

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

小川 勇二郎¹⁾

1. 九州大学層序学講座での新しいテクトニクス

1978年秋、九州大学(以下、九大)に赴任してみると、そこでは新しい地質学の風が吹いていた。付加体学の創始者の一人である勘米良亀齢教授のもと、それまでの私が知っていたのとは異なる層序学・堆積学や構造地質学が行われていた。堆積岩の産状を露頭でつぶさに観察し、生層序学、特に微化石による地層の対比、堆積学、特に堆積相解析、堆積プロセスと堆積環境を考察し、構造地質学、特に変形のジオメトリーと変形相などのデータをすべて記載し総合的に議論するという、いわば総合的産状地質学であった。学生たちはタービダイトやメランジュ、オリストストロームなどの用語を日常的に使っていた。さらに微化石のうち1970年代までに日本ではルーティン化されていたコノドント化石のチャートや頁岩からの産出に基づく西日本での地史の再編の議論が進んでいた。いくつかの大学では放散虫化石の単体を固結した岩石から取り出し、ある場合にはプレパラートに埋め込むか走査顕微鏡で写真撮影し同定し、年代を決め生層序的な対比を試みることが始められていた。従来はチャートがあると角岩あるいは珪岩とされ古生層に対比されていたが、微化石を抽出してみると大半は中生代の三畳紀ないしジュラ紀であることが分かってきた。そのため放散虫を用いた生層序学、地層の年代対比は全国的なブームとなった。それまでもチャートで薄片を用いた顕微鏡観察でも、関東山地の三波川ないし御荷鉾地域のチャートがジュラ系ではないか、それらと秩父帯の地層が、ほぼ水平のナップ構造を取っているのではないかと、などと東京教育大学の藤本治義教授によって議論されていた(今井, 2005)。その考えが正しかったかのように、秩父古生層と呼ばれたものはジュラ紀までを含むものであると変わったのである。その後大部分はジュラ紀の付加体であり、それを覆ってペルム紀の付加体がナップ構造で載っているとされた(松岡ほか, 1998)。こうして微化石の単体抽出による組織的な生層序学的な研究が一斉に始まったことにより、研究手法は完全に一変した。これはその後

「放散虫革命」と言われ、日本のお家芸と考えられていることは周知の通りである(佐藤, 1989; 松岡, 2000)。

1980年ころからも、九大の層序学講座では老若男女ほとんどの人が微化石層序学に取り組むようになった。ある学生はなんと露頭の前でルーペで年代までわかるとの神通力も備えていた。こうしてコーヒーレントの地層(整然相)や礫岩の礫からはもとより、複雑な産状を呈する岩体(混在相、カオティックな岩体、いわゆるメランジュ; つまり雑然とした混在岩または混雑岩(中国での使用法)と呼ばれる岩体)では、ブロックとマトリックスとの両方から同じ年代の放散虫が検出されることもあり、また異なる年代のこともあり、さらに同一の層序がスラストスタックによって何度も繰り返すことも各地から知られるようになり(Matsuda and Isozaki, 1991; Kimura, K. and Hori, 1992)、ある場合には、外側へ向かって若い層序が規則的に配列することもわかってきて(Nishi, H., 1988; Nishi, T., 1994)、それらの発達史的解釈が焦点ともなった。九大ではそうした放散虫チャートは大陸から離れた海洋プレート上のいわゆる遠洋性堆積物であろう、との予想を立てていた。そうではなく大陸縁や陸棚でもチャートは堆積する、と考える研究者も多かった。しかし、チャートは大規模な玄武岩の上に載っている場合も多く、その上位へ珪質頁岩、砂質タービダイトへと続くシークエンスを示すこともあり、産状や意義が興味の焦点となった。今ではそれらは海洋プレート層序(Ocean plate stratigraphy; OPS)と位置付けられているが(Matsuda and Isozaki, 1991; 脇田, 2000; Wakita, 2014)、当時は、チャートと砂岩が互層するように見えることの方が重要視されていた。

私は大学院生が見つけた三畳紀のコノドントを含むチャートの地層の周辺に、砂岩が複雑に入り込んでいる露頭について、砂とチャートの互層ではなく、一部ジュラ紀におよぶチャートの上に珪質頁岩が載り、さらにその上に砂岩が重なった地層が、後の変形で逆断層で積み重なったり、砂が液状化して岩脈ないしシルでチャート層に注入したものであると解釈した(Ogawa et al., 1983)。また四国

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：九州大学, 新しい研究手法, 最初の付加体シンポジウム, trenchers, 海外での研究, 海溝タービダイト, 海陸の同時研究, サザンアプランス付加体, 玄武岩のテクトニックセッティング

秩父帯の北帯にジュラ紀の地層が分布することを示した。類似のことは関東山地の秩父帯(広義)にも見られると予想した。後日、砂岩が遠洋性堆積物や玄武岩などの海洋性の岩石と見かけ上互層したり注入状に交わったり、混在化している場合の大半は、サザンアプランズでも、フランシスカンの一部でも、逆断層で接するか、堆積性のいわゆるオリストストロームと考えられるほかに、砂の液状化あるいはカタクラスティックな変形(破碎変形)をして流動化あるいは液状化して砂岩の粒子が構造的に注入したものでだろうと議論した(Ogawa and Nishi, T., 1996; Ogawa, Mori, R. *et al.*, 2015; Ogawa, 2019)。

もう一つ重要なことは、九大では大学院生の宮田雄一郎氏と辻 隆司氏を中心として実験的な堆積学や流動化の室内実験が行われていたことであり、彼らは日南層群などでよく観察されるタービダイトの種々の堆積構造や堆積直後の二次的な構造の再現を目指して、自作の装置で日夜取り組んでいた。その成果の一部が世界初の dish structure の流動化による再現実験であった(辻・宮田, 1987)。これは日本語で書かれた論文ではあったが、この分野の第一人者のイギリスのレディング大学の John Allen 教授の目に止まり、大いに評価された。こうして私は大学院時代から温めていた堆積物や岩石の野外で見られる変形様式と変形特性の地質学的な解明には、野外観察と室内実験の両面から検討し、そのプロセス、メカニズム、テクトニックな意義を総合的に議論する必要があるとの重要性を痛感した。

