

阿保花崗岩起源のマサにおける膨張

相澤泰造¹・酒井俊典²・成岡市²

The expand in a decomposed granite, and its cause

Taizo AIZAWA¹・Toshinori SAKAI²・Hajime NARIOKA²

Abstract: The considered section where was between two faults of the decomposed granite expanded upward. The section was the dark gray decomposed granite that mainly consisted of biotite. The outer side of two faults was the white decomposed granite that mainly composed of quartz and feldspar. The direction of a relative expansion of the portion pinched between two faults was about 51-degree slant upper part, and the amount of displacement was a maximum of about 26 mm. For the predictions, the elasto-plastic FE analysis based displacement control was conducted. The relative displacement obtained by FE analysis was almost agree with the actual relative displacement. X-ray diffraction was performed on two kinds of decomposed granites. The kaolinite and mica were contained rich in the dark gray decomposed granite. The quartz, potassium feldspar and plagioclase were contained rich in the white decomposed granite.

The kaolinite and mica in the dark gray decomposed granite were a weak combination of minerals. For this reason, it was found that the larger expansion may be caused by cutting. On the other hand, as the quartz was a stable mineral, no expansion may be appeared, and the white decomposed granite was a less amount of expansion induced by cutting.

Key Words : expansion, clay minerals, decomposed granite, X-ray diffraction

1. はじめに

応力開放による岩盤の膨張は、土質工学会(1974)により、蛇紋岩や泥質片岩・第三系泥岩に対する研究が行われている。花崗岩は、北海道から沖縄まで日本各地に広く分布しており、その風化残積土である風化花崗岩(以下、マサと呼ぶ)は、深層風化が進み同一地点であっても風化程度が異なるため、土質工学的に特殊土に位置づけられている。風化花崗岩地帯の切土による応力解放に伴う膨張の影響は泥岩ほどではないものの、マサの膨張現象を研究することは法面の安定性を評価する上で有効であると考えられる。しかし、マサの膨張についての研

究は現在まで十分に行われていない。本研究では、三重県伊賀市で発生した、切土に伴う応力開放を誘因としたマサの膨張現象について検討を行った。

2. 法面の状況

対象地は三重県伊賀市の切土法面で、断層により暗色部(以下、黒マサと呼ぶ)と白色細粒部(以下、白マサと呼ぶ)に分けられた。この内、黒マサは2つの断層にはさまれた法面の中央部に分布し、白マサは法面の両翼部に分布していた。なお、黒マサと白マサでは花崗岩(マサ)の岩相が大きく異なるため、かつてこの面を境に岩盤が変位したものと判断し、両者の境界を「断層」と判断した。本地点では、切土直後、Fig. 1に示す2つの断層に挟まれた中央部分の黒マサがPhoto. 1に示したように、斜め上方に向けて押し出し、1段目小段に段差が生じ

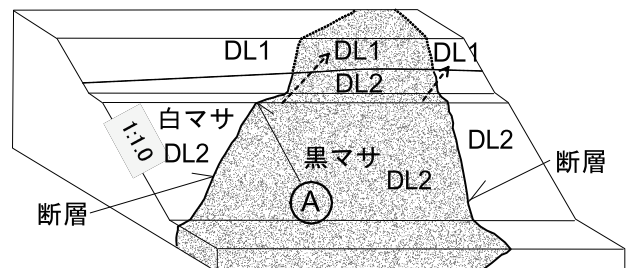


Fig. 1 法面ブロックダイアグラム。
The block diagram of a slope.



Photo. 1 膨張状況。
Situation of expansion.

¹Faculty of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho Tsu, Mie 514-8507, Japan. Corresponding author: 相澤泰造, 三重大学生物資源学部

²Graduate school of Bioresources Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho Tsu, Mie 514-8507, Japan

2008年9月5日受稿 2009年3月24日受理
土壌の物理性 112号, 3-7 (2009)

