

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—

Dust in a Tunnel

—Property and Concentration of Dust,

Measure against Dust and New Scrubber—

新藤 敏郎*
Toshirō Shindō

平田 篤夫*
Atsuo Hirata

稲葉 力*
Tsutomu Inaba

要 約

トンネル坑内で発生する粉じんについて、粉じんの性状、人体に及ぼす影響、粉じん対策、新開発の集じん装置について概説する。

社内で制定した「トンネル等坑内粉じん濃度測定基準」に基づき、全国各地のトンネル施工箇所の粉じんを測定した結果から、作業別の粉じん濃度、相対粉じん濃度と質量濃度の関係等を述べる。遊離けい酸についても、測定値と公表されている資料とを比較している。

粉じん対策として、発生源側の対策、発生した粉じんの除去対策、作業側側の対策の3つにわけて説明し、事例を2例あげている。

新開発の「荷電噴霧式集じん装置」については、室内及び現場実験を行い、基礎的な成果を収めたので、それについて述べるとともに、今後の展望を記す。

目 次

- §1. はじめに
- §2. トンネル坑内の環境について
- §3. 粉じんの測定
- §4. 粉じん対策
- §5. 集じん実験
- §6. おわりに

§1. はじめに

トンネル坑内の環境に及ぼす要因の中では、浮遊粉じんの影響が最も大きいと考えられる。従来最大の粉じん発生源であった削孔作業において、水ぐりが一般的となるなど、削孔作業に関しては発生粉じん量が減少している。一方、近年 NATM が広く採用されるようにな

り、吹付け作業から発生する粉じんが問題となっている。

浮遊粉じんのもたらす問題は、けい肺・じん肺訴訟でもわかるように、トンネル工事を施工する建設業界としては、看過できない状況に至っている。

トンネル坑内の浮遊粉じんに対する規制値については法的なものではなく、労働省の指導又は産業衛生学会の勧告値があるのみで、施工業者の自社基準値に委ねているのが現状である。

このような状況で、当社は昭和59年4月に「トンネル等坑内粉じん濃度測定基準」*1「粉じん測定に関する技術要領」*2を定め、浮遊粉じん及び遊離けい酸の測定を各トンネル現場に義務づけた。

技術研究部では、質量濃度の測定を担当するとともにデータの収集・分析につとめている。また、技術研究部クリーンルーム班の成果である荷電噴霧式の集じん機構

*技術研究部土木技術課

*1以下、「測定基準」
*2以下、「技術要領」

を応用した集じん機を製作して、トンネル坑内で集じん実験を行った。

本報文は、粉じんの発生源、性状、粉じん対策、粉じん測定の結果及び新装置を用いた集じん実験について概説するものである。

§2. トンネル坑内の環境について

2-1 粉じんの発生源と状況

トンネル坑内では限られた空間に種々の粉じんが発生している。その発生源となる作業と発生状況には、つぎのようなものがある。

(1)削孔（穿孔）

現在では水ぐりをするのが一般的なので、粉じんの発生はほとんど抑えられている。

(2)発破

爆発力により、多量の粉じんを一時的に広範囲にわたり発生させる。作業員は全員退避しているため、粉じんに接触するときには拡散されたものとなっている。

(3)掘削・ずり出し

発破工法の場合は、レール方式のずり出しであれば、ロッカショベル等でずり積み作業を行う際にずりの粉じんが発生する。タイヤ方式のずり出しであれば、ずり積み作業の粉じんに内燃機関の排ガス中のカーボンブラックが加わる。

機械掘削の場合は、切羽の岩が湿っていれば（あるいは含水比が高ければ）粉じんの発生は少ないが、逆の条件ならばロードヘッダ等の掘削によって発生する粉じんが問題となる。

(4)吹付けコンクリート

トンネル施工における最大の粉じん発生源であり、大量の粉じんが長時間にわたり発生し、その濃度も高い。

2-2 粉じんの粒径分布

(1)一般的な粒子の場合

発生した粉じんについて、人体に及ぼす影響からどのような粒径分布を示しているか、また、集じん機の粒径別の捕集効率はどうかという観点から、粒径分布について調べてみる必要がある。一般的な粒子の大きさを Fig. 1 に示す。

