

(千葉大学学位申請論文)

東南極，日の出岬のトーナライトの
岩石学的研究

2015年1月

千葉大学大学院理学研究科
地球生命圏科学専攻

孫 羽

鉱物略号

Ab:	albite	アルバイト
Act:	actinolite	アクチノ閃石
Afs:	alkali feldspar	アルカリ長石
Alm:	almandine	アルマンディン
Amp:	amphibole	角閃石
An:	anorthite	灰長石
And:	andalusite	紅柱石
Ap:	apatite	リン灰石
Arg:	aragonite	アラゴナイト
Brn:	bronzite	古銅輝石
Bt:	biotite	黒雲母
Cal:	calcite	方解石
Coe:	coesite	コーサイト
Cpx:	clinopyroxene	単斜輝石
Crd:	cordierite	堇青石
Crn:	corundum	コランダム
Cum:	cumingtonite	カミングトン閃石
Di:	diopside	ディオプサイド
Ed:	edenite	エデン閃石
Ep:	epidote	緑簾石
Grs:	grossular	グロッシュラー
Grt:	garnet	ザクロ石
Hbl:	hornblende	ホルンブレンド
Hem:	hematite	赤鉄鉱
Hyp:	hypersthene	紫蘇輝石
Ilm:	ilmenite	イルメナイト
Jd:	jadeite	ヒスイ輝石
Kfs:	K-feldspar	カリ長石
Ky:	kyanite	藍晶石
Lws:	lawsonite	ローソン石
Mag:	magnetite	磁鉄鉱
Mnz:	monazite	モナザイト
Ms:	muscovite	白雲母
Nph:	nepheline	霞石

Ol: olivine カンラン石
Omp: omphacite オンファス 輝石
Opq: opaque mineral 不透明鉱物
Opx: orthopyroxene 斜方輝石
Or: orthoclase 正長石
Pg: paragonite パラゴナイト
Pl: plagioclase 斜長石
Prp: pyrope パイロープ
Qz: quartz 石英
Rt: rutile ルチル
Scp: scapolite 柱石
Shl: sahlite サーラ輝石
Sil: sillimanite 珪線石
Spl: spinel スピネル
Spn: sphene (titanite) スフェーン
Sps: spessartine スペッサルティン
Wo: wollastonite 珪灰石
Zo: zoisite ゴイサイト
Zrn: zircon ジルコン

本論では、古銅輝石とサーラ輝石を除く、鉱物の略号は Whitney and Evans (2010) から引用した。

目次

Abstract	3
要旨	4
第1章 はじめに	6
1-1 研究の背景	6
1-1-1 アダカイトの研究の現状	7
1-1-2 日の出岬のアダカイト質トーナライトの特徴	10
1-2 日の出岬のトーナライトの研究史	11
1-3 問題点	12
第2章 地質概説	14
2-1 南極の地質	14
2-2 リュツオ・ホルム岩体の地質	16
2-3 日の出岬の地質	19
2-4 日の出岬の岩石とリュツオ・ホルム岩体の関係	20
第3章 岩石記載	23
3-1 主要なトーナライト.....	23
3-2 安山岩質岩脈	27
3-3 グラニュライト	28
3-4 石灰珪質岩とその中の細脈状トーナライト	34
3-4-1 石灰珪質岩	34
3-4-2 細脈状トーナライト	36
第4章 全岩化学組成	39

4-1	主成分元素	39
4-1-1	分析方法	39
4-1-2	分析結果	39
4-2	微量元素と希土類元素	40
4-2-1	分析方法	40
4-2-2	分析結果	41
第5章 Sr-Nd 同位体比組成		44
5-1	分析方法	44
5-2	Nd モデル年代値 (T _{DM})	44
5-3	Sr-Nd 同位体比特徴	45
第6章 考察		47
6-1	モデル計算によるトーナライトの結晶分化の検討	47
6-2	トーナライトとグラニュライトとの成因関係	49
6-3	日の出岬のトーナライトマグマの成因	52
6-3-1	日の出岬のトーナライトの岩石化学特徴	52
6-3-2	日の出岬のトーナライトと石灰珪質岩との関係	56
6-3-3	日の出岬のトーナライトの藍晶石の起源	59
おわり		63
謝辞		65
引用文献		66
図		83
表		141

Abstract

Adakitic rocks play an important role in better understanding of the geodynamic formation and evolution of the granitic continental crust throughout Earth's history. The Proterozoic tonalites occur in Cape Hinode, East Antarctica, and have similar adakitic chemical compositions. They are characterized by the occurrence of xenocrystic garnet and kyanite, and contain enclaves of orthopyroxene-bearing ultrabasic-intermediate and calc-silicate metamorphic rocks. In this study, we have carried out petrologic and geochemical studies on the tonalites and associated rocks from Cape Hinode. The geochemical data and calculated results suggest that fractional crystallization is as a plausible evolutionary process to cause the wide range of compositions of tonalites, and some ultrabasic-intermediate enclave rocks are the products of fractional crystallization. The mode of occurrence of kyanite suggests that it formed in a silica-oversaturated environment and later reacted with silica-undersaturated magmas which were relatively H₂O-rich upon ascent of magmas. The chemical and textural features of calc-silicate enclaves suggest that a series of dehydration melting reaction of epidote with the other minerals took place with decompression upon ascent of tonalitic magmas. Since tonalites near such calc-silicate enclaves show a non-adakitic geochemistry, the significance of epidote as a hydrous mineral has been confirmed in the genesis of adakitic magmas by dehydration melting of slab.

要 旨

東南極、プリンス・オラフ海岸東部の日の出岬には、斜長岩によく似た見かけを呈し、まれではあるが捕獲結晶状の藍晶石を含む中期原生代のトーナライトが産出する。それは白雲母や黒雲母、ザクロ石を含むものからホルンブレンドや単斜輝石、斜方輝石を含むものまで多様な鉱物組成を示し、全体として太古代 TTG (Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite) や高 SiO_2 アダカイトに類似した化学組成を有している。そのトーナライト中には斜方輝石を含む超苦鉄質～中性岩 (グラニュライト) や石灰珪質岩の岩塊と安山岩質岩脈も産出する。本研究では、日の出岬のトーナライトとそれに伴う岩石を対象として、岩石学及び岩石化学的研究を行った。

広範な化学組成のトーナライトに対しては、まず、主成分元素による結晶分化作用の可能性と分別鉱物の割合を検討した。さらに、その割合を用いて、分化過程における微量元素の変化を Rayleigh 分別モデルで検討した。その結果、トーナライトの全岩化学組成の多様性は同一のマグマから斜方輝石、単斜輝石、斜長石、ホルンブレンド、黒雲母と不透明鉱物の結晶分別作用に起因しており、特に斜長石とホルンブレンドが大きな役割を果たしたと考えられる。

Rb-Sr 系及び Sm-Nd 系の全岩アイソクロン年代値や初生値からは日の出岬のアダカイト質トーナライトの成因としては、約 10 億年前に沈み込んだスラブの部分溶融が最有力であり、安山岩質岩脈はそれとは異なる古い起源物質に由来していることが示された。

グラニュライトの岩塊に対しては、地球化学特徴と Nd モデル年代値を検討した結果、大半のものが斜方輝石、単斜輝石、斜長石、ホルンブレンド、黒雲母などの結晶がトーナライトマグマから沈積したものである可能性が高いこ

とが明らかになった。

石灰珪質岩塊中にも細脈状のトーナライトが産出するが、それは特有の鉱物組成（有色鉱物は濃緑色の単斜輝石）と全岩化学組成（高いCaOとYの含有量、低いアルミナ過飽和度など）を持ち、石灰珪質岩と反応したことを示唆している。その細脈状のトーナライト中に高い頻度で藍晶石が出現し、その一部は石英を包有し、周囲をコランダムやスピネルを伴う灰長石コロナによって取り囲まれており、SiO₂成分に過剰な環境で成長したが、後にSiO₂成分に不飽和で比較的H₂Oに富んでいたマグマと反応したことを示唆している。

トーナライト中の石灰珪質岩ではCaザクロ石と灰長石のシンプレクタイト状の連晶組織が特徴的に見られるが、それは日の出岬の周辺に分布する角閃岩相のリュツォ・ホルム岩体の緑簾石+石英の組合せを持つ石灰珪質岩と対照的である。その連晶組織と全岩の化学組成等から、それは緑簾石を主とする岩石であったことと、トーナライトマグマによって地下深部から持ち運ばれたものであり、マグマの上昇に伴う減圧によって一連の緑簾石分解反応が進行したことを考えられる。また、石灰珪質岩塊中の脈状トーナライトが非アダカイト質であることから、スラブの脱水融解反応において、緑簾石の挙動を理解することが重要であることが明らかになった。アダカイト質マグマの成因論ではスラブ融解説が有力であり、含水鉱物として緑簾石は角閃石とともに重要であるにも関わらず、ほとんど注目されてこなかった。本研究によって、緑簾石がアダカイト成因論に新しい視点と手掛りを与えることが示された。

1 はじめに

1-1 研究の背景

地球を特徴づける花崗岩質大陸地殻の形成・発達過程を解明することは地球を理解する上で重要である。その際、特にアダカイト質な化学組成をもつ火成岩類が注目され、世界各地からアダカイト質岩の産出が報告るとともに、成因に関する活発な議論が行われてきた。土谷 (2008) によって、アダカイト質岩の地質学的重要性が以下のようにまとめられている：

(1) 大陸地殻の起源及び発達：太古代に形成された大陸地殻は主にトーナライト (Tonalite) - トロニエム岩 (Trondjemite) - 花崗閃緑岩 (Granodiorite) (以下 TTG) と呼ばれる花崗岩からなる。それは K に乏しく、Na に富み、Y や重希土類元素に枯渇し、Sr に富むことなどの化学的な特徴を持つ。原生代以降ではアダカイト質火成岩が太古代 TTG に類似した化学組成の特徴を有しており (Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999) , 同様のプロセスで形成された可能性が高い。このように、アダカイト質岩は地球史初期における大陸地殻の形成機構の解明の鍵を握る重要な岩石であると考えられる。

(2) 地殻-マントル間の物質循環を示す岩石：1.5GPa 以上の高圧条件下での部分熔融実験によって、K に乏しい玄武岩質岩からアダカイト質メルトが得られている。アダカイト質メルトが生成されるのは、角閃石、ザクロ石とルチルなどが部分熔融時の残留固相として含まれ、斜長石は含まれないからである (Sen and Dun, 1994; Rapp *et al.*, 1991; Xiong *et al.*, 2005)。このように高圧条件下で、玄武岩質岩からアダカイト質マグマが生成される時の残存固相は密度が高いため、そのままマントルに沈み込める。したがって、アダカイト質マグマは

地殻-マントル間での物質循環の過程で形成されると考えられる。これらに対して、地殻内の低圧条件下で、玄武岩質岩の部分溶融によって中間質-珪長質マグマが生成される場合、残存固相に斜長石が含まれるため低密度となり、マントル中に沈んでいくことができない。したがって、この場合、中間質-珪長質マグマ生成は地殻内での物質分化の結果と考えられる。以上の点から、アダカイト質岩は地殻-マントル間の物質循環を解明する際にも重要である。

1-1-1 アダカイトの研究の現状

アダカイトの定義及び岩石化学的特徴

アダカイトは、元来は、アリューシャン列島の Adak 島に産出する特殊な化学組成を持った火山岩類に対して定義されたもので、新生代の島弧・海溝系において若くて、熱い海洋地殻が沈み込み、部分溶融すること（スラブメルティング）によって生成されたと考えられた (Defant and Drummond, 1990)。アダカイトの岩石化学的特徴は Na に富み、一般的な島弧火成岩に比べて高い SiO_2 (>56 wt %) や Al_2O_3 (>15 wt %), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比, LREE (軽希土類元素) / HREE (重希土類元素) 比を持ち、特に Sr に富み Y に乏しいため、Sr/Y 比が高いことなどが挙げられる (Defant and Drummond, 1990; Martin *et al.*, 2005)。以上の特徴から、Sr/Y-Y 図 (Defant and Drummond, 1990) と $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - Yb_N 図 (Martin, 1999) の二つの判別図がよく使用される。これらの特徴は、実験岩石学的研究 (Rapp *et al.*, 1991; Rapp and Watson, 1995; Sen and Dunn, 1994; Xiong *et al.*, 2005; Winther and Newton, 1991) から、玄武岩質岩が高圧条件下で部分溶融する時の残存固相として Y や重希土類元素に富むざくろ石や角閃石と、Nb や Ta に富むルチルが含まれ、Sr や Eu に富む斜長石が含まれないことで説明されてき

た。

アダカイトの分類

アダカイト質岩は多様である。Martin *et al.* (2005) は、世界各地から報告されたアダカイトの分析値を検討し、 SiO_2 が60wt% 前後を境にした化学組成の系統的な特徴の違いを見いだして、アダカイトを SiO_2 の高いアダカイト ($\text{SiO}_2 > 60\text{wt}\%$, HSA: high silicate adakite) と SiO_2 の低いアダカイト ($\text{SiO}_2 < 60\text{wt}\%$, LSA: low silicate adakite) に分類した。HSA は、スラブメルティング (Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999) あるいは厚い大陸地殻底部における玄武岩質岩の部分溶融 (Atherton and Petford, 1993; Zhang *et al.*, 2001a) により、一方 LSA はアダカイト質メルトに汚染されたマントルが部分溶融することによって形成されたと考えられた。また、HSA がエクロジャイトやザクロ石角閃岩の部分融解実験 (Rapp *et al.*, 1991; Sen and Dunn, 1994) によって生成されたメルトの組成よりも Mg や Cr, Ni などに富むことについては、スラブメルティングによって生成したメルトが上昇する過程でマントルと反応したことによる影響を示しているものと説明されている。

このほかに、アダカイト質岩を以下のように分類することもある：(1) 典型的なアダカイト；一般的な島弧火成岩に比べ Al, Na, Sr に富む (Defant and Drummond, 1990; Drummond and Defant, 1990), (2) Mg に富むアダカイト；典型的なアダカイトに比べ Mg# 値 {mol. $100 \times \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO})$ (total Fe)} が高く, Cr, Ni に富む (Kelemen, 1995; Yogodzinski *et al.*, 1995; Shimoda *et al.*, 1998), (3) 太古代の花崗岩 (TTG)；典型的なアダカイトに比べ Si に富み, Mg に乏しい。2.5Ga~4Ga の 90% の太古代大陸地殻は TTG である (Jahn *et al.*, 1981; Martin *et al.*, 1983)。 (4) K に富むアダカイト；典型的なアダカイトより K_2O に

富む (Atherton and Petford, 1993; Zhang *et al.*, 2001a; Xu *et al.*, 2002; Xiao and Clemens, 2007)。

アダカイトの成因論

最初、アダカイトマグマは、若くて熱い海洋地殻が沈み込んで部分融解すること(スラブメルティング)に起因すると考えられた (Defant and Drummond, 1990; Peacock *et al.*, 1994)。しかし、その後の研究で、例えば Castillo (2012) が述べているように必ずしも若くないスラブのメルティングの可能性も指摘されてきた。すなわち、アダカイトが形成されるテクトニクスとして、マントル中に残ったスラブの断片の溶融、水平-低角度の沈み込み (Gutscher *et al.*, 2000; Beate *et al.*, 2001; Bourdon *et al.*, 2002), スラブの引き裂き (Calmus *et al.*, 2003; Yogodzinski *et al.*, 2001; Thorkelson and Breitsprecher, 2005), 沈み込みの開始期 (Sajona *et al.*, 1993), 沈み込みの末期 (Sajona *et al.*, 1996) および島弧衝突期 (Sajona *et al.*, 1994, 2000) などである。これらは、スラブが若くない場合でも、特定の条件でスラブが部分溶融すれば、アダカイト質マグマは発生する可能性があるということである。

さらに別のアダカイトマグマの成因論として、厚い大陸地殻の底部における玄武岩質岩の部分融解説 (Atherton and Petford, 1993; Zhang *et al.*, 2001a), マントル起源の玄武岩質マグマの結晶分化作用説 (Castillo *et al.*, 1999; Gao *et al.*, 2009; Macpherson *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2007; Takahashi *et al.*, 2005), 下部地殻起源マグマの結晶分化作用説 (矢田・大和田, 2003) などの説も提案されてきた。このようなアダカイトの成因論の多様性はアダカイトを特徴づける化学的な特徴が比較的単純なことに起因する。

1-1-2 日の出岬のアダカイト質トーナライトの特徴

東南極の原生代末期～古生代初期のリュツォ・ホルム岩体分布域内に位置する日の出岬に、中期原生代のトーナライトが産出する。それは先行研究では「斜長岩的片麻岩」, 「トロニウム岩質片麻岩」, 「変成トロニウム岩」, 「変成トーナル岩」などと呼ばれたこともあるが、変成作用の効果は限定的であり、組成的にはほとんどがトーナライトであるため、本研究では一括して深成岩としてのトーナライトと呼ぶことにする。このトーナライトには以下のような特徴が見られる：

(1) トーナライトは太古代の TTG や高 SiO_2 アダカイト (HSA) に類似した全岩化学組成を持つ (Ikeda *et al.*, 1997 など)。

(2) トーナライトには有色鉱物として黒雲母やホルンブレンド、単斜輝石が出現するが、それらに藍晶石が共存することがある (Hiroi *et al.*, 2006, 2008)。一般的にホルンブレンドや単斜輝石のようなアルミナに乏しい鉱物は藍晶石と共存しないため、日の出岬のアダカイト質岩に藍晶石が含まれることは世界的にも珍しく、一般にアダカイト質岩にはこのような岩石が伴われることがないため (土谷, 2008), これらもアダカイト質マグマの成因を解明する上では重要な手掛りになると考えられる。

(3) トーナライトの中には斜方輝石を含む超苦鉄質～中性岩 (グラニュライト) と石灰珪質岩の岩塊が産出する。

以上のように、東南極の日の出岬に産するトーナライトには、アダカイト質岩の成因を解明する上で重要な手掛りがあるため、それを対象として研究を行った。なお、藍晶石と石灰珪質岩に関する研究の一部はすでに印刷公表してある (孫羽ら, 2014)。

1-2 日の出岬のトーナライトの研究史

日の出岬のトーナライトについては、多くの先行研究があるが、それらは以下のようにまとめられる：

年代学的研究：Shiraishi *et al.* (1995) はトーナライト 9 試料の Sm-Nd 全岩アイソクロン年代測定を行い、 $1031 \pm 69 \text{ Ma}$ の年代値と 0.5115520 の I_{Nd} 値 (Nd 同位体比初生値)、 $+4.7 \pm 1.0$ の ϵ_{Nd} 値を報告した。また、同じ試料の Rb-Sr 全岩アイソクロン年代測定も行い、 $1273 \pm 104 \text{ Ma}$ の年代値と 0.70275 の I_{Sr} 値 (Sr 同位体比初生値) を報告した。これらの年代値はトーナライト中のジルコンの SHRIMP (Sensitive High Resolution Ion Microprobe) による U-Pb 年代値 ($1017 \pm 13 \text{ Ma}$) に近く (Shiraishi *et al.*, 1994, 2003), I_{Nd} 値および I_{Sr} 値を勘案すると、約 10 億年前の短期間にトーナライトマグマの生成—上昇—固結の一連の火成活動があったと考えられる。なお、泥質片麻岩の 1 試料の Sm-Nd と Rb-Sr 全岩アイソクロン年代測定により、2Ga の Nd モデル年代値 (T_{DM}) が得られている (Shiraishi *et al.*, 1995)。

Fraser and McDougall (1995) はトーナライト中の角閃岩的片麻岩と南西部のペグマタイトから $480 \pm 5 \text{ Ma} \sim 526 \pm 5 \text{ Ma}$ の K/Ar との $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 鉱物年代値 (黒雲母、白雲母および角閃石) を報告している。それらはリュツォ・ホルム岩体の K-Ar 鉱物年代値とほぼ同じである (Fraser and McDougall, 1995)。

Motoyoshi *et al.* (2004, 2005) は日の出岬南西部のザクロ石を含むペグマタイト中のモナザイトから 935~1007Ma の EMP (Electron Microprobe) 年代を報告している。

地球化学的研究：Kanisawa *et al.* (1979) はトーナライトの主成分組成の検討

を行い、それらが周りのリュツォ・ホルム岩体の岩石より低い K_2O/Na_2O 比と高い Fe_2O_3/FeO 比を持つことを示した。Ikeda *et al.* (1997) は、トーナライトの主成分及び微量成分の検討を行い、高い Na_2O/K_2O , K/Rb , Sr/Y , $(La/Yb)_N$ 比と低い CaO/Na_2O 比, Y と Yb の含有量という特徴から、それがスラブメルティング起源説によって説明できるとした。Hiroi *et al.* (2006) は斜方輝石を含むグラニュライトの主成分組成から、グラニュライトはトーナライト質マグマから分別結晶作用して集積したものと推定した。

鉱物的研究：Hiroi *et al.* (2008) はそのようなトーナライト中に残晶状の藍晶石とザクロ石が出現することを報告した。彼らはその産状等から、これらの鉱物はトーナライトマグマによる捕獲結晶ではあるが、もとはトーナライトマグマの起源物質であるエクロジャイトの溶け残り鉱物であった可能性があるとして指摘した。

以上のように、日の出岬のトーナライトは高 SiO_2 アダカイトや太古代の TTG に類似した全岩化学組成の特徴を有しており、中央海嶺玄武岩 (MORB) (Mid-Ocean Ridge Basalt) がエクロジャイト相条件下で部分融解してできたメルトに由来すると考えられてきた (Shiraishi *et al.*, 1995; Ikeda *et al.*, 1997; Hiroi *et al.*, 2006, 2008)。

1-3 問題点

まだ未解決の点も少なくない。それらは、(1) 日の出岬のトーナライトの SiO_2 含有量が 60wt% 以下から 70wt% 以上まで変化するが (Shiraishi *et al.*, 1995 など)、その広範な組成変化の原因は何であるのか？

(2) 捕獲岩状の超塩基性～塩基性岩 (グラニュライトと角閃岩) 及び石灰珪

質岩と安山岩質岩脈が産出する。これらの岩石は、トーナライトとどのような関係だったのであろうか？

(3) 捕獲結晶状の鉱物（ザクロ石と藍晶石）を含むことがある、藍晶石は斜長石に包有された他形粒として出現するが、藍晶石と斜長石の間にはほとんど常に粘土鉱物（ピナイト）と炭酸塩鉱物が介在しており、藍晶石がこれら斜長石の変質物から生成された後生鉱物である可能性も残されている。藍晶石はどのように形成されたのか、トーナライトマグマとどのような関係だったのであろうか？

2 地質概説

2-1 南極大陸の地質

南極大陸は約 1400万 km² の面積を持つ、地球上では五番目の大陸である。その 98% が氷で覆われており、氷の厚さは平均 1600m である。南極大陸は南極横断山脈 (Transantarctic Mountains) を境にして、東南極 (East Antarctica) と西南極 (West Antarctica) に分けられる (Fig. 1a)。東南極は Gondwana 大陸の一部であったが、これまでの研究から、Gondwana 大陸は東 Gondwana (南極、インド、オーストラリア、アフリカの一部など) と西 Gondwana (南アメリカとアフリカの大部分) が Grenville (Grenville) 期 (約10億年) の造山運動 (Moores, 1991; Dalziel, 1991; Hoffman, 1991) と後期原生代の Pan-Africa (Pan-Africa) 期 (約 5 億年) の造山運動 (shiraishi *et al.*, 1992; Jacobs *et al.*, 1998) を通じて形成されたものとされている。約 5 億年前の Gondwana 超大陸における東南極と周辺地域の復元地質図を (Fig. 1b) に示す。西南極はいくつかのテレーン (地塊) が東南極に付加されたものである。

東南極大陸はほとんど氷床で覆われているため、露岩は海岸線と内陸の山脈に沿って、微かに見られる。東南極大陸は全体として、主に先カンブリア系の楕状地とその縁辺部の造山帯からなり、太古代から古生代初期までの幅広い年代を示す変成岩類や火成岩類が産出する、それらの年代的特徴から以下の 3つの段階と考えられる。

(1) 太古代-原生代初期 (>1600Ma) に、ロディニア超大陸形成に伴って、大陸の核となる古い地殻断片が形成された (A: Terre Adelie, C: southern Prince

Charles mountains, G: Grunehogna, M: Miller Range, N: Napier Complex, S: Shackleton Range, V: Vestford Hills) (Harley *et al.*, 2003)。ロディニア超大陸は McMenamin *et al.* (1990) により提唱されたもので、約 10 億~7 億年前に誕生し、約 6 億年前に分裂したと考えられている超大陸である。

(2) 中期原生代 (1300~900Ma) に、東南極はゴンドワナ大陸の一部として、グレンヴィル造山運動 (約 10 億年) を受けた。変成作用と年代値の異なる 3 つの地塊 (MP: Maud Province, RP: Rayner Province, WP: Wiles Province) に分かれていた。MP は 1090~1030Ma, RP は 900~990Ma, WP は 1130~1330Ma の年代値を示す (Fitzsimons, 2000; Meerts, 2003; Satishi *et al.*, 2008; Hokada, 2012)。

Fig. 1bから見ると、MP はアフリカのカープヴァールクラトン (Kaapvaal craton) と、RP はインドの東ガート帯 (Eastern Ghats Belt) と、WP はオーストラリアのオルバニーフレーザーレンジ (Albany-Fraser Range) と繋がっており、それらの一部であったと考えられる (Jacobs *et al.*, 2003b; Fanning *et al.*, 1996)。

(3) 原生代末期-古生代初期 (600~500Ma) に、パンアフリカン造山運動があり、2 つの大規模な縫合帯 (EAAO: East African-Antarctic Orogen, PO: Pinjarra Orogen) が形成された (Fig. 1b)。EAAO は東西ゴンドワナ大陸の縫合帯であり、リュツォ・ホルム岩体 (LH, Lützow-Holm Complex) からヤマトベルジカ岩体 (Yamato-Belgica Complex), セール・ロンダーネ山地 (Sør Rondane Mountains) を通り、ドロニングモードランド (Dronning Maud Land) のシャクルトン山脈 (Shackleton range) までに連続する (Shiraishi *et al.*, 1992, 2004; Jacobs *et al.*, 1998, 2003a; Sheraton *et al.*, 1996; Hokada and Motoyoshi, 2006)。PO は主にプリッツ湾 (Prydz Bay) 周辺に分布しており (Boger *et al.*, 2001), オーストラリアのリーウィン岩体までに連続する (Fitzsimons, 2000; Meerts, 2003)。

南極横断山脈は、東南極楕状地の西側部分を境する、オース海岸からクィーソモードランドまでにかけて約 4000 km 延長している。それはニムロド (Nimrod) 造山運動 (約 10 億年) , ベアドモア(Beardmore) 造山運動 (約 6.5 億年) , ロース (Ross) 造山運動 (約 4~5 億年) , 削剥期, ビーコン (Beacon) 累層群の堆積, フェラー (Ferrar) ドレライトの活動 (約 1.6 億年) が受けて, さらに新生代第三紀に地塊運動により隆起して形成された山脈である (国立極地研究所, 1986)。

西南極は東南極に比べより新しい年代であり, 主に中生代初期の造山帯および中生代後期から新生代初期の造山帯からなる。それは東南極の古太平洋縁部に付加・融合したものである。先カンブリア時代後期から古生代の地層もある。この地域には, 堆積岩と火山岩が広く分布し, 激しい褶曲作用を受けたことが特徴である, 現在も堆積作用と火山活動を続けている (国立極地研究所, 1986)。

2-2 リュツォ・ホルム岩体の地質

本研究対象である日の出岬地域はリュツォ・ホルム岩体分布域に位置している。しかし, これまでの研究から, 日の出岬に産出する岩石は年代値や岩相, 変成度などの点で周辺のリュツォ・ホルム岩体のものとは異なっており, 異地性岩塊の可能性が高いと考えられる (Hiroi *et al.*, 2006, 2008)。比較のため, まずリュツォ・ホルム岩体の地質について記載する。

リュツォ・ホルム岩体は東南極のプリンス・オラフ海岸からリュツォ・ホルム湾岸にかけての地域に分布している (Fig. 2a)。リュツォ・ホルム岩体では, プリンス・オラフ海岸の東から西に向かって角閃岩相からグラニュライト相ま

で変成度が系統的に上昇する (Hiroi *et al.*, 1983, 1987, 1991)。海岸に沿って、多くの露岩があるが、それらは周辺氷河によって隔てられる。東側は原生代のレイナー岩体と境しているが、両者は断層関係にあると推定されている。西側には大陸氷床を挟んでヤマト・ベルジカ岩体があり、さらに西方にはセールロンダーネ山地の変成岩と火成岩体が産する。

リュツォ・ホルム岩体を構成する岩石は、泥質から砂質および中性変成岩が主要であり、少量の塩基性～超基性、石灰珪質、珪質変成岩などがこれに加わる。一般的に層状構造が発達する。ミグマタイト構造もよく見られる。日の出岬よりも西方では泥質から砂質および中性変成岩中に塩基性～超基性変成岩が孤立したレンズ状岩塊として産する。これは母岩とともに昇温期変成作用と後退変成作用を受けている。もと層状の火成岩体を構成していたものの断片と推定されている。花崗岩類とペグマタイトの岩脈が多数見られる (Hiroi *et al.*, 1983, 1986, 1987, 1991; Suda *et al.*, 2008)。

リュツォ・ホルム岩体のグラニュライトの変成条件は 800-850°C, 0.7-0.8GPa と見積もられている (Hiroi *et al.*, 1991)。宗公海岸の南部にルンドボーグスヘッタ (Rundvågshetta) がリュツォ・ホルム岩体の最高温度部になり、そこでは泥質変成岩中で斜方輝石+珪線石+石英の鉱物組み合わせ (Kawasaki *et al.*, 1993; Motoyoshi and Ishikawa, 1997), またザクロ石-斜方輝石グラニュライト中ザクロ石中ではサフィリン+石英の産状 (Yoshimura *et al.*, 2008) が見られ、1000°C以上の超高温変成作用を受けたことが示唆された。また、Motoyoshi (1986) は斜長石-ザクロ石-珪線石-石英圧力計を用いて、ルンドボーグスヘッタでは 1.1GPa 以上の圧力になったことがあると推定されている。

リュツォ・ホルム岩体の変成岩類については、年代的研究も数多くされてきた。例えば Shiraishi *et al.* (1992, 1994, 2003) は SHRIMP を用いて、リュツォ・

ホルム岩体の様々な地域の異なる変成相の岩石から得られたジルコンの U-Pb 年代測定を行い、年代が 520~550Ma に集中することを示した。Fraser *et al.* (2000) はルンドボークスヘッタで変形したリュウコゾームから 517 ± 9 Ma のジルコンの U-Pb 年代値と報告している。

K-Ar 鉱物年代値の測定も多数に行われている。例えば Kaneoka *et al.* (1968), Yanai and Ueda (1974), Shibata *et al.* (1985), Takigami *et al.* (1992) は、363 Ma ~560 Ma の K-Ar 鉱物年代値を得られた。Fraser and McDougall (1995) はリュツォ・ホルム岩体の五つ場所の片麻岩とペグマタイトなどから 429 ± 4 Ma ~ 599 ± 6 Ma の K-Ar 鉱物年代値 (黒雲母, ホルンブレンド, カリ長石および白雲母) を報告している。Fraser (1997) は角閃岩相片麻岩から 520~560Ma の K-Ar と $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ という鉱物年代値を報告した。

モナザイトの年代については、Hokada and Motoyoshi (2006) がスカレピークスハルセンのザクロ石-珪線石片麻岩から 650~580Ma と 550~520Ma の CHIME (chemical Th-U-total Pb isochron method) 年代値を報告している。

以上の年代学的データから、リュツォ・ホルム岩体が約 520~550Ma に主要な変成作用を受けており、パンアフリカン造山帯の一部であると考えられている (Shiraishi *et al.*, 2003)。

一方、花崗岩類については、Shibata *et al.* (1985) が東オングル島の角閃石黒雲母片麻花崗岩から 482 ± 9 Ma の Rb-Sr 鉱物年代値, Nishi *et al.* (2002) が奥岩の花崗岩から 485 ± 50 Ma の Rb-Sr の全岩アイソクロン年代値, Ajishi *et al.* (2004) がカスミ岩の花崗岩から 492 ± 23 Ma の Rb-Sr の全岩アイソクロン年代値を報告している。これらは変成作用の年代より若く、花崗岩はリュツォ・ホルム岩体の変成ピークよりも後に貫入したと考えられた (Nishi *et al.*, 2002)。

ところで、Shiraishi *et al.* (1994, 2003) は変成岩中のジルコンのコア部分が約

2500~1000Ma の年代であることから、リュツォ・ホルム岩体はグレンヴィル造山運動期前のクラトン (craton) の砕屑物とグレンヴィル時期に形成された初成的な地殻 (島弧) に由来するものが合併したコラージュ (collage) であると考えられる。

これらの年代学と岩石学的特徴から、リュツォ・ホルム岩体はグレンヴィル造山運動以前に形成された大陸地殻及びグレンヴィル期の島弧などがパンアフリカン造山運動時に衝突して形成された東西 Gondwana の縫合帯の一部であると考えられる (Shiraishi *et al.*, 2003, 2008)。

2-3 日の出岬の地質

日の出岬は東南極、プリンス・オラフ海岸の東部の南緯 68°09′, 東経 42°40′ のところに位置する。前述したように、日の出岬はリュツォ・ホルム岩体の角閃岩相地域内に位置している。約 20km² の範囲に特異な見かけを示す中～粗粒のトーナライトが分布する (Fig. 2b)。そのため、トーナライトは、Yanai and Yishikawa (1978) の地質図では「斜長岩質片麻岩」、「ザクロ石含む斜長岩質片麻岩」、「ホルンブレンド片麻岩」の3種類の変成岩として分類・記載されている。上述したように、本研究では一括してトーナライトと呼ぶことにする。なお、トーナライトは不均質で、同じ地点でも多様な岩相が見られる (Fig. 3a)。トーナライト中に捕獲結晶状ザクロ石が含まれることである (Fig. 3b)。まれではあるが斜長石と黒雲母の濃集による火成層状 (堆積) 構造が見られることもある (Hiroi *et al.*, 2006)。少量の暗色の安山岩質岩脈がトーナライト中に産出する (Fig. 3c)。また、多数の淡紅色ペグマタイト岩脈が貫入しており、その一部から淡青色の緑柱石が報告されている (Yanai and Ishikawa, 1978; Hiroi *et al.*,

2006)。一部のトーナライトは強く変形され、ザクロ石や黒雲母などが新たに形成されているのが観察される。トーナライト中にはさまざまな大きさの超塩基性～中性岩および石灰珪質岩の岩塊が産出する (Fig. 3d)。超塩基性～中性岩は単斜輝石あるいはザクロ石を含む角閃岩である場合もあるが (Yanai and Ishikawa, 1978), 大部分は多様なモードの斜方輝石を含むグラニュライトである (Hiroi *et al.*, 2006)。それは産状から大きく二種類に分けられている：a, 孤立レンズ；b, 層状構造を示す薄層 (Fig. 3e)。Hiroi *et al.* (2006) は、全岩の化学組成や鉱物組織の特徴から、それらはキュムレート起源であると推定している。

日の出岬の南西部には、少量の石灰珪質岩や角閃岩、含ザクロ石ペグマタイトを伴う泥質片麻岩 (珪線石-ザクロ石-黒雲母片麻岩, ザクロ石-黒雲母片麻岩) が産出する (Fig. 2b) (Yanai and Ishikawa, 1978; Hiroi *et al.*, 1983, 2006)。それらは様々な程度に変形作用を受けており、特に強く変形されたものからは珪線石を置換する藍晶石が報告されている (Hiroi *et al.*, 2006)。これらの岩石とトーナライトの主要な分布域との間には数百メートル幅の氷床があり、両者の直接の関係は不明である。

2-4 日の出岬の岩体とリュツォ・ホルム岩体の関係

Hiroi *et al.* (2006, 2008) も指摘しているように、下記の理由により、日の出岬に産出する岩石はリュツォ・ホルム岩体中の異地性岩塊であり、約 5 億年前のパンアフリカン変動のピーク後ではあるが終焉前のある時期にリュツォ・ホルム岩体に接合したものと考えられる。

(1) 年代値：前述したように、Shiraishi *et al.* (1994, 2003) はリュツォ・ホルム岩体の様々な地域の多様な岩石中のジルコンから 520~550Ma の SHRIMP 年

代値を報告し、この時期をリュツォ・ホルム岩体の主要な変成時期としている。これに対して、日の出岬のトーナライト中のジルコンの SHRIMP 年代値は約 1000Ma である。Motoyoshi *et al.* (2004) は日の出岬南西部の泥質片麻岩に貫入する含ザクロ石ペグマタイト中のモナザイトの EMP 年代値として 935~1007Ma を報告し、これを主要な変成時期としている。一方、Fraser and McDougall (1995) はトーナライトとペグマタイト中の角閃石や黒雲母、白雲母に対して $480 \pm 5\text{Ma}$ ~ $526 \pm 5\text{Ma}$ の K/Ar および $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代値を報告し、この時期にも何らかの変成作用を受けたことを明らかにしている。

(2) 岩相：リュツォ・ホルム岩体の主要な岩相は泥質～砂質および中性の変成岩であり、少量の塩基性～超塩基性、石灰珪質および珪質の変成岩を伴う (Hiroi *et al.*, 1983, 1986, 1987, 1991; Suda *et al.*, 2008)。一般に層状構造が発達しているが、ミグマタイト構造もよく見られる。また多様な岩相の花崗岩類とペグマタイトの岩脈が多数貫入している。一方、日の出岬に産出するような異なる見かけを示すアダカイト質トーナライトは、宗谷海岸からプリンス・オラフ海岸にかけての地域では、日の出岬以外では見られない。

(3) 変成度：リュツォ・ホルム岩体では、プリンス・オラフ海岸の東部から西に向かって角閃岩相からグラニュライト相まで変成度が系統的に上昇する (Fig. 2a) (Hiroi *et al.*, 1983, 1987, 1991)。日の出岬が位置するプリンス・オラフ海岸東部は角閃岩相地域であるが、前述したように、日の出岬ではグラニュライトが産出する。したがって、日の出岬の岩石の変成度は周りのリュツォ・ホルム岩体のもとは不調和的である (Hiroi *et al.*, 2006)。

(4) Al_2SiO_5 鉱物：リュツォ・ホルム岩体の泥質変成岩には、ピーク変成時の珪線石に加えて残晶状の昇温期藍晶石と珪線石や堇青石を置換する降温期紅柱石が出現することがある (Hiroi *et al.*, 1983, 1995, 未公表データ)。これに対

して、本研究でも記載・考察するように、日の出岬のトーナライト中には残晶状の藍晶石が出現する、また日の出岬南西部の泥質片麻岩の一部にはピーク変成時の珪線石を置換する藍晶石が出現する (Hiroi *et al.*, 1983, 2006)。したがって、日の出岬に産出する岩石の降温時の温度－圧力経路と周囲のリュツォ・ホルム岩体のそれとは異なっていたと考えられる。

第3章 岩石記載

岩石薄片を作成し、偏光顕微鏡で観察を行った。また、千葉大学の走査電子顕微鏡（日本電子製 SEM JSM-5600）を用いて BSE (back scattered electron)の観察も行った。

鉱物の化学組成は千葉大学の波長分散型 EPMA（日本電子製 JXA-8230）とエネルギー分散型 EDX（日本電子製 SEM JSM-5600 と OXFORD 製 Link ISIS-300）を用いて定量分析した。いずれの機器でも標準試料には天然の珪酸塩鉱物と酸化鉱物を使用した。波長分散型 EPMA の測定条件は、加速電圧 15kV、電流値 12nA、ビーム径 1~2 μ m、ピークの測定時間 10 秒、バックグラウンドの測定時間 5 秒である。エネルギー分散型 EDX の測定は、加速電圧 15kV、電流値 0.8nA、ビーム径約 10 μ m、測定時間 100 秒で行った。標準試料は天然の珪酸塩鉱物と酸化鉱物を使用した。標準試料には天然の珪酸塩鉱物及び酸化鉱物を用いた。分析元素は、SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、FeO (Total)、MnO、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、P₂O₅ の 10 元素とした。元素マッピングはエネルギー分散型 EDX で加速電圧 15kV、電流値 30nA で行った。

3-1 主要なトーナライト

構成鉱物の量比を調べるために、日の出岬のトーナライト 17 試料についてモード測定を行った。測定には X-Y ステージを用い、顕微鏡下 1000~3000 点を数えた。Fig. 2b に岩石試料の採集地点を示す。Streckeisen (1976) の花崗岩質岩の分類では、トーナライト岩—石英閃緑岩に区分される (Fig. 4)。モード組

成 (Fig. 5a)では、トーナライト中の各鉱物のモードの変化幅は広く、斜長石 (52-78%)、石英 (4-40%)、黒雲母 (0.1-12%)、ホルンブレンド (0-9%)、不透明鉱物 (0-3.6%)で、白雲母、単斜輝石、斜方輝石とザクロ石が少量含まれる。色指数が 0.7-22.8% である。

日の出岬に産出するトーナライトについては、Yanai and Ishikawa (1978) や Hiroi *et al.* (2008) が記載公表している。本研究での顕微鏡観察の結果でも、以下のような事項が指摘される。トーナライトの主要な構成鉱物は斜長石、石英と少量の有色鉱物である。いずれも肉眼的に暗色であるため、斜長岩に類似した見かけが特徴的である。有色鉱物はホルンブレンドと黒雲母であることが多いが、これに単斜輝石が加わることも少なくない。さらに斜方輝石やザクロ石あるいは白雲母が見られることもあり、鉱物組成は多様である。副成分鉱物としてアルカリ長石、イルメナイト、マグネタイト、ジルコン、リン灰石、モナザイトを含む。また、炭酸塩鉱物や粘土鉱物などの二次鉱物も普通に見られる。さらに藍晶石やスピネルなどが産することもある。鉱物の化学組成の分析結果をTable 1 に示した。

斜長石は半自形～他形で、粒度は変化富む (数 mm~10 数 cm)、一般にアルバイト双晶を示す。アンチパーサイト構造もよく見られる (Fig. 6a)。また石英、ジルコン、リン灰石とホルンブレンドなど他の小結晶を包有していることも少なくない。特に、多数の細粒リン灰石、流体包有物と微細な詳細不明の透明および不透明鉱物を包有することが多く、これが肉眼的な暗色の原因となっているものと考えられる (Fig. 6b)、An は 24-33 mol%であることが多い。

石英は他形で、粒度に変化富み (数 mm~10 数 cm)、肉眼では灰紫色～乳白色を呈し、鏡下では波状消光する。ホルンブレンドやジルコンなど小結晶を包有することがある (Fig. 6c)。流体包有物と微細な詳細不明の包有物を含むこと

が多く、それらが線状に連なることがある (Fig. 6d)。また多数の針状ルチルを含むこともある (Fig. 6e)。

角閃石は半自形～他形の長柱状結晶が多い。大部分は $X' = \text{緑色}$, $Z' = \text{緑色} \sim \text{緑褐色}$ の多色性を示す、不均質であることが多い、しばしばイルメナイトのラメラを含む。角閃石が黒雲母と伴って場合が多いが、単独の結晶として無色鉱物の間に産することもある。また黒雲母やリン灰石、ジルコンなど小結晶を粗粒の角閃石に包有していることがある (Fig. 6f)、粗粒の角閃石が斜方輝石や石英、斜長石など小結晶をポイキリティックに包有していることもある、縁部の一部に黒雲母細粒に置換されている (Fig. 6g)。角閃石の分類図 (Leake *et al.*, 1997) により、角閃石は主にカルシウム角閃石の種類のホルンブレンドであり (Fig. 7a)、ほとんどエデン閃石組成であり、一つはフェロ普通角閃石組成を示す。Xmg は 0.52-0.59 であり、コアとリムの Xmg に大きな違いがない。

黒雲母は半自形～他形の片状結晶や棒状結晶の集合体が多い、 $X' = \text{淡褐色}$, $Z' = \text{褐色}$ の多色性を呈す。しばしば不透明鉱物 (主にイルメナイト) やホルンブレンドを伴うことが多いが (Fig. 6h)、単独の結晶として無色鉱物の間に産することもある。石英の小結晶や不透明鉱物と伴われる場合もある (Fig. 6i)。ホルンブレンドの中心を切る産する場合も見られる (Fig. 6j)。ホルンブレンドの縁部に二次的な反応物の細粒集合体として産することもある (Fig. 6g)。粗粒片状の黒雲母は斜長石やジルコン、リン灰石など小結晶を包有していることもある (Fig. 6k)。黒雲母の一部変質して緑泥石化していることがある。Xmg は 0.51-0.60 に集中する。

単斜輝石は淡緑色の半自形～他形粒であり、周囲にホルンブレンドを伴うことが多い。しばしば単斜輝石と斜方輝石の連晶が見られるが (Fig. 6l)、単斜輝石と石英との連晶も見られる。淡色のアクチノライトや粘土鉱物によって様々

な程度に置換されていることも多い (Fig. 6m)。斜方輝石は淡赤色で半自形～他形粒として、単斜輝石とともに産する。石英との連晶も見られる。また淡色のアクチノライトや粘土鉱物によって様々な程度に置換されていることも多い (Fig. 6n)。粗粒の斜方輝石が黒雲母とホルンブレンドを伴い、斜長石と石英からなる基質に散在していることもある (Fig. 6o)。単斜輝石はサーライトの組成を示す、斜方輝石はハイパーシンの組成を示す (Fig. 7b)。

ザクロ石には他形で、斜方輝石、ホルンブレンド、黒雲母、斜長石、マグネタイトなどに置換された残晶状のもの (Fig. 8a) と細粒で自形的なもの (Figs. 8c, d) がある。前者には自形的な斜長石、ルチル、イルメナイト、リン灰石などが包有されていることがあるが、後者には細粒の石英とマグネタイトが多数包有されていることが多い。Figure 8b はそのザクロ石とその周辺を元素マッピングした結果を示す。YHM04121903B-2 中の残晶状のザクロ石は EPMA で分析した結果、20% 前後の Prp 成分、19% Grs 成分、Sps 成分を固溶した Alm である (Table. 2)。コアから外側に向かって、Alm が減少し、Sps が増加する逆累帯構造を示す (Fig. 8e)。このザクロ石は斜長石と石英と共存し、Grs 成分はおおよそ 20% を含有しており、これは高压条件下で形成されたものと考えられる (Hiroi *et al.*, 2008)。

藍晶石は多様な岩相・組成のトーナライト中の斜長石に包有された他形粒として出現する。ほとんどの場合、斜長石と藍晶石の間に褐色の粘土鉱物 (ピナイト) と炭酸塩鉱物が介在しており (Fig. 9)、その中に緑色のスピネルが見られることがある。前述したように、多数の薄片を作成・観察した結果、藍晶石の周囲にピナイト化を免れた灰長石コロナが確認された (Fig. 10)。灰長石コロナには 0.02 mm 以下の大きさの緑色スピネルに加え、アルカリ長石やルチル、鉄鉱物が含まれている。灰長石は単結晶である場合もあるが、光学的方位の異

なる複数の結晶の集合体である場合もある。この他に、0.02 mm 以下の大きさのコランダムと緑色スピネルを含む白雲母が藍晶石を置換しているのも観察される (Fig. 10a)。

角閃石の総 Al 量などの組成は生成の温度と圧力条件に大きく支配されるため、角閃石の化学組成から、トーナライトの固結条件 (温度・圧力) を見積もった。トーナライトにおける圧力条件は、3 つのカルシウム角閃石圧力計 (Hammarstorm and Zen, 1986; Hollister et al., 1987; Johnson and Rutherford, 1988) を用いて見積もった、カルシウム角閃石-斜長石温度計 (Blundy and Holland, 1990) も同時に使って、共存するホルンブレンドと斜長石のペア組成を用いて計算を行った。その結果、4.5-6.2 kbar, 810-840°Cの圧力温度と見積もった (Table. 3)。それはトーナライトマグマの結晶作用の最後ステージの条件と思われる。

3-2 安山岩質岩脈

野外における産状 (Fig. 3c) から、トーナライトの活動とほぼ同時期に貫入した数メートルの岩脈である。肉眼的には、主要なトーナライトより暗黒色で細粒である。主に斜長石 (47%)、石英 (22%)、黒雲母 (15%) とホルンブレンド (14%) によって構成されており、少量のマグネタイトなど不透明鉱物 (3%) を伴う (Fig. 5a)。ホルンブレンドと黒雲母の量は主要なトーナライトより多い。中粒で、構成鉱物が特徴的に伸びた、定向配列を示す (Figs. 11a-d)。斜長石は他形で、肉眼では暗灰色であり、アルバイト双晶を示す場合が多い。斜長石の An は主要なトーナライトより高い値 (37 mol%) を示す (Table. 1)。石英は他形で、鏡下では波状消光する。角閃石は他形の長柱状結晶であることが多い。大部分は X' = 緑色、Z' = 緑色～緑褐色の多色性を示す。不均質であることが多く、しばしば他形の不透明鉱物 (イルメナイト) を含む。角閃石の分類図 (Leake et

al., 1997) ではホルンブレンドである (Fig. 7a), 不均質で, 主要なトーナライトと同様にエデン閃石組成を示すことがあるが, フェロ普通角閃石組成を示すこともある。Xmg は 0.54 である (Table. 1)。黒雲母は主に半自形～他形の伸びた片状結晶として産する, X' = 淡褐色, Z' = 褐色の多色性を呈す。黒雲母の Xmg は 0.56 である (Table. 1)。イルメナイトとマグネタイトの連晶が見られることもある。

3-3 グラニュライト

トーナライト中の小岩塊として産出するグラニュライト 11 試料についてモード測定を行った。その結果を Table 4, 柱状図を Figure 5b に示す。顕微鏡観察の結果は Hiroi *et al.* (2006) が記載しているが, その概要は以下の通りである。

YHM04121903A

この岩石は全体として, 粗粒のホルンブレンドからなる, それらの中には不規則な斜方輝石や単斜輝石, 斜長石など小結晶を多く包有する関係を示す (Fig. 12a)。ホルンブレンドの粒間を斜方輝石や単斜輝石, 斜長石など小結晶が充填される場合もある (Fig. 12b)。主な構成鉱物は斜方輝石, 単斜輝石, 斜長石, 黒雲母とホルンブレンドであり, 石英は含まれない。鉱物構成比は斜長石 7.3%, 黒雲母 2.6%, ホルンブレンド 68.3%, 斜方輝石 14.2%, 単斜輝石 7.3% である。副成分鉱物として少量のリン灰石, ジルコンを伴う。少量のイルメナイトも産する (Table. 4)。ホルンブレンドは均質で, 茶かっ色かかった緑色を示す。斜方輝石は淡赤色の他形粒, 単斜輝石は淡緑色の他形粒として存在する。

YH04122003B

この岩石には多量の斜方輝石が含まれる。主な構成鉱物は斜方輝石, 斜長石, とホルンブレンドであり, 単斜輝石は含まれない。鉱物構成比は斜長石 22.7%, 石英 10.2%, ホルンブレンド 6.2%, 斜方輝石 60.6% である。少量の黒雲母, リン灰石, ジルコン, イルメナイトなど不透明鉱物を伴う (Table. 4)。全体として, 他形斜方輝石が目立つ (Fig. 12c), その中にホルンブレンドをポイキリティックに包有する。ホルンブレンドは不均質で, 淡緑色から緑かっ色を示す。その中にはイルメナイトなどの不透明鉱物のラメラが発達している。斜方輝石は淡赤色の他形中粒-粗粒で, 石英と接する場合も見られる (Fig. 12d)。

YH04122003C

この岩石は試料 YH04122003B と類似する組織をもつ, 石英を含まず, 有色鉱物が多い。不均質で, 主な構成鉱物は斜方輝石, 単斜輝石, 斜長石とホルンブレンドであり, 不透明鉱物は多めに富む。鉱物構成比は斜長石 9.2%, ホルンブレンド 6.6%, 斜方輝石 50.7%, 単斜輝石 22.7%, 不透明鉱物 10.6% である。このほかに, 少量の黒雲母, リン灰石, ジルコンなどを伴う (Table. 4)。全体として, 無色鉱物が少ない。粗粒の斜方輝石, 単斜輝石とホルンブレンドが見られる。斜方輝石は淡赤色の他形粒, 単斜輝石は淡緑色の他形粒として存在する。斜方輝石と単斜輝石は直接には接してならず, その間にホルンブレンドが介在する (Fig. 12e)。粗粒の斜方輝石と単斜輝石はホルンブレンドの小結晶をポイキリティックに包有していることもある。ホルンブレンドは不均質で, 淡緑色から茶かっ色かかった緑色を示す。その中にはイルメナイトなど不透明鉱物のラメラが形成している。ホルンブレンドの縁部が不透明鉱物に置換されているのがよく見られる (Fig. 12f)。

