nature ダイジェスト

科学が深まる、世界が広がる

01
2018

「人工知能」時代と人間の仕事

02 雷による光核反応を検出！
04 太陽系外からの初めての使者
08 4種の塩基置換に対応した「一塩基エディター」
07 FROM 日経サイエンス
食物の脳作用

nature.com/naturedigest

Nature Café Report Vol. 19

芸術はなぜ人の心を動かすのか

音楽と医学の学問的融合の発展を目指して

果たして、美しい音楽とは何なのか。人は音楽からどのように影響を受けるのか。また、このような問いを科学的に探究することは、音楽家や科学者、ひいては社会にとって、どのような意味があるのか。東京藝術大学の第 6 ホールで開催された第 19 回 Nature Café では、音楽家と科学者、精神科医らが一堂に会し、音楽と医学の交わりで生まれる「化学反応」について論じた。パネルディスカッションのモデレーターは *Nature Human Behaviour* のチーフエディター、スタボローラ・コースタ。

共 催　東京藝術大学 AMS プロジェクト

協 賛　東京藝術大学 130周年 Tokyo University of the Arts 130th Anniversary　nature human behaviour

2つの専門分野を融合させる絶好の機会としたい――今回のパネリストで東京藝術大学学長 澤和樹（さわかずき）氏は、開会の辞でこう語った。今回の Nature Café は、学際的な活動を推進する東京藝術大学の「AMS (Arts Meet Science)」プロジェクトと Nature Café との共催で、プログラムには、弦楽五重奏やピアノ演奏なども含まれており、贅沢な構成であった。

音楽と科学が結び付くことの意義

Café は、2人の専門家による問題提起の講演から始まった。最初に、精神科医の近藤伸介（こんどうしんすけ）氏（東京大学医学部附属病院精神神経科）が、音楽には多様な治療効果があることを紹介した。音楽に「心が癒やされる」とはよくいわれることだが、それだけではない。例えば、脳卒中（脳血管障害）の後遺症に、体の左側半分の空間に注意が向かなくなる半側空間無視（はんそくくうかんむし）という症状がある。左側を意識するように仕向けるリハビリテーションが必要で、その1つに、ピアノなどの鍵盤楽器で、音階を逆に弾くという方法があるそうだ。ドシラソファミレドという音の並びが刺激となり、左側を自然に意識するようになるという。

その他に、話しかけてくる相手に気付くことが困難という障害がある自閉スペクトラム症の人に、太鼓などをたたいて気付かせる方法がある。大きな音に反射的に視線を向けるという本能的な反応が人間にはあるので、それを利用したものだという。

近藤氏は、バッハの「平均律クラヴィーア曲集」を聴くと眠りにつけるという患者の例も紹介した。過去の被虐によるトラウマから不眠を訴える患者だが、比較的単純な音が淡々と続くこの曲により安心感を得られるのではないかと近藤氏は推測する。そして、音楽がこのような治療的な作用をもた

らす仕組みを詳しく調べていくことは、臨床上も非常に価値があるのではないかと問題提起した。

次の講演者、西川伸一（にしかわしんいち）氏（京都大学名誉教授）は、音楽を科学的に研究することは音楽家にとってどのような意味があるかと問うた。西川氏は、長年、発生・再生医学を研究してきた科学者であるが、クラシック音楽の熱心なファンであり、AMSの発起人でもある。

音楽家が他者に「私の音楽を理解してもらいたい」と考えたときに科学が役に立つはずだと、西川氏は言う。芸術における美しさの判断は、快・不快といった感情と、記憶・経験・理解といった脳の機能が統合された結果の反応だが、その詳しい仕組みに関して、脳科学や心理学の分野で研究が進んでいると続けた。この問題は、パネルディスカッションでも、澤氏とトーマス・コーンバーグ氏（カリフォルニア大学サンフランシスコ校 生化学・生物物理学教授）を加えて議論が交わされた。

（左から）スタボローラ・コースタ、西川伸一氏、澤和樹氏、近藤伸介氏、トーマス・コーンバーグ氏

科学的研究はまだ始まったばかり

音楽が脳にどのような影響を及ぼすかについては、科学的にどこまで解明されているのだろう。西川氏は次のように前置きをして、話を始めた。視覚を主にした美術分野における研究はよく進んでいる。しかし、音楽に関しては研究が始まったばかりであり、*Nature Human Behaviour*などの学術誌をチェックすることは欠かせないだろう。例えば、音楽のリズムの刻み方が文化として生まれていく仕組みの解析といった興味深い論文を目にすることもあるからだ。西川氏は説明を続けた。人間にとって、外界の刺激の受け取りや、外界への発信のチャネルの１つが音楽だと捉えられる。例えば左脳の障害（脳卒中など）により、言語というチャンネルが機能しなくなっても、右脳が機能していれば音楽のチャネルは有効かもしれない。

会場からは、脳卒中などの後遺症に関連した質問が多く出た。脳出血後、好きだった音楽に興味を失い雑音がうるさく感じられる（聴覚過敏）という方からの質問に対して、近藤氏は、自分の注意が向けられていない音は雑音として排除する働きが普通は備わっているのだが、それが、脳出血で障害されてしまったのかもしれないと説明した。

近藤氏はさらに、双極性障害の患者に処方される薬を服用すると音程が半音程度低く感じる現象が起こることについて言及した。おそらく内耳での音（ピッチ）の認識と、脳の中での音のマッピングとの間の過程でズレが生じてしまうのだろう。これは絶対音感がある人には耐えがたい症状である。

音楽家が広い視野を持つために

パネルディスカッションに参加したコーンバーグ氏は音楽家であり、生物学者である。米国のジュリアード音楽院でチェロを５年間学んだ後に、生物学の大学院に入り、科学者になった。中等・高等教育の過程で、音楽と科学を同時に、かつ専門的に学ぶのは難しいのが実情だが、音楽と科学は決してつながらないものではないと指摘する。実際に、音楽家として成長するために、音楽以外のさまざまな世界に触れて思考の幅を広げようと努めている音楽家は多いそうだ。コーンバーグ氏は、そのような音楽家の例として、ヨーヨー・マ氏を挙げた。世界的なチェリストであるマ氏は、人類学をはじめさまざまなバックグラウンドを持つ。今回のCafé に寄せたビデオレターで、音楽と科学には共通項が多く、真実の探求とその証明、人間や自然を忍耐強く分析する力などがあると指摘した。

音楽家にとって、特に藝大の学生にとって、科学者と接点を持つことは貴重な経験であろうと澤氏も考える。自分の専門領域外に目や耳を向けることが、音楽家としての幅を広げることにつながるのではないか。また、就職を考えたときにも、一般社会での活躍の場を広げることにつながるだろうと澤氏。

閉会の挨拶として、藝大AMSプロジェクトのコーディネーターである谷口賢記（たにぐちまさのり）氏が、日本においても学校教育の中で芸術と科学の両方を同時に専攻するのは難しく、このCafé が素晴らしい音楽と科学の交流の場となったことをうれしく思うと締めくくった。

文：藤川良子（サイエンスライター）

nature ダイジェスト

#01

JANUARY 2018

nature.com/naturedigest

2018 年 1 月 1 日発行
© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.
掲載記事の無断転載を禁じます。

COVER IMAGE: DONALD IAIN SMITH/BLEND IMAGES/GETTY

NEWS FEATURE

AI 時代の仕事と雇用

デジタル技術の進歩は著しく、特に、人工知能（AI）と呼ばれる機械学習システムの進歩は、世界の労働者のあり方に革命をもたらすといわれる。AI が良き相棒となるか人間の雇用を奪うかをはじめ、デジタル技術が人間の仕事にどんな影響をもたらすか、3 つの観点で検証した。

NEWS IN FOCUS

02 雷による光核反応を検出！
大気中で雷によって原子核反応が起こり、放射性同位体や陽電子を生成する明確な証拠が初めて得られた。

05 実験者の性別がケタミンの作用を左右する？！
マウスへのケタミン投与実験で観察される抗うつ作用は、投与者が男性でなければ表れないという報告がなされた。

10 米国 FDA の諮問委員会が遺伝子治療薬の承認を勧告
病因となる変異を標的にする遺伝子治療薬が、米国で初めて承認される運びとなりそうだ。

11 光子も「クーパー対」に相当する対に
光子が、超伝導での「クーパー対」と共通する仕組みにより、物質中である種の対になるとみられることが分かった。

13 木星を深部から揺さぶる嵐
NASA の木星探査機ジュノーは、53 日周期の長楕円軌道から観測を行い、木星の磁場がまだらなことや、両極にサイクロンがいくつもあることを発見。謎が深まっている。

14 TMT建設にゴーサイン

無効となったマウナケア山での 30m 望遠鏡（TMT）建設に対し、地元当局は再審査により新たな建設許可を出した。

15 国際単位系（SI）が変わる

1960 年に創始されて以来の最大規模の見直しが進められている国際単位系。単位は定数との関係で定義され、早ければ 2019 年 5 月から 4 つの基本単位が改定となる。

NEWS & VIEWS

30 衛星を使った量子鍵配送と量子テレポーテーションに成功

量子通信での信号の伝送距離は数百 km が限界だったが、中国の研究チームが人工衛星を使って限界を突破した。

32 ハチを誘引するために花が編み出した「青色光の輪」の正体

花弁表面には種を超えて同程度の不規則性があることが分かった。このナノ構造は、散乱光との作用でハチの目を引く青色光の輪を生み、進化的に保存された戦略とみられる。

NEWS SCAN

07 レジを変えて食習慣を変える / 食物の脳作用

EDITORIAL

35 遺伝子発現を調節する遺伝的影響をヒト個体レベルで明らかに

HIGHLIGHTS

37 2017 年 11/2 ～ 11/30 号

EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY/M. KORNMESSER

NEWS IN FOCUS

太陽系外からの初めての使者

奇妙な軌道で、猛スピードで地球に接近して遠ざかっていった未知の天体は、太陽系外から飛来した恒星間天体と分かった。

VCHAL/ISTOCK/GETTY IMAGES PLUS/GETTY

NEWS IN FOCUS

4 種の塩基置換に対応した「一塩基エディター」

CRISPR 系の改変によって、DNA でも RNA でも個々の塩基を精密に書き換えられるようになり、変えられる塩基の幅も広がった。

ILLUSTRATION BY PAWEŁ JONCA

NEWS FEATURE

ゾンビ細胞を退治して若さを保つ

自ら消滅しない老化細胞の除去が強力なアンチエイジング戦略になることがマウスで明らかになり、ヒトでの試験が始まっている。

雷による光核反応を検出！

大気中で雷によって原子核反応が起こり、放射性同位体や陽電子を生成する明確な証拠が初めて得られた。

上空で発生した雷が引き金となって、放射性同位体である炭素14（^{14}C）や、電子の反粒子である陽電子が生成されることは、理論的に予測されていた。このたび、京都大学の宇宙物理学者の榎戸輝揚（えのとてるあき）らは、その明確な観測的証拠を得たことを、*Nature* 2017年11月23日号481ページで報告した[1]。

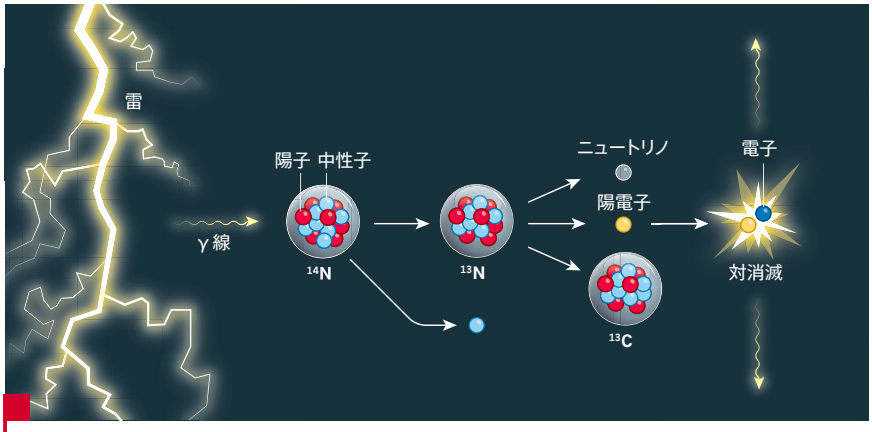
1990年代以降、天文衛星によって地球からのγ線フラッシュが検出されている。このγ線フラッシュは雷に起因すると考えられている。榎戸らはこのような雷雲や雷による高エネルギー大気現象を観測しようと、新潟県柏崎（かしわざき）市をはじめとする北陸の日本海沿岸各地にγ線検出器を設置した。日本海沿岸の冬の雷は強力なことで有名で、その上、雷雲の高度が低いためγ線が大気で吸収されにくく、比較的観測しやすいと、榎戸は言う。

2017年2月6日、落雷に伴い、柏崎刈羽（かりわ）原子力発電所（新潟県）内に設置した複数の検出器が通常とは異なる信号を検知した。雷をきっかけに発生した一連のγ線を検知したのだ。最初の信号は、10 MeV（メガ電子ボルト）に達する高エネルギーのγ線による1ミリ秒未満のスパイクで、続いて2番目の信号として0.1秒程度続くγ線残光が検出された。その次に決定的な証拠となる3番目の信号、すなわち0.511 MeVのγ線が検出され、その輝線は約1分間継続した。これは紛れもなく、陽電子が電子と衝突しエネルギーを放出して消滅する「対消滅」の特徴である。

検出された3種のγ線信号を合わせて考えると、ロシア連邦核センター（サロフ）の物理学者Leonid Babichが10年ほど前に提唱した雷での光核反応[2]の発生が指摘される。雷が作る強い電場によって光速に近い速度まで加速された電子は、γ線を放出する。Babichの説によると、このγ線の一部が大気中の窒素（^{14}N）などの原子核と衝突することによって、中性子を弾き飛ばすという。ほとんどの中性子は、少し飛び回った後、別の窒素原子核に吸収される。中性子を受け取った原子核は、エネルギーをもらって励起状態になる。この原子核が脱励起する際、γ線を放出する。これが2番目の信号（γ線残光）として検出されたものだ。

一方、中性子を1個失った窒素原子核（^{13}N）は不安定であり、10分程度の半減期で放射性崩壊して、陽電子を1個放出する。この陽電子は、即座に1個の電子と対消滅し、0.511 MeVのγ線光子2個を放出する。これが3番目の信号だと榎戸は説明する。不安定な窒素の原子核（^{13}N）は10分程度で崩壊してしまうのに、検出器でこの信号を捉えられたのは、雷雲の高度が低く、しかも風向きの条件が良く、たまたま検出器の近くを通り過ぎたからだと榎戸は推測している。光核反応の検出可能性が十分に調べられていなかったのは、これらの状況がうまく重なることがめったになかったからかもしれない。研究チームはこれまでに同様の事象を数回観測しているが、今回報告した事象が今のところ最も明瞭な事象であると、榎戸は言う。

また、Babichは、γ線によって窒素



BABICH, L. *NATURE* **551**, 443-444 (2017).

榎戸らは、雷で光核反応が起こり、陽電子（電子の反粒子）が生成したことを裏付ける証拠を得た。その仕組みはこうだ。まず、雷で生じた高エネルギーのγ線が^{14}Nの原子核と衝突して中性子を弾き出し、^{13}Nを生成する。^{13}Nは不安定なため約10分の半減期で崩壊し、ニュートリノと陽電子を放出し、安定な^{13}Cに変わる。この陽電子は瞬間的に大気中の電子と衝突し、対消滅を起こして0.511MeVのエネルギーを持つγ線光子2個を放出する。榎戸らは、この特徴的なγ線を検出したことを報告した。

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

から弾き出された中性子の一部は、窒素原子核を^{14}C（通常の炭素よりも中性子が2個多い放射性同位体）に変換するだろうと予測していた。^{14}Cは生物にも吸収され、生物の死後長期にわたってゆっくりと崩壊する。このため、^{14}Cは放射性炭素年代測定に用いられ、考古学者にとって有用な時計となっている。

大気中の^{14}Cは主として宇宙線によって作られると考えられてきた。しかし、原理的には、雷も^{14}Cの供給に寄与し得ると明らかになった。ただし、全ての雷が光核反応を引き起こすかは定かではないので、雷がどの程度寄与しているかはまだはっきりしないと榎戸は言う。

「榎戸らのデータの解釈については、私も同じ見解です」と、ニューハンプシャー大学（米国ダラム）の物理学者Joseph Dwyerは言う。ただし、雷や雷雲に伴う陽電子に関する謎が、榎戸らの説明で全て解明されたわけではないとDwyerは付け加える。特に、Dwyerが2009年に調査用航空機で観測した事象は、今回の光核反応と整合しないようである。Dwyerの検出器が陽電子の特徴を検出したのはほんの1秒未満であった。核崩壊由来にしては短すぎるとDwyerは言う。またDwyerのケースでは、最初のγ線フラッシュが検出されなかった。「もしフラッシュが発生したのであれば、一目瞭然だったはずなのですが」とDwyer。■

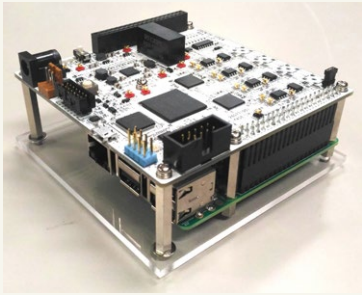
（翻訳：藤野正美）

Lightning makes new isotopes
doi: 10.1038/nature.2017.23033
2017.11.22 (Published online)
Davide Castelvecchi

1. Enoto, T. *et al. Nature* http://dx.doi.org/10.1038/nature24630 (2017).
2. Babich, L. P. *JETP Lett.* **84**, 285–288 (2006).

学術系クラウドファンディングに後押しされた高エネルギー大気物理学の進展

榎戸輝揚（京都大学）/ 湯浅孝行（シンガポール在住）



北陸地方で冬季に発生する雷雲や雷は、世界的に見ても強力で、魅力的な研究対象です。雷雲がやってくると原子力発電所の放射線モニタリングで線量が増大することが知られており、2006年頃、土屋晴文（当時・理化学研究所）と榎戸（当時・東京大学）は放射線の測定装置を自作し、雷雲の電場で準定常的に加速された電子からの制動放射γ線の観測に成功して、研究に乗り出しました。翌年には中澤知洋（東京大学）も加わり、Gamma-Ray Observation of Winter THundercloud（GROWTH）コラボレーションとして、大学院生を中心に柏崎市で10年近く観測を行っています。

雷雲からのγ線をマッピング観測したり、雷に同期した高エネルギー事象を数多く捉えたりするため、榎戸と湯浅（当時・理化学研究所）は、可搬型で高性能な放射線の測定器を北陸沿岸に多数設置する新計画（雷雲プロジェクト）を2015年から始めました。当初、科学研究費補助金などに採択されず苦労したため、academist 社が運営するサイトで学術系クラウドファンディングに挑戦し、市民サポーターからの寄付でプロジェクトを先に進めることができました。安価な測定器を大量に作るため、Raspberry Pi で駆動できγ線光子の情報を1個ずつ取得できる高性能な FPGA ボードと付属システムを新たに開発しました（写真）。これらの検出器の製作と設置やデータ解析には、大学院生の和田有希（東京大学物理学専攻）が活躍し、得られた観測から物理パラメータを探るシミュレーションを古田禄大（同）が担当しました。小さなグループですが機動的で、大学院生が最前線で研究しています。

まさに「雷雲と雷の高エネルギー大気物理学」と呼べる新しい分野が誕生しつつあります。私たちはX線天文学や宇宙線観測の技術をスピンオフして使っていますが、これら素粒子・原子核・宇宙物理の視点に加え、これまで伝統的に雷を観測してきた大気電気や気象学の研究者とも学際的な連携を進めています。さらに雷雲の上空で発生するエルブスやスプライトなどの可視光の発光現象との関係を高校生と協力して観測していたり、ロケット誘雷実験を石川県で進めるなど、分野を超えて「高エネルギー大気物理学」の創出へ進んでいます。今後の進展にご期待ください。

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

太陽系外からの初めての使者

奇妙な軌道をとる謎の天体が発見され、集中的な観測の結果、この天体が太陽系外から飛来した恒星間天体であることが明らかになった。

2017年10月19日、観測史上初の恒星間天体と見られる天体が発見され、科学者たちは、このまたとない機会を最大限に生かそうとデータ収集に奮闘した。というのも、この天体は非常に高速で動いており、発見から10日余りですでにうお座の方向に遠ざかっていて、2カ月後には最大級の望遠鏡でも見えないほどに暗くなってしまうからだ。

カリフォルニア大学ロサンゼルス校（米国）の天文学者David Jewittは、「銀河系の別の場所から来た天体が、我々の太陽系内を通過するのをリアルタイムで見られるなんて、実に興味深いです。恒星間天体の観測はこれが初めてですから」と語る。

残念ながら、この天体が太陽系に再び戻ってくることはない。「猛スピードで遠ざかっていて、観測できる時間は本当に限られていました」とJewittは説明する。しかし、数週間という短期間に行われた多数の観測からはいくつもの発見があり、2017年10月27日にはその光学スペクトルがarXivで公開され[1]、2017年11月20日にはさらに総合的な分析結果が*Nature*オンライン版で発表された（後に2017年12月21日号に掲載[2]）。

奇妙な軌道

米国ハワイ州マウイ島のハレアカラ山山頂にあるパンスターズ1（Pan-STARRS1）望遠鏡が太陽系外からの来訪者の姿を初めて捉えたのは、10月19日未明、ちょうど新月の夜だった。その日の朝、この天体に最初に気付いたハワイ大学マノア校の天文学者Rob Werykは、「普通の彗星や小惑星とは違った動きをしていました」と振り返る。

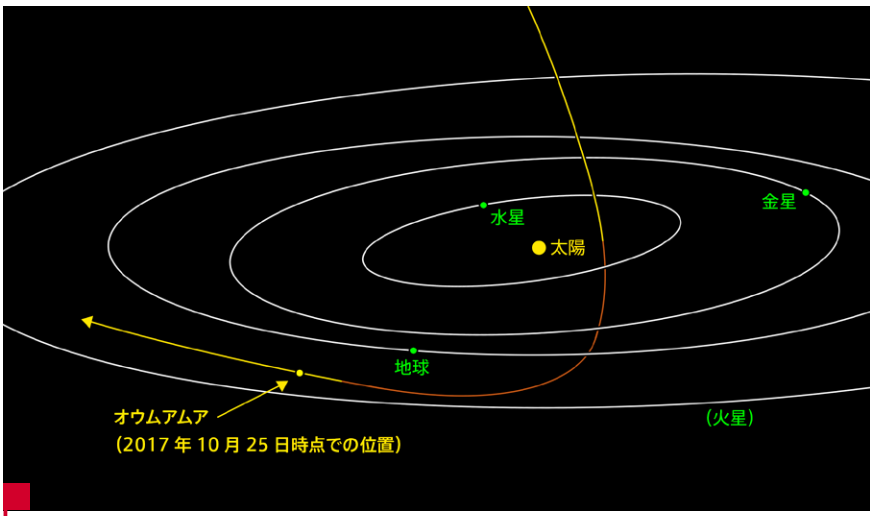
彗星や小惑星は通常、太陽を中心とする楕円軌道を回っていて、天体の軌道の形を表す値である軌道離心率は1より小さい。一方、太陽系の外から飛来して高速で通過していく天体であれば、その軌道離心率は1より大きく、双曲線軌道をとる。

今回、複数の観測結果から導き出されたこの謎の天体の離心率は約1.20と非常に大きく、双曲線軌道をとる恒星間天体であることが明らかになった。マドリード・コンプルテンセ大学（スペイン）の天文学者Carlos de la Fuente Marcosは、「この天体が双曲線軌道上を動いていることはほぼ確実です」と言う。観測の過程で彗星や小惑星などその分類が次々と変化したこの天体は、この軌道分析の結果を受けて最終的に恒星間天体であることを示す「1I/2017 U1」という仮符号が与えられ、ハワイで最初に観測されたことから、ハワイ語で「斥候」や「使者」を意味する「オウムアムア（‘Oumuamua）」と命名された。

オウムアムアが太陽に最も近づいたのは2017年9月9日で、このときは水星の軌道よりも内側を移動していたという。地球への最接近は10月14日で、その距離は2400万km（地球から月までの距離の約60倍）だった。

舞い込んだ朗報

世界各地の天文学者による観測からは、その珍しい軌道の他にもオウムアムアの物語が徐々に明らかになってきた[2]。オウムアムアは非常に小さくて暗く、分光計測の結果からは、表面が全体的



NASA/JPL-CALTECH

恒星間天体オウムアムアの太陽系内での軌道。

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

に赤くて、太陽系内の彗星や小惑星に見られるような有機物を豊富に含む表面の色に似ていることが分かった。また、光度曲線の分析結果からは、この天体が、長軸と短軸の長さの比が10:1程度で平均半径が約100mの細長い葉巻型をしていると推定された。入射光と反射光のエネルギーの比であるアルベドを0.04と仮定して計算すると、その大きさは800×80×80m程度になる。さらに、近日点での太陽からの距離が、太陽と地球の間の距離の4分の1という近さであったにもかかわらず、コマや尾などの彗星活動が見られなかったことから、オウムアムアは小惑星様の天体であると考えられる。一方で、この天体の詳しい組成や年齢、太陽系外のどこからやって来たのかについてはまだ分かっていない。

研究者たちは以前から、こうした太陽系外からの使者の到来を予測してきた。1990年代に恒星間天体飛来の可能性について研究していたサウスウェスト研究所（米国コロラド州ボールダー）の惑星科学者Alan Sternは、「ずいぶん長く待たされました」と感慨深く語る。

こうした予測は、太陽系が誕生して間もない時期に、木星、土星、天王星、海王星などの巨大惑星が、その強力な重力によって何兆個もの彗星や小惑星を太陽系外の星間空間にはじき飛ばしたという考えに基づいている。他の惑星系でも同様の現象が起きたとすれば、星間空間には「はぐれ天体」がうようよしていることだろう。Sternは、「太陽系内を通過する恒星間天体の数を明らかにすることで、銀河系全体にそうした天体がいくつあり、それらをはじき出した惑星系がいくつあるかを見積もることができます」と説明する。

シェフィールド大学（英国）の名誉教授で天文学者のDavid Hughesは、「ここ数年で見つからなければ、少々不安になっていたでしょう」と打ち明ける。

オウムアムアは、こと座の方向からやって来た。これは、太陽系が向かっている方向とほぼ一致する。そのため研究者たちは、今後もこと座の方向から来る恒星間天体の方が多いだろうと予測している。ちょうど、雨の中を走ると背中よりも胸の側に多くの雨粒が当たるのと同じ論理だ。

初めての使者となったオウムアムアに続いて、多くの恒星間天体が太陽系を訪れるはずだと、Jewittは確信している。■

（翻訳：三枝小夜子）

Astronomers race to learn from first interstellar asteroid ever seen
doi: 10.1038/nature.2017.22925
2017.10.31 (Published online)
Ken Croswell

1. Masiero, J. Preprint at http://arxiv.org/abs/1710.09977 (2017).
2. Meech, K. J. *et al. Nature* **552**, 378–381 (2017).

