

四国中央部三波川帯緑泥石帯砂質片岩中のジルコンのフィッシュントラック年代: 2つの異なる年代とその意味

Fission-track zircon ages of psammitic schist from the chlorite zone of the Sambagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan: two distinct ages, and implications

竹下 徹* 長谷部徳子** 野村和良***

Toru Takeshita*, Noriko Hasebe** and Kazuyoshi Nomura***

2009年4月2日受付. 2010年9月3日受理.

* 北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門地球惑星システム科学分野

Division of Earth and Planetary System Science, Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

** 金沢大学環日本海域環境研究センター

Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University

*** アジア航測(株) 事業推進本部防災地質部防災地質課
Asia Air Survey Co., Ltd.

Corresponding author; T. Takeshita
torutake@mail.sci.hokudai.ac.jp

Abstract: We analyzed the fission-track (FT) thermochronology of zircon in two samples of psammitic schist from the chlorite zone of the Sambagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan. The samples were collected from the lower-grade part of the chlorite zone (pumpellyite–actinolite facies). Detrital zircons from a single locality along the Asemi River are completely annealed, yielding FT ages of 92.6 ± 6.2 Ma (1 σ , 13 grains), and those from a single locality along the Dozan River are also completely annealed, yielding FT ages of 47.2 ± 3.8 Ma (1 σ , 7 grains). Although both samples were collected from within the chlorite zone, the two FT zircon ages are different, possibly because they represent the timing of peak metamorphism in the former sample, and a D3 thermal event (post peak-metamorphism) in the latter sample.

Keywords: zircon, fission-track dating, Sambagawa metamorphic rocks, chlorite zone, thermal event

はじめに

フィッシュントラック (fission track, 以下FT) 法は、閉鎖温度の低い (ジルコンの場合 $10^6 \sim 10^7$ 年の時間スケールにおいて約 280°C, Tagami et al., 1998) 放射年代測定法として知られており、火成岩・変成岩の冷却 (変成岩の場合は主として上昇に伴う) 年代や冷却後の熱イベントの年代を求めるのに有効である (例えば, Spear, 1993). 四国中央部三波川変成岩中のジルコンのFT年代については、これまで

Shinjoe and Tagami (1994) や Wallis et al. (2004) らの報告がある. Shinjoe and Tagami (1994) は徳島県大歩危地域のジルコンのFT年代 (56–69 Ma) を冷却年代と考え、Takasu and Dallmeyer (1990) による $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代 (70–77 Ma) と組み合わせて、大歩危ユニット (後述) の冷却史を推定した. しかし、Wallis et al. (2004) は、FT長の解析に基づき大歩危地域のジルコンのFT年代は変成作用後の約 30 Ma 以降に生じた2次加熱によって若返っていると、2次加熱の一つの候補として中期中新世 (約 15 Ma) の西南日本外帯の火成活動を挙げた. 一方、Wallis et al. (2004) は汗見川流域の灰曹長石–黒雲母帯に産する変成礫岩中のジルコンのFT年代は真に上昇・冷却年代を示すと推論し、変成岩の上昇・冷却史を議論した.

今回我々は、四国中央部三波川変成岩の温度履歴に一つの情報を与える目的で緑泥石帯の2か所で、砂質片岩から得られたジルコンのFT年代を測定した. その結果、これまで得られているジルコンのFT年代とは異なる意味を持つ年代値が得られたのでここに報告する.

地質概説、変成条件および試料採取地点

四国中央部三波川変成岩は、泥質片岩中の鉱物組み合わせに基づいて、低変成度から緑泥石帯、ざくろ石帯、曹長石–黒雲母帯および灰曹長石–黒雲母帯に区別されている (Fig. 1, 例えば, Higashino, 1990). 本研究では2地点 (Loc. A: 高知県長岡郡本山町早稲田, Loc. B: 愛媛県四国中央市富郷町豊坂, Fig. 1b) から砂質片岩試料を採取し、それらの試料中に含まれるジルコンのFT年代の測定を行った. 2つの砂質片岩試料はともに緑泥石帯から採取された. 緑泥石帯は、構造的上位の緑泥石帯高温部 (緑色片岩相) と下位の低温部 (パンペリー石–アクチノ閃石相) に分けられる (Nakajima et al., 1977; Banno et al., 1978). 緑泥石帯低温部はパンペリー石消滅のアイソグラッドにより緑泥石帯高温部から区分され、緑泥石帯の殆どの部分を構成する (Fig. 1b, Nakajima, 1982; Banno, 1998). Nakajima et al. (1977) および Nakajima (1982) は、四国中央部三波川帯において、パンペリー石–アクチノ閃石相の温度条件を 300–350°C 程度とモデル計算により見積もったが、地域による変成度の差異は Sakaguchi and Ishizuka (2008) がその後より詳しく解析したものと調和的である. 試料採取地点Aは緑泥石帯低温部に属し (Fig. 1b), その近傍でかつてローソン石が発見されたことがあるが (Watanabe and Kobayashi, 1984), 方解石–アルバイト–白雲母–ローソン石の変成鉱物組み合

