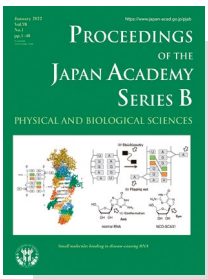
ISSN 2758-7274

PJA News Letter No.15

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　眞鍋淑郎氏	1
はやぶさ２・リュウグウ座談会	
中村栄三・津田雄一・家　正則・深尾良夫	8
Vol. 98 掲載論文紹介	13
Proceedings of the Japan Academy, Ser. B について	16
Editorial Board	16

挨拶

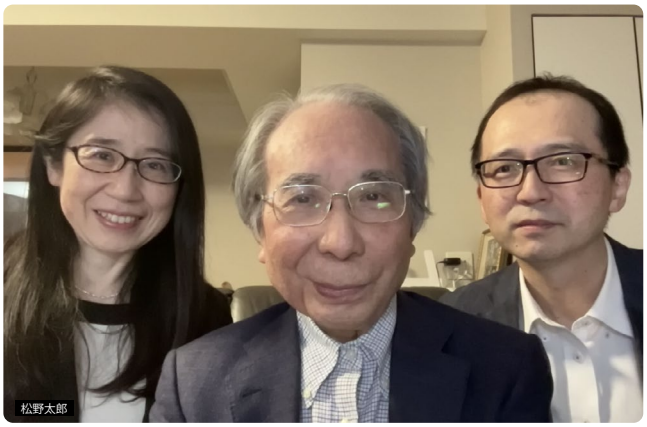
Editor-in-Chief
鈴木 邦彦

学士院欧文紀要 B（PJA-B）のNews Letter 15号をお届けいたします。本号には色々な点で、対照的とも見える二つのプロジェクトを取り上げました。一つは2021年にノーベル物理学賞をお受けになった米国在住の眞鍋淑郎先生の御研究、もう一つは日本挙げての宇宙探求のプロジェクトで、出版された時には80名を超す共著者に依った「はやぶさ２」の成果です。各々、ご関係の方々による座談会形式でご覧に入れておりますので、表面的・形式的な違いにも拘らず、どちらもサイエンスの成果として重要なものであることをご理解・お楽しみ戴ければと思います。因みにPJA-B は来年、創刊volume 100に到達いたしますので、特別の企画を準備しております。ご期待ください。

インタビュー

眞鍋淑郎 × (聞き手) 松野太郎 阿部彩子

本院の客員である眞鍋淑郎博士が2021年秋にノーベル物理学賞を受賞されました。ノーベル財団が発表した授賞の理由は次の通りです。「地球の気候を物理的にモデル化し、その変動を定量化して、地球温暖化の予測を確かなものにした。」それでは眞鍋博士は当初から地球が温暖化することを予見し、未来への懸念を動機として気候のモデル計算を進めたのでしょうか？この問いとそれへの答えが本インタビューの中核です。今回の聞き手は眞鍋博士の後輩であり、大学院時代を同じ研究室で過ごした松野太郎会員（東京大学名誉教授）、そして眞鍋博士の精神を継承しつつ気候研究に携わる阿部彩子氏（東京大学教授）です。インタビューはZoomを使ったオンライン形式で三度にわたり実施され、森岡優志氏（海洋研究開発機構副主任研究員）および伊藤孝士氏（国立天文台講師。インタビューの構成と本稿の執筆も）の協力を得ました。



Zoom画面のスクリーンショットを加工した集合写真。
（左：米国側。左から）森岡優志、眞鍋淑郎、眞鍋信子（夫人）
（右：日本側。左から）阿部彩子、松野太郎、伊藤孝士

気候モデル作り

松野：眞鍋さんが行われた仕事を端的に言えば、大気・海洋の動的状態を表す大循環モデル（GCM; General Circulation Model）を作り上げ、それを用いて気候に関する様々な数値実験を行ったことです。1956年にはNorman Phillipsが数値天気予報の基礎として定式化された方程式を長期間（30日）積分し、平均することによって、大気大循環の平均的な状態が再現されることを示しました。眞鍋さんは1958年に渡米され、更に本格的なGCMを作るところから研究を開始されました。眞鍋さんが米国海洋大気庁（NOAA）の地球流体力学研究所（GFDL; Geophysical Fluid Dynamics Laboratory）において実施し、その成果を1964年に出版された放射対流平衡の研究[1]はノーベル物理学賞の重要な授賞根拠のひとつです。あの頃の研究はどのような形で進められたのでしょうか？

眞鍋：あの頃はGFDLで私の上司だったJoseph Smagorinskyが乾いた大気の大循環モデルを作り、私が放射や湿潤過程や陸面など他の部分のモデルを作って、それを組み合わせました。Phillipsとは異なり、Smagorinskyは流体の運動方程式の本来の形を保つプリミティブ方程式[2]をモデルに採用したのです。そしてPhillipsのモデルで発生していた計算不安定性を回避するために非線形粘性[3]を導入しました。

松野：非線形粘性ですね。日本ではSmagorinsky粘性とも呼ばれていました。今言われた不安定性が原因し、Phillipsの時代には30日間以上の数値実験が不可能でした。眞鍋さんらは非線型粘性を導入し、より長期に渡る実験を可能にしたのですね。

眞鍋：はい、そうです。

松野：そもそもSmagorinskyは長期の天気予報に必要なGCMの構築を目的として眞鍋さんを日本から招聘したと伺っています。眞鍋さんはまず放射平衡過程のモデル化に集中され、精密なモデルを作られた。鉛直方向を9層に分割しましたよね。それに対して大気力学の研究者達からは「Phillipsの大循環モデルを拡張するためだけに、なぜそこまで放射平衡過程に力を入れるのか？」という批判がありました。あの計算には9層への分割がどうしても必要だったのでしょうか？

眞鍋：はい、9層が必要でした。確かに色々な批判がありましたが僕はそれを気にせず、時には「おまけ」を付けて10層以上も使いました。

阿部：鉛直方向の放射伝達を計算する際には、大気成分のうち気温に強く影響する水蒸気と二酸化炭素とオゾンを組み込んだのですよね？

眞鍋：はい。しかしそのモデルを使って放射平衡を計算すると、モデル内での地上気温が実際の観測値よりもだいぶ高くなります。現実の大気ならここで対流が生じ、熱が上方へ運ばれるべきでしょう。僕はこの効果を取り入れるため、対流調節[4]という近似手法を組み込みました。

松野：対流調節も眞鍋さんご自身が考えられた手法なのですか？天文学における恒星の内部構造論にも同様な扱いがありますね。

眞鍋：僕が考案したものです。対流調節は対流圏の上層まで到達する深い湿潤対流（ホットタワー）をモデル化するために開発しました。ホットタワー内には飽和した空気を含む上昇気流がありますが、同様に飽和した下降気流がそれを相殺します。だから、ホットタワー内部の温度分布は湿潤断熱減率を維持する。松野さんの言われる通り、恒星の内部構造論にも似たような扱いがあるかもしれません。

阿部：なるほど、よく分かりました。

松野：それで僕の観察ですが、放射平衡の数値計算を実施された頃から、眞鍋さんは気象というより気候の研究へ積極的に足を踏み入れた。例えば数値モデルに地球上の水循環を取り込み、今や有名なバケツモデル[5]を考案されたように、です。そのようにして気象の分野に留まらず、より大きな気候システムを再現する数値モデルを作られたわけですが、気候の研究には以前から関心をお持ちだったのですか？

眞鍋：はい、興味はありました。結果的に、工夫をこらしたモデルは上手く動きました。欧州の中期天気予報センター（ECMWF）の人からは未だに「我々の天気予報の期間を伸ばせたのはあなた方の数値モデルのおかげだ」と感謝されますよ。

松野：確かにECMWFが取り組む中長期の予報では水文過程が重要になるから、バケツモデルの出番になりますよね。水文過程を数値モデルに取り組んで気候の研究をするという計画は日本にいる頃からお持ちでしたか？

眞鍋：持ってましたね。

松野：ああ、それで得心したことがひとつある。僕が眞鍋さんと同じ研究室にいた頃、東大理学部の気象学教室には地表のエネルギーバランスや水循環に関する色刷りのきれいな図がソ連のどこかから定期的に届いていて、眞鍋

---

1 Manabe & Strickler (1964), Journal of Atmospheric Sciences, 4, 361-385.

2 **プリミティブ方程式：**鉛直方向は静水圧平衡を仮定し、水平方向は通常の運動方程式に従って運動が生じるとする方程式系。

3 **非線形粘性：**大気の大循環を数値的に扱う際に格子サイズより小さい流れの効果を拡散で表現する手法があり、その大きさを渦粘性係数で表す。渦粘性係数が速度への依存性を持つ場合に方程式は非線形となり、そこに現れる粘性は非線形粘性と呼ばれる。

4 **対流調節：**モデル内で対流が生じた際には気温の高度分布を湿潤断熱減率に瞬間的に近付け、それにより飽和した水蒸気を降水とみなす手法。

5 **バケツモデル：**地表には森林や砂漠があるためその水収支は複雑だが、それをバケツに溜まった水の深さの違いとみなす近似モデル。このモデルでは陸にある各格子に植生を反映した「バケツ」が置かれ、各々における水収支や温度から土壌水分量や流出量などが算出される。

さんはそれをいつも眺めておられた。当時のソ連はシベリアに気象観測所を多く持ち、熱収支や水収支に関する良い観測をしていたようです。眞鍋さんは長い時間を掛けてそういう図表をじっくりと読まれていた。

眞鍋：はい。ソ連から届いた資料を読んで学んだもっとも有用な知識は土壌水分の扱いです。放射と対流のモデル化が終われば、次の問題は陸地をどうモデルに入れるかですから。それで僕が作ったのがバケツモデルなのですが、そこではそういう資料に載っていた科学者Mikhail Ivanovich Budykoの研究にヒントを得たのです。

