー，酒

1. 人間工学とモノづくり

今日，私たちのまわりには道具や人工環境などヒトがつくり出した“モノ”に満ち溢れています。そして，それらをより優れたモノにしていくための努力が払われてきました。では，そうした優れたモノと言わせるためにはどういう要素が必要でしょうか。強い，速い，軽いなどのいわゆる機能的な要素の他に，使いやすい，分かりやすい，安全な，健康的な，などの言葉で表現される要素，すなわちヒトの心身にとってどのような効果や影響があるのかが重要な決め手となります。

そうしたヒトとモノとの整合性を科学し，その知見をモノづくりに応用していく分野が人間工学です。たとえば，疲れにくいイス，操作ミスを起こしにくい機械，分かりやすいパソコンソフトなどは人間工学の成果の例といえます。こうした優れたモノづくりをしていくためには，それを使うヒトの運動，感覚，認知の機能や感性などの特性を調べ，それに適した設計値を求めること，あるいは既存のモノを使う際のヒトの心身への影響を評価し，その結果から次なるモノの設計に繋げていくことなどが行われます。つまり，人間工学の専門家はヒトの心身の状態や行動を計測することを主な生業（なりわい）の一つとしています。

それを行うための実験室として，大阪市立大学には人工気候室が設置され，これまでヒトを対象とした数多くの計測実験が行われてきました。本編ではそれを紹介することにより，こうした施設の必要性とヒトに基づくモノづくりの重要性を伝えたいと思います。

2. 人工気候室とは

その名が示す通り気候環境をコントロールできる実験室です。当大学では人間環境制御装置の名称で1992年に設置されました（写真1）。基本スペックとして，温度：-15～50℃，湿度：30～85%，照度：0～5000Lxの範囲に設定可能となっています。ただし，氷点下や高温・高湿の過酷な環境に設定されることはまずありません。その多くは，温湿度による心身



写真1. 人工気候室

への影響を捉えるため生活で通常体験する範囲の気候条件に設定したり、温湿度によるヒトへの影響を統制し別の目的の計測精度を高めるためニュートラルで定常的な気候条件に設定して用います。

もちろん人工気候室だけでは上述のようなヒトの計測はできません。そこには、脳波・筋電図・心電図といった生体信号を捉える装置、ヒトの動きを3次元的に捉えるモーションキャプチャシステムなどをはじめとするヒトを測る様々な計測機器が存在しています(表)。

しかし、こうした部屋や装置が揃っただけでもまだ計測はできません。それらに精通し、適切な計測を遂行できる専門スタッフが必要です。そのスタッフとして、山下久仁子技術職員が常駐しています。様々な計測実験に際し、その計測計画の立案から計測の実施、そして得られたデータの解析までの仕事をこなしてくれます。また、計測システムを動かすソフトの開発や改編、卒論や修論博論等で計測を行う学生の直接指導なども彼女の手によります。

このように、人工気候室、各種計測装置、専門スタッフの3つが揃い、初めて質の高いヒトの計測が可能となります。

表. 人工気候室に設置される主な計測機器

[動作関連測定]

- ・ 3次元動作解析システム
- ・ トレッドミル
- ・ 握力用ロードセル
- ・ 床反力計
- ・ 重心動揺計
- ・ エレクトロゴニオメーター
- ・ 体圧分布測定システム

[生体電気信号および各種生理機能測定]

- ・ 赤外線酸素モニター装置 (NIRS)
- ・ 非観血的連続自動血圧計
- ・ 呼吸代謝測定装置
- ・ サーモレコーダ
- ・ 小型ポリグラフテレメータおよび心電図アンプ
- ・ フリック計測装置
- ・ 多用途テレメータシステム
- ・ レーザー組織血流計
- ・ 皮膚温計測用データ収集型ハンディタイプ温度計
- ・ 呼吸ピックアップ
- ・ 携帯型脈波測定装置
- ・ マルチトリガシステム
- ・ 携帯型心拍数・活動量データロガー

3. メーカーとの共同実験例

この人工気候室を用いた計測は、教員の研究や教育の一環としてだけではなく、様々なモノづくり企業等から依頼される計測もあります。これまでそうした多くのメーカーからの依頼を主に受託研究や共同研究の形で受け入れてきました。ここでは、専門的な研究のための計測ではなく、読者の皆さんにも分かりやすい、身近なモノづくりのための計測依頼事例を紹介しましょう。ただし、企業からの要請という性格上その内容を外部に公表できないものが多いため、ここではその中でも公表可能でこの設備の機能を十分利用した計測実験事例を取り上げます。

●大型テレビ視聴がヒトの心身に及ぼす影響

だいぶ前になりますが、2004年に某テレビメーカーからある計測依頼がありました。その頃のテレビは画面の大型化が急速に進み、その種類も液晶形式とプラズマ形式の2つが存在しました。液晶・プラズマ戦争と呼ばれるほど、それぞれのメーカーがその性能向上にしのぎを削っていた時代です。依頼は、液晶テレビとプラズマテレビのどちらが目を疲労させにくいかを定量的に評価してほしいというものでした。当時は液晶の方がプラズマに比べて残像が多く輝度のコントロールに制限もあったため、液晶の方が疲れると経験的には言われていましたが、その客観的な証拠はまだ明らかにされていませんでした。

これを受け、そのメーカーと共にまず目の疲労を測る有効な生理指標や心理指標を模索していきました。様々なトライ&エラーや予備実験を繰り返し、眼電図によるテレビ視聴前後の瞬目率（瞬きの頻度）の変化と、独自に作成した主観的な疲労度評価尺度、その他近赤外線酸素モニター装置（NIRS）や心電図による心拍変動性等も生理指標に加え、同じ大きさと輝度の液晶テレビとプラズマテレビを共通の照明環境と視聴距離に合わせ実験を行いました（写真2）。視聴する映像としては、視覚疲労を助長させる短時間の実験映像や、様々なジャンルの映像を複合した1時間ものの模擬番組映像を作成し、様々な年代や国籍の方々に参加してもらいました。この計測では温湿度の影響は関係ないように思われますが、瞬目率が湿度の影響を受けるため、気温 25℃、湿度 50%に固定できる人工気候室が威力を発揮しました。

その結果、たしかにプラズマテレビの方が液晶テレビに比べて相対的に目の疲労が少ない



写真 2. テレビ視聴実験
（参加者の背中に垂れ下がる線は、眼電図や NIRS 装置からのコード。写真はプラズマ／液晶比較実験ではなく、その後行われた 2K／4K テレビ比較実験のもの）

ことや、交感神経活動度がより低くなる（ストレスがより低いと推測される）こと等を客観的定量的に示すことができました。これらの成果は学会で発表するだけでなく、米国や韓国でもそれを紹介する講演の機会を得ることができました（その後、液晶テレビの技術も向上したため、今同じような実験を行えば恐らくプラズマテレビとの差異は出ないと予想されま

す）。このメーカーとの共同実験はこれで終わりとはなりませんでした。さらに目の疲労を生じさせにくい視聴距離の評価、その後に出た新技術のテレビ、すなわち立体感を与える 3D テレビ→高精細 4K テレビ→輝度範囲の広いハイダイナミックレンジテレビと次々登場するテレビの各特性が視聴者の心身に及ぼす影響を評価する実験が続き、結局 2017 年まで約 13 年間継続しました。

