石英の波動消光の定量測定と変形度

Quantitative analysis of wavy extinction in
quartz and the degree of deformation

田 切 美 智 雄 (Michio TAGIRI)*
堀 江 典 子 (Noriko HORIE)*

Wavy extinction in quartz is a good indicator for the magnitude of deformation. The intensity of wavy extinction (IWE) in quartz was quantitatively measured using polarized optical microscope, digital camera and NIH Image. Quartz-grain showing a maximum interference color is appropriate for the measurement of IWE. A traverse for the measurement is set across the parts showing distinctive wavy extinction, where subgrain boundaries in deformed quartz generally intersect with the line. The brightness of each part showing wavy extinction is measured at the extinction position of a subgrain. A gradation of brightness is treated as 256 gradient in computer. IWE is defined by the formula, $IWE = \tan(\text{magnitude of brightness}/1000 \times \text{length of the line for measurement})$, where the length is scaled by millimeter. Based on this method, we can give an intensity of wavy extinction to deformed quartz grains, and it has been shown that the mylonitic and weakly mylonitized granitic body adjacent to the Tanakura shear zone in northeastern Japan can be divided into several zones of deformation intensity. This method can be applicable to many kinds of deformed minerals to describe the degree of deformation.

Keywords: Wavy extinction, Quartz, Deformation, Mylonite, NIH Image

I. 研究目的

石英は花崗岩類のミロナイト化に伴って動的再結晶により細粒化する。この再結晶石英粒径はこれまで塑性変形時の差応力を見積もるための応力計として利用されてきた(例えば, Twiss, 1977; White, 1979a, Etheridge and Wilkie, 1979)。石英粒径にもとづく方法は, ある応力レベルに相当する歪みエネルギーの導入と再結晶粒界形成によるエネルギーの増加との間に平衡状態が成立することを前提にしている。したがって, 再結晶粒径を差応力レベルの指標として利用する場合, 新しい応力に対応した粒径になるまでにかなりの歪量を必要とすることに注意すべきである(White, 1979a; Kohlstedt and Weathers, 1980; 相川・青山, 1983)。天然における複雑な変形および変成史を考えると, ある一つの変形ステージに対応する平衡再結晶粒径を推定するのは困難であり, さらに, 変形後のアニー

リングの際の粒成長により再結晶粒径は保存されにくいと考えられる。したがって粒径から求めた差応力について, 定量的な議論をすることは一般に困難である(White, 1979b)。

他方, 石英の波動消光は応力によって生じる歪みが原因と考えられており, 岩石変形の指標として利用することができる。Fig. 1 に示すように, 石英の波動消光とは, 結晶内すべりに起因する石英格子内の転位や, 転位が面上に配列することによって形成される亜粒子境界(subgrain boundary)の存在による。転位や亜粒子境界が変形結晶中には多数存在するため, 格子回転によって光学的方位が微小距離(nm オーダー)で連続的に変化するのである。波動消光の強さは転位や亜粒子境界の密度とその回転角に比例する。従って, 波動消光は歪量(変形の程度)を表していることになる。本研究では, 石英の偏光顕微鏡画像をフリーウェアソフトの NIH Image を用いて画像解析し(例えば, 沼原・

(平成 10 年 7 月 6 日受付, 平成 10 年 10 月 20 日受理)

* 茨城大学理学部地球生命環境科学科, 〒310-8512 水戸市文京 2-1-1

* Department of Environmental Sciences, Ibaraki University, Bunkyo 2-1-1, Mito 310-8512, Japan

Fig. 1. Schematic sketches of mechanism of wavy extinction and changes in crystallographic orientation of quartz. The figures (a) to (b) are quoted from Nicolas and Poirier (1976): (a) lattice curvature due to geometrically necessary dislocations, (b) kinking. Quartz of (a) and (b) shows wavy extinction. Figures (c) and (d) are microscopic sketches of deformed quartz in thin section. The arrows indicate the orientation of c -axis. Figure (c) shows a maximum grade of wavy extinction in a distance of (l), and (d) is for a given case. In the NIH Image, the brightness at the extinction position is counted as 255, and that at the diagonal position is 0. The intensity of wavy extinction is defined by the equation, $(255-\text{brightness})/\text{length}$.

小島, 1995; 高倉・土肥, 1996; Bjørnerud and Boyer, 1996), 石英の波動消光強度を定量化することに成功した。さらに, 波動消光強度を用いると個々の岩石の変形度を指標化することができる。波動消光強度を用いて阿武隈山地の花崗岩地帯の変形の強さが棚倉断層から離れるにつれて減少していく様子を変形分帯として示すことができた。

II. 試料採取地域の地質

棚倉断層系は, 茨城県常陸太田市から福島県東白川郡棚倉町にかけて北北西—南南東の方向で幅約 3 km の間隔で並走する 2 条の断層で構成され, 東縁断層と西縁断層の間が棚倉破碎帯と呼ばれている (大槻, 1975)。破碎帯内部には東方の阿武隈高原の変成岩や花崗岩のミロナイト, 西方の八溝山系の堆積岩のミロナイトが分布している (齊藤ら, 1992) (Fig. 2)。

