

## 原著論文

## ロジン岩から考えられる神居古潭帯南部超苦鉄質岩体の蛇紋岩化作用の条件とテクトニックな関係

Serpentinization condition and tectonic position of ultramafic masses estimated from rodingite in the southern part of the Kamuikotan tectonic belt, Central Hokkaido

東 豊土<sup>1\*</sup>・加藤孝幸<sup>2,3</sup>

Toyoto Azuma<sup>1\*</sup> and Takayuki Katoh<sup>2,3</sup>



## Article

2019年11月21日 受付, 2019年12月19日 受理

## 要旨

ロジン岩は蛇紋岩化作用の副産物として生成する。神居古潭帯には、蛇紋岩体に隣接する、あるいはテクトニックブロックとしてのロジン岩が数多く見出されており、そのロジン岩の生成温度から、神居古潭帯の蛇紋岩体のテクトニックな位置づけを検討した。とくに、同じ超苦鉄質岩体から産出する生成温度の異なる複数のロジン岩を考えると、ロジン岩の鉱物組み合わせから推定される幅広い温度は、そのロジン岩化作用を励起させた超苦鉄質岩が、上昇過程のさまざまな温度条件で起こした蛇紋岩化作用の反映であると考えられる。神居古潭帯の糠平超苦鉄質岩体（HL シリーズ）は、沙流川超苦鉄質岩体（H シリーズ）の東側に隣接する岩体であるが、最初のロジン岩化作用は西側の沙流川超苦鉄質岩体より高温状態で始まっている。現在、対象とするエリアで HL シリーズと H シリーズは連続していないが、元は HL シリーズが H シリーズの下位に伏在していた可能性がある。

## Abstract

Rodingite is generated as a byproduct of serpentinization. Many rodingites adjacent to the serpentinite body or as a tectonic block were found in the Kamuikotan Belt, and the tectonic position of the serpentinite body in the Kamuikotan Belt was examined from the rodingitization conditions of the rodingites in this study. In particular, considering rodingitized serpentinites with different rodingitization conditions from the same ultramafic complex, the wide-range temperature estimated from the mineral assemblage of rodingite can be considered as a reflection of serpentinization that occurred under various temperature conditions of the ultramafic rock caused the rodingitization. The Nukabira ultramafic complex (HL series) in the Kamuikotan belt is adjacent to the east of the Sarukawa ultramafic complex (H series) and starts at a higher temperature than Sarukawa ultramafic complex. At present, the HL series and the H series are not continuous in this studied area, but it is possible that the HL series including the Nukabira ultramafic complex originally lie below the H series represented by the Sarugawa ultramafic complex.

**キーワード:** ロジン岩, ロジン岩化作用, 蛇紋岩, 蛇紋岩化作用, 蛇紋岩起源ロジン岩, 神居古潭帯

**Keywords:** rodingite, rodingitization, serpentinite, serpentinization, rodingitized serpentinite, Kamuikotan Belt

- 1: 日高山脈博物館, 北海道沙流郡日高町本町東 1 丁目 297-12  
Hidaka Mountains Museum, 297-12 Honcho-Higashi, Hidaka Town 055-2301, Hokkaido Prefecture, Japan
- 2: アースサイエンス株式会社, 北海道札幌市北区北 39 条西 3 丁目 2-1  
Earth Science Co., Ltd, 2-1, Nishi-3, Kita-39, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 001-0039, Japan
- 3: 北海道総合地質学研究センター  
Hokkaido Research Center of Geology

\* Corresponding author E-mail address: hmc@town.hidaka.hokkaido.jp

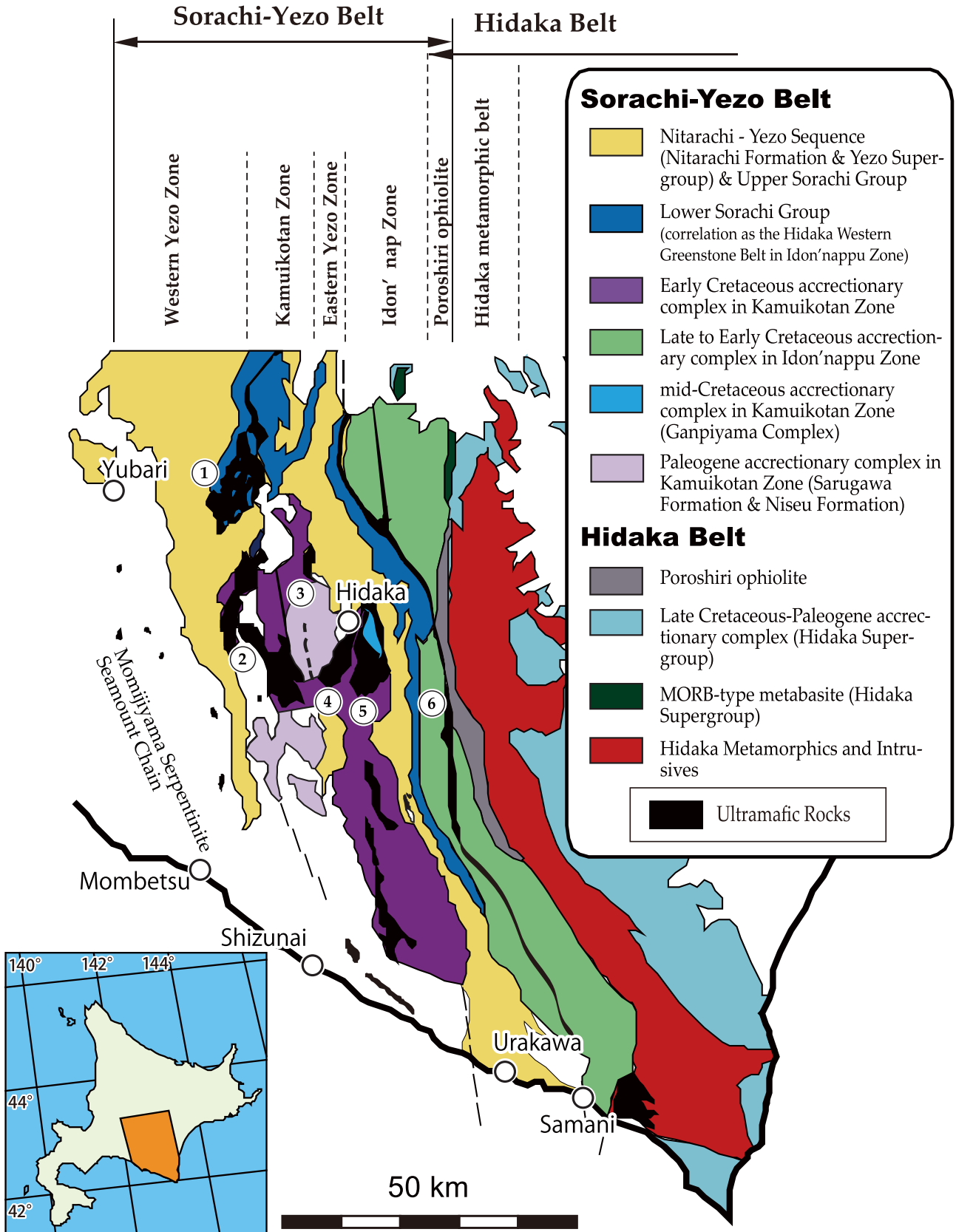


図1. 中央北海道南部地域の地質概略図. 植田(2006), 加藤・合地(2008), 植田・川村(2010), 東・加藤(2012), 東ほか(2014)に基づき編集した。①～⑥は蛇紋岩帯を示す(本文を参照)。

Fig. 1. Geological outline map for the southern part of central Hokkaido. In reference to Ueda (2006), Katoh and Gouchi (2008), Ueda and Kawamura (2010), Azuma and Katoh (2012) and Azuma et al.(2014; 2016). Abbreviations in the open circles show the ultramafic rock bodies (1: Yubari serpentinite body, 2: Mukawa serpentinite body, 3: Akaiwa serpentinite body and minor serpentinite body along Niseu River, 4: Sarugawa complex, 5: Nukabira complex, 6: Westernmost Hidaka serpentinite belt).

## はじめに

北海道中央部・神居古潭構造帯には、岩内岳かんらん岩体を除き、蛇紋岩化あるいはメランジュ化した超苦鉄質岩体が分布する。東側には小規模な蛇紋岩体がイドンナップ帯分布域に構造線をつくって分布（日高西縁蛇紋岩帯：新井田・加藤，1978）し、その西側には夕張紅葉山から三石にかけて、中新統滝の上層やその相当層の分布域に小規模な蛇紋岩体が点々と分布する（根本ほか，1942；加藤ほか，2003）。加藤・合地（2008）はこれらの蛇紋岩体が滝の上層堆積盆中に上昇した蛇紋岩海山と考え、紅葉山蛇紋岩海山列と呼んだ。

蛇紋岩は、かんらん岩に熱水が加わることで生成される変成岩（あるいは熱水変質岩）の一種である。蛇紋岩化作用を蒙ると、かんらん岩を構成している鉱物（かんらん石、直方（斜方）輝石、単斜輝石）は、蛇紋石鉱物（クリソタイル、リザルダイト、アンチゴライト）や緑泥石、滑石などに置換され、クリソタイルーリザルダイトから成るメッシュ組織（Wicks and Whittaker, 1977）や砂時計組織（O' Hanley and Wicks, 1987）、輝石が蛇紋石や緑泥石などに置換されるバスタイト組織（Wicks and Whittaker, 1977）、アンチゴライトが示す綾織り状の bladed-mat 組織（Maltman, 1978）（=interpenetrating 組織；O' Hanley, 1996）など、特有の組織を示す。

ロジン岩は、蛇紋岩に伴って産出することが知られており、一般に CaO や H<sub>2</sub>O に富み、SiO<sub>2</sub> やアルカリに乏しい岩石である（例えば、Kobayashi and Shoji, 1988）。しかし、Na 含有鉱物であるペクトライトを含むロジン岩も存在する（東ほか，2014）。かんらん岩が蛇紋岩化する際に、かんらん岩に含まれる Ca（や Na）が蛇紋石等に固溶されにくいため、熱水を介して、すでに生成していたかんらん岩体周縁の蛇紋岩やそれに隣接する岩石へと移動し、その岩石を交代し、透輝石、ハイドログロシユラー、ぶどう石やベスブ石、ペクトライトなどの Ca を含むさまざまな鉱物が生成する。

かんらん岩の蛇紋岩化に伴う熱水による元素移動は、頻りに議論されている（たとえば、Bach et al., 2004, 2006；森下ほか，2008a, 2008b など）。ロジン岩の生成は、蛇紋岩化作用と密接な関係があることで、蛇紋岩や超苦鉄質岩が存在するテクトニックセッティング、例えば、沈み込み帯や中央海嶺付近などにおける、流体と岩石の反応、流体による元素の移動などの解明、ロジン岩やそれらに付随する岩石や母岩などが蒙った変質や変成作用の温度圧力条件の経緯の解明などに有効な情報を有していることが注目されている。supra-subduction zone や沈み

