

令和元年6月3日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04549

研究課題名(和文) 高効率バイオマス利用に向けた多機能性混合イオン液体-超臨界CO₂システムの適用研究課題名(英文) Application of multi-functional mixed-ionic liquid and supercritical CO₂ systems for efficient biomass processing

研究代表者

Smith Richard Le (SMITH, Richard)

東北大学・環境科学研究科・教授

研究者番号：60261583

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、イオン液体-超臨界CO₂システムによるバイオマス反応・分離プロセスのさらなる高効率化に向け、目的合成物質をgamma-valerolactoneに選定し、反応場に混合イオン液体を適用した。混合イオン液体には、高バイオマス溶解性と高CO₂溶解性といった、異なる機能性を期待した。基礎物性(高圧密度、CO₂溶解度および無限希釈活量係数)についてはそれらの測定・モデリングを行い、Kamlet-Taftパラメータを用いる極性評価、さらにformic acidを水素源としたlevulinic acidからのgamma-valerolactone反応試験を加え、総合的な評価を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

イオン液体を混合しその両機能を維持しようとする混合イオン液体については世界的にも種々の検討がなされているが、物性研究においてはその検討例が多いとは言えない。実際、本研究にて報告した混合イオン液体へのCO₂溶解度や混合イオン液体の無限希釈活量係数については、論文ベースで数報のみしか報告されていない。中でも混合イオン液体の高圧密度については本研究において初めて報告されたものであり、その高圧における非理想性については初めて明らかになった事実である。

混合イオン液体の利用方法は今後もさらなる拡がりを見せると予想され、本研究は非食用バイオマスの有効利用手法構築に向けた重要な位置づけである。

研究成果の概要(英文)：Mixed-solvents, properties and catalytic systems related to efficient processing of biomass with ionic liquids and supercritical carbon dioxide (scCO₂) were studied. Basic physical properties (solute activity coefficients at infinite dilution, high pressure densities and CO₂ solubilities) were measured and theoretical relationships were developed. Characterization of solvent polarity was studied by measuring Kamlet-Taft parameters of mixed-solvent systems where it was found that solvent phase polarity could be advantageously controlled with solvent-phase composition. Appropriate catalysts, ionic liquids, supercritical and catalytic systems were identified, whereas hydrogenation of biomass-related substrates with bifunctional catalysts was studied. A hydrogen-free, ionic liquid-scCO₂-formic acid-bifunctional Ni/NiO catalyst reaction system that produces gamma-valerolactone in high yields (97%) with unprecedented efficiency (3 h) was developed as one example.

研究分野：化学工学

キーワード：イオン液体 物性測定 物性理論 バレロラクトン 極性 超臨界流体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

セルロースを中心とする非食用バイオマスの有効利用手法の構築は、自国にて十分なエネルギー産生が見込めない我が国において重要な課題の1つである。当研究グループでは、セルロースを出発原料として、有用なバイオ燃料やバイオポリマーの原料となるような物質を高効率に合成・抽出するプロセスの構築を検討している。本研究では、セルロースから 5-HMF (5-hydroxymethylfurfural), levulinic acid, γ -valerolactone の合成経路を念頭に置き、混合イオン液体と超臨界 CO₂ を組み合わせることにより本プロセスの実現を目指したものである。

イオン液体は、常温常圧で液体の有機塩であり、難燃性・不揮発性といった数多くの特異な性質を有する新規溶媒である。イオン液体は、適切なカチオンとアニオンを選定することにより目的とする反応・抽出場設計をできるのが特徴である。従来型の一般的な有機溶媒では、セルロースをはじめとするバイオマスを可溶化させられないが、イオン液体は、そうした最適デザインを行うことによりバイオマス可溶性を発現させられる。一方で超臨界 CO₂ は、一般に高粘度とされるイオン液体溶液の可塑性（低粘度化）に寄与すると共に、反応生成物の抽剤の役割も果たす溶媒である。CO₂ 自体が不活性であり、反応生成物の抽出汚染などの恐れも低く、反応生成物の抽出に際しては減圧のみで分離可能という特徴も有する。こうしたイオン液体・超臨界 CO₂ の組み合わせは、バイオマスからの有用物質合成・抽出プロセスに際しては最良と考えてきた。

