

PJA News Letter

No.14



<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 吉野 彰氏	1
トピックス 構造生物学を激変させた クライオ電子顕微鏡法	8
Vol. 97 掲載論文紹介	9
Proceedings of the Japan Academy, Ser. B について	12
Editorial Board	12

挨拶

Editor-in-Chief
鈴木 邦彦

今年も学士院欧文紀要 Series B の Newsletter をお届けいたします。日常生活にも何かと制限の多い COVID-19 による混乱の中にも拘らず、リチウムイオン電池の発明・開発で 2019 年ノーベル賞を受賞なさった吉野彰会員のインタビューを白川英樹会員にお願いすることが出来ました。更には、構造生物学の飛躍的な発展に貢献したクライオ電子顕微鏡の開発に中心的な役割を果たされた藤吉好則会員にはその開発の歴史、機能、今後の発展の見通しなどに就いてご寄稿戴くことも出来ました。読者の皆様にお楽しみ戴けるものと信じます。それと共に、欧文紀要の更なる発展のためには学士院会員のみならず、世界中の研究者からの質の高い総説、原著論文の投稿が必須です。皆様からのご投稿をお待ち致します。

軽量で長持ち、繰り返し充電ができるリチウムイオン電池は、私たちの日常に欠かせないスマートフォンやノートパソコンといった IT 機器だけでなく、環境問題の解決に大きな役割を果たす電気自動車、太陽光発電や風力発電、「はやぶさ 2」などの宇宙探査機にまで幅広く使われています。リチウムイオン電池を発明、開発した吉野彰・旭化成名誉フェローには、2019 年のノーベル化学賞は

インタビュー

吉野 彰

×

(聞き手)

白川英樹

じめ数々の賞が贈られました。研究のきっかけは、白川英樹・筑波大学名誉教授が発明した導電性ポリアセチレンとの出会いだったとか。本日は、2000 年ノーベル化学賞を受賞した白川名誉教授にインタビューをお願いし、吉野博士の開発にかけた思いや、今後ますます期待されるリチウムイオン電池の展望などについて、ともに語っていただきました。



京都大学工学部石油化学科の 第1期生

白川：ノーベル賞の受賞、おめでとうございます。

吉野：ありがとうございます。あっという間に2年が経ちました。

白川：お聞きしたいことはたくさんありますが、始めに吉野さんが自然科学に興味をお持ちになった子ども時代のことからお話いただけますか。

吉野：はい。私が生まれたのは、のちに万国博覧会が開かれた大阪の千里山という所です。子どもの頃は竹藪だらけでしたから、トンボやカブトムシを獲る外遊びの中で湧いてくる素朴な疑問、たとえば池の周りをぐるぐる回っているトンボに縄張りがあることとか、様々な自然現象に好奇心を持つようになりました。小学校4年生の時、担任の先生から「面白いですよ」と勧められて読んだのが、マイケル・ファラデーの『ロウソクの科学』という本です。難しい現象を子どもにもわかりやすく説明した内容でしたので、自然科学の中でもケミストリーは面白そうだなと感じ、化学の道を選ぶことになったのだと思います。担任の先生は生物系出身だったと記憶していますが、「物が化けるから化学と呼ぶんです」と教えてくれました。確かに『ロウソクの科学』でも熱によって蝋が溶けたり、炎の形が変わったりする理由が書かれていて、強く印象に残りましたね。

白川：自然に親しむことと化学が好きになることはなかなか結び付きませんが、火が燃えるのは酸化反応で純粋な化学だから、やはり『ロウソクの科学』の影響が大きかったのですね。京都大学の理学部ではなくて工学部に入ったのは、どんな理由からですか。

吉野：うーん、やはり純粋な学問より、研究で何かを見つけ、それを商品として世の中に出すことのほうに躍動感を覚えて、工学部を選んだように思います。

白川：当時の工学部は、受験時から各科に分かれていましたか。

吉野：はい。化学系は工業化学、石油化学、合成化学、高分子化学、化学工学の5学科あったと思います。私はちょうど燃料化学が石油化学に名称が変わった時の第一期生なんです。正直に言いますと、燃料化学から石油化学に名前が変わった時に定員が30名から50名に増えたんですよ。志望理由の一つはそこなんです（笑）。これなら受かりそうだなと。また、当時は福井謙一先生¹もいらっしゃったし、名前が変わったばかりで最先端の学問分野をやれるということも選んだ理由の一つでした。

白川：具体的に卒業研究につながるところに配属されるのは3回生からですか。

吉野：一応、3回生から配属されますが、実際の卒業研究は4回生の後半だけです。

白川：米澤貞次郎²先生の研究室に所属されたのですね。大学院生には社会に出るか、研究者として大学に残るかという選択がありますが――。

吉野：どちらかという、研究して何か新しい物を作って世の中に出すことに憧れていましたので、修士課程までは行きましたが、民間でやっていきたいという思いがありました。

白川：それで旭化成に入られたわけですね。

吉野：はい。私が入社したのは1972年で、世界的にもあらゆる産業が時代の変わり目にあり、特に化学産業は従来の汎用的な化学素材から新しいものをつくっていかねばいけない転換

期でした。それまで繊維産業だった旭化成も、住宅や医薬などの新規事業を始めていて、新しい分野に挑戦していく気運が、特に旭化成にあったので選んだように思います。

たった1人で基礎探索研究を手がける

白川：旭化成に入社された当初から基礎研究的な仕事に就かれたのですか。

吉野：ええ。多分、どの会社も、技術系で入れば、研究、製造、場合によっては営業、技術、いろいろな部門に配属されるわけですよ。研究部門にもさまざまなステージがあります。普通は1つの研究所の中でプロジェクト的なテーマが1つか2つあり、製品化するための研究が90%くらいでしょうか。仮に100人いる研究所であれば、90人は既に動き出しているテーマに関わり、残りの10%がいわゆる基礎探索研究をする。基本的には1人ですね。

白川：1人でやるのですか。

吉野：ええ、基本は1人です。基礎研究グループはあるのですが、実際には1人が1つのテーマを受け持って、次の大きなプロジェクトにつながるシーズを生み出すことが使命。私はそこに配属され、結果的に基礎探索研究を続けることになりました。

白川：それは「2年を目途に」ということだそうですが、2年という明文化されたものがあるのですか。それとも暗黙の……。

吉野：明文化はされていませんが、確かにその通りだと思うんです。まず自分でプランを立て、いろんな実験設備を準備するのに1年はかかります。それから研究を始め、うまく行っているかどうかというのは2年目には判断ができ、思惑通りに進んでいなければ

