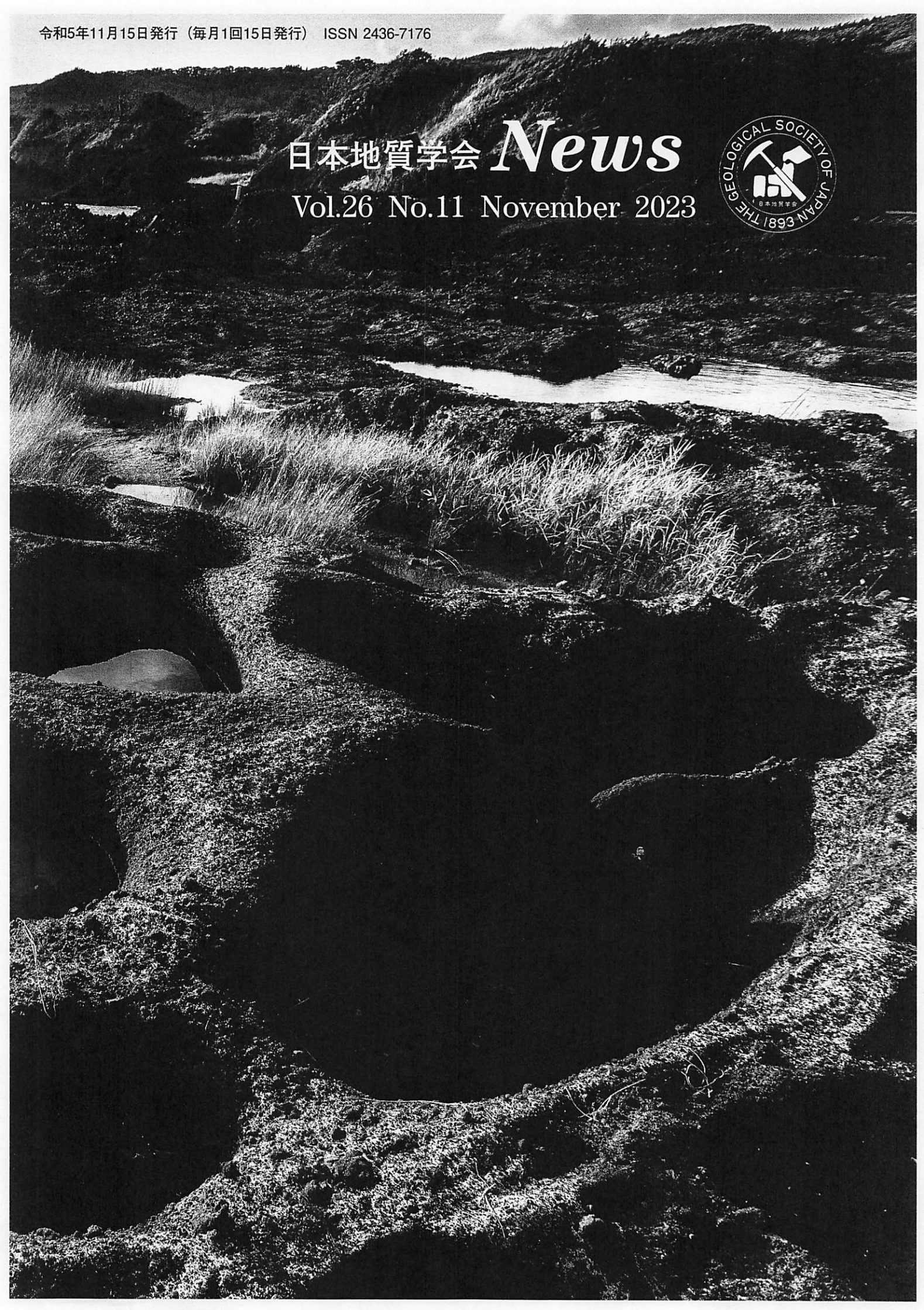


日本地質学会 *News*

Vol.26 No.11 November 2023



# 京都大会： 2023年受賞記念講演

2023年度日本地質学会各賞の受賞記念講演・スピーチ（2023年9月17日～19日：京都大学）等の内容をもとに各受賞者の皆様に原稿をご執筆いただきました。

## 地殻とマンツルのレオロジーと構造地質学的研究

日本地質学会賞

道林克禎（名古屋大学大学院環境学研究科）

### プロローグ

此の度は日本地質学会賞という大変栄誉ある賞を賜りましたこと、心よりお礼申し上げます。そして、大学教員になってからの29年間、お世話になった国内外の数多くの研究者の方々と学生諸君に感謝申し上げます。記念講演では、マンツル地質学～惑星探査みたいなフィールドサイエンス～と題し、特にマンツル研究について紹介させていただきます。

最初に簡単な自己紹介をいたします。私は静岡大学理学部地球科学科に1984年4月に入学しました。1年先輩に、岡田誠日本地質学会会長と鹿児島大学理学部の山本啓司教授がいてお世話になりました。卒業研究は、増田俊明助手（当時）の研究室で中央構造線マイロナイトの研究を行いました。この卒業研究によって、岩石の変形組織学の世界に魅せられて現在に至っています。静岡大学大学院で修士課程を修了後、1990年4月からオーストラリア政府国費留学生／ジェームズクック大学奨学生としてオーストラリア北東部クイーンズランド州タウンズビルにあるジェームズクック大学地質学科の博士課程に進学しました。指導教員は、変成岩の変形組織学で著名なティム・ベル先生です。

