



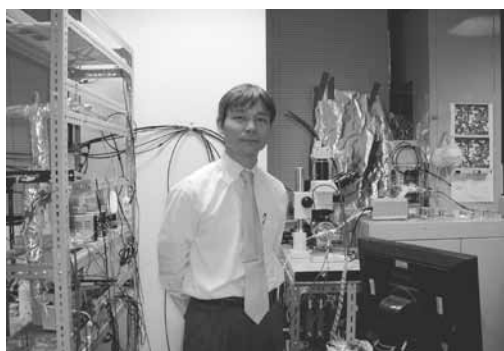
In Laboratory Now

研究室訪問 1

エネルギー効率の向上へ

花村 克悟 研究室

～炭素循環エネルギー研究センター



花村 克悟 教授

近年、温暖化の一因と考えられている CO_2 を少しでも減らすため、世界中でさまざまな取り組みが行われている。温暖化の進行を完全に食い止めるには、新たなクリーンエネルギーの開発や省エネルギー化の促進により、排出される CO_2 の量を抜本的に削減することが必要不可欠とされているのだ。

花村研究室では、社会の持続可能な発展を実現するために、 CO_2 排出量の抑制につながるさまざまな研究を行っている。それらの研究を3つに分けて紹介していこう。

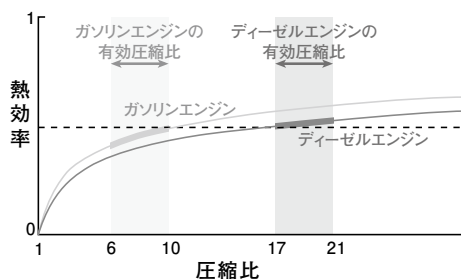


フィルターの内部を観る技術

自動車は、私たちの代表的な移動手段であり、同時に大量のエネルギーを消費して CO_2 を排出する機械でもある。この自動車による環境負荷を軽減する一つ的手段として、ディーゼル車の利用が挙げられる。ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べて熱効率がいため、 CO_2 の排出量が少ない。このディーゼル車を広く普及させることができれば、省エネルギー化と CO_2 排出量削減の両方を実現することができる。

ディーゼルエンジンの熱効率がガソリンエンジンのものより高いのは、エンジン内の圧縮系の仕組みが違うからだ。エンジンでは燃料の燃焼を極短時間で行う必要がある。ガソリンエンジンは空気とガソリンの混合気体を圧縮し、火花によって一点を着火させ、燃焼を徐々に全体に広げるため、一度に燃焼させる混合気体の量には限界があり、圧縮比（圧縮前後のシリンダー容積の比）は10程度が最大となる。一方、ディーゼルエンジンは圧縮した高温の空気の中に燃料である軽油を投入し、全体を一瞬で自然発火させて同時に燃焼させるため、圧縮比を17～21程度まで上げることができ、その結果熱効率が高くなるのだ（図1）。

しかし、ディーゼルエンジンの排気ガスには、ガソリンエンジンのものに比べて、大気汚染の原因となる窒素酸化物や炭素からなる微粒子（スス）が大量に含まれているという欠点がある。窒素酸化物は燃料を完全燃焼させると発生し、ススは燃料を不完全燃焼させると発生するため、双方の発生量を同時に減らすことは原理上不可能なのだ。ディーゼル車の普及には、これらの物質を除去し、排気ガスをきれいにする技術が必要である。



