

## 砥石の透過率改善に関する研究

磯部佳成\*

Study on the Improvement on the Permeability of Grinding Stone  
Yoshinari Isobe

本研究は多孔体の一つである砥石の透過率を改善するため、透過率に直接影響すると考えられる加工液やガス、ミスト等の流路となる多孔体を形成する気孔の連通に着目し、気孔の大きさ、配合割合等を変数として気孔の連通性を調べた。その結果、①一連通路の面積を大きくすること、②複数の気孔径の組合せをすることで多孔体の透過率を数倍改善できることが見出された。

## 1. 緒言

作業環境改善やCO<sub>2</sub>削減できる環境低負荷のミスト研削加工を実現するため、ミスト研削技術を提案するとともに合わせてミストが砥石内を通して供給できる従来砥石と比較して透過率の高い連通気孔型砥石<sup>1)</sup>を開発した。

本研究は開発した連通気孔型砥石の透過率を改善するため、最初に透過率に直接影響すると考えられる加工液やガス、ミストの流路となる気孔の連通に着目し、気孔材の大きさ、配合割合等を変数として気孔の連通性について解析した。次に解析結果をもとに多孔体を試作し、透過率を測定・評価した。

## 2. 解析

多孔体の任意断面である2次元平面を解析モデルとして、多孔体構造を形成する気孔の大きさ、割合等を変数としたパーコレーション理論<sup>2)</sup>を用いた数値解析をおこなった。

## 2・1 パーコレーション理論

パーコレーション(percolation: 浸透)理論は、例として図1に示す5×5の正方格子においてマス目(サイト)またはつなぎめ(ボンド)上に任意の確率で○を置き、クラスターをつくるモデルのことである。本研究ではサイトパーコレーションを採用した。対象とする格子に区切られたマス目に○を任意に置くとする。○を置いたマス目において、その上下左右隣り合ったマス目に注目し連続した○のあるマス目のつながりを見出す。この塊をクラスター(cluster)という。このとき青点線で示す○が格子上辺から格子下辺まで○でつながる場合を連通したとする。

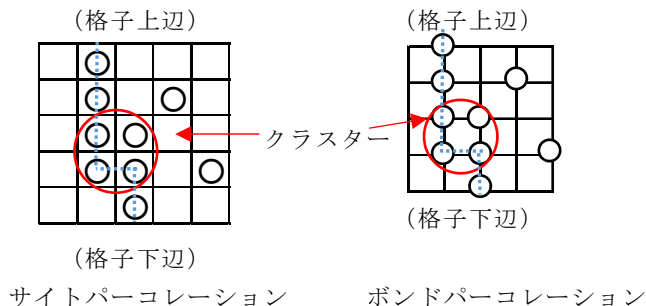


図1 パーコレーション

## 2・2 気孔の解析

パーコレーション理論を用いた気孔解析をマイクロソフト社製Excel上で駆動するマクロプログラム(Visual Basic for Application)によるシミュレーションで実施した。気孔をランダムに平面配置して砥石の多孔体を2次元モデル化した。本研究で気孔形状は配向性のない円を採用した。本解析は図2に示す二種類の円を検査面積内に不規則に配置した。検査面積の上辺から下辺に連通する気孔の連通率(式(1))および連通面積率(式(2))を求めた。

$$\text{連通率} = \frac{\text{連通した回数}}{\text{計算した回数}} \quad (1)$$

$$\text{連通面積率} = \frac{\Sigma(\text{連通した面積})/\text{連通した回数}}{\text{検査面積}} \quad (2)$$

作成したプログラムは、2次元、400マス×400マス四方内に気孔をクラスターで表現し、2種類の気孔(例えば直径比5:1を直径40マスのクラスター:直径8マスのクラスターと設定)をランダム配置させた。上辺から下辺まで気孔が連通する確率(連通率)を求める上で気孔率を一定として、気孔径の組合せ、各気孔の配合率を変化させた。ここで気孔率は気孔の総面積を検査面積で割った値となる。また図3に示すように作成したプログラムの乱数の発生についても検証した。1から100の間の数を乱数で20000回発生させた。ここで平均値になる発生数200のライン上と乱数グラフが一致することを確認した。次に図4に10000回までおこなった連通率プログラムの計算回数と計算結果の変化を示す。