しかしながら、これまでの検討例より、「バイオマス可溶性」かつ「高 CO₂ 溶解性」を有するイオン液体種が僅少であることがわかった。これは、イオン液体の各種性質が主としてアニオン依存の傾向が強いために、異なる機能の両立が場合によって困難になっていると考えた。この打開策として、当然ながら分子構造からカチオン・アニオンを設計するの1つの方法ではあるが、他方で、それらの性質を有する既存のイオン液体2種（あるいはそれ以上）を混合した、混合イオン液体という選択肢が簡便で、有用であると考えた。

2. 研究の目的

以上のような背景を受け、本研究では、混合イオン液体 - 超臨界 CO₂ システムを実現すべく、種々の検討を行う。具体的には、(1)基礎物性、(2)溶媒特性、(3)反応試験の3つの項目に分け、本システムの総合的な評価を目的とする。基礎物性に関しては、混合イオン液体の高圧密度、CO₂ 溶解度、無限希釈活量係数などの測定およびモデリングを通じ、混合イオン液体が単一のイオン液体の混合から予想される理想性よりどの程度偏倚するのかなどを評価する。溶媒特性に関しては、Kamlet-Taft パラメータ測定を中心に、混合イオン液体の極性が（基礎物性と同様に）どの程度理想性から偏倚するのかなど、あるいは低極性である高圧 CO₂ が溶解した際にどの程度極性が低下するのかなどを、定量的に評価する。反応試験に関しては、実際に種々の合成について溶媒を換え検討する。

3. 研究の方法

(1) 混合イオン液体に関連する基礎物性測定

高圧密度

高圧密度は、基礎物性の中でも最も基本的なものの1つである。イオン液体には、バイオマス可溶性種として [bmim]Cl (1-butyl-3-methylimidazolium chloride)、高 CO₂ 溶解性種として [bmim][Tf₂N] (1-butyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide) を選定し、これらの混合比は物質質量基準で 0.75:0.25, 0.50:0.50, 0.25:0.75 とした。これらの混合イオン液体については、イオン液体の物質質量基準の組成を X とし、[bmim]Cl _{X} [Tf₂N] _{$1-X$} の形で表記する。なお、測定対象のイオン液体については、ここで報告する上記の種以外にも数種検討済みである。測定に際してはペローズ法に基づく測定装置を使用し、温度は 313 - 393 K、圧力は 200 MPa 以下とした。なお、基準となる大気圧密度に関しては、振動式密度計を用いて 293 - 373 K の温度域にて測定を行った。

CO₂ 溶解度

CO₂ 溶解度に関しても、上記と同じ混合イオン液体 [bmim]Cl _{X} [Tf₂N] _{$1-X$} を用い、MSB (Magnetic Suspension Balance) 法により測定を行った。温度は 353 - 393 K、圧力は 15 MPa 以下とした。なお CO₂ 溶解度においても、高圧密度同様に他のイオン液体種についての測定も終えているが、ここでは本系においてのみ報告をまとめた。

無限希釈活量係数からの分配係数予測

イオン液体と CO₂ 間における対象溶質の抽出挙動予測のためには、2 相間の分配係数を知るのが最良であると考えられる。しかしながら、高圧装置での分配係数測定は煩雑であるため、ここでは、大気圧下のガスクロマトグラフィーを応用して測定可能な溶質の無限希釈活量係数を測定対象として選択し、装置を構築した。具体的には、固定相にイオン液体をコーティングした担体を充填して作製したパッキドカラムを準備し、溶質の保持時間を測定することで無限希釈活量係数に変換した。検出器には TCD を用いた。なお、他の測定と同じ混合イオン液体 [bmim]Cl _{X} [Tf₂N] _{$1-X$} を使用し、温度範囲は 313 - 353 K とした。

また、これら ~ の物性測定に関しては、状態方程式を用いたモデリング評価を行い、特に、混合イオン液体の物性予測が単一イオン液体から可能なのかどうかという点と、無限希釈活量係数測定の結果から、イオン液体 - 超臨界 CO₂ 間における分配係数予測が可能なのかとい