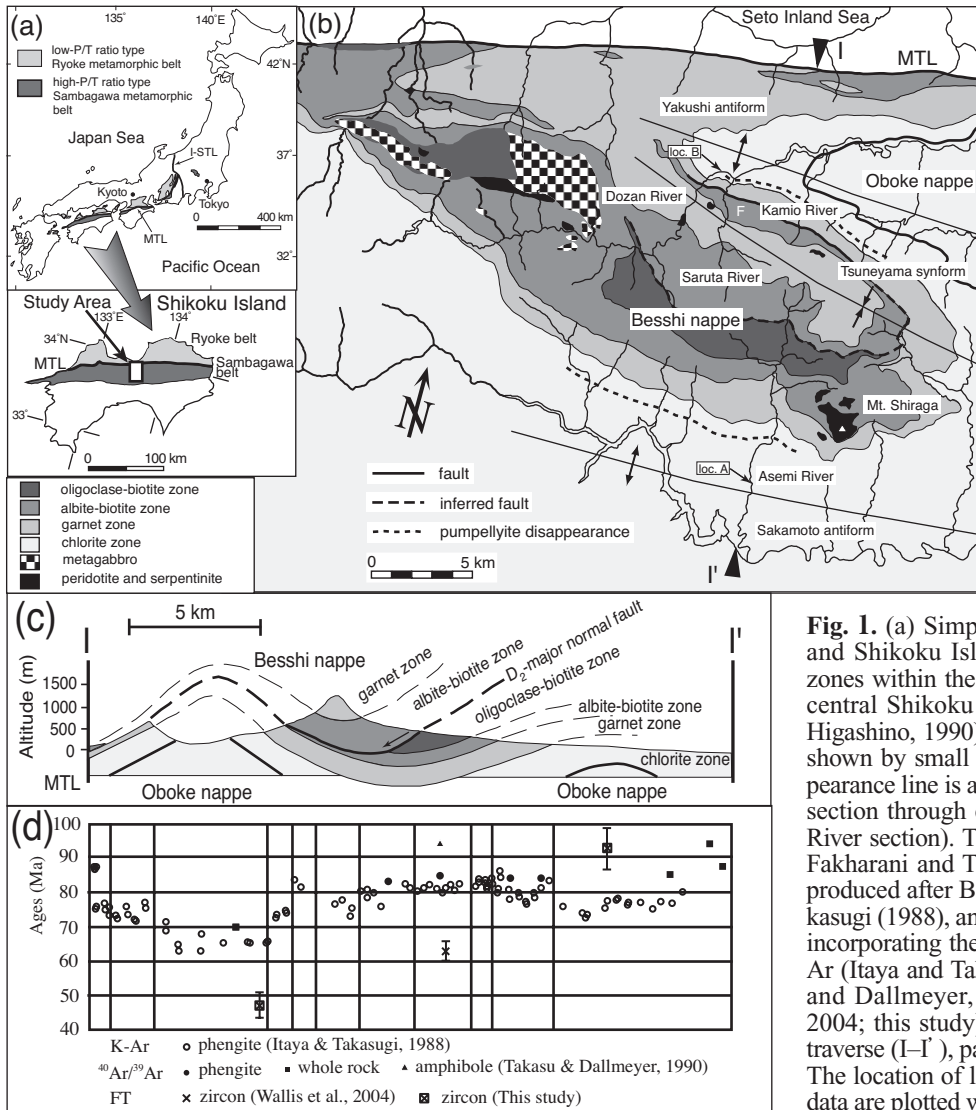


Fig. 1. (a) Simplified index map of SW Japan and Shikoku Island. (b) Map of metamorphic zones within the Sambagawa metamorphic belt, central Shikoku (the present study area) (after Higashino, 1990). Sample localities A and B are shown by small arrows. The pumpellyite disappearance line is after Nakajima (1982). (c) Cross-section through central Shikoku (Kamio-Asemi River section). The section is after fig. 1c of El-Fakharani and Takeshita (2008), which was reproduced after Banno et al. (1978), Itaya and Takasugi (1988), and Takasu and Dallmeyer (1990), incorporating the D₂ major normal fault. (d) K-Ar (Itaya and Takasugi, 1988), ³⁹Ar/⁴⁰Ar (Takasu and Dallmeyer, 1990), and FT (Wallis et al., 2004; this study) age data plotted along a N-S traverse (I-I'), parallel to the cross-section in (c). The location of line I-I' is shown in (b). FT age data are plotted with error bars of 1σ.

