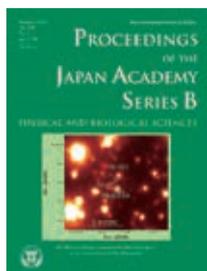




# PJA News Letter

No.17

<https://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 森田浩介氏 羽場宏光氏 森本幸司氏 坂口聡志氏	1
トピックス がんの粒子線治療と日本	8
Vol. 100 掲載論文紹介	9
Proceedings of the Japan Academy, Ser. B について	12

## 挨拶

 Editor-in-Chief  
長田 重一

学士院欧文紀要B (PJA-B) は昨年、第100巻を迎え、過去の代表的な原著論文を再掲し、専門家による振り返りが行われました。日本の優れた研究成果が掲載されてきたことに深く感銘を受けます。近年では、「小惑星探査機はやぶさ2」の成果や「巨大ブラックホール近傍の恒星」の観測、動物細胞への葉緑体導入などの論文が大きな反響を呼んでいます。現在、海外からの投稿が増えていますが、編集委員の厳正な審査により、掲載は限られています。今後は欧米の研究者からの投稿が増えることを期待しています。

PJA News LetterはPJA-Bの活動を補完し、トピックをインタビューや随筆の形式で掲載しています。今回は、113番元素「ニホニウム」の発見と命名の経緯について、九州大学・理化学研究所の森田先生のグループに、また、がん治療として注目される粒子線治療について、白土会員に現状を紹介していただきました。

森田浩介氏を中心とする理化学研究所（理研）の実験グループによって日本で初めて原子番号113の新元素が発見され、「ニホニウム」と名付けられたのは2016年のことです。アジアでも初となる快挙でした。日本では前世紀以来、新元素発見にあと一歩と迫りながら果たせなかった歴史がありますが、そうした伝統のうえに、創意と努力がついに実を結んだ形です。グループはさらに、新元素と未知の領域をめざして挑戦を進めています。新

## インタビュー

 森田浩介  
羽場宏光  
森本幸司  
坂口聡志

×

(聞き手)

 巽 和行  
小林 誠

元素発見のこれまでとこれからを、現在は理研の特別顧問に加えて九州大学高等研究院特別主幹教授を務める森田氏に、化学と物理学のそれぞれの観点からの意義も含めて、巽和行会員と小林 誠会員がお話を伺いました。共同研究者として、理研の羽場宏光超重元素研究部部長と森本幸司超重元素分析装置開発チームリーダー、坂口聡志九州大学理学研究院教授にも加わっていただきました。

左より 坂口聡志氏、羽場宏光氏、森田浩介氏、森本幸司氏 (提供 理化学研究所)



**巽**：今日は、九州におられる森田先生に、東京から小林先生と私とでお話を伺っていきます。共同研究者の方々にもそれぞれの場所からご参加いただいています。どうぞよろしくお願い致します。

**森田**：こちらこそ、どうぞよろしくお願い致します。

**巽**：森田先生とは、2011年にモスクワのロシア科学アカデミーで開催された新元素命名式典で一緒にさせていただきました。私はIUPAC（国際純正・応用化学連合）の会長として、ロシア由来の元素を紹介するとともに、新たに承認された元素の名前と元素記号の宣言を行いました。

**森田**：よく覚えています。ロシアの114番元素フレロビウムと、米国の116番元素リバモリウムの命名でした。

**巽**：大きな式典でしたが、日本人は我々2人だけでしたね。その後、森田先生は一時、体調をくずされておられたと聞いておりましたが、お元気そうで何よりです。

**森田**：ありがとうございます。

**巽**：モスクワで式典が開かれた当時はニホニウムが話題になるより前、森田先生の研究がまだ続いているさなかだったと思いますが、現地の新聞社やテレビ局からインタビューを受けました。「113番元素はいつ、ロシアで発見された」と公式に発表されるのか、というのです。彼らは、ロシアがすぐに見つけているんだという確信を持って聞いてきました。私としては、適当に答えざるを得ませんでした。そういう経緯もありましたので、最終的に日本の理化学研究所（理研）に命名権が与えられた時は非常に感慨深いものがありました。今日は、化学者である私が最初に質問させていただき、物理学者である小林先生にも加わっていただく形で進めたいと思います。113番

元素ニホニウムの合成、あるいは発見に至るまでの経緯に加え、ニホニウムと命名した理由、そして、新しい元素が日本で初めて作られたことのインパクトをどのようにお考えなのか、こうしたことを中心に伺っていきたく思います。まず、森田先生が新しい元素を作ろうとなさった動機は何だったのでしょうか。

**森田**：私は九州大学を卒業した後、大学院に進学し、東京大学の原子核研究所で実験をしていました。その最後の頃に、理研から移られた野村 亨先生とお会いして、一緒に研究するようになったのがきっかけです。

**小林**：それは何年頃のことですか。

**森田**：1984年頃だったと思います。

**巽**：その時から新しい元素を作ろうと考えておられたのでしょうか。

**森田**：当時、理研で新しい加速器リングサイクロトロンが作られて、それを使って何をやるかという議論が盛んになされていました。野村先生はその中の一つの柱として、未発見の原子核を作るのがいいんじゃないか、それにこの加速器は適しているんじゃないか、というお考えをお持ちでした。私は野村先生のグループに所属していましたので、未発見の原子核をめざす研究と一緒に進めていくことになりました。私も理研に移り、野村先生のもとで、GARIS（気体充填型反跳分離器）という、できた原子核を分離するための装置の開発に取り組みました。

**巽**：理研の加速器は新しい元素を作るのに適していると聞いたことがあります。それはどういうことでしょうか。

**森田**：新しい元素を作るには、原子核を融合させて重たいものを作りますが、エネルギーが高すぎると、破壊されてしまいます。私たちが使った理研の線形加速器RILACはエネルギーが適当に低くて、融合反応に適している

ということがありました。私たちの実験と加速器との適合性が良かったと考えております。

**巽**：理研では、初めからそういう考えであの加速器が作られたのでしょうか。

**森田**：はい、そうだと思います。

**小林**：そのRILACを改造したことが発見につながったと聞いていますが、それはどういうことでしょうか。

**森田**：原子核が衝突してさらに融合する確率は100兆分の1と小さいので、とにかく衝突回数を増やすしかありません。それにはビーム強度が重要で、ビーム強度を大幅に増強することが最大の改造でした。それが非常にうまくいったことで研究が進みました。