う点において、考察を行った。

(2) 混合イオン液体 - CO₂系の溶媒特性把握
イオン液体の溶媒特性把握の一環として、本研究においては、Kamlet-Taft パラメータによる極性評価を行った。本手法は、色素の基底および励起電子状態エネルギー周囲の極性環境の影響で変化する、すなわち、溶媒極性の高低に応じて色素の吸収スペクトルが変化する現象（ソルバトクロミズム）を利用するものである。イオン液体には、他の測定と同じ[bmim]Cl_x[Tf₂N]_{1-x}を中心とする混合イオン液体を選定した。特に、高压 CO₂ 溶存状態にあるイオン液体の Kamlet-Taft パラメータ測定に際しては、Fig. 1 で示すような実験装置を設計・製作し、測定を行った。温度は 313–353 K とし、CO₂ 圧力は 20 MPa まで測定可能である。

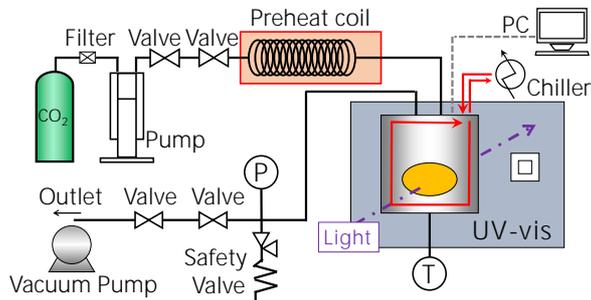


Fig. 1 高压 UV 測定実験装置概略図

(3) 反応試験

本研究にて検討を行った系として、levulinic acid と Formic acid からの γ -valerolactone 合成がある。本研究においては、まず触媒合成として、5-sulfosalicylic acid dihydrate と NiSO₄·6H₂O あるいは CuSO₄·5H₂O を用いたグルコースの水熱炭化を行った。触媒評価には、XRD、FT-IR、TEM、TG-DTA を用いた。続いて、これにより合成した炭素触媒を、超臨界 CO₂ 存在下あるいは非存在下のイオン液体中で用い、 γ -valerolactone 合成を試みた。反応温度は 110 °C ~ 170 °C とし、反応時間は 2–8 h とした。

4. 研究成果

(1) 混合イオン液体に関連する基礎物性測定 高压密度 雑誌論文 9・10・12

混合イオン液体の高压密度を測定したところ、全組成および全圧力領域において相転移にともなう密度の急激な変化は確認できなかった。

混合による非理想性を議論可能な物性量として、過剰モル体積がある。大気圧条件下でこれを評価した既往の研究によれば、混合イオン液体における過剰モル体積は 0 またはわずかに正を示す（膨張）というのが一般的である。本検討では 200 MPa までの過剰モル体積を評価した（Fig. 2）が、50 MPa で最大 1.0 cm³/mol 程度、200 MPa で 1.8 cm³/mol まで上昇した。これらの値は既往の報告例と比較しても非常に高い値を示した。これは、理想混合と比較して膨張していることを示しており、イオン大きさの違い、すなわち Cl⁻ アニオンと [Tf₂N]⁻ アニオンの大きさ違いによるものと推定された。

続いて、状態方程式を用いたモデリングを行った。本研究においては、格子流体理論に基づく状態方程式の 1 種である、Sanchez-Lacombe Equation of State (SL EoS) およびその修正型である ϵ^* -modified Sanchez-Lacombe Equation of State (ϵ^* -mod SL-EoS) を用いた。

Table 1 に、結果を示す。Table には、モデルとの偏差を表す、絶対平均偏差（ARD）を示してある。このとき、単一イオン液体の純成分パラメータを決定した後、2 つのイオン液体間の補正パラメータである相互作用パラメータ (k) の有無で比較を行った。Table より明らかなように、相互作用パラメータを用いない場合も著しく悪い推算精度とはならなかったものの、 k を用いた相関では良好な計算結果を得られた。このことから、イオン液体の混合に際しては、無視できない程度の非理想性が生じており、これを補正することにより混合イオン液体密度（つまり、高压下のイオン液体混合状態）を正確に表現できることが明らかとなった。

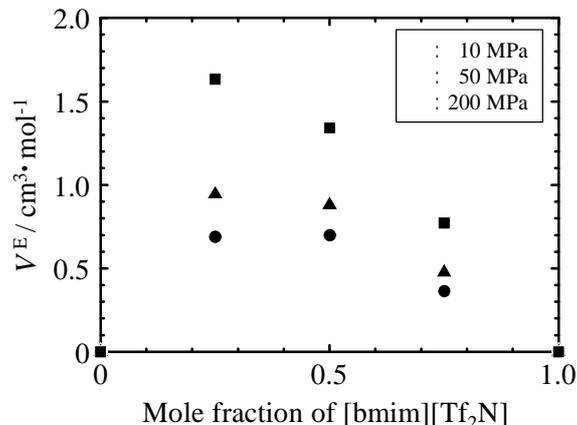


Fig. 2 混合イオン液体[bmim]Cl_x[Tf₂N]_{1-x} 過剰モル体積 (392 K)

