



京機短信

KEIKI short letter

No.391 2024.04.01

京機会(京都大学機械系同窓会)

tel. & fax. 075-383-3713

E-Mail: jimukyoku@keikikai.jp

URL: <http://www.keikikai.jp>

編集責任者 京機短信編集委員会

目次

- ・ 令和5年度卒業証書授与式・修了証書授与式……平方寛之、嶋田隆広、泉井一浩 (pp.2-3)
- ・ series ものづくり出前講義 (3)「コイルモーター」と「リニアモーターカー」
……藤川卓爾 (pp.4-9)
- ・ series 研究最前線 (13) マイクロバブルマシン……名村今日子 (pp.10-16)
- ・ S42関東同期会……長崎 啓 (p.17)

機械システム学コース卒業証書授与式より



機械理工学専攻・マイクロエンジニアリング専攻修了証書授与式より



5年ぶりに開催した修了記念パーティーより



令和5年度卒業証書授与式・修了証書授与式

工学部物理工学科機械システム学コース長 平方寛之 (H9/1997卒)
工学研究科機械理工学専攻長 嶋田隆広 (H16/2004卒)
同研究科マイクロエンジニアリング専攻長 泉井一浩 (H8/1996卒)

令和6年3月26日、令和5年度の学部卒業式が京都市勧業館みやこめっせにて開催されました。式の終了後、機械システム学コースの卒業生は吉田キャンパスへ移動しました。吉田キャンパスでは、平方コース長より卒業者に卒業証書が授与されました。また、日本機械学会畠山賞受賞者の柴田匠さんと行友雅紀さんの表彰も行われました。コース長はお祝いの言葉とともに、「熱中できることを見つけ、オリジナリティを發揮し、未知の領域を切り開くような活躍を期待しています」とのメッセージを送りました。



日本機械学会畠山賞表彰

令和6年3月25日に、令和5年度の大学院学位授与式が京都市勧業館みやこめっせにて開催されました。終了後、桂キャンパスへ移動しました。桂キャンパスでは、博士課程修了者には研究科長から、修士課程修了者には嶋田専攻長と泉井専攻長から学位記が授与されました。また、日本機械学会三浦賞受賞者の佐々木貴光さん、高塚尚輝さん、北田敦也さんの表彰も行われました。最後に、泉井専攻長から、「今後の変革のAI時代においても、研究活動で鍛えた問題解決力を存分に活かしてほしいこと、人材交流を大切にしてほしいこと」とのメッセージが伝えられ、授与式が終了しました。

修了証書授与式終了後には、京機会主催で修了記念パーティーも開催しました。



日本機械学会三浦賞表彰



修了記念パーティーの様子

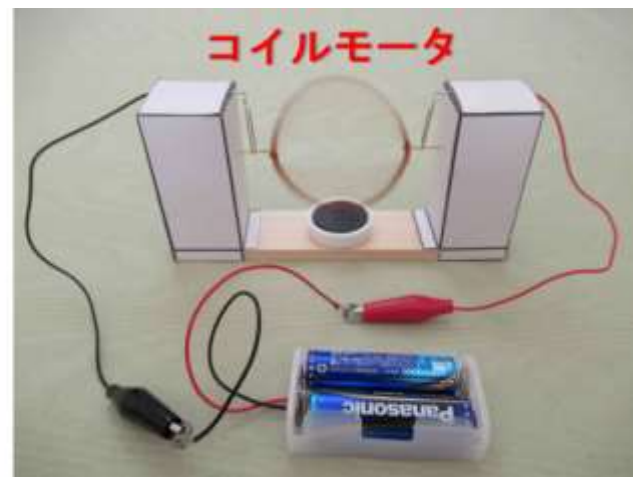
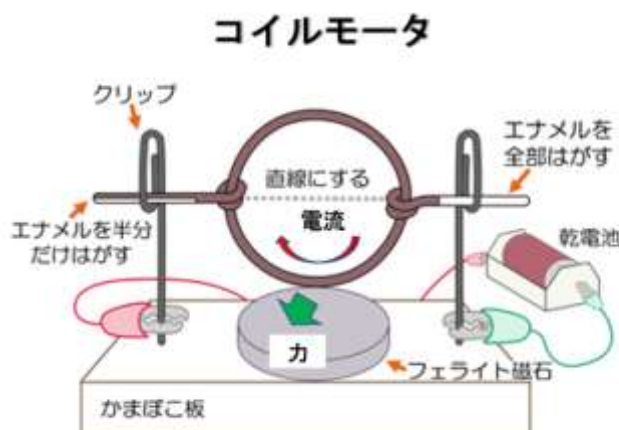
series ものづくり出前講義 (3)

「コイルモーター」と「リニアモーターカー」

藤川卓爾 (S42/1967 卒)

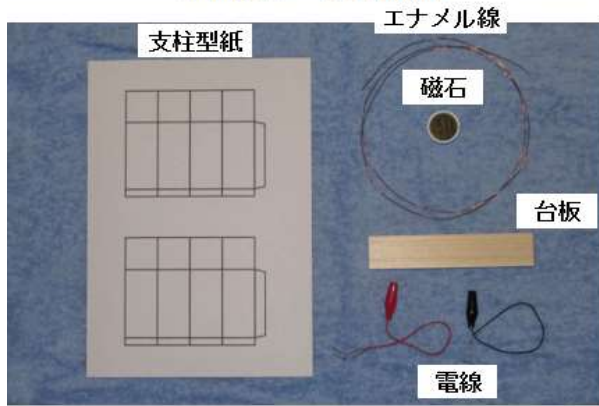
諫早高校の出前授業では先方から「リニアモーターカー」を要請されました。筆者は「リニアモーターカー」については何の経験もありませんでしたので、確実にできるものとして「ミニ風車」を提案しました。また、筆者には初めてですが世間では良く作られている「コイルモーター」も提案しました。

