

陥没構造形成のメカニズムと熱水活動

小出 仁 ・ 北 卓治 ・ 古宇田 亮一

(地質調査所) (大手開発) (地質調査所)

陥没構造は様々な機構で形成されるが、火山性陥没構造は、しばしば地熱や熱水性鉱床のような有用資源を伴う。したがって、その形態や深部構造や分布を知ることは、経済的にも大変重要である。狭義には、マグマが地表に噴出しているものが、火山性構造であり、マグマが地表に達しなかったものは潜火山性構造であるが、ここでは両者を含めて広義の火山性構造として扱うことにする。通常の地下のマグマは母岩より比重が軽いため上昇しようとする性質を持っている。比重差によって、地下深部から浅部へ可塑性の大きな軽い物体が上昇してくることによって形成される構造をダイアビルという。狭義のダイアビルは、上昇してくる可塑性の物質、すなわち注入核が固体の場合をいうが、マグマのような流体の場合も、形成される構造の基本形態は似ているので、広くダイアビルとして扱われることが多い。すなわち、ダイアビルを形成する原動力は重力であり、基本的に上下方向のベクトルを持った力である。マグマ・ダイアビルの場合は、エネルギーの根源は、地球内部の熱になるが、直接の原動力はやはり重力である。ダイアビルの有効高さと、母岩との比重差が大きいほど、ダイアビル核頂部の内圧は大きくなる。ダイアビル核頂部の内圧の増減が周囲のダイアビル構造を形成する。

地殻内の応力状態は、決して等方的でないことが、応力測定等で確かめられている(小出、1976等)。特に、日本は応力や地質構造の異方性や不均質性が大きい。ダイアビル注入核は流体ないし流動性の高い固体なので、たとえ注入核の内圧が主な動力源であっても、応力や地質の異方性に大きな影響を受ける。

地殻内の応力状態が水平方向には等方的であるなら、ダイアビルによって放射状および環状の割れ目が生じ、ドーム状に地表付近は隆起する(図1)。ダイアビル核の形や応力状態によっては、ドーム状隆起の中心部が、キーストーン効果により逆に陥没し、典型的な円形のカルデラを作る。すなわち、鉛直軸を中心とした軸対称構造になる。ところが、実際のダイアビル構造が完全な軸対称になることはまれである。大陸では、かなりきれいな放射状岩脈や環状岩脈が見られることがあるが、それでもよくみると異方性がある。インパクト・クレーターでは、非常にきれいな環状構造が見

られることがあるが、異常に高い衝撃圧のためにきれいな軸対称割れ目が形成されたと考えられる。三次元のモデル解析を行なうと、水平方向の応力偏差に比較して、ダイアビル注入核の圧力がはるかに大きくない限り、きれいな軸対称構造は形成されない。断面が円形の岩株状ダイアビル核の上方に形成される割れ目の平面分布は、地殻の水平応力が完全に等方的ならば、図2のように軸対称になると予測される。しかし、水平応力に多少の異方性があると、例えば図3のような割れ目が形成される。この割れ目はよく見るとわずかに弧状になっているが、実際にこのような岩脈を観察すれば、平行岩脈群と考えるであろう。むしろ、大まかに見れば、軸対称に近いダイアビルが観察される方が不思議であるともいえる。

図3のような割れ目に挟まれた地域、すなわち潜在する貫入岩体の直上部が陥没すると、円形のカルデラとはならず、長円形ないし多角形の火山性陥没になる。また、既存の断層や成層構造の影響があると特に多角形になりやすい。実際に、日本のたいの火山性陥没は、完全な円形ではなく、むしろ長円形か多角形である。(藤田, 1973) また、応力や地質構造の異方性がある場合は、割れ目の発達に軸対称にはならないので、岩脈や熱水性鉱脈も部分的になり、むしろ面対称型に発達する傾向がある(北, 1983)。

