地質調査所月報，第50巻，第8号，p. 499-508，1999

足尾地域花崗岩体の変質と方解石の形成

濱崎聡志* 月村勝宏* 藤本光一郎** 池田隆司*** 小村健太朗***

Satoshi HAMASAKI, Katsuhiro TSUKIMURA, Koichiro FUJIMOTO, Ryuji IKEDA and Kentaro OMURA (1999) Alteration and calcite formation in the granitic rocks, Asio area, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 50 (8), p. 499-508. 10 figs., 1 table, 2 appendix-tables.

Abstract: This paper has described the alteration minerals in host rock and microfractures of granitic rocks, and the formation process of them. Samples were taken from the drill core, maximum depth 2002 m, in the granodiorite, Asio area, central Japan. The host granodiorite has many microfractures with width of less than 2 mm. The main alteration minerals in the host rock are illite, chlorite, calcite and fluorite. Plagioclase is altered to illite and biotite to chlorite. The microfractures are filled with quartz, illite, chlorite, laumontite or calcite. There are rare correlations between the alteration degree and the depth. The alteration degree increases toward the microfracture, so the hydrothermal solution along the fractures altered the nearby host rock. Although the measured present temperature of 2000 m deep ground water is 91℃, the alteration minerals formed at less than 100℃ are not observed. Therefore the alteration minerals have not been formed by the present deep ground water.

As the alteration proceeds, illite and chlorite are accompanied with much calcite. Based on the occurrence of calcite and chemical composition of primary rock-forming minerals, the alteration of An-component plagioclase and precipitation of calcite have occured intimately. It is considered that the pH and Ca^{2+} concentration of the hydrothermal solution caused the acceleration of both reactions. The plagioclase-water interaction and precipitation of calcite are very important in the alteration process of the granitic rock.

要　旨

花崗岩における母岩および微小割れ目に生じた変質鉱物とその生成過程について考察した．試料は栃木県足尾地域の花崗閃緑岩体に掘られたボーリングコア（最大深度2002m)から採取された．花崗閃緑岩母岩中には幅2 mm以下の非開口性微小割れ目が多く見られる．母岩中の主な変質鉱物はイライト・緑泥石・方解石・蛍石であり，黒雲母が緑泥石へ，斜長石がイライトへと変質している．微小割れ目は，石英・イライト・緑泥石・濁沸石・方解石で充塡されている．母岩の変質度は，コアサンプルの深度とほとんど相関がなく，微小割れ目近傍ほど強い．したがって，微小割れ目を通路とした熱水が近傍の母岩を変質させたと考えられ，大量の熱水が広範囲に駆動した地熱地域の変質とは異なる．検層による現在の地下水温度は深度2000mの孔底でも91℃であり，100℃以下で生成される変質鉱物はコア中には見い出されない．したがってコア中の変質鉱物は現在の深層地下水によるものではない．

母岩の変質が進行するにつれ緑泥石・イライトは方解石をともない，変質が強いほど方解石は増加している．方解石の産状と初生造岩鉱物の化学組成から，An成分の斜長石の変質と方解石の形成が密接に関連して進行したと考えられる．これは両者の反応が熱水のpHとCa^{2+}濃度によって相互に促進されたためと推定される．したがって斜長石-水反応および方解石の形成は花崗岩の変質過程においてきわめて重要である．

1．はじめに

岩石の変質や地下水の性質を知ることは，マグマ-熱水系あるいは岩石風化において流体の性質や挙動を明らかにするだけでなく，高レベル放射性廃棄物地層処分における天然バリアの性能を評価する上でも重要である．変質鉱物とくに粘土鉱物は，放射性核種の吸着能力が高い．そのため，岩盤中の割れ目を移行してきた地下水中の核種が割れ目沿いやその近傍の変質鉱物に吸着，固定され，核種の移行を妨げるあるいは遅延させると考えら

*資源エネルギー地質部（Mineral and Fuel Resources Department GSJ）
**地殻熱部（Geothermal Research Department GSJ）
***防災科学技術研究所地圏地球科学技術研究部（National Research Institute for Earth Science and Desaster Prevention）
〒305-0006　つくば市天王台3-1

Keywords: granitic rock, alteration, microfractures, plagioclase, calcite, Ashio

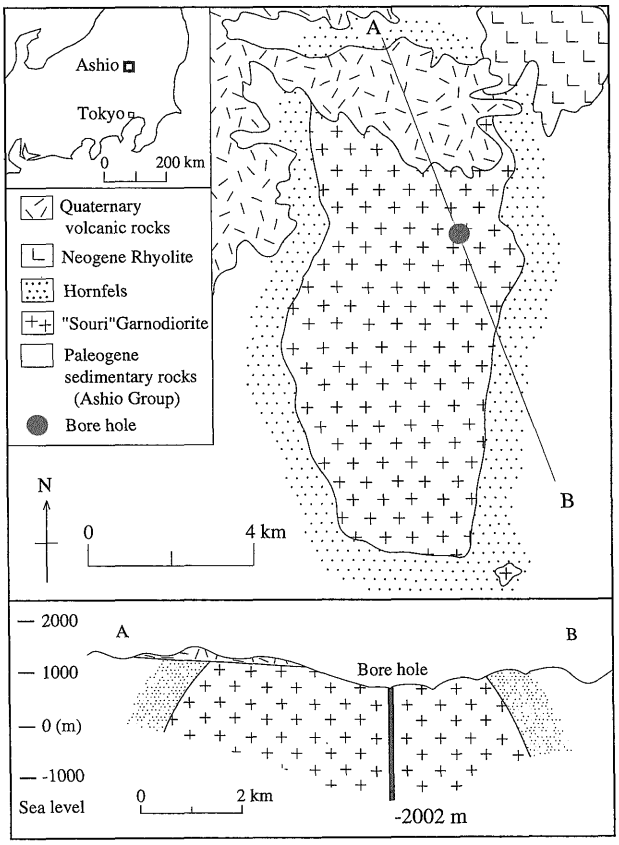
れる．鉱物が持つ吸着や固定の程度と核種の種類は各鉱物によって異なる．したがって，岩石中の割れ目における鉱物の変質状況を知ることは，放射性核種の移行現象を推定する上で重要である．また，割れ目付近の鉱物はその近傍における水-岩石反応によって地下水組成に影響を及ぼすと考えられる．したがって，微小割れ目やその近傍の鉱物の変質状態を把握することは，地下水の化学組成，水質形成機構を推定する上でも重要となる．

