

精密計測・超平面の創成に使われる精密石材の 湿潤環境下での微小変形メカニズムの解明

竹村貴人^{1*}・高橋学²・長田昌彦³・北村圭史⁴

¹ 日本大学 文理学部地球システム科学科 (〒156-8550 東京都世田谷区桜上水2-25-40)

² (独) 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 (〒305-8567 つくば市東1-1-1)

³ 埼玉大学 地圏科学研究センター (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

⁴ 株式会社関ヶ原製作所 (〒503-1593 岐阜県不破郡関ヶ原町2067)

*E-mail: takemura.takato@nihon-u.ac.jp

精密加工・計測に用いられるハンレイ岩で作られている石定盤のナノ・マイクロ領域の内部構造を定量的に示し、微小変形メカニズムを解明するため、産地の異なる3種類のハンレイ岩を使った湿潤環境下での変形試験を行った。その結果、ナノオーダーの微小間隙が多い石材ほど、変形量が多い事が明らかにされた。このことから、水の関与する石材(石定盤)の変形は、微小間隙内の液体架橋により発生する引張応力で収縮していた石材表面が水で濡らされることにより、液体架橋の消失と伴に上に凸の変形が生じるという仮説を示した。

Key Words : *Micro-deformation, Nano-pore, Meniscus, Precision stone*

1. はじめに

近年の精密工学の飛躍的な進歩に伴い、より高精度なレベルでの加工・計測の需要が産業技術分野で高まっている。従来から、このような加工・計測を行う際にその作業台(定盤)として石材が使われており、石定盤と呼ばれている。定盤に石材が使われる理由として金属製品に比べ、経年変化が微小、静電気の発生が微小、石自体に除振・防振機能が有、熱膨張率が金属に比べ小さく平面精度が安定、傷がついてもカエリ(へこみに相当する盛り上がり)が出ないなどの特徴があり、石材は高精度が求められる定盤やXYステージなどのマシンベースなどに利用されている(図-1)。特に近年、液晶サイズの大型化や液晶パネルの大量生産によるコスト圧縮に伴いガラス基板のサイズも大型化し、大型の作業台としての石定盤が求められている。例えば、液晶テレビの大型化に連動して必要となるパネルも大型化し続けている。更に、需要の高い大型液晶テレビに使われるパネルの1枚当たりのコストを低下させるため、ガラス基板1枚からより多くのパネル枚数を切り取れるようにすることで生産効率を上げる試みが行われている¹⁾。現在では、液晶パネルを取り出すガラス基板は第10世代であり、そのサイズは2880mm×3130mmと大型で、このガラス基板1枚から42型Wで15枚、65型Wで6枚の液晶パネルの切り出しが可能である²⁾。ここで、大型化するガラス基板からパネルを切り

出すということは、切り出されたパネルに必要な平面度をガラス基板も維持しなければならないことは明らかである。このようなガラス基板の製造には、その作業台として石定盤が使われており、そのサイズは、ただ単に大型化するのみならず、これまでと同様の高い平面精度の維持が求められている。これまで機械工学系の分野では、定盤の安定性や平面性の精度の検証³⁾が国内外を問わず多く行われているが、そのメカニズムまで追求しているものは少ない。ここで、石定盤の大型化により顕在化してきている問題のうち、特に石定盤の周辺環境の温湿度の変化により起こる微小変形が、平面度の不安定を引き起こすことがわかっている。この微小変形は変位量ではマイクロメートル領域であり、石材レベルでの歪み量はナノ・マイクロストレイン領域となる。また、このような領域の微小変形は、多くの場合、求められる精度の範囲内であるが、その精度は使われる石材の産地等で大きく異なる。

岩石・岩盤(石材)の変形挙動は、地質学、地盤力学や岩石力学では地震の発生やトンネルの変形などの大変形を研究対象としているため、このような微小歪み領域での石材の変形メカニズムに関する研究は、ほとんど行われてこなかった。本研究では、石定盤として主に使われるインタクトなハンレイ岩のナノ・マイクロ領域の内部構造を定量的に示し、微小歪み領域の変形挙動が石材ごとに異なる理由について明らかにすることを試みる。

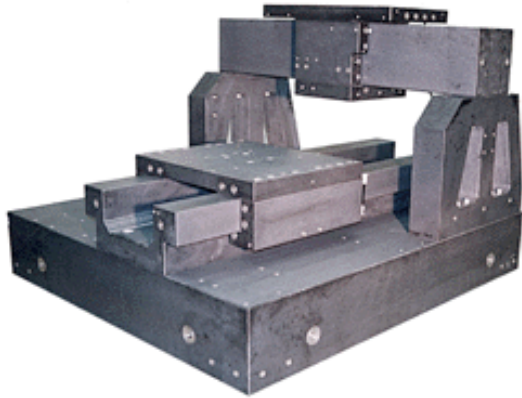


図-1 ハンレイ岩製の XY ステージ (上) および石定盤 (下)