込み帯深部域、中央海嶺深部域、rift continental margin、顕生代の造山帯など、さまざまな P-T 条件やテクトニックセッティングで形成されたロジン岩の岩石学的特徴や形成過程などが検討され、流体と岩石の反応過程や元素の挙動なども明らかにされてきている（たとえば、Coleman, 1966, 1967；Leach and Rodgers, 1978；Evans et al., 1979；Wares and Martin, 1980；Katoh and Niida, 1983；Muraoka, 1985；Kawamoto et al., 2018；Laborda-López, 2018；Li et al., 2017；Nishiyama et al., 2017；Früh-Green et al., 2017；Beard et al., 2002；Zanoni et al., 2016；Koutsovitis et al., 2013；Li et al., 2014；Austrheim and Prestvik 2008；Frost et al., 2008；Bach and Klein 2009；Python et al., 2011 など）。

上記の議論にはないが、神居古潭帯において、蛇紋岩と異なる岩石ではなく、蛇紋岩自体がロジン岩化する例が報告されている（東・加藤，2012・東ほか，2014）。蛇紋岩自体のロジン岩化については、蛇紋岩に接する岩石がすでに、ロジン岩化により高 Ca（または Ca 飽和）状態であったなどの理由が考えられている（東・加藤，2012・東ほか，2014）。

ここでは、このように密接な関係にあるロジン岩と蛇紋岩の関係性に注目し、神居古潭帯南部・日高地域に分布する超苦鉄質岩とロジン岩の先行研究の結果を用い、この地域の超苦鉄質岩体群相互の初生的な位置関係について、拘束条件を示す。

## 地質概説

北海道中央部の空知ーエゾ帯は、東から順に、イドンナップ帯、蝦夷東帯、神居古潭帯の各亜帯に区分されている（Jolivet and Miyashita, 1985；君波ほか，1986；川村ほか，1999 ほか；植田，2007）（Fig.1）。イドンナップ帯は白亜紀の非変成～極低変成の付加体と蛇紋岩の分布（日高西縁蛇紋岩帯：新井田・加藤，1978）によって特徴付けられ（Kiminami et al., 1985；Kiyokawa, 1992；川村ほか，2001；植田，2006）、沈み込み帯前縁部で形成されたと考えられている（植田，2006，2007）。蝦夷東帯は、前弧海盆堆積物である蝦夷層群によって占められており、前弧地殻表層部として位置づけられている（植田，2007）。蝦夷層群は砂泥質岩で構成され、空知ーエゾ帯では、前期白亜紀～後期白亜紀まで一連の整合層序を示す（たとえば、Takashima et al., 2004）が、一部神居古潭帯との境界部分では、前期白亜紀末（Albian）の層準に不整合が認められている（小山内・松下，1960；松下・鈴木，1962；川村ほか，1999；Ueda et al., 2002）。神居古潭帯は、付加体を源岩とする高圧～低圧変成岩と蛇紋岩の分類によっ

て特徴付けられ、前弧域の深部相と位置づけられる(植田, 2007)。模式地の旭川周辺に比べ、南部域となる日高町周辺では、比較的低変成度の岩石が分布する傾向がある(中野, 1981)。これら蛇紋岩体にはしばしばロジン岩が伴われている(Yagi et al., 1968; Bamba et al., 1969; 番場, 1972, 1980; 加藤, 1978; Katoh and Niida, 1983)。

### 神居古潭帯の超苦鉄質岩体の特徴

神居古潭帯の超苦鉄質岩は、ほとんどが蛇紋岩となっている。その源岩については、主として熔け残りかんらん岩であるハルツバージャイトおよびダナイトであり、ごく一部の岩体はレルゾライトをともなう。Research Group of Peridotite Intrusion (1967) による超苦鉄質岩類の分類: H シリーズ (dunite-harzburgite-orthopyroxenite)・L シリーズ (dunite-lherzolite-plagioclase lherzolite)・W シリーズ (dunite-wehrlite-clinopyroxenite) によれば、ほとんどの岩体は H シリーズであるが、少量のレルゾライトをともなう岩体には、新井田・加藤 (1978) によって、HL シリーズが提唱されている。

神居古潭帯南部地域では、西から東に向かって、以下のように超苦鉄質岩体が分布している。(Fig.1)

- ①夕張岳蛇紋岩体 (Nakagawa and Toda, 1987): 青色片岩や角閃岩などの低温高圧～低圧の変成岩ブロックを取り込む、蛇紋岩メランジェである。原岩は、ハルツバージャイト主体 (=H シリーズ)
- ②鷓川岩体 (新井田・福井, 1987; 加藤・中川, 1986): H シリーズで、蛇紋岩メランジェおよび塊状蛇紋岩帯 (東側) をともなっている。
- ③ニセウ川沿いの小規模岩体～赤岩岩体 (占冠村) (国分, 1987): ハルツバージャイト主体でレルゾライトをともなう (=HL シリーズ)。赤岩岩体周辺では、高圧変成岩のブロックも含まれている。
- ④沙流川岩体 (新井田・加藤, 1978): H シリーズで西傾斜している。神居古潭帯の超苦鉄質岩体の中で蛇紋岩化をまぬかれた岩内岳かんらん岩体 (番場, 1955) を含む。
- ⑤糠平岩体 (加藤・中川, 1986): HL シリーズ。高角な東傾斜。高圧鉱物を含む雁皮山コンプレックス (川村ほか, 2001) を取り囲む。リーベッカイト石英片岩や“幸太郎石” (東ほか, 2016) のような青色片岩相の変成岩や、蛇紋岩源高温型ロジン岩 (東ほか, 2014) などのテクトニックブロックを含む。糠平岩体は神居古潭構造帯の南部東側の HL シリーズ超苦鉄質岩体群の南北配列の北端に位置し、南へ向かって新冠ダム・岩清水・ペラ

リ山・三石の各超苦鉄質岩体がミ型雁行状に配列する。これらにはかんらん石単斜輝岩で代表されるウェーラライト (W) シリーズの岩脈が多いという共通点もある。  
⑥日高西縁蛇紋岩帯の小岩体群 (新井田・加藤, 1978): HL シリーズ。

神居古潭帯のさらに東側には日高変成帯のかんらん岩が分布する。また、神居古潭帯の西側には、紅葉山蛇紋岩海山列 (加藤・合地, 2008) が分布している。片状化するが原岩はハルツバージャイト主体で、神居古潭構造帯の超苦鉄質岩と同様に、島弧火成活動を受けて部分溶融の進んだかんらん岩を原岩とする。

蛇紋岩化作用については、上述の各超苦鉄質岩は大部分が低温・低圧型の蛇紋岩化作用(約 300℃以下)を受けて、リザルダイト・クリソタイルが生成している。夕張岳蛇紋岩体や東側の糠平岩体の一部には高温・高圧側で安定なアンチゴライトが出現するが、現在のところ、糠平岩体のアンチゴライト蛇紋岩が岩体の一部を構成するのか、テクトニックブロックであるのかは不明である (加藤, 2018)。

### ロジン岩化の温度と蛇紋岩化の温度の関連性のアイデア

ロジン岩の生成過程としては、数々の先行研究でも述べられているように、かんらん岩が蛇紋岩化作用を蒙ることで、Ca を含む熱水が発生し、その熱水が蛇紋岩に接する岩石と反応することで、隣接する岩石がロジン岩化するが、隣接する岩石が Ca 飽和状態ないし高 Ca 状態となっている場合は、蛇紋岩自体にロジン岩化作用が及ぶと考えられる。すなわち、ロジン岩化作用が発生するには、蛇紋岩化作用が起こらなければならない。このことに注目し、ロジン岩の鉱物組み合わせの安定共生関係や鉱物同位体比組成などを用いて蛇紋岩化作用を解析できる(たとえば、Schandl et al., 1990; O'Hanley et al., 1992; Frost, 1975; Schandl and Mittwede, 2001; Mittwede and Schandl, 1992; Dubińska et al., 2004 など)。また、ロジン岩化作用をもたらした(≡蛇紋岩化作用を起こした)初生的な流体を、流体包有物として含むロジン岩構成鉱物の研究も行われている(たとえば、Schandl et al., 1990; Normand and Williams-Jones, 2007 など)。

先に述べた蛇紋岩自体がロジン岩化する場合の条件については筆者らの初歩的な指摘以外、研究例がない。

糠平岩体では、300℃程度で生成した低温型蛇紋岩源ロジン岩 (東・加藤, 2012; Fig.2) と、400～600℃程度の高温型蛇紋岩源ロジン岩 (いわゆる日高ヒスイ [番場,