実験者の性別がケタミンの作用を左右する?!

マウスにケタミンを投与する実験で、投与者が男性の場合にだけ、マウスに抗うつ作用が見られることが報告された。

2017年11月14日、ワシントンD.C.で開かれた神経科学会の会議で発表された研究結果は、強力な気分高揚作用を持つケタミンが脳とどのように相互作用するかについての謎をますます深めた。またこの知見は、マウスの行動実験の再現性に関して疑問も投げかけている。

動物の麻酔薬としてよく知られている麻薬ケタミン。数時間以内にうつ状態を改善できる可能性を秘めていることから、精神科医たちは関心を寄せるようになっている。しかし、この薬が厳密にどのように働くかははっきり分かっておらず、多くの研究者たちが、動物モデルを使ってそのメカニズムを解明しようとしている（*Nature* ダイジェスト 2016年7月号「うつ緩和はケタミン代謝産物の作用か?」参照）。

メリーランド大学（米国ボルチモア）の神経科学者Polymnia Georgiouもそうした研究者の1人である。2015年に彼女は、ある男性の同僚から「自分が不在の間、代わりにいくつか実験をしておいてくれないか」と頼まれた。実験には、強制水泳試験と呼ばれる抗うつ剤試験の標準的な方法も含まれてい

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

た。強制水泳試験では、健康なマウスに薬剤を注射してから水槽の中に入れ、マウスが泳ぐのを諦めて助けを待つようになるまでどれくらいの時間泳ぎ続けるかを測定する。

抗うつ剤を投与された健康なマウスは、未処置のマウスよりもより長い時間泳ぐことができる、というのがGeorgiouの男性の同僚がケタミンを使用した実験で発見した結果だった。

においと脳

しかし、Georgiouが正確に彼のプロトコルどおりに実験を行ったにもかかわらず、ケタミンを投与したマウスがプラセボを注射されたマウスよりも長く泳ぐことはなかった。そこで、彼女を含めた4人の女性研究者と4人の男性研究者が実験を行うことによってこの食い違いを調べたところ、ケタミンが抗うつ剤として働くのは男性の研究者が投与したときだけだということが分かった。

においが関わっているのではないかと考えた研究者たちは、マウスをヒューム・フードに入れ、薬剤を注射した人のにおいをかぐことができないようにした。これによって、実験者の性別の影響をケタミンの効果から完全に排除することができた。ヒューム・フードの中のマウスの横に男性が着用したTシャツを置いておくと、Georgiouら女性研究者にケタミンを注射されたマウスは、プラセボを注射されたマウスよりも長い時間泳いだ。この結果は、ケタミンが作用するには男性のにおいが必要であることを示唆している。

Georgiouの研究室のボスである神経科学者のTodd Gouldは、エール大学(米国コネチカット州ニューヘイブン)の抗うつ剤研究者Ronald Dumanの研究室でも、女性研究者がケタミン投与実験を行った場合に同様の影響を観察していることを知った。そこでGouldは、Dumanに彼の研究室でGeorgiouの水泳試験実験をやってみてくれないかと依頼した。8人の男性研究者と8人の女性研究者がマウスにケタミンを注射したところ、同じ結果が得られた。女性が注射したマウスは、薬剤に反応しなかったのである。

Georgiouらは他の抗うつ剤で実験を繰り返したが、その場合には研究者の性別は重要ではないように思われた。GeorgiouとGouldは、抗うつ作用は、マウス脳内でのケタミンと男性のにおいとの特異的な相互作用の結果ではないかと考えている。

しかし、他の証拠から、研究者の性別が他のタイプの行動実験にも影響を与え得ることが示唆されている。*Nature Methods*に2014年に発表された論文[1]では、男性の研究者に扱われると、マウスはより強いストレスを受け、痛みに対し反応しにくくなることが示された。さらに、神経科学会でGeorgiouの発表を聴いていたサンパウロ大学(ブラジル)の行動神経科学者Silvana Chiavegattoも、彼の研究室で同様の現象を観察しているという。Chiavegattoはうつ病の研究を行っているがケタミンは使用していない。

モデルを再考

「これは非常に面白い結果だと思いますし、私たちの分野に広い意味を持ちます」と、クウィニピアク大学(米国コネチカット州ハムデン)の行動神経科学者Adrienne Betzは言う。しかし彼女は、結果は予備的であり、この作用がケタミンとマウスに特異的であるかどうかはまだ明らかになっていないと慎重だ。

この潜在的含意について異なる意見を持つ人々もいる。何百編もの論文で、女性実験者がマウスでケタミンを含む抗うつ剤の作用を示していると、サウスウェスタン大学(米国テキサス州ダラス)の神経科学者Lisa Monteggiaは述べる。マウスが注射されるときにストレスを感じているかどうかといった他の要因も、マウスの行動に影響を与えるかもしれないと彼女は言う。

GouldとGeorgiouは、彼らの結果は、必ずしも以前の研究結果が無効だと示しているわけではないと言う。彼らはただ、自分たちの研究室におけるケタミン実験では、男性研究者がマウスに注射したときにだけ作用が見られたということを示したにすぎない。ケタミンがヒトに対する強力な抗うつ剤であるという確かな証拠がある。Gouldは、薬剤を投与する人の性別が、うつ病患者でその薬剤がどれくらいよく効くかに影響するとは考えていないが、それついては一度も検証されたことがない。

Gouldは今回の結果について、マウスの行動に対する薬剤の影響を調べている研究者たちは、論文で実験者の性別を報告して、他の研究室でもその結果を確実に再現できるようにするべきだということを示唆していると付け加える。「再現性に影響を及ぼしている要因には、認識されていないものがたくさんあります。この現象もそのうちの1つです」とGouldは言う。「私たちにとって、それは都合の悪い真実なのです」。■

(翻訳：古川奈々子)

Sex matters in experiments on party drug — in mice
doi: 10.1038/nature.2017.23022
2017.11.17 (Published online)
Sara Reardon

1. Sorge, R. E. *et al. Nature Methods* **11**, 629–632 (2014).

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

レジを変えて食習慣を変える

スーパーのレジ周りに健康的な食品を陳列すると…

お腹がすいているときにスーパーに行くと、買うつもりのなかったものを余計に買って帰ることがある。だが衝動買いの原因は、空腹の苦しみだけではない。商品の陳列場所も影響しているのだ。

レジの近くはジャンクフードの陳列が特に多い。レジ周辺に最もよく置かれている商品は糖分や塩分の多いスナック菓子であることが調査研究によって示されている。それらを健康的な商品に取り換えるだけで客の行動を変えられることを示唆する報告もある。

例えば2012年にオランダで行われた研究では、病院の売店の棚で手に取りやすい位置に健康的なスナックが置いてあると、病院職員がジャンクフードを控える傾向があることが見いだされた。2014年にノルウェーとアイスランドで行われた研究では、レジ周囲に置かれていた不健康な商品を健康的なものに変えると、会計直前にカゴに入れる健康的食品の額が大幅に増えることが分かった。

ニューヨーク市保健精神衛生局はこれらの発見に注目し、1000軒を超える店のオーナーの協力を得て、栄養価の高い食品を仕入れて販促してもらっている。同局の調査研究員Tamar Adjoianは、「健康的な食品をより魅力的に陳列すれば、それらの購入を増やすことができます」と言う。

Adjoianらは欧州の研究結果が多数のレジが並ぶニューヨークの店舗にも当てはまるか確認するため、スーパー3軒に研究に協力してもらった。各店舗に1列だけ健康的な商品を陳列するレジを作り、キャンディーやクッキーなどの加工スナックの代わりに果物やナッツなど1食200キロカロリー以下の商品を置いた。そして2週間にわたり、各店舗での購入の様子を1回3時間、合計6回記録した。

観察された2100人超の客のうち、レジ付近の陳列商品を購入したのは4%だけだった。だがそれらの人について見ると、健康的な商品を陳列したレジに並んだ客は通常のレジに並んだ客に比べ、栄養価の高い商品の購入が2倍多く、不健康な商品の購入は40%少なかった。2017年9月の*Journal of Nutrition Education and Behavior*に報告。

この効果は小さいように思えるかもしれないが、陳列商品を変えたレジの数を増やせば、客の目を栄養価の高い低カロリー食品に向けることができるとAdjoianは考えている。■

（翻訳協力：粟木瑞穂）

食物の脳作用

不味いものを食べても快感物質が放出される

痛さを感じると、脳は天然の痛み止めを作り出す。モルヒネなどの強力な薬物と似た化学構造の物質だ。「内因性オピオイド」と呼ばれるこれらの物質が、別の働きもしていることが最近の研究で示された。身体のエネルギーバランスの調節に一役買っているらしい。

トゥルク大学（フィンランド）の脳画像研究者Lauri Nummenmaaらは健康な男性10人について、オピオイド受容体に結合する放射性物質を被験者に注射し、陽電子放出断層撮影装置（PET）を用いて受容体の活動を可視化することで、脳で放出される内因性オピオイドを測定した。

すると、被験者がおいしいピザを食べた後に、脳内に天然の鎮痛物質が出ている証拠が認められた。そして驚いたことに、栄養的には同様だがはるかにおいしくなさそうな流動食（Nummenmaaに言わせると「栄養たっぷりのドロドロ」）を食べた後では、脳はさらに多くの内因性オピオイドを放出した。オピオイド放出は食物のおいしさとは無関係なようだった。この成果は*Journal of Neuroscience* 2017年8月号に掲載された。

過去に行われたヒトと動物の研究から、内因性オピオイドは食事に伴う快感の伝達に関与していると考えられていたため、Nummenmaaはこの結果に驚いた。

ピザよりも流動食を食べた後の方が脳内に放出されるオピオイドが多くなる理由はまだ不明だが、食事の15分後に行われた脳スキャンの時点で生産されていたオピオイドの量が多かったのは、流動食の方が速く消化されるからかもしれないと研究グループは推測している。

今回の結果は、オピオイドがエネルギー代謝にこれまで考えられてきた以上の幅広い役割を果たしている可能性を示している。満腹になってエネルギーが補給されたことがオピオイド系を始動させるきっかけになっている可能性が考えられるとNummenmaaはいう。

「疼痛や食事、喜びなど、オピオイド放出を活性化する条件を改めて考えてみると、これらは全てホメオスタシス（体内のエネルギーバランスの維持）に関連しています」とNummenmaaは説明する。「最も面白いのは、食べるということが、感覚上の快感がなくてもこのシステムを始動させることです」。■

（翻訳協力：粟木瑞穂）

Scientific American trademarks used with permission of Scientific American, Inc.

4種の塩基置換に対応した「一塩基エディター」

CRISPR系の改変によって、DNAでもRNAでも個々の塩基を精密に書き換えられるようになっただけでなく、対応できる塩基の幅も広がった。

このほど、遺伝子編集のためのツールがさらに増えた。DNAあるいはRNAの狙った部位をピンポイントに変更できる技術が、ブロード研究所（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）の2つの研究グループからそれぞれ報告されたのだ。いずれも原型となっているのはCRISPR遺伝子編集系である。CRISPR系は、比較的大きなDNA断片を切り出す分子的ハサミであり、平滑末端を生じる上、切断部位を予測することは比較的難しい。これに対して今回報告された新しい系は、個々の塩基を書き換えることができる。一塩基を変化させられるということは、ヒトの全遺伝的疾患の半分以上の修正に挑めるようになったことを意味している。

Nature 2017年11月23日号464ページに掲載された研究[1]を率いた化学生物学者David Liuは、「CRISPRを基盤とする方法を用いて個々の塩基を修復しようとするこれまでの試みのほとんどは、精度が高くなく、いわば木のこぶを除去するためになたで切り落とすようなものでした。これに対して、我々が開発した新しい技術は、より精密な『化学的な除去手術』のようなものです」と言う。

Liuらのチームは2016年、ゲノムの二重らせんを切断することなしに、標的とするDNAの塩基1文字を別の文字に変換する「塩基編集」法を初めて報告した[3]。この方法は、それ以来世界中で、真菌から植物、魚類、マウス、ある血液疾患を引き起こし得る異常な遺伝子を持つヒト胚（はい）まで、幅広い生物で遺伝子の修正に用いられている。しかし、この塩基編集法で行うことのできる化学変換は、シトシン（C）からチミン（T）、あるいはグアニン（G）からアデニン（A）への2種類（つまり、C–G塩基対のT–A塩基対への変換）のみだった。

このほどLiuらは、新しい塩基編集法を開発して、TからC、AからG（つまり、T–A塩基対のC–G塩基対への変換）という、これまでのものとは逆方向の変換が可能であることを示した。この方法により、点変異（関与するのは1つの異常塩基のみ）という最も一般的な種類の変異を正常に戻すことができる。

Liuらは実際にこの技術を用いて、ヒト胎児由来腎臓細胞や骨がん細胞において、目的とする修正を約50%の効率で行うことができ、副産物はほぼ検出されないことを示した。一般的なCRISPRを基盤とする従来法では、標的配列を切断して、前後の配列ごと、細胞に導入した「変更したい塩基配列」を含む1本鎖DNAと置き換えるが、この方法で一塩基が修正される効率は5%未満である上、目的の領域以外に意図していない挿入や欠失を生じることが多い。

「今回の成果はゲノム編集分野における飛躍的な進歩です」と、ソウル国立大学（韓国）の分子遺伝学者Jin-Soo Kimは言う（彼は今回の研究には関わっていない）。

一方、生物工学者Feng Zhangの率いる研究チームは、DNAではなくRNAで同様の変換が可能であることを示し、*Science* 2017年11月24日号1019

VCHAL/ISTOCK/GETTY IMAGES PLUS/GETTY

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

ページ[2]に発表した。この方法では、Aをイノシン（I）に変化させる。Iは、細胞のタンパク質合成装置によってGと読み取られる塩基である。従って、ゲノムに恒久的な変化を加えることなく、疾患を引き起こす1つの変異を一時的に修正することができる。遺伝子を修正する治療法として考えると、この方法は繰り返し行う必要があるが、より安全性の高い選択肢かもしれない。さらに、疾患の理解がその後進んだ場合には、治療法を変更することも可能と考えられる。「RNA療法であれば、治療法をアップグレードできるのです」とZhangは言う。

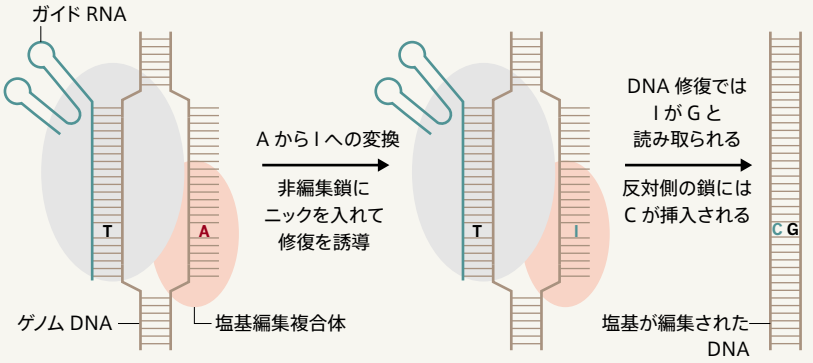
Zhangらのチームの RNA編集法は、天然に存在するアデノシンデアミナーゼを用いて、Aを脱アミノ化させてIに変化させる。Zhangらはこの酵素を、酵素活性を喪失させたCas13と融合させた（通常のCRISPR系でDNAとの結合を担うのはCas9であるのに対し、Cas13はCRISPR系でRNAとの結合を担う酵素である）。そして、この融合タンパク質を、塩基配列特異的なガイドRNA分子とともに用いることで目的部位の修正を試みた。その結果、疾患を引き起こす変異の23～35%を修正でき、オフターゲット活性の発生率は低かった。

2016年にLiuらのチームが報告した塩基編集法[3]では、天然に存在するシチジンデアミナーゼを操作して、酵素活性喪失型のCas9と融合させている。これによってCからTへの変換が可能になった。しかし、TをCへと変換する同様な天然の酵素を見つけ出すことはできなかった。そこで、Liuらは、Zhangらのチームが用いたのと同様の転移RNAアデノシンデアミナーゼから研究を始めた。

Liuらのチームは、7世代にわたり細菌細胞の進化を誘導し、研究室でタンパク質工学的手法を用いることで、DNAを認識して編集するアデノシン塩基エディターを作り出した。この酵素はDNAのAを脱アミノ化してIに変化させる（Iは細胞にGと読み取られる）。そのためこの系では、Iの反対側のDNA鎖にCが挿入される（「塩基を変化させる」参照）。

塩基を変化させる

DNA や RNA の一塩基をピンポイントで変更するための方法がいくつか考案されている。今回 Liu らが開発した技術[1]は、CRISPR–Cas9 系を改変しており、T を C へと変換する。この方法では、まず、DNA の A を脱アミノ化して I に変化させる。細胞は I を G と読み取るため、I の反対側の DNA 鎖には C が挿入される。



全ての塩基の編集を可能に

ユタ大学（米国ソルトレークシティー）のゲノム工学研究者Dana Carrollは、Liuらが用いた指向性進化手法が、暗闇の中での射撃のようなものであったことを指摘し、「この研究は英雄的な努力で成り立っています。私にはそのような研究を行う根性はありませんでした。David Liuに脱帽です」と言う。

A→G、T→C、G→A、C→T、という4種類の塩基変換（つまり、A–T⇆G–C）を行う能力は、「治療や農学において精密な編集を行うために非常に有益だと考えられます」と、中国科学院の遺伝学・発生生物学研究所（北京）の植物遺伝学者Caixia Gaoは言う（彼も今回の研究には関わっていない）。

また、「創薬やDNAを使ったデータストレージ（*Nature* **537**, 22–24, 2016参照）にも有用であることが証明されると考えられます」と、アストラゼネカ社（スウェーデン・ヨーテボリ）の遺伝子編集研究者Marcello Marescaは言う。

この他の塩基編集法の開発では（RNAの変換であっても）、天然に存在しない酵素が必要になるだろう。しかし、その種の障害でLiuが立ち止まったことはない。「可能な塩基編集法が全て開発されるまで挑戦し続けます」と、Liuは言う。■

（翻訳：三谷祐貴子）

CRISPR hacks allow for pinpoint repairs
Vol. 550 (439–440) | 2017.10.26
Elie Dolgin

1. Gaudelli, N. M. *et al. Nature* **551**, 464–471 (2017).
2. Cox, D. B. T. *et al. Science* **358**, 1019–1027 (2017).
3. Komor, A. C., Kim, Y. B., Packer, M. S., Zuris, J. A. & Liu, D. R. *Nature* **533**, 420–424 (2016).

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

米国FDAの諮問委員会が遺伝子治療薬の承認を勧告

病因となる変異を標的にした遺伝子治療薬が、米国で初めて承認される運びとなりそうだ。

米国食品医薬品局（FDA）の諮問委員会は、遺伝子変異を原因とする疾患の遺伝子治療薬の初承認に向けて道筋をつけた。2017年10月12日、外部専門家からなる諮問委員会は、ある種の遺伝性網膜疾患に対する遺伝子治療薬の効果がリスクを上回るとして、FDAに承認を勧告することを満場一致で採決した。FDAは諮問委員会の示した指針に従う必要はないが、実際には指針に従う場合が多い。この遺伝子治療薬voretigene neparvovec（商品名ラクスターナ）の承認に関する最終的な判断は、2018年1月12日までに下される予定である。

収益の大きい米国医薬品市場での承認は、遺伝子治療研究者が待ち焦がれていた有効性の実証と言えるものだ。「今回の勧告は、この種の遺伝子治療薬に対しては初めてのものです。遺伝子治療への期待が膨らみ始めています」とスタンフォード大学（米国カリフォルニア州）の遺伝学者Mark Kayは話す。

遺伝子を補塡

ラクスターナはスパーク・セラピューティクス社（米国ペンシルベニア州フィラデルフィア）の製造で、*RPE65*という遺伝子のコピーが2つとも変異している遺伝性網膜ジストロフィーの患者を治療するために設計されたものだ。この変異があると光に対する眼の反応が低下し、最終的に網膜の視細胞が障害され、視力が低下していく。

ラクスターナは、*RPE65*遺伝子の正常なコピーを1個組み込んだウイルスで構成されている。このウイルスを網膜下に注入して、正常な*RPE65*コピーをそこで発現させ、正常なRPE65タンパク質を作らせるのである。

同社は、31人を登録した無作為化比較対照試験を行い、この治療を受けた患者では特殊な障害物コースをうまく通り抜ける能力がおおむね改善されたことを明らかにした[1]。この改善状態は、同社がデータを収集した丸1年の間ずっと維持されたが、対照群では全般的に改善が見られなかった。この結果は、ラクスターナの効果がリスクを上回ることをFDAの諮問委員会が納得するのに十分なものだった。

遺伝子治療は過去30年の間に激しい浮き沈みを経験してきた。1990年代初頭には遺伝子治療研究が最高潮だったと、ボストン小児病院（米国マサチューセッツ州）の科学部門主任David Williamsは話す。「若手研究者にこの領域に進まぬよう言っても聞き入れられないほどでした」とWilliams。やがて、遺伝子治療の臨床試験で若い登録患者が死亡する事例が発生し、また、免疫疾患の小児患者の遺伝子治療で白血病になる場合があることも分かってきた。

投資家は遺伝子治療から手を引いていき、一部の学術研究者は遺伝子治療に対して徐々に冷笑を浴びせるようになった。欧州の規制当局は2012年に1件の遺伝子治療薬を承認したが、重症膵炎（すいえん）を起こす事態に陥ったため、多くの人はこの薬の効果に疑いの目を向けた（この遺伝子治療薬の製造元は、2017年10月25日に切れるこの薬の販売ライセンスを更新しないと発表済みである）。当時、Kayは同僚の1人に、「君が遺伝子治療を研究するなんて、せっかくの頭脳がもったいない。あれは疑似科学だよ」と言われたという。

しかし、一部の研究者はこうした問題に根気よく取り組み続け、ヒト細胞に遺伝子を送り込むためのベクター（遺伝子の乗り物となるウイルスなど）を改良し続けた。そのうち徐々に、新しい臨床試験から有望な結果が得られ始め、製薬会社が希少な遺伝疾患の治療薬開発に以前より関心を持つようになり、投資家も戻ってきた。現在は、遺伝子治療ベクターに対する需要が高すぎて供給が追いついておらず、研究者らは臨床研究に必要とする試薬類の一部を入手するのに18カ月から2年も待たされている状態だとWilliamsは話す。

適度の期待

遺伝子治療はここ数年で、血友病や鎌状赤血球症、免疫疾患のウィスコット・アルドリッチ症候群といった、さまざまな疾患で有望な結果を出している。2017年10月4日、Williamsは同僚と、大脳型副腎白質ジストロフィー

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

（ALD）の遺伝子治療試験の結果を公表した。大脳型ALDは、神経系と副腎が機能不全に陥り命に関わる場合もある深刻な疾患である[2]。試験では、遺伝子治療を施した17人の男児のうち15人の疾患の進行が約2年間にわたって止まった。

FDAは、2017年8月30日に同局初の遺伝子治療薬を承認したが、その仕組みは、免疫細胞を遺伝子操作で改変して、がんと闘わせるというものだ。このがん治療薬はラクスターナと違って、特定の病因変異を標的にするのではなく、患者の体から取り出した免疫細胞に投与される。それにより遺伝子改変を施した免疫細胞を、また患者の体に戻すのである。

そのため、ラクスターナに対するFDAの承認は新たな時代の幕開けになると研究者らはみている。「遺伝子治療の一般的概念は、欠損した遺伝子の補塡（ほてん）もしくは補償であり、ラクスターナの働きもそれに当たります」と、同じくスタンフォード大学の小児血液専門医Matthew Porteusは話す。「皆、とてもワクワクしています」。

しかし、ラクスターナからは、この世代の遺伝子治療の限界も浮かび上がってくる。ラクスターナは視力を改善するようだが、ベクターに使ったウイルスが正常な*RPE65*遺伝子をどれくらいの期間にわたって発現し続けるかはまだ明らかでなく、従ってその効果がどのくらい続くかも不明なのだ。「これは『治癒』と言える段階ではないのです」とKayは話す。

同様に、Williamsらの大脳型ALDの遺伝子治療も、脳での症状の進行は遅くできるようだが、年を取ってから現れる体の他の部分の症状を治すことは期待できない。

「これらの疾患を本格的に治癒させようと思うなら、遺伝子治療技術の大幅な改良がまだまだ必要だと思います」とKayは話す。「しかし、研究を着々と進めていくことで、改良に役立つ治療薬がいずれ登場するのではないでしょうか」。■

（翻訳：船田晶子）

FDA advisers back gene therapy
Vol. 550 (314) | 2017.10.19
Heidi Ledford

1. Russell, S. *et al. Lancet* **390**, 849–860 (2017).
2. Eichler, F. *et al. N. Engl. J. Med.* http://dx.doi.org/10.1056/NEJMoa1700554 (2017).

