

サブダクション・ゾーンとしての日本列島

上田 誠也 (東京大学地震研究所)
Seiya UYEDA

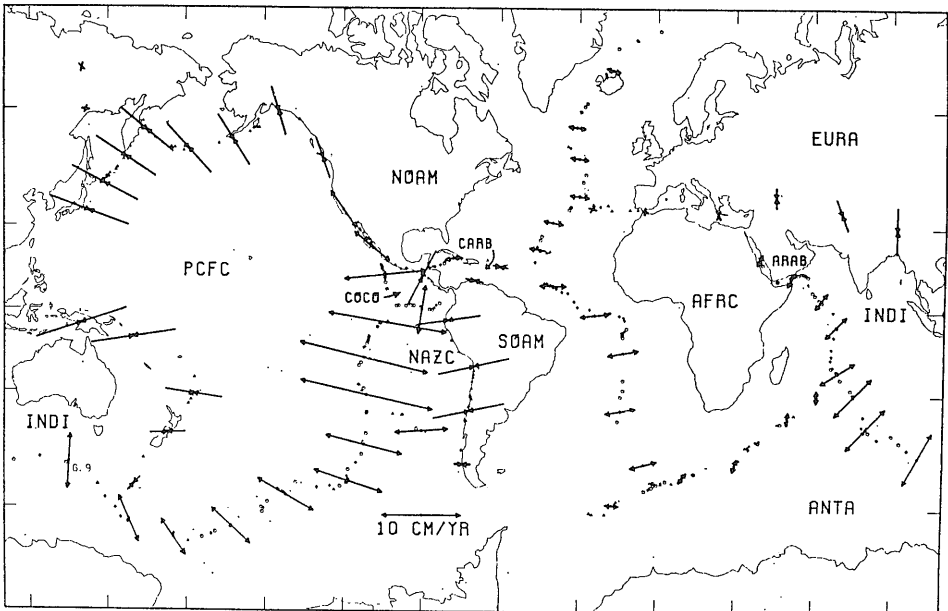
日本列島はサブダクション・ゾーン いわゆる沈み込み帯に属するわけでありまして 私が今日申し上げたいいくつかのメッセージを最初にあげますと

1. サブダクションというのは プレートテクトニック マシンと申しますか地球を一つのマシンと考えた時には そのプレートテクトニック・モーションの原動力であるということ。
2. 同じサブダクションといっても いろいろな種類があるのであって それを一つにまとめて説明しようなどということは無益なことである。 少なくとも典型的には二つのタイプのサブダクションがあるのだということ。 それを私はマリアナ型 チリ型と申しております。
3. 日本海のような back arc basin は開いてできるわけですが そういうものと大きな海が開くのは同じプロセスである。 つまり spreading center で開く同じ現象であって サブダクションがプレート運動の原動力であるとするならば開くほうはむしろ受動的な

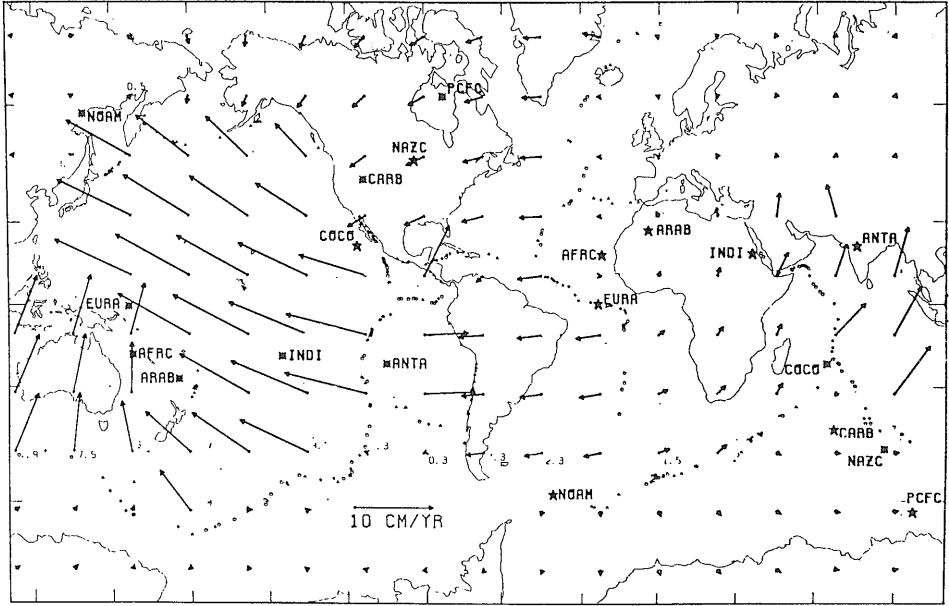
プロセスである。 sea floor spreading というプロセスは非常にenergetic であって物事を動かしているようにみえますがむしろ逆であるということ。 back arc basin で起こっている現象はsea floor spreading で起こる現象と非常に似ているので いわゆる熱水鉱床のようなものも生まれる可能性があるということ。

4. それから最後にサブダクションに伴なって堆積物がどこへいくかという問題についてお話ししたいと思います。

プレートテクトニクスというのははなはだうまい考えであって 各プレートの相対運動を定量的に決めることができます (第1図)。 詳しいお話はいたしませんがある仮説 すなわちハワイのようなホットスポットといわれるところがマントルに対して動かないという仮定をいたしますと この相対運動をマントルに対する絶対運動 (第2図) に書き直すことができます。 当然のことですが この図の中で非常に速く動いているプレートが 原動力をたくさんもっていると考えら



第1図 プレートの相対運動 (MINSTER and JORDAN, 1980).

