琉球弧の地球科学的研究—断層と風化・侵食 プロセスに関する研究の課題と展望—

尾 方 隆 幸^{*1, a}・大 坪 誠^{*2}

琉球弧における第四紀テクトニクス研究および地形プロセス研究をレビューした。琉球弧は、ユーラシアプレートにフィリピン海プレートが沈み込む収束境界に沿う島弧で、火山島、山地島(付加体)、隆起サンゴ礁島などに分けられ、それぞれ地形プロセスが異なる。第四紀の地殻変動は、礫性堆積物からなる更新統の石灰岩(琉球層群)に多くの横ずれ断層と正断層を形成している。付加体で構成される山地・丘陵では、さまざまな環境条件に支配された風化・侵食速度を反映しながら、地形変化が進行している。これまでの自然地理学的研究は、琉球弧にみられるいくつかの地形を熱帯・亜熱帯特有の気候地形とみなしてきたが、それらの地形プロセスは気候条件のみならず地質条件も踏まえて再検討されるべきである。今後の研究には、地質条件と気候条件の両者を総合・統合した地形プロセスの理解が求められる。

キーワード：琉球弧，断層，風化，侵食，地形プロセス

I. は じ め に

琉球弧は、九州島から台湾島の間に連なる、全長約 1,200 km の島弧である(図 1)。この島弧は、ユーラシアプレートの下にフィリピン海プレートが沈み込む琉球海溝とほぼ平行に配列する島々によって構成される。琉球弧のユーラシア大陸側には、水深 2,000 m を超える活動的な背弧海盆である沖縄トラフがあり、さらにその西側には東シナ海の大陸棚が広がる。第四紀は、氷河性海面変動と活発な地殻変動によって、現在みられる島弧が形づくられ、またその変動が進行しつつある重要な地質時代にあたり、東アジアの地史においても琉球弧の第四紀学的研究が果たすべき役割は大きい。

琉球弧の地学・自然史については、一般向けの普及書を含め、これまで数多くの書籍が刊行されてきた。地質や地史に関する普及書に、木崎編(1980, 1985)、氏家(1986)および木村編(2002)があり、地形の普及書としては河名(1988)がある。ただし、これらの普及書には、普及書ゆえの簡略化された解説や、著者独自の見解が少なからず含まれている上、科学的理解が古くなった部分

が多くなってきている。最近では、神谷(2007)が琉球弧の自然史について大胆な仮説を提示しているほか、琉球大学理学部「琉球列島の自然講座」編集委員会編(2015)が、生物・地学の両面から琉球弧の自然環境を平易に解説している。

一方、複数の専門家によって最新の研究成果がまとめられた学術書は、刊行時に到達している学説を概観する上で価値が高い。そのような学術書として、サンゴ礁地域の地理学的研究をまとめたサンゴ礁地域研究グループ編(1990, 1992)、日本の地形に関するシリーズの町田ほか編(2001)があり、地理や地形に関して 20 世紀に行われた主要な研究は、これらにほぼ網羅されている。さらに最近になって、地域地質のシリーズとして日本地質学会編(2010)、サンゴ礁研究の知見を整理した日本サンゴ礁学会編(2011)、地誌のシリーズとして野澤ほか編(2012)が刊行され、地質学分野と地理学分野については 2000 年代の研究成果までを概観できるようになった。

しかしながら、琉球弧の島々の地形、特に最近の地球科学を踏まえた陸域の地形形成プロセス(以下では「地形プロセス」)については、最近の研究による知見の更

2019 年 3 月 13 日受付。2019 年 7 月 25 日受理。

*1 琉球大学教育学部 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地。

*2 産業技術総合研究所活断層・火山研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第七。

*a Corresponding author : taka@edu.u-ryukyu.ac.jp

図1 琉球弧と周辺の大地形

尾方・井村 (2018) を改変. △: 山地島, ●: 隆起サンゴ礁島. 等深線の間隔は 300 m.

Fig. 1 Geological and geographical setting of the Ryukyu arc, modified from Ogata and Imura (2018)

△: Accretionary mountain islands, ●: Uplifted coral reef islands. Contour interval is 300 m.

新もあり、前述したような普及書や学術書でなされている解釈には疑問視される部分も出てきている。本稿では、琉球弧の地形、特に地形形成環境と地形プロセスについて、内的営力と外的営力の両面から主要な研究を紹介し、知見の更新が必要ないくつかのトピックスを抽出するとともに、内的営力と外的営力を組み合わせた地形の理解について議論する。内的営力には火山活動と地殻変動があるが、本稿では、地殻変動のみ、特に新生代第四紀の断層運動を対象とし、火山島は対象にしない。外的営力には風化・侵食・運搬・堆積の諸作用があるが、本稿では主に陸域として露出している地形構成物質の風化・侵食プロセスを対象にする。本稿で扱う断層と風化・侵食プロセスは、火山島以外の琉球弧の地形プロセスを論じるにあたり、特に重要な営力である。

II. 島弧の地域地質と島嶼の地形分類

琉球弧の島々は、地球科学の観点からいくつかのタイプに分類できるが、目崎 (1980, 1984, 1985, 1988) による地形の分類は地理学的にも地質学的にも重要であ

り、現在でもしばしば用いられている。目崎の分類では、全ての島がまず「高島」と「低島」に分けられ、その下位区分として、「高島」が「火山島」と「山地島」に、「低島」が「隆起サンゴ礁島」と「台地島」、「砂州島」に、それぞれ細分されている。これらの下位区分は島の成因を踏まえたもので地球科学的な意味を持つが、「高島」と「低島」の大別にはやや難がある。各島の絶対的な標高でみると、必ずしも実態に即していない部分があるためである。例えば、「高島」に分類される伊是名島の最高地点は約 120 m に過ぎず、一方で「低島」に分類される喜界島は 200 m を超える標高がある。こうした事情を踏まえ、尾方 (2017) は、「高島」と「低島」をそれぞれ「山がちな島」と「平らな島」として整理し直したが、本章では目崎の下位区分を参考にした尾方 (2016a) および尾方・井村 (2018) に基づき、奄美群島以南の大部分を構成する山地島と隆起サンゴ礁島の地域地質を整理する。

表 1 に、火山島を除く奄美群島以南の主要な島嶼の地形分類を、面積、最高高度、表層地質などの情報とあ

表 1 琉球弧における主要な島嶼の地形分類

Table 1 Geomorphological classification of the Ryukyu arc, modified from Machida *et al.* (2001)

大分類	中分類	小分類	面積(km ²)	最高地点(m)	最高地点の表層地質	地形分類
中琉球	奄美群島	喜界島	57	224	第四系(石灰岩)	隆起サンゴ礁島(低島)
		奄美大島	719	694	付加体(チャート)	山地島(高島)
		徳之島	248	645	付加体(マトリクス)	山地島(高島)
		沖永良部島	95	246	付加体(玄武岩)	隆起サンゴ礁島(低島)
		与論島	21	97	付加体(マトリクス)	隆起サンゴ礁島(低島)
	沖縄諸島	伊平屋島	21	294	付加体(チャート)	山地島(高島)
		伊是名島	14	120	付加体(チャート)	山地島(高島)
		沖縄島	1183	498	付加体(マトリクス)	山地島(高島)
		伊江島	23	172	付加体(チャート)	隆起サンゴ礁島(低島)
		粟国島	8	97	新第三系(砂岩・泥岩)	隆起サンゴ礁島(低島)
		久米島	59	326	火山岩(安山岩・玄武岩)	山地島(高島)
		渡名喜島	4	179	付加体(石灰岩)	山地島(高島)
		渡嘉敷島	16	227	付加体(マトリクス)	山地島(高島)
		座間味島	7	161	付加体(マトリクス)	山地島(高島)
	南琉球	宮古島	159	115	第四系(石灰岩)	隆起サンゴ礁島(低島)
		伊良部島	29	89	第四系(石灰岩)	隆起サンゴ礁島(低島)
		下地島	9	16	第四系(石灰岩)	隆起サンゴ礁島(低島)
		多良間島	20	34	第四系(石灰岩)	隆起サンゴ礁島(低島)
		石垣島	223	526	深成岩(花崗岩)	山地島(高島)
		竹富島	6	33	付加体(チャート)	隆起サンゴ礁島(低島)
		小浜島	8	99	変成岩	山地島(高島)
		西表島	288	470	新第三系(砂岩)	山地島(高島)
南琉球	八重山列島	黒島	10	14	第四系(石灰岩)	隆起サンゴ礁島(低島)
		与那国島	28	231	新第三系(砂岩)	山地島(高島)
		波照間島	13	60	第四系(石灰岩)	隆起サンゴ礁島(低島)

町田ほか編(2001)を大幅に改変。表層地質は産総研シームレス地質図および筆者らの現地調査に基づく。地形分類は目崎(1985)による。

Surface materials are based on Seamless Digital Geological Map of Japan (1 : 200,000) (<https://gbank.gsj.jp/seamless/>) and our field observation. Geomorphological classification is based on Mezaki (1985). The central and southern parts of the Ryukyu arc consist of Amami, Okinawa, Miyako and Yaeyama islands which include accretionary mountain islands and uplifted coral reef ones.

