



# 東京学芸大学リポジトリ

Tokyo Gakugei University Repository

## 史跡・吉見百穴における塩類風化による凝灰岩の削 剥深と気候条件との定量的関係（論説）

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2023-04-06 キーワード (Ja): キーワード (En): Salt weathering, Denudation depth, Temperature, Relative humidity, Tuff, Yoshimi Hyaku-Ana, Historic site 作成者: 有賀, 夏希 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2309/00179959">http://hdl.handle.net/2309/00179959</a>

# 史跡・吉見百穴における 塩類風化による凝灰岩の削剥深と気候条件との定量的関係

有賀 夏希\*

キーワード：塩類風化, 削剥深, 気温, 相対湿度, 凝灰岩, 吉見百穴, 史跡

## I はじめに

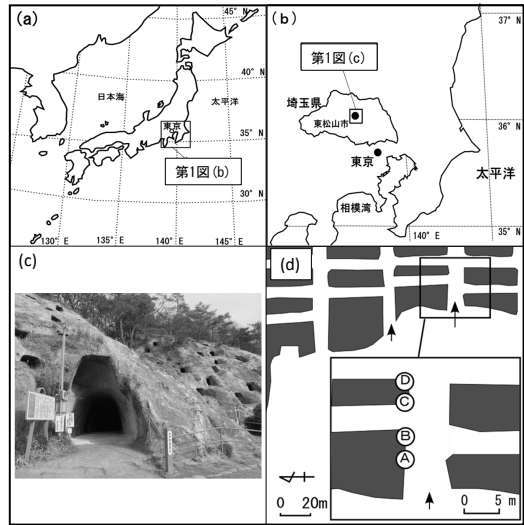
塩類風化とは、塩類の析出に伴い岩石が分解・細粒化する現象であり、物理的風化作用の1つとされる(Winkler, 1994; Goudie and Viles, 1997)。塩類風化のおもなメカニズムは、塩溶液から結晶が成長するときの結晶化圧力による岩石の破壊であり、その岩石を破壊する応力となる塩の結晶化は、岩石表面の温度と乾燥条件に大きく影響される(Matsukura and Tanaka, 2000)。塩類風化のメカニズムは、室内実験や野外観測という2つのアプローチによって議論されてきた。室内実験では主に、塩類風化と岩石の強度低下との関係(山田ほか, 2005; 山本ほか, 2005; 佐藤ほか, 2011など)を、野外調査では塩類風化による析出鉱物を考察した研究が行なわれてきた(関・酒井, 1987; 朽津, 1992; 川野・小坂, 2002など)。塩類風化は、岩石表面に塩溶液が供給され、その場所の気候の影響を受けて岩石表面が乾燥し塩の結晶化が起こることにより発生する。塩類風化の発生により岩石表面の強度は低下し、岩石表面の強度がそこに作用する侵食力以下になると、岩石表面は侵食され岩屑が生産される。その侵食力は風や波などの外的営力や重力などであり、これら一連の地形形成プロセスにより、様々な地形が

形成される。朽津ほか(2003)は、鎌倉やぐらにおいて、やぐら内の風化量、気温・湿度を観測することにより、やぐらの開口率と風化量との関係について考察した。藁谷(2005)では、砂岩とラテライトで構成されたアンコールワットを対象として、気温と湿度の観測、岩石の物理的・化学的特性を調べ、異なる風化環境・異なる岩石がもたらす風化プロセスの違いについて考察した。これらの研究により、塩類風化を規定する要因として、気温や湿度という気候要素が関係することが明らかにされている。またSunamura and Aoki(2011)は、塩類風化によって形成されるタフォニの成長速度について岩石物性と気候環境の指標を用いてS字曲線で表現されるモデル式を提案し、塩類風化による地形の変化は岩石物性と気候要素で説明できる可能性を示した。

埼玉県の史跡・吉見百穴には、凝灰岩体に堀削された素彫りの軍需坑道跡が存在する。多くの研究により、吉見百穴の坑道内の壁面では塩類風化が進んでいることが報告され、塩類風化による析出鉱物・岩屑の生産に関する研究が行われてきた。吉見百穴の坑道壁面を対象とした研究をいくつか挙げる。まず塩類の析出鉱物については、千葉ほか(1975)、朽津・尾崎(1999)、堀口ほか(2000)による研究の蓄積が

\* 株式会社東京地図研究社(学部62期, 院48期)

ある。千葉ほか (1975) は吉見丘陵に分布する第三紀の酸性凝灰岩に関して、坑道内で析出する塩類は硫酸塩鉱物であることを明らかにしている。朽津・尾崎 (1999) は、塩類風化による析出鉱物の季節変化と産出状態の場所的違いについて、堀口ほか (2000) は岩石表面に生成する析出物の生成過程について報告した。また、大山ほか (1999) では、壁面の風化メカニズムと風化速度に関して、凝灰岩の風化メカニズムと風化速度および岩盤中の微生物の影響について考察し、硫酸の起源は黄鉄鉱の酸化であること、岩盤中の微生物は検出されなかったことを報告した。高屋ほか (2011) では塩類風化に影響を与える要因として、アルノーゲンの析出を挙げており、塩類風化速度について岩屑生産の季節変化から考察した。高屋・小口 (2011) では塩類風化による岩屑生産に関して、析出塩類と岩屑生産量の季節変化との関係を考察し、析出塩類量と岩屑生産量は一次相関の関係をもつことを明らかにしている。最後に、Hayakawa at al. (2015) は、レーザースキャナーを使用し、塩類風化による壁面地形の微小変化量に関する考察を行なっている。このように吉見百穴では、鉱物学、地質学や地形学に関する研究の蓄積があるものの、そのほとんどが壁面の風化による析出鉱物や、風化のメカニズムに関する風化研究である。壁面の地形に着目した研究は Hayakawa at al. (2015) のみであり、風化による壁面の削剥量と、風化環境に関与する気温や湿度という気候要素との定量的な結びつきを調べたプロセス地形学的研究はほとんど行なわれていない。そこで本研究では、吉見百穴の凝灰岩で構成された削剥の程度が異なる坑道壁面を対象として、削剥量と気温や湿度といった気候環境条件 (風化環境条件) との定量的関係を明らかにすることを目的とし、1年間の定期観測を実施した。



第1図 対象地域の位置と坑道平面図

## II 調査地域

### 1. 吉見百穴

調査対象地域は埼玉県比企郡吉見町の史跡・吉見百穴である。吉見百穴は、埼玉県の中央部に位置し (第1図ab)、東松山市と隣接する吉見町の吉見丘陵の南西端に存在する。金井塚 (1986) によると、百穴とは吉見丘陵の南西端の西側斜面に刻み込まれた古墳時代後期の横穴墓群を指し、その横穴墓の数は現在確認できるもので219基あり、大正12年には日本の代表的な横穴群として国指定史跡に指定されている。百穴の位置する吉見丘陵南西部には、新第三系福田層の凝灰岩、泥岩および砂岩が分布している。これらの岩石は変成岩類と断層で接し、そこに第四系物見山礫層が不整合に覆っている (松丸・林, 1980)。同敷地内には、第二次世界大戦末期の1945年に掘削された網の目状に張り巡らされた幅約4m、高さ約2.2mの地下軍需坑道跡が存在する (第1図c)。現在立ち入りが可能な坑道は、観光地として開放されている一部分である。また、吉見丘陵の西側には市野川

