

データファイル Supplementary Data File

四国北西部の始新統ひわだ峠層と三波川変成岩類の露出年代の再確認

The Eocene Hiwadatoge Formation, SW Japan: Constraints on the timing of the denudation of the Sambagawa metamorphic rocks

楠橋 直 安藤友一 谷 健一郎 松原尚志 栗田裕司 奈良正和 山路 敦

Nao Kusuhashi, Yuichi Ando, Kenichiro Tani, Takashi Matsubara, Hiroshi Kurita,
Masakazu Nara and Atsushi Yamaji

目次

補説

ひわだ峠層と久万層群に関する層序研究史	1
層序各説 (ひわだ峠層以外)	4
碎屑性ジルコンの U-Pb 年代測定の分析手法	5
データファイルの引用文献	6

附図

Fig. S1	Stratigraphic schemes	10
Fig. S2	Outcrop map of the study area	11
Fig. S3	Nonconformity outcrops	12
Fig. S4	Outcrops the Hiwadatoge Formation	12
Fig. S5	Fossils from the Hiwadatoge Formation	12
Fig. S6	QFL and QmFLt plots for sandstones	13
Fig. S7	Box plots for sandstone roundness parameters	13
Fig. S8	Outcrops of the Kuma Group	14
Fig. S9	Photographs of the Ishizuchi Group	14
Fig. S10	Images of zircons	14

附表

Table S1	Modal compositions of sandstones	15
Table S2	Analytical data and ages	15

ひわだ峠層と久^く万^ま層群に関する層序研究史

四国北西部の石鎚山とその西方に分布する“第三系”(Fig. 1 のひわだ峠層・久万層群・石鎚層群をまとめたもの)については、古くは小川(1902)や野田・神津(1910)、佐藤(1929, 1931, 1938)による地質図幅説明書や、森下(1921)などによる簡単な記載があり、また、大塚(1935)や鈴木(1937)も「石鎚山第三系」・「石鎚第三紀層」と呼んで触れている。それ以前にも、Nathorst(1888)がこの地域の地層から産出した植物化石を報告していて、これがこの地域の地質・古生物学的な報告としては、最初期のものの一つであると考えられる。植物化石については、上の地質図幅説

明書にも記述があるほか、Endô and Morita (1932) や小林 (1950) らも産出を報告しているが、いずれも正確な産出層は不明である。地質に関するより詳しい初期の研究としては、Tsuya (1935) による現在の石鎚層群の火成岩類に関するものがある。しかし、この地域の堆積岩類についての研究はこの時点では進んでおらず、Tsuya (1935) も同時期の太田 (1935) や鈴木 (1937) らと同様に「石鎚山第三紀層」と一括して呼ぶのみである。

堆積岩類を含めたこの地域の岩相層序は、吉田 (1951) や永井 (1951) 以降、主に永井と堀越の一連の研究 (例えば、永井・堀越, 1953, 1954, 1955; 永井, 1956, 1972; 堀越, 1957; Nagai, 1957, 1958, 1959, 1968) により確立された。すなわち、この地域の“第三系”は、三波川変成岩類と一部で和泉層群を不整合で覆い、下位で主に陸源砕屑岩類からなる久万層群と、その上位に不整合で重なる、火山砕屑岩類や火成岩類を主とする石鎚層群からなるものである (永井, 1956; 堀越, 1957; Nagai, 1957) (Figs. 2, S1)。吉田 (1951) は、この久万層群と石鎚層群に相当するものをまとめて石鎚層群と定義していたが、永井 (1956) や堀越 (1957) による再定義以降は、現在まで後二者の層序の枠組みが用いられている。そのため、以下では、この時点でひわだ峠層と層序学的に区別されている石鎚層群については触れない。堀越 (1957) や Nagai (1957) はさらに、久万層群は下位の二名層と上位の明神層からなるとした (層群の命名がその構成層の定義に先行した) (Figs. 2, S1)。

後にひわだ峠層として久万層群から分離される地層は、永井や堀越の一連の岩相層序学的研究の初期の段階で、すでに二名層 (当初は下坂場峠礫岩層と呼んでいた; 木原, 1985 の同名の部層とは異なることに注意) の岩相の一部と捉えられている (永井・堀越, 1953)。二名層と明神層の関係は、一時は不整合とされたが (例えば、Nagai, 1968; 永井, 1972)、実際には二名層のうち現在の古岩屋層に相当する部分と明神層とは整合関係にあることがわかっている (例えば、甲藤・平, 1979; 楠橋・山路, 2001; 越智ほか, 2014)。

久万層群を含む“第三系”について、佐藤 (1929, 1931, 1938) は中新統と考えた。ただし、佐藤 (1929) はその根拠について Nathorst が植物化石を中新世のものとしたと述べるのみで文献を引用していない (Nathorst, 1888 は植物化石について鮮新世より古くないことを示唆しつつ、基本的には年代不明としている)。佐藤 (1931, 1938) も特に根拠は示していない。太田 (1935) も Nathorst について同様の記述をしているが、やはり文献が示されていない。また、矢部 (1935) は、中新統を特徴づける可能性のある植物相の産地として、久万層群分布域の地名を挙げている。小林 (1950) も「石鎚中新統」と呼んでおり、永井・堀越 (1955) の頃までは、確実な根拠は示されていないものの、この地域の“第三系”は全体として中新統と漠然と考えられていた。

その後、永井 (1956) は、久万層群下部 (後に二名層と命名; 上述) が中期始新世を示す大型有孔虫を産する (後年 Hanzawa, 1959 が記載; なお、Hanzawa, 1959 は有孔虫の示す年代を中～後期始新世としている) ことから、同層群下部を中部始新統とした (ただし、化石が産出したのは二名層のうち現在のひわだ峠層のみ)。彼は同時に、久万層群の上部 (後の明神層) から産出する植物化石に、山口県宇部炭田の始新統宇部層群から産出する *Sabalites* や *Nelumbo* が含まれることを根拠に、同層群上部を上部始新統と推定した。すなわち、久万層群は全体として始新統だと考えられるようになった。これにより、翌年の同層群構成層の岩相層序学的な定義 (堀越, 1957; 上述) と併せて、古典的な久万層群観が形成されたわけである。後に松尾 (1980) が植物化石に基づき、久万層群中に中新統が存在する可能性を指摘したが、久万層群全体の年代的見直しは、その後もしばらくされることはなかった。そして、1990 年頃になると、“始新統”久万層群は三波川変成岩類を不整合で覆う最古の地層として、同変成岩類の地表への露出年代を制約すると考えられるようになったのである (例えば、Isozaki and Itaya, 1989, 1990; Yokoyama and Itaya, 1990)。

永井や堀越らよりも後のひわだ峠層・久万層群の層序研究として重要なのは、木原 (1985)、成田ほか (1999)、および越智ほか (2014) によるものである。ここではひわだ峠層と関係する話題に

絞って述べるので、久万層群全体としての層序研究については越智ほか(2014)を参照されたい。

木原(1985)は久万層群の岩相層序を大幅に見直した(Fig. S1)。木原(1985)の研究で重要なのは、その層序の枠組みではなく(層序関係には誤認が多い)、永井らが二名層と呼んだ岩相中に、現在のひわだ峠層と古岩屋層に相当する異なる岩相が含まれていることを明確にし、両者を部層として区別したことである。実際、甲藤・平(1979)も指摘していたように、ひわだ峠層は主に浅海成層からなり(本文参照)、古岩屋層は土石流堆積物を主体とするような非海成層(例えば、楠橋・山路, 2001; 越智ほか, 2014)で、両者の岩相は全く異なる。なお、木原(1985, 表1; 1986, 表1)は、論文の層序表では、“ひわだ峠細礫岩層”(= ひわだ峠層)が三波川変成岩類を無整合で覆うように描いているが(Fig. S1)、両者の関係に関する明確な記載はしていない。

続いて成田ほか(1999)は、木原(1985)の部層区分を一部利用する形で、久万層群の層序を再定義した(Fig. S1)。その際、永井らの二名層は基本的にひわだ峠層と古岩屋層という二つの層に分けられた(実際には“下坂場峠層”も含めて三つの層に分けられたが、“下坂場峠層”は古岩屋層の一部であることが越智ほか, 2014により示されている)。また、成田ほか(1999)は同時に、渦鞭毛藻化石と珪長質凝灰岩のジルコン・フィッシュン・トラック(FT)年代測定により、従来久万層群とされていた地層群の中で、ひわだ峠層だけが始新統で、残りの大部分は中新統であるとして、ひわだ峠層を久万層群から分離した。ここに至って、ひわだ峠層は久万層群とは異なる独立した地層であることが明らかにされたのである。なお、久万層群については成田ほか(1999)以外にも、ジルコンFT年代測定(鹿島・武智, 1996)、黒雲母K-Ar年代測定(竹下ほか, 2000)、ジルコンU-Pb年代測定(成田ほか, 2020, 2022; 新正・折橋, 2021)により前期～中期中新世の放射年代(18～15 Ma)が得られている。それ以降、中新統であることが明らかになった久万層群にかわって、始新統のひわだ峠層が三波川変成岩類の露出年代を制約すると考えられるようになるのだが(例えば、成田ほか, 1999; 長谷川ほか, 2019a, b)、成田ほか(1999)もまた、ひわだ峠層と基盤や久万層群との関係については言及していない。したがって、これまでは、久万層群が三波川変成岩類を不整合で覆うという事実が、そのままひわだ峠層にも適用される形で、同層も三波川変成岩類を不整合に覆うと“仮定”されていたにすぎなかったのである。