解析試料は茨城県里美村北部から福島県矢祭町南部に分布する阿武隈帯花崗岩地域より採取した。この地域は棚倉破碎帯の東縁断層の東側, つまり狭義の棚倉破碎帯の外側に位置し, 田中・落合 (1988) がミロナイト質花崗閃緑岩と記載しているところである。里川ルートは断層にほぼ直交しており, 段階的な変形を解析するために断層近傍から, 石英が花崗岩の等粒状組織を示して変形をほとんど被っていないと確認できる地点までの 14 試料を採取した。採取露頭では面構造の走向および傾斜を測定し, 定方位試料とした。滝川ルートでは無定方位で試料を採取した。

今回採取した阿武隈花崗岩ミロナイトの各試料について, 葉片状構造に平行な面, 葉片状構造に直交しかつ粒子の伸長方向を示す線構造に平行な面, それらの面に直交する面の 3 方位で定方位薄片を作成した。変形の弱い花崗岩類については任意の方位で薄片を作成した。石英の波動消光は葉片状構造に平行な面では明瞭でないため, 後 2 者どちらかの方位の薄片を用いた。

露頭では, 棚倉東縁断層に近い地域では石英粒が引き伸ばされている様子が観察された。断層から離れるにしたがって粒子の引き伸ばされる様子が弱くなり, 最も離れた地点では石英の伸長が認められなかった。里川ルートの 1 と 8 地点ではシェアバンドと斜長石周囲の非対称圧力影から運動のセンスを判定でき, 露頭に戻した場合, 西盤は北北西から南南東の左横ずれセンスである。

III. 波動消光の強さの定量的測定

波動消光は, 石英には特に特徴的に見られる現象で,

Fig. 2. A simplified geologic map, sample localities and zonal mapping of the degree of deformation in the studied area.

歪みが強いほど強く現れる。この度合いを定量的に測定する事によって、変形度を見積もる。

測定は、NIH Image というフリーウェアの画像解析ソフトを用いておこなった。一定の明るさのもとで、試料ステージを回転させ、レターデーションが最大になる結晶を選ぶ。理想的には c 軸が薄片に平行で、XZ 面で波動消光が観察できる結晶が本解析には望ましい。このような結晶を選ぶことによって、対角位での最大光量を一定に保ち、c 軸方位の違いによる光量差を最小におさえることができる。c 軸が薄片に平行でない場合は Panozzo-Heilbronner and Paule (1993) が行ったように、方位による光量補正を行わなければならない。c 軸が薄片に平行で無い場合はレターデーションが最大でなくなるので、最大光量が小さく見積もられ、波動消光の強さは本来の強さより弱く観察されることになる。目的の石英粒子が最も波動を強く示

す位置（この時一部が消光位にある）で止め、デジタルカメラで撮影する。パソコンにグレースケールで画像を取り込むと、コンピュータはその画像の濃淡変化をピクセルの集まりで表示する。ここでは濃淡の度合いの範囲を一定にするため、256 段階の階調値で変換して数値化する。

NIH Image から画像を開く。画像上の測定したい部分を選び、光量変化が最大になる波動方向に測定ラインを引く。この方向は一般に顕微鏡の亜粒子境界に直交する。本地域のほとんどの試料で、この亜粒子境界は c 軸方向を向いている。パソコン画面上で、横軸方向は画面上の長さに、縦軸は濃度が 256 階調に数値化され、濃度変化がグラフ化される (Fig. 3)。なお、暗黒が 255、最大光量が 0 である。グラフには一粒子内での波動消光による連続的濃度変化と、キンクバンドによる不連続的濃度変化が示される。そこで連続して変

Fig. 3. Digital processing using NIH Image. The photograph (a) shows a wavy extinction in quartz and the white line indicates the position of profile-analysis. The lines in the graph (b) indicate the gradation of brightness by wavy extinction along the white line. The horizontal axis of the graph denotes a length of the measurement line in millimeter on the computer display.

化する部分を選び、濃度変化量の千分の一を実際の長さ (mm) (注意：画面上の長さでない) で割って、傾斜角を求める。これを波動消光強度と呼ぶ。ただし、光学的な像分解能から、幅 $5\mu\text{m}$ 以上連続して変化する場合を波動消光とした。幅 $5\mu\text{m}$ 以内で光量が不連続的に変化する場合が粒子およびキंक境界と仮定した。波動消光強度を一粒子から何個か測定し、同一薄片から多数測定するのが望ましい。

IV. 波動消光強度と変形指標

滝川ルートでの波動消光強度の頻度分布 (%) の変化を Fig. 4 に示す。図から明瞭のように、断層に近い試料 1 では波動消光強度は角度の大きいものが多く、断層から離れるにしたがって角度の大きいものの頻度が減少し、小さいものが増加する。試料 16 は滝川ルートの断層から最も離れた試料で、波動消光強度 $20\sim 40^\circ$ のものが多くなっている。里川ルートの 6 試料分を Fig. 5 に示す。試料 1 から 13 までは滝川ルートと比較して少し波動消光強度値が小さいが、変化の傾向は同じ様である。試料 15 は断層よりかなり離れた試料で、変形がほとんど認められないものである (Fig. 2 を参照)。

