

オスロ地域 - 近代岩石学発祥の地と古リフト -

蟹澤 聰 史¹⁾

1. はじめに

ノルウェー南部のオスロ地域は地質学的に古くから注目され、「水成論者」と「火成論者」の論争当時, Werner の弟子の Leopold von Buch (1810) 以来, Hausmann (1811-1818), Lyell (1835, 1837) らが次々と訪れた。さらに, オスロ大学地質学教室の創設 (1811) とともにこの地域の地質は早くから研究され, Brögger (1851-1940), Vogt (1858-1932), Goldschmidt (1888-1947), Barth (1899-1971) らによる火成岩および変成岩岩石学, 鉱物学の研究地として知られている。オスロ (Oslo) は 1624 年大火に見舞われ, その後デンマーク王クリスチャン四世によって再建されて以来, 1924 年まではクリスチャニア (Kristiania, Christiania) と呼ばれていた。Brögger や Goldschmidt の古い論文ではクリスチャニア地域と記されているのはそのためである。オスロ地域の初期の研究者は, 構造運動と火成作用との間に密接な関係があると考え, 後に Cloos (1939) によってライン地溝帯, 東アフリカリフト系と同様なリフト構造をもつことが明らかにされた。この地域は石材として有名なラルビカイト (larvikite) の産地でもあり, 多くのコールドロンに伴われるアルカリ花崗岩類や, rhomb porphyry (菱形断面を示すアルカリ長石斑晶を持つ粗面岩~粗面安山岩=Buch, 1810の命名) と呼ばれる火山岩類を産し, さらに過アルカリ岩やカーボナタイトで有名な Fen がリフト帯西縁近くにある。第 1 図にオスロ地域地質略図を示す。

オスロ地域に関する研究はこれまで地質学的, 岩石学的, およびマグマ活動の立場から集中的になされてきた。最近ではリフト下部地殻および上部マントルの組成と構造, さらにリフトダイナミックスとリフト化の過程に関心が向いている。まず, 地震波屈折プロファイルや精密重力測定によりオスロリフト帯のモホ面が上昇していることが明らかにされ, マルチチャンネル反射波データによるリフト系の海底部分の情報が増大した。

2. オスロ地域・オスロ地溝帯とオスロリフト

オスロ地域 (Oslo Region) という場合は周囲が先カンブリア界に囲まれ, それよりも新しい岩石からなる, 延長 200km, 幅 35~65km, 面積およそ 10,000km² の地域の地理学的名称である。オスロ地溝帯 (Oslo Graben) という場合は成因の意味をもつ。ほぼ南北性の主断層は南東部および北西部のみにみられるが, 全体は小断層で分断され, 複雑化している。現在露出している地形学的表面は地溝帯の深部をみていることになる。オスロ地溝帯は南部の Vestfold 地域と北部の Akershus 地域とに分けられ (Ramberg and Larsen, 1978), 前者は東側を Oslofjorden 断層帯で, 後者は西側を Randsfjorden 断層帯で境される。現在ではペルム紀一石炭紀のオスロ地溝帯はデボン紀から第三紀にかけての長期間に形成された北極一北大西洋リフト系の一部分を形成するものとして位置づけられている (Ziegler, 1978, 1982)。

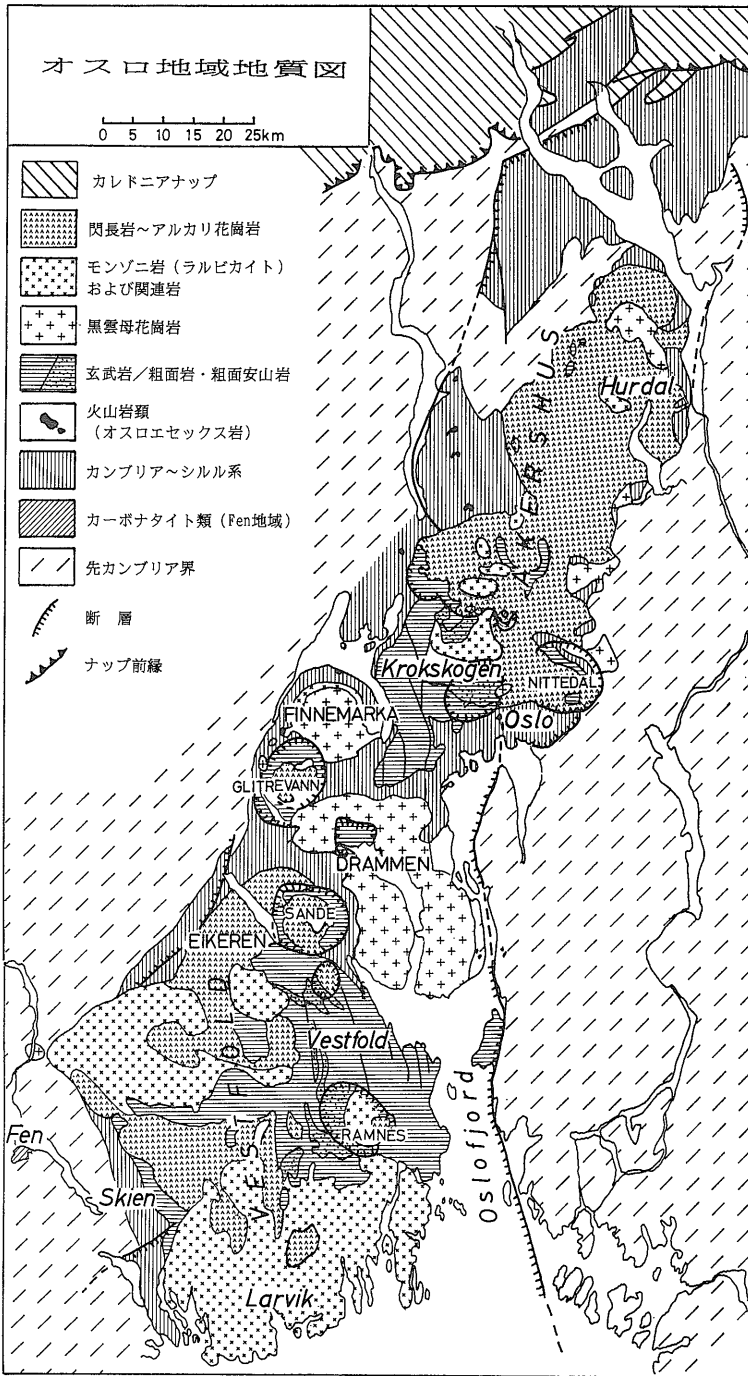
オスロリフト (Oslo Rift) は主としてペルム紀に活動したさらに広い断裂帯であり, オスロ地溝帯はその一部が陸上でみられる部分で, 激しいアルカリ貫入岩や噴出岩の活動で特徴づけられる大陸内リフト帯の一部である (Dons, 1978; Ramberg and Larsen, 1978)。オスロリフトは地球物理学的データによれば SSW 方向に Skagerrak 海峡まで続くが, 北方延長はカレドニアナップに覆われていて不明である (第 2 図)。しかし, この地域の北東端から 100km ほど北北東にあるスウェーデンの Särna アルカリ複合岩体はオスロリフト帯の火成岩と同じ年代を示し, このリフト帯の北方延長と考えられる (Bylund and Patchett, 1977)。

