


情報通信研究機構の研究グループ等は、DNA を材料としたナノスプリングを開発し、細胞の超高感度計測に成功した。本計測技術により、生物の機械的な情報処理メカニズムの解明が大きく前進することに加え、今後、超省エネに寄与する新原理の情報処理システムの開発に繋がることが期待される。

企業名	 国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）		
研究分野	情報通信技術の研究開発を基礎から応用まで統合的な視点で推進し、大学、産業界、自治体、国内外の研究機関などと連携して、研究開発成果を広く社会に還元し、イノベーションを創出することを目指す。		
所在地	〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4丁目2-1		
TEL	042-327-7429	URL	https://www.nict.go.jp/
資本金	—	在籍者数	1,337名（2023年4月現在）

【本技術の概要】

国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT（エヌアイシーティー）、理事長：徳田 英幸）の岩城光宏主任研究員らの研究グループは、国立研究開発法人理化学研究所（理研、理事長：五神 真）と共同で、DNA（デオキシリボ核酸）を材料に世界最小のコイル状バネ（ナノスプリング）を設計し、細胞への“微小な力”の超高感度計測に成功した。今回開発したのは、細胞へのノイズレベルの“微小な力”の大きさと向きを、サブピコニュートン（10⁻¹²ニュートン）精度で検出する計測技術で、これにより、生物の力学情報処理メカニズムを解明することが可能となった。まだ詳しくわかっていない「脳や細胞における超省エネの機械的な力の情報処理メカニズム」を解明することができれば、全く新しい原理によるコンピューターの開発等につながると思われる。今後、超省エネで電力消費の少ない全く新しい原理の情報処理システムを実現する新たな指針を得ることが期待される。

なお、本成果は、2023年7月3日（月）10:00（日本時間）に、米国科学雑誌「ACS Nano」に掲載された。

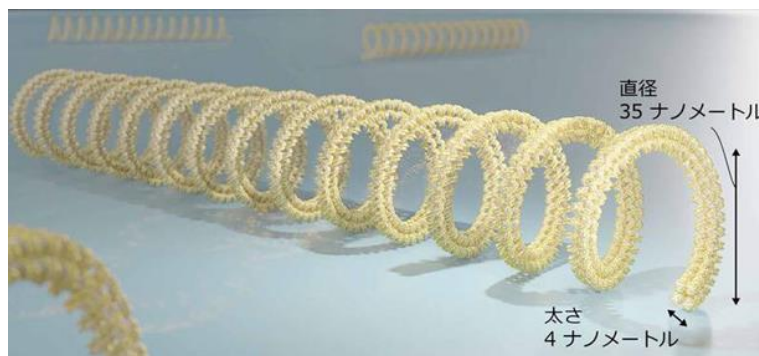


図1. DNA を材料に設計したタンパク質サイズの世界最小のコイル状バネ（ナノスプリング）の模式図

引用元：<https://www.nict.go.jp/press/2023/07/03-1.html>

【背景】

生物は、化学分子や電気のような神経伝達物質で互いに情報のやり取りを行い、現状のコンピューターよりも少ないエネルギーで複雑な情報処理を行っていることが知られている。近年、機械的な力を信号として情報のやり取りを行っていることがわかってきた。この“微小な力”を高感度に検出し、超省エネな力学情報処理をしていると考えられているが、そのメカニズムはわかっていない。その理由は、細胞が検知している“微小な力”を高感度で計測する技術が開発されていないと考えられ、既存の計測技術では、微小な力の時間的な変動を正確にとらえることができないこと、力の測定レンジが狭く、力の大きさと同時に向きの情報を高い時間分解能で得ることができないこと、などの問題があった。

【今回の成果】

本研究では、DNA を材料にしてタンパク質サイズの世界最小のコイル状バネ（ナノスプリング）を設計し（図 1 参照）、細胞とガラス基板の間に連結させて（図 2 参照）、細胞への“微小な力学情報（大きさと向き）”をサブピコニュートン（ 10^{-12} ニュートン）精度で精密計測することに世界で初めて成功した。

直径 35 ナノメートル（ナノは 10 億分の 1 分）、長さ 200~700 ナノメートルのナノスプリングを設計し、その一端を細胞膜表面に存在するインテグリン^(注1)に連結し、もう一端を細胞外部のガラス基板に連結した。両者の間で力学的な情報のやり取りが起こると、ナノスプリングが伸展もしくは短縮するのが観察され、伸展の向きの変化も同時に観察することができた。さらに、これらの変化をナノメートル精度で精密に画像解析する手法を新たに開発したことで、力の大きさと向きの時間的な変動を同時に計測することができた（図 2 参照）。ナノメートル解像度での計測が実現したことで、ノイズレベルの“微小な力”（~1 ピコニュートン）も含めた動的な変動を容易に検出することが可能になった。

（注 1）細胞表面に存在するタンパク質で、細胞外のコラーゲンなどに直接、結合することで力学情報を受感し、細胞内部の様々な分子に情報を伝達する役割を担う。

【ナノスプリングを用いた細胞の機械的な力の計測例】

生物の機械的な情報処理のメカニズムを解明するためには、細胞の微小な機械的な力を測定することが不可欠である。本研究では、ナノスプリングを用いた計測例を開発した（図 2 参照）。ナノスプリングの両末端を 1 本鎖 DNA とし、これらと相補的な配列を持つ 1 本鎖 DNA を介して、インテグリン結合分子（RGD ペプチド, cRGDFK）およびガラス基板への接着分子（ビオチン）をナノスプリングにつなげた。これにより、インテグリンとガラス基板の間をナノスプリングで連結し、蛍光観察によって伸展長を精密計測することで、ピコニュートンの“微小な力”の変動が世界で初めて検出できた。（白矢印のバネが伸展している（図 2 右下写真内）。）