実際に粉じんの粒径分布を求めるには、粉じんを粒径別に捕集する多段ステージを持つサンプラを使用して捕集する。得られた粒径分布は、基準となる粒子に対して空気動力学的に分粒されたものと等価であるといえるので、人体の呼吸器系の各部分への沈着・堆積特性を知るのに用いられる。この特性を Fig. 2 に示す。このように

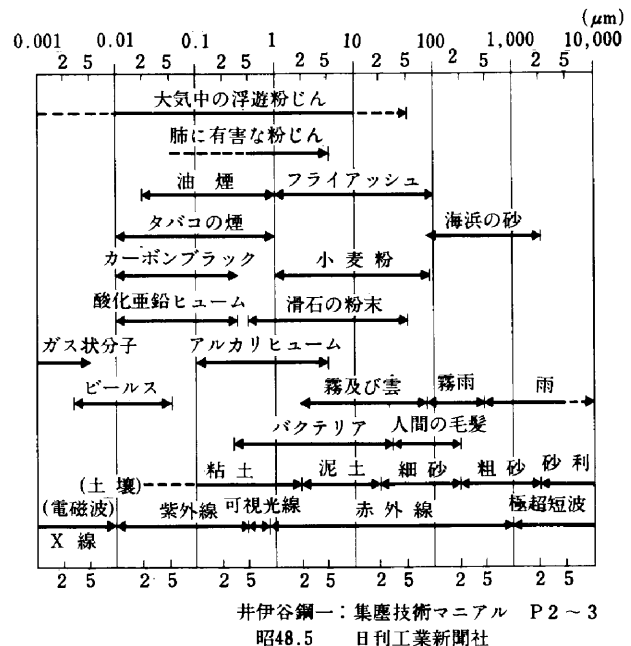


Fig.1 粒子の大きさ

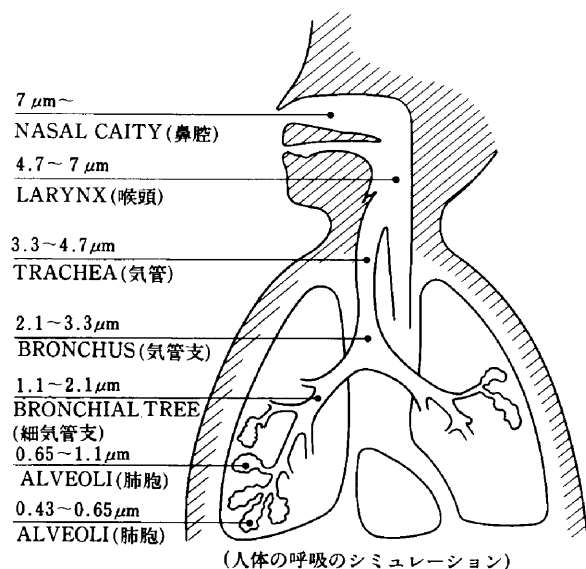


Fig.2 SIMULATION HUMAN RESPIRATORY SYSTEM (人体の呼吸のシミュレーション)

