

サイエンスの舞台裏

—カリフォルニア湾の作り方—*

高橋雅紀¹⁾

*日本地球惑星科学連合2010年大会にて講演

1. 経緯

パソコンの中を整理していたら、懐かしい原稿が出てきた。2009年の3月に東京大学理学部の松浦充宏先生が退官される際、有志が集まって雑誌「月刊地球」に特集号を出そうということになり、私にも何か記事を書いてくれないかと頼まれ書いたものである。企画はその後頓挫して、特集号は結局出版されることはなかった。たぶん、依頼された誰よりも早く原稿をまとめ上げてPDFを提出したが、そのまま記憶の彼方に忘れ去られてしまった。それではもったいないので、ここにそのまま報告しようと思う。

記事のタイトルは「紙と鉛筆と地質学と地球物理学 (Integration of geology and geophysics in Japan)」。地質学会に本籍を残しつつも、覚悟を決めて住民票を地震学会に移した数年後だったから、地質学と地球物理学の融合 (fusion)、あるいは統合 (integration) の必要性を強く感じていたのであろう。振り返れば、その後の10年近く地球物理研究者の中に入り込み、分野間融合を主張しながら研究発表を続けてきた。目に見える効果には疑問符が付くが、どこかの誰かに私の哲学が伝わっていると思いたい。

記事は、軽微なミスや投稿規定に対応する修正だけにした。当時のアカデミーを取り巻く時代背景と併せてこの記事の評価するためには、リアリティーをそのまま記録することが必要と思われたからである。奇しくも、記事を書き上げた日付は、東日本大震災のちょうど2年前であった。あの時、私は何を思い、何を考えていたのだろうか。過去と現在を行ったり来たりする地質学者の習性から、8年前を振り返ってみたい。

2. はじめに

固体地球を研究対象としている日本の地質学と地球物理学は、いつの頃からか遠く離れてしまった感がある。地質学の研究もますます個別現象に特化され、声高に叫ばれてきた“分野間融合”は、分野内の“専門分野間融合”から始

めなければならない。ひとつには、多くの研究者の関心を集められる、根幹となるべき研究テーマの枯渇が原因であろう。それは、プレートテクトニクスという宴のあとなのだから仕方がないにしても、あまりにも時間が経った気がする。蛸壺研究に陥らないためにも、分野を越えた情報の交換と問題の共有化は、意識して続けるべきと思う。

具体的にどのようなテーマが発見されるのかわからないけれども、「隣は何をする人ぞ。」と意欲的に動き回れば、棒に当たる犬も出てこよう。居心地の良い自分の専門性の中に閉じこもらず、隣の食堂に出かけてまずは食べてみる。うまいかまずいかは、それから判断する。もしかすると、隣は宝の山かもしれない。宝の価値に、気づいていないだけなのかもしれない。歳をとってからではなかなか難しいので、若い研究者は積極的に周辺分野に出向いて欲しい。そのような行動を奨励する雰囲気、学会に求められていると思う。

3. 松浦先生との気まずい出会い

松浦充宏先生の退官記念号をまとめるにあたって、私にも何か執筆して欲しいとの松浦先生の意向を名古屋大学の鷲谷威教授からメールを受けたのは、2009年2月の終わりであった。私は典型的な地質学者であり、生粋の地球物理学者である松浦さん(以下、“さん”付けをご容赦願いたい)と初めてお会いしたのは2004年秋の九州大学での日本地震学会だから、たかだか数年間のお付き合いである。もちろん専門分野が違うので、お会いできるのは春の地球惑星科学連合大会と秋の地震学会だけであり、これまで10数回しかお会いしていない。何を書いてもよろしいようなので、記憶を頼りに思いつくままキーボードをたたいてみた。

2004年の地震学会は、私にとっては地震学会に入会して初めての発表であり、それまで20年以上も発表を続けてきた日本地質学会から地震学会に活動場所を移した覚悟の参加であった。伝手も柵もない地震学会で、立ち見が

1) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

キーワード：思考実験、テクトニクス、海嶺の沈み込み、背弧拡大

出ることを期待した初めての発表は肩すかしとなり、消沈しきって聴いていた講演のうちで松浦さんの発表が印象に残った。「衝突率を導入すると、プレート沈み込み帯の地殻変動が説明できる。」と言うような内容だったと記憶するが、地質屋にはなんとも難しい。インドの衝突は100%、伊豆-丹沢の衝突は50%で、日本海溝では10%だという。前二者はいいとしても、日本海溝には何もぶつかっていない。

ぶつかっているのが何なのか、講演を聴いていてすぐピンときた。その学会で私が発表した、日本海溝の移動のものではないか。私のモデルでは、日本海溝の西向きの移動速度は年に1~2 cm、一方、太平洋プレートの速度は9~10 cm だから、太平洋プレートの運動の10~20%が衝突していると考えても実質は変わらない。インドや伊豆半島と違って日本海溝では何かが衝突しているわけではないが、観測としては同じに映るはずである。早速、懇親会で松浦さんにお話を伺おう、というより私のモデルを売り込もうと接近を試みた。

背広姿に品のある眼鏡のいかにも東京大学教授といった風貌にちょっと尻込みし、同じ地質屋同士で地質学会では昔から気さくな松田時彦さんをお願いし、きっかけを作っていた。「日本海溝では何も衝突していないのに、10%の衝突率は、実際には何をみているのですか?」。一瞬、松浦さんの顔色がこわばって、「失敗したかな。」と内心つぶやいた。そのあとの10分間だか20分間だかの気まずい雰囲気は、今でもはっきり憶えている。

