

AIMR Magazine

Advanced Institute
for Materials
Research

07
March 2015

[特集]

夢のような水 超臨界水

有機物と無機材料が出会うフロンティア

[AIMR in the world]

Thomas
P. Russell

ポリマーから数学連携まで

持続可能な社会に向けて

[巻頭対談インタビュー]

社会が抱える様々な課題の解決に向けて、大学が、AIMRが果たすべき役割とは

阿尻 雅文 × 小宮山 宏

東北大学原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR) 教授

三菱総合研究所 理事長 プラチナ高層ネットワーク 会長 東京大学 総長顧問

AIMR
Magazine

Advanced Institute
for Materials
Research

AIMRマガジン 2015年3月号

東北大学原子分子材料科学高等研究機構 広報・アウトリーチオフィス
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1

Tel. 022-217-6146 Mail. outreach@wpi-aimr.tohoku.ac.jp

<http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/>

<https://www.facebook.com/TohokuUniversity.AIMR>



持続可能な社会に向けて

～社会が抱える様々な課題の解決に向けて、大学が、AIMRが果たすべき役割とは～

阿 尻 雅 文

東北大学原子分子材料科学
高等研究機構(WPI-AIMR)
教授

小 宮 山 宏

三菱総合研究所 理事長
プラチナ高層ネットワーク 会長
東京大学 総長顧問

エネルギー問題、食糧問題、さらに日本の場合は財政問題などが重なり、社会の持続可能性が大きく揺らいでいる。こうした問題を解決し、新たな社会を創造するためにはイノベーションが必要だ。イノベーションの先導役を担うべきは、大学をはじめとする研究機関である。我々は、日本の将来像をどのように描けばよいのだろうか。

サチュレーションの時代へ

阿尻:持続可能な社会について小宮山先生は、3つの課題を挙げておられます。一つ目がリサイクルつまり物質循環の徹底、次がエネルギー効率を3倍に高めること、そして自然エネルギーの活用を今の2倍にまで高めることです。

小宮山:物質、エネルギー面から持続可能な社会を捉えると、その3つが鍵となる。ただ、これからの社会については、もう一つの視点を意識することが重要でしょう。それは「サチュレーション」すなわち「飽和」です。

阿尻:モノが満ちあふれている社会、ということでしょうか。

小宮山:私は1944年生まれで、私より5歳ぐらい年上の人は、飢えを経験している。私は飢えたことはないけれども、物欲、つまり本当に欲しいモノがたくさんあった。最初は白黒テレビで、学生時代はクルマです。1957年生まれの阿尻さんには実感がないかもしれませんが。

阿尻:言われてみれば、私たちの子ども時代はまさに高度成長期でした。白黒テレビがカラーになり、クルマを持つのがステータスだったのが少しずつ当たり前ようになっていきました。毎日の生活が急速に変わっていったのを憶えています。

小宮山:日本では今、計算上2人に1人がクルマを持っている。寿命も完全に飽和状態に達しました。1900年代までの人類の

平均寿命は20代にとどまっていた。それが1900年に31歳になり、今では70歳を超えている。まさに、あらゆるものが飽和状態にある。飽和すればリサイクルする方が安くなるから、当然リサイクル社会になっていく。

阿尻:モノを追い求めてきた社会が満足して、今転換期を迎えているとすれば、価値基準も大きく変わるのではないのでしょうか。

小宮山:次に求められるのは「クオリティ」です。例えば、移動にもクオリティを求める。健康を考えるなら自転車、環境に配慮するなら電動三輪車といった案配です。そうしたクオリティの高い社会が「プラチナ社会」だと考えています。

阿尻:社会を支えるエネルギーにもクオリティが求められるわけですね。それがエネルギー変換の高効率化であり、また自然エネルギーの導入だということでしょうか。

小宮山:太陽光と地熱は無限に使えるエネルギーであり、技術はすさまじい勢いで進化しています。つい最近南米で100万kWクラスの発電所の入札がありました。火力発電所と太陽光発電所が応札し、勝ったのは太陽光です。

阿尻:自然エネルギー技術もそこまで来たということですね。生活用品のエネルギー効率が上がれば、エネルギー需要も減るといったことも考えれば、2050年にはすべてが自然エネルギーで賄われる、これが先生の持論です。すると現状のシステムからいかに転換を図るかが課題となりますね。

求められるトランジションマネジメント

阿尻:既に社会に出来上がったシステムに対し、新たな投資をして自然エネルギーへの転換を図るのは、よほどのメリットがないと容易でないかもしれません。

小宮山:けれどもコストを考えれば、今後は自然エネルギーがどんどん有利になる。一方で、例えば原子力発電所などは、放射性廃棄物の処理に加えて、テロ対策なども考える必要が出てくるでしょう。トランジションマネジメントでは、現時点で表面化していないコストまでを含めて議論していくことが必要です。

阿尻:エネルギー生産だけでなく、利用する立場でも、コストパフォーマンスは重要です。先生はご自宅を、いち早くエコハウスにされていますね。太陽光発電を取り入れられたのが10年ぐらい前だったのでしょうか。

小宮山:正確には12年前で、もう十分に元は取れています。太陽光発電といえばメンテナンスが大変だと誤解されているようですが、私の家では何もしていません。太陽電池は言ってみれば、外がガラスで中は石、ほぼ無限に持つわけです。