2. Trenchers の登場

1979年に地質学雑誌に、ロンドンで1980年7月に付加体シンポジウムありとの案内が出た。これはオックスフォード大学の院生の新鋭 Jeremy Leggett 氏からの提案であった。これは、彼が静岡大学新妻信明博士も乗船研究者として参加したメキシコ沖中米海溝での DSDP-IPOD Leg 66 船上で研究者たちと語り合い、帰国途上コーネル大学の Dan Karig 教授を訪ねて発想した、世界初の付加体シンポジウムであった。私は数名の若手を誘って参加することにした。日本からは東大(東京大学)地震研究所の上田誠也教授と中村一明助教授、同海洋研究所の藤岡換太郎氏ら計9名が参加した。このレゲットシンポジウムには、ヨーロッパ以外からもアメリカ、オーストラリアなどの著名な地質・地球物理の研究者が集まった。特にカリフォルニアを拠点として活躍し始めたアメリカの若手(多くは私と同年配かより若い)研究者が活躍した。Dan Karig, James Casey Moore, Greg Moore, Tom Shipley,

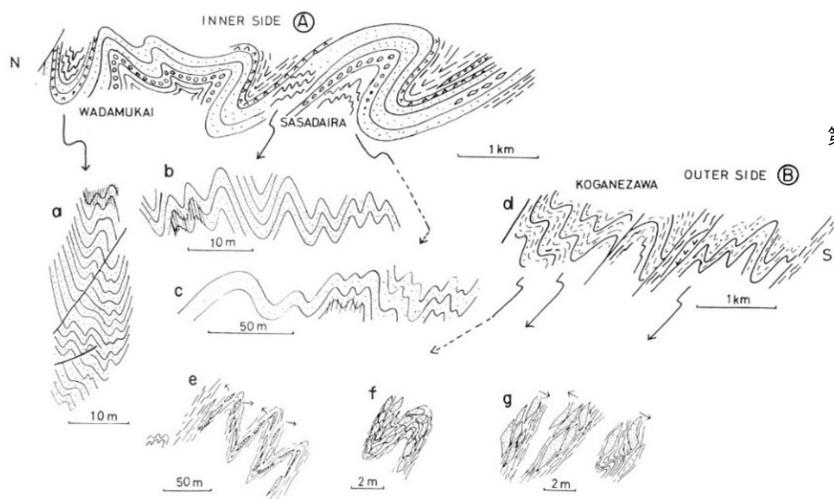
Neil Lundberg, Darrel Cowan, Ken Aalto, Ralf Moberly, Roland von Huene, Don Seely, Keith Crook, Juan Zuffa, Lavern Kulm, Allan Smith, Harold Reading, Xavier Le Pichon らの「そうそうたる」人々だった。

シンポジウムでは、当時パリ大学の Le Pichon 教授のエーゲ海南方での蒸発岩のクレタ島への沈み込みが正断層のプレート境界をつくるという驚くべき地質の紹介もあった。それは潜水船による観察によって、岩塩ドームの上昇の重力テクトニクスが勝つ沈み込み帯の発見であった。過去の付加体については、コンビナーのロンドン大学インペリアルコレッジの講師に就任したばかりの Leggett 博士のサザンアプランズ付加体(オルドビス・シルル紀)の筆石(graptolite)の生層序学に基づいて外側へ若くなるスラストシートの配列が認定され、そのスタックによる付加体形成の基本モデルの紹介があった。現在の付加体では James Casey Moore や Tom Shipley, Mike Underwood, Neil Lundberg らのメキシコ沖中米海溝の海溝堆積体(主として海溝タービダイト)のオフスクレイピング(かきあげ)、アンダープレイティング(底付け)、サブダクション(沈み込み)の三分割による再配列の Leg 66 の成果がハイライトとなった(Moore, J. C., Watkins *et al.*, 1982b; Underwood and Bachman, 1982)。日本からも3つの話題が提供され、特に高知大学に赴任したばかりの平 朝彦博士らの四国と紀伊半島の四万十層群での新しい調査を中心とした海溝付加体のモデル(Taira *et al.*, 1982)が注目を集めた(講演はレスター大学の Md. Whitaker 博士)。このシンポジウム特集号はロンドン地質学会特別号10号(Leggett, 1982)として発刊された。

シンポジウム参加者の多くが、直後のスコットランドのサザンアプランズへのポスト集会巡検(1週間)に参加した(第1図)。このサザンアプランズへの巡検では、玄武岩・チャートを含むメランジュ相の上位の厚い粗粒タービダイトが随所に発達し、10枚ものスラストシートの大半を占めるのを一堂確かめた。その概略やその後の集大成の研究は先の小川・久田の「付加体地質学」やロンドン地質学会特別号10号、それにエディンバラロイヤルソサイエティ彙報2000年号(Clarkson *et al.*, 2001)などに紹介されている。最大の議論となったのは、スラスト帯を構成する厚いタービダイトがどこでたまったのか、それを示す積極的な証拠はあるのか、それがどのようにして付加体へ持ち込まれたのか、であった。そのころには堆積相から堆積環境や堆積条件を推測することは付加体以外の堆積盆地でも普通に議論されるようになっていた。また海底扇状地やチャネル(流路)での堆積作用の議論も行われていた。このシ



第1図 サザンアランズでの巡検の参加者。Dan Karig (中列左から2人目), James Casey Moore (その右の横向き), Jeremy K. Leggett (前列右から3人目)。そのほか今でも活躍する人々の若き姿(最前列, Greg Moore; 後列, Tim Byrne, 藤岡換太郎, Roland von Huene, Darrel Cowan, Mark Brandon など; 敬称略)を見ることができる。背後の露頭はシルル紀のスレート (Karig 夫人撮影)。Karig 氏の右後ろが筆者。



第2図 関東山地の小仏層群(白亜紀の四万十層群に対比)の褶曲構造断面 (Ogawa, 1982a)。変形シリーズから見ると、陸側(図の左の島弧側)で剪断褶曲(スレート劈開)、海溝側(図の右側)でレンズ褶曲が卓越する。赤石山地でも同様である (Ogawa and Horiuchi, 1978)。小仏層群の大小の褶曲構造はいくつかのスラストシートを構成しているのかもしれない。この部分には海洋性岩石は含まれないので、デコルマンゾーンの上位を見ていると思われる。この変形シリーズや変形様式の並びは、第1部の第3図の木村(1971)や、Uemura(1981)、植村(2000)と類似している。

シンポジウムと巡検での議論はその最後のホテルのバブでの一大討論会で最高潮に達した。Leggett 博士は、オックスフォード大学の Stuart McKerrow 博士から学位をもらったばかり、ロンドン大学インペリアルコレッジの講師に就任したばかりの弱冠25歳の新進気鋭であったが、その延々と続く最後の討論会を乗り切った。多くの人々が賛同し納得したのは、この付加体は海溝タービダイトを主とするもので、筆石頁岩の層準でかきあげられて、次々と付加されていくということだった。彼はそのシンポジウム特集号のタイトルを、“Trench fore-arc geology”とし、参加者の総称をなんと“trenchers”と呼んだのだ。こうした議論はシンポジウムと巡検を通して止揚され、一同の共通理解となった。