が流れているが、その水面は軍需工場跡の床面から5mほど低い位置にあり、軍需坑道跡の床面が水没した跡は観察されない（朽津・尾崎, 1999）。吉見百穴とは通常、古墳時代後期の横穴墓群と軍需坑道跡の二つを指す言葉として用いられる。

## 2. 調査対象地点の設定

現地調査は吉見百穴内の地下軍需坑道跡地の壁面で行なった。坑道内は網の目状に張り巡らされており、合計6つの入口が存在する。しかし坑道内には崩落箇所がいくつか確認されているため、ほとんどが立ち入り禁止区域となっている。第1図dは調査対象の立ち入り禁止区域の坑道内平面図である。黒枠の地点では、2003年まで吉見百穴に隣接して営業していた温泉施設（名称：吉見薬泉）の風呂跡が存在する。この風呂跡は、現在は水が抜かれ放置されており、周辺の壁面上部は掘削した当時の状態のままと思われる凹凸のあるノミの跡がみられ、下部はノミの跡はなく削剥されているのが観察される。以上の状況から、風呂跡周辺の壁面は、営業停止した2003年までは常に湿った環境が保たれ、塩類風化による削剥は発生しなかったと考えることができる。そして壁面に掘削当時のノミの跡が残存することは、初期地形の復元が可能となり、2003年以降の時間継続による削剥量の見積もりが可能となる。一般に、野外において塩類風化をもたらす塩類の供給や乾燥条件には、風や雨、日射量などの影響が複合的に絡むが、坑道内である本調査地点は、風雨・日射などの影響がほとんどなく、屋外に比べてシンプルな条件をもつ。本研究では、この風呂跡周辺の坑道壁面を調査対象とし、削剥の程度が異なる隣接した壁面を4地点（A～D）選び、調査地点として設定した。坑道入口からの水平距離は、地点Aが1.7m、地点Bが4.1m、地点

Cが9.7m、地点Dが14.1mである。各地点の高さは、地点Aが2.2m、地点Bが2.3m、地点Cが2.3m、地点Dが2.3mである。調査対象とした壁面の面積は、地点Aが3.5㎡、地点B・C・Dが3.7㎡であり、ほぼ同一である。

## Ⅲ 調査・観測方法

現地調査は、2014年12月から2015年12月までの約1年間にわたって実施した。2014年12月29日に観測機器を設置し、2015年1月11日、2月24日、4月3日、5月11日、6月15日、7月24日、8月26日、9月24日、10月29日、11月28日、12月26日の計11回の定期観測を行った。各壁面の測定点は3箇所ずつ、計12箇所設置した。壁面下部から高さ0.4mの位置に測定点A3～D3、0.8mの位置に測定点A2～D2、1.2mの位置に測定点A1～D1を設置した。

坑道内の環境条件を測定するために、気温と相対湿度（以下単に湿度とする）の観測を行なった。気温と湿度は、連続観測が可能なデータロガー（KNラボラトリーズ（株）製、ハイグロクロン）を用いて2015年1月1日0時～12月31日23時までの1年間、1時間間隔で行なった。データロガーは測定点A1・A3・B1・B3・C2・D2の壁面近傍の計6箇所と坑道外の直射日光と風雨の当たらない軒下に設置した。各地点の代表地点として、高さ0.8mのA2～D2におけるデータを利用した。地点AとBに関してはA2とB2のデータを観測していないため、A1とA3の実測値の平均をA2に、B1とB3の平均値をB2とした。またこの補正の妥当性については、2015年11～12月の期間にA2、B2に新たにデータロガーを設置し、実測値を用いて検証を行った。

2003年から2014年までの11年間の壁面の削剥量を把握するため、各地点の壁面に測線を

1本設けて地形測量を行い、縦断形を作成した。初期地形面を示すと思われるノミの跡が残存した面と、削剥された面との境界部は明瞭な段差になっており、削剥されている部分はわずかに凹み、その表面形態はノミの跡がなくきわめて平滑であった。地点Dではノミの跡が残存し、削剥されていなかったことから、地点Dの縦断形を削剥前の原地形とみなし、地点A～Cの初期地形の復元を行い、11年間における最大削剥深 (cm) の算出を行った。本研究ではこの最大削剥深を削剥量の指標として用いることとする。

坑道壁面には風雨による外的営力はほとんど作用せず、壁面はほぼ垂直であることから、塩類風化によって岩盤表面の強度が低下すれば、壁面に生じた岩屑は、析出した塩類とともに自重落下する。したがって、本調査地点で生産される岩屑の量は、塩類風化作用のみの影響を受けて生じた風化量とみなすことができる。塩類風化による岩屑生産の季節変化を把握するために、壁面下部に岩屑採取用のブルーシート (縦0.9m×横1.6m) を設置した。調査日ごとにブルーシート内に落下した崩落物質を回収し、前回調査からの崩落量とした。

この崩落量には析出した塩類と、岩屑の両方が含まれていることが考えられる。そのため崩落物中に含まれる塩類についてXRD (X線解析分析装置、リガクRAD-X) 分析により、析出塩類の同定を行った。また、崩落物中の塩類量と岩屑量の関係について把握するために高屋・小口 (2011) を参考に塩類と岩屑の分離を行なった。分離の方法について説明する。まず崩落物を110℃で24時間以上炉乾燥させた後に重量の計測を行なった。次に乾燥させた崩落物を容器内で水と混合させて十分に攪拌させた後、吸引濾過を行い、濾紙上に残ったものを再度110℃で24時間以上炉乾燥させ、塩類除去後

の岩屑のみの重量を計測した。そして全体の乾燥重量から岩屑の重量を差し引いて、崩落した塩類の重量を算出した。

## IV 調査・観測結果

### 1. 壁面の観察

各地点の壁面の様子を撮影した写真を示す。写真1aは地点Aの壁面の様子を撮影した写真である。地点Aの壁面上部は灰色で、坑道掘削当時のものと思われるノミで削られた凹凸が残っていた。壁面下部は茶色を帯び上部に比べて凹みがあり、表面は凹凸の跡がなく比較的平坦であった。以上より壁面下部はノミで削られた跡が削剥したことが考えられた。削剥した高さの上限は壁面基部から約130cmであった。写真2aは2015年4月3日調査時に撮影した写真であるが、約1cmほどの厚みで壁面が浮きあがり、板状に削剥しそうになっている様子がみられた。

写真1bは地点Bの壁面の様子を撮影した写真である。地点Bも地点Aと同じように、壁面上部はノミの跡が残り凹凸のある灰色部分が観察された。壁面下部の茶色の部分は平坦であり、ノミの跡がなく削剥したと考えられた。削剥した高さの上限は約90cmの高さであり地点Aよりも低くなっていた。また、マルで示したところは削剥している地点と、していない地点の境界であるが、ノミの跡は確認されず、壁面が灰色になっていた。この場所の壁面を軽く叩くと中が空洞になっているような音がした。この部分は壁面表面が浮き始めており、今後板状の剥落が起こることが推測された。

写真1cは地点Cの壁面の様子を撮影した写真である。地点Cでは全体的に灰色のノミの跡がみられ、削剥されている場所は下部でわずかにみられる程度であった。削剥の上限は約40

cmの高さであり、地点A、Bよりも低かった。写真1dは地点Dの壁面の様子を撮影した写真である。壁面表面には、凸凹があるノミの跡がみられ、削剥した箇所は観察されなかった。写真2bは、2015年4月3日調査時に撮影した地点Dの壁面の様子である。壁面に白い結晶物が大量に付着しているのが観察された。この結晶物は、冬季から春季にかけて地点A、B、C、Dで共通して観察され、とくに大量に観察されたのは地点C、Dであった。この結晶物を舐めると塩の味がしたことから、この結晶物は岩石表面に析出した塩類であると推測される。この事実は、吉見百穴では塩類が析出し、塩類風化が発生しているという朽津・尾崎(1999)や高屋・小口(2011)の報告と一致する。

