

付加体学事始め：黎明期における私的回想

第三部 発展期へ

小川 勇二郎¹⁾

1. バルバドス海嶺付加体での掘削研究

私の付加体研究は、第一部および第二部(小川, 2023a, b)で述べたように国際的な動向と並行して進展して来たのだが、国際深海掘削計画(DSDP-IPOD)が、グローマー・チャレンジャー号からジョイデス・レゾリューション号に代わってODPになる1980年代中頃から、世界の注目は次にどこで基本的プロセスとメカニズムを明らかにするかに集中した。各海域で予備調査を行っていた研究グループはおおよそ4, 5だったろう。日本の南海付加体は海陸相互の比較研究が可能ということで有利な状況にあった。これらの計画では音波探査断面の取得に続いて掘削によって試料を採取し、また同時にロギング(孔内計測)を行い孔内での様々な測定や実験を行うというものであった。水圧破碎法などによって水平面内での主応力軸の推定ができるようになると、一気に詳細で精度の高い研究ができるようになった。また音波探査も三次元となり、それにより詳細な海底地形図と内部構造との比較、それらの側方への追跡もできるようになった(倉本, 1994; Moore, G. *et al.*, 2007)。特に、上に述べたロギングの他にも、パッカーによる現場での間隙水圧の測定に基づく透水率の計測や主応力軸の推定も試みられた。こうして現世の付加体の海底下のさまざまな状態の測定が成功すれば、同時に行われる堆積物の変形組織や構造地質学的、地球化学的研究との対応の議論や具体的なテクトニクス解明が可能になるはずであった。しかしこれらの深海掘削は国際的かつグループごとの大規模な計画であって、理想的な場合でのみ成果が得られるのであって、巨額な予算を投入して行われる国際深海掘削の故慎重に計画が練られた。

中村一明教授亡き後、海洋地質学・地球物理学の数名の若手が東京大学海洋研の平朝彦教授のもとに集まり、国際計画を協力して分担することになった。私はODPのテクトニクスパネルの委員を引き受け、1988年から年2回の掘削プロポーザルの検討委員会に5年間出席した。欧米各国の代表たちは非常な熱意でこの委員会で激論を戦わ

せた。私はJames Casey Moore教授に聞いた。今まで多くの成果を上げてきたので、貴殿のグループはずいぶん余裕がある計画を立てられるねと。そうしたら返事は驚くべきものだった。いやアメリカでも我々の計画に賛成する人はそれほど多くはない。ほとんどの地質屋は大陸を研究していて海洋に興味のある人は少ない。海洋関連の人でも多くは環境や地史であって、またテクトニクスや地球物理の人も多くはプレート拡大海嶺に興味があって、沈み込み帯に興味のある人はマイナーだというのだ。なるほど合衆国では一部にしか現世の沈み込み帯はなく、現実味がないのだろうかと思ったものだ。それだけに彼と彼のグループは、大西洋プレートがカリブプレートへ沈み込む境界のバルバドス海嶺付加体(Barbados ridge accretionary prismとridgeをつけて呼ばれることが多い)の先端部分の掘削に集中した。Moore教授は見通しと熱意は一流だった。忍耐強く実験レグのプロポーザルを用意し、1979年のLeg78A(Moore, J. C., Biju-Duval *et al.*, 1982)の後、ODPの初期の1986年のLeg110で非常に良いコアリングを行った(Moore, J. C., Mascle, *et al.*, 1988)。私は、平朝彦教授の推薦を受け、二度目の掘削航海であったが、放散虫生層序学の宇都宮大学の酒井豊三郎教授とともに、このバルバドス海嶺付加体のLeg110に参加した(小川・石丸, 1989)。その後バルバドスでは1994年と1996年に実験を主としたLegs156と171が立て続けに行われ、試料の採取と実験・計測はほぼ成功した。成果はODPのInitial ReportとScientific Resultsに報告されている。また、基礎的な地質、特にバルバドス海嶺付加体を含めてそのほかの付加体でのコアの記載や1990年代までの変形組織研究は、Moore, J. C. (ed.) (1986)に、それらを含めて海底、陸上の多くの付加体の構造地質学的と土質力学的な議論は、Maltman (ed.) (1994)にまとめられている。この間、私は1992年に筑波大学に異動した。

