

# 日本海背弧海盆 vs. 東アフリカ地溝帯

## —アセノスフェアの上昇とリフトの形成—

巽 好 幸<sup>1)</sup>

### 1. はじめに

リフトまたは地溝帯は、引張応力場でリソスフェア内に形成された伸長した窪地、と定義することができる。リフトの形成メカニズムを明かにすることは、プレートテクトニクス自体は幕を閉じようとしている現在でも未だ解明されていない。プレート運動の原動力を解明する上で本質的な問題であろう。リフト形成の過程では、それらの因果関係は別として、リソスフェアの薄化とアセノスフェアの上昇が起こる。上昇するアセノスフェアは、浅所へ移動することで部分融解し、マグマを生産することになる。従って、リフト系における火山活動は、マントル内のダイナミックな過程のあらわれであり、火山活動を解析することによってリフト形成のメカニズムに関して重要な情報が得られる可能性がある。

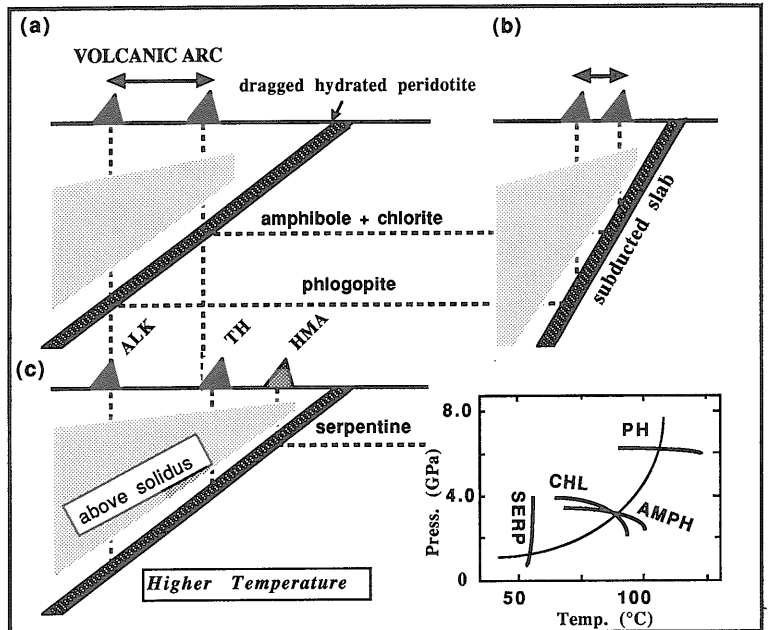
ここでは、Tatsumi and Kimura (1991 a) が行った、2種の異なったリフトにおける、アセノスフェアの上昇様式の比較を中心に、リフト形成に対する私なりのイメージを紹介する。

### 2. リフトの形成メカニズム： 能動的か受動的か？

リフト形成の成因論は、アセノスフェアとリソスフェアの相対的な役割によって、能動的 (active) および受動的 (passive) なメカニズムに区分することができる。前者は、アセノスフェアの上昇にリフト形成の基本的な原動力を求めるもので

あり、この場合リフトの形成に必要な引張力は、1) リフト形成以前の地表の隆起 (ドローイング), 2) リソスフェア内へのマグマもしくはアセノスフェアの貫入, 3) アセノスフェアの流動による引きずり力などで生ずると考えられている。一方、受動的リフト形成論は、グローバルなプレートの相対運動が基本的なリフト形成の原動力であると主張する。これらの個々のメカニズムについての紹介は、他の文献を参考にしていただきたい (例えば、瀬野, 1990)。

Sengor and Burke (1978) は、リフト形成と火山活動の相対的時間関係が、能動的・受動的リフト形成を判別する重要な判断材料になることを強調した。即ち、能動



第1図 沈み込み帯マグマの発生に認められる一般的特徴。ALK, アルカリ玄武岩; TH, ソレライト質玄武岩; HMA, 高Mg安山岩; PH, 金雲母; CHL, 緑泥石; AMPH, 角閃石; SERP, 蛇紋石。

1) 京大大学院理学部地質学鉱物学教室：  
〒606 京都市左京区北白川追分町

キーワード：リフティング, 日本海, 東アフリカ地溝帯,  
アセノスフェアの上昇

のリフト形成においては、アセノスフェアの上昇を意味する火山活動がリフトの形成に先んじて起こっているのに対して、受動的リフトにおいてはそれらの関係が逆になっている。しかし、この理想的な状況が成り立つことはむしろ希な場合であり、火山活動のみならず、リフト近傍におけるあらゆる種類のアセノスフェアの移動に関する情報を総合して判断する必要がある。

