

マイクロ波加熱の基礎と応用

三谷 友彦^{1*}

Basics and applications of microwave heating

Tomohiko Mitani^{1*}

概要

本稿では、生存圏研究所で推進しているマイクロ波加熱の応用研究事例について記す。また、その前段階として、熱に関する話題提供ならびにマイクロ波加熱の基礎としての加熱原理について述べる。

1. はじめに

昨年（2018年）の日本の夏は大層暑かったらしい。。。「らしい」と書いたのは、著者が2017年9月～2018年9月の1年間アメリカ・フロリダ大学に長期滞在中だったため、日本の酷暑を経験していないからである。昨年のフロリダの夏は最高気温が連日32℃前後で、これでも十分に暑いのだが、日本の40℃越えはさぞ厳しかったに違いない。ちなみに、アメリカ・カリフォルニア州のデスバレーでは昨夏に52℃を観測したそうである。いずれにせよ気温が体温を超えてしまえば、やる気が失せるのみならず体温の調節機能すら危ぶまれる状況である。

さて、本稿では「マイクロ波加熱」について、加熱原理や研究の応用例について述べる。マイクロ波加熱は電子レンジに代表されるように実生活の中にも広く普及している加熱方法であるが、まずその前段階として「熱」という言葉に焦点を当てたい。

「熱」という言葉からまず思い浮かぶのは、お湯、ストーブ、夏の日差しを浴びた車のボンネット等々「何かしら熱いもの（温かいもの）」である。これらの熱いものは、およそ周辺環境の温度や自分自身の体温を基準に判断することが多い。周りよりも温度が高いから「熱い」、自分の体温より温度が低いから「冷たい」ということである。また、人間の体温そのものを「熱」で表現することもある。例えば「平熱」とか「39℃の熱がある」という言葉である。これらは健康状態における体温を基準にして比較している。いずれにせよ、日常で使われる「熱」という言葉は、何か基準となる温度があって「熱い」とか「冷たい」とかを表現する。

一方で、物理用語、特に熱物理学や熱力学分野における「熱(Heat)」という言葉は少し意味合いが異なる。例えば文献¹⁾では、熱を「熱源との“熱的接触”による系へのエネルギー伝達」と定義しており、文献²⁾では熱を「2つの物体間の“温度差”に起因する一方の物体から他方の物体への“自発的な”エネルギーの流れ」と定義している。熱源とは、それ自身の温度が外部環境に左右されないエネルギーの源のようなものであり、例えば200℃に設定した巨大なオープンレンジを想像すればよい。系とは、温度が一樣な物体あるいは物体を含む環境と考えてよく、例えばオープンレンジに入れる前の20℃の牛肉と思って構わない。いずれにせよ重要なことは、2つの物体間あるいは熱源と系との間に温度差があり、それらが接触していることによって一方から他方にエネルギーが伝わる状況でのエ

2019年6月14日受理.

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生存圏電波応用分野.

* E-mail: mitani@rishi.kyoto-u.ac.jp

エネルギー伝達のことを「熱」という。すなわち、200℃のオーブンレンジに 20℃の牛肉を入れると、オーブンレンジから牛肉に「熱が伝わって」牛肉の温度が上がる。

ちなみに、熱物理学には「仕事(Work)」という用語の定義もあり、例えば文献²⁾では「系に出入りする熱以外の全てのエネルギー伝達のこと」と書かれている。例えば、紙の上に鉛筆で書いた文字を消しゴムで消すとき、何度も消しゴムをこすると消しゴムが熱くなる。これは、どこから消しゴムに「熱が伝わった」のではなく、「紙の上で消しゴムをこすという仕事」によって消しゴムに「エネルギーが伝わり」、結果的に「消しゴムの温度が上がった」という解釈をする。

実は、我々が日常的に使っている「熱」という言葉は、熱物理学での「仕事」に相当することが多く、例えば上述した消しゴムの温度上昇も「摩擦熱」と呼ばれる。本稿で紹介するマイクロ波加熱も同様に、マイクロ波自身が高温を持っているのではなく、マイクロ波が物体（例えば食品）に何らかの仕事をし、マイクロ波のエネルギーが食品に伝わることによって、最終的に食品の温度が上がるという現象を「マイクロ波加熱」と呼んでいる。