阿尻:太陽光発電の効率は、今はさらに向上しているでしょうし、今後導入される設備が増えれば増えるほど、エネルギーコストは下がっていきますね。

小宮山:おそらく2050年には、再生可能エネルギーが飽和状態となり、タダで使えるでしょう。しかも完全にクリーンなエネルギーです。新たなシステムへの移行をどのように図るのか。まさにトランジションマネジメントが求められているのです。

技術のフュージョン

阿尻:やはり、「技術」は鍵であって、そのような経済予測やエネルギーの今後を考える際にも、技術の進化を計算に入れる必要がありますね。

小宮山:技術の進化については、10数年前からかなり正確に評価してきたのだけれど、現実には常に予想を上回っている。1992年には、太陽電池1kWが600万円したのに、今では20万円です。

阿尻:新技術についてですが、2通りあるように思っています。一つは、技術のアセンブリーです。必要なもの、足りないものは、どこからもってくる。これまでの延長線上で技術開発を進めるような場合には「アセンブリー」の考え方で何とかやってきたのだと思います。ところが、最先端で走り始めると、どうやら、それでは解決できないことにも出くわしてくるようになった。これから必要なのは、もう一つの技術革新のあり方、まったく異なる分野の知識や知恵を融合することではないでしょうか。

小宮山:融合、これをサチュレーションに合わせるなら「フュージョン」ですね。



阿尻:先ほど、リサイクルという話もでしたが、超臨界リサイクル技術の開発を行っていた時にもそれを体験しました。ポリウレタンを作る工場では、製造過程で廃棄物が出ます。これを水と反応させれば、原料素材に戻せることがわかっている。とはいえ相手は廃棄物なので、水と有機物を均一に混ぜるために溶媒を使ったり、触媒を使うのではコストが合わない。これが化学屋の限界です。ところが、物理化学の人がでてきて教えてくれました。ここで少し温度と圧力を上げると、水と油が均一に混ざると。さらに、水科学の人が、その条件なら水分子そのものが触媒として働くと、夢のようなことを教えてくれました。もちろん最終的には、プロセス工学がそれを実プラント化したのですが、全く違う視点、発想の融合があって初めて、廃棄物のケミカルリサイクル技術が生まれたと思っています。

小宮山:問題は「融合しろ」というだけでは、人は動かないこと。東大をはじめ全国のいろいろなところで融合を目指した組織が作られたけど、なかなか思い通りにはいっていません。

阿尻:AIMRでも、今、数学と材料科学の融合による新科学・技術の創成を図っています。しかし、当初は「融合しろ」と言われても、どう動けば良いかわかりませんでした。なにしろ言葉がお互いに通じない。ところが、ある時、両方の分野の言葉を知っている人、我々はInterface Unitと呼んでいますが、彼らに来てもらった。相手の言葉が分かり始めると、その領域にどっぷりつかって議論していける。今は、少しずつではあるのですが、新しい融合科学ができています。やはり、イノベーションを引き起こすカギは、融合ではないかと思っています。

小宮山:その中核を担うのが大学であり、企業との連携によりイノベーションが実現する。例えば東北大学と東芝が、超小型センサを使った日常人間ドックの研究を進めています。あれなどはMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)をはじめセンシング、通信、素材から医療までの先端研究を一つに結集したからこそ実現したわけです。



日本発のイノベーションを起こすために

阿尻: それでも、どうも日本はイノベーションを起こす力が、まだ弱いと言われていますが、何が欠けているのでしょうか。

小宮山: なぜシリコンバレーでイノベーションが起こるのか。アメリカはニューワールドで、過去から引きずるものが何もないからです。

阿尻: 先ほど、日本での再生可能エネルギーへのシフトについて、トランジションマネジメントの重要性が話題にあげましたが、技術革新に加えて、何かが必要だということでしょうか。

小宮山: イノベーションとは創造的破壊です。現状を破壊したところから創造がスタートする。ところが日本のように基盤ががちりできていて、これを破壊するのは難しい。だったらシリコンバレーと組んでイノベーションを起こせばいい。

阿尻: ただ、先生が著書で書いておられるように、日本は『課題先進国』であり、およそほとんどの課題を解決してきた実績もあります。技術力や問題解決の土壌はあるわけです。これを世界に向けて活用すればよいのではないのでしょうか。

小宮山: 確かに我が国はエネルギー危機や公害も克服してきた。とはいえ課題解決とイノベーションは違うでしょう。

阿尻: イノベーションは、技術だけでなく、社会システムも一緒に変わっていくということでしょうか。エネルギーインフラなど、社会の仕組みができあがっている分野でのイノベーションは、日本では難しいかもしれません。

小宮山: 東大で画期的な人工心臓を開発した女性がいました。これを実用化しようとしたが、日本では規制が多すぎて埒が明かない。そこでアメリカに渡ってベンチャーを起業し、ジョンズ・ホプキンス大学と共同開発に取り組んだ。これを後に東大病院が使っています。

阿尻: 技術力はあるのに、社会で使おうとすると抵抗があってスムーズに進まない。基礎技術を開発したら、実用化は海外で進めるのも一案なのかもしれません。

小宮山: 東大発のベンチャーでいえば人型ロボット開発の「SCHAFT」が、Googleに巨額で買収されている。彼らの成果が今後、どう活用されるのかはわかりませんが、非常にもったいない話です。

