

## 1-5 大陸性洪水玄武岩に関係する Ni-Cu-PGE 鉱床のテクトニクス

ニッケル・銅・PGE 硫化物鉱床は塩基性～超塩基性の貫入岩・火山岩中に胚胎する。このタイプの鉱床は形状と組成から、次の4つのタイプに分けることができる。(1) アストロプレム起源の塩基性シルに伴う鉱床 (Sudbury, Ni : Cu=1 : 1)。(2) リフト-大陸性洪水玄武岩起源の塩基性シル・岩脈に伴う鉱床 (Noril'sk, Duluth, Crystal Lake, 金川, Ni : Cu=1 : 1~11)。(3) コマチアイト質火山岩・貫入岩に伴う鉱床 (Thompson, Langmuir, Kambalda, Pechenga, Shangani, Ni : Cu=1 : >10)。(4) その他、ソレアイト質貫入岩に伴う鉱床 (Lynn Lake, Giant Mascot, Kotalahti, Selebi-Pikwe, Ni : Cu=1 : 2~3)。

大陸性洪水玄武岩に伴うニッケル・銅・PGE 鉱床では、ロシアの Noril'sk 鉱床 (555Mt, Ni2.7%, Cu2.06%) および中国の金川鉱床 (515Mt, Ni1.06%, Cu0.67%) が世界第2位と第3位のニッケル埋蔵量を誇る鉱床であり、現在、ニッケル鉱山として採掘が行われている。その他、同じ成因の鉱床は米国ミネソタ州の Duluth 鉱床 (4,000Mt, Ni0.2%, Cu0.66%)、カナダの Great Lake 鉱床 (45.6Mt, Ni1.2%, Cu0.34%) およびグリーンランドの Disko Bugt 鉱床がある。これらの鉱床は現在のところ、まだ開発には至っていない。本章では、Duluth の鉱床の概要について述べ、更に Duluth 鉱床と Noril'sk 鉱床がどのようなテクトニクスの基で形成されたのかについて検討する。最後に、Duluth 鉱床と Noril'sk 鉱床の生成メカニズムを基に、ブラジルのパラナ地域における銅-ニッケル-PGE 鉱床の可能性について検討する。

### 1-5-1 Duluth 鉱床

#### (1) 地質

北米の Midcontinent リフト (Midcontinent Rift: MCR) は Kansas 中部から北に Superior 湖、Michigan 南部を通り、Ohio まで約 2,300 km の延長を持つ。MCR は原生代中期 (1,200-1,100 Ma) に形成された世界最大クラスの大陸性リフトである。MCR を構成する岩石は Superior 湖周辺でのみ露出がみられ、その他の地域では古生層により覆われる。MCR の全体像は重力の高異常でのみ知ることができる (Fig.II-1-5-1)。

Superior 湖周辺のリフトには Keweenawan 貫入岩類が分布する (Fig.II-1-5-2)。Keweenawan 貫入岩類は東部の Kapsukasanig 構造帯のネフェリン・カーボナタイト複合岩体、北部の Coldwell、Killala Lake などの斑レイ岩質・閃長岩質複合岩体、南部および西部の洪水玄武岩に関係する Mellen 複合岩体および Duluth 複合岩体およびその他スペリオール湖周辺の小規模なシル、岩脈などからなる。東部および北部のアルカリ岩質複合岩体は直径 1-5 km の環状構造を特徴とする。

Superior 湖西部および南部の洪水玄武岩は始生界 (花崗岩、グリーンストーン)、原生代前期の Animikean 層 (グレイワッケ、粘板岩および鉄層) を覆い、ソレアイト質な逆帯磁の洪水玄武岩の活動から始まり、正帯磁の洪水玄武岩の活動で終わる。その噴出量は約  $1 \times 10^6 \text{ km}^3$  であり、デカンやパラナの洪水玄武岩と比べると小規模である。

Superior 湖西岸には洪水玄武岩に伴う、塩基性の層状貫入岩体である Duluth 複合岩体およびシ

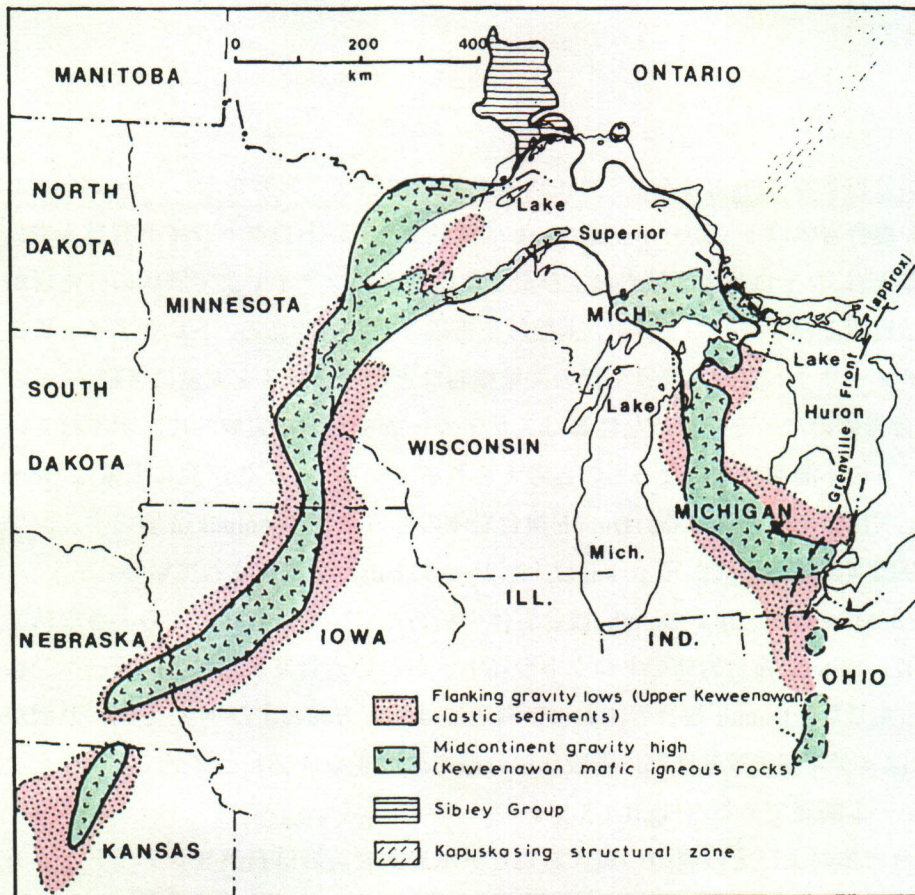


Fig. II-1-5-1 Generalized map of the Midcontinent rift of North America, after P.W. Weiblen (1980)

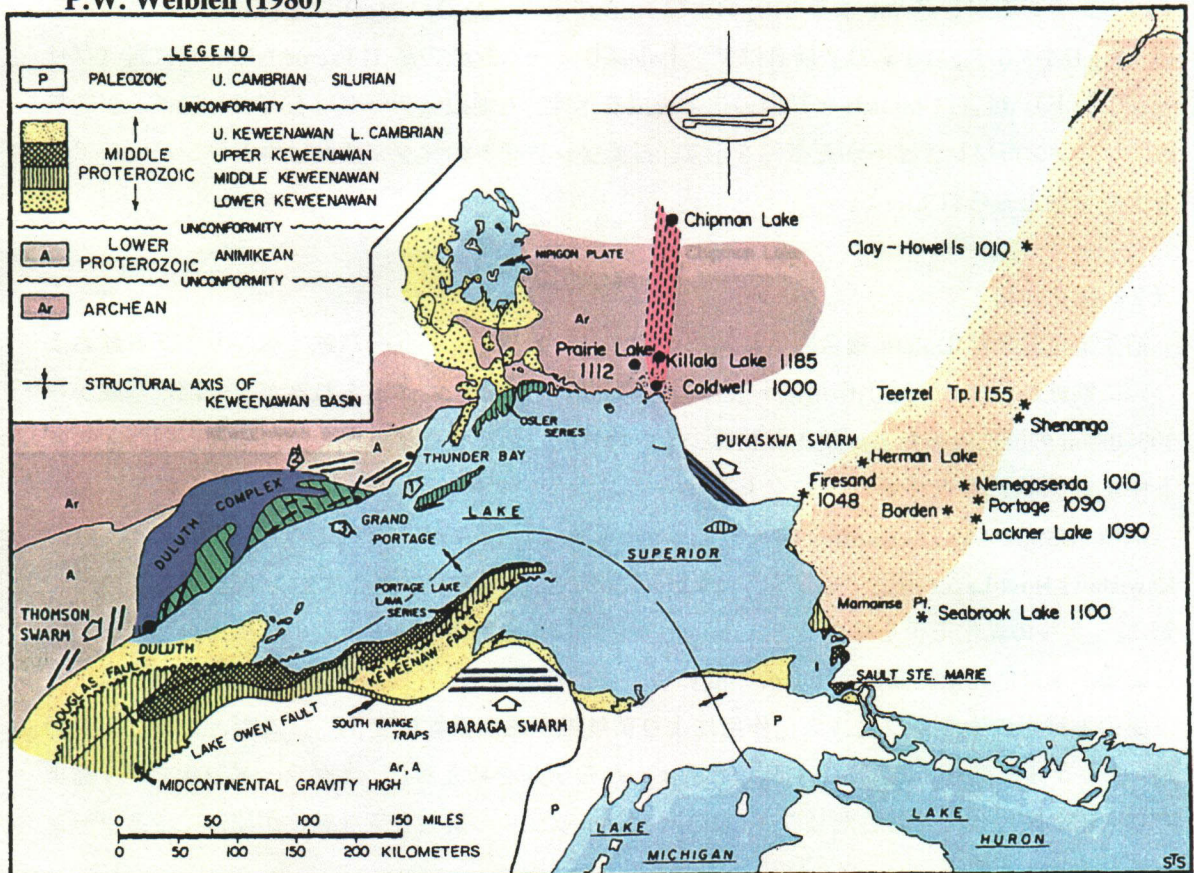


Fig. II-1-5-2 Generalized map of the Lake Superior region

Asterisks, nepheline-carbonatite complexes (K-Ar ages in m. y.) in the Kapuskasing Structural Zone (Gittens and others, 1967; Currie, 1976). Solid dots, alkaline intrusions in the Coldwell Alkaline Province (Currie, 1976). Diagonal lines, North Shore Volcanic Group. The "Nipigon Plate" refers to the patterned areas north of the Osler Series (Card and others, 1972). It includes the Sibley Group (checked pattern) (Franklin and others, 1980) and an extensive area of dip slope exposure of Keweenaw diabase sills (randomly slashed pattern). Keweenaw dike and sill swarms are indicated with heavy parallel lines. One, two, and three refer to the Thunder Bay, Gunflint, and Grand Portage swarms, respectively. The Mellen Complex is located in the area SW of the Keweenaw Fault. (P. W. Weiblen, 1982).