わせは、約 8 kb、350°C および $X_{CO_2} = 0.0005$ 以下で安定であると見積もられている (Goto et al., 2007). また、地点 B も詳しいデータは提示されていないが、Nakajima (1982) によるとパンペリー石-アクリノ閃石相に属するとされる (Fig. 1b). なお、上記の緑泥石帯の温度・圧力条件は、Enami et al. (1994) によって議論されたもの (300–360°C, 5.5–6.5 kb) とも調和的である。

三波川変成岩は、上昇に伴う温度低下時に D₁, D₂ および D₃ 時相の変形を経験した (例えば、原ほか, 1977; Faure, 1983; Wallis, 1990; Hara et al., 1992). D₁ は東西方向の、上盤西ずれの剪断変形が優勢な大規模塑性変形である。D₂ はもともと南フェルゲンツのスラストや横臥褶曲の形成で定義された (例えば、原ほか, 1977; Faure, 1983). しかし最近、構造的上位層準を中心として、北フェルゲンツの横臥褶曲を伴う上盤北落としての正断層が顕著に発達していることが明らかとなり、D₂ 正断層と命名された (Osozawa and Pavlis, 2007; El-Fakharani and Takeshita, 2008). D₃ 時相は、東西ないし西北西–東南東走向・水平な軸を持つ、開いた鉛直褶曲の発達で定義される。D₃ 褶曲は、三波川変成

岩上昇後に生じ (Banno et al., 1978; Hara et al., 1992)、中央構造線の左横ずれと関連して発達したと解釈されている (Hara et al., 1980). 露頭スケールの D₃ 褶曲は、中央構造線や地質図スケールの D₃ 褶曲 (津根山シンフォームおよび薬師アンチフォーム, Fig. 1b) の近傍に顕著に発達する。

試料採取地点は南北に 15 km 隔たっており、それぞれ津根山シンフォームの南翼および北翼を構成するが、ほぼ似通った構造的層準に位置する。また、両試料採取地点 A および B の周辺は殆ど泥質片岩によって構成されているが、これらの地点にのみ層厚 5 m および 70 m の薄い砂質片岩がそれぞれ挟まれている。両地点は、構造要素の発達を異にする。地点 A の砂質片岩中では、東西走向で北に低角傾斜する軸面を持つ、波長数 10 cm 以下の D₂ 褶曲やそれに伴うクレニユレーション劈開の発達が顕著である一方、D₃ 褶曲は泥質片岩には発達するが砂質片岩中には殆ど発達していない。地点 A と比べると、地点 B の砂質片岩は泥質片岩とともに、東西走向で高角の軸面を持つ D₃ 褶曲により、波長数 10 cm 以下で著しく褶曲している。

四国中央部三波川変成岩の上昇・冷却の放射年代について

Table 1. Results of age calculations

Sample	N	ρ_s ($\times 10^6 \text{cm}^{-2}$)	N_s	ρ_i ($\times 10^6 \text{cm}^{-2}$)	N_i	ρ_d ($\times 10^6 \text{cm}^{-2}$)	N_d	$T \pm 1\sigma$ (Ma)	$P(\chi^2)$ (%)
Loc. A	13	9.97	936	4.06	381	0.2100	2324	92.6 \pm 6.2	30
Loc. B	7	9.34	406	7.45	324	0.2100	2324	47.2 \pm 3.8	63

N: Number of counted grains. ρ_s : Density of spontaneous tracks. N_s : Number of spontaneous tracks counted to determine ρ_s . ρ_i : Density of induced tracks in a single sample. N_i : Number of induced tracks counted by a muscovite external detector, to determine ρ_i . ρ_d : Density of induced tracks in NBS-SRM612 dosimeter glass. N_d : Number of induced tracks counted by a muscovite external detector, to determine ρ_d . T: FT age calculated from pooled N_s and N_i for all grains counted. $P(\chi^2)$: Probability of χ^2 for N degrees of freedom ($N=n-1$).