## 2. 壁面削剥深

第2図に各地点の壁面縦断面を示す。実線は現地形を示し、破線は地点Dをもとに復元した初期地形である。地点A、B、Cでは、水平方向のくぼみであるノッチが形成されている。ノッチ上端の高さは、地点Aでは壁面基部から156cm、地点Bでは88cm、地点Cでは35.5cmであった。ノッチの平均は地点Aで2.0cm、地点Bでは1.9cm、地点Cでは2.0cmであり、ノッチの高さに差はあるものの、深さの差はほとんどみられなかった。しかし、地点Dを用いて復元した初期地形をみると、地点によって削剥深が異なることがわかった。最大削剥深(D)は、それぞれ地点Aで11.8cm、地点Bでは7.4cm、地点Cでは4.4cmであった。

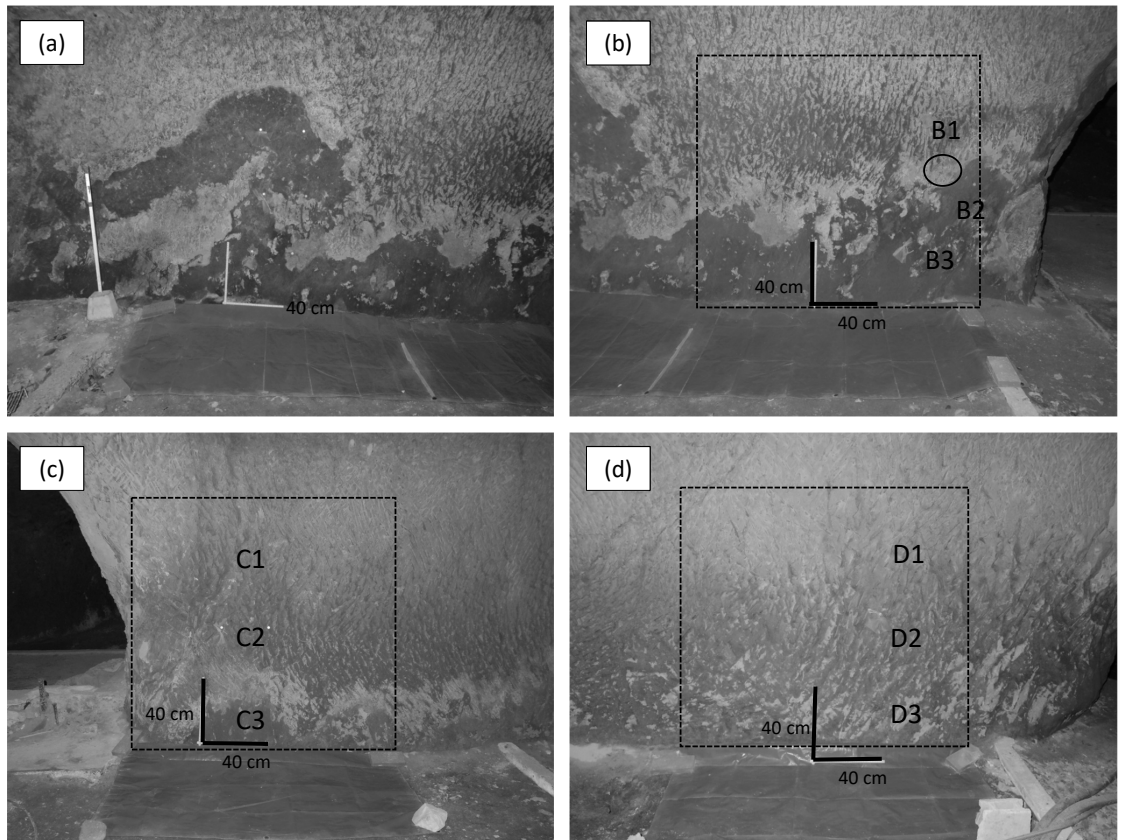
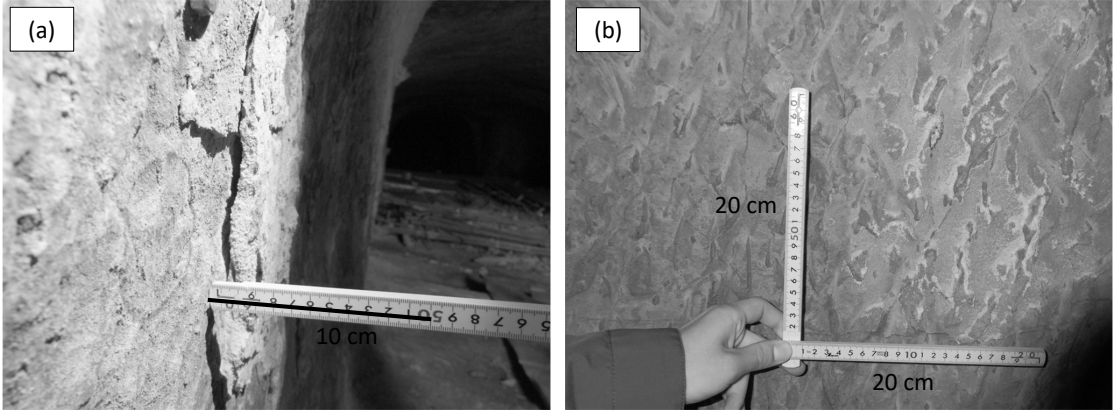
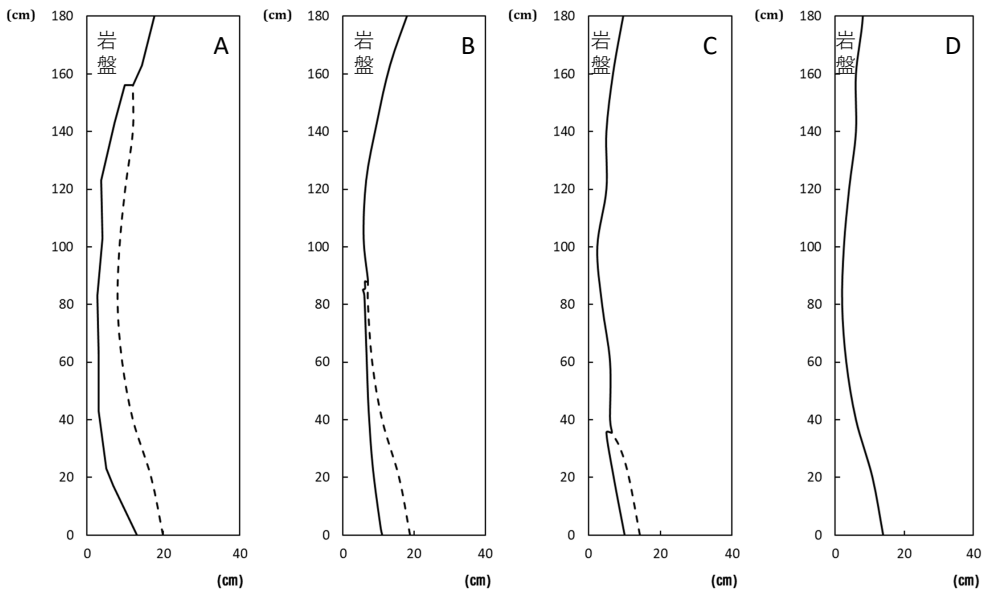


写真1 調査対象壁面



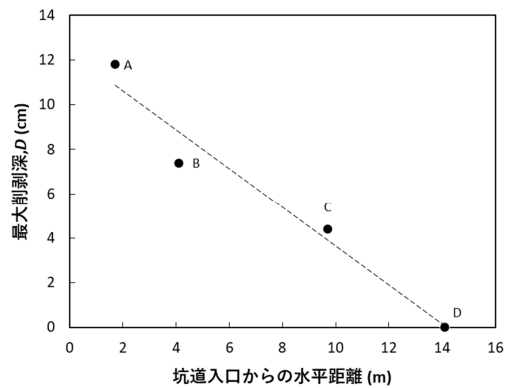
(2015年4月3日撮影)

写真2 調査対象壁面



第2図 壁面縦断面形. 破線は初期地形面を示す.