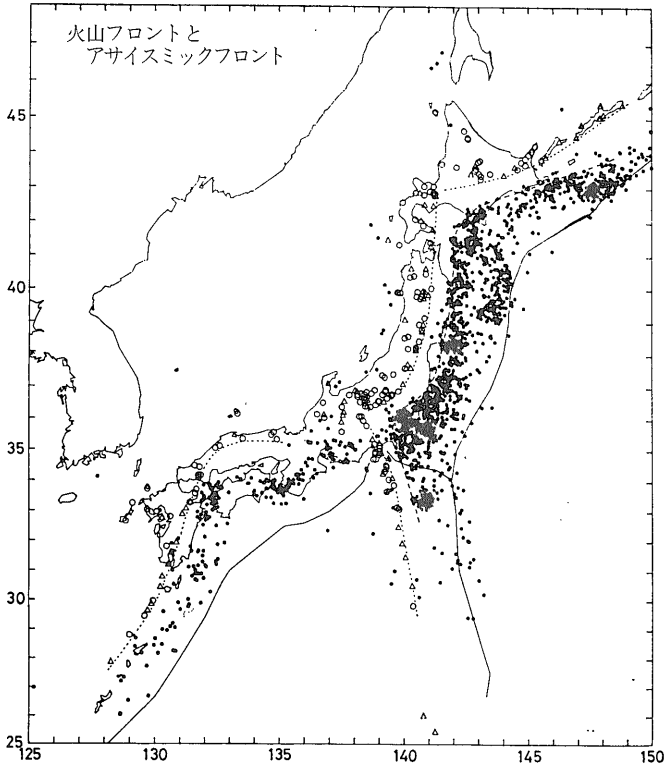


第2図 プレートの絶対運動 (MINSTER and JORDAN, 1980).

れます。そういうプレートはみんなサブダクション・ゾーンをもっており そちらの方に向かって非常な速さで動いているらしいのです。試みに各々のプレートについてサブダクション・ゾーン(海溝)が全体の周囲に対して占める比率とプレートの平均速度をプロットしてみますと サブダクション・ゾーンをたくさん持っているプレートはスピードが速く そうでない場合は遅いということが非常によくわかります。このことは 詳しいことは省略いたしますが“押ししている”ということはたいして利いていないのであって“引っぱっている”ということがプレートを動かす原動力の最大のものであろうと考える根拠であります。原動力論にはマントル対流論といわれる古典的な考えがありますけれども実際には引っぱるのが最大の力であって 引っぱられて両側へ離れていくところへ受動的に下からものが上がってきて spreading が起こっているのだと考えた方がいいと思われるのであります。また サブダクション・ゾーンを特徴づけるのはご承知のとおりいわゆる深発地震帯(和達・ベニオフ・ゾーン)であります。地震というものとは温度が低くないと起きないものであるとするならば 低温のものが常に地球の内部に supply されていなければこういう現象は起きないわけですから深発地震はサブダクションが起こっていることの大きな証拠になると思います。

そういうところで起こる地震を予知するのが日本で大きな仕事になっておりますが 私はそれについて一

つの提案をしております。最近では新しいテクニック いわゆる VLBI (遠くの星からの電波のノイズを使って距離を非常に精密に計る) を使いましてプレート・モーションをリアルタイムでフォローできる時代がだんだん近づいてきている。これを利用しますとプレートがどのくらい動いたかということがわかって大地震が起こる前兆を捕えることができるのではないかと思います。しかし 実際には大きなプレート間の相対運動だけではなくて 実際に海溝のところで行っている相対運動も測れないと意味のある 予知はできないのではないかと思います。私はかねてより海溝をまたいで本当に線をひっぱってあらゆる測器をつないでリアルタイムにそこでの相対運動をはかりそれと大規模なプレートの動きとの両方を比べることによって地震がさしせまっているかどうかを知ろうという提案をしているのですが これはまだ誰もまともに取り上げてくださってはおりません。そこで予知の問題になりますが 東海地震ということで みなさん目の色変えておられるわけなんです。私はもしかするとあそこにはすごく大きな地震は起きないのではないかと近頃考えておるので そのことをちよつと簡単に申し上げたいと思います。東海地区では伊豆半島が日本に衝突しています。ところが衝突をすると不思議なことに大地震が起きなくなるとことがあるらしい。これはちよつと常識的ではないような気がするんですがサブダクションが静かに普通に起こっ

