

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00120

研究課題名(和文) ミニマルセルの創成を通してみる生命誕生のための非平衡熱力学条件

研究課題名(英文) Non-Equilibrium Thermodynamic Conditions for Emergence of Life Revealed by Minimal Cells

研究代表者

今井 正幸 (Imai, Masayuki)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：60251485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、外部から原料(グルコース)を取り込み、これをグルコース分解酵素と反応させることによりエネルギー分子(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)を生産し、このH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>がAOTベシクル上でアニリンを鋳型重合することにより、特定のモノマー配列を持つ情報高分子PANI-ESを合成する。このPANI-ESは外水相中にあるAOT膜分子をAOTベシクルに取り込む働きをする。同時にAOT分子と同時にコレステロール(Chol)をもベシクルに取り込むようにすると、AOTベシクルは成長だけではなく、分裂もするようになる。さらに浸透圧を制御して持続的なベシクルの再生産を可能にし、最先端のミニマルセルの創成に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生命が物質からどのように誕生したのか？最も大きな謎の一つである。現在、その謎に迫るために探査機を小惑星に送って生命を構成する基本分子を探したり、最小限の遺伝子を使って生命システムの最も基本的な性質である増殖を再現する研究などが行われている。しかし、この問題の一番の問題は「分子の集合体が増殖し、進化するための基本的な物理法則が存在するのか」という点である。これを明らかにするためには、生命システムのコピーを作るのではなく、既知の分子から自律的・持続的に増殖するシステムを一から作り上げることが最も重要である。本研究はこの方針に沿って研究を行い、現時点で最も進んだ自己生産システムの構築に成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, succeeded in establish a most advanced minimal cell system. The ingredient (glucose) is taken in from the outside and reacted with glucose-oxidase to produce energy molecule (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), which triggers the template polymerization of aniline on the AOT vesicle to synthesize PANI-ES with a specific monomer sequence. This PANI-ES incorporates AOT molecules in the external solution into the AOT vesicle. When cholesterol is also incorporated into the vesicle simultaneously, AOT + cholesterol vesicles show not only growth but also division. Furthermore, by controlling the osmotic pressure, sustainable reproduction of vesicles was attained.

研究分野：ソフトマター物理

キーワード：ミニマルセル 自己生産 エネルギー代謝 情報高分子

### 1. 研究開始当初の背景

生命は高分子(タンパク質・核酸)膜分子(脂質)などのソフトマターと呼ばれる分子の集合体が、それらの構成成分を合成する化学反応ネットワークと連携して増殖していく非平衡システムである。この特異な性質を持つ「生命システム」がいかにして物質世界から生まれたのか?という根源的な問題は生物学のみならず物理学としても重大かつ未解決の「問い」である。分子生物学は生命の基本となる現象の分子論的な描像を確立してきたが、そのようなミクロな描像を積み上げて「どのようにして生命が物質から生まれて、安定に存在しうるのか?」という生命の最も基本的な問いに答えることはできない。これに対して近年、生命として最も基本的な性質「膜に囲まれたシステムが外部から原料を取り入れて自らのシステムを構築する分子を合成し(代謝)それら分子群を用いてシステムを複製する(自己生産)そして複製である子システムも親システムと同じ特性を有する(遺伝)」を持つ最小限のシステム(ミニマルセル)を人工的に構築することにより生命とは何かを理解する取り組みが生まれた。このミニマルセルを実現する為の主流のアプローチが合成生物学的手法であり、既存の生物から必要最低限の成分だけを抽出し、それらを用いて生命システムを再構築する手法である。しかし、このアプローチでは現在の生命が用いている DNA やタンパク質などを介した複雑な化学反応ネットワークを再構築する為、たとえ生命系を再現することができたとしても、どのようにしてそのようなシステムが誕生したのかという問いには答えることができない。

