

# 南中国雲南省小濫田セクションの 浅海相最下部カンブリア系の詳細層序

—岩相・鍵層と地域・広域対比—

河野 聖那\* 磯崎 行雄\* 佐藤 友彦\*\*  
張 興亮\*\*\* 劉 偉\*\*\*

## High-resolution Stratigraphy of the Lowermost Cambrian Sequence at the Xiaolantian Section, Yunnan, South China: Lithofacies, Key Bed, and Local/Regional Correlation

Sena KONO\*, Yukio ISOZAKI\*, Tomohiko SATO\*\*,  
Xingliang ZHANG\*\*\* and Wei LIU\*\*\*

[Received 20 April, 2020; Accepted 24 August, 2020]

### Abstract

Detailed lithostratigraphy of the Lower Cambrian in South China, composed mostly of phosphorite and carbonate, is analyzed at the Xiaolantian section in the Chengjiang area, Yunnan. Six distinct lithostratigraphic units (Units 1 to 6 in ascending order) are recognized in the small shelly fossil (SSF)-bearing Zhongyicun Member, together with one particular terrigenous clastic unit (Unit 3) in the middle. Sedimentary features of these beds indicate that they were deposited in shallow marine settings in off-shore to upper slope of the Kangdian rift-related basin in western South China. The lithostratigraphy of the Xiaolantian section correlates not only with those of the neighboring sections at Hongjiachong and Maotianshan in Chengjiang, but also with those of five other sections (Meishucun, Wangjiawan, Xiaohuangcaoling, Zhujiaping, and Laolin) in Yunnan. This regional correlation highlights a particular unit composed of terrigenous clastics solely in the middle of the Zhongyicun Member, e.g., Unit 3 of the Xiaolantian section. This unit serves as a useful key bed for a lithostratigraphical correlation within the basin because a similar unit (interval) was recognized at the same horizon in seven other sections in Yunnan. This key bed and its stratigraphic horizon are noteworthy, as this marks a significant horizon of SSF zone boundary; i.e., between the *Anabarites trisulcatus*-*Protohertzina anabarica* Zone and the *Paragloborilus subglobosus*-*Purella squamulosa* Zone of the Terreneuvian, Lower Cambrian.

**Key words** : Cambrian, small shelly fossils, diversification, phosphorite, key bed, South China

キーワード : カンブリア紀, 小型有殻化石, 多様化, リン酸塩岩, 鍵層, 南中国

\* 東京大学大学院総合文化研究科学宇宙地球科学教室

\*\* 東京工業大学理学院地球惑星科学系

\*\*\* 西北大学地質学教室初期生命・環境陝西研究拠点

\* Department of Earth Science and Astronomy, The University of Tokyo, Tokyo, 153-8902, Japan

\*\* Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 152-8550, Japan

\*\*\* Shaanxi Key Laboratory of Earth Life and Environment, Department of Geology, Northwest University, Xian, 710069, PR China

## I. はじめに

先カンブリア時代エディアカラ紀末から古生代最初期のカンブリア紀初頭に急速に起きた動物の多様化は、しばしばカンブリア紀の爆発的進化と呼ばれている (Brasier, 1979; Gould, 1989; Marshall, 2006; Erwin and Valentine, 2013; Shu *et al.*, 2014; Landing and Kouchinsky, 2016; Zhu and Li, 2017; Zhuravlev and Wood, 2018 など)。希少な Lagerstätten から産する軟体部組織を保存した化石記録として、中国雲南省の澄江 (Chengjiang) 群集 (Zhang and Hou, 1985; Hou *et al.*, 1995; Shu *et al.*, 1999; Hu, 2005 など)、清江 (Qingjiang) 群集 (Fu *et al.*, 2019)、そしてカナダのバージェス頁岩 (Burgess Shale) 群集 (Walcott, 1911; Conway Morris *et al.*, 1987; Caron *et al.*, 2013 など) が知られている。ただし、それらはあくまでカンブリア紀前期の後半以降 (清江群集: 約 518 Ma, 澄江群集: 約 520 Ma, バージェス頁岩群集: 約 505 Ma) の化石群集であり (図 1), カンブリア紀最初期の軟体部化石の産出はきわめて少なく、生痕化石を除けば、これまでに雲南省産の最大体長 30 cm に及ぶミミズ型の *Vittatusivermis annularius* (図 1 中央の写真; Zhang *et al.*, 2017; 詳細な帰属不明) が報告されたのみである。現生動物の遺伝子系統の解析からは、遺伝子レベルでの動物多様化はすでに原生累代末のエディアカラ紀にはじまったとされる (Peterson *et al.*, 2008; Erwin, 2009) が、新規形態の発現を示す具体的な化石記録は、ほとんどカンブリア紀の小型有殻化石 (small shelly fossils; SSF) に限られる。

SSF はカンブリア系最下部から多産し (Matthews and Missarzhevsky, 1975; Yang *et al.*, 2016 など), そのなかには少なくとも海綿動物, 刺胞動物, 軟体動物, 腕足動物, 毛顎動物などの多様な分類群の遺骸が含まれる。この時期の急速な SSF 多様化の原因として複数の解釈, 例えば, 大気酸素の増加 (Canfield *et al.*, 2007; Campbell and Squire, 2010; Chen *et al.*, 2015; Dong *et al.*, 2019; He *et al.*, 2019; Wei *et al.*, 2020

など), 海水化学組成の変化では塩濃度の低下 (Knauth, 2005) やカルシウムの増加 (Brennan *et al.*, 2004), 地殻のリフト化でできた地溝帯内の盆地でのリン酸の局地濃集 (Sato *et al.*, 2014) などが提案されたが, いまだに研究者間で合意は得られていない。その解明には最初期の SSF 多様化を記録する最下部カンブリア系の詳細な層序の検討が不可欠である。

これまでエディアカラ系最上部からカンブリア系最下部に関する詳しい層序学・年代学的研究は, おもにカナダ東岸ニューファンドランド島や, アフリカのモロッコ, ナミビアなどで進められてきた (Misra, 1969; Brasier *et al.*, 1994; Landing, 1994; Grotzinger *et al.*, 1995; Gehling *et al.*, 2001)。ただし, これらの碎屑岩相の地層からは SSF 産出が稀で, SSF 多様化の詳細な記録は得られていない。これに対して, SSF を多産する炭酸塩岩やリン酸塩岩が分布するシベリアと南中国においてカンブリア系最下部の生層序がたてられてきた (Roazanov *et al.*, 1969; Luo *et al.*, 1982, 1984; Khomentovsky, 1986; Qian and Bengtson, 1989; Missarzhevsky, 1989; Roazanov and Zhuravlev, 1992; Khomentovsky and Karl-ove, 1992, 1993; Steiner *et al.*, 2007 など)。なかでも, 南中国南西部, 雲南省東部の最下部カンブリア系からは保存良好な SSF が多産し (Luo *et al.*, 1982, 1984; Qian and Bengtson, 1989 など), とくに晋寧 (Jinning) 地域の梅樹村 (Meishucun) セクションでは, 詳細な SSF 層序 (図 1; Qian and Bengtson, 1989; Brasier *et al.*, 1990; Parkhaev and Demidenko, 2010; Yang *et al.*, 2014) に加えて, 炭素同位体層序 (Brasier *et al.*, 1990), 海水化学組成の変化 (Xing *et al.*, 2015; Liu and Zhou, 2017), 凝灰岩層の放射性年代 (Sawaki *et al.*, 2008; Compton *et al.*, 2008), 堆積環境の推定 (Sun *et al.*, 2020) などの多彩な研究がなされた。また同省北部にある曲靖 (Qujing) 地域の朱家青 (Zhujiqing) セクションや昭通 (Zhaotong) 地域の肖灘 (Xiaotan) セクションに露出する深い堆積相のカンブリア系最下部についても同様の解析がなさ

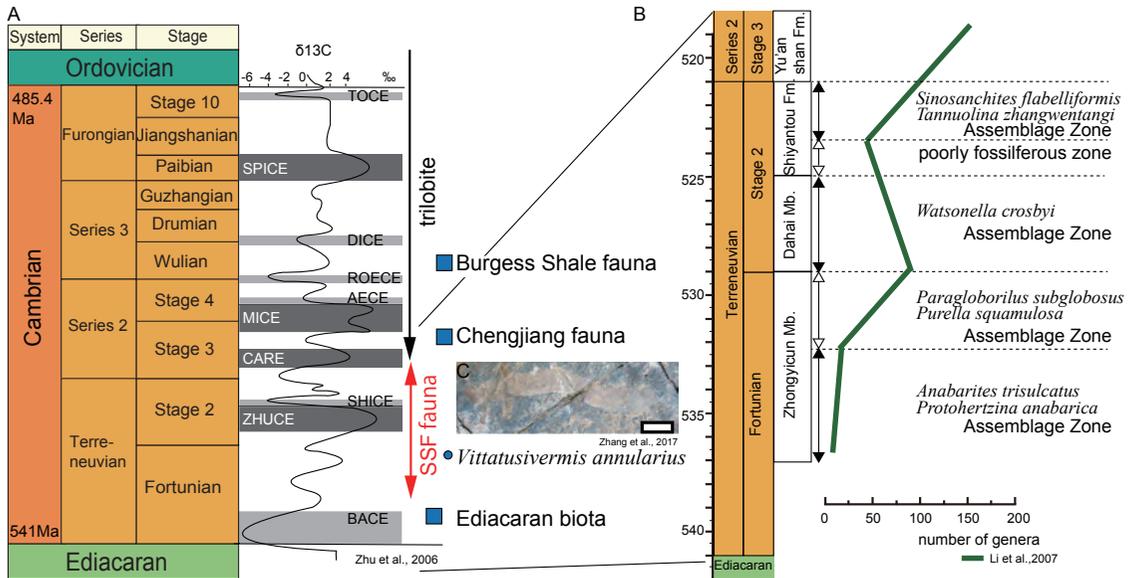


図 1 カンブリア系の標準層序区分とカンブリア系テルヌーブ統のSSF群集帯区分. A: カンブリア系の標準層序区分 (Cohen *et al.*, 2013), 炭酸塩の炭素同位体比の経年変化 (Zhu *et al.*, 2006 を改変), および主要な化石群集層準. カンブリア紀初期の化石記録は, 最古の軟体部を保存したミミズ状の化石 *Vittatusivermis annularius* (Zhang *et al.*, 2017; スケールバー: 10 mm) を除くと, SSFのみであることに注目. B: 南中国の下部カンブリア系テルヌーブ統のSSF層序 (Steiner *et al.*, 2007) と多様性 (属数) の増加 (Li *et al.*, 2007). SSFの最初の多様化は, 最前期フォーチュン期の *Anabarites trisulcatus*-*Protohertzina anabarica* 群集帯/*Paragloborilus subglobosus*-*Purella squamulosa* 群集帯境界頃に起きた.

Fig. 1 General stratigraphic subdivision of the Cambrian and SSF Assemblage Zone(s) of the Terreneuvian. A: Framework of Cambrian stratigraphic subdivision (Cohen *et al.*, 2013) with carbon isotope curve of carbonates (modified from Zhu *et al.*, 2006) and horizons of representative fossil fauna-biota. Note that the lowermost Cambrian yields only SSFs, except for deworm-like *Vittatusivermis annularius*, which is the oldest Cambrian soft-bodied animal fossil ever reported (Zhang *et al.*, 2017; scale bar: 10 mm). B: SSF zonation of the Terreneuvian (lowermost Cambrian) established in South China (Steiner *et al.*, 2007) and SSF diversity change (number of genera; Li *et al.*, 2007). The first major diversification of SSF occurred during the Fortunian around the boundary between *Anabarites trisulcatus*-*Protohertzina anabarica*/*Paragloborilus subglobosus*-*Purella squamulosa* assemblage zones.

