とんどが先達の成果の補完に終わる。これは成果主義やコストパフォーマンス（費用対効果）を強調するあまり、ハッキリ先が見えるテーマしか取り上げられない教育者や研究開発者しか生き残れない現状にある。さらに、学術研究の成果を工業製品にまで発展させたいと本気で思っている教員が如何ほどいると言うのか。研究成果を利用したいならば企業側で行うべきだと大多数の大学教員は考えている。元来、大学にはそのような機能や人材は少ないにもかかわらず、多くの大学にベンチャービジネスラボラトリーが設置された。

起業家教育に対する現実的な大学での対応は、企業で開発研究員として活躍できる人材を育成し、彼らに野心さえあれば実力を蓄えて起業することに期待することである。新たなものに挑戦する気概を持った人材育成を心がけて、本法で薄膜を作り、光触媒、湿度センサー、紫外線測定器などへの応用研究を試みてきたが、その課程でも教科書や文献に載っていない製造プロセスに対して懐疑的で不信感を抱く学生や共同研究者も多く存在した。権威に頼り、寄らば大樹の蔭といった安全・安心を旨とする意識は、いつまでも権威や大樹がなんの革新もされずに存続できるという不条理に気がつき訂正されなければならない。アントレプレナーの定義にあるような独創性と冒険性を持った人材は少ないが、多くの企業や大学との共同研究を通じて知り合った開発研究者や教育者および学生の中に特別の教育・訓練を受けていないが野心家がいるということは心強い事である。起業家を育成しようとするれば、幼少の頃に発明・発見物語や冒険物語に夢を抱いた記憶を忘れずに持っている人に対して機会を提供できる教育コースを大学に併設することが好ましい。高等教育機関としての大学で基礎に重きを置く理学系と応用に重きを置く工学系をそれぞれアインシュタイン型とエジソン型と呼ぶとすれば、後者に重点をおいたイノベーション志向の経営者が教員を含めた開発研究者を組織し、半官半民の起業家向けの実践的コースを立ち上げることが必要である。

まとめ

従来のゾル・ゲル法を改良して新規酸化物薄膜製造法（アドバンスドゾル・ゲル法）を考案し、目的とする機能性酸化物薄膜が簡単に製造できる差別化技術を開発した。機能性

セラミック薄膜の応用として高性能の光触媒膜を耐熱基体上に密着性良く接合できたことから多くの利用分野が期待された。また、その他の機能性酸化物を利用したセンサーなどの製品を高価な装置を必要としないで製造できることから、ベンチャー企業を立ち上げ、教育に反映させることを試みた。しかし、この試みを通して起業家意識を育てることを図ったが、その成果は上がったとは言えない。起業家育成は極めて難しく、現有のカリキュラムでは対応できないので起業家向けのコースが必要である。

文 献

- 1) A. Fujishima, K. Hashimoto, and T. Watanabe, *TiO₂ Photocatalysis: Fundamentals and Applications*, BKC, Inc. Japan (1999).
- 2) 藤島 昭, 橋本和仁, 渡部俊也, 光触媒のしくみ, 日本実業出版社 (2000).
- 3) 作花済夫, ゼル・ゲル法の科学, アグネ承風社 (1998).
- 4) 作花済夫, ゼル・ゲル法の応用技術の新展開, シーエムシー出版 (2000).
- 5) S. Rengakuji, Y. Nakamura, and Y. Hara, *Electrochemistry*, **69**, 764 (2001).
- 6) Y. Nakamura, Y. Katou, and S. Rengakuji, *Electrochemistry*, **72**, 408 (2004).
- 7) E.-M. Mohamed, Y. Nakamura, Y. Fujii, M. Kamiya, and S. Rengakuji, *Electrochemistry*, **72**, 455 (2004).
- 8) S. Ikeno, T. Kawabata, H. Hayashi, and K. Matsuda, *Mater. Trans.*, **43**, 939 (2002).
- 9) Y. Hara, S. Rengakuji, Y. Nakamura, and A. Shinagawa, *Electrochemistry*, **70**, 13 (2002).