2. マイクロ波加熱の原理

マイクロ波とは電磁波（電波）の一種であり、数 GHz～数十 GHz の周波数、約数十 cm～数 cm の波長をもつ。周波数とは 1 秒間あたりの波の振動数のことで、例えば関西において 100V コンセントから得られる交流の電気は 60Hz の周波数（1 秒間に 60 回の振動）をもつ。G（ギガ）は 10 億のことで、つまりマイクロ波は 1 秒間に数十億回から数百億回の振動数を持つ電磁波である。波長は 1 回の振動分に対応する波の長さのことで、真空中を伝搬する電磁波の場合は光の速さ（秒速約 30 万 km）と周波数を用いて（波長）＝（光の速さ）÷（周波数）と定義される。よって、秒速 30 万 km（＝秒速 3 億 m）を数十億回の振動数で割れば、波長は約数十 cm となる。ちなみに、電線を流れている 60Hz の交流の電気も空中を伝搬させることができれば電磁波とみなすことができ、その時の波長は約 5000km となる。また、周波数の逆数のことを周期と呼び、マイクロ波の周期は数億分の 1 秒～数十億分の 1 秒となる。

マイクロ波によって物体が加熱される現象は、「誘電加熱」という原理に基づくが、この誘電加熱についてここから詳しく説明をする。まず、ある物体に電氣的な影響を与えた時、その物体内で電氣的な偏りが発生するかどうかで物体を区別することができる。例えば、図 1 に示すように物体を金属板で挟んで、片方の金属板に電池の＋極、もう片方の金属板に電池の－極を取り付けて、電池のスイッチを on にする。このとき、電気は正と負でお互いを引き付けあい、正と正や負と負ではお互いが反発するので、金属板の＋極に物体内の－が引き寄せられ、金属板の－極に物体内の＋が引き寄せられる。したがって、図 1 のように物体内には電氣的な偏りが発生する。このような物体を「誘電体」と呼び、誘電体内部に発生する電氣的な偏りを「誘電分極」と呼ぶ。また、電池のスイッチを on にした時に金属板間に発生する電氣的な場のことを電界（電場）と呼ぶ。電界の向きは、図 1 の矢印で表すように金属板の＋極から－極に向かう方向に定義する。

さて、この誘電分極は電池のスイッチを on にした瞬間に発生するのではなく、それなりの時間経過を伴って発生する。また、電池のスイッチを off にすれば元の状態に戻るが、この際もそれなりの時間経過を伴って元に戻る。分極が発生するまでの時間は分極の種類によってマチマチであるが、

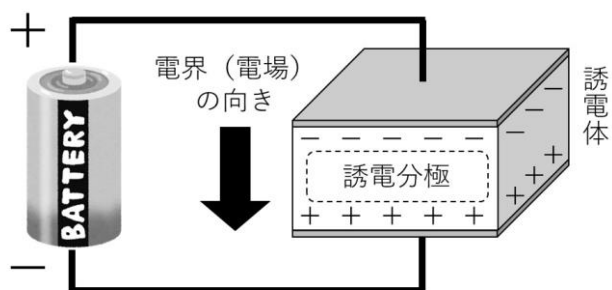


図1：誘電体と電界（電場）と誘電分極の関係。
誘電体に電界（電場）をかけると誘電体内に電氣的な偏り（誘電分極）ができる。

誘電体全体が分極するような場合に最も時間がかかる。といっても何十万分の1秒～何十億分の1秒という一瞬の出来事であるが、実はこの分極に要する時間がマイクロ波の周期に結構近いのである。