青森県南西部の尾太鉱床と秋田県北西部の太良鉱床の間に、火山性陥没構造が見出され、青秋カルデラと呼ばれている(通商産業省資源エネルギー庁, 1982、北, 1984)。青秋カルデラは、東半分はかなり明瞭で、ランドサット画像でも明らかであるが、西半分は明らかでない(図4)。カルデラの北北西縁にある尾太鉱床と南東縁の太良鉱床は、金属鉱業事業団の西津軽広域調査地域内で、それぞれ第一および第二の鉱脈型鉱床である。また、第三の鉱脈型鉱床である舟打鉱床は、尾太鉱床の北東方のやや離れた位置にある。鉱脈や岩脈および断層は様々な方向のものがあるが、北東-南西方向の割れ目が特に優勢であることを示している。したがって、北東-南西方向の圧縮応力が水平方向では最大であるような地殻応力状態でダイアビル構造が形成されたと考えられる。

重力測定によれば、青秋カルデラの中心部は、高重力異常があり、貫入岩体の存在を示している(図5)。このような構造は熱水性鉱床の形成に理想的環境になる。

大きな断層のずれによって隆起・陥没構造が形成されることもある。これらの隆起域と陥没域は、断層の規模に応じてごく小さなものから、かなり大規模な構造まで存

在する。横ずれ断層は、通常は直線（平面）的でなく、エシュロン状の不連続や屈曲がある。エシュロン状の屈曲部に、隆起・陥没域が形成される。

エシュロン状の食い違いの向きと断層のずれとの関係によって、屈曲部で両側の岩盤が引き離される場合と、押し合う場合がある。横ずれ断層では、屈曲部が伸張することにより、地表部が陥没し、いわゆるブルアパート・ベーズンが形成される（図6）。深部の応力場は伸張型になっているため、マグマが貫入しやすい状態になっている。また、マグマの貫入は、逆に伸張型のエシュロン状屈曲の発達を促進する効果もある（Koide, 1978）。したがって、ブルアパート・ベーズンは、火山性あるいは潜火山性陥没であるケースが多い。また、ブルアパート・ベーズンは四辺形に近い形態になることが多い（図7）。

横ずれ断層の変位によって、逆にエシュロン状屈曲部が圧縮される場合は、ドーム、または背斜あるいは逆断層が生じ、地表は隆起する（図8）。このような隆起部は石油をトラップしていることがある（図9）。このようなタイプの油田地域ではエシュロン状断層の分布が、油田探査の手がかりになる。また、隆起部の外側に、沈降域が生じることがある。

上記のようにエシュロン状の横ずれ断層と関連して、隆起や陥没が帯状の地域内に繰り返し分布し、全体として横ずれの構造帯を形成する。前記の西津軽地域では、青秋カルデラを含め、陥没や隆起域が断層と関係して帯状に分布し、横ずれ構造帯を形成している（図10）。中部高地から九州に至る西日本中軸部も、中央構造線を主断層とした大規模な横ずれ構造帯と考えられる。

グイアビル形成のメカニズムは、媒体が均質であって、応力状態が等方等質である限りは、かなり説明が進んだといえる。しかし、実際には、地殻の応力状態は不均質であり、また等方的ではない。ここに述べたように、断層等と密接に関連している場合が多い。熱水性鉱床や地熱資源は、マグマそのものよりも、マグマから放出される初生水やマグマによって加熱された地下水により形成される。熱水も、マグマと同様に比重が低いために、上昇しようとするがマグマより粘性はるかに小さいために、既存の割れ目や応力場の影響をはるかに受けやすい。Nishiwaki and Uyeda (1980)、西脇 (1981) は、水平方向の圧縮応力が大きい場合は、グイアビル上方の割れ目が形成され難く、熱水が注入核付近にトラップされるため、斑岩型鉱床等が形成されるが、水平方向の圧縮応力が小さい場合は割れ目が生じやすく、熱水は地表に