### 2. 研究の目的

本研究では生命システムを縮約したミニマルセルを単純な分子群を用いて創成し、そのシステムが非平衡条件下で安定に存在する条件を見出すことにより、物質から生命が誕生した謎に迫る。生命の根源的なシステムは図 1 (a)に示すように、i) グルコースを取り込んでエネルギー分子 ATP を生産するエネルギー生産系、ii) ヌクレオシドを取り込んで情報高分子 DNA を合成し、DNA の遺伝情報をもとに分子機械タンパク質を合成する遺伝情報加工系、および iii) エネルギー生産系の副生産物から脂質分子を合成し、膜に供給する膜合成系、の3つの化学反応系から成っている。この反応ネットワークで合成された脂質分子を使ってベシクルが成長・分裂(増殖)するのが、生命の最も根源的な性質である。この特性を縮約したミニマルセルを単純な分子群を用いて実験室で構築する。我々のミニマルセルのデザインを図 1 (b)に示す。このシステムは生命システムと同様に i) グルコースからエネルギー分子( $H_2O_2$ )を生産するエネルギー生産系、ii) モノマーからベシクルを構成する膜分子の構造をコードした情報高分子(PANI-ES)を合成する遺伝情報加工系、および iii) エネルギー生産系の副生産物から膜分子を合成し膜に供給する膜合成系、から構成されている。このエネルギー代謝系を備えた化学反応ネットワークを用いて持続的な自己生産ベシクルシステムを実現させることが本研究の目的である。また、このシステムを記述する化学反応速度論、情報エントロピーの収支、ベシクルの成長・変形・分裂・膨潤の物理を検討することによりミニマルセルを支える基本原理を明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では、図 1 b に示したミニマルセルを構築する。まずエネルギー生産系は、グルコース分解酵素(GOD)および情報高分子 PANI-ES の重合触媒(HRP)を含む反応溶液中に細胞サイズの AOT ベシクルを準備し、そこにエネルギー分子および遺伝情報分子合成の原料となるグルコースと情報高分子の原料であるアニリンを外部から供給する。グルコースは GOD によりエネルギー分子の役割を果たす  $H_2O_2$  を生産する(エネルギー生産)。生成した  $H_2O_2$  は、AOT ベシクル上で触媒 HRP の存在下でアニリンと反応して PANI-ES を重合する。この時、AOT の親水基(スルホ基)の構造が鑄型となり、アニリンとスルホ基の間に水素結合を形成することにより特定のモノマー配列を持つ情報高分子 PANI-ES が選択的に鑄型重合される(遺伝情報加工)。AOT ベシクル上に吸着した PANI-ES は外水相にある AOT 分子と水素結合を作って、AOT 分子の親水性を低下させることにより AOT 分子をベシクル膜に取り込むことによって、ベシクルが成長する。この時、同時

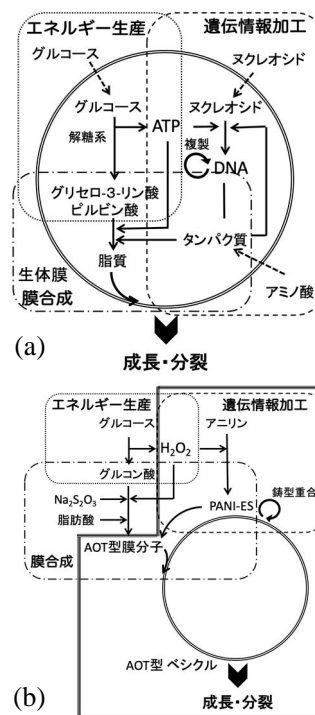


図 1 (a) 生命システムの縮約モデル、(b)我々のミニマルセルの縮約モデル。

に逆コーン型形状を持つコレステロール(Chol)を加えると、ベシクルは成長だけでなく分裂をするようになる。ただし、この場合ベシクル膜面積は増加するが、体積は増加しないのでベシクルの自己生産は持続的ではない。そこでベシクルの内外に浸透圧調整物質を加えて持続的な体積を実現することにより、ベシクルの再帰的な自己生産すなわちミニマルセルを実現する。

このミニマルセルの化学反応経路とその反応分子濃度の時間発展および膜面積の増加を計測することにより、このミニマルセルの速度論的方程式を確立し、実験結果との比較により化学反応ネットワークの安定性を議論する。また情報高分子 PANI-ES の持つ情報エントロピーを計算し、スルホ基とアニリンの間の水素結合エネルギーと比較することによりこの情報高分子合成の安定性を明らかにするとともにベシクルの成長・変形・分裂・膨潤を記述する理論的枠組みを構築し、分子シミュレーションで変形・分裂の分子的な起源を明らかにする。