「コイルモーター」は電磁誘導の法則や直流モーターの原理を学ぶためには絶好の機械です。

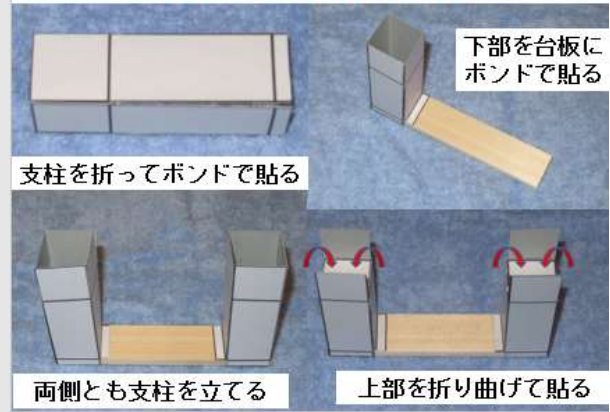


「コイルモーター」はコイルのエナメル線の太さと巻数やコイルの直径などに最適値があるようです。0.4 mm φ、0.6 mm φ と 1.0 mm φ の3種類のエナメル線で試してみました。0.4 mm φ では細すぎて両側の軸受のところが撓んでしまいます。1.0 mm φ ではコイルが重くなり、かつ軸受部分の直径が太くなるので、軸受の摩擦抵抗が大きくなります。電圧が同じでコイルの巻き数を多くすると巻き数に反比例して電流が減少するので電流×巻き数に比例する電磁力は変わりません。電圧も増やして電流を同じようにすれば電磁力が大きくなりますが、やはりコイルが重くなってしまいます。何種類か試してみた上で、0.6 mm φ のエナメル線を缶コーヒーの缶に6回半巻いてコイルを作り、3.0 ボルトで回すと上手く行きました。

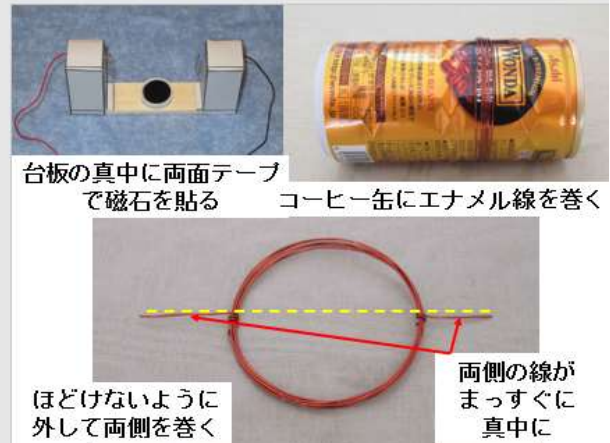
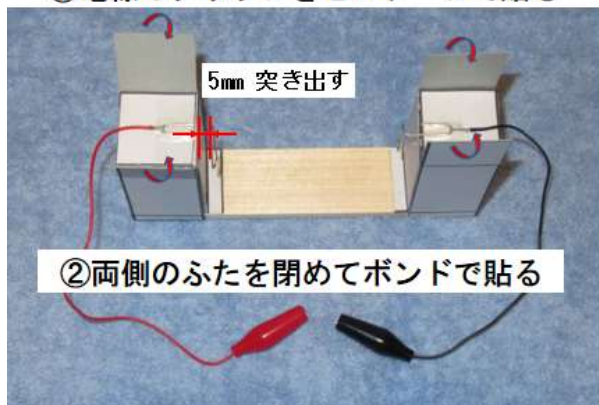
コイルモータの材料



