

本田財団レポート No. 183

第 43 回本田賞授与式 記念講演 (2022 年 11 月 17 日)

「好奇心が駆動するサイエンスを 未来の技術につなぐ」

東京大学大学院工学系研究科 教授

国立研究開発法人理化学研究所

香取量子計測研究室 主任研究員／

光量子工学研究センター 時空間エンジニアリング研究チーム
チームリーダー

国立研究開発法人科学技術振興機構 未来社会創造事業
プログラムマネージャー

香取 秀俊 博士

公益財団法人 **本田財団**

香取 秀俊 博士

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授

国立研究開発法人理化学研究所

香取量子計測研究室 主任研究員／

光量子工学研究センター 時空間エンジニアリング

研究チーム チームリーダー

国立研究開発法人科学技術振興機構 未来社会創造事業

プログラムマネージャー



■ 生まれ

1964年9月27日 日本

■ 学 歴

1988年 東京大学工学部物理工学科卒業

1990年 東京大学大学院工学系研究科

物理工学専攻 修士課程修了

1994年 東京大学大学院 論文博士（工学）

■ 職 歴

1991年 東京大学工学部 教務職員

1994年 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

1997年 科学技術振興事業団 ERATO 五神協同励起
プロジェクト 基礎グループリーダー

1999年 東京大学工学部 附属総合試験所
協調工学部門 助教授

2005年 東京大学大学院工学系研究科
物理工学専攻助教授

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

2010年～現在 東京大学大学院工学系研究科
物理工学専攻 教授

2010年～16年 科学技術振興機構 戦略的研究推進事業
ERATO 香取創造時空間プロジェクト研究総括

2011年 理化学研究所 基幹研究所
香取量子計測研究室 招聘主任研究員

2014年～現在 理化学研究所 香取量子計測研究室
招聘主任研究員／
光量子工学研究センター
時空間エンジニアリング研究チーム
チームリーダー

2014年～22年 ドイツ チュービンゲン大学
Distinguished Guest Professor

2018年～現在 科学技術振興機構 未来社会創造事業 大規模
プロジェクト型「クラウド光格子時計による
時空間情報基盤の構築」プログラムマネージャー

■ 受賞歴

2001年 丸文研究奨励賞

2005年 欧州周波数時間フォーラム賞
日本学術振興会賞
ユリウス・シュプリンガー応用物理学賞

2006年 丸文学術特別賞
日本 IBM 科学賞

2008年 ラビ賞

2010年 市村学術賞 特別賞

2011年 光・量子エレクトロニクス業績賞（宅間宏賞）
文部科学大臣表彰・科学技術賞
フィリップ・フランツ・フォン・ジーボルト賞

2012年 朝日賞

2013年 東レ科学技術賞
藤原賞
仁科記念賞

2014年 紫綬褒章

2015年 日本学士院賞

2016年 応用物理学会業績賞

2017年 江崎玲於奈賞

2020年 服部報公会90周年特別賞
墨子量子賞

2022年 基礎物理学ブレイクスルー賞

■ 主な会員等

日本物理学会、応用物理学会、レーザー学会、
American Physical Society、日本工学アカデミー

好奇心が駆動するサイエンスを未来の技術につなぐ

香取秀俊
東京大学、理化学研究所



■ はじめに

この度は本田賞を賜り、誠に光栄に存じます。本田財団の関係者ならびに選考委員の先生方に厚く御礼申し上げます。また、この場をお借りいたしまして、ご祝辞いただきました清水富士夫先生*1、五神真先生*2、そして倉石様*3に厚く御礼申し上げます。

清水先生と五神先生のお話を聞きながら、学生時代から 30 年近くの思い出が頭の中をよぎりました。この講演では学生時代からを含め、光格子時計の成り立ちについてお話ししたいと思います。

清水先生のお話にもありましたように、話が研究の詳細になると難しいので、そのときは同僚の反応を見て進めようと思います。そして、ざっくばらんな研究の様子、あるいは研究しながら考えたことを話していこうと思います。

タイトル「好奇心が駆動するサイエンスを未来の技術につなぐ」。英語で言いますと Curiosity driven に研究を進めて、研究者として非常に楽しんできました。こうして 20 年も研究を楽しんだら、祝辞の中のお言葉にもありましたように、この技術を使って、人類、社会に役立つような成果を残したいと、歳を取るに従って考えるようになりました。今日はまさに、そういうところを話していきたいと思います。

■ 日本の時刻を守る光格子時計

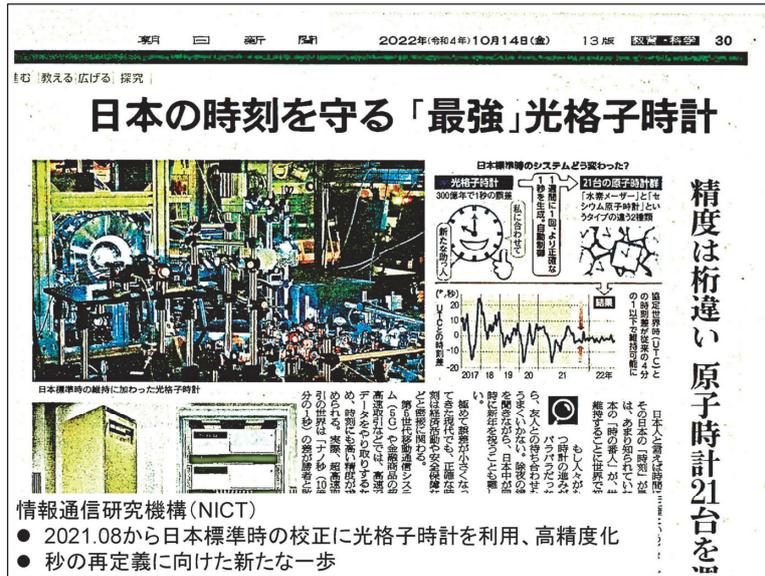


図-1

〈図-1〉ちょうど、このスピーチの準備をしていたころ、井戸さん*4 たちの NICT のグループで「光格子時計を使って日本標準時の校正を始めた」という新聞記事が出ました。これは光格子時計を始めた頃の夢でした。

興味本位に面白いことなら何でもいいという研究の最初の段階から、だんだん技術が出来上がり、最後はその技術を社会に還元する。このように最初から最後までつながる研究に巡り合えたことはたいへん光栄なことです。

時計の精度、相対不確かさ

- 周期現象の繰り返しの回数 n を数える：経過時間 $t = nT = n/v$
- 周期が δT 狂うと、時間も $\delta T = n\delta T$ だけ狂う
→ 時間精度 $\delta t/t = \delta T/T = \delta v/v$ は、振り子の相対精度が決める

周期: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$
振動数: $\nu = 1/T$

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{10 \text{ s}}{1 \text{ yr.}} = \frac{10 \text{ s}}{60 \times 60 \times 24 \times 365 \text{ s}} \approx 3 \times 10^{-7} \left(= \frac{\Delta v}{v} \right)$$

(高精度なクォーツ腕時計)

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{1 \text{ s}}{6000 \text{ 万年}} \approx 5 \times 10^{-16}$$

(国際原子時、セシウム原子時計)

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{1 \text{ s}}{2 \times 138 \text{ 億年}} \approx 1 \times 10^{-18}$$

(光格子時計)

- 精密計測を極めると、時間・周波数計測に行きつく
- 測定を時間に置き換えるのが精密計測の鉄則 → GPSの測距、 $l = ct$

Aether clock

図-2

〈図-2〉これからお話しする時計の精度の表し方について述べておきます。時間計測は周期 T で繰り返す現象の繰り返しの回数 n を正確に数えさえすればいい。この単純さが、時間計測が非常に高精度である秘訣です。ある周期現象を n 回数えたら、時間経過は $t = nT$ です。この周期が δT

ずれることで時間も $n \times \delta T$ だけずれます。正確な時間計測で肝心なのは、正確な周期現象です。

腕時計を買いに行くと「年差 10 秒の時計です」というスペックを目にします。1 年間、つまり $60 \times 60 \times 24 \times 365$ 秒で 10 秒ずれるとき、この分数 10^{-7} の指数乗の部分を取って、これは相対精度が 7 桁の時計と言います。

セシウム原子時計だと、約 15 桁半の相対精度で、6000 万年に 1 秒ずれる精度です。

これからお話しする光格子時計は 18 桁の精度の時計です。研究を始めたころ、研究室のアピール文を書く機会がありました。 10^{18} 秒は、ビッグバンで宇宙が誕生して 138 億年の 2 倍もの時間です。宇宙誕生から 1 秒もずれない時計というキャッチフレーズをつけました。

ところが、実際の社会では、300 億年で 1 秒ずれるかどうかは、大きな意味を持つとは思えないわけです。後半では、その精度にどのような応用を見出していくかを話します。

■ 刹那を読む時計

私は精密計測に興味がありました。やるからには極めたい、すると時間や周波数計測に行き着きます。観測する量を時間に置き換えるのが、精密計測の鉄則です。光速が定義されて、長さ測定が時間計測に置き換わったのはその端的な例です。GPS の衛星からある場所まで電波が伝わる時間から距離を割り出しています。こうして精密計測は周波数、時間計測に帰着します。その時間を刻む根幹が原子時計です。

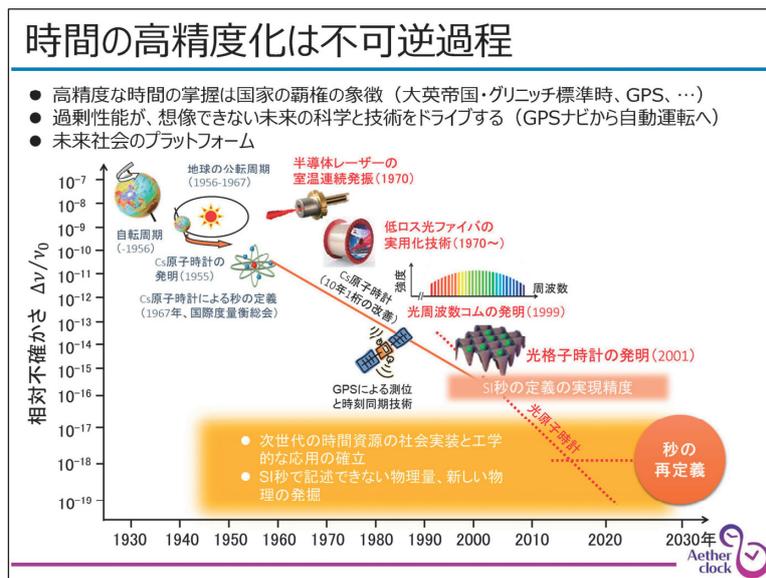


図-3

〈図-3〉時計の高精度化には際限がありません。もとは地球の自転や公転で 1 秒が決められましたが、1967 年にセシウム原子時計で定義が変わりました。そのとき 10 桁で始まった時計の精度が、いまでは 15 桁から 16 桁になりました。光格子時計によって、その精度がさらに 100 倍から 1000 倍改善されようとしています。

その先にあるのが新しい「秒の定義」です。18 桁の時計でどんな新しい物理が見えるか、どんな新しい応用があるか見出したいと思います。

時計の進化の歴史は社会の進化の歴史にも等しい。高性能な時間掌握は、かつて国家の覇権の

象徴でした。いまでは、GPS が社会のプラットフォームとして非常に大きな機能を果たしています。光格子時計で観測可能になる相対論的な時空間が社会にどのようなインパクトを与えることになるでしょう。

刹那(10^{-18})を読む時計、サイエンスとビジネス

- 光原子時計を作る
- Curiosity drivenに光格子時計を考えたころ
 - あり得ない時計を考える、競争しないで済む研究
- 秒の再定義の可能性
 - Friendly competitionによる研究加速

- 光格子時計の小型化
- 時空を測る時計、スカイツリーで相対論を検証する
- 使い途を想像できない高精度が面白い、Seeds drivenに不連続な未来を構想する
- まとめ



図-4

〈図-4〉 Google さんに聞くと 10^{-18} は「刹那」と言うそうです。光格子時計はまさに刹那を読む時計です。このサイエンスと、その社会実装を考えていきます。

こちらが目次です。まず光原子時計の原理を述べます。それから光格子時計の構想を Curiosity driven に考えたころのこと、そして、世界の研究者がこの研究に参入してきて、秒の再定義の可能性が出てきた頃のことを話します。