●著者プロフィール

氏名：蓮覚寺聖一 Seichi RENGAKUJI
所属：北陸職業能力開発大学校
役職：校長
趣味：囲碁

③ イオン液体の科学— 環境調和型教材への応用

高木由美子

1 はじめに

溶媒は化学反応の要であり、合成反応の場で様々な有機溶媒が用いられている。しかし有機溶媒はその特性上、揮発性、可燃性であるものが多い。もし、不揮発性で難燃性の有機溶媒があればその有用性は大きい。イオン液体は、まさにその

ような不揮発性、難燃性を示し、しかもユニークな溶解性を示す液体である。このため、さまざまな観点から活発に研究され、単なる溶媒を超えた機能性材料としても注目されている¹⁾。新中学校学習指導要領（平成20年3月）では、「水溶液とイオン」の項目が復活し、「科学技術」の役割について

解説が加えられた。物質の不思議や化学への興味を喚起するのに適した先端科学であるイオン液体を用いた教材開発およびその実践例を紹介する。

2 イオン液体の化学

イオン液体はイオンのみからなる溶媒であり、水とも有機溶媒とも異なる特徴を持ち、「第3の溶媒」とも呼ばれている。一般に不（難）揮発性、高い熱安定性、広い液体温度範囲をもつ、不燃性、高いイオン伝導性等、幅広い特性を有している。また、陽イオンと陰イオンの組み合わせ次第でさまざまな特性を作り出すことができ、従来の溶媒と大きく異なっている。

イオン液体の研究は、1990年代にいわゆる常温熔融塩系に対して“Ionic Liquid”という言葉が一般的に用いられるようになって以来、国内外での研究が活発になった。戦略的プロジェクト研究が実施され、イオン液体のさまざまな分野での利用に熱い期待が寄せられている。“Ionic Liquid”をキーワードとして発表された原著論文・特許の数は1992～2009年で未だ増加し続けており（2009発行の原著論文は3500報以上）、数多くの総説、解説書が発刊されている²⁾。

「イオン液体とは何か」「イオン液体で何が起こるか」「イオン液体で何ができるか」といった問いに対する回答も数多く得られてきた³⁾。イオン液体には、さまざまなドメイン構造が存在することが報告されており、デザインされた構成イオンの構造の多様性が、興味深い特性を生み出している。イオン液体は電荷を持った液体であるなどユニークな特徴を生かして新規な反応場・分離場・電気化学場などとして利用されている。有機溶媒を用いて行う反応の代替溶媒としてイオン液体を用いた例はもちろんのこと、極性物質、非極性物質とともに溶かすイオン液体の特性を生かしたバッチ処理・リサイクル反応場を構築することが可能である。イオン液体は塩でありながらリパーゼなどの酵素タンパクを安定化させ、生体関連の触媒反応も水中の反応よりも効率的に進行させることができる。バイオマスをセルロースとして溶解させる、プラスチックを原料まで溶解させるなどイオン液体ならではの利用法も注目される点である⁴⁾。

3 イオン液体を活用した教材開発

3.1 新学習指導要領における新規内容とマイクロスケール実験

平成20年3月、小・中学校新学習指導要領が公示された^{5,6)}。新学習指導要領は平成18年12月に改正された教育基本法や平成19年6月に公布された学校教育法の一部改正などを踏まえ、「生きる力」をはぐくむという学習指導要領の理念を実現するため、その具体的な手立てを確立する観点から改訂が行われた。この中で、理数教育の充実などをあげるとともに教科等を横断して改善すべき事項として、情報教育、環境教育、ものづくり、キャリア教育、食育、安全教育、心身の成長発達についての正しい理解を求めている。

