

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24241023

研究課題名(和文)プラスチックおよびバイオ高分子のアップグレード化学リサイクル

研究課題名(英文)Development of chemical recycling of plastics and biopolymers toward effective valorization

研究代表者

上村 明男(Kamimura, Akio)

山口大学・創成科学研究科・教授

研究者番号：30194971

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,300,000円

研究成果の概要(和文)：プラスチックや天然由来の高分子の化学リサイクルを効果的に進めるためには、その効率を高める化学的研究が不可欠となる。本研究ではこれまでに基礎的な知見を得てきた高分子の解重合反応について、超臨界流体、イオン液体、リポソームを反応場として用いる酵素反応系について、反応機構的な検討と考察を通じて、反応の効率を上げまたその一般性を求めた研究を行った。その結果、ポリアミドの超臨界流体中での反応機構の全貌を明らかにすることができ、その高効率解重合や化学変換反応を開発した。イオン液体中で極めて短時間で有用な物質変換を達成できた。またリポソーム系酵素反応によってセルロースの高効率化学資源化に新たな知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Studies on depolymerization reaction of plastics and natural polymers toward efficient valorization were carried out. We investigated efficient depolymerization of polyamides in supercritical methanol. Kinetic studies on this reaction revealed whole reaction mechanism and substitution of amino group in the monomer took place through SN2 reaction with added carboxylic acid. This reaction was generally applied and many of simple amines were also converted into alcohols under the same conditions. Ionic liquids provided a new conversion of sorbitol to isosorbide in only 10 minutes by heating in a microwave oven. This reaction was efficiently catalyzed by catalytic amounts of acid and solid acid catalyst such as ion exchange resin was also useful. Cellulose was effectively converted into glucose in ionic liquids in the presence of liposomes including cellulase, which was effectively stabilized and maintained its chemical reactivity for the efficient conversion.

研究分野：有機合成化学

キーワード：解重合反応 高分子 プラスチック セルロース 超臨界流体 イオン液体 リポソーム

## 1. 研究開始当初の背景

増え続けるプラスチック廃棄物の適切な処理は現在求められている課題である。また、植物由来の非可食性バイオマスの大きな部分を占めるセルロースやリグニンの効果的な再資源化も、二酸化炭素排出を抑制するためには必要な技術とされている。石油をはじめとする化石由来の炭素資源の今後の枯渇が予想されることから、これらの再資源化の確立は急務である。

我々はこれまでにプラスチックやバイオマスなどの「ポリマー」の化学的再資源化の手法を種々開発し、処理困難とされるプラスチックの選択的な分解や再資源化法の開発、およびその化学的戦略の確立に大きく貢献してきた。たとえば、これまで処理困難であった繊維強化プラスチック (FRP) も、超臨界アルコールやイオン液体を用いることで速やかに解重合反応させて、構成成分のガラス繊維とモノマー成分とリンカー成分をそれぞれ分別して回収することに成功した (Kamimura, *ChemSusChem* 2008)。あるいはイオン液体を用いた世界初のナイロン6の効果的解重合を発表した (Kamimura, *Org. Lett.* 2007)。さらに得られた成分を用いて FRP の再生合成にも成功し、プラスチック製品の試作品を作成することにも成功した (Yamada, Kamimura, *J. Mater. Cycle Waste Manag.* 2010)。未発表ではあるがセルロースもイオン液体を用いることで、グルコースへの選択的な化学的分解とその単離に新しい方法を開発することもできた。また、これらの反応をイオン液体中で進めることにも世界で始めて成功した。

しかし、化学リサイクルを現実のものとするためには、化学的な変換反応の開発以外に経済性の問題を解決せねばならない。そのためには、反応によってより高付加価値なものを生み出すことが重要となる。この考えに基づき、我々はナイロン6を超臨界メタノール中で処理すると、対応するモノマーであるカプロラクタムでなく、より価値の高い化学原料であるヒドロキシカルボン酸エステルに効果的に変換する反応を見いだした (Kamimura, *Green Chem.* 2011)。この方法は「アップグレード化学リサイクル法」すなわち「高付加価値生成物を作るプラスチックの解重合プロセス」として期待できる方法である。この反応は化学リサイクルにおける経済性の問題を克服する第一歩であり、他のプラスチックや天然高分子の「化学リサイクル法」の実現に向けた反応の開発に結びつく糸口となると考えた。

