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—

八 反 地 剛* 松 倉 公 憲**

Factors Controlling Weathering Rates of Carbonate Rocks in Soil: An Approach from a Field Weathering Experiment

Tsuyoshi HATTANJI* and Yukinori MATSUKURA**

[Received 6 December, 2016; Accepted 3 April, 2017]

Abstract

The weathering of carbonate rocks in soil is an essential process in the evolution of karst landforms as well as in the global carbon cycle. Among the various methods for measuring the weathering rates of carbonate rocks, a field weathering experiment using rock tablets is a simple and relatively easy method to estimate the spatial distribution of weathering rates in karst terrains. This paper introduces some results of field experiments on the weathering of carbonate rocks. The results are summarized based on the following three factors: global climatic condition (annual temperature and precipitation), local environmental conditions (soil moisture), and duration of experiment. Annual precipitation is one of the major factors controlling the weathering rates of carbonate rocks. At a local scale, weathering rates are controlled by the duration of water saturation in soil, although some experiments also indicate the effects of soil water chemistry on weathering rates. Changes in the surface condition of tablets, as well as inter-annual climatic variations also affect weathering rates. Duration of experiment should be set carefully to reduce influences from the duration of the experiment.

Key words : karst, limestone, tablet, soil water content, dissolution

キーワード : カルスト, 石灰岩, タブレット, 土壌水分, 溶解

I. はじめに

カルスト地形は、石灰岩や苦灰岩などの炭酸塩岩の風化によって形成される。炭酸塩岩の風化速度¹⁾を明らかにすることは、カルスト地域の地形変化を解明するうえで必要不可欠である。また、炭酸塩岩の構成鉱物であるカルサイトやドロマイ

トの溶解反応において、大気中あるいは土壌中の二酸化炭素が消費される。一般的に土壌中の二酸化炭素濃度は大気中に比べて高いことから、土壌中では炭酸塩岩の風化が促進される（吉村・井倉, 1993）。

野外における風化速度が定量的に見積もられるようになったのは1970年代である。初期の研究

* 筑波大学生命環境系

** 筑波大学名誉教授

* Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8572, Japan

** Professor Emeritus, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8572, Japan

では、河川の流量、カルシウムやマグネシウムなどの溶存物質濃度、および流域面積から、炭酸塩岩地域の地表面での風化速度を推定する方法（物質収支法）が用いられた（Smith and Atkinson, 1976）。この方法は世界各地のカルスト地域に適用され、例えば山口県秋吉台の風化速度は 51 mm/ky であると推定された（井倉ほか, 1989）。この手法により、適度な大きさをもったカルスト地域全体の平均的な風化速度を見積もることが可能になったが、例えば尾根部や谷部、あるいはドリーネ内部などの小地形のスケールにおいて風化速度の分布を推定することは困難であった。

1990 年代以降、二次宇宙線により炭酸塩岩内に生じる宇宙線生成核種 ^{36}Cl 濃度から、風化速度を推定する方法が利用されるようになった（Stone *et al.*, 1994; Matsushi *et al.*, 2010a, b）。この手法では、地表あるいは土壤基盤岩境界の岩石試料からその地点の風化速度を求めることができるため、風化速度の空間的な分布を得ることが可能である。さらに、対象とする時間スケールがおおむね数万年から数十万年程度であるため、長期的な地形変化を論じるうえでメリットがある。ただし、この手法により得られる風化速度は数万年スケールの環境変動の影響を含む値であり、現在その地点において進行している風化速度とは異なる可能性がある。

炭酸塩岩の風化速度を求める別のアプローチとして、野外風化実験がある。この手法は 1970 年代以降、Trudgill (1977) や Jennings (1981) により導入されたものであり、成形した既知の岩石試料を任意の地点に設置あるいは土壤中に埋設し、一定期間を経過したのち、再度その試料を回収して試料の重量変化を求める方法である（松倉・八反地, 2006）。すでに初期の提案から約 40 年経過したが、簡便かつ直接的に現在の風化速度の値を得ることが可能であるため、近年でも多くの研究において採用されている。本稿では野外風化実験により土壤中の炭酸塩岩の風化速度を評価した研究について概説し、(1) グローバルなスケールにおける気候条件の影響、(2) ローカルな環境条件の影響、(3) 実験期間の長さの 3 つ

の要因が風化速度に及ぼす影響について議論する。

II. 土壌における炭酸塩岩の野外風化実験

1) 既存研究

1-1) スコットランドおよびイングランドにおける実験

Trudgill (1977) は、直径 1.5 cm、厚さ 0.5 cm の石灰岩タブレットを作成し、スコットランド北部 Traligill 流域の土壤基盤岩境界に設置した。夏季（4 ～ 11 月）と冬季（11 ～ 3 月）の 2 つの期間においてタブレットの回収・測定を行った。その結果、夏季の重量減少量（平均 0.503 g/y）は冬季の値（平均 0.055 g/y）の 10 倍程度であり、風化速度の季節変化が示された。