### 3. 能動的なリフト形成の例

#### 3.1 日本海背弧海盆

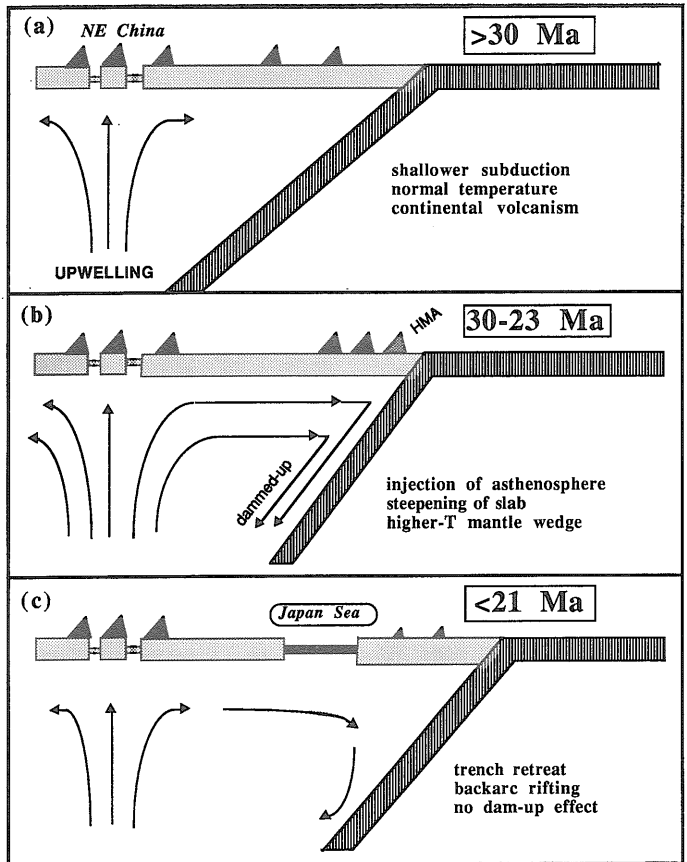
日本海は東北・西南日本両弧とアジア大陸の間に位置する縁海であり、背弧拡大過程によって形成されたと考えられている(例えば, Uyeda and Miyashiro, 1974; Taylor and Karner, 1983), 1980年代中ごろから精力的に行われた東北・西南日本両弧の岩石に対する古地磁気測定の結果, 日本海背弧海盆の主要部分は, 21-14Maのある時期に起こった東北日本弧の反時計周り回転と, 15±1Maに起こった西南日本弧の時計周り回転運動によって形成されたことが明らかになった(例えば, Otofui et al., 1985 a, b; Tosha and Hamano, 1988).

最近我々は, 東北日本弧における火山活動の時間変化を解析して, 日本海の形成は, アセノスフェアがマントルウェッジ内へ貫入したことによって引き起こされた可能性を示した(Tatsumi et al., 1989). 詳細は, 原著または他の解説(能田・巽, 1989)に譲るとして, ここではごく簡単に我々の論点を紹介してみよう。

過去に遡って島弧火山活動を解析する場合, 現在の火山活動に対する基本的な知識が必要不可欠である。多くの火山弧で認められる火山活動の一般的特徴を, 第1図に概念的に示した。それらは, 1) 火山弧は本質的には2列の火山列で形成され, 2) それぞれの火山列は沈み込むスラブ上110 kmと180-200kmに位置し, 3) 従って, スラブの傾角と火山弧・前弧の幅は反比例関係にある。また, 4) マントルウェッジ内が異常高温になった場合には海溝軸近傍に特異な火山活動(ボニナイト・サヌキトイドと呼ばれる高Mg安山岩)が認められる。5) マグマ中の液相濃集元素含有量は背弧側に向かって増加し, 火山数は海溝側ほど多い。これらの特徴の成因について, Tatsumi (1989) は次のように説明した。上の