ロンドンの地質学会講堂での私の講演の内容は、日本大学在職時から始めていた関東山地の小仏層群(四万十層群相当層)と三浦・房総半島の新第三系の大小構造の成果に基づいて、ともにある種の付加体やその上の前弧盆地堆積物であり、かつシステムティックな褶曲とスラストで特徴づけ

られるとしたものだった (Ogawa, 1982a)。その前に赤石山地の四万十層群相当層の大小構造も記載・議論していた (Ogawa and Horiuchi, 1978)。それらは、大学院時代までの考えと、九大の勘米良研究室の双方の考えを取り入れたものだった。四万十層群のうち、いわゆるメランジュを主とする部分は付加体と考えたが、その上のタービダイトは前弧盆地堆積物と当時は考えていた。実際は、そのようなものもあるが、多くのタービダイトは、前弧盆地をバイパスし、海溝堆積物であると認められるようになった (Moore, J. C., Watkins, *et al.*, 1982b; Underwood and Bachman, 1982)。砂泥互層は中深度(数 km 程度の深度)からシストへの変形様式が、深さとともに変化する二つのシリーズを持つものであるとするものであった(第2図)。さらに、三浦・房総半島の新第三系の褶曲・スラスト帯は斜め沈み込みプレート境界での浅い変形であるが、どちらもある種の付加体で、四万十層群は深く、三浦・房総のものは浅いとの議論であった (Ogawa, 1982b)。四万十層群の変形シリー

ズの地域的な分布は、第一部(小川, 2023)に述べたように木村敏雄教授の提唱にもあったが、私はこれが対変成帯の分布の仕方に似ていると気が付いた。独自にほとんど同じことを考えていたことになる。

私は、付加体と言えども海溝域から島弧の温度構造や歪様式に関係しているということ、すなわち側方からの均一歪が勝つとスレート劈開で特徴づけられる剪断褶曲のシリーズができ、深部では千枚岩からシストに至る。一方不均一なシア(剪断)歪が勝つとレンズ褶曲のシリーズができ、深部は同じようにシストに至ると考えた。しかも、それにはもしかしたら温度勾配も影響するかもしれない、と考えた(後述)。徳山 明博士はレンズ褶曲のシリーズは環太平洋地域での特徴的な構造であると、すでにシドニーの1976年のIGC(International Geological Congress, 万国地質学会議)での発表で看破していた。後日このレンズ褶曲は一種のトランスポーズド構造(転位構造)であることが分かった。このような変形特性の露頭での識別を変形様式の変化あるいは変形相としてとらえる研究は、東大の木村敏雄教授と徳山 明博士のほか、新潟大学の植村 武教授によっても唱えられており、一般には、深さに対応する封圧と coaxial か non-coaxial かの歪の様式と歪量によって異なると考えられていた。それらは、破断をせずに変形する歪の限界としての延性度(ductility)が重要な要素であると知られていた(Donath and Parker, 1964)。Uemura(1981)、植村(2000)は、もう一つの指標として岩相の違いを ductility contrast(延性較差)ととらえて、この二つ(つまり延性度と延性較差)を両軸にとったダイアグラムを提唱した。この考え方は主として三軸変形破壊実験による実験岩石力学を露頭での特に砂泥互層を主とする地層の変形に応用し、それによりテクトニクス上の意義付けを行ったということで大いに意義がある。付加体は海溝タービダイトを主としたそれは大半が砂泥互層であることから、この植村ダイアグラムは付加体研究にとっても画期的であった。また木村教授の二つのシリーズの違いは歪の様式によっている、しかもそれは歪の様式や均一性、さらに温度勾配にも関連しているかもしれないと考えられるので、露頭での変形様式と変形相シリーズの考え方は新たなテーマとして登場した。なお、後日、私はこの砂泥互層の延性較差は、歪の周期によって逆転することがある、つまり地震動などの短い周期の歪が加わると、むしろ砂のほうが泥よりも延性が高くなる(流動しやすい)ことを、堆積直後の砂泥互層の変形様式の特徴として説明した(Ogawa, 2019)。

なお1980年代になってJames Casey Moore教授らのグループのアラスカコディアク島での研究が知られるように

なった。彼らのごく初期のうちから、付加体は大規模な脱水システムであると見抜いていた(Moore, J. C. and Byrne, 1987; Moore, J. C., Taira and Moore, G., 1991; Tarney *et al.* eds., 1991)。私は上に述べたように、1982年のロンドン地質学会の付加体特集号論文で、変形シリーズのテクトニクス上の意義は対変成帯の概念に類似の温度勾配の高低と歪の均一性か否かにあるように議論した。つまり付加体でも島弧火山に近い部分には前者が、海溝に近い部分には後者が発達しやすいということに関東山地でも赤石山地でも見つけていた。世界の褶曲スラスト帯では環太平洋地域ではスレート劈開はまれであるが、それ以外の地域ではスレートベルトと言われるように普通にかつ広域に発達している。また大構造としては小仏層群は陸側で陸方フェルゲンツ、海側で海方フェルゲンツの相反褶曲スラスト構造を示すことを地層の上下判定の結果から議論した(第2図)。そこで、会議やシンポジウムでしばしば会う Moore 教授に上に述べたようなスレート劈開の発達する地域的な傾向を聞いてみたところ、確かにコディアクでは海溝側ではなく島弧側に多いと答えていた。

今でこそ思うと、小仏層群は主として海溝タービダイトからなり、それらは大きなデコルマンゾーンより上位の浅い部分の構造を見ており、また赤石山地では海洋の岩石を含む白根層群とタービダイトからなる赤石層群とが、デコルマンゾーンを含んでほぼ水平なナップ構造をとっているのだということである。これらの全体像は、四万十帯(広義)の全域を通じて、ほぼ当てはまるのが今では知られていて、その一部は、三波川結晶片岩類となって上昇していることも明らかにされている。ただ、全体の年代論などについては、秩父帯との関係で、依然として課題がある(加藤ほか編, 2022)。また過去の地層の堆積域や集積域が海溝かどうかを直接的に決める方法はあまりない。もし、海洋性の岩石(中央海嶺玄武岩や層状チャートなど)が取り込まれていればそうと確かめられるかもしれない(Darrel Cowan氏との1980年代でのディスカッションによる)。テクトニクスの全体像を知るには、付加体に取り込まれている玄武岩のテクトニックセッティングの認定が最重要であることが分かった。これらの複数の課題は、その後私のスコットランドサザンアプランスでの研究で明らかにされることになった(後述)。

