

## トンネル工事における粉じん測定及び換気等に関する文献等について

## 1 ガイドラインでの粉じん目標レベル設定の経緯

- (1) 「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン（平成12年12月26日付け基発第768号の2。以下「ガイドライン」という。）の「粉じん濃度目標レベル」の趣旨は、このガイドラインの内容を検討した報告書（建災防(2000)）において、「坑内における作業環境管理を進める過程で、粉じん発生源における粉じん発散等を防止するための発散源対策が適切であるか否か及び換気装置等が適切に稼働しているか否かを判定する際の指標」とされている。
- (2) さらに、建災防(2000)では、粉じん濃度目標レベルは、「坑内における粉じん濃度を可能な限り最小限にとどめるための現実的な目標レベルとする必要がある、ずい道の種類、坑内の粉じん作業における作業工程、作業の態様、粉じん発生の態様等を踏まえ、設定することが重要である」としている。
- (3) その上で、建災防(2000)では、粉じん濃度目標レベルについては、「実現可能な範囲で出来るだけ低い値を設定することとし、具体的には、現在の換気技術レベル等を考慮し、 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 程度とすることについて、検討することが適当と考えられる」と提言している。この提言を踏まえ、ガイドラインでは、粉じん濃度目標レベルとして $3\text{mg}/\text{m}^3$ を採用している。

## 2 粉じん濃度に関する基準、所要換気量等に関する文献

- (1) ACGIH(2018)では、ばく露限界値 (TLV) が定められていない粒子状物質については、空気中濃度を $3\text{mg}/\text{m}^3$  (吸入性粉じん (レスピラブル)) 及び $10\text{mg}/\text{m}^3$  (吸引性粉じん (インハラブル)) より低く抑えるべきであるとしている。さらに、結晶質シリカ (遊離けい酸) の TLV を $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ としている。ばく露評価では、粉じん濃度に結晶シリカの含有率 (Q 値) を乗じて結晶質シリカの曝露量を求め、この値と TLV を比較する (Souve et. al (2013) など)。この考え方では、TLV を満たすことのできる粉じん濃度は、Q 値に反比例して小さくなる (5% で 1/5、10% で 1/10、15% で 1/15、30% で 1/30 など)。
- (2) 管理濃度等検討会 (2008) では、吸入性粉じんの濃度を測定し、その中でもっとも有害性がある結晶質シリカについて管理濃度を定めることとし、ACGIH の TLV の付録 E で規定する混合物の複合的な影響を評価する相加式を用い、 $3\text{mg}/\text{m}^3$  と $0.025\text{mg}/\text{m}^3$  を包含する管理濃度として、 $3/(1.19Q+1)$ を採用した (Q: 遊離けい酸含有率)。この考え方では、管理濃度は、Q 値にほぼ反比例して小さくなる (5% で 1/6.95、10% で 1/12.9、15% で 1/18.85、30% で 1/36.7 など)。

(3) 日本産業衛生学会が発行する許容濃度等の勧告（2018年度）を見ると、吸入性結晶質シリカの許容濃度は0.03 mg/m<sup>3</sup>とある。また、第2種粉じんとして、結晶質シリカ含有率3%未満の鉱物性粉じんでは、吸入性粉じんの許容濃度を1 mg/m<sup>3</sup>、総粉じんの許容濃度を4 mg/m<sup>3</sup>と規定している。

(4) 欧州諸国については、European Network for Silica (NEPSI) がヨーロッパ各国の

Occupational Exposure Limits（職業上暴露限界）の一覧表を示しており、それによれば、「Quartz, respirable dust（吸入性シリカ粉じん）」の暴露限界として、0.025～0.15 mg/m<sup>3</sup>の値をヨーロッパ各国では規定している。表で示す（NEPSI 2019）。