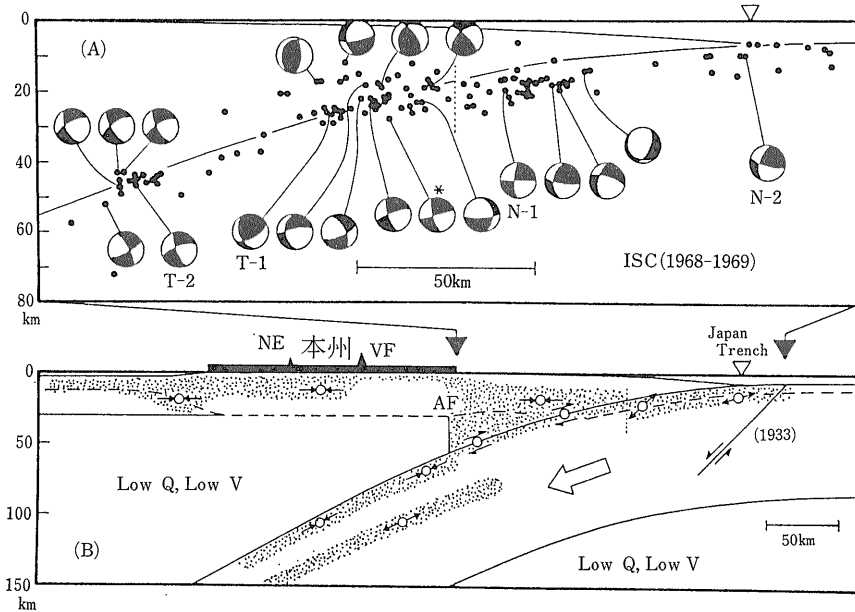


第3図 日本及び周辺地域の第4紀火山(中ヌキ印)と深度40—60kmのマンテル地震の分布。(吉井1979)
 点線……火山フロント 破線……アサイシミック フロント
 実線……海溝軸

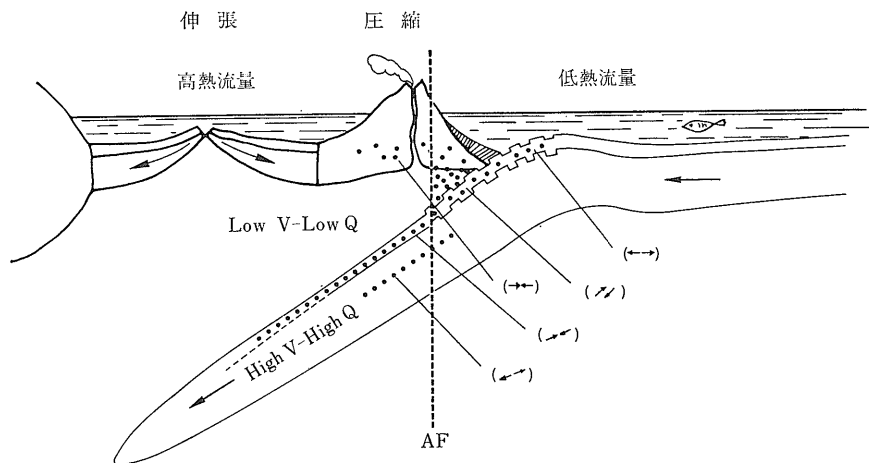
ていれば大地震が起こるんですが 陸塊のようなものが衝突をしますとストレスは上がると考えられるのに どうも不思議に巨大地震が起きなくなる性質があるようです. 例えばナスカ・リッジ カーネギー・リッジ テハンテベック・リッジ そういものがぶつかると巨大地震がなくなる. そこでは 小さな地震や変形がおこるだけです. そうい目でみますと伊豆の所は伊豆半島がまさにぶつかっている所というわけです.

地震予知については軽々にものをいうべきではない面もあるので この程度にしてサブダクション・ゾーンとしての日本列島について考えを進めてみましょう. 日本列島の aseismic front や火山のフロントをみますと マントルが温度の低い側と高い側にははっきりと分かれているようにみえます(第3図・第4図). 冷たいプレートが入り込んだ所までは冷たいが aseismic front から陸側は急に暖かくなってアセノスフェアが非常に浅い所まできているのではないかということであります.

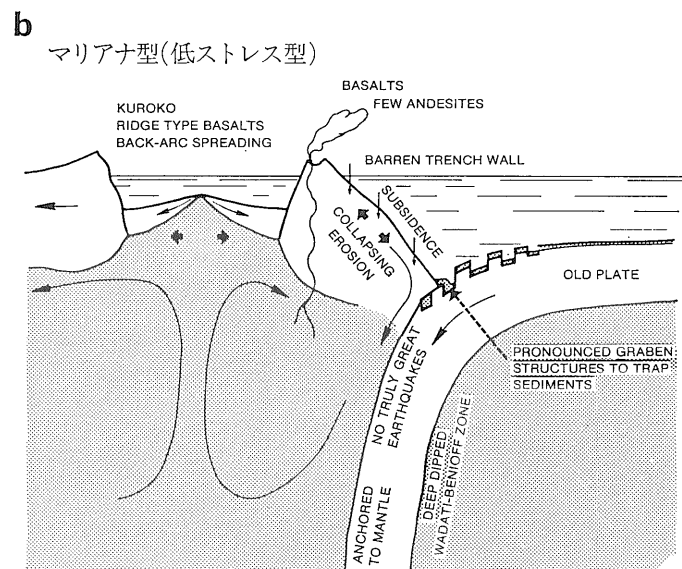
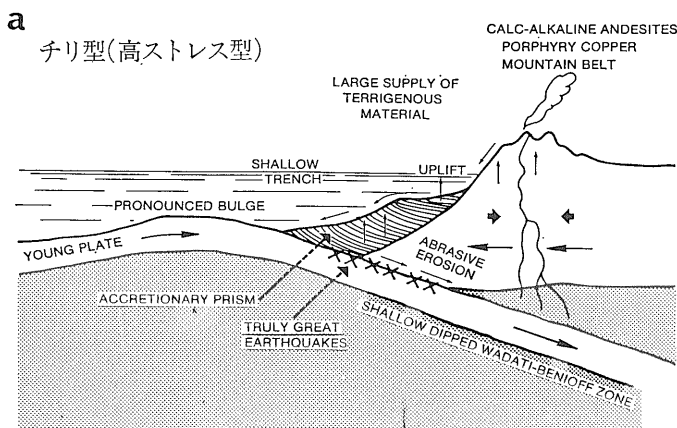
そのようなことを考えますと サブダクションあるいは island arc というものに関して一つのイメージがわいてくるわけでありませう. 冷たいプレートが沈み込んでゆく.