わせて整理した。琉球弧は、約1,000万年前にユーラシア大陸から分離し、それが左横ずれ断層であるトカラ構造海峽と慶良間海裂(図1参照)によって分断され、現在みられる島弧になったと考えられる(例えば、松本ほか, 1996; 新城, 2014)。これら2つの左横ずれ断層を境に、琉球弧は北琉球・中琉球・南琉球に分けられる。このうち、本稿で対象にする中琉球は奄美群島と沖縄諸島に、南琉球は宮古列島と八重山列島に、それぞれ分けられる。島嶼の面積・標高と、最高地点の表層地質をみると、概ね、付加体からなる比較的大きな島と、第四系の石灰岩からなる比較的小さな島とに分けることができる。目崎による地形分類では、前者が山地島、後者が隆起サンゴ礁島に、ほぼ一致する。

山地島は、火山フロントの太平洋側に位置する、主に堆積岩が地表面を覆う島々である。地質学的には、琉球弧の中ほどに位置する沖縄諸島までは西南日本弧の一部を構成する秩父・三宝山帯と四万十帯の延長とみなされ、その境界は本州から続く仏像構造線で区分される(日本地質学会編, 2010)。これらの地層は海洋プレート

を構成する玄武岩、海洋プレート上で堆積した石灰岩・チャートと、大陸から運ばれた泥岩、砂岩および礫岩からなり、沈み込み帯島弧の付加体である。この山地島の典型例が奄美大島と沖縄島北部で、いずれも仏像構造線が島を東西に分けている。東側に見られる四万十帯では、中生代白亜紀から新生代古第三紀にかけて海溝で変形した砂岩や泥岩がみられ、一部では著しく褶曲している。秩父・三宝山帯では、古生代ペルム紀から中生代白亜紀にかけて形成された玄武岩、石灰岩、チャートなど海洋プレート層序の地層が沈み込み帯で付加し、さらに変形を受け、オリストリスを混在させるメランジュを形成している。

隆起サンゴ礁島は、新生代新第三紀にユーラシア大陸から供給され堆積した泥岩や砂岩を基盤とし、その上位に第四紀に形成された石灰岩がのる新しい島々である。隆起サンゴ礁島を特徴づける第四系石灰岩は、一般に「琉球石灰岩」と呼ばれる(例えば、Hanzawa, 1935; 尾方, 2016a)(以下、本稿では「琉球石灰岩」を用いる)。琉球石灰岩には、サンゴ礁が隆起した礁性石灰岩と碎屑

性石灰岩があり、造礁サンゴや石灰藻類の化石もよく観察される。これらの新第三系・第四系の層序は、奄美群島の喜界島・沖永良部島・与論島、沖縄島中南部、宮古島などに典型的にみられる。

III. 第四紀を対象とした断層研究

琉球弧の島々は、地形の発達過程において断層運動の影響を受けることがあり、それによって形成された断層地形は風化・侵食作用を促進して、さらなる地形変化を生じさせる。琉球弧の断層は、活動的な背弧海盆の拡大に伴う島弧の形成ステージごと、また地域的にも多様である。本章では、琉球弧の各島において、現在の地形プロセスとの関係が強いと考えられる第四紀に活動した主要な断層について、それらの地域的な違いも含めて整理し、これまでの断層研究に関する課題を示す。

琉球弧の多くの島々には、琉球石灰岩を切る断層(図2)が発達しており、多くの地質調査によっても報告されている(図3および図4:例えば、木崎編, 1985; 木村編, 2002)。これらの断層は、波照間島を除いて高角な正断層である(図4)。沖縄島や宮古島など琉球弧の大部分では、北東-南西方向の島弧を高角に切る断層、いわゆる「島弧胴切り断層」が発達し、このエリアは海底部分も含めてブロック化している(木崎編, 1985; Matsumoto *et al.*, 2009; Arai *et al.*, 2014)。この島弧胴切り断層は、琉球石灰岩に乏しい沖縄島北部や奄美大島でも発達しており(木崎編, 1985)、このブロック運動は「うるま変動」と呼ばれている(沖縄第四紀調査団・沖縄地学会, 1975; 木崎・大城, 1977)。なお、これらの断層のいくつかは活断層とされ(活断層研究会編, 1991)、それらの断層

のタイプと調和的な地震活動が起こっている(図5; Kubo and Fukuyama, 2003)。

次に、島弧胴切り断層以外の断層が多く発達する島(喜界島、与那国島および波照間島)の断層の特徴について整理する(図4)。これらの島々では海成段丘が発達しており、その隆起速度は喜界島で約2.1 m/千年(Inagaki and Omura, 2006)、波照間島・与那国島で約0.2~0.3 m/千年(大村・太田, 1992; 大村ほか, 1994)と推定されている。喜界島は、奄美大島の東、琉球弧の島々では最も琉球海溝に近い位置にあり、この島には琉球海溝に平行な走向を持つ正断層群が多く発達する(図4)。喜界島は世界的にみても特に地盤の隆起が活発な地域で、その大きな隆起速度は、琉球海溝での奄美海台の沈み込みによるものと考えられている(Tokuyama *et al.*, 1985)。琉球弧の最西端に位置する与那国島では、東-西、西北西-東南東および東北東-西南西走向の正断層が多く発達し(図4)、島の周辺海域においても同様の断層が発達している(活断層研究会編, 1991)。与那国島とその周辺海域の断層は北へ傾斜するものが多く、沖縄トラフ内の南側に発達する正断層群と類似した走向を持つ(坂井ほか, 1978)。琉球弧の最南端に位置する波照間島では、琉球弧では珍しく横ずれ断層が発達している(図4)。琉球弧の宮古島以西では、フィリピン海プレートがユーラシアプレートに対して斜めに沈み込んでおり(図3)、琉球海溝に近い波照間島での断層運動および波照間島周辺の地震活動は、この斜め沈み込みに伴う影響を受けていると考えられている(Kubo and Fukuyama, 2003)。なお、喜界島、与那国島、および波照間島の断層の多くは、前述した島弧胴切り断層と同様に活断層とされている。

図2 琉球石灰岩を切る正断層(与那国島)

断層面を破線、断層を挟んだ同一層準を*で、それぞれ示す。

Fig. 2 A normal fault cutting the Ryukyu limestone (Pleistocene Ryukyu Group) in Yonaguni island. A broken line shows the fault plane, and asterisks show a same bed.

図 3 琉球弧および周辺海域の地質と断層

木村編 (2002) を一部改変. 白抜き文字で示す島の地質および断層については図 4 を参照.

Fig. 3 Geology and faults around the Ryukyu arc, modified from Kimura (2002)

Quaternary faults are especially shown in Figure 4.

る (活断層研究会編, 1991).

以上のように, 琉球弧の多くの島々にみられる第四紀に発達した断層は, 各島のテクトニックフレームワークでの位置に影響を受けている可能性が高い (図 5). 琉球弧に広く発達する島弧胴切り断層群の主要な成因とし

て, 大きく 2 つの説が提示されている. 一つ目は, 2000 年前後から提案された, 沖縄トラフの拡大による島弧部分の海溝側への張り出しに伴う島弧と平行方向に発達する伸長変形, いわゆる「島弧平行ストレッチング」として沖縄トラフの活動に関連付けるモデルである (Fabbri

図 4 琉球石灰岩を切る断層が発達する主な島の地質

木崎編 (1985) および活断層研究会編 (1991) を一部改変. (a) 喜界島, (b) 沖縄島中南部, (c) 宮古島, (d) 与那国島, (e) 波照間島. ここでは, 琉球石灰岩, 断層および推定断層の分布を示す.

Fig. 4 Quaternary faults cutting the Ryukyu limestone (Pleistocene Ryukyu Group) and geology of uplifted coral reef island in the Ryukyu arc, modified from Kizaki (1985) and Active Faults Research Group (1991)

(a) Kikai island, (b) Central and southern parts of Okinawa island, (c) Miyako island, (d) Yonaguni island and (e) Hateruma island.

and Fournier, 1999; Fournier *et al.*, 2001; Kubo and Fukuyama, 2003). その一方, Ujiie (1994) は, 島弧胴切り断層群の形成を, 琉球石灰岩が堆積する前の島弧の隆起運動に求め, 沖縄トラフの陥没と関連して議論している. 島弧胴切り断層群の形成プロセスについて両者の食い違いが生じる理由としては, 島弧胴切り断層群の形成開始時期が不明確であること, 島弧胴切り断層群を活動させる過去の地殻応力に関する情報が不足していることが挙げられる. 前者の断層形成時期に関しては, 断層

の活動開始時期を制約する鍵となる第四系の年代層序の解像度が不足していることが大きい. 琉球石灰岩は, 日本列島の第四系のように火山灰を挟在させることが稀で, 詳しい年代層序を立てることが困難である. 琉球弧の各島においては, 層相解析, 年代測定, および微化石層序学的研究によって, 琉球石灰岩が細かく区分され, 酸素同位体ステージとの対比が試みられており (例えば, Konishi *et al.*, 1974; 大村・太田, 1992; Iryu *et al.*, 2006; Yamamoto *et al.*, 2006), それらの地層区分

図 5 琉球弧における地震と応力場

(a) 地震のメカニズム解、(b) 応力場、Kubo and Fukuyama (2003) を一部改変。(b) 中の黒色棒は地震のメカニズム解から推定した T 軸 (引っ張り軸) の方向を示す。K: 喜界島, O: 沖縄島, M: 宮古島, Y: 与那国島, H: 波照間島, NIED のメカニズム解は防災科学技術研究所カタログのデータ (1997 年 1 月～2001 年 10 月) を、HCMT のメカニズム解は HCMT カタログのデータ (1977 年 1 月～2001 年 4 月) を、それぞれ示す。

Fig. 5 Seismicity and stress field around the Ryukyu arc

(a) Earthquake focal mechanisms (depth <30 km), and (b) orientations of T-axes (black lines) estimated from earthquake focal mechanisms, modified from Kubo and Fukuyama (2003). K: Kikai island, O: Okinawa island, M: Miyako island, Y: Yonaguni island, and H: Hateruma island. NIED earthquake focal mechanisms are data from the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention catalog (Jan. 1997–Oct. 2001). HCMT earthquake focal mechanisms are data from the HCMT catalog (Jan. 1977–Apr. 2001).

