

と失われたり出現したりした可能性もある。

ヒトとチンパンジーのゲノム配列が広範囲にわたって類似していることから、多くの研究者はアミノ酸変異を起こすような変化はそれほど高頻度ではないだろうと考えてきた。しかし驚くべきことに、研究共同体は遺伝子のタンパク質コード領域に見られる配列変異が、非コード領域の変異よりも際だって低いわけではないことを見いだした。ただし、こうした遺伝子のうち一部は、最近になって生じた偽遺伝子(欠陥を持ち機能しない遺伝子コピー)らしい。また、今回比較できた231個の活性があると見られる遺伝子のうち179個は、ヒトとチンパンジーでタンパク質コード領域の長さが同じだった。この179個の遺伝子のうち140個には1個以上のアミノ酸変異があったが、おそらく活性への影響はごく少ないか、まったくないだろう。しかし、コード領域の長さが同じ179個を除いた残りの52個のうち47個の遺伝子には、かなりの構造変化が見られる。

研究共同体は今回、ヒト21番染色体とチンパンジー22番染色体の遺伝子について、予備的な発現比較実験まで行ってしまった。2種類の組織について調べただけだが、彼らの解析結果によると20%の遺伝子が発現量に有意な差を示した。こうした知見から推測するに、この染色体が哺乳類全遺伝子の1%を持つとすると、ヒトとチンパンジーのゲノム全体では何千個もの遺伝子がタンパク質の構造上の変化が発現量の違いを示すことになる。これは、我々人類が類人猿と決別する際に決定的に作用したとされる仮説上の遺伝子変化の探索が、そう簡単にはいかないことを意味する。

2種の間に見られる形態や生理や行動の大きな差違が、単に小規模な変化が蓄積した結果以上のことが原因となっているならば、我々の前途には最も決定的な配列変化を見つけ出すという挑戦的課題が待ち受けていることになる。例えば、言語能力の発達に重要だと考えられているFOXP2遺伝子産物は、ヒトとチンパンジー間で2カ所のアミノ酸しか違わない。おそらく、この遺伝子はヒトの進化系統で選択の対象となったのだろう。もっとも、この遺伝子が言語能力に果たす役割はヒトとチンパンジーの比較⁵からではなく、ヒトの変

異研究から示唆されたものである⁶。

チンパンジー系統で起きた配列変化の中でヒト特異的な形質と無関係なものを見つけ出すには、他の大型類人猿との比較が必要になってくる。ヒトとチンパンジーのDNAを比較することで生じた種々の疑問にもっと答えるために、目下必要なのはゴリラのゲノム配列情報だろうか。 ■

原子の腕時計

Robert Wynands

しょっちゅう時計を合わせなくてはならないのは億劫なことだ。では、原子時計を腕時計にするというのはどうだろう。製造技術が向上し、時間合わせの方法も進歩したおかげで、それも実現できそうになってきた。

原文: *The atomic wrist-watch*

Nature Vol.429(509-510)/3 June 2004; <http://www.naturejpn.com/digest>

正確な計時は現代社会の重要な基盤である。最も正確な計時装置、つまり各国の国立計量研究所にある一次原子標準器は大きな洋服ダンスほどの空間を占有し、 10^{15} 分の1あるいは3000万年に1秒という正確さで時間を記録している。しかし、誰もがこのレベルの性能を必要としているわけではなく、 10^{12} 分の1程度の安定度ならば靴箱くらいの大きさの時計で実現できる。このような装置は、遠隔通信等でマルチユーザーネットワークにおける高速データ伝送の同期をとるために、世界中で数千台が使われている。原子時計がもっと小さくなり、手ごろな方法で製造できれば、さらに広い範囲で利用されるようになるだろう。

小型の原子時計を実現しようとする際にぶつかる物理的な問題や技術的な問題のいくつかを解決する方法が今回見つかった。Liewらは *Applied Physics Letters*¹ や学会発表² で蒸気セル型周波数標準器を大量生産に適した数ステップの手順で小型化したと発表した。*Physical Review Letters* では、Jauら³ が小型の蒸気セル型原子時計に固有の欠点を解消す

著者の **Jean Weissenbach** は、Genoscope(仏国立塩基配列解析センター; Genoscope, 91000 Evry, France) に所属している。
e-mail: jsbach@genoscope.cns.fr

1. The International Chimpanzee Chromosome 22 Consortium *Nature* **429**, 382–388 (2004).
2. Olson, M. & Varki, A. *Nature Rev. Genet.* **4**, 20–28 (2003).
3. www.genome.gov/11509418
4. Hacia, J. G. et al. *Nature Genet.* **22**, 168–171 (1999).
5. Enard, W. et al. *Nature* **418**, 869–872 (2002).
6. Lai, C. S. L., Fisher, S. E., Hurst, J. A., Vargha-Khadem, F. & Monaco, A. P. *Nature* **413**, 519–523 (2001).

