

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 13 日現在

機関番号：13301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24117007

研究課題名(和文)磁気感応運動マシナリーの構造機能相関

研究課題名(英文)Structure and Function of magnetotactic motility machinery

研究代表者

福森 義宏(Fukumori, Yoshihiro)

金沢大学・その他部局等・理事

研究者番号：60135655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 79,400,000円

研究成果の概要(和文)：磁性細菌は、ナノサイズの磁気オルガネラ「マグネトソーム」を用いて地磁気を感知し、地磁気に沿って遊泳する走磁性を示す。このような磁気感応細菌は、世界中の水環境中に広く分布しているが、その磁気感応機構の詳細は不明であった。本研究では、走磁性運動の定量化、生細胞イメージングによるマグネトソーム動態とべん毛回転運動の可視化と解析、高速原子間力顕微鏡による生細胞分子イメージングにより、MamK細胞骨格の機能解明を中心として、磁性細菌の磁気感応運動の分子機構を解析した。

研究成果の概要(英文)：Magnetotactic bacteria synthesize a nano-sized magnetic organelle termed the magnetosome, which they use to assist with their magnetic navigation in a specific bacterial motility called magnetotaxis. Magnetotactic bacteria are ubiquitous in aquatic environments in the world. However, the detailed molecular mechanisms of magneto-reception and magnetotaxis are still an enigma. Here, we focused on the function of MamK cytoskeleton, and analyzed molecular mechanisms of magnetotactic motility through the newly developed method for magnetotaxis quantification and the cutting-edge microscopic techniques, TIRF and high-speed AFM, for imaging dynamics of magnetosome and flagellum in living cells.

研究分野：生化学

キーワード：磁性細菌 細胞骨格 オルガネラ アクチン ベン毛 マグネトソーム 地磁気

1. 研究開始当初の背景

多くの生物が、磁気を感じることができることが知られている。生物の磁気感知機構の分子メカニズムはほとんど明らかにされていないが、その中でも磁性細菌は最も研究が進んでいる(雑誌論文⑩)。磁性細菌は、磁鉄鉱結晶・蛋白質・リン脂質膜で構成されるセンサー超分子複合体「マグネトソーム」を形成し、これを細胞の長軸方向に沿って直鎖状に配置する。その結果、本細菌は、地磁気の方に細胞の向きを固定でき、運動超分子複合体である「べん毛」を用いて磁気によって“動く(走磁性)”ことができる。地磁気は鉛直方向に傾いているため、北半球に生息する磁性細菌はS極に向かって移動し、生育に適した微好気環境を効率的に見出すことができる

(youtube 動画 参照 : <https://www.youtube.com/watch?v=TNgOjYmbwTA>)。このように、磁性細菌は磁気方向を「マグネトソーム」で感知し、それに基づき「べん毛」を用いて生体運動を行う。センサーマシナリーと運動マシナリー、2つの超分子マシナリーの連動によって複雑な生体運動を可能にしている。しかしながら、“走磁性”という現象の記載と、それに関わる遺伝子群の同定は行われているが、センサーマシナリーである「マグネトソーム」がどのように形成され、機能を発現するのか、どのようにして磁気シグナルが運動マシナリーに伝えられるのか、具体的なメカニズムは不明である。

2006年、研究代表者らは、マグネトソームが4つの微細構造(磁鉄鉱結晶、マグネトソーム小胞、粒子間物質、マトリクス)で構成され、それぞれ特異的な蛋白質が局在することを明らかにした(J. Bacteriol. 188: 3805-3812 (2006))。その後、2010年、研究代表者らは、世界で初めて高速原子間力顕微鏡(高速AFM)を用いてマグネトソームを生理的条件下で観察することに成功し、リン脂質膜小胞の外側に蛋白質層(マトリクス)があることを明らかにし、その機能に迫った(PNAS 107:9382-9387 (2010))。これらマグネトソーム局在蛋白質(約30種類)は、磁性細菌に特有で機能未知の蛋白質群であり、マグネトソームの形成と機能を担っている。従って、これらマグネトソーム局在蛋白質の機能解析することで、新奇かつ複雑な磁気感応運動マシナリーを解明することができる。

