

南西ガーナ Birimian 帯 Kumasi 層群における砂岩層
碎屑ジルコン U-Pb 年代

吉丸 慧*・清川昌一*・伊藤 孝**・堤 之恭***

(2014年11月28日受理)

U-Pb age of detrital zircons from Kumasi Group sandstone
in Birimian belt, southwestern Ghana

Satoshi YOSHIMARU*, Shoichi KIYOKAWA*, Takashi ITO** and Yukiyasu TSUTSUMI ***

(Received November 28, 2014)

Abstract

The Birimian greenstone belt, southwestern Ghana, is mainly composed of mid to deep oceanic sedimentary sequence of metavolcanic rocks (Sefwi Group) and metasedimentary rocks (Kumasi Group, $<2154\pm 2$ Ma). Extensive syn-tectonic granitoid plutons named Eoeburnean (2180-2150 Ma) and Eburnean (2130-2070 Ma) also occurred. We measured U-Pb ages on detrital zircon grains from Kumasi group sandstone with LA-ICP-MS to improve the understanding of the crustal evolution. The results for 43 samples indicated a single peak of 2163 Ma, coinciding with the age of granitic intrusions, implying that Kumasi Group sedimentation occurred after erosion and weathering of these granitic rocks.

はじめに

原生代初期は、初期大陸形成や大酸化事変、原始生命の誕生といった地球表層での大きな変化が起こった時代と言われている (Kranendonk 2012)。原生代初期の浅海における環境は、浅海性堆

*九州大学理学部地球惑星科学科 (〒 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 : Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, Hakozaki, Fukuoka, 812-8581, Japan)

**茨城大学教育学部地学研究室 (〒 310-8512 水戸市文京 2-1-1 : Geosciences Laboratory, College of Education, Ibaraki University, Mito, Ibaraki, 310-8512, Japan)

***国立科学博物館地学研究部 (〒 305-0005 つくば市天久保 4-1-1 : Department of Geology and Paleontology, National Museum of Nature and Science, 4-1-1 Amakubo, Tsukuba, Ibaraki 305-0005, Japan)

積物から比較的解明されているが、それに対して深海底の環境についてはあまり明らかになっていない。原生代初期の深海底の地層を含む地質体は、太古代クラトンが衝突した場所として知られるカナダの Cape Smith 帯, Flin Flon 帯, オーストラリアの Mount Isa 帯, 西アフリカの Birimian グリーンストーン帯などに残されている可能性が高い (Windley 1995)。我々は、原生代初期の地層が残っているガーナ Birimian 帯について詳細な地質調査を行い、得られた試料から当時の海洋底の環境を復元するプロジェクトを始めている (清川・伊藤 2009)。

また、ガーナには多くの金鉱床が分布しており、アフリカ第二の金の産出国として知られている (U.S. Geological Survey 2012)。そのため、大規模な金鉱山が稼行している地域の地質や地殻発達史について幾つかの報告がなされている (Davis et al. 1994, Feybesse et al. 2006, Perrouy et al. 2012 など)。しかし、地質構造が複雑であり、また露出が悪いために、完全な層序復元は成されていない。

本研究では、ガーナ南西部の地層層序や後背地を復元する目的で、火山岩を主とするグリーンストーン帯を被覆し、金鉱山を形成する砂岩を主体とする地層 (Kumasi 層群) を対象に、Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) によるジルコンの U-Pb 年代測定を行った。ここではその概要を報告する。

Birimian 帯

西アフリカクラトン (Fig. 1) は約 20 億年前から安定して存在する (Loh and Hirdes 1999)。その西部には太古代の地質帯が分布しており、南東部は主に約 21 億年前 (原生代初期) の Eburnean 造山運動により変形・変成作用を受けた Birimian 帯が分布している (Feybesse et al. 2006)。Birimian 帯は下部の変成火成岩 / 堆積岩類 (Sefwi 層群) とその上部の変成堆積岩類 (Kumasi 層群) に大別され、礫岩層を主とする Tarkwa 層群に覆われている (Fig. 2)。また、この地域においてこれまで報告されている TTG 花崗岩類は二つの年代グループに分けられ、それらは Eoeburnean (2180 ~ 2150 Ma), Eburnean (2130 ~ 2070 Ma) と呼ばれている (Perrouy et al. 2012)。

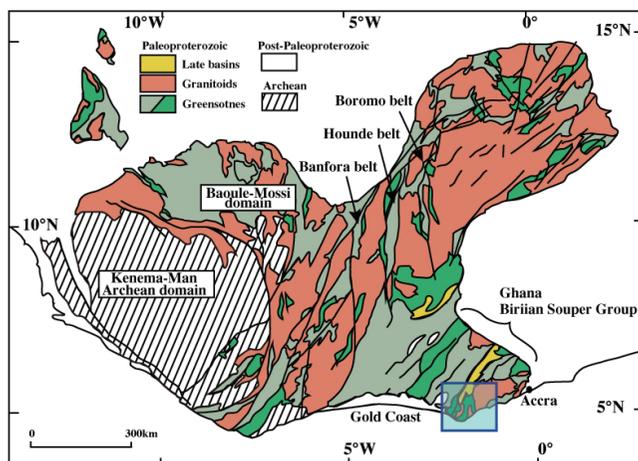


Fig. 1 The West African craton (modified after Milési et al. 2004).

