

地球温暖化現象と洞窟

鹿島 愛彦*

The Earth's Greenhouse Effect and the Caves

Naruhiko KASHIMA*

ABSTRACT

The purpose of this paper was to outline the climate variation due to the Earth's greenhouse effect in the recent and past Earth. For example, Earth's climate in geological age, Snowball Earth and Sea level change. Erosion (sea) caves are now to be submerged by the rise in sea level caused rising concentration of greenhouse gases. As examples to give Ehime and Okinawa Prefectures. In contrast to this, at the Muroto Peninsula, Kochi Prefecture, sea caves lifted above the active littoral zone by uplift in response to the interplate earthquakes. At corrosion (limestone) caves, cave levels correlate with remnant terraces and fluvial deposits along the river valley walls.

The vertical distribution of the horizontal cave levels and multilevel limestone cave resulted from sea level changes caused the Earth's greenhouse effect. This conclusion has been pointed out that the data of limestone caves in Taishyaku plateau, Hiroshima Prefecture, Japan and Mammoth cave system, Kentucky, U.S.A.

Key Words: *Earth's greenhouse effect, Climate variation, Sea level change, Erosion (sea) cave, Corrosion (limestone) cave.* [大阪経済法科大学地域総合研究所紀要創刊号] [*Regional Research Institute (RRI), Osaka University of Economics and Law, Vol.1 (2009), 121–130pp*]

* 愛媛大学名誉教授・大阪経済法科大学客員教授

1. はじめに

人類が、これまで地層中に閉じこめられてきた化石燃料（石炭・石油など）を、エネルギー源として燃焼し始めた産業革命以降の1750年時点の280ppmから、地球大気中のCO₂量は増加の一路をたどり、2005年には379ppmまで達するようになってきている。

地球大気中のCO₂ガスは、水蒸気・CO・メタンと共に温室効果ガスとして働き、地球表面の平均気温を15℃に保持してきた。もしこの温室効果が無ければ現在の地球表面の平均気温は-19℃となっていると計算されている。

現在、地球表面の大気の平均気温は上昇を続けており、1906年-2005年の100年間に0.074℃/10年の割合で上昇している。1956年-2005年の50年間における上昇率は0.13℃/10年、1981年-2005年の25年間における上昇率は0.177℃/10年と最近になるほど上昇率が大きくなっている(IPCC、2008)¹⁾。

この地球温暖化現象の要因としては、太陽放射の変化・雲量の変化などの自然的なもの、人為的な温室効果ガスの放出・エアロゾルの増大・土地利用の変化（アルベドの変化）が挙げられている。

地球温暖化に伴う気温・水温・降水量の変化、生態系への影響、海水面の上昇、人類活動への悪影響などが具体的に示されるようになって来ている。

この地球温暖化に対する対策として「京都議定書（気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書）」が1995年12月に議決され2005年2月に発効しているが、その削減対象期間である2008～2012年以降の世界の温室効果ガス削減の枠組みとして、ポスト京都議定書作成などが論議されている。2007年には第4次評価報告書が公開されている。ポスト京都議定書は2009年のCOP15で合意される予定になっている。

本文においては、人為的要因による地球温暖化現象以前の過去における気候変動と、気候変動のもたらす侵食洞窟（海食洞窟）・溶食洞窟（石灰岩洞窟）の形成について考察する。

2. 地質時代の気候変動

地球の過去における温暖化現象は、地質時代における太陽放射量・太陽放射に対する地球の反射率（アルベド）の問題もあるが、地表大気中のCO₂濃度の高かった時代に認められており、CO₂濃度の変化により地球平均温度の変化が決定されて来ている。

内嶋（1989）²⁾によれば、現在の地球下層空気の平均気温は15℃で、カンブリア紀（570Ma（=百万年単位）前）から鮮新世（35.4Ma前）までの顕生代全期間を通じて、地球平均気温は現在より2.8～11℃高かった。すなわち、各時代の平均気温は18～26℃であった。顕生代末期（漸新世、鮮新世および鮮新世末期後、特に第四紀）には気温は著しく低下した。巨大な氷河