光子も「クーパー対」に相当する対に

光子が、超伝導での「クーパー対」と共通する仕組みにより、物質中である種の対になるとみられることが分かった。

超伝導は、電流が物質中で抵抗ゼロで流れる現象だ。超伝導の原因は、電子が物質中で、ある仕組みで「クーパー対」という対になることだが、今回、光子も物質中でクーパー対と共通する仕組みにより、時間的な相関を示す対になるとみられることがブラジルの物理学者たちの実験で分かった。

この研究を行ったのは、リオデジャネイロ連邦大学（UFRJ；ブラジル）とミナス・ジェライス連邦大学（UFMG；ブラジル・ベロオリゾンテ）の研究者らで、*Physical Review Letters* 2017年11月10日号[1]で報告した。このプロセスは、光が水などの透明な液体を通過するときに室温で起こるが、観察はとても難しい。論文の共著者で、UFRJの理論物理学者André Saraivaは、「対の形成が起こり得るというだけではなく、それはどこにでもあるのです」と話す。

この発見は、UFMGのAdo Jorioが率いる研究が発端だった。Jorioらは、光が物質中でどのように散乱されるかを研究していた。光の散乱が起こるとき、光子は物質中の原子にエネルギーを与えてエネルギーの一部を失う場合があり、この原子は振動する。もしも、2番目の光子がすぐにこの振動エネルギーを吸収したら、2つの光子は間接的に関連付けられ、1つがエネルギーを得て、もう1つは失うことになる。

UFRJの物理学者Belita Koillerは、Jorioの研究の話を聞いて、1つの光子が引き起こした振動がもう1つの光子に影響するというこのプロセスが、超

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

伝導でのクーパー対の形成と似ていることに気付いた。クーパー対では、電子が引き起こした、原子の格子の振動が、もう1つの電子を引きつける。

超伝導では、クーパー対を作ることにより、多数の電子がエネルギーの低い同じ状態に入ることができ、電流が抵抗なしに流れる。この仕組みで超伝導を説明した理論はBCS理論と呼ばれている。

クーパー対の原因になっている原子格子の振動は、量子力学によって許されたわずかな時間だけ存在するもので「仮想フォノン」と呼ばれる。Koillerらは、光子の場合も仮想フォノンが関与しているのではないかと考えた。

UFRJの研究チームは、光子も、仮想フォノンを通じて互いに相互作用しているとしてBCS理論と同様の理論的取り扱いで記述でき、光子間の相互作用には電子間の相互作用と共通点があることを理論的に示した。

一方、UFMGの研究者たちは、水やトルエンなど透明な8種の液体に室温でレーザー光パルスを通過させることにより、そうした光子対が形成されている証拠を探した。彼らは、現れる光子の中から、同時に到着した対で、1つの光子は赤色方向へ色が変化し（エネルギーを失っている）、もう1つは青色方向に変化している（エネルギーを得ている）ものを探した。

研究チームは、そうした同時に得られる光子対（エネルギーは同量だけ増加・減少している）の数が、そのエネルギー（波長）変化量に応じて、どう増減するかを、特定の波長の光を通過させるフィルターを使って調べた。その実験結果は、光子も仮想フォノンを仲立ちとして対になっているとして、BCS理論と同様の理論的取り扱いで計算した結果とよく一致した。得られる光子対は極めてわずかで、1秒間に約10の16乗個の光子が物質を通過しても、得られる対は10対にすぎなかった。それでも、全くの偶然で観測される数の100倍に相当する。

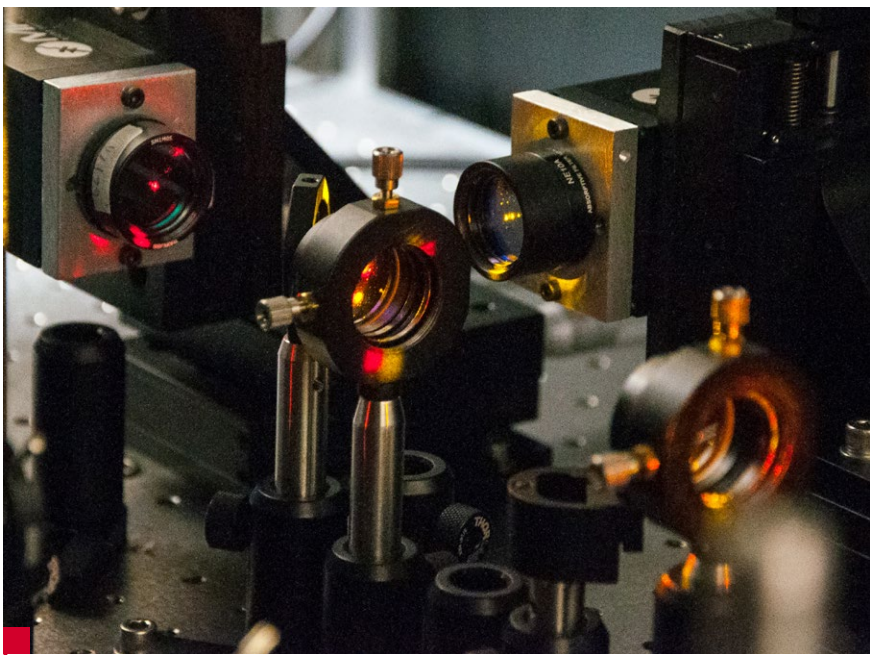
クーパー対の場合は、電子間に引力が働き、電子対は束縛状態になっている。一方、今回の光子対は、エネルギーが同量だけ増加・減少した対が同時に観測される、時間的な相関を示す。今回の現象と超伝導との類似性をどこまで見いだせるのかは、今後の研究課題だ。

ロチェスター大学（米国ニューヨーク州）の量子物理学者で、今回の研究には参加していないNick Vamivakasは、「これは、光散乱、物性物理学、量子光学の見事な交差点のような研究で、本当にわくわくします」と話す。

物質中では、クーパー対は広範囲の興味深い効果に関係しているが、今のところ、光子対が何かの効果に関係していることを示すデータは得られていない。「その問題はまさに私たちが解明したいと思っている、とても重要な課題です」とSaraivaは話す。

光子対の数を増やすことができれば、この効果を応用することも可能かもしれない。光子対と物質の相互作用を利用して、現在は検出できない物質の性質を明らかにできるかもしれない。また、光子対が、2粒子のタイミングだけではなく、その量子的性質も関連し合っているのであれば、室温の水は「もつれた光子」の非常に安価な発生源になるかもしれない。もつれた光子は、量子暗号や量子計算に不可欠なものだ。■

（翻訳：新庄直樹）



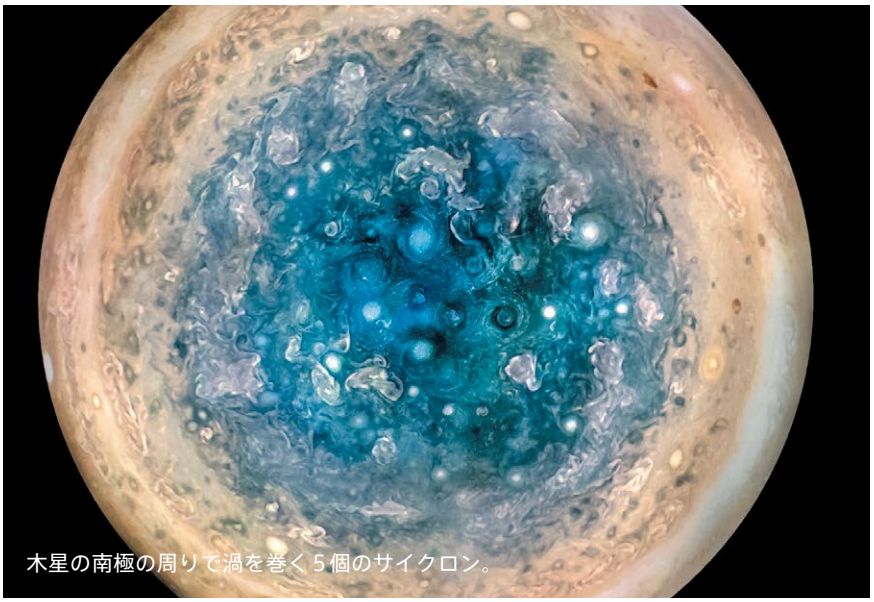
CASSIANO RABELO

ブラジルの物理学者たちは、水にレーザー光パルスを当て、超伝導のクーパー対と共通する仕組みで生じたとみられる光子対を検出した。

Light can act like a superconductor
Vol. 550 (438–439) | 2017.10.26
Elizabeth Gibney

1. Saraiva, A. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 193603 (2017).

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.



NASA/JPL-CALTECH/SWRI/MSSS/BETSY ASHER HALL/GERVASIO ROBLES

木星の南極の周りで渦を巻く5個のサイクロン。

木星を深部から揺さぶる嵐

NASAの木星探査機ジュノーは、渦巻く風が作り出す有名な帯が表層だけの現象ではなく、数千kmの深さまで達していることを明らかにした。

太陽系最大の惑星である木星の内部の様子が、これまでで最高の精度で観測された。木星の色彩豊かな縞（しま）模様は、緯度によって大気中で東風と西風が交互に吹いていることで生じる。今回の観測が行われるまで、こうした縞模様が浅層だけにあるのか、それとも深部にまで達しているのかは分かっていなかった。ジュノーの研究チームのメンバーであるワイツマン科学研究所（イスラエル・レホヴォト）の地球物理学者Yohai Kaspiは、2017年10月18日、米国ユタ州プロヴォで開かれた米国天文学会惑星科学部会の年次総会で、「縞模様の深さを決定することは、ジュノー・ミッションの主要な目標の1つです」と語った。

研究チームは今回、木星の重力場を調べることで、その内部を数千kmの深さまで探ることに成功した。木星の重力は内部の状態を反映して場所によってわずかにばらつきがあり、上空を飛行するジュノーの速度に影響を及ぼす。ジュノーは木星に接近するたびにこの変化を測定して、2017年5月には、木星が、大きくて輪郭の不明瞭なコアを持つことを明らかにしている[1]。

コートダジュール天文台（フランス・ニース）の惑星科学者Tristan Guillotによると、今回の観測から、木星の重力場は歪（ゆが）んでいて、北半球と南半球では異なるパターンを示すことが分かったという。これは、木星の深部で水素を豊富に含むガスが非対称に流動していることを示唆する。Guillotは総会で、「予想外の発見でした。私たちの観測でこういうものが見えるのか、自信は全くありませんでしたから」と語った。

木星の内部構造に関するもう1つの手掛かりは、深さとともに重力場がどのように変化するかを調べる観測からもたらされた。理論研究では、重力シグナルが大きいほど深部のガスの流れは強いと予想されていた[2,3]。木星の内部全体が1つの塊として回転しているのか、それとも、マトリョーシカ人形のように表層から深層までの各層が独立した多重構造をとり、別々に回転しているのかを明らかにする上で、この情報は重要だ。ジュノーは、表層から深さ3000kmまでの物質が流動していることを示唆する、強力な重力シグナルを検出した。ただしKaspiによると、これは「表層の雲と風を調べ、内部も同じようになっていると推定」した上での見積もりにすぎないという。マトリョーシカ人形のようになっているかを明らかにするためには、さまざまな深さでのガスの流動の強さを決定する今後の研究を待たなければならない。

ジュノー・ミッションの科学者たちは現在、重力データから他に何を知ることができるかを探っている。例えば、大赤斑と呼ばれる有名な嵐は、大気中のどの程度の深さまで伸びているのだろうか？　ジュノーに搭載されている別の観測機器は、すでに、大赤斑の根が数百km下まで伸びていて、もっと深い可能性もあることを示唆している。カリフォルニア工科大学（米国パサデナ）の惑星科学者David Stevenson

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

は、「重力データに現れるほど深いかどうかはまだ分かりませんが、観測に挑戦しています」と言う。

また、ジュノーが可視光と赤外線で撮影した両極に、サイクロンがいくつも集まっていたことは、人々を大いに驚かせた。ジュノー以前に木星の両極の上空を飛行した探査機はなかったため、科学者が両極の嵐を見たのは今回が初めてだったのだ。サイクロンは北極の周りに8個、南極の周りに5個あったが、こうした場所に存在していること自体が謎だった。コンピューターモデルでは、渦を巻く極風の中で、これほど小規模の嵐が安定して存在できるわけがないと予想されていたからだ。

NASAのジェット推進研究所（米国カリフォルニア州パサデナ）の惑星科学者Fachreddin Tabataba-Vakiliは、その答えは「渦結晶（vortex crystal）」という物理学概念にあるのかもしれないと言う。地球上でも、渦結晶は、回転する超流動体などいくつかの事例で見られ、物質の流れの中で小さな渦が形成され、周囲の物質が流れ続けても渦が消えずに残るときに生じる。

Tabataba-Vakiliは、木星の両極の周りにある流れがこの概念と同様のダイナミクスを作り出しているのかもしれないと考えている。次なる課題は、両極のサイクロンの数が異なる理由を説明することだ、と彼は言う。■

（翻訳：三枝小夜子）

Jupiter's stormy winds churn deep into the planet
Vol. 550 (437–438) | 2017.10.26
Alexandra Witze

1. Wahl, S. M. *et al. Geophys. Res. Lett.* **44**, 4649–4659 (2017).
2. Hubbard, W. B. *Icarus* **137**, 357–359 (1999).
3. Kaspi, Y. *Geophys. Res. Lett.* **40**, 676–680 (2013).

TMT建設にゴーサイン

新たな建設許可は出たものの、法廷での争いは続く。

2017年9月28日、米国ハワイ州土地・天然資源委員会（BLNR）は30m望遠鏡（Thirty Meter Telescope：TMT）の新たな建設許可を出し、次世代の天文台がハワイ島マウナケア山に建設される可能性が復活した。

地元住民の一部は、マウナケア山にはすでに複数の望遠鏡があり、新たな望遠鏡の建設は神聖な山をさらに冒涜（ぼうとく）する行為であるとして、TMTの建設に反対している。TMTの最初の建設許可は2011年2月に出ていたが、数年に及ぶ法廷での争いの後、ハワイ州最高裁判所によって2015年12月に無効とされた（*Nature* ダイジェスト2016年3月号「TMTの建設許可が無効に」参照）。BLNRが許可を出す際に適正な手続きに従っていなかったというのがその理由だ。新たな建設許可は、古い建設許可に代わるものとして、TMT国際天文台にプロジェクトを進める法的権利を与えた。

しかし、TMTを巡る物語は完結にはほど遠い。建設反対派がハワイ州最高裁判所に上訴申し立てを行ったからである。これで建設許可は保留になる。TMT建設に反対しているハワイ環境連合（ホノルル）は、「全ての法的手続きが適正に行われるまでは、建設に着手してはならない」との声明を出している。

BLNRの今回の決定は、ヒアリング担当官で元判事のRiki May Amanoの勧告に基づいている。彼女は2017年に40回以上にわたる公聴会の取りまとめを行い、7月には、建設を許可することが望ましいとする勧告を提出した。9月に別の公聴会が開かれ、その後、BLNRの7人の委員が評決を行い、賛成5、反対2で建設が許可されることになった。委員長のSuzanne Caseは、「BLNRがこれまで出した決定の中で最も難しいものの1つでした」と言う。

新たな建設許可は、望遠鏡の建設計画にゼロ排水システムや、労働者への文化や天然資源に関する教育などの項目を追加するよう要請している。

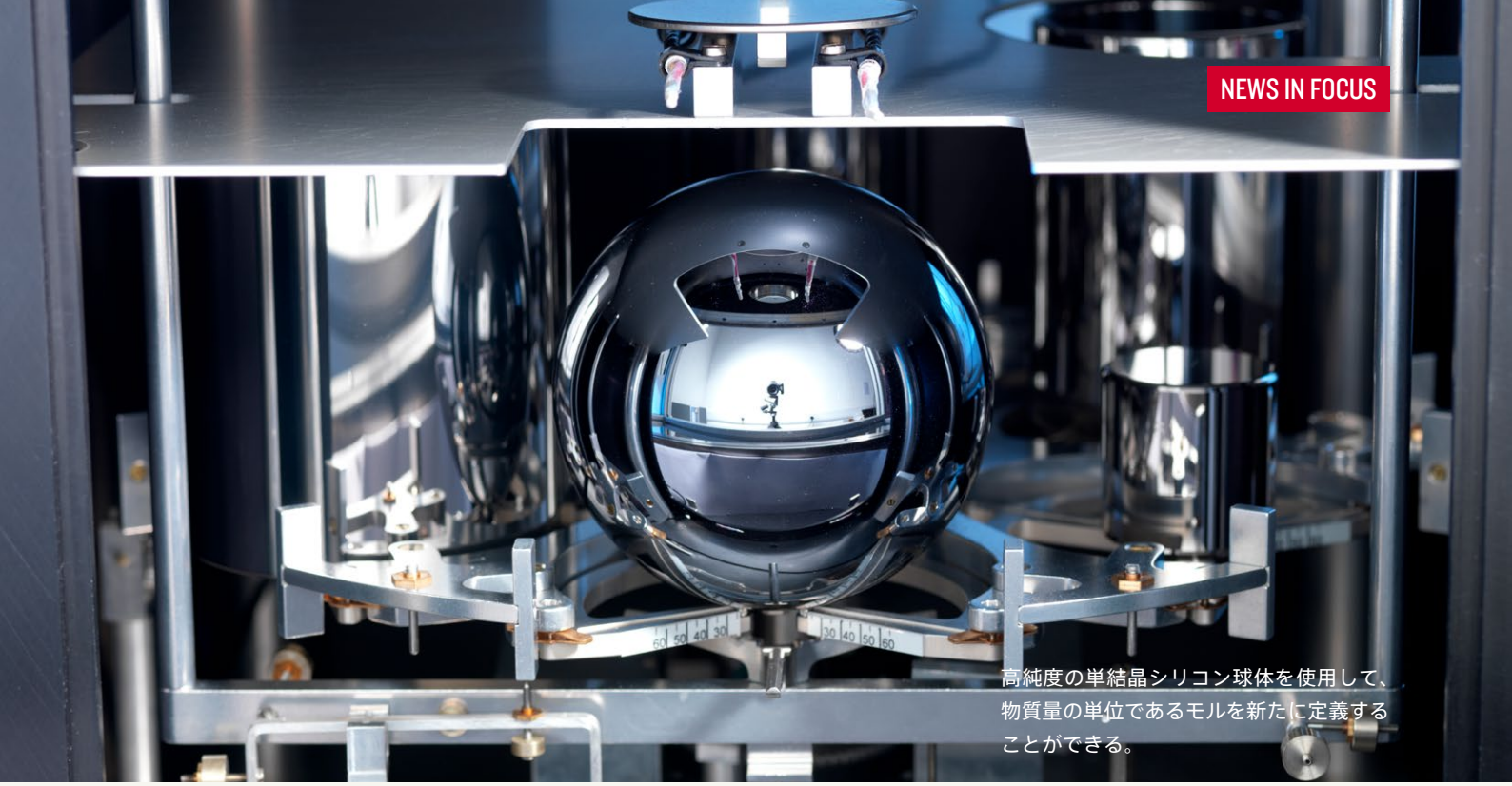
TMT建設支持者たちは、新しい望遠鏡が天文学の長い歴史を持つハワイ州にさらなる教育と雇用の機会をもたらすことを期待している。TMT国際天文台の評議員会議長Henry Yangは、今回の決定には大いに勇気付けられたと述べ、「地元の声に丁寧に耳を傾け、マウナケアをハワイ文化と教育と科学の世界的中心地にするという共通のビジョンを実現するために、計画を進める所存です」という声明を発表した。

TMT国際天文台は、2018年4月までにマウナケアでの建設に着手できなかった場合には、スペイン領カナリア諸島のラ・パルマ島で望遠鏡を建設する可能性を探っている。■

（翻訳：三枝小夜子）

Hawaii telescope gets go-ahead
Vol. 550 (20) | 2017.10.5
Alexandra Witze

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.



高純度の単結晶シリコン球体を使用して、物質量の単位であるモルを新たに定義することができる。

NATL. PHYS. LAB., UK

国際単位系（SI）が変わる

より高精度の基準が、宇宙の測定方法を変えるかもしれない。

国際単位系（international system of units：SI）の定義の改定が進んでいる。国際度量衡委員会（CIPM）は、1960年に国際単位系が創始されて以来最大規模の見直しにより、7つの基本単位のうち、アンペア（A）、キログラム（kg）、ケルビン（K）、モル（mol）の4つの定義の改定に乗り出した。基礎的な定数との関係を使って定義し直すことで、抽象的・恣意（しい）的な定義に頼らないようにすることが目的だ。CIPMは、2017年10月16～20日にパリ近郊で開かれた会合で、この計画について検討し、勧告をまとめた。国際単位系を監督する国際度量衡総会（CGPM）が2018年11月に開催され、ここでCIPMの勧告が承認されれば、4つの基本単位の定義が2019年5月から改定となる。

現時点では、キログラムはパリ近郊の施設の密閉容器中で保管されている国際キログラム原器という金属塊の質量として定義され、電流の単位であるアンペアは、無限に長い2本の導線の間に働く力についての思考実験によって定義されている。モルは、0.012kgの炭素12の中に存在する原子の数に等しい数の要素粒子を含む系の物質量として定義され、ケルビンは、水の三重点（水と氷と水蒸気という3つの相が平衡状態で共存する温度と圧力）との関係で定義されている。これらの基本単位は、将来的には定数との関係で導出されることになるわけだ。例えばアンペアは、電気素量（電子の電荷の大きさ）に基づいて定義される。

国際単位系の定義の改定は、日常レベルの測定には影響を及ぼさないかもしれないが、最高レベルの精度で測定を行う科学者にとっては、より多くの方法で、どんな場所や時間でも、どんなスケールでも、精度を損なうことなく測定を行えるようになるという恩恵がある。■

（翻訳：三枝小夜子）

編集部註：国際単位系の再定義については、以下の*Nature*ダイジェストの記事を参照されたい。

2014年4月号
「アンペアの再定義に向けて」

2013年11月号
「絶対的な絶対温度を目指せ」

2011年10月号
「2010年版の基礎物理定数表」

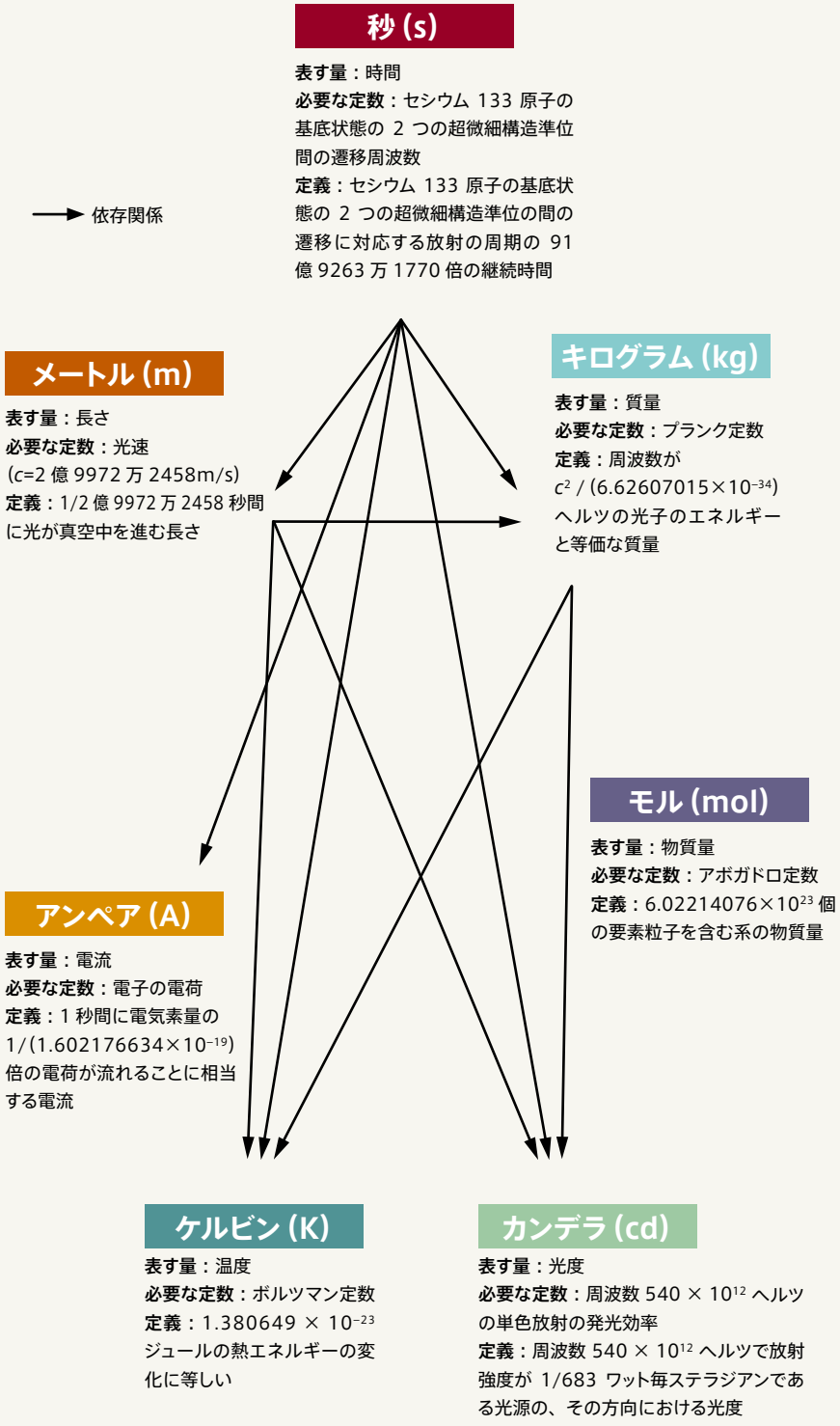
2011年1月号
「キログラム原器の引退勧告へ、さらに前進」

New definitions of scientific units are on the horizon
Vol. 550 (312–313) | 2017.10.19
Elizabeth Gibney

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

国際単位系はこう変わる

改定後の国際単位系では全ての単位が定数との関係で定義され、定数の値は固定される。単位の多くは、お互いの関係によって定義されるようになる。例えば、キログラムの定義には、プランク定数の他に秒とメートルの定義が必要だ。

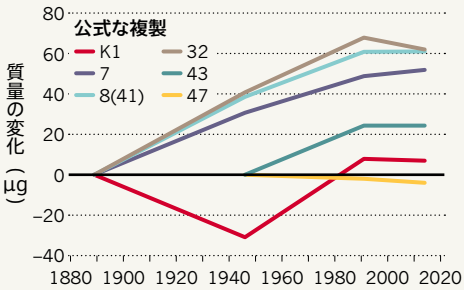


問題点

日常的なスケールの測定ならば、既存の国際単位系の定義で十分だ。しかし、現代科学で極端なスケールの測定を行う場合、これでは物足りない。また、度量衡学者は、特定の点や物質に基づいて単位を定義するのは問題が多く、エレガントでもないと言う。

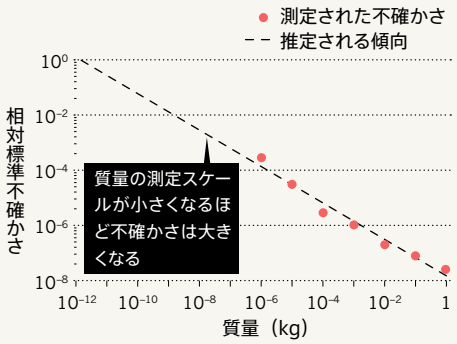
キログラムの不安定性

キログラムは現在、パリ近郊の施設の密閉容器中で保管されているプラチナとイリジウムの合金製の金属塊の質量によって定義されている。物質は容易に原子を失ったり空気中の分子を吸着したりするため、人工物を利用して単位を定義することは長らく問題視されていた。国際キログラム原器の公式な複製は複数作られているが、一部の複製の質量は、1 世紀の間に国際キログラム原器より少なくとも 50μg 増加している。



スケールの問題

固定したスケールで単位が定義されている場合、そのスケールから離れるほど不確かさは大きくなる。例えば現在の定義では、ミリグラム領域の測定の最小相対不確かさは、キログラム領域の測定の不確かさより 2500 倍も大きい。現在提案されているように定数に基づいて単位を定義するようになれば、この問題は解決する。



SOURCE: SHAW, G. *ET AL. METROLOGIA* **53**, A86–A94 (2016).