3. オスロリフトの構造

ノルウェーとデンマークの間の Skagerrak 海峡にはオスロ地溝帯から延長する Skagerrak 地溝帯が発達し, オスロ地溝帯に連続する 2 つの主要な後期古生代の断層

1) 東北大学教養部地学教室: 〒980宮城県仙台市青葉区川内

キーワード: オスロ地域, リフト帯, リフト火成活動, アルカリ深成岩類, コールドロン

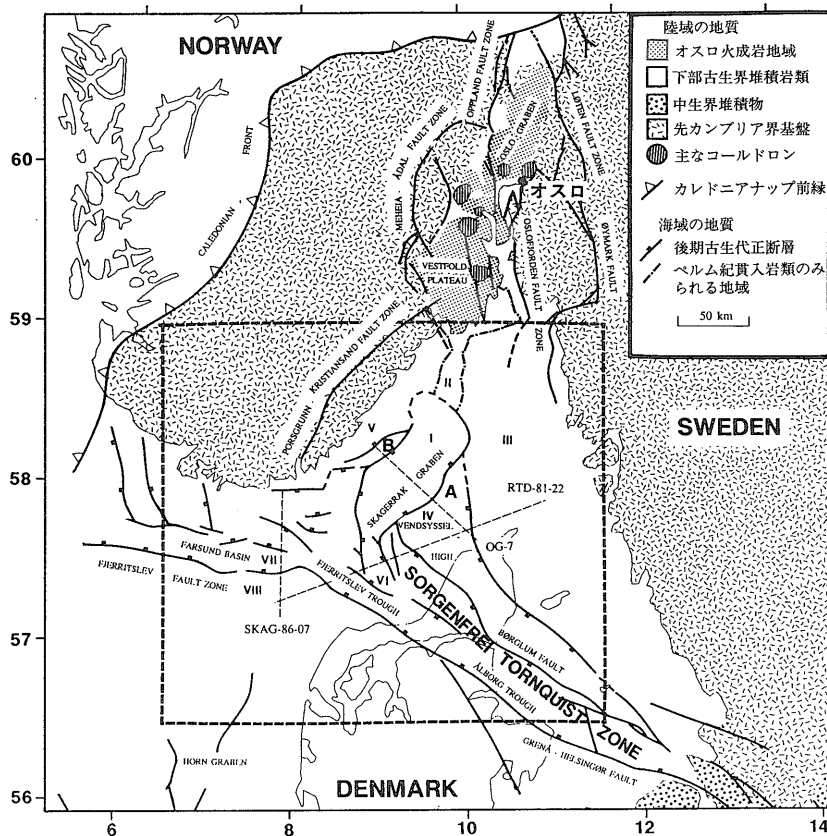


第1図 オスロリフト地質略図 (Ramberg and Larsen, 1978 をもとにその後の資料を加えて修正・簡略化)

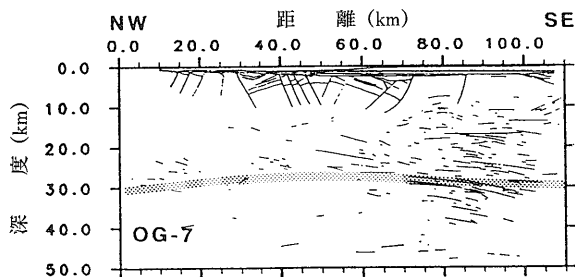
で境される (第2図)。この地溝帯内では大部分が火山碎屑物起源の下部古生界堆積物が保存されている。Skagerrak 地溝帯の形成は後期古生代におけるデンマーク北方の NW-SE 方向に沿った右横ずれ断層運動に関連する (Ro et al., 1990a)。第3図にオスロ地溝帯南部の Skagerrak における地震波プロファイルを示す。

オスロリフト地域ではモホ面が 3-5km 上昇し、地殻が薄化している。この薄化は一部はリフティングに先だっており、明らかにリソスフェアの変形の場合と同じである。カンブリア〜シルル紀堆積物は主としてリフト内部に形成され、リフティングが上昇と同時にあったことも意味する。オスロリフト帯に比べて、Skagerrak 地溝帯は沈降が大きく比較的火成活動が少なかった。オスロリフトの形成は、大規模な東西伸張ストレスによる受動的リフティング機構で説明される。受動モデルでは水平方向の伸張によってリソスフェアの薄化がおり、引き続いて先リフトのアセノスフェアの上昇を引き起こす。受動モデルの重要な結論は低圧側へ等温線がシフトし、温度勾配が大きくなることである。このモデルは先カンブリア後期〜シルル紀の地殻とリソスフェアの弱体化、およびダイアピル運動に好都合なリソスフェアの伸長が主要な要素である (Ro et al., 1990b)。この結果、先リフトの下部大陸リソスフェアの部分はソリダス P-T 条件より高温になり、アセノスフェアに転化する (第7図)。

オスロリフト下部の地殻には苦鉄質キュムレイトとリフティングの際に再融解した物質の残存物と考えられる高密度物質の存在が重力データから予想される (Ro et



第2図
オスロリフト周辺の構造図
対象地域は8つの地域に細分される。Skagerrak地溝(I), Fjerritslevトラフ(VI)およびFarsund盆(VII)が安定台地(II-V, VIII)からFjerritslev断層, Börglum断層および断層A, 断層Bで区分される。(Ro, H. E., Stuevold, L. M., Faleide, J. I. and Myhre, A. M., 1990)



第3図 Skagerrak 地域の地震波プロフィール
反射率は南東よりも地溝帯の内部と北西では弱くなる。地溝帯の下部のモホ面の上昇とサブモホ面反射がみられる。(Ro, H. E., Larsson, F. R., Kinck, J. J. and Husebye, E. S., 1990)

al., 1990b; Neumann et al., 1986). 南方の Skagerrak 地溝帯では、リソフェアの薄化はリフトの東側にずれてマグマの上昇が妨げられ、地殻の途中に留まっているであろう。ペルム紀初期のオスロ地溝帯の断面を第4図に示した。

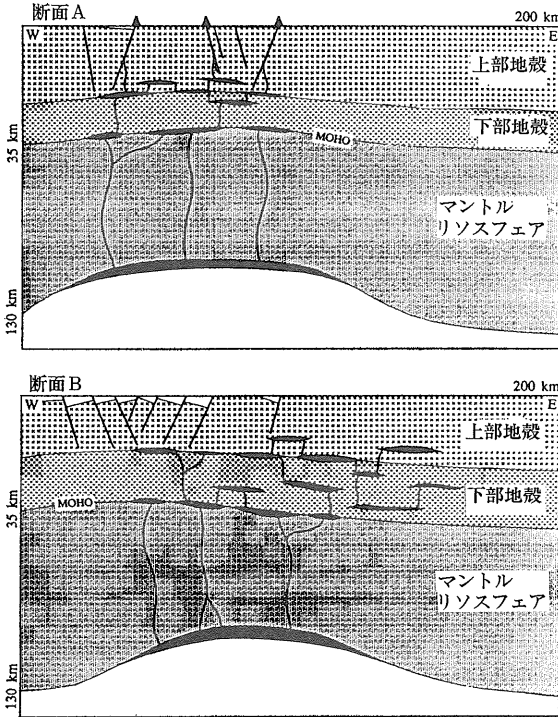
オスロ地溝帯では、層厚2,000mに達する先リフト系の早期カンブリア系～シルル系が先カンブリア系基盤を