1 福井謙一：1918年～1998年。京都大学名誉教授。フロンティア電子論の研究でR. ホフマンとともに1981年ノーベル化学賞を授与され、文化勲章も受章。日本学士院会員。

2 米澤貞次郎：1923年～2008年。京都大学名誉教授。福井謙一教授の弟子。吉野博士の京大在籍当時、最先端の量子化学の研究に取り組んでいた。

ば別の新しいものを考える。そういうサイクルになりますから。

白川：次から次へ。それが4回ほど、ということでしたか。

吉野：そうです。3つ目の研究テーマが中断したのが1981年で、4つ目のテーマを考えなきゃいかんと思って、ちょうどその時期にポリアセチレン³に出会ったんです。たまたまその年の始めに京大を訪問する機会があり、米澤先生にご挨拶に行きました。その時、試験管に入ったポリアセチレンを見せていただいたんです。山邊時雄先生⁴のグループが作られたものだと思うのですが、あの外観を見て、まず感動しました。

白川：誰が見てもそうですね。有機物だとは信じられない。

吉野：それで、4番目のテーマとして取り上げることにしました。ですから、企業の研究としては少し異質といえますか、あくまで素材をベースにした研究で、何に使うかはその次に考える。テーマを提案し、装置を作るために半年くらい京都に通って山邊先生に教わりました。当時の私の研究所が神奈川県川崎市にありましたので、川崎でもポリアセチレンを始めて研究テーマにするとところからスタートしたわけです。

白川：ポリアセチレンに興味を持たれたのは、電池になると考えていたからですか。

吉野：いえいえ、ポリアセチレンにはいろいろな機能があるので、最初は自分で作ってどういうものかを確認し、それから何に使うのが最適かを考えていくというアプローチですね。

白川：つまり、光が出るといった、いろいろな用途があるから、そのうちの

どれかが何かの製品につながるという感覚ですか。

吉野：ええ。企業の研究のアプローチには2つあります。一つは既存の技術を固めて何に使えるかを考える。もう一つはその逆で、世の中に今、こういうものが必要とされていて、自分の手元にはまだ何の技術もないけれども、求められているものにつながる技術を作っていくという2通りのやり方です。ポリアセチレンは、まず技術からスタートしました。当時は太陽電池になる、その導線の代わりになる、場合によっては常温超電導になるかもしれないといった多くの可能性があり、それを1つ1つ研究する過程では当然、各々の産業分野でどんな状況があるかも調べていきました。

素材開発メーカーの強み

白川：私はいつも不思議に思うのですが、電池になることは1977～1978年頃にはもう、いろいろな所で研究が行われていて、多くの場合は陽極でヨウ素とか、いわゆるアクセプター・ドーピング⁵によるということでした。私自身も、ポリアセチレンはグラファイトに似ていて、グラファイトが2次元、実際にはグラフェンが積み重なって3次元になっているのだけれども、まあ2次元とっていい。それが1次元になったものがポリアセチレンだから、層間化合物ということで、アクセプターでもドナーでも出来るのだらうと思っていたんですね。実際に私自身もカリウムを入れてみたことがあるのですが、全く変化がなくて、あきらめちゃったんだけど、実際に電気化学的にもアクセプター・



25年前に筑波大学の実験室で合成し、高純度アルゴンで封入したポリアセチレンのフィルム（白川氏所蔵）

ドーピングもできるし、ドナー・ドーピング⁶もできる。だから、両極ともポリアセチレンを使って電池ができるということを研究者はだいたいわかっていて。ところが、ドナー・ドーピングにカリウムやリチウムを入れたものはものすごく不安定で、空気中に出すとバツと火がついて燃えるほどだったんですね。世界中でアクセプター・ドーピングの電池一色で研究が進んでいた中で、あえて非常に不安定なドナー・ドーピングをされたのは、なぜですか。

吉野：理由は2つあります。1つはポリアセチレンが電池に使えることは既にわかっていたので、当時の私はまだ電池業界と全く関係のない立場でした

3 **ポリアセチレン：**単結合と二重結合が交互に連なった直鎖状高分子 $-(CH=CH)_n-$ アセチレンの重合反応で合成するのでポリアセチレンと名付けられた。

4 **山邊時雄：**1936年生まれ。京都大学名誉教授。長崎総合科学大学元学長。当時、福井教授の研究室の助教授で、白川名誉教授と共同研究をし、福井教授退官後、後任に就いていた。

5 **アクセプター・ドーピング：**ヨウ素などの電子受容性物質を加えて、ポリアセチレンから π 電子を引き抜いて正孔（ホール）をつくることにより、これが正のキャリアとなり導電性が発現する。

6 **ドナー・ドーピング：**アルカリ金属のような電子供与性物質を加えて、ポリアセチレンに電子を与えることにより、これが負のキャリアとなり導電性が発現する。



吉野 彰 氏

が、状況を調べると、新型2次電池の研究開発が非常に盛んに行われていたものの、ことごとく商品化に失敗していた。その原因を調べていくと、やはり負極に問題がありました。当時は金属リチウムを使っていて、負極に基づく問題から商品化に至っていなかった。従って、新型2次電池を本気で商品化するため新しい負極の材料を求めているのが当時の電機業界でした。それで、ポリアセチレンをドナー・ドーピングで負極に持っていくのが面白そうだなと考えたのが1つ。もう1つは、今おっしゃったように、リチウムにしてもドナー・ドーピングしたら確かに不安定です。

白川：はい。

吉野：ですけれども、よく観ていきますとね、確かに空気中の酸素や水分に触れると不安定ですが、完全に密閉した状態で置いておくと、意外と安定だとわかった。その理由として、私が考えたのはアニオン重合⁷のイメージなんです。アニオン重合は非常に難しいですよ、ほんのちょっとした水分でもすぐ止まってしまう。しかし、完璧に水分や酸素のない状態ではまさに末

端アニオンが生きている。

白川：そうです。リビング重合⁸ですね。

吉野：ええ。リチウムをドーピングしたポリアセチレンって、アニオン重合みたいなイメージかなと。ちゃんとした理想的な状況さえ整えてあげれば、アニオン・ドーピングするよりはカチオン・ドーピングしたほうが安定するのかなと。もう1つ確信したのは、アニオン・ドーピングするとフワーと伸びて膨れていくじゃないですか。確かに ClO_4^- みたいな大きなアニオンが中に入っていくと、ものの見事に膨れて伸びる。不思議だったのは、リチウムドーピングしても全く膨れず、変化しないんです。つまり、リチウムイオンというのは本質的には安定で、しかも非常に居心地のいい場所にいる。そういうことで、業界が新しい負極材料を求めているという事実と、リチウムドーピングしたポリアセチレンが見不安定だけれども、実は非常に安定しているという2つの点ですね。

