



化石木の安定炭素同位体比変動と汎世界的気候変動との対比

小林由季^{1*}・保柳康一²

Correlative relationship between stable carbon isotope ratios of fossil wood and global climate change

Yuki Kobayashi^{1*} and Koichi Hoyanagi²

はじめに

第四紀更新世は、極域や大陸に氷床や氷河が発達した氷期と温暖な間氷期が繰り返し、数万年周期の気候変動が顕著になった時期である (Ruddiman, 2001)。このような変動は、海洋の有孔虫殻などの炭酸塩鉱物の酸素同位体比 (Lisiecki and Raymo, 2005) もしくは安定炭素同位体比 (Wang, et al., 2010) の変化として示されてきた。一方、有機物の安定炭素同位体比については、陸上高等植物の安定炭素同位体比 -27% 前後を示すのに対し、海洋の植物プランクトンがつくる有機物は -22% 前後の値を示す (Rau et al., 1982) という性質を利用して、泥岩などの細粒堆積物中の有機物の安定炭素同位体比から陸源有機物の寄与を求め、海進海退に対応させる研究がおこなわれてきた (Omura and Hoyanagi, 2004)。これに対し、本研究では陸上高等植物起源の安定炭素同位体変動を化石木から求めることで、安定炭素同位体変動を従来利用されてきたような海陸の地質学的イベントを対比するための指標としてではなく、気候変動の指標として利用することが可能かを検討した。

陸上高等植物は温暖期に繁茂し、軽い炭素 (^{12}C) を優先的に固定する選択的炭素固定を行う。この時、大気中の ^{13}C の割合が増加し、定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) は相対的に高い

値を取るようになる。一方、寒冷期には陸上高等植物の量が減少して軽い炭素が空気中に放出される。このことによって、大気の ^{12}C の割合が増加して安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) は、相対的に低い値を取るようになる。なお、海洋植物プランクトンも ^{12}C の選択的固定をおこなうが、海洋に多量に蓄えられている無機炭素を固定するため、大気中の無機炭素の同位体比に対する影響は間接的となり、海洋植物プランクトンの増減による ^{12}C 貯留効果は大気の炭素同位体比に直接的影響をもたないとされる (Ruddiman, 2001)。

さらに、陸上高等植物や海洋植物プランクトンの安定炭素同位体比は、大気の安定炭素同位体比より常にほぼ一定の値 (約 $18\sim 20\%$) だけ低いとされる (Ruddiman, 2001)。したがって、化石木の安定炭素同位体比変動は、大気中の安定炭素同位体比変動を反映する。

白亜紀・古第三紀境界などにおける大気中の二酸化炭素同位体比変化を陸上有機物の安定炭素同位体比分析によって知る試みは多くなされているが (Arens and Jahren, 2000; Mora et al., 1966; Gardner and Gilmour, 2002; Maruoka et al., 2007)、周期的な海水準変動と関連付けた研究は、Pearce et al. (2005) など数少ない。そこで本研究では、台湾桃園県大漢渓流域および中部日本の新潟県田川流域に分布している更新統より採取した陸上高等植物化石の安定炭素同位体比を測定し、火山灰層序、微化石層序によって求められた年代軸を利用して深海底堆積物中の底棲有孔虫の酸素同位体比曲線 (LR04 スタック; Lisiecki and Raymo, 2005) と対比させ、海水準変動との関係を考察した。

受付: 2014年2月6日 受理: 2014年6月3日

¹ 信州大学大学院理工学系研究科地球生物圏科学専攻
〒390-8621 長野県松本市旭 3-1-1

Graduate School of Science and Technology, Shinshu University, 3-1-1, Asahi, Matsumoto 390-8621, Japan