## 2. 研究の目的

しかし我々の開発したこの反応には、まだまだ反応機構的に不明な点や改良点も多く残されており、化学リサイクルを使える技術とするためには、これらの反応のメカニズムを明らかにしていくことが必要である。また

この知見をこれまでの技術に活かし、合成高分子や天然高分子の幅広い化学資源化に展開していくことも望まれる。そこで本研究課題では「廃プラスチックと麦わらを宝の山に」を実現するために、高分子を付加価値の高い化学原料化するための「アップグレード化学リサイクル」について、基礎的な化学を明らかにするとともに多角的な反応を検討することで、一般的な高分子化合物の再資源化に結びつけるための方法論の開発を進める音を目的とする。

本研究の推進には、合成及び天然高分子の解重合反応への「有機合成化学方法論」と「有機反応機構論」の積極的な展開を進め、高付加価値生成物を得るために必要な条件の解明や、基礎的知見を多角的な反応への展開を行い、合成高分子 (ナイロン、ポリカーボネート、不飽和ポリエステル、エポキシ樹脂など) と天然高分子 (セルロース・ヘミセルロース・リグニンなど) の解重合反応を有機化学の見地から明らかにする。そして得られた知見を活用した解重合反応の新展開を目指し、単なる高分子の解重合反応を経済的にも成り立つ再資源化法に転換するための化学リサイクルの新方法論の確立をめざす。

## 3. 研究の方法

本研究では、超臨界アルコールやイオン液体を用いて、合成あるいは天然高分子の解重合反応を多角的な条件で試み

- A. 各種条件下で解重合反応させ、その反応の生成物の同定
- B. 生成物の時間的分布を明らかにして追跡とシミュレーションを使った速度論の決定
- C. 速度論の結果中間体の候補化合物の推定から反応経路を提案
- D. 反応機構に基づいた適切な反応効率向上への展開

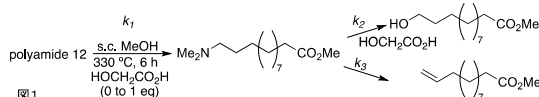
を行う。そのために適切と考えられる触媒の添加や反応条件の改良を通じ、解重合反応をより効率的にするための知見を得る。これを通じてアップグレード化学リサイクルのために望ましい生成物を得るための最適条件を探索する。見いだされた最適条件を通じてこれまでの解重合反応や新しい解重合反応の開発や展開を行う。以上の方法論によりこの研究を開始した。

## 4. 研究成果

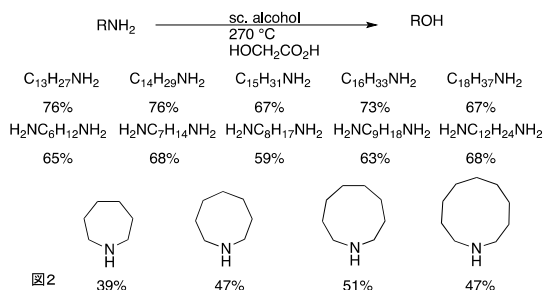
(1) 超臨界メタノールを使ったポリアミドの解重合反応の反応機構の解明と新展開

超臨界メタノールを用いたポリアミド 12 の解重合反応機構：超臨界アルコールを用いてポリアミド 12 の解重合反応を行った。添加するカルボン酸としてグリコール酸およびピバル酸を用い、その量を変化させて、反応生成物の分布データをもとに、シミュレーションを行って、解重合反応の速度論の解析を行った。その結果、ポリアミド 12 のヒドロキシカルボン酸メチルあるいはドデセン

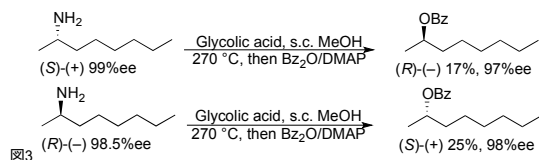
酸メチルへの変換反応はモノマーであるアミノドデカン酸への解重合ののちに、末端アミノ基の置換反応もしくは脱離反応が起こることで、それぞれの生成物に変換されることがわかった。それぞれの反応速度  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  を見積もることができ、特にアミノ基のヒドロキシドデカン酸メチルへの変換の速度  $k_2$  が添加したグリコール酸の濃度に比例したことから、置換反応の求核剤がグリコール酸であること、水酸基への変換は、グリコール酸部位のメタノールによる可溶倍分解で進行していることが明らかとなった(図1)。このことは  $^{18}\text{O}$  で同位体交換した酢酸を添加した実験でも確かめることができた。