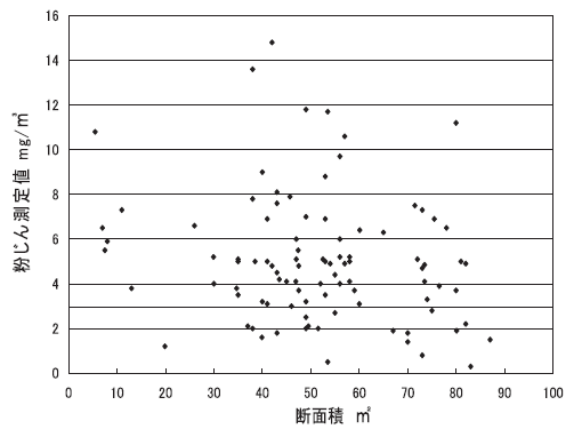
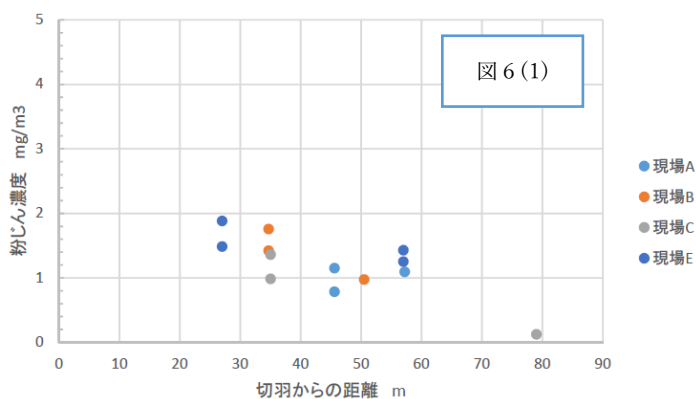
Country/Authority (see caption p. 3)	(in) (n) dust INHA LABLE	(in) (n) dust RESPIRABLE	Quartz	Cristobalite	Tridymite	Diatomaceous earth	Amorphous silica	Fused silica	Kaolin	Mica	Talc
Austria/I	10	5	0,15	0,15	0,15			0,15			2
Belgium/II	10	3	0,1	0,05	0,05	3	2	0,1	2	3	2
Bulgaria/III		4	0,07	0,07	0,07	1 <sup>2</sup>					3
Cyprus/IV		/	10k/Q <sup>3</sup>	/	/	/	2	/	/	/	/
Czech Republic/V			0,1	0,1	0,1			4		2	2
Denmark/VI	10	5	0,1	0,05	0,05	1,5		0,1	2		
Estonia			0,1	0,05	0,05		2				
Finland/VII	10	/	0,05	0,05	0,05	5					2
France/VIII	10	5	0,1	0,05	0,05				10		
Germany/IX	10	0,5 <sup>4</sup>	0,05 <sup>5</sup>	0,05 <sup>5</sup>	0,05 <sup>5</sup>	0,3 <sup>6</sup>	4 <sup>7</sup>	0,3 <sup>8</sup>	/	/	/
Greece/X	10	5	0,1	0,05	0,05						2
Hungary			0,15	0,1	0,15						2
Ireland/XI	10	4	0,1	0,1	0,1		2,4	0,08	2	0,8	0,8
Italy/XII	10	3	0,05 <sup>9</sup>	0,05	0,05			0,1	2	3	2
Lithuania/XIII		10	0,1	0,05	0,05						1
Netherlands/ XVI	10	5	0,075	0,075	0,075					2,5	0,25
Norway/ XVII	10	5	0,1	0,05	0,05	1,5	1,5			3	2
Poland/ XVIII	2	0,3	0,1	0,1	0,1	2	2	1	10		1
Portugal/ XIX	10	5	0,025	0,025	0,025			0,1	2	3	2
Romania/ XX		10	0,1	0,05	0,05				2	3	2
Slovakia	10		0,1	0,1	0,1		2			2	2
Slovenia			0,15	0,15	0,15			0,3			2
Spain/ XXI	10	3	0,05	0,05	0,05			0,1	2	3	2
Sweden/ XXII		5	0,1	0,05	0,05						1
Switzerland/ XXIII		6	0,15	0,15	0,15		0,3	0,3	3	3	2
UK/ XXIV	10	4	0,1	0,1	0,1	1,2	2,4	0,08	2	0,8	1

(5) 粉じん濃度を減少させるための所用換気量（希釈換気）については、建災防(2012)において、清浄な外気を送気することを前提として、所用換気量(Q) = (換気係数(K) × 粉じん発生量(S)) / (粉じん管理目標濃度(E) × 所要換気時間(t))としており、所要換気量は粉じん管理濃度目標に反比例する。したがって、粉じん発生量が同じで粉じん管理濃度目標が1/10になれば、所要換気量は10倍となる。

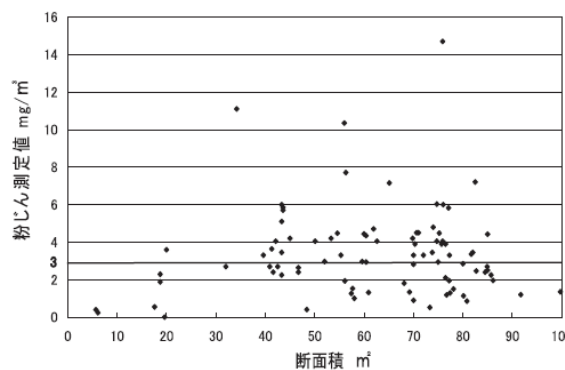
### 3 トンネル坑内の粉じん濃度に関する文献

(1) 建災防(2000)は、掘削断面積が60m<sup>2</sup>以上のずい道（NATMを採用している72現場）における粉じん濃度について、単純平均では、コンクリート吹きつけ時において4.16mg/m<sup>3</sup>、ずり出し作業時において3.11mg/m<sup>3</sup>であったとしている。一方、6mg/m<sup>3</sup>未満の現場の割合は、吹きつけ時で約80%、ずり出し時で約90%であり、3mg/m<sup>3</sup>未満の現場は、吹付、ずり出しそれぞれで約30%、約55%であったとしている。断面積60m<sup>2</sup>以下未満（NATM採用17現場）においては、吹付時の平均濃度は5.11mg/m<sup>3</sup>であり、6mg/m<sup>3</sup>未満、3mg/m<sup>3</sup>未満の現場の割合は、それぞれ約70%、約30%であったとしている。

- (2) 西村(2010)は、ガイドラインの粉じん濃度目標レベルに対して、ガイドライン以前は $3\text{ mg/m}^3$ 以上が約80%であったが、2005年の調査では、 $3\text{ mg/m}^3$ 以下が50%とかなり改善が進んだとしている(図1)。
- (3) 労働安全衛生総合研究所(2018)は、NATM工法による5つの山岳トンネルの坑内において、切羽から25mから100mで定点測定(質量濃度測定法)で1サイクルを通じた測定を行ったところ、切羽からの距離に影響を受けているようには見えず、 $0.8\sim 2\text{ mg/m}^3$ に分布したとしている(図6(1))。



