

岩石の色彩測定と風化区分および物性値評価への応用

満下淳二・石沢一吉

遠藤 司・武内俊昭

Color Measurement of Rocks and its Application to Weathering Classification and Physical Property Evaluation

Junji MITSUSHITA, Kazuyoshi ISHIZAWA,
Tsukasa ENDO and Toshiaik TAKEUCHI

Abstract

It is known that in general, rock color gradually turn to brownish as weathering proceeds. It is therefore common to use changes in rock color as a rough index of weathering, together with such structural changes as opening of cracks and reaction to hammering, etc. Therefore, if it were possible to quantitatively record rock color, one might achieve a somewhat objective view of classes of weathering.

The authors used a chromometer to measure the colors of drilling core samples from a variety of different geological ground types (granite, sandstone and felsic volcanoclastic rock) and studied the relationships of the results to weathering and differences in rock quality. Concerning sandstone, the relationship between change in color due to weathering and internal mineralogical change was also studied.

The "L*a*b*" color spacing system presented in 1976 to the Commission Internationale de l'Eclairage was used in assigning numbers to colors in the study (Fig.3). Also codified under the Japan Industrial Standards (JIS Z 8729), it is a relatively easily understood system that is constructed according to a pair of coordinates at right angles. Prior research on the colors of rock and minerals that graded colors numerically uses L* a* b* color spacing, and it is adopted as well by this paper.

Color measurement was conducted using the CR-200 chromometer made by Minolta Camera (Fig.4 and Fig.5). This instrument conducts measurement with an optical head having an aperture of 8 mm fit snugly against the specimen.

First of all, the effects on measurement results of the following three aspects the core samples whose appearance could be expected were studied: (1) differences in diameters of mineral particles, (2) surface curvature and (3) surface moisture or dryness (Chapter 3).

Concerning item (1), as shown in Fig. 5, it was found that differences in diameters of mineral particles resulted in major difference in brightness, (L* value) but that hue and chroma (a* and b* values) are not greatly affected.

Concerning item (2), as shown in Fig. 6, it was found that differences in surface curvature were no more than the curve ratio of the core sample, measurements are not affected.

Concerning item (3), as shown in Fig.8, it was found that differences in surface moisture or dryness greatly affect L* value, but not the other two values.

Chapter 4 covers the relationships between color and classification of rock (4.1), color change due to, weathering and its relation to mineralogical changes and changes in physical properties (4.2) and its applicability to assessment of dam aggregate (4.3).

Following is a summary of the findings:

- (1) A systematic relationship between color and rock classification was determined, reflecting mainly the degree of weathering.
- (2) The turning of rock to yellowish-brown with weathering is due to dissolution and accumulation of iron hydroxides that occurs with progressive microcracking and fissuring. This process is also systematically related to absolute dry specific gravity and rate of moisture absorption, and there is a clear relationship between the latter two factors and change in color.
- (3) The correlations between change in rock color and physical property values were applied to assessment of rock aggregate the dams, using color as an index. The sites to which the aggregate that was studied is supplied use the same type of color-based assessment standards.

In summary, there is a systematic relationship between change in rock color and weathering. It is therefore possible to establish an accurate and objective set of color indices to indicate the state of weathering. When the correlations between these standards and physical properties can be established, it is possible to use rock color to evaluate rock mass or aggregate. In addition, there is real potential in applying color of numerically-coded rock as a standard in evaluating rock ground in the early stages of site investigations or for distinguishing fine differences in physical properties of different kinds of rock ground.

1 まえがき

岩石の色は、内部に含まれる鉱物の構成や化学組成を示唆する第一の指標であるといえることができる。

鉱物の色は、主として含まれる遷移元素・ランタニド元素の電子遷移、着色中心としての格子欠陥、バンド間遷移などにより、特定の波長の電磁波が吸収されることによっている (Burns, 1970; 森本ほか, 1975)。また、同一鉱物内の隣接元素間に、たとえば、 Fe^{2+} とか Fe^{3+} などのような酸化状態の異なるイオンが含まれると、荷電移動による電磁波吸収帯の移動が起こり、色が変化する。

一般に、岩石の色が風化の進行によって、褐色へと逐次変化することが知られている。このために、岩石の色の変化を指標として、割れ目の開口度などの岩石組織の変化やハンマーの打撃に対する反発度などを加味し、大まかな風化区分がなされることが多い。(たとえば、九里ほか, 1971; 伊東ほか, 1988 など)。田中 (1955) の岩盤岩質判定基準は、主として風化の程度によって区分されたものである。したがって、岩石の色を定量的に記述することができれば、風化区分としての岩盤等級区分をある程度客観的に行うことが可能であると考えられる。しかし、実際の肉眼観察によって色を記述する際には、「赤褐色」、「帯赤黄褐色」、「淡褐色」などのように、色

を表す言葉を組み合わせた感覚的な表現方法がとられ、客観性、再現性に欠けたものとなっている。

土壌化学の分野においては、土壌の特徴を記述する上で、色が重要な指標となることから、より客観的かつ定量的な記述をするための努力がなされてきた。たとえば、Shield et al. (1968) は、マンセル記号を用いて、土壌の色を記述している。また、Torren et al. (1984) は、terra rossae の赤色化の程度を分光光度計を用いて測定した。このような方法は、色の記述の客観性という意味では、十分に評価されるべきものであったが、前者では、測定の精度が悪く、十分な定量的検討には耐え難いものであったし、後者では、測定の簡便さや迅速性という面で大きな問題があった。

Nakashima et al. (1989) は、布、家具、食物などで色による品質管理に利用されている色彩色差計を用いて岩石・鉱物の色を測定し、内部での酸化状態や化学反応の進行状況によって、色が系統的に変化することを明らかにした。また、Nagano and Nakashima (1989) は、色彩色差計を用いて、花崗岩の風化に伴う色彩の変化を検討し、風化に伴う水酸化鉄 ($\text{FeO}(\text{OH})$) の生成によって、岩石の色が黄褐色へと系統的に変化することを明らかにした。さらに、Nakashima et al. (1992) は、岩石・鉱物の色と内部における酸化状態と化学反応の進行度合の関係を総括し、風化作用では、主として針

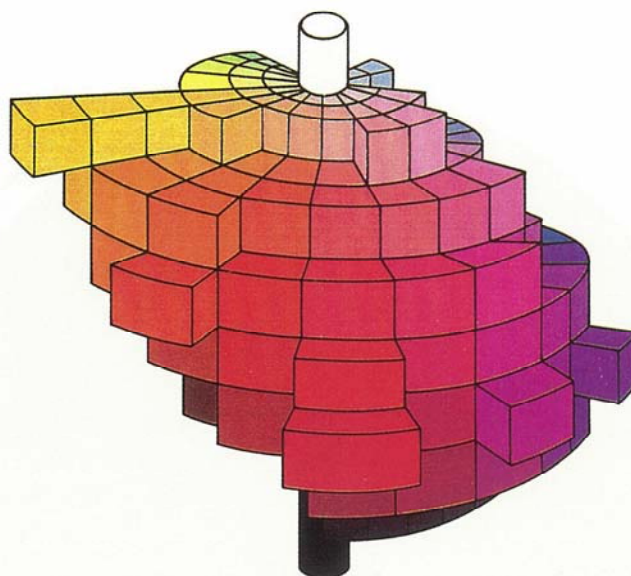


図-1 マンセル表色系の色立体 (ミノルタカメラ株「色を読む」より)
 Fig.1 Solid view of Munsell surface colors (after Minolta Camera Co.)

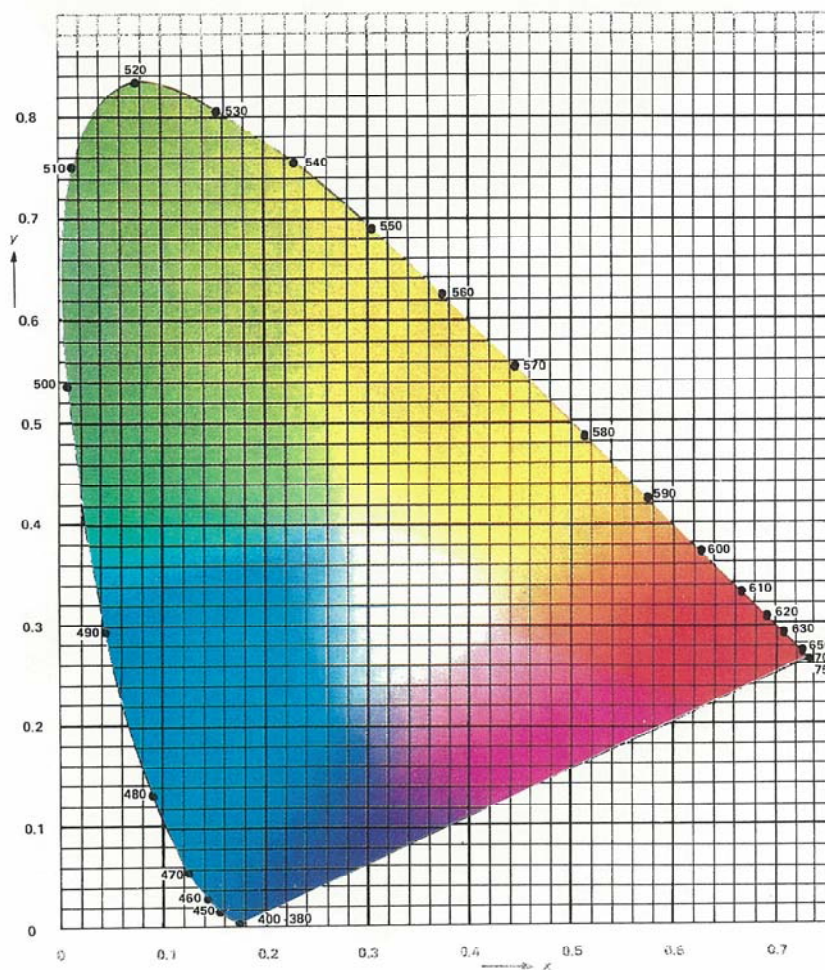


図-2 xy色度図 (ミノルタカメラ株「色を読む」より)
 Fig.2: xy color chroma scale (after Minolta Camera Co.)

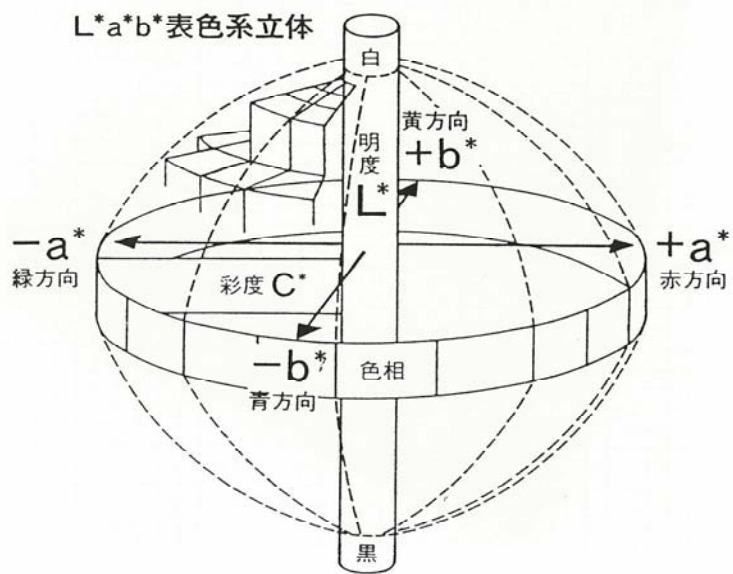
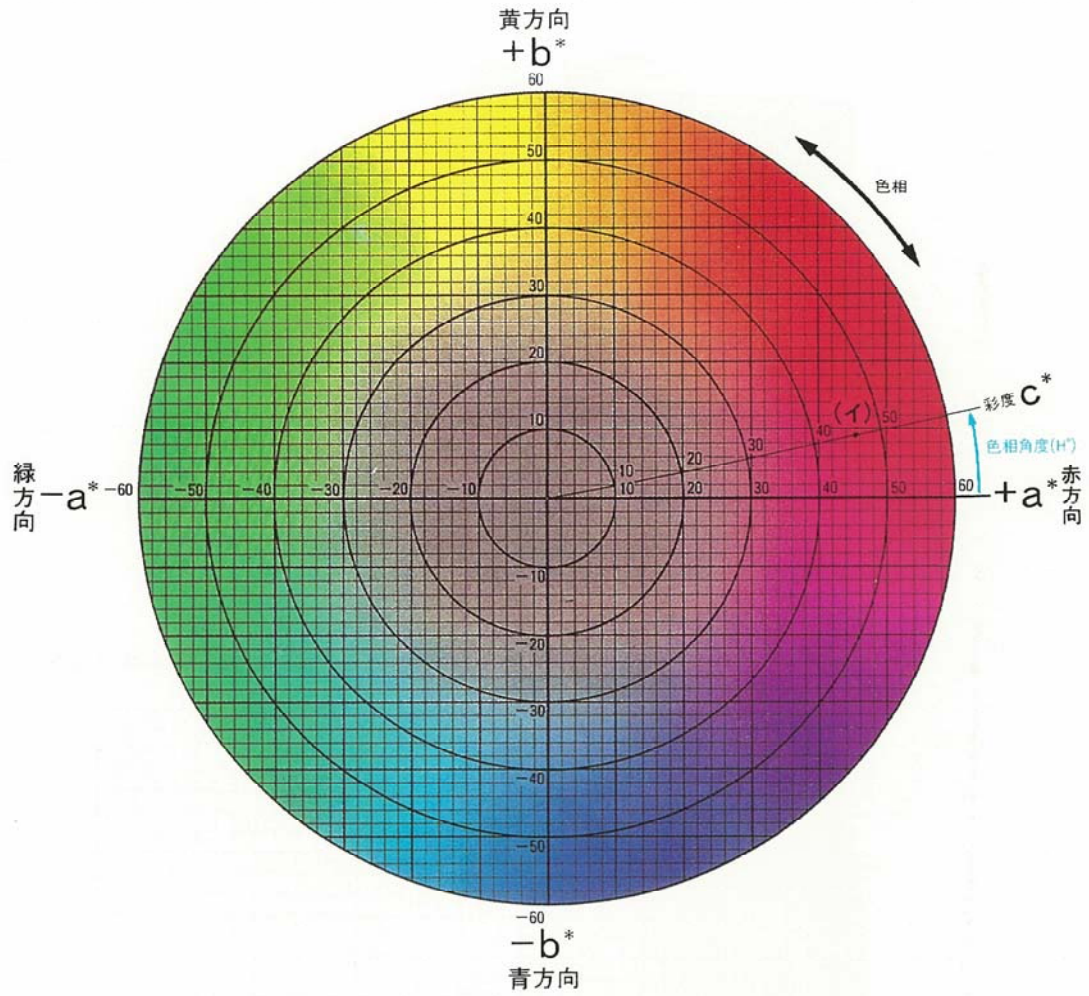


図-3 L*a*b*色空間 (ミノルタカメラ株)「色を読む」より
 Fig.3 L*a*b* color spacing (after Minolta Camera Co.)