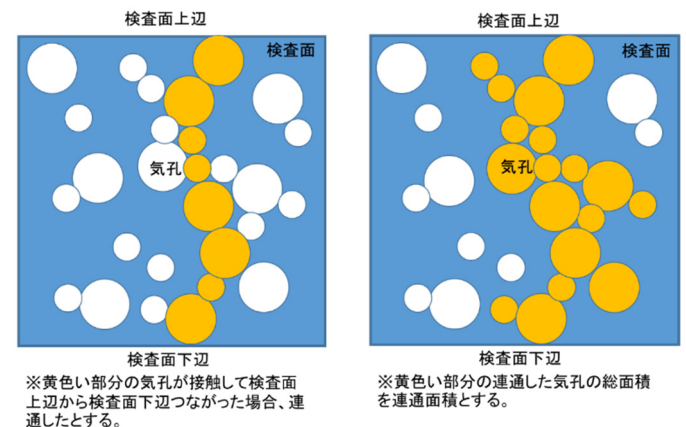


図2 気孔の連通と連通面積について

\* 企業支援部加工技術グループ

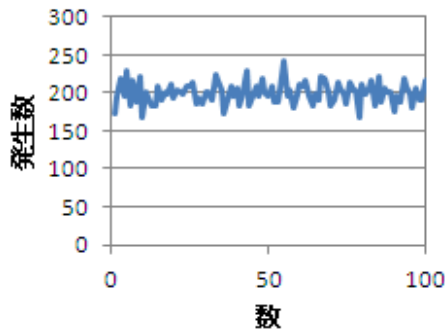


図3 乱数発生の確認

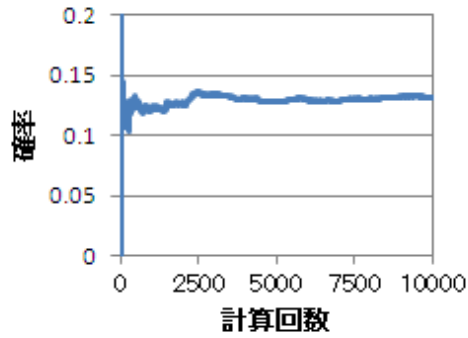


図4 計算回数と計算結果の変化

計算回数が2500以上で計算結果が収束していることが確認された。これより連通率の計算回数を3000回とした。

2・3 解析結果

図5に気孔解析例および図6に気孔解析の結果を示す。本解析は、多孔体で最大気孔率となる気孔率70%，多孔体で設定できる気孔径比6:1～1.25:1の組合せ、基準となる径比1の気孔の配合率を0%から100%の範囲で連通面積率と連通率の変化を調べた。

図6(a)の連通面積率の結果から1.25:1以上の組合せで配合率0.2以下(径1の割合)で連通面積率が配合率1での値よりも増加していることがわかる。また、図6(b)の連通率の結果からは、1.25:1の組合せにおいて配合率0.5付近で連通率が配合率1での値よりも増加していることがわかる。これらの結果から気孔径比1.25:1，気孔径比5:1の2つの組合せについて連通面積率および連通率の観点から透過率改善が見込まれる。