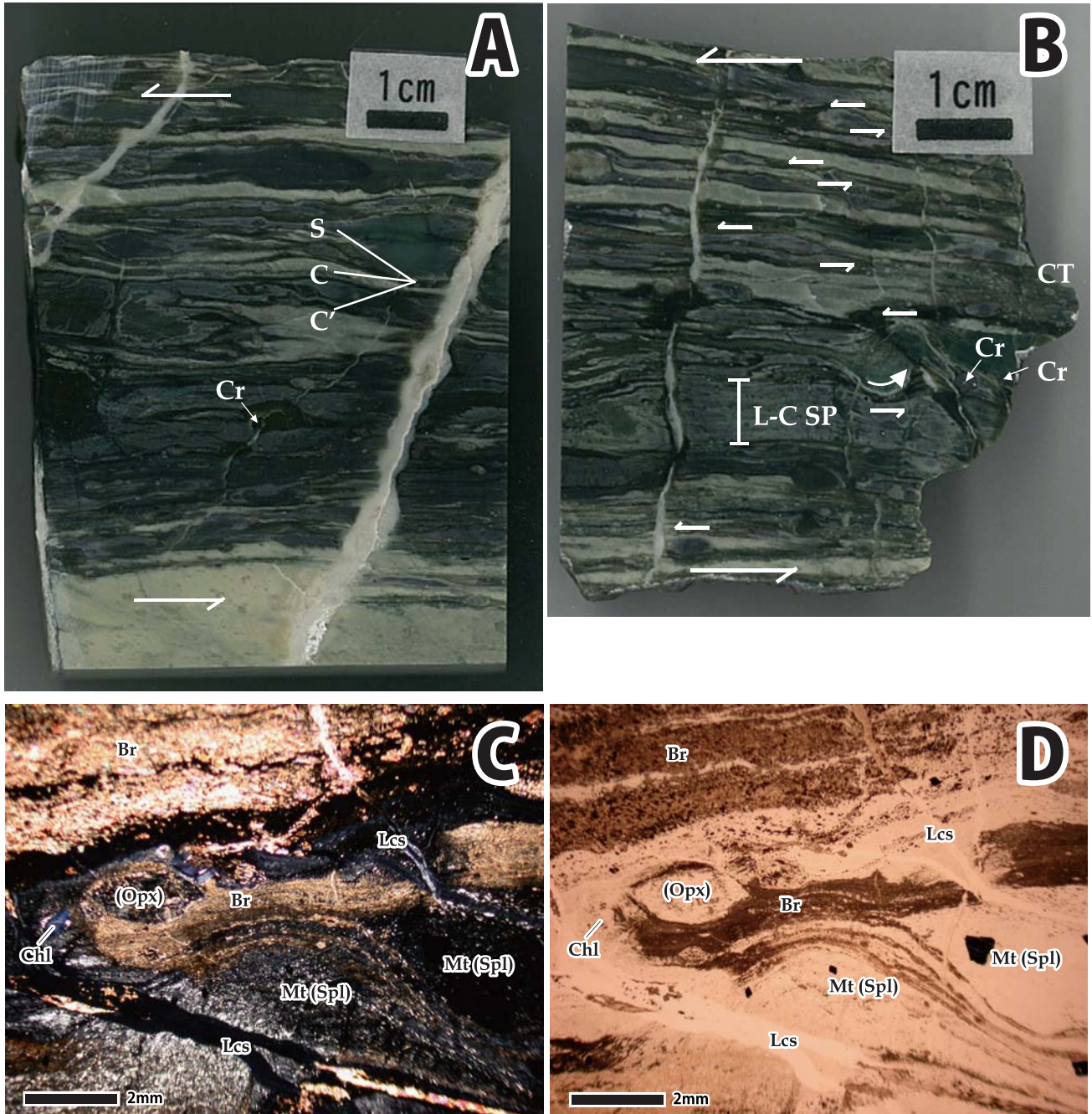


図2. 今回用いる低温型蛇紋岩起源ロジン岩 (サンプル名: SP-1) の切断面(A, B)および偏光顕微鏡下写真(C: クロスニコル, D: オープンニコル) (東・加藤, 2012を参照). 暗緑色部と帯緑灰白色部 (ロジン岩鉱物からなる) とによる葉片状の面構造, ポーフイロクラストの周囲の非対称変形組織, カタクレーサイト, メッシュ組織を有する蛇紋岩レンズ, クロマイト, S-C構造が観察できる, 典型的なテクトナイト(A, B). 変質した直方 (斜方) 輝石ポーフイロクラストの周りにブルーサイトからなる $\sigma$ タイプ非対称性の変形組織が認められる. ブルーサイトなどからなる片状組織も認められる. これらをきるように低結晶度の蛇紋石脈が生成する (C, D). L-C SP: メッシュ組織を有する蛇紋岩レンズ, CT: カタクレーサイトの部分, Cr: クロマイト (クロムスピネル), opx: 直方 (斜方) 輝石, Lcs: 低結晶度蛇紋石, Br: ブルーサイト, Chl: 緑泥石, Mt: 磁鉄鉱, ( ): 仮像.

Fig. 2. Photographs (A, B) and microphotographs (C: in cross-polarized, D: in plane-polarized) of low-temperature type rodingitized serpentinite (SP-1, in this study), reference to Azuma and Katoh (2012). Tectonite of rodingitized serpentinites, observed a foliation in greenish gray-white part, consisting of rodingite minerals, and dark green part, an asymmetric deformation textures around porphyroclasts of varying sizes, a serpentinite lens preserved mesh texture, a cataclastic part and chromites (chrome spinels) (A, B).  $\sigma$ -type asymmetric deformation structure consisting of brucite is observed around altered olthopyroxene porphyroclast. Schistose structure consisting of brucite and other minerals are also observed. Low-crystallization serpentine veins are lastly generated to over these (C, D). L-C SP: serpentinite lens preserved mesh texture consisting of lizardite-chrysotile, CT: cataclastic part, Cr: chromite (chrome spinel), opx: orthopyroxene, Lcs: low-crystallization serpentine (containing deweylite), Br: brucite, Chl: chlorite, mt: magnetite and ( ): pseudomorph.

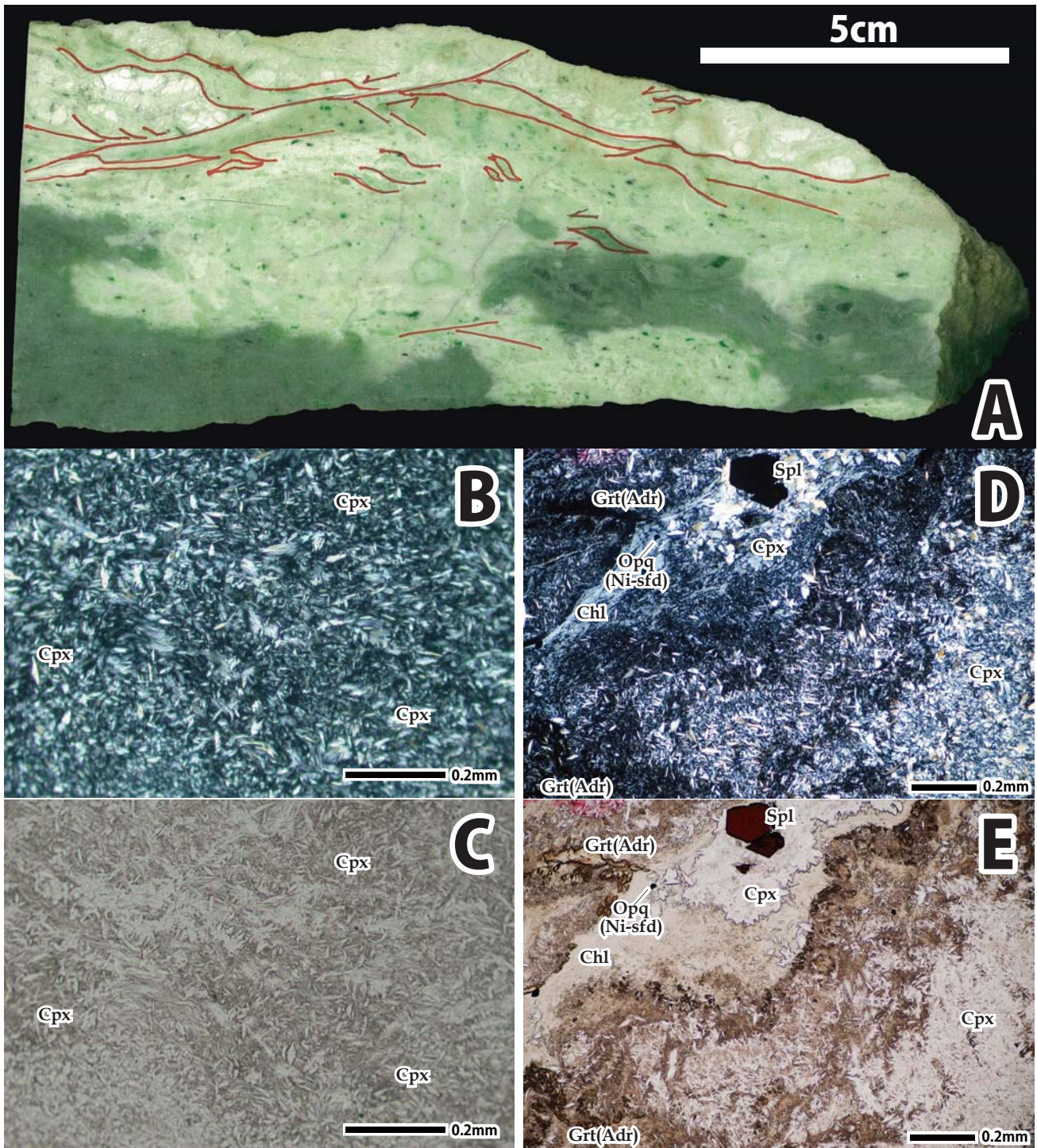


図3. 今回用いる高温型蛇紋岩起源ロジン岩 (サンプル名: SP-2) のサンプル切断面 (A) および偏光顕微鏡下写真 (B, D: クロスニコル, C, E: オープンニコル) (東ほか, 2014 を参照). (A) 高度にロジン岩化作用を蒙っており, 源岩の構成鉱物や組織はスピネル以外残存していない. 一部のスピネルの周囲にはウヴァロヴァイトが生成している. 灰緑色部に生じた割れ目に白色部が形成され, 全体が塑性流動変形組織を示し, 非対称な複合面構造をつくる. (B, C) 全体的に変成単斜輝石が卓越し, それぞれが不規則な綾織り状の組織を呈している. (D, E) スピネルは, 源岩の蛇紋岩由来と考えられ, 他形~半自形で赤褐色を示す. ざくろ石は, 粒状および不定形状であるが, 良結晶度で散在している. 綾織り状の変成単斜輝石の間を縫うように, 不定形のプール状の緑泥石が認められる. Cpx: 単斜輝石, Spl: スピネル, Chl: 緑泥石, Grt(Adr): ざくろ石 (アンドラダイト), Opq(Ni-Sfd): 不透明鉱物 (含ニッケル硫化鉱物).

Fig. 3. Photographs (A) and microphotographs (B, D: in cross-polarized, C, E: in plane-polarized) of high-temperature type rodingitized serpentinite (SP-2, in this study), reference to Azuma et al. (2014). (A) The mineral content and texture of the protolith are not preserved by high-grade rodingitization and deformation, except for spinel. uvarovite is observed around spinel and/or replace spinel. Gray-greenish part and white part are formed plastic flow deformation structure and asymmetric composite planar fabrics. (B, C) An irregular and interpenetrating shaped secondary (metamorphic) clinopyroxene dominates. (D, E) Spinel derived from serpentinite is a hedral to an unhedral in shape and reddish-brown in color. Garnet (Cr-andradite) is scattered in granular and irregular shapes. An irregular pool-shaped chlorite is recognized between interpenetrating and micro-fiber-shaped secondary (metamorphic) clinopyroxene, overall deformation. Cpx: clinopyroxene, Spl: spinel, Chl: chlorite, Grt(Adr): garnet (andradite), Opq(Ni-Sfd): opaque mineral(nickel-bearing sulphide).

表1. 今回用いるロジン岩サンプルの岩石学的特徴と区分.

Table 1. Petrological features of rodingite samples and their classification in this study.