電磁波には上述した電氣的な場（電界）と磁氣的な場（磁界）の両方が存在し、電磁界の正負の向きが周期に合わせて交互に変化する。したがって、誘電体が電磁波に照射されると、電界の正負の変化に伴って誘電体内部の誘電分極の正負も変化する。このとき、電磁波の周期が誘電分極の変化時間と比べて十分に遅い場合は、電磁波の電界変化に対して誘電分極が直ぐに追いつくことができる。ところが、電磁波の周期が誘電分極の時間変化と同程度になると、電磁波の変化に対する誘電分極の発生が遅れ始めるため、誘電体内に分極が発生しようとしているにも関わらず電界の向きが先にひっくり返ってしまう。つまり、誘電分極の+側に電磁界の+側が近づき、誘電分極の-側に電磁界の-側が近づいてくるので、反発作用によって誘電体内の+と-が突然反対方向に移動させられるような状況となる。誘電体の気持ちになって考えると「+極（-極）があるからそっちに近づいたのに、いざ近くまで来てみたら-極（+極）に変わっているじゃないか！」と、急ブレーキを踏まされたあげく反対方向にUターンさせられるのである。しかも、Uターンして逆方向に向かったら、また電界の正負が反転しているので急ブレーキを踏まされて、、、ということが1秒間に何十億回と誘電体内に起きていることとなる。図2にその様子と、誘電分極する+成分と-成分を自動車の動きに見立てた比喩的な図を示す。急ブレーキをかけさせているのが電磁波の電界の役割であり、急ブレーキによって生じるエネルギー損失が電磁波から誘電体に伝わるエネルギーに相当する。これによって、電磁波から誘電体にエネルギーが伝わり、最終的に誘電体の温度が上昇する。

上述の現象は誘電体がもつ分極時間と電磁波の周期に依存するため、電磁波の電界変化の周期が遅すぎても早すぎても、この現象は起こりにくい。遅すぎる場合は電界変化に対して誘電分極が十分に間

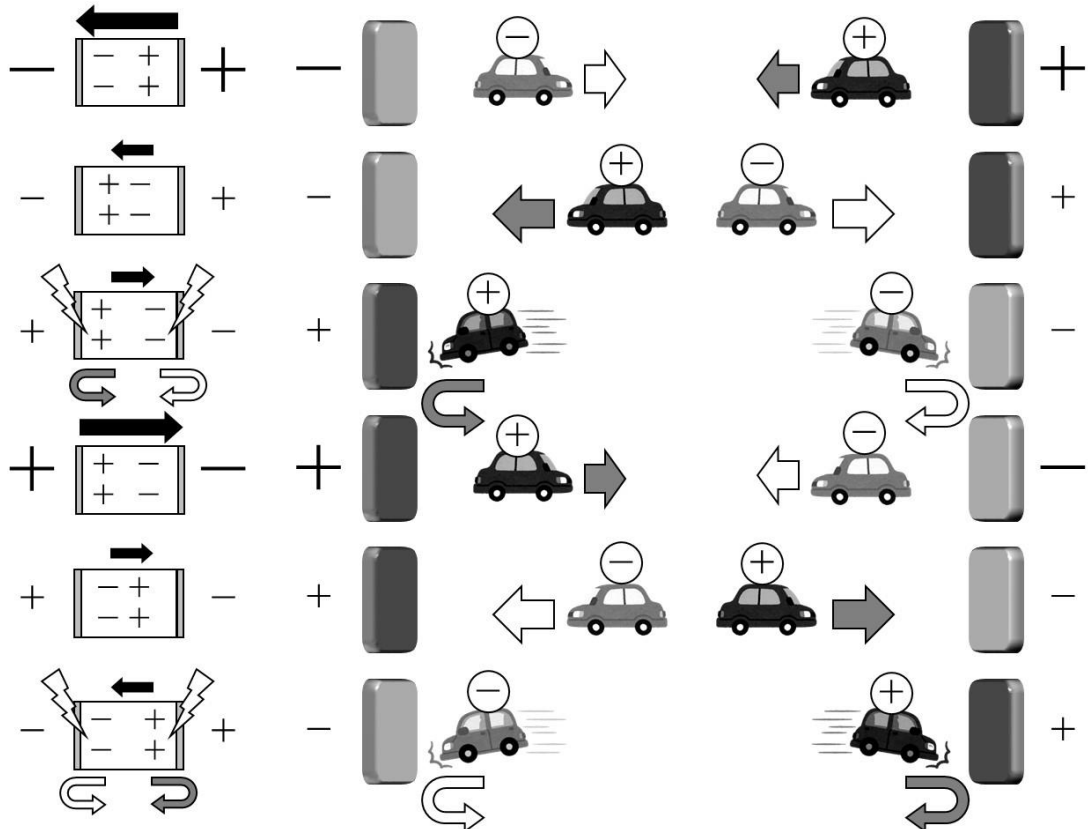


図2：電界の向きの変化と誘電分極の変化の図。誘電分極より先に電界が変化すると、誘電分極にブレーキがかかってしまう。右図は、誘電分極する+成分と-成分を自動車の動きに見立てた比喩的な図。ブレーキのエネルギーが最終的には熱に変わることによって誘電体が加熱される。