粉じんの粒径分布を知ること、集じん機の捕集効率を考慮する場合の資料となる。

(2)トンネル坑内の粉じん粒子の場合

粒径分布の測定を、吹付作業とずり出し作業について現場で行った。測定位置は切羽から61mに設け、吹付け作業については9.5m地点にも設置した。

測定結果を Fig. 3 の粒径加積曲線に示す。その結果と Table 1 から、作業別に浮遊粉じん量と粉じん濃度をまとめてみると、以下のことがわかる。

①粉じん中の9μm以下の粒子の割合（通過率）は、ず

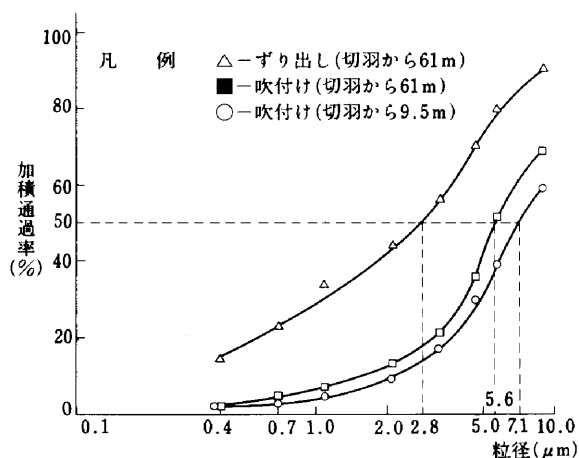


Fig.3 粒じんの加積通過率

Table1 作業種別にみた粉じんの粒径及び濃度

項目	測定条件	吹 付 け		
	ずり出し	切羽から61m	切羽から61m	切羽から9.5m
9 μm以下の粒子の割合	90%	69%	59%	
9 μm以上の粒子の割合	10%	31%	41%	
9 μm以下の粉じん濃度	6.2mg/m ³	13.6mg/m ³	24.8mg/m ³	
9 μm以上の粉じん濃度	0.7mg/m ³	6.2mg/m ³	17.1mg/m ³	
50%粒子径	2.8 μm	5.6 μm	7.1 μm	

り出し作業の方が吹付け作業より大きな値を示している。

②50%粒子径は、吹付け作業の方がずり出し作業より大きい。

③吹付け時の粉じん中に占める9 μm以上の粒子の全粉じん量に占める割合は、切羽に近い方が遠い場合よりやや大きい。

④吹付け時の粉じん濃度は、9 μm以下も9 μm以上も切羽に遠い方が低い値を示している。

以上の理由として、①、②については、作業時にダンプトラックやバックホーなどの内燃機関の排気ガスによる影響があるとみられ、ずりだけの粉じんではなく、排気ガスとの複合粉じんとなっている。ただし、粉じん濃度は吹付け作業時の方が、ずり出し作業時より大きくなっている。③については、切羽に近い点から遠い点に至るまでに、重い粒子が沈降するためと考えられる。④については、9 μm以下の粒子についても、粉じんの沈降により低くなるものと考えられる。

人体の呼吸器系への影響をみると、Fig. 2, 3 からずり出し作業では粒子がほぼ均等に分布していて、呼吸器全体に同程度に沈着・堆積することがわかる。吹付け作業では、粒径3.3 μm以上の粒子が80%近くを占めているため、ほとんどが気管入口付近に沈着・堆積することがわかる。

§3. 粉じん測定

3-1 粉じん測定の目的

トンネル作業に従事する者が、長年にわたって粉じんを吸入すると、じん肺・けい肺にかかる怖れがある。しかし、可燃性ガスや有毒ガスとは異なり、即座に災害に直面しないので、知らず知らずのうちに粉じんを吸入している。こういった粉じんばく露の実態を把握するため、当社でも「測定基準」及び「技術要領」を定めて、測定を実施し今後の対策の資料とする必要があった。

なお、ここで述べる粉じんの粒径は、特にことわらない限り10 μm以下とする。

3-2 粉じんと遊離けい酸の許容濃度

トンネル坑内の粉じんに関して、労働安全衛生法（以下「安衛法」という。）第65条の関係条項規則に「粉じん則第26条」がある。この「粉じん則第26条」には測定の対象として「特定粉じん作業の行われている屋内作業場の粉じんの濃度、遊離けい酸の含有率」を定めている。ちなみに同則では粉じんの定義を「物の破碎、選別、その他の機械的処理又は堆積にともない発生し、飛散する物質」としている。一方、許容濃度については日本産業衛生学会が Table2 の勧告値を示している。

これによると鉱物性粉じんの許容濃度は、遊離けい酸含有量によって分けられる。遊離けい酸含有率が10%以上の場合には、吸入性・総粉じんとも、含有率の増加にともない許容濃度は減少する。

遊離けい酸とは粉じん中に含まれているけい酸分のことで、主として二酸化けい素（SiO₂）である。これが、じん肺・けい肺のおもな原因であり、粉じん中に含まれる遊離けい酸含有率で許容濃度が定められている。

3-3 粉じん測定方法

測定方法を以下に概説するが、詳細は「測定基準」及び「技術要領」を参照されたい。

(1) 粉じんの単位について

粉じん濃度の単位は質量濃度として mg/m³、相対濃度として cpm (counts per minute) を使用する。日常の測定は相対濃度で測定するのが一般的である。質量濃度は換算係数と相対濃度から次の式で求められる。

$$D = K \cdot C$$

K : 質量濃度換算係数

C : 相対濃度 (cpm)

D : 質量濃度 (mg/m³)

