

浮遊粉じん中の遊離けい酸含有率に関する文献等について

1 文献レビューの結果

(1) 鉛・亜鉛鉱山について、房村(1955)は、岩石それ自体の含有する遊離けい酸と、

それが粉砕されて発生した粉じん中の遊離けい酸とは、量的に差があることが知られているとし、採取した岩石を粉砕した微粒子の遊離けい酸の含有率をリン酸法で調べた。この結果、坑道の走向方向(0-72m)、傾斜方向(高さ80-205m)における上盤、鉱脈、下盤のいずれについても非常に激しい変動が認められることから、「一鉱脈又は一岩石から一つ採取された試料をもってその鉱脈又は岩石の全体としての遊離けい酸を知ることはできない」としている(表5、表6)。一方で、3区の鉱脈中の遊離けい酸濃度の分布は、統計的に有意な差(P=0.05)はなかったとしている。また、全ての試料(111試料)中の遊離けい酸の含有率を10%刻みの分布として分析すると、正規分布していたとしている(表10)。

第5表 鉱脈走向方向の遊離珪酸の変動

| 距離 m        |   | 0m    | 37m   | 71m   |
|-------------|---|-------|-------|-------|
| 上<br>鉱<br>下 | 盤 | 24.16 | 41.09 | 29.72 |
|             | 脈 | 37.57 | 53.26 | 45.24 |
|             | 盤 | 50.04 | 40.20 | 12.85 |

第6表 鉱脈傾斜方向の遊離珪酸の変動

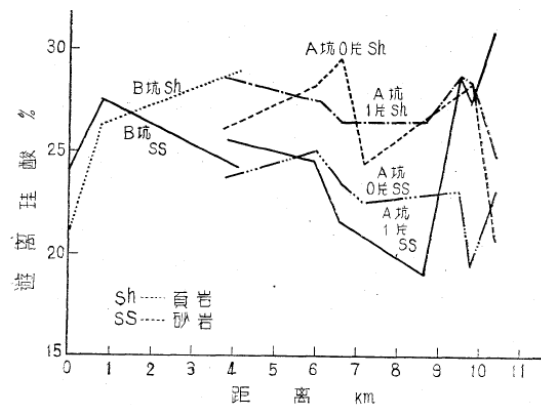
| 海拔高さ m      |   | 80m   | 175m  | 205m  |
|-------------|---|-------|-------|-------|
| 上<br>鉱<br>下 | 盤 | -     | 50.74 | 21.38 |
|             | 脈 | 36.93 | 65.81 | 64.45 |
|             | 盤 | 17.79 | 25.66 | 30.24 |

第10表 鉱床内遊離珪酸の分布

| 遊離珪酸 | 10%未満 | 20%未満 | 30%未満 | 40%未満 | 50%未満 | 60%未満 | 70%未満 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 上盤   | 1     | 3     | 15    | 8     | 1     | 2     | 1     |
| 鉱脈   | -     | 1     | 3     | 11    | 9     | 5     | 4     |
| 下盤   | 1     | 6     | 11    | 9     | 5     | 1     | -     |
| 母岩   | 4     | 5     | 3     | -     | -     | -     | -     |
| 中石   | -     | 1     | -     | 1     | -     | -     | -     |
| 計    | 6     | 16    | 32    | 29    | 15    | 8     | 5     |
| 累計   | 6     | 22    | 54    | 83    | 98    | 106   | 111   |
| 頻度%  | 5.4   | 19.6  | 48.7  | 74.8  | 88.4  | 95.5  | -     |

(2) 石炭鉱山について、房村(1957)は、走向方向0-11kmの砂岩、頁岩を粉砕した微

粒子の遊離けい酸含有率を調べたところ、走向に沿って遊離けい酸の分布はかなり変動している(図1)が統計上の有意差(P=0.1)はなく、一方で、砂岩と頁岩の遊離けい酸含有率には統計上の有意差(95%範囲:頁岩28.26-25.52%、砂岩25.23-22.67%)があったとしている。また、砂岩中の遊離けい酸分布は正規分布となっているとし、頁岩についても、正規型をなすものと推定される、として