越智ほか(2014)は、下坂場峠付近の古岩屋層中に、ひわだ峠層に由来する礫が多く含まれることを見出し、ひわだ峠層と久万層群とが不整合関係にあると考えた。また彼らは同時に、木原(1985)と、それを一部引き継いだ成田ほか(1999)の層序の問題を指摘し、久万層群は下位で主として基盤の三波川変成岩類に由来する礫岩の卓越する古岩屋層(成田ほか, 1999)と、その上位に整合に重なり、砂岩礫・泥岩礫・花崗岩類礫を主体とする礫岩や砂岩・泥岩からなる明神層(堀越, 1957; Nagai, 1957)から構成されるとした(Figs. 2, S1)。古岩屋層は永井や堀越の二名層からひわだ峠層を除いたものにおおよそ相当し、明神層は永井らの明神層とほぼ同じである。すなわち、越智ほか(2014)は、久万層群の層序を基本的に永井や堀越らの枠組みへと戻したわけである。それにもかかわらず、越智ほか(2014)が久万層群の下部を構成する層の名称として二名層ではなく古岩屋層を用いているのは、二名層の模式地である久万高原町二名に分布するのが主にひわだ峠層であり(本文参照)、したがってひわだ峠層を含まない久万層群構成層の名称として、二名層はふさわしくないからである。その意味では、本来ならばひわだ峠層は二名層と呼ばれるべきだと思われるが、この点について越智ほか(2014)は、二名層が永く主に古岩屋層の岩相からなる層の名称として使用されてきたことから、誤解を避けるために二名層ではなくひわだ峠層の名称を使用することを提案している。なお、越智ほか(2014, fig. 2)も、ひわだ峠層が三波川変成岩類を無整合で覆うように層序表を描いているが、その関係を明確に記載しているわけではない。また、ひわだ峠層と久万層群の関係についても、礫の観察のみに基づいて推定したものであった。

層序各説 (ひわだ峠層以外)

1. 三波川変成岩類

ひわだ峠層 (および久万層群・石鎚層群) の基盤を構成する。調査地域には主に結晶片岩類が分布する。この地域では全体として苦鉄質片岩が卓越し、次いで泥質片岩が特に調査地域南部に多くみられる。また、一部で珪質片岩が挟まれる。結晶片岩類の片理面は一般に東西ないし北東-南西走向で北に傾斜するが、その姿勢には場所による変動が大きい (Figs. 3, S2)。また、調査地域西端の三郷の辻北方では、結晶片岩類中に変塩基性岩がごく一部で露出し、ひわだ峠層はこの変塩基性岩をも無整合で覆っている (仲田ほか, 2019)。現在、変塩基性岩露頭は限られた地域でわずかに見られるにすぎないが (仲田ほか, 2019)、類似した岩石がこの地域以外でも下坂場峠北方、二名中条 (Fig. 5a)、またごくわずかではあるが入野西方などで、ひわだ峠層中に中礫から巨礫サイズの礫として含まれている。そのため、ひわだ峠層堆積時には、変塩基性岩体は現在露出するよりも東方まで、連続的あるいは断続的に結晶片岩類に挟まれて露出していた可能性が指摘されている (仲田ほか, 2019)。

2. 久万層群

2.1. 古岩屋層 調査地域において、古岩屋層は下坂場峠周辺と^{ひわだ}鵠田峠南西の由良野付近に分布する (Figs. 3, S2)。そのうち、下坂場峠周辺の分布については越智ほか (2014) が詳しく述べているので、本稿では触れない。なお、下坂場峠周辺では、一部で本層がひわだ峠層を傾斜不整合で覆っていると推定されるが (Fig. 3)、確実な不整合露頭は確認できていない。また、調査地域東端では、鵠田峠から久万盆地へ下りる林道やその付近の沢沿いに、中礫から巨礫サイズの結晶片岩の角～亜角礫からなる、淘汰の悪い礫岩が露出する (Fig. S2)。この礫岩は久万盆地に露出する久万層群に連続する。礫岩の岩相は古岩屋層のそれであるが、側方ではやや下位の層準でも、より細粒な砂岩・泥岩を主体とする岩相 (従来明神層とされている) に変化する (Fig. S2)。明神層にも、基盤との不整合近傍には結晶片岩礫からなる礫岩が見られることが知られており (木原, 1985; 越智ほか, 2014)、調査地域東端のこの礫岩を古岩屋層とすべきか明神層の一部とすべきかは、本研究の調査範囲からは判断できない。

由良野付近の古岩屋層の分布は露出が限られているが、推定される分布は、本層が結晶片岩類とひわだ峠層を浸食して形成した谷地形を埋積していることを示している。ただし、結晶片岩類との無整合境界は一部で露出しているものの、ひわだ峠層との不整合露頭は未確認である。全層厚は 100 m 以上と推定されるが、露出が悪いことと上限がわからないため、正確には不明である。この地域の古岩屋層は主に礫岩層からなり、一部で砂岩薄層を挟む。礫岩は中礫サイズ以上の角～亜円礫からなる淘汰の悪いものが大部分で、構成礫は結晶片岩類を主とするが、ひわだ峠層分布域の近くでは同層の碎屑岩類も礫として多く見られる。露頭によっては、ひわだ峠層の碎屑岩類が礫径 2 m を超える巨大ブロックとして含まれている (Fig. S8a) (奈良ほか, 2017)。

由良野付近のこれらの地層は、下坂場峠周辺の古岩屋層と分布が連続しない。またこの地域には明神層は分布しない。そのため、これらの地層の帰属は厳密には明らかではない。しかしながら、結晶片岩類とひわだ峠層を不整合に覆い、かつそれらの碎屑物を礫として含むこと、土石流堆積物と考えられる不淘汰な礫岩を主体とすることは、古岩屋層 (礫種の上では特に下坂場峠周辺の古岩屋層) の岩相と酷似しており、由良野付近のものも古岩屋層の一部と考えられている (奈良ほか, 2017)。

2.2. 明神層 本層は、調査地域においては、二名川流域から桂ヶ森南麓を経て桂ヶ森東麓にかけてほぼ連続的に分布する。ただし、桂ヶ森南麓から東麓にかけては狭い帯状の分布となり、露出も良くない。調査地域では本層と古岩屋層との累重関係は確認できないが、他地域では古岩屋層

から明神層へは整合漸移することが知られている (例えば, 楠橋・山路, 2001; 越智ほか, 2014). 調査地域における明神層の露出部の層厚は, 二名川流域では 400 m 程度 (越智ほか, 2014, fig. 9), 桂ヶ森南麓から東麓ではせいぜい 200 m 程度である. 調査地域の本層は, 主に断層を介して三波川変成岩類およびひわだ峠層と接していると推定されるが (本文参照), 少なくとも入野西方においては, 一部で本層が結晶片岩類を無整合に覆っている.

この地域の明神層は中礫岩層を主体とし (Fig. S8b), 砂岩層や砂質シルト岩層を挟む. 中礫岩層はしばしば大礫を含み, 淘汰のあまり良くないものと, 中程度に淘汰されているものがある. 層厚は数十 cm から 20 m 近いものまで様々で, しばしば下位層を浸食している. また砂岩層中に小規模なレンズ状に挟まれることもある. 礫種は砂岩・泥岩といった碎屑岩類と花崗岩類が主で, 結晶片岩類礫を含むこともある. 久万川沿いに露出する明神層には花崗岩類礫がほとんど含まれないが (例えば, 木原, 1985), 桂ヶ森東麓では入野西方においても, 花崗岩類は多くはないものの礫として普通に含まれている.

砂岩層には極細粒砂岩層から極粗粒砂岩層までさまざまな粒度のものが見られ, しばしば正級化や逆級化を示す. 層厚は 10 cm 程度から 2 m ほどが普通で, 下位層を浸食したり上位層に浸食されたりすることも多い. また, 礫岩層中にレンズ状に挟まれることもある. 淘汰は一般にあまり良くなく, 層によっては細礫や中礫を含む. 平行葉理や斜交葉理の発達するものと, 塊状に見えるものがある. 砂質シルト岩は数 cm から数十 cm 厚で, 主に砂岩層に挟まれる. やはり淘汰はあまり良くない場合が多い. 砂岩や砂質シルト岩はしばしば炭質物を含み, また炭質な平行葉理を伴うものも見られる. 細粒な砂岩層や砂質シルト岩層からは, 葉化石を中心とする植物化石が産出することがあるが, 調査地域では保存の良い化石はまだ確認できていない.

3. 石鎚層群

調査地域では桂ヶ森を中心に, 石鎚層群の火山碎屑岩類が明神層を被覆し, また火山岩類が石鎚層群自体を含め下位の岩体に貫入する. ただし, 一般に露出は良くない. 火山碎屑岩の一部は高野層 (石鎚層群最下部構成層; 堀越, 1957) の結晶質凝灰岩である (Fig. S9a). 高野層は下部の軽石質凝灰岩と上部の結晶質凝灰岩からなるとされるが (堀越, 1957), 調査地域においては軽石質凝灰岩は見られず, 結晶質凝灰岩が直接明神層を覆っている. ただしこの結晶質凝灰岩が見られるのは, 鵠田峠周辺から入野西方にかけての桂ヶ森東麓で, それより西方の桂ヶ森南麓から二名川流域にかけては分布しないか, あるいは露出していない. また, 入野西方では不整合露頭は確認できていないものの, 一部でひわだ峠層の小分布や結晶片岩類を直接高野層が覆っている. 結晶質凝灰岩以外の火山碎屑岩 (安山岩質な礫岩など) や火山岩類については, 石鎚層群の何層に対比可能か現時点では不明なので, ここでは全てを石鎚層群と一括しておく. 現在ひわだ峠層と直接接しているものとしては, 先述の高野層のほかに, 鵠田峠南方の標高約 795 m のピーク周辺において同層に貫入する安山岩質な小規模岩体がある (Figs. 3, S2, S9b). ただし, この岩体は露出が悪い上に, 露頭の多くは著しく風化・変質が進んでいる.