以上述べたように、この1980年7月のレゲットシンポジウムとサザンアプランス付加体巡検およびそれらを集めたロンドン地質学会特集号のLeggett(1982)は、まさに付加体地質学の幕開けにふさわしいものとなった。陸上は過去の地質を現し、海洋は現在を現す、と私も感慨深いも

のがあった。私は地球史を研究するには陸上だけではなく海底も同時に研究すべきだと強く思った。すなわちプレートテクトニクスのセッティングの中のどこでそのような作用が行われたのかを知るには、露頭での観察や多くの研究手法を用いて、「現在は過去の鍵である」との地質学の基本原理と関連する実験結果などを総動員して、できるだけ露頭の前で、帰納的、総合的に議論する必要があるということである。さらに、第三部で述べるように、潜水船からの目視観察や測定は、まさに陸上地質と同じことを、海底でもできることを示すことになるということである。

3. 海洋地質学への招待（淡青丸とグローマー・チャレンジャー号航海）

これらの九大での研究活動と前後して、1981年、東大海洋研究所の藤岡換太郎氏から初代淡青丸での鹿児島湾航海への誘いがあった。これは私にとって最初の研究航海であった。油津漁港への嵐の中での帰還にも懲りずに次のチャンスを待っていたところ、望外にも同研究所の奈須紀幸教授から、DSDP-IPODのLeg 84、グアテマラ沖の中米海溝での掘削航海への招待をいただいた。渡りに船とばかりにロスアンゼルス経由でパナマからグローマー・チャレンジャー号に乗り込んだ。1982年正月であった。グローマーの航海はLeg 96までであったから、全体から見ると後期の方の航海であったが、初めてのアメリカ西海岸訪問も付録としてあり、私としてはまさにおまけつきの籤に当たったようなものだった。航海そのものはグアテマラ沖の中米海溝の陸側斜面(Dickinson教授とSeely博士らは付加体と考えていた)は付加体ではなく、そこには大量の蛇紋岩と玄武岩などがつまっていることが判明した(小川, 1982b)。さらに丁度研究していた脈状構造(vein structure)の良質なサンプルも中新世の斜面堆積物から採れた。コーチフ(共同主任研究者)の一人の米国地質調査所のRoland von Huene博士は、私に両方の岩石試料の優先的なサンプリングを認めてくれ、まさにgenerousなコーチフとしての度量を示してくれた。偶然にもそのころ私は房総半島の嶺岡帯で蛇紋岩と玄武岩からなる類似のオフィオリティックな岩石(海洋底の苦鉄質岩, 超苦鉄質岩に類似する岩石)の調査を始めていた。これら二つの研究成果は、DSDPのイニシャルレポートの84巻に収められることになった(Ogawa and Miyata, 1985; Ogawa et al., 1985)。後日2012年にvon Huene博士がEGU(European Geosciences Union)からアーサー・ホームズメダルを授与された時の記念講演にも参加でき、しかも質問もさせてい



第3図 Roland von Huene 博士(左)と, David Scholl 博士. von Huene 博士がアーサー・ホームズメダルを受けた2012年 EGU (ウィーン)にて。

ただいた。恩師の一人でもある(第3図)。

1982年のグローマーの航海後の付録は日本地質学会からの補助もあり盛沢山だった。まずスタンフォード大学に当時富山大学の丸山茂徳博士を訪ねた。また同時に近隣のメンロパークの米国地質調査所にカリフォルニアの地質研究者、テレインアナリシス(付加した外来の地質体の意義を議論する研究手法)提唱者の一人の、のちにカリフォルニア大学バークリー校の教授となるDavid Jones博士を訪ねた。Jones博士は丸山博士と私をDiablo RangeのフランスカンメランジュとGreat Valley方面への巡検に誘ってくれた。前者ではブルーシストが頁岩のマトリックスにブロックとして含まれる露頭、また後者では前弧盆と考えられている白亜紀層の基底のあたかも整合的に接するCoast Range Ophioliteの超苦鉄質岩を紹介してくれた。後日Jones博士が勘米良亀齡教授の招きで九大を訪問し講座を挙げての球磨川沿いの巡検をした時には、博士は広がって分布する蛇紋岩体を堆積的な広がりを示すももとの層序単位ではないかと解釈したのには一堂驚愕した。丸山博士は日夜高圧実験装置をスタンフォード大学のJ. G. Liou教授の下で動かして忙しそうであったが、同時に同大学には当時国立建築研究所の瀬野徹三博士と東京大学院生の川勝均氏が留学しており、大学院生であり後にペリంగాムのワシントン州立大学教授になるDavid Engebretson氏のプレート絶対運動からプレート同士の相対運動を理論的に求める研究のセミナーに出たり、丁度来訪した東大地震研究所の中村一明教授とともにサンアンドレアス断層の巡検をしたりした。さらにスタンフォード大学のJim Ingle教授とともにカリフォルニア大学サンタクルズ校の

Bob Garrison 教授と James Casey Moore 教授を訪問した。Moore 教授はグアテマラ沖のすぐ北のメキシコ沖中米海溝での掘削で典型的な付加体の形成プロセスとメカニズムを明らかにしたばかりであったが(前述)、それとは全く別のタイプの海溝陸側斜面の蛇紋岩を主とするグアテマラ沖での成果を聞いて大いに興味を持ってくれた。同一の沈み込みでも、途中にリッジが突入して海溝タービダイトがせき止められると、それが堆積しないグアテマラ沖では、海溝に沈み込む正断層地形の奥部に、陸側斜面から堆積物が崩壊してそのまま沈み込み、それゆえ海溝は陸側に後退するという沈み込み侵食が典型的に発達することが、グアテマラ沖中米海溝で示されたのであった(Aubouin *et al.*, 1982; 小川, 1982b)。それは日本海溝で Hilde (1983) や Ogawa (2011) で示されたものと同じ、沈み込み侵食型の海溝陸側斜面の典型例であった。

続いてシアトルのワシントン大学に Darrel Cowan 教授を訪ねた。Moore 氏、Cowan 氏と私の3人はともに、全くの同年生まれであり、その前のサザンアプランス巡検で親しくなっていたので、これも望外のことであったが大いに交流を深めることができた。Cowan 教授は調査が佳境に入っていたベリンガム沖合のサンホアンアイランズの巡検を企画してくれた(Brandon *et al.*, 1988)。ワシントン大学の研究施設に宿泊しボートで移動しながら海岸沿いを見学した。岩体の多くが私が大学院時代に調べていた四国秩父帯の中の黒瀬川構造帯の岩石や地層と驚くべき一致を示していた。種類も年代も、さらに1976年にシドニーのIGCの会議中のキャンベラ近郊への巡検に参加した際に、同行した浜田隆士教授から聞いていたシルル・デヴォン紀のサンゴ化石とも種類が一致していた。それらは後日テイリアナリシスの研究者たちがテチスーパンサラッサ海の Wrangellia terrane のものであると議論することになった上に(Cowan *et al.*, 1997), Nur and Ben-Abraham (1977) のパシフィカ大陸の再配分説にも関連するかもしれないことであった。驚くべきことが Leg 84 と続く計約3か月の間に私の周辺で起きていた。こうして1982年の初頭は中米と北米の西海岸の沖合と合衆国本土で過ぎていった。これらは単に楽しく思い出される以上に、私の研究人生にとって決定的なことでもあった。