ル・岩脈群が分布する (Fig.II-1-5-3)。Duluth 複合岩体は弓状の形態を示し、その延長は 225 km ある。Duluth 複合岩体は下位から Bardon Peak ペリドタイト、トロクトライト質貫入岩、アノーサイト質貫入岩、フェロ花崗閃緑岩および最上位のグラノファイヤまで層状の分化岩からなる。下盤は変堆積岩および逆帯磁の玄武岩、上盤は正帯磁の玄武岩である。トロクタイト質貫入岩は斑レイ岩、アノーサイト岩、下部原生代の変堆積岩などのゼノリスを大量に含む。

Duluth 複合岩体のバイモーダルな性質はスケアガードマグマで実験的に証明されているように、シリケイトの不混和現象によるものと考えられる。シリケイトの不混和現象は North Shore 火山岩層など噴出岩でもみられる。Duluth 複合岩体の生成深度は Animikan 層のホルンフェルス化作用および閃亜鉛鉱の組成から 10 km 以上 (2~2.5 kbars) と推定されている。

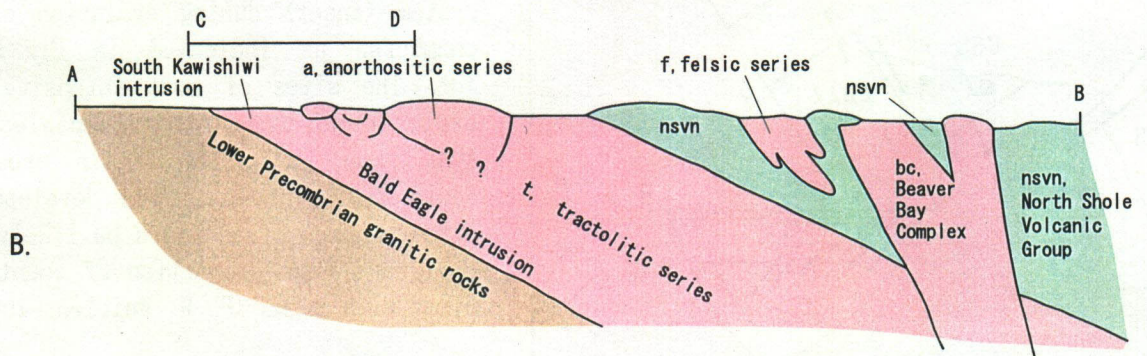
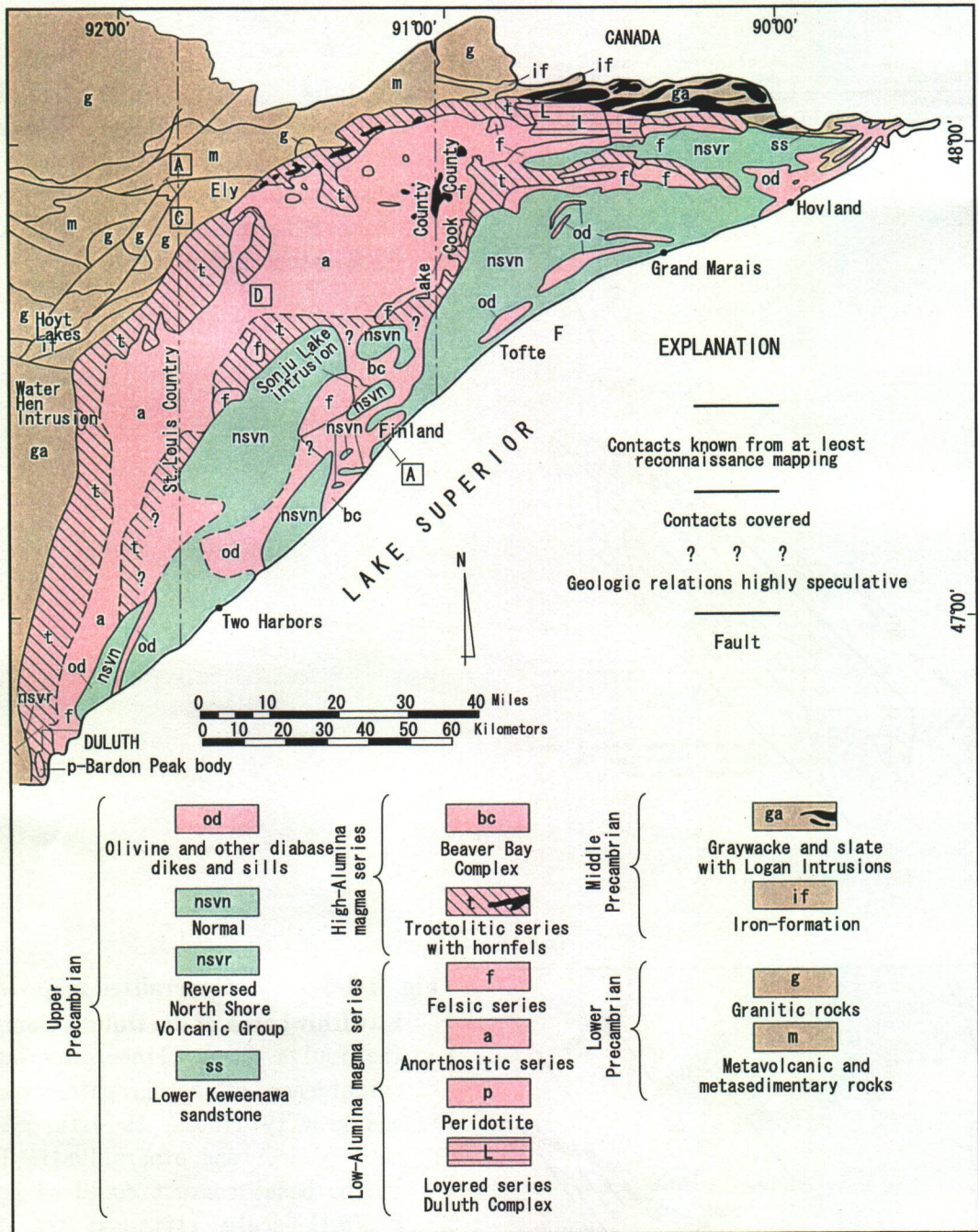
Weiblen and Morey (1980)は Duluth 複合岩体の構造について研究し、次のような結論を得た (Fig.II-1-5-4)。Duluth 複合岩体のトロクトライト~斑レイ岩質貫入岩は半グラバーベン状のマグマ溜まりから生じた。Duluth 複合岩体および周辺には NE 方向および NW 方向の断層がみられるが、これらはマグマ溜まり基底部の階段状の分岐を形成するリフトとマグマ溜まりを横断するトランスフォーム断層である (Fig.II-1-5-5)。

Duluth 複合岩体およびその周辺の貫入岩類と洪水玄武岩溶岩は石英ソレイトとカンラン石ソレイトの2つのグループに区分できる。両者は岩石学的に明確に区分できる。石英ソレイトはカンラン石ソレイトより  $\text{TiO}_2$  および REE に富み、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  に乏しいなどの特徴がある (Fig.II-1-5-6, Fig.II-1-5-7)。前者はマントルプリューム起源の高 Ti Faeroe Island 玄武岩 (グリーンランド)、後者は MORB と類似の化学組成を示す。古地磁気データは石英ソレイトが逆帯磁、カンラン石ソレイトが正帯磁を示す。石英ソレイトのマグマ活動はカンラン石ソレイトより早期とみられている。

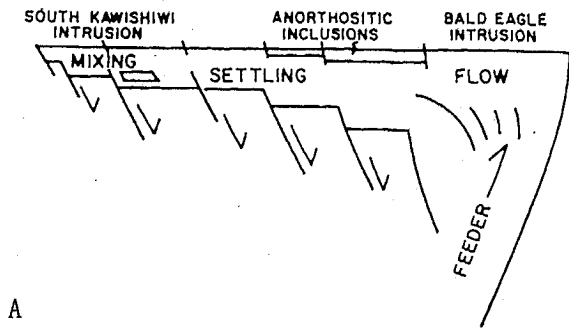
## (2) 鉱化作用

初生硫化鉱物は Duluth 複合岩体基底部に偏在し、黄銅鉱、キューバ鉱、ペントランド鉱および磁硫鉄鉱からなる。鉱化作用は一般に基底部から 100 m 以内にみられるが、一部は基底から 300-400 m の所にみられる。硫化鉱物は少量、塊状鉱として存在するが、その他はトロクトライト中に鉱染状に存在する。トロクトライトには大量の変堆積岩のゼノリスがみられる。探査 (INCO,USS,AMAX)は Gunflint 地区と Kawishiwi-Hoyt Lakes 地区に集中している (Fig.II-1-5-5)。Kawishiwi-Hoyt Lakes 地区では鉱量 40 億トン、品位 Cu 0.5 wt%、Cu/Ni= 3.33 が確認されている。銅-ニッケルの鉱化モデルによると、Duluth 複合岩体基底部において下盤の堆積岩からマグマ中に硫黄が溶け込んだ結果、メルトの不混和現象によりニッケル・銅の鉱化作用が生じた。硫黄は下盤の堆積岩のホルンフェルス化作用により黄鉄鉱が磁硫鉄鉱に変化し、過剰となった硫黄が銅・ニッケルと結合したとみられる。このようなモデルを考えると、半グラバーベン状マグマ溜まり基底部の階段状に分岐したリフトの部分が銅・ニッケルの最も有望な鉱化が期待できるゾーンと言える。

Thunder Bay 輝緑岩岩脈群のうち、Crystal Lake 岩脈などでは Cu-Ni の弱い鉱化作用がみられる。Crystal Lake 岩脈は延長 700mあり、断面はカヌーのような形をしている。岩脈内部は分化が進

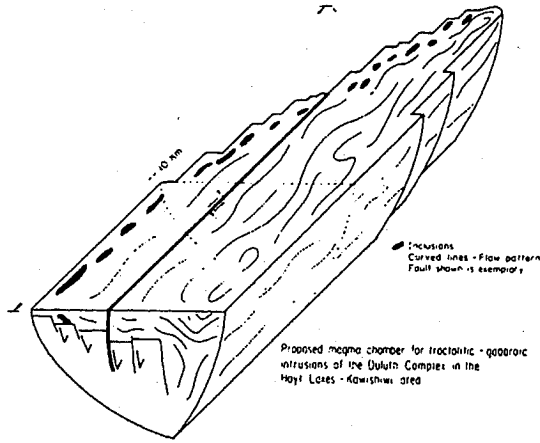


**Fig. II-1-5-3 Generalized bedrock geological map (A) and the cross section (B) of the Duluth Complex (P.W. Weiblen, 1982)**

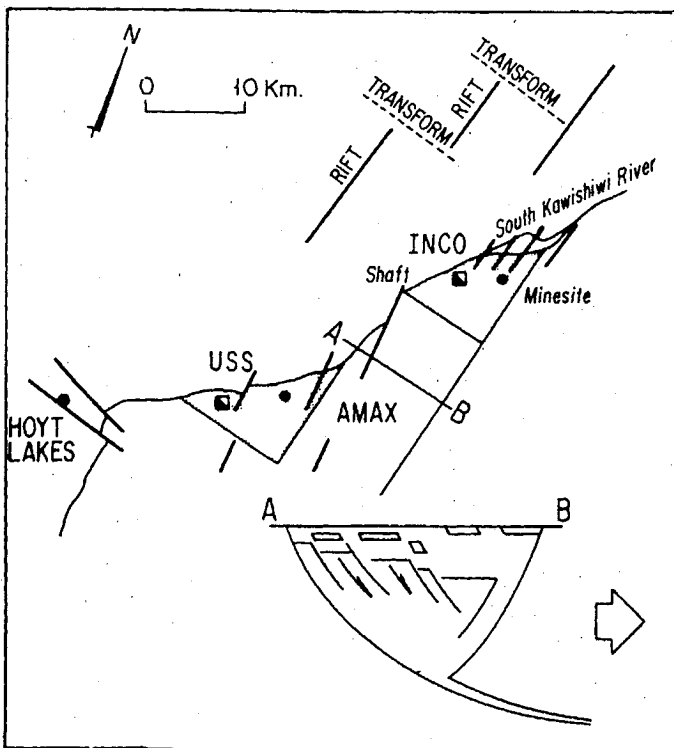


**Fig. II-1-5-4** Cross section along Fig. II-1-5-3 1-5-3. C-D indicates crystallization regimes deduced from textures. (B) Three-dimensional view of a proposed magma chamber normal to cross section C-D (P. W. Weiblen, 1982).