以上に鑑み，本研究では，岩石の変質をバルクだけでなく鉱物レベルで明らかにすることが必要と考え，母岩および微小割れ目に生じた変質鉱物とその形成過程を鉱物毎に微視的に解析した．試料は栃木県足尾地域の花崗岩体に掘られた深度2000mのボーリングコアから採取した．なお，生成鉱物による花崗岩地域の深層地下水の化学組成の推定については Hamasaki *et al.* (1995) によって，また本研究の一部についてはすでに濱崎他 (1996) および Hamasaki and Tsukimura (1997) で公表した．したがって，本報告では光学および電子顕微鏡観察による変質鉱物の記載を中心に，それらの化学組成からも考察を行い，初生造岩鉱物とその二次生成鉱物への変質過程について述べる．

2．周辺地質とボーリングコア

ボーリング地点付近の地質図および断面図を各々Fig. 1に示す．本地域にはジュラ紀足尾層群の粘板岩・砂岩・チャート・石灰岩などの堆積岩類が広く分布している．これに白亜紀～古第三紀の花崗岩類が貫入し，周囲にホルンフェルス化をおよぼしている．それらを第四紀火山岩が覆っている．ボーリングが掘削されたのは，「沢入花崗閃緑岩」とよばれる露出面積6×12kmの足尾地域最大の深成岩体である（河田・大沢，1955）．また本岩体からの花崗閃緑岩はJG-1として地質調査所標準岩石試料にもなっており，87～92MaのK-Ar年代値が報告されている（矢内，1972；長尾他，1984；Sudo *et al.*, 1998）．ボーリングは防災科学技術研究所によって地殻応力測定を目的として1988年から1991年にかけて掘削された．岩体ほぼ中央部東寄りに垂直に掘削され，最大深度は2002mであった（塚原・池田，1990）．

サンプルの採取深度と掘削時の検層温度をFig. 2に示す．サンプルは深度23mから2001mまでの母岩または割れ目から合計15個採取した．母岩は浅所から深所にわたり肉眼上未変質のものから変質の強いものまでほぼ均等数に数個ずつ採取した．13℃の地表から測定された深度1650mまでの孔内検層温度は，深度とともにほぼ直線的に増加しており，孔底での温度は91℃であった（池田他，1993；小村他，1994）．コアサンプルの写真をFig. 3に示す．コア中には幅2mm以下の微小割れ目が多く見られた(Fig. 3-bの矢印)．これらの微小割れ目はほとんど非開口性であるが，幅の広いものは開口している．



第1図 “沢入花崗閃緑岩”地域の地質図および地質断面図（矢内，1972）

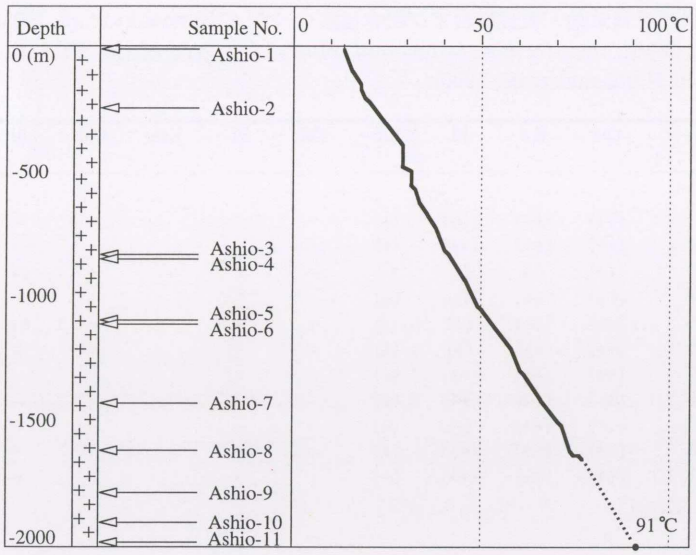
Fig. 1 Geological map and cross section of the “Souri Granodiorite” area which was drilled. (Yanai, 1972)

3．試料とその鉱物組成

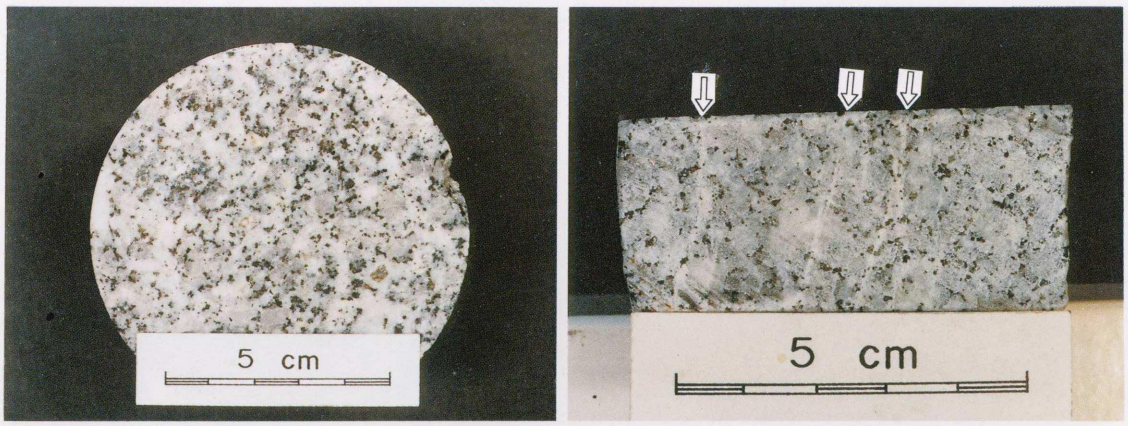
母岩中の生成鉱物は主に薄片の偏光顕微鏡観察によって同定した．また割れ目中の生成鉱物の同定にはこの他にXRD（リガク，RAD-rA，40*kV*-120*mA*，Cu回転対陰極）およびSEM（JEOL，JSM-5400LV）を用いた．さらにSEM付属のEDXにより鉱物の化学組成を決定し，鉱物同定および変質過程における化学反応の考察に供した．結果をTable-1に示す．

母岩は優白色粗粒の岩相で，一部細粒になる箇所もあるが全体的には岩相変化の少ない塊状の岩体であり，石英・カリ長石・斜長石・黒雲母を主要造岩鉱物とする黒雲母花崗閃緑岩である．角閃石・輝石は観察されなかった．母岩中の主な変質鉱物はイライト・緑泥石・方解石・蛍石である．

各造岩鉱物は変質に対し黒雲母，斜長石，カリ長石，石英の順に脆弱であった．石英は強変質試料でもほとんど変質していない．次いでカリ長石も，変質のかなり進



第2図　ボーリング孔における現在温度（小村他，1994）
Fig. 2　Present temperature of the drillhole. (Omura *et al.*, 1994)



第3図　ボーリングコアの写真．a) Ashio-4 (851 m), b) Ashio-7 (1440 m)．矢印は微小割れ目を示す．
Fig. 3　Photograph of the drill core. a) Ashio-4 (851 m), b) Ashio-7 (1440 m). Arrows show the microfractures.

