

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 16 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420777

研究課題名(和文) 光エネルギー駆動型液相反応用カプセル型マイクロリアクターの開発

研究課題名(英文) Development of catalyst-loaded microcapsule reactor for light driven reactions

研究代表者

古澤 毅 (Furusawa, Takeshi)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50375523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、エネルギー・環境問題に係る液相反応として「BDF合成反応」と「有機物の分解反応」を選定し、同反応を十分に進行させ、かつ今まで報告例がない「光エネルギーを駆動源とする新規カプセル型マイクロリアクターの構築」を目指した。まず、BDF合成速度・反応物/生成物の透過速度・活性種の溶出抑制の観点から、CaO/活性炭内包アルギン酸カプセルをBDF合成用マイクロリアクターとして構築することに成功した。次に、光触媒内包カプセルを用いたメチルオレンジの分解反応における律速段階を推定し、内包する光触媒の種類を変更することで、新規触媒系を構築できる可能性を見出した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is the development of novel catalyst-loaded microcapsule reactors for the reactions. It was found that CaO(100 mg/mL)-active carbon(0.5 mg/mL)-loaded alginate capsules are most suitable catalyst system for BDF synthesis via methanolysis of rapeseed oil under light irradiation. Although the capsule breakage reached 53% after 6 h of the reaction, this system gave high BDF yield (60% for 1 h and 90% for 6h of the reaction) with a small amount (0.4% of charged CaO catalyst) of Ca leached into BDF phase. For the photo-catalytic degradation of methyl orange dissolved into water, it was confirmed that the permeation rate of methyl orange molecules through the alginate shell of the prepared capsules is much faster than the degradation rate of methyl orange on the catalyst encapsulated in the capsules. Thus, the degradation rate of methyl orange using the prepared capsules depends on the kinds of photo-catalysts loaded in the capsules.

研究分野：触媒化学

キーワード：カプセル型マイクロリアクター 触媒 光熱変換物質 光触媒 液相反応 膜改質 光エネルギー

1. 研究開始当初の背景

当研究グループでは、廃食用油に含有するトリグリセリドのエステル交換反応に有効な固体塩基触媒として CaO を選定し、反応途中の活性種(Ca ジグリセロキシド)の溶出を抑制し、CaO 触媒の完全分離・回収を達成可能なカプセル型マイクロリアクターの構築に成功していた。また、光エネルギーを熱エネルギーへ変換する光熱変換物質を適切に選定し、CaO 触媒と共にカプセル内部に内包すると、光エネルギーを駆動源とする BDF 合成が可能である点も見出ししていた。しかし、これらの世界初の研究成果にも数々の課題が残されていた。例えば、カプセル壁膜へ様々な修飾(シランカップリング剤を用いた架橋、アルギン酸の二重化など)を行うと、活性種の漏出抑制および触媒の分離回収は容易になる一方で、原料のカプセル内部への透過速度や生成物のカプセル外への透過速度が遅くなり、カプセル内部での BDF 合成速度に多大な影響を与える点などである。また、カプセル型マイクロリアクターを異なる液相反応や触媒系へ発展させ、本システムの有効性を証明する必要もあった。

2. 研究の目的

前述の背景から、本研究には大きくわけて 2 つの目的があった。まず、壁膜に修飾を施した BDF 合成用カプセル型マイクロリアクターにおける原料・生成物の透過速度を実測し、反応中のカプセル内外の液組成変化を経時的に追跡し、BDF 合成速度を算出する。その結果を受けて、十分な透過速度および BDF 合成速度を有し、活性種の溶出を完全に抑制した「光エネルギー駆動型 BDF 合成用カプセル型マイクロリアクター」を構築することが第一の目的である。次に、本システムを異なる液相反応や触媒系へ発展させるため、2 種類の反応 + 触媒系を検討した。1 つ目は液相反応として染料(メチルオレンジ)を含有する水溶液の光酸化反応を、触媒系として光触媒(TiO₂, 窒素ドーピング型 TiO₂)内包カプセル型マイクロリアクターを、2 つ目は液相反応として脂肪酸のエステル化反応を、触媒系として固体酸触媒内包カプセル型マイクロリアクターを選定した。第一の目的で確立した透過速度の実測および反応速度の算出方法を利用し、既存の光触媒、あるいは固体酸触媒を越える分解活性を示す新たな系を構築し、2 種類の「光エネルギー駆動型液相反応用カプセル型マイクロリアクター」を提案することが第二の目的である。