鉄鉱の生成によって、色彩が黄褐色へと変化するのに対し、熱水変質では、赤鉄鉱が安定となるため、色彩が赤褐色へと変化することを示した。Nakashima たちによるこれらの一連の研究は、岩石の色の定量的測定を迅速かつ簡便に行う方法を示すとともに、風化による岩石の色の変化に対して、鉱物学的・化学的根拠を与えたものである。しかし、たとえば、岩盤や骨材の評価などに岩石の色を指標として利用し、地質工学上の実用性をもたせるためには、岩石の色の定量的表現に加え、さらに、具体的な物性値との関係を明らかにする必要がある。

武内ほか (1994) は、この点を考慮し、色彩色差計によって、ボーリングコアの連続的な色測定を行って、コア表面の変化と岩盤等級区分との間に系統的な関係があることを示した。これは、主として花崗岩類を対象とした予察的なものであり、種類の異なる岩石に対する測定、さらに、風化に伴う岩石の色の変化と物性値との関係を検討することが今後の課題として残された。

筆者らは、白亜紀広島型花崗岩、ジュラ紀丹波帯 II 型地層群の砂岩および新第三紀中新世珪長質火山碎屑岩類という地質の異なる 3 つの地域において採取されたボーリングコアを用いて、色彩色差計による色の測定を実施し、風化区分としての岩盤等級区分との関係について検討した。また、上記の硬砂岩について風化に伴う色の変化と内部の鉱物学的変化の関係をも調べた。

本報告では、これらの結果について報告するとともに、色彩色差計による岩石の色の測定法とそれに関わる幾つかの課題について述べる。

2 色彩の数値化

物質の色は、その物質において反射または透過した光の中の可視光 (波長約 380~780nm) の波長特性によって決められる。

大田 (1993)、中嶋 (1994) およびミノルタカメラ (株) の「色を読む話」によれば、色の表現法に関して、つぎの 4 つの方法が示されている。

① マンセル記号による方法

人間の目で感知した色は、感覚的、主観的なもので、知覚色と呼ばれる。この知覚色の表現法として知られている A. H. Munsell 考案のマンセル表色系は、図-1 に示す色立体で表現され、マンセルカラーチャートを用いて色を表示する。実際は、マンセルカラーチャートと物体の色を肉眼で比較し、物体の色に最も近いカラーチャートの記号 (マンセル記号) で表示する。

② XY 色度図 (CIE 1931 色度図) による方法

光に関する標準を研究し、発表している国際照明委員会 (CIE: Commission Internationale de l'Eclairage) は、1931 年に、マンセル記号に代わる色の定量化として、X, Y, Z で表記する方法を提案した (XYZ 表色系: CIE 1931 表色系)。この方法は光の三原色である青 (Blue: 波長約 450nm)、緑 (Green: 波長約 550nm)、赤 (Red: 波長約 600nm) をもとに表示されるもので、この表示系をグラフに表現する方法として、図-2 に示すような XY 色度図 (CIE 1931 色度図) があり、次式によって定義されるものである。

$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

③ L* a* b* 色空間 (CIELAB 色空間) による方法

国際照明委員会は、1976 年に、上記の XY 色度図の歪を解消した、L* a* b* 色空間を発表した。これは、XY 色度図の歪みを引き伸ばして、等方空間に表現できるようにしたものである。この色空間は、図-3 に示すように、「L*」は色の明度 (100 が完全な白、0 が完全な黒)、「a*」は赤緑 (正方向が赤、負方向が緑)、「b*」は黄青 (正方向が黄、負方向が青) を表現するものである。通常いわれている色の違いは、色相に相当するもので、図-3 に示す円の円周方向の違いに相当する。一方、同じ色相でも彩度の違いがあり、これは中心からの距離に相当し、色の鮮やかさを表わすものである。

④ L* u* v* 色空間による方法

国際照明委員会は、1976 年に、L* u* v* 色空間を発表している。これは、色の混合などを取り扱うことを目的とした色空間である。この色空間は、照明やテレビモニターなどの製造業界で利用されている。

そして、上記の L* a* b* 色空間と L* u* v* 色空間は、JIS (JIS Z 8729) にも取り入れられている。

しかしながら、これらの方法のうち、①のマンセル記号による方法は、視覚の個人差や周囲の照明条件などによって判断が分かれる場合があり、真に定量的とはいえない。また、②の XY 色度図による方法は、物体の色を連続的に表現できる利点はあるが、歪んだ馬蹄形の平面に表現され感覚的に理解しにくいものである。

③の L* a* b* 色空間は、比較的理解しやすい直交

座標によって構成されていることから、既往の色に関する研究においても、 $L^* a^* b^*$ 色空間を使用しており（たとえば、Nakashima et al., 1992）、本報文においても、この $L^* a^* b^*$ 色空間を使用する。

3 色の測定に対する岩石資料の状態の影響

本報文において色の測定に使用した計測器は、ミノルタカメラ株式会社製の色彩色差計 CR-200（以下 CR-200 と称する）である（図-4 および図-5）。この色彩色差計は、 $L^* a^* b^*$ 以外にも、XYZ 表色系やマンセル表色系などによる測定も可能である。CR-200 の測光原理は、輝度が常に一定な光源（パルスキセノンランプ）から出た光を、拡散板を使ってあらゆる方向から試料を照射し、垂直方向の反射光を色の 3 原色に対応するフィルターを組み合わせたセンサーで受光し、即座に測定値を表示するものである。受光口径は 8 mm である。測定は外部に光が漏れないように、受光ヘッドと試料を密着させて行わなければならない。

一般に、岩石は、複数の色彩を持つ鉱物が不均質に混在しており、また、ボーリングコアを使用して測定する場合には、曲面として測定することになる。

そこで、鉱物粒子の大きさ、ボーリングコア側面の曲率および表面の乾湿が、色の測定結果に与える影響について検討した。

3・1 鉱物粒子の径による影響

CR-200 は、直径 8 mm の円内の色を平均化した値を表示する。

これに対し、岩石の粒度はチャートのような陰微晶質（顕微鏡レベル）なものから、粗粒花崗岩のような一つの結晶で 1 cm 位の大きさのものであり、極めて多様である。直径が 8 mm 以下の鉱物の色を測定する場合には、直径 8 mm の受光口径では、複数の鉱物の混合色を測定することになる。また逆に、粗粒な岩石の色を測

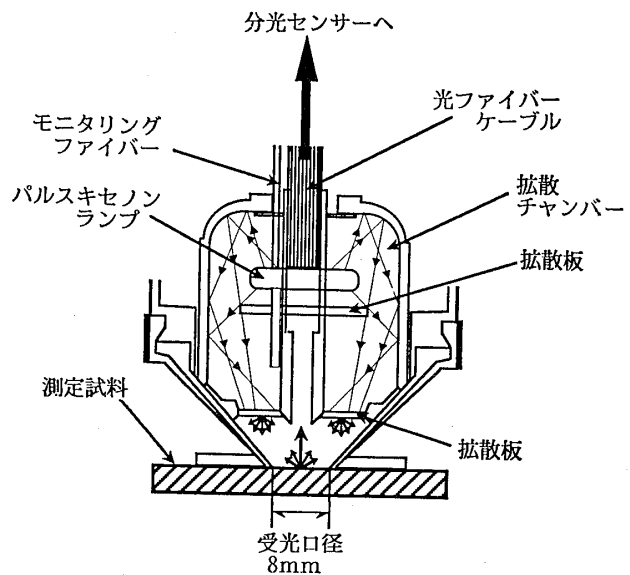


図-4 色彩色差計 (CR-200) 測定ヘッド概要図
Fig. 4 Measuring head of Minolta CR-200 chromometer



図-5 色彩色差計 (CR-200)
Fig. 5 Chromometer (Minolta CR-200)

定する場合には、ある大きな一つの結晶の色のみが測定結果に反映することになる。したがって、岩石表面の受光箇所によって、測定値が異なることが考えられる。

そこで、新鮮な細粒砂岩（中生代ジュラ紀丹波帯地層群）と新鮮な中粒花崗岩（中生代白亜紀）の2つの板状試料（面積約 100cm² の範囲を研磨したもの）の表面について、無作為に10箇所の測定を実施した。

上記の試料の肉眼観察による特徴としては、細粒砂岩は、直径 0.1~0.4mm 程度の石英などの鉱物を含み、幅 1~3 mm 程度の石英脈が網目状に認められ、全体的に青灰色を呈している。中粒花崗岩は、黒雲母（黒色）、角閃石（深緑色）、長石（白色）、石英（透明）か

ら構成され、それぞれ、直径 1~6 mm 程度の大きさで、これらは容易に区別できる岩石である。

測定結果を図-6に示す。L* 値については、砂岩は 34~39、花崗岩は56~67の範囲にあり、ばらつきの範囲幅は、花崗岩の方がやや大きい。a* 値については、砂岩は 0~-0.9、花崗岩は-0.6~-1.4の範囲にある。また、b* 値については、砂岩は-0.1~-1.8、花崗岩は0.7~3.1の範囲にある。したがって、砂岩と花崗岩の a* 値および b* 値のばらつきの範囲幅は同じ程度とみることができる。

