

日本学士院賞 受賞者

香 取 秀 俊
か とり ひで とし



専攻学科目
略 生 年 月 歴

量子エレクトロニクス	昭和三九年	九月
	昭和六三年	三月
	平成二年	三月
	同 三年	八月
	同 六年	四月
	同 六年	九月
	同 六年	一〇月
	同 九年	一〇月
	同 一一年	四月
	同 一四年	一〇月
	同 一七年	四月
	同 一七年	一〇月
	同 二二年	五月
	同 二二年	一〇月
	同 二三年	四月

東京大学工学部物理工学科卒業
東京大学大学院工学系研究科修士課程修了
東京大学工学部教務職員
東京大学工学部助手
ドイツ・マックスプランク量子光学研究所客員研究員
博士(工学)
科学技術振興事業団五神協同励起プロジェクト基礎グループリーダー
東京大学工学部附属総合試験所助教
科学技術振興事業団さきがけ研究員(兼務、平成一七年九月まで)
東京大学大学院工学系研究科助教
(独)科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST 研究代表者
東京大学大学院工学系研究科教授(現在に至る)
(独)科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 ERATO 香取創造時空プロジェクト研究総括(平成二七年四月より国立研究開発法人、現在に至る)
(独)理化学研究所香取量子計測研究室招聘主任研究員(平成二七年四月より国立研究開発法人、現在に至る)

博士(工学)香取秀俊氏の「光格子時計の 発明とその開発」に対する授賞審査要旨

時間と周波数の測定は、あらゆる物理量の計測のなかで、最も精密かつ正確な測定が行われている。時間の単位は一九六七年度の第一三回国際度量衡総会の決議により、

「秒は、セシウム133の原子の基底状態の二つの超微細構造準位の間の遷移に対応する放射の周期の9 192 631 770 倍の継続時間である」¹⁾と定義されている。

一九五五年にL. Essenが開発したセシウム原子時計の不確かさは 10^{-12} 程度であったが、現在の不確かさは 10^{-14} ないし 10^{-15} に達している。そこで他の物理量は周波数に変換することにより高精度の測定が実現されている。たとえばJosephson効果により電圧の精密測定が行われ、光速度を定義値(299 792 458m/s)とすることにより、長さの単位の不確かさは秒と同じになっている。(一九八三年第一七回国際度量衡総会の決議)

原子時計(原子周波数標準)の精度を高め、不確かさを小さくす

るためには、スペクトル線の中心周波数をより正確に求めることと、中心周波数の安定化が必要であるが、それには量子論的な限界がある。

スペクトル線の中心周波数測定の不確かさは、スペクトル線幅だけでなく、それを観測する信号対雑音比で決まる。すなわち不確かさを小さくするために線幅を狭くしても、信号対雑音比が減少すれば不確かさは増大する。

スペクトル幅を小さくするには、外場の摂動を受けない原子が理想的であるが、観測するためにはある程度の摂動を与えなければならぬ。また測定時間 Δt での測定周波数の不確かさを $\Delta\nu$ とすると、およそ $\Delta\nu \cdot \Delta t \approx 1$ である。そこで10GHzの周波数を 10^{-15} の不確かさで測定するには、原子の定常状態の寿命として 10^6 秒必要である。 N 個の原子集団を測定すれば測定時間は $1/\sqrt{N}$ になるが、原子間の相互作用によって線幅が広がり、中心周波数もシフトするので、測定周波数の不確かさが増大する。

周波数測定の不確かさに限界があるなら、スペクトル線の周波数が高いほど、相対不確かさ $\Delta\nu/\nu$ は小さくなる。そこでレーザー分光の進歩により、光周波数の原子時計、略称光時計、の研究が進められている。いくつかの提案のなかで有力候補として研究されていたのは、レーザー冷却した単一イオンをPaul trapの中に捕捉し

て、その禁制遷移を観測する方法であった。

この方法は、イオンを電場 0 の位置に捕捉しても、イオンには量子論的な広がりがあるので外場の影響が残り、観測のための電磁場の影響も避けられない。そして線幅 W をせまくするために測定時間 Δt を長くすると、その時間に一個の光子が出るだけなので信号が弱くなる。極低温にすれば熱雑音は減少するが、量子雑音は避けられない。