白川：もちろん、起電圧が高いということも織り込み済みですね。

吉野：ええ。

白川：製品になる過程で、随分、いろいろな障害があって、対極としてコバルト酸リチウムに行き当たったのは、グッドイナフ⁹さんの文献を見られたのでしたね。

吉野：はい。

白川：その時はまだポリアセチレンが対極にあったわけですね。ポリアセチレンとコバルト酸リチウム。具体的にはそれで開発研究をずっと進められた。ポリアセチレンは有機物だから、金属の数分の1の重さで電池ができるなら軽くていいだろうと私は思ったのですが、軽ければ体積が大きくなる。軽くて嵩張るから、吉野さんもほかの材料を探すことになり、苦労されたのですね。どうやって他の材料を連想されましたか。

吉野：おっしゃるとおり、ポリアセチレンを負極に使うてできた新しい電池をお客さんに持っていったところ、「重量ベースでは合格だけど、体積ベースでダメだ」と言われたわけです。原因はポリアセチレンの比重にありました。比重が2以上なら、計算上は小型と軽量が両立する。ポリアセチレンと同じような共役二重結合からなる化合物で、比重2以上ある構造ということ、カーボン材が浮かんできたんです。

白川：なるほど。

吉野：それでカーボンを集中的に調べて評価していきました。当時、世の中にあったカーボン材料は良くなかったのですが、たまたま旭化成の別の研究所で「VGCF」という新しい炭素繊維の研究グループがあり、そのサンプルをもらって電池として評価する指標があった。それが1つの大きなきっかけになりました。

白川：その炭素は、なんというのですか。

7 アニオン重合：付加重合反応において成長端の炭素アニオンにモノマーが付加してポリマーが生成する反応。

8 リビング重合：ある種の重合反応ではモノマーが消費された後も成長端の反応性が保たれている（生きている）場合があり、モノマーを追加すると更に重合反応が進むのでこのような名称が付いた。

9 ジョン・グッドイナフ：1922年生まれ。吉野博士とノーベル化学賞を共同受賞したアメリカ人科学者。当時、英国オックスフォード大学の無機化学研究所長を務めており、材料化学の専門誌に寄稿した「高エネルギー密度電池向けの新しいカソード材料」という論文が吉野博士の目に留まり、ポリアセチレンを負極に使うアイデアが生まれた。

吉野：Vapor phase grown carbon fiber.

白川：気相成長法炭素繊維ですか。

吉野：ええ。水素とベンゼンを1000℃くらいで触媒を塗ったところに通します。気相からいきなり髪の毛が伸びるように、カーボンとしての結晶構造が電気の負極として結果的に良かったのだと思います。

白川：旭化成はそれをどういう製品として開発したのですか。

吉野：開発というより、繊維の研究。炭素繊維という新しい研究テーマでした。

白川：ああ、なるほど。それでよく調べたら、飯島先生¹⁰が開発されたカーボンナノファイバーそのものだったというわけですね。

吉野：はい、そうです（笑）。VGCFというのは100 μmくらいの繊維で、その中心にナノレベルのチューブが入っていたということです。

白川：つまり、探索は広範囲にわたったけれども、自社製品に最良の物があったのですね。

吉野：ええ。新しい製品を開発して成功する時には、材料の開発が有利ですね。最終的にはそれが製品につながなくても、ブレイクスルーのきっかけになるのは、やはり材料です。

白川：すぐれた素材があったということは、材料開発メーカーの特色でもあったと。

吉野：はい。特に研究段階での材料ですから、他社だと絶対に無理。製品になれば入手可能ですが、別の企業の研究レベルの物質同士をくっつけるのはあり得ない話なので、そういう意味では材料を自社で開発できるというのは重要な点でした。

白川：なるほどねえ。利点と欠点を考慮して製品ができるのですが、現在はモバイル機器の電池、つまり小型で高密度の電池に進んできました。もう一つ、できるだけ化石燃料を使わな



白川 英樹 氏

いという面での太陽電池や風力発電などは時間的にも不安定な電源ですね。バックアップするためには嵩張っても大容量の電池。昼貯め込んで夜出すといった太陽電池などにポリアセチレンがいいんじゃないかと思ったけれども、現実にはそうはいかなかった。

吉野：モバイルITの電源として考える場合、重力も重要ですが、あの狭いスペースに入らないといけませんので、まずは体積。ただ、おっしゃったように、今はそれ以外の用途がでてきました。大容量も、ですし、最近、真剣に検討されているのが飛行機やグライダーです。携帯電話メーカーにとって中継基地が地上にあることはやっかいな問題で、まだまだつながりにくい所がありますし、中継基地をいっぱい作っていくのも大変なので、空に浮かべようという計画が今、具体的に動いています。成層圏辺りまでグライダーとプロペラ機を飛ばすという用途が重要視されてきているんです。この場合、空を飛ばないといけないので、重量最優先。そうした新しい用途についても研究が広がっています。

白川：なるほどねえ。

研究開発における3つの壁

白川：私は大学しか知らないし、日本

学士院会員の皆さんの多くも大学に所属されていると思うので、企業での研究についてもう少しお聞きしたいと思います。研究の目が出る過程で、「悪魔の川」「死の谷」「ダーウィンの海」という3つの障害を乗り越えないといけないとおっしゃっていますね。それは、企業の研究開発では今も普通に言われていることですか。

吉野：実際にそういう言葉は使わなくても、3つの壁を乗り越えないといけないところは基本的に同じですね。「悪魔の川」というのは、基礎探索研究で1人、孤独な中で新しい物を見出す苦しみ。それがうまくいった時、人も増えて1つのプロジェクトになる。そして実際に商品化しようとした時、いろいろな問題が出てくるのが「死の谷」。その谷を乗り越えたら世の中に出るのですが、すぐに売れるわけではない。マーケットを立ち上げるための研究もあります。3つの壁、それぞれに苦労はありましたが、一番しんどかったのは最後の「ダーウィンの海」ですね。これは非常に悩ましく、真綿で首を絞められるようでした（苦笑）。白川：自分の力だけではどうしようもないですからね。