第1図 遊離珪酸の分布

いる。

- (3) 採石プラントについて、房村 (1972) は、ハイボリュームサプラ (250-300l/min) によるろ紙捕集法で浮遊粉じんを採取し、リン酸法で遊離けい酸含有率を調べた。これによると、チャート質砂・頁岩、ホルンフェルス砂岩、砂岩・粘板岩互層がほぼ等しく (58.4-55.8%)、普通砂岩は30%台であり、塩基性岩類は10%台又はそれ以下であったとし (表7)、従来分析してきた各種岩石の遊離けい酸含有率の結果の範囲内であった (表8) としている。

- (4) トンネル坑内の浮遊粉じんについて、新藤ら (1985) は、多段式分粒器を持つサンプラーを用いて採取した結果を示している。このうち、10 $\mu$ m以下の粉じんについて遊離けい酸含有率を測定したところ、粘板岩 (21.3%)、砂岩 (17.4%)、石灰岩 (10.7%)、コンクリート吹きつけ材料 (0.4%) 等であり、房村 (1972) の値より小さい傾向があるとしている (Table 4)。

- (5) 日本作業環境測定協会 (2010) は、NATM工法の4つのトンネルを対象に、個人ばく露測定 (8時間) と切羽から50m地点での定点測定を行った。個人ばく露測定は、Dorr Oliver サイクロン付きサンプラー (4 $\mu$ m、50%カット相当) を装着したろ紙捕集方式サンプリングと、定点測定 (10分以上) は、多段階分粒装置 (レスピコンパーティクルサンプラー) を装着したろ紙捕集サンプリングを行い、X線解析分析装置を使用して遊離珪酸含有率を求めた。この結果、定点測定 (表31) では、地質別に、花崗岩 (A) : 6.4%、砂岩・頁岩 (B) : 10.7%、花崗斑岩 (C) : 9.8%、凝灰岩・泥岩 (D) : 6.9%であり、個人

第7表 岩石別の遊離珪酸含有率

| 岩 石       | 分 析<br>試料数 | 遊 離 珪 酸 % |       |       |
|-----------|------------|-----------|-------|-------|
|           |            | 最 大       | 最 小   | 平 均   |
| 砂 岩       | 12         | 46.45     | 24.00 | 36.04 |
| ホルンフェルス砂岩 | 4          | 68.12     | 37.87 | 55.82 |
| 砂岩・粘板岩互層  | 6          | 76.22     | 35.60 | 55.84 |
| チャート質砂・頁岩 | 8          | 74.65     | 31.75 | 58.42 |
| 片 麻 岩     | 4          | 48.60     | 6.15  | 30.83 |
| 輝 英 斑 岩   | 2          | 27.88     | 23.86 | 25.87 |
| 閃 緑 岩     | 2          | 6.54      | 1.01  | 3.78  |
| 蛇 紋 岩     | 1          | -         | -     | 19.06 |
| 安 山 岩     | 1          | -         | -     | 15.18 |
| 石 灰 岩     | 1          | -         | -     | 3.00  |
| か ん ら ん 岩 | 1          | -         | -     | 2.39  |
|           | 3          | 0.38      | 0.22  | 0.30  |

第8表 各種岩石の遊離珪酸 (%)

| 種 類     | 遊離珪酸  | 種 類       | 遊離珪酸  |
|---------|-------|-----------|-------|
| 火 成 岩   |       | 過塩基性岩     |       |
| 酸 性 岩   |       | 輝 岩       | 0~1   |
| 花 崗 岩   | 29~38 | 角 閃 岩     | 0~23  |
| 石 英 斑 岩 | 25~53 | か ん ら ん 岩 | 0~1   |
| ペグマタイト  | 28~32 | 堆 積 岩     |       |
| 流 紋 岩   | 21~34 | 砂 質 頁 岩   | 25~65 |
| 花崗閃緑岩   | 18~28 | 頁 岩       | 22~58 |
| 中 性 岩   |       | 粘 板 岩     | 20~45 |
| 石英粗面岩   | 26~47 | 凝 灰 岩     | 28~44 |
| 石英安山岩   | 23~41 | 凝 灰 岩     | 25~58 |
| 角閃安山岩   | 20~34 | 珪 質 土 石   | 45~82 |
| 変朽安山岩   | 11~30 | 粘 土       | 17~50 |
| 輝石安山岩   | 5~17  | 変 成 岩     | 0~8   |
| ふ ん 岩   | 32~41 | 片 麻 岩     | 17~37 |
| 斑 岩     | 26~34 | 雲 母 片 岩   | 32~52 |
| 粗 面 岩   | 8~14  | 泥 片 岩     | 6~34  |
| 粗面安山岩   | 4~6   | 緑 泥 片 岩   | 18~41 |
| 塩 基 性 岩 |       | 緑 角 閃 片 岩 | 10~22 |
| 斑 れ い 岩 | 0~11  | 珪 質 頁 岩   | 68~93 |
| 輝 緑 岩   | 4~14  | ス カ ル ン   | 30~50 |
| 輝 玄 岩   | 8~28  |           |       |

