

岩石の破碎過程における粉塵量の制御について

CONTROLS OF DUST GENERATION DURING ROCK CRUSHING PROCESS

今井忠男*, 馬場将行**, 木崎彰久***, 杉本文男****

by Tadao IMAI, Masayuki BABA, Akihisa KIZAKI and Fumio SUGIMOTO

1. はじめに

岩石の破碎・粉碎工程においては、多量の粉塵が発生し、現場ではこれを抑制することが求められている。しかしながら、現状では、岩石の破碎・粉碎特性が未解明なため、根本的な粉塵発生の制御法は考案されておらず、集塵や散水などの対処療法的な対策しかとられていない。

このような現状において、岩石の破碎・粉碎工程における微破碎物(粉塵)までの粒度分布の特徴について、破碎エネルギーとの関係で定式化することができれば、粉塵等の微粒子の生成を抑制した効率的な岩石の破碎・粉碎設計が可能となる。

著者らは、以前の研究¹⁾から、岩石破碎物の粒度分布について独自の式を提案し、粒度分布の特徴はこの式から得られるフラクタル次元で示すことができることを明らかにしてきた。さらに、前報²⁾においては、インパクトクラッシャによる岩石の破碎エネルギーと破碎物のフラクタル次元との関係を明らかにすると共に、フラクタル次元は破碎比によって決まることを示した。これらの結果を要するに、岩石の破碎条件として、クラッシャの破碎比と破碎エネルギーが決まれば、理論的に破碎物の粒度分布が推定でき、さらに粉塵となる微粒子の生成量が算定できるようになった。

本研究では、前報の研究成果を踏まえ、岩石の破碎過程における微粒子の発生量と、その微粒子が粉塵として空間に飛散する量との関係を明らかにすることを目的とし、破碎工程における粉塵測定を行った。具体的には、岩石試料をインパクトクラッシャを用いて破碎・粉碎し、このとき発生する粉塵濃度を粒径ごとに測定し、破碎過程で発生する粉塵総量と破碎物の粒度分布との関係を解明した。

以上の研究から、インパクトクラッシャによって生成される微粒子量と粉塵量とを、必要最小限に抑制する破碎条件の解明が期待される。

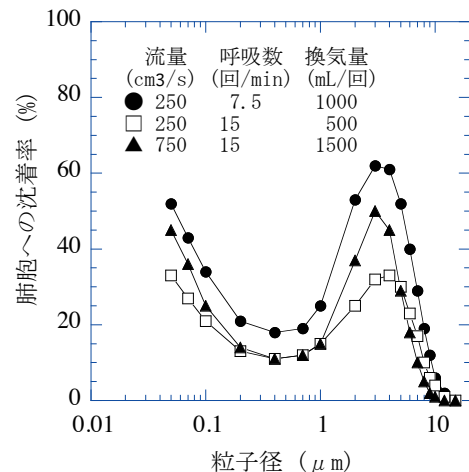


図1 粒子の粒径と肺への沈着率との関係³⁾

2. 岩石破碎物の粒度特性と粉塵の有害性

結晶質シリカを含む粉塵は、珪肺症のリスクが高く、肺がんの危険性も指摘されている。図1は、人間が粉塵を吸入した場合、粉塵径(相対沈降径)による肺胞での吸着率の変化を示している³⁾。図より、肺胞では、粒径が約3-4 μmの粉塵の沈着率が最も高く、それ以上では粒径が大きくなるにしたがい沈着率は低下し、10 μmでは、ほぼ0となっている。なお、作業環境測定基準では、肺に有害性のある粉塵径(吸入性粉塵)を、7.07 μm以下と定義している⁴⁾。また、結晶質シリカを100%とする吸入性粉塵について、厚生労働省では、管理濃度を0.05mg/m³としており、極めて低濃度な粉塵環境を要求している⁴⁾。現在、粉塵濃度の抑制は、散水および集塵によって、経験的に管理しているが、粉塵の総発生量を抑制しなければ、根本的な環境リスクを低減できない。

3. 岩石破碎物の粒度分布式と粉塵量の算定方法

3.1 破碎物の粒度分布式

著者等は、破碎物の粒径 ϕ の累積質量分布 $R(\phi)$ は、そのフラクタル性を利用して、次式で表すことが可能であることを報告してきた¹⁾。

$$R(\phi) = 1 - \frac{C_F}{(3/D - 1)W_{max}} \phi^{3-D} \quad \dots (1)$$

* 秋田大学大学院 教授 国際資源学研究科 (〒010-0852 秋田市手形学園町1-1)、 ** 元秋田大学大学院生、*** 秋田大学 准教授、**** 秋田大学名誉教授