これらの限界を越える高精度の光時計を実現することは不可能であると考えられていたが、香取氏が考案した光格子時計はこれらすべての難点を克服する世界的な発明であった。

香取秀俊氏は一九九八年、Sr 原子を短時間で 1.7×10^{-8} K 以下の極低温にレーザー冷却する技術を開発した²³⁾。そして、一九九九年、冷却した Sr 原子を光トラップに捕捉するとき、魔法波長と名付けた波長のレーザーを用いて、光電場による遷移周波数のシフトを除去する着想を得た。二〇〇一年、魔法波長のレーザーでつくった光格子に多数の Sr 原子を捕捉し、スペクトル線周波数の光シフトが除去されることを実証した²⁴⁾。

この光格子時計は、レーザー冷却した多数の極低温の原子を計測することにより、高精度で高安定な周波数標準の実現を可能にする。光の周波数は数百テラヘルツであるから、光格子に一〇〇万個の原

子を魔法波長の光のトラップに補足した光格子時計の不確かさは、短時間で 10^{-18} 、すなわち十八桁の精度になる。

二〇一一年には、二つの同位体 ^{87}Sr と ^{89}Sr の光格子時計の周波数比較によって、およそ 10^{-18} の不確かさを実証した²⁵⁾。また、本郷にある東京大学と小金井にある情報通信研究機構 (NICT) の光格子時計の周波数比較により、五〇 m の標高差に対応する重力ポテンシャルシフト約二・六ヘルツを検出した²⁶⁾。

二〇一四年には、周囲温度を九五 K にして黒体放射による周波数シフトを常温の一〇〇分の一に減らした二台の光格子時計の周波数で一か月にわたって 2×10^{-18} の一致を達成した²⁷⁾。さらに装置の小型化の研究も進んでいる²⁸⁾。小型可搬な光格子時計は、重力ポテンシャルの測量調査など、各種の超精密測定への応用が期待される。

日本では香取研究室のほか、情報通信研究機構でも産業技術総合研究所でも研究が進められ、Yb および Hg の光格子時計もつくられている。米、仏、独の計量研究所でも光格子時計がつくられるようになって、国際的な周波数比較測定がおこなわれ、時間の単位「秒」の将来の再定義の有力候補になっている。

以上に述べたように、香取氏の発明は時間と周波数の精密測定の研究を世界的にリードしているものであって、国内国外の多くの著名な賞が授与されており、日本学士院賞に相応しい業績である。