の発達した鮮新世の最も寒冷な時代は、現在より約5℃低かったと述べている（Fig.1）。

第四紀（1.79Ma～現在）における気温変化については、海底堆積物コア・湖底堆積物コア・極地氷河コアなどを使用した詳細な研究が行われている（町田ほか、2003）³⁾。

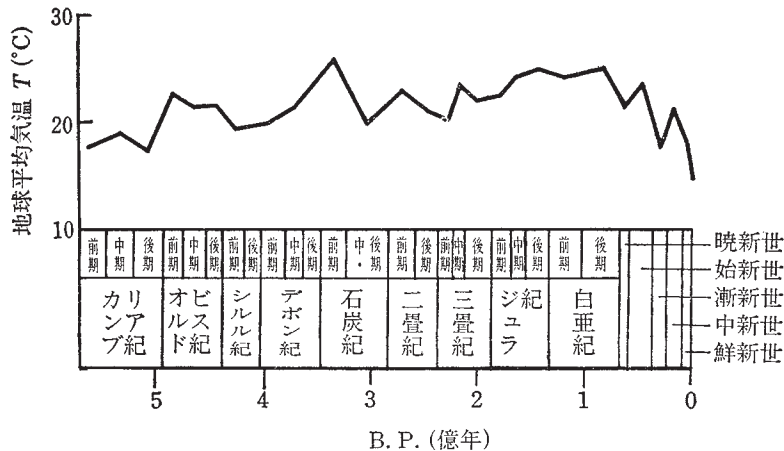


Fig.1. 顕生代における地球平均気温（T）の変化（内嶋、1989）。Variations of the earth's average temperature (T) of the Phanerozoic (Uchijima, 1989).

3. スノーボール・アース（Snowball Earth）

地球は誕生直後のマグマ・オーシャン（Magma Ocean）に覆われた高温の状態から徐々に冷却しており、第四紀のいくつかの氷河期・間氷期時代を経て現在の後氷期時代に至ったと考えられてきた。近年、先カンブリア時代の終わり頃、約6～8億年（600～800Ma）前頃の氷河堆積物の研究から当時の全地球表面が完全に氷床に覆われた状態にあったことが明らかにされ、この状態がスノーボール・アース（Snowball Earth＝雪球地球）・全地球凍結である。約6～8億年（600～800Ma）前に4回、22億年（2200Ma）前にも全地球的な寒冷化が発生していたと考えられている（川上、2003）⁴⁾。この全地球的凍結の状態は、火山活動による大気中のCO₂ガスの蓄積が、氷結した海洋に吸収されることなく行われ、その温室効果により復元されたものとされている。この寒冷化を契機として生物界においては、原生物の大量絶滅－多細胞生物の出現といった生物進化が助長されたものと考えられている。

地球表面の受ける太陽放射量が減少すれば地球寒冷化現象が発生することになる。地球表面の受ける太陽放射量（太陽光）は、地表に突入した天体の衝突で巻き上げられた膨大な粉塵・火山の大噴火による火山塵・大規模な森林火災の煙・雲などで遮られ、寒冷化が進行することになる。

現在においては、人為的なエアロゾル（Aerosol）の排出物質（工場煙、ジェット機・自動車の排気ガス、スモッグ、焼き畑の煙など）が地球表面への日射量減をもたらしており（日笠

効果)、地球薄暮化を進めており地球寒冷化が進行しているはずであるが、急速に増大する地球温暖化の陰となって目立たない存在となっている。日笠効果がなければ、現在の地球温暖化下における気温上昇率はもっと大きいものになっていると考えられている。