Leg110の成果としての酒井豊三郎教授の放散虫の化石帯に基づくスラストシートの繰返しは、Leg156でも補強され詳細に判明し、付加体先端の構造的な発達史が詳し

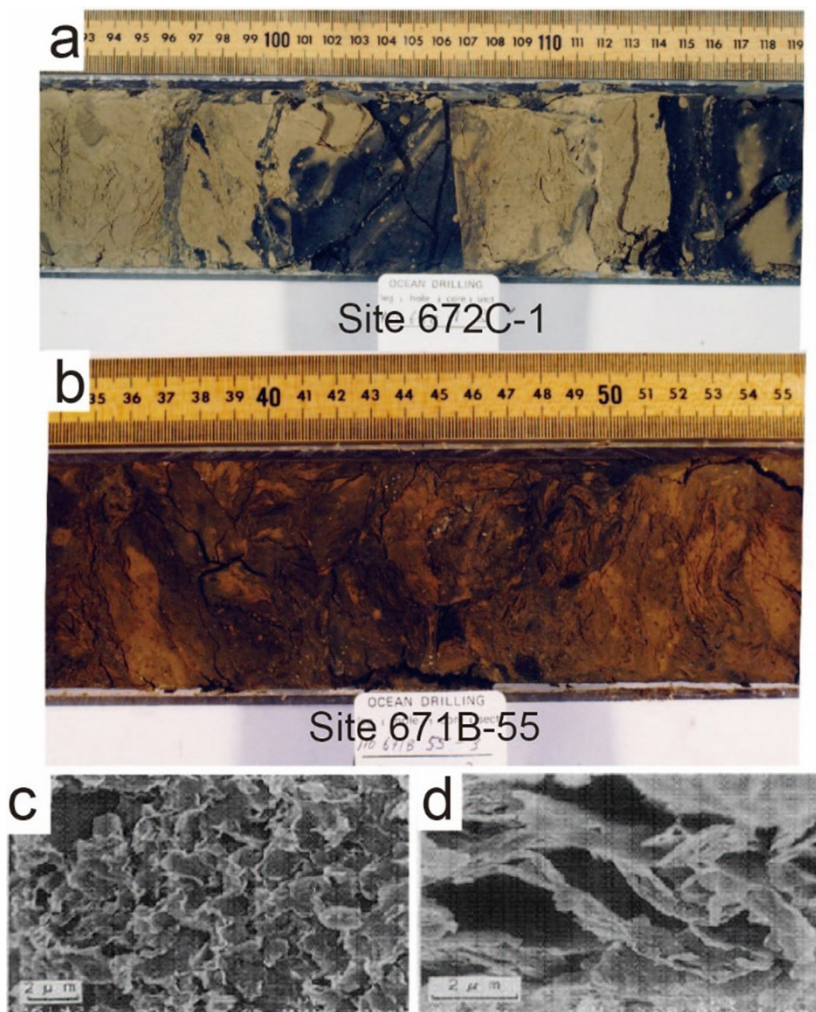
1) 筑波大学名誉教授 〒300-2358 茨城県つくばみらい市陽光台

キーワード：バルバドス海嶺付加体、日仏KAIKO計画、潜水調査、掘削技術、間隙水圧、流体移動、変形特性、観察の重要性、タイプロカリティ

く解明された。古地理的発達やカリブプレートの東進によるテクトニックな意義なども含めて、私がコチーフの一人として参加した Leg156 の成果を含めて総合的には以下のようにまとめられる (Westbrook, 1982; Brown and Westbrook, 1987; Behrmann *et al.*, 1988; Labaume *et al.*, 1997; DiLeonardo *et al.*, 2002; 小川・石丸, 1989; 山縣・小川, 1989; 小川・久田, 2005)。すなわち、1) 大西洋側の大洋底およびアンティル海溝にたまった南米アマゾン川とオリノコ川に由来する砂質ないし泥質タービダイトやチャンネル堆積物が、古第三紀から順次付加し続け、2) 現在の付加体の少なくとも 12 km の幅の先端部分は放散虫に富む中新世の粘土質堆積物に沿って長距離すべり、そこに最大厚さ 30 m のデコルマンゾーンを形成する。3) それから派生するスラストによって中新世以上の地層が複数回繰り返し、断層面に沿って泥ダイアピルが発生し、海底には総計 450 個以上の泥火山が発達する。4) さらに先端から約 20 km 陸方では古第三紀の同様な堆積物上のすべり面もあって、デコルマンゾーンは陸方へ次第にステップダウンしている。5) それらの古第三紀と中新世以降の堆積

物は先端で低角なスラストで繰り返す(オフスクレイピング; 剥ぎ取り)だけでなく、6) 陸方で序列外スラスト (out-of-sequence thrust; OOST) と呼ばれるより低角の断層でもう一度繰り返し、古第三紀層も含めた二重三重に重なるナップ構造をとる。7) またデコルマンゾーン周辺には大小のデュプレックスが形成されてアンダープレイティング(底付け)が行われている、などである。

この中で、流体移動で重要な働きをしているのは、デコルマンゾーンでの特徴的なスケリークレイや stratal disruption と呼ばれるリーデルシア(ずれ変形ゾーン内部の剪断割れ目)による変形部分である。前者における高間隙率の組織をもつ部分に沿ってメタンに富む流体が選択的に流れている。それは元来多孔質の放散虫や間隙率の大きい粘土質堆積物の組織が破壊されたために(第1図)、高い間隙水圧と高い勾配が発生し、それゆえ内部摩擦がほとんど無視できるほどになったためすべりやすく、かつ流体移動の場にもなると説明された (Moore, J. C. and Byrne, 1987; Moore, J. C., 1989; Moore, J. C. *et al.*, 1991; Labaume *et al.*, 1997)。スケリークレイの実態はそれま



第1図 バルバドス海嶺付加体の先端部のそれぞれ Site 672 (変形前線の約 5 km 沖合)、671 (変形前線の約 3 km 陸側) の中新世の放散虫粘土岩のコア写真 (a, b) (筆者撮影、実際の色は、これに近い。小川未発表資料) と SEM 写真 (c, d)。a) は、全くシアを受けておらずマンガン酸化物が生じており、部分的に黒色を呈する。一方、b) はシアを受けてスケリークレイとなっており、水酸化マンガンのコゲ茶色を呈する。下はそれぞれに対応する Leg156 の凍結乾燥法による試料の SEM 写真。左下のバーは 2 μ m。c) のクレイフレイクは edge-edge ないし face-edge の非破壊のままの高間隙の状態である (672-C-1)。d) は、シアを受けてジョグができており高い間隙流体圧の故に高間隙のままとなっており、流体の通路たり得る。Takizawa and Ogawa (1999) による。(Elsevier 社からの転用許可済み)。