る今までにない動作モードを提案している。その結果、原子時計は一個あたり €100(約13,000円)以下の価格になり、その大きさと電力消費量は携帯端末さらにはハイテク腕時計にすら利用できるほどになるだろう。

従来の原子時計では、ギガヘルツ(10^9 Hz)周波数帯のマイクロ波を原子に照射している。マイクロ波が原子に吸収されることによって、最も確率の大きい2つの特定の原子内部エネルギー準位間の遷移を誘導し、マイクロ波の周波数変動が抑えられる。このようにして、周波数変動を抑えられたマイクロ波つまり原子時計の最も重要な出力信号は、原子の内部構造を巨視的に表わすことになる。セシウム時計では、最適周波数は1秒あたり9,192,631,770振動(周波数で9GHzの少し上)であり、したがって出力信号をこの数字で割れば、原子時計の1秒の「チクタク」が得られる。時計を動作させるために通常選ばれるエネルギー準位の特定のペアはセシウムの16に分裂した基底準位の内の中央にある準位である。これらの準位では、そのエネルギーの相違は磁場のゆらぎによって弱い摂動を受

けるだけである。小型の時計では、一般的にはセシウム原子はセンチメートル単位の大きさのガラスセルに収められ、室温より若干高い温度で原子蒸気の状態に維持される。

マイクロ波で駆動されるこのような時計は、マイクロ波の波長である3.2cmよりずっと小さいガイド構造にはマイクロ波がなじまないため1cm程度までしか小型化できない。しかしこの障害はレーザー光を用いることで克服できる。光ビームが9GHz離れた2つの光学周波数成分をもっている場合、コヒーレントポビュレーショントラッピングと呼ばれるプロセスで2つの原子状態の結合もできる。これに似たやり方で親指大の全光学式時計がかつて製作されたが⁴、今回Liewら¹は小型の蒸気セル(図1b)を製造する技術を開発することで、この作業をさらに重要な段階へと進めた。

彼らの最新の成果²では、電子部品と電源をのぞく光学的な仕組みすべて(「物理パッケージ」)を数立方ミリメートルしかないデバイス上に実装している。さらに、すべての加工ステップは既存のウェハー

スケールの実装加工技術と十分な互換性がある。原理的には、数百または数千の物理パッケージを同時に製造でき、1ユニットあたりの製造価格を抑えられる。時計全体の総電力消費量は数十ミリワットになり、電池で動かせるようになると思われる。

しかし、小型化には安定度の低下が伴う。安定度は1秒あたり 10^{10} 分の2、より長期間にわたってはほぼ 10^{11} 分の1になってしまう。原子時計の安定度は2つのパラメーターに依存している。安定度は信号検出時の信号対雑音比(SN比)が増加すると向上し、マイクロ波の共鳴線幅(つまり、9GHzの周波数が最適値からずれる程度)が広がると低下するのである。