**巽**：森田先生が理研で研究しておられた時には、次の新元素合成に取り組んでおられる若い先生方は、まだおられませんよね。先生のご指導で若い研究者が育ってこられたと理解してよろしいでしょうか。

**森田**：はい。ただ、指導というより、共同研究ですね。

**巽**：私の専門は無機化学で、新しい超重元素を作るには原子核をぶつけていくんだという以上に詳しくは知らないのですが、そこにはどういう考え方、あるいはルールがあるのでしょうか。

**森田**：原子核同士の静電反発力が大きいことが、融合反応を阻害する原因になっていますので、その反発力が小さくなるような組み合わせ、つまり、より非対称な原子番号同士をぶつけることが原則です。例えば、50と50で100を作るのではなくて、90と10で100を作る方が静電反発力を小さくすることができます。そういった考えで反応を選び、原子番号83のビスマスの原子核に、原子番号30の亜鉛の原子核ビームを当てることにしました。

**巽**：なるほど。それでうまくいったわけですね。

森田：はい、おかげさまでうまくいきました。

小林：ロシアのやり方と森田先生のやり方は、違う点もあるように思うのですが、いかがですか。

森田：重たい原子核同士の融合反応を使って作ることは、世界中で共通ですので、日本でもロシアでもアメリカでも同じです。ただそれを、どれだけ回数を多く、できるだけ大強度で、しかも長期間続けられるかが鍵になりますので、携わっている研究者の粘りというか、諦めない気持ちですね。来る日も来る日も、またゼロイベントでしたね、というのを諦めずに100日、1000日と続けて、それでも精神的にめげない連中が最後は生き残って成果を出してきているように思います。

小林：実際の実験の様子をちょっと伺いたいんですが、ずっとモニターを見てるわけですね。すると、目的とするイベントが起きる。

森田：はい、そうです。

小林：リアルタイムでパッと分かるわけですか。

森田：はい、なるべくリアルタイムで、こういう現象が起こったら多分そうだろうと想定しておいて、そういうのが起こったら詳しく生データを見る。そんな繰り返しです。

小林：候補となるようなイベントはたくさん起こるのですか。

森田：まあまあ起こります。

小林：それでも、何百日も目的とするものが出てこないときは、どんな心境なんですか。

森田：重要なパラメーターは衝突させる時のエネルギーというか速度ですので、そこさえ間違っていれば、待っていれば来るという、変な話かもしれませんが、信念のようなものです。いろいろな予備実験もやって、今やっているあの速度で間違いないんだと、自



左より 小林 誠氏、巽 和行氏

分たちで自分たちを信用しながら、あとはただひたすら、イベントが起こってくれるのを待っているだけです。

巽：実験を始められたのが2003年9月、翌2004年7月には最初のイベントが観測され、続いて2005年4月に2回目のイベントが観測されました。ここまでは比較的短期間で結果が出たように見えますが、3回目はそれから7年以上も後の2012年8月でした。その間はかなり苦しかったのではないかと想像しますが。

森田：はい、そうですね。でもポアソン分布ってそんなものです。ビームの積算量の計算通りにはなかなか行かないです。だから、これくらい出てこない確率は1割2割はあるんだろうなということは計算しながら、しんどい実験をやっているんだからまあしょうがないだろうと、みんながお互い納得しながら研究を続けていました。最初は100日に1回ぐらい出ていたので、100日ぐらい実験を続けられればいいのかなと思ってやるんですけど、それが200日、300日となっていくんです。

巽：研究は一般的に言って忍耐力が求められると思いますが、先生方のご研究で求められる忍耐力は桁違いのように思います。森田先生は、楽観的という表現がいいのかどうか、そんなふう

にも見えるんですが、一緒にやっておられる若い方はいかがでしたか。

羽場：そうですね。やはり重い元素を作ろうと思うと、時間がかかるし、思うように作れない。だからといって、

実験条件を変えようとしても、その一つの実験条件を探索するのもやはり時間がかかる。それで、一つの条件を決めたらずっと待つのが鉄則と、森田さんに教えていただきました。それに従ってこれまで来たように思います。

巽：グループの先生方は全員、忍耐力が強いんですね。普通だとなかなか難しいと思いますが。

森本：ニホニウムの実験をする前に、ドイツのグループが発見していた108番から112番までの元素を作る実験をやりました。その結果、私たちの装置で再現できたうえに、ドイツの装置より2倍性能が良いということが確認できました。実験条件も一つずつ確認しながら進めました。それからニホニウムの実験を始めたので、これでいけるという自信のようなものがグループの中にはできていました。だから、自信を持って待てた、と思います。前の段階の実験がなければ、不安になったり、この実験条件は正しいかな、などと考えたりしたかもしれません。

巽：しかし、本当によかったですね、



りがたいと思っています。理事長をされておられた野依良治先生が化学のご専門で、このテーマには殊のほか思い入れが深かったようで、いろいろとサポートしていただきました。

**巽**：国にも、もっと支援体制を確立してほしいと思っています。

次に命名の件です。新元素の命名に当たってはまず、発見した権利をどこが持つか、IUPACとIUPAP（国際純粋・応用物理学連合）から推薦された化学者と物理学者の両方からなるワーキンググループで審議します。

**森田**：3回目のイベントを受けて発表した論文が審議されましたが、その合同ワーキンググループに対して、我々に優先権があるのではないかという趣旨の手紙をずいぶん書きました。

**巽**：どんなふうに書いたんですか。イベント数としては、確かロシアが結構数はあると主張していたと思います。きちんとしたイベントとして認知されるべきものだというのでしょうか。

**森田**：はい、そうです。

**巽**：ワーキンググループの反応はどうでしたか。

**森田**：反応は特にありませんでした。でも、そういう時は簡単に返事はできませんよね。少しずつ少しずつですが、個人的にも、そのメンバーに直接お会いしたり、手紙を書いたりしました。

**巽**：命名権が認められた時は、嬉しかったでしょうね。

**森田**：はい。思い切り飲みました。

**巽**：理研に命名権を与えるというIUPACの発表は2015年の大晦日でした。事前にご存知でしたか。

**森田**：いいえ、大晦日の朝に知らないうちにメールが入っていました。これは大変なことになったと思ってすぐ理研に連絡したら、即出てこいと。その日のうちに飛行機を予約して理研に飛んで行きました。

**小林**：巽先生は事前にご存知だったんですか。

**巽**：いいえ、知りませんでした。実は、私はこの日まで、IUPAC前会長という立場にありました。IUPAC本部のあるアメリカでは12月30日、日本時間では大晦日というやや異例のタイミングでの発表でしたが、115番、117番、118番というアメリカとロシアが共同で見つけた元素に加えて日本が見つけた元素が入っていたので、私がまだその職にある間にと配慮してくれたのかもしれませんが。3回目のイベントがもっと早かったら、会長としてニホニウムの命名式典に臨めた可能性があったとも言われましたが、世の中はそういうものなのでしょう。とにかく、ニュースを聞いてほっとしました。お正月におめでたいニュースが流れてよかったです。