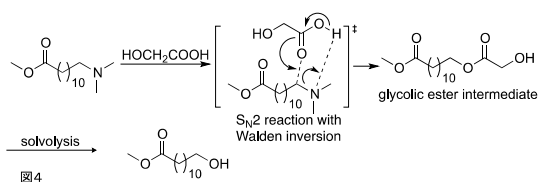
超臨界メタノールを用いたポリアミドの解重合反応を活かした新しい化学変換反応：一般に脂肪族アミノ基の一段階での置換反応は、有機合成的に困難な反応とされているが、ここで見いだした反応はアミノ基の置換反応としても有望である。そこで、普通のアミンに対してこの処理を行うことでアルコールへの変換を試みたところ、第一級アルキル基についたアミンや環状アミンは容易に置換反応されてアルコールやジオールに変換できることが明らかとなった(図2)。



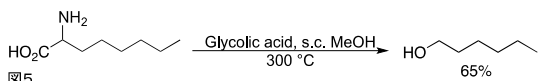
一方、光学活性な第二級アルキル基についた第一級アミンは収率は低下したものの、40%程度の収率で置換生成物を与え、得られたアルコールが完全に立体反転し、その光学純度が低下しないことがわかった。このことは、図1の反応におけるグリコール酸による置換プロセス ( $k_2$  の反応) がワルデン反転を伴う反応機構で進行していることを明確に示す(図3)。



すなわち、超臨界アルコール条件でのグリコール酸添加による、アミノ基の置換反応はグリコール酸の酸素が求核剤として作用する  $\text{S}_{\text{N}}2$  反応であることが明らかとなった(図4)。

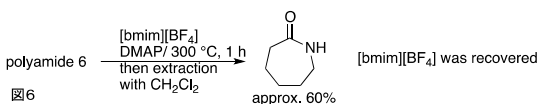


この反応が天然由来のアミノ酸に対しても適用できるなら、極めて有効な反応になり得る。そこで、種々のアミノ酸に対して超臨界アルコール処理を行ったが、アミノ基の置換に先立って脱炭酸が進行することがわかった。例えばアミノオクタン酸をグリコール酸存在下超臨界メタノール処理を行うと、炭素数が1つ少ないヘプチルアルコールが主生成物として得られてくることがわかった。この反応のメカニズムについては現在検討を行っている(図5)。



(2) イオン液体を用いた高分子の解重合反応と、生成物の化学資源化を目指した変換反応  
イオン液体を用いたポリアミドの解重合反応の効率化：我々はこれまでにポリアミド6の解重合反応がイオン液体[PP13][TFSA]中で効果的に進行することを明らかにしているが、反応生成物である対応するモノマーが脂溶性であるためにイオン液体[PP13][TFSA]と分離が困難である問題があった。ポリアミド6の場合はカプロラクタムが蒸留可能であったので、反応混合物を直接減圧蒸留することで対応していたが、そのための熱エネルギーの損失を考えると、抽出分離などの方法をとるほうが望ましい。そこで水溶性イオン液体である[bmim][BF<sub>4</sub>]を代わりにもちいて解重合反応を検討した。

ポリアミド6を少量のDMAP存在下、親水性イオン液体[bmim][BF<sub>4</sub>]中で300 に加熱したところ、期待した解重合反応は進行し、目的のカプロラクタムが約60%で得られた(図6)。反応は1時間で終了し、反応混合物を冷却し手から水を加え、有機溶媒で抽出することで効果的に生成物とイオン液体の分離が可能であった。イオン液体は抽出後の水相を濃縮することで回収でき、再利用も可能であった。しかし、この方法では若干のイオン液体が生成物に混じってきてしまうこと、解重合生成物の収率が、[PP13][TFSA]中での反応に比べやや低下することがわかった。すなわち、[TFSA]を有するイオン液体並みに反応性の高い水溶性イオン液体を用いれば、もう少し収率の改善につながると考えられるが、現状ではそのようなイオン液体はないために、このことは今後の課題として解決されるべき問題であろう。

