

地中に埋設した石灰岩の 溶解速度に関する室内実験

高屋 康彦 (大東文化大学経営学部)

A Laboratory Experiment on Dissolution Rate of Limestone Buried in the Ground

Yasuhiko TAKAYA

要 旨

地中に埋まっている岩石を想定して2種の石灰岩および1種の花崗岩を珪砂中に埋設し、散水タイマーとシャワーヘッドを使った簡易降雨装置により、毎日5分間雨を降らせて岩石を溶解させる室内実験を1年間実施した。年間の重量欠損率は、石灰岩では0.059-0.250%であり、露出した状態よりも、地中に埋設した方が溶解することがわかった。2種類の珪砂の中では、細粒よりも粗粒の方で溶解した。その差は琉球石灰岩よりも本部石灰岩の方でわずかに大きく、砂の粒径の効果は緻密な岩石の方が大きいことが明らかになった。場の条件が同じであった場合は、本部石灰岩より琉球石灰岩の方が溶解しており、間隙率の大きい琉球石灰岩の方で水が通りやすく、溶解したと考えられる。すなわち、定期的に雨が降る環境で地中に埋まった状態でも、溶解速度には試料の物理的性質（物性）の影響が及んでおり、その効果がみられることがわかった。

1 はじめに

石灰岩は雨水などに溶かされてカルスト地形を創り出す岩石であることで知られ、室内実験からも他の岩石に比べて水に溶けやすい岩石であることが明らかにされている（例えば、高屋ほか, 1996; 高屋ほか, 2006; 高屋・小口, 2010）。一般に、岩石の風化の進行は非常に遅いため、その速度を正確に見積もることは難しい。野外における石灰岩の風化速度を実測するために、岩石片を比較的長い期間設置し、重量欠損を計測した実験研究の事例が数多くあり、それらを総括したレビューも行われている（松倉・八反地, 2006; 八反地・松倉, 2007; 八反地・松倉, 2017）。ここではまず実験で設定する条件によって、既往の実験を整理することを試みる。第1に実験を実施する場の条件が挙げられる。例えば、設置地点の地質・土壌・底質、水分状態（水と接触しているか否か、流れの有無）や水質（雨水に近いのか、岩石の成分が溶け込んでいるのか）、そしてそれらの要因となる気温や降水量などの気象条件である。第2に使用する試料の条件があり、形状を整える際に岩石を破碎するケースあるいは一定の形に整形するケースが多い。破碎・粉碎には表面積を増やす効果

があり、反応を促進して有意なデータを得やすくする狙いがある。整形する場合は、タブレット状(小型のディスク)にする事例が多い。その理由は、同一形状の試料を用意することが比較的容易であり、複数のものを扱いやすいからである。ただし、一部が欠けたり割れたりすると重量が大きく変化するため、速度値に影響が出やすいことに注意する必要がある。そして第3に実験を行う場と試料との関係性・条件があり、例えば、野外で設置する時間あるいは回収頻度等が挙げられる。以上、実験でどのようなデータを得たいのかを明確にすることが重要と言えよう。

次に場の条件として野外の環境を想定し、より現実の実験結果を得ることを目的とした野外実験において、現場に試料を設置した事例のレビューを行う。まず試料を地表面上に置いたケース、土壤中に埋めたケースを挙げる。漆原らによる実験(漆原, 1991; 漆原ほか, 1999a, Urushibara et al., 1999)では、日本各地に直径4 cm、厚さ3 mmまたは4 mm(体積約3.8-5.0 cm³)のディスクを地上(空中)や土壤中に埋設した。期間は1年または4年であり、土壤中の風化速度は空中の数倍あった。また風化速度は地域によって異なり、同じ地点でも気候・気象条件の影響(例えば、降水量の大小で速度に約2倍の差があった)がみられ、気象条件の1つである降水量に比例する傾向や二酸化炭素濃度などの影響を指摘した。Thorn et al. (2006a, b)は、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(寒冷地)で野外風化実験を行った。Thorn et al. (2006a)では粒径6.2 mmに粉碎した苦灰岩および花崗岩を地表面に設置し、Thorn et al. (2006b)では円盤型タブレット(直径40 mm、厚さ2～3 mm、体積約2.5-3.8 cm³)の苦灰岩、花崗岩および石灰岩を土壤中に埋設した。実験期間は最長で約10年間であった。土壤中では石灰岩は苦灰岩よりも速く風化した。風化速度と深度の間には関係性はなく、排水性との関係、気象条件との関係が認められた。松倉らによる野外実験(Matsukura and Hirose, 1999; Matsukura et al., 2007; 八反地・松倉, 2017)では、阿武隈山地で採取された花崗岩、ハンレイ岩および石灰岩(大理石)を含む複数の岩石を、直径3.45 cm、厚さ約1 cm(体積約9.3 cm³)に整形して阿武隈山地の小流域の谷頭部に埋設し、約3か月ごとまたは約6か月ごとに回収した。設置場所は、地上および水分条件の異なる土壤中である。飽和土層中の石灰岩は、他に比べてきわめて速く風化した。地上と不飽和土層での風化速度がやや大きく、腐植層直下での風化速度がやや小さかった。また、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ことを報告した。その他に、カルスト台地のドリーネで現場の岩石を使用して行ったケースがある。Akiyama et al. (2015)は、秋吉台のドリーネに石灰岩(径約3.5 cm、厚さ約1 cm、体積約9.6 cm³)を埋設し、土壌水分量との風化速度の関係を議論した。実験期間は約2年である。土壌深さ50 cmの風化速度は、斜面上部・中部で大きく(1.90～2.45%/yr)、斜面下部・底部で小さかった(0.42～0.68%/yr)。風化速度は土壌水分の飽和状態が持続する時間に比例すると報告した。