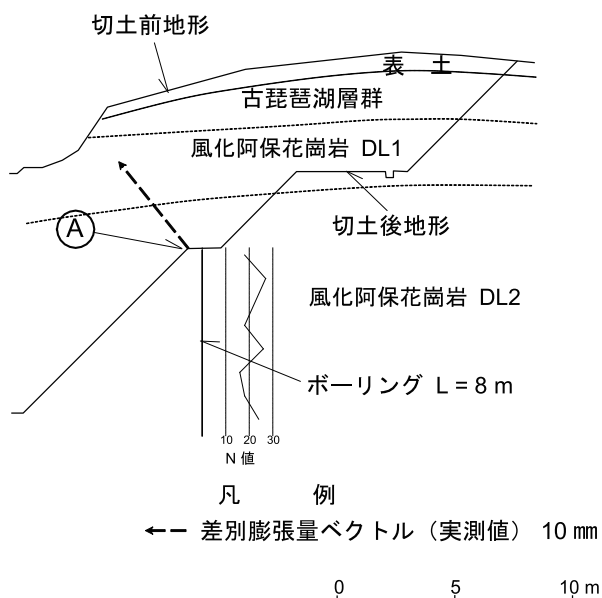


Fig. 2 法面断面図.
The section of a slope.

た。本地区は、領家帯に属し、Fig. 2 に示すように中生代白亜紀後期に貫入した白雲母含有黒雲母花崗岩からなる阿保花崗岩を基盤とし、その上位を、第三紀鮮新世の湖沼堆積物である古琵琶湖層群上野累層が覆い、最上位が表土となっている。古琵琶湖層群上野累層は、花崗岩礫とマサ起源の砂を主体とする砂礫からなっている。対象の切土法面は、阿保花崗岩の原位置風化物である DL 級岩盤のマサが厚く分布し、さらに風化の進行度により DL1 と DL2 の 2 つに区分できる。このうち、上位の DL1 は、20 mm 程度の土壤硬度指数（山中式土壤硬度計）を示し、岩組織をやや残す構造的レゴリスとなっていた。下位の DL2 の内、黒マサは見かけ上、黒雲母を多く含み土壤硬度指数は平均 22 mm、白マサはほとんど黒雲母を含まず土壤硬度指数は平均 26 mm であった。DL2 の黒マサ・白マサとも岩組織の明瞭な構造的サブライトとなっていた。なお、ここでのマサの風化区分は Ollier・松尾（1971）の区分に準じた。

Photo. 1, Fig. 1, Fig. 2 に示すように、切土に伴う黒マサと白マサの境界部の変形差は、最大箇所（A 地点）で、黒マサが相対的に約 50° 斜め上方へ向けて約 26 mm であった。なお、法面には湧水や地下水の染み出しは認められなかった。

3. 試験・調査

切土面の黒マサ箇所と白マサ箇所の 2 箇所（ブロックサンプリングにより不かく乱試料）を採取し、土質試験に供した。土質試験は湿潤密度などの物理試験と三軸圧縮試験（CU）の力学試験を実施した。

Fig. 3, Fig. 4 に主応力差-ひずみ関係を示す。主応力差-ひずみ関係において、黒マサではひずみ軟化が認められなかったのに対し、白マサではピーク後軟化が認められた。同一の σ_3 における、主応力差は黒マサにくらべ白マサが 5 倍程度大きい値を示した。A 地点における切土量が 7 m 程度であったことから、上載荷重を約 120

kN m^{-2} とし、 $\sigma_3 = 120 \text{ kN m}^{-2}$ における弾性係数（変形係数）を求めた結果、黒マサ（DL2）では $13,850 \text{ kN m}^{-2}$ 、白マサ（DL2）では $33,660 \text{ kN m}^{-2}$ であった。また、Fig. 3, Fig. 4 の結果をもとに黒マサ、白マサのせん断強度を求めると、粘着力 (C') は、黒マサでは 5.7 kN m^{-2} 、白マサでは 135.2 kN m^{-2} 、内部摩擦角 (ϕ') は黒マサでは 25.49° 、白マサでは 25.48° であった。Table 1 に黒マサ、白マサの土質試験結果を示す。不かく乱試料の初期間隙比は黒マサでは 1.020、白マサでは 0.505 と白マサの方が小さく、湿潤単位体積重量は黒マサでは 17.26 kN m^{-3} 、白マサでは 19.38 kN m^{-3} と白マサの方が大きかった。

Fig. 2 に示す DL2 黒マサ箇所（A 地点）で実施したボーリング調査の結果、法表面から深度 7 m までの N 値は 20 前後とほぼ一定で、深度 7.5 m（孔底）まで地下水は確認されなかった。また、ボーリング孔に設置したパイプひずみ計の約 1 ヶ月後の累積孔内変位量は、Fig. 5 に示すように孔底から変位し地表面で 1.33 mm の変位であった。