Sefwi 層群は、主に苦鉄質火成岩、火山碎屑岩、千枚岩からなり、これらに花崗岩が貫入している。この花崗岩の形成 (貫入) 年代は 2174 ± 2 Ma (ジルコン U-Pb 年代; Oberthür et al. 1998) であるため、地層の堆積年代はそれ以前とされる。

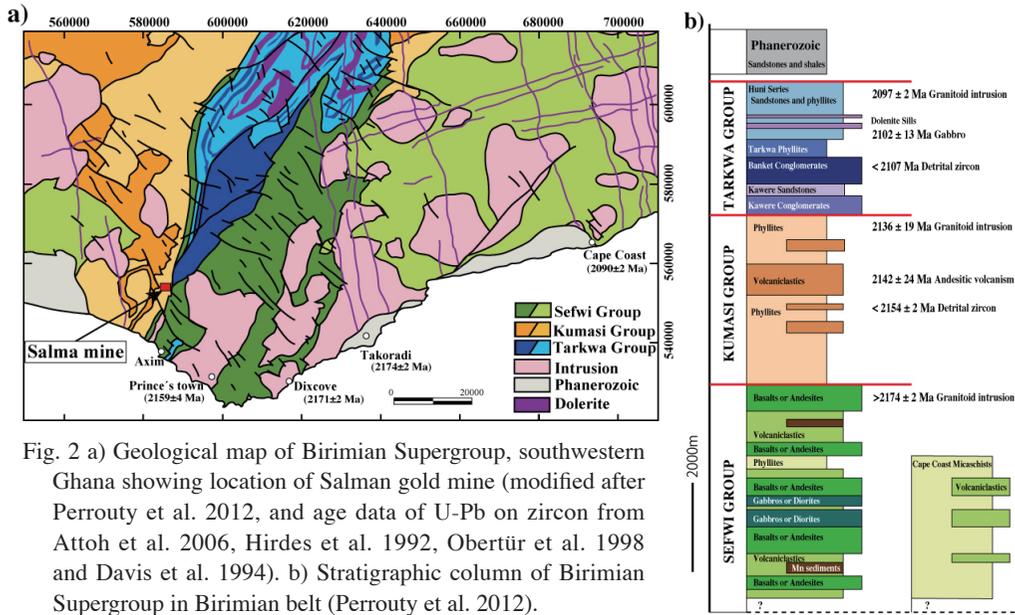


Fig. 2 a) Geological map of Birimian Supergroup, southwestern Ghana showing location of Salma gold mine (modified after Perrouty et al. 2012, and age data of U-Pb on zircon from Attoh et al. 2006, Hirdes et al. 1992, Obertür et al. 1998 and Davis et al. 1994). b) Stratigraphic column of Birimian Supergroup in Birimian belt (Perrouty et al. 2012).

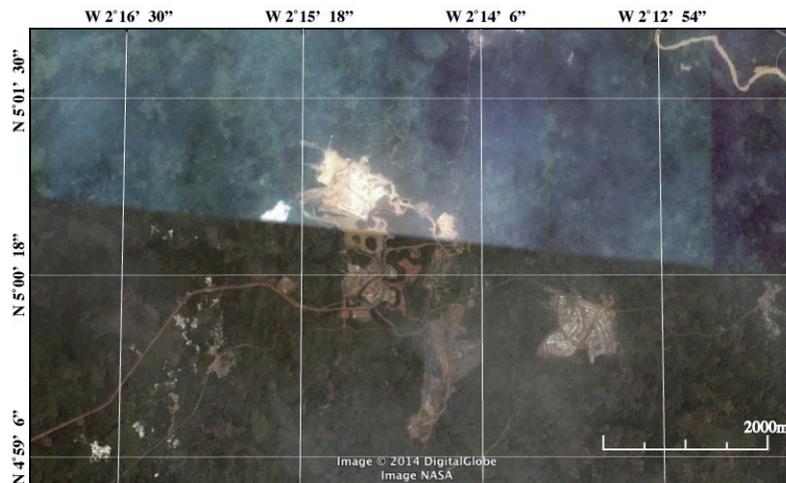


Fig. 3 Aerial photograph of Salma gold mine (obtained through Google Earth).

Kumasi 層群は、安山岩質火山砕屑岩や千枚岩で構成されており、Sefwi 層群上に形成された堆積物とされる。最も若い砕屑性ジルコンの年代は 2154 ± 2 Ma (Oberthür et al. 1998), 貫入した花崗岩の年代は 2136 ± 19 Ma (ジルコン U-Pb 年代; Perrouty et al. 2012) であるため、堆積年代はこの間に制限される。

Tarkwa 層群は Sefwi 層群を不整合に覆っている。礫岩・砂岩・千枚岩から成り、砕屑性の金鉱山が発達する。最も若い砕屑性ジルコン年代は、 2132 ± 2.8 Ma (Davis et al. 1994), 花崗岩の貫入年代は 2097 ± 2 Ma (チタン石 U-Pb 年代; Oberthür et al. 1998) であるため、上記と同様に堆積年代はこの間に制限される。