で乾燥によって二次的に変形した試料で調べられていたが、筑波大学の滝沢 茂博士らは軟弱堆積物の凍結乾燥法を開発し、初めてありのままの変形前後の組織を明らかにすることに成功した(Takizawa and Ogawa, 1999)(第1図c, d). Leg171 では間隙水圧と透水率の現場測定も試みられた。中新世のデコルマンのより下位にはオリノコ川由来の粗粒な砂岩もあり、そこにも西からの間隙水が流れているらしいということが推定された。こうして、James Casey Moore 教授をリーダーとする4回もの掘削航海によって、バルバドス海嶺付加体の具体的な実態が詳しく解明されたのである。

そのほかの地域では、たとえばオレゴン沖のカスカディア付加体や南海付加体でも掘削は行われたのであるが、依然としてより深い部分でのプロセスとメカニズム、たとえば巨大地震発生の場合である沈み込むプレートの上面までは掘削は到達できていなかった。理由の一つはジョイデス・レゾリューションのコアリングは、パイプを海底にそのまま突き刺して掘削する裸掘りとも呼ばれるもので、砂岩の流動化や液状化、さらにスメクタイトを主とする粘土層の高間隙水圧によって掘削の先端の崩壊が起きやすく、それ以上掘削が続けられなくなるからでもあった。それを克服するには二重パイプでの掘削(ライザー掘削)が必要であった。これらの技術は陸上の掘削や海底下でも浅海での石油ガスの採取では普通に行われていることであったが、深海での技術を実現しそれを科学掘削に応用するには、特別な掘削船を必要としていた。それに関してはさまざまな議論があったが、結果的に日本の大型掘削船「ちきゅう」の建造と実行が図られた。南海付加体の掘削とその結果に関しては、平 朝彦氏の書物(地質学3, 岩波書店, 平(2004)), 木村 学氏の書物(東大出版, 木村 学(2002)), 木村 学・木下正高氏編著の書物(東大出版, 木村 学・木下(編)(2009), 木村 学ほか(2018)などに詳しい。

2. 日仏 KAIKO 計画

掘削研究が進展しつつある中、日仏両国で潜水船による日本周辺の高溝域の海底の目視観測と試料採集(日仏 KAIKO 計画)が計画実行された。これは陸上の地質調査の深海底版である。フランスは海洋国家である。パリ大学のちにエコールノルマル・シュペリユールの Xavier Le Pichon (グザヴィエ・ルピション)教授を先頭に日本周辺の沈み込み境界を大きく3地域に分けて、1984年の海底地形図とシングルチャンネル音波探査、それに1986年からの潜水船での一連の調査研究が行われた。予備調査を含め

ると3回のフランスの調査船と潜水船航海、3回の東海洋研究所の調査船の航海がなされた。またそれらの延長としての海洋科学技術センター(現海洋研究開発機構)の潜水船「しんかい6500」による調査も行われた。日仏 KAIKO 計画の成果は、1987年からの4冊の特集号(*Earth and Planetary Science Letters*, 1987; *Tectonophysics*, 1989; *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 1989; *Earth and Planetary Science Letters*, 1992; それぞれ, Le Pichon *et al.*, eds., 1987; Okada and Cadet, eds., 1989; Cadet and Uyeda, eds., 1989; Kastner and Le Pichon, eds., 1992)で集大成がなされたのだが、代表者の一人の小林和男教授のメタンの染み出しモデルはそれまでの海溝で起きている特徴的な脱水現象を端的にまとめたものだった(Kobayashi, 2002)。メタンの染み出しの証拠は化学合成生物群集と炭酸塩のセメンテーションであって、チムニー状のパイプも採集された結果(第2図)、炭素と酸素の同位体を用いたバクテリア起源の生物化学作用による硫酸還元とメタン酸化のモデルが解明された(Sakai *et al.*, 1992)。こうした生物地球化学的研究からは、海溝域での脱水作用は、化学合成生物群集と炭酸塩のセメンテーションとにほとんど1対1に対応していることもわかった。

フランスからの KAIKO 計画参加者の何人かは構造地質と地球物理の境界領域に興味をもつ意欲的な人々だった。そのうちの数名の大学院生が全国のいくつかの大学に留学



第2図 1986年の潜水艇ノチール号による潜航によって南海トロフの変形前線付近から、私が初めて石灰質のパイプを採集してきた直後に、研究を主導したルピション先生と小林和男教授とともに撮った記念すべき写真。試料の分析と議論は、Sakai *et al.* (1992)を参照のこと。

していたが、彼らは日本の若手研究者にかなりの影響を与えたようだった。今でも超丹波帯、ナップテクトニクスあるいは彼らの言うマイクロテクトニクスなどの研究は、日本の多くの地質研究者に記憶されている。彼らの大胆な発想、見事なまでのスケッチや想像図などは、さすが自由と芸術の国ならではのものだと私も感心した。

KAIKO 計画が終了した後の 1990 年秋、パリでのまとめのシンポジウムが行われた。その後現ソルボンヌ大学教授の Laurent Jolivet 博士の案内の下、日仏の総計 20 名ほどの地球科学者がフランスチームによって招待され、コルシカ島の 1 週間の巡検が行われた。日本からは初めて地質巡検に参加するという地球物理学や地球化学分野の研究者が多く、今でもその時の楽しさが語り草になっている。ここでは Jolivet 博士は景色や露頭の前で得意のスケッチをすらすらと描き、我々にコルシカ島が海没しそうなスイスアルプスの延長である、事実エクロジャイトを海岸近くで見ることができる、などを印象付けてくれた(第 3 図)。