レビューの最後に、流れのある水の中で速度値を実測した野外実験を挙げる。Hattanji et al. (2014)は、溪流を対象とした野外実験を約3年間実施し、半年に1度試料を回収して重量欠損を計測した。試料の形状は直径3.45 cm、厚さ約1 cm(体積約9.3 cm³)のタブレットである。溪流水のカルサイト飽和度が高い場合、風化速度が小さいことを示した。得られた計測値は、年間の欠

損に換算して 0.19-4.47%/yr であった。鍾乳洞やドリネが形成されていく過程においては、長期的にみればイベントと呼べるような大雨が降ることもあり、その時には平常時より速い流れが発生してそれらが集中する場所が生まれると考えられる。高屋（2018）は、茨城県南部の加波山の東側斜面の小流域で、風化速度の実測値を得るために岩石を埋設して毎年重量を計測する野外実験を実施し、1年毎の重量欠損から見積もった風化速度の4年経過時での値を報告した。設置場所には、渓流水のわずかな流れがあり、地表面上でも土壌中でもなく、小河川から流出してきた土砂（マサ土）がみられる。これは、流れがないが土壌飽和帯にあるケース（Matsukura et al., 2007）や流れのある水中のケース（Hattanji et al., 2014）とは異なる環境に該当する。野外で起きている自然現象を解明するために、流れのある条件下での実測値を得ることは第一義的に大きな意義がある。さらに、これまで数多く行われたきた室内実験（例えば、高屋ほか, 1996; 高屋ほか, 2006; 高屋・小口, 2010）で得られた知見を基に物理的性質（例えば、間隙率）の異なる複数の岩石を用いて、一般性を捉えることが重要である。そして室内実験においては、野外実験で得られた知見（例えば、条件の与え方、設置場所によるデータの違い）を活かし、より現実に近いデータを得ることのできる条件設定をする必要があろう。

本研究では、高屋（2018）で行った野外実験の場、すなわち水の流れがあり且つやや土砂に埋設している環境を想定し、室内実験を実施した。期間は1年間である。用いた試料は高屋（2018）と同じ3種の岩石であり、降雨が1日のうちに5分間（連続）だけある環境下で、2種の砂に埋設したものとむぎ出しの状態 で置いたものの計3条件で実施した。本稿では、1年間の室内実験によって得られた溶解速度の値を報告する。

2 実験試料

実験に用いた岩石は、高屋（2018）の野外実験で用いたものと同じ石灰岩2種と花崗岩1種の計3種である。石灰岩は、沖縄県産の本部石灰岩（M-Ls）と琉球石灰岩（R-Ls）であり、花崗岩は茨城県産の加波山花崗岩（K-Gr）である。本部石灰岩は、灰色から暗灰色を呈するペルム紀本部層の石灰岩であり、本部半島北西部の名護市安和から部間、本部町崎本部周辺に産する（木崎, 1985）。いわゆる大理石で結晶質なため、非常に徹密で硬い性質を持つ。琉球石灰岩は、琉球列島に広く分布する更新世琉球層群を構成する石灰岩である。茶色から象牙色を呈し、巣穴と呼ばれる無数の間隙を有する。琉球石灰岩は、古い方から那覇石灰岩、読谷石灰岩、牧港石灰岩の3つに区分されており（Flint et al., 1959; MacNeil, 1960）、本実験では那覇層から得られた那覇石灰岩を用いた。加波山周辺の地質の概要として、筑波山塊に分布する花崗岩類は西南日本内帯の領家帯および山陽帯の延長とされ（Ishihara, 1977）、花崗岩類は南から北に向かって、筑波花崗岩、加波山花崗岩、稲田花崗岩に分かれる（宮崎ほか, 1996; 吉岡ほか, 2001）。そのうち加波山花崗岩は、筑波花崗岩および稲田花崗岩の両者を貫く関係にあり、中粒の黒雲母花崗岩および細粒の白雲母含有黒雲母花崗岩の2種が主たる岩相で、加波山には墓石や灯籠用石材として名高い「真壁石」の採石場が点在