第3図は横軸に入口からの距離、縦軸に最大削剥深 ( $D$ ) をとり両者の関係について表わしたグラフである. このように11年間では、地点A, B, Cでは入口からの距離が近いほど削剥深が大きく、入口から14mの地点Dではほとんど削剥されていないという場所的差異が存在することがわかった.



第3図 坑道入口からの距離と削剥深の関係

### 3. 気温・湿度の観測結果

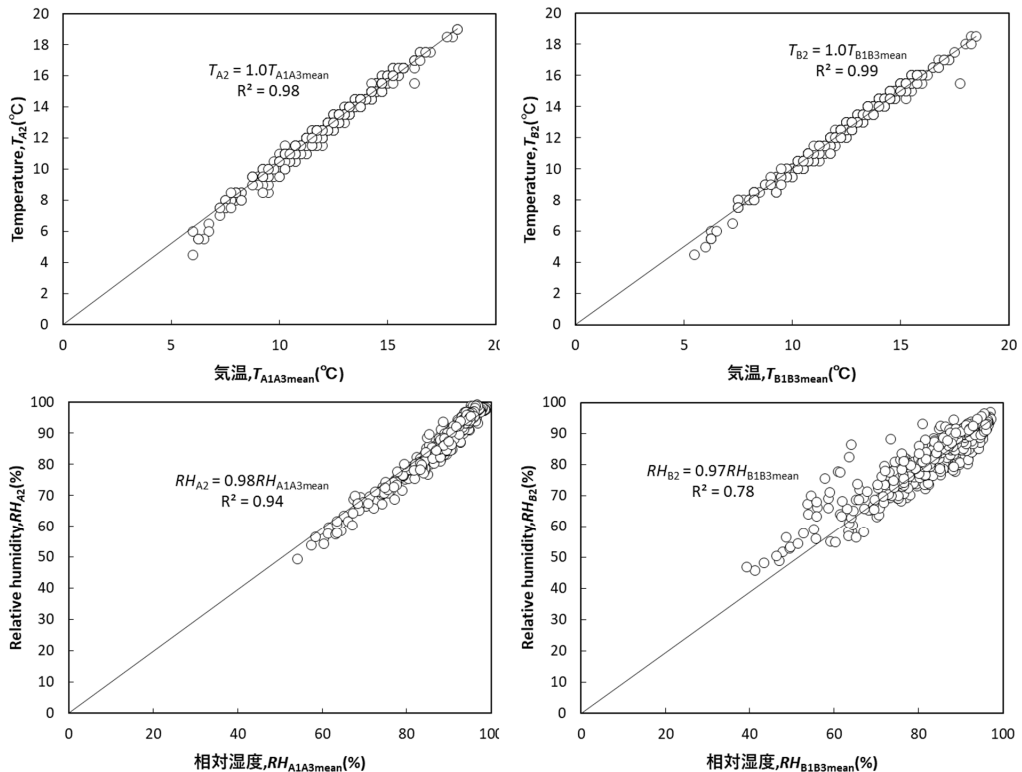
#### 1) データ補正

気温・湿度の各地点の代表地点として、A2～D2のデータを用いる。しかし、地点AとBに関してはA2とB2のデータを観測していない。A1とA3、B1とB3の実測値の平均をそれぞれA2、B2の値として採用することが可能かどうかを検討するため、A2、B2にデータロガーを設置し、11～12月に観測を行った。第4図は縦軸にA2、B2の気温 (T)・湿度 (RH) の実測値データを、横軸にA1とA3、B1とB3のTまたはRHの平均値 ( $T_{\text{mean}}$ ,  $RH_{\text{mean}}$ ) をとり、それらの関係を示したものである。TとRHともに、回帰直線は、 $Y = X$ の一次式に近く、決定係数の大きさも1に近い。このことから、A1とA3、B1とB3の実測値の平均をそ

れぞれA2、B2の値として用いることが可能と判断し、採用した。

#### 2) 気温・湿度の観測結果

第1表は観測期間内の月別の最高・最低・平均の気温湿度をまとめたものである。まず各地点の最高気温に着目すると、地点Aでは8月に27℃、地点Bでは8月に26.5℃、地点Cでは7月に26℃、地点Dでは7月に23.5℃、坑外では8月に38.5℃であった。最低気温は、坑道内はいずれの地点も2月であり、地点Aは-0.5℃、地点Bでは-0.5℃、地点Cでは-1.0℃、地点Dでは-1.0℃、坑外では3月の0℃であった。また、平均気温の最大はいずれの地点も8月であり、地点Aで21.6℃、地点Bでは21.9℃、地点Cでは20.9℃、地点Dでは20.1℃、坑外では8月の27.2℃であった。平均気温の最低値は、坑



第4図 A2、B2との相関関係



第1表 観測期間内の気温(上)と湿度(下)

単位(°C)													
	地点	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
最高気温	A	12.3	11.0	16.5	17.0	25.3	24.0	26.8	27.0	23.8	20.5	19.0	15.5
	B	12.8	11.0	16.8	16.8	24.5	23.5	25.8	26.5	23.8	21.5	18.5	15.0
	C	12.0	10.5	15.5	16.5	24.5	23.5	26.0	25.0	23.5	21.0	17.5	13.5
	D	10.5	11.5	14.0	14.5	22.0	21.5	23.5	23.0	22.5	20.0	16.5	14.5
	坑外	—	13.5	25.0	29.5	32.5	32.0	37.0	38.5	32.5	27.5	21.0	18.0
最低気温	A	0.5	-0.5	1.3	4.8	10.3	13.8	16.0	18.0	15.3	11.0	5.3	2.8
	B	1.0	-0.5	1.3	5.0	10.5	14.0	16.0	18.5	15.5	11.0	3.5	2.0
	C	0.5	-1.0	0.5	4.0	10.5	14.0	15.5	18.0	15.5	11.0	5.5	3.0
	D	1.5	0.0	1.5	5.5	10.0	13.5	15.5	18.0	15.5	11.0	5.5	3.0
	坑外	—	3.0	0.0	3.5	12.0	15.5	19.5	19.0	16.5	11.0	3.5	1.0
平均気温	A	4.6	4.5	7.1	10.4	14.4	16.6	20.1	21.6	19.2	15.4	12.8	8.1
	B	4.9	4.8	7.4	10.7	14.6	16.8	20.4	21.9	19.4	15.7	12.6	7.7
	C	4.8	4.6	7.1	10.3	14.0	16.1	19.3	20.9	18.9	15.4	12.4	7.9
	D	4.7	4.5	6.8	9.8	13.1	15.3	18.4	20.1	18.5	15.2	12.5	8.2
	坑外	—	7.9	10.2	14.8	21.6	22.6	26.4	27.2	22.7	18.0	13.3	8.8