んだ試料でもほとんど変質していない．一方，斜長石では変質が進むにつれて結晶の中心部がイライトへ交代し始め，さらに変質が進行すると結晶全てがイライト化している（Fig. 4-1, 3, 4）．また，累帯構造に沿ってイライト化が見られることがある（同-2）．斜長石の結晶が全てイライト化した段階になると，カリ長石もパーサイト構造のアルバイトを残してほとんどイライト化している．黒雲母ではへき開沿いに緑泥石による交代が進行し，やがて完全に緑泥石化している（Fig. 5-1, 2, 3）．かなり緑泥石化した段階からは方解石をともなってくることが多い（同-4）．蛍石は石英中の小穴を充填しており，粒径約2 μmの斑点状に産している（Fig. 5-4；Fig. 7-3, 4）．蛍石は母岩の変質が強いほど増加する傾向にあり，含有量が比較的多い場合にはそのモード%は全岩中の1%前後に達する．

これらの顕微鏡観察から母岩の変質度を新鮮・弱・中・強の4段階に区分した．区分の基準は次のとおりである．新鮮：黒雲母および斜長石が未変質，ただし斜長石はわずかに変質していることがある．弱変質：黒雲母結晶中の2－3割の部分が緑泥石に，斜長石は結晶中心および累帯構造に沿って部分的にイライトに交代されている．方解石が斜長石中にイライトと共生して少量見られる．中変質：黒雲母結晶中の7－8割の部分が緑泥石化している．斜長石結晶中の半分以上がイライトに交代されており，未変質の斜長石結晶はない．黒雲母，斜長石中に各々緑泥石，イライトと共生して方解石がしばしば生成している．強変質：黒雲母は結晶が完全に緑泥石に交代されている．斜長石もほとんどの結晶中の7－8割ときに全ての部分がイライトに交代されている．緑泥石，イライトのいずれも方解石を伴うことが非常に多い．

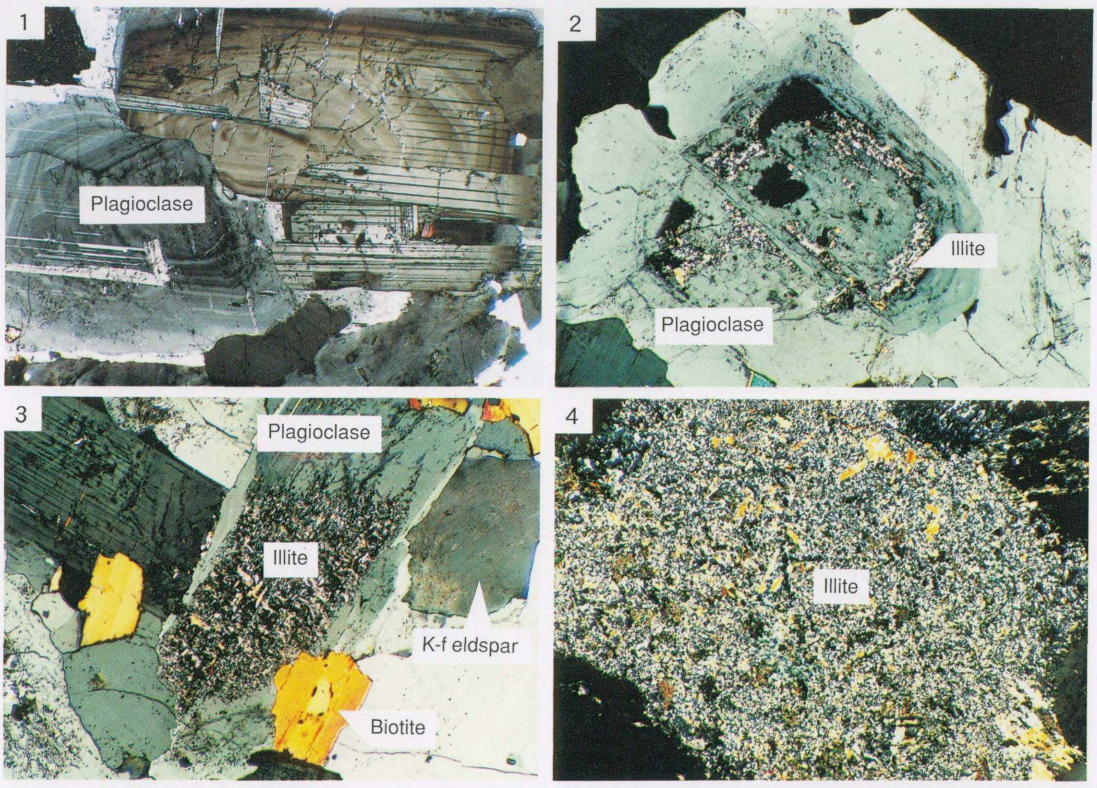
一方，母岩中の微小割れ目は，石英・イライト・緑泥石・濁沸石・方解石のいずれかで充填されている（Ha-

第1表　試料・深度・造岩／変質鉱物・変質度および現在温度の一覧（Hamasaki *et al.*, 1995に加筆）.

Table 1 List of samples, depth, rock-forming/alteration minerals, degree of the alteration and present temperature (Corrected in Hamasaki *et al.*, 1995).

Sample	Depth(m)	Qtz	K-f	Pl	Bio	Cal	Fl	Lau	Chl	Ill	Alteration	Present temp.(C)
Host rock												
Ashio 1	23	(++)	(++)	(++)	(+)				-	-	fresh	12.7
Ashio 2	243	(++)	(++)	(++)	(+)	-			-	--	week	21.3
Ashio 3	850	(++)	(-)	(-)	(-)	--	-		+	++	v. strong	43.4
Ashio 4	851	(++)	(++)	(++)	(+)	--	-		--	--	week	43.5
Ashio 5	1113	(++)	(++)	(--)	(-)	+	--		+	++	strong	53.3
Ashio 6	1115	(++)	(++)	(+)	(+)	--	--		+	+	moderate	53.4
Ashio 7	1440	(++)	(++)	(++)	(+)		-		-	-	fresh	67.4
Ashio 8	1621	(++)	(++)	(++)	(+)	-	-		-	--	fresh	74.8
Ashio 9	1806	(++)	(++)	(+)	(--)	--	--		--	+	moderate	83 *
Ashio 10	1916	(++)	(++)	(++)	(+)		--		-	-	week	88 *
Ashio 11	2001	(++)	(++)	(++)	(--)	-	--		--	+	moderate	91 *
Fracture												
Ashio 3-a	850	+				--			+	+		43.4
Ashio 5-a	1113	+				-			--	-		53.3
Ashio 6-a	1115	+				+		++	+	+		53.4
Ashio 9-a	1806	+				--		+	+	+		83 *