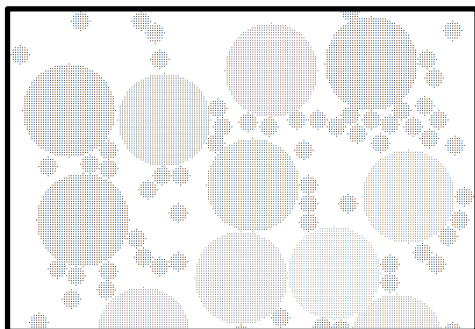
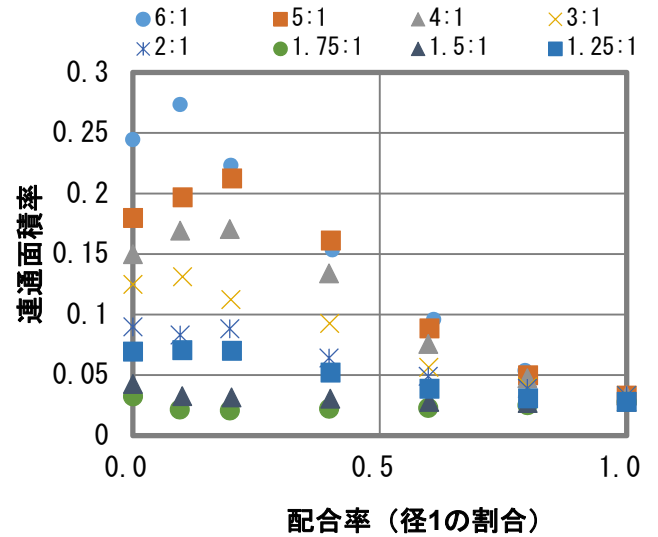
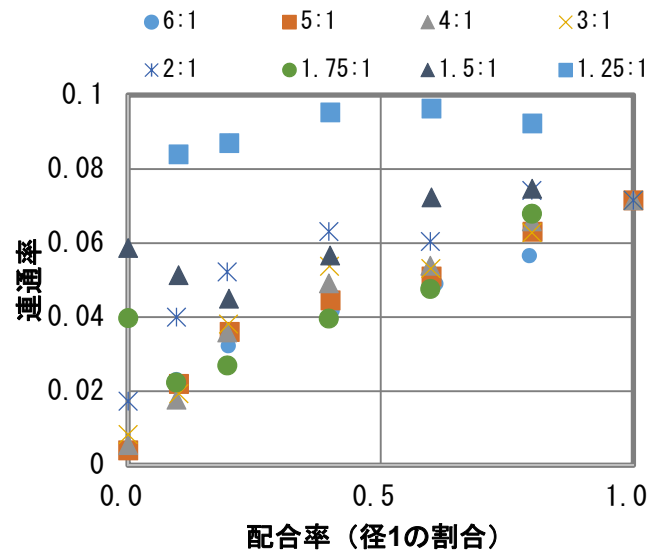


図5 気孔解析例(検査面の一部、気孔径比5:1)



(a) 気孔の連通面積率と配合率の関係



(b) 気孔の連通率と配合率の関係

図6 気孔解析の結果

3. 多孔体による解析の確認

3・1 多孔体の試作

解析結果の有効性を確認するため解析と同条件の多孔体を試作した。多孔体は、骨材に珪酸カルシウム、結合材に水ガラス、気孔材にプラスチック玉を採用した。ここで気孔材の形状は球である。表1の多孔体の原料配分に示す配分で骨材、結合材、気孔材を混練し外径φ50[mm]、厚さ15[mm]の円盤を型押しで成形した。乾燥後1000℃で焼成することでプラスチック玉がガス化、水ガラスが固化し多孔体が形成される。試験体一種につき3つ計30個試作した。多孔体の気孔率は、電子比重計(ALFA MIRAGE社製EW-300SG)を用いて、各1つをアルキメデス法により算出した。測定結果を表2に示す。また、焼成後透過率測定のため中央部に内径10[mm]の穴を設けた。

表1 多孔体の原料配分

試験体	気孔組合せ	割合	骨材[g]		気孔材[g]			
			珪酸Ca	水ガラス	φ1プラ玉	φ1.5プラ玉	φ2プラ玉	φ5プラ玉
①	φ1	100%	85	15	30			
②	φ5	100%	85	15				30
③	φ1、φ5	10%、90%	85	15	3			27
④	φ1、φ5	30%、70%	85	15	9			21
⑤	φ1、φ5	50%、50%	85	15	15			15
⑥	φ1.5	100%	85	15		30		
⑦	φ2	100%	85	15			30	
⑧	φ1.5、φ2	10%、90%	85	15		3	27	
⑨	φ1.5、φ2	30%、70%	85	15		9	21	
⑩	φ1.5、φ2	50%、50%	85	15		15	15	

表2 試作した多孔体の気孔率

試験体	気孔率[%]
①	68.0
②	69.2
③	67.6
④	65.4
⑤	69.1
⑥	67.7
⑦	68.4
⑧	68.7
⑨	67.5
⑩	68.8

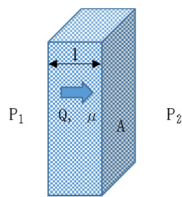
3・2 多孔体の透過率<sup>3)</sup>

多孔体の透過率は、式(3)の Darcy 則を基として本実験に即した円筒座標系に展開された式(4)で算定した。

$$\frac{Q}{A} = k \frac{\Delta P}{\mu l} \quad (3)$$

ここで

- A [m<sup>2</sup>] : 断面積
- k [m<sup>2</sup>] : 透過率
- Q [L/s] : 流量
- l [m] : 多孔体幅
- ΔP [Pa] : 圧力差 (ΔP=P<sub>1</sub>-P<sub>2</sub>)
- μ [Pa・s] : 流体の粘性係数



$$k = \frac{Q}{2\pi b \Delta P} \mu \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) \quad (4)$$