3. 研究の方法

以降、上述した 2 つの目的に分けて述べる。

(1) BDF 合成

光エネルギー駆動型 BDF 合成用マイクロリアクターの構築において検討した内容は、(a) 様々な膜改質を施した CaO 内包カプセルを用いて、反応物であるトリグリセリド、あ

るいは生成物である脂肪酸メチルエステル(FAME)のカプセル膜透過試験を行い、透過速度を算出する、(b) 各種 CaO 内包カプセルを用いて BDF 合成反応を行い、反応途中でのカプセル内外の液組成を分析し、BDF 合成反応機構を提案すると共に、BDF 合成速度を算出する、(c) BDF 合成反応途中でのカプセル内部の CaO 相の変化も追跡し、活性種を同定する、(d) 反応後の BDF 相中の Ca 濃度を測定し、膜改質による Ca 種の溶出抑制への影響を検討する、(e) CaO/光熱変換物質内包カプセルにおいても同様に、カプセル内外の液組成変化、および固相変化を追跡し、BDF 合成反応機構を確定する、(f) CaO/光熱変換物質内包カプセルにおいて、数種類の光熱変換物質の候補から最も相応しい物質を選定する、(g) CaO/活性炭内包カプセルにおける反応物・生成物の透過試験を行い、カプセル膜の透過性を検討すると共に、BDF 合成反応へ与える影響を検証する、(h) 内包する活性炭の濃度、カプセルに照射する光の光量などの様々な因子が光エネルギー駆動型 BDF 合成反応へ与える影響を検討する、(i) 反応後の BDF 相中の Ca 濃度を分析し、Ca 種の溶出抑制程度を検討する、の以上 9 項目である。

(2) 他の液相反応

以下、光酸化反応とエステル化反応に分けて述べる。

光酸化反応

まず、用いる光触媒として市販のルチル型 TiO₂、市販のアナターズ型 TiO₂、独自の手法で調製した熟成 TiO₂ および窒素ドーピング型 TiO₂ を選定した。次に、これらの光触媒粉末をカプセル内部に内包する手法を新たに開発した。続いて作成したカプセルを用いて、メチルオレンジの膜透過試験を行い、反応物であるメチルオレンジがカプセル内外を透過可能であることを確認した。最後に、各種光触媒内包カプセルを用いて、紫外光照射下でのメチルオレンジ分解反応を実施し、得た結果より現時点で最も相応しいカプセル型マイクロリアクターを選定し、更なる課題について列挙した。

脂肪酸のエステル化反応

まず、触媒および光熱変換の双方を担う物質として無定形炭素質固体酸触媒を調製し、同物質を内包したカプセルを作成し、光照射下でのオレイン酸のエステル化反応を行った。次に、2 つの機能を 1 つの物質へ担わせるのは困難と考え、スルホン化 ZrO₂ を固体酸触媒、活性炭を光熱変換物質としてカプセルを作成し、同様に光照射下でのエステル化反応へ適用した。いずれの場合においても、固体酸触媒をカプセルへ内包すると、エステル化反応活性が著しく低下したため、反応物であるオレイン酸および生成物である FAME のカプセル膜透過試験を行った。