Sample name	previous research references	rock body	Original Rock	Mineral assemblages		degree of Rodingitization	Relict mineral	
				rodingite	vein			
MD-N	Katoh & Niida(1983)	80606-12e	Niikappu	MD	Di+ Pre>Chl» <b>Wo</b> > Ep	Pre>Di	100	
		80606-12d	Niikappu	MD	Pre» Di > <b>Wo</b> » Gro+Chl+Ep	Pre	100	
		80606-12c	Niikappu	MD	Di > <b>Wo</b> +Gro> Pre» <b>Ves</b> +Ep	Tre, Pre	100	
		80606-12b	Niikappu	MD	Di> Pre+Gro> > <b>Wo</b> > Ep(?)	Pre	100	
		80606-12a2	Niikappu	MD	Pre>Di»Chl+ <b>Wo</b> +Gro	Chl, Chl+Tre,Tre	100	
80606-12a1	Niikappu	MD	Chl+Di»Tre+Ep(?)					
MG-N	Katoh & Niida(1983)	80606-10d	Niikappu	MG	Pre> <b>Wo</b> +Gro> Di+Chl>Xo	Pec	20	Ab>Ho>Chl
		80606-10e	Niikappu	MG	Pre>Gro> Di+Chl	Chl, Cc	30	Ab>Chl>Ho
		80606-10a	Niikappu	MG	Pre+ <b>Wo</b> >Di> Xo	Pec	100	
SL-1	Katoh & Niida(1983)	74923-1	Sarugawa	SL	Pec> <b>Pre</b> >Gro>Chl		100	
SL-2	Katoh & Niida(1983)	74109-6a	Sarugawa	SL	Gro> Di> Chl	Chl» <b>Ves</b> +Di	100	
		74109-6b	Sarugawa	SL	Gro» Di> Chl+Ep(?)> <b>Ves</b>	<b>Ves</b> >Gro> Di+Chl Gro> Di> Chl <b>Ves</b> >Di+Chl	100	
SP-1	Azuma & Katoh(2012)	SP1	Nukabira		Chl>Di>Uva>Gro	Di	100	Liz+Chr
SP-2	Azuma et al.(2014)	SP2	Nukabira		Di>Chl>Pec, Adr>> <b>Wo</b>		100	(Atg)?

MD: microdiorite; MG: microgabbro; SL: slate; SP: serpentinite.

Gro: hydrogrossular; Di: diopside; Chl: chlorite; Ep: clinozoisite - epidote; Pec: pectolite; Il: ilmenite; Pre: prehnite; Wo: wollastonite; Ves: vesuvianite; Tre: tremolite; Xo: xenotilite; Cc: calcite; Ab: albite; Ho: hornblende; Liz: lizardite; Chr: chrysotile; Atg: antigorite; Uva: uvarovite

1972; 番場, 1980]; 東ほか, 2014; Fig.3) が発見され、同じ岩体内で、生成温度の異なる蛇紋岩源ロジン岩が形成されている。同一岩体内でのこの生成温度の違いについては、超苦鉄質岩体の浅部への上昇（温度低下）過程のさまざまな段階で蛇紋岩化作用が起こることや、マグマの貫入などが起こることで、ロジン岩が形成された場の温度が局所的に上昇することが考えられる。

糠平岩体や隣接する沙流川岩体には、microdiorite ~ microgabbro の貫入岩脈が報告されており（加藤, 1978; 加藤・中川, 1986）この熱的影響を考える必要がある。しかし、上記の貫入岩自体がかんらん岩に貫入後に起こった蛇紋岩化作用によってロジン岩化作用を受けており、この地域のロジン岩の主体となっている（Katoh and Niida, 1983）。岩内岳かんらん岩体に貫入する幅 4m の微閃緑岩は幅数 m 規模で接触変質帯が生成し、かんらん岩中の直方（斜方）輝石の滑石化や、緑泥石の生成を起こしているが、そこにロジン岩化は認められない。

蛇紋岩源ロジン岩については、蛇紋岩源ロジン岩の変形が著しいことや貫入岩体による熱水変質や脱水反応などの痕跡が認められないことなどから、貫入岩体による影響は考えにくい。地下深部で“純粋に”蛇紋岩化が起こった場合、Ca を含む流体のみが浅部に上昇し、蛇紋岩と隣接しない岩石がロジン岩化することも考えにくい。したがって、ここで取り上げているエリアにおいては、ロジン岩化と蛇紋岩化との温度はほぼ同じであると考えてよい。すなわち、ロジン岩化の異なる温度は、付加体に侵

入する超苦鉄質岩の上昇過程での、さまざまな温度条件で起こった蛇紋岩化作用の反映であると考えられる。

### 神居古潭帯南部のロジン岩の鉱物組合せと温度推定

ここで、神居古潭帯南部の蛇紋岩体とともに産出するいくつかのロジン岩について、生成温度を考えてみたい。今回検討するロジン岩は、Katoh and Niida (1983) によって報告された、新冠蛇紋岩体（糠平岩体と同じ HL シリーズの神居古潭帯南部東側の岩体群）に産出する、microdiorite, microgabbro を源岩とするそれぞれのロジン岩 (MD-N, MG-N)、沙流川岩体のスレートを起源とするロジン岩 (SL-1, SL-2)、東・加藤 (2012) によって報告された、糠平岩体の蛇紋岩を源岩とする低温型ロジン岩 (SP-1)、東ほか (2014) によって報告された糠平岩体の蛇紋岩を源岩とするロジン岩 (SP-2) である (Fig.4)。これらのロジン岩の鉱物組み合わせ (Table.1) より生成温度 (Fig.5) を推定する。

プレーナイトの安定条件は共生関係や圧力にもよるが、低圧では 200℃以上 (Inoue, 1995), 400℃以下 (Liou, 1971) で安定である。しかし、圧力が高いと存在できず（およそ 1.5kb 以上）、パンペリー石などに分解する (Nitch, 1971)。プレーナイト+緑泥石は 350℃以上ではパンペリー石+アクチノ閃石+石英に変化する (Nitch, 1971)。珪灰石の生成条件については、おおむね 600℃以上で安定 (例

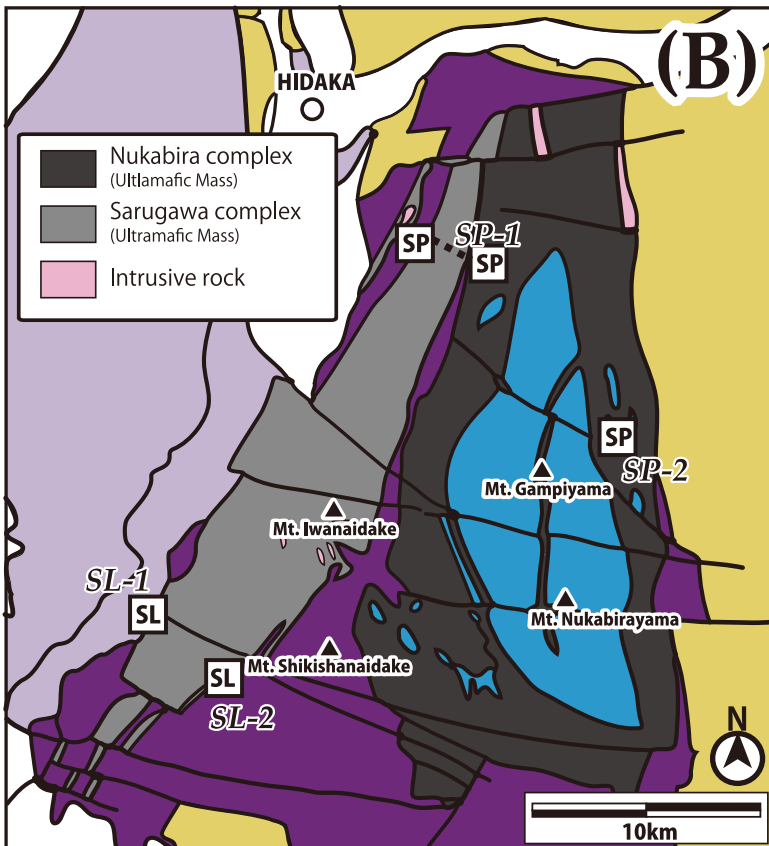
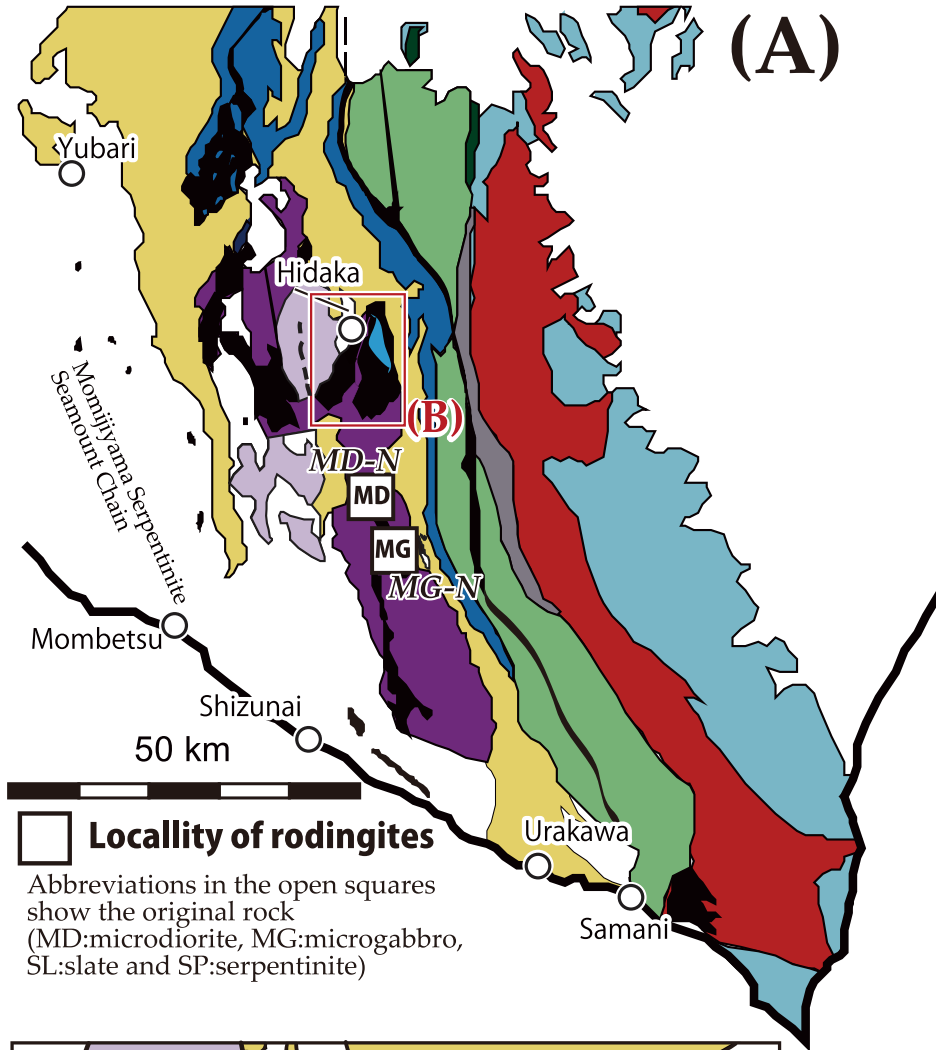


図4. 本論文で用いるロジン岩サンプルの位置と地質概略図。□はロジン岩サンプルの位置、□中のアルファベットは、そのロジン岩の源岩を示す (MD: microdiorite, MG:microgabbro, SL: slate (mudstone) and SP:serpentinite.)。凡例は図1, サンプル名はTable1を参照。

Fig. 4. Geological outline map including the studied rodingite sample locality. Open squares show the locality of rodingite samples and abbreviations in the open squares show the original rock (MD: microdiorite, MG:microgabbro, SL:slate (mudstone) and SP:serpentinite). For other legends and abbreviations, see Figure 1 and Table 1.





