

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：82502

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K18745

研究課題名(和文)逆ミセル中の新規ボーズ・アインシュタイン凝縮の検証

研究課題名(英文)Validation of a new type of Bose-Einstein condensation in reverse micelles

研究代表者

村上 洋(Murakami, Hiroshi)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子生命科学研究所・主任研究員

研究者番号：50291092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,700,000円

研究成果の概要(和文)：フレーリッヒの細胞モデルは、細胞中で代謝エネルギーを使って、ボーズ・アインシュタイン凝縮のように巨視的な電気分極振動が発生する。正しければ細胞中の生体機能研究が大きな修正を迫られる革新的な理論である。しかし、細胞の複雑さのためこのモデルの検証は困難であった。我々は、逆ミセルという、構成要素が格段に少ないモデル細胞を構築し、マイクロ波エネルギー注入を用いて検証研究を行った。逆ミセル中の水が異常な熱発生現象を示した。逆ミセル中でフレーリッヒが予想するような動的な転移現象を検証するための実験条件を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半世紀近い未解決問題であり生命の基礎となる仕組みを与えるフレーリッヒの細胞モデルが、実験的に実証されれば大きな学術的及び社会的衝撃を与え、生命研究にブレークスルーを起こすと考えられる。本研究はその物理的核心部分の検証を目指した。理論モデルに対応する実験条件の探索が検証の鍵であり、本研究の成果はそのモデルの物理条件を満足する系を構築し実験条件の候補を見つけたことである。これにより検証研究に一つの道筋が見ついた。

研究成果の概要(英文)：A cell model proposed by H. Frohlich demonstrates that a coherent vibration of polarization emerges by using metabolic energy as in Bose-Einstein condensation, leading to the situation in which the conventional idea for biological functions in cells will be critically changed. However, it has been difficult to experimentally confirm the validity of that model because of the complexity of cells. We addressed this difficulty using reverse micelles in which there are much fewer constituents compared with in cells and using an energy input of microwaves. The experimental condition was acquired for verifying dynamical transitions such as one predicted by Frohlich.

研究分野：物性物理 生物物理

キーワード：逆ミセル フレーリッヒ 誘電体モデル ボーズ・アインシュタイン凝縮 細胞 マイクロ波 テラヘルツ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

今から1世紀ほど前に提出されたボーズ・アインシュタイン(BE)凝縮の実験的実証は20世紀末に成功した(2001年ノーベル賞)。一方、半世紀程前、超伝導などの理論物理学者フレリッヒは細胞の誘電体モデルを提出した(Fröhlich, Phys. Lett. 1968; Nature, 1970, 図1参照)。細胞は水や生体高分子など電気的極性をもった構成分子からなる誘電体と見なすことができる。このモデルは細胞中で代謝エネルギーを使ってBE凝縮が起こるという革新的理論である。そして、その凝縮の結果起こるテラ(10^{12})ヘルツ(THz)領域のコヒーレントな光学的格子振動が細胞内の生体反応の秩序・高効率性の基盤となることを説明した。以後フレリッヒ(F)凝縮と呼ぶ。細胞を対象にした広範な検証実験はモデルを支持するような結果を示したが、細胞の複雑性に起因して直接的実証は困難であった。今世紀に入ってから、他に妥当な検証方法が見つからないまま現在に至っている。