Qtz: quartz, K-f: K-feldspar, Pl:plagioclase, Bio: biotite, Cal: calcite, Fl: fluorite, Lau: laumontite, Chl: chlorite, Ill: illite
++: very much, +: much, --: a little, -: little, No symbol: zero, ( ): primary mineral, *: estimated temperature



第4図　母岩中でイライトに交代される斜長石の顕微鏡写真．直行ポーラー．幅3 mm．1）累帯構造をもつ新鮮な斜長石．2）斜長石が累帯構造に沿ってイライトに交代され始めている．3）斜長石の核がイライトに交代され始めている．黒雲母はまだ交代されていない．4）斜長石の全ての部分がイライトに交代されている．

Fig. 4　Photomicrograph showing plagioclase replaced by illite in the host rocks. Crossed polars. Width is 3 mm. 1) Fresh plagioclase with zonal structure. 2) Plagioclase begins to be replaced by illite along the zonal structure. 3) The core of plagioclase begins to be replaced by illite. Biotite is not altered yet. 4) All plagioclase is replaced by illite.

masaki *et al.*, 1995）．なおイライトについては，EDXによる分析の結果，$Na_{0.05}K_{0.88}Mg_{0.14}Fe_{0.07}Al_{2.54}Si_{3.26}O_{10}(OH)_2$という平均化学組成（N＝13）を示す．

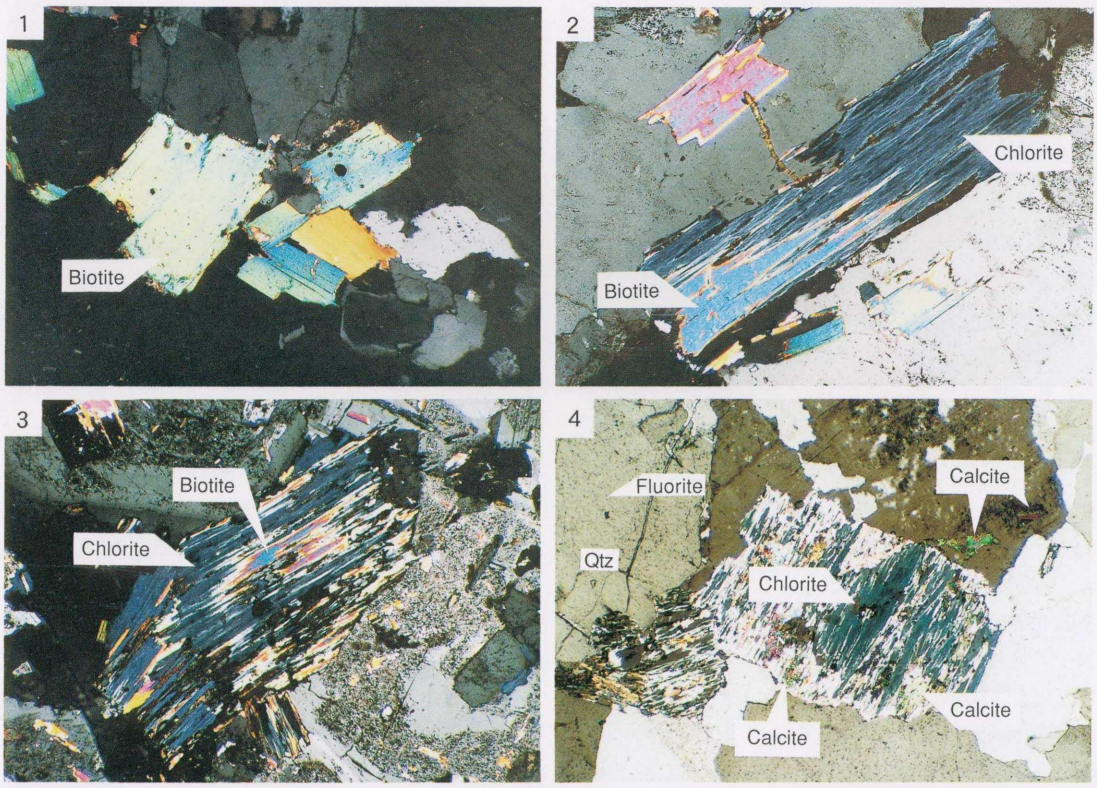
Fig. 6に，開口した微小割れ目を充填している変質鉱物のSEM像写真を示す．各鉱物は割れ目壁面に自形を呈して産している．

4．方解石の産状

変質のある程度進んだ母岩中には方解石が多く見られる．その産状は次の5つに分類できる．1：緑泥石のへき開沿いに成長（Fig. 5-4），2：斜長石中でイライトと共生（Fig. 7-1），3：他鉱物を切って幅0.5mm以下の微細脈を形成（同-2），4：自形-半自形の粒子状（同-3），5：鉱物粒間や破砕された鉱物の割れ目を充填（同-4）．以上の方解石の産状と母岩の変質度には明瞭な相関が見られる．たとえば1では，変質の初期段階では黒雲母のへき開沿いに緑泥石が交代しているのみであり，方解石はほとんど見られない．しかし変質が進行すると緑泥石のへき開沿いに方解石が見られるようになる．またへき開に沿った方解石が他鉱物中にそのまま伸長して見られることもある（Fig. 5-4）．2では，弱変質試料では斜長石はイライトのみに交代されていることが多く，方解石をともなうことはまれである．しかし強変質試料になると方解石がイライトと共生している産状が多くなる．3の微細脈は，肉眼で見られる幅2mm程度の割れ目よりもさらに微小なかつての割れ目である．弱変質母岩中にも微細脈は普遍的に見られるが方解石で満たされたものはほとんどない．4および5の産状は強変質試料でしか見られない．以上のことから，母岩の変質が進行するにつれ，方解石の含有量は明らかに増加している．また，微細脈あるいは他鉱物の粒間を埋めるなどの産状は，方解石が花崗岩の変質過程の後半から最末期まで形成されていたことを示している．