と島弧胴切り断層との切断関係を詳しく検討する必要がある。後者の応力情報は、島弧の発達過程を議論する際に必要な原動力を知るための情報である。例えば、Goto *et al.* (2018) のような地表(海底も含む)に現れた断層の検討のみでは不十分であり、応力の情報に基づく議論が不可欠である。琉球弧では、露頭規模の小断層群の姿勢やすべり方向を「断層スリップデータ」として取り扱う応力逆解析法 (Stress tensor inversion : Angelier, 1984) による検討が、中琉球の沖縄島や南琉球の島々でなされている (Kuramoto and Konishi, 1989 ; Fabbri and Fournier, 1999 ; Fournier *et al.*, 2001)。しかしながら、これまでの研究が用いた応力逆解析法は、取り扱う小断層群が単一の応力によって活動したと仮定している (例えば、Etchecopar *et al.*, 1981 ; Angelier, 1984 ; Michael, 1984)。現在に続く沖縄トラフの本格的な活動は約 200 万年前から始まったとされており (Shinjo *et al.*, 2000)、背弧海盆の拡大を伴いながら徐々に発達しつつある島弧は、最近 200 万年間でさまざまな応力を経験していると考えられる。琉球弧のような非常に活動的な島弧では、第四紀における詳しい応力史を明らかにすることが重要であり、今後は複数の応力を記録した「不均一な断層スリップデータ」を取り扱うことが可能な応力逆解析法 (例えば、Yamaji, 2000) を導入することが必要である。

ところで、これらの正断層群は、沈降運動の場で発達したものなのだろうか。中琉球と南琉球を境する慶良間海裂では、正断層運動によって、北東側 (中琉球側) の琉球石灰岩が 1,500 m も落ち込んでいることが報告されている (Matsumoto *et al.*, 2009)。また、沖縄トラフ内ではグラベン線の発達を示す正断層群が多く認められており (例えば、木村, 1983 ; Sibuet *et al.*, 1998)、これらは背弧海盆拡大に伴う沈降運動の場で形成された断層である。その一方、現在陸域として存在する琉球弧の島々には、第四紀更新世における海成段丘の発達に伴い、酸素同位体ステージの異なる琉球石灰岩が堆積している (例えば、大村・太田 1992 ; Ota and Omura, 1992 ; 太田ほか, 2000)。前述した正断層群は、段丘化した琉球石灰岩を切っている断層、もしくは、異なる形成ステージの段丘どうしを境する断層である。これらのことは、琉球石灰岩を切る正断層群が、現在進行形で続く隆起運動の場において発達したものであることを示唆する。つまり、琉球弧で第四紀に発達する正断層群は沈降運動の場で形成された断層とは考えにくく、このことに留意して断層形成プロセスを理解しなければならない。

琉球弧が隆起運動の場であることは、断層による変位が地表付近の風化・侵食の開始や再開を引き起こしやすいことを意味する。

IV. 地形プロセス研究

地形変化は、地表面を構成する地層や岩石が風化・侵食プロセスを受けることによって進行する。こうした侵食地形は、地形構成物質、地形形成営力、および地形変化継続時間の関数で決まる (例えば、松倉, 2008)。琉球弧の山地・丘陵でもこれらの変数を整理しながら検討する必要があるが、琉球弧に広くみられるカルスト地形に関しては研究成果が蓄積されているものの、それ以外の地形プロセスについては、Matsukura and Yatsu (1982) や Maekado *et al.* (1982) などを除き、あまり研究が行われていない。本章では、まず石灰岩の風化・侵食とカルスト地形に関連する地形プロセス学的研究をレビューし、続いて尾方・井村 (2018) に基づき、カルスト以外の地形と地形プロセスについて検討を加える。

1. 石灰岩の風化速度と生物風化

石灰岩が風化・侵食を受けることによって形成されるカルスト地形では、風化・侵食プロセスとその速度を明らかにすることが最も重要で、それらを求める野外観測・実験や室内実験が数多く行われてきた。琉球弧に広くみられる第四系の琉球石灰岩では、隆起サンゴ礁にのり上げた巨礫の台座岩が、喜界島 (松倉ほか, 2005 ; Matsukura *et al.*, 2007 ; 早川ほか, 2009)、沖縄島 (青木ほか, 2006)、石垣島 (青木ほか, 2007) で確認されている。特に喜界島では、台座岩から石灰岩表面の削剥速度が推定され、205 mm/千年と見積もられた。この石灰岩の削剥速度を考慮すると、喜界島の隆起速度は、これまで得られてきた知見 (例えば、Inagaki and Omura, 2006 ; 尾方, 2015) よりも 1 割ほど大きい可能性がある。地形変化を総合的に解明するためには、隆起速度や風化・侵食速度を個別に求めるのみではなく、両者の組み合わせで考えなければいけないことは明らかで、今後はそのような方向性の研究も必要である。

琉球弧のような温暖で多雨な地域では、風化に対する生物の効果も重要である。しかしながら、琉球弧に限らず、生物風化を対象にした地形学的研究はこれまでにほとんど行われてこなかった (Song *et al.*, 2007, 2010 ; 宋・松倉, 2008 ; 松倉, 2017)。風化研究では石造建築物を用いた野外実験が盛んに行われているが、それらの石造物に与える生物風化の影響についてもあまり研究がない (Inkpen *et al.*, 2012 ; 藁谷, 2017)。これまでの研

究事例をみても、バクテリアが溶解速度を大きくさせる場合 (Song *et al.*, 2007; Kawano and Tomita, 2011), 地衣類の被覆が溶解速度を小さくさせる場合 (McIlroy de la Rosa *et al.*, 2014) などがあり, 風化に対する生物の効果は複雑である。地形変化の準備段階としての風化を正しく理解するためには, 風化プロセスを複雑化させる生物の効果を評価することが重要であり, Sakiyama and Matsubara (2018) が砂岩と石灰岩の不整合において生物風化の効果を評価したような, 琉球弧の地の利を活かした研究の展開が求められる。

2. 石灰岩の溶解と気候依存性

琉球弧のカルスト地形が注目される理由の1つに, カルストの気候依存性がある。琉球弧は, 日本の中では特に温暖で多雨な気候であり, 地理的な比較対象として重要な位置づけにあることは事実である。そのような観点から, 石灰岩の溶解速度を地域的に比較する野外実験が行われ (例えば, 松倉・八反地, 2006; 羽田・藁谷, 2017; 八反地・松倉, 2017), 日本国内では亜熱帯環境下の事例として沖縄島や南大東島が実験地の1つとされた (漆原, 1991; 漆原ほか, 1999; Urushibara-Yoshino *et al.*, 1999)。石灰岩の溶解速度が降水量と関係することは物質収支の観点 (Smith and Atkinson, 1976) から明らかであるが, 単純に気候帯と対応するわけではない。例えば, 漆原 (1991) の実験は, 沖縄島での溶解速度が日本の中でも小さいことを示している。また, 羽田・藁谷 (2017) は, 円錐カルストやタワーカルストを熱帯地形としながらも, その一方で気温と溶解速度が無関係であるデータを示している。八反地・松倉 (2017) でも強調されたように, 溶解速度に影響するグローバルな気候条件としては, 流域での物質収支を大きくコントロールする降水量が重要であろう。

カルストの気候依存性を議論するためには, 地質学的時間スケールを考慮する必要もある。石灰岩の溶解速度や削剥速度については研究が蓄積されてはいるものの, 琉球弧における定量的なデータは限られる。また, 野外実験で測定される溶解速度が, 氷期・間氷期サイクルを包含する $10^4 \sim 10^5$ 年の時間スケールでの地形変化にどの程度の寄与をもたらすかも議論が必要である。風化環境に限定しても数十万年にわたる気候変動の影響を強く受けているはずであり (西山, 2018), 円錐カルストやタワーカルストといった地形の形成になると, 現在より寒冷な氷河時代の地形変化を 100 万~200 年以上にわたって受けているとみるべきである。グローバルな環境変動の影響と地形プロセスの時間スケールを踏まえる