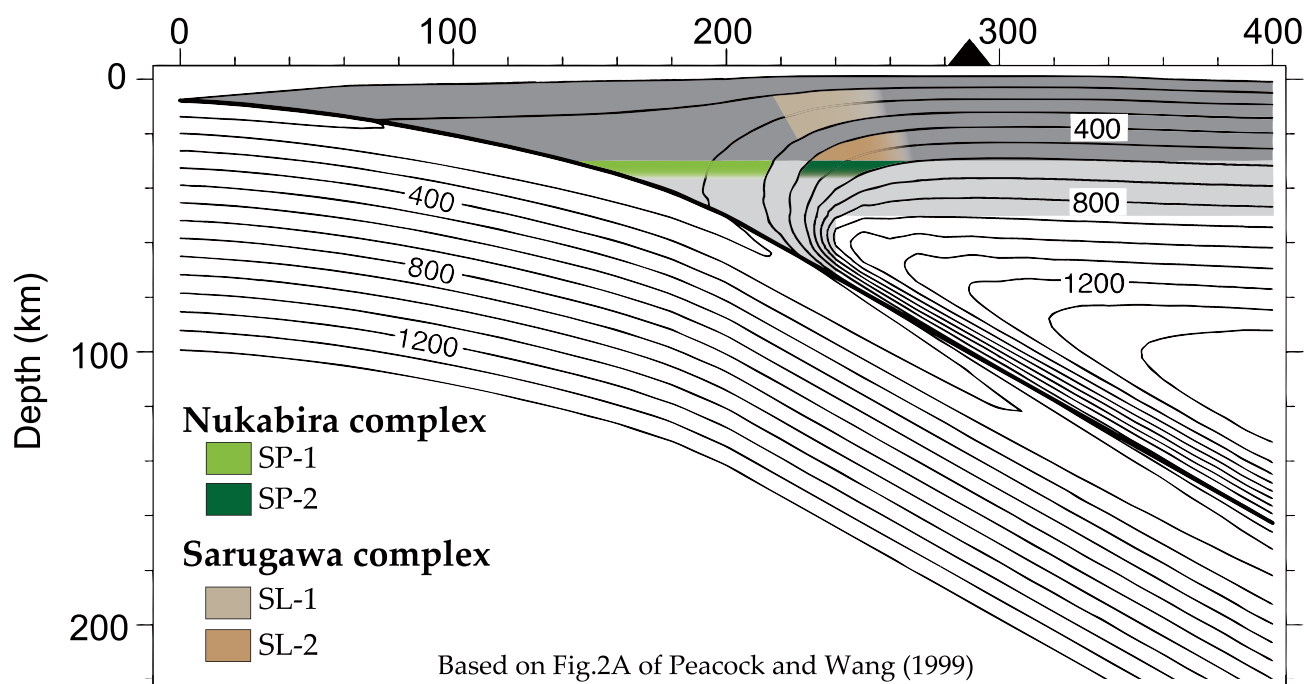


図6. 糠平岩体蛇紋岩起源ロジン岩と沙流川岩体ロジン岩の形成環境の推定. Peacock and Wang (1999) Fig. 2Aを元にして今回のデータを加筆.

Fig. 6. Estimated condition of rodingitized serpentinite in the Nukabira complex and rodingite in the Sarugawa complex. Based on and modified after Fig. 2A of Peacock and Wang (1999) with the data of this study.

よりも東方で生成できると考えられる (Fig.6).

今回の沙流川岩体の泥質岩 (原文では slate と一括) 起源のロジン岩については, SL-1 は Eocene の沙流川層 (あるいは蝦夷群層 Turonian の泥岩?: 加藤, 2018) が蛇紋岩と見かけ上その上盤側でテクトニックに接触する部分, SL-2 は逆に沙流川岩体の下盤側で Early-Cretaceous 付加体 (岩清水コンプレックス) の変形した泥岩が蛇紋岩と (テクトニックに接触する部分の試料である. これら 2 つの時代の異なる地質体中を, 沙流川超苦鉄質岩体が上昇するなかで, 蛇紋岩化作用が進行し, テクトニックコンタクトの泥質岩のロジン岩化が起こったと考えられる. 付加体に侵入する超苦鉄質岩の上昇過程での, さまざまな温度条件で起こった蛇紋岩化作用の反映であると考えられると, SL-1 と SL-2 の温度差は, 付加体を考慮するとより深部であったであろうときの蛇紋岩化が, 岩清水コンプレックスの泥質岩に比較的溫度が高い状態でのロジン岩化をもたらし, 上昇して浅部にいたったときの蛇紋岩化が, 沙流川層に低温の状態でのロジン岩化をもたらしたと考えられる.

全体として, 最初のロジン岩化は新冠岩体および糠平岩体 (HL シリーズ) が, 沙流川岩体 (H シリーズ) より高温 (地温勾配を考慮するとより深部) で起こったと考えられる. すなわち, 糠平岩体 (HL シリーズ) と沙流川岩体 (H シリーズ) は, 現在断層関係にあって連続していない (加藤・中川, 1986) が, もとは H シリーズの下

位に HL シリーズが伏在する一連のウェッジマントルがそれぞれ断片化して, 流川岩体と糠平~新冠岩体になったと考えて矛盾はない. HL シリーズはより深部 (~沈み込み帯内側) にあったため, 最初のロジン岩化がより高温で起こりやすく, かつ生成後の長距離の上昇のためテクトナイト化が進みやすかった. なお, 各岩体の蛇紋岩化はかんらん岩体の周辺などごく一部にとどまり, 蛇紋岩化作用はおよそ 40°C の低温まで起こる (O' Hanley, 1996) ため, 地殻中における蛇紋岩化作用に伴うロジン岩が多数生成する.

## 課題 (問題点) と今後の展望

### 局所的な熱源による蛇紋岩化作用の可能性:

局所的な熱源による蛇紋岩化作用の可能性については, 神居古潭帯・ニセウ川沿いの小規模蛇紋岩体にて蛇紋岩にともなう緑泥石岩が報告されている. 岡村ほか (2018)・Okamura et al. (2018) では, ロジン岩化した貫入岩の周囲などに普遍的に産する暗緑色の緑泥石岩については, 貫入岩による熱水変質作用で蛇紋岩化作用ないし緑泥石岩化作用が急速に (もしくは同時に) 起こり, その結果磁鉄鉱ダストが大量に生成して緑泥石+磁鉄鉱からなる黒ずんだ色調を呈する可能性を示している. 一方で, 岡村ほか (2018)・Okamura et al. (2018) は, 同地域で, ロジン岩化をまぬがれた microdiorite と接触する透明度の高

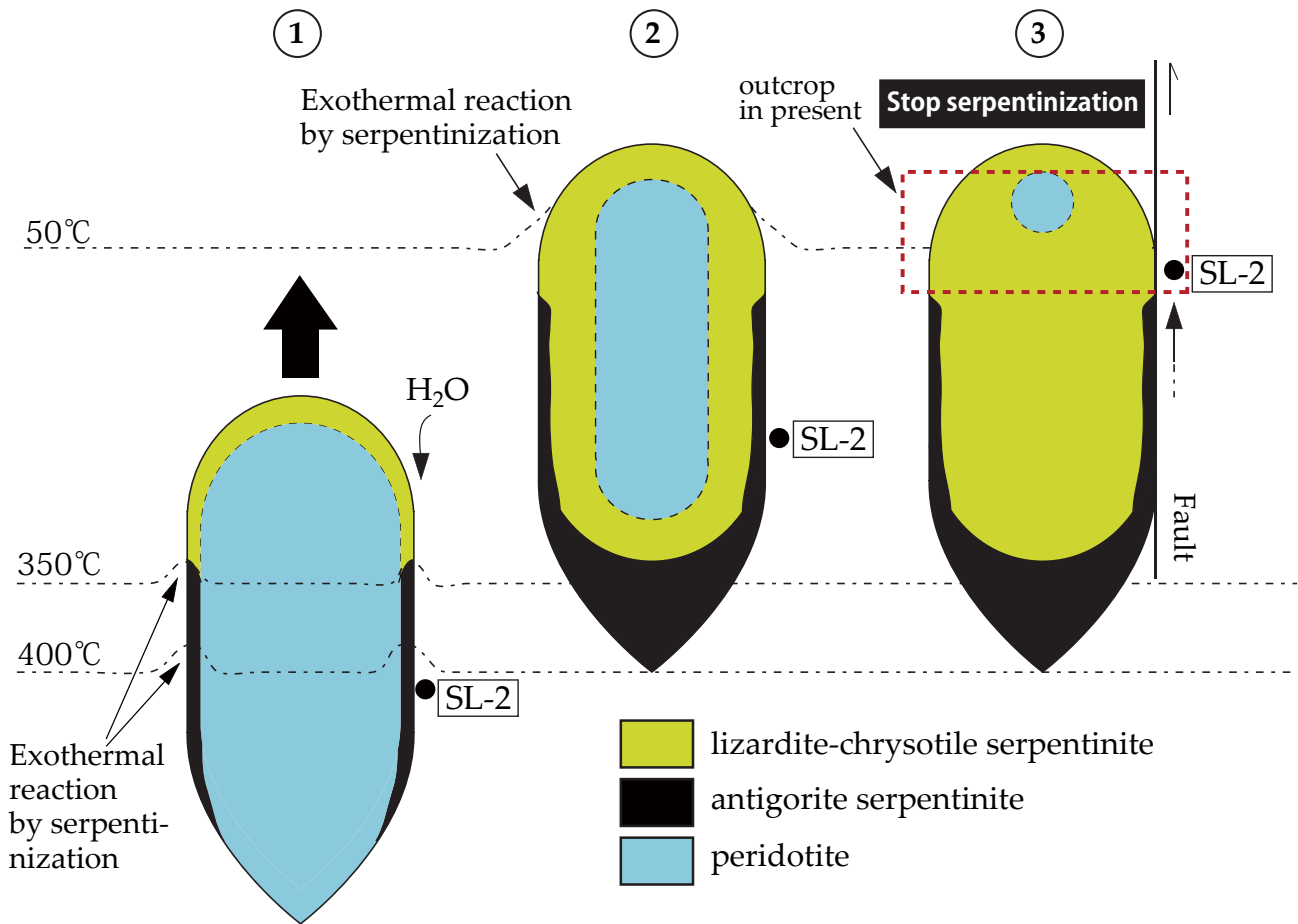


図7. 神居古潭帯南部超苦鉄質岩のテクトニックな位置の概念図. □中のアルファベットは今回用いたサンプル名を示す (Fig.4, Table 1を参照).