Table4 遊離けい酸含有率測定結果

| 岩 種                 | 遊離けい酸含有率 (%) |
|---------------------|--------------|
| 片 麻 岩               | 0.5          |
| 砂 岩                 | 17.4         |
| 粘 板 岩               | 21.3         |
| 石 灰 岩               | 10.7         |
| 安 山 岩               | 5.8          |
| 凝 灰 岩 (風化赤)         | 1.3          |
| 凝 灰 岩 (風化黒)         | 1.6          |
| コンクリート吹付け材料 (現場混練前) | 0.4          |

表 31 遊離けい酸含有率測定結果

| トンネルNo. | 遊離けい酸含有率 (%) | 平均値 (%) | 標準偏差 | 変動係数 (%) |
|---------|--------------|---------|------|----------|
| A       | 6.4          | 8.5     | 2.12 | 25.1     |
| B       | 10.7         |         |      |          |
| C       | 9.8          |         |      |          |
| D       | 6.9          |         |      |          |

ばく露測定 (表31) では、地質別に、花崗岩 (A) : 6.4%、砂岩・頁岩 (B) : 10.7%、花崗斑岩 (C) : 9.8%、凝灰岩・泥岩 (D) : 6.9%であり、個人

ばく露測定(表 21)では、A:5.6%、B:13.4%、C:8.1%、D:8.2%であった。

(6) 労働安全衛生総合研究所(2019)は、3つのトンネル掘削工事における浮遊粉じんにおける遊離けい酸含有率をエックス線回折分析法(XRD)により分析した。主な岩石の種類ごとの遊離けい酸含有率は、19.9%(安山岩)、19.1%(花崗閃緑岩)16.0%(細粒砂岩)、であった。

表 21 遊離けい酸含有率(個人ばく露)

| 作業者No. | 遊離けい酸含有率(%) | 平均値(%) | 標準偏差 | 変動係数(%) |
|--------|-------------|--------|------|---------|
| A1     | 4.5         | 5.5    | 1.56 | 28.4    |
| A2     | 6.3         |        |      |         |
| A3     | 6.3         |        |      |         |
| A4     | 5.4         |        |      |         |
| A5     | 3.0         |        |      |         |
| A6     | 7.4         |        |      |         |
| B1     | 15.8        | 13.4   | 5.47 | 40.9    |
| B2     | 8.0         |        |      |         |
| B3     | 19.0        |        |      |         |
| B4     | 9.0         |        |      |         |
| B5     | 8.6         |        |      |         |
| B6     | 19.8        |        |      |         |
| C1     | 13.4        | 8.1    | 3.35 | 41.4    |
| C2     | 4.1         |        |      |         |
| C3     | 7.4         |        |      |         |
| C4     | 7.5         |        |      |         |
| C5     | 8.1         |        |      |         |
| D1     | 9.7         |        |      |         |
| D2     | 10.2        | 8.2    | 3.87 | 47.5    |
| D3     | 3.6         |        |      |         |
| D4     | 13.1        |        |      |         |
| D5     | 3.4         |        |      |         |
| D6     | 8.9         |        |      |         |
| 作業者全体  |             |        |      |         |

