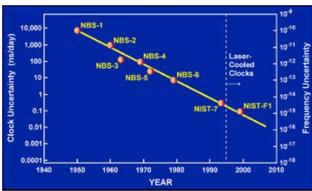


# 時計の歴史

時計	内容（開発者等）	制度
<b>①日時計</b> スペインセビリヤで作られた日時計 	古くからあるが、近代的な日時計はイスラムの天文学者が作ったものを改良して作られた。 1371年、 <b>イブン・シャーティル</b> は、9世紀の <b>バッターニー</b> が考案した三角法を元にして、年を通して時間間隔が変わらない日時計を発明した。	年を通して時間間隔が変わらない日時計を発明し、日時計の棒を鉛直に立てるのではなく、地軸方向に合わせておけば、季節の影響を受けないことに気がついた。
<b>②オスマンの機械時計</b>	オスマン帝国の技術者 <b>タキ・アルジン</b> は、アラームが鳴る機械式目覚し時計を開発した。	この時計にさらなる改良を施し、一つの文字盤で時間、分、秒が表しており、さらに分の表示には5秒毎に刻みが入れてあった。
<b>③振り子時計</b>	1580年代、イタリアの博学者、 <b>ガリレオ・ガリレイ</b> により、振り子の等時性が発見され、これを利用した振り子時計が、1656年、オランダの科学者 <b>クリスティアーン・ホイヘンス</b> により設計された。	最初のもものは1日に1分ほど狂うものであったが、後には10秒程度にまで縮められている。
<b>④懐中時計</b>	1675年、 <b>ホイヘンス</b> は、イギリスの自然哲学者 <b>ロバート・フック</b> が発明した板バネを改良して <b>ヒゲゼンまい</b> を発明し、懐中時計の振り輪 (balance wheel) 用の調整バネ (balance spring) として利用した。	ヒゲゼンまいの発明により、懐中時計は非常に正確になり、今まで1日に数時間狂っていたところを10分程度にまで縮めることに成功した。
<b>⑤クロノメーター</b>	クロノメーターは携帯用の非常に正確な時間測定器具である。初期のころ、経度を測定して遠洋航海するためのものだった。現在は、スイスの機関 <b>COSC</b> の認定基準を満たす腕時計を指す。	クロノメーターには、動かしたり、場所を移したり、温度が変わったりしても狂うことが無いことがまず求められる。

<p><b>⑥水晶時計</b></p> <p>※水晶振動子：二酸化ケイ素の薄片に交流電圧をかけ、一定の振動数で振動させることで時間を計測</p>	<p>1880年、<b>ジャック・キュリ</b>-と<b>ピエール・キュリ</b>-によって石英の結晶が持つ圧電効果が発見された。これにより、1927年には、<b>水晶振動子を用いた最初のクォーツ時計</b>がカナダのベル研究所の<b>ワレン・マリソン</b>と<b>J.ホトン</b>によって作られた。</p> <p>1969年、セイコは世界で初のクォーツ腕時計アストロン (Astron) を製造した。</p> <p>現在でも、水晶振動子の高性能さと低コストのため、数多くのクォーツ時計が生産されている。</p>	<p>最初は、真空管を用いたため、限られた用途にしか使われなかった。</p> <p>1932年には、週ごとの地球の回転率の微細な変化を測定できるほどのクォーツ時計が開発され、アメリカ国家基準局（現在のアメリカ国立標準技術研究所）はこれを標準時間用として1960年代まで採用。</p> <p>(精度：15秒/月程度)</p>
<p><b>⑦電波時計</b></p>	<p>電波時計は原子時計などの基準時計からラジオなどを通じて送られてきた時刻系を元に時間を修正する時計である。</p>	<p>普通は単一の情報を元に修正されるが、グローバル・ポジショニング・システム(GPS)など複数の情報を元に修正するものもある。</p> <p>電波時計はヨーロッパでは1980年代後半から広まっている。</p>
<p><b>⑧原子時計</b></p> <p>※現在では、国際単位系で1秒は「<b>133Cs (セシウム)原子</b>における2つの電子のスピンのエネルギー状態間の遷移に対応する放射が<b>91億9263万1770回</b>繰り返される時間である」と定義されている。</p> 	<p>原子時計は現在知られている最も正確な時計である。</p> <p><b>1949年に最初に開発された原子時計は、スミソニアン博物館に展示されている。</b>これはアンモニア分子の吸収線を利用して作られたものであった(精度は悪かった)。</p> <p>1955年に英NPLで発明された、1個の<b>セシウム原子のスピンの運動量</b>から求められた原子時計は、精度が<math>10^{10}</math>でした。これは、<u>300年に1秒の誤差に相当</u>します。</p>	<p>アメリカ国立標準技術研究所が管理しているセシウム原子時計は、<u>1年で300億分の1秒未満しか狂わない</u>。そのため、正確とはいえない地球の自転速度に時計をあわせる必要が生じ、協定世界時において閏秒を挿入することとなった。(冷却原子泉型原子時計は、<math>10^{16}</math>乗の精度を保っていて、これは、<u>3億年に1秒の誤差に相当</u>。)</p>
<p><b>⑨光格子時計</b></p> <p>※原子時計の応用である。1つの原子ではなく、光格子に閉じ込めた複数の原子を取り扱う。また、133Cs(セシウム)ではなく、<b>Sr87(ストロンチウム)</b>を使うと、放射の周波数が429兆2280億422万9873.4となるので、精度が向上し、原理的には、<u>約300億年に1秒の誤差</u>となる</p>	<p>極低温にした約100万個の原子の集団に特別な周波数のレーザー光を照射し、「光格子」と呼ばれる仮想的な“くぼみ”をつくり、そこに1個ずつ原子を固定して閉じ込めて、複数の原子の平均振動数を求めて時間を計測する。</p>	<p>2003年に世界に先駆け東京大学大学院の香取秀俊教授の研究チームが実証した、「光格子時計」は、セシウム原子時計を100倍以上凌駕する18桁の精度(300億年で1秒の誤差に相当)に達し、将来の「秒の再定義」の有力候補としても注目されています。</p>

