

Title	[研究ノート] 観光利用による鍾乳洞の大気環境変化：沖縄島「玉泉洞」における移動観測
Author(s)	池田, 未来; 尾方, 隆幸
Citation	沖縄地理(11): 33-41
Issue Date	2011/6/25
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12001/17821">http://hdl.handle.net/20.500.12001/17821</a>
Rights	沖縄地理学会

## 観光利用による鍾乳洞の大気環境変化 — 沖縄島「玉泉洞」における移動観測 —

池田未来\*・尾方隆幸\*\*

(\* 琉球大学教育学部学生・\*\* 琉球大学教育学部)

### Human Impacts on Micro-meteorological Conditions in a Show Cave (Gyokusendo Cave Park), Southern Part of the Okinawa Island

Mirai IKEDA and Takayuki OGATA

(Faculty of Education, University of the Ryukyus, Okinawa 903-0213, Japan)

#### 摘 要

Micro-meteorological observations were undertaken in the Gyokusendo show cave located in the southern part of Okinawa Island, where Quaternary limestone lies under a subtropical environment. Air temperature and carbon dioxide strongly reflect the number of tourists. High carbon dioxide area moves resulting from the difference between inside and outside meteorological conditions of the show cave. Measured data frequently and extremely exceeded 2,400 ppm in carbon dioxide, which prevents stalactite formation and causes limestone corrosion.

キーワード：鍾乳洞，石灰岩，気温，二酸化炭素，沖縄島

**Key words:** cave, limestone, air temperature, carbon dioxide, Okinawa Island

#### I はじめに

観光鍾乳洞で発生する環境問題のひとつに、観光客のオーバーユースによる気温とCO<sub>2</sub>濃度の上昇がある(漆原 1996)。こうした大気環境の変化は、鍾乳洞の形成に直接的に関わる石灰岩の化学的風化(溶解)プロセスに影響を与える。一般に、CO<sub>2</sub>濃度が上昇すると、石灰岩の溶解速度は大きくなる(たとえば、Sweeting 1972; Ford and Williams 1989; 漆原ほか 1999a; 高屋ほか 2006)。大沢(2009)は、鍾乳石の成長には、鍾乳洞の内外の気温差による大気の流動と、それにともなう洞窟内のCO<sub>2</sub>濃度の変動が深く関わることを指摘している。また、洞窟内のCO<sub>2</sub>濃度が2,400 ppmを超えると、浸透水中の炭酸カルシウムの沈殿が生じなくなり、逆に鍾乳石に対する再溶食が始まるとされる。室内実験においては、温度が高いほど石灰岩の溶解の初期反応が大きくなることも示されており(高屋ほか 2006)、気温も石灰岩の溶解速度に影響を与えることがわかっている。

観光鍾乳洞での大気環境変化については、国内外でいくつかの観測事例がある。年間約4万人が訪れるオーストラリアのジェノラン洞窟では、入洞者数とCO<sub>2</sub>濃度に高い相関がみられた(Dragovich and Grose 1990)。この研究で観測されたCO<sub>2</sub>濃度の最高値は、471人が入洞した日の1,500 ppmであった。国内では、漆原ほか(1998, 1999b)が、福島県のあぶくま洞で入洞者数とCO<sub>2</sub>濃度・気温との関係を調査している。漆原ほか(1998)は、入洞者数とCO<sub>2</sub>濃度との高い相関が認められ、入洞者数1,500人で鍾乳石の再溶食が始まる基準値2,400 ppmに達し、4,800人で人体へ危険が生じる5,000 ppmに達することを示した。また、入洞者数の増加に伴って洞窟内の気温は増加し、入洞者数の伸びが鈍化すると気温は低下に転じることも明らかになった。漆原ほか(1999b)では、入洞者数と気温・CO<sub>2</sub>濃度との正の相関があり、風向・風速調査によって、あぶくま洞の閉鎖的な上部洞が年間を通じてほぼ無風状態である

ことが示されている。東京都の日原鍾乳洞で調査を行った古谷ほか（2005）も、1,248 人の入洞で洞窟内の CO<sub>2</sub> 濃度が 2,400 ppm に達するとの結果を得ている。

しかしながら、これまでの研究のほとんどは断続的な観測で、観測日も 1～5 日間と少ない。漆原ほか（1999b）は、気温については夏期 38 日間、冬期 16 日間の連続観測をしているものの、洞窟内の CO<sub>2</sub> 濃度を長期間にわたってモニタリングした研究はない。そこで筆者らは、沖縄島南部に位置する玉泉洞において、気温・CO<sub>2</sub> 濃度の移動観測と、定点での高精度なモニタリングを実施した。本稿ではその第一報として、20 地点で得られた移動観測データを報告し、観光客が大気環境に及ぼす影響について予察的に考察する。