●その他の計測実験

これ以外にも様々な企業と様々なタイプの計測実験を行ってきました。たとえば、オフィス機器メーカーの依頼に基づき、より疲れにくいイスの評価のため主に体圧分布測定システムを用いた座面の体圧分布の計測。家電メーカーの依頼に基づき、冷蔵庫の開閉や電気掃除機使用時の負担軽減を図るための筋電図を用いた筋負担計測、あるいは電池式カイロの効果を検証するため人工気候室の温湿度を変化させながらの皮膚温や皮膚血流量等の生理計測と主観的温冷感の計測。飲料メーカーの依頼によるペットボトルの開けやすさ改善を目的とした筋電図や動作解析等の計測など。これらはそのごく一部の例となります。

こうした生理計測を含む多面的な計測により、ユーザ本人も意識しないような心身の変化や影響を客観的に捉えてきました。

4. 今後の課題

このような企業からの依頼計測以外に、もちろん本務の研究や学生の卒論・修論・博論等のための計測もこの人工気候室で数多く行われ、その稼働率はかなり高いといえます。上に紹介した計測実験例の多くは温湿度そのものの影響を調べる目的ではないものの、それらを一定に保つことにより温湿度変化の外乱を取り除き、計測の精度をより高めるという目的でも大変貢献してきました。そして、こうした実験室での計測により、モノがそれを用いるヒトの心身の負担やストレス、快適性や安全性などに与える影響を明らかにして、そのデータをより優れたモノづくりに活かすことへと繋げてきました。

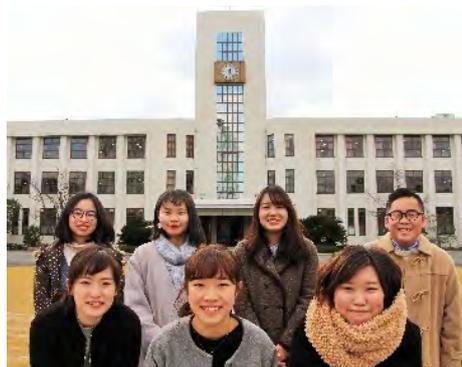
しかし、初めのページにも記した通り、人工気候室が導入されてからすでに 28 年になろうとしています（2020 年春時点）。そろそろ老朽化してきており、空間の容量的にも様々な需要に対応できなくなりつつあります。そのため、新たな人工気候室の導入も視野に入れていかなければなりません。それについては次の世代の方々に託したいと思います。

こうしたヒトを対象とした計測を行う実験室の存在は、同じ学内でもあまり知られていないのが現状ではないでしょうか。そのため、この機会をお借りして紹介させていただきました。これをお読みの皆さん方がこうした施設にも興味を持たれることを期待しつつ、筆を置くことにいたします。

利用者からの報告

日本酒酒器セット（徳利・お猪口）

表現・表象文化論演習Ⅱ履修生



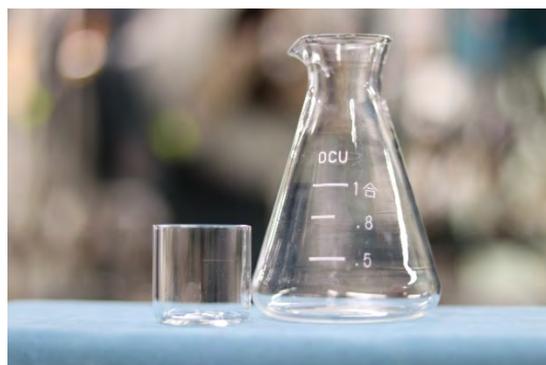
2019年4月に販売を開始した「大阪市立大学オリジナル日本酒 月の桂」。文学部「表現・表象文化論演習Ⅱ」でアートマネジメントを学ぶ学生が中心となって、そのプロモーション企画を行いました。

1つの目玉企画として、クラウドファンディングの商品企画「ガラス製酒器セット」を考案しました。

工作技術センターに制作いただいた徳利は、既製の三角フラスコの口の部分を短く切り、バーナーで温めて柔らかくしながら徐々に口を広げていきます。注ぎ口の部分を引っ張り、徳利として使用できる形に仕上げてくださいました。

側面に1合のメモリ、底面に学章をプリントし、大学オリジナルであることが分かるような工夫。また、お猪口は、ガラス管を使用し、太さの異なる2本のガラス管をバーナーで熱して接合し、飲み口は怪我をしないように加工を施していただき、飲みやすいサイズに。

限定140セットは、大変好評で開始からわずか24時間で完売しました！



利用者からの報告

テラヘルツ光渦発生用螺旋型位相板の作製

青石 宗一郎 (あおいし そういちろう)

所属：工学研究科 電子情報系専攻

専門分野：テラヘルツ波工学

趣味：読書, スポーツ観戦



自然界の多くの光はその伝わり方として、波面が球面で放射状に進む状態と波面が平面となって一方向に進む状態が殆どです。ところが特殊な条件下では波面が螺旋状になって進む光が存在し、それを光渦といいます。螺旋の中心は強度が0の特異点であるため、ドーナツ状の強度分布を持ちます。この特徴を利用し、高強度な光渦レーザーを金属表面に照射しナノスケールの極細金属針を作製した

例や、光渦を誘導放出に利用して高い空間分解能を実現する STED 顕微鏡などが報告されています。私が研究しているテラヘルツ(以下, THz)波領域でも光渦を使った研究が近年積極的に行われています。THz 波領域での光渦の発生方法としては螺旋型位相板(Vortex Phase Plate, VPP)が有名です。VPP は螺旋階段状の構造を持ち、中心に THz 波を透過させることで方位角方向に波面を少しずつずらして螺旋状にし、図1のように光渦を発生させることができます。近年我々のグループでは、THz 光渦を金属メッシュデバイス(Metal Mesh Device, MMD)に照射することで通常では励起が困難なダークモードを効率的に励起できることを発見し、今後積極的な利用を考えています。VPP はその最大段差によって光渦に変換される有効範囲が決まるため、光渦を用いた研究を進める上では様々な段差の VPP を精密・簡便に作製する技術が重要です。そこで、私は THz 波領域でオリジナルな VPP を作ることを目指して設計開発に取り組みました。設計では THz 帯で比較的透明で安価な樹脂材料であるポリプロピレン(以下, PP)や Zeonex を材料に選択しました。屈折率を考慮して形状を設計し、設計したものを工作技術センターの富高さんに見て頂き、作製方法を相談しました。螺旋階段の形状に切削する際、一塊で作るのが難しいため、2つの円盤から VPP の半分をそれぞれ作製する