マグネトソーム局在蛋白質にはアクチンに似たMamK蛋白質が含まれている。研究代表者らは、MamKが*in vitro*で繊維状構造を形成し、細胞骨格として機能し得ることを報告した(J. Bacteriol. 189: 8737-8740 (2007))。この細胞骨格が、マグネトソームの細胞内における配置や動態、また磁気モーメントを細胞へ伝える役割を担っているというモデルが提唱されている。

2. 研究の目的

以上の研究動向より、MamK細胞骨格が、

マグネトソームの形成・機能発現の中心的役割を果たしており、具体的には、マグネトソームの細胞内の動的な空間配置のコントロールし、磁気センサーを形成すると同時に、磁気情報を運動マシナリー「べん毛」に伝達する働きも担っていることが期待される。このことから細胞骨格とセンサーマシナリー「マグネトソーム」、運動マシナリー「べん毛」の構造機能相関を明らかにすることで、磁気感応運動マシナリーの分子基盤を解明できると期待される。

本研究では、走磁性の定量化、最先端の顕微鏡技術を用いた生細胞イメージングによるマグネトソームの動態、べん毛運動の可視化と解析、高速AFMによる生細胞イメージングにより、磁気オルガネラの形成・機能発現機構の解明を目的とする。具体的には、生細胞においてセンサーマシナリー「マグネトソーム」、「MamK細胞骨格」、運動マシナリー「べん毛」の3つの超分子複合体を可視化し、その動態を観察し、いかにして磁気感応をなし得ているかを解析する。さらに、MamK細胞骨格の生化学的解析と高速AFMを用いた生理条件下での特性解析を行う。以上により細胞骨格がどのようにして、磁気センサーを形成・機能させるのか、明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 走磁性の定量化

新規の走磁性の定量的評価法としてmagnetic swimming assayを確立した。本法では、細菌の運動性の評価に用いられる軟寒天培地を用いたswimming assayを磁界中で行ない、培地中に磁場に沿って形成される楔形のハローの長さを比較することにより走磁性を評価した。

(2) マグネトソームの生細胞蛍光イメージング

マグネトソーム小胞に特異的に局在する膜蛋白質MamCと蛍光蛋白質GFPとの融合蛋白質を発現させ、マグネトソームを蛍光標識することで生きた磁性細菌内のマグネトソーム動態の生細胞イメージングを行った。広宿主域プラスミドを用いて、磁性細菌*Magnetospirillum magneticum* AMB-1細胞内にMamC-GFPの融合蛋白質を発現させた。細胞画分のウエスタンブロッティングによりMamC-GFPがマグネトソームに特異的に局在することを確認した。培養を行いながら、蛍光顕微鏡観察をするため、細胞をチャンバー内に固定した。MamC-GFPを発現させた*M. magneticum* AMB-1細胞を、ポリ-L-リジンでコートしたカバーガラスに付着させ、長時間観察による細胞の遊離を防ぐためジェランガムゲルにより細胞を固定した。液体培地で満たしたチャンバー内で、微好氣的に磁性細菌の培養を行いつつ24時間に渡って長時間蛍光タイムラプス観察を行った。観察には、全反射蛍光顕微鏡による斜光照明(HILO照

明) 法を用いた。

(3) MamK 細胞骨格蛋白質の高速 AFM 観察

MamK の分子特性を明らかにするため、高速 AFM を用いて *in vitro* での MamK 重合反応を観察した。単量体 MamK は、大腸菌細胞内で形成された MamK 繊維をアルカリ性緩衝液中で脱重合させ、塩析、イオン交換クロマトグラフィ、ゲルろ過することにより、精製した。単量体 MamK、Mg イオン、K イオンを含むリン酸緩衝液に、ATP を添加し、MamK が重合する様子を高速 AFM で観察した。