単位(%)													
	地点	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
最高湿度	A	95.3	95.8	95.6	97.0	97.7	98.6	98.5	97.6	97.9	99.0	99.2	96.2
	B	95.6	95.4	95.6	96.8	97.5	98.3	98.1	98.8	98.6	98.5	99.4	97.0
	C	94.1	95.0	95.5	96.9	97.0	98.8	98.8	97.0	95.2	98.3	98.1	98.8
	D	96.9	97.3	96.8	98.1	99.8	100	100	100	100	100	100	100
	坑外	—	87.3	89.7	94.0	89.9	91.3	94.2	92.3	95.8	99.1	93.8	100
最低湿度	A	37.0	29.5	32.6	56.3	41.0	41.2	83.7	82.7	63.3	44.7	49.4	41.7
	B	39.0	31.6	31.9	57.9	40.3	45.5	84.3	83.0	61.4	43.3	57.7	45.8
	C	39.9	34.2	38.8	62.0	41.2	45.2	82.2	87.8	60.3	50.2	62.4	55.7
	D	55.5	58.3	55.7	69.7	59.1	59.9	92.2	91.9	72.0	61.1	70.7	59.7
	坑外	—	21.9	15.5	24.7	15.6	24.1	48.8	41.3	33.9	27.0	29.5	21.7
平均湿度	A	77.3	80.6	82.0	91.6	88.7	94.4	95.2	94.0	93.4	89.3	88.8	83.1
	B	76.4	80.2	81.6	91.1	89.4	94.6	95.3	94.6	93.6	88.2	90.4	82.7
	C	75.0	78.4	82.9	92.0	89.5	94.4	95.8	93.7	91.2	89.2	91.8	87.9
	D	84.7	88.4	88.9	93.0	92.8	96.9	99.0	98.4	97.2	94.0	94.1	89.1
	坑外	—	61.7	55.4	68.4	58.4	73.2	79.1	75.6	77.2	67.7	76.4	65.1

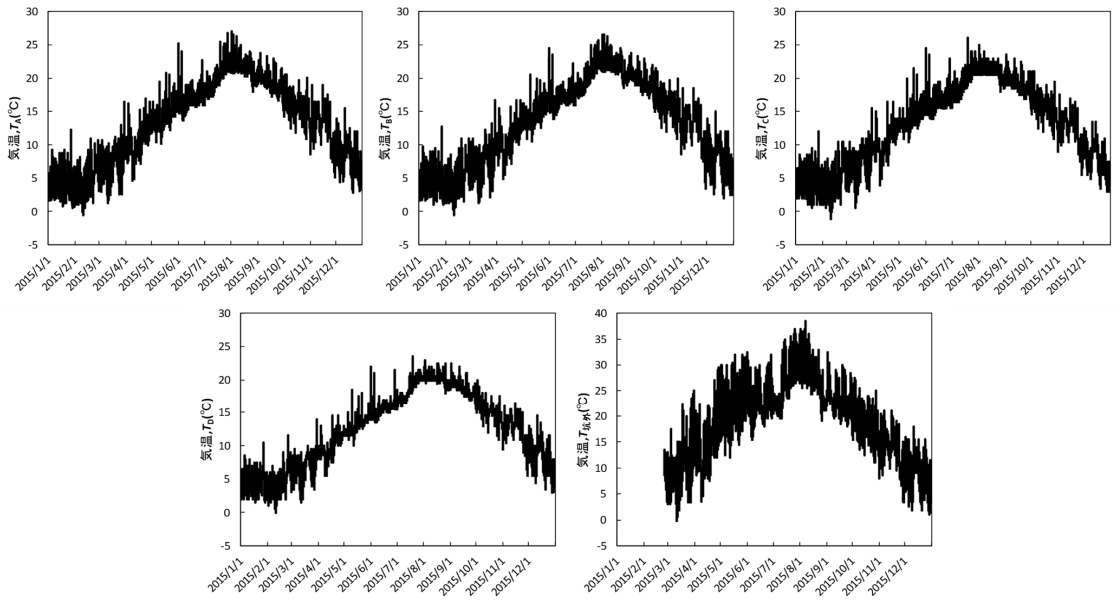
内、坑外ともに2月であり、地点Aで4.5°C、地点Bでは4.8°C、地点Cでは4.6°C、地点Dでは4.5°C、坑外では7.9°Cであった。このように、各地点で最高気温と最低気温には差はあるものの、平均値ではほとんど差が見られなかった。また、最高湿度はどの地点も100%に近い結果になった。最低湿度は各地点に差があり、坑道外では3月に15.5%、地点Aでは2月に29.5%、地点Bでは2月に31.6%、地点Cでは34.2%、地

点Dでは1月に55.5%、という結果になり、坑道入口に近いほど最低湿度が低くなるという結果になった。平均湿度についてみると、坑道外では69.4%、地点A、B、Cで約80%、地点Dで93.1%であり、坑道入口から遠い地点Dは平均的に高い湿度を保っていることがわかる。

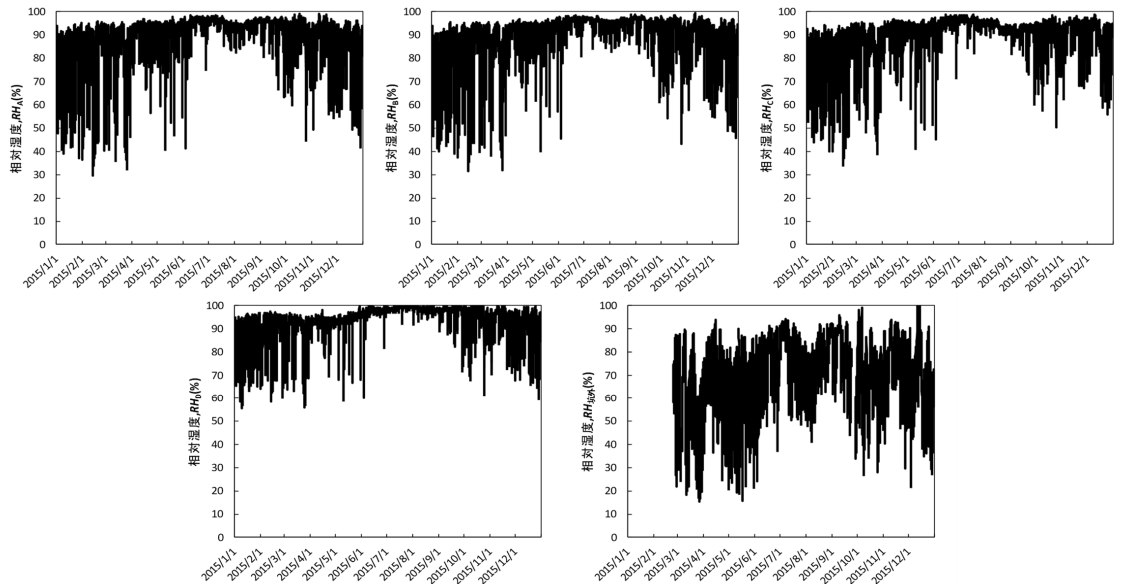
各地点における気温の時間的変化を第5図に示す。気温( $T$ )の時系列変動パターンについてみると、坑道内外の全地点できわめて類似し

