

石工の経験則と花崗岩の力学的性質

The empirical knowledge of quarryman and physical properties of granite

く 工	どう 藤	よう 洋	ぞう 三*	はし 橋	もと 本	けん 堅	いち 一**
さ 佐	の 野		おさむ 修***	なか 中	がわ 川	こう 浩	じ 二****

1. はじめに

岩石が石材として建築材や装飾材に使用され始めたのは、ピラミッドの例をとるまでもなく、人類史の始まりとほぼ時期を一にしているといえよう。今日、鋼やコンクリートなどの材料の進歩により、建設材料の主役としての地位を他に譲ってはいるものの、依然として石材としての岩石の需要は増え続けている。これは、岩石の持つ光沢や模様などが、人工の素材より優れているためであろう。

また、最近では岩盤内への構造物の建設や地震予知などとの関連で岩石が土木技術者の新しい関心を集めている。こうした学問的な関心とは別に、日々岩石と直接的な関わり合いをもって生活している人々がいる。「石に生き、石に老い、石に埋もれていく人々」(馬越道也著「北木島の石材史」) 石切場の石工職人はその代表的なものである。近年、外国産の安価な石材の輸入などに伴い、生産や販売を近代化しようとする傾向も顕著になってきているが、現在でもなお尺貫法による単位が使用されていることから明らかなように、石工の世界は、多分に職人的な雰囲気を残している。このため岩石との関わりにも独特なものがあり、経験則という形で独自の岩石観を形成している。これらの経験則の中には、明らかに科学的批判に耐え得ないものもあるが、検討に値する経験則も少なくない。このような経験則の一つに、いわゆる「石目」を識別する能力がある。

筆者らは、主に、花崗岩の異方性に関する研究のために、全国各地の花崗岩採石場を訪問し、岩石を採取して力学試験を行う一方で、訪問先で石工職人にインタビューし、石目に関する経験則を学んできた。ここでは、これらの成果の一端を紹介し、それと岩石の力学的性質との関係について述べる。

2. 石目の呼称

「土木用語辞典」(技報堂出版)によれば、石目とは「節理以外で、岩石の割れやすい方向。石切場で、採石に当たってはこの性質を利用して石塊を造る。」とあり、「地学辞典」(古今書院)では

「岩石中に存在する割れやすい特殊の方向をいう。石目に3種類あって、普通の石目は垂直および水平に近い諸面で、垂直で最も割れやすい面を俗に「一番」(rift)といい、一番に直角な他の垂直面を「二番」と称し、これらの2面に直角な水平の石目を「重(かさね)」という。一番、二番および重ねはそれぞれ縦断節理および水平節理の方向と一致することが多い。石目の方向および程度を察知することは採石上最も重要な事項で、石工は採石に際し石目を利用して硬質な岩石から石材を採取する。」とある。「土木用語辞典」および「地学辞典」両方に共通している解釈として、まず石目という用語が採石場で用いられる経験的な用語であるという点であり、更に「割れやすい方向」を意味するという点がある。しかしながら以上の説明には明らかに不十分な点や、誤りが含まれている。例えば、水平の石目を「重」と称するのは、一部の地域に限られており、瀬戸内地域の採石場では水平の石目を「一番」と呼ぶことが多い。また、石目を有する岩石の種類に