覆う。これらのカンブリア系～シルル系堆積物はカレドニア造山で褶曲し(写真1)、50-200m厚の浅海性堆積物からなる上部石炭系 Asker 層群に不整合で覆われる(Sundvoll et al., 1990)。Asker 層群は上部が集塊岩、凝灰岩からなり整合的にリフティング時の溶岩に覆われる。

オスロリフトの西部および東部の先カンブリア界基盤は、1000-1200 Ma 前に部分融解と角閃岩相変成作用を被った変堆積岩、花崗片麻岩、変斑れい岩、花崗岩およびミグマタイトからなる。さらに古いグラニュライト相変成岩の断片がオスロ地域の南西にみられる。上昇と侵食によってペルム系最上部の1-3 kmが削剝され、オスロ火成複合岩体の頂部が露出したと推定される。

4. オスロ地溝帯の火成活動

オスロ地域の火成岩は Brøgger (1890 ほか) によって研究され、主としてドイツ語による60編以上の論文が公表された。それ以来、火成岩には模式地の名前がおもに採用され、現在でもいくつかの名前は日常的に用いられている。しかし、ノルウェー以外の国の人々も含めて日



第4図 ベルム紀初期のオスロリフト断面図

断面図Aはリフトの北部(オスロ地域)で、断面図Bは南部(ユトランド半島北部)を示す。断面図Aではリソスフェアの薄化がリフト軸に対して対称的になっており、マグマは地表面に達している。地殻内部のマグマは地溝帯内部の局所的なドーミングと地溝帯縁辺部の対称的上昇を引き起こす。地殻内部とリフトの外側の水平的マグマの流動はストーピングと地殻の強度の違いに基づいて、部分的に重力異常の原因となる。断面図Bでは、リソスフェアの薄化はわずかにリフトの東側によっている。マグマの上昇はさきざられ、全てのマグマはリフト表面に対して非対称的に地殻の内部に貫入する。地殻の中央部とモホ面に保持されたマグマはラミナとして観測される。(Ro, H. E., Larsen, F. R., Kinck, J. J. and Husebye, E. S., 1990)



写真1 オスロ南西 Asker 付近の箱型褶曲を示すカンブリア～オールドビス系。泥質岩と石灰質岩との互層がホルンフェルス化している。Goldschmidt の接触変成岩研究の地域。

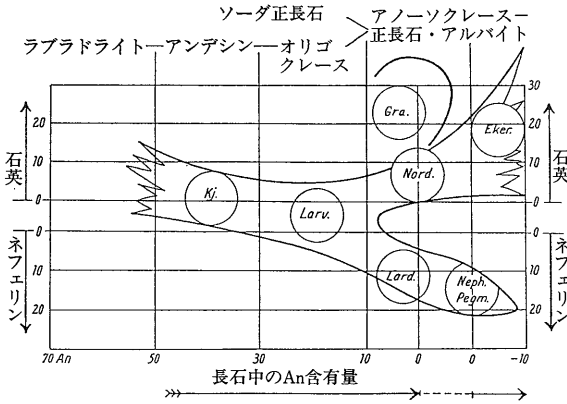
の残した分析値や数千枚にのぼる薄片の再検討から、この地域の火成岩を；A) オスロエセックス岩 (Oslo essexite) と呼ばれる苦鉄質系列, B) モンゾ閃緑岩 (kjeldasite)—モンゾニ岩 (larvikite)—アルカリ閃長岩 (nordmarkite)—過アルカリ花崗岩 (ekerite) の中性～酸性系列, C) アルカリ長石ネフェリン閃長岩 (lardalite) の中性過アルカリ系列, および D) 花崗岩からなる酸性系列の4つの基本系列に分類した。彼はアルカリ玄武岩とオスロエセックス岩を生じたマグマと、rhomb porphyry 溶岩や浅所貫入の深成岩体をもたらししたマグマの2つの起源を仮定した。このB, C および D の関係はオスロ地域の岩石系列の 'Family Tree' として知られる(第5図)。また、V. M. Goldschmidt (1911) による火成岩周辺に発達するカンブリア～シルル系の被った接触変成帯の研究は化学平衡論に基づいた近代変成岩岩石学の基礎となった。

オスロリフトの火成活動の変遷は Oftedahl (1960), Ramberg and Larsen (1978) および Sundvoll et al. (1990) によってまとめられた。Oftedahl は各地域の玄武岩活動を B₁～B₃ に分けた。Sundvoll et al. は、リフトの火成活動を；(1)B₁玄武岩活動, (2)Rhomb Porphyry の活動, (3)中心噴火とカルデラ形成, (4)巨大プルトンの貫入, の4相に区分した。さらに次のように細分される。

- ①オスロリフトの火成活動は 300 Ma 以前の後期石炭紀に始まり、6,000万年の間継続した。
- ②火成活動は 304–294 Ma を示す玄武岩～閃長岩質岩石の岩床と岩脈で始まった。この年代値は中～上部 Asker 層群の堆積の時期である。
- ③オスロリフトの伸張はグラーベンの形成と同時期の大量の B₁玄武岩溶岩と中性の rhomb porphyry (RP)溶岩

本人にはなじみの少ない名前も多い。ここではなるべく IUGS (Le Maitre, ed., 1989) の分類体系を用いるが、特別な呼称が読者に有効であろうと思われる場合はかっこに入れて示した。

オスロリフト帯はシリカに飽和した岩石から過アルカリ岩までの岩石が密接に伴って産し、若いリフト地域とは異なり、大部分が深成岩としてみられる。“Die Entstehung der Gesteine (1939, Barth, Correns, Eskola)” や “Theoretical Petrology (1952)” などの岩石学教科書の著者として知られる Tom. F. W. Barth は、Brögger



第5図 Barth の family tree

Kj.: Kjelsasite=モンゾ閃緑岩, Larv.: Larvikite =ラルビカイト, Nord.: Nordmarkite=アルカリ閃長岩, Eker.: Ekerite=過アルカリ花崗岩, Lard.: アルカリ長石ネフェリン閃長岩, Neph. Pegm.: ネフェリン閃長岩ペグマタイト, Gra.: 花崗岩

の噴出で始まった。この活動は 295-285 Ma 前に最盛期に達し、およそ 275 Ma 前まで続いた。B₁ 玄武岩は北方に向かうほどアルカリと厚さが減少する。南西部 Skien 地域ではネフェリナイト～ペイサナイト、Oslofjord に沿った地域では中程度のアルカリ岩～サブアルカリ岩、オスロ北方では無斑晶ソレアイトの活動と、地域ごとに差がみられる。Rhomb porphyry はアルカリ長石に富む粗面安山岩などの割れ目噴火で生じた。多量の RP 岩脈が地溝帯内部とその側部に見られること、また RP 溶岩の厚さの変化から主断層に近く平行な割れ目が上部地殻でのマグマ上昇の重要な通路であったことを示唆する。④主要な断層活動とリフトの形成は 285 Ma よりやや早く始まった。

⑤中央火山の形成は南部の Vestfold 地域ではおよそ 280 Ma 以前に、北部の Akershus 地域ではそれより数 100 万年おくれて始まった。噴出時期が最高潮に達したのは中央火山の形成と同時で、それらの多くはコールドロンを形成した。環状岩脈と中央貫入岩体の年代はこれらの中央火山が 270-245 Ma にカルデラ崩壊を被ったことを示している。オスロエセックス岩 (Oslo essexite) と呼ばれ (Barth, 1945), 最古期貫入岩とされた層状斑れい岩は 266±6 Ma の Rb-Sr 全岩年代をもち、現在では中央火山活動期の火山リーダーと考えられている (Ramberg and Larsen, 1978; Neumann et al., 1990)。