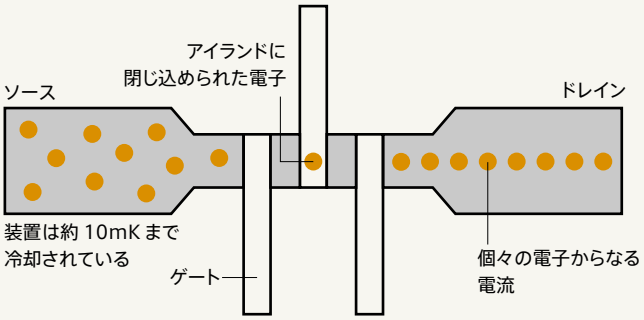
© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

手法

国際単位系の定義の改定後は、研究者はさまざまな実験を用いて、定数と測定される各単位とを関連付けられるようになる。

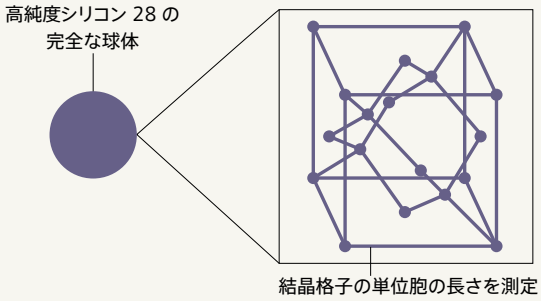
アンペア：単電子ポンプ

電子の電荷の測定に用いられる電子ポンプはアンペアの定義にも利用できる。このポンプは、導電体中を高速で流れる電子を 1 個ずつ閉じ込めて、個々の電子を数えて測定可能な電流を生じさせる。



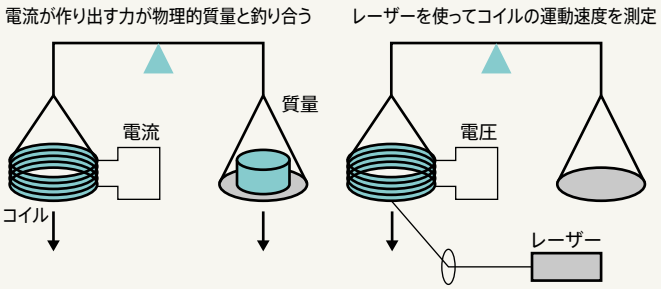
モル：シリコン球体

単結晶シリコン球体を用いて、アボガドロ定数を精密に測定する。高純度シリコン 28 を真球に近い球体にし、その結晶格子の単位胞の長さと球体の平均直径をレーザーを使って測定することで、球体中に存在する原子の数を正確に決定することができる。



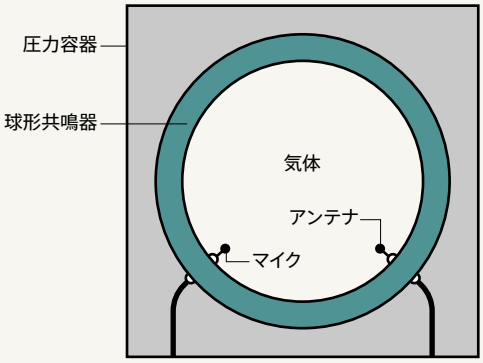
キログラム：ワット天秤（てんびん）

ワット天秤は、2 つの異なる実験を用いて機械的な力と電磁気力を比較する。最初に、磁場中のコイルに電流を流して、既知の物理的質量と釣り合う力を発生させる。次に、磁場中でコイルを移動させて起電力を生じさせる。コイルの運動速度と、電圧および電流をプランク定数と関連付ける実験値を測定することで、試料の重さをキログラムで正確に決定することができる。



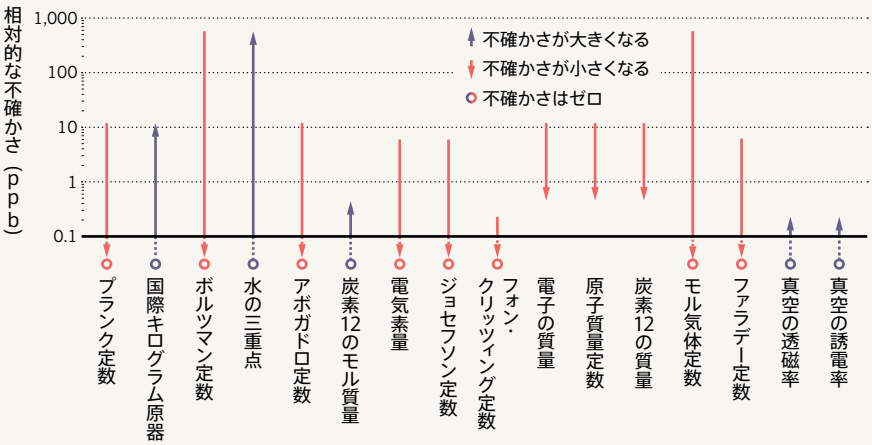
ケルビン：音響気体温度計

この手法は精密な温度測定に用いられる。気体を満たした球形共鳴器中で共鳴する音波の周波数と、共鳴器の体積を測定することにより、共鳴器中の一定の温度における音速（共鳴器中の原子の平均速度に比例）を決定することができる。



将来

新しい国際単位系の定義の基礎となる定数の数値の合意に向け、実験チームは数十年間準備を続けてきた。基準は厳しく、キログラムチームがこれをクリアできたのは 2015 年である。2017 年 7 月 1 日までに全グループが最終的な数値を提出し、今回の会合で厳密な数値として固定された。これが 2018 年に定数として承認され、2019 年 5 月から定義の運用が開始されると、現行の定数が持つ不確かさは、新しい定数で定義された単位を用いる「測定値」へと移行する。単位の改定により、現在ゼロである国際キログラム原器の質量の不確かさは、少なくとも 10ppb（1ppb=1×10^{-9}）となる。



© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

ゾンビ細胞を退治して若さを保つ

自ら死のうとしない老化細胞の除去が強力なアンチエイジング戦略になることは、
すでにマウスで実証済みだ。そして今、ヒトを対象とする試験が始まろうとしている。

メイヨークリニック（米国ミネソタ州ロチェスター）のJan van Deursenは、2000年に、自らの手で作り出した遺伝子改変マウスを見て困惑した。老衰状態に見えるそのマウスは、当初期待したように腫瘍を発生させる代わりに、奇妙な病気を持っていた。生後3カ月という若さで毛が細くなり、両目は白内障となって生気がなかったのだ。van Deursenはその後数年かけて、マウスがこうした状態になった理由を明らかにした。このマウスは高速で老化し、その体には、分裂はしないが死のうともしない奇妙な型の細胞がいっぱい詰まっていたのである[1]。

この結果からvan Deursenと同僚らは、あることを思いついた。マウス体内にあるこれらの「ゾンビ細胞」を除去すれば、早すぎる老衰を遅らせることができるのではないかと考えたのだ。その答えは「イエス」だった。van Deursenのチームは2011年、こうした「老化細胞」を除去することで、老齢に伴う病態の多くが防げることを明らかにしたのである[2]。この発見がきっかけとなって、同様の知見が次々と報告された。その後7年の間に、数十件の実験研究によって、老齢の器官で老化細胞が蓄積することや、それらの老化細胞を除去することで特定の病態が軽減もしくは予防できることが確認されている（「『アンデッド』状態の細胞」参照）。2017年には、マ

ILLUSTRATION BY PAWEŁ JONCA

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

ウスでこれらの老化細胞を一掃すると健康状態や毛の密度、腎機能が改善されることが明らかになり[3]、また、肺疾患の改善[4]や、損傷した軟骨の修復[5]も報告された。さらに2016年の研究によれば、老化細胞の除去によって、正常に加齢するマウスの寿命も延びるようだ[6]。

「老化細胞を除去するだけで、新たな組織形成を促進させることができるでしょう」と、ジョンズホプキンス大学（米国メリーランド州ボルティモア）の生体医工学者で、軟骨修復の論文の首席著者でもあるJennifer Elisseeffは話す。除去によって、組織が本来持っている修復機構の一部が活性化されるのだと彼女は説明する。

van Deursenらが観察したアンチエイジング現象は、50年以上前に初めて報告された「老化細胞（senescent cell）」、つまり、広く見られる分裂を行わない細胞の研究に、思わぬ展開をもたらした。細胞が老化した状態になる（ほぼ全ての細胞にそうなる可能性がある）と、自身のコピー細胞を作るのをやめて、数百種類のタンパク質を排出し始め、抗細胞死経路をパワー全開で推進させる。老化細胞は言うなれば人生の「たそがれ」の時期にあたり、まだ死んではいないが最盛期のように分裂することもない。

バイオテクノロジー企業や製薬会社は現在、老齢による劣化を回復させるか、もしくは少なくとも食い止めることを期待して、老化細胞を選択的に死滅させる薬剤（senolytic；老化細胞除去薬もしくは老化細胞死誘導剤と呼ばれる）を熱心に試験している。van Deursenが共同設立者となっているユニティ・バイオテクノロジー社（Unity Biotechnology；米国カリフォルニア州サンフランシスコ。以下、ユニティ社）は、変形性関節症や眼疾患、肺疾患の患者を対象とした複数の臨床試験を今後2年半かけて行うことを計画している。メイヨークリニックでは、2011年の研究にも参加した老年学者James Kirklandが、加齢に伴うさまざまな病態を老化細胞除去薬で治療する小規模な概念実証試験をいくつか慎重に始めているところだ。「マウスやラットで常に良い結果が出ても、いざヒトに適用すると壁にぶつかってしまうものなので、心配で、夜あまり眠れないんです」とKirklandは打ち明ける。

そうしたヒトへの適用の壁を乗り越えたアンチエイジング薬は他にまだないが、それにはもっともな理由がいくつかある。まず、健康寿命の延び方を測る臨床試験では助成金を獲得することが不可能に近い。また、老化は概念としてもつかみどころがない。米国食品医薬品局（FDA）はいまだに、老化を治療が必要な状態だとは見なしていない。

ユニティ社の社長Ned Davidによれば、もしいずれかの臨床試験から「ヒトに有効そうな気配」が感じられた場合、治療薬の開発や老化の基本過程のさらなる解明がぐっと進むだろうという。老化過程を調べている他の研究者らも大いに注目している。老化細胞除去薬は臨床試験が「いつでもできる態勢」にあると、アルバート・アインシュタイン医科大学老化研究所（米国ニューヨーク）の所長であるNir Barzilaiは話す。「老化細胞除去薬はじきに登場して、高齢者で効果を発揮できるのではないかと考えています。それも今後2、3年以内のことと思います」。

老化細胞の暗黒面

微生物学者のLeonard HayflickとPaul Moorheadは1961年に、細胞レベルの加齢現象を表す用語として「老化（senescence）」という言葉を作り出した。しかし当時は、細胞の老化を調べた研究がわずかしかなく、そんな観察研究をしてどうなるんだとばかにされたことをHayflickは覚えている。彼ら2人の考え方はその後、数十年にわたって無視された。 細胞の多くは自ら死んでいくが、細胞老化の状態になる能力は、分裂する全ての体細胞（生殖細胞以外の細胞）に存在する。しかし、こうした「たそがれ」状態の細胞は長い間奇妙な存在でしかなかったと、25年以上にわたって細胞老化を研究してきた生物医学研究所（スペイン・バルセロナ）のManuel Serranoは話す。「我々は、これらの細胞が何か重要なことをしているのかどうか、よく分かりませんでした」。老化細胞は、自己複製能力を自ら無効化しても代謝活動は維持しており、基本的な細胞機能を発揮し続けることが多いのだ。

2000年代中ごろには、細胞老化は主として、損傷を受けた細胞の増殖を停止させて腫瘍形成を抑制するための方法の1つだと解釈されていた。研究者らは現在も、発生や疾患において細胞老化がどのように起こるかを調べ続けている。細胞は変異したり損傷を受けたりした場合に、多くが分裂を止め、その損傷が娘細胞に受け継がれるのを回避していることが分かっている。また、老化細胞は胎盤や胚（はい）でも見つかっている。老化細胞は、そうし

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

た場所で一時的な構造の形成を誘導し、その後、他の細胞によって一掃されてしまうようだ。

しかし、分子生物学者Judith Campisiが「暗黒面」と呼ぶ細胞老化の特性を研究者らが見つけるまで、そう長くはかからなかった。2008年にバック加齢研究所（米国カリフォルニア州ノバト）のグループをはじめとする3つの研究グループが、老化細胞がサイトカインや増殖因子、プロテアーゼなどの分子を大量に排出し、それらの分子が近隣細胞の機能に影響を与えたり、局所的炎症を引き起こしたりすることを示したのである[7-9]。Campisiのグループは、この活性を細胞の「老化関連分泌表現型（SASP）」と記述した[7]。彼女のチームは最近の未発表の研究で、SASPに関与する数百種類のタンパク質を特定した。

こうした分泌はおそらく、若く健康な組織では回復過程の一部にあたるのだろうとSerranoは話す。損傷した細胞は種々の分子を分泌することで、近隣組織に修復を促し、また、免疫系に自らを除去させるための損傷シグナルを出しているのだろう。しかし、ある時点で老化細胞が蓄積し始める。この過程は、関節の慢性的炎症である変形性関節症や、アテローム性動脈硬化症などの病態と関連付けられている。こうした蓄積がいつ、どういう理由で起こるかは分かっていないが、時の経過につれて免疫系が老化細胞への対処をやめてしまうせいではないかと考えられている。

意外なことに、老化細胞は組織ごとに少しずつ異なっていることが判明している。これらの細胞は異なるサイトカインを分泌し、異なる細胞外タンパク質を発現し、異なる戦術を使って死を回避する。そうした途方もない多様性のせいで、老化細胞を見つけ出したり可視化したりすることが難しくなっている。「現状では、『これが老化細胞だ』という決定的な特徴は何もないんです。何もね」とCampisiは強調する。

実際、老化細胞を規定する特徴（分裂しないこと）でさえも決定的な事項ではない。例えば化学療法の後、細胞は最大2週間かけて老化状態になるが、その後どこかの時点で増殖するがん化状態に戻るのだと、アルバートアインシュタイン医科大学の薬理学者Hayley McDaidは話す。2017年、そうした説の裏付けを取るための大規模な共同研究から、皮膚がんと乳がんのマウスモデルで化学療法直後に老化細胞を除去することにより、がんがあまり広がらなくなることが明らかになった[10]。

普遍的な特徴が見いだせないため、老化細胞のリストを作ることも難しくなっている。組織に存在する老化細胞を探すには多数のマーカーを使わなければならず、そのため時間と労力と費用がかかってしまうのだとvan Deursenは話す。この作業は、細胞老化の汎用マーカーがあればもっと容易になるだろうが、標識すべき特異的タンパク質や特定すべきプロセスが一切分かっていない。「自分だったら、細胞老化の特異的マーカーが決して見つからない方に、良いワイン1瓶を賭けますね」とCampisiは言っている。

しかし2017年の初め、ある研究グループが組織内の老化細胞を数える方法を考え出した。ワイツマン科学研究所（イスラエル・レホヴォト）のValery Krizhanovskyと同僚らが、細胞老化の分子マーカーでマウス組織を染色し、それらを画像化して腫瘍や老齢組織内の老化細胞の数を解析したのだ[11]。「老化細胞の数は予想よりかなり多かったです」とKrizhanovskyは話す。若いマウスでは、どの器官でも、老化していたのは細胞のわずか1%だったが、生後2年の老齢マウスでは、一部の器官で細胞の最大20%が老化していたのである。

ただし、これらの捉えどころのない「たそがれ細胞」には良い面もあった。見つけるのは難しいかもしれないが、死なせるのは簡単なのである。

老化細胞を追い出せ

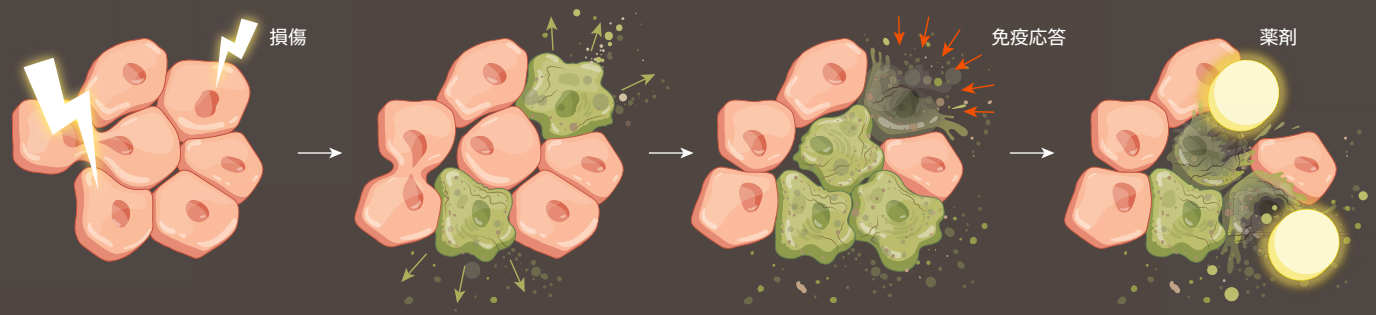
2011年11月、Davidは3時間の飛行機搭乗中に、van DeursenとKirklandが発表したばかりの「ゾンビ細胞」除去に関する論文を読み、さらに2度、3度と読み返した。そこに書かれた考え方は「とても簡潔で美しいものでした」とDavidはそのときの感動を思い出す。「詩的だと言ってもいいくらいでした」。飛行機が着地すると、バイオテク企業をいくつも立ち上げてきたDavidはすぐにvan Deursenに電話をかけ、72時間後には、会ってアンチエイジング企業の設立を検討することをvan Deursenに承諾させていた。

Kirklandは、サンフォード・バーナム・プレビス医学研究所（米国カリフォルニア州ラホヤ）の共同研究者らと共に、まずは老化細胞を死滅させられそうな化合物を

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

「アンデッド」状態の細胞

細胞は損傷や疾患をきっかけに老化への道をたどることがある。老化した細胞がどのように振る舞うかが分かりつつあり、老化した細胞を除去する仕組みについても研究が進んでいる。



引き金
損傷や疾患が起こっている際に、他の細胞からのシグナルと連動して老化が引き起こされる。

シグナルを排出
いったん老化すると、細胞は分裂をやめ、免疫分子を誘引するサイトカインなどのタンパク質を排出する。

一掃されるか居座るか
免疫細胞が老化細胞を死滅させ、組織の再生を可能にする。しかし、病的な組織や老齢の組織では老化細胞が蓄積する。

ゾンビキラー
開発中の薬剤が、細胞の生き残り戦術を無効にして関節や血管、眼から老化細胞を除去する。

迅速に見つけ出そうと、ハイスループットのスクリーニングに取り組んだ。ところが、この取り組みは、薬剤が分裂する細胞と分裂しない細胞のどちらに作用するかを知るための「画期的な仕事」だということに気付いたのだと、Kirklandは話す。何度か試しては失敗した後、彼は別のやり方を試してみた。

老化細胞は、いくつかの防御機構に依存して「アンデッド」状態で生き延びている。そこでKirklandは、スクリプス研究所（米国フロリダ州ジュピター）のLaura Niedernhoferらとの共同研究で、それらの防御機構を探し始めた。その結果、細胞死を防ぐシグナル伝達経路が6つ見つかり、老化細胞はそれらの経路を活性化して生き延びていることが分かった[12,13]。

そこで、それらの経路を破壊してくれる化合物を見つけることが重要課題になった。2015年の春、Kirklandのチームは初の老化細胞除去薬をいくつか特定した。その1つは、FDAがすでに承認していた抗がん剤「ダサチニブ」で、老化したヒト脂肪前駆細胞を除去する。また、植物由来の健康食品サプリメント「クェルセチン」は、老化したヒト内皮細胞を他の細胞型の中から選択的に標的とする。この2つを併用すると、別々に用いるよりも効果が上がり、マウスでさまざまな加齢関連疾患の症状を軽減した[14]。

その10カ月後、アーカンソー医科学大学（UAMS;米国リトルロック）のDaohong Zhouらは、現在「ナビトクラックス」と呼ばれる老化細胞除去化合物を突き止めた。この化合物は、老化細胞の生存を助けるBCL-2ファミリーの2種類の抗アポトーシス性タンパク質を阻害する[15]。その後、Kirklandの研究チーム[16]やKrizhanovskyの研究チーム[17]もこれと同様の発見を数週間以内に報告した。

現在までに14種類の老化細胞除去薬が文献上で報告されており、その中には低分子や抗体が含まれ、2017年3月にはペプチドも加わった。このペプチドは、細胞死経路の1つを活性化して、老齢マウスの毛の艶や体力を回復させる[3]。

これまでのところ、それぞれの老化細胞除去薬は特定の「フレーバー」の老化細胞を死滅させるものでしかない。従って、加齢によるさまざまな疾患を標的にするには、多種類の老化細胞除去薬が必要になる。「このため問題が難しくなっています。それぞれの老化細胞は違う方法で身を守っていると考えられるからです。そのため、老化細胞を全て除去するには薬の組み合わせ方を見つける必要があります」とNiedernhoferは話す。ユニティ社には、どの老化細胞がどの疾患と関連付けられるかを記した大きな図表がある。そこには、任意の種類の老化細胞に固有な全ての脆弱性や、それらの弱点の利用法、特定の組織に適した薬剤を作り出すために必要な化学的情

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

報などが含まれている。症状ごとに異なる種類の薬剤を開発する必要があることは、疑う余地がないとDavidは話す。「こんなことをしないで済めばよかったのですが、残念なことに生物学にはこの図表のような基礎的な情報がなかったのです」。

これら全ての課題を考えたとき、老化細胞除去薬には魅力的な性質がいくつかある。病態を防いだり進行を遅らせたりするには、おそらく、1年に1回というように一定期間ごとに老化細胞を一掃する必要がある。そのため、老化細胞除去薬が体内に存在するのは短期間になる。この種の「ヒット・エンド・ラン」式の薬剤送達なら副作用が出る可能性は低くなるだろうし、健康状態の良いときを狙って投与することもできるだろう。ユニティ社では、病的状態の組織に老化細胞除去薬を直接注入することを計画している。つまり、変形性関節症の場合であれば膝の関節、加齢性黄斑変性症であれば眼底に注入するのである。