第4図
 (A)日本海溝から東北日本海岸までの震源断面. メカニズムは鉛直面への投影。(吉井1979)
 (B)東北日本弧下の震源およびメカニズム概念図.
 破線……モホ面
 アミカゲ……震源の多いところ VF 火山フロント
 AF……アサイシミックフロント



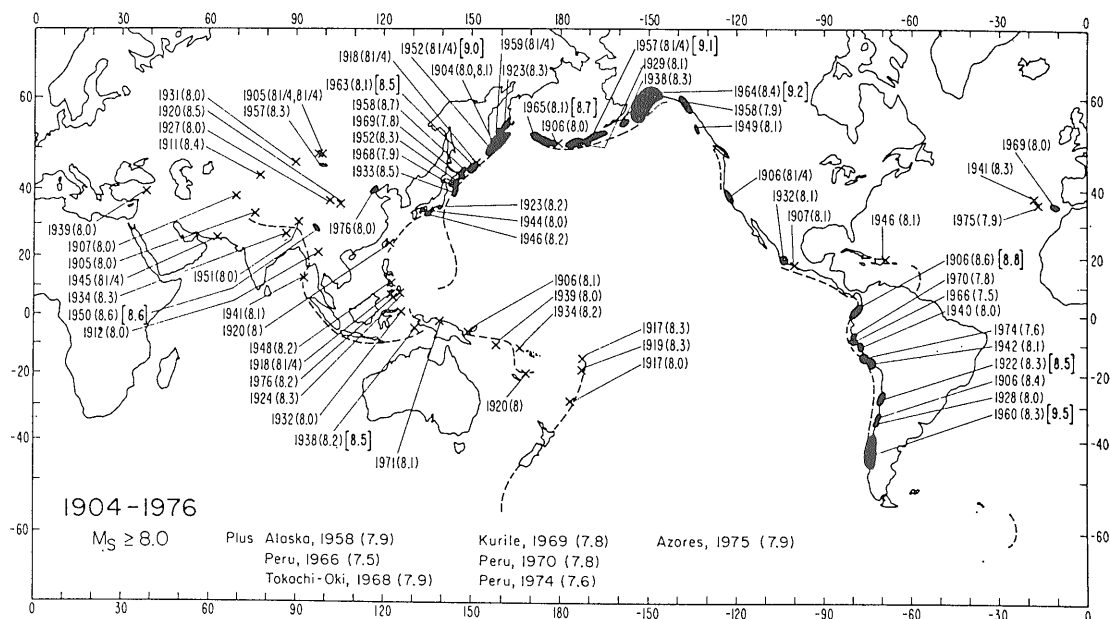
第5図
理想化された沈み込み帯
(スケール不同).
点……震源 矢印……プレ
ート運動 V……地震波速
度 Q……地震波のQ
AF……アサイシミック
フロント カッコ内矢印
(地震メカニズム).
(UYEDA, 1983)
このような理想化はよくない!



第6図 典型的な2つのタイプの沈み込み帯 (スケール不同).
a) チリ型 (高ストレス型)
b) マリアナ型 (低ストレス型)
(UYEDA, 1983)

そうすると地震が起き 盛んに compression を受ける. volcanic front から陸側は非常に heat flow が高くて なおその後日本海があってそのような海は extension によって開いたというように考えられるわけです (第5図). しかし このようなモデルは非常に矛盾に満ちていまして 冷たいものはいついそが熱くなる. compression をうけるとその後が extension になるという具合です. これを説明しようとしているいろいろな方が非常な苦勞をしていますが それはいずれも満足なものではない. 非常に無理があるので. 私が申し上げたいのは サブダクション・ゾーンをこういう単純な考えで説明しようとするのは間違っているのではないかと断言してあります.

サブダクション・ゾーンというのは太平洋周辺にいっぱいありますが南米のような完全に back arc basin を持たないものとマリアナのようにほとんど陸的な弧がなく back arc basin が現在開いているものがあります. また 日本列島のように back arc basin がかつては開いていたが今日では開いていないものもある. そういうものをごっちゃにして全部まとめて一つの議論をしようというのは 私にいわせると男と女の区別をしないで人体解剖学をやるようなもので 合理的な結論が出るわけではない. 必ず矛盾にあたるのではないかと思います. まず結論を申し上げますと サブダクションにはマリアナ型 (low