YH04122006A

この岩石は自形～半自形粒単斜輝石と斜方輝石からなる結晶集積構造が発達する。主な構成鉱物はホルンブレンド、斜方輝石、単斜輝石、斜長石と黒雲母であり、少量の石英が含まれる。鉱物構成比は斜長石 4.6%、石英 0.5%、ホルンブレンド 35.6%、斜方輝石 27.8%、単斜輝石 28.2%、黒雲母 3.1% である。副成分鉱物としてリン灰石とジルコンがわずかに含まれる。イルメナイトなど不透明鉱物は少ない (0.1%) (Table. 4)。全体として、粗粒の単斜輝石とホルンブレンドが斜方輝石の小結晶をポイキリティックに包有している。少量の斜長石と石英がそれらの粒内を埋めている (Fig. 12g)。黒雲母は半自形～他形で、淡褐色-褐色の多色性を呈し、定向配列している。斜方輝石は淡赤色の自形～半自形粒、単斜輝石は淡緑色の自形～半自形粒として存在する場合もある (Fig. 12h)。

YH04122006B

この岩石は YH04122006A に組織上には類似しているが、ホルンブレンド、石英と斜長石の量が増える。単斜輝石と斜方輝石は他形粒であることが多い (Fig. 12i)。主な構成鉱物はホルンブレンド、斜方輝石、単斜輝石、斜長石、石英と黒雲母である。鉱物構成比は斜長石 13.7%、石英 7.4%、ホルンブレンド 43.2%、斜方輝石 26.8%、単斜輝石 5.8%、黒雲母 2.8% である。副成分鉱物としてリン灰石とジルコンがわずかに含まれる。イルメナイトなど不透明鉱物は少ない(0.2%) (Table. 4)。斜方輝石は淡赤色の他形粒、単斜輝石は淡緑色の他形粒として存在する、ポイキリティックな斜方輝石が粗粒の単斜輝石中に見られることがある、ホルンブレンドに置換される場合もある (Fig. 12j)。黒雲母は半自形～他形で、淡褐色～褐色の多色性を呈し、定向配列している。ホルンブ

レンドは不均質で、淡緑色から茶かっ色かかった緑色を示す、その中にはイルメナイトなど不透明鉱物ラメラが形成している。

YH04122006C

この岩石はホルンブレンド、斜方輝石、単斜輝石、黒雲母の定向配列による線構造が発達する (Fig. 12k)。主な構成鉱物はホルンブレンド、斜方輝石、単斜輝石、斜長石と黒雲母である。鉱物構成比は斜長石 13.4%、ホルンブレンド 49.5%、斜方輝石 22.7%、単斜輝石 10.8%、黒雲母 3.4% であり、石英は含まれない。副成分鉱物としてリン灰石がわずかに含まれる。ジルコンが少し多めに含まれるが、イルメナイトなど不透明鉱物は少ない (0.1%) (Table. 4)。黒雲母は半自形～他形で、淡褐色～褐色の多色性を呈し、定向配列を示す。斜方輝石は淡赤色の他形粒、単斜輝石は淡緑色の他形粒で、それらの縁部は淡緑色ホルンブレンドに交代されていることがある (Fig. 12l)。ホルンブレンドは不均質で、淡緑色から茶かっ色かかった緑色を示す、その中にはイルメナイトなど不透明鉱物のラメラが見られる。

YH04122006D

この岩石もホルンブレンドと黒雲母の定向配列による線構造が発達する (Fig. 12m)。主な構成鉱物はホルンブレンド、斜方輝石、単斜輝石、斜長石、石英と黒雲母である。鉱物構成比は斜長石 19.1%、石英 2.3%、ホルンブレンド 55.6%、斜方輝石 7.7%、単斜輝石 8.8%、黒雲母 6.1% である。副成分鉱物としてリン灰石とジルコンがわずかに含まれる。イルメナイトなど不透明鉱物が少ない (0.3%) (Table. 4)。斜方輝石は淡赤色の他形粒、単斜輝石は淡緑色の他形粒で、お互いに接して、さらにホルンブレンドに囲まれる場合もある (Figs. 12n)。斜

方輝石と石英は接することがある。黒雲母は半自形～他形で、淡褐色～褐色の多色性を呈し、定向配列線構造である。ホルンブレンドは不均質で、淡緑色から茶かっ色かかった緑色を示す、その中にはイルメナイトなど不透明鉱物ラメラが見られる。

YH0412501A-2

この岩石は斜長石と黒雲母からなる結晶集積構造が発達する (Fig. 12o)。主な構成鉱物は斜長石と黒雲母であり、少量の斜方輝石、石英と不透明鉱物が含まれる。鉱物構成比は斜長石 39.1%、石英 5.4%、黒雲母 52.9%、斜方輝石 0.6%、不透明鉱物 1% である。副成分鉱物として粗粒のリン灰石、ジルコンとスフェーンが含まれる。また方解石も多少含まれている (0.6%) (Table. 4)。多量の黒雲母からなる基質には粗粒の斜長石と少量の細粒石英が存在する。黒雲母は半自形～他形で、細粒～粗粒、片状を示すことが多い。淡褐色～褐色の多色性を呈し、定向配列を示す場合もある。ピナイトにすべて置換された斜方輝石が少量産する、斜長石にはアンチパーサイト構造が見られる (Fig. 12p)。

YH04122502B

粗粒の片状黒雲母とホルンブレンド結晶が目立つ結晶集積構造が発達する、その中に細粒の斜方輝石含まれる。主な構成鉱物は石英、黒雲母、ホルンブレンド、斜方輝石であり、単斜輝石と斜長石が含まれない (Fig. 12q)。鉱物構成比は石英 17.9%、黒雲母 22%、ホルンブレンド 18.8% 斜方輝石 39.4%、不透明鉱物 1.6% である。副成分鉱物として比較的少量のジルコンと少量のリン灰石が含まれる (Table. 4)。斜方輝石は淡赤色で他形中粒である。黒雲母は粗粒他形で、淡褐色～褐色の多色性を呈し、変形線構造を示す。ホルンブレンドは不

均質で、淡緑色から茶かっ色かかった緑色を示す、ホルンブレンドはイルメナイトラメラを含み、斜方輝石とホルンブレンドの周辺部に少量のカミングトン閃石を伴うことが多い (Fig. 12r)。

YH04122502C

この岩石は主として粗粒ホルンブレンドと斜長石によって構成され、その中に中粒の斜方輝石と単斜輝石が含まれる (Fig. 12s)。主な構成鉱物はホルンブレンド、斜方輝石、単斜輝石、斜長石、石英と黒雲母である。鉱物構成比は斜長石 21%、石英 7.4%、ホルンブレンド 56.2%、斜方輝石 9.9%、単斜輝石 2.9%、黒雲母 1.5%、不透明鉱物 1% である。副成分鉱物として少量のリン灰石とわずかなジルコンが含まれる (Table. 4)。斜方輝石は淡赤色の他形粒、単斜輝石は淡緑色の他形粒で、お互いに接する場合が見られる。斜方輝石と単斜輝石は淡緑色ホルンブレンドに囲まれることがよく見られる (Fig. 12t)。ホルンブレンドは不均質で、淡緑色から茶かっ色かかった緑色を示す、その中にはイルメナイトなど不透明鉱物ラメラが見られる。

YH04122502D

この岩石は粗粒のホルンブレンドと斜方輝石が発達する。その中に黒雲母と斜長石の小結晶が含まれる (Fig. 12u)。主な構成鉱物は斜長石、黒雲母、ホルンブレンド、斜方輝石である。鉱物構成比は斜長石 9.4%、ホルンブレンド 55.2%、斜方輝石 26.4%、黒雲母 8.3%、不透明鉱物 0.5% であり、石英と単斜輝石が含まれない。副成分鉱物としてリン灰石が少量に含まれ、ジルコンが多めに含まれる (Table. 4)。黒雲母は細粒他形で、淡褐色~褐色の多色性を呈し、弱く配列している場合がある。斜方輝石は淡赤色の他形粒、ホルンブレンドは不均質で、

淡緑色から茶かっ色かかった緑色を示す。顕著な構造は見られない。

斜長石、斜方輝石、単斜輝石、黒雲母の化学組成の定量分析を行った。その結果を Table 1 に示す。

斜長石の An は 33-38mol% の付近に集中する。角閃石は Leake *et al.* (1997) の分類図により、主にカルシウム角閃石の種類のエデンニテイクホルンブレンドとエデンナイトである (Fig. 7a), Xmg は 0.69-0.86 である。斜方輝石は主にハイパーシンであるが、1 試料ではブロンザイトである, Xmg は 0.64-0.81 である。単斜輝石は主にサーライトであるが、1 試料ではディオプサイトである (Fig. 7b), Xmg は 0.72-0.87 である。黒雲母の Xmg は 0.67-0.74 で、トーナライト中のものよりも高い。

斜方輝石と単斜輝石を含むグラニュライト試料 (YH04122006A, YH042006B, YH04122502C) に対しては、両輝石温度計 (Wood and Banno, 1973) 及び単斜輝石-斜長石圧力計 (McCarthy and Patiño Douce, 1998) を用いて計算した結果、670°C-820°Cの温度と 5.2-7 kbar の圧力が見積もられた (Table. 3)。

3-4 石灰珪質岩とその中の細脈状トーナライト

石灰珪質岩塊の周辺には数 mm から数十 cm の幅で発達した不均質な「混成岩」的トーナライトが観察されることが多い (Fig. 3d)。しかし野外でも鏡下でも、「混成岩」的なトーナライトと「一般的」なトーナライトおよび石灰珪質岩との境界は不明瞭である。

3-4-1 石灰珪質岩

日の出岬の石灰珪質岩は、単斜輝石に富むという特徴づけられる。肉眼的には、ザクロ石と単斜輝石の量比によって暗赤褐色や濃緑色を呈するが (Fig. 13a, b), 二次的な緑簾石に富むものは黄緑褐色である (Fig. 13c)。主に斜長石とザクロ石あるいは単斜輝石によって構成され、少量の柱石、磁鉄鉱、スフェーン、リン灰石、方解石を伴うが、石英は含まれない。試料によってさまざまな量の二次的なザクロ石、少量の石英を包有する緑簾石および柱石が産する (Fig. 14)。

斜長石は主としてザクロ石とともに出現する場合と主として単斜輝石とともに出現する場合とで異なる粒度と形態を示す。前者では粗粒で、他形・細粒のザクロ石を多数包有したシンプレクタイト状であるが (Figs. 14a-d), 後者では比較的細粒で、単斜輝石と等粒状の集合体を構成することが多い (Fig. 15a, 15b, 16a)。

少量の石英を含む二次的な緑簾石がさまざまな厚さでザクロ石粒を縁取っているのが普通に観察されるが (Figs. 14f, h), そのような緑簾石がほとんど含まれない試料において、ザクロ石に包有された残晶状の緑簾石が出現することがある (Figs. 14c, d)。ザクロ石は暗赤褐色を呈し、粗粒な単斜輝石から遠いほど、粒径が小さくなる傾向が見られる、単斜輝石と接している産状や、独立した不規則な形を示す (Figs. 14i, j)。ザクロ石とマグネタイトからなるシンプレクタイトも見られる (Figs. 14k, l)。

単斜輝石は一般に濃緑色を呈し、トーナライト中のものに比べると細粒で (Fig. 13a), 多量の定向配列したマグネタイトのラメラを含む (Figs. 14m, n)。一部の単斜輝石はザクロ石と類似した組織を示すことがある。またザクロ石中の微細な包有物として出現することも少なくないが、ザクロ石を包有することはほとんどない。単斜輝石と斜長石の粒界にも少量の石英を含む緑簾石と二次的なザクロ石の薄層 (Figs. 14o, p) が見られることが多い。この他に、粒状のスフ

ェーンとマグネタイトが単斜輝石の周辺に出現する (Figs. 14k, l)。

柱石は粗粒結晶 (最大長さ 16cm) として産出し、斜長石に類似した産状を示す。柱石と単斜輝石の粒界にも少量の石英を含む緑簾石と二次的なザクロ石が見られることがある (Fig. 14o, 14p)。柱石の内部に単斜輝石やアパタイト、小さい点々状な緑レン石を含む。以上述べたさまざまな二次的なザクロ石と緑簾石は降温時の反応によって形成されたものと考えられる。

3-4-2 細脈状トーナライト

ここでは石灰珪質岩塊中の 2cm 以下の厚さの細脈状トーナライト (試料 YH04122201A) (Fig. 13) を記載する。偏光顕微鏡下单斜輝石に富む石灰珪質岩と「混成岩」的なトーナライトとが漸移的な関係にあるようなことが多い。石英およびアルカリ長石の有無と構成鉱物の粒径が急変するところを両者の境界とした (Figs. 15a, b) (Fig. 16a)。

主に単斜輝石、斜長石、石英によって構成されており、少量のアルカリ長石、柱石、チタナイト、ジルコン、マグネタイト、リン灰石を伴う。このほかに藍晶石、コランダム、スピネル、堇青石なども少量出現する。また、少量の角閃石や炭酸塩鉱物、粘土鉱物などの二次鉱物も産する。

斜長石は半自形～他形で粗粒 (最大 10 mm) であり、双晶とアンチパーサイト構造を示すことが多い。細粒のアルカリ長石と石英を多量に含むことが多い。しばしば定向配列した微細な詳細不明の鉱物を含む (Figs. 15c, d)。

石英は一般に他形で、斜長石に包有された細粒のものから 1 cm 以上の粗粒のものまでであるが、後者は波状消光を示すことが多い。粗粒の場合には長さ最大 11mm、幅 5mm に至る (Figs. 15a, b)。ミルメカイト構造も見られる。

単斜輝石は半自形～他形で石灰珪質岩中のものに比べてはるかに粗粒 (最大

10 mm) である (Figs. 15e, f) (Figs. 16a, b)。濃緑色を呈し、多様な粒度の定向配列したマグネタイトのラメラを多数含む (Figs. 15g, h)。石英を取り囲むような産状を示すこともある (Figs. 16a, b)。柱石も石英を取り囲むような産状を示し、微細な緑簾石を含むことが多い。粒状のスフェーンとマグネタイトが単斜輝石の周辺に出現する (Figs. 15i, j)。

藍晶石は常に斜長石に包有された他形粒として出現するが、多くの場合、藍晶石と斜長石との間に赤褐色の粘土鉱物 (ピナイト) と炭酸塩鉱物の集合体が介在している。しかしまれではあるが、コランダムやスピネル、堇青石、アルカリ長石などを包有した灰長石コロナがピナイト化を免れているのが観察される (Fig. 16)。灰長石コロナの周囲を斜長石が取り囲むことが多いが、その組成は段階的あるいは連続的に曹長石成分に富むものに移り変わる (Figs. 16d-e, 17b-e)。特筆すべきは、コランダムを含む灰長石コロナに取り囲まれた藍晶石中に微細な他形の石英が出現することがあることである (Fig. 17c)。

試料 YH04122201A に出現する鉱物の代表的な EPMA 分析値を Table 5 に示す。石灰珪質岩中の斜長石の灰長石成分含有量 (X_{An}) はザクロ石とシンプレクタイトを構成する場合は 0.9 以上の灰長石であるが、単斜輝石と共存する場合は 0.9 以下とやや低い。トーナライト細脈中の斜長石の X_{An} は 0.33~0.53 と大きく変動するが、これは日の出岬の主要なトーナライト中の斜長石の X_{An} (0.24~0.33) (Table. 1) に比べて高い。またトーナライト細脈中の藍晶石を置換する灰長石コロナの X_{An} は時に 0.98 に達するが、その周囲を 0.5~0.7 の斜長石が取り囲んでいる。石灰珪質岩中の濃緑色単斜輝石の X_{Mg} は 0.3~0.5 であり、トーナライト細脈中の濃緑色単斜輝石の X_{Mg} は 0.4~0.6 である。また Table 4 に示したように、相当量の Fe^{3+} が見積もられる。なお、主要なトーナライト中の単斜輝石は淡緑色で、 X_{Mg} は 0.65 以上であるため (Table. 1)、それとは明瞭に異

なる。ザクロ石はグランダイト成分が 80% 超すことが少なくないが、その半分以上はアンドライト成分と見積られる。トーナライトの近傍で、斜長石中にわずかに残存したものはさらにアンドライト成分とスペッサルティン成分に富んでいる。石灰珪質岩中の粗粒な緑簾石とザクロ石や単斜輝石の縁部の二次性緑簾石の化学組成はあまり変わらず、約 25% のピスタサイト成分を含有している。柱石の EqAn は $100 \times (Al-3)/3$ で定義される、その値はほぼ 71 である。

灰長石コロナ中に出現するスピネルにも多少の Fe^{3+} が見積られるが、その ZnO の含有量は 1.0wt% 以下であり、 X_{Mg} は約 0.1 である。藍晶石とコランダムは Fe_2O_3 含有量はいずれも 0.5wt% 以下である。なお、堇青石は変質が著しいため、その化学組成は不明である。

第4章 全岩化学組成

4-1 主成分元素

4-1-1 分析方法

安山岩質岩脈試料の1個，主要なトーナライト試料の18個とグラニュライ
ト試料の11個に対して，山口大学機器分析センター設置の蛍光 X 線分析装置
(RIX3000) を用いて全岩の主成分 10 元素 (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P)
を分析した，結果は Table 6 に示した。測定は試料と $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ のフラックスを
1:5 に混合して作成したガラスビードによって行った。分析方法は山崎ら
(1999) が記載している。分析値 FeO と Fe_2O_3 は区別せずに総量を $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{total}}$ とし
て表示し，無水に補正した値を用いた。

4-1-2 分析結果

トーナライトは全体として SiO_2 は 55.8 wt% ~ 78.27 wt% の広い範囲を示す。
CIPW ノルム鉱物の計算結果から，Barker (1979) の分類図ではほとんどがトー
ナライトに区分される (Fig. 18a)。アルミナ過飽和度 (aluminum saturation index;
ASI) は $100 \times \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ で定義されるが，トーナライトの ASI は
0.89~1.11 で，メタアルミナス~わずかにパーアルミナスである。 K_2O vs SiO_2 図
(Gill, 1981) では，多くの試料が低い K 値の領域にプロットされる (Fig. 18b)。
 Na_2O はやや高い値(2.85~5.27 wt%) を示すが， MgO は低い値(0.11~2.82 wt%)で
ある。主成分元素のハーカー図 (Fig. 19a) は，本研究の分析値に加えて，Ikeda
et al. (1997) によるトーナライトの分析値を示した。 SiO_2 の増加に伴って， Al_2O_3 ，
 Fe_2O_3 ， MgO ， CaO ， TiO_2 ， P_2O_5 ， Na_2O のいずれも連続的に減少する明瞭なト

レンドが見られる, 本研究と先行研究の分析結果とよく一致する。

一方, 安山岩質岩脈 (YHM04121901B) は主要なトーナライトとは異なる化学特徴を示す (Fig. 19a)。トーナライトに比べて, 低い値 SiO_2 (59.12 wt%) を示す, Al_2O_3 と Na_2O も低い, Fe_2O_3 と K_2O は高い。先行研究 (Ikeda *et al.*, 1997) で分析された試料 (74010113) にも安山岩質岩脈と同様の特徴を示すものである。 K_2O vs SiO_2 図では, 安山岩質岩脈は中間 K 値の領域にプロットされる。

グラニュライトの主成分元素は次のように大きくばらつく (Fig. 19b), SiO_2 (44~55.09 wt%), 高い値 Fe_2O_3 (8.49~17.9 wt%), MgO (6.39~23.01 wt%), MnO (0.09~0.8wt%), Cr (12.9~1843 ppm), Ni (16.7~937 ppm)。グラニュライトのノルム鉱物は主にカンラン石, 単斜輝石, 斜方輝石と斜長石からなる, 少量の正長石やイルメナイトとリン灰石が含まれる (Table. 6), カンラン石-斜長石-輝石の量比によるハンレイ岩の分類図では, ハンレイノーライトやカンラン石ハンレイ岩と優黒質カンラン石ハンレイ岩の地域にプロットされる (Fig. 19c)。

石灰珪質岩試料 YH04122201A 中の細脈状トーナライト (Fig. 13) の全岩化学分析値を Table 6 に示す。主要なトーナライトの中で SiO_2 含有量の近い試料の全岩化学組成 (Kanisawa *et al.*, 1979; Ikeda *et al.*, 1997; Hiroi *et al.*, 2008) も Table 7 に示したが, それらと比べると, 主要元素では CaO が高く, K_2O と TiO_2 が低い。ASI は 0.75 で, 藍晶石が含まれているにもかかわらずメタアルミナスである。

4-2 微量元素及び希土類元素

4-2-1 分析方法

山口大学において 10 の微量元素 (Ba, Cr, Nb, Ni, Rb, Sr, V, Y, Zn, Zr) も分析し

た、結果を Table 6 に示す。分析試料は主成分元素分析と同一のものである。分析方法も主成分化学組成と同じである。

なお、主要なトーナライト試料の 4 個、安山岩質岩脈試料の 1 個とグラニュライト試料の 4 個については、新潟大学において ICP-MS 分析装置を用いて、希土類元素 (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) ならびに微量元素 (Li, Sc, Co, Ga, Ge, Cs, Hf, Ta, Pb, Th, U) を分析した、その結果は Table 6 に示す。

4-2-2 分析結果

主要なトーナライトにおいては、 SiO_2 の増加に伴って Y, Zr, Cr, V は減少するトレンドが見られる。Ba と Rb 含有量は著しく分散する (Fig. 19b)。Sun and McDonough (1989) の N-MORB (normal-mid-ocean ridge basalt) 組成で規格化したスパイダー図 (Fig. 20a) では LIL (large ion lithophile elements) 元素に濃集し、HFS (high field strength elements) 元素に乏しく、Nb, Ta, La, Ce, P, Ti の顕著な負異常と Ba, Pb, Sr の顕著な正異常が見られる。これは先行研究 (Ikeda *et al.* 1997) のトーナライト (試料 74010113 を除く) と類似したパターンである (Fig. 20c)。本研究と先行研究 (Ikeda *et al.* 1997) の $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比は 7.78~42.35, 6.03~26.27 である。コンドライトで規格化した希土類元素 (REE) のパターン図 (Fig. 21a) では、軽希土元素 (LREE) に富む、重希土元素 (HREE) に枯渇する右下がりのパターン。Eu がやや正異常を示す特徴である。これは先行研究 (Ikeda *et al.*, 1997) のトーナライト (試料 74010113 を除く) と類似し、TTG や高い SiO_2 アダカイトの平均組成と一致するが、花崗岩の平均組成と異なるパターンとなる (Fig. 21c)。そのほか、Defant *et al.* (1990) によるアダカイトと一般的な島弧火山岩の分類図では、アダカイトの領域にプロットされる (Fig. 22)。

しかし、安山岩質岩脈 (YHM04121901B) と先行研究 (Ikeda *et al.*, 1997) のトーナライト (74010113) の微量元素では主要なトーナライトと異なる化学特徴を示す (Fig. 19b)。前者では Sr が低く, V, Y and Zr が著しく高い。試料 (YHM04121901B) は主要なトーナライトより高い REE の含有量を示す。N-MORB 組成で規格化したスパイダー図 (Fig. 20a) では, より高い HFS 元素含有量 (例えば Y と Yb), より顕著な P, Ti の負異常を示す。それはむしろ島弧に産する花崗岩類の特徴に近い (sajona *et al.*, 1996)。試料 74010113 と YHM04121901B の (La/Yb)_N 比はより低くて, それぞれ 1.75 と 3.16 である。コンドライトで規格化した希土類元素 (REE) のパターン図 (Fig. 21a) では, 軽希土元素 (LREE) にやや富む, 重希土元素 (HREE) にフラットなパターン, Eu がやや負異常の特徴である。それも島弧火成岩の特徴である (Rogers *et al.*, 1989)。しかも, Defant *et al.* (1990) によるアダカイトと一般的な島弧火山岩の分類図では, 島弧性の安山岩-デイサイト-流紋岩 (ADR) の地域にプロットされる (Fig. 22)。これは, 起源マグマ組成の違いを反映している可能性が高いと考えられている。

グラニュライトの微量元素も大きくばらつく, N-MORB 組成で規格化したスパイダー図 (Fig. 20b) では, 2 試料 (YH04122502C と YH04122006C) と主要なトーナライトのパターンとよく類似する, LIL 元素に濃集し, HFS 元素に乏しく, Nb, Ta, La, Ce の顕著な負異常と Ba, Pb, Sr の顕著な正異常であるが, 主要なトーナライトより著しく P, Ti の負異常が見られる。しかし, 2 試料 (YH04121903A と YH04122003C) と主要なトーナライトのパターンと類似するが, 他の 2 試料 (YH04122502C と YH04122006C) よりややフラットな P, Ti のパターンが見られる。グラニュライトのコンドライトで規格化した希土類元素 (REE) のパターン図 (Fig. 21b) では, 軽希土元素 (LREE) にやや富む, 重

希土元素 (HREE) には主要なトーナライトよりフラットなパターンを示す。

石灰珪質岩塊中のトーナライト細脈部分 (YH04122201A) の微量元素では、Sr に富んでいない、Rb と Ba は著しく低いことと Y がやや高いことも特徴的である (Table. 7)。これらの点は、細脈状のトーナライトがアダカイト質ではないことを示しており、石灰珪質岩と反応したことを示している。

第5章 Sr-Nd 同位体組成

5-1 分析方法

Sr と Nd 同位体の測定は、新潟大学の質量分析計 MAT-262 (Finigan 社製) を用いて行った。結果を Table 8 に示す。試料は前述した ICP-MS 分析用試料と同一である。測定方法は Miyazaki and Shuto (1998) に従い、 $^{87}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ 比及び $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比は同位体比標準試料の同位体比でそれぞれ規格化した。

5-2 Nd モデル年代値 (T_{DM})

Nd モデル年代値 (T_{DM}) は ^{147}Sm の崩壊定数 (λ) を $6.54 \times 10^{-12}/\text{y}$ (Lugmair and Marti, 1978), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比 = 0.512638, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比 = 0.1966 (Depaolo and Wasserburg, 1976) を用いて, $T_{\text{DM}} = (1/\lambda) \ln [1 + \{0.51315 - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{rock}}(T)\} / \{0.2136 - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{rock}}(T)\}]$ で計算した。この際, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ の測定誤差は 0.1% (1σ), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ の測定誤差は 0.01% (1σ) である。得られた年代の誤差は 2σ で示した。初生値 $^{87}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ (SrI) と初生値 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (NdI) は 1000Ma で計算した。

Nd モデル年代値 (T_{DM}) の計算結果を Table 8 に示す。主要なトーナライトは 1.11-1.55Ga の年代値を得た。それは先行研究 (Shiraishi *et al.*, 1995) の分析結果 ($T_{\text{DM}} = 1.21-1.37\text{Ga}$) よりもやや広い幅をもつ。

一方、安山岩質岩脈 (YHM04121901B) から 2.72Ga の Nd モデル年代値が得られた。それは主要なトーナライトの年代値よりはるやかに古い時期。それについては後に考察する。

グラニュライトの 2 試料 (YH04122502C, YH04122006C) から得られた 1.43Ga と 1.47Ga の Nd モデル年代値は、主要なトーナライトの年代値の範囲内

にある。ほかの 2 試料 (YH04121903A, YH04122003C) から得た 1.59Ga と 1.75Ga の年代値は、主要なトーナライトの年代値の範囲外にあり、やや古い時期。

5-3 Sr-Nd 同位体比特徴

ϵNd 値は Depaolo and Wasserburg (1976) の定義したもので、 $\epsilon\text{Nd} (T) = [({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{rock}}(T) / ({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(T) - 1] \times 10^4$, $({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(T) = 0.511836 - 0.1966 \times [(\exp \lambda_{\text{sm}} T) - 1]$ の式を用いて計算した。その結果を Table 8 に示す。

Fig. 23 には、1000Ma で補正した Sr 同位体初生値 (SrI 値)– $\epsilon\text{Nd} (t)$ 図を示した。図から見ると、主要なトーナライトの SrI 値は 0.702607~0.702921 の狭い範囲で、 $\epsilon\text{Nd} (t)$ 値は 2.5~5.9 の幅をもつ。それは先行研究 (Shiraishi *et al.*, 1995) の分析結果 (SrI=0.702871~0.703002, $\epsilon\text{Nd} (t)$ =3.6~4.2) とほぼ重なっているが、ややより広い幅をもつ。

Rb-Sr 系の全岩アイソクロンの Sr 同位体比初生値は 0.7028, Nd 同位体比初生値は 0.5118 を得た (Fig. 25)。

一方、安山岩質岩脈 (YHM04121901B) と先行研究 (Shiraishi *et al.*, 1995) の試料 (74010113) の同位体組成は主要なトーナライトと多少異なる特徴を示す。試料 (YHM04121901B) は 1.0 と低い $\epsilon\text{Nd} (t)$ 値を示す。試料 (74010113) は 4.4 の $\epsilon\text{Nd} (t)$ 値を示し、主要なトーナライトの範囲にある。SrI 値では、主要なトーナライトと比べて、試料 YHM04121901B は 0.703090 と若干高く、試料 74010113 は 0.704210 ともっと高い値を示す。

主要なトーナライトと比べて、グラニュライトの SrI 値は 0.6989332~0.718085 と広い範囲を示すが、主要なトーナライトの範囲外にある。 $\epsilon\text{Nd} (t)$ 値は 2~3.8

の狭い範囲で，主要なトーナライトの範囲にある。

第6章 考察

6-1 モデル計算によるトーナライトの結晶分化の検討

顕微鏡観察からトーナライトは以下のような点が指摘される：

① SiO_2 含有量の高い試料：ホルンブレンドのモード値が低く，含まれない場合もある。斜長石と石英の自形性は弱い，特に藍晶石を含む場合には粒径が大きい (Fig. 24)。

② SiO_2 含有量の低い試料：少量の斜方輝石と単斜輝石を含む場合がある。ホルンブレンドの自形性は強く，縁部が黒雲母に部分交代されていることが多い。黒雲母とホルンブレンド両方が含まれるもの分布範囲は広い。イルメナイトやマグネタイトなど不透明鉱物を多量に包有する。

微量元素では，Y と Cr がホルンブレンドが減少すると減少する，Sr 含有量は斜長石のモード変化と対応している。Ba と Rb の含有量は分散が著しいが，黒雲母の量比の変化に対応する。

トーナライトの全岩化学組成の変化幅は広いが，一連のトレンドを形成する (Fig. 19a)。 SiO_2 の増加に伴って， Al_2O_3 ， Fe_2O_3 ， MgO ， CaO ， TiO_2 ， P_2O_5 ， Na_2O ，Y，Zr，Cr，V のいずれも連続的に減少する明瞭なトレンドが見られる。N-MORB 組成で規格化したスパイダー図 (Fig. 20a) では，LIL 元素に濃集し，HFS 元素に乏しいを示す。また， I_{Sr} 値は SiO_2 や MgO などの含有量の増加に伴う変化は認められず，ほぼ一定である (Fig. 25)。同化分別結晶作用というのは，分別結晶作用 (fractional crystallization) の過程で地下の物質を同化して岩石を形成する作用 (AFC: DePaolo, 1981)。同化分別結晶作用の場合になったら，結晶分化の混合率により， I_{Sr} 値は SiO_2 や MgO などの含有量の増加に伴うあ

る程度変化する，一定であることは生じ得ない。したがって，それが同化分別結晶作用 (AFC, assimilation fractional crystallization) 可能性が低いと考えられる。

以上のように，鏡下の特徴，モード組成及び全岩化学組成との相関を見ると，トーナライトの組成変化は広いが，それは同じマグマからの分別結晶作用による可能性である。

トーナライトの分別結晶作用を検証する目的で，GENMIX (LeMaitre, 1979, 1981; 亀谷ほか 2001) を用いて検討した。GENMIX は LeMaitre (1979, 1981) によって，Generalized Mixing Model の略称として，岩石化学や地球化学における岩石学的モデルに基づくマスバラスの解析に対して名づけられたものである。

モデル計算に用いた親マグマ，娘マグマ及び分別される鉱物の化学組成や計算結果を Table 9 に示す。Table 9 はトーナライト中の最も苦鉄質 (低い SiO₂，高い MgO) である試料 (ST041225-3-1) の組成を本岩体の初生的なマグマ組成を仮定して，それから様々な鉱物を分別させていった，右の方の YHM04121903B に向かって本岩体を形成したマグマの分化が進行したものと考えられる。つまり，ST041225-3-1 からより YHM04121903B への分化では，斜長石が 39.51 %，ホルンブレンドが 8.94 %，斜方輝石が 1.88%，黒雲母が 5.59% 分別結晶作用によって取り除かれたものと考えられる，Rss (residual sum of squares) は計算によって得られた値と実際の全岩化学分析値との差を示すが，この値が小さいほどモデルは適合度が高いことになる。また，YHM04121903B から YH04122302A への分化では斜長石，ホルンブレンド，単斜輝石とマグネタイトが，YH04122302A から YH 04122302B への分化では斜長石，ホルンブレンド，イルメタイト，黒雲母が，YH04122302B から YH04122301B への分化では斜長石，ホルンブレンドがそれぞれ分別される。

YH04122301B から YH04122602 への分化が黒雲母，斜長石，カリ長石とマグネサイト，YH04122602 から YH04122003A への分化では斜長石と黒雲母などが分別されている。計算では，これらの鉱物組み合わせである斜長石，ホルンブレンド，黒雲母，単斜輝石と不透明鉱物を分別鉱物相とした。斜長石とホルンブレンドの分別される量比が高く，大きな役割を果たしたことを示唆している。

さらに，マスバランス計算で得られた分別鉱物の割合を用いて，分化過程における微量元素の変化をレイリー分別モデルを用い，親マグマ組成をもとに鉱物相と残液中の微量元素含有量を計算し，実際の岩石の微量元素含有量と比較することでマスバランス計算結果を検証した。なお，鉱物-液相間の分配係数は，Gill (1981), Rollinson (1993), Peace and Norry (1979), Martin (1987), Arth (1976), Nash and crecraft (1985), Tsuchiya *et al.* (2007), Green and Pearson (1987), Nielsen *et al.* (1992), Ringwood (1970), Icenhower *et al.* (1996), Francalanci *et al.* (1987) のデータを使用した (Table. 10)。(Stage-1, 2) は安山岩，(Stages-3, 4) はディサイト，(Stages-5, 6) は流紋岩に対応する分配係数をそれぞれでを使用した，Fig. 26 に計算結果を示す。この分別過程においてこれらレイリー分別モデルの計算結果と実際の岩石組成と良い一致が認められた。結晶分化モデル計算結果からもトーナライトの組成変化は分別結晶作用に起因している可能性を支持する。

6-2 トーナライトとグラニュライトとの成因関係

グラニュライトについては Hiroi *et al.* (2006) が記載しているが，トーナライト中に含まれるグラニュライトは孤立した レンズ状と層状岩塊の二つの産状 (Fig. 3e) を示す。また特定の鉱物が集積したことを示す野外での構造から，一部のグラニュライトはトーナライトから晶出した鉱物が沈積濃集することに

よって生成したと考えられる (例えば, 試料 YH04122501A-2) (Fig. 12)。

顕微鏡観察からは, Fig. 12 示すように, 少なくとも一部の試料において明確な結晶集積構造が確認される。主要・微量成分組成 (Figs. 19a, b) から, グラニュライトがトーナライトの組成変化トレンドとは無関係であることが分かる。これは特定の鉱物の濃集したものであることと示唆している。濃集過程にはマグマからの結晶分化と起源物質の部分融解の溶け残りが考えられる。これらの可能性を検討するため, $(\text{FeO}+\text{MgO})-\text{Al}_2\text{O}_3$ (wt%) (Fig. 27a) の組成変化図を作成した。 $(\text{FeO}+\text{MgO})-\text{Al}_2\text{O}_3$ の組成変化図では, $(\text{FeO}+\text{MgO})$ の増加につれて, グラニュライトの Al_2O_3 は減少するが, トーナライトの Al_2O_3 は増加する。グラニュライトの著しい高い $(\text{FeO}+\text{MgO})$ 値は輝石を主とした鉱物が濃集した可能性がある。ここで, グラニュライトのモードの斜長石-輝石-角閃石図 (Fig. 19c) とノルム斜長石-輝石-カンラン石図 (Fig. 19d) にプロットしたのである。

また, N-MORB 組成で規格化したスパイダー図 (Fig. 20b) では, グラニュライト中の 2 試料 (YH04122502C, YH04122006C) がトーナライトのパターンに類似した Nb, Ta, La, Ce, P, Ti の顕著な負異常を示し, これらの 2 試料の ϵNd (t) 値は主要なトーナライトの ϵNd (t) 値の範囲内にあり, Nd モデル年代値も主要なトーナライトの範囲内にある。また, 野外産状では, 層状構造を示す薄層として主要なトーナライトと密接に分布する。

一方, グラニュライトのほかの 2 試料 (YHM04121903A, YH04122003C) は, 野外の産状では, 孤立したレンズ状岩体として主要なトーナライト中に産出する。これらの試料では鏡下の観察でも結晶集積構造が確認されない (Fig. 12)。N-MORB 組成で規格化したスパイダー図 (Fig. 20b) やコンドライトで規格化した希土類元素パターン (Fig. 21b) でも, 前述の 2 試料グラニュライト

(YH04122502C, YH04122006C) とは異なるパターンを示す。Nd モデル年代値 (1.59Ga と 1.75Ga) も主要なトーナライトの範囲内に外れる。このように、すべてのグラニュライトを一括して扱うのは難しく、さらに詳しい検討が必要である。

次に、最も低い SiO₂ と高い MgO のトーナライト試料 (ST041225-3-1) を出発物質として、微量元素 Sr と Y を用いて、レイリー分別モデル $C_R/C_0 = (1 - F^D)/(1 - F)$ によるベクトル解析をした (Fig. 27b)。鉍物はグラニュライトの主要鉍物を設定し、元素の分配係数は Ewart and Griffin (1994), Thomas *et al.* (2002), Bea *et al.* (1994), Watson and Green (1981), Endo *et al.* (1999), Green (1994) から引用した。データを Table 11 に示す。結果として、トーナライト試料 (ST041225-3-1) のベクトルの方向はキュムレートを示すグラニュライトの沈積鉍物組成の方向へ向かっているようにも見える (Fig. 27b)。組成トレンドの方向は各試料のそれぞれ割合の主要鉍物 (ホルンブレンド, 斜長石, 黒雲母, 単斜輝石と斜方輝石) のベクトルの合力によって決められる。例えば YH04122502C の鉍物モードでは、ホルンブレンドと斜長石を主体とした、ベクトル図にもその組成方向へ向かっている。一方、Sr-Y のベクトル図でグラニュライトの 3 試料 (YH04122502B, YH04122502D, YH04122501A-2) が Y 値が高い。それは副成分鉍物のジルコンなど Y の分配係数が大きいものが多量にあると考えられる。特に、試料 YH04122502B は主に斜方輝石, ホルンブレンド, 黒雲母と石英からなるキュムレート様岩であるが (Table. 4), 比較的少量のジルコンが含まれ, そのため Y と Zr が高い。また, 試料 YH04122501A-2 は主に斜長石と黒雲母からなるキュムレートであるが (Table. 4), 副成分鉍物としてジルコンだけでなく, リン灰石やスフェーンなどが多量に含まれるため, それらの影響が大きいことがベクトル図に反映されている。逆に, この図では, 斜長石

と黒雲母が主要相であることが示されておらず、この図の限界を示している。以上のことから、一部のグラニュライトはトーナライト質マグマの分別結晶作用により形成され結晶の集積したもの（キュムレート）である可能性が高いと考えられる。

しかし、検討した結果から、3 試料（YHM04121903A, YH04122003B, YH04122003C）の組成トレンドの方向は主要鉱物組成の方向へ向かっているのが認めおれず、またキュムレートも示さない（Fig. 27b）。例えば、試料 YH04122003B は斜方輝石と斜長石を主体とするが、ベクトル図では違う鉱物組成の方向へ向かっているように見える。以上のことから、グラニュライトの中の多量のノルムカンラン石などは（Fig. 19c）、スラブメルティングの融け残り物質のような異なる起源のものであるが、今後に残された問題である。

6-3 日の出岬のトーナライトマグマの成因

6-3-1 日の出岬のトーナライトの岩石化学特徴

日の出岬のトーナライトは高 SiO_2 アダカイト（例えば、Drummond and Defant, 1990; Martin *et al.*, 2005）や太古代の TTG に類似した全岩化学組成の特徴を示す。重希土類元素と Y に乏しく、Sr と Eu 正異常を示すという特徴があるが、それを説明するためには溶融残存相に重希土類元素と Y に富む鉱物が存在しなければならない。そのような鉱物としては、ザクロ石が最適とされている（Rollison, 1993）。これらの点から、先行研究でも、日の出岬のトーナライトのマグマは MORB がエクロジャイト相条件下で部分融解してできたメルトに由来すると考えられてきた（Shiraishi *et al.*, 1995; Ikeda *et al.*, 1997; Hiroi *et al.*, 2006, 2008）。また、Hiroi *et al.* (2006, 2008) はそのようなトーナライト中

に残晶状の藍晶石とザクロ石が出現することを報告し、これらの鉱物はトーナライトマグマによる捕獲結晶ではあるが、もとはトーナライトマグマの起源物質であるエクロジャイトの溶け残り鉱物であった可能性がある」と指摘している。

ここでは、先行研究に加え、新たに分析した同位体組成、岩石化学、年代学などのデータから、スラブ溶融説の妥当性以外の成因論にも言及しつつ、日の出岬のアダカイト質トーナライトの成因を議論する。

(1) 厚い大陸地殻底部由来のアダカイトは K_2O 含有量が比較的高い (~3wt%), Na_2O 含有量が低い (Atherton and Petford *et al.*, 1993; Zhang *et al.*, 2001; Xu *et al.*, 2002; Xiao and Clemens, 2007), Th (10-20ppm) ような不適合元素に顕著に富むこと (Plank, 2005) などの特徴がある。

一方、高圧下($\geq 1.5\text{GPa}$) スラブメルティングが起こる、 K に乏しい MORB 組成の岩石の部分融解実験からは、低 K_2O 量と低 K_2O/Na_2O の比のアダカイト質メルトが得られ、また溶融残存物質として、斜長石は含まれないルチルやザクロ石などが得られたことが明らかにされた (Rapp *et al.*, 1991, 1995; Sen and Dunn, 1994; Xiong *et al.*, 2005)。

日の出岬のトーナライトは、 K_2O 量 (0.3 ~ 1.3 wt%), 高 Na_2O (2.8 ~ 5.3 wt%), 高 Na_2O/K_2O 比 (2.1 ~ 11.5), 低 Th 含有量 (0.03 ~ 0.9ppm) を有しており (Table 6), 厚い大陸地殻底部由来ではなく、スラブメルティングに由来すると考えられる。

(2) アダカイト質岩は N-MORB で規格化したスパイダー図上で明瞭な Nb や Ta, Ti の負異常を示す (Fig. 20a)。その原因としては、① 大陸地殻の中の Fe-Ti 酸化物の分別結晶、② 地殻とマントル中の Ti に富む含水ケイ酸塩、例えば金雲母と角閃石の分別、③ 沈み込んだ堆積物の Ta/Th と Nb/Th の比が低

い、④ スラブメルティングにより形成された融け残り物質にルチルがある、など可能性がある (Kelemen *et al.*, 2003)。日の出岬のトーナライトには角閃石と雲母が普遍的出現し、輝石と Fe-Ti 鉱物も少量ふくまれることから、① と ② の可能性は低く、③ と ④ の可能性が大きいと考えられる。

(3) 沈み込む海洋地殻に由来するアダカイトは、多くの場合、島弧火成岩と共生する (Defant *et al.*, 1991; Kay *et al.*, 1993; Sajona *et al.*, 1993, 2000)。日の出岬にも、主要なトーナライトに貫入した安山岩質岩脈が見られる (YHM04121901B)。先行研究 (Ikeda *et al.* 1997) の試料 (74010113) と本研究の安山岩質岩脈 (YHM04121901B) の希土類元素パターンは類似するが、主要なトーナライトとは異なる。また N-MORB で規格化したスパイダー図 (Fig. 20c) でも、試料 (74010113) と安山岩質岩脈 (YHM04121901B) のパターンは類似するが、トーナライトとは異なる特徴を示す。さらに、前述したように、主成分、微量元素組成、Sr/Y-Y のアダカイト判別図及び Sr-Nd 同位体値からも、安山岩質岩脈 (YHM04121901B) と試料 (74010113) が主要なトーナライトとは異なる特徴をもつ。それはこれらの岩石が主要なトーナライトの起源と異なり、島弧のような沈み込み帯に由来ものと考えられる。このような島弧火成岩と共生する点からも、日の出岬のトーナライトはスラブメルティングに由来することを支持している。

ところで、安山岩質岩脈 (YHM04121901B) の Nd モデル年代は 2.72Ga であり、主要なトーナライト (1.0-1.1Ga) よりはるかに古い。グラニュライトの試料 (YH04122003C) は 1.75Ga の古い年代を示す。DanDunkley の私信 (2010) によると、トーナライト試料 (73123106) の採集場所は Fig. 2b に示す、その中のジルコンのコア部分の SHRIMP による U-Pb 年代値は 1019.3 ± 7 Ma、ジルコンのリム部分は 961.6 ± 7.6 Ma であり (Fig. 28a)、日の出岬では 1020 Ma に深成活動が

あり、960 Ma に変成作用があったことを示唆する。また、日の出岬地域南西部の泥質片麻岩（珪線石－ザクロ石－黒雲母片麻岩）試料（74010304）中のジルコンの SHRIMP による U-Pb 年代値を測定した。結果、970 Ma の変成年代と 3.33Ga の碎屑粒年代値が得られた（Fig. 28b）。それは本研究で得られた 2.72Ga と古い Nd モデル年代値と調和的である。

ところで、日の出岬の周りのリュツォ・ホルム岩体の様々な地域からも古い年代値（1.8-2Ga, 2.7Ga）が得られている（Shiraishi *et al.*, 1992, 2008; Satisch-Kumar, *et al.*, 2008）。リュツォ・ホルム岩体はグレンヴィル造山運動以前に形成された大陸地殻及びグレンヴィル期の島弧などがパンアフリカン造山運動時に衝突・集積して形成された東西 Gondwana の縫合帯の一部である（Shiraishi *et al.*, 2003, 2008）。

(4) 沈み込んだ若い海洋地殻（MORB）に由来するアダカイトは低い SrI (<0.7040) を持つことが多いが（Faure, 1986）、厚い大陸地殻底部に由来するアダカイトは高い SrI と低い Nd を持つことが多い。日の出岬のトーナライトは MORB と類似した Sr 同位体初生値（SrI）（0.702607~0.702921）と ϵ Nd (t) 値（2.5~5.9）をもって（Fig. 23）、スラブ起源のアダカイト質岩の同位体組成に似ている（Kay *et al.*, 1993; Tsuchiya *et al.*, 2007; Stern and Kilian, 1996; Defant *et al.*, 1991, 1992）。この点からも、日の出岬のトーナライトは大陸地殻底部の部分熔融に由来すると考えにくい、スラブメルティングに由来する可能性が高い。

なお、スラブメルティングの場合、部分融解するのは MORB だけではなく、その上にあった堆積物やその下にあったハンレン岩も含まれる。それは主として Sr-Nd 同位体組成に現れており、平均的な MORB よりもやや高 ϵ Sr 値と低 ϵ Nd 値を示す（Stern and Kilian, 1996; Bindeman *et al.*, 2005; Tsuchiya *et al.*, 2007）。日の出岬のトーナライトもこのような特徴を示す。

ところで、全岩アイソクロン図 (Fig. 25) によるトーナライトの Sr 同位体比初生値 (SrI) は 0.7028, Nd 同位体比初生値 (NdI) は 0.5118 であった。Shiraishi *et al.* (1995) はトーナライトから 0.70275 の SrI と 0.51155 の NdI を報告しているが、両者がほぼ一致している。

6-3-2 トーナライトと石灰珪質岩との関係

石灰珪質岩塊の近傍の「混成岩」的なトーナライトは、全岩化学組成、鉱物組合せ、単斜輝石と斜長石の化学組成などの特徴から、石灰珪質岩の影響を受け、アダカイト質の特徴を失ったことを示している。すなわち、トーナライトマグマが石灰珪質岩を「同化」したと考えられるが、それはどのような反応だったのであろうか? トーナライトマグマの固結条件として、Hiroi *et al.* (2008) は 800°C 以上の温度と約 5kb の圧力、上述した本研究は 810-840°C, 4.5-6.2 kbar の温度圧力と見積もっている。そのような温度・圧力条件下では、石灰珪質岩が部分融解することが実験的に明らかにされており (例えば, Boettcher, 1970; Huckenholz *et al.*, 1975), 石灰珪質岩が部分融解して生じたメルトがトーナライトマグマと混合した可能性がある。トーナライト中の石灰珪質岩の全岩化学組成 (Table. 7) と鉱物組織, 特に Ca ザクロ石と灰長石とのシンプレクタイトの特異な組織と鉱物の量比から、緑簾石に富む岩石においてメルトの関与する次のような反応が順次進行したことを示唆している。



実際、灰長石とシンプレクタイトを形成する Ca ザクロ石中に残晶状の緑簾石が出現すること (Figs. 14a-d) と、後退変成の著しい石灰珪質岩は少量の石英を含む緑簾石に富むという観察事実 (Figs. 14e-h) がそれを支持している。さら

に後述するように、トーナライトマグマは上昇して珪線石の安定領域に入ったにもかかわらず、藍晶石が珪線石に相転移していないことは、藍晶石とトーナライトマグマとの反応が藍晶石の安定領域内で進行し、その後、藍晶石は反応系から孤立して凍結保存されたことを示唆している。これらの反応は $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の 4 成分系で自由度の数が 1 の反応に近似できる。Fig. 29 には Boettcher (1970) によるこの 4 成分系での自由度の数が 1 の反応群 (岩石成因論的グリッド petrogenetic grid) を $P_{\text{total}} = P_{\text{H}_2\text{O}}$ の条件で示し (緑簾石はゾイサイト, Ca ザクロ石はグロッシュラーと表示されている), さらに石灰珪質岩に推定される P - T 経路も示した。特に反応 (1) は「流体相が関与しない脱水融解反応 vapor-absent dehydration melting reaction」であり, $P_{\text{H}_2\text{O}}$ の変化に影響されないものとして重要である。1980 年代から多様な花崗岩質岩中に出現する「火成緑簾石 magmatic epidote」が注目されるようになり (Schmidt and Poli, 2004), マグマの生成を含め, 火成活動における緑簾石の重要性がしだいに明らかになってきた。

日の出岬の南西部には, 泥質片麻岩に伴って少量の石灰珪質岩が産出する (Fig. 30)。それはザクロ石+単斜輝石+斜長石+石英+くさび石の鉱物組合せをもっており, トーナライト中の石灰珪質岩の鉱物組合せと調和的である。しかし構成鉱物の量比や組織は大きく異なっており, 両者の異なった原岩と反応経過を示している。日の出岬のアダカイト質トーナライトマグマがエクロジャイト相条件下で玄武岩質岩が部分熔融することによって生成したものであるならば, トーナライト中の石灰珪質岩は斜長石の濃集したハンレイ岩起源である可能性やしばしばエクロジャイトなどの玄武岩質変成岩に付随する緑簾石の脈やプール (例えば, Sheng *et al.*, 2013) であった可能性がある。

ところでプリンス・オラフ海岸では, 日の出岬よりも西側 (厳密には, 二番

岩の西側) に石灰珪質岩における次の反応に基づくアイソグラッドがひかれ (Figs. 29, 31), リュツォ・ホルム岩体の東から西に向かったの累進変成作用を指示するものの一つとなっている (Hiroi *et al.*, 1987)。



Fig. 29 にはこの反応 (3) も示されているが, Fig. 2a と Fig. 29 から明らかのように, 日の出岬の岩石はプリンス・オラフ海岸東部に分布するリュツォ・ホルム岩体の岩石よりも高温であり, その温度構造とは不調和的である。この点は前述した年代値, 岩相, 変成度などの点から, 日の出岬の岩石がリュツォ・ホルム岩体中の異地性岩塊であるとする Hiroi *et al.* (2006, 2008) の推定を補強している。

上記の日の出岬における観察事実は緑簾石のアダカイト質マグマの成因論における重要性を具体的に示している。緑簾石族鉱物は, 火成岩や, 変成岩, 堆積岩などのさまざまな岩石から産出し, 幅広い温度圧力条件下で安定である。特に沈み込み帯で昇温変成作用を受けたスラブにおいて, Fig. 32 を示すように, 緑色片岩相から, 藍閃石片岩相, 緑簾石角閃岩相, エクロジャイト相への累進変成作用の過程を通して, 緑簾石族鉱物は存在する。脱水融解反応においては, 角閃石とともに不可欠な含水鉱物である (Thompson and Ellis, 1994; Vielzeuf and Schmidt, 2001; Skjerlie and Patiño Douce, 2002; Schmidt and Poli, 2004)。さらに, 緑簾石族鉱物は沈み込みスラブの中で微量元素の Sr や希土類元素などの主要なホスト鉱物として, 地殻-マントル間の元素循環に重要な役割を果たすことも指摘されている (Enami *et al.*, 2004)。