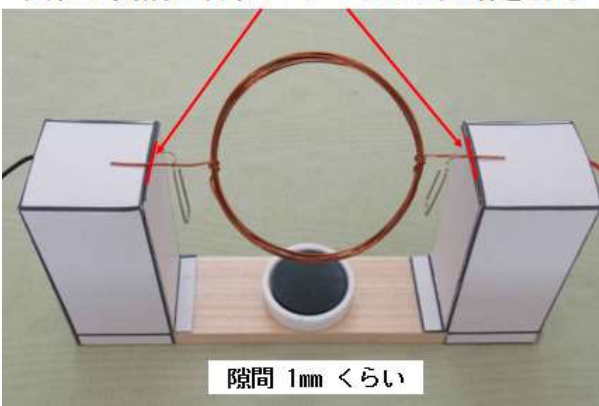
コイルモータ架台の製作



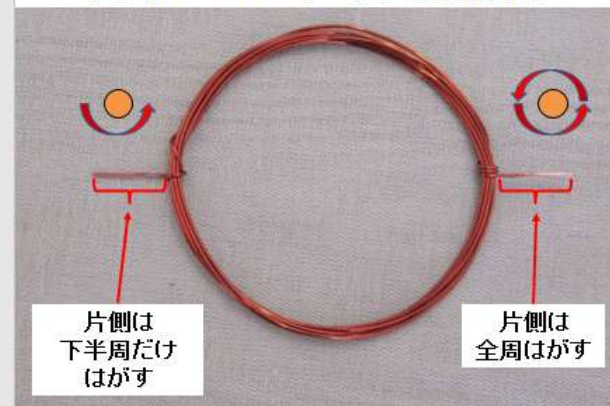
①電線のクリップをセロテープで貼る



支柱の間隔に合わせてコイルの先端を切る



サンドペーパーでエナメルをはがす



それでも、「コイルモーター」は「ミニ風車」と違って、作れば回るというものではありません。「コイルモーター」には回転機械としての重要なポイントがあり、上手く回るためには両側の軸部分が真直ぐになっていることや、この軸に対して重さのバランスが取れていることが必要です。もう一つの重要なポイントは両側の軸受部分のエナメル線の絶縁の剥がし方です。サンドペーパーで片側は全周を剥ぎますが、もう片側は半周だけ剥ぎます。これによって直流モーターの整流子の役割を果たします。この半周だけ剥がす角度が重要です。コイルが鉛直

になった状態で下半分だけ剥がします。こうするとこの状態でコイルに電流が流れて磁石に近い下側の電線に横向きの電磁力が働いて回転します。コイルが半周回ったときにはエナメルで絶縁されて電流が流れないのでコイルは惰性で回ります。一方、コイルが水平になった状態で下半分だけ剥がすとコイルに電流が流れても磁石から遠いし、右側の電線と左側の電線に働く電磁力が相殺して回りません。この辺り、「コイルモーター」は正に「ものづくり」のエッセンスを含んだ機械です。

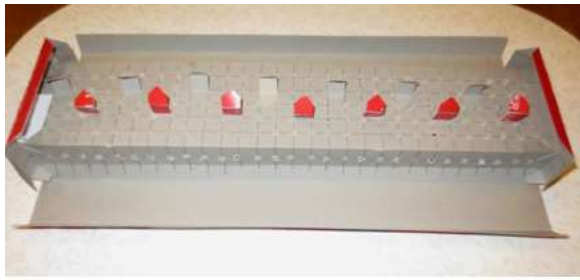
次に「リニアモーターカー」です。諫早高校から要請されたので何とかしないといけないと思って全く自己流で試作を始めました。「リニアモーターカー」は磁力によって車体を浮上させ、磁力によって車体を推進するものです。

まず浮上を試みました。永久磁石を取付けた線路と車両を製作しました。永久磁石は線路と車体でお互いに反発する向きに貼り付けました。線路上に車両を載せると磁石が反発して車両が浮上した直後に軸方向にずれて着床してしまいます。瞬間的安定状態（浮上）とは、その1点だけでバランスが取れている状態で、きわめてバランスが取り難く、少し外乱があるとずれて下に落ち、持続的安定状態（浮上なし）に移ります。浮き上がったその瞬間だけ線路と車両の軽い接触による静摩擦力で静止しているものと思われます。これより、永久磁石による安定浮上は諦めました。



永久磁石による浮上試験

そこで次に空気浮上を試みました。線路の底面と側面に沢山の小穴を開けてヘヤードライヤーで空気を吹き込むと空の車両は浮上しましたが、永久磁石を載せると重くなって浮き上がりませんでした。