と, 現在の気候帯のみで風化・侵食環境を議論することは適切とはいえない。

比較的時間スケールでの地形変化においては, 宇宙線生成核種 (^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl など) を用いた年代測定が注目されており, あらゆる地域で研究が進んでいる。日本のいくつかの地域でピナクルの削剥速度を見積もった Matsushi *et al.* (2010) によれば, 琉球弧で求められた削剥速度は, 沖縄島北部・辺戸で $49 \pm 3 \text{ mm/千年}$, 沖縄島北部・山里で $48 \pm 4 \text{ mm/千年}$ であったが, 北海道ではそれを超える削剥速度 (中頓別で $55 \pm 4 \text{ mm/千年}$, 士別で $60 \pm 4 \text{ mm/千年}$) が求められている。この結果は, 温暖な気候だから溶解を主因とする削剥速度が大きいという単純な事象ではないことを意味しており, 尾方 (2016b) や松四 (2017) でも指摘されているように, 物理的風化と化学的風化の相互作用としてとらえることが重要である。

3. カルスト地形の再検討

地形形成プロセスは気候条件のみで決まるわけではなく, 地質条件と組み合わせて理解する必要がある。琉球弧のカルスト地形は, これまで主に熱帯・亜熱帯に特有の地形と解釈され, 詳しい検討がなされないまま一般にも普及・定着してきた。目崎 (1984) および河名 (1988) は, 沖縄島では土壤中の二酸化炭素濃度が日本本土より高く, 溶解速度が大きいと, 熱帯特有の円錐カルストが形成されているとしている。前門 (1990, 1996) も, 琉球弧のカルストを熱帯地形としており, それらを引用した町田ほか編 (2001) でも同様の解説がなされている。しかしながら, これらの研究で根拠とされてきた二酸化炭素濃度のうち, 比較対象とされた秋吉台の低い値 (目崎, 1984) は, 人為的改変を受けた土壤のものであることに留意しなければならない。秋吉台では農民が「山焼き」を行っており (庫本, 1990), 土壤中の二酸化炭素濃度を高める生物活動は自然条件下のものとはいえない。

琉球弧のカルスト地形を熱帯・亜熱帯の地形とする解釈は, 円錐カルストは熱帯地形の指標であるという前提に立っているが, この前提もグローバルな視点から地形学的に再検討する必要がある (Ogata, 2015)。三宝山帯に位置する沖縄島の本部半島には, 古生界ペルム系の本部層 (塊状石灰岩) と, 中生界三畳系の今帰仁層 (層状石灰岩) がある。これらのうち, 層状石灰岩の今帰仁層は円錐カルストを形成しているが, 塊状石灰岩の本部層に明瞭な円錐カルストは認められず, わずか数 km ほどしか離れていない地形の違いを気候条件で説明することはできない。今帰仁層に形成された円錐カルストの斜

図 6 沖縄島・本部半島に分布する円錐状地形の斜面物質
物理的風化を強く受けていることが示唆される。

Fig. 6 Surface materials on a slope of a cone shaped limestone hill of Motobu peninsula located in the northern part of Okinawa island
Many boulders indicate physical disintegration of limestone.

面は、物理的風化を強く受けたとしか考えられない巨礫によって覆われている(図6)。この斜面物質は、石灰岩に発達する層理面や節理に沿って破碎されたと考えられる岩塊が累積したものであろう。このように、本部半島に露出する今帰仁層の層状石灰岩は、化学的な溶解だけではなく、層理面や節理に沿った物理的な破碎も受けやすいはずである(尾方, 2016b)。

琉球弧でタワーカルストとされてきた地形についても、再検討が必要である。荒川・三浦(1990)は、沖縄島最北端にある辺戸御嶽(標高248m)の地形を「中国・桂林で典型的に発達しているタワーカルスト地形と同種の地形」としているが、熱帯アジア各地にみられる典型的なタワーカルストとは地形が大きく異なる。熱帯アジアの典型的なタワーカルストの場合、斜面の基部に落石による巨礫が認められることは稀で、ほぼ垂直の斜面が溶食によって形成されつつあることを示している(尾方, 2018)。一方、今帰仁層に形成された辺戸御嶽のカルストでは、ほぼ垂直な斜面は認められるものの、その基部に崖錐が形成されており、物理的風化に伴う落石が崖で発生している事実を示唆している(図7)。荒川・三浦(1990)は「上部斜面は垂直で露岩からなる40~50m岩壁をなし、下部は判然とした傾斜変換点でもって緩やかな斜面へ移行する。この下部斜面にはオオバギなどの琉球列島の石灰岩地域特有の植生で覆われているが、森林下には堆積物がほとんどなく、ただ崩壊した岩屑のり、エプロン状に岩体を取り囲んでいる」と説明してい

る。この「岩屑」は落石による崖錐堆積物そのもの、「エプロン状の地形」は崖錐そのものといえよう。さらに、辺戸御嶽の崖は仏像構造線による衝上断層であることを理解する必要がある。辺戸御嶽では、秩父帯の今帰仁層が四万十帯の名護層の上にのり上げており、下盤側の名護層分布域に今帰仁層の層状石灰岩からの落石が堆積し、崖錐が形成されている(図7)。

以上のように、琉球弧のカルストにおいて強調されてきた気候依存性には、議論が不十分な点が多い。これまでの研究を集約すれば「溶解速度の小さい日本本土では傾斜の小さい台地状のカルストになり、溶解速度の大きい琉球弧では傾斜の大きい円錐カルストやタワーカルストができる」とまとめられるが、その解釈には見直しが必要である。沖縄島北部にみられる急傾斜のカルスト地形、具体的には本部半島の円錐状の地形や辺戸御嶽のタワー状の地形は、地殻変動と物理的風化の影響を強く受けた斜面で構成されているとみるべきである。尾方(2018)は、熱帯カルストの指標として、層状石灰岩に形成された円錐カルストを十分条件とすべきではなく、塊状石灰岩に形成されたタワーカルストを必要条件とすべきであることを指摘した。気候地形帯としての熱帯・温帯の境界を定めることは、グローバルな視野から慎重になされるべきである。物理的風化については、廣瀬・玉城(2011)が本部半島の円錐カルストで温度の連続観測を行っており、今後は熱風化の可能性も検討する必要がある。

4. カルスト以外の侵食地形

琉球弧の地質は、秩父・三宝山帯の付加体(玄武岩、石灰岩およびチャート)、四万十帯の付加体(粘板岩や千枚岩など)、新第三系の堆積岩(泥岩や砂岩)、および第四系堆積物(琉球石灰岩など)に大別され、岩質によって卓越する風化・侵食作用は多様である。例えば、前述した石灰岩の溶解のほか、砂岩の塩類風化や泥岩の乾湿風化など、岩質ごとに発生しやすい特定の風化プロセスが認められる。したがって、地質帯の違いが地形プロセスに影響を与えることは間違いない。

秩父・三宝山帯には、海洋プレート層序を構成していた複雑な地質が隆起・侵食を受けた結果として、山地が形成されている。沖縄島北部では本部ユニット(中生界三畳系および古生界ペルム系)、奄美大島では湯湾ユニット(中生界三畳系および古生界ペルム系)とされる付加体で(日本地質学会編, 2010)、泥質岩を主体とする基質の中に海洋プレート層序を構成する玄武岩・石灰岩・チャートが混在する。それぞれの岩石の風化抵抗性

によって異なる地形が形成されるが、玄武岩は分布域が小さいため、地形としての特徴を把握しにくい。一般的には、付加体のチャートや石灰岩は風化・侵食されにくく、組織地形として急斜面を保っていることが多い(例

えば、寺岡ほか, 1986)。このような岩石制約地形は、仏像構造線を遠望する図7にも明確に示されている。

四万十帯を構成する沖縄島北部や奄美大島には、主に海溝を充填していた堆積岩や、それが続成作用を受けた粘板岩や千枚岩が隆起・侵食を受けて形成された山地や丘陵が広がる。この地形をつくるのは、沖縄島北部では嘉陽層(新生界古第三系始新統・漸新統)および名護コンプレックス(中生界白亜系)、奄美大島では和野層(新生界古第三系始新統)および奄美コンプレックス(中生界白亜系)とされる地層で(日本地質学会編, 2010)、前者は主にタービダイト、後者は主に粘板岩や千枚岩からなる。粘板岩や千枚岩は物理的に風化しやすく、さらに高温で多雨な気候の影響も受けて、速やかに侵食が進むと考えられる。例えば、沖縄島北部に多い千枚岩の地域では、台風などの降雨イベント時に多数の小規模な表層崩壊が繰り返されていることを毎年のように確認している。こうした表層崩壊と、崩壊した岩屑が小河川によって運び去られることによって、現在の地形が形成されているとみられる。

新第三系の海成堆積岩としては、八重山層群と島尻層群がある。中新統の八重山層群は、ユーラシア大陸から近い浅海底の堆積環境で形成された砂岩優勢の砂岩・泥岩互層であり、中新統・鮮新統の島尻層群もユーラシア大陸起源の陸源性堆積岩で、細粒の堆積物を主体としている(日本地質学会編, 2010)。琉球弧のいくつかの島々、具体的には沖縄島中南部、西表島および与那国島では、これらの堆積岩が風化・侵食を受けた地形が地表面を構

(a)

(b)

(c)

図7 沖縄島・辺戸御嶽の地形と斜面物質

(a) 辺戸岬から望む辺戸御嶽周辺の地形。写真奥の4つのピークが秩父帯の石灰岩で、崖の基部に崖錐とみられる安息角の斜面が認められる。ピーク左側のなだらかな地形は四万十帯で、境界には仏像構造線がある。(b) 辺戸御嶽の地形。石灰岩が仏像構造線に沿ってほぼ垂直な崖を形成し、その下部に安息角に近い斜面が認められる。(c) 辺戸御嶽の斜面末端付近の斜面物質。落石によると考えられる多数の岩塊が堆積しているが、最近の地形変化は活発でないと考えられ、植生と土壌が発達し、安定化している。

Fig. 7 Landform and surface materials of Hedou limestone mountain at the northernmost Okinawa island

(a) Landform around the Hedou mountain. A geological lineament of Butsuzo Tectonic Line between Chichibu and Shimanto belts controls weathering and erosion processes. (b) Landform of the Hedou mountain. Rock falls from limestone cliffs form talus slopes (ca. 35°). (c) Surface materials of the Hedou mountain. Limestone boulders resulting from rock falls lie on the foot of the talus slope.