後半は、この技術をいかに社会に役立てるかを話します。装置の小型化を行って、東京スカイツリーで相対論の実証実験を行った話をします。

さらに小型化が進んだとき、どんなアプリケーションがあり得るか。いま持っている技術から Seeds driven に不連続な未来を想像してみたいと思います。

■ 光原子時計を作る

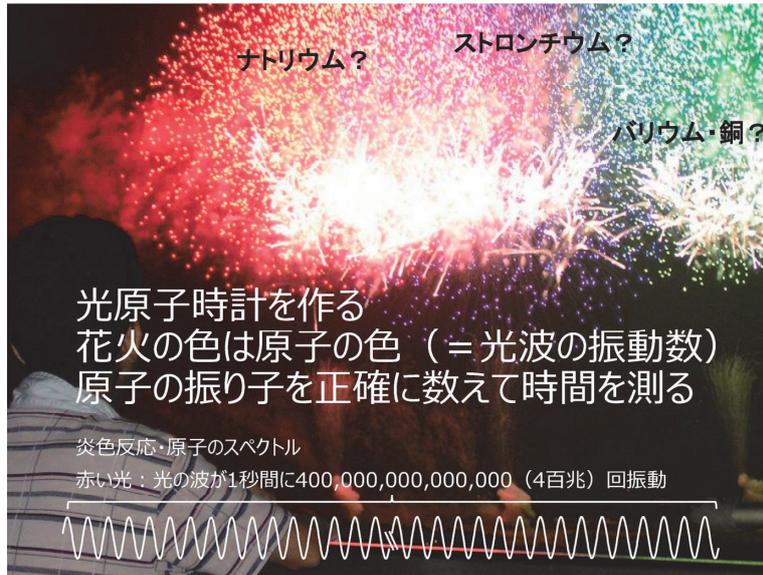


図-5

〈図-5〉夏の夜空の花火の色は、炎色反応を見えています。ナトリウムが光ればオレンジ色、バリウム・銅だと青色、緑に光ります。

今日お話しするのはストロンチウムです。ストロンチウムはちょうどこの写真の紫色の辺りです。ストロンチウムには青色と赤色の強いスペクトルがあります。赤と青を同時に見ると人間は紫と認識します。

このスペクトルのうち光格子時計で原子の振り子として使うのは、1秒間に約400兆回振動する、赤色のスペクトルの方です。この振動を400兆回数えると1秒になります。

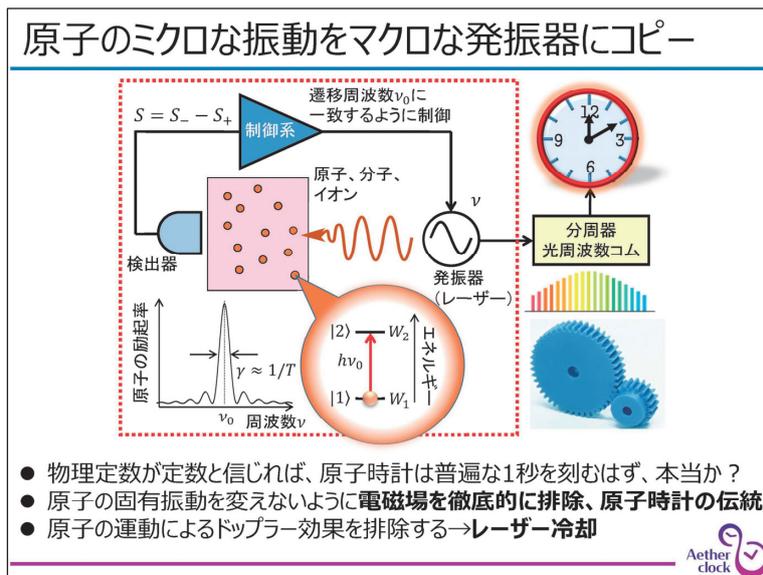


図-6

〈図-6〉原子時計開発で大事なことは、原子のマイクロな振動を、（使っているレーザーポインターのような）マクロなレーザーの振動に上手くコピーすることです。

光を原子に当て、原子が光を一番吸収するようにレーザーの周波数を制御します。原子の遷移周波数をコピーしたレーザー発振器ができれば、400兆回振動したら1秒進めるように歯車を使って分周します。

こういう研究をしていて、物理学者は最後に何を見たいか？

物理定数は定数だと信じるので、物理定数でできる原子の振動も定数だろう。それを使えば普遍的な1秒を共有できるだろう、というのが原子時計の発想です。

物理学者はあまのじゃくなもので、常識に逆らいたい。超高精度な原子時計を使えば、本当に物理定数は定数か？時間・空間的に一定か？が検証できるであろう。それが研究の大きな動機のひとつです。

従来、原子時計の設計指針は、原子の固有振動を変えないように周囲の電場や磁場を徹底的に排除することでした。原子の振動数を変えるもうひとつ原因のが、原子が運動していることによるドップラー効果でした。これを排除するためにレーザー冷却が発明されました。清水先生のお話にありましたように、私が学生時代に研究していたのが、このレーザー冷却です。

■ レーザーによる原子の運動操作

レーザー光による原子の運動操作(1980~)

(Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips, 1997 Nobel Prize)

1) レーザー冷却:
原子の運動量を光子の運動量で制御する
→ 絶対温度0.000001Kかもっと低温まで原子を冷却

Aether clock

図-7-1

〈図-7-1〉この原子のレーザー冷却の研究は1980年ごろから始まりました。原子の運動は、質量×速度で与えられる運動量を持っています。その対向する方向から光子を当てると光子の運動量分だけ原子の運動量が減少します。これを多数回繰り返すと、原子がほぼ静止するまで原子の運動量が減少します。これは、温度に換算して1μK程度で、絶対零度に極めて近い温度です。

レーザー光による原子の運動操作(1980~)

(Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips, 1997 Nobel Prize)

1) レーザー冷却:
 原子の運動量を光子の運動量で制御する
 → 絶対温度0.000001Kかもっと低温まで原子を冷却

2) 光双極子トラップ:
 電場を加えると原子は分極する
 - 誘起双極子モーメント: $\vec{\mu} = \alpha(\omega)\vec{E}(\omega)$
 (ω がゆっくり振動すれば、 μ は同相、 $\alpha > 0$)
 - 光シフト: $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{E} = -\frac{1}{2}\alpha|\vec{E}|^2 \propto -\alpha(\omega)I$

Aether clock

図-7-2

〈図-7-2〉 こうして冷却された原子を光トラップします。原子に電場を加えると、原子核と電子の重心が僅かにずれます。これを原子が分極すると言います。この分極した原子が電場と相互作用することで原子のエネルギーが変化します。

レーザー光による原子の運動操作(1980~)

(Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips, 1997 Nobel Prize)

1) レーザー冷却:
 原子の運動量を光子の運動量で制御する
 → 絶対温度0.000001Kかもっと低温まで原子を冷却

2) 光双極子トラップ:
 電場を加えると原子は分極する
 - 誘起双極子モーメント: $\vec{\mu} = \alpha(\omega)\vec{E}(\omega)$
 (ω がゆっくり振動すれば、 μ は同相、 $\alpha > 0$)
 - 光シフト: $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{E} = -\frac{1}{2}\alpha|\vec{E}|^2 \propto -\alpha(\omega)I$

α はレーザー周波数 ω に依存する。 $\omega < \omega_0$ なら $\alpha > 0$ 、原子は光が強いところへ

Aether clock

図-7-3

〈図-7-3〉 一般に、レーザー光では強度が空間的に変化します。レーザー光強度が一番高いところで原子のエネルギーが最小になり、原子はエネルギー最小のところへ集まろうとします。これが光で原子をトラップする原理です。

例えば、下敷きで静電気を起こすと、髪の毛が下敷きに吸い付きます。こうした吸着現象も、光トラップと同じ原理です。

レーザー光による原子の運動操作(1980~)

(Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips, 1997 Nobel Prize)

1)レーザー冷却:
 原子の運動量を光子の運動量で制御する
 → 絶対温度0.000001Kかもっと低温まで原子を冷却

2)光双極子トラップ:
 電場を加えると原子は分極する
 - 誘起双極子モーメント: $\vec{\mu} = \alpha(\omega)\vec{E}(\omega)$
 (ω がゆっくり振動すれば、 μ は同相、 $\alpha > 0$)
 - 光シフト: $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{E} = -\frac{1}{2}\alpha|\vec{E}|^2 \propto -\alpha(\omega)I$

極低温原子は光強度が最大の腹に捕獲される:
 原子が光の格子で並ぶ→「光格子」

Aether clock

図-8

〈図-8〉 光を鏡で折り返すと定在波ができてきます。定在波では腹の部分のレーザー光強度が極大になるので、そこで原子のエネルギーが一番低くなります。この結果、原子は腹の位置につかまり、原子が周期的に並ぶ光格子ができます。

■ 研究の原点、1990年の比叡山・日米セミナー

1990年の比叡山・日米セミナー、研究の原点

(博士課程1年生の頃)

FIG. 1. Schematic diagram of the apparatus.

PHYSICAL REVIEW LETTERS
 2 JULY 1990

Localization of Atoms in a Three-Dimensional Standing Wave
 C. I. Westbrook, R. N. Watts, C. E. Tanner, S. L. Rolston, W. D. Phillips, and P. D. Lett

$\Delta \omega = \pi$ (MHz)

光の定在波の作るポテンシャルに捕まった原子で、ドップラー効果と反跳シフトが消失

清水先生の周りには光格子時計へのアイデアとキーパーソンが

- Hall先生に自作の**半導体レーザー**をみてもらう
- Phillips博士のお供で京都まで、新幹線の隣の席で**ラムディック分光**の議論
- 黒須さんの**Sr/Ca**、清水研伝統の準安定状態希ガス原子冷却

Aether clock

図-9

〈図-9〉 1990年、清水富士夫先生が、比叡山で日米セミナーを開かれました。ちょうど私が博士課程1年生のときです。清水先生はスピーチで「私は何もしていません」と仰っていましたが、清水先生の周りには光格子時計に繋がるアイデアとキーパーソンに溢れていました。私の一連の研究の原点になりました。

John Hall先生はレーザーの安定化のエキスパートです。よく研究室に来られて、半導体レー

ザーの安定化の議論をしました。

1997年にレーザー冷却でノーベル賞を受賞された Bill Phillips 先生がおみえになったときは、「君、京都までお供をして新幹線でお連れしなさい」と清水先生に言われ、新幹線の隣の席で議論を聞いていました。

ちょうどそのとき Phillips 先生と Westbrook さんが議論されたのが、光の定在波で原子が捕まっているようだ。その証拠として散乱光からドップラー効果が消えているのではないか。ちょうどその論文が出るころで、白熱したラムディッケの効果の議論をされていました。

黒須さんは、Sr (ストロンチウム) と Ca (カルシウム) のレーザー冷却の研究をされていました。また、清水研伝統の準安定希ガス冷却の実験がありました。

こういうバックグラウンドを全部うまく組み合わせると光格子時計が出来上がりました。

■ Curiosity driven に光格子時計を考えたころ

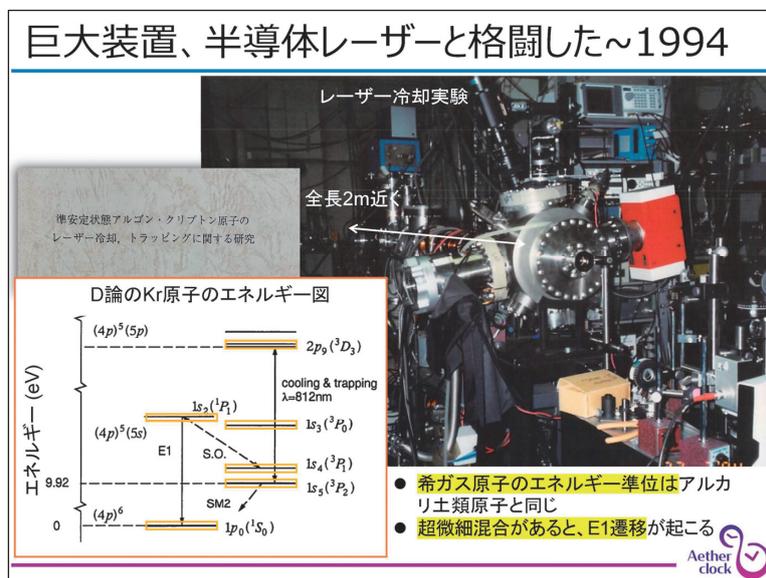


図-10

〈図-10〉博士の研究では、全長 2m もある巨大な真空装置と格闘して、希ガスのレーザー冷却の実験をしていました。博士論文で扱った希ガスのエネルギー図と、いま光格子時計に使っているエネルギー図は全く一緒です。このおかげで、博士論文を書いているころ考えていたことが、今の研究にそのまま当てはまりました。