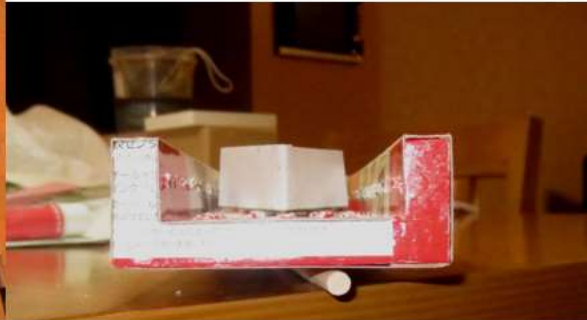
空気浮上の軌道内部



底面と側面の小穴から空気吹き出し



空気源は
ヘアードライヤー



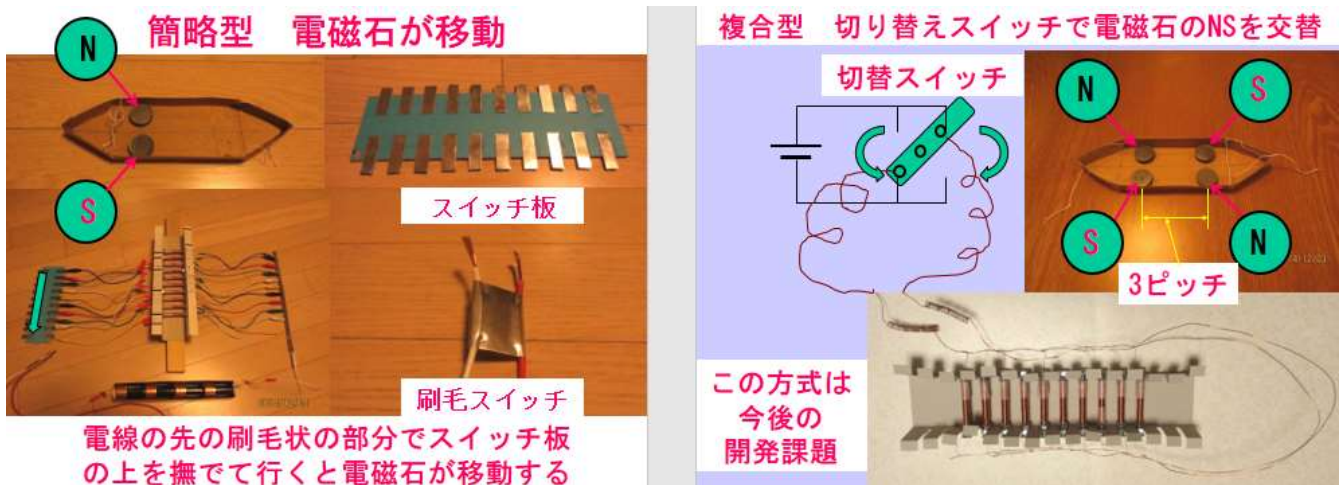
空の車両は浮上するも永久磁石
を載せた重い車両は浮上せず

もう一つは推進機構です。ボルトにエナメル線を巻いて電磁石を作ります。これを等間隔に溝を切った型紙を折り曲げたものに嵌め込んで線路を作ります。



ボルトにエナメル線を巻いた電磁石に電流を流すと片側がN極、反対側がS極になります。これに対応して車両には永久磁石を2つ極性を逆にして貼り付けます。線路の電磁石を励磁すると永久磁石によって車両が移動します。簡略型は単純に電磁石を1本ずつ切り替えながら励磁して行きます。電磁石の片側は電線を電池のプラス極に、反対側はスイッチ板に接続します。電池のマイナス極に接続した電線の先の刷毛スイッチでスイッチ板の上を撫でて行くと励磁された電磁石が順次移動します。複合型は電磁石の電線の接続方向を1本ごとに反転し、N極

と S 極が交互に並ぶようにして、それを切替スイッチによって時間的に反転させます。車両側には電磁石 3 ピッチ分離して永久磁石を 2 組貼り付けます。ただし、この方法はまだ実績がなく今後の開発課題です。



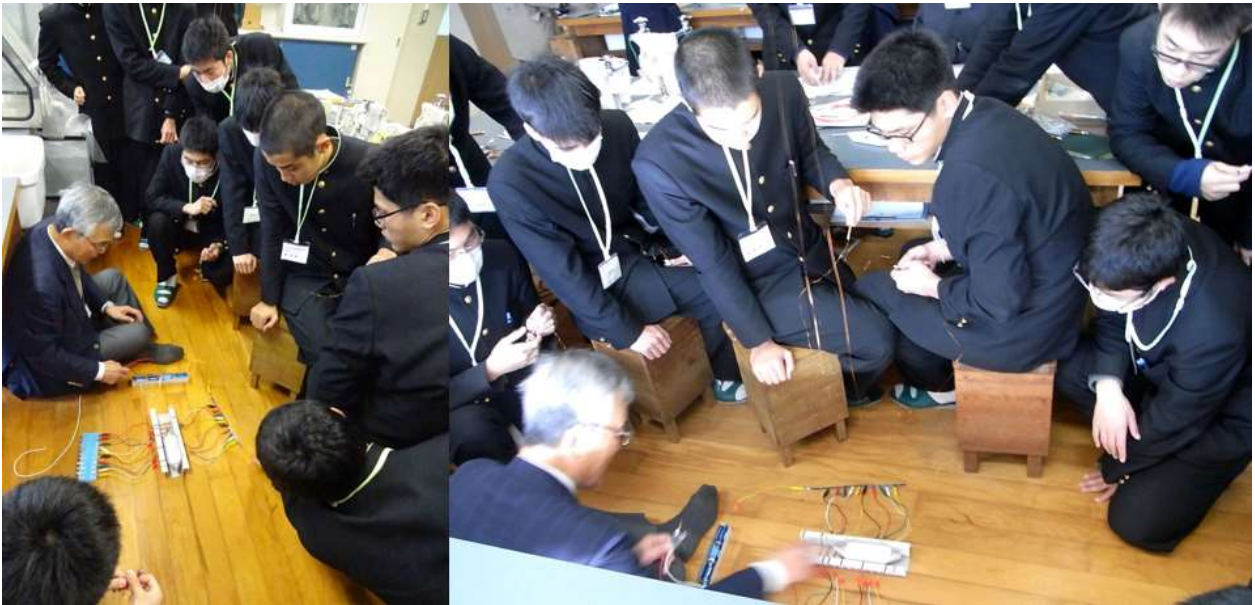
浮上が上手く行かなかったので線路にコロを並べて車両を動かすことを試みましたが、摩擦抵抗が大きく上手く動きませんでした。そこで考えたのが、車両を天井から吊るす方法です。これで推進抵抗がなくなります。



