

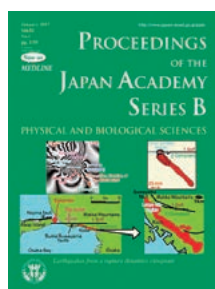
# PJA News Letter

No.10

<http://www.japan-acad.go.jp/pjab>

日本学士院

Proceedings of the Japan Academy,  
Ser. B ニュースレター



## 目次

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| 挨拶                                            | 1  |
| インタビュー 香取秀俊 氏                                 | 1  |
| トピックス 原子物理の先駆者長岡半太郎に新たな光                      | 8  |
| Vol. 93 掲載論文紹介                                | 9  |
| Proceedings of the Japan Academy, Ser. B について | 12 |

## 挨拶

Editor-in-Chief  
大塚 正徳

昨年 PJAB に投稿された論文数は例年に比べて多く、年末には 100 編に達しました。これに伴い出版された論文数も多く 50 編でした。論文数の増加は喜ばしいことですが、これに伴って論文の質も向上することを期待しています。PJAB を高いレベルに保つことは編集委員会に課せられた責任と思っています。

PJAB の特徴的なことの一つは、読者が広い専門分野に属していることです。そこで広範囲の読者を対象としている点で代表的な Nature の投稿規定を調べてみました。Nature では、article の最初におかれた 150 words 以内の summary は専門外の読者を目標にしているとはっきり書いてあり、そのうえ summary の内容として書くべきことも詳しく指示されていました。この点については、PJAB 編集委員会でも将来検討が必要になるかも知れません。

人々が時間を共有するための道具である時計は、前世紀半ばまで地球の自転で定義されていました。ところが自転は潮汐摩擦の影響で遅くなり、誤差が生じます。1955 年に原子時計が発明されると、この分野は天文学から物理学にシフトし、1967 年以降は 3 千万年に 1 秒以下という高い精度で計れるようになりました。'80 年代には「単一イオン光時計」の原理が開発されました。さらに精度を上げるため、特別な波長の光で作った格子の入れ物に約千個の原子を入れ、それらの原子の振りを同時に観測する「光格子時計」

## インタビュー

香取秀俊

×

(聞き手)

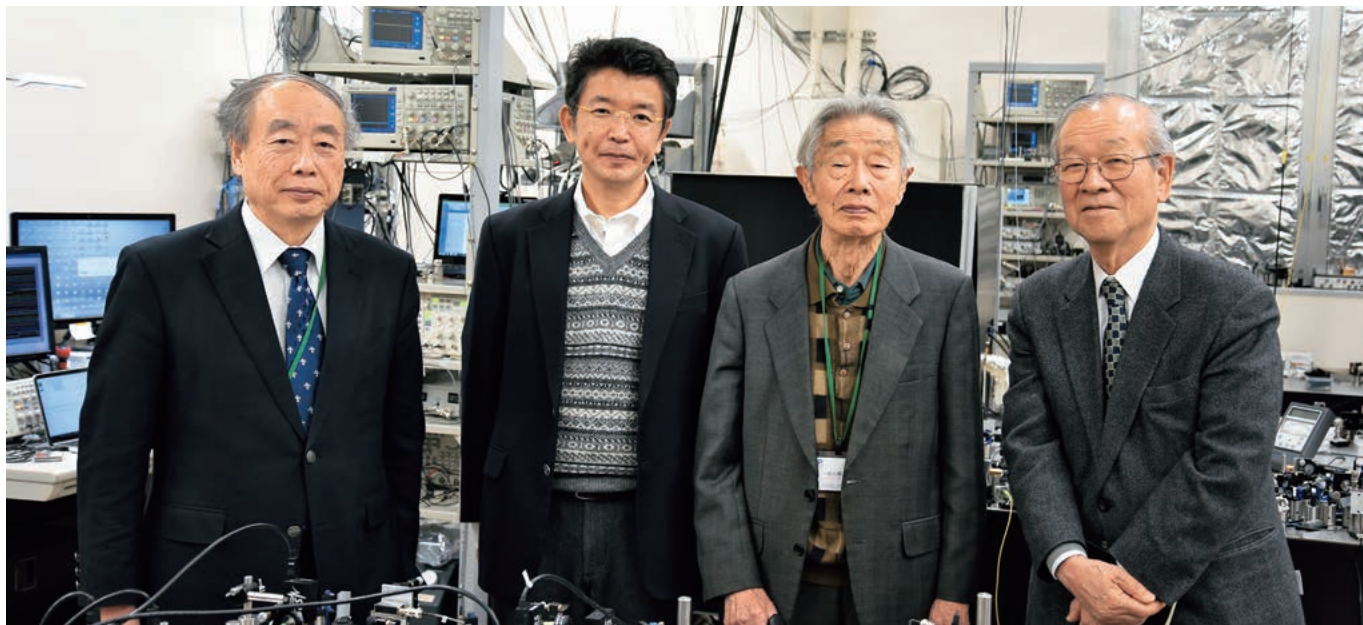
霜田光一

小林 誠

山崎敏光

は、数時間の測定で 18 桁の相対精度を達成する (300 億年で 1 秒しか狂わない) 時計です。今回は、光格子時計を発明した東京大学大学院工学系研究科教授で理化学研究所主任研究員の香取秀俊博士にお話をうかがいました。聞き手はいずれも日本学士院会員で、メーカー・レーザーが周波数の高い発振器としてすぐれた原子時計となることを明らかにした霜田光一・東大名誉教授、素粒子物理学が専門の小林誠・高エネルギー加速器研究機構特別荣誉教授、原子核・素粒子研究が専門の山崎敏光・東大名誉教授です。

左より小林 誠氏、香取秀俊氏、霜田光一氏、山崎敏光氏



## 世界でやっていない 新しい手法で

**霜田：**香取先生は、清水富士夫先生の研究室でレーザーを用いて原子を冷却する研究を始められたのでしたね。それが現在の研究の土台になっているのではないかと思います。

**香取：**はい、そうです。東大工学部物理工学科の大学院生だった頃です。

**山崎：**物理工学科は素晴らしい研究者をたくさん輩出されていますが、非常に基礎科学的なことをやる所ですね。

**香取：**確かに、物理工学と理学部物理の境界はあまりなくて、どこが境界かという素粒子や天文があるかないくらいですね。物理工学はエンジニアリングと繋がりそうな物理が多いです。当時はレーザー冷却のどこがエンジニアリングと関わるだろう？と思っていましたが、それが20～30年かけて進化し、エンジニアリングに使える手法になったのは嬉しいことです。