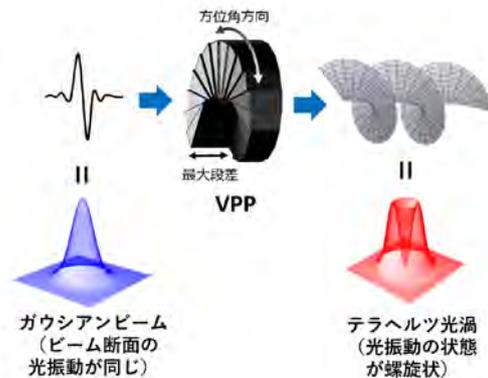


図1 VPP による THz 光渦の発生仕組み。

ことにしました．切削加工はセンターの方に依頼し，光学的な段差の評価は私が分光して行いました．図2はこれまで作製して頂いたVPPです．これらのVPPは全て工作センターの富高さんに作製して頂きました．図2の左上のVPPがPP製・8段のものです．PP製平行平板に対し，方位角方向に45 deg ずつフライス盤で切削されています．光渦の中心周波数が0.95 THz（波長：316 μm）になるように1段あたり78 μmに設計しています．このVPPの各プレートに THz 波を透過させた際の透過波形が図3の挿入図です．図から段数に応じてほぼ等間隔に波形が遅れていることがわかります．各波形のデータを用いてフーリエ解析したところ，段差の平均が設計値78 μmに対し78.6±7.2 μmであることがわかりました．また，作製したVPPを透過したTHz波ビームを調べたところ，一部が光渦に変換されていることが確認できました．Zeonex製のVPPでも段差に同程度のオーダーの誤差が生じており，これらについては切削の際に材料が変形してしまうことが誤差の一因と考えられ，改善方法を検討しています．現在は作製して頂いたVPPで変換した光渦がMMDにおける共鳴に及ぼす影響を調べています．



図2 作製して頂いたVPP.

最後に，VPPの作製に置きまして，時には学会発表申し込み間際の無理な日程で作製をお願いすることもありました．そのおかげで学会申し込み間に合ったこともあり，非常に感謝しております．今後もいろいろとお願いすることがあると思いますが，何卒よろしく願いいたします．

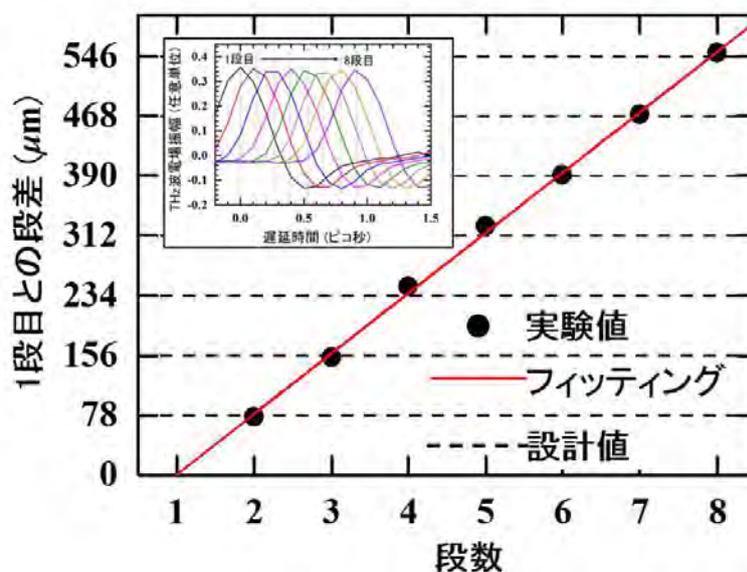


図3 作製したVPPの段差評価の結果．(PP製，0.95 THz(8段)仕様)．破線は設計値．

挿入図：VPPの各プレートに対する透過波形．

利用者からの報告

アルギン酸ビーズ作製のガラス管

下芝 佑弥 (しもしば ゆうや)

所属：工学研究科 化学生物系専攻

専門分野：生体機能工学

趣味：野球観戦、釣り



コンクリートは世界で広く利用されている建築材料の1つである。しかし経年劣化によって、ひびが入ってしまう、ひびから水や空気が侵入しコンクリート内部の鉄筋が腐食されてしまう、といった問題が発生する。これを新たなものに交換するには莫大な費用がかかる。この問題を解決するために私は、微生物を用いた自己修復コンクリートの研究を行っている。これはコンクリートの主成分である炭酸カルシウム (CaCO_3) を産生する微生物をコンクリート内に混在させ、ひびが生じた際に微生物が産生した CaCO_3 でひびを埋めるというものである。

しかし、またしても問題が発生する。コンクリート内は強アルカリ条件であるため、そのままでは微生物が生存できないのだ。そこで微生物をアルギン酸カルシウムのビーズで強アルカリから保護することを検討したが、一重のビーズでは微生物は生存できなかった。

そのため内側にのみ微生物を封入して外側は保護層とした二重ビーズを作製することを検討した。

そこでガラス工作センターに、大

小2本のガラス管を組み合わせた二重管を作製していただいた。もともとは内側の管を側面から出す設計だったが、センターの方に相談したところ、図1のように外側の管を側面から出す方が作製しやすいとのことだったので変更していただいた。この二重管を用いて二重ビーズを作製したところ図2のように、きれいな二層構造になった(図2は微生物を入れず、内側のみ青色色素で染色したもの)。

今後、この二重ビーズを用いて実験を行う予定だ。

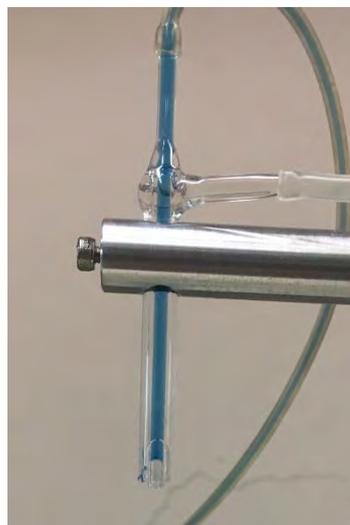


図1 ビーズ作製の様子



図2 ビーズの拡大写真

利用者からの報告

バブル可変型の連続振動バブル晶析装置

柳田 凌人 (やなぎた りょうと)



所属：工学研究科 化学生物系専攻

専門分野：化学工学（晶析）

趣味：eスポーツ

私の研究では連続振動バブル晶析装置（COBC）という晶析装置について研究を行っています。COBCにおいてバブルの形状が管内の流体に与える影響は大きいため、様々な形状のバブルを作製することで生成物に与える影響を調べます。（図1）

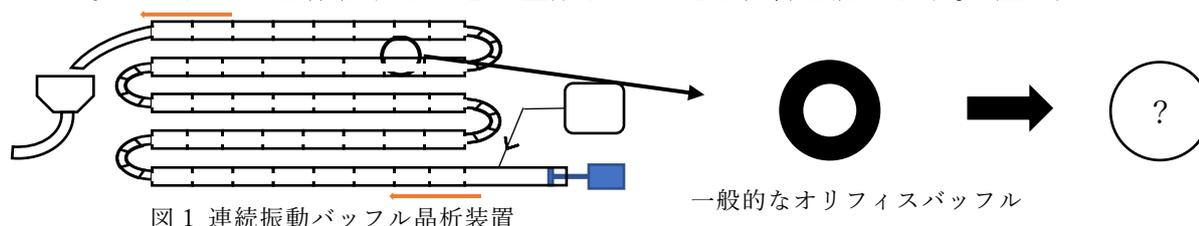


図1 連続振動バブル晶析装置

一般的なオリフィスバブル

一般的に研究で用いられているものや、既製品として販売されている COBC はガラス管にくびれを作ることでオリフィスを配置しています。しかしその一体型の仕組みではバブルの形状を変化させることは不可能です。そこで今回金属工作センターに相談して、オリフィス部分をステンレス板で作り亚克力管と馬蹄クランプで挟み込む新たな装置を作製していただきました(図2,3)。また装置入口にあるピストン機構も具体的には示されてなく、1からこの装置に最適なものを作りました。微調整や作り直しを何度も繰り返し、その度に親身に相談に乗り、丁寧な仕事をして頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。今後ともよろしくお願いたします。