4. イギリス留学：サザンアプランス付加体の野外調査

その1982年春、私は British Council のスカラーの奨学金試験を受けた。試験は過酷で困難なものだったが、運よく合格し、1982年10月から1983年9月までロンドン

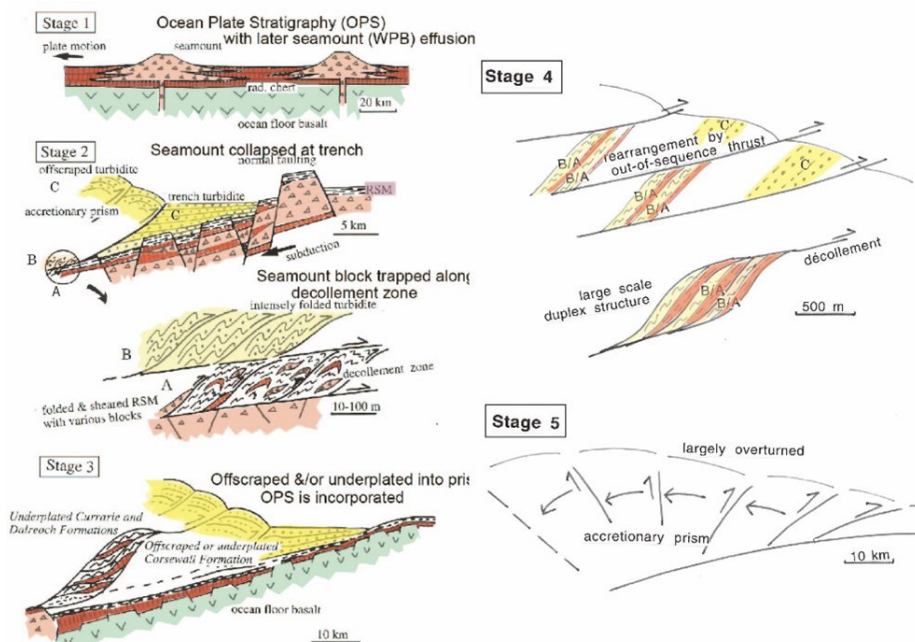
大学インペリアルコレッジの Leggett 博士のもとに留学した。もはや学生気分でもなかったが、Leg 84 のグアテマラ沖からの試料をなんとか研究レベルまで上げないといけない。出発までに協力者とともにおおよそのデータをそろえておいたのだが、それを満足のいく形にしなければならない。Leggett 博士は、サザンアプランスと南海付加体との比較研究のために訪日が決まっていたので彼が不在の時は一人で、また時として Andy Thickpenney 氏(サブロペルの研究)、Ernie Rutter 博士(岩石の変形挙動の研究)、および当時ロンドン地質学会会長の Janet Watson 教授などと議論するなどして、インペリアルコレッジでの研究を続けた。ここは大英帝国の威光を色濃く残す都市型のキャンパスであった。ロンドン地質学会のあるピカディリーサーカスも近く、近隣にはアルバートホールなどの文化施設だけでなくダーウィンの博物館として知られる自然史博物館や地質博物館などもあり、また、ヒースロー空港を利用する多くの外国の研究者が来訪する便利な大学であった。近隣の地質古生物学者は100名近くに達し、彼らでケンジントン・ジオロジカル・ソサイエティーを作っているとのことだった。この間さまざまな地方へ出かけた。ある場合は小規模な研究集会、ある場合は家族との旅行であったが、最も重要なものは1983年4月下旬から7月まで、スコットランドのグラスゴウ南方のバラントレ村にシャーレ(山小屋風の簡単な宿泊施設)を借りてのサザンアプランス付加体最北西部のオルドヴィス紀部分の詳細なマッピングプロジェクトであった。

1983年春から、私は Leggett 博士やエディンバラ大学の Alastair Robertson 教授とは1週間ほど一緒に調査をしたが、その後約2か月半の間、私は一人で海岸沿いの全面露頭の急崖を上り降りして、バラントレ以南 Glen App と呼ばれる溪谷までをくまなく歩いた。その間人には全く会わなかった。特に詳細に観察したのは、玄武岩やチャートから珪質頁岩を経てタービダイトに覆われる後に海洋プレート層序(OPS)と呼ばれるようになる岩体を含むメランジュ的な部分とその周辺であった。ここのオルドヴィス紀の付加体の地層や岩石は私が九大に赴任して以降、九大の方々の案内で歩いた宮崎県の四万十北帯の一部と驚くほど類似した堆積相、構造相を呈していた。放散虫やコノドントもわずかに産出したが、放散虫の代わりに筆石(graptolite)を用いた黒色頁岩の年代からスラストシートがシルル紀部分を含めて10枚ほど、次第に南方へ若くなるように配置していた。とくに最北西部には、海洋性プレート層序のブロックやスラブが、泥質のマトリックスに含まれるいわゆるメランジュ岩体が規則的にデュープレックス構造をとっ

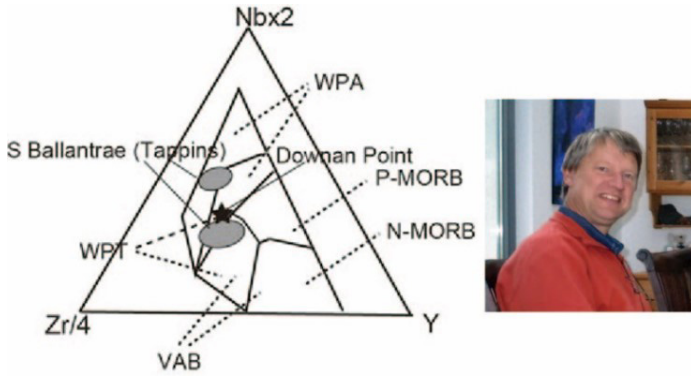
て分布していた。

サザンアプランス付加体は第一部で述べたように、McKerrow 博士や Leggett 博士らによって、おおよその大構造と付加体形成モデルは提出されていたが、決定的な大小構造の解明や詳細な構造解析までには至っていなかった。また厚い砂岩も発達しておりそれがどのような堆積盆のものかについてもさまざまな議論があり、縁海説から海溝説まで議論百出であった。それらの議論は後に McKerrow 博士による特集がロンドン地質学会誌 (McKerrow, 1987) に組まれている。1980 年のレゲットシンポジウムと巡検に参加した“trenchers”たちはほとんどの砂泥互層は海溝タービダイトであり、それがメランジュ岩体とともにスラストスタックを構成している、と確信していたのだが、その後 1999 年に、Peach and Horne の記念碑的な論文“The Silurian in Scotland”を祝うサザンアプランス地質学 100 年記念シンポジウムがエディンバラで開かれてみると (Clarkson *et al.* eds., 2001), シルル紀では海洋プレートと思われる堆積盆地は閉じてきて縁海的になったとの意見もだされてはいたが、すでに多くの研究者は全体が構造的にも発達史的にも付加体であろうとの一致した見解に達していた (Leggett, 1987; Floyd, 2001; Ogawa, 1998, 2001)。