ここで

- k [m<sup>2</sup>] : 透過率
- d<sub>o</sub> [m] : 多孔体外径
- d<sub>i</sub> [m] : 多孔体内径
- Q [L/s] : 流量
- b [m] : 多孔体幅
- ΔP [Pa] : 圧力差
- μ [Pa・s] : 流体の粘性係数

式(4)の ΔP は、図7に示す測定装置で中央に内径を持つ円筒形の多孔体の大気圧と多孔体内径内の差圧計測で求めた。

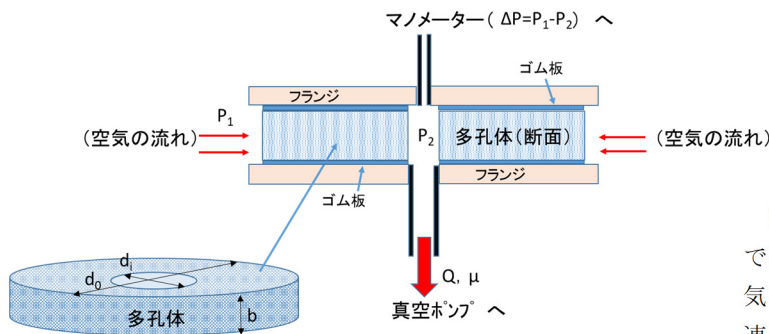
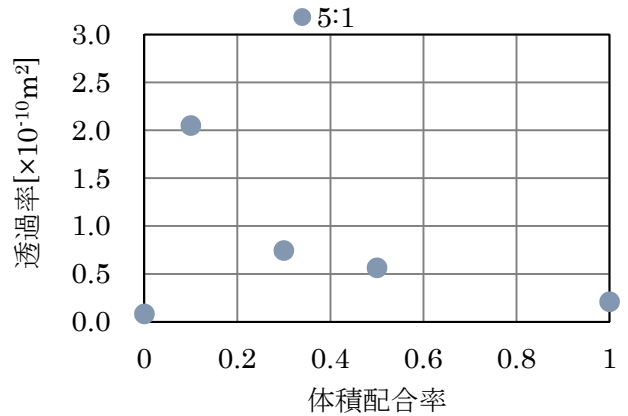
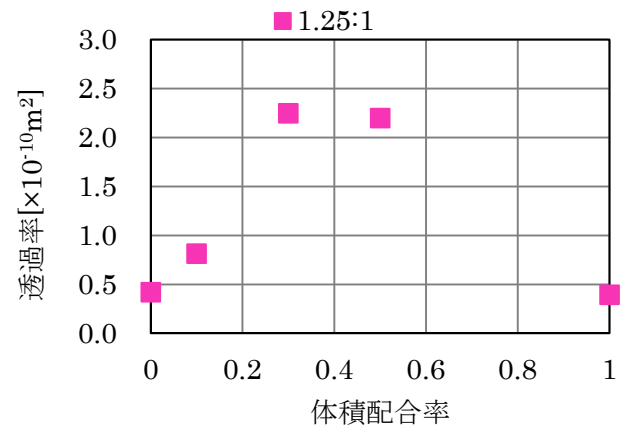


図7 透過率測装置概要



(a) 気孔径比 5:1 の透過率



(b) 気孔径比 1.25:1 の透過率

図8 透過率測定結果

試作した多孔体の透過率の測定結果を図8に示す。ここで透過率は、流量 0.01~0.1L/s の範囲である。測定結果の気孔径比 5:1 のグラフ曲線は、解析結果の気孔径比 5:1 の連通面積率のグラフ形状と近似していると考えられる。また、測定結果の気孔径比 1.25:1 のグラフ曲線は、解析結果の気孔径比 1.25:1 の連通率のグラフ形状と近似していると考えられる。これらから多孔体の透過率は、流入面から流出面までの流路となる連続接続する気孔の発生割合(連通率)が大きいほど改善される。また連続接続する気孔の連通する面積が大きいほど透過率が改善できると考えられ、単一気孔径の多孔体の数倍の透過率改善が見込まれる。