こうして日仏 KAIKO 計画では、南海、駿河、相模の 3 トロフ、千島海溝、日本海溝および房総沖三重点などの主要な沈み込み境界で一連の研究が行われ、それは後の南海・東海計画を含め、はじめフランスの「ノチール」、のちに日本の「しんかい 6500」による潜水調査で一応の幕を閉じたのであるが、その後の小林和男教授のいくつかの航海や、海洋研究開発機構の航海でもそれらを補足する大きな成果が得られていた。そのうち私が関連したものとしては、日本海溝と房総沖三重点および、南海付加体のうち天竜海底谷と潮岬海底谷での基本的なデータの取得と潜水(有人および無人)調査があげられる。それらのうち海溝海側と陸側斜面の地形、変形、岩石の産状などについては西太平洋海域とマリアナ海溝の例をも含めて、小川ほかの編著の書物(Springer 社, Ogawa *et al.*, eds., 2011)にまとめられている。これらの調査地域では、調査前の 1933 年に起きたアウターライズにおける昭和三陸地震津波や、調査直後に起きた 2011 年 3 月 11 日の東北沖巨大地震の二つの巨大地震と類似の、過去の地震活動で形成されたとと思われる地形変化、地質構造、地すべり堆積物、さらに房総沖三重点での大崩壊などがすでに観察され、議論されていた(Ogawa, 2011; Ogawa and Yanagisawa, 2011)。

3. 南海付加体の目視観察

その後、現山口大学の川村喜一郎教授を代表として、現徳島大学の安間 了教授らとともに南海付加体の潜水船による研究も行われた。これはまさに深海底を目視することによる現世深海底の付加体マッピング調査であった。我々は海洋研究開発機構の無人潜水艇「かいこう 10K」を用いた試験公開にも参加させてもらい、天竜海底谷の出口で新鮮な変位したばかりの断層露頭も見出していた。そこで露頭の直接観察とサンプリングが行える場所として天竜海底谷と潮岬海底谷に絞って計画を練った。採用されたプロジェクトは、2005 年と 2006 年に「しんかい 6500」による計 18 回の潜航となって実現した(Kawamura *et al.*, 2009)。我々は敷設されたケーブルを避けつつ、最大限の露頭選択を海洋研究開発機構の運航部、航海関係者、潜水チームやサポートの方々と共に試み、地形のスウォスマッピング(いわゆるマルチナロービームによるマッピング、多重の音波源を用いる地形図作成)や浅部の堆積層の詳細な構造がわかる 4 kHz subbottom profiling を併用しつつ調査を行った。強敵は黒潮であったが関係者の努力により、大きな成果が得られた。代表的な成果は、先の Ogawa *et al.*, eds. (2011)にも収められているが、そのほかにも Kawamura *et al.* (2009)と Kawamura and Ogawa (2018)にまとめられている。特に、天竜海底谷の東海スラストの周辺において何ステージもの複雑な面構造を持つ千枚岩質のサンプルを露頭から採集した。それが 230℃の変成・変形を受けており、急速な上昇と巨大海底地すべりによって、現在の付加体斜面に露出したと議論したことは特筆される(Kawamura *et al.*, 2011)。これは南海付加体からの最初の顕著な変成岩のサンプルであった。このようにこれらの潜航観察やその後の研究で分かった重要なことは、現在の南海付加体の先端部分が大小の褶曲スラスト構造で特徴づけられる一



第 3 図 1990 年秋のコルシカ島巡検で、変成岩露頭の前で得意のスケッチをすらすらと描き説明する Jolivet 博士。この方法は後に私も真似することになったが、絵と説明の上手さでははるかに後塵を拝する。後列左から 2 人目から、いずれも東京大学の飯山敏道教授、小林和男教授、酒井 均教授。

方、海底地すべりや液状化、流動化などの未固結・半固結状態での変形を伴う大崩壊を起こしているということであり、それが巨大津波の原因にもなっているかもしれないと議論したことである (Kawamura and Ogawa, 2018; 小川・川村, 2020)。これらの現世の海底下の付加体の諸構造、特に地層の重複や断層伝播褶曲 (fault-propagation fold) は三浦・房総半島および姥島群島の新第三系の付加体の変形に非常に類似しており、露頭の状況や小構造は、この両者の付加体が、海と陸との間でほとんど 1 対 1 に対応する (Raymond *et al.*, 2019; 森・小川, 2021; Ogawa and Mori, S., 2021)。

4. 将来展望

以上のように、付加体と海溝域の研究は、陸上地質と海洋地質の双方の調査研究の結果と、研究者同士の互いの協力と交流を通じて発展してきたといえる。陸上は主として過去のもののしかも比較的深いところの状況を示していたし、海洋は主として現在のプロセスとメカニズムを示していた。後者は手法的にも地質学だけでなく、地球物理学、地球化学、地球生物学などの知識と研究方法を総動員して行われてきた。今日では、これらは手法は異なっても、分野としては統合されたといってもよい。このような手法すべてが海溝テクトニクスの解明に必要であった。それによって、プレートの沈み込み境界たる海溝で行われている現象が現在から過去にまでつながるように思えた。たとえば北米における直近の大造山運動の一つであるコルディレラ造山運動は、かつて Dewey and Bird (1970) によって予想されたように、島弧海溝系の造山運動として意義づけられるとも思われた。しかし、一般の造山運動のうちのどこまでが付加体形成と海溝テクトニクスで語られるのか、すなわち沈み込みだけで造山運動ができるのか、そうではなく、大陸移動とその衝突を伴う大規模なプレートの動きやマントルの上昇などを含むより複雑なテクトニクスを必要としているのではないかとの議論が、最近本場の北米コルディレラでの Johnston (2008), Hildebrand (2009, 2013) らの研究によって提唱されている。北米での議論は大きな盛り上がりを見せているようであるが (Hoffman, 2013), 決着はいまだしである。