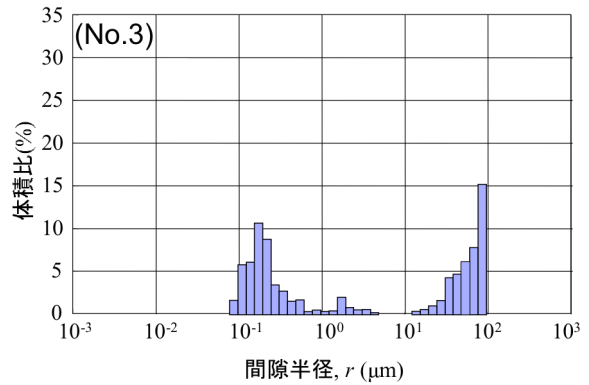
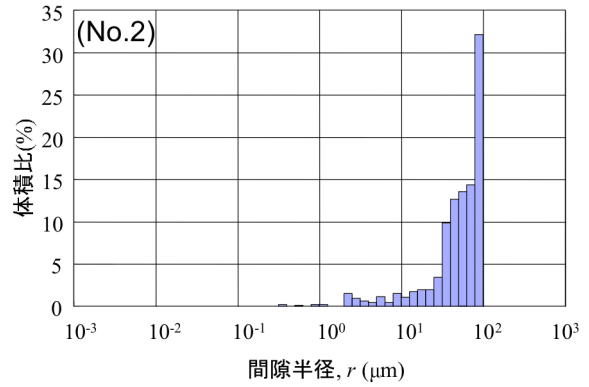


図-2 水銀圧入法による No2 と No3 の間隙半径分布

表-1 試料の基本物性

	No.1	No.2	No.3
密度(g/cm ³)	2.97	3.00	2.98
一軸圧縮強度(MPa)	335.3	251.4	229.9
ヤング率 E ₅₀ (GPa)	69.18	128.41	62.2
ヤング率 E ₁₀ (GPa)	18.62	29.98	17.50
ポアソン比 ν ₅₀	0.17	0.20	0.18
圧裂引張強度(MPa)	22.74	16.35	16.38
弾性波速度(km/s)	6.44	7.03	5.82
間隙率(%)	0.16	0.11	0.18
平均間隙径(μm)	43.75	49.02	23.85
平均間隙径の2次モーメント(μm ²)	14.12	11.16	3.04

2. 実験および結果

2.1 石材試料および基本物性

石定盤で使われる石材は熱膨張率が小さいハンレイ岩が主に使われている。岩石を構成する構成鉱物の熱膨張率は常温付近では、石英、角閃石、普通輝石、微斜長石、正長石、斜長石の順で小さくなるとされており、特に石英の熱膨張率は他のものと比べて2倍以上である⁴⁾。従って火成岩で、ある程度の強度があり、まとめて採掘できるという条件では深成岩が適切であり、さらに、熱膨張率の低い石材という条件で、石英の入っていないハンレイ岩が適切であるといえる。本研究では、産地の異なる3種類のハンレイ岩を用い、湿潤環境下での変形試験を行う。ここで、それぞれの試料の基本物性である一軸圧縮強度、密度、熱伝導率、ヤング率、ポアソン比、弾性波速度と間隙に関する情報を表-1にまとめた。それぞれの試料での基本物性での違いはあまりないといえよう。ここで、間隙に関する情報は間隙率及び間隙径分布であり、水銀圧入式ポロシメーターにて測定をした(図-2)。また、間隙径分布の平均間隙径は間隙径分布