## II 調査地

玉泉洞は、沖縄島南部を流れる雄樋川の流域に発達した、全長 5,000 m を超える洞窟群である（図 1）。この地域では、基盤岩となる第三紀泥岩（島尻層群）の上位に第四紀礁性石灰岩（琉球層群）が堆積している。玉泉洞は、この両層の不整合面、もしくは琉球層群の内部に形成されていると考えられる（日本洞窟学会ほか 1992；尾方 2010）。

洞窟群の一部は、大型観光施設「おきなわワールド」の一部として公開されている。「おきなわワールド」には年間約 120 万人の入場があり、そのうち約 8 割が観光洞に入洞する。修学旅行や団体ツアーなどのコースに設定されることも多く、休日を中心に多くの入洞者がある。観光洞は、台風など特別な場合を除いて年中無休で公開されている。公開時間は 9 時～17 時 30 分である。

観光洞の長さは約 800 m で（図 1）、筆者らのレベル測量によれば、観光用に設置された歩道の最高所は海拔 14.4 m（観光洞入口付近）、最低所は海拔 4.7 m（観光洞出口付近）で、比高 9.7 m である。観光洞の入口（上流側）は夜間には閉鎖されるが、出口（下流側）では外気との通気が保たれている。昼間には、入口・出口いずれにおいても外気との交換が発生するが、観光客の入口には筒状の空間に長い階段（標高差 10 m 以上）が設置されているのに対し、観光客の出口では洞床が直接外気に接しているため、大気環境はまったく異なる。また、

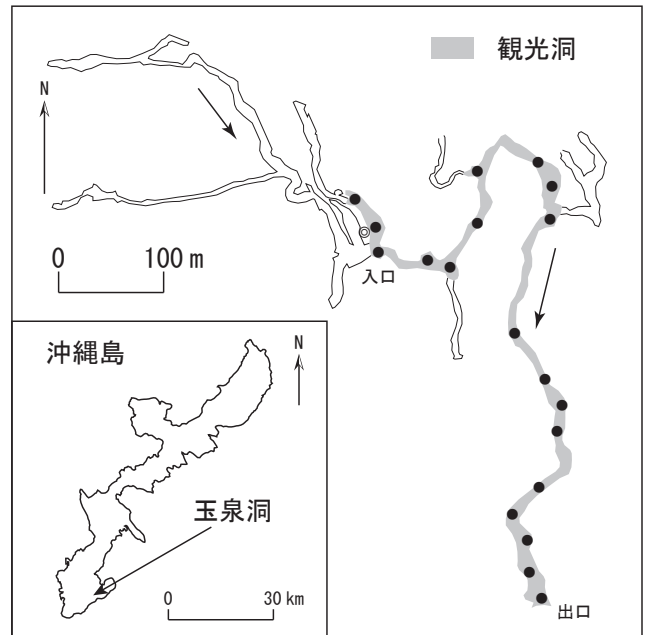


図 1 調査地および観測地点の位置  
●は洞窟内（19 地点）、◎は洞窟外（1 地点）。矢印は地下水流の方向。洞窟の基図は日本洞窟学会ほか（1992）。

観光コースの途中には、地下水系における支流との合流部など、ある程度の通気が発生する場所もある。しかし送風機などによる人為的な換気は行われていない。夏休みなどには、小学生を対象とした探検ツアーなどで、観光ルートから外れたところに入洞することもある。

最寄りの気象観測地点（アメダス糸数）における 1979～2000 年の平年値は、年平均気温 21.0℃、年降水量 1,944.0 mm であった。CO<sub>2</sub> 濃度については入手可能なデータが限られるが、気象庁によって八重山諸島の与那国島で得られた 2009 年の平均値は、389 ppm であった。

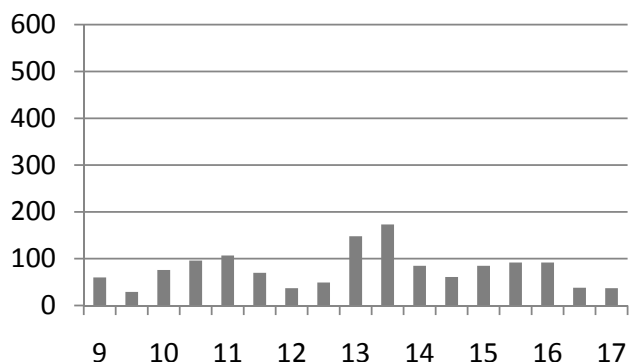
## III 調査方法

移動観測は、2010 年のゴールデンウィークと夏休み期間中に集中的に実施された。調査日は、4 月 29 日、5 月 2 日、5 月 4 日、7 月 17 日、7 月 18 日の 5 日間である。観光洞の入口（洞窟外）の 1 地点と、観光洞のコース沿い（洞窟内）に設定した 19 地点の、計 20 地点で、歩道から 1.0 m の高さの気温と CO<sub>2</sub> 濃度を測定した。図 1 に観測地点の位置を示す。