阿尻: ナノ粒子合成に関する超臨界反応の研究成果で、もう一つ実用化した技術があります。我々が20数年前に世界に向けて発信したものです。ところが、これをいち早く実用化したのは韓国でした。そして、その材料技術はすでに社会にインストールされている。ベースに何もなかったところなら、一番新しく良いものを取り入れることができる。

小宮山: まさにグローバル化が進み、人類の情報伝達スピードは「神の見えざる手」を超えていますからね。情報は一瞬にして

世界に広がる、これを逆手に取って利用すればいい。



国際化のカギを握る英語力

阿尻: 海外での展開も視野に入れた研究開発となると、いわゆる「国際化」を意識する必要があります。ここも日本の弱いところですね。

小宮山: とりえず英語です。もちろん研究者は英語の論文を読み、英語で論文を書く。だから英語ができる、などと思っはいけない。国際化で求められる英語力とは、そのレベルのものではない。

阿尻: WPIは全部英語で、技術に関して議論する分には全く問題はあります。特に若い人達はそうです。ですから先ほど申し上げたように融合科学も出来上がります。ただ、たしかに、先生達で集まってWPI内に新たな文化をつくらうといったレベルの話になると、口数が減ってしまうようです。

小宮山: 私も研究者だったときに英語で苦労したことはありません。ところが大学の総長になると、海外で込み入った交渉をしなければならぬ。これを英語でできないと、真の国際化は進みません。日本の外交が弱いのも、外交官の英語交渉力に原因が求められるのではないのでしょうか。

阿尻: もっとも2050年ぐらいまで先を見通すなら、スマホなどでの同時自動翻訳が、言葉の壁を崩してくれているような気がします。

小宮山: 会食の席でのひそひそ話でも使えるぐらいに進化する

ことを期待しますよ。それまでは、英語をまったく問題としない若い人達をどんどん登用して、引っ張って行ってもらいたい。

AIMRに期待する「プラチナマテリアル」開発

阿尻: 将来への期待に関して、AIMRのような組織には何が求められるのでしょうか。

小宮山: まず、素晴らしいのが数学を道具として使う発想でしょう。例えば物理の道具として数学が使われた結果、積分が進歩しました。材料科学に関しても数学をどんどん活用すればよい。

阿尻: その材料についてですが、今後の研究の方向性についてどのようにお考えでしょうか。

小宮山: マテリアルは、あらゆるものを支えています。私も昔、薄膜の研究をしていましたが、これは情報技術のためであり、その先に見えていた目的は省エネです。再生エネルギーへの転換を図る上でも、結局はマテリアルが重要なポイントとなるわけです。

阿尻: これを我々は「グリーンマテリアル」と呼んでいます。先生のおっしゃる2050年のビジョンを達成するために、必要なのは「グリーンマテリアル」であると。

小宮山: そこは「サステイナブル」、いや「プラチナマテリアル」と言って欲しいところだな(笑)。少しまじめに話すなら、グリーン＝環境といった概念にとらわれると、範囲が狭くなる。これに対してプラチナは、これからの社会のあり方を表す言葉です。プラチナ社会を実現するためにも新しい技術、融合が必要、AIMRには大いに期待しています。



阿尻 雅文 Tadafumi Adschiri

1957年新潟県生まれ。東京大学大学院工学系研究科化学エネルギー工学専攻博士課程修了(工学博士)。東京大学工学部助手、東北大学工学部助手、助教を経て、2002年より同大元物質科学研究所教授、2007年よりAIMR主任研究者。

小宮山 宏 Hiroshi Komiyama

1944年栃木県生まれ。東京大学大学院工学系研究科化学工学専攻博士課程修了(工学博士)。東京大学助手、助教、教授、同工学部長などを経て、2005年より2009年まで東京大学総長を務める。その後、三菱総合研究所理事長に就任。

01 巻頭対談インタビュー

小宮山 宏 × 阿尻 雅文
「持続可能な社会に向けて」

07 特集

夢のような水 超臨界水
有機物と無機材料が出会うフロンティア

09 NEWS & INFORMATION

- AIMR、ケンブリッジ大学と
合同ワークショップを開催
- The AIMR International
Symposium 2015開催

10 AIMR in the world

Thomas P. Russell
「ポリマーから数学連携まで」
分野横断で実現する持続可能な社会

13 材料科学コラム

「ちょっと寄り道 MATERIALS」第7話

14 New Staff

Song Toan PHAM

Editor
中道康文

Design/Printing
株式会社 島山デザイン事務所

produced by
東北大学原子分子材料科学高等研究機構
広報・アウトリーチオフィス

夢のような水

超臨界水

有機物と無機材料が出会うフロンティア

岡尻雅文、高見誠一、北條大介、青木宣明、鈴木明、相田努 = 文

超臨界水とはなんだろう

皆さんにとって、水はもっともなじみ深い物質の一つではないでしょうか。授業で習うというよりも日常的に使っている、そんな「水」の研究を大学で行っていると聞いたら、少し驚くかもしれませんね。実は、水には、超臨界水という面白い「状態」があるのです。