留学中は、修士研究まで続けていた中央構造線マイロナイトに加えて、カナダ・オンタリオ湖北岸に位置したヘムロ金鉱床の変形構造とアメリカ合衆国アリゾナ州ツーソン近くのベースアンドレンジに発達したデタッチメント断層マイロナイト、そして、オーストラリア中央部エアズロックの南に位置したウッドロフスラストマイロナイトの研究を行いました。博士課程在学中、地質学科全体セミナーにおいて1992年と1993年の2年連続で博士課程最優秀研究発表賞を受賞したことが大きな自信になりました。また、1994年にPh.Dを取得するまでの4年間を海外で学生として過ごした経験は、英語力の上達を含めて、後に国際共同研究を推進する基盤となりました。

帰国した1994年4月からの半年間を日本学術振興会特別研究

員（PD）として東京大学理学部地質学教室（受入教員：吉田静男助教授）で過ごし、同年10月から静岡大学理学部地球科学科の助手に採用され、途中にフランス留学2年を挟んで、助教授、准教授、教授と職階が上がり、2018年4月からは名古屋大学大学院環境学研究科教授として研究教育活動を続けています。



マンツル研究を志すようになったのは、修士1年の時に増田研究室で実施した北海道調査の際に幌満カンラン岩の砂利をみて感動したことからです。カンラン岩がとてもキレイで、いつか研究したいとずっと夢を描いていました。この夢が叶ったのは、1997年8月からの2年間、日本学術振興会海外特別研究員としてフランスのモンペリエ大学に留学したときです。モンペリエ大学地球科学部門の部門長であり、マンツルのレオロジー研究で世界的に有名なアドルフ・ニコラ教授からアラビア半島のオマーンオフィオライト調査に誘われて、1998年1月からの5週間、フランソワーズ・ブーディエ教授を含めた3人でキャンプしながらカンラン岩体の系統的な地質調査と岩石採取を行いました。これがマンツル研究の本格的な始まりです。さらに、調査で得たカンラン岩試料について、ニコラ教授の共同研究者であったデイビッド・マインプライス博士からカンラン岩の結晶方位解析について丁寧に教えてもらいました。そのおかげで、フランス留学を終えて静岡大学に戻ったとき、マンツルを研究