Crabtree and Trudgill (1985) は、イングランドのシェフィールド近郊の苦灰岩を基盤とする丘陵地帯において、苦灰岩質タブレットを用いた風化実験を 2 年間実施した。イギリス気象庁のデータによるとシェフィールドの年平均気温（日最高気温と日最低気温の平均）は 10.0℃、年降水量は 835 mm である。著者らは直径 3.1 cm、厚さ 0.7 cm に成型されたタブレットを、丘陵地内 22 地点の土壤基盤岩境界に設置した。初期重量に対する重量減少速度は斜面下部で小さく（0.2 ～ 0.3%/y）、斜面上部において大きくなった（0.5 ～ 0.6%/y）。その理由は、地中水の挙動と土壌の化学的性質により説明されている。すなわち、斜面上部は雨水の降下浸透が生じる酸性の環境であるが、斜面下部はカルシウム分を多く含む地下水流の影響によりアルカリ性の環境になっているため、斜面下部の風化速度が小さくなったと考えられている（図 1）。

Trudgill *et al.* (1994) は、Crabtree and Trudgill (1985) と同じサイトにおける 10 年間の風化実験の結果と初期の 1 ～ 2 年分の実験結果（Crabtree and Trudgill, 1985）を比較し、風化速度が時間とともに低下したことを明らかにした。野外風化実験では実験期間の長さも風化速度の支配要因になることから、風化実験によって得られる風化速度は空間的な差異を示す指標に限定して用いるべきであると論じている。

図1 イングランド・シェフィールド近郊の丘陵地帯におけるタブレットの重量減少速度の分布と地中水の流動 (Crabtree and Trudgill, 1985).

Fig. 1 Effects of subsurface water flow on weight loss rates of tablets at a hillslope near Sheffield, England (Crabtree and Trudgill, 1985).

1-2) オーストラリア南東部における実験

Jennings (1981) は、オーストラリア南東部のニューサウスウェールズ州のカルスト地域 (Coolleman Plain) において、石灰岩タブレットを用いた風化実験を行った。この研究では 40 mm × 25 mm × 10 mm に成型された板状のタブレットが用いられた。試料は約1年間 (329日間) ~ 7年間 (2682日間)、ドリーネと尾根

(interfluv) の土壤中、あるいは洞窟内の溪流に設置された。土壤中の風化速度は 0.11 ~ 0.40 %/y であり、洞窟内溪流の風化速度 (0.27 ~ 0.67 %/y) よりやや小さな値であった。また、ドリーネの土壤中の風化速度 (0.11 ~ 0.26 %/y) は、尾根部の土壤中 (0.27 ~ 0.40 %/y) よりもやや小さな値を示した。ドリーネと尾根の間の風化速度に差異が生じた原因として土壤の排水性の違い

などをあげているが、十分な証拠は得られていない。

1-3) 日本各地における実験

漆原 (1991) は 1989 年から 1990 年までの 1 年間、日本国内の 6 地域 (北海道北見, 岩手県岩泉, 埼玉県秩父, 山口県秋吉台, 沖縄本島, 南大東島) において、直径 4 cm, 厚さ 3 mm に成型された石灰岩片を地上 1.5 m, 土壌中の A1 層位 (深さ 10 ~ 20 cm) と B2 層位 (深さ 45 ~ 65 cm) に設置した。使用された石灰岩はスロベニアで採取されたものである。実験結果によると、降水量の少ない北見 (年降水量 764 mm) や岩泉 (1089 mm) では風化速度が小さく、降水量の多い秋吉台 (1995 mm) や南大東島 (1592 mm) の風化速度が大きかった。一方、沖縄本島の風化速度はやや小さく、蒸発による影響が指摘された。

その後、漆原ほか (1999a) および Urushibara-Yoshino *et al.* (1999b) は、1993 年から 1997 年にかけて、日本国内の 7 地域 (北海道当麻, 阿武隈, 秩父, 秋吉台, 四国カルスト, 高知県龍河洞, 南大東島) において、直径 4 cm, 厚さ 4 mm に成型された石灰岩タブレットを、地上 1.5 m, 土壌中の A3 層位 (深さ 20 ~ 40 cm) と B2 層位 (深さ 45 ~ 60 cm) に設置した。この実験では、スロベニア, 中国 (桂林), 秩父の 3 種類の石灰岩が使用された。土壌中 (A3, B2 層位) における風化速度は地域によって異なった。例えば 1993 ~ 1994 年の風化速度は、北海道当麻では 0.41 ~ 0.63%/y であったのに対して、秋吉台では 1.25 ~ 2.88%/y, 南大東島では 1.04 ~ 1.37%/y であった。また同一の地点において気候の年々変動による風化速度の変動があった。例えば秋吉台では、降水量の多い 1993 年の風化速度 (2.66 ~ 2.88%/y) は、降水量の少ない 1994 年の風化速度 (1.25 ~ 1.40%/y) の 2 倍程度であった。各年度・各地点の土壌中における風化速度は、おおむね年降水量に比例したが、その決定係数は 0.24 ~ 0.32 であり、二酸化炭素濃度の地域差の影響を示唆している。