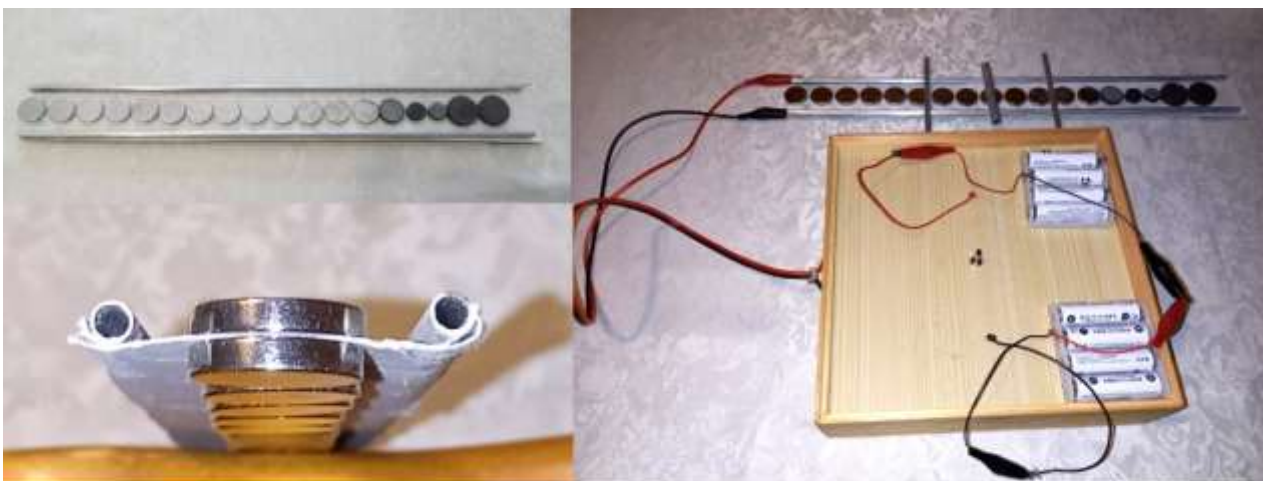
コロは走行抵抗が大きい

天井吊り下げは走行抵抗なし

諫早高校では多くの生徒たちが「ミニ風車」、何人かの生徒たちが「コイルモーター」を作りました。「リニアモーターカー」に取り組んだ生徒たちも少なかつたのですが、電磁石を作るためにボルトにエネメル線を巻くのに時間がかかってしまい、完成に至りませんでした。予め製作しておいたリニアモーターカーのモデルを使ってリニア走行のデモンストレーションをしました。



最近になって、別のタイプの「リニアモーター」があることを知りました。2本のパイプの間に永久磁石を並べて線路を作ります。線路の上に直角にパイプを置きます。線路のパイプを電池のプラス極とマイナス極につなぐと線路上に置いたパイプに電流が流れて線路の軸方向に動きます。永久磁石は通常のフェライト磁石では弱く、ネオジム磁石を使いました。ネオジム磁石を線路の底面に取り付けるのに両面テープで貼り付けたのでは接着力が弱く隣の磁石を近づけただけで剥がれてしまいます。そこで断面図に示すように両側からネオジム磁石で底面を挟むように磁力で取り付けました。



線路の上面と断面

12ボルト電源と切替スイッチ

<追伸> タカラトミー社から本格的な「リニアモーターカー」のモデルが発売されています。さすがはプロです。 [p150526.pdf \(takaratomy.co.jp\)](https://www.takaratomy.co.jp/p150526.pdf)

series 研究最前線 (13)

マイクロバブルマシン

名村今日子 (H22/2010 卒)



「小さな泡は機械部品になりうるか？」

1. はじめに

私は学部4年生から博士後期課程の間に、マイクロエンジニアリング専攻の鈴木基史先生のご指導のもと、光熱変換薄膜と光音響効果に関する研究を主に行っておりました。その間に見つけた水中のマイクロバブル (μm スケールの気泡) とその周りの流れの面白さに魅了され、現在は光熱変換薄膜を活用しながら気液界面と流れに関する研究を行なっています。本稿では、流路壁面近傍に約1 m/sの流れを誘起できる水蒸気リッチバブル (Fig. 1) についてご紹介します。

2. 水蒸気リッチバブルを使ったマイクロ流体駆動

少量の流体を μm スケールの流路の中で扱う技術やそれに関連する研究分野はマイクロフルイディクス (microfluidics) と呼ばれ、1990年代ごろから急速に発展してきました。特に細胞やDNAなどの少量の生体試料を使った検査や研究のプラットフォーム作りに欠かせない技術となっています。このほかにも、例えば水冷技術の高効率化にマイクロフルイディクスが絡んでいます。冷却効率を上げるために、熱交換フィンを微細化して熱交換面積を大きくしたり、熱源により近い位置に微細な流路を掘り込んだりする取り組みが進められ、流路が

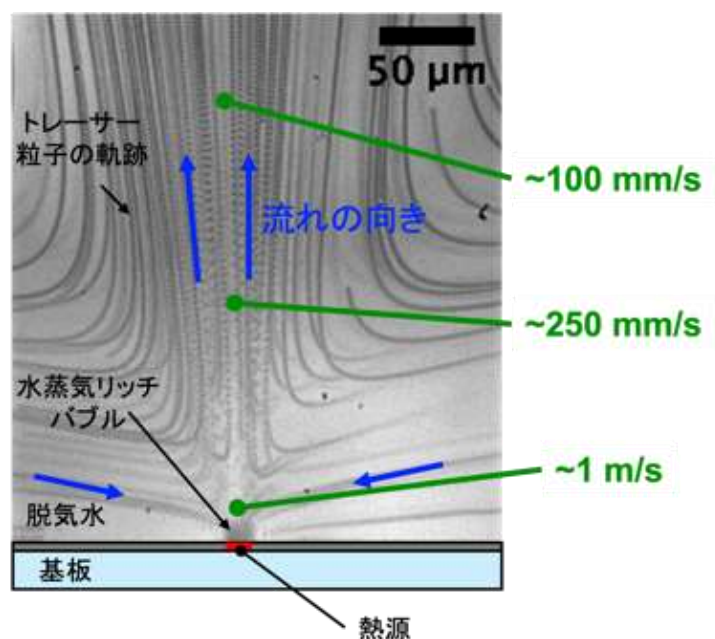


Fig. 1 水蒸気リッチバブル周辺の対流の様子。

μm スケールに到達しています。一見、流路の微細化はいい事ばかりのようですが、 μm スケールの流路の中で流体を駆動したり攪拌したりすることは容易ではありません。流体力学の教科書を読むと、基本的に壁面上で流速は0になると書いてあります。その壁の近くで強い流れを作るためには、粘性によるせん断応力に打ち勝つ強い力で流体を駆動する必要があります。例えば、直径10 μm 、長さ10 mmの管内に平均流速100 mm/sの水の流れを作ろうとすると、管の端から約3気圧もの力で流体を押さなくてははいけません。これは「圧力損失」として知られています。つまり、 μm スケールの流路の場合、外からポンプで流体を押し込んで流すのは大変です。