**山崎：**レーザー冷却が次々に発見されるようになったのは、年次で言うところの……。

**香取：**1982年にW.D. フィリップスが「中性原子をゼーマン減速<sup>\*1</sup>した」と発表したのが、中性原子での始まりです。その前に、イオンで冷却できたという報告が1978年でした。

**山崎：**物理の中でも素粒子などの分野は最先端で、原子物理はどちらかというとその対極にありました。それが急速にいろんな面から注目されるようになってきたのは、やはり単一原子とか、レーザー冷却などが研究できるようになったからですね。だんだん素粒子そのものの研究にも使われるようになって、分野が融合してきた。最近の重力波発見はよい例ですね。物理工学

科にはそういう方面の研究者や学生がたくさんいて、原子物理は今や最先端の学問になっています。

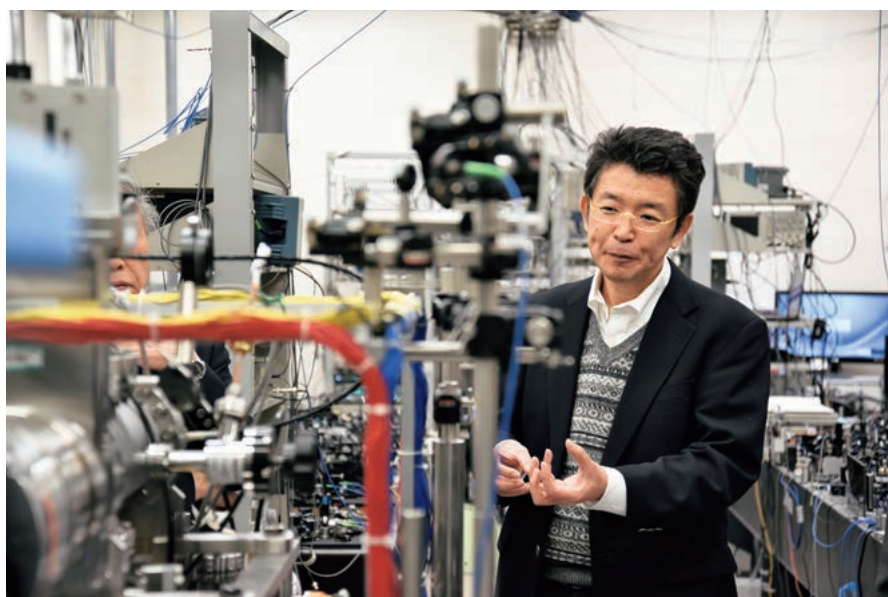
**香取：**レーザーを使った原子物理が発展したのは、やはり原子核の実験に比べると気軽にできるからだだと思います。半導体レーザーの進展が果たした役割は非常に大きく、昔は色素レーザーを使った大がかりな実験をしなくてはいけなかったのが、今は手軽な半導体レーザーでできるようになりました。以前は「レーザー冷却」とか「単一原子を観測」といった物理の基礎に迫る、個々のトピックスが面白かったのですが、今はそれらを融合させ、システムとして新たな実験ができるようになったことが進展だと思います。昔は単一原子の量子跳躍<sup>\*2</sup>を「見た」だけで十分なトピックスで、その先に続く応用なしに論文が書けましたが、今はそれを手法として使ってどんな新しい物理が見えるのか、どんな新しい技術に結びつくのかが重要になってきました。

**山崎：**光格子時計の実験を始められた動機は。

**香取：**ポスドク（客員研究員）として

ドイツのマックスプランク量子光学研究所（MPQ）へ行くことになったのですが、その頃はイオントラップでつかまえた単一イオンを見る原子時計が最先端で、大多数の研究者が「単一イオン時計」を追いかけていました。ポール博士が発明した「ポールトラップ」の原点にイオンを捕まえると、そこは四重極電場の原点になっているのでイオンには電場の摂動が生じません。これは、原子時計を作るための完璧な入れ物です。デーメルト博士は、ポールトラップ中の単一イオンに対して量子跳躍を観測し、単一イオンを計測する実験技術を作り、それを使うと将来18桁の精度の時計ができると提唱しました。

ポール、デーメルト、ラムゼーの3氏が1989年にノーベル物理学賞を受賞したこともあって、この分野の研究者は「次世代の原子時計はイオン時計の方向で決まりだろう」と考えるようになりました。けれど、単一イオンで時計を作るのは測定の統計を取るのに時間がかかって難しい実験でした。マックスプランク研究所のワルター教授が単一イオン時計の実験をなさって



\*1 ゼーマン減速：ゼーマン効果を利用して、原子の運動をレーザー光で減速する方法。

\*2 量子跳躍（quantum jump）：原子に光が当たると、内側の軌道を回っていた電子が外側の軌道を回ようになる現象。





とになったのは大変よかったですね。

**小林：**実際に最初に動いたのは何年ですか。

**香取：**2003年に初めて実験的に魔法波長を決定し、時計の動作をさせたのが2004年です。その頃は、時計の動作をさせると言っても、数人がかりでレーザーを調整し、やっと30分ほど動くといった実験をしていたので、原理検証ではあったけれども、時計には程遠く、まさに高分解能分光の実験という感じでした。それが今は、インターネット経由で研究員がレーザーを調整して一週間以上動かし続けられます。だんだん時計らしくなってきますが、世の中の人が思う時計って「1年や2年、止まりませんよね」というのが本当の時計なので（笑）、そういうところまで頑張りたいと思います。

**霜田：**先ほど実験装置を見せてもらいましたが、ああいうミラーマウントも日本ではなかなかすぐには買えなかったというか、まだ出ていなかった時代ですよ。2000年代に入ってからじゃないかな、小さい口バストなレーザーができるようになったのは。

**香取：**技術の進化に負うところは、非常に大きいですね。私が清水研に入った頃はまだ工作室で作ったような手作りのミラーマウントがある時代で、そのようなミラーマウントだと、数個動かす分にはいいけど、ここの実験室でやっているように100個200個の単位ではとても動かないです。