諸点の中で, 1) から3) に関しては, マントルウェッジ最下部に形成される含水カンラン岩層内での, 角閃石・緑泥石(3.5 GPa), 金雲母(6 GPa)の圧力依存性の高い脱水分解反応が, 原因となっている。4) については, 通常は前弧ウェッジ内に形成される含水マントルが, 異常高温の為に融解するためである, とされている。また, マントルダイアピルからマグマが分離する深さは背弧側の方が大きい(ため(Tatsumi et al., 1983), 部分融解程度に違いが生じ, 液相濃集元素含有量の水平変化が観察される。含水カンラン岩層での脱水分解反応では, 海溝側(角閃石・緑泥石)の方が大量のH<sub>2</sub>Oを放出するので, その結果海溝側で多数の火山が生成される。

第2図に, 我々の提出した日本海の形成モデルを簡略化したもので示す。1つの重要な観察事実は, 日本海の形成(正確には, 弧状ブロックの回転運動)以前に, 火山弧・前弧の幅が狭くなったことである。上述の, 火山弧に見られる一般的特徴を考慮に入れると, これらの観察事実は, スラブ傾角の増大を示していると考えられる。即ち, 日本海の形成以前に, マントルウェッジ内で物質移



第2図 簡略化した日本海背弧海盆の形成モデル。

動が起こったことが推定される。このマントルウェッジ内への物質移動とスラブ傾角の増大は、どのように起こったのであろうか？ マントル物質に対する慣性力はほとんど無視できること、物質移動の後に日本海の拡大が起こったことを考慮に入れると、マントルウェッジ内へアセノスフェア物質が貫入した、と考えるのが最も合理的であるように思える。つまり、能動的なメカニズムによって日本海が形成した可能性が高い。スラブが自重で大きく傾いた場合も想定できるが、この場合には質量欠損を補うためにアセノスフェアがマントルウェッジ内に流れ込むのみで、背弧海盆を形成する力は持ち得ない。また、受動的なスラブの沈隆 (Dewey, 1980) では、スラブ傾角は小さくなるであろう。

高温のアセノスフェアの貫入は、マントルウェッジ内に異常高温状態をもたらしたのであろう。このことは、千葉県銚子で 23Ma に高 Mg 安山岩が産することで裏付けられる。また、前期中新世の東北日本弧では、島弧横断方向での液相濃集元素含有量の変化が認められないこと、背弧側の方が火山噴出物量が多いことなども、マントルウェッジ内、特に背弧側での熱異常を反映していると考えられる。

### 3.2 ケニアリフト

ケニアリフトは東アフリカリフト系の一部を構成し、典型的な大陸内リフトの例として、多くの研究者の注目を集めてきた。この地域においては、白亜紀末期に最初のドーミングが起こったとされている (Saggerson and Baker, 1965) が、この時期には火山活動もリフトの形成も確認されていない。その後、中期中新世と鮮新世に、ドーミングが認識されており、前者の場合には、ドーミングの直後にリフトの形成が起こったことが指摘されている (Baker and Wohlenberg, 1971)。Baker を中心とした人達の、精力的な火山活動時期に関する研究によって、この地域では、23Ma 頃から火山活動が始まった、とされている。このことは、最近の、系統的な試料採取に基づいた多数の年代測定結果 (Itaya and Sawada, 1989; Tatum and Kimura, 1991b) によって、確認された (第3図)。即ち、この地域では、火山活動、言い替えれば上部マントル内の物質上昇が、リフトの形成に先んじて起こったと考えられ、このことは、ケニアリフトの形成が能動的メカニズムに支配さ