A

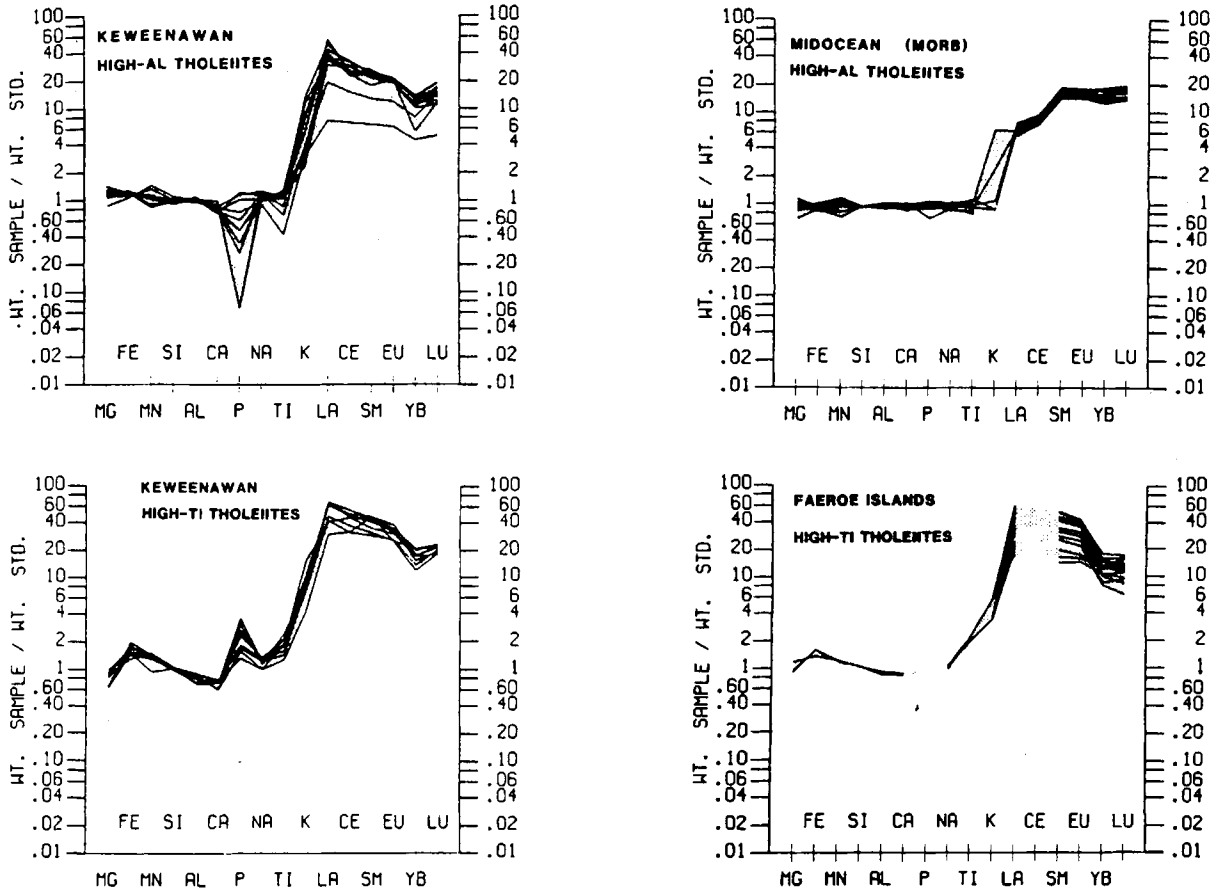


B



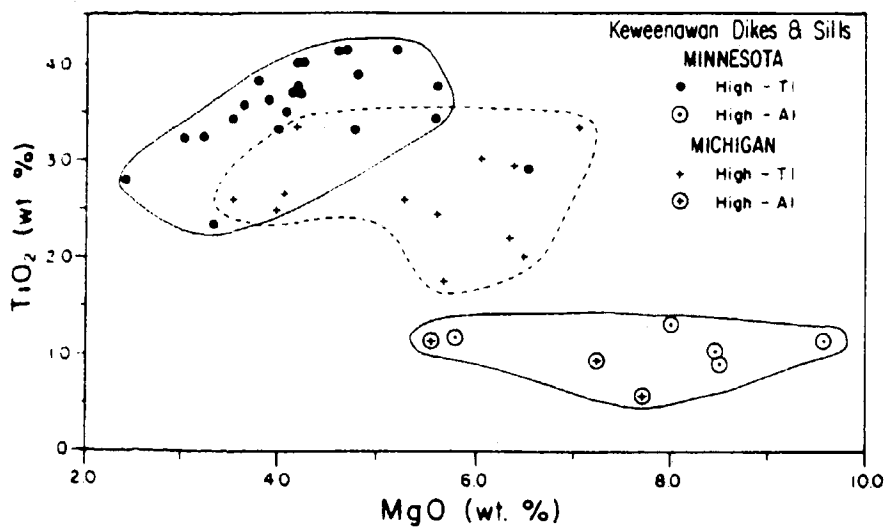
**Fig. II-1-5-5** Generalized map view of the Kawishiwi area of the Duluth Complex

The faults (heavy lines) are suggested by coincidence of topographic, aeromagnetic, and gravity lineaments with joint density data (Cooper and others, 1981). The offsets in the basal contact could be generated by a small scale rift and transform fault system (inset) during evolution of magma chambers, as indicated in Fig. II-1-5-4 (B). The sites of most intensive (Cu-Ni) exploration by mining companies (USS, AMAX, and INCO) lie within areas that could represent extensive development of offsets. Such areas would be likely places to find a high proportion of country rock mixed with magma (P. W. Weiblen, 1982).



**Fig. II-1-5-6 Normalization plots of compositions of Keweenaw dikes and sills; Mid-Ocean Ridge Basalt (MORB), and mantle plume basalt (High-Ti Faeroe Islands basalt)**

Data are average, minimum, and maximum values. (Table 6). Data are normalized to an average composition of Midocean ridge basalt (MORB) from Bor-ming Jahn and others (1980). (P. W. Weiblen, 1992).



**Fig. II-1-5-7 Variation diagram of MgO versus TiO<sub>2</sub> for Keweenaw dikes and sills in Minnesota and Michigan**

Michigan. Minnesota data from N. W., Jones (in preparation); Michigan data from Wilband and Wasuwanich (1980). High-Ti refers to quartz tholeiite and high-Al to olivine tholeiite compositions. Fractional crystallization of liquidus phases of olivine, plagioclase, pyroxene, and oxides cannot produce the high-Ti variation from high-Al (Wilband and Wasuwanich, 1980). (P. W. Weiblen, 1982).

んでおり、トラフ状の層状構造がみられる。岩脈の岩相は下位から斑レイ岩、かんらん石斑れい岩、トロクアイト・アノーサイトの互層、かんらん石斑れい岩からなる。硫化鉍物はかんらん石斑れい岩中に存在し、その組み合わせは Duluth 複合岩体と同じである。かんらん石斑れい岩は Duluth と同じように、大量のホルンフェルス化した変堆積岩ゼノリスを含む。鉍石は品位が低く経済性がない。品位が低いのは岩脈が貫入する際、母岩との混成作用が弱かったため、不混和による硫化物メルトの生成が十分でなかったことによるものとみられる。

### (3) Midcontinent リフトのテクトニクス

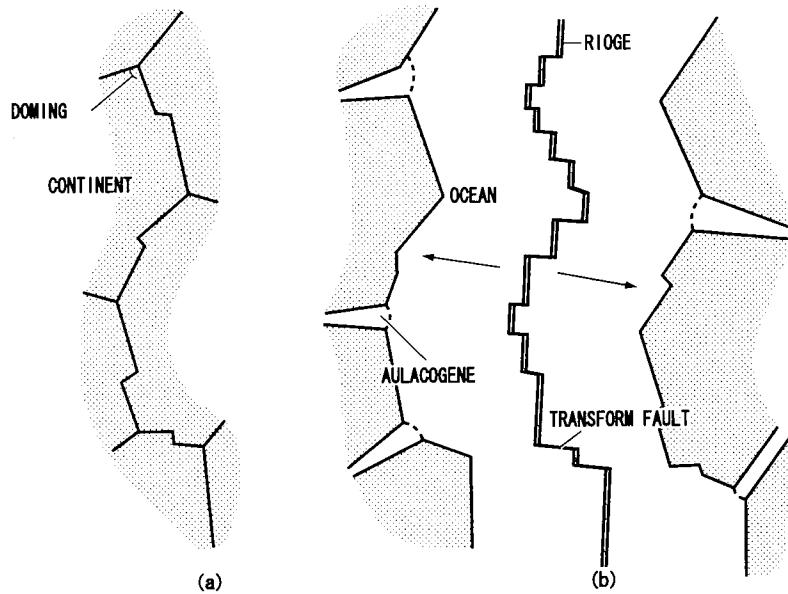
#### a) 三重会合点モデル

大陸分裂のひとつのモデルとして、大陸内の複数の地点でホットスポット的なドーミングが起こり、三重会合点 (Triple junction) ができ、それらが連結してリフト系となり、やがて大陸分裂に至るという考えがある (Fig.II-1-5-8)。このようなリフト系のマグマは生成深度、メルトとフューダーの反応およびメルトの結晶分化程度などにより、CO<sub>2</sub> やアルカリが豊富なマグマからソレライト質マグマに進化するという現象がみられる (Bailey, 1978)。エチオピア-紅海リフト、グリーンランド東部の North Atlantic リフトおよび現在の Mid-Atlantic リフトなどはこの例である。MCR の Keweenawan 貫入岩類もアルカリ質岩体、ソレライト質岩体からなり、このモデルを当てはめることは可能である (Fig.II-1-5-9)。Keweenawan 貫入岩類と North Atlantic リフト (第三紀の開口) の貫入岩類を比較すると、類似の構造をみることができる。この対比では、Sibley 地溝、Codwell アルカリ岩体または Kangerdlugssuaq アルカリ岩体のいずれかがオラーコジン (failed arm) になる。残り 2 本のアーム (arm) はリフトの軸方向に一致し、他の三重会合点のアームに連結される。このアームの方向には洪水玄武岩が分布する。スペリオール湖と Faeroes はそれぞれ三重会合点とみられ、これらはマグマの活動の中心であった。

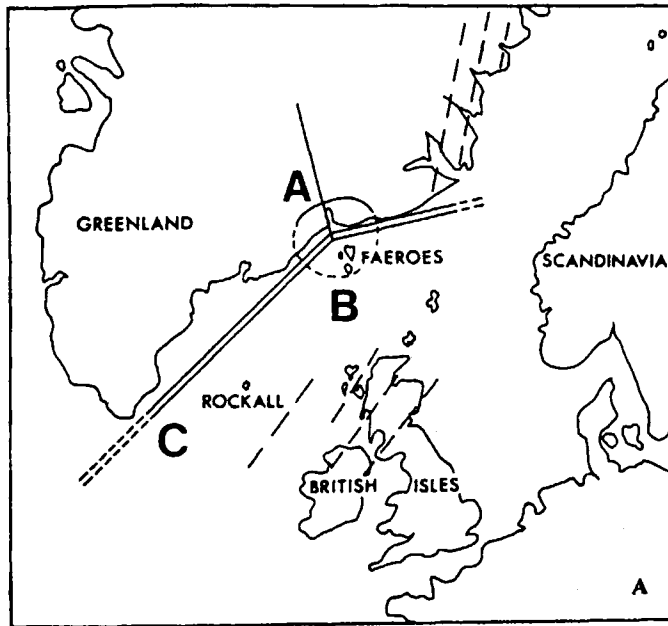
#### b) トランスフォーム断層モデル

トランスフォーム断層モデルは横ズレ運動により、リフトとトランスフォーム断層の形成を説明するモデルである。等方均質媒体では横ズレ運動が始まると、最初、単純なせん断割れ目が生ずる (Fig. II-1-5-10, A-E)。もしこの媒体に既存の割れ目があれば、せん断割れ目は方向が変化する (Fig. II-1-5-10, D-E)。横ズレ運動が進行するにつれ、共役なせん断割れ目 (R, R') は横ズレ方向に対し低角度な割れ目 (R) がより低角度なせん断割れ目、高角度な割れ目 (R') がより高角度な拡張割れ目になる (Fig. II-1-5-10, G)。横ズレ運動が更に進行すると、低角度なせん断割れ目がトランスフォーム断層、高角度な拡張割れ目がリフトに発展する (Fig.II-1-5-11)。

Norman (1978)によると、Keweenawan 貫入岩類の分布もトランスフォーム断層モデルにより説明できる (Fig.II-1-5-12)。Chase and Gilmer (1973)もリフトの中にトランスフォーム断層を想定している。例えば、Gunflint、Thomson の岩脈群、Duluth 複合岩体の形態、MCR の形態もこのモデルに当てはめることができる (Fig.II-1-5-12)。重力異常 (-20 mgal) から推定される MCR はいくつかのセグメントに分かれる。これらは NE-SW 方向と NW-SE 方向のトレンドを示しており、それぞれ、せん断割れ目、トランスフォーム断層モデルを予想させる (Fig.II-1-5-13, A)。

