

花こう岩と鉱床

Granites and Metal deposits

花こう岩とは、花こう岩問題とは

What is granite?

Controversy surrounding the origin of plutons (granites)

分類

Classification

花こう岩系列、そして鉱床

Granitoids series and mineralization

※花こう岩は身近な岩石であるが、その成り立ちに議論が絶えなかった。実用上の要請があり、細分した名前への見直しが求められている。

花崗岩とは What is Granite?

- Granite A visibly crystalline plutonic rock with granular texture; composed of quartz and alkali feldspar with subordinate plagioclase and biotite and hornblende. (Dictionary of Geology & Mineralogy. McGRAW-HILL)
- カコウ岩質岩石 フェルシックで石英を含む深成岩類(岩石学Ⅱ、都城・久城)

水成論と火成論 Neptunists and Plutonists

18世紀後半の岩石の成因論

- 水成論者地球上の岩石は、砂岩でも花崗岩でも玄武岩でも、海の水から沈殿した水成岩(堆積岩)と考えた。

Neptunists believed that granites - along with all rocks - were precipitated from the oceans.

- 火成論者(Plutonists) 地球上には海底や湖底に堆積してできた水成岩もたくさんあるが、例えば玄武岩や花崗岩は、高温の融解した物質(マグマ)が冷却・固結してできた火成岩と考えた。

Plutonists posited that plutonic rocks had their origin in fire and were crystallized from magmas.

(岩石学Ⅲ、都城・久城 ; Coleman et al., 2016)

ゲーテ 地質学論集 鉱物篇

木村直司(編訳)ちくま学芸文庫、2010

Johann Wolfgang Goethe

Neue Gesamtausgabe des Originalverrages.

Schriften zur Geologie und Mineralogie.

- 花崗岩は太古の時代から注目すべき岩石であり、われわれの時代にさらに注目のあたいするものとなった。
- 水は基本量塊を溶解状態に保つのに作用していた。この一般的溶解状態から花崗岩がまず沈殿し、結晶となった。
- 花崗岩が成り立っているところは一過性で水を濁らせていた。

→水成論者

Neptune and Pluto



Greek god of sea and earthquakes



God of underworld

From National Earth Science Teachers Association (NESTA)

岩脈の観察 Dykes

- Huttonはスコットランド高地で花崗岩の脈が他の岩石を貫いているところを見つけ火成論の一つの根拠とした。花崗岩のまわりにある岩石は、花崗岩の熱によって変化している(変成作用の観念)。

Ultimately, it was the recognition of dikes (tabular bodies of rock crosscut older rocks) that vanquished the Neptunists. Plutonists successfully argued that these rocks could not have been deposited from the sea.



岩脈、南極セルロンダーネ山地
Dyke, Sor Rondane, Antarctica

※Huttonの観察した岩脈のスケッチをウェブで見つけることができなかった(参考書には良く掲載されている)。

空間問題 Room problem

火山岩は火山の火口から流出することを見ることができ、火成岩であることを理解しやすい。一方花崗岩がマグマから生成することを直接見ることができない。

Volcanic rocks can be witnessed to erupt as crystal-liquid mixture (clearly igneous). However the evolution of plutonic rocks is not directly observable.

花崗岩体の多くは非常に巨大である。そのように巨大な量のマグマが地殻の中に入り込んできて、その現在の空間をどうして占めることができたか？

Room problem: If granites intrude as magmas, how are the wall rocks displaced in order to make space for the granite?

花崗岩化作用 Granitization

20世紀中頃、花崗岩体はその岩体の位置に、前にあった堆積岩あるいは変成岩が変成・交代作用を受けてできるという考えが提案された。変成作用によって花崗岩を生じると考えられる過程を花崗岩化作用(granitization)とよぶ。

Transformists 変成岩説を主張。

Magmatist 火成岩説を主張。

(岩石学Ⅲ、都城・久城)

During a 1947 conference by GSA, the origin of plutons had evolved to debate between a melt-dominated mechanism (crystallization from a magma – magmatism) or a metasomatic mechanism with minor melt (the dominantly solid-state alteration from a magma – migmatism).

(Coleman et al., 2016)

火成岩説が有力 Magmatism is supported

花崗岩には火山岩が伴うこと、岩石の溶融実験で花崗岩組成の液体が生じること、同位体的に花崗岩が堆積岩から固体で変化したものと考えられないこと、等々で花崗岩はマグマから生じたことに落ち着く。貫入機構としてストーピングなどで説明。

Melting experiment for rocks and plutonic-volcanic connections support magmatism concepts. Stopping mechanism is supported in intrusion system.

ストーピング Stopping, Magmatic stopping

Shale -----

Granite ---



上昇するマグマが母岩を機械的に破壊しながら進入するもの。破壊された母岩は沈み込む。沈んだ母岩の分だけマグマは上昇していく。これで空間問題を説明する。

A process of igneous intrusion in which magma gradually works its way upward by breaking off and engulfing blocks of the country rocks.

空間問題再考 A revival of the room problem

再び空間問題。

あらたな空間問題や花崗岩と火山岩の関係の議論が持ち上がった。それには深成活動(マグマから結晶化して固結するまで)がどのくらいの期間かが鍵となる。

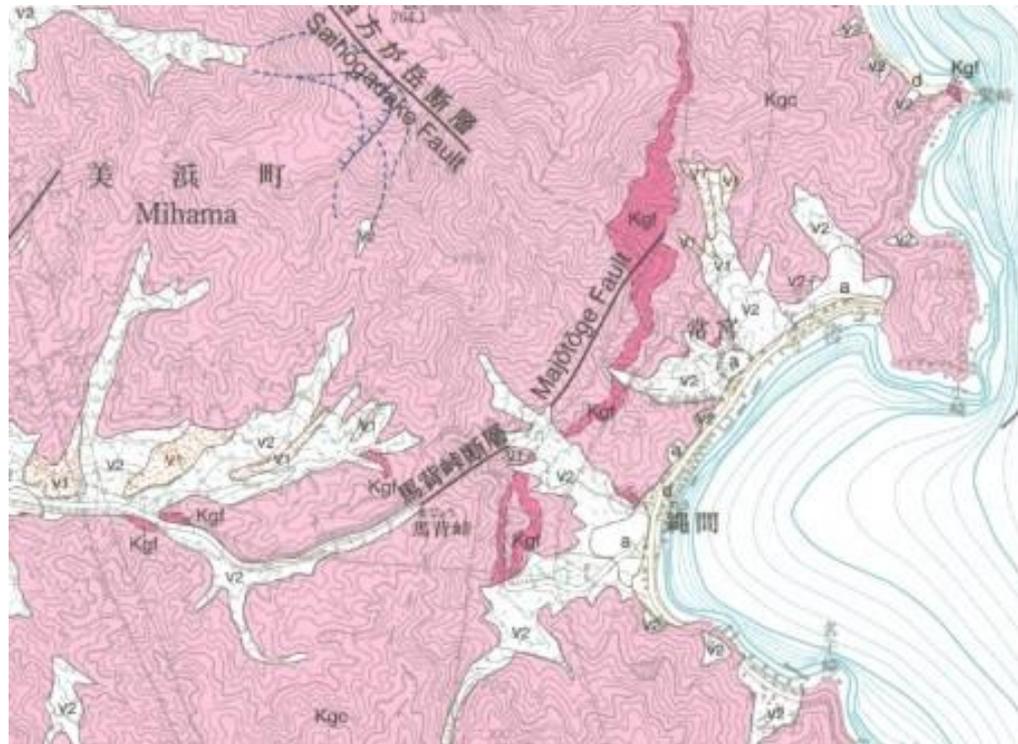
A look into the room problem and plutonic-volcanic connections provides a good view into why it is critical to understand the pace of plutonism. During the late 1980s to early 1990s, there was a revival of interest in the room problem for granite plutons.

岩脈やシルの積み重なり

Amalgamation of many dikes and/or sills

空間問題の一つの解として花崗岩体は多くの岩脈やシルが貫入したという考えがある。最初の貫入岩はまわりの岩石との温度が違うので境界が残る。続いて貫入してくるとマグマの温度に近いので境界は消失してしまう。大きな単一の花崗岩マグマの貫入だと空間提供を考えにくい、岩脈やシルの貫入なら空間問題の説明がしやすい。

It is proposed that most granitic plutons could form through the amalgamation of many dikes and/or sill. The earliest intrusions would cool quickly and preserve contacts due to contrast between wall-rock and magma temperature. An incrementally assembled granite pluton spends significant intervals at or near magmatic temperatures, helping to erase contacts between increments.



花崗岩体の中を調査すると、細粒相(アプライト)が層状に分布していることがある。複数のシート状花崗岩の貫入関係の名残かもしれない。

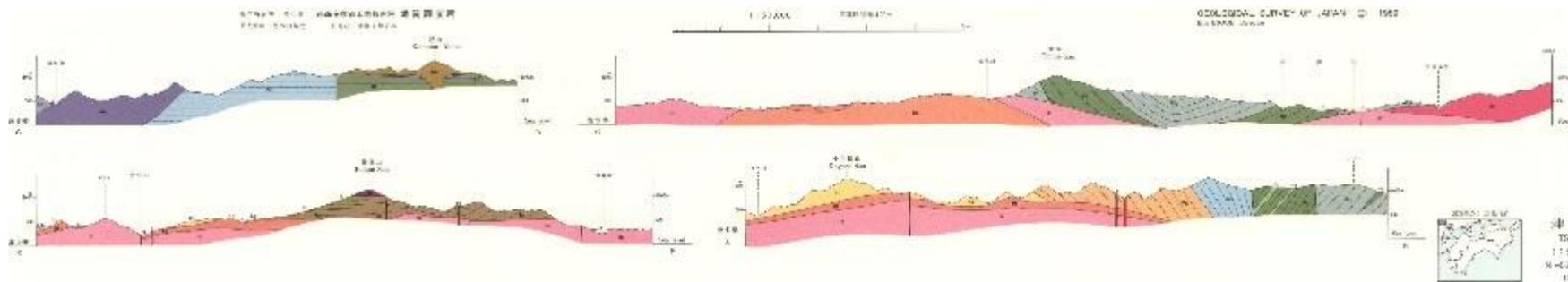
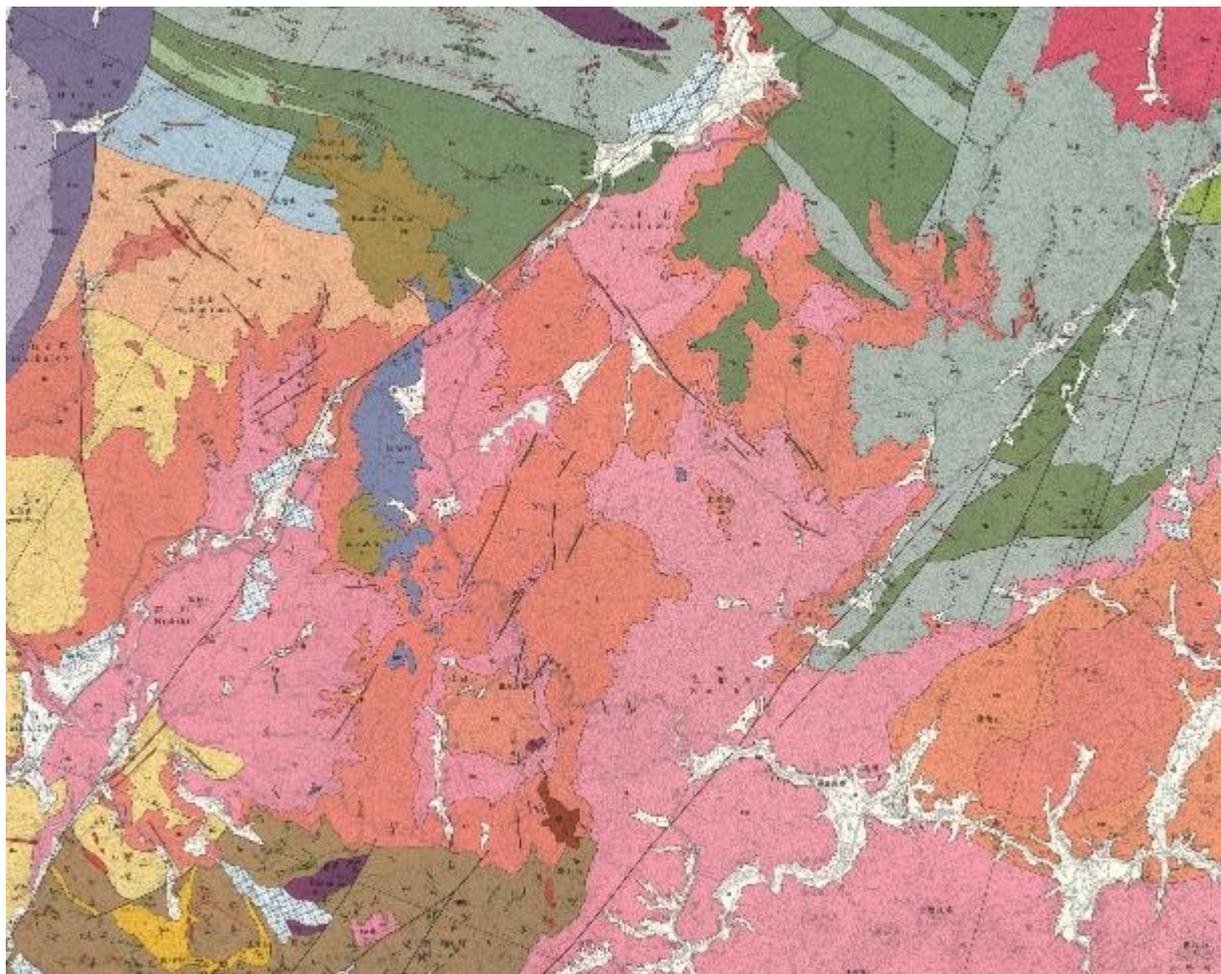
花崗岩体が時間間隙があって貫入して、周辺に細粒相が発達したのかもしれない(急冷縁)。

Fine-grained granitic layer (sheet) is often developed in the Host granitic body.