また、がんでは細胞が1個残っても新しい腫瘍の火種になり得るが、それと違って、アンチエイジング療法では組織内の老化細胞を全て死滅させる必要はない。マウスを使った研究から、老化細胞の多くを死滅させるだけで、効果を得るのに十分なことが示されているのだ。結局のところ、老化細胞除去薬は既存の老化細胞を一掃するだけであって、それ以降の老化細胞の生成を予防するわけではない。従って、細胞老化が体内で果たす腫瘍抑制という本来の働きは保たれることになる。

そうしたメリットがあっても、老化細胞除去薬の威力を全ての人が確信しているわけではない。Hayflickが最初に細胞老化を発見してからほぼ60年経つが、彼は現在、老化現象とは老化細胞を除去することでは変えられない情け容赦のない生物物理学的過程だと考えている。「老化の過程を妨げようとする取り組みは有史以来ずっとありました。しかし現在も、老化の過程について何も分かっていません。つまり、老化過程を妨げることが実証されたものも今のところ皆無ということです」とHayflickは話す。

老化細胞除去薬の支持派はもっと楽観的であり、近年の研究成果を受けて活気づいている。2016年、van Deursenのチームは老化細胞除去薬の試験を超高齢マウスで行った。正常に加齢するマウスで老化細胞を除去すると、加齢に伴う腎臓や心臓などの器官の劣化が遅くなることを明らかにしたのだ[6]。さらに、老化細胞除去薬によってマウスの平均寿命が約25%延びた（*Nature* ダイジェスト2016年4月号「老化細胞を除去したマウスは長生き」参照）。これはアンチエイジングに熱心な人々にとってうれしい話だろう。

マウスを使った研究で良い結果が得られたことから、すでに7、8社が老化細胞除去薬の研究領域に食指を動かしているとKirklandは見ている。メイヨークリニックでは、慢性腎疾患に対してダサチニブとクェルセチンの併用を試す臨床試験が始まった。Kirklandは、他の老化細胞除去薬をさまざまな加齢関連疾患に対して試す計画だ。「試験では複数の化学物質セットを用いて、複数の病態について検討したいと思っています」と彼は話す。

老化細胞を除去することでヒトの加齢関連疾患が実際に改善されたら、研究者らはもっとさまざまなアンチエイジング治療薬を作り出そうとするだろうとDavidは話す。その一方で、細胞老化の研究者からは、厳密な安全性試験がヒトで完了するまで老化細胞除去薬を投与すべきではないという声が上がっている。老化細胞除去薬は齧歯（げっし）類で創傷治癒を遅らせることが明らかになっており、それ以外の副作用がある恐れもある。「まだ危険すぎます」とKirklandは話す。

van Deursenによれば、生物学の基本的問題を日々解明し続けることが、アンチエイジング研究を成功させるための最良の道だという。「そうすることで初めて、老化現象というものの本質を理解することができ、老化を防止できる合理的なやり方が明らかになるでしょう」。■

（翻訳：船田晶子）

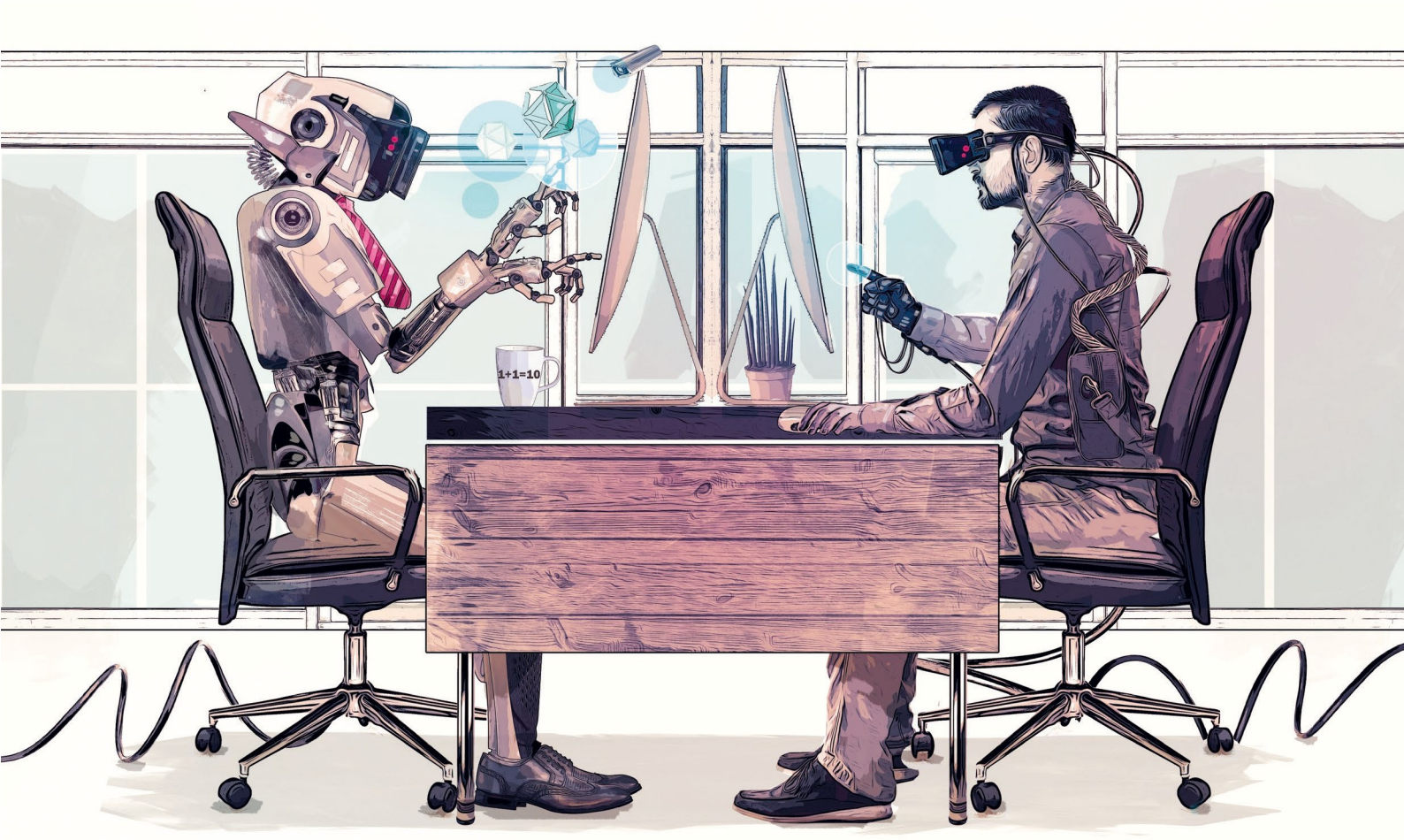
To stay young, kill zombies
Vol. 550 (448–450) | 2017.10.26
Megan Scudellari
（米国マサチューセッツ州ボストン在住の科学ジャーナリスト）

1. Baker, D. J. *et al. Nature Cell Biology* **10**, 825–836 (2008).
2. Baker, D. J. *et al. Nature* **479**, 232–236 (2011).
3. Baar, M. P. *et al. Cell* **169**, 132–147 (2017).
4. Schafer, M. J. *et al. Nature Communications* **8**, 14532 (2017).
5. Jeon, O. H. *et al. Nature Medicine* **23**, 775–781 (2017).
6. Baker, D. J. *et al. Nature* **530**, 184–189 (2016).
7. Coppé, J.-P. *et al. PLoS Biol.* **6**, e301 (2008).
8. Kuilman, T. *et al. Cell* **133**, 1019–1031 (2008).
9. Acosta, J. C. *et al. Cell* **133**, 1006–1018 (2008).
10. Demaria, M. *et al. Cancer Discov.* **7**, 165–176 (2017).
11. Biran, A. *et al. Aging Cell* **16**, 661–671 (2017).
12. Zhu, Y. *et al. Aging Cell* **14**, 644–658 (2015).
13. Fuhrmann-Stroissnigg, H. *et al. Nature Communications* **8**, 422 (2017).
14. Kirkland, J. L. & Tchkonia, T. *EBioMedicine* **21**, 21–28 (2017).
15. Chang, J. *et al. Nature Medicine* **22**, 78–83 (2016).
16. Zhu, Y. *et al. Aging Cell* **15**, 428–435 (2016).
17. Yosef, R. *et al. Nature Communications* **7**, 11190 (2016).

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

AI時代の仕事と雇用

デジタル革命は世界の労働者のあり方をどのように変えるのか、3つの観点から検証する。



ILLUSTRATIONS BY CHRIS MALBON

2016年、オンライン授業を提供する教育会社「Udacity」の設立者で社長でもある起業家のSebastian Thrunは、人工知能（AI）を利用して営業部門のてこ入れをすることにした。Udacityには、受講に関する問い合わせをしてくる人々にオンラインチャットで対応する営業担当者が大勢いる。スタンフォード大学（米国カリフォルニア州）でコンピューター科学の研究室も主宰しているThrunは、学生の1人と協力してこれらのオンラインチャットの記録を集め、受講者の獲得につながったチャットに印を付けた。2人は機械学習システムにそれらを入力し、よくある質問に対する最も効果的な応答を収集させた。

彼らは次に、出来上がった「デジタル営業アシスタント」を人間の営業担当者と一緒に働かせた。問い合わせが入ると、プログラムが適切な応答を提案する。営業担当者はそれを使って返事をするが、必要に応じて手直しすることもできる。つまり、あらゆる状況をカバーする広範なデータを蓄積し、瞬時に反応することができる営業マニュアルである。彼らのシステムはうまく行った。営業部門はこれまでの2倍の人数の見込み客に同時に応対できるようになり、応対が売り上げに結び付く割合も高くなった。自分たちのシステムは、社内で最も優秀な営業担当者たちのスキルをパッケージにして営業部門の全

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

員に分け与えるものだと、Thrunは言う。彼は、この方法は革命を起こす可能性があると見ている。「蒸気機関や自動車が人間の筋力を増幅したように、人間の知力を増幅し、超人的な知性の持ち主に変えるのです」。

人工知能、ロボット工学、クラウド・コンピューティング、データ分析、モバイル通信などのデジタル技術は、この10年間で飛躍的に進歩した。これらの技術は、今後数十年のうちに、農業、医療、製造業から、販売、金融、運輸まで、ほとんど全ての産業を変容させ、仕事の本質を作り変えるだろう。マサチューセッツ工科大学（MIT；米国ケンブリッジ）のデジタル経済イニシアチブ（Initiative on the Digital Economy）を率いるErik Brynjolfssonは、「多くの仕事が消えてなくなり、多くの新しい仕事が生まれ、また必要とされるでしょう。それ以上に、はるかに多くの仕事の形が変わるでしょう」と予想する。

しかし、確実な予測は難しい。「デジタル技術が猛スピードで進歩しているからです。これはある意味良いことなのですが、その影響についての理解が全然追いつかないという問題が生じてしまうのです」とBrynjolfssonは言う。「この技術がもたらす変化に関する研究は、ニーズが非常に高く、とても大きなチャンスがあります」。実際、研究者たちはこうした研究を始めているが、これまでに集まった証拠を見ると、物語は単純な筋書きにはなりそうにない。デジタル技術の進歩は、複雑かつ微妙なやり方で仕事を変え、労働者にとってはチャンスとリスクの両方を創り出すと考えられるからだ（「さらなる研究が必要なテーマ」参照）。

以下では、デジタル社会における仕事の未来について、3つの切迫した問題を紹介し、研究者が出し始めた答えを見ていく。

機械学習は熟練労働者を不要にするか？

技術の進歩による仕事の自動化の波は以前にもあり、そのときには、単純で反復的で型通りに進められる仕事は機械が引き受けるようになった。だが機械学習の登場により、「認知（cognitive；状況を認知して自ら学習・思考し、答えを出す）」を要する、より複雑で型通りには進められない作業を自動化できる可能性が開かれた。「この40～50年間は、人間が十分に理解していない作業を自動化することは不可能でした」とBrynjolfssonは言う。「けれども今は違います。機械が自分で学習できるようになったからです」。

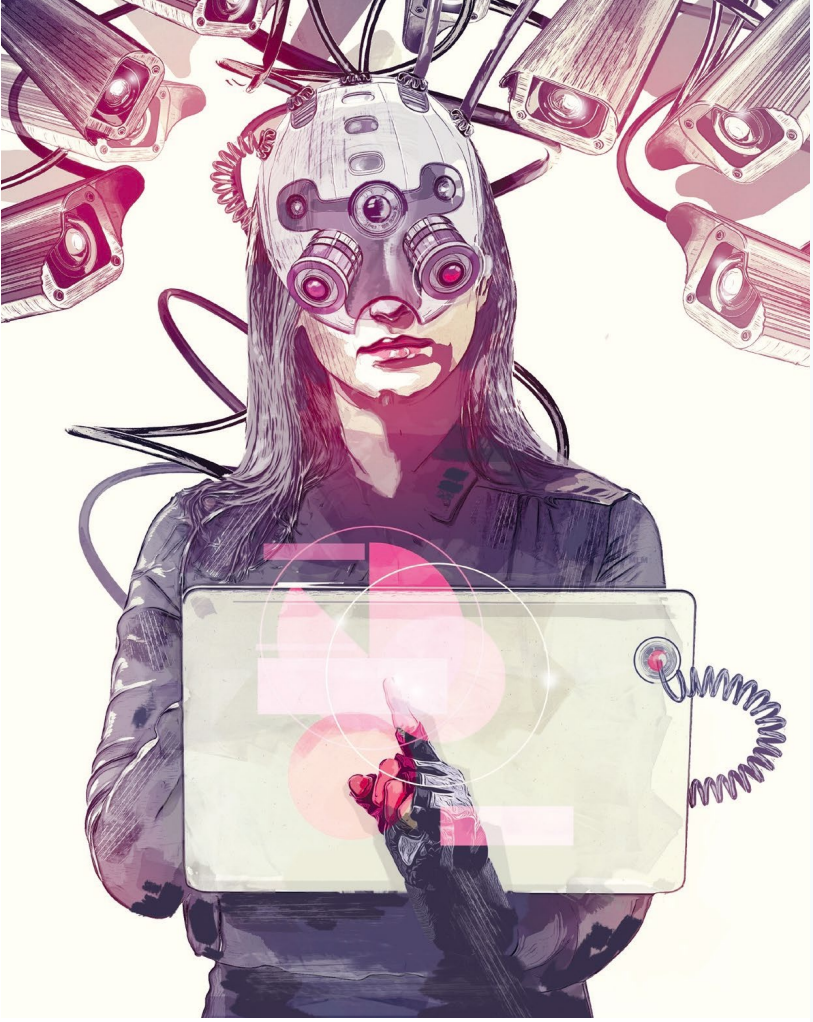
話し言葉を翻訳し、画像を分類し、株の銘柄を選び、詐欺を検知し、病気を診断することができる機械学習システムは、新しい領域や意外な領域で、人間に匹敵する能力を見せている。「機械は、人間には到底不可能な量の標本データを見ることができます」とThrun。彼が率いる研究チームが2017年初頭に発表した論文では、12万9000点の皮膚病変の画像を使って人工知能を訓練したところ、皮膚科専門医に匹敵する精度で皮膚がんを診断することができたと報告している[1]（*Nature* ダイジェスト 2017年5月号「AIによるがん診断支援が現実味を帯びてきた」参照）。

このような進歩を目の当たりにした人々は、以前は複雑過ぎて自動化できないと考えられていた分野でも、機械学習システムが人間の労働者に取って代わるようになるのではないかと心配するようになった。そして初期の見積もりでは、人間の雇用に関して悲惨な未来が予想された。2013年、英国のオックスフォード大学マーティンスクールの技術・雇用プログラム（Oxford Martin Programme on Technology and Employment）の研究者らは、機械学習と移動ロボット工学の進歩と未解決問題を検討し、702種類の職業が自動化により機械に取って代わられる可能性を見積もった[2]。その結果は驚くべきもので、米国の仕事の47%がコンピューター化による消滅の危機にさらされ、運輸、物流、製造、管理支援の仕事は特に危ないとされた。もし本当なら、タクシー運転手、弁護士秘書、文書整理係などは大変なことになってしまう。

しかしその後、他の研究者たちが「多くの職種の労働者が実際に行っている仕事の多様性を考えると、47%という数字は大き過ぎる」と主張した。欧州経済研究センター（Centre for European Economic Research、ドイツ・マンハイム）の上級研究員Ulrich Zierahnは、「労働者が職場で実際に行っている仕事をもっと掘り下げ、タスク構造を調べれば、47%という数字はもっと小さくなります」と言う。

例えば、オックスフォード大学の研究は、簿記、会計、監査の事務員が自動化により職を失う危険性は98%と報告していた。けれどもZierahnらが、こうした職種の人々の実際の仕事内容に関する調査データを分析したところ、

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.



76%の人がグループでの作業や対面でのやりとりを必要とする仕事をしていることが明らかになった。少なくとも現時点では、そうした作業は容易には自動化できない[3]。同様のアプローチを他の職種にも広げた著者らは、調査を行った21カ国で消滅の危機にある職業の数について、それほど意外ではない数字を導き出した。自動化により大きな危険にさらされる労働者の割合は米国では9%にすぎず、低いところでは韓国とエストニアの6%で、最高でもドイツとオーストリアの12%であった（「ロボットにはまだ負けない」参照）。

Brynjolfssonは現在、カーネギー・メロン大学（米国ペンシルベニア州ピッツバーグ）のコンピューター科学者Tom Mitchellと協力して、機械学習の影響をさらに深く掘り下げようとしている。彼らは、機械学習に特に適したある種の作業について、その特徴を大まかにつかむ方法を考え出した。例えば、機械学習システムは、1セットの入力（皮膚病変の画像など）を別の1セットの出力（がんの診断など）に翻訳するような作業が得意だ。また、機械学習システムの訓練には大量のデジタルデータが必

NEWS FEATURE

さらなる研究が必要なテーマ

科学者たちは、技術が職場をどのように変えるか予想しようと取り組んでいる。

変わりゆく仕事の世界は、研究者に無数の研究テーマを提供してくれる。本文で取り上げたもの以外に仕事の現場で生じている傾向と、それに関連して研究者が提起する問題（現時点ではほとんど答えが出ていない）を2つ挙げる。

雇用者による新しい形の追跡や監視に対し、労働者はどのように反応しているか？

雇用者は昔からスタッフの仕事ぶりを監視してきたが、職場の監視は新しい時代に入っている。

企業は今では、コンピューターに向かう労働者のキー入力を記録したり、モニターのスクリーンショットを遠隔で撮影したりする他、モーションセンサー、生体認証、無線ICタグ（radio-frequency identification ; RFID）やGPSを利用して勤務時間外の動きまで追跡できるようになっている。

こうした監視技術の普及に対して労働者がどのくらい抵抗を感じているか、どこで線引きをするべきかなどの問題は、まだ明らかになっていない。新しい形の監視は、目立たない形で裏目に出たり、信頼関係や士気やイノベーションを台無しにしたりはしないだろうか？

人間強化技術は労働者の健康や安全にどのような影響を及ぼすか？

認知能力を高める薬物から、肉体労働を安全かつ容易にする生体工学的「外骨格」まで、人間の能力を向上させるさまざまな技術が職場に入り込もうとしている。

実際に、人間強化技術が労働者の健康や安全を守るのに役立つ場合もあるだろう。覚醒を促進するモダフィニルなどの薬物は長距離ドライバーの事故を防ぎ、外骨格は関節への負荷や筋肉の疲労を軽減するかもしれない。こうした技術が長期的に使用されると、労働者が過度の労働や危険な業務を課され、直接または間接に不利益を被ることにならないかは、まだ分からない。 E.A.

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

要であるため、こうしたデータを入手しやすい作業に用いられることになるだろう。BrynjolfssonとMitchellは今、複数の大規模な職業データベースを調べていて、職場での各種作業がこうした規準にどの程度当てはまるかを決定しようとしている。

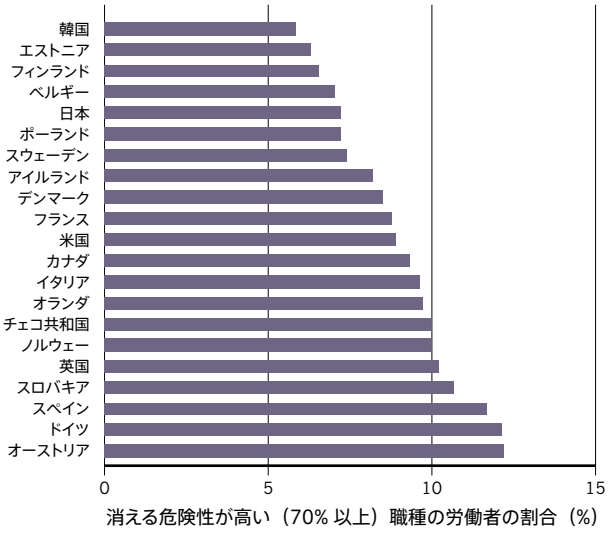
この種の分析が行われるようになっても、労働市場でどのような結果になるかを見極めるのは困難だ。ある作業の自動化が可能であっても、実際に自動化されるとは限らないからだ。新しい技術はしばしば組織的な変化を必要とし、そうした変化には費用も時間もかかる。法律や倫理や社会の壁が、技術の発達を遅らせたり失敗に終わらせたりすることもある。ミラノ大学（ビコッカ校）（イタリア）で健康情報学を研究しているFederico Cabitzaは、「AIはまだ既製品にはなっていません」と指摘する。例えば、医療分野で機械学習システムを導入するためには、技術ができているだけでは不十分で、システムを稼働させるために多くの人手と時間を捧げる覚悟が必要だと彼は言う。介護者や患者の同意が必要なのは言うまでもない。

これまでの研究から、労働者は新しい技術に柔軟に適応することが分かっている。20世紀の後半には、作業の自動化が進むにつれて職業内で変化が起こり、従業員は、より複雑で、決まった手順では進められないような仕事を担うようになった。未来の事例を考えるとき、自動化による変化が望ましい方向に作用する場合もある。型通りの手順で診断がつくものを自動化されたシステムに任せることで、医師は患者とのやりとりや難しい症例にもっと時間を割けるようになるかもしれない。「コンピューターが上手に病気を判断できるようになってきたからといって、医師という職業がなくなるわけではないのです」とMitchellは言う。「私たちは今よりも良い医師に治療してもらえるようになるのかもしれません」。

実際、多くの人は、AIシステムに取って代わられることなく、Udacityの営業担当者のように一緒に働くようになるのかもしれない。例えば、自動運転車はまだ、どんな状況でも単独で走行できるレベルには達していないため、日産自動車は人力による解決法を開発している。自動運転車が道路工事や交通事故などの理解不可能な状況に遭遇すると、車が遠隔指令センターに連絡して、問題の地点を通過するまで人間の「運転管理者」が車に代わって操縦するのだ。ヒューマン・コンピュテーション研究所（Human Computation Institute；米国ニューヨーク州イサカ）のPietro Michelucci所長は、「機械と人間の考え方は根本的に違っていて、それぞれに長所があります。ですから、機械と人間が手を結ぶのはごく自然なことなのです」と言う。

ロボットにはまだ負けない

2016年の報告で、高所得の21カ国で自動化により消える危険性が高い（70%以上）職業の割合が考察された。それぞれの職業で労働者が実際に行っている仕事の多様性を考慮しているため、以前の研究の見積もりよりも低い数字になっている。



SOURCES: OECD/REF. 3 (HTTP://GO.NATURE.COM/2KK4D4Y)

ギグ・エコノミー拡大で労働者からの搾取が進む？

労働者がインターネット上のプラットフォームを利用して短期の小さな仕事を見つける「ギグ・エコノミー（gig economy）」は、労働者の柔軟性、多様性、自律性を約束する働き方として、近年急成長している（「ギグ」の元々の意味は、ミュージシャンが短期の契約で演奏すること）。デジタルに仲介されたオンデマンド式の単発の仕事には、タクシーサービス「ウーバー（Uber）」の運転手として働くことから、アマゾン・メカニカルターク（Amazon Mechanical Turk）などの巨大なクラウドワーキング・プラットフォームでのマイクロタスク（調査への協力、短い文章の翻訳、画像の分類など）の受注まで、さまざまな形態がある。

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

こうしたデジタルのプラットフォームにより、労働者はどこで発注された仕事でも受注できるようになった。地理的な壁がなくなれば、労働者は良い仕事を選んで受注できるわけだ。オックスフォード大学のデジタル地理学者Mark Grahamは、「例えばあなたがナイロビに住んでいても、地元の労働市場の制約を受けずに済むのです」と言う。Grahamらは数年前から東南アジアとサハラ以南のアフリカにおけるデジタルオンデマンド経済の研究をしている。彼らは、これらの地域の150人以上のギグワーカーと対面でのインタビューを行い、500人以上について調査し、インターネット上の労働プラットフォームでの数十万件のやりとりを分析した。

彼らの予備的な研究結果は、こうした単発の仕事でそれなりの利益を得ているギグワーカーもいることを示していた。調査への回答者の68%が、ギグワークの報酬が世帯収入の大きな部分を占めていると答えていた。また、デジタルプラットフォームは、就労機会が制限されている人々（家族を介護している女性や労働許可を持たない移民など）を含め、さまざまな人に仕事を提供していた。「本当にもうかっている人もいます」とGrahamは言う。「けれどもそれは、一部の人です」。

ギグ・エコノミーでは労働者が著しい供給過剰状態にあり、一部の労働者は、自分が妥当と考える金額よりも安い報酬で仕事を受注するようになっている。厳しい締め切りに間に合わせるため、猛烈なペースで長時間働く労働者も多い。「一般に、彼らの生活は非常に不安定で、与えられる仕事にノーとは言えないと感じています」とGraham。「請け負った仕事を時間通りに終わらせるために48時間ぶっ続けで仕事をすることもあるという人も、少なからずいました」。

