

《 解 説 》

マイクロ波加熱に適したゼオライト-炭素複合触媒

岡本昌樹

近年、マイクロ波加熱を利用した化学反応が注目されている。マイクロ波を利用することにより通常の加熱に比べて低温で速く反応が進行するなどの利点がある。固体触媒がマイクロ波を吸収できる場合、実際に反応が進行する場所である触媒のみを加熱し、反応器や溶媒を加熱する必要がないため、エネルギーの削減ができる。しかし、工業触媒としてよく使用されているゼオライトはマイクロ波照射によりほとんど加熱されない。マイクロ波を良く吸収する炭素とゼオライトを複合化することにより、マイクロ波加熱に適したゼオライト触媒を調製した。ゼオライト中の一部の細孔に炭素を充填することによりゼオライト粒子の内部から加熱され、反応が進行する場所であるゼオライト触媒のみを加熱できた。また、ゼオライト触媒の内部から加熱されることにより、触媒内部での反応が主に進行した。その結果、外表面での反応が抑制され、形状選択性を向上させることができた。

キーワード：マイクロ波加熱，炭素，FAU，MWW，形状選択性

1. はじめに

マイクロ波による加熱は、簡便に早く加熱できることから家庭用電子レンジに用いられるなど、広く利用されている。化学反応においてもマイクロ波加熱を利用した研究が数多く報告されている¹⁻⁵⁾。ヒーターや電気炉などの通常の加熱を用いた場合に比べて、低温で速く反応を進行させることができることや、特定の部分のみを加熱できることによりエネルギーを削減できることなど、マイクロ波加熱には様々な利点がある。

液相反応では、マイクロ波により加熱できる溶媒を用いると、溶媒のみを選択的に加熱できるため、反応器を加熱する必要がない。固体触媒を用いる場合、触媒のみを選択的に加熱することができれば、反応器に加えて溶媒も加熱する必要がないため、大幅なエネルギーの削減が期待できる。マイクロ波加熱に用いられる固体触媒としては、マイクロ波を良く吸収する炭素などと複合化した触媒や、炭素を担体とした触媒が用いられている。炭素が選択的に加

熱されることにより、触媒活性点に熱が伝わり、反応が進行する。一方、化学工業ではゼオライトが触媒として良く使用されているが、シリカを主成分とする触媒は、マイクロ波をほとんど吸収しない。そのため、触媒を選択的に加熱することが難しい。このことがゼオライトを触媒とする反応において、マイクロ波加熱がほとんど用いられていない理由の一つとなっている。

また、ゼオライト触媒には、細孔内で反応が進行することにより形状選択性が発現するという特徴がある。通常の加熱方法では、反応器の外部から加熱され、触媒粒子全体が均一に加熱される。そのため、触媒反応が細孔内部だけではなく、外表面でも進行する。外表面で反応が進行すると、形状選択性が発現しない。もしゼオライト粒子の内部のみを加熱することができれば、外表面よりも細孔内部の温度が高くなり、外表面での反応を抑制することができる。すなわち、形状選択性の向上が期待できる。このことは、マイクロ波加熱を触媒反応に用いる場合の新たな利点になりうる。

本稿では、マイクロ波加熱に適したゼオライト触媒について、二つ紹介する。一つは、細孔に炭素を詰めたゼオライトをコアとし、そのコアを結晶成長させたコア-シェル構造のゼオライト触媒である。もう一つは、二次元に広がった2種類の細孔の一方

受理日 2022年10月25日

慶應義塾大学自然科学研究教育センター

〒223-8521 神奈川県横浜市港北区日吉4-1-1

E-mail: okamoto.m@keio.jp

Copyright © 2023 Japan Zeolite Association All Rights Reserved.