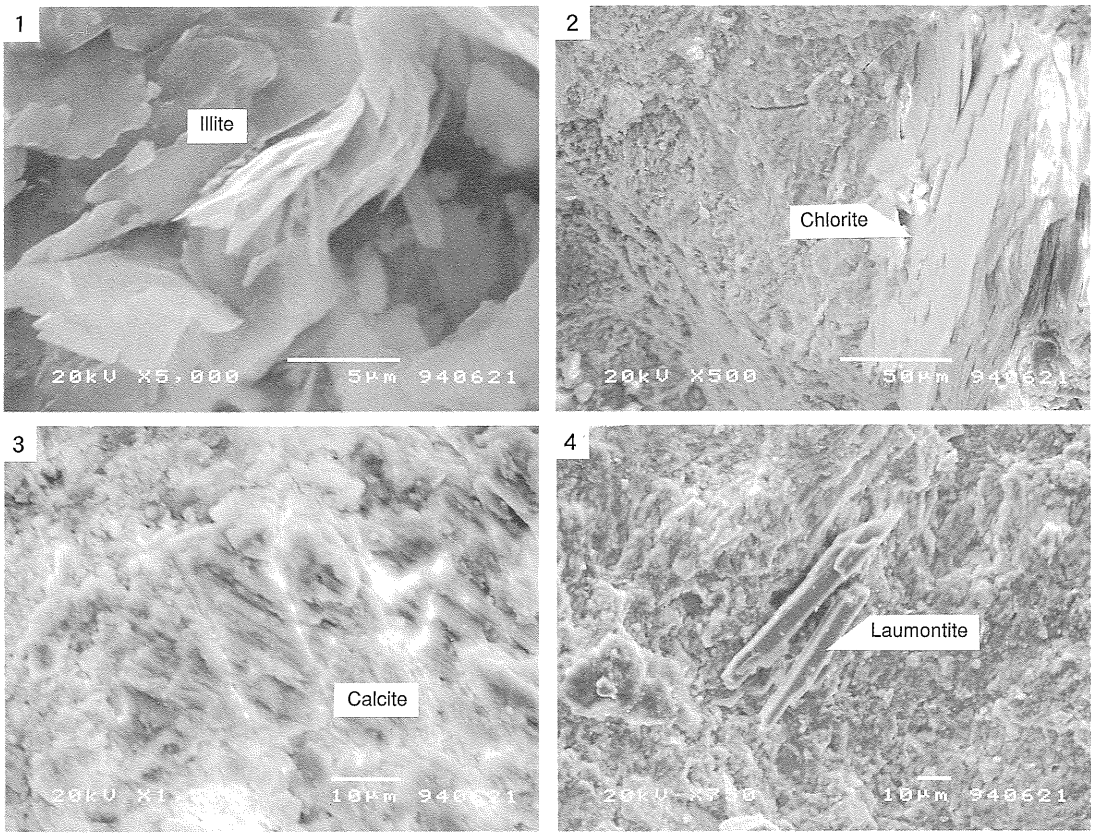
5．考　察

母岩中および微小割れ目を充填する変質鉱物の種類と



第5図　母岩中で緑泥石に交代される黒雲母の顕微鏡写真．直行ポーラー．幅3mm．1）明瞭な壁開をもつ新鮮な黒雲母．2）黒雲母が壁開に沿って緑泥石に交代され始めている．3）黒雲母のほとんどの部分が緑泥石に交代されている．4）黒雲母が完全に緑泥石に交代され，方解石が壁開沿いに形成されている．方解石は緑泥石の壁開の延長にも観察される．蛍石に充填された微小穴が石英中に多数見られる．

Fig. 5　Photomicrograph showing biotite replaced by chlorite in the host rocks. Crossed polars. Width is 3 mm. 1) Fresh biotite with conspicuous cleavages. 2) Biotite begins to be replaced by chlorite along the cleavages. 3) Most biotite replaced by chlorite. 4) All biotite replaced by chlorite, and calcite precipitates along the cleavages. Calcite can be observed also on the extension of chlorite cleavages. Many pinholes which are filled with fluorite can be observed in quartz.



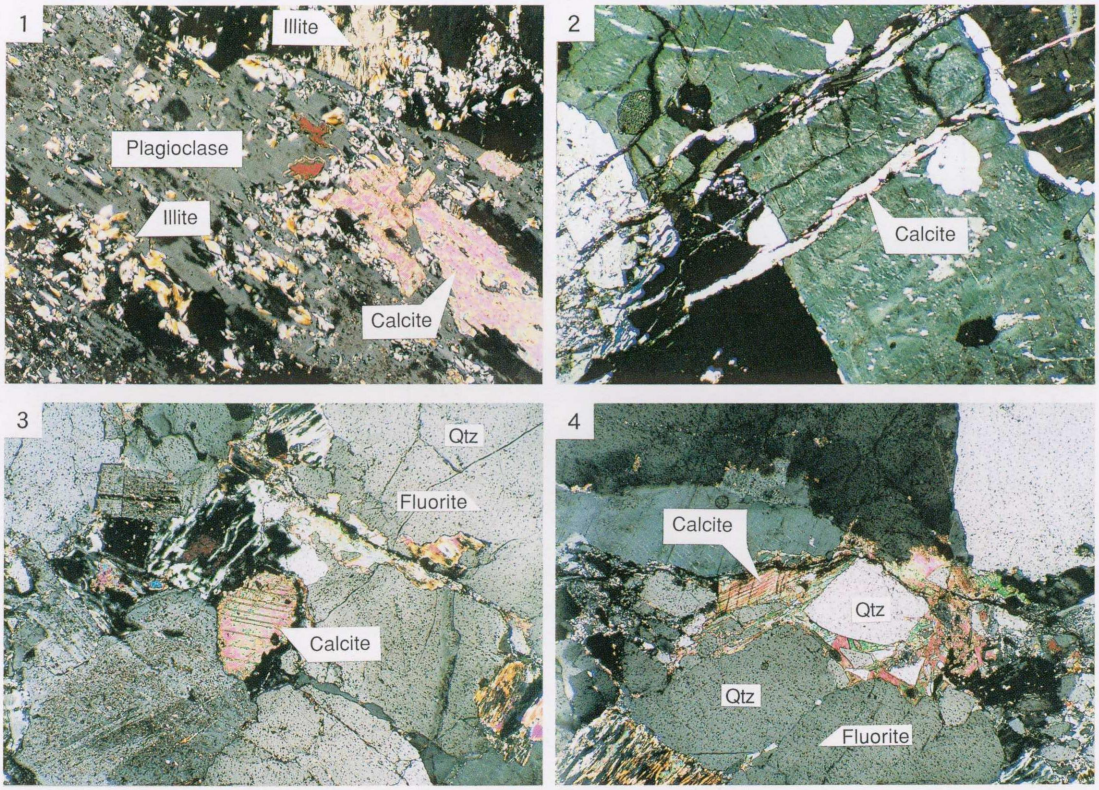
第6図　微小割れ目を充填する変質鉱物の走査電子顕微鏡写真.
Fig. 6　Scanning electron micrograph of alteration minerals filling microfracures.