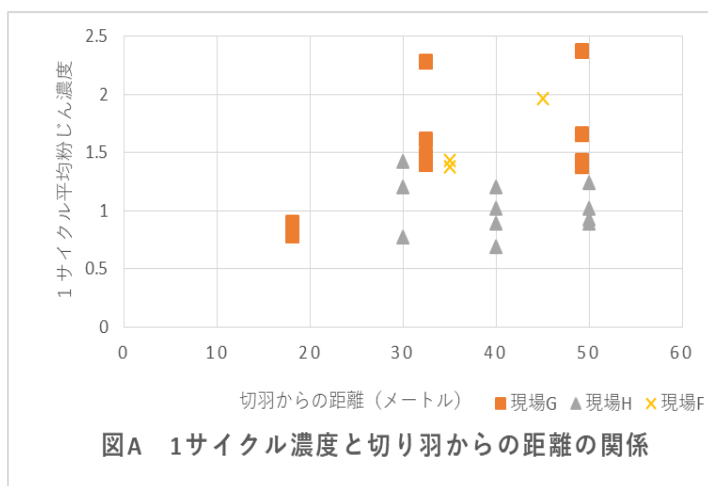
「ガイドライン」以前 1998年建災防調査データ



「ガイドライン」後 2005年日本建設機械化協会データ

図-1 「ガイドライン」前後の調査データの比較

- (4) 労働安全衛生総合研究所(2019)は、NATM工法による3つの山岳トンネルの切り羽から18mから50mで定点測定(質量濃度測定方法)で1サイクルを通じた測定を行ったところ、それぞれの現場ごとの粉じん濃度分布は、現場F ( $1.38\sim 1.96\text{ mg/m}^3$ )、現場F ( $0.79\sim 2.38\text{ mg/m}^3$ )、現場F ( $0.77\sim 1.42\text{ mg/m}^3$ )に分布し、いずれの現場も、切り羽との距離と粉じん濃度には関連は見受けられないとしている(図A参照)。労



図A 1サイクル濃度と切り羽からの距離の関係

表C 定点測定の粉じん濃度の平均値

現場	平均粉じん濃度*( $\text{mg/m}^3$ )
現場A	0.97
現場B	1.59
現場C	1.18
現場D	0.96
現場E	1.69
現場F(1)	1.38
現場F(2)	1.70
現場G(1)	1.30
現場G(2)	1.77
現場H(1)	0.92
現場H(2)	1.12
平均	1.32

\* 1サイクル測定値(切り羽からの距離が50m以内に限る。)の平均値

働安全衛生総合研究所が2018年と2019年に測定した8つの山岳トンネルの1サイクル定点測定の各トンネルの粉じん濃度の平均値は、0.96~1.77mg/m<sup>3</sup>となっており、いずれも2mg/m<sup>3</sup>を下回っている(表C)。

- (5) 米国の状況として、Sauve et. al (2013)は、建設業における結晶質シリカのばく露状況を報告している。報告は、1987年から2009年に発表された文献から6118の記録を集めて工事種別に分析した結果、トンネル工事(tunnel boring)での結晶質シリカ(QCS)濃度の幾何平均は0.328mg/m<sup>3</sup>と、TLV(0.025mg/m<sup>3</sup>)の13.1倍となっており、コンクリート研磨(scabbling concrete)とはつり(chipping)に次いで、3番目に高い濃度であった(Fig. 1)。

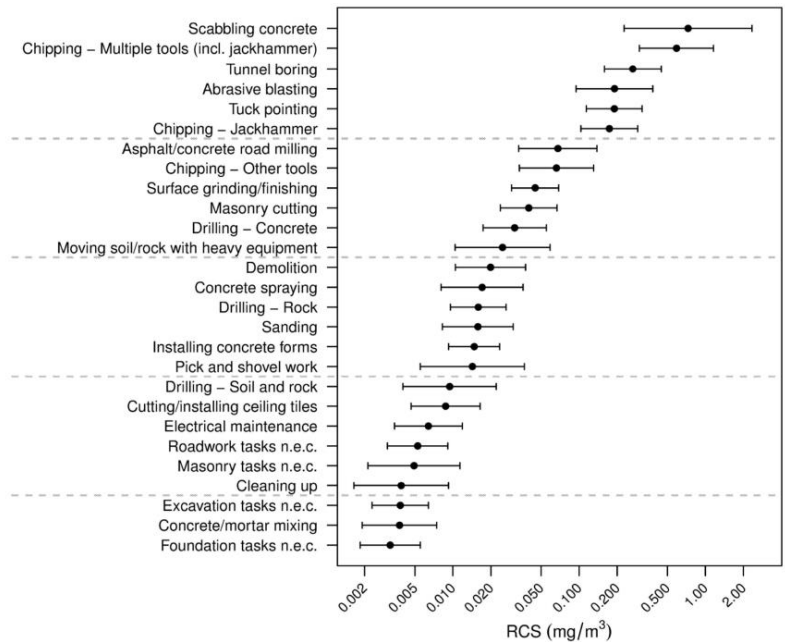
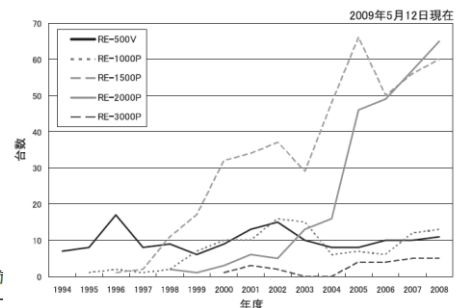


Fig. 1. Estimated geometric mean respirable crystalline silica exposure by task, based on the median sampling duration by task, year 1998 and absence of source controls, averaged across 20 iterations.

- (6) 米国の状況として、Flanagan et. al (2006)は、建設業における結晶質シリカのばく露状況を報告している。報告は、1992年から2002年(70%は1997-2002)における134機関からの報告を分析した結果、トレンチ又はトンネルの掘削(Cut trench/tunnel)の結晶質シリカ濃度の幾何平均は0.25mg/m<sup>3</sup>、吸入性(レスピラブル)粉じん濃度の幾何平均は15.64mg/m<sup>3</sup>であり、それぞれ、TLV(0.025mg/m<sup>3</sup>, 3mg/m<sup>3</sup>)の10倍、5.2倍であって、作業別では3番目に高かった。

#### 4 トンネル坑内の換気手法に関する文献

- (1) 西村(2010)は、トンネル技術の発展と現状についての総説において、集塵機的能力が大型化し、2000m<sup>3</sup>/minクラス、3000m<sup>3</sup>/minクラスが主流となっ