噴出して、黒鉱等の噴気堆積性鉱床ができることを指摘した(図11)。

広い意味での火山性あるいは潜火山性構造は、規模や形態が様々であり、関連する資源の存在状況も様々である(表1)。しかし、必ずしも大規模な構造に大規模な鉱床が伴うわけではない。伸張応力場の方が大規模なダイアビル構造を形成しやすい。この場合は噴気堆積性鉱床は期待できるが、斑岩型や高品位の鉱脈鉱床はむしろ小規模な潜頭性のダイアビルの方が有望であると考えられる(表1)。しかし、地殻の応力とダイアビルや熱水割れ目の関係は、さらに詳細な研究が必要である。

参考文献

- Crowell, J.C. (1974) Origin of late Cenozoic basins in southern California, in (Dickinson, W.R. ed.) Tectonics and Sedimentation, Spec. publ. Soc. econ. Paleont. Miner, Tulsa, 22, 190-204.
- 藤田至則 (1973) 日本列島の成立, グリントフ造山, 築地書館, 257 p.
- Harding, I.P. (1974) Petroleum traps associated with wrench faults. Bull. A.A.P.G., 58, 1290-1304.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (1982) 昭和56年度広域調査報告書, 西津軽地域, 167 p.
- 北 卓治 (1983) 海洋陸化時における金銀鉱床の生成, 月刊地球, 47号, 268-274.
- 北 卓治 (1985) スライドで見るグリーンタフ, 国土開発技術研究センター, 111 p.
- 小出 仁 (1976) 地下の応力をはかる, 地質ニュース, 257, 14-22.
- Koide, H. (1979) Mechanical role of fluid intrusion in the development and stability of deep-seated fractures and fault system, Proc. 2nd intern. Conf. New Basement Tectonics, 306-317.
- 西脇親雄 (1981) 西南太平洋の斑岩銅鉱床のテクトニクス規則, 鉱山地質, 31, 131-146.
- Nishiwaki, C. and Uyeda, S. (1980) Tectonic control of porphyry copper genesis - stress regime at the time of ore emplacement - Fourth Joint Meeting, MMIJ-AIME 1980, Tokyo, 17-25.

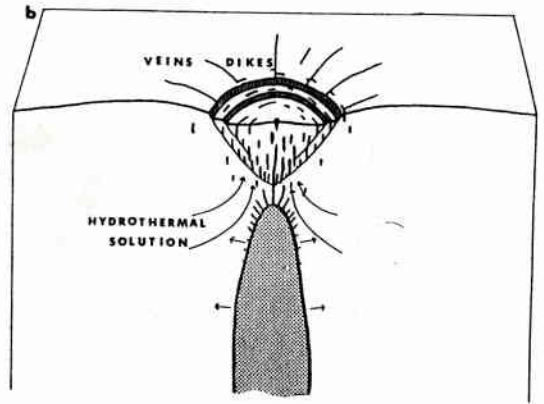
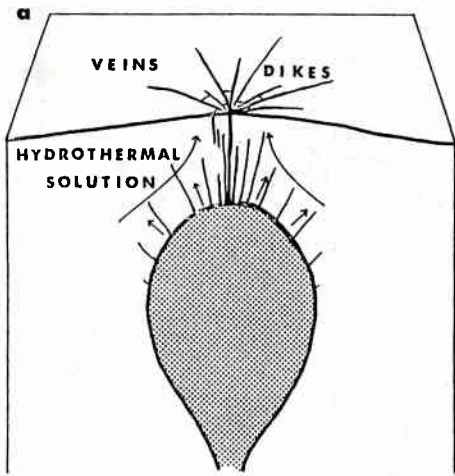