吉野：そうなんです。そういう場合、解決の糸口は悩んでいる人同士のネットワークです。そこで、お客さんの立

10 飯島澄男：1939年生まれ。カーボンナノチューブの発見（1991年）と電子顕微鏡による構造決定で知られる物理学者で化学者。文化功労者。日本学士院会員。名城大学終身教授。

場の人も含めた本音が聞ける。商品化しても世の中の人に全く関心がなければあきらめればいいのですが、大抵は「関心はあるけど、まだ買わないよ」というパターン。振り返ってみると、やはり皆、待っていたのだと思います。新しい物を最初に使うのはリスクがあるでしょ。万が一、トラブルが起きた時のことを考えて、「先頭は嫌なんだよ」といった話が出てくる。「誰かが使い始めたら使おう」という時期が3〜4年はあり、誰かが先頭を切って使い始め、それが評判良ければ、皆が一斉にドーンと動いていく。

白川：その辺は、携帯電話の発展と軌を一にしていたということでしょうか。

吉野：まさに、おっしゃる通りです。

白川：大学の研究者側から見て、不思議に思うことがもう一つあります。それは、旭化成でリチウムイオン電池の基礎が出来上がり、商品につながったのだけでも、旭化成は商品としてリチウムイオン電池を製造していない。それはどういうわけですか。

吉野：それはですねえ（笑）、リチウムイオン電池が出来た時、社内でいろいろな議論がありました。電気事業に進出するのも1つの案でしたが、その分野において旭化成は素人だから難しいだろうと。もともと材料メーカー

なので、電池においても材料ビジネスに特化した方がいいのではないかという議論。もう1点が技術売り、いわゆるライセンスビジネスですね。じつは電気事業そのものは、旭化成も10年くらいやっているんです。

白川：そうなのですか。

吉野：ええ。ただし単独ではなく、東芝と合併会社を作ってやっていました。電気事業は変化の激しい業界ですし、親会社が2つあると意思決定に時間がかかってうまくいかない。それで、最終的には東芝に100%委譲し、旭化成は電気事業から撤退した形になりました。材料ビジネスについては単独でやってきて、特にセパレーター事業は大きく成長しました。ライセンスビジネスも他の電池メーカーにライセンスを売ることによって成功しています。

地球環境問題への貢献

白川：携帯電話ができた時は、私も大きな衝撃を受けました。しかも主要電源から切り離され、自分で電源を供給する。その当時は、鉛電池でしたか。

吉野：あの当時、小型密閉鉛電池というのがありました。かなり大きくて、電池をポケットに入れておいて、携帯電話を使いたい時につなぐ。その次がニッケルカドミウム電池。当社ではそ

の2つが主流でしたが、重いし嵩張るので困っていたわけです。

白川：結局、今日に至るスマホがリチウムイオン電池の用途としては一番大きいのですか。

吉野：数年前まではそうでしたが、現在は電気自動車向けのほうが圧倒的に大きいですね。

白川：大型ということですね。しかし、広がるきっかけは小型化が先にあった。それでも、社会的要求として大型化する必要はあったと思います。

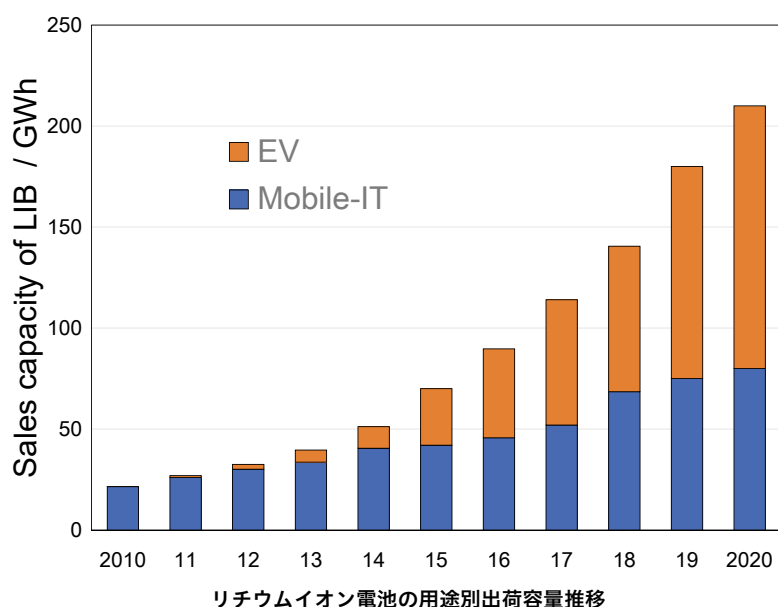
吉野：もちろんです。一般の人が買えるような電気自動車が出たのが2010年、10年ほど前です。リチウムイオン電池が小型のモバイルIT向けに出てから、ちょうど20年目。市場での安全性も含めた20年の実績が第一にあると思います。当然、技術も向上するし、コストも下がる。それで、「じゃあ、自動車にも」ということになったのではないのでしょうか。いきなり車からは難しいので。

白川：リチウムイオン電池と言うくらいだから、コバルト酸リチウムというリチウム資源を使うわけですね。リチウムは普遍的にあるとはいえ、まとまって出るとは極めて限られ、それほど豊富にある金属ではない。資源という面での見込みはあるのでしょうか。

吉野：世界で見た時、2025年までに新車販売台数の15%くらいが電気自動車になるという読みです。確かに資源の問題はあるにせよ、絶対量としてはなんとかなるレベルですが、将来、15%が100%になった時には当然、ご指摘のようにコバルトを含めた資源問題は間違いなく出てくるでしょう。ただ、車の場合はリサイクルがかなり楽で、実績で言うと、鉛バッテリーを搭載している現在の車のリサイクル率は約99%なんですよ。

白川：ほう、そうですか。

吉野：なぜかという、車は廃車手続きが法律で決まっているので、必ず決まった場所に集まるんです。集めてさえもらえば、あとは鉱山会社の仕事みたいになってくる。一方、携帯電話



やコンピューターはどこにいくかわからない（苦笑）。電機工業会でもリサイクル活動に力を入れています、いったん出回った物を回収するのは難しいんですね。また、地球環境問題を考えた時、リサイクルが出来ない製品はこれから間違いなく売れなくなります。ですから、電池に関しても資源問題は大きな課題ではありますが、逆にリサイクルが定着していくと考えています。