1-4) スウェーデン北部ラップランドの高山地域における実験

1994 ~ 2004 年にかけて、スウェーデン北部ラップランドの高山地域 (Kärkevagge) において一連の野外風化実験が行われた (Dixon *et al.*, 2001; Thorn *et al.*, 2002, 2006a, b)。実験サイトの気候は寒冷 (年平均気温 -1.7°C) であり、年降水量は 1750 mm である。Dixon *et al.* (2001) および Thorn *et al.* (2006a) は粒径 6.2 mm に粉碎した苦灰岩および花崗岩試料を複数地点の地表面に設置した。Thorn *et al.* (2002, 2006b) は、円盤型タブレット (直径 40 mm, 厚さ 2 ~ 3 mm) に成型した苦灰岩, 花崗岩および石灰岩タブレットを、複数地点の土壌中に埋設した。実験期間は、1994 ~ 1999 年, および 1999 ~ 2004 年の 2 つの期間であり、合計約 10 年間であった。本稿では土壌中の実験結果について紹介する (Thorn *et al.*, 2006b)。石灰岩は同一の地点に設置された苦灰岩よりも速く風化した。また、風化速度が地点によって大きく異なる要因について統計解析 (分散分析) により検討した。その結果、風化速度と土壌の層位や設置深度の間には有意な関係はみられなかったが、風化速度と土壌の排水性との関係は明瞭であった。また苦灰岩の風化速度は前半の 5 年間 (平均 2.36%/5 y) よりも後半の 5 年間 (平均 3.90%/5 y) の方が大きく、その理由として後半の 5 年間は前半に比べて温暖・湿潤であったことをあげた。

1-5) オーストリアアルプスにおける実験

Plan (2005) は、オーストリアアルプスの Hochschwab 山の北面斜面の 13 か所に 5 cm × 5 cm × 1 cm の板状に加工された岩石タブレット 70 個を 1 年間設置した。タブレットには、さまざまな種類の石灰岩や苦灰岩, および大理石が用いられた。設置地点は標高 650 m から 2100 m の土壌中あるいは地上であった。この研究では、1 年間の重量減少量をタブレットの表面積と密度で除した値 (単位 $\mu\text{m}/\text{y}$) を風化速度として用いている。土壌中のタブレット風化速度は標高によって異なり、とくに標高 650 m の風化速度 ($40 \mu\text{m}/\text{y}$) は他の標高帯 (10 ~ $20 \mu\text{m}/\text{y}$) に

比べて大きかった。また、標高 1600 m 地点のうち、ドリーネ内に設置した大理石タブレットの風化速度 ($50 \mu\text{m}/\text{y}$) は、同標高の他の地点での風化速度 ($15 \mu\text{m}/\text{y}$ 程度) よりも大きかった。この結果は、地中水がドリーネ内に集中することにより風化速度が増加し、ドリーネの地形発達が進むというフィードバックの存在を示唆している。

1-6) スペイン中部における実験

Krklec *et al.* (2016) は、スペイン中部のカルスト地域 (Tietar Valley) の土壤中 (深さ 5 ~ 10 cm と 50 ~ 55 cm) に、苦灰岩からなるタブレット (直径 30 mm, 厚さ 3 ~ 6 mm) を 1 年間埋設した。実験サイトの気候は比較的乾燥しており、年降水量は 797 mm, 年平均気温は 14.7°C である。実験開始日 (2012 年 11 月 18 日) から約 6 か月後に一度タブレットが回収されており、実験期間は前半と後半に分かれている。降雨量が多かった前半の 6 か月に、1 年間の風化量のうちの 8 割程度が進行した。1 年間の風化速度は深さ 5 ~ 10 cm において $2.48 \mu\text{m}/\text{y}$, 深さ 50 ~ 55 cm において $1.75 \mu\text{m}/\text{y}$ であった。土壤中の風化速度が比較的小さいことから、調査地付近にみられる unroofed cave の形成において、物理的な崩落 (陥没) が重要ではないかと指摘している。

2) 阿武隈山地における長期実験

前節では世界各地における野外風化実験の結果を紹介した。多くの実験の実施期間は 1 ~ 2 年程度であり、長いものでも 10 年程度である。本節では著者らが 1992 年末から現在まで阿武隈山地において実施している野外風化実験の方法および結果について概説する。なお、初期の 5 年間のデータは Matsukura and Hirose (1999) に、10 年間のデータは Matsukura *et al.* (2007) に報告されている。本節では、2002 年から 2016 年までの未公表データを含む延べ約 22 年間の風化実験の結果を報告する。著者の把握する限り、野外風化実験を 20 年以上継続した事例はほかにないようである。

この実験では、阿武隈山地で採取された花崗岩、ハンレイ岩および結晶質石灰岩 (以下、大理石とする) などを含む計 8 種類の岩石を、直径

3.45 cm, 厚さ約 1 cm に成形し、花崗閃緑岩小流域の谷頭部の 4 地点に埋設した (Matsukura and Hirose, 1999; Matsukura *et al.*, 2007)。実験サイトにもっとも近い気象庁アメダス観測点「小野新町」における年降水量は 1245 mm, 年平均気温は 10.5°C である。1992 年 12 月 28 日に 1 回目の埋設を行い、1999 年までは約 3 か月ごと、1999 年から 2011 年までは約 6 か月ごとにタブレットを回収した。回収後、タブレットに付着している泥などを丁寧に洗浄し、 110°C で 24 時間炉乾燥した後、重量を計測した。計測後のサンプルを再度現地に設置して、1 サイクルとなる。なお、2011 年以降は回収・計測の頻度を 5 年ごとに変更した。

設置場所は、地上、腐植層直下 (地中深さ約 15 cm), 不飽和土層中 (地中深さ約 60 cm), 飽和土層中の 4 地点である。2008 ~ 2009 年にかけて行われた土壤水分観測によると、不飽和土層は降雨時のごく短時間を除きつねに不飽和状態である。飽和土層の埋設地点付近には湧水がみられ、降水量の少ない冬季にも持続的に湧出する²⁾。