私は、その後の Alastair Robertson 教授のもとでの玄武岩の化学分析なども踏まえて、以下のような議論を行った (第 4, 5, 6 図)。すなわち、1) 海洋プレート層序 (OPS) の最下底の玄武岩のすべてがホットスポットの海山起源を示すこと、2) それらを含む複雑な岩体はある種のメランジュであり、配列は海山とその上の OPS および海溝タービダイトからなる数 10 m 厚さのいくつものホースによるスラストデュープレックスを形成すること、3) そのようなメランジュの取り込みはデコルマンゾーン周辺で行われたこと、4) 全体はその OPS からなるメランジュ的な岩体、タービダイトが激しく褶曲を繰り返す部分、および厚いタービダイトが同斜構造の様な傾斜をなす部分の三つ組みの岩体のセットとなって繰り返していること、などである (Ogawa, 1998, 2001)。このような三つ組みはその後世界の多くの付加体でも認められるようになった。こうした議論を具体的なテクトニクスに結び付けるには、堆積から構造変形、変成作用などの一連の解明と、とりわけ含まれる玄武岩のテクトニックセッティングの特定が重要であることを再認識した (第 4, 5, 7 図)。こうして 1970 年代後半から各国で急速に進展していた付加体研究は、また新しい手法や概念を見つけて次の段階に入るのである。



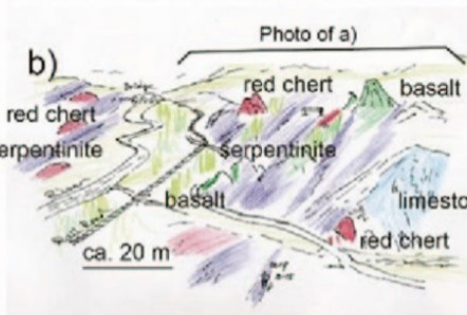
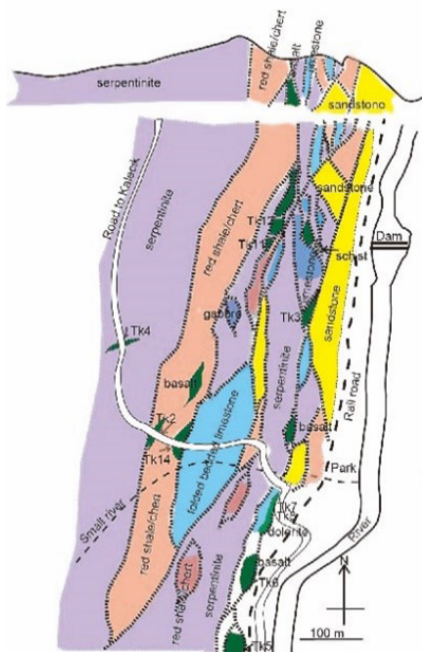
第 4 図 サザンアプランス付加体の最北西部バラントレ南方のオールドヴィス紀の付加体先端発達モデル (Ogawa, 1998 を改変) (塗色は小川)。海山の突入とデコルマンゾーン上でのオフスクレイピングとアンダープレイティング (A)、さらに海溝タービダイトの褶曲層 (B) とのデュープレックス形成、および同斜構造の厚いタービダイト (C) との、三つ組みが低角のスラスト (序列外スラスト (out-of-sequence thrust; OOST) と予想) によって重なる。海洋プレート層序を伴ういわゆるメランジュは、海山の海溝における崩壊とデコルマンゾーンでの混交の二つによるとの解釈。このような発達プロセスがサザンアプランス付加体ばかりでなく日本でも多くの付加体の基本モデルであることが、構造解析と玄武岩の化学分析で確かめられた (Ogawa and Taniguchi, 1989)。



第5図 サザンアブランズのオールドヴィス紀付加体に含まれる玄武岩ブロックのメシェーデ・ダイアグラムへのプロット (Ogawa, 1998 を改変) (左) と、ドイツ、グライフスヴァルト大学の Martin Meschede 教授 (右)。このプロットの提唱はチュービンゲンの大学院生時代であったという。Meschede 教授は美しい図満載の Plate tectonics という教科書を、Frisch, Blakey 教授らと共著で Springer 社から出版したことで知られている (Frisch et al., 2011)。なおこのオールドヴィス紀の付加体中の玄武岩ブロックのうち、小規模なものはおそらく WPA (ホットスポット的なアルカリ玄武岩)、大規模なものは、Downan Point Lava と呼ばれる巨大スラブと同等の WPT (ホットスポット的なソレイライト玄武岩) と解釈される。



第6図 バラントレオフィオライトを巡検中一休みするエディンバラ大学の Alastair Robertson 教授 (左) と、ロンドン大学チェルシー・コレッジから同大学の新統合されたロイヤルホロウェイ・コレッジに移った Tony Barber 博士 (1993 年 7 月)。このオフィオライトはサザンアブランズ付加体の直北に位置し、オックスフォード大学の John Dewey 教授によってプレートテクトニクスによって最初に説明されたオールドヴィス紀のもので、さまざまな種類の玄武岩のほか蛇紋岩、変成岩などを伴うが、最近ではデュプレックス構造をとる島弧の産物であると Sawaki et al. (2010) は述べている。ロバートソン教授はサイプラスアンバーの研究で有名であるが、それはなんとレスター大学の大学院生の時であるとのことである。またバーバー博士はインドネシアなどでのメランジュや泥火山の研究で知られる。