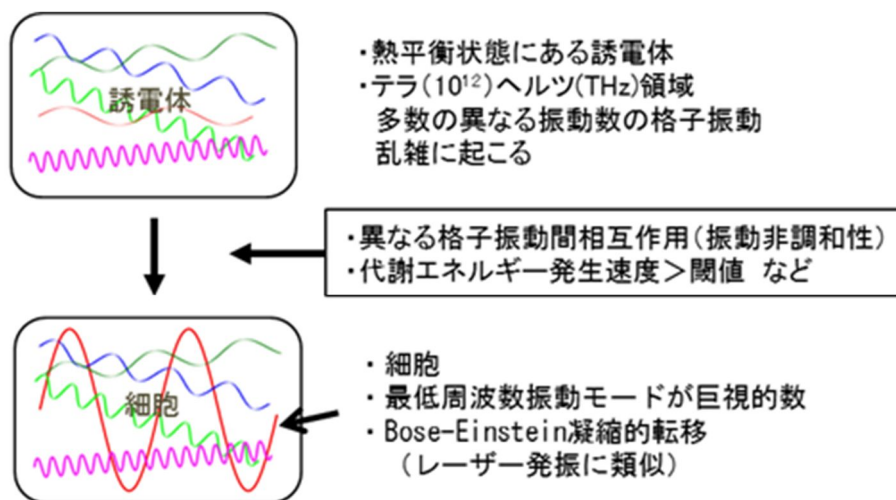


図1. フレリッヒ(F)凝縮

2. 研究の目的

申請者は、逆ミセル(Reverse micelle:RM)(図2)を用いて構成要素が格段に少ないモデル細胞を構築し、代謝エネルギーの代わりに逆ミセル内にレーザー光やマイクロ波(Microwave:MW)によりエネルギー注入を行うことを着想し、F凝縮検証への準備を整えてきた。本研究の目的は、逆ミセルを対象としてF凝縮、すなわち、エネルギー注入速度が閾値を超えた時に起こる THz コヒーレント格子振動凝縮の転移を観測することである。

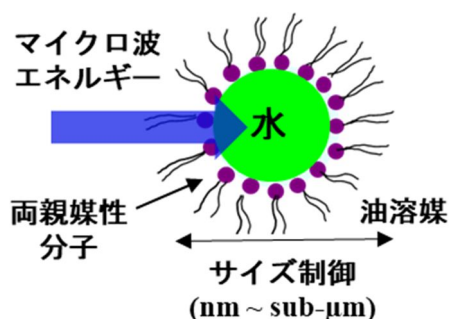


図2. 逆ミセル模式図

3. 研究の方法

F凝縮の検証の最初の鍵はそれが起こる可能性がある実験条件を見いだすことである。具体的な実験条件の理論的な指針がないため、広範囲の実験条件を調べる必要がある。系内で動的な転移が起こる時にその物性には何らかの異常性が表れると考えられる。そこで、光・熱変換分子を導入した逆ミセルへのレーザーエネルギー注入やマイクロ波により逆ミセル内の水に直接エネルギー注入し、光散乱や温度測定など物性の変化を調べた。マイクロ波照射により物性の異常な振る舞いが見つかった。ここで、2.45GHzの半導体発振器をマイクロ波源に用い、マイクロ波を伝搬させるために導波管システムを構築した。液体試料が入ったガラス管を導波管に挿入し、窓からサーモカメラで温度変化測定を行った。