光格子時計の重要なアイデアの 1 つの「超微細混合で生じる E1 遷移」を使うのも、博士論文のときに経験済みのことでした。清水研での研究は本当に大きな果実を与えてくれました。



図-11

〈図-11〉清水先生のお話にもあったように、博士取得後にマックス・プランク研究所に行く機会をいただきました。「君は次どうするの？考えてないなら、行ってらっしゃい」と言われるままに行きました。

マックス・プランクから提案された研究の中で「原子時計の研究をやりたい」と言うと、清水先生に「時計の研究は止めたほうがいいよ。そんなことを始めたら何年も論文が書けないから就職先が見つからないよ」と言われたのを覚えています。

やらないほうが良いと言われれば、やりたくなるのが人情です。マックス・プランクで隣の研究室で進められていたイオントラップを使った原子時計の実験を傍目で眺めていました。その頃、自分では光格子中の1次元イオンのダイナミクスを見る研究をしていました。

突然よそ者が研究室に行っても、学生を説得して実験を進めるのは大変でした。素直に言うことを聞いてくれたのは、エレクトロニクスとコンピュータくらいです。自由に面白い研究をしたいという欲求が最高潮に達していた頃です。

マックス・プランク研究所では、世界中の研究者が最新データを持って、毎週のようにセミナーが開かれていました。まさにそこは研究情報の集積地で、欧米では密に情報交換をして研究をすすめていることを思い知りました。日本に帰ったら、その情報戦に挑むような研究をするのは厳しいことは容易に想像できました。日本で勝負するには、世界でやっていないことをやるしか解がないと「世界でやっていないこと」リストを作るのに精を出しました。これが、光格子時計につながります。

イオントラップの手法を中性原子に導入(97~)

- 実験したい欲求が最高潮のとき、五神ERATOプロジェクトで日本に帰れる！プロジェクト提案。「レーザー冷却だけでボーズ凝縮を実現」
- のるかそるかの大打撃、Sr冷却の提案をしたら、清水先生もここばかりは「できなかったら困るから、もっと簡単なのにしたら？」
- 狭線幅レーザー冷却、極めて弱い遷移を使ってレーザー冷却、温度400nK

VOLUME 62, NUMBER 6 PHYSICAL REVIEW LETTERS 8 FEBRUARY 1999

Magneto-Optical Trapping and Cooling of Strontium Atoms down to the Photon Recoil Temperature

Hidetoshi Katori, Tetsuya Ido, Yoshitomo Isoya, and Makoto Kawata-Gonskani
 Cooperative Excitation Project, ERATO, Japan Science and Technology Corporation (JST), KSP-D-842, 5-2-1 Suhafu,
 Tsukuba-shi, Ibaraki-shi, 211-0012, Japan

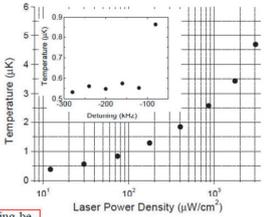
received 4 September 1998

and trapping of strontium atoms down to the photon recoil temperature $5s^2^1S_0$ and $5s5p^3P_1$ transition at 461 nm were further cooled in a sideband transition 3S_1 at 689 nm. We have thus obtained an m^2 and a minimum temperature of 400 nK, corresponding to a λ which is 3 orders of magnitude larger than the value that has been reported. This scheme provides us an opportunity and system to study the fermions as well as bosons. [S0031-9007(98)08352-5]



井戸
向山

experimental possibility is applying sideband cooling between $5s^2^1S_0$ and $5s5p^3P_1$ states. Coupling these two states to upper $5s5p^1P_1$ and $5s6s^3S_0$ states, respectively, by an infrared laser may realize optical potentials with the same vibrational energy separation $\hbar\omega_m$ for both states simultaneously. Since ω_m can be larger than the linewidth γ_2 or E_R/\hbar , the well established scheme in a single ion cooling [22] can be applied to the ensemble of neutral



←光トラップのデザイン
のアイデア

Aether clock

図-12

〈図-12〉 そのころ（1996年の終わりころ）、五神先生から「ERATOのプロジェクトを始めるので好きな研究を何でも提案してみなさい」「ボーズ凝縮のようなマクロな量子現象を見いだすような系を提案してみなさい」と連絡をもらいました。

このときレーザー冷却だけでボーズ凝縮を作ろうと、まだ世界で誰もやっていない研究を提案しました。この当時としてはとても野心的な研究です。普段は「もっと大胆な研究をきなさい」と言う清水先生も、このときばかりは「本当にそれ、できるの？」と心配して、「もっと簡単な原子がいいんじゃないの？」と言ってくださったのも懐かしい思い出です。

このERATOの研究では、井戸さんと一緒に研究を進め、非常に短期間で素晴らしい結果が出ました。分光にも使うような極めて弱い時計遷移を使ってレーザー冷却を行い、400nKという1光子の反跳で受け取るエネルギーまで原子を冷却することができました。

この研究を進めながら、次はイオントラップのアイデアを導入するような実験に展開したいと思っていました。

光トラップをデザイン、光格子時計の原点(98)

Optimal Design of Dipole Potentials for Efficient Loading of Sr Atoms

Hidetoshi KATOHI, Tetsuya IDO and Makoto KUMATA-GONORAMI

Cooperative Excitation Project, ERATO, Japan Science and Technology Corporation (JST),
KSP D-412, 3-8-1 Sohdai, Tokai-ku, Kawasaki 212-8502

(Received May 11, 1999)

- 光トラップ中でのレーザー冷却最適化
- 光トラップ：双極子遷移に近共鳴な光で2準位が反発
→光トラップとレーザー冷却は相容れない (のが常識だった)
- 狭線幅冷却遷移では状態が結合しないので、2準位の光トラップの深さをレーザー波長でチューニング可能
- 偏光依存性が大きすぎて原子時計にはなりそうにない
- 原子時計の会議に呼ばれて、秘策を練る機会をもらった

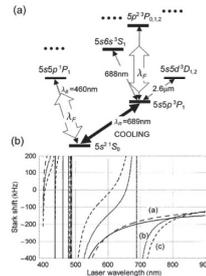
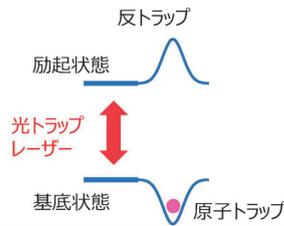


Fig. 1. (a) Strontium energy levels. The dipole-allowed transition $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ is used for the preliminary cooling, and the spin-forbidden transition $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ for the secondary cooling. In the final stage of the secondary cooling, the dipole-trapping laser couples 1S_0 and 3P_1 states to the upper singlet and triplet series, respectively, to produce light-shift potentials. (b) Light shifts for 1S_0 and 3P_1 states are shown by the solid and dashed lines, respectively, as a function of the laser wavelength λ_L . We assumed a linearly polarized light with the laser power density $I_L = 100 \text{ mW/cm}^2$ (1 J/cm^2). The dashed lines correspond to the light shifts depending on the choice of quantization axis and the magnetic sublevels; the light shift of $m_J = 0$ sublevel by the π polarized light (a), $m_J = \pm 1$ by the σ^+ light (b), and $m_J = \pm 1$ by the π light and $m_J = 0$ by the σ^+ light (c).



図-13-1

〈図-13-1〉 ポーズ凝縮を作るには光トラップ中での冷却が必要でしたが、従来、光トラップとレーザー冷却は相容れないというのが常識でした。学生の時に読んだ Steven Chu さんの光トラップ中でのレーザー冷却を説明した教科書で、励起状態は反トラップになるので冷却とトラップは共存し得ないと書いてありました。

光トラップをデザイン、光格子時計の原点(98)

Optimal Design of Dipole Potentials for Efficient Loading of Sr Atoms

Hidetoshi KATOHI, Tetsuya IDO and Makoto KUMATA-GONORAMI

Cooperative Excitation Project, ERATO, Japan Science and Technology Corporation (JST),
KSP D-412, 3-8-1 Sohdai, Tokai-ku, Kawasaki 212-8502

(Received May 11, 1999)

- 光トラップ中でのレーザー冷却最適化
- 光トラップ：双極子遷移に近共鳴な光で2準位が反発
→光トラップとレーザー冷却は相容れない (のが常識だった)
- 狭線幅冷却遷移では状態が結合しないので、2準位の光トラップの深さをレーザー波長でチューニング可能
- 偏光依存性が大きすぎて原子時計にはなりそうにない
- 原子時計の会議に呼ばれて、秘策を練る機会をもらった

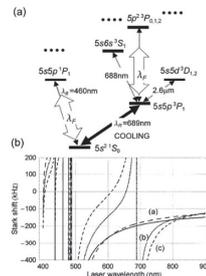
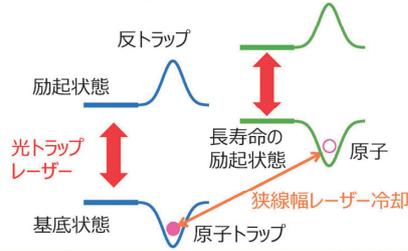


Fig. 1. (a) Strontium energy levels. The dipole-allowed transition $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ is used for the preliminary cooling, and the spin-forbidden transition $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ for the secondary cooling. In the final stage of the secondary cooling, the dipole-trapping laser couples 1S_0 and 3P_1 states to the upper singlet and triplet series, respectively, to produce light-shift potentials. (b) Light shifts for 1S_0 and 3P_1 states are shown by the solid and dashed lines, respectively, as a function of the laser wavelength λ_L . We assumed a linearly polarized light with the laser power density $I_L = 100 \text{ mW/cm}^2$ (1 J/cm^2). The dashed lines correspond to the light shifts depending on the choice of quantization axis and the magnetic sublevels; the light shift of $m_J = 0$ sublevel by the π polarized light (a), $m_J = \pm 1$ by the σ^+ light (b), and $m_J = \pm 1$ by the π light and $m_J = 0$ by the σ^+ light (c).