碎屑性ジルコンの U-Pb 年代測定の分析手法

年代測定は, ジルコンの分離から分析まで国立科学博物館においておこなった. ジルコン粒子は, 高電圧パルス選択性粉碎装置 (Selfrag Lab) による試料粉碎, 椀掛けによる軽鉱物除去, 磁石 (NEOMAG 8000) による磁性鉱物除去, および重液分離 (ジヨードメタン, 3.3 g/cm^3) を経て試料中から抽出した. それらの中からハンドピックにより無作為に選んだジルコン粒子のほか, ジルコン標準試料の TEMORA2 (417 Ma; Black et al., 2004) および OD3 (Iwano et al., 2013) と, ガラ

ス標準試料 NIST SRM610 をエポキシ樹脂で封入し、1 μm までのダイヤモンドペーストで研磨した。その後、走査型電子顕微鏡 (JSM-6610, JEOL) でジルコン粒子の後方散乱電子像とカソードルミネッセンス像を観察し、可能な限り、オシラトリー累帯構造を示し包有物や割れ目のないリム部分を分析スポットに選定した (Fig. S10)。分析に利用した装置は、Nd-YAG を発振源とする波長 213 nm のレーザーを用いるレーザー・アブレーション・システム (NWR213, Electro Scientific Industries) と、四重極型誘導結合プラズマ質量分析装置 (Agilent 7700x, Agilent Technology) とを、buffered type スタビライザー (Tunheng and Hirata, 2004) を介して接続したものである (Tsutsumi et al., 2012)。レーザー径は約 25 μm とし、3.5 J/cm², 10 Hz でアブレーションをおこなった。キャリアガスには He (660 ml/min) を用いた。分析は 2 回に分けて同条件でおこなった。

U および Th 濃度は、ガラス標準試料 SRM610 の測定データを用いて、²⁹Si を内標準として算出した。²⁰⁶Pb/²³⁸U 比の補正に関しては TEMORA2 を標準試料とし、二次標準試料には OD3 を用いた。初生鉛の補正は、コンコーディア図作成には ²⁰⁸Pb 補正 (例えば, Williams, 1998), 年代値計算には ²⁰⁷Pb 補正をおこなった (Stacey and Kramers, 1975)。本研究では、コンコダントなデータについてのみ扱い、年代値は ²³⁸U–²⁰⁶Pb 年代の値を用いる。なお、二次標準試料 OD3 からは、1 回目の分析時には加重平均 ²³⁸U–²⁰⁶Pb 年代 32.32 $\pm$ 0.38 Ma (n = 10, mean squared weighted deviation (MSWD) = 1.51, 誤差は 95% 信頼区間) が、2 回目には 32.37 $\pm$ 0.38 Ma (n = 15, MSWD = 0.76) が得られた。両者は誤差の範囲で一致しているため、本研究の議論では 1 回目と 2 回目の分析結果を併せて扱う。Iwano et al. (2013) は、同試料について加重平均 ²³⁸U–²⁰⁶Pb 年代 33.0 $\pm$ 0.1 Ma (2 σ) を報告している。また、Lukács et al. (2015) は 32.853 $\pm$ 0.016 Ma (95% 信頼区間) を得ている。本研究で得られた加重平均年代はいずれも、これらの値と誤差の範囲をわずかに超えて乖離している。

データファイルの引用文献

- Black, L. P., Kamo, S. L., Allen, C. M., Davis, D. W., Aleinikoff, J. N., Valley, J. W.,...Foudoulis, C., 2004, Improved ²⁰⁶Pb/²³⁸U microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. *Chem. Geol.*, **205**, 115–140.
- Cox, E. P., 1927, A method of assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains. *J. Paleontol.*, **1**, 179–183.
- Dickinson, W. R., Beard, L. S., Brakenridge, G. R., Erjavec, J. L., Ferguson, R. C., Inman, K. F.,...Ryberg, P. T., 1983, Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **94**, 222–235.
- Endô, S. and Morita, H., 1932, Notes on the genera Comptoniphyllum and Liquidambar. *Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ., 2nd Ser., Geology*, **15**, 41–53.
- Folk, R. L., 1974, *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, Austin, 182p.
- Hanzawa, S., 1959, The foraminiferal species *Fabiania cassis* (Oppenheim), in Japan. *Contrib. Cushman Found. Foram. Res.*, **10**, 119–122.
- 長谷川 遼・磯崎行雄・大友幸子・堤 之恭, 2019a, 中央構造線 (MTL) の活動開始時期: 三河大野-伊平地域の低角度 MTL に隣接する三種類の白亜系砂岩の碎屑性ジルコン年代からの制限. *地学雑誌*, **128**, 391–417. [Hasegawa, R., Isozaki, Y., Ohtomo, Y. and Tsutsumi, Y., 2019a, Onset timing of Median Tectonic Line (MTL): constraints from U–Pb ages of detrital zircons from 3

- distinct Cretaceous sandstone units adjacent to the low-angle MTL in the Mikawa-Ono/Idaira area, central Japan. *J. Geogr. (Chigaku Zasshi)*, **128**, 391–417.]
- 長谷川 遼・磯崎行雄・堤 之恭, 2019b, 領家/三波川帯境界域の後背地: 西南日本中軸帯の古第三系・新第三系砕屑岩のジルコン年代測定. 日本地質学会第126年学術大会講演要旨, T7-O-2. [Hasegawa, R., Isozaki, Y. and Tsutsumi, Y., 2019b, Provenance of the Ryoke/Sanbagawa transition domain: dating for Paleogene-Neogene clastics from the axial SW Japan. *126th Ann. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, T7-O-2.]
- 堀越和衛, 1957, 四国石鎚山付近の地質. 愛媛大学紀要, 第II部(自然科学), **2**, 127–142. [Horikoshi, K., 1957, Geology of the Neighbourhood of Ishizuchi-yama, Shikoku. *Mem. Ehime Univ., Sec. II (Sci.)*, **2**, 127–142.]
- Isozaki, Y. and Itaya, T., 1989, Origin of schist clasts of Upper Cretaceous Onogawa Group, Southwest Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **95**, 361–368.
- Isozaki, Y. and Itaya, T., 1990, Chronology of Sanbagawa metamorphism. *J. Metamorph. Geol.*, **8**, 401–411.
- Iwano, H., Orihashi, Y., Hirata, T., Ogasawara, M., Danhara, T., Horie, K.,...Yamamoto, K., 2013, An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as a secondary U–Pb dating standard. *Isl. Arc*, **22**, 382–394.
- 鹿島愛彦・武智賢樹, 1996, 四国, 石鎚山第三系久万層群の凝灰岩のフィッション・トラック年代. 岩鉱, **91**, 196–200. [Kashima, N. and Takechi, K., 1996, Fission-track age of tuffs from the Kuma Group, Shikoku, Japan. *J. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **91**, 196–200.]
- 甲藤次郎・平 朝彦, 1979, 久万層群の新観察. 地質ニュース, **293**, 12–21. [Katto, J. and Taira, A., 1979, New observation of the Kuma Group. *Chishitsu News*, **293**, 12–21.]
- 木原茂樹, 1985, 愛媛県中央部, 久万町周辺の始新統久万層群の層序と堆積環境. 構造地質研究会・砕屑性堆積物研究会編, “スランプ相”の形成とテクトニクス. 133–144. [Kihara, S., 1985, Stratigraphy and Paleoenvironment of the Kuma Group around the Kuma Town in central Ehime Prefecture, Shikoku. *Memoirs of the Symposium on Formation of Slump Facies and its Relation to Tectonics*, 133–144.]
- 木原茂樹, 1986, 四国北西部, 古第三系久万層群の三波川変成岩類源堆積物について. 砕屑性堆積物の研究(砕屑性堆積物研究会), **4**, 33–40. [Kihara, S., 1986, Unique sediments of the Paleogene Kuma Group, consisting mostly of clasts from the Sambagawa metamorphic rocks in the northwest Shikoku. *Clastic Sediments (J. Res. Gr. Clas. Sed. Japan)*, **4**, 33–40.]
- 小林貞一, 1950, 日本地方地質誌, 四国地方. 朝倉書店, 243p. [Kobayashi, T., 1950, *Regional Geology of Japan, Shikoku*. Asakura Publ., 243p.]*
- 楠橋 直・山路 敦, 2001, 愛媛県面河地域の久万層群が示す西南日本の中新世テクトニクス. 地質雑, **107**, 26–40. [Kusuhashi, N. and Yamaji, A., 2001, Miocene tectonics of SW Japan as inferred from the Kuma Group, Shikoku. *J. Geol. Soc. Japan*, **107**, 26–40.]
- Lukács, R., Harangi, S., Bachmann, O., Guillong, M., Danišík, M., Buret, Y.,...Szepesi, J., 2015, Zircon geochronology and geochemistry to constrain the youngest eruption events and magma evolution of the mid-Miocene ignimbrite flare-up in the Pannonian Basin, eastern central Europe. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **170**, 52, doi: 10.1007/s00410-015-1206-8.
- 松尾秀邦, 1980, 石鎚山系, 瓶ヶ森林道における名野川越植物群について. 四万十帯の地質学と古生物学(甲藤次郎教授還暦記念論文集), 林野弘済会高知支部, 49–56. [Matsuo, H., 1980, On the Nanokawagoe flora from the Kamegamori-rindo (forestal road), Ishizuchi Range, Shikoku,