参考文献

1. I. Ushijima, M. Takamoto, M. Das, T. Ohkubo, and H. Katori, "Cryogenic optical lattice clocks", *Nature Photon.*, **9**, 185 (2015).
2. T. Akatsuka, H. Ono, K. Hayashida, K. Araki, M. Takamoto, T. Takano, and H. Katori, "30-km long optical fiber link at 1397 nm for frequency comparison between distant strontium optical lattice clocks", *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 032801 (2014).
3. S. Okaba, T. Takano, F. Benabid, T. Bradley, L. Vincetti, Z. Maizelis, V. Yampol'ski, F. Nori, and H. Katori, "Lamb-Dicke spectroscopy of atoms in a hollow-core photonic crystal fibre", *Nature Commun.* **15**, 4096 (2014).
4. V. D. Ovsiannikov, V. G. Pal'chikov, A. V. Tachenachev, V. I. Yudin, and H. Katori, "Multipole, nonlinear, and anharmonic uncertainties of clocks of Sr atoms in an optical lattice", *Phys. Rev. A* **88**, 013405 (2013).
5. A. Yamaguchi, M. Fujieda, M. Kumagai, H. Hachisu, S. Nagano, Y. Ii, T. Ido, T. Takano, M. Takamoto, and H. Katori, "Direct comparison of distant optical lattice clocks at the 10^{-16} uncertainty", *Appl. Phys. Exp.* **4**, 082203 (2011). 【第 34 回応用物理学論文賞】
6. M. Takamoto, T. Takano, and H. Katori, "Frequency comparison of optical lattice clocks beyond the Dick limit", *Nature Photon.* **5**, 288-292 (2011).
7. H. Katori, "Optical lattice clocks and quantum metrology", *Nature Photon.* **5**, 203-210 (2011).
8. A. Derevianko and H. Katori, "Colloquium: Physics of optical lattice clocks", *Rev. Mod. Phys.* **83**, 331 (2011).
9. H. Katori, T. Takano, and M. Takamoto, "Optical lattice clocks and frequency comparison", *J. Phys.: Conf. Ser.* **264**, 012011 (2011).
10. F. L. Hong and H. Katori, "Frequency metrology with optical lattice clocks", *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 080001 (2010).
11. T. Akatsuka, M. Takamoto, and H. Katori, "Three-dimensional optical lattice clock with bosonic ^{88}Sr atoms", *Phys. Rev. A* **81**, 023402 (2010).
12. H. Katori, K. Hashiguchi, E. Yu. Il'inova, V. D. Ovsiannikov, "Magic wavelength to make optical lattice clocks insensitive to atomic motion", *Phys. Rev. Lett.* **103**, 153004 (2009).
13. M. Takamoto, H. Katori, S. I. Marmo, V. D. Ovsiannikov, and V. G. Pal'chikov, "Prospects for optical clocks with a blue-detuned lattice", *Phys. Rev. Lett.* **102**, 063002 (2009).
14. F. L. Hong, M. Misha, M. Takamoto, H. Inaba, S. Yamaguchi, A. Takamizawa, K. Watabe, T. Ikegami, M. Imae, Y. Fujii, M. Amemiya, K. Nakagawa, K. Ueda, and H. Katori, "Measuring the frequency of a Sr optical lattice clock using a 120 km coherent optical transfer", *Opt. Lett.* **34**, 692-694 (2009).
15. M. Takamoto and H. Katori, "Coherence of spin-polarized fermions interacting with a clock laser in a Stark-shift-free optical lattice", *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 013301 (2009).
16. T. Akatsuka, M. Takamoto, and H. Katori, "Optical lattice clocks with non-interacting bosons and fermions", *Nature Phys.* **4**, 954-959 (2008).
17. J. Ye, H. J. Kimble, and H. Katori, "Quantum state engineering and precision metrology using state-insensitive light traps", *Science* **320**, 1734-1738 (2008).
18. S. Blatt, A. D. Ludlow, G. K. Campbell, J. W. Thomsen, T. Zelevinsky, M. M. Boyd, J. Ye, X. Baillard, M. Fouche, R. L. Targat, A. Brusch, P. Lemonde, M. Takamoto, F. L. Hong, H. Katori and V. V. Flambaum, "New limits on coupling of fundamental constants to gravity using ^{87}Sr optical lattice clocks", *Phys. Rev. Lett.* **100**, 140801 (2008).
19. H. Hachisu, K. Miyagishi, S. G. Porsev, A. Derevianko, V. D. Ovsiannikov, V. G. Pal'chikov, M. Takamoto, and H. Katori, "Trapping of neutral mercury atoms and prospects for optical lattice clocks", *Phys. Rev. Lett.* **100**, 053001 (2008).