² 信州大学学術研究院理学系地質学領域

Department of Geology, Institute of Science, Shinshu University

* Corresponding author: kobayashi.y554@gmail.com

試料採取地点とその周辺の地質

1. 台湾, 大漢溪

台湾北西部は主に中新統から更新統の浅海成から陸成の堆積物で構成されており, 下位より桂竹林層 (Kueichulin Formation), 錦水頁岩 (Chinshui Shale), 卓蘭層 (Cholan Formation), 楊梅層 (Yangmei Formation) に区分されている (Fig. 1). Lin et al. (2011) は, 卓蘭層と錦水頁岩境界を石灰質ナンノ化石帯 NN17 の基底とし, 卓蘭層上部付近に NN18 と NN19 の境界があるとしている. これらの年代は, それぞれ 2.49 Ma と 1.93 Ma である (Anthonissen and Ogg, 2012). 試料は, 台湾北西部を流れる大漢溪 (Da-han River) に分布する卓蘭層 (Cholan Formation) から採取した (Fig. 2). 卓蘭層の主な岩相は, 泥岩層と細粒砂岩層である. 砂岩層には平行層理, 平板型斜交層理, タイダルバンドル (tidal bundles) が見られ, これは高エネルギー環境下の潮流の影響を表す (Lin et al., 2011). 激しく生物擾乱を受けた砂質シルト岩層や厚い泥岩層は, 堆積環境がラグーンなど低エネルギー環境になったことを示す (Lin et al., 2011).

2. 中部日本, 田川

中部日本の新潟県西南部に位置する魚沼丘陵周辺には, 日本の更新統を代表する魚沼層群が広く分布している (Figs. 1 and 3). 魚沼層群は, 火山灰鍵層によって最下部層・下部層・中部層・上部層に区分されている (魚沼丘陵団地研究グループ, 1983; 小林ほか, 1991, 1995). 一方, 柳沢ほか (1985) はこれらの地層を和南津層と魚沼層に区分している. この論文では, 保柳ほか (2000) で用いられている区分にしたがって, 魚沼層群のうち小林ほか (1991, 1995) の下部層および最下部層を下部魚沼層, 中部層を中部魚沼層, 上部層を上部魚沼層とする. 研究対象は下限を SK110 火山灰 (1.65 Ma), 上限を SK030 火山灰 (1.15 Ma) (新潟火山灰グループ, 1983) とする中部魚沼層の全層準で, 試料は十日町市の東部に位置する魚沼丘陵を流れる田川から採取した (Fig. 3). 中部魚沼層は層厚数 m~10 数 m の礫層と層厚 10~40 m の砂・シルト互層からなる河川成層で, 全層厚は約 200 m である. 田川流域を含む十日町地域では, 礫層と砂・シルト互層が交互に出現するが, 層厚数 m の礫層の発達する層準が, SK110 の直上, 魚野地川火山灰付近, SK050 付近, SK030 直下の 4 層準に見られる (風岡ほか, 1986).

研究手法

1. 試料について

卓蘭層 (台湾, 大漢溪): 台湾大漢溪の露頭から化石木を採取した. Fig. 4 の化石木は, 貝化石が多くみられる石灰質な岩相中に約 2~5 cm 前後の木片として存在していた. 一方, Fig. 5 の化石木は木の根が伸びていることから立木の化石であると考えられる. 比較的連続して試料を採取できた層準から 30 個の試料を選び, それらの安定炭素同位体比の測定を行った. 試料は層厚 0.5~20 m 間隔で採取した. 一部では同一層準で複数個の試料を採取した.

中部魚沼層 (中部日本, 田川): 中部日本新潟県田川の地層中から化石木を採取した. Fig. 6 は SK030 火山灰と下位の砂岩層に挟まれて産出した木片状の化石木, Fig. 7 は SK110 火山灰と上位の泥岩に挟まれた立木状の化石木である. 結果として, 地層中から合計 53 試料を採取し, 安定炭素同位体比の測定を行った. 試料の採取間隔は, 露頭の欠如や化石木が産出しない層準があることから様々であるが, 層厚 5~25 m である.

2. 試料の処理方法

化石木を純水で洗浄した後, 70°C 前後に保った乾燥機で乾燥させたものを, 乾燥後ハンマーで細かく砕き, ピンセットを使用してなるべく内部から新鮮なものを数 mg 採取した.