図 1. ダイアビルによる軸対称構造，隆起 (a) および陥没 (b)。

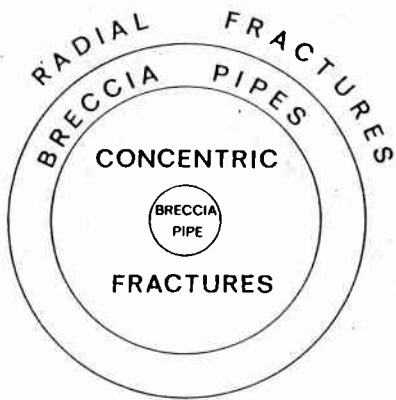


図 2. ダイアビルによる環状構造 (平面図)

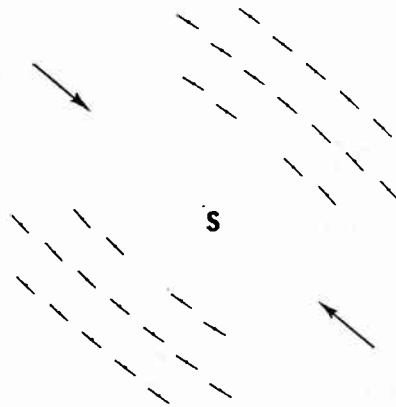


図 3. 水平応力に異方性がある場合のダイアビルによる割れ目の例 (平面図)