は、フェンジャイト K-Ar (Itaya and Takasugi, 1988), 角閃石およびフェンジャイト $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Takasu and Dallmeyer, 1990), およびジルコン FT 年代測定法 (Wallis et al., 2004) を用いて, 94–63 Ma の値が得られている (Fig. 1d).

FT 年代測定方法および結果

採集した試料から一般的な手順による鉱物分離によってジルコンを抽出した。得られたジルコンを PFA テフロンシートにそれぞれ 62 粒子 (地点A), 47 粒子 (地点B) 埋め込み, 荒削りして内部面 (4 π 面) を出しダイヤモンドペーストで研磨した後, KOH : NaOH = 1 : 1 (モル比) の共融液を 230°C に熱したものを etchant として (Gleadow et al., 1976), FT を光学顕微鏡下で観察可能になるまでそれぞれ 20 時間 (地点A), 30 時間 (地点B) エッチングした。その後外部ディテクターとしてウランを含まない白雲母を貼付け, 標準ガラス (NIST612) とともに京都大学原子炉実験所 KUR の TC-Pn 照射孔にて中性子照射を行った。国際勧告に従い (Hurford, 1990) ζ 校正により年代値を決定した (ζ 値: 358.9 \pm 7.0, 誤差は 1 σ , Hasebe et al., 1993)。その結果, 地点A の試料では 13 粒子, 地点B では 7 粒子の年代測定を行うことができた。 χ^2 検定に合格し, 何らかのイベントを反映する年代値 (それぞれ 92.6 \pm 6.2 Ma, 47.2 \pm 3.8 Ma, 誤差は 1 σ) が得られた (Table 1)。

考 察

1. 地点A 試料中のジルコン FT 年代の意味: 変成ピークの年代

地点A 試料中のジルコンの FT 年代 (92.6 \pm 6.2 Ma, Fig. 1d) は, その分布が 60 Ma から 145 Ma までばらついてはいるが, χ^2 検定に合格しており何らかのイベントによりアニーリングを受けた後の冷却年代と推察される。すなわち, 地点A 試料中のジルコンは原岩の堆積後, すべてのトラックが消失する温度 (以下, 完全アニーリング温度, $10^6 \sim 10^7$ 年の時間スケールにおいて約 350°C, Tagami et al., 1998) 以上の温度を経験したと推察される。この推定温度は, 地点A の緑泥石帯について推定されている変成温度条件と矛盾しない。また, ジルコンの FT 年代は, やはりピークの変成年代と解釈された Takasu and Dallmeyer (1990) による別子ユニット緑泥石帯の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代 (85–94 Ma) と誤差の範囲で一致する。したがって, 本 FT 年代は地点A のピークの変成年代をほぼ示すと推察するのが最も妥当である。

地点A の構造的低位には, 同様にパンベリー石-アクチノ

閃石相の条件で変成作用を被った大歩危ユニット (四万十層群, Hara et al., 1992; Aoki et al., 2007) が分布するが (Figs. 1b and c), 最近その年代論について進展があった。Aoki et al. (2007) は, Laser-ICP-MS 法を用いて大歩危ユニットから得られた碎屑性ジルコンの U-Pb 年代を測定し, 80–90 Ma が堆積年代の下限であると推定した。したがって, ジルコンの FT 年代および $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代から推定される地点A 付近の変成ピーク年代は, 大歩危ユニットの原岩堆積年代とほぼ同じであるかより古いことが明確になった。この事実は, 従来から言われていた別子ユニットと大歩危ユニットのユニット区分 (Takasu and Dallmeyer, 1990) が妥当であるほか, 地点A 付近の岩石が別子ユニットに属していることを示す。

2. 地点B 試料中のジルコン FT 年代の意味: D3 時相の年代

一方, 地点B 試料中のジルコン FT 年代 (47.2 \pm 3.8 Ma, Fig. 1d) も, 2 次加熱によるリセット年代である。しかし, 今回得られた地点B 試料中のジルコン FT 年代は, 地点A 試料中の変成ピーク年代と考えられるジルコン FT 年代よりも顕著に若いため, 変成ピーク直後の上昇・冷却年代を示すと考えるより, ピーク変成作用後に生じた熱イベント後の冷却年代を示すと考えるのが妥当である。