⑥主要な貫入岩は第 1 期モンゾニ岩質岩石 (ラルビカイト) の貫入とともに始まり、これに伴われる閃長岩、アルカリ閃長岩、アルカリ長石ネフェリン閃長岩、ネフェリン閃長岩 (foyaite-hedrumites) が続き、第 2 期に閃長

岩およびアルカリ花崗岩が貫入した。活動の時期は Vestfold 地域では 280-267 Ma, Akershus 地域では 273-241 Ma の間継続した。オスロ地溝帯のほぼ中央、Vestfold 地域の北部では、アルカリ花崗岩からなる Eikeren 岩体 (Neumann et al., 1990), Drammen および Finnemarka (Czamsanske, 1965; および 1972, 1973 の Czamsanske らの論文では Finnmarka と呼んでいる) などの黒雲母花崗岩類を主体とする 271~267 Ma の年代の大きなバソリスが貫入する。オスロ地溝帯の北部では閃長岩質～アルカリ花崗岩が多い。これらがリフト帯全域のほぼ 60% を占める。大部分の貫入岩類は浅所貫入の性格をもつ。

⑦Sr 年代および初生値から、マントル由来マグマが Vestfold 地域では 300-280 Ma の間、Akershus 地域では 300-275 Ma 継続したことを示す。いずれのグラーベン地域も著しく分化したマントル起源マグマおよび再融解マグマが長期間にわたって継続した。マグマがマントル起源から地殻起源へと変化したことはリフトの中央軸部への火成活動の移動に伴っている。

⑧構造および火成活動は時間とともに SSW から NNE に移動した (Rasmussen et al., 1988; Sundvoll et al., 1990)。伝播速度は年間 1~2 cm と推定され、プレート運動およびホットスポットの拡大速度とほぼ同じである。

⑨Akershus での火成活動が Vestfold 地域よりも長期に及んだ理由は、リフト帯の両側の先カンブリア紀断層帯の再動でストレスが開放された結果、リフト帯下部で高温のリソスフェアを生じて部分融解を引き起こしたことによる。

5. コールドロン

オスロリフト地域には、中央火山の活動によって 15~18 個のコールドロンが形成された。これらは直径 5~16 km, 平均 10~12 km の大きさをもつ。コールドロンは環状岩脈、中央貫入岩体、流紋岩～粗面岩質の溶岩やドーム、カルデラ陥没堆積物 (イグンブライト, 碎屑岩, 湖成堆積物) からなり、これに若いルトンが貫入している。6 つのコールドロンだけがその縁の大部分を保存し、その他は不完全な形で残っている。コールドロン内部は沈下ブロックがほぼ完全に保存されているものから、中央貫入岩体が大部分を占めているものなどがある (Ofte-dahl, 1978)。

環状岩脈は大部分が閃長岩質で、中央貫入岩体はモンゾニ岩～閃長岩質である。カルデラブロックの頂部はモンゾニ岩質から閃長岩質マグマに累帯的に組成分化した

マグマ溜りに沈み込んだ。沈降はマグマ系の最上部でのわずかな広域的張力成分の地殻運動によって始まった。最上部のマグマ溜りの上の2~5kmの厚さのブロックは明瞭な環状断層に沿って沈んだ。これらのマグマはドミングを伴わずに上昇した。再生ドームが発達しなかったのは下部マグマの組成および粘性に起因すると考えられ、中性の組成のマグマをもったコールドロンは玄武岩質盾状コールドロンとイグニブレイトを生ずる再生タイプの中間の型である (Ofte Dahl, 1978)。台地玄武岩や rhomb porphyry の活動からカルデラ活動への変化は割れ目噴火から中央火山活動へと噴火様式が変わったことにより、伸長ストレスの最盛期の終息を表す (Ramberg and Larsen, 1978; Sundvoll et al., 1990)。

6. 代表的火成岩体

オスロ地域の深成岩類には先に述べたようにいろいろな種類のものがみられる。このうち、モンゾ閃緑岩およびモンゾニ岩は南部の Larvik を中心としたラルビカイトおよびその関連岩からなる Larvik 環状岩体で、その他 Ramnes や Sande コールドロンの中心部にもみられる。閃長岩類は Larvik 岩体の北方および地溝帯北方に広く分布する。花崗岩類は地溝帯中央部の Finnemarka および Drammen 岩体などの大岩体と後期のいくつかの小岩体である。アルカリ花崗岩は南部の Eikerens 岩体およびリフト帯北部に分布する (第1図参照)。

6-1. Larvik 環状岩体

オスロリフト帯南部の Larvik を中心に広く分布する。モンゾニ岩~閃長岩質岩石からなる岩体で、石英、ネフェリン、オリビン (Fo₄₀₋₈₈)、Al と Ti に富むペーガス閃石質ホルンブレンドなどがみられる。Rb-Sr 全岩年代と Sr 初生値は 277±3Ma, 0.70391 を示す (Sundvoll et al., 1988)。一部の岩石にみられる微斜長石の変種は美

しい暗青色の閃光 (schillerization) を発し、わが国でも石材としてしばしば用いられる (写真2参照)。ラルビカイト (Larvikite) の名称は Brögger (1890) の命名による。ラルビカイトは長石の性質がサブソルバスのオリゴクレスとアルカリ長石の2長石の組み合わせか、単一のハイパーソルバス微ベルト長石かどうかによって、肉眼でも鏡下でも著しく異なった様相を呈する。量的には SiO₂ に富む系列が最も多く、ネフェリン閃長岩は全露出岩石の1%以下である。2つの系列への分化は残液系の thermal divide に関係し、最初に SiO₂ に飽和したマグマは花崗岩 ミニマムに進み、不飽和のマグマは逆のコースをとる (Neumann, 1980)。ラルビカイトの長石はアノソクレスで斜長石のコアをもつ。ネフェリン閃長岩になるにつれて An 成分に乏しく Or 成分に富むようになる。長石の閃光の原因は、クリトパーサイトへの (801) に平行な離溶の結果で、青色の閃光はおもに (100) 上に現われる。(Rosenqvist, 1965)。この岩体は、地殻下部の7-10 kb の圧力下における玄武岩メルトの分別結晶作用で、アルカリ長石+オリビン±単斜輝石+Fe-Ti 酸化物+アパタイトの除去により、過飽和あるいは不飽和の岩石を生じたもので、集積相のネフェリン閃長岩もみられる (Neumann, 1980)。

ネフェリン閃長岩の風化面はネフェリンの自形白色結晶が浮き出ており、特徴のある外観を示す (写真3)。

6-2. Finnemarka 複合岩体

Finnemarka 複合岩体は、オスロリフト帯に貫入したペルム紀の浅所侵入岩体である。モンゾニ岩 (akerite)。花崗閃緑岩、花崗岩からなり、花崗岩が岩体の大部分を占める (Czarnaske, 1965)。Rb-Sr 全岩年代は 268±3Ma で、Vestfold 地域では最も若く、Sr 初生値は 0.70466±12 を示す (Sundvoll and Larsen, 1990)。分化とともにイルメナイトへの Mn 濃集が顕著で MnTiO₃ が63%に達