地理的不平等もかなり残っている。Grahamらは2014年の研究[4]で、ある大規模なプラットフォームで2013年3月に発生した6万件以上のやりとりを分析した。その結果、ほとんどの仕事が高所得国の雇用者によって発注され、低・中所得国の労働者によって受注されていたことが明らかになった（「ギグ・エコノミーがもたらす不平等」参照）。

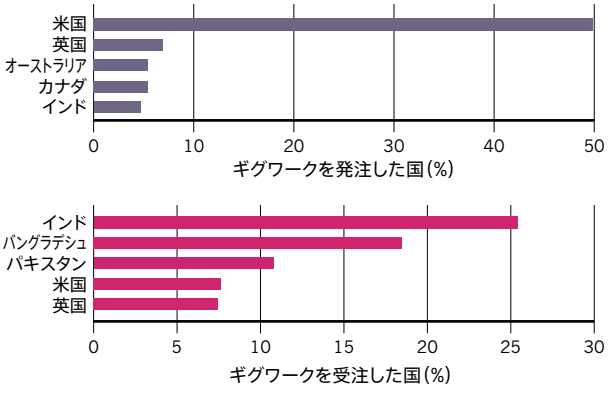
ギグ・エコノミーでは世界中どこでも仕事を受注できるはずだが、発注者の近くに住んでいる労働者はやはり有利であるようだ。彼らは海外の労働者よりも仕事を受注する割合が高く、同様の仕事に対してはるかに高額の報酬を得ている（例えば、米国の労働者の平均時給が24.13ドルであるのに対して、同様の仕事をする海外の労働者の平均時給は11.66ドルである）。そして、一部の低・中所得国は、他の国よりはるかに多くの仕事を獲得している。Grahamの分析では、上位2カ国はインドとバングラデシュだった。

不平等の一部は実務的な懸念によって説明できる。一部の発注者は、言語の違いや時差がある外国の労働者に仕事を発注することを躊躇する。また、インドとバングラデシュへのアウトソーシングの歴史の長さが、この地域の労働者を魅力的に見せている可能性も考えられる。しかし、意識的あるいは無意識の差別も関係している。Grahamのチームは、仕事を提示する際に、一部の国の人々は応募する必要がないと明記する発注者がいることに気付いた。Grahamと一緒に研究をしている研究者Mohammad Amir Anwarは、「こうした技術で世界のさまざまな場所を結び付けられるようになっても、私たちが期待するほどには、異なる人々の間に橋をかけることはできていません」と言う。

ギグワーカーに関する別の大規模な民族学的研究では、ギグワークがどのように行われているかを解明しようとしている。この研究は、労働者が成功するために必要なものについての手掛かりも与えてくれる。マイクロソフ

ギグ・エコノミーがもたらす不平等

英語でのフリーランスワークを仲介する最大規模のオンライン・プラットフォームでは、全体の半数近くの仕事が米国の雇用者から発注され、仕事を受注する労働者の多くはアジアに住んでいる。それぞれの上位5カ国は以下の通り。



SOURCE: ILABOUR (HTTP://GO.NATURE.COM/2GZE5TZ)

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

ト研究所（Microsoft Research）の上級研究者である人類学者のMary Gray（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）と計算社会学者のSiddharth Suri（米国ニューヨーク）は、2013年から2015年にかけて米国とインドの約2000人のギグワーカーを調査し、そのうちの200人に長時間のインタビューを行った。

最初に明らかになったことの1つに、ギグワーカーはしばしば独立の自律的な労働者として説明されるが、実際にはその多くが連絡を取り合い、協力し合っているという事実がある[5]。労働者はお互いに助け合ってアカウントやプロフィールを作成し、良い発注者や新たに掲載された仕事に関する情報を共有し、技術的・社会的に支え合っていた。Suriによると、ギグワーカーはシステムから排除された人間的なつながりを再び追加しようとして意識的に努力している。彼らは自分の時間を割いてこうした作業をしているので、「ギグワーカーが人間的なつながりに価値を認めていることは明らか」だという。

GrayとSuriらは、より定量的な追跡研究[6]として、アマゾン・メカニカルタークの1万人以上のギグワーカーについて社会的なつながりの地図を作成し、彼らの協力関係が実際に役に立っていることを明らかにした。プラットフォームの1人以上とのつながりがある労働者は、つながりを持たない労働者よりも納品した仕事の受領率が高く、優秀さの証明となる「マスター」のステータスを持っている割合が高く、新しい仕事を早く見つけていた。生産的なギグワーカーになるためには「協力し合う必要があることが分かりました。彼らはお互いを必要としているのです」とGrayは言う。

デジタルスキルの格差は解消できるか？

専門家たちは長年にわたりデジタルスキルの不足に警鐘を鳴らしてきた。ハイテクの仕事を担える訓練を受けた労働者の数が少なすぎる上、ある種の地理的領域や人口統計群の労働者は、基礎的なデジタルリテラシー（デジタル機器を活用して社会活動を行う能力）の不足のため、デジタル経済の中で成功することができないというのである。こうした懸念を払拭（ふっしょく）しようと、デジタルリテラシーやデジタルスキルを向上させるための各種の革新的なプログラムが世界中で登場している。これまでの研究により、どんなプログラムがうまくいき、どんなプログラムがあまりうまくいっていないか、そして、スキル訓練のどんな点が期待通りに行っていないかについての手掛かりが集まり始めている。

記録的な成功を収めたプログラムもある。今から10年以上前、米国防総省高等研究計画局（DARPA）は、米国海軍の新兵を情報システム技術者として訓練するための「デジタルチューター」システムの開発に着手した。このシステムは、1人1人の生徒に合った訓練ができ、双方向的で、適応性がある。生徒はこのチューターと1対1で訓練を行い、さまざまな項目について学び、関連する問題を解く。デジタルチューターは概念学習と考察を優先し、これまで学んだことを生徒に何度も復習させる。生徒がその項目をマスターしたとシステムが判断したら、次の項目に進むことができる。

米国防衛分析研究所（IDA；米国バージニア州アレクサンドリア）の研究者が2014年にこのプログラムのレビューを行ったところ[7]、16週間のコースを終えた12人の新兵が、米国海軍がその2倍以上の時間をかけて行う従来のIT訓練を終えた新兵よりも優秀だったことが明らかになった。それだけではない。この12人は、平均10年の経験を持つ海軍の年長のIT技術者グループよりも、ほとんど全ての点で優れていた。レビュー論文の共著者Dexter Fletcherは、「こんなことができるのですから、もっと活用するべきではないでしょうか。職業訓練への応用を本気で考えるべきです」と言う。

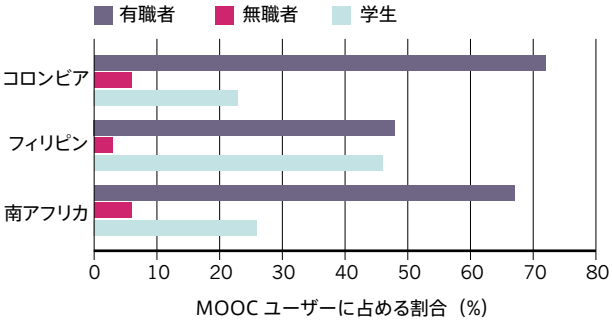
Fletcherはその後の追跡研究[8]で、民間のIT系職種への就職を希望する100人の退役軍人に対し、このデジタルチューターの微修正バージョンを使って訓練を行ったところ、この実験でも同様の結果を得た。訓練プログラムを終えた退役軍人の97%が、半年以内に希望するIT系職種への就職を果たし、この分野で3～5年の経験がある人と同程度の平均年収を得ることができたのだ。

この他にも、人々のデジタルスキルを向上させ、雇用を改善するための戦略が多数奨励されている。インターネット上で大学レベルの授業を無料で受講できるMOOC（Massive Open Online Course）や、コンピューター・プログラミングの基礎を教える短期間集中型の訓練コース「コーディング・ブートキャンプ（coding bootcamp）」も、そうしたプログラムの1つである。

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

もう一度学びたい

2016 年に MOOC で学んだコロンビア、フィリピン、南アフリカの受講者の調査により、ほとんどの受講者が有職者か学生で、仕事のために特定のスキルや資格を求めていることが明らかになった。



SOURCE: REF. 9 (HTTP://GO.NATURE.COM/2YFAPWC)

2016年にコロンビア、フィリピン、南アフリカの1400人のMOOCユーザーに関する分析[9]が行われ（「もう一度学びたい」参照）、受講者の80%が低所得または中所得の家庭で育ち、41%がごく基本的なコンピュータースキルしか持っていないことが明らかになった。また、MOOCの受講者の半数以上（56%）が女性で、最も人気があるプログラムはコンピューター科学だった。この報告書の共著者であるワシントン大学情報学部（米国）のMaria Garridoは、「実は女性たちは、女性が少ない分野の講義を受けているのです」と言う。

しかし、MOOCのプログラムは玉石混交で、厳密な評価を受けているものはほとんどない。一方のコーディング・ブートキャンプは高額で、多くの時間を投資する必要があり、基本的にはハイテク産業が集中している地域や都会でしか開催されていない。さらに、ここにも成績の格差がある。スタンフォード大学の2人の研究者が6万7000人以上のMOOCの受講者について行った2015年の研究[10]によると、女性の受講者や、アフリカ、アジア、南米の男女の受講者は、男性の受講者や、北米、欧州、オセアニアの男女の受講者に比べて、区切りとなる段階（講義の50%を視聴するなど）に到達する割合が低く、成績も振るわなかった。

デジタルスキルの課程を修了した人でも、実際に就職するとなるとさまざまな壁に突き当たる。研究者が2004年にストラスモア大学（ケニア・ナイロビ）のITプログラムを修了したケニア人学生にインタビューをしたところ、一部の学生は、大学を卒業して地元の経済活動に参加しようとしたときに、自分の専門知識の価値を分かってもらえず、それを活用できるような仕事もないのではないかと心配していた[11]。この研究に参加したペンシルベニア州立大学（米国ユニバーシティーパーク）の情報科学者Lynette Yargerは、「特に不安を感じていたのは女子学生です」と言う。ある学生は、「私は女性なので、雇用者は私にIT系の仕事をさせるわけにはいかないと考えるかもしれません。そうなったら、私は大学で身に付けた知識を活用できず、自分がやりたい仕事ができないかもしれません」と語ったという。

研究により明らかになっていることが1つある。どんなに良くできている訓練プログラムでも、デジタルワークの世界での成功を保証するものではないということだ。「人より優れたスキルを持ち、コンピューターの使い方が分かっていても、必ずしも良い仕事に就けるわけではないのです」とGarridoは言う。「デジタルスキルはパズルの重要なピースですが、それだけでは不十分なのです」。■

（翻訳：三枝小夜子）

The Shape of Work to Come
Vol. 550 (316–319) | 2017.10.19
Emily Anthes
（ニューヨーク在住の科学ジャーナリスト）

1. Esteva, A. *et al. Nature* **542**, 115–118 (2017).
2. Frey, C. B. & Osborne, M. *The Future of Employment: How Susceptible are Jobs to Computerisation?* (Univ. Oxford, 2013); available at http://go.nature.com/2wpgywa
3. Arntz, M., Gregory, T. & Zierahn, U. *OECD Social, Employment and Migration Working Papers* , No. 189 (OECD, 2016); available at http://doi.org/cdmj
4. Lehdonvirta, V., Barnard, H., Graham, M. & Hjorth, I. Internet, Policy & Politics Conference 2014: Crowdsourcing for Politics and Policy, Oxford, 25–26 September 2014; available at http://go.nature.com/2xczyhg
5. Gray, M. L., Suri, S., Ali, S. S. & Kulkarni, D. in *Proc. 19th ACM Conf. on Computer- Supported Cooperative Work & Social Computing* 134–147 (2016); available at http://doi.org/cdtt
6. Yin, M., Gray, M. L., Suri, S. & Vaughan, J. W. in *Proc. 25th Int. Conf. on World Wide Web* 1293–1303 (2016); available at http://doi.org/cdtw
7. Fletcher, J. D. & Morrison, J. E. *Accelerating Development of Expertise* (Institute for Defense Analyses, 2014); available at http://go.nature.com/2kjdfuk
8. Fletcher, J. D. *Digital Tutoring in Information Systems Technology for Veterans: Data Report* (Institute for Defense Analyses, 2014).
9. Garrido, M. *et al.* 'An examination of MOOC usage for professional workforce development outcomes in Colombia, the Philippines, & South Africa' (Univ. Washington Inf. Sch. 2016); available at http://go.nature.com/2xej1s9
10. Kizilcec, R. F. & Halawa, S. in *Proc. Second (2015) ACM Conference on Learning@ Scale* 57–66 (2015); available at http://doi.org/cdt3
11. Kvasny, L., Payton, F. C., Mbarika, V. W., Amadi, A. & Meso, P. *IEEE Trans. Educ.* **51**, 256–261 (2008).

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

衛星を使った量子鍵配送と量子テレポーテーションに成功

応用物理学

量子通信は、古典的な通信方法に対して多くの利点を持つが、信号の伝送距離はこれまで数百kmが限界だった。今回、中国の2つの研究が人工衛星を使ってこの限界を破り、地球規模の量子通信ネットワークの実現に近づいた。

光の量子的性質は、それを古典物理学では不可能なやり方で通信手段として使うことができる。例えば、光の量子的性質を利用して、暗号化されたメッセージを絶対的な安全性で交換することができ、また、ある対象に関する情報を対象そのものを送らずに転送することができる。しかし、光ファイバーなどの典型的な量子通信経路では、通信距離が長くなるとともに失われる光子も多くなるため、情報の送信器と受信器の間の距離は厳しく制限される。今回、中国科学技術大学（安徽省合肥市）のJian-Wei Pan（潘建偉）が率いる研究グループのSheng-Kai Liao（廖勝凱）ら[1]と、同じ研究グループのJi-Gang Ren（任継剛）ら[2]はそれぞれ、地球周回軌道を回る衛星と地上局との間の量子通信を成功させ、*Nature* 2017年9月7日号43ページと70ページで報告した。衛星と地上局間では、光子は主に真空の空間を通過するので、光子の損失は最小限に抑えられる。この結果、彼らは、これまでの研究[3,4]で達成された通信距離を数百kmも延長した。これは、地球規模の量子通信の実現に向けて画期的な成果だ。

量子通信は、量子的粒子の性質に情報を符号化するもので、この情報を遠い場所に転送し、その情報を操作して特定のタスク（課題）を行うことを目指す[5]。そうした基本的なタスクに、量子鍵配送と量子テレポーテーションがあり、これらは古典情報を使っては達成できない。量子鍵配送は、通信する2者が「秘密鍵」と呼ばれるビット列を共有することを可能にするもので、彼らは彼らだけが知っている秘密鍵を使ってメッセージの暗号化と解読を絶対的な安全性で行うことができる。量子テレポーテーションは、粒子の量子状態を、その粒子そのものを送ることなく、転送する。このタスクは、もつれた2つの粒子を必要とする。もつれた2つの粒子は、互いに遠く離れていても、1つの粒子の状態を測定するともう1つの粒子の状態も決定される。

原理的にはどのような量子的粒子もこれらのタスクに使うことができるが、光子は、他の粒子よりも環境の変化に影響されにくいので、量子通信の情報の運び手として適している。実際、量子鍵配送と量子テレポーテーションは、光子系で実証されていて、光ファイバーと自由空間通信チャネルの両方で、最大数百kmの距離で成功している[4,6]。しかし、こうしたチャネルでの通信距離を延長しようとすると、光の損失という根本的な障壁に必ず行き当たる。この制限は古典的な光通信でも存在するが、古典的な光通信では信号を増幅して元に戻すことができる。しかし、量子通信ではそれはできない。

宇宙では、光子はほとんどじゃまされずに長距離を進めるし、地球規模の通信や科学ミッションのための、高度な衛星技術とインフラがすでに存在する。このため、衛星を使った量子通信の可能性は、10年以上前から徹底的に研究されてきた。特に、オーストリアが主導する研究コンソーシアムは、国際宇宙ステーションを使うことを想定して研究を行ってきた[7]。しかし、衛星を使う量子通信に伴う課題は膨大にある。これまで、衛星による量子通信を模擬する地上実験を超える成果を上げることができたのは、少数の事例だけだった[8]（もっとも、衛星量子通信を模擬する地上実験は、試験台としては今も非常に有用ではある[9]）。量子通信の一部の機能は、低軌道衛星[10]や静止軌道衛星[11]、基本的な量子通信ハードウエアを装備した小型衛星[12]を使って実行された。しかし、衛星による量子鍵配送や量子テレポーテーションを完全に実証

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

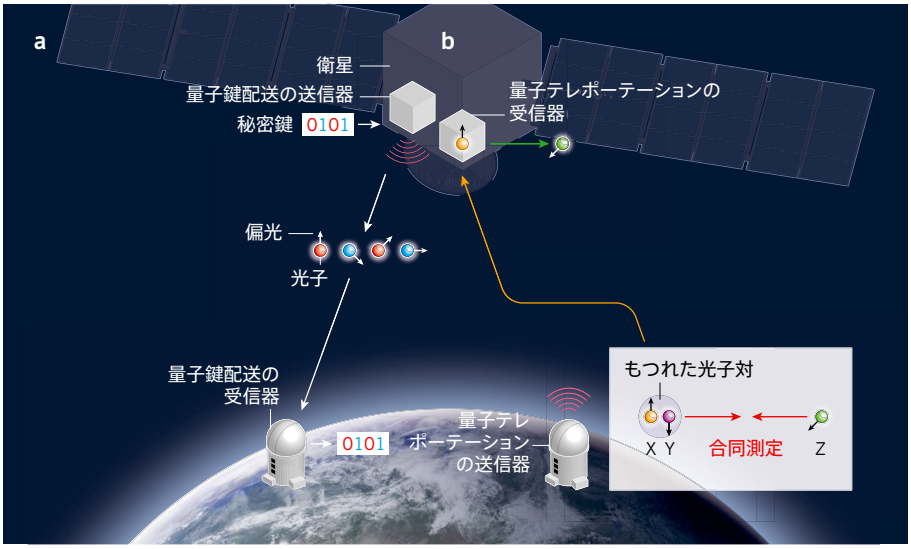


図 1　長距離量子通信

a　量子鍵配送は、通信する 2 者が、彼らだけが知っている秘密鍵と呼ばれるビット列を共有することを可能にするものだ。この秘密鍵を使って、秘密のメッセージを絶対的な安全性で暗号化し、解読することができる。Liao らは、秘密鍵を光子の偏光状態に符号化し、衛星上の送信器と地上の受信器との間で量子鍵配送を実証した[1]。

b　量子テレポーテーションは、粒子そのものを送らずに、粒子の量子状態を転送する。Ren らは、地上の送信器から衛星上の受信器へ、光子の偏光状態のテレポーテーションを行ったことを報告した[2]。Ren らは、もつれた光子対（1 つの粒子の状態を測定するともう 1 つの粒子の状態が決まるような状態）である光子 X と光子 Y を作り、光子 X を衛星に送った（オレンジ色の矢印）。彼らはそれから、光子 Y と、3 番目の光子 Z（その偏光状態をテレポートする）の合同測定を行った。最後に、彼らはこの測定結果を使い、光子 X の偏光が光子 Z の偏光に変わった（緑色の矢印）かどうかを決定した。

するには、技術的飛躍が必要だった。

今回、Liao らと Ren らは、衛星による量子鍵配送と量子テレポーテーションを完全に実証することに成功した。この2つの実験は、中国が2016年8月に打ち上げた、高度約500kmの低地球軌道の衛星「墨子（ぼくし）」（英語名Micius）を使った。この衛星は、量子通信のために特別に設計され、さまざまなタスクに必要ないくつかのモジュールを装備している。彼らは、近赤外波長の光子の偏光に量子情報を符号化した。

Liao らの量子鍵配送実験では、送信器は衛星上に、受信器は北京市に近い地上局にあり、通信距離は最大で1200kmだった（図 1a）。この構成は、ダウンリンク・シナリオと呼ばれ、光は、その経路の最後の部分でのみ地球の大気を通過する。このため、光が雲などの物体の端をかすめて通過するときに影の部分に回り込む、回折の影響が小さくなる、という利点がある。

一方、Ren らの量子テレポーテーション実験は、アップリンク・シナリオを使い、量子状態をテレポートされる光子は、チベット自治区西部のガリ地区にある地上局から最大で1400km離れた衛星上の受信器へ送られた（図 1b）。この構成は、ダウンリンク・シナリオよりも技術的に難しいが、複雑なもつれ対生成装置に地上でアクセス可能であるために選択された。Pan の研究グループは、衛星に搭載したもつれた光子対源から、光子対を地上の2カ所に送ることに成功したことを2017年6月に発表している[13]。Ren らは今回、量子テレポーテーションを行うため、もつれた光子対を地上で作り、その 1 つを衛星に送った。それから彼らは、地上でもう 1 つの光子と 3 番目の光子（その偏光状態をテレポートする）の合同測定を行った。最後に彼らは、この測定結果を使って、衛星上の光子の偏光が 3 番目の光子の偏光に変わったかどうかを決定した。

科学的な観点から見ると、Liao や Ren らの結果は、1000km を超える距離でも量子通信が可能であることを証明したといえる。地上のリンク（通信路）を使ってこの距離の量子通信を行うことは不可能だろう。しかし、何

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

より、彼らの結果は、技術的側面に並外れて力を注ぐことによって可能になった工学上の偉業といえる。彼らは、非常に高精度に光を追跡できる高度なシステム、同期技術、コンパクトかつ軽量で宇宙で実証された光子源や光子検出器など、最先端の技術を開発した。これらの進歩が、光ファイバー量子通信に匹敵する性能につながり、宇宙空間を利用して1000kmを超えて信号を転送できる、量子通信実験の新時代への道を開いた。

量子鍵配送の次の段階は、衛星を信頼できる秘密鍵中継器として使い、地球上の2つの離れた場所の間で安全なメッセージ交換を実証することだろう。衛星システムに特有のセキュリティ上の抜け穴を検討することも必要だ。量子鍵配送実験の応用の範囲を広げるためには、Liaoらが使った軌道よりも高い軌道の衛星と、より長波長の光子が必要になるだろう。

一方、より現実的な設定での量子テレポーテーションを実証するためには[14]、もつれた光子対源を衛星上で動作させる必要があるだろう。これを達成し、衛星コンステレーションと呼ばれる人工衛星群を使う可能性も考慮すれば[15]、やがては、地上と衛星の両方のリンクからなる地球規模の量子通信ネットワークが実現する可能性がある。また、今回報告された成果は、基礎的な物理学の宇宙空間を利用した研究においても、量子通信への応用を支えている中心的原理の理解を深めるという面で有用かもしれない[16]。■

（翻訳：新庄直樹）

Quantum signals could soon span the globe
Vol. 549 (41–42) | 2017.9.7
Eleni Diamanti
フランス国立科学研究センター（CNRS；パリ）、
ピエール・マリー・キュリー大学（フランス・パリ）に所属

1. Liao, S.-K. *et al. Nature* **549**, 43–47 (2017).
2. Ren, J.-G. *et al. Nature* **549**, 70–73 (2017).
3. Korzh, B. *et al. Nature Photonics* **9**, 163–168 (2015).
4. Ma, X.-S. *et al. Nature* **489**, 269–273 (2012).
5. Gisin, N. & Thew, R. *Nature Photonics* **1**, 165–171 (2007).
6. Diamanti, E., Lo, H.-K., Qi, B. & Yuan, Z. *npj Quantum Inf.* **2**, 16025 (2016).
7. Ursin, R. *et al. in Proc. 59th Int. Astronaut. Congr.* A2.1.3 (Int. Astronaut. Fed., 2008).
8. Bedington, R., Arrazola, J. M. & Ling, A. *npj Quantum Inf.* **3**, 30 (2017).
9. Pugh, C. J. *et al. Quantum Sci. Technol.* **2**, 024009 (2017).
10. Vallone, G. *et al. Phys. Rev. Lett.* **115**, 040502 (2015).
11. Günthner, K. *et al. Optica* **4**, 611–616 (2017).
12. Takenaka, H. *et al. Nature Photonics* **11**, 502–508 (2017).
13. Yin, J. *et al. Science* **356**, 1140–1144 (2017).
14. Valivarthi, R. *et al. Nature Photonics* **10**, 676–680 (2016).
15. Liao, S.-K. *et al.* Preprint at https://arxiv.org/abs/1611.09982 (2016).
16. Joshi, S. K. *et al.* Preprint at https://arxiv.org/abs/1703.08036 (2017).