図1に水の状態図を示します。状態図とは物質が各温度、圧力で物質がどの状態にあるかを示している図です。物質の三態という言葉は学校で習ったかと思います。気体、液体、そして固体です。ここで、物質の状態は温度と圧力によって決まることを思い出しましょう。水であれば、1気圧の場合、0°Cで液体から固体(氷)に凝固し、100°Cで液体から気体(水蒸気)へと沸騰します。この融点、沸点は圧力によって変わります。例えば高い山の上などでは、圧力が低いため、水の沸点はずっと低くなります。ですから、山の上では、煮炊きをするのに圧力釜が必要になるのです。

逆に圧力が高ければ沸点は上昇します。このように、融点、沸点は温度と圧力の関数として、それぞれ融解曲線、蒸気圧曲線上で表されます。

では、圧力を高くすれば、沸点はどんどん高くなり、物質はどんなに高温であっても、液体でいられるのでしょうか。答えはNoです。水の場合、374°Cを超えるとどんなに圧力を高くしても液化することができなくなります。この水の臨界温度を超えた水を超臨界水と呼んでいます。超臨界水は気体のような拡散性と液体のような溶解性を併せ持つようになります。

超臨界水は、実は自然界にも存在します。例えば、深海の熱水鉱床などがそれです。このような場で生命が誕生したと言われているのではなく、超臨界水に岩石が溶解した状態であることも分かってきました。このような状態から、温度、圧力が下がると、水の溶解力が低くなり、ある成分が析出して鉱脈ができあがります。

Image: NOAA
http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/04fire/logs/april12/media/champagne_vent.html

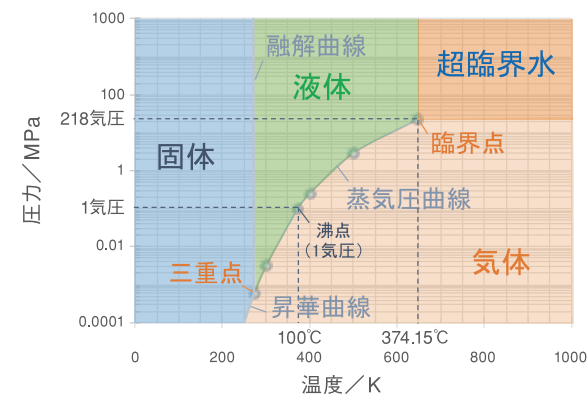


図1: 水の状態図

超臨界水を利用する・ナノ粒子をつくる。

深海の熱水鉱床のような高温・高圧の状態を地上で作リ、様々な反応に利用してみようと考え、約25年前、超臨界反応の研究を開始しました。バイオマス変換、廃棄物リサイクル、有機合成、ナノ粒子合成など、様々な研究を行ってきましたが、そのいくつかはすでに工業化しています。ここでは、ナノ粒子を合成する研究について紹介していきます。

超臨界水を反応場にするような利点があるでしょうか。水は、地球にある唯一の自然の溶媒と言っても良いでしょう。この状態で、地球そのものも、生命も生まれてきたのですから、地球環境にもっとも優しい溶媒とも言えます。さらに超臨界状態では、不思議なことに、水と油が混ざり合います。そして、水分子そのものが、酸や塩基触媒として機能します。超臨界水を反応溶媒に用いれば、有害な有機溶媒や触媒を使ったりしなくても良いことになります。もう一つ面白い点があります。この気体とも液体とも見分けがつかない状態では、反応の平衡や速度が、ほんの少しの温度圧力でも大きく変化し、通常見られないような特異な反応も生じるのです。

たとえば超臨界水中で、ちょうど鉱脈ができるのと同じような環境を作ってみましょう。超臨界状態では、密度と比誘電率が大きく低下するため、溶解度が急激に減少し、大きな過飽和度が得られます。過飽和度が大きいほど、より小さな金属酸化物の粒子が得られるのです。これは、気温が急に下がって、飽和蒸気圧以上の過飽和の水蒸気が一気に凝結して細かい霧となるのに似ています。私たちの研究室ではこの方法で、10ナノメートル位の(ナノはミリの100万分の1の大きさを表します)金属酸化物ナノ粒子の合成に成功しています。

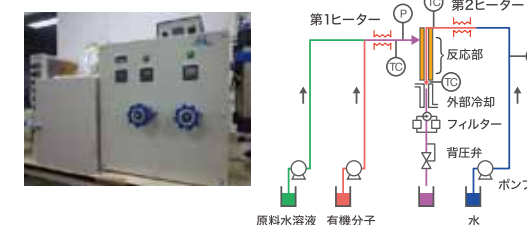
このナノ粒子合成反応中に、油(界面活性剤)を入れてみましょう。超臨界状態では、水と油は均一に混ざり合います。そして無機ナノ粒子の合成が進むとともに、有機分子との反応も生じます。これにより、金属酸化物表面に有機分子が結合した、サ

イズが10ナノメートル以下の有機修飾ナノ粒子が生成します。私たちの研究室では、図2に示す小型の高圧容器、あるいは流通式の反応装置を使う二つの方法で、金属酸化物ナノ粒子と有機修飾ナノ粒子を合成しています。