## ●原子時計についての情報

原子時計は現在知られている最も正確な時計である。数千年で1秒と狂うことが無い。そのため、その他の時計や時間計測器具の校正に使われている。1949年に最初に開発された原子時計は、スミソニアン博物館に展示されている。これはアンモニア分子の吸収線を利用して作られたものであった。現在では、もっぱら**セシウム原子のスピン角運動量**から求められている。それ以外には水素やルビジウムなど、セシウム以外の原子も使われている。ルビジウムを使ったタイプは小さく、電力が少なくて済み、安価でもある。

原子時計の誕生は時計の歴史上画期的なものである。従来時計は、地球の自転を24時間と定義し、それをいかに正確に計測するかを目的に発展していったのだが、原子時計の精度は地球の自転速度の精度を上回るようになった。そのため1967年、国際単位系(SI)においては、セシウムの性質を時間基準として採用した。国際単位系では、1秒を「基底状態の**133Cs 原子**における2つの電子のスピンエネルギー状態間の遷移に対応する放射が9,192,631,770回繰り返される時間である」と定義している。アメリカ国立標準技術研究所が管理しているセシウム原子時計は、**1年で300億分の1秒未満しか狂わない**。そのため、正確とはいえない地球の自転速度に時計をあわせる必要が生じ、協定世界時において閏秒を挿入することとなった。

最初に作られた原子時計は長さが2mほどありましたが、その後精度と共に小型化の研究も進みました。

近年はワンチップに収まるサイズの原子時計が実用化されています。

最新のものは4cm角という小ささで、100mWの低電力で稼働するものもできています。精度の面でも3000年に1秒を達成するものもあります。

今後は様々な機器への応用が進むでしょう。

## ●光格子時計についての情報

2005年3月、東京大学大学院の香取秀俊教授の研究チームが開発した「光格子時計」は 160億年で1秒しか狂わない画期的なものである。現在公認上、最も精度の高いセシウム原子を使ったものは、 $10^{15}$ （10の15乗）の精度であり、これは3000万年に1秒程度狂ってしまうのに対し、香取研究室のものは $10^{18}$ の精度である。極低温にした原子を光の波長以下の微小領域「光格子」に閉じ込めつつ、そのポテンシャルによる共鳴周波数に対する摂動をゼロにするという、相反する条件を満たすことにより成功した。ここまでの精度だと一定不変であるはずの物理定数の時間変化さえ観測可能となる。つまり、宇宙の誕生とされる 138億年前にまで遡っても0.8秒しか誤差がないものである。

光格子時計では、「魔法波長」と呼ばれる特別な波長を持ったレーザーを使って卵のパックのような原子の容れ物を作り、その中に原子を閉じ込めることでうまく原子を固定し、今まで問題となっていた原子が振動しまう現象を抑えこんで精度を向上させることに成功した。