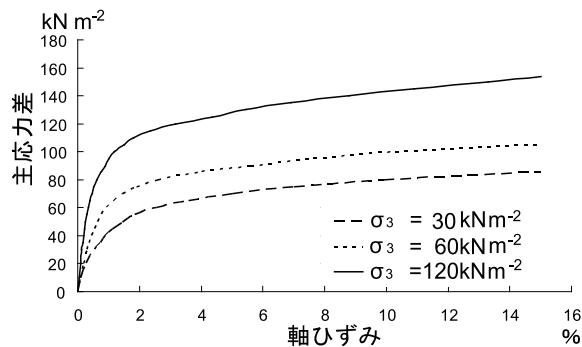


Fig. 3 黒マサの応力-ひずみ曲線.
Stress-strain curve of a dark gray decomposed granite.

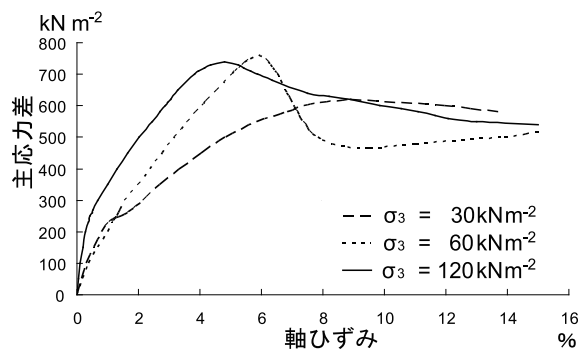


Fig. 4 白マサの応力-ひずみ曲線.
Stress-strain curve of a white decomposed granite.

Table 1 土質試験結果.
Result of soil test.

試料	黒マサ DL2	白マサ DL2
粘着力 C' (kN m^{-2})	5.7	135.2
内部摩擦抗角 ϕ' (度)	25.49	25.48
間隙比	1.020	0.505
湿潤単位体積重量 γ (kN m^{-3})	17.26	19.38
弾性係数 E (kN m^{-2})	13,850	33,660

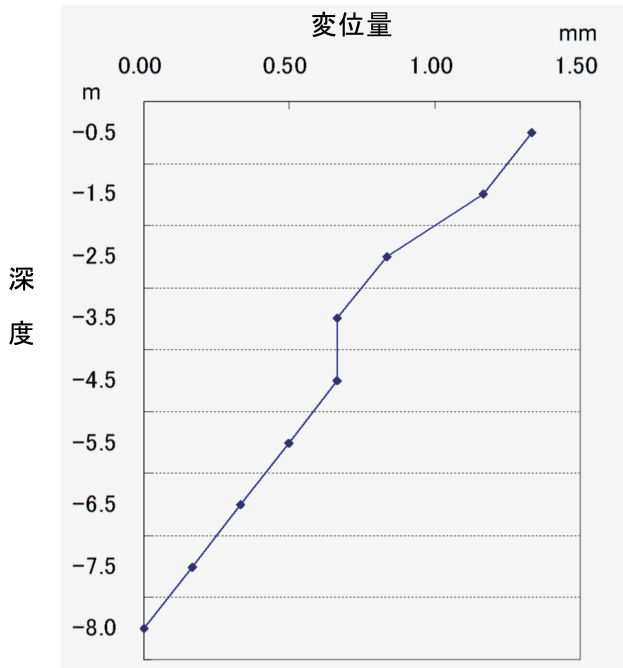


Fig. 5 孔内変位量と深度関係図 .
Relationship of movement and a depth.

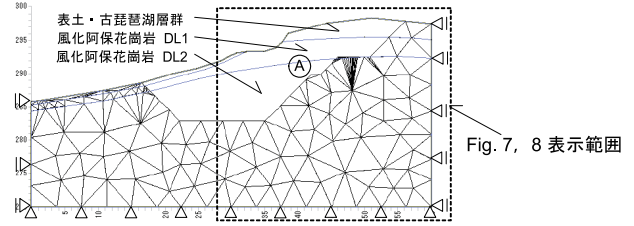


Fig. 6 FEM 分割図 .
FEM mesh.