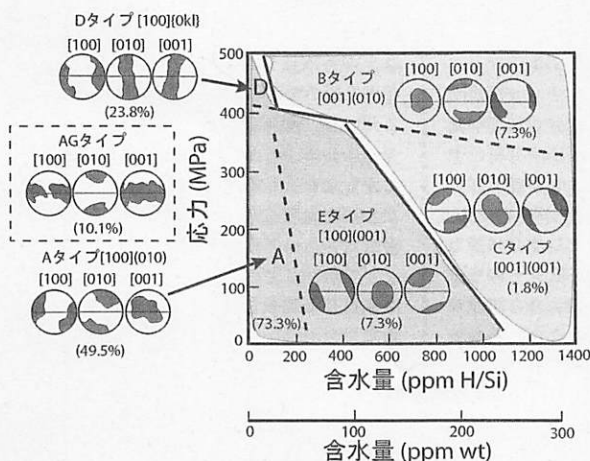


図1 カンラン石の結晶方位ファブリックの分類

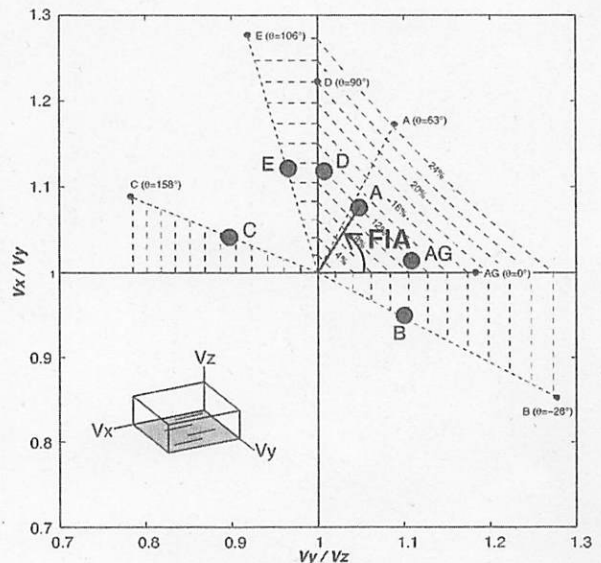


図2  $V_p$ プリン図とFIA

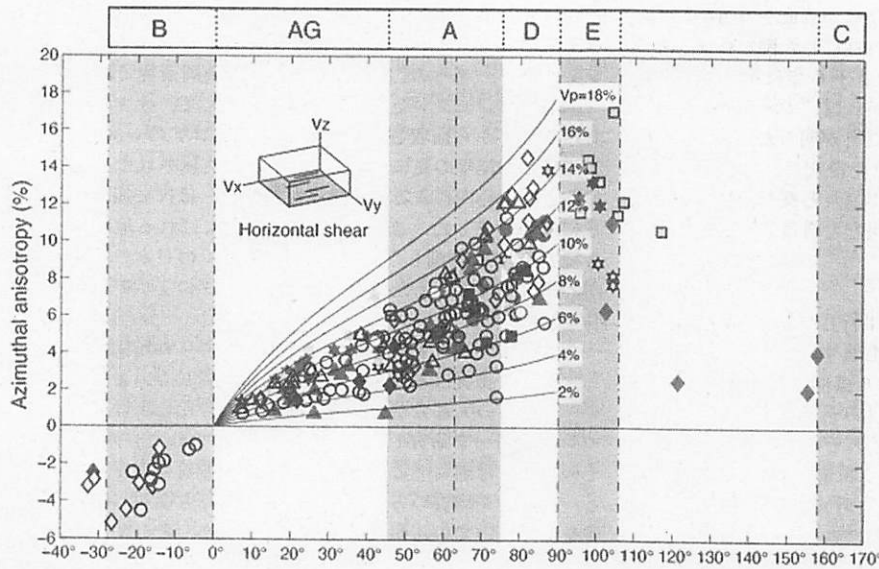


図3 カンラン石の結晶方位ファブリックと方位異方性の関係

する体制を比較的円滑に整えることができました。ただし、マントル研究を始めたばかりの頃は、カンラン岩研究が今に至るライフワークになるとは思ってはいませんでした。

マントルのレオロジーと地震波異方性

それでは、ここからはマントルのレオロジーと地震波異方性の研究について少し紹介いたします。海洋プレートの海洋地殻と最上部マントルの内部構造は、地震波速度構造によって明らかにされてきました。特に地殻とマントルの境界であるモホロビッチ不連続面直下の最上部マントルでは、地震波速度に強い異方性があり、最も速い方位はプレート運動に平行と考えられています<sup>[1]</sup>。しかし、これらの地震波速度構造を真に理解するためにはマントル物質であるカンラン岩の構造解析に基づく物質科学モデルが必要です。