「何か話題を変えなければ。そうだ、西南日本のフィリピン海プレートのスラブの話しよう。」。その日の講演では、西南日本の地下のフィリピン海プレートのスラブの先端がどこまで沈み込んでいるのかといった内容の発表がいくつかあり、単純に新鮮な印象を受けていたからである。「先生、西南日本のフィリピン海プレートが、山陰よりも先には見えないとの講演がいくつかありましたが、なぜ西南日本には、フィリピン海プレートのスラブが途中までしか見えないのか分からないのですか?」と質問してみた。「さっぱり分からない。」との返事を受けて、早速、日本列島の模型を引っ張り出して説明を始めた。「2,500 万年前まで遡って考えると、西南日本にはフィリピン海プレートのスラブが途中までしかないことが分かりますよ。」と。

日本海の拡大と四国海盆の拡大、そしてそれ以降の日本列島の成り立ちを簡単に説明し、フィリピン海プレートのスラブは山陰よりも先にはもともと存在していないことを話したら、ちょっと雪解けを感じた。その後、ひとつふたつ会話をしたあと、「今度、東大にきてセミナーで話をし

てごらん下さい。」との一言を頂いた。「まあ、初めての場所だ。新人のつもりでよくやった。」と自分に言い聞かせて、九州をあとにした。私はそのとき、41 歳であった。

実際に東京大学理学部の「固体地球セミナー」で講演したのは、そのときのパワーポイントファイルをみると2005年12月14日、タイトルは「日本列島の圧縮テクトニクスの原因」で、スライド数は772枚、2時間ノンストップの講演であった。地質研究者ではただひとりセミナーに参加していた木村 学さん(教授なのだけれど、昔からそういう間柄なので)も、最後まで必死に聴いてくれた。講演後、セミナーを担当していた松浦さんの直弟子である深畑幸俊君(現在は京都大学防災研究所)からは鋭いコメントが入り、さすが地球物理研究者は論理(logic)に厳しいと感心した。

その後、東京大学で開催された国際ワークショップに参加し、引き続き野外巡検で伊豆半島の衝突地域(足柄層群や丹沢層群、箱根火山など)を海外の研究者と一緒に歩いたときは、思った以上に地球物理研究者が地質に興味があることに驚いた。そういえば、地球物理学の大御所の故・竹内均東京大学名誉教授も、随分地質学の訳本を執筆していた。地質屋は嫌いだけれど、地質学はとても好きだったのかもしれない。巡検初日の夜中、東京から箱根に駆けつけた松浦さんと明け方近くまで酒を呑みながらの熱い議論は結構きつかった。

その後は、深畑君がコンビナーをしている地球惑星科学連合大会のセッション(プレート収束帯のテクトニクス)で、毎回トリで講演している。昨年の講演で、「今年もトリをつとめさせていただきます。」と言ってから講演したら、そのあとポスター会場でコーヒーを飲みながら、松浦さんが「トリかぁ・・・。」と呟いたのが今でも忘れられない。トリは次の講演を気にしないで済むだけのだけれど、それでも毎回責任を感じつつ準備している。あと何回、トリで講演できるだろうか。

思い出話だけでは申し訳ないので、サイエンスの話をして松浦さんへの祝辞としよう。何を話そうか悩むのだけれど、通常の論文集ではないこのような企画だから、最近考えていることのひとつを紹介したい。まとまっているわけでもなく、レビューをきちんとしているわけでもない。私のサイエンスの最初の一步は、いつもこのような感じであるとの紹介文だから、気楽に読んで頂きたい。