れてきた (Luo *et al.*, 1982, 1991; Li and Xiao, 2004; Li *et al.*, 2009, 2013; Cremonese *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2020; Wei *et al.*, 2020)。

ただし梅樹村セクションのようなきわめて浅い堆積相の地層からはSSFが多産するものの, 複数の堆積間隙を内在するため, 不完全なSSF層序しか得られない。一方で, 深い堆積相のセクションには層序学的欠損は少ないが, SSFの産出はきわめて稀である。このような二律背反のため, これまで連続性の高いセクションでの高分解能SSF層序の確立が困難であった。そこで, 本研究では層序的連続性が高くかつSSFを比較

的多く産する, 中間的深度で堆積したカンブリア系下部に注目し, 雲南省澄江地域の小濫田 (Xiaolantian) セクション (図 2, 3) においてカンブリア紀初期のSSF多様化の背景で起きた環境変化の解析を試みた。小濫田セクションは, その上部から保存良好な澄江生物群化石が産することで知られていた (Hou *et al.*, 1995, 2004; Hou and Bergström, 1997; Hu, 2005) が, 最下部カンブリア系層序の詳細は不明であった。本稿では, 小濫田セクションの岩相層序を詳細に記載し, 南中国西部の他セクションとの対比に有効な鍵層の意義について議論する。SSF層序自体の

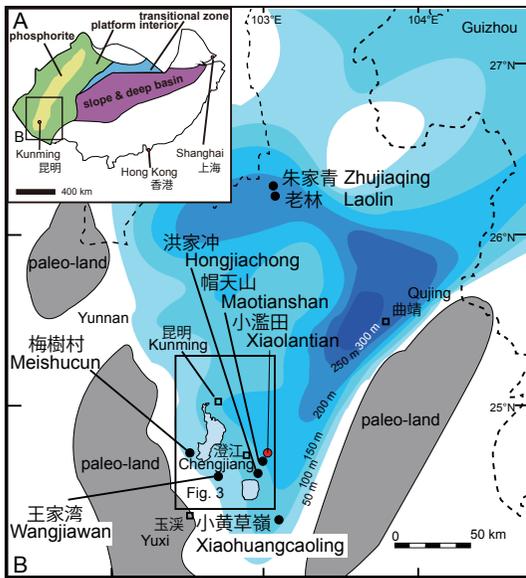


図 2 南中国全体と雲南省東部のカンブリア紀初期の古地理図 (Wu and Li, 2002; Zhu *et al.*, 2003 を簡略化) および代表的セクションの位置。A: 南中国地塊西部では、原生累代末にリフト化が起きて、雲南省東部から四川省南部にかけて南北方向の康滇盆地が形成された。エディアカラ紀からカンブリア紀前半にこの内湾浅海に厚い地層が堆積し、とくにリン酸塩岩層 (黄色) が集中的に堆積した。B: その盆地の南端にあたる雲南省東部では、浅海に多様な堆積場が存在した。堆積場の深さを 50 m ごとの等層厚線で区切った青色系の濃淡で示す。とくに浅い堆積場には SSF を多産する最下部カンブリア系が連続的に堆積した。多数のセクションのなかで梅樹村セクションが中国のエディアカラ系/カンブリア系境界の模式セクションとされてきた。

Fig. 2 Cambrian paleogeographic map of eastern Yunnan, South China (simplified from Wu and Li, 2002; Zhu *et al.*, 2003). A: In western South China, continental rifting occurred in the late Proterozoic, forming the N-S-trending Kangdian basin in eastern Yunnan and southern Sichuan (yellow area), where thick phosphorite-bearing strata were deposited during the Ediacaran and early Cambrian. Phosphorite deposited intensively in embayments of the basin. B: Eastern Yunnan was located at the south margin of the basin with various depositional settings within shallow marine environments. The depths of the depositional settings are indicated in shades of blue with isopach intervals of 50 m. Especially in the shallow settings, where SSF-bearing the lowermost Cambrian were deposited continuously, detailed lithostratigraphic research was conducted in many sections. Meishucun section was known as the stratotype section of Ediacaran-Cambrian boundary in China.

詳細は、別途報告する。

## II. 地質概説

南中国 (Yangtze) 地塊は超大陸ロディニアから約 7 億年前頃に分裂した後、エディアカラ紀後期からカンブリア紀初期には低緯度海洋域中の孤立した島大陸として存在していたとされる (Li *et al.*, 2008; Torsvik and Cocks, 2017; 図 2A)。当時の同地塊の西北側には陸域が、またその東南側には陸棚、大陸斜面および深海盆が発達した (Zhu *et al.*, 2003; Steiner *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2015; 図 2B)。同地塊の基盤岩である中・後期原生累代の花崗岩類や変成岩類を不整合に覆って、原生累代末から古生代前期の厚い浅海相の地層が堆積した (Fan and Zhang, 1994; Zheng and Zhang, 2007)。とくに同地塊西部にあたる雲南省や四川省には、原生累代後期に康滇 (Kangdian) リフト帯が形成され、それに伴って出現した南北約 300 km、東西幅約 80 km の南北方向に延びた康滇盆地に、浅海相の厚い上部原生累界および下部古生界が堆積した (Fan, 1978)。

雲南省東部に広く産する下部カンブリア系は、上部エディアカラ系灯影 (Dengying) 層を整合

に覆って厚く堆積した。下部カンブリア系は下位から順に、<sup>ジュージュアチン</sup>朱家青 (Zhujiaying) 層、<sup>シエントウ</sup>石岩頭 (Shiyantou) 層、そして<sup>ユアンジャン</sup>玉案山 (Yu'anshan) 層から構成される (Hou *et al.*, 1995, 2002; Hou and Bergström, 1997; Hu, 2005; Zhu *et al.*, 2001)。朱家青層は、下位から順に<sup>ダイブ</sup>待補 (Daibu) 部層、<sup>ソンイーツン</sup>中誼村 (Zhongyicun) 部層、および<sup>ダーハイ</sup>大海 (Dahai) 部層に区分される (Zhu *et al.*, 2001; 図 3)。特徴的な厚いリン酸塩岩からなる中誼村部層は SSF を多産する (Qian *et al.*, 2001; Steiner *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2014)。このリン酸塩岩は農業肥料の原料として多数の地点で採掘された

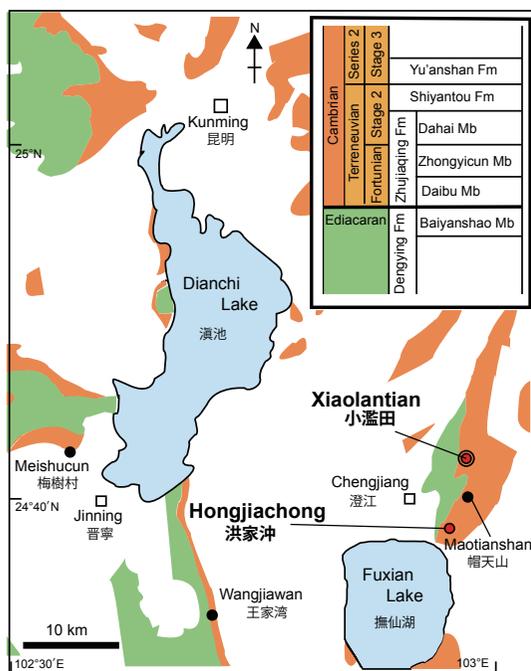


図3 雲南省東部のエディアカラ系・カンブリア系の分布および雲南省のカンブリア系標準層序区分 (Luo *et al.*, 1984). 下部カンブリア系朱家青層の中位を占める中誼村部層は、おもにリン酸塩岩層と炭酸塩岩層からなり、SSFを多産する。

Fig. 3 Distribution of Ediacaran and Cambrian strata in eastern Yunnan, with standard stratigraphic subdivision of the Lower Cambrian in Yunnan (Luo *et al.*, 1984). The Zhongyicun Member, in the middle of the Zhujiqing Formation, is composed of bedded phosphorite and carbonate, with many SSF.

ため、しばしばそれらの採掘跡露頭において同層の詳しい層序が解析されてきた。同省中央部の滇池 (Dianchi) 南西に位置する梅樹村セクションや同省北部の老林 (Laolin) や朱家青 (Zhujiqing) セクションなどがその好例である (Luo *et al.*, 1982, 1984; Zhu *et al.*, 2001; Jiang and Chen, 2008; 図2, 4)。

本研究の対象とした小濫田セクション (北緯24度40分49秒, 東経102度58分45秒) は、撫仙 (Fuxian) 湖北岸に位置する澄江地域、小濫田村南方の小さな谷間に露出する (図2, 3, 5)。澄江生物群の発見地として著名な帽天山

(Maotianshan) セクション (Hou and Bergström, 1997; Jiang and Chen, 2008 など) の約3 km 北方に、またリン酸塩岩層の詳細層序が記載された洪家冲 (Hongjiachong) セクション (Sato *et al.*, 2014) の北方約7 km に位置する。本セクションには、全層厚が約100 m におよぶ最上部エディアカラ系から下部カンブリア系が露出する (図5: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2011)。他セクションの下部カンブリア系と同様に、待補部層, 中誼村部層, 大海部層, 石山頭層, および玉案山層が順次累重する。玉案山層からは、*Anomalocaris* を含む保存良好な澄江群集が産出する (Hou *et al.*, 1995, 2004)。

### III. 研究方法

小濫田セクションにおいて、おもにSSFを多産する中誼村部層および大海部層を中心に野外調査と試料採取を行った。中誼村部層および大海部層はおもに谷の西側に連続的に露出し (図5)、また東側の採石場跡にも中誼村部層下部が良好に露出する。露頭から83試料を採取した。また比較のため、Sato *et al.* (2014) が報告した洪家冲セクションの中誼村部層最下部からも27層準について追加試料を採取した。さらに、谷の約10 m 西側の尾根 (北緯24度40分52秒, 東経102度58分45秒, 標高1977 m) から掘削されたボーリング・コア (ZK2A) 試料をあわせて検討した。このボーリング・コアは2010年に東京大学と中国の西北大学の共同研究により掘削されたもので、その詳細は別途報告の予定である。コア径は75 mm, また全長約87 mの連続試料で、上部エディアカラ系の白岩峭 (Baiyanshao) 部層から下部カンブリア系の石岩頭層 (図3) を貫く。露頭試料25層準およびボーリング・コア試料の18層準の試料について合計43枚の岩石薄片を作成し、偏光顕微鏡による観察・記載を行った。

### IV. 小濫田セクションの岩相層序

本章では、露頭およびボーリング・コアから採

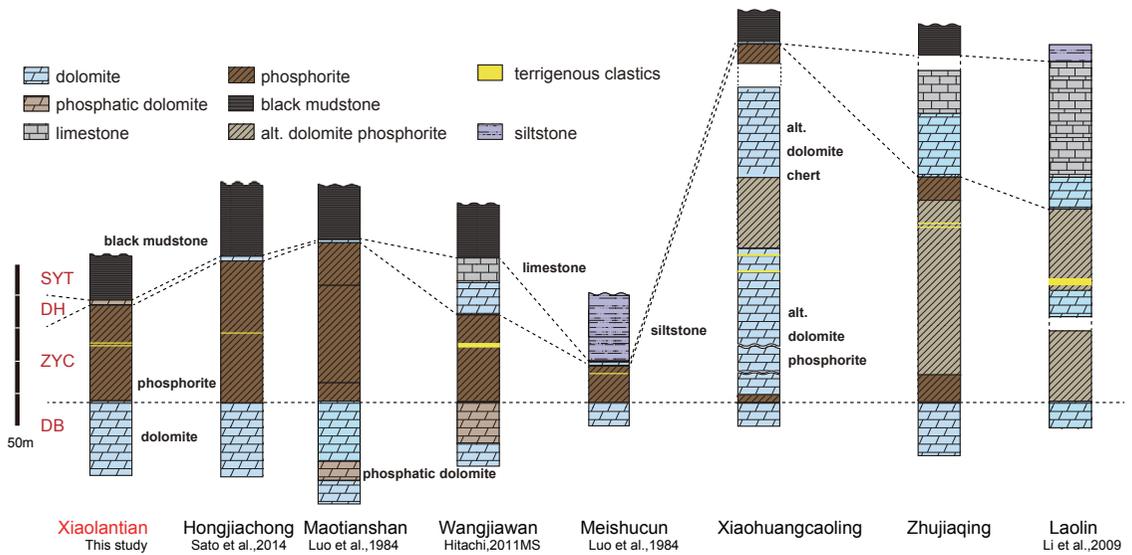


図 4 雲南省東部の代表的な 8 セクションにおける最下部カンブリア系の柱状図と層序対比。DB: 待補部層, ZYC: 中誼村部層, DH: 大海部層, SYT: 石岩頭層。SSF を産する中誼村部層のリン酸塩岩層 (濃褐色) の層厚がセクションごとに大きく変化することに注意。

Fig. 4 Stratigraphic columns of the Lowermost Cambrian at eight representative sections in eastern Yunnan. DB: Daibu Member, ZYC: Zhongyicun Member, DH: Dahai Member, SYT: Shiyantou Formation. Note that the thickness of SSF-bearing phosphorite (dark brown) of the Zhongyicun Member changes laterally among these sections.