以上の試験結果から、直径 8 mm の受光口径の色彩色差計による測定では、粒径の大きい鉱物を含む岩石に

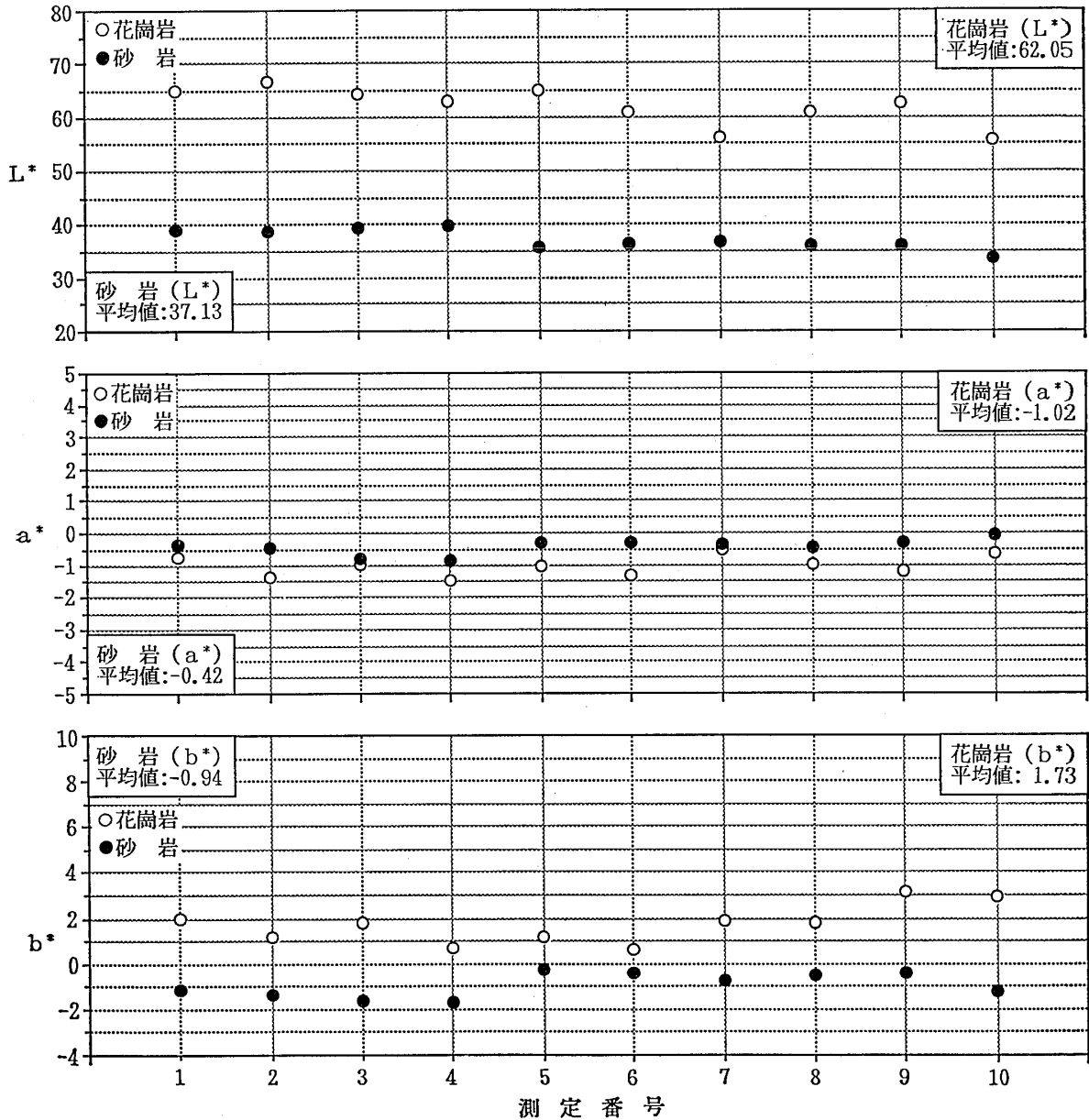


図-6 10回の測定における測定値の変化

Fig. 6 Changes in measured values over 10 measurements

おいては、 L^* 値のばらつきが大きくなる傾向が認められたが、 a^* 値および b^* 値に対しては、粒径による影響は小さいことが判明した。

また、岩石表面の受光領域の違いによる差異も小さいことから、1回の測定で、その試料の値とした。

3・2 ボーリングコアの曲面が色測定に与える影響

色彩色差計は、測定ヘッドを平坦な測定面に密着させて計測することが原則である。しかし、多くの場合、ボーリングコアを用いて測定を行ったため、側面、すなわち、曲面において測定する場合についての影響を検討することが必要となった。

そこで、ボーリングコアの側面での測定を想定して、次のような実験を行った、図-7に示すように、赤、オレンジ、黄、薄黄と呼称されている色紙を用いて、平坦な面にした場合と、ボーリングコア（公称 $\phi 66\text{mm}$ のコアの場合、約 50mm の円筒になる）と同じ曲率で曲げた場合の測定値を比較した。

測定結果を図-8に示す。その結果、4試料とも測定値はほとんど同じであり、ボーリングコアの曲率程度であれば、測定結果に影響を与えないことがわかった。

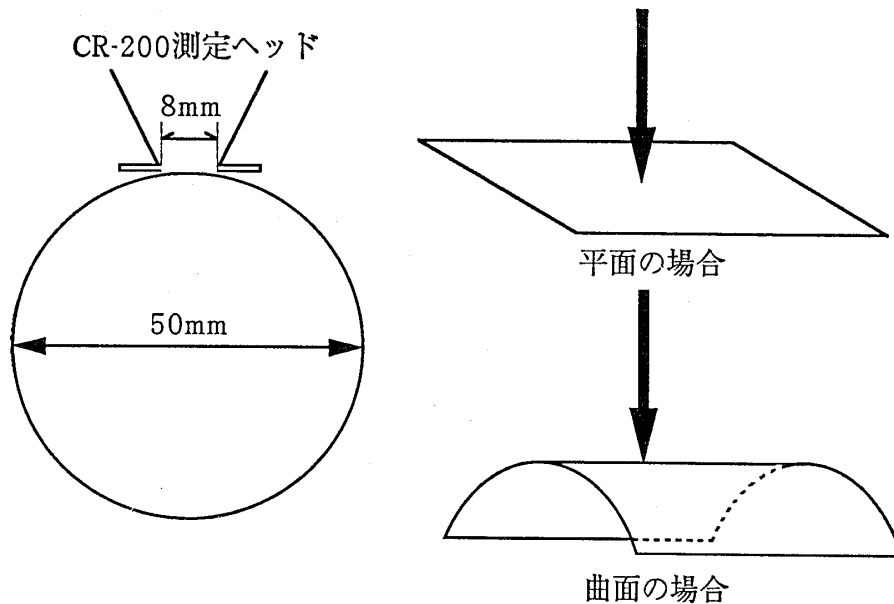
3・3 岩石表面の乾湿が色測定に与える影響

通常、露頭やボーリングコアで地質観察を行うとき、岩石表面の乾湿の違いによって、見た目の印象が異なることを経験している。そこで、色の測定において、岩石表面の乾湿の違いが、色の測定値にどの程度の影響を与えるかについて検討した。

この検討は、中生代白亜紀の広島型花崗岩の同じボーリングコアを用い、乾燥した状態と湿潤した状態で、それぞれ同一点において表面の色を測定し比較した。測定は、新鮮な岩石の分布する 1m 区間長のコアで、深度方向に 2cm 間隔ごとに行った。

その結果を図-9に示す。 a^* 値および b^* 値は、深度 $50\text{cm} \sim 100\text{cm}$ 間では、湿潤状態における値の方に、若干大きい傾向が認められるが、深度 $10\text{cm} \sim 50\text{cm}$ 間では、よく一致している。この実験の結果からは、 a^* 値および b^* 値は、乾燥・湿潤の影響をほとんど受けないと判断できる。

L^* 値は、乾燥あるいは湿潤の状態によって、大きな違いを示している。すなわち、乾燥状態の L^* 値は 60 程度であるのに対して、湿潤状態では 40 程度であり、乾燥



試料名	赤	オレンジ	黄	薄黄
	$L^* = 46.94$	$L^* = 59.81$	$L^* = 83.12$	$L^* = 82.61$
	$a^* = 53.07$	$a^* = 47.63$	$a^* = -12.88$	$a^* = -4.71$
	$b^* = 32.83$	$b^* = 51.54$	$b^* = 68.91$	$b^* = 41.72$

注：色の測定値は平面で測定したもの

図-7 曲面影響の実験に使用した試料とその実験方法

Fig.7 Sample used in study of effects of surface curvature and the method of study

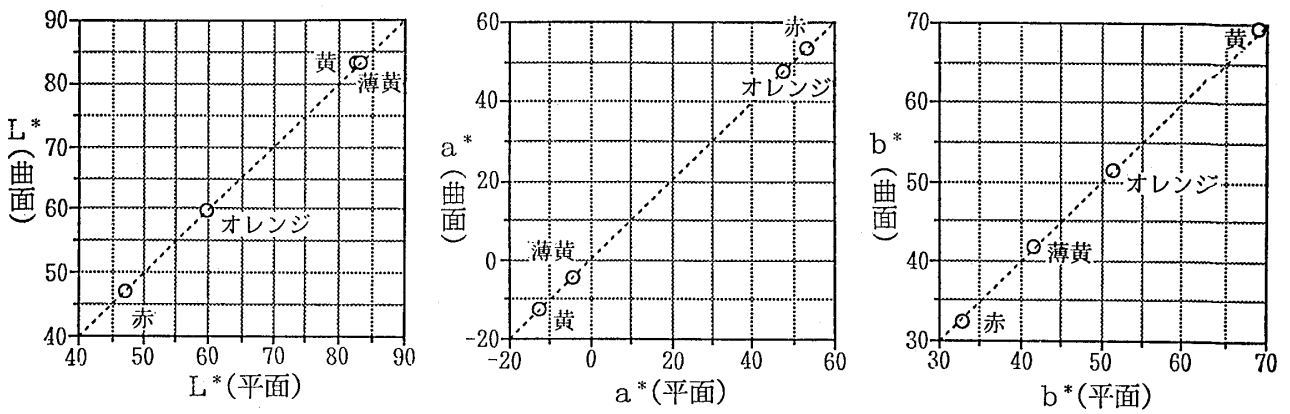


図-8 平面と曲面の色の測定値の関係

Fig. 8 Measured value and color relationships for flat and curved surfaces

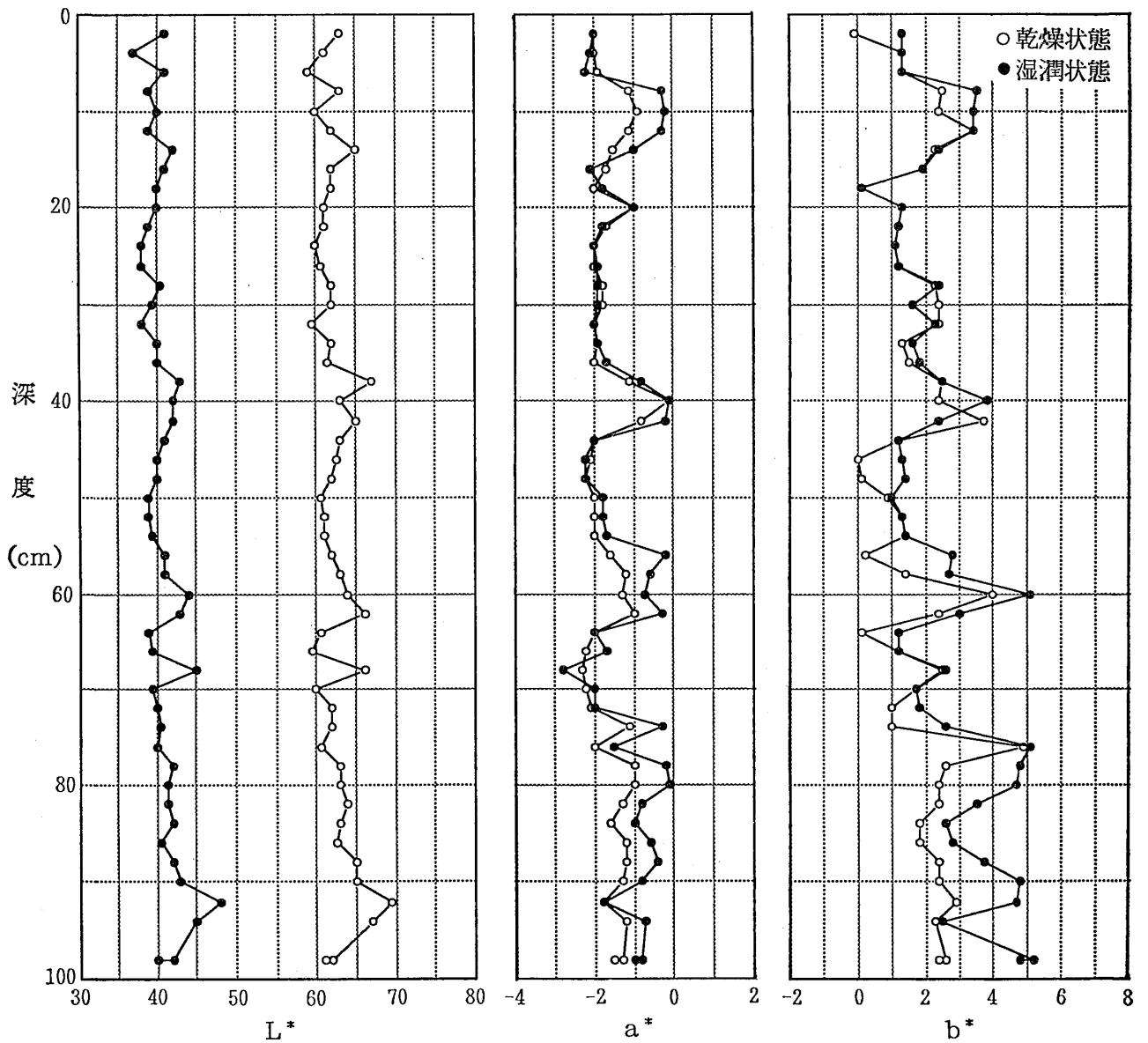


図-9 乾燥・湿潤状態の色測定値への影響

Fig. 9 Effects on color of degrees of moisture or dryness

状態の方がより白っぽくみえることを示している。また、深度に対するL* 値の変化形態は、ほとんど同じであるといってもよく、L* 値の差は深度に関係なく、約20となっている。