**霜田：**少し話は違いますが、量子コンピューターの進歩も似たような研究ですね。原理的な実証はできているけれども、それをシステムにしたり、長時間使えるようにすることは目鼻がつかないというか、つきかけているといった状況でね。香取さんの光格子時計よ



りも、量子情報処理のほうが遅れているかもしれない。

**香取：**私も量子コンピューターには非常に興味がありまして、光格子時計を最初に提案した時、頭の中では量子コンピューターのキュービット<sup>\*6</sup>だと思っていたんです。

**霜田：**なるほどね。

**香取：**3次元の光格子の中に1粒ずつ原子を入れて、基底状態が励起状態かで、量子コンピューターのキュービットになります。魔法波長トラップは、キュービットのコヒーレンス時間を延ばす工夫でした。2000年頃の作戦としては、いきなり量子コンピューターで研究費をもらうのは大変だし、時間もかかるから、まずは集団として $|0\rangle$ 状態、 $|1\rangle$ 状態の励起を実証するのがいいかなと思ったんです。そうやって実現できるのが時計です。

**霜田：**そうだね。

**香取：**全部のキュービットが $|1\rangle$ 状態に励起するようにレーザー周波数を制御すれば時計になります。この頃、ワインランド先生はイオントラップを使って原子時計を作るというのと、量子ビットの最初の実験的な実証をされていて、それを見ていて時計と量子コンピューターは同じものだと思ったので、光格子時計を進めるのもそんな具合でいこうかなと考えました。イオンを使った量子コンピューティングは

1995年に提案されていて、まさに時計遷移をキュービットにしています。イオンを使ったコンピューティングの提案が出て、後追いすることもできない。光格子時計ベースだったら、まだやりようがあるかなと考えました。原子を自由自在に操るための道具立てがいろいろ揃ったので、今後はそれらを使っていかに役に立つ道具を作るか。それを使って、今度は新しい物理を探るための道具を作ることが大事だと思います。

## 時間の制御がもたらすもの

**小林：**18乗とか19乗の桁の精度とか、時間の制御というのは最も基礎的なことですが、物理の他の分野にどういう影響を与えるのかというお話をいただけますか。

**香取：**それはぜひ、私も教えていただきたいことです（笑）。今、実験装置を東京スカイツリーに持って行って相対論の検証をやろうとしています。東大と理研で時計の比較をする実験をした時は、重力赤方偏移から、15mの標高差を時計の精度の5cmで測定しました。この標高差は国土地理院が行った水準測量の結果と合いました。15mの標高差を5cmで出したというのは、逆に言うと3桁で相対論が正しかったという証拠になります。

<sup>\*6</sup> キュービット (qubit)：量子情報の最小単位。quantum bitともいう。

時計による相対論の検証がどこまで行われているか調べてみると、NASA が 1980 年に Gravity Probe A というロケット実験で、水素メーザーを 1 万 km まで打ち上げて、重力赤方偏移と相対論の予言がどこまで合っているかを調べた実験が 4 桁の精度で相対論を検証しているんですね。

**霜田：**そうですね。

**香取：**理研と東大で高さはそんなに気にしなかったにもかかわらず 3 桁だった。では、意図的に少し高低差をつけてやれば、NASA のロケット実験を上回るだろうと。それが今回、スカイツリーでやろうとしていることです。一つを 450 m の展望台へ持っていき、もう一つの時計を一階に置いて、時計に 450 m の高低差をつける予定です。

**小林：**でも、光ファイバーでつながなきゃいけないでしょ。スカイツリーにも、縦に。

**香取：**ええ。スカイツリーは電波塔なので、通信用のファイバーをたくさん持っているんです。そのうちの 1 本を貸してもらおう予定です。450 m を時計の不確かさ 1 cm で読めれば、5 桁の検証ができるんです。それと同時に、光格子時計がどのくらいのサイズに収まるか、小型化の実証実験にもしたいと思っています。

**霜田：**その高低差の測定について考えてみました。東京スカイツリーなら同じ場所だからいいのですが、遠方の場合、たとえば東京と名古屋とか、京都とかとの間の高低差の比較をする時に、光ファイバーのリンクでつながますね。私が気にするのは、その際に重力シフトで周波数が変わるわけですが、そのほかにファイバーが、先ほど圧力によるシフトということを言いましたが、圧力だけでなくテンションも変わる。ストレスが変わるわけだから、地殻が動いてファイバーが引っ張られたりし

て、それによる位相のズレが起きますね。それと高低差によるシフトとの区別はどうやったらできるのですか。

**香取：**ファイバーで 2 つの時計をつなぐ時、ファイバーは引っ張れば伸びるし、気温が上がると伸びてしまいます。伸びるってことは、こちらの時計から見ると、他方の時計が速さ  $v$  で向こうに行くので、ドップラー効果で周波数が低くなります。そのドップラー効果を 18 桁以下にするには、 $v/c < 10^{-18}$ 、つまり速度を  $v < 3 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  に抑える必要があります。ちょっと熱膨張が起きると、簡単にドップラー効果が起きる。それで今の実験では 2 台の時計をファイバーでつなぐとき、マイケルソン干渉計を組み入れて、ファイバー長が一定になるように電気的な制御を入れています。ファイバー経路で送った光を戻して干渉させて、アームの長さがいつも同じになるようにします。理研一東大間の実験でも、30 km のファイバーで巨大マイケルソン干渉計を組み、重力干渉計と同じようなことをしています。

**山崎：**非常に面白い実験ですが、難しい点もたくさん含んでいる気がします。 $10^{-18}$  までわかるようになったら面白いと思いますが、では何を実際に計るのか、その基準と較正をどうするか、などなどと考えてみたら、よくわからなくなるんですね（笑）。重力って、どこでも違うという問題がある。重力を作っている地球という巨大な物体の中味はよく分かっていない。天体の及ぼす日周、年周効果、などもある。地球や天体全体が及ぼす電磁場にしても、何処までがバックグラウンドであるか、どれが知りたいシグナルであるか、その同定が難しい。逆に言えば、地球全体から来ている効果と、小さな実験室で検知できる部分とがどのくらいの S/N 比になるかといった問