4. 紙と鉛筆と時間があれば

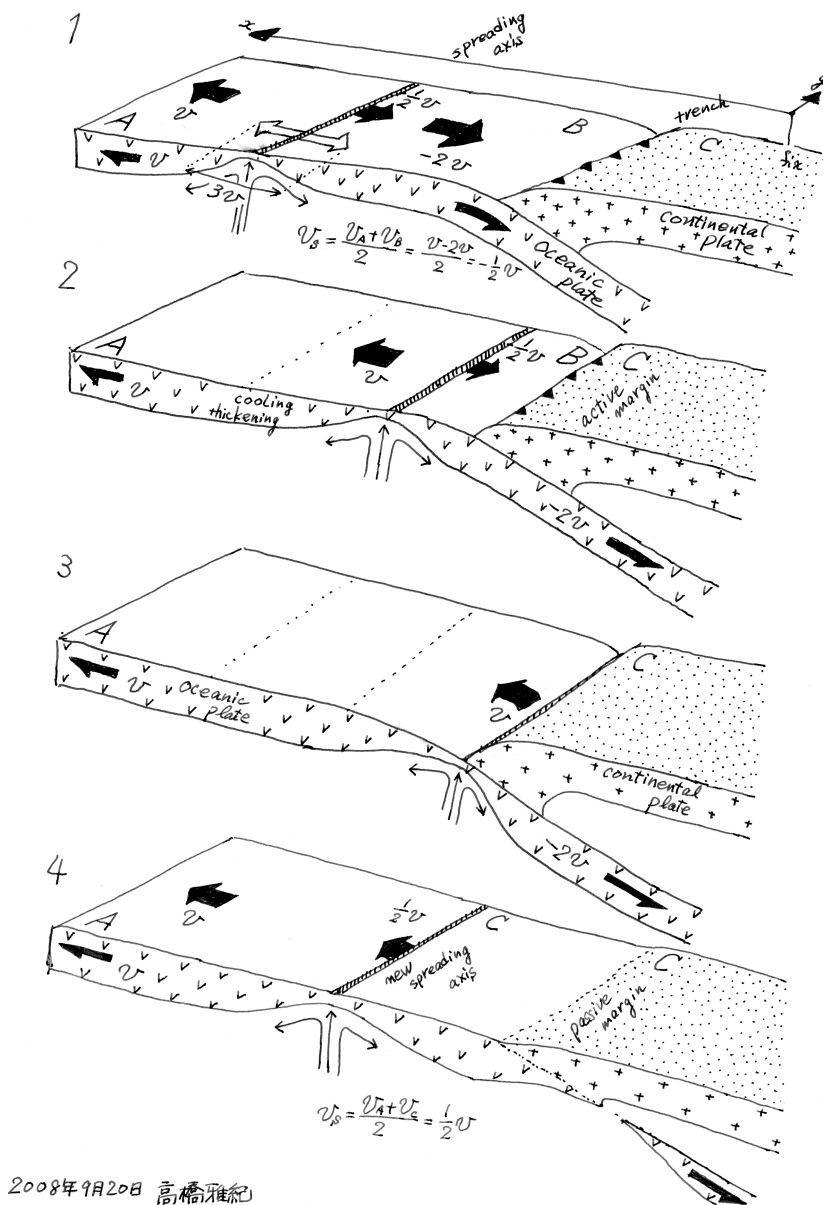
拡大している海洋プレートのAとBがあり、片側の海

洋プレート B が大陸プレート C の下に沈み込んでいる基本モデルから思考実験を始めてみよう (第 1 図)。図で右向きをマイナス (-), 左向きをプラス (+) とし, わかりやすいようにそれぞれ東および西向きとする。したがって, 奥に向かう方向が北向きである。そして, 大陸プレート C は固定させておく。

海洋プレート A は西に向かって V の速さで移動し, 一方, 海洋プレート B はその 2 倍の速さで東に移動している, すなわち $-2V$ の速度で移動しているとしよう (第 1 図の 1)。したがって, 海洋底は $|3V|$ の速さで拡大している, 片側拡大速度の大きさは, その半分の $|1.5V|$ となる。海洋底は東西に発散している, その中間に

位置する海洋底拡大軸は南北方向となる。そして, 海洋プレート B は $-2V$ で移動しており, 一方, 片側拡大速度の大きさは $|1.5V|$ なので, 拡大軸は $-0.5V$ の速度で移動していく。すなわち, 海洋底拡大軸は, $|0.5V|$ の速さで海溝に向かって東に移動していく (第 1 図の 2)。そして, ついには海溝に到達するはずだ。

海洋底拡大軸が海溝に到達したら, どうなるだろうか。それまでは, 大陸プレート C に対して海洋プレート B は $-2V$ の速度で移動している, 海溝では両者は $|2V|$ の速さで収束, すなわち海洋プレートが $|2V|$ の速さで沈み込んでいた。ところが, 拡大軸が海溝に達すると, それまで大陸プレート C と海洋プレート B の境界であった