成している。砂岩を主体とする八重山層群が地表に露出し、それが侵食された地形は、西表島や与那国島の山地・丘陵でみられる。河名 (1988) は、西表島の侵食地形を盆状谷と呼び、高温多雨な環境による深層風化の影響を受けたものとしている。島尻層群の侵食地形は、沖縄島中南部の丘陵で広く認められ、この地形において重要なのは乾湿風化 (スレーキング) である (Maekado *et al.*, 1982; Matsukura and Yatsu, 1982)。地すべりによる移動土塊の残留強度を決める要因が配向性粘土鉱物であることを解明した Nakamura *et al.* (2010) は、島尻層群の移動土塊はケイ酸塩鉱物 (スメクタイト、パーミキュライト、クロライト、白雲母) の含有率が 30~50%、うちスメクタイトは全鉱物中の 8~14% であることを示した。スメクタイトのような 2:1 層状ケイ酸塩鉱物が多く含まれる島尻層群の泥岩は、それらの粘土鉱物の膨潤性により速やかに乾湿風化が進行する。さらに細かく破碎された斜面物質に含まれる塑性指数の高い粘土鉱物の影響もあり、中村ほか (2012) が詳述したような侵食作用が繰り返し発生していると考えられる。

以上に述べた、石灰岩以外の付加体や海成堆積岩の侵食地形のうち、島尻層群の地すべりを除いては、前述したように研究が遅れ気味といえる。図 7 の事例からもわかるように、基本的には、秩父・三宝山帯の付加体より、四万十帯の陸源性堆積岩 (主に砂岩と泥岩) の方が風化に対する抵抗性は低く、侵食されやすい地質条件であると推察される (尾方・井村, 2018)。今後は、地形プロセスおよび地形発達の両面からの詳しい研究が望まれる。さらに、島尻層群が分布する地域の地すべりなどは、地形災害として人間活動に深く関係する場合もある。例えば、佐々木ほか (1990) は、地質的な弱面がすべり面に転化しているが、地すべり発生の直接的な引金の 1 つとしてせん断応力の増加を伴う人為的な地形改変を挙げており、陳ほか (2007) も人為的な地形改変に伴う応力解放の可能性を指摘している。今後は、地球科学の成果を蓄積させながら、農学・工学や社会科学の知見と統合させるような応用科学への展開も求められる。

V. 内的営力と外的営力を組み合わせた地形の理解へ

1. 地形形成環境と隆起・侵食

琉球弧は、日本列島の中では最も低緯度に位置するため、気候地形学の観点から注目されやすい地域といえる。しかし、カルスト地形の気候依存性に再検討が必要なことを論じてきたように、地形プロセスに対する気候

条件の評価は慎重になされる必要がある。前述した石灰岩の風化・侵食プロセス以外にも、砂岩の風化速度が温帯でも熱帯でもあまり変わらない結果が得られるなど (Waragai, 2016; 藁谷, 2017)、現象は複雑である。さらに風化速度が全体としての地形変化、すなわち侵食・運搬・堆積プロセスに地殻変動を加味した積分的な地形変化にどの程度寄与するのかも、正しく評価されなければならない。

琉球弧の地形形成環境は、概して温暖で多雨な気候に特徴づけられる。地理的スケールを狭めれば、琉球弧の中では南琉球の方がやや高温ではあるが、地形の影響も受ける降水量の違いは緯度帯では説明しにくい。例えば、アメダス地点の年降水量および年平均気温の平年値 (1981~2010 年) をみると、奄美大島・名瀬では 2837.7 mm, 21.6℃, 沖縄島・那覇では 2040.8 mm, 23.1℃, 宮古島では 2021.0 mm, 23.6℃, 石垣島では 2106.8 mm, 24.3℃である。しかし、これまで論じてきたように、地質学的時間スケールではグローバルな気候変動があるため、風化・侵食速度も時間的に一定ではない。地形プロセスにおいて問題になる気候変動は全球的なもので、そのような寒冷化や温暖化は琉球弧全域に及ぶため、琉球弧各地の風化・侵食プロセスを比較する際、因子としての気候環境には大きな違いはないとみてよいであろう。

地形プロセスにおいては、時間的要因、すなわち地形構成物質がどれくらいの時間をかけて風化・侵食を受けているかという観点で考えることも重要である。地形変化継続時間を考えるときの基本情報は、まずは地層の年代であるが、地層が形成された時代と、地形変化が始まった時代、すなわち陸域に露出して風化・侵食を受け始めた時代が一致しないことには注意を要する。四万十帯の山地・丘陵には、アマミノクロウサギをはじめとする大陸起源の生物種が残存しており (尾方, 2017)、少なくとも数百万年の時間にわたって陸域であり続けた可能性が高い。一方で、現在の地形プロセスを考えると、これらの山地・丘陵の侵食速度は大きいとみられ (尾方・井村, 2018)、陸域が長期間にわたり継続し続けるためには隆起イベントが頻繁に起こっている必要がある。新生界の八重山層群については、陸上に露出して侵食を受け始めたのは新第三紀の後半以後である。より新しい地層である島尻層群は、沖縄トラフの拡大が本格的に始まる前 (約 1000 万年~200 万年前) の堆積岩で、陸上に露出して侵食を受けたのは更新世に入ってからである。したがって、Maekado *et al.* (1982) が論じた泥岩の丘陵は、地質学的にはかなり短い時間で形成された侵食地形

と考えられる。

琉球弧の山地・丘陵に関するこれまでの研究の中には、仮説の域を出ないものや、知見が古く見直しが必要なものが散見される。その代表的なものが隆起準平原であろう。山地島の奄美大島などには定高性を持った尾根が形成されていることがあり、それらの地形は隆起準平原と解釈されている（例えば、佐藤, 1959; 町田ほか編, 2001）。しかしながら、デービスの侵食輪廻モデルを前提とした地形の解釈には再考が必要で（尾方・井村, 2018）、今後の詳しい研究が求められる。また、新生界が侵食された地形についても、新第三系の八重山層群・島尻層群と第四系の琉球層群との関係は不整合であり、第四紀に入ってからの隆起でいったん侵食されたことを示唆しているが、詳しい地史はわかっていない。第四紀の地形発達・地形プロセス研究は、これらの諸問題に取り組んでいく必要がある。

2. 内的営力（断層）と外的営力（風化・侵食）との関係

最後に、断層運動と風化・侵食との関係について、いくつかの課題を指摘する。両者の因果関係としては、断層が風化・侵食プロセスに影響することはあっても、その逆は考えにくい。そこで、本稿では「断層が風化・侵食にどのように影響しうるか」という観点に絞って議論する。テクトニクスが風化プロセスをコントロールする要因のひとつであることは間違いなく（柏木, 2017）、主たる地形プロセスが内的営力から外的営力に移行する過程を分析する上で、この議論は極めて重要である。

物理的風化にしても化学的風化にしても、岩石の内部や表面において水が介在するプロセスが基本になるため、まずは内的営力で形成された断層が水の動きにどう影響するかを考える必要がある。断層面に沿って周囲の岩石が破碎されている断層破碎帯は、一般に断層コアとダメージゾーンに分けられる（例えば、Chester and Logan, 1986 ; Caine *et al.*, 1996 ; Cello *et al.*, 2001 ; Choi *et al.*, 2016）。断層コアは断層変位の大部分を賄う部分で、断層コアの周辺には亀裂が密集するダメージゾーンが発達する（Choi *et al.*, 2016）。断層破碎帯における透水性は、断層破碎帯の物理性によって高くなったたり低くなったりする。前者の例として、ダメージゾーンで開口亀裂が発達することで岩盤に比較的大きな規模の間隙が生じ、その間隙に水が集中しやすくなることがある（Billi *et al.*, 2003 ; Bense *et al.*, 2013）。後者の事例には、断層コアに断層粘土が厚く連続して地下水の浸透や流動が遮断されることがある。実際、恵那山トンネル

のような山岳トンネル掘削の際に、厚い断層粘土を突破した瞬間に大出水した事例がある（池田・大島, 1975 ; 高橋ほか, 1985）。露頭スケールでの亀裂中の水の動きを議論した横山・西山（2017）および西山・横山（2017）は、亀裂中の流れが溶解に対して寄与することを指摘する一方で、亀裂ネットワークにおいて一部の亀裂だけが流路になる可能性があることも指摘しており、室内実験やシミュレーションによって間隙での反応・輸送過程を詳細に解明していく必要がある。

琉球弧の場合、琉球石灰岩を切る正断層が数多く存在し、また地表において琉球石灰岩の断層変位が認められる（図 4）。正断層活動は断層コア周辺に開口亀裂を伴う場合が多く、断層面およびその周辺が流体の経路になりやすい（Sibson, 2000）。琉球石灰岩の間隙率は約 15～48% と高く（Maekado, 1989 ; 宮城・小宮, 2003）、比較的大規模な亀裂を生じさせる断層の存在は、まとまった水の移動経路を提供している可能性がある。すなわ

図 8 宮古島の石灰岩堤と模式断面図
写真中の破線は正断層の位置を、点線は硬化作用の縁を、それぞれ示す。

Fig. 8 Landform of limestone walls
(a) Limestone walls in Miyako island, and (b) schematic cross section of a limestone wall. Broken and dotted lines in (a) show cliffs formed by the normal faults and edges of the hardened limestone, respectively.