相対性理論では、高い場所に行くほど、時間の進み方が速くなっています。これを、光格子時計を使って時間を測った結果、スカイツリーの展望台では地上よりも1日あたり4.26ナノ秒だけ速く時間が進んでいることがわかりました。（4.26ナノ秒 = 0.00000000426秒です！）

## Sr 光格子時計

そもそもこの世界は、重力によって時間の進み方が異なる。例えば山頂など標高の高い場所に比べ、山のふもとなどの標高の低い場所では時間がゆっくりと進む。家の中でも、2階にいる人に比べて1階にいる人の時間の方が非常にわずかではあるがゆっくりと進んでいるのだそう（参考：「理研の博士に聞いてみよう」）。このことは、アルベルト・アインシュタイン氏の「相対性理論」に基づく。

逆に言えば、精度の高い時計が開発されればわずかな時間のズレから「重力の変化」の観測が可能となり、「重力の変化」に伴う「時間の変化」を観測することで、地下資源探査、地下空洞、マグマ溜まりなどの発見に応用できる可能性がある。これは、災害予知などにも役立つと考えられている。

そこで開発されたのが、精度の高い時計「光格子時計」。現在1秒の長さは3000万年に1秒狂わないとされる精度の「セシウム原子時計」が用いられて計測されているが、セシウム原子（=1秒間に91億9263万1700回振動）よりもさらに振動数が多い**ストロンチウム原子（=1秒間に429兆2280億422万9873.4回振動）**を用いることで測定する際に受ける外部からの影響を最小限にとどめている。

また、その振動数をできるだけ短い時間で正確に数えるためにはたくさんの原子を集め平均の数を出すのだが、そうしたとき原子同士がぶつかったり他からの影響を受けないように、卵のバックのような原子を閉じ込める容器が必要となる。それが香取教授が発明した「光格子」。レーザー光で作られたこの「光格子」を用いた時計が「光格子時計」である。

光格子時計は既に精度の高い時計であったが、今回の発表では、低温環境でストロンチウム原子を分光することによって黒体輻射の影響をこれまでの 100 分の 1 に低減することに成功し、「低温動作・光格子時計」の開発に至った。この「低温動作・光格子時計」の精度は、2 台の時計で 1 秒のずれが生じるのに 160 億年かかることに相当し、それはつまり宇宙年齢 138 億年で 1 秒も狂わないことを意味する。

――研究者らは、「時計はもはや『従来の時間を共有するツール』としての役目を超えて、『重力で曲がった相対論的な時空間を見る新しい計測ツールになる』」と話す。

3000 万年に 1 秒も狂わない「セシウム原子時計」では、10 メートルの高さの違いによる時間の進み方の違いを区別できた。そして、300 億年に 1 秒も狂わない「光格子時計」ならば、わずか 1 センチの高さの違いによる時間の進み方の違いまで区別できるようになる。私たちは近い将来、「時計」を「時間を測る道具」以外の、どのような道具として試しているだろうか。

理化学研究所（理研）開拓研究本部香取量子計測研究室の**牛島一朗**特別研究員（研究当時、現客員研究員、東京大学大学院工学系研究科助教）、**高本将男**専任研究員、**香取秀俊**主任研究員（東京大学大学院工学系研究科教授）の研究チームは、ストロンチウム（Sr）原子を用いた「光格子時計」の高精度化に向けて、光格子レーザーによる共鳴周波数のずれ（光シフト）を高次の効果まで含めて精密に評価した結果、光シフトの影響を最小とする光格子の「実効的魔法条件」を導き出しました。

本研究成果は、現在の「秒」の定義であるセシウム原子時計の精度を 3 桁上回る「19 桁精度」の光格子時計の実現に向けた重要なステップであり、秒の再定義への議論を活発化する成果です。また、19 桁精度の時計は、ミリメートル精度の相対論的測地などを可能にし、時間／周波数の標準技術の枠を超えた、広範な応用の可能性を広げます。

今回、研究チームは、光格子中の Sr 原子の振動量子状態および光格子レーザーの強度と周波数を精緻に制御し、光格子の光シフトを評価しました。その結果、これまで実験的に観測されなかった電気四重極子／磁気双極子および超分極による高次分極効果の高精度測定に成功しました。このデータを基に、光格子の光シフトを 19 桁精度に低減する実効的魔法条件となる光格子レーザーの強度、周波数を決定しました。本研究は、米国の科学雑誌『Physical Review Letters』の掲載に先立ち、オンライン版（2018 年 12 月 28 日付け）に掲載されました。