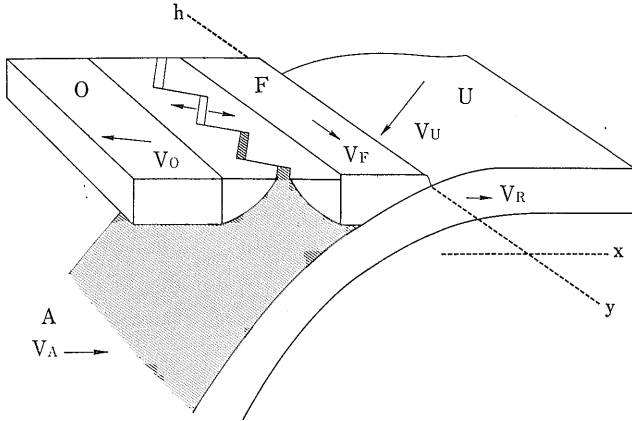
第7図 1904—1976における巨大地震。リヒターマグニチュードは丸カッコ内。新マグニチュードはカギカッコ内。真の巨大地震 ($M > [8.5]$) はほとんどすべてチリ型沈み込み帯で起こる。(KANAMORI, 1978)

stress) とチリ型 (high stress) という2つの典型(第6図)がある。マリアナ型の特徴は古いプレートが深い角度で落ちていて island arc は小さくてその後に back arc basin が開いている。ここでは決して大きな地震は起きない。それに比べてチリ型は若いプレートが浅い角度で入っていて 山全体は compression の場であって高いアンデス山脈がある。火山岩でいうと前者はパサルトのようなものしか出ないが後者はカルクアルカリ岩系のアンデサイトが出ます。つまり非常に contrasting なわけです。そのことの原因は、恐らくマリアナ型では subduct する側のプレートと陸側のプレートの間の interaction が非常に弱い、ほとんどゼロに等しいが、チリ型ではそれが非常に強く押し合っているということであって、そのために非常に違った様相が生まれるのではないかと思います。

今から少しそのことをもう少し具体的にお話したいと思います。陸側のプレートの中で起こる地震から推定された地殻内のストレスで議論しますと、地殻内のストレスはチリ型では予想どおり compression (オス型) であるのに対して、マリアナ型では extension (メス型) であるということです。同様の違いが、海岸線の隆起の状況とか、海のプレートが沈みこむ前に少し盛り上がるとかいう現象にもあらわれております。その中で最も著しいのはいわゆる巨大地震であります。マグニチュードで8.5よりも大きい地震は例外なくチリ型の所で

起こって、マリアナ型の所では起きないということがあります(第7図)。こういうことをまとめてみますと、チリ型とマリアナ型は非常に contrasting な性質があって、チリ型の方では2枚のプレートが非常に強くカップルしてぎゅうぎゅう押し合っているのに対して、マリアナ型の方ではそうでないということになりそうです。マリアナ型では2つのプレートがほとんどデカップルしていると推定されるのです。そこでそれはどういうことだということになりますが、いろんな考えが出されています。金森さんが出された考えでは、そういう違いは1つのプロセスのある違った段階をみている、すなわち evolution の違った phase をみていることになる。始めはチリ型ですが、だんだんマリアナ型になってまた元へもどる。これはなかなか魅力的な考えらしくて、踏襲される方も多いのですが、必ずしもまいわけではありません。チリではなかなかマリアナ型になりません。一方、サブダクトする側のプレートの年齢がものごとを支配するという Molnar らの考えもあります。古いプレートはより重いわけですからより自由に落ちてゆくが、新しい方のプレートは沈みながらいないために陸との間に強い摩擦を生ずるというわけです。これは確かに一面の真理をとらえています。しかしそれですべてがきまるわけでもなさそうです。

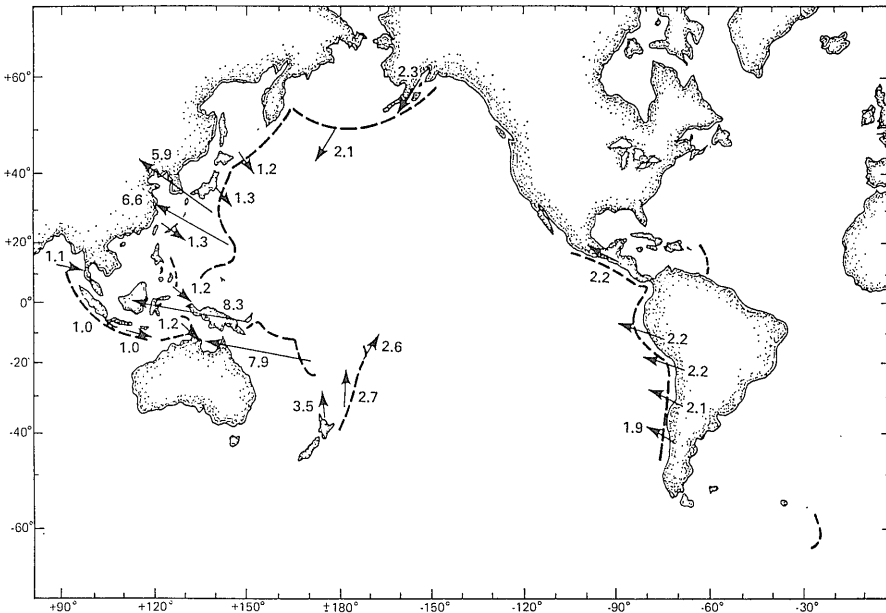
もうちょっと物事を簡単(幾何学的立場で)に考えてみます(第8図)。サブダクション・ゾーンの後側の back