に合うので急ブレーキを踏む必要がないし、早すぎる場合は誘電分極が全く間に合わないのでアクセルもブレーキも踏めずにほぼ留まった状態となる。結局のところ、誘電分極に近い周期を持った電磁波が誘電体にエネルギーを伝える（つまり、電磁波が誘電体に仕事をすること）ことができ、その周期を持った電磁波がマイクロ波ということである。これがマイクロ波加熱の原理であり、このような加熱原理を「誘電加熱」と呼ぶ。

3. 生存圏研究所におけるマイクロ波加熱応用研究

3.1 マイクロ波加熱応用研究の概要

マイクロ波加熱の最大の応用先は電子レンジの世界的普及が示すように食品加熱であるが、食品以外にも様々な分野でマイクロ波加熱が利用されている。図3にマイクロ波加熱の応用分野を示す。特に、1980年代後半辺りからマイクロ波を化学反応に利用する研究が創出される³⁾とともに、金属粉末をマイクロ波で加熱できることが1999年に発見⁴⁾されて以降、様々な分野でのマイクロ波加熱応用研究が広まっている。また、元々は電気電子工学分野あるいは物理分野で扱われる電磁波

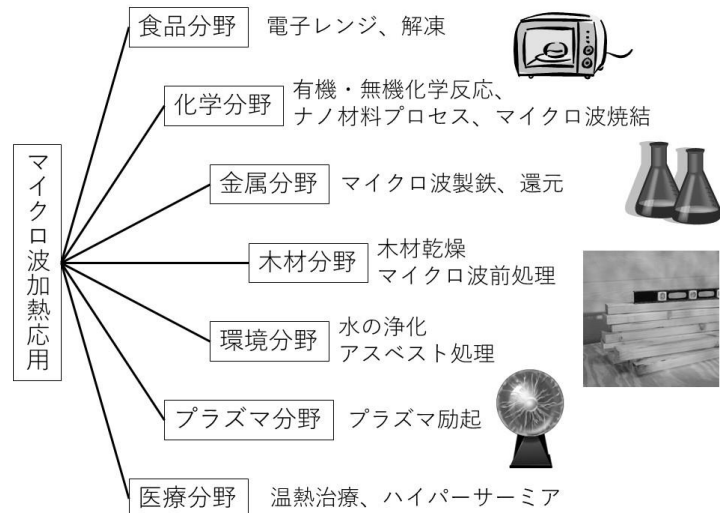


図3：マイクロ波加熱の応用分野。

（マイクロ波）が、化学分野や農学分野、医療分野等の様々な異分野で利用されていることから、最近のマイクロ波加熱応用研究は異分野が集まった学際融合研究となることが多い。

マイクロ波加熱の最大の特徴は、「加熱速度が速いこと（高速性）」と「温まりやすいもの／温まりにくいものがあること（選択性）」である。この特徴については、「陶器のマグカップに入った牛乳をオーブンレンジで温めるとどうなるか？電子レンジで温めるとどうなるか？」を想像すると分かりやすい。オーブンレンジで牛乳を温める場合（実際にそうする人はごく少数だと思われるが）、温まるまでには時間がかかるし、そもそもの準備段階としてオーブンレンジ自体の温度を上昇させる必要がある。また、いざ牛乳が温まった時はマグカップも同じ温度まで温まるので、マグカップの耳を素手で持つと火傷をする危険性がある。一方、電子レンジで温める場合は、1分もかからずに牛乳を温められるだけでなく、マグカップ自体はさほど温まらないので、マグカップの耳を素手で持つことができる。前者が加熱の高速性、後者が加熱の選択性である。特に加熱の選択性については通常の加熱方法では起こり得ないため、これまで想定できなかったような化学反応の可能性が期待されている。また高速性に関しても、通常の化学反応よりも反応時間が大幅に短縮されるような事例が数多く存在する⁵⁾。