Table 1 混合イオン液体の高压密度 (≤100 MPa) に対する ϵ^* -mod SL EoS 推算・推算結果, ARD/%

	Prediction ($k = 0$)	Correlation ($k \neq 0$)
[bmim]Cl _{0.75} [Tf ₂ N] _{0.25}	0.297	0.143
[bmim]Cl _{0.50} [Tf ₂ N] _{0.50}	0.475	0.071
[bmim]Cl _{0.25} [Tf ₂ N] _{0.75}	0.328	0.067

混合イオン液体[bmim]Cl_x[Tf₂N]_{1-x}へのCO₂溶解度は、[bmim][Tf₂N]の組成が上がるにつれて上昇する傾向が見られた。これをより定量的に評価するべく、ヘンリー定数を用いた比較を行った。結果を Fig. 3 に示した。図より明らかなように、ヘンリー定数の挙動は組成に対する線形依存(点線)から下に凸の偏倚を示しており、これは、理想混合の溶解度以上にCO₂が溶解することを示している。前述の高圧密度の挙動から推察すると、イオン液体同士の混合により理想より膨張、すなわち空隙が生じ、それによりCO₂の溶解度が上昇したと考えられる。

また、単一イオン液体の純成分パラメータ、[bmim]Cl-CO₂間、[bmim][Tf₂N]-CO₂間および[bmim]Cl-[bmim][Tf₂N]間の相互作用パラメータを用い、ε*-mod SL-EOSにより混合イオン液体に対するCO₂溶解度を推算したところ、全温度・全圧力・全混合イオン液体組成におけるCO₂溶解度の推算精度はARDで1.9%となり、極めて良好な精度を得た。この値は、SL EoSにて9.8%であったことから良好であると言える。以上より、混合イオン液体に対するCO₂溶解度は、高圧密度、各イオン液体に対するCO₂溶解度を把握し、適切な状態方程式を適用することで推算可能であることが示唆された。

無限希釈活量係数 雑誌論文 1

まず、単一イオン液体[bmim]Clおよび[bmim][Tf₂N]を用いて、無限希釈活量係数を測定した。いくつかの溶質種については文献値が存在するため、それらと比較することで装置の健全性を確認した。その上で、状態方程式ε*-mod SL-EOSを適用してイオン液体-溶質間の相互作用パラメータを決定した。「イオン液体-CO₂間における溶質の無限希釈分配係数」を予測するためのパラメータが全て揃ったため、これにより既往の無限希釈分配係数報告例の推算を行った。推算精度は9.2~37.5%となり、十分な推算精度であったと言える。この知見を元に、同様に混合イオン液体に関する無限希釈活量係数を測定、状態方程式の適用を行い、実際には報告例の皆無な、混合イオン液体に関する分配係数の推算を行えた。

(2) 混合イオン液体 - CO₂系の溶媒特性把握 雑誌論文 5・6・7 など

高圧CO₂溶存下のイオン液体極性評価に先立ち、まず、混合イオン液体における大気圧条件下の極性評価を行った。測定対象である Kamlet-Taft パラメータは、双極性/分極率パラメータπ^{*}、水素結合供与性α、水素結合受容性βであり、[bmim]Cl_x[Tf₂N]_{1-x}を含む混合イオン液体について、293 - 353 Kの温度域にて測定を行った。[bmim]Cl_x[Tf₂N]_{1-x}については特に[bmim]Clの水素結合受容性度βが[bmim][Tf₂N]と比較して著しく高いために、組成に対して線形的な変化ではなく、[bmim]Clに強く影響を受けるような組成依存性を示した。例えば[bmim][Tf₂N]を増加させ、50:50程度のモル濃度比になっても元のβ値から20%程度しか減少しておらず、充分高い値を維持した。