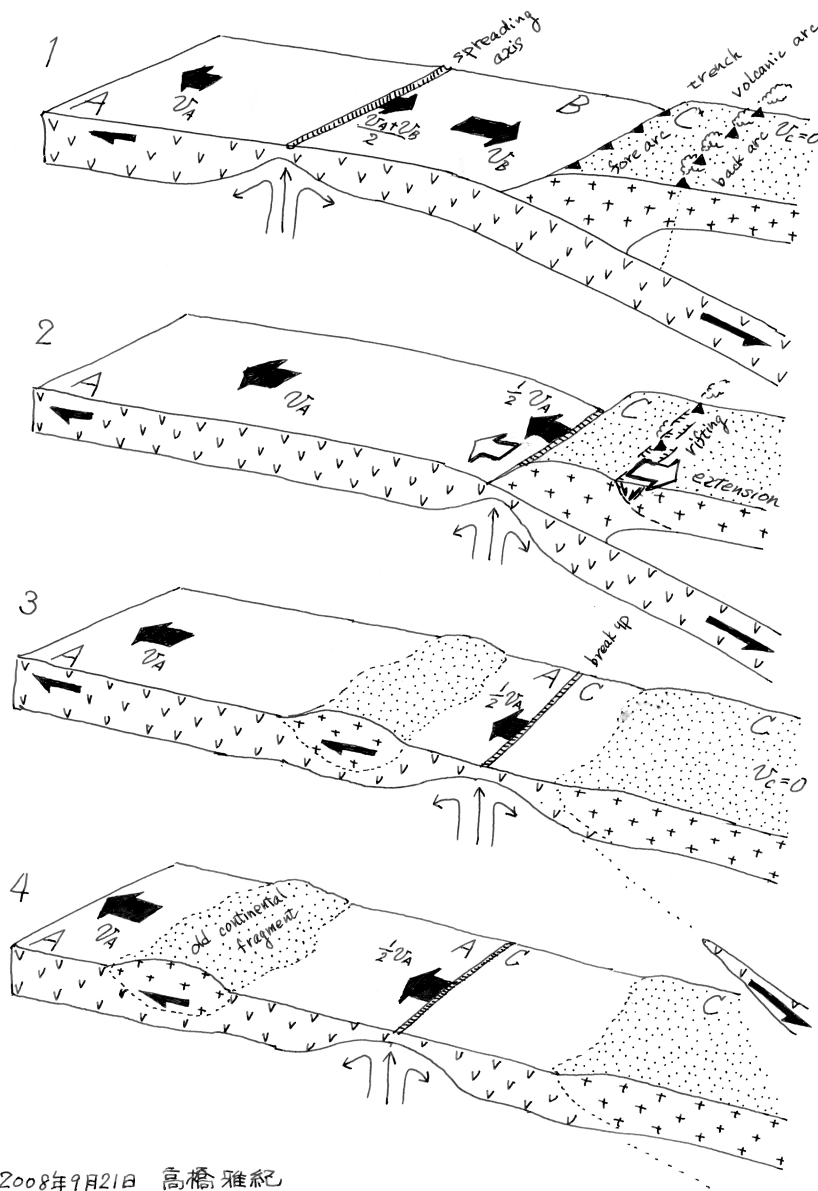
第 1 図 海溝に到達した海洋底拡大軸に関する思考実験 (基本モデル)。

海溝は、大陸プレートCと海洋プレートAの境界になってしまう(第1図の3)。大陸プレートCに対して海洋プレートAは $|V|$ の速さで西に移動しているのので、両者は発散していくこととなる。その結果、大陸プレートCと海洋プレートAの新たな拡大軸が $|0.5V|$ の速さで西に移動しながら、両側のプレートに海洋底が付け加わっていくはずである(第1図の4)。

海洋プレートAは何もなかったように西に移動していくが、大陸プレートCは沈み込み帯から大西洋型大陸縁に移行してしまう。個々のプレートが一樣な運動を継続していたとしても、大陸プレート縁が活動的大陸縁(active margin)から非活動的大陸縁(passive margin)に転換して

しまうことがあり得る。ちょっと騙されているようだ。

続いて、このモデルを基本とし、沈み込み帯の地学現象を考慮し考察してみよう。海洋プレートが沈み込んでいる上盤プレートには、プレートの沈み込みにもなって、海溝と平行な火山列が形成される。例えば、南米大陸西縁の陸弧(continental arc)や東北日本弧などの島弧(islands arc)である。これらの陸弧や島弧では、海溝からある距離だけ離れた地下深部でマグマが発生し、地表に噴出したものが火山となる。火山活動のない海溝側は前弧(foreside arc)、火山活動が活発な範囲を背弧(back-arc)と大別されるが、後者を火山弧(volcanic arc)と呼ぶ場合が多い。両者の境界が火山フロント(volcanic front)だ。



2008年9月21日 高橋雅紀

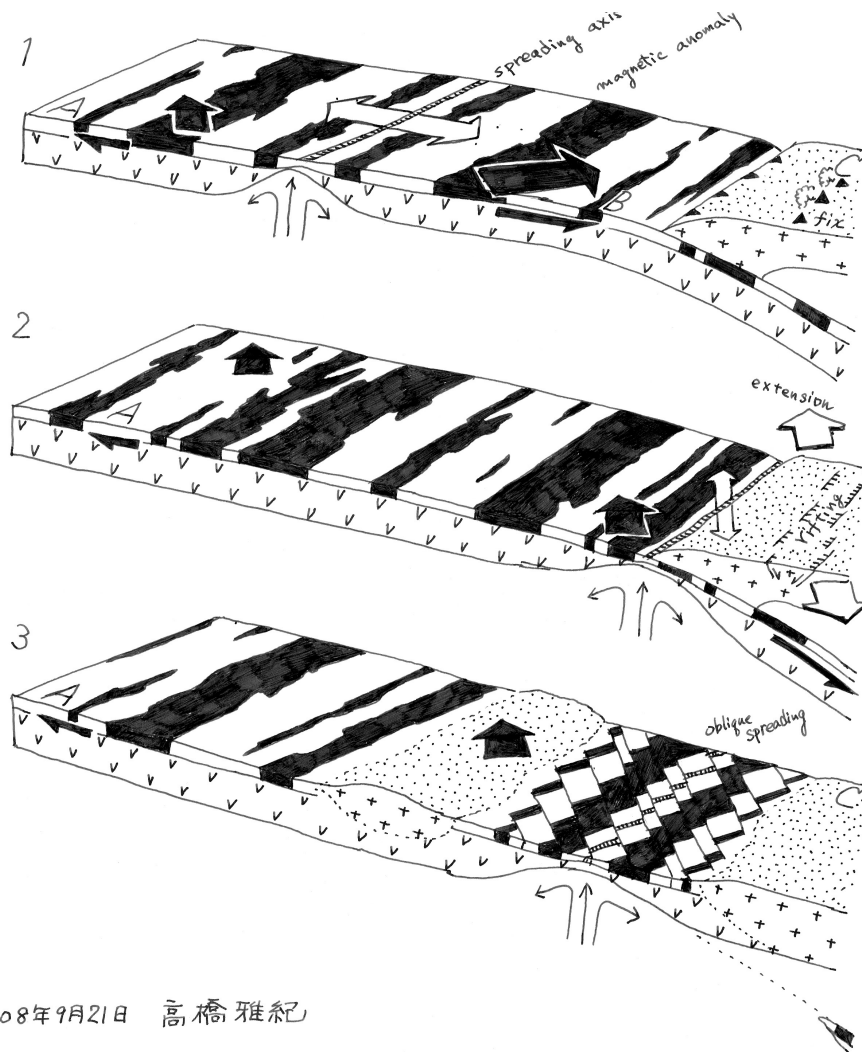
第2図 海溝に到達した海洋底拡大軸に関する思考実験(背弧拡大モデル)。

火山弧はマグマの熱で温められているので、冷たい前弧域よりも変形しやすい。冷えたチョコレートは固いけれど、温まったチョコレートが柔らかいと同じである。そのため、沈み込み帯の上盤プレート縁では、いつも火山弧に変形が集中する。さて、このような火山弧の特質を基本モデルに組み入れたら、どうなるであろうか。先ほどと同様に、3つのプレートを使って思考実験をしてみよう。