$f(r)$ の n 次モーメント $\int f(r)r^n dr$ において $n=1$ とし、 $n=2$

とした時は間隙径分布の2次モーメントであり、値が小さなほど、小さな間隙が多いことを意味する。これらの基本物性から見た3つの石材には大きな違いは見られな

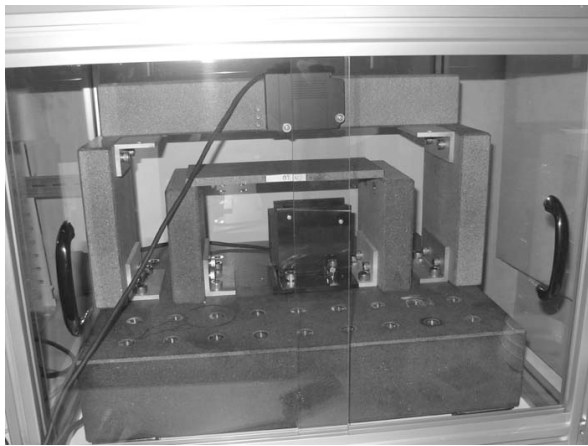


図-3 試験装置写真

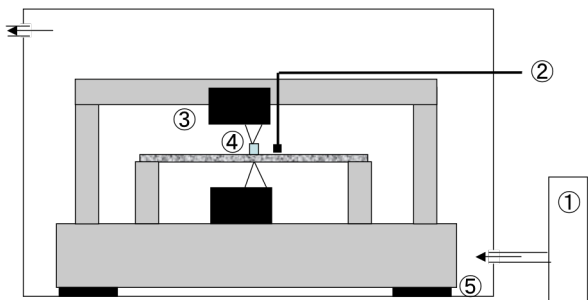


図-4 試験装置概要：①温湿度制御装置、②温湿度計測センサー、③レーザー変位計、④石英ガラス製測定ターゲット、⑤除振ゴム

かったが、間隙に関する情報から見ると、No.3の試料の間隙径分布の2次モーメントに大きな違いが見られた。

2.2 実験方法

これら3種類の石材が湿潤環境下におかれた時の変形挙動を計測するための実験を行った。実験に用いた供試体は250mm×100mm×10mmの板状試料であり、2点で支持した状態で上面の全面を20mlの水で濡らし、その過程における変位をレーザー変位計（分解能0.1μm）により計測した。試験装置を図-3、-4に示す。図-4の灰色部材は全て石材からできており、それぞれの結合部のL字部材は撥水コーティングされた低熱膨張素材であり、熱や湿度による装置全体の変形を最小となるような構成とした。また、装置内は温湿度制御装置（温度±0.5度以下、湿度±3%以下）により温度25度、湿度60%で制御した。

2.3 実験結果

3種類の石材の実験の結果を図-5に示す。ここで、供試体の上面を水で濡らした時を経過時間0としており、図中のマイナスの時間は装置および供試体の変動がないことを確認するための時間であり、変動幅は±0.3μm

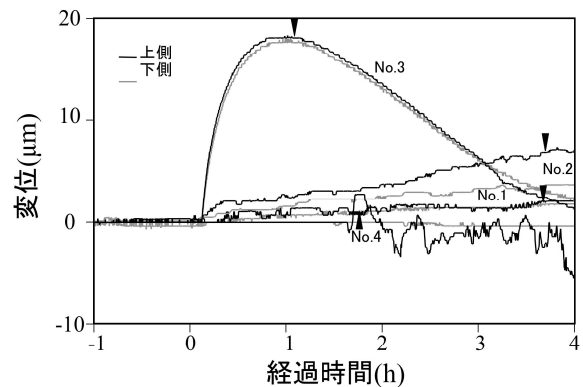


図-5 No.1-3の石材試料およびNo.4の真鍮試料の変形試験の結果。それぞれの試料の黒線は供試体上面、灰色は下面の変位を示す。図中の黒三角は供試体上面の水が蒸発し試料表面の一部が離水し始めた時間を示す。

以下であった。また、図中の黒三角は供試体上面の水が蒸発し試料表面の一部が離水し始めた時間を示している。実験の結果、供試体の上下面ともにほぼ同じ変位量の変形が起こり、No.1, 2は1-5μmの上に凸の変形、No.3では18μmの上に凸の変形が生じた。また、No.4の真鍮試料では、下面は全く変形しないが、水に濡れた上面は湿潤後2時間半経過した後に数μmの変形が生じた。供試体表面を水で濡らした場合に生じる変形の原因の一つとして、蒸発過程で起こる気化熱の発生による温度差が考えられるが、熱膨張の正負を考えると下に凸になるはずである。また、No.1から3のハンレイ岩試料では、変形が蒸発前に起こっていること、変形が上に凸であるため、湿潤環境下での石材変形には、気化熱による変形以外のなんらかの要因が寄与していると考えられる。一方で、No.4の真鍮試料では蒸発開始後に下に凸に変形しているため、表面の水の蒸発により発生した気化熱による温度変化によるものと考えられ、石材試料とは異なる要因であると言える。

3. 考察・まとめ

湿潤環境下に置かれたハンレイ岩の石材は、その種類により発生する変位量が異なることがわかった。その原因として考えられるものとして、ハンレイ岩の主要構成鉱物である角閃石や輝石などの変質より生じた粘土鉱物の膨潤が考えられる。しかしながら、これらのハンレイ岩試料からは、X線回折分析(XRD)の結果、膨潤性の粘土鉱物とされるスメクタイトは検出されていない事と、3つのハンレイ岩のXRDスペクトルがほぼ同じであることより特定の粘土鉱物の膨潤によるものではないと考えられる⁹⁾。もう一つの考えられる原因として、表面張力の影響による変形が挙げられる。表面張力の影響は、石材表面が水で濡れることによって、表面にある間隙内に形成され