地球表面の受ける太陽放射量(日射量)の変化については、地球の公転運動や自転を要素として、M.Milankovitch(1930)が10万年を周期とするサイクルのあることを計算している。地球の自転軸の傾斜角(周期4.1万年)・公転軌道の離心率(周期9.5万年・12.5万年・40万年)・自転軸の歳差運動(周期1.9万年・2.2万年・2.4万年)の周期的変化を基に、緯度ごとの太陽放射量を60万年前まで遡って計算し、その結果を日射量・年代曲線として表している(ミランコビッチ曲線)(ウィキペディア、2008)⁵⁾。第四紀における少なくともほぼ10万年周期の氷期・間氷期のサイクルは、太陽放射量の変化で説明可能とされている。

4. 海水面の変化

現在、地球温暖化の結果として、海水面の上昇が海岸に海拔高度以下の地域を有する諸国に及ぼす影響が深刻な問題となっている。

世界の海洋の平均海水温度は水深3000mまでにおいては上昇しており、温暖化の影響で追加される熱の80%は海洋に吸収され海水を膨張させている。そのため平均海面水位は、1961年～2003年において上昇率は年平均1.8mm、1993年～2003年の上昇率は年平均3.1mmが観測されている。観測値の3.1mm/年のうち、海水の熱膨張の結果1.6mm/年・氷河・氷帽の融解0.77mm/年・グリーンランド氷床の融解0.21mm/年・南極氷床の融解0.21mm/年・その他とされている(IPCC、2008)¹⁾。

2100年までのIPCCによる排出シナリオに対する世界平均地上気温の上昇量は、最良の推定

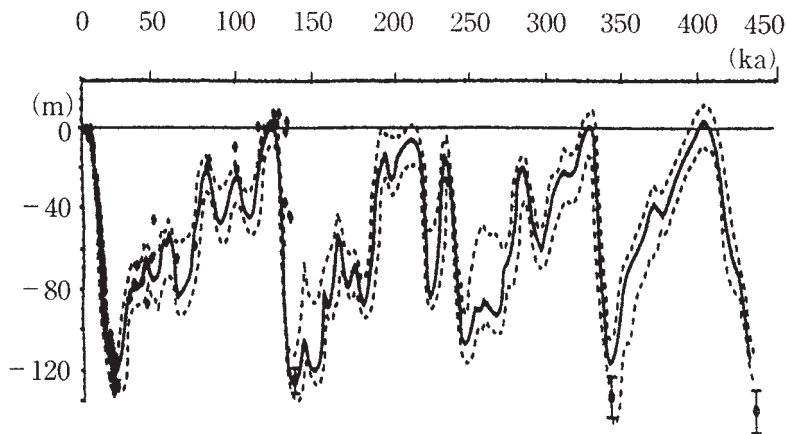


Fig.2. 45万年前以降の氷河性海面変動 (Labeyrie et al., 2002) (町田ほか、2003)。

Glacial eustasy after the 0.45 Ma (Labeyrie et al., 2002) (Machida et al., 2003).

値で（B1：最も排出量の少ないシナリオ）1.8℃、（A1F1：最も排出量の多いシナリオ）4.0℃と評価されており、これに伴う海面水位上昇は（B1）0.18～0.38m、（A1F1）0.26～0.59mと評価されている（IPCC、2008）¹⁾。

第四紀における氷期・間氷期のサイクルでは、最終氷期最盛期の18,000年前から6,000年前までの間に海水準が120m以上上昇したことが明らかにされている。現在のグリーンランドと南極の氷床がすべて融解すると海水面は約80m上昇すると予想されている。

45万年前以降の氷河性海面変動については、深海底コアから得られた深海底温度変化の影響を補正した曲線としてFig.2のような記録が示されている。

5. 侵食洞窟

日本に分布する侵食洞窟（erosion cave）としては海食洞窟（sea cave）と湖食洞窟（lake cave）が存在する。いずれの場合も海岸・湖岸を形成する岩石の種類に関係なく、何時の時代においても一刻の休みもなく岸辺に分布する砂礫と波浪による侵食作用によって洞窟が形成される。どこにでも形成されるものではなく、岩石中の割れ目などの弱部や岩石の硬弱などに支配されることが多い。