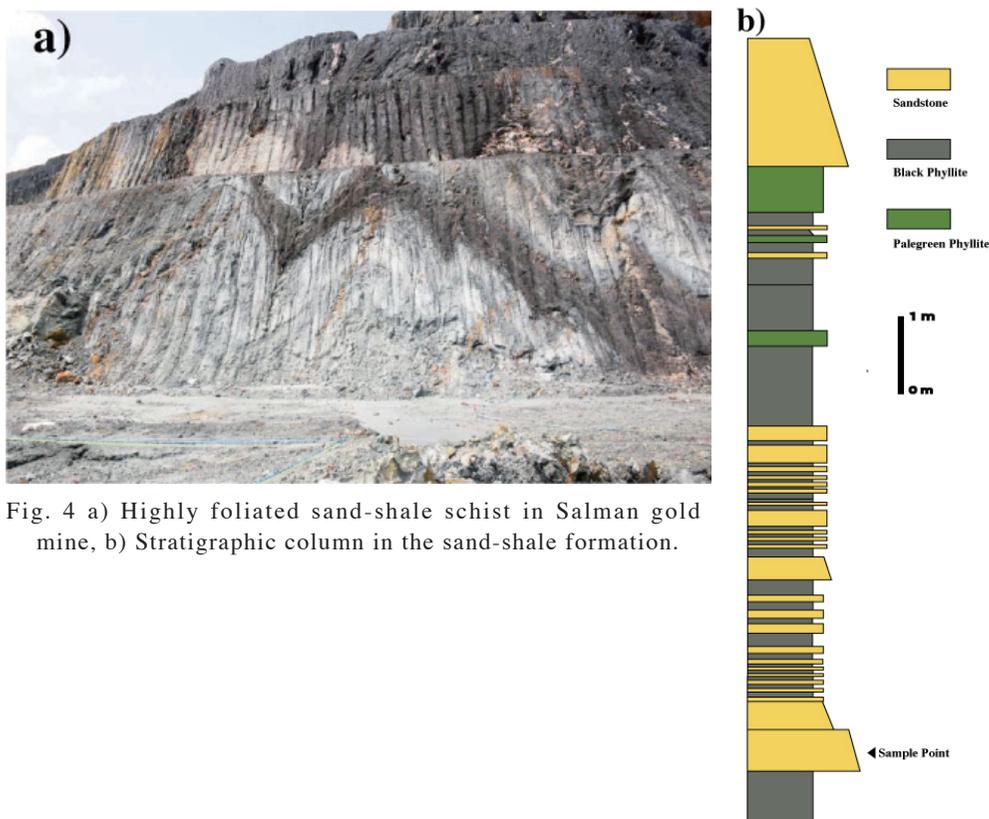


Fig. 4 a) Highly foliated sand-shale schist in Salman gold mine, b) Stratigraphic column in the sand-shale formation.

Salman 金鉱山周辺の地質

調査地域は、ガーナ南西部 Kumasi 堆積盆の東縁部の Ashanti 断層沿いに位置する Salman 金鉱山 (Fig. 3) である。岩相は、片理の発達した砂岩泥岩互層で、これらが不整合に花崗岩帯を覆っている。鉱山に露出する地層は 50 ~ 200m の層厚を持ち、Fig. 2b に示した柱状図では Kumasi 層群の下部にあたる。鉱山の露頭 (Fig. 4a) は片理が発達し Eburnian 変形作用の影響を被っているが、地層面は残っており、層序の復元が可能である。年代測定試料は、約 10m にわたり連続する砂泥互層のうち、厚さ 1 m 程の砂岩から得た (Fig. 4b)。

ジルコン分析手法

ジルコン分離：ジルコンの分離のため、持ち帰ったサンプル約 2 kg を超音波洗浄の後、ジオクラッシャーおよびディスクミルを用いて 50 ~ 300 μ m の大きさに粉碎した。粉末となった試料をツールピーカーに入れ水簸分離を行い、オープンで乾燥後、1,1,2,2-テトラプロモエタンを用いて重液分離を行った。分離された重鉱物を磁性分離し、ハンドピッキングでジルコンのみ

を回収した。

マウント作成：サンプルから分離したジルコン粒子、標準ジルコンとして FC1 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=0.1859$; Paces and Miller 1993)、および標準ガラス NIST SRM 610 をエポキシ樹脂に固め、ジルコン粒子の中心が露出するようにダイヤモンドペーストで研磨した。マウントした樹脂の高さは、Laser Ablation System のサンプルホルダーと同じ高さにするために約 5 mm に調節した。

ジルコンの観察(SEM)：ジルコン粒子の観察のため SEM を用いて後方散乱電子像(BEI)とカソードルミネッセンス像(CLI)を撮影した。これらの顕微鏡観察から LA-ICP-MS で分析するスポットを決定した。SEM 観察後、試料は分析のため蒸着した炭素を研磨し、純水中で超音波洗浄した。

Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) 分析：年代値測定は国立科学博物館所有の LA-ICP-MS を用いて行った。Laser Ablation System は Electro Scientific Industries 社製の NWR213 を使い、ICP-MS は Agilent Technology 社製の Agilent 7700x を用いた。

レーザーは、直径 25 μm 、強度 4 – 5 J/cm^2 に調節した。キャリアガスは、エアロゾル化した元素の運搬効率を高めるために He を用いた (Eggins et al. 1998)。キャリアガス He とメークアップガス Ar の流量はそれぞれ 580-620ml/min, 900ml/min とした。また、より安定した ^{206}Pb - ^{238}U 比と Pb 同位体比を得るために、試料室と Ar ガス注入部の間に Tuheng and Hirata (2004) スタビライザー (Tuheng and Hirata 2004) を装着して分析を行った。

全ての測定は時間分析で行われ、U-Pb 年代測定のため ^{29}Si , ^{202}Hg , ^{204}Pb (^{204}Hg), ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U の核種をカウントした。カウント時間は、 ^{29}Si , ^{202}Hg , ^{204}Pb (^{204}Hg), ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U については 10ms, ^{206}Pb は 30ms, ^{207}Pb について 40ms とした。

分析の前には、表面の汚染の影響を除去するために分析スポットへレーザーを数回照射し、クリーンな面を露出させて行った。1 スポットの分析は 55 秒間で行っており、はじめの 20 秒間はレーザーを停止した状態でバックグラウンドを測定し、その後の 35 秒間はレーザーで試料を蒸発させた。35 秒間のデータのうち、安定した 20 秒間を測定データとして用いた。

U, Th の濃度は NIST SRM 610 スタンダードガラスの ^{29}Si を内標準として求めた。Pb 同位体比は NIST SRM 610 で補正し、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比は FC 1 で補正した。初期鉛補正は ^{208}Pb と ^{207}Pb を用いて行い (Williams 1998)、初期鉛組成は Stacey and Kramers (1975) を基にした。