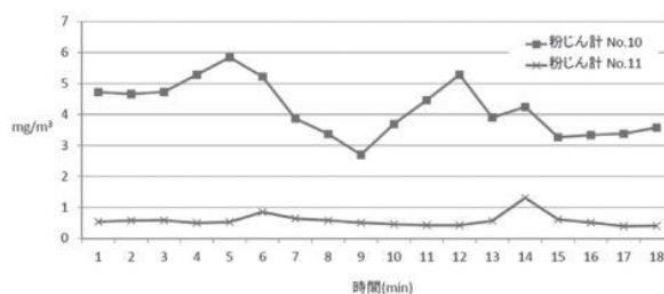
表一-3 管理濃度の強化による換気設備

目標濃度	3mg/m <sup>3</sup> の場合		2.5mg/m <sup>3</sup> の場合			
	吸引捕集	拡散希釈	吸引捕集	拡散希釈	吸引捕集	拡散希釈
換気方式	吸引捕集	拡散希釈	吸引捕集	拡散希釈	吸引捕集	拡散希釈
必要風量	1,395 m <sup>3</sup> /min	1,733 m <sup>3</sup> /min	1,395 m <sup>3</sup> /min	2,070 m <sup>3</sup> /min	1,395 m <sup>3</sup> /min	2,575 m <sup>3</sup> /min
ファン動力	80 kW × 2	110 kW × 2	80 kW × 2	110 kW × 4	80 kW × 2	110 kW × 4
集じん機能力	2,000 m <sup>3</sup> /min	3,000 m <sup>3</sup> /min	2,000 m <sup>3</sup> /min	3,000 m <sup>3</sup> /min	2,000 m <sup>3</sup> /min	1,800 m <sup>3</sup> /min × 2
総動力	320 kW	370 kW	320 kW	590 kW	320 kW	660 kW

モデル：発破工法 2,000 m 75 m<sup>2</sup> 算定方法：建災防「ずい道建設工事における換気技術指針」による

ているとしている（図2）。さらに、従来の希釈方式に加え、より効果的な吸引捕集方式が開発され、必要風量の減少が可能となったとしている（表3）。

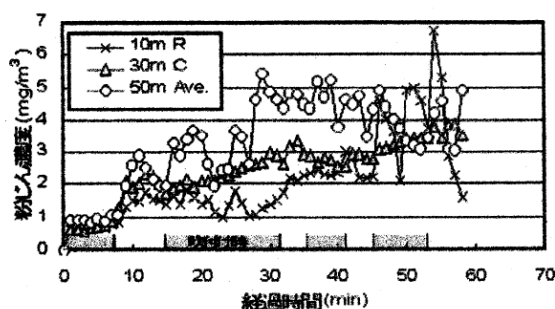
- (2) 大林組ら(2012)は、平成24年度の日本建設機械施工協会会長賞の受賞業績として、トンネル坑内の粉じん低減工法である「トラベルクリーンカーテン」の効果を検証している。具体的には、2車線トンネル（断面積80m<sup>3</sup>）を想定した模擬トンネルにおいて、カーテン無し（送風量1000m<sup>3</sup>/min、排気量1500m<sup>3</sup>/min）とカーテンあり（送風量750m<sup>3</sup>/min、排気量1500m<sup>3</sup>/min）の場合の粉じん濃度を比較したところ、濃度が8mg/m<sup>3</sup>の状態で装置を稼働させ、カーテン後方の濃度を0.1mg/m<sup>3</sup>まで下げることができ、かつ、切羽付近の濃度が3mg/m<sup>3</sup>を下回るのに要する時間が225秒から170秒に短縮したとしている。実際のトンネルでの吹付作業中（総風量1330m<sup>3</sup>/min、排気量2000m<sup>3</sup>/min）に、カーテンより切羽側（切羽から15m）と後方（切羽から50m）で測定した結果、カーテンの効果は確認できたとしている（図7）（15m地点では3～6mg/m<sup>3</sup>、50m地点では0.5～1.2mg/m<sup>3</sup>程度）。



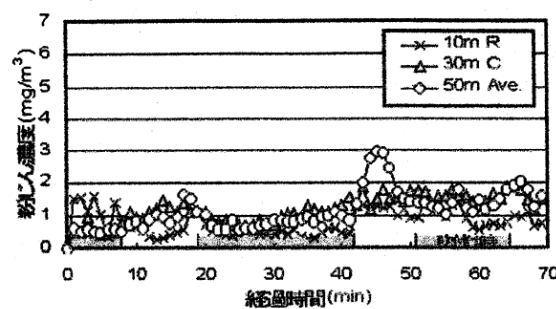
図一七 現場適用結果（吹付時、送風量1330m<sup>3</sup>/min、排気量2000m<sup>3</sup>/min）

## 5 換気以外の粉じん濃度低減方策に関する文献

- (1) トンネルに関する学術誌で発表された論文における粉じん低減対策に関するものの検索結果から、換気以外の粉じん低減方策の文献を収集した。大窪ら(2002)は、液体急結剤を使用した吹付コンクリートの採用による粉じん濃度低減効果を報告している。具体的には、高速道路トンネル工事（送気量1200m<sup>3</sup>/min）において、従来の粉体急結剤（P方式）と液体急結剤をスラリー化したもの（S方式）を使用した場合の粉じん濃度を切羽から10m、30m、50m地点で測定した値を比較し、S方式の方が粉じん濃度が低いことが確認できたとしている（図3、4）。また、赤坂ら(2004)は、模擬トンネルにおいて、粉体急結剤（カルシウムアミネート系）を添加することにより、切羽から10m、30m、50mの位置の粉じん濃度が、添加しないケースの



図一三 P方式の粉じん濃度経時変化(送風停止)



図一四 S方式の粉じん濃度経時変化(送風停止)



