

赤色クサリ礫風化の実験的研究

—— 防災に関する基礎的研究 I ——

満 塩 大 洗

(理学部地学科)

I. はじめに

地球上には、上部から気圏・岩石圏・水圏の3圏があり、これらにまたがって、生物圏という特殊な圏がある。これらの自然界での相互作用のうち、特に風化作用はこれらの圏のなかでも、岩石圏と大気圏・水圏と密接な関係をもっている。

一方、防災というのは、自然界に起こる災害から如何に合理的・経済的に防御するかということになり、この基本的観点の出発点は風化作用ということになる。この風化作用とは前述の層状構造の内、岩石圏と水圏・大気圏との相互作用ということになる¹⁾。そこで、筆者はこのような観点から、岩石類の加熱による変化を追求してきた²⁾³⁾。これは自然界では、第四紀の中期更新世(約70万年-10万年前)に発達する高位段丘の赤色クサリ礫層や、中位段丘を構成する黄褐色の半クサリ礫層に含有されている礫の赤色風化作用⁴⁾を解明する手がかりを得ることであり、防災にも基本的に通じるものである。すなわち、これらは相似象学の観点からみれば、まず大きい方の地球的な規模では、3つの巨大な圏、すなわち、大気圏・水圏・岩石圏の相互作用のうち、大気圏、および、岩石圏の相互作用であり、小さな規模では、固体である岩石類と気体である空気との相互作用ということになる。

試料は以下の地点から採集した。すなわち、高知県仁淀川の河口付近、および、土佐市宇佐付近・香美郡夜須町手結・室戸市室戸岬の海岸において、さらに、花崗岩は松山市北部の三津浜港付近の海岸から採集した。これらの試料は堆積岩類の砂岩・泥岩・4種の色相(白・赤・黒・緑)のチャート・石灰岩・ドロマイト、さらに、凝灰岩(赤・緑)、および、変成岩類の緑色岩の11種類である。また、火成岩類は軽石・安山岩・石英安山岩・石英粗面岩・花崗斑岩・花崗岩・斑レイ岩の7種類である。

これらの試料について加熱実験を行い、色相の変化を解明するとともに、加熱前後の重量変化についても検討した結果について報告する。

II. 実験方法

2-1 サンプルング

使用した試料は表1のようである。すなわち、前述のように堆積岩類は10種類、変成岩は1種類で、火成岩類は軽石を含めて7種類である。これらはそれぞれ、新鮮な円礫状の試料を採集した。

2-2 実験方法

風化による赤色化は鉄の影響によるものが大であるから、まず、基本的な実験として、鉄分含有

表 1. 採集試料表, および, 1000℃加熱による重量減少率

No.	岩 石 名	採集場所	地質帯／時代	減少率(%)
1	砂岩	仁淀川河口付近	白亜紀	1.4
2	泥岩	仁淀川河口付近	白亜紀	1.7
3	チャート(白)	仁淀川河口付近	トリアス紀	0.4
4	チャート(赤)	仁淀川河口付近	トリアス紀	0.4
5	チャート(緑)	仁淀川河口付近	トリアス紀	0.9
6	チャート(黒)	仁淀川河口付近	トリアス紀	0.8
7	花崗岩	松山市三津浜港	嶺家帯	7.9
8	緑色岩	仁淀川河口	御荷鉾帯	3.6
9	安山岩	仁淀川河口	面河酸性岩類	3.4
10	石灰岩	土佐山田	秩父帯	19.7
11	斑レイ岩	室戸岬付近	四万十帯	1.3
12	ドロマイト	韓国	先カンブリア紀	46.2
13	凝灰岩(赤)	土佐市萩岬	白亜紀	4.0
14	軽石	土佐市宇佐海岸	第四紀	2.4
15	石英安山岩	仁淀川河口	第三紀	2.8
16	石英粗面岩	仁淀川河口	第三紀	3.2
17	凝灰岩(緑)	土佐市宇佐	白亜紀	4.3
18	花崗斑岩	山口市	白亜紀	1.7