波浪の岸辺に対する侵食作用は、水面下数mから波浪の到達する高さにまで及ぶが、海水面高度が安定していれば、その範囲内での成長が継続されることになる。

しかし地球温暖化・寒冷化の結果として、海水面高度が昇降し侵食作用の及ぶ岸辺の標高が変化することになる。温暖化の結果は水量の増加をもたらす、現在形成中の海食洞窟は次第に水中に没していき沈水海食洞窟に、さらには海中洞窟となり陸上からは観察出来なくなってしまふ。逆に寒冷化の場合は、海食洞窟は水面を離れて陸上部となり離水海食洞窟となる。

したがって、海食洞窟の形成された最初のレベルを示す洞口の高度変化は、過去における海水面の変化を示す証拠として利用できることになる。但し、海水面の変化は地殻変動による海岸の昇降の場合にも発生するので、その点の検討も必要である。

愛媛県愛南町の足摺宇和海国立公園内の鹿島には洞口の海中深度が11mの沈水海食洞窟（洞口の幅20m・高さ25m・奥行き80m）があるほか、鹿島の南西約3km地点のコデ島（周囲約100m・標高44m）には、海面下23mのところ洞口幅7.5m・高さ13m・奥行き50mの海中洞窟が存在する（鹿島、2008）⁶⁾。この地域に沈水した海岸段丘についての記録はないが、高知県宿毛湾には深度-40mの海底平坦面があり、これは約1万年前に形成されたものとされているが（満塩ほか、1992）⁷⁾（満塩ほか、2000）⁸⁾、コデ島の海中洞窟は海水面の標高が-40mであった時代に形成された海食洞窟の沈水したものであると考えられる。

一方、高知県室戸岬には弘法大師（空海）の修行洞窟として有名な御蔵洞があるが、現在の洞口の標高は7mあり離水海食洞窟である。1,200年前、弘法大師の修行した当時は洞口まで海

水の達する海岸であったとのことであるから、海水面は1,200年間に7 m下降したことになる。

室戸岬付近では、完新世後半に少なくとも6回の海水準安定期が識別され、それに対応した海岸段丘などの地形面が発達している。これらの分布高度と離水時期については、上位から11.0m (5,000~4,000 yrs BP)・8.5~9.0m (2,700~2,600 yrs BP)・6.6~6.7m (2,200~2,000 yrs BP)・6.0m前後 (1,100~1,000 yrs BP)・3.5~4.0m (800~700 yrs BP)・1.0~1.5m (200 yrs BP~)と推定されている。室戸半島の隆起現象は、プレート陸側斜面に存在する低角逆断層が活動することによって発生する、プレート内地震による変位が累積されたものと考えられている(前空, 1992)⁹⁾。

安芸市大山岬には「底部の標高が7 m前後の海食洞、標高4~5 m前後のベンチ・ノッチが発達している。また大山岬や下山の岩礁には標高5~7 mにカキ、ボーリングシェル、ヤッコカンザシ、サンゴの群体が付着しており、上限部のカキの¹⁴C年代は1290±60 (HR-323)~1515±60 yrs BP (HR-215) (いずれも) 暦年未補正」という値を示した」これも地震隆起の結果であるとされている(前空, 2006)¹⁰⁾。

満塩 (2000)¹¹⁾は、高知県全体の洞窟の形成成因について、第四紀の海水準変動や地盤の変動(地震動による)に関連して詳しく述べている。そして、洞窟の生成に関連した主要な地質時代は、後期更新世以後での間氷期の中位段丘形成時(約15万年前)から、ウルム(最終)氷期の低位段丘形成時期までが重要であるとしている(満塩ほか, 2001)¹²⁾。

