

# イオン液体を使用する 省エネ液式デシカント空調機

公益財団法人豊田理化学研究所 フェロー、鳥取大学 名誉教授 伊藤 敏幸

近年、低消費電力で運転でき、換気と空調を同時に実現する液式調湿空調機が開発されています。しかし、現行の液式調湿空調機は金属腐食性が極めて大きい塩化リチウム30%水溶液を調湿材に使用しているため、配管やセンサーにチタン等の特殊な材料が不可欠であり、このために高価な製品となり普及が進んでいませんでした。最近、イオン液体が液式調湿空調機用の調湿材候補として注目されるようになりました。本稿では液式調湿空調機の調湿材となるイオン液体の開発動向について紹介します。

## はじめに

環境省は省エネと温室効果ガス排出抑制のために夏場の冷房設定温度として28℃を推奨しています。しかし、我が国のような高温多湿な環境においては28℃が快適な室温と云いがたいのが実情です。また、新型コロナウイルスの蔓延で、空調時にも頻繁に換気することが必要になりました。このため、換気しつつ冷房と除湿が同時にできる空調機が求められています。液式調湿空調機は、換気を行いつつ除湿冷房あるいは加湿暖房を行うことができ、現在主流のコンプレッサ式空調機の80%以下の電力で運転できる省エネ空調機です。ところが、現行の液式調湿空調機は、金属腐食性が極めて大きい塩化リチウム30%水溶液を調湿材に使用しています。このため、配管やセンサーにチタン等の特殊な材料が不可欠になり、高価な製品となり普及が進んでいませんでした。しかも、産出国が偏在している塩化リチウムは空調機の調湿材に相応しい材料ではありません。

最近、液式調湿空調機の調湿材としてイオン液体が注目されるようになりました。塩は通常、高沸点・親水性であり、ほとんどの塩は熔融状態にするために数百℃の加熱が必要ですが室温で液体の塩が存在し、このような室温で熔融状態の塩は「イオン液体」と呼ばれています<sup>[1]</sup>。イオン液体は超難燃性、ほぼ不揮発性であり、有機物・高分子・無機物に対するユニークな溶解性を示し、性質をデザインできる液体として、この20年間に飛躍的に研究が進みました。本稿では液式調湿空調機の調湿材イオン液体の開発動向について紹介します。

## イオン液体調湿材のデザイン

イオン液体を調湿材に用いる空調機の動作原理を図1に示します<sup>[2]</sup>。冷却したイオン液体「冷イオン液体水溶液(ドライ)」を外気と接触させると、外気の湿気がイオン液体に吸収されると同時に外気が冷却され、生じた「ドライ冷気」を室内に導入すれば室内の冷房と除湿が同時に実現します(図1、左)。

湿気を吸収した「イオン液体水溶液(ウエット)」はヒートポンプを介して加温し、導入外気(あるいは室内の温空気)と接触させて湿気を外気あるいは室内の温空気に移してウエット温風として排気します(図1、右)。水分含量が減少したイオン液体水溶液(ドライ)は熱交換器で冷却し、これを繰り返すことで冷房空調機として機能します。この装置では、換気しつつドライ冷気を発生させることができ、一方、ウエット温風を室内に導入することで冬季は加湿器不要の暖房空調機となります。

では、どのようなイオン液体が調湿空調機の用途に相応しいでしょうか? Brenneckeらはイオン液体で最も一般的なイミダ

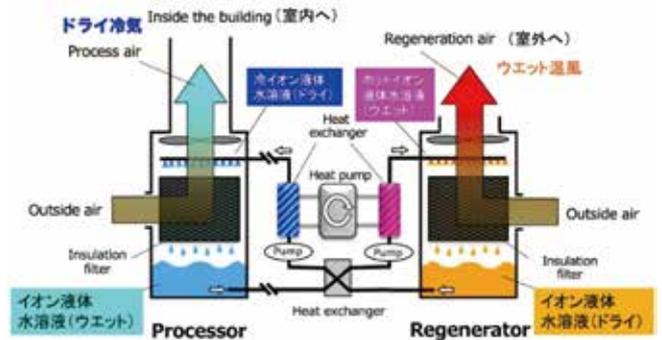


図1. イオン液体調湿空調機の原理[2]

ゾリウム塩イオン液体の吸湿能力を調べ、吸湿能は主にアニオンに依存すると報告しています。アセタートアニオン([OAc])が最大の吸湿性を示し、ジメチルリン酸([(MeO)<sub>2</sub>PO<sub>2</sub>])、メタンスルホン酸([OMs])の順に吸湿性が低下し、[NTf<sub>2</sub>]アニオンが最低になります(図2)<sup>[3]</sup>。