松野：おお、Budykoだったのですか？

眞鍋：その通りです。米国で気候モデルを作るにあたり、僕は真っ先に水文過程に手を付けました。ワシントンの米国国会図書館に通い詰めて勉強した時期もあります。しかし図書館にある専門文献の説明はどれもややこしく、僕のモデルには使えそうにない。ならばいっそのこと自分で一から考えようと決意し、Budykoの研究にヒントを得て作ったのがバケツモデルです。自分で言うのも何ですが、バケツモデルってのは実に良いアイディアなんですよ。僕は色々な数値モデルを作って来ましたが、これは上手くゆきました。しかし、同じように僕が考案したモデルのうちフラックス調整[6]などは大変な論議を呼んだ。皆さん最初から疑いの目で見ていて。今になっても未だ僕のやった研究は全部駄目だと言う人もいます。「フラックス調整なんてものを使った眞鍋のやったことは全部がおかしい」と言う人が、たくさんね。日本にも大勢いらっしゃいます。

伊藤：新しいモデルを提唱する時なんて、そんなものですよね。賛同よりも多くの批判を受ける。批判されるのはまだましで、大概は無視される。自分に理解できないものを前にした時、その存在を認められず感情的な非難に走る人はどこにでもいるでしょう。

阿部：うーん、そうかもしれない。フラックス調整の原理や実装法は先生が最近出版された書籍[7]に詳しく書かれていますね（pp. 192-197）。

眞鍋：そう。読んでみてください。

阿部：ところで眞鍋先生はBudykoと直接の交流もお持ちでしたか？眞鍋先生とBudyko、そして松野先生は環境問題解決への貢献に対してブループラネット賞[8]を受賞されています。

眞鍋：はい。その頃はSmagorinskyが世界気候研究計画（WCRP）のリーダーで、ソ連とも正式な共同研究を行いました。で、あちら側のリーダーがBudykoだった。

伊藤：え、それって1980年代ですよね？冷戦の真っ只中、デタントも崩壊して。その時期にソ連と共同研究するなんて、米国は共産圏の研究水準によほど関心があったのでしょうか？

眞鍋：と言うか1970年頃から米ソの科学者は旧ソ連のあちこち、たとえばレニングラードやタシケントで会議を持ち、地球の気候について盛んに討論していたのです。国連の世界気象機関（WMO）も後押ししていた。伊藤さんは米ソが鍔迫り合いする会議を想像したのだろうけど、そういう感じではありません。どれも友好的な会合で、冷戦という雰囲気はなかった。それに僕はソ連に行くと友達に会えるから、とても楽しいんですよ。すごいvodka！そしてまあ、キャビアのおいしいこと！（全員が笑）

阿部：先生もソ連に行ったんですか？

眞鍋：ええ。もう、素晴らしかったんです。ある滞在の最後にはBudykoが僕達を大きな軍用ヘリコプターに乗せて、タジキスタンやその南のアフガニスタン国境、それを超えたパキスタン近くの峰を上がってね。そのどこかの頂上、標高5000mくらいの所に着陸して、そこでまたvodkaを飲んで。もう、実に楽しかったです。

松野：それはすごい。アフガニスタンへの侵攻もあった頃ですよね。もしかすると当時のソ連も欧州センターのように大循環モデルを自国に持ち込みたかったのでしょうか？そして自国でもモデルを開発したいと。

眞鍋：「もしかすると」ではなく、彼らは驚くほど積極的でしたよ。だから軍用ヘリまで使って僕達をヒマラヤの天辺まで連れて行って。

伊藤：うーん。そんな時期に国境の山岳地帯へ軍が外国人研究者を連れてゆくって、とてつもなく異例ですよね。何をしに行ったのですか？観光じゃありませんよね？

眞鍋：それはもう、その辺りの山岳氷河がどんどん後退している様子をBudykoが我々に見せるためですよ。

阿部：ああ、なるほど。その頃にはソ連の人々も気候の変化を感じていたんですね。色々な意味でびっくりですが、彼らの本気度が感じられます。

GFDLの研究環境

松野：一般論に戻りますが、GCMのように大規模な数値モデルを作るのはとても大変です。当時GFDLにあった眞鍋さんのグループではRobert StricklerやRichard Wetheraldがプログラミングを担当していたと聞いています。眞鍋さん自身はプログラミングに関与せず、数値実験結果の解析と論文執筆に集中できる環境にいたと理解して良いでしょうか？

眞鍋：ま、結果としてそうなりました。

---

6 **フラックス調整：**大気と海洋を結合した大循環モデルを使う際に計算結果と観測値を整合させる手法。大気モデル・海洋モデルが各々算出する海表面での熱と水のフラックスの差異の分布を先に得ておき、それを用いて数値実験の結果を調整し、より現実的な海氷分布などを得る。

7 眞鍋淑郎・アンソニー J. ブロッコリー（2022）地球温暖化はなぜ起こるのか、増田耕一・阿部彩子 監訳、ブルーバックス、講談社。

8 **ブループラネット賞：**地球環境が抱える問題の解決に大きく貢献した人物および団体を顕彰するために旭硝子財団が創設した賞。眞鍋氏はその第一回受賞者であり（1992年）、Budyko（1998年）と松野氏（2013年）も受賞している。

阿部：それは私も伺いたかったことです。1960-1970年代にかけて眞鍋先生は「世界一たくさん計算機を使う男」と呼ばれていたそうですね。あの頃のGFDLでは研究者とプログラマとの間にどういう協力体制がありましたか？

眞鍋：実は、放射対流平衡の計算までは僕自身がプログラムを書いていたんですよ。しかしバグがなかなか取れず、ずいぶん苦労しました。いつもそれが気にかかって朝の2時や3時に目を覚まし、そのままオフィスへ行ってバグ探しをする。大変でしたね。でも、その苦労は後で役に立ちました。最終的には技術スタッフに僕の考えを伝えてプログラムを作ってもらい、数値実験の実施も任せたのですが、そうなってからも僕は技術スタッフ達が書くプログラムのミスを見付けることができました。もし僕が殿様みたいに全くプログラミングをせずに最初からすべて他人に任せていたら、そういうことは不可能だったでしょう。

松野：そうですか。しかし当時のGFDLでも研究者が自分でプログラムを作り上げる例がありましたよね？例えば眞鍋さんと同様に日本からGFDLへ渡った都田菊郎さん[9]とか。

眞鍋：はい。でも僕自身に関しては、プログラミングを人に任せる方が効率的でした。人には向き不向きがありますから、それぞれが自分の得意なことに専念するのが大事だと思います。

伊藤：研究の方向性に関する見通しが良かったから、優れた人材が眞鍋さんの下へ集まったのでしょう。

眞鍋：いや、それよりも僕のところで働いていた人々がたまたま々そういう能力を持っていた面が大きいです。

松野：さて気候に関する精巧な数値モデルが出来上がり、それを操る人材が揃っていたとしても、モデルを動かすためには計算機資源が必要です。例えば先ほどお話しされた放射平衡の計算でも、水蒸気や二酸化炭素の光学特性をきちんと扱って放射伝達方程式を積分し、気温の高度分布の時間変化を追うには大きな資源を要したはずです。GFDLにはその実現に十分な量の計算機資源があったのですよね？

眞鍋：はい。計算機資源はふんだんに使えました。

松野：そうですか。この研究分野において当時の日本と米国との最大の違いはやはり電子計算機の存在でしょう。眞鍋さんが渡米された1958年と言えばGFDLでも大型計算機が使えるようになり、IBM 701、704、7090あたりが使われていた頃ですね。それでも計算機資源は貴重だったわけですが、眞鍋さんに対して優先的な資源の割り当てがあったりしたのでしょうか？

眞鍋：しばしばそう誤解されるのですが、それはありません。私達の研究グループには計算機のTime Sharing System（TSS）に詳しい人が大勢おりました。TSSを駆使することで、計算機資源を最大限有効に使えたのです。

松野：ここで言うTSSとは、いわば隙間資源の有効活用という意味ですか？

眞鍋：その通りです。TSSを上手く使うことで私達のプログラムは他のグループの計算の隙間にスルスルっと入り込み、最大限まで計算機資源を使い切ったのです。それにより私達は大きな数値実験を実施できました。

松野：あ、そうだったのですね。私はSmagorinskyが眞鍋さんへ優先的に計算機資源を配分していたものと思っていました。眞鍋さんの研究プロジェクトはGFDLの看板でしたから。

眞鍋：いえ、そういう贔屓（ひいき）は全くされていません。僕達の計算機の使い方が巧みだったからです。

阿部：GFDLで数値実験を行っていた研究者はみんなTSSを利用して効率良く資源を使っていたのですか？

眞鍋：そうでもありません。例えば都田さんの計算は効率が悪く、計算機資源を無駄遣いしていました（笑）。それでもSmagorinskyは懐が深かった。「都田は計算機の無駄遣いをしているが、素晴らしい研究を行っている。計算機を少々無駄遣いするくらいは構わない。」と言って、都田さんにもどんどん計算機資源を与えていました。実際のところ欧州（ECMWF）の予報が出発できたのは都田さんがあそこへ行き、非効率なものではあったが彼のプログラムを移植したからです。

松野：それは良い話ですね。結果を見れば、ECMWFは都田さんが関与した時代から一貫して世界の中長期天気予報分野で先頭を走り続けている。そして今のお話を伺えば、Smagorinskyが長い期間にわたりGFDLをリードできた理由も分かる気がします。

眞鍋：はい。彼はまさに理想的なリーダーでした。

松野：GFDLにいらした頃、眞鍋さんはSmagorinsky以外にも多くの研究者と交流されたと思います。GFDLに敷地を提供するPrinceton大学には当時、天文学者のMartin Schwarzschildなどもいましたよね。彼とも交流はあったのでしょうか？

眞鍋：少しだけね。GFDLは1968年頃にWashington DCからPrincetonへ移転したのですが、その時にはGFDL受け入れの是非を議論する委員会をPrinceton大学が作ったのです。Martin Schwarzschildはその委員の一人でした。地質学者のHarry Hessなどもね。その委員会がGFDLをPrincetonに呼んでも良いという結論にしてくれたんです。

松野：なるほど。Washington DCからPrincetonへの移転は、GFDLにとって結果的に良かったのでしょうか？

眞鍋：はい、有り難かったです。やっぱりWashington DCにいるとね、年がら年中「その研究は実用になるのか?」と言われ続ける。でもそこから離れてPrincetonに来たら、俗離れした研究をやっても誰も何も言わなくなった。