#### 4. 研究成果

##### ミニマルセルの創成

##### (1) 代謝経路を持つ自己生産ベシクル系の構築

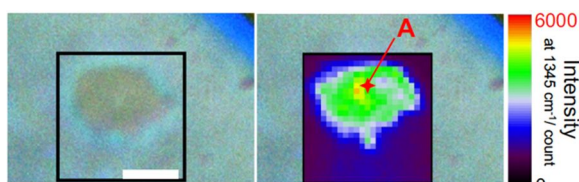


図2 グルコースから PANI-ES までのカスケードな代謝反応系を用いた時の PANI-ES の鑄型重合の確認。左：重合反応後の AOT ベシクルの明視野像（スケールは 10 $\mu$ m）右：顕微ラマンで PANI-ES の特徴的なピークを使ったマッピング像。両者の一致から PANI-ES が AOT ベシクル上に合成されたことを確認できる。

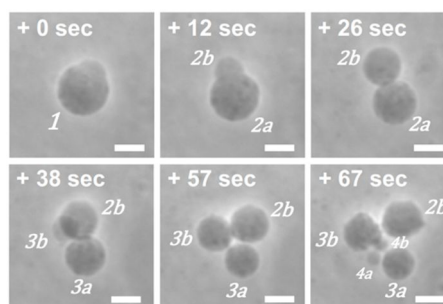
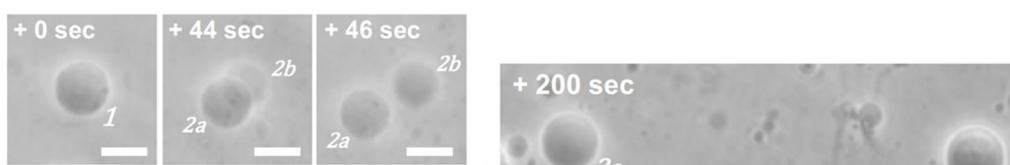


図3 グルコースから PANI-ES までのカスケードな代謝反応系を持つ自己生産ベシクルの成長・分裂過程。（スケールは 10 $\mu$ m）

まず、GOD および HRP を含む反応溶液中に AOT ベシクルを準備し、そこにグルコースとアニリンを供給して、 $H_2O_2$  を生産、この  $H_2O_2$  を用いて AOT ベシクル上で PANI-ES の鑄型重合ができるかを調べた。重合後のベシクルを取り出し、顕微ラマンで PANI-ES に特徴的なピークを用いてベシクルをマッピングすると（図 2）、確かに AOT ベシクル上に PANI-ES が合成されていることが確認され、グルコース  $H_2O_2$  PANI-ES という原料からエネルギー分子合成、そして情報高分子合成への代謝経路が確立していることが確認された。そこで、このシステムに、AOT と Chol を供給することによりベシクルの成長・分裂が行われるかを確認した。ここで、PANI-ES を介して Chol を AOT ベシクルに供給するためにスルホ基を持つ両親媒性分子としてドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム(SDBS)をキャリアーとした SDBS と Chol の混合ミセルを導入した。このシステムでベシクルの成長を観察したところ、図 3 に示すように親ベシクルから子ベシクル、孫ベシクル、ひ孫ベシクルまで 4 世代にわたって自己生産することが確認された（第 4 世代まで自己生産するベシクルは 47 ベシクル中 21 ベシクルで 45%）。この時、ベシクルの面積は 1.8 倍程度まで増加するが体積は殆ど一定であるので、分裂を繰り返すごとにベシクルのサイズが小さくなる問題があり、持続的な自己生産ベシクルとは言えなかった。