白川：そうしますと、企業の開発としてはリサイクルされやすい商品が重視されると。

吉野：そうです。コバルト、マンガン、ニッケルといった金属類は集めさえすれば再利用しやすいのですが、プラスチックのリサイクルとなると結構しんどいですね。

白川：その通りですね。リチウムの話に戻ると、当然、同列のアルカリ金属としてのナトリウム、カリウムがあるわけで、この2つはほぼ無尽蔵。それを使うと起電力は下がるけれども、資源的には全く問題ない。そういう点で、リチウムイオン電池が、たとえばナトリウムイオン電池に置き換わるといった可能性はあるのですか。

吉野：今後の研究次第でしょうね。特にナトリウムについてはかなり研究が進んでいます。ただ、やはり裸のナトリウムイオンとリチウムイオンで比べると、ナトリウムはイオン半径が大きいので、そのハンディキャップを克服できるかどうか……。材料開発次第でしょうね。

白川：いずれにしても、今やリチウム電池はなくてはならないものになり、今後は大容量のバッテリーが求められるということですね。今後の開発の見通しはいかがでしょうか。

吉野：大容量とおっしゃるのは、電池としての大きさですよ。これについては現在、2つの動きがあります。アメリカのテスラという電気会社がやっているパソコン用の丸い電池を1万個ほどつなぐやり方と、1つの電池の大きさを50倍ほどにするという2つ

のアプローチの方法です。技術的にはほぼ出来上がっているのではないのでしょうか。

白川：吉野さんは、今後もリチウムイオン電池の研究に関わっていかれるのですか。

吉野：もちろん、そうです。携帯電話、スマートフォン、コンピューターへのマーケットが一応出来上がり、次に電気自動車という新しいマーケットが今、動きつつある。その延長線上に蓄電システム、地球環境問題へとつながっていく流れで動いていますので、やらなければいけないことはまだまだ沢山あると思っています。

白川：もはや一企業の問題ではなく、国の問題になりますね。

吉野：そうです。現実には政府のグリーンイノベーション戦略があり、カーボンニュートラルにつながる研究に対して、産業界を中心にテコ入れし、財政的な支援を含めて進んでいます。

白川：各国が国を挙げて取り組んでいると思いますが、先端を走っているのはどこですか。

吉野：まだ同列でスタートラインではないでしょうか。カーボンニュートラルその他、いろいろな議論がされていますが、実際に動き出すのは2025年辺りと考えています。今はそのための準備期間。

白川：でも、その準備期間が一番大切なのでは……。

吉野：おっしゃる通りです。2025年にどれだけスタートダッシュがかけられるかだと思います。ちょうど2回目のお阪万博の年ですね。

白川：ではぜひ、そこへ向けて、さらに事業化が進められるようにお願いします。

吉野：はい。ありがとうございます。

白川：最後に若い研究者に何かアドバイスがありましたら。

吉野：私がポリアセチレンに始まる研究に取り組んだのは、33歳の時でした。歴代のノーベル賞受賞者が受賞理由となる研究を何歳から始めたかという統計があり、平均すると35歳前後

と聞いています。確かに、ある程度の知識が身に付き、ある程度の権限も与えられ、そこから新しいことに挑戦して失敗したとしてもまだリカバリーのチャンスがある頃。ですから、若い時は文句を言わずに実力を溜め、充電しておきなさい。そして35歳前後になったら、思い切って大きなことにチャレンジしなさいと言いたいですね。今は、若い研究者にとってハッピーな時代です。私の時代は「マーケットがあるのですか」と聞かれても答えられなかったわけですが、今はカーボンニュートラルがこれほど注目され、サステナブルな社会を築いていこうという目標が決まっています、マーケットはある。それを実現する技術ができていない状況なので、こんなに楽な開発はありません。あとは自分の力をどれだけ発揮できるか。そこで良い技術を生み出せたら、世界中から尊敬されますよ。

白川：その通りですね。本日は大変貴重なお話をありがとうございました。

吉野 彰（よしの あきら）

1948年、大阪府吹田市生まれ。京都大学工学部石油化学科卒、同大学院工学研究科修士課程修了。工学博士（2005年大阪大学）。1972年、旭化成工業（現 旭化成）株式会社入社。同社の電池材料事業開発室長、吉野研究室長、リチウムイオン電池材料評価研究センター理事長などを経て、2017年より名誉フェロー。名城大学大学院理工学研究科教授、京都大学および岡山大学の名誉博士。2019年ノーベル化学賞をはじめ、The Charles Draper Prize（全米技術アカデミー）、日本国際賞など多くの賞を受賞。紫綬褒章、文化勲章を受章。日本学士院会員。

白川 英樹（しらかわ ひでき）

1936年、東京生まれ。東京工業大学理工学部化学工学科卒。同大学院理工学研究科で博士号取得。同大資源化学研究所助手、米国ペンシルバニア大学博士研究員を経て、筑波大学教授（現名誉教授）。1984年、ポリアセチレンをフィルム状に合成する方法を開発。さらに金属に匹敵する導電性を高めることに成功し、「プラスチックは電気を通さない」という常識を破った。この「導電性高分子の発見と発展」により、2000年ノーベル化学賞、高分子化学功績賞などを受賞。文化勲章を受章。2001年、日本化学会特別顕彰。日本学士院会員。

構造生物学を激変させたクライオ電子顕微鏡法

東京医科歯科大学 藤吉 好則

構造生物学は、医学・薬学、基礎生物学などの分野で使われる構造情報を提供する。また、2000年から始まったEvidence-Based Drug Developmentにより構造創薬が注目されるようになった。しかし、膜タンパク質や複雑な分子の構造解析は、容易ではなかった。この状況が、クライオ電子顕微鏡を用いた単粒子解析法の発展によって激変した。