4. 研究成果

(1) 光エネルギー駆動型 BDF 合成反応

まず、本研究で作成した各種カプセルの光学顕微鏡写真とカプセル膜断面の SEM 画像を図 1 に示す。内包物のないアルギン酸カプセルは透明であるのに対し、CaO 粉末あるいは光熱変換物質(Cr₂O₃/TiO₂, 活性炭)を内包すると、粉末に由来する色調を得たため、全ての物質の内包が可能であることが分かった。また、アルギン酸一重膜で作成したカプセルに関しては、カプセル直径は約 2 mm、カプセル膜厚は 30 μm とほぼ同じであるのに対し、シランカップリング剤やアルギン酸などで更なる膜改質を行うと、直径は約 3~4 mm、膜厚は 60 μm まで増加することも分かった。さらに、アルギン酸カプセルおよび膜改質を施したカプセルに対して反応物・生成物のカプセル膜透過試験を行った結果、膜厚が小さく、適度な疎水性処理を施すと透過速度が向上することが分かった。

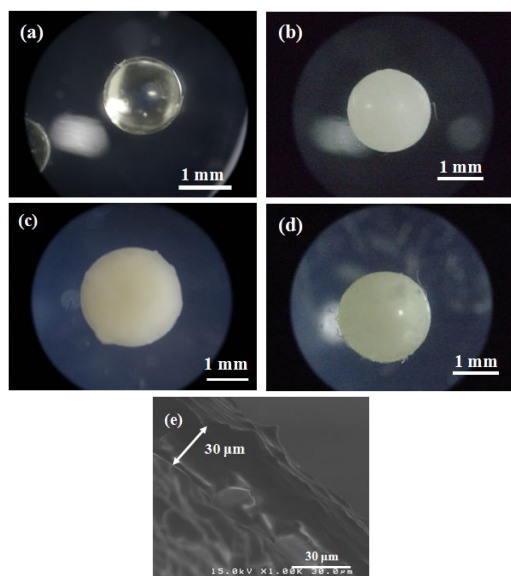


図 1 各種カプセルの光学顕微鏡写真と膜断面の SEM 画像: (a) Alg-カプセル, (b) CaO 内包カプセル, (c) CaO+Cr₂O₃/TiO₂ 内包カプセル, (d) CaO+活性炭内包カプセル, (e) CaO 内包カプセル膜断面 SEM 画像

次に、CaO 内包アルギン酸カプセルと CaO 内包シランカップリング剤修飾アルギン酸カプセルを用いて、BDF 合成反応途中のカプセル内外の液組成変化とカプセル内部の固相変化を追跡した。カプセル内外の液組成を分析した結果、BDF 合成反応は以下のように進行することが分かった: (A) メタノールがカプセル内部に透過した後、トリグリセリドのエステル交換反応が起こり、ジグリセリド(DG)、モノグリセリド(MG)、FAME を生成する、(B) カプセル内部へのメタノール透過は継続し、直ぐにエステル交換反応で消費される、(C) 生成した DG と MG はカプセル外へ一旦透過するのに対し、FAME はカプセル内部に蓄積する、(D) カプセル外部の DG と MG がもう一度カプセル内部へと透過し、FAME へと転換すると同時に、カプセル内部に蓄積した FAME が徐々にカプセル外部へと透過する、(E) 最終的にカプセル外部のトリグリセ

リドが完全に消費されるまで上記過程が進行する。また、反応途中の固相を XRD 測定で分析した結果、FAME 収率が向上する時間帯(2~3 時間)の固相上では Ca ジグリセロオキシドが形成しており、同種が活性種ではないかと推察された。以上の分析結果より、CaO 内包カプセルを用いた BDF 合成反応の反応機構を図 2 のように提案する。