##### (2) 再帰的な自己生産ベシクル系の構築

上に述べた自己生産ベシクルを再帰的なものにするためには、誕生した子ベシクルの体積を親ベシクルの体積まで膨潤させる必要がある。体積を膨潤させる最も単純な方法は、ベシクル内に浸透圧調整物質を封入することである。AOT ベシクル内にスクロースを封入すると、浸透圧差により外水相から水が侵入してベシクルの体積が増加するが（この時、外水相に含まれる AOT 分子も体積膨張に伴う膜張力の増加を解消するために AOT ベシクル膜に取り込まれる）、そのタイムスケールは 100 秒程度でありすぐに飽和してしまうので、持続的なベシクルの成長・分裂は期待できない。そこでベシクルの外水相には膜透過性の高い浸透圧調整物質フルクトース、内水相には膜透過性が低い浸透圧調整物質グルコースを封入し、グルコースの希釈効果をフルクトースの浸透効果によって補うことで持続的な体積膨張を実現した。図 4 には浸透圧調整を行った自己生産ベシクル系での成長・分裂過程を示しており、第 3 世代までベシクルの膜面積と体積が回復して成長 変形 分裂 体積回復のサイクルにより持続的なベシクルの再生産が行われていることを示している。



### (3) 代謝経路を備えたミニマルセルの数理モデルの構築

上記のように、本研究では図5に示すような代謝反応経路を持つ持続的に成長・分裂するミニマルセルを構築した。ミニマルセルを切り口にした生命システムの研究の特徴は、各素過程の物理的背景が明確であるので、ミニマルセルの振舞いをブラックボックスなしで記述できる点にある。我々のミニマルセルの反応系はグルコースから  $H_2O_2$  を合成する反応(R1)、 $H_2O_2$  を用いて AOT ベシクル上で情報高分子 PANI-ES を合成する反応(R2)-(R8)、PANI-ES が AOT 分子を取り込んで膜成長する過程(R9)に対して速度論的方程式を立て、PANI-ES 合成(図6a)と AOT ベシクル膜面積(図6b)の時間発展を求めて実験結果と比較した。その結果、フィッティングパラメーターなしで実験と数理モデルの予言(実線)が一致し、我々のモデルで予想した通りの代謝反応とベシクル成長の結合がこのミニマルセル内で進んでいることが確認できた。

今回、我々が構築したミニマルセルの最大の特徴は、特定の配列情報をもつ PANI-ES と AOT ベシクルの成長が連携していることである。そこで、この連携が成立するための条件として、情報高分子 PANI-ES が持つ情報量(シャノンエントロピー)とアニリンと AOT 間の水素結合の結合エネルギーの関係が熱力学第二法則を満たすかどうかを確認した。その結果 PANI-ES の配列が持つエントロピーは結合エネルギーに比べて十分小さく、特定の配列を持つことによるエントロピーの損失は結合エネルギーで十分補えることがわかった。そのような特定の配列を持つ PANI-ES は溶液中の AOT と特異的な相互作用により結合し、AOT は親水性を失って AOT ベシクル膜に取り込まれてベシクルの成長をもたらす(AOT 分子の化学ポテンシャルが PANI-ES との結合により増大し、膜中にある AOT の化学ポテンシャルとの差が生まれ、それによる AOT 分子の流れができる)。すなわち、AOT と PANI-ES の特異的な相互作用が、情報高分子とベシクル成長を連携する鍵であることがわかった。

