微生物が地盤の隆起の原因になっていることを 探る実験的研究

山中健生*・宮坂秀一*・庄子和夫*・陽田秀道**

Experimental Verification of Bacterial Cause of Upheaval of the Ground

Tateo YAMANAKA*, Hidekazu MIYASAKA*, Kazuo SHOJI* and Hidemichi YOUTA**

Abstract: The damage by upheaval of the residential land of houses built on the mudstone of the Miocene has been reported in Iwaki-city area, Fukushima prefecture, Japan. The present studies were performed intending to clarify the reasons why the land was upheaved. When the fresh mudstone was added to the culture medium for *Thiobacillus novellus* supplemented with sodium sulfide, the pH of the medium decreased from 8 to 3.2 during 7 day-cultivation at 28°C. When the mudstone was added to the medium for *Thiobacillus ferrooxidans* in which ferrous sulfate was replaced by powdered pyrite and pH was adjusted to 7, the pH of the medium decreased from 7 to 2, and the concentrations of ferrous and ferric ions in the medium greatly increased. When the mudstone sterilized at 121°C for 20 min was used, neither the decrease of the pH nor the increase in the concentrations of ferrous and ferric ions was observed. Therefore, the microorganisms, sulfur oxidizing and acidophilic iron oxidizing bacteria, in the mudstone seemed to have oxidized pyrite to form sulfuric acid if sulfide was available, even though the initial pH of the mudstone was 7 - 8. Sulfuric acid thus formed will form gypsum which seems to be one of the causes of upheaval of the ground.

1. はじめに

近年、中新世の未風化泥岩地盤に建設した住宅の床下の地盤や、工場の床版下の地盤が隆起する盤膨れ現象が福島県いわき市を中心に起こっており、これによる被害が社会問題になっている。切土して露出した未風化泥岩のpHは7~9であり、この未風化泥岩を空気に曝しておくと数ヶ月でpHが4から2付近まで低下する。このような泥岩を調べた結果、硫酸還元菌、硫黄酸化細菌、好酸性鉄酸化細菌が生息することが明らかになった。また、盤膨れを起こした土壌の表面には石膏が晶出し、光沢を示している。このような現象を、陽田は、次のような機構に基づき考察している。すなわち、切土した未風化の泥岩上に住宅や工場を建築することにより、床下温度

が上昇し、それに伴い泥岩の温度も上昇し、未乾燥の嫌気的条件下で硫酸還元菌が H_2S を発生する。 H_2S が泥岩の乾燥に伴い空気に触れると、硫黄酸化細菌の作用により H_2SO_4 が生じpHが4付近まで低下する。次の段階で好酸性鉄酸化細菌が活動を始め、土中のパイライト(FeS_2)を酸化して H_2SO_4 を生成する。この H_2SO_4 がカルシウムと反応して $CaSO_4$ を、また、他の鉱物と反応してジャロサイトを生成する。このような二次鉱物の生成を伴う生化学的風化作用のため、泥岩の破碎や粉化が起こり土壌の体積が膨張する。

本研究では、この陽田の予想が正しいかどうかを明らかにするため、盤膨れの起こる地区の泥岩を用いて、その中に生息する微生物によりパイライトが酸化されるかどうかを調べた。

2. 実験方法

まず、硫黄酸化細菌用の培地(pH 7-8)に泥岩を入れ振とう培養するとpHが低下すること(つまり泥岩中に硫黄酸化細菌がいること)および、好酸性鉄酸化細菌用の培地(pH 2)に泥岩を入れて振とう培養すると $Fe(II)$ が $Fe(III)$ に酸化されること(つまり泥岩中に好酸性鉄酸化細菌が

1996年10月17日受付, 1996年11月28日受理

* 日本大学理工学部

Department of Industrial Chemistry, College of Science and Technology, Nihon University, Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101, Japan