同じ圧縮比で熱効率を比べるとガソリンエンジンの方が高いが、より高い圧縮比を使えるディーゼルエンジンの方が、結果的には高い熱効率となる

図1 圧縮比-熱効率のグラフ

窒素酸化物の除去には、触媒を使い、尿素水溶液を混ぜることで、無害な窒素と水蒸気に変換するという方法がある。また、ススを取り除くには、セラミックス製のフィルター (Diesel Particulate Filter; DPF) で捕集するという方法が一般的である。だが、ススを捕らえ続けると次第にDPFの内部が詰まっていき、内圧が高くなる。その結果、エンジンにかかる負荷が大きくなってしまふのだ。そのため、ある程度DPFの内部が詰まるたびに、再生用バーナーで加熱した600度の高温ガスを流し、捕集されたススを焼き飛ばす必要がある。このとき、セラミックスにはその内部に大きな温度差があると割れてしまうという性質があるので、DPFを壊さないように高温ガスの流し方を工夫しなければならない。また、すべてのススを完全に焼き飛ばしてしまうとDPFの内部がスカスカになり、小さなススが通り抜けてしまうようになるため、焼き飛ばす量にも加減が必要なのだ。さらに、実際に作ったDPFがススを取り除くことは実験で確認することができるのだが、内部でどのようにススが捕らえられているのかは観察することができない。そのため、どのような内部構造にすれば性能の良いDPFを作ることができるのか、よくわかっていなかった。これらのような、ススを取り除く上でのさまざまな問題を解決するためにも、DPF内部におけるススの挙動を正確に把握する技術が求められていた。

そこで花村研究室では、DPFを二つに割り、その断面を十分に研磨してガラスを張ることで、実際にDPFの中を顕微鏡下で直接観察することができるようにした(図2)。顕微鏡の対物レンズは1/30秒で対物間距離を100 μ m往復振動し、自動で焦点を合わせるという機能を持つ。そのため、内部の映像は非常に鮮明で、全ての深さに対して焦点を合わせることが可能だ。この顕微鏡に設置した状態でDPFに排気ガスを通すことで、ススが幅約10 μ mの流路の中でどのような動きをし、どのように捕らえられているのかを目で見る事ができる。また、高温ガスを流した際に、捕らえられていたススが燃えていく様子も観察することが可能だ。これを赤外線カメラで撮影することにより、ススが燃焼している際の温度も調べることができる。さらに、DPFの内部にはススを低温で燃焼させるための触媒が含まれており、

触媒に接触しているススと接触していないススの燃焼の違いを確認することも可能だ。

これらはあくまで断面にガラスを張った状態での結果であるため、温度分布などがDPF内部の本来のものとは異なる可能性がある。しかし、それであっても高い評価を受けていることから、この技術の有用性がうかがえるだろう。

このように、DPFの内部を実際に観察することで、DPFの設計に必要なさまざまな情報を得ることができる。従来は、それらの情報は計算によるシミュレーションから求めていた。しかし、この研究によって実際にDPF内部の様子が明らかになり、これまでの考えを肯定する現象だけでなく、従来の常識とは異なる現象も確認された。花村研究室はこれらの情報をもとに、より良いDPFの構造を提案している。将来、自動車による大気汚染は軽減され、ディーゼル車の普及は進み、CO₂の排出量はさらに減少していくだろう。

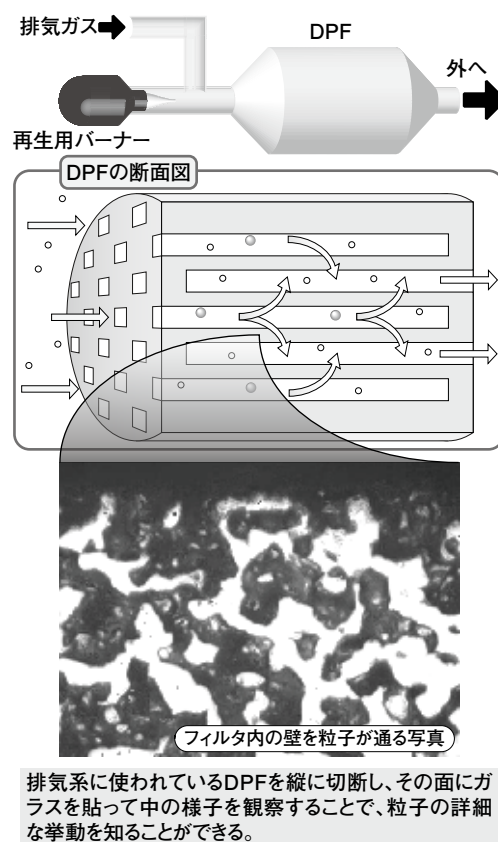


図2 DPFの断面図と実際に顕微鏡で観た写真



バイオマスと燃料電池の融合

化石燃料を用いてほとんどのエネルギーを供給している現在、この一部を担える可能性を持つ有力な燃料源として木材が注目されている。木材を燃やすと CO_2 が排出されるが、樹木はその生長過程で CO_2 を吸収する。燃やした木材の分だけ新しく樹木を植えれば、大気中の CO_2 の増加を相殺できる（カーボンニュートラル）。このような使い方をする限り、木材は大気中の CO_2 を増加させないクリーンな燃料といえるのだ。