阿部：ふふ、「俗離れ」（笑）。

松野：GFDL近隣の空気がそうですよね。あのForrestal Campusという所

9　都田菊郎（1927–2019）：眞鍋氏・松野氏と同門であり、眞鍋氏よりやや遅れて渡米して、GFDLにおける眞鍋氏の同僚となった。

は何やら農場みたいで、その辺を牛が歩いていたりする。Washington DCとは確かに違います。

眞鍋：Smagorinskyだけではなく、米国気象局の長官だったBob Whiteや研究部長のHarry Wexllerに代表される上層部が僕達の研究の意義をきちんと理解してくれたことが有り難かったですね。さっき述べたPrinceton大学の委員会だけではなく、気象局も大学側と連携する形でGFDLの移転を認める英断を下した。そしてGFDLがPrincetonに移ってからは、我々の研究のために巨額な予算を確保してくれた。その金額たるや、大変なものですよ。だからGFDLには最先端の大型計算機が次から次へと入って来た。すごかったですねえ。

松野：Bob Whiteは当時のケネディ大統領とも仲が良いという話でした。本物の権力者達がGFDLの将来を考えていたのですね。

眞鍋：そう、驚くべきことで。そうこうするうちに米国は宇宙飛行士を月へ送り、着陸して石を採取して見事に帰還させるなど、すごく勢いのある時代だった。そういう時代に研究に没頭できた我々は幸運でした。ああいう雰囲気があったからこそ最先端の気候モデルを作れたんです。

阿部：ああ、何かとても羨ましい。

人生を楽しむ秘訣

松野：眞鍋さんが渡米された後である1960-1970年代、地球の平均気温は低く、寒冷と言える気候でした。日本でも氷河期が来ると噂され、北極の氷山が大西洋を南下したこともあります。その時期に眞鍋さんは地球の温暖化に関係する論文を幾つも発表された。その頃には「将来は地球が温暖化する」と既に確信されていたのですか？

眞鍋：いいえ、そんなことはありません。確かに1940年代から1970年代にかけて全球平均気温や地表面温度は下がり続け、一方で二酸化炭素濃度は上昇していました。でも、そういう状況はそれ以前にも度々あったんです。私の本（p.3の脚注7）のp.16にある図を見てください。私はそのことを知っていたので、当時の寒冷化は気になりませんでした。

松野：それでも眞鍋さんは1967年に放射対流平衡モデルを使って二酸化炭素濃度のみを2倍および1/2にした数値実験を行い、大気の温度を計算して論文[10]を発表されました（図）。その結果はノーベル財団が発表したノーベル物理学賞の業績解説でも引用されているわけですが、あの研究はどういう意図で行われたのですか？

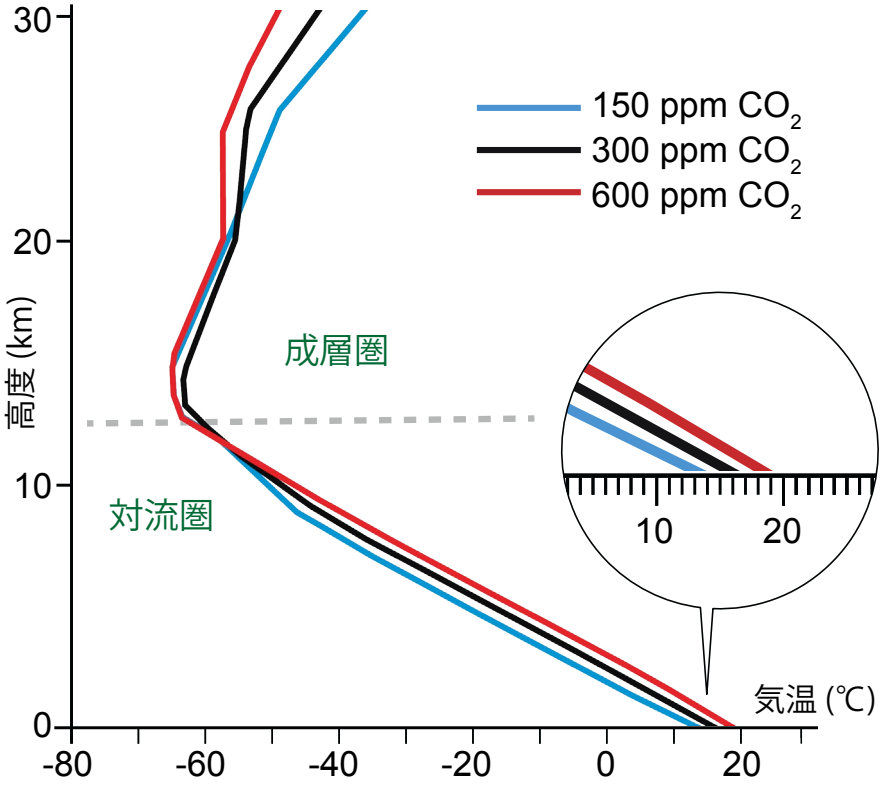
眞鍋：あれは一種の寄り道ですな。そのことは林祥介さん（神戸大学教授）が見事に看破してくれました[11]。

阿部：確かにフーリエ以来、地球の気候に関しては二酸化炭素の役割が重要だと認識されていました。後の時代にはアレニウスも大気中の二酸化炭素濃度を2倍にする問題設定を考えています。そういった話は先生のご著書の第2章と第3章に書かれていますね。

眞鍋：その通りです。その辺りの物事には以前から僕も関心があり、調べてみただけのことです。

松野：なるほど、純粋に科学的好奇心からの研究だったのですね。

阿部：出発点が好奇心だったとしても、そこから考えを深めてああいうモデル計算をやり抜くのは、普通の人にはできないことです。



放射対流平衡モデルを使って計算された大気温の高度分布（Manabe & Wetherald（1967），本ページの脚注10を参照）。二酸化炭素濃度300 ppmを基準とし、それが150ppmに減ると地上気温は2.28℃低下し、600 ppmに増えると2.36℃上昇する。このモデルは眞鍋氏が後に実施したGCMによる数値実験にも組み込まれた。ノーベル財団のホームページに掲載された資料を改変して引用（Credit: Johan Jarnestad / The Royal Swedish Academy of Sciences）。

---

10 Manabe & Wetherald (1967), Journal of Atmospheric Sciences, 24, 241-259.

11 林祥介（2021）、真鍋淑郎の科学と彼を育んだ人々、論座（朝日新聞）、2021年12月17日（およびその続編，同年12月18日）。

松野：そうですね。今の阿部さんの発言に関連し、眞鍋さんに対して私が持つ印象をひとつ申し上げましょう。眞鍋さんはとにかくよく考えるのです。研究者ならそんなの当たり前だと思われるかもしれませんが、眞鍋さんほど一つの物事を考え続ける人はそう多くはいない。たとえば僕が大学院に入って間もない頃ですが、眞鍋さんとはしばしば研究の議論をしました。冷静に話が進むうちは良いのですが、議論は往々にして白熱し、時には眞鍋さんの旗色が悪くなることもある。そうすると眞鍋さんは「ちょっとdenkenして来る。」と言って、どっかへ行っちゃうんですね。denkenはドイツ語です。「考える」という意味。

阿部：えー、隠れちゃうんですか？

松野：そう。どこに行くのか、建物の外に出ていったのかトイレに籠っていたのかは定かでないのですが。でも、しばらく隠れた後には再びふらっと現れて、その時にはしっかりとした反論が出来上がっている。そういうことが何度もありました。眞鍋さんは徹底的に考える人、denkenする人だというのが僕の印象なのです。僕が阿部さんとよく議論する氷期サイクルの話で言えば、眞鍋さんはきっと「氷期が終わると氷がこう解けて、その解け水があそこへ行って、それがこういう影響を及ぼして、その結果ああいう現象が生じて、…」という感じでいつも延々と考えているのでしょうね。

阿部：研究者は単にモデル計算して論文を書くだけではいけない。計算の結果を見て「これはなぜこうなるのか？どのように説明されるのか？」を徹底的に考えるべきである。私もそれを眞鍋先生から教わりました。

眞鍋：まあ、それが僕の長所なのか短所なのか分かりませんが、とにかく同じことをしつこく考え続ける。一生考え続ける。それが僕の人生における一番の楽しみでしたね。今でもそうです。

阿部：はい。先生は物事を考えるのが本当に楽しそうです。

眞鍋：ひとつのことを「これでもか、これでもか」と考え続ける。すると面白い考えがますます多く浮かんでくる。そういうのが人生のモットーとして良かったんじゃないかな。

松野：論文が印刷になる前のゲラ校正でも、眞鍋さんは内容へ戻って検討されますよね。私もGFDLでご一緒した時に目撃しましたが、受理された論文のゲラが戻ると眞鍋さんがそれをいつまでも見ているのです。「この単語をここで使うのは適当なのかな？よく分からなくなったからもう一度考える」とか言いながら。計算結果の物理量についても必要があればそこで考え直すらしく、プリンタからの出力用紙をずらっと広げて再検討されている。そのように徹底的に考えること、どこまでも細部を詰めて考えるお姿の記憶が鮮明です。先ほど話題に上ったご著書（p.3の脚注7）の執筆でも眞鍋さんは徹底的に物を考えられたようで、幾つかの素過程については従来とは異なる説明の仕方を採用されたと伺いました。

阿部：有効放射温度や有効放射高度の説明ですね。あの本の第1章や第6章にあります。そこでの説明は眞鍋先生がこれまで論文で行って来たものとは確かに違います。ノーベル賞の受賞記念講演でもこの新しい説明を使われていましたね。

眞鍋：あの本の執筆には確かに長い時間が掛かりました。しかも書き始めてから13年ほど経った頃、阿部さんが今おっしゃった辺りの説明に自分自身で納得できなくなっちゃった。要するに、地球温暖化に関する僕自身の理解が足りないのではないかと。そこで改めて考えて、気温や水温のみならず水循環についても整合的に説明できるよう理屈を作り直したのです。