** (株) ヨウタ

Youta Co., 3 Ojima-machi 12-2, Iwaki-city, Fukushima 973, Japan

いること)を確かめた。次に、硫黄酸化細菌用の培地(pH 7-8)へパイライトを加えたものに泥岩を入れて振とう培養すると、pHが低下するとともにパイライトが分解されることを $\text{Fe(II)}+\text{Fe(III)}$ の増加の測定により明らかにした。土壌サンプルとしては、いわき市内の造成地の盤膨れ現象の見られる地区の泥岩を用いた。以下のいずれの実験においても、泥岩は宅盤下、20-70 cmの深さのものを細粉化して用い、121°C、20分間加熱した泥岩を対照として用いた。

2.1 硫黄酸化細菌

Santerら²⁾の *Thiobacillus novellus* 用の無機培地に0.2% Na_2S を加えpHを7-8に調整した溶液200 mlを500 ml坂口フラスコに入れ滅菌した後、細粉化した泥岩10 gを加えて28°Cで振とう培養し、pHの変化を測定した。

2.2 好酸性鉄酸化細菌

SilvermanとLundgrenの9K培地³⁾(pH2, 13.3g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ を含む)200 mlに細粉化した泥岩10 gを加えて500 mlの坂口フラスコにいれ28°Cで振とう培養し、 Fe(III) の生成量をロダン塩法⁴⁾で測定した。

2.3 pH 2 におけるパイライトの酸化

SilvermanとLundgrenの9K培地³⁾200mlに FeSO_4 の代りに細粉化したパイライト5 gを加え、pHを2に調整したのち細粉化した泥岩10 gを加えて28°Cで振とう培養して、 $\text{Fe(II)}+\text{Fe(III)}$ の生成量を *o*-フェナントロリン法⁵⁾で測定した。好酸性鉄酸化細菌が存在すると、式(1)のように、パイライトの硫黄は酸化されて硫酸になるが Fe は Fe^{2+} になって溶解する。 Fe^{2+} は一部が酸化されるので、培養液中には $\text{Fe(II)}+\text{Fe(III)}$ が増加する⁶⁾。

2.4 泥岩中の細菌によるパイライトの酸化

T. novellus 用の培地 (pH 7-8)に0.5% Na_2S を加えたものの200mlに細粉化したパイライトを加え、さらに、細粉化した泥岩10 gを加えて500ml坂口フラスコに入れ28°Cで振とう培養し、 $\text{Fe(II)}+\text{Fe(III)}$ の生成量を *o*-フェナントロリン法⁵⁾で測定した。

3. 実験結果と考察

T. novellus 用培地に Na_2S を追加して泥岩を加えた場合は次第にpHが低下し、用いた土の中に硫黄酸化細菌が生息することを示した(Fig. 1A)。しかし、*T. novellus* 用培地に Na_2S を添加しない培地では $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ が存在するにも係らずpHの低下が見られなかった(Fig. 2A)。この結果は、この泥岩の中の硫黄酸化細菌が $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ を酸化できないことを示した。また、Fig. 3Aに示すように、泥岩はpH 2において Fe(II) を Fe(III) に酸化したので、この土の

Fig. 1 The pH change observed when the culture medium for *Thiobacillus novellus* supplemented with sodium sulfide (pH 7-8) was shaken at 28°C in the presence of mudstone. The medium contained sodium sulfide and sodium thiosulfate as the sulfur compounds. (A) mudstone without heat-treatment was added, (B) mudstone heated at 121°C for 20 min was added.

Fig. 2 The pH change observed when the culture medium for *Thiobacillus novellus* (pH 7) was shaken at 28°C in the presence of mudstone. The medium contained only sodium thiosulfate as the sulfur compound. (A) mudstone without heat-treatment was added, (B) mudstone heated at 121°C for 20 min was added.

中に好酸性鉄酸化細菌が生息することが示された。Fig. 4Aは、pH 2 において泥岩によりパイライトが酸化され、 $\text{Fe(II)}+\text{Fe(III)}$ が生成することを示している。また、Fig. 5A, Cは、 Na_2S が存在すればpH 7から出発しても泥岩によりpHが次第に低下し、それに伴ってパイライトが酸化さ

Fig. 3 The increase in the concentration of Fe(III) observed when the culture medium for *Thiobacillus ferrooxidans* (pH 2) was shaken at 28°C in the presence of mudstone. (A) mudstone without heat-treatment was added, (B) mudstone heated at 121°C for 20 min was added.