3.2 木質バイオマス前処理用マイクロ波加熱装置の研究

木質バイオマスは再生可能エネルギーの一つとして注目されており、その利用方法の一つとしてバイオエタノール等のバイオ燃料生成が挙げられる。ただし、木質バイオマスを構成するセルロース、ヘミセルロース、リグニンのうちバイオエタノールの原料となるのはセルロースとヘミセルロースであるため、リグニンを取り除いてセルロースとヘミセルロースを効率よく糖化・発酵させるための「前処理工程」が必要となる。前処理工程で利用される手法としては、酸・アルカリを用いた化学的手法や爆砕等の物理的手法があるが、我々の研究グループではマイクロ波加熱を利用した前処理装置の開発に取り組んできた。

NEDO プロジェクト「バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発（先導技術開発）／木質バイオマスからの高効率バイオエタノール生産システムの研究開発」で開発した木質バイオマス前処理用マイクロ波加熱装置の写真を図4に示す。図4左側の写真は、研究初期の頃に開発した装置であり、金属パイプ中を流れる木質バイオマス（木粉あるいはチップを含む水溶液）の途中にマイクロ波照射装置を3ユニット（1ユニットあたりの最大マイクロ波出力1.2 kW）設置したものであり、木質バイオマスが搬入口から搬出口に達するまでマイクロ波によって連続的に前処理される⁶⁾。また、ユニット数は木質バイオマスのパイプ内の移動速度や処理量、反応時間によって可変にすることができる。図4右側の写真は、容量50Lまで装置を大型化したものであり、木質バイオマスを装置上部から搬入して下部から搬出する途中にマイクロ波照射装置を8ユニット（1ユニットあたりの最大マイクロ波出力1.5 kW）設置したものである⁷⁾。容量50Lの大型装置においては、木質バイオマスの加熱速度から算出されるマイクロ波吸収効率（照射したマイクロ波エネルギーのうち木質バイオマスに吸収されるエネルギーの割合）79%を達成した⁷⁾。



図4：木質バイオマス前処理用マイクロ波加熱装置の写真。（左：マイクロ波出力1.2 kW×3ユニット、右：マイクロ波出力1.5 kW×8ユニット、容量50 L）

3.3 化学反应用マイクロ波加熱装置の研究

前節の事例は比較的大規模なマイクロ波加熱装置の研究開発であったが、マイクロ波加熱を少量の反応系で試験的に利用したい場合には大規模装置は不向きである。また、電子レンジを改造したマイクロ波加熱研究や、マイクロ波を使った化学反応研究用の市販マイクロ波照射装置も存在するが、これらの装置は2.45 GHz帯の周波数（電子レンジと同じ周波数帯）を利用していることがほとんどである。2.45 GHzの周波数帯が利用される理由は、この周波数帯がマイクロ波加熱用途として国際的に決まっているからであるが、必ずしも学術的観点から決定された周波数帯ではない。もちろん、2節で述べたようにマイクロ波は誘電加熱に適した電磁波であるが、本当にどの周波数が化学反応にとって適しているのかは自明ではない。したがって、学術的なマイクロ波加熱研究においては、広い周波数範囲で利用できるようにマイクロ波加熱装置の方が何かと有用性が高い。