ち、琉球石灰岩を切る断層は、石灰岩の溶解を促進させる効果がある。この効果は、琉球石灰岩が分布する地域において、断層面の姿勢の空間的分布と鍾乳洞の発達との度合い(地下水系の密度)を詳細に明らかにすることによって、より具体的に議論できるようになるであろう。

断層が地表面に露出する場合、断層運動そのものが内的営力となり、直接的な地形変化を引き起こす。その断層に垂直変位があれば、断層面に新たな崖が出現し、その面が新たに風化・侵食を受けるようになる。すなわち、断層による変位が外的営力による地形変化のスタートを意味する場合がある。新たな面が露出することで斜面の安定状態(Terzaghi, 1950)を喪失する場合があります。断層運動後に斜面崩壊が新たに生じることも考えられる。琉球石灰岩の断層崖は沖縄島南部や宮古島などに明瞭に認められるが、実際には新鮮な崖を保っている場合が多い。琉球石灰岩は、第四系とはいえず、固結した堆積物として存在している。また、前述したような断層面に沿った地中への水の浸透により、断層崖の表面ではむしろ風化プロセスが作用しにくくなる可能性がある。琉球石灰岩にしばしばみられる石灰岩堤(荒川ほか, 1987; 今泉ほか, 1989; 荒川・三浦, 1990)も、その一例といえる。石灰岩堤は、炭酸カルシウムと水との反応によって表面硬化作用が発生し、それが風化に対する抵抗性を高め、断層崖が侵食から取り残された地形である(Flint *et al.*, 1953)。島弧とほぼ直交してのびる宮古島の高角正断層群(図4)では、石灰岩堤が明瞭なリニアメントを形成している(図8)。これらの地形プロセスを明らかにするためには、琉球石灰岩を切る断層崖における詳しい調査で事例を蓄積する必要がある。

VI. ま と め

琉球弧で行われてきたこれまでの研究を概観すると、主に、断層については構造地質学を専門とする研究者、断層地形については変動地形学を専門とする研究者、風化・侵食については地形プロセス学を専門とする研究者といったように、それぞれ個別になされてきた傾向がある。しかしながら、それらの地球科学的事象は実際には連続している。地殻にかかる応力は断層を発生させ、断層は地表面に変位を生み、地表面の変位は風化・侵食プロセスを開始または再開させる。地形を総合的に理解するためには、個別の事象を切り離した調査・解析だけではなく、個別分野で蓄積されてきた知見を統合させる試みも必要である。そのような領域横断的な議論の場は、国内では日本地球惑星科学連合(JpGU: Japan Geosci-

ence Union)によって提供されるようになったが、少なくとも琉球弧の地球科学研究については、学際的な議論がまだほとんどなされていない。現在進行形で島弧が発達しながら地形変化が進みつつある琉球弧では、とりわけ学際的な視点から地形を解明していく必要がある。

ところで、学際的な検討によって地球科学各分野で得られた知見を総合すると、個別研究の相互でみられる「見かけ上の矛盾」が発覚することもある。すなわち、実際の事象には科学的真理が存在するはずであるが、現在の限られた知見からは統一的な理解が難しく、あたかも矛盾しているようにみえてしまうことがある。例えば、筆者らが最近野外調査を行っている与那国島では、サンゴ礁が隆起した海成段丘が地表面の一部を構成している(Ogata *et al.*, 2019)。その一方で、背弧海盆の拡大に関連した引っ張りのテクトニクスによる正断層が地表面の一部を沈降させている可能性がある(大坪ほか, 2019)。与那国島では風化プロセスの調査・解析もなされているが(Ogata, 2019)、それと地殻変動との関係は、まだほとんど検討されていない。現在みられる与那国島の地形を総合的に解釈しようとしても、筆者らはまだ合理的な説明ができない状況にある。このような状況は、与那国島のみではなく、琉球弧の他の島々にも認められるだろう。琉球弧で行われてきたテクトニクスおよび地史の研究については、別稿で詳しくレビューすることにしたい。

今後の研究では、個別分野での分析的な調査・解析とあわせて、領域横断的な知見の統合を試み、相互にみられる「見かけ上の矛盾」を洗い出し、それらをひとつひとつ解決していく作業も求められる。第四紀学には、地質学や地理学の多くの分野を包含している長所があり、琉球弧においても第四紀学を軸にした領域横断的な研究が増えていくことを期待したい。

謝辞 本稿をまとめるにあたり、琉球大学戦略プロジェクト研究経費(「琉球島嶼の水循環と琉球石灰岩に関連した学際的研究」および「岩内微生物と地盤災害の関連性評価と革新的な地盤修復技術の開発」)を使用した。また、投稿原稿は、匿名査読者の示唆に富むコメントによって改善された。記して謝意を表する。

引 用 文 献

- Angelier, J. (1984) Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research*, 89, 5835-5848.

- 青木 久・前門 晃・若月 強・小暮哲也・松倉公憲 (2006) 沖縄島荒崎海岸の迷子石カサカンジャーの定置時期に関する一考察. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 7, 53-58.
- 青木 久・春田知実・松四雄騎・前門 晃・松倉公憲 (2007) 石垣島における台座岩の形成条件と形成速度. 筑波大学陸域環境研究センター報告, no. 8, 35-40.
- Arai, K., Inoue, T., Ikehara, K. and Sasaki, T. (2014) Episodic subsidence and active deformation of the forearc slope along the Japan Trench near the epicenter of the 2011 Tohoku Earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 408, 9-15.
- 荒川達彦・三浦 肇 (1990) 溶かされたサンゴ礁—カルスト地形—, サンゴ礁地域研究グループ編「熱い自然—サンゴ礁の環境誌—」: 215-229, 古今書院.
- 荒川達彦・大城直樹・井川裕之 (1987) 琉球列島における石灰岩堤及び石灰岩屏について. エリア山口, no. 17, 16-31.
- Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O. and Scibek, J. (2013) Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, 127, 171-192.
- Billi, A., Salvini, F. and Storti, F. (2003) The damage zone-fault core transition in carbonate rocks : implications for fault growth, structure and permeability. *Journal of Structural Geology*, 25, 1779-1794.
- Caine, J.S., Evans, J.P. and Forster, C.B. (1996) Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1025-1028.
- Cello, G., Tondi, E., Micarelli, L. and Invernizzi, C. (2001) Fault zone fabrics and geofluid properties as indicators of rock deformation modes. *Journal of Geodynamics*, 32, 543-565.
- Chester, F.M. and Logan, J.M. (1986) Composite planar fabric of gouge from the Punchbowl fault zone, California. *Journal of Structural Geology*, 9, 621-634.
- 陳 伝勝・宜保清一・佐々木慶三・中村真也 (2007) 沖縄, 島尻層群泥岩分布地域の地すべり類型区分の試み—地すべりの危険度評価に関連して. 日本地すべり学会誌, 43, 339-350.
- Choi, J.-H., Edwards, P., Ko, K. and Kim, Y.-S. (2016) Definition and classification of fault damage zones : A review and a new methodological approach. *Earth-Science Reviews*, 152, 70-87.
- Etchecopar, A., Vasseur, G. and Daignieres, M. (1981) An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *Journal of Structural Geology*, 3, 51-65.
- Fabbri, O. and Fournier, M. (1999) Extension in the southern Ryukyu arc (Japan) : Link with oblique subduction and back arc rifting. *Tectonics*, 18, 486-497.
- Flint, D.E., Corwin, G., Dings, M.G., Fuller, W.P., Mac Neil, F.S. and Saplis, R.A. (1953) Limestone walls of Okinawa. *Geological Society of America Bulletin*, 64, 1247-1260.
- Fournier, M., Fabbri, O., Angelier, J. and Cadet, J.-P. (2001) Regional seismicity and on-land deformation in the Ryukyu arc : Implication for the kinematics of opening of the Okinawa Trough. *Journal of Geophysical Research*, 106, 13751-13768.
- Goto, H., Arai, K. and Sato, T. (2018) Topographic anaglyphs from detailed digital elevation models covering inland and seafloor for the tectonic geomorphology studies in and around Yoron island, Ryukyu arc, Japan. *Geosciences*, 8, 363.
- 羽田麻美・藁谷哲也 (2017) 熱帯環境下 (カンボジア, アンコール・ワット寺院) における炭酸塩岩タブレットの溶食特性. 地学雑誌, 126, 343-354.
- Hanzawa, S. (1935) Topography and geology of the Riukiu Islands. Tohoku Imperial University, Science Reports, Second Series (Geology), 17, 1-61.
- 八反地 剛・松倉公憲 (2017) 土壌中における炭酸塩岩の風化速度とその制約条件—野外風化実験からのアプローチ—. 地学雑誌, 126, 355-367.
- 早川裕之・青木 久・藤永 豪・前門 晃・松倉公憲 (2009) 澁澤写真を用いた喜界島における台座岩の高さの推定. 地形, 30, 227-231.
- 廣瀬 孝・玉城玲奈 (2011) 沖縄島本部山里の円錐カルストを構成する石灰岩の表面温度観測と熱風化実験. 沖縄地理, no. 11, 21-32.
- 池田和彦・大島洋志 (1975) わかりやすい土木地質学入門. 224 p, 土木工学社.
- 今泉真之・富田友幸・座波吉実 (1989) シュミットロックハンマーによる宮古島南東部琉球石灰岩の工学的性質について. 応用地質, 30, 1-13.