- Japan. In Taira, A. and Tashiro, M., eds., *Geology and Paleontology of the Shimanto Belt, Selected Papers in Honor of Prof. Jiro Katto*, Rinyakosaikai Press, 49–56.]
- 森下正信, 1921, 松山附近の和泉砂岩と第三紀層. 地質雑, **28**, 93–94. [Morishita, M., 1921, The Izumi sandstone and Tertiary around Matsuyama, *J. Geol. Soc. Japan*, **28**, 93–94.]*
- 永井浩三, 1951, 石鎚山第三系の層位學的研究 (1) 愛媛縣上浮穴郡久萬附近. 地質雑, **57**, 291. [Nagai, K., 1951, Stratigraphic study on the Ishizuchi-yama Tertiary (1) Kuma region, Kamiukena-gun, Ehime Prefecture. *J. Geol. Soc. Japan*, **57**, 291.]*
- 永井浩三, 1956, 石鎚山第三紀層の地質時代と西部日本古第三紀の古地理. 愛媛大学紀要, 第 II 部 (自然科学), **2**, 145–154. [Nagai, K., 1956, Geological age of Ishizuchiyama Tertiary and Paleogene paleogeography of west Japan. *Mem. Ehime Univ., Sec. II (Sci.)*, **2**, 145–154.]
- Nagai, K., 1957, The upper Eocene flora of the Ishizuchi range, Shikoku, Japan. *Mem. Ehime Univ., Sec. II (Sci.)*, **2**, 73–82.
- Nagai, K., 1958, Some geological problems of the Ishizuchi range, Shikoku. *Mem. Ehime Univ., Sec. II (Sci.)*, **3**, 95–108.
- Nagai, K., 1959, Some geomorphological problems of the Ishizuchi range, Shikoku. *Mem. Ehime Univ., Sec. II (Sci.)*, **3**, 251–263.
- Nagai, K., 1968, The Eocene Kuma Group. *Mem. Ehime Univ. (Sci.), Ser. D (Earth Sci.)*, **6**, 1–4.
- 永井浩三, 1972, 四国, 始新統久万層群. 愛媛大学紀要, 自然科学, D シリーズ (地学), **7**, 1–7. [Nagai, K., 1972, The Eocene Kuma Group, Shikoku. *Mem. Ehime Univ., Sci., Ser. D (Earth Sci.)*, **7**, 1–7.]
- 永井浩三・堀越和衛, 1953, 愛媛県伊予郡砥部町附近の第三紀層. 愛媛大学紀要, 第 II 部 (科学), **1**, 119–132. [Nagai, K. and Horikoshi, K., 1953, Tertiary deposits distributed in the neighbourhood of Tobe, Iyo-gun, Ehime-ken. *Mem. Ehime Univ., Sec. II (Sci.)*, **1**, 119–132.]
- 永井浩三・堀越和衛, 1954, 愛媛県上浮穴郡久万附近の地質. 愛媛大学紀要, 第 II 部 (科学) (A シリーズ), **2**, 49–62. [Nagai, K. and Horikoshi, K., 1954, Geology of the neighbourhood of Kuma, Kamiukena-gun, Ehime-ken. *Mem. Ehime Univ., Sec. II (Sci.), Ser. A*, **2**, 49–62.]
- 永井浩三・堀越和衛, 1955, 愛媛県温泉郡黒森峠附近の地質. 愛媛大学紀要, 第 II 部 (科学) (A シリーズ), **2**, 141–153. [Nagai, K. and Horikoshi, K., 1955, Geology of the neighbourhood of Kuromori-toge, Onsen-gun, Ehimeken. *Mem. Ehime Univ., Sec. II (Sci.), Ser. A*, **2**, 141–153.]
- 仲田光輝・楠橋 直・齊藤 哲・大藤弘明・奈良正和, 2019, 愛媛県久万高原町の三波川変成岩類中に新たに見つかった“粗粒な”変塩基性岩体. 地質雑, **125**, 447–452. [Nakata, K., Kusuhashi, N., Saito, S., Ohfuji, H. and Nara, M., 2019, A “coarse-grained” metabasite body newly found in the Sambagawa metamorphic rocks in Kumakogen Town, Ehime Prefecture, SW Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **125**, 447–452.]
- 奈良正和・楠橋 直・岡本 隆・今井 悟, 2017, 久万層群と三崎層群: 日本海拡大期の西南日本弧前弧中新統が記録するもの. 地質雑, **123**, 471–489. [Nara, M., Kusuhashi, N., Okamoto, T. and Imai, S., 2017, The Kuma and Misaki groups: Geological and palaeoenvironmental records preserved in the Miocene forearc deposits during the opening of the Sea of Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **123**, 471–489.]
- 成田佳南・楠橋 直・谷 健一郎, 2022, 愛媛県東温市滑川溪谷の中部中新統石鎚層群高野層. 日本地質学会第 129 年学術大会講演要旨, T7-P-1. [Narita, K., Kusuhashi, N. and Tani, K., 2022, The Middle Miocene Takano Formation (Ishizuchi Group) along the Namekawa gorge, Toon, Ehime, SW Japan. *129th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, T7-P-1.]

- 成田佳南・谷 健一郎・楠橋 直, 2020, 愛媛県の中新統久万層群明神層と石鎚層群高野層から得られたジルコン U-Pb 年代. 第 20 回日本地質学会四国支部総会・講演会プログラム・講演要旨集, 15. [Narita, K., Tani, K. and Kusuhashi, N., 2020, Zircon U-Pb ages from the Miocene Myojin Formation (Kuma Group) and the Takano Formation (Ishizuchi Group), Ehime. *20th Ann. Meet. Shikoku Branch Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 15.]*
- 成田耕一郎・山路 敦・田上高広・栗田祐司・小布施明子・松岡敷充, 1999, 四国の第三系久万層群の堆積年代とその意義. 地質雑, **105**, 305–308. [Narita, K., Yamaji, A., Tagami, T., Kurita, H., Obuse, A. and Matsuoka, K., 1999, Depositional age of the Tertiary Kuma Group, Shikoku, and its significance. *J. Geol. Soc. Japan*, **105**, 305–308.]
- Nathorst, A. G., 1888, Zur fossilen Flora Japan's. *Palæontol. Abh.*, **4**, 197–250.
- 野田勢次郎・神津俣祐, 1910, 松山圖幅地質説明書. 農商務省地質調査所, 196p. [Noda, S. and Koze, S., 1910, *Explanatory Text of the Geological Map of Matsuyama, Zone 6, Col. V*. Geological Survey of Japan, Ministry of Agriculture and Commerce, 196p.]*
- 越智真人・間宮隆裕・楠橋 直, 2014, 四国の中新統久万層群層序の再検討: “下坂場峠層”と“富重層”. 地質雑, **120**, 165–179. [Ochi, M., Mamiya, T. and Kusuhashi, N., 2014, A reexamination of the stratigraphy of the Miocene Kuma Group, Shikoku, SW Japan: the “Shimosakabato Formation” and the “Tomishige Formation.” *J. Geol. Soc. Japan*, **120**, 165–179.]
- 小川琢治, 1902, 高知圖幅地質説明書. 農商務省地質調査所, 118p. [Ogawa, T., 1902, *Explanatory Text of the Geological Map of Kōchi, Zone 6, Col. VI*. Geological Survey of Japan, Ministry of Agriculture and Commerce, 118p.]*
- 大塚彌之助, 1935, 西南日本中央構造線と長崎三角地域とに關する二三の考察. 震研輯報, **13**, 457–468. [Otuka, Y., 1935, Median Dislocation Line of Southwest Japan and the Nagasaki “Dreiecke.” *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Imp. Univ.*, **13**, 457–468.]
- 佐藤戈止, 1929, 久万地質説明書, 縦行 19 横行 32 圖幅第 245 號. 商工省地質調査所, 23p. [Sato, H., 1929, *Explanatory Text of the Geological Map of Japan, Scale 1:75,000, Kuma, Zone 32 Col. XIX, Sheet 245*. Geological Survey of Japan, Ministry of Commerce and Industries, 23p.]
- 佐藤戈止, 1931, 松山地質説明書, 縦行 19 横行 31 圖幅第 240 號. 商工省地質調査所, 34p. [Sato, H., 1931, *Explanatory Text of the Geological Map of Japan, Scale 1:75,000, Matsuyama, Zone 31 Col. XIX, Sheet 240*. Geological Survey of Japan, Ministry of Commerce and Industries, 34p.]
- 佐藤戈止, 1938, 新居濱地質説明書, 縦行 18 横行 31 圖幅第 239 號. 商工省地質調査所, 70p. [Sato, H., 1938, *Explanatory Text of the Geological Map of Japan, Scale 1:75,000, Niihama, Zone 31 Col. XVIII, Sheet 239*. Geological Survey of Japan, Ministry of Commerce and Industries, 70p.]
- 新正裕尚・折橋裕二, 2021, 四国西部中新統久万層群の酸性凝灰岩のジルコン U-Pb 年代. 地質雑, **127**, 595–603. [Shinjoe, H. and Orihashi, Y., 2021, Zircon U-Pb age of the acidic tuff from the Miocene Kuma Group, western Shikoku. *J. Geol. Soc. Japan*, **127**, 595–603.]
- Stacey, J. S. and Kramers, J. D., 1975, Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **26**, 207–221.
- 鈴木 醇, 1937, 西南日本外帯及び琉球列島に發達せる花崗岩質岩石に就いて. 地質雑, **44**, 625–660. [Suzuki, J., 1937, Granitic rocks in the outer zone of Southwest Japan and Ryukyu Islands. *J. Geol. Soc. Japan*, **44**, 625–660.]*
- Takashimizu, Y. and Iiyoshi, M., 2016, New parameter of roundness *R*: circularity corrected by aspect ratio. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **3**, 2, doi: 10.1186/s40645-015-0078-x

- 竹下 徹・田中秀実・板谷徹丸, 2000, 四国西部‘石鎚山第三系’の K-Ar 年代とその意義. 地質雑, **106**, 308–311. [Takeshita, T., Tanaka, H. and Itaya, T., 2000, K-Ar ages of the ‘Ishizuchi-yama Tertiary System’ in western Shikoku, Japan, and their implications. *J. Geol. Soc. Japan*, **106**, 308–311.]
- Tsutsumi, Y., Horie, K., Sano, T., Miyawaki, R., Momma, K., Matsubara, S.,...Yokoyama, K., 2012, LA-ICP-MS and SHRIMP ages of zircons in chevkinite and monazite tuffs from the Boso Peninsula, Central Japan. *Bull. Natl. Mus. Nat. Sci., Ser. C*, **38**, 15–32.
- Tsuya, H., 1935, On the Omogo acidic rocks. *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Imp. Univ.*, **13**, 910–924.
- Tunheng, A. and Hirata, T., 2004, Development of signal smoothing device for precise elemental analysis using laser ablation-ICP-mass spectrometry. *J. Anal. At. Spectrom.*, **19**, 932–934.
- Williams, I. S., 1998, U–Th–Pb geochronology by ion microprobe. In McKibben, M. A., Shanks, W. C. P. and Ridley, W. I., eds., *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*, Rev. Econ. Geol., **7**, 1–35.
- 矢部長克, 1935, 中, 下部瑞穂統. 東北帝國大學理學部地質學古生物學教室研究邦文報告, **12**, 1–28. [Yabe, H., 1935, Middle and lower Mizuho Series. *Contrib. Inst. Geol. Paleontol. Tohoku Imp. Univ.*, **12**, 1–28.]*
- Yokoyama, K. and Itaya, T., 1990, Clasts of high-grade Sanbagawa schist in Middle Eocene conglomerates from the Kuma Group, central Shikoku, south-west Japan. *J. Metamorph. Geol.*, **8**, 467–474.
- 吉田博直, 1951, 石鎚山近傍の第三紀火成岩類に就いて (豫報). 廣島大學地學研究報告, **1**, 37–47. [Yoshida, H., 1951, On the Tertiary igneous rocks in the vicinity of Ishizuchi-yama, Shikoku (preliminary report). *Geol. Rep. Hiroshima Univ.*, **1**, 37–47.]