Fig. 7. Schematic chart of tectonic position for ultramafic masses in southern part of the Kamuikotan Belt. Abbreviations in the open squares show the sample name in this study (see Fig.4 and Table 1).

い緑色の蛇紋岩起源緑泥石岩も報告しており、これらは、microdiorite が貫入したとき、蛇紋岩化がほぼ完了しており、貫入による蛇紋岩化が起らず、蛇紋岩の緑泥石岩化が起った可能性を示している。

神居古潭帯南部の超苦鉄質岩体には、局所的な microdiorite などの貫入岩脈が数多く認められており、蛇紋岩起源のロジン岩の形成過程などは、局所的熱源にも注意しながら、十分に検討していく必要がある。

#### 蛇紋岩化作用の温度範囲：

糠平岩体では高温型蛇紋岩源ロジン岩の生成温度 (400~600°C) からみて、その周囲にあった元の蛇紋岩は、アンチゴライト蛇紋岩の安定条件化 (たとえば, Evans, 2004; Bromiley and Pawley, 2003 など) にあったと考えられる。

糠平岩体は主としてリザルダイトークリソタイル蛇紋岩からなるが、アンチゴライト蛇紋岩が一部存在するとの報告がある (加藤, 2018)。高温型蛇紋岩源ロジン岩は、低温型蛇紋岩源ロジン岩にメッシュ組織を示すリザルダイトークリソタイル蛇紋岩の組織が残存しているのとは

異なり、これらの組織や鉱物は認められない。アンチゴライト蛇紋岩は、アンチゴライトが綾織り状組織を示す (Maltman, 1978; O' Hanley, 1996) が、今回とりあげた高温型蛇紋岩源ロジン岩は、変成単斜輝石が綾織り状組織をつくっている (東ほか, 2014; Fig.3B, C)。また、綾織り状組織が残存するポーフィロクラストが、テクトナイト中に散在する (Fig.3D,E)。したがって、高温型蛇紋岩源ロジン岩は、アンチゴライト蛇紋岩が、400~600°Cの条件下でテクトニックな変形作用を受けつつ、ロジン岩化作用を蒙り、綾織り状組織を仮像として残し、変成単斜輝石に置換された可能性が考えられる。

一方、同岩体の低温型蛇紋岩源ロジン岩は、相対的に低温 (300°C以下) で生成しており、リザルダイトークリソタイル蛇紋岩が主体で、アンチゴライトは認められないため、そのような条件下で蛇紋岩化作用およびロジン岩化作用を蒙った。比較的浅部まで岩体が上昇してから、蛇紋岩化作用・ロジン岩化作用を蒙ったのであろう。蛇紋岩化作用の下限は約 40°Cと考えられている (O' Hanley, 1996)。糠平岩体はかんらん石や輝石が残存しているので、

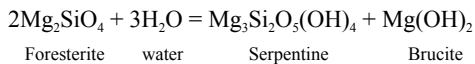
この温度以下になって、蛇紋岩化作用が停止するまで、蛇紋岩化作用は進行したはずである。

#### 蛇紋岩化作用とロジン岩化作用の推定温度の矛盾：

沙流川岩体の泥質岩起源ロジン岩 (SL-2) は、西に傾斜する沙流川岩体の基底に接するテクトニックコンタクトの変形した泥岩 (岩清水コンプレックス) を源岩とする。その生成温度は、特にベスブ石の存在から 400°C 以上と考えられる。そのような温度条件の下でかんらん岩が蛇紋岩化作用を蒙ったとき、リザルダイトークリソタイル蛇紋岩ではなく、アンチゴライト蛇紋岩が生成されるはずである。しかし、沙流川岩体では、リザルダイトークリソタイル蛇紋岩であり、アンチゴライト蛇紋岩の産出は知られていない。すなわち、蛇紋岩化作用を蒙った温度条件とロジン岩化作用を蒙った温度条件について、ロジン岩の生成温度が高いという矛盾がある。

このことについては、沙流川岩体によく観察される、microdiorite ~ microgabbo の貫入岩脈のような局所的な熱源を考えることも可能であるが、SL-2 にはそのような直接的な影響を示すものは確認できない。また、一般的には、超苦鉄質岩体の蛇紋岩化作用は、地殻中を上昇する温度降下の過程で起こる。温度の高い深部へ逆戻りするなどして起こる逆蛇紋岩化作用 (deserpentinization) は認められない。

ところで、蛇紋岩化作用は吸水発熱反応である。例えば、蛇紋岩化作用による流体-岩石間の反応



は、吸水発熱反応である (MacDonald and Fyfe, 1985; Peacock, 1987; Fyfe, 1990; Bach et al., 2002; Lowell & Rona, 2002; Früh-Green et al., 2003; Evans, 2008 など)。その発熱性は、蛇紋岩化作用が一度始めると、そのほかの熱源がなくても蛇紋岩化作用を継続させるために十分な流体を加熱し続けられるポテンシャルがある (たとえば、Lowell and Rona, 2002; Emmanuel and Berkowitz, 2006 など)。反応による発熱量については、P-T 条件や反応の元となる物質の量などで異なるものの、蛇紋岩化作用で反応して生成される蛇紋石 1mol あたり約 82 kJ (MacDonald and Fyfe, 1985) ~ 83 kJ (300 K・10~200 MPa; Vance et al, 2007), 反応に必要な水 1mol あたり 35 kJ 程度 (Evans, 2008), 150°C・20 MPa でかんらん岩と水 (starting materials of reaction) 1kg あたり 200 kJ 程度 (Fig.6 of Brunet, 2019) など、放出する熱量は高く、とくに大西洋中央海嶺の“Lost City”の熱水系の機構においては、蛇紋岩化作用によって放出される熱のみを熱源として、熱水循環活動を駆動させていることも示唆されてい

る (たとえば, Kelley et al., 2001, 2005; Lowell and Rona, 2002; Früh-Green et al., 2003; Emmanuel and Berkowitz, 2006; Kelly and Shank, 2010; Titarenko and McCaig, 2016 など)。

地温勾配による温度に加えて、蛇紋岩化作用による発熱を熱源に流体の加熱が起こっていれば、蛇紋岩化作用によって発生するロジン岩化作用を励起させる Ca 溶存熱水も、蛇紋岩化作用によって放出される熱によって、加熱されるであろう。

とくに、沙流川岩体に断層接触 (テクトニックコンタクト) する泥質岩源ロジン岩 (SL-2) を考えると、リザルダイトークリソタイル蛇紋岩を形成する温度条件下 (たとえば, 200~300°C) で蛇紋岩化が起こり、Ca が熱水に放出されつつ、蛇紋岩化作用によって放出される熱を熱源に蛇紋岩化作用も進み、その結果 Ca 溶存熱水が 400°C 程度以上に加熱されるという可能性はどうだろうか。しかし、この場合、いったん生成したリザルダイトークリソタイル蛇紋岩が逆蛇紋岩化作用により、アンチゴライトに置換されるであろう。

そこで考えられるのは、テクトニックコンタクトは断層であるので、アンチゴライト安定条件のときに生成したロジン岩が、蛇紋岩定置後に上昇したという可能性である (Fig.7)。

## まとめ

1. ロジン岩の鉱物組み合わせから推定される温度は、そのロジン岩化作用を励起させた超苦鉄質岩のさまざまな温度条件で起こった蛇紋岩化作用の反映であると示した。
2. 新冠蛇紋岩体および糠平超苦鉄質岩体 (HL シリーズ) は、沙流川超苦鉄質岩体 (H シリーズ) より高温部 (付加体形成を考慮するとより深部) で最初のロジン岩化を起こした。
3. 蛇紋岩化作用が起こった温度より、それに隣接するロジン岩のロジン岩化作用の起こった温度のほうが高い理由については、テクトニックコンタクトである断層が再移動したことで説明が可能である。これは、H シリーズの下位に HL シリーズが伏在していた可能性と矛盾しない。