に炭素を詰めて加熱場とし、もう一方の細孔を反応場とする、加熱場と反応場が交互に積層したゼオライト触媒である。

2. コアの細孔に炭素を充填したコア-シェル構造のFAU型ゼオライト触媒

FAU型ゼオライトは、工業的に使用されているゼオライトの一つである。FAU型ゼオライト触媒をマイクロ波で加熱することができれば、マイクロ波加熱の工業利用が期待できる。FAU型ゼオライトは12員環の細孔と細孔径よりも大きな空間であるスーパーケージを有するゼオライトである。この大きな細孔と空間には炭素を充填することができる⁶⁾。ゼオライト結晶の中心部(コア)の細孔とスーパーケージに選択的に炭素を充填することができれば、炭素がマイクロ波を吸収し、ゼオライト内部のコアを加熱することができるため、マイクロ波加熱に適した触媒となる。

Mochizukiらは、FAU型ゼオライトのコアに炭素を充填することにより、マイクロ波加熱に適したゼオライト触媒を初めて報告した⁷⁾。図1で示すように、まずコアのFAU型ゼオライト(Y)の細孔内に

炭素を充填し(CY)、その後、コアのゼオライトの周りにFAU型ゼオライトをエピタキシャルに結晶成長させ、コア-シェル構造(CY@Y)を調製した。最後にシェルの細孔内にあるFAU型の構造規定剤を抽出によって取り除き、プロトン型にイオン交換することにより、コアのみに炭素が詰まったFAU型のゼオライト(CY@HY)を調製した。成長前後のSEM像、およびTEM像から結晶成長していること、および、結晶断面の炭素の分布からコアのみに炭素が充填されていることを明らかにした。

CYを用いて、マイクロ波加熱に及ぼす炭素の効果を調べた。マイクロ波加熱には、TE103シングルモードキャビティーを用い、出力を30 Wに固定して、2.45 GHzのマイクロ波で加熱した(図2)。なお、周波数については国内での割り当てから、通常2.45 GHzのマイクロ波が加熱に使用される。マイクロ波発生器からアイリスを通してマイクロ波を導入し、プランジャーを動かしキャビティー内で共振させる。定常波には、電場が最大になるところ(E max)と、磁場が最大になるところ(H max)がある⁸⁾。

マイクロ波加熱の詳細については、成書を参照いただきたい⁹⁾。ここでは、誘電体の加熱について簡

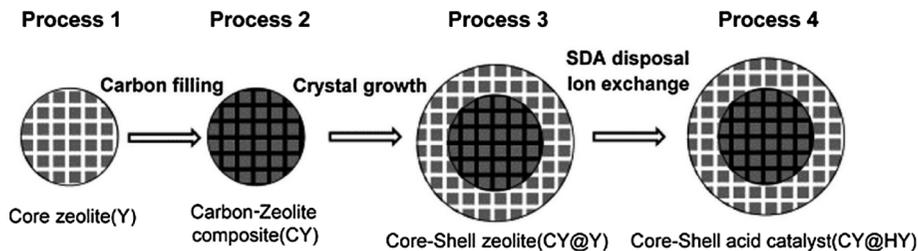


図1. コアの細孔に炭素を充填したコア-シェルゼオライト (CY@HY) の合成スキーム。

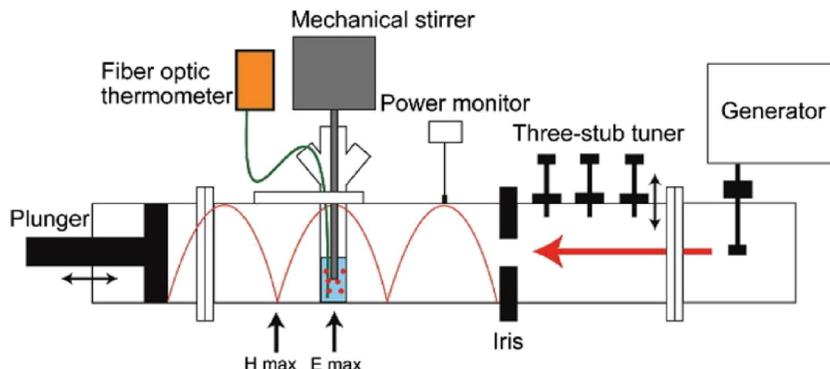


図2. マイクロ波照射による反応装置の概略図。

単に説明する。誘電体は、マイクロ波の照射によって物質固有の誘電損失 ϵ_r'' と電場の大きさ $|E|$ の2乗に比例した熱 P_e を発生⁹⁾。

$$P_e = \pi f \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2$$

(ただし、 f : 周波数, 真空における誘電率: ϵ_0)