ただし、 D はフラクタル次元、 C_F は近似係数、 $W_{\max}$ は試料の全質量である。上式において、 $R(\phi)=0$ となるときの粒径を粒子の最大径 $\phi_{\max}$ とすると、上式は粒径比 $(\phi/\phi_{\max})$ を用いて表すことが可能となり、次式のように簡略化され、 D と $\phi_{\max}$ との関数となる。

$$R(\phi) = 1 - (\phi/\phi_{\max})^{3-D} \quad \dots (2)$$

測定した粒度分布値に対し、上式を近似させることで、 D 値を求めることができる。なお、 $\phi_{\max}$ は、粒度分布の測定値から算定する。また、破砕物の平均粒径 ϕ_{50} は、上式に $R(\phi_{50})=0.5$ の条件を代入し、次式で表される。

$$\phi_{50} = 0.5^{1/(3-D)} \cdot \phi_{\max} \quad \dots (3)$$

前報では、平均粒径 ϕ_{50} と破砕前の岩石の初期粒径 ϕ_0 とによって決まる破砕比 (ϕ_{50}/ϕ_0) と D 値との関係について、図2のように岩種ごとに明らかにした。同様に、スクリーン径 ϕ_s と最大径 $\phi_{\max}$ との関係も明らかとした。これら岩石破砕の基礎データを用いることで、破砕条件となる破砕比 (ϕ_{50}/ϕ_0) を決めると、(2)式より破砕物の粒度分布を求めることが可能となった。逆に、破砕比をコントロールすることで、粒度分布を変化させ、微粒子の生成を抑制することが予測される。

なお、最大径 $\phi_{\max}$ は破砕比と負の相関があり、次式の範囲となることも明らかとした。

$$0.4\phi_s < \phi_{\max} < 0.8\phi_s \quad \dots (4)$$

とくに、破砕比が十分小さい場合は、岩種に関わらず、 $\phi_{\max}=0.8\phi_s$ と仮定でき、粒度分布式(2)をより単純化して用いることが可能である。

3.2 微粒子の生成割合と浮遊する粉塵の発生率

ある粒度分布における ϕ_a 以下の微粒子の割合 $R(\phi_a)$

は、式(2)と(3)より、 ϕ_{50} を用いて次式で求めることができる。

$$R(\phi_a) = 0.5(\phi_a/\phi_{50})^{3-D} \quad \dots (5)$$

上式から、必要な平均粒度 ϕ_{50} の破砕物を生産したとき、有害な粉塵となる $\phi_a=7\mu\text{m}$ 以下の微粒子の生成割合を推定することができる。よって、微粒子の生成割合 $R(\phi_a)$ は、フラクタル次元 D と平均粒径 ϕ_{50} とで決まると考えられる。本研究では、この $R(\phi_a)$ に対し、実際に粉塵となって浮遊した粉塵発生割合 R_{md} を測定し、両者の関係から粉塵発生率 R_R を次式で推定した。

$$R_R = R_{\text{md}} / R(\phi_a) \quad \dots (6)$$

本実験では、この粉塵発生率 R_R を求め、破砕条件と粉塵発生との関係を明らかにする。

3.3 粉塵の捕集濃度による粉塵割合の算定法

ここでは、体積 V の密閉空間における総粉塵量 m_{d0} を粉塵濃度 C_d から推定し、粉塵発生割合 R_{md} を算定法する手法について検討する。

ある密閉空間 $V(\text{m}^3)$ において、一定流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ で、時間 $t_d(\text{s})$ の間に粉塵を捕集し、その質量 $m_d(\text{mg})$ を測定したときの粉塵濃度 $C_d(\text{mg}/\text{m}^3)$ は、次式で表すことができる。

$$C_d = m_d / (Q \cdot t_d) \quad \dots (7)$$

また、粉塵粒子が密閉空間内に一様に拡散していると仮定すると、粉塵濃度 C_d から、空間内の総粉塵量 m_{d0} は次式で推定できる。

$$m_{\text{d0}} = C_d V \quad \dots (8)$$

さらに、この総粉塵量 m_{d0} が、質量 $W_{\max}(\text{mg})$ の岩石を破砕する過程で発生したものと仮定すると、発生した粉塵発生割合 $R_{\text{md}}(\%)$ は次式で求めることができる。