図-13-2

〈図-13-2〉ところが、その頃我々が実験していたスピン禁制遷移でのレーザー冷却では、トラップレーザー光が（冷却遷移の）上準位をさらに上準位に結合するので、その波長を変えれば、レーザー冷却に使う上下準位の光トラップの深さを自由にチューニング可能になりました。得られた実験データを付けて、光トラップの最適設計の論文を書きました。

清水先生がおっしゃるように、こういうアイデアはいくらでも出るのだけれども、大事なのは、そのアイデアをいかに実験的に実現し、発展させるかです。

これはイオントラップに似た系なので原子時計によさそうですが、よく考えると光の偏光依存性が大きすぎて原子時計にはなりそうもありません。これを原子時計にする方法はないのかと考え始めました。

■ あり得ない時計を考える



図-14

〈図-14〉考えを進める絶好の契機が2001年、7年に1度開かれる原子時計の国際会議に招待されたときです。これはその会議のProceedingsに載っていた写真です。ここにはJohn Hall先生、Dave Wineland先生など、この後ノーベル賞を取られる先生がたくさんいらっしゃる会議でした。

こんな大御所ばかりの会議に若者1人呼ばれてしまうと、実験成果で太刀打ちできない。「若者らしい突拍子もないアイデアを言わないと」という気になります。従来、電磁場を徹底的に排除するのが原子時計でした。電磁場をうまくエンジニアリングする新しい原子時計の指針があってもいい、という提案をしました。

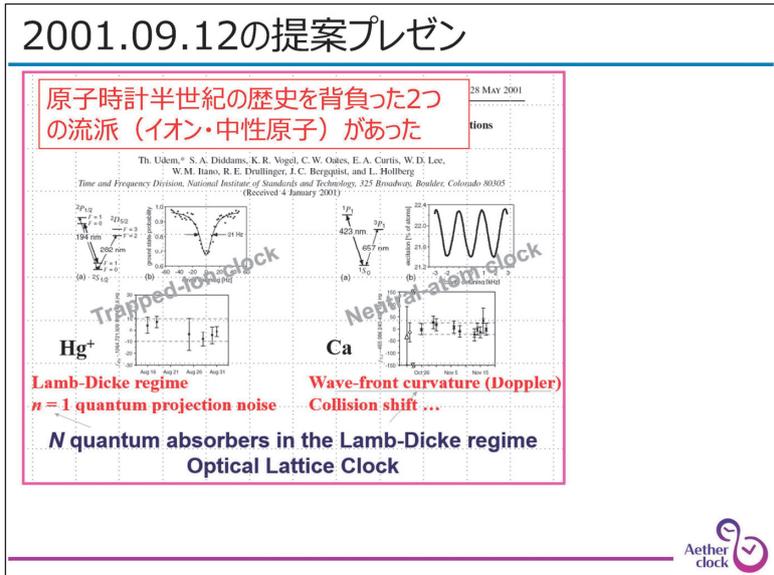


図-15-1

〈図-15-1〉 そのころ原子時計といえば、1) 単一のイオンを観測する単一イオン光時計と、2) 自由落下する中性原子集団を観測する中性原子光時計、の2種類の方法がありました。このイオン時計と中性原子の時計のいいところ取りをするような研究はできないかと考えたのが光格子時計です。

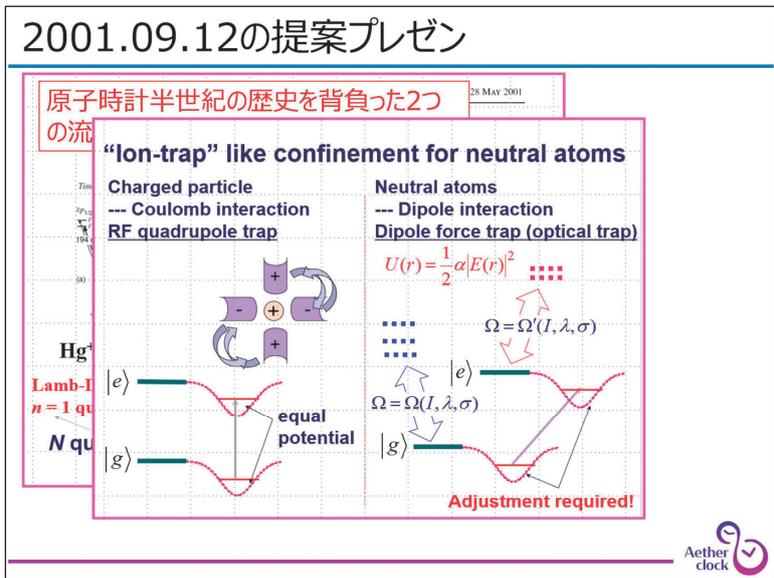


図-15-2

〈図-15-2〉 イオントラップでは基底状態・励起状態と同じ深さの閉じ込めができますが、中性原子では一般にそうなりません。先ほどの禁制遷移なら上下準位の閉じ込めの深さをチューニング可能というアイデアをここに投入します。それでイオントラップ的な閉じ込めができました。

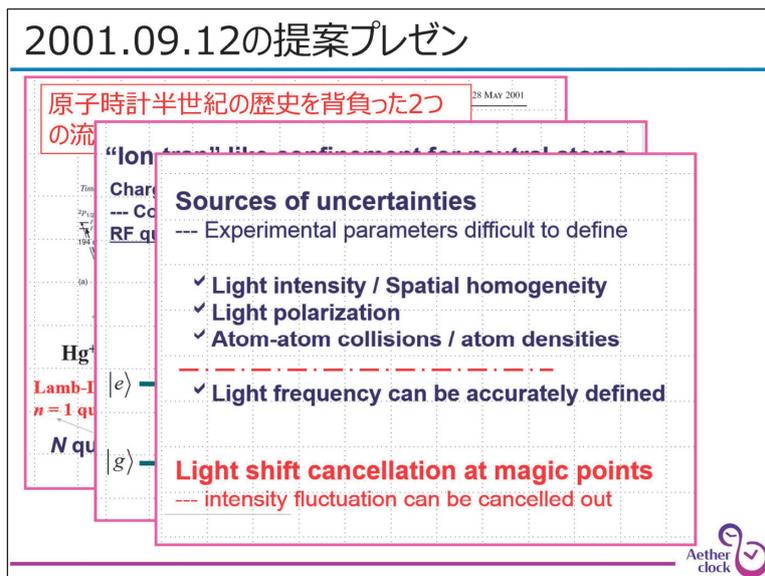


図-15-3

〈図-15-3〉これが魔法波長のアイデアを書いたところです。マジックポイントを使えば、トラップの閉じ込めのエネルギーがキャンセルできるだろう。

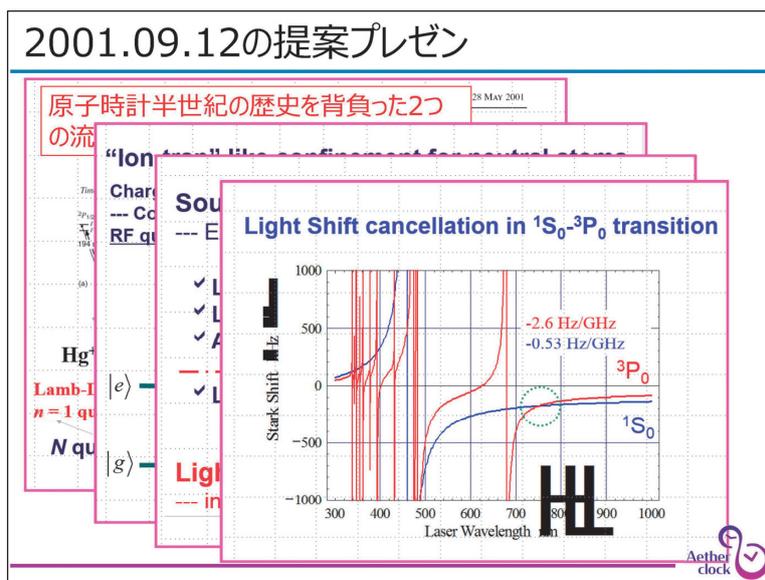


図-15-4

〈図-15-4〉軌道角運動量が 0 になるスカラーの状態を使えば、偏光の依存性が入ってこない
ので、理想的な光シフトの制御ができるだろう。これが魔法波長、魔法周波数を使った光格子時
計の一番のアイデアと置いていたところです。

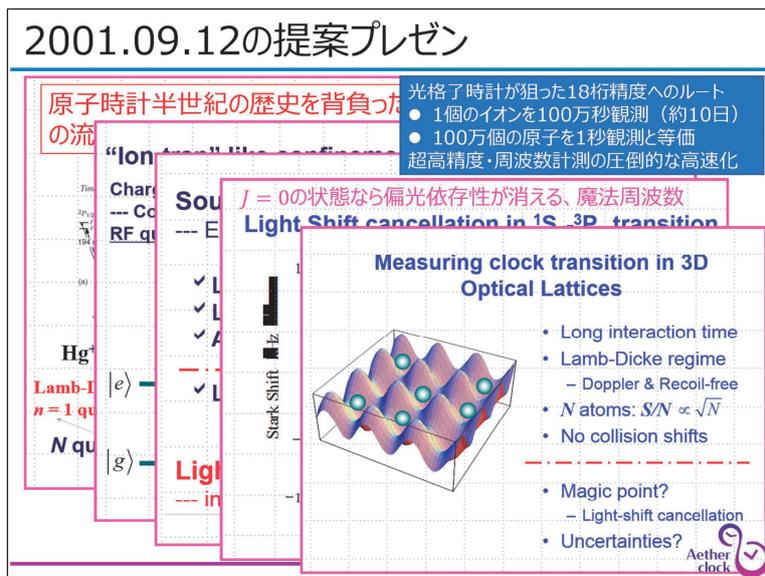


図-15-5

〈図-15-5〉この当時の光原子時計が狙った18桁の測定の筋書きは、単一のイオンを100万回することでした、ところが、これには約100万秒、つまり10日の測定時間を要します。もし、光格子に100万個の原子をつかまえることができれば、単一イオン時計の100万倍の速さで18桁の精度に到達するでしょう。時間計測の圧倒的な高速化を狙うのが、光格子時計の目論見でした。



図-16

〈図-16〉五神先生のERATOプロジェクトの終了の頃に、そのような光格子時計のアイデアの実現を考えていました。プロジェクト終了の時の記念写真を見ると、皆さん笑顔でいい表情をされている。非常に成功したプロジェクトでした。

五神先生が優れた指導者で教育者と思うのは「香取君の研究は、このERATOが絶頂ですかね？」と、私の闘志に火をつける言葉をかけてくれる。そんなことを言われると、今まで以上に大きな研究をしようという気になります。

学生時代、清水先生が「研究者は山師じゃないと」と仰っていたのが、脳裏に浮かびます。研究者たるもの、野心的に新しい研究の源泉を見つけたいといけない。

■ 秒の再定義の可能性

研究≡歴史に挑戦、周波数至上主義者のプロトコル

VOLUME 91, NUMBER 17 PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 24 OCTOBER 2003

Ultrastable Optical Clock with Neutral Atoms in an Engineered Light Shift Trap

Hidetoshi Katori¹ and Masao Takamoto
Engineering Research Institute, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113
V. G. Pal'chikov
Institute of Metrology for Time and Space at National Research Institute for Physics and Radiotechnical Measurements-IMVP VNIIFTRI, Mendeleev, Moscow Region
V. D. Ovsiannikov
Department of Physics, Voronezh State University, Voronezh 394006, Russia
(Received 25 March 2003; published 24 October 2003)

An ultrastable optical clock based on neutral atoms trapped in an optical lattice is proposed. Complete control over the light shift is achieved by employing the $5s^2S_{1/2} \rightarrow 5s5p^2P_0$ transition of ^{87}Sr atoms as a "clock transition." Calculations of ac multipole polarizabilities and dipole hyperpolarizabilities for the clock transition indicate that the contribution of the higher-order light shifts can be reduced to less than 1 mHz, allowing for a projected accuracy of better than 10^{-17} .

$h\nu = h\nu_0 - \frac{\alpha_e(\omega_m) - \alpha_g(\omega_m)}{2} E^2 + \text{高次項}$

- 魔法周波数, magic frequency
- $\Delta\alpha(\omega_m) = \alpha_e(\omega_m) - \alpha_g(\omega_m) = 0$
- 高次項の影響：18桁目でしか現れない

- 過去半世紀の原子時計開発の努力は、原子に加わる摂動を極限まで取り除くこと、
- この延長線上には、単一イオン時計しか解がない
- 摂動を18桁レベルでエンジニアリングは無理と思われていた
- 光格子時計：原子時計を構築するプロトコルを周波数で与える (精密計測の鉄則)
- Pal'chikov, Ovsiannikovが電場の4次の光シフトを計算、大丈夫そう
- 黒体輻射のシフトが2Hz、低温環境が必要(→2014年に実現)



図-17

〈図-17〉この後、光格子時計の不確かさ見積もりを入れた提案論文を書きました。従来の原子時計の開発の努力は原子に加わる電場・磁場を排除することでしたが、この延長線上には従来の単一イオンの時計しかない。原子に摂動を加え、それが18桁レベルでうまくエンジニアリングできるとは誰も信じていなかったことです。

冒頭でお話ししたよう測定を周波数に置き換えるのが精密計測の鉄則でした。この鉄則に則って、摂動を与えるプロトコルを周波数で与えてやれば可能性はあるだろう。これが魔法周波数(波長)の発想です。この魔法周波数のプロトコルで消えない高次の効果もありました。理論家に聞くと高次の効果は18桁目くらいだろうとのことで、18桁を目指す光格子時計の提案に至りました。