## 2 考察

- (1) 房村(1955)と房村(1957)は、鉱山及び炭鉱の岩石を粉砕した微粒子の分析結果であり、房村(1972)は採石プラントの浮遊粉じんであることから、岩石種類毎の遊離けい酸含有率の定量的な分析の根拠としては適切でないが、定性的な傾向を評価するためには妥当である。
- (2) 房村(1955)、房村(1957)において、同一の坑内における遊離けい酸含有率の測定結果が正規分布していることを踏まえると、一定期間、坑内労働を行う労働者がばく露する遊離けい酸の総量は、坑内の岩石の種類に対応する遊離けい酸含有率の平均値を連続してばく露する場合の総量とほぼ同じになることが推定できる。また、房村(1955)、房村(1957)による鉱山の調査結果によれば、走向方向や傾斜方向については遊離けい酸含有率に統計上の有意差はなく、一方で、岩石の種別が異なる場合は統計上有意差がある。これらを踏まえると、トンネル掘削前のボーリング調査結果により主たる岩石の種類を把握し、過去の岩石分類別の遊離けい酸含有率の平均値と照らし合わせ、当該トンネルの遊離けい酸含有率を推定する方法は妥当と考えられる。
- (3) 火成岩は、二酸化ケイ素(SiO<sub>2</sub>)の含有率によって酸性岩、中性岩、塩基性岩、超塩基性岩に分類されているため、この分類は、当然、遊離けい酸(SiO<sub>2</sub>)含有率に影響する。房村(1972)の表8から、岩石種類ごとの遊離けい酸含有率の平均値を分類別に平均すると、酸性岩(30.4%)、中性岩(22.3%)、塩基性岩(10.7%)、超塩基性岩(4.0%)となっている。
- (4) 一方、堆積岩は、いろいろな起源をもつ粒子によって構成されているため、化学組成はまちまちであるが、房村(1972)の表8から、堆積岩(珪岩を除く。)の遊離けい酸含有率の平均値は33.43%と酸性岩(30.4%)とほぼ同程度であり、また、

新藤ら（1985）でも、砂岩（17.4%）、粘板岩（21.3%）、石灰岩（10.7%）といった堆積岩の遊離けい酸含有率は、中性岩である安山岩（5.8%）より高く、日本作業環境測定協会（2010）の表 31 でも、堆積岩（砂岩・頁岩（10.7%）、凝灰岩・泥岩（6.9%））は、酸性岩である花崗岩（9.8%）とほぼ同程度の含有率となっている。このため、過去の文献からは、堆積岩は酸性岩とほぼ同等の遊離けい酸含有率であることが推定される。

- (5) 変成岩は、岩石が熱や圧力等により変性したものでその由来はまちまちであるが、房村（1972）の表 8 によれば、ケイ素を多く含む珪岩を除けば、遊離けい酸含有率の平均は 29.0%となり、酸性岩（30.4%）とほぼ同等であることが推定される。
- (6) 以上から、遊離けい酸濃度を推定するための岩石の分類については、第 1 グループ（火成岩のうち酸性岩、堆積岩、変成岩）、第 2 グループ（火成岩のうち中性岩）、第 3 グループ（火成岩のうち塩基性岩及び超塩基性岩）の 3 つ程度とし、それぞれのグループ別に標準的な遊離けい酸含有率を設定することができる可能性があると考えられる。なお、二酸化ケイ素（SiO<sub>2</sub>）が再結晶した変成岩である珪岩を多く含む地層をトンネル掘削する場合は、この分類による推定によらず、別途、遊離けい酸含有率を実測すべきである。
- (7) 各グループ別のトンネル坑内の遊離けい酸含有率の定量的な評価については、新藤ら（1985）及び日本作業環境測定協会（2010）によるトンネル掘削中の粉じんの実測値を踏まえると、第 1 グループの岩石による標準的な粉じん中の遊離けい酸含有率は、10%～20%程度であることが見込まれる。さらに、房村（1972）の表 8 によれば、第 2、第 3 グループの遊離けい酸含有率は第 1 グループのそれぞれ 3 分の 2、3 分の 1 程度と推定されるが、本年度実施の追加調査で検証した。
- (8) 本年度実施された追加調査結果（労働安全衛生総合研究所（2019））によれば、酸性岩に属する花崗閃緑岩について、遊離けい酸含有率が 19.1%であり、また、堆積岩に属する細粒砂岩の遊離けい酸含有率が 16.0%であった。これらの値は、新藤ら（1985）、日本作業環境測定協会（2010）、房村（1972）の測定結果と整合的であり、第 1 グループの遊離けい酸含有率の推計とも合致する。しかし、中性岩に属する安山岩の遊離けい酸含有率（19.9%）は、新藤ら（1985）の安山岩の測定結果（5.8%）より大幅に高かった。この理由としては、房村（1972）の表 8 によれば、安山岩は、種類によって遊離けい酸含有率にばらつきがあるためと考えられる（表 8 では、石英安山岩、角閃安山岩、変朽安山岩の遊離けい酸含有率の平均値は、花崗閃緑岩より高い。）。
- (9) 以上の結果を踏まえると、第 1 グループ（酸性岩、堆積岩、変成岩）については、標準的な遊離けい酸含有率を 20%とすることは、過去の文献と整合し、妥当であるといえる。一方、第 2 グループ（中性岩）については、労働安全衛生総合研究所（2019）で安山岩が 19.9%であったこと、房村（1972）の表 8 から、中性岩には、