Age (Ma)	Period	Epoch	Taoyuan Northwest Taiwan (Lin et al., 2011)	Niigata Central Japan (Hoyanagi et al., 2000)
0.46	Quaternary	Pleistocene	Yangmei Formation	Upper Uonuma F.
1.93*				Cholan Formation
	2.49*	Neogene	Pliocene	
3.58	early			Chinshui Shale
		late	Kueichulin Formation	
	Miocene	late		Shiyya Formation
				Teradomari Formation

Fig. 1 Stratigraphy of the study areas. * after Lin et al. (2011), ** after Kurokawa (1999).

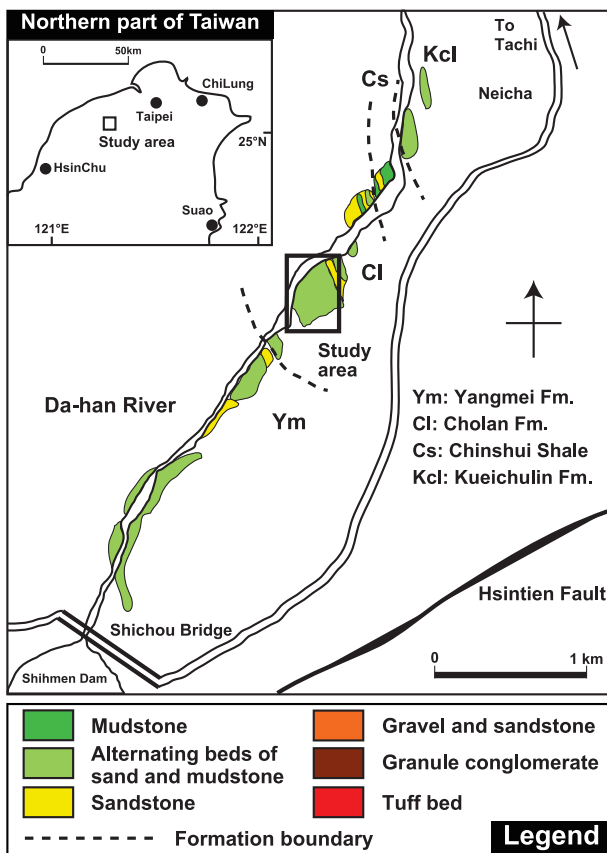


Fig. 2 Map showing lithology along the Da-han River, Taoyuan County, Taiwan. Simplified from Lin et al. (2011).

3. 安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$) 測定

安定炭素同位体比測定には元素分析装置（サーモフィッシャー社製 FlashEA1112 NC Analyzer）と安定同位体比質量分析計（サーモフィッシャー社製 Delta V Advantage）を使用した。1.5~2.0 mg に秤量した化石木をスズ箔に包んだ。これを完全に燃焼させ、発生した質量数 44 と 45 の二酸化炭素を、ヘリウムガスで質量分析計に送りそれぞれ測定し、試料中に含まれていた炭素の同位体比を測定した。安定炭素同位体比の測定値は、サウスカロライナ州 PeeDee 層から採取されたペレムナイト化石（PDB）の炭酸カルシウムを基準物質として算出される。標準試料として Atropine ($\delta^{13}\text{C} : -23.2\%$) を用い、8 試料ごとに測定した。標準試料の繰り返し分析に基づき算出した安定炭素同位体比の誤差は $\pm 0.03\%$ であった。

結 果

1. 卓蘭層の安定炭素同対比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$)

化石木の安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$) の多くが -27% 前後の値を取り、最も高い値は -24.49% 、最も低い値は -29.15% であり (Fig. 8 左側)。振幅が 2% 程度の短周期変動が見られる。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$ は、大局的には上位に向かって減少する傾向を示し、下部では $-28 \sim -24\%$ の間で変動するのに対し、上部では $-29 \sim -26\%$ の間で変動する。

2. 中部魚沼層の安定炭素同対比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$)