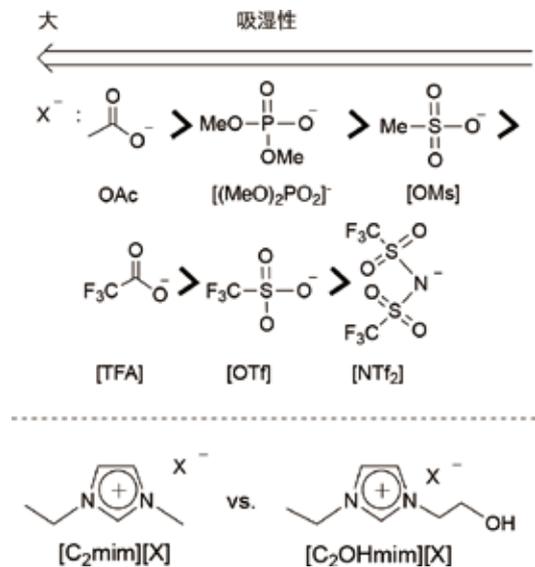


図2. イミダゾリウム塩イオン液体の吸湿性のアニオン依存性<sup>[3]</sup>

次に、アニオン([X])をトリフルアセチルアニオン([TFA])に固定し、カチオンの側鎖構造が吸湿性に及ぼす影響を調べたところ、水と混合した際の発熱量は[C<sub>2</sub>mim][TFA]の方が[C<sub>2</sub>OHmim][TFA]より大きく、[C<sub>2</sub>mim][TFA]の吸湿性は[C<sub>2</sub>OHmim][TFA]を凌駕していることがわかりました。水酸基を導入すれば吸湿性は上がると思われそうですが意外な結果です。水酸基導入で[C<sub>2</sub>OHmim]カチオンと[TFA]アニオン間の相互

作用が強まり、このために[C<sub>2</sub>OHmim][TFA]ではTFAと水との相互作用が低下してしまい、総合的に[C<sub>2</sub>mim][TFA]の吸湿性能が[C<sub>2</sub>OHmim][TFA]より大きくなったと考えられています。

吸湿性物質は水と混合した際に発熱します。発熱量の大きな吸湿剤は、吸湿した状態から水分を飛ばして再生するために大きなエネルギーを必要とします。イオン液体は水に溶かした際の発熱量が、広く吸湿剤に使われているシリカゲルや塩化カルシウムより格段に少ないという特徴があります。これは、吸湿したイオン液体の再生が非常に容易であることを示しています。

このような研究成果を踏まえ、イオン液体([C<sub>1</sub>mim][Cl]や[C<sub>1</sub>mim][BF<sub>4</sub>])を液式調湿空調機の調湿材に使用する試みが2011年にJianらから報告されました<sup>[4]</sup>。また、Feyeconは安全性の高いコリニウムカチオンと乳酸アニオンとを組み合わせた吸湿性イオン液体([Ch][Lac])を報告しています<sup>[5]</sup>。ただし、[Ch][Lac]は安定性が低いという大きな問題がありました。

筆者は様々な分野でイオン液体を使用してきましたが<sup>[6]</sup>、イオン液体の吸湿性にはしばしば悩まされていました。そのような時に液式調湿機の吸湿材という用途に出会いました。イミダゾリウム塩イオン液体の場合、イミダゾリウム環の2位の酸性度が高く、2位で金属カルベン錯体を形成するために金属腐食性が認められています。従って、吸湿材という用途には非イミダゾリウム塩イオン液体が望ましいと考えられます。しかし、カチオンが異なるとBrenneckeのデザイン指針は使えません。そ

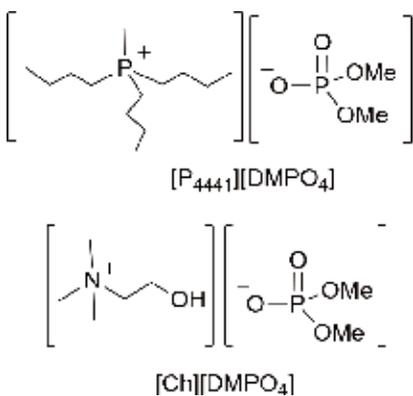


図3. 調湿性イオン液体[P<sub>4441</sub>][DMPO<sub>4</sub>], [Ch][DMPO<sub>4</sub>]