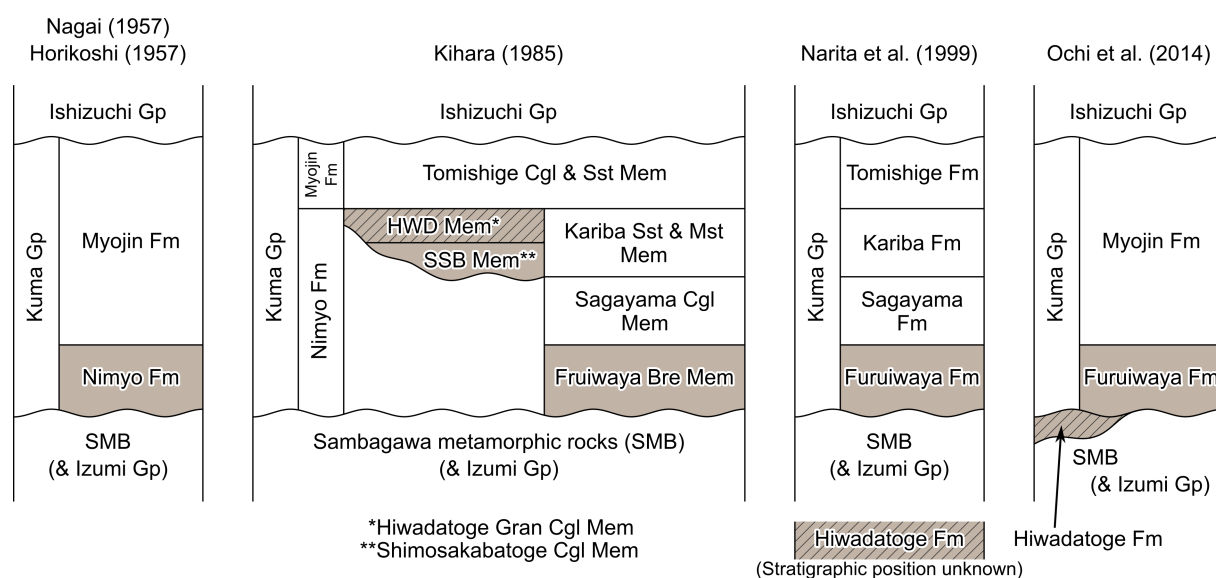
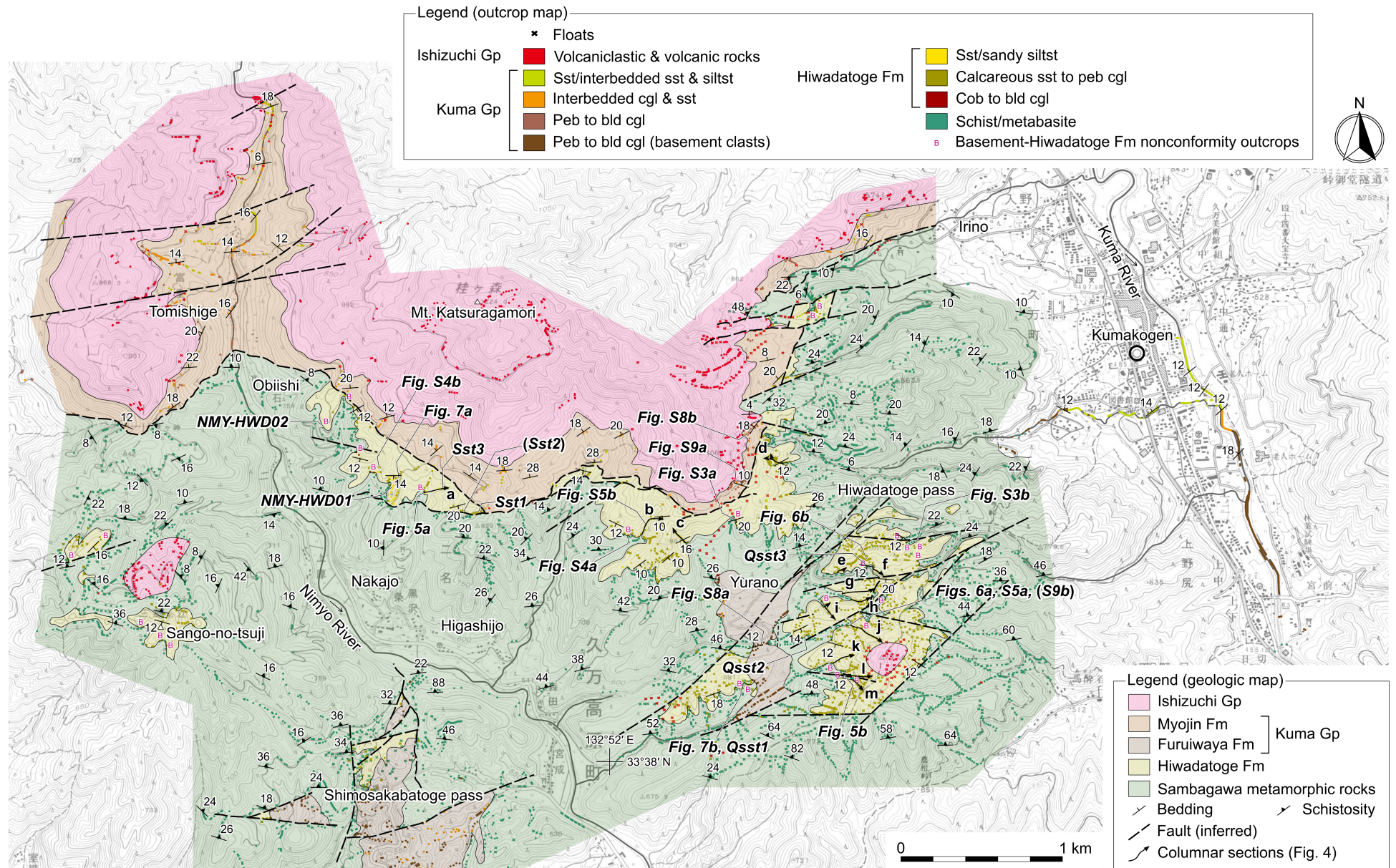


Fig. S1. Schematic stratigraphic columns for the Hiwadatoge Formation and the Kuma Group proposed by previous studies (adapted from Ochi et al., 2014). We adopted the stratigraphy of Ochi et al. (2014) in this study. Column heights are not representative of the thicknesses of formations or members. The colored formations and members were originally included in the Nimyo Formation by Nagai (1957) and Horikoshi (1957), and the Hiwadatoge Formation is hatched. Bre, Breccia; Cgl, Conglomerate; Fm, Formation; Gp, Group; Gran, Granule; Mem, Member; Mst, Mudstone; Sst, Sandstone.



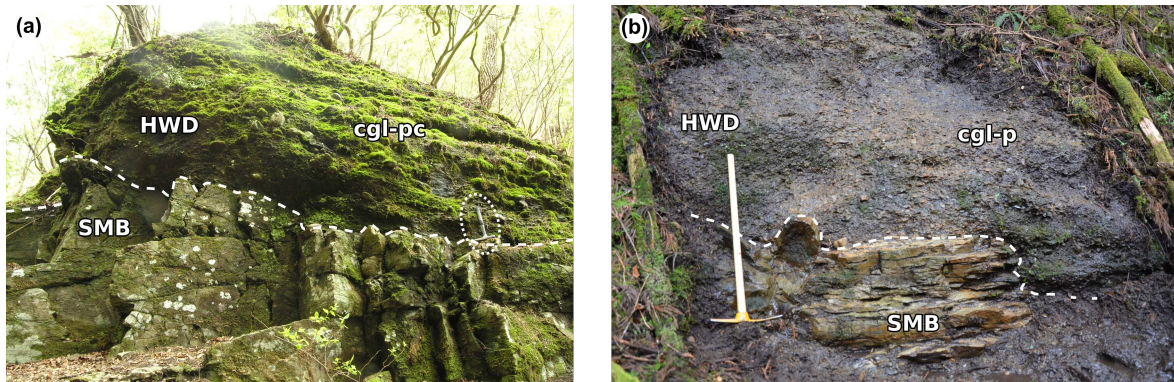


Fig. S3. Nonconformity (dashed lines) between crystalline schists of the Sambagawa metamorphic rocks (SMB) and the Hiwadatoge Formation (HWD). **(a)** Pebble to cobble conglomerate (cgl-pc) overlying the SMB. The hammer in the dotted ellipse is ~30 cm long. **(b)** Pebble conglomerate (cgl-p) overlying the SMB. The pickaxe is ~90 cm long. The outcrop locations are shown in Figs. 3 and S2, and more photographs are shown in Fig. 5.

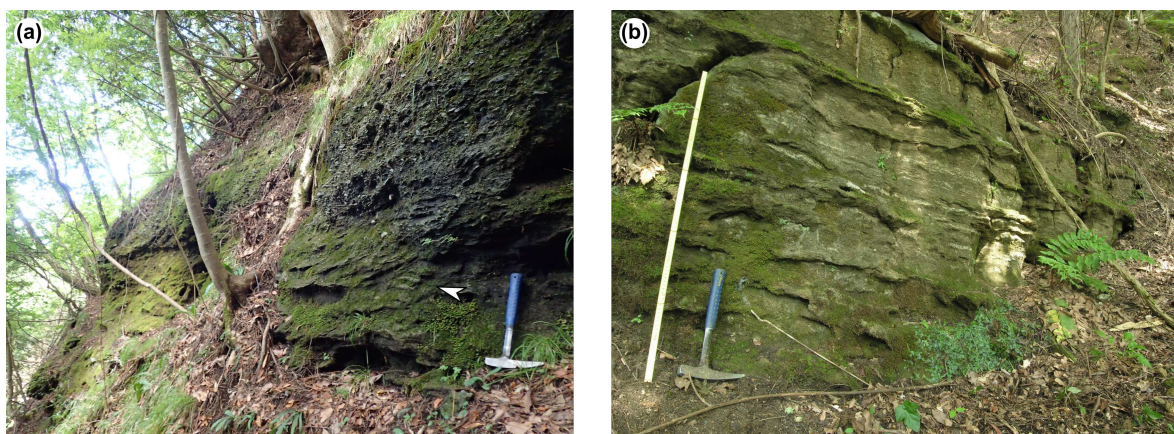


Fig. S4. Outcrops of the Hiwadatoge Formation. **(a)** Trough cross-stratified (arrow) medium-grained sandstone bed overlain by a pebble conglomerate bed. The hammer is ~30 cm long. **(b)** Stratified calcareous pebble and granule conglomerate beds. The hammer is ~30 cm long. The outcrop locations are shown in Figs. 3 and S2, and more photographs are shown in Fig. 6.