中学校では、第一、第二両分野共通の内容として、「自然環境の保全と科学技術の利用」が設定された。エネルギー資源の利用や科学技術の発展と人間生活とのかかわりについて認識を深め、自然環境の保全と科学技術の利用の在り方について科学的に考察し判断する態度を養うことが目的とされている。自然環境の保全と科学技術の利用の在り方について科

学的に考察し、持続可能な社会をつくることが重要であることや、科学技術が日常生活や社会を豊かにしていること、安全性の向上に役立っていることに触れること、また、理科で学習することが様々な職業などと関係していることにも触れることと明記された。すなわち、科学技術と人間、エネルギーと環境など総合的な見方を育てることがねらいとなっている。また今回の改訂で、廃棄物の処理等を環境に留意して適切に行うことを指導することとともに、生徒実験などのスケールをマイクロ化するよう例示された。

日本ではマイクロスケール実験、アメリカでは Small Scale Chemistry と呼ばれている実験 (Fig. 1) は各国で研究がなされており、次のような利点がある⁷⁾。

- ・化学試薬を縮小（従来の実験室で使用される1000分の1程度に）することができる。
- ・無駄な生成物が非常に少なく、処分の費用はほとんどかからない。
- ・小規模であるため、有害な物質が生成しても、安全性が高い。
- ・グリーンケミストリーの原則は、すべての実験に組み込まれている。
- ・ガラス製品からプラスチックへ移行できる。
- ・実験のプラットホームは、実験室ではなく、小さいスペースで実現できる。
- ・コストを削減することができる。
- ・化学変化を直感的に理解することができる。また、多くの化学変化を同時に観察することもできるので、比較が容易である。
- ・実験器具・装置は、それぞれの実験専用に設計できる。また、従来使用されていた実験器具に比べ安価で再利用も可能である。

マイクロスケール化すれば、環境に優しい手法であるだけでなく、反応時間が短くなることにより、一時間内に試すことのできる実験の数を増やすことができ、今までは時間の関係で省略していた実験や班ごとに条件を変えて実施していた実験も生徒が各自で試すことができるようになり、教員の有効な指導により創造性、問題解決能力、科学的思考能力を育むことができる。また、時間に余裕ができることにより、指導する教師にとって学生の到達状況を的確に評価することができるようになる。

新学習指導要領で中学校にイオン概念が復活し、高等学校では先端科学の導入や大学との連携した学習が奨励されている。イオン液体は、不揮発性で少量でも溶媒の蒸発を気にせず実験でき、繰り返して使用できる。溶媒特性も優れており、イオン伝導性も高く、可燃性や毒性もないなど、魅力的な特徴を有しているとともに、マイクロスケール化することによりコストも軽減でき、学校教育への導入が可能になったのではないかと考え、教材化に着手した。

4 イオン液体を活用した実施例

4.1 イオン液体と従来型溶媒の比較

まず始めに学校教育と大学との連携型の学習に導入しようということで、出張講義型の学習教材を考案し、連携先の高等学校で実施した。先端化学で取り上げられているイオン液体をわかりやすく紹介するためにその物理化学的な特徴に着目して、高等学校でも簡単に手に入る材料を用いて紹介する

Fig. 1 マイクロスケール実験の実施例：a,b) 大気汚染モデル実験，c) 指示薬による酸塩基判定，d) 自作マイクロビュレットによる滴定，e) イオンの定性分析実験。

ことを考えた。実施は，高等学校生徒を対象に行い，説明は大学生，大学院生の TA の協力を得て実施した。比較した項目は以下の通りである。

1) 液体のおいをかいてみよう

典型的な有機溶媒（ピリジン，クロロホルム，ジエチルエーテル，ヘキサン，酢酸，エタノール，メタノール，ジメチルホルムアミド等）と合成反応等に使われるイオン液体数種（1-Butyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl) amide) [bmim][TFSA]，1-Butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate [bmim][PF₆]，1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate [bmim][BF₄] 等）を用意し，サンプル管に入れておいをかいてもらい，有機溶媒は，それぞれ特有のにおいがあるが，イオン液体は不揮発性であるため無臭であることを体験した。その際，ワークシートの記入，分子模型モデルを生徒に利用させる，おいを感じるメカニズム，構造の理解の補助につとめた。イオン液体の蒸気圧はほとんど 0 であることを利用した測定法の改良は，走査型電子顕微鏡撮影法に大きな革新をもたらしている。たとえば，イオン液体が導電性であり，かつ真空中でも，蒸発しないことを利用して生体分子を含む絶縁体試料を，イオン液体に浸潤させることにより SEM で観測できる科学と技術が開発されている⁸⁾。