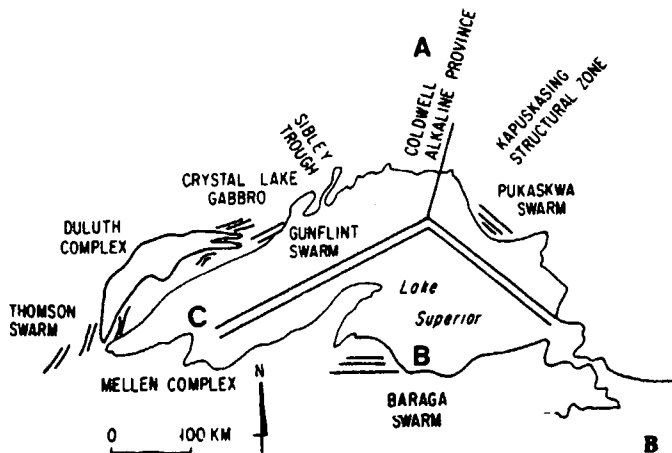


**Fig. II-1-5-8 Formation of aulacogene (b) associated with the rupture of the continent (a)**



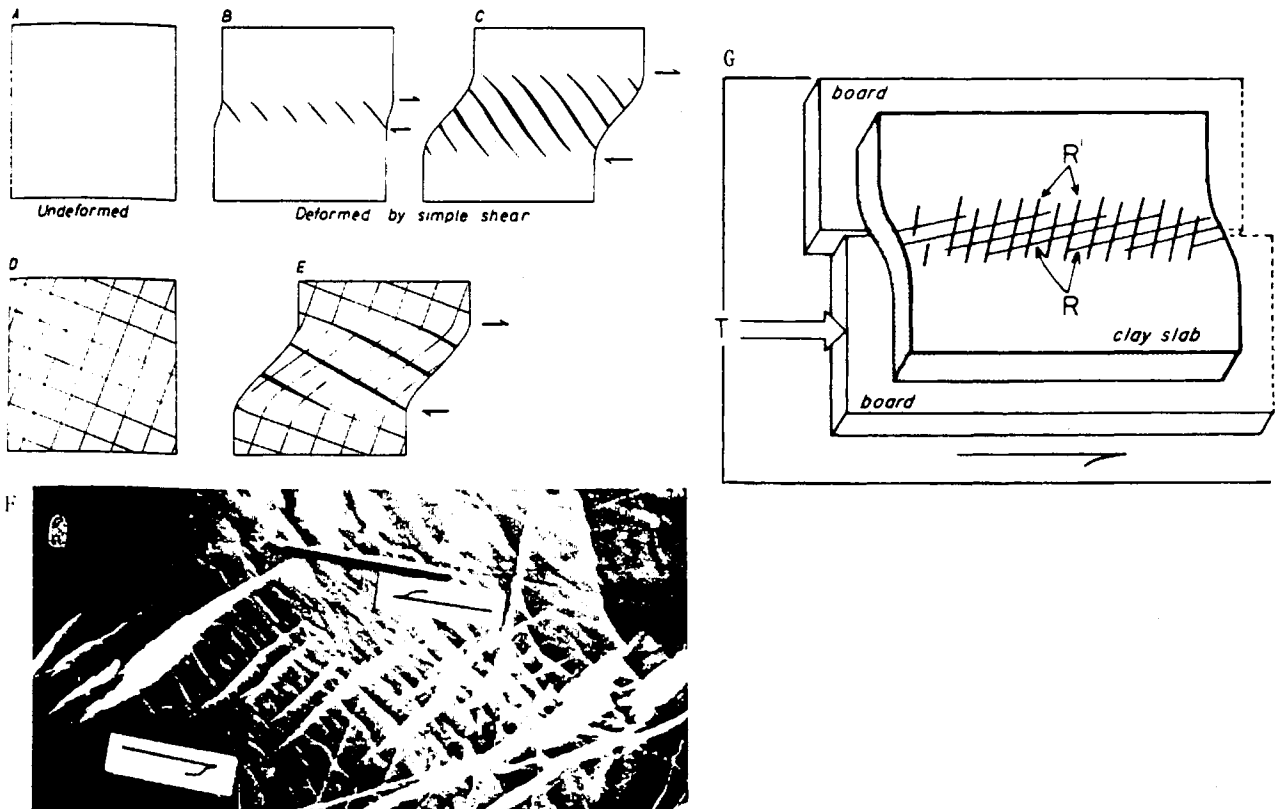
**Fig. II-1-5-9 Possible analogies between the geometry of the igneous rocks associated with the Tertiary opening of the North Atlantic and those in the Midcontinent Rift System**

(A) Failed arm-rift relations in the North Atlantic (modified from Brooks, 1973); (a) Kangerdlugssuaq alkaline intrusion, (b) high-FeTi quartz tholeiite volcanism. (c) high-Al olivine tholeiite volcanism. (B) Analogous relations to (A) in the Lake Superior region of the Midcontinent Rift System; (a) Coldwell Alkaline Province, (b) quartz tholeiite dikes and sills, (c) olivine tholeiite dikes and sills. (P. W. Weiblen, 1982).



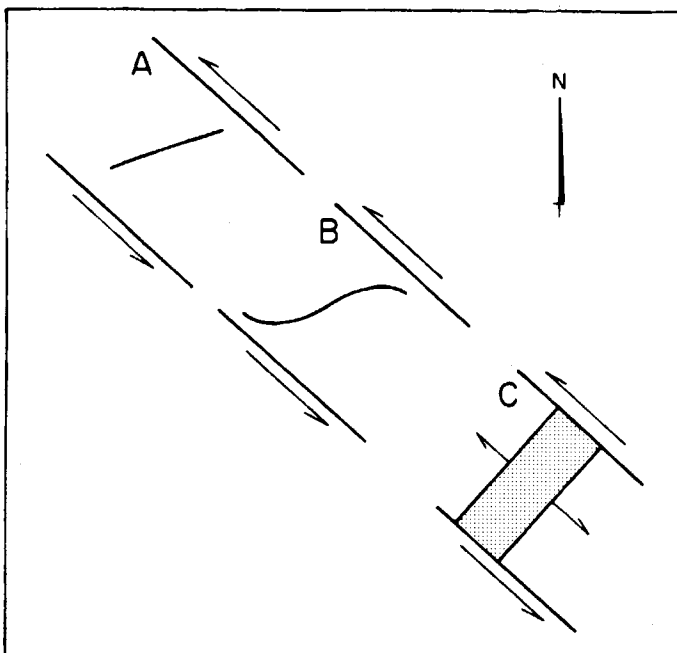


Transform Fault Model



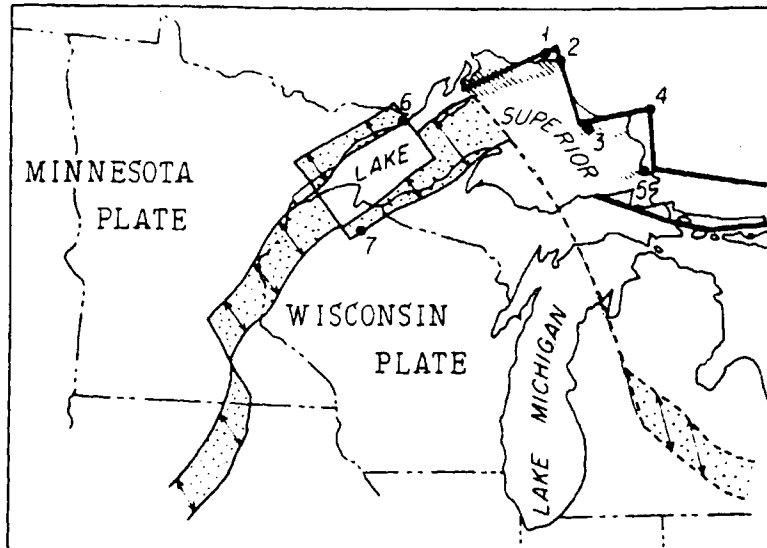
**Fig. II-1-5-10 Shear mechanisms for producing extensional features in rocks**

A-F, simple shear from Ramsay (1967, p. 88-89). A-C illustrate structures that are likely to develop with shear in an isotropic rock. Note the curvature in the tension gashes that develops with progressive shear (B-C). D and E illustrate structures that might form in a previously jointed rock. F illustrates zone of an echelon quartz-filled tension gashes produced in graywacke by simple shear. Note the similarity in the shape of the large gash on the left and the map pattern of the Duluth Complex (Fig. II-1-5-2, 3, 9) G, pattern of fractures in the Riedel shear experiment (Tschalenko, 1970). The primary shears (R) rotate to lower angles to the direction of movement as shearing progresses. The conjugate shears (R') are essentially the tension gashes in simple shear (B). The two shear directions are analogous to those depicted by Cloos (1955) for shear with rotation. (P. W. Weiblen, 1982).



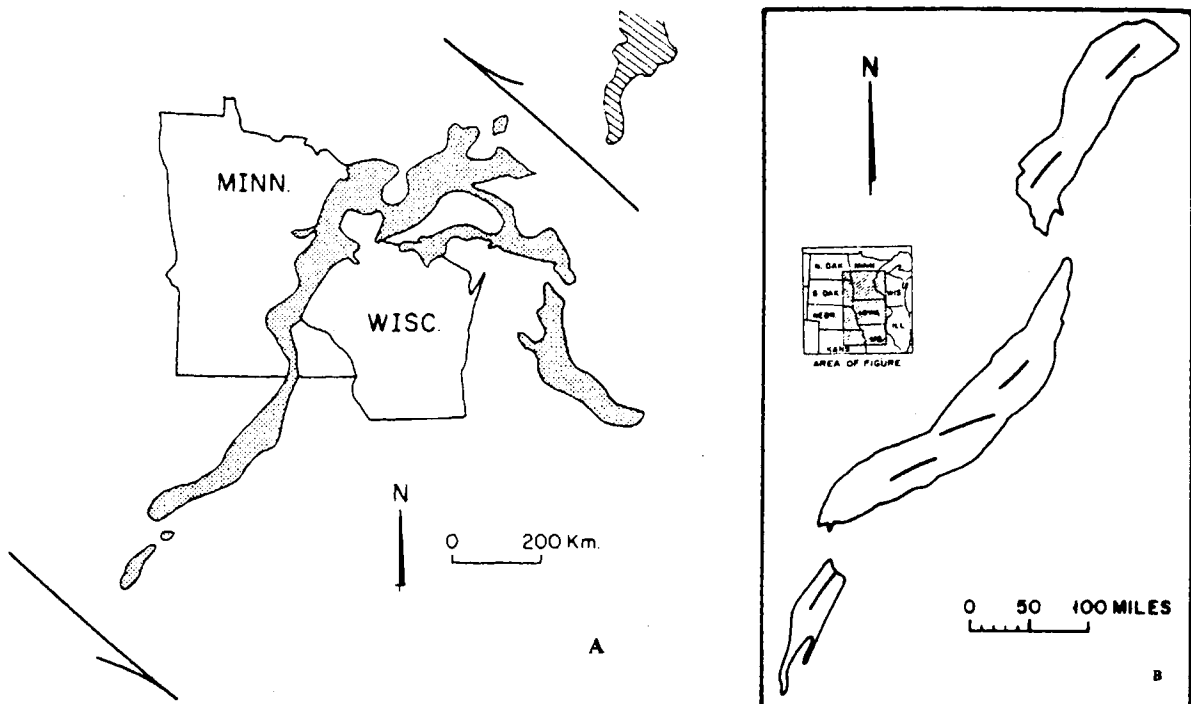
**Fig. II-1-5-11 Hypothetical transition in tectonic regimes proposed for the Midcontinent Rift System**

(A) In an initial stage, left lateral wrench faulting would produce simple shear or conjugate Riedel fractures at high angles to the shear directions (Fig. II-1-5-10). Intersection of these directions with preexisting zones of weakness would localize alkaline magmatism as found in the Kapuskasing Structural Zone and the Coldwell Alkaline Province. (B) Progressive shear would produce an echelon fractures as exemplified by the quartz tholeiite and olivine tholeiite dike and sill swarms (Fig. II-1-5-9). (C) The gravity model of Chase and Gilmer (1973) and the half-graben magma chamber model of Weiblen and Morey (Fig. II-1-5-4) suggest that wrench faulting did progress to actual rifting. (P. W. Weiblen, 1982).