第7図 トルコ、アンカラ東方の Kalecik (カレジック) におけるアンカラメランジュの地質図・断面図 (左；紫色は蛇紋岩、青は石灰岩、緑は玄武岩、黄色はタービダイト) および景色写真とスケッチ (右；南を向いて；筆者未発表資料)。蛇紋岩にはマッシブなハルツバージャイトが卓越し、シアは断層周辺に限られる。玄武岩にはソレイライトとアルカリ岩の両方が含まれる。チャートは白亜紀、石灰岩は三疊紀。そのほかに変成岩の小ブロックが断層に沿って含まれる。全体は断層帯であると解釈される。これらは嶺岡帯と年代こそ異なるが、産状はすべて共通である。嶺岡帯がもし全面露頭であったならこのようではないかと思わせるものであった。2000 年当時はこのような露頭であったが、現在は全域がブドウ園 (ヴィンヤード) となっている。

5. 世界の付加体と断層帯中の玄武岩のテクトニックセッティング

玄武岩や海洋層序、蛇紋岩などがタービダイトとともに断層帯に含まれる地質体は世界中に多く、それらがオフィオライトの一部が出ているものなのか、それともたとえば大陸間の衝突を意味するシューチャー（縫合帯）なのか、また付加体にも同じような岩体の組み合わせがあることがあるがその意義は何なのか、などの疑問が世界中から出されていた。1980年代から今日に至る諸論文、シンポジウムの報告書や特集号、出版物などを見ると、このテーマは長年にわたって世界の地質研究の耳目となっていたことがわかる。北米西岸やサザンアプランズ巡検後、私がサイプラスやオマーンのいわばオフィオライトのタイプロカリティー（模式地）を3回にわたって見、さらにフランスカンやトルコ中部のアンカラメランジュと呼ばれる地質体、および房総半島の嶺岡帯の発達史を調査研究するに及んで、世界共通の大きなテーマであることが分かった（Dilek and Newcomb eds., 2002; Dilek and Robinson eds., 2003; Wakabayashi and Dilek eds., 2021）。そして、付加体における玄武岩については、どの地質体にも一様に認められる共通性があることも分かった。すでにサザンアプランズ付加体は四万十付加体と瓜二つであることがわかっていたが、アンカラメランジュは、嶺岡帯とその周辺での諸岩石の起源や分布状況（Mori *et al.*, 2011）とほとんど同じであることも分かった（第7図）。一言でいうと衝突帯やシューチャーは必然的に最後のステージの直前には沈み込み帯のテクトニクスを受けるということであり、海溝域にタービダイトがもたらされるとそこには付加体が形成されやすい、ある場合にはオフィオライト様の岩石やOPSや、ホットスポット起源の岩石の組み合わせもその内部や近隣に取り込まれるということである。日本ではOgawa and Taniguchi (1989)の西南日本のいくつかの例に続いて、坂本ほか(1993)は瀬戸川帯の例で、またMori *et al.* (2011)は嶺岡帯の例で示したとおりである。

文 献

Aubouin, J., von Huene, R., Baltuck, M., Arnott, R., Bourgeois, J., Filewicz, M., Kvenvolden, K., Leinert, B., McDonald, T., McDougall, K., Ogawa, Y., Taylor, E. and Winsborough, B. (1982) Leg 84 of the Deep Sea Drilling Project: subduction without accretion; Middle America Trench off Guatemala. *Nature*, **297**, 458-

460.

- Brandon, M. T., Cowan, D. S. and Vance, J. A. (1988) The Late Cretaceous San Juan thrust system, San Juan Islands, Washington. *Geological Society of America Special Paper*, no. 221, 81p.
- Clarkson, E. N. K., Floyd, J. D. and Stone, P. eds. (2001) The Southern Uplands Terrane: Tectonics and biostratigraphy within the Caledonian Orogen. Proceedings of a conference held at Our Dynamic Earth, Edinburgh 23-24 September, 1999. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, **91** for 2001, 323-566.
- Cowan, D. S., Brandon, M. T. and Garver, J. I. (1997) Geological tests of hypotheses for large coastwise displacements; a critique illustrated by the Baja British Columbia controversy. *American Journal of Science*, **297**, 117-173.
- Dilek, Y. and Newcomb, S., (eds.) (2002) Ophiolite concept and the evolution of geological thought. *Geological Society of America Special Paper*, no. 373, 504p.
- Dilek, Y. and Robinson, P. T. eds. (2003) Ophiolites in Earth History. *Geological Society, London, Special Publication*, no. 218, 43-68.
- Donath, F. A. and Parker, R. B. (1964) Folds and folding. *Geological Society of America Bulletin*, **75**, 45-62.
- Floyd, J. D. (2001) The Southern Uplands Terrane: a stratigraphical review: *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, **57** for 2000, 998-1013.
- Frisch, W., Meschede, M. and Blakey, R. (2011) *Plate Tectonics: Continental Drift and Mountain Building*. Springer-Verlag, Berlin. 212p.
- Hilde, T. W. C. (1983) sediment subduction vs. accretion around the Pacific. *Tectonophysics*, **99**, 381-397.
- 今井 功 (2005) 藤本治義—関東山地の地質および日本の地学教育. *地球科学*, **59**, 145-147.
- 加藤碩一・脇田浩二・斎藤 眞・高木哲一・水野清秀・宮崎一博 編 (2022) 日本列島地質総覧—地史・地質環境・資源・災害—. 朝倉書店, 460p.
- 木村敏雄 (1971) “破断”と“褶曲”, *地質学雑誌*, **77**, 335-340.
- Kimura, K. and Hori, R. (1992) Offscraping accretion of Jurassic chert-clastic complexes in the Mino-Tamba, central Japan. *Journal of Structural Geology*, **15**, 145-

161.