取した試料の観察に基づいた待補部層の上部, 中誼村部層, および大海部層の岩相層序を記述する。本セクションの待補部層最上部, 中誼村部層, および大海部層の柱状図を図 6 に示す。

待補部層の上部は主として成層した灰色または褐色の苦灰岩およびリン酸塩質苦灰岩からなり, 数 cm 厚のチャート薄層 (しばしばレンズ状) を挟在する。細粒の苦灰石や 0.1-0.5 mm 程度のリン酸塩粒子を含む。陸源粗粒碎屑物粒子はきわめて少ないが, 稀に 0.1 mm 以下の石英および少量の白雲母を含む。

中誼村部層は, 露頭では約 30 m, またコア試料では約 35 m の層厚をもつ。本部層はおもに層状リン酸塩岩からなり, 層状苦灰岩を伴う。SSF はとくに上部から多産する。本部層は岩相の異なる 6 つのユニット, すなわち下位より順にユニット 1 から 6 へ区分される (図 6)。各ユニットの詳細は後述する。

大海部層は約 1.5 m の層厚をもち, 緑色を帯

びた淡褐色のリン酸塩岩質/苦灰岩質泥岩からなる。径 0.2-0.5 mm 程度の海緑石粒を多く含む特徴的な層をなす。大海部層と石岩頭層との境界には約 15 cm の凝灰岩層が挟まれる。

以下にリン酸塩岩を主体とする中誼村部層の 6 つのユニットについて詳述する。

ユニット 1 (層厚: 露頭で 4.5 m, コア試料で 5.9 m): 単層厚が約 30 cm におよぶ厚層の明灰色リン酸塩岩質苦灰岩と 2-3 cm 厚の葉理の発達した脆いリン酸塩岩またはチャートが互層する。薄片観察から, 基質は苦灰石およびリン酸塩からなり, 100 μm 以下のリン酸塩粒子と黒色有機物, および少量の白雲母を含むこと, また 100 μm 程度の苦灰石や 100 μm 以下の碎屑性石英が卓越することが確認された。

ユニット 2 (層厚: 露頭で 7 m, コア試料で 6.5 m): 20-30 cm の厚く成層するリン酸塩岩を主とし, 層厚 10-30 cm の風化した苦灰岩を挟在する。薄片では, 円磨されたリン酸塩粒子や生砕

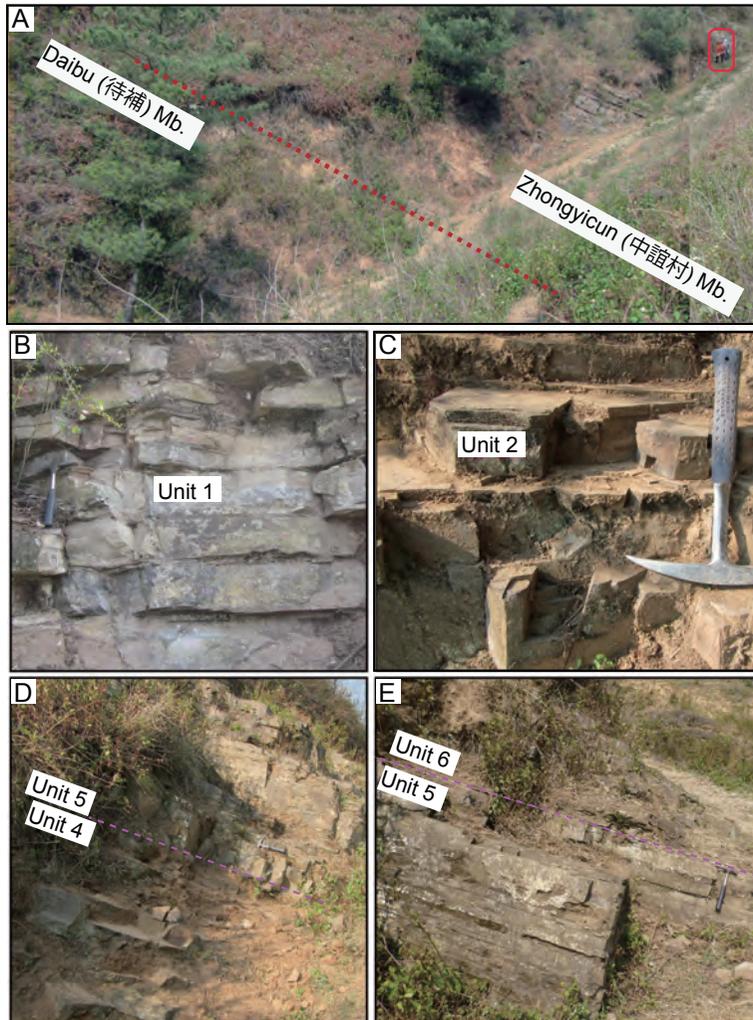


図 5 小濫田セクションにおける下部カンブリア系の産状。A: セクションの下半部に位置する待補部層/中諛村部層境界 (右上にスケールの人), B: ユニット1のリン酸塩岩質苦灰岩層, C: ユニット2のリン酸塩岩層, D: セクション上部の位置するユニット4/5の境界, E: 同ユニット5/6の境界。

Fig. 5 Outcrop views of Xiaolantian section (Fig. 3). A: Distant view with the boundary between the Daibu Member and the overlying Zhongyicun Member exposed in the lower half of the section, (a person as a scale at upper right). B: bedded phosphatic dolomite of Unit 1. C: phosphorite of Unit 2. D, E: boundaries of Units 4 and 5 and of Units 5 and 6 in the upper part of the section.

物, 黒色有機物を主体とし, 最大 500  $\mu\text{m}$  程度のやや円磨された石英が少量みられる。さらに, リン酸塩粒子や黒色有機物等が密集したリン酸塩のノジュールを含む。

ユニット2とユニット3との境界は露頭では観察されないが, 両ユニットの層理は互いに斜交

しており, ユニット2の最上部に地層の欠損がある。おそらく軽微な不整合とみなされる。

ユニット3 (層厚: 露頭で1.1 m, コア試料で1.2 m): リン酸塩岩を主体とし, 黒色泥岩層を二層準挟むことが特徴である (図7)。苦灰岩を含む。本セクションの中諛村部層のなかでこのユ

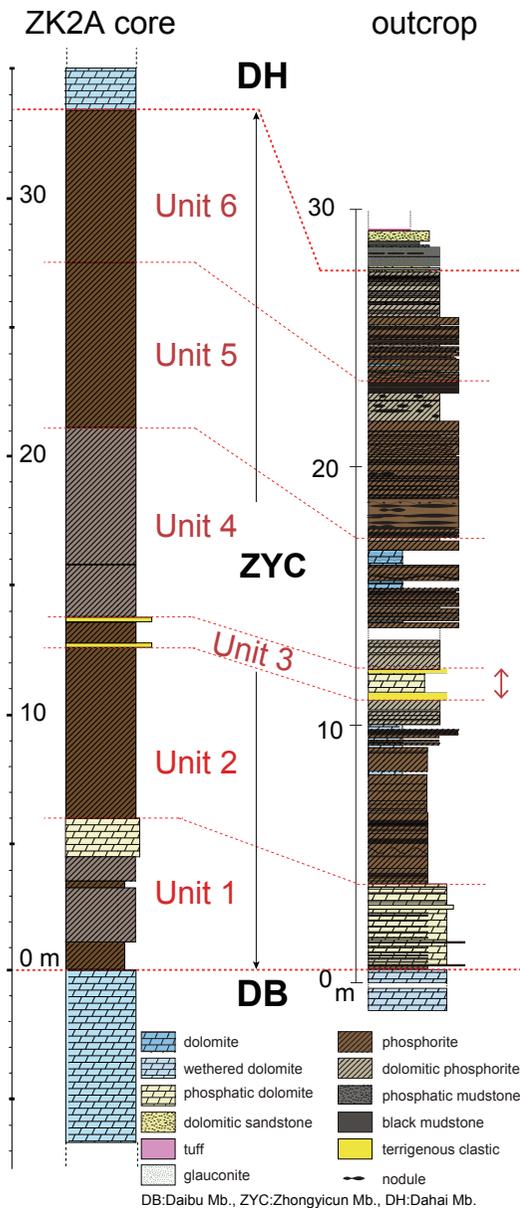


図 6 小濫田セクションにおける中諠村部層の露頭およびボーリング・コアの柱状図と両者の対比。主としてリン酸塩岩から構成される中諠村部層のなかで、ユニット3のみが特異な陸源砕屑層を含む。

Fig. 6 Stratigraphic columns of the Zhongyicun Member at Xiaolantian section, showing correlation between drilled core (left) and surface exposure (right). Zhongyicun Member is mainly composed of phosphorite, except for Unit 3 showing with two terrigenous clastic beds.

ニットのみが黒色泥岩層を含む。以下、二層の黒色泥岩をXL201（下位）およびXL203（上位）と、また間に挟まれるリン酸塩岩をXL202と呼ぶ。XL201（層厚 30 cm）：剥離性が高く、非常に脆い黒色泥岩からなる。薄片観察から、細粒の泥質苦灰石中に長径 30  $\mu\text{m}$  から最大 100  $\mu\text{m}$  程度のリン酸塩および黒色有機物粒子を多く含むこと、また同サイズの石英および白雲母を少量含むことが観察される。XL202（層厚 75 cm）：本層準は硬い暗灰色の苦灰岩質リン酸塩岩からなる。長径 4-5 mm 程度の黒色のリン酸塩岩ノジュールがパッチ状に含まれる。おもにリン酸塩からなり、黒色有機物、リン酸塩粒子、やや円磨された苦灰石、および少量の白雲母を伴う。苦灰石は下部に多く、最大長径 1 mm 径の粒子が含まれるが、ほとんどは 0.1 mm 以下の細粒のものが多い。上部ほどサイズが小さい傾向がある。苦灰石が少ない上部において、約 300  $\mu\text{m}$  のSSFが確認できる。黒色リン酸塩岩ノジュールがパッチ状に含まれる部分は苦灰石を欠く。XL203（層厚 15 cm）：剥離性が高い非常に脆い黒色泥岩からなる。薄片では、リン酸塩粒子、黒色有機物、さらに 50  $\mu\text{m}$  程度の細粒苦灰石が少量認められる。

ユニット4（層厚：露頭で 3.4 m、コア試料で 7.3 m）：主として単層約 10-20 cm のリン酸塩岩からなり、薄成層の苦灰岩質リン酸塩岩および苦灰岩を挟む。また長径約 10 cm、厚さ 2-6 cm の苦灰岩が塊状またはレンズ状に挟まれる。苦灰岩とリン酸塩岩の境界は波状を呈す。風化面では本ユニット中部の苦灰岩は長径約 10 cm の特徴的な玉ねぎ状風化組織をもつ。リン酸塩岩および苦灰岩には、粒径の小さなリン酸塩粒子が作る羽状の模様が観察される。薄片では、主たるリン酸塩の他に 50  $\mu\text{m}$  程度の細粒の黒色有機物、50-100  $\mu\text{m}$  の碎屑性石英、そして少量の白雲母が認められる。