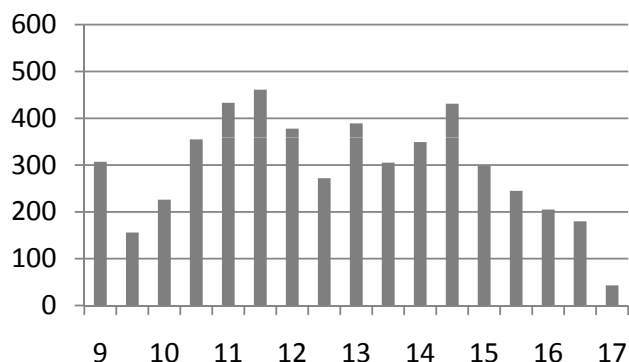
気温と CO<sub>2</sub> 濃度の測定は、それぞれの日に 4 回（8 時 30 分～、12 時～、15 時～、17 時～）行われた。1 回の測定には約 45 分を要した。測定には、ポー

観光利用による鍾乳洞の大気環境変化  
—沖縄島玉泉洞における観測事例—

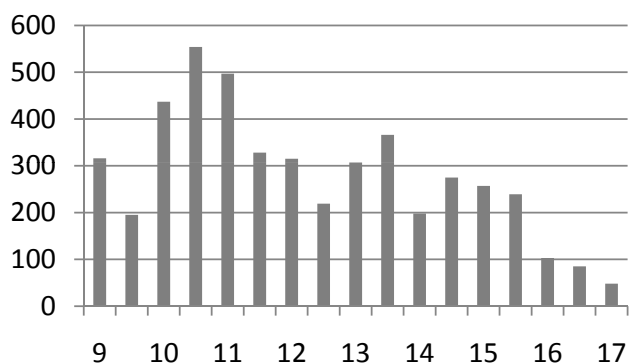
A: 4月29日



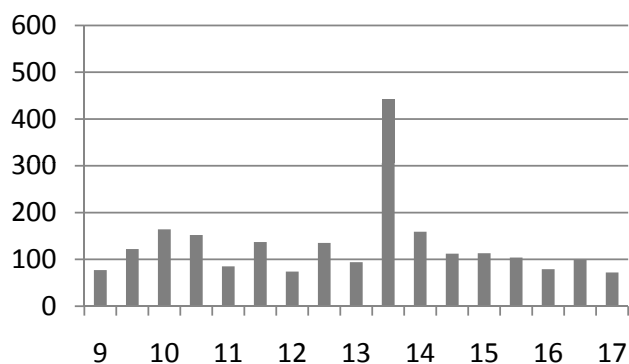
B: 5月2日



C: 5月4日



D: 7月17日



E: 7月18日

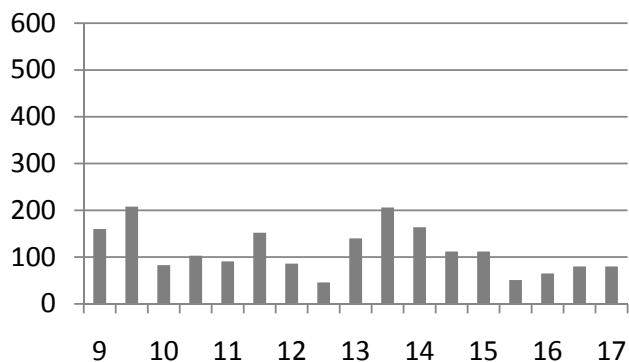


図2 入洞者数 (30分ごと)  
縦軸は入洞者数 (人), 横軸は時刻.

ダブル CO<sub>2</sub> 計 (p SENSE-RH サカキコーポレーション社製) を使用した. CO<sub>2</sub> 濃度の測定範囲は 0 ~ 5,000 ppm, 精度は ± 30 ppm である (測定限界は 9,999 ppm であるが, 5,001 ~ 9,999 ppm は精度範囲外となる). いずれの観測日も, 観測開始前に風通しのよい標準大気中 (CO<sub>2</sub> 濃度: 約 400 ppm) で校正を行った.

移動観測とあわせ, 入洞者数も調査した. すべ

ての観測日の営業開始から営業終了まで, 観光洞の入口で通過人数をカウントし, 30 分単位で入洞者数を集計した.

#### IV 調査結果

##### 1. 入洞者数

###### 1) 4月29日 (図2A)

累積入洞者数は 1,335 人で, 13 時台に小さなピー

クがあった。11時台前半の107人、13時台前半の148人、13時台後半の173人を除き<sup>1)</sup>、30分あたりの入洞者数は100人に満たなかった。

## 2) 5月2日(図2B)

累積入洞者数は5,034人で、11時台と14時台にピークがみられた。10時台後半から14時台後半にかけて、12時台後半を除いて30分あたり300人を超える入洞が続いた。とりわけ、11時台前半には433人、11時台後半には461人、14時台後半には431人が入洞した。

## 3) 5月4日(図2C)

累積入洞者数は4,739人で、10～11時台にピークがあった。ピーク時には、10時台前半に437人、10時台後半に554人、11時台前半に497人の入洞があった。