量の相違による変化を検討した。鉄分としては、純鉄 Fe および針鉄鉱 $\text{FeO}(\text{OH})$ を使用した。これらをカオリンによって希釈し、それぞれ、重量比で 1 : 0 から 0 : 1 までの混合比をコータイル法 (1 / 4 分割法) によって 5 種類づつ作成した。

また、風化現象は海中でもみられるので、海水に 24 時間浸透させて置いた試料と、無処理の試料とをそれぞれ 1000℃ に加熱して、これらを相互比較した。

さらに、これら各試料、および、前述の各岩石試料を電気炉内に、100℃ から 1000℃ までの 100℃ ごとに、それぞれ各温度ごとに加熱した。その後、所定温度に到達後に、炉より取り出して、室内に静置し、冷却した。これをマンセルの土色帳により、複数人員の肉眼で鑑定した。

さらに、加熱処理前と 1000℃ に加熱後の重量を測定し、重量減少率を算出した (表 1)。

Ⅲ. 結 果

以上の方法によって、表 2 - 6 の結果が得られた。

3 - 1 鉄分の影響

鉄分の配合比の相違によって、各試料の加熱による色相変化の結果を表 2 に示す。

純鉄の場合は、常温ではカオリンが多くなるにつれて、黒色は次第に薄くなる。

1. 赤色クサリ礫風化の実験的研究

表2. 純鉄とカオリンの配合比変化による加熱後の色相変化

温度(℃)	常温	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1 : 0	N3/0	→	→	→	→	5Y 3/1	7.5YR 3/1	7.5YR 3/2	→	→	→
3 : 1	N4/0	→	→	→	→	→	5Y 3/2	7.5YR 4/1	5YR 4/1	→	→
1 : 1	N6/0	→	→	→	→	5Y 6/1	7.5YR 6/1	→	→	→	→
1 : 3	N7/0	→	→	→	→	5Y 7/1	7.5YR 7/1	→	5YR 7/1	→	→
0 : 1	N8/0	→	→	→	→	→	→	→	→	5R 8/1	→

*重量比率は純鉄：カオリン。化学式：純鉄，Fe カオリン， $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$

すべての配合比でも、400℃まではそれぞれの色に変化はない。しかし、500℃では純鉄のみでは5Y 3/1黄黒、1 : 1では5Y 6/1黄灰、1 : 3では5Y 7/1淡黄灰となる。600℃になると純鉄は7.5YR 3/1黒褐、3 : 1は5Y 3/2黄灰となる。また、1 : 1はこの温度以上は不変で、7.5YR 6/1褐灰となる。1 : 3は7.5YR 7/1の淡黄灰色となる。700℃以上で純鉄は7.5YR 3/2黒褐となる。3 : 1の場合は700℃で7.5YR 4/1、800℃以上では5YR 4/1褐灰で不変である。1 : 3は800℃以上で5YR 7/1淡褐灰となる。カオリンのみはN 8/0灰白であるが、900℃以上で5R 8/1赤灰となる。

一方、針鉄鉱の場合はもともと10YR 7/8黄橙色である。常温ではカオリンが多いほど黄色味を帯びてくる(表3)。200℃で針鉄鉱は5YR 5/6赤橙で、300–500℃まで7.5R 3/4暗赤となる。600℃以上では7.5R 2/2黒赤となって不変である。3 : 1でも100℃までは不変で10YR 7/6明黄褐、200℃で10YR 6/8明黄褐、300℃で10R 4/3灰赤褐、400℃以上になると7.5R 4/4灰赤で不変となる。また、1 : 1では、200℃まで2.5Y 7/6黄色であるが、300℃で10YR 7/2淡黄褐灰となり、400–700℃では10YR 4/4で1、800℃以上は10R 5/2赤灰である。1 : 3でも、200℃まで2.5Y 8/2であるが、300℃で10YR 7/2淡黄褐灰となり、400℃は10YR 6/2、500–700℃では5YR 6/2、800℃以上で7.5R 7/2淡赤灰色である。