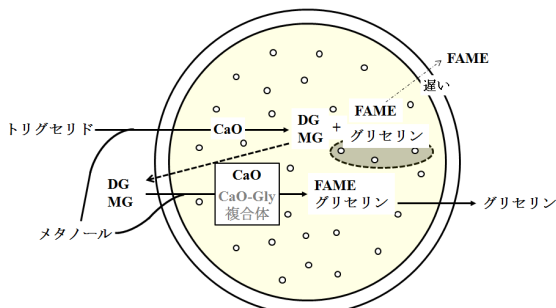


図 2 CaO 内包カプセルを用いた BDF 合成反応の反応機構

種々のカプセルにおける BDF 合成速度の算出を試みた結果、アルギン酸一重膜以外のカプセルでは反応物・生成物の透過速度が律速となり不可能であったのに対し、アルギン酸一重膜ではトリグリセリドのエステル化が律速であり、1 次反応とみなした場合の速度定数が $1.4 \times 10^{-3} [s^{-1}]$ となることが分かった。さらに、様々な膜改質を施したカプセルを用いた BDF 合成反応後の BDF 相中 Ca 濃度を分析した結果、膜改質を介してカプセル膜を強化したカプセルでは、Ca 溶出量をより抑制できることも分かった。しかしながら、上述のように膜改質によって透過速度・BDF 合成速度が大幅に減少することを勘案すると、Ca 溶出率が 0.5~1.0% と若干高いが、アルギン酸一重膜のカプセルを利用することが最良と考えた。以上の結果より、光熱変換物質も内包する系においては、アルギン酸一重膜で検討することとした。

CaO/光熱変換物質内包カプセルに関して、まず光熱変換物質の選定について検討した。本研究では、窒素ドープ型 TiO₂、Cr₂O₃/TiO₂、活性炭を候補とし、広範囲の波長領域を吸収できること、光触媒活性を示さないこと、反応物・生成物に溶解しないこと、光エネルギーを熱エネルギーへ変換し、反応溶液を加熱可能であること、などの観点で比較・検討を行った。例えば、窒素ドープ型 TiO₂ は N/Ti 比によって傾向が異なり、N/Ti 比=0.2 までの窒素ドープ型 TiO₂ では 400~450 nm の可視光領域の光吸収特性が TiO₂ よりも向上するが、光触媒活性を有し、反応溶液に溶解するため、光熱変換物質として相応しくない。一方、N/Ti 比=0.3 以上の試料は、後加水処理を行うことで反応溶液に不溶となり、光触媒活性を示さず、一部の試料では 400~450 nm の可視光領域の光吸収特性が向上し、実際に反応溶液の加熱も可能であった。以上の知見より、窒素ドープ型 TiO₂ (N/Ti 比=0.4) を光熱変換物質の

1 候補とした。同様に、 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ についても検討した結果、Cr 担持量の増加に伴って光触媒活性が著しく減少し、赤外領域まで含めた広範囲の光吸収特性が改善されることが分かった。また、いずれの試料も反応溶液に不溶であったことから、18wt% $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ を 2 つ目の候補とした。最後に活性炭は事前の研究から反応溶液に不溶であり、光触媒活性を有さず、赤外領域までの広範囲な光吸収特性に優れ、反応溶液の加熱も可能であったので、3 つ目の候補とした。さらに、カプセル内部に内包する最適濃度を調査するために、反応溶液中に各光熱変換物質を懸濁し、照射下での温度上昇試験を行い、窒素ドープ型 TiO_2 では 3 mg/mL-反応溶液、18wt% $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ も 3 mg/mL-反応溶液、活性炭に関しては 0.5 mg/mL-反応溶液以上の濃度であれば特性に変化がないことを確認した。以上の結果より、各濃度の光熱変換物質(3 種類の候補)を各々 CaO 触媒と共に内包して調製したカプセルの一例が図 1 に示した光学顕微鏡写真である。これらの作成したカプセルを用いて、照射する光の波長領域の影響、および光量の影響についてまず検討した。例えば、活性炭を光熱変換物質として用いた場合、CaO+活性炭内包カプセルはいずれの波長領域(紫外、可視、赤外)においても作動し、BDF 合成反応が進行するのに対し、窒素ドープ型 TiO_2 は紫外および可視の一部を照射した際のみ作用することが分かった。つまり、利用する光熱変換物質の光吸収特性に依存することが判明した。なお、 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ は活性炭と同様の結果であった。また、CaO+ $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 内包カプセルにおいて光量の影響を検討した結果、光量を 0.6W から 3.6W まで上昇すると、BDF 収率が向上することも分かった。一方、CaO+活性炭内包カプセルでは、活性炭の内包濃度を 2.0mg/mL とすると、3.6W の光量によってカプセル内部温度が急上昇し(図 4 (e))、カプセル破損が生じ、反応場(カプセル内部)を失う

