

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04303

研究課題名（和文）音場における熱物質移動の物質分離場としての利用

研究課題名（英文）Application of acoustic field to efficient separation processes

研究代表者

藤木 淳平（Fujiki, Junpei）

名古屋大学・未来社会創造機構・特任講師

研究者番号：20530190

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、音場内における熱物質移動が吸着現象に与える効果を調査し、音波による吸着促進機構を解明することで、音を利用した効率的な物質分離という革新的分離プロセスの開発に繋がる知見を得ることを目的とした。検討の結果、音場の圧力振幅によりX型ゼオライトへのCO₂の吸着挙動が変化することを見出し、それに伴いCO₂の吸着促進が生じることを明らかにした。また、本検討により得られた吸着促進機構の知見に基づけば、吸着分離以外にも応用ができる可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において、音場内におけるCO₂の吸着挙動の解析を行い、ゼオライト13XにおけるCO₂の吸着促進現象を明らかにしたことで、音による吸着促進についての基礎的知見が得られ、効率的な物質分離の可能性が示されたことで、多孔質材料を用いた物質分離の更なる発展に寄与する知見が得られた。また、本技術は熱音響現象を利用して排熱から発生させることが可能である管内の音場を利用できるため、排熱有効利用の観点からも持続可能社会実現への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the effects of heat and mass transfer in an acoustic field on adsorption phenomena were investigated to elucidate the mechanism of enhanced adsorption by acoustic sound waves and to obtain knowledge that will lead to the development of an innovative separation process, i.e., efficient material separation using acoustic sound produced from waste heat. As a result, it was found that the adsorption behavior of CO₂ on zeolite 13X varied depending on the pressure amplitude of the acoustic field and that CO₂ adsorption was enhanced accordingly. Based on the knowledge of the enhancement mechanism of CO₂ adsorption obtained from this study, there is a possibility that acoustic sound enhancement can be applied not only to adsorptive separation but other separation processes.

研究分野：吸着、熱工学

キーワード：吸着分離 音場 熱物質移動 CO₂

1. 研究開始当初の背景

近年、将来における持続可能な社会の実現のために低環境負荷かつ省エネルギーな分離技術の開発が重要になっている[1]。特に、地球温暖化ガスであるCO₂の分離回収や大気汚染防止のための有害物質除去、来たる水素社会に向けた高純度水素の分離精製、化学プラントにおける炭化水素分離などの社会・産業的に重要な諸課題における分離技術の革新が求められている。そのためには、従来の分離技術に対し、技術融合や新規材料開発、プロセス複合化など様々な取り組みを以って大幅な分離性能の向上が不可欠である。

ガス分離やヒートポンプなどの吸着関連技術に関しては、吸着材の吸着容量および吸着速度が性能向上に関する重要な因子である。工業的な吸着プロセスでは、特に動的吸着特性が重要であり、律速過程となる吸着速度(粒子内拡散・物質移動)の向上が期待されている。

近年、秋澤らは、定常流存在下において反応管内に音の定在波を発生させ、その音場の速度振幅が最大になる位置を吸着場とすることにより水蒸気の吸着速度が促進されることを実験的に見出した(図1)[2]。しかしながら、音場内における吸着速度の促進機構に関しては不明であった。申請者は、厳密な数値計算を用いて現象解析を行うことにより、その促進機構の一端を解明することに成功した。その結果によれば、音波により生じる振動流が、特定の条件下において流体境界を薄化することにより、物質移動が促進されることが示唆された[3]。この研究成果により、効率的な吸着場として音場を利用できる可能性が示されたが、音波は速度振幅だけでなく圧力振動も伴う現象であり、それにより生じる熱物質移動が吸着材および吸着現象に与える効果に関しては未だ明らかでない。そのため、音場を効果的な物質分離場として利用するためには、音場(速度振幅と圧力振動およびそれに伴う熱物質移動)が吸着現象に与える効果について、その全容を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、効率的な物質分離場としての音場の利用を目的として、音場内における熱物質移動が吸着現象に与える効果を調査し、音波による吸着促進機構を明らかにすることで、音を利用した物質分離という革新的分離プロセスの開発に繋がる知見を得る。

3. 研究の方法

本研究では、X型ゼオライトへのCO₂吸着をモデル系として、音場が吸着現象に与える効果に関して、実験ならびに理論解析により明らかにすることで、音場の物質分離場としての有効性を示す。まず、音場自体が物質分離に与える影響の有無を評価、解析することで、音場内における最適な吸着材設置位置についての知見を得る。その検討結果に基づき、音場内におけるX型ゼオライトへのCO₂吸着試験を実施し、音場の速度振幅および圧力振幅が吸着特性に与える効果を系統的に評価、解析することで、音場における吸着促進現象に関する基礎的知見を得る。以上の検討により、音波による吸着促進機構について包括的に理解し、吸着材を音場内に設置した際の熱物質移動と吸着促進との関係を明らかにすると共に、他の化学プロセス等への音場利用に関する知見を得る。