た変動を示した。しかし、変動幅には場所的な違いがみられ、坑道内の各地点の変動幅は坑道外よりも小さかった。坑道内の各地点間で変動幅を比べると、地点A, B, Cよりも地点Dは小さくなった。次に各地点における湿度（RH）

の変化を第6図に示す。湿度（RH）の時系列変動パターンについてみると、坑道内外の全地点で類似した変動パターンを示した。変動幅をみると、坑道外での変動幅は大きく、坑道内での各地点は坑道外より小さくなった。坑道内では



第5図 各地点の気温の月変化



第6図 各地点の湿度の月変化

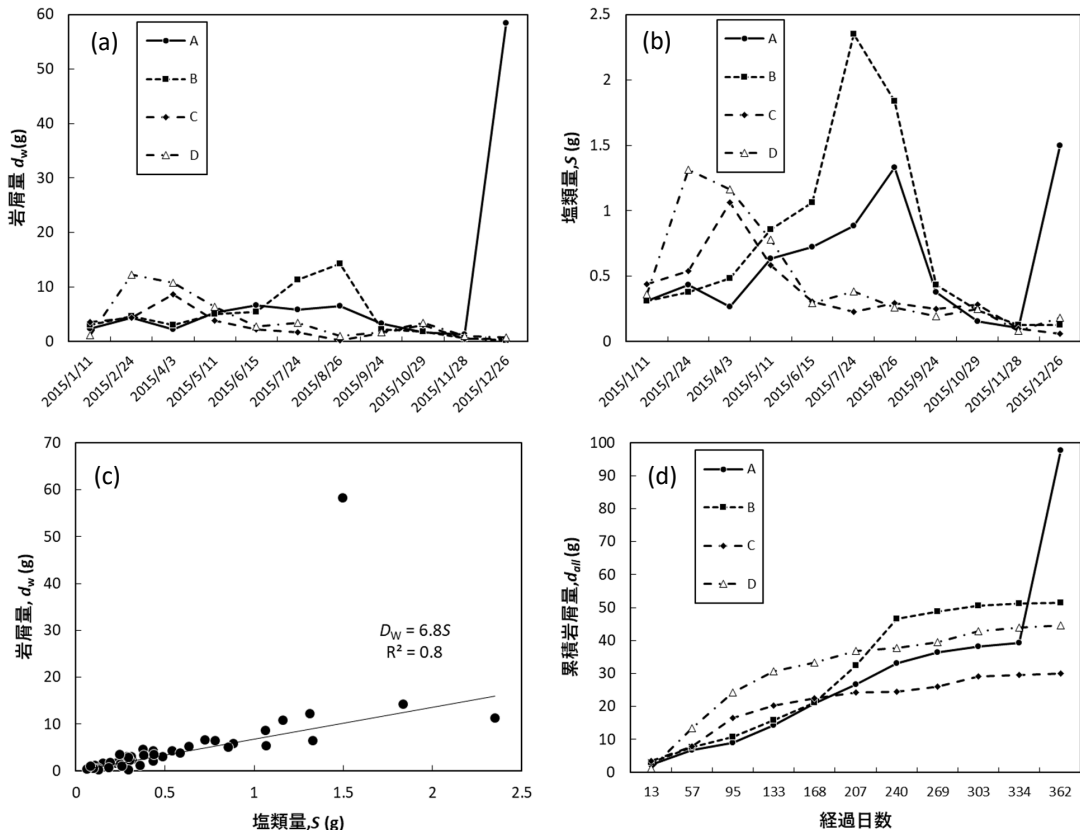
入口に近い地点A, B, Cで相対的に大きく, 地点Dで小さいという傾向がみられた。

#### 4. 崩落量の計測結果

第7図aは調査日ごとに回収した岩屑量 ( $d_w$ ) の変化を示したものである。どの地点も毎月岩屑が生産され, 最大の生産量は2015年12月26日に採取した地点Aの58.3gであった。各地点の傾向は, 地点C, Dでは, 冬から春先(2月から4月)の時期に岩屑量が相対的に多くなっていた。地点A, Bでは, 夏(7~8月)の時期に岩屑量が多かった。最大の岩屑量を記録した2015年12月26日の地点Aでは板状の岩片の崩落が確認された。その大きさは, 長辺が10cm, 短辺が4cm, 厚さが約1cmであつた。

た。高原(2013)は, 2013年の調査時に地点A, Bの壁面下部の崩落物を10個回収し, その厚さの計測をしているが, その計測で得られた崩落岩片の平均の厚さは1.6cmであったと報告している。今回採取された板状の岩片の厚さは, 高原(2013)の調査時のものと近い値である。崩落物は, どの地点も直径1cmほどの岩片と砂質・シルト質の細粒物質が多く確認された。

第7図bは崩落物に含まれた塩類量(S)の調査日ごとの変化を示したものである。グラフは崩落岩屑量とおおよそ同じ傾向を示し, 地点C, Dでは, 冬から春先(2月から4月)の時期に塩類量が相対的に多くなり, 地点A, Bでは, 夏(7~8月)の時期に塩類量が多くなった。



第7図 崩落量の計測結果

第7図cは縦軸に岩屑量 ( $d_w$ ), 横軸に塩類量 (S) をとり, 両者の関係について示したグラフである. 両者の傾向を見ると, 2015年12月26日の地点Aのデータを除き, 崩落した塩類の量が多いほど岩屑の量も多くなるという比例関係がみられることがわかる. この傾向は, 高屋・小口 (2011) の報告結果と同様である. また, XRD 分析の結果, 崩落物中に含まれた析出塩類は全地点共通で, 石膏 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) であることがわかった. この分析結果から, 石膏 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) の析出により塩類風化が発生し, 崩落が起こったと解釈できる. 第7図dは, 縦軸に累積の岩屑量 ( $d_{\text{all}}$ ) を, 横軸に調査日からの経過日数を取り, 1年間の累積岩屑量を示したものである. 岩屑量を比較すると, 地点Aで最も多く, ついで地点B, 地点D, 地点Cの順となった.

## V 考察

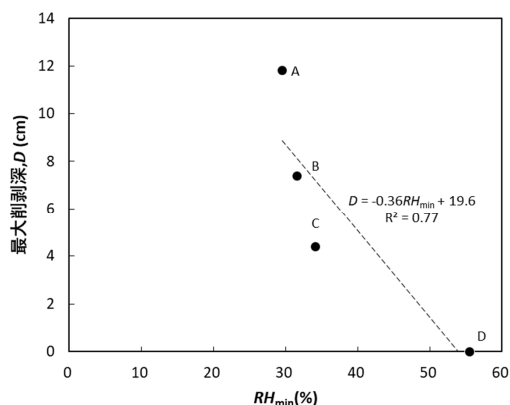
### 1. 各地点の気候環境と削剥深との関係

第2表は, 得られた計測値・観測値の結果である. 相対湿度の最小値は, 最高気温や最低気温に比べて, 調査地点によって値が大きく異なり, 地点Aが最も低く, B, C, Dの順に大きくなる. これは入口から近い地点ほど, 外部の気候 (坑道外) の影響を強く受け, 相対湿度が低下しやすいことを示している. そこで, 本調査地点の削剥深 ( $D$ ) は相対湿度 ( $RH$ ) と強い

関係があると考え, 各地点の  $RH_{\text{min}}$  と  $D$  との関係調べてみたところ (第8図),  $RH_{\text{min}}$  が低いほど, 最大削剥深 ( $D$ ) が大きくなるという傾向がみられた (決定係数は0.77). このことから, 壁面の削剥深は最低湿度の大きさに関係するといえる.