一般に、変形した岩石の物性（物理）情報には、組織と結晶方位ファブリックの2つがあります。しかし、カンラン岩の場合、蛇紋岩化作用の影響で組織解析は困難なことが多いので、結晶方位の定向配列からレオロジーと地震波異方性を研究することがよくあります。カンラン岩の分類は岩石学的にはかんらん石-直方輝石-単斜輝石の鉱物モードで分類されますが、レオロジー研究ではカンラン石の結晶方位定向配列の6つのタイプ（結晶方位ファブリックといいます）によってカンラン岩を分類します。2000年代に入って、イエール大学の唐戸俊一郎教授のグループがカンラン岩の高温高压変形実験研究から、結晶方位ファブリックの形成には流動応力と含水量が大きく関わっていることを示しました（図1）<sup>[2]</sup>。この分類を基にして上部マントルの大構造が描かれていますが、それを検証した例はほとんどありません。

私は、マントル研究を始めた当初から結晶方位ファブリックが上部マントル内部でどのように分布しているのかに興味があり、研究室の学生達に協力してもらって北西太平洋周辺を中心としてカンラン岩データを集めてきました。そして、結晶方位ファブリックのデータ数がある程度増えてきた段階で、全てのデータを定量的に比較検討するために、結晶方位ファブリックと地震波（P波）異方性の関係を表す方法を2016年にEPSLに発表しました<sup>[3]</sup>。この方法は構造地質学の古典的な手法であるフリンダイアグラムを応用したもので、結晶方位ファブリックから計算されるP波速度についてカンラン岩の面構造と線構造に対する速度比を縦軸と横軸とすることで、結晶方位ファイブリ

ックの特徴を1つの値だけで表すことができます。私はこの図をVpフリントとよんでいます（図2）<sup>[4]</sup>。

この方法を使って、それまでに発表した論文のデータから研究室の卒業研究/修士研究/博士研究の未公表データまでの全ての結晶方位ファブリックのデータをVpフリントに投影しました。さらに、Vpフリントの横軸に対して原点と各点を結んだ直線の角度をファブリックインデックスアングル（FIA）と定義し（図2）、FIAを使って採取地点毎に結晶方位ファブリックを分類した結果、北西太平洋の海溝カンラン岩にはCタイプ以外の5つのタイプが存在することがわかりました。なぜ海溝カンラン岩の結晶方位ファブリックが多様なか未解明ですが、この結果から地球表層のわずか30%しかない陸上で得られるマントルの情報は、一見すると多様にみえますが、もしかしたら海洋底の極一部からもたらされたのではないかと考えるようになりました。もしかしないかもしれませんが、さらなる研究が必要です。

2016年に提案した方法の最大の利点は、海洋底で観測される方位異方性と直接比較できることです。例えば、東北日本沖の太平洋プレートで観測された方位異方性は、モホ面近くは5%であるのに対して、深くなると13%まで大きくなるとの報告があります<sup>[5]</sup>。この結果を検討するために、プレート運動のよう