海洋プレートBが大陸プレートCに沈み込み、大陸プレートCの端には海溝と平行な火山弧が形成されている(第2図の1)。海洋底拡大軸が海溝に到達すると、大陸プレートCの縁に成長していた陸弧は、西に移動している海洋プレートAの運動により、海洋側(西)に引き出されようとされるはずである。このとき、変形は熱的に柔らかい火山弧に集中すると予想され、火山弧に沿って東西に引っ張られた地溝帯、すなわちリフト(rift)が形成されるであろう(第2図の2)。

そして、リフトが拡大して、ついには大陸プレート縁が伸張破断(breakup)すると、海洋底拡大に移行する。その結果、海洋プレートAは、かつてのプレートCの陸弧の前弧域をのせたまま西に移動していくが、前弧をはぎ取られた大陸プレートCは非活動的大陸縁に移行する(第2図の3と4)。白亜紀の花崗岩塊が海底から採取されている大東諸島のように、古い大陸地殻がより新しい海洋底に取り囲まれているパラドックスは、このようなメカニズムで説明できるかもしれない。

さらに、空想をつづけて、今度は海洋プレートのAとBのいずれの運動にも、北向きの成分がある場合を考えてみよう。つまり、プレートAは北西にプレートBは東北東に移動し、両者は東西に発散しながら北に移動しているとするケースである。わかりやすいように、海洋底の縞状地磁気異常も示しておく(第3図の1)。今度のケースでもこれまでと同様に拡大軸は南北となる(というより、そ



2008年9月21日 高橋雅紀

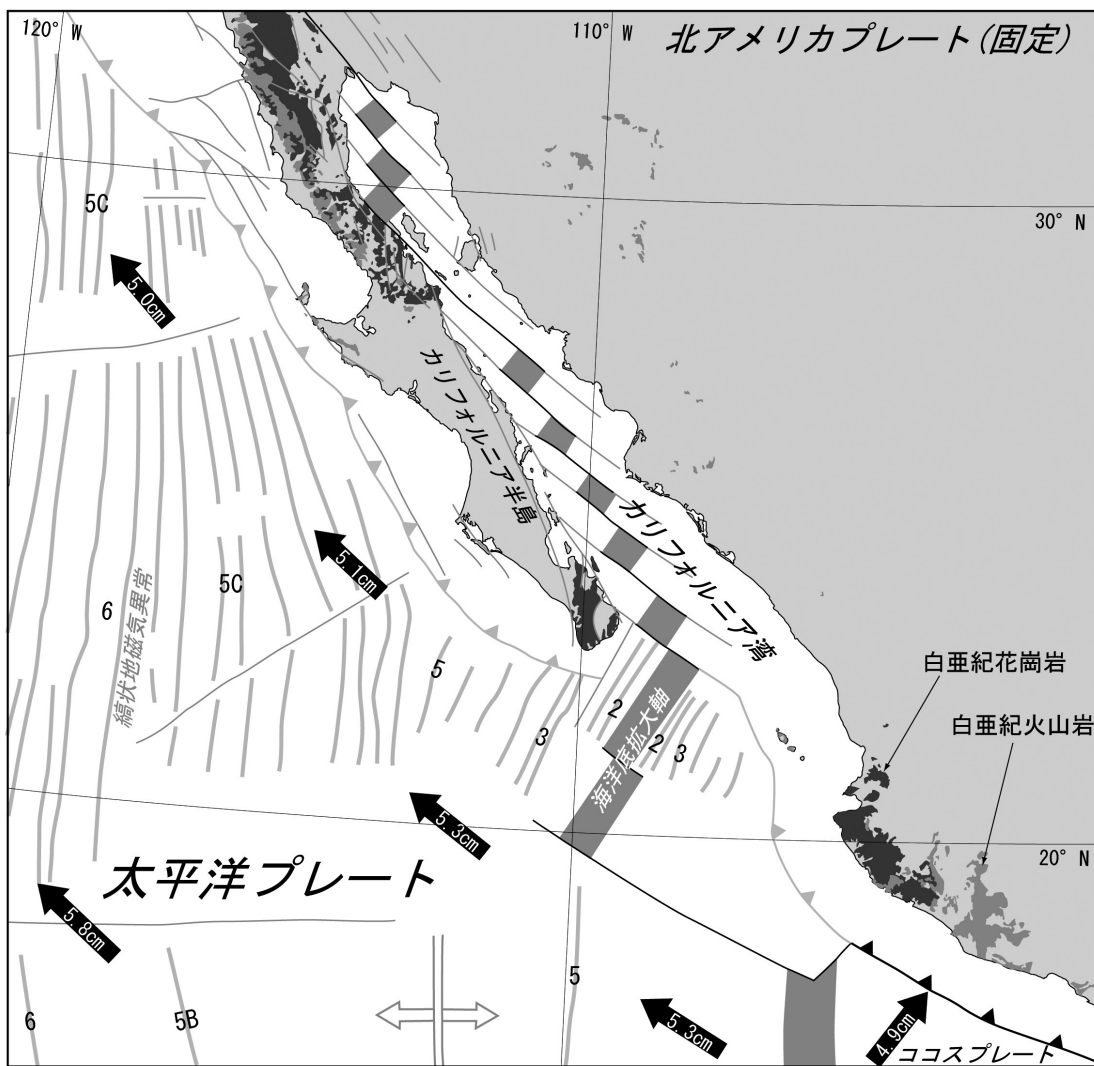
第3図 海溝に到達した海洋底拡大軸に関する思考実験(斜め背弧拡大モデル)。

のように設定する)。プレートAの東向きの速さよりもプレートBの西向きの速さの方が大きいので、拡大軸はこれまでと同様に | 0.5V | の速さで海溝に近づいてくる。拡大軸が海溝に到達すると大陸プレートCの火山弧でリフトが成長し、ついには伸張破断に至って海洋底拡大が開始する(第3図の2)。