## 4) 7月17日(図2D)

累積入洞者数は2,220人で、13時台後半にピークがあった。30分あたりの入洞者数は100人前後で推移したが、13時台後半には団体客があり、442人が入洞した。

## 5) 7月18日(図2E)

累積入洞者数は1,939人で、9時台と13～14時台に小さなピークがみられた。ピーク時の入洞者数も最大で208人で、それ以外の時間帯では、概ね、30分あたり100人前後の入洞者数で推移した。

## 2. 気温

観測された気温は、入口付近で高く、出口に近づくにしたがって低くなり、外気の影響を受ける出口で再び高くなる傾向を示した。外気温の高い日は洞窟内の気温も高かったが、気温の変動幅は、洞窟外で大きく、洞窟内で小さかった。洞窟内平均気温をみると、4月29日のみ外気温より高く、それ以外の観測日では外気温より低かった。ゴールデンウィークより夏休みの方が、洞窟内外の気温差は大きかった。夏休みには、洞窟入口および出口で外気温の影響を受け、気温が高めになった。

### 1) 4月29日(図3A)

外気温は、8時台、12時台、15時台、17時台でそれぞれ、19.2℃、21.0℃、21.9℃、20.8℃であった。洞窟内平均気温はそれぞれ、21.9℃、22.3℃、

22.5℃、22.1℃であった。洞窟内平均気温は外気温より0.6～2.7℃高く、いずれも15時台に最も高くなった。

### 2) 5月2日(図3B)

外気温は、8時台、12時台、15時台、17時台でそれぞれ、24.2℃、24.0℃、23.8℃、23.1℃であった。洞窟内平均気温はそれぞれ、22.6℃、23.2℃、23.1℃、22.4℃であった。外気温は8時台から低下を続けたが、洞窟内平均気温は12時台に最も高くなった。洞窟内平均気温は外気温より0.7～1.6℃低かった。

### 3) 5月4日(図3C)

外気温は、8時台、12時台、15時台、17時台でそれぞれ、23.1℃、25.4℃、24.8℃、23.7℃であった。洞窟内平均気温はそれぞれ、22.9℃、23.3℃、23.3℃、22.9℃であった。外気温は12時台に、洞窟内平均気温は12～15時台に特に高くなった。洞窟内平均気温は外気温より0.2～2.1℃低かった。

### 4) 7月17日(図3D)

外気温は、8時台、12時台、15時台、17時台でそれぞれ、29.2℃、31.2℃、31.2℃、29.6℃であった。洞窟内平均気温はそれぞれ、25.0℃、25.4℃、25.3℃、25.1℃であった。洞窟内平均気温は外気温より4.2～5.9℃低かった。外気温も洞窟内平均気温も、12～15時台に最も高くなった。

### 5) 7月18日(図3E)

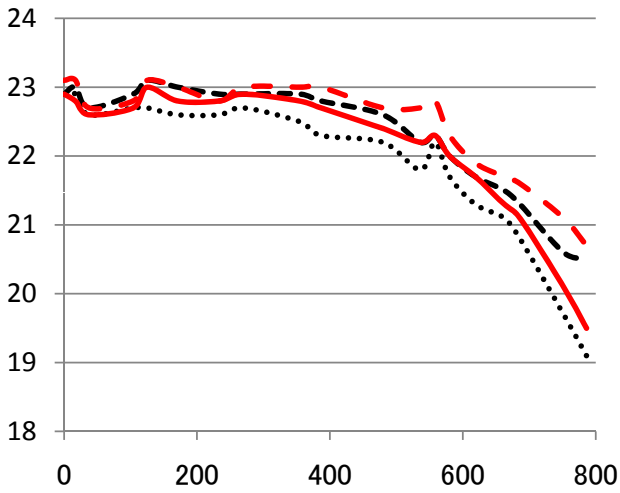
外気温は、8時台、12時台、15時台、17時台でそれぞれ、28.6℃、29.4℃、30.4℃、27.0℃であった。洞窟内平均気温はそれぞれ、24.9℃、25.0℃、25.2℃、24.9℃であった。洞窟内平均気温は外気温より2.1～5.2℃低く、いずれも15時台に最も高くなった。

## 3. CO<sub>2</sub>濃度

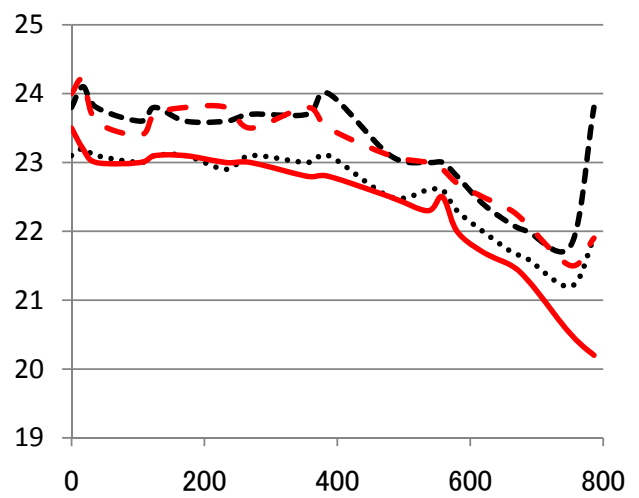
洞窟外のCO<sub>2</sub>濃度は、すべての観測日で得られた20データでみると386～405 ppmの範囲にあり、ほぼ標準的な値とみなせる。一方、洞窟内には、4月29日を除いて、標準値の6～10倍に達するCO<sub>2</sub>高濃度域が形成されていた。しかし、その分布域は一定ではなく、時間によって高濃度域が移動する現象も観測された。