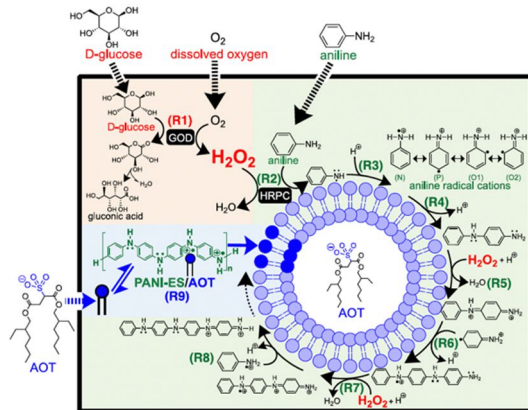


図5 本研究で実現したミニマルセルの代謝反応経路 (R1) ~ (R9)。

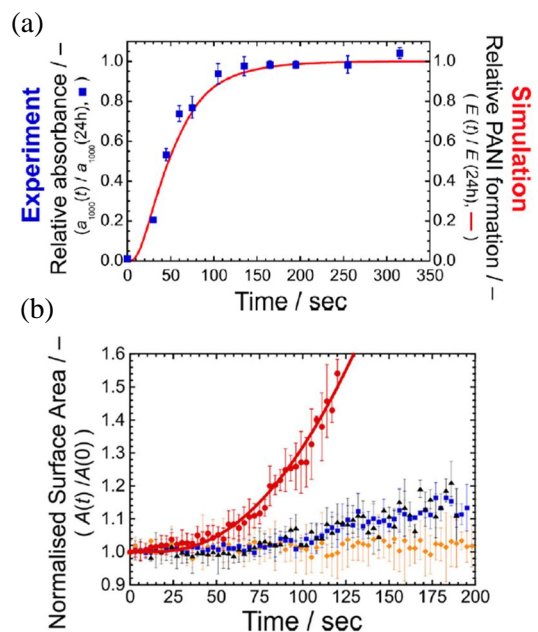


図6 数理モデルで予言した本研究のミニマルセルにおける PANI-ES 合成の時間発展(a)と AOT ベシクルの膜面積の時間発展(b)。実線は理論モデルの予言。(b)のオレンジ、黒、青のデータは PANI-ES の合成が出来ていない対照実験のデータ。

最後に、AOT 分子を取り込んだミニマルセルの変形・分裂・膨潤の数理モデルを作成した。ベシクルの成長で膜には AOT 分子とキャリアである SDBS ミセルに取り込まれた Chol が供給され流。この 2 種類の形状が異なる膜分子の膜への供給速度の差が作る膜の自発曲率が分裂をもたらす変形の原因であることを膜弾性理論をベースにして明らかにした。続くベシクルの分裂は、異なるガウス曲率弾性率を持つ 2 種類の膜分子 (AOT と Chol) の分布が負のガウス曲率を持つベシクルのネックと結合することによりネックが不安定化すること

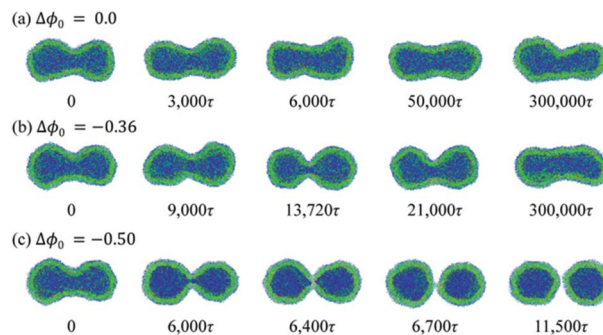


図7 AOT と Chol からなる 2 成分ベシクルの内膜と外膜の Chol 濃度  $\Delta\phi_0$  の違いによる変形と分裂の様子。

で引き起こされることを膜弾性理論をもとに説明し、計算機シミュレーションで再現した。図7は AOT と Chol を想定した 2 種類の膜分子の内膜と外膜の濃度差 (供給速度の差) によるベシクル変形と分裂の違いをシミュレーションしたもので、濃度差が大きくなると分裂が誘起されることを示している。また、持続的なベシクルの体積膨張についても浸透圧調整物質の膜透過性の違いを考慮した膨潤モデルで、実験で得られた体積膨張の再現に成功した。