Kumasi 層群砂岩のジルコン U—Pb 年代

電子顕微鏡観察：ジルコンは、最大で 200 μm ほどの大きさで、鉍物分離作業中に粉碎したと思われる破片状の粒子以外は、少し丸みを帯びており円磨されているのが確認できた (Fig. 5)。また、ジルコンのコアリングや変質が観察された (Fig. 6)。

LA-ICP-MS 分析：ジルコン 116 粒について行い、83 の数値年代データが得られ (Table. 1)、そのうちから 47 のコンコダント ($-5 < \text{Disc} \% < 5$) な数値年代が得られた。それらの年代頻度分布曲線 (Fig. 7) はほぼ 1 箇所に集中し、 $2163 \pm 80 \text{ Ma}$ のピークを示した。このピークは約 1950~2400 Ma と年代幅が広く、Eoeburnean 花崗岩類 (2180~2150 Ma) と Eburnean 花崗岩類 (2130 ~ 2070 Ma) の年代を含み、その識別は難しい。

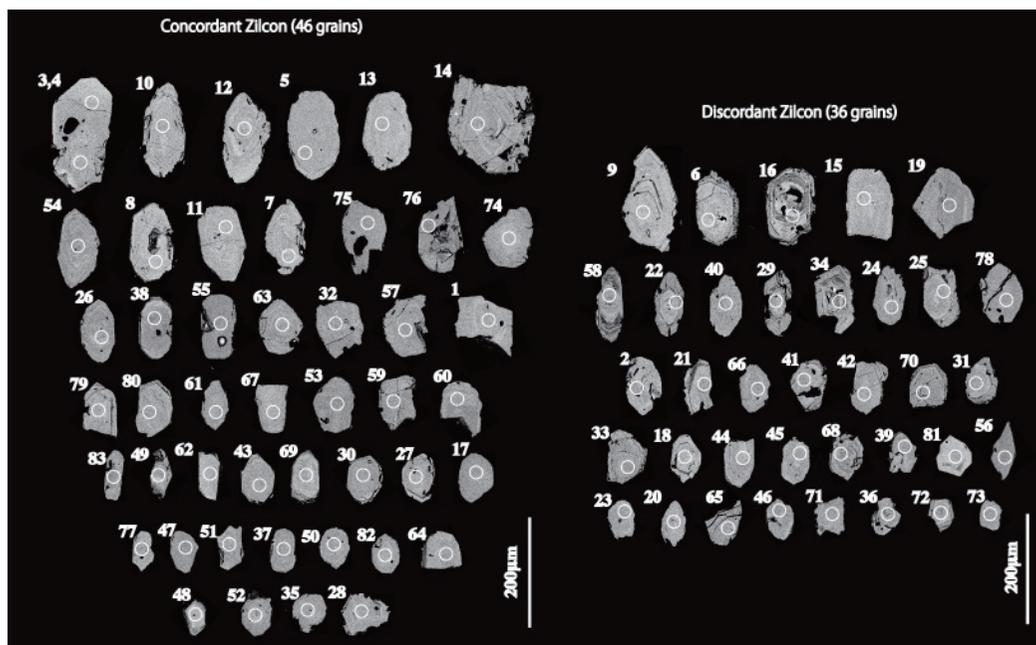


Fig. 5 Backscattered electron image of detrital zircon grains from Kumasi Group sandstone. The circles show analyzed spots with numbers corresponding to Table 1.

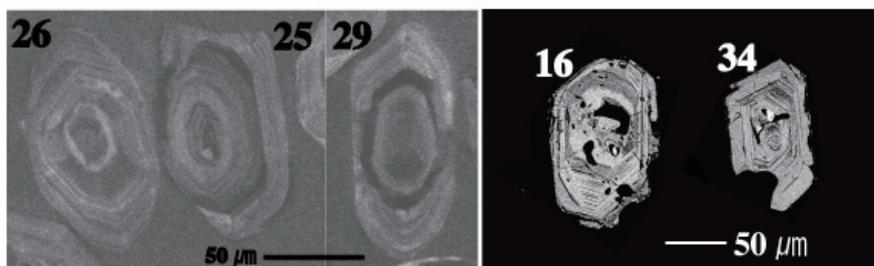


Fig. 6 Zonal structures (25, 26, 29, Cathode Luminescence) and partially deteriorated grains (16, 34, Backscattered electron image) as observed from SEM Images of detrital zircons. Numbering corresponds to Table 1.

ディスコダントなデータを含む年代頻度分布曲線からは 2406 ± 86 Ma の小さなピークが見られるが、これはジルコンの U-Pb 組成の変化や二次的な変質を被っているためである。また、コンコーディアダイアグラム (Fig. 8) 上で曲線から大きくずれたデータ (Fig. 5-24, 34, 40 など) に関しても同様のことが考えられ、ジルコンの変質により鉛を失っていることが原因と思われる。これらのディスコダントな碎屑性ジルコンから原岩の年代推定を行うのは困難である。

その他、分析を行ったが数値年代データが得られなかったジルコン 34 粒は、U-Pb 比が分析途中で変化するもの、ジルコンに含まれる初期 Pb が多いものである。これらの結果は、ジルコンの変質により U-Pb の閉鎖系が失われたことや、コアリング等の分析スポットの不均質によって生じたと考えられる。