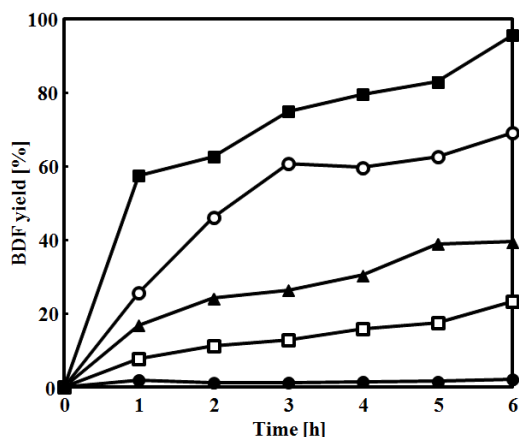


図 3 光エネルギー駆動型 BDF 合成反応結果 (3.6W, 全波長領域照射) : ■ CaO+活性炭, ○ CaO+ $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, ▲ CaO+窒素ドープ型 TiO_2 , □ CaO, ● 活性炭内包カプセル

ため、BDF 収率が大幅に低下する。そこで、活性炭内包濃度と光量に関して更に詳細に検討した結果、CaO+活性炭内包カプセルでは活性炭内包濃度 0.5 mg/mL、光量 3.6W で最良の BDF 収率(BDF 合成速度)が得られることが分かった。以上より、各光熱変換物質で見出された最良の反応条件(光量 3.6W, 全波長領域照射)で BDF 合成反応を行った結果を図 3 に示す。BDF 収率(合成速度)の序列は、活性炭 < CaO < CaO+窒素ドープ型 TiO_2 < CaO+ $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ < CaO+活性炭内包カプセルであった。この序列になった理由としてカプセル内部の温度が考えられるため、照射下でのカプセル内部温度をサーモグラフィーで測定した。但し、様々な測定条件が BDF 合成反応時と異なるので、あくまでも間接的な証拠である。各種カプセルの内部温度を測定した結

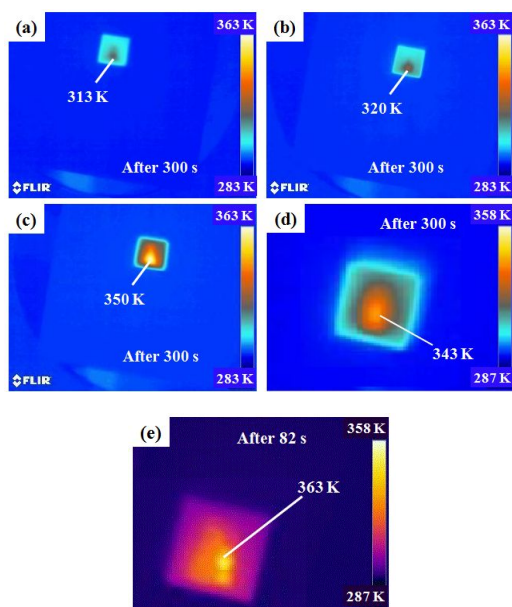


図 4 各種カプセルにおけるサーモグラフィー測定結果 : (a) CaO 内包, (b) CaO+窒素ドープ TiO_2 内包, (c) CaO+ $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 内包, (d) CaO+活性炭(0.1 mg/mL)内包, (e) CaO+活性炭(2 mg/mL)内包カプセル