ハチを誘引するために花が編み出した「青色光の輪」の正体

光生物学

さまざまな花の花弁にナノ構造の反復的なパターンがあり、そこには種を超えて同程度の不規則性が認められることが分かった。さらに、この「一定の不規則性」は、散乱光との作用で青色光の輪を生み出し、ハチを引き寄せる目印となっているようだ。

遺伝物質を性的パートナーへ効果的に渡す能力は、進化の強力な促進因子だ。ヒトをはじめとする移動性のある生物は、性的パートナーが互いに誘引し合うように進化した。しかし、植物のように固着性の生物は、媒介者に頼らざるを得ない。花粉の遺伝物質を運搬するハチはその一例だ。そうした媒介者は固着性の種の生存に不可欠であり、両者は緊密な関係を持ちながら共進化してきた[1,2]。*Nature* 2017年10月26日号469ページで、ケンブリッジ大学（英国）のEdwige Moyroudらは、花を咲かせるさまざまな植物がマルハナバチ（*Bombus terrestris*）を誘引する「青色光の輪」を生じるように進化したことを明らかにした[3]。

花粉媒介者は、嗅覚刺激と視覚刺激を併用することによって花を見つけ出す[4,5]。ハチにとっては、おそらく花の色と形が主要な識別要因だろう。しかし、ハチには色が見えるという考え方に対しては、ハチの眼が青以外の多くの色に比較的鈍感であることを示した光受容やスペ

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

HOWARD RICE

EDWIGE MOYROUD

図 1　さまざまな花色の花弁に見られる青色光の輪

ウルシニアの一種（*Ursinia calendulifolia*、左）とギンセンカ（*Hibiscus trionum*、右）の各花弁の内側暗色部分に見える青色光の輪。Moyroud らは、花を咲かせる植物の花弁を覆うナノ構造の反復的な配列が、青色光の散乱を促す一定の不規則性を持つように進化したことを明らかにした[3]。これによって生じる青色光の輪は、ハチを誘引する。

クトル感受性の研究[6,7]によって疑問が提起されている。

色には、色素分子から生じるものが多い。色素分子は、白色光のスペクトルの一部を吸収し、残りの部分を素通りさせるため、この部分が色として目に見えるようになる。青色は、理由はいまだ解明されていないが、色素だけで作るのは難しいようだ。そのため、花を咲かせる被子植物には、青の花色のものが比較的少ない。

青色ではない多くの花がハチを引きつける理由は何なのかという疑問は、興味深い研究領域として認識され始めた。青くない花は、青い花と同じくらい効率的にハチを誘引することができ、その能力は、花の大きさや香り、外見的な色合いとは無関係とみられる。そのため、ハチが的確かつ効率的に花を発見するときに、別の刺激が関与していることは間違いない。

被子植物の花色は、花弁表面のナノ構造の反復パターンにも影響される。太陽光中のさまざまな色のスペクトルは、そうしたナノ構造のモチーフと相互作用して物理学的に分離され、特定の波長だけが反射される。生じる色は、モチーフの間隔と大きさによって決定される。このナノ構造の典型的なサイズでは、青色のスペクトルが散乱しやすいため、この構造色発生プロセスによって青は容易に生じる。ナノ構造は光沢の基盤にもなり、光学的色相を生じる。それは花弁の基調色に加えられ、特定の光が当たったときや、特定の角度で照明が当たったときのみにちらちらと目に映る、ほのかな色である

被子植物へのハチの誘引を研究するため、Moyroud ら[3]は、進化的に互いに近縁でなく色がさまざまな12種の花のナノ構造を慎重に分析した。予想どおり、花の表面にはさまざまなナノ構造の反復モチーフが認められ、さまざまな色相が生じていた。研究チームは、こうした反復モチーフのそれぞれの構成にはいくらかの不規則性が認められる、という過去の研究成果[8–10]を確認した。意外にも、不規則性の程度は全12種の間で似通っており、それぞれの花の基本的な色相を生じる根本的なナノ構造のパターンとは無関係であることが分かった。従って、「不規則性の程度」は進化的に保存されており、他の点では異なる種の間でも共通の現象のようである。この不規則性は単一の共通祖先から受け継がれ、さまざまな進化の分枝に広がったとも考えられるが、この現象が複数回にわたって別々に生じた可能性も排除できない。

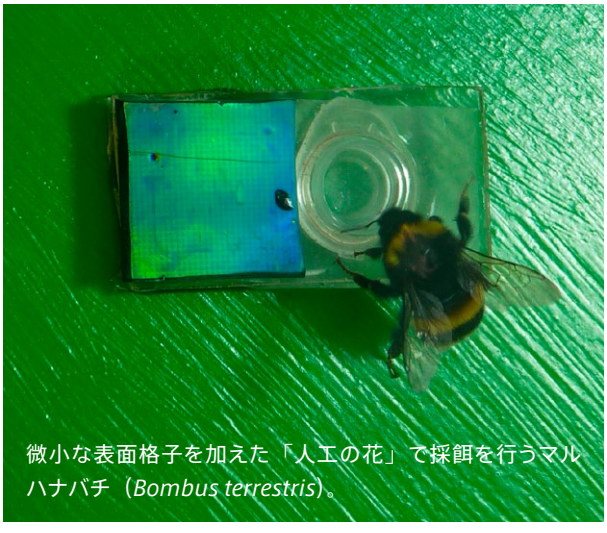
© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

ナノ構造配列の不規則性の程度が進化的に保存されていることには、どのようなメリットがあるのだろうか。Moyroudらは、不規則性は不完全性なのではなく、はっきりと見える視覚的出力と機能に関係しているという仮説を立てた。この仮説に基づいて研究を進めたチームは、太陽光線をある角度で花に当てると、不規則なナノ構造が青色光の「輪」を生じることを発見した。この光の輪（ヒトの眼には花弁が暗色の場合によく見える）は、花の基調色と混じり合っているかのようだ（図1）。

Moyroudらは、さまざまな色の花で青色光の輪が常に生じていることを発見した。この輪から生じる青色光は明確なスペクトル域を持っており、これはハチが感知できる領域であった。研究チームは、青色光の輪を生じる不規則性をまねた微小な表面格子を有する、人工的な花を製作した。そして、マルハナバチを用いた行動実験を行い、採餌速度と訪花回数を測定した。ハチは、青色光の輪がない花よりも、それがある花の方に強く誘引された。

最後に研究チームは、背景色と青色光の輪によるコントラストの影響を評価するため、3つの異なる基調色の人工的な花に青色光の輪を作り、ハチがどれに誘引されるか調べた。ハチを最も強く誘引したのは青い背景色の花だった。ただし、青色光の輪は、青い花への採餌を強めなかった（予想どおりではあるが、ハチは青い背景色を見ることができるため）。対照的に、黄色と黒色の背景色の花では採餌が強化された。上記を合わせると、研究チームのデータから、青色光の輪がハチを誘引する重要な視覚シグナルであることを示す総合的な証拠が得られた。

EDWIGE MOYROUD



微小な表面格子を加えた「人工の花」で採餌を行うマルハナバチ（*Bombus terrestris*）。

こうして謎は解決された。花はさまざまな生態学的理由（生物の誘引や忌避、光の有害なスペクトルの散乱など）のために異なる基調色を持っている可能性があるが、このたび、ハチを誘引する顕著な青色光の輪も兼備することができると分かった。青色光の輪は、被子植物系統の進化を通じて保存されてきたと考えられる、秩序ある不規則なモチーフから生じ、何百万年にもわたって花の生殖に成功をもたらしている。

Moyroudらの論文は、ハチの行動生態学、植物の進化生物学、光学的モデリング、そして材料科学といった、さまざまな研究領域を組み合わせたものだ。そうした専門知識の異例の融合は、この重要な生物学的過程の解明に最も堅牢なやり方で迫ることを可能にし、この研究に訴求力を持たせている。

今回の研究には明らかに生態学的な意味がある。いずれは、生物からヒントを得た人工的な表面や、強い青色光の輪を持つ特別な種の花を利用して、ハチの個体群やその授粉の効果がもっとよく管理できるようになるかもしれない。しかし、まずは、自然条件下で青色光の輪が持つ意味を明らかにすることが必要だろう。さらに、光の輪が他の昆虫の誘引においても重要性を持つならば、それを明らかにするのも面白いだろう。他にも疑問がある。ハチに授粉を依存しない植物は、青色を利用しているのだろうか？　昆虫を摂食する植物は、獲物を誘引するために青色を利用しているのだろうか？　この光学的現象の生態学的な重要性に関しては、まだ知るべきことがたくさんある。■

（翻訳：小林盛方）

How flowers get the blues to lure bees
Vol. 550 (467–468) | 2017.10.26
Dimitri D. Deheyn
カリフォルニア大学サンディエゴ校スクリプス海洋研究所（米国ラホヤ）に所属

1. Balamurali, G. S., Krishna, S. & Somanathan, H. *Curr. Sci. India* **108**, 1852–1861 (2015).
2. Bukovac, Z. *et al. Evol. Ecol.* **31**, 153–172 (2017).
3. Moyroud, E. *et al. Nature* **550**, 469–474 (2017).
4. Chittka, L. & Raine, N. E. *Curr. Opin. Plant. Biol.* **9**, 428–435 (2006).
5. Leonard, A. S. & Masek, P. *J. Comp. Physiol. A* **200**, 463–474 (2014).
6. Bukovac, Z. *et al. J. Comp. Physiol. A* **203**, 369–380 (2017).
7. Dyer, A. G. & Chittka, L. *J. Comp. Physiol. A* **190**, 105–114 (2004).
8. Vignolini, S. *et al. New Phytol.* **205**, 97–101 (2015).
9. Whitney, H. M. *et al. Science* **323**, 130–133 (2009).
10. Whitney, H. M., Reed, A., Rands, S. A., Chittka, L. & Glover, B. J. *Curr. Biol.* **26**, 802–808 (2016).

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

社説

遺伝子発現に対する遺伝的影響がヒト個体レベルで明らかに

多くの人々の主な体内組織の全てについて、遺伝子の発現調節に対する遺伝的多様性の影響を調べるという、念願の研究が結実した。

「観察と探索によって明らかになった類似点と相違点が、人類の知識の基盤になっている」。かつてアルフレッド・ノーベルは、こう言った。人間の個人差と共通性は、過去のそれぞれの文化と時代において、外部的事象から精神的影響に至るまでさまざまな手掛かりを用いて独自に説明されてきた。今日では、生物学研究のかなりの部分が、人間のDNAの類似点と相違点に着目した研究に主眼を置いており、こうした類似点と相違点の無数の組み合わせによって良い影響や悪い影響が生み出されていることを調べるのが、最先端の遺伝学研究だ。

Nature 2017年10月12日号には、そうした遺伝学的プロジェクトの1つから複数の研究結果が報告された。これらの論文は、ヒトゲノムの調節コードを研究者らがそれぞれ解析した結果を記述したもので、疾患と関連する遺伝的多様体（バリアント、遺伝的変動体）が体内のさまざまな組織でどのような機能を果たしているかを明らかにする上で役立つと考えられている。

このプロジェクトは「GTEx」（Genotype-Tissue Expression；遺伝子型-組織発現）と呼ばれる。人間の体内にある44組織において、遺伝的多様性と、遺伝子発現に対するその影響をカタログ化することを目的としている。このプロジェクトの結果は、前述の*Nature*に4編の論文として報告され（204、239、244、249ページ参照）、同時掲載のNews and Viewsでも論じられた（190ページ参照）。これらで報告された極めて重要な遺伝子調節領域の大半は、遺伝子の近くに位置して影響を及ぼしていることが明らかになった。また、遺伝的多様性による遺伝子調節は体内組織間で重要な差があり、重要な個体差も認められることが報告されている。これは、2015年に発表された予備的研究の結果をもとに発展させた研究の成果だ。

GTExプロジェクトは、幅広い方面で期待され、長い期間を経てようやく実現にこぎつけた。この研究プロジェクトが最初に提案されたのは2008年のことで、リソースデータベースとそれに関連したバイオバンク（1000人の故人から採取した全ての主要なヒト組織が登録されている）の構築を目標とし、遺伝的多様性と遺伝子発現の関係を調べる研究に利用できると考えられていた。

それは当時の技術力をはるかに超えたものと考えられ、多くの人々は、非現実的な構想だとして取り合わなかった。それだけ多くの組織を1人のドナーからどのように採取するのか。それだけ多くの人々をどのようにして動員し、その同意を適切に得るのか。組織ドナーの死後、所定の期間（組織によって異なる）内に質の高い試料をどのようにして採取するのか。そして、この研究によって得られたデータは、生きている人間を反映していると見なすことができ、遺伝子調節に関する既知の知見を再現するのだろうか。このような疑問が次々と浮かび上がってきた。

一方、こうした目標を達成する科学的必要性については疑問視されなかった。ヒトゲノム計画が2000年代前半に完了した後も、ゲノミクス研究者のコミュニティーでは、ヒトゲノムの標準カタログの作成が続けられた。この標準カタログには、全世界のさまざまな集団について、集団内

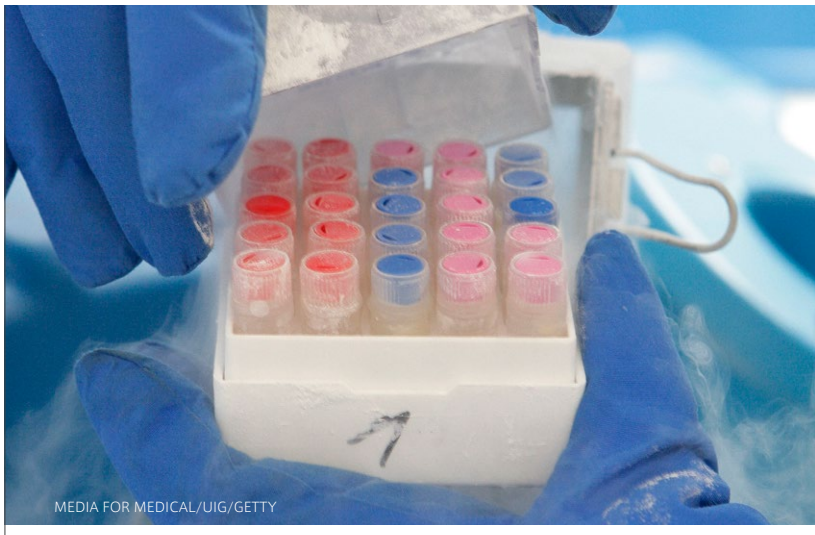
© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

と集団間の遺伝的多様性の特徴が記述され、さまざまな種類の細胞と組織における機能要素の同定が始まった。また、人間のさまざまな疾患に関連する遺伝的多様性が同定され、その多くが非コード領域で見つかり、この領域が遺伝子調節において役割を担っていることが示唆された。

このような関連を調べるのがGTExコンソーシアムだ。そのためにGTExプロジェクトに参加する科学者は、（169ページのNews記事で論じられているように）死後の試料提供を巡る倫理的、法的、社会的問題を検討するための枠組みを必要とした。米国では、死体から採取した試料に関する研究に、人間を実験対象とする場合のルールが適用されないため、米国で行われたGTExプロジェクトでは同意を取得する必要はなかった。しかし、GTExプロジェクトの研究者は、故人の最近親者から同意が得られた試料だけを用いることに決めた。この点は称賛に値する。推定同意という手法もあり、これは移植のための臓器提供には賢明な策だが、基礎研究では、恩恵が直ちに得られるわけではなく、その内容も分かりにくいため、それほど適切な手法とはいえない。また、このプロジェクトでは、組織ドナーの家族との連絡を絶やさない研究者がいたのも良かった。それらの家族の多くは、プロジェクトの会議に出席して、故人の科学への寄与が今も続いている様子を聞いていた。

また、ドナーの家族のほぼ全てが、このプロジェクトで得られた遺伝的結果の一部、特に治療可能な疾患と関係する情報を家族に還元することを望んでいる。GTEx研究は、そのような計画にはなっていなかったが、プロジェクトのまとめ役になる人々やその他の研究者は、今後の研究で、研究結果を組織ドナーの家族に還元できるのかどうか、できるとすれば、どのような方法があるのかを検討すべきだろう。

死亡したドナーに依存するのはなぜだろう。これまでの研究のほとんどは、対象が細胞株や血液に限られていたが、GTExプロジェクトは、疾患と関係する他の組織、例えば心臓や腎臓の評価を目指した。そして、生体ドナーからは得られない生体材料（例えば脳）を調べたいという希望や、同じドナーから複数の組織試料を集める必要があったため、このプロジェクトでは、組織ドナーを募集して、その死後に迅速に組織試料を入手するための方法を見つけなければならないことは明白だった。このプロジェクトでは、ドナー候補を特定するために、既存のプログラム（例えば死亡直後に行われる検死解剖）のネットワークや臓器移植登録と組織移植登録が利用された。


MEDIA FOR MEDICAL/UIG/GETTY

GTExプロジェクトは、現在に至るまでにオープンアクセスのデータベースと組織バイオバンクを構築した。既に生物医学研究に幅広く利用されており、それによって明確な指針と手順が生み出され、次世代の研究に対して情報を与え始め、その基礎作りに寄与している。

次世代の研究としては、例えば、GTExのようなプロジェクトの展開を続けて、さまざまな集団でドナーの数を増やし、試料採取の規模を拡大して、遺伝的多様性と遺伝子調節の差異による影響について解明を進める研究などが望ましい。こうした研究を補完するのが、計画段階にある「ヒト細胞アトラス」で、単一細胞の塩基配列解読を行って、さまざまな種類の細胞とその関係をさらに明らかにすることを目指している（*Nature*ダイジェスト2017年10月号「細胞に魅せられた科学者」参照）。

今のところ、全ての生物医学研究者は、GTExプロジェクトから次々と発表される大量のデータとヒトゲノムの調節コードに関する知見を歓迎すべきだ。これは、人間の体内の全ての細胞における遺伝的多様性と遺伝子調節の特徴を解明するという意欲的な最終目標に向けた重要な一歩だ。■

（翻訳：菊川要）

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

2017年11月2日号 | Vol. 551 No. 7678

キロノバの解剖学：中性子星同士の合体の余波

表紙は、2つの中性子星の合体によって生じた、「キロノバ」と呼ばれる低光度のトランジェント天体の想像図である。まさにそうしたイベントが2017年8月17日に、Advanced LIGO検出器とAdvanced Virgo検出器によって、当初は重力波の形で観測された。重要なのは、GW170817と呼ばれるこのイベントが、強い電磁波信号を伴っており、多くの天文台で観測されたことである。その結果、合体によって生じたγ線バーストについてかなりの量の情報が集められた。今週号の*Nature*では、6編の論文と関連するNews & Viewsでキロノバの詳細が検討されている。このイベントの可視光放射と近赤外放射が、I. Arcaviら、E. Pianら、S. Smarttらの3本の論文で報告され、GW170817が実際にキロノバであったことが確認されている。また、E. Trojaらは、GW170817からの放出物のジェットが軸方向から少し外れているように見えることを示す、合体によるX線放射について報告している。5番目の論文では、D. Kasenらが、予測を絞り込むのに役立つ最新の観測結果を用いて、キロノバイベントにおける重元素の生成を調べ、中性子星の合体によって宇宙の重元素の大半が供給されると示唆している。さらに、D. Holzらは、キロノバを用いてハッブル定数を独立して再測定し、他の測定結果と一致する結果を得ている。

Cover; 10.1038/nature24291; 10.1038/nature24298; 10.1038/nature24290
10.1038/nature24303; 10.1038/nature24453; 10.1038/nature24472

分子生物学：染色体構造におけるコヒーシンの役割

間期染色体の核の組織化は、トポロジカルドメイン（TAD）の境界やループに見られるCTCFやコヒーシンなどの構造タンパク質複合体によって仲介されると考えられている。しかし、これらのタンパク質を実験的に除去しても、染色体の組織化に及ぼす影響は限定的であることが分かっている。今回F. Spitzらは、マウスの肝臓細胞でコヒーシンを積み込む因子であるNipblを誘導によって欠失させた。染色体に結合するコヒーシンがなくなると、TADやTAD関連ループは消失するが、ゲノムの区画への隔離は保存され、転写に影響が見られたのは一部の遺伝子のみであった。TADの消失によって、局所的な転写活性を反映する、より微細な区画構造が明らかになった。従って、ゲノムの組織化は、コヒーシンの必要性が異なる2つの別々の機構によって生じていると考えられる。

10.1038/nature24281

進化学：6万世代にわたる細菌の進化

最も長く続けられている細菌の進化実験である、「大腸菌（*Escherichia coli*）の長期進化実験（LTEE）」では、大腸菌の12の複製集団が6万世代以上にわたり継続的に培養されている。M. DesaiとR. Lenskiらは今回、LTEEの6万世代全体にわたり、500世代間隔で全ゲノム塩基配列解読を行った結果を示している。解析からは、この制御された環境における細菌の長期的な適応の、複雑で動的な進化過程が明らかになり、また、クローン干渉、遺伝子のヒッチハイク効果、および選択の標的変化に関する知見も得られた。

10.1038/nature24287

幹細胞：繊維芽細胞のスプライシング因子

L. Qianらは今回、単一細胞のRNA塩基配列解読法を用い、繊維芽細胞から心筋細胞への再プログラム化の基盤となる機構の解明を試みた。そして、再プログラム化に不可欠な大規模な発現変化を引き起こす開始段階で、mRNAのプロセシングとスプライシングに関係する因子、中でもスプライシング因子Ptbp1の発現が低下していることを発見した。繊維芽細胞が心臓特異的なスプライシングパターンをとるには、Ptbp1の発現低下が不可欠である。またこの方法によって、再プログラム化の間に誘導心筋細胞の濃縮を可能にする細胞表面マーカーも特定できた。

10.1038/nature24454

2017年11月9日号 | Vol. 551 No. 7679

シナプスの彫刻：接着分子によってアストロサイトとニューロンの相互作用が生じる仕組み

表紙は、3D印刷したマウスのアストロサイトモデル2つ（オレンジ色と灰色）を、脳内で見られるように互いに並べて置いた画像である。アストロサイトは、ニューロンと密接な関係があり、その結果として、シナプスの機能に大きな影響を及ぼし得ることが、ずいぶん以前から知られている。しかし、アストロサイトが複雑な構造を獲得してニューロンとの関係性を維持する分子的な仕組みは、よく分かっていない。今回C. Eroglu らは、マウスでは、そのカギの1つが、ニューロンのシナプスにおける役割が知られている細胞接着分子群

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

のニューロリギンを発現するアストロサイトの能力であることを示している。アストロサイトでは、ニューロリギンが、ニューロン上に発現するニューレキシンタンパク質と相互作用し、アストロサイトの形態発生を調節することで、シナプスの密度や機能を調整する。具体的には、著者らは、アストロサイトがニューロリギン2を発現していない場合、大脳皮質の興奮性シナプスの形成と機能が損なわれることを見いだした。ニューロリギンの変異が統合失調症などの神経疾患と関連していることがすでに知られていることから、著者らは、アストロサイトが疾患の原因となる機構に関与している可能性を示唆している。 Cover; 10.1038/nature24638

神経科学：老化のシグナル

我々ヒトの老化速度には大きな個体差がある。線虫の一種*Caenorhabditis elegans*でも、寿命や加齢に関連する衰退に多様性が見られる。今回S. Caiらは、*rgba-1*（*regulatory-gene-for-behavioural-ageing-1*）および神経ペプチド受容体遺伝子（*npr-28*）の多型が、*C. elegans*で老化速度の変化を引き起こすことを示している。*rgba-1*はグリア細胞で神経ペプチドをコードしており、ニューロンで*npr-28*がコードする受容体を活性化することで、SIR-2.1を介するミトコンドリアでの異常タンパク質応答の活性化の低下を引き起こし、これによって老化が調整される。 10.1038/nature24463

構造生物学：転写開始前複合体中のTFIIH

RNAポリメラーゼ（Pol）IIは、遺伝子転写を開始する際にプロモーターDNA上に基本転写因子を集合させて開始前複合体（PIC）を形成する。今回P. Cramerらは、酵母のPICと、PICがコアMediator（cMed）と結合したPIC複合体のクライオ（極低温）電子顕微鏡構造を報告している。基本的なコアクチベーターであるMediatorと複合体を形成したPICの構造は46個の因子からなり、酵母の転写開始に必須の因子全てが含まれている。この構造から、TFIIH（transcription factor IIH）の構成が明らかになり、TFIIHの「コア」モジュールと「キナーゼ」モジュールが、プロモーターDNAの開裂とPol IIリン酸化にそれぞれどのように機能しているかが示唆された。 10.1038/nature24282

生態学：森林生物多様性を脅かすエッジ効果

世界の森林の分断化は、生物多様性および生態系サービスの低下につながっている。今回M. Pfeiferらは、メタ解析を行い、世界各地の森林の哺乳類、鳥類、爬虫類（はちゅう）および両生類の計1673種について、人間活動による森林分断化が個体数に及ぼす影響を評価した。その結果、分断化により生じた林縁がもたらす影響（エッジ効果）によって、これらの動物種の85％で個体数が変化しており、鳥類の11％、爬虫類の30％、両生類の41％、哺乳類の57％では、林縁に近づくほど個体数減少の度合いが著しいことが分かった。総合すると今回の知見は、世界の森林の半分以上において、脊椎動物個体群の崩壊が起きていることを示唆している。 10.1038/nature24457

CHI' EN C. LEE

エッジ効果により個体数が減少している、絶滅危惧種のマレーセンザンコウ（*Manis javanica*）。

神経科学：神経精神医学に関する遺伝的手掛かり

第16染色体の小さな領域の欠失によって生じる16p11.2のコピー数多型は、自閉症をはじめとする多数の神経精神疾患との関連が見られる。以前の研究から、この座位内の遺伝子*kctd13*が、ゼブラフィッシュの神経解剖学的異常の原因である可能性が示唆されていた。C. Powellらは今回、*kctd13*欠失ゼブラフィッシュや*Kctd13*欠失マウスにおいて神経発達異常を再現できなかったことを報告している。彼らは、シナプス伝達の減弱を観察し、これがKCTD13/CUL3ユビキチンリガーゼの基質の1つであるRhoAのレベル上昇と相関することを見いだした。*Kctd13*を欠失したマウスは、社会性障害や反復グルーミング行動など、自閉症の徴候である多くの行動表現型を示さなかった。これらの知見は、*kctd13*や*Kctd13*の欠失のみで自閉症関連行動の原因となるとするモデルを支持せず、16p11.2欠失症候群が多遺伝子性の機構による可能性を残すことになった。 10.1038/nature24470