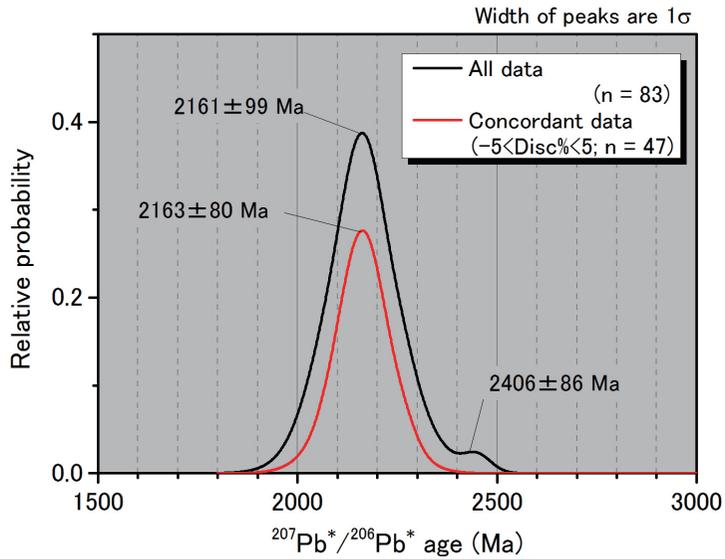


Fig. 7 $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ age relative probability curves.

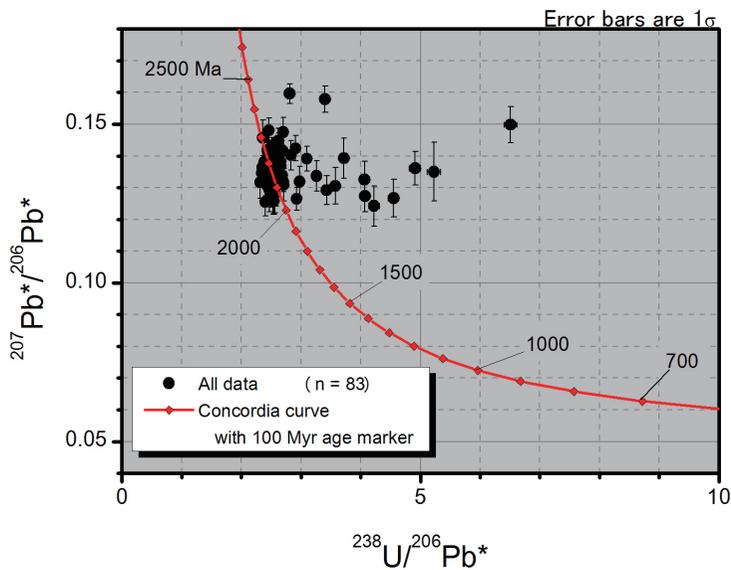


Fig. 8 Plots on Tera-Wasserburg U-Pb Concordia diagram plots.

まとめ

本研究では、ガーナ南西部 Birimian 帯の Kumasi 層群砂岩に含まれるジルコンについて、Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) による U-Pb 年代測定を行った。結果が示す年代は、主に 21.6 億年前であった。これは、Birimian 帯中に見られる造山時花崗岩

Table 1. LA-ICP-MS U-Pb data and calculated ages of zircons in the sample 121120-03.