地点B 付近の緑泥石帯では, フェンジャイトの K-Ar 年代は 65–70 Ma と, 南側同層準の汗見川流域のそれに比べて約 10 Ma 若いことが報告されている (Fig. 1d, Itaya and Takasugi, 1988)。この事実は, 地点B 付近の緑泥石帯のフェンジャイト K-Ar 年代も, 新期の熱イベントにより若返ったことを示唆し, ジルコン FT 年代がピーク変成作用以後の熱イベント後の冷却年代を示すという推測と調和的である。

放射年代の若返りをもたらした 2 次加熱の原因は完全には特定出来ない。しかし, その候補として D2 あるいは D3 時相に生じた高温流体の活動が挙げられる。D2 正断層活動時には, 大量の石英脈がへい入しており, それらは石英の脆性-塑性転移点の条件 (約 300°C) で変形している (El-Fakharani and Takeshita, 2008)。同様に, D3 時相にも大量の石英脈がへい入しており, それらも軽微であるが同様な条件で塑性変形している (Takeshita and Hara, 1998)。また, D3 時相と D3 時相末期 (エシュロン石英脈形成時相, 竹下ほか, 1997) にへい入した石英脈中では, 流体包有物の充てん温度は約 150–350°C に及ぶ (Seki et al., 1993; 竹下ほか, 1997)。したがって, D2 および D3 時相の変形時の温度は, 局部的にジルコン FT の完全アニーリング温度 (約 350°C) を超えており, ジルコン FT 年代がリセットされた

ことは十分考えられる。

地点BではD3褶曲の発達程度が著しいこと、また、最近D2時相と対比されると考えられる三波川帯と領家帯の接合をもたらした中央構造線の市之川時階の活動年代が約60 Maであると推察されたこと (Kubota and Takeshita, 2008; Takagi et al., 2010) を考えると、地点Bの顕著に若いFT年代はD2ではなくD3時相の年代であると現段階では解釈される。したがって、上記のフェンジャイトのK-Ar年代もD3時相に若返ったと解釈される。ここで、フェンジャイトのK-Ar系の閉鎖温度は約 $400 \pm 25^\circ\text{C}$ と推定されているので (Dodson, 1973), フェンジャイトのK-Ar系はD3時相の温度条件では完全にリセットされず、その年代は部分的に若返ったことが推察される。