安定炭素同位体比は、試料の多くが -28% 前後の値をと

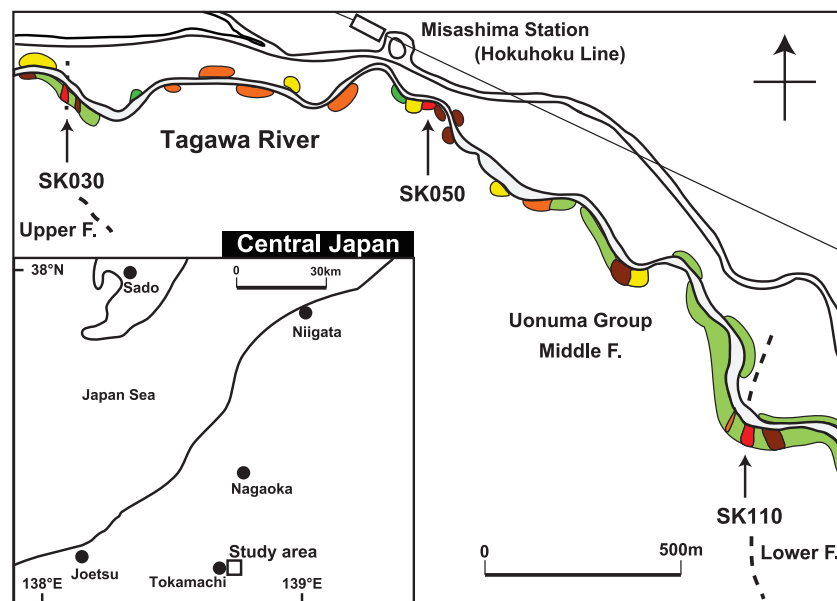


Fig. 3 Map showing lithology along the Tagawa River, Niigata Prefecture, Central Japan. Legend refer to Fig. 1.

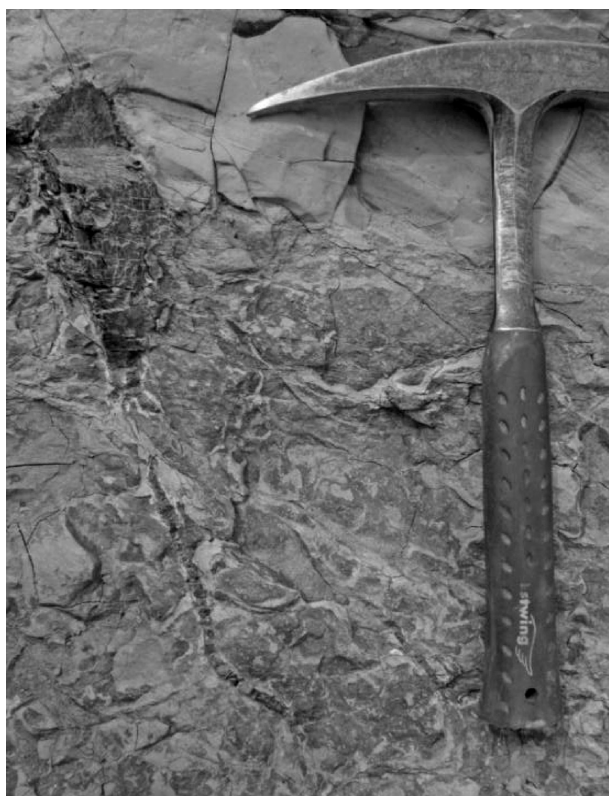


Fig. 4 Bay-head delta plain deposits with insitu tree trunk and rootlets. Stratigraphic position of the photo refers to Fig. 8.



Fig. 5 Flood-tidal delta deposits contain wood fragments in the Cholan Formation. Stratigraphic position of the photo refers to Fig. 8.



Fig. 6 Fluvial sediment in the Middle Uonuma Formation. Wood fragments exist between ash layer (SK030) and sandstones. Stratigraphic position of the photo refers to Fig. 8.



Fig. 7 Fluvial sediment in the Middle Uonuma Formation. Wood fragments exist between ash layer (SK110) and sandstones. Stratigraphic position of the photo refers to Fig. 8.