- Leggett, J. K. ed. (1982) Trench-forearc geology. *Geological Society of London Special Publication*, no. 10, 576p.
- Leggett, J. K. (1987) The Southern Uplands as an accretionary prism: the importance of analogues in reconstructing palaeogeography. *Journal of the Geological Society London*, **144**, 737-752.
- Matsuda, T. and Isozaki, Y. (1991) Well-documented travel history of Mesozoic pelagic chert in Japan: from remote ocean to subduction. *Tectonics*, **10**, 475-499.
- 松岡 篤 (2000) 付加体研究のツールとしての放散虫. 地質学論集, no. 55, 17-26.
- 松岡 篤・山北 聡・榊原正幸・久田健一郎 (1998) 付加体地質の観点に立った秩父累帯のユニット区分と四国西部の地質. 地質学雑誌, **104**, 634-653.
- McKerrow, W. S. (1987) The Southern Uplands Controversy. *Journal of the Geological Society, London*, **144**, 735-736.
- Moore, J. C. and Byrne, T. (1987) Thickening of fault zones: A mechanism of mélangé formation in accreting sediments. *Geology*, **15**, 1040-1043.
- Moore, J. C., Watkins, J. S. McMillen, K. J., Bachman, S. B., Leggett, J. K., Lundberg, N., Shipley, T. H., Stephan, J.-F., Beghtel, F. W., Butt, A., Didyk, B. M., Niitsuma, N., Shephard, L. E. and Stradner, H. (1982) Facies belts of the Middle America Trench and forearc region, southern Mexico: results from Leg 66 DSDP. In: Leggett, J.K. ed., Trench-forearc geology, *Geological Society of London, Special Publication*, no. 10, 77-94.
- Moore, J. C., Taira, A. and Moore, G. F. (1991) Ocean Drilling and accretionary processes: *GSA Today*, **1**, 265-268.
- Mori, R., Ogawa, Y., Hirano, N., Tsunogae, T., Kurosawa, M. and Chiba, T. (2011) Role of plutonic and metamorphic block exhumation in a forearc ophiolite mélangé belt: An example from the Mineoka belt, Japan. in Wakabayashi, J. and Dilek, Y. eds. Mélanges: Processes of formation and societal significance. *Geological Society of America Special Paper*, no. 480, 95-115. doi:10.1130/2011.2480(04)
- Nishi, H. (1988) Structural analysis of part of the Shimanto accretionary complex, Kyushu, Japan, based on planktonic foraminiferal zonation. In: Taira, A. and Ogawa, Y. eds., The Shimanto belt, southwest Japan - Studies on the evolution of an accretionary prism. *Modern Geology*, **12**, 47-69.
- Nishi, T. (1994) Geology and tectonics of the Sambosan Terrane in eastern Kyushu, Southwest Japan - Stratigraphy, sedimentological features and depositional setting of the Shakumasan Group. *Journal of Geological Society of Japan*, **100**, 199-215.
- Nur, A. and Ben-Abraham, Z. (1977) Lost Pacifica continent. *Nature*, **279**, 41-43.
- Ogawa, Y. (1982a) Tectonics of some forearc fold belts in and around the arc-arc crossing area in central Japan. in J. K. Leggett ed., *Trench-forearc geology, Geological Society of London Special Publication*, no.10, 49-61.
- 小川勇二郎 (1982b) 中米海溝域のテクトニクス. 科学, **53**, 467-476.
- Ogawa, Y. (1998) Tectono-stratigraphy of the Glen App area, Southern Uplands, Scotland: anatomy of an Ordovician accretionary complex. *Journal of the Geological Society, London*, **155**, 651-662.
- Ogawa, Y. (2001) Duplex structures and their tectonic implication for the Southern Uplands accretionary complex. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, **91**, for 2000, 515-519.
- 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 (2023) 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.
- Ogawa, Y. and Horiuchi, K. (1978) Two types of accretionary fold belts in central Japan. *Journal of Physics of Earth*, **26**, Suppl., S321-336.
- Ogawa, Y. and Miyata, Y. (1985) Vein structure and its deformational history in the sedimentary rocks of the Middle America Trench slope off Guatemala, Deep Sea Drilling Project Leg 84. *DSDP Initial Report*, **84**,

- 811-829. http://www.deepseadrilling.org/84/dsdp_toc.htm (閲覧日：2023年8月26日)
- Ogawa, Y. and Taniguchi, H. (1989) Origin and emplacement of basaltic rocks in the accretionary complexes in SW Japan. *Ophiolite*, **14**, 177-193.
- Ogawa, Y. and Nishi, T. (1996) Chaotic injection bodies in a Jurassic accretionary complex - Examples from the Sambosan Belt, eastern Kyushu. *In*: Noda, H. and Sashida, K. (eds.) *Commemoration Volume of Professor Hisayoshi Igo*. 43-54.
- Ogawa, Y., Nakashima, K. and Sunouchi, H. (1983) Mesozoic accretion of siliceous deposits in southwest Japan. *In*: A. Iijima, J. R. Hein & R. Siever eds., *Siliceous Deposits in the Pacific Region*, Elsevier, 413-426.
- Ogawa, Y., Fujioka, K., Nishiyama, T., Uehara, S. and Nakagawa, M. (1985) Ophiolitic rocks of the Middle America Trench Landward slope off Guatemala: Deformational characteristics and tectonic significance. *DSDP Initial Report*, **84**, 791-809. http://www.deepseadrilling.org/84/dsdp_toc.htm (閲覧日：2023年8月26日)
- Ogawa, Y., Mori, R., Tsunogae, T., Dilek, Y. and Harris, R. (2015) New interpretation of the Franciscan Melange at San Simeon coast, California: Tectonic intrusion into an accretionary prism. *International Geology Review*, **57**, 824-842.
- 坂本隆之・小川勇二郎・中田節也 (1993) 瀬戸川付加体中の緑色岩類の起源とそのテクトニクス上の意義. 地質学雑誌, **99**, 9-28.
- 佐藤 正 (1989) 日本中・古生界研究の放散虫革命. 応用地質, **30**, 33-42.
- Sawaki, Y., Shibuya, S., Kawai, T., Komiya, T., Omori, S., Iizuka, T., Hirata, T., Windley, B. F. and Maruyama, S. (2010) Imbricated ocean plate stratigraphy and U-Pb zircon ages from tuff beds in cherts in the Ballantrae Complex, SW Scotland. *GSA Bulletin*, **122**, 454-464.
- Taira, A., Okada, H., Whitaker, J. H. McD. and Smith, A. J. (1982) The Shimanto Belt of Japan: Cretaceous-lower Miocene active-margin sedimentation. *In*: J. K. Leggett, (ed.), *Trench-forearc geology. Geological Society London Special Publication*, no. 10, 5-26.
- 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.
- 辻 隆司・宮田雄一郎 (1987) 砂岩層中にみられる流動化・液状化による変形構造：宮崎県日南層群の例と実験的研究. 地質学雑誌, **93**, 791-808.
- Uemura, T. (1981) Deformation facies, series and grands. *Journal of Geological Society of Japan*, **87**, 297-305.
- 植村 武 (2000) 構造地質学要論—地質体の変形—. 愛智出版, 東京都, 324p.
- Underwood, M. B. and Bachman, S. B. (1982) Sedimentary facies associations within subduction complexes. *In*: Leggett, J. K. ed., *Trench-forearc geology, Geological Society of London, Special Publication*, no. 10, 537-550.
- Wakabayashi, J. and Dilek, Y. eds. (2021) 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.
- 脇田浩二 (2000) 美濃帯のメランジュ. 地質学論集, no. 55, 145-163.
- Wakita, K. (2014) OPS mélangé: a new term for mélanges of convergent margins of the world. *International Geology Review*, **57**, 529-539. doi:10.1080/00206814.2014.949312

OGAWA Yujiro (2023) The Early History of Accretionary Prism Research: A Reminiscence (Part2: Development of Accretionary Prism Research).

(受付：2023年3月6日)