### 2. 崩落岩屑量と気温・湿度条件との関係

第9図は, 第1軸に気温 ( $T$ ) の変化と岩屑量 ( $d_w$ ) を, 第2軸に湿度 ( $RH$ ) の変化をとり,  $d_w$  と  $T$ ,  $d_w$  と  $RH$  との関係のみたグラフである. なお,  $d_w$  は棒グラフで示した. まず, 地点Aに着目すると,  $d_w$  のピークは板状の岩片の削剥が確認された12月 (冬季) であり,  $T$  と  $RH$  がともに低い時期であった. また  $T$  のピークである夏季にも  $d_w$  は多かった. 地点Bでは



第8図 最大削剥深と最低湿度との関係

第2表 計測・観測値

地点	最大削剥深 $D(\text{cm})$	気温		相対湿度		入口からの距離 (m)	風化環境指数 ( $\alpha$ ) $T_{\text{max}}/RH_{\text{min}}$
		$T_{\text{max}}(^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{min}}(^{\circ}\text{C})$	$RH_{\text{max}}(\%)$	$RH_{\text{min}}(\%)$		
A	11.8	27.0	-0.5	100.0	29.5	1.7	0.9
B	7.4	26.5	-0.5	100.0	31.6	4.1	0.8
C	4.4	26.0	-0.1	100.0	34.2	9.7	0.8
D	0.0	23.5	0.0	100.0	55.5	14.1	0.4

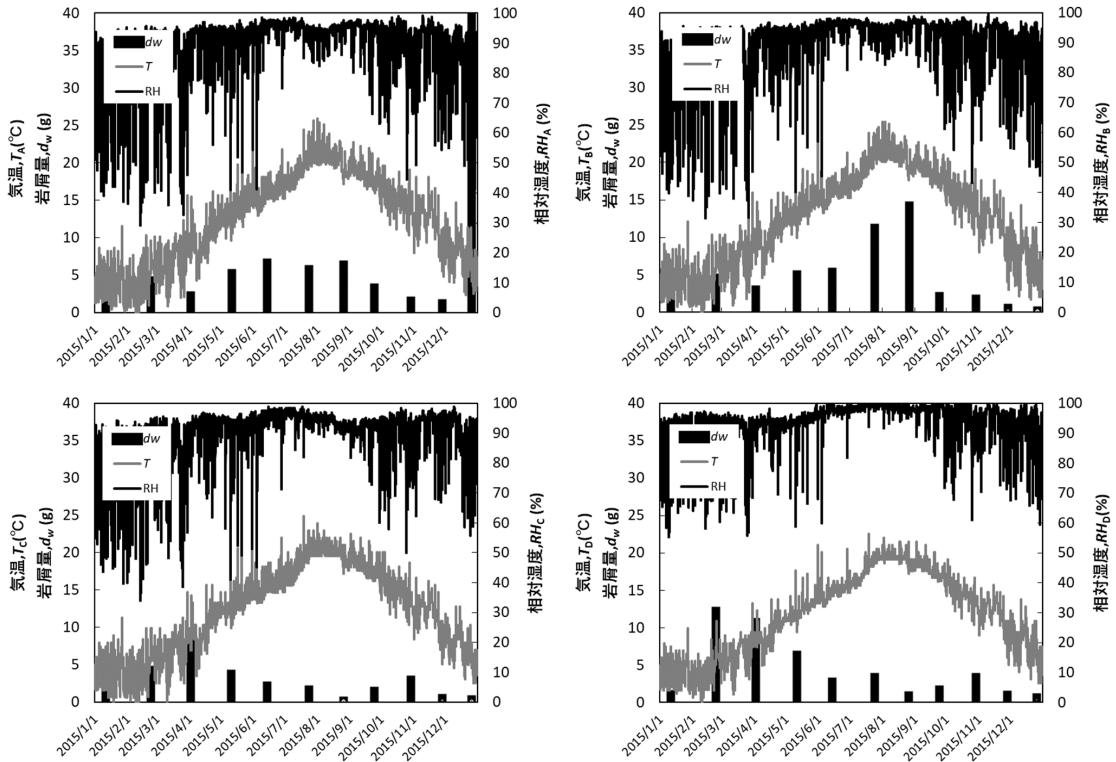
地点Aと同じく、 $T$ が高い夏季に $d_w$ が多くなっていた。地点C、Dでは2月から4月に $D$ が多く、この時期は $RH$ が低い時期であった。これらの結果から、 $d_w$ は、 $T$ が高くなる時期と $RH$ が低い時期に多いと解釈される。このことは壁面での岩屑生産が、高温または低湿度条件下で多くなることを示しているが、これらの条件は壁面が乾燥し塩溶液が結晶化しやすい気候条件であることと対応し、 $d_w$ が大きい地点ほど塩類風化が発生しやすい環境であると考えられる。これは岩屑崩落物が多いほど塩類が多く含まれるという結果（第7図c）と調和的であり、本調査地点における壁面の削剥プロセスは、主として塩類の析出に伴う塩類風化の発生によるものと判断できる。

### 3. 削剥深と風化環境との関係

相対湿度 ( $RH_{min}$ ) が低いほど、最大削剥深 ( $D$ ) が大きくなること、崩落岩屑量 ( $d_w$ ) は気温 ( $T$ ) が高くなる時期と湿度 ( $RH$ ) が低い時期に多いという結果から、壁面の削剥は気温・湿度の両方の要因によって規定されと考えられる。そこで各地点の最高気温 ( $T_{max}$ ) と最低湿度 ( $RH_{min}$ ) を用いて壁面表面の乾燥（塩溶液の蒸発）しやすさを示す風化環境指数  $\alpha$  の作成を行なった。 $\alpha$  は以下のように定義した：

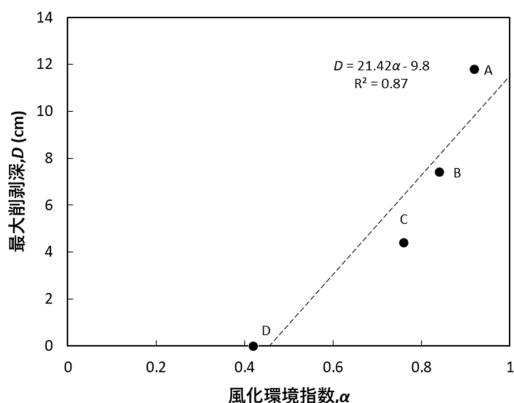
$$\alpha = T_{max} / RH_{min} \quad (1)$$

この指数  $\alpha$  は、 $RH_{min}$  が小さく  $T_{max}$  が大きい地点ほど値が大きくなり、その地点の水分が蒸



第9図 調査日ごとの岩屑量と気候条件との関係

発しやすい環境であることを示す。各地点の  $\alpha$  を求めると、地点Aが0.92、地点Bが0.84、地点Cが0.76、地点Dが0.42であった。これらの結果を用いて、縦軸に最大削剥深、横軸に  $\alpha$  をとり、両者の関係についてプロットした（第10図）。両者の関係は、 $\alpha$  が大きいほど  $D$  が大きくなるという右下がりの傾向を示す（決定係数は0.87）。このことは、塩類風化による壁面の削剥は  $RH_{\min}$  と  $T_{\max}$  といった風化環境条件に關与する2つの気候要因で説明できること示している。