20. V. D. Ovsiannikov, V. G. Pal'chikov, A. V. Taitchenachev, V. I. Yudin, H. Katori and M. Takamoto, "Magic-wave-induced 1S_0 - 3P_0 transition in even isotopes of alkaline-earth-metal-like atoms", *Phys. Rev. A* **75**, 020501R (2007).
21. M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, Y. Fujii, M. Imae, and H. Katori, "Improved frequency measurement of a one-dimensional optical lattice clock with a spin-polarized fermionic ^{87}Sr isotope", *J. Phys. Soc. Jpn.* **75**, 104302 (2006). [JPSJ 注目論文賞]【日本物理学会第 18 回論文賞】
22. T. Kishimoto, H. Hachisu, J. Fujiki, K. Nagato, M. Yasuda, and H. Katori, "Electrodynamic trapping of spinless neutral atoms with an atom chip", *Phys. Rev. Lett.* **96**, 123001 (2006).
23. V. D. Ovsiannikov, V. G. Pal'chikov, H. Katori, and M. Takamoto, "Polarization and dispersion properties of light shifts in ultrastable optical frequency standards", *Quant. Electron.* **36**, 3-19 (2006).
24. M. Yasuda, T. Kishimoto, M. Takamoto, and H. Katori, "Photoassociation spectroscopy of ^{88}Sr : reconstruction of the wave function near the last node", *Phys. Rev. A* **73**, 011403R (2006).
25. F.-L. Hong, M. Takamoto, R. Higashi, Y. Fukuyama, J. Jiang, and H. Katori, "Frequency measurement of a Sr lattice clock using an SI-second-referenced optical frequency comb linked by a global positioning system (GPS)", *Opt. Express* **13**, 5253 (2005).
26. M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, and H. Katori, "An optical lattice clock", *Nature* **435**, 321-324 (2005).
27. M. Yasuda and H. Katori, "Lifetime measurement of the 3P_2 metastable state of strontium atoms", *Phys. Rev. Lett.* **92**, 153004 (2004).
28. H. Katori and T. Akatsuka, "Electric manipulation of spinless neutral atoms on a surface", *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, 358-361 (2004).
29. M. Takamoto and H. Katori, "Spectroscopy of the 1S_0 - 3P_0 clock transition of ^{87}Sr in an optical lattice", *Phys. Rev. Lett.* **91**, 223001 (2003).
30. H. Katori, M. Takamoto, V. G. Pal'chikov, and V. D. Ovsiannikov, "Ultrastable optical clock with neutral atoms in an engineered light shift trap", *Phys. Rev. Lett.* **91**, 173005 (2003).
31. T. Ido and H. Katori, "Recoil-free spectroscopy of neutral Sr atoms in the Lamb-Dicke regime", *Phys. Rev. Lett.* **91**, 053001 (2003).
32. T. Mukaiyama, H. Katori, T. Ido, Y. Li, and M. Kuwata-Gonokami, "Recoil-limited laser cooling of ^{87}Sr atoms near the Fermi temperature", *Phys. Rev. Lett.* **90**, 113002 (2003).
33. H. Katori, "Spectroscopy of strontium atoms in the Lamb-Dicke confinement", Proceedings of the 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology, edited by P. Gill (World Scientific, Singapore, 2002) p.323-330.
34. H. Katori, T. Ido, Y. Isoya, and M. Kuwata-Gonokami, "Laser cooling of strontium atoms toward quantum degeneracy", CP551, Atomic Physics 17, edited by E. Arimondo, P. DeNatale, and M. Inguscio, (American Institute of Physics, 2001) p.382-396.
35. T. Ido, Y. Isoya, and H. Katori, "Optical-dipole trapping of Sr atoms at a high phase-space density", *Phys. Rev. A*, **61**, 061403(R) (2000).
36. H. Katori, T. Ido, and M. Kuwata-Gonokami, "Optimal design of dipole potentials for efficient loading of Sr atoms", *J. Phys. Soc. Jpn.* **68**, 2479-2482 (1999). [日本物理学会第 6 回論文賞]
37. H. Katori, T. Ido, Y. Isoya, and M. Kuwata-Gonokami, "Magneto-optical trapping and cooling of strontium atoms down to the photon recoil temperature", *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1116-1119 (1999).
38. H. Katori, S. Schlipf, and H. Walther, "Anomalous Dynamics of a Single Ion in an Optical Lattice", *Phys. Rev. Lett.* **79**, 2221-2224 (1997).
39. H. Katori, H. Kunugiata, and T. Ido, "Quantum statistical effect on ionizing collisions of ultracold metastable Kr isotopes", *Phys. Rev. A* **52**, R4324-R4327 (1995).

40. H. Katori and F. Shimizu, "Laser-induced ionizing collisions of ultracold krypton gas in the $1s5$ metastable state", *Phys. Rev. Lett.* **73**, 2555-2558 (1994).
41. H. Katori and F. Shimizu, "Lifetime measurement of the $1s5$ metastable state of argon and krypton with a magneto-optical trap", *Phys. Rev. Lett.* **70**, 3545-3548 (1993).
42. H. Katori and F. Shimizu, "Laser cooling and trapping of argon and krypton using diode lasers", *Jpn. J. Appl. Phys.* **29**, L2124-L2127 (1990).