ほぼ1/2となったと報告している。

- (2) さらに、大里ら(2002)は、粉じん抑制剤を吹付コンクリートに添加することによる粉じん濃度低減効果を報告している。具体的には、粉じん抑制剤(セルロース系樹脂を主成分とする白色粉体)の添加率ごとに粉じん濃度測定を行ったところ、添加量の増加に応じて粉じん濃度の低減効果がみられた(図3)としている。
- (3) 為石ら(2006)は、アルカリフリー液体急結剤(AF急結剤。水溶性アルミニウム塩系)を用いたコンクリート吹付け時の粉じん低減効果を報告している。NATM工法の山岳トンネル工事において、光散乱方式の相対濃度計(P-5L)を切羽から5mの地点に2台、50mの地点に3台設置して測定を行った。AF急結剤を使用したときの50m地点の粉じん濃度の平均値は、 $0.92\text{mg}/\text{m}^3$ であり、粉体急結剤(カルシウムアルミネート系)使用時の $3.72\text{mg}/\text{m}^3$ の約1/4であった。さらに、切羽5m地点でも、 $2.3\sim 2.7\text{mg}/\text{m}^3$ と低い濃度を達成したとしている。

- (4) 鈴木ら(2003)は、圧縮空気をいわずにコンクリートを吹き付ける方式(エアレス吹付)による吹き付け時の粉じん濃度低減効果を報告している。具体的には、3つのNATM工法のトンネル(No.1(内断面 $71.4\text{m}^2$ )、No.2(断面 $46.7\text{m}^2$ )、No.3(断面 $62.9\text{m}^2$ )。総風量はいずれも $1,200\text{m}^3/\text{min}$ )の吹き付け作業時に通常吹付とエアレス吹付を比較したところ、断面の大きさに関わらず、切羽から50m地点の粉じん濃度が $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下となったとしている。また、経時変化では、切羽50m後方においては通常吹付が最大 $13.6\text{mg}/\text{m}^3$ 、エアレス吹付では最大 $2.2\text{mg}/\text{m}^3$ 、切羽5m後方では通常吹付が最大 $20.8\text{mg}/\text{m}^3$ 、エアレス吹付では最大 $5.5\text{mg}/\text{m}^3$ となり、効果が確認できたとしている(図8)。

- (5) 最新の情報として、尾畑(2019)は、山岳トンネルのコンクリート吹付作業における遠隔吹付技術の開発について報告している。吹付機にネットワークカメラを搭載し、作業員は、切羽から離れた場所に設置する移動式の操作室内部から、モニタ映像を見ながら吹付機のリモコンボックスを操作する。試験施工の結果は、通常の吹付コンクリートと変わらない仕上がりであったことがわかったとしている。

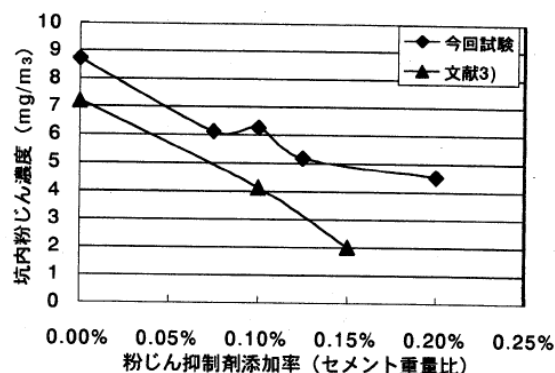


図3 粉じん抑制剤の添加率と粉じん濃度の関係

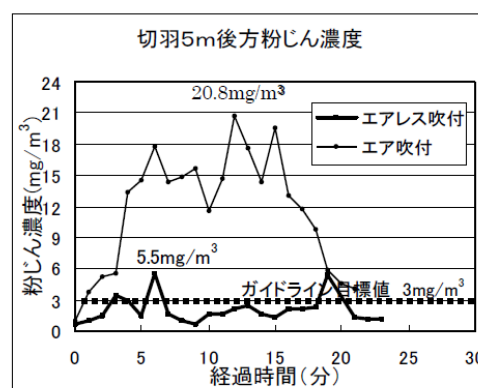
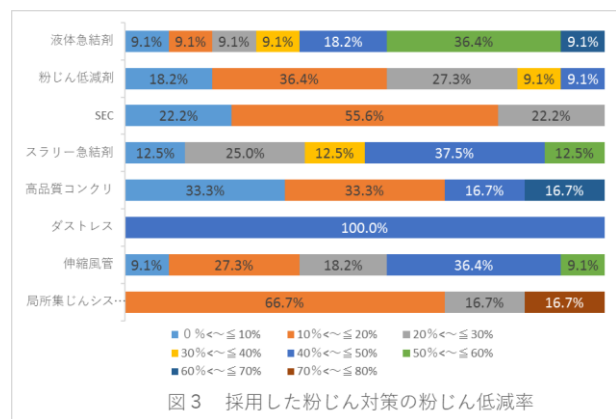
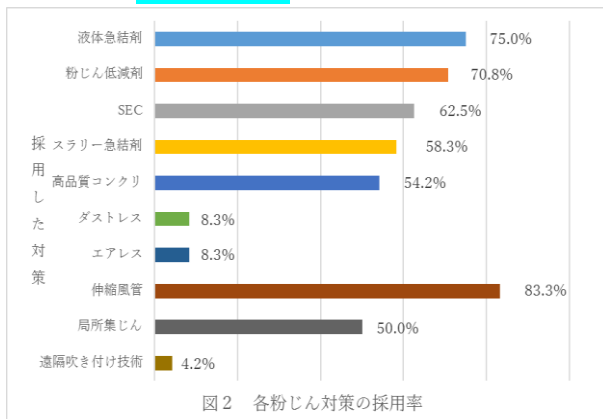


