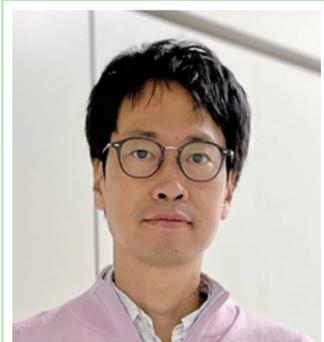


# 力学で生物ゆらぎの情報処理を理解して操作する 超省エネコンピュータや聴覚・触覚の生体内ICT開発を目指して



**岩城 光宏**  
(いわきみつひろ)  
未来ICT研究所  
神戸フロンティア研究センター  
バイオICT研究室  
主任研究員  
大学院修了後、大阪大学助教、特任准教授、理研にて副チームリーダーなどを経て、2022年にNICT入所。生物の力学情報処理の研究と応用に従事。大阪大学招へい准教授（兼務）。博士（理学）。

これまでの生物の研究から、脳神経ネットワーク等が進化の過程で電氣的、分子的、力学的な情報通信を利用して省エネルギーで複雑な情報処理を行っていることが明らかになりました。これらの自然の情報処理システムを理解し応用することで、社会に革新をもたらす可能性があります。そこで私たちは、筋肉のような力学通信を利用した情報処理システムや分子レベルの弾性部品（ナノスプリング）の設計・分析を通して、超省エネルギーなシステム開発や聴覚・触覚の生体内ICT開発を目指しています。

## ■背景

18世紀から始まった電氣的な情報通信技術や現代の光通信技術などは、電話、テレビ、コンピュータ、そしてインターネットにより現代社会で不可欠な発展を遂げました。一方で、生物に注目すると、脳神経ネットワークが利用する電

氣的な情報通信、分子を介したやりとり（分子通信）及び機械的な力を介した情報通信方法（力学通信）が数十億年かけて進化し、極めて少ないエネルギーで複雑な情報処理を実現しています。例えば、人間の脳はたかだか20 W程度の消費エネルギーでシステムを維持し、複雑な情報処理をしていると言われていいます。これらの自然のICTを理解し、新たな情報処理コンセプトを生み出したり、自然のICTシステム内部を設計・操作する技術は未開拓の分野であり、社会を変革する大きな可能性を秘めています。自然のICTの特徴の一つは、生物が利用できるエネルギーが極めて小さいため、システム内部の熱的なゆらぎを抑え込むことができず、情報処理が複雑で確率的なプロセスとなる点です。現在、脳の確率的な情報処理の研究が進められていますが、多数の神経細胞がネットワーク化された超複雑なシステムであるため、全容はまだ明らかになっていません。そこで私たちは、生命の階層の中でも比較的小規模で、近年、設計が可能になってきた生体分子システムに焦点を当てて研究を進めています。

## ■生体分子システムの設計と内部動作解析

生体内では多様な生体分子が自己集合してシステムを構成し、その内部で力学的な情報のやり取りを行っています。例えば、動物が普遍的に持っている筋肉には、最小単位構造として存在するサルコメアと呼ばれる分子システムがあり、生物分子モータ（ミオシン）がお互いに力学通信を行いながら協調的に動作しています。個々のミオシンは熱的にゆらいで