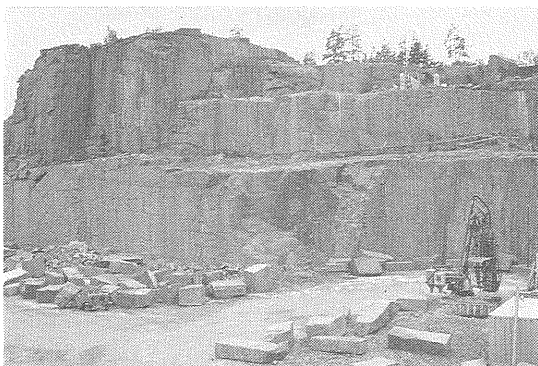


写真2 Larvik 東方のラルビカイト (マリナ・パール) の石切場



写真3 Larvik 環状岩体のネフェリン閃長岩の露頭写真 (白い部分がネフェリン結晶)

する (Czamanske and Mihalik, 1972). 輝石, 角閃石, 黒雲母の組成は分化とともに酸化条件が累進的に進んだことを示す. 黒雲母およびホルンブレンドの $Fe/(Fe+Mg)$ 比は苦鉄質岩から珩質岩へ減少し, 通常とは逆の変化をする. 結晶作用は PH_2O が ≤ 1000 bar で, 温度は $700^{\circ}C$ 位で行なわれた (Czamanske and Wones, 1973). マグマの進化過程での酸化作用が極端に進んだ例として, 日本でもしばしば紹介された岩体である.

6-3. Drammen 花崗岩体

オスロリフトのほぼ中央部にあり, 黒雲母花崗岩を主体とした大岩体である. Finnemarka 岩体と並んで, 他の深成岩類とはややその性質を異にする. Rb-Sr 鋳物年代は 267 ± 4 Ma を示すが, これは2次の年代で, 地質学的証拠からは 270 Ma より古いと考えられる (Sundvoll and Larsen, 1990). この岩体の成因については; 苦鉄質マグマの分化 (Ramberg, 1976), 希土類パターンに基づいた地殻物質の再融解 (Neumann et al., 1977), U, Th および K の挙動に基づく先カンブリア紀花崗岩類の再融解 (Kileen and Heier, 1975), 同位体比からのマントル起源説 (Sundvoll, 1978; Jacobsen and Wasserburg, 1978) などがある. Gaut (1981) は苦鉄質マグマの貫入によって再融解が起こり, 能動的リフト化作用によって促進される可能性, 苦鉄質マグマ起源における液体不混和がリフト帯での苦鉄質-珩長質マグマのバイモダル分布に重要な役割を果たすなどの可能性を挙げながら, これらの大陸リフト下における過程についてはさらに研究を要するとしている.

この他に石英の少ないソーダ微斜長石, マイクロペーサイト, ソーダ角閃石, ソーダ輝石からなる花崗岩 (ekerite) や閃長岩に伴われ, これらに移行する細粒~中粒のアルカリ花崗岩の小岩体がオスロリフト帯の各地にみられる.

6-4. Eikeren 岩体

オスロリフト中で最も大きい過アルカリ花崗岩で, フッ素に富むアルベゾン~リヒテル閃石, アクマイト質単斜輝石が含まれる (Neumann, 1976; Neumann et al., 1990). 単斜輝石の組成は Ac-Hd-Di 上で Morotu (Yagi, 1953) の輝石と同じ経路をたどる. Brögger (1890) は, これらの岩石を「ソーダ花崗岩」と命名したが後に“ekerite”と変更した. 271 ± 1 Ma の Rb-Sr アイソクロン年代と Sr 初生値 0.7053 ± 6 が求められている (Rasmussen et al., 1988).

Barth (1945) は ekerite をモンゾ閃緑岩-モンゾニ岩-アルカリ閃長岩-過アルカリ花崗岩の系列の最終生成物と考えた. 最近では ekerite は揮発成分に富み, 壁岩への揮発成分の散逸と鋳物分別の結果, 化学的分別を経

た残液メルトから形成されたとされている (Neumann et al., 1977; Rasmussen et al., 1988).

6-5. Fen 過アルカリ岩~カーボナタイト複合岩体

オロリフト帯西方, 特に Fen 付近には, 先カンブリア界を貫くいくつかのカーボナタイト・アルカリ岩が爆発角礫岩およびキンパーライト-アルカリ玄武岩岩脈として記載されている (Ramberg and Barth, 1966) (写真4参照). Fen 岩体は Telemark の Ulefoss 付近の先カンブリア界基盤を貫く環状複合岩体で古くから最もよく研究されている. Fen 岩体の同位体年代は $540-560$ Ma を示す (Andersen and Sudvoll, 1987; Andersen and Taylor, 1988) ことから, この活動はオスロリフトに直接関係したものというよりも, スウェーデンの Alnö 岩体とともに後期先カンブリア~カンブリア紀初期の Iapetus 海の拡大に関連したアルカリ岩 (Piper, 1985; Roberts et al., 1985) と考えられている. 岩体南西部はアルカリ輝石とネフェリンを含む過アルカリ岩 (melteigite-ijolite) の貫入, 中西部および東南部には一部珩質なカルサイトカーボナタイト (söfvite) が大量に貫入する. 東部は露出に乏しく, 黒雲母・チタンオーゾナイト・ネフェリンを含むランプロファエーの一種 (damkjernite) と珩酸塩に富む不均質なアンケライト鉄カーボナタイトからなる. 赤鉄鉱-カルサイト-ドロマイトカーボナタイト (rödberg) が岩体東縁に沿ってみられる.

壁岩の花崗岩類は fenitization を受けて閃長岩質岩石 (fenite) となっている. Brögger (1921) は, カーボナタイトの成因を地殻深所での石灰岩が融解したものと考えた. 現在ではカーボナタイトはキンパーライト, ネフェリナイト, その他の過アルカリ岩などの苦鉄質岩類を特徴的に伴うことおよび低 Sr 初生値から, 基本的にはマントル起源であると一般に認められている. 一方, 酸素および炭素同位体比は上部マントルの値に比べて変化範囲が大きく, 同位体的に地殻でのなんらかの汚染, あるいは固化カーボナタイトの熱水変質などが示唆されている.

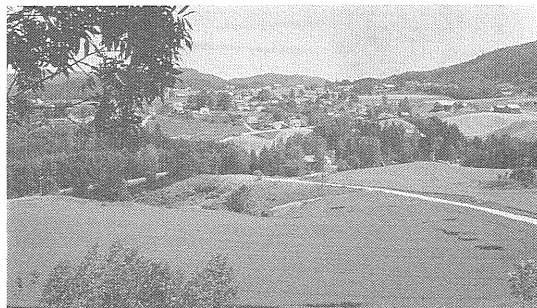


写真4 Fen アルカリ岩~カーボナタイト複合岩体の露出する付近

る (Andersen, 1984, 1987, 1988; Andersen and Sundvoll, 1987). Fen 岩体の本源マグマは ijolite に関連したもので、地殻上部に貫入して輝石とネフェリンを集積し、輝石の集積により melteigite を形成した。その後、マグマは液体不混和によってカーボナタイトと珪酸塩の部分とに分離した。カーボナタイトメルトは現在の侵食レベルに貫入して輝石カルサイトカーボナタイトとなり、珪酸塩の部分はネフェリン閃長岩となった。輝石は液体不混和に近い液体から集積した。岩体西縁の貫入岩の Sr, Nd 同位体的特徴 (540 Ma における $\epsilon_{Nd} \geq +2.7$, $\epsilon_{Sr} \leq -12$) は枯渇マントル起源であるが、ある程度上部大陸地殻による汚染を示唆する (Andersen, 1988; Andersen and Taylor, 1988)。