(4) 磁性細菌のべん毛運動の可視化

ビオチン・ストレプトアビジン結合を利用し、*M. magneticum* AMB-1 のべん毛に、Qdot ナノビーズを結合させることで、細胞両極にある極べん毛を蛍光標識した。べん毛を蛍光標識した細胞の遊泳運動を、レーザー光源と開口数が大きな高倍率のレンズを備えた斜光照明蛍光顕微鏡と、高感度、高時間分解能を有する EMCCD カメラを用いて、動画撮影し、べん毛運動を解析した。

(5) 高速 AFM による生細胞イメージング

AFM 観察には、液体培地中で培養した対数増殖期のグラム陰性細菌 (磁性細菌 *M. magneticum* AMB-1、大腸菌、光合成細菌 *Rhodobacter sphaeroides*) を用いた。これらの細菌細胞をポリ-L-リジンとグルタルアルデヒドで化学修飾したマイカ基板に生きたまま固定した。固定した細胞の生存は、生・死二重染色キット (LIVE/DEAD BacLight Bacterial Viability Kit) を用いて確認した。高速 AFM 観察は、液体培地中で行った。探針の長さは、約 1 μm のものを用い、0.5~1 fps で細胞の外膜表面の分子構造を観察した。

4. 研究成果

(1) 走磁性の定量化

新規の走磁性の評価方法として magnetic swimming assay を開発した。野生株と *mamK* 欠損株の走磁性を比較したところ、*mamK* 欠損株は野生株より短いハローを形成した。従来の走磁性測定法である光散乱法では *mamK* 欠損株と野生株との間に、表現型の差異は検出されない。そこで、*mamK* 欠損株においてハローの長さが短くなる原因を調べたところ、遊泳速度、磁鉄鉱結晶の大きさや形状に差異無かったが、対数増殖期に磁気微粒子の数が減少することがわかった。この結果は、*mamK* 欠損株では、マグネトソームの娘細胞への安定的な分配が行われていないことを示唆し、MamK 細胞骨格の新しい機能として論文発表した (雑誌論文⑩)。また、本法は MamK 以外のマグネトソーム蛋白質の機能解析への利用も期待できる。

(2) マグネトソームの生細胞蛍光イメージング

HILO 顕微鏡を用いたマグネトソームの生細胞蛍光イメージングの結果、細胞周期全体にわたるマグネトソーム動態を高時間分解能で動画観察することに成功した。これまでに、電子顕微鏡観察の結果から、マグネトソームの直鎖状配置は、MamK 細胞骨格繊維とマグネトソームとの相互作用により保たれることが提案されている。本研究では、生細胞蛍光イメージングにより細胞内のマグネトソームの動態をタイムラプス観察することで、生きた細胞内での MamK 細胞骨格の役割を調べた。

野生株と *mamK* 欠損株のマグネトソーム局在と動態を比較すると、野生株では、マグネトソームは、細胞中央に直鎖状に細胞周期を通じて固定されていたのに対し、*mamK* 欠損株では、マグネトソームは凝集体をつくり細胞内の偏った位置に存在するか、ランダムに分散し移動する様子が観察された。*mamK* 欠損株細胞内のマグネトソームの拡散定数を求めたところ、リボソームなどの細胞内を単純拡散する分子と同等であった。このことから、MamK 細胞骨格はマグネトソームを細胞中央に直鎖状につなぎとめることで、拡散によるマグネトソームの分散を防ぎ、安定に固定された効率的な磁気センサーとして機能させていることが明らかになった (論文投稿中)。微小な細菌細胞内のナノサイズのオルガネラは、大きな真核細胞のオルガネラと比較して、拡散による影響を強く受けることから、細胞骨格によるオルガネラの固定が、磁気センサーとしての機能発現に重要であると考えられる。

また、一つの親細胞から生じた娘細胞に受け継がれた MamC-GFP の蛍光強度を比較することで、マグネトソームの娘細胞への分配割合を調べた。その結果、野生株ではマグネトソームは、娘細胞にほぼ均等に分配されるのに対し、*mamK* 欠損株では、不均等に分配されることがわかった。MamK 細胞骨格は、娘細胞へのマグネトソームの均等分配にも必要であることが明らかになった。