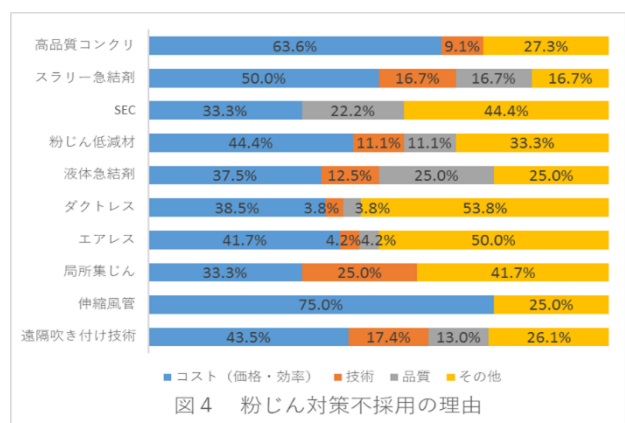
図8 切羽後方5m地点の粉じん濃度経時変化

## 6 トンネル建設工事における粉じん対策実施状況の現況調査結果

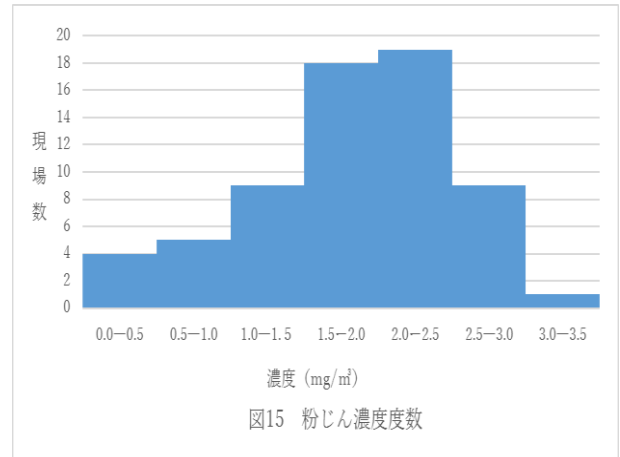
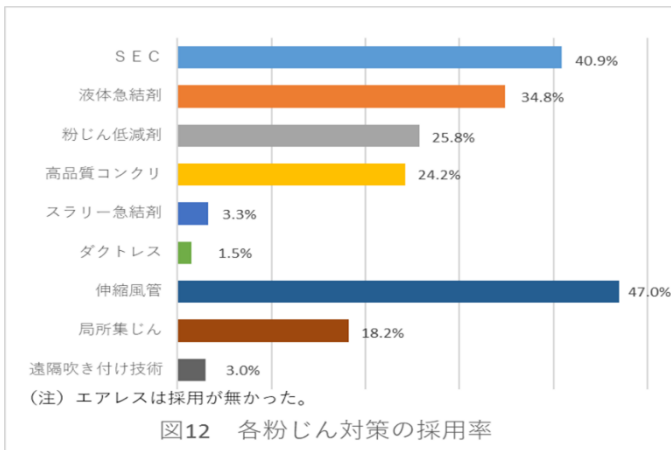
- (1) 厚生労働省(2019))は、トンネル建設工事を行っている 28 社の本社(回収率 100%)と、66 現場(回収率 78.6%)から、現状のトンネル建設工事における粉じん濃度、管理能力や低粉じん化対策の取り入れ状況等に関するアンケートの提出を受け、その結果を分析した。
- (2) 本社調査によれば、各粉じん対策の採用率は、液体急結剤が 75.0%、粉じん低減剤が 70.8%など、5 種類のコンクリートへの低粉じん化対策の採用率は 5 割を超えている。一方で、ダストレス、エアレス吹きつけの採用率はいずれも 8.3%にとどまる。換気設備の強化については、伸縮風管の採用率が 83.3%、局所集じん装置が 50.0%であった(図 2)。採用した対策による粉じん濃度の低減率は、おおむね 8 割程度で 10%以上となった。対策によっては、50%を超える低減率を達成したのものもあった(図 3)。対策を採用しなかった理由としては、コスト(価格・効率)が高く(33%~75%)、技術的な課題(0%~25%)、品質(0%~25%)よりも割合が高かった(図 4)。粉じん濃度目標レベルの引き下げについては、50%が可能であると回答し、引き下げ可能なレベルとしては、1.5~2.0mg/m<sup>3</sup>とする回答が最も多かった(42.9%)。



- (3) 現場調査によれば、調査対象のトンネル(66 現場)は、大断面(40m<sup>2</sup>以上)が 87.9%であり、60~80m<sup>2</sup>のトンネルが最も多かった。施工方法は、発破が最も多く(62.7%)、機械(23.9%)、発破機械併用(13.4%)の順であった。各粉じん対策の採用率は、液体急結剤が 40.9%、粉じん低減剤が 25.8%など、5 種類のコンクリートへの低粉じん化対策の採用率はいずれも本社調査と比較して 3 割程度低い。ダストレス(1.5%)の採用率も低かった。換気設備の強化については、伸縮風管の採用率が 47.0%、局所集じん装置が 18.2%であった(図 12)。本社調査と現場調査の違いは、現場ごとに対応には



らつきがあるためと考えられる。粉じん濃度については、93.9%が現行のガイドラインどおり、切り羽から50mの地点で測定を行っており、各現場の粉じん濃度の平均値は、 $2\text{mg}/\text{m}^3$ 前後であったとする現場が最も多く、 $2\text{mg}/\text{m}^3$ 以下が過半数(55.4%)を占めた(図15)。粉じん目標レベルの引き下げについては、39.4%が可能と回答し、引き下げ可能なレベルとしては、 $2.0\sim 2.5\text{mg}/\text{m}^3$ が最も多かった。



## 7 作業環境測定及びその評価の趣旨について

- (1) 作業環境測定の評価は安衛法第65条の2に規定されており、その趣旨は、「単位作業場所について、作業環境測定の結果得られる測定値を統計処理し、評価値を算出して、測定対象物質ごとに決められている管理濃度と評価値等を比較することにより管理区分の決定を行うこと」とされている(労働安全衛生法の詳解(1991))。
- (2) さらに、評価値については、作業場内における有害物質の濃度の分布は、「時間的にも空間的にも正規分布ではなく、対数正規分布に近い」ことを前提とし、幾何平均値と幾何標準偏差を用い、全ての測定点(場所、時刻、日を含む。)のうち、管理濃度を超えるような濃度を示す測定点が5%未満である値(第1評価値)と、環境空气中の有害物質の平均濃度(第2評価値)を算定している(日本作業環境測定協会(2010))。