(1次元)光格子時計の実現、2005

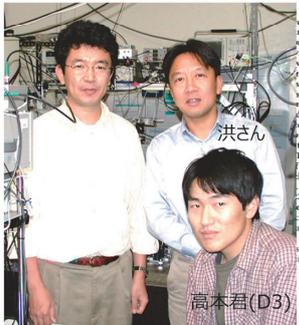
Vol 435/19 May 2005 doi:10.1038/nature03541 nature

サイエンスの原動力は、未知へのワクワク感
面白い研究は、どんどん進む！

LETTERS

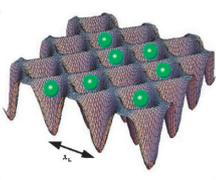
An optical lattice clock

Masao Takamoto¹, Feng-Lei Hong², Ryoichi Higashi¹ & Hidetoshi Katori^{1,2}



Development of time and frequency is a prerequisite for technologies that underpin modern communication networks and navigation systems (GPS). The SI second is currently based on the hyperfine splitting of the ground state of ^{133}Cs atoms with a fractional uncertainty of 1.2×10^{-16} . Thanks to the optical frequency comb, optical clocks have attracted increasing attention because of their superior precision. Ultracold neutral atoms in free space have high performance that is approaching that of optical lattice clocks. Here we report a different type of optical lattice clock: neutral atoms trapped in an optical lattice serve as the "clock transition." The transition frequency for the $5s^2S_{1/2} \rightarrow 5s5p^2P_0$ transition is $29,952(15)$ Hz, as determined by an optical lattice clock. The transition frequency is a magnitude narrower than that observed for ^{133}Cs atoms, and its stability is better than that of the ^{133}Cs clock. The transition frequency is insensitive to the highest possible degree. An indicator of the fractional instability which is minimized by the high-Q ($Q = \nu_0/\Delta\nu$) transition. The given by the Allan deviation¹⁰

$$\sigma_y(\tau) = \Delta\nu/\nu_0\sqrt{N\tau} \quad (1)$$



can confine atoms in a submicrometre region, and its periodicity allows the production of billions of micro-traps in a volume of 1 mm^3 . These features are indeed attractive for fine spectroscopy with enhanced stability. In general, such a lattice-trapping field significantly modifies the internal states of atoms by so-called light shifts, and so the system was not seriously considered for atomic clocks until the demonstration of the light shift cancellation technique^{6,7}. The transition frequency ν



図-18

〈図-18〉この頃ちょうど高本君が博士課程にいました。彼が光格子時計を世界で初めて実現し、

博士を取得しました。光格子時計の周波数計測のために、当時、産総研におられた洪さんが東大に測定装置を持ってきてくれて、光格子時計の実証実験をしました。

サイエンスの原動力は未知へのワクワク感です。こういう面白い研究は、たとえ難しくてもどんどん進むものです。

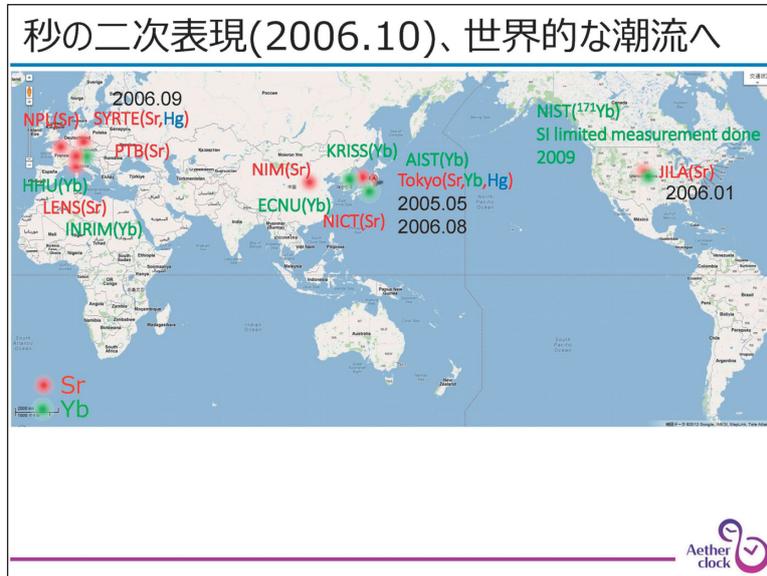


図-19-1

〈図-19-1〉光格子時計をやっているのは、われわれだけかと思いきや、われわれが実現した半年後にはアメリカのグループ、その後、フランスのグループも実現しました。研究はいつの間にか始まるとみんな同じ方向を向くのです、このときはいち早く実現できたことで胸をなで下ろしました。

それから、この光格子時計の研究は全世界に広がっていきました。今では 30 近くのグループで、この研究が行われています。

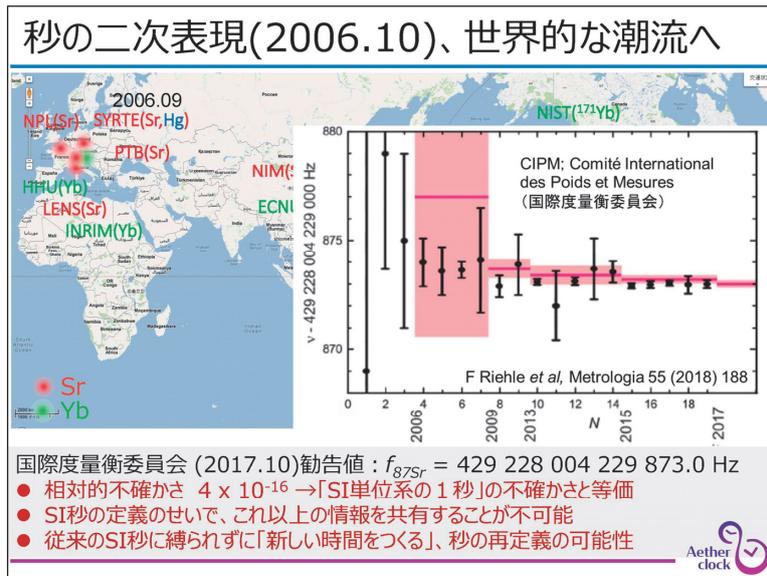


図-19-2

〈図-19-2〉多くの研究グループが参入することで、ストロンチウムの遷移周波数をどこまで

正確に測れるかが競われました。この結果、測定の不確かさがだんだん狭まっていきました。

研究を始めた当初（2005年）こんなに大きかった不確かさが、今では16桁の精度で記述できるようになりました。この不確かさは、1秒の定義の不確かさで決まっています。つまり、セシウム原子によるSI秒の定義のせいで、これ以上、周波数の情報が共有できない状況です。これが秒を再定義する大きなモチベーションになりました。

■ 光格子時計の第2幕・小型化

光格子時計の展開～ERATO時空間、未来社会Pj
(2010-2016) (2018-2017)

光格子時計の第2幕：
小型・可搬化と**高精度化**をどこまで進められるか？

- 同期計測法：光格子時計の量子限界に迫る(2011)
- 黒体輻射シフトの克服で18桁へ(2014)
- 高次、多重項光シフトの対策、19桁へ(2015～)
- 可搬光格子時計の青写真を作る、ラボ外運転
- スカイツリーを利用した重力赤方偏移の検証
- 時計のネットワークを作る、見えること
- **縦励起ラムゼー**
- 未来の時計



図-20

〈図-20〉これから後半、光格子時計の展開をお話しします。2010年から始まったERATO創造時空間プロジェクトの研究と2018年に始まった未来社会プロジェクトで進めている研究を紹介します。

光格子時計の第2幕では、小型・可搬化と高精度化がどこまで進められるかが焦点です。この中でオレンジ色に色分けしてあるところが高精度化に相当するところです。高精度化の話はますます詳細になり19桁がターゲットです。そのアイデアの大枠は完成し、実証のフェーズです。最後では、小型化を進め、いかに社会実装を目指すかに焦点を当てていきます。



図-21

〈図-21〉 97年に始めた基礎研究に、どんどん装置とアイデアを付け足して、時計の18桁の比較をしたときは、ラボ全面に実験装置を展開して、2台の時計が動く状況でした。こんな大きさだと、「たとえ測れても使い道がない」と思うわけです。20年も基礎研究をしたら、最初約束した未来の量子技術の実用化を目指したいという思いが強くなりました。

まずは装置の全体像を示して、今後の小型化の指針を考え始めました。個々の装置を継ぎ足していくと、ますます複雑化してやがて破綻するので、研究としてサステイナブルになりません。研究を発展させるには、完成した技術からブラックボックス化していく必要があります。

この写真の装置は、まるで真空管の時代の、コンピュータのようです。もっと実験を現代的にしよう、実用に耐える技術と向き合おうと考えました。



図-22

〈図-22〉 これまでのレーザーを使った精密分光の実験は、1日中レーザーと格闘するのが常でした。30年前の私の学生時代からそうです。レーザーと格闘することで疲れては実験が進まない。

まずは、調整不要のレーザーを作りました。

写真の手前、透明の箱に入っているのが、単一波長で発振しているレーザーです。横で、ドライバーで光学定盤をたたいても発振が乱れることはありません。従来のレーザーで微調が必要な部分をレーザー溶接で固定して、調整不要のレーザーを作ることから始めました。

そうすると、水晶発振器に位相同期のループ（PLL）を作る手軽さで、レーザー発振器に対して光のPLLを作って、光の周波数や位相を自在に制御できるようになります。光の周波数も、従来のエレクトロニクスの延長線に来るような実験を構想したいと思うようになりました。



図-23

〈図-23〉 そのころ、島津製作所と縁があって共同研究することになりました。島津製作所の皆さんに協力してもらって、エレクトロニクスの小型化ができました。こうして、ラボ全面に展開したエレクトロニクスが赤枠のふたつの箱に収まりました。この上面に、レーザーなどの光学系を配置しました。手前の黒い箱が光格子時計の本体です。この小型装置で 18 桁の時計が実現しました。

■ スカイツリーで相対論を検証する

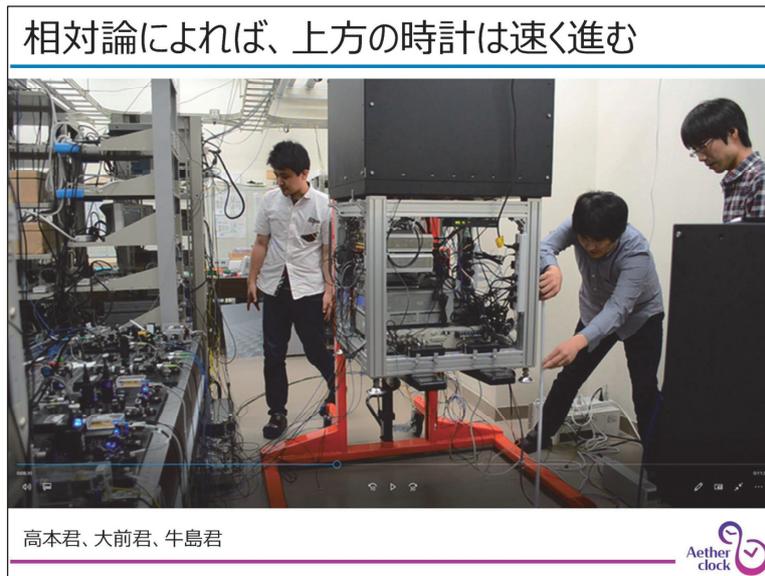


図-24

〈図-24〉時計が小型になったので、時計の高さを変えて相対論の検証をしてみます。相対論によれば、上方の時計は速く進むといえます。では、1m 時計を持ち上げたらどうなるか。高本君、大前君、牛島君の協力を得て、こんな実験が実現しました。