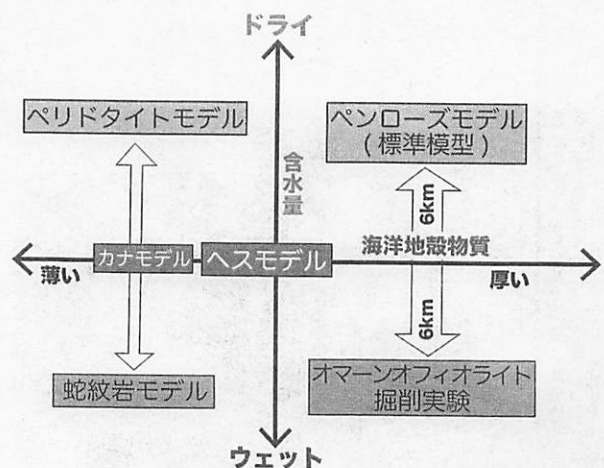


図4 海洋プレートの岩石層序モデルの比較

な水平剪断流動によってカンラン岩の構造が形成される条件下で、横軸のFIAに対して縦軸を方位異方性にした図を作成しました(図3)。その結果、モホ面近いマントルではAG~Aタイプ、深くなるとDタイプが形成されていけば、太平洋プレートで観測された方位異方性を説明できることが明らかになりました。この地震学と物質科学を融合させた研究は、私にとってThe Marriage of Rock and Wavesとよばれる概念を具現化したもので日本地質学会賞に相応しい成果だと自負しています。

### 海洋プレートと海溝底の研究

次に、マントルのレオロジー研究と平行して進めている海洋プレートと海溝底の研究について紹介します。中央海嶺で形成された海洋プレートは海溝からマントル深部に沈み込みます。一方、海洋プレートに浸透した水は、沈み込み帯でスラブから脱水して地表に戻ります。この2つはそれぞれ岩石循環と水循環であり、この2つが惑星地球における物質大循環の要です。私をこの2つを合わせて地球リサイクルと呼んでいます。

モホロビッチ不連続面は全ての大洋で6~7kmと均質です。この不連続面までが海洋地殻と定義されているので、海洋地殻の厚さは全ての大洋で6~7kmと考えられており、1973年にオフィオライトを基にして考案された厚さ6kmの海洋地殻を含めた海洋プレートの岩石層序モデルはペンローズモデルとして知られています<sup>[6]</sup>。しかし、これまでの海洋底探査によって、実際の海洋地殻の岩石層序モデルとして、ペンローズモデルだけではなく、ヘスモデルとして有名な蛇紋岩モデルまで複数のモデルが提案されています。これらの岩石層序モデルは一見すると多様ですが、それを特徴づけるのは海洋地殻(火成作用)の厚さと含水状態(浸水量)です。従って、横軸に海洋地殻物質の厚さ、縦軸に含水量をとると、全ての岩石層序モデルを1つの図で比較することができます(図4)。海洋プレートは、中央海嶺における拡大速度で分類されることが一般的ですが、この図のように別の尺度で見直す必要があると考えています。

また、現在の海洋の大部分を占める太平洋を構成する海洋プレートへの浸水量は少ないと考えられる一方で、海底探査の結果から大西洋やインド洋を構成する海洋プレートは海洋地殻が薄く浸水量も多いことが明らかになっています。プレートテクトニクスによれば、現在の地球表層では、地質学的な時間スケールにおいて太平洋が次第に狭くなりながら大西洋が拡大しています。このことは、地球表層からドライな海洋プレート(太平洋)が減って、ウェットな海洋プレート(大西洋)が拡がりつつある状態と考えられます。ウェットな海洋プレートが大部分を占める未来の地球表層は、どのような環境になっているのでしょうか?

国際陸上掘削計画の一環として2016年11月から2018年3月まで、ペンローズモデルの模式地として知られるオマーンオフィオライト岩体の下部地殻から最上部マントルまでの6地点を掘



図5 日本人最深潜航記録を60年ぶりに更新

削し、300mから400mの連続コアの採取に成功しました<sup>[7]</sup>。私も基盤研究(S)による研究補助金の支援を受けながら、プロジェクトリーダーの1人としてこの国際共同研究であるオマーン掘削プロジェクトを牽引しました。そして、オマーン王国における地下から回収されたばかりの掘削コアの一次記載から、2017年と2018年の夏にそれぞれ2ヶ月間実施された超深部探査船ちきゅう船内による掘削コア記載まで、ほぼ一通りの作業工程に携わりました。また、CMサイトとよばれる地殻-マントル境界を400m掘削したCMコアには、多くの日本の研究者にも関心をもってもらえたことで日本グループのプレゼンスが高まりました。