2) 液体が電気を通すか調べよう

分子性溶媒であるヘキサン等の有機溶媒は電気を流さないが，イオン伝導性が高いイオン液体はイオン液体の中で電子が溶媒和されるために電子伝導性物質のような振る舞いをする⁹⁾。このことを利用して，鉛筆の芯を電極に回路を作製し，実際に電流がどのくらい流れているかどうかは電子メロディーの音で確認した。単一乾電池 3 個を直列につないで実施したときの電流値は，ヘキサン，エタノール，また，イオン交換水ではほとんど 0 であるのに対して，[bmim][BF₄] などのイオン液体は硫酸等の電解質を使ったときの 60% くらいの電流が流れる (Fig. 2)。

リチウム二次電池や，電気二重層キャパシタのようなデバイスではより高い電圧でも分解しないカーボネートなどの有機溶媒が電解質として用いられている。また，化学反応エネルギーを電気エネルギーに変換する“燃料電池”，光化学エネルギーを電気エネルギーに変換する“色素増感太陽電池”，

電気二重層へのイオンの吸脱着現象を利用して電気をためる“電気二重層キャパシタ”等は次世代デバイスとして注目されており，自然要因によってばつづく風力発電や，太陽光発電の出力の平坦化，夜間電力を蓄積して日中に活用するなど電力平準化のための電源として検討されている。現在のところ，分子性液体の電解液をそのまま置換しうるほどのイオン液体はまだ開発されていないが，イオン液体を用いれば高温条件下でも使用可能な電解質や¹⁰⁾，低温でプラスチッククリスタル相を示すイオン液体も開発されており¹¹⁾ 様々な可能性を有するデバイスの電解質としての用途が期待されている。

3) 液体に火を近づけてみよう

有機溶媒は，可燃性であるのでマッチ程度の炎を近づけただけで引火するが，イオン液体はバーナー（高等学校では酸素バーナー等はないので，携帯型のハンドバーナーを持参した）の炎を近づけても引火したり蒸発したりしないことを確認した (Fig. 3)。

不燃性，熱安定性が高いことは潤滑油として使用する際にも効果的である。1,3-alkylimidazolium 系のイオン液体は，アルキル鎖が短い方が側鎖の分解による自動酸化が進行しにくいので耐久性が高く，水分の混入がない疎水系の [emim][TFSA] などは，現存の合成油より熱・酸化安定性が高いことなどがわかってきており，有効な酸化防止剤の開発が示唆されている¹²⁾。

4) 液体を混ぜ合わせてみよう

イオン液体は，アニオンとカチオンの組み合わせによって水に溶けるもの，油に溶けるもの，どちらにも溶けないもの等，様々な性質を作り出すことができる。そこで，有機溶媒や，イオン液体を各種準備し，イオン液体と，水をそれぞれ染料で着色して，溶け方を体験してもらった。例えば，[bmim][TFSA] と（赤色油性色素で着色），水（青色水性色素で着色），ヘキサンを入れ，攪拌後静置すると，三層に分離する (Fig. 4)。

イオン液体のバルク体の極性はいろいろな方法で見積もられており，Kazlauskas らによると，1-Alkyl-3-methylimidazolium 系のイオン液体はエタノールからメタノールあたりの極性を示す^{13,14)}。また，カチオンとアニオンの親／疎水性の強度を見積もる方法も報告されている¹⁵⁾。