また, Schmidt and Poli (2004) が指摘しているように, 流体に不飽和な玄武岩質岩 (MORB) の高圧条件下での部分融解実験の結果 (Apted and Liou, 1983; Poli, 1993; Lambert and Wyllie, 1972; Pawley and Holloway, 1993; Poli and Schmidt,

1995) (Fig. 33) から、圧力の上昇と共に、安定な鉱物組み合わせは次のようになる：(1) 0.8GPa 以下では、角閃石+斜長石+石英±緑簾石の角閃石相の鉱物組み合わせが安定である、(2) 0.8-1.0GPa 以上では、緑簾石とザクロ石が加わり、角閃石+斜長石+緑簾石+ザクロ石+石英の鉱物組み合わせへになる、(3) 1.8-2.0GPa では、斜長石が分解してオンファス輝石が形成され、角閃石+緑簾石+単斜輝石+ザクロ石+石英の鉱物組み合わせになる、(4) 2.5GPa 以上では、角閃石が分解して、ゾイサイト+単斜輝石+ザクロ石+石英/コーサイトのゾイサイト-エクロジャイト相の鉱物組み合わせへと変化する、(5) 3GPa では、ゾイサイトが分解して、K に乏しい玄武岩質岩が狭義のエクロジャイトへと変化して、オンファス輝石+ザクロ石+コーサイトの無水鉱物組み合わせになる。緑簾石族鉱物は 1-2.5GPa の広い安定地域を持つ。

以上の観察事実や実験的研究の結果から、玄武岩質岩や石灰珪質岩の高圧(エクロジャイト相)条件下での部分融解において緑簾石族鉱物は重要であり、スラブ融解説を中心にしたアダカイト質マグマの成因の解明には不可欠なものと考えられる。

6-3-3 日の出岬のトーナライトの藍晶石の起源

日の出岬に分布する多様な岩相・組成のアダカイト質トーナライト中に藍晶石が出現することは、すでに Hiroi *et al.* (2006, 2008) によって報告されている。彼らはその起源についても議論しているが、藍晶石が粘土鉱物(ピナイト)や炭酸塩鉱物によって囲まれているため、問題が残されていた。本研究でさらに多数の薄片を作成・観察した結果、2種類のトーナライト中で藍晶石を囲むピナイト化を免れた灰長石コロナが確認された。灰長石コロナには微細な他形の残留藍晶石に加えて、コランダムやスピネル、アルカリ長石、ルチルなどが含

まれており、それがシリカに不飽和な環境で藍晶石とトーナライトマグマとの反応によって生成されたことを示している。すなわち、この反応の時点ではトーナライトマグマはシリカに不飽和であったことになる。さらにそのようなコロナを伴う藍晶石が石英を包有することがあることも確認されており、それは藍晶石がシリカに過飽和な環境で成長したことを示している。以下、これらの新事実から、藍晶石とトーナライトマグマとの関係の変遷および藍晶石の成因について考察する。

トーナライトは石英を含む火成岩であり、マグマから石英が晶出することは自明である。石英が晶出し始めると、マグマはシリカに過飽和となるが、石英晶出前のマグマはシリカに不飽和である。トーナライト組成の岩石の高温高压条件での部分融解実験の結果 (例えば, Lambert and Wyllie, 1974; Stern *et al.*, 1975; Wyllie, 1977; Huang and Wyllie, 1986; Rutter and Wyllie, 1988; Conrad *et al.*, 1988; Carroll and Wyllie, 1990; Patiño Douce and Beard, 1995; Schmidt and Thompson, 1996; Singh and Johannes, 1996; Skjerlie and Johnston, 1996; Patiño Douce, 2005) によると、(1) 石英がマグマと共存するのは、圧力にほとんど関係なく、 H_2O に過飽和な場合にはソリダス付近の比較的狭い温度範囲に限定されるが (Fig. 34a), H_2O に乏しい場合には $900^{\circ}C$ 以上 (多くの場合, $1000^{\circ}C$ 以上) の高温まで拡大する (Fig. 34b), (2) 1.5 GPa 以上の高压条件では、藍晶石が花崗岩質メルトとともに生成される場合もあるが、生成されない場合の方が多い、(3) 1.0 GPa 以下での脱水融解過程では斜方輝石が生成されることがあるが、それは系の組成によって大きく異なる、(4) 含水系では比較的高压条件下で緑簾石がメルトと共存するが、緑簾石の出現領域は系の酸素分圧によっても大きく左右される、等が明らかにされてきた。藍晶石と反応したトーナライトマグマがシリカに不飽和であったことと、見積もられる温度が $800^{\circ}C$ 以上であること

から、その時点のトーナライトマグマが比較的 H₂O に富んでいたことが示唆される (Fig. 34b では、含水量は 4wt% 以上)。なお、その温度の見積もりは Hiroi *et al.* (2008) がカルシウム角閃石-斜長石温度計と両輝石温度計を用いて行ったものであるが、上述した本研究での計算結果 (Table. 3) や石灰珪質岩の鉱物組合せ (灰長石+Ca ザクロ石+石英) (Fig. 29) と調和的である。

トーナライトに出現する藍晶石の成因としては、(1) トーナライトマグマから生成した火成鉱物、(2) トーナライトマグマが地殻内を上昇中に偶然捕獲した外来結晶、(3) トーナライトマグマの起源物質であるエクロジャイトが部分融解した時に生成された融け残り鉱物、(4) エクロジャイトがサブソリダス条件下にある時に生成された変成鉱物、(5) トーナライト中の石灰珪質岩に含まれていた変成鉱物、等が考えられる。前述した藍晶石の産状と部分融解実験の結果から (1) の可能性は低い。(2) の可能性は否定できないが、日の出岬の広範な地点から多様な岩相・組成のトーナライトに藍晶石が産出することから、偶然取り込まれた可能性よりもトーナライトマグマと藍晶石との強い成因的な関係性が示唆される。すなわち、(3) あるいは (4) および (5) の可能性が大きいと考えられる。玄武岩質岩の高温高压部分融解実験の結果 (例えば、Lambert and Wyllie, 1972; Stern *et al.*, 1975; Wyllie, 1977; Huang and Willie, 1986; Beard and Lofgren, 1991; Rapp *et al.*, 1991; Rushmer, 1991; Winther and Newton, 1991; Wyllie and Wolf, 1993; Sen and Dunn, 1994; Wolf and Wyllie, 1994; Rapp and Watson, 1995; Singh and Johannes, 1996; Springer and Seck, 1997; López and Castro, 2001; Vielzeuf and Schmidt, 2001; Skjerlie and Patiño Douce, 2002; Schmidt and Poli, 2004; Xiong *et al.*, 2009) から、(1) 約 1~2 GPa の压力下で H₂O に過飽和な場合、ソリダスの温度は 700°C 以下であり、トーナライトのそれに近い、(2) 約 1GPa 以上の高压条件では少量の石英が出現する、(3) 高压条件ではザクロ石が出現

するが、出現し始める圧力は系の組成によって異なる、(4) H_2O に過飽和な場合、石英がメルトと共存するのはソリダスに近い狭い温度範囲に限定される、(5) H_2O に乏しい場合、系の組成によって多少異なるが、石英とメルトの共存は 1000°C 以上の高温まで拡大する、(6) 藍晶石が生成されるは 1.5GPa 以上の高压条件で、アルミナに富む場合 ($>17.2\text{ wt\% Al}_2\text{O}_3$) に限定される、(7) 沈み込み帯で形成されるエクロジャイトには緑簾石が含まれる可能性が高く、そのようなエクロジャイトでは $1.5\sim 2.0\text{GPa}$ の圧力条件では 800°C 以下で緑簾石を消費する脱水融解反応が始まるなどの点が指摘される (Fig. 34)。したがって、アルミナに乏しい MORB 起源のエクロジャイトには藍晶石は出現しないことになる。しかし、Bindenmann *et al.* (2005) や Tsuchiya *et al.* (2007) が指摘しているように、堆積物あるいは斜長石の濃集したハンレイ岩などスラブのいくつかの部分構成する岩石が混合することによってアルミナに富化すると、 1.5GPa 以上の圧力と約 800°C の温度で緑簾石を含有したエクロジャイトが部分融解し、トーナライト質メルトとともに石英を含む藍晶石が生成される可能性が生じる。この時点ではメルトと藍晶石とは平衡に共存するが、メルトが分離・濃集してマグマとなり、地表に向かって上昇して減圧すると、持ち運んできた藍晶石とは非平衡の関係になり、反応し始める。一方、Fig. 13 に示した石灰珪質岩中の細脈状のトーナライトに高頻度で藍晶石が出現することから、藍晶石はもともと石灰珪質岩に含まれていた可能性もあるが、石灰珪質岩がエクロジャイトに伴われていたものならば、これもスラブの部分融解になる。いずれにして、Defant and Drummond (1990) や Martin *et al.* (2005) らによって提唱されたように「若くて熱いスラブが部分融解」する場合、エクロジャイト化した MORB だけが部分融解するのではなく、スラブを構成する多様な岩石が部分融解すると考えるのが自然である。

以上、日の出岬のトーナライト中に出現する藍晶石の新しい産状が明らかになったことから、藍晶石はトーナライトマグマによる捕獲結晶ではあるが、もとはトーナライトマグマの起源物質であるスラブに由来する可能性が高い。

おわり

東南極、プリンス・オラフ海岸東部の日の出岬にはアダカイト質トーナライトが産出するが、その地球化学的な特徴だけではなく、その中に産出する超塩基性～中性岩および石灰珪質岩の岩塊と捕獲結晶状のザクロ石や藍晶石はアダカイト質火成岩類の成因解明に重要な手掛かりとなる。本研究によって得られた結果は以下の通りである：

1. 日の出岬のトーナライトに見られる広範な化学組成は、主として同一のマグマから斜方輝石、単斜輝石、斜長石、ホルンブレンド、黒雲母と不透明鉱物の結晶分別作用に起因する。
2. 捕獲岩状の超塩基性～中性岩塊の大半はトーナライトマグマから斜方輝石、単斜輝石、斜長石、ホルンブレンド、黒雲母などが沈積してできたものである。
3. 藍晶石の産状から、それがシリカに過飽和な環境で生成された後で、シリカに不飽和なマグマと反応したことで、その時点のトーナライトマグマが比較的 H_2O に富んでいたことが明らかになった。藍晶石はトーナライトマグマが地下深部から持ち運んできた捕獲結晶であり、上昇途中の藍晶石の安定領域内で反応系から分離され、凍結保存されたものである。
4. 捕獲岩状の石灰珪質岩塊もトーナライトマグマによって地下深部から持ち運ばれたものであり、マグマの上昇に伴う減圧によって緑簾石分解反応が進

行した。石灰珪質岩塊中の細脈状トーナライトは非アダカイト質であるが、それは石灰珪質岩と反応したためである。またこの細脈には、高頻度で藍晶石が出現するため、広くトーナライト中の藍晶石は石灰珪質岩に由来することと、石灰珪質岩はもともと海洋地殻の斜長石を含むハンレイ岩であった可能性が指摘される。

5. 緑簾石は角閃石とともに含水鉱物として、スラブの脱水融解反応では極めて重要であり、さらにスラブ融解説を中心にしたアダカイト質マグマの成因論では、ザクロ石や角閃石に加えて、緑簾石族鉱物の挙動に注目する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始あたたかいご指導と激励を賜りました指導教官の廣井美邦教授には心から感謝いたします。千葉大学理学部岩石鉱物学研究室の井上厚行教授、津久井雅志教授、吉田修二准教授、古川 登助教および地殻構造研究室の金川久一教授には多大なるご指導をいただきました、厚く御礼申し上げます。本研究を進める間に、山口大学の大和田正明教授及び新潟大学のサティッシュ・クマール教授は、丁寧にご指導いただきました、ここに深く感謝申し上げます。著者は国立極地研究所の特別共同利用研究員として外田智千准教授に研究指導を受けることができ、厚く御礼申し上げます。本研究で使用した野外データと岩石試料は第46次南極地域観測隊で得られたものである。山口大学機器分析センター設置の蛍光X線分析装置を使用の際に、大和田正明教授及び岩石研究分野の学生の皆様に大変お世話になった。ICP-MS, Sr-Nd 同位体組成分析とSm-Nd 全岩アイソクロン年代測定では新潟大学のサティッシュ・クマール教授に、EPMA 分析では国立極地研究所の外田智千准教授、九州大学の足立達朗助教にご援助いただいた。国立極地研究所の白石和行教授と本吉洋一教授、堀江憲路博士、オーストラリアのD. J. Dunkley 博士 (当時国立極地研究所)、島根大学の亀井淳志准教授、西日本東南極セミナーの皆様に数多くの有益なコメントをいただいた。名古屋学院大学の小林記之講師 (当時千葉大学)、日鉄鉱コンサルタント株式会社の加藤陸実博士 (当時千葉大学)、千葉大学の柳綾彦氏及び岩鉱研究室の学生の皆様には常に研究のサポートをしていただいた。岡本国際奨学交流財団、千葉大学生涯学習友の会、千葉大学国際交流センター及び千葉大学のスタッフの皆様には、学生生活を通じて大変お世話になった。最後に、長い留学生活を見守って下さった家族や友人に心よりお礼申し上げます。本当にありがとうございました。

引用文献

- Ajishi, H., Kawano, Y., Kagami, H. and Ikeda, T. (2004): Geochronological study of post-metamorphic granite from Kasumi Rock, Lützow-Holm Complex, East Antarctica. *Polar Geoscience*, 17, 35-44.
- Apted, M.J. and Liou, J.G. (1983): Phase relations among greenschist, epidote-amphibolite, and amphibolite in a basaltic system. *American Journal of Science*, 283A, 328-354.
- Arth, J.G. (1976): Behavior of trace elements during magmatic processes - a summary of theoretical models and their applications. *Journal of Research of the US Geological Survey*, 4, 41-47.
- Atherton, M.P. and Petford, N. (1993): Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362, 144-146.
- Barker, F. (1979): Trondhjemite: definition, environment and hypotheses of origin. In: Barker, F. (Ed.), *Trondhjemites, Dacites, and related rocks*, Elsevier, New York, 1-12.
- Bea, F., Pereira, M.D. and Stroh, A. (1994): Mineral/leucosome trace-element partitioning in a peraluminous migmatite (a laser ablation-ICP-MS study). *Chemical Geology*, 117, 291-312.
- Beard, J.S. and Lofgren, G.E. (1991): Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6.9 kb. *Journal of Petrology*, 32, 365-401.
- Beate, B., Monzier, M., Spikings, R., Cotton, J., Silva, J., Bourdon, E. and Eissen, J. P. (2001): Mio-Pliocene adakite generation related to flat subduction in southern Ecuador: the Quimsacocha volcanic center. *Earth and Planetary Science Letters*, 192, 561-570.
- Bevins, R.E., Kokelaar, B.P. and Dunkley, P.N. (1984): Petrology and geochemistry of lower to middle Ordovician igneous rocks in Wales: a volcanic arc to marginal basin transition. *Proceedings of the Geologists' Association*, 95, 337-347.
- Bindeman, I.N., Eiler, J.M., Yogodzinski, G.M., Tatsumi, Y., Stern, C.R., Grove, T.L., Portnyagin, M., Hoernle, K. and Danyushevsky, L.V. (2005): Oxygen isotope

- evidence for slab melting in modern and ancient subduction zones. *Earth Planetary Science Letter*, 235, 480-496.
- Blundy, J. D. and Holland, T. J. B. (1990): Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104, 208-224.
- Boettcher, A.L. (1970): The system CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O at high pressures and temperatures. *Journal of Petrology*, 11, 337-379.
- Boger, S.D., Wilson, C.J.L. and Fanning, C.M. (2001): Early Paleozoic tectonism within the East Antarctic craton: The final suture between east and west Gondwana? *Geology*, 29, 463-466.
- Bourdon, E., Eissen, J.P., Monzier, M., Robin, C., Martin, H., Cotton, J., and Hall, M. (2002): Adakite-like lavas from Antisana volcano (Ecuador): evidence for slab melt metasomatism beneath Andean northern volcanic zone. *Journal of Petrology*, 43, 99-217.
- Calmus, T., Aguilon-Robles, A., Maury, R.C., Bellon, H., Benoit, M., Cotton, M., Bourgois, J. and Michaud, F. (2003): Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites ("bajaites") from Baja California, Mexico: the role of slab melts. *Lithos*, 66, 77-105.
- Carroll, M.R. and Wyllie, P.J. (1990): The system tonalite-H₂O at 15 kbar and the genesis of calc-alkaline magmas. *American Mineralogist*, 75, 345-357.
- Castillo, P.R., Janney, P.E. and Solidum, R. (1999): Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134, 33-51.
- Castillo, P.R. (2012): Adakite petrogenesis. *Lithos*, 134-135, 304-316.
- Conrad, W.K., Nicholls, I.A. and Wall, V.J. (1988): Water-saturated and undersaturated melting of met aluminous and peraluminous crustal compositions at 10 kb: evidence for the origin of silicic magmas in the Taupo volcanic zone, New Zealand, and other occurrences. *Journal of Petrology*, 29, 765-803.
- Dalziel, I.W.D. (1991): Pacific margins of Laurentia and East Antarctica-Australia as a conjugate rift pair: Evidence and implications for an Eocambrian supercontinent, *Geology*, 19, 598-601.

- Defant, M.J. and Drummond, M.S. (1990): Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347, 662-665.
- Defant, M.J., Richerson, P.M., DeBoer, J.Z., Stewart, R.H., Maury, R.C., Bellon, H., Drummond, M.S., Feigenson, M.D. and Jackson, T.E. (1991): Dacite Genesis via both Slab Melting and Differentiation: Petrogenesis of La Yeguada Volcanic Complex, Panama. *Journal of Petrology*, 32, 1101-1142.
- DePalo, D.J. (1981): Trace element and isotopic effects of combined wall rock assimilation and fractional crystallization. *Earth Planetary Science Letter*, 53, 189-202.
- DePalo, D.J. and Wasserburg, G.J. (1976): Inferences about magma sources and mantle structure from variations of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. *Geophysical Research Letters*, 3, 12, 743-746.
- Drummond, M.S. and Defant, M.J. (1990): A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95, 21503-21521.
- 遠藤美智子, 土谷信高, 木村純一 (1999): 南部北上帯, 金華山花崗岩類の岩石化学的特徴とその地質学的意義. *地質学論集*, 53, 85-110.
- Enami, M., Liou, J.G. and Mattinson, C.G. (2004): Epidote Minerals in High P/T Metamorphic Terranes: Subduction Zone and High-to Ultrahigh-Pressure Metamorphism. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56, 346-398.
- Ewart, A. and Griffin, W.L. (1994): Application of Proton-Microprobe data to trace-element partitioning in volcanic-rocks. *Chemical Geology*, 117, 251-284.
- Faure, G. (1986): *Principles of Isotope Geology*. Second ed., Wiley, New York, 589p.
- Fanning, C.M., Moore, D. H., Bennett, V. C. and Daly, S. J. (1996): The 'Mawson Continent': Archaean to Proterozoic crust in the East Antarctic Shield and Gawler Craton, Australia. A cornerstone in Rodinia and Gondwanaland. Australia. In 14th Australian Geological Connection, Geological Society of Australia, Abstracts, 41, 135.
- Fitzsimons, I.C.W. (2000): Grenville-age basement provinces in East Antarctica: Evidence for three separate collisional orogens. *Geology*, 28, 10, 879-882.
- Franalanci, L., Peccerillo, A. and Poli, G. (1987): Partition coefficients for minerals in

- potassium-alkaline rocks: Data from Roman province (Central Italy). *Geochemical Journal*, 21, 1-10.
- Fraser, G.L. and McDougall, I. (1995): K/Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages across the Lützow-Holm complex, East Antarctica. *Proceedings of NIPR Symposium on Antarctic Geosciences*, 8, 137-159.
- Fraser, G.L. (1997): Geochronological constraints on the metamorphic evolution and exhumation of the Lützow-Holm Complex, East Antarctica. Doctor Thesis, Australian National University, 254p.
- Fraser, G., McDougall, I., Ellis, D.J. and Williams, I.S. (2000): Timing and rate of isothermal decompression in Pan-African granulites from Rundvågshetta, East Antarctica. *Journal of Metamorphic Geology*, 18, 4, 441-454.
- Gao, J., Klemd, R., Long, L. L., Xiong, X.M. and Qian, Q. (2009): Adakitic signature formed by fractional crystallization: An interpretation for the Neo-Proterozoic meta-plagiogranites of the NE Jiangxi ophiolitic mélange belt, South China. *Lithos*, 110, 277-293.
- Gill, J.B. (1981): *Orogenic Andesite and Plate tectonics*. Springer Verlag, New York, 390p.
- Green, H.T. (1994): Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis -Sedona 16 years later. *Chemical Geology*, 117, 1-36.
- Green, T.H. and Pearson, N.J. (1987): An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti-rich minerals and silicate liquids at high pressure and temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 55-62.
- Gutscher, M.A., Maury, F., Eissen, J.P. and Bourdon, E. (2000): Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, 28, 535-538.
- Hammarstrom, J.M. and Zen, E-an. (1986): Aluminium in hornblende: an empirical geobarometer. *American Mineralogist*, 71, 1297-1313.
- Harley, S.L. (2003): Archaean-Cambrian crustal development of East Antarctica: metamorphic characteristics and tectonic implications. Geological Society, London, Special Publications, 206, 203-230.
- Hiroi, Y., Shiraishi, K., Yanai, K. and Kizaki, K. (1983): Aluminum silicates in the Prince Olav and sôya Coasts, East Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 28, 115-131.

- Hiroi, Y., Shiraishi, K., Motoyoshi, Y., Kanisawa, S., Yanai, K. and Kizaki, K. (1986): Mode of occurrence, bulk chemical compositions and mineral textures of ultramafic rocks in the Lützow-Holm Complex, East Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 43, 62-84.
- Hiroi, Y., Shiraishi, K., Motoyoshi, Y. and Katsushima, T. (1987): Progressive metamorphism of calc-silicate rocks from the Prince Olav and Sôya Coasts, East Antarctica. *Proceedings of NIPR Symposium on Antarctic Geosciences*, 1, 73-97.
- Hiroi, Y., Shiraishi, K. and Motoyoshi, Y. (1991): Late Proterozoic paired metamorphic complexes in East Antarctica, with special reference to the tectonic significance of ultramafic rocks. In: Thomson, M. R. A., Crame, J. A. and Thomson, J. W. (eds) *Geological Evolution of Antarctica*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 83-87.
- Hiroi, Y., Motoyoshi, Y., Shiraishi, K. and Ellis, D. J. (1995): The significance of euhedral calcic plagioclase inclusions in garnet from the Lützow-Holm Complex, East Antarctica: A textural indicator of partial melting in pelitic gneisses. *Proceedings of NIPR Symposium on Antarctic Geosciences*, 8, 107-120.
- Hiroi, Y., Motoyoshi, Y., Satish-Kumar, M., Kagashima, S., Suda, Y. and Ishikawa, N. (2006): Granulites from Cape Hinode in the amphibolite-facies eastern part of Prince Olav Coast, East Antarctica: New evidence for allochthonous block in the Lützow-Holm Complex. *Polar Geoscience*, 19, 89-108.
- Hiroi, Y., Motoyoshi, Y., Ishikawa, N., Hokada, T. and Shiraishi, K. (2008): Origin of xenocrystic garnet and kyanite in clinopyroxene-hornblende-bearing adakitic meta-tonalites from Cape Hinode, Prince Olav Coast, East Antarctica. In: Satish-Kumar, M., Motoyoshi, Y., Osanai, Y., Hiroi, Y. and Shiraishi, K. (eds) *Geodynamic Evolution of East Antarctica: a key to the East-West Gondwana Connection*. Geology Society, London, Special Publications, 308, 333-350.
- Hoffman, P.F. (1991): Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? *Science*, 252, 1409-1412.
- Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H. and Sisson, V.B. (1987): Confirmation of the empirical correlation of aluminium in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*, 72, 231-239.

- Hokada, T. and Motoyoshi, Y. (2006): Electron microprobe technique for U-Th-Pb and REE chemistry of monazite, and its implications for pre-, peak- and post-metamorphic events of the Lutzow-Holm Complex and the Napier Complex, East Antarctica. *Polar geoscience*, 19, 118-151.
- 外田智千 (2012): ジルコン年代学と南極大陸の地質発達史. *フィッション・トラック*, ニュースレター, 第 25 号, 35-37.
- Holdaway, M.J. (1971): Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram. *American Journal of Science*, 271, 97-131.
- Huang, W.L. and Wyllie, P.J. (1986): Phase relationships of gabbro-tonalite-granite-water at 15 kbar with applications to differentiation and anatexis. *American Mineralogist*, 71, 301-316.
- Huckenholz, H.G., Hölzl, E. and Lindhuber, W. (1975): Grossularite, its solidus and liquidus relations in the CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system up to 10 kbar. *Neues Jb. Miner. Abh.* 124, 1-46.
- Icenhower, J. and London, D. (1996): Experimental partitioning of Rb, Cs, Sr, and Ba between alkali feldspar and peraluminous melt. *Mineralogist*, 81, 719-734.
- Ikeda, Y., Shiraishi, K. and Yanai, K. (1997): Petrogenesis of the meta-trondhjemites from Cape Hinode, East Antarctica. *Proceedings of NIPR Symposium on Antarctic Geosciences*, 10, 102-110.
- Jacobs, J., Fanning, C.M., Henjes-Kunst, F., Olesch, M. and Paeche, H.J. (1998): Continuation of the Mozambique Belt into East Antarctica: Grenville-Age metamorphism and polyphase Pan-African high-grade events in central Dronning Maud Land. *Journal of Geology*, 106, 385-406.
- Jacobs, J., Fanning, C.M. and Bauer, W. (2003a): Timing of Grenville-age vs. Pan-African medium- to high grade metamorphism in western Dronning Maud Land (East Antarctica) and significance for correlations in Rodinia and Gondwana. *Precambrian Research*, 125, 1-20.
- Jacobs, J., Klemd, R., Fanning, C.M., Bauer, W. and Colombo, F. (2003b): Extensional collapse of the late Neoproterozoic-early Palaeozoic East African-Antarctic Orogen in central Dronning Maud Land, East Antarctica. *Geological Society, London, Special Publications*, 206, 271-287.

- Jahn, B.M., Glikson, A.Y., Peucat, J.J., Hickman, A.H. (1981): REE geochemistry and isotopic data of Archean silicic volcanics and granitoids from the Pilbara Block, Western Australia: implications for the early crustal evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45: 1633-1652.
- Johnson, M. C. and Rutherford, M. J. (1988): Experimental calibration of aluminium-in-hornblende geobarometer applicable to calc-alkaline rocks *EOS*, 69, 1511.
- Kanisawa, S., Yanai, K. and Ishikawa, K. (1979): Major element chemistry of metamorphic rocks of the Cape Hinode district, East Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 14, 164-171.
- 兼岡一郎, 小嶋稔, 小嶋美都子, 鮎川勝, 永田武 (1968): K-Ar Ages and Palaeomagnetic Studies on Rocks from the East Coast of Lützow-Holm Bay, Antarctica. *南極資料*, 31, 12-20.
- Kay, S.M., Ramos, V.A. and Marquez, M. (1993): Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks of slab melting prior to ridge trench collision in southern South America. *J. Geol*, 101, 703-714.
- Kawasaki, T. Ishikawa, M. and Motoyoshi, Y. (1993): A preliminary report on cordierite-bearing assemblages from Rundvågshetta, Lützow-Holm bay, east Antarctica: evidence for a decompressional P-T path? *Proceedings of the NIPR Symposium on Antarctic Geosciences* 6, 47-56.
- Kelemen, P. B. (1995): Genesis of high Mg# andesites and the continental crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 120, 1-19.
- Kelemen, P.B., Hanghøj, K. and Greene, A.R. (2003): One View of the Geochemistry of Subduction-related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3, 593-659.
- 国立極地研究所 (NIPR) 編 (1986): *南極の科学 5 地学*, 426p.
- 亀谷 敦, 早坂康隆, 今岡照喜 (2001): GENMIX プログラム (岩石モデル解析) の再開発. *山口県立山口博物館研究報告*, 27, 21-34.
- Lambert, I.B. and Wyllie, P.J. (1972): Melting of gabbro (quartz eclogite) with excess water to 35 kilobars, with geological applications. *The Journal of Geology*, 80, 693-708.
- Lambert, I.B. and Wyllie, P.J. (1974): Melting of tonalite and crystallization of

- andesite liquid with excess water to 30 kilobars. *The Journal of Geology*, 82, 88-97.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., et al. (1997): Nomenclature of amphibole: report of the Subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and minerals names. *American Mineralogist*, 82, 1019-1037.
- LeMaitre, R.W. (1979): A New Generalised Petrological Mixing Model. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 71, 133-137.
- LeMaitre, R.W. (1981): GENMIX- A generalized petrological mixing model program. *Computers and Geosciences*, 7, 229-247.
- López, S. and Castro, A. (2001): Determination of the fluid-absent solidus and supersolidus phase relationships of MORB-derived amphibolites in the range 4–14 kbar. *American Mineralogist*, 86, 1396-1403.
- Lugmair, G.W. and Martin, K. (1978): Lunar initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: differential evolution of the lunar crust and mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 39, 349-357.
- Macpherson, C.G., Dreher, S.T. and Thirlwall, M.F. (2006): Adakites without slab melting: high pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth Planetary Science letters*, 243, 581-593.
- Martin, H., Chauvel, C. and Jahn B.M. (1983): Major and trace element geochemistry and crustal evolution of Archaean granodioritic rocks from eastern Finland. *Precambrian Research*, 21, 159-180.
- Martin, H. (1987): Petrogenesis of Archaean trondhjemites, tonalites, and granodiorites from eastern Finland: major and trace element geochemistry. *Journal of Petrology*, 28, 921-953.
- Martin, H. (1995): The Archaean grey gneisses and the genesis of the continental crust. In: Condie, K.C. (Ed.), *Archaean Crustal Evolution*. Elsevier, pp. 205–259.
- Martin, H. (1999): Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46, 411-429.
- Martin, H., Smithies, R.H., Rapp, R., Moyen, J.F. and Champion, D. (2005): An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79, 1-24.
- McCarthy, T.C., and Patiño Douce, A.E. (1998): Empirical calibration of the silica–

- Ca-tschermak's-anorthite (SCAn) geobarometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 16, 5, 675–686.
- McMenamin, M.A.S. and McMenamin, D.L.S. (1990): *The emergence of animals: the Cambrian breakthrough*. Columbia University Press, New York, 217 p.
- Meerts, J.G. (2003): A synopsis of events related to the assembly of eastern Gondwana. *Tectonophysics*, 362, 1-40.
- Miyazaki, T. and Shuto, K. (1998): Sr and Nd isotope ratios of twelve GSJ rock reference samples. *Geochemical Journal*, 32, 345-350.
- Moores, E.M. (1991): Southwest U.S.-East Antarctic (SWEAT) connection: A hypothesis. *Geology*, 19, 425-428.
- Motoyoshi, Y. (1986): Prograde and progressive metamorphism of the granulite facies Lützow–Holm Bay region, East Antarctica. Doctor Thesis, Hokkaido University.
- Motoyoshi, Y., Hokada, T., Hiroi, Y. and Shiraishi, K. (2004): EMP dating on Cape Hinode of the Lützow-Holm Complex, East Antarctica. Abstracts of 24th Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 23.
- Motoyoshi, Y., Hiroi, Y., Hokada, T. and Shiraishi, K. (2005): Geological belonging of CapeHinode metamorphics, Lützow-Holm Complex, East Antarctica. Abstracts Volume of Annual Meeting of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists, 224.
- Motoyoshi, Y. and Ishikawa, M. (1997): Metamorphic and structural evolution of granulites from Rundvågshetta, Lützow-Holm Bay, East Antarctica. C.A. Ricci (Ed.), *The Antarctic region: geological evolution and processes*, Terra Antarctica Publications, Siena, 65-72.
- Nash, W.P. and Crecraft, H.R. (1985): Partition coefficients for trace elements in silicic magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 2309-2322.
- Nielsen, R.L., Gallahan, W.E. and Newberger, F. (1992): Experimentally determined mineral-melt partition coefficients for Sc, Y and REE for olivine, orthopyroxene, pigeonite, magnetite and ilmenite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110, 488-499.
- Nishi, N., Kawano, Y. and Kagami, H. (2002): Rb-Sr and Sm-Nd isotopic geochronology of the granitoid and hornblende biotite gneiss from the Oku-iwa Rock in the Lützow-Holm Complex, East Antarctica. *Polar Geoscience*, 15,

46-65.

- Patiño Douce, A.E. (2005): Vapor-absent melting of tonalite at 15-32 kbar. *Journal of Petrology*, 46, 275-290.
- Patiño Douce, A.E. and Beard, J.S. (1995): Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar. *Journal of Petrology*, 36, 707-738.
- Pawley and Holloway (1993): Water sources for subduction zone volcanism: New experimental constraints. *Science*, 260, 664-667.
- Peacock, S.M., Rushmer, T. and Thompson, A.B. (1994): Partial melting of subduction oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121, 227-244.
- Pearce, J.A. and Norry, M.J. (1979): Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69, 33-47.
- Pearce, S.M. Rushmer, T. and Thompson, A.B. (1994): Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121, 227-244.
- Plank, T. (2005): Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, 46, 921-944.
- Poli, S. (1993): The amphibolite-eclogite transformation; an experimental study on basalt. *American Journal of Science*, 193, 1061-1107.
- Poli, S. and Schmidt, M.W. (1995): H₂O transport and release in subduction zones: Experimental constraints on basaltic and andesitic systems. *Journal of Geophysical Research, solid earth*, 100, 22299-22314.
- Rapp, R.P., Watson, E.B. and Miller, C.F. (1991): Partial melting of amphibolite /eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. *Precambrian Research*, 51, 1-25.
- Rapp, R.P. and Watson, E.B. (1995): Dehydration melting of metabasalt at 8-32kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36, 891-931.
- Ringwood, A.E. (1970): Petrogenesis of Apollo 11 basalts and implications for lunar origin. *Journal of Geophysical Research*, 75, 6453-6479.
- Rodríguez, C, Sellés D, Dungan M, Langmuir C, and Leeman W. (2007): Adakitic dacites formed by intracrustal crystal fractionation of water-rich parent magmas at Nevado de Longaví volcano (36.2°S; Andean Southern Volcanic Zone, central

- Chile). *Journal of Petrology*, 48, 2033-2061.
- Rogers, G. and Hawkeworth, C.J. (1989): A geochemical traverse across the North Chilean Andes: evidence for crust generation from the mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 91, 271-285.
- Rollinson, H. (1993): *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific & Technical, London. 352p.
- Rushmer, T. (1991): Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid-absent conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107, 41-59.
- Rutter, M.J. and Wyllie, P.J. (1988): Melting of vapour-absent tonalite at 10 kbar to simulate dehydration-melting in the deep crust. *Nature*, 331, 159-160.
- Sajona, F.G., Maury, R.C. and Bellon, H. (1993): Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Phillipines. *Geology*, 21, 1007-1010.
- Sajona, F.G., Bellon, H., Maury, R.C., Pubelier, M., Cotton, J. and Rangin, C. (1994): Magmatic response to abrupt changes in geodynamic settings: Pliocene-Quaternary calc-alkaline and Nb-enriched lavas from Mindanao (Philippines). *Tectonophysics*, 47-72.
- Sajona, F.G., Maury, R.C. Bellon, H., Cotton, J. and Defant, M. (1996): High Field Strength Element Enrichment of Pliocene-Pleistocene Island Arc Basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines). *Journal of Petrology*, 37, 693-726.
- Sajona, F.G., Maury, R.C. and Pubellier, M. (2000): Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao (Philippines). *Lithos*, 54, 173-206.
- Satishi-Kumar, M., Hokada, T., Kawakami, T. and Dunkley, D. J. (2008): Geosciences research in East Antarctica (0°E-60°E): present status and future perspectives. In: Satish-Kumar, M., Motoyoshi, Y., Osanai, Y., Hiroi, Y. & Shiraishi, K. (eds) *Geodynamic Evolution of East Antarctica: a key to the East-West Gondwana Connection*. Geological Society, London, Special Publications, 308, 1-20.
- Schmidt, M.W. and Poli, S. (2004): Magmatic epidote. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56, 399-430.

- Schmidt, M.W. and Thompson, A.B. (1996): Epidote in calc-alkaline magmas: An experimental study of stability, phase relationships, and the role of epidote in magmatic evolution. *American Mineralogist*, 81, 462-474.
- Sen, C. and Dunn, T. (1994): Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117, 394-409.
- Sheng, Y.-M., Zheng, Y-F, Li, S-N. and Hu, Z. (2013): Element mobility during continental collision: insights from polymineralic metamorphic vein within UHP eclogite in the Dabie orogen. *Journal of Metamorphic Geology*, 31, 221-241.
- Shibata, K. Yanai, K. and Shiraishi, K. (1985): Rb-Sr mineral isochron ages of metamorphic rocks around Syowa Station and from the Yamato Mountains, East Antarctica. *Memoirs of National Institute of Polar Research. Special issue 37*, 164-171.
- Shimoda, G., Tatsumi, Y., Nohuda, S., Ishizaka, K., and Jahn B.M. (1998): Setouchi high-Mg andesites revisited: geochemical evidence for melting of subducting sediments. *Earth Planetary Science Letter*, 160, 479-492.
- Shiraishi, K., Hiroi, Y., Ellis, D.J., Fanning, C.M., Motoyoshi, Y. and Nakai, Y. (1992): The first report of a Cambrian orogenic belt in East Antarctica-an ion microprobe study of the Lützow-Holm Complex. *Recent Progress in Antarctica Earth Science*, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 29-35.
- Shiraishi, K., Ellis, D.J., Hiroi, Y., Fanning, Y., Motoyoshi, Y. and Nakai, Y. (1994): Cambrian orogenic belt in East Antarctica and Sri Lanka: implications for Gondwana assembly. *Journal of Petrology*, 102, 47-65.
- Shiraishi, K., Hokada, T., Fanning, C.M., Misawa, K. and Motoyoshi, Y. (2003): Timing of thermal events in eastern Dronning Maud land, East Antarctica. *Polar Geoscience*, 16, 76-99.
- Shiraishi, K., Kagami, H. and Yanai, K. (1995): Sm-Nd and Rb-Sr isochron ages for meta-trondhjemites from Cape Hinode, East Antarctica. *Proceedings of NIPR Symposium on Antarctic Geosciences*, 8, 130-136.
- Shiraishi, K., Dunkley, D.J., Hokada, T., Fanning, C.M., Kagami, H. and Hamamoto, T. (2008): Geochronological constraints on the Late Proterozoic to Cambrian crustal evolution of eastern Dronning Maud Land, East Antarctica: a synthesis of

- SHRIMP. In: Satish-Kumar, M., Motoyoshi, Y., Osanai, Y., Hiroi, Y. & Shiraishi, K. (eds) *Geodynamic Evolution of East Antarctica: a key to the East-West Gondwana Connection*. Geological Society, London, Special Publications, 308, 21-67.
- Sheraton, J.W., Tindle, A.G. and Tingey, R.J. (1996): Geochemistry, origin, and tectonic setting of the Prince Charles Mountains, Antarctica. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 16, 345–370.
- Singh, J. and Johannes, W. (1996): Dehydration melting of tonalites. Part II. Composition of melts and solids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 125, 26-44.
- Skjerlie, K.P. and Johnston, A.D. (1996): Vapor-absent melting from 10 to 20 kbar of crustal rocks that contain multiple hydrous phases: Implications for anatexis in the deep to very deep continental crust and active continental margins. *Journal of Petrology*, 37, 661-691.
- Skjerlie, K.P. and Patiño Douce, A.E. (2002): The fluid-absent partial melting of a zoisite-bearing quartz eclogite from 1.0 to 3.2 G Pa; Implications for melting in thickened continental crust and for subduction-zone processes. *Journal of Petrology*, 43, 291-314.
- Smithies, R.H. (2000): The Archaean tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. *Earth Planetary Science Letter*, 182, 115-125.
- Smithies, R.H. and Champion D.C. (2000): The Archaean High-Mg Diorite Suite: Links to Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite Magmatism and Implications for Early Archaean Crustal Growth. *Journal of Petrology*, 41, 1653-1671.
- Springer, W. and Seck, H.A. (1997): Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 kbar: implications for the origin of TTG magmas. *Contribution to Mineral and Petrology*, 127, 30-45.
- Stern, C.R. and Kilian, R. (1996): Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contribution to Mineral and Petrology*, 123, 263-281.
- Stern, C.R., Huang, W.L. and Wyllie, P.J. (1975): Basalt-Andesite-Rhyolite-H₂O:

- crystallization intervals with excess H₂O and H₂O-undersaturated liquidus surfaces to 35 kilobars, with implications for magma genesis. *Earth Planetary Science Letter*, 28, 189-196.
- Streckeisen, A. (1976): To each plutonic rocks its proper name. *Earth Sci. Rev.*, 12, 1-33.
- Suda, Y., Kawano, Y., Yaxley, G., Korenaga, H. and Hiroi, Y. (2008): Magmatic evolution and tectonic setting of metabasites from Lützow-Holm Complex, East Antarctica. In: Satish-Kumar, M., Motoyoshi, Y., Osanai, Y., Hiroi, Y. and Shiraishi, K. (eds) *Geodynamic Evolution of East Antarctica: a key to the East-West Gondwana Connection*. Geological Society, London, Special Publications, 308, 211-233.
- Sun, S.-S. and McDonough, W. F. (1989): Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42, 313-345.
- 孫羽・廣井美邦, 大和田正明 (2014): 東南極, 日の出岬の藍晶石を含むトーナライト: 特に, 石灰珪質岩塊近傍に産出するものについて. *岩石鉱物科学*, 第43巻, 第6号, 203-214.
- Takahashi, Y., Kagashima, S. and Mikoshiba, U. M. (2005): Geochemistry of adakitic quartz diorite in the Yamizo Mountains, central Japan: Implications for Early Cretaceous adakitic magmatism in the inner zone of southwest Japan. *The Island Arc*, 14, 150-164.
- Takigami, Y., Funaki, M. and Tokieda, K. (1992): ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronological studies on some paleomagnetic samples of East Antarctica. *Recent Progress in Antarctic Earth Science*, 61-66.
- Thompson, A.B. and Ellis, D.J. (1994): CaO + MgO + Al₂O₃ + SiO₂ + H₂O to 35 kb: Amphibole + alc, and zoisite dehydration and melting reactions in the silica-excess part of the system and their possible significance in subduction zones, amphibolite melting, and magma fractionation. *Amer. J. Sci.*, 294, 1229-1289.
- Thomas J.B. Bodnar, R.J. Shimizu, N. and Sinha, A.K. (2002): Determination of zircon/melt trace element partition coefficients from SIMS analysis of melt inclusions in zircon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 2887-2901.

- Thorkelson, D.J. and Breitsprecher, K. (2005): Partial melting of slab window margins: genesis of adakitic and non-adakitic magmas. *Lithos*, 79, 25-41.
- Tsuchiya, N., Kimura, J. I. and Kagami, H. (2007): Petrogenesis of Early Cretaceous adakitic granites from the Kitakami Mountains, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167, 134-159.
- 土谷信高 (2008): アダカイト研究の現状と問題点ーアダカイト質岩の多様性の成因とその地質学的意義. *地球科学*, 62, 161-182.
- Watson, E.B. and Green, T.H. (1981): Apatite/liquid partition coefficients for the rare earth elements and strontium. *Earth and Planetary Science Letters*, 56: 405-421.
- Vielzeuf, D. and Schmidt, M.W., (2001): Melting relations in hydrous systems revisited: application to metapelites, metagreywackes and metabasalts. *Contribution to Mineral and Petrology*, 141, 251-267.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W. (2010): Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.
- Winther, K.T. and Newton, R.C. (1991): Experimental melting of hydrous low-K tholeiite: evidence on the origin of Archaean cratons. *Bull. geol. Soc. Denmark.*, 39, 213-228.
- Wood, B. J. and Banno, S. (1973): Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 42, 109-124.
- Wolf, M.B. and Wyllie, P.J. (1994): Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time. *Contribution to Mineral and Petrology*, 115, 369-383.
- Wyllie, P.J. (1977): Crustal anatexis: An experimental review. *Tectonophysics*, 43, 41-71.
- Wyllie, P.J. and Wolf, M.B. (1993): Amphibolite dehydration-melting: sorting out the solidus. In: Prichard, H.M., Alabaster, T., Harris, N.B.W and Neary, C.R. (eds) *Magmatic processes and plate tectonics*. Geological Society, London, Special Publications, 76, 405-416.
- Xiao, L. and Clemens J.D. (2007): Origin of potassic (C-type) adakites magmas: Experimental and field constraints. *Lithos*, 95, 399-414.

- Xiong, X.L., Adam, J. and Green, T.H. (2005): Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis (J). *Chemical Geology*, 218, 339-359.
- Xiong, X., Keppler, H., Audétat, A., Gudfinnsson, G., Sun, W., Song, M., Xiao, W. and Yuan, L. (2009): Experimental constraints on rutile saturation during partial melting of metabasalt at the amphibolite to eclogite transition, with applications to TTG genesis. *American Mineralogist*, 94, 1175-1186.
- Xu, J-F., Shinjo, R., Defant M.J., Wang, Q. and Rapp R.P. (2002): Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust. *Geology*, 30, 1111-1114.
- 矢内 桂三, 植田 良夫 (1974): 昭和基地付近産岩石の絶対年代とその考察. *南極資料*, 48, 70-81.
- Yanai, K. and Ishikawa, T. (1978): Geological map of Cape Hinode, Antarctica. Antarctic Geological Map Series, sheet 11 (with explanatory text 6p). Tokyo, Nat. Inst. Polar Res.
- 矢田 純, 大和田正明 (2003): 佐賀県中部に分布する白亜紀高 Sr トーナル岩 (糸島岩体) とトロニウム岩 (深江岩体) の成因関係: マグマの分化作用による検討. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 109, 9, 518-532.
- Yogodzinski, G.M., Kay, R.W., Volynets, O.N., Koloskov, A.V. and Kay, S.M. (1995): Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge. *Geol. Soc. Amer. Bull*, 107, 505-519.
- Yoshimura, Y. Motoyoshi, Y. and Miyamoto, T. (2008): Sapphirine+quartz association in garnet: implication for ultrahigh-temperature metamorphism at Rundvågshetta, Lützow-Holm Complex, East Antarctica. Geological Society, London, Special Publications, 308, 377-390.
- 山崎 徹, 大和田正明, 今岡照喜, 白木敬一 (1999): 蛍光 X線分析装置による岩石中の主成分及び微量成分の定量分析. *山口大学機器分析センター報告*, 7, 22-31.
- Zhang, Q., Wang, Y., Qian, Q., et al. (2001a): The characteristics and tectonic-met allogenic significances of the Mesozoic adakites in eastern China. *Acta*

petrologica Sinica, 17, 236-244 (in Chinese with English abstract).

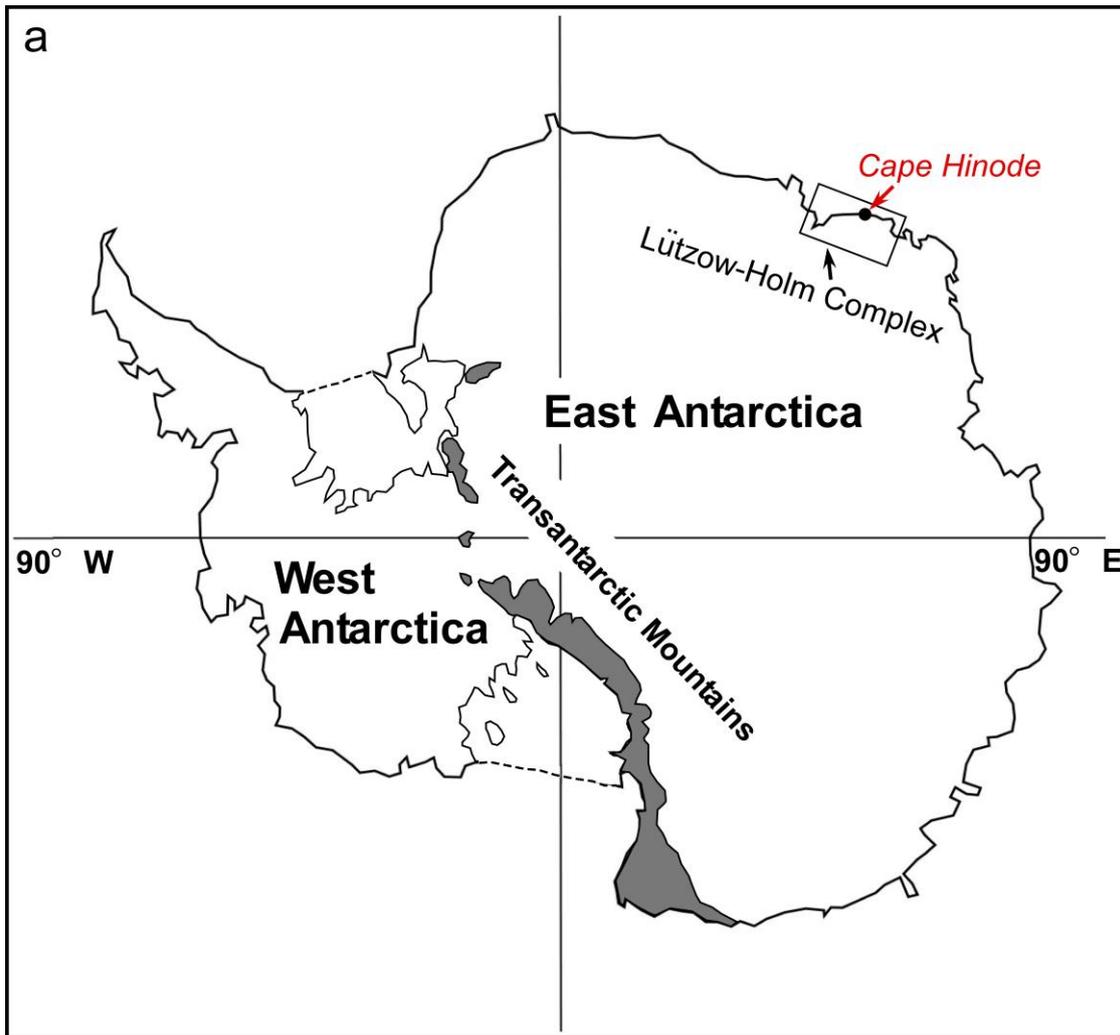


Fig. 1a. Map of Antarctica showing three main parts, East Antarctica, West Antarctica and Transantarctic Mountains, and the location of the Lützow-Holm Complex and Cape Hinode (modified after National Institute of Polar Research).

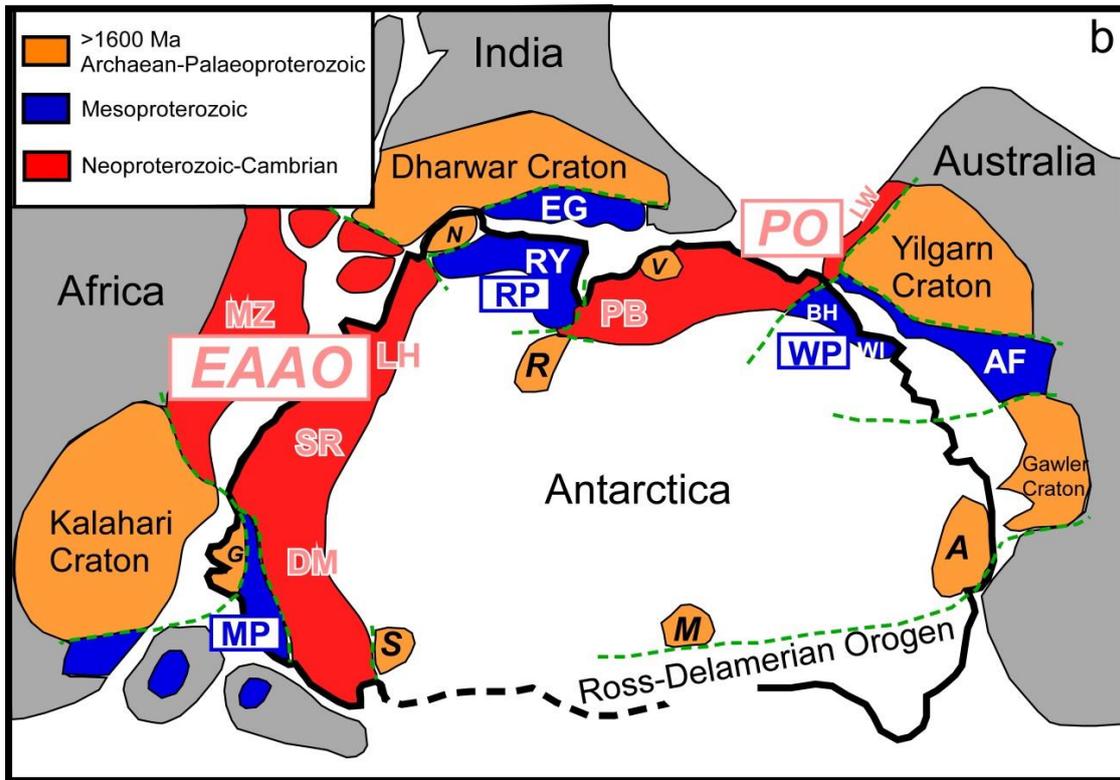


Fig. 1b. Map showing reconstruction of East Antarctica and surrounding parts of Gondwana at 500Ma (modified after Satishi-Kumar *et al.*, 2008; Hokada *et al.*, 2008; Fitzsimons, 2000 and Harley, 2003).