**Fig. II-1-5-12 Rifting models for the Midcontinent Rift System (from Norman, 1978)**

Shaded area outlines Chase and Gilmer's (1973) model. Heavy lines outline rift and transform intersections proposed by Norman (1978) to explain locus of alkaline complexes and sites of extensive felsic magmatism. 1. Prairie Lake Complex; 2. Coldwell Complex; 3. Michipicoten Island; 4. Firesand River Complex; 5. Batchawana area; 6. Hoveland, Minnesota; and 7. Mellen, Wisconsin. Gravity data do not indicate lithospheric separation north of Lake Superior. (P. W. Weiblen, 1982)



**Fig. II-1-5-13 Regional patterns of geophysical anomalies in the Midcontinent Rift System**

(A) Outline (stippled area) of the -20 milligal Bouguer gravity anomaly of the Midcontinent Rift System (from Craddock, 1972). Trends of individual segments range from northeast to northwest. Possibly this range in orientation of segments and their sinuous continuity record a change in fracture patterns with time analogous to the two directions shown for a shear couple depicted in Fig. II-1-5-10. and Fig. II-1-5-11. (B) Outline of aeromagnetic anomalies in the southern part of the Midcontinent Rift System (from King and Zietz, 1971). As suggested for the northern part of the rift in (A), the sinuous pattern might also more closely reflect a change in fracture directions due to shear with time rather than a single rift-transform geometry.

M C R 南部の空中磁気異常も同じ方向のせん断割れ目や拡張割れ目の存在を予測させる (Fig.II-1-5-13, B)。Chase and Gilmer (1973)は拡張割れ目の分離、リフトの幅は 55 km 程度であると推定している。

## 1-5-2 Noril'sk 鉱床

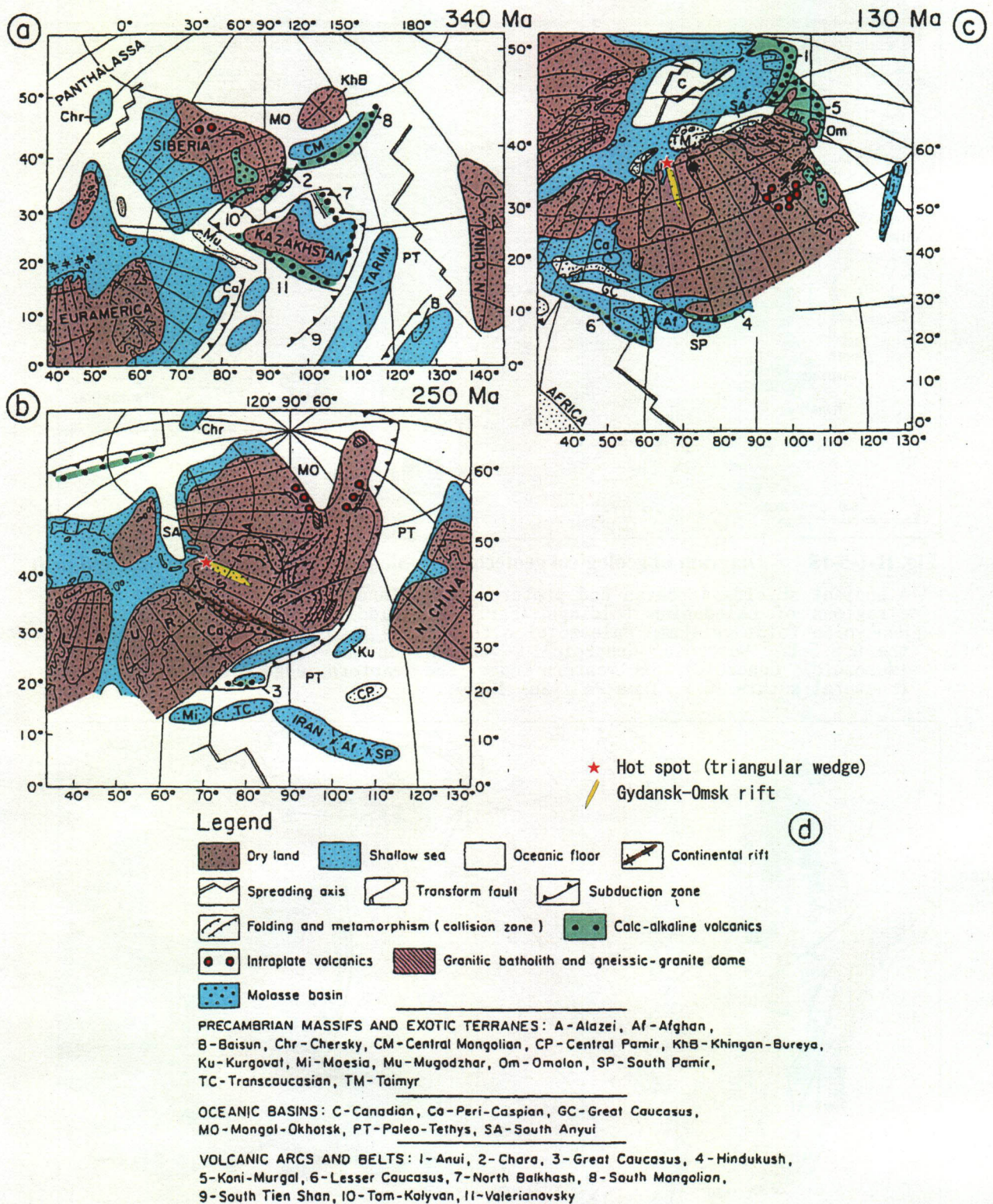
### (1) 北部ユーラシア大陸の古地理

Zonnenshain et al. (1990)は古生代から中生代の北部ユーラシア大陸古地理を再現した (Fig.II-1-5-14)。石炭紀前期 (340 Ma) ~二畳紀後期: ユーロアメリカ、シベリア、カザフスタンの各プレートがウラル海を沈み込み帯として収束していた。各プレートの収束はウラル造山帯の形成とともに完了し、Laurasia プレートを形成した。この収束運動はヘルシニアン造山運動と連動している。二畳紀後期 (250 Ma) ~三畳紀前期: 圧縮応力場から拡張応力場に転換した。二畳紀末には現在の Gydansk 半島に形成されたホットスポットから Laurasia プレートの分裂が始まり、東の Siberian プレートと East European プレートに分裂した。Laurasia プレートの分裂は北から南に伝播し、1,000 km 以上の延長を持つ Gydansk-Omsk リフトとなった。このリフトに沿って、多量のソレライト質玄武岩からなるシベリア洪水玄武岩が噴出した。シベリア洪水玄武岩は  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年代測定によれば、二畳紀末 ( $248.9 \pm 2.8\text{Ma}$ : Campbell et al., 1992) の 60 万年の間に噴出したものとみられている。三畳紀前期~第三紀中期: シベリア洪水玄武岩の火成活動後も拡張応力場は継続し、Siberian プレートと East European プレートは更に東西方向に離れて行き、地殻の薄くなった所に West Siberian 低地が形成された。

### (2) Siberian プレートのテクトニクス

East European プレートと Siberian プレートは二畳紀末のシベリア洪水玄武岩の火成活動を発端に大陸分裂を起こした (Fig.II-1-5-15)。この大陸分裂は Siberian 大陸移動 (Siberian continental drift) と呼ばれている (Tamrazyan, 1962)。両プレートの縫合線 (suture line) は分裂後の構造運動により変形しているが、その形状から分裂前の大陸を再構築することができる (Fig.II-1-5-17)。この大陸地殻は地質構造から、異なる 3 つのブロックに分けることができる。(1) プレカンブリアン系の基盤岩露出ブロックとそれらを覆って古生層が分布する安定台地 (platform)、(2) カレドニアン、ヘルシニアンおよびアルプスの各造山帯。そして、(3) 大陸分裂によって形成された地溝帯 (West Siberian 低地, Turan 低地など)。地溝帯は全体が標高 160 m 以下の広大な低地帯になっている。

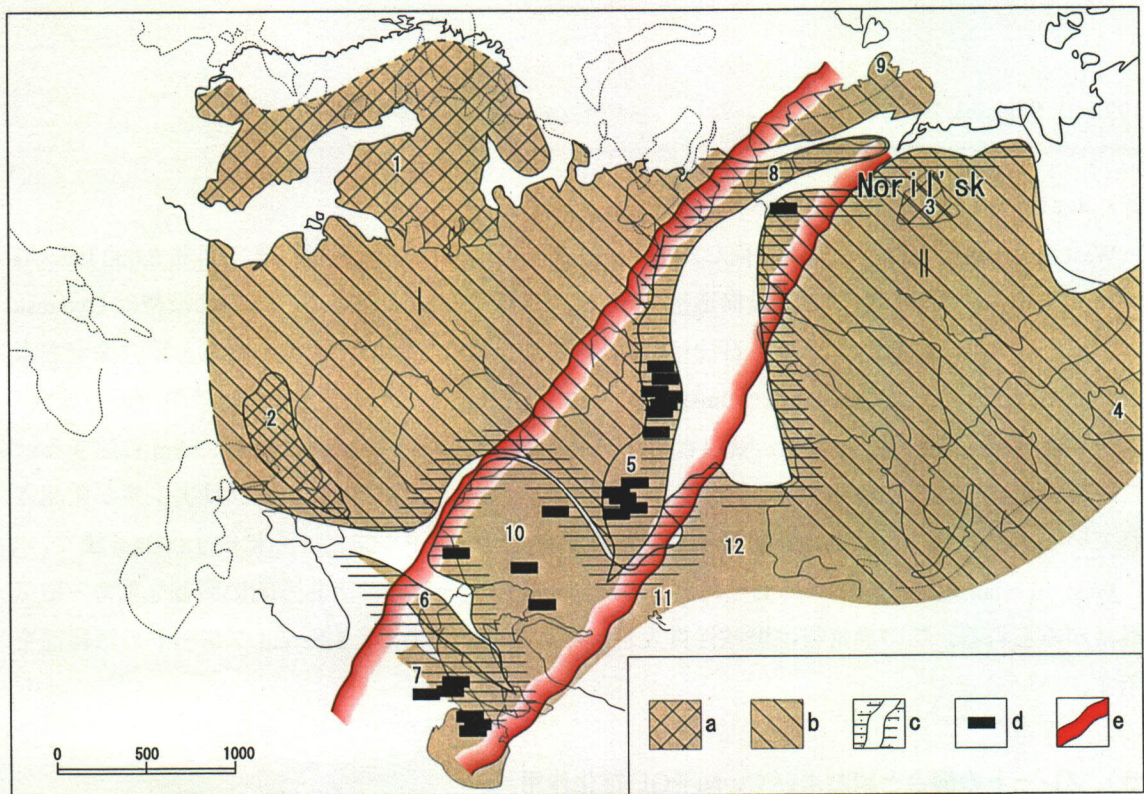
各プレートのモホ面の深度は地震探査などによると、East European プレート、Siberian プレートおよびその南の Kazakhstan 地塊が 40-50 km である。West Siberian 低地は大部分が 30-40 km、その北縁部の Gydansk 半島が 30 km 以下と最も薄い (Fig.II-1-5-16)。Gydansk 半島付け根 ( $N68^\circ$ ,  $E85^\circ$ ) は Gydansk-Omsk リフトと Khatanga 地溝をアームとする三重会合点とみられる。Noril'sk 鉱床はこの三重会合点に上昇してきたブリュームにより形成されたものと推定される。Noril'sk 鉱床はプレートの移動により、現在、三重会合点とは約 300km 離れている (Nalrett et al.,