表1 実験に用いた岩石試料の物理的性質

	本部石灰岩 M-Ls	琉球石灰岩 R-Ls	加波山花崗岩 K-Gr
真比重, ρ_{ture}	2.71	2.66	2.64
かさ比重, ρ_{bulk}	2.69	2.28	2.62
間隙率, n (%)	0.76	14.07	0.77

する。年代測定の結果は、58-63 Ma (河野・植田, 1966; 柴ほか, 1979; Arakawa and Takahashi, 1988) と報告されており、古第三紀はじめのものとされる。

これらの岩石を直方体、3 cm×3 cm×6 cm (体積は 54 cm³) の同一形状に整形し、実験の出発物質とした。試料の物理的性質として、重さと体積を計測してかさ比重を算出した後、ピクノメーター法で真比重を測定し、その値とかさ比重の値から間隙率を得た。それらの値を表1に示す。本実験で採用した2種の石灰岩の間には、間隙率の値に大きな差異が認められた。花崗岩は間隙率が1%以下と小さく、非常に緻密な岩石であった。

岩石試料を埋設する土壌・底質を想定した材料として、三河珪石社製の珪砂4号(平均粒径約0.7 mm)および6号(平均粒径約0.2 mm)を用いた。この珪砂は、愛知県岡崎市の領家変成帯中の石英片岩を砕いたものである。珪砂の持つ性質の一つとして、透水性試験を実施した。試験方法は日本工業規格 JIS A 1218 「土の透水試験方法」(2009)に規定されており、本実験で使用した珪砂に適するものとして定水位試験を実施した。得られた値は三河珪砂4号では 1.10×10^{-6} (m/s)、三河珪砂6号では 2.24×10^{-7} (m/s) であり、両者の間の差異はワンオーダーあることが確認された。

3 実験方法

実験では、土中にある岩石を想定して2種類の珪砂の中に試料を埋設させるとともに、降雨を想定して定期的に雨滴を作用させる装置を使用した。実験中の試料と降雨時の様子を図1に示す。試料は、水はけのよい穴の開いたポリ袋を外側に布製のコーヒーフィルターを内側に重ねて袋を作り、その中に珪砂と岩石試料を入れて埋設を行った。使用したフィルターは、丸太衣料製のネルドリップ104で、素材は綿80%、ポリエステル20%のネル生地である。ポリ袋は、高密度ポリエチレンから成るネクスタ製の水切りごみパックで、サイズは幅180×高さ140×マチ10 mmである。2枚の袋はポリスチレンのクリップ(Laurel プラスチッククリップ)で止め、袋が広がらないように固定した。雨滴の水は上水道からホースを繋いだ正方形のシャワーヘッド(ZENHOX 10 スクエア)を使用し、園芸用の散水タイマー(藤原産業社製セフティー3 SST-3N)によって通水する時刻・継続時間を制御した。通水時間は、1日ごとに5分である。雨滴降下(降雨)時には、浸透能を超える降雨強度が得られており、表面に水があふれている状態にあった。また、2種類の珪砂に石灰岩2種を埋設し(2×2=4ケース)、花崗岩を含む全3種の試料を比較のために珪砂に埋設させな