現在、木材を燃料として発電する装置が開発されているが、実用化にはいくつか問題がある。その一つが発電効率の問題だ。木材を燃やして得られる熱から発電するのでは排熱などによるエネルギー損失が大きく、非常に効率が悪い。加えて、間伐材や廃材など、現実的に燃料として収集できる木材の量には限りがある。そこで花村研究室では木材のガス化プロセスと燃料電池を融合したシステムを使い、少ない木材からより多くの発電をするための研究を行っている。

花村研究室で開発している発電装置は、主に二つの部分に分けられる。一つは木材をガス化する部分だ。ガス化とは、木材を構成している有機物を高温下で Ni 系触媒を用いて反応させ、主に水素と CO_2 を生成させることである。これにより、木材のエネルギーをすべて水素のエネルギーとし

て取り出すのだ。もう一つは、生成した水素と空気中の酸素を反応させ、水蒸気と電気エネルギーを取り出す燃料電池の部分である。ここでは、燃料電池の中で最も効率が高いといわれている、電解質に固体酸化物を使用した固体酸化物型燃料電池（SOFC）の原理を用いている。

このシステムでは、SOFC 装置内部の発熱反応で発生する熱を、ガス化炉内の吸熱反応過程に供給することにより、装置全体のエネルギー効率を高めている（図3）。このように、一つの装置の中で水素の生成と発電の両方を行う燃料電池のことを内部改質型燃料電池と呼ぶ。これは、都市ガスから水素を作って発電する装置などに実用化されている。しかし、木材から水素を生成する過程と燃料電池による発電を組み合わせることを試みたのは、花村研究室が世界で初めてだ。以降では、花村研究室で開発している装置について、ガス化炉と燃料電池の部分に分けて紹介する。

ガス化炉は、高温で多孔質状の Ni 系触媒を水素分離膜に取り囲んだ構造になっている。投入口から入れられた粉末状の木材は、触媒を介して



という反応を起こし、水素などのガスに変換される。発生した水素は水素分離膜によって外側の燃

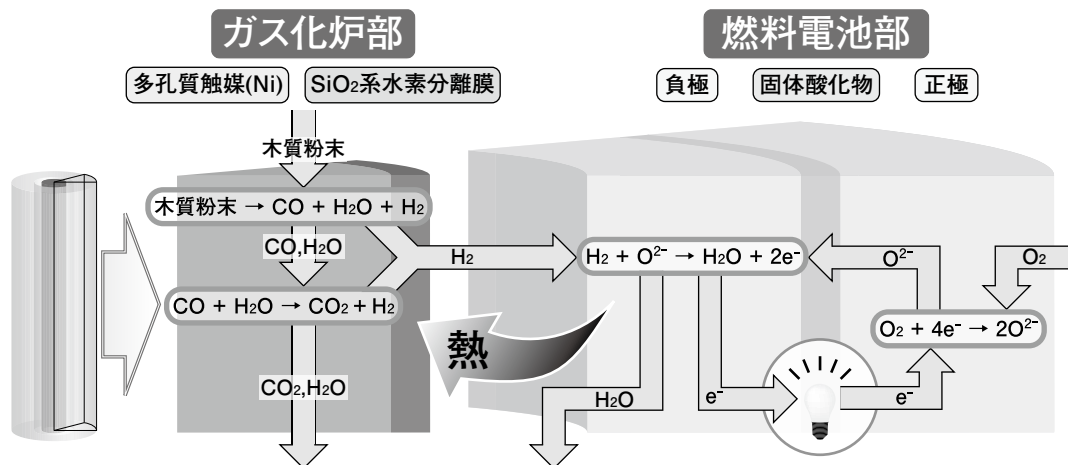
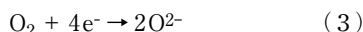