口絵にオスロ地溝帯代表的岩石薄片の顕微鏡写真を載せた。

6-6. 岩石の主成分化学組成

オスロ地域の深成岩類は大多数の岩石がアルカリ岩である。ネフェリン閃長岩、含アルカリ輝石含石英アルカリ閃長岩、およびアルカリ花崗岩は過アルカリ岩 (ノルムアクマイト含有) で、石英モンゾニ岩はアルカリ/サブアルカリの境界に位置する。NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂ 面 (PH₂O=1kb) 上でのノルム組成は、モンゾニ岩、オリビン閃緑岩、含アルカリ輝石含石英アルカリ長石閃長岩ではアルカリ長石 divide 上のアルカリ長石ミニマム付近である。著しく不飽和のアルカリ長石ネフェリン閃長岩は thermal valley の低部近くにあり、過アルカリネフェリン閃長岩は thermal valley のカリに富む地域にある。アルカリ岩あるいは過飽和岩石 (石英モンゾニ岩、アルカリ閃長岩の大部分、アルカリ花崗岩) はアルカリ長石-SiO₂ における thermal valley 付近にプロットされる (Neumann, 1976)。

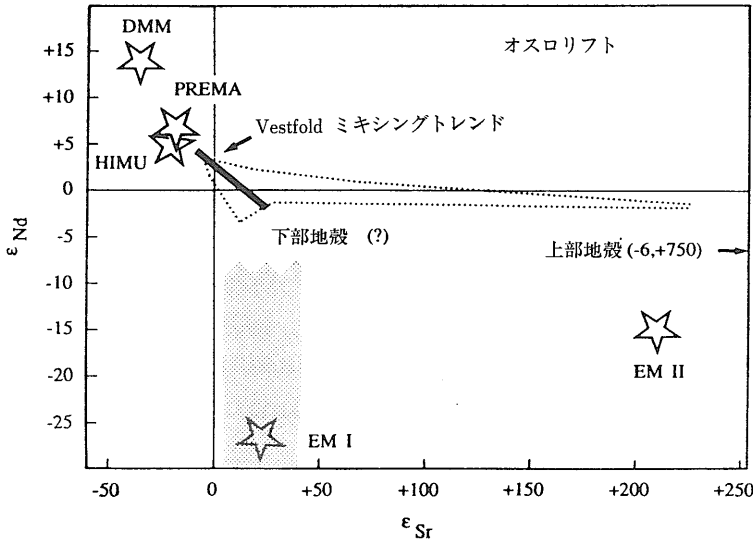
6-7. 岩石の生成条件

第1期貫入のラルビカイト (モンゾニ岩) とその関連岩、および第2期貫入のアルカリ岩～過アルカリ岩との間には系統的な違いがある。ラルビカイトとその関連岩は、高温のドライなマグマから QFM バッファに近い酸素フェュガシティのもとで浅所で結晶した。結晶作用の温度はオリビン閃緑岩で1150°C、モンゾニ岩で1090°C、アルカリ長石ネフェリン閃長岩で1065°Cを示す。ネフェリン閃長岩は925°C付近で始まった。第2期貫入のアルカリ閃長岩では、最も分化した岩石のソーダ質輝石や角閃石は780°C以下の結晶温度を示し PH₂O=1kb に近かった。酸素フェュガシティは QFM バッファよりも酸化的な条件から還元的な条件に変化した (Neumann, 1988)。これらの違いは後述のように同位体的にも区別されている。

7. オスロリフト帯の岩石の同位体的成因論

オスロ地域のアルカリ岩の成因論については、古くは岩石相互の量的関係、地球化学的特徴に基づいたものであった。Barth はオスロ地溝帯を地球深部からの脱ガスの場と考え、そこでアルカリ添加により先カンブリア紀基盤岩が in situ で再融解したものと考えた (Barth, 1945; Oftedahl, 1967)。さらに Sundvoll (1978), Jacobsen and Wasserburg (1978) は K-Th-U, Rb/Sr, Rb/Sr-Sm/Nd データから、玄武岩とモンゾニ岩質岩石は直接マントル起源であるが、閃長岩と花崗岩およびその噴出相は地殻組成を混合したと考えた。最近では、オスロ博物館の研究者を中心にして次のようなモデルがリフト形成と関連させて提案されている。

この地域の岩石の Sr 初生値は広い範囲をもつ。大部分の玄武岩質～第1期モンゾニ岩質岩石 (RP 溶岩とラルビカイト) は中程度に枯渇したマントル起源の Sm-Nd, Rb-Sr および微量元素組成値をもつ。つまり、Larvik のラルビカイト～アルカリ長石閃長岩、その噴出相 (rhomb porphyry 溶岩) は Th や Ta などの LIL 元素に富み、Sr 初生値は 0.70388～0.70391 でマントル起源と考えられる (Sundvoll and Larsen, 1990)。これらの岩石の大部分の同位体初生値は $\epsilon_{Sr} : -3 \sim -16$, $\epsilon_{Nd} : +3.3 \sim +4.2$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} : 18.9 \sim 19.3$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} : 15.59 \sim 15.66$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} : 38.6 \sim 39.1$ の狭い範囲に集中し、それほど汚染しなかった (Neumann et al., 1988)。玄武岩マグマは下部地殻のマグマ溜りで次第に先カンブリア基盤の再融解を引き起こした。その結果、第2期の閃長岩や花崗岩の Sr 初生値は 0.7039 よりも明らかに大きく、下部地殻の再融解が著しい地殻物質の添加で形成されたと考えられる。比較的 LIL 元素に乏しく、Sr 初生値が 0.705-0.706 の閃長岩系列の岩石 (コールドロン内部のアルカリ長石閃長岩) は中部～深部地殻の一部が再融解またはそれによる汚染で生じた (Rasmussen et al., 1988)。さらに、オスロ地域北端の Hurdal 閃長岩と花崗岩は、LIL 元素に富み、かつ 0.704-0.716 の Sr 初生値をもち、上部地殻でかなり汚染したものである (Sundvoll and Larsen, 1990)。Vestfold および Krokskogen の玄武岩マグマは Nd-Sr 同位体比に幾分枯渇し、放射性 Pb に富んだ (PREMA タイプ) リソスフェアマントル起源であり、オスロリフトの火成活動は、先リフト下部リソスフェアでの PREMA 起源のものが卓越する。これらのマグマは下部地殻でオリビン+単斜輝石を分別し、いくらか汚染された。リソスフェアマントル起源の多いことはオスロリフトが受動的メカニズムで始まったことを示唆する。ペルム紀～石炭紀におけるオスロリフト帯岩石の



第6図 ベルム紀~石炭紀におけるオソロリフト帯岩石の初生 $\epsilon_{Nd}-\epsilon_{Sr}$ の $t=0$ Ma (☆印) における主なマントル組成と比較した場合の関係。