4. FEM 解析

関連流れ則を用いた Drucker-Prager 弾塑性モデルによる FEM 解析(ソフトウェア名・「土留丸」五大開発(株))により、法面切土後の膨張変形の解析を行った。

FEM 弾塑性変形解析に用いた各々の土質強度定数を Table 2 に示す。DL2 の黒マサおよび白マサの土質強度定数 (C' ・ ϕ' ・ E ・ γ) は実施した土質試験結果を採用した。DL1 より上位の層である古琵琶湖層群は、マサ化した花崗岩(「クサレ礫」)を主体とし、マサ起源の砂をマトリックスとする砂礫層であり、その上位の表土も古琵琶湖層群起源の残積土を主体としているため、土質強度定数を統一して設定した。伊東ら(1988)は、風化の進行したマサの工学的性質について明らかにしており、粘着力は $1.0\sim 1.5\text{ kN m}^{-2}$ 、内部摩擦角は $23\sim 27^\circ$ 、変形係数は $9,800\sim 46,100\text{ kN m}^{-2}$ 、湿潤密度は $16.7\sim 19.6\text{ kN m}^{-3}$ と述べている。これらの結果をもとに、DL1 より上位の軟質で土化している表土・古琵琶湖層群の土質強度定数は上記値の最低値を用いた。また、DL1 は、表土・古琵琶湖層群と黒マサ DL2 の中間的性状を示すと考え、両者の中間値を採用した。平井(2001)は、ポアソン比 ν について通常 0.3 程度、間隙比が大きく強度が低下し

Table 2 設定土質強度定数 .
The soil properties.

土質定数	表土・ 古琵琶湖層群	DL 級風化花崗岩 (マサ)		
		DL1	黒マサ DL2	白マサ DL2
C' (kN m^{-2})	1.0	3.4	5.7	135.2
ϕ' ($^\circ$)	23.0	24.3	25.5	25.5
E (kN m^{-2})	9,800	11,825	13,850	33,660
ν	0.15	0.15	0.30	0.30
γ (kN m^{-3})	16.7	17.0	17.3	19.4

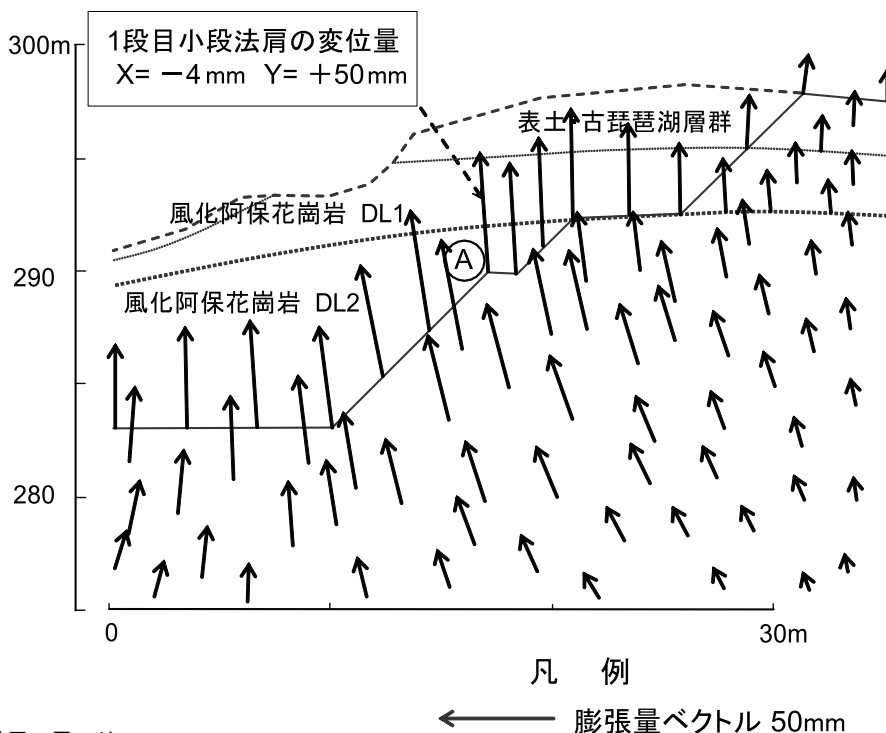


Fig. 7 FEM 解析結果 (黒マサ).
FEM result (dark gray decomposed granite).