安山岩等、種類によっては酸性岩と同程度の遊離けい酸含有率を持つ岩石があることを踏まえると、第1グループと同様に、標準的な遊離けい酸含有率を20%とすることは、安全側の評価として妥当と考えられる。一方、第3グループ（塩基性岩、超塩基性岩）については、第1、第2グループと比較して、遊離けい酸含有率が低いことは房村(1972)の表8から容易に推定できるが、トンネル坑内での実測値が文献になく、今年度の追加調査でも測定値を得ることはできなかった。このことは、第3グループの岩石を主たる岩石とするようなトンネルの掘削は、まれであることを示すものである。このため、現時点の限られた情報によって、あえて標準的な遊離けい酸含有率を定める必要はないと考えられる。ただし、第3グループは、文献から第2グループよりも低い遊離けい酸含有率が推定されるため、仮に、第3グループの岩石を主たる岩石とするトンネルを掘削する場合、安全側の推定値として、第2グループの標準遊離けい酸含有率20%を使用することは差し支えないと考えられる。

(10) (9)の遊離けい酸含有率は、掘削・ずり出し作業中のものである。一方で、コンクリート吹き付け時の遊離けい酸含有率は、1%未満（新藤ら（1985））である。さらに、1サイクルの総粉じん量に占める掘削・ずり出しの粉じん量の占める割合は、労働安全衛生総合研究所（2018、2019）の測定結果によると、発破工法で（56%～24%）、機械掘削で（70%～11%）である（表D参照）。このため、(9)の遊離けい酸含有率を1サイクル平均濃度に乘ずると、遊離けい酸濃度を過大評価することとなる。このため、1サイクル粉じん濃度に対する遊離けい酸含有率は、(9)の含有率に、一定の比率を乗じて算出する方法も考えられる。

(11) しかし、コンクリート吹付での粉じん量は、岩盤の状況や吹付コンクリートの種類や低粉じん剤の使用の有無にも影響されるため、表Dにあるように同じ工法であってもばらつきが非常に大きく、標準的な比率を定めることは困難である。さらに、掘削時の粉じん量が1サイクル総粉じん量に占める割合は、最大で、発破工法で56%、機械掘削で70%あることを考えると、(9)の遊離けい酸含有率をそのまま1サイクル粉じん濃度に乗じる方法でも、安全のマージンとして過大であるとは言えない。なお、正確な遊離けい酸含有率を特定したい場合は、1サイクル連続測定で採取した試料をエックス線回折分析方法により分析することとなる。