**森田**：ありがとうございます。

**巽**：新元素の命名権は見つけた人であり、提案された後、5ヶ月のパブリックコメントや審議を経て正式に決まります。関係者がいろいろ言うこともあり、それを取り入れることはまずないんですが、こういう手続きを踏むことになっています。

**森田**：2016年3月にニホニウムという名前を提案して、11月末に正式に認められました。少し心配もしましたが、幸い異論はなく、ホッとしました。

**巽**：元素名として、ニッポニウム、ニホニウムといろいろな可能性があったと思いますが、そのいきさつはどうだったんでしょう。

**森田**：ニッポニウムは一度命名されてキャンセルされたので、そういう名前は使わないというガイドラインがあったと思います。小川正孝先生が1908年に43番元素を発見したとしてニッポニウムと命名しましたが、再現されなかったために幻の新元素となっ

てしまいました。43番元素は1937年に米国での加速器を使った実験で確認され、1947年にテクネチウムと命名されました。後に、小川先生が見つけたのは周期表で一つ下に位置する75番元素で、レニウムとして命名された元素だったことがわかりました。

**巽**：小川先生は東北大学の総長も務めた化学者で、その業績は再評価されており、日本化学会はその関連資料を化学遺産に認定しています。

**森田**：ニッポニウムは響きがきれいですが、こうした経緯から使えません。国の名前の表記としては、ニホン、ニッポンと両方とも認められており、ニホニウムでいいのではないかとメンバーで集まり、相談して決めました。

**巽**：他に、地名や人名などもあり得ると思いますが、特段の議論があったわけではないのですね。

**森田**：ありませんでした。野依先生は、理研に因む「リケニウム」だと冗談でおっしゃっておられましたが。

**巽**：日本で最初の新元素ですから、日本に由来する名前にしていただいて、非常に良かったと思っています。

では次に、新元素が日本で発見され、日本に由来するニホニウムという名前がついたことはいまでもなく大変に素晴らしい出来事であり、大きなインパクトがあったと思います。皆さんは、それを肌で感じておられるのではないかと思います。いかがでしょう。

**森田**：基礎学問を日本でちゃんとやっているんだということを若い人たちに示すのにとってもいい例になったのではないかと感じています。

**羽場**：周期表は一般の方にもおなじみなので、一般向けの講演や記事を頼まれることも多く、社会に貢献できると肌で感じられました。講演会も多く開かれ、子供たちが興味を持って聞いてくれたのも非常に大きな成果だっ



(左) 森田氏と気体充填型反跳分離器「GARIS」 (右) 理研重イオン線形加速器「RILAC」(提供 理化学研究所)

たと思います。日本の基礎科学の将来の発展にとってもよかったです。

**森田:** 最初のイベントを観測してからちょうど20年になるのを記念して開かれた昨年11月の講演会も、子供さんが非常に多かったですね。

**羽場:** はい。参加者の半分ほどが子供たちで、大変大きな反響がありました。我々もいい講演会ができたという満足感がありますし、周りからそう言ってもらえました。

**森本:** 一番嬉しいのは、教科書に載ったことですね。一般公開でも、低学年の子供たちから年配の方まで、熱心に質問をしていただきました。

**坂口:** 森田先生の後を継いで九州大学で教員をしています。二ホニウムのニュースが流れたときに小学生や中高生だった子どもたちが科学に目覚めて、九州大学に入学してきたり、実際にプロの研究者になったり、という例を多く見えています。日本の科学が次世代につながっていくための非常に重要なイベントだったと感じています。

**巽:** 日本の科学全体を盛り上げる宣伝塔として、これからも大いに活躍していただきたいと思います。

**小林:** 次は119番元素だと思います

が、進捗状況はいかがですか。

**森田:** 淡々と実験を進めていますが、実験を始めた2018年からすでに7年経ち、たぶん今が一番苦しい時期じゃないかなというふうに思っています。

**森本:** 96番のキュリウムを標的に、23番のバナジウムのビームを衝突させて119番を作ろうとしています。キュリウム自体人工元素なので米国の研究所から提供を受けて共同研究を進めています。ニホニウムとはまた違った難しさがあります。

**巽:** 他国の状況はどうですか。

**森田:** 119番を目指しているのは我々のグループだけではないと思います。

**森本:** 中国がやっている可能性があるのと、ロシアもやる可能性があります。アメリカの研究所も新元素探索の準備実験を始めていて、119番、120番あたりが目下の狙い目ではありますが、どこから何が出てきてもおかしくない状況です。

**巽:** どこでどんな研究をしているのか、なかなかわからないんですね。情報はどうやって集めるのでしょうか。

**森本:** 超重元素の研究に関する研究会である程度のことわかります。新元素探索に向けての準備実験のような論

文から推測したりもします。

**巽:** さまざまな研究分野で中国の躍進が続いていますが、新元素の分野はどうでしょうか。

**森田:** はい、かなり力を入れていると思います。

**巽:** これまでロシア、アメリカ、ドイツといった国々との間で行われてきた交流は、中国とも同様ですか。

**森田:** 友人もたくさんいますし、向こうから何人も研究者が来て、共同研究をしています。協調しつつ、競争する。それは、他の国と変わりません。

**巽:** もともと中国には原子核物理の伝統はあるのでしょうか。

**森田:** はい、かなりあると思います。

**巽:** 化学者の立場から言うと、新しい元素を見つける、つまり、周期表の下の方に載っている元素を増やしていくことは大変興味深いんです。特に、新しいものができたときに、それがどんな性質を持っているかを知りたい。元素の性質が幅を持って見えてくるという面もあります。

**森田:** ただ、私たちの研究で取り扱う原子の個数は1個や2個なんです。1個や2個の原子を使って化学をやることそのものが大きな挑戦で、それを

研究テーマとする学問もあるくらいです。「Atom-at-a-time Chemistry」と呼んでいます。化学の人と手を取り合いながらやっています。

**巽**：森田先生は覚えておられるでしょうか。確か20年ほど前、研究費の申請を「重元素の化学」というテーマで出され、化学者として奇異に感じたことを私はよく覚えています。1個の原子でどんな化学ができるのか。どんなふうを考えておられたのでしょうか。