$$R_{\text{md}} = C_d V / W_{\max} \cdot 100 \quad \dots (9)$$

このように、密閉空間で岩石を破砕し、そこに発生する粉塵濃度を測定することで、破砕過程における粉塵発生割合 R_{md} を算定することが可能となる。

4. 研究方法

4.1 試料岩石

表1に、本実験に用いた石灰岩および安山岩の基礎物性値を示す。本試料は、それぞれ骨材として

表1 岩石試料の基礎物性値

岩 種	産 地	圧縮強度(MPa)	絶乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)
石灰岩	東京都	71	2.68	0.37
安山岩	秋田県	98	2.45	3.13

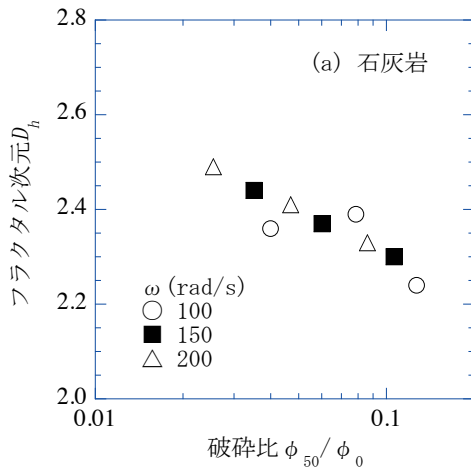


図2 インパクトクラッシャによる破砕比とフラクタル次元との関係²⁾

使用されているものである。なお、この安山岩は、吸水率が3%以上のため、主に路盤材に用いられることが多い。また、破碎実験にあたっては、それぞれの岩石試料を、あらかじめ粗破碎して、初期粒径 $\phi_0=30\pm 5\text{mm}$ 、初期質量 $W_{\text{max}}=20\sim 80\text{g}$ の大きさに揃え、含水条件を自然状態として用いた。

4.2 インパクトクラッシャによる破碎実験

本実験で用いたインパクトクラッシャ(三庄インダストリー製、NH-34)の詳細については、前報を参照されたい。なお本機の仕様は、ハンマ質量 $M=0.342\text{kg}$ 、最大回転数3,450rpmであり、ハンマは、コントローラによって任意の角速度 $\omega(\text{rad/s})$ に調整可能である。また、排出される試料の最大粒径 ϕ_{max} は、スクリーン径 ϕ_s を調整することで制御できる。なお、インパクトクラッシャの破碎エネルギー E_h の算定法についても前報を参照されたい。

破碎実験では、クラッシャ内のハンマの角速度 ω を、100、150、200rad/sの3段階に変化させ、投入試料が全て排出されるまで破碎した。また、クラッシャの破碎室内には、スクリーン径 ϕ_s が3、6、12mmの3種類のメッシュスクリーンを設置した。

破碎実験後の破碎物は、粒度分布を測定し粒度分布式(2)で近似して、粒度分布の特徴を示すフラクタル次元 D を求めた。

4.3 粉塵濃度の測定方法

図3に粉塵捕集システムを示す。体積 $V=0.237\text{m}^3$ の密閉空間内には、インパクトクラッシャとアンダーセン型の粉塵サンプラ(東京ダイレック製、MCP-16.7-1025)を設置し、粉塵サンプリング用の吸引ポンプは、密閉空間の外に設置した。