小型の時計では、蒸気セルは小さいので蒸気密度を増さなければならない。このために、セシウム原子を80°C以上に加熱し、信号を出

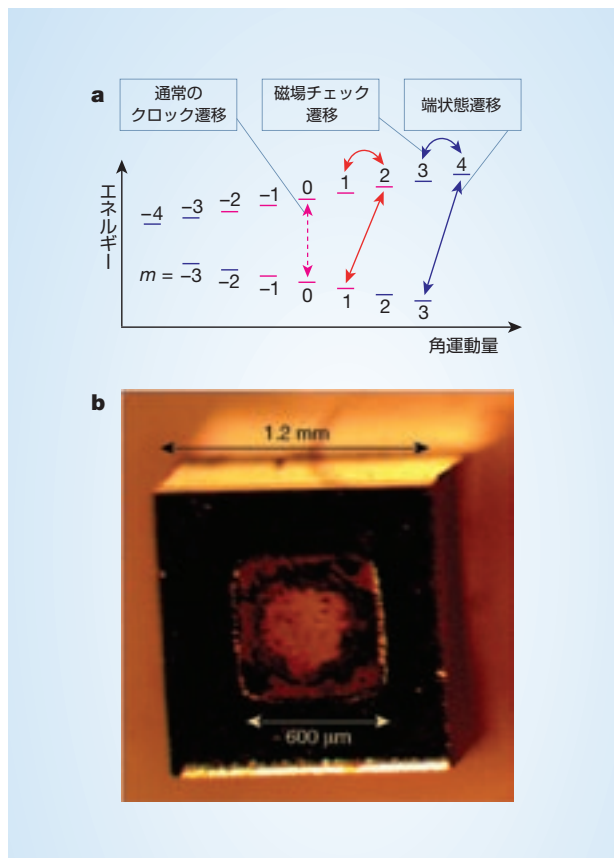


図1 時計の仕組み。a, セシウム原子(青および赤のみ)の基底状態のエネルギー準位、弱い磁場が存在するため分裂している。各準位のエネルギーは m 、つまり原子の角運動量に関する磁気量子数に応じて変わっている。通常のクロック遷移は $m=0$ の2つの準位間である。しかしながら、Jauら³は(セシウムでは $m=3$ と $m=4$ の間、ルビジウムでは $m=1$ と $m=2$ の間)端状態共鳴が小型の原子時計には望ましいと提案している。b, Liewら¹が製作した小さな原子蒸気セル。(厚さ0.375mmの)シリコン片にけられた正方形のスルーホールに少量の金属セシウムが充填されており、両側がガラスシートで密封されている。

す原子の総数が通常の蒸気セルと同じになるようにしている。このような高密度では、原子は頻りに相互に衝突する。各々の衝突はスピン交換というプロセスによって原子とレーザー光あるいはマイクロ波との相互作用を妨害し、共鳴線の幅を広くする。また、衝突によってクロック遷移に関係する2つのエネルギー準位から離れたところに原子のエネルギー準位が移り、その結果、信号の発生に関与する有効な原子数が減少し、SN比が低下する。

Jauら³は基底多重項状態(図1a)の外側の端にあるこれまでとは異なる準位のペアを選んで、この効果に対抗することを提案した。いわゆる光ポンピングは円偏光レーザー光を用いて、ほとんどすべての原子を最も外側の準位のどちらかに移し、その結果、信号強度とSN比が向上する。同時に、端状態の一つにあ

る原子間のスピン交換は(角運動量が保存されるため)有効ではなく、スピン交換衝突は共鳴線の幅を広げない。総合すると、これら2つの効果は時計の安定度を十倍から百倍向上させ、時計の性能を 10^{12} 分の1より良いという価格が€50,000ほどの既存のデバイスの性能範囲に入れることが可能である。

しかしながら、これらの端状態のエネルギーは磁場強度によって大きく変わるといふ重大な欠点があり、このために大きな有効体積をもつ原子時計では通常は使われなかった。Jauら³は隣接する準位間の高周波遷移を用いて、小型セル中の磁場を正確に測定し、電子回路ループを追加して変化をきめ細かく補正する方法を提案した。複雑さが増すことやわずかな不確実性は、短期安定度に対する潜在的に大きな利益を考えるとおそらく許容できるだろう。

Liewら¹のような小型の原子時計が商品となるには、いまだ少し時間がかかるだろう。原子腕時計は本当に望まれているのだろうか。 10^{11} 分の1という正確さは1日につき1マイクロ秒に相当し、通常の日常的な用途ではそこまで正確でなくても

いいだろう。しかし、サイズが小さく低価格になると思われることから、改良型のGPS受信機や自立運用を目的として設計されるタイミング依存デバイスといった、時計以外の製品の重要な構成要素となるだろう。Jauら³が予測した性能の向上が現実のものとなれば、手ごろな原子時がマスマーケットに出回ることになるにちがいない。■

筆者のRobert Wynandsはドイツ国立物理工学研究所(Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany)に所属している。
e-mail: robert.wynands@ptb.de

1. Liew, L.-A. et al. *Appl. Phys. Lett.* **84**, 2694–2696 (2004).
2. Kitching, J. et al. in *Proc. 18th Eur. Frequency and Time Forum*, Guildford, UK, April 2004 (IEE, Stevenage, UK, in the press).
3. Jau, Y.-Y. et al. *Phys. Rev. Lett.* **92**, 110801 (2004).
4. Kitching, J., Knappe, S., Hollberg, L. & Wynands, R. *Electron. Lett.* **37**, 1449–1451 (2001).