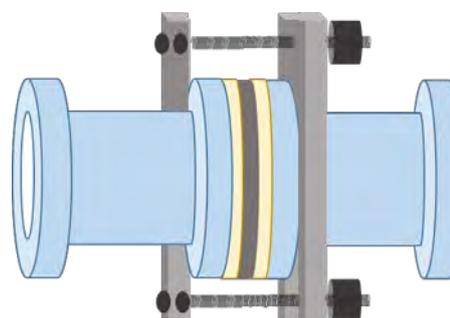


図2 バブルを挟み込むことで変更可能な晶析装置



図3 完成した晶析装置の全体図

技術ノート

シリコンゴム栓の穴あけ

中原 啓晃（なかはら ひろあき）

所属：研究支援課

趣味：卓球、読書、プチ DIY



研究室等においてシリコンゴム栓（以下シリコン栓）を使用することは比較的多く、また化学・生物系の実験などでは、シリコン栓にガラス管などを差し込んで使用することも多いかと思います。初めから穴があいているものや、途中まで穴があけてあり表面を必要に応じてカットしてガラス管を通すことができるシリコン栓も販売されていますが、穴の大きさ・数・位置の制限があるのではないのでしょうか。今回は当ガラス工作室（以下ガラス室）の機器を使用したシリコン栓の穴あけの方法を紹介したいと思います。

なぜガラス工作でシリコン栓の穴あけかと言うと、ガラスを加工する際に（図1）のような道具を使用することがあります。これはガラス管の端に取り付けて、チューブをつないで、空気（自分の息）を吹き込んでガラスを膨らます時に使用します。ガラス管の太さは様々なので、色々な大きさのものを常備しています。昔はコルク栓やゴム栓を使用していたそうですが、現在はほとんどシリコン栓です。全て自作するのでシリコン栓に穴をあける必要があります。

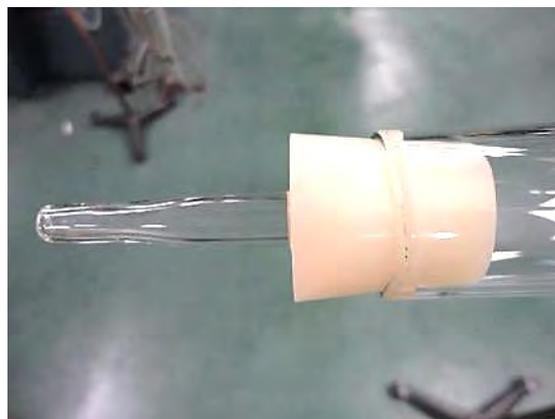


図1

1. まず最も一般的な方法だと思いますが、コルクボーラー（コルクボーラーと表記されているものもある）を使用する方法です。（図2）刃先が平らなものと鋸状のものがありますが、シリコン栓には刃先が鋸状のものを使用します。手でグリグリ回しながら穴をあけていきます。（図3）穴自体はあくと思いますが、穴の大きさが表面と裏面で違ったり、垂直にあかなかったりします。また穴が小さくなりがちで、少し大きめのボーラーを使用しているにもかかわらず、ガラス管を挿入する際にかかなり苦労することもよくあります。また大きい穴をあける場合はかなり力が必要で、一つの穴あけで相当疲れます。数が多くなく、それほど大きな穴をあけない場合や、あまり外見にこだわらない場合には、手軽な方法だと言えます。



図 2

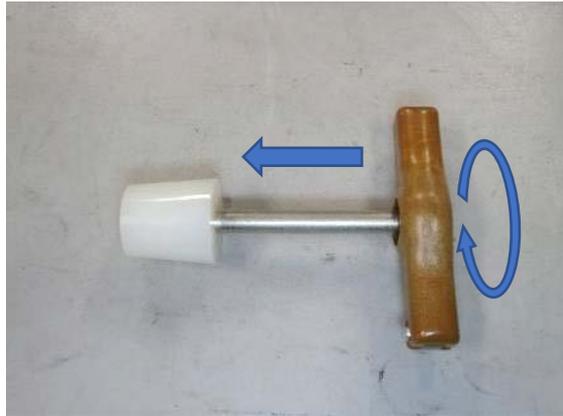


図 3

2. 次にスピードホルダーという固定具を使用した方法です。(図 4) ある程度の大きさがあるシリコン栓の穴あけに使用します。上下には使用するボーラーに合ったガイドリングを装着して両側のネジをしめてシリコン栓を固定し、前述のコルクボーラーで穴をあけていきます。(図 5) ガイドリングのおかげで、穴をあける位置を固定でき、穴も垂直にあきます。またしっかり固定できているので力が入れやすく速く穴をあけることができます。とはいえ、やはり手で回していくので大きい穴をあける場合は疲れますし、上下で挟んで固定するのでシリコン栓が横方向に膨らみます。その状態で穴をあけるので、ホルダーから外すと穴の大きさが小さくなります。どれぐらい小さくなるかはシリコン栓の大きさと穴の大きさの割合や固定する力具合によっても変わってきます。コルクボーラーで穴をあける場合は差し込みたいガラス管より 1 サイズ又は 2 サイズ大きめのボーラーを使用します。あとから穴を少しだけ大きくしようと思ってもボーラーが先にあけた穴に入ってしまったので広がらないのでボーラーのサイズ選定は重要です。



図 4



図 5

3. 次は機械を使用した方法です。ガラス室にはガラス工作で使用するカーボンの治具を製作するための卓上フライスがあります。これにドリルとホルダーをセットして穴をあけていきます。ドリルは竹用ドリルを使用します。ホルダーはシリコン栓に合わせて機械工作部門

の方に作って頂きました。



図 6



図 7

竹用ドリルを使用することでシリコン栓が切れていきます。切り屑の排出のため、何度か上下を繰り返しながら切り込んでいきます。貫通する際もあまり押し込まずに進めていくと、裏側もきれいに穴があきます。差し込みたいガラス管と同じ径のドリルで穴をあければ、ちょうどいい大きさの穴があきます。この方法だと複数の穴あけや任意の位置での穴あけが可能です。また穴自体もきれいで、大きい穴あけも負担がありません。(図 8)



図 8

4. 次は電極や熱電対を通すための細い穴をあける方法です。千枚通しのような先のとがったもので刺して穴をあけても問題ないと思いますが、筆者はガラス工作で使用するタングステン棒を使用して穴をあけます。(図 9)