なお、誘電損失は総説¹⁰⁾およびデータベース¹¹⁾にまとめられている。水および活性炭がマイクロ波により加熱されるのは、誘電損失が10および35程度と大きな値であるためである。一方、直鎖アルカンやシリカは誘電損失が低い(≪1)、温まりにくい。固体触媒の誘電損失は含水率などで変わるため、実測することが望ましい。例えばMWW型ゼオライトの誘電損失は、乾燥前後でそれぞれ実測値で0.052と0.008であった。

ゼオライトの分散液の位置が、電場が最大になるようにセットし、1200 rpmで攪拌した。分散液には、誘電損失が小さいヘプタン($\epsilon_r'' = 0.003$)を使用した。このヘプタンの温度を、光ファイバー温度計を用いて測定した。図3にマイクロ波照射後のヘプタン温度の経時変化を示す。ヘプタンのみでもマイクロ波により加熱されるが、CYを分散させると150秒でほぼ沸点に達した。炭素を充填していない通常のFAU型ゼオライト(Y)でもヘプタンのみよりは加熱される。炭素(誘電損失 ϵ_r'' が35程度)を含むCYのほうが速く加熱された。このように炭素と複合化することによりCYが加熱され、ヘプタンも速く加熱されることがわかる。

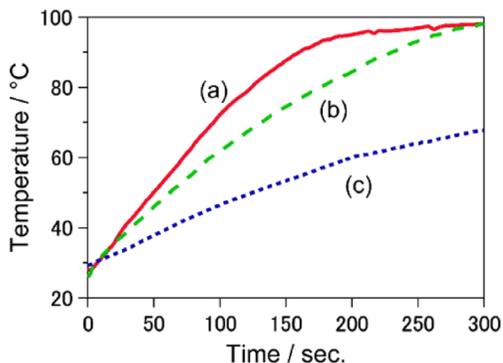


図3. マイクロ波によるゼオライト分散液(分散媒:ヘプタン)の加熱特性. (a) CYを分散したヘプタン, (b) Yを分散したヘプタン, (c) ヘプタンのみ.

1-フェニルエタノールの脱水反応の触媒にFAU型ゼオライトを用い、ヘプタン溶媒の還流温度で反応を行った。CY@HYでは、コア部分の細孔は炭素で詰まっているため反応に関与できない。そこで、反応に使用できる細孔の容積が等量になるように触媒量を揃えた。生成物の収量を図4に示す。プロトン型のFAU型ゼオライト(HY)を触媒に用いた場合、通常加熱(CH)とマイクロ波加熱(MW)とは収量に差はない。CY@HYを用いると、MWの時に高い収量が得られた。このことは、マイクロ波により選択的にCY@HYが加熱され、触媒が還流温度よりも高い温度になることにより、高い収量が得られ

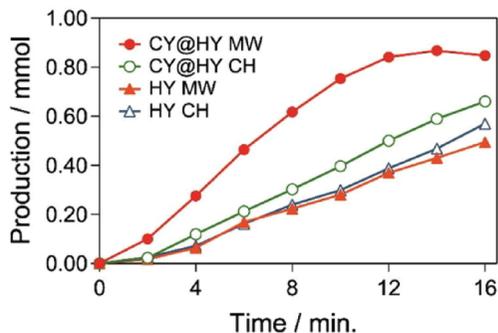
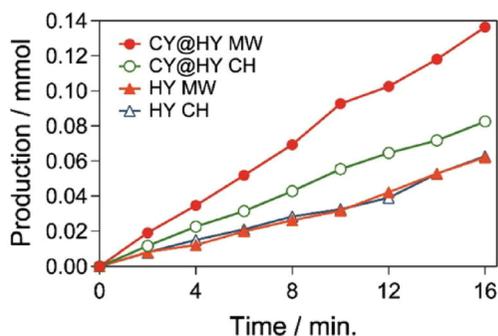
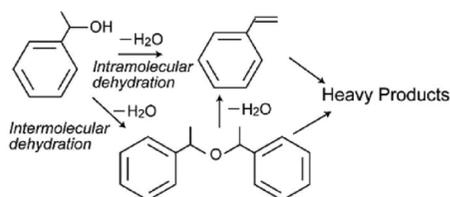


図4. 1-フェニルエタノールの脱水によるスチレン(上), およびビス(α -メチル-ベンジル)エーテル(下)の収量の経時変化. ●, ○: CY@HY (1.0 g), ▲, △: HY (0.58 g), MW: マイクロ波加熱, CH: 通常加熱.