次に、MamK の ATPase 活性のマグネトソーム細胞内配置における役割を調べた。ATPase 活性を持たない変異型 MamK (MamK^{E143A} または MamK^{D161A}) 発現株において、マグネトソームの細胞内動態を観察し、MamK の ATPase 活性がマグネトソームの細胞内配置に必要なかを調べた。変異型 MamK を発現させた細胞では、野生株に比べて、ランダムに移動するマグネトソームが増加した。この結果から、MamK の ATPase 活性は、マグネトソームの安定な直鎖状配置に必須であり、ATPase 活性を介した MamK 繊維の動態がマグネトソームの配置機構に関与していることが示唆された (論文投稿中)。

(3) MamK 細胞骨格蛋白質の高速 AFM 観察

MamK は、ATP 存在下で、MamK 単量体が重合することで細胞骨格繊維を形成する (J.

Bacteriol. 189: 8737-8740 (2007))。 (2)の結果から、MamK の ATPase 活性がマグネトソームの細胞内配置に必要であることが明らかになった。真核生物のアクチンでは、その ATPase 活性は、アクチン繊維に極性をもたらし、トレッドミルを行う動的な細胞骨格繊維の形成に必須である。MamK 繊維においても、トレッドミルによる繊維の動態がマグネトソームの配置に関わることが予想される。そこで、*in vitro* での MamK 繊維の動態を、高速 AFM を用いて観察し、MamK 繊維の分子特性を解析した。

高速 AFM は、溶液中での生体分子の動態をサブミリ秒の時間分解能とナノメートルの空間分解能で可視化することができる。精製した単量体 MamK は、ATP 存在下で重合を開始し、二重らせん構造の繊維を形成した。伸長時の繊維には重合の速い端(+端)と遅い端(-端)があり、MamK 繊維の重合には極性があることが示された。また、+端での重合と、-端での脱重合に駆動される MamK 繊維のトレッドミル運動を観察することに成功した。このことから、MamK は、アクチンと同様に、その繊維に極性を持ち、トレッドミルによる動的な繊維を形成することが示された(論文投稿準備中)。

(4) 磁性細菌のべん毛運動の可視化

磁性細菌は、マグネトソームを地磁気感知のための磁気センサーとして利用し、べん毛を用いて磁場に沿って遊泳する。*M. magneticum* AMB-1 は、細胞の両極に 1 本ずつ極べん毛をもつ。しかし、本細菌が遊泳時にどちらのべん毛を、どのように回転させて遊泳し、走磁性運動を行うのか、についてはこれまで不明であった。また、一般的な細菌のべん毛運動の研究において、片方の細胞極に 1 本だけべん毛をもつ単べん毛細菌や、周毛性のべん毛をもつ細菌のべん毛運動については、研究が進んでいるが、細胞の両極に極べん毛をもつ細菌のべん毛運動の報告は少ない。そこで、本研究では、*M. magneticum* AMB-1 のべん毛を蛍光標識し、走磁性運動時のべん毛回転運動の詳細を調べた。

本研究では、*M. magneticum* AMB-1 のべん毛を Qdot ナノビーズで蛍光標識し、EMCCD カメラとレーザー蛍光顕微鏡を用いてべん毛運動を動画撮影し、解析した。その結果、両極のべん毛の回転運動の観察に成功した。細胞が直進する際、進行方向に対して前方のべん毛は、細胞体の周りで時計回りに回転し、後方のべん毛は細胞体の外側に張り出し、反時計回りに回転することが明らかになった。すなわち、本細菌では、進行方向に対して前方のべん毛と後方のべん毛が、反対方向に回転していることがわかった。