いいかえれば、L* 値は、反射率を表しており、乾燥状態の場合には、表面の微細な傷などの影響によって、光の反射が多くなるのに対し、湿潤状態の場合には、結

晶内部にまで光が透過し、反射光として検出されるものが少ないためであろうと考えられる。

4 測定結果と考察

4・1 岩石の色と岩盤等級区分との関係

現在、一般に行われている岩盤等級区分は、地質、

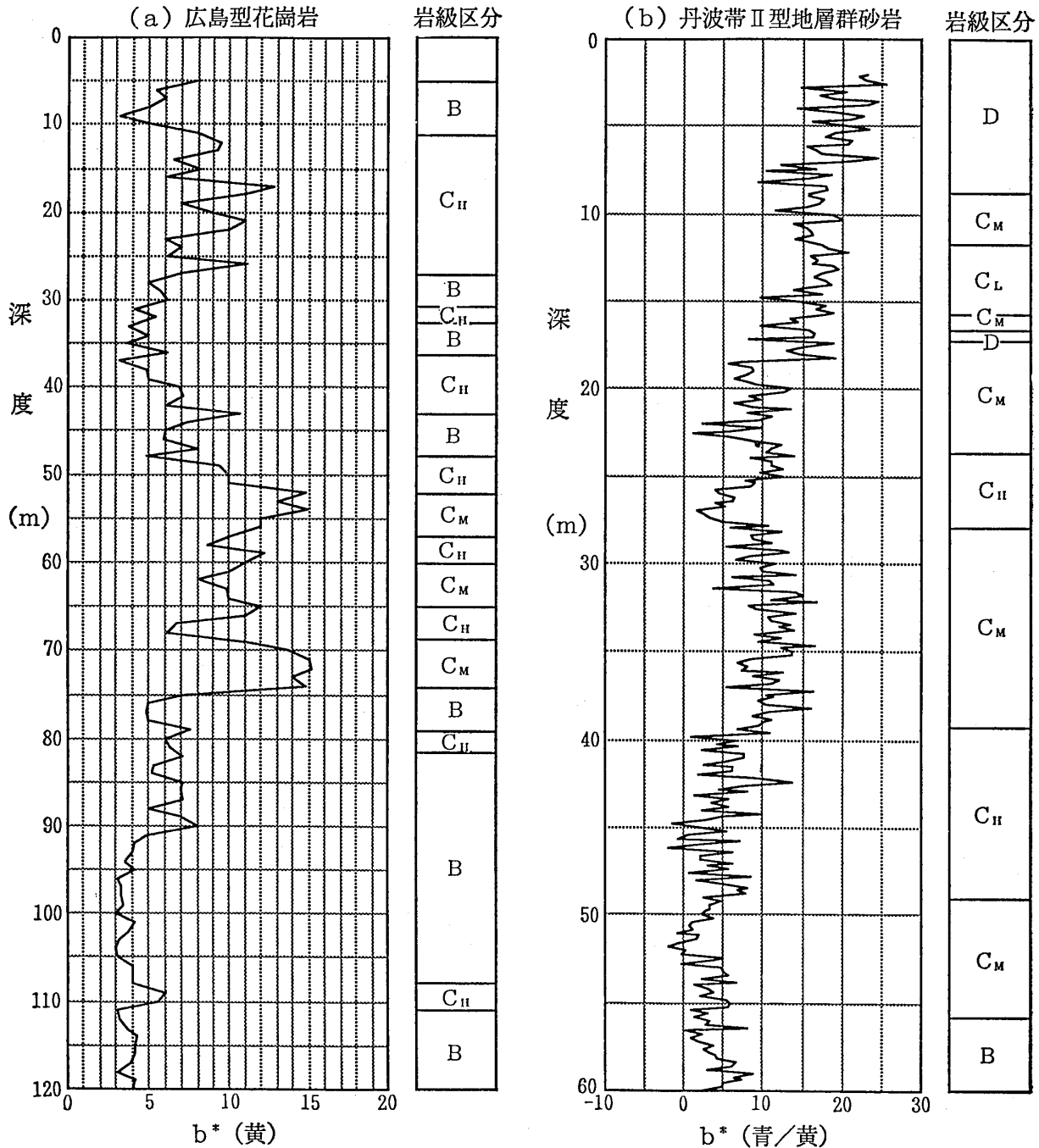


図-10 花崗岩および砂岩のb* 値と深度および岩盤等級との関係
 (広島型花崗岩および丹波帯Ⅱ型地層群砂岩のボーリングコアについて測定したものである)
 Fig. 10 Relationships between b* values and granite and sandstone rock grade
 (from measurements of Hiroshima granite and Tanba sandstone, Type II Suites drilling samples)

色、硬軟、割れ目の間隔、割れ目の状態などの細区分を組み合わせて行われている。地質の種類が同じであれば、色や割れ目の状態は、風化の程度を直接反映する要素であり、岩石の硬軟や割れ目の間隔もまた、溶解による空隙やマイクロクラックの増加を反映するという意味で、風化を二次的に反映する要素であるといえる。したがって、岩石の色の変化と風化区分としての岩盤等級区分の間には、系統的な関係があると思われる。そこで、白亜紀広島型花崗岩地域、ジュラ紀丹波帯Ⅱ型地層群の砂岩からなる地域、新第三紀中新世の珪長質火山碎屑岩類からなる地域の地質の異なる3つの地域の岩石について、その色と岩盤等級区分との関係を検討した。

各地域ともダムの建設計画があり、多数のボーリング調査や横坑調査の結果などに基づいて、その地域特有の岩盤等級区分がなされている。このため、各地域毎に、その代表的な岩盤等級が見られるようなボーリングコアから、試験のための試料を抽出し、色測定を行った。

図-10は、広島型花崗岩および丹波帯Ⅱ型地層群の砂岩について、ボーリング孔の深度方向への色の変化と岩盤等級区分を対比したものである。図の横軸の b^* 値は、岩石の黄色化の度合を示している。

一般に、岩石は風化するにつれて黄褐色化することから、この値の大きさは、ほぼ風化の度合を表すものと考えてよい。この2つの図を大局的に見れば、岩石の色の褐色化によって示される風化の程度と岩盤等級区分と

の間には、関係がありそうである。

つぎに、上記の広島型花崗岩および丹波帯Ⅱ型地層群の砂岩について、 a^*-b^* 図上で、岩石の色と岩盤等級区分との関係を示すと、図-11および図-12のようにな

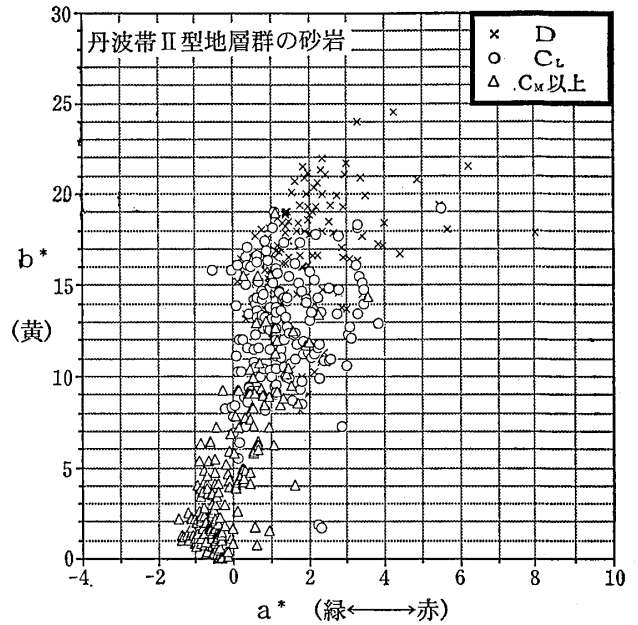


図-12 丹波帯Ⅱ型地層群砂岩の色変化を示す a^*-b^* 図 (岩盤等級別に示す)

Fig. 12 a^* and b^* values corresponding to changes in the color of sandstones of Tanba Type II Suites (shown according to rock grade)

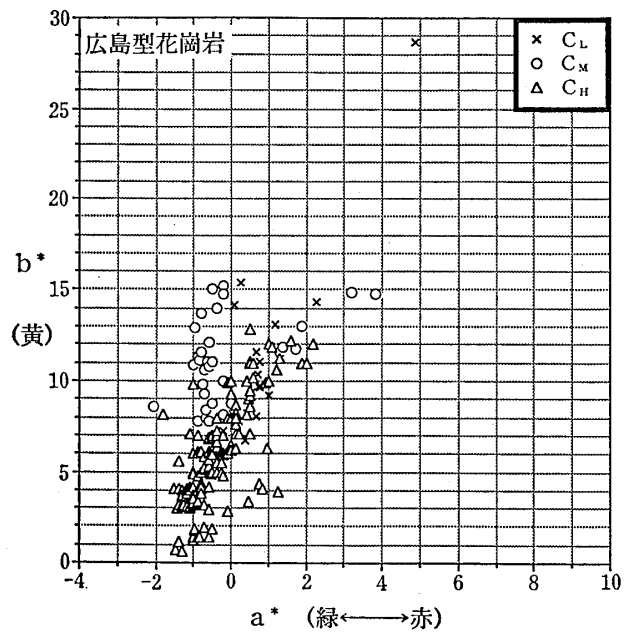


図-11 広島型花崗岩の色変化を示す a^*-b^* 図 (岩盤等級別に示す)

Fig. 11 a^* and b^* values corresponding to changes in the color of Hiroshima granite (shown according to rock grade)

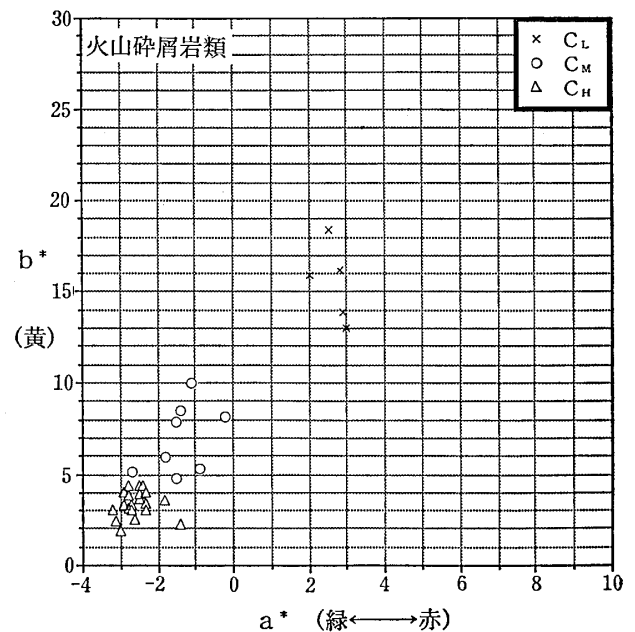


図-13 火山碎屑岩類の色変化を示す a^*-b^* 図 (岩盤等級別に示す)

Fig. 13 a^* and b^* values corresponding to changes in the color of volcaniclastic rocks (shown according to rock grade)

る。また、図-13は、珪長質火山碎屑岩類の色と岩盤等級区分との関係を示す a^* — b^* 図である。

これらの図から明らかなように、各地域とも、岩盤等級に応じて岩石の色が、ほぼ系統的に変化していることが判る。また、その色の変化経路が b^* 軸（青—黄）側へ寄った黄褐色へと向かう経路をとることは、3つの地域の岩石において、共通して認められる傾向である。

Nakashima et al. (1992)は、色彩色差計を用いて測定された岩石・鉱物の色と内部における化学反応との関

係を調べている。これによると、風化では、主として水酸化鉄が生成するために、色が黄褐色へと変化するのに対し、熱水変質では、主として赤鉄鉱が生成するために、暗赤色へと変化する。また、緑泥石や沸石を生じるような変質では、 a^* 軸に平行に色の変化が見られること、すなわち、緑泥石化が進むほど緑色へと変化する色が述べられている。これらの関係を図-14に示す。この図と図-11から図-13に示した3つの地域における岩石の色測定の結果を比較すると、3つの地域における岩

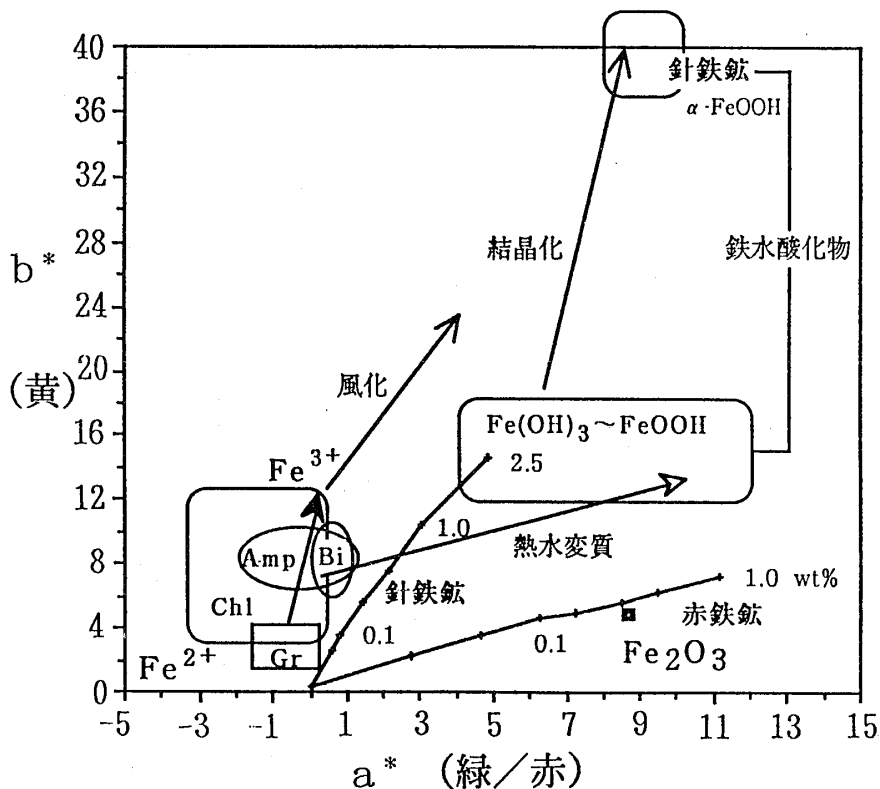


図-14 若干の岩石および鉱物の色の範囲を示す a^* — b^* 図

水酸化鉄と針鉄鉱を結ぶ結晶化の矢印は、水酸化鉄の結晶度の増加による色の変化経路を示す。針鉄鉱および赤鉄鉱と印した変化線は、アルミニウムの粉にそれぞれの数字の割合（重量％）で混入したときの色の変化経路を示す。風化の際には主として水酸化鉄が、熱水変質の際には、主として赤鉄鉱が生成されることから、新鮮な花崗岩を出発点として、風化あるいは熱水変質した際に予想される色の変化経路を矢印で示してある。[Nakashima et al. (1992) の図の一部に加筆]

Fig. 14 a^* and b^* values indicating changes in color of some rocks and minerals. The arrows (signifying crystallization) that join iron hydroxides and goethite indicate the course of color change due to increase in crystallization of iron hydroxides. The course of change described by the lines labeled "goethite" and "hematite" charts the colors corresponding to aluminum content (the numbers are the proportion by weight). Fresh granite is assumed as the starting point, the arrows indicating expected color changes with weathering and hydrothermal alteration (given that iron hydroxides are mainly produced by weathering and hematite is mainly produced by the hydrothermal alteration).