**森田**：統計的な学問ですから、個数が必要であることは明らかです。お答えとしては、繰り返しをやることしかない、ということになります。

**巽**：ニホニウムにしても3個。とてもではありませんが、統計的処理はできませんね。

**森田**：はい。ですから、簡単な例を挙げると、水銀に近ければ、何か他の金属にくっつくだらう、ではその吸着エンタルピーを測ってみよう、といった研究かと思えます。

**小林**：化学との関係でいけば、陽子の数である原子番号が重要になるんでしょうが、原子核物理としてみれば、中性子の数も同じくらいの意味を持っています。中性子の数が多い方を探すという、そちらはどうでしょうか。

**森田**：ぜひやりたいとは思っていますが、方法がわからないんです。

**巽**：どこが難しいのですか。とにかく衝突させて作るんですよ。

**森田**：はい。中性子がより多い原子核同士を衝突させることに尽きますが、その方法がなかなか思いつきません。

**巽**：ぶつけても、中性子がかえって減ってしまうということですか。

**森田**：原子核は内部エネルギーを持つと、すぐに中性子をボロボロ出してしまうんです。

**坂口**：私も中性子が多い原子核の作り方を探したいと考えています。超重元

素は寿命が短いのですが、中性子が多い同位体には、量子力学的な効果によって寿命が伸びる「安定の島」と呼ばれる領域があるのではないかと考えられています。しかし、どのあたりにあるか、どれくらいの大きさなのか、ほとんど分かっていない。今見つかった超重核の中でも中性子数が多いものは実際に桁違いに寿命が長くなることが分かっていますが、その先は人類未踏の領域です。理研の装置に加えて、九州大学の新型の加速器も使って、新同位体の合成法の開拓に挑みたいと思っています。それには、核反応の理論研究も新しい装置も必要です。いわば、頭と手の両方を駆使して探索を進めたいと考えています。

**小林**：安定の島の研究は、日本がリードしているのでしょうか。

**坂口**：中性子過剰核を使った融合反応の研究の準備が整ってきたのがこの数年です。10年、20年くらいで世界に先駆けた結果を出していきたいと思っています。

**巽**：大学の研究費は厳しい状態が続いていますが、大丈夫ですか。

**坂口**：加速器自体はすでにあるんですが、整備するための予算がつきにくくなってきています。九大の加速器は世界に1台しかないもので、オリジナリティのあるところで勝負したいと思っていますが、電気代が高騰すると加速器自体を運転することができなくなります。歯がゆいところはあります。

**巽**：新元素の発見、そして人類未到の安定の島の探求。これからの研究の発展が大いに楽しみです。良いスタッフに恵まれておられるようなので、研究がどんどん進むことを期待しています。今日はどうもありがとうございます。

(構成：辻 篤子中部大学特任教授)

## 森田 浩介 (もりた こうすけ)

1957年、福岡県生まれ。九州大学理学部物理学科、同大学院理学研究科修士課程修了後、理化学研究所の研究者を経て、理化学研究所仁科加速器研究センター森田超重元素研究室准主任研究員・同センター超重元素研究開発部長・同センター特別顧問、九州大学大学院理学研究院教授・同高等研究院特別主幹教授を歴任。仁科記念賞、井上學術賞、日本学士院賞等を受賞。専門は実験核物理学。

## 羽場 宏光 (はば ひろみつ)

1971年、石川県生まれ。金沢大学理学部化学科卒業。同大学院自然科学研究科博士課程修了。日本原子力研究所先端基礎研究センター博士研究員、理化学研究所森田超重元素研究室研究員等を経て、現在、理化学研究所仁科加速器科学研究センター核化学研究開発室室長・同センター超重元素研究部部長。専門は核化学。

## 森本 幸司 (もりもと こうじ)

1967年、神奈川県生まれ。大阪市立大学理学部物理学科卒業。立教大学理学研究科博士課程修了。東京大学宇宙線研究所教務補佐員、立教大学非常勤講師、科学技術振興事業団研究員、理化学研究所研究員等を経て、現在、理化学研究所仁科加速器科学研究センター超重元素分析装置開発チーム・チームリーダー。専門は実験核物理学。

## 坂口 聡志 (さかぐち さとし)

1981年、東京都生まれ。東京大学理学部物理学科卒業。東京大学大学院理学研究科博士課程修了。理化学研究所仁科加速器研究センター基礎科学特別研究員等を経て、現在、九州大学大学院理学研究院物理学部門教授。専門は実験核物理学。

## 巽 和行 (たつみ かずゆき)

1949年、奈良県生まれ。大阪大学基礎工学部化学工学科卒業。同大学院基礎工学研究科博士課程修了。米国テキサスA & M大学博士研究員、米国コーネル大学博士研究員、大阪大学理学部高分子学科助手、大阪大学基礎工学部助教授、名古屋大学理学部・同大学院理学研究科教授、名古屋大学物質科学国際研究センター長、国際純正応用化学連合 (IUPAC) 会長を歴任。名古屋大学名誉教授、日本学士院会員。専門は無機化学。

## 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、同大学院理学研究科博士課程修了。高エネルギー物理学研究所物理研究系教授、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所教授・研究所長等を歴任。高エネルギー加速器研究機構特別栄誉教授、名古屋大学素粒子宇宙起源研究所 (KMI) 名誉所長、日本学士院会員。専門は素粒子論。

## がんの粒子線治療と日本

北海道大学大学院医学研究院医理工学グローバルセンター・日本学士院 白土博樹

がんの陽子線治療や炭素線治療といった粒子線治療の昨今の世界的隆盛と保険適用の拡大には、日本の医理工学者の努力が大きく貢献している。

放射線治療は「がんに電離現象を集中し周囲の正常組織への照射量を減らすこと」が重要で、1890年代からX線で皮膚疾患に対して欧米中心に開始された。その後、ガンマ線、電子線、中性子線、ヘリウム線、パイ中間子線などが様々な体深部のがんを試されてきた。1980年代から、数mの電子加速器で発生できる高エネルギーX線が、故高橋信次博士（昭和56-60年日本学士院会員）らの発案を源とするコンピュータ断層撮影と可動式多段絞りを利用した強度変調で華々しく発展して標準治療となっている。