積算埋設日数 8143 日間の大理石タブレットの重量減少率³⁾の時間変化を図 2 に示す。飽和土層の大理石タブレットは、他の設置地点に比べてきわめて速く風化した (図 2A)。埋設・回収のサイクルが変更された 2011 年以降もほぼ同様の速度で重量が減少し続けており、2016 年の時点の重量は初期重量の約 40% であった。

地上、腐植層直下、不飽和土層の風化速度が飽和土層に比べてかなり小さいことから、重量減少率 (縦軸) の目盛りを 100 ~ 95% の部分のみに拡大したものを図 2B に示す。図 2B から、地上と不飽和土層の風化速度がやや大きく、腐植層直下の風化速度がやや小さいことが読みとれる。また、飽和土層とは異なり、風化の進行が比較的遅い時期とやや加速する時期が存在する。

3) 秋吉台のドリーネにおける実験

主要なカルスト地形の一つであるドリーネにおいて風化実験を行った研究は限られている (Jennings, 1981; Plan, 2005)。秋山 (2012) および Akiyama *et al.* (2015) はこの点に着目し、ド

図 2 阿武隈山地の実験サイトにおける大理石タブレットの 22 年間の重量減少量の変化。A. 飽和土層とその他の埋設深度の比較，B. 地上，腐植層直下および不飽和土層の比較。

Fig. 2 Temporal changes in weight loss of marble tablets over 22 years at an experimental site in the Abukuma Mountains. A. Comparison of saturated soil layer and other soil layers. B. Comparison of ground surface, humus soil layer and unsaturated soil layer.

リーネの地形および土壤水分量が風化速度に及ぼす影響を明らかにすることを目的として，秋吉台北部のドリーネにおいて野外風化実験を行った。気象庁アメダス観測点「秋吉台」における年平均降水量は 1995 mm，年平均気温は 13.6℃である。実験には，秋吉台付近の採石場で採取された石灰岩と，阿武隈山地の採石場で採取された結晶質石灰岩（大理石）⁴⁾ をそれぞれ直径約 3.5 cm，厚さ約 1 cm に成形し，表面を研磨した試料を使用し

た。これらのタブレットを 2009 年 4 月に斜面上部（Site U），中部（Site M），下部（Site L），およびドリーネ底部（傾斜変換点付近，Site B）の 4 か所において土壌中の深さ 50 cm に埋設した。また，斜面上部と下部では深さ 15 cm の土壌中にも埋設した。実験期間は 2009 年 4 月 19 日～11 月 23 日，2010 年 3 月 21 日～2011 年 1 月 22 日，2011 年 4 月 6 日～12 月 5 日の 3 期間（合計 668 日間）である。各期間の最終日にタブ

図 3 秋吉台のドリーネにおける電気比抵抗断面と石灰岩タブレットの重量減少速度の分布 (Akiyama *et al.*, 2015 を一部改変)。黒色の縦線は、簡易貫入試験により土壌 (N_c 値 30 以下) であると推定される部分を示す。

Fig. 3 Spatial distribution of weight loss rates of limestone tablets with results of electrical resistivity tomography at a doline in the Akiyoshi-dai Plateau (revised after Akiyama *et al.*, 2015). Vertical black bars indicate soil depth measured with cone penetration tests ($N_c < 30$).

レットを回収し、実験室にて洗浄、炉乾燥 (110℃) の後、重量測定を行った。

本研究では、埋設場所の環境条件や地盤構造を把握するため、実験サイトにおいてさまざまな観測や探査を行った。各埋設地点では地温と土壌水分の連続観測を行った。また、土壌空気採取器と二酸化炭素検知管 (ガステック法) を用いて、土壌中の二酸化炭素濃度を計 15 回断続的に測定した。さらに、タブレットを埋設した斜面において二次元電気比抵抗探査 (二極法) を行い、ドリーネの地盤構造や土壌水分の分布を把握した。

土壌深さ 50 cm に埋設した石灰岩 (秋吉台) タブレットの風化速度は、斜面上部 (Site U) と中部 (Site M) で大きく (1.90 ~ 2.45%/y)、斜面下部 (Site L) と底部 (Site B) で小さかった (0.42 ~ 0.68%/y, 図 3)。また、深さ 15 cm の土壌中に埋設したタブレットの風化速度は、同地

点の深さ 50 cm に埋設したタブレットよりも小さかった。実験期間中に土壌水分が飽和状態であった時間の割合と、タブレットの風化速度の関係を図 4 に示す。図 4 の横軸の値は、土壌水分が飽和状態 (飽和度 97% 以上) である時間が全実験期間に占める割合である。例えば、実験期間中つねに飽和状態であれば、この値は 100% になり、逆につねに不飽和 (飽和度 97% 未満) の状態であれば 0% になる。大理石 (阿武隈) の風化速度の絶対値は石灰岩 (秋吉台) よりもやや小さいが、いずれも飽和状態が長く持続する埋設地点において風化速度が大きくなる傾向がみられた (図 4)。したがって、風化速度の空間的な違いは、埋設地点・深度の土壌水分量、とくに飽和状態の持続時間に大きく制約される。各埋設地点の二酸化炭素濃度と風化速度の関係は明瞭ではない結果をあわせて、風化速度には土壌水分の飽和時

図4 土壌水分が飽和状態であった時間の長ささとタブレットの重量減少速度の関係. Akiyoshi-dai (limestone), Akiyoshi-dai (marble), Abukuma (marble) はそれぞれ、石灰岩を秋吉台に埋設した実験、大理石を秋吉台に埋設した実験、大理石を阿武隈山地に埋設した実験の結果を示す. 阿武隈山地の大理石の重量減少速度は、初期の5年と期間全体(22年間)の値の両方を示した。

Fig. 4 Weight loss rates of tablets and relative duration of water saturation. Akiyoshi-dai (limestone), Akiyoshi-dai (marble) and Abukuma (marble) refer to an experiment using limestone at the Akiyoshi-dai Plateau, an experiment using marble at the Akiyoshi-dai Plateau, and an experiment using marble at the Abukuma Mountains, respectively. Weight loss rates of Abukuma (marble) include the results for the initial five years and the entire period (22 years).