粗粒花崗岩と屋根の堆積岩の境界に細粒花崗岩がひろがっている。

これが繰り返すと大きな花崗岩になるのかもしれない。

Fine-grained granite is spreaded between coarse-grained granite and roof-like sedimentary rocks. Batholithic body can be produced by repeating the above type granite mass.



花崗岩同士の貫入関係

Intrusive relation between two granitic bodies

Inada Granite

Coarse-grained
granite

Amabiki Granodiorite

Leuco margin

Medium-grained
granodiorite



異なる花崗岩が接するとき、後から貫入した花崗岩の縁は優白質である。

深成岩の年代測定 Dating plutonic rocks (Granites)

ジルコンU-Pb法 : 閉鎖温度800°C

スフェーンU-Pb法 : 閉鎖温度680°C

角閃石Ar-Ar法 : 閉鎖温度550°C

黒雲母Ar-Ar法 : 閉鎖温度350°C

これらから花崗岩体の熱史を組み立てられる

Zircon U-Pb age: Zircon begins to crystallize (zircon saturation temperature, $>800^{\circ}\text{C}$) when the magma becomes completely solid.

Titanite U-Pb age: Titanite leaks daughter Pb down to temperature of 680°C (closure temperature).

Hornblende Ar-Ar age: The closure temperature is 550°C .

Biotite Ar-Ar age: The closure temperature is 350°C .

冷却史 Cooling rates

花こう岩体の単独の貫入では一気に冷却する。

次々と貫入してくると、高温の閉鎖温度の時期は狭い時代に集中するが、低温の閉鎖温度の年代測定法による年代に広がりがある。

岩脈やシルの貫入で体積を増す場合である。

Tuolumne岩体はマグマが貫入し最終的な固結までに1000万年以上かかったと考えられている。

Incrementally assembled plutons slowly add heat to the system over the duration of pluton assembly. Individual pulses initially cool quickly. Therefore high-temperature chronometers may yield a tight age cluster and low-temperature chronometers may yield a spread in ages. In the Tuolumne Intrusive Suite (CA, USA), the magmas had accumulated and solidified over a 10 My interval between 95 Ma and 85 Ma.

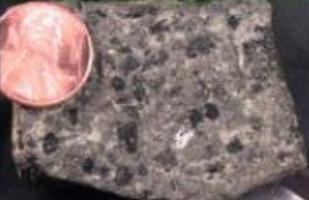
火成岩類の分類 Classification of igneous rocks

A CLASSIFICATION OF IGNEOUS ROCKS

火成岩類の基礎的・定性的な分類

Basic and qualitative classification

花崗岩(類)はフェルシック(珪長質)で明色(色指数が小さい)、粗粒な岩石である。対応する火山岩(細粒岩)は流紋岩である。

		Cooling History/Texture		
		Slow Cooling and Coarse Grained	Fast Cooling and Fine Grained	Very Fast Cooling and Glassy/Cellular
Mafic and Dark Color		GABBRO 	BASALT 	SCORIA 
	Intermed. and Intermed. Color	DIORITE 	ANDESITE (PORPHYRY) 	
Felsic and Light Color		GRANITE 	RHYOLITE 	PUMICE 
				OBSIDIAN 

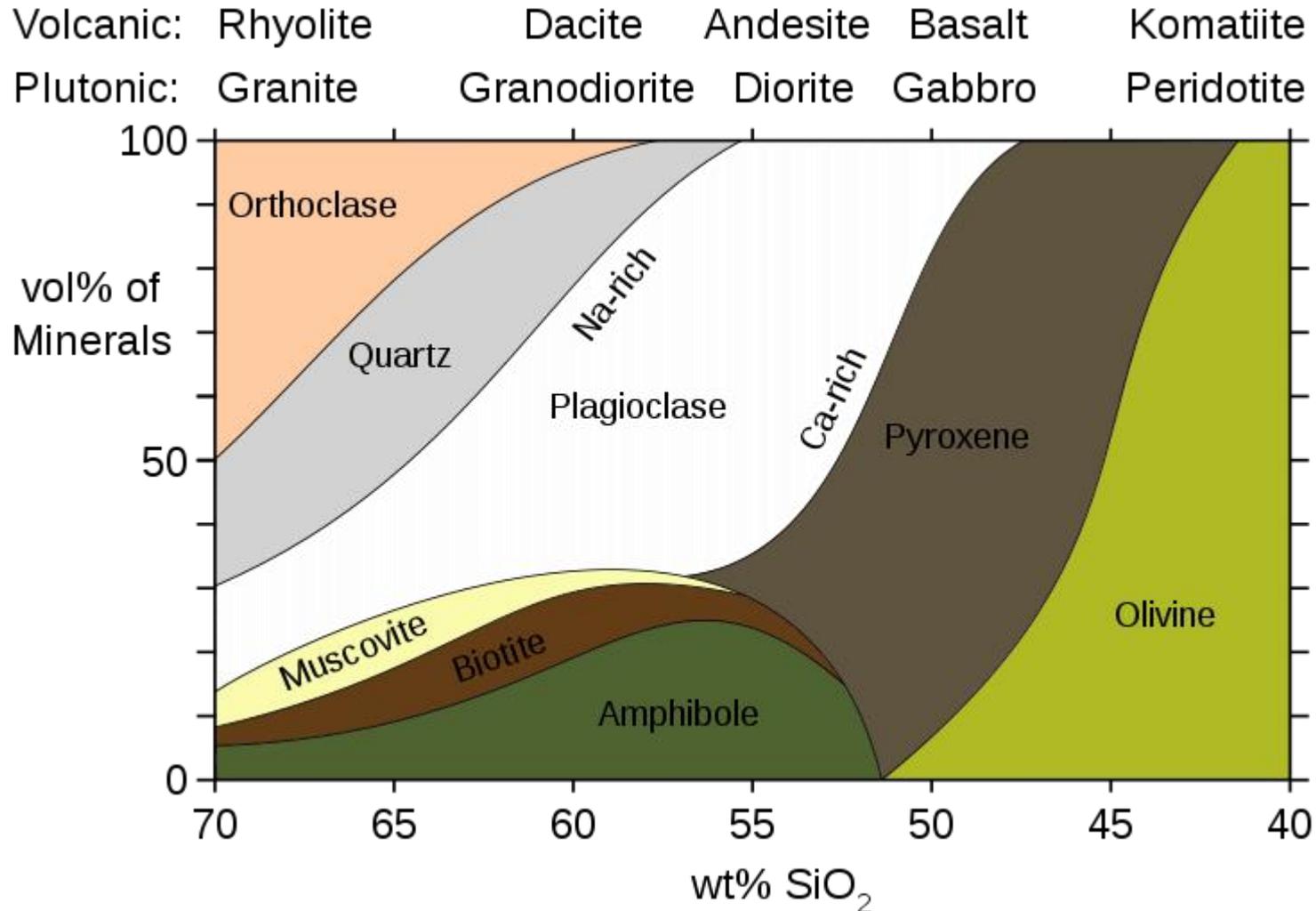
L.S. Fichter
geollab.jmu.edu/Fichter/IgnRx/introigrx.html

An Introduction To Igneous Rocks

<http://csmres.jmu.edu/geollab/Fichter/IgnRx/Introigrx.html>

火成岩類の分類(鉱物組合せ)

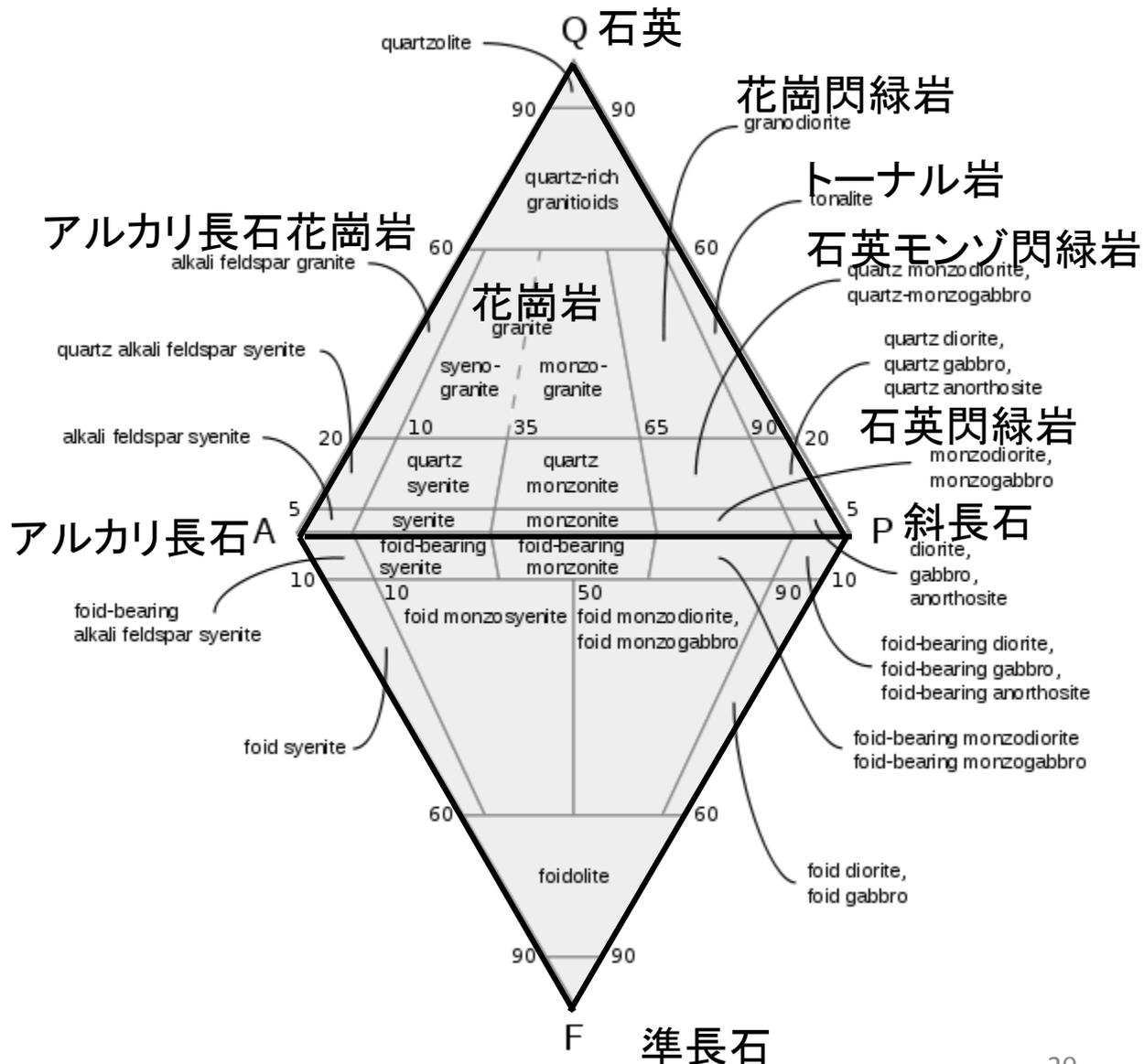
Classification of igneous rocks based on mineral assemblage



花崗岩類のモード組成分類 Modal classification of granitoids

鉱物容量比を使い
岩石名を定める。
薄片やスラブで鉱物
を同定し、ポイント
カウンターで積算
する。染色をして画
像に取り込みコン
ピューター上で面
積を求める。

専門家でも少々煩
雑、苦鉄質鉱物の
情報(量)がない。
→表現の見直し中



花こう岩を別の視点から区分：花崗岩系列 Granitoid series

1975年頃から、マグマ成因論と花崗岩地質学をむすぶ分型論が提案されるようになった。鉍床探査の指標となる。

- ・オーストラリア学派のI, S, A, Mタイプ分類
- ・石原舜三の鉄酸化鉍物（磁鉄鉍の有無）に着目した区分（欧米でなく、地質分野では新興国のオーストラリアや日本が先導する）

The greatest contribution to the granite petrology during the last quarter of 20th century would be the proposition of the granitoid series: magnetite-series, ilmenite-series, I-type, M-type and A-type. The granitoid series has been employed as a tool for mineral exploration, because they are closely associated with particular metal deposits. Australian and Japanese geologists have played an important role on the establishment of the granitoid series.