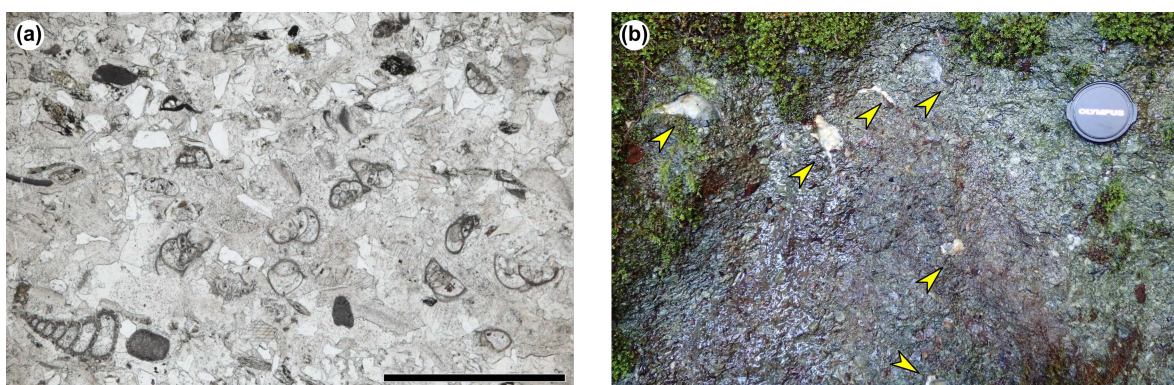


Fig. S5. Fossils from the Hiwadatoge Formation. **(a)** Photomicrograph taken under plane-polarized light of a sandy limestone collected at the outcrop shown in Fig. 6a. The scale bar is 1 mm. **(b)** Mode of occurrence of molluscan fossils (arrows) in a pebble conglomerate. The lens cap is 4 cm in diameter. The outcrop locations are shown in Figs. 3 and S2.

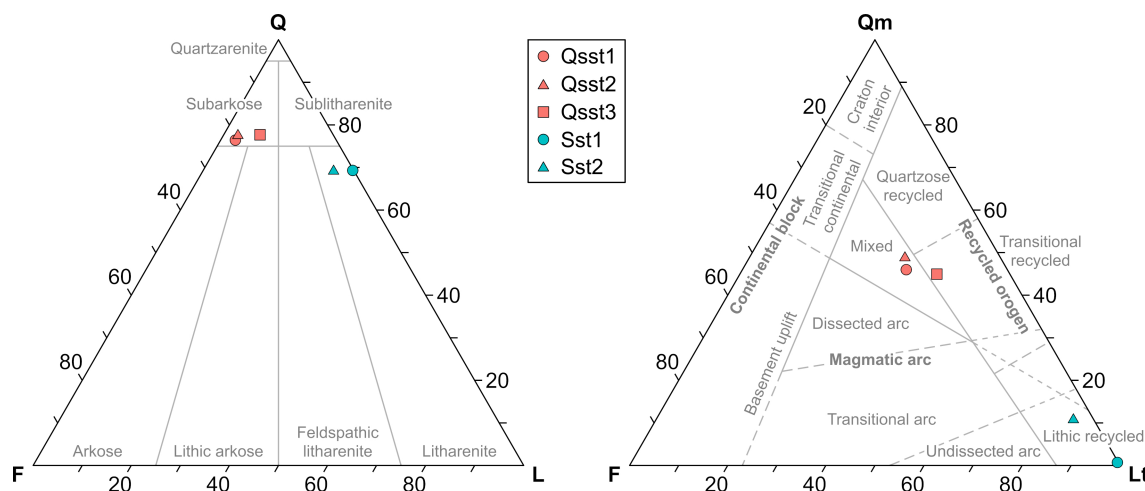


Fig. S6. QFL (left) and QmFLt (right) diagrams showing differences in the framework modes of the quartz-rich (Qsst1–3) and other (Sst1–2) sandstone samples collected from the Hiwadatoge Formation. Sst1 is a calcareous sample and Sst2 is non-calcareous. The sandstone classification in the QFL diagram is adapted from Folk (1974), and the provenance types in the QmFLt diagram are from Dickinson et al. (1983). The sample locations are shown in Figs. 3 and S2, a photomicrograph of Qsst1 is shown in Fig. 7b, and the modal composition of each sandstone is listed in Table S1. F, feldspars (plagioclase + K-feldspar); L, lithic fragments; Lt, total lithic fragments (L + polycrystalline quartz); Q, quartz (monocrystalline + polycrystalline); Qm, monocrystalline quartz.

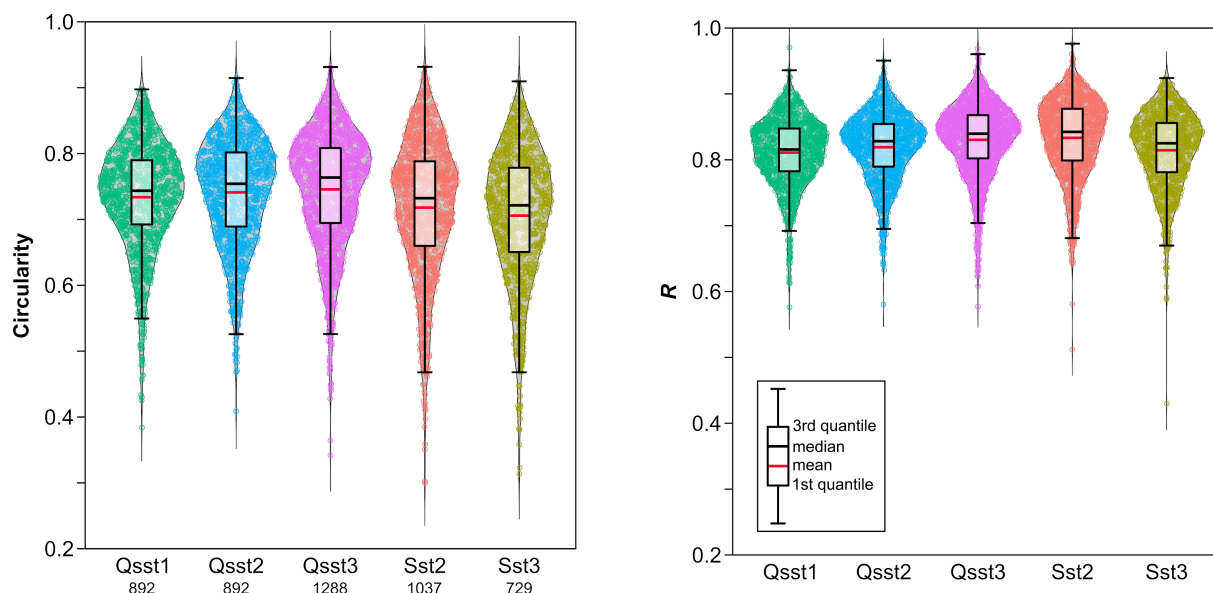


Fig. S7. Box plots of two roundness parameters, circularity (Cox, 1927) and R (Takashimizu and Iiyoshi, 2016), of the framework grains of three quartz-rich (Qsst1–3) and two other (Sst2–3) sandstone samples collected from the Hiwadatoge Formation. Sst3 is a calcareous sample. Both parameters were calculated by analyzing thin-section images using ImageJ software (version 1.53e). The number of grains examined for each sample is shown below the label on the horizontal axis in the left plot. Whiskers represent all grains lying within 1.5 times the inter-quartile range of each sample. The sample locations are shown in Figs. 3 and S2, and a photomicrograph of Qsst1 is shown in Fig. 7b.

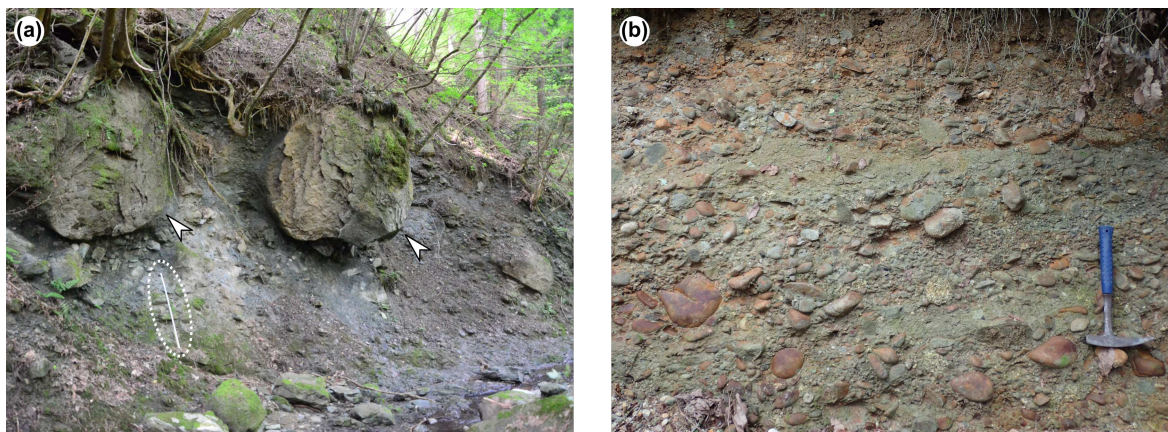


Fig. S8. Outcrops of the Kuma Group. **(a)** Poorly sorted conglomerate of the Furuiwaya Formation containing large clasts from the Hiwadatoge Formation (arrows). The ruler in the dotted ellipse is 1 m long. **(b)** Pebble to cobble conglomerate of the Myojin Formation with discontinuous interbedded sandy beds. The hammer is ~30 cm long. The outcrop locations are shown in Figs. 3 and S2.

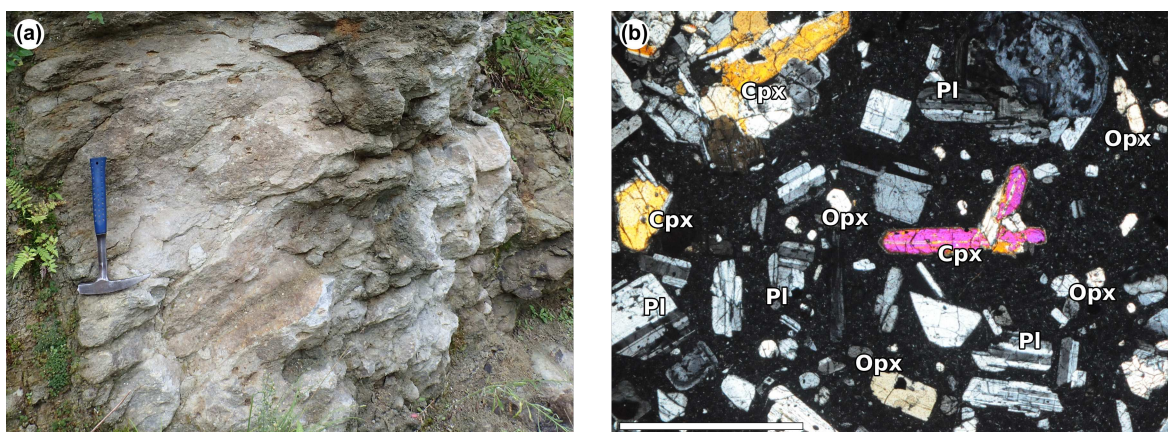


Fig. S9. Photographs of the Ishizuchi Group. **(a)** Outcrop of a crystalline tuff of the Takano Formation. The hammer is ~30 cm long. The outcrop location is shown in Figs. 3 and S2. **(b)** Photomicrograph taken under cross-polarized light of an andesite collected as a float near the outcrop shown in Fig. 6a, which most likely originated from the intrusion to the southeast of the sampling locality. The scale bar is 1 mm. Cpx, clinopyroxene; Opx, orthopyroxene; Pl, plagioclase.