ユニット5（層厚：露頭で 5.6 m、コア試料で 6.4 m）：リン酸塩岩と薄成層の苦灰岩質リン酸塩岩が互層する。リン酸塩岩質あるいは苦灰岩質のレンズ状ノジュールが認められる。鏡下では主たるリン酸塩の他に、100  $\mu\text{m}$  程度の石英、黒色有

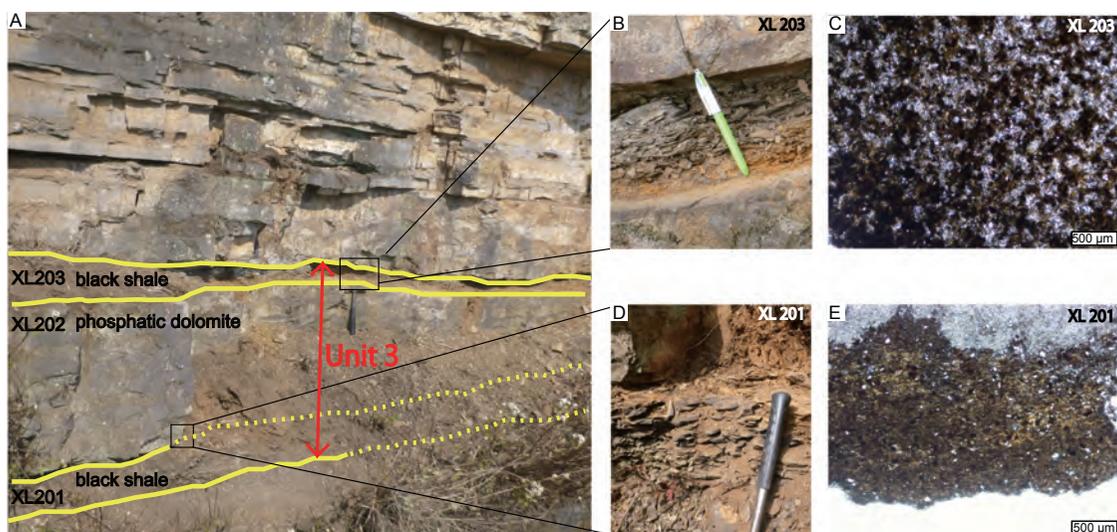


図 7 ユニット 3 の岩相：露頭写真と薄片の顕微鏡写真。A：層厚 110 cm のユニット 3 はおもに暗灰色の苦灰岩からなり、底部 B と頂部 D の 2 層準に黒色泥岩を挟在する。これらの黒色泥岩の薄片の顕微鏡写真をおのおの C および E に示す（スケールバー：500  $\mu\text{m}$ ）。鏡下で、褐色粒子がリン酸塩、白色粒子が石英粒子、虹彩色光沢粒子が苦灰石、そして黒色粒子は黒色有機物と岩片である。

Fig. 7 Outcrop and microscopic views Unit 3. A: Unit 3, 110 cm thick; mainly composed of dolomite, with two black mudstone beds B (top) and D (bottom). Photomicrographs of the black mudstones of C and E (scale bar: 500  $\mu\text{m}$ ). Brown: phosphorite; white: quartz; vari-colored: dolomite; black: black organic matters and rock fragments.

機物、また少量の白雲母が認められる。

ユニット 6（層厚：露頭で 4.8 m，コア試料で 5.9 m）：単層約 2-3 cm の薄い層理をもち、葉理が発達した暗灰色のリン酸塩岩および苦灰岩質リン酸塩岩からなる。上部はスランプ構造をもつ。鏡下では、主たるリン酸塩および生砕物の他に、200  $\mu\text{m}$  を超える少量の石英や数百  $\mu\text{m}$  から 1 mm 大の SSF が認められる。本ユニット上部のリン酸塩岩については裸眼観察でも SSF が確認できる。

## V. 対 比

### 1) 隣接する ホンジャーチン 洪家冲 (Hongjiachong) および マオティエンシャン 帽天山 (Maotianshan) セクションとの対比

小濫田セクションの約 7 km 南方に位置する洪家冲セクションは、Sato *et al.* (2014) によって詳細が記述されており、小濫田セクションと酷似する岩相層序と層厚をもつ下部カンブリア系が

露出する。下位から順に、苦灰岩や珩質泥岩を主とする待補部層（約 45 m）、層状リン酸塩岩からなる中誼村部層（約 40 m）、そして苦灰岩からなる大海部層（約 2 m）から構成される。このセクションの中誼村部層は、Sato *et al.* (2014) により、岩相に基づきユニット A からユニット E に細分された。これらの 5 つのユニットのうち、ユニット A（22 m 厚のリン酸塩岩）、ユニット C（4.5 m 厚のリン酸塩岩/石灰岩交互層）、ユニット D（8 m 厚のリン酸塩岩/石灰岩交互層）、およびユニット E（3 m 厚の層状リン酸塩岩）は層相、および岩相において小濫田セクションのユニット 2, 4, 5, そして 6 におおのよく対応する（図 8）。とくに、中誼村部層の最上部を占める小濫田セクションのユニット 6 のリン酸塩岩と洪家冲セクションのユニット E の暗灰色のリン酸塩岩は、薄く成層すること、SSF などのリン酸塩粒子および生砕物に富むこと、またスランプ構造をもつことなどの点において、互いに酷似

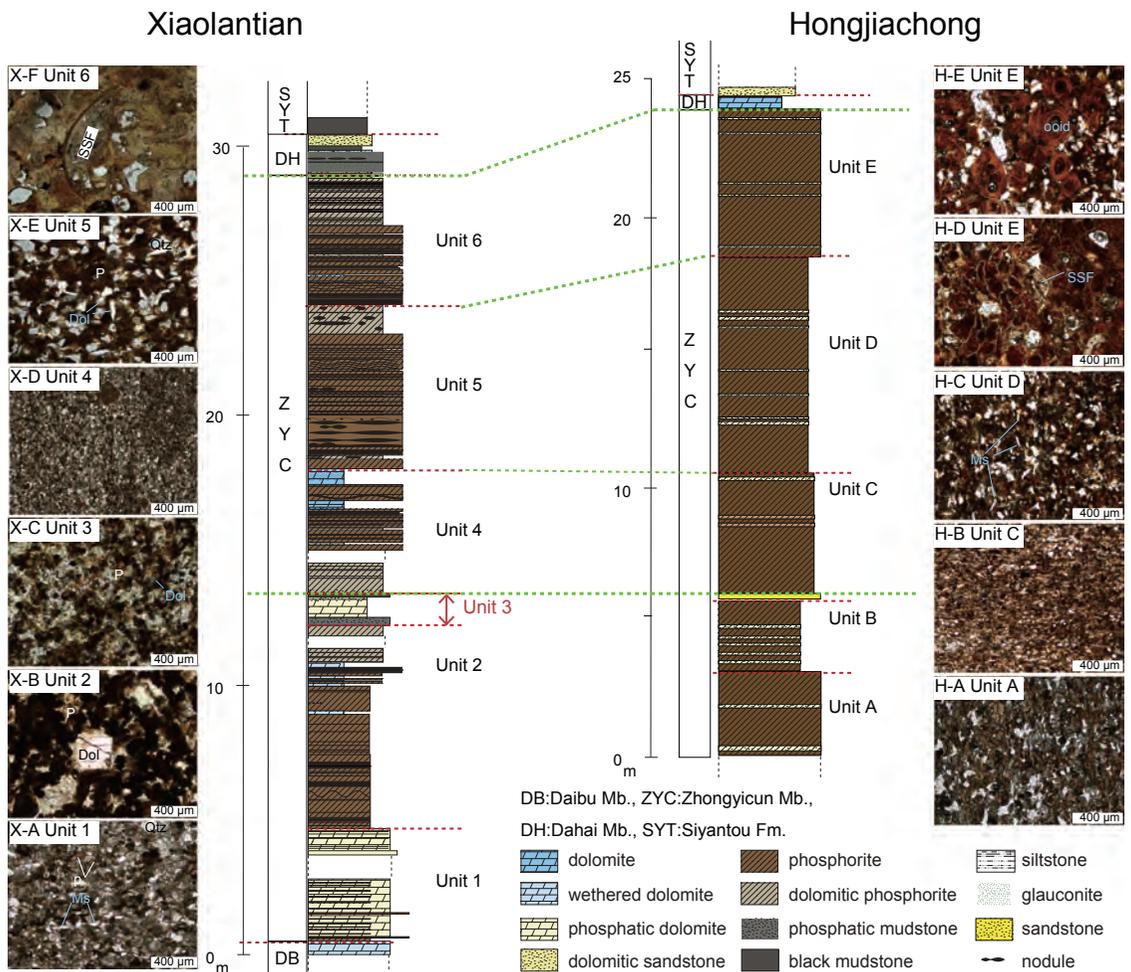


図 8 小濫田セクションと隣接する洪家冲セクションとの間の中諛村部層の岩相対比。両セクションの中諛村部層は、層厚および岩相の特徴において、互いによく類似する。両セクションの柱状図の横に各ユニットの代表的な岩石の薄片顕微鏡写真を示す（スケールバー：400 μm）。P：リン酸塩，Qtz：石英，Ms：白色雲母。とくに中諛村部層中に産する特異な碎屑岩層のおおのユニット3およびユニットC（図7）は鍵層として有用である。

Fig. 8 Lithostratigraphic correlation of Zhongyicun Member between Xiaolantian and the neighboring Hongjiachong sections. Both sections resemble each other in thickness and lithological features. Photomicrographs of all unit are shown next to the columns (scale bar: 400 μm). Mineral abbreviations: P: phosphorite, Qtz: quartz, Ms: muscovite. Unique terrigenous clastic horizon (Fig. 7) in the middle of Zhongyicun Member serves as a key bed for regional correlation.

する。

洪家冲セクションのユニットC底部に挟在する20 cm厚の砂質泥岩は、中諛村部層中で唯一となる粗粒碎屑岩層をなし、小濫田セクションのユニット3の黒色泥岩層のみと対比が可能である。ただし、両セクションの間には碎屑岩層の枚

数および層厚において明瞭な違いがある。また、洪家冲セクションの厚いリン酸塩岩層（ユニットA）と上位の碎屑岩層との間に産するユニットB（22 m厚のリン酸塩岩/石灰岩交互層）の岩相に相当する地層区間は、小濫田セクションには全く認められない。

澄江地域の帽天山セクションは、前述の小濫田および洪家沖セクションの間に位置し(図2, 3, 4), 保存良好な澄江化石群の産出で知られる(Hou and Bergström, 1997; Hu, 2005 など)。本セクションでは、上部エディアカラ系から下部カンブリア系が連続的に露出し、中誼村部層(層厚: 73.5 m)の下部はオーライト様構造を伴うリン酸塩岩質苦灰岩および苦灰岩から、また中部および上部は砂質のリン酸塩岩からなり(図4), また大海部層(層厚: 1.28 m)はリン酸塩岩質苦灰岩からなるとされる(Luo *et al.*, 1982)。しかし、帽天山セクションは、その後の採掘により消失したため、現在は観察できない。

小濫田、帽天山、および洪家沖セクションを比較すると、小濫田および洪家沖セクションにおける中誼村部層の層厚はほぼ同じであるのに対し、帽天山セクションの同部層は他の2倍以上の層厚を有す。また、小濫田セクションおよび洪家沖セクションは中誼村部層中部の陸源碎屑岩層を除いて粗粒な碎屑物を含まないのに対し、帽天山セクションの中誼村部層は全体に砂質である。しかし、これら3つのセクションは、互によく対比されることが確認された。

## 2) 康滇盆地内の他セクションとの対比

次に雲南省東部から四川省南部に広がっていた康滇盆地のなかにあつて、やや異なる岩相と層厚をもつ代表的な4地点、すなわち梅樹村<sup>シャオファン</sup>、小黃草嶺<sup>ツァオリン</sup>(Xiaohuangcaoling)、王家湾<sup>ワンジャワン</sup>(Wangjiawan)、そして朱家青および老林の中誼村部層および大海部層(図2, 3, 4)との比較・対比を試みる。