図3 花村先生が開発しているシステムの概略

料電池部に供給されるため、ガス化炉内の水素濃度は低くなる。これにより、上の化学反応式は平衡に至らず、右側に進行し続ける。また、ここで化学反応は吸熱反応であるが、装置全体の熱の授受があるので、ほとんど加熱の必要がないのだ。

このガス化炉での問題は、木材の中に含まれている樹液などの油分や、ガス化の際に生じるススにより、多孔質触媒の内部が詰まることだ。内部が詰まると最終的に装置は動かなくなるので、実用化のためにはこの問題の解決が必要である。油分は高沸点炭化水素なので、ガス化炉内部が800度以上に保たれていれば蒸気として存在する。しかし、少しでも温度が下がると液化するため、ガス化炉内部の温度を下げないための工夫が必要だ。また、ススは触媒で上手く反応させてガス化できればいいのだが、既存の触媒では完全なガス化ができず、少なからずススが生じてしまう。このススにどう対処するかが今後の課題だ。

次に、燃料電池部の仕組みについて説明する。燃料電池部は、図3のように内側から多孔質状の負極、電解質、酸素を供給する正極という3つの部分から構成されている。装置全体が800度以上に加熱されているため、正極の酸素は



という反応により、酸素イオンとして存在している。電解質には固体酸化物であるGDC (Gd_2O_3 -doped CeO_2) が用いられている。これは酸素イオンを透過させるため、酸素イオンは内側の負極へと移動する。負極には水素分離膜によりガス化炉から分離された水素が存在するため、

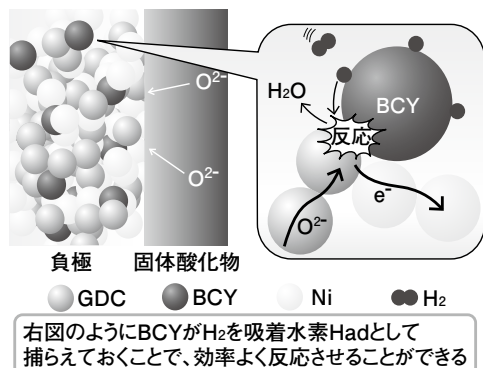
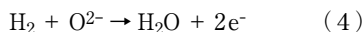


図4 現在予想されている負極における反応機構

という反応が起き、水蒸気と電子が生じる。ここで生じた正・負極間の電位差を起電力として利用することで、発電することができるのだ。

この燃料電池部の効率を上げるためには、電池の内部抵抗を小さくすることが重要である。内部抵抗が大きいと、水素の化学エネルギーを電気エネルギーに変換するときの熱損失が大きくなってしまい、効率が悪いのだ。正極の反応（3）は800度以上の環境下ではすぐに起こるため、抵抗はわずかである。また、酸素イオンが電解質内を移動する際の抵抗は、電解質を薄くすることで非常に小さくできる。したがって、最後に残った負極での反応（4）に関連する抵抗をいかに小さくできるかが課題となる。

従来は、負極を多孔質にすることにより、反応する面積を増やして抵抗を下げていた。花村研究室はこの方法とは別に、さらに抵抗を下げる全く新しい方法を発見した。従来の負極構成物質である、電子を通すNiと酸素イオンを通すGDCの他に、新たにプロトン伝導体であるセラミックスBCY ($\text{BaCe}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$) を10:9:1の割合で配合させた。これを負極に用いた結果、式（4）の反応における抵抗が従来の半分まで落ちたのだ。詳しい原理は今まさに解明されつつあるが、花村研究室ではBCYの表面が水素を吸着することにより、反応速度が上昇したのではないかと考えている（図4）。今後、この原理が完全に解明されれば、さらに抵抗を下げることも可能だろう。また、この方法はバイオマスとの融合装置には関係のない、一般的な燃料電池へも応用できるため、花村研究室は燃料電池の高効率化の新しい道も開拓したことになるのだ。