図 9



図 10

このタングステン棒はガラス器具の修理などで使用するものです。先端は削って尖らせて

あります。このタングステン棒をバーナーで加熱して、シリコン栓に刺していきます。熱で溶けるので簡単に刺し込めます。冷めて固くなればまたタングステン棒を加熱して刺し込んでいきます。使用するタングステンの太さで穴の大きさを調整でき、後から穴を大きくすることも可能です。短所としては穴の位置決めが難しいこと、用いる道具が特殊なことです。

5. 最後に特殊な方法なのでお勧めではありませんが、シリコン栓を液体窒素で凍らせて穴をあける方法もあります。凍らせるので普通のドリルで穴があきますが、凍らせることによる変形が大きいことや、液体窒素を用意する手間や取り扱いのことを考えるとあまり実用的ではないかと思います。

今回シリコン栓の穴あけについて紹介しましたが、それぞれの環境で使用できる道具や機器に違いがあるかと思います。同じ方法で行うことは難しい場合でも、紹介した内容を参考にさせて頂けたらと思います。ガラス室では5以外の全ての作業を行うことができますので、必要な場合はご利用ください。

資料

工作技術センター利用状況

(2019年1月～2019年12月)

【依頼工作件数】

	理学部	工学部	生活科学部	複合先端	実験棟	その他	合計
機械工作	80	250	3	21	4	8	366
ガラス工作	241	99	1	17	9	10	377

【設備機械・器具の利用件数】

	理学部	工学部	生活科学部	複合先端	実験棟	その他	合計
機械工作	79	927	7	35	8	2	1058
ガラス工作	65	55	0	1	0	5	126

【物品請求件数】

	理学部	工学部	生活科学部	複合先端	実験棟	その他	合計
機械工作	112	657	5	12	10	3	799
ガラス工作	5	12	0	2	0	0	19

【機械工作部門の時間外利用件数】

	理学部	工学部	生活科学部	複合先端	合計
機械工作	0	67	0	0	67

【講習会等受講者数】

	理学部	工学部	生活科学部	医学部	文系	教職員	合計
機械工作	17	98	0	0	0	0	115
ガラス工作	23	11	0	0	1	3	38

【実習関連】

理学部化学科化学実験Ⅱ（ガラス細工）

前期 2日×6回（計12日間） 45名（ガラス工作部門）

資料

工作技術センターの主な設備

機械工作部門

機種名	性能	数量	用途
ワイヤー カット 放電加工機	最大加工寸法 幅 750m/m 奥行 500m/m 高さ 310m/m	1	放電による 金属の切断
マシニング センター	X 軸移動量 762m/m Y 軸移動量 460m/m Z 軸移動量 450m/m	1	平面及び曲面, 溝, 穴あけ, ネジ切り加工等
NC フライス盤 (牧野)	テーブル移動量 左右 710m/m 前後 400m/m 上下 360m/m	1	平面及び曲面, 溝, 穴あけ, ネジ切り加工等
NC 旋盤	最大加工径 410m/m 最大加工長さ 550m/m	1	直径 (410m/m) 長さ (550m/m) までの旋削
大型普通旋盤	ベッド上の振り 560m/m 心間最大距離 1500m/m 主軸回転数 25~1500 (12 段) rpm	1	直径 (10~560m/m) 長さ (1500m/m) までの旋削
中型普通旋盤	ベッド上の振り 460 m/m 心間最大距離 1000m/m 主軸回転数 25~1500 (12 段) rpm	2	直径 (3~460m/m) 長さ (1000m/m) までの旋削
中型普通旋盤	ベッド上の振り 510m/m 心間最大距離 850m/m 主軸回転数 30~1000 (12 段) rpm	1	直径 (3~510m/m) 長さ (850m/m) までの旋削
小型普通旋盤	ベッド上の振り 360m/m 心間最大距離 800m/m 主軸回転数 70~1500 (6 段) rpm	4	直径 (2~360m/m) 長さ (800m/m) までの旋削
小型精密旋盤	ベッド上の振り 240m/m 心間最大距離 390m/m 主軸回転数 160~2600 (10 段) rpm	1	直径 (2~240m/m) 長さ (390m/m) までの旋削

機種名	性能	数量	用途
立型タレット フライス盤 (牧野)	テーブル移動量 左右 710m/m 前後 500m/m 上下 400m/m	1	平面及び溝加工, 穴あけ等
立型タレット フライス盤 (静岡鐵工)	テーブル移動量 左右 820m/m 前後 300m/m 上下 450m/m	1	平面及び溝加工 穴あけ等
ラジアル ボール盤	コラム表面と主軸中心距離最大 915m/m 最小 300m/m 穴あけ能力 (S45C) 35m/m, (FC25) 45m/m 主軸穴テーパ MT - No4	1	穴あけ加工
直立 ボール盤 (紀和)	振り 550m/m 穴あけ能力 (S45C) 40m/m (FC25) 50m/m 主軸穴テーパ MT - No4	1	穴あけ加工
直立 ボール盤 (吉田)	振り 550m/m 穴あけ能力 (S45C) 40m/m (FC25) 50m/m 主軸穴テーパ MT - No4	1	穴あけ加工
卓上 ボール盤 (遠州)	振り 450m/m 穴あけ能力 23m/m 主軸回転数 195~2100 (6段) rpm	2	穴あけ加工 (丸テーブル)
卓上 ボール盤 (吉良)	振り 420m/m 穴あけ能力 23m/m 主軸回転数 200~2100 (6段) rpm	1	穴あけ加工 (角テーブル)
精密卓上 ボール盤	振り 500m/m 穴あけ能力 0.4~3.0m/m 主軸回転数 6000~13000rpm	1	穴あけ加工
帯鋸盤	切断能力丸材 250m/m 角材 高さ 250×幅 300m/m	1	金属材料の切断
小型 万能帯鋸盤	切断し得る厚み 95m/m テーブル寸法 400×300m/m ふところ寸法 315m/m	1	板材の切断 (金属, プラスチック, 木材等)
大型 万能帯鋸盤	切断し得る厚み 300m/m テーブル寸法 700×600m/m ふところ寸法 1010m/m	1	板材の切断 (金属, プラスチック, 木材等)
マキタ 丸鋸盤	切断し得る厚み 92m/m テーブル長さ 2105m/m 奥行き寸法 1500m/m	1	板材・角材の切断 (木材、プラスチック)