X線治療では（ビームの射入方向から見て）がん遠端部より先の正常組織が照射されてしまう弱点を有するが、陽子線は加速器のエネルギー調整によりがんの深さで停止させ得るため、がん遠端部より先の正常組織の照射量を減らせ、大きながんもX線より安全に治療できる（図参照）。日欧米は、2000年代から産学官連携で技術競争を繰り広げつつ、陽子線治療がX線治療よりも放射線有害反応を減らせることを臨床試験等で示し続けたところ、各国で公的医療保険適用が進み治療患者数が年々増加し、すでに世界累計で30万人以上に利用されている。陽子線治療施設数は2024年6月時点で稼働中132（米国46、日本20、中国8、他58）、建設中30であり、日本は装置小型化・安定性・呼吸等で動く臓器のがんへの照射技術等で世界をリード

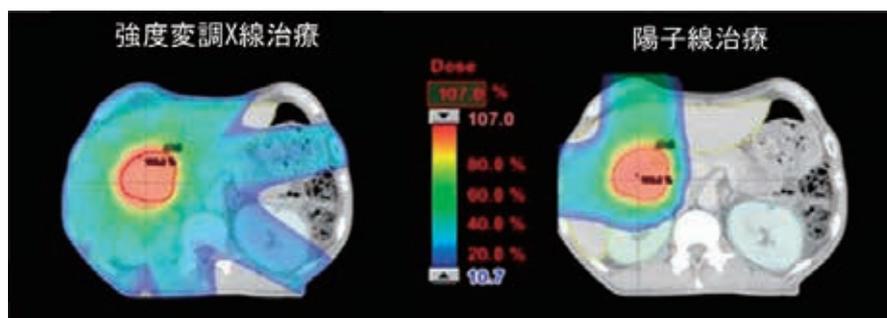
し、米国・アジアのトップクラスの大学病院・がんセンター32施設に日本製治療装置が導入されている。日本国内では、成人の限局性がん（頭頸部・肺・膵臓・肝臓・胆道・大腸・前立腺・骨軟部）の一部と小児がん全般が保険適用されている。

炭素線治療における日本の世界貢献は、陽子線以上である。炭素線は、陽子線より側方散乱が少なく体内線量分布がシャープで、X線や陽子線に抵抗性の低酸素がん細胞にも有効だが、吸収線量と生体反応の関係が複雑で、装置は陽子線より約3-5倍高額である。日本では、故梅垣洋一郎博士ら先見の医理工学者が放射線医学総合研究所（現在の量子科学技術研究開発機構）での炭素線治療装置開発を推進し、臨床研究を1994年に開始し、優れた臨床成績を発表し続けた。炭素線治療施設は世界で16施設（日本7、中国3、ドイツ2、他4）が稼働し4施設が建設中で、20施設中11施設が日本製装置を導入している。すでに世界で5万人以上に利用され、日本では陽子線治療とほぼ同じがん種（長期実績がない小児腫瘍を除く）のほか、婦人科領域

の悪性黒色腫・子宮腺がんが保険適用されている。

ちなみに、筆者は2014-16年に関連学会委員長を拝命し、長年患者負担額が大きい先進医療であった粒子線治療の初めての保険適用のために、札幌の自宅を朝5時に出て、東京で厚生労働省との対面会議や日本全体の施設をまとめる会議を行い、夜11時に帰宅する出張を週1~2回1年半続けたところ、感染症が悪化し敗血症となり死地を彷徨った。「大学の基礎研究を保険適用に繋げて誰でも受けられる治療にできること」が医理工学の醍醐味と意気込み、睡眠不足を軽んじていたが、60歳目前の体には十分な休養が必要なことも、その時悟った。10年後の今となつては、良い思い出である。

現在、日本はリアルタイム画像追跡+迎撃照射法、超電導磁石による炭素線治療装置の小型/軽量化などにおいて他国をリードし、レーザー駆動イオン加速による超小型化にも挑戦しており、今後もわが国の医理工学研究や産学官連携への期待は大きい。



図：肝臓がん（赤い輪郭）に対して通常の強度変調X線治療では、X線ががんをすり抜け正常肝臓全体に処方線量の20%以上が照射されてしまうが、陽子線治療では照射されない正常肝臓領域が広いため、有害反応発生確率が低い。

No. 1



### Review Series to Celebrate Our 100th Volume

Shigekazu NAGATA: Cloning of human Type I interferon cDNAs

1970年代後半、インターフェロン（IFN）に抗腫瘍活性が報告され、1979年から1981年IFN $\beta$ 、IFN $\alpha$ 、IFN $\gamma$  cDNAが単離された。IFN遺伝子クローニングに至る背景とこの研究がサイトカイン遺伝子探索に与えた影響について述べる。

Masanori IYE: Kimura's contributions on Earth polar motion studies

木村栄は日本の緯度観測データが他国と整合しない原因を調べ、全観測所に共通する変動項（z項）の存在を示した。z項の地球物理学的理解がなされたのは68年後だが、その理解につながった木村の寄与について解説する。

### Review

Miyuki TABATA and Yuji MIYAHARA: Control of interface functions in solid-state biosensors for stable detection of molecular recognition

バイオトランジスタは半導体工学と生命科学の融合分野の代表例である。本総説では、半導体表面における分子認識反応の設計、信号変換原理を議論し、DNAシーケンサの実用化例を含めて様々な分子認識反応を検出するバイオトランジスタについて概説した。

### Original Articles

Yoshimi MATSUMOTO, Seiji YAMASAKI, Kouhei HAYAMA, Ryota IINO, Hiroyuki NOJI, Akihito YAMAGUCHI and Kunihiko NISHINO: Changes in the expression of *mexB*, *mexY*, and *oprD* in clinical *Pseudomonas aeruginosa* isolates

臨床分離された多剤耐性緑膿菌（MDRP）の特徴として、薬剤排出ポンプ*mexY*の過剰発現と外膜ポリリン*oprD*の低発現を明らかにし、排出ポンプ阻害剤をシプロフロキサシンやアズトレオナムと併用する治療戦略が有効であることを示した。

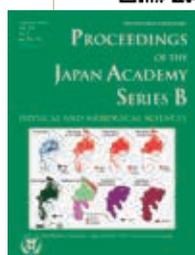
Joe-Air JIANG, Yu-Yuan LIU, Min-Sheng LIAO, En-Cheng YANG, Ming-Yin CHEN, Yi-Yuan CHUANG and Jen-Cheng WANG: Complementary use of visual and olfactory cues to assess capture of *Bactrocera dorsalis* (Hendel): Implementation and field verification via an IoT-based automatic monitoring system