**謝辞** 引用した文献の執筆者のうち、とくに神居古潭帯研究者の方には、直接日高山脈博物館を訪れて議論していただき、地域地質や地質学・岩石学などの理解を深めさせていただいている。ここに記して謝意を表する。

## 引用文献

- Austrheim, H. and Prestvik, T., 2008, Rodingitization and hydration of the oceanic lithosphere as developed in the Leka ophiolite, north-central Norway. *Lithos*, **104**, 177-198.
- 東 豊土・加藤孝幸, 2012, 神居古潭帯・糠平岩体由来のロジン岩化蛇紋岩質テクトナイト. むかわ町立穂別博物館研究報告, **27**, 7-16.
- 東 豊土・加藤孝幸・斉藤晃生・和田恵治・佐々木克久, 2014, 日高ヒスイを含む蛇紋岩源高温型ロジン岩の岩石学的特徴. 日本地質学会第 121 年学術大会, 演旨, 267.
- 東 豊土・加藤孝幸・和田恵治・斉藤晃生・佐々木克久, 2016, 幸太郎石一高压変成作用を受けた蛇紋岩関連オリストストローム. 日本地質学会第 123 年学術大会, 演旨, 202.
- Bach, W., Banerjee, H.J., Dick, J.B. and Baker, E.T., 2002, Discovery of ancient and active hydrothermal systems along the ultra-slow spreading Southwest Indian Ridge 10° -16° E. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **3**, 1-14.
- Bach, W., Garrido, C.J., Paulick, H., Harvey, J. and Roser, M., 2004, Seawater-peridotite interreactions: first insights from ODP Leg 209, MAR 15 ° N. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **5**, Q09F26, doi:10.1029/2004GC000744.
- Bach, W. and Klein, F., 2009, The petrology of seafloor rodingites: insights from geochemical reaction path modeling. *Lithos*, **112**, 103-117.
- Bach, W., Paulick, H., Garrido, C.J., Ildfonse, B., Meurer, W.P. and Humphris, S.E., 2006, Unraveling the sequence of serpentinization reactions: petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15 ° N (ODP Leg 209, Site 1274). *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi: 10.1029/2006GL025681
- 番場猛夫, 1955, 岩内岳橄欖岩体. 北海道地質要報, **29**, 7-14.
- 番場猛夫, 1972, 北海道のいわゆる「日高ヒスイ」について. 鉱山地質, **22**, 21-20.
- 番場猛夫, 1980, 北海道日高千栄産クロム透輝石ヒスイ. 宝石学会誌, **7**, 9-13.
- Bamba, T., Yagi, K. and Maeda, K., 1969, Chrome Garnet from the Vicinity of Nukabira Mine, Hidaka Province, Hokkaido, *Japan. Proc. Japan Acad.*, **45**, 109-114.
- Beard, J.S., Fullagar, P.D., and Krishna Sinha, A., 2002, Gabbroic pegmatite intrusions, Iberia Abyssal Plain, ODP Leg 173, Site1070: Magmatism during a transition from non - volcanic rifting to seafloor spreading. *J. Petrol.*, **43**, 885-905.
- Beddoe-Stephens, B., 1981. Metamorphism of the Rossland volcanic rocks, southern British Columbia. *Can. Min.*, **19**, 631-641.
- Bromiley, G.D. and Pawley, A.R., 2003, The stability of antigorite in the systems MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (MSH) and MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (MASH) : The effects of Al<sup>3+</sup> substitution on high-pressure stability. *Amer Mineral.*, **88**, 99-108.
- Brunet, F., 2019, Hydrothermal production of H<sub>2</sub> and magnetite from steel slags: a geo-inspired approach based on olivine serpentinization. *Front. Earth Sci.* **7**, 17. doi: 10.3389/feart.2019.00017
- Buckner, D.A., Roy, D.M. and Roy, R., 1960, Studies in the system CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, II: The system CaSiO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O. *Am. Jour. Sci.*, **258**, 132-147.
- Caruso, L.J. and Chernosky, J.V., 1979, The stability of lizardite. *Can. Min.*, **17**, 757-769.
- Coleman, R. G., 1966, New Zealand serpentinites and associated metasomatic rocks. *New Zealand Geol. Surv. Bull.*, **76**, 1-102.
- Coleman, R. G., 1967, Low-temperature reaction zones and Alpine ultramafic rocks of California Oregon, and Washington. *U. S. Geol. Surv. Bull.*, **1247**, 1-49.
- Dachs, E. and Metz, P., 1988, The mechanism of the reaction 1 tremolite + 3 calcite + 2 quartz = 5 diopside + 3CO<sub>2</sub> + 1 H<sub>2</sub>O: results of power experiments. *Contr. Min. Petr.*, **100**, 542-551.
- Dubińska, E., Bylina, P., Kozłowski, A., Dörr, W., Nejbort, K., Schastok, J. and Kulicki, C., 2004, U-Pb dating of serpentinization: hydrothermal zircon from metasomatic rodingite shell (Sudetic ophiolite, SW Poland). *Chemical Geology*, **203**, 183-203.
- Emmanuel, S., and Berkowitz, B., 2006, Suppression and stimulation of seafloor hydrothermal convection by exothermic mineral hydration. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **243**, 657-668. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.028>.
- Evans, B.W., 2004, The serpentinite multisystem revisited: chrysotile is metastable. *Int. Geol. Rev.* **46**, 479-506.
- Evans, B.W., 2008, Control of the products of serpentinization by the Fe<sup>2+</sup>Mg<sub>1</sub> exchange potential of olivine and orthopyroxene. *J. Petrol.*, **49**, 1873-1887.
- Evans, B. W., Trommsdorff, V. and Richter, W., 1979, Petro-

- ogy of an eclogite-metarodingite suite at Cima di Gagnone, Ticino, Switzerland. *Amer Mineral.*, **64**, 15-31.
- Frost, B.R., 1975, Contact metamorphism of serpentinite, chloritic blackwall and rodingite at Paddy-Go-Easy Pass, Central Cascades, Washington. *J. Petrol.*, **16**, 272-313.
- Frost, B.R., Beard, J.S., McCraig, A. and Condliffe, E., 2008, The formation of micro-rodingites from IODP hole U1309D: key to understanding the process of serpentinization. *J. Petrol.*, **49**, 1579-1588.
- Früh-Green, G.L., Kelley, D.S., Bernasconi, S.M., Karson, J.A., Ludwig, K.A., Butterfield, D.A., Boschi, C. and Proskurowski, G., 2003, 30,000 years of hydrothermal activity at the Lost City Vent Field. *Science*, **301**, 495-498.
- Früh-Green, G.L., Orcutt, B.N., Green, S.L., Cotterill, C., Morgan, S., Akizawa, N., Bayrakci, G., Behrmann, J.-H., Boschi, C., Brazleton, W.J., Cannat, M., Dunkel, K.G., Escartin, J., Harris, M., Herrero-Bervera, E., Hesse, K., John, B.E., Lang, S.Q., Lilley, M.D., Liu, H.-Q., Mayhew, L.E., McCaig, A.M., Menez, B., Morono, Y., Quéméneur, M., Rouméjon, S., Sandaruwan Ratnayake, A., Schrenk, M.O., Schwarzenbach, E.M., Twing, K.I., Weis, D., Whattham, S.A., Williams, M., Zhao, R., 2017, Expedition 357 summary. In G. L. Früh-Green, B. N. Orcutt, S. L. Green, C. Cotterill, and the Expedition 357 Scientists (Eds.), Atlantis massif serpentinization and life (pp. 1-34). College Station, TX: International Ocean Discovery Program.
- Fyfe, W.S., 1990, Plate tectonics and the hydrosphere. In: Nesbitt, B.E. (Ed.) Fluids in Tectonically Active Regions of the Crust. Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook 18, 299-312.
- Harker, R.I. and Tuttle, O.F., 1956, Experimental data on the P (sub  $\text{CO}_2$ ) -T curve for the reaction; calcite-quartz  $\rightleftharpoons$  wollastonite-carbon dioxide. *Am. Jour. Sci.*, **254**, 239-256.
- Hinrichsen, V.T. and Schürmann, K., 1969, Untersuchungen zur Stabilität von Pumpellyit. *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh.*, **10**, 441-445.
- Hsu, L.C., 1980, Hydration and phase relations of grossular-spessartine garnets at  $P_{\text{H}_2\text{O}}=2\text{Kb}$ . *Contr. Min. Petr.*, **71**, 407-415.
- Inoue, A., 1995, Formation of clay minerals in hydrothermal environments. In Velde, V. (Ed), Origin and mineralogy of clays, 268-329, Springer.
- Ito, J. and Arem, J.E., 1970, Idoclase : synthesis, phase relation and crystal chemistry. *Amer Mineral.*, **55**, 880-912.
- Jolivet, L. and Miyashita, S., 1985, The Hidaka shear zone (Hokkaido, Japan): Genesis during a right-lateral strikeslip movement. *Tectonics*, **4**, 289-302.
- Kalinin, D.V., 1967, Lower temperature boundaries for the formation of tremolite, diopside and wollastonite under hydrothermal conditions: experimental data. *Geol. Geofiz. Akad. Nauk SSSR*, **1**, 123-126. (in Russian). (See also English transl. In *Geochem. Intern.*, **4**, 836-839).
- 加藤孝幸, 1978, 神居古潭帯の沙流川超塩基性岩体について. *地球科学*, **32**, 273-279.
- 加藤孝幸, 2018, 日高町岩内岳かんらん岩体を通る東西地質断面. 日高山脈博物館紀要「日高山脈研究」, **1**, 21-30.
- 加藤孝幸・合地信生, 2008, 中央北海道における古第三紀~中新世初期の「特異地質体」と北東向き沈みこみ, 日本地質学会第115年学術大会要旨, 229.
- 加藤孝幸・中川 充, 1986, 神居古潭構造帯超苦鉄質岩類の由来. *地団研専報*, **31**, 119-135.
- Katoh, T. and Niida, K., 1983, Rodingites from the Kamuikotan tectonic belt, Hokkaido. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, **IV**, **20**, 151-169.
- 加藤孝幸・新井田清信・高橋功二, 2003, 下部中新統, 滝の上層中の“蛇紋岩”. 日本地質学会, 第110年学術大会, 要旨, 66.
- Kawamoto, T., Hertwig, A., Schertl, H. P., et al., 2018. Fluid Inclusions in Jadeitite and Jadeite-Rich Rock from Serpentinite Melanges in Northern Hispaniola: Trapped Ambient Fluids in a Cold Subduction Channel. *Lithos*, **308/309**, 227-241.
- 川村信人・植田勇人・中川 充・加藤孝幸・日高収束帯研究グループ, 2001, 空知-エゾ帯の“未分離日高累層群”からの高圧変成鉱物の発見. *地質雑*, **107**, 237-240.
- 川村信人・植田勇人・鳴島 勤, 1999, 前弧海盆堆積物中の不整合とスランプ体—中部蝦夷層群基底部の層位的現象—. *地質学論集*, **52**, 37-52.
- Kelley, D.S., Karson, J.A., Blackman, D.K., Früh-Green, G.L., Butterfield, D.A., Lilley, M.D., Olson, E.J., Schrenk, M.O., Roe, K.K., Lebon, G.T., Rivizzigno, P. and the AT3-60 Shipboard Party, 2001, An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30 ° N. *Nature*, **412**, 145-149.
- Kelley, D.S., Karson, J.A., Früh-Green, G.L., Yoerger, D.R., Shank, T.M., Butterfield, D.A., Hayes, J.M., Schrenk, M.O., Olson, E.J., Proskurowski, G., Jakuba, M., Bradley, A., Larson, B., Ludwig, K., Glickson, D., Buckman, K.,