Archaean-Palaeoproterozoic (>1600Ma): A: Terre Adélie, G: Grunehogna, M: Miller Range, N: Napier Complex, R: Ruker Terrane, S: Shackleton Range, V: Vestfold Hills
 Mesoproterozoic (1300-900Ma): MP: Maud Province, RP: Rayner Province, WP: Wilkes Province, AF: Albany-Fraser Range, BH: Bungar Hills, EG: Eastern Ghats Belt, NN: Namaqua-Natal Belt, RY: Rayner Complex, WI: Windmill Island
 Neoproterozoic-Cambrian (600-500Ma): DM: Dronning Maud Land, LH: Lützow-Holm Complex, LW: Leewin Complex, MZ: Mozambique Belt, PB: Prydz Bay, SR: Sør Rondane Mountains
 EAAO: East Africa-Antarctic Orogen; PO: Pinjarra Orogen.

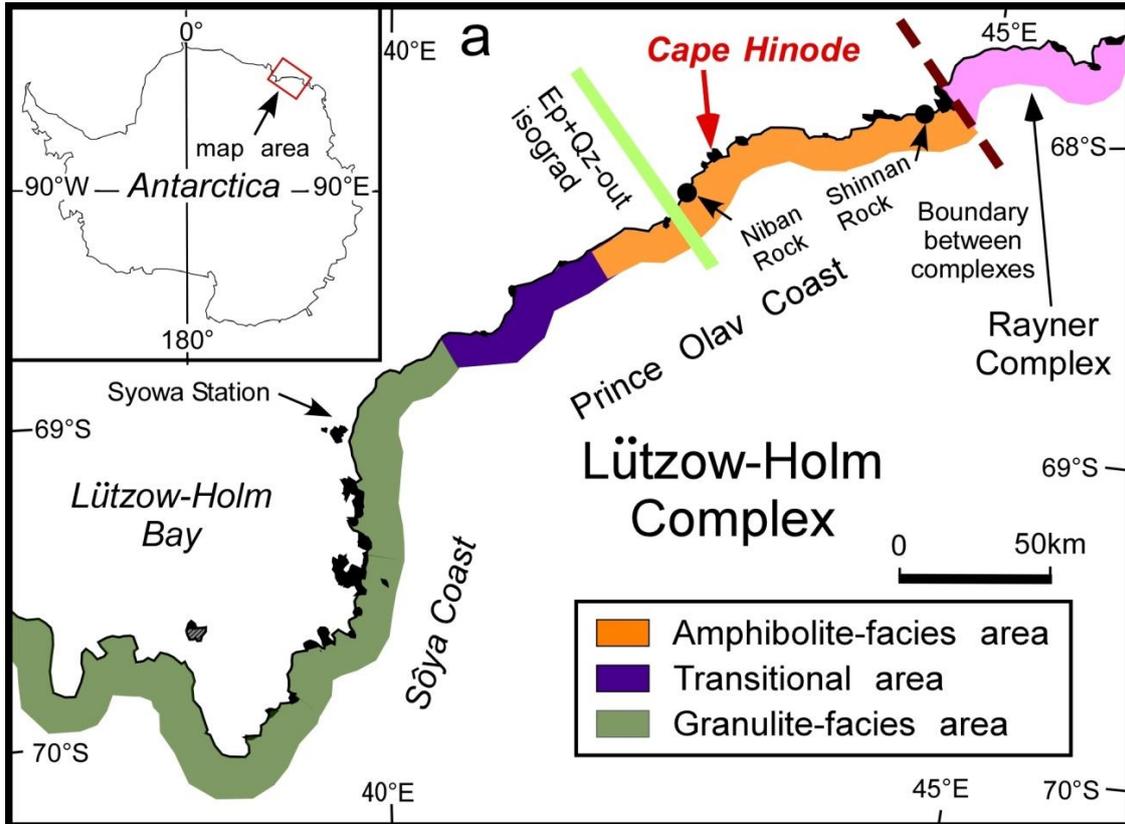


Fig. 2a. Map of Lützow-Holm Complex showing a systematic increase in metamorphic grade from east to west and the location of Ep+Qz-out isograd (modified after Hiroi *et al.*, 1983, 1987).

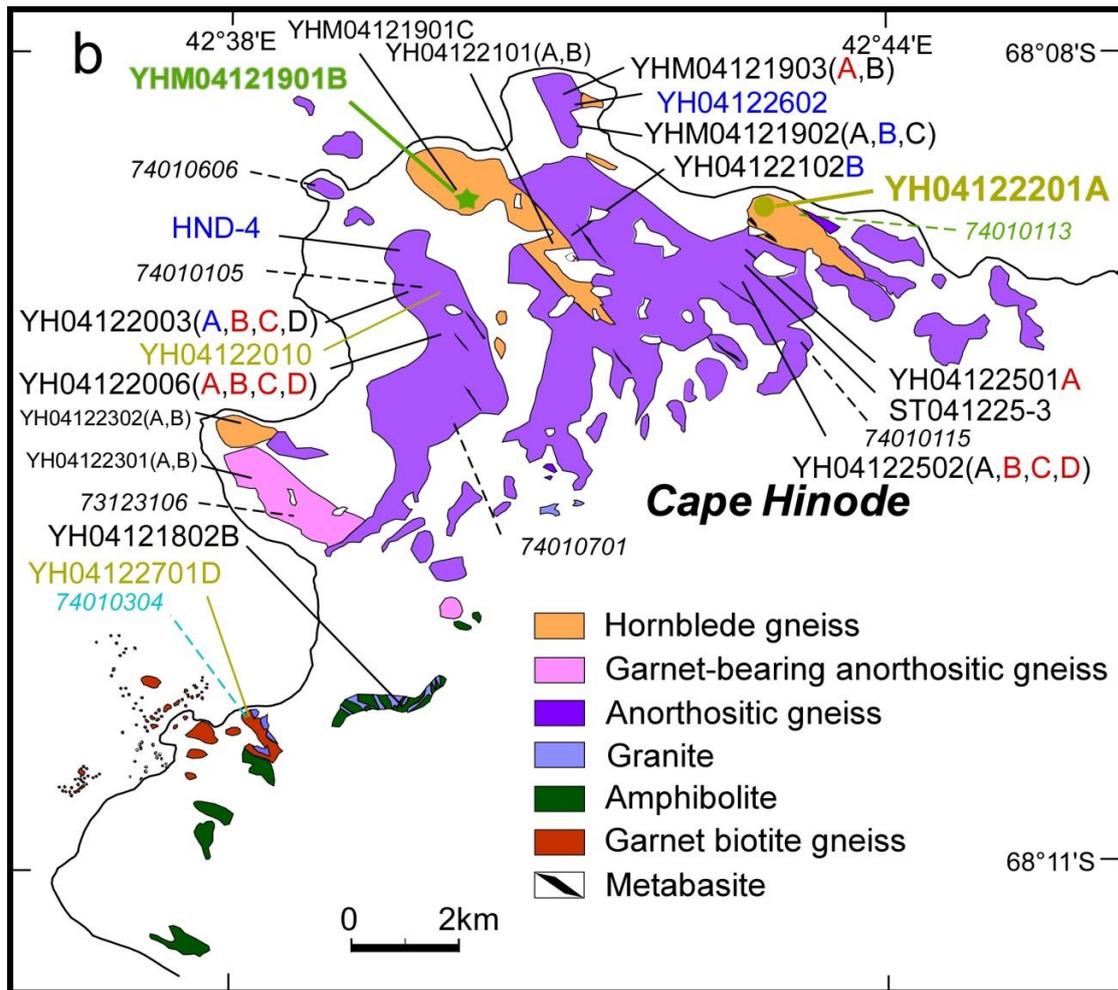


Fig. 2b. Geological map of Cape Hinode area (modified after Yanai and Ishikawa, 1978) showing localities of samples. In this paper hornblende gneiss, garnet-bearing anorthositic gneiss, and anorthositic gneiss are collectively called tonalite, because tonalite is highly heterogeneous even at the same locality and metamorphic modification is limited in extent. Black numbers, tonalite samples for bulk analysis in this study; blue numbers, kyanite-bearing tonalite samples; red numbers, granulite samples for bulk analysis in this study; green star, andesitic dyke; yellow number, calc-silicate rock; pale blue, sillimanite-garnet gneiss; italic types, samples after Kanisawa *et al.* (1979).



Fig. 3a. Field photograph showing the heterogeneous feature of tonalite (sample YHM04121902) even at the same locality in the Cape Hinode area.



Fig. 3b. Field photograph showing the occurrence of xenocrystic garnet in tonalite (sample YH04122002) (after Hiroi *et al.*, 2008).

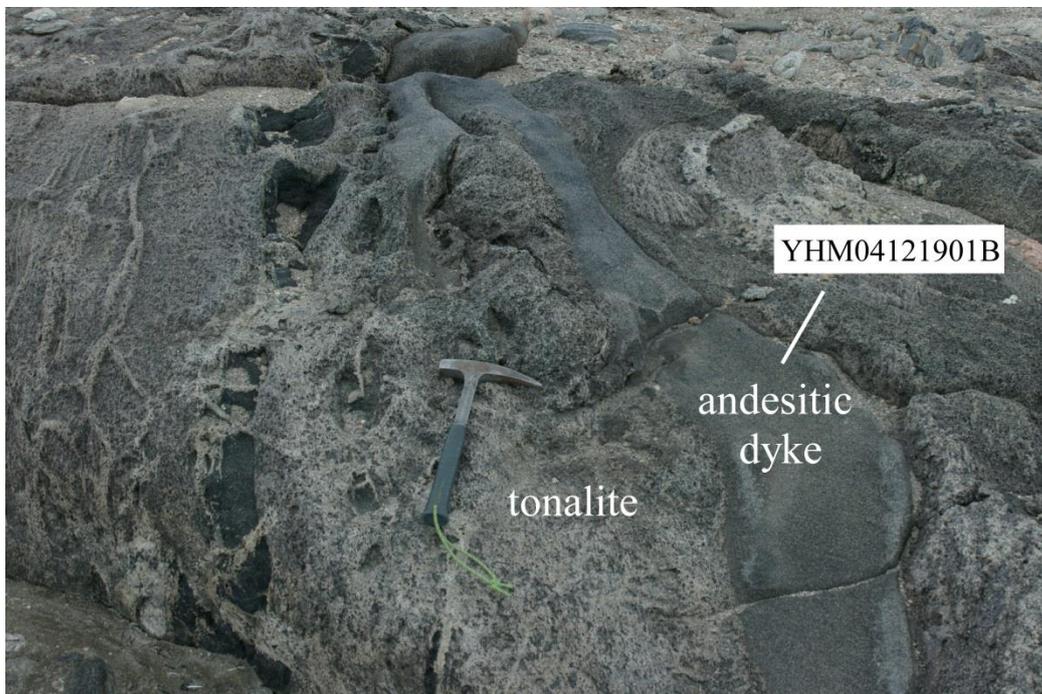


Fig. 3c. Field photographs showing the mode of occurrence of andesitic dyke (sample YHM04121901B) intruding into tonalite. Higher magnification of the area in the rectangle in upper photograph.

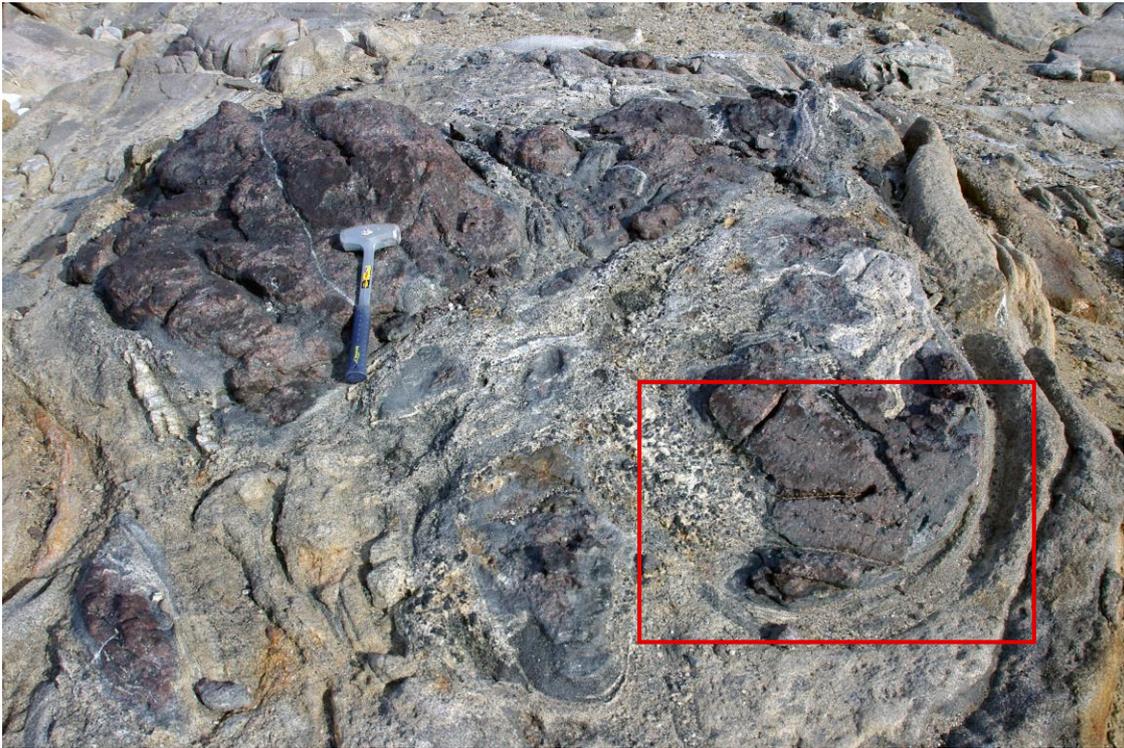


Fig. 3d. Field photographs showing the mode of occurrence of calc-silicate rocks enclosed in tonalite (see Fig. 2b for locality). Higher magnification of the area in the rectangle in upper photograph. Note the “hybrid rocks” in and around calc-silicate rocks indicated by a blue arrow (after Sun *et al.*, 2014).

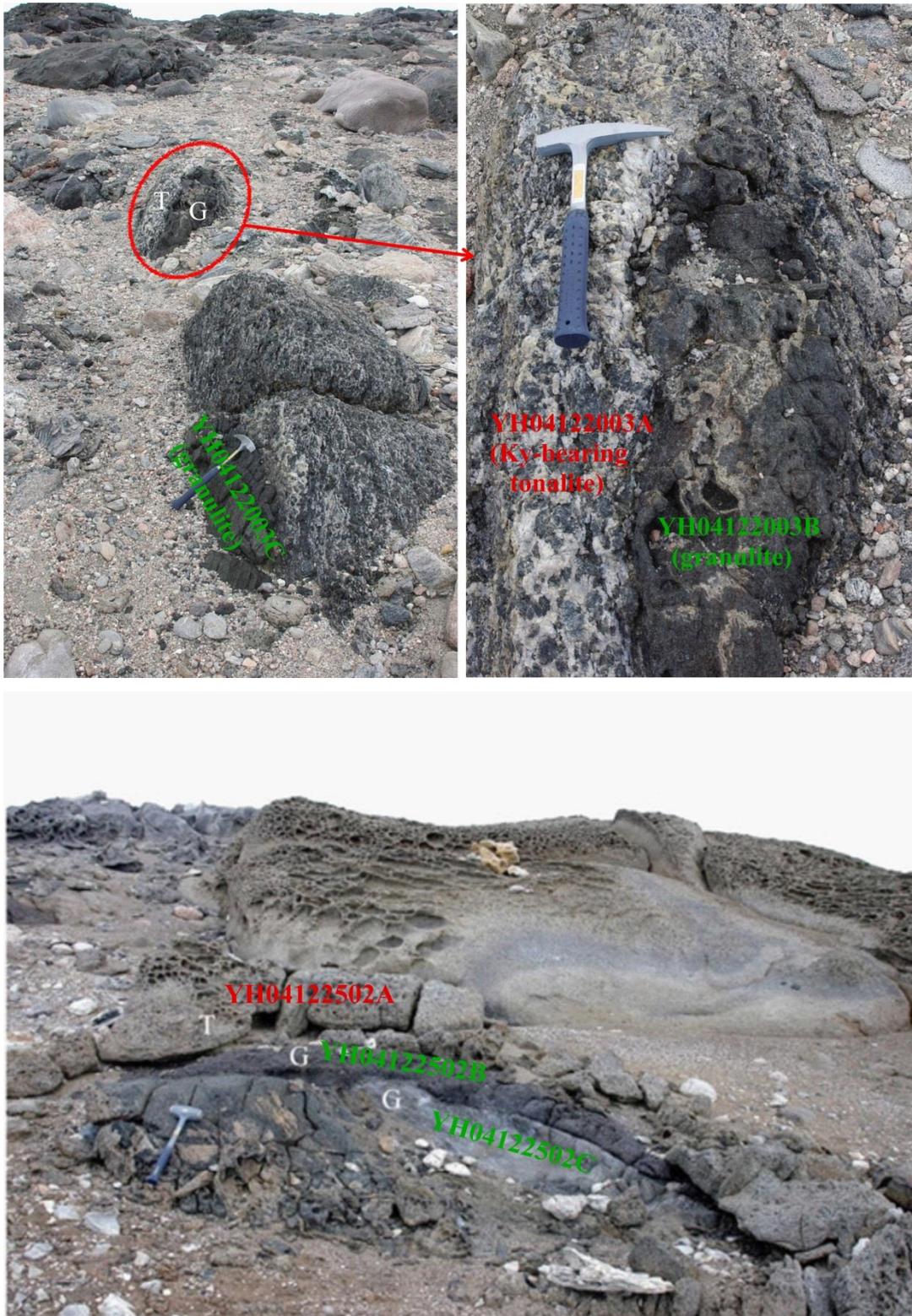


Fig. 3e. Field photographs showing the modes of occurrence of granulites (G) in tonalites (T), either as isolated lens (upper) or well-layer bodies (lower) (after Hiroi *et al.*, 2006).

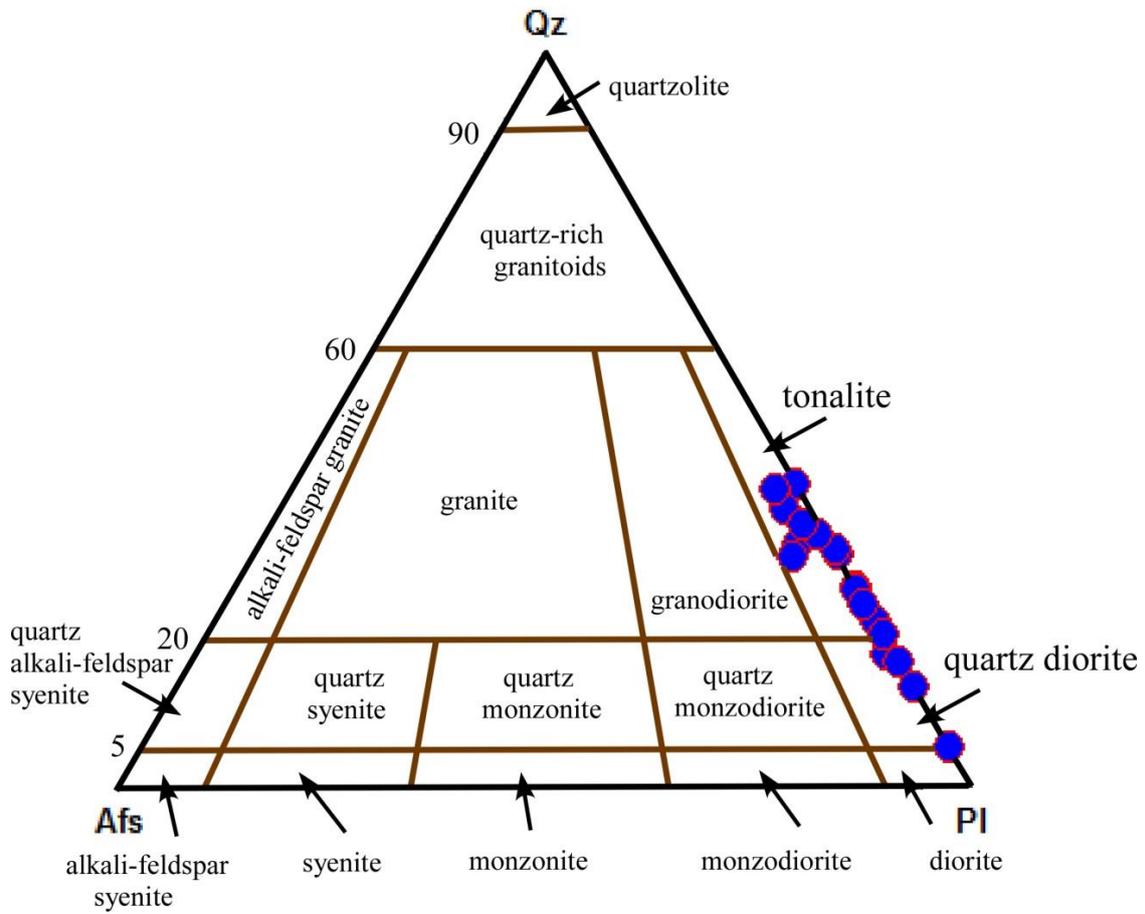
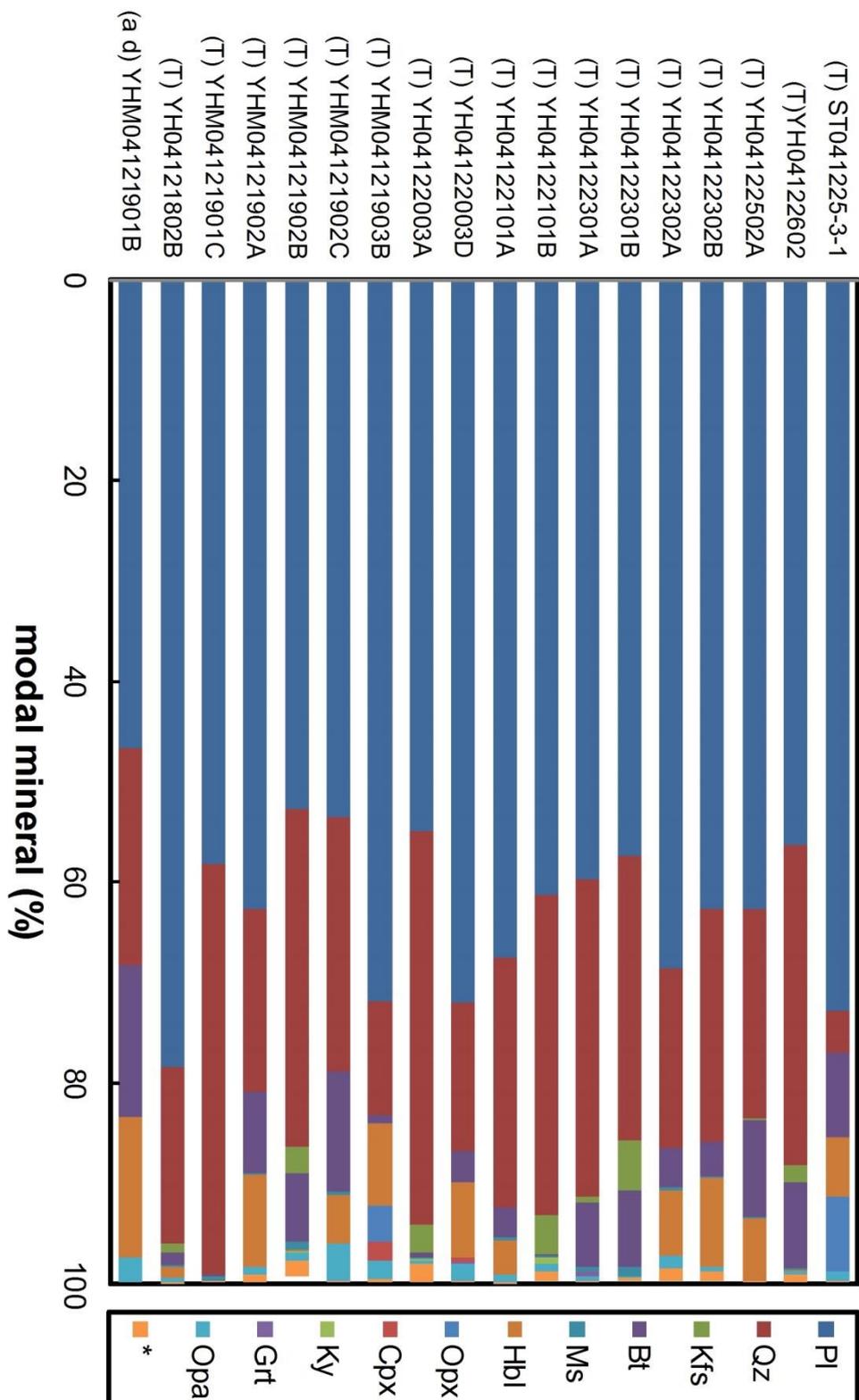
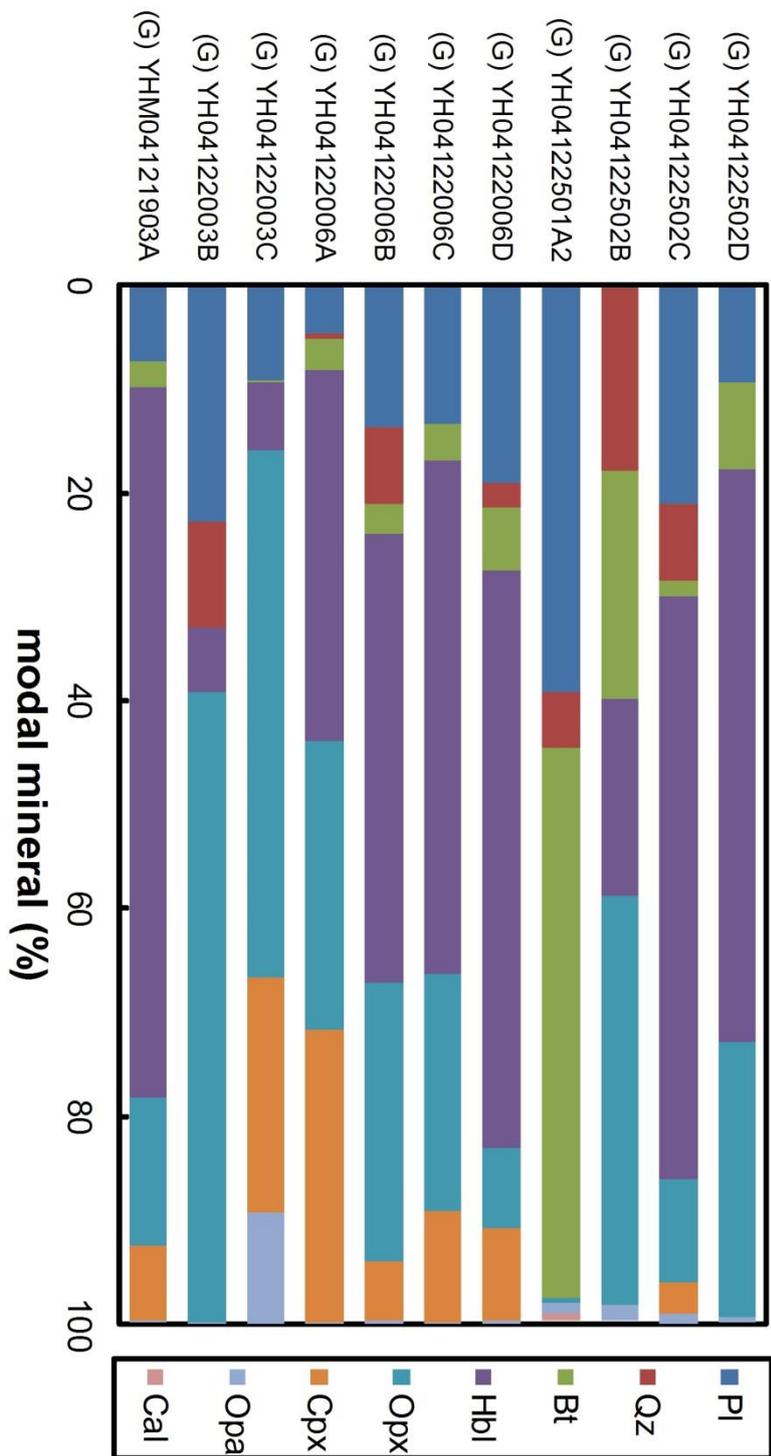


Fig. 4. The quartz, alkali-feldspar and plagioclase modal diagram for the petrological classification of granitic rocks (after Streckeisen, 1976) (Blue circle, tonalite samples of this study).



*: clay and carbonate minerals; (a d): andesitic dyke; (T): tonalite

(a)



(G): granulite

(b)

Fig. 5. Bar-graph showing the modal compositions of (a) andesitic dyke and tonalites, (b) granulites.

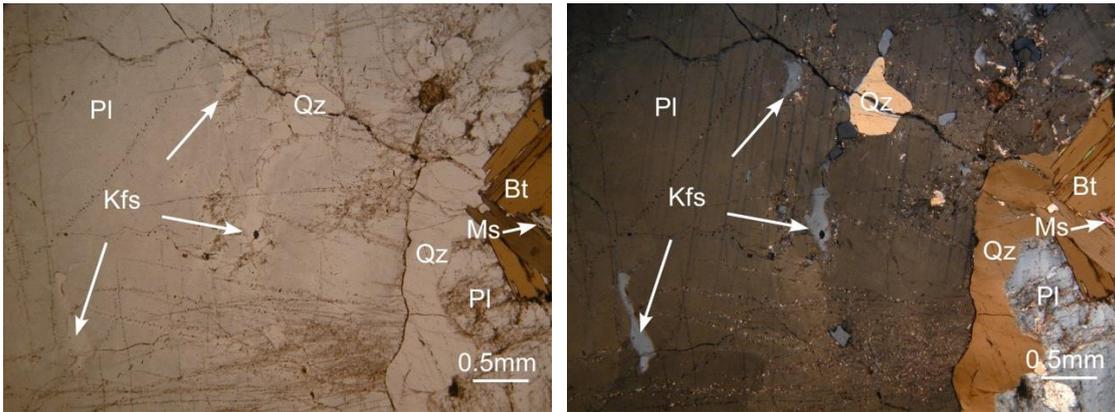
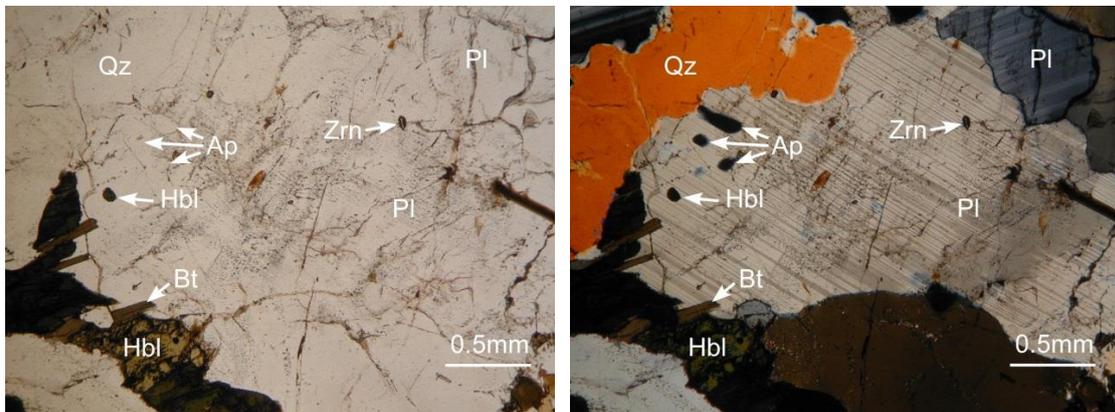
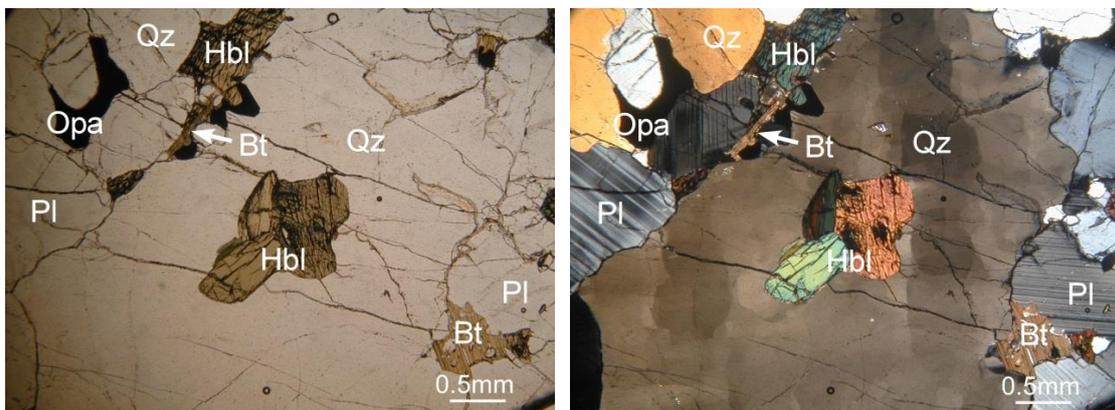


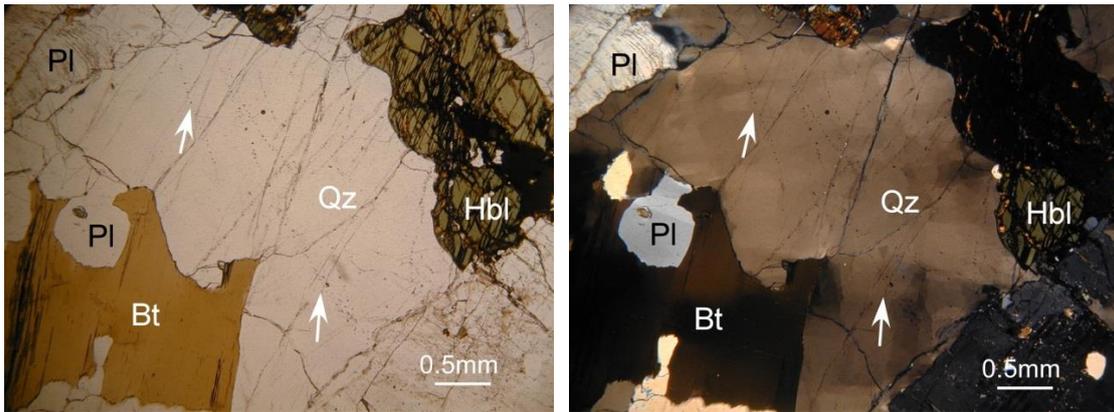
Fig. 6. Photomicrographs of tonalites from the Cape Hinode area. (a) The twinning and antiperthite are common in plagioclase in tonalite (sample YHM04121902B).



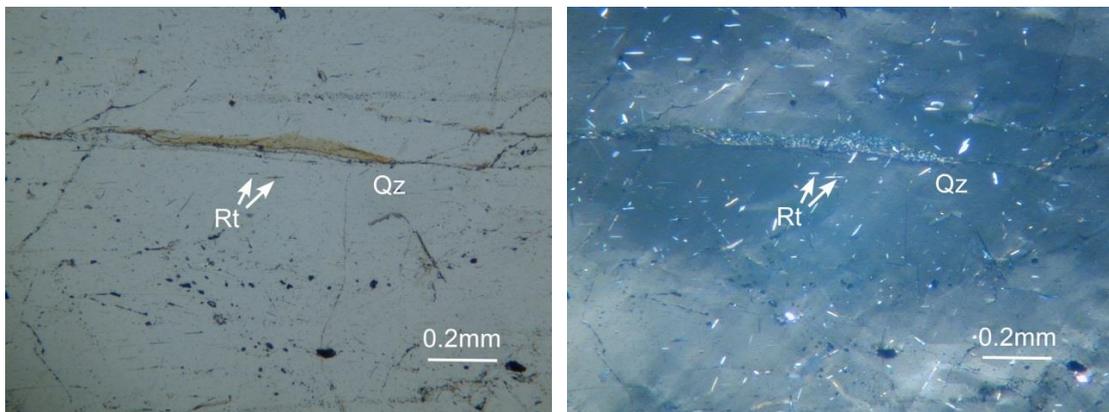
(b) Coarse-grained plagioclase in tonalite (sample YHM04121902A) contains many small inclusions of apatite, zircon, hornblende, fluid and fine-grained unidentified opaque and transparent minerals.



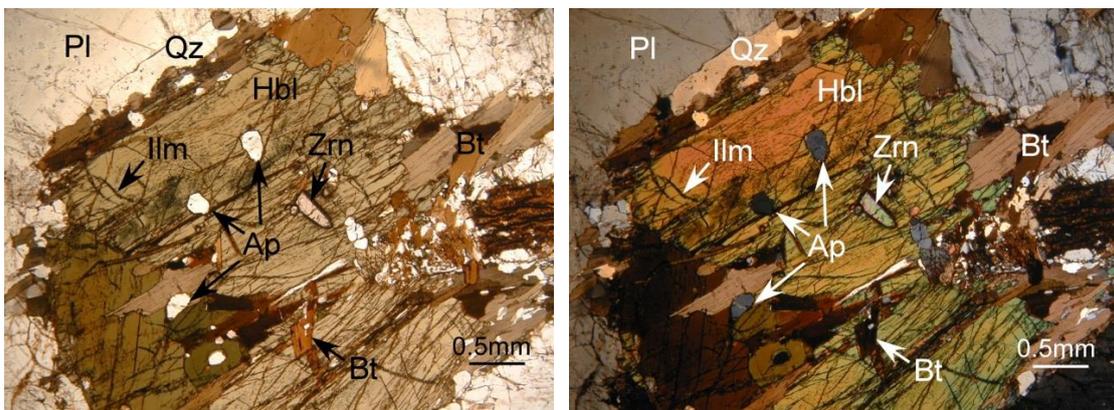
(c) Small hornblende grains in tonalite (sample YH04122302B) are included in coarse-grained quartz grain.



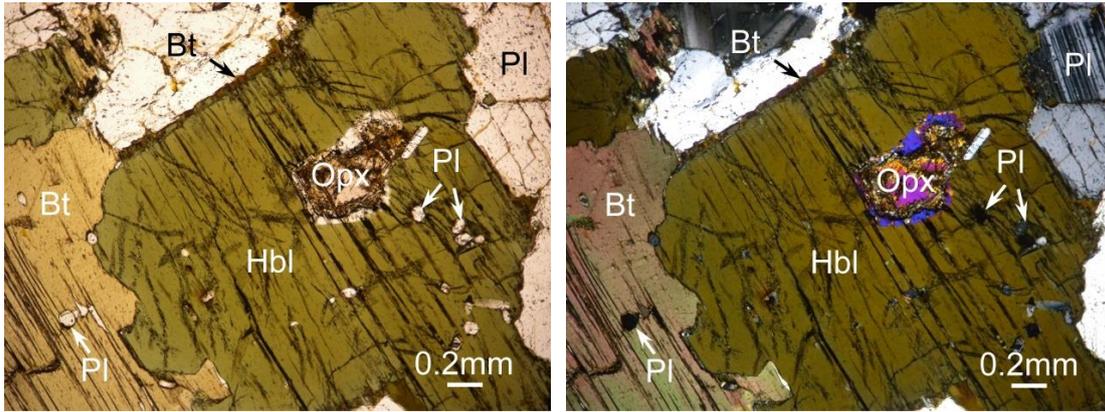
(d) Quartz in tonalite (sample YH04122502A) contains many fluid and fine-grained unidentified inclusions showing linear arrangements.



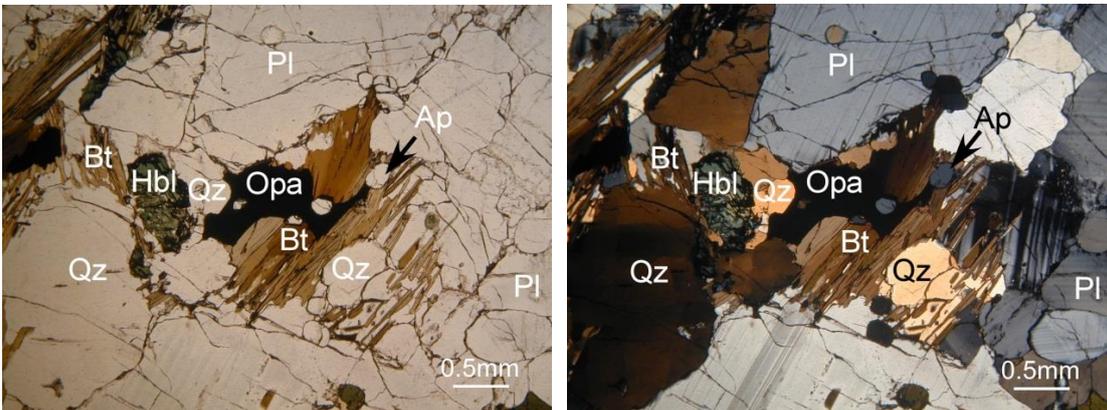
(e) Quartz in tonalite (sample YHM04121902B) also encloses many small tiny needles of rutilite.



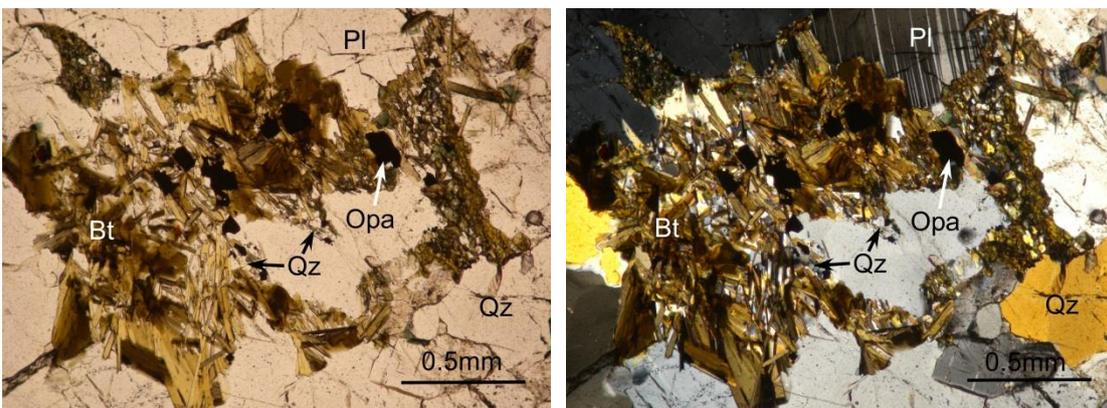
(f) Coarse-grained hornblende in tonalite (sample YH04121802B) is usually heterogeneous in composition and color, with irregular exsolution of ilmenite, and commonly encloses small crystals of biotite, apatite and zircon.



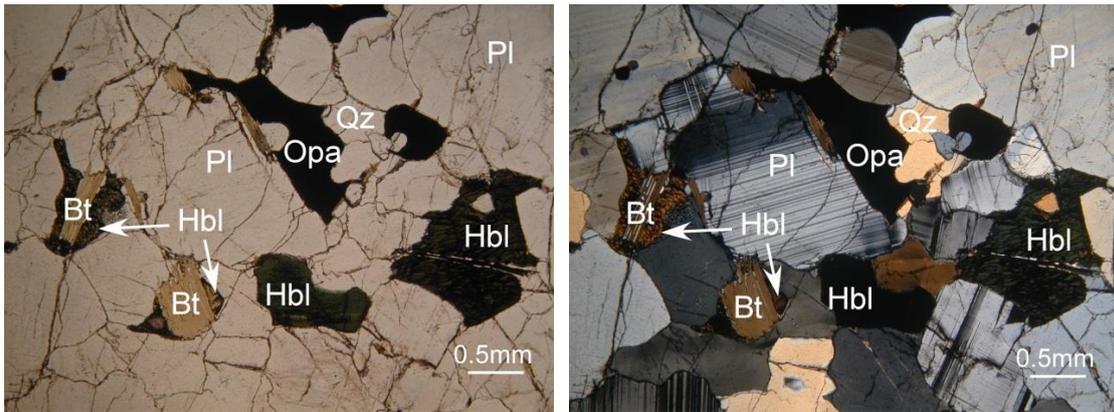
(g) Coarse-grained hornblende in tonalite (sample ST041225-3-1) poikilittically encloses small crystals of orthopyroxene and plagioclase, and is replaced by fine aggregates of biotites on rims.



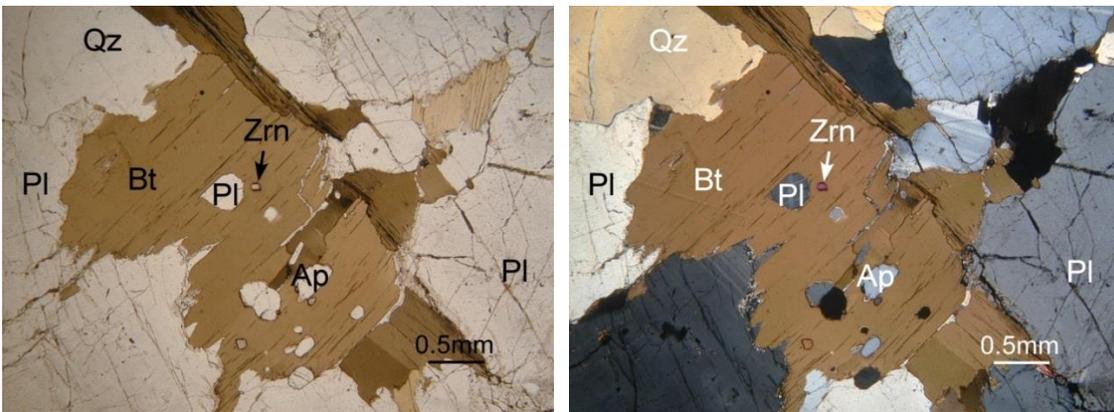
(h) Some biotites in tonalite (sample YH04122302B) are larger flakes, occurring with opaque minerals and hornblendes.



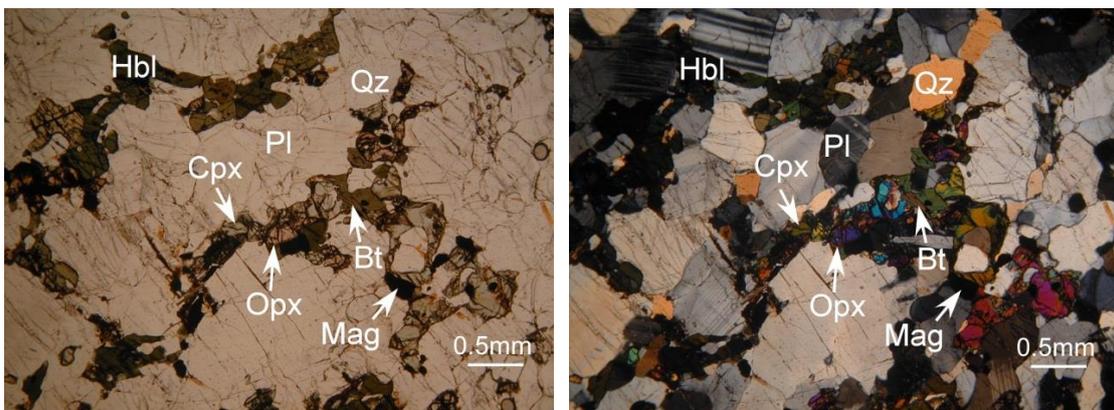
(i) Some biotites in tonalite (sample YH04122101A) are fine grained and usually occur with opaque minerals as well as small quartz grains.



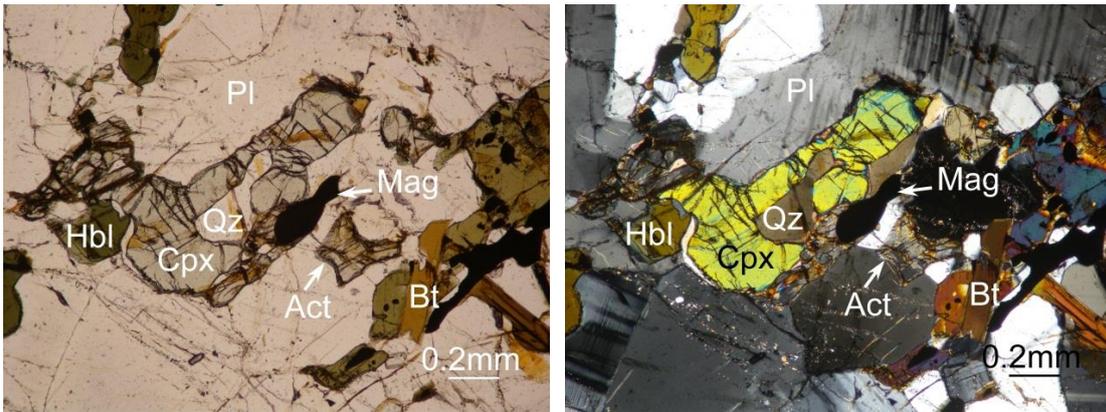
(j) Some hornblendes in tonalite (sample YH04122302B) are cut by biotites.



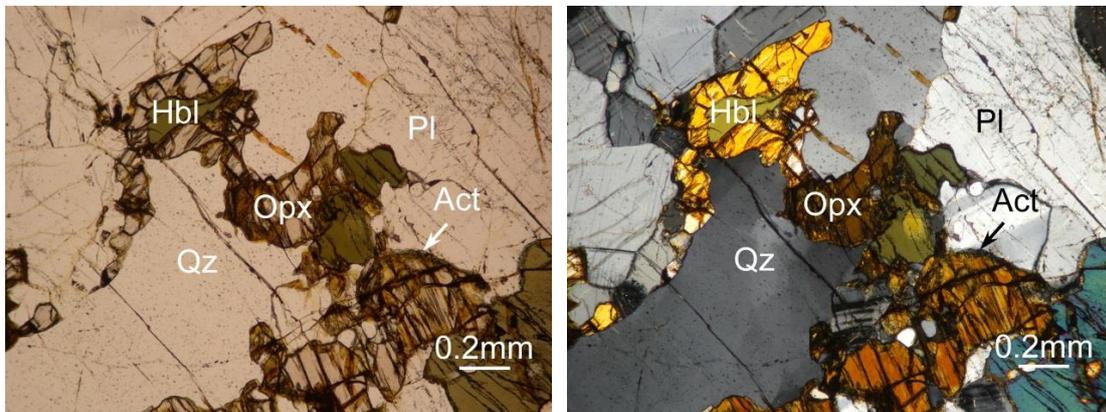
(k) Coarse-grained biotite in tonalite (sample YH04122502A) encloses small crystals of plagioclase, zircon and apatite.



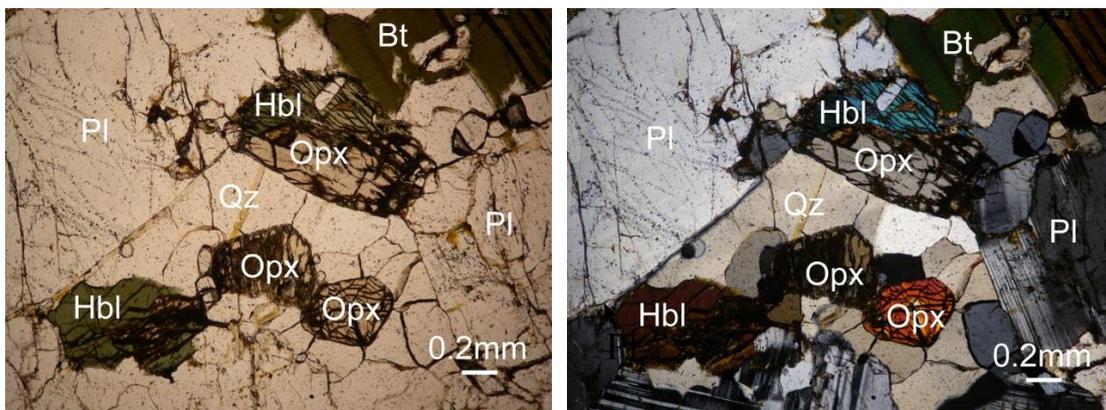
(l) In some tonalites (sample YHM04121903B) clinopyroxene is intergrown with orthopyroxene.