れているらしいことを示している。

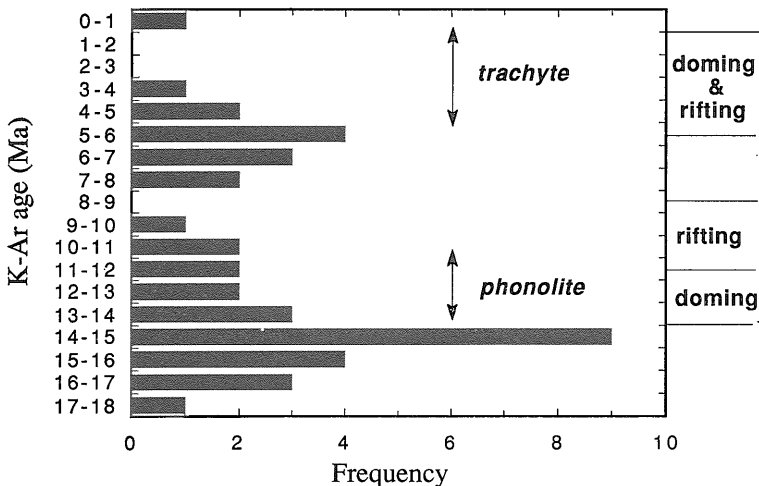
しかし、能動的リフト形成に異論を唱えるむきも無いわけではない。例えば、Rosendahl (1987) は、次の3点から受動的リフト論を支持している：(1) 沈隆域と先リフト期の地質構造がよく対応する；(2) 地溝帯域で、ドーミングが認められない場所がある；(3) 火山活動がリフトの形成後に始まっている地域もある。しかし、これらの観察事実も、能動的リフト形成論の中に取り組むことは可能である。即ち、既に Burke and Dewey (1973) が述べているように、リフトの形成が、線状に配列した個々のプルームの上昇に原動力があるとすれば、プルームとプルームの間では受動的なリフトの形成が卓越し、上述のような観察がなされるに違い無い。

## 4. マントル内の流れとリフトの形成

上述のように、少なくとも日本海背弧海盆と東アフリカ地溝帯では、能動的なリフトの形成が、現時点では最も合理的なメカニズムである、と考えられる。つまり、マントル内のアセノスフェアの流れが、リソスフェアの薄化・リフト形成の基本的な原動力であるらしい。ここでは、これらのリフト形成に際して、アセノスフェアがどのように流れたかを、概観してみよう。

### 4.1 日本海背弧海盆

マントル物質の上昇流は、密度差によって形成されるものであるから、本質的には垂直な流れとなるであろう。日本海背弧海盆の形成に関しては、アセノスフェアのマントルウェッジ内への貫入が主な原動力であることは



第3図 サンプルヒル (ケニア) の玄武岩類に対する放射年代とケニアリフトにおけるテクトニックな事件。

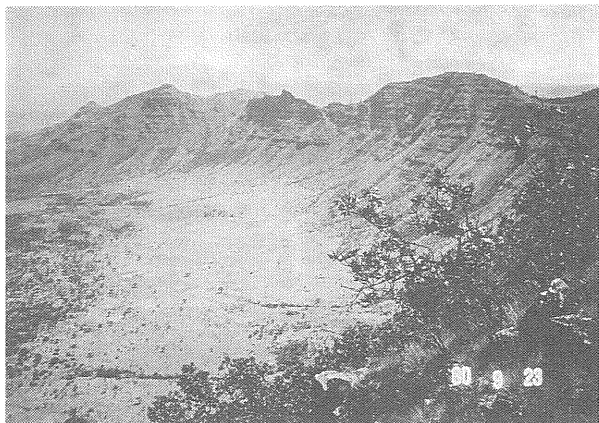


写真1 ケニア サンプルヒルズ周辺の風景.  
塩基性—中性の溶岩流が何枚も重なっている様子が観察される。

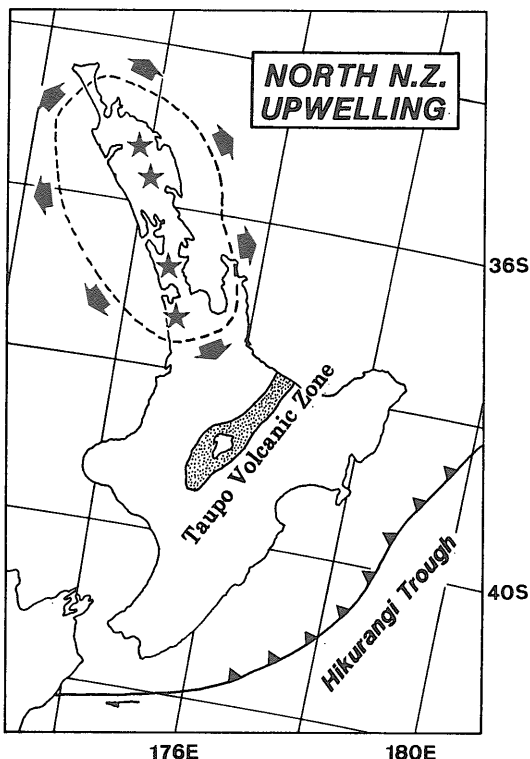
すでに述べたが、上昇流そのものがリフト形成を引き起こしたとは考えにくい。何故ならば、沈み込むスラブによって、上昇流は遮断されてしまうであろうからである。更に、リフトの形成時にドーミングが認められないこと (Yamaji, 1990) も、リフト直下への上昇流の存在とは相入れない。従って、やや水平なアセノスフェアの流れが要請される。このような流れを最も簡単に発生させるには、沈み込み帯の背後の上部マントル内に上昇流が存在すれば良い。上昇流は、リソスフェアの下面に当ることで、水平流となってマントルウェッジへ流れ込むであろう。中国東北部には新生代の玄武岩を主とする火山岩類が分布している。これらはおそらく太平洋プレートの沈み込みとは無関係に発生したものであろうから、この地域にマントル上昇流の中心があったと考えることは可能であろう。この中国大陸内のマントル上昇流は、Miyashiro (1986) の提案するホットリージョンと現象論的には一致する。但し、中国東部の火山活動が、1つの巨大な上昇流で形成されたのではなく、いくつかのプルームの時間空間的な集合が、ホットリージョンとして認識されているのであろう。

