

巻頭言

持続可能な社会の構築を目指して、SDGs やグリーンケミストリーといった取り組みが世界的に推進されている。これらは、化学物質の使用において人体や地球環境への負荷を低減するための概念であり、そのための科学技術の総称である。近年、揮発性有機溶媒の代替溶媒として深共晶溶媒 (Deep eutectic solvent : DES) が、多くの研究者や技術者に注目されている。深共晶溶媒は 2003 年に初めて報告されたが、当初これはイオン液体の一種であると考えられていた。しかし、以下に述べる点で深共晶溶媒は、イオン液体とは異なる存在と考えられる。まず、イオン液体はカチオンとアニオンの組み合わせによって構成される「分子」であるが、深共晶溶媒は、水素結合を形成する二種類以上の化合物（これらは両方とも固体、もしくはどちらか一方が固体である）を混ぜる（不純物化する）ことによって、単体成分と比較して大幅な共晶融点降下が起こり、それぞれの純粋な成分の融点よりも低い温度（室温付近）で液体状態を作り出せる「混合物」のことである。この融点の低下は、広範な化学種間の水素結合と電荷の非局在化に起因すると考えられている。それは水素結合供与体 (Hydrogen bond donor : HBD) と水素結合受容体 (Hydrogen bond acceptor : HBA) から成っており、イオン液体とは異なり、電荷をもたない化合物であってもかまわない。また、イオン液体に比べて環境親和性が高く、有毒なものが少ないのも特徴である。原理上は組み合わせだけで任意の物性をもった溶媒を無限に作り出すことができる。深共晶溶媒は分子間同士の相互作用が強いものが多いために、優れた熱安定性、調整のしやすさ、安価、低い蒸気圧（難揮発性）、そして、無視できるほどの低毒性、さらには生分解性や不燃性など、多くの有益な特性を有しており、従来の有機溶媒やイオン液体に代わる環境に優しい溶媒として将来が期待されている。

深共晶溶媒の研究は緒についたばかりであるが、本溶媒で発現される多くの物理化学的特性は、従来の溶媒と比較して種々の分子内および分子間相互作用に起因した影響を大きく受けると考えられる。今後、触媒、分離、電気化学などの数多くの分野で幅広い用途について、深共晶溶媒を最大限に活用するには、本溶媒を構成するバルクの化学構造、界面（気体 / DES、液体 / DES、固体 / DES）構造などをより深く理解する必要があると思われる。

最近では多くの分野で、深共晶溶媒に関する学会発表、論文や解説など、次々と新しいトピックスが生まれてきている。特に常温常圧下において固体を液体にして取り扱えることは革新的な技術であり、多くの分野で新しい技術革新の誕生が期待される。このような背景で出版される本書は、深共晶溶媒の最前線と思われる新しい内容や、多くの分野で活躍されている筆者を優先的に選定し、全体では 4 編の構成とした。その内容は、第 1 編は深共晶溶媒の基礎・原理、第 2 編は抽出溶媒への応用、第 3 編は物質・材料設計と合成およびその応用、第 4 編にはバイオ・ライフサイエンス分野への応用について、それぞれの最新の成果をまとめたものである。

いくつかの単体成分を「混ぜる（不純物化）」ことによって創出される深共晶溶媒は、今までにない新しい物性や機能性を発現し、多く分野でそれらを活用した研究成果が誕生し、発見されている。さらに、その最前線では、その実装化までが議論されている。このような深共晶溶媒を「真の分子設計ができる溶媒」とするためには、その特性を支配する基礎物性および基礎原理の理解がますます不可欠となってくるであろう。

本書が少しでも基礎科学の理解と、これに基づいた応用分野の創出や開拓につながることを願いながら、物質・素材を基盤とした新たな「環境にやさしい科学の世界が実現する」ことを期待したい。

2025 年 7 月

宮崎大学名誉教授
馬場由成

第 1 章 深共晶溶媒の基礎と物性

花田隆文*¹，後藤雅宏*²

1 深共晶溶媒の基礎

深共晶溶媒（deep eutectic solvent；DES）とは、ルイスまたはブレンステッド酸・塩基を混合して得られる溶媒である。深共融溶媒や、低転移温度混合物（low-transition-temperature mixture；LTTM）とも呼ばれる。近年では特に、水素結合を供与する化合物（hydrogen bond donor；HBD）と受容する化合物（hydrogen bond acceptor；HBA）を混ぜることで生じる大幅な融点降下により、幅広い温度帯で液体として利用できる溶媒を指すことが多い。Abbott らにより 2003 年に発表されて以来、その特異な溶媒物性から様々な分野での応用が期待され研究が進められている¹⁾。水や有機溶媒に替わる第三の液体として、イオン液体（IL）と並べて説明されることが多いが、IL は有機カチオンとアニオンからなる“分子”であるのに対し、DES は HBD と HBA の“混合物”である。したがって、HBD と HBA それぞれの分子構造に加え、混合比率によっても溶媒物性を制御できる特性を有する。IL は 2000 年代初頭から研究が本格化し、近年では論文報告数は頭打ちになりつつある。一方、DES はここ 10 年ほどで急激に論文報告数が増加していることから、今後さらなる発展が見込まれる（図 1）。