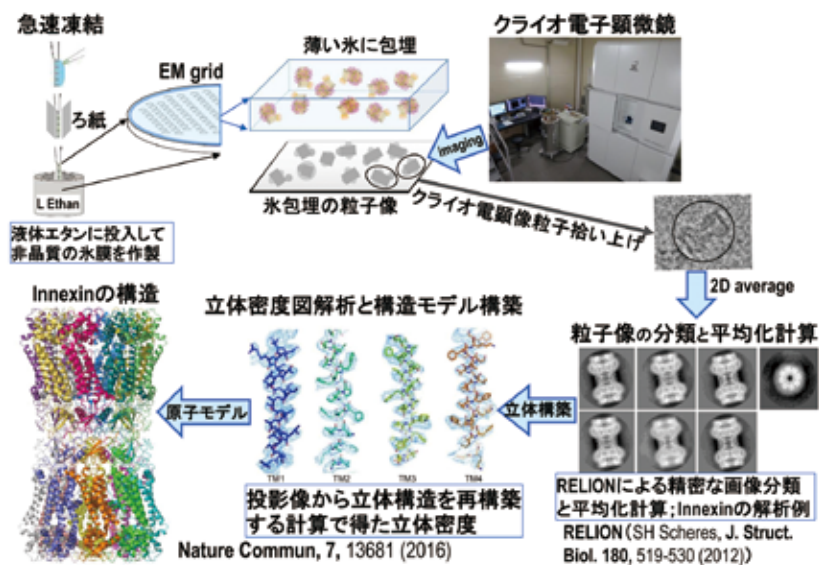
基本となる単粒子解析用のコンピュータプログラムは1981年に開発され改良されてきた。非晶質の氷に包埋する急速凍結法が1984年に開発された。絶対温度4Kに試料を冷却して高分解能像を撮影できるクライオ電子顕微鏡を1986年に開発した。近年、電子線を直接検出できる高性能のカメラシステムが開発され、2013年に辛みや温度感受性のチャンネルTRPV1の

構造が解析された。これを嚆矢として、単粒子解析法による構造が次々発表されるようになり、構造解析数が年間4,000を超えるようになった。すなわち、複雑な分子でも精製できれば、構造解析が可能になった。最近、人工知能を用いてタンパク質の構造を予測するプログラム(AlphaFold)が開発された。これを用いて作製した構造モデルを、クライオ電子顕微鏡で解析した密度図に当てはめ、正しくない構造部分を実際の密度図に合うように改変することで、極めて短期間に立体構造が解析できるようになった。

単粒子解析法は図に示すような流れで解析する。1) 標的分子を精製し、膜タンパク質の界面活性剤を何らかの方法で除く。2) 試料を最適な厚さの氷に包埋してクライオ電子顕微鏡像を

撮影する。通常1日で数千枚の像を自動撮影できる。3) 解析プログラムを用いることで、粒子像を自動で拾い上げるが、1日の撮影画像で数十万粒子~百万粒子程度を拾い上げることができる。4) 拾い上げた像を、何種類かの異なる構造が存在すると仮定して、解析プログラムRELIONなどによりクラス分けを行い、同一構造に分類した2次元平均像を計算する。5) それらから立体再構成する解析法で、3次元の密度図が計算できる。6) その密度図とアミノ酸配列の情報を用いて、原子モデルを作製する。

図の例で示すギャップ結合チャンネルは、発生制御や、炎症、細胞死、免疫応答、筋収縮などに関わっている細胞間をつなぐチャンネルで、脊椎動物にはコネキシンが、無脊椎生物にはイネキシンが発現して、ギャップ結合を形成している。このイネキシンは、長年努力しても結晶学では解析できなかったが、単粒子解析法によって、高い分解能での構造をわずか2か月で解析できた。ギャップ結合は大きな可溶性分子を透過できるが、複雑なゲーティング機構で制御されるとともに、速いゲーティング制御も行っている。単粒子解析法を用いることで、構造解析できなかった標的分子の構造情報が短期間で得られるようになったこの例のように、様々なタンパク質やその複合体の構造解析が飛躍的に進むようになっている。



クライオ電顕を用いたイネキシンの単粒子解析

No. 1



Review

Tomoyuki MIYAZAKI, Hiroki ABE, Hiroyuki UCHIDA and Takuya TAKAHASHI: Translational medicine of the glutamate AMPA receptor

DOI: [10.2183/pjab.97.001](https://doi.org/10.2183/pjab.97.001) **Cover Illustration**

グルタミン酸AMPA受容体は脳内情報伝達の中核分子である。AMPA受容体の生理作用は実験動物や*in vitro*の実験系では詳しく調べられているが、ヒト生物学・臨床への応用は進んでいない。本reviewではAMPA受容体のtranslational medicineの現状について概説した。

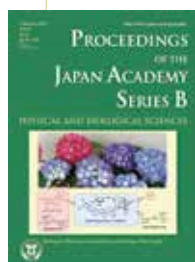
Original Article

Hirota SUGAWARA: On the effectiveness of the search and find method to suppress spread of SARS-CoV-2

DOI: [10.2183/pjab.97.002](https://doi.org/10.2183/pjab.97.002)

感染者のクラスターをPCRテストなどにより発見追跡する、あるいは無症状感染者、軽症者を大規模PCRテストにより発見、隔離するなどの方法がSARS-CoV-2の拡散を防ぐのに有効であることをデータで示す。データ解析はいわゆる標準模型に基づいて行う。ここでは世界各地の幾つかの都市を選んでデータ解析を行って結論を導く。一般論としてこの方法とSocial distancing法の併用が有効であることが導かれる。

No. 2



Reviews

Kumi YOSHIDA, Kin-ichi OYAMA and Tadao KONDO: Insight into chemical mechanisms of sepal color development and variation in hydrangea

DOI: [10.2183/pjab.97.003](https://doi.org/10.2183/pjab.97.003) **Cover Illustration**

アジサイは日本原産で原種の花色（実際にはガク片）は青色である。同一アントシアニンが青、赤、紫を発色することを最大の特徴とする。この課題にどう取り組み、花色変異の仕組みや色素の化学構造を明らかにしたかを解説する。

Ken-ichi UCHIDA: Transport phenomena in spin caloritronics

DOI: [10.2183/pjab.97.004](https://doi.org/10.2183/pjab.97.004)

スピントロニクスは、スピントロニクスと熱輸送・熱電物性が融合することによって近年急速に発展してきた研究分野である。本稿では、スピントロニクス分野で研究されている各種輸送現象の対称性と振る舞いをまとめた。

Original Article

Makoto ASAHINA, Reiko FUJINAWA, Haruhiko FUJIIHARA, Yuki MASAHARA-NEGISHI, Tomohiro ANDOU, Ryuichi TOZAWA and Tadashi SUZUKI: JF1/B6F1 *Ngly1*^{-/-} mouse as an isogenic animal model of NGLY1 deficiency

DOI: [10.2183/pjab.97.005](https://doi.org/10.2183/pjab.97.005)

NGLY1欠損症はNGLY1遺伝子変異に起因する希少疾患である。今回、C57BL/6系統の*Ngly1*ヘテロマウスに日本産のJF-1系統の*Ngly1*ヘテロを掛け合わせることで、胚性致死を回避する*Ngly1*-KOマウスを作製した。このマウスは遺伝背景が均一な病態モデル動物として有用である。