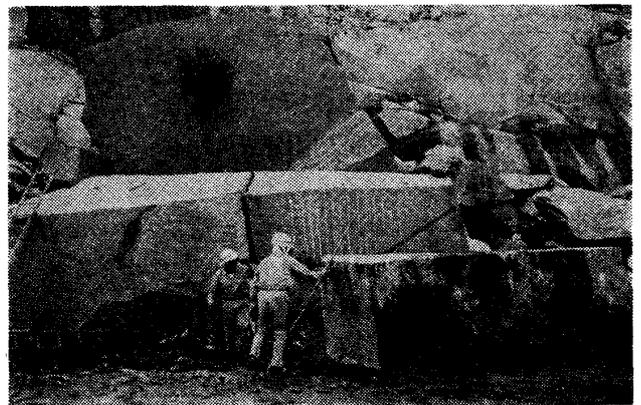


写真-1(a) 山口県徳山市の黒髪島花崗岩の採石場

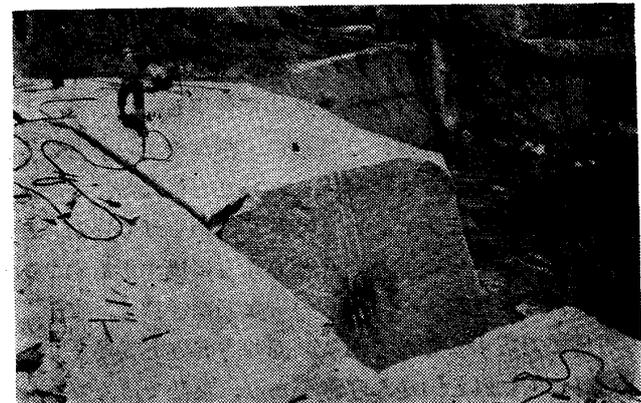


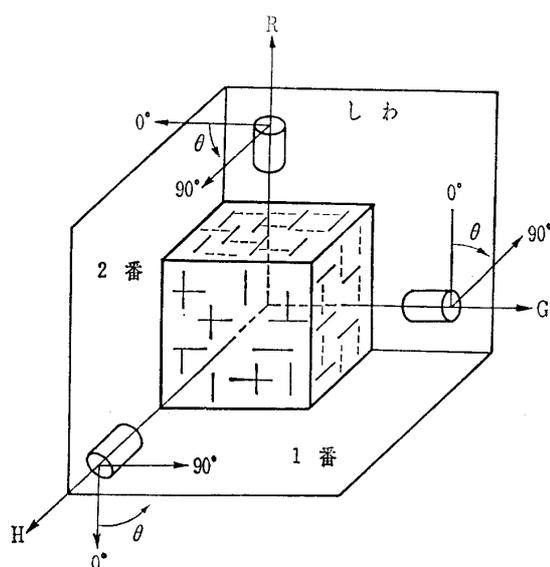
写真-1(b) 茨城県稲田の稲田花崗岩の採石場

*徳山工業高等専門学校助教授

**徳山工業高等専門学校助手

***山口大学助手 工学部

****山口大学教授 工学部



図—1 石目の模式図

表—1 各地の採石場での石目の呼称

No	銘柄名	産地	岩石名	石目の呼称		
				1	2	3
1	盛岡みかげ	岩手県盛岡市	角閃石黒雲母石英閃緑岩	一番	二番	おし
2	吾妻みかげ	福島県梁川町	黒雲母花崗閃緑岩	目	二番	三番
3	稲田みかげ	茨城県稲田	黒雲母花崗岩	目	二番	重ね
4	庵治石	香川県庵治町	黒雲母花崗岩	目	二番	重ね
5	北木石	岡山県笠岡市	黒雲母花崗閃緑岩	目	二番	しわ・むり
6	大島石	愛媛県宮窪町	角閃石黒雲母花崗閃緑岩	目	二番	しわ
7	議院石	広島県倉橋島	黒雲母花崗岩	一番	二番	こあ
8	徳山みかげ	山口県徳山市	黒雲母花崗閃緑岩	目	二番	しわ

(岩石名は小島丈児氏による)

関する記述も明らかではない。このことは、石目という用語が明確な定義を持つ学問的用語として必ずしも定着していないことと関連していると考えられる。

筆者らの調査によれば、石目は、一般に、一番割れやすい面が「一番」、あるいは単に「目」と呼ばれており、2番目に割れやすい面が「二番」または「二の目」と呼ばれることが多く、これらと直交する面については、さまざまな呼称がある。筆者らがこれまでに訪ねた採石場の中から石目の呼称について代表的なものを選び、銘柄名、岩石名などと併せて表—1に示す。この一番と二番に直交する面の呼称は、「しわ(しわい)」、「むり(無理)」など、一般に「割れにくい」という意味を込めて使用していることが多い。字句にこだわれば、これらは「割れやすい」という意味での石目の範ちゅうには入らないことになる。一方、一部の地域では「三番」という呼称が用いられている。これなどは「割れやすい」という範ちゅうに属するものであろう。また「かさね」や「すくい」などの呼称は、水平方向の石目に対応するものであり、面の方向性と関連している。

海外にもこれと同様な呼称があり、英語では、割れやすい順に、rift plane, grain plane, hardway plane あるいは

は headgrain plane という分類がある。この場合の hardway plane は日本語の「シワ」や「ムリ」に対応する用語であると考えられる。一方で、bedding plane, rift plane, hardway plane という分類もあり、この場合の bedding plane は、日本語の「すくい」に対応するものである。