## 8 考察(新たな粉じん濃度測定の結果の位置づけ)

- (1) トンネル工事(NATM・発破工法)は、削孔・装薬→発破・待避→ずり出し・支保工建込→コンクリート吹付→削孔・装薬というサイクルを4～6時間程度で繰り返すが、作業ごとに粉じん濃度は大きく異なる。このため、粉じん濃度が時間的に対数正規分布しているという作業環境測定の評価値の算定の前提(日本作業環境測定協会(2010))は成り立たない。また、空間的にも、単位作業場は切り羽から集じん口までとするにしても、集じんしきれない粉じんの濃度を管理するという観点であれば、トンネル全長の測定が必要となる可能性が高く、現在検討している測定点の数では、



これらの空間的な平均を求めることも困難である。

- (2) これらの問題を新たな測定方法（1 サイクル連続測定や個人サンプラーによる測定）によりある程度解決したとしても、単位作業場を特定できない問題は残る。すなわち、トンネルの切羽は毎日前進していくため、切羽の土質が前日とは異なる可能性が高い上、仮に同じ土質であったとしても土中の水分量等の変動により、測定日の単位作業場と測定日の翌日の単位作業場の粉じんの発生しやすさには、連続性があるとはいえず、前者の平均的な作業環境は後者の平均的な作業環境に一致するとはいえない。
- (3) 以上から、現在検討している新たな粉じん濃度測定の結果は、作業環境測定の評価値に基づく厳密な管理区分設定にはなじまない。このことは、遊離けい酸に係る測定が行われる場合にあっても同様である。一方で、当該測定結果は、トンネル工事中の粉じん濃度の工学的対策の効果を示す目安としては使用可能であることから、従来どおり、工学的対策である、発散源対策及び換気装置等が適切かを判定する際の指標である「粉じん濃度目標レベル」と比較するための値として位置づけるべきである。
- (4) ただし、遊離けい酸に係る測定結果については、工学的対策だけで十分な低減を図ることは困難である。例えば、遊離けい酸含有率が 15% の場合、粉じん濃度は、ACGIH 方式で 1/15、管理濃度方式で 1/19 にまで粉じん濃度が低減される必要があり、そのための所要換気量（希釈方式）はその逆数である 15 倍～19 倍となる（建災防（2012））。現在の一般的な換気量である 2000m<sup>3</sup>/min においては（西村（2010））、大口径の送風管（1700mm）を使用しているも、風速が 14m/s（2000m<sup>3</sup>/2.3m<sup>2</sup>/60）に達しており、それを単純に 15 倍すると風速 210m/sとなる。送風機等の工学的限界はさておき、そのような風速を切羽に導入することは、落石等、切羽での労働災害の発生を誘発する恐れがあるなど、現実的でない。なお、米国においてもこのような管理を行っていないことは、トンネル工事における結晶シリカ濃度の幾何平均が TLV の 10～13 倍となっていることから明らかである（Sovue et.al（2013）、Flanagan et.al（2006））。
- (5) 遊離けい酸による健康障害の防止のためには、作業者の遊離けい酸のばく露を十分に低減する必要があることから、換気等の工学的対策による作業環境改善に加え、義務付けられている電動ファン付き呼吸用保護具を適切に選択する等の作業管理が必要となる。米国安全衛生庁（USOSHA）や ISO/TS 16975 においては、測定されたばく露濃度をばく露の基準値で除した値を「要求防護係数」（ISO では、protection level (PL)）として評価する。そして、「要求防護係数」を上回る「指定防護係数」（assigned protection factor (APF)）を有する呼吸用保護具を使用することを定めている（US-OSHA 29 CFR 1910.134）。
- (6) ばく露濃度の基準値は、それぞれの物質ごとに決定されるものであるが、遊離けい

酸ばく露濃度の基準値については、国際的に最も厳しい値である、米国政府労働衛生専門家会議（ACGIH）で提案されている結晶質シリカのばく露限界値（TLV）である、 $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ を採用することが妥当である。なお、一般的な粉じんに対するばく露の基準値は $3\text{mg}/\text{m}^3$ であることから、はるかに厳しい値である $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ に対して十分な指定防護係数を有する呼吸用保護具を使用すれば、一般粉じんに対する防護としては十分なものとなる。

- (7) 粉じん濃度測定値の評価方法として、全測定値を算術平均するのか、幾何平均するのかという問題がある。一般的な作業環境の濃度分布は、発生源からの距離に応じて指数的に濃度が減少する幾何正規分布を前提として、評価値の計算には、幾何平均が多く用いられる。しかし、労働安全衛生研究所（2018）の図6（1）で、1サイクル連続測定の粉じん濃度は、切羽からの距離との関連は見られない。労働安全衛生研究所（2019）においても同様の結果となった（図A参照。）この理由は、切羽近辺に分布する大粒径の粉じんを分粒装置によって除いていること、強力な換気によって発散後短時間で粉じん濃度が空間的に均質化することなどが考えられる。このため、粉じん濃度測定値の評価値は、全測定値を算術平均した値とすることが妥当である。