果を図 4 に示す。測定結果より、光熱変換物質の光吸収特性によって所定時間で到達する温度が異なり、カプセル内部温度と BDF 収率に密接な関係があることが示唆された。また、CaO+活性炭(0.5 mg/mL)内包カプセルが最良の触媒系であり、同カプセルにおける膜透過性および BDF 合成反応機構を検証した結果、反応物・生成物の透過性は十分であり、図 2 に示した反応機構と同様に BDF が合成されていることを確認した。最後に、ICP によって BDF 相に溶出した Ca 種を分析した結果、Ca 濃度は 20 ppm (投入した CaO の 0.37%が溶出している量)とごくわずかであり、同カプセルが、本研究の第一目的の「光エネルギー駆動型 BDF 合成用カプセル型マイクロリアクター」であると結論付けた。

(2) その他の液相反応

まず、光酸化反応に関しては、光触媒粉末をカプセルへ内包する手法を確立し、調製したカプセルの膜をメチルオレンジが透過することを確認する必要があった。種々検討した結果、光触媒粉末を内包する手法を決定し、図5に示す光触媒内包カプセルを作成するのに成功した。カプセル径は5 mm、カプセル膜厚は126 μmであり、メチルオレンジ透過試験結果より、メチルオレンジはカプセル内から外へ、あるいは外から内へ十分に透過することを確認した。

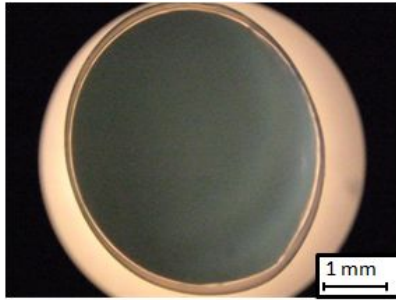


図5 光触媒内包カプセルの外観写真

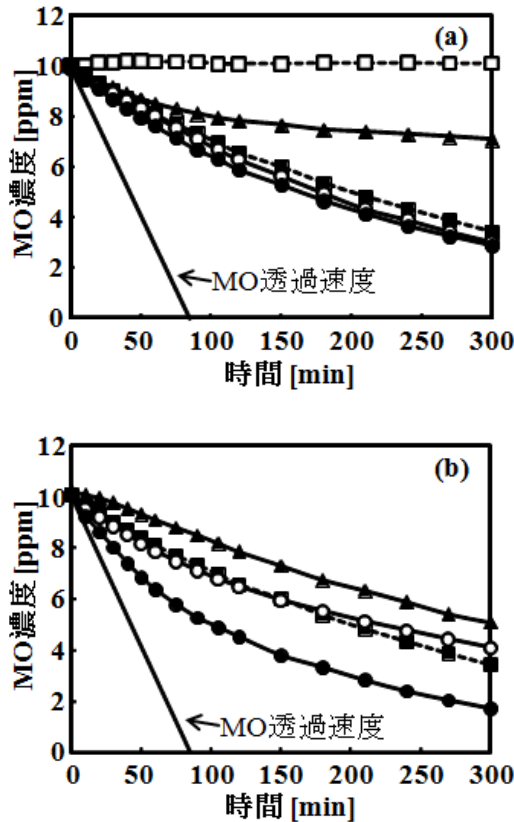


図6 メチルオレンジ分解反応結果:(a) □ ブランク実験, ▲ ルチル型 TiO₂, ■ P25, ○ 窒素ドーピング型 TiO₂, ● 熟成 TiO₂内包カプセル, (b) P25内包カプセル, ▲ 内包濃度 2.6wt%, カプセル数 50 個, ○ 内包濃度 3.9wt%, カプセル数 50 個, ■ 内包濃度 7.5wt%, カプセル数 50 個, ● 内包濃度 3.9wt%, カプセル数 100 個