No. 3



Reviews

Akihito FUJISAWA: Review of plasma turbulence experiments

DOI: [10.2183/pjab.97.006](https://doi.org/10.2183/pjab.97.006)

プラズマ核融合の分野では乱流プラズマの研究が国際的に進められている。本総説では、乱流プラズマ中の自発電場と輸送の分岐現象、および微視的揺らぎが作り出す帯状電磁場の発見など世界に先駆けた日本の実験研究について紹介する。

Kazuhiro IWAI: LUBAC-mediated linear ubiquitination: a crucial regulator of immune signaling

DOI: [10.2183/pjab.97.007](https://doi.org/10.2183/pjab.97.007) **Cover Illustration**

ユビキチンは多様なユビキチン鎖を形成することで分解以外にも多彩な様式でタンパク質の機能を制御する。本総説では著者が発見したユニークな直鎖状ユビキチン鎖の生理機能、疾患との関連について概説した。

Hideki INNAN and Takahiro SAKAMOTO: Multi-dimensional diffusion process of allele frequencies in population genetics

DOI: [10.2183/pjab.97.008](https://doi.org/10.2183/pjab.97.008)

集団遺伝学において、対立遺伝子の頻度の挙動を記述するために拡散方程式が用いられる。この拡散方程式は、複数遺伝子座の挙動を同時に記述する際、その解は難解を極める。本稿では、そのよ

うな複数遺伝子座拡散方程式の扱いを実例に即して紹介する。

No. 4



Reviews

Mizuki YAMAMOTO, Jin GOHDA, Taishin AKIYAMA and Jun-ichiro INOUE: TNF receptor-associated factor 6 (TRAF6) plays crucial roles in multiple biological systems through polyubiquitination-mediated NF- κ B activation

DOI: [10.2183/pjab.97.009](https://doi.org/10.2183/pjab.97.009)

転写因子NF- κ Bは、様々な細胞種の増殖、分化、アポトーシスを制御する。本総説では、NF- κ B活性制御を担うE3ユビキチンリガーゼTRAF6の作用機序とその注目すべき生理的および病理的役割について概説する。

Teruo MIYAZAWA: Lipid hydroperoxides in nutrition, health, and diseases

DOI: [10.2183/pjab.97.010](https://doi.org/10.2183/pjab.97.010) **Cover Illustration**

長寿社会を支える「食」の働きを知るため、認知症・動脈硬化症・糖尿病・癌における加齢性酸素障害としての生体膜脂質の酸化反応機構を明らかにし、「食」として摂取した栄養成分によるこれらの防御効果を解明した。

Kiwamu TAKEMOTO: Optical manipulation of molecular function by chromophore-assisted light inactivation

DOI: [10.2183/pjab.97.011](https://doi.org/10.2183/pjab.97.011)

CALI法は光によるタンパク質不活化技術であり、任意の場所・タイミングで特異的な分子操作が可能である。本総説ではCALI法の原理やこれまでの応用例、さらに今後の発展の道筋について概説する。

No. 5



Reviews

Tomio KOBAYASHI: Experimental verification of the standard model of particle physics

DOI: [10.2183/pjab.97.013](https://doi.org/10.2183/pjab.97.013)

1970年代に理論的に確立された素粒子の標準モデルが、その後40年にわたって実験的に検証されていった過程について、最高エネルギーコライダー実験を中心に解説する。ハイライトは、グルーオンの発見、LEPによる精密測定、ヒッグス粒子の発見などである。

Takayoshi KOBAYASHI: Advanced time-resolved absorption spectroscopy with an ultrashort visible/near IR laser and a multi-channel lock-in detector

DOI: [10.2183/pjab.97.014](https://doi.org/10.2183/pjab.97.014) **Cover Illustration**

Tiサファイアレーザーを励起光として非共直線配置の光パラメトリック増幅器から可視(500-780nm, <5fs)パルス光及び深紫外(260-280nm, <10fs)パルス光を発生した。開発した128チャンネルロックイン検出器と組み合わせて、超高速分光装置を開発し多くの凝縮系物質の超高速過程を明らかにした。

Yaeta ENDO: Development of a cell-free protein synthesis system for practical use

DOI: [10.2183/pjab.97.015](https://doi.org/10.2183/pjab.97.015)

リボソームRNAの機能・構造の解明など植物や微生物由来の細胞毒素の分子機作解明から得た知見を基に、高効率で実用的な無細胞タンパク質合成法を確立した。本稿では、研究・開発過程を概説し、技術の活用状況についても紹介した。

No. 6



Reviews

Akihiko YOSHIMURA, Daisuke AKI and Minako ITO: SOCS, SPRED, and NR4a: Negative regulators of cytokine signaling and transcription in immune tolerance

DOI: [10.2183/pjab.97.016](https://doi.org/10.2183/pjab.97.016)

サイトカインは重要な細胞間コミュニケーションツールであるが、生体の恒常性を保つためにそのシグナル伝達は厳密に制御されている。本総説ではサイトカインシグナルの主要な制御因子であるSOCSファミリーとSPREDファミリーについて、その制御メカニズムと生理的意義、関連する疾患、さらにこれらを統御する核内受容体NR4aファミリーについて解説する。

Yasuki NAGAI: Production scheme for diagnostic-therapeutic radioisotopes by accelerator neutrons

DOI: [10.2183/pjab.97.017](https://doi.org/10.2183/pjab.97.017) **Cover Illustration**

核医学診断・治療に使用される放射性物質の安定確保と新規開発は喫緊の課題である。本稿では、これら放射性物質の国産化による放射性医薬品創製を目指し遂行中の加速器中性子を用いた製造法及び分離精製法について解説する。

Yoichiro KAMATANI and Yusuke NAKAMURA: Genetic variations in medical research in the past, at present and in the future

DOI: [10.2183/pjab.97.018](https://doi.org/10.2183/pjab.97.018)

No. 7



遺伝的多型は、過去20～30年の医学・医療の進歩に大きく貢献してきた。最近のDNAシーケンシング技術の進歩により、B細胞およびT細胞の単一細胞分析または詳細なレパートリー解析を行うことが可能になった。本総説では、過去、現在、そして未来の医療分野における遺伝的変異の役割を紹介する。

Reviews

Masanori IYE: Subaru Telescope —History, active/adaptive optics, instruments, and scientific achievements—