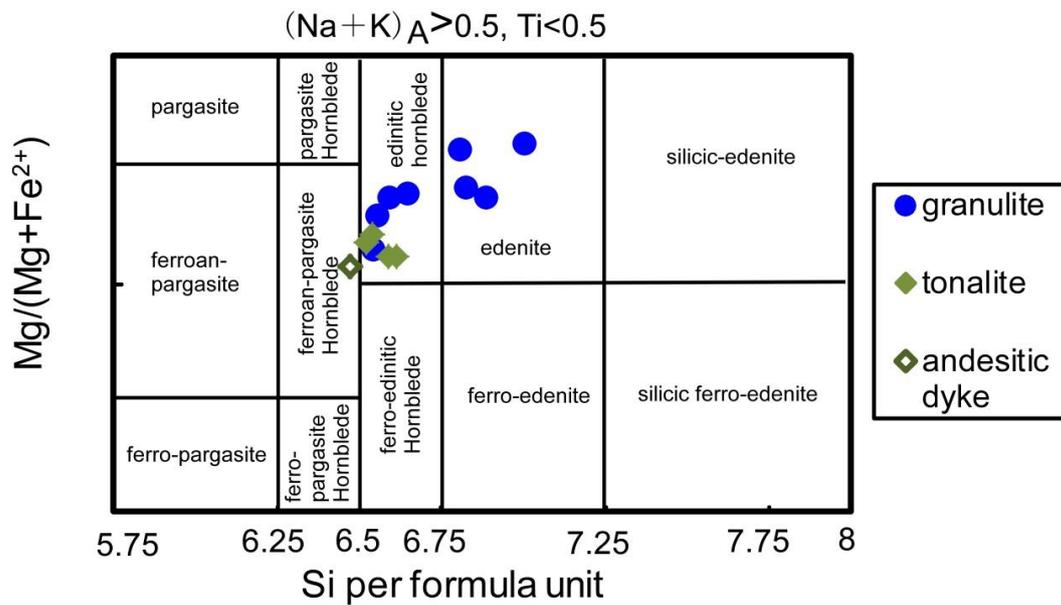
(m) Clinopyroxene in tonalite (sample YHM04121903B) is pale green, sometimes intergrown with quartz, usually replaced by actinolite and clay minerals in various degrees.



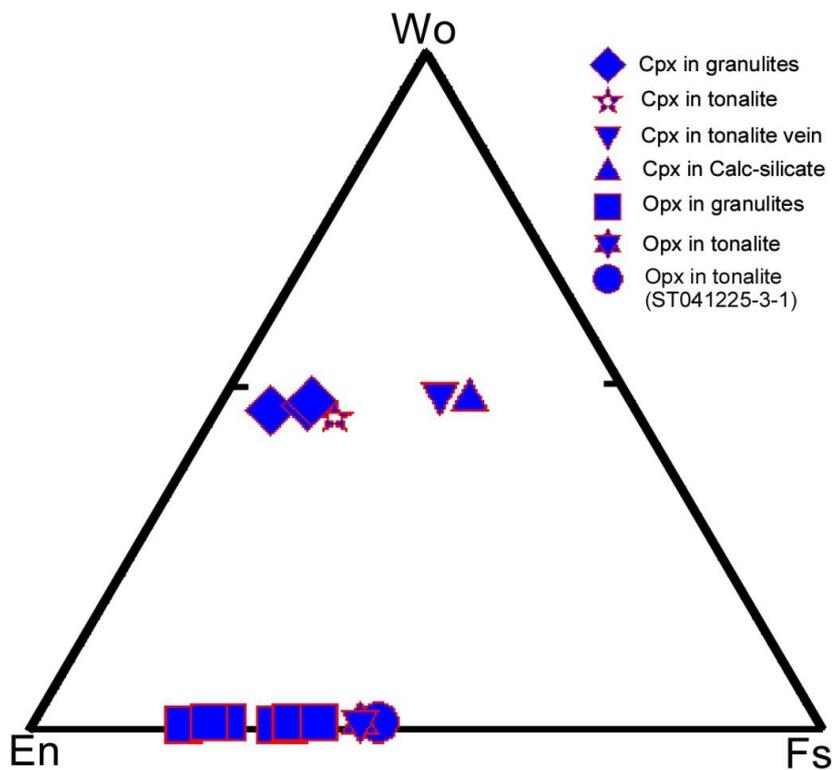
(n) Orthopyroxene in tonalite (sample YHM04121903B) is pale red, sometimes intergrown with quartz, usually replaced by actinolite and clay minerals in various degrees.



(o) Coarse-grained orthopyroxene in tonalite (sample ST041225-3-1) occur with biotite and hornblende, and are irregularly distributed in the groundmass composed of plagioclase and quartz.

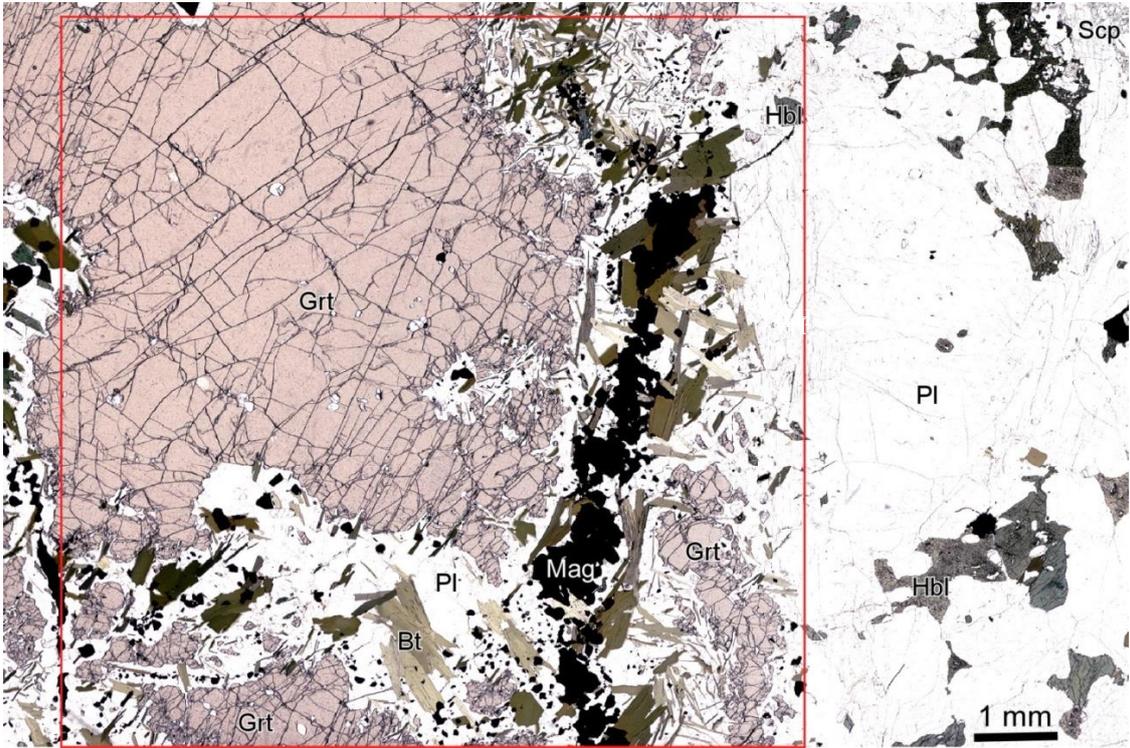


(a)

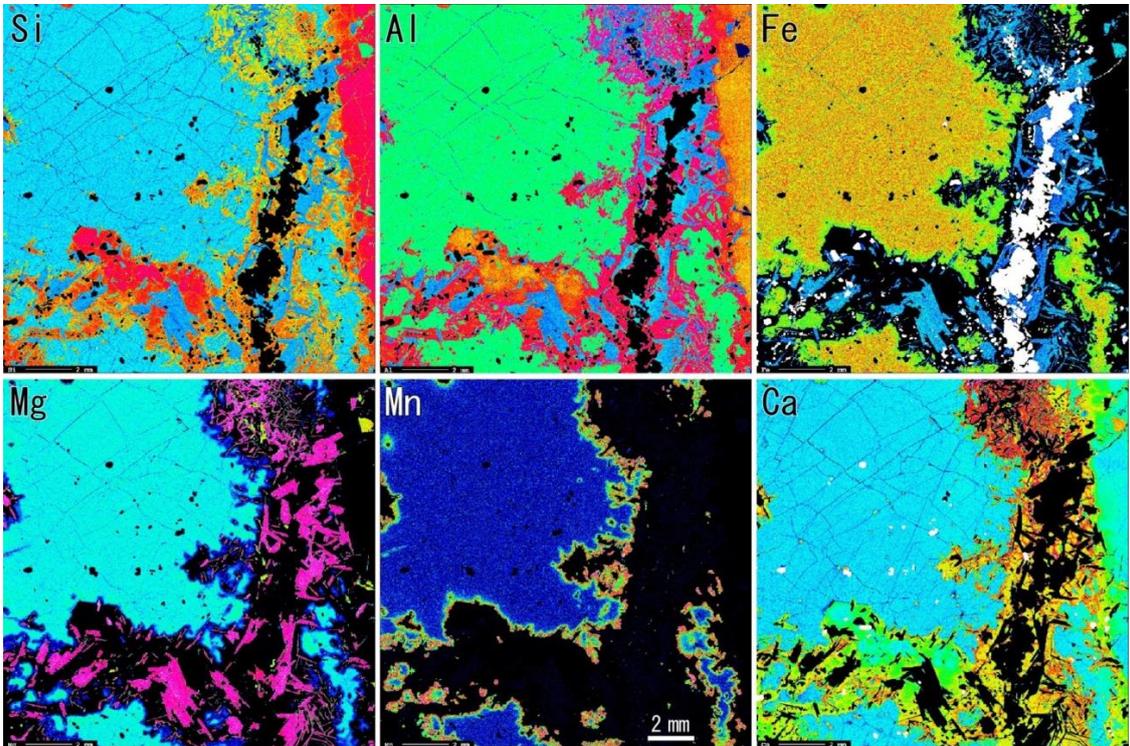


(b)

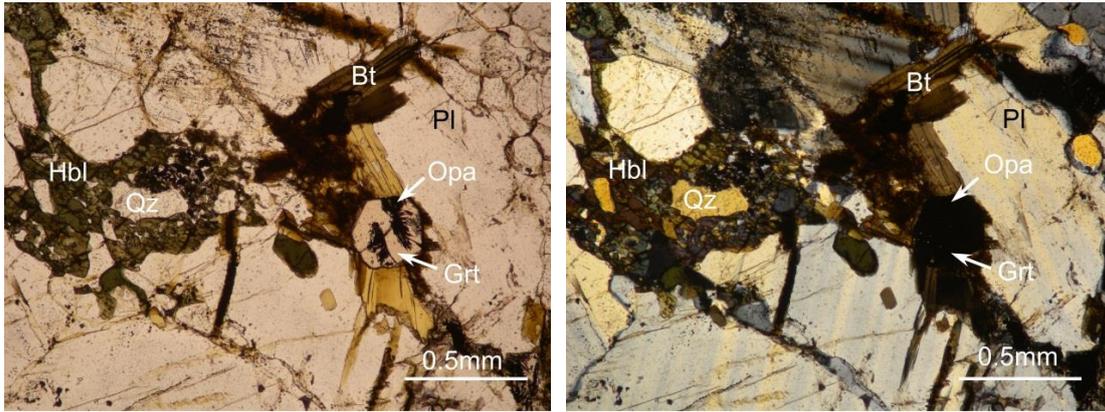
Fig. 7. (a) Classification of amphiboles in andesitic dyke, tonalite and granulite samples from Cape Hinode after Leake *et al.* (1997), (b) Wo-En-Fs diagram showing compositions of Cpx and Opx in samples from Cape Hinode.



a

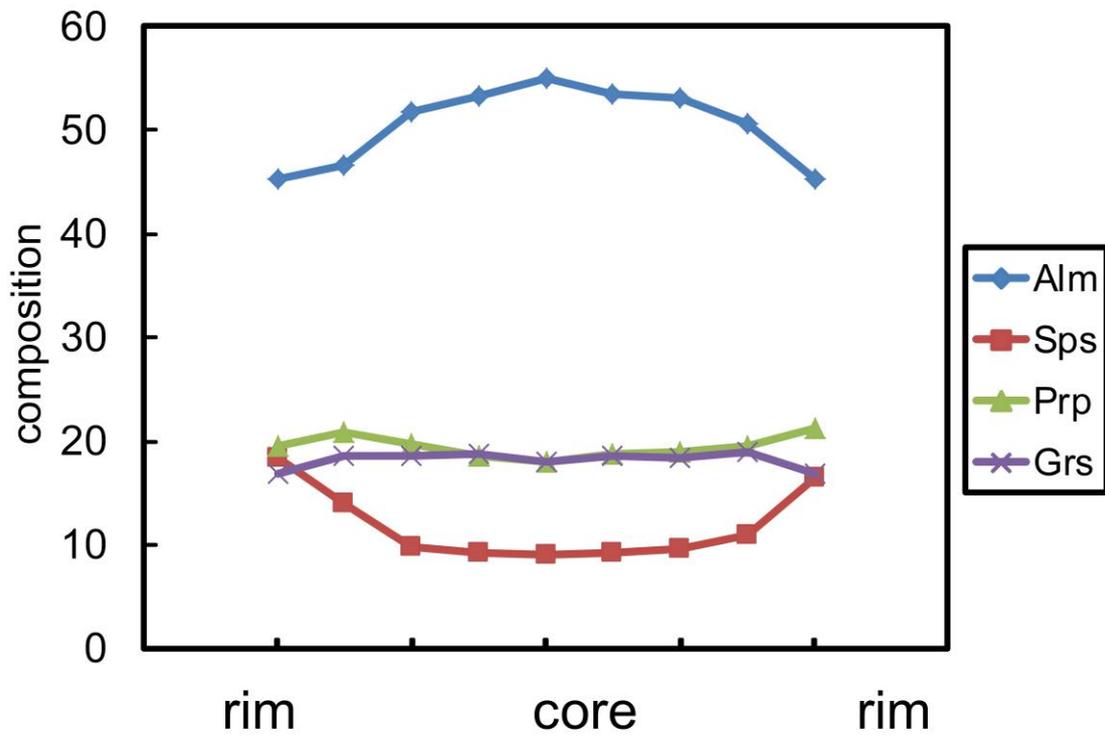


b



c

d



e

Fig. 8. (a) Photomicrographs of xenocrystic garnet and its breakdown products in tonalite (sample YH04122002) in the Cape Hinode (after Hiroi *et al.*, 2008). (b) mapping of the area in the rectangle in upper photograph (a) (after Hiroi *et al.*, 2008). (c) and (d) Photomicrographs of opaque mineral inclusion-bearing euhedral garnet grain in tonalite (sample YH04122003D) from Cape Hinode. (e) Zoning profile of relict garnet grain in sample YHM04121903B-2.

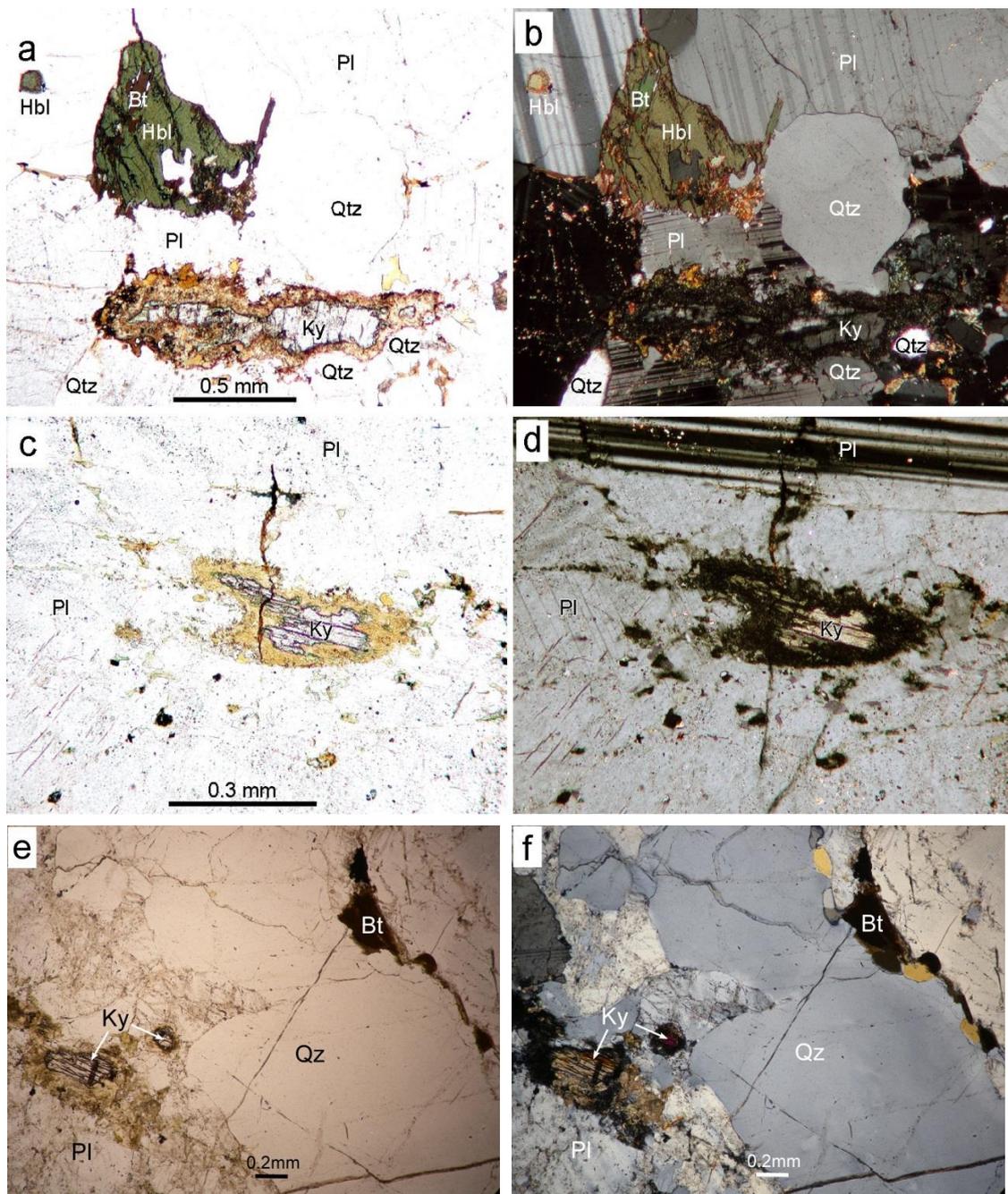


Fig. 9. Photomicrographs showing the mode of occurrence of kyanite in tonalites. (a)-(b) kyanite is surrounded by pinite in contact with plagioclase and quartz. Hornblende accompanied by biotite occurs near the kyanite, but these minerals are never in direct contact (HND-4). (c)-(d) Kyanite is totally enclosed within plagioclase in sample YH04122003A (Figs. a-d after Hiroi *et al.*, 2008). (e)-(f) kyanite is always surrounded by pinite in contact with plagioclase and quartz (sample YHM04121902B).

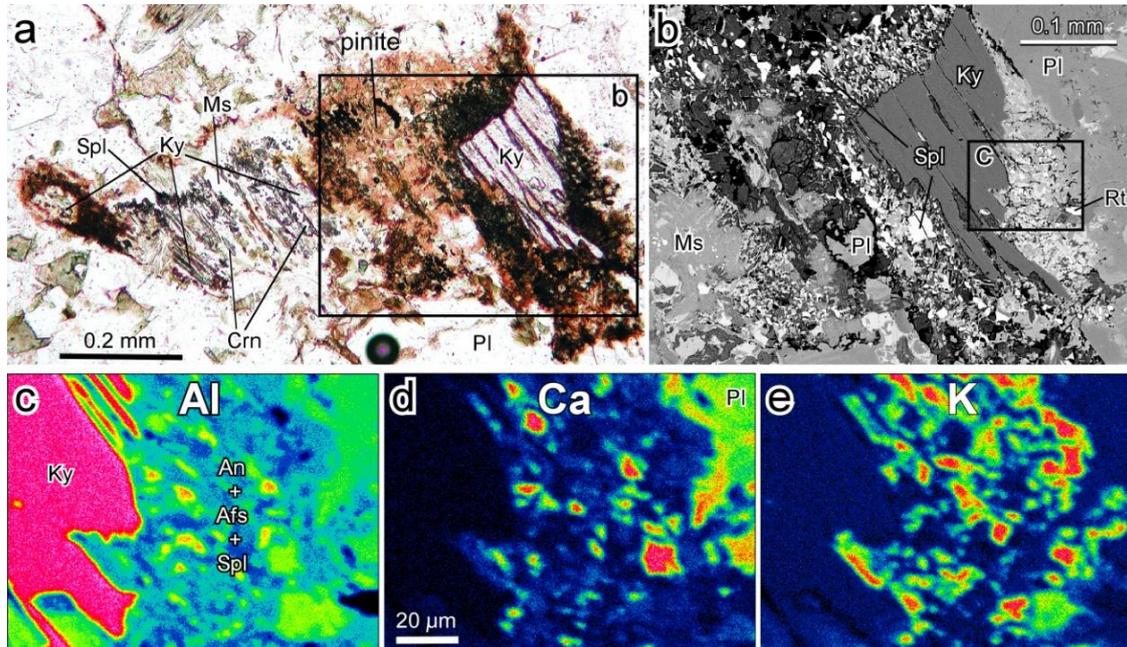


Fig. 10. (a) Photomicrograph showing the mode of occurrence of kyanite in tonalite sample YHM04121902B (see Fig. 1b for locality). Kyanite is replaced by muscovite and anorthite corona which is extensively replaced by dark-colored pinite. Both muscovite and anorthite contain corundum and spinel in addition to relict kyanite. Plane polarized light. (b) Back-scattered electron image of the area in the right-hand rectangle in (a). Anorthite corona replacing kyanite contains spinel, alkali feldspar, rutile and Fe-oxide. (c)-(e) Elemental maps of the area in the right-hand rectangle in (b). The brighter, the higher the elemental content is. Mineral abbreviations are after Whitney and Evans (2010) (after Sun *et al.*, 2014).

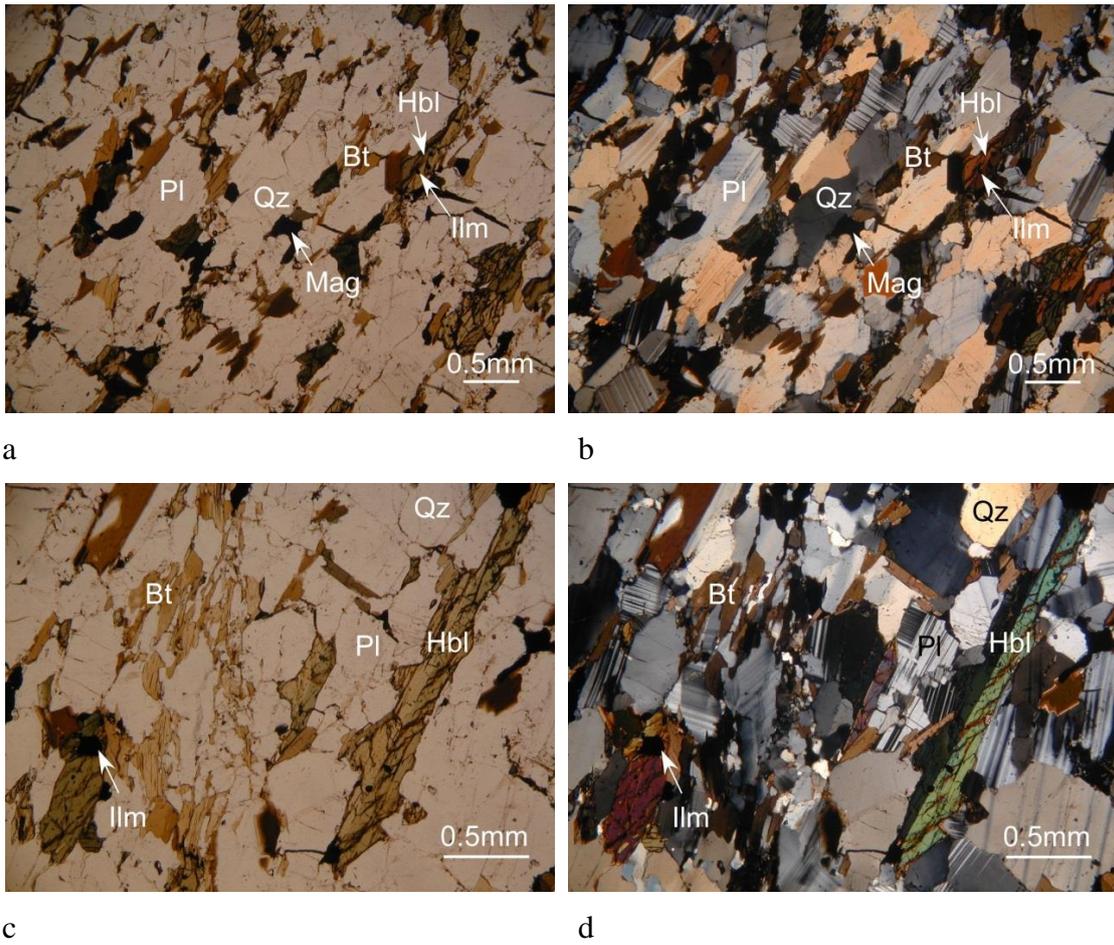


Fig. 11. (a)-(b) Photomicrographs of plagioclase-hornblende-biotite-quartz-bearing andesitic dyke (sample YHM04121901B) in Cape Hinode. Note the foliation. (c)-(d) Photomicrographs of opaque mineral inclusions (ilmenite) in hornblende.

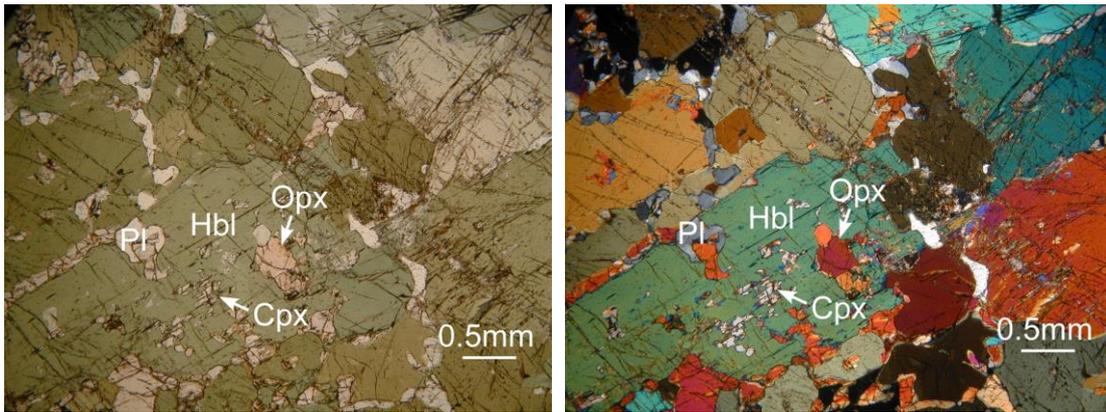
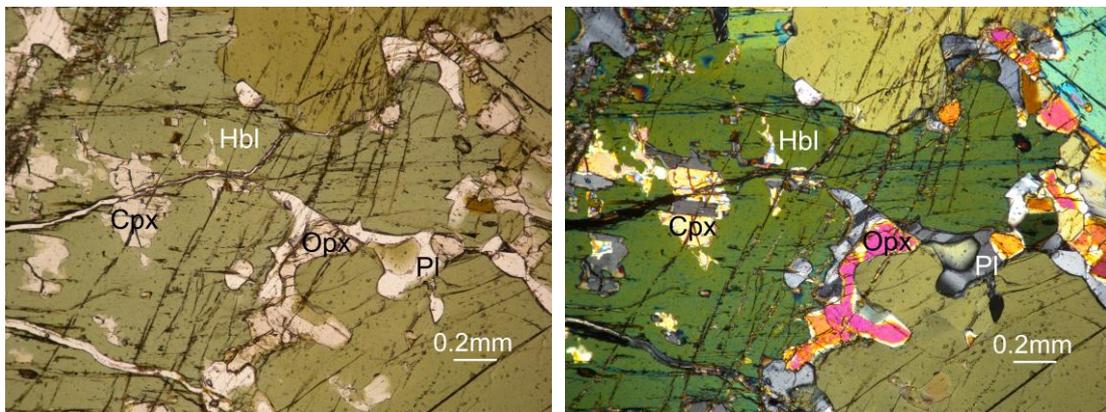
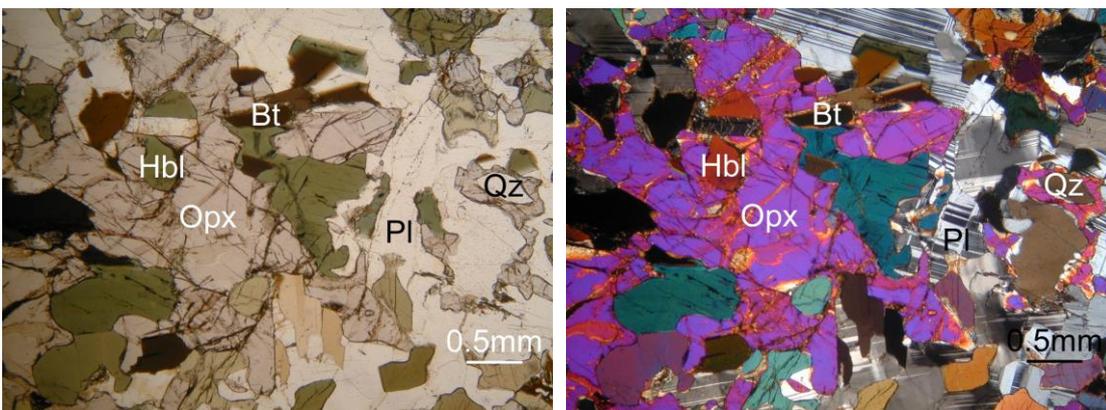


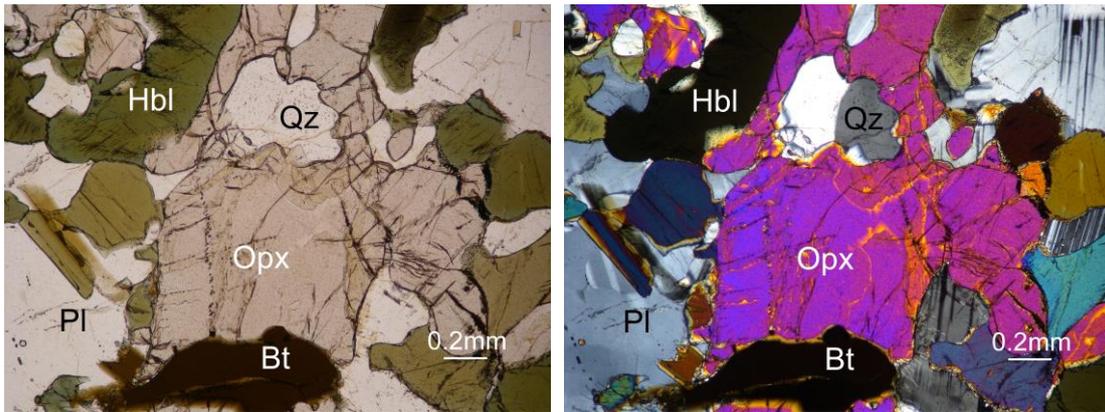
Fig. 12. Photomicrographs of granulites from the Cape Hinode area. (a) Poikilitic hornblende encloses many small grains of clinopyroxene, orthopyroxene and plagioclase in (sample YHM04121903A).



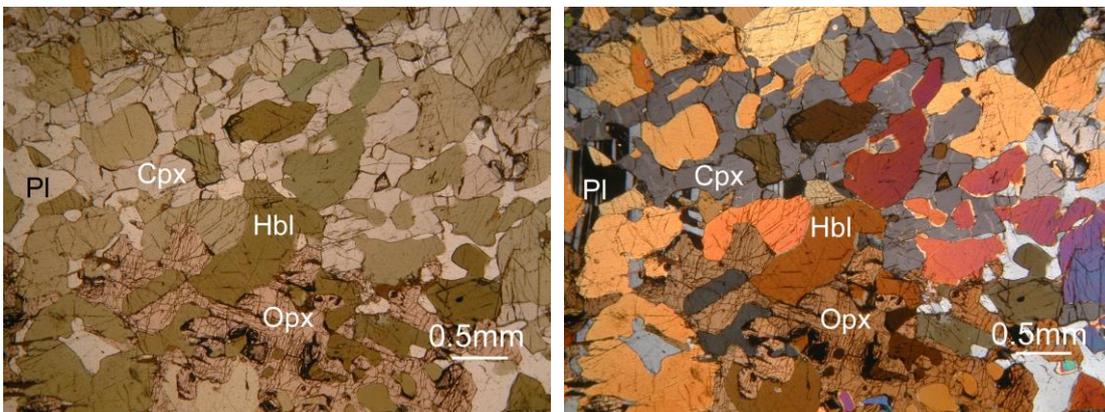
(b) The granulite (sample YHM04121903A) is mainly composed of coarse-grained hornblende, some small clinopyroxene, orthopyroxene and plagioclase occur as interstitial grains.



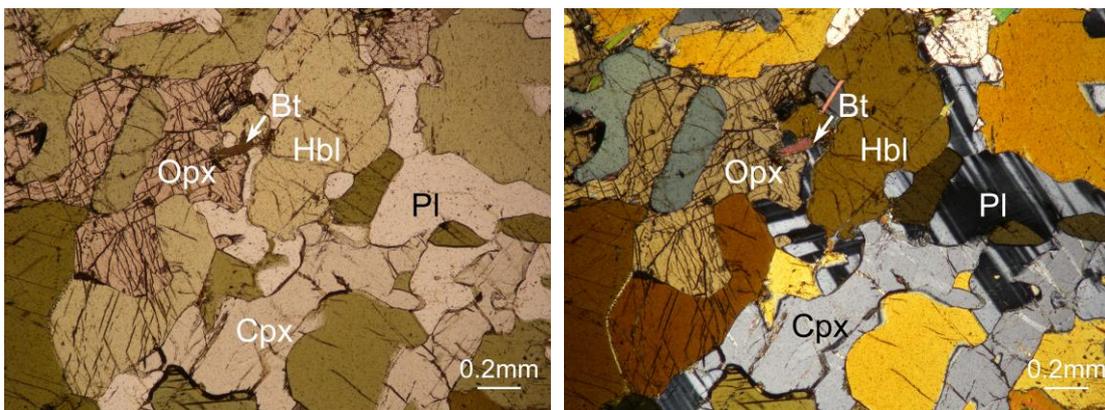
(c) Orthopyroxene occurs with hornblende, biotite, plagioclase and quartz in granulite (sample YH04122003B).



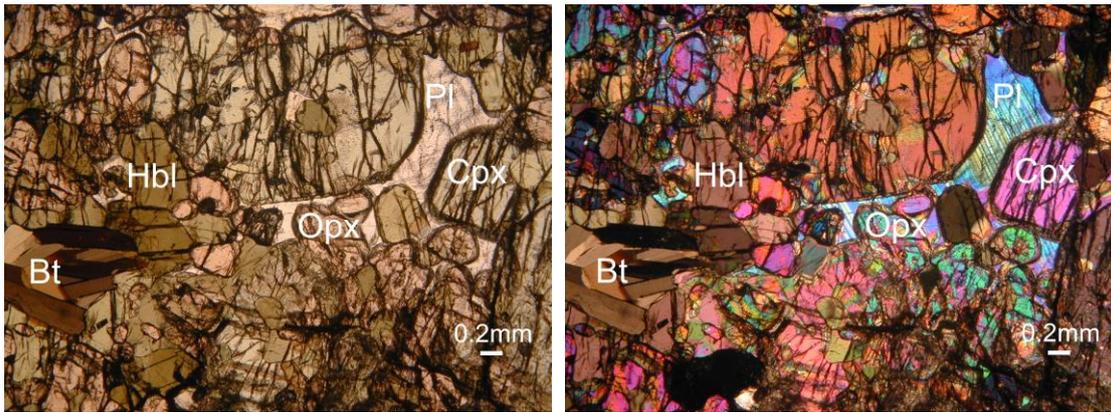
(d) Hornblendes show heterogeneous feature, orthopyroxene is in direct contact with quartz in (sample YH04122003B).



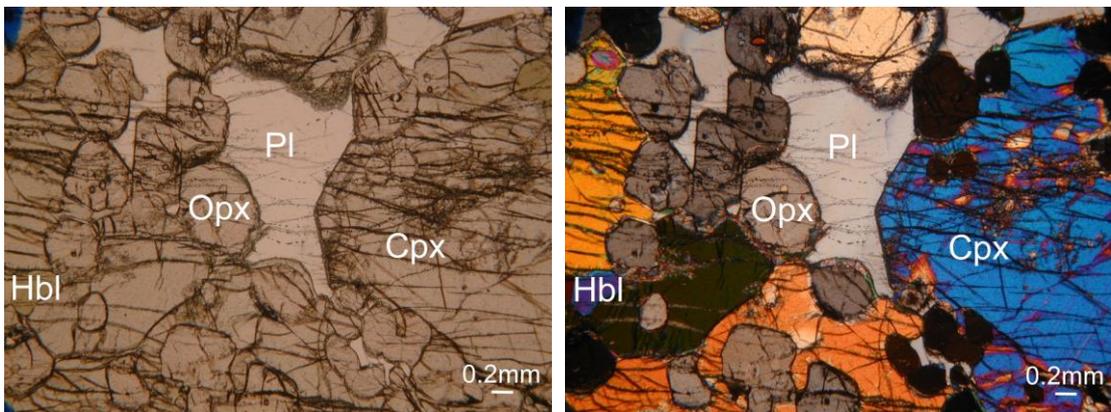
(e) Intimate association of orthopyroxene, clinopyroxene and hornblende in (sample YH04122003C).



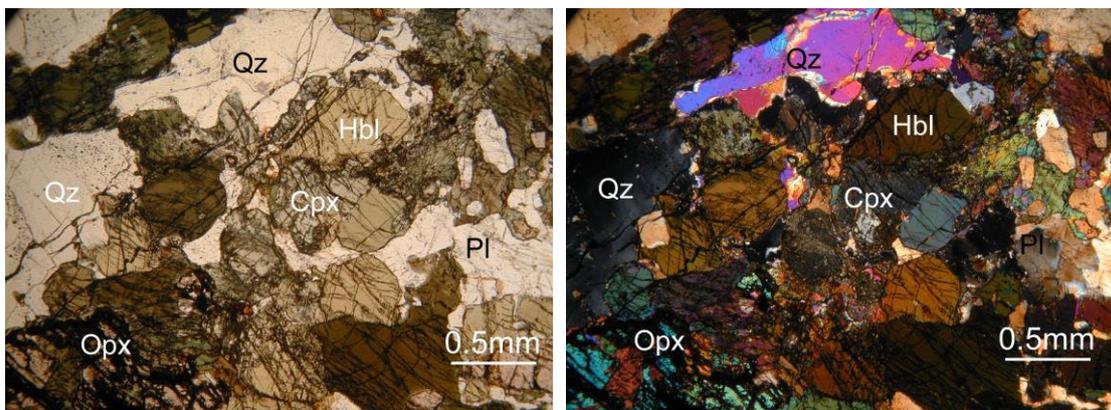
(f) Intimate association of orthopyroxene, clinopyroxene and hornblende and plagioclase in (sample YH04122003C).



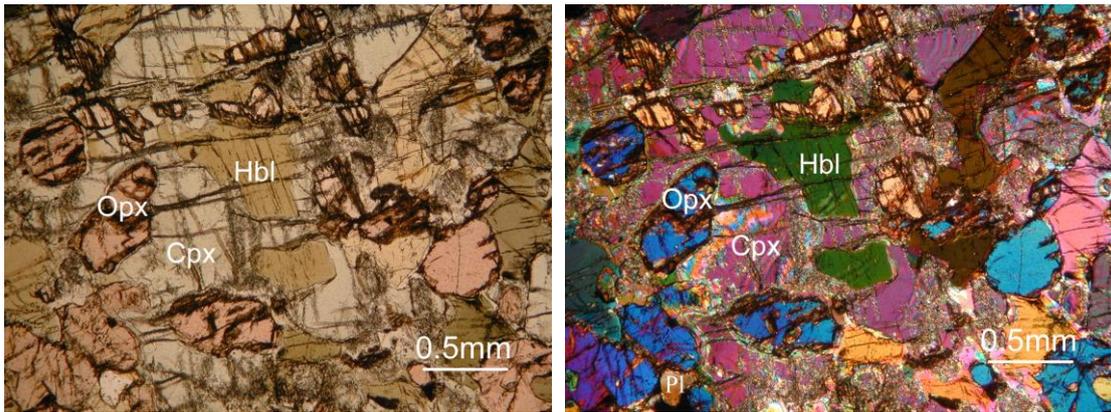
(g) Coarse-grained clinopyroxene and hornblende enclose smaller orthopyroxene in (sample YH04122006A). Plagioclase occurs as interstitial grain.



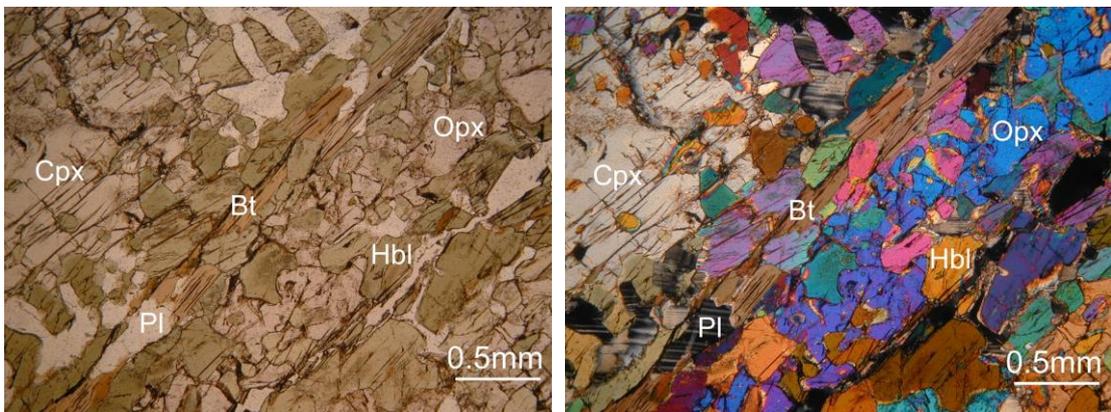
(h) Euhedral to subhedral orthopyroxene and clinopyroxene occur in (sample YH04122006A).



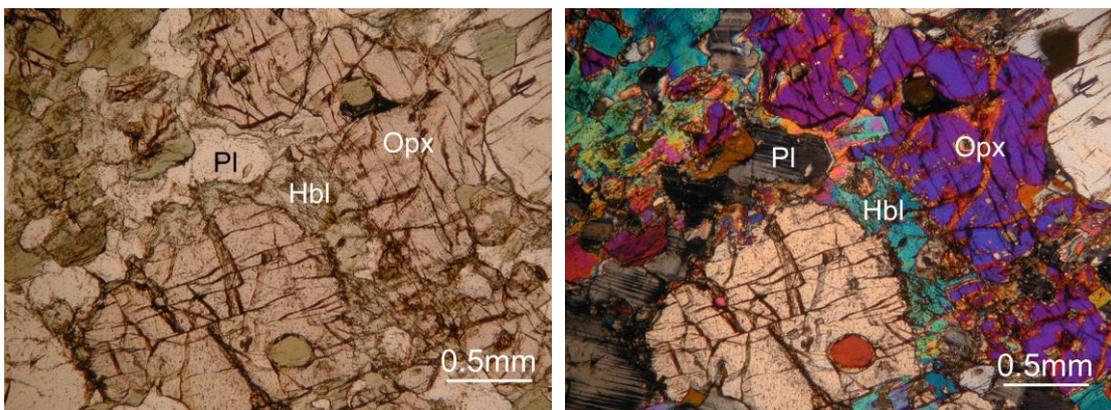
(i) Anhedral orthopyroxene and clinopyroxene with quartz occur in (sample YH04122006B).



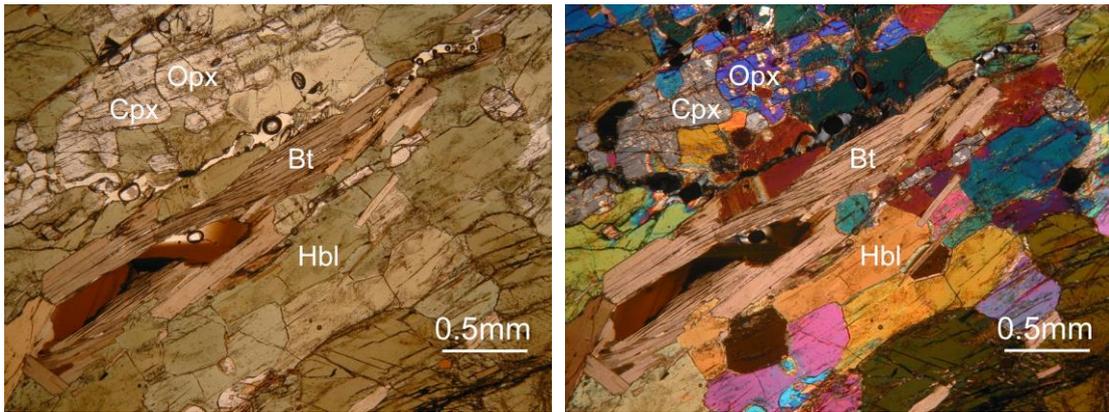
(j) Coarse-grained clinopyroxene encloses smaller orthopyroxene and is partially replaced by hornblende in (sample YH04122006B).



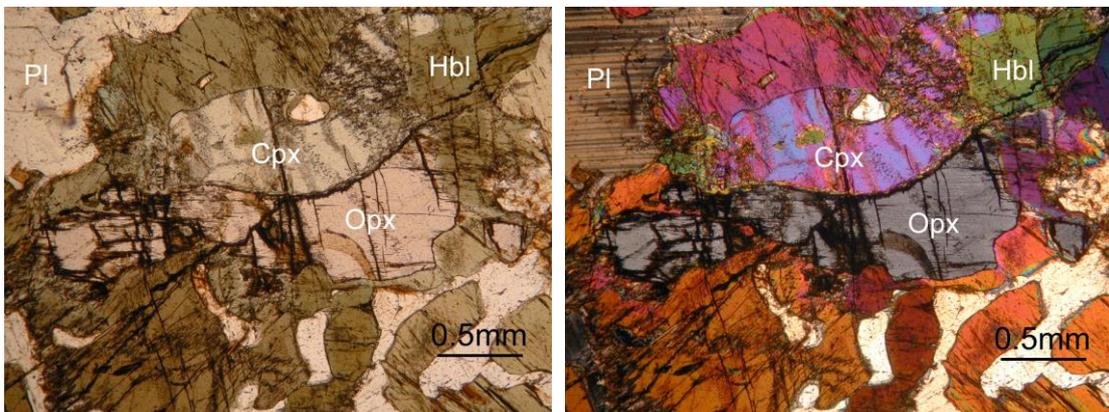
(k) Orthopyroxene, clinopyroxene, hornblende and biotite show weak preferred orientation in (sample YH04122006C).



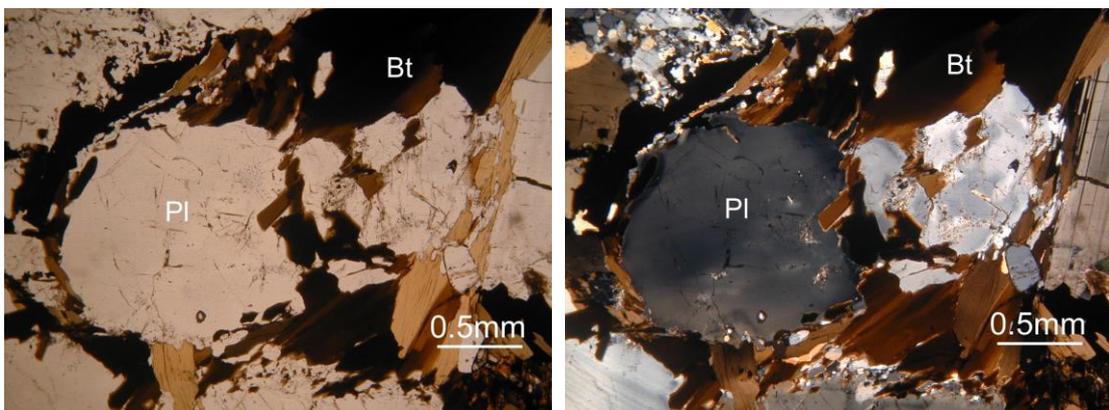
(l) Orthopyroxene is partially replaced by hornblende in (sample YH04122006C).



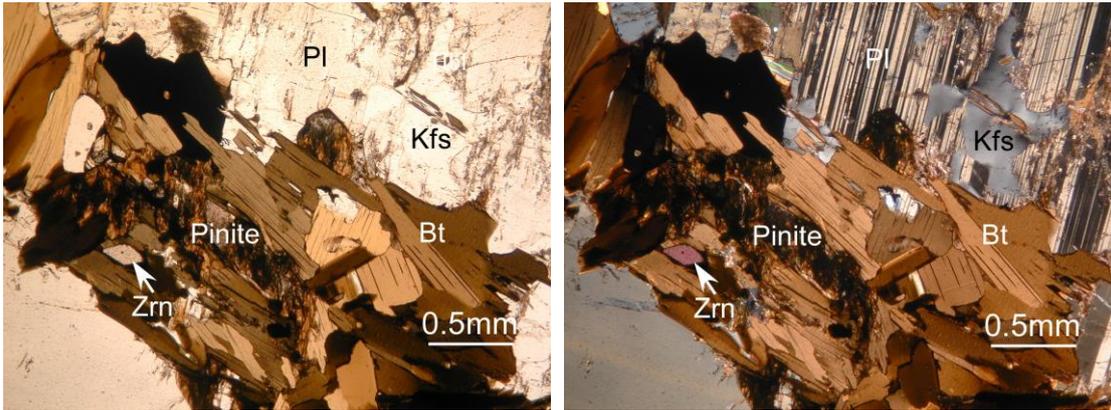
(m) Hornblende and biotite show preferred orientation and made of the foliation of (sample YH04122006D).



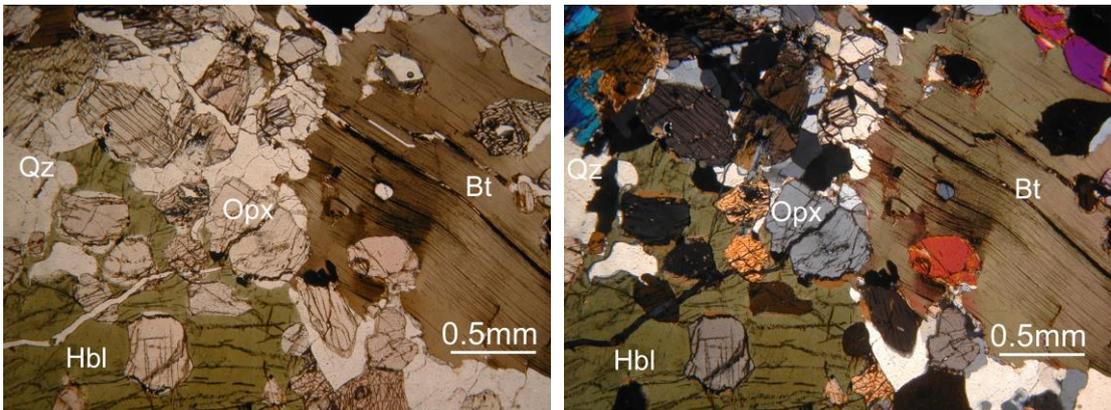
(n) Orthopyroxene and clinopyroxene are surrounded by hornblende in (sample YH04122006D).