[Based on figure in Nakashima et al. (1982)]

石の色の変化が、風化に伴う水酸化鉄の生成と増加による色の变化経路に対応していることがわかる。このことは、3つの地域における岩石の色の変化が、風化の影響によることを示しているとともに、岩盤等級区分が風化の程度を大きく反映したものであることを物語っている。

岩盤等級区分における風化の度合は、主として岩石の色や割れ目の状態として記述され、区分されている。それは、手触りや肉眼観察による色調によって識別されたものであり、個人差や分解能という面で、ある程度の幅をもつものと思われる。

筆者らが予察的に行った色の識別実験調べれば、色彩色差計による a^* 値でおよそ2程度、 b^* 値でおよそ4程度の差を示す色の变化は肉眼では識別できなかった。これは、あくまでも肉眼で見て色が違うかどうかの判別であり、さらに、肉眼で見た色を、たとえば、「淡黄褐色」と記述するか「淡褐色」と記述するかというような記述法の問題が加わると、色の区分はさらに曖昧になるであろう。

図-11から図-13に示したように、隣り合う岩盤等級区分間に、色の範囲が一部重複し合うのは、このような感覚に基づく区分の不確かさによるものと考えられる。しかしながら、色彩色差計によって色を数値化すれば、このような不確かさは解消されるはずであり、色を指標とした風化区分によって、より精確かつ客観的に岩盤等級の区分を行うことができることが期待される。

以上のように、岩石の色の变化は、主として風化の程度を反映したものであり、岩盤等級区分との間に、系統的な関係があることが認められた。したがって、岩石の色を指標として、風化区分としての岩盤等級区分を客観的に表示することが可能であると考えられる。しかし、これの実用化のためには、岩石の色と目的に応じた物性値との対応関係を明らかにするとともに、その関係がどのような物理・化学的機構によっているかを検討しておく必要がある。

4・2 風化による岩石の色と鉱物学的変化および物性値との関係

前節で扱った3種の岩石のうち、丹波帯Ⅱ型地層群の砂岩は、その地域内においては、粒径や結晶量の変化は見られず、均質である。また、粒径は0.3~0.6mmと細粒である。したがって、この実験で使用した色彩色差計の測定口径(ϕ 8mm)程度の面積の測定でも、その岩石を十分代表できる再現性のある測定値を得ることができると考えた(第3節参照)。そこで、この砂岩を用

いて、風化による色の变化と内部の鉱物学的変化および物性値との関係を検討した。

検討に用いた試料は、図-11に示した試料の内から色彩値を基準にして、

新鮮部 (a^* 値 <0 , b^* 値 <5)

中風化部 ($0 < a^*$ 値 <1.0 , $5 < b^*$ 値 <10)

強風化部 (a^* 値 >1.0 , b^* 値 >10)

の3部に区分し、それらを代表するものとして、それぞれ2つの試料を選択した。そして、各試料から岩石薄片を作成し、風化に伴う砂岩の色の变化が、内部の組織や鉱物の変化とどのような関係にあるかを明らかにするために、偏光顕微鏡を用いて、組織と構成鉱物の観察を行った。

各試料の色彩値と顕微鏡による観察から得られた特徴は、下記に示す通りであり、その要点を表-1に示す。

(1) 新鮮部 (a^* 値 <0 , b^* 値 <5)

Wentworth (1922) による砂岩の分類基準によると、石質ワッケないシアレナイトに区分される。主要な斑状結晶として石英 $>$ カリ長石 $>$ 斜長石が含まれ、この他重鉱物として黒雲母、白雲母、緑泥石、緑レン石、ザクロ石、鉄鉱、ジルコンなどを少量含む。岩片としては、酸性凝灰岩や花崗岩が多く、このほかに、頁岩、安山岩、変成岩類が少量含まれる。黒雲母は、 X =淡褐色、 $Y=Z$ =黄褐色の多色性を示すものが多く、このほかに、緑色種のもものが少量含まれる。緑泥石は、ほとんどの場合、独立した碎屑性結晶として含まれており、黒雲母の周辺部に風化によって生じたものは極めて少ない。結晶粒界から基質へ連続する細かな割れ目が見られるが、黒色不透明鉱物によって充填されている。また、方解石の細脈(幅0.01~0.1mm)が発達するが、溶脱による空隙や他の鉱物による充填は認められない(写真-1および写真-2参照)。

(2) 中風化部 ($0 < a^*$ 値 <1.0 , $5 < b^*$ 値 <10)

黒雲母はその周辺に沿って緑泥石化していることが多く、複屈折が高いことから雲母であると判断される場合でも、その多色性は緑がかかった色調(X =淡黄色、 $Y=Z$ =緑色~黄緑色)へと変化している。方解石脈の一部は溶脱し、褐鉄鉱や石英によって充填されている。結晶粒界に沿って褐鉄鉱が付着していることが多い。また、基質中のいたるところに雲母、粘土鉱物、炭酸塩鉱物が生じている(写真-3および写真-4参照)。

(3) 強風化部 (a^* 値 >1.0 , b^* 値 >10)

黒雲母は緑泥石化しており、周辺の基質部に褐鉄

表一 風化度合の異なる砂岩の色と顕微鏡観察による特徴

Table 1 Characteristics of colors of sandstone of varying degrees of weathering, as determined by microscopic examination

	試料番号	測定色彩値 (平均)	顕微鏡観察結果
新鮮部	No. 1	L*値 37.13 a*値 -0.42 b*値 -0.92	斑状結晶として石英>カリ長石>斜長石が含まれ、その他の重鉱物として、黒雲母、白雲母、緑泥石、緑レン石、ザクロ石、鉄鉱ジルコンなどが含まれる。黒雲母は、X=淡褐色、Y=Z=黄褐色の多色性を示している。緑泥石は碎屑性結晶として含まれる。方解石の溶脱や鉄鉱の褐色化は認められない。
	No. 2	L*値 36.58 a*値 -0.94 b*値 -1.07	斑状鉱物や重鉱物の構成は、試料No. 1と同じである。黒雲母は淡黄色~褐色の多色性を示している。幅0.2~0.3mmほどの石英脈や方解石脈が発達するが、溶脱や褐鉄鉱の付着は見られない。
中風化部	No. 3	L*値 38.41 a*値 -0.42 b*値 4.79	黒雲母は、その周辺に沿って緑泥石化していることが多く、複屈折が高いことから、雲母であると判断される場合でも、その多色性は、緑がかかった色調(X=淡黄色、Y=Z=緑色~黄緑色)へと変化している。方解石脈の一部は溶脱し、褐鉄鉱や石英によって充填されている。褐鉄鉱付着割れ目・空隙の容積比は6.4%である。
	No. 4	L*値 44.28 a*値 0.30 b*値 8.38	黒雲母は、その周辺に沿って緑泥石化し、さらに、その周辺の基質は褐鉄鉱で汚染されている。結晶粒界から基質へと連続する開口割れ目が発達し、褐鉄鉱が付着している。基質中には、微小な雲母炭酸塩鉱物が生じている。褐鉄鉱付着割れ目・空隙の容積比は13.5%である。
強風化部	No. 5	L*値 43.87 a*値 0.84 b*値 11.08	黒雲母は緑泥石化しており、周辺の基質部に褐鉄鉱が付着している。方解石脈は見られず、褐鉄鉱、石英、微細な雲母からなる脈が発達している。結晶粒界から基質中に連続する割れ目(幅0.01mm以下)が発達し、褐鉄鉱や微細な炭酸塩鉱物、粘土鉱物で充填されている。褐鉄鉱付着割れ目・空隙の容積比は10.5%である。
	No. 6	L*値 44.74 a*値 2.16 b*値 11.47	黒雲母は、緑泥石や銅光沢を示す雲母鉱物に変化している。斑状結晶内を横切る開口割れ目や、結晶粒界から基質へと連続する開口割れ目が発達し、褐鉄鉱や微細な炭酸塩鉱物、粘土鉱物で充填されている。褐鉄鉱付着割れ目・空隙の容積比は16.4%である。

鉄が付着している。方解石脈は見られず、褐鉄鉱、石英、微細な雲母からなる脈が発達する。結晶粒界から基質中に連続する割れ目(幅 0.01mm 以下)が発達し、褐鉄鉱や微細な炭酸塩鉱物、粘土鉱物によって充填されている。また、基質のほとんど全てにわたって、雲母、粘土鉱物、炭酸塩鉱物が生じている(写真一5および写真一6参照)。

以上のように砂岩の風化の進行につれて、2つの変化が識別できる。一つは、黒雲母の中風化段階における緑色化と強風化段階での緑泥石化であり、他の一つの変化は、褐鉄鉱の付着した割れ目や空隙の増加である。

(a) 黒雲母の緑泥石化について

一般に黒雲母の風化においては、黒雲母→緑泥石→加水雲母→パーミキュライト→カオリナイトに至る一連の風化系列が知られている(中川ほか, 1972; 三浦, 1973; 塚本ほか, 1988)。また、Winchell

et al. (1951) は、黒雲母から緑泥石へと変化する中間段階で緑色雲母を生じる場合もあることを報告している。これらの報告によれば、上記の観察事項が岩石の風化過程の一部を示していることを証明している。

(b) 割れ目や空隙の増加について

褐鉄鉱の付着した割れ目や空隙の増加を定量的に示すために、中風化部と強風化部のそれぞれの2試料から作られた 3.6cm×2.4cm の岩石薄片を10倍に拡大した写真の上に、6mm 間隔に作られているメッシュを載せて、メッシュの交点にある割れ目や空隙の数を計測した。

なお、測定に先立って精度を評価するために、間隔が12mm, 8mm, 6mm, 4mm, 2mm の5種類のメッシュによって、風化程度の異なる2つの試料の測定を行ったが、メッシュ間隔が6mm以

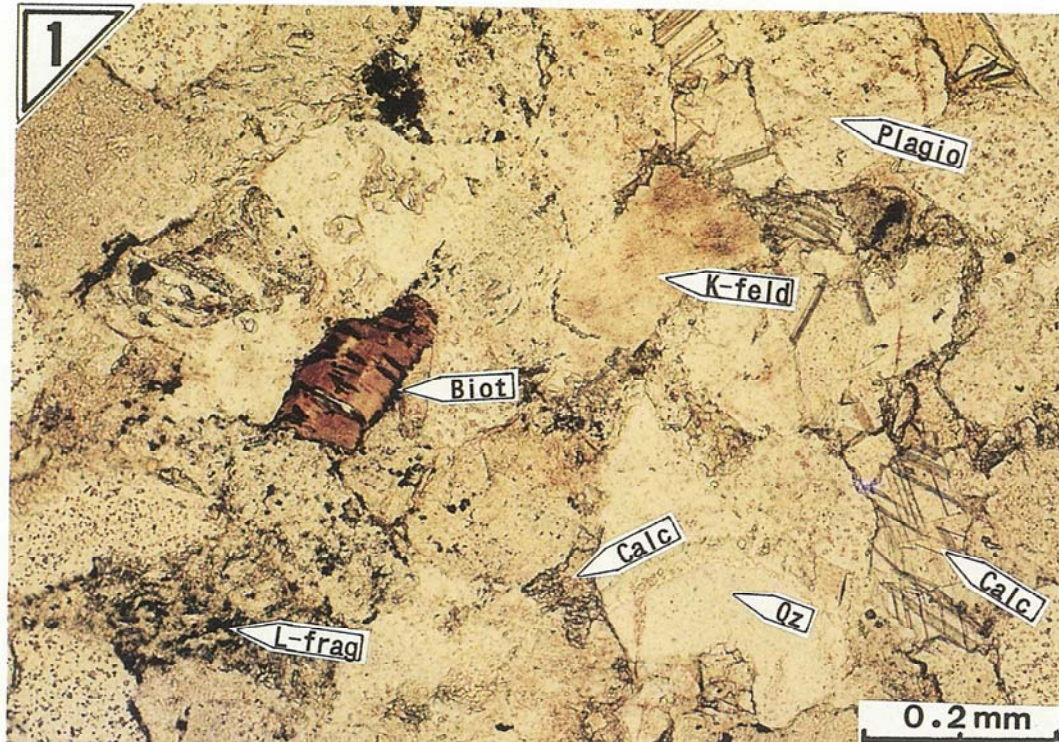


写真-1 新鮮な砂岩の顕微鏡写真(試料番号 No.1)

斑状結晶として石英>カリ長石>斜長石が含まれ、その他の重鉱物として黒雲母が見られる。黒雲母は、X=淡褐色、Y=Z=黄褐色の多色性を示す。方解石の幅0.2mm程度の脈が見られる。

平行ニコルで撮影。Qz: 石英、K-feld: カリ長石、Plagio: 斜長石、
Biot: 黒雲母、Calc: 方解石、L-frag: 岩片

Photo 1 Microscopic photograph of fresh sandstone (sample No.1)

Has the following porphyritic crystal content: quartz > potassium feldspar > plagioclase. Biotites are also contained as heavy minerals. Biotites show pleochroism: X=light brown, Y=Z=yellowish brown. There is also a vein of calcite of 0.2 mm width.