間の長さが重要であることが実証された。

なお、この実験では斜面下部やドリーネ底部での風化速度が小さかった(図3)。一方、同じドリーネにおける宇宙線生成核種³⁶Clによる長期的な風化速度は、ドリーネ斜面上部よりも斜面下部の方が大きく(Matsushi *et al.*, 2010b)、風化実験の結果と違いが生じた。実際には、斜面下部や底部には土壌が厚く堆積し、タブレットを埋設した土壌浅部(深さ15 cm, 50 cm)は比較的乾燥していた。電気比抵抗探査の結果(図3、およびAkiyama *et al.*, 2015のFig. 4)は、ドリーネ底部の土壌深部(1 m以深)に電気比抵抗の低い部分があることを示している。通常、石灰岩の電気比抵抗は高く(350 Ω・m以上、図3中の赤

色から白色の部分)、粘土層の電気比抵抗は低い(100 Ω・m以下、図3中の青色の部分)。また、粘土層内の電気比抵抗は水分状態によって変化し、土壌水分が高くなるほど電気比抵抗値は小さくなる(Burger *et al.*, 2006)。したがって、ドリーネ底部の土壌深部には水分量の高い粘土層が存在していると解釈され、これらの場所では、飽和状態が長時間持続していることが推定される。したがって、土壌浅部(深さ50 cm未満)のタブレットの実験結果とは異なり、ドリーネ底部の土壌深部(深さ5 m付近)の基盤岩の風化速度は、実際には大きいかもしれないと推定している。

III. 野外実験における土壌中の炭酸塩岩風化速度の支配要因

前の章において、さまざまな条件下における炭酸塩岩の風化実験の結果を概説した。ここではこれらの結果を(1)気温と降水量に基づくグローバルな気候条件、(2)土壌水分状態に基づくローカルな環境条件、(3)実験期間の長さの視点から整理し、各条件が風化速度に与える影響について考察する。

1) 気温と降水量に基づくグローバルな気候条件

炭酸塩岩の風化速度が年降水量や気温によって異なることは、すでに物質収支法によって示されている(Smith and Atkinson, 1976)。また、日本各地における野外風化実験により、気候条件の差異が風化速度に与える影響も議論されている(漆原, 1991; 漆原ほか, 1999a; Urushibara-Yoshino *et al.*, 1999b)。本節では、第2章で紹介したすべての論文を対象として、各地の風化実験における風化速度の値と、その実験サイトの気候条件⁵⁾の関係を検討する。なお、研究によって使用されている炭酸塩岩の種類、タブレットの大きさや形状、実験期間などが異なることから、風化速度の差異を絶対値として厳密に比較することは困難な面もあるが(松倉・八反地, 2006)、本稿ではこれらの実験条件の違いが誤差として含まれることを前提として、以下の基準により各実験の結果を整理した。

図 5 風化実験サイトの気候条件と炭酸塩岩タブレットの重量減少速度の関係。A. 年降水量と重量減少速度, B. 年平均気温と重量減少速度。漆原 (1991), Trudgill *et al.* (1994), Matsukura and Hirose (1999), Urushibara-Yoshino *et al.* (1999b), Thorn *et al.* (2006b), 秋山 (2012), Akiyama *et al.* (2015), Krklec *et al.* (2016) のデータに基づき作成。

Fig. 5 Climatic conditions of experimental sites and weight loss rates of carbonate-rock tablets. A. Annual precipitation and weight loss rates, B. Mean annual air temperature and weight loss rates. Data sources: Urushibara-Yoshino (1991), Trudgill *et al.* (1994), Matsukura and Hirose (1999), Urushibara-Yoshino *et al.* (1999b), Thorn *et al.* (2006b), Akiyama (2012), Akiyama *et al.* (2015) and Krklec *et al.* (2016).

- (a) 風化速度の指標として重量減少速度 (%/y) を用いる⁶⁾。
- (b) 実験初期 (おおむね 1 ~ 5 年間) のデータを用いる。
- (c) 岩種を石灰岩, 苦灰岩, 大理石の 3 つに分類する。

実験サイトの年降水量と重量減少速度の関係 (図 5A) にはばらつきがみられるが, 年降水量の増加とともに重量減少速度の最大値が増加する傾向を読みとることができる。物質収支法を用いた

既存研究 (Smith and Atkinson, 1976) は, 年降水量の増加とともに風化速度が増加する傾向を示しており, 本研究の結果 (図 5A) と矛盾しない。また, 降水条件が同じ場合, 苦灰岩の重量減少速度が石灰岩よりも小さくなる (Thorn *et al.*, 2006b)。同様に大理石の重量減少速度も石灰岩よりも小さくなる傾向もあるが (秋山, 2012), データが限られており, 異なる気候条件下での岩種による重量減少速度の違いを確認することができなかった。一方, 重量減少速度と年平均気温の関係