〈回分式反応装置〉



〈流通式反応装置〉



〈有機修飾ナノ粒子〉

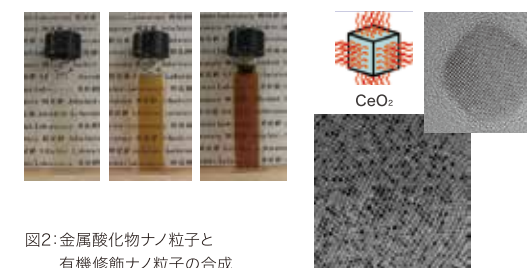


図2: 金属酸化物ナノ粒子と有機修飾ナノ粒子の合成

有機修飾ナノ粒子をどう使う？

合成した有機修飾ナノ粒子は有機分子に覆われていますから、有機溶媒とも親和性が高く、有機溶媒の中に入れて、一つ一つバラバラに分散し、まるで溶液のような状態となります。では、この有機修飾ナノ粒子はどのように使われるのでしょうか。この粒子は、有機溶媒だけでなくポリマーにも高濃度で分散しますから、ポリマーとナノ粒子からなるハイブリッド材料を合成できます。分散するだけではありません。セラミックスのナノ粒子の量を増やしていき、体積分率が80vol%以上になっても、まるで溶液のように流動することがわかりました。まさにフルイディックセラミックスと言える新しい材料が誕生しました。これによって、電気絶縁性を持ち、加工性もあり、高熱伝導を示す、夢のような材料を作ることができました。我々は、これを超ハイブリッド材料と呼んでいます。

ナノ粒子を高濃度で分散しても流動するのであれば、インクとしてもつかえそうです。現在、印刷技術を使って、電気回路を描いたり、3Dプリンティングで造形する技術の開発もすすめています。

NEWS & INFORMATION

AIMR、ケンブリッジ大学と
合同ワークショップを開催

AIMRは、2014年12月にケンブリッジ大学と合同で材料科学分野のワークショップを開催しました。今回で3回目となる合同ワークショップは、12月10日(水)にケンブリッジ大学材料科学冶金学科棟で行われ、AIMRとケンブリッジ大学から合わせて約40名が参加しました。小谷元子機構長とAlan Lindsay Greer教授の挨拶に続いて、一杉太郎准教授、西浦廉政教授、浅尾直樹教授の3名のAIMR研究者のほか、ケンブリッジ大学から3名の教授が招かれ基調講演を行いました。また、ケンブリッジ大学の学生や若手研究者によるポスター発表や塚田捷特任教授による研究者交流プログラムの紹介も行われました。午後からは、材料科学、化学、数学のそれぞれの分野に分かれて多くの議論が交わされ、ワークショップは盛況のうちに幕を閉じました。



基調講演を行う一杉太郎准教授

The AIMR International
Symposium 2015開催

AIMR International Symposium 2015 (AMIS2015)が、2015年2月17日から19日にかけて、仙台国際センターにおいて開催された。里見進東北大総長、宇川彰WPIプログラムディレクター代理、小谷元子AIMR機構長の挨拶につづき、プリンストン大学のF. Duncan M. Haldane教授ら6名の基調講演をはじめ、海外からの招待講演者やAIMRの研究者34名が講演を行った。今回のシンポジウムでは「A new horizon for materials science with mathematics collaboration」のテーマのもと、アメリカ、中国、オーストラリア、ドイツ等13ヶ国から268名の参加者が集い、各講演後活発な意見交換が行われた。新設されたポスター賞では、98のポスター発表の中から、伊藤良一助教と義永那津人助教が受賞の栄誉に輝いた。



このような技術の開発で一番重要なのが、なぜ流動化するのかという原理の解明です。AIMRでは、数学の先生方と一緒にその難題に挑戦しています。

もう一つ、面白いことが見つかりました。超臨界法を使えば、ナノ粒子の形が制御できそうということです。一般に、結晶ができていく時、不安定な面を外に出さないように結晶成長します。結晶の形をみると、同じ物質であれば、どれも大体似ているのがこれが理由です。そして、いつも最も安定な面が外に露出しています。超臨界法を使うことで、その露出面を制御できる可能性ができました。

ナノ粒子は、体積当たりの表面積が大きいので、触媒としても期待されています。しかし、安定な面は、実は、触媒活性もさほど高くないのです。ところが、有機修飾反応は、逆に不安定な面から進んでいきます。であれば、不安定な面を外に露出したナノ粒子を合成できそうです。修飾分子を外した後、このナノ触媒の活性を評価してみたところ、通常、400°C以上でないに進まない反応が、150°C程度の低温でも進むことが確認できました(図3)。

これは、様々な触媒反応に利用できそうです。今特に注目しているのは、この高活性触媒を用いて、吸熱反応(廃棄物と水の反応で水素をつくる反応)を低温で生じさせる技術です。これが可能であれば、今まで使えずに大量に捨てられていた低温排熱エネルギーを回収利用できることになるからです。今、エネルギーの問題というと、太陽電池、風力、バイオマス利用など、いわゆる自然エネルギーが注目され、技術開発が進められています。しかし、使われずに捨てられている低温の排熱量を調べてみると、実は、今開発中の自然エネルギーに相当するほど大きな量なのです。AIMRでは、「グリーンマテリアル」の創成を目指していますが、まさにグリーンマテリアルと呼べる夢の触媒の開発を進めているところです。