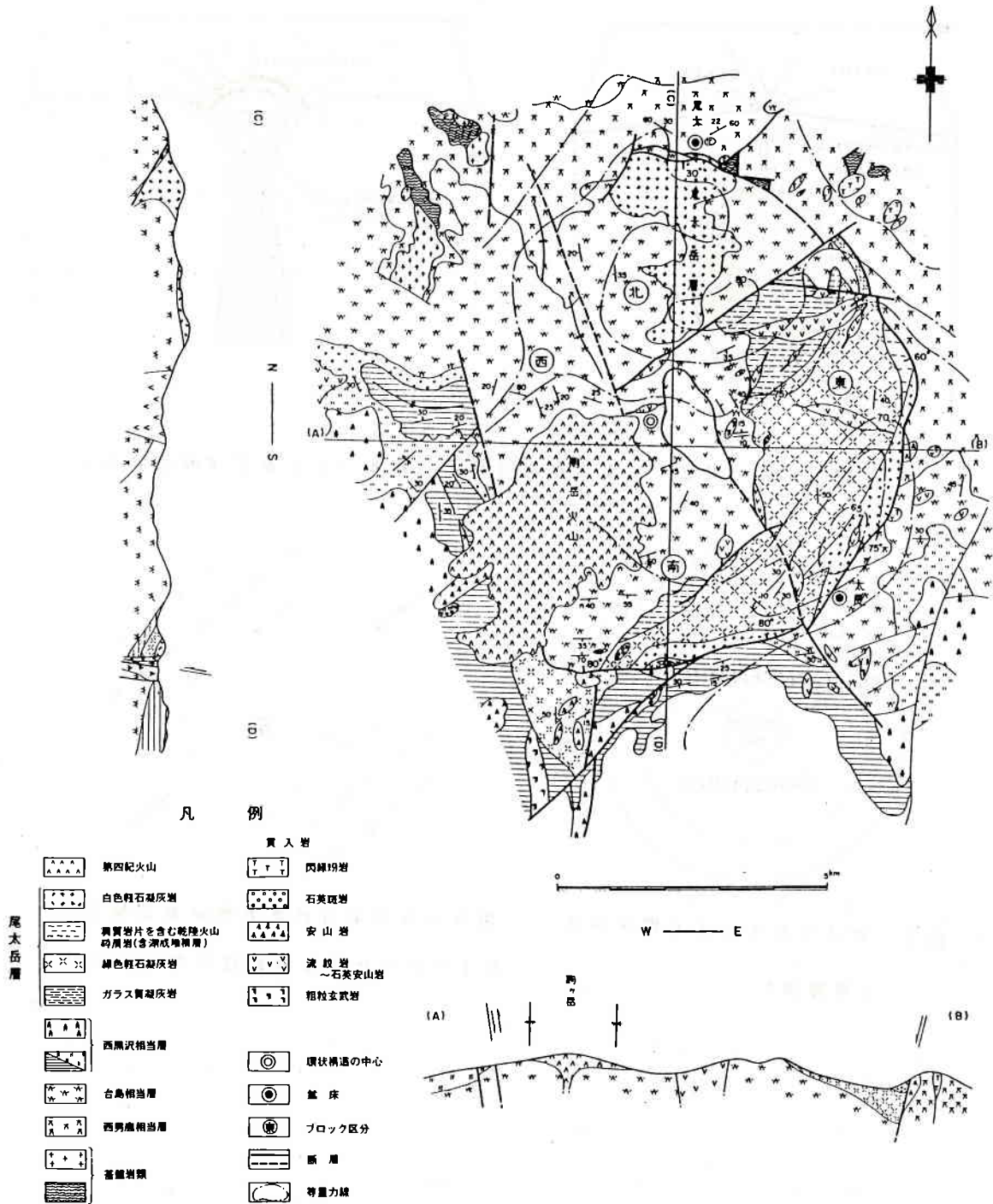


図4, 青秋カルデラ付近の地質(通商産業省資源エネルギー庁, 1982)。

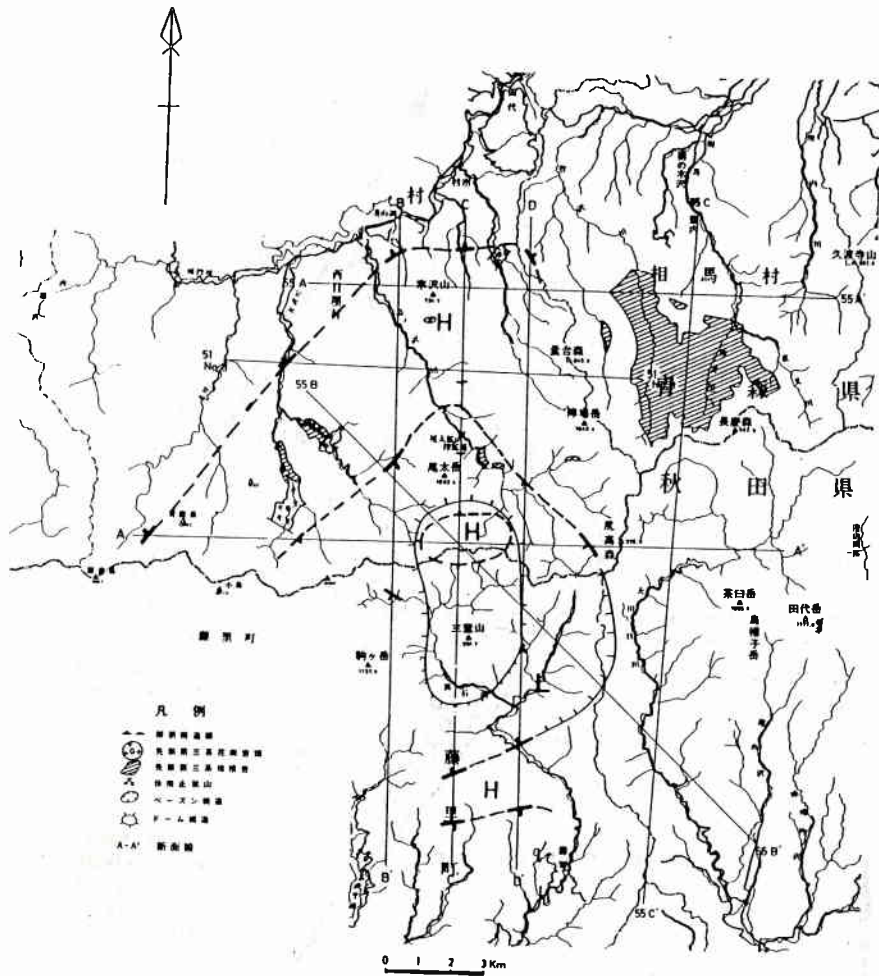