花崗岩のアルファベット分類(I, S, M, A, -type)

Alphabetical classification (I, S, M, A, -type)

- I-type/S-type オーストラリアのChappell & Whiteが提唱した分類
- Iタイプ Caに富む
- I-type 角閃石を含む
- Occurrence of Ca-bearing mafic minerals such as hornblende and rich in Ca.
- Sタイプ AlとKに富み、CaとNaに乏しい
- S-type 白雲母、キンセイ石、ザクロ石、紅柱石、珪線石を含む
- Presence of aluminous minerals such as cordierite, garnet, Al_2SiO_5 minerals and muscovite, and rich in K and Al and poor in Ca and Na.

※Iタイプはマグマ形成過程で火成岩が関与したと考えられる。Sタイプは泥質堆積岩が関与したと考えられる。

The I-types are contributed by the igneous rocks in their magma genesis and the S-types by the pelitic sedimentary rocks.

花崗岩のアルファベット分類(I, S, M, A, -type) Alphabetical classification (I, S, M, A, -type)

Mタイプ Caに富み、Kに乏しい
マントルが関与

Rich in Ca and poor in K.

Aタイプ アルカリに富みAlに乏しい
アルカリに富む火成岩が関与

High alkali and low H₂O (anhydrous) contents

※Mタイプはマントル起源の岩石に成因的に関連がある。Aタイプはアルカリ岩に伴う。

The M-type granitic magma is related with the low alkaline mafic igneous rocks of the upper mantle origin. The A-type granitoids are often accompanied by the felsic igneous rocks of the alkali rock-series.

石原による花崗岩系列

Granitoids series proposed by Ishihara

- ・磁鉄鉱系花崗岩：磁鉄鉱を含み、高い3価鉄/2価鉄の全岩組成を示す。酸化条件下で結晶化した。
- ・チタン鉄鉱系花崗岩：磁鉄鉱を含まず低い3価鉄/2価鉄の全岩組成を示す。還元的条件下で結晶化した。

The magnetite-series granitoids are characterized by the presence of magnetite and high Fe^{3+}/Fe^{2+} whole-rock ratio and crystallize under the oxidized condition.

The ilmenite-series granitoids are characterized by the lack of magnetite and low Fe^{3+}/Fe^{2+} whole-rock ratio and solidify under the reduced environment.

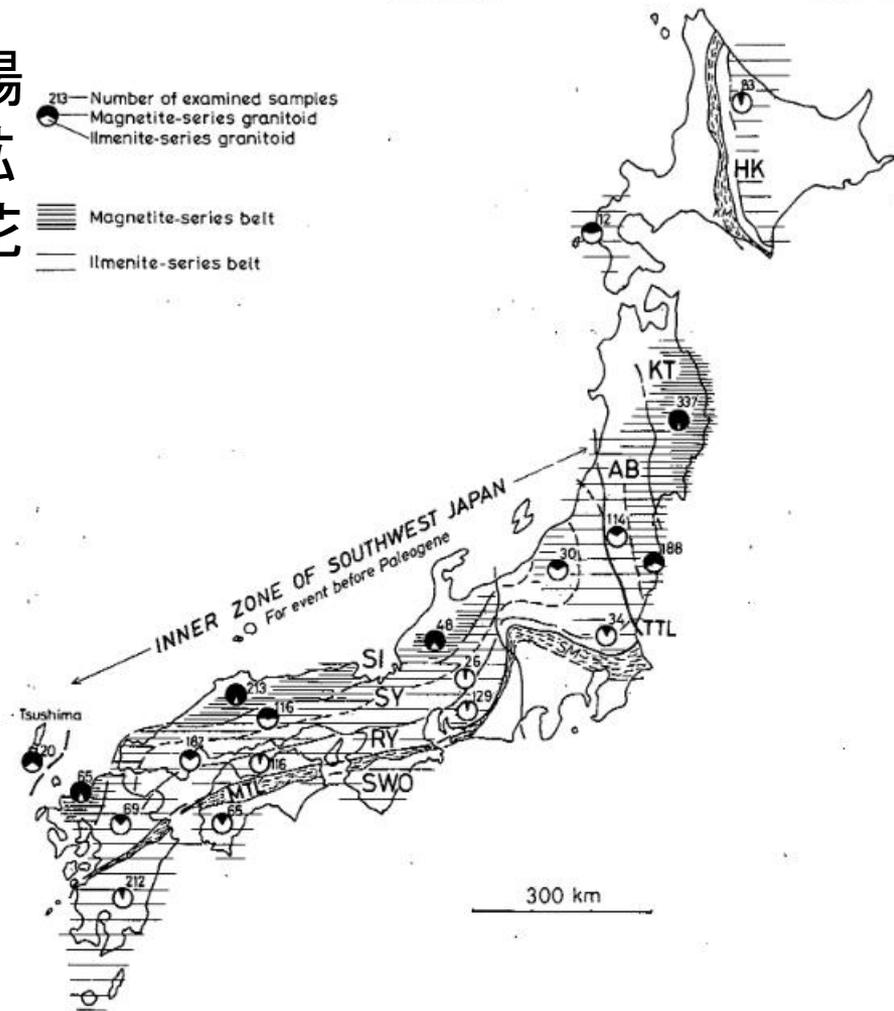
The magnetite-series granitoids are closely related in their magma genesis to the igneous rocks oxidized on the earth's surface and the ilmenite-series granitoids the crustal materials containing crustal carbon.

花崗岩系列の分布 Distribution on the granitoids series

西南日本では領家帯と山陽帯の花崗岩類はチタン鉄鉱系、山陰帯は磁鉄鉱系の花崗岩類が卓越する。

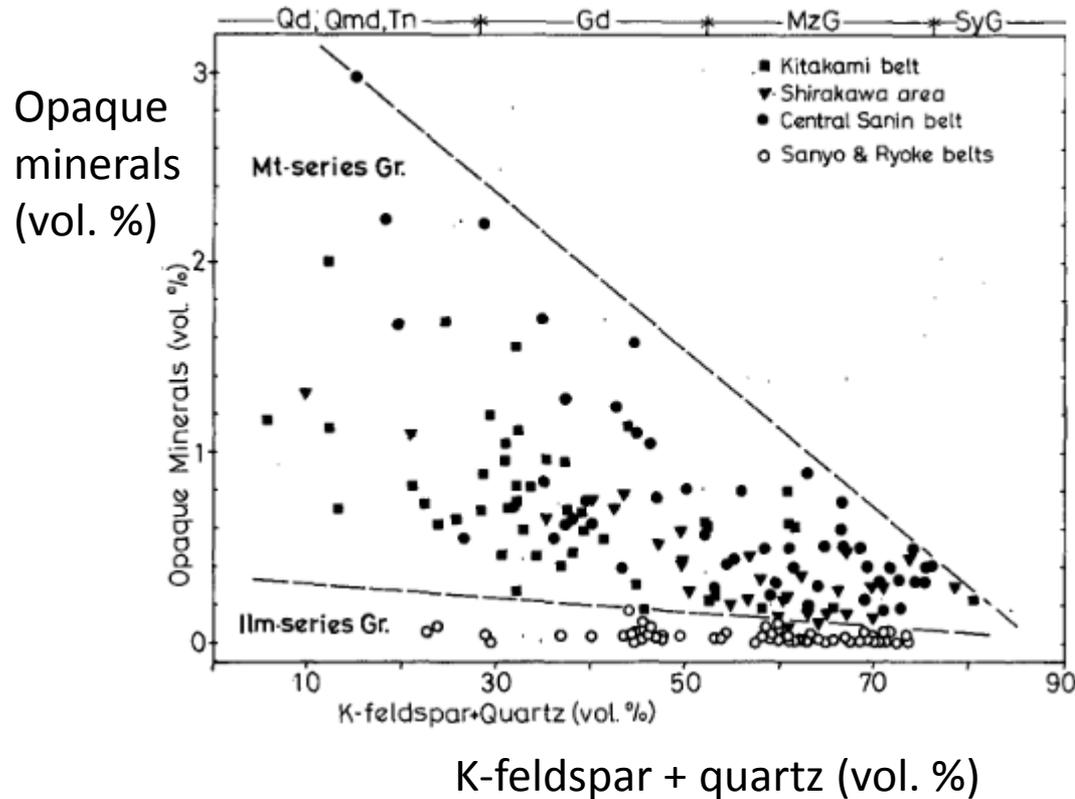
In Southwest Japan, the ilmenite series rocks are dominant in Ryoke and Sanyo belts and the magnetite series rocks are dominant in San-in belt.

(Ishihara, 1977)



モード組成と花崗岩系列

Granitoids series based on modal analyses



モード組成から磁鉄鉱系とチタン鉄鉱系の花崗岩類を区別できる。

The granitoids series rocks are distinguished from modal analyses.

実用的な花崗岩系列識別

How to distinguish the granitoids series type in practical

- 1.モード組成の不透明鉱物量 Opaque mineral modal data: 0.1 vol.%
- 2.岩石帯磁率 Magnetic susceptibility: 100×10^{-6} emu/g、1 or 3×10^{-3} SIU
- 3.全岩 Whole rock chemistry: $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ (wt. %): 0.5

以上の指数より大きい値を持つ岩石が磁鉄鉱系、小さい場合にはチタン鉄鉱系である。The magnetite series rocks show over these values; the ilmenite series rocks less than these values.

もっと手軽には磁石を携帯して花崗岩に付着するかどうかで花崗岩系列を識別できる。

KT-10

Homepage of the Raax Co., Ltd

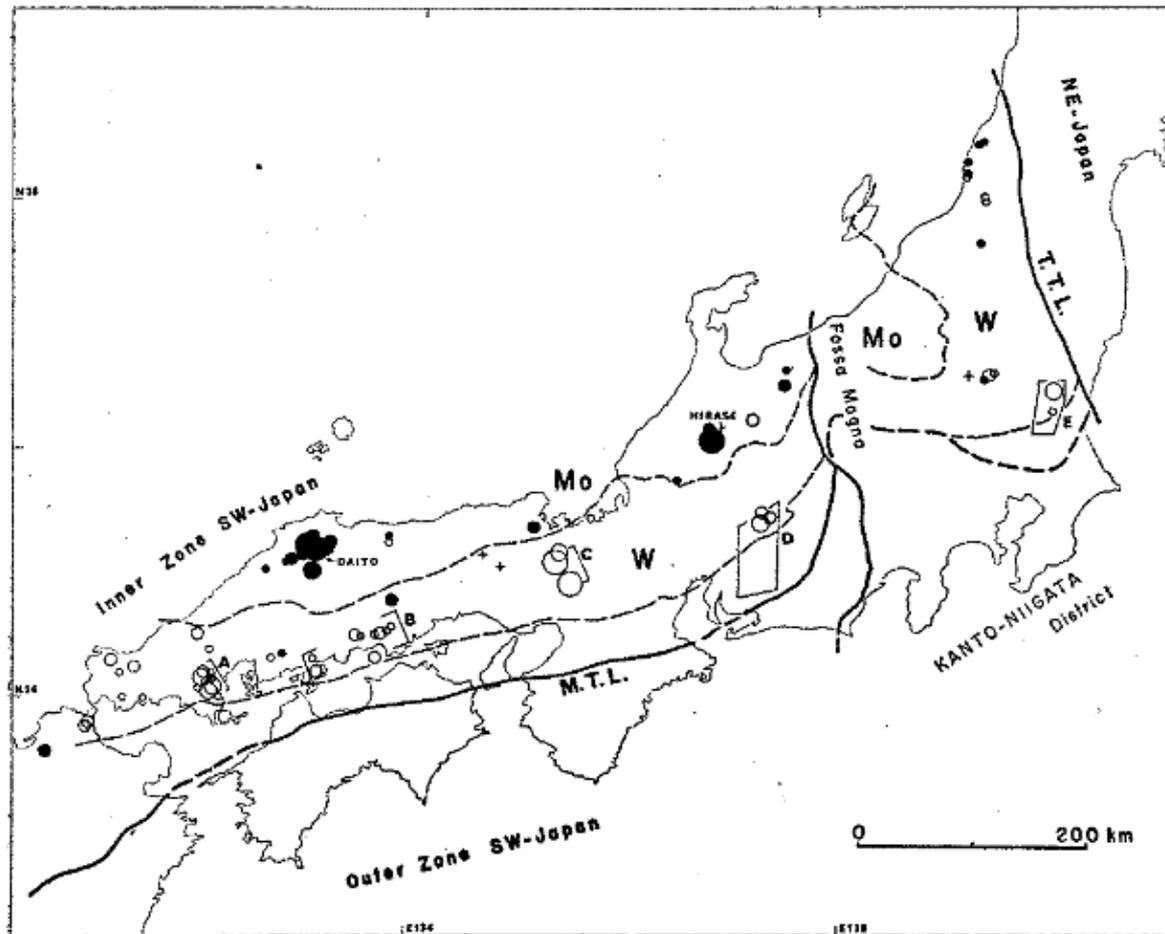


花崗岩系列と鉱床

Selected items	Cu-Mo deposits	Sn-W deposits
Related granitoids	Magnetite-series	Ilmenites-series
Rock composition	Tonalite-granite	Granite
Breccia pipe	Common	Rare-none
Pegmatite cap	None	Common
Orebody	Large vertical extent (1-3 km)	Small vertical extent (100-300 m)