- Bradley, A.S., Brazelton, W.J., Roe, K., Elend, M.J., Delacour, A., Bernasconi, S.M., Lilley, M.D., Baross, J.A., Summons, R.E. and Sylva, S.P., 2005, A serpentinite-hosted ecosystem: the Lost City hydrothermal field. *Science*, **307**, 1428–1434.
- Kelley, D.S. and Shank, T.M., 2010, Hydrothermal systems: a decade of discovery in slow spreading environments. In: Rona, P.A., Devey, C.W., Dymont, J. and Murton, B.J. (Eds.), *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*, **188**, pp. 369–407. Amer. Geophysical Union, Washington.
- 君波和雄・小松正幸・新井田清信・紀藤典夫, 1986, 北海道中生界の構造区分と層序. 地団研専報, **31**, 1-15.
- Kiminami, K., Kontani, Y. and Miyashita, S., 1985, Lower Cretaceous strata covering the abyssal tholeiite (the Hidaka Western Greenstone Belt) in the Chiroro area, central Hokkaido, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **91**, 27-42.
- Kiyokawa, S., 1992, Geology of the Idonnappu Belt, central Hokkaido, Japan: evolution of a cretaceous accretionary complex. *Tectonics*, **11**, 1180-1206.
- Kobayashi, S. and Shoji, T., 1988, Metasomatic process in the formation of rodingite in Boso Peninsula, Chiba, Japan. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **83**, 514-526.
- 国分英彦, 1987, 北海道勇払郡冠冠村ニニウ地域における神居古潭帯の蛇紋岩類の進入時期. 穂別町立博物館研究報告, **4**, 11-12.
- Koutsovitis, P., Magganis, A., Pomonis, P. and Ntaflos, T., 2013, Subduction-related rodingites from East Othris, Greece: mineral reactions and physicochemical conditions of formation. *Lithos*, **172–173**, 139–157.
- Laborda-López, C., López-Sánchez-Vizcaíno, V., Marchesi, C., Gómez-Pugnaire, M.T, Garrido, C.J., Jabaloy-Sánchez, A., Padrón-Navarta, J.A and Hidas, K., 2018, High - P metamorphism of rodingites during serpentinite dehydration (Cerro del Almiraz, Southern Spain): Implications for the redox state in subduction zones. *J. Metamorph Geol.* **36**, 1141-1174. DOI: 10.1111/jmg.12440.
- Leach, T.M. and Rodgers, K.A., 1978, Metasomatism in the Wairere Serpentinite, King Country, New Zealand. *Mineral. Mag.*, **42**, 45-62.
- Li, X.H., Putiš, M., Yang, Y.H., Koppa, M., and Dyda, M. 2014, Accretionary wedge harzburgite serpentinitization and rodingitization constrained by perovskite U/Pb SIMS age, trace elements and Sm/Nd isotopes: Case study from the Western Carpathians, Slovakia. *Lithos*, **205**, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.06.001>
- Li, X.-P., Duan, W. Y., Zhao, L. Q., et al., 2017. Rodingites from the Xigaze Ophiolite, Southern Tibet—New Insights into the Processes of Rodingitization. *European Journal of Mineralogy*, **29**, 821–837.
- Liou, J. G., 1971, Synthesis and stability relations of prehnite,  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ . *Amer. Min.*, **56**, 507-531.
- Liou, J.G., 1973, Synthesis and stability relations of epidote,  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{FeSi}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$ , *J. Petrol.*, **14**, 381-413.
- Lowell, R.P., Rona, P.A., 2002, Seafloor hydrothermal systems driven by the serpentinization of peridotite. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1531. <http://dx.doi.org/10.1029/2001GL014411>.
- MacDonald, A.H. and Fyfe, W.S., 1985, Rate of serpentinization in seafloor environments. *Tectonophysics*, **116**, 123-135.
- Maltman, T.J., 1978, Serpentine textures in Anglesey, North Wales, United Kingdom. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **89**, 972-980.
- Malvoisin, B., Chopin, C., Brunet, F. and Galvez, M.E., 2012, Low-temperature wollastonite formed by carbonate reduction: a marker of serpentinite redox conditions. *J. Petrol.*, **53**, 159-176.
- 松下勝秀・鈴木 守, 1962, 5 万分の 1 地質図福説明書「農屋」. 北海道開発庁, 38p.
- Mittwede, S.K. and Schandl, E.S., 1992, Rodingites from the southern Appalachian Piedmont, South Carolina, USA. *Eur. J. Mineral.*, **4**, 7-16.
- 森下知晃・中村謙太郎・澤口 隆・原 香織・荒井章司・熊谷英憲, 2008a, 海洋リソスフェアの熱水変質に伴う元素移動. 地学雑誌, **117**, 220-252.
- 森下知晃・荒井章司・田村明弘・石田義人, 2008b, 北海道日高町の濃鮮緑色角閃石斑状変晶を含む角閃岩転石の岩石学. 岩石鉱物科学, **37**, 1-14.
- Muraoka, H., 1985, Serpentinization reaction responsible for rodingite formation of the Ashidachi ultramafic complex, Southwest Japan. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.* **80**, 413-428, 1985.
- Nakagawa, M. and Toda, H., 1987, Geology and petrology of Yubari-dake serpentinite melange in the Kamuikotan Tectonic Belt, Central Hokkaido, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **93**, 733-748.
- 中野仁礼, 1981, 北海道, 静内—三石地域の神居古潭帯および日高西縁構造帯緑色岩類の変成作用. 地質雑, **87**, 211-224.
- 根本忠寛・三本杉巳代治・水口文作, 1942, 10 万分の 1

- 地質図幅「登川」および同説明書。北海道工業試験場報告, **5**, 31p.
- 新井田清信・福井敏之, 1987, 北海道富内北方地域の堆積性蛇紋岩。穂別町立博物館研究報告, **4**, 33-47
- 新井田清信・加藤孝幸, 1978, 北海道中軸帯の超苦鉄質岩類。地団研専報, **21**, 61-82.
- 新井田清信・紀藤典夫, 1986, 北海道における白亜紀島弧—海溝系—その地質構成と造構史—。地団研専報, **31**, 379-402.
- Nishiyama, T., Yoshida-Shiosaki, C., Mori, Y. and Shigeno, M., 2017, Interplay of irreversible reactions and deformation: a case of hydrofracturing in the rodingite–serpentinite system. *Prog. Earth. Planet. Sci.* **4**, Article number: 1. doi: 10.1186/s40645-016-0115-4.
- Nitsch, K. H., 1971, Stabilitätsbeziehungen von Preinit and Pumpellyit-haltigen Paragenesen. *Contr. Mineral. Petrol.*, **30**, 240-260.
- Normand, C. and Williams-Jones, A.E., 2007, Physicochemical conditions and timing of rodingite formation: evidences from rodingite-hosted fluid inclusions in the JM Asbestos mine, Asbestos, Quebec. *Geochem. Trans.*, **8**, doi:10.1186/1467-4866-8-11.
- O'Hanley, D.S., 1996, Serpentinities-Records of Tectonic and Petrological History. *Oxford Monographs on Geology and Geophysics*. **34**, Oxford University Press, Oxford.
- O'Hanley, D.S., Schandl, E.S., and Wicks, F.J., 1992, The origin of rodingites from Cassiar, British Columbia, and their use to estimate T and P(H<sub>2</sub>O) during serpentinization. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 97-108.
- O'Hanley, D.S. and Wicks, F.J., 1987, Structural control of serpentine textures in the Cassiar Mining Corporation's open-pit mine at Cassiar, British Columbia. *Geol. Assoc. Can.-Mineral. Assoc. Can. Joint Annual Meeting Program Abstr.* **12**, 77.
- 岡村 聡・富岡 明・加藤孝幸・立田 理・東 豊土・堺 俊樹, 2018, 神居古潭帯の蛇紋岩にともなう緑泥石岩—縄文遺跡から出土する緑色玉類の原産地の可能性—。日本地質学会第 125 年学術大会, 演旨, 363.
- Okamura, S., Tomioka, A., Katoh, T., Tatsuda, S., Azuma, T. and Sakai, T., 2018, Chloritized rocks associated with serpentinite from the Kamuikotan Tectonic Belt, North Japan; implications for source and manufacturing of the beads and stone tools from the Paleolithic - Jomon period. Learning from Our Ancestors: Using Modern Earth Science Methods to Understand Ancient Practices Posters, AGU Fall Meeting 2018, GH11B-0916.
- 小山内熙・松下勝秀, 1960, 日高山脈西縁の白堊系。II 一右左府, 額平川, 新冠川・宿主別川, イドンナップ川, アブカサンベ川, 高見, 三石・梟舞川地域の白堊系の層序。北海道地下資源調査所報告, **24**, 19-37.
- Perkins, D., III, Essene, E.J., Westrum, E.F., Jr. and Wall, V.J., 1977, Application of new thermodynamic data to grossular phase relations. *Contr. Min. Petr.*, **64**, 137- 147.
- Peacock, S.M., 1987, Thermal effects of metamorphic fluids in subduction zones. *Geology*, **15**, 1057-1060.
- Peacock, S.M. and Wang, K., 1999, Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: examples from Southwest and Northeast Japan. *Science*, **286**, 937-939.
- Python, M., Yoshikawa, M., Shibata, T. and Arai, S., 2011, Diopsidites and rodingites: serpentinization and Ca-metasomatism in the Oman ophiolite mantle. In: Srivastava RK (Ed.) Dyke swarms: keys for geodynamic interpretation. Springer, Heidelberg, pp 401–435.
- Robinson, G. R., Haas, J. L., Schafer, C. M., Hasleton, H.T., 1983, Thermodynamic and thermophysical properties of selected phases in the MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>, CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>, and Fe-FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> systems, with special emphasis on the properties of basalts and their mineral components, *US Geol. Survey, Open-File Rept.*, **83-79**, 429.
- Research Group of Peridotite Intrusion, 1967, Ultrabasic rocks in Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **73**, 543-553.
- Schandl, E.S. and Mittwede, S.K., 2001, Evolution of the Acipayam (Denizli, Turkey) rodingites. *Int. Geol. Rev.*, **43**, 611-623
- Schandl, E., O'Hanley, D.S., Wicks, F.J., and Kyser, T.K., 1990, Fluid inclusions in rodingite: a geothermometer for serpentinization. *Econ. Geol.*, **85**, 1273-1276.
- 正路徹也, 1971, ベスブ石の熱水合成とスカルン化作用。鉱山地質, **21**, 457-460.
- Takashima, R., Kawabe, F., Nishi, H., Moriya, K., Wani, R. and Ando, H., 2004, Geology and stratigraphy of forearc basin sediments in Hokkaido, Japan: Cretaceous environmental events on the Northwest Pacific margin. *Cret. Res.*, **25**, 365-390.
- Titarenko, S.S. and McCaig, A.M., 2016, Modelling the Lost City hydrothermal field: influence of topography and permeability structure. *Geofluids*, **16**, 314-328. doi: 10.1111/gfl.12151.
- 植田勇人, 2006, 日高衝突帯前縁部における白亜紀付加



- 体の地質構造. 地質雑, **112**, 699-717.
- 植田勇人, 2007, 海山沈み込みに伴う前弧域の発達過程と固体物質循環. 地質学雑誌, **113**, 補遺, 137-152.
- 植田勇人・川村信人, 2010, 第 2 章中生代～古第三紀収束域の地質帯, 2.2 付加体, 2.2.3 空知－エゾ帯の付加体, c. イドンナップ帯. 日本地質学会編, 日本地方地質誌 1: 北海道地方, 朝倉書店, 29-40.
- Ueda, H., Kawamura, M. and Yoshida, K., 2002, Blueschist-bearing fluvial conglomerate and unconformity in the Cretaceous forearc sequence, south central Hokkaido, northern Japan: Rapid exhumation of high-P/T metamorphosed accretionary complex. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **108**, 133-152.
- Vance, S., Harnmeijer, J., Kimura, J., Hussmann, H., Demartin, B. and Brown, J.M., 2007, Hydrothermal systems in small ocean planets. *Astrobiology*, **7**, 987-1005.
- Wares, R. P. and Martin, R. F., 1980, Rodingitization of granite and serpentinite in the Jeffrey mine, Asbestos, Quebec. *Can. Mineral.*, **18**, 231-240.
- Wicks, F.J. and Whittaker, E.J.W., 1977, Serpentine textures and serpentinization. *Can. Mineral.*, **15**, 459-488.
- Yagi, K., Bamba, T. and Okeya, M., 1968, Pectolites from Chisaka, Hidaka Province and Nozawa mine, Furano, Hokkaido. *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. IV*, **14**, 89-95.
- Zanoni, D., Rebay, G., and Spalla, M.I., 2016, Ocean floor and subduction record in the Zermatt - Saas rodingites, Val-touranche, Western Alps. *J. Metamorphic Geol.*, **34**, 941-961. <https://doi.org/10.1111/jmg.12215>