阿部：対流調節近似によって設定された温度勾配ありきで説明を始める方式ですね？

眞鍋：その通りです。大気中の温室効果ガスが増えれば上向きの赤外放射は減り、下向きの放射は増える。このことを起点にすれば大気温の上昇も水の循環についてもすべて整合的に説明できることに気が付いた。

松野：それについての数値実験の結果はかなり前（1960年代）に得られていたはずですが、改めて考え抜いた末にようやく納得できる説明に到達した、そういうことでしょうか？

眞鍋：そうです。もちろん、専門家向けには「その理由は放射伝達の式に含まれている。方程式を見ろ」という説明の仕方もありますよ。大学院教育ではそういう方式を採用しているのかもしれない。しかし最初からあんな複雑なものを見せられたら、大半の人は勉強したくなくなってしまう。だから自分で数値実験を行っている専門家の中にも、計算はできるし結果は知っているが物事の本質を理解していない人が多いのです。地球温暖化はそれほど複雑で、素人は言うに及ばず専門家にさえさっぱり分からない部分がある。しかし現実を見れば地球は温暖化しているわけですから、僕はその理由の説明を考え続けたのです。

松野：そうだったのですね。

眞鍋：僕があの本を書く上で最も慎重に避けた説明はこういったものです。「理由はよく分からないけど、モデル計算をするとこうなります。」地球が温暖化する理由をそんな風に説明したら、理解されないどころか僕の言うことを誰も信じなくなる（笑）。モデルを作って計算をして結果を得ることは大事だけど、結果が意味するものを正しく理解し、それを他人に説明できることも同じくらい大事である。そういう気持であの本を書きました。書籍の原題がそうです。“Beyond Global Warming”という原題のbeyondに込めたのは、地球が温暖化するという計算結果を超えて物事の本質的な理解に到達すべきという主張です。

阿部：denkenし続ける眞鍋先生ならではの、素敵な書名だと思います。

眞鍋：ありがとう。こういう感じで、くどいくらいに一つのことを考え続ける。僕が人生を楽しめている秘訣はきっとそれだと、今になって思いますね。

気候と生命、そして宇宙へ

松野：眞鍋さんは今後、どのような方向へ進まれますか？今もっとも面白く、興味があることは何でしょう？まさか地球温暖化絡みで政治的な方向へ進むことは、、、ありませんよね？

眞鍋：それはありません、安心してください（笑）。今の僕の関心はもっと長い期間の気候変化にあります。特に氷床が果たす役割。たとえばグリーンランドの氷床がこれからの2, 3千年間で急速に縮小するという予測には多くの人が同意しています。しかしもっと先、今後100万年間や1000万年間に地球上の氷床がどういう進化を遂げ、気候はどう変わるのか？そういう問題に興味があります。温室効果ガスの変化量や地球の運動による日射変動との兼ね合いも重要ですね。

松野：確かにそこは氷期の周期性を考慮した長期の気候予測という大きな課題へ繋がる点です。これについては阿部さんが氷床モデルを作って精密な計算を進めており、私も期待しています。

眞鍋：はい。そして更に長い期間、たとえば数億年以上に渡る気候変化を考えると、微生物の果たした役割が実に興味深い。プランクトンなどの微生物は地球環境の影響下で進化して来ましたが、それだけではなく、微生物が環境に対して影響を与えて来たことも分かりつつあります。その相互作用の歴史を知りたくて、僕も分子生物学の本を何冊か読みました。しかしその中身は簡単に理解できるものではない。とても難しい。でもこれはとても面白く、また大切なテーマです。

阿部：いわゆる環境と生命の共進化ですね。眞鍋先生はそれをノーベル賞受賞直後の記者会見でも述べられていました。地球を理解するには生物の進化を理解することが必須である、と。

眞鍋：はい。そして何と言っても宇宙ですよ！無数にある星、銀河、とにかく宇宙は面白い。地球と宇宙はつながっていて、地球の気候も宇宙の影響下にあります。阿部さんや伊藤さんがお詳しいミランコビッチ・サイクルなどはその典型ですよね。そして、もっと大きなスケールのコスモロジーは実に壮大です。ハッブル宇宙望遠鏡が撮影した銀河の画像は傑作ではありませんか。見た目が台風とそっくりな渦巻き銀河もたくさんある。あの類似には目を見張ります。

阿部：ああ、本当にそうですね。

眞鍋：でしょう？コスモロジーって実に面白いんです。

阿部：はい、私もそう思います。そう言えば眞鍋先生が大学で専門分野を地球物理に定めた時、お父様に「僕には地球物理と天文の区別が付かない」と言われたと仰っていましたね。眞鍋先生は身近にあって目に見えるもの、たとえば雲や山や川に興味があったから天文学ではなく地球物理学、特に気象学を専門に選んだと伺いました。でも最近では技術が発達し、大きな望遠鏡を使えば遠い宇宙にある天体が手に取るように見える。まるで先生が小さな頃に見ていた雲や山や川のように。コスモロジーの世界がいよいよ地球に直結しそうな予感、わくわくする気持ちは私にもあります。もし眞鍋先生が今から大学生に戻ったら、地球物理学ではなくて天文学を専門にして、しかもそれらを融合した新しい科学を作るかもしれない。ねえ眞鍋先生、これからでも遅くありませんよ！

松野：確かにそうですね。太陽系以外の惑星系だって何千個も見付かっているし、人間に見える世界は大きく広がっています。

眞鍋：そう。僕はもっと勉強したいのです。コスモロジーが僕達の研究とも深い関わりがあるなんて、この歳になるまで気付かなかった。だからとても興味があって、僕は最近いつも天文学の本を開いて読んでいます。ハッブル宇宙望遠鏡の後継機も無事に動き出して、宇宙の果てにある銀河も見えるらしいじゃありませんか。とにかくコスモロジーは面白い。僕も、皆さんも、もっとエンジョイしなくては！

眞鍋 淑郎（まなべ しゅくろう）

1931年 愛媛県生まれ。東京大学理学部物理学科地球物理学課程卒業、同大学院数物系研究科地球物理学専攻博士課程修了。理学博士。米国気象局を経て米国海洋大気庁の地球流体力学研究所（GFDL）上級研究員などを歴任。1997年から2001年まで宇宙開発事業団と海洋科学技術センターによる共同プロジェクトである地球フロンティア研究システムの地球温暖化予測研究領域領域長を務めた。現在は日本学士院客員、プリンストン大学上級気象研究者、海洋研究開発機構（JAMSTEC）顧問およびフェロー。日本気象学会藤原賞、米国気象学会ロスビー研究メダル、ブループラネット賞、朝日賞、ボルボ環境賞、欧州地球科学連合ミランコビッチメダル、米国地球物理学会ウイリアム=ボウイメダル、ベンジャミンフランクリンメダル、クラフォード賞、ノーベル物理学賞、文化功労者・文化勲章などを受賞。

松野 太郎（まつの たろう）

1934年 長野県生まれ。東京大学理学部物理学科地球物理学課程卒業、同大学院数物系研究科地球物理学専攻博士課程中途退学。理学博士。九州大学助手、東京大学助教授を経て東京大学教授、北海道大学教授、地球フロンティア研究システム長、JAMSTEC地球環境フロンティア研究センター長を経て、現在は日本学士院会員、東京大学名誉教授、JAMSTEC地球環境フロンティア研究センター特任上席研究員（非常勤）およびフェロー。日本気象学会藤原賞、日本学士院賞、米国気象学会ロスビー研究メダル、世界気象機関賞、ブループラネット賞などを受賞。

阿部 彩子（あべ あやこ）

1963年 東京都生まれ。東京大学理学部地学科地理学課程卒業、同理学部地球物理学科学士入学および卒業。同大学院理学系研究科地球物理学専攻修士課程修了。スイス連邦工科大学地球科学専攻博士課程修了、Dr. Nat. Sci. 取得。日本学術振興会特別研究員、東京大学助手、助教授を経て、現在は東京大学大気海洋研究所教授。地球フロンティア研究システムでは地球温暖化予測研究領域古気候研究グループリーダーを眞鍋淑郎領域長の下で務めた。日本気象学会賞、日本第四紀学会学術賞、地球環境史学会貢献賞、日本雪氷学会学会賞、欧州地球科学連合ミランコビッチメダル、日本学士院賞などを受賞。

森岡 優志（もりおか ゆうし）

1983年 東京都生まれ。東京大学理学部地球惑星物理学科卒業、同大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了。博士（理学）。JAMSTEC付加価値情報創生部門アプリケーションラボ副主任研究員。2021年11月より米国海洋大気庁地球流体力学研究所とプリンストン大学大気海洋科学プログラム客員研究員。日本海洋学会岡田賞、Advances in Atmospheric Sciences Editor's Awardなどを受賞。

伊藤 孝士（いとう たかし）

1967年 山形県生まれ。東京大学理学部地球物理学科卒業、同大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻博士課程中途退学。博士（理学）。国立天文台天文シミュレーションプロジェクト講師。

左から　家　正則、津田　雄一、中村　栄三、深尾　良夫 氏

座談会

中村栄三
津田雄一
×
(聞き手)
家　正則
深尾良夫

無人小惑星探査機「はやぶさ」の奇跡的な地球帰還から4年後の2014年、小惑星リュウグウのサンプルを持ち帰る新たなミッションを掲げ「はやぶさ２」が打ち上げられました。有機物や水を多く含んでいると推定されるリュウグウは、その形成や進化を知ることによって地球の水や生命の起源を解明する重要な手がかりを与えると期待されています。そして2020年、「はやぶさ２」は無事帰還し、その半年後から回収試料の解析が始まりました。2022年になりその解析結果が公表され、私たちは新たな太陽系物質科学の進展に胸をおどらせることとなりました。中でも岡山大学惑星物質研究所の中村栄三教授や「はやぶさ２」プロジェクトリーダーの津田雄一博士のグループが本誌Vol. 98　No. 6に発表した論文「On the origin and evolution of the asteroid Ryugu: A comprehensive geochemical perspective」は大反響を呼び起こしました。今回は、その中村教授と津田博士をお招きし、日本学士院の家正則（国立天文台名誉教授）と深尾良夫（東京大学名誉教授）の両会員がお話をうかがいます。