前方、後方のどちらのべん毛の回転が、細胞の前進運動に寄与しているのだろうか。観察の過程で、前方のべん毛回転のみで遊泳する細胞や、後方のべん毛回転のみで遊泳する

細胞が稀に観察された。これらの細胞は、蛍光染色の過程で、どちらかのべん毛が障害を受け機能できなくなったものと考えられる。このような、前方または後方のどちらか一本のべん毛回転のみで遊泳する細胞は、いずれも直進することができていたが、その速度は、前後両方のべん毛を回転させて遊泳する細胞の遊泳速度のおよそ 3 分の 1 であった。このことから、本細菌が直進する際、前後両方の極べん毛の回転が共同して前進するための推進力を生み出すことが示唆された(論文投稿準備中)。これらの研究成果は、*M. magneticum* AMB-1 のべん毛回転運動の詳細を初めて明らかにしたものである。前方と後方のべん毛回転がどのようなメカニズムで制御されているのか、今後の研究課題となっている。

(5) 高速 AFM による生細胞イメージング

AFM は、主として精製した蛋白質やオルガネラ等を用いた *in vitro* 実験系で用いられるが、微小な細菌細胞での運動マシナリーの解析には、生きた細胞で分子構造動態を観察することが必須である。そこで、本研究では、高速 AFM を用いて、生きた細菌の表層構造を液体培地中で観察し、これまで電子顕微鏡などにより静止画像でのみ観察されてきた細菌の細胞表層構造とそのダイナミクスをナノオーダーの解像度でとらえることに初めて成功した。*M. magneticum* AMB-1 の細胞を化学修飾したマイカ基板に生きたまま固定した。基板に固定した細菌の細胞表層を、高速 AFM を用いて液体培地中で観察したところ、細胞の表層が網目状の構造体により完全に被われていることが明らかになった。精製した外膜において、AFM 探針を用いた微解剖実験を行ったところ、網目状構造は、ポリリン分子により構成されてこと、網目状構造は外膜表面をゆっくりとランダムに移動することが明らかになった。これらの結果は、新しい細菌外膜の構造を示すものであり、論文④として発表した。さらに、同様の構造は大腸菌や光合成細菌でも観察され、グラム陰性細菌に保存された外膜構造であることが示唆された(雑誌論文②③)。

(6) その他の研究成果

① マグネトソーム局在蛋白質の機能解析

磁気センサー「マグネトソーム」の形成機構を明らかにするため、MamP と呼ばれるマグネトソーム蛋白質に着目し、その機能解析を行った。その結果、MamP は対数増殖期にマグネトソーム内の磁鉄鉱結晶の成長に必須であること、磁鉄鉱の形成には MamP へのヘム c の結合が必要であることが示され、MamP は磁性鉱物の合成に関わる新奇のヘム蛋白質であることが明らかになった(雑誌論文④)。また、マグネトソームに豊富に局在する蛋白質 MamA が、磁鉄鉱結晶の形成に関わるマグネトソーム膜蛋白質 Mms6 と相互作用