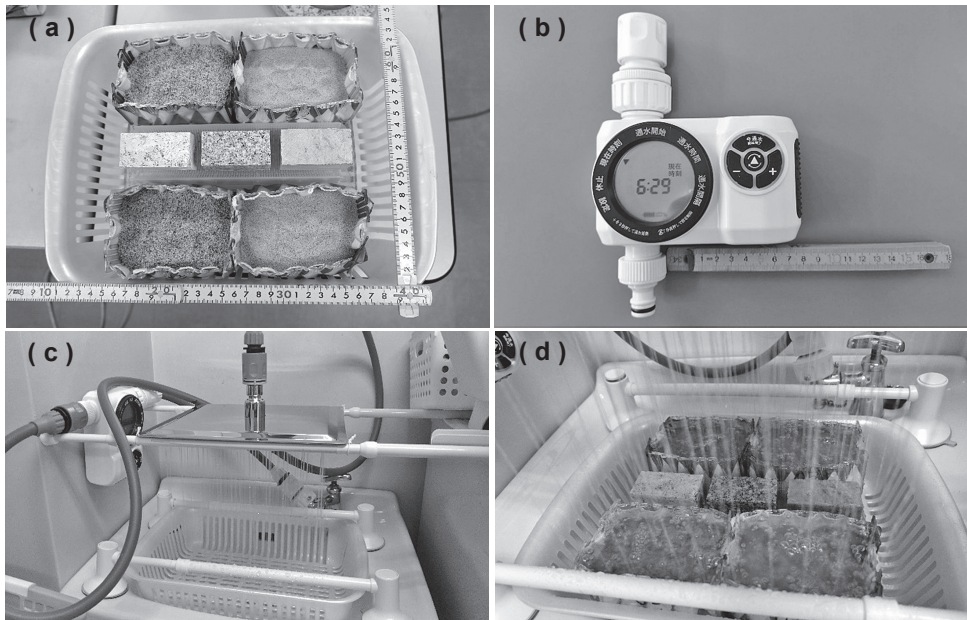


図1 実験の様子：(a) 試料の配置，(b) 散水タイマー，(c) 降雨装置，(d) 降雨時の様子

いむき出しの状態を設置した。計7つのケースが存在する。

実験は室内（大東文化大学東松山キャンパス第二研究棟4Fの研究室）で、2019/12/20から2020/12/20までの1年間実施した。実験装置が確実に作用し、降雨が確認されたのは計355日であり、施設点検・工事で断水となって降雨がなかったのが3日（1/4, 25, 31）、停電などで降雨の有無が確認できなかった日が7日（2/20, 3/1, 3/29, 4/3, 4/12, 8/23, 9/13）あった。実験前と実験後の試料の重さを計測し、重量欠損から溶解速度を算出した。

4 結果と考察

実験後に各試料を回収し、風乾させて重量を計測した。その値を実験前と比較し、1年間の欠損率を算出した結果を表2に示す。得られた年間の欠損率は、加波山花崗岩を除くと0.059-0.250%であった。3つの場の条件の中では、粗い4号の珪砂に埋めたケースにおいて最大であった。次いで溶解が進んだのは、細かい珪砂の6号のケースである。4号のケースと6号のケースとの差は非常にわずかであり、穴の開いた琉球石灰岩よりも緻密な琉球石灰岩の方が若干大きかった。露出したケースでは、埋設したケースに比べて欠損率が小さく、その値には一桁の差があった。地中に埋設した場合の年間の欠損率を岩石ごとに整理すると、本部石灰岩では0.217-0.220%、琉球石灰岩では0.249-0.250%であり、緻密な本部石灰岩の方が穴の多い琉球石灰岩より大きかった。すなわち、砂の粒径の効果は、間隙率の小さい岩石の方が大きいという結果となった。間隙率が大きい岩石では、粒径の効果が薄まると言える。露出のみの設定であった真壁花崗岩は、1日5分間の降雨とい

表2 実験で得られた1年間の重量欠損率

	M-Ls	R-Ls	M-Gr
	%/yr	%/yr	%/yr
珪砂4号(粗)	0.220	0.250	-
珪砂6号(細)	0.217	0.249	-
露出	0.059	0.082	0.000

う本実験の条件下では重量の欠損は認められなかった。

同じ場の条件下において石灰岩2種の欠損率の比較を行うと、珪砂に埋設した実験および露出した実験すべてにおいて、本部石灰岩より琉球石灰岩の方が大きく、溶解が進んでいた。この結果は、穴の空いた琉球石灰岩の方が、緻密な本部石灰岩よりも溶けることを示しており、水の通り方が反映されたと考えられる。すなわち、砂に埋もれた状態であっても、試料の物理的性質(物性)の効果が溶解速度に及ぶことがわかった。この石灰岩2種の差を条件ごとに整理すると、露出時が最も大きく、珪砂に埋設したケースでは粗い4号に比べて細かい6号のケースで大きかった。その理由は今のところ不明である。

本実験で与えた降雨の条件は、1日毎に5分間連続で降らせる設定であった。石灰岩の溶解の進行は、雨の降り方、水の通り方と関係があり、実験で定めるそれらの条件および土壌・底質の種類それらの持つ性質に大きく左右される。今後の課題としては、降雨の継続時間および頻度を変え、現場の土・堆積物に近い土壌・底質材料を検討し、その効果を評価することが挙げられる。さらに地中に埋まっている石灰岩の溶解特性について議論を進めるには、岩石表面の凹凸や粗さなどを正確に評価する必要があり、その手法の開拓・検討が求められる。それらを今後進めていきたい。