なぜ「Nature」でなく「PJA-B」に？

深尾：「はやぶさ２」の大成功の中でも、とりわけサンプルリターンのインパクトは大きいと思います。その回収試料解析に携わった中村さんたちの論文への反響がすごく、SNS上では「なぜ『Nature』や『Science』など世界的な雑誌ではなく、聞いたこともない『PJA-B』なのか」という反応がありました。日本学士院の先生方の間でも「なぜ我が紀要に投稿していただけたのか」という声が上がったりしました。そういったところから中村さん、お願いいたします。

中村：私がポスドクをしていたパリから日本に帰ってきたのは1987年秋ですが、日本の地球宇宙化学やサンプルリターン計画はNASAやESA（欧州宇宙機関）に比べて大変遅れていました。火星のサンプルリターンが2013年に実施されると言われていた頃で、どこよりも分析技術が優れていれば我々も日本からでも参加できるのに、と思ったことを覚えています。幸い、田舎（鳥取県三朝町にある現岡山大学惑星物質研究所）に職を得ることが出来ましたので、その夢を実現するべく分析体制を整え始め、現在に至っています。

最初に論文の投稿先を考えたのは、2003年に打ち上げられたはやぶさ1

号機によって、2010年に持ち帰ることになる小惑星イトカワ回収試料の初期分析に参画したときでした。分析の準備段階において、回収試料のキュレーション委員長をされていた久城育夫先生(学士院会員)を中心に、模擬試料を用いた分析結果をもとに、各個人またはグループの分析能力を評価して初期分析への参加者が決められました。

深尾：それはいつごろのことですか。

中村：2000年から2001年にかけてです。当時から国家プロジェクトに参画している意識が強くて、私はその模擬試料分析の結果を日本の雑誌で公表したいと考え、日本のできたばかりの英文雑誌に出そうとしたのですが、受け入れられなかった。それを基に実施した実際のイトカワ試料の初期分析結果も投稿先が議論されることなく、『Science』に投稿されました。私たちはその後『Proceedings of the National Academy of the United State of America』など外国の雑誌で公表したのですが、日本人としてはあまり面白くない。今回、津田さんがやってくれた完璧なサンプルリターンは「はやぶさ」同様国家プロジェクトなので、今度こそは最初の分析結果は納税者である日本の国民の皆さんに論文として公表したいという思いがありました。

津田：私は2003年、はやぶさ1号機が打ち上がる1カ月前に宇宙科学研究所に入りました。幸い1号機のミッションに打ち上げから関わり、私はオペレーション担当で、中村先生とはミッションのどこかでお会いしていて、「すごく熱い先生がいるなあ」と思いました。2号機ではプロジェクトエンジニアとして設計をリードする立場で、当初から「面白いミッションにしようよ」と声をかけていただきました。着陸に成功し地球帰還も見えてくると、「準備はできている。あとは帰ってきさえすれば、しっかり分析はやる」と。プレッシャーでした（笑)。

帰還後、世界的な成果の論文を最初に出すのはやはり世界で一級といわれているところという議論になり、そこに誰も疑問を持たない。しかし、中村先生から「これ、日本のミッションだよね」と言われ、ハッとさせられました。中村先生は「これは一級の成果に必ずなるから、この論文が出たところが世の中から見てもらえる場所になる」とおっしゃっていました。それを実行していただいたのが、PJA-Bだったと私は考えています。

家：PJA-Bは、天文学から医学、生物学、化学など全分野をカバーしている特殊な雑誌で、専門性の高い論文は投稿しにくい。最近は、オリジナルな論文がほとんどなくなって、とても心配していました。ですから、中村先生の論文は本当に衝撃的でした。国家プロジェクトにあたるようなものについては、やっぱり学士院の紀要にちゃんとした論文を書いてほしいと思っています。「はやぶさ2」もまさにそういう位置づけなので、大変ありがたかったですね。中村先生の高い見識に衝撃を受けました。

中村：今回は津田先生が中心になって“完璧以上”の成果を出し、サンプルを届けてくれたわけです。「手土産はもう詰めたので、待っていてください」という自信あふれる言葉が返ってきたのを思い出しますよ。

津田：(笑)

深尾：これだけ成功すると、当分、分析には困らないのではありませんか。逆に言うと、将来的にこのままでいいのか、その辺はどう考えればいいのでしょう。

津田：ミッションはそんなに頻繁にできるわけではありません。特に日本の場合は、早くても5年に1回。サンプルリターン系だと、下手すると10年に1回くらいです。その間ずっと分析が続き、その中から、次はこんな物が欲しいという議論が沸き起こってこなければいけない。だから、もう少しペースが速くてもいいかなという気がします。

中村：サンプルリターンの重要な点は、回収された試料は死なないというところです。ずっと残る。5年後、10年後、50年後に新しいアイディアとか分析技術が上がって、我々が想像もしないようなサイエンスになる可能性を秘めている。何かあるたびに「リュウグウの試料がある」となって、将来のサイエンスにつながっていく。そういう意味でも非常に大きなミッションだったと思います。

津田：我々は試料を5.4g採ってきたのですが、そのうち60%は何もせずに保管することにしています。将来、知見が増えたり分析技術が向上したりした時、物があるとそれが出来るということです。保管しておくというのも重要な役割です。

中村：もう一つ重要なのは隕石との比較です。隕石は受け身の試料で、降ってくるのを待っている。今回は人類がそこへ行き試料を採ってきた。これは我々が地球上で地質学・フィールドワークをやるのと変わらない。確かめようと思えば、リュウグウの同じ所へ行ってチェックできるわけです。科学の基本である再現性を保証できる。その極めて重要なことを成し遂げたと思いますね。

津田：実際に着陸した場所が分かっていて、どの石のどの部分を採ったかまで映像で撮れています。

中村：はやぶさ1号機も、イトカワの写真はたくさん撮っていたので、どこに行けばどういう結果が期待できるか分かっていた。僕はもう一度行こうじゃないかと言ったのですが、人類としてはやっぱり冒険したいから、同じところには……。

津田：同じ場所へ行くのは、エンジニアリングにはあんまり評判がよくないです。再現性の重要性は分かるけれど、エクスプロレーションという部分で新しい世界に期待してしまう。

深尾：次のターゲットは何ですか。

津田：まさに今、議論しているところです。サンプルリターンの目的は、太陽系の歴史や生命の歴史を見るため、始原性――昔の状態をとどめている物質をできるだけそのままの形で持ってくることに価値がある。はやぶさ1号

機がイトカワからSタイプ天体の岩のようなサンプルを持って帰ってきて、リュウグウではその一歩外側の炭素質成分を含むCタイプの天体から持ってきた。次は火星より遠くにある物が欲しいとみんな言います。ミッション的にはさらに難しくなりますが、メインベルトよりもっと遠くにはDタイプというものもある。それと彗星ですね。ハレー彗星みたいなカイパーベルトからやってきたようなものもあり得る。すると出来立ての太陽系の物質が手に入る。

中村：僕は分析しながら、リュウグウはもともと彗星で、非常に遠いところの物を持ってきていると感じていました。たまたま今、近地球型の軌道になっていると考えています。そういうことを実証するために、実際の氷の天体をそのまま採って持ち帰りたい。

アミノ酸は宇宙から来た？

家：中村先生、この論文の概要を説明していただけるとありがたいのですが。

中村：大きかったのは、生の試料を汚染させることなく持って帰ってきたことです。我々は試料を個別的で専門的な視点からだけではなく、物性、化学組成、年代などを含む総合的な物質科学的解析を試みました。貴重で少量な試料ですから、ダイヤモンドの刃で微小粒子を削ることで平坦な面を作り、イオンビームや電子線などを用いたプローブ分析を行うと同時に、その過程で形成される削り滓をすべて回収し、化学処理を伴う全岩バルク元素・同位体分析を行いました。つまり、一つの試料から多くの性質の異なる情報を抽出することで、“連立方程式”を構成しそれを解くことで、リュウグウの複雑な物質進化を理解する戦略でした。リュウグウ粒子を構成する鉱物の約9割は粘土鉱物でした。その中に、いろいろな小さい鉱物が含まれ、驚くほど美しい自形結晶の集合体が見つかりました。さらに、10ミクロンを超えるサイズの有機物の塊もありました。その塊の窒素・炭素・水素の同位体を測定すると、粒子ごとのそれらの値と比べて極めて大きな変化を示すものがありました。特に、窒素の同位体比が非常に高いものと、逆に非常に低いものが共存していたことは驚きでした。このような極端に大きな同位体変動は30K～50Kの極めて低い温度環境下でないと起こりません。太陽系形成以前の星雲の中での反応と考えられます。太陽系前駆星雲にはガスと氷に取り囲まれた1ミクロン足らずの非晶質ケイ酸塩ダストが存在していたと考えられています。その氷の中で、炭素、水素、酸素、窒素が強烈な紫外線などの宇宙線と反応して（フォトシンセシス）有機物ができます。その氷で覆われたダストが衝突を繰り返し集まることで太陽系天体が誕生したわけです。

家：そのミクロな粒子がそういうプロセスで合体したということですが、石になるのに何か火成岩みたいな熱いフェーズというのはなかったわけですか。

中村：それは、リュウグウ試料からは認められませんでした。リュウグウの元となった天体は極低温の太陽系前駆星雲の外縁部で氷を伴うダストが衝突集積して形成されたと考えています。

深尾：この論文の最初のレスポンス、新聞などで出てきたのは、生命の起源というところです。その話と今の有機物の大きな塊とは、どういう関係にあるのですか。

中村：そこは非常に重要でして、皆さんすぐにアミノ酸に着目したわけですが、僕は非常に不満でした。タンパク質形成に必要な必須アミノ酸を含む多くのアミノ酸を確かに検出できました。地球のものではなく宇宙から来たものです。しかし今回の論文では、生命の起源物質が地球以外の宇宙でできていて、氷天体がその進化に重要な役割を果たした可能性を示し、いわゆる生命の起源を議論する上での一つの物差しを作ったようなものだと思います。その先、すなわち生命の起源の解明まではまだすごく遠い。地球史初期に大気が薄ければ、地表付近までプラズマが到達しアミノ酸が合成される可能性もあり、今後の研究の展開を待つ必要があるでしょう。人類はまだ試験管で生命を作ることさえ出来ていません。まだまだ、謎は多いのです。ただ、宇宙から生命のビルディングブロックがやって来ることが可能であることが、「はやぶさ2」によって確実に示されたのです。