Labels	$^{206}\text{Pb}^{\text{(1)}}$ (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^{\text{(1)}}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^{\text{(1)}}$	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^{\text{(1)}}$ age ⁽¹⁾ (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^{\text{(1)}}$ age ⁽¹⁾ (Ma)	Disc ⁽²⁾ (%)
20-03_001	0.00	51	23	0.46	2.44 ± 0.06	0.1418 ± 0.0040	2212.1 ± 45.3	2250.0 ± 48.0	1.68
20-03_002	1.30	76	44	0.59	2.69 ± 0.06	0.1416 ± 0.0046	2037.0 ± 37.1	2248.0 ± 56.0	9.38
20-03_003	0.32	74	34	0.46	2.49 ± 0.05	0.1409 ± 0.0041	2177.3 ± 39.9	2240.0 ± 49.0	2.80
20-03_004	0.24	83	34	0.42	2.47 ± 0.06	0.1292 ± 0.0038	2191.9 ± 43.6	2089.0 ± 50.0	-4.92
20-03_005	0.52	31	10	0.32	2.56 ± 0.07	0.1281 ± 0.0061	2124.2 ± 48.2	2073.0 ± 81.0	-2.47
20-03_006	7.41	224	120	0.55	3.72 ± 0.07	0.1393 ± 0.0064	1535.3 ± 27.4	2220.0 ± 77.0	30.84
20-03_007	0.23	152	50	0.34	2.60 ± 0.05	0.1343 ± 0.0028	2098.1 ± 36.4	2156.0 ± 36.0	2.69
20-03_008	1.08	172	79	0.47	2.56 ± 0.05	0.1360 ± 0.0032	2127.2 ± 33.8	2178.0 ± 40.0	2.33
20-03_009	0.46	176	72	0.42	2.69 ± 0.04	0.1339 ± 0.0032	2039.1 ± 26.6	2151.0 ± 41.0	5.20
20-03_010	3.18	85	42	0.50	2.58 ± 0.05	0.1303 ± 0.0061	2109.2 ± 32.5	2104.0 ± 79.0	-0.25
20-03_011	0.12	101	44	0.45	2.55 ± 0.04	0.1379 ± 0.0035	2132.3 ± 30.2	2202.0 ± 44.0	3.16
20-03_012	1.23	88	41	0.48	2.51 ± 0.05	0.1413 ± 0.0045	2160.6 ± 36.7	2244.0 ± 54.0	3.72
20-03_013	0.00	89	43	0.50	2.56 ± 0.05	0.1302 ± 0.0032	2128.8 ± 32.8	2102.0 ± 43.0	-1.28
20-03_014	1.25	96	32	0.34	2.62 ± 0.05	0.1348 ± 0.0037	2081.0 ± 34.7	2163.0 ± 48.0	3.79
20-03_015	6.50	176	95	0.56	2.98 ± 0.05	0.1319 ± 0.0048	1866.9 ± 27.1	2125.0 ± 63.0	12.15
20-03_016	0.00	129	83	0.66	2.81 ± 0.05	0.1596 ± 0.0031	1962.2 ± 29.5	2453.0 ± 32.0	20.01
20-03_017	0.66	67	32	0.49	2.54 ± 0.06	0.1258 ± 0.0043	2136.4 ± 41.5	2041.0 ± 59.0	-4.67
20-03_018	3.10	186	105	0.58	3.10 ± 0.06	0.1391 ± 0.0039	1802.5 ± 29.9	2217.0 ± 48.0	18.70
20-03_019	0.17	52	30	0.59	2.65 ± 0.06	0.1383 ± 0.0061	2061.3 ± 43.0	2208.0 ± 74.0	6.64
20-03_020	1.63	146	78	0.55	2.93 ± 0.04	0.1264 ± 0.0036	1895.7 ± 25.0	2050.0 ± 49.0	7.53
20-03_021	4.54	132	57	0.44	2.83 ± 0.05	0.1402 ± 0.0046	1949.0 ± 29.3	2231.0 ± 56.0	12.64
20-03_022	7.95	338	104	0.31	4.07 ± 0.08	0.1273 ± 0.0049	1416.6 ± 25.5	2063.0 ± 66.0	31.34
20-03_023	1.37	140	55	0.40	2.50 ± 0.04	0.1269 ± 0.0030	2169.6 ± 31.5	2056.0 ± 42.0	-5.53
20-03_024	8.74	291	127	0.45	4.91 ± 0.09	0.1361 ± 0.0053	1194.8 ± 20.9	2179.0 ± 67.0	45.17
20-03_025	9.87	322	120	0.38	4.55 ± 0.08	0.1267 ± 0.0059	1280.7 ± 21.5	2053.0 ± 81.0	37.62
20-03_026	0.14	122	61	0.51	2.58 ± 0.04	0.1331 ± 0.0034	2110.6 ± 30.7	2141.0 ± 44.0	1.42
20-03_027	0.54	126	76	0.62	2.54 ± 0.04	0.1368 ± 0.0039	2142.7 ± 29.8	2188.0 ± 49.0	2.07
20-03_028	0.00	131	62	0.49	2.55 ± 0.04	0.1380 ± 0.0025	2135.2 ± 29.7	2204.0 ± 31.0	3.12
20-03_029	9.59	276	152	0.57	4.06 ± 0.09	0.1325 ± 0.0058	1418.2 ± 27.3	2133.0 ± 74.0	33.51
20-03_030	0.53	96	48	0.52	2.54 ± 0.04	0.1308 ± 0.0041	2140.5 ± 30.1	2110.0 ± 54.0	-1.44
20-03_031	0.55	120	49	0.42	2.63 ± 0.05	0.1390 ± 0.0037	2077.8 ± 33.6	2217.0 ± 46.0	6.28
20-03_032	0.35	126	53	0.43	2.50 ± 0.05	0.1343 ± 0.0035	2166.4 ± 36.2	2156.0 ± 44.0	-0.48
20-03_033	0.60	98	52	0.55	2.53 ± 0.05	0.1259 ± 0.0041	2147.6 ± 36.6	2043.0 ± 57.0	-5.12
20-03_034	12.37	1410	1190	0.87	6.51 ± 0.11	0.1499 ± 0.0057	921.1 ± 14.1	2346.0 ± 63.0	60.74
20-03_035	0.05	74	42	0.58	2.51 ± 0.06	0.1356 ± 0.0046	2164.3 ± 41.0	2173.0 ± 57.0	0.40
20-03_036	7.13	176	127	0.74	3.58 ± 0.07	0.1305 ± 0.0058	1589.6 ± 27.5	2106.0 ± 76.0	24.52
20-03_037	0.18	127	75	0.61	2.47 ± 0.04	0.1372 ± 0.0037	2188.2 ± 32.7	2194.0 ± 46.0	0.27
20-03_038	0.19	62	25	0.42	2.51 ± 0.06	0.1403 ± 0.0045	2164.2 ± 41.2	2232.0 ± 54.0	3.04
20-03_039	1.62	141	77	0.56	2.41 ± 0.05	0.1314 ± 0.0040	2241.4 ± 36.9	2118.0 ± 52.0	-5.83
20-03_040	14.23	173	78	0.46	5.23 ± 0.12	0.1350 ± 0.0092	1128.5 ± 22.9	2165.0 ± 115.0	47.87