岩石の変形度を見積もるために、波動消光強度ヒストグラムから得られる波形を統計処理し、その岩石の変形度の指標として利用することを提案する。ヒストグラムのピーク値から分布数を積算して 25% になったところで分布幅を取り、その中間値をもってその岩石の変形度とする。データの集中度がよくピークが明瞭な時は、この値はピーク中央値と同じである。変形度を a から f の 6 段階に分け、変形度の指標とする (Table 1 and 2)。変形の指標に従うと、棚倉破碎帯外側で東方に位置する花崗岩地帯は 6 つに変形分帯することが可能である (Fig. 2)。この花崗岩地帯の変形度帯は構造線と平行ではないようである。

本研究では石英伸長のタイプの違いや方位の違いによる波動消光強度の変化も検討したが、報告は別の機会にするつもりである。

最後に、本方法は石英ばかりでなく、かんらん石などの波動消光強度も測定でき、花崗岩ミロナイト以外の多くの変形岩に応用が可能である。今後、波動消光強度と c 軸方位の変化量、波動消光強度と転位密度との関係、さらには歪み量の地質的分布の評価など解明すべき点は非常に多く、多くの研究が期待される。

謝 辞 本研究に際し、三菱マテリアル (株) 総合研究所の研究助成を受けた。ここに、厚く感謝いたします。さらに、高橋正樹、野口高明両氏には有益な助言をいただいた。また、査読者の一人には重要な御指摘を多数いただき、特に謝意を表します。本研究の一部は平成 10 年度地球惑星科学関連学会で報告した。その際コメントを下された多数の方々に感謝いたします。

Fig. 4. Frequency percent histogram of the intensity of wavy extinction for 5 samples from the Taki River route. Sample number is shown in the diagram, and see Fig. 2 for sample localities.

Fig. 5. Frequency percent histogram of the intensity of wavy extinction for 6 samples from the Sato River route. Sample number is shown in the diagram, and see Fig. 2 for sample localities.

Table 1. Intensity of wavy extinction

Sample	IWE	Sample	IWE
Sato-1	60	Taki-1	70
Sato-2	55	Taki-4	65
Sato-3	50	Taki-8	60
Sato-5	30	Taki-12	65
Sato-6	50	Taki-16	40
Sato-7	25		
Sato-8	30		
Sato-9	25		
Sato-10	20		
Sato-11	20		
Sato-12	15		
Sato-13	20		
Sato-14	10		
Sato-15	10		

IWE: Intensity of Wavy Extinction

Table 2. Degree of deformation

IWE	DD
70-90	f
55-65	e
40-50	d
25-35	c
15-20	b
0-10	a

DD: Degree of Deformation

引用文献

- 相川信之, 青山信宏 (1983), 中央構造線に近接する花崗岩類の変形. 鉱物雑, **16**, 特別号 1 号, 251-255.
- Bojórnerud, M.G. and Boyer, B. (1996), Image analysis in structural geology using *NIH Image*. In *Structural Geology and Personal Computers* (Declan G.D.P. Ed.), Pergamon, 105-121.
- Etherridge, M.A. and Wilkie, J.C. (1979), Grainsize reduction, grain boundary sliding and the flow strength of mylonites. *Tectonophys.*, **58**, 159-178.
- Kohelstedt, D.L. and Weathers, M.S. (1980), Deformation-induced microstructures, paleopiezometers, and differential stresses in deeply eroded fault zone. *J. Geophys. Res.*, **85**, 6269-6285.
- Nicolas, A. and Poirier, J.P. (1976), *Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks*. pp. 444, John Wiley & Sons.
- 沼原利彦, 小島清嗣 (1995), 医学・生物学のための画像解析ハンドブック実践 NIH Image 講座. pp. 156, 羊土社.
- 大槻憲四郎 (1975), 棚倉破砕帯の地質構造. 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, **76**, 1-71.
- Panozzo Heilbronner, R. and Pauli, C. (1993), Integrated spatial and orientation analysis of quartz c-axes by computer-aided microscopy. *J. Struct. Geol.*, **15**, 369-382.
- 斎藤登志雄, 高橋治之, 天野一男 (1992), 棚倉断層周辺新第三系地質図. 茨城大学理学部.
- 高倉公朋, 土肥健純 (1996), 外科手術のための NIH Image. pp. 135, 中山書店.
- 田中久雄, 落合清茂 (1988), 南部阿武隈山地, 埴深成岩体と周辺の変成岩類について. 岩鉱, **83**, 318-331.
- Twiss, R.J. (1977), Theory and applicability of a recrystallized grain size paleopiezometer. *Pure. Appl. Geophys.*, **115**, 227-244.
- White, S.H. (1979a), Grain and sub-grain size variations across a mylonite zone. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **70**, 193-202.
- White, S.H. (1979b), Difficulty associated with paleo-stress estimates. *Bull. Mineral.*, **102**, 210-215.