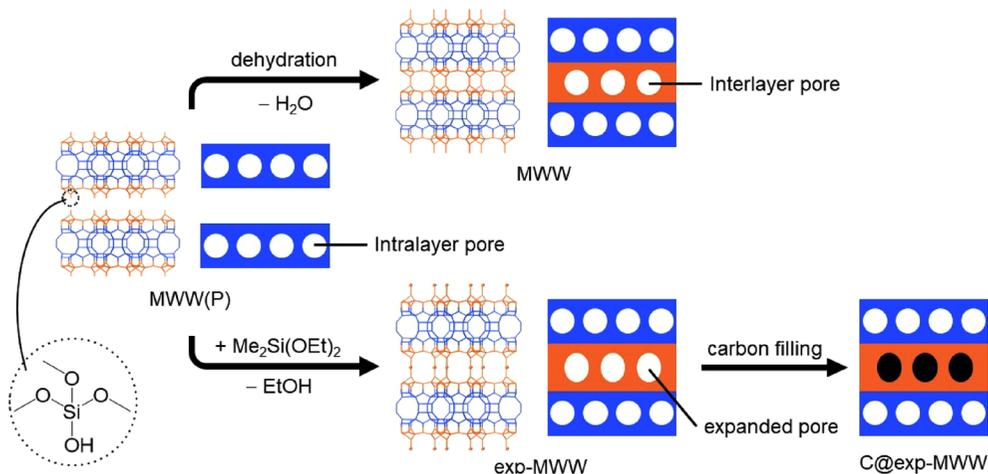


図5. 加熱場と反応場が交互に積層したMWW型ゼオライト (C@exp-MWW) の合成スキーム.

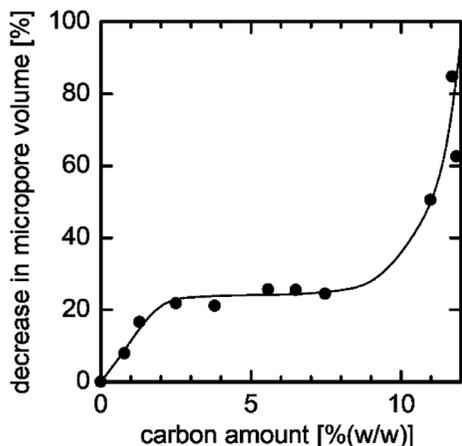


図6. exp-MWWへの炭素導入量に対するミクロ孔容積の減少量変化.

たと報告した。Arrheniusプロットを行い、触媒の温度を推定した結果、オレフィンおよびエーテルの生成については6℃および11℃高い温度になっていると算出された。

この報告では、ゼオライトを炭素との複合体にすることにより、マイクロ波加熱に適したゼオライト触媒を調製できることを示した。しかし、ゼオライト結晶のサイズが5 μm程度で加熱場と反応場は数μm離れている。熱の効率的な伝導には、反応場となる細孔が加熱場と数nmレベルで隣接していることが望ましい。すなわち加熱場と反応場が数nmレベルで交互に配置された構造が理想的な構造であると考えた。

3. 加熱場と反応場が交互に積層したMWW型ゼオライト

MWW型ゼオライトは、2種類の二次元の細孔が交互に重なった構造である。もし一方の細孔にのみ炭素を充填することができれば、炭素が詰まった細孔と詰まっていない細孔が交互に重なった構造、すなわち加熱場と反応場が交互に配置された理想的な構造を作ることができる。しかし、MWW型ゼオライトの2種類の細孔はともに10員環細孔であり、一方のみに選択的に炭素を導入することが難しい。そこで、一方の細孔を拡張することを考えた。MWW型ゼオライトは、10員環細孔を有するシートが積み重なった層状のシリケート前駆体(MWW(P))を焼成することにより合成される。焼成により層間にもう一方の10員環細孔が形成される。Wuらは、このシリケート前駆体の層間を-O-Si(CH₃)₂-O-で繋ぐことにより、層間で形成される10員環細孔を12員環に拡張することができることを報告した¹²⁾。層間拡張したMWW型ゼオライト(exp-MWW)を用いれば、炭素源の分子サイズの違いにより拡張した細孔のみに炭素源を導入することが可能となると考えた。図5に加熱場と反応場が交互に積層したMWW型ゼオライト、すなわち拡張した細孔に炭素を充填したMWW型ゼオライト(C@exp-MWW)の合成スキームを示す¹³⁾。