沖縄本島本部半島の沖合10kmに位置する伊江島東海岸沖のサンゴ礁の前縁斜面には、大洞窟と呼ばれている海中洞窟が存在している。水深20m付近に高さ1 m・幅2 mの入り口があり、およそ15m四方の方形を呈している。大洞窟の最大水深は31mである。この洞窟は約8,000年前に水没したものであるとされている(北村ほか, 2003)¹³⁾。

また沖縄県南大東島においても海中洞窟・離水洞窟の存在が報告されている(鹿島, 2008)¹⁴⁾。

6. 溶食洞窟

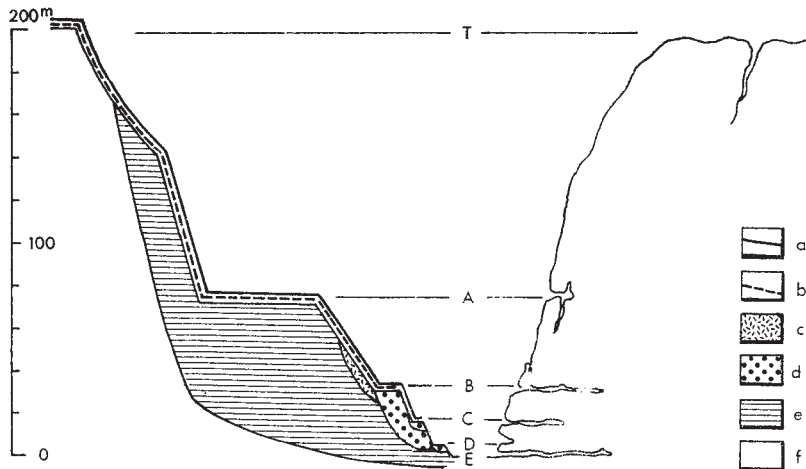
溶食洞窟(corrosion cave)は石灰岩(CaCO_3)・苦灰岩($\text{Ca}(\text{Mg, Fe, Mn})(\text{CO}_3)_2$)・石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)・岩塩(NaCl)・氷河($\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Ice}$)などの可溶性岩石に形成されるが、日本においては石灰岩洞窟(limestone cave)・苦灰岩洞窟(dolomite cave)が存在する。いずれも大気中・土壌中の CO_2 を溶かし込んで弱酸性となった地下水の溶解作用により形成される。石灰岩洞窟の形成過程については諸説があるが、地下水面付近の流動する水によって石灰岩が溶解され成長するものとする考え方が一般的である。

石灰岩層の地下水面のレベルは、地表の河川のレベルとほぼ同じ高度に存在し、河川水は流下して海洋に到達する。地球温暖化・寒冷化による海水面の昇降は、上述したように陸地の地下水面を上下させる。したがって、石灰岩洞窟を形成する場となる地下水面の位置(レベル)

は変化することになる。その結果、溶食作用のレベル変化に対応した洞窟の多層化現象が認められることになる。さらに、このレベルは地表における河岸段丘のレベルに対応することになる。

日本においてこの事実を初めて認めたのは、愛媛県仁淀川流域における石灰岩洞窟と河岸段丘を調査し、河岸段丘の年代が判れば石灰岩洞窟の形成年代が判るとした永井（1961）¹⁵⁾である。

1969年には北備後台地研究グループにより、広島県帝釈峡において石灰岩洞窟と河岸段丘の



帝釈峡および東城川の模式断面図。a：新三瓶火山灰，b：古三瓶火山灰，c：古崖錐，d：段丘堆積物，e：備北層群（中新統），f：古生層（主に石灰岩），T：帝釈高原面，A～Eは第2図のそれらに対応する）