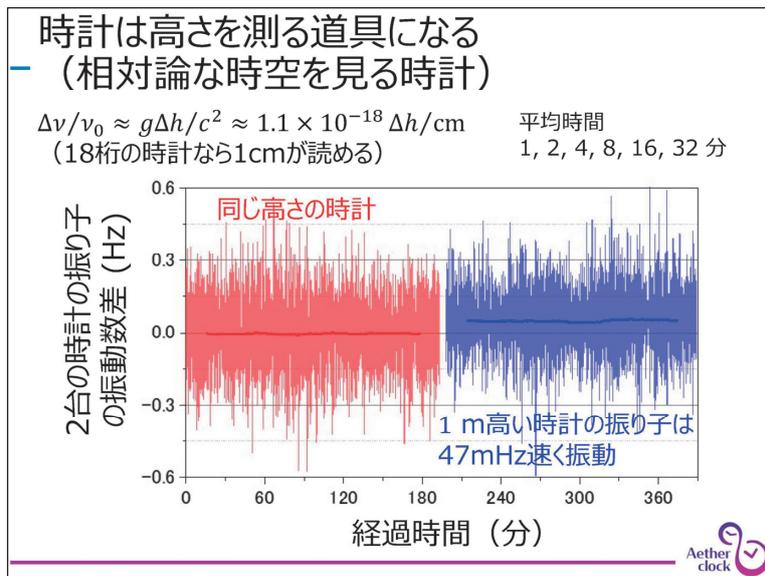


図-25

〈図-25〉同じ高さに置いた時計、1m 持ち上げた時計のうなりの周波数を見えています。生データだとノイズが大きくて判別が付きませんが、30 分の隣接平均を取ったのが赤と青の実線です。同じ高さの時計は 18 桁目まで合って周波数差はゼロですが、1m の高低差がある時計比較では、40mHz の周波数差が観測できます。

先ほどの五神先生の話にもありましたが、地上では 1cm 高くなるごとに時計の 18 桁目が速く振動するようになります。そうすると、18 桁を読む時計は地上で 1cm の高低差を読む時計となります。時間を共有する道具であった時計が時空間を探るためのセンサーになる。その新しい応用を見つけていきたいと考えています。

測定のイメージ（結構難しい測定）

16桁の数字（セシウム原子時計でも時間をかければ測れる）

上の時計の振り子： $\nu=429\ 228\ 004\ 229\ 873.047$ Hz

下の時計の振り子： $\nu=429\ 228\ 004\ 229\ 873.000$ Hz

$$\Delta\nu = 0.047 \text{ Hz}$$

注)

Hzの単位が有効なのは、16桁目まで、それ以上は定義が実現できないので、数字も書けない。それでは不便なので再定義。

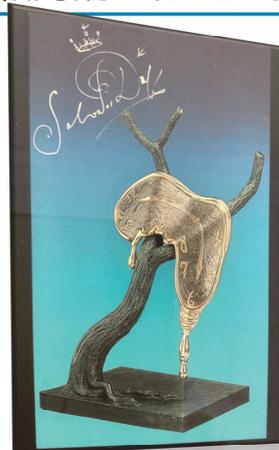
実験で見えている桁は、今の秒の定義で埋もれているところ。



図-26

〈図-26〉これは測定のイメージです。今の1秒の定義で16桁の数字は記述できる。ところが17桁目、18桁目は記述する言葉がありません。この実験は今の秒の定義では記述できない桁にどんな新しい応用が隠れているかの一例です。この桁では1cmの高低差が読めます。今後、これが普通になる時代が来るでしょう。

相対論にインスパイアされたダリのやわらかい時計



- パーソナルスケールで時空間のゆがみが見える
- 10-20年後、時計の役割はどうなるだろう？
- 相対論を実社会で使う時代が来る
- まずは、フィールド実証。相対論の検証。



図-27

〈図-27〉中学のころ初めて見たダリの、カマンベールのように溶けた、と称される時計を思い出します。アインシュタインの相対論にインスパイアされ、ダリが「記憶の固執」という絵を描いたのが1931年です。初めてこの絵を見たときには何のことか分かりませんでした。ラボでこの時計の風景が現実になりました。

パーソナルスケールで時空間のゆがみが見えるようになると10年後、20年後、時計の役割はどう変わるだろう？相対論を実社会で使う時代が来るのだろうと思います。そのフィールド実証をしたのがスカイツリーの実験です。

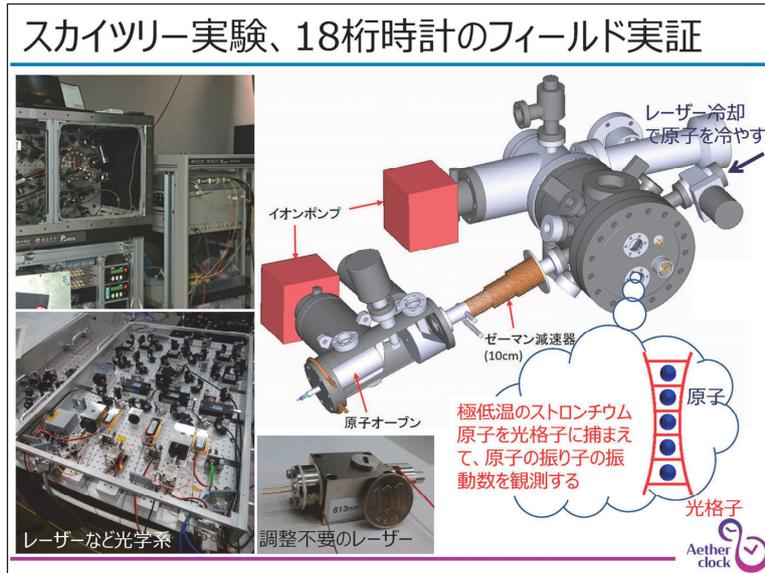


図-28

〈図-28〉これがスカイツリーの実験で使った装置です。先ほどお話した調整不要のレーザーを使い、レーザーの装置をこのブレッドボード上（左下）にまとめました。光格子時計の本体は、1辺約 60 cmの立方体の磁気シールドに入っています（左上）。図の右側の真空装置の中で、原子を光格子に閉じ込め、原子の遷移周波数を測定します。

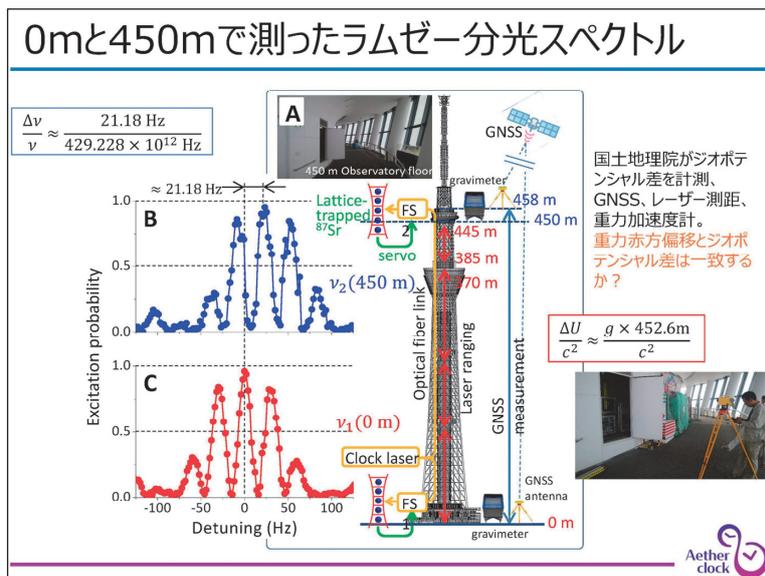


図-29

〈図-29〉東京スカイツリーの地上 0m の会議室に 1 台目の時計を設置し、450m の展望回廊にある小部屋に 2 台目の時計を置かせてもらいました。450m の高低差で、重力による時計の進み方の違い 21Hz が見えてきます。

この検証では時計の重力赤方偏移と実際の重力ポテンシャル差の一致を精密に検証しました。このために国土地理院の方に水準測量、レーザー測距、GNSS 測距をお願いして、高低差を出してもらいました。

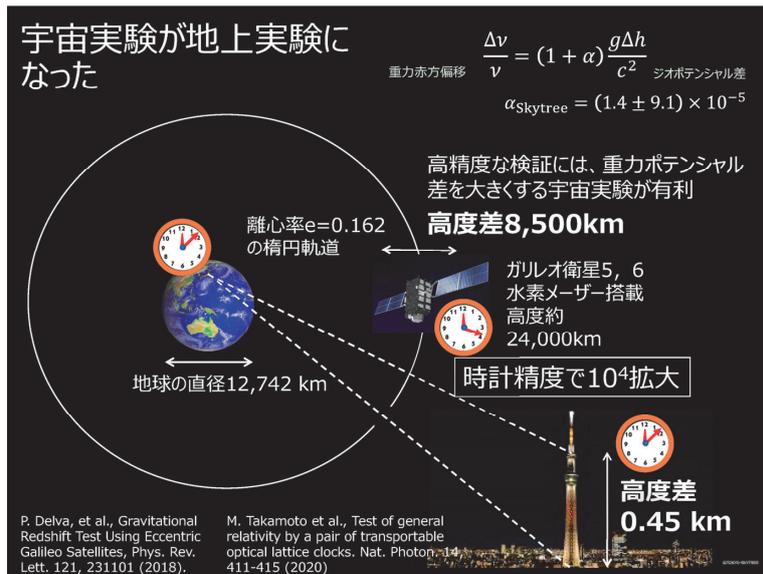


図-30

〈図-30〉この結果、重力赤方偏移と重力ポテンシャル差が5桁の精度で一致していることが示せました。

こういう実験精度は従来、人工衛星やロケットを使って、地上1万kmもの高度、高低差を使って得られる結果でした。相対論の検証には宇宙実験が必要と思われていましたが、それがわずかに地上450mの高低差で同様の精度の実験ができた。相対論効果は地上の新しいセンシングとして使えることを示した実験です。

■ 時空を測る時計

時計は量子・高度差計、相対論的センシング

水準点

- 東大と理研の時間を比べてみよう
- 異なる機関間での時計の比較はSI秒の再定義に重要なステップ
- 18桁の比較では、むしろ重力ポテンシャル差を測っている！→相対論的測地
- 測地応用のためには、短時間で計測できることが大事→安定度のいい光格子時計の出番

Aether clock

図-31

〈図-31〉時計は相対論的なセンシングに使うことができる。特に、測地応用では多数の原子を観測して、短時間で周波数計測を行う光格子時計の特長が活かされます。将来、道端にある水準点が光格子時計で置き換わる日が来ると思います。

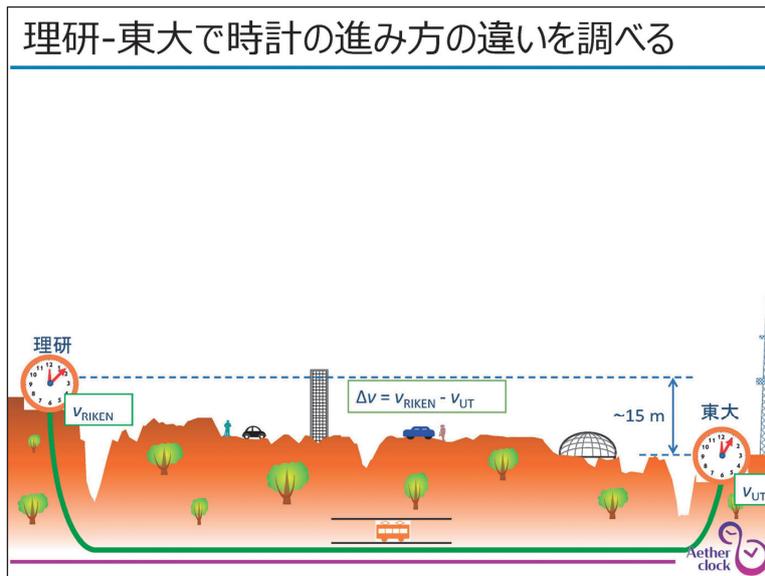


図-32-1

〈図-32-1〉これは18桁の時計を比較した実験です。東大のラボと理研のラボに光格子時計を用意して、それを光ファイバーでつなぎ、時計の信号を伝送し、東大の時計と理研の時計の進み方の違いを調べる実験をしました。