ゼオライトなどの多孔体材料の細孔内に炭素を形成する場合、炭素源にはフルフリルアルコール⁶⁾、トルエンとパラホルムアルデヒド⁶⁾、スクロース¹⁴⁾

などが報告されている。12員環の細孔内には入ることができるが10員環には入ることができない炭素源を調べた結果、スクロースが適していることがわかった。そこで炭素源としてスクロースを用い、窒素気流下200℃で重合させたのち900℃で炭化を行った。炭素の導入量に対するミクロ孔容積の減少量の変化を図6に示す。炭素量が3 wt%までは細孔容積は炭素量に比例して減少し、その後、一定になった。3 wt%までは拡張した12員環内に炭素が充填され、12員環細孔が埋まると、外表面に炭素が析出するため3 wt%以上で細孔容積の減少が見られないと考えた。10 wt%以上では、析出した炭素が外表面を覆い始めたため、10員環の細孔入り口を塞ぎ、急激に細孔容積が減少した。アルゴン吸着により、2種類の細孔のうち、どちらの細孔に炭素が充填されたかを調べた。図7に3 wt%の炭素を充填したexp-MWW (C@exp-MWW)の低圧領域における吸着等温線と、Saito-Foley法により算出した細孔径分布を示す。CormaらはMWW型ゼオライトの吸着等温線において、相対圧が 1×10^{-5} 付近の吸着は10員環への吸着で、 1×10^{-5} から 1×10^{-3} での吸着は、層間に形成される細孔内に存在する12員環の空間(スーパーケージ)への吸着であると報告している¹⁵⁾。層間を拡張すると 5×10^{-4} 付近での吸着量が増えることから、この吸着は拡張した細孔への吸着と推測した。炭素を充填するとこの領域での吸着量のみが減少することから、炭素は拡張した細孔のみに吸着していると考えられる。このことは細孔径分布(図7右)を見ても、層間を拡張すると0.7 nm付近の細孔が増えるが、炭素を充填すると0.7 nmの細

孔のみが減少していることからわかる。

マイクロ波照射による加熱特性を調べるために、石英製の流通式反応管に触媒を充填し、予備加熱をしていないヘリウムガスを流通させながらマイクロ波を照射して触媒の温度を測定した。マイクロ波加熱装置には、気相反応用のマイクロ波加熱装置MR-2G-100(凌和電子株式会社、円筒型TM010モード共振器)を使用した。水がゼオライトに吸着しているとマイクロ波の照射によって水が加熱されることから、事前に200℃で3時間加熱し、触媒から吸着水を取り除いた。電場が最大となるところに反応管を設置し、消費電力50 W一定で加熱した。触媒の温度は、反応管の側面から赤外放射温度計で測定した。酸型のMWW (H-MWW)では300秒で100℃に加熱されることに対し、C@exp-MWWでは450℃まで加熱された(図8)。MWWと炭素導入量と同量のグラファイトを物理混合したH-MWW + Gでは急速に加熱されるものの250℃までしか加熱されなかった。H-MWW + Gでは、グラファイトが加熱されてもMWWに熱を伝える前に気流によって熱が失われると考えられる。一方、C@exp-MWWでは炭素が粒子内部にあるため、ヘリウムにより冷却されにくく、熱が粒子内部にとどまっていると考えられる。すなわち、触媒内部に炭素を充填することにより気流により熱が失われることなく有効に利用できることがわかった。

MWW型ゼオライトは、芳香族のアルキル化¹⁶⁻¹⁹⁾、トルエンの不均化^{20,21)}、アルコールの脱水²²⁻²⁴⁾、MTO反応²⁵⁾、アルドール縮合²⁶⁾など様々な反応の触媒として用いられている。その中で、トルエンの