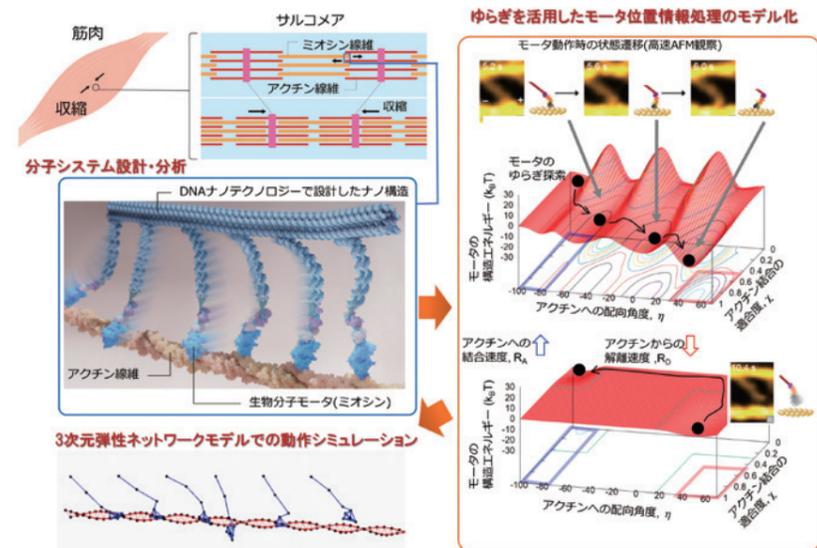


図1 生体分子システムの設計と動作シミュレーション

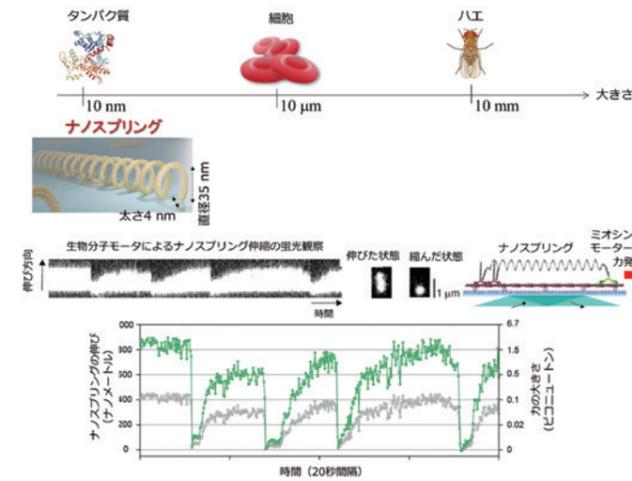


図2 ナノスプリングと生命の各階層の大きさとの比較（上）及び聴覚で働くモータ（ミオシンVI）1分子によるナノスプリングの伸縮の蛍光観察と力の検出（下）

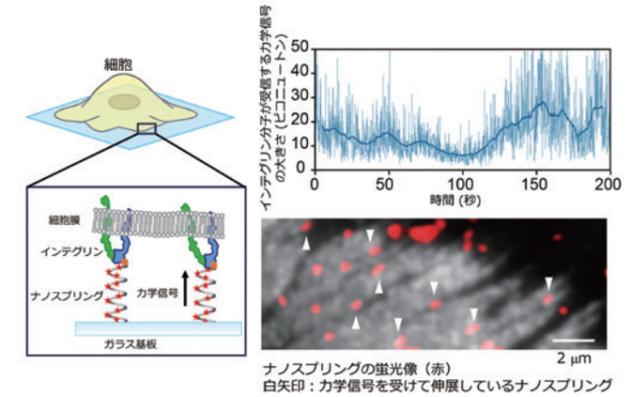


図3 細胞膜上のインテグリン分子が受信する力学信号の超高感度検出

おり、システム内外と力学通信をしながら自身の位置情報を柔軟に処理しています。このため、サルコメアは力学通信を利用した情報処理を行うインテリジェントなマイクロロボットとも言えます。また、熱的なゆらぎを活用して運動するので、人工的なアクチュエータでは実現できないレベルでの省エネルギー性を実現しています。この仕組みを理解し応用するために、私たちは、DNAナノテクノロジーを活用してサルコメアのような分子システムを人工的に設計し（図1）、設計したシステムの内部動作を世界で初めて精密に観察する技術を開発してきました<sup>[1]</sup>。同時に、内部動作を定量的に再現したシミュレーションモデルも構築し、動作予測や情報物理の視点から解析することで、自在な操作や超省エネルギーな情報処理の理解にもつなげる努力をしています。

## ■力学通信を可視化するナノスプリングの開発

2021年のノーベル生理学・医学賞は、生物が力学情報を受信して応答する素子となるメカノセンサ分子（Piezo）の発見に授与されました。ミオシンを含む生物分子モータもメカノセンサ分子であり、近年、多種多様な分子がメカノセンサとして機能していることが明らかになっています。しかし、これらの分子がどのような力学情報をやり取りしているのかを可視化するのは難しく、力学通信を利用

した情報処理の理解が遅れています。そこで私たちは、生体分子の大きさ（10 nm程度）に近い世界最小のコイル状バネ（ナノスプリング）を設計し、分子同士や細胞と細胞外環境をバネでつないで、その伸縮の変動や向きを高感度に検出する技術を開発しました（図2）。DNA分子を組み上げてボトムアップ的に作成するため、フォトリソグラフィーなどの既存技術で作成するバネの数十倍の微細化に成功しています。生体材料ですので生体適合性も高く、生体分子システムや生体内へ導入しても毒性なく組み込めると期待しています。実証実験として、細胞が接着する足場の硬さを検知するインテグリン分子にナノスプリングを連結して観察すると、インテグリン1分子を介して細胞が受信する微小な力の大きさと向きが秒オーダーで変動している様子を世界で初めて捉えることができました（図3）<sup>[2]</sup>。ノイズとなる熱ゆらぎと大差ない力学信号を受信して処理しているため、分子システムや細胞の内部動作解析と合わせることで、確率的な動作をベースとした超省エネ情報処理の理解が進むと期待しています。

## ■今後の展望

私たちは自然のICTの中でも、消費エネルギーや効率の評価が容易な、力学通信を利用した情報処理システムに注目し、研究を行っています。筋肉のような

システムの設計と分析から超省エネ情報処理の動作原理を理解し、自在な操作につなげることで、様々な社会実装の新しい可能性を追求しています。例えば、動作原理の理解から超低消費電力のコンピュータ設計のヒントを得たいと考えています。また、生物の持つ五感のうち、聴覚と触覚は生体外部の力学的な信号を検知・処理して脳に伝達しています。自在に制御可能なサルコメアのようなマイクロロボットを聴覚・触覚システムに組み込むことで、特定の信号を増幅して感度を高めたり、病気や老化によって鈍った感覚機能を補助する可能性があります。さらに、ナノスプリングは力学信号を蛍光シグナルに変換するフォースセンサとして機能するため、生体内に組み込んで蛍光シグナルを検出することで、将来的には生体内の硬さ情報をモニタリングすることが可能になると期待されます。皮膚組織、血管、がん組織などの硬さは老化や悪性度との相関が高く、体内の状態を診断する新しい生体内ICT技術となる可能性を秘めています。

## 参考文献

- [1] FUJITA, K., OHMACHI, M., IKEZAKI, K., YANAGIDA, T., IWAKI, M., "Direct visualization of human myosin II force generation using DNA origami-based thick filaments," Commun. Bio. 1, 2, 437, 2019.
- [2] MATSUBARA, H., FUKUNAGA, H., SAITO, T., IKEZAKI, K., IWAKI, M., "A programmable DNA origami nanospring that reports dynamics of single integrin motion, force magnitude and force orientation in living cells," ACS Nano, 17, 13185-13194, 2023.