亜熱帯アジア果実類の大害虫であるミカンコミバエのフェロモントラップに各色のLEDを付与し、緑色から赤色までの長波長光に虫の誘引機能があることを明らかにした。捕殺個体の自動カウントと遠隔送信機能を組み込み、各地の捕殺数を監視するモニタリングシステムを開発した。

Shogo NISHIYAMA, Tomohiro KARA, Brian THORSBRO, Hiromi SAIDA, Yohsuke TAKAMORI, Masaaki TAKAHASHI, Takayuki OHGAMI, Kohei ICHIKAWA and Rainer SCHÖDEL: Origin of an orbiting star around the galactic supermassive black hole **Cover Illustration**

私たちの銀河である天の川銀河の中心には、巨大ブラックホールがある。そのすぐ近くに、他の銀河で生まれた可能性のある、100億歳を超えるような星を発見した。天の川銀河形成の歴史や、銀河同士の合体を理解する手がかりになる星である。

No. 2



### Review Series to Celebrate Our 100th Volume

Shinji TOYOTA: Discovery of internal rotation and conformers of 1,2-dichloroethane: the dawn of the concept of conformation

水島三郎（1899-1983）は、1,2-ジクロロエタンに内部回転により交換する配座異性体が存在することを実証し、立体配座の概念を提唱した。1930年代に報告された初期の論文を中心に、その後の業績および現代科学の発展への貢献を紹介する。

### Review

Hiroyoshi NISHIKAWA: Establishment of immune suppression by cancer cells in the tumor microenvironment

免疫治療はがん治療の新たな選択肢となりつつある。本総説では、がん細胞が持つドライバー遺伝子変異が直接的に免疫系に作用してがん組織に免疫抑制機構を構築し、がん免疫治療の抵抗機序となっていることを示す。

### Original Articles

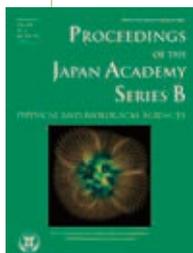
Ryo ENDO and Junko IWAHASHI: Analysis of the spatial distribution of the landslides triggered by the 1923 Great Kanto Earthquake, Japan **Cover Illustration**

1923年9月1日に発生した大正関東地震では、神奈川県の間部を中心に多くの土砂移動が報告された。決定木分析の結果から、斜面傾斜角、新第三紀地質、水平変位量及び最大せん断ひずみが、土砂移動と関係が深い要素と推定された。

Yoshie UCHIDA, Hidenobu UCHIDA, Takeshi SATO, Yuko NISHIMOTO, Koichi TSUTSUMI, Takao OI, Mitsutaka TANIGUCHI, Kazuhito INOUE and Yoshihiro SUZUKI: Cytochrome c oxidase subunit I gene in *Thalassiosira nordenskiöldii* strains inhabiting in cold and warm sea waters

北海道サロマ湖の海氷付着珪藻のミトコンドリアCOI遺伝子配列を決定した。この配列中の2つのイントロンは温暖な東シナ海の株には存在せず、1つは北大西洋の寒冷な海域の株と共通、他の1つはサロマ湖株に特有であった。

No. 3



#### Review Series to Celebrate Our 100th Volume

Tetsuo IRIFUNE: Kawai-type multianvil ultrahigh-pressure technology

川井型マルチアンビル装置 (KMA) は、大阪大学の故川井直人教授らにより約50年前に発明され、世界の超高压科学研究者により活用されている。本稿ではKMA技術の発展と、地球深部科学や材料科学への応用について解説する。

#### Reviews

Yuichiro NAGAME and Tetsuya K. SATO: Chemical characterization of heavy actinides and light transactinides – Experimental achievements at JAEA

周期表上で原子番号の上限に位置する元素では、大きな核電荷に起因する顕著な相対論効果で特異な化学挙動が期待される。しかし、これらの元素は加速器を用いた核反応でしか合成できず、わずかに数十個の原子しか得られない。重元素のユニークな化学的性質を単一原子レベルで明らかにした成果について紹介する。

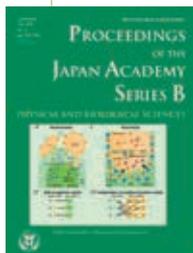
Shoichi YAMADA, Hiroki NAGAKURA, Ryuichiro AKAHO, Akira HARADA, Shun FURUSAWA, Wakana IWAKAMI, Hirotada OKAWA, Hideo MATSUFURU and Kohsuke SUMIYOSHI: Physical mechanism of core-collapse supernovae that neutrinos drive **Cover Illustration**

重力崩壊型超新星爆発は、大質量星がその進化の最後に起こす現象で、中性子星やブラックホールを形成する主たるチャンネルである。本総説では大規模シミュレーションを中心とした近年の理論の進展と残された課題について解説する。

Daisuke IWAH: Projection mapping technologies: A review of current trends and future directions

プロジェクションマッピング (PM) は、身の回りの実物に映像を投射することで、サイバー世界と現実世界をシームレスに融合して拡張現実環境を作り出す。従来のエンターテインメント用途を超えて、医療手術、製品設計、遠隔対話など、様々な分野での活用が有望視されている。本論文では、模様があたり立体面であったりする様々な実物の質感さえも自在に切り替えることができるPMの最新技術を解説する。

No. 4



#### Review Series to Celebrate Our 100th Volume

Fumio ARISAKA: Isolation and grouping of RNA phages by Itaru Watanabe *et al.* (1967)

日本各地から採取した分離材料から、K12F<sup>+</sup>に感染する約30種のRNAファージを分離し、血清学的にI~IIIの3つの群に分類された。これまでに単離されたMS2、f2及びR17はグループI、QβファージはグループIIIに分類された。

#### Review

Kohji MURASE, Seiji TAKAYAMA and Akira ISOGAI: Molecular mechanisms of self-incompatibility in Brassicaceae and Solanaceae **Cover Illustration**

本総説では、植物の自家不和合性反応の本質である、花粉の因子と雌ずいの因子の相互作用について、アブラナ科植物では自己認識型であり、ナス科やバラ科の植物では、非自己認識型であることについて紹介する。