磁鉄鉱系花崗岩には銅-モリブデン鉱床を伴い、チタン鉄鉱系花崗岩にはスズ-タングステン鉱床を伴う

西南日本のモリブデン鉱床は山陰に、タングステンは山陽に分布
Molybdenum (Mo) and Tungsten (W) ore deposits in south-west Japan



第1図 西南日本内帯のモリブデン・タングステン鉱床の定量的表示 (Ishihara, 1971 原図)。
●はモリブデン鉱床、○はタングステン鉱床、共に大きさは鉱床の規模を表す。
Aは山口県東部、Bは広島県東部-岡山県南部、Cは京都府下、Dは岐阜県苗木地
域、Eは茨城県高取近傍の鉱床群。

玖珂鉱山(タングステン)

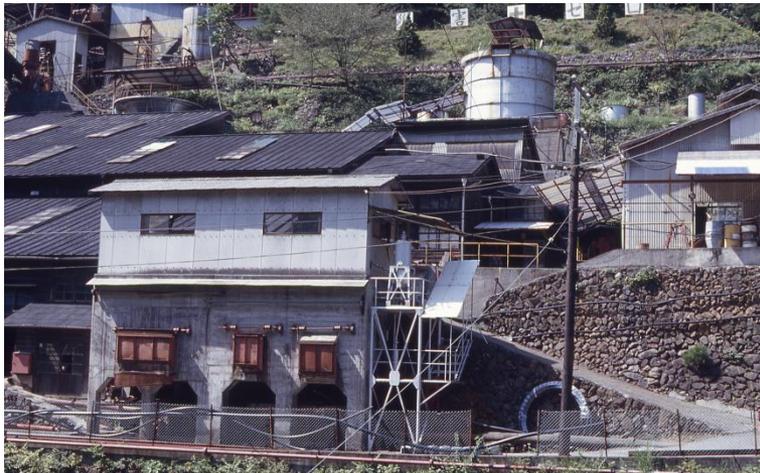
Kuga Mine (Tungsten)

玖珂鉱山の歴史は古く、銀・すず・銅・タングステンを採掘する鉱山として400年の歴史を持つ。天正年間(1573～1591)には銀が発見され、慶長年間(1596～1614)にはすずが、嘉永年間(1847～1853)には毛利藩により銅が稼行され、その後、稼行と休山が繰り返された。タングステン鉱山として日本一の産出量を誇った。平成5年(1993)3月閉山。

現在、旧玖珂鉱山の坑道の一部を利用したテーマパーク「美川ムーバレー」として観光客を集めている。かつての坑道や選鉱施設を見ることができる。

This mine dug silver, tin, copper and tungsten ores in 400 years history. Now the mine works as mining theme park.

美川ムーバレー



上の美川ムーバレー案内図はウェブ「きままに鉱山・炭鉱めぐり」より転載。

左の写真は玖珂鉱山が稼行していた当時の選鉱所。

付録1: モンゴル中部の花崗岩と鉱床

Appendix 1: Granite and ore deposits in central Mongolia

1995-1999年、JICA「モンゴル地質鉱物資源研究所」プロジェクトではモンゴル中部バヤンホンゴル地域をモデルフィールドとして20万分の1地質図6枚を作成した。層序関連では、微化石、付加体の概念、砂岩解析等あらたな地質の見方を導入した。花崗岩関連では、花崗岩系列の概念を導入し、既存鉱床の考察を行った。

Concepts was applied to granite and ore deposits in Mongolia.

モンゴル中部バヤンホンゴルの地質

Geologic Map in Bayankhongol area, central Mongolia

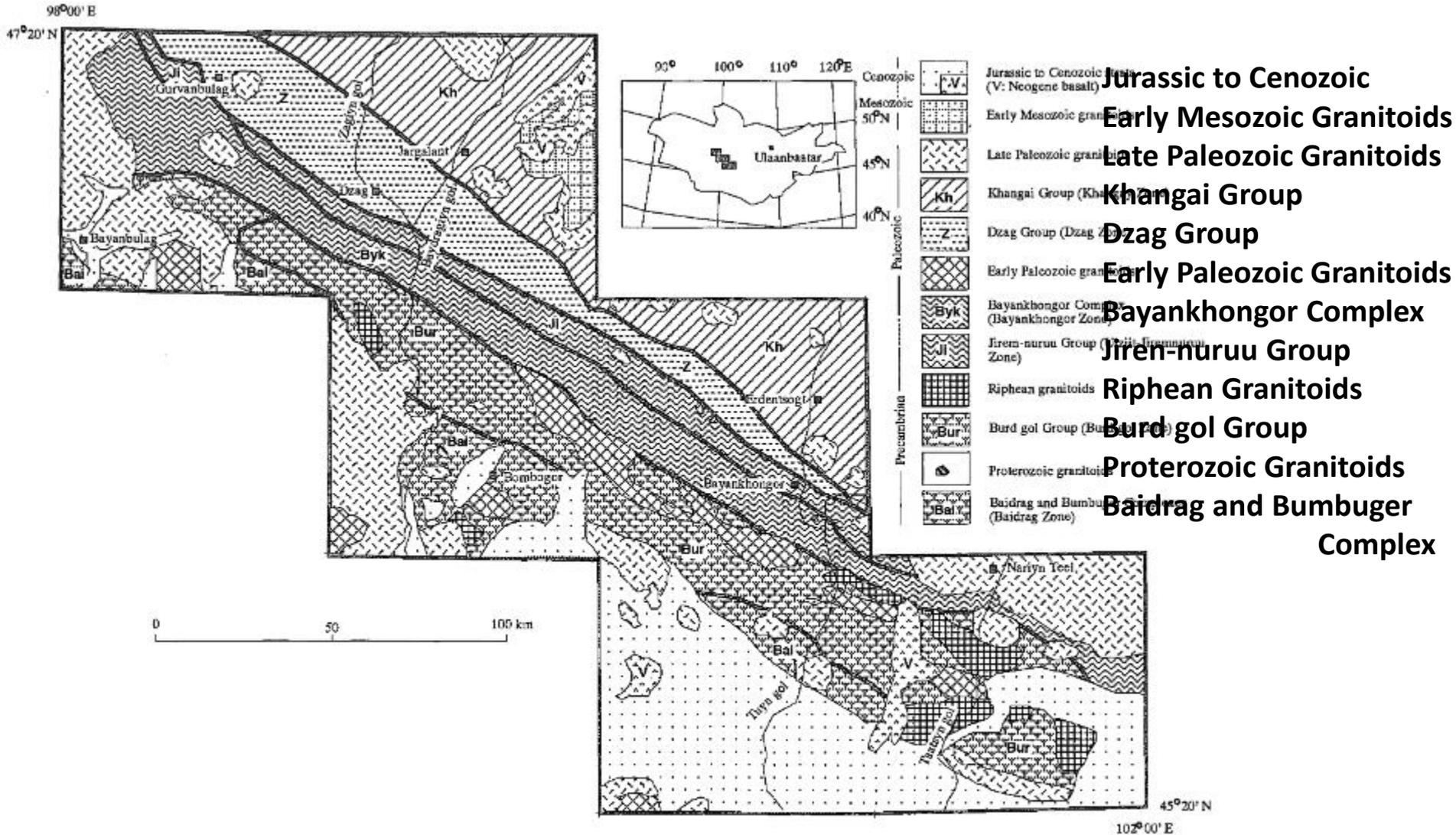


Fig. 1 Simplified geologic map Modified from Geology Group of IGMR Project (1999). The word "gol" in this figure means river in Mongolian.

花崗岩の産状

Field occurrences of granite in Mongol



遠望で花崗岩の分布がわかる場合がある。
露頭は採石場でなくとも規模が大きいことがある。

花崗岩類のモード組成 Modal data of granites

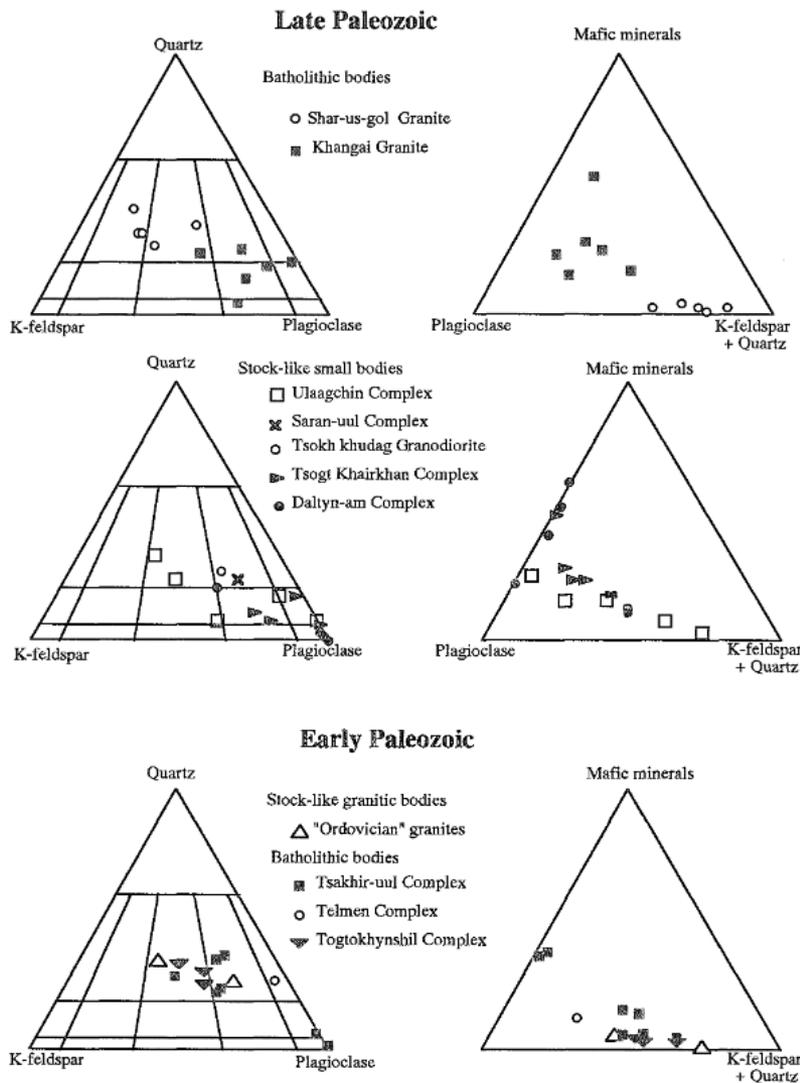


Fig. 2 Modal compositions of the granitoids

前期古生代はトータル岩-花崗閃緑岩-花崗岩というQ-K-P図で水平になる変化である（日本の中生代花崗岩類も同様）。
後期古生代では、石英モンゾ閃緑岩-花崗岩で、Q-K-P図で右下から斜めに上がる変化である。

花崗岩の化学

Chemistry of granites

$A/NK: Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$

$A/CNK: Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$
(モル比)

化学組成でI-タイプ、S-タイプ、A-タイプを区分するのにこの図は重要する。

Daltyn-am岩体ではI-タイプの領域となる。その他の岩体はI-タイプが卓越するが、一部はS-タイプやA-タイプの性質を示す。

Granites are dominant in I-type but partly in S-type and A-type.

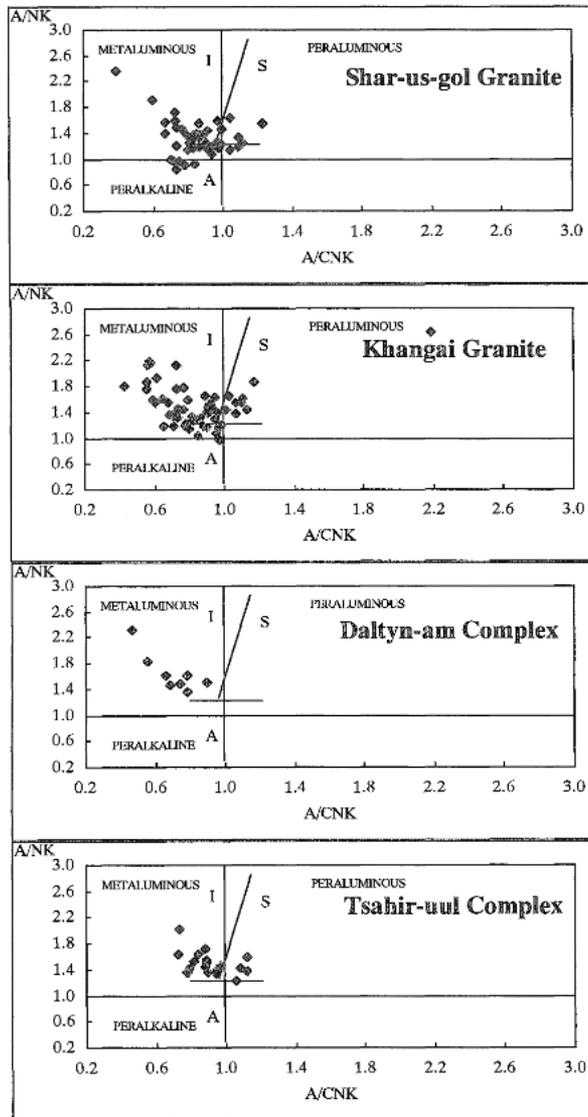


Fig. 3 A/NK vs. A/CNK diagram A/NK: $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$, A/CNK: $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ in molecule. I, S, and A are fields of I-, S-, and A-type granitoids (Chappel and White, 1977; Collins *et al.*, 1982). Boundaries are modified on the basis of Maeda *et al.* (1986). Chemical data are based upon data in the texts of previous geological maps (e.g., Tumurchudor, 1990; Davaa *et al.*, 1989; Bayarsaihan *et al.*, 1990) and our unpublished data.