Photographed by open nicol. Qz: quartz, K-feld: potassium feldspar, Plagio: plagioclase, Biot: biotite, Calc: calcite, L-frag: lithic fragment.

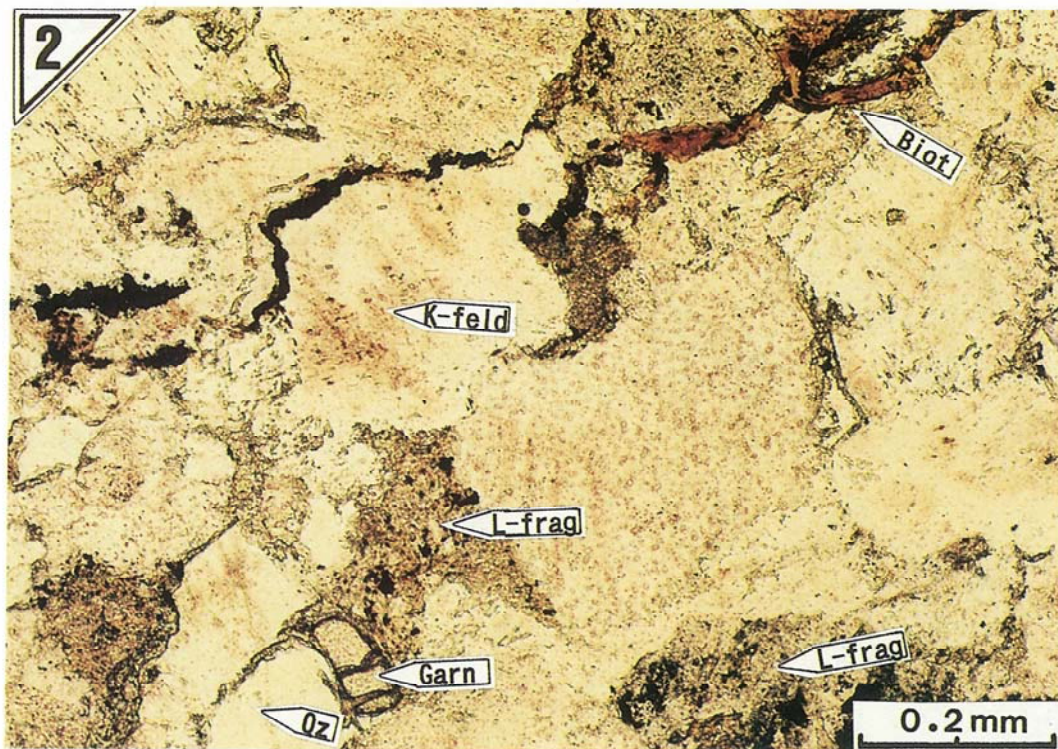


写真-2 新鮮な砂岩の顕微鏡写真 (試料番号 No.2)

斑状鉱物や重鉱物の構成は試料No.1と同じである。黒雲母は淡黄色～褐色の多色性を示す。幅0.2～0.3mm程度の石英脈が発達するが、溶脱は見られない。平行ニコルで撮影。Qz: 石英、K-feld: カリ長石、Biot: 黒雲母、Garn: ザクロ石、L-frag: 岩片

Photo 2 Microscopic photograph of fresh sandstone (sample No.2)

The porphyritic minerals and the heavy minerals are the same as those of sample No.1. Biotite pleochroism, from light yellow to brown. There is a vein of quartz 0.2-0.3 mm wide. No leaching of veins is observed.

Photographed by open nicol. Qz: quartz, K-feld: potassium feldspar, Biot: biotite, Garn: garnet, L-frag: lithic fragment

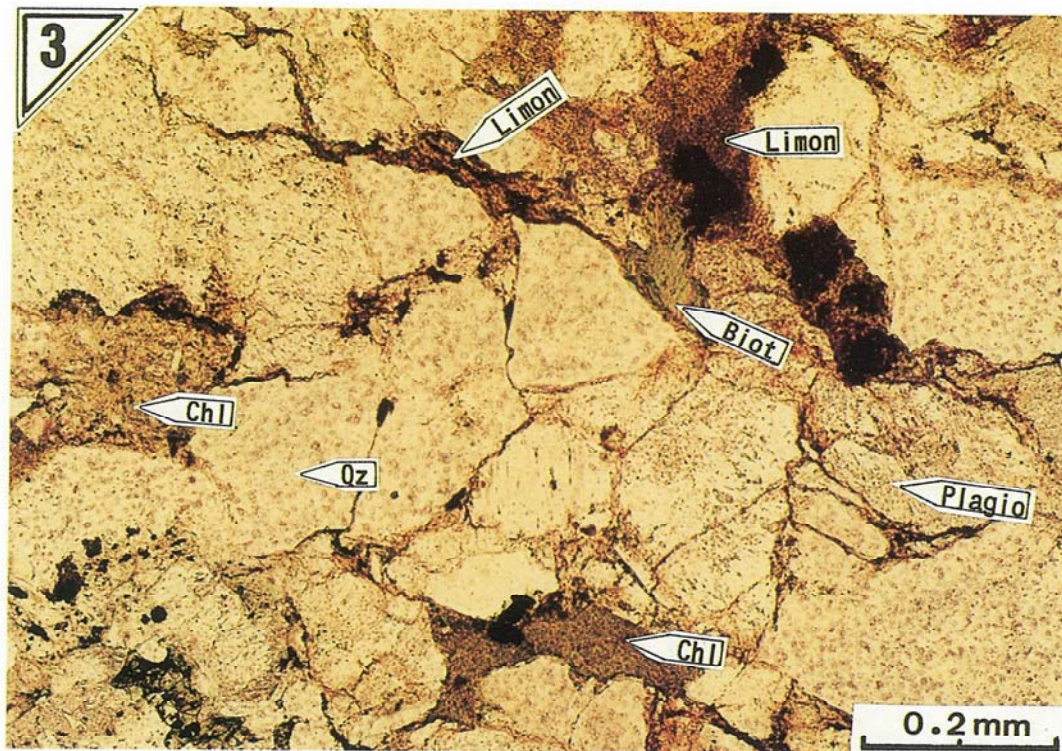


写真-3 中風化の砂岩の顕微鏡写真(試料番号 No.3)

黒雲母はその周辺に沿って緑泥石化していることが多く、複屈折率が高いことから雲母であると判断される場合でも、その多色性は緑がかった色調(X=淡黄色、Y=Z=緑色~黄緑色)へと変化している。方解石脈の一部は溶脱し、褐鉄鉱によって充填されている。褐鉄鉱附着割れ目・空隙の容量比=6.4%。
平行ニコルで撮影。Qz:石英、Plagio:斜長石、Biot:黒雲母、
Chl:緑泥石、Limon:褐鉄鉱

Photo 3 Microscopic photograph of moderately weathered sandstone (sample No.3)

In the surrounding area there are many places where biotites are altered to chlorite. Even in places where, the mineral is determined to be still mica from the high birefringence, biotites show greenish pleochroism (X = light yellow, Y=Z = green to yellow). Part of the calcite vein shows leaching and is filled with limonite. The limonite-stained cracks have a volumetric ratio of 6.4%.

Photographed by open nicol. Qz: quartz, Plagio: plagioclase,
Biot: biotite, Chl: chlorite,
Limon: limonite

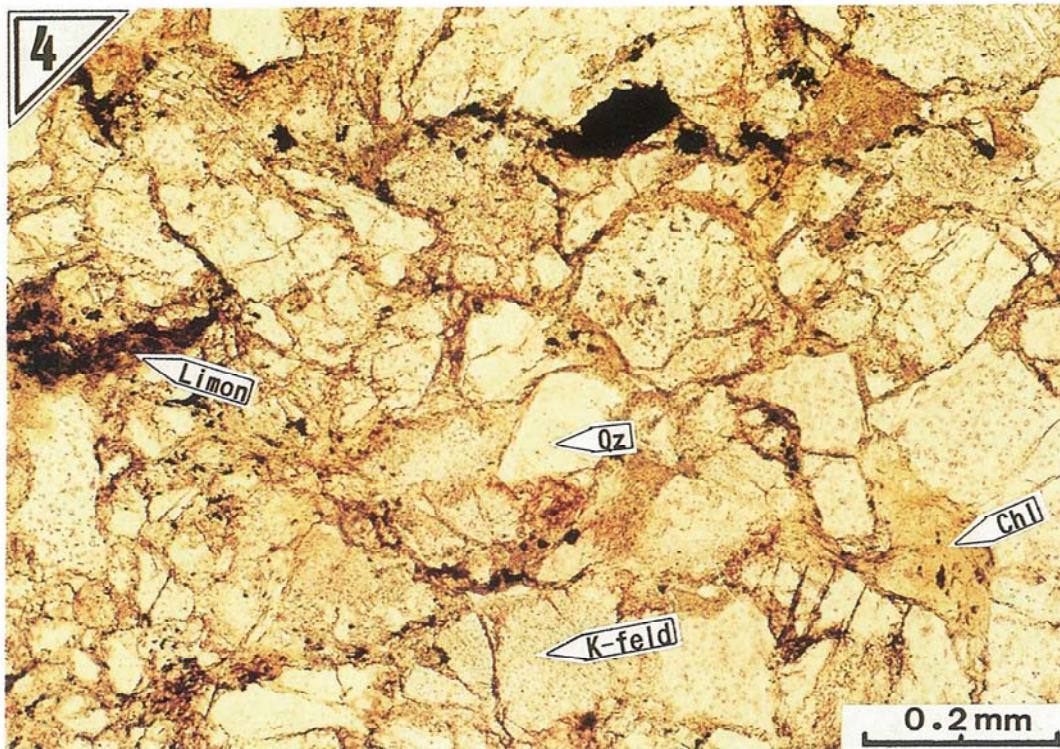


写真-4 中風化の砂岩の顕微鏡写真(試料番号 No.4)

黒雲母はその周辺に沿って緑泥石化し、さらに、その周辺の基質は褐鉄鉱で汚染されている。結晶粒界から基質へと連続する開口割れ目が発達し、褐鉄鉱が付着している。基質中には微量な雲母や炭酸塩鉱物が生じている褐鉄鉱充填割れ目・空隙の容量比=13.5%。

平行ニコルで撮影。Qz:石英、K-feld:カリ長石、Chl:緑泥石、
Limon:褐鉄鉱

Photo 4 Microscopic photograph of moderately weathered sandstone (sample No.4)

In the surrounding area there are many places where biotite has turned to chlorite. Also, the matrix of the area is tainted with limonite. There are continuous open cracks from grain boundaries to the matrix that are covered with limonite. The limonite-filled cracks in the matrix, which show small amounts of mica and carbonate minerals, have a volumetric ratio of 13.5%.

Photographed by open nicol. Qz: quartz, K-feld: potassium feldspar,
Chl: chlorite, Limon: limonite

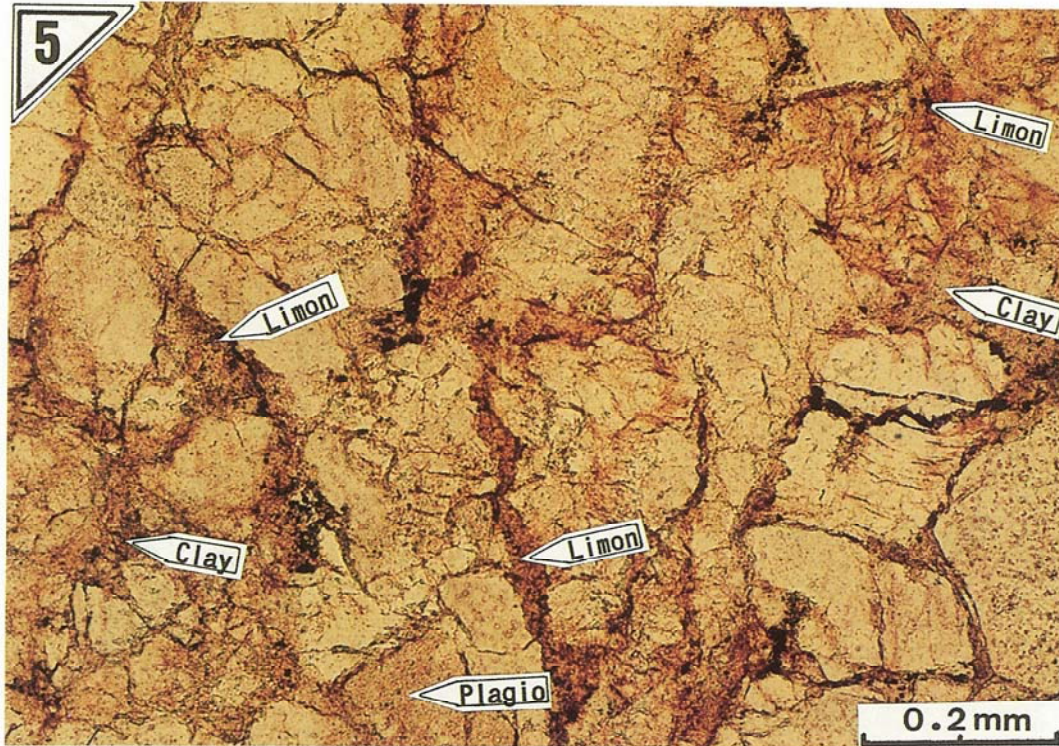


写真-5 強風化の砂岩の顕微鏡写真 (試料番号 No.5)

黒雲母は緑泥石化しており、周辺の基質部に褐鉄鉱が付着している。方解石脈は見られず、褐鉄鉱、石英、微細な雲母からなる脈が発達する。結晶粒界から基質中に連続する割れ目(幅0.01mm)が発達し、褐鉄鉱や微細な炭酸塩鉱物、粘土鉱物で充填されている。褐鉄鉱付着割れ目・空隙の容量比=10.5%。

平行ニコルで撮影。Plagio: 斜長石(絹雲母化)、Limon: 褐鉄鉱、Clay: 粘土鉱物(炭酸塩鉱物も含む)

Photo 5 Microscopic photograph of highly weathered sandstone (sample No.5)

Biotite has turned to chlorite and the surrounding matrix is covered with limonite. No calcite is observed, but limonite, quartz and a vein of fine quartz are present. There are continuous cracks from grain boundaries (width is less than 0.01 mm) that are filled with limonite and fine carbonate and clay minerals. The limonite-stained cracks have a volumetric ratio of 10.5%.