- Inagaki, M. and Omura, A. (2006) Uranium-series ages of the highest marine terrace of the upper Pleistocene on Kikai Island, central Ryukyus, Japan. *The Quaternary Research (Daiyonki-kenkyu)*, 45, 41-48.
- Inkpen, R.J., Viles, H.A., Moses, C., Baily, B., Collier, P., Trudgill, S.T. and Cooke, R.U. (2012) Thirty years of erosion and declining atmospheric pollution at St Paul's Cathedral, London. *Atmospheric Environment*, 62, 521-529.
- Iryu, Y., Matsuda, H., Machiyama, H., Piller, W.E., Quinn, T.E. and Muttiti, M. (2006) Introductory perspective on the COREF Project. *Island Arc*, 5, 393-406.
- 神谷厚昭 (2007) 琉球列島ものがたり—地層と化石が語る二億年史—. 189 p, ボーダーインク.
- 柏木洋彦 (2017) 顕生代のグローバル気候変動と風化作用. *地学雑誌*, 126, 513-531.
- 活断層研究会編 (1991) 新編日本の活断層. 437 p, 東京大学出版会.
- 河名俊男 (1988) 琉球列島の地形. 127 p, 新星図書出版.
- Kawano, M. and Tomita, K. (2011) Microbial enhancement of the dissolution rates of kaolinite by interaction of heterotrophic bacterium *Pseudomonas fluorescens*. *Clay Science*, 15, 33-41.
- 木村政昭 (1983) 沖縄トラフの陥没構造形成に関する考察. *地質学論集*, no. 22, 141-157.
- 木村政昭編 (2002) 琉球弧の成立と生物の渡来. 206 p, 沖縄タイムス社.
- 木崎甲子郎編 (1980) 琉球の自然史. 282 p, 築地書館.
- 木崎甲子郎編 (1985) 琉球弧の地質誌. 278 p, 沖縄タイムス社.
- 木崎甲子郎・大城逸郎 (1977) 琉球列島の古地理. *海洋科学*, 9, 542-549.
- 庫本 正 (1990) 秋吉台の利用. 漆原和子編「カルスト—その環境と人びとのかかわり—」: 21-28, 大明堂.
- Konishi, K., Omura, A. and Nakamichi, O. (1974) Radiometric coral ages and sea level records from the late Quaternary reef complexes of the Ryukyu Island. *Proceedings of the Second International Coral Reef Symposium*, 2, 595-613.
- Kubo, A. and Fukuyama, E. (2003) Stress field along the Ryukyu Arc and the Okinawa Trough inferred from moment tensors of shallow earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, 210, 305-316.
- Kuramoto, S. and Konishi, K. (1989) The southwest Ryukyu Arc is a migrating microplate (forearc sliver). *Tectonophysics*, 163, 75-91.
- 町田 洋ほか編 (2001) 日本の地形7 九州・南西諸島. 355 p, 東京大学出版会.
- Maekado, A. (1989) Some physical and mechanical properties of the limestones in Okinawa Island. *Bulletin of Okinawa Geographical Society*, 2, 29-33.
- 前門 晃 (1990) けずられてできた熱帯地形—円錐丘の語るもの—. サンゴ礁地域研究グループ編「熱い自然—サンゴ礁の環境誌—」: 230-240, 古今書院.
- 前門 晃 (1996) 多様な琉球列島のカルスト地形. 漆原和子編「カルスト—その環境と人びとのかかわり—」: 161-167, 大明堂.
- Maekado, A., Hatta, T. and Matsukura, Y. (1982) Field measurement on slaking in Shimajiri mudstone in Okinawa, south western Japan. *Annual Report of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba*, 8, 45-50.
- 松倉公憲 (2008) 地形変化の科学—風化と侵食—. 242 p, 朝倉書店.
- 松倉公憲 (2017) 地形学からみた風化研究の問題点と今後の課題. *地学雑誌*, 126, 271-296.
- 松倉公憲・八反地 剛 (2006) タブレット野外風化実験にまつわるいくつかの問題点. 筑波大学陸域環境研究センター報告, no. 7, 41-51.
- Matsukura, Y. and Yatsu, E. (1982) Wet-dry slaking of Tertiary shale and tuff. *Transaction, Japanese Geomorphological Union*, 3, 25-39.
- 松倉公憲・前門 晃・廣瀬 孝・青木 久・小暮哲也 (2005) 台座岩から推定される石灰岩地表面の溶解による低下速度. 筑波大学陸域環境研究センター報告, no. 6, 17-21.
- Matsukura, Y., Maekado, A., Aoki, H., Kogure, T. and Kitano, Y. (2007) Surface lowering rates of uplifted limestone-terraces estimated from the height of pedestals on subtropical island of Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1110-1115.
- 松本 剛・木村政昭・仲村明子・青木美澄 (1996) 琉球弧のトカラギャップおよびケラマギャップにおける

- 精密地形形態. 地学雑誌, 105, 286-296.
- Matsumoto, T., Shinjo, R., Nakamura, M., Kimura, M. and Ono, T. (2009) Submarine active normal faults completely crossing the southwest Ryukyu Arc. *Tectonophysics*, 466, 289-299.
- 松四雄騎 (2017) 宇宙線生成核種を用いた岩盤の風化と土層の生成に関する速度論—手法の原理, 適用法, 研究の現状と課題. 地学雑誌, 126, 487-511.
- Matsushi, Y., Sasa, K., Takahashi, T., Sueki, K., Nagashima, Y. and Matsukura, Y. (2010) Denudation rates of carbonate pinnacles in Japanese karst areas: Estimates from cosmogenic ^{36}Cl in calcite. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 268, 1205-1208.
- McIlroy de la Rosa, J.P., Warke, P.A. and Smith, B.J. (2014) The effects of lichen cover upon the rate of solutional weathering of limestone. *Geomorphology*, 220, 81-92.
- 目崎茂和 (1980) 琉球列島における島の地形学的分類とその帯状分布. 琉球列島の地質学的研究, 5, 91-101.
- 目崎茂和 (1984) 日本の主要カルストの地形形成について. 琉球大学法文学部紀要 (史学・地理学編), 27・28, 139-169.
- 目崎茂和 (1985) 琉球弧をさぐる. 253 p, 沖縄あき書房.
- 目崎茂和 (1988) 南島の地形. 158 p, 沖縄出版.
- Michael, A.J. (1984) Determination of stress from slip data: Faults and folds. *Journal of Geophysical Research*, 89, 11517-11526.
- 宮城調勝・小宮康明 (2003) 琉球石灰岩の有効空隙率と圧縮強度. 琉球大学農学部学術報告, no. 50, 131-135.
- Nakamura, S., Gibo, S., Egashira, K. and Kimura, S. (2010) Platy layer silicate minerals for controlling residual strength in landslide soils of different origins and geology. *Geology*, 38, 743-746.
- 中村真也・佐々木慶三・木村 匠・宜保清一 (2012) 亜熱帯湿潤地形の発達と地すべり—沖縄島, 島尻層群地域—. 日本地すべり学会誌, 49, 237-250.
- 日本地質学会編 (2010) 日本地方地質誌 8 九州・沖縄地方. 648 p, 朝倉書店.
- 日本サンゴ礁学会編 (2011) サンゴ礁学. 362 p, 東海大学出版会.
- 西山賢一 (2018) 日本における岩石の風化研究の進展と課題. 地質学雑誌, 124, 877-888.
- 西山直毅・横山 正 (2017) 岩石内部の水の分布—露头スケールからナノスケールまで—. 地学雑誌, 126, 311-323.
- 野澤秀樹ほか編 (2012) 日本の地誌 10 九州・沖縄. 672 p, 朝倉書店.
- 尾方隆幸 (2015) 奄美群島, 喜界島のジオサイトとジオストーリー. 地学雑誌, 124 (1), v.
- Ogata, T. (2015) Geocological systems on cone karst in tropical and subtropical regions, Eastern and Southeastern Asia. Japan Geoscience Union Meeting 2015, HGG01-P01.
- 尾方隆幸 (2016a) 沖縄地域の概要. 目代邦康・大野希一・福島大輔編「シリーズ大地の公園—九州・沖縄のジオパーク—」: 119-125, 古今書院.
- 尾方隆幸 (2016b) カルスト. 目代邦康・大野希一・福島大輔編「シリーズ大地の公園—九州・沖縄のジオパーク—」: 126-127, 古今書院.
- 尾方隆幸 (2017) NHK「プラタモリ」にみる地球科学のアウトリーチ効果. 地理, 62 (6), 4-10.
- 尾方隆幸 (2018) 境界の魅力—インドシナ半島シームレス巡検—. E-Journal GEO, 13, 338-346.
- Ogata, T. (2019) Honeycomb weathering (tafoni) of sandstone and environmental factors in Yonaguni Island, Okinawa Prefecture, Japan. Japan Geoscience Union Meeting 2019, HGM03-P01.
- 尾方隆幸・井村隆介 (2018) 琉球弧の地形形成環境と地形プロセス. 鹿児島大学生物多様性研究会編「奄美群島の生物多様性」: 10-25, 南方新社.
- Ogata, T., Nara, M., Otsubo, M. and Shibata, T. (2019) Geoscientific setting and educational significances of Yonaguni Island in the Ryukyu Arc, Eastern Asia. Japan Geoscience Union Meeting 2019, MIS08-P08.
- 沖縄第四紀調査団・沖縄地学会 (1975) 沖縄の自然: その生いたちを訪ねて. 237 p, 平凡社.
- 大村明雄・太田陽子 (1992) サンゴ礁段丘の地形層序と構成層の $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 年代測定からみた過去 30 万年間の古海面変化. 第四紀研究, 31, 313-327.
- 大村明雄・児玉京子・渡辺将美・鈴木 淳・太田陽子 (1994) 与那国島のサンゴ礁段丘および段丘構成層からのウラン系列年代—それらの海面・地殻変動史への意義—. 第四紀研究, 33, 213-231.
- Ota, Y. and Omura, A. (1992) Contrasting styles and rates of tectonic uplift of coral reef terraces in the