バヤンホンゴル地域花崗岩類の年代

Age data of granites

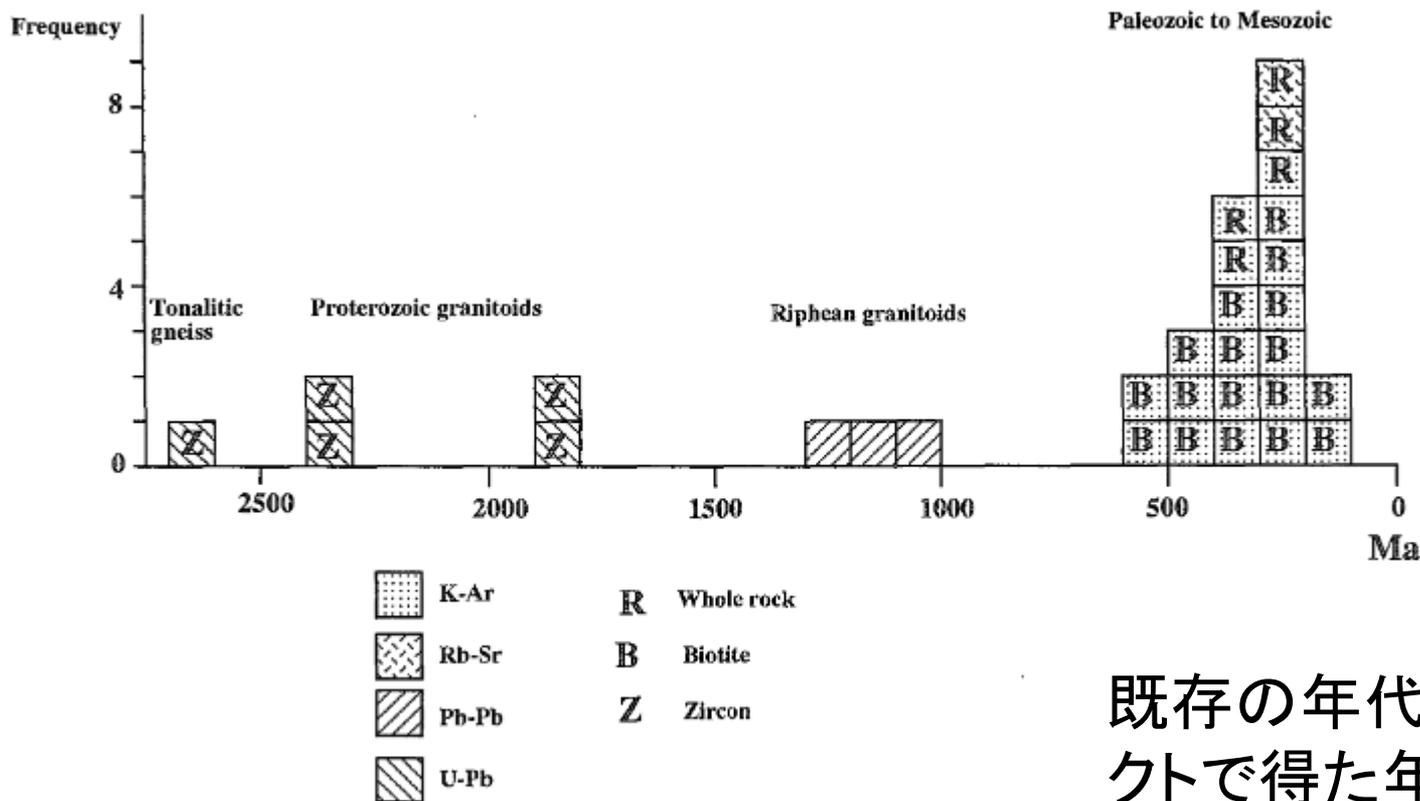


Fig. 4 Histogram of age data

既存の年代値とプロジェクトで得た年代値をまとめた。当時はICP-MSを使った年代を求めることは行われていない。

花崗岩類 Granite distribution in the area

Granitoids in the Bayankhongor area

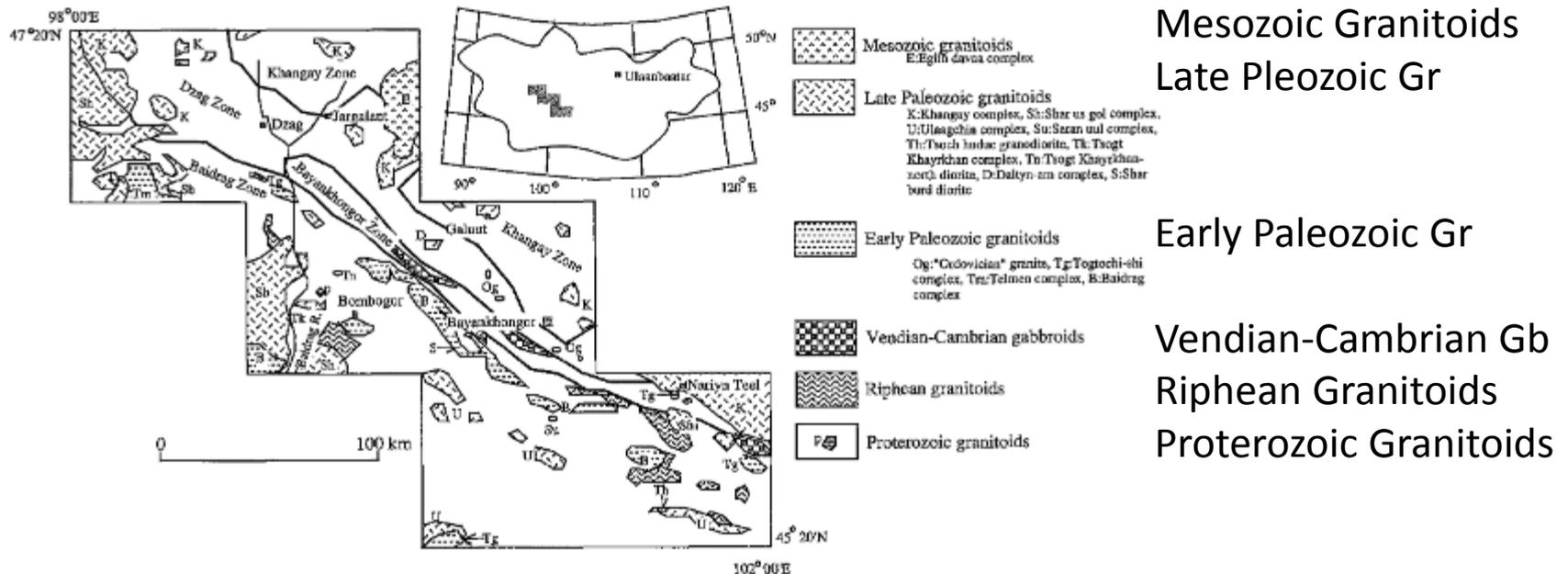


Fig. 1. Geologic map. Simplified and based upon Byamba (1985), State Geological Fund (1995) and Tungalag (1997).

花崗岩類の帯磁率 Magnetic susceptibility

Magnetic susceptibility of Granitoids in Early Paleozoic

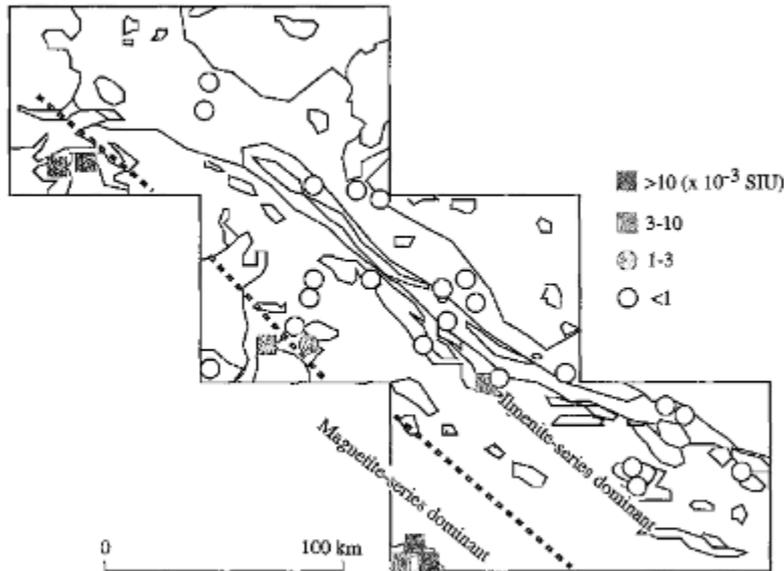


Fig. 2 Magnetic susceptibility of the granitoids in early Paleozoic.

Magnetic susceptibility of Granitoids in Late Paleozoic

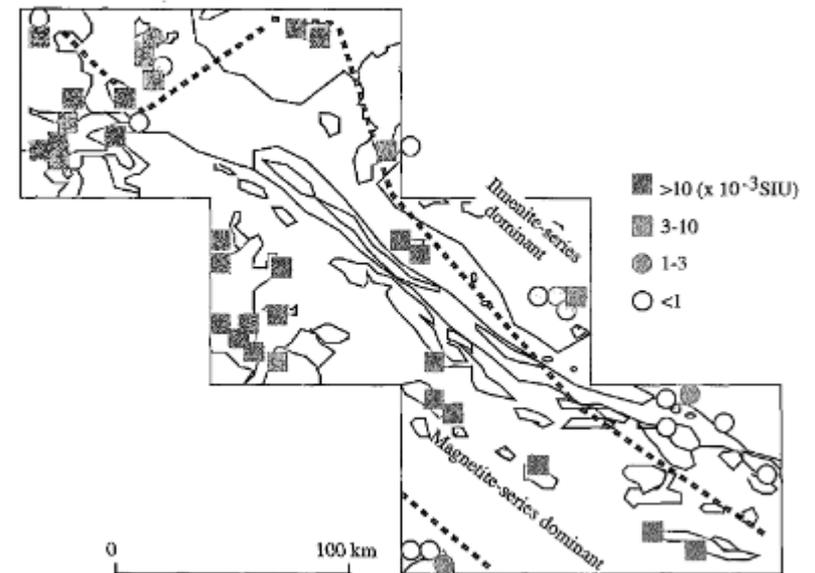


Fig. 3 Magnetic susceptibility of the granitoids in late Paleozoic.

前期古生代の花崗岩類の帯磁率
Early Paleozoic granites

後期古生代の花崗岩類の帯磁率
Late Paleozoic granites

Fe₂O₃/FeO

Frequency of the Granitoids having Fe₂O₃/FeO over 0.5 (Early Paleozoic)

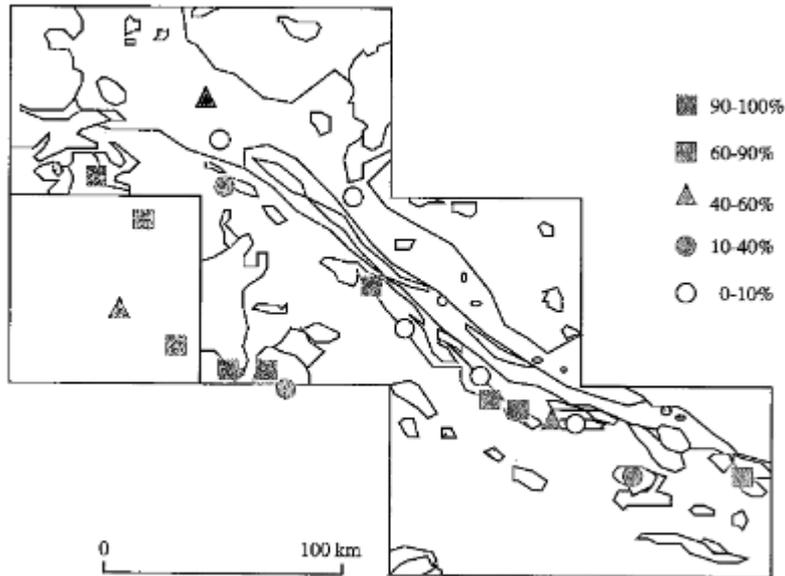


Fig. 5 Frequency of the granitoids having Fe₂O₃/FeO ratio higher than 0.5 (Early Paleozoic).

