国際共同研究事業 令和3(2021)年度実施報告書

令和 4 年 4 月 18 日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]
東北大学・流体科学研究所
[職・氏名]
教授・小宮敦樹
[課題番号]
JPJSJRP 20191801

1. プログラム名 中国との国際共同研究プログラム(JRP with NSFC)

2. 研究課題名

(和文) 超臨界流体による汚染土壌の改質・浄化 -高効率分離促進技術の開発-

(英文) Supercritical Fluid Assisted Contaminated Soil Remediation:

Key Mass Transfer Issues and Technological Development

3. 共同研究実施期間

令和 2 年 1 月 1 日 ~ 令和 6 年 12 月 31 日 (5 年 0 ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Chinese Academy of Sciences・Professor・CHEN Lin

5. 当該年度実施状況

- ・当該年度実施計画書の「当該年度実施計画の概要」の内容と対応させつつ、当該年度の実施状況を簡潔に記載してください。再委託又は共同実施を行った場合は、それぞれの実施状況がわかるように記載してください。
- ・当該年度又は前年度(複数年契約を締結し繰越を行った場合)の各費目における増減が研究経費総額の 50% (この額が 300 万円を超えない場合は 300 万円)に相当する額を超えた場合は、その理由と費目の内訳を変更しても計画の遂行に支障がないと考えた理由を記載してください。

本事業では、超臨界条件下における二酸化炭素の特異な熱・物質移動現象とその相互作用を理解し、超臨界流体を用いた高効率低環境負荷の汚染土壌改質手法を確立することを目的としている。研究三年目の本年度は昨年度と同様に研究申請書に記載した3基軸のうち、「基軸1:超臨界条件下における物質輸送現象を定量的に理解し、モデル化する」および「基軸2:超臨界流体と汚染物質の相互作用を分子スケールで明らかにする」に資する活動を進めてきた。令和2年度は新型コロナウイルスの影響により研究計画が大幅に遅れることとなったため、その遅れを取り戻すべく、具体的には以下の4項目を進めてきた。

1. 小スケール実験実施
2. 土壌サンプルの物性取得
3. 数値計算コードの構築および分子動力学計算
4. 溶解性実験実施

このうち、日本側では1,2の一部,3の一部を実施し、中国側では2の一部,3の一部,4を実施した。本年度もコロナの影響で渡航は一年を通して不可であったことから、これまで通りの研究報告会を毎月末にオンラインで開催し、即時の情報共有を図った。以下、各項目についてまとめる。

小スケール実験実施

令和2年度に観察セル内に超臨界状態を作り上げる昇温・昇圧の手順を確立し、本年度は高圧試験実施許可も下りたことから、この手順を用いて超臨界状態における熱物質移動現象を光学干渉計により可視化した。温度-圧力条件については、臨界点から離れた323K-8.0MPaにおける現象(Far condition)と、臨界点近傍の313K-8.0MPaにおける現象(Near condition)を精緻可視化し、超臨界流体における熱拡散現象が場の密度および粘度にどのような影響を受けるか実験的に評価した。この条件は中国側で進めている数値シミュレーションの条件に一致しており、日本側で得られた実験結果を中国側に提供することで数値シミュレーションの妥当性を評価することも兼ね備えている。可視化実験結果より、Far conditionにおいては超臨界状態においても代表長さが大きい系では温度差起因の自然対流が生じ、移流による熱拡散が確認された。特異な熱移動現象は観察されなく、低レイリー数領域では拡散支配の熱移動が生じ、高レイリー数領域では移流を含んだ熱移動が観察された。しかしながら、Near conditionにおいては、場のわずかな温度変化により諸物性が急激に変化し、複雑な熱移動現象が観察された。これらの結果は中国側によって進められてきた数値シミュレーションによる結果と一致しており、臨界点近傍における熱物質移動現象の促進が期待できる結果となった。

土壌サンプルの物性取得

熱拡散実験可視化装置を利用し、物質拡散可視化実験を行った。土壌汚染物質である重金属等を使用した実験は国内では実施が難しいことから、本研究では別の汚染物質である高揮発性物質に焦点を当て、揮発性の高いアセトンを用いることで物質輸送現象を可視化した。また、土壌を模擬した多孔質体を採用し、揮発現象と多孔質体構造との関係について可視化実験を行うことで評価した。揮発性物質の濃度場可視化実験には浮力による影響およびステファン流れに代表される流体力学的流れの影響を受けるため、これらを考慮したセル設計を行い、物質移動量を評価した。この結果、多孔体を有する場合は、気液自由界面の場合に比して蒸発量は格段に低く、かつ時間的な変化に着目すると、第二種境界条件(物質流束一定)に疑似できる蒸発過程を示すことが明らかとなった。この成果については現在国際学術誌に投稿すべく準備を進めており、令和4年度初期に投稿予定である。