以上のように、純鉄の場合は $4Fe + 3O_2 = 2Fe_2O_3$ となり、あるいは、針鉄鉱の場合は $2FeO(OH) + O_2 = Fe_2O_3 + H_2O$ となる。さらに、磁鉄鉱の場合は、 $4Fe_3O_4 + O_2 = 6Fe_2O_3$ となる。この他に、FeOや $Fe(OH)_3$ なども、十分な好氣的雰囲気のもとではいずれ酸化されて Fe_2O_3 となる。すなわち、岩石類の色相を赤色化するのは主として酸化第2鉄であり、鉄分が多いほど赤くなる。なお、マンガ Mn も価数によっては、茶褐色を呈するのは指摘するまでもない。

また、第四紀層中の赤さは鉄分のうち赤鉄鉱や針鉄鉱であることを、片岡ら(1974;1976)が実験的に確認しており⁵⁾⁶⁾、本実験の結果と一致している。しかし、阿子島ら(1973)・Akojima(1973)の檀山層・舟場層(Mitusio, 1989)中⁹⁾の砂岩礫の風化殻の厚さの側定結果⁷⁾⁸⁾は、地層の時代区分には意味が無いことは既に指摘している(満塩ら, 1977; 満塩, 1989など)³⁾⁹⁾。

3-2 海水処理の色相変化

海水中に24時間浸透させたものは、砂岩・千枚岩・チャートであるが、これらを実験のものとして

比較する（表4）。

砂岩の場合は常温で7.5YR 6/1 黄灰色であるが、1000℃加熱後では、無処理物が10R 5/4 灰赤褐色と10R 5/4 赤灰色で、少しは異なる。千枚岩は初めはN 2/1 黒色であるが、加熱後はいずれも2.5YR 4/2 暗赤褐色で、どちらも相違ない。チャートは常温で7.5GY 6/1 緑灰色であるが、加熱後はいずれも5 Y 8/4 と5 Y 8/2 の淡橙色で変わらない。

すなわち、海水中での浸透は、1日くらいの期間では変化はないと考えられる。さらに長時間の浸透が必要であろうが、そうすれば筆者がこれまで報告してきたような海水への溶脱作用が起こり¹⁰⁾、本論の主旨とは異なる結果となる。

表3．針鉄鉱とカオリンの配合比変化による加熱後の色相変化

温度(℃)	常温	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1 : 0	10YR 7/8	→	5YR 5/6	7.5R 3/4	→	→	7.5R 2/2	→	→	→	→
3 : 1	10YR 7/6	→	10YR 6/8	10R 4/3	7.5R 4/4	→	→	→	→	→	→
1 : 1	2.5Y 7/6	→	→	10YR 7/2	10YR 4/4	→	→	→	10R 5/2	→	→
1 : 3	2.5Y 8/2	→	→	10YR 7/2	10YR 6/2	5YR 6/2	→	→	7.5YR 7/2	→	→
0 : 1	N8/0	→	→	→	→	→	→	→	→	5R 8/1	→

*重量比率は針鉄鉱：カオリン。化学式：針鉄鉱， Fe O(OH) カオリン， $\text{Al}_4 \text{Si}_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_8$

表4．海水処理および無処理試料の1,000℃加熱の色相変化

No.	試 料	前処理	常 温	1000℃加熱
1 a	砂 岩	無処理	黄灰色 7.5 Y 6/1	灰赤褐色 10 R 5/4
1 b	砂 岩	海水処理	黄灰色 7.5 Y 6/1	赤灰色 10 R 5/2
2 a	千枚岩	無処理	黒色 N 2/1	暗赤褐色 2.5 Y R 4/2
2 b	千枚岩	海水処理	黒色 N 2/1	暗赤褐色 2.5 Y R 4/2
3 a	チャート	無処理	緑灰色 7.5 G Y 6/1	淡橙色 5 Y R 8/4
3 b	チャート	海水処理	緑灰色 7.5 G Y 6/1	淡橙色 5 Y R 8/2