は明瞭ではない（図 5B）。熱帯地域のデータの不足により傾向が不明瞭になっていることも考えられるため、今後さらにデータの蓄積が必要であろう。

以上の分析から、設置場所の風化速度の最大値は、おおむねその地域の年降水量によって制約されることを指摘した。一方で阿武隈とスウェーデン北部（Kärkevagge）のデータには大きなばらつきがある。このように同一地域であっても風化速度が大きく異なる原因として、同一地域内でのローカルな環境条件の影響がある。この点について、次節で議論する。

2) 土壌水分状態に基づくローカルな環境条件

小地形スケールを対象にした研究では、設置地点の環境条件の影響が議論されてきた。本質的に石灰岩の溶解反応には水が必要であることから、土壌中での風化速度にはもっとも大きな影響を及ぼす要因は土壌水分量であろう（Matsukura and Hirose, 1999; Thorn *et al.*, 2002, 2006b, Matsukura *et al.*, 2007; Akiyama *et al.*, 2015）。前述のとおり Akiyama *et al.* (2015) は、風化速度が水分飽和の持続時間に比例することを示した（図 4）。また、阿武隈山地の飽和土層における水分飽和の時間割合を 100% とみなし、阿武隈における実験結果を図 4 に含めて示した。阿武隈山地の飽和土層における大理石タブレットの重量減少速度（初期の 5 年間の値）は、秋吉台で得られた回帰直線の延長線上に位置している（図 4）。岩種が同一であれば、各実験サイトの風化速度は水分飽和時間の長さによって決定され、その最大値は一年中飽和した状態の土層における風化速度を示すと考えられる。

ただし従来の研究結果のなかには、相対的に湿潤な環境であっても風化速度が小さくなる事例もある。Jennings (1981) は、ドリーネ内の土壌における風化速度が尾根部の土壌よりも小さいことを示した。また、Crabtree and Trudgill (1985) は、斜面下部の土壌における風化速度が斜面上部の土壌よりも小さいことを報告した。後者では、斜面下部には石灰岩の岩盤内を通過した硬度の高い地下水が流入するため、溶解が進まな

かったと解釈している（図 1）。渓流を対象とした野外実験では、渓流水のカルサイト飽和度が高い場合、タブレットの風化速度が小さくなることも示されている（Hattanji *et al.*, 2014）。一方、秋吉台における実験の埋設深度（深さ 15 ~ 50 cm）では、カルサイト不飽和の状態が維持されていた（Akiyama *et al.*, 2015）。また、阿武隈山地の実験サイトの基盤岩は花崗閃緑岩であり、湧水はカルサイトに対して不飽和である。したがって、図 4 に示されている埋設地点ではいずれもカルサイト不飽和の状態が維持されていたために、水分飽和の持続時間に比例して風化速度が増加したと考えられる。

Akiyama *et al.* (2015) の実験では、斜面下部や底部のより深い場所にタブレットを埋設することができなかった。埋設深度より深い位置の地下水がカルサイトに対して飽和状態である場合、斜面下部や底部における実際の風化速度は想定よりも小さくなる可能性がある。このことはドリーネの地形発達に対しても大きな影響を及ぼす可能性があり、今後さらに詳細に検討する必要がある。

3) 実験期間の長さ

実験期間の長さが風化速度に影響を及ぼすことが知られているが、具体的にどのような影響があるかは状況によって異なる。Trudgill *et al.* (1994) は、長期（10 年間）の風化速度が実験初期よりも小さくなるという結果を示し、その原因として表面状態の変化、土によるエッチピットの埋没、埋設に伴う土壌攪乱の頻度、実験期間中の気候変動をあげた。一方、Thorn *et al.* (2006b) による 10 年間の実験で前半の 5 年間よりも後半の 5 年間の風化速度が大きかったのは、後半で気候が比較的温暖であったためであると解釈されている。

阿武隈山地での実験（図 2）のうち飽和土層では、22 年間の重量減少速度（2.47%/y）が初期の 5 年間の値（3.60%/y）よりも小さかった。飽和土層では重量減少速度がきわめて大きく、22 年経過時点の重量が初期重量の 40% まで減少していた。このことは、実験の進行とともに溶解反応を受ける表面積が減少し、それが重量減少速

度に影響を及ぼした可能性がある。一方不飽和土層では、22年間の重量減少速度(0.148%/y)が初期の5年間の値(0.099%/y)よりも大きかった。不飽和土層における重量減少率の変動には不規則な階段状の変動があった(図2)。このような変動を生じる原因は不明であるが、次の2つの可能性がある。その1つは物理的風化の影響である。化学的風化の進行に伴い岩石の構成鉱物が物理的に分離した際、風化速度が一時的に加速する可能性がある。実際に阿武隈での野外実験において、飽和土層中の花崗閃緑岩試料には化学的風化と物理的風化の相互作用が働いたと考えられている(Yokoyama and Matsukura, 2006)。もう1つの要因は気候の年々変動である。降水量の変動に伴って土壤水分量も変動するため、水との接触が多い期間に溶解反応が促進され、一時的に風化速度が大きくなる可能性がある。

風化速度が実験期間中の気候変動の影響を受けたと考えられる事例は多い(Urushibara-Yoshino *et al.*, 1999b; Thorn *et al.*, 2006b)。したがって、1年間の野外風化実験の結果をそのまま外挿して長期間の風化速度の指標としてとり扱うことにはリスクがある。一方、風化速度が比較的大きい条件(>1%/y)では、実験の進行とともにタブレットの状態が大きく変化してしまう。このため、単純に実験期間を長くとればよいとも限らない。野外風化実験を実施する場合には、気候条件や埋設地点の環境条件に応じて、適切な実験期間を設定することが望ましい。