「割れやすさ」というのは、強度異方性の経験的な概念であるが、岩石の強度異方性という言葉からまず思い浮かぶのは、堆積岩を特徴づける堆積面や、変成岩を特徴づける流理面である。こうした岩石に強度異方性が存在することはよく知られているが、これらに対して石目という表現が使われることは少ない。石目という用語で強度異方性が表現される岩石は、ほとんどが火成岩の範ちゅうに入る。なかでも、花崗岩、花崗閃緑岩が大半を占める。一部安山岩やはんれい岩の産地でも、採石の際に「目」が利用されている。

3. 石目の識別方法

機械化が進んだ現在においては、石材の採石、加工を機械に頼る傾向が顕著になっているが、作業のほとんどを人力に頼らざるえなかった時代においては、岩石の割れやすい面を見つけるという技能が貴重であったことは想像に難くない。

それでは、石工職人はどのようにして、この石目を識別するのだろうか。この方法には大きく分けて2通りの方法がある。一つは、石英内のクラックの方向から識別する方法であり、いま一つは、黒雲母や角閃石など特定の造岩鉱物の配列方向から識別するという方法である。前者の場合、石英内のクラックが「目」の方向に優先的に並んでいることを意味し、我が国の石切場においては、一般にこの方法が多く用いられている。後者の場合は、石目の方向と流理構造(flow structure)の方向が一致しているということの意味する。例えば、盛岡市の閃緑岩の採石場などではこの方法が用いられている。更に大島花崗岩(愛媛県)や香川県丸亀沖の青木石などにもこの傾向が見られる。しかしながら、石目の方向と流理面が斜交している地域もあり、このことは流理構造から石目の方向を判断するという方法が必ずしも一般性を持ち得ないということを示している。この点については後述する。

更に各地の採石場に共通しているのは、目の方向によって表面の手触りが異なるということである。すなわち、目肌(一番割れやすい面の表面)は、手触りが一番なめらかで、次に二番肌、シワ肌と続く。

一般に、石目を識別するためには、観察する面にある程度の面積を必要とする。すなわち、クラックから見る場合も、造岩鉱物の配向性から見る場合も、全体的な「流れ」が問題とされるため、観察面が広ければそれだけ石目の方向も正確に判断できる。強度異方性の大きな岩石では、石

英内のクラックが卓越しているため、経験を積みば専門家でなくとも識別することができるようになる。

更に石目の見分けやすさは時刻によっても異なり、観察面の陰影がはっきりする明け方や日没時のほうが石目の識別は容易である。日ごろ慣れ親しんでいる採石場の石目の方向性は、経験的に知り得ているために作業の進行も早い。例えば、一番の目は「陽が登り沈んでいく方向」（愛知県岡崎市）といった具合に代々語り継がれている採石場も少なくない。

4. 石目の力学的特性

石切場において、岩盤から節理や石目の方向を考慮しながら、目的とする岩塊をはく離させる作業を「大割」、または、はく離させる手段と関連して「大発破」などと呼ぶ。この作業には通常黒色火薬やジェットバーナーが使用される。また、はく離した岩塊を細かくして行く工程は、一般に「小割」と呼ばれる。これは、写真-2に示すように破断予定面に沿って、経験的に体得された間隔で複数の矢穴をせん孔し、その中にせり矢を配して打撃し、小塊にしていくというものである。

このように、石工による採石の過程を力学的に解明しようとする場合、大割から小割にいたる全過程を通じて、静力学的な破壊効果に加えて、発破やハンマー打撃など動的な効果を考慮しなければならないことは明らかである。しかしながら、例えば岩石の動的な強度を、石目の方向を考慮しながら明らかにすることは、極めて困難である。したがって以下では、主に石目の影響下での静力学的な挙動について述べる。

石目の影響下での岩石の挙動を力学的に記述しようとする場合、石目の存在に敏感な物理量を選択することが重要である。石切場において、石工が石英中のクラックを見て石目を判断するということから、クラックの存在に敏感な物理量が、石目の存在下での岩石の力学的挙動をうまく表現できると考えられる。そのような物理量として、ここではP波の伝播速度 (V_p) と引張り強度 (圧裂強度, σ_t) を