3－3 各試料の色相変化

新鮮物の各試料から各温度において変化した色相について述べる（表5）。

これらのうち、堆積岩類の砂岩・泥岩・チャートの4種類・石灰岩、および、火成岩類の安山岩・花崗岩については既に報告している（満塩ら，1990）³⁾ので、ここでは省略する。

3－3－1 堆積岩類

ここでは、表5にすべての結果を示し、そのうち No.10の石灰岩までは述べているので³⁾、ここではそれ以外の物について述べる。

1. 赤色クサリ礫風化の実験的研究

表5. 各温度毎の加熱による各種堆積岩類の色相変化

温度(℃)	常温	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
砂 岩	N5/0	→	→	→	→	N6/0	10YR 6/1	7.5YR 6/2	5YR 6/2	10R 4/3	→
泥 岩	N4/0	→	→	5Y 4/1	10YR 4/1	→	→	10R 4/2	7.5R 4/2	7.5R 5/2	→
チャート (白)	N8/0	→	→	10YR 8/1	10YR 8/2	→	7.5YR 8/1	→	5YR 8/2	5YR 8/3	→
チャート (赤)	5R 5/1	→	→	→	10R 4/1	10R 3/1	→	7.5R 3/2	→	→	→
チャート (緑)	7.5GY 5/1	→	7.5GY 5/1	7.5GY 4/1	5Y 5/1	10YR 5/2	7.5YR 6/3	5YR 6/2	5YR 6/4	5YR 6/3	2.5YR 7/4
チャート (黒)	N4/0	→	→	→	→	N5/0	→	7.5YR 4/1	5YR 4/1	→	→
石灰岩	N8.0	→	→	→	5Y 8/1	→	→	→	7.5YR 8/1	5YR 8/1	→
ドロマイト	N8/0	→	→	→	5Y 8/2	→	→	7.5YR 8/1	5YR 8/1	→	→
凝灰岩 (赤)	10R 4/1	→	→	→	→	→	→	→	10R 4/6	→	→
凝灰岩 (緑)	10BG 7/1	→	→	→	10Y 5/1	7.5Y 4/1	7.5YR 4/4	5YR 4/3	10R 4/1	→	→
緑色岩	10GY 5/1	→	→	10GY 6/1	10Y 7/1	7.5Y 5/1	10YR 4/1	10YR 5/1	7.5YR 4/2	5YR 4/2	2.5YR 4/2

3-3-1-1 ドロマイト

ドロマイトは300℃まではN 8 / 0 灰白色である。400-600℃で 5 Y 8 / 2 淡黄灰色となる。700℃では7.5YR 8 / 1 淡褐灰色であるが、800℃以上では 5 YR 8 / 1 淡褐灰色となる。

3-3-1-2 赤色凝灰岩

赤色凝灰岩は常温から700℃までは10R 4 / 1 赤灰色で不変である。しかし、800℃以上で10R 4 / R 6 赤橙色となるのみである。

3-3-1-3 緑色凝灰岩

緑色凝灰岩は常温-300℃まで10BG 7 / 1 淡青色である。400℃で10Y 5 / 1 黄灰色となり、500℃で7.5Y 4 / 1 黄灰色、600度で7.5YR 4 / 4 褐色となる。700度では 5 YR 4 / 3 灰赤褐色で、800℃以上では10R 4 / 1 赤灰色となり、これがやっと赤色凝灰岩の常温-700℃までの物と同じとなる。

3-3-1-4 緑色岩

緑色岩は300℃までは10GY 5 / 1 緑灰色であるが、400℃付近から変化が始まり、10Y 7 / 1 淡黄灰色となり、500℃では7.5Y 5 / 1 黄灰色で、600℃で10YR 4 / 1 黄褐灰色となり、さらに700℃では10YR 5 / 1 黄褐灰色となる。そしてさらに、800℃では7.5YR 4 / 2 褐灰色、900℃では 5 YR 4 / 2 褐灰色、1000℃では2.5YR 4 / 2 暗赤灰色と変化していき、赤色化が進む。