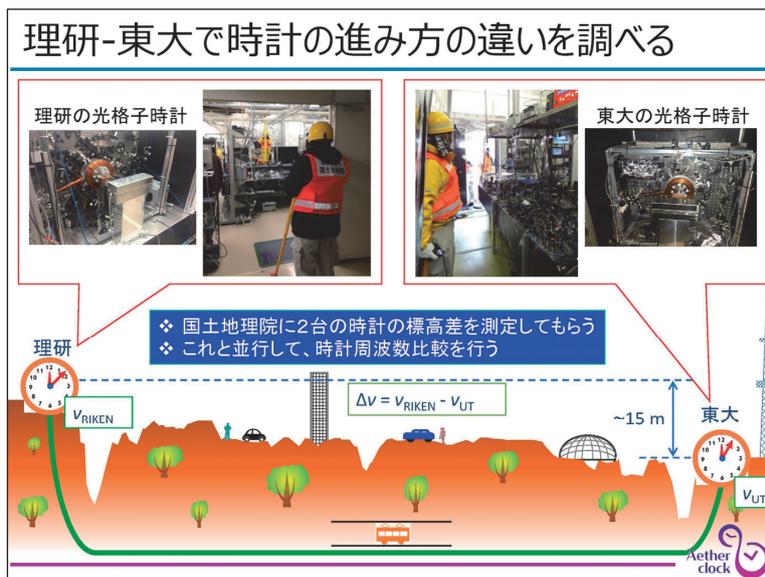


図-32-2

〈図-32-2〉このときも国土地理院の方に水準測量で標高差を測ってもらう一方で、我々は時計の周波数差を測りました。

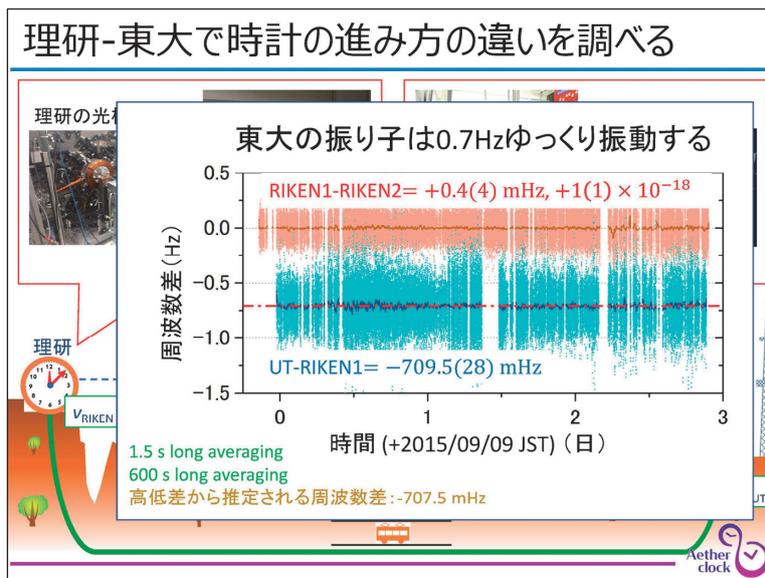


図-32-3

〈図-32-3〉理研で、同じ光学テーブルに置いた2台の時計は18桁まで合いますが（グラフの橙色）、東大の時計は700mHz ゆっくり振動しています（グラフの水色）。これは、東大のラボは理研のラボに比べ15m 標高が低いことを示し、水準測量の結果とも一致しました。これはデモンストレーションですが、これを実際に使う時代が来るだろうと思います。

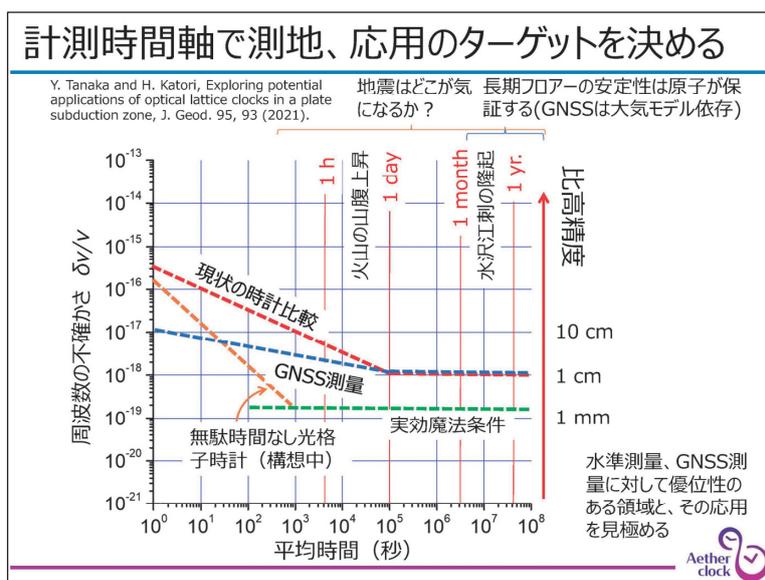


図-33

〈図-33〉こうした測地応用のターゲットを考えています。先ほどの実験では数時間で数 cm の高低差が読めました。GNSS の測量をすると、1日程度で1cm が判別できるようになりますが、大気の揺らぎやジオイドモデルため絶対値を決めるのが難しいと言われています。

その点、光格子時計を使った測地では原子時計の長期安定性が信頼できるのが利点です。さらに高速性があれば申し分ありません。この高速化のために「無駄時間なし光格子時計」を構想中です。短時間、例えば1000秒で19桁、高低差にしてmmを読む時計を作りたいと思います。光格子時計のプロトコルにひと工夫加えると19桁を読むような実効魔法条件が作れます。こんな2つのアイデアで、これからの実験を進めたいと思っています。

こうやって時計開発のターゲットができると、次はそれを使った応用を探したくなります。火山の噴火予知には、あるいは地震を予測するにはどういったターゲットがあればいいか。そんなことを地球物理や測地の研究者と議論し始めました。

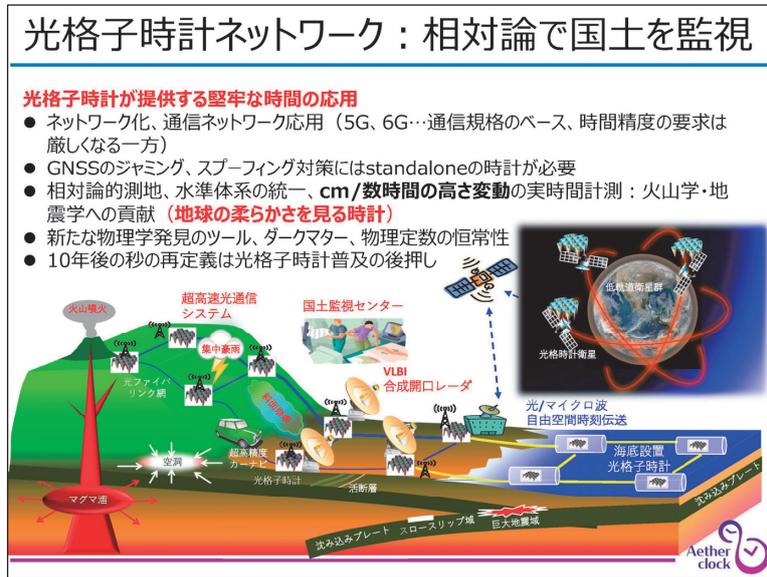


図-34

〈図-34〉光格子時計が小型化され、ネットワーク化されると、地下で何が起きているか、時計の信号で分かる時代が来るでしょう。超高性能な原子時計が地球の柔らかさを見る道具になります。いったん原子時計の堅牢なタイムベースができれば、GPS がそうであったように、これ以外に広範な応用が見つかるでしょう。

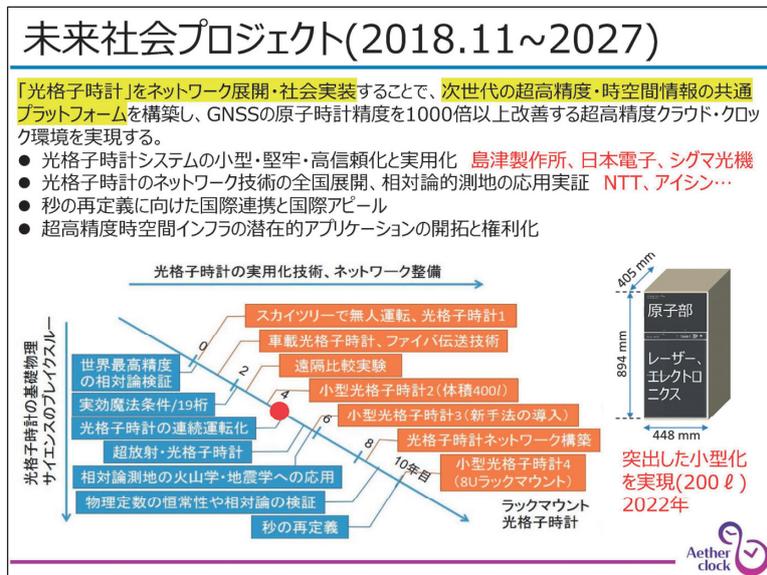


図-35

〈図-35〉いま、この光格子時計の社会実装を目指す未来社会プロジェクトの最中です。ここでは企業の方々、島津製作所、日本電子、シグマ光機、NTT、と一緒に実用化技術を開発し、その

アプリケーションを考えようとしています。

スタートから4年間たったところで、光格子時計の体積が200Lのサイズになりました。小型冷蔵庫ぐらいの大きさです。あとは耐久性、耐久年数が延びれば時計の実用化も近いです。

■ 光格子時計の新たな展開

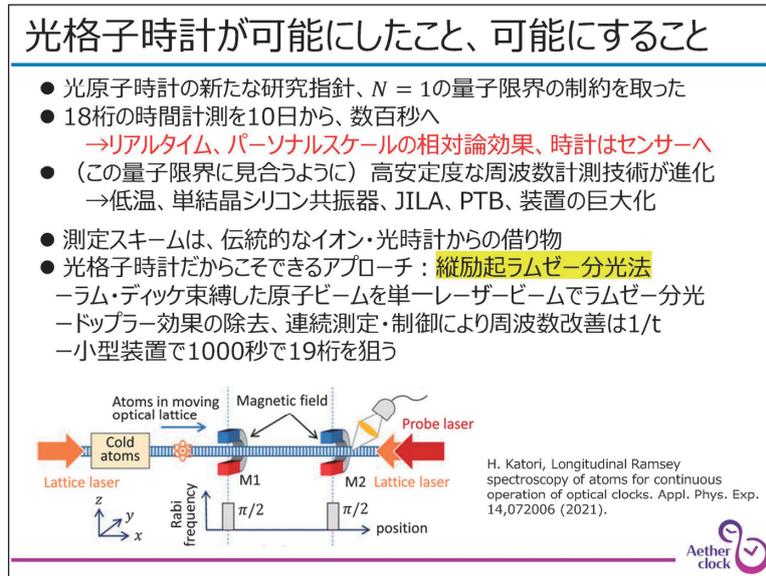


図-36

〈図-36〉これまでを振り返り、光格子時計が可能にしたこと、これから可能にすることをまとめます。光格子時計の功績は、原子時計に新たな研究指針を与えたことです。従来、単一の原子の観測にともなう量子限界が原子時計の限界を決めていましたが、それを見事に破ることができた。この結果、従来なら10日も要する18桁の時間計測が高速化しました。

1cmの高低差を数百秒あるいは数時間のリアルタイムで観測し、パーソナルスケールで相対論効果が見える時代、やがてはそれを利用する時代になるだろうと思います。

極めて安定度の高い光格子時計が実現した結果、それに見合うような計測技術がここ10年ぐらいで大きく進歩しました。こうして光格子時計は上手くいきましたが、まだ測定手法の根本のところ、伝統的なイオン光時計の手法から抜け切れていないのが反省点です。

光格子時計だからこそできる新しい測定手法を考えたいと思っています。詳細は省きますが、縦励起ラムゼー分光法という新手法を去年論文にしました。これで光格子時計の新たな展開を図りたいと思います。今よりさらに小さな装置で、1000秒で19桁。高さにしてmmを狙う時計を目指します。