すべての分野でも同じであるが、付加体や海溝研究においても、多くの研究手法がこの数 10 年間で急速に進展した。第二部で述べた放射虫革命や化学分析もそうであるが、碎屑性ザーコンの年代測定もしかりである。今やデータは洪水のようにあふれており、ひとつひとつの地域での

議論も複雑化し、またそれをまとめて広域、あるいはグローバルな議論をすることにもまた一般化することも、さらに斬新な発想と深い考察を必要としている。付加体・海溝研究はそこが海洋プレートの沈み込み個所であり、多くのものが集積し、また多くの現象が集中するところであるゆえに、最も重要なテーマの一つでもあり続けると思われる。その時に思い起こされるのは、全体、全域を通じての事物と現象についての観察の重要性である。すでに日仏 KAIKO 計画の前段階でのプレートテクトニクスの研究計画案のまとめにおいて、計画のリーダーの一人だった東大の飯山敏道教授は、特集号 (月刊地球, 3 巻, 7 号) のタイトルの副題に、いみじくも「観察の重要性」とつけた (飯山, 1981)。けだし名言であると思う。

小川・久田 (2005) は当時までの研究をまとめて付加体の紹介を試みた。付加体はどのように定義されるべきだろうか考えたが、定義のある現象なのか、それといくつかの要素が集まって結果として付加体が形成されるのだろうか悩んだ。付加体の認定と定義は別だろうが、定義もないことを論ずることもできない。私が海陸の研究を通じて学んだのは、「海洋プレートの沈み込み境界すなわち海溝に集積した、あるいはそこに持ちきたされた堆積物や岩石が、海溝テクトニクスで陸側にもたらされて褶曲スラスト帯を形成したものがすなわち付加体である」ということである。しかもそこに集積した堆積物は急速な堆積、埋没、変形を一気に受ける。それは脱水、高間隙水圧、重力か水頭による上下ないし側方への移動を伴う。ゆっくりした周期の偏差応力から地震時などの短い周期の振動による偏差応力までの種々の変形を受ける。特に、砂岩 (砂) と泥岩 (泥) は、偏差応力の周期によっては逆転する反応を受け、脆性と延性挙動が逆転する (Ogawa, 2019)。しかも海溝付加体の多くの地層はそうした変形を伴いつつ、主としてスラストによる側方短縮と重力作用による地すべりやダイアピルを同時に伴う (Ogawa, 2019; Ogawa and Mori, S., 2021)。それゆえ露頭で現在見られるあるいは現地で観測測定される事象が、そのようなものであると確実に言えば、付加体の特徴をもつものと言えらると思われる。つまり、海溝付加体は、急速な堆積、側方短縮変形、頻繁な巨大地震、地すべりなどの斜面崩壊などで特徴づけられるので、それらによる現象が復元された場合は、付加体と認定することができる。

それらの現象は、世界的に見ても、フランスカン・コンプレックス、サザンアプランス付加体、海底のバルバドス海嶺付加体、四万十付加体と海底の南海付加体および三浦・房総地域でとりわけよく観察される。この 6 地域こ

そ、付加体のタイプロカリティーであると言えるだろう。過去の付加体に関しては、本回想で述べたように、古地理的なあるいはプレートの沈み込み帯での特徴的な現象に関連した堆積物・岩石集積体の持つそれぞれのステージの現象を、各段階ごとに過去に戻しそれを逐一復元すること (palinspastic restoration) によって、付加体は初めて具体的に意義づけられるのではないか。その際、最も重要なことは、海陸の地球科学を同時に推し進めることであろう。

こうして 1970 年代後半に始められた付加体学は当初の海陸からの調査研究によって発展し、具体的な形成プロセスとメカニズム、それに付加体発達における流体移動やテクトニクス上の意義などが、2000 年前後までに急速に明らかにされていった。その間、本回想では詳しく述べることができなかつた以下のテーマも同時に行われてきた。筆者が関心を強く持ったものに限っても以下のようなものがある。1) 付加体(スラストウェッジ)形成のサンドボックス実験 (Noda *et al.*, 2020; Koge *et al.*, 2022; 高下・野田, 2020), 2) メランジュ岩体の形成メカニズムと堆積作用と構造作用の相互の関係を含むテクトニクス上の意義 (Festa *et al.*, 2019; Ogata *et al.*, 2019; Ogawa, 2019), 3) デコルマンゾーンの組織の変化と透水問題と土質力学試験の応用 (Knipe and Rutter, eds., 1990; Tarney *et al.*, eds., 1991; Ogawa, 2019), 4) 真三軸変形透水試験の付加体での流体移動への適用 (Ogawa and Vrolijk, 2005), 5) 付加体中の堆積直後の砂泥互層の変形問題と重力の役割 (Ogawa and Mori, S., 2021), 6) コルディレラ型造山運動と付加体形成の関係と日本列島の形成問題 (小川未発表資料), 7) 高圧変成岩の上昇問題 (Maruyama *et al.*, 1996; Iwamori, 2003), 8) 海溝巨大地震と巨大津波のプロセスとメカニズムへの海溝学の適用 (Kawamura and Ogawa, 2018; 丸山, 2020; 戎崎・丸山, 2020; 小川・川村, 2020), などである。これらにかかわるトピックスは現在も多く研究者によって精力的な研究が続けられているのは承知のとおりである。