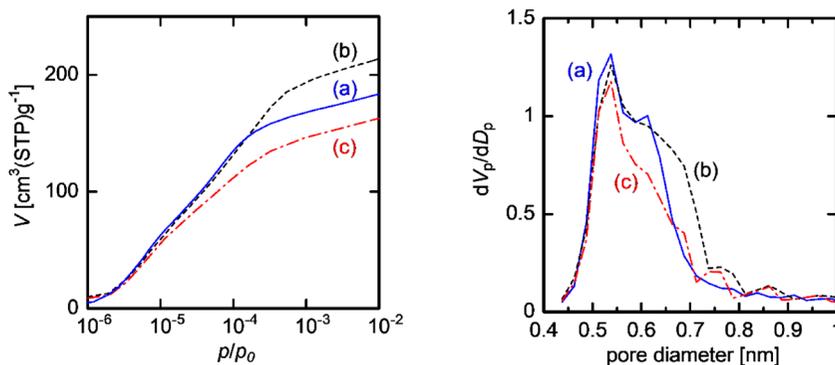


図7. 低相対圧におけるアルゴン吸着等温線(左)とSaito-Foley法による細孔径分布(右). MWW (a実線), exp-MWW (b破線), C@exp-MWW (c一点鎖線).

メチル化において、形状選択性が発現することがInagakiらによって報告されている¹⁶⁾。電気炉による通常加熱とマイクロ波加熱を用い、メタノールによるトルエンのメチル化を行った。触媒量は反応に有効な酸量が同量になるように揃えた。反応に有効な酸量とは、トルエンがアクセスできる酸点の量であり、トルエンと分子径がほぼ等しいピリジンを触媒に吸着させ、昇温脱離により脱離した量を反応に有効な酸量とした。通常の電気炉加熱では触媒層内部を熱電対で測定し、マイクロ波加熱では熱電対が使用できないため反応管の側面から赤外放射温度計で測定した。電気炉加熱において熱電対と赤外線温度計の温度差は赤外線温度計の方が高く、5℃以内の差であった。赤外線温度計が高い温度を示すのは

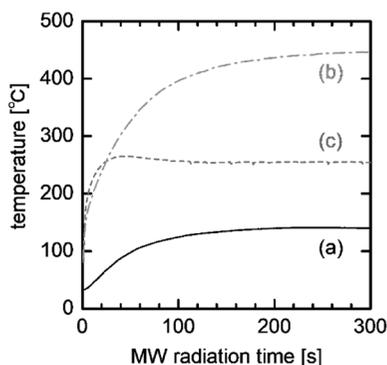


図8. マイクロ波加熱による温度変化。H-MWW (a 実線), C@exp-MWW (b 一点鎖線), H-MWW + G (c 鎖線)。

電気炉では反応管の外側から加熱されているためと考えられる。

250℃で反応を行ったときのトルエン転化率を表1に示す。通常加熱では、H-MWWとH-C@exp-MWW、H-MWW+Gに触媒活性は大きな差がなかった。マイクロ波加熱では、H-MWW+Gの活性に変化はなかったが、H-C@exp-MWWではトルエン転化率が大幅に向上した。このことから、H-C@exp-MWWが選択的に加熱され、触媒内部の温度が高くなっていることがわかる。H-MWWを用い通常加熱で同等の転化率を得るためには、300℃程度必要であることから、マイクロ波熱を用いた時H-C@exp-MWW触媒内部は50℃程度高いことが推測される。

生成物選択性について、触媒量を調整し転化率を約20%に揃えて、マイクロ波加熱の影響を調べた(図9)。通常加熱においてH-MWWとH-C@exp-MWWを用いた場合の生成物分布はほぼ同じであった。H-C@exp-MWWを用いてマイクロ波加熱を行うと、*o*-キシレンの選択率が向上し、1,2,4-トリメチルベンゼンの選択率が減少した。Inagakiらによると、トリメチルベンゼンと*m*-キシレンは、それぞれ外表面酸点でキシレンのメチル化と*p*-と*o*-キシレンの不均化により生成すると述べられている¹⁶⁾。これらの反応は外表面酸点で進行しているため形状選択性を示さない反応である。マイクロ波加熱によりこれらの反応が抑えられた。マイクロ波加熱では触媒内部が加熱され外表面は気流により冷却されるため、外表面付近での反応が抑えられる。その結果、