その化学組成は，深度との間にほとんど相関をもたない（Hamasaki *et al.*, 1995）．一方，試料中に微小割れ目が存在する場合には割れ目に近いほど変質は強くなっている．つまり，深度にかかわらず微小割れ目近傍の母岩は強変質であり，離れた部分ではほとんど変質していない．このことから，微小割れ目が水の通路となり近傍の母岩を変質させたと考えられる．したがって，これらの変質は，地熱地域のように潜頭マグマが熱源となり大量の熱水を駆動させ広域的な熱水変質を生じさせたケース（佐々木他，1995など）と同様には考えにくい．

本岩体の微小割れ目においては，濁沸石が認められる．したがって微小割れ目を通路とした水は，140℃以上であったことがわかる（Liou, 1971）．コアの検層による現在の地下水温度は23mの13℃から上昇し2000mで91℃である（池田他，1993）．しかし，100℃以下で生成される変質鉱物，たとえばスメクタイトなどは全レベルにおいて見い出されていないため，コア中の変質鉱物は現在の深層地下水によるものではないと考えられる．したがって母岩を変質させた水の起源としては2つの可能性が挙げられる．ひとつは花崗岩を形成したマグマの固結最末期の140℃以上の熱水，もうひとつは岩体固結後に現在よりも高い地温勾配によって140℃以上まで熱せられた当時の地下水であり，いずれのケースにしても割れ目を通路として近傍の母岩を変質させたと考えられる．

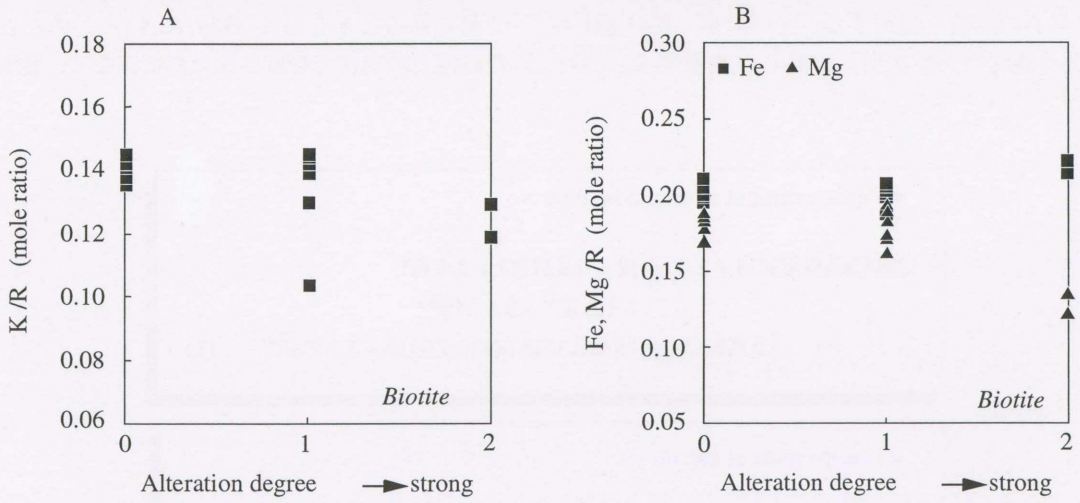
前述のように変質鉱物の組成と深度には対応関係がないが，母岩の変質度と初生造岩鉱物の化学組成には明瞭な相関が見られる．Fig. 8, 9には，母岩の変質度と黒雲母および斜長石の化学組成変化について，モル比で各々示している．変質が進行するにつれて黒雲母ではK, Mgが減少し，Feはやや増加しているが変化量は小さい．一方斜長石ではCaの割合が大きく減少し，Si/Al比が増加している．これは変質の進行にともない残存斜長石に占めるAn成分の割合が減少し，相対的にAb成分が増加，もしくはAlbite化が進んでいることを示している．新鮮な斜長石を含む試料では，斜長石の中心部はCaに富む化学組成のものが多く，鏡下では結晶の中心部からイライト化し始めている例が多い．したがって斜長石は選択的にAn成分に富む部分からイライトへの交代が始まったと考えられる．また累帯構造に沿ってイライト化している斜長石もしばしば見られるが，これもかつてのAn成分に富む部分の帯状構造を表していると考えられる．

さらに，前述のように顕微鏡下での観察からは母岩の変質の進行に伴い方解石および蛍石の含有量が増加している．したがって，花崗岩の変質とこれらの鉱物の形成



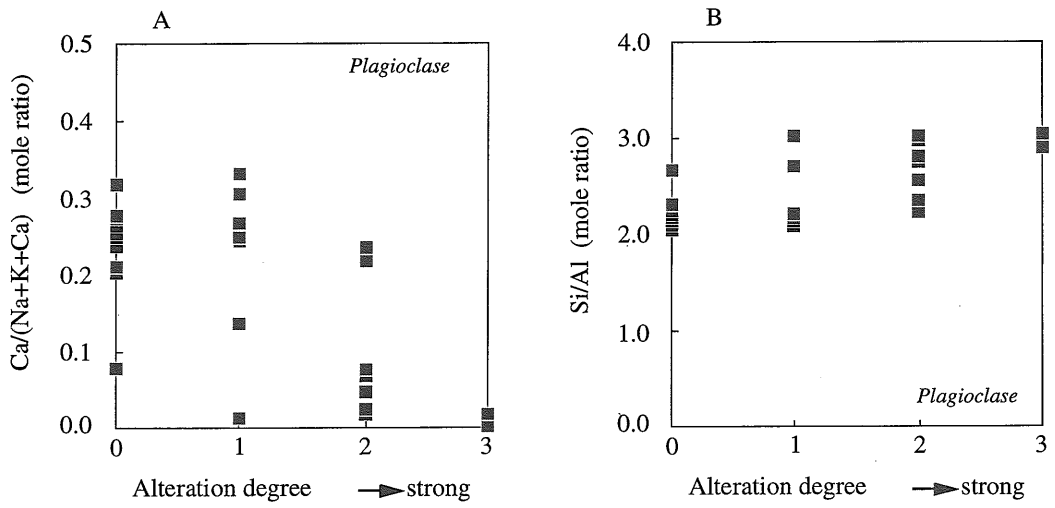
第7図　母岩中に形成されている方解石の顕微鏡写真．直行ポーラー．No. 1～No. 3は3 mm幅，No. 4は1. 5 mm幅．1）強変質岩中でのイライトと方解石の共生．2）方解石細脈．3）他鉱物粒子の境界にみられる方解石．石英中の微小穴は蛍石に充填されている．4）破砕鉱物のマトリックスを埋める方解石．石英中の微小穴を蛍石が充填．

Fig. 7　Photomicrograph showing calcite formation in the host rocks. Crossed polars. No. 1 to 3 are 3 mm and No. 4 is1.5 mm wide. 1) Paragenesis of illite and calcite in the strongly altered plagioclase. 2) Calcite veinlets. 3) Calcite in grain boundary of other minerals. Pinholes in quartz are filled with fluorite. 4) Calcite in matrix of sheared minerals. Pinholes in quartz are filled with fluorite.