Table2 粉塵の許容濃度

I. 遊離珪酸含有10%以上の粉塵（次式により計算）			
吸入性粉塵* $M = \frac{2.9}{0.22Q + 1} \text{ mg/m}^3$			
総粉塵** $M = \frac{12}{0.23Q + 1} \text{ mg/m}^3$			
M：許容濃度，Q：粉塵中遊離珪酸含有率（%）			
II. 各種粉塵			
	粉 塵 の 種 類	許容濃度 mg/m^3	
		吸入性粉塵*	総 粉 塵**
第1種粉塵	滑石、ろう石、アルミニウム、アルミナ、珪藻土、硫化鉱、硫化炭鉱、ベントナイト、カオリナイト、活性炭、黒鉛	0.5	2
第2種粉塵	遊離珪酸10%未満の鉱物性粉塵、酸化鉄、カーボンブラック、石炭、酸化亜鉛、二酸化チタン、ポルトランドセメント、石灰石、大理石、線香材料粉塵、穀粉、綿塵、木粉、草粉、コルク粉、ペークライト	1	4
第3種粉塵	その他の無機および有機粉塵	2	8
石綿粉塵	クリソタイル、アモサイト、トレモライト、アンソフィライト、アクチノライト	時間加重平均：5 μm 以上の石綿繊維で2繊維/ cm^3 （これに対応する石綿粉塵の重量濃度は0.12 mg/m^3 ） ceiling値：5 μm 以上の石綿繊維で10繊維/ cm^3 （いかなる時も15分間の平均濃度がこの値をこえてはならない）	
	クロソドライト	0.2繊維/ cm^3	

〔注〕 1. * 吸入性粉塵：次に示す分粒特性を有する分粒装置を通過した粒子を吸入性粉塵とする。

$$P = 1 - \frac{D^2}{D_0^2} \quad (D \leq D_0)$$

$$P = 0 \quad (D > D_0)$$

ここに、P：透過率，D：粉塵の相対沈降径（ μm ）， D_0 ：7.07 μm

2. **総粉塵：捕集器の入口における流速を50～80 cm/sec として捕集した粉塵を総粉塵とする。

3. 粉塵の許容濃度は、下記付録(1)遊離珪酸10%以上の粉塵および第1種、第2種、第3種粉塵測定法によって測定された濃度である。

4. 石綿粉塵の測定法は付録(2)に示したメンブランフィルター法またはX線回折法によるか、あるいは、これらの方法で得られる値と比例的関係をもつ値の得られる他の方法によるものとする。

(2)測定対象作業

トンネル内の粉じんを大別すると、岩石を主原料とする粉じんとセメントを主原料とする粉じんに分けられる。前者の対象となる作業には、穿孔、掘削及びずり出し作業があり、後者の対象となる作業には、吹付け作業がある。

初期の測定結果から、穿孔及び掘削作業では通常ほとんど粉じんが発生しないと判断できたので、以後の測定はずり出し作業と吹付け作業を対象とした。ただしロードヘッダ等（自由断面掘削機）を用いて掘削すると、粉じんの発生が大きいと考えられるので、この場合は測定対象作業とした。

(3)測定点

切羽で作業を行っている場合、トンネル平面を3 m×3 mのメッシュに分割し6点をその作業場所の測定点とし、その後方にも参考に測定点を6点設置する。この測定点の配置はあくまでも標準であって、断面の大きさや作業機械の配置等の関係により変更することにした。さらに、作業は行っていないが一般通行等に供される場所として、トンネル全長についてトンネル坑口から100 mごとに測定点を1点ずつ設けた。