20-03_041	0.00	69	40	0.60	2.46 ± 0.05	0.1480 ± 0.0038	2197.1 ± 37.9	2325.0 ± 43.0	5.50
20-03_042	1.24	113	52	0.47	2.62 ± 0.05	0.1448 ± 0.0040	2084.6 ± 34.9	2286.0 ± 46.0	8.81
20-03_043	0.36	94	40	0.43	2.56 ± 0.05	0.1347 ± 0.0041	2128.5 ± 36.2	2162.0 ± 52.0	1.55
20-03_044	1.03	72	25	0.36	2.40 ± 0.05	0.1255 ± 0.0044	2243.1 ± 41.6	2037.0 ± 61.0	-10.12
20-03_045	0.74	109	67	0.63	2.47 ± 0.04	0.1265 ± 0.0041	2189.6 ± 32.1	2050.0 ± 57.0	-6.81
20-03_046	1.19	93	44	0.48	2.65 ± 0.05	0.1369 ± 0.0042	2060.8 ± 30.3	2189.0 ± 53.0	5.86
20-03_047	1.29	56	22	0.40	2.71 ± 0.05	0.1309 ± 0.0051	2025.4 ± 33.2	2111.0 ± 67.0	4.05
20-03_048	0.56	161	70	0.45	2.43 ± 0.04	0.1328 ± 0.0032	2219.8 ± 32.6	2137.0 ± 41.0	-3.87
20-03_049	0.83	86	41	0.49	2.46 ± 0.04	0.1307 ± 0.0040	2202.6 ± 33.4	2108.0 ± 53.0	-4.49
20-03_050	0.13	81	37	0.46	2.48 ± 0.05	0.1322 ± 0.0040	2185.6 ± 38.5	2129.0 ± 51.0	-2.66
20-03_051	2.01	96	53	0.56	2.53 ± 0.05	0.1329 ± 0.0047	2150.3 ± 36.3	2137.0 ± 61.0	-0.62
20-03_052	1.49	174	75	0.44	2.70 ± 0.04	0.1320 ± 0.0032	2029.3 ± 26.5	2125.0 ± 43.0	4.51
20-03_053	0.05	94	48	0.52	2.54 ± 0.04	0.1380 ± 0.0040	2140.4 ± 30.2	2203.0 ± 49.0	2.84
20-03_054	0.00	141	89	0.65	2.48 ± 0.04	0.1359 ± 0.0035	2182.8 ± 29.2	2177.0 ± 44.0	-0.27
20-03_055	0.26	58	27	0.47	2.40 ± 0.06	0.1371 ± 0.0050	2243.4 ± 45.3	2192.0 ± 62.0	-2.34
20-03_056	0.32	49	20	0.43	2.32 ± 0.06	0.1317 ± 0.0051	2312.7 ± 53.5	2121.0 ± 67.0	-9.04
20-03_057	0.14	95	45	0.48	2.52 ± 0.04	0.1353 ± 0.0035	2155.8 ± 32.0	2169.0 ± 44.0	0.61
20-03_058	5.83	191	84	0.45	3.43 ± 0.07	0.1292 ± 0.0045	1649.7 ± 28.5	2088.0 ± 61.0	20.99
20-03_059	0.19	109	51	0.48	2.56 ± 0.05	0.1366 ± 0.0037	2123.3 ± 34.3	2185.0 ± 46.0	2.82
20-03_060	0.00	83	48	0.59	2.38 ± 0.04	0.1380 ± 0.0033	2258.6 ± 34.6	2204.0 ± 41.0	-2.48
20-03_061	0.09	70	31	0.46	2.51 ± 0.05	0.1390 ± 0.0044	2164.9 ± 39.8	2215.0 ± 54.0	2.26
20-03_062	0.00	144	98	0.70	2.51 ± 0.04	0.1432 ± 0.0026	2160.1 ± 28.9	2268.0 ± 31.0	4.76
20-03_063	0.00	146	95	0.67	2.43 ± 0.04	0.1352 ± 0.0027	2224.2 ± 32.1	2167.0 ± 35.0	-2.64
20-03_064	0.18	95	35	0.38	2.44 ± 0.04	0.1319 ± 0.0037	2212.2 ± 34.1	2125.0 ± 48.0	-4.10
20-03_065	0.23	102	50	0.50	2.64 ± 0.05	0.1427 ± 0.0039	2068.2 ± 32.0	2261.0 ± 47.0	8.53
20-03_066	5.76	211	141	0.68	3.26 ± 0.06	0.1337 ± 0.0048	1724.5 ± 26.2	2148.0 ± 61.0	19.72
20-03_067	0.00	141	70	0.51	2.35 ± 0.04	0.1363 ± 0.0024	2282.9 ± 32.1	2182.0 ± 31.0	-4.62
20-03_068	9.56	230	114	0.51	4.22 ± 0.09	0.1242 ± 0.0064	1369.9 ± 25.8	2019.0 ± 88.0	32.15
20-03_069	3.58	152	73	0.49	2.53 ± 0.04	0.1326 ± 0.0040	2145.1 ± 31.0	2134.0 ± 52.0	-0.52
20-03_070	4.49	295	168	0.58	3.40 ± 0.05	0.1579 ± 0.0041	1661.6 ± 20.2	2434.0 ± 44.0	31.73
20-03_071	0.35	69	28	0.42	2.70 ± 0.05	0.1475 ± 0.0046	2028.2 ± 32.4	2318.0 ± 53.0	12.50
20-03_072	5.19	117	66	0.58	2.63 ± 0.05	0.1413 ± 0.0059	2078.8 ± 34.9	2244.0 ± 71.0	7.36
20-03_073	0.92	124	54	0.45	2.91 ± 0.05	0.1424 ± 0.0040	1903.5 ± 29.9	2258.0 ± 48.0	15.70
20-03_074	0.52	201	133	0.68	2.45 ± 0.04	0.1306 ± 0.0033	2209.4 ± 33.9	2107.0 ± 43.0	-4.86
20-03_075	0.00	31	12	0.39	2.36 ± 0.07	0.1457 ± 0.0056	2275.5 ± 60.4	2297.0 ± 64.0	0.94
20-03_076	0.22	88	17	0.30	2.55 ± 0.05	0.1323 ± 0.0041	2134.5 ± 36.5	2130.0 ± 54.0	-0.21
20-03_077	0.00	56	52	0.62	2.56 ± 0.05	0.1327 ± 0.0030	2127.7 ± 37.9	2135.0 ± 39.0	0.34
20-03_078	0.00	68	43	0.65	2.44 ± 0.05	0.1306 ± 0.0044	2213.9 ± 41.2	2107.0 ± 57.0	-5.08
20-03_079	0.58	110	36	0.33	2.46 ± 0.05	0.1387 ± 0.0036	2197.8 ± 38.2	2212.0 ± 44.0	0.64
20-03_080	0.23	120	46	0.39	2.60 ± 0.05	0.1315 ± 0.0034	2094.7 ± 35.1	2120.0 ± 45.0	1.20
20-03_081	0.00	112	70	0.64	2.35 ± 0.04	0.1346 ± 0.0029	2288.8 ± 36.3	2160.0 ± 37.0	-5.96
20-03_082	0.00	135	72	0.54	2.56 ± 0.05	0.1335 ± 0.0024	2127.1 ± 33.2	2146.0 ± 31.0	0.88
20-03_083	1.62	82	43	0.54	2.50 ± 0.06	0.1351 ± 0.0056	2167.6 ± 40.9	2166.0 ± 71.0	-0.07