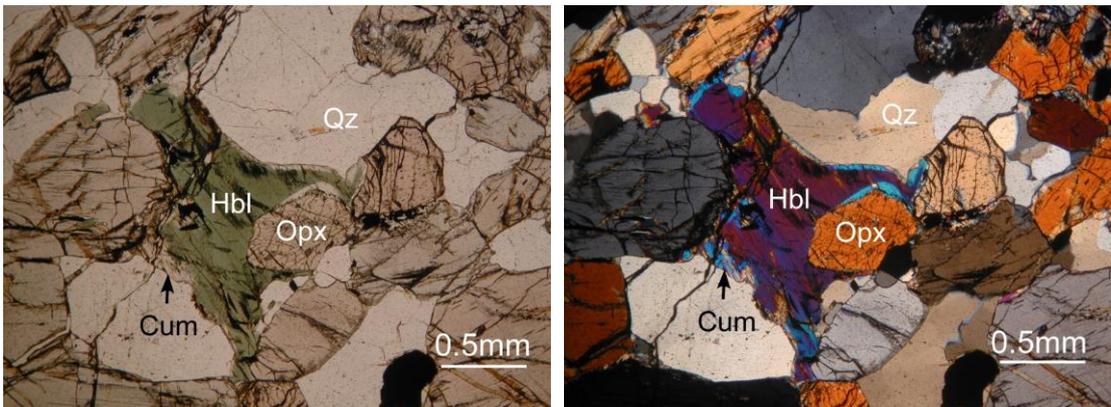
(o) Plagioclase and biotite form cumulate in (sample YH04122501A-2).



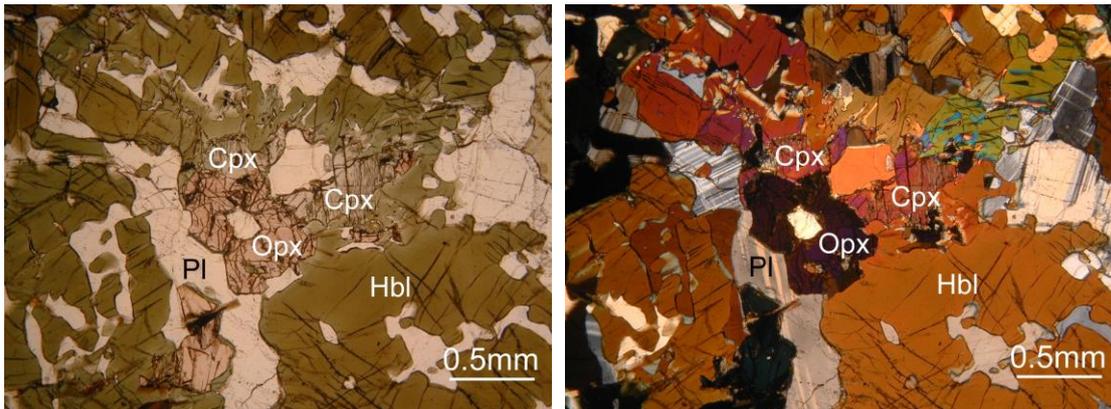
(p) Plagioclase shows antiperthite texture in (sample YH04122501A-2). Minor amount of orthopyroxene occur, but is completely replaced by pinitite.



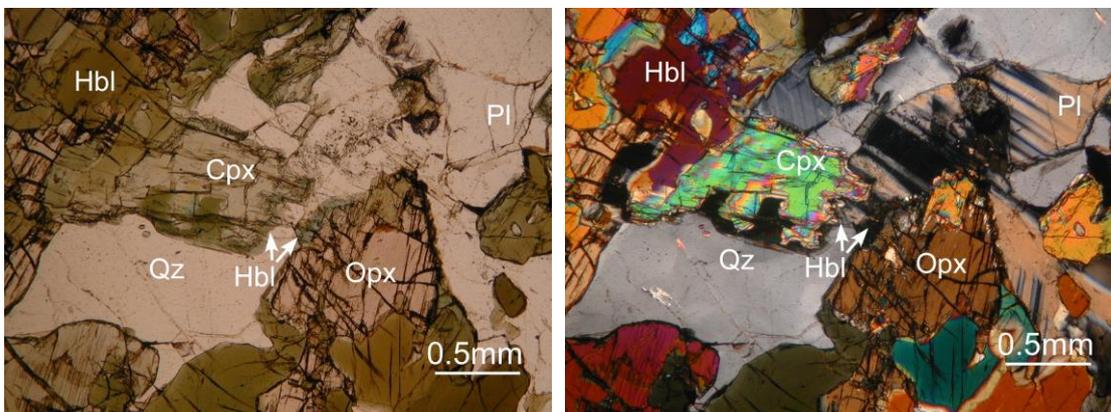
(q) Coarse-grained biotite and hornblende enclose fine-grained orthopyroxene in (sample YH04122502B). Quartz is present, but plagioclase and clinopyroxene are absent.



(r) Orthopyroxene and hornblende are surrounded by cummingtonite in (sample YH04122502B).



(s) Coarse-grained hornblende and plagioclase are the major constituents of (sample YH04122502C). Small amounts of clinopyroxene and orthopyroxene are also present.



(t) Clinopyroxene and orthopyroxene are commonly surrounded by hornblende in (sample YH04122502C), and plagioclase and quartz are also present.



(u) Coarse-grained hornblende and orthopyroxene are the major constituents of (sample YH04122502D). Minor amounts of biotite and plagioclase also occur.

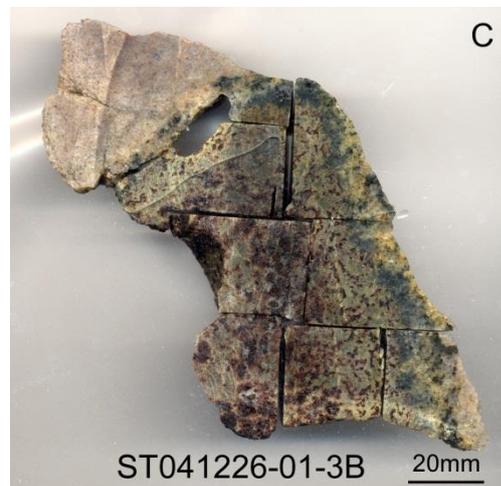
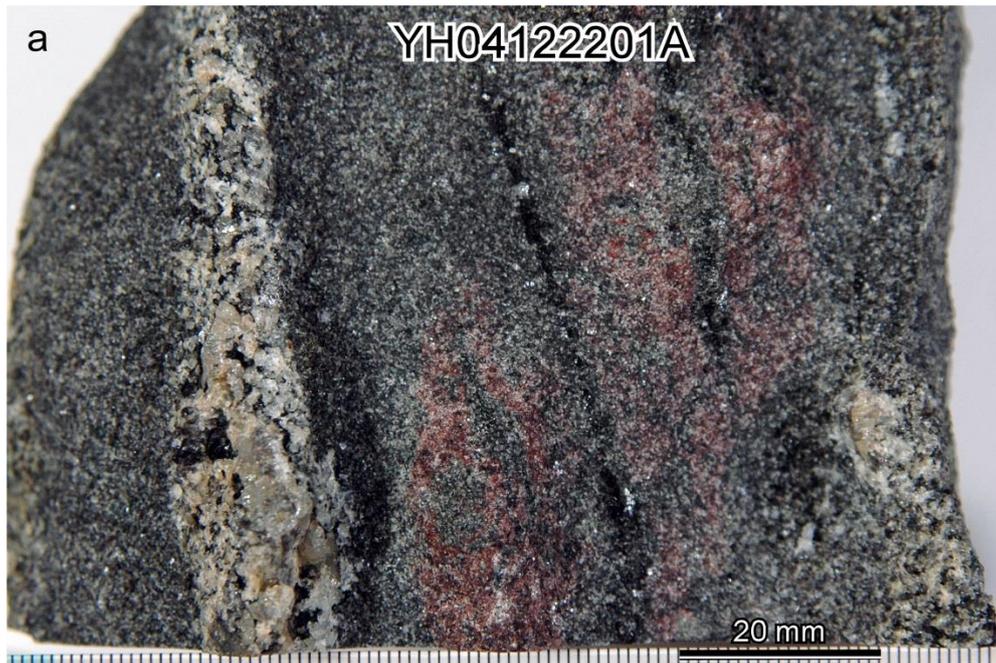
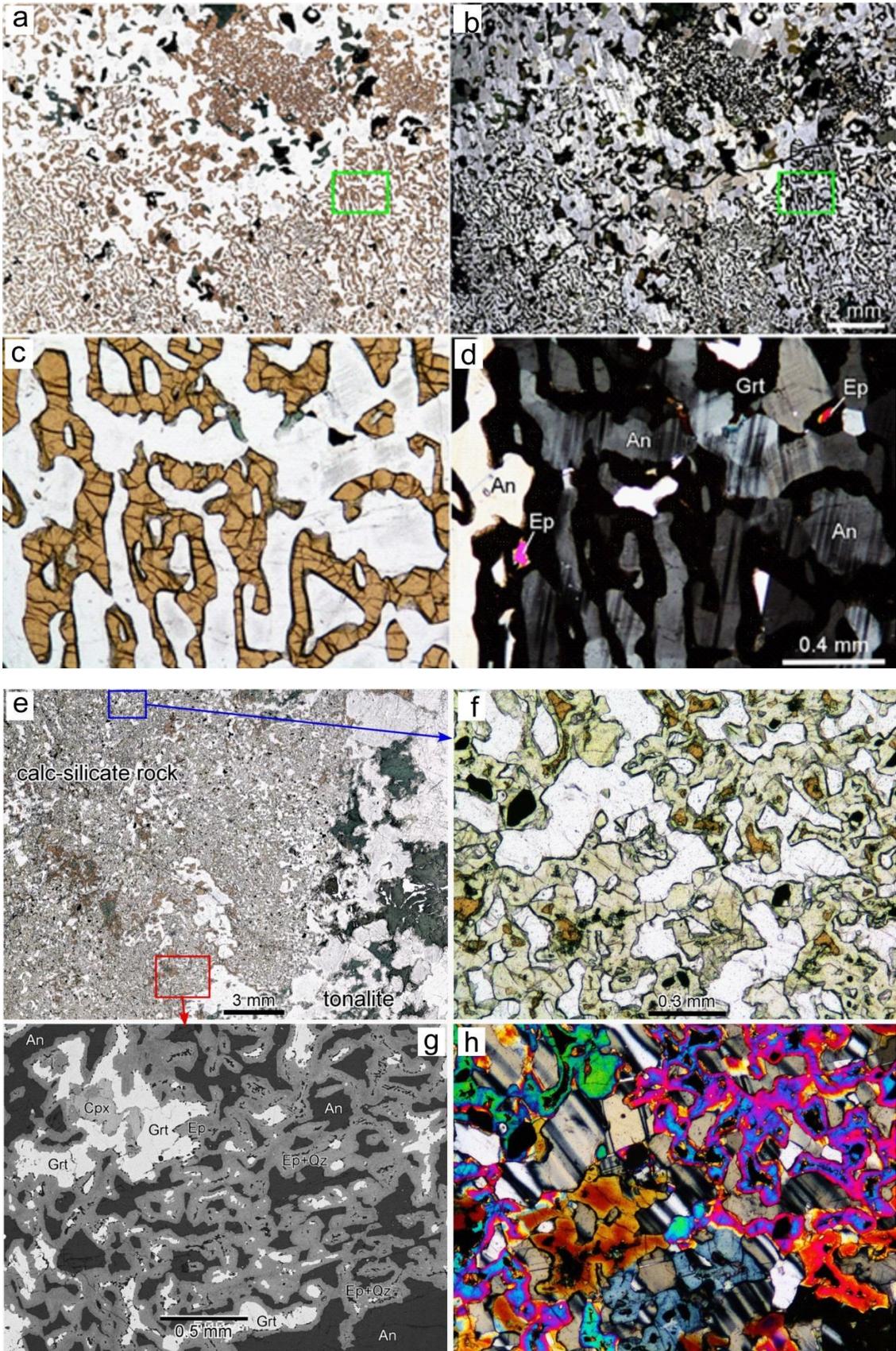
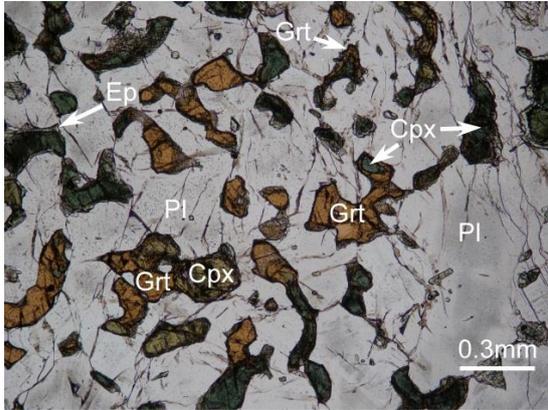
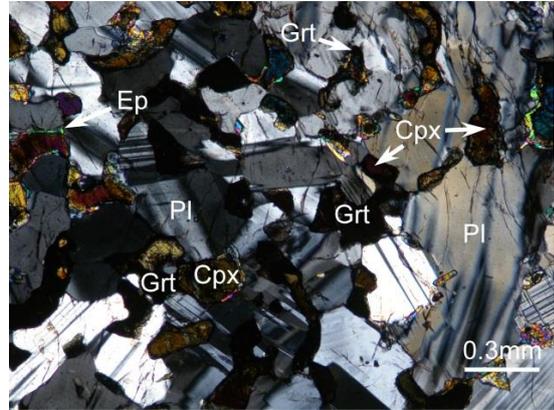


Fig. 13. (a)-(b) Photographs of sample YH04122201A, showing the heterogeneous feature of calc-silicate rock and thin tonalitic vein and dark green, dark reddish brown color. The purple rectangle showing Figs. 15a-b and red rectangle showing the location of quartz-bearing kyanite in tonalite vein, respectively. (c) Photographs of sample ST041226-01-3B, showing the yellow-greenish brown color of calc-silicate rock in Cape Hionde (Figure a after Sun *et al.*, 2014).

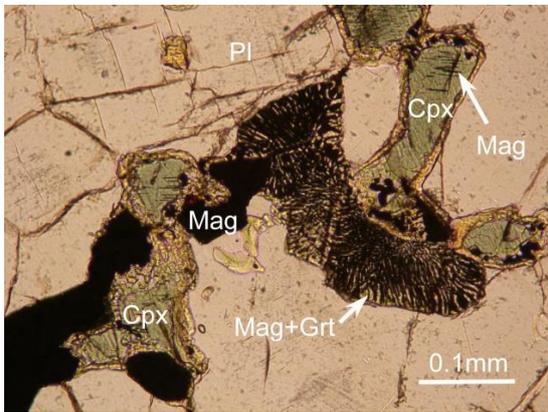




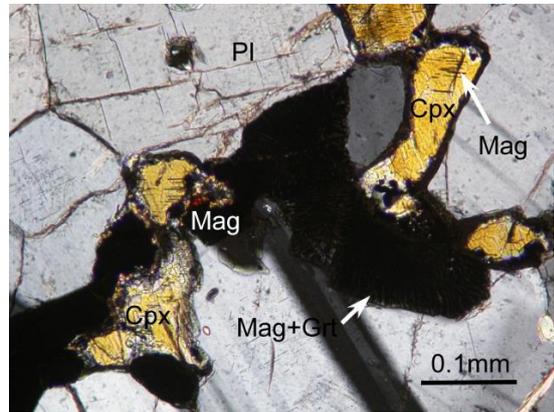
i



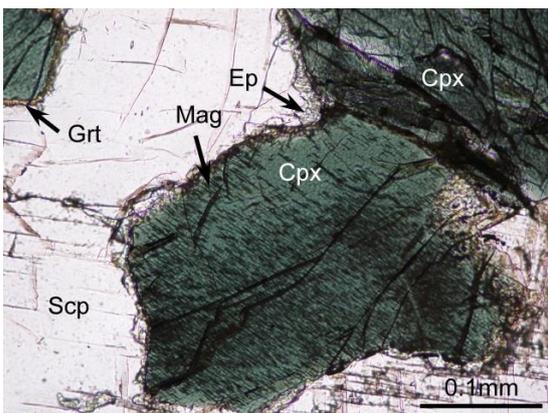
j



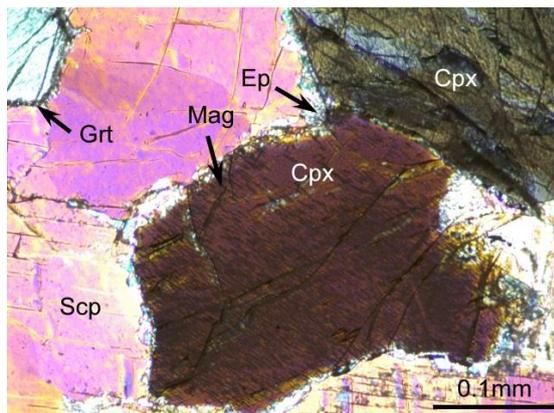
k



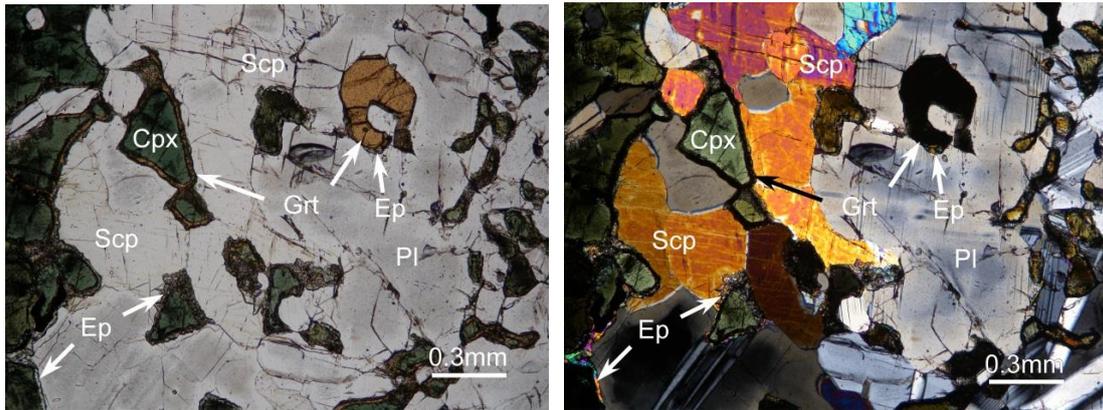
l



m

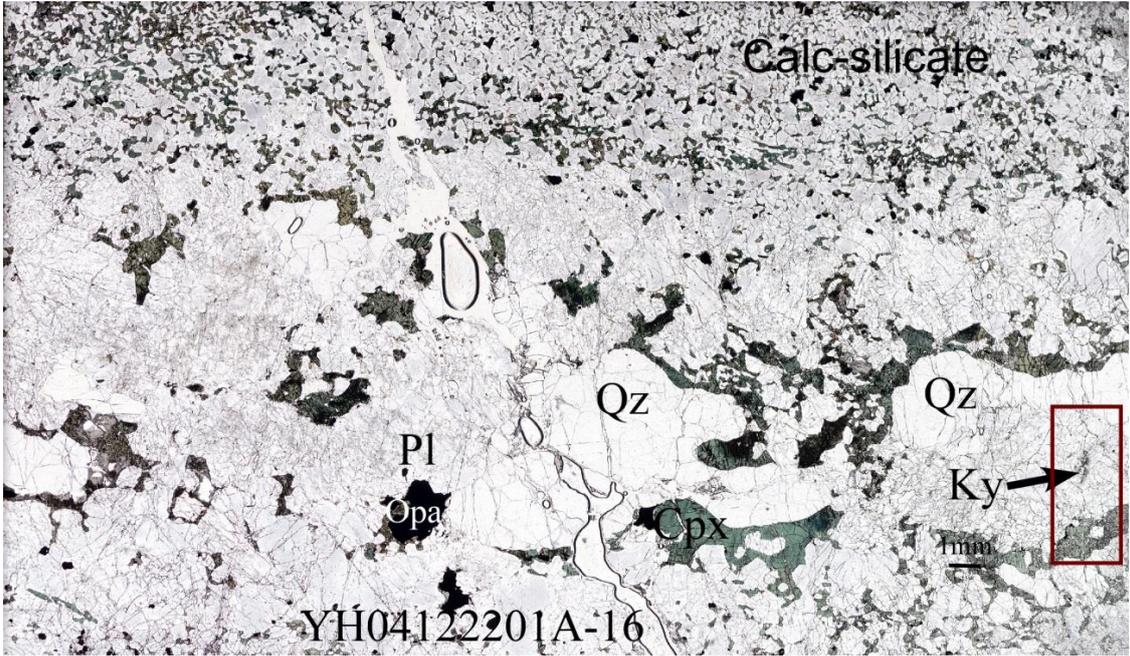


n

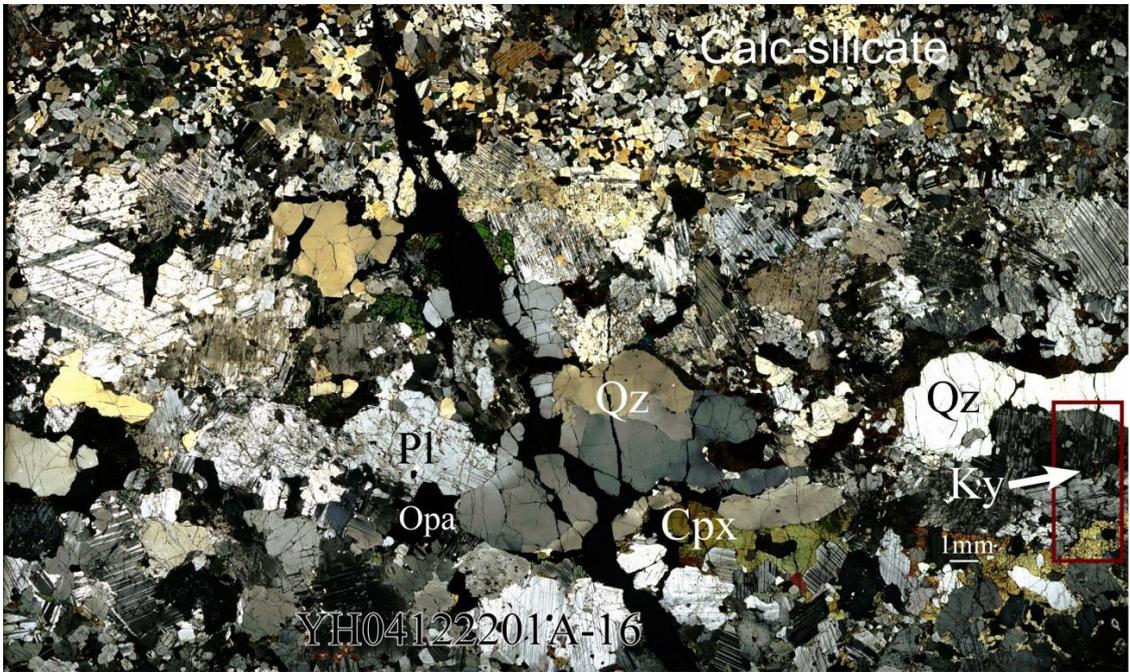


o p

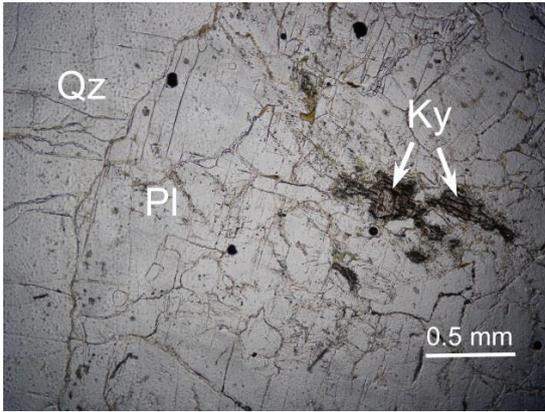
Fig. 14. (a)-(d) The symplectitic intergrowths of anorthite and Ca-garnet. Small amounts of clinopyroxene and magnetite are also present. Plane polarized light. (c)-(d) The area in the lower green rectangle in (a)-(b), showing the rare occurrence of relict epidote inclusions within Ca-garnet (sample 74010112) (Figs. a-d after Sun *et al.*, 2014). (e)-(h) photomicrograph showing the relationship of tonalite and calc-silicate rock (YH04122010EX-1). (f) and (h) Higher magnification of the area in the blue rectangle in (e), photomicrographs of garnet, clinopyroxene, plagioclase and epidote+quartz from calc-silicate (YH04122010EX-1). (g) Higher magnification of the area in the red rectangle in (e), back-scattered electron images of small amounts of quartz occurring in epidotes calc-silicate. (i)-(j) Photomicrograph of garnet, clinopyroxene and plagioclase from calc-silicate, the occurrences of garnets, and clinopyroxenes are rimmed by the secondary minerals of garnet and epidote within plagioclase. (k)-(l) The symplectitic intergrowths of magnetite and Ca-garnet. Clinopyroxene contains numerous tiny magnetite lamellae, and rimmed by secondary mineral of Ca-garnet, the opaque minerals (magnetite) occur around clinopyroxene. (m)-(n) Photomicrograph of clinopyroxene contains numerous tiny magnetite lamellae. (o)-(p) Photomicrograph of garnet, clinopyroxene, plagioclase and scapolite from calc-silicate, clinopyroxenes are rimmed by the secondary minerals of garnet and epidote within scapolite, numerous tiny opaque mineral inclusions occur in clinopyroxene (sample YH04122201A).



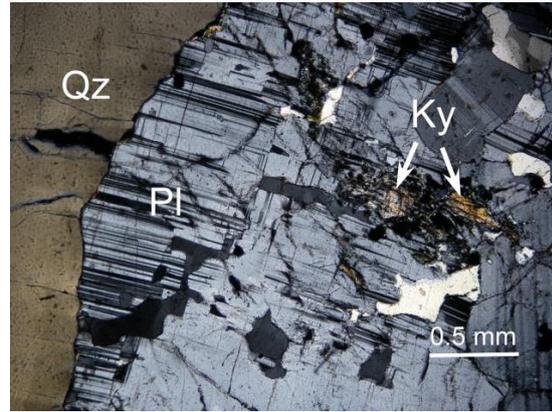
a



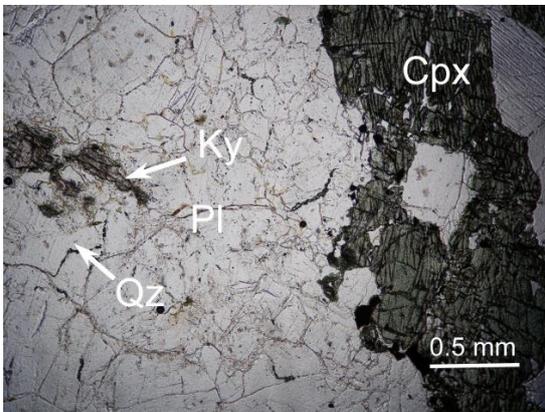
b



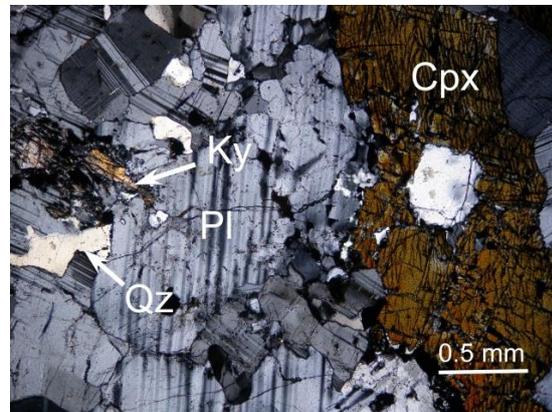
c



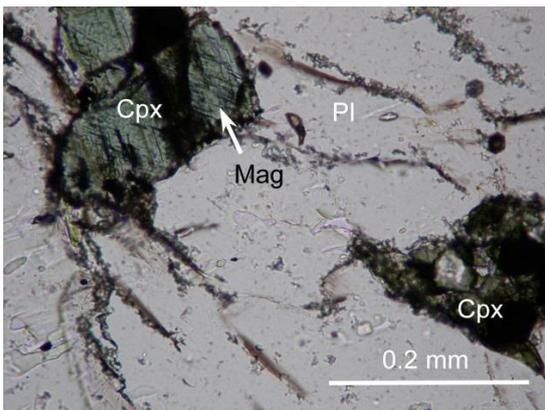
d



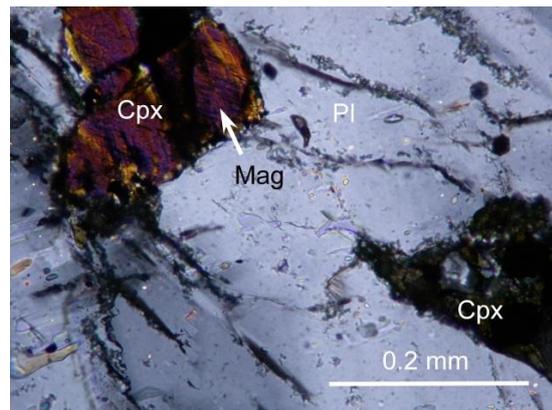
e



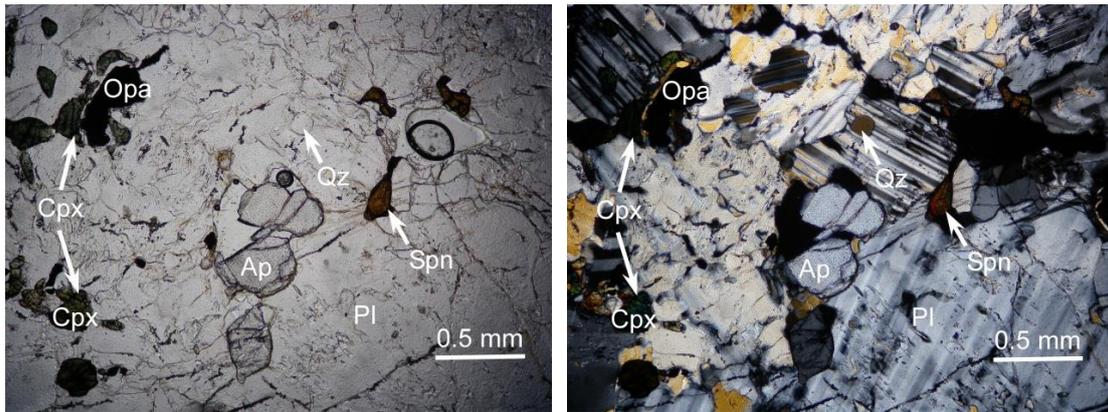
f



g



h



i

j

Fig. 15. (a)-(b) Higher magnification of the area in the purple rectangle in figure.13b, photomicrographs of kyanite-bearing thin tonalite vein in calc-silicate rock (sample YH04122201A). Tonalite is coarse grained and contains plagioclase and quartz, the calc-silicate rock is fine-grained and contains plagioclase. (c)-(d) Higher magnification of the upper part of area in the red rectangle in figures. 15a-b, photomicrograph of plagioclase and quartz near kyanite, (e)-(f) Higher magnification of the lower part of area in the red rectangle in figures a-b, photomicrograph of clinopyroxene near kyanite. (g)-(h) Clinopyroxene contains numerous tiny magnetite lamellaes. (i)-(j) The opaque minerals (magnetite) occur around clinopyroxene, apatite and sphene are also present.

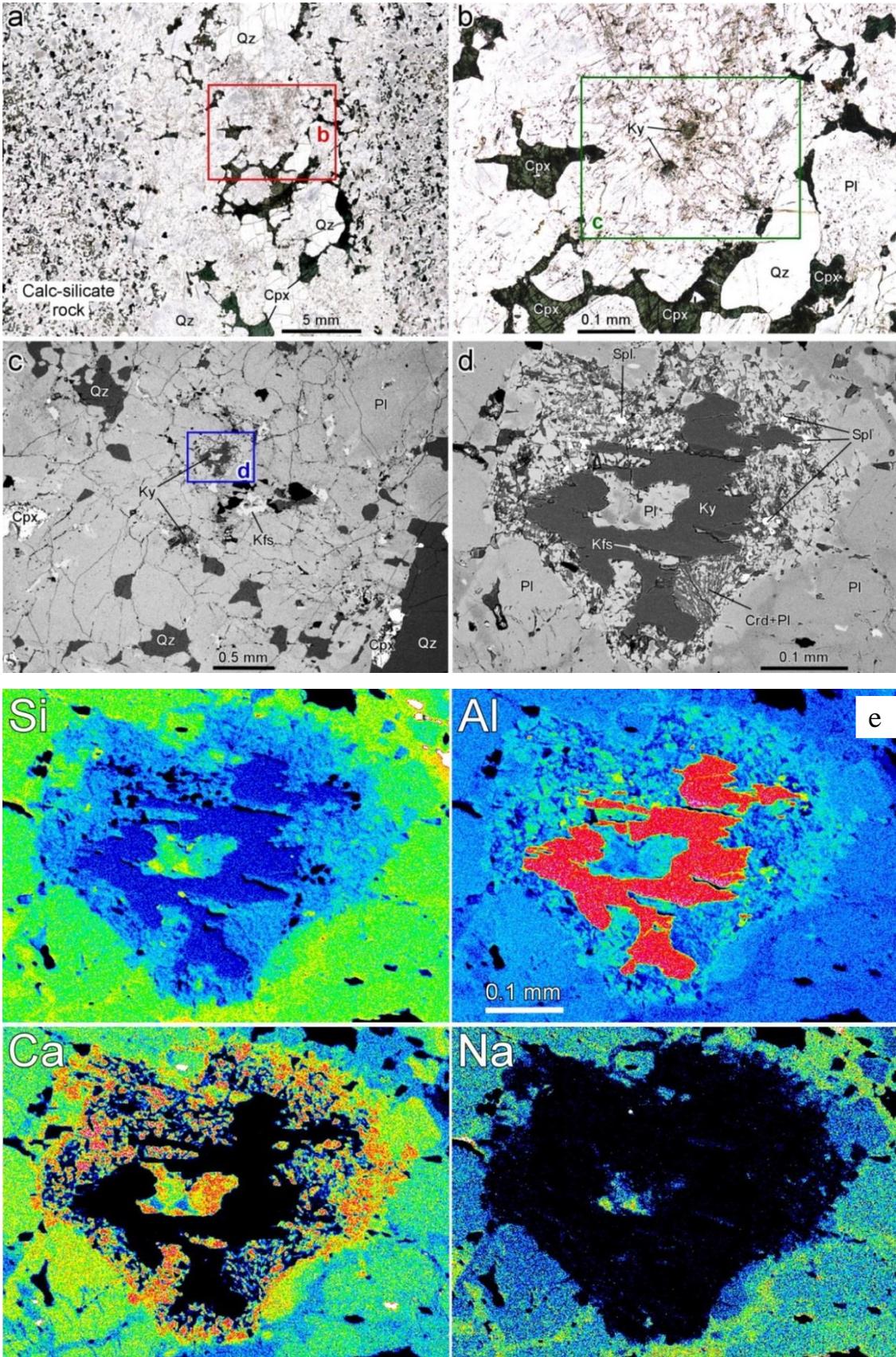


Fig. 16. (a)-(b) Photomicrographs of kyanite-bearing thin tonalite vein in a calc-silicate rock (sample YH04122201A). Tonalite is coarse grained and contains alkali feldspar and quartz, which are absent in fine-grained calc-silicate rocks. Plane polarized light. (b) Higher magnification of the area in the rectangle in (a). (c)-(d) Back-scattered electron images of kyanite-bearing tonalite vein. (c) Higher magnification of the area in the rectangle in (b). (d) Higher magnification of the area in the rectangle in (c). Note kyanite is extensively replaced by anorthite corona containing spinel, alkali feldspar, and cordierite. The anorthite corona is partially replaced by clay (pinitite) and carbonate minerals, and surrounded successively by more sodic plagioclase (Figs. a-d after Sun *et al.*, 2014). (e) The Elemental maps of the area of figure d.

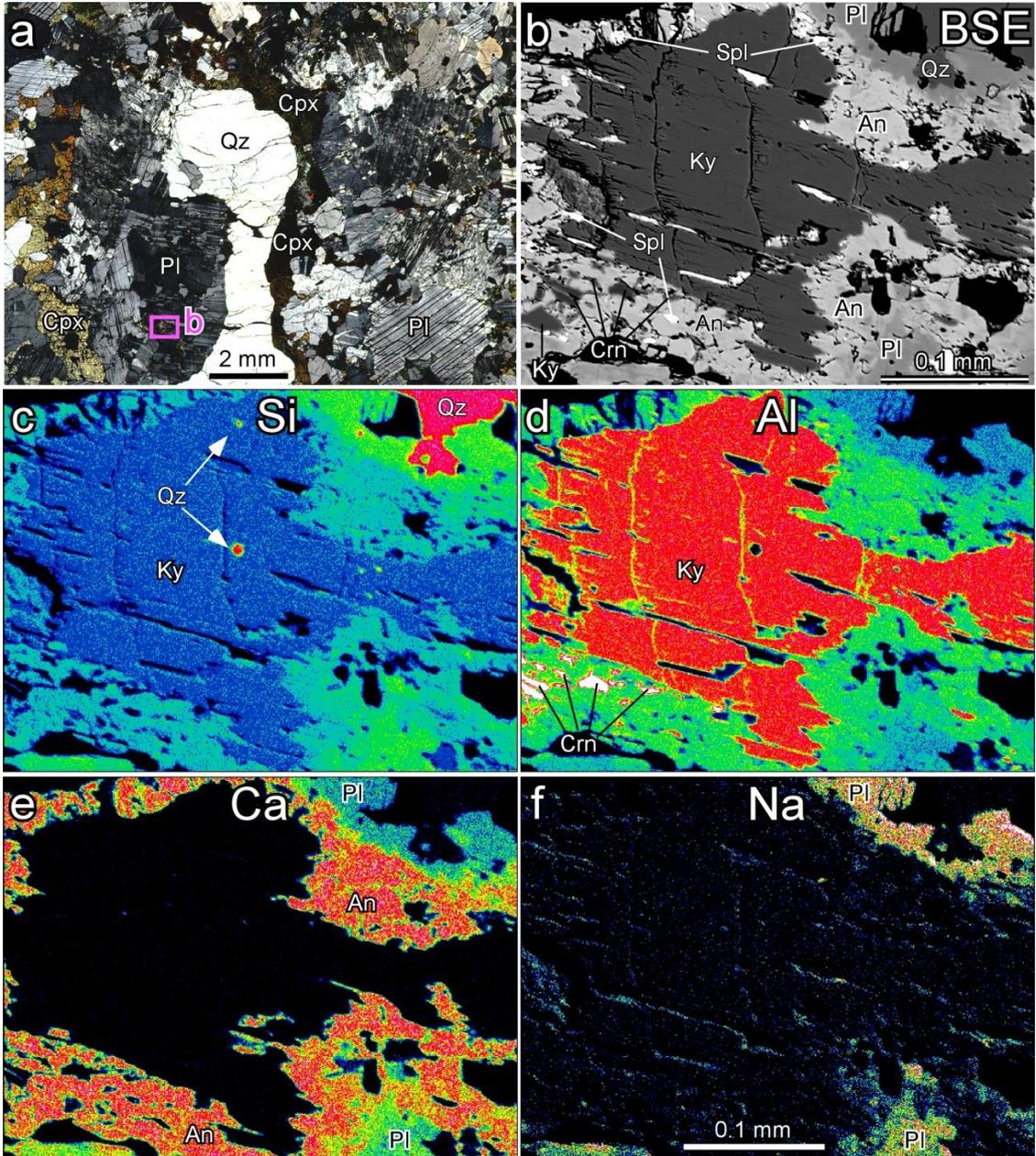
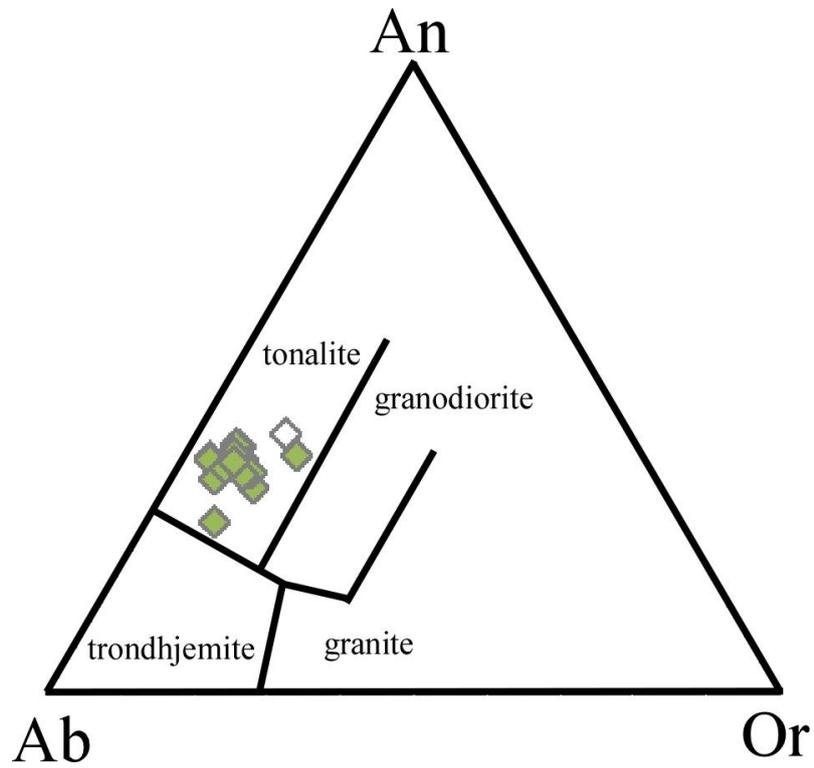
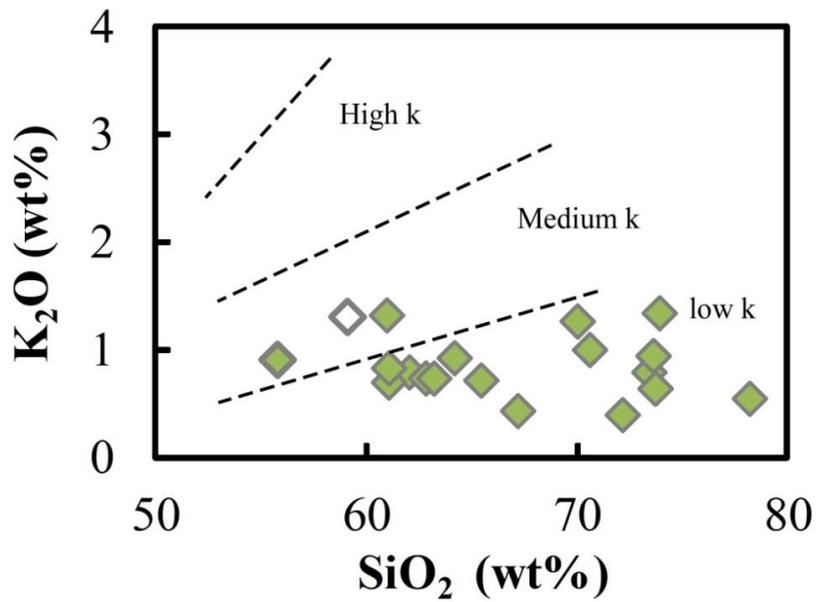


Fig. 17. (a) Higher magnification of the area in rectangle in figures 15a-b, showing kyanite-bearing thin tonalite vein cutting calc-silicate rock (sample YH04122201A). Crossed nicols. (b) Back-scattered electron image of the area in the lower rectangle in (a). Kyanite is surrounded by anorthite corona containing corundum and spinel. (c)-(f) Elemental maps of the nearly same area in (b). The brighter, the higher the elemental content is. Note that quartz occurs within kyanite (after Sun *et al.*, 2014).

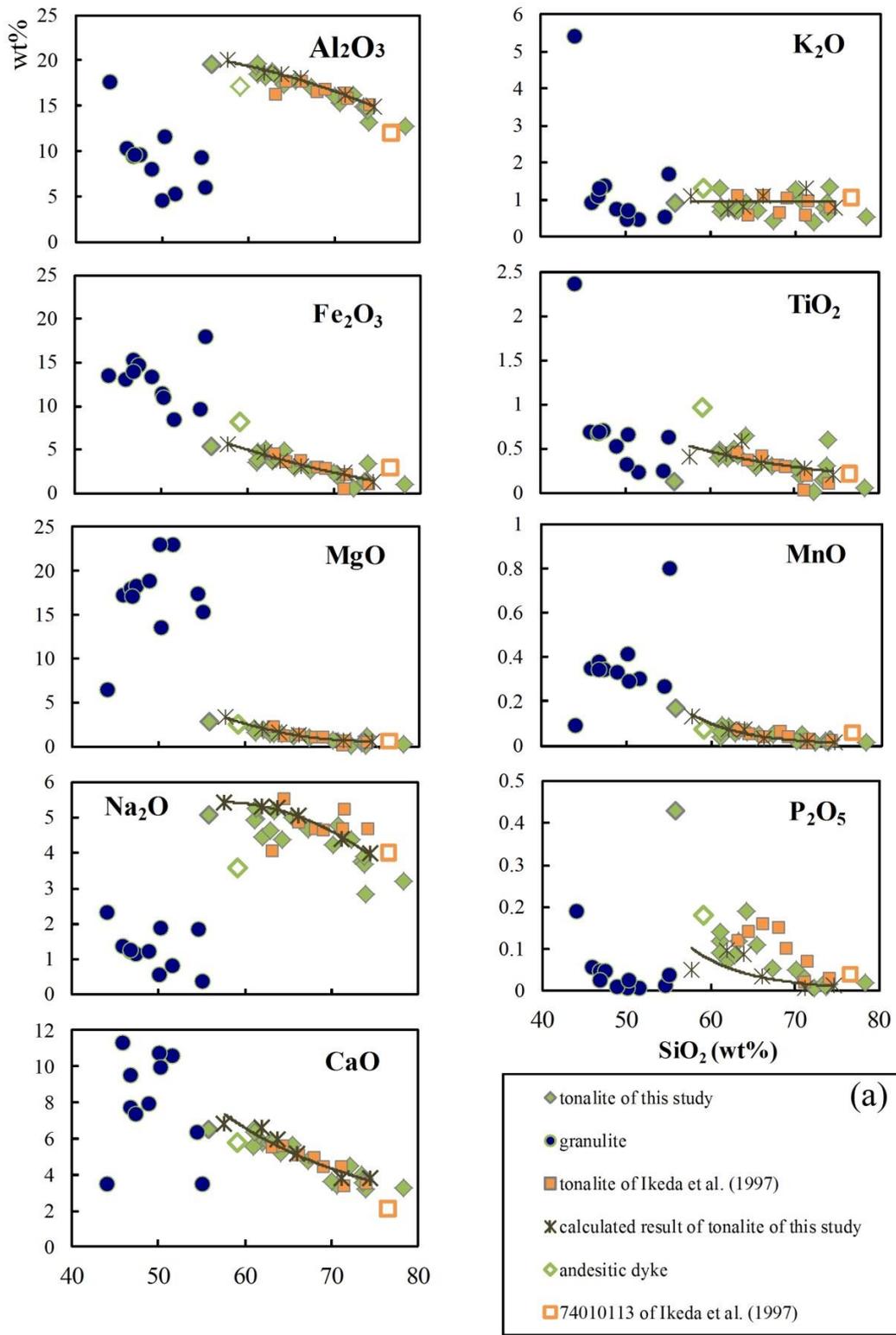


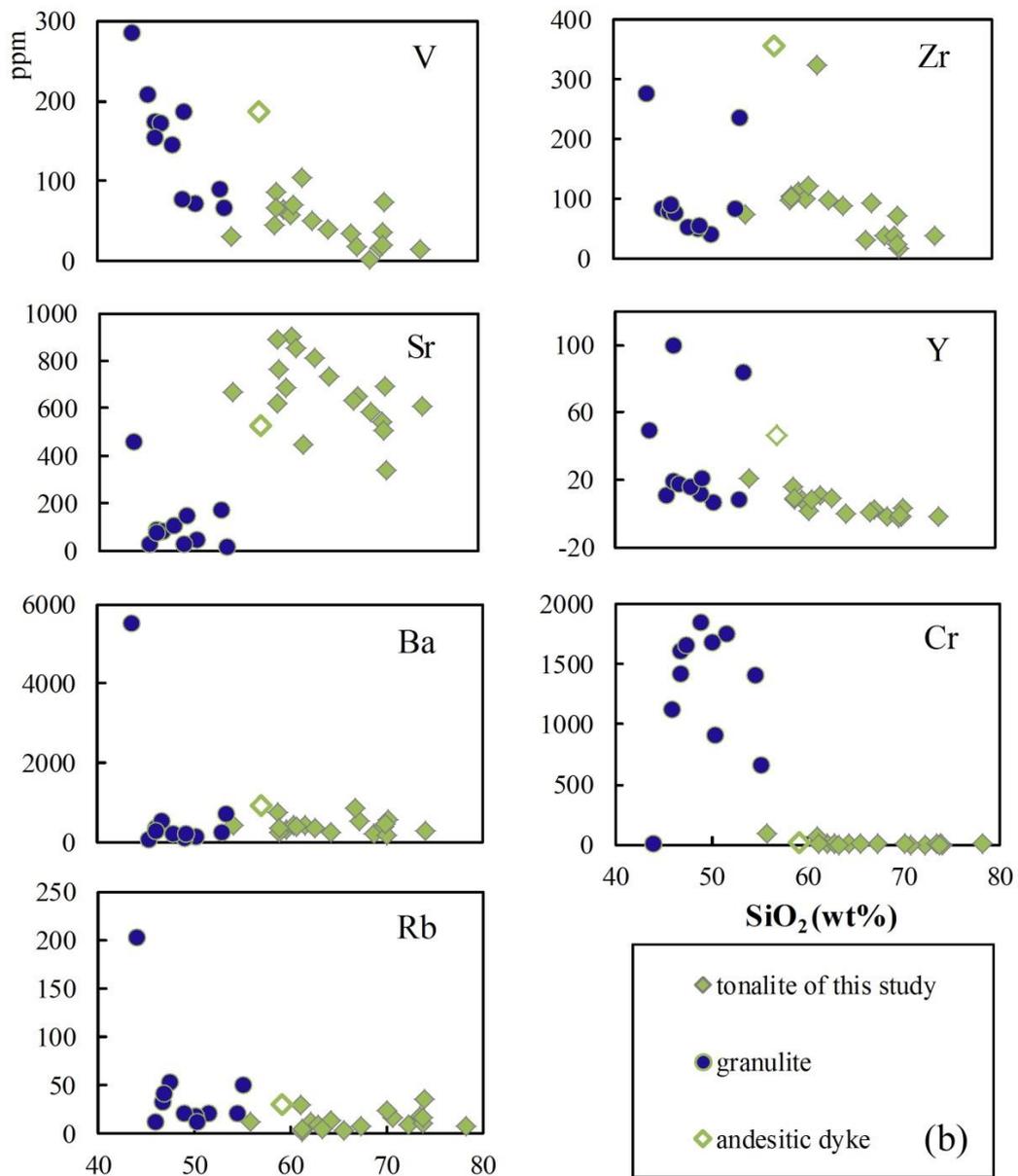
(a)



(b)

Fig. 18. (a) Normative An-Ab-Or diagram (Barker, 1979) for the classification of andesitic dyke and tonalites. (b) K₂O versus SiO₂ diagram for andesitic dyke and tonalites (Gill, 1981). Green color, tonalite; white color, andesitic dyke.