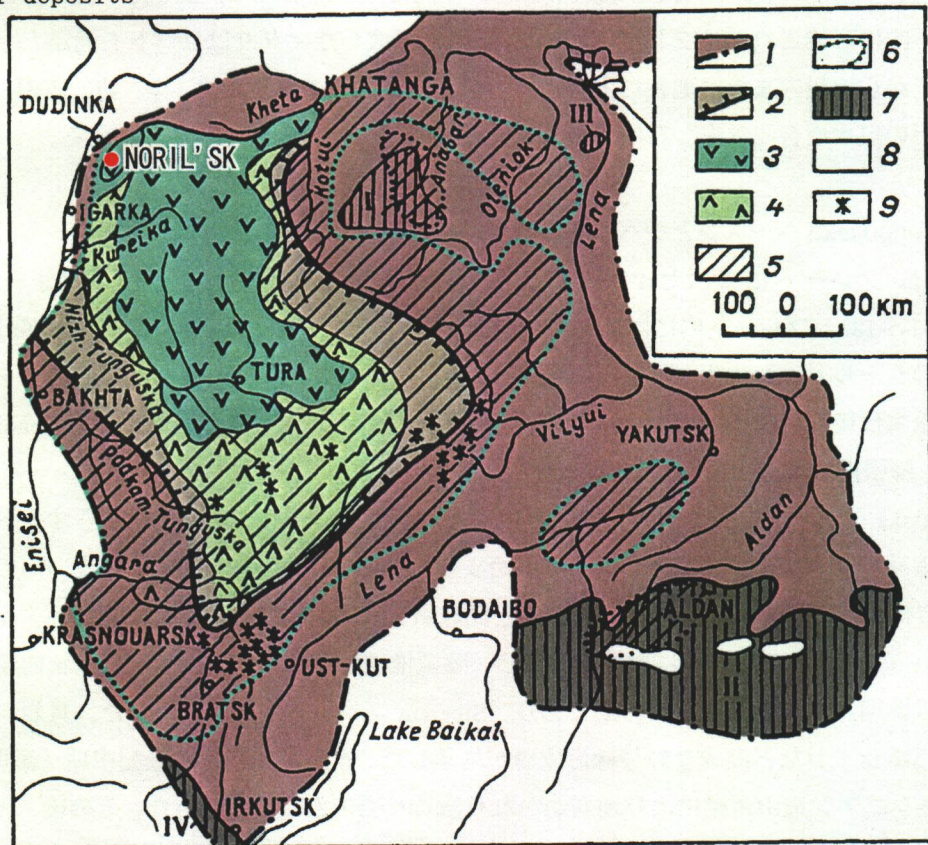
**Fig. II-1-5-14 Reconstruction of the position of the American, European, Siberian, Kazakhstan, north China, and several smaller plates**

(a) the early Carboniferous 340 Ma; (b) the Late Permian, 250 Ma; and (c) the Early Cretaceous. Within the larger plates, lines of latitude and longitude refer to their present-day positions. The position of the plates in each diagram refers to their absolute positions during the period in question (drawn after Zonnenshain et al., 1990).





**Fig. II-1-5-17 Copper deposits and the Siberian fractural structural suture**  
 a=shields (1=the Baltic shield, 2=the Ukrainian shield, 3=the Anabar shield, 4=the Aldan shield); h=platforms (I =East-European, II =Siberian); c=edges of the Siberian fractural suture; d=copper deposits; e=concentration zone of main copper deposits



**Fig. II-1-5-18 Scheme of distribution of traps on the Siberian platform (from data by Lurje and Masaitis, 1964)**  
 1. Siberian platform boundaries; 2. Boundaries of the Tunguska synecise; 3. The area of predominant basalt development; 4. The area of distribution of tuffaceous sequences; 5. The areas of intrusive traps development (sills, dikes); 6. Boundaries of development of intrusive traps; 7. Outcrops of the crystalline basement; 8. Areas of development of the platform cover; 9. Localities of basalt explosion pipes. (v. v. Zolotuklin, 1988).

1992; D. Schissel, 2001)。

#### a) West Siberian 低地

West Siberian 低地は、北極海に面した Gydansk 湾から南の Omsk 市付近まで南北 2,000 km、幅 30~50 km のグラーベン状の陥没構造帯を形成している (Fig.II-1-5-16)。この陥没帯は Gydansk-Omsk リフトと呼ばれており、石油・天然ガス地帯となっている。地震・磁気・重力探査およびボーリングによると、Gydansk-Omsk リフトは West Siberian 低地が大陸移動の中で最も拡張・沈下したゾーンであり、堆積岩、噴出岩がリフトを埋めている。堆積層は最大 25 km に達する。これらを覆って地表には中生界、新生界が分布する。ボーリングでは先カンブリアン系が確認されている。このリフトは狭い断層帯として南の中央カザフスタンまでさらに約 1,000km 続く。

West Siberian 低地東部のエニセイ川西 100-200km のゾーンでは南北方向に顕著な重力・磁気異常がみられる。この異常帯は塩基性貫入岩類によるものであり、Siberian プレートの西縁部を示す。

#### b) プレートの縫合と銅および Cu-Ni-PGE 鉱化作用

East European プレートと Siberian プレートを元の 1 つのプレートに縫合すると、Fig.II-1-5-17 のようになる。大部分の銅鉱床 (Urals, Kazakhstan, Uzbekistan など) は縫合部にプロットされる。ノルリスクの銅・ニッケル・PGE 鉱床もプレート縫合部の最北端に位置する。縫合部はかつて、プレート内に形成されたリフトに相当する。鉱床を形成したマグマはリフトを通路としてアセノスフェアから地殻内または地表に上昇したものと推定される。その他、金、鉛、亜鉛、タングステンなどの熱水性金属鉱床、石油および石炭鉱床もこのリフトに沿って分布する。

### (3) Tunguska ベーズンとシベリア洪水玄武岩

Siberian プレートはエニセイ川とレナ川の間位置する大陸性プラットフォームである (Fig.II-1-5-18)。プレート内には北部に Anabar シールド、南部に Aldan シールドが分布する。これらのシールドは始生代、原生代の片麻岩、結晶片岩、コーツアイトおよびこれらをほぼ水平に覆う原生代後期以降の火成岩 (K-Ar 年代: 865-1,195 Ma) からなる。原生代の Vendian 期 (約 600Ma、膨張期) は造山運動により浸食が進んだ。

Tunguska クラトン内部ベーズンの地史は次とおりである。カンブリア紀からオルドビス紀前期 (収縮期) は Siberian プレートの沈降が始まり、Siberian プレートは一部、浅い海の中にあった。礫岩、石英砂岩およびエバポライトなど湖成層、海成層が堆積した。オルドビス紀後期 (膨張期) から Siberian プレートは次第に隆起し、陸源堆積物が多くなった。シルル紀前期~石炭紀前期 (収縮期) は海進が進んだ時期であり、Siberian プレートは再び沈降した。頁岩、石灰岩およびエバポライトなど湖成ないし縁海成層が堆積した。石炭紀中期-二畳紀中期 (膨張期) は最初、ヘルシニアン造山運動により地層がかなり激しく変形と浸食を蒙った。その後、石炭紀後期から二畳紀には陸成の砂岩、シルト岩および礫岩からなる Tunguska 層が堆積した。石炭や天然ガスは Tunguska 層中に胚胎する。

二疊紀末 (248.9±2.8M、膨張期)、Tunguska ベーズン内に多量のソレイト質・アルカリ質玄武岩からなるシベリア洪水玄武岩が  $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$  という広大な範囲に噴出した。溶岩は北の方が厚く、南に向かって薄くなる。それらの層厚は最大 3,000 m に達する。Tunguska ベーズン北部の洪水玄武岩はソレイト質玄武岩、ソレイト質ピクライト、アルカリ質玄武岩など変化に富む組成を示すが、その他の地域の洪水玄武岩は均質なソレイト質玄武岩からなる。

Tunguska ベーズン内およびその周辺には大量の岩脈状、シル状、パイプ状のソレイト質・アルカリ質火成岩が貫入している。Noril'sk Cu-Ni-PGE 鉱床はこのマグマ活動の一部である超塩基性-塩基性貫入岩に伴って形成された。Noril'sk 鉱床は主にデボン紀の硫酸塩が豊富なエバポライト、泥岩および石灰岩からなる堆積層中に胚胎する。硫化鉱物の硫黄同位体の分析値などから、エバポライトが Noril'sk 鉱床の生成に重要な役割を果たしたと考えられている。

#### (4) Noril'sk 鉱床周辺の地質構造

Noril'sk 鉱床は Siberian プレート内の Tunguska ベーズンの北西端にあり、西側は West Siberian 低地、北側はジュラ系～白亜系堆積物からなる Khatanga 地溝によって区切られる (Fig.II-1-5-19)。

Noril'sk 鉱床周辺では、ベーズン、背斜 (隆起) および断層などの地質構造がみられる。ベーズンは北から南に Kharayelakh ベーズン、Vologochan ベーズンおよび Noril'sk ベーズンがある。断層は NNE-SSW 方向の Noril'sk-Kharayelakh 断層、Imanga 断層および Keta-Irba 断層、ENE-WSW 方向の Mikchand 断層および North Kharayelakh 断層、NNW-SSE 方向の Kumga 断層がある。背斜は NNE-SSW 方向の Khantayka-Rybnaya 背斜、N-S 方向の Dudinka 背斜、NNW-SSE 方向の Kayerkan-Pyasino 背斜がある。

Noril'sk 鉱床は South Noril'sk 鉱床、Noril'sk 鉱床、Talnakh 鉱床および Talmi 鉱床などひとつの鉱床群である。これらの鉱床はいずれも、NNE-SSW 方向の Noril'sk-Kharayelakh 断層沿いに存在する。その他、NNE-SSW 方向の Imanga 断層沿いに Imanga 鉱床がある。反射法地震探査のデータによると、Noril'sk-Kharayelakh 断層の東側から西側に向かってモホ面の深度は 45 km から 50 km と深くなる。South Noril'sk 鉱床は N-S 方向の Dubinsky 背斜構造、Noril'sk 鉱床および Talnakh 鉱床は NNW-SSE 方向の Kayerkansky-Pyasinsky の背斜構造により鉱床が隆起している。NNW-SSE 方向および N-S 方向の断層は鉱床生成後も動いていたものと予想される。

Noril'sk 鉱床と Talnakh 鉱床は、鉱床形成に最も重要な役割を果たした Nadezhinsky 玄武岩溶岩層の最も厚い部分に位置している。すなわち、両鉱床は溶岩流の噴出中心部 (フィーダー) に形成されたものと予想される (Fig.II-1-5-20)。Talnakh 鉱床の富鉱部と Noril'sk-Kharayelakh 断層との関係を見ると、Noril'sk-Kharayelakh 断層は鉱体の形から、右横ズレのせん断性の断層であることが予想される (Fig.II-1-5-21)。断層東側は断層沿いに細長い鉱化帯が形成されているが、断層西側の鉱化帯は北西に伸びる三角形のような形態を示す。これは断層の右横ズレ運動に伴って形成された引張裂罅帯とも考えられる。



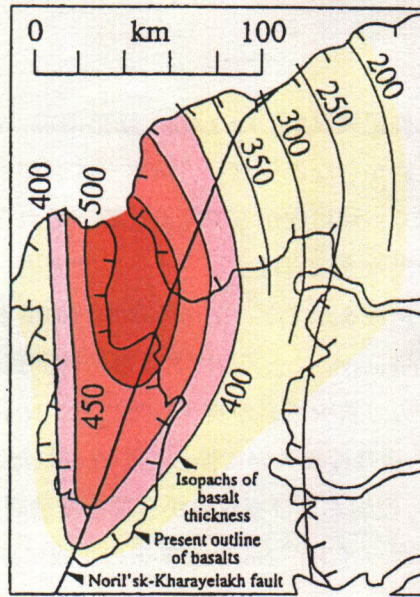
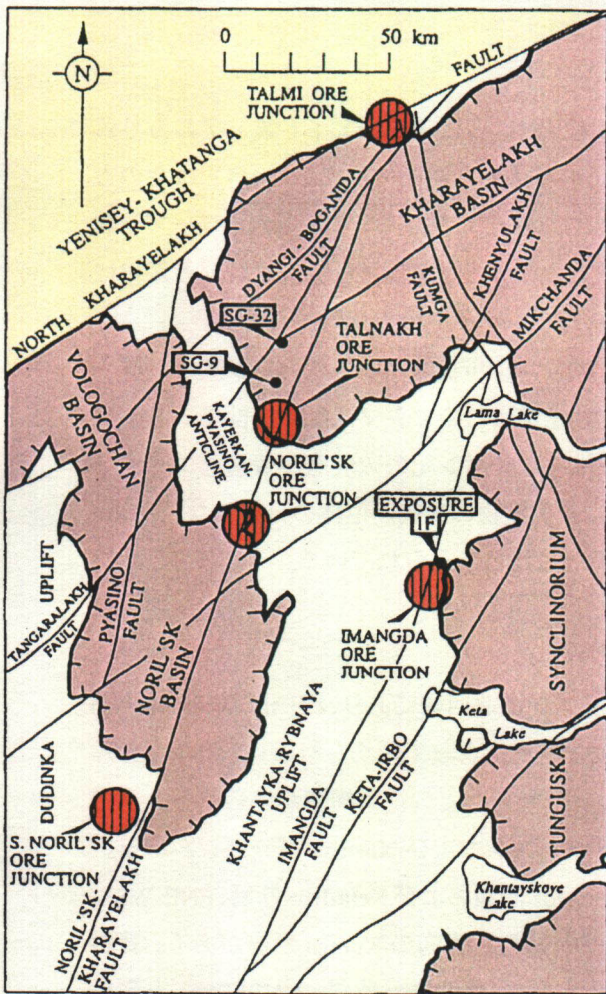