題が生じてくるのではないかな。そこが面白いところですけど、どこからそういう問題を切り開いていくか、非常にチャレンジングなことのように思えます。でもまずは、それが計れる超高分解能分光の装置がなくては何も動きませんね。極限を追求する香取先生の装置が出来て実験が実現したとき、それから生まれるサプライズを追って考え始めるようになる。人間が予言する能力って限られているので、何かのきっかけで初めて気が付くことが多いですよ。ゼロ効果だと言われても、とにかく計ることを続ければ、凄い発見が生まれるような気がしてきました。

**香取：**私もそう思います。時計の研究をして、そういう基礎的な興味を持つ研究者は「ゼロだと思っていることを検証しましょう」という感覚なんですよ。先ほどの異種の原子の周波数比が一定かどうかというのも、とりあえずみんな一定と思っているんだけど、そこに一定じゃないものが出たら面白いだろうと……。みんながゼロだと思っていることが、ノンゼロかもしれないのを検証するために大実験を構想し、それに大きな研究投資をするのは大変ですが、今やっている研究が心地好いのは、ちゃんと役立つ光格子時計を作っているからです。だけど、その副産物としてサイエンスでいろいろ遊べて楽しい。だから、納税者にちゃんと説明がつき（笑）、基礎的サイエンスを同時に楽しめるところが、この実験のいいところかなと思います。

**霜田：** $\alpha$ （微細構造定数）の恒常性についての実験は、どういうふうに視野に入れていらっしゃるのですか。

**香取：**それがまさに水銀原子とストロンチウム原子で作った原子時計の周波数を比較するという話です。それらの周波数比は周波数コムで正確に測定でき、今の場合だと、時計の精度の 18





う」と提案する時、最初にどう言えばいいか、ぜひ良い教えをいただきたいと思うのですが……。

一同：(笑)。

## 光格子時計のある世の中

**香取：**たとえばアメリカがGPSを整備した背景には米ソ冷戦という文脈があって\*7、問答無用で推進したわけですが。でも光格子時計のネットワークだと「50年後の社会インフラとして重要です」と言っても、「じゃあ、明日やる理由はどこにあるんですか」と言われて「ウーン……」となってしまう。出来た将来の姿から再構成してみれば、こういうツールがあったらいろいろなことに役立つと思うのですが、今それをすぐ配備しなければいけない必然性はなくて、どうしたらいいかなと……。マグマの移動とか火山の噴火とか、いろいろ想像をめぐらせていますが、光格子時計が未来をどう変えるかを予言することは難しいんだけど、いったんインフラができて、それに乗った応用がいろいろできると、逆に「あっていいでしょ」という話になるはずですよ。

**山崎：**地球の問題なら、やはりどこか実際に地上に起こってくる地震などに関連づける分野の学問があると思います。だけどそれが超精密時計と関連づけるという話になると、やっている人はいないと思います。たとえば地震と津波だけでも非常に大きな問題ですから、面白いことが出てくるのであれば、いがみ合いによる、つまらない戦争に多額の金を費やすよりは、副産物の多い時計に投資したほうがいいという考え方は当然あると思いますね。

**香取：**光格子時計がどれくらいの大き

桁まで測れます。原子の遷移周波数はボーアの項×相対論補正の項を測定します。相対論補正は $1 + \alpha Z^2$ で原子の核電荷 $Z$ に依存します。 $Z$ の大きめの原子と小さめの原子、たとえば水銀とストロンチウムの原子で比をとると、水銀原子は $\alpha$ が変わった時の周波数依存性が、 $Z$ の2乗分だけ大きい。ストロンチウムはそれに比べて、あまり変わりません。たとえば周波数比を今年取って10年後、あるいは10秒後でもいいんですが、そこで周波数比が変化しているかどうかを見る。変動していれば、それは $\alpha$ が変動している証拠となります。一方、 $\alpha$ が重力と結合があるかどうか知りたいければ、たとえばスカイツリーの上でやった場合と理研でやった場合で周波数比が同じかどうかを調べることで $\alpha$ と重力の結合の有無も分かります。精度の高い時計が2つあれば、いろいろ面白い基礎物理実験ができます。

**小林：**たとえば1年後に比較するとして、 $\alpha$ に対する感度はどのくらい？

**香取：**水銀原子とストロンチウム原子で17桁の精度で周波数比較ができれば、 $\alpha$ に対する感度は $10^{-17}$ /年ほどです。感度そのものが大きい原子ってあります。たとえば、トリウムの核遷移を見てみると1万倍とか、多価イオンのある遷移を使うと、光格子時計の比較をするよりも感度が100倍もありま

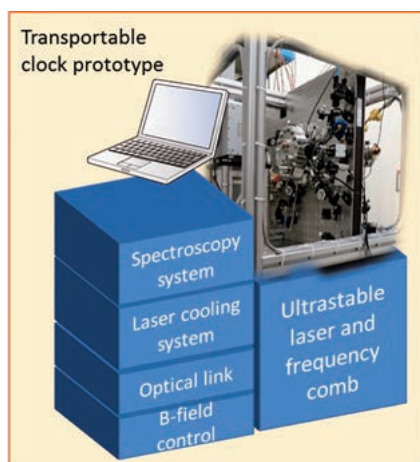
す。トリウムの原子核時計にしても、多価イオンを使った原子時計にしても、時計とは名前はあるにしても、実用になるような時計ではないので、役に立つかもしれないという意味では、光格子時計は感度は低くても、副産物としてはいいかなという気がします。

**小林：**ほかにも資源探索とか、活火山の予知とか、いろいろお話があったと思いますが。

**山崎：**地震予知とか……。

**香取：**その辺はなかなか真面目に考えるのは難しいんですけど(笑)。先ほど山崎先生が、地球のちょっとした質量の偏りみたいなものをどうやって捕らえられるのかという話をされましたが、捕らえるとしたら、面的に光格子時計のネットワークを作って、空間的にマッピングしてやるというのが、解じゃないかと思います。今はGPSというツールがあり、時刻同期ができていて測位できて、地震の後だと、その測位でどう地形が変形するかといったことがインフラとしてあるわけですが、光格子時計をそういうインフラとして日本で整備したら面白いだろうと思います。たとえば地下で質量分布の変化が起これば、2つの時計で重力ポテンシャルの差として見えます。時計が面的につながっていれば、重力ポテンシャルをマッピング可能になります。「そういうインフラを作りましょ