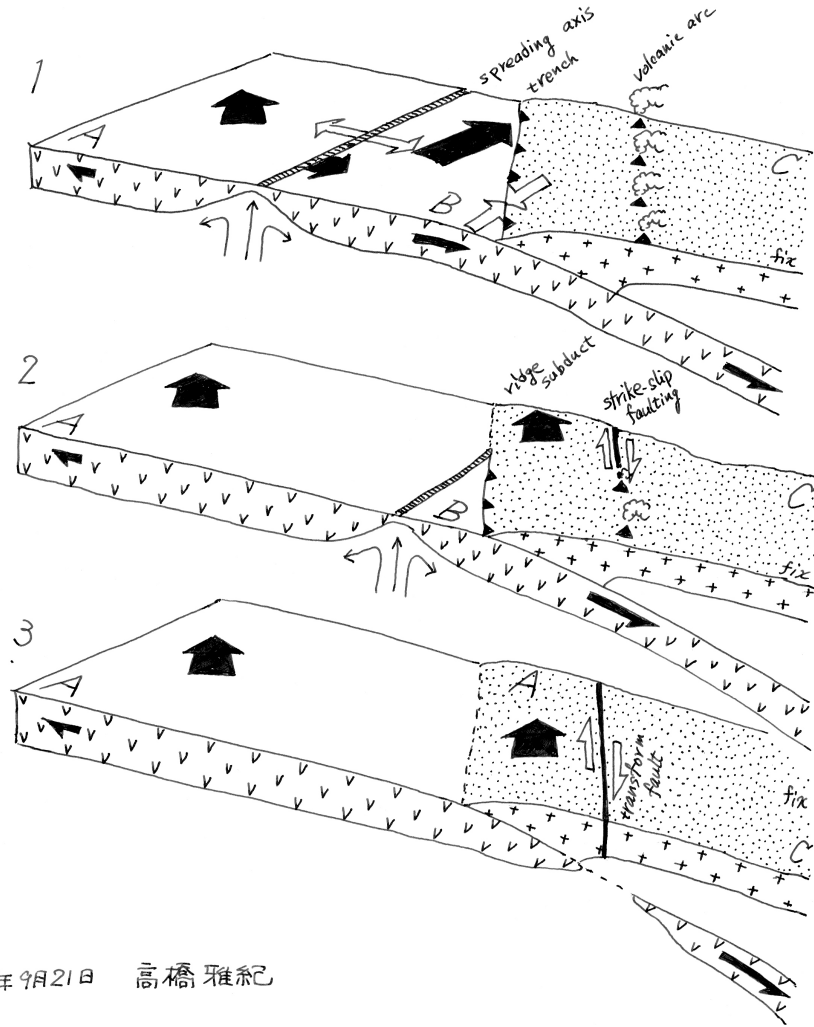
このとき、火山弧は海溝と平行であるが、大陸プレートCに対して海洋プレートAは北西に移動しているので、両者の相対運動の方向は北西 - 南東方向である。したがって、個々の海洋底拡大軸の方向は、相対運動の方向と概ね直交する北東 - 南西方向に形成されると考えられる。そして、それらは北西 - 南東方向のトランスフォーム断層(transform fault)に細かく分断されつつ、全体としては南北方向の海洋底拡大軸(群)が形成されると予想される(第3図の3)。北米大陸から分裂しつつあるカリフォルニア

半島やカリフォルニア湾の雁行する海洋底地磁気異常は、このように形成されていると考えられる(第4図)。そして、このことは、海嶺の拡大が能動的(active spreading)ではなく受動的(passive spreading)であることを物語っている。

さらに、思考実験を続けてみよう。これまででは、拡大軸が海溝と平行である場合を考えてきた。拡大軸と海溝が平行でない場合は、どうなるのであろうか。最初は海溝が、海洋プレートAの運動方向に平行である場合を考えてみよう(第5図の1)。海洋プレートAとBのいずれも北向き成分があり、相対運動は東西に発散、そして拡大軸は南北で東に移動し、プレートAの運動方向(北西 - 南東)に平行な海溝に到達するケースである。この場合も拡大軸は徐々に海溝に近づくが、拡大軸と海溝が平行でないので北部ほど早く拡大軸が海溝に到達する(第5図の2)。



第4図 カリフォルニア湾の雁行状拡大により、北アメリカ大陸から離れつつあるカリフォルニア半島。白亜紀の花崗岩や火山岩が分布するカリフォルニア半島は、周囲の海洋底よりも古い。