作業場所の測定点は、その作業での平均粉じん濃度を算出するためのもので、作業場所後方の測定点は粉じんの拡散状態をみるためのものである。Fig. 4 にトンネル

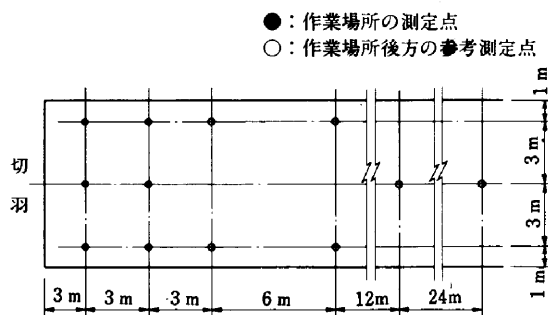


Fig.4 測定点の標準配置図

幅8 mの場合の標準配置図を示す。

測定は側壁から1 m以上離れた定常気流中の点で、高さは下盤から1.0～1.5m程度で行う。

これらの測定点は光散乱式デジタル粉じん計での測定点であり、ローボリュームエアサンプラでの測定箇所は前述の切羽付近の作業場所の測定点から1点を選ぶ。

(4)測定機器

①光散乱式デジタル粉じん計

粉じんに光を当て、その散乱光の光量が粉じんの質量濃度に比例することを利用した相対濃度計である。単位はcpmを用いる。

②ローボリュームエアサンプラ

1分間に15 l～30 lの空気を吸引し、7.07 μm 又は10 μm 以下の粉じんをフィルタで捕集する装置である。粉

じん質量と吸引空気量から質量濃度を計算する。単位は mg/m^3 を用いる。

③ TR エアサンプラ

1 分間に 20 l の空気を吸引し、 $10\mu\text{m}$ 以上と $10\mu\text{m}$ 以下の粉じんを別々のフィルタで捕集する装置である。

④ アネモスタ風速計

$0\sim 50\text{m}/\text{sec}$ の風速の計測が可能であり、切換えにより $0\sim 90^\circ\text{C}$ の温度計測もできる。

⑤ 電子天秤 (最終読取値 0.01mg)

⑥ デシケータ

(5) 測定方法

測定したのは主として次の 3 種の値である。それぞれ個別に説明する。

① 粉じん濃度の分布 (相対濃度)

② 質量濃度換算係数 (K 値)

③ 遊離けい酸含有率

1) 粉じん濃度の分布

Fig. 4 に示す各測点で相対濃度を測定した。「測定基準」では、各測点で原則として 5 回以上測定することになっているが、作業時間と測点数の関係から困難なので、3 回程度とした。

測定順序はランダムにせず、順序を一定にして行った。

2) 質量濃度換算係数 (K 値)

切羽近辺の測点を選び、ローボリュウムエアサンプラとデジタル粉じん計で同時に測定した。作業開始後、粉じんの浮遊状態が一定に達したと判断してから作業終了まで測定した。

1 作業 1 点だけの場合が多いが、余裕があるときはトンネル 1 断面につき 3 点測定した。

3) 遊離けい酸含有率

ローボリュウムエアサンプラでは、フィルタに付着した粉じんを用いて遊離けい酸を求めるのが困難である。したがって、作業場所において代表的と考えられる岩石粉を採取し、 200 メッシュふるい下に対して「りん酸法」を適用して求めた。

岩石粉が粗い場合は、すりつぶして試料を調整した。

3-4 粉じん測定の結果

測定開始以来現在まで、8 現場の測定を実施した。個々の現場条件によって測定値は異なるが、ここでは一般的傾向を述べるにとどめる。

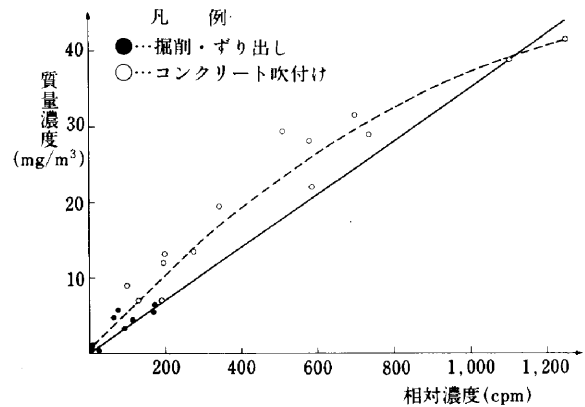


Fig.5 相対濃度～質量濃度の関係

(1) 作業の種類と粉じん濃度

粉じん濃度は Fig. 5 に示すように、掘削・ずり出し作業では質量濃度で表わして最高が約 $6.5\text{mg}/\text{m}^3$ 、吹付け作業では逆に最低でも $6.5\text{mg}/\text{m}^3$ となっている。吹付け作業時において一般的な環境条件の場合、粉じん濃度は相対濃度で $400\sim 600\text{cpm}$ に達している。その場合、質量濃度は $20\sim 30\text{mg}/\text{m}^3$ になっていることがわかる。視覚的には、かなりかすむ状況といえる。