はじめにクラッシャで試料を破碎し、その直後に破碎室の上蓋を開け、粉塵が密閉空間に浮遊し

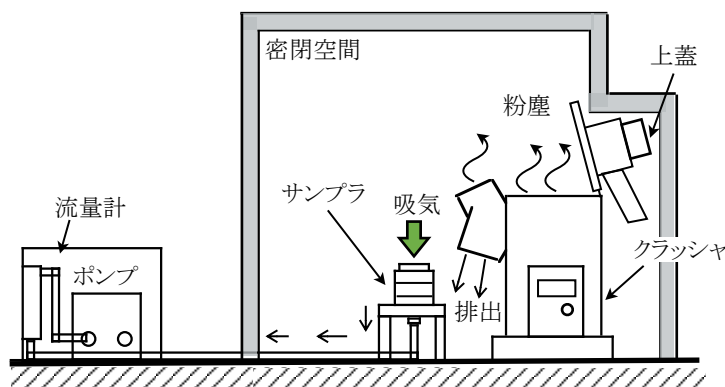
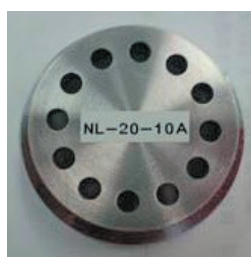
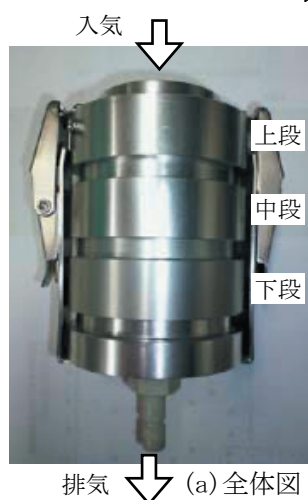
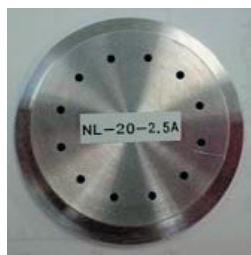


図3 粉塵捕集システム



(b) 上-中段間の入気孔



(c) 中-下段間の入気孔

図4 アンダーセンサンプラの概要

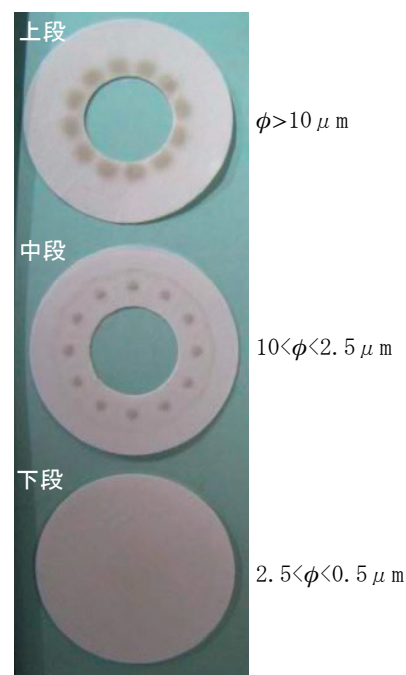


図5 粉塵捕集後の各段のフィルタ

た状態で、粉塵濃度を測定した。このとき、ポンプの流量を667mL/sとし、30s間吸引した。この時のサンプル量は全体の約10%である。この吸引した空気量と集塵した粉塵の質量 m_d から、粉塵濃度 C_d を式(7)で算定した。さらに、粉塵質量 m_d から粉塵発生割合 R_{md} (%)を式(9)で算定した。

本測定で用いたアンダーセン型サンプラを図4に示す。サンプラ上部から吸引された周辺空気は、サンプラ内に設置された入気孔によって、流入速度が調整される。入気孔から空気と共に速度を増して流入した粉塵のうち、粒子径が大きく慣性力が高い粒子は、衝突板上のフィルタに捕集され、粒子径が小さく慣性力の小さい粒子は、衝突板中央の孔から空気とともに排出される。ここで、段階的に入気孔の径を調節することによって、入気孔径に応じた粒子が衝突板に捕集され、粉塵を分粒して捕集するこ

とができる。

本実験で用いたサンプラの中には、図5に示すように上・中・下段に、3段階の集塵フィルタが設置してあり、粉塵は粒径別に分粒して捕集できる。このサンプラの分粒性能は、上段、中段および下段について、それぞれ相対沈降径が $10\mu\text{m}$ 以上、 $10\sim 2.5\mu\text{m}$ および $2.5\sim 0.5\mu\text{m}$ の範囲である。これら補修用フィルタの集塵前後の質量差を計測し、粉塵濃度 C_d を求めた。