数値計算コードの構築

中国側では令和3年度中に分子動力学法を用いた数値シミュレーションコードの開発を行ってきた。これに合わせて、日本側ではミリメートルスケールでの熱物質移動現象を評価する計算コードの開発を汎用シミュレーションコードを利用して行った。具体的にはCOMSOL MultiPhysicsを用い、亜臨界状態、超臨界状態、さらには臨界点近傍における数値計算の妥当性について評価を行った。計算グリッドの依存性も合わせて評価し、パラメトリックな計算結果および上述のFar, Near conditionsの可視化結果との比較を行った。この結果、超臨界状態においては汎用コードにおいても定性的に熱物質移動を評価することができることが明らかとなったが、臨界点近傍では評価ができないことが分かった。臨界点近傍領域においては、中国側で進めている分子動力学による評価を行っていくこととなった。

これらの研究実施状況は中国側と常に共有化しており、月1回の定期オンライン会議にて進捗状況を報告してきた。次年度以降については、月例のオンライン会議は進めていくが、コロナの状況が改善された時点でサイトビジットを実現させる。

7. 研究発表（当該年度において本共同研究の一環として本事業による支援を受けたことを明示して発表したものについて記載してください）

[雑誌論文] 計(3)件 うち査読付論文 計(3)件

通番	共著の有無*1	著者名、論文標題等*2
1	○	Dynamic imaging and analysis of transient mass transfer process using pixelated-array masked phase-shifting interferometry, <u>Q. Wu</u> , <u>L. Chen</u> and <u>A. Komiya</u> , International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.174 (2021), 121339. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121339
2	○	Numerical analysis of gas production from large-scale methane hydrate sediments with fractures, <u>Y. Feng</u> , <u>L. Chen</u> , <u>Y. Kanda</u> , <u>A. Suzuki</u> , <u>A. Komiya</u> and <u>S. Maruyama</u> , Energy, Vol.236 (2021), 121485. DOI: 10.1016/j.energy.2021.1214850
3	○	Measurement of transient transport process of different molecules across mixed fiber (CA-CN) membrane by pixelated-array masked phase-shifting interferometer, <u>L. Chen</u> , <u>Q. Zhang</u> , <u>Q. Wu</u> , <u>D. Yang</u> , <u>G. Zeng</u> , <u>Y. Zhang</u> and <u>A. Komiya</u> , Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.130 (2022), 110490. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2021.110490

[学会発表] 計(5)件 うち招待講演 計(0)件

通番	共著の有無*1	発表者名、発表標題等*2
1		Accurate visualization of carbon dioxide heat transfer under supercritical condition using high-speed phase-shifting interferometer, <u>Y. Kanda</u> , <u>H. Ito</u> and <u>A. Komiya</u> , Proceedings of the Second Asian Conference on Thermal Sciences (2nd ACTS), Fukuoka, Japan, (2021), 20514.
2	○	Preliminary Measurements of CO ₂ Cavity Convection from Sub-Critical to Supercritical Conditions Using Pixelated Phase-Shifting Interferometry, <u>Q. Wu</u> , <u>L. Chen</u> , <u>Y. Zhang</u> and <u>A. Komiya</u> , Proceedings of the Second Asian Conference on Thermal Sciences (2nd ACTS), Fukuoka, Japan, (2021), 30713.
3	○	Numerical Investigation of Convection Heat Transfer of Supercritical CO ₂ in Porous Media: The Effect of Porous Structure, <u>Y. Feng</u> , <u>L. Chen</u> , <u>Y. Kanda</u> and <u>A. Komiya</u> , Proceedings of 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021), Sendai, Japan, (2021), 652-653.
4	○	Experimental Visualization of Transient Heat Transfer under Supercritical Conditions Near and Far from Critical Point on <i>p-T</i> diagram, <u>H. Ito</u> , <u>Y. Kanda</u> , <u>L. Chen</u> and <u>A. Komiya</u> , Proceedings of 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021), Sendai, Japan, (2021), 660-661.
5	○	Pore-Scale Modeling on Skin and Volume-Averaged Friction Factors in 3D Micromodel Following Supercritical CO ₂ Invasion Nature, <u>K. Ragui</u> , <u>L. Chen</u> , <u>Y. Kanda</u> and <u>A. Komiya</u> , Proceedings of 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021), Sendai, Japan, (2021), 664-665.

[図書] 計(0)件

通番	共著の有無*1	著者名、著書名等*2
1		

*1 相手国側参加者との共著(共同発表)がある場合は○と記入。

*2 当該発表等を同定するに十分な情報を記載すること。例えば学術論文の場合は、著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年(西暦)、最初と最後の頁、掲載論文の DOI、学会発表の場合は発表者名、発表標題、学会名、発表年(西暦)、発表地(国名、国外開催の場合のみ)、図書の場合は著者名、著書名、出版社名、発行年(西暦)、総ページ数、ISBN、など(順番は入れ替わってもよい)。相手国側参加者との共著となる場合は、著者名が複数であっても省略せず、その氏名を記入し下線を付すこと。

*3 足りない場合は適宜行を追加すること。

8. 本事業による産業財産権の出願・取得状況(当該年度に出願又は取得したもの)

[出 願] 計(0)件

通番	産業財産権の名称、発明者、権利者、産業財産権の種類、番号、出願年、国内・外国の別
1	

[取 得] 計(0)件

通番	産業財産権の名称、発明者、権利者、産業財産権の種類、番号、取得年、国内・外国の別
2	

* 必要に応じて、欄を追加してください。