た場合は 0.15 程度と述べている．この結果を基に，緩みの著しい表土・風化上野累層および DL1 は 0.15 を，DL2 の黒マサと白マサとはともに 0.30 を採用した．なお，塑性体積変化を規定するダイレタンシー角については，関連流れ則を用いているため内部摩擦角と同値である．Fig. 6 に解析に用いた有限要素メッシュ及び境界条件を示す．解析では，黒マサ・白マサ境界部にある断層を Fig. 1, Fig. 2 の点 A を通り，斜面に対し直行するものに近似した．また，黒マサと白マサは十分な幅があり，その接触部（断層）でスムーズに沈下・隆起すると仮定した．解析による検討は，DL2 部分の物性値をそれぞれ黒マサ・白マサに変え，平面ひずみ条件で両者の変位差を求めた．解析結果を Fig. 7, Fig. 8 に示す．切土を行うことで，黒マサ・白マサともほぼ鉛直上方に膨張し，小段法肩の A 地点での変位量は，黒マサで約 50 mm（水平変位 -4 mm, 垂直変位 $+50$ mm），白マサで約 22 mm（水平変位 -1 mm, 垂直変位 $+22$ mm）と，黒マサの方が大きかった．解析による黒マサと白マサの膨張ベクトル量の差は約 28 mm であり，現地での実測値 26 mm とほぼ一致した．

5. X 線回折結果

膨張量差の原因を明らかにするため，黒マサと白マサの鉱物組成について X 線回折を実施した．その結果を Fig. 9, Table 3 に示す．黒マサは粘土鉱物のカオリナイトと雲母類に対応するピーク強度が大きく，カリ長石に対応するピーク強度は非常に小さく，斜長石に対応するピークは認められなかった．これは斜長石とカリ長石の

大部分がカオリナイトに変質したことによるものと考えられる．また，石英に対応するピーク強度は比較的大きな値を示しているものの，その強度は白マサと比較すると小さかった．これは原岩が石英の少ない岩石であったことが原因と考えられる．なお，黒マサ，白マサとも吸水膨張の著しい粘土鉱物であるスメクタイトに対応するピークは認められなかった．花崗岩の造岩鉱物である黒雲母は風化すると，緑泥石，パーミキュライト，カオリナイトへと変化し，斜長石は風化するとカオリナイトに変化する．以上より，X 線回折結果から黒マサと白マサについて下記が明らかとなった．

- 1) 黒マサは斜長石のすべてと黒雲母の一部がカオリナイトに変質している．
- 2) 白マサは石英が非常に多く，斜長石の一部がカオリナイトに変質している．

黒マサ，白マサの分析結果を比較すると，黒マサでは風化変成鉱物であるカオリナイトに対応する X 線強度がより大きく，白マサより風化が進行していると考えられた．このため，黒マサは，鉱物間の結合が弱いことや，間隙比，単位体積重量にみられるように切土以前からゆるい状態にあり，弾性係数も小さかったと考えられる．これに対し，白マサは安定した鉱物である石英が非常に多く，黒マサに比較し風化しても石英粒子間の結合が保たれていたため，密な状態が保たれ，弾性係数が大きかったと考えられる．これらのことから，風化が進み強度が低下した黒マサの方が，切土にともない応力開放による膨張量が大きくなったものと考えられる．