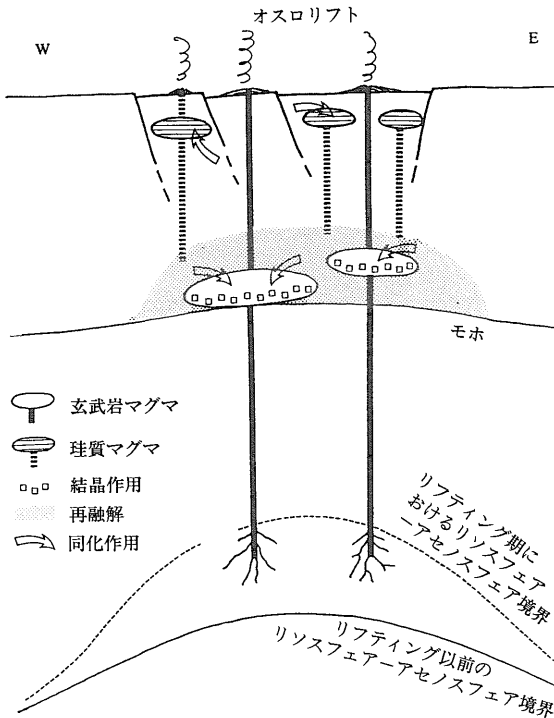
DMM: 枯渇したマントル, PREMA: 一般的マントル, HIMU: 高U/Pbマントル, EM I および EM II: 富化マントル, 太い直線: Vestfold ミキシングトレンド, 点線で囲った範囲: 閃長岩・アルカリ花崗岩類の範囲, 影の部分: Rb-Sr系でアイソクロンを定義する珩質貫入岩体の初生値の範囲, オソロリフトのデータは Neumann (1988), 南東ノルウェーの上部地殻 (300 Ma に再計算した値) については Andersen (1987), Andersen and Taylor (1988), Björlykke (私信) による. (Neumann, E-R., Sundvoll, B. and Överli, 1990)

$\epsilon_{Nd}^t - \epsilon_{Sr}^t$ 関係を第6図に示す。

地殻の下のリソスフェアはいくらから Sr と Nd 同位体で枯渇していたが, Pb 同位体で富んでいた。このようなリソスフェア下部起源の玄武岩マグマがマントル/地殻境界部付近(モホ面の深さ: ~35km, ~10kb) に集積し, ここで分別作用をおこして十分浮力が働くようになり, 張力場の働く薄化した地殻を上昇した。マントル/地殻境界部での苦鉄質マグマの集積はリソスフェア上部での地温勾配を増加させて, 地殻物質の一部を融解した。この融解によって石英モンゾニ岩や含石英アルカリ長石閃長岩などの汚染された岩石を形成した (Neumann, 1980; 1988)。

上部地殻に貫入した後, 珩質マグマの主成分・微量成分はアルカリ長石の除去による分別作用と流体相による元素の移動で変化した。この段階では壁岩との大きな相互作用はなかった (Lasmussen et al., 1988)。

これまでで紹介した岩石学的・地球化学的および地球物理学的なデータから考えられるオソロリフト下部の断面の模式図は第7図のようなものとなる (Neumann et al., 1990)。



第7図 (左) リフティング期におけるオソロリフト下部の地殻と上部マントルの模式図。

スケールは任意にとってある. (Neumann, E-R., Sundvoll, B. and Överli, 1990)

8. おわりに

オソロ地域は近代岩石学発祥の地としてよく知られているとともに, 最近ではリフトの形成とその構造の面からも詳しく研究されている。沈み込み帯の地質にはなじみが多い私にとって, オソロ地域はその美しい自然とともに新鮮な

興味を呼び起こしてくれた。このような地域に目を向けて下さったのは黒田吉益教授を代表者とする国際共同研究のプロジェクト(課題番号 02041036)の方々であった。黒田教授はじめ山田哲雄, 丸山孝彦, 山口佳昭, 石川賢一および Dr. J. Naterstad, Dr. S. Dalglæen の諸氏には現地での調査や討論でたいへんお世話になった。また, 本誌編集委員会の佐藤興平氏はオスロ地域紹介の機会を与えて下さった。いくつかの図版の引用については Elsevier 社および Dr. E-R. Neumann, Dr. H. E. Ro, 両氏の許可を得た。以上の方々に感謝する。

<付記>本稿投稿後, Dr. E-R. Neumann, Dr. H. E. Ro 両氏からオスロリフトに関する新見解が *Tectonophysics* (1992) (ed. P. Ziegler) に掲載されるとの教示を頂いた。今回以後の新しい考えが紹介されるであろうことを付記するとともに, 両氏に謝意を表したい。

文 献

- Andersen, T. (1984): Secondary processes in carbonatites: petrology of "rödberg" (hematite-calcite dolomite carbonatite) in the Fen central complex, Telemark (South Norway). *Lithos*, **17**, 227-245.
- Andersen, T. (1987): Mantle and crustal components in a carbonatite complex, and the evolution of carbonatite magma; REE and isotopic evidence from the Fen complex, southeast Norway. *Chem. Geol. (Isotopic Geoscience)*, **65**, 147-166.
- Andersen, T. (1988): Evolution of peralkaline calcite carbonate magma in the Fen complex, southeast Norway. *Lithos*, **22**, 99-112.
- Andersen, T. and Sundvoll, B. (1987): Strontium and neodymium isotopic composition of an early tinguaite (nepheline microsyenite) in the Fen complex, Telemark, southeast Norway: age and petrogenetic implications. *Nor. Geol. Unders.*, **409**, 29-34.
- Andersen, T. and Taylor, P.N. (1988): Pb isotope geochemistry of the Fen carbonatite complex, S.E. Norway: Age and petrogenetic implication. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 209-215.
- Barth, T. (1945): Studies on the igneous rock complex of the Oslo Region, II, Systematic petrography of the plutonic rocks, *Skr. Nor. Vidensk.-Akad. Oslo: Mat. Naturv. Kl.*, **1944**, no. 9, p. 104.
- Brögger, W.C. (1890): Die Mineralien der Syenitpegmatitgänge der süd-nordwestlichen Augit und Nephelinsyenite. *Z. Kristallogr. Mineral.*, **16**, p. 663.
- Brögger, W.C. (1921): Die Eruptivgesteine des Kristianiagebietes. IV. Das Fengebiet in Telemark, Norwegen. *Skr. Vidensk. Selsk., I. Mat. Naturv. Kl.* **1920**, no. 9. p. 408.
- Buch, L. von (1810): Reise durch Norwegen und Lappland. Vol. I & II, Berlin.
- Bylund, G. and Patchett, P.J. (1977): Palaeomagnetic and Rb-Sr isotopic evidence for the age of the Särna alkaline complex, western central Sweden. *Lithos*, **10**, 73-79.
- Cloos, H. (1939): Hebung-Spaltung-Vulkanismus. *Geol. Rundsch.*, **30**, 401-527.
- Gzamanske, G.K. (1965): Petrologic aspects of the Finnmarka igneous complex, Oslo area, Norway. *Jour. Geol.*, **73**, 293-322.
- Gzamanske, G.K. and Mihalik, P. (1972): Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarka complex, Oslo area, Norway: Part 1, The opaque oxides. *Jour. Petrol.*, **13**, 493-509.
- Gzamanske, G.K. and Wones, D.R. (1973): Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarka complex, Oslo area, Norway. Part 2, The mafic silicates. *Jour. Petrol.*, **14**, 349-380.
- Dons, J.A. (1977): Terminology and History of Investigation. In Dons, J.A. and Larsen, B.T. (eds.) "The Oslo Paleorift". *Nor. Geol. Unders.*, **337**, 9-16.
- Dons, J.A. and Larsen, B.T. (eds.) (1977): The Oslo Paleorift. A review and guide to excursions. *Nor. Geol. Unders.*, **337**, p. 199.
- Gaut, A. (1981): Field relations and petrography of the biotite granites of the Oslo region. *Nor. Geol. Unders.*, **367**, 39-64.
- Goldschmidt, V.M. (1911): Die Kontaktmetamorphose im Kristianiagebiet. *Skr. Nor. Vidensk.-Akad. Oslo. Mat. Naturv. Kl.* **1911**, no. 11, p. 405.
- Jacobsen and Wasserburg, (1978): Nd and Sr isotopic study of the Permian Oslo rift. Short Pap., 4th Int. Conf. on Geochronology, Cosmochronology, and Isotope Geology. U.S. Geol. Surv., Open-File Rep., 78-701, 194-196.
- Kileen, P.G. and Heier, K.S. (1975): A uranium and thorium enriched province of the Fennoscandian Shield in southern Norway. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **39**, 1515-1524.
- Lasmussen, E., Neumann, E-R., Andersen, T., Sundvoll, B., Fjerdingsstad, V. and Stabel, (1988): Petrogenetic processes associated with intermediate and silicic magmatism in the Oslo rift, south-east Norway. *Mineral. Mag.*, **52**, 293-307.
- Le Maitre (ed.) (1989): A classification of igneous rocks and glossary of terms Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the systematics of igneous rocks. Blackwell Scientific Publ. Ltd., Oxford, p. 193.
- Neumann, E-R. (1976): Compositional relations among pyroxenes, amphiboles and other mafic phases in the Oslo Region plutonic rocks. *Lithos*, **9**, 85-109.
- Neumann, E-R. (1980): Petrogenesis of the Oslo Region larvikites and associated rocks. *Jour. Petrol.*, **21**, 499-531.
- Neumann, E-R. (1988): Isotopic and petrological rela-