5. まとめにかえて

以上、私がかかわった付加体研究の特に黎明期に出会った活躍した人々との交流に焦点を当てつつ、付加体学がどのように進展してきたかについて述べた。我が国でも戦前から多くの先駆的な発想があったことが分かる。中でも小沢儀明博士、小林貞一教授、大塚弥之助教授、小池清博士、久野久教授、都城秋穂教授らは、すでに現在考えられているのと類似の付加体あるいは海溝テクトニクスをイ

メージしていたと言ってよい。多くはプレートテクトニクスの科学的な発想と肉付けの行われ始めた 1960 年代から 1970 年代のはるか以前の研究であった。これらの日本の研究者の発想と業績はまさにプレートテクトニクスの黎明期の研究として最大限意義付けられる。さらに黎明期から発展期においては深海掘削事業と海溝域における研究計画を指導した奈須紀幸、小林和男、中村一明の三教授の役割は特筆すべきものと思われる。また初期のうちに大陸縁での大小構造の変形相のシリーズを明らかにし付加体の内部構造とほとんど同じ成果に到達していた木村敏雄教授と植村武教授、褶曲スラスト帯としての海溝付加体の概念を諸外国に先駆けて陸上の実地調査から示した勘米良亀齡教授を忘れてはいけない。我々もこれらの方々の上に乗っているのだと思われる。本回想で紹介したこれらの先駆者に、本論を終わるにあたって感謝とともに心から敬意を表したい。さらに近年世界各地の陸上でまた海洋観測や深海掘削でさまざまな変形の様相が観察されるようになった。それらは本文で紹介した方々と、東京大学大気海洋研究所 (旧海洋研究所) および海洋研究開発機構 (旧海洋科学技術センター)、産総研地質調査総合センター (旧地質調査所) の多くの方々に負うところが大きいことを記し、深甚の謝意を表したい。海外の研究者としては先駆者中の先駆者である Jeremy Leggett 博士、Roland von Huene 博士、および James Casey Moore 教授に心から感謝する。私の 50 年以上の地質学の学びの中で上に述べた方々以外からも多くのご教授を受けた。編集にあたって、産総研地質調査総合センターの宇都宮正志博士と小松原純子博士ほか編集委員会の方々にお世話になったことを記して感謝する。

文 献

- Behrmann, J. H., Brown, K., Moore, J. C., Mascle, A., Taylor, E., Alvarez, F., Andreieff, P., Barnes, R., Beck, C., Blanc, G., Clark, M., Dolan, J., Fisher, A., Gieskes, J., Hounslow, M., McLellan, P., Moran, K., Ogawa, Y., Sakai, T., Schoonmaker, J., Vrolijk, P., Wilkens, R. and Williams, C. (1988) Evolution of structures and fabrics in the Barbados Accretionary Prism. Insights from Leg 110 of the Ocean Drilling Program. *Journal of Structural Geology*, **10**, 577-591.
- Brown, K. M. and Westbrook, G. K. (1987) The tectonic fabric of the Barbados Ridge accretionary complex. *Marine and Petroleum Geology*, **4**, 71-81.

- Cadet, J. P. and Uyeda, S., eds. (1989) Subduction Zones: The KAIKO Project. *Tectonophysics*, **160**, 1–337.
- Dewey, J. F. and Bird, J. M. (1970) Plate tectonics and geosynclines. *Tectonophysics*, **10**, 625–638.
- DiLeonardo, C. G., Moore, J. C., Nissen, S. and Bangs, N. (2002) Control of internal structure and fluid-migration pathways within the Barbados Ridge decollement zone by strike-slip faulting: Evidence from coherence and three-dimensional seismic amplitude imaging. *Geological Society of America Bulletin*, **114**, 51–63.
- 戎崎俊一・丸山茂徳 (2020) 津波地震とは何か? Tsunami, Earth and Networking (TEN), *Journal of International Tsunami Disaster Prevention Society* (国際津波防災学会誌), **1**, 83–87.
- Festa, A., Pini, G. A., Ogata, K. and Dilek, Y. (2019) Diagnostic features and field-criteria in recognition of tectonic, sedimentary and diapiric mélanges in orogenic belts and exhumed subduction-accretion complexes. *Gondwana Research*, **74**, 7–30.
- Hildebrand, R. S. (2009) Did westward subduction cause Cretaceous-Tertiary orogeny in the North American Cordillera? *Geological Society of America Special Paper*, no. 457, 71p.
- Hildebrand, R. S. (2013) Mesozoic Assembly of the North American Cordillera. *Geological Society of America Special Paper*, no. 495, 169p.
- Hoffman, P. F. (2013) The tooth of time: The North American Cordillera from Tanya Atwater to Karin Sigloch. *Geoscience Canada*, **40**, 71–93.
- 飯山敏道 (1981) 概論：プレートテクトニクス—観察の重要性. 月刊地球, **3**, 404–410.
- Iwamori, H. (2003) Viscous flow and deformation of regional metamorphic belts at convergent plate boundaries. *Journal of Geophysical Research*, **108**, 2321–2345.
- Johnston, S. T. (2008) The Cordilleran Ribbon Continent of North America. *Annual Review of Earth Science*, **36**, 495–530.
- Kastner, M. and LePichon, X., eds. (1992) Fluids in convergent margins. *Earth and Planetary Science Letters*, **109**, 275–650.
- Kawamura, K. and Ogawa, Y. (2018) Internal structure, active tectonics and dynamic topography of the eastern Nankai accretionary prism toe, Japan, and its tsunamigenic potential. *Geological Magazine*, **158**, 30–38. doi:10.1017/S0016756818000699
- Kawamura, K., Ogawa, Y., Anma, R., Yokoyama, S., Kawakami, S., Dilek, Y., Moore, G. F., Hirano, S., Yamaguchi, A., Sasaki, T., and YK05-08 Leg 2 and YK06-02 Shipboard Scientific Parties (2009) Structural architecture and active deformation of the Nankai Accretionary Prism, Japan: submersible survey results from the Tenryu Submarine Canyon. *Geological Society of America Bulletin*, **121**, 1629–1646.
- Kawamura, K., Ogawa, Y., Hara, H., Anma, R., Dilek, Y., Kawakami, S., Chiyonobu, S., Mukoyoshi, H., Hirano, S. and Motoyama, I. (2011) Rapid exhumation of metamorphosed sediment with gravitational collapse in an active eastern Nankai accretionary prism, *In* Ogawa, Y., Anma, R. and Dilek, Y., eds., *Accretionary Prisms and Convergent Margin Tectonics in the Northwest Pacific Basin*. in the Series: Modern Approaches in Solid Earth Sciences: Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, no. 8, 215–227.
- 木村 学 (2002) プレート収束帯のテクトニクス学. 東京大学出版会, 271p.
- 木村 学・木下正高 (編) (2009) 付加体と巨大地震発生帯—南海地震の解明に向けて. 東京大学出版会, 281p.
- 木村 学・木下正高・金川久一・金松敏也・芦寿一郎・斎藤実篤・廣瀬丈洋・山田泰広・荒木英一郎・江口暢久 (2018) 南海トラフ地震発生帯掘削がもたらした沈み込み帯の新しい描像. 地質学雑誌, **124**, 47–65.
- Knipe, R. J. and Rutter, E. H., eds. (1990) Deformation mechanics, rheology and tectonics. *Geological Society of London Special Publication*, no. 54, 383–398.
- Kobayashi, K. (2002) Tectonic significance of the cold seepage zones in the eastern Nankai accretionary wedge: an outcome of the 15 years' KAIKO projects. *Marine Geology*, **187**, 3–30.
- 高下裕章・野田 篤 (2020) クリティカルテーパーモデル—土質力学の基礎からの導入. 地質調査研究報告, **71**, 49–61.
- Koge, H., Ashi, J., Park, J.-O., Miyakawa, A. and Yabe, S. (2022) Simple topographic parameter reveals the along-trench distribution of frictional properties