3-3-2 火成岩類

火成岩も既に述べた物は省略して表5に示し、ここではそれ以外について述べる。

3-3-2-1 軽石

これは常温で5 Y 7/1 淡黄灰色、100℃では10YR 7/1 淡黄褐灰色であるが、200-700℃間では10YR 6/1 黄褐灰色となる。800℃以上では10R 4/4 灰赤褐色となる。

3-3-2-2 石英安山岩

これは400℃までは5 Y 8/1 淡黄灰色であるが、500℃でも5 Y 7/1 の淡黄灰色となる。600-700℃では10YR 8/1 淡黄褐灰色である。800℃以上は7.5YR 8/4 淡橙色となる。

3-3-2-3 石英粗面岩

これは常温から400℃までN 4/0 暗灰色であるが、500℃で7.5YR 3/1 黄黒色となり、600-700℃では10YR 3/1 黒褐色である。800℃以上では7.5YR 8/4 淡橙色となる。

3-3-2-4 花崗斑岩

花崗斑岩は常温から300℃までは同色相の10YR 8/2 淡黄褐灰色である。しかし、400℃では7.5YR 8/2 淡褐灰色となり、赤みを帯びはじめる。500-700℃ではさらに赤みを増して、5 YR 8/2 淡橙色となり、800℃以上では2.5YR 7/4 灰赤橙色となる。

3-3-2-5 斑レイ岩

斑レイ岩は初めから300℃までは7.5Y 2/1 黒色である。しかし、400℃では7.5Y 3/1 黄黒となり、500・600℃では2.5Y 3/2 黒褐色となる。700℃でも10YR 2/3 黒褐であるが、800℃以上では7.5R 3/4 暗赤色となる。

表6. 各温度毎の加熱による各種火成岩類の色相変化

温度(℃)	常温	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
軽 石	5Y 7/1	10YR 7/1	10YR 6/1	→	→	→	→	→	10R 4/4	→	→
安山岩	7.5R 2/2	→	→	→	7.5R 3/2	→	→	→	→	→	→
石英 安山岩	5Y 8/1	→	→	→	→	5Y 7/1	10YR 8/1	→	7.5YR 8/4	→	→
石英 粗面岩	N4/0	→	→	→	→	7.5Y 3/1	10YR 3/1	→	7.5YR 8/4	→	→
花 崗 斑 岩	10YR 8/2	→	→	→	7.5YR 8/2	5YR 8/2	→	→	2.5YR 7/4	→	→
花崗岩	7.5YR 7/2	→	→	7.5YR 7/3	7.5YR 6/2	5YR 7/1	2.5YR 7/2	10R 7/1	10R 7/2	→	10R 7/3
斑レイ岩	7.5Y 2/1	→	→	→	7.5Y 3/1	2.5YR 3/2	→	10YR 2/3	7.5R 3/4	→	→

以上の各岩石類の加熱変化には、3つのパターンがみられる。すなわち、

- 1) 常温から約300℃までは変化がなく、400℃付近から有機物の酸化のため徐々に黄色味をおび始め、500-700℃で黄褐色の中位段丘礫層の半クサリの色相となる。さらに、800℃以上で赤褐

1. 赤色クサリ礫風化の実験的研究

色となり、クサリ礫の色相となる。大部分はこのパターンに属している。

- 2) 黒色チャートのように、常温から約600℃までは変化はなく、700℃から赤色味をおび始め、800℃以上で赤色になるもの。
- 3) 軽石のように、100℃で既に赤色味をおびるが、700℃まではきわだった変化はなく、800℃で一挙に赤色化が最大になるもの。

の3種類である。これらは、500℃くらいまでは中位段丘の黄褐色の色相に相当し、800℃以上は赤褐色の高位段丘の色相に相当する。

3-4 重量減少率

この結果を表1に示す。

3-4-1 堆積岩類

チャートは各種の色ともに、減少率は非常に小さく、いずれも0.9%以下であり、安定している。砂岩・泥岩は1.4-1.7%であるが、凝灰岩は緑・赤ともに約4%である。また、変成岩の緑色岩も3.6%である。しかし、石灰岩とドロマイトは19.7と46.2%も減少したが、これは二酸化炭素の解離によるものである。