では、その有機物は宇宙でどうやってできたか。天文学、特に電波天文学などの大きなテーマの一つでもあります。星雲を構成するダストを覆う氷の層に強烈な紫外線が当たると光化学反応を起こし、簡単なアミノ酸ができる。実験でもできます。そういうところでないと、同位体比がこんなに高いものと低いものを同時に作れない。しかも一つの恒星を基にしても作れない。あっちこっちで恒星が死んだり、超新星爆発（スーパーノヴァ）が起こったりして、何十億年かの歴史をもった氷を伴う埃が集まり太陽系の元となったのです。

今回、明確になったのは、氷が一度溶けないと粘土鉱物を作れないこと。水とケイ酸塩の反応でないと粘土鉱物はできないのです。じゃあどうやって氷を溶かすか。リュウグウの元の天体（氷微惑星）が形成された太陽系形成初期には、超新星爆発で形成された不安定核種のアルミニウム26（^{26}Al）が存在していました。^{26}Alは半減期が短く、^{26}Mgに変換され、その際に大きな熱を放出します。それが熱源となって、氷天体の内側からどんどん氷を溶かし、微粒子として集積したケイ酸塩や金属などが反応して水の中に溶けていきます。ナノメータサイズの不溶性有機物はこの水質変質で形成された粘土鉱物中に包有物として含まれていることがデータから読み取れます。これらの不溶性有機物やサブミクロンサイズの有機物の塊は、氷微惑星形成以前に有機物を含むダスト粒子の衝突によって成長した可能性があります。固体といえども有機物は氷やケイ酸塩に比べて柔らかく破壊されにくいため、

くっつきやすい性質を持つようです。この過程の解明は今後の大きな課題であると思っています。

家：^{26}Alの半減期はどれくらいですか。

中村：71.7万年。すごく短いです。

家：短いですね。それくらいの間に氷がいっぱいくっついて、十分な大きさのものができたわけですか。

中村：そうとしか考えられません。リュウグウの試料を電子顕微鏡で観るとスカスカで、約半分が空隙です。1回氷が溶けて、鉱物と反応させて、その後燃料の^{26}Alがなくなるので冷えて再凍結する。その氷が宇宙空間で昇華した結果が空隙を作ったのです。

家：そういうのが、表面の観察で分かるわけですか。

中村：分かります。それで、ある温度でリュウグウ試料に含まれる鉱物を全部溶かすためにはどれくらいの量の水が必要かシミュレーションを行ってみました。その結果、観察された空隙率と、シミュレーションで得られた水と鉱物の量比がだいたい一致したのです。

深尾：先ほど津田先生が言われた、遠くというのは、まだ氷の状態の、その辺までということですか。

中村：そうです。凍っている天体が必要です。

深尾：それは、木星よりも遥かに遠いのですか。

中村：木星軌道あたりからカイパーベルト（海王星の外にある小惑星帯）にあります。もう一つ重要なことがあります。炭素質隕石には太陽系内部で1000℃を超える高温で融解したものが混ざっています。今度のリュウグウ試料でも発見されていますが、詳細な岩石学的記載からそれらはリュウグウの構成物質に後から付け加わったものであり、リュウグウの元となった氷天体はほとんど太陽系内部の影響を受けていないことが分かりました。これはすごいことです。

家：それはどうして分かるのですか。

中村：カンラン石や輝石など、高温でないとできない鉱物が中に少量含まれます。もし氷が溶ける時に既に入っていたならば、その鉱物も変質して粘土鉱物になるはずですが、全く変質していないので、それはありえない。もう一つは、酸素同位体を測ってみると、リュウグウそのものとは全然違う。そこから、後で違うものが入ってきて混ざったということになります。ではいつ入ったのか。これはリュウグウが氷の彗星核として太陽系内部に移動してきたとすると実は全部説明できる。要するに、リュウグウは彗星起源であるということです。実は、ESA（欧州宇宙機関）のロゼッタミッションが氷の天体、チュリモフ・ゲラシメンコ彗星の核の詳細な観察を行って、素晴らしい情報を提供してくれました。すなわち、彗星の核からジェットが出ているんです。ジェットが出るということは、太陽光で内部温度が上昇して氷が昇華しH_2OやCO_2などのガスができ、ある時、爆発的にジェットが出る。ロゼッタは彗星の核の表面にはジェットに伴う最大300m程度の陥没が多くあることを発見しました。昇華によってできた空洞を埋める形で天井が落下し、更に周りが壊れてどんどん落ちこんでいくんですね。

家：撹拌が起きるのですね。

中村：そうです。上のものが下に、角運動量を保存したまま落ちる。氷の昇華に伴う崩落によって岩体が中心にどんどん集まってきますよね。そうすると自転速度が上がって、最終的には遠心力が増すことで算盤玉状になり、同時に瓦礫状（ラブルパイル）構造になったと考えられます。全く新しい形成モデルです。

深尾：カンラン石というのはどこでできるのですか。

中村：太陽系の内側、太陽に近い場所ですね。

深尾：それが遠くまでいってしまうのですか。

中村：今までは太陽の磁場に乗って遠いところ（太陽系外縁部）に放り投げられるなどと解釈されていました。太陽の近くで太陽系始原物質が溶けて液滴が形成され、それが外に向かって飛ばされ、太陽系外縁部でできつつある隕石の母天体に混入する。それが今までの考えなのですが、リュウグウの解析から、太陽付近でできたものはもともとなく、それが混入したのは最近であると考えられます。活発に活動する彗星核の表面に普通隕石や炭素質隕石が衝突し、その破片が昇華でできるジェットに含まれる地下物質と共に吹き上げられ、脱出速度以下のものが再堆積することによって取り込まれたのでしょう。その際、ガスは再び再凍結するため、取り込まれた物質は全く変質しません。Re-Os同位体分析の結果は、リュウグウでジェットの活動があったのはごく最近（100万年以内？）であったことを示唆しています。

家：あの数粒から歴史を読み解くというのはすごいことですね。

中村：さらに今回は、「はやぶさ２」は表面にタッチダウンした際にタンタル製の弾丸をリュウグウ表面に撃って試料を採取しています。2回目は、銅板をリュウグウ表面に衝突させてクレーターを作った後、周辺に飛び散ったと考えられる地下物質を回収しました。

津田：2kgの銅板ですね。

中村：秒速2kmのスピードで表面にぶつけて、深さ1.7m、直径15mの逆円錐形に近いクレーターを作ることに成功したんですよね。

深尾：あの程度の深さで、そんなに違うことが分かるのかと思ったけど。

中村：分析結果は一部類似する部分もありますが、1回目と2回目で試料の性質が異なることも分かりました。また、タンタル製の弾丸の痕跡が3個の粒子に明瞭に記録されていました。

家：あれは、「はやぶさ2」が着陸して帰ってきたという証拠ですよね。

中村：感激しました。2回目のタッチダウンでは、クレーターを作った後に飛び出してきた物、地下の物をちゃんと「はやぶさ２」は採った。それも証明できたと思います。

津田：エンジニアリング的には、地下何mから採ってきたことを証明できなくて……採ってきたものから知るし

かない。いくつかの研究グループの分析の結果、地下から採っていることを裏付ける証拠が出てきています。実は、2回目の着陸に成功した後、微妙な言い方をしていました。「地下物質を採った」ではなく「地下物質へアクセスした、それに成功しました」と。今は、地下物質を採ってきたと、自信を持って言えます。

中村：我々は受け取った16粒の粒子ごとに性質の異なる多くのデータを集めて総合的に検討するのですが、データが出る度に考えていた仮説を修正しないといけない。すなわち、私たちの経験を超える見たことのないようなデータが出ると、そのたびに新しく方程式を加えて連立方程式を解いていくような感じです。未知の16個の隕石を半年という短い時間で分析・解釈するようなもので、それは楽しい反面すごく苦しかったです。

次章「天文学と地質学が結びついた！」は本誌ウェブサイトに掲載

地球の水がどこから来たのか解明できた？

家：私、天文学が専門で分からないので……水による変質について教えていただければ。

中村：リュウグウの祖先の氷天体は太陽系の縁辺部にあったと考えられるので、水は確実に氷ですね。温度としては木星付近で100Kくらい。それよりもっと遠いところですから70Kとか。従って水や炭酸ガスは固体（氷）になります。その氷を溶かしたのは、先ほど申し上げた放射性核種の^{26}Alです。太陽ができて200万年くらいで氷小天体内部の温度が氷の融点を超えてガラスのような非晶質ケイ酸塩と反応する水質変成を起こし、大量の粘土鉱物が出来たと考えられます。

家：論文の図にある白っぽい結晶みたいなものが、その時にできたのですか。

中村：はい。天体表面からの熱放射と内部での^{26}Alによる熱生成を考慮すると、氷は内側から外側に向かって溶け、^{26}Alの消滅に伴って今度は外側から内側に向かって凍っていくでしょう。この過程で溶けている元素の濃度も変化し過飽和になることで結晶が晶出したと考えられます。さらに重要なのは氷と水の相境界付近は入れ込んだ状態だと思うのです。

家：粘土になるのは、水が入って変成するということですが、圧力はどうなんでしょうか？高圧？

中村：数十キロメートル程度の小天体内での0℃付近での出来事なので、それほど高圧ではないです。

家：天体でもそういうことが起こった。

中村：はい。氷を溶かせば、そういう化学反応が起こります。リュウグウは1回溶けて、再凍結した。その一部が、その後ある時期に太陽に近い軌道に入ってきて、サブリメーション（氷の昇華）が始まり、時間をかけて水気を飛ばしたという感じです。要はフリーズドライです。その結果、氷の抜け殻として空隙がたくさん残った。