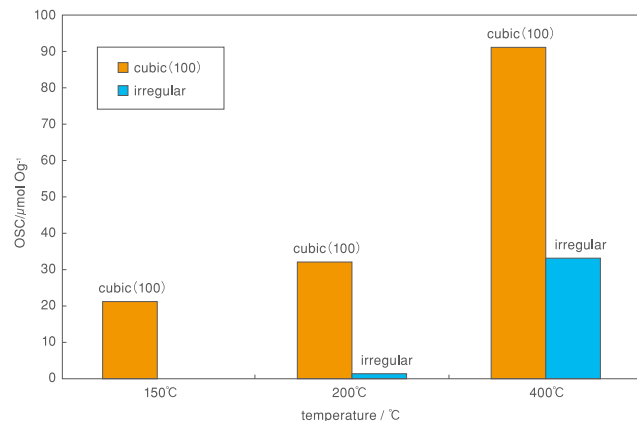


図3: 露出面を制御した有機修飾ナノ粒子は、低温でも高い反応性を示す。

ポリマーから数学連携まで

分野横断で実現する持続可能な社会

マサチューセッツ大学アマースト校の教授にしてAIMRの主任研究者のトーマス・ラッセル教授は、米国エネルギー省が支援する研究所で、ポリマー材料による太陽エネルギー利用を研究するグループのディレクターも務めている。今回は、ポリマー材料の専門家として、数学者との連携をはじめとする様々なプロジェクトを推進しているラッセル教授に、自身の研究やエネルギー利用の未来、数学連携の可能性について語っていただいた。

Thomas
P. Russell

–はじめにラッセル教授が現在進めている研究について教えてください。

ラッセル教授:私は、有機薄膜太陽電池、特にポリマー(高分子化合物)をベースにした有機薄膜太陽電池の研究に携わっています。有機薄膜太陽電池は、人類が直面しているエネルギー問題への解決策の1つになると考えています。我々は、変換効率11%という驚くほど優良な有機ポリマーベースのデバイスを得ることに成功しました。これまで報告されたなかで、最も効率が高いデバイスです。

–具体的に有機薄膜太陽電池のどの点に注目してきたのですか？

ラッセル教授:光を吸収して電気に変換する活性層と呼ばれる部分を最適化することに焦点をおいてきました。活性層は、光活性ポリマーとC₆₀フラーレンという炭素材料の混合でできています。太陽電池の機能向上の鍵は、活性層における数十ナノメートルというサイズの共連続構造と呼ばれる網目状の構造にあります。この問題に関しては、AIMRの共同研究者である中嶋准教授とWang博士が、高分解能の原子間力顕微鏡(AFM)を使って、電極界面での形態の観察に成功し、界面での結晶の存在を明らかにしました。

さらに、我々は、層間材料の開発も行い、変換効率を数パーセント向上させることができました。こうした研究により、変換効率11%を可能にするデバイスを作成することができたのです。6年前、標準的なデバイスは5%の変換効率がやっとであり、デバイスの商品化は失敗に終わっていました。しかし、この短い期間に変換効率が2倍以上となり、今後の発展にもよりますが、実用化の可能性が非常に高くなったと言えます。

–そのほかに、ナノ粒子を使った研究もされていますね。

ラッセル教授:ご指摘の通り、私にとってもう1つの重要な研究は、ナノ粒子界面活性剤の研究です。油の中に混ざった水滴は、通常、混ざり合わない2つ液体間の接触面積を最小にするため、球状の形をとります。水滴に電場を加えて球体を楕円形に変形させることができますが、電場をオフにすると元の形に戻ってしまいます。ところが、ナノ粒子界面活性剤に覆われた水滴に、電場などの外部からの作用を加えて楕円状に変形させると、電場をオフにしても楕円形のまま維持され、球体に戻らないことがわかりました。

–なぜ変形が維持されるのでしょうか。

ラッセル教授:水滴が楕円状になると、体積は変わらず表面積が増えるため、それに応じて界面のナノ粒子界面活性剤の数も増加します。そこで電場をオフにすると、水滴は楕円形から元の球体に戻ろうとします。しかし、界面にはあまりに多くのナノ

粒子が集合しており、その状況は、例えるなら大勢の人々のいる部屋で壁が迫ってくるようなものです。人々は押し込まれて、身動きが取れなくなりますね。この状態は、液滴の形状が球体に戻るのを妨げ、変形したまま保ちます。この方法を使えば、液体の性質を保ったまま、固体の構造的な安定性を持つ材料を作ることができるのですから非常に興味深い方法だと考えています。この技術をどのような場面で応用できるでしょうか。例えば、1つが絶縁性の液体で、もう1つが伝導体だったとすると、ナノ粒子界面活性剤で液体を変形させることで、液体電子回路を作ることができ、液体電池が実現可能となります。

このような研究のほかにも、共重合体から2次元と3次元フィルムを生成するための自己組織化プロセスの研究を、数学者であるステファン・ハイド教授(オーストラリア国立大学)や小谷AIMR機構長と共同で行っており、ガラス材料の構造変化についても中嶋准教授らと共に研究を手がけています。