4. 研究成果

まず、音波を入力することが可能な固定層型反応器を付随する音場評価装置(図1)を作製し、吸着材を設置せずに、円管内で音場自体が濃度分極を誘発するかを実験的に検証した。ここでは、管内に与える音場の条件を系統的に変化させ、管内の各位置におけるCO₂濃度の経時変化を計測することで、音場による物質分離(濃度分極)の有無を評価することとした。その結果を図2に示す。図2より、管内の任意の3カ所のCO₂濃度は音場を発生させても変化しなかったことから、本研究の条件下では、音場が濃度分極を発生させることはないとし唆された。

次に、固定層型反応器の管内の任意の位置に吸着材を設置して、CO₂の吸着破過試験を実施した。吸着材の設置位置は、圧力振幅のみが影響する位置(Position 1)、速度振幅のみが影響する位置(Position 2)、それらの相乗効果の影響を評価できる位置(Position 3)の3ヶ所とした(図3)。各設置箇所において音場の強度および流量を変化させて試験を実施した。

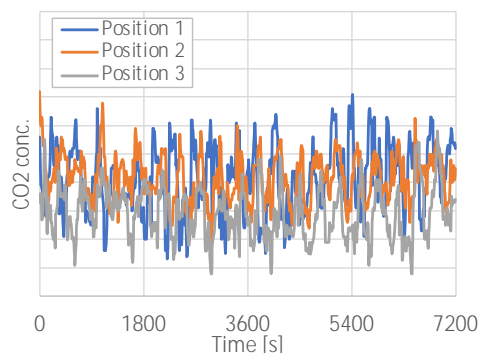
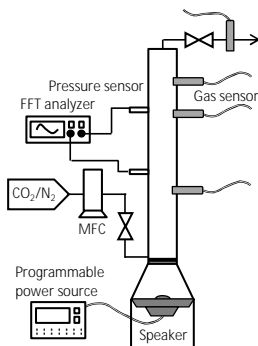


図1 音場評価装置概略 図2 音場が濃度分極に与える影響の検討

まず、圧力振幅のみが影響する Position 1 に吸着材を設置した結果を図 4 に示す。図 4 より、音場の圧力振幅により CO₂ の吸着挙動は明らかに変化しており、振幅強度をあげると CO₂ 吸着量が増加したことから (図 5)、音場の圧力変動が吸着を促進することが示唆された。吸着量は最大で 1.3 倍まで増大したことから、圧力変動による吸着促進は吸着性能の向上に非常に有効な手段となりうる。CO₂ 吸着に伴う温度変化に関して、高強度の音場を発生させると、2 段階の温度変化を示すように変化することがわかる。これは、二段階

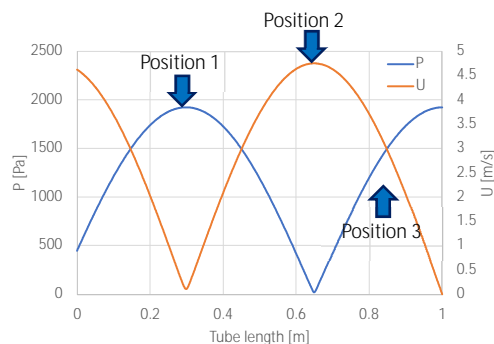


図 3 管内の音場の解析例と吸着材設置位置

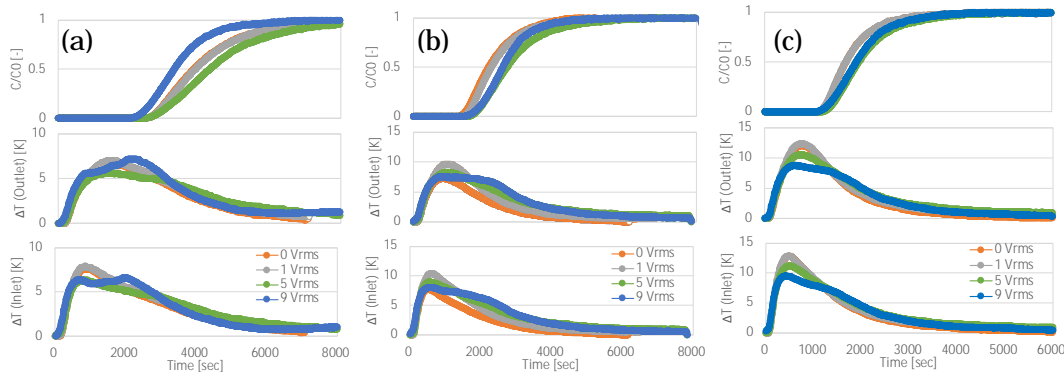


図 4 圧力振幅が CO₂ 吸着に与える影響; 流量小 (a), 中 (b), 大 (c)