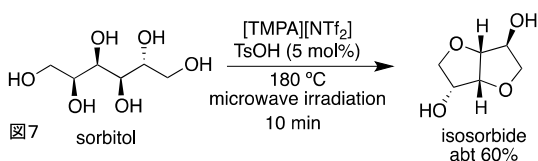


イオン液体を用いたバイオマスの高効率

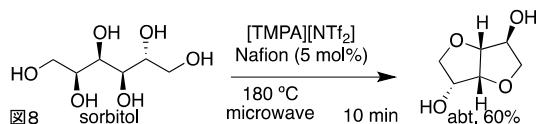
な新規変換反応：我々はすでに疎水性イオン液体と酸および塩化リチウムを共存させることで、セルロースの効果的な解重合反応を開発し、得られたグルコースを単離する手段を開発した。そこで、グルコースを化学原料として効果的に変換する反応の開発を行うことを考え、その還元体であるソルビトールのイソソルビドへの変換をイオン液体中で行うことを考えた。この反応はソルビトールからの2分子脱水反応であり、疎水性イオン液体中で反応すれば、反応を進行させた後、生成物であるイソソルビドが水溶性なので、単離も抽出によって簡単にできると考えた。

ソルビトールを疎水性イオン液体である [TMPA][TFSA] 中でマイクロ波を用いて加熱したが、200 まで加熱しても全く反応しないことがわかった。一方、それ以上の温度では、目的のイソソルビドは反応後期に少量生じるものの、その前駆体と考えられる 1,4-アンヒドロソルビトールは全く得られず、1,5-アンヒドロソルビトールが主生成物として得られることがわかった。これは、2分子脱水に必要なソルビトール末端水酸基のプロトン化による活性化がイオン液体中では起こっていないためと考えた。そこで、反応を活性化させるために、触媒量のトルエンスルホン酸を添加することを考えた。

ソルビトールを [TMPS][TFSA] 中、少量の p-トルエンスルホン酸存在下、マイクロ波加熱したところ、180 で10分加熱するだけでイソソルビドを60%以上の収率で得られることを見いだした。これは既存の同様の変換反応の中でも最も迅速に進行する反応である。イソソルビドとイオン液体は抽出操作によって完全に分離でき、抽出後の水相と有機相を濃縮するだけで、生成物とイオン液体を完全に単離回収することができた。回収したイオン液体は反応に再利用でき、5回まで効率を落とすことなく反応が可能であることを明らかにした。すなわちこの新たな高効率バイオマス変換反応を開発できた(図7)。



この変換反応は固体酸触媒を用いても可能である。ソルビトールを [TMPS][TFSA] に混合し、を触媒量の強酸性イオン交換樹脂である Nafion 樹脂を添加後、マイクロ波で180に10分間加熱するだけでイソソルビドを高収率で得られることを見いだした(図8)。



### (3) イオン液体と酵素反応を活用したバイオマスの化学変換の新展開

リポソームに複合化したセルラーゼを用

いたイオン液体中でのセルロースの変換反応：新たな方法論として、セルロースの解重合においてイオン液体とセルラーゼを用いることを考えた。この方法論のメリットは反応を室温下の穏和な条件で行えることにある。しかしセルラーゼはイオン液体中では失活してしまうことが知られており、イオン液体のセルロース溶解性と、セルラーゼの失活の阻止の両立が、この方法論の成否を決めることになる。そのためセルラーゼをリポソームに封入し、イオン液体中に分散することで、イオン液体に溶解したセルロースを、リポソーム内部で活性を保っているセルラーゼを用いてグルコースに変換する方法を考えた。

リポソーム封入したセルラーゼは、リポソームに酵素を封入する通常の方法によって作成した。これを [bmim][Cl] にセルロースとともに混合し、室温にてセルロースの加水分解反応を検討した。セルラーゼの活性は保たれるものの、変換反応の効率が低いことがわかった(図9)。