このようにして内部抵抗を小さくできると、出力が大きくなる。つまり、これまでと同等の出力をより小さな装置から得られるのだ。花村先生は、将来この発電システムを電車で搭載し、山で積んだ木材を燃料として移動しながら、都市中に電気を供給するというモバイルパワープラントの構想を想い描いている。そうなれば、森林をエネルギー源とする電気供給システムを築くことにより、現在枯渇しつつある化石燃料の寿命を長らせることが期待できる。今後、装置のさらなる高効率化・小型化が進めば、このような夢のシステムが実現されるかもしれない。



光を使った排熱の回収技術

クリーンエネルギーの中でも、太陽光発電などに用いられている光電池は近年技術開発が進み、大きな注目を受けている。一般的な太陽光発電ではSi系半導体を用いた光電池で太陽光を受け、その光エネルギーを電気エネルギーに変換して発電している。しかし、光電池はある一定以上のエネルギーを持った光しか原理上電気に変換することができない。光のエネルギーは波長が短いほど大きくなるので、発電に利用できるのはSi系半導体の場合では波長が約 $1.1\mu\text{m}$ 以下の光だけだ。

一方、GaSbやInGaAsSbなどといった化合物半導体を用いた光電池は、それぞれ波長が約 $1.8\mu\text{m}$ 、約 $2.3\mu\text{m}$ の光（近赤外光）までも電力に変換することができる。そのため、これらは熱光起電力（Thermophotovoltaic; TPV）発電に用いられる。TPV発電とは、高温な金属やセラミックスから放射される熱輻射（注1）のエネルギーを、光電池によって電気エネルギーに変換するというものだ。

このTPV発電は、高温であればどのような熱源からでも発電が可能という利点を持ち、小型化と大規模化のどちらにも対応できるという特性もある。また、理論的には燃料電池にさえ匹敵する効率を出せる可能性を秘めている。そのため、今後この技術を応用することにより、さまざまな機械から排熱として捨てられているエネルギーを、電力として回収することが期待されているのだ。

しかし、このTPV発電は、低温熱源の放射する熱輻射からは十分な出力を得ることができないという欠点をもつ。熱輻射として放射されるエネルギーの大きさは、放射体の絶対温度の4乗に比例するため、絶対温度が低くなると放射されるエネルギーの量は格段に小さくなるのだ。加えて、図5のように、波長の長い領域により多くのエネルギーが分配されるようになる。その結果、発電における出力は大幅に低くなってしまふのだ。

放射体として金属を用いる場合、その表面に微細な穴（マイクロキャビティ）を多数加工することにより、放射される熱輻射の波長を制御することができる。前述のように、光電池で電力に変換できる光は近赤外の狭い波長領域の熱輻射だけなので、波長を制御することにより発電効率を上げることが可能だ（詳しくはp.8のコラム参照）。

さらに、現在花村研究室では、エバネッセント波（図6）という光の特殊な現象を利用して、金属を放射体とするTPV発電システムの出力を飛躍的に上昇させる方法を考えた。順に説明しよう。

一般に熱放射のときは、熱輻射は表層からだけではなく内部からも放射されている。金属の場合は屈折率が非常に大きいため、内部から放射された熱輻射の大部分は表面で全反射し、内部に返り熱として吸収される。例えばNiの場合は屈折率の実部（注2）がおおよそ5なので、約 12° の範囲の熱輻射しか外部には放射されない（図7）。

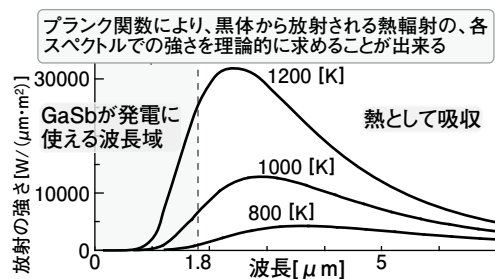


図5 プランク関数

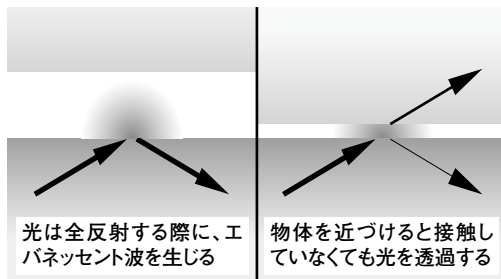


図6 エバネッセント波の性質

注1：すべての物体は熱放射により電磁波という形でエネルギーを発し続けており、発せられた電磁波のことを熱輻射という。

注2：金属の屈折率は、複素数で表わされる。その実部は屈折の度合いを表し、金属以外の物質で用いられている屈折率と同じ意味をもつ。ちなみに、虚部は減衰係数と呼ばれ、光が金属中で一定距離を進んだ際に減衰する度合いを表している。