さて、オマーンオフィオライト掘削で得られた海洋地殻物質とマントル物質はどちらも予想以上に変質していました。特にカンラン岩の大部分が蛇紋岩に変わっていたことは、マントルのレオロジーを研究している私には多少なりとも残念でした。その思いとは別に、これらの掘削コアの変質の程度を比較すると、マントル物質の方が海洋地殻物質よりも変質(浸水)の影響を強く受けている傾向が認められました。そして、海洋底において、海洋地殻が厚くあまり濡れていなくても、もしかしたらその下位(深部)のマントルは少なからず濡れているかもしれないと考えようになりました。

現在の海洋プレートの変質(浸水)状態はどうなっているのでしょうか?それを検証するためには超深部探査船ちきゅうによるマントル掘削が必要です。マントル掘削計画はペンローズタイプの海洋地殻6kmを掘進してその下位のマントルに到達してマントル物質を直接採取する計画です。現在までに掘削候補地点は、ハワイ沖、メキシコ沖、コスタリカ沖の三箇所に絞られ、事前探査が少しずつ進んでいます。しかし、マントル掘削計画の実現は、予算的にも技術的にも1960年代にアメリカ合衆国によって先導されたモホール計画と同様に「月よりも遠い道」となっています<sup>[8]</sup>。こうした状況ではありますが、マントル掘削までのロードマップを立案し、オマーン掘削プロジェクトをはじめとして、ゴジラメガマリオン掘削、アウターライズ掘削、前弧マントル掘削などの比較的实现可能な掘削計画を立ち上げて少しずつ進めています。

前弧マントル掘削計画については、私が中心となって2016年4月に掘削概要提案書を国際深海掘削計画に提出しました<sup>[9]</sup>。掘削候補地点は、伊豆・小笠原海溝の陸側斜面の水深7000m地点です。これまでの海底地質調査から海溝7000m以深にマントルが直接露出している可能性が高いと考えており、前弧マントル掘削の実現を目指して伊豆・小笠原海溝の調査と研究を継続的に進めています。そして、この調査研究をきっかけとして、東京海洋大学の北里洋博士に誘われて2022年夏のプレッシャードロップ号による日本近海の高深部調査航海に参加しました<sup>[10]</sup>。

2022年8月13日(土)、世界的冒険家のヴィクター・ベスコボ氏とアメリカの民間潜水艇リミッティングファクターに乗船して伊豆・小笠原海溝の最深部約9800mまで潜航しました(図5)。これにより、東京水産大学学長だった佐々木忠義教授が1962年にフランスのアルシメード号で千島・カムチャツカ海溝の水深9545mに潜った日本人最深潜航記録を60年ぶりに更新するという名誉を得ました<sup>[10]</sup>。この潜航についてはテレビ番組でも大きく報道され、2022年の「時の人」になりました。

しかし、海溝最深部では潜水船のマニピュレータが動かず、岩石採取が叶わなかったため、うれしい気持ちはありつつも、悔いが残る潜航となりました。ちなみに、ベスコボ氏は、私と一緒に伊豆・小笠原海溝の最深部に潜航する直前の航海で、マリアナ海溝チャレンジャー海淵の最深部約10900mに(何度目かの)潜航を行っていました。最近、その時に撮影した超深海底の崖の画像がSNSにアップロードされたのですが、そこにはチャレンジャー海淵最深部に露出した岩石の様子が写っていま

す。風化した色合いから、おそらくマントル物質だろうと思われる。この画像を見て、改めていつかマリアナ海溝チャレンジャー海淵の最深部に潜航して岩石を採取したいとの思いを強くしました。これが実現するかどうかは定かではありません。いずれにしても、超深海底への潜航は、もはやただの夢ではありません。海溝底研究には、直接アプローチできる新時代が到来していることをここに強調したいと思います。