- on shallow plate boundary fault. *Earth, Planets and Space*, **74**, 56. doi:10.1186/s40623-022-01621-6
- 倉本真一 (1994) 外洋における三次元音波探査の例 (バルバドス島沖での探査例について). *海洋調査技術*, **6**, 3-21.
- Labauve, P., Maltman, A. J., Bolton, A., Tessier, D., Ogawa, Y. and Takizawa, S. (1997) Scaly fabrics in sheared clays from the décollement zone of the Barbados Accretionary Prisms, ODP Leg156. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, College Station, TX (Ocean Drilling Program)*, **156**, 59-77.
- Le Pichon, X., Kobayashi, K., Cadet, J. P., Iiyama, T., Nakamura, K., Pautot, G. and Renard, V., eds. (1987) Project Kaiko. *Earth and Planetary Science Letters*, **83**, 181-375.
- Maltman, A. J., ed. (1994) *The Geological Deformation of Sediments*. Chapman & Hall, 362p.
- 丸山茂徳 (2020) 国際津波防災学会誕生までのいきさつと2年間の歩み. *Tsunami, Earth and Networking (TEN), Journal of International Tsunami Disaster Prevention Society (国際津波防災学会誌)*, **1**, 1.
- Maruyama, S., Liou, J. G. and Terabayashi, M. (1996) Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. *International Geology Review*, **38**, 485-594.
- Moore, G. F., Bangs, N. L., Taira, A., Kuramoto, S., Pangborn, E. and Tobin, H. J. (2007) Three-dimensional splay fault geometry and implication for tsunami generation. *Science*, **318**, 1128. doi:10.1126/science.1147195
- Moore, J. C., ed. (1986) Structural Fabric in Deep Sea Drilling Project Cores from Forearcs. *Geological Society of America Memoir*, no. 166. 160p.
- Moore, J. C. (1989) Tectonics and hydrogeology of accretionary prisms: role of the décollement zone. *Journal of Structural Geology*, **11**, 95-106.
- Moore, J. C. and Byrne, T. (1987) Thickening of fault zones: A mechanism of mélange formation in accreting sediments. *Geology*, **15**, 1040-1043.
- Moore, J. C., Biju-Duval, B., Bergen, J., Blackington, G., Claypool, G., Cowan, D., Duennebier, F., Guerra, R., Hemleben, C., Hussong, D., Marlow, M., Natland, J., Pudsey, C., Renz, G., Tardy, M., Willis, M., Wilson, D. and Wright, A. (1982) Offscraping and underthrusting of sediment at the deformation front of the Barbados Ridge, Deep Sea Drilling Project Leg 78A. *Geological Society of America Bulletin*, **93**, 1065-1077.
- Moore, J. C., Mascle, A., Taylor, E., Andreieff, A., Alvarez, F., Barnes, R., Beck, C., Behrmann, J., Blanc, J., Brown, K., Clark, M., Dolan, J., Fisher, A., Gieskes, J., Hounslow, M., McLellan, P., Moran, K., Ogawa, Y., Sakai, T., Schoonmaker, J., Vrolijk, P., Wilken, R. and Williams, C. (1988) Tectonics and hydrogeology of the northern Barbados Ridge: Results from Ocean Drilling Program Leg 110. *Geological Society of America Bulletin*, **100**, 1578-1593.
- Moore, J. C., Brown, K. M., Horath, F., Cochran, G., MacKay, M. and Moore, G. (1991) Plumbing accretionary prisms: effects on permeability variation. *Philosophical Transactions of Royal Society of London, A*, **335**, 275-288.
- 森 慎一・小川勇二郎 (2021) 相模湾北縁部, 姥島群島の三浦層群の層序と構造 —火砕岩鍵層の追跡による複合デュープレックス構造と断層伝播褶曲—. *地学雑誌*, **130**, 1-26.
- Noda, A., Koge, H., Yamada, Y., Miyakawa, A and Ashi, J. (2020) Subduction of trench-fill sediments beneath an accretionary wedge: Insights from sandbox analogue experiments. *Geosphere*, **16**, 1664-1679. doi:10.1130/GES02212.1
- Ogata, K., Festa, A., Pini, G. A., Pogacnik and Lucent, C. C. (2019) Substrate deformation and incorporation in sedimentary mélanges (olistostromes): Examples from the northern Apennines (Italy) and northwestern Dinarides (Slovenia). *Gondwana Research*, **74**, 101-125. doi:10.1016/j.gr.2019.03.001
- Ogawa, Y. (2011) Erosional subduction zone in the northern Japan trench: Review of submersible dive reports. In Ogawa, Y., Anma, R., and Dilek, Y., eds., *Accretionary Prisms and Convergent Margin Tectonics in the Northwest Pacific Basin*. in the Series: Modern Approaches in Solid Earth Sciences: Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, no. 8, 39-52.
- Ogawa, Y. (2019) Conceptual consideration and outcrop interpretation on early stage deformation of sand and mud in accretionary prisms for chaotic deposit formation. *Gondwana Research*, **74**, 31-50.