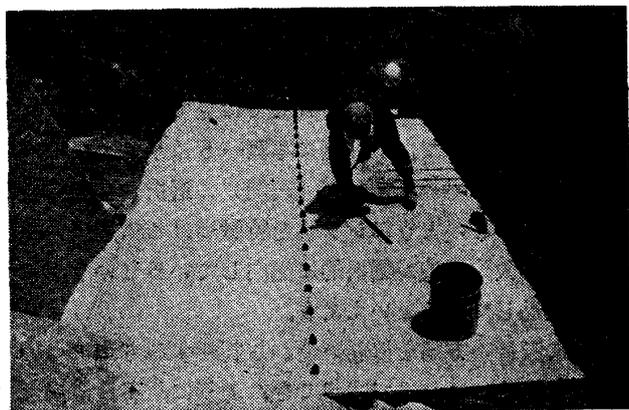


写真-2 セリ矢とハンマーを使用した小割作業

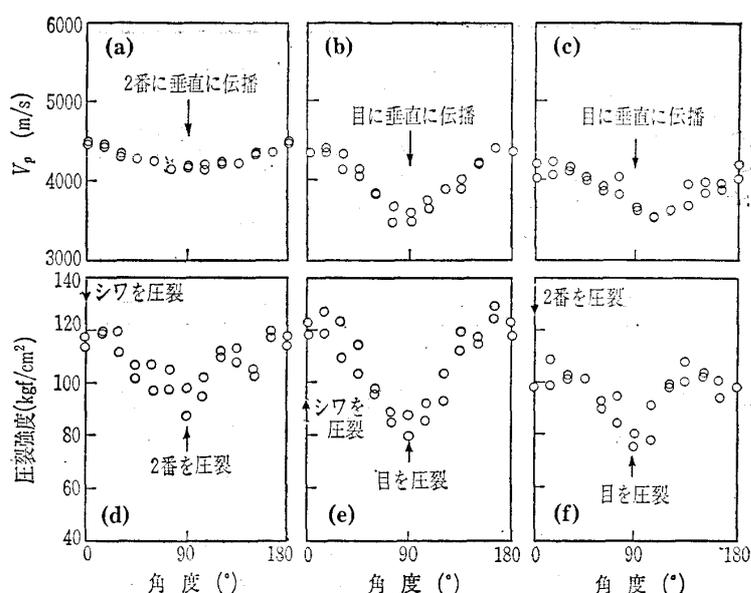


図-2 大島花崗岩内を伝播する縦波と圧裂強度

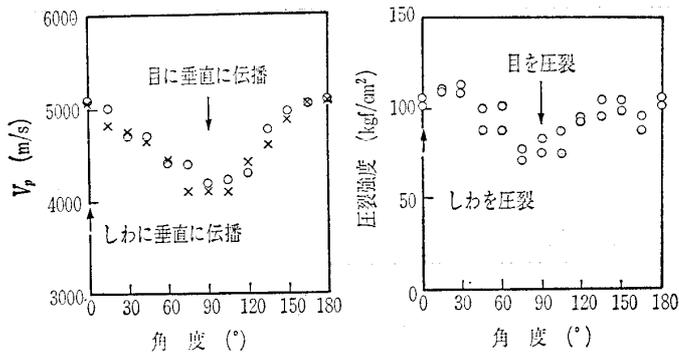
考える。 V_p はクラック（特に開口したクラック）の存在に敏感で、クラックのない状態（実際にはありえないが）で最高値を示し、クラック密度が増加するにつれて速度は一般に低下する。また、クラック先端の応力集中やクラック相互の干渉により、クラック密度の増加が強度低下の原因となることはよく知られている。

図-2に大島花崗岩（愛媛県越智郡余所国）の V_p および圧裂試験による引張り強度の測定例を示す。この岩石の採取地における「目」の方向はほぼ水平面に一致し、「二番」および「シワ」はほぼ鉛直面となっている。目の方向が、水平面および鉛直面にほぼ一致することは他の採石場でも同じである。図中の横軸の0°および90°は石工職人の判断した石目の方向を示している。