第2図に、中国東北部にマントル上昇流が存在した (今も存在するであろう) 場合の、日本海背弧海盆の形成過程を模式的に示す。ほぼ水平なアセノスフェアの流れは、沈み込むスラブを海溝側へ押す役割を果たす。従って、スラブの傾角が大きくなり海溝軸も後退するであろう。この海溝軸の後退は上板プレート内に引張力を発生させ、最も地温勾配の高い (リソスフェアの強度が弱い) 火山フロント付近でリフトの形成が引き起こされた、と考えられる。

アセノスフェアの水平流は、上昇の中心からある程  
1991年2月号

度の距離しか存在し得ない。あまり上昇中心から離れると、水平流は下降流となってしまう。背弧海盆に寿命が存在するのは、第2図に示すように、アセノスフェアの流れが下降流に転じた後はスラブを押すことができないからではなからうか？

今述べたような、沈み込み帯背後におけるマントル上昇流の発生と背弧海盆の形成、という組み合わせは、ニュージーランド北島にも存在する (第4図)。この地域では、太平洋プレートがヒクラングトラフでインドプレートの下へ沈み込み、タウポ火山帯を形成している。また、この火山帯では現在地溝帯が形成されつつあり、背弧背盆の拡大が進行していると考えられる (例えば、Cole, 1984)。一方、北島北西部の半島部には、第四紀の玄武岩類が主として単成火山として分布している。これらのマグマの発生には、ヒクラング海溝における沈み込みは関与していないと思われる。何故なら、スラブに沿った深発地震はこの地域下では認められない。従って、マントル物質の上昇がマグマの発生を促している可能性が高い。更に、東北日本弧の場合と同様に、リフティングに先だって火山フロントの海溝側への移動が認められる (Kamp, 1984)。つまり、半島部下の



第4図 ニュージーランド北島における、マントル上昇流とタウポにおける背弧海盆の拡大 (打点域)。

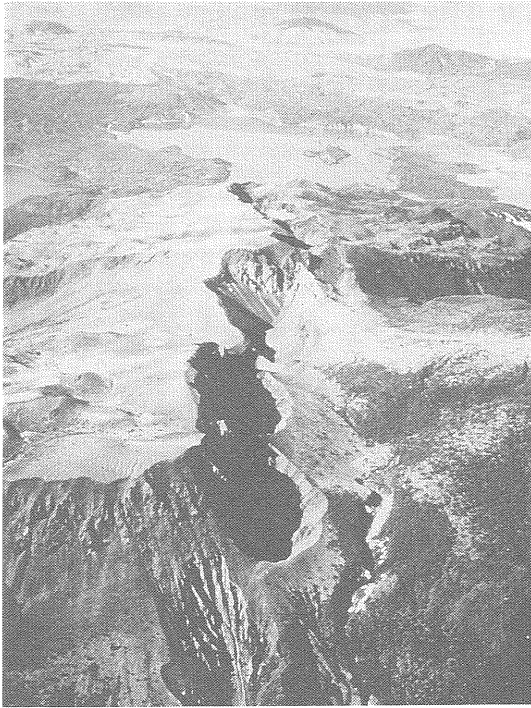


写真2 ニュージーランド タウポ地溝帯の火山群。火口列が地溝帯の伸びの方向に並ぶ。

アセノスフェアの上昇流が水平流となって北島下のスラブを東へ押しやった結果、タウポ地溝帯が形成されている、と考えることができる。

## 4.2 東アフリカ地溝帯

この地域では、ほぼ垂直なマントルの上昇流がドーミングやリフティングを引き起こしていることは問題無いであろう。ドーミングがケニアとエチオピアなどで地域的に独立して(分離して)起こっていることは、上昇流はカーテン状に起こっているのでは無く、独立したプルームの上昇に伴ったものであることを示しているのではなかろうか。