4. 研究成果

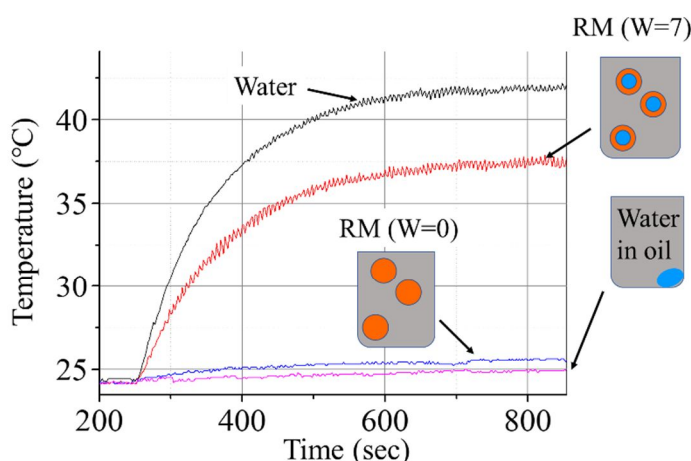


図3. マイクロ波照射(~12 W/cm²)による液体試料の温度変化

液体試料の MW 照射による温度の時間変化を図 3 に示す。水試料は約 42 まで温度上昇を示し、まわりの空気への熱散逸との釣り合いにより定常状態に達した。一方、水を含まない逆ミセル溶液(W=0, W は界面活性剤と水の比であり、サイズ制御パラメータ)は 1 程度の温度上昇しか示さなかった。この試料では界面活性剤の体積分率が約 7% であり、ほとんどが無極性溶媒であるために MW 加熱が起こらない。しかし、この逆ミセル溶液に体積分率 2.5%の水を加えた W=7 の逆ミセル溶液試料は約 38 まで温度上昇した。比較として、イソオクタン中に同じ体積分率の水を加えてセルの底に水滴が相分離した状態にある試料(図の Water in oil)では温度上昇がほとんど見られなかった。水と水を含む逆ミセルの熱発生は、水とイソオクタンの比熱(それぞれ、 $4.18 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ と $2.12 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$)と水とイソオクタンの密度 0.69 (g/ml) を用いて大雑把に評価できる。水は 24.5 から 42 の上昇によりおよそ 14.6 J である。逆ミセル試料は 25.5 (水なし逆ミセルの温度上昇の分を考慮)から 37.5 の上昇で約 3.5 J であり、水の値のおよそ 4 分の 1 である。しかし、水の体積当たりで比較すると逆ミセル中の水が通常の水より 10 倍程度大きな熱発生を示すことになる。図 4 は水の単位体積当たりの熱発生量の照射強度依存性であり、逆ミセル(w=7)と水を比較している。両者とも照射強度に比例して熱発生量が増加している。そして、同じ照射強度で逆ミセルの熱発生量が水に比べて一桁程度高い。熱発生速度についても同様の結果を得た。

物質のマイクロ波による熱発生は、誘電加熱と呼ばれ、物質の誘電損失係数で理解さ

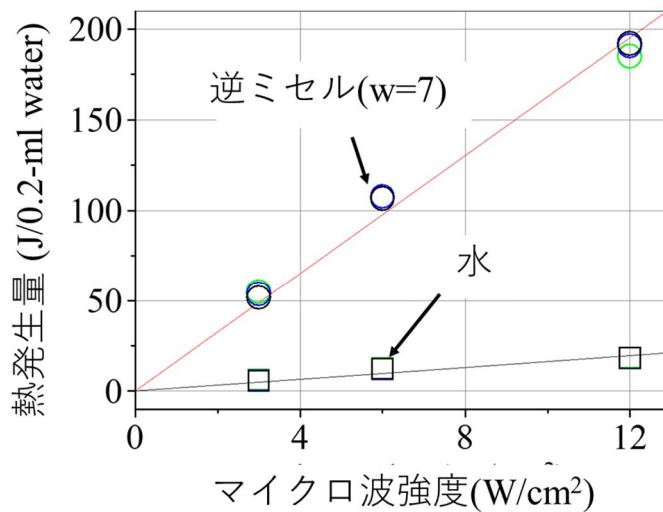


図4. 熱発生量の照射マイクロ波強度依存性

れる。逆ミセルの誘電損失係数は含まれる水の体積分率の小ささに起因して水に比べて非常に小さい。つまり、逆ミセル中の水の誘電特性は通常の水と変わらないことを意味する。ここで、誘電率測定は摂動的な弱い電場を加えて熱平衡状態に近い系の線形応答を観測していることに注意する必要がある。本研究のように温度変化を引き起こすような強い電場下の非平衡状態の場合、系が非線形応答を示し、F凝縮のような動的な転移が起こる可能性があると考えている。非平衡開放形で見られる自己秩序現象や散逸構造は、外部からのエネルギーや物質の注入により時間・空間的秩序が発生する結果である。そして同時に熱を外部に捨てる必要がある。生物はその典型例である。逆ミセル中でエネルギー注入によりF凝縮のようなコヒーレントな電気分極振動という動的秩序が発生しているならば、同様に熱を外部に捨てる必要がある。本研究の実験結果はこの熱発生を見ており、通常の誘電加熱現象とは異なる可能性がある。本研究によりF凝縮検証のための実験条件の候補が見つかった。この条件下で今後検証研究を進める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiroshi Murakami	4. 巻 13
2. 論文標題 Unusual microwave heating of water in reverse micellar solution	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5025
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-31742-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 村上 洋
2. 発表標題 ナノ水性媒質のマイクロ波誘電加熱
3. 学会等名 日本物理学会2022秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上 洋
2. 発表標題 ナノ水のマイクロ波誘電加熱
3. 学会等名 第16回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム
4. 発表年 2022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
研究協力者	渡辺 純二 (Junji Watanabe) (60201191)	大阪大学・生命機能研究科・准教授 (14401)	

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
---------	---------