り、最も高い値は -25.42% 、最も低い値は -30.27% であった (Fig. 8 右側)。3%前後の比較的小さい幅での短周期変動がみられる。下部では振幅が2~4%であるのに対して、上部では振幅が3~5%になり、全体として振幅は上位に向かって拡大傾向にある。

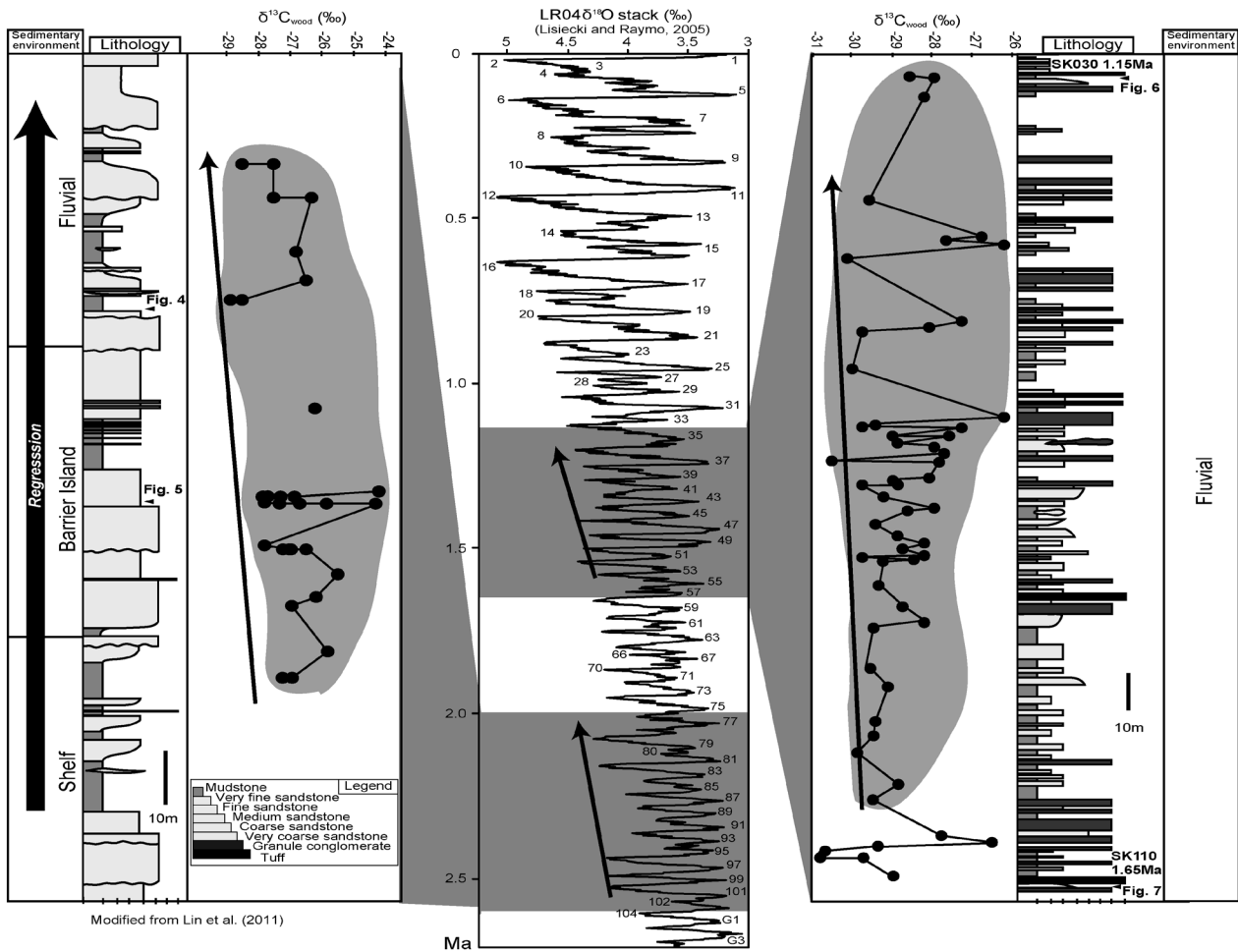


Fig. 8 Left: Stable carbon isotope ratios of fossil woods in the Cholan Formation, Taiwan. Middle: Oxygen isotope ratios (LR04 stack; Lisiecki and Raymo, 2005). Right: Stable carbon isotope ratios of fossil woods in the Middle Uonuma Formation, Central Japan.

Arrows indicate secular trend of stable carbon isotope fluctuations. Figs. 4 to 7 in the lithologic columns indicate the position of photos.