\*7 アメリカ国防総省の軍事衛星によって運用されるGPSは、1983年の大韓航空機撃墜事件を機に民間に開放された。



持ち運び可能な光格子時計のプロトタイプ。大型冷蔵庫サイズに全ての実験装置を収める。

さになるかという予想図です。霜田先生がおっしゃった東京と京都のように離れた場所にある時計をファイバーでつないで、高低差を見る時に、潮汐の効果がリアルタイムで効いてきます。

**小林：**潮汐による重力ポテンシャルの変化ですね。

**霜田：**それは、セシウムの時計でもすでに測定されていて、精度は違うわけだけど、2桁くらいまでは測定されているのかな。

**香取：**東京と九州の時計をつなげて実験すると、6時間で14 cm、東京・九州が相対的に上下するのが見えるはず。今まで時計を比較する時、潮汐の効果を動的に入れる必要はなかったのですが、18桁で比較する時は動的に入れないと比較ができなくなる。逆に言うと、こういうダイナミクスを見る時、この時計を使える。今までは潮汐の時間変動を気にするほど時計の精度は高くなかったので、時計を比較するには一定の標高差を引けば事足りました。潮汐の時間依存が見えるようになると、ポテンシャルをリアルタイムで見るようなツールになります。

**小林：**もうユニバーサルな秒の定義というのは、不可能だってことですよね。

**香取：**難しいですね。スカイツリーに持っていこうとしている時計は、大型

冷蔵庫くらいのサイズを想定しています。このくらいのサイズで18桁の時計ができるんだっていうと、なんとなく現実的です。面的に光格子時計のネットワークを作ると、周波数の差として、重力ポテンシャルの情報がリアルタイムで見えてくる。

**山崎：**何乗になるといったことは、もう理論的にはわかっているのですか。

**香取：**マグマが動いてどう変化するかということも、モデル次第でどんな体積を仮定するかによりますが、計算している人はいます。時計って重力ポテンシャル計だけれども、加速度で見る情報とポテンシャルで見る情報は違うので、原子加速度計を作って、2つの方法を組み合わせれば、深さ方向くらいのラフな情報って何か出てくるかもしれない。それで、最近は原子干渉計にも取り組んでいます。

**山崎：**雄大な規模ですね。

**香取：**原子干渉計では、中空の光ファイバーの中でラムゼーの分光をしてやり、ファイバー軸方向の加速度を見ようとしています。光格子時計の場合、原子の運動によるドップラー効果が時計の精度を低下させるので格子に閉じ込めますが、干渉計の場合は魔法波長のレーザーを進行波にして格子を作らないようにします。そうするとファイバーの軸に沿った原子ガイドとして働きます。時計で使っている電子状態の間で干渉計を作ります。一次元の原子干渉計ができて一次元の加速度がわかるようになると、今度はこれを3つ組み合わせると、3軸の加速度計ができる。加速度計の限界って、地面振動なんです。その振動をキャンセルするように、たとえば原子を2つ置いて、この2つの原子が共通に受ける加速度は相殺して、残差の情報を読み取りましょうというのが勾配計です。その勾配計を作って、真ん中に質量を置

いて、今度はG（重力定数又は万有引力定数）を計るような実験をすると面白いなと思っています。

**山崎：**面白いですね。お話は尽きない。

**霜田：**いろいろと夢のような発展があるから……。

**小林：**精度が上がれば、マグマの位置までも追いかけることができるようになるでしょう。

**山崎：**今後、大いに期待できる分野ですね。本日はどうもありがとうございました。

#### 香取 秀俊（かとり ひでとし）

1964年、東京都生まれ。1988年、東京大学工学部物理工学科卒。同大学院工学研究科修士課程修了。マックスプランク量子光学研究所客員研究員、科学技術振興事業団グループリーダーを経て、'99年東大工学部助教授、2010年同大学院工学研究科教授、'11年から理化学研究所・香取量子計測研究室・主任研究員。2012年朝日賞、東レ科学技術賞、'13年仁科記念賞、'14年紫綬褒章、'15年日本学士院賞、'17年江崎玲於奈賞を受賞。

#### 霜田 光一（しもだ こういち）

1920年、埼玉県生まれ。東京帝国大学理学部物理学科卒。1948年東大理学部助教授（物理学）、'59年教授となり、'60年より理化学研究所主任研究員を兼任。東京大学名誉教授、理研名誉研究員、日本学士院会員。1974年東レ科学技術賞、'79年米国光学会C.E.K.Mees Medal、'80年日本学士院賞、'90年勲二等瑞宝章、2008年文化功労者。

#### 小林 誠（こばやし まこと）

1944年、愛知県生まれ。名古屋大学理学部物理学科卒。同大学院理学研究科修了。京都大学理学部助手、高エネルギー物理学研究所教授、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所長を経て、同研究機構特別荣誉教授、名古屋大学特別教授、総合研究大学院大学名誉教授、日本学士院会員。'85年アメリカ物理学会J.J.Sakurai賞、日本学士院賞、2007年欧州物理学会高エネルギー・素粒子物理学賞、'08年ノーベル物理学賞受賞（「自然界において3世代のクォークの存在を预言する対称性の破れの起源の発見」に関する業績で益川敏英博士と）、文化勲章受章。

#### 山崎 敏光（やまざき としみつ）

1934年、東京都生まれ。東京大学理学部物理学科卒。同大原子核研究所助手、カリフォルニア大学、ニールス・ボーア研究所研究員、東大教授を経て、'86年から東大原子線研究所所長。退官後は日本学術振興会監事などを歴任。東京大学名誉教授、日本学士院会員。原子核物理と素粒子ビーム科学における業績で、'87年恩賜賞・日本学士院賞、'94年藤原賞、2009年文化功労者。