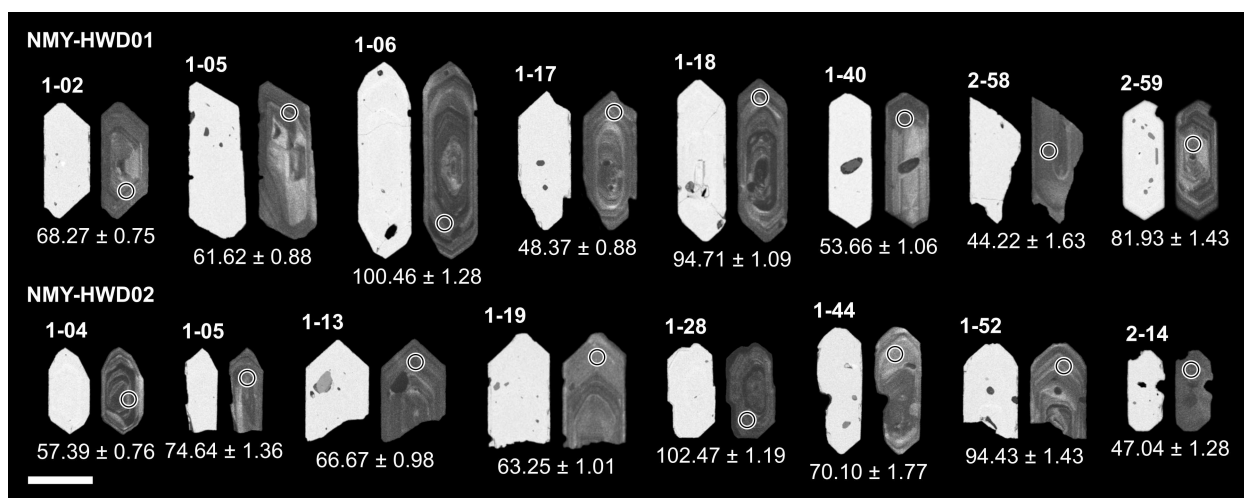


Fig. S10. Backscattered electron (left) and cathodoluminescence (right) images of selected zircon grains separated from the NMY-HWD01 (upper) and NMY-HWD02 (lower) samples of the Hiwadatoge Formation, with the ^{238}U - ^{206}Pb age (^{207}Pb corrected, 1σ error) obtained from each. The locations of the analyses are shown by circles on the cathodoluminescence images. The scale bar is 100 μm . The sample locations are shown in Figs. 3 and S2.

Table S1. Modal compositions (% except for total counts) of three quartz-rich (Qsst1–3) and two other (Sst1–2) sandstone samples of the Hiwadatoge Formation analyzed by point counting. Modal proportions and total counts in parentheses are those when only quartz, feldspars, and lithic fragments are included. “–” indicates that no points were counted for that type of grain in the thin section. The sample locations are shown in Figs. 3 and S2, QFL and QmFLt diagrams for the sandstones are shown in Fig. S6, and a photo-micrograph of Qsst1 is shown in Fig. 7b. Bcl, bioclast; Kfs, K-feldspar; L, lithic fragments; Mtx, matrix; Pl, plagioclase; Qm, monocrystalline quartz; Qp, polycrystalline quartz.

Sample	Grain size	Quartz		Feldspars		L	Bcl	Mtx	Total counts
		Qm	Qp	Pl	Kfs				
Qsst1	medium-coarse	40.5 (46.0)	26.8 (30.5)	1.1 (1.3)	17.0 (19.3)	2.6 (3.0)	–	12.1	1809 (1591)
Qsst2	medium-fine	41.8 (49.2)	24.4 (28.7)	1.0 (1.2)	15.4 (18.1)	2.4 (2.8)	–	15.0	2019 (1716)
Qsst3	medium-very coarse	38.0 (45.0)	27.6 (32.7)	0.8 (1.0)	11.7 (13.9)	6.3 (7.4)	–	15.5	2511 (2121)
Sst1	coarse	0.5 (0.7)	49.9 (68.7)	0.1 (0.1)	0.0 (0.1)	22.2 (30.5)	6.5	20.8	2699 (1963)
Sst2	fine	8.1 (11.1)	42.6 (58.5)	1.2 (1.6)	1.7 (2.4)	19.3 (26.5)	1.9	25.2	2509 (1828)

Table S2. U and Th contents, U–Pb isotopic ratios (^{208}Pb corrected), and calculated ages (^{207}Pb corrected) of detrital zircon grains from sandy siltstone samples (NMY-HWD01 and NMY-HWD02) of the Hiwadatoge Formation. See Figs. 3 and S2 for the locations of the sampled outcrops. Errors on isotopic ratios and ages are 1σ . Pb* indicates radiogenic Pb.

Analysis	Grain	U (ppm)	Th (ppm)	Isotopic ratios		^{238}U – $^{206}\text{Pb}^*$ ages (Ma)
				$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	
NMY-HWD01						
1	1-01	619	313	64.99 ± 0.87	0.0477 ± 0.0017	98.44 ± 1.30
1	1-02	473	379	93.93 ± 1.03	0.0472 ± 0.0021	68.27 ± 0.75
1	1-03	279	75	64.36 ± 0.84	0.0527 ± 0.0029	98.80 ± 1.29
1	1-04	616	189	63.87 ± 0.75	0.0474 ± 0.0013	100.14 ± 1.17
1	1-05	653	312	104.12 ± 1.50	0.0441 ± 0.0017	61.62 ± 0.88
1	1-06	481	135	63.67 ± 0.81	0.0463 ± 0.0016	100.46 ± 1.28
1	1-07	289	132	68.58 ± 1.03	0.0457 ± 0.0026	93.33 ± 1.39
1	1-09	257	138	96.98 ± 1.55	0.0468 ± 0.0050	66.17 ± 1.04
1	1-10	404	339	69.83 ± 0.98	0.0448 ± 0.0023	91.67 ± 1.28
1	1-11	387	255	76.96 ± 1.21	0.0452 ± 0.0043	83.37 ± 1.25
1	1-12	829	303	65.16 ± 0.72	0.0483 ± 0.0014	98.15 ± 1.09
1	1-13	739	254	66.99 ± 0.79	0.0488 ± 0.0027	95.41 ± 1.10
1	1-14	462	153	69.93 ± 1.09	0.0474 ± 0.0031	91.59 ± 1.42
1	1-16	572	276	93.25 ± 1.21	0.0479 ± 0.0019	68.72 ± 0.91
1	1-17	293	173	132.78 ± 2.43	0.0450 ± 0.0027	48.37 ± 0.88
1	1-18	637	541	67.45 ± 0.77	0.0492 ± 0.0015	94.71 ± 1.09
1	1-19	248	91	67.68 ± 0.97	0.0486 ± 0.0043	94.48 ± 1.33
1	1-20	386	445	76.59 ± 1.23	0.0474 ± 0.0019	83.62 ± 1.34
1	1-21	295	173	79.69 ± 1.35	0.0471 ± 0.0034	80.39 ± 1.36
1	1-23	398	236	95.29 ± 1.40	0.0536 ± 0.0044	66.77 ± 0.97
1	1-25	491	271	97.90 ± 1.55	0.0467 ± 0.0048	65.54 ± 0.99
1	1-28	467	282	102.53 ± 1.35	0.0492 ± 0.0021	62.42 ± 0.84
1	1-30	315	134	105.07 ± 1.72	0.0467 ± 0.0043	61.10 ± 0.99
1	1-32	345	153	75.23 ± 1.38	0.0439 ± 0.0055	85.53 ± 1.52
1	1-33	774	118	65.61 ± 0.72	0.0514 ± 0.0016	97.10 ± 1.08
1	1-36	569	333	106.59 ± 1.80	0.0386 ± 0.0056	60.71 ± 0.96
1	1-39	406	231	94.40 ± 1.37	0.0440 ± 0.0021	67.93 ± 0.98
1	1-40	659	202	119.33 ± 2.33	0.0490 ± 0.0026	53.66 ± 1.06
1	1-41	471	209	57.35 ± 0.88	0.0456 ± 0.0037	111.73 ± 1.63
1	1-42	382	84	61.08 ± 0.73	0.0503 ± 0.0019	104.40 ± 1.26