■ 想像以上の未来、思いが未来を拓く

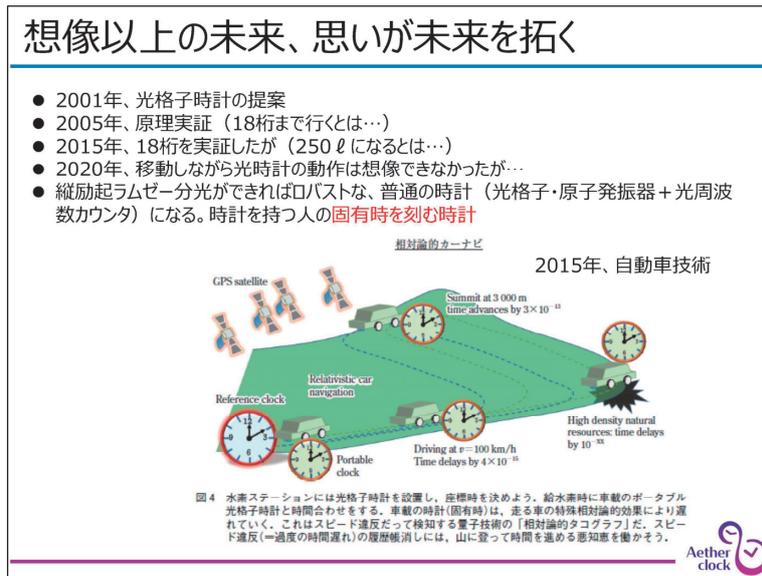


図-39

〈図-39〉これまでの研究を振り返ると、いつも想像以上の未来がありました。継続的な研究への思い入れが未来を拓いてきたように思います。

2001年に光格子時計を提案したころ、提案したけれども、なかなか実験は大変だろうと思っていました。

2005年に原理実証はできましたが、新聞記者さんに「18桁になるのはいつですか」と聞かれ、何とも答えようがない。「10年ぐらいですかね」と言っていたら、2015年に18桁の実証ができました。このとき、「時計の大きさはどのぐらいですか」と聞かれて返答に困りましたが、その後、先ほどの200Lができました。

さらに、縦励起ラムゼーという新しい分光法を使うとmmの高低差が測れる小型の時計ができるかもしれません。

例えば車に時計を載せると、車が走れば時計が遅れる。時間遅れで、スピード違反の取り締まりをされる時代になるかもしれない。罰金を取られると思ったら山にのぼり時間を進めて帳消しにできる。

2015年、自動車の雑誌にそんなエッセイを書きましたが、つぎはこれも実現するかもしれません。こうなると、時計を持つ人の固有時を刻むのが小型の光格子時計の役割になります。

次世代人材へバトンをつなぐ: 高校教科書の最終章



図-40

〈図-40〉 去年、高校物理の教科書の最終章の原稿依頼がありました。今日お話ししたような光格子時計のネットワークを作ると、地殻変動が見えるかもしれない、あるいは、いままで発見されない物理の新しい知見が得られるかもしれない、ということを書きました。

高校生が相対論は日常生活で見えることと知れば、その高校生が大学生や社会人になったときに本当のアプリケーションを発掘してくれるのではないか、若い人材にバトンをつなぐタイミングに入ってきました。

■ Seeds driven に未来を構想する

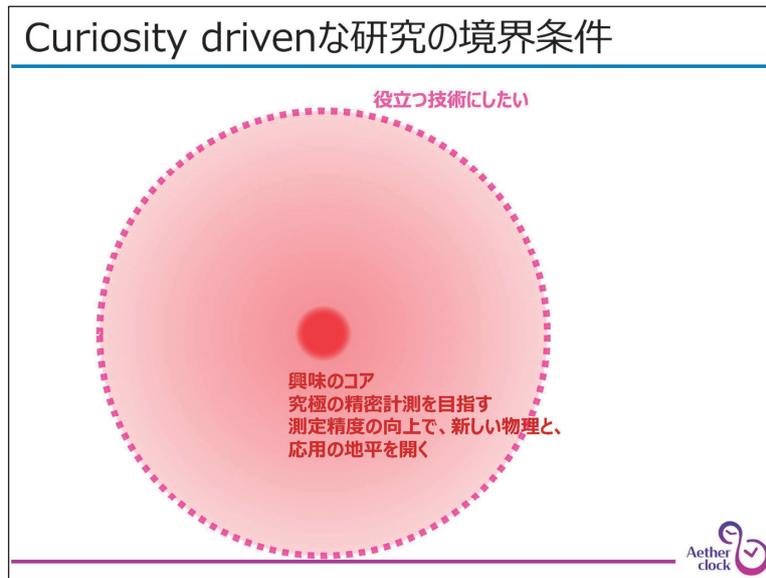


図-41-1

〈図-41-1〉 こういう研究がどう進んできたか、振り返ってみたいと思います。

「精密計測を極めたい」が興味の中心にありました。測定精度の向上で新たな物理の地平を探る、あるいは新たな応用を探りたいと思って研究を続けてきました。そして最後には、役に立つ技術にしたいという思いがありました。

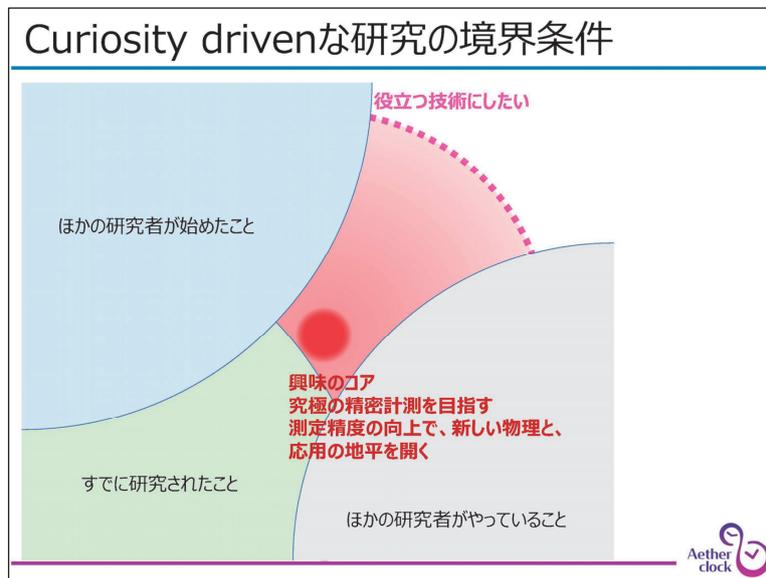


図-41-2

〈図-41-2〉 研究の方向の可能性は 360 度、全方向あるのだけれど、すでに研究されていることは研究する必要ないだろう、あるいは、ほかの研究者がやっていることも自分で研究するには及ばない。さらに、ほかの研究者が始めそうなこともあえてする必要はないだろう。こうして自分にしかできない研究の方向はおのずと狭まっていきます。

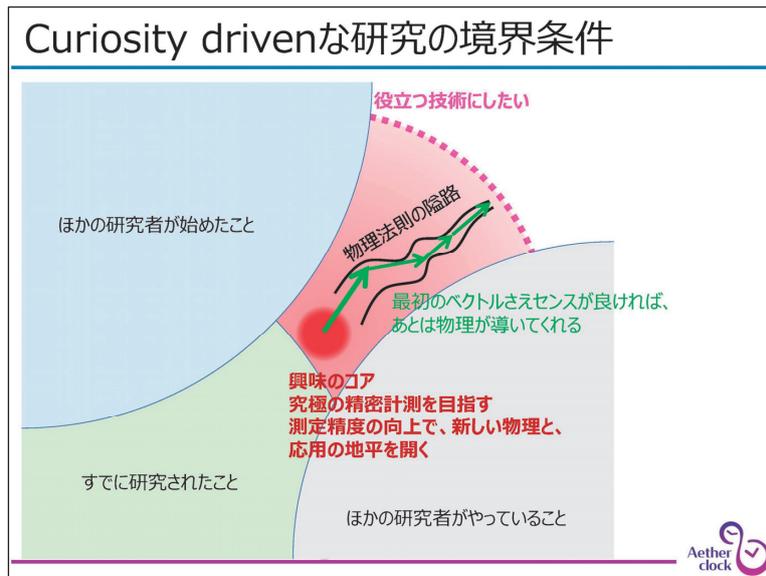


図-41-3

〈図-41-3〉最初の研究の方向さえ正しければ、あとは物理法則が正しい方向に導いてくれます。これが今回の一連の研究です。まずは最初のアイディアを思いつく、実験をして問題が生じたら、嬉々として問題を回避するプロトコルを考える。その繰り返しでここまで来ました。

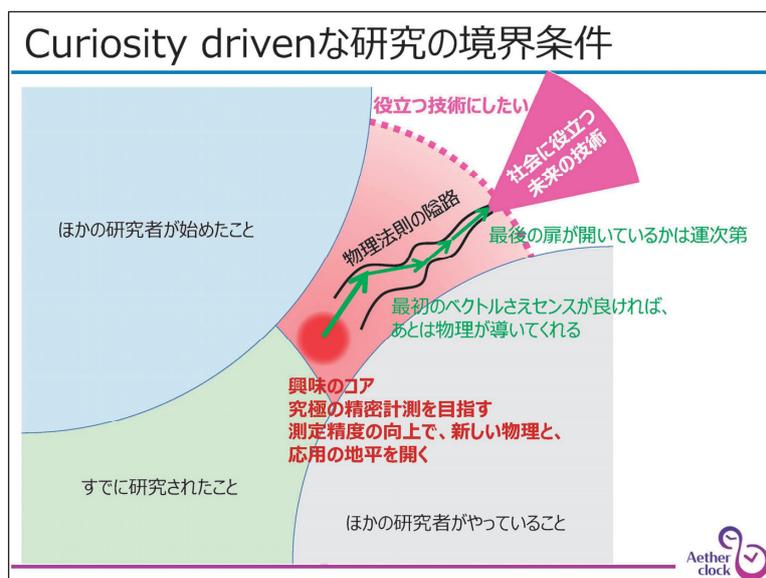


図-41-4

〈図-41-4〉最後、未来の技術への扉が開いているかどうか。これからの運次第、研究次第で、楽しみなところです。

まとめ

- Curiosity drivenに始まった、時空のゆがみを見る時計
- SI秒の枠組みを超える計測は、学生時代には夢の世界

- 新たなゲームのルールを作ってガラパゴスの楽園を謳歌した～2005
- 想定外のFriendly competition、標準へ
- Seeds drivenにありうる未来を構想、アカデミアと企業の共創により未来を変える
- 技術のブラックボックス化の先に、未来のアプリケーションが拓かれる

- 研究の勝負の仕方を教わった恩師（清水先生、五神先生、ワルター先生）、エキサイティングで波瀾万丈の研究を支えてくれた、同僚、研究室メンバー、そして家族に心より感謝いたします。



図-42

〈図-42〉 ずいぶん長くなりましたが、最後のスライドです。

時空間のゆがみを見る時計の研究は Curiosity driven に始まりました。

SI 秒の枠組みを超える計測ができるなんて、学生時代には夢にも思わないことでした。

魔法波長・光格子時計という原子時計研究の新しいゲームのルールを作って、自分たちで楽しめる研究の楽園ができました。

やがて、この競争のない研究の楽園に、多くの研究者が参入して、Friendly competition が始まります。このおかげで将来の標準につながるロードマップができました。

こうして出来上がった技術で Seeds driven に不連続な未来を構想してみたい。企業との共創によって研究成果を具現化して社会実装したいと思っています。

そのために、まず大事なものは技術のブラックボックス化です。iPhone にしても、ああいう小型のブラックボックスができたからこそ、そこに人々が集まって、果てしないアプリケーションが広がっていく。光格子時計が未来の社会のコア技術になることを楽しみにしています。

ご挨拶いただいた清水先生、五神先生、ドイツでお世話になったワルター先生に研究での勝負の仕方を教わったと思っています。この 20 年以上、とてもエキサイティングで波瀾万丈な研究を支えていただきました同僚の方々に心より感謝申し上げます。



図-43

〈図-43〉最後、お世話になった方々のスライドで終わりにしたいと思います。ご清聴ありがとうございました。

(注) 所属・役職・プロフィール内容は授与式当時

- *1: 清水 富士夫氏 元電気通信大学レーザー新世代研究センター 教授
- *2: 五神 真氏 国立研究開発法人 理化学研究所 理事長
- *3: 倉石 誠司氏 本田技研工業(株) 会長
- *4: 井戸 哲也氏 情報通信研究機構 電磁波研究所 時空標準研究室 室長

■このレポートは本田財団のホームページに掲載されております。
講演録を私的以外に使用される場合は、事前に当財団の許可を得てください。

〈MEMO〉

〈MEMO〉

発行所 公益財団法人 **本田財団**
104-0028 東京都中央区八重洲2-6-20ホンダ八重洲ビル
Tel.03-3274-5125 Fax.03-3274-5103
<https://www.hondafoundation.jp>
発行者 角 田 正 樹