図5. 青秋カルデラ付近の地下構造図（重力より）（通商産業省資源エネルギー庁，1982）。

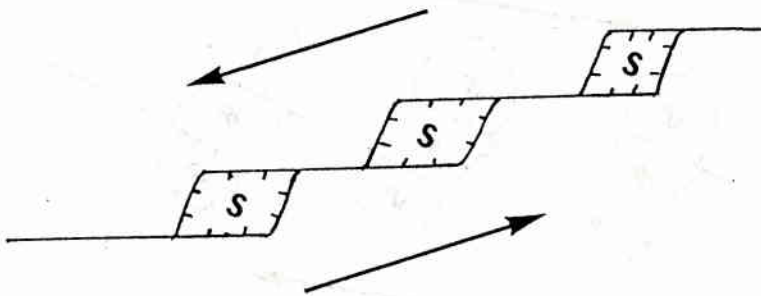


図6. エシュロン状横ずれ断層によるプルアバート・ベーズン（S；陥没）。

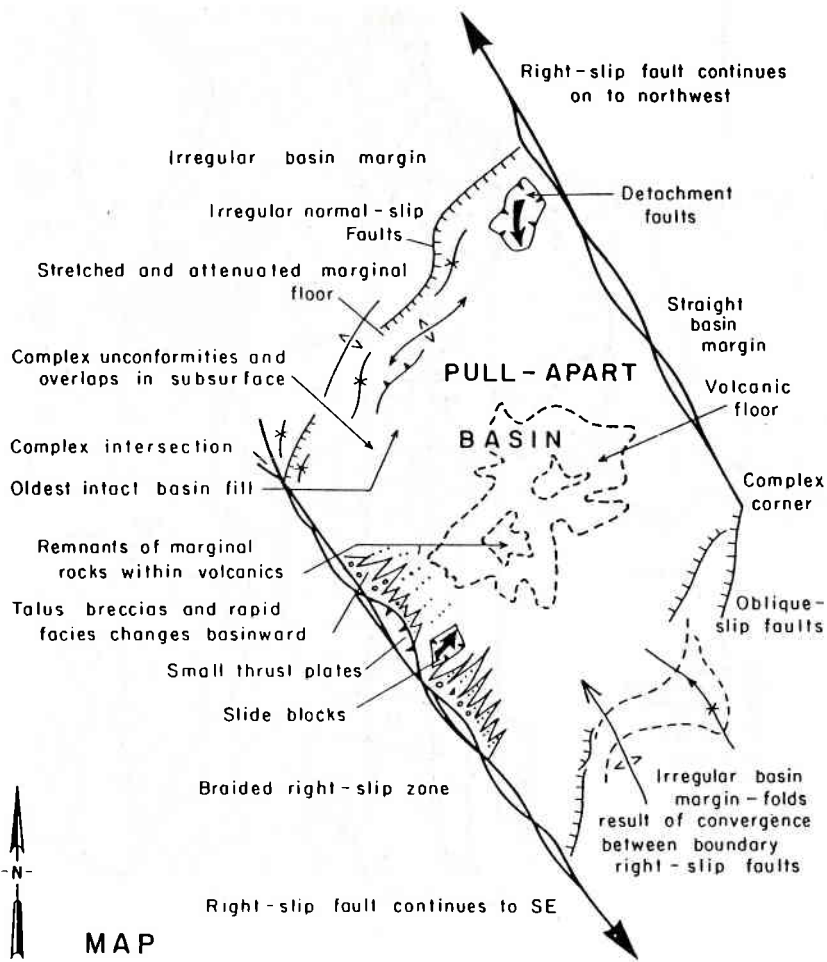


図 7. 横ずれ断層にともなうプルアパート・ベースン (Crowell, 1974)。

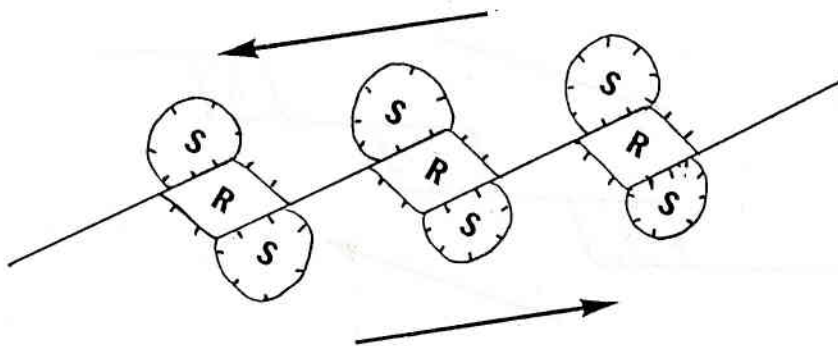


図 8. エシュロン状横ずれ断層による隆起 (R: 隆起, S: 陥没)