考 察

1. 卓蘭層の安定炭素同位体比変動と堆積環境の関連

本研究で測定した化石木の安定炭素同位体は、上位に向かって減少傾向を示す。よって、大気の安定炭素同位体比は減少傾向であったと考えられる。さらに、卓蘭層の試料について Lin et al. (2011) の岩相柱状図と対比させてみると、安定炭素同位体比を測定した地点の堆積相は陸棚から湾沿岸のバリアシステムを経て河川環境への海退を示している。また、卓蘭層は下限の堆積年代が錦水頁岩との境界で 2.53 Ma、上部の堆積年代は 1.93 Ma と与えられているので (Lin et al., 2011)、汎世界的海水準変動を示すとされる

LR04 スタック (Lisiecki and Raymo, 2005) と同区間で対比を行った。その結果、卓蘭層から求められた化石木の安定炭素同位体比は LR04 スタックと同様、数万年周期の変動を示し、さらにこの区間における減少傾向は、LR04 スタックで認められる 2.5~1.9 Ma における酸素同位体比の増加傾向と対応づけられる。すなわち、堆積相が示す海退はこの寒冷化に対応したものであると考えられ、寒冷に伴って大気の安定炭素同位体比は低くなっていったと思われる (Fig. 8)。

2. 中部魚沼層の安定炭素同位体比変動と堆積環境の関連

Kurokawa (1999) によって求められた火山灰の年代を用いて、安定炭素同位体比変動を LR04 スタックと対比した

(Fig. 8). 化石木の安定炭素同位体比は、数万年周期の規則的な変動を示し、その振幅は上位へ向かって増大傾向を示す。振幅の小さい部分では氾濫源環境を示すと考えられる泥質堆積物が卓越し、振幅が大きい部分では河川チャネルを示す礫質堆積物が卓越している。また、この振幅の増大は1.7~1.2MaにおけるLR04スタックの振幅の増大と対応づけられる。LR04スタックは氷床量すなわち海水準と同調しているとみなすことができるので、この振幅の増大は海水準変動の振幅の増大を示唆する。したがって、海水準変動量の増大が後背地における粗粒碎屑物生産を増加させたのかもしれない。

結 論

台湾北西部の桃園県大漢溪の更新統卓蘭層と中部日本新潟県魚沼丘陵の更新統中部魚沼層から化石木を採取し、その有機炭素の安定同位体比を測定した。卓蘭層(2.5~1.9Ma)の堆積相が示す海退現象は、化石木の安定炭素同位体比の減少傾向が示す寒冷化傾向と調和的である。また、それらは、LR04スタックが示す寒冷化傾向とも矛盾しない。さらに、化石木の安定炭素同位体比変動には短周期の変動が見出だされ、これは底生有孔虫の酸素同位体比変動曲線の短周期変動と対応づけられる可能性がある。また、中部魚沼層(1.65~1.15Ma)でも、化石木の安定炭素同位体比は数万年周期の変動を示し、その振幅が上位に向かって増大する傾向を示し、LR04スタックと調和している。また、振幅の増大する上部では粗粒な岩相が卓越する傾向にある。このように化石木の安定炭素同位体比変動は、堆積相変化が示す堆積環境変遷と調和的で、かつ酸素同位体比変動曲線(LR04スタック; Lisiecki and Raymo, 2005)と同様の数万年の周期変動を示していることが示された。したがって、化石木の安定炭素同位体比は気候変動を反映している可能性があると考えられる。

謝辞: 国立中央大学(台湾桃園県中壢市)の林 殿順博士には、台湾の地層について様々なご教授を頂くとともに、試料採取に際してご便宜頂いた。また、同大学の藩 遵友氏はじめ学生・院生の方々には、試料の採取をお手伝い頂き、現地では堆積相の解釈など御議論を頂いた。査読をして頂いた井龍康文教授からは様々なご指摘を頂き、それによって原稿が改善された。以上の方々に感謝いたします。

文 献

Anthonissen, D.E. and Ogg, J.G., 2012, Cenozoic and Cretaceous bio-chronology of planktonic foraminifera and calcareous nanno-

fossils. In Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D. and Ogg, G.M., eds., *The geological time scale 2012*, 2, 1083-1127, Elsevier BV.