機種名	性能	数量	用途	
高速切断機(高速カッター)	最大切断寸法 砥石寸法	115m/m 405m/m	1	パイプ及び角・丸棒の切断
切断機(シャーリング)	剪断能力 最大切断巾	4.5m/m 1220m/m	1	薄板の切断
折曲機	折曲げ能力(手動)	1.6×2000m/m	1	薄板の折曲げ
万能工具研削機	テーブルの振り 両センター間の距離 砥石軸頭の前後送り 砥石軸頭の上下送り テーブル移動距離	250m/m 740m/m 250m/m 250m/m 500m/m	1	工具及び小物の研削
卓上ドリル研削機	研削能力	3~13m/m	1	ドリル刃の研削
ベルト研削機	ベルト寸法	100×915m/m	1	金属材料の研削
グラインダー	砥石寸法	255×25m/m	2	工具及び金属の研削
交流アーク溶接機	定格電流	250A	1	鋼材及びステンレスの溶接
TIG溶接機	交直両用 出力電流	300A	1	ステンレス及びアルミニウムの溶接
マイクロ TIG 溶接機	直流パルス 出力電流	50A	1	薄板の溶接
スポット溶接機	足踏式最大溶接能力	2.3m/m×2枚	1	薄板の溶接
エアープラズマ切断機	切断能力板厚	0.1~20m/m	1	鋼材及びステンレスの切断
足踏式切断機	剪断能力 最大切断巾	1.2m/m 600m/m	1	薄板の切断
エアークンプレッサー	圧力	9.9 kg/cm ²	1	エアープラズマ用
プレス機	加圧能力	5Ton	1	プレス加工用
精密定盤	寸法	600×900×100m/m	1	小物のケガキ, 測定
精密石定番	寸法	450×600×110m/m	1	小物のケガキ, 測定
溶接定盤	寸法	1000×2000×150m/m	1	大型構造物の溶接

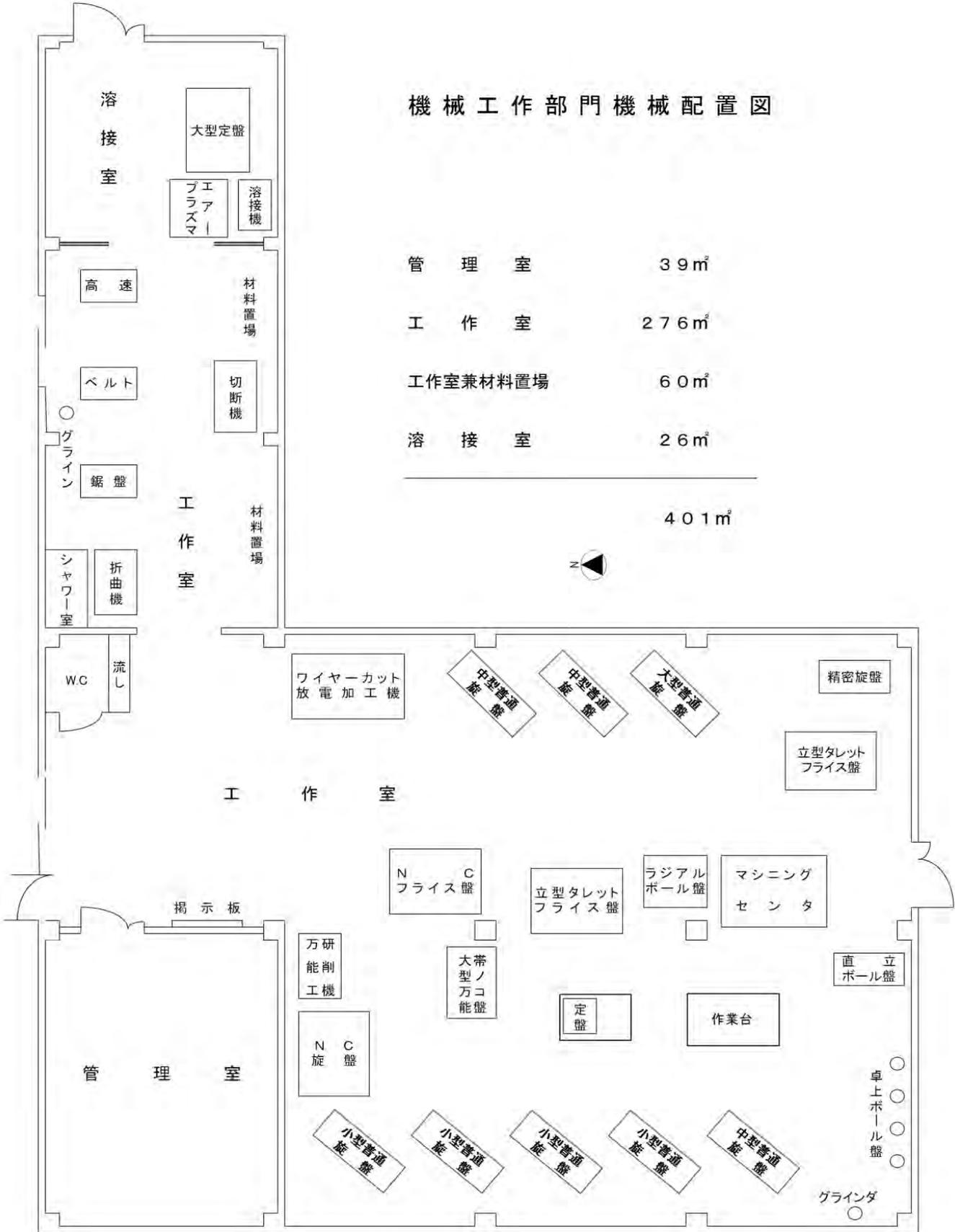
ガラス工作部門

機種名	性能	数量	用途
大型 ガラス旋盤	主軸貫通穴径 300m/m チャック間最大距離 1500m/m 主軸回転数 0~100rpm	1	大口径, 長尺ガラス管の加工 (直径 30~300m/m)
小型 ガラス旋盤	主軸貫通穴径 40m/m チャック間最大距離 600m/m 主軸回転数 0~100rpm	1	小口径ガラス管の精密加工 (直径 3~35m/m)
ダイヤモンド カッター	ホイール径 150m/m×0.7t スピンドル回転数 4500rpm	1	ガラス, セラミック等の切断
ダイヤモンド 万能帯鋸盤	切断能力 高さ 200m/m 奥行き 220m/m テーブル寸法 500×400m/m	1	ガラス, セラミック等の切断
超音波加工機	最大出力 300W 加工台寸法 100×100m/m 加工物最大重量 2 Kg	1	ガラス, セラミック, シリコン等の穴あけ及び形彫り加工
マシニングセ ンタ	主軸回転数 1000~60000rpm 移動量 X305×Y460×Z153mm	1	ガラス板, 管の穴あけ, 溝加工等
ガラス 回転研削盤	テーブルの長さ 1000m/m ダイヤモンドホイール径 125m/m 研削可能径 200m/m	1	ガラス管の端面研削, フランジの研削,
平面研削機	平面盤径 500m/m, 325m/m 回転数 0~200rpm	1	ガラス管, 板, フランジ等の平面摺加工
平面研削機	平面盤径 200m/m 回転数 225rpm	1	ガラスの平面研削, 鏡面研磨
大型電気炉	内寸 500×500×1270m/m 温度範囲 700℃	1	ガラス加工歪除去 アニール用
中型電気炉	内寸 400×400×740m/m 温度範囲 20~700℃	1	ガラス加工歪除去 アニール用
小型マッフル 炉	内寸 200×320×215mm 温度範囲 室温~1100℃	1	ガラス加工歪除去 ガラス板融着
ベーキング炉	内寸 400×420×2000m/m 温度範囲 20~300℃	1	デュワー瓶真空用
サンドブラ スト	吸上式 ノズル径 2.5mmφ	1	ガラス, 金属の表面加工
リューター	回転数 ストレート 2000~50000rpm アングル 1000~14200rpm	1	ガラス, セラミック等の研削