次に、種々の光触媒粉末をカプセルに内包し、紫外線照射下でのメチルオレンジ(MO)

分解反応を行った。ブランク試験で分解しないのに対し、光触媒内包カプセルを用いるとMO分解反応が進行することが分かった(図6a)。また、光触媒の種類によって分解特性は変化する点、およびいずれの触媒系もカプセル膜をMOが透過する速度よりも著しく遅く、カプセル内部の光触媒上での反応が律速であることが示唆された。さらに、例えば市販アナタース型 TiO₂ (P25)の内包濃度や反応系に投入するカプセル量を変更すると、MO分解特性が向上する条件を見出せる可能性も示唆された(図6b)。従って今後、高活性な光触媒粉末を用い、内包濃度やカプセル投入量を工夫すれば、有効な触媒系を見出せる可能性はあると結論付けた。

続いて、脂肪酸のエステル化反応に関しては、原料であるオレイン酸あるいは副生物である水が、効率的にカプセル内外を透過する膜修飾方法が確立していない点、および触媒活性や光熱変換機能が不十分である点などから開発に時間がかかっている。現在は、カプセル内外の液組成を分析することで、反応機構を解明し、律速段階を特定し、カプセル化することで大幅にエステル化速度が低下する原因を究明している最中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

- (1) T. Furusawa, F. Kurayama, H. Handa, R. Kadota, M. Sato, N. Suzuki, Transesterification of rapeseed oil with methanol using CaO and active carbon powders encapsulated microcapsule under the light irradiation, Appl. Catal. A, 査読有, 475 (2014) 69-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2013.12.033>
- (2) 古澤毅, 倉山文男, 佐藤正秀, 鈴木昇, CaO 触媒/光熱変換物質内包型カプセルを用いた光エネルギー駆動型 BDF 合成反応, 触媒, 査読無, 56 (2014) 284-289.
- (3) T. Furusawa, M. Watanabe, R. Kadota, T. Matsumoto, M. Sato, N. Suzuki, Methanolysis of rapeseed oil to fatty acid methyl esters using microencapsulated CaO and TiO₂-supported chromium oxide under light irradiation, Fuel Processing Technology, 査読有, 140 (2015) 125-131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.003>
- (4) T. Furusawa, F. Kurayama, M. Shiba, R. Kadota, M. Sato, N. Suzuki, CaO-loaded alginate capsule modified with silane coupling agents for transesterification of rapeseed oil with methanol, Chemical Engineering Journal, 査読有, 288 (2016) 473-481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.12.031>
- (5) T. Furusawa, R. Kadota, M. Sato, N. Suzuki,

Improvement of the performance of encapsulated CaO and active carbon powders for rapeseed oil methanolysis to fatty acid methyl esters under condensed light irradiation, Fuel Processing Technology, 査読有, 154 (2016) 197-203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.08.032>

- (6) T. Furusawa, Biodiesel fuel production using CaO-loaded alginate capsules, 査読有, J. Jpn. Petroleum Institute, accepted.

〔学会発表〕(計 8 件)