これに対して我々は、局所熱源とその上に生成するバブルのみを使って、流路壁面近傍に1 m/sに達する流れを作ることに成功しました[1]。この方法を使うと、流路内の流れが必要な場所に小さなポンプを配置できるのです！ Fig. 1は流路壁面に平行な方向から撮影したバブルと流れの様子を示しています。熱源と書かれた部分の上にあるぼんやりとしたものがバブルです。30000 fpsで撮影した1000枚の画像を重ねることで、水中に懸濁したトレーサー粒子の軌跡を可視化して流れの様子を表しています。バブルが流れを生み出しており、緑の文字で示した通り、バブルの近傍には1 m/sにもなる流れが生じます。さらにバブルから100 μm 以上離れた地点においても、100 mm/s以上の流れが作られます。

このようなバブルと流れを作るには、まず局所熱源を準備します。金属細線ヒーターでもいいのですが、我々は熱源の大きさ・形・位置を変えやすい、光熱変換を使って水を加熱しています。まず、 FeSi_2 薄膜や金ナノ粒子薄膜などの光を効率よく吸収して熱に変換する薄膜（膜厚50–100 nm）をガラス基板上に準備します。その薄膜上に波長785 nm、強度10–100 mW程度のCW（continuous wave）レーザーを集光しました。すると、薄膜上のレーザーが照射された直径5–10 μm 程度の範囲が熱源となります。この熱源を使って、脱気水を局所加熱します。脱気水は真空超音波脱気法を用いて比較的簡単に準備できます。準備した脱気水を局所加熱すると、直径10–20 μm 程度のほぼ水蒸気でできたバブルが生成します。ここではこのバブルを水蒸気リッチバブルと呼ぶことにします。この水蒸気リッチバブルは局所熱源上で急峻な温度勾配に晒されます。バブルに働く表面張力は、温度が高くなるほど弱くなる性質があります。そのため、バブルが温度勾配に晒されることで、表面張力勾配ができ、マランゴニ力と呼ばれる剪断力が働きます。

このマランゴニカは周囲の流体を駆動します。また、バブルは局所熱源上で激しい蒸発と凝縮を繰り返しており、サブMHzで自励振動することがわかっています[2]。そのため、この振動が音響ストリーミングと同じ原理で流れを生み出します。これらの効果によって、Fig. 1に示したような流れが得られます。この流れは、 μm スケールの流路内での流体の駆動や攪拌、物体駆動などに活用できると期待されます。また、バブルは必要なときにだけ生成できるので、作って消せる機械部品のように働いてくれるのではないかと期待しています。

3. 水蒸気リッチバブル周辺の流れの向きの制御

水蒸気リッチバブルは強い流れを生み出せるだけでなく、熱源の形を変えることで流れの向きを制御することもできます[3,4]。バブルの周りの流れの向きは、基本的にバブルに与えられた温度勾配の向きに依存します。例えば、平らな基板の上の円形の熱源の上でバブルを生成すると、バブルは基板表面に垂直な方向に温度勾配を感じます。そして高温の基板側から低温の流体側に向かって流れが生じます (Fig. 2 (a,b))。しかし、この熱源の横にもう一つ熱源を設置すると、バブルは基板表面に平行な方向の温度勾配にもさらされます (Fig. 2 (c))。すると、基板表面に平行な方向に流れが傾くのです (Fig. 2 (d))。この方法を使うと、薄い流路の中で流路壁面に平行な方向に流体を駆動できるので、流体のポンピングに適した流れを作ることができます。