No. 5



#### Review Series to Celebrate Our 100th Volume

Hidenori MIMURA: Invention of the split-anode magnetron

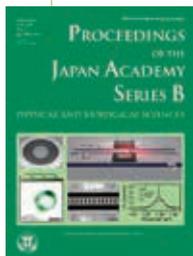
マイクロ波源として電子レンジ等に広く利用されているマグネトロンは、岡部金次郎 (1896-1984) の発明による分割陽極マグネトロンを基にしている。本論文において、岡部が発表したProc. Imp. Acad.の論文を紹介して、発明へ至った経緯と、その動作原理について解説する。

#### Review

Tomohiro KUROKAWA and Kohzoh IMAI: Chondroitin sulfate proteoglycan 4: An attractive target for antibody-based immunotherapy **Cover Illustration**

著者らが発見したCSPG4は、細胞表面に存在するプロテオグリカンの一種で、腫瘍進展や転移を促進する多機能分子である。モノクローナル抗体治療やCAR-T細胞療法の有望な標的として注目され、本論文ではその機能と治療応用の最前線を論じる。

No. 6



#### Review Series to Celebrate Our 100th Volume

Tomoyuki KITAGAWA: Studies on "Ascites sarcoma"

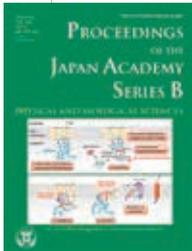
この論文は有名な吉田肉腫 (腹水腫瘍) 樹立の最初のレポートである。戦後の日本病理学会で初めてこの報告に接した研究者たちは、敗戦間際の困難な状況の中で、しかも地方の医学校の研究室で、かくも創造的かつ重要な研究が成し遂げられていたという事実に驚嘆し、そして廃墟からの研究再建を勇気づけられたのである。吉田肉腫は以後抗がん剤開発のスクリーニング法として重要な役割を果たし、またその後作られた多数の腹水腫瘍系と共に、がんの個性の細胞生物学レベルでの解明に大きく貢献した。

#### Review

Wataru TERASHIMA and Yuichiro K. KATO: Optical coupling of individual air-suspended carbon nanotubes to silicon microcavities **Cover Illustration**

通信波長帯のナノ光源であるカーボンナノチューブはシリコンフォトニクスと相性が良い。本稿では、合成直後の清浄な単一のカーボンナノチューブと微小共振器との光結合に関する研究について、著者らの成果を中心に紹介する。

No. 7



### Original Article

Shiro TOCHITANI, Takamitsu TSUKAHARA and Ryo INOUE: Perturbed maternal microbiota shapes offspring microbiota during early colonization period in mice

母体腸内細菌叢を攪乱すると、子の腸内細菌叢のプロファイルが母体腸内細菌叢に似ること、ただし母体腸内細菌叢において高い割合を占める一部の細菌は子に殆ど伝搬せず、母から子への腸内細菌の垂直伝搬には細菌分類選択性があることが明らかになった。

### Review Series to Celebrate Our 100th Volume

Mizuo ANDO, Kunihiro FUKUSHIMA and Kazunori NISHIZAKI: The discovery of acatalasemia (lack of catalase in the blood) and its significance in human genetics

カタラーゼはヘムを含む抗酸化酵素で、かつてはヒトの生存に必須と考えられていた。分子遺伝学的手法が限られていた時代に、人類遺伝学において先駆的役割を果たした無カタラーゼ血症（アカタラセミア）の研究を概説する。

Kenji SOBUE: Calmodulin: a highly conserved and ubiquitous  $\text{Ca}^{2+}$  sensor

細胞が機能を発現する際には、 $\text{Ca}^{2+}$ （カルシウム イオン）は細胞内の $\text{Ca}^{2+}$ 受容体蛋白質と結合して情報伝達を行う。カルモデュリンは、構造上種族間で高度に保存されかつ広汎な機能を果す $\text{Ca}^{2+}$ 受容体蛋白質として発見された。カルモデュリン発見の経緯と、その後の進展について紹介する。

### Review

Keiko SHIMAMOTO, Kohki FUJIKAWA, Tsukiho OSAWA, Shoko MORI, Kaoru NOMURA and Ken-ichi NISHIYAMA: Key contributions of a glycolipid to membrane protein integration **Cover Illustration**

著者らは、膜タンパク質が大腸菌内膜に組み込まれる際に、糖脂質が重要な役割を果たすことを見出した。生物有機化学的アプローチにより、糖脂質が関わる膜タンパク質挿入機構の一端が明らかになってきたので、本稿で概説する。

### Original Article

Yuki YOSHIDA, Akiyoshi HIRAYAMA and Kazuharu ARAKAWA: Transcriptome analysis of the tardigrade *Hypsibius exemplaris* exposed to the DNA-damaging agent bleomycin

クマムシのDNA損傷耐性・修復メカニズムを明らかにするために、プレオマイシン処理後のトランスクリプトーム・メタボローム解析を行った。結果、クマムシ固有の新規耐性遺伝子候補やトリプトファン代謝経路の活性化が見出された。

### Review Series to Celebrate Our 100th Volume

Saburo AIMOTO, Naoto MINAMINO, Takeshi ISHIMIZU and Masami KUSUNOKI: Crystals of taka-amylase A, a cornerstone of protein chemistry in Japan **Cover Illustration**

赤堀四郎（1900–1992）は、日本のタンパク質研究を先導した化学者である。酵素タカアミラーゼAの結晶化に成功し、その分子構造や立体構造、酵素活性発現機構の解明に取り組んだ。これらの研究が日本のタンパク質科学の礎となったことを紹介する。

Kumi YOSHIDA: Tracing the genealogy of research on the mechanism of blue flower coloration by anthocyanin based on Keita Shibata's work

柴田桂太（1877–1949）は、日本で最初の植物生理学・生化学講座の教授で、フラボノイド研究に多大な業績を残した。中でも、アントシアニンによる青色花色について、pH説に対抗して弟の柴田雄次（1882–1980）と提出した金属錯体説は、花色研究の金字塔とも言える。その一端を紹介する。

### Reviews

Hisayoshi NOZAKI, Kayoko YAMAMOTO and Kohei TAKAHASHI: Whole-genome sequencing analysis of volvocine green algae reveals the molecular genetic basis for the diversity and evolution of sex

21世紀になり次世代シーケンスの技術が跳躍的に発展した結果、これまで困難と考えられていた非モデル生物の全ゲノム解析が可能となった。本総説では性の多様性と進化の研究で注目されている緑藻ボルボックスの仲間（volvocine green algae）における全ゲノム解析を利用した最新の研究成果を紹介する。

Takafumi MINAMIMOTO, Yuji NAGAI and Kei OYAMA: Imaging-based chemogenetics for dissecting neural circuits in nonhuman primates