機種名	性能	数量	用途
卓上 複合工作機	旋盤：ベッドの振り 150m/m 心間最大距離 250m/m 主軸回転数 100~2000rpm ミーリング：主軸回転数 100~1500rpm 穴あけ能力 ~10m/m	1	ガラス加工具の加工 (金属、カーボン等)
歪検査機	JIS 直接法, JIS 比較法, 円偏光法, 直接偏光法, 歪標準器法による検査可能	1	ガラスの加工歪の検査, 測定
純粋製造器	採水能力 1.5liter/hour 加熱防止機構, 採水水位自動停止機構付	1	ガラスの化学メッキ 洗浄等
スポット 溶接機	最大出力 2~200W-S 電極加圧力 9.8~130N	1	金属の薄板の溶接 (3m/m 以下)
エアーコンプレッサー	吐出空気量 85/100L/min 最高圧力 0.8MPa	1	マシニングセンタ、サンド ブラスト用
ターボ分子ポンプ	排気速度 210L/s 到達圧力 $<1 \times 10^{-6}$ Pa	1	デュアー瓶の真空引き
スクロールポンプ	排気速度 90L/s 到達圧力 5×10 Pa	1	デュアー瓶の真空引き
ロータリーポンプ	排気速度 240L/s 到達圧力 1×10^{-6} Pa	1	デュアー瓶の真空荒引、 真空封じ
ホットプレート	最高温度 550℃ プレート寸法 250×250mm	1	ガラス板張合せ
TLC プレート カッター	切断能力 200mm <3.0t	1	ガラス板の切断

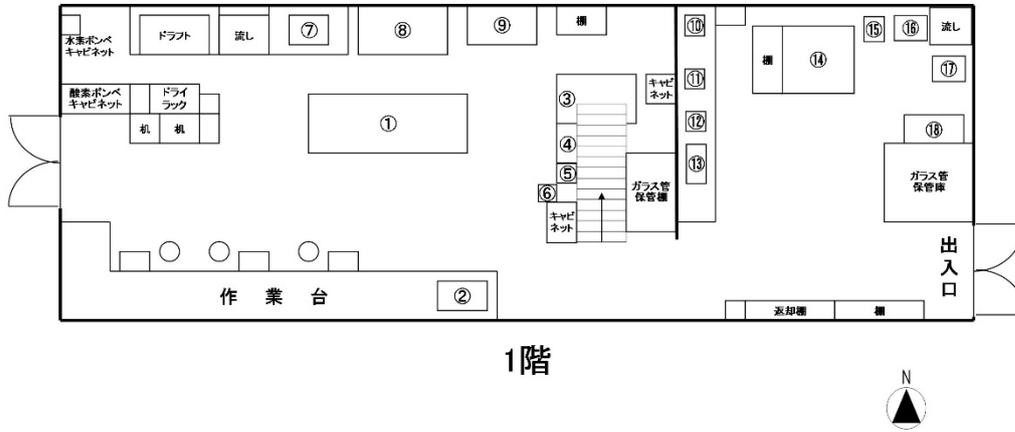
資料

機械工作部門機械配置図

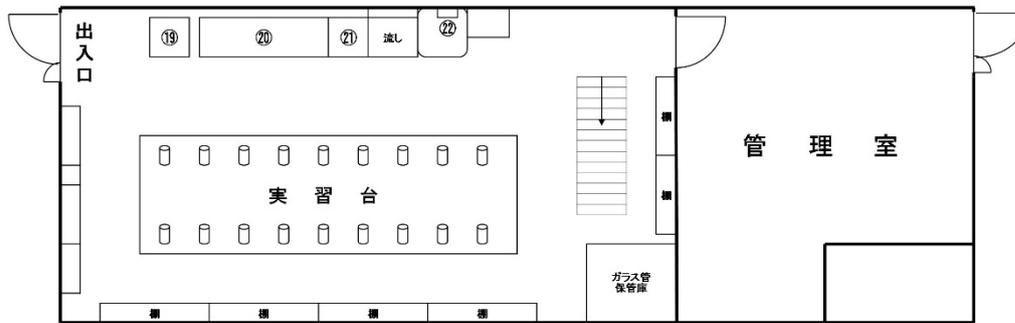


資料

ガラス工作部門機器配置図



1階



2階

- | | |
|--------------|------------|
| ①大型ガラス旋盤 | ⑬小型複合工作機 |
| ②小型ガラス旋盤 | ⑭マシニングセンタ |
| ③大型電気炉 | ⑮エアコンプレッサー |
| ④中型電気炉 | ⑯サンドブラスト |
| ⑤小型マッフル炉 | ⑰万能小型切断機 |
| ⑥歪検査機 | ⑱超音波加工機 |
| ⑦ダイヤモンドバンドソー | ⑲ラップ盤(磨き) |
| ⑧ガラス平面研削盤 | ⑳アニーリング炉 |
| ⑨ガラス回転研削盤 | ㉑真空ライン |
| ⑩スポット溶接機 | ㉒蒸留水製造器 |
| ⑪卓上グラインダー | |
| ⑫小型バンドソー | |

報 告

運営委員会議事録

運営委員各位

工作技術センター 所長

第1回「工作技術センター運営委員会」

日時：平成31年3月27日（水）14：00 ～15：30

場所：工学部第2会議室（旧サブセンター）

出席者：石川（理）、加藤（工）、保野（理）、原（工）【敬称略】

欠席者：渡部（生）、山岸（医）【敬称略】

オブザーバー：佐藤（複合先端研究機構）、須賀（機械）、堀井（ガラス）【敬称略】

報 告

1) 所長の任期満了に伴う次期委員（31年度）について

- ・所長の任期満了に伴う交代について

石川修六先生の任期は31年度も継続されます。

2) 運営委員の交代について

- ・運営委員の任期満了に伴う交代について

生活科学部は渡部 嗣道先生から岡本 滋史先生に交代しました。

他の委員については交代はありません。

3) 大型機器予算による備品購入について

(ア) 機械工作部門 3月6日に納入されました。

(イ) ガラス工作部門 3月22日に納入されました。

4) 利用者委員会からの報告

- ・「Fabrica」30号の発刊について

「Fabrica」30号は3月7日（木）に学内外に配布、発送を完了しました。

- ・センター談話会「火の祭」について

第33回工作技術センター談話会「火の祭」が平成30年11月7日に開催されました。

議 題

1、平成 30 年度決算について

原案通り承認されました。

2、平成 31 年度予算（案）について

原案通り承認されました。

3、その他

・ガラス工作室の移転について

工学部D棟耐震問題のため、ガラス工作室は4号館に移転することが決定している。工事は年内に完了する工程になっているが、移転時期は決定していない。移転時期が決定すれば早めの周知が必要である。

・工作技術センターの HP について

工作技術センターに設置している工作技術センターの HP のサーバーの老朽化に伴い、大阪市立大学 HP のサーバーへの移設を検討している。広報室との調整を進めていくことを確認した。