(2) K 値について

3-3. で説明した K 値は、Fig. 5 中の各測点の勾配で与えられる。相対濃度が約 500cpm を越えると勾配はゆるくなる傾向がある。この理由は、光散乱式粉じん計の原理を考えれば納得できる。

同図中の実線は $K = 0.035$ を表わしており、測定開始当初、目安としていた値である。破線は回帰分析で求めたもので、相関係数は 0.98 である。

吹付け作業の場合、相対濃度が大きくなると K 値の分散は小さくなる傾向を示し、掘削・ずり出し作業の場合は相対濃度が 100cpm 程度の値を多く示していて、分散が大きくなる傾向を示している。吹付け作業の場合、換気量、粉じん抑制剤の有無等の条件を同一とすれば、吹付け技術・混合状態により粉じん濃度が大きく変化すると考えられる。

(3) 遊離けい酸含有率

測定結果を Table 4 に示す。日本鉱業会誌による Table 3 と Table 4 を比較すると、Table 4 の値の方が小さい傾向にあるが、同一の岩を分析しているわけではないので値が違っていても不思議ではない。

(4) その他

これまで筆者らが測定してきたのは、粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の粉じん濃度であり、粒径 $7.07\mu\text{m}$ 以下の吸入性粉じんについては特に測定をしなかった。しかし、産業衛生学

Table3 各種岩石の遊離けい酸含有率(%)

種 類	遊離けい酸	種 類	遊離けい酸	種 類	遊離けい酸
火成岩		塩基性岩		変成岩	
酸性岩		斑 れい 岩	0~11	片 麻 岩	17~37
花 崗 岩	29~38	輝 緑 岩	4~14	雲 母 片 岩	32~52
石 英 斑 岩	25~53	玄 武 岩	8~28	緑 泥 片 岩	6~34
ペグマタイト	28~32	超塩基性岩		緑 簾 片 岩	18~41
流 紋 岩	21~34	輝 岩	0~1	角 閃 片 岩	10~22
花崗閃緑岩	18~28	角 閃 岩	0~23	珪 岩	68~93
中性岩		かんらん岩	0~1	ス カ ル ン	30~50
石英粗面岩	26~47	堆積岩			
石英安山岩	23~41	砂 岩	25~65		
角閃安山岩	20~34	砂 質 頁 岩	22~58		
変朽安山岩	11~30	頁 岩	20~45		
輝石安山岩	5~17	粘 板 岩	28~44		
ふ ん 岩	32~41	凝 灰 岩	25~58		
斑 岩	26~34	珪 岩	45~82		
粗 面 岩	8~14	粘 土	17~50		
粗面安山岩	4~6	石 灰 石	0~8		

房村信雄：砕石プラントにおける粉じんの実態
日本鉱業誌 88巻 1,007号 P23~28 1972

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

会の勧告値は吸入性粉じんと総粉じんについてであり、トンネル関係の粉じんに関する議論も吸入性粉じんを対象としつつあるようである。

筆者らも最近の測定では両方測定しているが、データ数が少なく公表できる段階に至っていない。Fig. 3からも予想されるように、吸入性粉じんの濃度の方が $10\mu\text{m}$ 以下の粉じんの濃度よりも、相当小さくなるようである。

§4. 粉じん対策

粉じん対策の基本は、粉じん発生量を減らすことである。発生して浮遊した粉じんは、人体に吸入されるまでに処理するのが望ましい。処理されずに人体に到達した粉じんは、防じんマスク等で捕集する。以上の3種類の対策が考えられる。

4-1 発生源側の対策

1) 掘削・ずり出し作業時

自由断面掘削機による掘削の場合、切羽を湿潤に保つ

ことによって粉じん発生量を大幅に減少できる。ずり出しについては、工事車両を電気式にすることで対応できる。

2) 吹付け作業時

リバウンド率と発生粉じん量は密接な関係があり、リバウンド率が最少となる S/C (砂セメント比) で発生粉じん量は最少となる⁶⁾。また、単位粗骨材率が増せば、発生粉じん量は減少する⁶⁾。これらを考慮して、Table5に示す粉じん抑制剤を添加して配合することで、発生粉じん量の大幅な低減が可能である。