以上の背景より、広い周波数範囲（「広帯域」と呼ぶ）で利用可能なマイクロ波加熱装置の研究開発を行った。

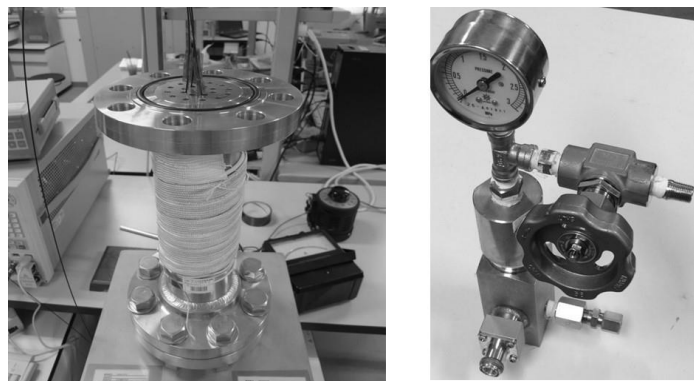


図5：広帯域マイクロ波加熱装置の写真。（左：容量360mL程度、右：容量20mL程度）

JST/CREST プロジェクト「二酸化炭素資源化を目指した植物の物質生産力強化と生産物活用のための基盤技術の創出／電磁波応答性触媒反応を介した植物からのリグニン系機能性ポリマーの創成」で開発した広帯域マイクロ波加熱装置の写真を図5に示す。左の写真は容量 360 mL 程度の容器であり、被加熱物を純水とした場合に 1.1 GHz～2.7 GHz の広い周波数範囲において装置の反射電力（照射したマイクロ波電力が被加熱物に加えられずに反射される電力の割合）を 10%以下に抑えている⁸⁾。右の写真は、容器容量を 20 mL 程度まで小型化した容器であり、被加熱物を純水とした場合に 1.45 GHz～2.7 GHz の広い周波数範囲において装置での反射電力を 10%以下に抑えている⁹⁾。今後は、これらの装置を使った様々なマイクロ波周波数での化学反応実験の実施が期待される。

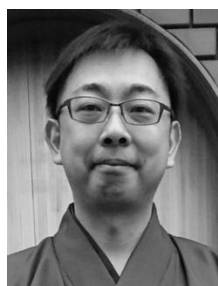
4. おわりに

マイクロ波加熱の応用研究は今後ますます活発化することが予想される。これは近年の論文数の増加傾向を見ても明らかであり、例えば Google Scholar において“microwave”、“biomass”というキーワードで検索すると、2012 年に 80 報強であった論文数が 2016 年には 250 報近くまで飛躍的に増加している¹⁰⁾。マイクロ波加熱応用研究の黎明期は、電子レンジを用いた比較的原始的な研究事例が多かったが、今後は半導体発振器・増幅器を利用した制御性の高いマイクロ波加熱応用の研究成果が生まれてくるであろう¹¹⁾。生存圏研究所では全国・国際共同利用設備「先進素材開発解析システム(ADAM: Analysis and Development System for Advanced Materials)」において、高度マイクロ波加熱応用及び解析サブシステムを有しており、様々な周波数帯でのマイクロ波加熱実験が実施可能である。これらの共同利用を通じ、マイクロ波加熱応用研究に関する様々な学際融合研究の実施が期待される。

参考文献

- 1) Kittel, C., Kroemer, H., *Thermal Physics*, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1980.
- 2) Schroeder, D. V., *An Introduction to Thermal Physics*, Addison Wesley Longman, San Francisco, 2000.
- 3) Estel, L., Poux, M., Benamara, N., Polaert, I., *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, **113**, 56-64, 2017.
- 4) Roy, R., Agrawal, D., Cheng, J., *Nature*, **399**, 668-670, 1999.
- 5) 堀越智、谷正彦、佐々木政子、図解よくわかる電磁波化学、日刊工業新聞社、2012.
- 6) Mitani, T., Oyadomari, M., Suzuki, H., Yano, K., Shinohara, N., Tsumiya, T., Sego, H., Watanabe, T., *Journal of the Japan Society of Energy*, **90**, 881-885, 2011.
- 7) Hasegawa, N., Mitani, T., Shinohara, N., Daidai, M., Katsura, Y., Sego, H., Watanabe, T., *IEICE Trans. Electron.*, **E97-C**, 986-993, 2014.
- 8) Mitani, T., Hasegawa, N., Nakajima, R., Shinohara, N., Nozaki, Y., Chikata, T., Watanabe, T., *Chem. Eng. J.*, **299**, 209-216, 2016.
- 9) Mitani, T., Nakajima, R., Shinohara, N., Nozaki, Y., Chikata, T., Watanabe, T., *Processes*, **7**, (3), 143, 2019.
- 10) Mitani, T., *J. Jpn. Petrol. Inst.*, **61**, 113-120, 2018.
- 11) 三谷友彦、ケミカルエンジニアリング、**64**, (6), 1-5, 2019.

著者プロフィール



三谷 友彦 (Tomohiko Mitani)

1999 年京都大学工学部電気電子工学科卒業／2001 年京都大学大学院情報学研究科修士課程修了／2006 年京都大学博士(工学)／2003 年京都大学宙空電波科学研究センター助手／2012 年同大学生存圏研究所准教授、現在に至る。マイクロ波加熱応用、無線電力伝送などマイクロ波応用に関する研究に従事。趣味は、スポーツ（実施と観戦の両方）、居酒屋やバーに行くこと、茶道（裏千家）。