米国のエネルギー政策について

–米国ではどのようなエネルギー政策が進められているでしょうか。また、ラッセル教授ご自身は、今後のエネルギーを巡る状況についてどのようにお考えですか？

ラッセル教授:米国政府、とりわけエネルギー省(DOE)は、将来持続可能な社会を達成することを目指して、基礎科学と材料科学を奨励するために多大な資金を投資しています。その中でも特に、太陽エネルギーは非常に重要だと考えられています。そこで私たちは、太陽光発電で使われるポリマーベースの材料を研究しています。ポリマーは、高性能でフレキシブルなデバイスを作成可能ですし、先に申し上げたとおり10%以上の変換効率を達成しているため、非常に有用です。

しかし、石油や石炭など化石燃料への依存度は依然としてとても高く、太陽光発電はエネルギー供給のごく一部を占めているに過ぎません。このような化石燃料への依存度を減らすことは、単に自国である米国や日本だけのための解決策ではなく、世界的な規模での解決策を考えるべきだと私は思います。大気汚染を起こさず、また二酸化炭素や一酸化炭素、硫化物などを排出しないエネルギー源を得ることが非常に重要なのです。

例えば今後、すべての車両が電気自動車になり得るでしょう。持続可能な社会を達成するためにそれは避けられないことです。米国では、再充電ステーションの設置に関してなど、順調に普及が進んでいます。石油の代替を可能にすることは、今後非常に重要な課題の1つになると思います。

–持続可能な社会になるためには、それ以外にも多くの事柄が求められます。例えば、エネルギー消費量を削減するよう人々の

意識を変える、また、エネルギー効率を向上させるための新材料を開発するなどですね。

ラッセル教授:そうですね。効率を向上させるという点では、新材料の開発、あるいは、従来の材料を再設計して改善することも非常に重要だと思います。また、熱電発電、太陽光発電、水力発電など、さまざまな資源をつかってエネルギーを保存する方法や生み出す方法について、新しいアイデアを考え出すことも必要です。これらすべてが非常に重要になると考えます。

相手の分野に乗り込む覚悟

–社会を変える新しい材料を開発するには、どのような取り組みが必要だと思いますか？

ラッセル教授:私の考えでは、AIMRが成果を出してきた最も重要な取り組みは、数学と材料科学の連携です。私にとってそれは、実に革新的な取り組みであり、重要な課題を抽出して解決することができれば、画期的な取り組みになる可能性を秘めていると思います。私自身、自己組織化プロセスの研究など、AIMRを通じて数学者と連携して研究を進めています。しかし、この種の取り組みは、成果を上げるまで長い期間を要します。さらに数学者と材料科学者がともに関心を寄せる課題が必要です。

その意味で、AIMRで行われているティータイムでのプレゼンテーションは、人々が交流するよい機会だと思います。誰かがプレゼンテーションをしたとして、それが見た人々にとって自分の分野ではないプレゼンテーションだったら、その人たちは関心を失うかもしれません。あるいは、それを聞いて、何か貢献や提案ができるかどうか考えるかもしれません。または、「よし。こんなのはどうだ。私なら解決できるかもしれない。一緒に研究すればきっと面白い成果がでるに違いない」と言うかもしれません。テーマがうまく適合することもあれば、しないこともあります。成功と失敗の比率は予想できませんが、人々が同じ部屋に集まり話し合うことは、とても大切だと思います。

私がサンノゼのIBMに勤めていた頃、ビュウグラフ(OHPシート)を用いたセミナー(スリー・ビュウグラフ・セミナー)と呼ばれる会が毎月開かれていました。そのセミナーでは、1つのアイデアを発表するのに、わずか3つのスライドしか使えません。発表内容は、考え抜かれた完全なアイデアである必要はありません。自分が研究している分野、興味深いことが起きている分野、他の人々から情報を得られそうな分野について、ただ人々に発表するのです。これは、物理科学部門全体で実施され、かなりの人数になりますが、みな真剣に参加していました。もしセミナーが非常に正式なかたちで行われると、発表者は、すでに終了した研究結果を発表しがちです。ですが、完了していない研究結果を発表することがよい場合もあるのです。時には、

アイデアを議題に取り上げ、皆で話し合うことも大切です。

–まずはお互い課題を出し合い、共通の興味を探ることが大切なのです。

ラッセル教授:その通りです。あまりよく知らない分野の研究者と仕事をするためには、取り組む課題が、双方にとっての課題でなければなりません。そして、相手の専門知識に頼る、逆に相手に対して専門知識を与えることが必要になります。そのためには、よく議論することが必要です。まずは自分の分野、自分の安全地帯から出て相手の分野に乗り込む覚悟を持たなくてはなりません。それが最も大切なことです。

最後にAIMRへの期待についてお聞かせください。

ラッセル教授:繰り返しますが、私は、数学-材料科学連携の重要性について確信しています。社会を変える新しい材料の開発に向けて、数学-材料科学の連携は本当に重要です。そして東北大学は、特にAIMRは、それが効果的に実施できる環境が整えられていると強く思います。



トーマス・ラッセル Thomas P. Russell

1952年生まれ。1979年、マサチューセッツ大学アマースト校で博士号を取得。ドイツ・マインツ大学のResearch Fellow、IBM研究所の研究員を経て、1996年よりマサチューセッツ大学教授。2007年よりAIMR主任研究者を兼ねる。

ちょっと寄り道

M A T E R I A L S

このコーナーでは、AIMRの研究分野である「材料科学」について、基礎的な事柄、歴史、世界の研究動向、AIMRにおける先端研究、等々をエッセイ風に紹介していきます。