Table5 粉じん防止剤

種 類	商 品 名	商 社 名	混 入 量	備 考
ポリエチレン オキサライド	エスベゾール		セメント重量の 0.5~1%	熊谷組CAV ショットクリート工法
有機系	シリボソ	富士物産㈱	0.2	西独ヘンケル社製
無機系	セックライト	大倉商事㈱	0.1~0.2	
改良型	セックライト	協立化学産業㈱	0.01~0.05	
	デンカクリアップ		0.1~0.3	電気化学工業㈱製

基本的な問題では乾式を選ぶか湿式を選ぶかという問題もあるが、いうまでもなく湿式の方が粉じん発生量は少ない。

その他にノズルマンの技術、つまり壁面に直角に吹付けることや吹付けコンクリート材の配合管理が発生粉じん量を大きく左右する要素と考えられる。

4-2 発生した粉じんの除去

発生してしまった粉じんは、できるだけ速やかに作業場所から除去する必要がある。Table2の許容濃度まで下げるのが理想であるが、現実的には不可能と考えられるので、次の2つの対策をとることになる。

1つは、トンネル坑内の換気により切羽の粉じんを坑外に搬出する方法で、もう1つは、作業場所集じん装置を用いる方法である。その他、一般的なのは、切羽で換気と集じん装置を併用する方法、坑外まで送り出した空気を集じん装置に通す等の方法が考えられる。

理想的なのは、発生したらずう除去する方法で、1例をFig. 6とFig. 7に示す。

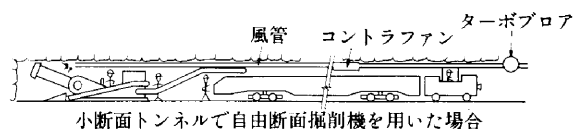


Fig.6 集じん機の配置例(1)

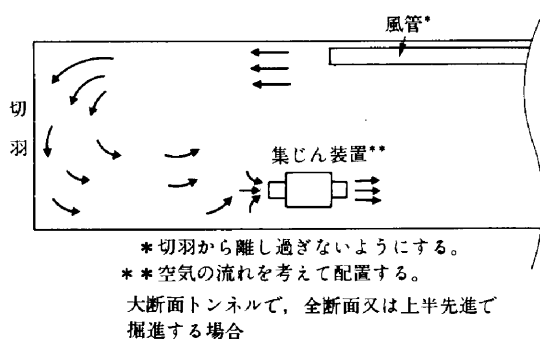


Fig.7 集じん機の配置例(2)

Table6 主要集じん装置一覧表

種類	名 称	集じん原理と集じん性	特 徴
重力集じん装置		重力の自然沈降。数10 μ 以上の粒子	寸法は非常に大きくなる
慣性力集じん装置	エルミネータ、ラメラ ：松坂貿易物 エルミネータ、コロロホルム ：日本硝子物	気流の急激な方向転換により慣性力での分離する。数10～10 μ 程度の粒子	目づまりの恐れがある じやま板が合成樹脂でできている
遠心力集じん装置	エアタンブラ ：三菱化工機 サイクロン	含じんガスを旋回運動を与え、遠心力によって、粒子をガスから分離する。数 μ 程度の粒子	粒子を水面で捕集する水面調整をする
音波集じん装置		含じんガスを音波振動を与えて粒子を凝集させる。1 μ 前後の粒子	
洗浄集じん装置	ブレッシテピアPU(20) (溜水式) ：住友商事 スクラバ(ジェット、サイクロン、ベンチュリー) ヨーパック(光てん式) (テフレット) ：日鉄化工機	含じんガスを液滴、液膜、気泡などによって洗浄し、粒子の付着、凝集を促進する。1 μ 前後の粒子	溜水式で水中に粉じんをくぐらす 潮解性、粘性物質は閉そくする恐れがある 可動部少なく、湿式より1m程度の粉じんを捕集する
ろ過集じん装置	オートロー(フィルタ) ：東洋空気調和 フィドレン(フィルタ) ：日本バイリーン シーカロス型 (ハケフィルタ) ：日本セメント ルアフィルタ ：三菱化工機	含じん、ガスをろ材を通して、粒子を分離する。0.1 μ 程度の粒子	ろ布が巻き取り式となっている。フィルタ交換、目づまりの恐れ ろ布が脱着式となっている。フィルタ交換、1.5ヵ月/回 ろ布が袋状となっている。バグ交換、本体が大きくなる
電気集じん装置	エアクリーナ ：日立製作所 ニッココースペースクリア ：日本工業 マッハ ：日本工業	ガスの粒子に特高圧直流電源を用い電荷を与えて集じん極に分離する。0.1 μ 以下も捕集	ろ過式と組み合わせ 電極線を空中に張る 電極筒式