家：地質学とか鉱物とかから、そういうことが読み解けるようになってきたのですね。

中村：ただ、極限の世界ですから、理論と合わせて解いていかないといけない。あと、各事象の時間の見積もりがすごく重要です。また、地球の水、海の水もリュウグウで十分に作れることが分かりました。

津田：地球の水の供給源ということですか。

中村：そうです。今回の分析結果は、リュウグウやその元となる氷を大量に含む彗星（氷天体）が地球が出来上がって落ち着いたころ（40－43億年前？）に降り注げば十分に作れる可能性を示しています。

深尾：津田先生にお伺いしたいのですが、こういう大きなプロジェクトって、個人の研究のやり方、数回に1回当たればいいというような考え方は許されないような気がするのですが、そのへんはいかがですか。

津田：難しいところです。科学とか技術の最前線って、トライ・アンド・エラーがないと進歩しないですよね。国家の大事業だから基本部分は失敗してはいけないけれど、いかに先端部分でチャレンジ性を残せるか。それぞれ技術とか科学の場面で誰かがチャレンジしている。その人達が多少失敗しても、全体としてはびくともしないような環境を作るのがすごく重要だと思います。

深尾：その先端部分は内緒にしておく（笑）。

津田：「はやぶさ2」みたいに、サンプルリターンをやると生命の起源が紐解けますとか、太陽系の歴史の情報が得られますとかは重要な部分なのですが、より具体的にブレイクダウンしたところではいっぱい仮説がある。先端で戦っている人達は自分の仮説に100%自信がなくても、チャレンジしています。技術も、誰もやったことがないからやりたいという人達がいる。うまくできなかったとしても、このミッションの屋台骨はびくともしないという作り方をします。これが両方うまくできた時に、良いミッションになると思っています。

「はやぶさ2」は実は屋台骨自体がチャレンジングでした。サンプルを持って帰ってくること、もう一つは探査機を途中で絶対に殺さないとか、そういうことですが、それを守りつつ挑戦性の高いミッションとか、トライ・アンド・エラーの余地を残す。おもしろがる人が増えると、結果として屋台骨部分も強くなる。2回目の着陸ができたり、人工クレーターを作れたりということが、その挑戦する余地の結果でした。

中村：ロケットの打ち上げを例にすると、失敗したら落ちる。それで批判を受ける。津田さんが今おっしゃったのは、そういう失敗があって初めてエンジニアも成長していくし、経験を積んで新しいチャレンジができる。今の日本の状態を見ていると、失敗を許さないような雰囲気がすごく強いように思います。だから、エンジニアもサイエンティストも、もっと楽しく仮説をいっぱい立てて、遊んで、遊びまくってキュ

リオシティ（好奇心）に沿ってまずやる。その中からちゃんとした成果を出していく。そこらへんをしっかり文化として作り上げていくことが今、問われている気がします。

深尾：ありがとうございました。

家：これをきっかけにPJA-Bに、先生に続くような論文が出てくることを期待します。

中村 栄三（なかむら えいぞう）

1955年佐賀県生まれ。1978年、山口大学文理学部卒業。1980年、東北大学大学院理学系研究科修士課程修了。1986年、カナダ・トロント大学博士課程修了。専門は地球化学。パリ大学地球物理学研究所研究員を経て、1987年、岡山大学地球内部研究センター（現：惑星物質研究所）助手、1992年、助教授、1995年、教授。2021年、岡山大学名誉教授・自然生命研究支援センター特任教授。

津田 雄一（つだ ゆういち）

1975年広島県生まれ。1998年、東京大学工学部宇宙工学科卒業。2003年、東京大学大学院工学系研究科宇宙工学専攻博士課程修了。同年、宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所助教。2014年、同研究所准教授。2015年、小惑星探査機はやぶさ２プロジェクトマネジャー。2020年、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授。

家　正則（いえ まさのり）

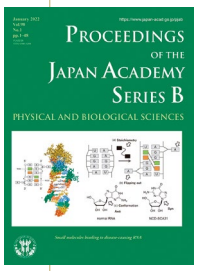
1949年、東京都生まれ。1972年、東京大学理学部天文学科卒業。1977年、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程修了、同大理学博士。東京大学理学部天文学科助手。1988年、国立天文台助教授、1992年、国立天文台教授。2014年、TMT国際天文台副議長。現在、日本学士院会員、国立天文台名誉教授、総合研究大学院大学名誉教授。

深尾 良夫（ふかお よしお）

1943年、東京都生まれ。東京大学理学部地球物理学科卒業。1971年、同大理学博士（地球物理学専攻）、名古屋大学助手。1978年、同大助教授、1988年、同大教授。1993年、東京大学教授、東京大学地震研究所長を経て、独立行政法人海洋研究開発機構地球内部変動研究センター長。現在は、日本学士院会員、東京大学名誉教授、国立研究開発法人海洋研究開発機構特任上席研究員。

Vol.98（2022）掲載論文

No. 1



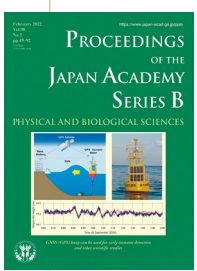
Reviews

Hitoshi KURUMIZAKA: Structural studies of functional nucleosome complexes with transacting factors
https://doi.org/10.2183/pjab.98.001
クロマチンは真核生物ゲノムの細胞核内での実体であり、遺伝子発現などのすべてのゲノム機能を制御している。本総説では、クロマチンの基盤構造であるヌクレオソームの構造的・機能的研究を中心に紹介し、クロマチンによるゲノム制御機構について概説する。

Yu NAKAGAWA and Yukishige ITO: Mannose-binding analysis and biological application of pradimicins
https://doi.org/10.2183/pjab.98.002
プラディミシンは、マンノース（Man）に結合するユニークな天然物である。本稿では、「低分子がManを特異的に認識する」という他に例をみない現象を解明した研究を概説するとともに、糖鎖研究におけるプラディミシンの活用法について論じた。

Kazuhiko NAKATANI: Possibilities and challenges of small molecule organic compounds for the treatment of repeat diseases **Cover Illustration**
https://doi.org/10.2183/pjab.98.003
ヒトゲノム中のリピート配列は、ある閾値を超えて伸長すると、多くの神経疾患の発症につながる。長いリピートを含む転写産物は、RNA結合タンパク質を捕捉する。著者らが発見したリピート結合分子は、神経疾患の治療薬としての少分子の可能性を示唆した。

No. 2



Reviews

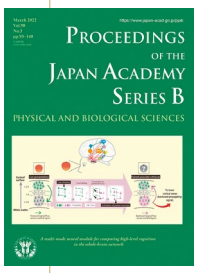
Teruyuki KATO, Yukihiro TERADA, Keiichi TADOKORO and Akira FUTAMURA: Developments of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system **Cover Illustration**
https://doi.org/10.2183/pjab.98.004
津波災害の軽減を目的としたGNSS海洋ブイによる津波の早期検知システムの開発研究に関するレビュー。当初の開発における相対測位を用いたシステムから、衛星通信による伝送と単独測位方式を用いた改良、さらに応用として海底地殻変動の連続観測に挑戦した実験を紹介する。

Yoshiro NIITSU, Yasushi SATO and Tetsuji TAKAYAMA: Implications of glutathione-S transferase P1 in MAPK signaling as a CRAF chaperone: In memory of Dr. Irving Listowsky
https://doi.org/10.2183/pjab.98.005
２相解毒酵素であるグルタチオンSトランスフェラーゼP1が、本来の機能からかけ離れた、MAPKシグナルのCRAFにシャペロン蛋白として働き、KRAS癌やBRAF癌の増殖を促進しているという事実を踏まえ、同酵素を抑制することでそれらの癌への治療効果あるいは分子標的剤耐性の克服を期待できるというということを概説した。

Original Article

Koichiro MAKI: An interpretation of COVID-19 in Tokyo using a combination of SIR models
https://doi.org/10.2183/pjab.98.006
COVID-19の陽性者数の変動は、人流による幾つかの不特定集団内での感染拡大と収束で再現でき、デルタ型変異株への移行割合も説明できた。さらに集団の大きさと拡大開始時期も推定可能であることを示した。

No. 3



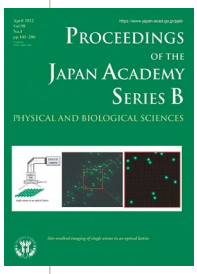
Reviews

Yasushi MIYASHITA: Operating principles of the cerebral cortex as a six-layered network in primates: beyond the classic canonical circuit model **Cover Illustration**
https://doi.org/10.2183/pjab.98.007
大脳皮質は6層構造の基本ユニットから構成される並列計算機である。記憶想起などの高次認知機能は、大脳連合野の第5/6層で計算され、第2/3層への局所逆投射や第6層からの下位皮質トップダウン制御を含むネットワーク動作によって創出されることを筆者は明らかにした。本稿では、この計算を行う大脳6層基本ユニットの新しい「正準」回路モデルDynamic Multimode Module（D3M）を提案する。

Masahide TAKAHASHI: RET receptor signaling: Function in development, metabolic disease, and cancer
https://doi.org/10.2183/pjab.98.008
著者らが発見した*RET*遺伝子は遺伝性、非遺伝性のがん、ヒルシュスプルング病の原因遺伝子であるとともに、神経栄養因子GDNFファミリー分子によって活性化され、腸管神経系、腎臓・尿管、精子形成に必須の役割を果たす。本総説では*RET*の多様な生理的、病理的機能および最近のがん治療薬としてのRET阻害剤開発について紹介する。

Misaki OKAHATA, Haruka MOTOMURA, Akane OHTA and Atsushi KUHARA: Molecular physiology regulating cold tolerance and acclimation of *Caenorhabditis elegans*
https://doi.org/10.2183/pjab.98.009
線虫*C. エレガンス*の低温耐性・温度順化は、温度応答に関わる分子と組織をシンプルに解析できる実験系である。本稿では線虫の低温耐性・順化の解析から見つかってきた、新規の温度受容体や、神経-腸-精子や筋肉からなる温度応答の組織ネットワークを概説する。