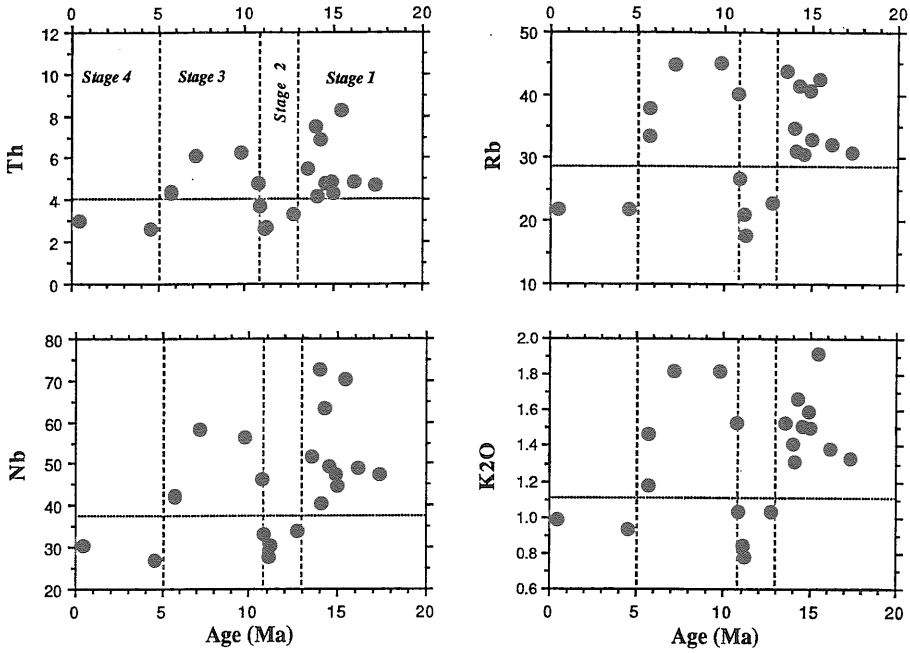
ケニアリフトの直下では、マントル上昇流が時間的に連続的に起こっているわけではなく、パルス状の上昇が起こっている可能性が高い。8-9 Ma に火山活動の休止期が認められること(第3図)、ドーミングが中期中新世と鮮新世に起こっていること、などがこの推論の根拠となっている。最近 Tatsumi & Kimura (1991b) は、ケニアリフトに産する玄武岩化学組成の時間変化を検討して、アセノスフェアの上昇とこれに伴うリソスフェアの薄化というサイクルが2度起こったことを示した。K-Ar 年代を測定した比較的未分化な玄武岩について、液相濃集元素含有量と噴出年代の相関を示したものが第5図である。この結果は、従来指摘されてきた、若い岩

石ほど液相濃集元素・シリカ不飽和度が減少する(Norry et al., 1981)、という概念を根本的に変更するものである。結晶分化作用・地殻物質の混染・大陸リソスフェアー組成の不均質・マグマの混合などの影響を検討した結果、第5図の時間変化は同一化学組成を持ったマントル物質の部分融解程度の違いで説明される。更に、部分融解程度の変化は、マントルプルーム自体の温度がもともと等しかったとすれば、プルーム(ダイアピル)の停止深度の違い、即ちアセノスフェアー/リソスフェアー境界深度の違いを反映していると考えられる。