## 原子物理の先駆者長岡半太郎に新たな光 —理研 OB 稲村卓氏が PJAB 誌に論文

長岡半太郎は原子物理学の黎明期に理化学研究所で中心的役割を担い、仁科芳雄らの逸材を育てた。後年、日本学士院の院長となり、いつまでも研究の第一線に立っていた。20 世紀の初め、分子の単位として知られていた原子の具体的描像は乏しいもので、最も有力なモデルはトムソンの唱えた正に帯電したスポンジケーキの中に負電荷をもつレーズンの粒が点在しているかのようなものであった。長岡半太郎は 1904 年、ロンドンの著名な学術誌 *Philosophical Magazine* に論文を発表し、原子は中心に陽電荷の固まり（原子核）を持ち、その周りに負電荷の粒子（電子）が周回しているというモデルを提案し、理論的考察を行った。中心に座る原子核の大きさや質量がどのようなものかはまだ全く未知の時代であったが、この論文は今日知られる原子の枠組みを初めて示したものであり、ラザフォードら後進の研究者に大きな影響を与えた。長岡の原子モデル提唱の 7 年後、ラザフォードはアルファ線の散乱から、長岡モデルの中心にある原子核が非常に小さなものであることを明らかにし、今日の原子の描像が明確になった。1913 年、ボーアはこれをもとに量子論を確立し、量子物理の輝かしい時代が始まった。

こう見てくると、今日の原子物理の祖は長岡に遡ることは明らかであろう。にもかかわらず、世の中では、長岡は太陽系原子モデルとは異なる特殊な「土星モデル」の提唱者とされ、原子モデルの創始者としてラザフォー

ド、ボーアと並び称されることは殆ど無い。日本においても、また長岡を生んだ理化学研究所においてすら然りである。何故こんな事態になってしまったのか？これが、稲村卓博士（元理化学研究所副主任研究員）が提起した大問題で、氏自ら 20 年以上にわたりこの歴史的現象の解明に携わってきた。そして、論文を執筆され、学士院の英文紀要に投稿されたのである。これは歴史上の大学者らのプライオリティに関わる問題を含むので、編集委員会としては慎重を期し、内外で著名な学識者数名にレビューをお願いし、出版を決定した (PJAB 92, 121-134 (2016), <http://doi.org/10.2183/pjab.92.121>)。その標題は Nagaoka's atomic model and hyperfine interactions である。この論文に引用されている文献は、英語のみならず、ドイツ語、フランス語など、当時の科学者の国際的分布を反映している。これら文献を精査して 1904 年以後の歴史を辿ることは容易なことではなかったに違いない。小生は稲村氏の情熱と努力に大いに動かされた。

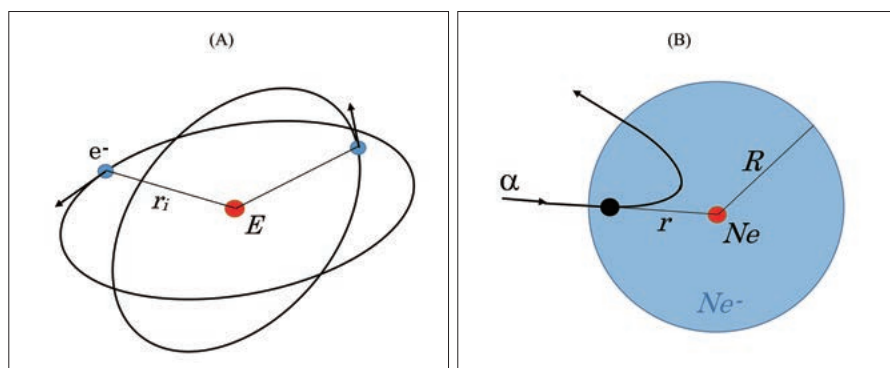
今年、理化学研究所創立 100 年記念行事として百年史が出版されることになり、その中に長岡半太郎に関する記述が載ることになった。そこに稲村卓博士の上記原著論文が引用されるので、さらにその紹介を兼ねて、本記事を書くことになった。

この稲村論文は、今日まで、わが国のみならず世界中の関連学界で、顧みられることがなくなった長岡原子物理

の珠玉に光をあてるものである。国語の辞典にも長岡半太郎の名前が出てくるが、見開くと、「土星型の原子模型」の発案者などと誤解を招く文字がならんでいる。初中等教育から大学の間でもそうである。そこで、できるだけ多くの方々、とくに理系の学生さん、理科の先生や教科書を執筆なさる方々に是非稲村論文を読んでいただきたい。

私がこの稲村氏の労作を読んで驚いたことは、次のことである。1923 年に発表された長岡・杉浦・三島の超微細構造に関する論文は、量子力学の鬼オウルフガング・パウリに非常に大きな感動を与えたようである。それを理研の書庫に探し出した稲村氏はスピンの関するパウリの論文も見つけ、驚愕したという。そこには長岡らの超微細原子分光に関する論文が驚くばかり詳細に正当に紹介されていたからである。「長岡半太郎と言えば土星型」と洗脳されていた者には、長岡らのそのような研究があったとは思ってもよめなかった、と稲村氏は述懐する。偉大な物理学者パウリは厳格な人で、他人を褒めそやすことはない、と言われてきた。その人が何と、東洋からの研究者の論文をこれほどまでに評価したとは、信じがたいことである。今日でも、長岡とパウリと超微細構造を結びつける人は見当たらない。専門が分化してしまっているからであろう。実際、長岡は学士院から研究助成金を得て精密分光実験の準備に着手している。自らの原子模型に基づいて、彼は人跡未踏の実験（後年の超微細構造分光）に賭け、それを深化させる狙いがあったのである。長岡は原子モデルの提唱で満足し、それで辞めてしまうような研究者ではなかった。

ラザフォードの有名な実験結果から得られた原子の描像は長岡模型と酷似していた（図参照）。しかし、ラザフォードはその類似性を嫌い、事あるごとに、自分の原子模型は太陽系型であり、長岡のものは土星型だと敢えて違いがあるかのように語っていたことなど、さまざまなエピソードもこの論



長岡モデル (A) とラザフォードモデル (B) との違い。説明は原論文を参照。



文で明らかにされた。残念ながら、ラザフォードの名声とともに「長岡土星模型」の呼称は世界中に広がってしまったのである。

稲村論文は、長岡原子模型を長岡・ラザフォード・ボーア模型 (N-R-B

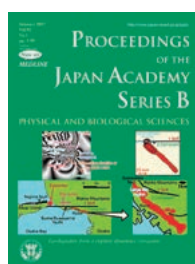
model) としてわが国から世界に向かって発信すべきである、と提唱している。同時に、今日の物理学で重要な意義をもつ原子の超微細構造の研究は長岡によって拓かれ、パウリに讃えられたことを強調している。今日、医学