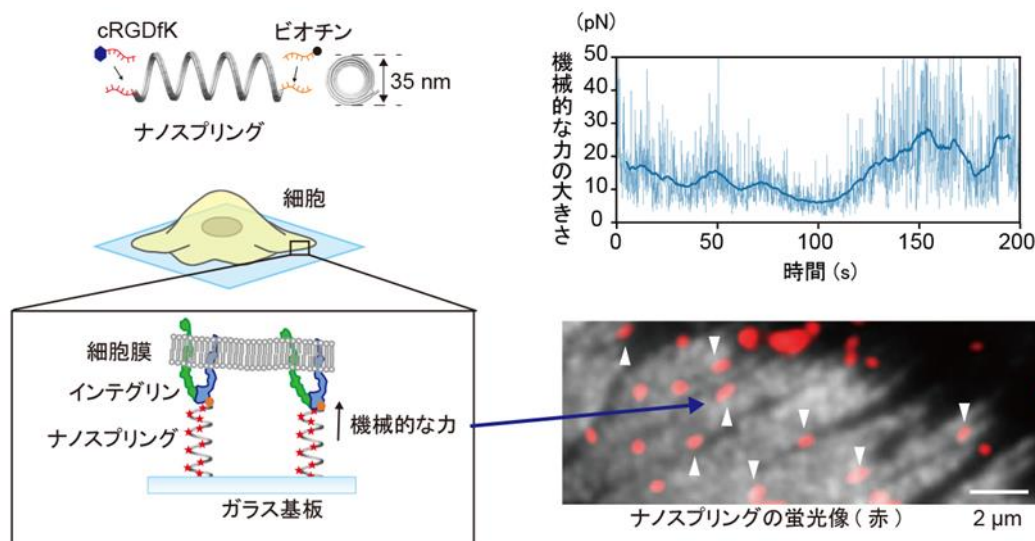


図 2. ナノスプリングを用いた細胞の検知する機械的な力の計測例

引用元：<https://www.nict.go.jp/press/2023/07/03-1.html>

【今後の展望】

細胞内部では、様々な接着斑形成分子やアクトミオシン^(注2)などが動的に揺らいで自己集合と離散を繰り返しながら、インテグリンを介した“微小な力学信号”を検出・情報処理し、細胞運動や遺伝子発現の調整などを行っていることがわかってきている。このように、システムが内包する“ゆらぎ（ノイズ）”を利用しながら情報処理する仕組みは、既存のコンピューターとは全く異なる原理であり、生物の超省エネな情報処理を実現するための重要な特徴であると考えられる。

既存のコンピューターは、ノイズを抑制してシステムを制御するため、情報処理に大きなエネルギーを必要とする。近年の情報処理量の増大やシステムの複雑化により、必要な電力量は増加している。その対応が喫緊の課題の一つとなっている。今回の技術開発を通して生物の力学情報処理の仕組みを学ぶことで、超省エネで電力消費の少ないノイズロバスト^(注3)な情報処理システムを実現する新たな指針を得ることが期待される。

(注2) 力を発生するミオシンモータータンパク質と細胞骨格となるアクチンフィラメントの複合体のこと。筋細胞内では筋収縮を引き起こし、その他の細胞種でも細胞運動や接着力を発生させる。

(注3) 情報処理や機械の動作に不要となる雑音（ノイズ）の影響を受けにくいという意味。

【各機関の役割分担】

- ・ 情報通信研究機構: ナノスプリングの設計、音響力顕微鏡でのバネ特性の評価、実験データの解析、画像解析プログラム開発
- ・ 理化学研究所: 細胞実験とナノスプリング蛍光観察の実施、実験データの解析

【論文紹介】

掲載誌: ACS Nano

DOI: 10.1021/acsnano.2c12545

URL: <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c12545>

【有望技術紹介 No.98】

論文名: A programmable DNA origami nanospring that reports dynamics of single integrin motion, force magnitude and force orientation in living cells

著者: 松原瞳、福永裕樹、齊藤崇啓、池崎圭吾、岩城光宏

なお、本研究の一部は、国立研究開発法人日本医療研究開発機構（AMED）革新的先端研究開発支援事業「メカノバイオロジー機構の解明による革新的医療機器及び医療技術の創出」の一環として、JP20gm5810022 の助成、及び科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業（CREST）「多細胞間での時空間的相互作用の理解を目指した定量的解析基盤の創出」の一環として、JPMJCR2023 の助成を受けて行われた。

専門家による目利きコメント

今回開発された DNA を材料に用いたナノスプリングにより、細胞への“微小な力”の超高感度計測に成功した。これにより、生物の力学情報処理の仕組みを理解することで、既存のコンピューターとは異なる原理による、生物の超省エネな情報処理技術を手にすることが期待される。

お問い合わせ	<p><本件に関する問合せ先> 国立研究開発法人情報通信研究機構 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 岩城 光宏 E-mail: iwakim@nict.go.jp</p>
	<p><広報（取材受付）> 国立研究開発法人情報通信研究機構 広報部 報道室 E-mail: publicity@nict.go.jp 国立研究開発法人理化学研究所 広報室 報道担当 Tel: 050-3495-0247 E-mail: ex-press@ml.riken.jp</p>