Table S2. Continued

Analysis	Grain	U (ppm)	Th (ppm)	Isotopic ratios		^{238}U - $^{206}\text{Pb}^*$ ages (Ma)
				$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	
NMY-HWD01						
2	2-01	541	174	112.77 ± 1.47	0.0427 ± 0.0031	57.07 ± 0.72
2	2-02	143	74	69.29 ± 1.25	0.0510 ± 0.0034	92.00 ± 1.70
2	2-03	478	281	107.94 ± 1.49	0.0493 ± 0.0036	59.29 ± 0.80
2	2-04	240	133	83.36 ± 1.25	0.0494 ± 0.0031	76.70 ± 1.18
2	2-05	296	143	99.97 ± 1.74	0.0519 ± 0.0028	63.79 ± 1.13
2	2-07	223	136	93.02 ± 1.76	0.0399 ± 0.0063	69.33 ± 1.22
2	2-08	252	157	103.29 ± 2.12	0.0438 ± 0.0061	62.35 ± 1.21
2	2-10	265	128	93.59 ± 1.80	0.0457 ± 0.0047	68.66 ± 1.30
2	2-11	456	236	105.45 ± 1.62	0.0468 ± 0.0024	60.84 ± 0.93
2	2-12	633	291	119.28 ± 1.86	0.0446 ± 0.0087	53.99 ± 0.85
2	2-15	110	153	109.16 ± 3.14	0.0410 ± 0.0047	58.79 ± 1.68
2	2-16	231	199	98.05 ± 2.16	0.0546 ± 0.0045	64.81 ± 1.47
2	2-17	278	271	101.66 ± 1.90	0.0489 ± 0.0030	62.97 ± 1.19
2	2-18	221	124	102.64 ± 2.01	0.0490 ± 0.0060	62.36 ± 1.18
2	2-19	264	175	80.96 ± 1.50	0.0458 ± 0.0027	79.14 ± 1.46
2	2-20	255	117	82.66 ± 1.50	0.0489 ± 0.0043	77.38 ± 1.38
2	2-22	221	207	93.72 ± 1.94	0.0376 ± 0.0075	69.26 ± 1.33
2	2-25	346	170	83.93 ± 1.61	0.0531 ± 0.0050	75.82 ± 1.43
2	2-26	479	219	62.55 ± 0.96	0.0491 ± 0.0019	102.11 ± 1.58
2	2-28	500	428	106.00 ± 2.10	0.0420 ± 0.0069	60.91 ± 1.12
2	2-29	132	88	95.65 ± 2.80	0.0547 ± 0.0107	66.43 ± 1.91
2	2-30	433	302	65.25 ± 0.94	0.0535 ± 0.0023	97.36 ± 1.42
2	2-32	418	302	79.48 ± 1.21	0.0481 ± 0.0048	80.55 ± 1.18
2	2-35	44	55	35.61 ± 1.11	0.0474 ± 0.0065	178.55 ± 5.47
2	2-36	247	218	98.05 ± 1.74	0.0368 ± 0.0068	66.24 ± 1.07
2	2-39	234	164	101.54 ± 2.28	0.0477 ± 0.0041	63.14 ± 1.45
2	2-40	197	138	59.50 ± 1.03	0.0498 ± 0.0060	107.23 ± 1.80
2	2-41	1219	650	103.75 ± 1.14	0.0473 ± 0.0016	61.83 ± 0.69
2	2-43	325	245	101.49 ± 2.28	0.0364 ± 0.0081	63.75 ± 1.32
2	2-44	375	212	61.57 ± 1.04	0.0525 ± 0.0052	103.30 ± 1.68
2	2-45	257	149	61.37 ± 1.00	0.0404 ± 0.0046	105.21 ± 1.66
2	2-46	1093	480	68.37 ± 0.88	0.0492 ± 0.0017	93.45 ± 1.21
2	2-47	131	61	112.81 ± 3.81	0.0298 ± 0.0122	58.03 ± 1.84
2	2-50	533	156	65.03 ± 0.83	0.0488 ± 0.0027	98.28 ± 1.25
2	2-51	78	66	93.78 ± 3.26	0.0447 ± 0.0065	68.38 ± 2.36
2	2-52	247	113	81.04 ± 1.52	0.0532 ± 0.0057	78.50 ± 1.47
2	2-53	289	162	86.58 ± 1.51	0.0529 ± 0.0031	73.52 ± 1.30
2	2-54	246	121	61.79 ± 1.09	0.0481 ± 0.0031	103.50 ± 1.86
2	2-55	385	305	101.03 ± 1.58	0.0471 ± 0.0027	63.49 ± 0.99
2	2-56	289	235	94.76 ± 2.15	0.0269 ± 0.0139	69.42 ± 1.46
2	2-57	51	24	85.35 ± 3.41	0.0343 ± 0.0142	76.34 ± 2.97
2	2-58	120	74	145.32 ± 5.61	0.0419 ± 0.0111	44.22 ± 1.63
2	2-59	290	139	78.47 ± 1.39	0.0447 ± 0.0044	81.93 ± 1.43
2	2-60	152	86	102.67 ± 3.10	0.0394 ± 0.0085	62.97 ± 1.81
2	2-61	403	179	70.51 ± 1.35	0.0355 ± 0.0072	92.19 ± 1.66
2	2-63	184	96	95.88 ± 2.17	0.0463 ± 0.0090	66.98 ± 1.48
2	2-64	334	236	96.97 ± 1.81	0.0484 ± 0.0069	66.05 ± 1.18
2	2-66	399	288	71.15 ± 1.43	0.0471 ± 0.0057	90.06 ± 1.75
2	2-69	750	271	60.70 ± 0.71	0.0511 ± 0.0016	104.94 ± 1.24
2	2-70	583	570	105.82 ± 1.71	0.0540 ± 0.0025	60.11 ± 0.99
2	2-73	938	209	65.47 ± 0.74	0.0463 ± 0.0027	97.93 ± 1.10
2	2-74	262	118	63.84 ± 0.93	0.0510 ± 0.0026	99.82 ± 1.48
2	2-75	276	220	65.82 ± 0.88	0.0520 ± 0.0027	96.71 ± 1.32
2	2-76	299	179	67.66 ± 1.28	0.0604 ± 0.0067	93.10 ± 1.74
2	2-81	813	320	107.19 ± 1.39	0.0431 ± 0.0041	60.17 ± 0.76
2	2-82	77	36	139.66 ± 7.15	0.0593 ± 0.0120	45.28 ± 2.41
2	2-83	145	74	66.67 ± 1.39	0.0546 ± 0.0040	95.18 ± 2.03
2	2-84	373	254	86.74 ± 1.67	0.0444 ± 0.0027	73.90 ± 1.42
2	2-85	214	218	107.36 ± 2.69	0.0512 ± 0.0044	59.47 ± 1.52
2	2-86	722	218	64.26 ± 0.79	0.0523 ± 0.0023	99.00 ± 1.22
2	2-88	290	215	129.86 ± 3.03	0.0439 ± 0.0089	49.65 ± 1.11

Table S2. Continued.

Analysis	Grain	U (ppm)	Th (ppm)	Isotopic ratios		²³⁸ U– ²⁰⁶ Pb* ages (Ma)
				²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb*	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	
NMY-HWD02						
1	1-04	1305	1188	111.40 ± 1.46	0.0502 ± 0.0019	57.39 ± 0.76
1	1-05	512	217	85.82 ± 1.55	0.0480 ± 0.0023	74.64 ± 1.36
1	1-08	265	109	68.57 ± 1.38	0.0442 ± 0.0027	93.33 ± 1.87
1	1-09	449	208	96.18 ± 1.52	0.0473 ± 0.0040	66.68 ± 1.02
1	1-13	460	284	96.19 ± 1.42	0.0473 ± 0.0020	66.67 ± 0.98
1	1-15	812	253	65.60 ± 1.03	0.0486 ± 0.0016	97.45 ± 1.53
1	1-16	460	237	85.38 ± 1.24	0.0479 ± 0.0037	75.03 ± 1.06
1	1-19	252	128	102.30 ± 1.72	0.0374 ± 0.0053	63.25 ± 1.01
1	1-23	660	302	107.28 ± 2.68	0.0492 ± 0.0055	59.66 ± 1.47
1	1-26	602	276	67.39 ± 0.82	0.0477 ± 0.0027	94.99 ± 1.13
1	1-28	625	185	62.66 ± 0.73	0.0449 ± 0.0023	102.47 ± 1.19
1	1-29	611	282	82.53 ± 1.00	0.0459 ± 0.0016	77.64 ± 0.93
1	1-34	279	115	84.58 ± 1.57	0.0396 ± 0.0052	76.28 ± 1.35
1	1-37	482	275	106.39 ± 2.06	0.0476 ± 0.0027	60.28 ± 1.18
1	1-38	380	200	89.83 ± 1.54	0.0450 ± 0.0041	71.47 ± 1.18
1	1-39	295	248	93.79 ± 1.99	0.0353 ± 0.0092	69.20 ± 1.28
1	1-41	581	355	76.77 ± 1.23	0.0468 ± 0.0037	83.52 ± 1.30
1	1-43	385	187	79.67 ± 1.51	0.0471 ± 0.0044	80.46 ± 1.51
1	1-44	123	73	91.47 ± 2.32	0.0465 ± 0.0038	70.10 ± 1.77
1	1-45	138	131	103.57 ± 2.61	0.0486 ± 0.0049	61.84 ± 1.59
1	1-46	332	112	81.82 ± 1.36	0.0468 ± 0.0049	78.40 ± 1.29
1	1-49	270	124	97.05 ± 1.88	0.0513 ± 0.0030	65.75 ± 1.29
1	1-50	1154	472	73.01 ± 1.02	0.0484 ± 0.0014	87.63 ± 1.22
1	1-51	346	177	93.05 ± 1.40	0.0523 ± 0.0048	68.48 ± 1.01
1	1-52	315	139	67.65 ± 1.01	0.0493 ± 0.0024	94.43 ± 1.43
1	1-53	174	91	99.34 ± 2.95	0.0418 ± 0.0039	64.57 ± 1.90
1	1-56	225	134	89.31 ± 1.73	0.0570 ± 0.0037	70.92 ± 1.40
1	1-58	174	131	103.50 ± 2.92	0.0414 ± 0.0102	62.44 ± 1.68
2	2-02	137	104	86.79 ± 1.86	0.0436 ± 0.0048	73.85 ± 1.57
2	2-08	221	116	84.59 ± 1.73	0.0416 ± 0.0070	76.33 ± 1.50
2	2-09	237	199	94.76 ± 2.00	0.0409 ± 0.0081	68.17 ± 1.30
2	2-14	219	117	136.96 ± 3.91	0.0445 ± 0.0093	47.04 ± 1.28
2	2-15	146	85	91.99 ± 2.43	0.0545 ± 0.0052	69.08 ± 1.87
2	2-19	97	107	105.29 ± 5.15	0.0475 ± 0.0363	60.94 ± 2.86
2	2-20	533	306	106.36 ± 1.80	0.0466 ± 0.0043	60.37 ± 1.00
2	2-21	379	129	61.80 ± 0.94	0.0514 ± 0.0023	103.04 ± 1.59
2	2-27	224	64	65.19 ± 1.23	0.0460 ± 0.0043	98.19 ± 1.81
2	2-28	186	103	83.99 ± 1.84	0.0462 ± 0.0081	76.43 ± 1.61
2	2-29	329	218	93.69 ± 1.77	0.0428 ± 0.0028	68.44 ± 1.29