Frequency of the Granitoids having Fe₂O₃/FeO over 0.5 (Late Paleozoic)

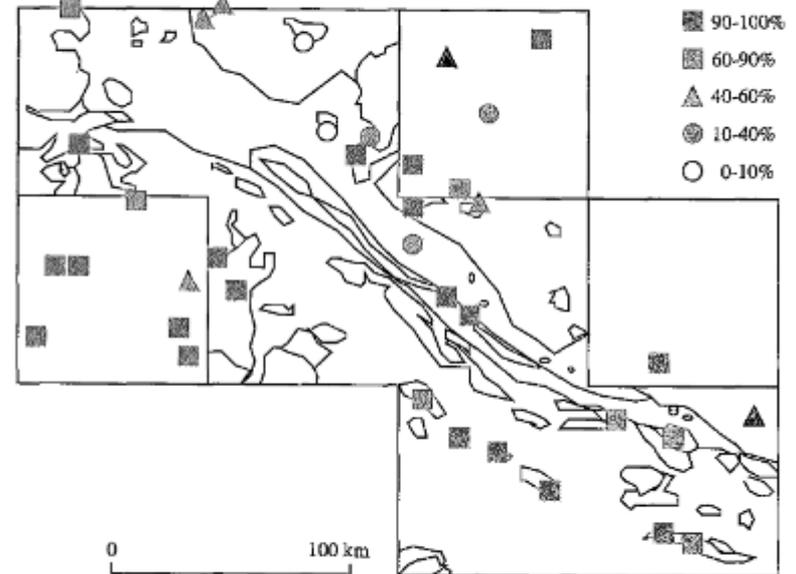


Fig. 6 Frequency of the granitoids having Fe₂O₃/FeO ratio higher than 0.5 (Late Paleozoic).

花崗岩系列のまとめ Summary

- ・リフエアンにはチタン鉄鉱系花崗岩類が卓越する。
- ・前期古生代にはチタン鉄鉱系花崗岩類が卓越するが、わずかに調査地域南西部に磁鉄鉱系花崗岩類が分布する。
- ・後期古生代には磁鉄鉱系花崗岩類が卓越する。

◎前期古生代から後期古生代にかけて磁鉄鉱系花崗岩類とチタン鉄鉱系花崗岩類の境界が北東に移動した。中後期古生代にハンガイ帯が形成され花崗岩の貫入の場が北東に移動したことで説明できる。(比較:日本の新第三紀と古第三紀-白亜紀の花崗岩と相似)

- ・中生代花崗岩類はチタン鉄鉱系である。

Ilmenite series is dominant in Late Proterozoic, ilmenite series in Early Paleozoic, Magnetite series in Late Paleozoic and Ilmenite series in Mesozoic. Pair of two series shifted towards Northeast.

後期古生代の鉱床と花崗岩系列

Ore deposits and Granite in Late Paleozoic

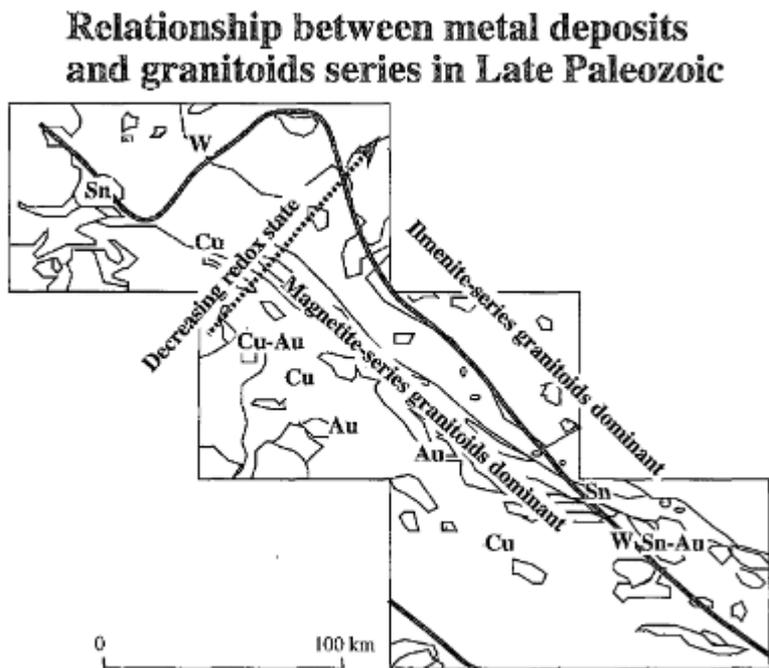


Fig. 7 Relationship between the selected metal deposits and the granitoid series in late Paleozoic.

後期古生代には銅及び金鉱床が磁鉄鉱系花崗岩類地域に分布する。スズ及びタングステン鉱床は磁鉄鉱系とチタン鉄鉱系花崗岩類の境界付近かチタン鉄鉱系花崗岩類地域に分布する。これらから調査地域の後期古生代花崗岩類は南西から北東へ還元的になることが示唆される。

Copper and gold deposits occur in Magnetite series, while Tin and Tungsten deposits in Ilmenite series.

付録2: 花崗岩の鉱物学で花崗岩
を深く知る

Appendix 2: More deep research
with mineralogy of granites

花崗岩類の鉱物学 Mineralogy of granites

(その1)角閃石圧力計 Hornblende geobarometer

相律の復習(Phase Rule)

相の数(P)、成分の数(C)、系の自由度(F)の関係

$$F=C+2-P$$

例;一成分系で3つの相が平衡にあると、 $F=0$. 温度と圧力が同時に確定。

例;2つの相が平衡にあると、 $F=1$. 温度を決めると圧力が確定、圧力を決めると温度が確定。

カルクアルカリ花崗岩;

SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , H_2O ----- $C=10$

角閃石、黒雲母、斜長石、正長石、石英、(スフェーン、磁鉄鉱、チタン鉄鉱)のうちの2相、固結直前メルトと気相と共存 ----- $P=9$

$$F=C+2-P=3$$

花崗岩の固結直前(ソリダス)の温度は 700°C 、温度依存性ない。

斜長石の組成はオリゴクレス~アンデシンで一定。

自由度2減り、 $F=1$ 、圧力だけが変数。

($f\text{O}_2$ が変数とする考えもあるが、スフェーン、磁鉄鉱、チタン鉄鉱のうち2つあれば大きく変化しない。)

(continued)

Total Al content ($Al(t)$) of magmatic hornblende coexisting with melt, hydrous fluid, biotite, quartz, K—feldspar, plagioclase (oligoclase to andesine) and two phases of sphene, magnetite or ilmenite in granitoids correlates linearly with crystallization pressure at the time of intrusion.

Phase rule; $F=C+2-P$

$C=10$ (SiO_2 , TiO_2 , --, H_2O); $P=9$ (hornblende, biotite, --, melt, vapor)

$F=10+2-9=3$, Solidus temperature= $700^{\circ}C$, Composition of plagioclase=Oligoclase

Therefore, $F=1$, which means pressure is variable.

なぜAlが指標になるか？

Why does Al become an indicator?

固結直前の単純化した反応式は、

2石英+2アノーサイト+黒雲母=角閃石+正長石

$2x\text{SiO}_2 + 2xCa\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

$= \text{Ca}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2 + \text{KAlSi}_3\text{O}_8$

このとき角閃石は、(Mg, Fe)SiとAlAlの置換(チェルマク置換)が可能である。そこで角閃石のAl量が圧力計の指標となる。

Simplified reaction is

$2\text{Quartz} + 2\text{Anorthite} + \text{Biotite} = \text{Hornblende} + \text{Orthoclase}.$

Within hornblende, (Mg, Fe)Si can replace Al Al. As a result, Al content becomes an indicator of pressure at crystallization.

角閃石圧力計 Hornblende geobarometry

Hammerstrom and Zen (1986)

$$P(\pm 3\text{kbar}) = -3.92 + 5.03\text{Al}(t)$$

Pは圧力(kbar)、Al(t)は角閃石のAlの総量(O=23)

Hollister et al. (1987) 2-8kbarの圧力計、中圧の参考情報を多くした。

$$P(\pm 1\text{kbar}) = -4.76 + 5.64\text{Al}(t)$$

Schmidt (1992) 圧力を規制した実験を行った。2.5-13kbarの圧力計

$$P(\pm 0.6\text{kbar}) = -3.01 + 4.76\text{Al}(t)$$

以上、角閃石圧力計の初期の研究の紹介、最近の動向は榎並(2013)の「岩石学」に載っている。

Pressure estimated from Al-in-hornblende (Takahashi, 1993)

第2表 角閃石中の Al 総量から推定した中国地方の花崗岩類の圧力(kbar)

Table 2 Pressure(kbar) estimated from Al-in-hornblende in the granitoids of Chugoku District in Japan

Belt		Central Chugoku	Eastern Chugoku
SAN-IN		Daito gd <2	Ningyo-pass gr <2, 3.2, 3.4
		Yokota gr <2	Okutsu gd 2.2
SAN-YO	Stock		Small granitic bodies 2.9, 3.9, 4.2
	Batholith	Hiroshima gr 3.3, 3.4, 4.1	Mannari gr 3.6
RYOKE	Massive Gneissose	Takanawa gd 4.2	Shiratori gr 4.0
			Shido gd 4.7, 5.0
			Shido gr 5.2, 6.4, 8.5

Numbers are pressure (kbar) estimated from chemical data of Tainosho et al. (1979), Czamanske et al. (1981) and Takahashi (1989), using geobarometer of Hollister et al. (1987) (2-8kbar) and Schmidt (1992) (8-13kbar). gd: granodiorite, gr: granite.

中部地方領家帯の花崗岩類の定置深度(圧力)
Emplacement depth of granites in Chubu area

新城トータル岩(Shinshiro Tonalite)
3.5 kbar

Anderson and Smith (1995)の角閃石圧力計

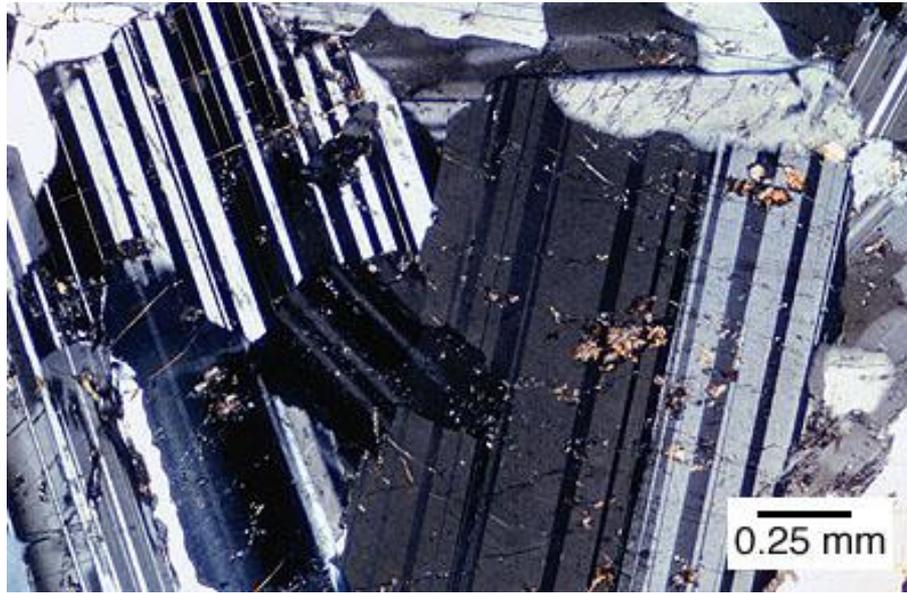
武節花崗岩(Busetsu granite)
1.8-2.7 kbar

Wu et al. (2004) のザクロ石-黒雲母-斜長石-石英圧力計

五ノ井(2016)より

名古屋大学大学院 環境学研究科地球環境科学専攻 平成27年度修士論文
審査会要旨集, p.11.)