帝釈峡における第四紀の編年

		地形・段丘	地 質	鍾乳洞	その他
第 四 紀	沖積世	現河床面		E水準の洞穴群	石灰岩にノッチの形成 馬渡・寄倉の岩陰遺跡 洞穴形成の最盛期
	後 期	東城面（比高 3～8m）	……新三瓶火山灰…… (10,000～15,000 y. B. P.)	D水準の洞穴群	
		河仁吾面（比高 12m）	……古崖錐形成Ⅱ…… ……古三瓶火山灰…… (18,000～22,000 y. B. P.)	C水準の洞穴群	
		帝釈学校面（比高 20～30m）	古崖錐形成Ⅰ	B水準の洞穴群	
	前 期	矢不立城面（比高 70m） （標高 420m）		A水準の洞穴群 縦穴の生長 鍾乳洞の萌芽的形成 ドリリーネ・ウパーレの形成開始	
第 三 紀		帝釈高原面の形成 （標高 500～600m）	備北層群 （中新統）		

Fig.3. 広島県帝釈峡および東城川の模式断面図（上）と帝釈峡における第四紀の編年表（下）（北備後台地団体研究グループ、1969）。Type geologic section of Taishyaku-gorge and Tojo-river, Hiroshima Prefecture (top) and chronological table of Quarternary at Taishyaku-gorge (bottom) (Kita-Bingo Plateau Research Group, 1969).

調査が行われ、河岸段丘の形成に連動した地下水位レベルの変化に対応した石灰岩洞窟の形成が明らかにされた。その結果4段階の河岸段丘と5水準の洞窟レベルが確定され、段丘面を覆う火山灰の年代値から石灰岩洞窟の形成時代の推定がなされた (Fig.3) (北備後台地研究グループ、1969)¹⁶⁾。

地下水面のレベル変化は、世界的な氷河性海水面変動に連動して形成されており、同様な現象は世界各地で報告されている。アメリカ合衆国・ケンタッキー州のマンモス洞窟系 (Mammoth cave system) は総延長556,849mの世界最長の石灰岩洞窟であるが、多層洞窟 (White, et al., 2005)¹⁷⁾ としても有名である。Green River 沿いの標高120~200m間に認められる河岸段丘・河川堆積物のA~Eのレベルに対応した洞窟とその形成年代は次のように報告されている (Fig.4)。

Level A (3.25Ma) ・ Level B (2.27Ma) ・ Level C (1.39Ma) ・ Level D (1.24Ma) ・ Level E (0.7Ma) ・ Active phreatic Level=Green river (Anthony, 2005)¹⁸⁾

ここで注目されるべき事は、Mammoth cave system (石灰岩洞窟) の形成が325万年前に始まっていることである。日本ではこれに匹敵する石灰岩洞窟は現在のところ明らかにされていない。

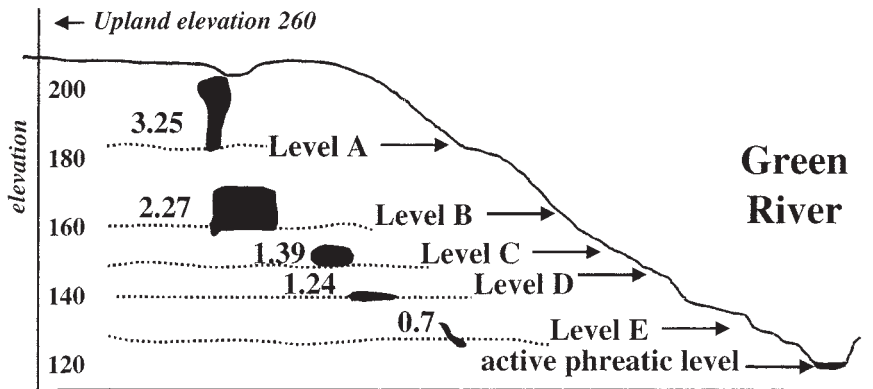


Fig.4. マンモス洞窟系の洞口レベルの概括的な標高と各洞窟レベルの形成年代 (Anthony,2005)。
Generalized elevations of cave levels and the age of each level, Mammoth cave system (Anthony, 2005).