第10図 最大削剥深と風化環境指数との関係

## VI 結論

本研究では吉見百穴の凝灰岩で構成された削剥程度が異なる坑道壁面において、削剥深、岩屑の生産量、気候条件に関する1年間の定期観測を実施することにより、塩類風化による削剥深と風化環境条件との定量的関係に関する考察を行った。得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 各地点の最高気温・最低湿度と壁面の削剥深との関係から、壁面の削剥深が大きい地点ほど最低湿度が低いことがわかった。すなわち壁面の削剥深は、湿度が低下しやすい環境ほど大きくなり、塩類風化の発生は湿度により左右されることが示唆された。
- (2) 気温と湿度の連続観測データと、岩屑量の季節変化との関係から、冬から春先の湿度が低い時期（2～4月）と、夏の気温が高い時期（7～8月）に岩屑量が多いことが分かった。この結果から、塩類風化によって生産される岩屑量は、壁面の水分が蒸発しやすい、気温が上昇する時期と、湿度が低下する時期に多くなることがわかった。
- (3) (1) と (2) の結果を踏まえ、壁面の乾燥しやすさを示す指標として、最高気温 ( $T_{\max}$ )

と最低湿度 ( $RH_{\min}$ ) の比で表される風化環境指数  $\alpha$  を作成した。  $\alpha$  は削剥深と明瞭な相関をもち、最低湿度と最高気温を用いて塩類風化による削剥深を説明できることがわかった。

本研究では1年間の気候データを観測し、塩類風化による削剥量と気候環境条件との関係を提示した。年によって気温が高い時や湿度がより低い時があると考えられるため、定期的かつ連続観測による分析がのぞまれるが、本研究結果をふまえると、国指定の史跡である吉見百穴を塩類風化による削剥から守るためには、坑道内の環境を（壁面の削剥が少ない）地点Dのような気温上昇、湿度低下の小さい気候環境に近づけ、壁面の風化速度を低下させることが重要であるといえる。現在も地点Dはわずかながら壁面の崩落は起こっている様子がみられ、今後地点Dでも壁面の風化が進む可能性がある。坑道奥の、常時湿潤で風化していない壁面における気候環境条件の把握が保存対策の重要な手段になるだろう。

## 謝辞

本研究は著者が東京学芸大学大学院教育学研究科に提出した修士論文の一部を加筆・修正したものである。本稿の骨子はJpGU-AGU Joint Meeting 2017 (幕張メッセ) で発表した。本研究を進めるにあたり、青木久先生をはじめとする東京学芸大学地理学分野の諸先生方からは丁寧なご指導を、埼玉大学の小口千明先生、北海道大学の早川裕弐先生には貴重なアドバイスを賜りました。現地調査の際には吉見町埋蔵文化財センターの太田賢一氏には長期にわたる現地調査へのご便宜・ご支援を頂いた。なお、本研究を行うに際し、科学研究費(基盤研究C: 26350399, 研究代表者・小口千明)を使用した。ここに記して感謝の意を申し上げます。

## 参考文献

- 大山隆弘・佐々木和裕・千木良雅弘(1999): 素掘りトンネル坑壁の堆積性軟岩の風化(その2) —凝灰岩の風化速度と微生物の影響—。電力中央研究所報告研究報告, U98046.
- 金井塚亮一(1986): 『吉見の百穴』教育社, 285p.
- 川野辰康・小坂和夫(2002): 中世石窟遺構の塩類風化—鎌倉のやぐらの例—。応用地質, 43-4, pp.124-133.
- 朽津信明(1992): 博物館明治村で観察された蒸発岩。岩鉱, 87, pp.388-391.
- 朽津信明・尾崎哲二(1999): 史跡・吉見百穴における蒸発岩。地質学雑誌, 105-4, pp.266-272.
- 朽津信明・高 東亮・秋山純子・森井順之(2003): 鎌倉やぐらに見る凝灰質砂岩の風化とそれに与える温度・湿度の影響。地形, 24-2, pp.169-181.
- 佐藤昌人・八反地 剛・若狭 幸(2011): 塩類風化に関する一実験—風化による強度低下と岩石物性—。筑波大学陸域環境研究センター報告, 12, pp.21-29.
- 関 陽太郎・酒井 均(1987): 千葉県館山市船形磨崖仏十一面観音像の劣化と水・岩石相互作用。岩石鉱物鉱床学会誌, 82, pp.230-238.
- 高原 亮(2013): 史跡・吉見百穴の地下軍需工場坑道壁の崩落可能性の検討。平成24年度埼玉大学建設工学科卒業論文。
- 高屋康彦・小口千明(2011): 塩類風化による岩屑生産の定量評価—史跡・吉見百穴の凝灰岩の事例—。地理学評論, 84-4, pp.369-376.
- 高屋康彦・小口千明・山崎麻衣・大西亮平(2011): 史跡・吉見百穴の坑道壁面における凝灰岩の塩類風化とその影響要因。地形, 32-3, pp.279-291.
- 千葉とき子・斎藤靖二・松原 聰(1975): 埼玉県吉見丘陵の酸性凝灰岩。Bulletin of the National Science Museum Series C, Geology, 1 (3), pp.111-117.
- 堀口隆士・中田正隆・鹿園直建・本間久英(2000): 凝灰岩表面での塩類の集積現象に見られるアルノーゲンの産状および生成過程—埼玉県吉見丘陵を例として—。鉱物学雑誌, 29, pp.3-16.
- 松丸国照・林 明(1980): 関東山地東縁の新第三系の層序。地質学雑誌, 86, pp.225-242.
- 山田 剛・青木 久・高橋 学・松倉公憲(2005): 塩類風化速度に与える岩石物性の影響に関する一実験。応用地質, 46-2, pp.72-78.
- 山本まりえ・青木 久・松倉公憲(2005): 青島砂岩の塩類風化速度に与える間隙率の影響に関する一実験。筑波大学陸域環境研究センター報告, 6, pp.23-31.
- 藁谷哲也(2005): アンコール・ワットを構成する砂岩およびラテライトの風化環境と風化ブ

- ロセス. 地形, 26-3, pp.239-257.
- Goudie, A. S. and Viles, H. A. (1997) : Salt weathering hazards: *Chichester, John Wiley & Sons*, 241p.
- Hayakawa Y, Oguchi, C Ariga, N and Aoki, H (2015) : Spatial Distribution of Changes in Rockwall Surface at Yoshimi-Hyakuana Cave, Central Japan, Revealed Terrestrial Laser Scanning. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, pp.619-626.
- Matsukura, Y. and Tanaka, Y. (2000) : Effect of rock hardness and moisture content on tafoni weathering on granite of Mount Doeg-sung, Korea. *Geografiska Annaler*, 82A, pp.59-67.
- Sunamura, T. and Aoki, H. (2011) : Application of an S-shaped curve model to the temporal development of tafoni of salt-wethering origin. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, pp.1624-1631.
- Winkler, E. M. (1994) : Stone in architecture. properties, durability. *Berlin, Springer Verlag*, 313p.

**Quantitative Relationship between Denudation Depth and Micro Climate Environments Due to Salt Weathering of Tuff in the Yoshimi Hyaku-Ana Historic Site**

**ARIGA Natsuki\***

**Keywords** : Salt weathering, Denudation depth, Temperature, Relative humidity, Tuff, Yoshimi Hyaku-Ana, Historic site

\*Tokyo Map Research Inc.