V_p の値は、「目」に垂直に進行する場合は最も小さく（約3500 m/s）、次いで「二番」（約4200 m/s）、「シワ」（約4400 m/s）となっている。このことは、「目」に沿う方向にクラックの密度が大きく、「シワ」の方向に少ないことを示唆している。引張り強度は、「目」の方向が最も小さく（約80 kgf/cm²）、次いで「二番」（約90 kgf/cm²）、「シワ」（約120 kgf/cm²）の順になっている。引張り強度のこの測定結果は、「目」が最も割れやすく、次いで「二番」で、「シワ」の方向は割れにくいという石工の経験則とよく一致している。

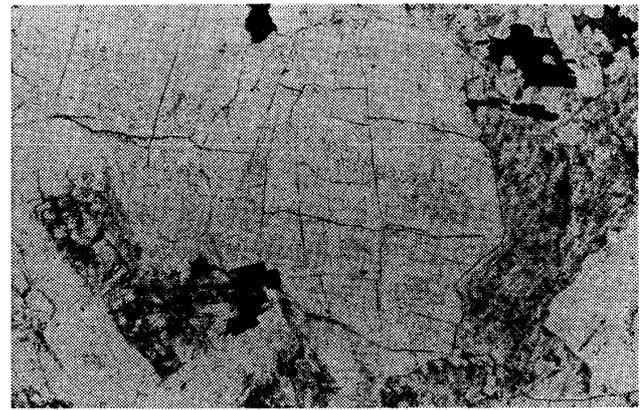
ここで図-2(f)によると、仮に60°の角度で圧裂した場合、圧裂強度は「二番」の方向より低い。このことは、「割れやすさ」という立場からすれば、この方向は「二番」の方向より割れやすいことになる。しかしながら、石目と異なる方向への破断を試みた場合、一般に石目の方向に沿うように破断面が「流れる」ため、破断形状が平面的にならない傾向がある。すなわち破断効果を、破断に必要な強度と破断面の形状の平面性という両面から考えた場合、「目」

資料—417



図—3(a) 黒髪島花崗岩の「二番」の面内の V_p の変動

図—3(b) 黒髪島花崗岩の圧裂強度 (端面が「二番」に平行)



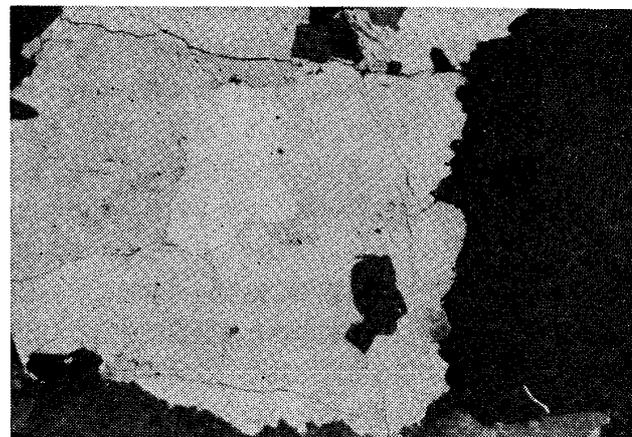
写真—3(a) 北木島花崗岩の偏光顕微鏡写真 (オープンニコル)。観察面は「シワ」の面で、長辺方向が「目」、短辺方向が「二番」、写真中央が石英。(左右端約 3.5 mm)

があらゆる方向で最も割れやすい方向であり、続いて「二番」が二番目に割れやすい面であるといえよう。換言すれば、これらの方向で圧裂強度は極小値をとることができる。実際に図—2の(a)~(f)のいずれの場合も、 0° および 90° で V_p および引張り強度は極値を示しており、石工の「目」を「読む」能力が極めて洗練されたものであることが示されている。

図—2は、石工の経験則からだけでは判断できなかった「シワ」の方向が割れにくい面かどうかという問題に対しても明確な解答を与えている。すなわち、引張り強度試験の結果から、強度の最大値は「シワ」に沿う面に近い面ではあるがわずかながら異なる方向に生じている。したがって、上に述べた破断形状と併せて考えた場合、「シワ」は、「最も割れにくい面」ではなく、「三番目に割れやすい面」と考えるのが妥当であろう。以上述べてきた傾向は大島花崗岩だけでなく、筆者らがこれまでに調べた花崗岩に共通した特徴である。図—3に、黒髪島花崗岩(山口県徳山市)の V_p と圧裂引張り強度の測定結果を示す。異方性の程度に差異があるものの、大島花崗岩についてこれまでに述べてきた結果に一般性が認められることは明らかであろう。