Photographed by open nicol. Plagio: plagioclase (turning to biotite), Limon: limonite, Clay: clay minerals (mixed with carbonate minerals)

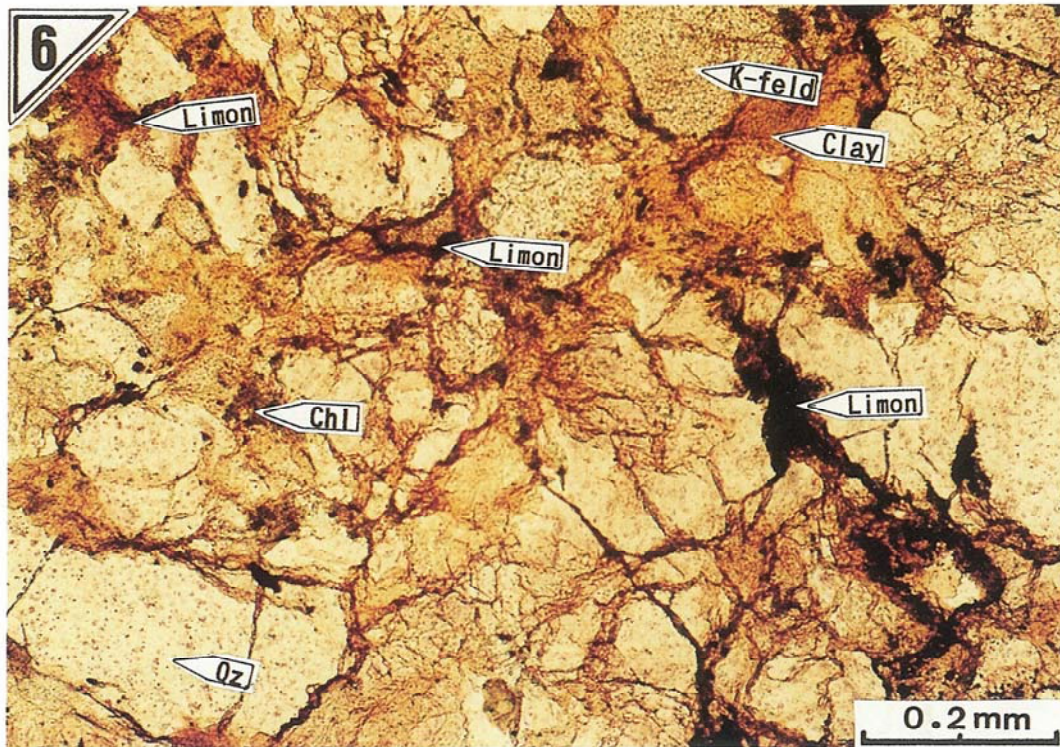


写真-6 強風化の砂岩の顕微鏡写真 (試料番号 No.6)

黒雲母は緑泥石や銅光沢を呈する雲母鉱物に変化している。斑状結晶内を横切る開口割れ目や結晶粒界から基質へと連続する開口割れ目が発達し、褐鉄鉱や微細な炭酸塩鉱物、粘土鉱物で充填されている。褐鉄鉱充填割れ目・空隙の容量比=16.4%。

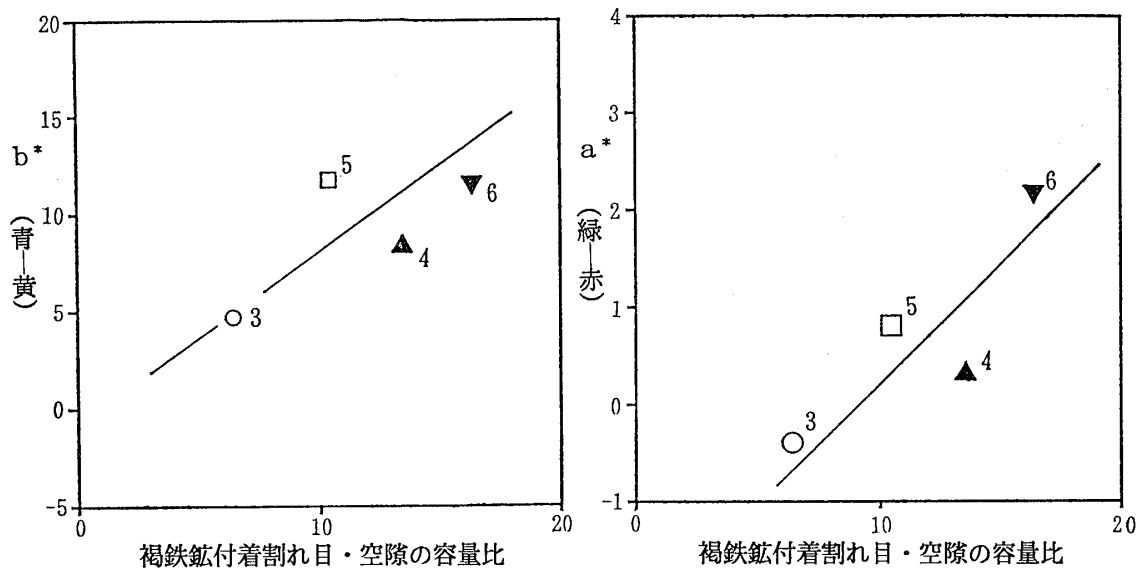
平行ニコルで撮影。Qz: 石英、K-feld: カリ長石、Limon: 褐鉄鉱、

Chl: 緑泥石、Clay: 粘土鉱物 (炭酸塩鉱物を含む)

Photo 6 Microscopic photograph of highly weathered sandstone (sample No.6)

Biotite has turned to chlorite and micaceous minerals with a bronze luster. Open cracks running laterally through the areas of porphyritic crystal and crystalline grain boundaries are filled with limonite and small amounts of carbonate and clay minerals. The limonite-filled cracks have avolumetric ratio of 16.4%.

Photographed by open nicol. Qz: quartz, K-feld: potassium, Limon: limonite, Chl: chlorite, Clay: clay minerals (mixed with carbonate minerals)



図—15 褐鉄鉱の付着した割れ目や空隙の容量比と風化砂岩の色との関係 (図中の数字は表—1 の試料番号)
 Fig. 15 Relationships between quantity of limonite-stained microcracks and color in weathered sandstones (Numbers correspond sample numbers from Table 1)

下の場合には容量比* が収束することを確認している。

測定結果は図—15に示すとおりである。この図から明らかなように、褐鉄鉱の付着した割れ目や空隙の容量比と色彩値との間には相関が認められる。すなわち、褐鉄鉱の付着した割れ目や空隙が増加するほど、砂岩の色が黄褐色化している。

Nagano et al. (1989) は、色彩色差計を用いて、花崗岩の風化に伴う色の変化を検討し、風化に伴う黄褐色化の原因が水酸化鉄 (ここでの褐鉄鉱) の生成と増加によることが明らかにした。

また、Nakashima et al (1992) は、この結果を踏まえ、幾つかの花崗岩の割れ目に沿う変化を検討し、花崗岩の風化の際には、非晶質水酸化鉄ないし針鉄鉱の生成によって黄褐色へと色が変化し、熱水変質においては、赤鉄鉱のみ生成する場合と赤鉄鉱と針鉄鉱の両方が生成する場合とに応じて、赤色あるいは褐色へと色が変化することを指摘した (図—14参照)。

さらに、Nagano et al. (1994) は、水溶液から沈殿

した水酸化鉄の結晶度が増加するにしたがって、褐色から黄色へと色が変化すること、すなわち、 $a^* - b^*$ 図上で、おおよそ b^* 軸方向へ色が変化することを明らかにした。

ここに実験の対象とした砂岩の場合、風化による色の変化は、 $a^* - b^*$ 図上で b^* 軸方向へ連続的に変化している。これは、Nakashima et al. (1992) によって示された風化による水酸化鉄の生成、増加経路に平行している (図—16 参照)。また、その色の変化経路は直線的であり、その変化経路の延長線上には、結晶度の異なる一連の水酸化鉄の色が位置している。このことは、風化に伴う砂岩の色の変化を、新鮮な砂岩の色とある結晶度そ水酸化鉄 (褐鉄鉱) の色とを端成分とする 2 色の混合によって説明できることを示している。すなわち、新鮮な砂岩に、風化により生成した水酸化鉄を累積させることによって、風化に伴う砂岩の色の変化が生じたことを意味している。これは、前述の顕微鏡観察によって明らかにされた砂岩の色の変化と内部の褐鉄鉱付着割れ目や空隙の容量比の変化が対応していることと調和的である。

以上のように、砂岩の風化に伴う色の変化が、内部の褐鉄鉱が付着した割れ目や空隙の増加に対応していることが明らかとなった。このような岩石中における割れ目や空隙の増加は、他の物性値にも影響を与えるものと予想される。

渡辺 (1979) は風化花崗岩について、山下ほか (1986) は風化した堆積岩類について、それぞれ、風化の進行に伴って、マイクロクラックや空隙の割合が増加すること

#ここに用いている岩石中の割れ目・空隙の割合の測定法は、地質学の分野で通常火成岩や堆積岩を対象に使用されているモード分析 (Modal analysis) に相当するものである。モード分析の結果得られる量は、その岩石薄片中に占める各鉱物の面積比、あるいは、大まかに体積比に相当するもので、「容量比」と呼ばれることが多い。ここでは、これにしたがって、容量比という語を使用する。

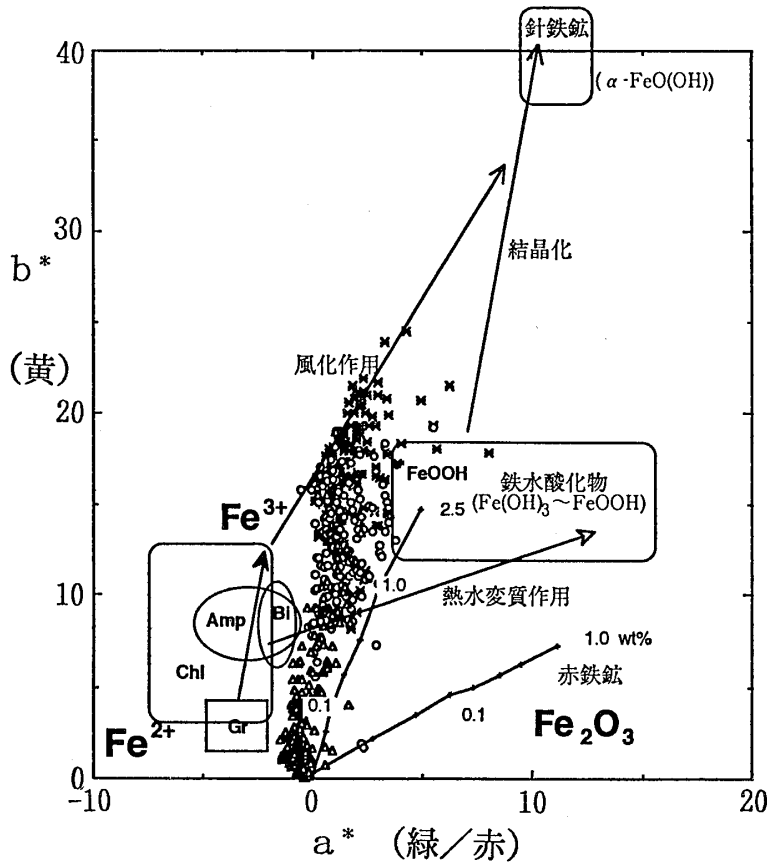


図-16 丹波帯Ⅱ型地層群砂岩の色の変化と若干の岩石および鉱物の色の変化経路との関係
 図-14に図-12に示す砂岩の色変化を記入したもの。砂岩の色の変化経路は、アルミニウムの粉と針鉄鉱の混合による色の変化経路に平行であり、新鮮な砂岩の色と針鉄鉱の色とを端成分とした2色の混合で説明できる。

Fig. 16 Relationships between changes in color in sandstones of, Tanba Type II Suites and slight quantities of rock and minerals
 In Fig. 14, the color changes of Fig. 11 are given. The trend of color change in sandstone correspond to the mixing of aluminum and goethite, indicating that the color change in sandstone can be explained by a simple mixing of portion of the colors of fresh sandstone and goethite