観光利用による鍾乳洞の大気環境変化  
—沖縄島玉泉洞における観測事例—

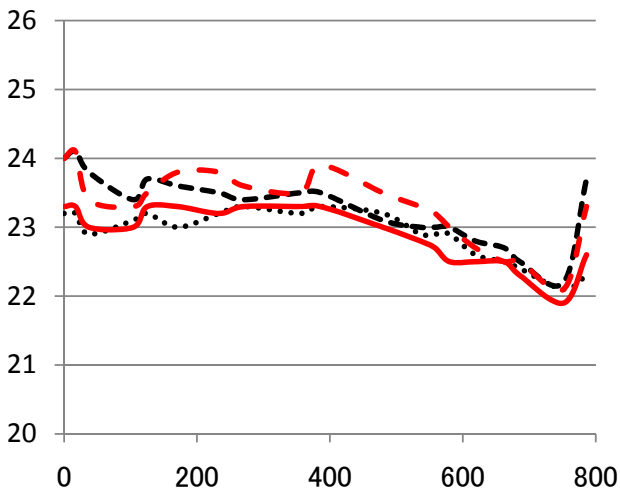
A: 4月29日



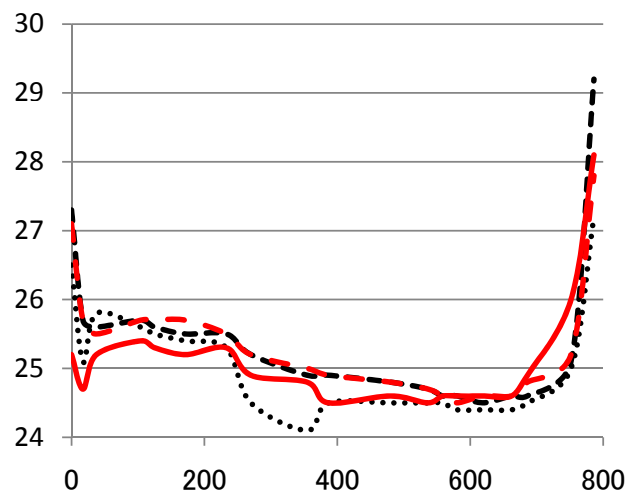
B: 5月2日



C: 5月4日



D: 7月17日



E: 7月18日

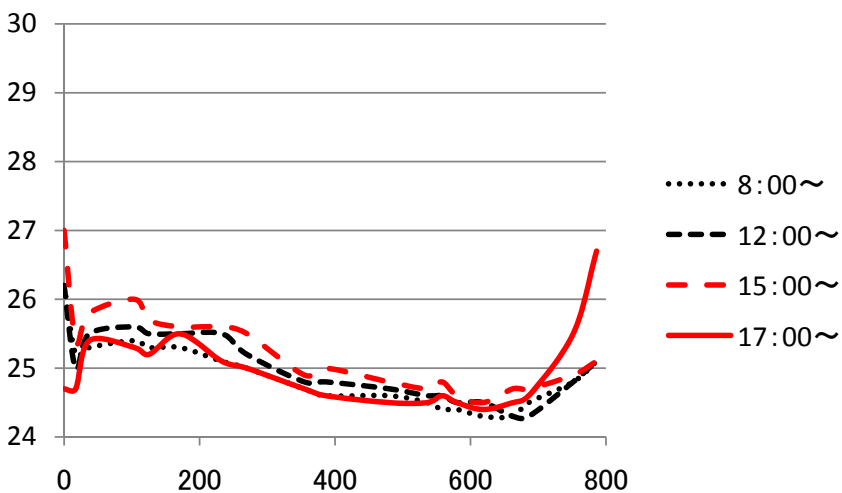
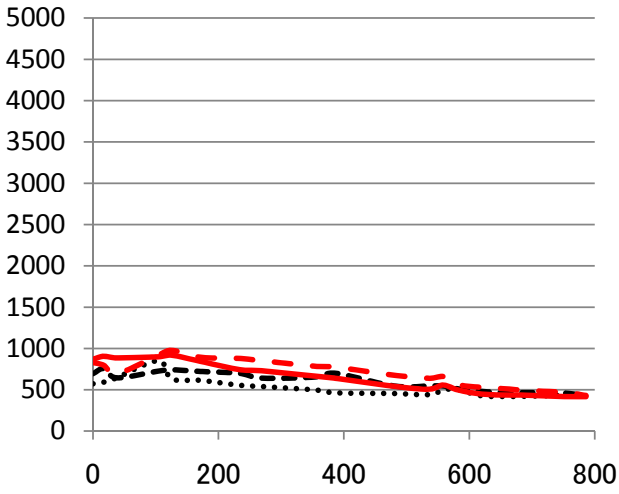
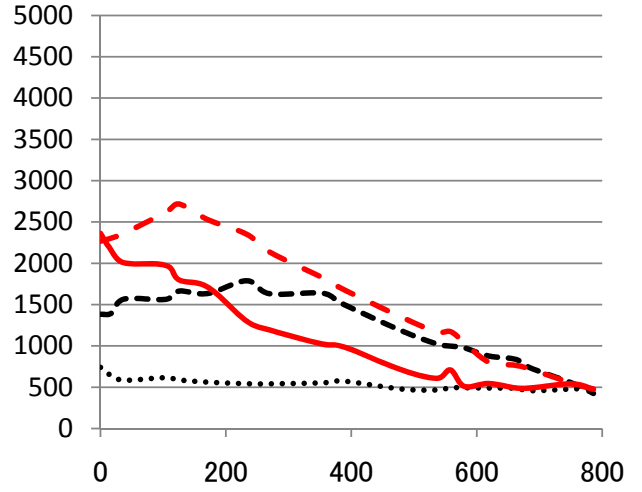