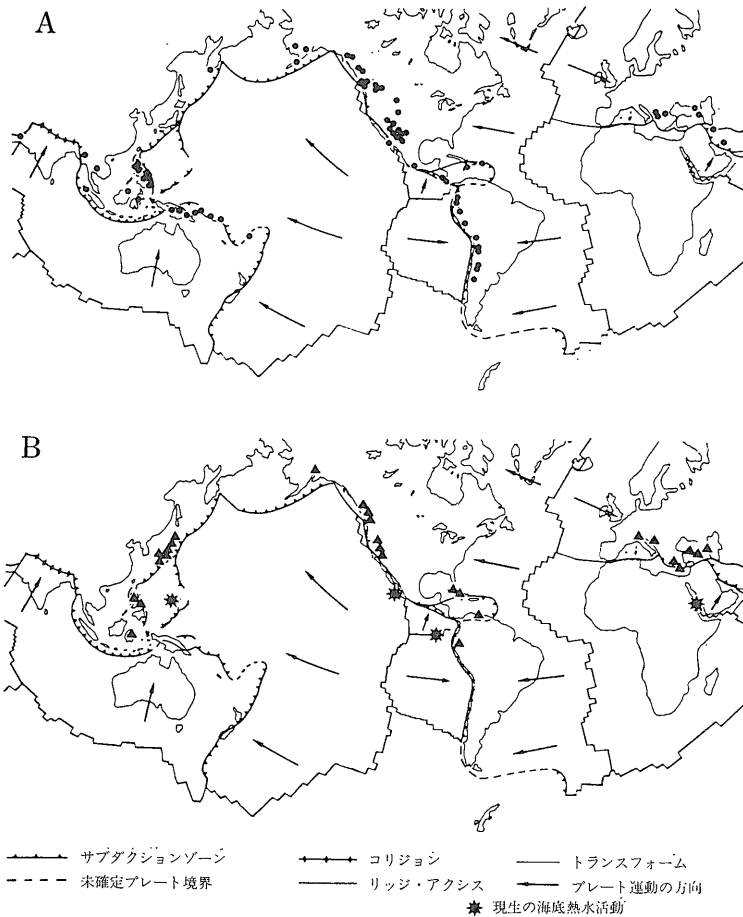
第8図
沈み込み帯の幾何学的モデル。(UYEDA, 1983)
O……絶対速度 V_O をもつ上盤プレート
U……絶対速度 V_U をもつ沈み込むプレート
F……島弧プレート(絶対速度= V_F)
A……アセノスフェア(絶対速度= V_A)
 V_R ……roll-back(海溝軸後退)速度
H……海溝のヒンジライン

arc が開くかどうか つまり extension になるかならないか すなわちサブダクション・ゾーンでのカップリングが弱い強いということは海溝の線 (hinge line) と overriding する陸側のプレートの相対運動で決まるのだと思われまふ。両者が互いに遠ざかろうとすれば当然 extension になるし 互いに向かつて進めば compression になるはずであります。さらに hinge line なるものはマントルにほぼ固定されていて しかもマントルの動きがほぼ静止していると考えますと 物事を決める critical な要因は overriding plate の運動の向きにかかってくるのではないかということになります。そうしますと back arc が開くか開かないかは overriding plate が絶対的な sense でどっちに動くかによ

て決まるのではないかということになります。そのことを overriding plate の運動の向きによってチェックしてみますと 南米のプレートは西に向かつて進んでおりますが フィリピン海のプレートは非常な勢いでトレンチの方から逃げている(第9図). このことをもうちょっと考えますと sea floor spreading によって大きな海が開くのも第一義的にはプレートとプレートが離れるから開くということに対応しています。つまり南米の西岸で沈みこんでいて大西洋が開いているということはそのまま日本海溝で沈みこんでいて日本海が開くとかマリアナ海溝で沈んでマリアナ・トラフが開くことと analogous なのであってなんら違いはないのではないかということになります。さらに heat flow の分布で申し



第9図
上盤プレートの絶対速度 (cm/年)
(UYEDA and KANAMORI, 1979).

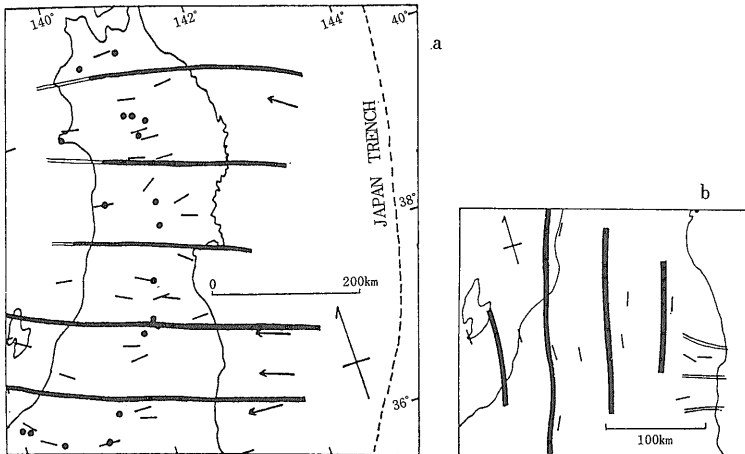


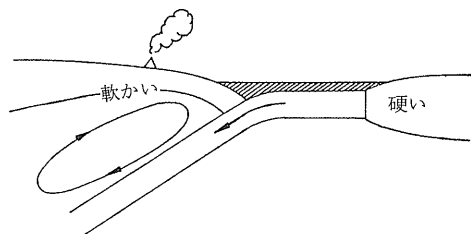
ますと 日本海のような back arc basin の heat flow が高いということも back arc が開いていたのが最近止まったというような事情から説明することができることになります。