4. 多孔体の機械的強度

透過率は、一般的に多孔体の気孔率が大きいほど大きくなる傾向がある。しかし、気孔率は、それが大きくなるほど多孔体内の空間が大きくなることを意味し、必然的に多

孔体の機械的強度が小さくなる。万能材料試験機(島津製作所製 UH-1000KNI)を用いて、本研究の多孔体の構造を適用した研削砥石から切り出された試験片 30 mm×30mm×100mm を荷重速度 1mm/min で圧縮試験をおこない、気孔率と機械的強度の関係を調べた。図 9(a)に測定結果を示す。気孔率が増加するとともに線形的に圧縮応力も減少することがわかる。

図 9(b)に同砥石の透過率と気孔率の関係を示す。1.25:1の測定値に着目すると気孔率 67%から 70%超の範囲で透過率が同値であることが見られる。これらから本研究の多孔体構造を採用することで同透過率であっても 3%程度気孔率を下げられ、機械的強度の向上できることが推察される。

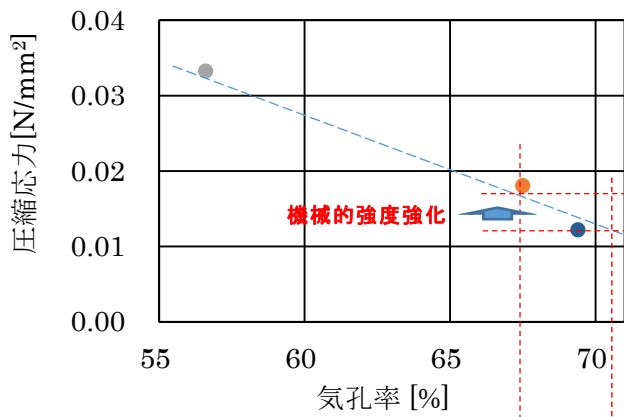
5. 結 言

これまでの解析、測定実験から以下の結果が得られた。

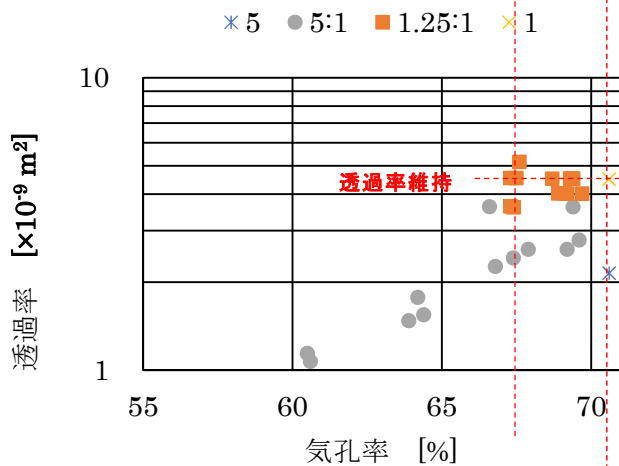
- (1) パーコレーションを応用した解析から気孔径比1.25:1、気孔径比5:1の2つの組合せをした多孔体は、単一気孔の多孔体の数倍の透過率改善が見込まれる。
- (2) 解析と同条件で試作した多孔体の透過率は、流入面から流出面までの流路となる連続接続する気孔の発生割合(連通率)が大きいほど改善される。また連続接続する気孔の連通する面積が大きいほど、透過率が改善されると考えられる。
- (3) 本研究の多孔体の構造を適用した研削砥石から切り出された試験片の圧縮試験結果から、本研究の多孔体構造を採用することで同透過率であっても気孔率を 3%程度下げられ、機械的強度の向上できることが推察された。

参考文献

- 1) 磯部ら：研削加工時における水ミスト冷却が被加工物に及ぼす効果に関する研究(ミスト冷却用超多孔性砥石の評価)，砥粒加工学会，ABTEC2006，p. 259-264 (2006)
- 2) 佐々木聡ら：よみがえれ！科学者魂，丸善，p. 7 (2009)
- 3) 斉藤ら：砥石車の透過率と周辺の流れの挙動，Vol. 44，No. 12，精密機械，p. 1501-1507 (1978)



(a) 砥石の圧縮応力と気孔率の関係



(b) 砥石の透過率と気孔率の関係

図 9 砥石の圧縮応力および透過率と気孔率の関係