- Ryukyu and Daito Islands, Southwestern Japan. *Quaternary International*, 15・16, 17-29.
- 太田陽子・佐々木圭一・大村明雄・野沢香代 (2000) 喜界島東岸, 志戸桶付近の完新世サンゴ礁段丘の形成と離水過程—ボーリング資料に基づく再検討. 第四紀研究, 39, 81-95.
- 大坪 誠・大橋聖和・尾方隆幸・柴田伊廣 (2019) 日本最西端沖縄県与那国島に分布する正断層群. 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, MIS08-01.
- 琉球大学理学部「琉球列島の自然講座」編集委員会編 (2015) 琉球列島の自然講座—サンゴ礁・島の生き物たち・自然環境—. 207 p, ボーダーインク.
- 坂井 卓・浜田正平・辻 和毅・鈴木 勲・黒川陸生 (1978) 八重山群島与那国島の地質. 琉球列島の地質学研究, 3, 61-78.
- Sakiyama, H. and Matsubara, H. (2018) Physical, chemical, and biological investigation of an unconformity between limestone and sandstone in a coastal area : Iriomote island case study. *Catena*, 171, 136-144.
- サンゴ礁地域研究グループ編 (1990) 熱い自然—サンゴ礁の環境誌—. 372 p, 古今書院.
- サンゴ礁地域研究グループ編 (1992) 熱い心の島—サンゴ礁の風土誌—. 324 p, 古今書院.
- 佐々木慶三・吉沢光三・宜保清一・江頭和彦 (1990) 沖縄島尻層群地帯の地すべり—地質学的背景—. 地すべり, 27 (2), 31-37.
- 佐藤 久 (1959) 奄美諸島の地形. 九学会連合奄美大島共同調査委員会編「奄美 (自然と文化)」: 39-53, 日本学術振興会.
- 新城竜一 (2014) 琉球弧の地質と岩石: 沖縄島を例として. 土木学会論文集 A2 (応用力学), 70 (2), 応用力学論文集, 17, I_3-I_11.
- Shinjo, R., Woodhead, J.D. and Hergt, J.M. (2000) Geochemical variation within the northern Ryukyu Arc : magma source compositions and geodynamic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140, 263-282.
- Sibson, R.H. (2000) Fluid involvement in normal faulting. *Journal of Geodynamics*, 29, 469-499.
- Sibuet, J.-C., Deffontaines, B., Hsu, S.-K., Thareau, N., Leformal, J.P., Liu, C.-S. and Act Party (1998) Okinawa Trough backarc basin : Early tectonic and magmatic evolution. *Journal of Geophysical Research*, 103, 30245-30267.
- Smith, D.I. and Atkinson, T.C. (1976) Process, landforms, and climate in limestone regions. Derbyshire, E. (ed.) *Geomorphology and Climate* : 367-409, John Wiley and Sons.
- 宋 苑瑞・松倉公憲 (2008) バクテリア風化に関する最近の研究の進展と今後の課題. 地形, 29, 313-328.
- Song, W., Ogawa, N., Oguchi, C.T., Hatta, T. and Matsukura, Y. (2007) Effect of bacillus subtilis on granite weathering : A laboratory experiment. *Catena*, 70, 275-281.
- Song, W., Ogawa, N., Oguchi, C.T., Hatta, T. and Matsukura, Y. (2010) Laboratory experiments on bacterial weathering of granite and its constituent minerals. *Géomorphologie, Relief, Processus, Environment*, 4, 327-336.
- 高橋彦治・菊池宏吉・吉川恵也・桜井 孝 (1985) 建設工事における地質工学. 316 p, 鹿島出版会.
- 寺岡易司・池田幸雄・鹿島愛彦 (1986) 宇和島地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万の 1 地質図幅), 91 p, 地質調査所.
- Terzaghi, K. (1950) Mechanisms of landslides. Paige, S. (ed.) *Application of geology to engineering practice* : 83-123, Geological Society of America.
- Tokuyama, H., Kong, Y.S., Kagami, H. and Nasu, N. (1985) Collision of the Amami Plateau with the Ryukyu Island Arc. Nasu, N., Kobayashi, K., Uyeda, S., Kushiro, I. and Kagami, H. (eds.) *Formation of active ocean margins* : 853-873, Terra Scientific Publishing Company.
- 氏家 宏 (1986) 琉球弧の海底—底質と地質—. 120 p, 新星図書出版.
- Ujiie, H. (1994) Early Pleistocene birth of the Okinawa Trough and Ryukyu Island Arc at the northwestern margin of the Pacific : evidence from Late Cenozoic planktonic foraminiferal zonation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 108, 457-474.
- 漆原和子 (1991) 日本における石灰岩片の溶食率の地域差. 地域学研究, 4, 107-117.
- 漆原和子・鹿島愛彦・榎本浩之・庫本 正・フランツ ディーター ミオトケ・仲 程正・比嘉正弘 (1999) 日本における石灰岩溶食率の経年変化とその地域性. 地学雑誌, 108, 45-58.
- Urushibara-Yoshino, K., Miotoko, F.-D. and Research

- Group of Solution Rates in Japan (1999) Solution rate of limestone in Japan. *Annual Physics and Chemistry of the Earth*, 24, 899-903.
- Waragai, T. (2016) The effect of rock strength on weathering rates of sandstone used for Angkor temples in Cambodia. *Engineering Geology*, 207, 24-35.
- 藁谷哲也 (2017) 石造物を利用した岩石の風化速度に関する研究動向. *地学雑誌*, 126, 455-471.
- Yamaji, A. (2000) The multiple inverse method : a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 22, 441-452.
- Yamamoto, K., Iryu, Y., Sato, T., Chiyonobu, S., Sagae, K. and Abe, E. (2006) Responses of coral reefs to increased amplitude of sea-level changes at the Mid-Pleistocene Climate Transition. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 241, 160-175.
- 横山 正・西山直毅 (2017) 露頭スケールからナノスケールまでの反応—輸送過程. *地学雑誌*, 126, 297-310.

Geoscientific studies on the Quaternary faulting and geomorphic processes of the Ryukyu arc, southwestern Japan

Takayuki Ogata^{*1, a} and Makoto Otsubo^{*2}

This paper reviews studies on the Quaternary tectonics and geomorphic processes of the Ryukyu arc, southwestern Japan. The Ryukyu arc lies along the subduction zone between the Eurasia and Philippine sea plates. Many islands of the Ryukyu arc are classified into volcanic islands, accretionary complex islands and uplifted coral reef islands. The Quaternary tectonics forms many strike-slip and normal faults in the Pleistocene limestone (Ryukyu group) originating from coral reef sediments. Mountains and hills con-

sisting of metamorphic and sedimentary rocks are eroded, reflecting the rate of weathering controlled by various environmental conditions. Previous physiographic studies considered several landforms as tropical and subtropical landscapes, whereas such landforms should be reconsidered in terms of geological factors as well as climatic ones. The authors suggest that future studies require a more comprehensive and integrated understanding of the geomorphic processes involving both the climatic and geological factors.

Keywords : Ryukyu arc, faults, weathering, erosion, geomorphic processes

*1 Faculty of Education, University of the Ryukyus. 1 Senbaru, Nishihara, 903-0213, Japan.

*2 Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, AIST. Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, 305-8567, Japan.

*a Corresponding author : taka@edu.u-ryukyu.ac.jp