### 2-1) 梅樹村<sup>メイシュツン</sup>(Meishucun)セクション

梅樹村セクション(図2, 3)の下部カンブリア系の層厚は19.8 mであり、下位から順に累重する小歪頭山<sup>シャオワイトウシャン</sup>(Xiaowaitoushan)部層(Zhu *et al.*, 2001による待補部層)、中誼村部層、および大海部層は、層1から層8に細分されている(Luo *et al.*, 1982, 1984)。小歪頭山部層(層1および2: 層厚約8.2 m)はおもに苦灰岩からなる。中誼村部層(層3から7: 層厚約11.6 m)は主として灰色のリン酸塩岩からなり、一部にオーラ

イト様の組織をもつ。中誼村部層中部の層5(約1.6 m)に挟まれる凝灰岩層中のジルコンから $536.5 \pm 2.5$  Ma という U-Pb 年代が報告された(Sawaki *et al.*, 2008)。最上位の層8(層厚1.1 m)は苦灰岩からなり、大海部層に対比されている。

後述するように梅樹村セクションでは層7が中誼村部層の標準層序における中位にあたることから、層3-6までが同部層の下半、層8のみが上半にあたる。したがって梅樹村セクションの主部は小濫田セクションの下半にほぼ対比されるとみなされる。

### 2-2) 小黃草嶺<sup>シャオファンツァオリン</sup>(Xiaohuangcaoling)セクション

小黃草嶺セクションは、撫仙湖の南端から東方に約20 kmの華寧<sup>フアンニン</sup>(Huaning)地域(図2, 3)のリン酸塩岩鉍山脇の道路沿いに露出する。同地域内では本セクションのおよそ3 km南方に産する火特<sup>フオート</sup>(Huote)セクションの下部カンブリア系について岩相およびSSF層序の報告(Luo *et al.*, 1982)はあるが、SSFの抽出を含めて本セクションの詳細な研究はなされていない。小黃草嶺セクションでの下部カンブリア系の全層厚は120 m以上に及び、下位から順に中誼村部層、大海部層、および石岩頭層が累重する。おのおの他セクションの同一層と比較して相対的に厚い。中誼村部層の層厚は約110 mに達する。同層の下部(約50 m)と上部(約20 m)はリン酸塩岩およびチャートを挟み、厚く成層する苦灰岩からなる。中部は苦灰岩質リン酸塩岩から、そして最上部(約6 m)はリン酸塩岩から構成される。中部の直下約10 mの区間の底部および頂部にはおのおの層厚が約40 cm(下半約20 cmはシルト、上半20 cmは黒色泥岩)および50 cmの2層の黒色泥岩が挟まれる(図9)。このように、全体の層序は小濫田セクションとよく対比される。ただし、本セクションの中誼村部層は上述の澄江・晋寧地域のセクションと比べて、苦灰岩がより卓越する一方で、リン酸塩岩が少なく、SSFの産出も乏しい。

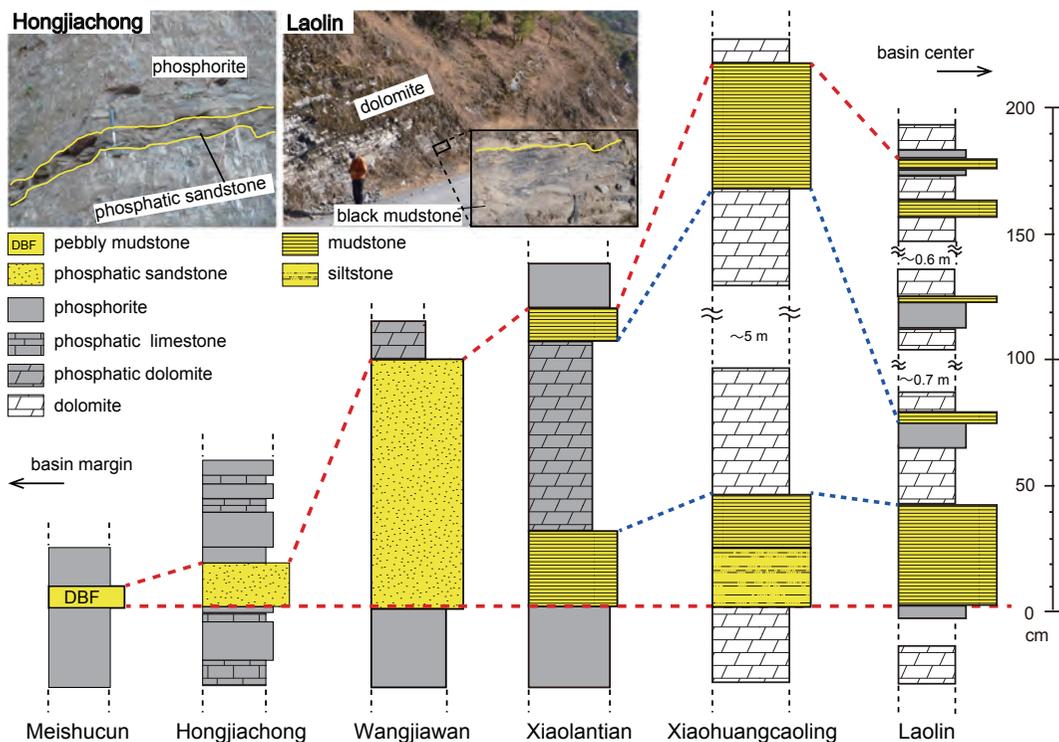


図9 雲南省東部の7つのセクションにおける中誼村部層中位の詳細対比と鍵層（粗粒碎屑岩層）。鍵層の岩相はセクションごとに変化し、相対的に浅い堆積相のセクションではより砂質に、深い堆積相のセクションではより泥質である。

Fig. 9 High-resolution correlation of mid-Zhongyicun key bed interval (Unit 3) among seven sections in eastern Yunnan. The key bed changes from sandy in relatively shallow facies to muddy in deep basin facies.

### 2-3) 王家湾 (Wangjiawan) セクション

王家湾セクションは撫仙湖の西約 20 km の六街 (Liujie) 北方に位置する。リン酸塩岩鉱山に層厚約 70 m の下部カンブリア系中誼村部層およびその上位の大海部層が露出する (図 2, 3)。大海部層は約 30 m に達し、他セクションに比べてきわめて厚いことが特徴である。下部は苦灰岩、そして上部は黒色泥岩からなり、数枚の凝灰岩層を挟在する。また、本部層にはストロマトライト様構造が確認される。本セクションに関しては Luo *et al.* (1984) による予察的報告があり、日達 (2011) らによる岩相および SSF の詳細な調査がなされた。本セクションの中誼村部層は、その岩相層序の詳細に及んで小濫田および洪家冲セクションとよく対比される。とくに下半と上半

の厚いリン酸塩岩層および両者の間に唯一挟在される特徴的なリン酸塩岩質砂岩層 (層厚約 1 m) は、小濫田セクションの中誼村部層中位のユニット 3 によく対応する (図 9)。

### 2-4) 朱家青 (Zhujiqing) および老林 (Laolin) セクション

昆明市から約 200 km 北方の曲靖地域に位置する朱家青セクションは、朱家青層の模式地である。リン酸塩岩鉱山内において、全層厚が約 148 m に及ぶ層序がたてられた (Zhu *et al.*, 2001; Qian *et al.*, 2002)。朱家青層の最下部の待補部層は主として苦灰岩からなる。その上位の中誼村部層 (層厚: 約 70 m) の主部が苦灰岩質リン酸塩岩およびリン酸塩岩質苦灰岩からなるのに対し、最下部と最上部はリン酸塩岩からなる。大海部層

(層厚：55 m 以上)の下部は苦灰岩から、また、上部は石灰岩から構成される。中誼村部層上部の約 1.5 m の区間には層厚約 20 cm の 2 層の黒色泥岩層が挟まれる。

朱家青セクションの約 4 km 南方に位置する老林セクションは、同セクションとほぼ同じ層序をもつ中誼村部層が露出し、これまでにその岩相層序、SSF 層序、および炭素同位体層序が解明されている。中誼村部層中に黒色泥岩層が挟在され (Li *et al.*, 2009)、約 3 m の区間に 5 層の黒色泥岩層が挟まれる。最下位の黒色泥岩層が最も厚く (層厚約 40 cm)、その上位に累重する苦灰岩およびリン酸塩岩中に厚さ約 2-8 cm の薄い黒色泥岩層が 4 層挟まれる (図 9)。

このように曲靖地域の両セクションの岩相や層厚は互いに類似し、それらの層序は小濫田セクションと概ね一致するが、層厚と岩相はかなり異なる。

## VI. 考 察

小濫田セクションの中誼村部層および大海部層についての上記の岩相記載に基づき、下部カンブリア系リン酸塩岩の堆積相について考察する。さらに近隣セクションおよび同じ康滇盆地内で堆積した他セクションの堆積環境と比較した上で、新たに検出した鍵層の層序学的意義を考察する。

### 1) 小濫田セクションの堆積場の復元

小濫田セクションに露出する最下部カンブリア系待補部層と中誼村部層底部のユニット 1 は、ともに厚く成層する苦灰岩および細粒の苦灰岩質泥岩から構成され、砕屑粒子をほとんど含まないことから、その堆積場は基本的に海岸から十分距離の離れた陸棚沖合の浅海あるいはそれより深い大陸斜面であったと判断される。

一方、その上位のユニット 2 から 5 までは、おもに層状の細粒リン酸塩岩層からなり、一部に苦灰岩質リン酸塩岩層を挟む。これらの層状リン酸塩岩は、明瞭で平坦な層理面をもち、ほとんど生物擾乱を被っていないこと、また生砕屑物を含むものの粗粒陸源砕屑物を欠くことから、基本的にユニット 1 と同様、海岸から離れた浅海から大

陸斜面上部で堆積したと判断される。ただし、ユニット 4 および 5 のリン酸塩岩は球状ないしレンズ状の苦灰岩の岩塊や薄層を挟み、また局部的に羽状層理をもつことから、間欠的に強い波浪の影響を受ける場、おそらく下位層に比べてより浅い場で堆積したと推定される。ユニット 1 から 5 までのなかで、唯一ユニット 3 だけは粗粒陸源砕屑物を含む点で特異であり、その意味については後で別途議論する。

最上位のユニット 6 は、よく成層した細粒均質なリン酸塩岩からなり、生砕屑物を多く含む。苦灰岩や陸源砕屑物をほとんど含まないこと、また一部にスランプ構造をもつことから、その堆積場は下位のユニットに比べてやや深く、おそらく大陸斜面中部から下部で堆積したと考えられる。

一方、ユニット 6 直上の大海部層のリン酸塩岩/苦灰岩質泥岩は、露頭表面はしばしば緑色を帯びるほど多量の高緑石を含み、大陸斜面最上部の傾斜変換領域周辺で堆積したと判断される。

雲南省東部において複数の下部カンブリア系岩相層序をまとめた康滇盆地の等層厚地図および古地理図 (Wu and Li, 2002; 図 2) に従うと、小濫田セクションは南中国地塊南西部の康滇盆地南部の陸域縁辺に位置し、おそらく同盆地南部の湾入部西側縁辺の沖合浅海および北東傾斜の大陸斜面上で堆積したと推定される。

雲南省東部の最下部カンブリア系のセクションは、いずれも上述のような待補部層から中誼村部層にかけての共通の岩相層序をもつ (例えば、Luo *et al.*, 1982; Sato *et al.*, 2014)。例えば、待補部層と中誼村部層との岩相境界は、主要なリン酸塩岩層の初出層準層とされてきた。ただし、中誼村部層および大海部層内部の詳細な岩相については、セクションごとに多様性が大きく、なかには明瞭な地層欠損をもつ場合がある。一般的な傾向として、Sato *et al.* (2014) が指摘した通り、中誼村部層のなかでもリン酸塩岩と苦灰岩との比率はセクションごとに大きく変化し、より陸に近い場所で堆積したリン酸塩岩優勢のもの (小濫田、洪家冲、帽天山、梅樹村、王家湾など) や、斜面ないし盆地で堆積した苦灰岩優勢のものがあ