図3 気温の空間分布  
縦軸は温度 (°C), 横軸は入口からの距離 (m).

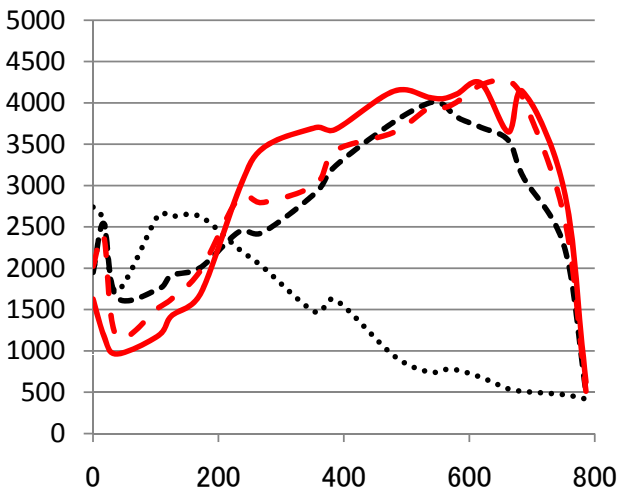
A: 4月29日



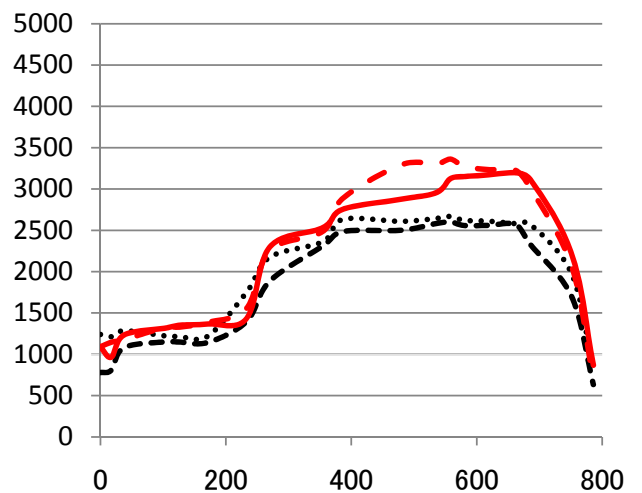
B: 5月2日



C: 5月4日



D: 7月17日



E: 7月18日

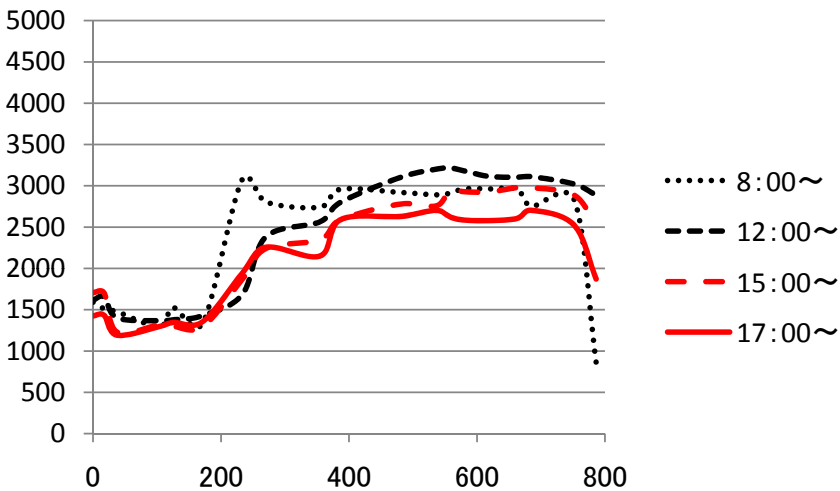


図4 CO<sub>2</sub> 濃度の空間分布  
縦軸はCO<sub>2</sub> 濃度 (ppm), 横軸は入口からの距離 (m).