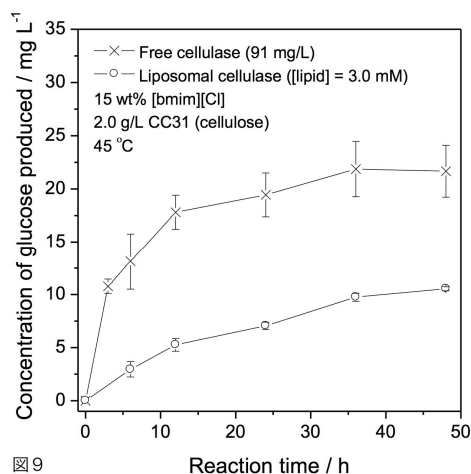


図9

反応の効率をさらに高めるために、セルロースをイオン液体(IL)で前処理し、セルロースの結晶状態をほぐした後に、セルロースのイオン液体中での加水分解を行うことによる反応の効率化を考えた。また反応効率を上げるために、荷電脂質膜の疎水部の構造に基づいてリポソームに複合化されたセルラーゼ活性を制御することで活性の向上を試みた。そこでセルラーゼ活性を安定化する荷電脂質膜をもつリポソームを開発した。その結果、荷電脂質を含有するリポソーム内のセルラーゼの糖化活性は、双性脂質のみから構成されるリポソーム系に比べて、48時間の反応後期において安定に活性が維持されることがわかった(図10)。すなわち、酵素法における問題点の一つである生成したグルコースなどの糖が酵素の活性を阻害することが、荷電脂質膜内ではうまく抑制され、反応活性が保持されることが強く示唆された。このことはリポソーム内に封入したセルラーゼを触媒とするセルロースの化学資源化法の確立に重要な指針を与えている。

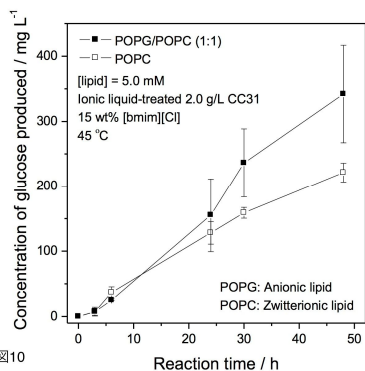


図10

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

1. H. Matsumoto, Y. Akinari, K. Kaiso, A. Kamimura, Efficient depolymerization and chemical conversion of polyamide 66; useful conversion to 1,6-hexanediol, 査読有, *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2017**, *19*, 326–331. DOI: 10.1007/s10163-015-0425-4
2. K. Mihono, T. Ohtsu, M. Ohtani, M. Yoshimoto, A. Kamimura, Modulation of cellulase activity by charged lipid bilayers with different acyl chain properties for efficient hydrolysis of ionic liquid-pretreated cellulose, 査読有, *Colloids Surface B* **2016**, *146*, 198 - 203. DOI:10.1016/j.colsurfb.2016.06.005
3. H. Matsumoto, K. Kaiso, A. Kamimura, An Efficient Conversion of Lysine to 2-Aminocaprolactam, 査読有, *Heterocycles* **2016**, *92*, 337 - 345. DOI: 10.3987/COM-15-13358
4. A. Kamimura, K. Murata, Y. Tanaka, T. Okagawa, H. Matsumoto, K. Kaiso, M. Yoshimoto, A Rapid Conversion of Sorbitol to Isosorbide in Hydrophobic Ionic Liquids under Microwave Irradiation, 査読有, *ChemSusChem* **2014**, *7*, 3257-3259. DOI: 10.1002/cssc.201402655
5. A. Kamimura, K. Ikeda, S. Suzuki, K. Kato, Y. Akinari, Tsunemi Sugimoto, Kohichi Kashiwagi, K. Kaiso, H. Matsumoto, M. Yoshimoto, Efficient conversion of polyamides to ω-hydroxyalkanoic acids; a new method for chemical recycling of waste plastics, 査読有, *ChemSusChem* **2014**, *7*, 2473-2477. DOI: 10.1002/cssc.201402125
6. M. Yoshimoto, K. Tanimura, K. Tokunaga, A. Kamimura, Hydrolysis of insoluble cellulose to glucose catalyzed by cellulase-containing liposomes in an aqueous solution of 1-butyl-3-methyl-imidazolium chloride, 査読有, *Biotechnol. Prog.*, **2013**, *29*, 1190-1196. DOI: 10.1002/btpr.1779
7. A. Kamimura, T. Okagawa, N. Oyama, T. Otsuka, M. Yoshimoto, Combination use of hydrophobic ionic liquids and LiCl as a good reaction system for the chemical, conversion of cellulose to glucose, 査読有, *Green Chem.* **2012**,