表1 MWW型ゼオライトを触媒として用いたメタノールによるトルエンのメチル化におけるトルエン転化率

触媒	加熱方法 ¹	温度計 ²	温度 [°C]	<i>W/F</i> (触媒重量/トルエン流速) [g h mol ⁻¹ toluene ⁻¹]	転化率 [%]
H-MWW	CH	TC	250	8.1	6.9
H-C@exp-MWW	CH	TC	250	21.6	6.7
H-MWW + G	CH	TC	250	8.3	4.0
H-C@exp-MWW	MW	IR	250	21.6	21.7
H-MWW + G	MW	IR	250	8.3	4.2
H-MWW	CH	TC	280	8.1	9.9
H-MWW	CH	TC	300	8.1	23.9
H-MWW	CH	TC	250	24.3	20.7
H-C@exp-MWW	CH	TC	250	64.8	23.8

¹CH: 通常加熱, MW: マイクロ波加熱, ²TC: 熱電対, IR: 赤外放射温度計.
トルエン 6.7 kPa (0.12 mmol min⁻¹), メタノール 6.7 kPa (0.12 mmol min⁻¹), 流通時間 1 h.

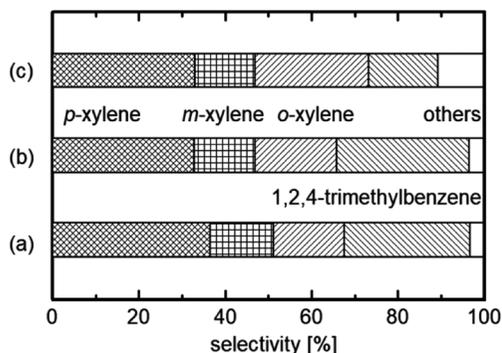


図9. トルエン転化率20%におけるトルエンのメチル化の生成物分布。(a) H-MWW, 電気炉加熱, (b) H-C@exp-MWW, 電気炉加熱, (c) H-C@exp-MWW, マイクロ波加熱。

触媒内部での反応が優勢になり、形状選択性が向上すると考えられる。

4. まとめ

ゼオライトは化学工業において重要な触媒であるが、マイクロ波ではほとんど加熱できない。ゼオライトの細孔の一部に炭素を充填し、ゼオライトを炭素と複合化することによりマイクロ波によって加熱できることを示した。また、実際に反応が進行する場所である触媒のみを加熱することで、反応器全体を加熱する必要がなくなり、エネルギーの削減につながる。気相流通式反応装置では、触媒外表面は気流に冷却されるため、触媒粒子内での反応が優先的に進み、ゼオライト触媒の特徴の一つである形状選択性が向上することも明らかにした。このようにマイクロ波加熱はエネルギー効率の良い反応システムを構築できるだけでなく、生成物選択性も向上できることから、今後、マイクロ波加熱が化学工業においてさらに利用されることを期待する。