第8図　黒雲母の変質度に対する化学組成変化．Rは Si＋Al＋Mg＋Fe のモル量を示す．A）変質度に対する K と R のモル比．B）変質度に対する Fe または Mg と R のモル比．数字の0，1，2は各々新鮮，弱，中変質に対応する．

Fig. 8　Chemical transition as an alteration degree of biotite. R shows the moles of Si＋Al＋Mg＋Fe. A) Potasium to R mole ratio as an alteration degree. B) Fe or Mg to R mole ratio as an alteration degree. Numbers of 0, 1, 2 show the degree of the alteration : fresh, weak, moderate, respectively.



第9図　斜長石の変質度に対する化学組成変化．A）変質度に対するCaとアルカリ元素のモル比．B）変質度に対するSiとAlのモル比．

Fig. 9　Chemical transition as an alteration degree of plagioclase. A) Calcium to alkali elements mole ratio as an alteration degree. B) Silica to aluminum mole ratio as an alteration degree.

は平行して行われた可能性が高い．Fig. 10は斜長石の変質と方解石の沈殿における化学反応式である（Hamasaki *et al.*, 1995）．(1)はアノーサイトがイライトに変質するとき，(2)は方解石が沈殿する際の反応である．(1)では，H^+がイライトに入りCa^{2+}が熱水中に溶出するため，熱水のpHは増加しCa^{2+}濃度が高くなる．一方，熱水中でH_2Oと反応したCO_2はHCO_3^-となり，Ca^{2+}と反応して方解石が沈殿する．この過程では，Ca^{2+}が方解石中に入り，H^+が熱水中に溶出する．したがって，方解石の沈殿が熱水中のpHとCa^{2+}濃度を減じるため，(1)の斜長石の変質を促進する．その結果，再びpHの増加とCa^{2+}濃度の上昇が生じ方解石が沈殿する．これら2つの反応は相互に促進しながら，冷却にともない流体と鉱物が平衡に達するまで行われたと考えられる．さらに，熱水中にF^-が存在すると，Ca^{2+}との反応から

$$Ca^{2+} + 2F^- = CaF_2$$

によって蛍石（CaF_2）が沈殿する．したがって，蛍石の存在は，変質をもたらした熱水中にHCO_3^-とともにF^-も含まれていたことを示している．一方，緑泥石中にも方解石は多く形成されている．しかし，黒雲母・緑泥石のいずれもCaはほとんど含まない．また前述のようにへき開に沿った方解石が他鉱物中にそのまま伸長して見られることもある（Fig. 5-4）．このことは方解石が緑泥石の交代で形成されたのではなく，他から移動し

< Replacement of anorthite by illite >

$$2.3\ CaAl2Si2O8 + 2.4\ SiO2 + 0.8\ H2O + 2.4\ H^+ + 1.2\ K^+ + 0.5\ Mg^{2+} \rightarrow 2.0\ K0.6Mg0.25Al2.3Si3.5O10(OH)2 + 2.3\ Ca^{2+} \quad (1)$$

< Precipitation of calcite >

$$HCO3^- + Ca^{2+} \rightarrow H^+ + CaCO3 \quad (2)$$

第10図　アノーサイトからイライトへの変質(1)，および方解石の形成(2)の化学反応．（Hamasaki *et al.*, 1995）．

Fig. 10　Chemical reactions of alteration for anorthite to illite (1) and formation of calcite (2) (Hamasaki *et al.*, 1995).

てきたCaの沈殿によることを示している．したがって，緑泥石中にみられる方解石中のCaも斜長石の変質によってもたらされた可能性が高い．以上のことから斜長石と水の反応および方解石の形成は，花崗岩が変質する過程において，主要な反応として寄与していると思われる．

6．ま と め

母岩の花崗閃緑岩は均質な岩相ではあるが，コア中には幅2mm以下の非開口性微小割れ目が多く見られる．母岩中の主な変質鉱物はイライト・緑泥石・方解石・蛍石であり，微小割れ目は，石英・イライト・緑泥石・濁沸石・方解石のいずれかで充填されている．各造岩鉱物でみると黒雲母が緑泥石へ，斜長石がイライトへと変質しており，母岩の変質の進行と方解石の含有量に相関がみられる．これはAn成分の斜長石の変質と方解石の沈殿が密接に関連して進行したためと考えられ，両者は花崗岩の変質において非常に重要である．

母岩の変質度はコア深度とほとんど相関はないが微小割れ目近傍ほど強いため，地下水が微小割れ目を通路として近傍の母岩を変質させたと考えられる．したがってこれらの変質は，地熱地域のように潜頭マグマが熱源となって大量の熱水を駆動させ高温かつ広域的な熱水変質を生じさせたケースと同様には考えにくい．また，検層温度による現在の地下水は深度2000mの孔底でも91℃であるが，100℃以下で生成される変質鉱物がコア中には見い出されないので，今回観察した変質は現在の深層地下水によるものでもない．今後，本岩体深部の変質鉱物の形成に関与した熱水の起源を明らかにする必要がある．

謝辞　本研究を進めるにあたり，電子顕微鏡の操作に際して地質調査所地殻熱部の柳沢教雄氏にお世話になった．またX線回折計による鉱物同定の際には同所資源エネルギー地質部の須藤定久資源解析研究室長，顕微鏡観察においては同所地質情報センターの平野英雄情報管理室長に助言をいただいた．薄片作成には地質調査所試料調整課の大和田朗技官の手を煩わした．記して以上の方々に深く感謝いたします．

文　献

Hamasaki, S., Tsukimura, K., Fujimoto, K., Omura, K. and Ikeda, R. (1995) Alteration Minerals in Granitic Rock at Ashio as Radionuclide Adsorption Materials. *Material Reserch Symposium Proceedings*, **353**, 1275-1282.