IV. ま と め

本稿では、土壤中における炭酸塩岩の野外風化実験について、海外の研究事例のほか、著者らが実施した実験結果を紹介し、これらの実験結果を整理した。同一地点において異なる岩石種を用いた風化実験を行ったケースでは、石灰岩の風化速度が苦灰岩よりも大きくなる。岩種が同一の場合風化速度の地域差には、年降水量と、ローカルな環境条件である土壤水分飽和状態の持続時間が重要である。一方で、土壤中の水の化学的性質が炭酸塩岩の風化速度に与える影響についての議論は

まだ十分ではなく、さらに検討を要する。野外風化実験の期間も、風化速度に影響を与える重要な要因の一つであり、今後実験を行う場合は、その設置場所の環境条件や気候条件に応じて、適切な実験期間を設定する必要がある。

野外風化実験のメリットは、(1)「現在」の環境における炭酸塩岩の風化速度を知ることができる点、および(2)多数の地点において実験を行うことにより、風化速度の空間的な分布を得ることが容易である点にある。一方、宇宙線生成核種³⁶Clを利用すれば数万年スケールでの長期的な風化・剝蝕速度を得ることができるため、それらの長期的な値と風化実験で得られる現在の値を比較することにも意義がある。今後、この手法により多様な条件下における炭酸塩岩の風化速度のデータを蓄積するとともに、さまざまなカルスト地形の発達過程について定量的な検討がなされることを期待する。

注

- 1) 炭酸塩岩のおもな風化作用は化学的風化作用(溶解作用)であると理解されており、「風化」の代わりにしばしば「溶解」あるいは「溶食」等の用語が用いられる。しかし、タブレットを用いた野外風化実験では、物理的風化作用がはたらく場合もある。本稿では、化学的風化作用に限定される「溶解」あるいは「溶食」ではなく、物理的作用を含む「風化」の用語を用いた。他の文献において「溶解速度」と表記されていた場合でも、本稿では「風化速度」に統一した。
- 2) 著者の一人である八反地は、1998年以降50回以上現地を訪問した。この間、湧水ではつねに流出がみられ、「飽和土層」の埋設地点はつねに飽和状態であった。
- 3) 図2では実験開始から2016年の最新の測定までの間、暴露させていた1系列(5個)の重量減少量を使用した。一方、前報(Matsukura *et al.*, 2007)では、2011年に分析用に回収した系列を含む2系列(10個)の重量減少量を使用した。このため、本稿の図2の重量減少量と前報の重量減少量は若干異なっている。
- 4) 本稿では、Akiyama *et al.* (2015)による秋吉台石灰岩タブレットの風化速度のほか、秋山(2012)に掲載されている阿武隈大理石のタブレットの風化速度を含めて報告する。
- 5) 各実験サイトにおける気候条件(年降水量、平均気温)について、論文に明記されている場合はその値を使用した。論文に明記されていない場合は各国の気象庁に相当する公的機関のウェブサイト参照し、実験サイトにもっとも近い地点の気候データ

を利用した。

- 6) Trudgill (1977) には、初期重量や重量減少率の値が示されていない。Plan (2005) はタブレットの一面にワニスを塗って実験を行っており、他の実験とは条件が異なる。これらの研究結果については除外した。