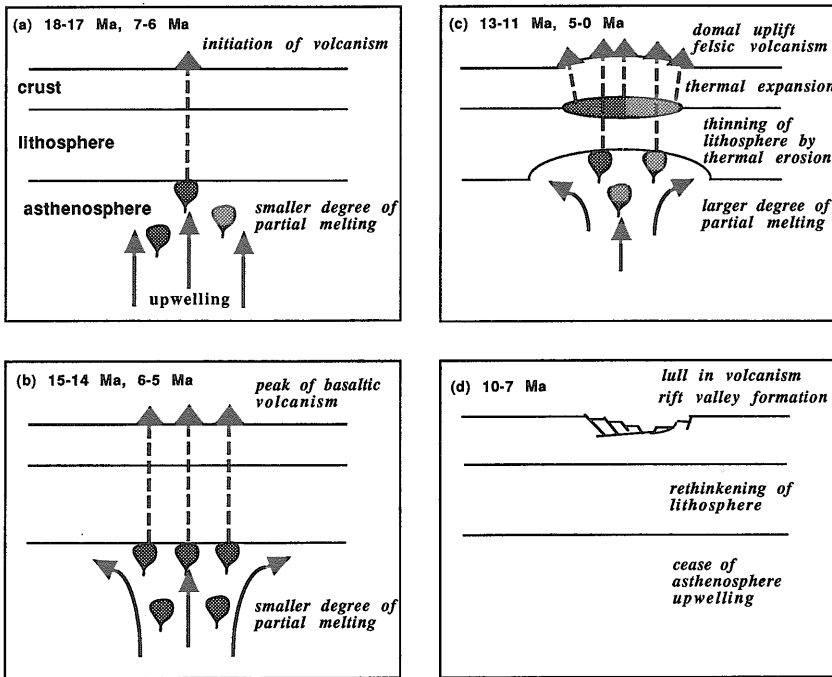
以上の考察と他の地質学的な観察事実を考慮に入れると、第6図に示すようなケニアリフトの発達史を描くことができる。18-17 Ma に火山活動が始まった頃には、厚いリソスフェアーの下部でダイアピルが停止してマグマを分離していたため、液相濃集元素に富んだマグマが生産された。15 Ma 頃にアセノスフェアーの上昇はピークに達し、多量の玄武岩マグマが形成された。この活発な上昇は、リソスフェアーの薄化を引き起こし、13-10.9 Ma にはより浅所でダイアピルの上昇を可能にし、従って部分融解程度の高い、液相濃集元素に乏しいマグマを生み出した。大量の玄武岩マグマの地殻内への貫入とその結晶分化作用、または熱の供給による地殻物質の融解によって、大量のトラカイトやフォノライトなどのフェルシックマグマが形成された。このような地殻内の熱異常は、地表ではドーミングとして現れたであろう。このドーミングは引き続きリフティングへと発達して行く。アセノスフェアーの上昇は、その後弱まり、10.8-9 Ma には上昇流はなくなったであろう。その結果、この地域の上部マントルは冷却し、リソスフェアーが厚くなった。このような過程が7 Ma 以降再び繰り返され、現在に至っている。

## 5. スラブの存在とリフティング

いままで述べてきた、背弧海盆・大陸地溝帯の形成は、本質的には、マントル深部からの上昇流にその原動力を帰することができる。これら2つのリフトにおいて、決定的に違っていることは、スラブの存在である。今まで、背弧海盆の形成にはスラブが次のような働きをすると、考えられてきた。1) マントルウェッジ内に二次対流を引き起こし、その対流がリフトの形成を引き起こす; 2) スラブの融解または脱水分解反応によってマグマが生産され、それがリフト形成を促す; 3) スラブが沈降することで海溝軸の後退がおり、受動的な背弧海盆の形成が起こる。今回示したモデルでは、スラブはアセノスフェアーの流れをせき止める役割を果たしている。このよ



第5図  
サンプルヒルにおける玄武岩化学組成の時間変化。2度の液相濃集元素含有量の減少が認められる。



第6図  
模式的に描いたケニアリフトの発達史。

うな効果を持つスラブの存在を除けば、日本海背弧海盆を形成したアセノスフェアの上昇流の中心であった中国東部と、東アフリカ地溝帯域とは、同じ様な状況であったと言えるのではなかろうか。つまり、マントル上昇流に伴う引張力がリソスフェアに働いた場合、沈み込

み帯におけるマグマの発生で既に薄化し弱くなっている島弧部が最も破壊しやすく、この部分に背弧海盆が形成されたのであり、もし、スラブが上昇流近傍に存在しなければ、中国東部にも東アフリカ同様に、大陸地溝帯が形成されていたと考えられる。