Arens, N.C. and Jahren, A.H., 2000, Carbon isotope excursion in atmospheric CO₂ at the Cretaceous-Tertiary boundary: evidence from terrestrial sediments, *Palaios*, **15**, 314-322.

Gardner, A.F. and Gilmour, I., 2002, Organic geochemical investigation of terrestrial Cretaceous-Tertiary boundary successions from Brownie Butte, Montana, and the Raton Basin, New Mexico, in: C. Koeberl, K.G. MacLeod (Eds.), *Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond*, Geol. Soc. Am., Spec. Pap., vol. 356, 351-362.

保柳康一, 池津大輔, 清水由花, 大村亜希子, 2000, 新潟県東頸城丘陵北東部に分布する鮮新-更新統におけるデルタ・エスチュアリーシステムの復元とシーケンス層序, *地球科学*, **54**, 393-404.

風岡 修, 立石雅昭, 小林巖雄, 1986, 新潟県魚沼地域の魚沼層群の層序と層相, *地質学雑誌*, **92**, 829-853.

Kurokawa, K., 1999, Tephrostratigraphy of the Nanatani to Uonuma Formations of 13 Ma to 1 Ma in the Niigata region, central Japan, *Journal of the Japanese association for petroleum technology*, **64**, 80-93.

小林巖雄, 立石雅昭, 吉岡敏和, 島津光夫, 1991, 長岡地域の地質, *地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅*, 地質調査所, 132 p.

小林巖雄, 立石雅昭, 吉村尚久, 上田哲郎, 加藤碩一, 1995, 柏崎地域の地質, *地域地質研究報告 5 万分の 1 図幅*, 地質調査所, 101 p.

Lin, A.T., Pan, T. and Chi, W., 2011, Field guide note: Stratigraphy and sedimentology of the Taiwan Foreland Sequence exposed along the Tahan River, NW Taiwan and an introduction for Field stops, *National Central Univ.*, 41 p.

Lisiecki, L.E. and Raymo, M.E., 2005, A Pliocene - Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, **20**.

Maruoka, T., Koeberl, C. and Bohol, F.B., 2007, Carbon isotopic compositions of organic matter across continental Cretaceous - Tertiary (K-T) boundary sections: Implications for paleoenvironment after the K-T impact event, *Earth and Planetary Science Letters*, **253**, 226-238.

Mora, C.I., Driese, S.G. and Colarusso, L.A., 1996, Middle to late Paleozoic atmospheric CO₂ levels from soil carbonate and organic matter, *Science*, **271**, 1105-1107.

新潟火山灰グループ, 1983, 魚沼層群中の火山性堆積物, *地研専報*, **26**, 23-31.

Omura, A. and Hoyanagi, K., 2004, Relationships between organic matter composition, depositional environments and sea-level changes in backarc basins, central Japan, *Jour. Sedimentary Research*, **74**, 620-630.

Pearce, C.R., Hesselbo, S.P. and Coe, A.L., 2005, The mid-Oxfordian (Late Jurassic) positive carbon-isotope excursion recognized from

- fossil wood in the British Isles. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **221**, 343-357.
- Rau G.H., Sweeney, R.E. and Kaplan I.R., 1982, Plankton ^{13}C : ^{12}C ratio changes with latitude: differences between northern and southern oceans, *Deep-Sea Research*, **29**, 1035-1039.
- Ruddiman W.F., 2001, *Earth's climate past and future*, W.H. Freeman and Company, 465 p.
- 魚沼丘陵団体研究グループ, 1983, 魚沼層群の層序, 地団研専報, **26**, 5-21.
- Wang, P., Tian J. and Lourens, L.J., 2010, Obscuring of long eccentricity cyclicity in Pleistocene oceanic carbon isotope records, *Earth and Planetary Science Letters*, **290**, 319-330.
- 柳沢幸夫, 茅原一也, 鈴木尉元, 植村 武, 小玉喜三郎, 加藤禎一, 1985, 地域地質研究報告 5万分の1図幅 十日町地域の地質, 地質調査所, 104 p.