診断でも重要な役割を果たす核+電子スピンの物理 (核磁気共鳴イメージング) も、そこに源流があったと言って良いかもしれない。

(山崎 敏光、日本学士院会員)

## Vol. 93 (2017) 掲載論文紹介

### No. 1



#### Reviews

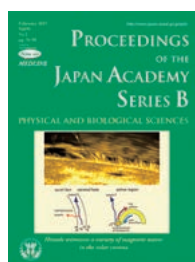
Shaw WATANABE: Low-protein diet for the prevention of renal failure. . . . . 1

Chiaki NISHIMURA: Folding of apomyoglobin: Analysis of transient intermediate structure during refolding using quick hydrogen deuterium exchange and NMR . . . . . 10

Koji UENISHI: Rupture, waves and earthquakes . . . . . 28

**Cover Illustration**

### No. 2



#### Reviews

Toshio YANAGIDA and Yoshiharu ISHII: Single molecule detection, thermal fluctuation and life . . . . . 51

Johannes F. G. Vliegenthart: The complexity of glycoprotein-derived glycans . . . . . 64

Takashi SAKURAI: Heating mechanisms of the solar corona . . . . . 87

**Cover Illustration**

### No. 3



#### Reviews

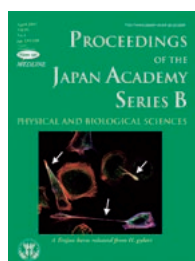
Masahito HAYASHI: Finite-block-length analysis in classical and quantum information theory . . . 99

Shin-ichiro SHODA: Development of chemical and chemo-enzymatic glycosylations . . . . . 125

Hugh COLVIN and Masaki MORI: Getting to the heart of the matter in cancer: Novel approaches to targeting cancer stem cells . . . . . 146

**Cover Illustration**

### No. 4



#### Reviews

Takashi ONODERA: Dual role of cellular prion protein in normal host and Alzheimer's disease . . . . . 155

Kazuhide INOUE: Purinergic signaling in microglia in the pathogenesis of neuropathic pain . . . . . 174

Akira TAKEDA, Naoko SASAKI and Masayuki MIYASAKA: The molecular cues regulating immune cell trafficking . . . . . 183

Masanori HATAKEYAMA: Structure and function of *Helicobacter pylori* CagA, the first-identified bacterial protein involved in human cancer . . . . . 196

**Cover Illustration**

- Ko HIRANO, Reynante Lacsamana ORDONIO and Makoto MATSUOKA: Engineering the lodging resistance mechanism of post-Green Revolution rice to meet future demands . . . . . 220

### Original Article

- Akihiro MATSUMOTO and Masao TACHIBANA: Rapid and coordinated processing of global motion images by local clusters of retinal ganglion cells . . . . . 234

### Reviews

- Tetsutaro OZAWA and Osamu ONODERA: Multiple system atrophy: clinicopathological characteristics in Japanese patients . . . . . 251

- Hiroshi KAWASAKI: Molecular investigations of development and diseases of the brain of higher mammals using the ferret . . . . . 259

- Takahiro HARA: Data management issues in mobile ad hoc networks. . . . . 270

- Minoru YOSHIDA, Norio KUDO, Saori KOSONO and Akihiro ITO: Chemical and structural biology of protein lysine deacetylases . . . . . 297

- Tsuneko OKAZAKI: Days weaving the lagging strand synthesis of DNA — A personal recollection of the discovery of Okazaki fragments and studies on discontinuous replication mechanism — . . . . . 322

**Cover Illustration**

- Isamu MIYAKAWA: Organization and dynamics of yeast mitochondrial nucleoids . . . . . 339

### Reviews

- Hitoshi OKAZAWA: Ultra-Early Phase pathologies of Alzheimer's disease and other neurodegenerative diseases . . . . . 361

**Cover Illustration**

- Satoko ARAKAWA, Shinya HONDA, Hirofumi YAMAGUCHI and Shigeomi SHIMIZU: Molecular mechanisms and physiological roles of Atg5/Atg7-independent alternative autophagy . . . 378

- Jun TAKOUDA, Sayako KATADA and Kinichi NAKASHIMA: Emerging mechanisms underlying astrogenesis in the developing mammalian brain . . . . . 386

### Original Article

- Yuji YAZAKI: How the Klein–Nishina formula was derived: Based on the Sangokan Nishina Source Materials . . . . . 399

### Reviews

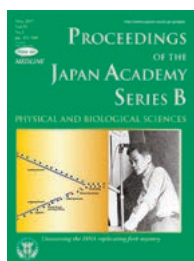
- Kiwamu NISHIDA: Ambient seismic wave field . . . . . 423

- Yousuke FURUTA, Takashi KOMENO and Takaaki NAKAMURA: Favipiravir (T-705), a broad spectrum inhibitor of viral RNA polymerase. . . . . 449

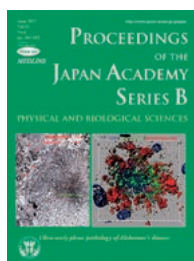
- Yasuo MORI, Nobuaki TAKAHASHI, Tatsuki KUROKAWA and Shigeki KIYONAKA: TRP channels in oxygen physiology: distinctive functional properties and roles of TRPA1 in O<sub>2</sub> sensing . . 464

- Shigeo OKABE: Fluorescence imaging of synapse dynamics in normal circuit maturation and in developmental disorders . . . . . 483

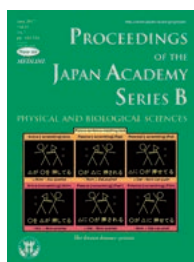
No. 5



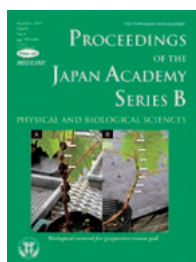
No. 6



No. 7







### Original Articles

- Masayoshi IIZUKA, Takao SUSAKI, Mimi TAMAMORI-ADACHI, Hiroko OKINAGA and Tomoki OKAZAKI: Intrinsic ubiquitin E3 ligase activity of histone acetyltransferase Hbo1 for estrogen receptor  $\alpha$ . . . . . 498
- Kyohei TANAKA, Shinri OHTA, Ryuta KINNO and Kuniyoshi L. SAKAI: Activation changes of the left inferior frontal gyrus for the factors of construction and scrambling in a sentence . . . . 511