1) 4月29日 (図4A)

洞窟外のCO<sub>2</sub>濃度は390～400 ppmで、洞窟内の平均CO<sub>2</sub>濃度は、8時台、12時台、15時台、17時台でそれぞれ、527 ppm, 602 ppm, 703 ppm, 652 ppmであった。CO<sub>2</sub>濃度は入口付近で高く、出口に近づくにしたがってやや低くなる傾向があったが、観測地点による大きな差はみられなかった。CO<sub>2</sub>濃度は15時台まで入口付近を中心に上昇し、営業終了後にやや低下した。この日に観測された最高値は977 ppm (15時台)であった。

2) 5月2日 (図4B)

洞窟外のCO<sub>2</sub>濃度は386～396 ppmで、洞窟内の平均CO<sub>2</sub>濃度は、8時台、12時台、15時台、17時台でそれぞれ、542 ppm, 1,231 ppm, 1,623 ppm, 1,137 ppmであった。CO<sub>2</sub>濃度は入口付近で高く、出口に近づくにしたがって低くなっていた。CO<sub>2</sub>濃度は15時台にかけて入口付近を中心に上昇し、営業終了後にやや低下した。CO<sub>2</sub>濃度の変動幅は、入口寄りで大きかった。この日に観測された最高値は2,717 ppm (15時台)であった。

3) 5月4日 (図4C)

洞窟外のCO<sub>2</sub>濃度は386～394 ppmで、洞窟内の平均CO<sub>2</sub>濃度は、8時台、12時台、15時台、17時台でそれぞれ、1,480 ppm, 2,712 ppm, 2,841 ppm, 2,832 ppmであった。営業開始前、すでに入口付近にCO<sub>2</sub>の高濃度域が形成されており、CO<sub>2</sub>濃度は2,740 ppmに達していた。多くの観測地点で、CO<sub>2</sub>濃度は17時台まで上昇を続けた。CO<sub>2</sub>の高濃度域は、徐々に出口方向へとずれていった。このため、朝方から夕方にかけてのCO<sub>2</sub>濃度は、入口付近では低下し、出口付近では上昇した。この日に観測された最高値は4,269 ppm (15時台)であった。

4) 7月17日 (図4D)

洞窟外のCO<sub>2</sub>濃度は390～405 ppmで、洞窟内の平均CO<sub>2</sub>濃度は、8時台、12時台、15時台、17時台でそれぞれ、1,968 ppm, 1,801 ppm, 2,216 ppm, 2,158 ppmであった。営業開始前、すでに出口付近ではCO<sub>2</sub>の高濃度域が形成されていた。この高濃度域では、15時台にかけてCO<sub>2</sub>濃度がさらに上昇したが、高濃度域の分布にはほとんど変化がなかった。この日に観測された最高値は3,362 ppm (15時台)であった。

5) 7月18日 (図4E)

洞窟外のCO<sub>2</sub>濃度は395～403 ppmで、洞窟内の平均CO<sub>2</sub>濃度は、8時台、12時台、15時台、17時台でそれぞれ、2,335 ppm, 2,432 ppm, 2,279 ppm, 2,095 ppmであった。営業開始前に出口付近にCO<sub>2</sub>の高濃度域が形成されており、営業終了後にCO<sub>2</sub>濃度はやや低下したが、高濃度域の分布にあまり変化はなかった。この日に観測された最高値は3,216 ppm (12時台)であった。

## V 考 察

### 1. 気温の空間分布と観光客の影響

洞窟外の平均気温が24℃前後であったゴールデンウィークより、最高気温が30℃を超えた夏休みの方が、全体としては洞窟内の気温も高くなった(図3参照)。これは、外気温が洞窟内の気温に影響を与えることを示している。しかしながら、洞窟内の気温の日変化は、洞窟外に比べてかなり小さかった。

洞窟内の気温分布は、外気温の変化より、局地的な環境条件の影響をより強く反映していると考えられる。5月2日のデータをみると、朝方から夕方にかけて外気温が低下したにもかかわらず、洞窟内の平均気温は観光客の多い時間帯に高くなっていた(図3B参照)。5月2日は、15時までに約4,000人が入洞した日である(図2B参照)。観光客の入洞が、洞窟内の気温に影響を及ぼしていることは明らかであろう。

洞窟内の気温は、入口から出口に向かって低下する傾向にあった。これは、閉鎖的で大気がこもりやすい入口付近で、観光客の入洞の影響を受け、気温が上がったためであろう。さらに、上流に位置する入口は出口より約10 m標高が高いこと、入口付近では観光客が滞りやすいことも、入口付近での気温上昇の一因として指摘できる。