Fig. 2 イオン液体に電気を通す。

また、液体の温度範囲が広いことを示すための動画も作成し、紹介している。一般に液体を冷やすと、融点で結晶化するが、ある種の(イオン)液体は過冷却を起こし、さらに冷却するとガラス転移を起こして固化(ガラス化)する。ガラス転移では、融点で物質が結晶化するときのような大きな構造変化を伴わず、粘度等の動的性質が劇的に変化する。1-Alkyl-3-methylimidazolium系のイオン液体もガラス転移温度付近で大きな熱容量変化が観測されることがわかり、カチオンのアルキル鎖が大きな構造エントロピーを持ち構造変化が大きく起きることがわかっている¹⁶⁾。

4.2 酪酸エチルの合成反応

イオン液体は単純な酸触媒反応でも効果を発揮する。カルボン酸と第一級アルコールのエステル化反応は高等学校で学習する。イオン液体[bmim][TFSA]を溶媒に用いるエステル化を教材実験に使用することを考えた。教科書に記載されているエステル化の触媒は濃硫酸であるが、スカンジウムトリフラート($\text{Sc}(\text{OTf})_3$)や、イオン交換樹脂を用いると、濃硫酸に比べて反応が速く、目的物を単離する際に、ペンタンを加えて静置すれば二層に分離し、簡単に触媒層と目的物を含む有機層を分離することができ、さらにイオン液体に触媒が担持され、何度も繰り返し再使用できることがわかった(Fig. 5)。本実験は、取り扱いに注意が必要である濃硫酸を

Fig. 3 イオン液体と有機溶媒を燃焼比較。

上は [emim][EtSO₄] にバーナーを近づけているところ。

Fig. 4 イオン液体とその他の溶媒を混ぜ合わせる。

使わないですみ、安全性を向上することができたと考えている。また、本実験は、五感で体験できる匂い分子を合成することになるため、興味の持てる題材であると考えられる。

4.3 磁性イオン液体

近年、マグネタイトなどの強磁性超微粒子を液体中に懸濁させた磁性流体とは異なり液体でありながら磁性をもつ磁性イオン液体が合成され、その性質の研究がなされている^{17,18)}。我々も同様の合成法で、イオン液体、金属塩を変化させて新規磁性イオン液体数十種類を合成し教材に応用している。実際の実験手順を以下に紹介する(Fig. 6)。

- 1) アルゴン雰囲気下で砕いた $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ をサンプル管に素早くはかりとる(吸湿性が高いため)。
- 2) 同じくアルゴンを吹き入れたサンプル管に [bmim]Cl をはかりとる。
- 3) ミクロスパーテルで 2) のイオン液体を 1) $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ にくわえ、固体がなくなるまでよくかき混ぜる(サンプル管をさわって吸熱固相反応が起こっていることを確かめる)。
- 4) 真空ポンプ用オイルを底にまんべんなく広げた培養プレートに駒込ピペットで吸い上げた [bmim][FeCl₄] を一滴落とす(駒込ピペットで磁性イオン液体をゆっくり吸い上げると水と磁性イオン液体が分離するので磁性イオン液体部分のみを滴下する)。
- 5) プレートの後ろから磁石を近づけて、液体が動く様子を観察する(Fig. 7)。

4.4 地域貢献活動の実施

2008年4月にオープンした香川大学博物館はいろいろなイベントを開催しているものの、まだ児童生徒対象の見てさわって動かせる展示がない。そこで、様々な優れた性質を持

使用したイオン液体
(アニオン)

(カチオン)