以上のように、人工的な代謝経路を持つ持続的に自己生産するミニマルセルの構築に成功した。このミニマルセルは膜分子を合成する代謝経路までは再現していないが、外部から原料を取り込み、それを分解してエネルギー分子を合成、そのエネルギー分子を用いてベシクルを構成する膜分子と選択的に相互作用する情報高分子を合成し、その高分子を介して膜分子を認識して取り込みベシクルを成長・分裂させる、エッセンシャルな部分は再現している。このミニマルセルは、より生命システムに近い膜分子合成系を持ち、進化するミニマルセルの創成の基盤となるものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kurusu Minoru, Kissner Reinhard, Imai Masayuki, Walde Peter	4. 巻 75
2. 論文標題 Application of an enzymatic cascade reaction for the synthesis of the emeraldine salt form of polyaniline	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Papers	6. 最初と最後の頁 5071 ~ 5085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11696-021-01620-z	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 該当する
1. 著者名 Khunpetch Petch, Sakuma Yuka, Imai Masayuki, Kawakatsu Toshihiro	4. 巻 33
2. 論文標題 Birthing of a daughter vesicle in a model system for self-reproduction vesicles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 077103 ~ 077103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0052248	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Urakami Naohito, Sakuma Yuka, Chiba Toshikaze, Imai Masayuki	4. 巻 17
2. 論文標題 Vesicle deformation and division induced by flip-flops of lipid molecules	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 8434 ~ 8445
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1sm00847a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 KURISU Minoru, IMAI Masayuki, WALDE Peter	4. 巻 61
2. 論文標題 Growth and Division of Vesicles Coupled with Information Molecules	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Seibutsu Butsuri	6. 最初と最後の頁 378 ~ 381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2142/biophys.61.378	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Murakami Kei, Ebihara Ryuta, Kono Takuma, Chiba Toshikaze, Sakuma Yuka, Zihel Primož, Imai Masayuki	4. 巻 119
2. 論文標題 Morphologies of Vesicle Doublets: Competition among Bending Elasticity, Surface Tension, and Adhesion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1735 ~ 1748
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bpj.2020.09.030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Minoru Kurisu, Reinhard Kissner, Masayuki Imai, Peter Walde	4. 巻 75
2. 論文標題 Application of an enzymatic cascade reaction for the synthesis of the emeraldine salt form of polyaniline	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Papers	6. 最初と最後の頁 5701-5085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11696-021-01620-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Imai Masayuki, Sakuma Yuka, Kurisu Minoru, Walde Peter	4. 巻 18
2. 論文標題 From vesicles toward protocells and minimal cells	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 4823 ~ 4849
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1sm01695d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kurisu Minoru, Katayama Ryosuke, Sakuma Yuka, Kawakatsu Toshihiro, Walde Peter, Imai Masayuki	4. 巻 6
2. 論文標題 Synthesising a minimal cell with artificial metabolic pathways	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Communications Chemistry	6. 最初と最後の頁 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42004-023-00856-y	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 該当する