用することを示し、マグネトソーム内の蛋白質間相互作用を始めて同定した(雑誌論文①)。これらの情報は、マグネトソーム形成の分子機構を解明するために重要である。

②新規磁性細菌の単離

磁性細菌の多様性を明らかにし、走磁性の生理的意義を解明するため新規の磁性細菌の単離培養を試みた。金沢市内の湖沼から、長さ約 13 μm 、直径約 8 μm の巨大な磁性桿菌 GRS-1 株(既知の磁性細菌で最大)を見いだした。本細菌は、 γ プロテオバクテリアに属し、数百個以上の磁鉄鉱結晶からなる長いマグネトソーム鎖を有し、また、細胞内にカルシウムを多量に蓄えていた。細胞極で数本のべん毛を束ね、これを用いて走磁性運動を行っている事がわかった(雑誌論文⑤)。観察が容易かつ大量の磁気微粒子を合成する GRS-1 を単離培養できれば、走磁性運動や磁気感応マシンナリーの解明への貢献が期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① Nguyen, H.V., Suzuki, E., Oestreicher, A., Minamide, H., Endoh, H., Fukumori, Y., Taoka, A. A protein-protein interaction in magnetosomes: TPR protein MamA interacts with an Mms6 protein. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 査読有、Vol.7、2016、pp.39-44.
- ② Oestreicher, Z., Taoka, A., Fukumori, Y. A comparison of the surface nanostructure from two different types of gram-negative cells: *Escherichia coli* and *Rhodobacter sphaeroides*. *Micron*, 査読有、Vol.72、2015、pp.8-14.
- ③ 田岡東、福森義宏 高速原子間力顕微鏡を用いたバクテリアの生細胞イメージング 化学と生物(農芸化学会誌)、査読有、Vol.53(5)、2015、pp.293-298。(表紙に採用)
- ④ Taoka, A., Eguchi, Y., Mise, S., Oestreicher, Z., Uno, F., Fukumori, Y. A magnetosome-associated cytochrome MamP is critical for magnetite crystal growth during the exponential growth phase. *FEMS Microbiol. Lett.* 査読有、Vol. 358、2014、pp.21-29.
- ⑤ Taoka, A., Kondo, J., Oestreicher, Z., Fukumori, Y. Characterization of uncultured giant rod-shaped magnetotactic *Gammaproteobacteria* from a fresh water pond in Kanazawa, Japan. *Microbiology*, 査読有、Vol. 160、2014、pp.2226-2234。(表紙に採用)
- ⑥ Jandaruang, J., Siritapetawee, J., Songsirithigul, C., Preecharram, S., Taoka, A., Dhiravisit, A., Fukumori, Y., Thammasirirak, S. Purification, Characterization, and Crystallization of *Crocodylus siamensis* Hemoglobin. *Protein J.* 査読有、Vol.33(4)、2014、pp.377-385.
- ⑦ Numoto, N., Nakagawa, T., Ohara, R., Hasegawa, T., Kita, A., Yoshida, T., Maruyama, T., Imai, K., Fukumori, Y., Miki, K. The structure of a deoxygenated 400 kDa haemoglobin reveals ternary- and quaternary-structural changes of giant haemoglobins. *Acta Cryst.* 査読有、Vol.D70、2014、1823-1831.
- ⑧ Sato, N., Ishii, S., Sugimoto, H., Hino, T., Fukumori, Y., Sako, Y., Shiro, Y., Toshi, T. Structures of reduced and ligand-bound nitric oxide reductase provide insights into functional differences in respiratory enzymes. *Proteins: Structure, Function and Bioinformatics*, 査読有、Vol.82(7)、2014、pp.1258-1271.
- ⑨ Noguchi, A., Ikeda, A., Mezaki, M., Fukumori, Y., Kanemori, M. DnaJ-promoted binding of DnaK to multiple sites on σ^{32} in the presence of ATP. *J. Bacteriol.* 査読有、Vol.196(9)、2014、pp.1694-1703.
- ⑩ 福森義宏、田岡東 磁性細菌オルガネラ「マグネトソーム」の構造機能相関の解明. *生物物理*、査読有、Vol.54(1)、2014、pp.11-14.
- ⑪ Sakaguchi, S., Taoka, A., Fukumori, Y. Analysis of magnetotactic behavior by swimming assay. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 査読有、Vol.77(5)、2013、pp.940-947.
- ⑫ Yamanaka, M., Ishizaki Y., Nakagawa, T., Taoka, A., and Fukumori, Y. Purification and characterization of coacervate-forming cuticular proteins from *Papilio xuthus* pupae. *Zoological Science*, 査読有、Vol.30(7)、2013、pp.534-542.
- ⑬ 福森義宏 アトモスフィア:「生化学実験」と「モノづくり」のイノベーション 生化学、査読有、Vol.85(11)、2013、pp.959.
- ⑭ Yamashita, H., Taoka, A., Uchihashi, T., Asano, T., Ando, T. and Fukumori, Y. Single-Molecule Imaging on Living Bacterial Cell Surface by High-Speed AFM.

Journal of Molecular Biology、査読有、
Vol.422、2012、pp.300-309.

- ⑮ Suzuki, H., Ikeda, A., Tsuchimoto, S., Adachi, K., Noguchi, A., Fukumori, Y., Kanemori, M. Synergistic binding of DnaJ and DnaK chaperone to the heat shock transcription factor σ^{32} assures its characteristic high metabolic instability: Implications for the heat shock protein 70 (Hsp70)-Hsp40 mode of function. J. Biol. Chem. 査読有、 Vol.287(23)、2012、pp.19275-19283.