Fig. II-1-5-20 Thickness of the Nadezhinsky formation (lower+middle+upper) suite which illustrates the basin into which lavas were accumulating at the time of eruption (after Naldrett et al, 1992)

Fig. II-1-5-19 Map of the Noril'sk region showing the outcrop of the lavas (areas surrounded by lines with attached hatching), main tectonic elements and principal ore junctions (from Naldrett et al, 1992) Map compiled on the basis of data collected by NKGRE and TsNIGRI.

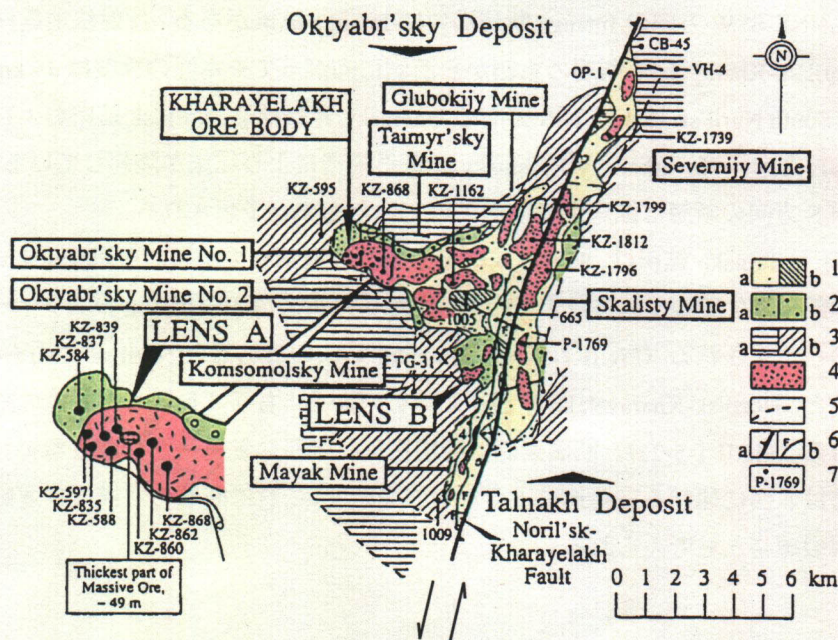


Fig. II-1-5-21 Plan showing the outline of the Northwest Talnakh intrusions, showing the distribution of lenses of massive sulfide  
 1=outline of ore-bearing intrusions. 2=the intrusions that are thought to represent the intruding mass of magma. 3=Differentiated apophyses(sills) of the ore-bearing intrusions. 4=massive sulfides underlying the intrusions. 5=erosional boundaries of intrusions:6=faults, (a) the Noril'sk Kharayelakh faults; 7=drill holes. (after Naldrett et al., 1996)

### 1-5-3 鉱床胚胎の場とテクトニクス

大陸性リフトの形成と大陸分裂を考える場合、三重会合点モデルとトランスフォーム断層モデルという2つのモデルが提案されている(第1-5-1節(3))。ここでは、トランスフォーム断層モデルに注目して、Duluth 鉱床、Noril'sk 鉱床の例をみながら、大陸性リフトの広域的な応力場および鉱床胚胎の場について考察する。最後に、第1-5章で述べてきた調査結果をもとに、パラナベズンにおける広域的な応力場、マグマ活動およびCu-Ni-PGE 鉱床胚胎の場について考察する。

#### (1) Duluth 鉱床

P. W. Weiblen (1982)は共役なせん断裂罅が横ズレ運動の進行により、ひとつがりフト、他方がトランスフォーム断層に発展することを示した(Fig.II-1-5-10, Fig.II-1-5-11)。せん断裂罅が横ズレ運動により、その内部に斜行する雁行状の2次せん断面を多数形成すること、横ズレ運動が進行すると、2次せん断帯は互いに繋がり、Cymoid loop と呼ばれるひとつの大きな引張裂罅帯を形成することは良く知られている(Byerlee et al., 1978, Fig.II-1-5-22)。鉱脈型鉱床の富鉱部もこのCymoid loop にできた鉱化帯である場合が多い。

Duluth 鉱床の場合、重力異常および空中磁気異常から、Midcontinent rift の形状とトランスフォーム断層の位置を把握できる(Fig.II-1-5-23)。鉱床を胚胎するDuluth 複合岩体は2つのトランスフォーム断層の横ズレ運動により形成された引張裂罅帯(開口割れ目帯)に貫入した岩体と解釈される。中間圧縮主応力軸( $\sigma_2$ )を垂直方向とすると、最大圧縮主応力軸( $\sigma_1$ )はNE-SW方向、最小圧縮主応力軸( $\sigma_3$ )の方向はNW-SE方向になり、引張裂罅面と $\sigma_3$ 軸面は直交する。

#### (2) Noril'sk 鉱床

Noril'sk、Talnakhなどの鉱床はNNE-SSW方向のNoril'sk-Kharayelakh断層沿いに存在する。この断層は右横ズレ(Fig.II-1-5-24)のせん断性の断層とみられる。更に両鉱床はNNW-SSE方向のKayerkansky-Pyasinsky背斜の位置にある。NNW-SSE方向は、Gydansk-Omskリフトの方向と一致することから、最大圧縮主応力軸( $\sigma_1$ )の方向を示すと推定される。最小圧縮主応力軸( $\sigma_3$ )は $\sigma_1$ の方向からKayerkansky-Pyasinsky背斜に直角なENE-WSW方向と推定される。断層西側のTalnakh 鉱化帯は北西に伸びる三角形を示すが、この応力場を仮定すると、この鉱化帯は一種の引張裂罅帯であったと言える。

Noril'sk、Talnakhの両鉱床はNNE-SSWとNNW-SSEの両構造方向の交差部にあると同時にNadezhinsky玄武岩溶岩層の最も厚い部分(volcano-center)に位置する。

以上のとおり、Noril'sk 鉱床がGydansk-OmskリフトおよびSiberian、East European両プレートの分裂をもたらした一連の広域応力場の中で形成されたものと推定される。更に、Fig.II-1-5-17(分裂前のプレートと既知銅鉱床群)をみると、既知銅鉱床群とNoril'sk 鉱床は鉱床形成に最も重要なNNE-SSWの構造帯内に形成されている。これは広域的な鉱床帯を考える場合、プレートの復元が重要な課題のひとつであることを暗示しており、興味深い現象である。

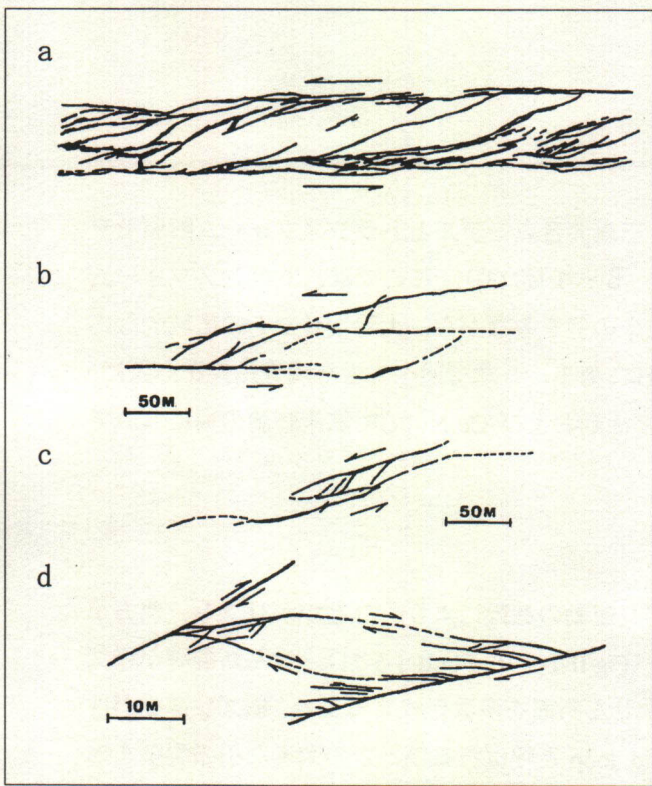


Fig. II-1-5-22 Interior structure of crush zone of the shear fracture formed by rock failure test (a) and those of vein (b~d) (K. Otsuki et al., 1991)