こで、カチオンを系統的に変えて、イオン液体の調湿機能を評価した結果、ホスホニウムカチオンとジメチルリン酸アニオンの組み合わせからなる[P<sub>4441</sub>][DMPO<sub>4</sub>]が優れた調湿材になることを見いだしました(図3)<sup>[2]</sup>。

[P<sub>4441</sub>][DMPO<sub>4</sub>]は、単独では金属腐食性を示しませんが、

水溶液になると銅に対してわずかに腐食性が認められました。ただし、塩化リチウム水溶液やイミダゾリウム塩イオン液体水溶液に較べると問題にならないレベルです。さらに最近、コリンカチオンとジメチルリン酸アニオンのイオン液体([Ch][DMPO<sub>4</sub>])が優れた調湿材になることを見つけました(図3)<sup>[7]</sup>。Feyeconらの[Ch][Lac]は不安定ですが、[Ch][DMPO<sub>4</sub>]は非常に安定です。

液式調湿空調機では、外気と接触させることで除湿、加湿を行うため、低い平衡水蒸気圧を示す調湿材が望まれています。[Ch][DMPO<sub>4</sub>]水溶液は実用的に十分な低い平衡水蒸気圧を示し、金属腐食性は[P<sub>4441</sub>][DMPO<sub>4</sub>]水溶液よりも低いことがわかりました。ただし、[P<sub>4441</sub>][DMPO<sub>4</sub>]水溶液に較べると3倍ほど粘性が高いという弱点もわかりました。従って、このイオン

液体を調湿材に使用する場合は、粘性を下げる補助溶媒が必要になると考えられます。

## おわりに

イオン液体には無数の種類があり<sup>[1]</sup>、さらに優れた調湿性イオン液体が見つかる可能性があります。液式調湿空調機はコンプレッサ式空調機の80%以下の電力で運転ができ、調湿原理が簡単ですから、コンパクトな空調機が設計できるはずで、さらに、デンタルガムでお馴染みの塩化アルキルピリジニウムなどの口腔殺菌剤を、調湿性や金属腐食性に影響しない程度混合すれば、空調、換気、殺菌を一挙に行う省エネ空調機ができる可能性があります。常時換気空調機は病院や学校、老人保養施設に非常に適しています。これらの施設の空調機がイオン液体調湿空調機になれば、日本全体では非常に大きな省エネが実現するのみならず、新型コロナウイルスなどの感染症対策に大いに貢献できると期待されます。

## 参考文献

- [1] イオン液体の化学-次世代液体への挑戦-、イオン液体研究会監修、西川恵子・大内幸雄・伊藤敏幸・大野弘幸・渡邊正義編、丸善出版、東京(2012)。
- [2] Watanabe, H.; Komura, T.; Matsumoto, R.; Ito, K.; Nakayama, H.; Nokami, T.; Itoh, T. *Green Energy & Environment*, 2019, 4, 139-145.
- [3] L. E. Ficke, J. F. Brennecke, *J. Phy. Chem. B* 2010, 114, 10496-10501.
- [4] L. Jing, Z. Danxing, F. Lihua, W. Xianghong, D. Li, *J. Chem. Eng. Data* 2011, 56, 97-101.
- [5] B. V. Feyecon, Patent PCT/NL 2011/050909.
- [6] Chemical Abstractsのもたらした偶然とセレンディピティ。鳥取大伊藤グループのイオン液体研究、伊藤敏幸、イオン液体研究会サーキュラーNo.13, 2019,03-18: <http://www.ilra.jp/newsletter.html>
- [7] Maekawa, S.; Matsumoto, R.; Ito, K.; Nokami, T.; Li, J-X.; Nakayama, H.; Itoh, T., *Green Chemical Engineering*, 2020, 1, in press. DOI:



伊藤 敏幸 氏

1976年東京教育大学卒業後、郷里の三重県で高校教諭をつとめた後、1986年東京大学 理学博士。1987年岡山大学教育学部助手、1990年同助教授、2001年10月鳥取大学工学部助教授、2004年4月同教授。2012年～2015年日本学術振興会学術システムセンター専門研究員兼任。2019年定年退職、鳥取大学名誉教授。1年間鳥取大学特任教授をつとめた後、2020年4月から現職。有機合成化学協会賞、GSC賞受賞。[専門]有機合成化学。[趣味]写真(雑誌CAPAに3回入選)。