[学会発表] 計27件(うち招待講演 4件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Ryosuke Katayama, Minoru Kurisu, Yuka Sakuma, Masayuki Imai
2. 発表標題 Vesicle membrane growth coupled with the structure of polyaniline : toward reproduction and evolution of minimal cell
3. 学会等名 日本生物物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keiya Goto, Seiji Hatano, Noboru Nagata, Yutetsu Kuruma, Masayuki Imai
2. 発表標題 Effect of starvation on the glycolytic oscillation in yeast cells
3. 学会等名 日本生物物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗栖実, 今井正幸
2. 発表標題 Synthesizing a minimal cell with artificial metabolic pathways
3. 学会等名 第47回生命の起原および進化学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 馬場晶子 今井正幸 Ulf Olsson
2. 発表標題 配列情報とベシクル再生産の連携による原始進化
3. 学会等名 第47回生命の起原および進化学会学術講演会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Minoru Kurisu, Peter Walde, Yuka Sakuma, Masayuki Imai
2. 発表標題 Reproduction of Vesicles: The Bottom-up Design for Synthetic Minimal Cell
3. 学会等名 第60回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akiko Baba, Keidai Sato, Kazuki Yokoyama, Ulf Olsson, Masayuki Imai
2. 発表標題 プロトセルの適応度地形
3. 学会等名 第60回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗栖実, Peter Walde, 今井正幸
2. 発表標題 人工的な代謝系を持つミニマルセルの合成
3. 学会等名 細胞を創る研究会15.0
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬場晶子 今井正幸 Ulf Olsson
2. 発表標題 プロトセルの適応度地形
3. 学会等名 細胞を創る研究会15.0
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今井正幸
2. 発表標題 ソフトマターから見た生命システム：プロトセルから多細胞生物まで
3. 学会等名 武蔵野大学数理工学シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayuki Imai, Minoru Kurisu, Peter Walde
2. 発表標題 Reproduction of vesicle coupled with chemical reaction network
3. 学会等名 第59回日本生物物理学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井正幸
2. 発表標題 生命システムをソフトマターで再構築する
3. 学会等名 高分子計算機科学研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minoru Kurisu, Ryosuke Katayama, Yuka Sakuma, Peter Walde, Masayuki Imai
2. 発表標題 Recursive vesicle reproduction system coupled with template polymerization of aniline: toward synthetic minimal cell
3. 学会等名 細胞を創る研究会14.0
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Seiji Hatano, Noboru Nagata, Yutetsu Kuruma, Toshihiro Kawakatsu, and Masayuki Imai
2. 発表標題 Oscillatory Phenomenon in Energy Production Pathway of Living System
3. 学会等名 細胞を創る研究会14.0
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Minoru Kurisu, Ryosuke Katayama, Yuka Sakuma, Peter Walde, Masayuki Imai
2. 発表標題 Reproduction cycles of vesicle coupled with template polymerization: toward autonomous synthetic protocell
3. 学会等名 第59回日本生物物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akiko Baba, Keidai Sato, Kazuki Yokoyama, Ulf Olsson, and Masayuki Imai
2. 発表標題 Growth of Primitive Cell Membrane Coupled with Amino Acid Sequence
3. 学会等名 第59回生物物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Seiji Hatano, Noboru Nagata, Yutetsu Kuruma, Toshihiro Kawakatsu, and Masayuki Imai
2. 発表標題 Oscillatory Phenomenon in Energy Production Pathway of Living System
3. 学会等名 第59回日本生物物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗栖実, Peter Walde, 今井正幸
2. 発表標題 ベシクルの自己生産: 人工的なミニマルセルのデザイン
3. 学会等名 第46回生命の起源および進化学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬場晶子, 横山和樹, 佐藤啓大, Ulf Olsson, 今井正幸
2. 発表標題 アミノ酸配列と連携した原始生体膜の成長
3. 学会等名 第46回生命の起源および進化学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kurisu, P. Walde, and M. Imai
2. 発表標題 Sustainable reproduction of vesicles coupled with surface confined template polymerization
3. 学会等名 From Soft Matter to Protocell 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Kurisu, H. Aoki, T. Jimno, Y. Sakuma, S. Luginbuhl, P. Walde and M. Imai
2. 発表標題 Reproduction of Vesicles coupled with a Membrane Surface-Confined Template Polymerization
3. 学会等名 Molecular Origins of Life 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栗栖実, 青木春隆, 神保岳大, 佐久間由香, S. Luginbuhl, P. Walde, 今井正幸
2. 発表標題 膜面上の高分子合成と連携した持続的なベシクルの自己生産
3. 学会等名 日本生物物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 蜂谷優人, 羽鳥日, 鳥谷部祥一, Steen Rasmussen, 今井正幸
2. 発表標題 Growth of Informational Molecules on Vesicle Surface
3. 学会等名 日本生物物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Baba, K. Yokoyama, U. Olsson, M. Imai
2. 発表標題 Effect of Oligopeptides on Growth of Primitive Vesicles
3. 学会等名 日本生物物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 波多野誠司, 永田昇, 車兪澈, 川勝年洋, 今井正幸
2. 発表標題 Glycolytic Oscillation in Yeast Induced by Nutrient Depletion
3. 学会等名 日本生物物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栗栖 実, Peter Walde, 今井 正幸
2. 発表標題 膜成長と高分子合成が相互触媒的に連携した持続的自己生産系の構築
3. 学会等名 「細胞を創る」研究会13.0
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬場晶子、今井正幸、Ulf Olsson
2. 発表標題 原始生体分子が誘起するベシクルの成長
3. 学会等名 「細胞を創る」研究会 13.0
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 波多野誠司、永田昇、車兪澈、川勝年洋、今井正幸
2. 発表標題 栄養の枯渇が引き起こす酵母の解糖系振動現象
3. 学会等名 「細胞を創る」研究会 13.0
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学理学研究科物理学専攻ソフトマター・生物物理研究室 <a href="https://www.bio.phys.tohoku.ac.jp">https://www.bio.phys.tohoku.ac.jp</a>
---

## 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
研究分担者	川勝 年洋  (Kawakatsu Toshihiro)  (20214596)	東北大学・理学研究科・教授    (11301)	
研究分担者	佐久間 由香  (Sakuma Yuka)  (40630801)	東北大学・理学研究科・講師    (11301)	
研究分担者	浦上 直人  (Urakami Naohito)  (50314795)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授    (15501)	

## 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1件

国際研究集会 From Soft Matter to Protocell 2020	開催年 2020年～2020年
--	--------------------

## 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			
スイス	ETH			
スウェーデン	Lund University			
デンマーク	Southern Denmark University			