続いて、高圧CO₂の存在下における双極性/分極率パラメータπ^{*}の挙動を Fig. 4 に示した。図中の2種のイオン液体は、バイオマス可溶性のイオン液体である。前述のイオン液体添加時の挙動と同じく、低極性のCO₂を添加することによる極性低下挙動は確認できたが、その低下率は充分抑えられており、バイオマスの溶解性は維持できているものと推察される。また、本系は単一イオン液体における挙動であるために、今後は混合イオン液体に対する挙動を確認する必要があると考える。

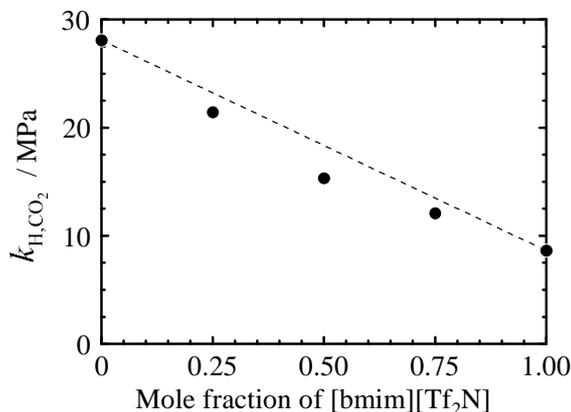


Fig. 3 混合イオン液体[bmim]Cl_x[Tf₂N]_{1-x}へのCO₂溶解におけるヘンリー定数(353 K)

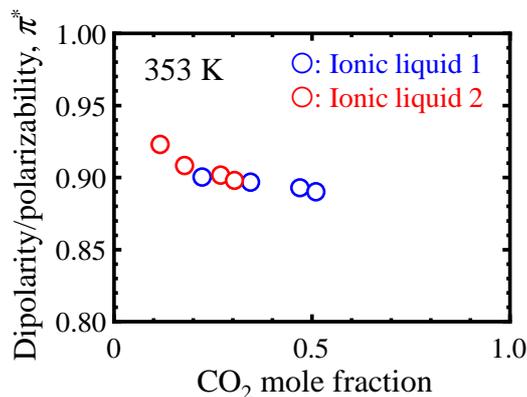


Fig. 4 イオン液体へのCO₂溶解にともなう極性変化挙動(353 K)

(3) 反応試験 雑誌論文 2 など

前述の通り、反応系の試験としては levulinic acid と formic acid(水素源)からのγ-valerolactone合成を検討した。このとき、CO₂の有無による反応性の差異を議論した。

まず、CO₂の非存在下においてもあらゆる条件において転化率(levulinic acid基準)は軒並み90%を超えており、用いた炭素触媒の高い活性を確認した。その一方で、γ-valerolactoneの収率を見ると、最も高い条件で25%(Ni/NiO-FC, 170 °C, 3 h)にとどまり、十分な収率を得られなかった。CO₂添加条件においては、転化率はやや劣る傾向があったものの、γ-valerolactone

の収率を見ると、最も高い条件で 97 % (前述と同じ, Ni/NiO-FC, 170 °C, 3 h) となり, 大幅に改善した .CO₂ 溶解にともなう粘度低下・物質移動促進などの効果もあるとは考えられるが, もっとも可能性が高い要因は γ -valerolactone が CO₂ によりイオン液体相から抽出され, それ以上の反応が進みづらくなったことであると推察された .

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 23 件)

T. Shida, Y. Hiraga, T. Sugiyama, Y. Sato, M. Watanabe, R. L. Smith, Jr., Measurement and modeling of infinite dilution activity coefficients of organic compounds in an equimolar ionic liquid mixture of [Bmim]Cl and [Bmim][Tf₂N], *Fluid Phase Equilib.*, 査読有, **488**, 72-78 (2019), DOI: 10.1016/j.fluid.2019.01.028

H. Guo, Y. Hiraga, X. Qi, R. L. Smith, Jr., Hydrogen gas-free processes for single-step preparation of transition-metal bifunctional catalysts and one-pot γ -valerolactone synthesis in supercritical CO₂-ionic liquid systems, *J. Supercrit. Fluids*, 査読有, **147**, 263-270 (2019), DOI: 10.1016/j.supflu.2018.11.010

H. Li, R. L. Smith, Solvents take control, *Nature Catalysis*, 査読有, **1**, 176-177 (2018), DOI: 10.1038/s41929-018-0040-6