これだけの熱輻射のエネルギーしか電力に変換できないので、出力は非常に小さい。

しかし、金属の内部から放射された熱輻射が表面で全反射するとき、その表面近傍にはエバネッセント波が生じている。そこで、光電池と放射体の間の距離を nm オーダーで近づけることにより、このエバネッセント波を介して発電するということが可能と考えられている。これにより、TPV 発電システムの出力を 10 倍以上も改善できる可能性があるのだ。

この方法を、さらにマイクロキャビティによる波長制御と併用することを考えたが、マイクロキャビティを加工した金属表面に関して、どのようにエバネッセント波が生じているのかは不明である。また、マイクロキャビティの内部に生じるエバネッセント波も、通常の伝播波と同様に波長が制御されるのかどうかもわかっていない。従来、マイクロキャビティを施した金属表面の放射特性をコンピュータによる計算で求める場合には、キルヒホッフの法則（注3）を利用して間接的に求めていた。その方が直接的な計算よりも遥かに簡単ではあったが、キルヒホッフの法則の原理上エバネッセント波が発生している様子を求めることはできなかった。

そこで花村研究室は、有限差分法という解析法を用いて、金属内部から放射される電磁波の様子をコンピュータで計算するプログラムを独自に開発した。このプログラムの計算結果から、金属表面におけるエバネッセント波の様子を予測することができるようになった。現在は、マイクロキャ

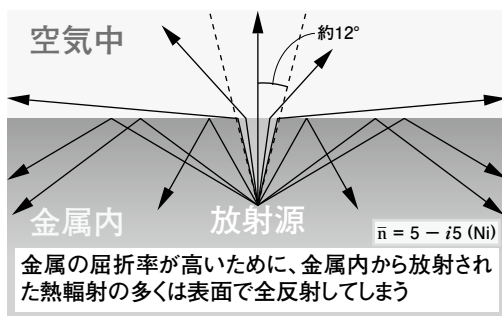


図7 Ni 内部からの熱放射

ビティを施した金属表面におけるエバネッセント波の成分を、光ファイバーを近づけることで実際に採取し、プログラムによる計算結果と比較しようとしている段階である。

また、先生はマイクロキャビティのない平らな金属表面を放射体として、光電池をエバネッセント波の領域内まで近づけて発電をするという実験も行った。この実験では、光電池をエバネッセント波の範囲内にまで近づけたとき、実際に短絡電流（注4）の値が従来の伝播光の場合に比べて約4倍となった（図8）。

今後、金属面と光電池の幅をさらに狭めることが可能になったり、エバネッセント波の利用とマイクロキャビティによる波長制御を併用したりした場合、発電効率を大幅に向上させることができる可能性は十分にある。TPV 発電による排熱の回収はより現実味を帯びてきており、将来的にはこの TPV 発電により、体温を熱源として携帯電話を充電できる程の電力を得ることさえも可能になるかもしれない。

これまで3つの研究を取り上げてきたが、これらの研究はすべて、化石燃料の使用量を抑えることにより、排出される CO₂ の量を削減することが目的となっている。今後、モバイルパワープラントが完成したり、TPV 発電による排熱の回収が実現するようになれば、より少ないエネルギーで社会の需要を満たすことができるようになるだろう。地球温暖化やエネルギー資源枯渇といった問題に立ち向かう、花村研究室の今後の研究に期待したい。