$\text{X}=\text{Cl, Br, PF}_6, \text{BF}_4,$

Fig. 5 イオン液体を活用したエステル合成。

つイオン液体といま注目の機能性物質である磁性流体の特徴を併せ持つ磁性イオン液体を作製し、1) 未来型教材を開発、2)「未来からの留学生」(香川大学教育学部フェスティバル)で公開し、3) 改良を重ね、博物館に体験できる展示物を作製することを計画した。従来の磁性イオン液体の提示方法は、サンプル管に詰めてあるものの横から磁石を当てて、液面が持ち上がるものを提示する方法であったが、底が広いシャーレに潤滑油を用いて、磁石に引きつけられていることをよりわかりやすく提示する方法を採用した。「夢化学 21 in Kagawa」との同時開催のこの講座は、8年目を迎えるが、2010年は、迷路の作製と体験を計画している (Fig. 8)。

5 おわりに

イオン液体は幅広い用途が期待されている化合物である。

Fig. 6 磁性イオン液体の合成。

Fig. 7 磁性イオン液体にネオジム磁石を近づける。

Fig. 8 磁性イオン液体迷路。

大学で実施する地域貢献活動はできる限り物質の不思議、最先端の科学の面白さを提示し、原理や背景を紹介するとともに、その面白さを学生が児童生徒にわかりやすい形で実施できるように工夫するのが重要だと考えている。イオン液体は、今までの「塩」の常識を超えた化合物である。活動を通じて、児童生徒や、保護者の方々の物質の不思議や化学への興味が少しでも高まってくれたらいいと考えている。

文 献

- 1) H. Ohno ed., *Ionic Liquid II-Marvelous and Developments and Colorful Near Future*, CMC pub., Tokyo (2006) [in Japanese].
- 2) K. Nishikawa ed., *Chemistry Today*, **474**, 18 (2010) [in Japanese].
- 3) Project URL: <http://ionliq.chem.nagoya-u.ac.jp/index.html> (2010.9.24 閲覧)
- 4) T. Itoh, *Chemistry Today*, **432**, 28 (2007) [in Japanese].
- 5) The curriculum guideline describing for elementary school : Science, The Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, June, (2008) [in Japanese].
- 6) The curriculum guideline describing for Junior High school : Science, The Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, March, (2008) [in Japanese].
- 7) Y. Takagi, *KUIO Journal*, **1**, 1 (2010) [in Japanese].
- 8) S. Arimoto, M. Sugimura, H. kageyama, T. Torimoto, and S. Kuwabata, *Electrochim. Acta*, **53**, 8228 (2008).
- 9) J. F. Wishart and P. Neta, *J. Phys. Chem. B*, **107**, 7261 (2003).
- 10) A. Noda, A. B. H. Susan, K. Kudo, S. Mitsushima, K. Hayamizu, and M. Watanabe, *J. Phys. Chem. B*, **107**, 4024 (2003).
- 11) D. R. MacFarlane, N. Forsyth, P. C. Howlett, J. M. Pringle, J. Sun, G. Annat, W. Neil, and E. I. Izgorodina, *Acc. Chem. Res.*, **40**, 1165 (2007).
- 12) I. Minami, H. Kamimura, and S. Mori, *J. Synthetic Lubrication*, **24**, 135 (2007).
- 13) S. Park and R. J. Kazlauskas, *J. Org. Chem.*, **66**, 8395 (2001).
- 14) J. L. Kaar, A. M. Jesionowski, J. A. Berberich, R. Moulten, and A. J. Russell, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 4125 (2003).
- 15) H. Kato, K. Miki, T. Mukai, K. Nishikawa, and Y. Koga, *J. Phys. Chem. B*, **113**, 14754 (2009).
- 16) O. Yamamuro, Y. Minamimoto, Y. Inamura, S. Hayashi, and H. Hamaguchi, *Chem. Phys. Lett.*, **423**, 371 (2006).
- 17) Y. Yoshida, A. Otsuka, G. Saito, S. Natsume, E. Nishibori, M. Takata, M. Sakata, M. Takahashi, and T. Yoko, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **78**, 1921 (2005).
- 18) S. Hayashi and H. Hamaguchi, *Chem. Lett.*, **33**, 1590 (2004).

●著者プロフィール

氏名：高木由美子 Yumiko TAKAGI
 所属：香川大学教育学部
 役職：准教授
 趣味：華道