2008年9月21日 高橋雅紀

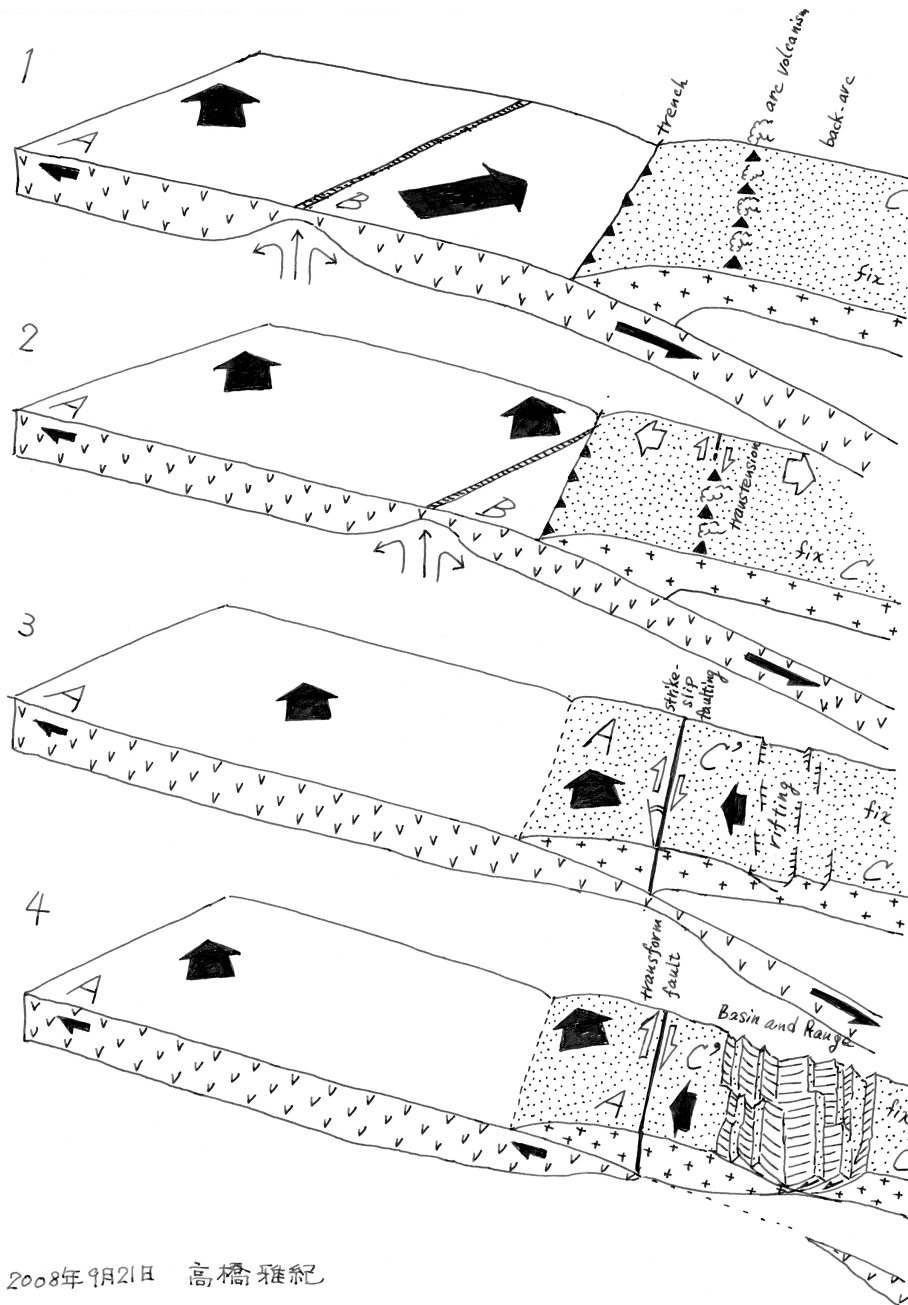
第5図 海溝に到達した海洋底拡大軸に関する思考実験 (トランスフォーム断層発生モデル)。

拡大軸が海溝に達した範囲では、大陸プレート縁では火山弧に沿って海洋プレートとの相対運動に対応した変形が形成される。このケースでは、両プレートの相対運動は北西-南東方向であり、海溝と平行な火山弧では、収束も発散もせず右横ずれの変位(横ずれ断層)が予想される。そして、拡大軸がすべて海溝に達すると、海洋プレートAと大陸プレートCの境界は、右横ずれのトランスフォーム断層となる(第5図の3)。このようにして、サンアンドレアス断層が発生した。

ただし、この考えは既に Atwater (1970) によって提示され見事に解かれている。彼女のモデルとの違いは、しいて言うならば、トランスフォーム断層は海溝ではなく、熱的に変形しやすい上盤の陸側部分(火山弧)で発生するというぐらいであろうか。

ところが、海溝の方向が海洋プレートAの運動方向と平行であるというのは、偶然というにはあまりにも都合が

良すぎる。そこで、海洋プレートAの運動方向が海溝よりも若干西向きである場合について、思考実験をしてみよう(第6図の1)。このケースでも拡大軸は南北であり、北ほど早く海溝に到達する(第6図の2)。拡大軸が海溝に達した際、大陸プレートCと海洋プレートBの相対運動は北西-南東方向であるが、海溝と平行な火山弧に形成されたトランスフォーム断層は、プレート相対運動の方向に比べて若干時計回りに偏っている。そのため、新たに発生したトランスフォーム断層で発散成分がまかなわれない、換言するなら、トランスフォーム断層であり続けるためには、断層を挟む両側が海洋側(西)に移動せざるを得ない。その結果、その背後(東側)では東西伸張変形、すなわちリフトが形成されるはずである(第6図の3と4)。サンアンドレアス断層の東側に発達するベースンアンドレンジ(Basin and Range)の伸張変形は、このように形成されたのかもしれない。



2008年9月21日 高橋雅紀

第6図 海溝に到達した海洋底拡大軸に関する思考実験（トランスフォーム断層＋背弧リフトモデル）。

仮にそうであるとすると、なぜカリフォルニア湾では海洋底拡大に移行したのに、その北側ではトランスフォーム断層とリフト帯の組み合わせになったのだろうか。単に、海溝と海洋プレートAの運動方向との斜交度の違いによるのであろうか。サンアンドレアス断層の背後ではスラブウインドウ (slab window) が広がっていくので、その影響も無視できない。あれこれ思考実験を続けたら、何かいいアイデアが浮かぶかもしれない。