7. まとめ

地球温暖化現象は大気中のCO₂ガスが人為的要因により増加してもたらされている現在の状況にのみ限定使用されるべきで、地質時代のCO₂増大時などにおける状況には気候変動を適用するとされているが、本報においては過去における気候変動・寒冷化現象 (雪球地球) ・温暖化現象 (海水面変化) について述べた。

地球大気中におけるCO₂の変動などがもたらす、地球表面の侵食作用・溶食作用の形成物である洞窟について考察した。海食洞窟の洞口のレベルが形成当時の海水面を、石灰岩洞窟の多層構造が洞窟形成当時の地下水面のレベル変化を示す重要な証拠として残されていることを指摘した。

謝 辞

本文は、大阪経済法科大学地域総合研究所における学術交流講演会で発表した「地球温暖化現象と洞窟」を基に加筆したものである。講演および本紀要への投稿の機会を与えてくださった、地域総合研究所所長の沢 勲教授に感謝申し上げます。

（2008年11月14日受稿、2008年12月20日掲載決定）

参考文献

- 1) IPCC:「IPCC 第4次評価報告書第1作業部会報告書」(気象庁翻訳)、25、2008。
<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4-wg1-spm.pdf>
- 2) 内嶋善兵衛訳:「プディコ・ロノフ・ヤンシン、地球大気の歴史ーその進化と未来を探るー」、189、朝倉書店、1989。
- 3) 町田 洋・大場忠道・小野 昭・山崎晴雄・河村善也・百原 新編著:「第四紀学」、朝倉書店、323、2003。
- 4) 川上紳一:「全地球凍結」、集英社新書、203、2003。
- 5) ウィキペディア:「ミランコビッチ・サイクル」、フリー百科事典 ウィキペディア (Wikipedia) 日本語版、2008年5月15日(木) 18:51、UTC、URL:<http://ja.wikipedia.org>。2008。
- 6) 鹿島愛彦:「御五神島・鹿島・コデ島(宇和島市・南宇和郡西海町)」、すねぐろの愛媛点描、15-17、2003。
- 7) 満塩大洗・加賀見英雄:「四国の第四系」、第四紀研究、31、297-311、1992。
- 8) 満塩大洗・鹿島愛彦:「西部四国、愛媛県第四系総括ー四国西部の環境地質学的研究、その15ー」、愛媛の地学研究、4、93-113、2000。
- 9) 前空英明:「西南日本外帯南部の完新世地殻変動」、第四紀研究、31、285-296、1992。
- 10) 前空英明:「室戸半島の第四紀地殻変動と地震隆起」、地質雑、112補遺、17-26、2006。
- 11) 満塩大洗:「高知県下の洞窟、その分布と成因ー特に、第四紀の海水準変動による変化に関連してー」、愛媛の地学研究、4、141-152、2000。
- 12) 満塩大洗・高知大学学術探検部:「高知県における洞穴の総括ー特に第四紀における環境変化に関連してー」、高知大学学術研究報告、50、67-80、2001。
- 13) 北村晃寿・加藤友喜・大橋秀一・平本真弓・坂口佳孝・田辺晶史・間藤基之:「沖縄のサンゴ礁にある海底洞窟堆積物の堆積相と堆積速度」、第四紀研究、42、99-104、2003。
- 14) 鹿島愛彦:「島嶼カルスト、南大東島星野洞について」、大阪経済法科大学科学技術研究所紀要、12、3-13、2008。
- 15) 永井浩三:「愛媛の地形」、松栄印刷所、83、1961:1987。
- 16) 北備後台地団体研究グループ:「鍾乳洞の形成期について」、地質雑、75、281-287、1969。

- 17) White William B. and David C. Culver: "Cave, Definition of", In David C. Culver and William B. White (eds.) *Encyclopedia of Caves*, 81-85, 2005.
- 18) Anthony Dalene M.: "Multileveled Caves and Landscape Evolution", In David C. Culver and William B. White (eds.) *Encyclopedia of Caves*, 397-400, 2005.