DOI: [10.2183/pjab.97.019](https://doi.org/10.2183/pjab.97.019) **Cover Illustration**

すばる望遠鏡建設計画の経緯、主鏡の能動制御、大気揺らぎを打ち消す補償光学技術、観測装置群の概説に加え、宇宙の夜明けの解明、重力レンズ効果による暗黒物質分布の観測、元素組成進化、太陽系以外の惑星と原始惑星系円盤の観測、などの研究成果を解説する。

Teruo SANO: Progress in 50 years of viroid research—Molecular structure, pathogenicity, and host adaptation

DOI: [10.2183/pjab.97.020](https://doi.org/10.2183/pjab.97.020)

ウィロイドは今から50年前に、ジャガイモの病気から発見された新しいクラスの病原因子で、タンパク質情報をコードしない小さなRNAである。本総説では発見から現在に至るウィロイド研究の進歩を、病原性発現機構と分子進化に焦点を当てて概説した。

Tsuneo OKADA: Development and present status of seismic evaluation and seismic retrofit of existing reinforced concrete buildings in Japan

DOI: [10.2183/pjab.97.021](https://doi.org/10.2183/pjab.97.021)

耐震性の低い既存建物を事前に見つけ出し、補強あるいは建替えを行うことは地震対策の重点項目の一つである。そのための耐震診断と耐震改修に関する研究と普及の進展と現状を、鉄筋コンクリート造建物を例にとって概説し、耐震改修の事例を示した。

Reviews

Hiroshi OKAMOTO and Shin TAKASAWA: Okamoto model for necrosis and its expansions, CD38-cyclic ADP-ribose signal system for intracellular Ca^{2+} mobilization and Reg (*Regenerating gene* protein)-Reg receptor system for cell regeneration

DOI: [10.2183/pjab.97.022](https://doi.org/10.2183/pjab.97.022)

インスリン産生膵β細胞の死のメカニズム研究の基となった「岡本モデル」が如何にして生まれ、また膵β細胞だけでなく種々の細胞の死さらには細胞の機能発現・再生増殖の新しい理解へと展開されてきたかを解説する。

Chie FURIHATA: Human gastric cancer risk screening: From rat pepsinogen studies to the ABC method

DOI: [10.2183/pjab.97.023](https://doi.org/10.2183/pjab.97.023) **Cover Illustration**

MNNG投与ラット実験胃がんのペプシノーゲン (PGI) の減少と、ヒト胃がんの血清PGIの減少との発見から、血清PGIおよびPGIIとHp IgG抗体レベルとを組み合わせた胃がんリスク・スクリーニング法である「ABC検診」確立を概説した。

Kousaku MURATA: Polyphosphate-dependent nicotinamide adenine dinucleotide (NAD) kinase: A novel missing link in human mitochondria

DOI: [10.2183/pjab.97.024](https://doi.org/10.2183/pjab.97.024)

生物界にはATP依存とポリリン酸依存の二種類のNADキナーゼが存在することを示し、両者の構造機能相関を明らかにした。特に、ヒトのミトコンドリアにはグラム陽性細菌型のポリリン酸依存NADキナーゼが存在することを証明し、その生物学的意義と機能を論じた。

No. 8



No. 9



Reviews

Kazuya ANDO: Generation and manipulation of current-induced spin-orbit torques

DOI: [10.2183/pjab.97.025](https://doi.org/10.2183/pjab.97.025)

スピン流と磁化の相互作用により発現するスピン軌道トルクは、スピン軌道相互作用を中心としたスピントロニクス of 著しい発展へと繋がった。本稿では、スピン軌道トルクの概要と測定手法を解説し、さらにスピン軌道トルクの生成と操作に関する最近の研究成果を紹介する。

Tsuneo IMAMOTO: Synthesis and applications of high-performance P-chiral phosphine ligands

DOI: [10.2183/pjab.97.026](https://doi.org/10.2183/pjab.97.026) **Cover Illustration**

高活性かつ高立体選択性を発現する不斉配位子の開発は、触媒的不斉合成化学における重要な研究課題である。本論文では、新規P-キラルホスフィン配位子の設計、合成および遷移金属錯体触媒不斉合成への利用について概説する。

Original Article

Hirohisa SUGAWARA: Effect of vaccination against COVID-19 spreading

DOI: 10.2183/pjab.97.027

ワクチン接種がCOVID-19感染症の拡散防止にどのように寄与しているかに関してデータ分析を行うことで検討する。また世界のワクチン接種状況についてもデータを解析する。いわゆる感染の標準モデルを用いて特に東京のデータを解析する。また新しい変種に関して遺伝子変異と感染能力との関連について検討する。

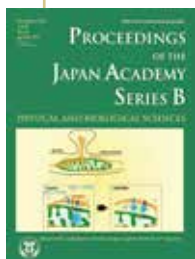
Review

Masafumi TSUBOI and Yusuke HIRABAYASHI: New insights into the regulation of synaptic transmission and plasticity by the endoplasmic reticulum and its membrane contacts

https://doi.org/10.2183/pjab.97.028

Cover Illustration

小胞体はニューロン全体に拡がり動的かつ複雑なネットワークを形成する。本稿では小胞体によるカルシウムイオンの局所制御が神経伝達の制御に果たす役割や、近年注目が集まっている小胞体-ミトコンドリア間接触の機能について最近の知見をまとめた。



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、地球惑星科学、生物学、工学、農学、医学等、自然科学全分野が対象です（Ser. A に掲載する数学を除く）。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（https://www.jstage.jst.go.jp/browse/pjab）においてオープンアクセス（CC-BY-NC）で全文が無料公開されます。もちろん、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3.493です。

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名による厳正な査読を行っており、アクセプトされた論文は、英文校閲の上、1カ月程度で出版されます。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。また、別刷を無料で50部進呈します。詳しい投稿規程は、本院のウェブサイト https://www.japan-acad.go.jp/pjab をご覧いただくか事務室まで御連絡ください。

Editorial Board

Editor-in-Chief

鈴木邦彦（神経化学・神経内科）

Executive Editors

深尾良夫（地球物理学）

長田重一（分子生物学・生化学）

Editorial Board Members

審良静男（免疫学）

黒岩常祥（生物科学）

小林 誠（物理学）

関谷剛男（薬学・核酸有機化学）

巽 和行（無機化学）

田中耕一（質量分析）

安元 健（水産化学）

山崎敏光（物理学）



PJA Newsletter
[PJA ニュースレター]
No.14

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

発行日/令和4年3月31日