5 まとめ

地中に埋設した岩石を想定し、2種の石灰岩および1種の花崗岩を用いて毎日5分間雨を降らせる室内実験を1年間実施した。得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 1年間の重量欠損率は、石灰岩では0.059-0.250%であった。露出した状態よりも、地中に埋設した条件の方が溶解することがわかった。2種類の珪砂の中では、細粒よりも粗粒の方で溶解が進んだ。
- (2) 同じ石灰岩において、埋設した砂の粒径の違いを比較検討すると、その差はそれほど大きくなかった。わずかではあるが、琉球石灰岩よりも本部石灰岩の方で若干大きかった。砂のサイズの効果は間隙率の小さい岩石の方が大きく、多孔質な岩石ではこの効果が薄まる。
- (3) 同じ場の条件において、岩石の違いを比較検討すると、本部石灰岩より琉球石灰岩の方が溶解していた。間隙率の大きい琉球石灰岩の方が水の通りやすく、緻密な本部石灰岩よりも溶解が進んだ結果と考えられる。すなわち、定期的に降雨のある環境下では、地中に埋設された状

態でも、溶解速度は試料の物理的性質（物性）の影響を受けることがわかった。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、三河珪石（株）の神谷康史氏には珪砂をご提供頂きました。関東技術サービス（株）の出井康行氏には、透水性試験に関してご協力頂きました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 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.
- Arakawa, Y. and Takahashi, Y. (1988) Rb-Sr ages of granitic rocks from the Tsukuba district. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology (Ganko)*, **83**, 232-240.
- Flint, D. E., Saplis, R. A. and Corwin, G. (1959) Military geology of Okinawa-jima, Ryukyu-retto, 5 Geolgy. Intelligence Division, Office of Engineer, Headquarters, U.S. Army Forces, Far East, Personnel of U.S. Geological Survey, 88p.
- 八反地 剛・松倉公憲 (2007) 石灰岩タブレットを用いた野外風化実験：水質が風化速度に与える影響：筑波大学陸域環境研究センター報告, **8**, 41-47.
- 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：地学雑誌, **126**, 355-367.
- 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.
- Ishihara, S. (1977) The Magnetite-series and Ilmenite-series Granitic Rocks. *The Society of Resource Geology*, **27**, 293-305.
- 河野義礼・植田良夫 (1966) 本邦産火成岩の K-A dating (IV) —東北日本の花崗岩類—：岩石鉱物鉱床学会誌, **56**, 41-55.
- 木崎甲子郎 (1985) 琉球弧の地質誌：沖縄タイムス社, 278p.
- MacNeil, F. S. (1960) Tertiary and quaternary Gastropoda of Okinawa. U.S. Geological Survey. Professional Paper, **339**, 1-148.
- 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 weight-loss of rock tablets due to weathering in a forested hillslope of a humid temperate region. *Zeitschrift für Geomorphologie, N. F.*, **51** Supplementary Issue 1, 27-40.
- 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, **7**, 41-51.
- 宮崎一博・笹田政克・吉岡敏和 (1996) 真壁地域の地質：地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 103p.
- 日本工業規格 JIS A 1218 (2009) 「土の透水試験方法」：日本規格協会, 8p.
- 柴 正敏・植田良夫・大貫 仁 (1979) 茨城県筑波地方, 変成岩類の K-Ar 年令：岩石鉱物鉱床学会誌, **74**, 122-125.
- 高屋康彦 (2018) 山地小流域に埋設した石灰岩および花崗岩の風化速度—岩石の風化に関する野外実験—：経営論集, **36**, 65-75.
- 高屋康彦・八田珠郎・松倉公憲 (1996) 堆積岩類および火成岩類の溶解特性に及ぼす岩石物性の影響：地形, **17**, 193-202.
- 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.
- 高屋康彦・小口千明 (2010) 石灰岩の海水への溶解特性に及ぼす塩分濃度および CO₂ ガスの影響に関する基礎実験：地形, **31**, 283-299.
- 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 Kärkevage, 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.
- 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.
- 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., Miotoko, F.-D. and Research Group of Solution Rates in Japan (1999b) Solution rate of limestone in Japan. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, **24**, 899-903.
- 吉岡敏和・滝沢文教・高橋雅紀・宮崎一博・坂野靖行・柳沢幸夫・高橋 浩・久保和也・関 陽児・駒澤正夫・広島俊男 (2001) 20 万分の 1 地質図幅「水戸」(第 2 版): 地質調査所.