5. 実験結果および考察

5.1 粉塵濃度の測定結果

(1) 粒径による粉塵濃度の違い

図6(1)~(3)は、粉塵サンプラの各段の衝突板で捕集された粉塵(安山岩)の顕微鏡写真を示している。サンプラの仕様は相対沈降径での粒子径(密度

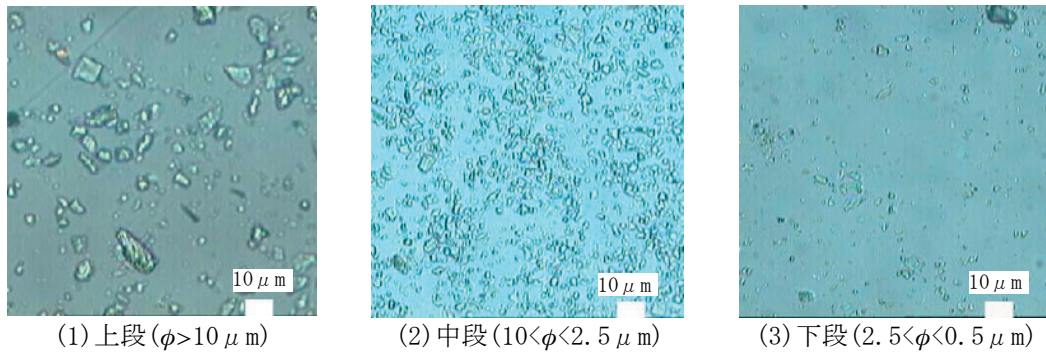


図6 サンプラの各段の捕集粒子(安山岩)

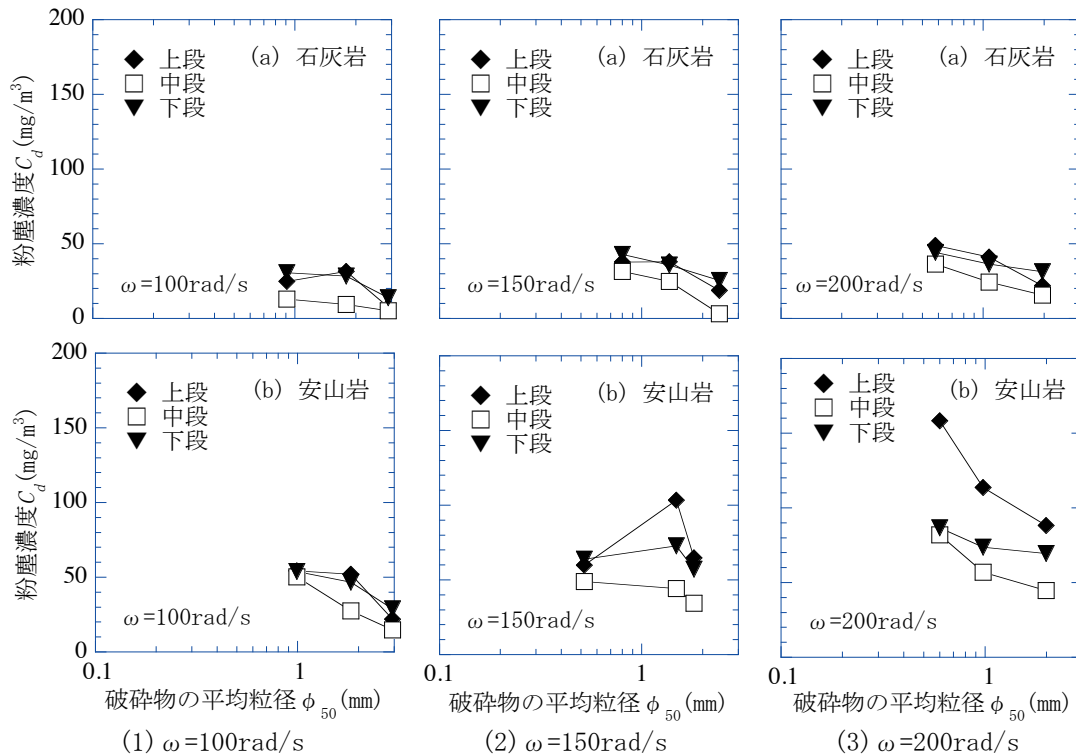


図7 平均破砕粒径 ϕ_{50} と粉塵濃度 C_d との関係 ($\phi_0 = 30 \pm 5\text{mm}$)

$1\text{g}/\text{cm}^3$)を示しているため、岩石の密度 $2.45\text{g}/\text{cm}^3$ を考慮し、粉塵の幾何学径を相対沈降径の約1/2と仮定すると、顕微鏡写真の粒子径は、およそサンプラの仕様どおりに分粒されていると考えられる。