表D 粉じん量定の作業別分布

| 現場                          | 施工方法 | サイクル | 定点                       | 切り羽からの距離 | 掘削・ずり出し   |       | 1サイクル総計   |       | 総粉じん量に占める掘削等の割合 |
|-----------------------------|------|------|--------------------------|----------|-----------|-------|-----------|-------|-----------------|
|                             |      |      |                          |          | 粉じん量 (mg) | 平均値   | 粉じん量 (mg) | 平均値   |                 |
| A                           | 発破   |      | ①                        | 45.6     | 0.106     | 0.130 | 0.478     | 0.407 | 31.8%           |
|                             |      |      | ②                        | 45.6     | 0.153     |       | 0.337     |       |                 |
| B                           | 発破   |      | ①                        | 34.7     | 0.351     | 0.258 | 1.211     | 1.088 | 23.8%           |
|                             |      |      | ⑥                        | 34.7     | 0.166     |       | 0.966     |       |                 |
| C                           | 機械   |      | ①                        | 35       | 0.818     | 0.713 | 1.178     | 1.015 | 70.2%           |
|                             |      |      | ④                        | 35       | 0.608     |       | 0.852     |       |                 |
| D                           | 機械   |      | ②                        | 28       | 0.098     | 0.098 | 0.261     | 0.261 | 37.6%           |
| E                           | 機械   |      | ①                        | 27       | 0.103     | 0.088 | 0.699     | 0.623 | 14.1%           |
|                             |      |      | ③                        | 27       | 0.072     |       | 0.547     |       |                 |
| F                           | 発破   | 1    | ①                        | 35       | 0.269     | 0.269 | 0.573     | 0.573 | 46.9%           |
|                             |      | 2    | ①                        | 35       | 0.380     | 0.414 | 0.616     | 0.741 | 55.9%           |
|                             |      | ②    | 45                       | 0.448    | 0.866     |       |           |       |                 |
| G                           | 機械   | 1    | ②                        | 18       | 0.056     | 0.078 | 0.359     | 0.596 | 13.0%           |
|                             |      |      | ③                        | 32.4     | 0.095     |       | 0.688     |       |                 |
|                             |      |      | ④                        | 32.4     | 0.102     |       | 0.652     |       |                 |
|                             |      |      | ⑤                        | 49.2     | 0.064     |       | 0.617     |       |                 |
|                             |      |      | ⑥                        | 49.2     | 0.071     |       | 0.665     |       |                 |
|                             |      | 2    | ②                        | 18       | 0.051     | 0.084 | 0.388     | 0.738 | 11.4%           |
|                             |      |      | ③                        | 32.4     | 0.083     |       | 0.977     |       |                 |
|                             |      |      | ④                        | 32.4     | 0.077     |       | 0.702     |       |                 |
|                             |      |      | ⑤                        | 49.2     | 0.114     |       | 0.936     |       |                 |
|                             |      |      | ⑥                        | 49.2     | 0.095     |       | 0.689     |       |                 |
| H                           | 発破   | 1    | ①                        | 30       | 0.083     | 0.083 | 0.470     | 0.347 | 24.0%           |
|                             |      |      | ③                        | 40       | 0.086     |       | 0.337     |       |                 |
|                             |      |      | ④                        | 40       | 0.078     |       | 0.259     |       |                 |
|                             |      |      | ⑤                        | 50       | 0.090     |       | 0.341     |       |                 |
|                             |      |      | ⑥                        | 50       | 0.080     |       | 0.328     |       |                 |
|                             |      | 2    | ①                        | 30       | 0.097     | 0.082 | 0.406     | 0.315 | 25.9%           |
|                             |      |      | ②                        | 30       | 0.066     |       | 0.217     |       |                 |
|                             |      |      | ③                        | 40       | 0.084     |       | 0.337     |       |                 |
|                             |      |      | ④                        | 40       | 0.086     |       | 0.292     |       |                 |
|                             |      |      | ⑤                        | 50       | 0.086     |       | 0.287     |       |                 |
|                             |      |      | ⑥                        | 50       | 0.071     |       | 0.346     |       |                 |
|                             |      |      | 1サイクルごとの粉じん量の平均値 (50m以内) |          |           |       |           |       |                 |
| 発破工法の平均                     |      |      |                          |          |           | 0.257 | 0.679     | 34.7% |                 |
| 機械掘削の平均                     |      |      |                          |          |           | 0.168 | 0.552     | 29.3% |                 |
| ※ 切り羽からの距離が51m以上の測定点を除いている。 |      |      |                          |          |           |       |           |       |                 |

(参照文献)

新藤敏郎、平田篤夫、稲葉力（1986）トンネル坑内の浮遊粉じんについて—粉じんの性状、濃度測定、対策、新方式の集じん装置—、西松建設情報 Vol. 8 pp. 19-28

房村信雄（1955）鉱山における遊離珪酸の分布、日本工業会誌 71 巻 803 号 pp. 235-239

房村信雄（1957）石炭鉱山の岩盤中にける遊離珪酸の分布、日本工業会誌 73 巻 826 号 pp. 211-214

房村信雄（1972）採石プラントにおける粉じんの実態、日本工業会誌 88 巻 1007 号, pp. 23-28

日本作業環境測定協会（2010）トンネル建設工事における個人ばく露濃度測定等推進事業検討委員会報告書（平成 21 年度厚生労働省委託事業）（社）日本作業環境測定協会

労働安全衛生総合研究所（2018）トンネル建設工事の切羽付近における粉じん濃度測定に関する研究報告書、独立行政法人労働者健康安全機構

労働安全衛生総合研究所（2019）トンネル建設工事の切羽付近における粉じん濃度調査結果速報値（現場 F～H）