る。層厚も、陸から離れた場で堆積したセクション（小黃草嶺，朱家青，老林など）がより厚い。このような岩相の多様性は大海部層に関しても同様に観察される。本セクションに隣接する澄江地域内の洪家沖セクションおよび帽天山セクションの、また康滇盆地内における他セクションの堆積環境について次に考察する。

## 2) 洪家沖および帽天山セクションの堆積環境

洪家沖セクションは岩相や層厚などについて小濫田セクションと共通する特徴をもつ。互いによく類似する両者は、康滇盆地西側の浅海から大陸斜面上部で堆積した下部カンブリア系の標準的層序をもつとみなされる。ただし、小濫田セクションはユニット3直下の地層欠損、大海部層/石岩頭層境界での凝灰岩層の挟在、オーイドの欠如、またユニット4および5からの化石欠如などの点で、洪家沖セクションと異なる。さらに、同じ澄江地域内に隣接して産する帽天山セクションは、小濫田および洪家沖セクションのどちらともやや異なる。とくに、帽天山セクションの中誼村部層の層厚は他の2セクションに比べて2倍以上あり、また全体として砂質であることから、同セクションは小濫田および洪家沖セクションに比べて陸に近い場で堆積した可能性が高い。

このように南北わずか10 kmほどの距離に隣接する3セクションの間でも、おそらく局所的な地形の起伏を反映した微細な岩相、層厚、その他の岩石学的特徴に違いがあるものの、三者は大局的には、ほぼ同様の環境で堆積したと考えられる。

## 3) 康滇盆地内の他セクションの堆積環境

Wu and Li (2002) の古地理図にしたがえば、康滇盆地のなかの各セクションは、おのおの次のような位置で堆積したとみなされる（図2，3）。すなわち、梅樹村セクション（澄江地域の西方40 km）は康滇盆地の西側、小黃草嶺セクション（澄江地域の南方約40 km）は盆地南東縁、王家湾セクション（澄江地域の南西約20 km）は盆地の西側、そして朱家青セクションおよび老林セクション（澄江地域の北方約200 km）は盆地北部におおの位置したと推定される。

とくに梅樹村セクションの中誼村部層には、

オーライト様組織やストロマトライト様構造をもつこと（Luo *et al.*, 1984 ; Yang *et al.*, 2014）から、光合成バクテリアが活動するきわめて浅い場で堆積したと考えられる。王家湾セクションの大海部層にもストロマトライト様構造が確認されており（日達, 2011）、局部的に浅い場で堆積した部分を含むことが示唆される。

これに対して、小黃草嶺セクションは、オーライト、ストロマトライト様構造、そして生物擾乱組織などの浅海を示唆する証拠をすべて欠くこと、また挟在する黒色泥岩層が細粒であり、粗粒な陸源性碎屑物を含まないことから、その堆積場は相対的に深く、また陸域から十分離れていたと推定される。

朱家青および老林セクションの朱家青層は、オーライト、ストロマトライト様構造、生物擾乱などの組織や、粗粒な陸源性碎屑物を含まないことから、相対的に深い場で堆積したと推定される。

比較したこれらのセクションのなかで、堆積時にもっとも海岸に近く、きわめて浅い環境であったとされるのが梅樹村セクションである。これに対し、小濫田および洪家沖セクションは浅海ながら梅樹村セクションよりも比較的陸から離れた場で、また朱家青セクションは上述のいずれのセクションよりも明らかに深い海盆内でおおの堆積したことが、本研究によって改めて支持された。

## 4) 鍵層としての碎屑岩層

小濫田セクションでは、中誼村部層中位に限定して2層（おのおの層厚は約30 cmと15 cm）の黒色泥岩層が、また洪家沖セクションでは、ほぼ同層準に限定して層厚約20 cmの砂質泥岩が挟在される。ここでは、これらの中誼村部層の中位に産する特徴的な岩相の対比について議論する。

梅樹村セクションでは、中誼村部層上半の層7の底部に約15 cmの不均質なリン酸塩岩質礫質泥岩層が産し、詳細は示されていないが、土石流堆積物と記載されている（Yang *et al.*, 2014）。この層は梅樹村セクションにおける中誼村部層のなかで唯一の粗粒碎屑岩である。その下位の層3-6のリン酸塩岩は澄江地域の中誼村部層下半のものに酷似することから、層7は中誼村部層中

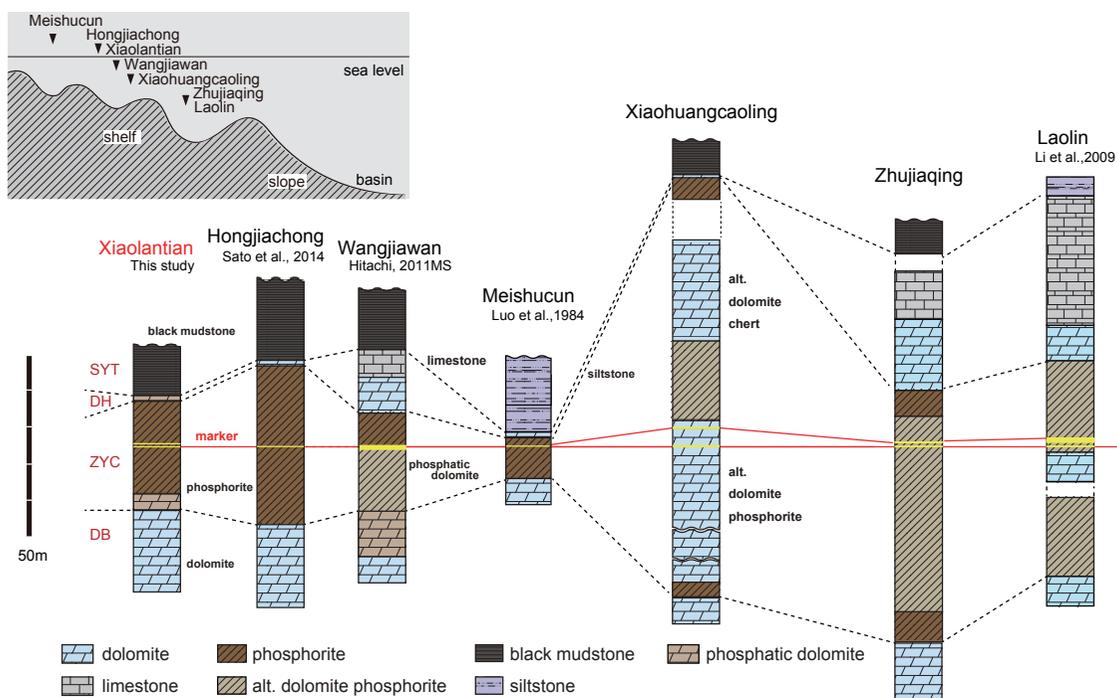


図 10 雲南省東部の 7 セクションにおける中誼村部層の対比。鍵層（陸源碎屑岩層）は、つねにリン酸塩岩層主体の中誼村部層の中位を占めることに注意。

Fig. 10 Lithostratigraphic correlation of Zhongyicun Member at seven sections in eastern Yunnan. Note that thickness, bed number, and adjacent lithofacies of the key terrigenous clastic horizon of the mid-Zhongyicun Member.

位の碎屑岩層に相当する可能性が高い。この礫質泥岩層と他セクションで認められる碎屑岩層とは一見岩相が大きく異なるが、中誼村部層中で碎屑岩層はきわめて稀であることから、対比を考える上で有効である。

小黄草嶺セクションの中誼村部層中位の約 6 m の区間には 2 層の黒色泥岩層（おのおのの層厚は約 40 cm と 50 cm）が挟在される。苦灰岩が卓越するこのセクションには、他層準に陸源碎屑岩は全く産しないことから、同部層中部の 2 層の黒色泥岩層で挟まれた区間は、小濫田セクションのユニット 3 に対比可能である。

王家湾セクションにも、中誼村部層の厚いリン酸塩岩中に層厚約 1 m のリン酸塩岩質砂岩層が確認されている（日達, 2011）。他セクションの碎屑岩層に比べると明らかに厚いが、この層は小濫田セクションのユニット 3 に対比できる。

朱家青セクションでは、中誼村部層上部の約 1.5 m の区間に限定して、層厚約 20 cm の黒色泥岩層が 2 層、また近接する老林セクションでは、同部層中部の約 3 m の区間に限定して、5 層の黒色泥岩層（最大 40 cm）が確認される。これらは、同地域の中誼村部層のなかでの唯一の陸源碎屑岩区間であることから、小濫田セクションのユニット 3 に対比が可能である。

このように、現在観察できるすべてのセクションにおいて、特異な陸源碎屑岩層が中誼村部層の標準層序の中位に限定して挟在されることが確認された（図 9, 10）。この碎屑岩層は雲南省内の南北約 200 km 以上の領域（図 2）にわたって追跡される有効な鍵層として利用できると判断される。ただし、上述の通りその層厚や粗粒碎屑粒子の粒径などは一定ではない。例えば梅樹村、洪家冲、および王家湾セクションでは陸源碎屑岩層は

いずれも単層のみであるが、その厚さは数センチメートルから約1 mまで大きく変化する。また洪水沖と王家湾セクションでは、陸源碎屑岩層が比較的粗粒な碎屑物粒子を含むのに対し、小濫田、小黃草嶺、朱家青、および老林セクションでは、より細粒の黑色泥岩層のみが挟まれる。このような岩相の多様性をもつものの、同層中位に限定される碎屑岩層準は、少なくとも堆積盆地内の対比にきわめて有効である。

この鍵層の年代については、2例の既報の放射性年代値から、制限が可能である。すなわち、梅樹村セクションにおける鍵層（層7底部のリン酸塩岩質泥岩層）の約5 m下位に産する層5（凝灰岩層）から、 $536.5 \pm 2.5$  Ma (Sawaki *et al.*, 2008) というジルコン U-Pb 年代が報告されている。また、帽天山セクションでの、鍵層より上位の大海部層底部から、 $523.9 \pm 6.7$  Ma (Okada *et al.*, 2014) というジルコン U-Pb 年代が報告されている。したがってこの鍵層の年代は  $536.5 \pm 2.5$  Ma と  $523.9 \pm 6.7$  Ma の間すなわちカンブリア紀、フォーチュン期から第二期最初期に制約される。

ちなみに、雲南省東部の下部カンブリア系のSSF層序に関する先行研究にしたがうと、*Anabarites trisulcatus-Protohertzina anabarica* 群集帯と *Paragloborilus subglobosus-Purella squamulosa* 群集帯との境界層準 (Marker B 層準と仮称; Luo *et al.*, 1984; Brasier *et al.*, 1994; Landing, 1994) は、梅樹村、小歪頭山、および老林セクションにおける中誼村部層の鍵層の直上に位置することになり (Shen and Schidlowski, 2000; Zhu *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2009), 群集帯境界にも年代指標が加わった。

以上のように、本研究での雲南省東部の下部カンブリア系の対比の結果、中誼村部層の中位に産する碎屑岩層は、康滇盆地内での有効な鍵層となること、またその層準はカンブリア系テルヌーブ統の下部から中部 (524-537 Ma) の区間に限定され、ほぼ *Paragloborilus subglobosus-Purella squamulosa* 群集帯下底にあたること本研究で明らかになった。

## 5) 鍵層の意義

この鍵層に基づく対比は、永らく雲南省のカンブリア系の模式セクションとされてきた梅樹村セクションの層序学的評価に関して大きな意味をもつ。なぜなら、上述のように梅樹村セクションの層7が小濫田セクションのユニット3に対比されるならば、梅樹村セクションはおもに中誼村部層下部のみから構成され、他セクションで観察される同部層上部の大部分を欠くことになるからである。おそらく、梅樹村セクションはきわめて浅い場で堆積したため、中誼村部層の上部は元々堆積しなかったか、あるいは堆積後に大幅に剝離され、二次的に消失した可能性が考えられる。朱家青セクションについても、同様に標準的な中誼村部層の下半がセクションのほとんどを占め、同部層上半はきわめて薄いと判断される。