(2) 粉塵濃度への影響因子

図7(1)~(3)は、クラッシャの角速度 ω ごとの粉塵濃度 C_d について、破碎物の平均粒径 ϕ_{50} との関係を示したものである。図7(2)(b)の上段データを除き、他の図では、破碎物の平均粒径が小さくなるに従い、粉塵の粒径に関わらず、粉塵濃度が増加する傾向にあることがわかる。なお、本サンプラの上段フィルタのデータには、径の大きい粒子の混入で誤差が大きくなる場合がある。この実験では、投入試料の初期粒径 ϕ_0 が一定($30\pm 5\text{mm}$)なため、平均粒径 ϕ_{50} が小さくなると、破碎比が小さくなっていることを示している。すなわち、破碎比を小さく設定すると、岩石はより細かく破碎され、粉塵が増加することがわかった。また、全ての測定結果において、有害粉塵($10\mu\text{m}$ 以下)の濃度は中段より下段が高いことから、 $2.5\mu\text{m}$ 以下の粒子が浮遊しやすいことがわかった。以前の研究において⁵⁾、圧縮強度が大きい岩石ほど、衝撃破碎において発生する微粒子の平均径が小さいことが分かっていることから、石灰岩より強度の高い安山岩の方が粉塵濃度が高くなることもわかった。

また、岩種に関わらず角速度 ω が大きく衝撃エネルギーが高くなると、粉塵濃度が増加する傾向にあり、とくに安山岩では、角速度 ω の影響が大きく、 100rad/s に比較し 200rad/s の粉塵濃度は、2~3倍に増加していることがわかる。これに対し、石灰岩における角速度 ω の影響は小さい。このことから、硬い安山岩は、破碎しにくいため、衝撃破碎エネルギーを大きくすると、より細かく破碎し粉塵量も増加す

ると考えられる。

5.2 粉塵の発生割合の算定

(1) 粉塵発生割合と平均粒径の関係

サンプラの中段と下段の粉塵濃度を加算した総粉塵濃度(粒径 $0.5\sim 10\mu\text{m}$)から、式(9)を用いて粉塵発生割合 $R_{md}(\%)$ を求めた。その結果について、図8に粉塵発生割合 R_{md} と破碎物の平均粒径 ϕ_{50} との関係として示す。図より、破碎物の平均粒径 ϕ_{50} が小さくなると、粉塵発生割合 R_{md} は増加する傾向にあるが、クラッシャの角速度 ω の影響は少ないことがわかる。また、 R_{md} は、石灰岩では $0.05\sim 0.2\%$ 、安山岩では $0.1\sim 0.3\%$ の範囲にあり、同じ平均粒径に破碎した場合、硬い安山岩の方が約2倍程度、粉塵が発生しやすいことがわかる。

(2) 粉塵発生率の算定

次に、図8より粉塵発生率 R_R を算定する。ここで、粉塵サンプラで捕集される粉塵の相対沈降径が $10\mu\text{m}$ 以下であることから、岩石の密度を考慮し、粉塵の幾何学径をその1/2の $5\mu\text{m}$ と仮定し、粒度分布式(5)による $5\mu\text{m}$ 以下の微粒子割合 $R(5\mu\text{m})$ の式において、図中のデータ R_{md} と最もよく近似できる R_R を求めた。なお、計算式に用いたフラクタル次元 D は、各岩石ごとの平均値を用い、石灰岩では $D=2.35$ および安山岩では $D=2.50$ とした。近似計算の結果、粉塵発生率 $R_R=0.07$ (7%)のとき、各岩石とも最もよく近似できることがわかった。図中にその近似線($R(5\mu\text{m})\times 0.07$)を示す。図より、粒度分布式から求めた微粒子割合の7%値(近似式)と粉塵発生割合は、よく一致しており、著者らが提案してきた粒度分布式によって、粉塵の発生割合を推定できることが明らかとなった。