た液体架橋（メニスカス）が消失することによるものと考えられる。ここで、試料表面を水で濡らす前の間隙内に存在する水はLaplaceの式に基づいた液体架橋を形成しており、間隙の壁面には液体架橋による引張応力が作用していると考えられる。ここで、試料内の間隙の壁面に作用している引張応力により生じる歪みは、以下のように記述することができる⁶⁾。

$$\varepsilon = \frac{2\gamma}{E_{10}r_w} \int_0^{r_w} \frac{dV(r)}{dr} dr \quad (1)$$

ここで、 γ は水の表面張力、 E_{10} は間隙部分の閉塞を反映しているヤング率、 $V(r)$ は間隙半径の分布関数、 r は間隙半径、 r_w は液体架橋の作用している間隙の半径である。ここで、間隙の壁面は濡れているものとし接触角は0度の理想状態としている。上式を用いて100nm以下および10nm以下の間隙にのみ液体架橋が形成されているとした場合、液体架橋により受け持たれている分の歪み量はNo.3試料の場合、それぞれ、 $1.03 \mu \varepsilon$ 、 $21.8 \mu \varepsilon$ となる。

ここで、実験による変形をたわみとし、両端支持の条件、供試体の断面形状を考え、変位量に変換すると、その変位量は試料上方向を正とした時、それぞれ、 $-1.07 \mu m$ 、 $-22.73 \mu m$ に相当する。この変位量は液体架橋により発生するものであるため、表面が水に濡れることで液体架橋の消失に伴い、変位量は0になり、相対的に上に凸の変形が生じると考えられる。表面を水で濡らした時に発生する変位量は、どのサイズの間隙が初期状態で液体架橋を形成しているかに依存していることから、間隙径の分布と初期状態での相対湿度が重要となってくる。

4. おわりに

本研究では、石定盤として主に使われるハンレイ岩のナノ・マイクロ領域の内部構造を定量的に示し、微小歪み領域の変形挙動が産地ごとに異なる理由について明らかにすることを試みた。その結果、水の関与した変形は

ナノ領域の間隙が多いハンレイ岩ほど、変形量が大きいたことが明らかにされた。水の関与する変形のメカニズムとして、石材試料中にあるナノ領域の間隙内の液体架橋が石材表面を水で濡らすことにより消失し引張応力が開放されることで上に凸の変形が生じるという仮説を示した。しかしながら、水銀圧入法で測定した間隙分布が代表体積要素として扱える量であるかという点や、初期相対湿度の液体架橋への影響などの問題が残っており、今後の課題としたい。また、本研究で扱った石定盤の微小変形は超精密加工を行う際に使われるベースの平面度をどの湿度状態で規定するのかという問題と、いかに変形量の小さな石材を探すかという問題であり、今後、より精密な条件での実験的研究を行う必要があると考えられる。

謝辞：本研究の一部は平成21年度日本大学文理学部自然科学研究所共同研究助成を受けて実施したものであり、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡邊克己, 福地昭, 大内昌雄, 川田徹：半導体製造装置・薄型ディスプレイ製造装置用基盤ホルダーの製造方法開発, 軽金属, Vol. 58(3), pp. 117-122, 2008.
- 2) テクノアソシエーツ：LCD パネル・メーカーの事業戦略研究 2008, p398, 日経BP社, 2008
- 3) 谷泰弘, 甲木賢太郎, 佐藤壽芳, 上村康幸：レーザ光を基準とした石定盤の光学式真直度測定法の開発, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 61(592), pp. 4805-4810, 1995.
- 4) Y. Fei *Thermal expansion* In: T.J. Ahrens, Editor, AGU Reference Shelf 2: Mineral Physics and Crystallography—A Handbook of Physical Constants, pp. 29–44., AGU, Washington, 1995.
- 5) 竹村貴人, 長田昌彦, 高橋学, 金丸龍夫, 北村圭史：精密石材としての斑レイ岩の岩石学的特徴と湿润環境下で発生する微小変形の発現機構, 応用地質, 投稿中
- 6) 下村匠, 福留和人, 前川宏一：微視的機構モデルによるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析 No.514/V-27, pp.41-53, 1995.

MIRO-DEFORMATION MECHANISM UNDER WET CONDITION OF PRECISION STONE USED FOR PRECISION MEASUREMENT AND PRECISION SURFACE CREATION

Takato TAKEMURA, Manabu TAKAHASHI, Masahiko OSADA, Keiji KITAMURA

Nano- and Micro-pore of the precision stone, which made by gabblo and is used for precision measurement and machining, was evaluated, and we carried out deformation test under wet condition using three different sample in order to clarify the micro-deformation mechanism. As a result, the displacement caused by water is strogly related to nano-pore. It is suggest that the micro-deformation caused by water will be taken place by release of the shrinkage stress, which is tesil stress associated with the meniscus, aroud the pore associated.