近年、化学遺伝学による神経活動操作が霊長類脳の特定の神経細胞種や経路の機能理解に重要な役割を果たしている。本稿ではイメージングを用いた最適化やリガンド開発などの技術開発から脳疾患治療への応用まで広く紹介する。

### Review Series to Celebrate Our 100th Volume

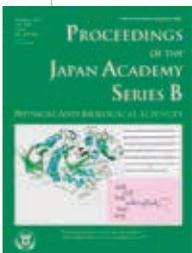
Masaru KONO: Motonori Matuyama and reversals of geomagnetic field **Cover Illustration**

松山基範（1929年）は、日本と周辺国の玄武岩の中に磁化方向が現在の地磁気方向とほぼ正反対のものがあることを見出し、第四紀前期に地磁気反転が起こったと結論付けた。当初注目されなかったこの論文は、K-Ar年代測定法の発展とともに1960年代に再評価され、古地磁気学の発展に大きく貢献した。

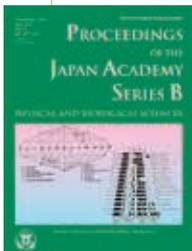
Hiroo IMURA: The spontaneous-diabetes rat: a model of noninsulin dependent diabetes mellitus by Yoshio Goto and Masaei Kakizaki (1981)

後藤・柿崎ラットは、軽度の糖代謝異常を有する非肥満Wistarラットから、数代の選択交配によって作られた非肥満糖尿病のモデル動物である。遺伝子改変によって作られた糖尿病モデル動物と異なり、インスリン分泌能は少ない。最近東アジアで、肥満が少ない糖尿病が増加しているが、そのモデル動物として適切であると考えられ、注目されている。

No. 8



No. 9



## Review

Takaki WATANABE and Masanobu KANO: Molecular and cellular mechanisms of developmental synapse elimination in the cerebellum: Involvement of autism spectrum disorder-related genes  
生後発達期にみられるシナプス刈り込みは、機能的な神経回路の確立のために重要である。本総説では、発達期小脳のシナプス刈り込みの分子細胞機構を概説し、多くの自閉スペクトラム症関連遺伝子が関わることを紹介する。

## Original Article

Ryota AOKI, Yayoi INUI, Yoji OKABE, Mayuko SATO, Noriko TAKEDA-KAMIYA, Kiminori TOYOOKA, Koki SAWADA, Hayato MORITA, Baptiste GENOT, Shinichiro MARUYAMA, Tatsuya TOMO, Kintake SONOIKE and Sachihiko MATSUNAGA: Incorporation of photosynthetically active algal chloroplasts in cultured mammalian cells towards photosynthesis in animals  
高温で光合成ができる紅藻・シソンの葉緑体をハムスター培養細胞・CHO-K1に取り込ませて、数日間、動物細胞内において葉緑体の内部構造を維持することに成功した。動物細胞内部で光合成の初期反応である電子伝達反応を検出した。

## Review Series to Celebrate Our 100th Volume

Yukari TOTSUKA and Keiji WAKABAYASHI: Report on the mutagenicity of flavone derivatives and their contribution to advancing scientific knowledge

杉村隆 (1926-2020) は日本を代表するがん研究者の一人である。杉村等が1977年Proc. Jpn. Acad. B誌に発表した食品中に広く分布するフラボン誘導体の変異原性の研究成果と、その成果を基に進展した科学的知見と国際的評価について概説する。

Yukari TOTSUKA, Masako OCHIAI and Keiji WAKABAYASHI: First report on a series of food-derived mutagenic and carcinogenic heterocyclic amines

日本のがん研究を先導した杉村隆 (1926-2020) 等は、1977年、トリプトファン加熱分解物中より発がん性ヘテロサイクリックアミン (HCA) であるTrp-P-1、Trp-P-2を見出した。この成果が契機となり、加熱食品中より一連のHCAが発見され、HCAのヒトがんへの関与に関する研究へと進展した。その経過について紹介する。

Takao SEKIYA: The first artificial cancer in the internal organs of experimental animals

Proc. Jpn. Acad. Bの100巻出版を記念して、佐々木隆興博士と吉田富三博士の掲載論文を再録し、オルトアミノアゾベンゼンを餌に混ぜてラットに与え、肝臓がんを生成させた世界初の実験動物の内臓に人工がんの作出成功の業績を紹介した。

## Review

Kazuhiko ISHIHARA: Biomimetic polymers with phosphorylcholine groups as biomaterials for medical devices

### Cover Illustration

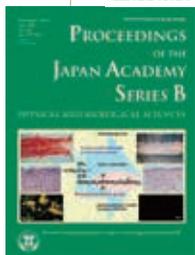
医療機器に生体親和性を付与できるポリマーは患者の生活の質の向上に重要である。著者は生体模倣設計でリン脂質ポリマーを考案し、工業的製造を実現した。本総説ではこのポリマーの合成から医療機器への実装までの道程について紹介する。

## Original Article

Yoshinori AKAIISHI and Toshimitsu YAMAZAKI: Kaonic nuclear clusters—a new paradigm of particle and nuclear physics—

ケイオン核の提唱から四半世紀に亘る研究を踏まえて、これまで全く知られていない核物質が存在することを論じている。その物質は、バリオン内に生き存えたケイオンの量子もつれにより、極端に高密度で堅固で安定な系を形成している可能性がある。

No. 10



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

本誌は、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、物理学、化学、天文学、地球科学、生物学、工学、農学、医学、薬学等、自然科学全分野が対象です(数学はSer. Aに掲載)。年10回刊行し、ReviewとOriginal Paperを掲載します。J-STAGE (<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/pjab>)

においてオープンアクセス(CC BY-NC)で全文無料公開しています。PubMedにも採録されています。最新のインパクト・ファクターは4.4です。

本誌への投稿資格に制限はありません。投稿された論文は、各分野の第一人者2名による厳正な査読を行って

り、アクセプトされた論文は、英文校閲の上、出版されますJ-STAGEでの早期公開も可能です。カラー印刷以外の投稿料・掲載料は不要で、カラー印刷についても1ページを無料としております。詳しい投稿規程は、本院のウェブサイト<https://www.japan-acad.go.jp/pjab>をご覧ください。



**PJA Newsletter**  
[PJA ニュースレター]  
No.17

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  
e-mail: [proc-b@mext.go.jp](mailto:proc-b@mext.go.jp)  
発行日/令和7年3月31日