を指摘した。また、これまでに、岩石の風化に伴う割れ目や空隙の増加と、かさ比重，絶対乾燥比重，吸水率，超音波速度，弾性係数，一軸圧縮強度などの間に，明瞭な関係があることが指摘されている (Iliev, 1966；九里ほか, 1971；斉藤ほか, 1971, 1975)。

したがって，岩石の風化に伴う色の変化と物性値との間に密接な関係があることが予想され，この関係を明らかにすることによって，色の変化を指標として，岩盤の評価を行う可能性が，より現実味を帯びてくるものと思われる。

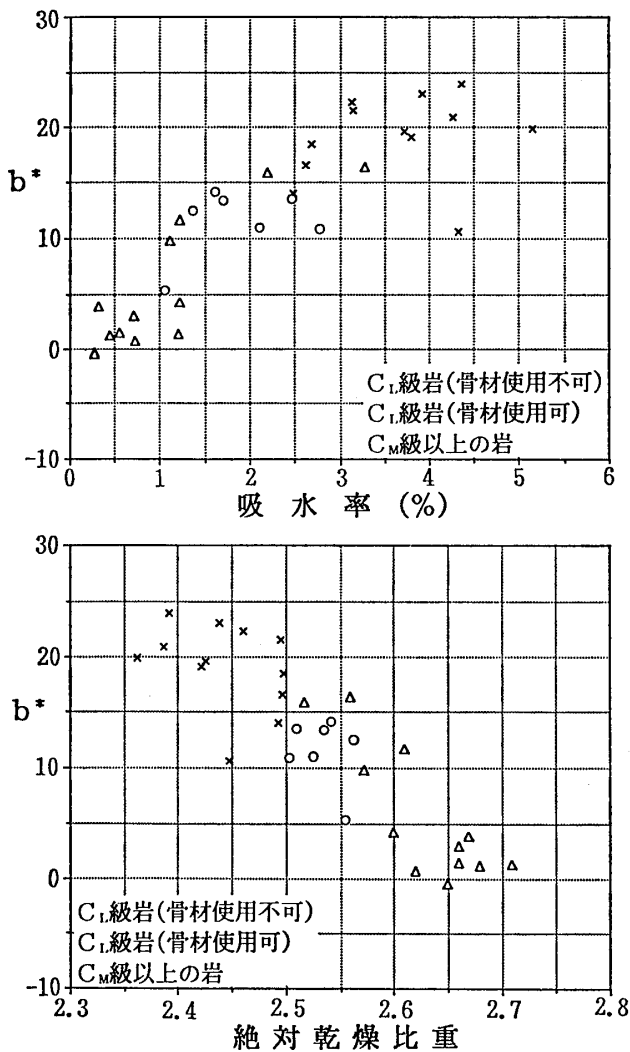
4・3 色の変化と物性値の関係，およびダム骨材判定への適用

この砂岩は，ダムコンクリートの骨材として使用する

ことが考えられており，おおむね C_M 級以上の等級を示す岩盤が対象となっている。土木学会のコンクリート標準示方書 (ダム編) では，コンクリートの粗骨材として使用する岩石の標準としては，吸水率が 3% 以下で，絶対乾燥比重が 2.5 以上であることとしている。筆者は，岩石の色と絶対乾燥比重および吸水率との関係が明らかになれば，ダムコンクリートの骨材としての適否の判定に，色測定が有効となると考えた。

そこで，ボーリングコアの肉眼観察によって，20個の C_L 級岩と，13個の C_M 級岩を抽出して，吸水率と絶対乾燥比重の測定を行なった。

図-17の (a) および (b) は，それぞれ， b^* 値と吸水率および b^* 値と絶対乾燥比重の関係を示したものである。これらの図においては，風化による黄褐色化の

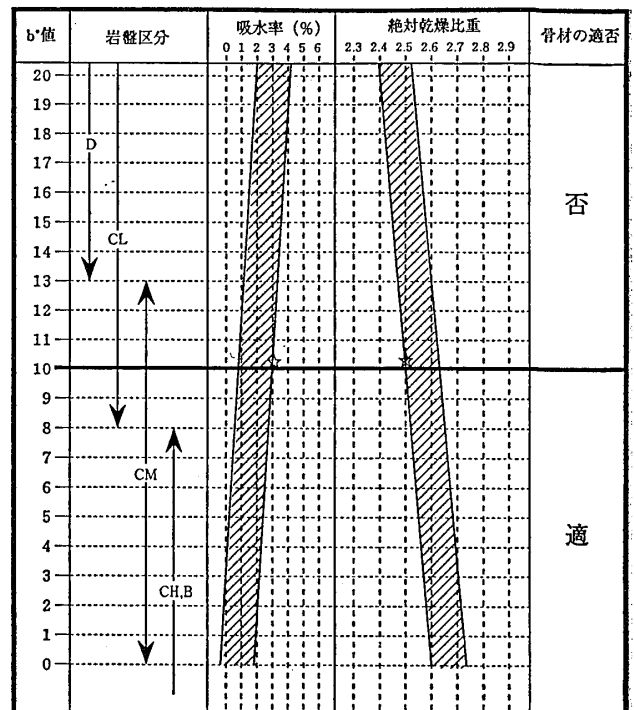


図一七 丹波帯Ⅱ型地層群の砂岩の色と吸水率および絶対乾燥比重との関係

Fig. 17 Relationships between color of sandstone from Tanba Zone II layer, water absorption ratio and absolute dry specific gravity

度合の指標である b^* 値と、割れ目や空隙の量の関数である吸水率や絶対乾燥重量との間に、明瞭な関係が認められる。このことは、4-2において検討した結果からも予想されることで、風化による岩石の色の变化を指標として、骨材としての適否判定に使用することが可能であることを示唆している。

さきに記したように、ダムコンクリートの骨材として適する岩石の基準は、吸水率が3%以下で、絶対乾燥比重が2.5以上となっている。図一七において、 C_M 級岩は吸水率が3%以下で、絶対乾燥比重は2.5となっており、 C_M 級岩を骨材とすることは、基準に合致するものと考えられる。この C_M 級岩の b^* 値は、10以下であるとなることができる。一方、19個の C_L 級岩においては、その半数は吸水率が3%以下であり、約3分



☆：土木学会の骨材基準値

図一八 丹波帯Ⅱ型地層群の砂岩の色、岩盤等級、吸水率、絶対乾燥比重の関係

Fig. 18 Relationships between color of sandstone from Tanba Zone II layer, rock grade, water absorption ratio and absolute dry specific gravity

の1は絶対乾燥比重が2.5以上となっている。

以上述べた b^* 値、岩盤等級、絶対乾燥比重および吸水率の関係を対比して図示すると図一八のようになる。この図をみると、 b^* 値が8~13の範囲は、 C_L 級岩と C_M 級岩が重複している。これは、岩盤等級に対する肉眼判定には個人的な偏りか、あるいは、曖昧さをもつ結果であることを示している。

骨材としての適否の判定は、原石山から岩石を切り出す段階で実施するものであり、短時間に行うことが求められる。絶対乾燥比重や吸水率によって判定することが望ましいことではあるが、短時間での実施は困難である。一方、肉眼判定は短時間に実施することはできるが、判定が客観的とはいえない。

このことから、判定をできるだけ客観化し、かつ、迅速・簡便に行える手段として、色彩の測定は有効であることがわかる。

5 まとめ

以上、地質の異なる3つの地域の岩石について実施した色彩色差計による色測定の結果に基づいて、風化区分としての岩盤等級区分との関係、風化に伴う岩石の色の

変化と岩石内部の鉱物学的変化,そして吸水率,絶対乾燥比重との対応関係について考察した。また,このような考察結果に基づいて,ダム原石山骨材調査に色彩色差計による岩石の色測定を適用し,色の変化を指標にして骨材評価を行った。これらの結果を要約すると,つぎのとおりである。

- ① 岩石の色の変化と岩盤等級区分との間には,系統的な関係が認められる。これは,主として風化の程度を反映したものである。
- ② 風化に伴う岩石の黄褐色化は,主として,溶解により生じたマイクロクラックや空隙への鉄水酸化物の累積に起因する。また,マイクロクラックや空隙の増加は,岩石の吸水率や絶対乾燥比重に系統的な変化をもたらすものであり,岩石の色の変化と吸水率や絶対乾燥比重との間には,明瞭な関係が認められる。
- ③ 岩石の色の変化と物性値との関係を,ダム原石山骨材調査に適用し,色を指標として骨材評価を行った。この色を指標とした骨材評価基準は,当該の現場において実用に供されている。

以上のように,風化に伴う岩石の色の変化は系統的であり,数値化された色によって,風化の程度を表す精度で,客観的な指標とすることができる。したがって,色を指標とした風化区分が可能であり,物性値との関係が明らかになれば,岩盤や骨材の評価などの指標として,岩石の色を用いることが可能である。また,数値化された岩石の色は,調査の初期の段階における岩盤評価の客観的基準として,あるいは,僅かな種類の物性値に基づいて岩盤を評価する際の各物性値間の対比の精確な指標として,実用の意義は十分にあると考える。

参 考 文 献

- Burns, R. G. (1970): Mineralogical applications of crystal field theory, Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 1-224.
- Iliev, I. G. (1966): An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties, Proceedings of 1st congress of ISRM, pp. 109-114.
- 伊東徳二郎, 久次米旭, 新長修二 (1988): まさ土の分類と工学的性質, 風化残積土に関するシンポジウム発表論文集, pp. 95-100.
- 九里尚一, 阿部 司, 斉藤徳美 (1971): 花崗岩類の風化に関する研究 (I), 物理探鉱, 第24巻, 第1号, pp. 140-144.
- 三浦 清 (1973): 深成岩類の風化に関する研究, 応用地質, 第14巻, 第3号, pp. 1-16.
- ミノルタカメラ株式会社: 色を読む話—色彩管理は「感覚」から「知覚」へ—.
- 森本信男, 砂川一郎, 都城秋穂 (1975): 鉱物学, 岩波書店.
- Nagano, T. and Nakshima, S. (1989) Study of colors and degree of weathering of granitic rocks by visible diffuse reflectance spectroscopy, Geochemical Journal, Vol. 23, pp. 75-83.
- Nagano, T., Nakashima, S., Nakayama, S., Osada, K. and Senoo, M. (1994): Study on crystallization of goethite from amorphous iron hydroxides by colorimetry and visible infrared spectroscopy, Clay and Clay Minerals, Vol. 42, pp. 226-234.
- 中川善兵衛, 小坂丈子, 浦部和順, 山田久夫 (1972): 岩手県千厩地方における石英閃緑岩の風化について, 岩石鉱物鉱床学会誌, 第67巻, pp. 283-290.
- 中嶋 悟 (1994): 地球色変化—鉄とウランの地球化学—, 近未来社.
- Nakashima, S., Ohki, S. and Ochiai, S. (1989): Infrared microspectroscopy analysis of the chemical state and spatial distribution of species in minerals, Geochemical Journal, Vol. 23, pp. 57-64.
- Nakashima, S., Miyagi, I., Nakata, E., Sasaki, H., Nittono, S., Hirano, T., Sato, T. and Hayashi, H. (1992) Color measurement of some natural and synthetic minerals—1, Rep. Res. Inst. Natural Resources, Mining College, Akita Univ., No. 57, pp. 57-76.
- 日本規格協会 (1980): JISZ 8729, L* a* b* 表色系及びL* u* v* 表色系による物体色の表示法.
- 大田 登 (1993): 色彩工学, 東京電機大学出版局.
- 斉藤徳美, 阿部 司, 九里尚一 (1971): 花崗岩の風化に関する研究 (II), 物理探鉱, 第24巻, 第5号, pp. 10-15.
- 斉藤徳美, 阿部 司, 九里尚一 (1975): 火成岩の風化による空隙組織の変化と弾性波速度との関係, 物理探鉱, 第28巻, 第3号, pp. 11-21.
- 田中治雄 (1951): ダムの地質, 理工図書 (株).

Shield, J. A., Paul, E. A., St. Arnaud, R. J. and Head, W. K. (1968): Spectrophotometric measurement of soil color and its relationship to moisture and organic matter, *Canadian Journal of Soil Science*, Vol. 48, pp. 271-280.

武内俊昭, 吉村正義, 藤井勢之 (1994) : 岩石の色彩の数値化と地質工学への利用, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 527-532.

Torren, J., Schwertmann, U., Fechter, H. and Alferez, F. (1984): Quantitative relationship between soil colour and hematite content, *Soil Science*, Vlo. 136, pp. 354-358.

塚本 齊, 水谷伸次郎 (1988) : 風化粘土の生成と変遷, 応用地質, 第29巻, 第3号, pp. 25-35.

渡辺邦夫 (1979) : 花崗岩中に発達する maicro-crack 系の性状とその定量評価の二, 三の試み, 応用地質, 第20巻, pp. 12-22.

Wentworth, Jr. C. M. (1922): A scale of grade and class terms for clastic sediments, *Journal of Geology*, Vol. 30, pp. 377-392.

Winchell, A. N. and Winchell, H. (1951): Elements of optical mineralogy — An introduction to microscopic petrology 一, John Wiley and Sons, Inc, London.

山下伸太郎, 鈴木隆介 (1986) : 風化に伴う堆積岩の間隙径分布の変化とそれに伴う強度の低下, 地形, 第7巻, pp. 257-273.