No. 4



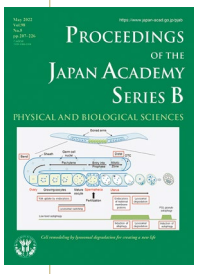
Reviews

Yoshiro TAKAHASHI: Quantum simulation of quantum many-body systems with ultracold two-electron atoms in an optical lattice **Cover Illustration**
https://doi.org/10.2183/pjab.98.010
強相関量子多体系を研究するための新実験プラットフォーム“光格子中の超低温2電子系原子イッテルビウム”を用いて得られた最近の研究成果（量子磁性、サウレスポンプ、など）および今後の可能性について解説した。

Tsunenobu KIMOTO: High-voltage SiC power devices for improved energy efficiency
https://doi.org/10.2183/pjab.98.011
SiCは高耐電圧・低損失素子用半導体として有望であり、実用化が始まった。本稿では、SiC素子の特徴を紹介した後、pn接合の絶縁破壊現象と酸化膜/SiC界面を用いたトランジスタ特性について述べる。また、将来の応用が期待される超高耐電圧素子の研究開発状況と課題を概説する。

Hideki YORIMITSU and Gregory J. P. PERRY: Sulfonium-aided coupling of aromatic rings via sigmatropic rearrangement
https://doi.org/10.2183/pjab.98.012
炭素—炭素結合を構築し有用有機分子を合成するための新手法として、酸無水物を活性化剤とするアリールスルホキシドとフェノールのカップリング反応を開発した。遷移金属触媒を用いる既存の手法とは全く異なる反応原理に基づいて、重要骨格であるビアリールを合成できる。

No. 5

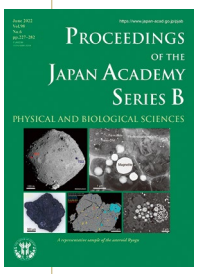


Reviews

Ken SATO: Multiple roles of endocytosis and autophagy in intracellular remodeling during oocyte-to-embryo transition **Cover Illustration**
https://doi.org/10.2183/pjab.98.013
受精は有性生物にとって発生の出発点である。本総説では卵母細胞が受精を経て初期胚へと変化する過程において細胞内リモデリングを制御するリソソーム分解系の役割とその分子機構について主に線虫で得られた知見を中心に紹介する。

Kyoko NOZAKI: Copolymerization of ethylene with non-vinyl polar monomers
https://doi.org/10.2183/pjab.98.014
高密度ポリエチレンは安価で剛性、耐薬品性に優れた汎用材料である。本稿では、ポリエチレンの機能性向上のために共重合させる極性モノマーに焦点を当て、一置換体からさらに高難度の多置換体に拡張するための触媒開発を概観する。

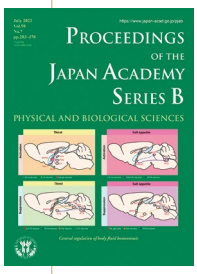
No. 6



Original Article

Eizo NAKAMURA et al. On the origin and evolution of the asteroid Ryugu: A comprehensive geochemical perspective **Cover Illustration**
https://doi.org/10.2183/pjab.98.015
探査機「はやぶさ２」によって回収された16粒の小惑星リュウグウ試料の詳細な地球化学総合解析を実施した結果、リュウグウは太陽系形成前から現在に至る複雑な物理化学過程を保持しており、生命の起源を含む太陽系物質進化を統一的に描くことができた。

No. 7



Reviews

Masaharu NODA and Takashi MATSUDA: Central regulation of body fluid homeostasis **Cover Illustration**
https://doi.org/10.2183/pjab.98.016
血液を始めとする体液の Na^+ 濃度は常に～145mMに保持されている。この体液恒常性は生命維持に必須であり、塩分／水分の摂取と排泄の精妙な制御によって実現されている。本総説では、体液恒常性と血圧制御を司る脳内機構について概説する。

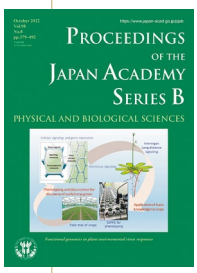
Kohzoh IMAI and Hiroaki TANIGUCHI: Therapeutic siRNA targeting the cancer cell stemness regulator PRDI-BF1 and RIZ domain zinc finger protein 14
https://doi.org/10.2183/pjab.98.017
2017年にPRDM14分子が幹細胞性を有し、乳癌等の癌で高発現することを見出した。PRDM14特異的なsiRNAを選択して、新たなDDS剤を用いて動物で治療効果と安全性を確認したので、現在乳癌患者で第１相試験を実施している。

Seiichiro OGAWA, Shinichi KUNO and Tatsushi TOYOKUNI: Design and synthesis of biologically active carbaglycosylamines: From glycosidase inhibitors to pharmacological chaperones
https://doi.org/10.2183/pjab.98.018
α-アミラーゼ阻害剤アカルボースの活性コアであるカルバ二糖部を構成する生理活性カルバグリコシルアミン類の、初期における合成的研究を概説し、最近に至る、新規シャペロン化合物の創製について解説した。

Original Article

Chao GU et al. Metabolomics of clinical samples reveal the treatment mechanism of lanthanum hydroxide on vascular calcification in chronic kidney disease
https://doi.org/10.2183/pjab.98.019
慢性腎不全の進行阻止に、Lanthanum hydroxide が効率的にリンを吸着して体外に排出すること、その機序としてPI3K-AKT-mTOR-HIF1の経路の阻害による血管平滑筋の石灰化抑制であることを報告した。

No. 8



Reviews

Koki IKEMOTO, Toshiya M. FUKUNAGA and Hiroyuki ISOBE: Phenine design for nanocarbon molecules
https://doi.org/10.2183/pjab.98.020
最近、明確で一義的な構造・組成をもつナノカーボンが挑戦的な合成標的として注目されている。本論文は、新しい合成単位「フェナイン」の登場により生み出された多様な巨大ナノカーボン分子について概説している。

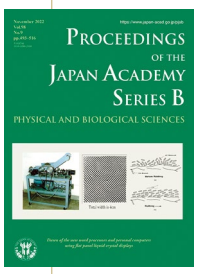
Motoko UNOKI and Hiroyuki SASAKI: The UHRF protein family in epigenetics, development, and carcinogenesis
https://doi.org/10.2183/pjab.98.021
UHRF1とUHRF2からなるUHRFタンパク質ファミリーはエピジェネティクス、発生、発癌において重要な役割を果たす。構造や進化などの基盤的な情報から、分子的な作用機序に関する最新の知見まで、本ファミリーの全てを概説する。

Minoru TAKEO, Yosuke AOKI and Takao KOYAMA: Recent volcanic activity at the Asama volcano and long-period seismic signals
https://doi.org/10.2183/pjab.98.022
日本の代表的な活火山である浅間山の深さ約10kmより浅い領域のマグマ供給系を、地震波速度構造と地殻変動及び火山性地震の活動に基づいて明らかにし、2004年以降の噴火活動及びその前駆現象との関連を解明した。

Masato ISHIGURO, Kurazo CHIBA and Seiichi SAKAMOTO: From Nobeyama Radio Observatory to the international project ALMA —Evolution of millimeter and submillimeter wave astronomy in Japan—
https://doi.org/10.2183/pjab.98.023
1982年の野辺山宇宙電波観測所の設立によって開花した日本のミリ波天文学はミリ波・サブミリ波帯での大型観測装置建設の国際共同プロジェクトALMA（2013年完成）へと発展した。その経緯と、装置概要、初期科学成果などについて解説する。

Kazuo SHINOZAKI and Kazuko YAMAGUCHI-SHINOZAKI: Functional genomics in plant abiotic stress respons-

No. 9

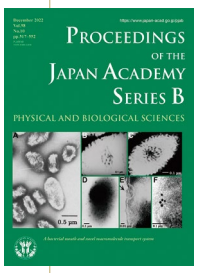


es and tolerance: From gene discovery to complex regulatory networks and their application in breeding **Cover Illustration**
https://doi.org/10.2183/pjab.98.024
植物は旱魃、高温、低温など厳しい環境変化に応答し適応して生存している。植物の環境ストレス応答と耐性獲得の分子機構、特に転写調節やシグナル伝達などに関するゲノム機能研究と乾燥耐性作物への応用に関して著者らの研究を中心に解説した。

Review

Shunsuke KOBAYASHI, Tomohiro MIYAMA, Hidenari AKIYAMA, Atsushi IKEMURA and Michio KITAMURA: Development of liquid crystal displays and related improvements to their performances **Cover Illustration**
https://doi.org/10.2183/pjab.98.025
液晶ディスプレイ（LCD）はテレビやPCの表示として広く用いられている。その1968年以来の55年間の発展において、その大量生産の基礎となる大面積無欠陥高品質LCDの著者らに依る実現などを紹介した。

No. 10



Reviews

Satomi YOSHIDA, Masato TAKEUCHI, Sachiko TANAKA-MIZUNO, Kayoko MIZUNO, Masayuki NAKASHIMA, Toshiki FUKASAWA and Koji KAWAKAMI: Clinical epidemiology and pharmacoepidemiology studies with real-world databases
https://doi.org/10.2183/pjab.98.026
医学研究では、診療報酬請求（レセプト）情報、急性期入院治療での診断群分類（DPC）情報、薬局における調剤情報、患者の電子カルテ由来診療情報などのリアルワールドデータを用いた臨床疫学研究、薬剤疫学研究が急速に発展しており、その概況や研究事例をレビューした。

Kousaku MURATA, Shigeyuki KAWAI and Wataru HASHIMOTO: Bacteria with a mouth: Discovery and new insights into cell surface structure and macromolecule transport **Cover Illustration**
https://doi.org/10.2183/pjab.98.027
細菌の細胞表層に多糖（アルギン酸）の取り込みに関わる高次構造体（口）が形成されることを見いだし、鞭毛形成タンパク質（フラジェリン）のアルギン酸結合能を中心にその輸送機構を明らかにした。口の移植による細胞機能の改変にも成功した。

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3.945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）
垣添忠生（泌尿器科学）
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）
山崎敏光（物理学）

PJA Newsletter
[PJA ニュースレター]
No.15

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
発行日／令和５年3月31日