Errors are 1-sigma; Pb_c and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively.

(1) Common Pb corrected by assuming $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = ^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ age-concordance

(2) The degree of discordance for an analyzed spot indicates the chronological difference between the two ages determined by Pb-Pb and

U-Pb methods, and is defined as $\{1 - (^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^* \text{ age}) / (^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^* \text{ age})\} \times 100$ (%) (e.g. Biao et al. 1996).

類の年代（2180～2150Ma および 2130～2070Ma）と同じであった。このことは、Kumasi 堆積盆形成時には Birimian 帯の花崗岩は陸上に露出しており、侵食作用が行われていたことを示唆している。

謝辞

本研究を進めるにあたり、九州大学理学部地球惑星科学科の高千穂奨学金、文部科学省科学研究補助金基盤研究 A（海外学術：課題番号 26257211）の一部を使用した。また、野外調査ではガーナ大学の Frank K. Nyame 教授とタルクワ鉱山技術大学の George M. Tetteh 氏に協力をいただいた。ここに記して感謝する。

引用文献

- Attoh, K., M. J. Evans and M. E. Bickford. 2006. Geochemistry of an ultramafic-rodingite rock association in the Paleoproterozoic Dixcove greenstone belt, southwestern Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 45, 333-346.
- Biao, S., A. P. Nutman, L. Dunyi and W. Jiashan. 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Research*, 78, 79-94.
- Davis, D. W., W. Hirdes, U. Schaltegger and E. A. Nunoo. 1994. U-Pb age constraints on deposition and provenance of Birimian and gold-bearing Tarkwaian sediments in Ghana, West Africa. *Precambrian Research*, 67, 89-107.
- Eggins, S. M., L. P. J. Kinsley and J. M. G. Shelley. 1998. Deposition and element fractionation processes during atmospheric pressure laser sampling for analysis by ICP-MS. *Applied Surface Science*, 127-129, 278-286.
- Feybesse, J. L., M. Billa, C. Guerrot, E. Dugey, J. L. Lescuyer, J. P. Milesi and V. Bouchot. 2006. The paleoproterozoic Ghanaian province: Geodynamic model and ore controls, including regional stress modeling. *Precambrian Research*, 149, 149-196.
- Hirdes, W., D. W. Davis and B. N. Eisenlohr. 1992. Reassessment of Proterozoic granitoid ages in Ghana on the basis of U/Pb zircon and monazite dating. *Precambrian Research*, 56, 89-96.
- 清川昌一・伊藤孝. 2009. ガーナ南西部・原生代 Birimian 超層群の地質 - 1 原生代前期の海洋底層序. 茨城大学教育学部紀要（自然科学）, 58号, 25-33.
- Kranendonk, M. J. V. 2012. *The geologic time scale 2012*. Elsevier, 299-392.
- Loh, G. and W. Hirdes. 1999. Explanatory Notes for the Geological Map of Southwest Ghana 1:100,000. Ghana Geological Survey Bulletin, 49, 14p.
- Milési, J. P., P. Ledru, J. L. Feybesse, A. Dommangeat and E. Marcoux. 1992. Early Proterozoic ore deposits and tectonics of the Birimian orogenic belt, West Africa. *Precambrian Research*, 58, 305-344.
- Oberthür, T., U. Vetter, D. W. Davis and J. A. Amanor. 1998. Age constraints on gold mineralization and Paleoproterozoic crustal evolution in the Ashanti belt of southern Ghana. *Precambrian Research*, 89, 129-143.
- Paces, J. B. and J. D. Miller Jr. 1993. Precise U-Pb Ages of Duluth Complex and Related Mafic Intrusions, Northeastern

- Minnesota: Geochronological Insights to Physical, Petrogenetic, Paleomagnetic, and Tectonomagmatic Processes Associated with the 1.1 Ga Midcontinent Rift System. *Journal of Geophysical Research*, 98, 13997-14013.
- Perrouy, S., L. Aillères, M. W. Jessell, L. Baratoux, Y. Bourassa and B. Crawford. 2012. Revised Eburnean geodynamic evolution of the gold-rich southern Ashanti Belt, Ghana, with new field and geophysical evidence of pre-Tarkwaian deformations. *Precambrian Research*, 204-205, 12-39.
- Stacey, J. S. and J. D. Kramers. 1975. Approximation of Terrestrial Lead Isotope Evolution by a Two-Stage Model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26, 207-221.
- Tunheng, A. and T. Hirata. 2004. Development of signal smoothing device for precise elemental analysis using laser ablation-ICP-mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 19, 932-934.
- U.S. Geological Survey, 2012. Mineral commodity summaries 2014 Gold - World Mine Production and Reserves. 67p.
- Williams, I. S. 1998. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe. In: Mckibben, M. A., Shanks III, W. C. and Ridley, W.I. (eds), *Application of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology*, 7, 1-35.
- Windley, B. F. 1995. *The Evolving Continents*. John Wiley & Sons, 526p.