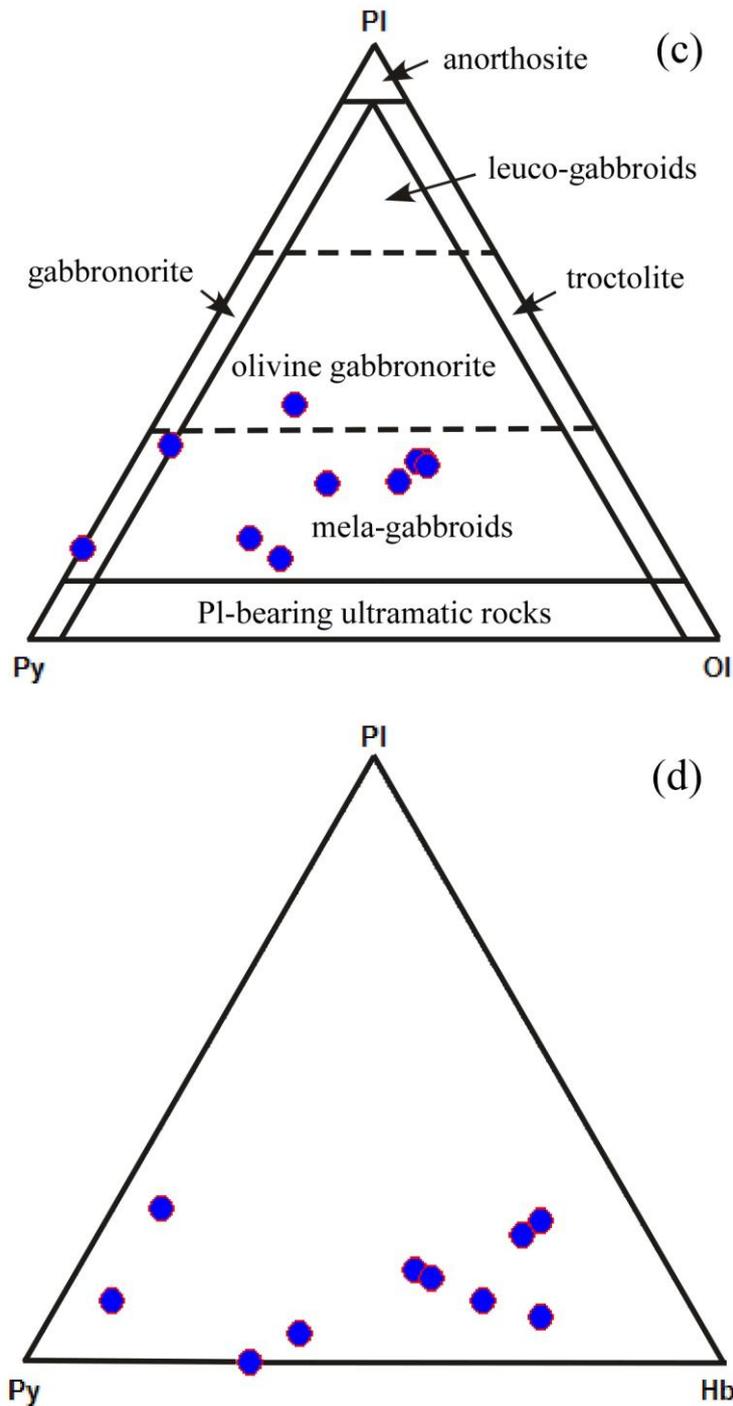


Fig. 19. (a) Major element variation diagrams of andesitic dyke, tonalites, granulites and tonalites of previous study (Ikeda *et al.*, 1997). (b) Trace element variation diagrams of andesitic dyke, tonalites and granulites. (c) Normative amounts of olivine, plagioclase and pyroxenes of granulites in gabbro classification diagram (after Streckeisen, 1976). (d) Modal amounts of hornblende, plagioclase and pyroxenes of granulites (Bule circle, granulite samples of this study).

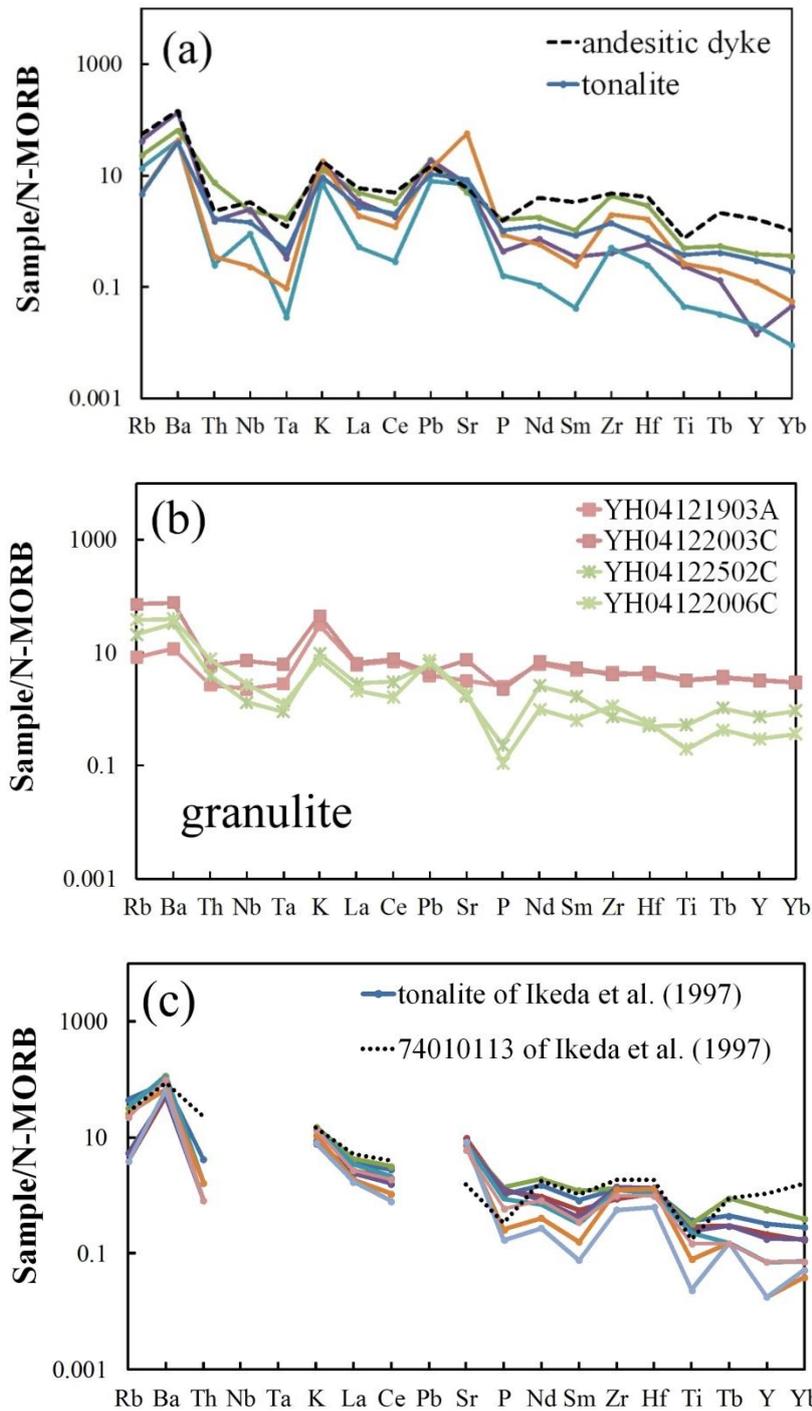


Fig. 20. (a) N-MORB normalized spider diagram of andesitic dyke and tonalites (normalizing values are after Sun and Mcdonough (1989)). (b) N-MORB normalized spider diagram of granulites. (c) N-MORB normalized spider diagram of tonalites of previous study (Ikeda *et al.*, 1997).

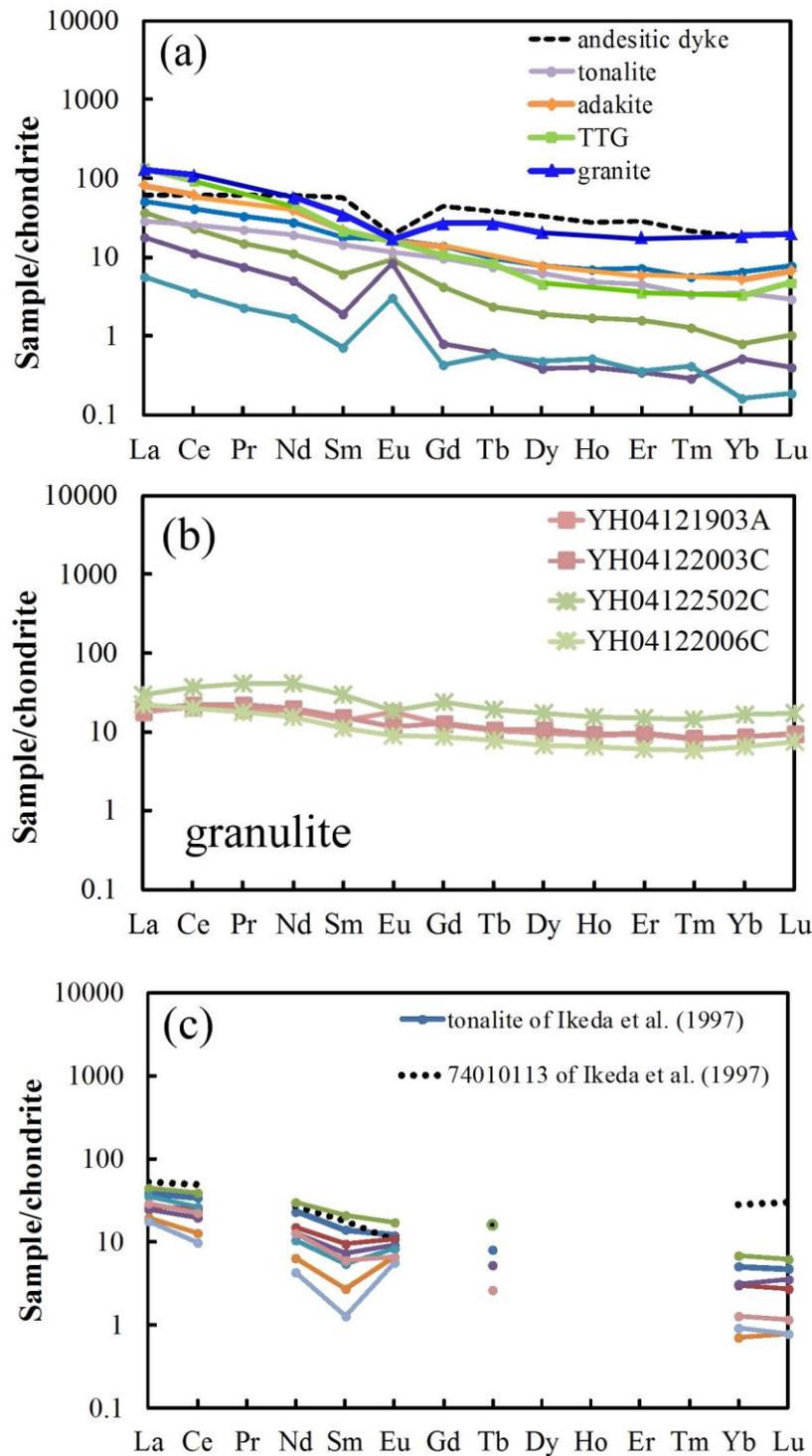


Fig. 21. (a) Chondrite normalized REE pattern of andesitic dyke and tonalites, has similar REE patterns to adakite and TTG (Martin *et al.*, 2005; adakite) (Martin, 1995; average Archean TTG and Modern granite). Normalizing values are after Sun and Mcdonough (1989). (b) Chondrite normalized REE pattern of granulites. (c) Chondrite normalized REE pattern of tonalites of previous study (Ikeda *et al.*, 1997).

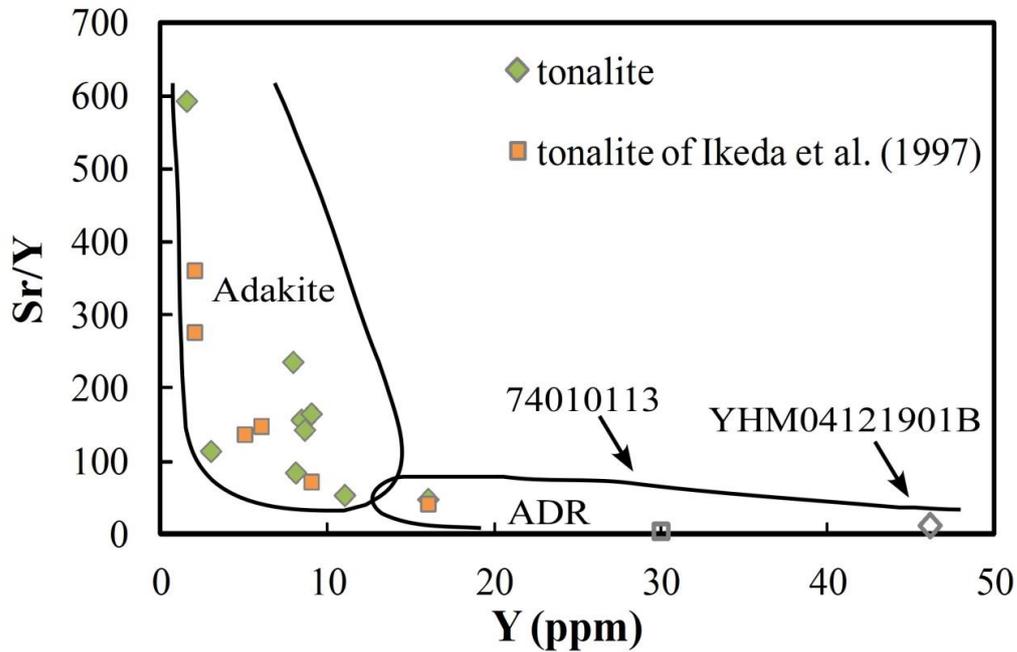


Fig. 22. Y vs Sr/Y diagram of andesitic dyke and tonalites, data from this study and previous study (Ikeda *et al.*, 1997). Adakite, Island arc Andesite-Dacite-Rhyolite (ADR) fields are from (Drummond and Defant, 1990).

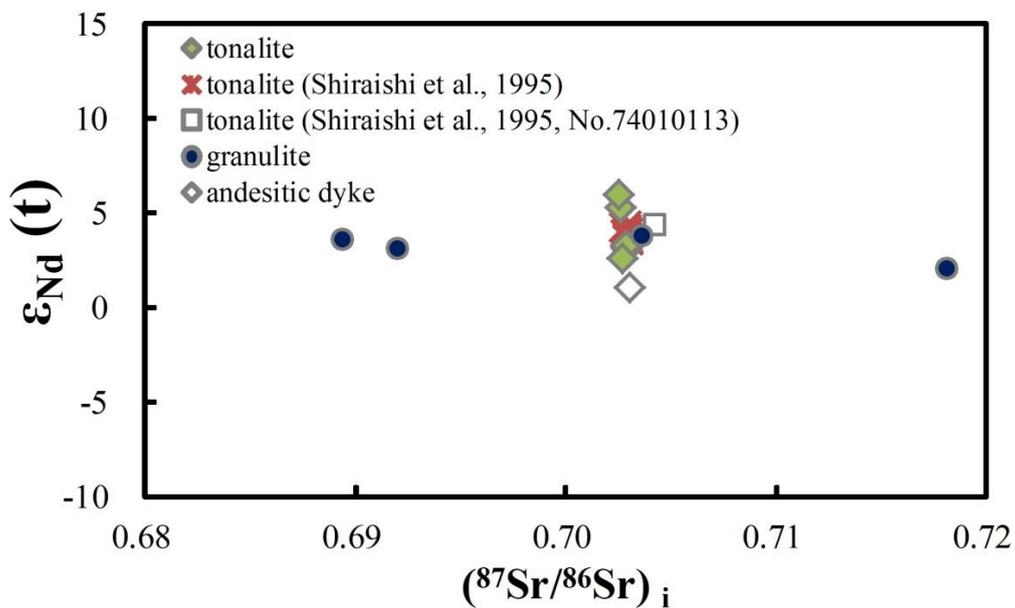


Fig. 23. The initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio vs $\epsilon_{Nd}(T)$ diagram for andesitic dyke, tonalites (this study) (previous study; Shiraishi *et al.*, 1995), for granulites (this study) from Cape Hinode.

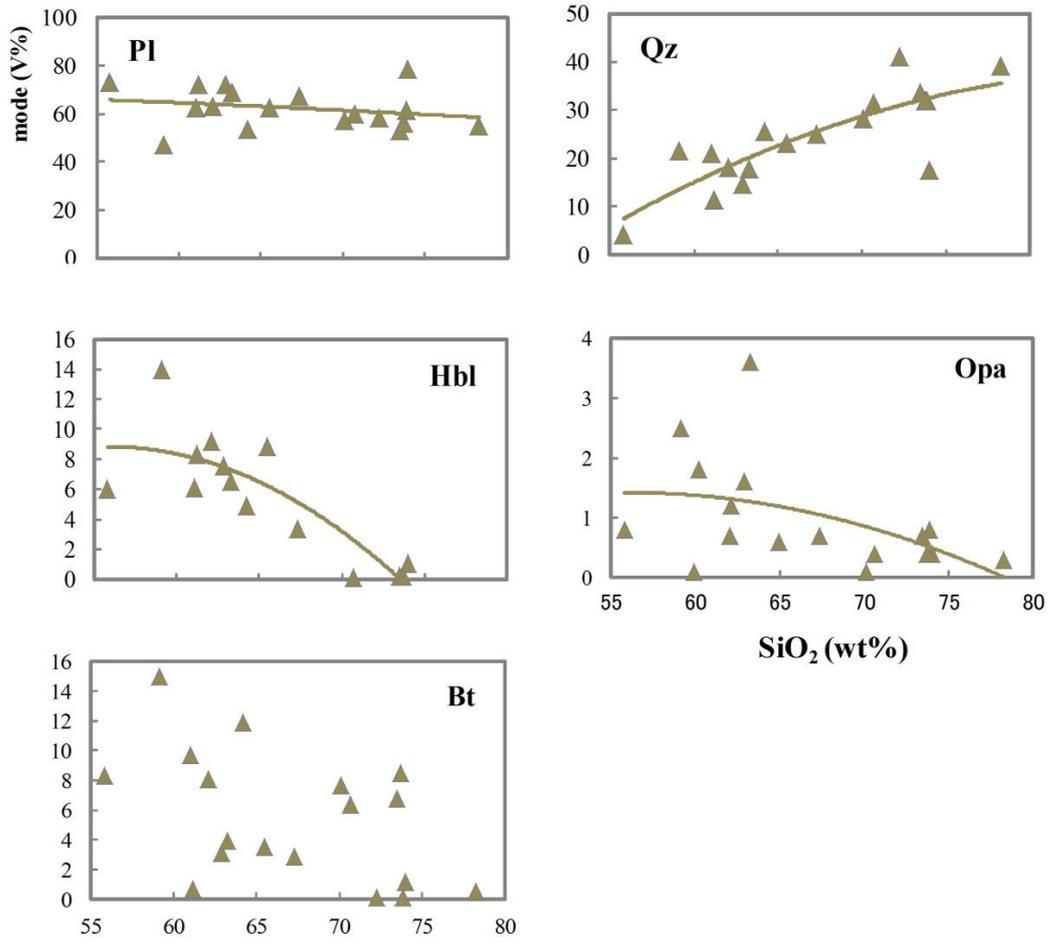


Fig. 24. Plots of mineral modals vs bulk SiO_2 contents for tonalites.

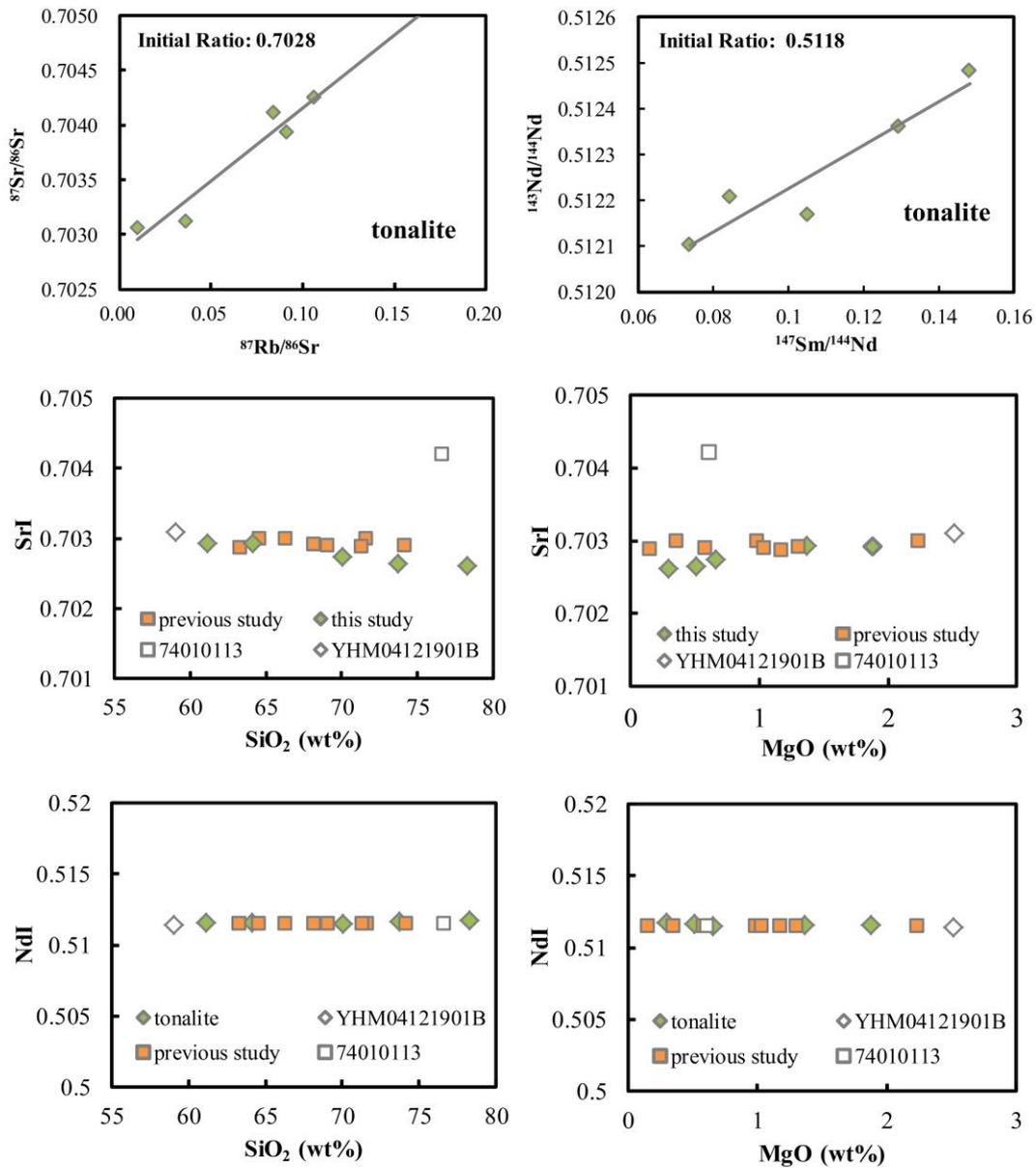


Fig. 25. Rb-Sr and Sm-Nd whole rock isochron diagrams for tonalites from Cape Hinode (this study). SrI vs SiO_2 , SrI vs MgO, NdI vs SiO_2 and NdI vs MgO diagrams for dyke tonalite and tonalites from Cape Hinode, data from this study and previous study (Ikeda et al., 1997; Shiraishi, et al., 1995).

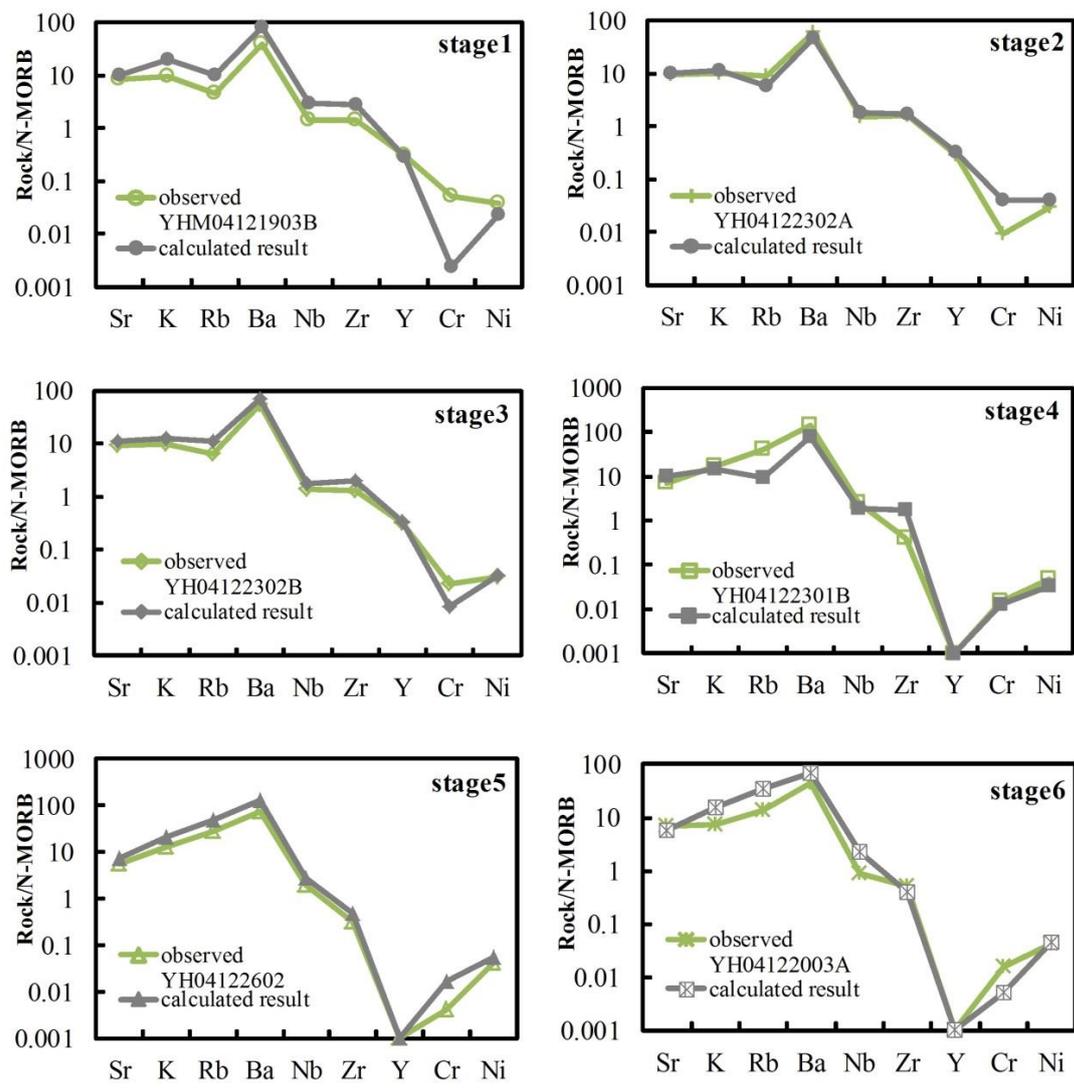


Fig. 26. Comparison with the calculated results of the trace elements modeling of fractional crystallization and the observed data for tonalites (this study), normalizing values are after Sun and Mcdonough, 1989; Cr, Ni normalizing values are after Bevins *et al.*, 1984).

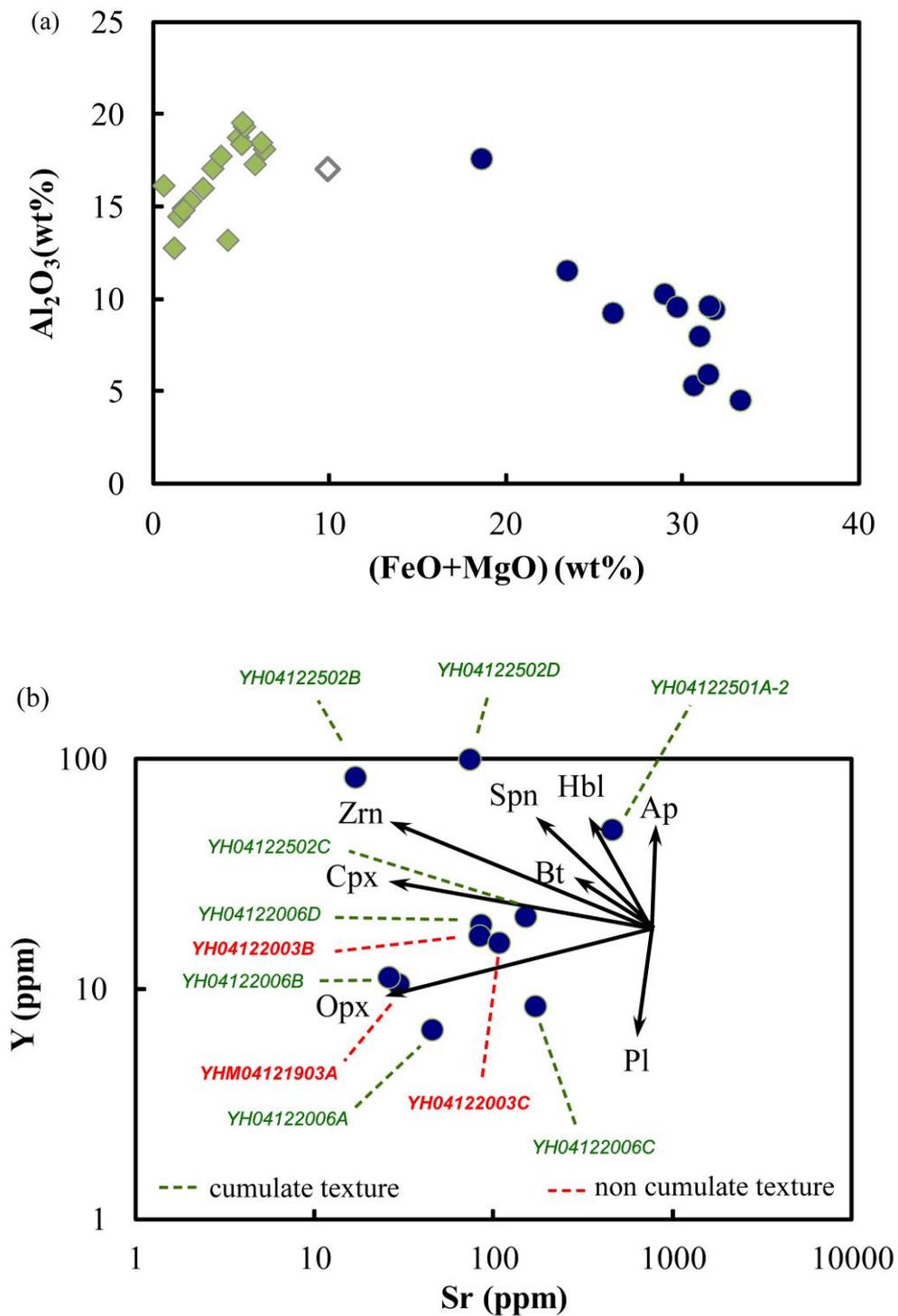


Fig. 27. (a) Al_2O_3 vs (FeO+MgO) diagram for andesitic dyke, tonalites and granulites. (b) Sr vs Y digram showing mineral accumulation vectors for granulites, Mineral-melt partition coefficients used see Table 4, green number, showing cumulate texture; red numer, showing non-cumulate texture.

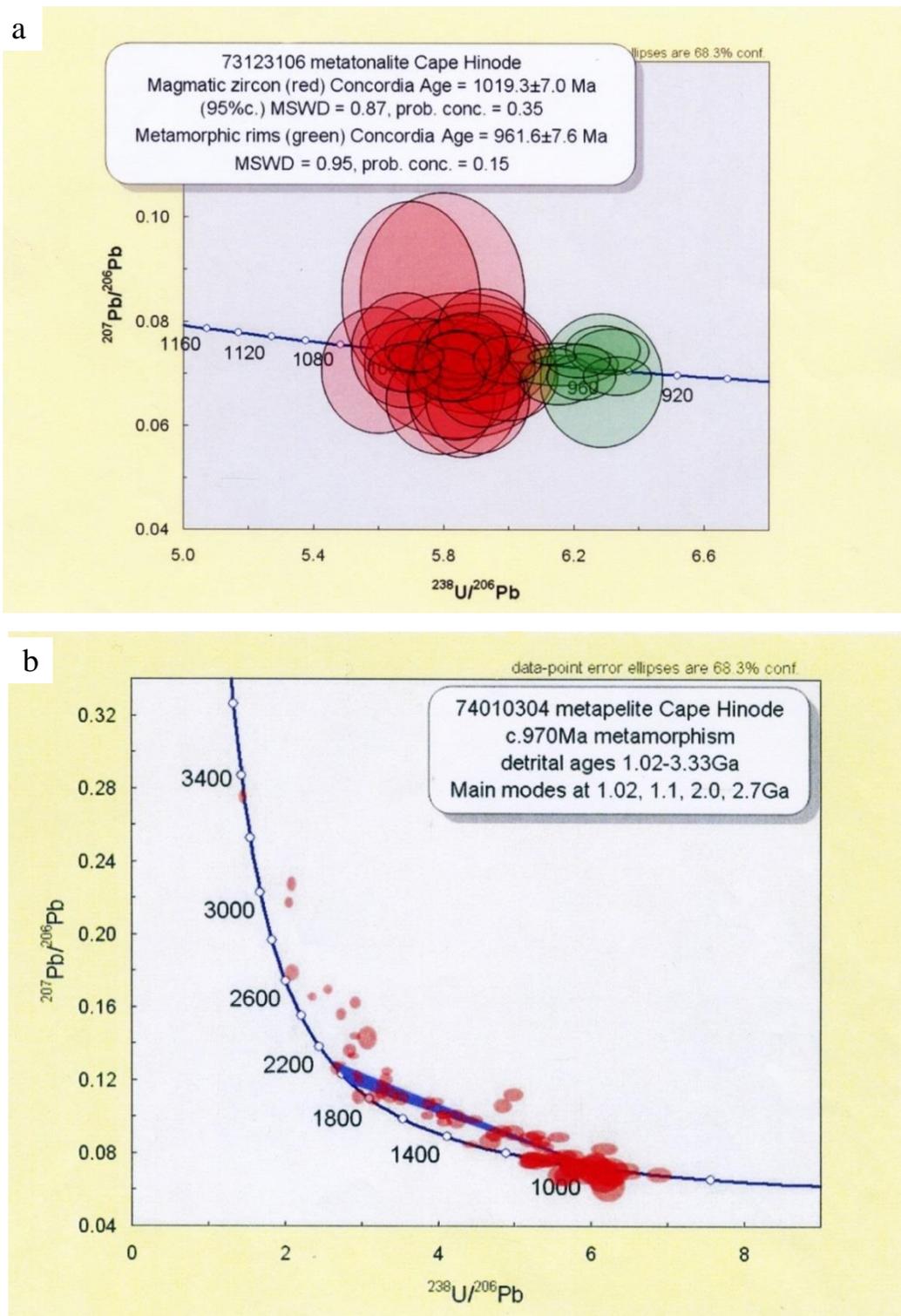


Fig. 28. U-Pb concordia diagrams for zircons in (a) tonalite (73123106), (b) sillimanite-garnet gneiss (74010304) from South-western part of Cape Hinode (Dan Dunkley 2010, personal communication).

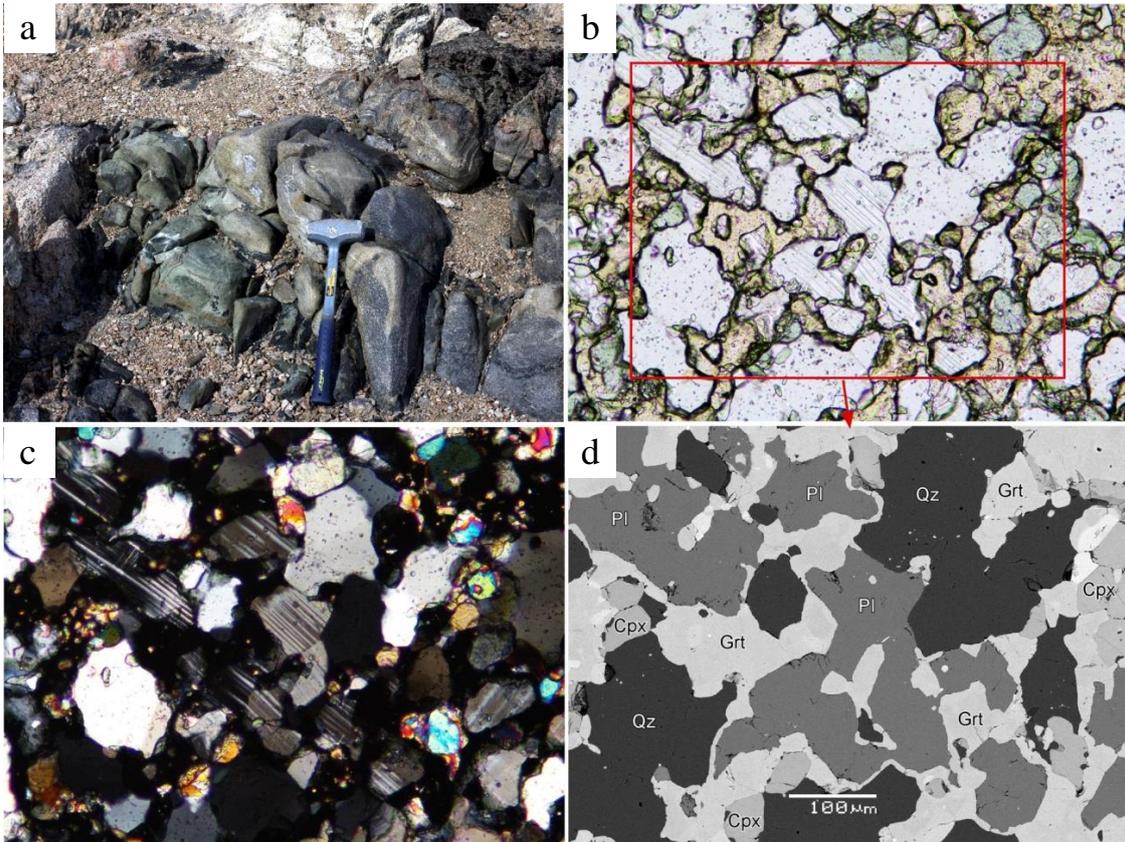


Fig. 30. (a) Field photographs showing mode of occurrence of calc-silicate rock (sample YH04122701D), associated with pelitic gneisses in the South-western part of Cape Hinode. (b)-(c) Photomicrographs of quartz-garnet-clinopyroxene-plagioclase-bearing calc-silicate rock. (d) BSE image of the rectangle area in (b).

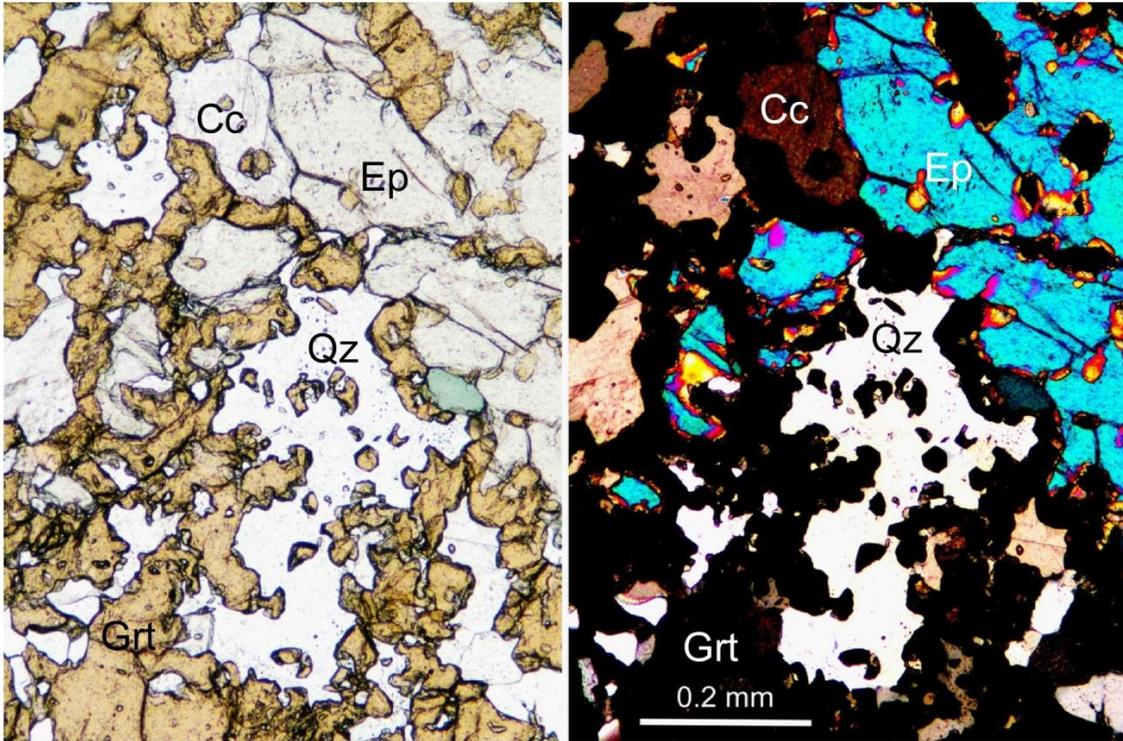


Fig. 31. Photomicrographs of quartz-garnet-calcite-epidote-bearing calc-silicate rock in the Niban Rock area of Lützow-Holm Complex.

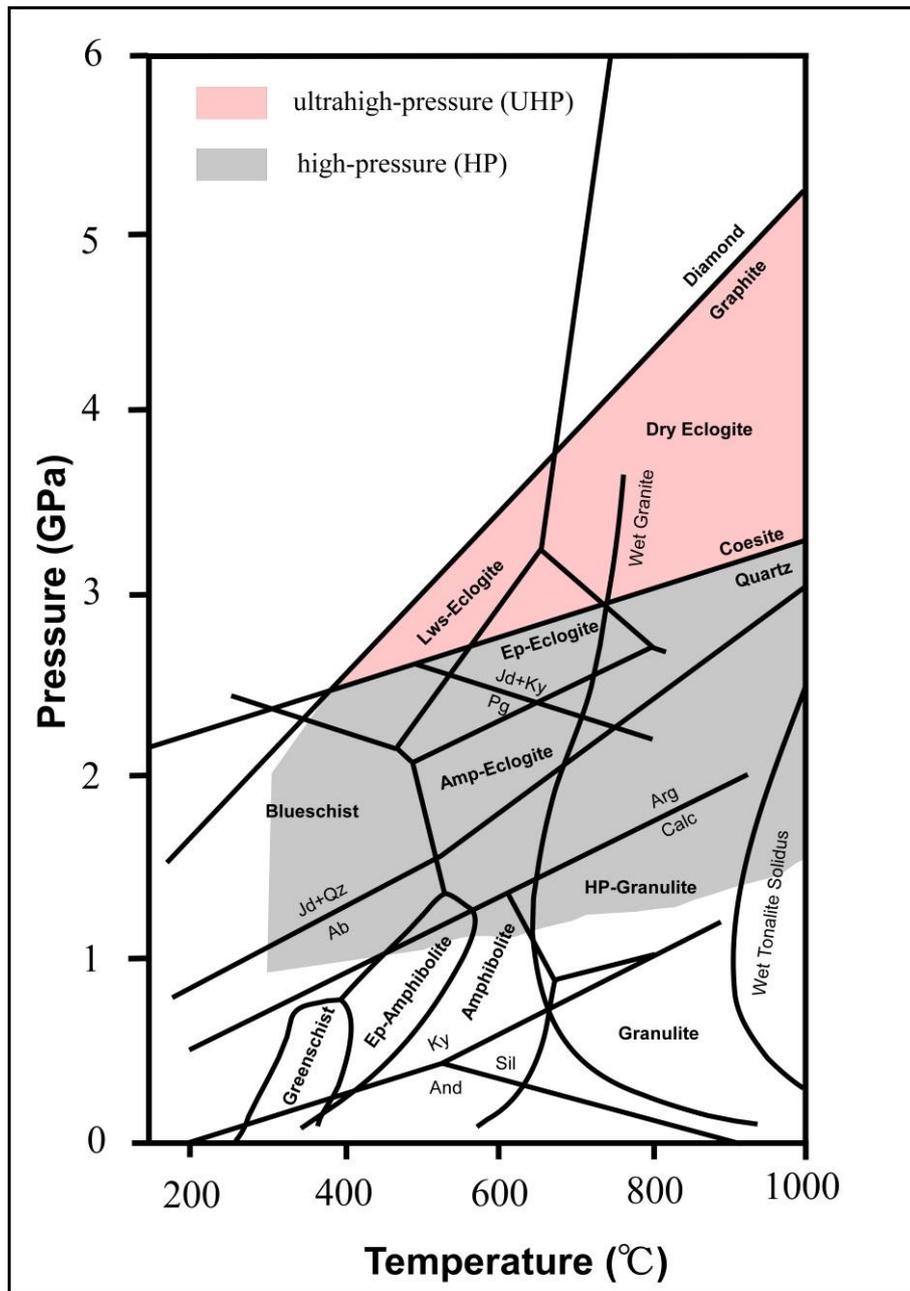


Fig. 32. P-T regimes of LP, HP and UHP metamorphism of the subduction zones, epidote minerals occur as phases in greenschist, blueschist, epidote-amphibolite facies and in the lawsonite and epidote eclogite facies (after Figure 1 of Enami *et al.*, 2004).

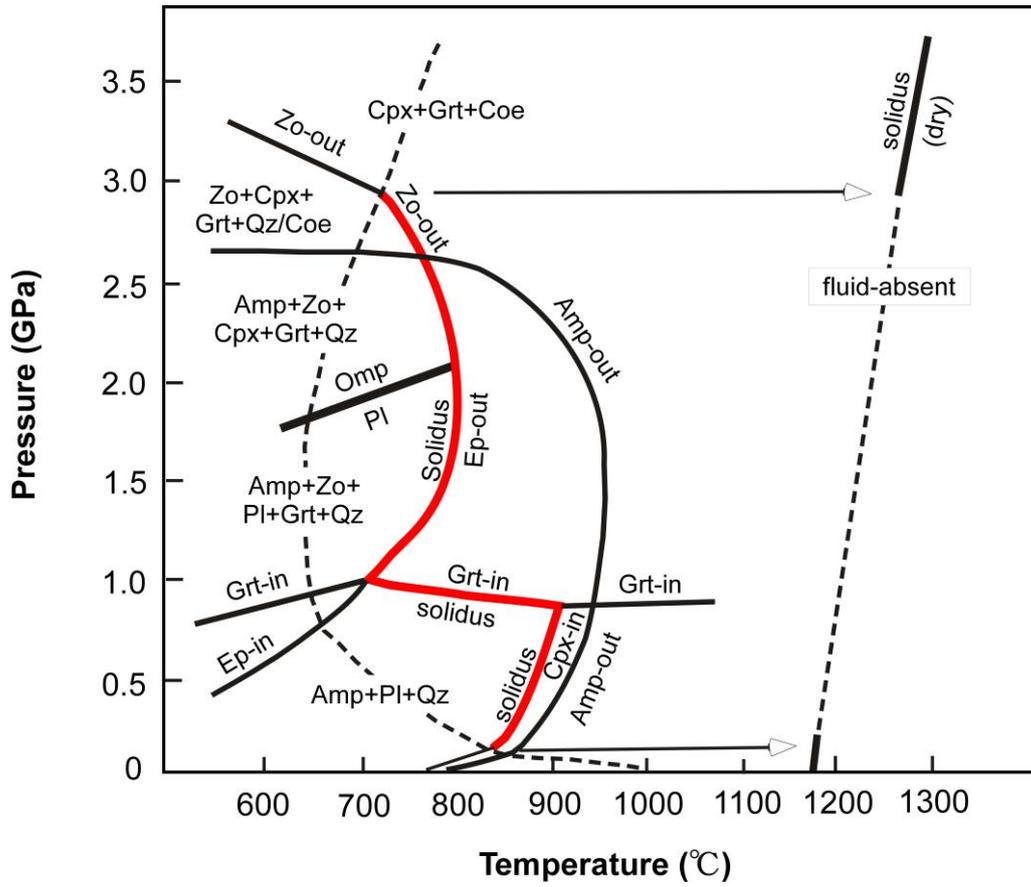


Fig. 33. Melting in an epidote-bearing basaltic rocks (MORB), showing the stability of epidote (after Schmidt and Poli, 2004).

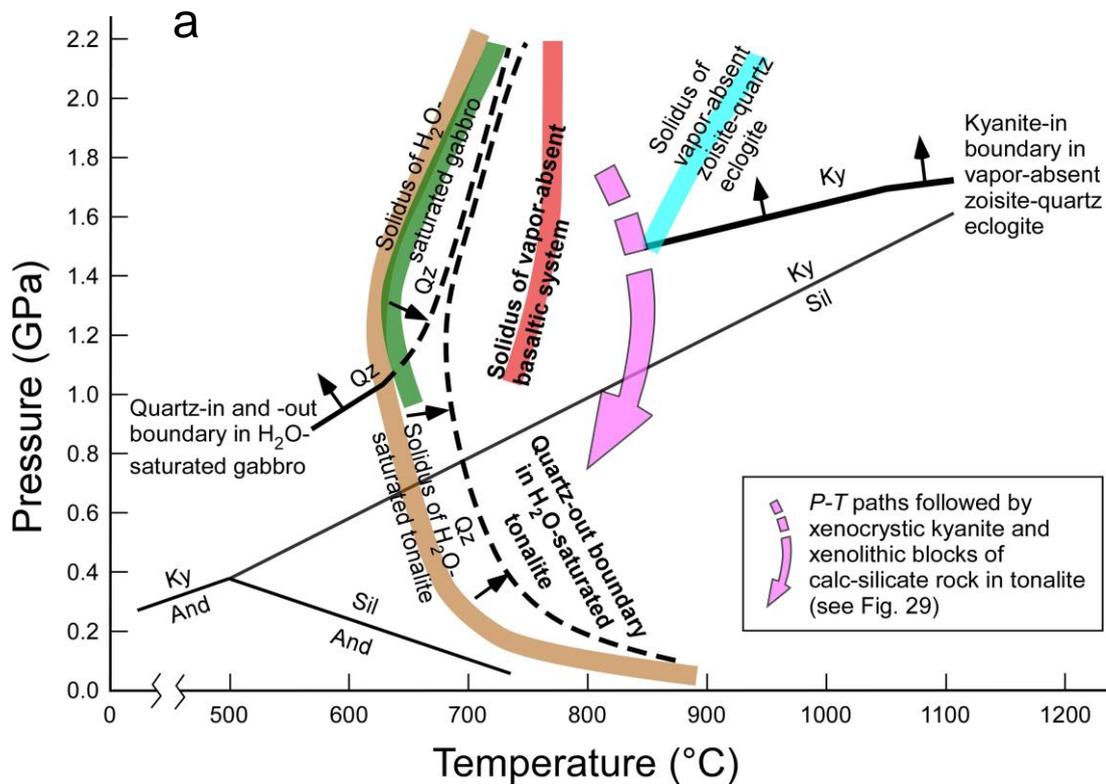


Fig. 34a. P-T diagram showing experimentally determined solidi, quartz-in and quartz-out boundaries in hydrous basaltic and tonalitic systems. ① solidus of H₂O-saturated tonalite (Lambert and Wyllie, 1974; Wyllie, 1977), ② solidus of H₂O-saturated gabbro (basaltic system) (Stern *et al.*, 1975; Wyllie, 1977), ③ quartz-in and quartz-out boundaries in H₂O-saturated gabbro (basaltic system) (Lambert and Wyllie, 1972; Wyllie, 1977), ④ quartz-out boundary in H₂O-saturated tonalitic system (Lambert and Wyllie, 1974; Wyllie, 1977), ⑤ solidus in vapor-absent epidote-bearing eclogite of MORB origin (Schmidt and Poli, 2004) (after Sun *et al.*, 2014), ⑥ solidus of vapor-absent zoisite-bearing quartz eclogite (basaltic system) (Skjerlie and Patiño Douce, 2002), ⑦ kyanite-in boundary in vapor-absent zoisite-bearing quartz eclogite (basaltic system) (Skjerlie and Patiño Douce, 2002).

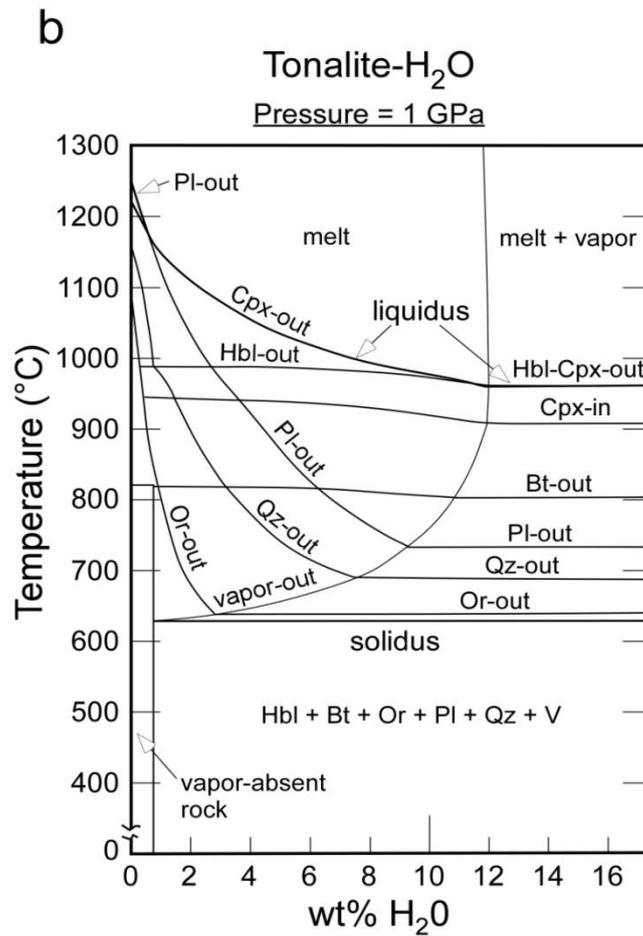


Fig. 34b. Schematic isobaric T-X_{H₂O} diagram for tonalite, showing the great effect of H₂O on the upper stability limits of individual minerals at 1GPa (Wyllie, 1977) (after Sun *et al.*, 2014).