これまでに様々な DES が開発されてきたが、一般に表 1 に示すように 5 種類に大別すること

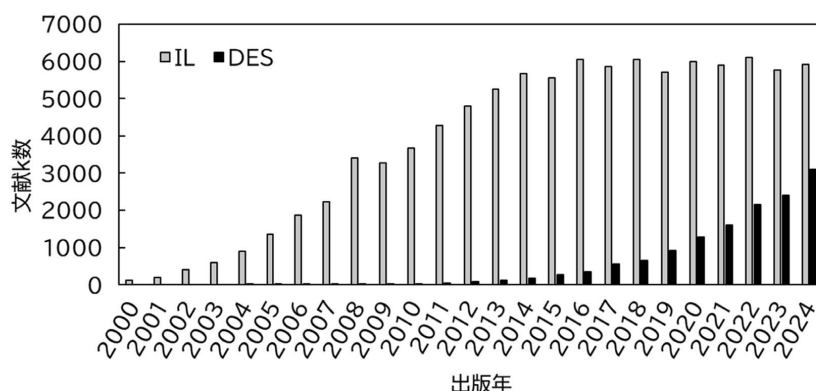


図 1 IL と DES の文献数の推移（Scopus で“ionic liquid”または“deep eutectic solvent”のキーワードで文献検索を実施し、2000 年以降のデータを収集・使用した）

*1 Takafumi HANADA 徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 助教

*2 Masahiro GOTO 九州大学 大学院工学研究院 主幹教授

ができる。ここで、 Cat^+ は有機カチオン、 X^- はアニオンをあらわす。Type I と II はそれぞれ有機塩 + 金属塩のかたちとなっており、金属塩の融点降下の研究が DES の起源となっていることがわかる。DES の開発当初は電解液やメッキ媒体としての応用例が多く、現在に至るまでさかんに研究されている一例である。最も典型的な DES として知られる塩化コリンと尿素からなる DES は Type III に分類される。Type IV は Type III の有機塩を金属塩に置換したものである。近年では HBD および HBA いずれも非イオン性の分子からなる DES を Type V として分類することが提案されている。DES を構成する典型的な HBD および HBA の分子構造を図 2 に示す。便宜上 HBD と HBA に分けて記述しているが、それぞれ逆の要素として組み込まれる

表 1 DES の分類

DESの種類	典型的な組成	例
Type I	Cat^+X^- / 金属塩	塩化コリン / 塩化亜鉛
Type II	Cat^+X^- / 水和金属塩	塩化コリン / 塩化クロム六水和物
Type III	Cat^+X^- / HBD	塩化コリン / 尿素
Type IV	金属塩 / HBD	塩化亜鉛 / 尿素
Type V	HBA / HBD	メントール / チモール

水素結合アクセプター化合物

水素結合ドナー化合物

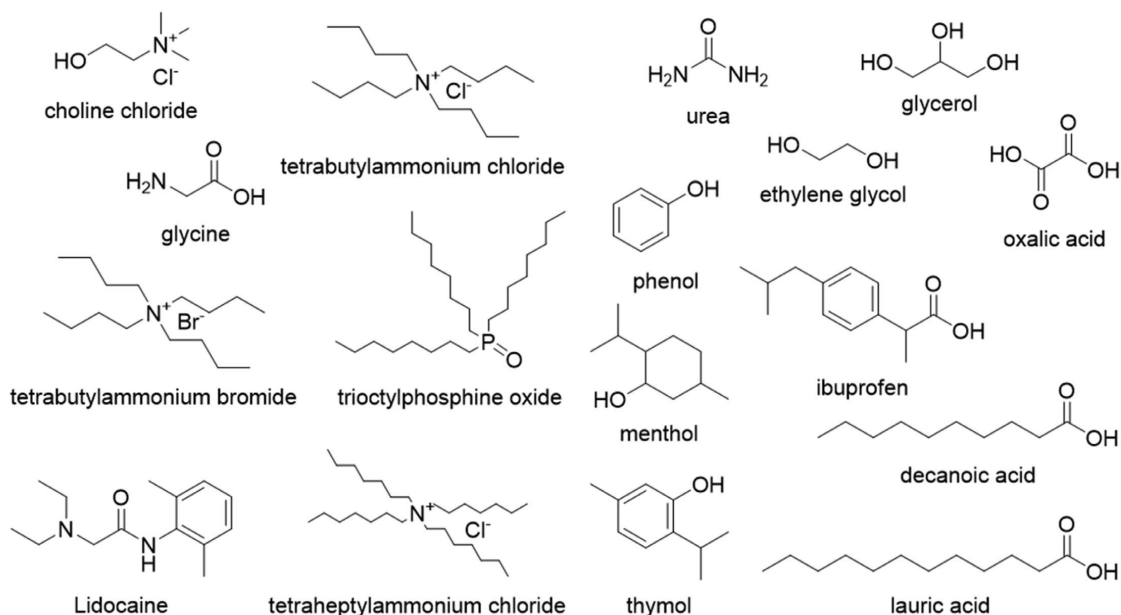


図 2 典型的な DES の構成分子