**Cover Illustration**

### Reviews

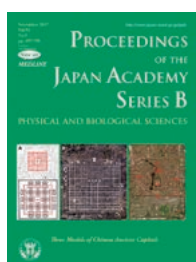
- Hitoshi GOTOH and Akio OKAYASU: Computational wave dynamics for innovative design of coastal structures. . . . . 525
- Akira KAWAGUCHI, Koji INOUE, Koji TANINA and Mizuho NITA: Biological control for grapevine crown gall using nonpathogenic *Rhizobium vitis* strain ARK-1 . . . . . 547

**Cover Illustration**

- Shohei MITANI: Comprehensive functional genomics using *Caenorhabditis elegans* as a model organism . . . . . 561
- Tomohiro WATANABE, Naoki ASANO, Masatoshi KUDO and Warren STROBER: Nucleotide-binding oligomerization domain 1 and gastrointestinal disorders . . . . . 578
- Tsutomu TAKEUCHI: Treatment of rheumatoid arthritis with biological agents—as a typical and common immune-mediated inflammatory disease . . . . . 600
- Kazuo CHIN: Overcoming sleep disordered breathing and ensuring sufficient good sleep time for a healthy life expectancy . . . . . 609
- Hideo AKUTSU: Dynamic mechanisms driving conformational conversions of the  $\beta$  and  $\epsilon$  subunits involved in rotational catalysis of  $F_1$ -ATPase . . . . . 630

### Original Article

- Kenji MORI: New synthesis of a stereoisomeric mixture of methyl 12-trishomofarnesoate, a juvenile hormone mimic useful in sericulture by increasing silk production . . . . . 648



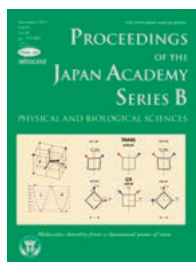
### Reviews

- Yuki HITOMI and Katsushi TOKUNAGA: Significance of functional disease-causal/susceptible variants identified by whole-genome analyses for the understanding of human diseases . . . 657
- Makoto MURAKAMI: Lipoquality control by phospholipase  $A_2$  enzymes. . . . . 677
- Shuntaro HARA: Prostaglandin terminal synthases as novel therapeutic targets. . . . . 703
- Shuji FUNO: Ancient Chinese capital models—Measurement system in urban planning— . . . 724

**Cover Illustration**

### Original Article

- Jun NOJIMA, Shu MEGURO, Naoto OHKAWA, Michiaki FURUKOSHI, Toshihide KAWAI and Hiroshi Itoh: One-year eGFR decline rate is a good predictor of prognosis of renal failure in patients with type 2 diabetes . . . . . 746



## Reviews

Kazushi SUZUKI, Atsushi IWATA and Takeshi IWATSUBO: The past, present, and future of disease-modifying therapies for Alzheimer's disease .....757

Yasuo TERAOKA, Hideki FUKUDA and Okihide HIKOSAKA: What do eye movements tell us about patients with neurological disorders? — An introduction to saccade recording in the clinical setting —.....772

Sumiko MOCHIDA: Millisecond  $\text{Ca}^{2+}$  dynamics activate multiple protein cascades for synaptic vesicle control .....802

## Original Articles

Satoshi NAKAMURA, Shoji IMAMICHI, Kazuyoshi MASUMOTO, Masashi ITO, Akihisa WAKITA, Hiroyuki OKAMOTO, Shie NISHIOKA, Kotaro IJIMA, Kazuma KOBAYASHI, Yoshihisa ABE, Hiroshi IGAKI, Kazuyoshi KURITA, Teiji NISHIO, Mitsuko MASUTANI and Jun ITAMI: Evaluation of radioactivity in the bodies of mice induced by neutron exposure from an epithermal neutron source of an accelerator-based boron neutron capture therapy system ...821

Lin Wei JONG, Takayuki FUJIWARA, Hisayoshi NOZAKI and Shin-ya MIYAGISHIMA: Cell size for commitment to cell division and number of successive cell divisions in multicellular volvocine green algae *Tetrabaena socialis* and *Gonium pectorale* .....832

Eizi HIROTA: Molecular chirality: A new approach from a dynamical point of view. ....841

Cover Illustration

## Proceedings of the Japan Academy, Ser. B について

Proceedings of the Japan Academy, Ser. B は、文部科学省の機関である日本学士院が刊行する英文学術誌で、1912 年に創刊されました。本誌は、化学、物理学、天文学、地球・宇宙科学、生物学、工学、農学、医学等、Ser. A に掲載する数学を除く自然科学全分野を対象とします。年 10 回刊行し、総説論文 (Review) と、原著論文 (Original Paper、速報を含む) 等

を掲載します。冊子の他、インターネットでも J-STAGE (<http://www.jstage.jst.go.jp/browse/pjab>) において全文が無料公開されます。2017 年公開の Impact Factor は 2.324 でした。また、PubMed にも採録されています。

本誌への投稿資格に制限はありません。オンラインシステムによる投稿の他、電子メールや郵便による投稿も可能です。投稿された論文は、各分野の

第一人者 2 名を査読者として厳正な査読を行っており、アクセプトされた論文は、1 カ月程度で出版されます。また、投稿料・掲載料は不要で、別刷を無料で 50 部進呈します。カラーページは印刷 1 ページを無料としています。詳しい投稿規程は、本院のウェブサイト <http://www.japan-acad.go.jp/pjab> をご覧いただくか事務室まで御連絡ください。



**PJA Newsletter**  
[PJA ニュースレター]  
No.10

発行/日本学士院  
〒110-0007 東京都台東区上野公園7-32  
TEL: 03-3822-2101 FAX: 03-3822-2105  
e-mail: [proc-b@mext.go.jp](mailto:proc-b@mext.go.jp)  
発行日/平成30年3月30日