康滇盆地のカンブリア系下部は、原生累代に形成されたリフト内の盆地において、基本的に安定した条件で連続的に堆積したとされる (Zhu *et al.*, 2001; Sato *et al.*, 2014)。同盆地内での最下部カンブリア系は、大略共通の岩相層序をもつものの、三葉虫出現層準の下位については、唯一の示準化石となるSSFが必ずしもすべてのセクションで産出するわけではない。また、凝灰岩層が少なく、放射性年代に基づく高精度の対比は困難であった。そのため、カンブリア系最下部の層序対比には炭酸塩岩中の無機炭素安定同位体比が用いられてきた (Li *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2019) が、小規模の同位体比変動の対比については、つねに層序学的連続性に関わる不確実性が伴う。

これに対して、本研究で確認した中誼村部層中位の碎屑岩層は、岩相がその下位および上位のリン酸塩岩や炭酸塩岩層とは大きく異なり、野外で容易に識別できるため、少なくとも康滇盆地内における対比にきわめて信頼性の高い鍵層と評価される。

ちなみに、この碎屑岩相鍵層が、わずかに岩相を変えながらも盆地南部全域で堆積したことは、盆地周辺の後背地の基盤岩から碎屑物がほぼ同じタイミングで供給されたことを暗示している。そ

の原因として、基盤地殻に特異な構造変形が生じたことや、短期間の海水準低下などが考えられる。この中誼村部層中位の鍵層は、テルヌーブ世でおきた最初の主要なSSF群集の入れ替わりのタイミングとほぼ一致することから、カンブリア紀初期の動物に影響を与えた環境変化、例えば寒冷化などを記録している可能性がある。今後、康滇盆地外の下部カンブリア系についても、類似の変動の有無を確認する必要がある。

## VII. ま と め

本研究では、南中国雲南省澄江地域に位置する小濫田セクションにおける最下部カンブリア系の詳細な岩相層序を明らかにし、同省の6セクションとの対比を行なった。その結果、以下の新知見が得られた。

- (1) 小濫田セクションの中誼村部層は、リン酸塩岩を主体とし苦灰岩を伴う。  
岩相に基づきユニット1-6に細分される。中位のユニット3は、セクション内で唯一の陸源性砕屑岩層として2層の黒色泥岩を挟在する。
- (2) 小濫田セクションの中誼村部層は、海岸から十分距離の離れた陸棚沖合の浅海あるいはそれより深い大陸斜面上部に堆積した。なかでも、ユニット4および5では間欠的に波浪の影響を受ける場で、一方ユニット6はやや深く、おそらく大陸斜面中部から下部で堆積した。
- (3) 小濫田セクションは、7 km 南方の洪家沖セクションと高精度で岩相対比される。小濫田セクションのユニット2は洪家沖セクションのユニットAに、また、ユニット4-6はユニットC-Eにおのおの相当する。ただし小濫田セクションでは、洪家沖セクションのユニットB層準を欠く。
- (4) 小濫田セクションのユニット3の砕屑岩層は、同じ澄江地域のみならず、晋寧地域、曲靖地域、および華寧地域の下部カンブリア系の中位に限定して産する砕屑岩層（区間）に対比される。

- (5) 康滇盆地内で確認された中誼村部層中位の陸源性砕屑岩層は、南北約200 kmにわたって追跡可能な有効な鍵層をなすことが判明した。その年代は、535.2-523.9 Maの期間（カンブリア紀前期テルヌーブ世）に限定され、SSFの*Anabarites trisulcatus-Protoherztzina anabarica*群集帯から*Paragloborilus subglobosus-Purella squamulosa*群集帯の底の直下にあたる。

## 謝 辞

大谷大学の鈴木寿志教授および名古屋大学の大路樹生教授からいただいた貴重な査読コメントにより本稿は大幅に改善された。本研究を進めるにあたり、東京大学大学院総合文化研究科の小河正基准教授、小宮剛教授、澤木佑介博士、鹿山雅裕博士ほか、駒場地球科学セミナーのメンバーからは貴重なご教示をいただいた。野外調査において、同セミナーの長谷川遼氏（現在、富士ゼロックス社）、また中国西北大学の舒徳干教授および李勇教授の協力を得た。これらの方々に感謝する。本研究には文部科学省科学研究補助金（no. 26257212）を使用した。

## 文 献

- Brasier, M.D. (1979): The Cambrian radiation event. in *The Origin of Major Invertebrate Groups* edited by House, M.R., Academic Press, 103-159.
- Brasier, M.D., Magaritz, M., Corfield, R., Huilin, L., Xiche, W., Lin, O., Zhiwen, J., Hamdi, B., Tinggui, H. and Fraser, A.G. (1990): The carbon- and oxygen-isotope record of the Precambrian-Cambrian boundary interval in China and Iran and their correlation. *Geological Magazine*, **127**, 319-332.
- Brasier, M.D., Cowie, J. and Taylor, M. (1994): Decision on the Precambrian-Cambrian boundary. *Epi-sodes*, **17**, 3-8.
- Brennan, S.T., Lowenstein, T.K. and Horita, J. (2004): Seawater chemistry and the advent of biocalcification. *Geology*, **43**, 473-476.
- Campbell, I.H. and Squire, R.J. (2010): The mountains that triggered the Late Neoproterozoic increase in oxygen: The second Great Oxidation Event. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**, 4187-4206.
- Canfield, D.E., Poulton, S.W. and Narbonne, G.M. (2007): Late-Neoproterozoic deep-ocean oxygenation and the rise of animal life. *Science*, **315**, 92-95.
- Caron, J.B., Gaines, R., Aria, C., Mangano, G. and Streng, M. (2013): A new phyllopod bed-like as-

- semblage from the Burgess Shale of the Canadian Rockies. *Nature Communications*, **5**, 1–6.
- Chen, X., Ling, H.F., Vance, D., Shields-Zhou, G.A., Zhu, M., Poulton, S.W., Och, L.M., Jiang, S.Y., Li, D., Cremonese, L. and Archer, C. (2015): Rise to modern levels of ocean oxygenation coincided with the Cambrian radiation of animals. *Nature Communications*, **6**, 1–7.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. and Fan, J.X. (2013): The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, **36**, 199–204. <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2020-01.pdf> (updated in 2020) [Cited 2020/04/20].
- Compston, W., Zhang, Z., Cooper, J.A., Ma, G. and Jenkins, R.J.F. (2008): Further SHRIMP geochronology on the early Cambrian of South China. *American Journal of Science*, **308**, 399–420.
- Conway Morris, S., Peel, J.S., Higgins, A.K., Soper, N.J. and Davis, N.C. (1987): A Burgess Shale-like fauna from the Lower Cambrian of Greenland. *Nature*, **326**, 181–183.
- Cremonese, L., Shields-Zhou, G., Syrucek, U., Ling, H.F., Och, L., Chen, X. and Li, D. (2013): Marine biogeochemical cycling during the early Cambrian constrained by a nitrogen and organic carbon isotope study of the Xiaotan section, South China. *Precambrian Research*, **225**, 148–165.
- Dong, B., Long, X., Li, J., Yang, X., Zhao, B. and Luo, J. (2019): Mo isotopic variations of a Cambrian sedimentary profile in the Huangling area, South China: Evidence for redox environment corresponding to the Cambrian Explosion. *Gondwana Research*, **69**, 45–55.
- Erwin, D.H. (2009): Early origin of the bilaterian developmental toolkit. *Philosophy Transactions of the Royal Society London B*, **364**, 2253–2261.
- Erwin, D.H. and Valentine, J.W. (2013): *The Cambrian Explosion: The Construction of Animal Diversity*. Roberts and Company Publishers, 406p.
- Fan, C. and Zang, Y. (1994): The structure and tectonics of western Yunnan. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, **9**, 355–361.
- Fan, P.F. (1978): Outline of the tectonic evolution of southwestern China. *Tectonophysics*, **45**, 261–267.
- Fu, D., Tong, G., Dai, T., Liu, W., Yang, Y., Ahang, Y., Cui, L., Li, L., Yun, H., Wu, Y., Sun, A., Liu, C., Pei, W., Gaines, R.R. and Zhang, X. (2019): The Qingjiang biota—A Burgess Shale-type fossil Lagerstätte from the early Cambrian of South China. *Science*, **363**, 1338–1342.
- Gehling, J.G., Jensen, S., Droser, M.L., Myrow, P.M. and Narbonne, G.M. (2001): Burrowing below the basal Cambrian GSSP, Fortune Head, Newfoundland. *Geological Magazine*, **138**, 213–218.
- Gould, S.J. (1989): *Wonderful Life: The Burgess Shale and Nature of History*. W.W. Norton, 352p.
- Grotzinger, J.P., Bowring, S.A., Saylor, B.Z. and Kaufman, A.J. (1995): Biostratigraphic and geochronologic constraints on early animal evolution. *Science*, **270**, 598–604.
- He, T., Zhu, M., Mills, B.J.W., Wynn, P.M., Zhuravlev, A.Y., Tostevin, R., Pogge von Strandmann, P.A.E., Yang, A., Polton, S.W. and Shields, G.A. (2019): Possible links between extreme oxygen perturbations and the Cambrian radiation of animals. *Nature Geoscience*, **12**, 468–474.
- 日達宇彦 (2011): 南中国雲南省王家湾地域における下部カンブリア系の岩相層序・生層序・同位体層序：リン酸塩濃集とSSFの多様化パターン. 東京大学大学院総合文化研究科修士論文, 130p. [Hitachi, T. (2011): *Lower Cambrian Lithostratigraphy, Biostratigraphy and Isotope Stratigraphy in the Wangjiawan Area, Yunnan, South China: Concentration of Phosphate and Diversification Pattern of SSF*. Master Thesis, Department of Earth Science and Astronomy, University of Tokyo, 130p. (in Japanese with English abstract)]
- Hou, X.G. and Bergström, J. (1997): Arthropods of the Lower Cambrian Chengjiang fauna, southwest China. *Fossils Strata*, **45**, 1–116.
- Hou, X.G., Bergström, J. and Ahlberg, P. (1995): *Anomalocaris* and other large animals in the Lower Cambrian Chengjiang fauna of southwest China. *GFF*, **117**, 163–183.
- Hou, X.G., Aldridge, R.J., Siveter, D.J., Siveter, D.J. and Feng, X.H. (2002): New evidence on the anatomy and phylogeny of the earliest vertebrates. *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, **269**, 1865–1869.
- Hou, X.G., Bergström, J. and Xu, G.H. (2004): The lower Cambrian crustacean Pectocaris from the Chengjiang biota, Yunnan, China. *Journal of Paleontology*, **78**, 700–708.
- Hu, S. (2005): Taphonomy and palaeoecology of the early Cambrian Chengjiang Biota from eastern Yunnan, China. *Berliner Palaobiologische Abhandlungen*, **7**, 1–197.
- Jiang, G., Wang, X., Shi, X., Xiao, S., Zhang, S. and Dong, J. (2012): The origin of decoupled carbonate and organic carbon isotope signatures in the early Cambrian (ca. 542–520 Ma) Yangtze platform. *Earth and Planetary Science Letters*, **317**, 96–110.
- Jiang, Z. and Chen, A. (2008): *The Basic Geology and Investigation Guidebook of Chengjiang Fauna National Geopark*. People's Publishing House, 138p. (in Chinese with English summary)
- Khomentovsky, V.V. (1986): The Vendian System of Siberia and a standard stratigraphic scale. *Geological Magazine*, **123**, 333–348.
- Khomentovsky, V.V. and Karlove, G.A. (1992): The Precambrian-Cambrian and principles of its justification in Siberia. *Russian Geology and Geophysics (Translation of Geologiya i Geofizika)*, **33**, 1–18.