文 献

- Aoki, K., Iizuka, T., Hirata, T., Maruyama, S. and Terabayashi, M., 2007, Tectonic boundary between the Sanbagawa belt and the Shimanto belt in central Shikoku. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **113**, 171–183.
- Banno, S., 1998, Pumpellyite-actinolite facies of the Sanbagawa metamorphism. *Jour. Metamorphic Geol.*, **16**, 117–128.
- Banno, S., Higashino, T., Otsuki, M., Itaya, T. and Nakajima, T., 1978, Thermal structure of the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku. *Jour. Phys. Earth*, **26**, (suppl.), 345–356.
- Dodson, M. H., 1973, Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **40**, 259–274.
- El-Fakharani, A.-H. and Takeshita, T., 2008, Brittle normal faulting in the highest-grade Sambagawa metamorphic rocks of central Shikoku, southwest Japan: Indication of the exhumation into the upper crustal level. *Jour. Asian Earth Sci.*, **33**, 303–322.
- Enami, M., Wallis, S. R. and Banno, Y., 1994, Paragenesis of sodic pyroxene-bearing quartz schists: implications for P-T history of the Sanbagawa belt. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **116**, 182–198.
- Faure, M., 1983, Eastward ductile shear during the early tectonic phase in the Sanbagawa belt. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **89**, 319–329.
- Gleadow, A. J. W., Hurford, A. J. and Quaife, R. D., 1976, Fission track dating of zircon: improved etching techniques. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **33**, 273–276.
- Goto, A., Kunugiza, K. and Omori, S., 2007, Evolving fluid composition during prograde metamorphism in subduction zones: A new approach using carbonate-bearing assemblages in the pelitic system. *Gondwana Res.*, **11**, 166–179.
- 原 郁夫・秀 敬・武田賢治・佃 栄吉・徳田 満・塩田次男 (Hara, I., Hide, K., Takeda, K., Tsukuda, E., Tokuda, M. and Shiota, T.), 1977, 三波川帯の造構運動。秀 敬編「三波川帯」(*The Sambagawa Belt*)、広島大学出版研究会(*Hiroshima Univ. Press*), 309–390.
- Hara, I., Shoji, K., Sakurai, Y., Yokoyama, S. and Hide, K., 1980, Origin of the Median Tectonic Line and its initial shape. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **18**, 27–49.
- Hara, I., Shiota, T., Hide, K., Kanai, K., Goto, M., Seki, S., Kairiki, K., Takeda, K., Hayasaka, Y., Miyamoto, T., Sakurai, Y. and Ohtomo, Y., 1992, Tectonic evolution of the Sambagawa schists and its implications in convergent margin processes. *Jour. Sci. Hiroshima Univ., Ser. C.*, **9**, 495–595.
- Hasebe, N., Tagami, T. and Nishimura, S., 1993, Evolution of the Shimanto accretionary complex: A fission-track thermochronological study. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, **273**, 121–136.
- Higashino, T., 1990, The higher grade metamorphic zonation of the Sambagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. *Jour. Metamorphic Geol.*, **8**, 413–423.
- Hurford, A. J., 1990, Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I.U.G.S. Subcommittee on Geochronology: *Chem. Geol., Isotope Geoscience Section*, **80**, 171–178.
- Itaya, T. and Takasugi, H., 1988, Muscovite K-Ar ages of the Sanbagawa schists, Japan and argon depletion during cooling and deformation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **100**, 281–290.
- Kubota, Y. and Takeshita, T., 2008, Paleocene large-scale normal faulting along the Median Tectonic Line, western Shikoku, Japan. *Island Arc*, **17**, 129–151.
- Nakajima, T., 1982, Phase relations of pumpellyite-actinolite facies metabasites in the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. *Lithos*, **15**, 267–280.
- Nakajima, T., Banno, S. and Suzuki, T., 1977, Reactions leading to the disappearance of pumpellyite in low-grade metamorphic rocks of the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. *Jour. Petrol.*, **18**, 263–284.
- Osozawa, S. and Pavlis, T., 2007, The high P/T Sambagawa extrusional wedge, Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **29**, 1131–1147.
- Sakaguchi, M. and Ishizuka, H., 2008, Subdivision of the Sanbagawa pumpellyite-actinolite facies region in central Shikoku, southwest Japan. *Island Arc*, **17**, 305–321.
- Seki, S., Hara, I. and Shiota, T., 1993, Transition from flexural-flow folding to flexural-slip folding in the Sambagawa belt. *Jour. Sci. Hiroshima Univ., Ser. C.*, **9**, 685–696.
- Shinjoe, H. and Tagami, T., 1994, Cooling history of the Sanbagawa metamorphic belt inferred from fission track zircon ages. *Tectonophysics*, **239**, 73–79.
- Spear, F. S., 1993, *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineralogical Society of America, Washington, D. C., 799p.
- Tagami, T., Galbraith, R. F., Yamada, R. and Laslett, G. M., 1998, Revised annealing kinetics of fission tracks in zircon and geological implications. In Van Den Haute, P. and De Corte, F., eds., *Advances in Fission-track Geochronology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 99–112.
- Takagi, H., Shimada, K., Iwano, H. and Danhara, T., 2010, Oldest record of brittle deformation along the Median Tectonic Line: fission-track age for pseudotachylyte in the Taki area, Mie Prefecture. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **116**, 45–50.
- Takasu, A. and Dallmeyer, R. D., 1990, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral age constraints for the tectonothermal evolution of the Sambagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan: a Cretaceous accretionary prism. *Tectonophysics*, **185**, 111–139.
- Takeshita, T. and Hara, I., 1998, c-Axis fabrics and microstructures in a recrystallized quartz vein deformed under fluid-rich greenschist conditions. *Jour. Struct. Geol.*, **20**, 417–431.
- 竹下 徹・直本啓祐・八木公史 (Takeshita, T., Naomoto, K. and Yagi, K.), 1997, 広島大学理学部地球惑星システム学教室蔵変形岩試料の研究(3) エシュロン石英脈中の古応力場解析と形成温度。広島大学博物館研究報告(*Bull. Hiroshima Univ. Museum*), no.3, 41–49.
- Wallis, S. R., 1990, The timing of folding and stretching in the Sambagawa belt: the Asemigawa region, central Shikoku. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **96**, 345–352.
- Wallis, S. R., Moriyama, Y. and Tagami, T., 2004, Exhumation rates and ages of metamorphism in the Sanbagawa belt: new constraints from zircon fission track analysis. *Jour. Metamorphic Geol.*, **22**, 17–24.
- Watanabe, T. and Kobayashi, H., 1984, Occurrence of lawsonite in pelitic schists from the Sanbagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan. *Jour. Metamorphic Geol.*, **2**, 365–369.