5. 偏光顕微鏡による石目の観察

このような力学的な試験からだけではなく、石目を直接に観察することも可能である。写真—3は、石目の方向を考慮して作製された倉橋島花崗岩、および北木島花崗岩(岡山県笠岡市)のシワ肌に関する薄片を偏光顕微鏡で観察したものである。写真の長辺方向が「目」に沿う方向であり、短辺方向が「二番」に沿う方向である。写真より、まず「目」に沿う石英内のクラック、および「二番」に沿う石英内のクラックが卓越していることが観察される。これらのクラックは石英内を貫いており、時として長石内に伸びることもある。これらの岩石に限らず、一般に、「目」に沿うクラックは「二番」に沿うクラックよりクラック長も長く密度も高い。このように、日本の花崗岩の「目」および「二番」を特徴づけるものは、多くの場合石英内のクラ



写真—3(b) 倉橋島花崗岩の偏光顕微鏡写真(クロスニコル)。観察面は「シワ」の面で、長辺方向が「目」、短辺方向が「二番」。(左右端約 3.5 mm)

ックであり、これらのクラックの選択的配向性と直交性が石目の直交性に対応しているものと考えられる。

これに対して「シワ」の構造は複雑である。黒髪島花崗岩の場合「シワ」を特徴づける構造は、シワ肌と平行に並んでいる「二番」より更に短く密度の低いクラックである。倉橋島花崗岩や大島花崗岩の場合は、写真—4に示すように、斜長石およびカリ長石内にシワ肌に沿う液粒面 (fluid inclusion plane) の選択的な配向性が認められる。これらの液粒面は、液体包有物が平面状に配列したものであり、かつて開口していたクラックが癒着した構造であると考えられている。したがって、これまでに見てきたクラックより更に古期のものである。更に写真—5に示すように、北木島花崗岩にはパーティング (裂開) の選択的な配向性が認められる。このようにシワ肌を特徴づける構造はいくつかあるが、欠陥構造が選択的に配向しているという点については共通しているといえよう。

最後に石目の方向を流理構造から判断する方法について付言しておく。これまで述べてきたように、石目の概念は外力を加えた場合の割れやすさと関連しており、力学的な

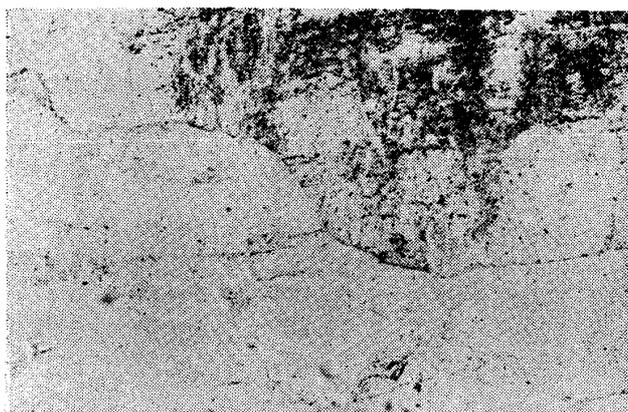


写真-4 大島花崗岩の偏光顕微鏡写真(オープンニコル)。観察面は「目」で、長辺方向が「二番」、短辺方向が「シワ」を示す。写真右上部の斜長石内に「シワ」に沿う液粒面が認められる。下部は石英。(左右端約1.7mm)

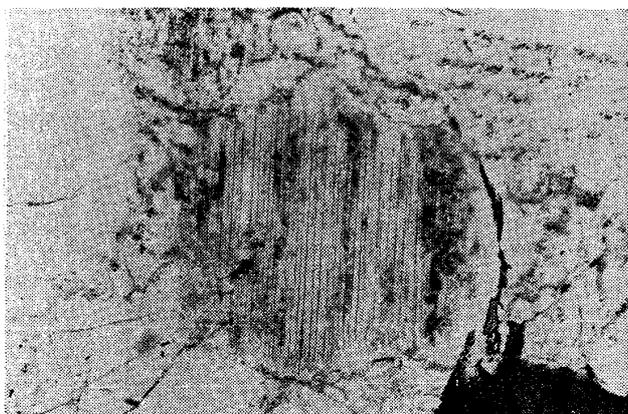


写真-5 北木島花崗岩の偏光顕微鏡写真(オープンニコル)。観察面は「目」で、長辺方向が「二番」、短辺方向が「シワ」を示す。写真中央のカリ長石内に「シワ」に沿うパーティングが認められる。(左右端約1.7mm)