## 9 考察（新たな粉じん濃度測定に係る目標レベル）

- (1) 現在検討している粉じん濃度測定結果に係る目標レベルの値は、工学的対策の目標値として、「坑内における粉じん濃度を可能な限り最小限にとどめるための現実的な目標レベルとする必要があり、ずい道の種類、坑内の粉じん作業における作業工程、作業の態様、粉じん発生の態様等を踏まえ、設定することが重要である」（建災防（2000））とされていることを踏まえる必要がある。
- (2) 西村（2010）によれば、2005年時点において、 $3\text{mg}/\text{m}^3$ を実現している現場は約50%としている。また、労働安全衛生総合研究所（2018, 2019）によれば、8つのNATM山岳トンネルでの1サイクル定点測定の各トンネルの平均値は、全て $2\text{mg}/\text{m}^3$ を下回っている（表C）。
- (3) 粉じん濃度低減のための技術開発の進展を観てみると、吸引捕集方式の開発（西村（2010））、トラベルクリーンカーテンの開発（大林組ら（2012））など、換気方法の技術開発が進んでいる。さらに、液体急結剤（大窪ら（2001）、為石ら（2006））、粉じん抑制剤（大里ら（2002））の吹付コンクリートへの添加、エアレス吹付（鈴木ら（2003））の採用によるコンクリート吹付時の粉じん濃度の低減方策の技術開発も進んでいる。また、遠隔操作によるコンクリート吹付作業の技術開発も進んでいる（尾畑（2019））。
- (4) 労働安全衛生研究所（2018）の最新の粉じん測定の結果や、粉じん濃度低減に関する技術開発の進展を踏まえれば、現在検討している粉じん測定に係る目標レベルは、実現可能な範囲で出来るだけ低い値を設定すべきである。適切な値を設定するため

に、現状のトンネル工事における粉じん濃度の現状、換気設備や低粉じんコンクリート吹付施工等の取り入れ状況をアンケート調査した。

(5) 厚生労働省(2019)においては、トンネル現場の約半数の粉じん濃度は $2\text{ mg/m}^3$ 以下となっており(図15)、約半数の粉じん濃度は $3\text{ mg/m}^3$ 以下であった2005年当時と比較して(西村(2010))、15年間で粉じん濃度は3分の2にまで低減している。さらに、下げることが可能と回答した事業者の42.9%が $1.5\sim 2.0\text{ mg/m}^3$ まで目標レベルを下げることを可能であると回答している。このため、大きな効果があると確認された粉じん低減化技術や、換気技術の導入がさらに進めば、目標レベルを $2\text{ mg/m}^3$ まで引き下げることが十分に達成可能であると考えられる。なお、これら技術を採用しない最大の理由がコスト(価格・効率)であるため、これら新技術の必要経費に係る発注条件における積算について、検討いただきたい。

(参考文献)

- Flanagan ME, Seixas N, Becker P, Takacs B, Camp J (2006) Silica Exposure on Construction Site: Results an Exposure Monitoring Data Compilation Project. J of Occup and Envi Hyg. Vol.3 pp. 144-152
- ISO/TS 16975-1: 2016 Respiratory protective devices – Selection, use and maintenance – Part 1: Establishing and implementing a respiratory protective device programme.
- NEPSI (2019) Occupational Exposure Limits in  $\text{mg/m}^3$  – Respirable dust In EU 27<sup>1</sup>+ Norway & Switzerland. Available at:  
[https://www.nepsi.eu/sites/nepsi.eu/files/content/document/file/oel\\_full\\_table\\_may\\_2019\\_europe.pdf](https://www.nepsi.eu/sites/nepsi.eu/files/content/document/file/oel_full_table_may_2019_europe.pdf)
- Sauve J, Beaudry C, Dion DC, Gerin M, Laboue J (2013) Silica Exposure During Construction Activities: Statistical Modeling of Task-Based Measurements from Literature. Ann Occup Hyg, Vol. 57, No. 4 pp. 432-443
- US-OSHA : 29 CFR 1910.134. The final Respiratory Protection Standard
- 赤坂雄司、大下武志、波田光敬、鈴木裕一 (2004) 吹付けコンクリートにおける急結剤の有無による粉じん発生量の相違について コンクリート工学年次論文集 Vol. 26, No. 1 pp. 1605-1610
- 大林組、国土交通省八代河川国道事務所(2012) トンネル坑内の粉じん低減工法「トラベルグリーンカーテン」の開発～短時間で坑内の作業環境を飛躍的に改善～ 建設の施工企画 2012年10月号 pp. 67-71
- 大窪克己、片寄学 (2002) 吹付コンクリートの粉じん対策 トンネル工学研究論文・報告集

- 第12巻 pp. 275-278
- 大里祥生、斉藤和男、吉富幸雄、内田正孝(2002) 山岳トンネル坑内の粉じん濃度低減の試み トンネル工学研究論文・報告集 第12巻 pp. 419-424
- 尾畑洋(2019) 次世代トンネル施工システムの開発ー吹付コンクリートの遠隔操作技術ー 土木施工 Vol. 60 No. 1 pp. 83-84
- 建設業労働災害防止協会(2000) ずい道工事における換気技術委員会報告書 平成12年3月
- 建設業労働災害防止協会(2012) ずい道等建設工事における換気技術指針(換気技術の設計及び粉じん等の測定)
- 管理濃度等検討会(2008) 管理濃度等検討会報告書 平成20年10月27日
- 鈴木裕一、野間達也、土屋敏郎、三河内永康(2003) 低粉じん型方式コンクリート吹付機の現場適用 フジタ技術研究報告第39号 pp. 1-6
- 為石昌弘、坂口和雅、富澤直樹、坂口武志(2006) アルカリフリー液体急結剤を用いた吹付けコンクリートによる粉じん低減効果 コンクリート工学 Vol. 44, No. 3
- 西村章(2010) 進化するトンネル換気技術 建設の施工企画 2010年9月号 pp. 47-53
- 日本作業環境測定協会(2010) 作業環境測定ガイドブック「0」総論編 第4版 pp. 153-161
- 日本産業衛生学会(2018) 許容濃度等の勧告(2018年度),  
<https://www.sanei.or.jp/images/contents/309/kyoyou.pdf>.
- 労働安全衛生法の詳解(1991) 第3版 労働調査会