H. Guo, A. Duereh, Y. Hiraga, X. Qi, R. L. Smith, Mechanism of Glucose Conversion into 5-Ethoxymethylfurfural in Ethanol with Hydrogen Sulfate Ionic Liquid Additives and a Lewis Acid Catalyst, *Energy Fuels*, 査読有, **32**, 8411-8419 (2018), DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b00717

A. Duereh, H. Guo, T. Honma, Y. Hiraga, Y. Sato, R. L. Smith, H. Inomata, Solvent Polarity of Cyclic Ketone (Cyclopentanone, Cyclohexanone): Alcohol (Methanol, Ethanol) Renewable Mixed-Solvent Systems for Applications in Pharmaceutical and Chemical Processing, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **57**, 7331-7344 (2018), DOI: 10.1021/acs.iecr.8b00689

A. Duereh, R. L. Smith, Strategies for using hydrogen-bond donor/acceptor solvent pairs in developing green chemical processes with supercritical fluids, *J. Supercrit. Fluids*, 査読有, **141**, 182-197 (2018), DOI: 10.1016/j.supflu.2017.11.004

Y. Hiraga, A. Duereh, R. L. Smith, Jr., Aspects of solvent polarity and solvent properties in developing efficient systems for processing biomass with ionic liquid mixtures and supercritical CO₂, *J. Supercrit. Fluids*, 査読有, **134**, 12-20 (2018), DOI: 10.1016/j.supflu.2017.12.022

H. Guo, A. Duereh, Y. Hiraga, T. M. Aida, X. Qi, R. L. Smith, Jr., Perfect recycle and mechanistic role of hydrogen sulfate ionic liquids as additive in ethanol for efficient conversion of carbohydrates into 5-ethoxymethylfurfural, *Chem. Eng. J.*, 査読有, **323**, 287-294 (2017), DOI: 10.1016/j.cej.2017.04.111

Y. Hiraga, S. Hagiwara, Y. Sato, R. L. Smith, Jr., Measurement and Correlation of High-Pressure Densities and Atmospheric Viscosities of Ionic Liquids: 1-Butyl-1-methylpyrrolidinium Bis(trifluoromethylsulfonyl)imide, 1-Allyl-3-methylimidazolium Bis(trifluoromethylsulfonyl)imide, 1-Ethyl-3-methylimidazolium Tetracyanoborate, and 1-Hexyl-3-methylimidazolium Tetracyanoborate, *J. Chem. Eng. Data*, 査読有, **63**, 72-980 (2018), DOI: 10.1021/acs.jced.7b00773

Y. Hiraga, K. Koyama, Y. Sato, R. L. Smith, Jr., High pressure densities for mixed ionic liquids having different functionalities: 1-butyl-3-methylimidazolium chloride and 1-butyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide, *J. Chem. Thermodyn.*, 査読有, **108**, 7-17 (2017), DOI: 10.1016/j.jct.2016.12.037

Y. Hiraga, K. Koyama, Y. Sato, R. L. Smith, Jr., Measurement and modeling of CO₂ solubility in [bmim]Cl – [bmim][Tf₂N] mixed-ionic liquids for design of versatile reaction solvents, *J. Supercrit. Fluids*, 査読有, **132**, 42-50 (2018), DOI: 10.1016/j.supflu.2017.02.001

Y. Hiraga, M. Goto, Y. Sato, R. L. Smith, Jr., Measurement of high pressure densities and atmospheric pressure viscosities of alkyl phosphate anion ionic liquids and correlation with the ϵ^* -modified Sanchez-Lacombe equation of state, *J. Chem. Thermodyn.*, 査読有, **104**, 73-81 (2017), DOI: 10.1016/j.jct.2016.09.013

H. Guo, X. Qi, Y. Hiraga, T. M. Aida, R. L. Smith, Jr., Efficient conversion of fructose into 5-ethoxymethylfurfural with hydrogen sulfate ionic liquids as co-solvent and catalyst, *Chem. Eng. J.*, 査読有, **314**, 508-514 (2017), DOI: 10.1016/j.cej.2016.12.008

A. Duereh, Y. Sato, R. L. Smith, H. Inomata, F. Pichierri, Does Synergism in Microscopic Polarity Correlate with Extrema in Macroscopic Properties for Aqueous Mixtures of Dipolar Aprotic Solvents?, *J. Phys. Chem. B*, 査読有, **121**, 6033-6041 (2017), DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b03446