- 小川勇二郎 (2023a) 付加体学事始め：黎明期における私的回想 第一部 地質学の道へ. GSJ 地質ニュース, **12**, 177-185.
- 小川勇二郎 (2023b) 付加体学事始め：黎明期における私的回想 第二部 付加体学の肉付け. GSJ 地質ニュース, **12**, 226-236.
- 小川勇二郎・石丸恒存 (1989) 付加体発達の一側面—デコルマ面の実体と意義. 月刊地球, **11**, 716-733.
- 小川勇二郎・久田健一郎 (2005) 付加体地質学. 共立出版, 160p.
- 小川勇二郎・川村喜一郎 (2020) 日本周辺海溝域の海底地すべりと津波発生に関する地球科学的研究の現状と課題. Tsunami, Earth and Networking (TEN), *Journal of International Tsunami Disaster Prevention Society* (国際津波防災学会誌), **1**, 71-82.
- Ogawa, Y. and Mori, S. (2021) Gravitational sliding or tectonic thrusting?: Examples and field recognition in the Miura-Boso subduction prism. In Wakabayashi, J. and Dilek, Y., eds., *Plate tectonics and ophiolites, and societal significance of geology: A celebration of the career of Eldridge Moores*. Geological Society of America Special Paper, no. 552, 197-232.
- Ogawa, Y. and Vrolijk, P. (2005) Control of internal structure and fluid-migration pathways within the Barbados Ridge decollement zone by strike-slip faulting: Evidence from coherence and three-dimensional seismic amplitude imaging. Discussion. *Geological Society of America Bulletin*, **118**, 253-254.
- Ogawa, Y. and Yanagisawa, Y. (2011) Boso TTT-type triple junction: Miocene to Quaternary accretionary prisms and present-day gravitational collapse. In Ogawa, Y., Anma, R. and Dilek, Y., eds., *Accretionary prisms and convergent margin tectonics in the Northwest Pacific Basin*. in the Series: Modern Approaches in Solid Earth Sciences: Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, no. 8, 53-73.
- Ogawa, Y., Anma, R. and Dilek, Y., eds. (2011) *Accretionary Prisms and Convergent Margin Tectonics in the Northwest Pacific Basin*. in the Series: Modern Approaches in Solid Earth Sciences, no. 8. Springer, 277p.
- Okada, H. and Cadet, J.-P., eds. (1989) Geology, geochemistry and biology of subduction zones. *Paleogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, **71**, 1-203.
- Raymond, L. A., Ogawa, Y. and Maddock, M. E. (2019) Accretionary unit formats in subduction complexes: Examples from the Franciscan and Miura-Boso complexes. *International Geology Review*, **62**, 1581-1609. doi:10.1080/00206814.2019.1667881
- Sakai, H., Gamo, T., Ogawa, Y. and Boulegue, J. (1992) Stable isotopic ratios and origins of the carbonates associated with cold seepage at the eastern Nankai Trough. *Earth and Planetary Science Letters*, **109**, 391-404.
- 平 朝彦 (2004) 地質学 2 : 地層の解説. 岩波書店, 441p.
- Takizawa, S. and Ogawa, Y. (1999) Dilatant clayey microstructure in the Barbados décollement zone. *Journal of Structural Geology*, **21**, 117-122.
- Tarney, J., Pickering, K. T., Knipe, R. J. and Dewey, J. F., eds. (1991) The behaviour and influence of fluids in subduction zones. *Philosophical Transaction of Royal Society, London, Series A*, **335**, 225-418.
- Westbrook, G. K. (1982) The Barbados Ridge Complex: tectonics of a mature forearc system. In J. K. Leggett, ed., *Trench-Forearc Geology*. Geological Society of London Special Publication, no. 10, 275-290.
- 山縣 毅・小川勇二郎 (1989) 混在岩の形成における泥ダイアピリズムの役割. 地質学雑誌, **95**, 297-310.

OGAWA Yujiro (2023) The Early History of Accretionary Prism Research: A Reminiscence (Part3: Further Stage of Research).

(受付：2023年3月6日)