Table 1. Representative EPMA analyses of minerals in andesitic dyke, tonalite and granulite samples.

Mineral rock type	plagioclase						
	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite	andesitic dyke
sample	YHM04121903B	YH04122302A	YH04122101A	YH04122301A	YH04122602	ST041225-3-1	YHM04121901B
wt%							
SiO ₂	58.65	59.22	60.63	61.55	58.98	59.68	58.52
TiO ₂	0.02	0.05	0.08	0.02	0.08	0	0.02
Al ₂ O ₃	24.13	24.13	24.58	22.85	24.36	25.27	25.78
FeO	0.14	0.1	0.02	0.05	0.17	0	0.01
MnO	0	0.05	0	0	0	0.04	0
MgO	0.06	0.18	0.15	0.19	0.13	0.19	0.15
CaO	7.11	6.14	6.79	5.24	6.68	7.12	7.89
Na ₂ O	7.61	7.95	8.43	8.86	7.84	7.76	7.2
K ₂ O	0.74	0.35	0.11	0.4	0.51	0.28	0.23
Total	98.46	98.17	100.79	99.16	98.75	100.34	99.8
O	8	8	8	8	8	8	8
Formula							
Si	2.68	2.69	2.69	2.76	2.67	2.66	2.63
Ti	0	0	0	0	0	0	0
Al	1.3	1.29	1.28	1.21	1.3	1.33	1.36
Fe	0.01	0	0	0	0.01	0	0
Mn	0	0	0	0	0	0	0
Mg	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ca	0.35	0.3	0.32	0.25	0.32	0.34	0.38
Na	0.67	0.7	0.72	0.77	0.69	0.67	0.63
K	0.04	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01
Total	5.05	5.01	5.03	5.02	5.03	5.03	5.02
An mol%	33.02	29.41	30.48	24.04	30.77	33.01	37.25

Mineral rock type	plagioclase							
	granulite	granulite	granulite	granulite	granulite	granulite	granulite	granulite
sample	YHM04121903A	YH04122003B	YH04122003C	YH04122006A	YH04122006B	YH04122006C	YH04122502C	YH04122502D
wt%								
SiO ₂	58	58.79	57.53	58.55	58.7	58.76	57.31	57.66
TiO ₂	0	0	0	0.06	0.04	0	0	0
Al ₂ O ₃	26.1	24.95	25.46	24.98	25.43	25.15	25.46	25.98
FeO	0.38	0.11	0.42	0.3	0.12	0.05	0.12	0.2
MnO	0	0.13	0	0.01	0.09	0	0.02	0
MgO	0.18	0.22	0.27	0.23	0.19	0.35	0.21	0.31
CaO	8.33	7.26	8.31	7.34	7.24	7.17	8.1	8.45
Na ₂ O	7.49	7.91	7.15	7.96	7.79	7.84	7.28	7.37
K ₂ O	0.24	0.19	0.27	0.12	0.24	0.09	0.28	0.03
Total	100.72	99.56	99.41	99.55	99.84	99.41	98.78	100
O	8	8	8	8	8	8	8	8
Formula								
Si	2.59	2.65	2.61	2.64	2.63	2.65	2.61	2.59
Ti	0.01	0	0	0	0	0	0	0
Al	1.37	1.32	1.36	1.33	1.34	1.34	1.36	1.38
Fe	0.01	0	0.02	0.01	0	0	0	0.01
Mn	0	0.01	0	0	0	0	0	0
Mg	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
Ca	0.4	0.35	0.4	0.35	0.35	0.35	0.39	0.41
Na	0.65	0.69	0.63	0.7	0.68	0.69	0.64	0.64
K	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0	0.02	0
Total	5.05	5.04	5.06	5.06	5.02	5.05	5.03	5.05
An mol%	37.74	33.33	38.10	33.02	33.65	33.65	37.14	39.05

Table 1. (continued 1)

rock type	orthopyroxene				
	tonalite	tonalite	granulite	granulite	granulite
sample	YHM04121903B	ST041225-3-1	YHM04121903A	YH04122003B	YH04122003C
wt%					
SiO ₂	51.63	51.59	53.72	52.18	53.59
TiO ₂	0.01	0.1	0.05	0.12	0.08
Al ₂ O ₃	0.89	1.19	1.1	1.08	1.37
FeO	24.54	26.24	20.17	22.29	19.53
MnO	1.02	1.15	0.82	0.65	0.6
MgO	19.3	18.98	23.44	22.12	24.77
CaO	0.49	0.42	0.28	0.4	0.36
Na ₂ O	0.98	0.89	1.01	0.9	0.94
K ₂ O	0	0	0	0	0
Total	98.86	100.56	100.59	99.74	101.24
O	6	6	6	6	6
Formula					
Si	1.98	1.97	1.98	1.96	1.96
Ti	0		0	0	0
Al	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06
Fe	0.78	0.84	0.62	0.7	0.6
Mn	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02
Mg	1.1	1.08	1.29	1.24	1.35
Ca	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
Na	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07
K	0	0	0	0	0
Total	4.04	4.07	4.05	4.06	4.07
Wo mol%	1.05	1.03	0.52	1.02	0.51
En	57.89	55.67	67.19	63.27	68.88
Fs	41.05	43.30	32.29	35.71	30.61
Xmg	0.59	0.56	0.68	0.64	0.69

Mineral	orthopyroxene				
	granulite	granulite	granulite	granulite	granulite
sample	YH04122006A	YH04122006B	YH04122006C	YH04122502C	YH04122502D
wt%					
SiO ₂	54.99	53.14	54.71	52.53	55.15
TiO ₂	0.02	0.11	0.1	0.11	0.07
Al ₂ O ₃	0.83	1.22	0.88	0.99	1.13
FeO	12.35	20.33	15.97	22.3	14.45
MnO	0.4	0.42	0.41	0.73	0.26
MgO	29.06	23.32	27.36	21.92	28.13
CaO	0.36	0.49	0.4	0.56	0.46
Na ₂ O	0.81	0.83	0.86	0.85	0.87
K ₂ O	0	0.07	0.06	0	0
Total	98.82	99.93	100.75	99.99	100.52
O	6	6	6	6	6
Formula					
Si	1.98	1.97	1.97	1.97	1.98
Ti	0	0	0	0	0
Al	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05
Fe	0.37	0.63	0.48	0.7	0.43
Mn	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Mg	1.56	1.29	1.47	1.23	1.5
Ca	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Na	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
K	0	0	0	0	0
Total	4.03	4.03	4.05	4.04	4.05
Wo mol%	0.52	1.03	1.02	1.03	1.03
En	80.41	66.49	74.62	63.08	76.92
Fs	19.07	32.47	24.37	35.90	22.05
Xmg	0.81	0.67	0.75	0.64	0.78

Table 1. (continued 2)

Mineral	clinopyroxene			
	tonalite	granulite	granulite	granulite
rock type	tonalite	granulite	granulite	granulite
sample	YHM04121903B	YH04122006A	YH04122006B	YH04122502C
wt%				
SiO ₂	51.39	53.6	53.28	52.13
TiO ₂	0.31	0.09	0.02	0.1
Al ₂ O ₃	1.87	1.42	1.76	2.11
FeO	9.02	4.1	6.9	6.88
MnO	0.46	0.15	0.17	0.29
MgO	12.91	15.96	14.05	13.69
CaO	21.36	22.84	22.5	22.8
Na ₂ O	1.03	1.08	1.11	1
K ₂ O	0.05	0	0.09	0
Total	98.4	99.24	99.88	99
O	6	6	6	6
Formula				
Si	1.96	1.98	1.98	1.96
Ti	0.01	0	0	0
Al	0.08	0.06	0.08	0.09
Fe	0.29	0.13	0.21	0.22
Mn	0.01	0	0.01	0.01
Mg	0.73	0.88	0.78	0.77
Ca	0.87	0.9	0.9	0.92
Na	0.08	0.08	0.08	0.07
K	0	0	0	0
Total	4.03	4.03	4.04	4.04
Xmg	0.72	0.87	0.79	0.78
Wo mol%	46.03	47.12	47.62	48.17
En	38.62	46.07	41.27	40.31
Fs	15.34	6.81	11.11	11.52

Mineral	magnetite				ilmenite	
	tonalite	tonalite	tonalite	andesitic dyke	tonalite	andesitic dyke
rock type	tonalite	tonalite	tonalite	andesitic dyke	tonalite	andesitic dyke
sample	YHM04121903B	YH04122101A	YH04122301A	YHM04121901B	YH04122302A	YHM04121901B
wt%						
SiO ₂	0.39	0.4	0.43	0.42	0.31	0.29
TiO ₂	0.09	0.12	0.12	0.14	47.92	53.27
Al ₂ O ₃	0.43	0.21	0.02	0.34	0.07	0.00
FeO	88.43	86.78	90.79	90.24	46.42	45.16
MnO	0.08	0.15	0.08	0.05	2.68	2.02
MgO	0.19	0.04	0.05	0.06	0.42	0.27
CaO	0.01	0	0.01	0	0.05	0.00
Na ₂ O	0.63	0.49	0.73	0.65	0.4	0.42
K ₂ O	0.04	0.05	0	0	0	0.00
Total	90.29	88.24	92.23	91.9	98.27	101.43
O	6	6	6	6	6	6
Formula						
Si	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01
Ti	0	0.01	0.01	0.01	1.89	1.99
Al	0.05	0.02	0	0.03	0	0
Fe	5.82	5.83	5.85	5.8	2.03	1.88
Mn	0	0.01	0.01	0.01	0.12	0.09
Mg	0.03	0.01	0.01	0	0.03	0.02
Ca	0	0	0	0.1	0	0
Na	0.09	0.08	0.11	0	0.04	0.04
K	0	0.01	0	0	0	0
Total	6.02	6	6.02	5.98	4.13	4.03

Table 1. (continued 3)

Mineral	biotite				
	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite
rock type	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite
sample	YHM04121903B	YH04122302A	YH04122101A	YH04122301A	YH04122602
wt%					
SiO ₂	35.79	35.84	36.73	35.99	35.49
TiO ₂	5.5	4.72	2.86	4.23	5.38
Al ₂ O ₃	14.18	14.34	15.84	15.68	14.2
FeO	15.82	16.92	16.07	17.96	17.24
MnO	0.13	0.05	0.37	0.08	0.11
MgO	12.72	12.23	13.47	10.49	11.52
CaO	0	0	0	0	0
Na ₂ O	0.74	0.68	0.77	0.7	0.65
K ₂ O	9.63	9.26	9.45	9.35	9.24
Total	94.51	94.04	95.56	94.48	93.83
O	22	22	22	22	22
Formula					
Si	5.47	5.51	5.53	5.54	5.49
Ti	0.63	0.55	0.32	0.49	0.62
Al	2.55	2.6	2.81	2.85	2.59
Fe	2.02	2.18	2.02	2.31	2.23
Mn	0.02	0.01	0.05	0	0.01
Mg	2.9	2.81	3.02	2.41	2.66
Ca	0	0	0	0	0
Na	0.22	0.2	0.23	0.21	0.19
K	1.88	1.82	1.81	1.84	1.82
Total	15.69	15.68	15.79	15.65	15.61
Xmg	0.59	0.56	0.60	0.51	0.54

Mineral	biotite				
	tonalite	andesitic dyke	granulite	granulite	granulite
rock type	tonalite	andesitic dyke	granulite	granulite	granulite
sample	ST041225-3-1	YHM04121901B	YH04122003B	YH04122003C	YH04122006B
wt%					
SiO ₂	36.31	36.15	36.8	37.57	37.7
TiO ₂	1.85	5.08	3.43	2.19	2.56
Al ₂ O ₃	15.77	14.74	14.28	15	15.11
FeO	17.19	17.23	13.99	10.98	10.88
MnO	0.14	0.03	0.03	0.13	0.07
MgO	13.49	12.14	15.83	17.36	17.42
CaO	0	0.01	0	0	0
Na ₂ O	0.71	0.62	0.72	0.93	0.73
K ₂ O	9.46	9.55	9.33	9.55	9.13
Total	94.92	95.55	94.41	93.71	93.6
O	22	22	22	22	22
Formula					
Si	5.53	5.49	5.56	5.62	5.63
Ti	0.21	0.58	0.39	0.25	0.29
Al	2.83	2.64	2.54	2.64	2.66
Fe	2.19	2.19	1.77	1.37	1.36
Mn	0.02	0	0	0.02	0.01
Mg	3.07	2.75	3.56	3.87	3.88
Ca	0	0	0	0	0
Na	0.21	0.18	0.21	0.27	0.21
K	1.84	1.85	1.8	1.82	1.74
Total	15.9	15.68	15.83	15.86	15.78
Xmg	0.58	0.56	0.67	0.74	0.74

Table 1. (continued 4)

Mineral	hornblend					
	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite	andesitic dyke	granulite
rock type	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite	andesitic dyke	granulite
sample	YHM04121903B	YH04122302A	YH04122101A	ST041225-3-1	YHM04121901B	YHM04121903A
wt%						
SiO ₂	43.14	43.12	43.97	43.56	43.32	45.07
TiO ₂	1.64	1.87	0.97	0.86	1.42	0.69
Al ₂ O ₃	10.69	10.51	11.07	10.96	11.1	10.43
FeO	14.3	15.34	16.89	15.52	16.56	11.06
MnO	0.22	0.36	0.34	0.38	0.2	0.07
MgO	11.45	11.04	10.4	11.12	10.84	14.47
CaO	11.78	11.6	11.65	11.25	12.06	11.76
Na ₂ O	1.65	1.95	1.7	1.87	1.67	2.32
K ₂ O	1.31	1.2	0.65	0.98	1.11	1.05
Total	96.18	96.99	97.64	96.5	98.28	96.92
O	23	23	23	23	23	23
Formula						
Si	6.54	6.52	6.61	6.59	6.47	6.64
Ti	0.19	0.21	0.11	0.1	0.16	0.08
Al	1.91	1.87	1.96	1.95	1.95	1.81
Fe	1.81	1.94	2.12	1.96	2.07	1.36
Mn	0.03	0.05	0.04	0.05	0.03	0.01
Mg	2.59	2.49	2.33	2.51	2.41	3.18
Ca	1.91	1.88	1.88	1.82	1.93	1.86
Na	0.48	0.57	0.49	0.55	0.48	0.66
K	0.25	0.23	0.13	0.19	0.21	0.2
Total	15.71	15.76	15.67	15.72	15.71	15.8
Xmg	0.59	0.56	0.52	0.56	0.54	0.70

Mineral	hornblend						
	granulite						
rock type	granulite						
sample	YH04122003B	YH04122003C	YH04122006A	YH04122006B	YH04122006C	YH04122502C	YH04122502D
wt%							
SiO ₂	43.95	44.43	49.5	46.24	48.85	46.28	47.01
TiO ₂	1.65	1.07	0.49	1.33	0.9	0.77	0.8
Al ₂ O ₃	10.67	10.41	7.24	8.97	8.71	8.88	9.89
FeO	12.46	11.34	5.28	10.71	7.2	11.39	7.57
MnO	0.25	0.14	0.1	0.15	0.13	0.17	0.11
MgO	13.04	14.2	18.19	14.94	16.89	14.3	16.62
CaO	11.47	11.68	12.03	11.35	11.67	11.39	11.81
Na ₂ O	2.12	2.12	1.71	1.89	1.98	1.81	2.32
K ₂ O	0.99	1.08	0.56	0.78	0.53	0.84	0.54
Total	96.6	96.47	95.1	96.36	96.86	95.83	96.67
O	23	23	23	23	23	23	23
Formula							
Si	6.55	6.59	7.16	6.82	7	6.88	6.8
Ti	0.19	0.12	0.05	0.15	0.1	0.09	0.09
Al	1.88	1.82	1.24	1.56	1.47	1.56	1.69
Fe	1.55	1.41	0.64	1.32	0.86	1.41	0.92
Mn	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
Mg	2.9	3.14	3.92	3.28	3.61	3.17	3.59
Ca	1.83	1.86	1.86	1.79	1.79	1.81	1.83
Na	0.61	0.61	0.48	0.54	0.55	0.52	0.65
K	0.19	0.2	0.1	0.15	0.1	0.84	0.1
Total	15.73	15.77	15.46	15.63	15.5	16.3	15.68
Xmg	0.65	0.69	0.86	0.71	0.81	0.69	0.80

Table 2. Representative EPMA analyses of garnet in tonalite sample (YHM04121903B-2).

Mineral rock type	garnet								
	tonalite (YHM04121903B-2)								
	R (F-42)	R (F-43)	R (F-44)	C (F-45)	C (F-46)	C (F-47)	R (F-48)	R (F-49)	R (F-50)
wt%									
SiO ₂	38.89	38.83	38.87	38.68	39.04	38.65	39.07	38.55	38.55
TiO ₂	0.1	0.12	0.07	0.05	0.07	0.04	0.14	0.06	0.02
Al ₂ O ₃	21.49	21.3	21.29	21.41	21.24	21.3	21.16	21.11	21.64
FeO	21.55	22.02	24.62	25.01	25.97	25.05	24.73	23.69	21.6
MnO	8.6	6.54	4.61	4.29	4.23	4.26	4.42	5.06	7.79
MgO	5.21	5.52	5.29	4.87	4.79	4.92	4.94	5.1	5.67
CaO	6.26	6.83	6.92	6.88	6.61	6.81	6.72	6.92	6.3
Na ₂ O	0.03	0	0.02	0	0.01	0.03	0	0.02	0
K ₂ O	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0	0
Total	102.13	101.16	101.69	101.19	101.97	101.07	101.19	100.51	101.57
O	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Si	2.997	3.006	3.004	3.004	3.017	3.006	3.03	3.011	2.98
Ti	0.006	0.007	0.004	0.003	0.004	0.002	0.008	0.004	0.001
Al	1.951	1.943	1.939	1.959	1.934	1.952	1.934	1.943	1.971
Fe	1.388	1.425	1.591	1.624	1.678	1.629	1.604	1.547	1.396
Mn	0.561	0.429	0.302	0.282	0.277	0.281	0.29	0.335	0.51
Mg	0.598	0.637	0.609	0.564	0.552	0.571	0.571	0.594	0.653
Ca	0.517	0.566	0.573	0.572	0.547	0.567	0.558	0.579	0.522
Na	0.004	0	0.003	0	0.001	0.005	0	0.003	0
K	0	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0	0
Total	8.022	8.013	8.025	8.008	8.011	8.014	7.996	8.016	8.033
Xmg	0.20	0.21	0.20	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.21
Alm	45.30	46.61	51.74	53.39	54.94	53.44	53.06	50.64	45.31
Sps	18.31	14.03	9.82	9.27	9.07	9.22	9.59	10.97	16.55
Prp	19.52	20.84	19.80	18.54	18.07	18.73	18.89	19.44	21.19
Grs	16.87	18.51	18.63	18.80	17.91	18.60	18.46	18.95	16.94

R: rim of garnet, C: core of garnet, Alm: almandine, Sps: spessartine, Prp: pyrope, Grs: grossular.

Table 3. P-T estimates of the representative tonalite and granulite samples from Cape Hinode using geobarometre and geotherometre

tonalite sample No.	geotherometre	methods	T (°C)	tonalite sample No.	geobarometre	methods	P (kbar)
YHM04121903B	P=6kbar	Blundy and Holland, 1990	839	YHM04121903B		Hammarstorm and Zen, 1986	5.57
	P=5kbar		840			Hollister et al.,1987	5.87
YH04122101A	P=7kbar		809			Johnson and Rutherford, 1988	4.53
	P=6kbar		811			Hammarstorm and Zen, 1986	5.89
YH04122302A	P=6kbar	Blundy and Holland, 1990	830	YH04122101A	Hbl	Hollister et al.,1987	6.24
	P=5kbar		832			Johnson and Rutherford, 1988	4.81
						Hammarstorm and Zen, 1986	5.59
					YH04122302A		Hollister et al.,1987
						Johnson and Rutherford, 1988	4.55
granulite sample No.	geotherometre	methods	T (°C)	granulite sample No.	geobarometre	methods	P (kbar)
YH04122006A	Cpx-Opx	Wood and Banno, 1973	814	YH04122006A	Cpx-Pl	McCarthy and Patiño Douce, 1998	5.16
YH04122006B			677	YH04122006B			5.41
YH04122502C			672	YH04122502C			7.02

Table 4. The modal mineral (%) of granulites

Sample No.	Pl	Qz	Bt	Hbl	Opx	Cpx	Opa	Cal	Ap	Zrn	Spn
YHM04121903A	7.3		2.6	68.3	14.2	7.3	0.1		×	×	
YH04122003B	22.7	10.2	×	6.2	60.6		×		×	×	
YH04122003C	9.2		×	6.6	50.7	22.7	10.6		×	×	
YH04122006A	4.6	0.5	3.1	35.6	27.8	28.2	0.1		○	○	
YH04122006B	13.7	7.4	2.8	43.2	26.8	5.8	0.2		○	○	
YH04122006C	13.4		3.4	49.5	22.7	10.8	0.1		○	△	
YH04122006D	19.1	2.3	6.1	55.6	7.7	8.8	0.3		○	○	
YH04122501A2	39.1	5.4	52.9		0.6		1	0.6	‡	‡	‡
YH04122502B		17.9	22	18.8	39.4		1.6		×	‡	
YH04122502C	21	7.4	1.5	56.2	9.9	2.9	1		×	○	
YH04122502D	9.4		8.3	55.2	26.4		0.5		×	△	

‡: rich in trace amount; △: moderate in trace amount; ×: minor in trace amount; ○: present only

Table 5. Representative EPMA analyses of minerals in sample YH04122201A

Rock type	plagioclase				clinopyroxene		garnet	epidote	kyanite	corundum	spinel	magnetite	titanite
	calc-sil (1)*	calc-sil (2)*	tonalite vein	tonalite (corona)	calc-sil (1)*	tonalite vein	calc-sil (2)*	calc-sil (2)*	tonalite (corona)	tonalite (corona)	tonalite (corona)	tonalite vein	tonalite vein
SiO ₂	48.58	45.17	58.23	43.52	49.07	48.85	36.96	38.39	37.16	0.10	0.12	0.05	30.58
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.02	0.29	0.22	0.56	0.07	0.05	0.01	0.11	0.33	37.68
Al ₂ O ₃	33.24	36.13	26.81	36.42	2.83	3.46	10.87	25.17	63.19	101.19	55.86	0.51	1.43
Cr ₂ O ₃	0.15	0.00	0.08	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.13	0.04	0.00	0.00	0.00
FeO**	0.39	0.30	0.17	0.16	18.54	15.78	21.21	9.76	0.28	0.37	40.92	94.61	1.34
ZnO	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	0.00	0.00
MnO	0.06	0.01	0.00	0.00	0.78	0.61	0.56	0.30	0.17	0.00	0.28	0.19	0.12
MgO	0.01	0.00	0.00	0.00	6.85	7.88	0.20	0.03	0.00	0.00	2.34	0.01	0.01
CaO	16.59	19.12	8.81	20.16	22.90	22.80	28.65	23.36	0.01	0.13	0.24	0.05	28.94
Na ₂ O	2.40	0.81	6.73	0.21	0.56	0.68	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.05	0.02	0.37	0.02	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	101.47	101.56	101.20	100.58	101.83	100.35	99.01	97.15	100.99	101.84	100.48	95.75	100.10
O	8	8	8	8	6	6	12	25	5	3	4	4	5
Si	2.200	2.055	2.584	2.007	1.876	1.872	2.975	6.040	0.995	0.001	0.003	0.002	1.002
Ti	0.000	0.000	0.000	0.001	0.008	0.006	0.034	0.008	0.001	0.000	0.002	0.009	0.929
Al	1.774	1.937	1.402	1.980	0.128	0.156	1.031	4.666	1.994	1.992	1.887	0.022	0.055
Cr	0.005	0.003	0.003	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
Fe ³⁺ ***				0.000	0.144	0.138	0.950	1.257	0.006	0.005	0.102	1.955	0.000
Fe ²⁺ ***	0.015	0.011	0.006	0.006	0.448	0.367	0.477	0.027			0.879	1.003	0.036
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000
Mn	0.002	0.000	0.000	0.003	0.025	0.020	0.038	0.040	0.004	0.000	0.007	0.006	0.003
Mg	0.001	0.000	0.000	0.000	0.390	0.450	0.024	0.007	0.000	0.000	0.100	0.001	0.000
Ca	0.805	0.932	0.419	0.996	0.938	0.936	2.470	3.936	0.000	0.002	0.007	0.002	1.016
Na	0.211	0.071	0.579	0.019	0.041	0.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.003	0.001	0.021	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	5.016	5.010	5.014	5.013	3.998	3.998	7.999	15.981	3.003	2.001	3.000	3.000	3.041
X _{Mg}					46.5	55.1	4.8				10.2	0.1	
X _{An}	79.0	92.8	41.1	98.0									

* calc-silicate rock (1) = clinopyroxene + plagioclase part; calc-silicate rock (2) = Ca-garnet + plagioclase part

** total iron as FeO

*** calculated assuming stoichiometry for clinopyroxene, garnet, epidote, spinel, and magnetite

$X_{Mg} = 100 \times Mg / (Mg + Fe^{2+})$; $X_{An} = 100 \times Ca / (Ca + Na + K)$ data source: Sun *et al.* (2014).

Table 6. Bulk chemical compositions and element analysis of andesitic dyke, tonalites and granulites from Cape Hinode

	1	1	2	3	4	5	6	7	8
type	andesitic dyke	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite
Sp.No	YHM041 21901B	YH0412 1802B	YHM041 21901C	YHM041 21902A	YHM041 21902B	YHM041 21902C	YHM041 21903B	YH0412 2003A	YH0412 2003D
XRF (wt%)									
SiO ₂	59.12	73.98	72.23	62.07	73.46	64.21	61.19	78.27	62.86
TiO ₂	0.97	0.6	0.01	0.4	0.14	0.64	0.48	0.06	0.49
Al ₂ O ₃	17.04	13.21	16.16	18.14	14.94	17.32	18.5	12.78	18.77
Fe ₂ O ₃	8.19	3.33	0.5	4.97	1.36	4.87	4.7	0.96	3.76
MnO	0.08	0.03	0.01	0.08	0.02	0.06	0.09	0.01	0.06
MgO	2.52	1.21	0.12	1.81	0.46	1.37	1.88	0.3	1.42
CaO	5.78	3.16	4.48	5.76	3.99	5.23	6.57	3.23	5.79
Na ₂ O	3.58	2.85	4.38	4.46	3.76	4.38	4.95	3.22	4.64
K ₂ O	1.31	1.33	0.38	0.79	0.78	0.91	0.69	0.54	0.73
P ₂ O ₅	0.18	0.02	0.01	0.07	0.02	0.19	0.12	0.02	0.08
LOI	0.4	0.51	1.01	0.7	0.8	0.5	0.69	0.58	0.67
Total	99.18	100.23	99.3	99.24	99.73	99.68	99.86	99.97	99.27
XRF (ppm)									
Ba	924.5	580	201.9	327.6	374.9	409	247	271.8	408
Cr	18.2	2.4	0.7	11.5	3	7.6	15	4.7	7.2
Ni	8.9	10.4	5.5	7.4	5.3	1.9	5.2	6	7.7
Rb	30.2	35.8	8.8	12.1	17.8	13	2.6	7.6	9.5
Sr	527	339.7	584.1	684.9	544	448	765	609.6	901.5
V	186.8	74.0	3.0	64.6	15.7	105	86	14.4	57.8
Zn	101.7	41.5	1.4	48	12.69	60	55	5.9	37.3
Zr	355.9	15.6	38.6	111.5	37	323	104	37.3	99.9
Y	46.1	3.0	<1	8.1	<1	11	8.4	<1	1.52
Nb	7.82	8.58	4.3	4.4	5.25	5.3	3.4	2.1	5.9
ASI	0.96	1.11	1.03	0.97	1.05	0.98	0.89	1.09	0.99
Na ₂ O/K ₂ O	2.73	2.14	11.53	5.65	4.82	4.81	7.17	5.96	6.36
Mg#	37.9	41.9	32.9	42	39.8	35.8	44.2	38.4	42.7
ICP-MS (ppm)									
Sc	26.91					7.78	11.88	2.08	
Co	19.07					8.40	10.90	1.32	
Ga	24.57					19.05	18.96	11.10	
Ge	1.11					0.99	0.80	0.14	
Cs	0.11					0.06	0.03	0.03	
La	14.77					12.21	6.90	1.31	
Ce	37.93					24.91	15.48	2.16	
Pr	5.87					3.15	2.08	0.22	
Nd	28.74					12.90	9.04	0.79	
Sm	8.69					2.75	2.21	0.11	
Eu	1.11					0.98	0.68	0.18	
Gd	9.22					2.81	1.98	0.09	
Tb	1.44					0.36	0.28	0.02	
Dy	8.39					1.98	1.57	0.12	
Ho	1.57					0.40	0.28	0.03	
Er	4.75					1.18	0.75	0.06	
Tm	0.54					0.14	0.09	0.01	
Yb	3.13					1.09	0.59	0.03	
Lu	0.50					0.19	0.08	0.00	
Hf	8.42					5.97	1.56	0.51	
Ta	0.16					0.23	0.06	0.00	
Pb	4.52					5.78	3.15	2.41	
Th	0.28					0.90	0.20	0.03	
U	0.23					0.31	0.05	0.10	

Table 6. (continued 1)

	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
type	tonalite	tonalite	tonalite	tonalite						
Sp.No	YH0412 2101A	YH0412 2101B	YH0412 2301A	YH0412 2301B	YH0412 2302A	YH0412 2302B	YH0412 2502A	YH0412 2602	HND-4	ST0412 25-3-1
XRF (wt%)										
SiO ₂	67.32	73.83	70.68	70.07	63.28	65.51	61.05	73.72	61.18	55.8
TiO ₂	0.30	0.31	0.19	0.30	0.43	0.30	0.39	0.16	0.46	0.13
Al ₂ O ₃	17.09	14.49	15.33	16.02	18.41	17.76	19.36	14.84	19.58	19.58
Fe ₂ O ₃	2.66	1.46	1.72	2.38	3.92	2.99	3.51	1.33	3.89	5.38
MnO	0.05	0.03	0.05	0.02	0.07	0.05	0.04	0.02	0.06	0.17
MgO	0.96	0.11	0.54	0.67	1.47	1.13	1.99	0.51	1.54	2.82
CaO	4.79	3.77	3.37	3.61	5.81	5.60	5.58	3.54	6.37	6.51
Na ₂ O	4.66	3.67	4.80	4.23	5.20	5.01	4.94	3.89	5.27	5.08
K ₂ O	0.42	0.63	0.99	1.26	0.72	0.71	1.31	0.93	0.82	0.91
P ₂ O ₅	0.06	0.01	0.04	0.05	0.12	0.11	0.09	0.01	0.14	0.43
LOI	0.72	0.64	0.49	0.66	0.70	0.58	0.70	0.67	0.56	0.74
Total	99.02	98.94	98.20	99.26	100.13	99.75	98.96	99.62	99.87	97.55
XRF (ppm)										
Ba	256.8	161.1	534	871.3	382	344	733	453.8	343	440
Cr	5.1	3.1	<1	4.2	2.7	6.4	67	1.2	13	89
Ni	7	6.1	5.3	6.8	4.2	4.3	14	5.7	5.7	25
Rb	8.3	10.3	16	23.38	5.1	3.6	30	16.05	4.3	12
Sr	734.2	695.1	648	634.7	855	813	622	508.4	889	666
V	40.2	35.7	18	34.2	71	51	45.0	19.3	66.0	31.0
Zn	30.8	4.5	30	31.1	51	36	54.0	14.3	46.0	103.0
Zr	88.6	71.5	92	30.2	121	97	98	24.1	102	75
Y	<1	<1	2.7	0.4	7.9	8.6	16	<1	9	21
Nb	3.4	2.0	1.4	5.75	3.5	3.2	4.5	4.51	3.5	3.3
ASI	1.02	1.07	1.02	1.08	0.93	0.93	0.98	1.07	0.93	0.92
Na ₂ O/K ₂ O	11.06	5.87	4.85	3.35	7.22	7.06	3.77	4.18	6.43	5.58
Mg#	41.7	13.4	38.3	35.7	42.6	42.8	52.9	43.4	43.9	50.9
ICP-MS (ppm)										
Sc				2.67				2.73		
Co				4.06				2.44		
Ga				16.92				14.87		
Ge				0.76				0.25		
Cs				0.10				0.05		
La				8.67				4.25		
Ce				13.91				6.91		
Pr				1.43				0.71		
Nd				5.30				2.36		
Sm				0.92				0.29		
Eu				0.53				0.48		
Gd				0.87				0.16		
Tb				0.09				0.02		
Dy				0.48				0.10		
Ho				0.10				0.02		
Er				0.26				0.06		
Tm				0.03				0.01		
Yb				0.14				0.09		
Lu				0.03				0.01		
Hf				1.19				0.60		
Ta				0.04				0.02		
Pb				5.70				4.86		
Th				0.19				0.19		
U				0.09				0.03		

Table 6. (continued 2)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
type	granulite										
Sp.No.	YHM041	YH0412									
	21903A	2003B	2003C	2006A	2006B	2006C	2006D	2501A2	2502B	2502C	2502D
XRF (wt%)											
SiO ₂	45.91	46.77	47.44	51.55	50.12	54.55	48.89	44.00	55.09	50.30	46.85
TiO ₂	0.69	0.68	0.71	0.23	0.32	0.26	0.53	2.37	0.62	0.67	0.70
Al ₂ O ₃	10.30	9.46	9.65	5.35	4.54	9.27	8.01	17.63	5.95	11.56	9.59
Fe ₂ O ₃	13.02	15.34	14.69	8.49	11.38	9.68	13.35	13.55	17.90	11.00	13.93
MnO	0.35	0.38	0.35	0.30	0.41	0.27	0.33	0.09	0.80	0.29	0.34
MgO	17.24	17.97	18.27	22.97	23.01	17.33	18.93	6.39	15.33	13.53	17.15
CaO	11.32	7.73	7.35	10.59	10.76	6.37	7.90	3.50	3.50	9.97	9.50
Na ₂ O	1.35	1.22	1.16	0.81	0.58	1.85	1.22	2.32	0.38	1.87	1.27
K ₂ O	0.93	1.09	1.36	0.47	0.45	0.54	0.74	5.40	1.70	0.70	1.32
P ₂ O ₅	0.06	0.05	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.19	0.04	0.03	0.03
Total	101.17	100.7	101.04	100.76	101.57	100.11	99.9	95.44	101.3	99.92	100.67
norm											
Qz									4.15		
Pl	23.61	27.67	27.04	16.43	13.27	31.35	24.85	23.8	12.81	37.37	26.43
Or	5.5	6.5	8.1	2.78	2.66	3.19	4.43	33.92	10.05	4.14	7.86
Nph	3.86							7.67			0.59
Crn								2.2			
Di	29.53	17.1	15.52	34.2	35.75	13.06	20.38		6.21	23.05	24.81
Hyp		8.39	10.5	23.39	19.06	47.82	20.99		65.51	16.43	
Ol	36.03	38.92	37.39	22.76	28.63	4.07	28.31	27.16		17.64	38.92
Ilm	1.31	1.31	1.35	0.44	0.61	0.49	1.01	4.79	1.2	1.29	1.33
Ap	0.14	0.12	0.12	0.02	0.02	0.02	0.02	0.46	0.09	0.07	0.07

Table 6. (continued 3)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
type	granulite	granulite	granulite	granulite	granulite	granulite	granulite	granulite	granulite	granulite	granulite
Sp.No.	YHM041 21903A	YH0412 2003B	YH0412 2003C	YH0412 2006A	YH0412 2006B	YH0412 2006C	YH0412 2006D	YH0412 2501A2	YH0412 2502B	YH0412 2502C	YH0412 2502D
XRF (ppm)											
Ba	73	346	549.2	125.9	107.4	248.8	205.4	5511.7	721.1	208.7	297.2
Cr	1126.3	1602.1	1655.9	1746	1680	1406.7	1843.1	12.9	662.3	903.9	1413.8
Ni	179.8	546.5	594.2	750.9	761.9	692.2	937.3	16.7	55.2	197.3	429.2
Rb	12.01	32.0	53.0	21.2	18.3	21.4	20.5	202.6	50.7	11.8	40.9
Sr	29.4	85.7	83.5	45.3	26	171.3	107.2	457.4	16.8	150.5	73.5
V	207.6	174.6	172.5	71.4	77.8	89.7	144.7	284.7	66.6	187.2	154.6
Zn	157.7	191.8	186	125	161	148	180	269	283	115	159
Zr	83	78.2	76.6	41.0	50.6	84.5	53.4	276.7	235.1	53.6	90.5
Y	10.5	19.2	17.2	6.7	11.2	8.4	16.0	49.3	83.9	20.8	99.3
Nb	2.1	5.9	4.9	3.2	2.4	6.4	7.2	16.3	6.8	5.4	9.8
ICP-MS (ppm)											
Sc	35.69		28.59			11.58				43.03	
Co	60.95		61.01			50.01				53.82	
Ga	17.00		14.85			15.08				16.96	
Ge	1.93		1.75			1.74				1.78	
Cs	0.01		0.20			0.08				0.02	
La	4.22		4.55			5.35				7.14	
Ce	12.47		13.75			12.19				22.95	
Pr	1.85		2.11			1.73				3.90	
Nd	8.54		9.45			7.22				19.19	
Sm	2.16		2.40			1.68				4.53	
Eu	1.04		0.67			0.52				1.09	
Gd	2.57		2.62			1.76				4.84	
Tb	0.38		0.41			0.29				0.71	
Dy	2.43		2.71			1.74				4.37	
Ho	0.52		0.53			0.37				0.89	
Er	1.55		1.58			0.99				2.47	
Tm	0.21		0.21			0.15				0.37	
Yb	1.47		1.49			1.12				2.86	
Lu	0.24		0.24			0.19				0.43	
Hf	1.28		1.38			1.16				1.04	
Ta	0.12		0.26			0.16				0.12	
Pb	0.73		0.85			2.18				1.90	
Th	0.23		0.50			0.93				0.47	
U	0.05		0.13			0.13				0.10	

*Total iron given as Fe₂O₃. LOI is loss on ignition. Total iron of norm calculated as FeO

ASI = mol Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O). Mg# = mol 100 × MgO/(MgO+FeO) (total Fe).

Table 7. Bulk rock compositions of tonalites and calc-silicate rock

Rock type	tonalite (thin vein in calc- silicate)	tonalite	tonalite	tonalite	calc-silicate (An-Grt symplectite)
Sample	YH0412 2201A	73123103	74010107	YH0412 2102	74010112 (74010204)
wt% SiO ₂	59.84	64.17	63.26	63.66	38.78
TiO ₂	0.18	0.41	0.46	0.56	0.26
Al ₂ O ₃	18.63	19.34	16.12	17.58	24.44
Fe ₂ O ₃ *	4.88	3.12	4.51	4.83	13.28
MnO	0.10	0.05	0.07	0.07	0.22
MgO	1.06	1.22	2.23	2.90	0.51
CaO	9.91	5.51	5.49	6.00	22.10
Na ₂ O	3.98	5.28	4.04	4.38	0.29
K ₂ O	0.35	0.60	1.08	1.26	0.06
P ₂ O ₅	0.03	0.15	0.12	0.14	0.11
LOI	0.53	0.61	0.73		0.79
Total	99.49	100.46	98.11	101.39	100.84
ppm Ba	57		556	568	
Cr	1.3		59.4	41	
Nb	3.1			3	
Ni			29	21	
Rb	1.1		25.2	25	
Sr	348		653	650	
V	35		64	99	
Y	33		9	11	
Zn	15		50	62	
Zr	96		96	151	
ASI	0.75	1.00	0.91	0.90	
Mg#	30.10	43.60	49.50	54.30	

* total iron as Fe₂O₃ASI = mol Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)

Mg# = mol 100 × MgO/(MgO+FeO*)

Sample YH04122201A (thin tonalite vein; this study); sample 73123103 (tonalite; Kanisawa *et al.*, 1979); sample 74010107 (tonalite; Ikeda *et al.*, 1997); sample YH04122102 (tonalite; Hiroi *et al.*, 2008); and sample 74010112 (calc-silicate rock; Kanisawa *et al.*, 1979), data sourcer: Sun *et al.* (2014).

Table 8. Isotope analysis result of representative rocks from Cape Hinode

Sample No.		Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Nd (ppm)
YHM04121901B	andesitic dyke	30.16	527.00	0.166	0.705441	0.000014	0.703090	28.74
YHM04121903B	tonalite	2.6	765.00	0.010	0.703060	0.000014	0.702921	9.04
YHM04121902C	tonalite	13	448.00	0.084	0.704109	0.000014	0.702917	12.90
YH04122301B	tonalite	23.38	634.70	0.107	0.704248	0.000013	0.702735	5.30
YH04122602	tonalite	16.05	508.40	0.091	0.703930	0.000014	0.702633	2.36
YH04122003A	tonalite	7.61	609.60	0.036	0.703120	0.000014	0.702607	0.79
YHM04121903A	granulite	12.01	29.40	1.182	0.708755	0.000014	0.691969	8.54
YH04122003C	granulite	53.02	83.50	0.417	0.724005	0.000014	0.718085	9.45
YH04122502C	granulite	11.78	150.50	1.019	0.703801	0.000014	0.689332	19.19
YH04122006C	granulite	21.44	171.30	0.199	0.706478	0.000014	0.703652	7.22
Sample No.		Sm (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon\text{Nd (t)}$	$T_{(\text{DM})}$ Ga
YHM04121901B	andesitic dyke	8.69	0.183	0.512597	0.000014	0.511402	1.0	2.72
YHM04121903B	tonalite	2.21	0.148	0.512483	0.000014	0.511514	3.2	1.55
YHM04121902C	tonalite	2.76	0.129	0.512361	0.000014	0.511516	3.2	1.42
YH04122301B	tonalite	0.92	0.105	0.512169	0.000013	0.511481	2.5	1.38
YH04122602	tonalite	0.29	0.074	0.512103	0.000012	0.511621	5.3	1.14
YH04122003A	tonalite	0.11	0.084	0.512208	0.000010	0.511656	5.9	1.11
YHM04121903A	granulite	2.16	0.153	0.512512	0.000010	0.511513	3.1	1.59
YH04122003C	granulite	2.40	0.154	0.512462	0.000014	0.511456	2.0	1.75
YH04122502C	granulite	4.54	0.143	0.512469	0.000014	0.511534	3.6	1.47
YH04122006C	granulite	1.68	0.141	0.512468	0.000014	0.511546	3.8	1.43

Table 9. Result of mass balance calculation with GENMIX using major element for tonalites from Cape Hinode

ST041225-3-1→YHM04121903B stage1						
	initial magma	final magma	fractionated minerals			
	ST041225-3-1	YHM04121903B	Pl	Hbl	Opx	Bt
SiO ₂ wt%	55.8	61.19	59.68	43.56	51.59	36.31
TiO ₂	0.13	0.48	0	0.86	0.1	1.85
Al ₂ O ₃	19.58	18.5	25.27	10.96	1.19	15.77
FeO	4.84	4.23	0	15.52	26.24	17.19
MnO	0.17	0.09	0.04	0.38	1.15	0.14
MgO	2.82	1.88	0.19	11.12	18.98	13.49
CaO	6.51	6.57	7.12	11.25	0.42	
Na ₂ O	5.08	4.95	7.76	1.87	0.89	0.71
K ₂ O	0.91	0.69	0.28	0.98		9.46
P ₂ O ₅	0.43	0.12	0	0	0	0
Total	96.27	98.7	100.34	96.5	100.56	94.92
proportions		0.4408	0.3951	0.0894	0.0188	0.0559
Degree of crystallization	0.5592					
fractionated proportions			70.65	15.99	3.36	10.00
residual sum of squares	0.3864					
YHM04121903B→YH04122302A stage2						
	initial magma	final magma	fractionated minerals			
	YHM04121903B	YH04122302A	Pl	Hbl	Cpx	Mag
SiO ₂ wt%	61.19	63.28	58.65	43.14	51.39	0.39
TiO ₂	0.48	0.43	0.02	1.64	0.31	0.09
Al ₂ O ₃	18.5	18.41	24.13	10.69	1.87	0.43
FeO	4.23	3.53	0.14	14.3	9.02	88.43
MnO	0.09	0.07	0	0.22	0.46	0.08
MgO	1.88	1.47	0.06	11.45	12.91	0.19
CaO	6.57	5.81	7.11	11.78	21.36	0.01
Na ₂ O	4.95	5.2	7.61	1.65	1.03	0.63
K ₂ O	0.69	0.72	0.74	1.31	0.05	0.04
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0	0	0	0
Total	98.7	99.04	98.46	96.18	98.4	90.29
proportions		0.8098	0.1231	0.0462	0.0157	0.0053
Degree of crystallization	0.1902					
fractionated proportions			64.72	24.29	8.25	2.79
residual sum of squares	0.1221					
YH04122302A→YH04122302B stage3						
	initial magma	final magma	fractionated minerals			
	YH04122302A	YH04122302B	Pl	Hbl	Ilm	Bt
SiO ₂ wt%	63.28	65.51	59.22	43.12	0.31	35.84
TiO ₂	0.43	0.3	0.05	1.87	47.92	4.72
Al ₂ O ₃	18.41	17.76	24.13	10.51	0.07	14.34
FeO	3.53	2.69	0.1	15.34	46.42	16.92
MnO	0.07	0.05	0.05	0.36	2.68	0.05
MgO	1.47	1.13	0.18	11.04	0.42	12.23
CaO	5.81	5.6	6.14	11.6	0.05	0
Na ₂ O	5.2	5.01	7.95	1.95	0.4	0.68
K ₂ O	0.72	0.71	0.35	1.2	0	9.26
P ₂ O ₅	0.12	0.11	0	0	0	0
Total	99.04	98.87	98.17	96.99	98.27	94.04
proportions		0.8013	0.1382	0.0425	0.0039	0.0141
Degree of crystallization	0.1987					
fractionated proportions			69.55	21.39	1.96	7.10
residual sum of squares	0.1365					

Table 9. (continued)

YH04122302B→YH04122301B stage4						
	initial magma	final magma	fractionated minerals			
	YH04122302B	YH04122301B	Hbl	Pl		
SiO ₂ wt%	65.51	70.07	42.98	59.54		
TiO ₂	0.3	0.3	1.57	0.03		
Al ₂ O ₃	17.76	16.02	10.51	24.97		
FeO	2.69	2.14	15.89	0.23		
MnO	0.05	0.02	0.26	0		
MgO	1.13	0.67	10.69	0.16		
CaO	5.6	3.61	11.8	6.8		
Na ₂ O	5.01	4.23	1.79	7.92		
K ₂ O	0.71	1.26	1.3	0.5		
P ₂ O ₅	0.11	0.05	0	0		
Total	98.87	98.37	96.79	100.15		
proportions		0.667	0.0762	0.2568		
Degree of crystallization	0.333					
fractionated proportions			22.88	77.12		
residual sum of squares	0.5035					
YH04122301B→YH04122602 stage5						
	initial magma	final magma	fractionated minerals			
	YH04122301B	YH04122602	Bt	Pl	Kfs	Mag
SiO ₂ wt%	70.07	73.721	36.19	61.11	63.36	0.32
TiO ₂	0.3	0.16	4.4	0	0.75	4.89
Al ₂ O ₃	16.02	14.838	15.71	24.49	18.56	0.1
FeO	2.14	1.2	19.25	0.25	0.01	85.08
MnO	0.02	0.018	0.11	0	0	0
MgO	0.67	0.514	10.37	0.25	0.16	0.14
CaO	3.61	3.541	0	6.21	0	0.07
Na ₂ O	4.23	3.887	0.74	8.43	1.21	0.67
K ₂ O	1.26	0.93	9.51	0.34	15.4	0
P ₂ O ₅	0.05	0.01	0	0	0	0
Total	98.37	98.819	96.28	101.08	99.45	91.27
proportions		0.8221	0.0211	0.1304	0.0189	0.0075
Degree of crystallization	0.1779					
fractionated proportions			11.86	73.30	10.62	4.22
residual sum of squares	0.022					
YH04122602→YH04122003A stage6						
	initial magma	final magma	fractionated minerals			
	YH04122602	YH04122003A	Pl	Bt		
SiO ₂ wt%	73.721	78.269	58.98	35.49		
TiO ₂	0.16	0.057	0.08	5.38		
Al ₂ O ₃	14.838	12.781	24.36	14.2		
FeO	1.2	0.87	0.17	17.24		
MnO	0.018	0.013	0	0.11		
MgO	0.514	0.303	0.13	11.52		
CaO	3.541	3.23	6.68	0		
Na ₂ O	3.887	3.217	7.84	0.65		
K ₂ O	0.93	0.535	0.51	9.24		
P ₂ O ₅	0.01	0.019	0	0		
Total	98.819	99.294	98.75	93.83		
proportions		0.807	0.167	0.026		
Degree of crystallization	0.193					
fractionated proportions			86.53	13.47		
residual sum of squares	0.078					

Table 10. Mineral-melt partition coefficients for trace elements used in Rayleigh fractional crystallization models of tonalites

	stage-1, 2					stage-3, 4				stage-5, 6			
	Pl1	Hbl1	Cpx	Opx	Mag1	Pl2	Hbl2	Bt1	Ilm	Pl3	Bt2	Mag2	Kfs2
Sr	1.8 ^a	0.36 ^d	0.033 ^b	0.032 ^b	0.01 ^a	2.84 ^e	0.022 ^e	0.52 ^f	0.01 ^g	5.633 ^f	0.53 ^f		4.5 ^f
K	0.11 ^a	0.33 ^a	0.011 ^b	0.014 ^b	0.01 ^a	0.263 ^e	0.081 ^e		0.01 ^g	0.1 ^f			
Rb	0.07 ^a	0.04 ^b	0.013 ^b	0.022 ^b	0.01 ^a	0.048 ^e	0.014 ^e	3.2 ^f	0.01 ^g	0.105 ^f	2.3 ^f		0.79 ^k
Ba	0.16 ^a	0.09 ^a	0.04 ^b	0.013 ^b	0.01 ^a	0.36 ^e	0.044 ^e	29 ^f	0.01 ^g	1.515 ^f	36 ^f		19.1 ^k
Nb	0.025 ^a	1.3 ^c	0.3 ^c	0.35 ^b	1 ^a	0.06 ^c	4 ^c	5.6 ^f	2.3 ^h	0.06 ^e	9.5 ^f		
Zr	0.013 ^c	1.4 ^b	0.27 ^a	0.046 ^b	0.4 ^a	0.1 ^c	4 ^c	1 ^f	1.883 ^f	0.1 ^c	1.8 ^f	0.8 ^e	0.05 ^f
Y	0.06 ^c	1.9 ^d	1.5 ^c	0.45 ^b	0.5 ^b	0.1 ^c	6 ^c	1.4 ^f	0.0045 ⁱ	0.13 ^f	1 ^f	2 ^e	
Cr	0.01 ^a	30 ^a	30 ^a	13 ^b	32 ^a	0.01 ^a	30 ^a	8.3 ^f	6 ^j	0.01 ^a	4.2 ^f		0.6 ^l
Ni	0.01 ^a	10 ^a	6 ^a	8 ^b	10 ^a	0.01 ^a	10 ^a	19 ^f	10 ^g	0.01 ^a	19 ^l		0.6 ^l

Source of data: Gill (1981)^a, Rollinson (1993)^b, Peace and Norry (1979)^c, Martin (1987)^d, Arth (1976)^e, Nash and crecraft (1985)^f, Tsuchiya et al. (2007)^g, Green and Pearson(1987)^h, Nielsen et al. (1992)ⁱ, Ringwood (1970)^j, Icenhower et al. (1996)^k, Francalanci et al. (1987)^l

Table 11. Mineral-melt partition coefficients and initial composition for Sr vs Y in vector diagram for granulites

	Pl	Hbl	Cpx	Bt	Opx	Ap	Zrn	Spn	initial compositions	
DSr	1.8 ^a	0.6 ^m	0.033 ^b	0.52 ^f	0.032 ^b	1.3 ^p	0.034 ⁿ	0.2 ^r	Sr (ppm)	666
DY	0.06 ^c	11.3 ^m	1.5 ^c	1.4 ^f	0.45 ^b	20 ^q	71.4 ^o	30 ^q	Y (ppm)	21

Source of data: Ewart and Griffin (1994)^m, Thomas et al. (2002)ⁿ, Bea et al. (1994)^o, Watson and Green (1981)^p, Endo et al. (1999)^q, Green (1994)^r.