- tions of the crust and upper mantle under the Oslo Graben, Southeast Norway. Progress in studies of the lithosphere in Norway. *Nor. Geol. Unders., Spec. Publ.* 3, 7-12.
- Neumann, E-R. (ed.) (1990) : Rift zones in the continental crust of Europe—geophysical, geological and geochemical evidence: Oslo-Horn Graben. *Tectonophysics*, 178, Special Issue
- Neumann, E-R., Brunfelt, A. O. and Finstad, K. G. (1977) : Rare earth elements in some igneous rocks in the Oslo Rift, Norway. *Lithos*, 10, 311-319.
- Neumann, E-R., Larsen, B. T., and Sundvoll, B. (1985) : Compositional variations among gabbroic intrusions in the Oslo Rift. *Lithos*, 18, 35-59.
- Neumann, E-R., Pallesen, S. and Andersen, P. (1986) : Mass estimates of cumulates and residues after anatexis in the Oslo Graben. *Jour. Geophys. Res.*, 91, 11629-11640.
- Neumann, E-R., Sundvoll, B. and Overli P. E. (1990) : A mildly depleted upper mantle beneath southeast Norway: evidence from basalts in the Permo-Carboniferous Oslo Rift. *Tectonophysics*, 178, 89-107.
- Neumann, E-R., Tilton, G. R., and Tuen, E., (1988) : Sr, Nd and Pb isotope geochemistry of the Oslo Rift igneous province, southern Norway. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 1997-2007.
- Oftedahl, C. (1960) : Permian rocks and structures of the Oslo Region. In O. Holtedahl (ed.), *Geology of Norway*, *Nor. Geol. Unders.*, 208, 298-343.
- Oftedahl, C. (1967) : Magmen-entstehung nach Lava-Stratigraphie im südlichen Oslo-Gebiete. *Geol. Rundsch.*, 57, 203-218.
- Oftedahl, C. (1978) : Cauldrons of the Permian Oslo Rift. *Jour. Volcanol. Geoth. Res.*, 3, 343-371.
- Piper, J. D. A. (1985) : Continental movements and break up in Late Precambrian-Cambrian times: prelude to Caledonian orogenesis. In Gee, D. G. and Sturt, B. A. (eds.) "The Caledonide orogen-Scandinavia and related areas" 19-34.
- Ramberg, I. B., (1976) : Gravity interpretation of the Oslo Graben and associated igneous rocks. *Nor. Geol. Unders.*, 325, 193pp.
- Ramberg, I. B. and Barth, T. F. W. (1966) : Eocambrian volcanism in southern Norway. *Norsk geol. Tidsskr.*, 46, 219-236.
- Ramberg, I. B. and Larsen, B. T. (1978) : Tectonomagmatic evolution. In Dons, J. A. and Larsen, B. T. (eds.), "The Oslo Paleorift. A review and guide to excursions". *Norg. Geol. Unders.*, 337, 55-73
- Rasmussen, E., Neumann, E-R., Andersen, T., Sundvoll, B., Fjerdingsstad, V. and Stabel, A. (1988) : Petrogenetic processes associated with intermediate and silicic magmatism in the Oslo Rift, south-east Norway. *Mineral. Mag.*, 52, 293-307.
- Ro, H. E., Stuevold, L. M., Faleide, J. I. and Myhre, A. M. (1990a) : Skagerrak Graben—the offshore continuation of the Oslo Graben. *Tectonophysics*, 178, 1-10.
- Ro, H. E., Larsson, F. R., Kinck, J. J. and Husebye, E. S. (1990b) : The Oslo Rift—its evolution on the basis of geological and geographical observations. *Tectonophysics*, 178, 11-28.
- Roberts, D., Sturt, B. A. and Furnes, H. (1985) : Volcanic assemblages and environments in the Scandinavian Caledonides and the sequential development history of the mountain belt. In Gee, D. G. and Sturt, B. A. (eds.) "The Caledonide orogen-Scandinavia and related areas" 919-930.
- Rosenqvist, (1965) : Electron-microscope investigations of larvikite and tönnsbergite feldspars. *Norsk geol. Tidsskr.*, 45, 69-71.
- Sörensen, R. (1975) : The Ramnes Cauldron in the Permian of the Oslo region, Southern Norway. *Nor. Geol. Unders.*, 321, 67-86.
- Sundvoll, B. (1978) : Isotope and trace-element chemistry, geochronology. In "The Oslo Paleorift" (Dons, J. A. and Larsen, B. T. eds.). *Nor. Geol. Unders.*, 337, 35-40.
- Sundvoll, B., Neumann, E-R., Larsen, B. T. and Tuen, E. (1990) : Age relations among Oslo Rift magmatic rocks: implications for tectonic and magmatic modelling. *Tectonophysics*, 178, 67-87.
- Sundvoll, B. and Larsen, B. T. (1990) : Rb-Sr isotope systematics in the magmatic rocks of the Oslo Rift. *Nor. Geol. Unders.*, 418, 27-46.
- Yagi, K. (1953) : Petrochemical studies on the alkalic rocks of the Morotu district, Sakhalin. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 64, 769-810.
- Ziegler, P. A. (1978) : North Sea Rift and Basin development. In Ramberg, I. B. and Neumann, E-R. (eds.), "Tectonics and Geophysics of Continental Rifts", *Nato Advanced Study Institute Series C*, 37, Reidel Dordrecht, 249-277.
- Ziegler, P. A. (1982) : Geological atlas of Western and Central Europe. Elsevier Amsterdam, p. 130.

KANISAWA Satoshi (1991) : The Oslo Region—the cradle of modern petrology and the paleorift—.

<受付: 1991年9月5日>