そのあとも、いろいろ条件を変えてみて、「ああなればこうなる、こうすればああなる。」といった思考を繰り返

しては、スケッチブックやチラシの裏に描きとめている。紙と鉛筆があれば、このように空想の世界を楽しむことができる。それらのうちのいくつかが発展して、最終的に論文となるのだけれど、かたちにまとまらなかったり、まとめていないものも沢山ある。あるいは、詳しく調べてみたら、既に海外の研究者が、立派な論文として公表していたことも何度かあった。

実は、この原稿を書いている合間に調べてみたら、ここまでのストーリーは既に Severinghaus and Atwater (1990) が各種データに基づいた復元をまとめている、

McQuarrie and Wernicke (2005) によってきれいなアニメーションまで作られていた。彼らは実データから復元を行い、一方、私は思考実験から組み立てたのでアプローチは異なるが、最終的なストーリーは読者には同じように映るので、ここまでの思考実験を論文として学術雑誌に投稿しても、掲載されることはないだろう。でも、それは構わない。要は、何かを見て(観察)、疑問を持って(興味)、考えて(思考)いく過程が楽しいのであって、論文になったかどうかは単に結果なのだから。だから、サイエンスの種は、多い方が楽しい。そして、種をひねり出すには、とりあえず紙と鉛筆があればいい。それだけあれば、絵を描く時間は何とかしてひねり出す。分析機器や解析装置はそれからだ。サイエンスはまだまだ、ひとりでも十分に楽しめる。最先端巨大プロジェクトだけが、サイエンスというわけではない。

5. 地質学と地球物理学

数年前に地震学会に入って地球物理研究者と話をしてみると、「地質研究者は、何を言っているのかさっぱり分からない。」としばしば耳にする。地質学者である私ですら、最近ようやく他の地質研究者の言わんとすることが理解できるようになってきたのだから、それはやむを得ない。地質学は間口が広いだけでなく、懐がとても深い。というより、底なし沼の様な学問分野なので、専門用語があまりにも多い。さらに定性的といえども聞かえは良いが、実際には研究者ごとの感覚的な概念が乱立していて、その交通整理は容易でない。それは、複雑な自然をそのままでは理解できないので、ひとつひとつ丁寧に記載せざるを得ない地質学の宿命でもある。

それでも、そのように複雑な現象の大局的な変化(地史あるいは地球史)には、そうせしめた法則がその背後に存在するであろうとの希望のもとに、地質研究者は日々部品の収集と記載を続けている。だから、地質学の醍醐味が味わえるようになるには、早くても20年かかると思う。世知辛い世の中、科学の世界もそんなに気長に待つてはくれないようで、若い地質研究者が目先の小さいネタを研究対象にせざるを得ないのはとても悲しい。

同じ固体地球を扱っているながら、実際に目の前に存在している複雑な物(岩石)を、まずは手にとり己の目で観察する地質学と、直接触れることができない地球内部や、一人では到底調査し尽くせない広域の現象を観測する地球物理学の手段は決定的に異なる。だから、地質研究者と地球物理研究者は、とても遠くに離れている。それでも、木を

見て森を見ない(見られない)地質学と、森を見て木を見ない(見られない)地球物理学は、どこかで繋がなくてはならない。

そのために両者を単に同じ空間に閉じこめても、そもそも言葉が通じないのだから会話は成立しない。どちらかが相手の言葉を学んで用い、あるいは相手が理解できる様に言葉を選んで意思疎通を心がけるしかないであろう。日本の地球惑星科学連合が、単に異なる分野の寄せ集めにならないためにも、まずは手の届きそうな所へ手を伸ばす意識が必要であると思う。

地質学と地球物理学は、一部ではあったかもしれないけれど、昔は一緒に議論していた。そして、その頃の書物を読むと、とても盛り上がっていた(上田・杉村編, 1973など)。2004年の秋、九州大学での地震学会で私から松浦さんに手を伸ばしてみたら、嫌々だったのかもしれないけれど、彼も手を伸ばして掴んでくれた。紙と鉛筆と時間さえあれば、サイエンスは十分楽しめる。地質学と地球物理学が繋がれば、地球科学はもっと盛り上がる。松浦さんも、きっとそう思っていると思う。

(2009年3月11日)

文 献

- Atwater, T. (1970) Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **81**, 3513–3536.
- Severinghaus, J. and Atwater, T. (1990) Cenozoic geometry and thermal state of the subducting slabs beneath western North America. *Geol. Soc. Am. Mem.*, **176**, 1–22.
- McQuarrie, M. and Wernicke, B. P. (2005) An animated tectonic reconstruction of Southwestern North America since 36 Ma. *Geosphere*, **1**, 147–172.
- 上田誠也・杉村 新(編)(1973) 世界の変動帯。岩波書店, 東京, 387p.



高橋雅紀 (たかはし まさき)

群馬県出身。1990年に東北大学で博士号を取得後、日本学術振興会特別研究員及び科学技術特別研究員を経て、1992年に地質調査所(現産総研)に入所。関東地方を中心に地質を調べ、日本列島の成り立ちを研究中。
URL: <https://staff.aist.go.jp/msk.takahashi/>

TAKAHASHI Masaki (2017) The back stage of the science -How to make the Gulf of California-

(受付: 2017年3月4日)