で CO₂ の吸着が生じたことを示しており、カラム前方から後方への熱熱移動が生じている可能性も示唆する結果である。しかしながら、吸着量と二段階の発熱挙動に注目すると、二段階の発熱挙動が極端に生じると吸着量としては低下する傾向が確認されたため、吸着促進には適切な音場強度があることが示唆された。

一方、速度振幅のみが影響する Position 2 や圧力振幅と速度振幅の相乗効果を期待した Position 3 に吸着材を設置した結果に関しては、吸着挙動に変化は見られるものの、吸着促進効果は確認されず、条件によっては吸着性能が低下したため、本研究の実験条件下においては、音場の速度振幅は負の影響を与えることが示唆された。先行研究[3]のシリカゲルへの水蒸気吸着においては、圧力振幅ではなく速度振幅が吸着促進に関与していたため、X 型ゼオライトへの CO₂ の吸着促進現象は、シリカゲルへの水蒸気吸着のそれとは異なるメカニズムで生じると考えられる。

その吸着機構を解明するため、X 型ゼオライトへの CO₂ および N₂ の吸着等温線を測定した。それらの試験結果を Langmuir 型等温式により解析し、その結果を用いて二成分系吸着等温線を IAS (Ideal adsorbed solution theory) 理論を用いて推算した (図 6)。その結果、5%CO₂-95%N₂ ガスに対する CO₂ の平衡吸着量は約 2.6 mol/kg であった。しかしながら、破過試験の結果から算出した音波照射無しの時の吸着量は流速 100 mL/min で 1.8 mol/kg、流速 200 mL/min で 2.2 mol/kg、流速 300 mL/min で 2.7 mol/kg であったことから、流量が小さい場合には物質移動 / 拡散が遅く、完全に平衡まで達していないと考えられる。一方、音波を照射し、圧力振幅を発生させた際には、吸着量が増加したことから、音波照射による圧力振動により物質移動 / 拡散が改善されたと考えられる。X 型ゼオライトへの CO₂ 吸着速度は細孔拡散が支配的であると報告されている[4,5]ことから、圧力振動により細孔内のガス置換 (細孔拡散) が促進され、ガス置換されにくい細孔深部まで CO₂ が拡散したため、吸着量が増加したと考えられる。

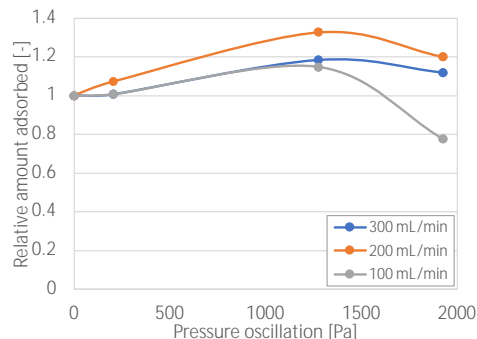


図 5 圧力振幅による CO₂ 吸着促進効果

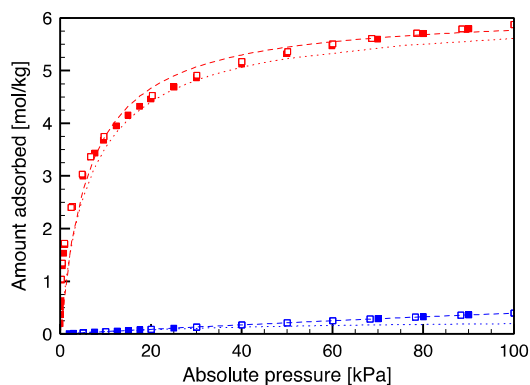


図 6 298 K における X 型ゼオライトへの CO₂ の吸着等温線; Langmuir モデル (破線), IAS モデル (ドット線)

以上の検討結果より、音場における振動流および圧力振幅を適切に設定することで吸着現象を促進できる可能性が示唆された。また、吸着促進現象はその拡散メカニズムと密接に関連していることが明らかとなった。音波による吸着促進のメカニズムに基づけば、吸着分離以外にも応用ができる可能性がある。

参考文献

- [1] JST, CRDS-FY2015-SP-04 (2016).
- [2] A. Akisawa et al., *Adsorption*, 24 (2018) 595.
- [3] J. Fujiki, et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*. 148 (2020) 119088.
- [4] J.A.C. Silva, et al., *Microporous Mesoporous Mater.* 158 (2012) 219.
- [5] M. Waray, et al., *Ind. Eng. Chem. Res.* 63 (2024) 7321.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤木淳平、上田祐樹
2. 発表標題 音場内におけるX型ゼオライトの二酸化炭素吸着挙動
3. 学会等名 第36回日本吸着学会研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------