Fig. 4 The increase in the concentration of Fe(II) + Fe(III) observed when the culture medium for *Thiobacillus ferrooxidans* containing pyrite in place of ferrous ion (pH 2) was shaken at 28°C in the presence of mudstone. (A) mudstone without heat-treatment was added, (B) mudstone heated at 121°C for 20 min was added.

れ、Fe(II)+Fe(III)が生成することを示している。なお、別に硫黄酸化細菌として*Thiobacillus neapolitanus*を用いた実験で、pH 3付近においてもこの細菌のみではパイライトを酸化することはできないことを確認した。Fig. 5A, Cに示した実験においては、H₂Sの代りにNa₂Sを用いたが、硫化物があれば泥岩中の細菌により酸化されてpH

Fig. 5 The increase in the concentration of Fe(II)+Fe(III) (A), (B) and the change of pH (C), (D) observed when the culture medium for *Thiobacillus novellus* supplemented with 0.5% Na₂S (pH 7) containing powdered pyrite was shaken at 28°C in the presence of mudstone. (A), (C): mudstone without heat-treatment was added; (B), (D): mudstone heated at 121°C for 20 min was added.

が低下するとともに、パイライトが酸化されてFe(II)+Fe(III)が生成するので、SO₄²⁻も式(1)に従って生成する。従って、陽田¹⁾が予想したように、泥岩中のH₂Sが硫黄酸化細菌により酸化されてpHが低下して、好酸性鉄酸化細菌が活動し多量のSO₄²⁻が生じるということが本実験により証明された。今回の研究では、硫酸還元菌の作用を証明できなかったが、用いた泥岩中にこの細菌が生息することはすでに報告してある¹⁾。大規模な造成における切土の際は、何の臭気も感じられないが、スパン50 mの大きな工場内の被害面積 1,200 m²程度を掘削した際には強いH₂Sの臭気を感じた。このH₂Sは硫酸還元菌の活動によるものと考えられるが、これらがかりに硫酸還元菌の活動によらないとしても、盤膨れが起こった場所の土中にはH₂Sが生じていることを示している。このようにして生じたSO₄²⁻がCa²⁺と反応してCaSO₄を生じたり、Ca²⁺以外の鉱物と反応してジャロサイトを生成し、泥岩の破碎が土壌の体積を膨張させ、盤膨れの原因になっていると考えられる。実際、比較的乾燥している土中にはCaSO₄が晶出している。また、CaSO₄の少ない盤膨れ箇所ではジャロサイトの生成が目視できる¹⁾。しかし、好酸性鉄酸化細菌の作用でパイライトからSO₄²⁻が多量に生じそれが原因となりCaSO₄やジャロサイトが生成することは、今後、実験的に証明する必要がある。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費補助金重点領

域研究「全地球史解説」(領域番号259)の援助を受けました.

文 献

- 1) 陽田秀道(1995): 泥岩の微生物及び化学的風化における地盤の隆起とその被害について. 第40回地盤工学シンポジウム, p. 99.
- 2) Santer, M., Boyer, J. and Santer, U. (1959): *Thiobacillus novellus*. 1. Growth on organic and inorganic media. J. Bacteriol., **78**, 197-202.
- 3) Silverman, M. P. and Lundgren, D. G. (1959): Studies on the chemoautotrophic iron bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans*. 1. An improved medium and a harvesting procedure for securing high cell yields. J. Bacteriol., **77**, 642-647.
- 4) Lazaroff, N. (1963): Sulfate requirement for iron oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans*. J. Bacteriol., **85**, 78-83.
- 5) Ballentine, R. and Dorothy, D. D. (1957): Determination of metals. Methods Enzymol., **3** 1002-1035.
- 6) DiSpirito, A. A. and Tuovinen, O.H. (1984): Oxidations of nonferrous metals by thiobacilli. In: Strohl, W. R. and Tuovinen, O. H. (eds.) Microbial Chemoautotrophy, Ohio State University Press, Columbus, 3-29 pp.