14, 2816-2820. DOI:10.1039/C2GC35811E

〔学会発表〕(計 25 件)

1. 上村明男・池田功介・松本紘・海磯孝二・吉本誠, 超臨界メタノール中でのポリアミドの解重合反応の反応機構, 日本化学会第 97 春季年会, 2017 年 3 月 18 日, 慶應大学(神奈川県横浜市)
2. K. Murata, T. Kawamoto, A. Kamimura, A Rapid Conversion of Sorbitol to Isosorbide in Hydrophobic Ionic Liquids, ISONIS10, 2016 年 11 月 18 日, 淡路夢舞台(兵庫県淡路市)
3. 上村明男・池田功介・松本紘・海磯孝二・吉本誠, ポリアミドのアップグレード化学リサイクルの反応速度的研究, FSRJ19 回研究討論会, 2016 年 9 月 2~3 日, 九州工業大学(福岡県北九州市)
4. A. Kamimura, K. Murata, Hydrophobic ionic liquids as a new tool for biomass conversion, French-Japanese Symposium on Medicinal and Fine Chemistry, (FJS 2016), 2016 年 5 月 16~18 日, 京王プラザホテル多摩(東京都多摩市)
5. 村田健虎・上村明男, 疎水性イオン液体を用いたソルビトールの高速脱水変換反応, 第 26 回万有福岡シンポジウム, 2016 年 4 月 23 日, 九州大学馬出キャンパス(福岡県福岡市)
6. A. Kamimura, H. Matsumoto, K. Kaiso, M. Yoshimoto, A study on depolymerization reactions of polyamides in supercritical methanol, 日本化学会第 95 春季年会, 2016 年 3 月 25 日, 同志社大学(京都市京田辺市)
7. A. Kamimura, Efficient Conversions of Plastics into Economically Valuable Products, PACIFICHEM2015, 2015 年 12 月 19 日, Honolulu, USA
8. A. Kamimura, Development of Green Conversions of Biomass in Hydrophobic Ionic liquids, PACIFICHEM2015, 2015 年 12 月 20 日, Honolulu, USA
9. 三穂野海, 大津豪志, 吉本誠, 上村明男, 荷電脂質膜内のセルラーゼを用いたイオン液体共存下における不溶性セルロース糖化反応, 化学工学会第 47 秋季大会, 2015 年 9 月 9~11 日, 北海道大学(北海道札幌市)
10. A. Kamimura, H. Matsumoto, K. Ikeda, K. Kaiso, An efficient conversion of polyamides to chemical feedstock, ISFR2015, 2015 年 9 月 9 日, Leoben, Austria
11. H. Matsumoto, K. Kaiso, M. Yoshimoto, A. Kamimura, An Efficient Method for Chemical Recycling of Plastics, GCS7, 2015 年 7 月 5 日, 東京国際フォーラム(東京都千代田区)
12. 田中佳季・上村明男, イオン液体中でのプラスチックの熱分解反応を用いた資源再利用法の開発, 日本化学会中国四国支部大会, 2014 年 11 月 8 日, 山口大学(山口県山口市)
13. A. Kamimura, Conversion of Biomass Using Hydrophobic Ionic Liquids, ASIL-6, 2014 年 9 月 30 日, Sydney, Australia
14. A. Kamimura, T. Okagawa, H. Matsumoto, K. Kaiso, M. Yoshimoto, CONVERSION OF

SORBITOL TO ISOSORBIDE IN HYDROPHOBIC IONIC LIQUIDS, EUCHEM2014 25th Molten salts and Ionic Liquids, 2014年7月8日, Tallinn, Estonia

15. 松本紘, 海磯孝二, 上村明男, 吉本誠, 鈴木秀三, 嘉藤一成, 秋成優吾, ポリアミドのアップグレードケミカルリサイクルに向けた新規解重合反応, 第3回 JACI/GSC シンポジウム, 2014年5月22日, 東京国際フォーラム(東京都,千代田区)

16. 上村明男, 新しい液体、イオン液体を使った有機合成の可能性—プラスチックとバイオマスの変換反応への研究例から考える—, 有機合成化学協会九州山口支部第2回講演会, 2014年11月17日, 宇部興産(山口県宇部市)