以上の解析から、インパクトクラッシャの破碎によって生成した $5\mu\text{m}$ 以下の微粒子のうち、粉塵

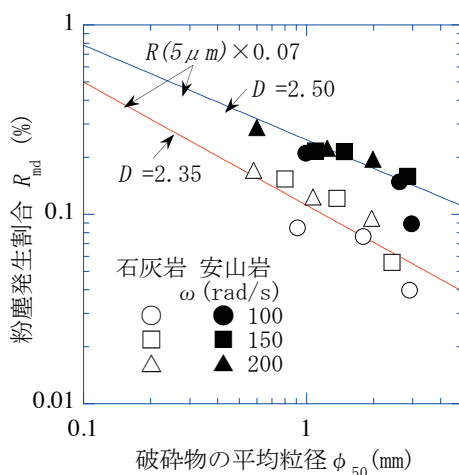


図8 粉塵発生割合 R_{md} と平均破碎粒径 ϕ_{50} との関係 ($\phi_0=30\pm 5\text{mm}$)

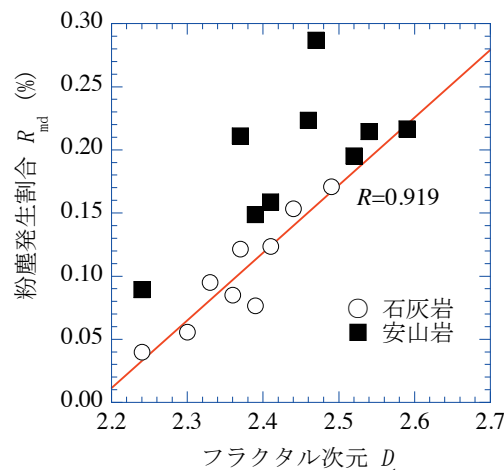


図9 粉塵発生割合 R_{md} と破碎物のフラクタル次元 D との関係

として浮遊するのは、7%程度で一定であることが明らかとなり、さらに、石灰岩に比較し、安山岩の粉塵発生量が多いことがわかった。この理由は、破碎物の平均粒径が同程度であっても、粒度分布におけるフラクタル次元が大きく、微粒子を多く含むためであると推察される。

(3) 破碎工程における粉塵の抑制対策

図9に、粉塵発生割合 R_{md} と破碎物のフラクタル次元 D との関係を示す。図より、石灰岩も安山岩もフラクタル次元 D が大きくなると、粉塵発生割合 R_{md} が増大していることがわかる。とくに、これらのデータを線形近似した場合、石灰岩のデータの相関は極めて良いことがわかる。以上のことから、粉塵発生割合は、破碎物の粒度分布におけるフラクタル次元に大きく影響を受けることが明らかとなった。

したがって、破碎過程において、粉塵となる微粒子の生成量を抑制するためには、破碎物のフラクタル次元を小さくする必要がある。具体的な対策としては、インパクトクラッシャを用いる場合には、可能な限り、破碎比(ϕ_{50}/ϕ_0)を大きくすること、周速度($r\omega$)を小さくし、衝撃力を小さくすること等が考えられる(前報の結果を参照)。

6. まとめ

本研究では、インパクトクラッシャによる岩石の破碎過程における破碎物の粒度分布と粉塵発生量との関係について、実験によって明らかにするとともに、粉塵発生の抑制方法について検討した。

本研究の結果を要約すると、以下のようである。

- (1) $10\mu\text{m}$ 以下の微粒子のうち、粉塵として浮遊する量は約7%である。
- (2) 粉塵の発生量は、破碎物の平均粒径が小さくなるほど、またフラクタル次元が大きくなるほど多くなる。
- (3) 同一破碎条件においては、岩石の強度が高いほど、粒度分布のフラクタル次元は大きくなり、粉塵の発生量が多くなる。
- (4) 粉塵の抑制対策としては、粒度分布のフラクタル次元を下げるよう、破碎比を大きくし、破碎の衝撃力を小さくする。

引用文献

- 1) 今井ら(2008): フラクタル次元を用いた砕石・砕砂の新たな粒度分布の指標、砕石の研究、第23巻、第1号、pp. 2-13.
- 2) 今井ら(2014): インパクトクラッシャによる骨材の一貫生産法の検討、建設用原材料、Vol. 18, No. 1, pp. 9-16.
- 3) Heyder, J., et al. (1986): Deposition of particles in the human respiratory tract in the size range $0.005\text{--}15\mu\text{m}$, J. Aerosol Sci., vol. 17, pp. 811-825.
- 4) 建設業労働災害防止協会(2004): 建設業における粉塵による疾病の防止、p. 6.
- 5) 都築翔: さく岩機の穿孔過程における岩石の衝撃破碎特性の評価、秋田大学大学院修士論文、平成18年度

(2019年10月4日受付 2020年4月2日受理)