さらにアナロジーを進めますともっと面白いことになります。最近アメリカの潜水艇によって海嶺の上で非常な熱水活動が発見されました。このことは当然マリアナ・トラフのような所にも apply できるのではないかと思います。事実マリアナ・トラフのような所で heat flow を測りますとものすごい local な変化をしめして非常に高い値が local にたくさん見つかっています。ですからもしここへ潜水艇でいきますと熱水鉱床あるいは熱水活動を見出す可能性がある。もしそういうことを見出されるとしますとこれはやや暴論になるかもしれませんが日本に黒鉱というものができた時代には原則的にそれと同じような事態が起こっていた。

つまりマリアナで現在起きていることが黒鉱では1500万年ほど前に起こっていたということになりそうです。両方共 back arc が開いてきた最後のぎりぎりのところですが arc の内側にありまして状況が非常にているからです。

そういう目でポーフィリー・銅と massive sulfide の分布をみますと(第10図) ポーフィリー・銅はチリ型のところにうんとこさざいます。西太平洋(日本を含めて)には少なくとも現在衝突していないところあるいは過去に鉱床ができた時分に衝突していなかったマリアナ型のところにはないということになります。それにひきかえて massive sulfide の方は日本にもいっぱいございます。というわけで2つのタイプのサブダクション・ゾーンは metallogenesis にも直接関係があるのではないかと思います。ところで日本はポーフィリー・銅がないのでチリ型ではないと





第12図 衝突する側が衝突される側より硬いという一般則の説明図。(上田1983)

ということになります。現在の日本は確かにチリ型になっています。日本海はもはや開いてはいません。しかし1500万年ほど前 Miocene には日本はマリアナ型であって extension の場であったということなのです。このことは過去のストレスを推定する方法によると 現在と Miocene の時代のストレス軸の方向が違っていて Miocene には extensional であったということに対応するのではないかと思います。(第11図)。

ところで 先程日本海が開くとか開かないとか 何型になるかということは 陸側のプレートのモーションに関係があるだろうと申し上げました。しかしアジア大陸を含めての大きなユーラシア大陸全体があっちこっち動いたりして 日本海が開いたり止まったりすると考えるのはやや困難ではないか。ユーラシア・プレートが後退したものなら アジア東縁には全面的に細長い海ができそうに思えますが 日本海は小さい。どうもそういうことは考えにくいとしますと 恐らく陸側プレートの運動を規定しているものは巨大なユーラシア・プレート全体の動きでなくて プレートの内部の運動でないかプレートが内部的に変形し壊れることに関係があるのではないかと考えられます。

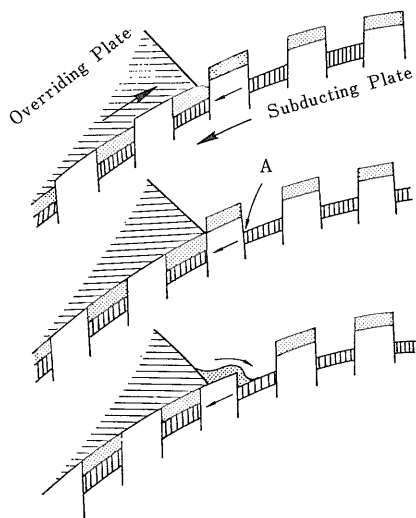
そもそもプレートは本当に硬いのかといいますが どうもそうではないのであって 衝突するやいなや文字どおりぐにやぐにやに曲がるように思われます。たいした力を加えなければ変形しないが 力を加えたら変形するというのがプレートの本質ではないか。プレート・テクトニクスはプレートが硬いという主張から出発したのですが 今や考えなおす時がきているのではないかと変形なしに動くということと硬いということは常に同義ではないのではないかと。有名な例はインドとアジアの衝突です。すごい変形がアジア大陸内に起こっています。ここでしばしば問題になるのは インドがぶつかるとなぜインドは変形しないでアジアが変形するのかということです。それに対する standard な答は インドはクレイトンであって非常に古いものであるから硬いが アジア大陸は造山帯だから柔らかいんだということです。

私はもう一步進めて考えてみますと 次のように考えられないかと思います。 固いものであれ柔らかいものであれ何でも衝突をする前には必ずサブダクションが行われる。 そうでないと衝突しないわけです。 ところで長い間サブダクションをやっていると 現在の日本列島の下がそうであるように アセノスフェアが上昇してくる。 つまり衝突される側は本質的に柔らかくなる性質がある。 すなわち衝突が起こる時には ぶつかる方が勝つという定理が成り立つのではないかと思うのです。

(第12図)。「攻撃は最大の防御なり」というわけであり。しかし もともと攻撃側であってもアメリカのエキゾティック・テレーンのように ぶつかって相手側へくっついてしまいますと海溝の位置がその外側へ動き今まで攻撃側だったのが守備側へまわり たちまちぐにやぐにやになってしまうこともあるように思います。ここでは正面衝突をした後には strike slip の運動が起こるといっても働いているのではないかと思いますけれどもやはり固いものが柔らかくなるということもあるのではないかと思います。 日本列島もまた accretion でだんだんとくっついてきて strike slip が起こったといわれておりますが 今述べた目でもう一回見直してみるのもいいのではないかとこの考えを持っています。