17. A. Kamimura, S. Yamamoto, T. Okagawa, T. Otsuka, M. Yoshimoto, DEPOLYMERIZATION OF POLYMERS IN IONIC LIQUIDS, 7th International Symposium on Feedstock Recycling of Polymeric Materials (7th ISFR 2013), 2013年10月23~26日, New Delhi, India

18. A. Kamimura, S. Yamamoto, T. Okagawa, T. Otsuka, M. Yoshimoto, Use of Ionic liquids in Developing a New Method for Feedstock Recycling, 6th International Conference on Green and Sustainable Chemistry (GSC6), 2013年8月6日, Nottingham, UK

19. A. Kamimura, M. Yoshimoto, A new method for the conversion of cellulose to glucose using hydrophobic ionic liquids in the presence of LiCl, 5th Congress on Ionic Liquids (COIL5), 2013年4月23日, Algarve, Portugal

20. A. Kamimura, S. Suzuki, K. Kato, H. Matsumoto, K. Kaiso, Mechanistic studies for depolymerization of polyamides in supercritical MeOH, The 21st IUPAC International Conference on Physical Organic Chemistry (ICPOC 21), 2012年9月9~12日, Durham, UK

21. 上村明男・海磯孝二・鈴木秀三・杉本常実・吉本誠, 超臨界アルコールを用いたポリアミドのアップグレードケミカルリサイクル, プラスチックリサイクル化学研究会第15回討論会, 2012年9月26日~27日, 伝国の杜(山形県米沢市)

22. 上村明男, 岡川大輝, 大山奈津美, 吉本誠, 疎水性イオン液体/塩化リチウムを用いたセルロースのグルコースへの変換反応, 第3回イオン液体討論会, 2012年12月7~8日, 沖縄県男女共同参画センター(沖縄県那覇市)

23. 岡川大輝・上村明男, イオン液体を用いたソルビトールの変換反応, 日本化学会第93春季年会, 2013年3月22日~25日, 立命館大学(滋賀県草津市)

24. 大塚珠弥・上村明男, イオン液体とマイクロ波照射を組み合わせたポリアミドの解重合反応, 日本化学会第93春季年会, 2013年3月22日~25日, 立命館大学(滋賀県草津市)

25. 谷村和彦・徳永和輝・吉本誠・上村明男, リポソーム内セルラーゼの安定性と不溶性

セルロース糖化活性に及ぼすイオン液体の影響, 化学工学会高松大会, 2012年12月6~7日, サポートホール高松(香川県,高松市) [図書](計4件)

1. 上村明男, イオン液体とマイクロ波照射によるプラスチックの解重合, 新しい溶媒を使った有機合成, 分担執筆, S&T出版, 東京, 2013年

2. 上村明男, 最先端材料システム One Point2 イオン液体, 高分子学会編集 分担執筆, 共立出版, 2013年

3. 上村明男, イオン液体の科学-新世代液体への挑戦-, 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, 分担執筆, 丸善出版, 2013年,

4. 上村明男・吉本誠, イオン液体研究最前線と社会実装, 分担執筆, 渡邊正義監修, シーエムシー出版, 2016年, 189-199ページ. [産業財産権]

なし

[その他]

ホームページ等

応用化学科スポットライト研究

<http://www.chem.yamaguchi-u.ac.jp/spotlight/kamimura.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

上村 明男 (KAMIMURA Akio)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号: 30194971

### (2) 研究分担者

吉本 誠 (YOSHIMOTO Makoto)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号: 80322246

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

嘉藤 一成 (KATO Kazunari)

山口大学・大学院医学系研究科・修士課程学生

池田 功介 (IKEDA Kosuke)

山口大学・大学院医学系研究科・修士課程学生

海磯 孝二 (KAISO Kouji)

宇部興産宇部研究所・主任研究員

松本 紘 (MATSUMOTO Hiroshi)

宇部興産宇部研究所・研究員

山口大学・大学院医学系研究科・博士課程学生

村田 健虎 (MURATA Kengo)

山口大学・大学院医学系研究科・修士課程学生

谷村 和彦 (TANIMURA Kazuhiko)

山口大学・大学院医学系研究科・修士課程学生

三穂野 海 (MIHONO Kai)

山口大学・大学院医学系研究科・修士課程学生