## 参 考 文 献

- Burke, K. and Dewey, J.F. (1973): Plume-generated triple junctions: key indicators in applying plate tectonics. *J. Geol.*, **81**, 406-433.
- Cole, J. W. (1984): Taupo-Rotorua Depression: an ensialic marginal basin of North Island. In: B.P. Kokelaar and M.F. Howells (eds.) *Marginal Basin Geology*, Blackwell, Oxford.
- Dewey, J.F. (1980): Episodicity, sequence and style at convergent plate boundaries. In: D. Strangeway (ed.) *The Continental Crust and its Mineral Resources*, Geol. Assoc. Can. Spec. Rep., 553-574.
- Itaya, T. and Sawada, Y. (1991): K-Ar ages of volcanic rocks in the Samburu Hills area, north Kenya. *Africa Study Monogr.*, in press.
- Kamp, P.J.J. (1984): Neogene and Quaternary extent and geometry of the subducted pacific plate beneath Island, New Zealand: implications for Kaikoura tectonics. *Tectonophys.*, **108**, 241-266.
- Miyashiro, A. (1986): Hot regions and the origin of marginal basins in the western Pacific. *Tectonophys.*, **122**, 195-216.
- 能田 成・巽 好幸 (1989): 沈み込み帯における火山活動Ⅱ- 背弧海盆形成のダイナミクス-. *科学*, **59**, 534-542.
- Norry, M.J. Truckle, P.H., Lippard, S.J., Hawkesworth, C.J., Weaver, S.D. and Harriner, G.F. (1980): Isotopic and trace element evidence from lavas, bearing on mantle heterogeneity beneath Kenya. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **A297**, 259-271.
- Otofuji, Y., Hayashida, A. and Torii, M. (1985): When was the Japan Sea opened? Paleomagnetic evidence from southwest Japan. In: N. Nasu et al. (eds.) *Formation of Active Marging*, Terra Pub., Tokyo, 551-556.
- Otofuji, Y., Matsuda, T. and Nohda, S. (1985): Paleomagnetic evidence for the Miocene counter-clockwise rotation of Northeast Japan - rifting process of the Japan arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **75**, 267-277.
- Rosendahl, B.R. (1987): Architecture of continental rifts with special reference to East Africa. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **15**, 445-503.
- Saggerson, E.P. and Baker, R.H. (1965): Post-Jurassic erosion-surface in eastern Kenya and their deformation in relation to rift structure. *Quat. J. geol. Soc. Lond., Lond.*, **121**, 51-72.
- Sengör, A.M.C. and Burke, K. (1978): Relative timing of rifting and volcanism on Earth and its tectonic implications. *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 419-421.
- 瀬野徹三 (1990): リフティングの原動力. *月刊地球*, **12**, 648-653.
- Tatsumi, Y. (1989): Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones. *J. Geophys. Res.*, **94**, 4697-4707.
- Tatsumi, Y. and Kimura, N. (1991a): Backarc extension vs. continental breakup: petrological aspects for active rifting. *Tectonophys.*, in press.
- Tatsumi, Y. and Kimura, N. (1991b): Secular variation of basalt chemistry in the Kenya Rift: evidence for the pulsing of asthenospheric upwelling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, in press.
- Tatsumi, Y., Otofujii, Y., Matsuda, T. and Nohda, S. (1989): Opening of the Sea of Japan by asthenospheric injection. *Tectonophys.*, **166**, 317-329.
- Tatsumi, Y., Sakuyama, M., Fukuyama, H. and Kushiro, I. (1983): Generation of arc basalt magmas and thermal structure of the mantle wedge in subduction zones. *J. Geophys. Res.*, **88**, 5815-5825.
- Taylor, B. and Karner, G.D. (1983): On the evolution of marginal basins. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **21**, 1727-1741.
- Tosha, T. and Hamano, Y. (1988): Paleomagnetism of Tertiary rocks from the Oga Peninsula and the rotation of Northeast Japan. *Tectonics*, **7**, 653-662.
- Uyeda, S. and Miyashiro, A. (1974): Plate tectonics and the Japanese Islands: a synthesis. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **85**, 1159-1170.
- Yamaji, A. (1990): Rapid intra-arc rifting in Miocene Northeast Japan. *Tectonics*, **9**, 365-378.

---

TATSUMI Yoshiyuki (1991): Japan Sea backarc basin vs. Eastern Africa continental rift: upwelling of asthenosphere and formation of rift.

---

<受付: 1990年12月29日>