謝辞

マイクロ波による加熱を行うにあたり、ご協力いただきました東京工業大学和田雄二特任教授、および九州大学椿俊太郎准教授に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) C. O. Kappe, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **43**, 6250 (2004).
- 2) A. de la Hoz, Á. Díaz-Ortiz, A. Moreno, *Chem. Soc. Rev.*, **34**, 164 (2005).
- 3) C. O. Kappe, D. Dallinger, *Mol. Diversity*, **13**, 71 (2009).
- 4) M. B. Gawande, S. N. Shelke, R. Zboril, R. S. Varma, *Acc. Chem. Res.*, **47**, 1338 (2014).
- 5) S. Horikoshi, N. Serpone, *Catal. Sci. Technol.*, **4**, 1197 (2014).
- 6) H. Nishihara, T. Kyotani, *Chem. Commun.*, **54**, 5648 (2018).
- 7) D. Mochizuki, R. Sasaki, M. M. Maitani, M. Okamoto, E. Suzuki, Y. Wada, *J. Catal.*, **323**, 1 (2015).
- 8) D. Mochizuki, M. Shitara, M. Maitani, Y. Wada, *Chem. Lett.*, **41**, 1409 (2012).
- 9) 堀越 智(編著). 篠原真毅. 滝澤博胤. 福島 潤(共著). マイクロ波化学: 反応, プロセスと工学応用, 三共出版(2013).
- 10) C. Gabriel, S. Gabriel, E. H. Grant, B. S. J. Halstead, D. M. P. Mingos, *Chem. Soc. Rev.*, **27**, 213 (1998).
- 11) 誘電率・透磁率データベース, <https://permittivity.jp/>.
- 12) P. Wu, J. Ruan, L. Wang, L. Wu, Y. Wang, Y. Liu, W. Fan, M. He, O. Terasaki, T. Tatsumi, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 8178 (2008).
- 13) M. Okamoto, T. Sakatsume, S. Tsubaki, Y. Wada, *J. Mater. Chem. A*, **10**, 14585 (2022).
- 14) S. H. Joo, S. Jun, R. Ryoo, *Microporous Mesoporous Mater.*, **44-45**, 153 (2001).
- 15) A. Corma, V. Fornés, J. M. Guil, S. Pergher, Th. L. M. Maesen, J. G. Buglass, *Microporous Mesoporous Mater.*, **38**, 301 (2000).
- 16) S. Inagaki, K. Kamino, E. Kikuchi, M. Matsukata, *Appl. Catal. A*, **318**, 22 (2007).
- 17) Y. Shi, E. Xing, W. Xie, F. Zhang, X. Mu, X. Shu, *Microporous Mesoporous Mater.*, **215**, 8 (2015).
- 18) M. Osman, S. Al-Khattaf, U. Diaz, C. Martinez, A. Corma, *Catal. Sci. Technol.*, **6**, 166 (2016).
- 19) W. Chu, X. Li, S. Liu, X. Zhu, S. Xie, F. Chen, Y. Wang, W. Xin, L. Xu, *J. Mater. Chem. A*, **6**, 12244 (2018).
- 20) L. Liu, M. Cheng, D. Ma, G. Hu, X. Pan, X. Bao, *Microporous Mesoporous Mater.*, **94**, 304 (2006).
- 21) Y.-J. Ji, B. Zhang, L. Xu, H. Wu, H. Peng, L. Chen, Y. Liu, P. Wu, *J. Catal.*, **283**, 168 (2011).
- 22) D. Liu, A. Bhan, M. Tsapatsis, S. A. Hashimi, *ACS Catal.*, **1**, 7 (2011).
- 23) M. M. Antunes, S. Lima, A. Fernandes, M. Pillinger, M. F. Ribeiro, A. A. Valente, *Appl. Catal. A*, **417**, 243 (2012).
- 24) M. V. Rodrigues, C. Vignatti, T. Garetto, S. H. Pulcinelli, C. V. Santilli, L. Martins, *Appl. Catal. A*, **495**, 84 (2015).
- 25) S. Wang, Z. Wei, Y. Chen, Z. Qin, H. Ma, M. Dong, W. Fan, J. Wang, *ACS Catal.*, **5**, 1131 (2015).
- 26) X. Du, Y. Yang, D. Shi, C. Lin, Y. Qiu, J. Sun, *Microporous Mesoporous Mater.*, **268**, 117 (2018).

Zeolite–Carbon Composite Catalysts for Microwave Heating

Masaki Okamoto

Research and Education Center for Natural Sciences, Keio University

Chemical reactions utilizing microwave heating have gained much attention recently, because compared to conventional heating, microwave heating increases reaction rate and reduces the temperature. When solid catalysts have the ability to absorb microwaves, heating only the catalyst, which is an actual reaction area, reduces energy consumption because it becomes unnecessary to heat the reactor and solvent. However, zeolites, which are often used as industrial catalysts, are difficult to heat via microwave radiation. Zeolite catalysts suitable for microwave heating were developed by forming composites of zeolites with carbon, enabling them to absorb the microwave effectively. When the zeolite pores were partially filled with carbon, the internal part of the zeolite particles could be heated by microwaves; moreover, only the zeolite catalyst over which the reaction occurred was heated. Thus, the catalytic reaction primarily occurred within the catalyst itself as it was heated from the inside. Consequently, unselective reactions catalyzed by acid sites on the external surface of the zeolites were inhibited, improving the shape selectivity.

Key words: microwave heating, carbon, FAU, MWW, shape selectivity

Copyright © 2023 Japan Zeolite Association All Rights Reserved.