花崗岩の鉱物学その2-斜長石双晶



斜長石双晶

戦後直後の研究 Gorai (1951)

偏光顕微鏡下で斜長石
双晶をタイプ分けする

タイプ1---A双晶

タイプ3---C双晶

タイプ4---C双晶

タイプ2---AまたはC双晶

タイプ2でAかCを区別のためには
ステージを回転してレターデー
ションを検することなどを行う

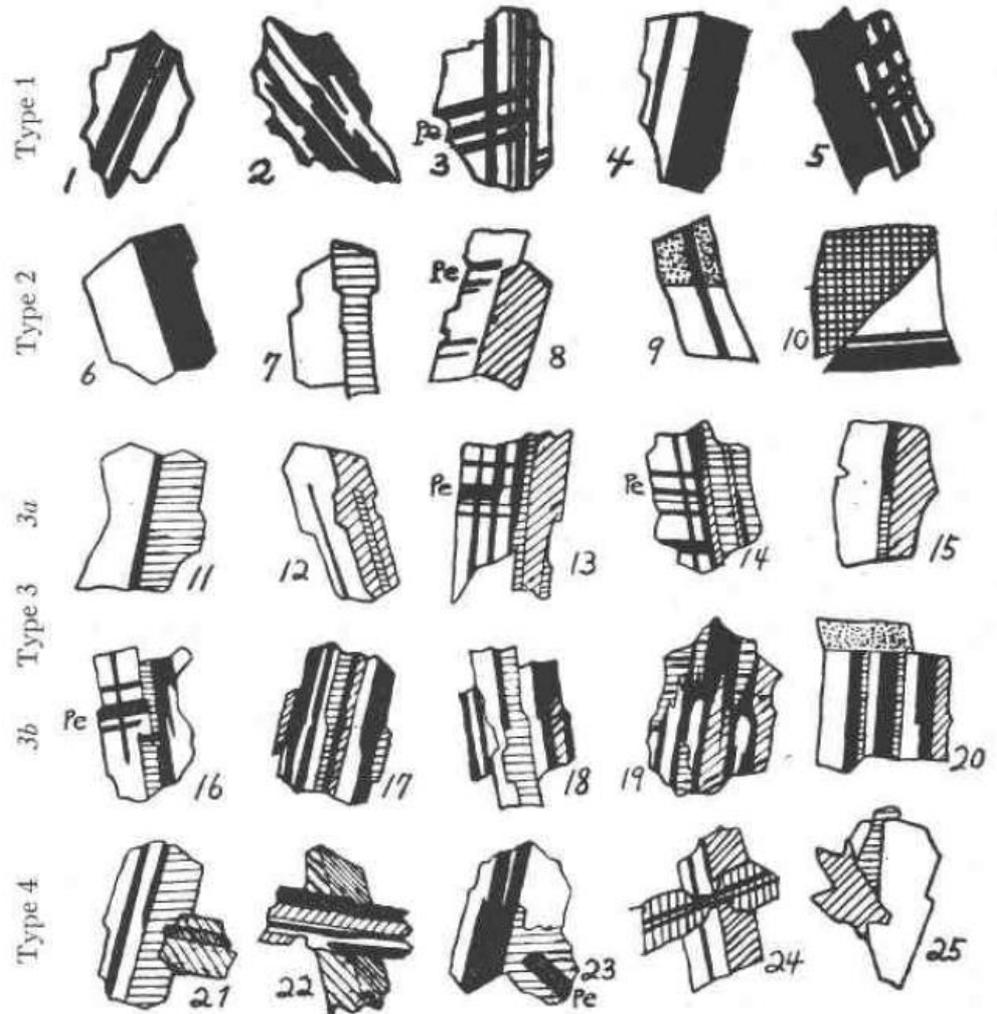


FIG. 1. Four types of twinned plagioclases.

Type 1. Polysynthetic twins and their modifications.

Type 2. Simple twins and their modifications.

Type 3. Complex twins and their modifications.

Type 4. Penetration twins.

Plagioclase of various granitic rocks

機器が十分でなかった当時の日本では、花崗岩研究で有力な手法となった。

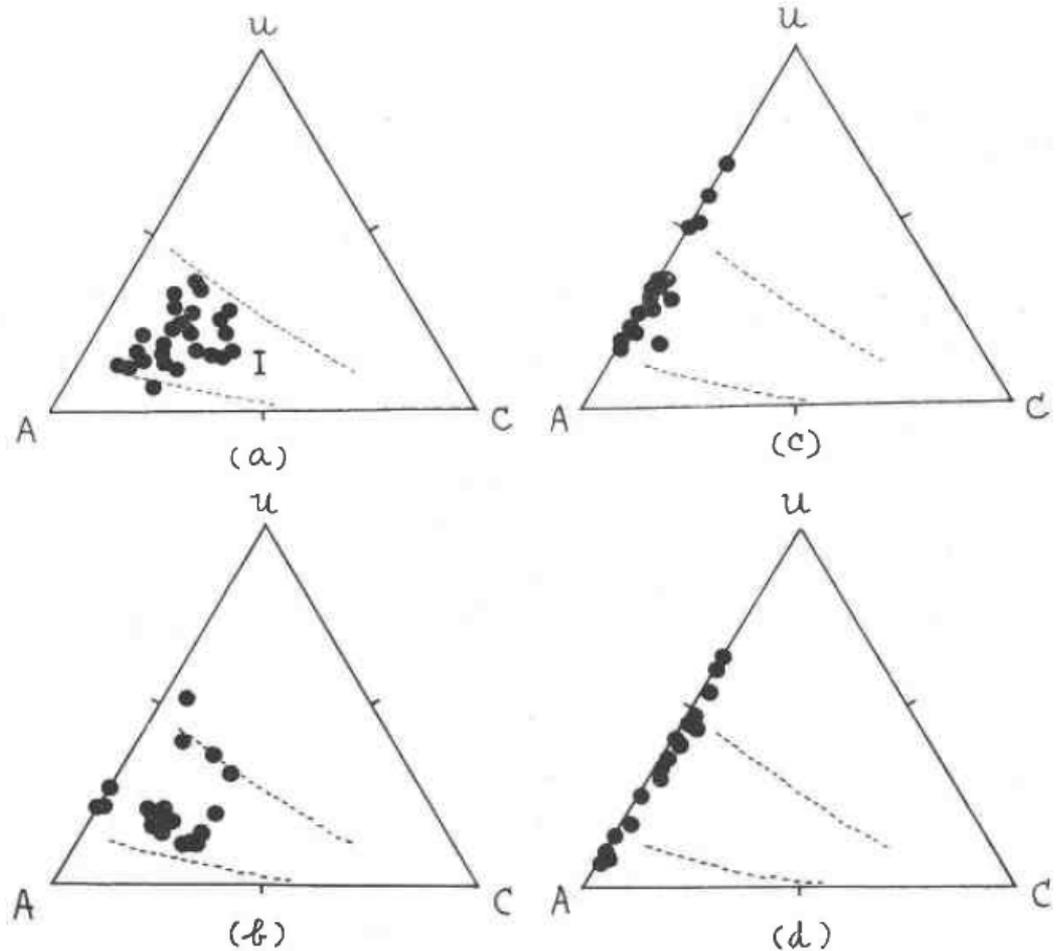
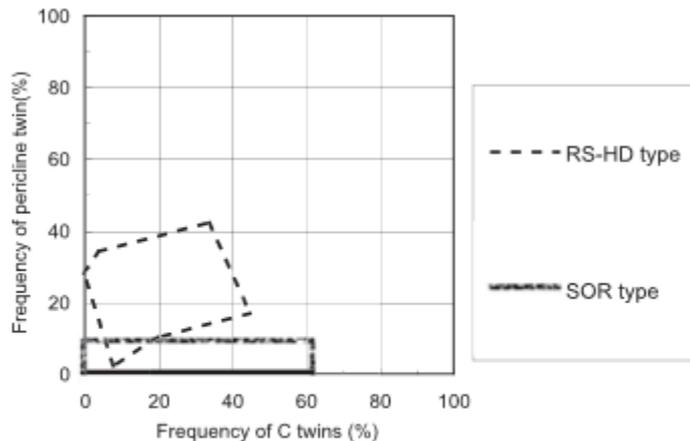


FIG. 13. U:A:C ratios in the plagioclase of various granitic rocks.
(a) Granitic rocks occurring as batholiths and stocks.
(b) Granitic rocks occurring as dikes and sheets.
(c) Granitic rocks occurring as lit-par-lit veins of injection-gneisses.
(d) Plutonic-looking rocks of Hida Plateau.
I = Field of typical igneous plagioclase.

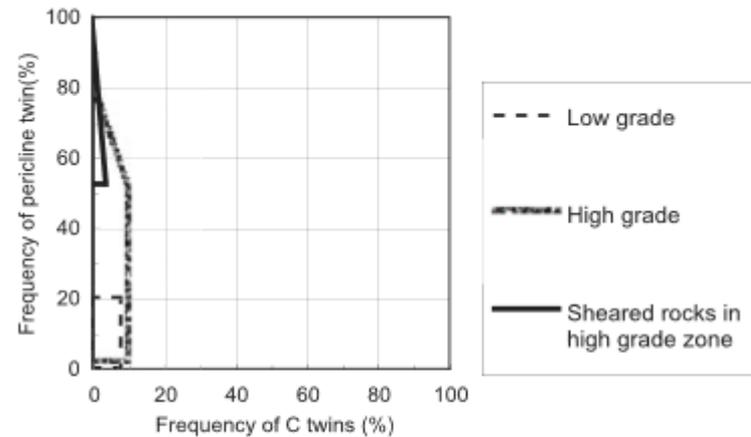
斜長石双晶再訪 Revision of Plagioclase twinning

斜長石双晶を光学的に同定し、それを岩石の性質と関連付ける研究は1950年代に盛んに行われた。議論の多くは出尽くしているようだが、偏光顕微鏡の記載の一環で双晶を同定しておくことで新たな発見があるかもしれない。2000年代に提案した図を以下に記す。



第3図 斜長石双晶に基づく花崗岩類識別図

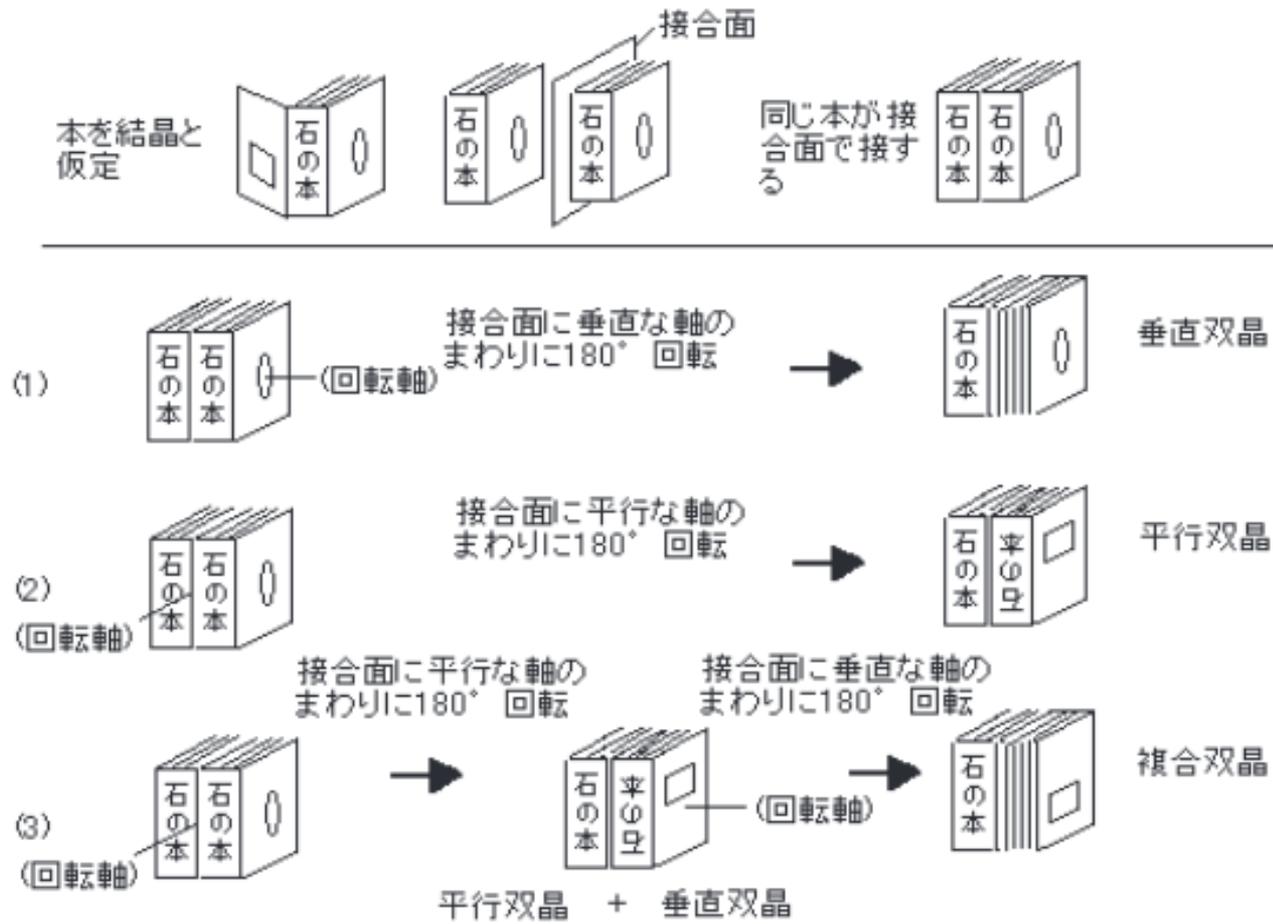
Fig. 3 Discriminative diagram for granitic rocks based on plagioclase twinning laws