濱崎聡志・月村勝宏・藤本光一郎・小村健太朗・池田隆司（1996）　花崗岩中の微小クラックに伴う変質鉱物の生成機構，足尾花崗岩体のコア試料の例（演旨）．日本鉱物学会1996年度年会公演要旨集，111.

Hamasaki, S. and Tsukimura, K. (1997) Formation mechanism of alterationminerals in the fractures in granitic rocks at Ashio, central Japan. *Proceeding of the 11th International Clay Conference*, p251.

池田隆司・小村健太朗・山本俊也・塚原弘昭（1993）　水圧破壊実験井における物理検層．物理探査学会第88回学術講演論文集，379-384.

河田清雄・大沢　穠（1955）　足尾地域の地質．地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，57p.

Liou, J. G. (1971) Stilbite-Laumontite Equilibrium. *Contr. Mineral. and Petrol.*, **31**, 171-177.

長尾敬介・西戸裕嗣・板谷徹丸・緒方惟一（1984）　K-Ar法による年代測定．岡山理科大学蛭山研究所報告，**9**，19-38.

小村健太朗・池田隆司・宝来帰一・小林洋二（1994）　活発な地震活動域の地殻熱流量－足尾2km井での精密測定－．日本地震学会講演予講集，295.

佐々木宗建・笹田政克・藤本光一郎・村松容一・小松亮・佐脇貴幸（1995）　流体包有物に記録された若い花崗岩貫入後の熱水活動－葛根田地熱地域と乳頭地熱地域を例に－，資源地質，**45**，303-312.

Sudo, M., Uto, K., Anno, K., Ishizuka, O. and Uchiumi, S. (1998) SORI93 biotite: A new mineral standard for K-Ar dating. *Geochemical Journal*, **32**, 49-58.

塚原弘昭・池田隆司（1990）　震源域に到達するボーリング調査－2000m. 地質ニュース，**436**，25-30.

矢内桂三（1972）　足尾山地北部の後期中生代酸性火成岩類，その1　地質．岩鉱学会誌，**67**，193-202.

付表第1表　Oを11個とした場合の黒雲母の化学分析値．0～3の数字は各々新鮮，弱，中，強の変質度を示す．
Appendix table 1 Chemical analysis of biotites based on 11 oxygens. Numbers of 0 to 3 show the degree of alteration: fresh, weak, moderate, strong, respectively.

Sample	Alt.	Depth	Si	Al	K	Na	Ca	Mg	Ti	Mn	Fe	Cr	O
Biotite													
Ashio1-1	0	23	2.77	1.37	0.92	0.05	0.00	1.23	0.17	0.03	1.33	0.00	11
Ashio1-2	0	23	2.75	1.35	0.92	0.11	0.00	1.17	0.20	0.05	1.35	0.00	11
Ashio 2	1	23	2.73	1.43	0.97	0.06	0.00	1.15	0.17	0.03	1.36	0.00	11
Ashio 4-1	1	23	2.72	1.51	0.97	0.00	0.00	1.09	0.18	0.05	1.33	0.00	11
Ashio 4-2	1	23	2.66	1.49	0.70	0.07	0.08	1.16	0.19	0.04	1.38	0.01	11
Ashio 7	0	1440	2.76	1.40	0.91	0.03	0.01	1.14	0.16	0.04	1.41	0.00	11
Ashio 8-1	0	1621	2.78	1.34	0.93	0.05	0.00	1.22	0.17	0.04	1.36	0.00	11
Ashio 8-2	0	1621	2.76	1.40	0.95	0.09	0.00	1.20	0.17	0.05	1.30	0.00	11
Ashio10-1	1	1916	2.78	1.28	0.93	0.02	0.00	1.29	0.19	0.05	1.33	0.00	11
Ashio10-2	1	1916	2.84	1.25	0.95	0.06	0.00	1.23	0.17	0.03	1.35	0.00	11
Ashio10-3	1	1916	2.81	1.35	0.87	0.02	0.00	1.27	0.18	0.04	1.25	0.00	11
Ashio11-1	2	2001	2.70	1.71	0.86	0.02	0.00	0.82	0.15	0.05	1.43	0.01	11
Ashio11-2	2	2001	2.61	1.75	0.81	0.08	0.00	0.93	0.11	0.07	1.51	0.00	11

付表第2表　Oを8個とした場合の斜長石の化学分析値．変質度の数字は付録1と同様．
Appendix table 2 Chemical analysis of plagioclases based on 8 oxygens. Alteration numbers show the same degree as appendix table 1.

Sample	Alt.	Depth	Si	Al	K	Na	Ca	Mg	Ti	Mn	Cr	Fe	O
Plagioclase													
Ashio1-1	0	23	2.73	1.26	0.01	0.74	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio1-2	0	23	2.74	1.24	0.02	0.76	0.26	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio1-3	0	23	2.76	1.21	0.01	0.84	0.21	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio1-4	0	23	2.78	1.21	0.01	0.82	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio1-5	0	23	2.72	1.28	0.01	0.75	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio1-6	0	23	2.74	1.24	0.01	0.79	0.25	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	8
Ashio1-7	0	23	2.88	1.08	0.05	0.96	0.08	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	8
Ashio 2-1	1	243	2.70	1.29	0.03	0.67	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio 2-2	1	243	2.71	1.27	0.00	0.76	0.27	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	8
Ashio 4-1	1	851	2.70	1.29	0.01	0.71	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio 4-2	1	851	2.72	1.27	0.01	0.75	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio 5-1	3	1113	2.99	0.98	0.00	1.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	8
Ashio 5-2	3	1113	2.97	1.03	0.03	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio 6-1	2	1115	2.97	1.01	0.00	1.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	8
Ashio 6-2	2	1115	2.88	1.13	0.05	0.89	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio 7	0	1440	2.76	1.23	0.01	0.78	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio 8	0	1621	2.68	1.30	0.00	0.70	0.32	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	8
Ashio 9-1	2	1806	2.93	1.06	0.03	0.97	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	8
Ashio 9-2	2	1806	2.99	1.00	0.01	0.97	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	8
Ashio10-1	1	1916	2.99	0.99	0.01	1.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	8
Ashio10-2	1	1916	2.75	1.23	0.01	0.78	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio10-3	1	1916	2.90	1.07	0.00	0.92	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio10-4	1	1916	2.73	1.24	0.01	0.77	0.26	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	8
Ashio11-1	2	2001	2.74	1.23	0.01	0.81	0.25	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	8
Ashio11-2	2	2001	2.82	1.20	0.00	0.78	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8
Ashio11-3	2	2001	2.93	1.06	0.00	0.97	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	8