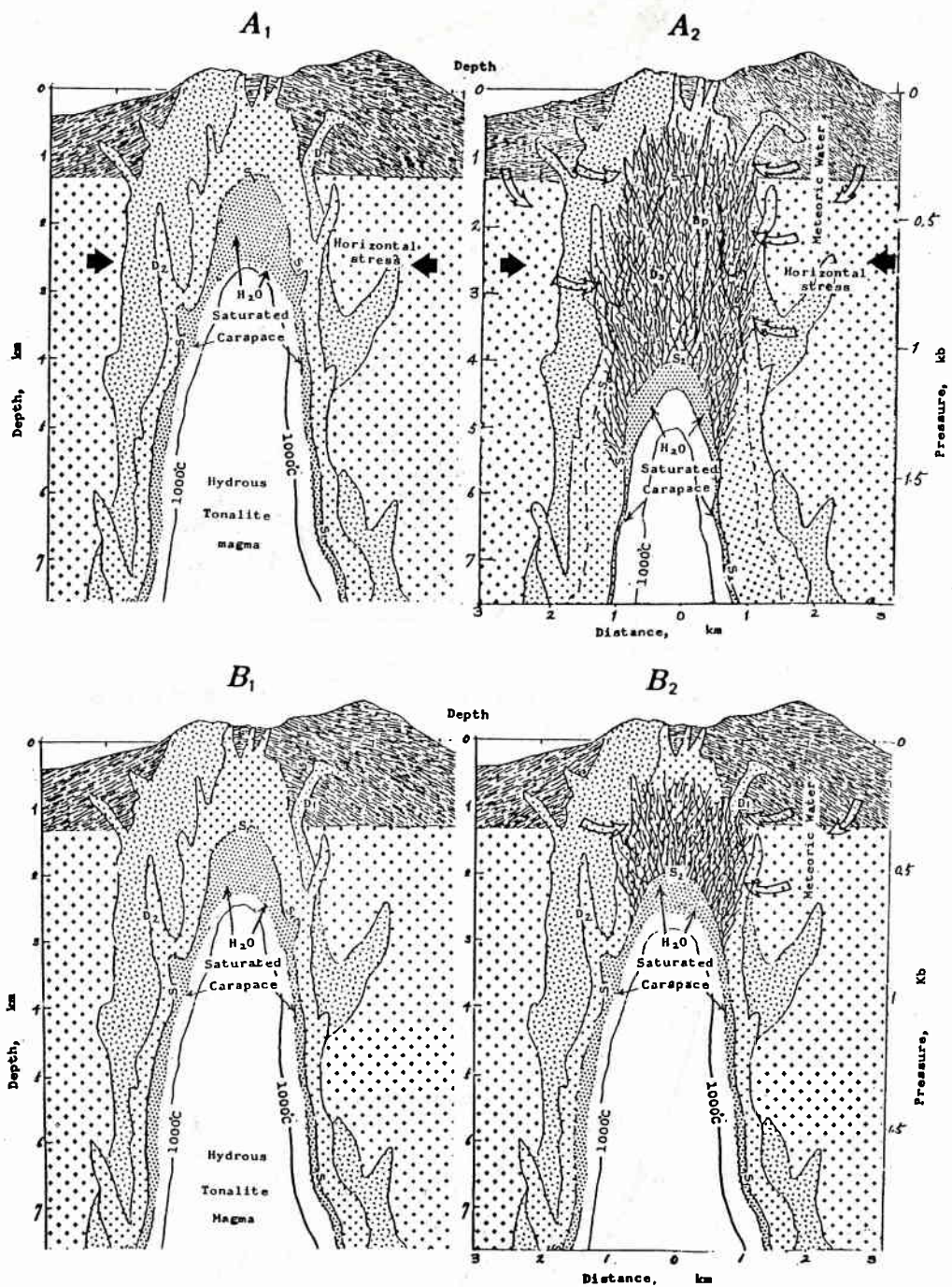


図 1 1 . 斑岩型鉱床と水平応力の関係 (Nishiwaki and Uyeda, 1980) .

A は水平圧縮応力が大きい場合 , B は水平圧縮応力が小さい場合 .

表 1, 火山性・潜火山性陥没構造と鉱床の関係

構造タイプ ↙ 鉱床	(A)	(B)		(C)	(D)	(E)
	パン ト パイ プ スト ック	火山性・潜火山性小型陥没構造 最大径<30 km		山 性 火 性 潜 火 性 火 火 火 火 火 火 ドーム状隆起	山 性 火 性 潜 火 性 火 火 火 大型陥没構造 ≥30 km	火山構造性陥没 グラバン ト リ フ ト オ ラ コ ー ジ ン
		(1)	(2)			
		環 状 構 造	不 定 多 角 形 ・ 楕 円			
a 中心陥没 内に堆積	小真木(黒鉄)	餌釣(大滝カル デラ)	花岡 小花 坂輪	深沢	北鹿ベーズン (?) (石油)	ガラパゴス・リフト 海一 紅 キースラーガ ン 船 カッパーベルト 油
b 貫入中心部の鉱脈・ 網状型(カルデラ・ タイプビル核)	小真木・土畑 プレッチャー・ パイプボーフィ リー型の一部	足尾	高玉(青木葉 生野)	ボーフィリー 型鉱床 大谷(W)	ブッシュェルト (アフリカ)	ドルース(北米) グレートタイク (アフリカ)
c 貫入外壁またはこれ に近接する鉱脈・鉱 脈・カルデラ・リム・ ダイアビル壁	中瀬の一部	足尾の一部 (河内) 院内	佐渡 網生 八鏡 三石	細倉 豊羽 尾平	サドベリー(北 米) ブッシュェルト (アフリカ)	ミシシッピー パレー型
d 貫入中心から離れた 外周部の鉱脈	中瀬の一部	宝倉(大滝カル デラ)	紀州 妙法	千歳	サドベリー(北 米) 大谷(Au・Ag)	
e 貫入中心から離れた 外周での堆積						マンガン団塊
備 考	極小規模 陥没・隆起は不明 なものが多い 高品位	小規模構造 金属量の高濃集 周囲は隆起	構造説明が不充 分のものを含む 日本では多角型 のもの多し	中規模なもの がみられる	大規模構造 B型の複合濃集 型(?) B型と思われる ものもある(?)	極めて大規模、 個々の鉱床はさ らに小規模構造 (A-B)に関連

有用鉱物濃集

拡散・スケール大

有用鉱物の濃集 ←

→ 拡散・スケール大