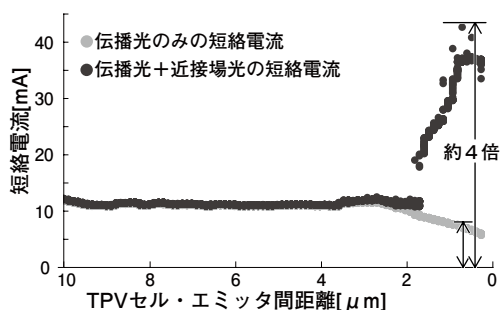


図8 エバネッセント波による短絡電流の変化

注3：ある物体が光を放射しやすい度合いと、吸収しやすい度合いは、波長の等しい光の間では等しくなるという法則。

注4：回路の抵抗を大きくし、直接電極間で計った電流の値。ほぼすべての電流が電流計に流れる。

コラム ～波長制御～

放射される電磁波の波長分布は、通常その物体の材質と温度によって固有である。しかし、金属の表面にマイクロキャビティと呼ばれる微細な凹構造を施すことにより、その波長分布を変えることができる。電磁波の半波長がその凹の幅より短い場合、放射量を増大させることが可能なのだ。

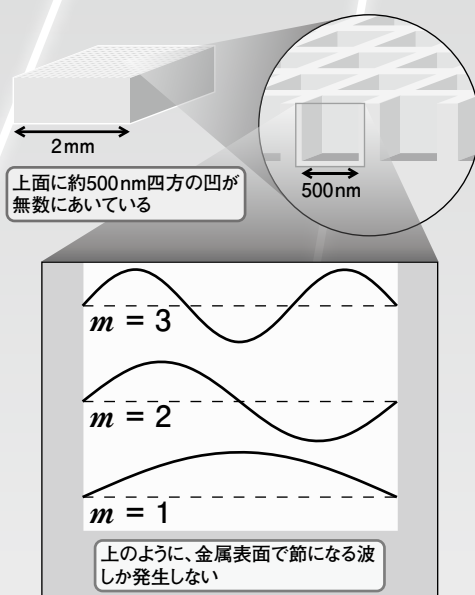
実際に加工するマイクロキャビティは、図A上に示すような、 μm オーダーの凹で、表面に平行な断面は正方形になっている。この加工により金属の表面積が広がるのだ。

一方、金属には表面の電界強度がほぼ0になるという性質がある。マイクロキャビティの内部に電磁波が発生している状態においても、その凹部表面の電界強度はほぼ0に保たれている。そのため、マイクロキャビティの内部には、内壁近傍の部分で電界が節になるような波長の電磁波しか、発生することができない。幅 d のマイクロキャビティの内部には、波長 λ が

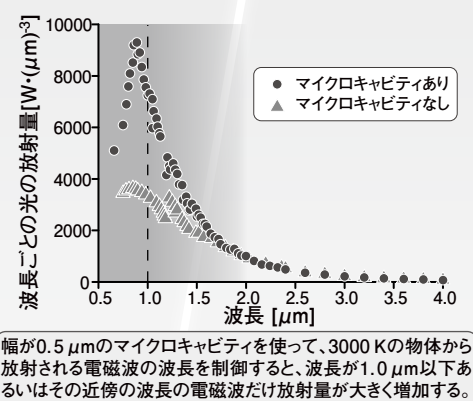
$$\lambda = 2d/m \quad (m=1, 2, 3, \dots)$$

となる電磁波しか発生しないのだ (図A下)。

これはつまり、表面積の増加分であるマイクロキャビティの内部からは、波長が $2d$ よりも長い電磁波は発生しないことになる。そのため、波長が $2d$ よりも長い電磁波の放射量を増加させることなく、それよりも短い波長の電磁波の放射量だけを增加させることができる (表面積効果)。また、マイクロキャビティの内部に発生する電磁波はある特定の波長でそろっているため、お互いに共鳴し合う (共鳴効果)。これら2つの効果により、波長が $2d$ よりも短い電磁波の放射量だけを增加させることができる (図B)。



図A マイクロキャビティ内部に発生できる電磁波



図B 波長制御の効果

花村先生の研究は企業と関わる部分が多くあり、試作したDPF内部でのススの様子を観るために、企業の方々が花村研究室を訪れることも多いそうです。

末筆になりますが、ご多忙なスケジュールの中、

度重なる研究室訪問などに快く応じて下さり、記事を書いていく上で多くの助言を下さった花村先生に厚く御礼申し上げます。花村先生及び研究室の方々のより一層のご活躍を心よりお祈り申し上げます。
(廣瀬 峻啓)