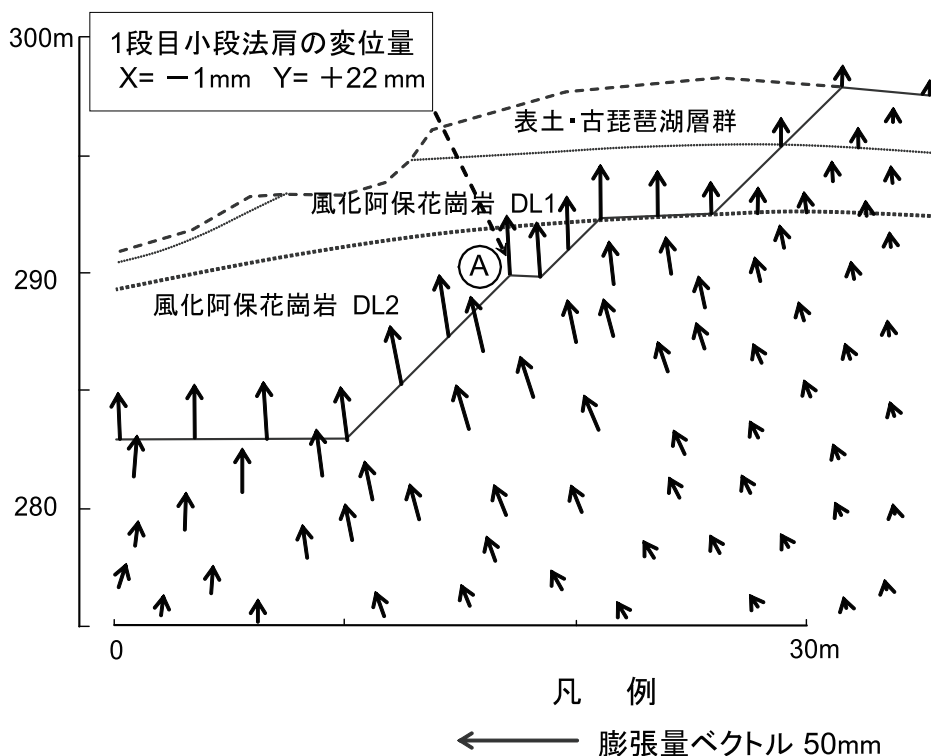


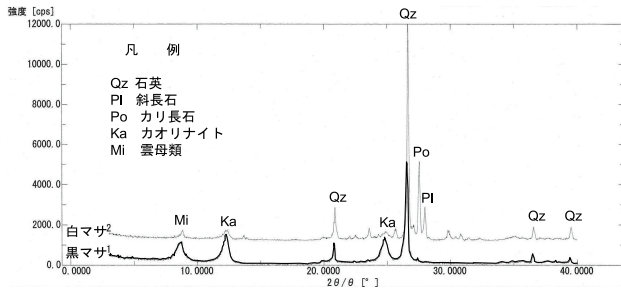
Fig. 8 FEM 解析結果（白マサ）.
FEM result (white decomposed granite).

Table 3 マサの造岩鉱物分析結果 .

Analytical results of rock-forming minerals in decomposed granite.

	石英	カリ長石	斜長石	雲母類	カオリナイト	緑泥石	パーミキュライト
黒マサ	+++	△	-	++	+++	-	-
白マサ	+++	++	+	+	++	-	-

ピーク強度: +++ 大, ++ 中, + 小, △ 微小, - なし.

**Fig. 9** X線回折結果 .
X ray diffraction result.

6. まとめ

現在まで、マサの膨張については知られていなかったが、領家帯の風化阿保花崗岩起源のマサを対象に検討を行った結果、切土などの応力開放により膨張することが

明らかとなった。特に、粘土鉱物を多く含み石英の少ないマサは切土などの応力開放により、大きく膨張することが明らかとなった。法面・斜面でのマサの膨張は緩みを促進し崩壊に至る可能性も考えられる。今後は、さらにマサの膨張について事例を収集し、応力解放を誘引とした切土法面の膨張から崩壊に至る機構を研究することが必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、京都大学防災研究所の山崎新太郎氏に X 線回折を行っていただいた。また、日本工営株式会社の守随治雄氏、五大開発株式会社の佐藤裕司氏から多くの適切な助言をいただいた。感謝いたします。

引用文献

- 平井利一 (2001): 土質工学をかじる . p.126, 理工図書, 東京 .
 伊東徳次郎, 久次米旭, 新長修二 (1988): 風化残積土に関するシンポジウム発表論文集 . まさ土の分類と工学的性質, 95-100, 土質工学会 .
 Ollier, C.D., 松尾新一郎監訳 (1971): 風化—その理論と実態 . pp.170-178, ラテイス, 東京 .
 土質工学会 (1974): 岩の工学的性質と設計施工への応用, pp.385-387, 地盤工学会, 東京 .

要 旨

マサの切土法面で 2 つの断層に挟まれた区間が斜め上に向かって膨張した。膨張した区間は黒雲母を多く含む黒マサで、2 つの断層の外側は石英・長石を主体とする白マサであった。2 つの断層に挟まれた部分の相対的な膨張の方向は 51° 斜め上方で、変位量は最大約 26 mm であった。FEM 解析により弾塑性変形解析した結果も実際の相対変位量とほぼ一致した。2 種類のマサについて X 線回折を行った結果、黒マサはカオリナイトと雲母類に対応するピーク強度が大きかったのに対し、白マサは石英とカリ長石・斜長石に対応するピーク強度が大きかった。このことから、黒マサのカオリナイトおよび雲母類が鉱物同士の結合を弱めていたことにより、応力開放に伴い大きく膨張した可能性があると推測した。また、白マサに多く含有されていた石英は安定した鉱物であり、石英粒子間の結合も大きいため、膨張量も少なかったと推測した。

キーワード: 膨張, 粘土鉱物, マサ, X 線回折