[学会発表] (計 60 件)

- ① 田岡東、福森義宏 “The actin-like cytoskeletal protein MamK plays a role in positioning of magnetic organelles for bacterial magnetotactic motility” 第 54 回日本生物物理学会年会シンポジウム 2016 年 11 月 27 日 つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
- ② Taoka, A., Kiyokawa, A., Uesugi, C., Oestreicher, Z., Fukumori, Y. “The actin-like cytoskeletal protein MamK and its ATPase activity play a role in the positioning of magnetosomes” Magnetotactic Bacteria 5th International Meeting 2016 年 9 月 12 日 マルセイユ (フランス)
- ③ 田岡東、福森義宏「磁性細菌の遊泳運動—アクチン様細胞骨格の役割—」第 89 回日本細菌学会総会シンポジウム 2016 年 3 月 23 日 大阪国際交流センター (大阪府大阪市)
- ④ 福森義宏「脱窒と酸素呼吸に関する進化的考察」第 37 回分子生物学会年会シンポジウム 2014 年 11 月 25 日 パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)
- ⑤ 福森義宏 “Diversity and Evolution of Magnetotactic Bacteria”環境微生物系学会合同大会 2014 シンポジウム 2014 年 10 月 24 日 浜松アクトシティコンgresセンター (静岡県浜松市)
- ⑥ 田岡東、山下隼人、Z. Oestreicher、福森義宏「高速 AFM を用いた細菌表面構造の生細胞イメージング」ナノプローブテクノロジー第 167 委員会 第 76 回研究会 2014 年 10 月 23 日 キャンパスプラザ京都 (京都府京都市)
- ⑦ 田岡東、山下隼人、Z. Oestreicher、福森義宏「高速原子間力顕微鏡 (高速 AFM) で「みる」バクテリアの細胞表面」環境微生物系学会合同大会 2014 シンポジウム 2014 年 10 月 22 日 浜松アクトシ

ティコンgresセンター (静岡県浜松市)

- ⑧ Taoka, A., Uesugi, C., Oestreicher, Z. Morii, K., Kiyokawa, A., Fukumori, Y. “Fluorescence live-cell imaging for visualizing the subcellular dynamics of magnetosomes”4th International Meeting on Magnetotactic Bacteria 2014 年 9 月 15-18 日 リオデジャネイロ (ブラジル)
- ⑨ 田岡東、山下隼人、Oestreicher, Z.、福森義宏 「高速原子間力顕微鏡 (High-speed AFM) を用いた微生物細胞表面の可視化」日本農芸化学会 2014 年度大会シンポジウム 2014 年 3 月 30 日 明治大学生田キャンパス (神奈川県川崎市)
- ⑩ Fukumori, Y., Kondo, J., Taoka, A. “Newly isolated giant rod-shaped magnetotactic bacterium from fresh water pond in Japan”. American Society for Microbiology 113th General Meeting 2013 年 5 月 18-21 日 デンバー (米国)
- ⑪ Taoka, A., Sakaguchi, S., Fukumori, Y. “Functional analysis of actin-like cytoskeletal protein MamK associated with magnetosomes using swimming assay”. American Society for Microbiology 113th General Meeting 2013 年 5 月 18-21 日 デンバー (米国)

[その他]

ホームページ等

本研究の成果は以下のホームページで公開している (<http://pronet.s.kanazawa-u.ac.jp>)。

本研究で撮影した磁性細菌の運動に関する動画は、youtube 及び、新学術領域研究「運動超分子マシナリー」が、アウトリーチ活動として作成したビデオライブラリー「運動超分子マシナリービデオアーカイブ」「動く生き物大事典」で公開している。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福森 義宏 (FUKUMORI, Yoshihiro)
金沢大学・理事 (副学長)
研究者番号：60135655

(2) 連携研究者

田岡 東 (TAOKA, Azuma)
金沢大学・理工研究域自然システム学系・准教授
研究者番号：20401888