- (1) M. Watanabe, T. Furusawa, T. Matsumoto, M. Sato, N. Suzuki, Methanolysis of rapeseed oil to biodiesel fuel with CaO and amorphous N-doped TiO₂ powders encapsulated microcapsule under the light irradiation, TOCAT7, June 1-6, Kyoto (2014).
- (2) 渡部萌, 古澤毅, 角田涼介, 松本太輝, 佐藤正秀, 鈴木昇, CaO/クロム担持型酸化チタン内包カプセルを用いた光エネルギー駆動型 BDF 合成反応, 第 114 回触媒討論会, 2014 年 9 月 25 日~27 日, 広島大学
- (3) 古澤毅, 触媒/光熱変換物質内包型マイクロカプセルを用いた光エネルギー駆動型 BDF 合成反応, 2014 年度材料技術研究協会討論会, 2014 年 12 月 5 日~6 日, 東京理科大学
- (4) 古澤毅, 渡部萌, 角田涼介, 松本太輝, 佐藤正秀, 鈴木昇, CaO/酸化クロム担持型酸化チタン内包カプセルを用いた光エネルギー駆動型 BDF 合成反応における光量の影響, 第 24 回日本エネルギー学会年次大会, 2015 年 8 月 3 日~4 日, 札幌コンベンションセンター
- (5) 古澤毅, 倉山文男, 志波幸, 角田涼介, 佐藤正秀, 鈴木昇, 膜改質を施した CaO 内包カプセルを用いた BDF 合成反応と速度論的解析, 化学工学会第 47 回秋季大会, 2015 年 9 月 9 日~11 日, 北海道大学
- (6) 角田涼介, 古澤毅, 佐藤正秀, 鈴木昇, CaO/活性炭内包カプセルを用いた光エネルギー駆動型 BDF 合成反応における光量の影響, 第 116 回触媒討論会, 2015 年 9 月 16 日~18 日, 三重大学
- (7) R. Kadota, T. Furusawa, F. Kurayama, M. Sato, N. Suzuki, The effect of active carbon loading amount on the performance of microcapsule encapsulated with CaO catalyst and active carbon powders for the methanolysis of rapeseed oil under the light irradiation, PACIFICHEM2015, December 15-20, Hawaii (2015).
- (8) 谷口佑太, 古澤毅, 佐藤正秀, 鈴木昇, 固体酸触媒/活性炭内包カプセルを用いた光照射下でのオレイン酸のエステル化反応, 第 118 回触媒討論会, 2016 年 9 月 20 日~23 日, 岩手大学

〔図書〕(計 8 件)

- (1) F. Kurayama, T. Furusawa, N. M. Bahadur, M. Sato, N. Suzuki, Nova Science Publisher Inc., Handbook on Oil Production Research, 2014, 295(147-173)
- (2) 古澤毅, 倉山文男, 佐藤正秀, 鈴木昇, 技術情報協会, マイクロ/ナノカプセルの調製, 徐放性制御と応用事例, 2014, 510(481-490)
- (3) 佐藤正秀, 古澤毅, 鈴木昇, サイエンス&テクノロジー, 塗布型透明導電膜の材料開発と成膜・パターン形成技術, 2015, 292(132-148)
- (4) 佐藤正秀, 古澤毅, 鈴木昇, 技術情報協会, 粉体・微粒子分析テクニク事例集, 2015, 399(240-241)
- (5) 鈴木昇, 古澤毅, 佐藤正秀, 情報機構, ナノ粒子の表面修飾と分析評価技術~各種特性を向上するためのナノ粒子表面関連技術とその評価~, 2016, 425(41-49)
- (6) 佐藤正秀, 古澤毅, 鈴木昇, 技術情報協会, シランカップリング剤の使いこなしノウハウ集~反応メカニズムから被覆率・反応状態の解析まで~, 2016, 384(17-20)
- (7) 佐藤正秀, 古澤毅, 鈴木昇, 情報機構, 超親水/超撥水化の基礎原理解析から各産業への応用実例~測定評価ノウハウ・超撥油親油化技術・現場の課題 Q&A~, 2017, 288(99-108)
- (8) 佐藤正秀, 古澤毅, 鈴木昇, 情報機構, 超親水/超撥水化の基礎原理解析から各産業への応用実例~測定評価ノウハウ・超撥油親油化技術・現場の課題 Q&A~, 2017, 288(109-117)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

宇都宮大学工学部応用化学科粉体・界面工学研究室 HP : <http://www.chem.utsunomiya-u.ac.jp/lab/funtai/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古澤毅 (FURUSAWA TAKESHI)

宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 50375523