そういうことを考えますとどのプレートはより柔らかいか どのプレートはより固いかということを決めていくのは プレートテクトニクスの次の段階として非常に必要なことと思われ。 その一つの基準は地球の中の温度の分布であります。 温度が高ければ柔らかいし温度が低ければ固いわけであり。 その温度を推定する方法は もちろん表面の heat flow を測ることでありまして これは非常に重要な仕事として各国で行っております。 実は我々も地調の海外室とか CCOP の御協力で 長年かかって東南アジアの地域を含めての heat flow の分布図をつくりつつある途中ですがそういう分布図によって固い・柔らかいの差別がつかますと ニューギニアが衝突すると何が曲がるかななどのことを解釈する上に 役に立つのではないかと思います。 われわれとしては これからもこの仕事を進めていきたいと考えるわけです。

最後にサブダクションに伴って sediment がどうなるかという問題について考えてみましょう。 そもそも sediment というものは柔らかくて軽いわけでありましてから それが地球の中へぎゅうぎゅう入っていくことは非常に考えにくいわけです。 したがって sediment は全部海溝陸側へ scrape off されて 一種のプリズムのような格好の構造をつくっていくだろうというふうに考え



第13図 堆積物沈み込みについてのモデル。
A点に“もの”を捨てるとたちまち埋められて沈み込んでゆく？
(HILDE, 1983 : UYEDA, 1983).

られたのです。けれども 現実には全然 sediment のない海溝の陸側斜面もある。実際 マリアナ海溝の断面で我々がドリルをした時には 本当にひとかけらも海からの物はなかったのでありまして 太平洋プレートにのっている sediment はもぐっていくに違いないわけです。そういうことは非常に物理的に考えにくいわけですが 一つのおもしろい suggestion としては これはいろんな方が言っているわけですがそれでも 海溝へさしかかってくると 海のプレートが曲がるために でこぼこができる。horst and graben 構造ができるわけです。山の上谷の底にそれぞれ堆積物がたまっているわけですが 陸側のプレートが頑張っておりますと 自然にうまいこと山の上の sediment は谷の底へ流し込まれるような格好で落ち込んでゆくのではないかとことです(第13図)。なるほどこういことがあれば 非常によく入るような気がいたします。もしこういことが正しいといたしますと これを利用して何でも物を棄ててやれば 近いうちに埋まってしまうだろう。大きなland slide がいっぺんに起こるとしますと 1日で全部もぐってしまうことができるだろう。つまり high-level の radioactive waste とか もっと大袈裟に言いますと原子力空母とか そういものもここへ棄ててしまうと あっさり海溝の中へ入ってってしまうのではないかと思うわけです。これには実はかなり現実性があるようにみえます。もう少し一般的に言いますと horst and graben があって sediment の量があんまり多くなければ 全部入っていく。さらに graben の方に余

力があれば 陸側の分までくいこんでいって tectonic erosion を起こすことができる。ただども graben の容積に比べて sediment がうんとたくさんありますとなかなかそうはいかないのでありまして せっかく graben につめこんでもまだ残るといことになります。どうも海溝には物を dispose する一定の能力がある。ですから能力と supply とのかねあいでもぐる時ともぐりきらない時があるのではないかと思われるのです。これを水洗便所モデルと言う方がおられますが その意味は分るような気がいたします。もちろん このようなことが ほんとうに起こるものかどうかをたしかめるには一万メートル級の深海潜水艇でも駆使して海溝底の徹底的調査を進める必要があると思います。たぶん相当お金のかかる大事業となるでしょうがこれはそれに値する研究だと思ひます。ではここで終わらせていただきたいと思ひます。

文 献

- HILDE, T. W. C., Sediment subduction vs. accretion around the Pacific, *Tectonophysics*, 99, 381-397, 1983.
- KANAMORI, H., Quantification of earthquakes, *Nature*, 271, 411-414, 1978.
- MINSTER, J. B. and T. H. JORDAN, Present day plate motions: A summary, in *Source Mechanism and Earthquake Prediction*, J. C. Allegre(ed.), Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 109-124, 1980.
- NAKAMURA, K. and S. UYEDA, Stress gradient in arc-back arc regions and plate subduction, *J. Geophys. Res.*, 85, 6419-6428, 1980.
- UYEDA, S., Comparative subductology, *Episodes*, vol. 1983, No. 2, 19-24, 1983.
- 上田誠也, 概論: 地球科学の現状と未来, *月刊地球*, 5, 506-510, 1983.
- UYEDA, S. and H. KANAMORI, Back-arc opening and the mode of subduction, *J. Geophys. Res.*, 84, 1049-1061, 1979.
- UYEDA, S. and C. NISHIWAKI, Stress field, metallogenesis and mode of subduction, in *The Continental Crust and its Mineral Deposits*, D. W. Strangway(ed.), Geol. Soc. Canada, Sp. Paper 20, 323-339, 1980.
- YOSHII, T., Comilation of geophysical data around the Japanese Islands(I), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 54, 75-117 (in Japanese with English abstract), 1979.