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

天文学：非常に珍しい超新星

過去15年間に数千の「重力崩壊型」超新星が観測されており、それらの超新星では、時間経過とともに速度低下する水素吸収線や、光度曲線の単一のピークか暗くなる前の約100日間安定した光度などが、共通する要素として見られる。今回I. Arcaviらは、そうした通常見られる要素を示さない超新星iPTF14hlsの観測結果を報告している。その光度曲線は複数のピークを持ち、600日にわたって減衰しなかった。彼らは、爆発の数百日前に太陽質量の数十倍のガスが放出されることによってその性質を説明できる可能性があると結論付けているが、これがどのようにして起こったかについて妥当な説明は存在しない。脈動的対不安定性（pulsational pair instability）によって、超新星爆発前に複数の噴出が予測されるが、このモデルは、iPTF14hlsに関与しているエネルギー収支と、速度低下のない水素吸収線が存在し続けることには矛盾している。

10.1038/nature24030

がん：抵抗勢力の溜まり場

腫瘍は、がん治療の間に薬剤抵抗性となることがある。加えて、いわゆる「persister」細胞、つまり執拗（しつよう）に残存する細胞が生じて、これらがリザーバーを形成し、そこから薬剤抵抗性がん細胞が出現することもあり得る。persister細胞はすでに、一部の薬剤には感受性を示さなくなっている。だが今回、M McManusたちは、persister細胞はある種の間葉系細胞と同じような状態となっていて、そのために脂質ヒドロペルオキシダーゼGPX4の阻害に選択的感受性を示すことを報告している。従ってGPX4を標的とすることは、薬剤抵抗性の防止につながる可能性のある新たな道を開く。

10.1038/nature24297

2017年11月16日号 | Vol. 551 No. 7680

皮膚再生：幹細胞と遺伝子治療を組み合わせて小児の表皮の再建に成功

表紙は、ヒト表皮幹細胞（ホロクローン）に由来するコロニーである。今回、7歳児のトランスジェニックホロクローンを用いて、この少年の損傷した皮膚が再生された。この少年は、皮膚の健全性が損なわれる遺伝性疾患である接合部型表皮水疱症の重度の患者で、皮膚の大半に水疱や創傷が慢性的に生じていた。今回M. De Lucaらは、この少年の治療にどのように取り組んだかを報告している。彼らは、患者の皮膚から得た幹細胞に、疾患遺伝子（今回の場合、ラミニン322の変異型β3鎖）の正常に機能するバージョンを、ウイルスベクターを用いて導入した。次に、この幹細胞を用いて、機能性表皮の大きなシートを成長させ、これを外科的移植片として用いて、少年の皮膚の80％を置換できた。今回の研究によって、表皮の発生に関する知見も得られ、表皮が特定の寿命の長い幹細胞によって維持されていることが明らかになった。関連するNews & Viewsでは、他の方法では治せない疾患を治療する幹細胞治療と遺伝子治療を組み合わせた治療法の指針となるトランスレーショナルリサーチの可能性を含め、この手法の限界と広い影響を探っている。

Cover; 10.1038/nature24487

地球物理学：深部マントルの神秘

地球の内部組成は、地震波が異なる物質を通過する際の速さの変化を画像化して見積もることができるが、深部マントルの異常には説明が難しいものも残っている。速い地震波の異常は過去に沈み込みがあった場所で見られ、比較的温度が低く密度の高いマントル物質の下向きの流れを示している。しかし、核−マントル境界の上にある巨大なドーム状の遅い地震波の異常は、特にその正味の浮力について異論が多い。今回H. Lauらは、太陽と月の引力に応答する地球の日々の変形をGPSで測定することで、地球の深部マントルの浮力を見積もっている。その結果、こうした下部マントルのドームの下部3分の2の平均密度が、平均マントル密度よりも約0.5％高いことが示された。著者らは、こうした構造体にはおそらく、沈み込んだ海洋プレートか、地球の形成に関係した始原的物質に由来する密度の高い化学成分が濃縮されていると結論している。

10.1038/nature24452

腫瘍免疫学：脂肪肝でのがんリスクの増大

がんの初期段階からのプログレッションは、適応免疫によって引き起こされる場合があると考えられている。しかし適応免疫が果たす役割については結論が出ていない。M. Karinらは今回、非アルコール性脂肪肝を発症しているヒトとマウスの炎症を起こした肝臓にはPD-L1を発現するIgA^+ B細胞が蓄積することを明らかにしている。炎症誘導性のこのIgA^+細胞は、肝臓でアグレッシブな肝細胞がんの発症を防止している細胞傷害性$CD8^+$ T細胞を抑制することで、がんのプログレッションを促進する。

10.1038/nature24302

生化学：酵素の動態をFRETで見る

P型ATPアーゼは、陽イオンを濃度勾配に逆らって輸送する

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

ことにより、細胞膜内外の電気化学ポテンシャルを維持している。例えば、筋小胞体や小胞体のCa^{2+}-ATPアーゼ（SERCA）は、ATP加水分解によって駆動され、筋収縮などのCa^{2+}シグナル伝達事象の後のカルシウム輸送を行う。今回、1分子蛍光共鳴エネルギー移動（FRET）法を用いて、P型Ca^{2+}-ATPアーゼであるLMCA1の動態が可視化された。FRETを用いて反応サイクル中間体を観察するこの方法によって、P型ATPアーゼの輸送サイクルとコンホメーション動態について、構造的手法や集合体を対象にした場合には得られなかった、1分子レベルでの知見が得られた。 10.1038/nature24296

惑星科学：冥王星はもやのため寒い

冥王星の気温は、標準的な理論による予測よりも低いことが観測された。考えられる説明の1つは水蒸気の存在であるが、そのような寒冷な大気を生じるには、平衡から桁違いにずれていなければならないと思われる。今回X. Zhangらは、モデリングを通して、冥王星の気温を調節しているのはガス分子ではなくもや（haze）の粒子であり、これは太陽系内で独特であることを示している。このことから、冥王星が以前に考えられていたよりも中赤外波長域で明るいはずであるという明瞭な予測が得られる。この予測は、再来年打ち上げ予定のジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡で検証できるはずである。

10.1038/nature24465

分子生物学：ユビキチンがDNAアルキル化の修復を推進する

アルキル化によるDNA損傷の修復を開始させる上流シグナル伝達経路はよく分かっていない。N. Mosammaparastらは今回、アルキル化損傷部位の周辺にASCC（activating signal cointegrator complex）が動員され、転写因子やスプライシング因子と共局在することを発見した。このASCCの動員は、E3リガーゼであるRNF113A（RING finger protein 113A）によって形成されたK63結合型ポリユビキチン鎖に対してASCC2タンパク質が結合する能力に依存するが、そのポリユビキチン化の標的はまだ不明である。X連鎖性裂毛症の患者はRNF113Aに変異を持っており、今回の知見によって、こうした患者がアルキル化剤に過剰な感受性を示す原因が明らかになった。 10.1038/nature24484

構造生物学：エボラを入れる箱を組み立てる

エボラウイルスのヌクレオカプシドは、ゲノムとそれを取り囲むタンパク質でできた殻に当たるカプシドからなり、ウイルス組み立ての足場として、またゲノム複製の鋳型として機能する。J. Briggsらは今回、クライオ（極低温）電子線トモグラフィーを用いてエボラウイルスのヌクレオカプシドの構造を解いた。使われたのは無傷ウイルス中のヌクレオカプシドと組換え集合体で、解析結果からウイルスRNAをカプシドで包み、アクセサリータンパク質を集合させる際のモデルが考案された。 10.1038/nature24490

2017年11月23日号 | Vol. 551 No. 7681

免疫サービス：ヒトペプチドローディング複合体の構造から免疫系のプライマーが明らかになった

表紙は、細胞の小胞体膜（灰色）をまたがるヒトペプチドローディング複合体（PLC）の構造である。PLCは、免疫応答の重要な要素であり、主要組織適合遺伝子複合体クラスI（MHC-I）分子へのウイルスなどの異物のペプチド断片の結合に関与する動的な複合体である。MHC-I分子が、ペプチド断片を人体の免疫細胞に提示し、侵入物に対する免疫系の抵抗が始まる。今回R. Tampéらは、クライオ（極低温）電子顕微鏡を用いてPLCの構造を明らかにし、複合体の編集モジュールがペプチド輸送体TAPの周りにどのように集まるか示している。さらに彼らは、MHC-Iへの抗原ペプチドの結合によってMHC-Iの構造が変化するため、安定なペプチド–MHC-I複合体の放出が促進され、免疫応答が始まることを見いだしている。この知見から、PLC、抗原プロセシング、MHC-Iを介した免疫が生じる仕組みの背後にある機構が垣間見えるようになってきた。

Cover; 10.1038/nature24627

古生物学：耳の骨が1～2個多かった古代の滑空性哺乳類

ハラミヤ類は恐竜の時代に生息していた哺乳類の1群で、現代のモモンガやムササビによく似た滑空の習性があったと考えられている。こうした滑空するハラミヤ類については、近年2つの新種が記載されており、今回のJ. Mengらによる新種の報告はそれに続くものである。今回記載された種は、1億6400万～1億5900万年前のジュラ紀に中国に生息していたもので、滑空への適応の他にも多くの興味深い特徴が認められた。例えば、その中耳は、哺乳類中耳の進化の興味深い中間点を示している。現代の哺乳類中耳は、鐙（あぶみ）骨、槌骨および砧骨の3つの耳小骨によって形成されているが、この滑空性ハラミヤ類の中耳では、さらに下顎の上角骨と頭蓋の外鼓骨が加わり、これまで知られていなかった5小骨系を形成していたと見られる。 10.1038/nature24483

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

微生物学：地球上の微生物多様性

L. Thompsonらは今回、地球マイクロバイオームプロジェクトのメタ解析研究において、コレクション、キュレーション、解析のパイプラインについての標準化した方法を開発して、2万7000以上の試料（土壌微生物、水生微生物、動物関連微生物および植物関連微生物）の16SリボソームRNA（rRNA）タグ塩基配列を調べ、細菌やアーキアの分布の基本構造や駆動要因の全球的状況を示した。この研究は、微生物生態学における将来的な研究のための重要な参照データベースや枠組みを示しただけでなく、特定の生物の全球的な分布に加えて、群集組成のさまざまなパターンも明らかにしている。これらの知見は、分散やニッチへの定着についての理解をより深めるものだ。 10.1038/nature24621

S. CRAIG CARY, UNIV. OF WAIKATO, NEW ZEALAND

地球で最も南に位置する活火山である、南極ロス島のエレバス山山頂で、地熱土壌を採取する研究者。

天文学：ペルセウス座銀河団に見られる太陽元素存在量

銀河団は高温ガスに取り巻かれており、そのガス中の元素存在度は、そうした銀河団の一生にわたってその中の銀河で発生した全ての超新星の累積的な影響の結果である。最近の研究では、銀河団の元素存在量が太陽のものとは異なることが見いだされており、銀河団と天の川銀河の超新星は別の歴史をたどったと示唆されている。しかし、観測機器の限界により、これらの観測は困難であった。今回、ひとみコラボレーションの山口弘悦（やまぐちひろや）（米国航空宇宙局ほか）らは、ペルセウス座銀河団を非常に高いスペクトル分解能で観測し、その鉄ピーク元素の存在比が太陽のものに近いことを明らかにしている。彼らは、チャンドラセカール質量に近いおよびそれ以下の白色矮星が混在しており、これらがIa型超新星爆発を通してこうした元素に寄与したと結論している。 10.1038/nature24301

がん免疫療法：量より質のネオアンチゲン

膵臓（すいぞう）がんの患者で5年以上生存するのは数パーセントにすぎないが、この相対的な長生きの理由は定かではない。今回の後向き解析において、V. Balachandranらは、ヒトの膵臓がんにおける長期生存の免疫機構を評価した。この解析は、生存が細胞溶解性T細胞の浸潤とポリクローナルT細胞応答の増加を伴う高度の変異負荷と相関し、そして腫瘍抗原MUC16遺伝子座の変異が長期生存者に豊富に見られることを明らかにしている。さらに、ネオアンチゲンと微生物間の交叉（こうさ）反応性の予測値が高い患者が、最も長く生存する傾向にあった。著者らは、ネオアンチゲンの量よりも、むしろ質が生存を決定するという証拠を提示している。

10.1038/nature24462

がん免疫療法：免疫療法に対する腫瘍応答を予測する

免疫チェックポイント阻害に対する応答は、腫瘍の内在性因子や微小環境因子に依存しており、免疫相互作用によって進化的に形作られるようだ。M. Łukszaらは今回、感染症モデルを改変した数学的な腫瘍適応度モデルを作成し、腫瘍と免疫の相互作用の枠組みとして用いている。これをヒトの黒色腫や非小細胞肺がんのデータに適用すると、このモデルは免疫チェックポイント阻害治療下でのがん細胞の進化動態を再現できた。 10.1038/nature24473

2017年11月30日号 | Vol. 551 No. 7682

筋細胞の再生戦略：異なる種類の筋繊維が部分的な再生に果たす役割

表紙は、プラナリア*Schmidtea mediterranea*の筋繊維ネットワークである。プラナリアの筋内では、再生される細胞が配置される位置を割り当てるのに役立つ多くの遺伝子が発現している。これは、失われた体の一部の再生を適切に制御する重要な側面である。これまでの研究で、位置制御遺伝子が特定されているが、位置制御遺伝子がどのようにして影響を与えるかはまだよく分かっていない。今回P. Reddienらは、異なる種類の筋繊維の再生が、異なる転写因子によって制御されていることを示している。つまり、縦走繊維の再生にはmyoDが必要であるのに対して、輪走繊維の形成にはnkx-1-1が必要である。さらに、縦走繊維が欠損すると再生が全く起こらず、輪走繊維が欠損すると、1つではなく2つの頭部が形成されることが見いだされた。結

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

果として、著者らは、異なる種類の筋には、損傷シグナル伝達やパターン形成を通して再生を調整する別々の役割があると示唆している。 Cover; 10.1038/nature24660

原子物理学：多体系の量子シミュレーション

リチャード・ファインマンは1982年に、コンピューターの素子間にさまざまな複雑な相互作用を誘起することによって物質の状態をシミュレートする手法として、量子コンピューターを提唱した。ここ数年で、量子シミュレーターが現実のものとなっており、キュービットを用いた方法もいくつかある。例えば、個別に制御される少数個のキュービットを用いて分子や量子磁性体のシミュレーションがすでに行われている。しかし、古典的コンピューターの能力を超えるタスクを実行することは依然として困難であった。今週号では2報の論文で、制御されるキュービットの数が過去最多となる量子シミュレーターが実証されている。M. Lukinらは51個の低温リュードベリ原子を、C. Monroeらは53個の捕捉イオンを用いて、イジング型量子磁性体における相転移を調べている。どちらのグループも、古典的なコンピューターで扱うことが困難な新しい多体相互作用を観測した。

10.1038/nature24622; 10.1038/nature24654

微生物学：マウスの腸内細菌は食塩感受性高血圧を抑制する

ヒトの疾患に腸内微生物相が役割を果たすことは、広く認められつつある。D. Müllerらは、塩分を多く含む食餌がマウスの腸内微生物相の構成を変化させ、乳酸菌の一種である共生細菌の*Lactobacillus murinus*の数を大幅に減らし、その代謝産物であるインドールの産生を低下させることを報告している。塩分を多く含む食餌が病原性の17型ヘルパーT（T_H17）細胞の生成を引き起こし、これがさらに高血圧や自己免疫と結び付くことは、以前の研究で示唆されている。塩分を多く含む食餌を与えられているマウスに*L. murinus*を投与すると、能動的に誘導された自己免疫性脳脊髄炎や食塩感受性高血圧の塩分による悪化が防止され、これがT_H17細胞の生成抑制を介していることが、今回明らかになった。さらに少数のヒト被験者でのパイロット研究で、塩の投与量を増やすと血圧上昇とT_H17細胞の増加が引き起こされ、これが腸内の*Lactobacillus*類の減少を伴うことも示された。だが、マウスでのこれらの知見がヒトでも通用するかどうかを決めるには、さらなる研究が必要である。 10.1038/nature24628

原子物理学：高エネルギーニュートリノの相互作用断面積

ニュートリノは通常の物質と弱く相互作用するが、ニュートリノのエネルギーが高くなるとニュートリノと核子の相互作用断面積が大きくなる。これまでは、比較的低いエネルギーでしか相互作用断面積が測定されていなかった。今回、IceCubeコラボレーションのS. Kleinらは、6.3～980テラ電子ボルト（TeV）というエネルギーのニュートリノの地球による吸収を測定したことを報告している。計算された断面積は、素粒子物理学の標準模型の予測と統計的に矛盾しておらず、コンパクト次元の影響を示す証拠は認められなかった。

10.1038/nature24459

細胞生物学：不可分の繋留タンパク質とSNARE

膜融合は多くの細胞事象に影響を及ぼし、細胞生存に不可欠である。この過程を仲介するさまざまな因子は、それぞれ異なる機能を持つと考えられている。例えば、繋留（けいりゅう）タンパク質は融合する膜の最初の認識と結合を行い、一方、SNAREタンパク質複合体は残りの役割を担い、力学的エネルギーを供給して膜を湾曲させ、半融合中間体を経て融合孔を形成する。しかし今回A. Mayerらは、この分業がそれほど明確でなく、また、繋留因子群は単なる補助的なパートナー分子ではない証拠を示す。酵母細胞では、繋留タンパク質も半融合状態から融合孔への移行に不可欠であることが分かった。具体的には、これらの繋留タンパク質は、SNARE複合体の体積を増加させて、半融合部位を変形させることで、機械的な役割を果たしている。これによって孔を開口するためのエネルギー障壁が低下する。 10.1038/nature24469

微生物学：腸内細菌の調剤術

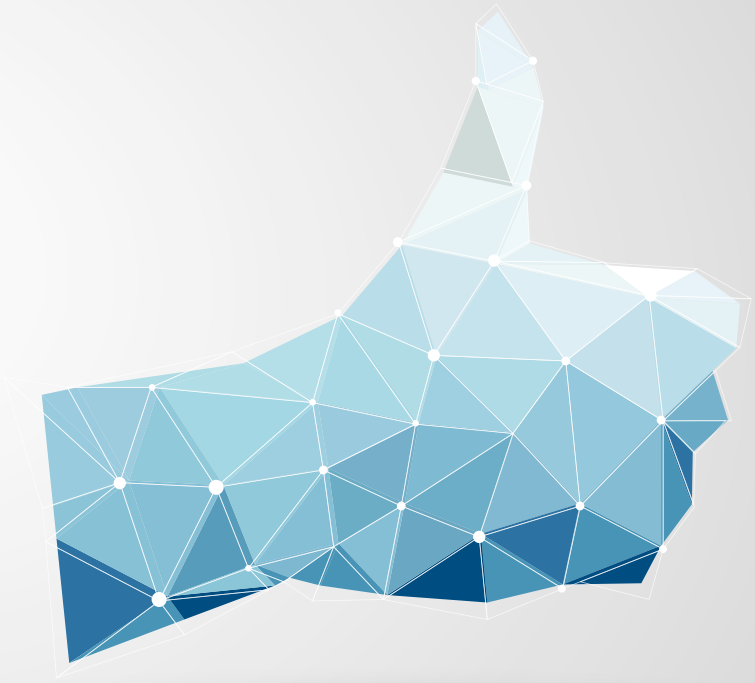
ヒトのマイクロバイオームは、健康に大きく影響する。ヒトの腸内微生物はさまざまな小分子を産生し、その多くは問題となるほどの濃度に達することがあるが、微生物の代謝経路やそれが宿主に影響を及ぼす仕組みについては、ほとんど解明されていない。今回J. SonnenebergとM. Fischbachらは、遺伝学的手法と代謝プロファイリングを用いて、腸内共生細菌*Clostridium sporogenes*が持つ芳香族アミノ酸の代謝に関わる遺伝子クラスターを明らかにした。このような代謝産物のうちの複数が、腸内微生物相だけによって産生されている。例えば、神経保護作用のあるインドールプロピオン酸（IPA）は、*C. sporogenes*以外にも数種類の腸内細菌が産生している。細菌コロニーが制御されているマウスでは、*C. sporogenes*に遺伝学的操作を加えるとIPAの血清レベルや宿主の生理状態を変化させることができる。 10.1038/nature24661

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

nature ダイジェスト

FOLLOW US!

facebook.com/NatureJapan
twitter.com/naturejapan
nature.asia/jp-regist



Nature、*Nature* ダイジェスト、Nature 関連誌の最新情報をフォローしよう!

SPRINGER NATURE

EDITOR'S NOTE

2017年のJohn Maddox賞は、医師で科学ジャーナリストの村中璃子氏が受賞しました。*Nature*の前編集長Sir John Maddoxにちなんだこの賞は、「困難や敵意に屈することなく、科学的なエビデンスに基づいて公益に資する科学的理解を広めた科学者やジャーナリスト」に贈られます。村中氏が困難に負けずHPVワクチンの安全性に関する情報を発信し続けてきた、というのが今回の受賞理由です。John Maddox賞を日本人が受賞するのは初めてで、私はてっきり今回の受賞が国内で大きな話題になるものだと思っていました。しかし、受賞者が発表された当日、取り上げた大手メディアは1社にとどまり、現在でも国内でさほど話題になっていない状況を残念に思います。今回の受賞は、メディアがこれまで発信してきた情報を覆すもので、報じづらい側面があることは理解できます。しかし、科学は、誤りがあっても事実の積み重ねによって正されていく学問です。我々メディアも、社会で正しい認識が形成されるよう正しい情報を発信していかねばなりません。今回のことを機に、国内でHPVワクチンに関して科学的根拠に基づいた議論が活発になることを望みます。 EM

「Natureダイジェスト」へのご意見やご感想、ご要望をメールでお寄せください。
宛先：naturedigest@natureasia.com
（「Natureダイジェスト」ご意見係）
掲載内容についてのご意見・ご感想は、掲載号や記事のタイトルを明記してください。今後の編集に活用させていただきます。皆様のメールをお待ちしております。

広告のお問い合わせ
T 03-4533-8094（広告部）
E advertising@natureasia.com

編集発行人：大場郁子
編集：宇津木光代、松田栄治、菖蒲さやか、山西三穂子
デザイン／制作：中村創　広告：高井優子　マーケティング：池田恵子

SPRINGER NATURE

シュプリンガー・ネイチャー
〒105-6005　東京都港区虎ノ門 4-3-1　城山トラストタワー 5F
T 03-4533-8050（代表）
www.naturejpn.com

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.
掲載記事の無断転載を禁じます。

*翻訳記事は、原則として原文に沿っております。一部、編集部でより分かりやすいように編集しております。

ネイチャー・ダイジェスト　1月号
平成30年1月1日発行 第15巻 第1号
編集発行人：大場郁子
発行所：ネイチャー・ジャパン株式会社
東京都港区虎ノ門4-3-1 城山トラストタワー5F
発売所：日本出版貿易株式会社
ISSN：2189-7778

Think Globally. Contribute Locally.

—Science that Matters—　世界的視野と社会貢献 — 科学の役割とは？

科学技術の進展は過去に大きな社会的変革と経済成長を起こしてきました。グローバル化が急激に進む現代社会において、科学者は世界規模の課題や地域社会の発展に対してどのような貢献が求められているのでしょうか。本フォーラムでは起業や基金設立を経験され、グローバルな視点で活躍しておられる識者を招き、世界的視野と社会貢献の意欲に富む人材を育むために教育機関にはどのような役割が求められているかについて議論を行います。

立命館アジア太平洋大学学長
出口治明氏

S&R財団 理事長
久能祐子氏

理化学研究所 生命システム研究センター チームリーダー
高橋恒一氏

一般社団法人 Glocal Academy 理事長
岡本尚也氏

一般社団法人21 Foundation 代表理事 TEDxTokyo 共同創始者
パトリック・ニュウエル氏

沖縄科学技術大学院大学 首席副学長
ロバート・バックマン

沖縄科学技術大学院大学 博士課程学生
ジェームズ・シュロス

PROGRAM

受付・開場

来賓挨拶

招待講演・パネルディスカッション

講師・パネリスト／出口治明氏（立命館アジア太平洋大学学長）
久能祐子氏（S&R財団理事長）
高橋恒一氏（理化学研究所 生命システム研究センター チームリーダー）
岡本尚也氏（一般社団法人 Glocal Academy 理事長）
パトリック・ニュウエル氏
（一般社団法人21 Foundation 代表理事、TEDxTokyo 共同創始者）
ロバート・バックマン（沖縄科学技術大学院大学首席副学長）
ジェームズ・シュロス（沖縄科学技術大学院大学博士課程学生）
モデレーター／ジェフリー・ローベンズ氏
（ネイチャー・リサーチ編集開発マネージャー）

ジェフリー・ローベンズ氏

※日英同時通訳　※プログラム・講演者は変更になる場合があります。

1月13日(土)

開場／13:00　開演／13:30～　終了予定／17:30

会場／有楽町朝日ホール

東京都千代田区有楽町2-5-1 有楽町マリオン11階

参加無料　定員 **600人**

応募方法　【応募締切】 2018年1月9日(火)

ハガキ、FAX、メール、WEBでご応募下さい。
ハガキ、FAX、メールは ❶氏名（フリガナ） ❷年齢 ❸住所 ❹電話番号 ❺参加人数を明記してお送り下さい。応募者多数の場合は抽選となります。
当選者には聴講券を発送します。（当日、会場に必ずお持ち下さい）
※頂いた個人情報は当フォーラムの受付業務のみに使用します。

ハガキ　〒812-8511（住所不要）
朝日新聞西部本社メディアビジネス部「OISTフォーラム2018」係
FAX　092-411-5734
メール　oist2018@asahi.com
WEB　http://www.asahi.com/ad/oist2018/

お問い合わせ　朝日新聞西部本社メディアビジネス部　TEL.092-474-2040（平日10時～18時）

主催／沖縄科学技術大学院大学　共催／朝日新聞社　協力／ネイチャー・リサーチ