- Khomentovsky, V.V. and Karlova, G.A. (1993): Biostratigraphy of the Vendian–Cambrian beds and the lower Cambrian boundary in Siberia. *Geological Magazine*, **130**, 29–45.
- Knauth, L.P. (2005): Temperature and salinity history of the Precambrian ocean: implications for the course of microbial evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **219**, 53–69.
- Landing, E. (1994): Precambrian–Cambrian boundary ratified and a new perspective of Cambrian time. *Geology*, **22**, 179–82.
- Landing, E. and Kouchinsky, A. (2016): Correlation of the Cambrian Evolutionary Radiation: Geochronology, evolutionary stasis of earliest Cambrian (Terreneuvian) small shelly fossil (SSF) taxa, and chronostratigraphic significance. *Geological Magazine*, **153**, 750–756.
- Li, D., Ling, H., Jiang, S., Pan, J., Chen, Y., Cai, Y. and Feng, H. (2009): New carbon isotope stratigraphy of the Ediacaran–Cambrian boundary interval from SW China: Implications for global correlation. *Geological Magazine*, **146**, 465–484.
- Li, D., Ling, H.-F., Shields-Zhou, G.A., Chen, X., Cremonese, L., Och, L., Thirwall, M. and Manning, C.J. (2013): Carbon and strontium isotope evolution of seawater across the Ediacaran–Cambrian transition: Evidence from the Xiaotan section, NE Yunnan, South China. *Precambrian Research*, **225**, 128–147.
- Li, G. and Xiao, S. (2004): Tannuolina and Micrina (Tannuolinidae) from the lower Cambrian of eastern Yunnan, South China, and their scleritome reconstruction. *Journal of Paleontology*, **78**, 900–913.
- Li, Z.X., Bogdanova, S.V., Collins, A.S., Davidson, A., De Waele, B., Ernst, R.E., Fitzsimons, I.C.W., Fuck, R.A., Gladkochub, D.P., Jacobs, J., Karlstrom, K.E., Lu, S., Natapov, L.M., Pease, V., Pisarevsky, S.A., Thrane, K. and Vernikovskiy, V. (2008): Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Research*, **160**, 179–210.
- Liu, Z. and Zhou, M. (2017): Meishucun phosphorite succession (SW China) records redox change of the early Cambrian ocean. *Geological Society of America*, **129**, 1554–1567.
- Luo, H., Jiang, Z., Wu, X., Song, X. and Ouyang, L. (1982): *The Sinian–Cambrian Boundary in Eastern Yunnan, China*. People’s Republic of China. 265p. (in Chinese with English summary)
- Luo, H.L., Jiang, Z., Wu, X., Song, X., Ouyang, L., Xing, Y., Liu, G., Zhang, S. and Tao, Y. (1984): *Sinian–Cambrian Boundary Stratotype Section at Meishucun, Jinning, China*. People’s Publishing House, 154p. (in Chinese and English)
- Luo, H., Wu, X. and Ou, L. (1991): Facies changes and transverse correlation of the Sinian–Cambrian boundary strata in eastern Yunnan. *Sedimentary facies and Palaeogeography*, **4**, 27–35.
- Marshall, C.R. (2006): Explaining the Cambrian “explosion” of animals. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **34**, 355–384.
- Matthews, S.C. and Missarzhevsky, V.V. (1975): Small shelly fossils of late Precambrian and early Cambrian age: A review of recent work. *Journal of the Geological Society of London*, **131**, 289–304.
- Ministry of Housing and Urban–Rural Development of the People’s Republic of China (2011): *Chengjiang Fossil Site*. Ministry of Housing and Urban–Rural Development of the People’s Republic of China, 143p.
- Misra, S.B. (1969): Late Precambrian(?) fossils from southern Newfoundland. *Geological Society of America Bulletin*, **80**, 2133–2140.
- Missarzhevsky, V.V. (1989): *Drevneyshie skeletnye okamenelosti i stratigrafiya pogranichnykh tolsch dokembriya i kembriya (Oldest Skeletal Fossils and the Stratigraphy of Precambrian/Cambrian Boundary Beds)*. Akademiya Nauk SSR, Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Geologicheskii Institut, Trudy, **443**, 238p.
- Okada, Y., Sawaki, Y., Komiya, T., Hirata, T., Takahata, N., Sano, Y., Han, J. and Maruyama, S. (2014): New chronological constraints for Cryogenian to Cambrian rocks in the Three Gorges, Weng’an and Chengjiang areas, South China. *Gondwana Research*, **25**, 1027–1044.
- Parkhaev, P.Y. and Demidenko, Y.E. (2010): Zooproblematica and Mollusca from lower Cambrian Meishucun section (Yunnan, China) and taxonomy and systematics of the Cambrian small shelly fossils of China. *Paleontologica Journal*, **44**, 883–1161.
- Peterson, K.J., Cotton, J.A., Gehling, J.G. and Pisani, D. (2008): The Ediacaran emergence of bilaterians: Congruence between the genetic and the geological fossil records. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, **363**, 1435–1443.
- Qian, Y. and Bengtson, S. (1989): Palaeontology and biostratigraphy of the Early Cambrian Meishucunian stage in Yunnan Province, South China. *Fossils and Strata*, **24**, 1–156.
- Qian, Y., Li, G.X. and Zhu, M.Y. (2001): The Meishucun stage and its small shelly fossil sequence in China. *Acta Palaeontologica Sinica*, **40**, 54–62.
- Qian, Y., Zhu, M., Li, G., Jiang, Z. and Van Iten, H. (2002): A supplemental Precambrian–Cambrian boundary global stratotype section in SW China. *Acta Palaeontologica Sinica*, **41**, 19–26.
- Rozanov, A.Y. and Zhuravlev, A.Y. (1992): *The Lower Cambrian Fossil Record of the Soviet Union, in Origin and Early Evolution of the Metazoa*. Plenum Press, 205–282.
- Rozanov, A.Y., Missarzhevsky, V.V., Volkova, N.A., Voronova, L.G., Krylov, I.N., Keller, B.M., Korolyuk, I.K., Lendzion, K., Michniak, R., Pykhova, N.G. and Sidorov, A.D. (1969): *The Tommotian Stage*

- and the Cambrian Lower Boundary Problem. Moscow, Nauka, 359p. (in English, 1981, New Delhi: India Amerind Publishing Co.)
- Sato, T., Isozaki, Y., Hitachi, T. and Shu, D. (2014): A unique condition for early diversification of small shelly fossils in the lowermost Cambrian in Chengjiang, South China: Enrichment of phosphorus in restricted embayments. *Gondwana Research*, **25**, 1139–1152.
- Sawaki, Y., Nishizawa, M., Suo, T., Komiya, T., Hirata, T., Takahata, N., Sano, Y., Han, J., Kon, Y. and Maruyama, S. (2008): Internal structures and U-Pb ages of zircons from a tuff layer in the Meishucunian formation, Yunnan Province, South China. *Gondwana Research*, **14**, 148–158.
- Shen, Y.A. and Schildlowski, M. (2000): New C isotope stratigraphy from southwest China: Implications for the placement of the Precambrian–Cambrian boundary on the Yangtze Platform and global correlations. *Geology*, **28**, 623–626.
- Shu, D.G., Luo, H.L., Conway Morris, S., Zhang, X.L., Hu, S.X., Chen, L., Han, J., Zhu, M., Li, Y. and Chen, L.Z. (1999): Lower Cambrian vertebrates from South China. *Nature*, **402**, 42–46.
- Shu, D.G., Isozaki, Y., Zhang, X.L., Han, J. and Maruyama, S. (2014): Birth and early evolution of metazoans. *Gondwana Research*, **25**, 884–895.
- Steiner, M., Li, G., Qian, Y., Zhu, M. and Erdtmann, B. (2007): Neoproterozoic to early Cambrian small shelly fossil assemblages and a revised biostratigraphic correlation of the Yangtze Platform (China). *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **254**, 67–99.
- Sun, X., Heubeck, C., Steiner, M. and Yang, B. (2020): Environmental setting of the Cambrian Terreneuvian rocks from the southwestern Yangtze Platform, South China. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **538**, 1–17.
- Torsvik, T.H. and Cocks, L.R.M. (2017): *Earth History and Palaeogeography*. Cambridge University Press, 317p.
- Walcott, C.D. (1911): Cambrian geology and paleontology II. Middle Cambrian Merostomata. *Smithsonian Miscellaneous Collections*, **57**, 17–40.
- Wang, D., Struck, U., Ling, H.F., Guo, Q.J., Shields-Zhou, G.A., Zhu, M.Y. and Yao, S.P. (2015): Marine redox variations and nitrogen cycle of the early Cambrian southern margin of the Yangtze Platform, South China: Evidence from nitrogen and organic carbon isotopes. *Precambrian Research*, **267**, 209–226.
- Wei, W., Frei, R., Gilleaudeau, G.J., Li, D., Wei, G.T., Huang, F. and Ling, H.F. (2020): Variations of redox conditions in the atmosphere and Yangtze Platform during the Ediacaran–Cambrian transition: Constraints from Cr isotopes and Ce anomalies. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **543**, 1–11.
- Wu, Z. and Li, F. (2002): Chapter 7. Research of Palaeogeographic environment of the Chengjiang fauna. in *Early Cambrian Chengjiang Fauna in Eastern Yunnan, China* edited by Chen, L., Luo, H., Hu, S., Yin, J., Jiang, Z., Wu, Z., Li, F. and Chen, A., Yunnan Science and Technology Press, 114–154. (in Chinese with English introduction)
- Xing, L., Zhou, M., Qi, L. and Huang, Z. (2015): Discussion on the PGE anomalies and source materials of K-bentonite (Bed 5) in the Lower Cambrian Meishucun section, Yunnan. *Chinese Journal of Geochemistry*, **34**, 346–361.
- Yang, B., Steiner, M., Li, G. and Keuo, H. (2014): Terreneuvian small shelly faunas of East Yunnan (South China) and their biostratigraphic implications. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **398**, 28–58.
- Yang, B., Steiner, B., Zhu, M., Li, G., Liu, J. and Liu, P. (2016): Transitional Ediacaran–Cambrian small skeletal fossil assemblages from South China and Kazakhstan: Implications for chronostratigraphy and metazoan evolution. *Precambrian Research*, **285**, 202–215.
- Zhang, W. and Hou, X. (1985): Preliminary notes on the occurrences of unusual trilobite *Naraoia* in Asia. *Acta Paleontologica Sinica*, **24**, 591–595. (in Chinese with English summary)
- Zhang, X., Liu, W., Isozaki, Y. and Sato, T. (2017): Centimeter-wide worm-like fossils from the lowest Cambrian of South China. *Scientific Reports*, **7**, 1–11.
- Zheng, Y.F. and Zhang, S.B. (2007): Formation and evolution of Precambrian continental crust in South China. *Chinese Science Bulletin*, **52**, 1–12.
- Zhu, M. and Li, X.H. (2017): Introduction: From snowball Earth to the Cambrian explosion—evidence from China. *Geological Magazine*, **154**, 1187–1192.
- Zhu, M., Zhang, J., Steiner, M., Qian, Y. and Jiang, Z. (2001): Early Cambrian stratigraphy of East Yunnan, southwestern China: A synthesis. *Acta Paleontologica Sinica*, **40**, 4–39.
- Zhu, M., Zhang, J., Steiner, M., Yang, A., Li, G. and Erdtmann, B.D. (2003): Sinian and early Cambrian stratigraphic frameworks from shallow- to deep-water facies of the Yangtze Platform: An integrated approach. *Progress in Natural Science*, **13**, 951–960.
- Zhu, M., Babcock, L. and Peng, S. (2006): Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, palaeobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction. *Palaeoworld*, **15**, 217–222.
- Zhu, M., Yang, A., Yuan, J., Li, G., Zhang, J., Zhao, F., Ahn, S.Y. and Miao, L. (2019): Cambrian integrative stratigraphy and timescale of China. *Science China Earth Sciences*, **62**, 25–60.
- Zhuravlev, A.Y. and Wood, R.A. (2018): The two phases of the Cambrian explosion. *Nature Scientific Reports*, **8**, 1–11.