概念である。これと造岩鉱物が優先的に配向しているということは直接には関連がないように考えられる。ここで写真-6に盛岡の石英閃緑岩の薄片の観察結果の一部を示す。写真から明らかなように、この岩石の「一番」の方向にはわずかながら石英内のクラックの選択的な配向が認められる。更に「二番」の方向には長石内に液粒面が卓越して存在している。すなわち、この岩石の場合、流理面と石目の方向はほぼ一致する。この一致が偶然であるかどうかは別として、石工職人は造岩鉱物の選択的な配向性を知ることによって、間接的に欠陥構造の方向を判断しているといえよう。

6. おわりに

以上述べてきたように、本稿では、花崗岩採石場などで採石の際に利用される石目をとりあげ、石工職人の石目を判別する能力が極めて洗練されたものであることを見て来た。更に弾性波速度や引張り強度、薄片の観察の結果から、

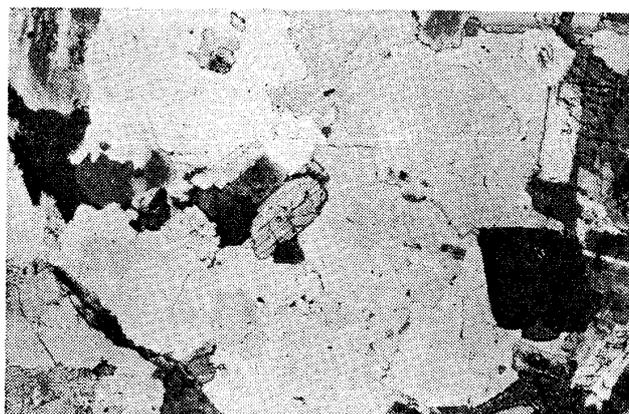


写真-6(a) 盛岡産石英閃緑岩の偏光顕微鏡写真(クロスニコル)。長辺方向が「目」、短辺方向が「二番」を示す。(左右端約3.5mm)

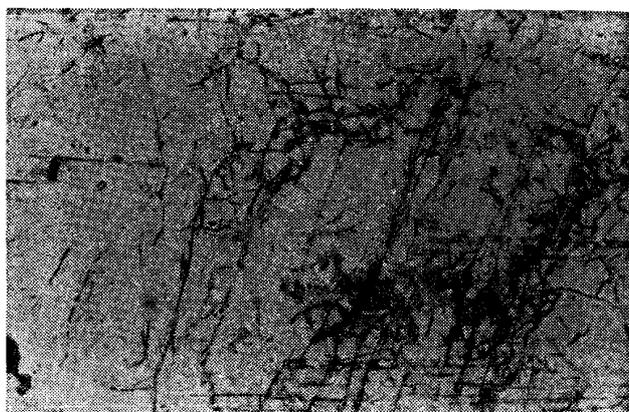


写真-6(b) 盛岡産石英閃緑岩の偏光顕微鏡写真(オープンニコル)。長辺方向が「目」、短辺方向が「二番」を示す。斜長石内で「二番」にほぼ平行な液粒面を示す。(左右端約1.7mm)

この石目を特徴づけるものが、クラックや液粒面など欠陥構造の選択的配向性であることを見て来た。

これらの石目がどのようにして形成されたかについては今のところ明らかではない。ただ筆者らは、工学的な立場から、これまで一番割れやすい「目」に注目して検討を進めてきたが、石目の起源を明らかにしようとする場合には「シワ」にも注目する必要があるだろう。このことは、シワ肌を決定している欠陥構造が、液粒面など主に古期のクラックであるという理由による。

石工職人の経験則は、石目に関してだけでなく、「キズ」(節理)や「行方(ゆきがた)」と呼ばれる構造など多岐にわたる。それらに対する考察は今後の課題としたい。

本稿をまとめるにあたり、瀬戸内地域を中心とする石工職人の方々には石目について多くのことをご教示いただいた。また、広島大学名誉教授小島丈兒先生には偏光顕微鏡の観察方法について懇切なご指導をいただいた。更に、徳山高専技官山本秀喜氏には実験と資料の整理で協力をお願いした。記して謝意を表す。

(原稿受理 1986.1.6)