3-4-2 火成岩類

軽石や安山岩類・石英粗面岩は約3%前後の減少率である。しかし、深成岩類の花崗斑岩・花崗岩や斑レイ岩は1.3-1.7%の減少率でしかない。

なお、加熱とともに岩石の硬度も減少して脆弱になり、かつ、細粒化した。これは基盤岩類などの風化変質による粘土鉱物化とも一致している¹⁾¹¹⁾¹²⁾

IV. ま と め

以上の18種類の試料の加熱実験による色相変化の結果を要約すれば、次のようになる。

- 1) 鉄分の配合比による加熱変化は、時間の経過とともに赤くなり、約400℃で黄褐色の中位段丘に、また、約800℃で高位段丘の赤褐色の色となる。
- 2) 試料を海水処理しても1日くらいでは無処理の物と相違はない。
- 3) 加熱変化には3つのパターンがみられる。すなわち、100℃で変化後はあまり変化がなくて800℃から急変する物、約600℃まで変化がなくて約700℃から変化する物、および、400℃付近から徐々に変化して800℃で赤色化する物である。
- 4) 重量減少率は堆積岩類のチャートや砂岩・泥岩は小さく、凝灰岩類はやや多く、石灰岩・ドロマイトは二酸化炭素の解離のために減少率は大きい。また、火成岩類のうち、火山岩類はやや大きく、深成岩類は小さい。

謝 辞

この報告をなすに当たり、高知大学農学部玉井佐一教授・理学部化学教室の西沢 均助教授に厚く感謝します。また、ご協力いただいた環境変動研究会の諸氏に重ねて感謝します。

文 献

- 1) 西沢 均・満塩大洗, 1992. 風化鉱物のキャラクターゼイション—防災に関する基礎的研究Ⅱ

- 一. くろしお, 特別号 (6) : 11-17.
- 2) 満塩大洗, 1985. 未利用資源の有効利用, その4, 腐植質火山灰の加熱による色の変化と第四系の色相との比較. 海洋・資源, (13) : 25-32.
- 3) 満塩大洗・山下修司・大山道也・木村壮一郎, 1990. 未利用岩石の有効利用, その2, 加熱による風化. ウェイストリソース, (22) : 13-20.
- 4) 満塩大洗・吉川 治, 1977. 高知市-室戸間の第四紀層. 日本地質学会巡検案内書, (7) : 1-23.
- 5) 片岡一郎・小野 敏, 1974. 高位・中位段丘赤色土の鉄の形態-樫山台地. 高大研報, 23 : 15-32.
- 6) 片岡一郎・北村哲朗・横田敏博, 1977. 領石付近の赤色風化殻の matrix における鉄の形態. 高大研報, 26 : 8-16.
- 7) 阿子島功・須鎗和巳・細岡秀博, 1973. 段丘面对比の指標としての“礫の赤色風化殻の厚さ”の統計的研究. 徳大学芸紀要, 22 : 1-9.
- 8) Akojima, I. 1973. Red weathering crust in terrace gravel as a key to terrace chronology. *Sci. Rep. Tohoku Univ., Geogr.*, 23 : 91-118.
- 9) Mitusio, T. 1989. The middle terrace problems in Shikoku, Japan. *Kuroshio*, spec. vol. 4 : 135-146.
- 10) 西沢 均・島内理恵・満塩大洗, 1988. 堆積物と水との相互反応-海洋牧場造成の基礎的研究. くろしお, 高大黒潮研報, 特別号, (2) : 25-33.
- 11) 塚本 齊・水谷伸治郎, 1988. 風化粘土の生成と変遷. 応用地質, 29 (3) : 231-241.
- 12) 水谷伸治郎, 1976. 頁岩の風化-その変質過程の速度論的考察-. 西田教授退官記念論集, 445-457.