第4図 斜長石双晶に基づく砂泥質(石英長石質)変成岩類識別図

Fig. 4 Discriminative diagram for psammitic to pelitic (quartz-feldspathic) metamorphic rocks based on plagioclase twinning laws

双晶入門 Concept of twinning



第1図
双晶の概念を2冊の本にたとえた解説。(1), (2), (3)の動作を本文中で説明してある。

本やマッチ箱で実際に上記の操作をしてみると良い。

斜長石双晶形式

Definition of twinning laws

第1表 An組成が30-50モル%の低温型斜長石で産出する双晶形式。

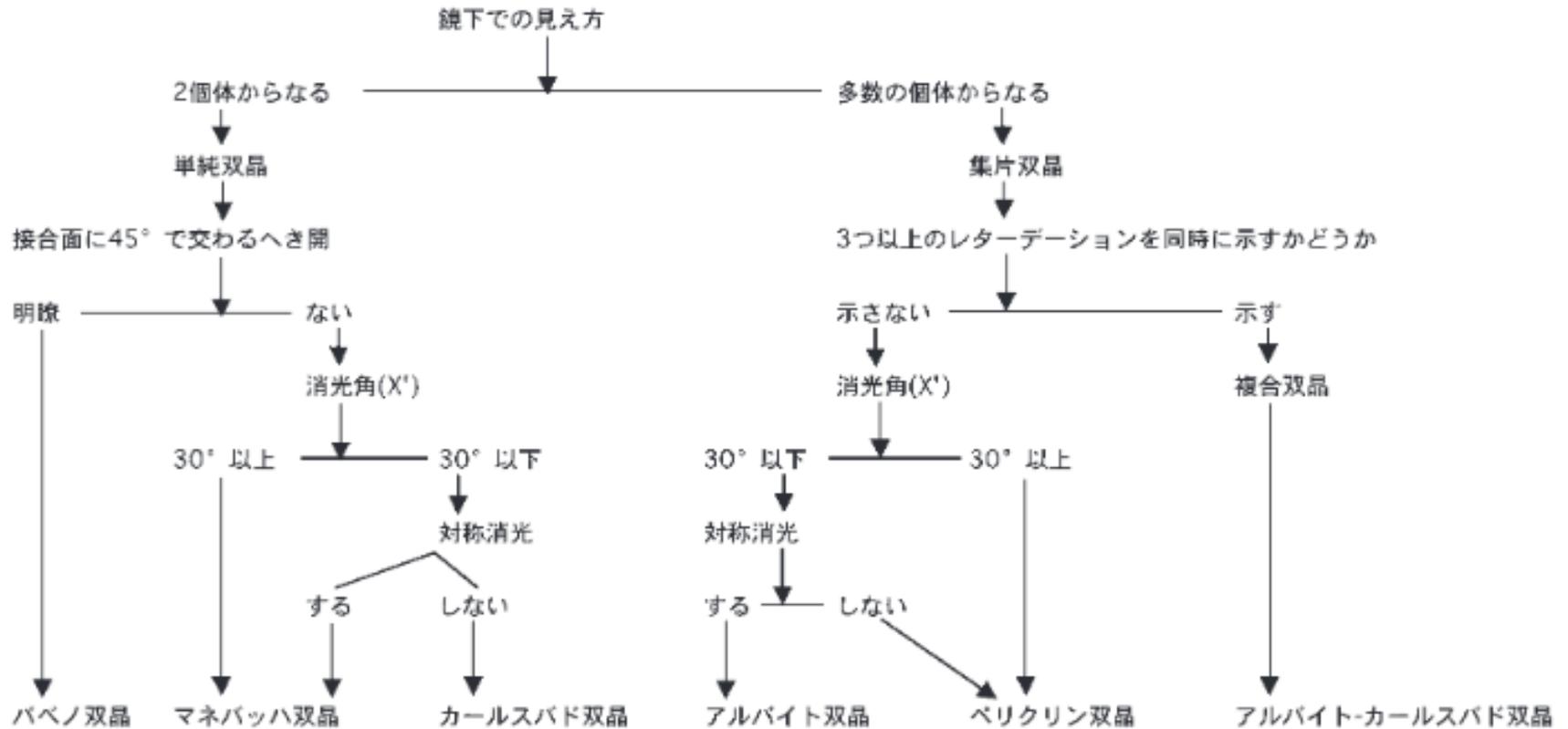
双晶の種類 鏡下での見え方 接合面	垂直双晶		平行双晶		複合双晶
	単純双晶	集片双晶	単純双晶	集片双晶	複合双晶
(010) (へき開)		アルバイト	カールスバド (双晶軸：c軸)		アルバイト-カールスバド (双晶軸：(010)面上でc軸に垂直な軸)
(001) (へき開)	マネバツハ			アクライン* (双晶軸：b軸)	
菱形断面 (b軸を含む面)				ペリクリン* (双晶軸：b軸)	
(021)または(0 $\bar{2}$ 1) (へき開に斜交)	バペノ				

*：An組成が30-50モル%の斜長石では光学的に区別できない

太字：普通に産出する双晶

斜長石同定法(オリゴクレス-アンデシン)

Practical method to know plagioclase twinning



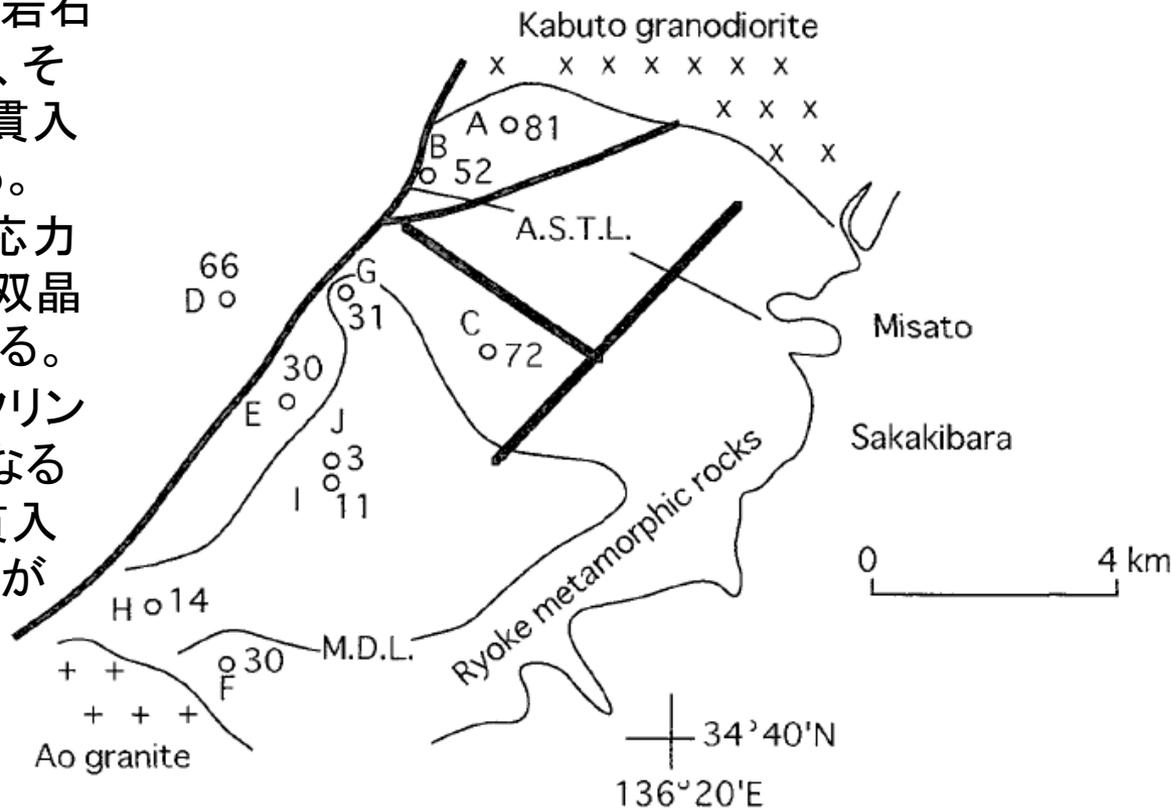
第2図 An組成が30-50モル%の低温型斜長石で接合面が薄片に垂直な場合の双晶形式決定法。

薄片を用意したので興味がある方は実際に偏光顕微鏡で観察してほしい。

三重県の領家変成岩中のペリクリン双晶

Case study in the metamorphic rocks in Mie pref.

この花崗岩は周囲の岩石
に変成作用を与えて、そ
れ自身変形しながら貫入
固結したとされている。
高温のもとでせん断応力
をかけるとペリクリン双晶
が生成する実験がある。
花崗岩の近くでペリクリン
双晶の頻度が大きくなる
ことから、花崗岩の貫入
で高温下で変形作用が
あった。



第3図 津西部地域の領家変成岩類における斜長石双晶中のペリクリン双晶の頻度 (%)

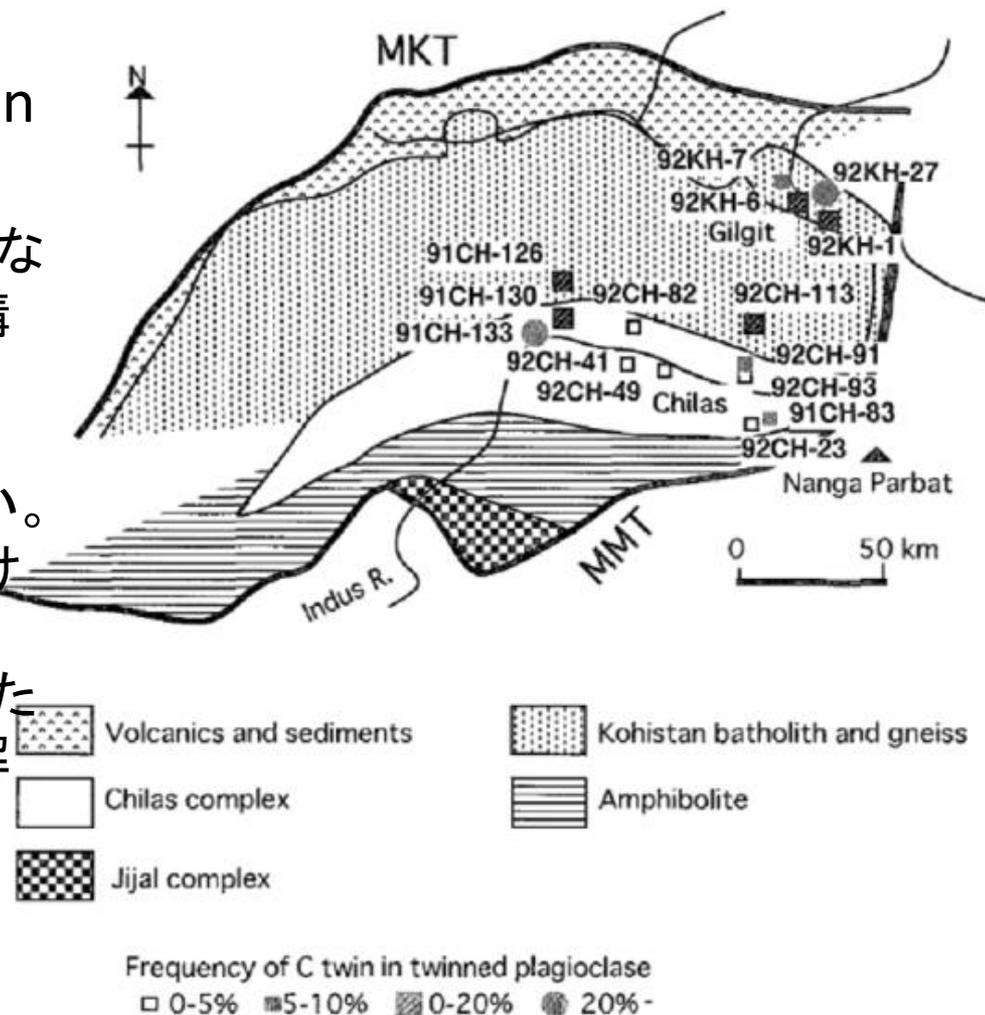
A.S.T.L.; 紅柱石珪線石転移線, M.D.L.; 白雲母消失線. AからJは第2図のものに対応する.

Fig. 3 Frequency of pericline twin in twinned plagioclase of the Ryoke metamorphic rocks in the west of Tsu City

A.S.T.L., andalusite-sillimanite transition line; M.D.L., muscovite disappearance line. A to J correspond to them of Fig. 2.

Case study:
Chilas complex in Pakistan
チラス岩体

岩体は褶曲していてさまざまな部分が露出していると地質構造から指摘されている。斜長石双晶は、中央部でC双晶の頻度が大きいが東側で小さい。そこで東側は変成作用を受けた深部が露出しているが、中央部は貫入岩の性質が残った岩体上部が露出していると解釈できる。



第6図 パキスタン北部、チラス岩体とコヒスタンバソリスの斜長石中のC双晶の頻度
 Fig. 6 Frequency of C twins in twinned plagioclase in the Chilas complex and Kohistan batholith, northern Pakistan