・工作技術センター規程の改正について

法人統合に伴う、工作技術センター規程の改正について承認されました。

・工作技術センター機器設備更新について

機械設備を更新するための費用として、追加の分担金の拠出や、利用料の値上げについては根拠が必要。

また、臨時運営委員会の時に決定していた財務課との話し合いは実現しなかった。今後、石川所長が事務に話を伺いに行くことを確認した。

資料

各種委員の取り組み

- (1) 「Fabrica」編集委員会：「Fabrica」31号発刊に向けて活動。
- (2) 談話会委員会：
本年は工作技術センター談話会「火の祭」は、34回目を迎えました。
「火の祭」は、工作技術センターが設立された1985年（昭和60年）の翌年から毎年恒例行事として開かれており、この談話会は理系学部間のまたは、教員と技術職員の交流の場として続いています。
第34回工作技術センター談話会「火の祭」を令和元年11月8日（金）午後3時00分～5時05分工学部会議室において開催、講演者及び講演題目は以下のとおりです。

講演

「プレートテクニクスとヒ素・水銀汚染」
益田 春恵（理学研究科）

「電子励起による物質構造の制御
-新しい光ナノ加工プロセス法確立を目指して-」
金崎 順一（工学研究科）

講演終了後「めたせこいあ」（田中記念館 1階）にて引き続き懇親会が催され、17名が参加されました。

講習会実施報告

(1) ガラス細工実技講習会実施報告

平成 31 年度 ガラス細工実技講習会を下記の要領で実施しました。

日 時 : 3 月 28 日～4 月 23 日 10 時 00 分～16 時 00 分

期間中設定日の連続 2 日間

場 所 : 工作技術センターガラス工作部門

内 容 : バーナーの使い方、ヤスリ傷の入れ方、切断方法 2 種、ガラス管の回し方、足場づくり、曲げ方、つなぎ方、T 字管

受講者数: 理学部 17 名、工学部 11 名

(2) ガラス細工体験講習実施報告

令和元年度ガラス細工体験講習を下記の要領で実施しました。

日 時 : 9 月 25 日～10 月 4 日、

14 時 00 分～16 時 30 分

場 所 : 工作技術センターガラス工作部門

内 容 : ガラス棒カット、バーナーの使い方、ガラス細工の基本、課題制作、自由製作

受講者数: 理学部 6 名、創造都市研究科 1 名、教職員 3 名

(3) 機械工作部門利用ガイダンス実施報告

平成 31 年度機械工作部門利用ガイダンスを下記の要領で実施しました。

日 時: 第 1 回 4 月 23 日 (火) 10:50～11:50 受講者 24 名

第 2 回 4 月 23 日 (火) 13:20～14:20 受講者 19 名

第 3 回 4 月 23 日 (火) 15:15～16:15 受講者 17 名

第 4 回 4 月 24 日 (水) 10:50～11:50 受講者 30 名

第 5 回 4 月 24 日 (水) 13:20～14:20 受講者 10 名

第 6 回 4 月 24 日 (水) 15:15～16:15 受講者 15 名

受講者合計 115 名

学部別参加者数

理 学 部 : 17 名

工 学 部 : 98 名

生活科学部 : 0 名

場 所 : 工作技術センター 機械工作部門

内 容 : ①各種工作機械の使用実例 (旋盤、ボール盤、フライス盤)
②金属材料の選別方法、各種届け用紙の記入方法
材料切断機械各種の取り扱いと注意点

令和元年度 工作技術センター利用者委員名簿

【運営委員会】

所 長 石川 修六 (理学部)

運営委員 加藤 健司 (工学部) 保野 陽子 (理学部) 原 晋介 (工学部)
岡本 滋史 (生活科学部) 山岸 敏之 (医学部)

【利用者委員会】

委員 長 加藤 健司 (工学部)

副委員長 篠田 圭司 (理学部)

(機械工作部門委員)

[理学部] 石川 修六 (物理) 井上 慎 (物理) 中野 英一 (物理) 保野 陽子 (化学)

迫田 憲治 (化学) 東海林 竜也 (化学) 伊藤 和央 (生物) 篠田 圭司 (地球)

[工学部] 大島 信生 (機械) 菜嶋 茂喜 (電物) 吉田 大介 (情報) 中西 猛 (化学バイオ)

鈴木 祐介 (建築) 角掛 久雄 (都市)

[医学部] 山岸 敏之 (医学部)

[生活科学部] 岡本 滋史 (居住環境)

[技術職員代表] 松山 利夫 (装置開発・施設系部門)

田中 里佳 (分析部門) 川脇 順子 (医学部)

[センター] 須賀 辰美 富高 幸信 植田 龍一 佐藤 高之

(ガラス工作部門委員)

[理学部] 石川 修六 (物理) 井上 慎 (物理) 中野 英一 (物理) 保野 陽子 (化学)

迫田 憲治 (化学) 東海林 竜也 (化学) 伊藤 和央 (生物) 篠田 圭司 (地球)

[工学部] 脇本 辰郎 (機械) 小林 中 (電物) 吉田 大介 (情報) 佐藤 絵理子 (化学バイオ)

鈴木 祐介 (建築) 角掛 久雄 (都市)

[医学部] 山岸 敏之 (医学部)

[生活科学部] 岡本 滋史 (居住環境)

[技術職員代表] 松山 利夫 (装置開発・施設系部門)

田中 里佳 (分析部門) 川脇 順子 (医学部)

[センター] 堀井 一孝 中原 啓晃

【Fabrica編集委員会】

委員 長 : 東海林 (理)

井上 (理) 保野 (理) 伊藤 (理) 大島 (工) 菜嶋 (工) 吉田 (工) 中西 (工) 鈴木 (工)

須賀 (セ) 富高 (セ) 植田 (セ) 佐藤 (セ) 堀井 (セ) 中原 (セ)

【談話会委員会】

委員 長 : 迫田 (理)

中野 (理) 篠田 (理) 脇本 (工) 小林 (工) 佐藤 (工) 角掛 (工) 岡本 (生)

須賀 (セ) 富高 (セ) 植田 (セ) 佐藤 (セ) 堀井 (セ) 中原 (セ)

工作技術センター職員名簿

(令和元年度)

所 長 石川 修六 (理学研究科 物理学科教授)

機械工作部門

須賀 辰美

富高 幸信

植田 龍一

佐藤 高之

ガラス工作部門

堀井 一孝

中原 啓晃

編集後記

ご多忙を極める中にも関わらずご尽力くださいました執筆者皆様のおかげで本号も無事に発行に至ることができました。ご協力賜りました皆様にこの場を借りて深く御礼申し上げます。大変ありがとうございます。編集ならびに資料作成に際し、ご協力いただきました編集委員会、センター職員ならびにセンター利用者の皆様方にも厚く御礼申し上げます。工作技術センターを活用した幅広い分野の成果を読者の皆様にご紹介できたことは、望外の喜びでございます。ぜひ今後も本センターが、皆様の研究の一助になりますことを祈念しております。(東海林)

【Fabrica編集委員】

委員長：東海林（理）

井上（理）保野（理）伊藤（理）大島（工）菜嶋（工）吉田（工）中西（工）鈴木（工）
須賀（セ）富高（セ）植田（セ）佐藤（セ）堀井（セ）中原（セ）