### 2. CO<sub>2</sub>濃度の空間分布と観光客の影響

洞窟内のCO<sub>2</sub>濃度の平均値は、ほとんどの日で、営業開始前から、12時台、15時台にかけて上昇した。これは、入洞者の増加に伴うCO<sub>2</sub>濃度の蓄積が原因である。入洞者が少なかった4月29日でCO<sub>2</sub>濃度の平均値も最高値も低かったことは、このことを裏づけている。CO<sub>2</sub>濃度の上昇量に着目



すると、入洞者の多かった5月2日と4日に、とりわけ大きな値を示した。入洞者が比較的少なかった7月18日のCO<sub>2</sub>濃度が高かったことは、営業開始時にすでに形成されていたCO<sub>2</sub>高濃度域の影響で、1日を通して高いCO<sub>2</sub>濃度が維持されたためであろう。

CO<sub>2</sub>の高濃度域は、少なくとも数日にわたって維持され、洞窟外の気圧変化の影響を受けながら、その分布域が変動していく。これは5月2日と4日のデータに顕著に表れている(図4B・C参照)。さらに、CO<sub>2</sub>濃度の空間分布は、日によっても大きく異なる。時間とともに高濃度域が変化する日もあれば、一日を通して高濃度域が変わらない日もある。これは、大気の流れが、観光客の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>を集積・拡散させている可能性を示唆する。調査地の場合、観光洞の出口に外気との交換口がある。また、洞窟内には支流があり、地下水系に沿った大気の流れも発生している。外気の気圧変化と、それに伴う風向・風速の変化が、洞窟内のCO<sub>2</sub>濃度の空間分布を決定していると考えられる。

洞窟内のCO<sub>2</sub>濃度は、鍾乳石の再溶食が始まるとされる2,400 ppmを、頻繁に、かつ大幅に超えていた。この観光鍾乳洞で発生している大気環境変化は、石灰岩の溶解に及ぼす環境条件、すなわち地形形成環境に影響を与えるレベルであるといえる。

## VI まとめ

玉泉洞における観測の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 洞窟内の気温は、外気温の影響だけではなく、観光客の入洞によっても上昇する。
- (2) 洞窟内のCO<sub>2</sub>濃度は、観光客の入洞によって上昇する。観光客の入洞によって形成されたCO<sub>2</sub>の高濃度域は集積・拡散し、その分布を変化させる。
- (3) 調査地のCO<sub>2</sub>濃度の上昇は、石灰岩の再溶解を引き起こすレベルに達している。

現在、温度・湿度・CO<sub>2</sub>センサーとデータロガーを用いたモニタリングの結果を解析している。これについては別稿にまとめる予定であるが、こう

した定量的データをもとに、オーバーユースを客観的に評価し、鍾乳洞の大気環境保全のための対策を考えるとともに、鍾乳洞の持続的な観光利用のための適正人数についても議論していく必要がある。

現地調査にあたり、大岡素平氏をはじめとする「おきなわワールド」の皆様にはご理解とご協力をいただきました。教育学部の自然環境教育教室をはじめとする琉球大学の多くの学生には、観測をお手伝いいただきました。記してお礼を申し上げます。

(投稿 2011年4月28日)

(受理 2011年6月22日)

## 注

- 1) たとえば「12時台」は12時00分～12時59分、「11時台前半」は11時00分～11時29分、「13時台後半」は13時30分～13時59分を表す。

## 文献

- 漆原和子編(1996):『カルスト』大明堂。
- 漆原和子・吉野徳康・上原 浩(1998):福島県あぶくま洞における観光客の入洞数と洞窟の大気環境の変化。地理学評論, 71A, 527-536。
- 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(1999a):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。
- 漆原和子・加藤美雄・上原 浩・吉野徳康(1999b):観光鍾乳洞における気候特性—福島県あぶくま洞を例として。季刊地理学, 51, 188-200。
- 大沢信二(2009):鍾乳洞の気象と鍾乳石の成長。大分地質学学会誌, 15, 1-10。
- 尾方隆幸(2010):琉球列島におけるジオパーク活動(第1報)。沖縄地理, 10, 49-50。
- 高屋康彦・廣瀬 孝・青木 久・松倉公憲(2006):室内実験における石灰岩の溶解特性に関する一考察。地学雑誌, 115, 136-148。
- 日本洞窟学会・日本ケイビング協会・日本洞窟協会・玉城村教育委員会・南都ワールド株式会社(1992):『玉泉洞ケイブシステム』玉城村教育委員会・南都ワールド株式会社。
- 古谷真城・中山大地・松山 洋・中野智子(2005):

- 観光鍾乳洞の気候特性と観光化の影響—東京都奥多摩郡日原鍾乳洞を例として．日本地理学会発表要旨集, 68, 83.
- Dragovich, D. and Grose, J. (1990) : Impact of tourists on carbon dioxide levels at Jenolan Caves, Australia: An examination of microclimatic constraints on tourist cave management. *Geoforum*, 21, 111-120.
- Ford, D., and Williams, P. (1989) : *Karst geomorphology and hydrology*. London: Unwin Hyman.
- Sweeting, M. M. (1972) : *Karst landforms*. London: Macmillan.