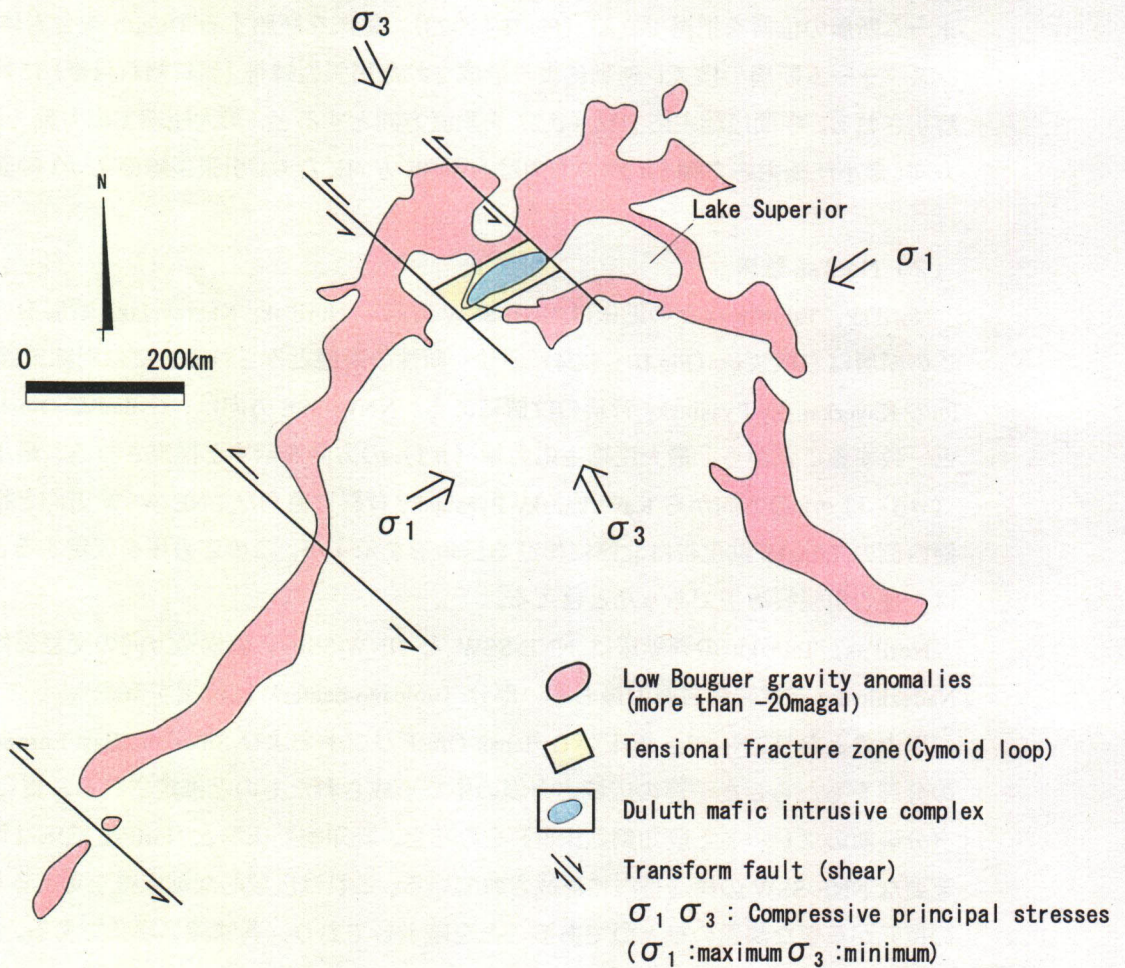
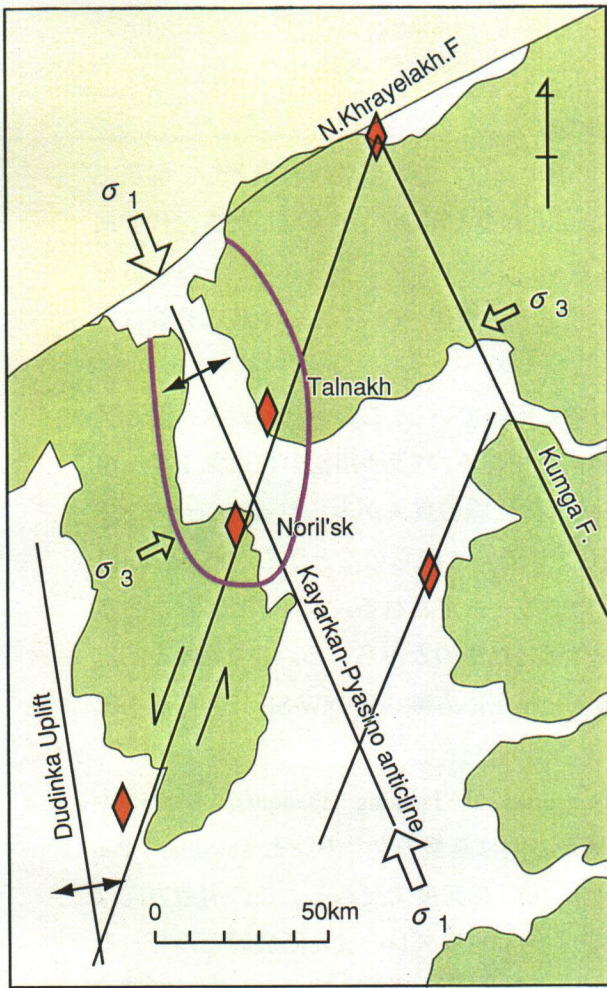


Fig. II-1-5-23 Formation model of Duluth mineralized intrusive complex



**Fig. II-1-5-24 Formation model of Noril'sk ore deposit**

- Sedimentary rocks of the Jurassic to the Cretaceous
- Siberian flood basalt
- Sedimentary rocks of the Paleozoic
- Faults and lateral movement
- Uplifts
- Tensional Fracture Zone(ore deposits)
- $\sigma_1, \sigma_3$  Compressive Principal Stresses ( $\sigma_1$ :maximum,  $\sigma_3$ :minimum)
- Volcanic center of Nadezhinsky lava unit more than 500meters in thickness.

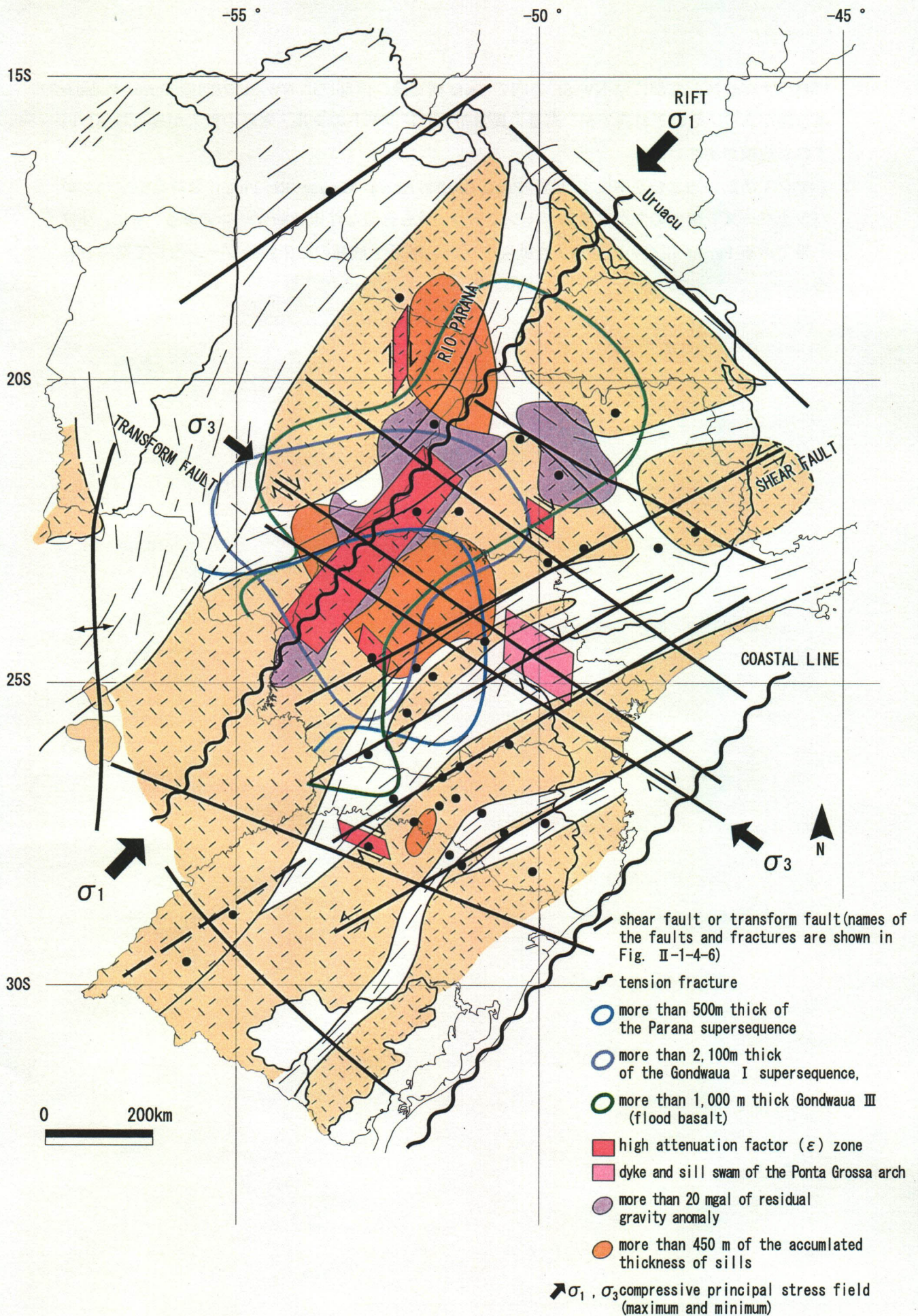
### (3) パラナベーズンにおける広域応力場と鉱床胚胎の場

パラナベーズンの断層、裂罅群をみると、リフト帯におけるひとつの広域応力場として解釈できる (Fig. II-1-5-25)。パラナベーズンの基盤構造は Gondwana 大陸の結合が終結した古生代前期にはほぼ出来上がっていたものと推定される。この基盤構造の中で、マントルプリュームが古生代から中生代にかけて胎動し、ベーズンの堆積、洪水玄武岩の噴出、Gondwana 大陸の分裂など一連の地質現象が起こした。

パラナベーズン中北部の Paraná 川はほぼ NE-SW 方向に流れている。この方向は南米大陸とアフリカ大陸の破断面であるベーズン東部の海岸線の方向でもある。パラナ川沿いには第 1 期～第 3 期の高  $\epsilon$  帯、高重力異常帯および厚いドレライトのシル・岩脈の貫入がみられる。ベーズンの堆積岩、洪水玄武岩も Paraná 川沿いに最も厚く堆積している。これらのことから、Paraná 川はマントルに繋がる大きな引張裂罅、すなわち、リフトであると推定される。オルドビス紀から白亜紀まで、プリュームはこのリフトを中心に胎動し続けていたものとみられる。応力場の方向は NE-SW 方向のリフトを想定すれば、NE-SW 方向が最大圧縮主応力軸  $\sigma_1$ 、NW-SE 方向が最小圧縮主応力軸  $\sigma_3$  となる。

パラナベーズンでは ENE-WSW の構造方向 (Transbrasiano, Jacuting, Taxaquara, Lancinha-Cubatao, Blumenau-Soledade) も卓越している。この構造方向は基盤のクラトンと Brazilian- Pan African 変動帯を境しており、最大圧縮主応力軸  $\sigma_1$  と約  $30^\circ$  の角度で交わる。この構造方向は基盤岩中の 2 次せん断裂罅の方向から、 $\sigma_1$  の方向と調和的な左横ズレのせん断裂罅とみられる (Rio Grande do Sul 地質図)。このせん断裂罅はドレライトのシル・岩脈を伴わないが、基盤の地質構造区を規制する重要な構造方向である。

更に、パラナベーズンでは NW-SE 方向の構造方向 (Alto Parnaiba, Tiete, Guapiara, Ponta Grossa, Abreu- Mourao, Rio Piquiri, Cacador, Torres Posadas, Rio Grande) がみられる。この構造方向はリフトの構造方向に直角であり、トランスフォーム断層と推定される。Paraná 川沿いおよび Ponta Grossa では多量のドレライトのシル・岩脈を伴う。Duluth 鉱床でみられるとおり、トランスフォーム断層は鉱床胚胎の場をもたらす最も重要な構造方向である。基盤岩中の岩脈が示す 2 次せん断裂罅の方向から、右横ズレのせん断裂罅が推定される (A. J. Melfi et al., 1988)。右横ズレせん断裂罅は時計回りの Gondwana 大陸の分裂と調和的である。NW-SE 方向のせん断裂罅の中で、特に注目されるのは Ponta Grossa, Abreu- Mourao, Rio Piquiri など裂罅が集中するゾーンである。このゾーンでは右横ズレ運動により、Duluthy 鉱床と同じように引張裂罅ゾーン (Cymoid loop) が形成され、多量のシル・岩脈ゾーンが貫入したものと推定される。Paraná 州西部の引張裂罅ゾーンは、Duluth 鉱床のように NE-SW 方向のリフト帯中に形成されている。Ponta Grossa の引張裂罅ゾーンは、ENE-WSW 方向のせん断裂罅との交点に形成されている。これらのように、トランスフォーム断層と他の構造との交点が大きな引張裂罅ゾーン (Cymoid loop) の形成に重要な役割を果たしたものと推定される。また M. S. M. Mantovani et al. (2001) は Ar- Ar 年代測定結果から、プリュームの上昇点である洪水玄武岩の噴出口は Paraná 川から次第に東に移動し、大陸の分裂に至ったと述べている。洪水玄武岩の噴出口は NW-SE 方向のトランスフォーム断層上を西から東に移動したことも考えられる。



**Fig. II-1-5-25 Comprehensive analysis map among the basement structure, basin sediment, gravity anomaly and regional stress field in the Parana basin**

パラナベーズン北部には NW-SE 方向の Tiete 構造線、南部には NW-SE 方向の Torres Posadas 構造線があり、それぞれ高  $\epsilon$  帯、高重力異常帯、ドレライトのシル・岩脈の貫入がみられる。いずれも規模が小さい。

マグマ活動の強さを基準にすれば、Ponta Grossa, Abreu- Mourao, Rio Piquiri 裂罅集中ゾーンがパラナベーズン最大のマグマ活動ゾーンであり、最も有望な鉱床胚胎ゾーンである。特に、リフト帯である Paraná 川沿いのシル・岩脈集中ゾーンが第 1 候補の鉱床胚胎ゾーンとして期待される。