A. Duereh, Y. Sato, R. L. Smith, H. Inomata, Methodology for replacing dipolar aprotic solvents used in API processing with safe hydrogen-bond donor and acceptor solvent-pair mixtures, *Org. Process Res. Dev.*, 査読有, **21**, 114-124 (2017), DOI: 10.1021/acs.oprd.6b00401

A. Duereh, Y. Sato, R. L. Smith, H. Inomata, Analysis of the Cybotactic Region of Two Renewable Lactone-Water Mixed-Solvent Systems that Exhibit Synergistic Kamlet-Taft Basicity, *J. Phys. Chem. B*, 査読有, **120**, 4467-4481 (2016), DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b03090

[学会発表](計12件)

T. Shida, Y. Hiraga, T. Sugiyama, Y. Sato, M. Watanabe, R. L. Smith, Jr., Measurement and modeling of infinite dilution activity coefficients for organic compounds in ionic liquid mixtures ([Bmim]Cl_{0.50}[Tf₂N]_{0.50}), The 8th International Symposium on Molecular Thermodynamics and Molecular Simulation (MTMS'18), 2018/09/04-07, Nihon University (Chiba・Narashino).

R. L. Smith, Jr., Methodology of using mixed-solvents for developing green chemical processes, The 5th International Symposium & Exhibition on Aqua Science and Water Resources (ISASWR'17), 2017/08/08-11, Fukuoka University (Fukuoka・Jonan-ku).

Y. Hiraga, H. Guo, Y. Sato, R. L. Smith, Jr., Measurement and Modeling of Kamlet-Taft Solvatochromic Parameters of Hydrogen-Bond donor and Acceptor Solvent Mixtures with the Preferential Solvation Model, The 5th International Symposium & Exhibition on Aqua Science and Water Resources (ISASWR'17), 2017/08/08-11, Fukuoka University (Fukuoka・Jonan-ku).

H. Guo, A. Duereh, T. M. Aida, R. L. Smith, Jr., Stability of 5-hydroxymethylfurfural in the mixture of hydrogen sulfate ionic liquid and ethanol, The 5th International Symposium & Exhibition on Aqua Science and Water Resources (ISASWR'17), 2017/08/08-11, Fukuoka University (Fukuoka・Jonan-ku).

R. L. Smith, Aspects of mixed-solvents for reactions and separations, 平成28年度化学系学協会東北大会, 2016/09/10-11, いわき明星大学, (福島・いわき).

Y. Hiraga, Y. Sato, R. L. Smith, Jr., Partition coefficients of benzene derivatives in ionic liquid – CO₂ biphasic systems, 平成28年度化学系学協会東北大会, 2016/09/10-11, いわき明星大学, (福島・いわき).

Y. Hiraga, K. Koyama, M. Goto, Y. Sato, R. L. Smith, Jr., High Pressure PVT and Solubility of Supercritical CO₂ in Mixed Ionic Liquids Having Different Functionalities, 15th European Meeting on Supercritical Fluids (EMSF), 2016/06/08-11, Essen (Germany)

萩原沙樹, 後藤武蔵, 平賀佑也, 佐藤善之, 相田卓, 渡邊賢, スミスリチャード, イミダゾリウム系イオン液体へのH₂およびH₂+CO₂混合ガス溶解度に関する研究, 化学工学会第48回秋季大会, 2016/09/06-08, 徳島大学, (徳島・徳島)

Y. Hiraga, Y. Sato, R. L. Smith, Jr., Theoretical Analysis of ePC-SAFT Equation of State for Predicting Infinite Dilution Partition Coefficients in Supercritical CO₂- Ionic Liquid Biphasic Systems, 14th PPEPPD 2016 (International Conference on Properties and Phase Equilibria for Product and Process Design), 2016/05/22-26, Porto (Portugal)

[図書](計2件)

Z. Fang, R. L. Smith, Jr., X. Qi, Production of Platform Chemicals from Sustainable Resources, Springer, 2017, 475 (1-475).

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 佐藤 善之

ローマ字氏名: (SATO, yoshiyuki)

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 50243598

研究分担者氏名: 平賀 佑也

ローマ字氏名: (HIRAGA, yuya)

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 学術研究員

研究者番号(8桁): 7075814

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。