#### エピローグ

本講演の最後にこれまでの研究教育実績を簡単に振り返ってみます。私は静岡大学時代の23年間に91名（延人数）の学部生／大学院生を送り出しました。名古屋大学では、2018年からの6年間で36名（延人数）の学部生／大学院生の研究指導を行っています。学部生が半数以上だった静大時代に対して、名大では大学院生が多くなっています。査読付き国際論文数は、年間2報の目標には全く到達しておらず、某申請書の審査員から年齢の割に論文数が少ないと揶揄されたことが忘れられません。一方、国際共著論文は近年増加しています。被引用数は、当たり前かもしれませんが出版論文数に比例して増えています。

国際共同研究に参加した経験からすると、参加するだけでなく主要な役割を得て研究を推進するためには、自分自身で書いた論文発表とその評価が必要十分条件だと思います。国際共同研究をしていると彼らが私の研究をよく知った上で声をかけてきたことがよくわかります。また、国際学術会議として世界最大規模のAGUミーティングに参加したとき、私の名前を知っている参加者が少なからずいて驚きました。全て論文から名前を覚えたらしく、論文を書いて良かったと思えた瞬間です。

静岡大学時代に地殻とマントルのレオロジー研究を一緒に取り組んでくれた学生の皆さんと積み上げた実績をもって名古屋大学に2018年に赴任し、榎並正樹教授の支援を受けながら頼朝佑衣さんと岩石鉱物学研究室（岩鉱）を立ち上げました。そして、今も静大時代と変わらず、学生さん達と一緒に研究できていることを幸せに感じています。赴任直後に、偏光顕微鏡の教科書で学生時代からお名前だけは知っていた諏訪兼位先生と年代関係の学術論文を通してお名前を知っていた柴田賢先生にもお目にかかりました。両先生ともに岩鉱の先代教授ですが、ご高齢でもとてもお元気で、お話をしながら岩鉱教授の立場の重

さを実感しました。驚くべき事に、1951年に岩石学鉱物学研究室として創設された岩鉱の歴代9名の教授のうち、私を含めて6名が日本地質学会賞を受賞しています。今回の受賞によって、ようやく岩鉱の教授として胸を張ることができそうです。

フランス留学後、静岡大学におけるマントル研究の立ち上げを研究室の学部生／大学院生と若手研究者に勢いづけていただきました。特に静大増田研のポストドクだった岡本敦さんとイェール大学唐戸研のポストドクだった片山郁夫さんには、知り合った当時から現在までの変わらぬ活躍によって私を常に奮い立たせてくれています。平賀岳彦さんは私の研究を誰よりも理解して励ましてくれています。その他、高澤栄さんと小原泰彦さんには陸と海のマントルのフィールドワークで多大なご支援をいただいています。お二人がいなかったら私のマントル研究のスケールは今よりもずっと小さくなっていただいことでしょう。その他、日本地質学会学術大会、日本地球惑星科学連合大会、日本掘削科学コンソーシアムの活動等の機会に、多くの方々と出会い、国内外の陸と海でたくさんの方々の貴重な経験をさせていただきました。最後に出張が多く家にあまりいない私を支えてくれた家族の存在は改めて大きいと実感しています。改めまして、日本地質学会賞を賜りましたこと、心よりお礼申し上げます。今後ともよろしくお願いたします。

#### 文献

- [1] Kodaira, S. et al. (2014) *Nature Geoscience*, 7, 371–375.
- [2] Karato, S. et al. (2008) *Ann. Review Earth Planet. Sci.*, 36, 59–95.
- [3] Michibayashi, K. et al. (2016) *Earth Planet. Sci. Lett.*, 443, 70–80.
- [4] 道林克禎 (2015) *地学雑誌*, 124 (3), 397–409.
- [5] Shinohara, M. et al. (2008) *Phys. Earth Planet. Int.*, 170, 95–106.
- [6] Michibayashi, K. et al. (2019) *Oceanography*, 32, 138–149.
- [7] Kelemen, P. et al. (2023) *J. Geophys. Res., Solid Earth*, 128, e2023JB026677.
- [8] 道林克禎 (2021) *地学雑誌*, 130, 461–482.
- [9] Michibayashi, K. et al. (2016) *IODP Proposal*.
- [10] 道林克禎 (2023) *科学通信*, 科学, 93, 99–103.