文 献

- 秋山沙苗 (2012): 秋吉台のドリーネにおける石灰岩の溶解速度: 野外風化実験と水文観測に基づく推定. 筑波大学大学院生命環境科学研究科地球科学専攻修士論文. [Akiyama, S. (2012): *Dissolution Rate of Limestone under Doline in the Akiyoshidai Karst Plateau: Evaluation from Weathering Experiment and Hydrological Observation in the Field*. Master's Thesis, Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba. (in Japanese with English abstract)]
- Akiyama, S., Hattanji, T., Matsushi, Y. and Matsukura, Y. (2015): Dissolution rates of subsoil limestone in a doline on the Akiyoshi-dai Plateau, Japan: An approach from a weathering experiment, hydrological observations, and electrical resistivity tomography. *Geomorphology*, **247**, 2-9.
- Burger, H.R., Sheehan, A.F. and Jones, C.H. (2006): *Introduction to Applied Geophysics*. W. W. Norton and Company, London.
- Crabtree, R.W. and Trudgill, S.T. (1985): Chemical denudation on a Magnesian Limestone hillslope, field evidence and implications for modeling. *Earth Surface Processes and Landforms*, **10**, 331-341.
- Dixon, J.C., Thorn, C.E., Darmody, R.G. and Schlyter, P. (2001): Weathering rates of fine pebbles at the soil surface in Kärkevagge, Swedish Lapland. *Catena*, **45**, 273-286.
- Hattanji, T., Ueda, M., Song, W., Ishii, N., Hayakawa, Y.S., Takaya, Y. and Matsukura, Y. (2014): Field and laboratory experiments on high dissolution rates of limestone in stream flow. *Geomorphology*, **204**, 485-492.
- 井倉洋二・吉村和久・杉村和久・配川武彦 (1989): 秋吉台の地下水およびその溶存物質に関する研究 (I) —秋芳洞の流出量および炭酸カルシウム排出量に基づく石灰岩の溶食速度—。洞窟学雑誌, **14**, 51-61. [Inokura, Y., Yoshimura, K., Sugimura, A. and Haikawa, T. (1989): Run-off and mass flux from the Akiyoshi-dai Plateau (I): Evaluation of solutional denudation rate based on run-off and calcium flux from Akiyoshi-do Cave. *Journal of the Speleological Society of Japan*, **14**, 51-61. (in Japanese with English abstract)]
- Jennings, J.N. (1981): Further results from limestone tablet experiments at Cooleman Plain. *Australian Geographical Studies*, **19**, 224-227.
- Krklec, K., Domínguez-Villar, D., Carrasco, R.M. and Pedraza, J. (2016): Current denudation rates in dolostone karst from central Spain: Implications for the formation of unroofed caves. *Geomorphology*, **264**, 1-11.
- 松倉公憲・八反地 剛 (2006): タフレット野外風化実験にまつわるいくつかの問題点; 筑波大学陸域環境センター報告, **7**, 41-51. [Matsukura, Y. and Hattanji, T. (2006): Some problems on field experiments on weathering rates using rock tablets. *Bulletin of the Terrestrial Environmental Research Center, The University of Tsukuba*, **7**, 41-51. (in Japanese)]
- Matsukura, Y. and Hirose, T. (1999): Five year measurements of rock tablet weathering on a forested hillslope in a humid temperate region. *Engineering Geology*, **55**, 69-76.
- Matsukura, Y., Hattanji, T., Oguchi, C.T. and Hirose, T. (2007): Ten year measurements of weathering rates of rock tablets on a forested hillslope in a humid temperature region, Japan. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F.*, **51** (Supplementary Issue 1), 27-40.
- Matsushi, Y., Sasa, K., Takahashi, T., Sueki, K., Nagashima, Y. and Matsukura, Y. (2010a): Denudation rates of carbonate pinnacles in Japanese karst areas: Estimates from cosmogenic ^{36}Cl in calcite. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, **268**, 1205-1208.
- Matsushi, Y., Hattanji, T., Akiyama, S., Sasa, S., Takahashi, T., Sueki, K. and Matsukura, Y. (2010b): Evolution of solution dolines inferred from cosmogenic ^{36}Cl in calcite. *Geology*, **38**, 1039-1042.
- Plan, L. (2005): Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian Alps. *Geomorphology*, **68**, 201-212.
- Smith, D.I. and Atkinson, T.C. (1976): Process, landforms, and climate in limestone regions. in *Geomorphology and Climate* edited by Derbyshire, E., John Wiley and Sons, 367-409.
- Stone, J., Allan, G.L., Fifield, L.K., Evans, J.M. and Chivas, A.R. (1994): Limestone erosion measurements with cosmogenic chlorine-36 in calcite—Preliminary results from Australia. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, **92**, 311-316.
- Thorn, C.E., Darmody, R.G., Dixon, J.C. and Schlyter, P. (2002): Weathering rates of buried machine-polished rock disks, Kärkevagge, Swedish Lapland. *Earth Surface Processes and Landforms*, **27**, 831-845.
- Thorn, C.E., Dixon, J.C., Darmody, R.G. and Allen, C.E. (2006a): A 10-year record of the weathering rates of surficial pebbles in Kärkevagge, Swedish Lapland. *Catena*, **65**, 272-278.
- Thorn, C.E., Dixon, J.C., Darmody, R.G. and Allen, C.E. (2006b): Ten years (1994-2004) of 'potential' weathering in Kärkevagge, Swedish Lapland. *Earth Surface Processes and Landforms*, **31**, 992-1002.
- Trudgill, S.T. (1977): Problems in the estimation of

- short-term variations in limestone erosion processes. *Earth Surface Processes*, **2**, 251-256.
- Trudgill, S.T., Crabtree, R.W., Ferguson, R.I., Ball, J. and Gent, R. (1994): Ten year remeasurement of chemical denudation on a Magnesian Limestone hillslope. *Earth Surface Processes and Landforms*, **19**, 109-114.
- 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 (駒澤大学応用地理研究所), **4**, 107-117. [Urushibara-Yoshino, K. (1991): The regionality of solution rate of limestone tablets in karat areas of Japan. *Regional Views, Institute for Applied Geography, Komazawa University*, **4**, 107-117. (in Japanese)]
- 漆原和子・鹿島愛彦・榎本浩之・庫本 正・フランツ・ディータミオトケ・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. [Urushibara-Yoshino, K., Kashima, N., Enomoto, H., Kuramoto, T., Miotoke, F.-D., Nakahodo, T. and Higa, M. (1999a): Secular change and regional differences of limestone solution rates in Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **108**, 45-58. (in Japanese with English abstract)]
- Urushibara-Yoshino, K., Miotoke, F.-D. and Research Group of Solution Rates in Japan (1999b): Solution rate of limestone in Japan. *Physics and Chemistry of the Earth*, **24**, 899-903.
- Yokoyama, T. and Matsukura, Y. (2006): Field and laboratory experiments on weathering rates of granodiorite: Separation of chemical and physical processes. *Geology*, **34**, 809-812.
- 吉村和久・井倉洋二 (1993): CO₂ 循環における炭酸塩岩溶解の役割. 地球化学, **108**, 45-58. [Yoshimura, K. and Inokura, Y. (1993): The role of chemical weathering of carbonate rocks in the geochemical cycle of CO₂. *Chikyukagaku (Geochemistry)*, **27**, 21-28. (in Japanese with English abstract)]