* 第7話 *

トモグラフィー

トモグラフィー(Tomography)とは、外からは見ることのできない物体の内部構造を音波や電磁波などを用いて探る方法の総称です。例えば、地球内部の構造を調べる地震波トモグラフィーもその一つです。と言われてもピンと来ないかもしれませんが、例えばX線CT(X-ray Computed Tomography)と書けば、どのような装置か思い浮かぶ方も多いことでしょう。現在では多くの医療機関に設置され、病気やけがの診断、健康診断等に使われています。X線を用いる透過撮影の代表格はX線の発見者であるW. C. レントゲンの名を冠するレントゲン撮影ですが、レントゲン撮影の場合はX線を身体のある一方向から入射させ、身体を透過して出てきたX線をフィルムや検出器で受光し写真(画像)にします。X線は原子番号の大きい元素でできた部分で多く吸収され、そこを透過するX線は強度が小さくなるため、特にカルシウムを主成分とする骨とそれ以外の部分を明瞭に識別できます。しかしながら、一方向の撮影では、例えば2つの骨が重なって見える場合、どちらが手前にあって、どちらが裏側にあるかを画像のみから識別することは困難です。それに対してX線CTでは、3次元のデータが取得できるため、上記のような前後関係も一目瞭然です。

X線CTの“C”はComputedであり、コンピュータによる膨大な数値計算が必要なことを意味していますが、トモグラフィー技術には数学が大きな貢献をしています。物体に様々な方向からX線等を入射して得られた複数の透過像(投影像)をある数学理論に基づいて計算すると、物体内部の構造(X線吸収係数の3次元分布)が得られます。ここで使われる数学はラドン変換と逆ラドン変換です。この理論的基礎はオーストリアの数学者J. ラドンが1917年に論文化しています。アメリカの物理学者A. M. コーマックは、このラドンの業績を知らずに、ラドン変換、逆ラドン変換と等価な理論を独自に構築し、物体内部の3次元構造を導き出す計算手法(再構成計算と呼びます)を1963, 64年に論文発表しました。これらの論文は当初それほど注目されなかったとのことですが、イギリスの電子技術者G. N. ハウンスフィールドがコーマックの論文に基づき、1971年に

実用的なX線CT装置を開発、翌年には開頭手術なしに人間の脳内患部の撮影に成功した歴史的成果を発表しました。コーマックとハウンスフィールドはこの業績により1979年にノーベル生理学・医学賞を受けています。医療現場で使われている類似の手法にMRIがありますが、X線CTとはだいぶ原理が違いますので、また機会がありましたら書きたいと思います。MRIもコンピュータを使ったトモグラフィーですのでCTの一種と考えられますが、CTと言うとX線CTを指すことが多いようです。

さて、このようなトモグラフィー技術は材料科学分野でも不可欠なものとなっています。材料中の亀裂等の非破壊検査法としても有用ですし、3次元構造がわかるというのも大きな魅力です。例えば、電気伝導や流体の振る舞いは3次元における物質の連結状態に依存しますが、3次元的に連結していても2次元断面観察ではつながっていないように見えることも多く、3次元でネットワーク構造を観察できることはとても重要です。装置開発も日進月歩です。人体の撮影に特化された医療用CTスキャナの解像度は1 ミリメートルくらいで、材料の研究には少し粗すぎます。産業用、基礎研究用に開発された高分解能X線CTスキャナでは1 ~ 10マイクロメートルの解像度があり、また、大型放射光施設SPring-8で開発された最先端のX線CT装置ですと、現在0.2マイクロメートル(200 ナノメートル)くらいの解像度があり、様々な材料研究に活用されています。



池田 進 Susumu Ikeda

1967年埼玉県生まれ。90年東北大学理学部卒業。セメント会社勤務後、東京大学大学院理学系研究科で学位取得。同大学院新領域創成科学研究科助教を経て、2008年よりAIMR助教。10年より准教授、11年より副事務部門長を併任。AIMR事務部門において、分野融合、数学-材料科学連携の支援を行うほか、共通機器の整備等を担当。

Song Toan PHAM

「自分の生きている世界について知りたいと考えたとき、科学が何か教えてくれると思いました」。こう、研究者になろうと思ったきっかけを答えてくれたPHAM助手。

いざ研究者となりたいと思ったとき、「なにかに新しいものが作りたい」と、材料科学を学び始めた。そして材料の中でも、実生活への応用の可能性が高い有機材料に魅かれた。「柔軟性や費用対効果の高さだけでなく、スピン情報を伝搬できる距離が無機材料に比べて長く、エレクトロニクスデバイスへの応用に向けてとても興味深い材料です」。現在は、AIMR水上研究室で有機スピントロニクスデバイスの研究を行っている。「東北大学はスピントロニクス分野で非常に有名で、AIMRにはトップレベルの研究者と装置が揃っています。そんな環境で研究ができるのは非常に楽しみです」

仙台に来る前は、ベトナム、大阪に住んでいたという。冬は寒くてつらくないかと質問してみたら、笑顔でこう答えてくれた。「雪やスキーが好きなので、仙台の生活をとても楽しんでいます」

Song Toan PHAM
AIMR助手

1986年、ベトナム・ハノイ生まれ。ベトナム国立大学卒業。大阪大学で博士号を取得後、2015年より現職

中道康文=文・写真