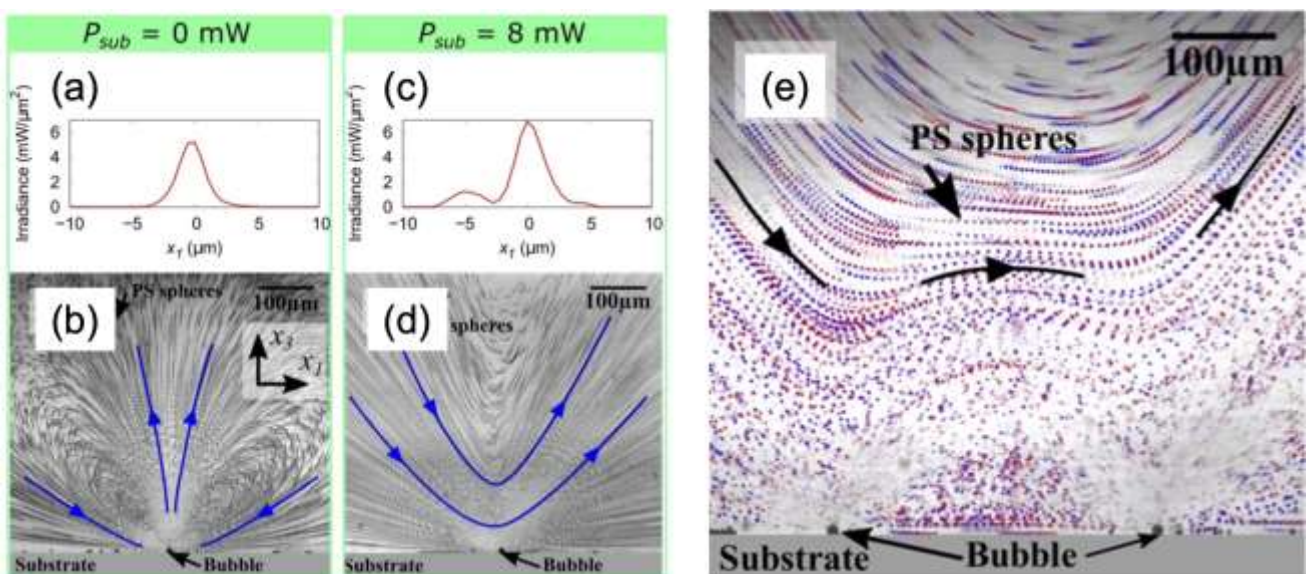


Fig. 2 レーザー1点照射時の(a)放射照度分布と(b)バブル周辺の流れの様子。レーザー2点同時照射時の(c)放射照度分布と(d)バブル周辺の流れの様子。(e)は(d)のバブルを2つ生成したときの流れの様子。[3] (used in accordance with the CC BY license.)

このように水蒸気リッチバブルは一つだけでも強い力を生み出します。1個の水蒸気リッチバブル周辺の流れは、ストークスレット（点力）が作る流れとしてよく近似できることがわかっています[1,3]。つまりバブルをそこに生成するという事は、向きや大きさを指定したストークスレットを配置しているようなものなのです。今のところ、まだ2個のバブルを使った流れのデモンストレーションまでしかできていませんが（Fig. 2 (e)）、複数のバブルを空間的・時間的に配置することで、任意の流れを合成できるのではないかと期待しています。

4. 水蒸気リッチバブル保持の基礎

さて、ここまでのところで「蒸気リッチバブルを生成します」と簡単に書きましたが、せっかくなので水中でバブルが存在する条件について少し触れておこうと思います。バブル半径が時間的に変化しない場合を考えましょう。バブルの半径を R 、内圧を P_b 、外圧を P_0 とし、表面張力を σ とします（Fig. 3(a)）。これらの間には $P_b = P_0 + (2\sigma/R)$ というラプラスの方程式が成り立つことが知られています。表面張力は常に正なので、バブルの内圧は外圧よりも高くなります。また、バブル半径が小さいほどバブルの内圧は高くなります。100°Cにおける飽和水蒸気圧は1気圧ですから、水温が100°Cの時には水蒸気だけでできたバブルは大気圧（1気圧）下では存在できません。加熱によって泡ができる、成長するという事は、少なくともその位置で水温が100°Cを超えていることです。ところが100°Cを超えたからといって、望みの大きさの水蒸気リッチバブルが手に入るわけではありません。例えば水温が105°Cであれば、飽和水蒸気圧は約120 kPaなので、バブル内の水蒸気の圧力はその程度になります。表面張力を58 mN/mとすると、バブルの半径が6 μm 以下のときには、大気圧と表面張力による圧力（ $P_0 + (2\sigma/R)$ ）の方がバブルの内圧（飽和水蒸気圧）よりも高くなるため、バブルは押しつぶされます。一方、バブルの半径が約6 μm のときには大気圧と表面張力による圧力がバブルの内圧とちょうど釣り合います。ところが、バブルが大きくなるほど表面張力による圧力が小さくなるわけですから、バブルは半径6 μm を少しでも超えると爆発的に成長します。水蒸気でできたバブルというのはそのような不安定性を持っています。

我々はバブルを局所熱源上で生成しています。そのため、熱源の周りだけが局所的に100°C以上に昇温しています。実際、バブルから数十 μm 離れたところはほ

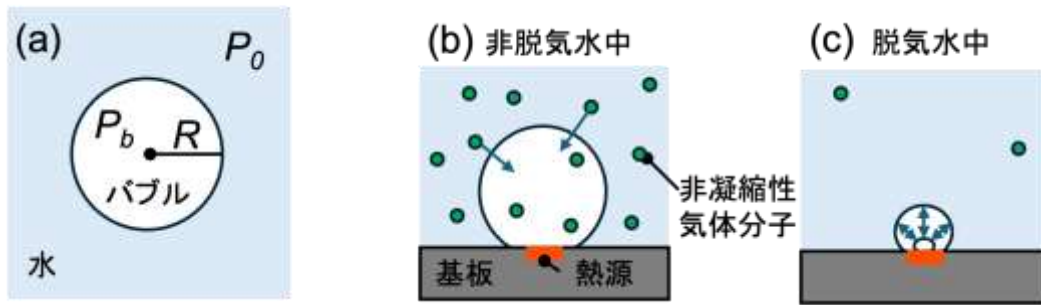


Fig. 3 (a)バブルの模式図。(b)非脱気水中と(c)脱気水中でバブルを生成したときの非凝縮性気体分子の拡散の様子。非凝縮性気体分子を強調して書いている。

ば室温に保たれます。そのおかげで、バブルが大きくなると周囲の冷たい流体で冷やされて、凝縮・収縮します。そうして直径10–20 μm 程度の振動するバブルを熱源上に保つことができるのです。バブルの振動周波数は、沸騰の分野で議論されるバブルの生成、成長、離脱のサイクルというよりは、レイリープレセット方程式などから導かれるバブルの共振周波数に近いことがわかっています[2,5]。

ここまでは完全に水しかないという条件での話をしてきましたが、実際には水の中から完全に酸素や窒素などの非凝縮性気体を取り除くことは容易ではありません。これらの気体が水中に溶けている場合はどうなるのでしょうか？水を局所加熱して蒸発させて、ほぼ水蒸気でできたバブルを生成できたとします。ところがヘンリーの法則で知られている通り、水中溶存気体濃度とそれに接する気体の圧力は比例します。そのため、水中に溶けていた非凝縮性気体分子が、平衡状態を作るためにバブルの中へ拡散してきます (Fig. 3(b))。大気と平衡している水の中でバブルを作れば、バブルの中には約1気圧分の空気分子が出てこようとなります。加圧してたくさんの二酸化炭素を溶かした炭酸水から、大気圧下で泡がたくさん出てくるのは、泡の中に出てくる二酸化炭素の圧力が大気圧以上になるからです。気体の拡散は相変化に比べてゆっくりなので、バブルが大きくなって冷えてしまっても激しく収縮することはなく、適当な大きさを平衡します。つまり、水を脱気してバブルを水蒸気リッチな状態に保つことが、激しく振動するバブルを保持し、強い流れを生み出すために重要なのです (Fig. 3(c))。ではどの程度、水中溶存気体量を減らせば良いのでしょうか？最近の我々の研究で、直径5–10 μm 程度の熱源上で水蒸気リッチバブルを安定して生成するためには、溶存酸素+窒素濃度が10 mg/L以下である必要があることがわかってきました[5]。さらに、非凝縮性気体の溶存量がほんの数mg/L変わるだけで、生成したバブルの内部が水

蒸気リッチになるのか非凝縮性気体リッチになるのかが変わってくるのがわかってきました。実はなぜほんの少しの水中溶存気体量の差でバブルの様子が変わるのか、まだはっきりとしたことはわかりません。今後、バブルの挙動と周辺の流れについて、さらに研究を進めていきたいと思っています。

5. おわりに

本稿では、脱気水中での水蒸気リッチバブルの生成とバブルを使った流体駆動についてご紹介しました。「小さな泡は機械部品になりうるか？」という問いに答える形ではありませんでしたが、気液界面を使って変幻自在の機械を作るのが私の夢です。この問いにはこれから取り組んでいこうと思います。実は最近になって、水を脱気しなくても蒸気リッチバブルを安定して生成できる方法を発見しました。今後この現象を活用できる範囲が増えていくのではと期待しています。泡や気液界面について考え始めて10年経ちましたが、まだまだわからないことが多くて興味がつきません。もし関連する現象にご興味がありましたら、ぜひお声がけください。

参考文献

- [1] Namura, K., Nakajima, K., & Suzuki, M. "Quasi-stokeslet induced by thermoplasmonic Marangoni effect around a water vapor microbubble," *Scientific Reports*, 7, 45776 (2017).
- [2] Namura, K., Okai, S., Kumar, S., Nakajima, K., & Suzuki, M. "Self-Oscillation of Locally Heated Water Vapor Microbubbles in Degassed Water," *Advanced Materials Interfaces*, 7(18), 2000483 (2020).
- [3] Namura, K., Imafuku, S., Kumar, S., Nakajima, K., Sakakura, M., & Suzuki, M. "Direction control of quasi-stokeslet induced by thermoplasmonic heating of a water vapor microbubble," *Scientific Reports*, 9(1), 4770 (2019).
- [4] Namura, K., Hanai, S., Kondo, S., Kumar, S., & Suzuki, M. "Gold Micropetals Self-Assembled by Shadow-Sphere Lithography for Optofluidic Control," *Advanced Materials Interfaces*, 9(18), 2200200 (2022).
- [5] Hiroshige, N., Okai, S., Zhang, X., Kumar, S., Namura, K., & Suzuki, M. "Microbubble oscillation on localized heat source affected by dissolved gases in

water,” Journal of Applied Physics, 135(9), 094701 (2024).

Profile

京都大学工学研究科マイクロエンジニアリング専攻マイクロ加工システム研究室
准教授

1988年、京都市に生まれる。2010年、京都大学工学部物理工学科を卒業。2012年に同大学大学院マイクロエンジニアリング専攻修士課程修了。2015年、同大学大学院マイクロエンジニアリング専攻博士課程修了後、博士号取得。2015年から京都大学工学研究科助教。2022年から現職。

研究室HP : <http://www.mpe.me.kyoto-u.ac.jp>

S42関東同期会

長崎 啓 (S42/1967卒)

令和6(2024)年3月22日(金)にS42卒(S38入学)関東同期会 愛称「金時会」が開催されました。



岡 毅遥、平尾 隆、古川 遵、前野幹彦、若園 修
松浦重治、藤川卓爾、元木敏雄、林 正広、長崎 啓、側島克信

傘寿を迎えた人、迎える人など、いつもの仲間11人が出席しました。集まる人数が何人になるまで続けるのかという話も出ましたが、大先輩に倣って2人になるまで続けたいものです。

以上