矢野礼二：吹付コンクリート入門

集じん装置には Table6 に示すものがある。現状では保守が簡単で捕集効率の優れたものはほとんどないが、今後、集じん装置が粉じん対策の切札となっていくべきであろう。

4-3 作業側側の対策

4-1、4-2の対策で Table2 の許容濃度まで下がらない場合、粉じんにばく露される作業側側の対策が必

要である。具体的には防じんマスクを着用することである。吹付け作業の場合には、4-1、4-2の対策を施しても許容濃度以下に収まらないのが現状であり、トンネル工事に占める吹付け作業の時間を考えると、現状では防じんマスクの着用は現実的な対策と考えられる。

防じんマスクには国家検定がある。参考までに Table7 に示す。表中、新旧規格とあるのは昭和58年12月28日に防じんマスクの規格の改正があったため(労働省告示第84号)、旧規格のマスクは昭和59年12月31日までに製造されたものに限り使用することができる。

粉じん側では、トンネル内の作業に関しては、ずり出しに関する作業についてだけ「呼吸用保護具を必要とする作業」としているが、当然、吹付け作業についても防じんマスクを着用すべきであろう。衝撃式さく岩機を用いて掘削する箇所が除外されているのは、粉じん側の第4条で「衝撃式さく岩機を湿式とすること」と定められていることによる。

以上、防じんマスクについて簡単に述べたが、使用にあたっての留意点について等の通達が出されているので、詳細は本支店の担当部署に問い合わせて戴きたい。

Table7 防じんマスクの規格

規 格	新 規 格	旧 規 格
項 目		
捕 集 効 率	95%以上 (試験流量 30 ℓ /min)	特 級 99.5%以上 1 級 95 %以上 2 級 85 %以上 (試験流量 30 ℓ /min)
吸 気 抵 抗	8mmH ₂ O以下(注1) (試験流量 40 ℓ /min)	特 級 8mmH ₂ O以下 1 級 6mmH ₂ O以下 2 級 6mmH ₂ O以下 (試験流量 30 ℓ /min)
排 気 抵 抗	8mmH ₂ O以下(注2) (試験流量 40 ℓ /min)	特 級 6mmH ₂ O以下 1 級 6mmH ₂ O以下 2 級 6mmH ₂ O以下 (試験流量 30 ℓ /min)
吸気抵抗上昇試験	上昇値 16mmH ₂ O以下 (試験流量40 ℓ /min、粉じんが100mg捕集された時の抵抗値)	上昇率 200%以下 (試験流量30 ℓ /min、100分後の抵抗上昇率)
排気弁の動的漏れ率試験	人工肺を用い排気弁の動作時における漏れ率の測定	
排気弁の作動気密試験		作動気密試験器にて行う
視 野	全 面 形 左 方 80度以上 上 方 50度以上 下 方 40度以上 半 面 形 下方60度以上、又は左もしくは右の斜め下方45度方向において60度以上	下 方 60度以上 下 方 60度以上
死 荷	全 面 形 ノーズカップなし ノーズカップあり 半 面 形	280cm ³ 以下 180cm ³ 以下 180cm ³ 以下
重 量	規 定 な し	(隔膜式) (直結式) 特 級 700g以下 200g以下 1 級 500g以下 160g以下 2 級 110g以下

(注1)試験流量が30 ℓ /minから40 ℓ /minに変更されているため、旧規格特級の値と比較すると制限がきびしくなっています。(吸気抵抗と試験流量は通常比例にあります。)

(注2)試験流量が30 ℓ /minから40 ℓ /minに変更されているため、旧規格値の4/3倍の値になったものと思われます。

§5. 集じん実験

Table6に掲げた集じん機は、トンネル内の粉じんの捕集には欠かせないが、それぞれに欠点を有している。例えばフィルタ式のものをを用いれば、フィルタの目詰まりを防ぐために定期的な清掃、交換作業が欠かせないし、湿式のものをを用いれば、水を多量に使用するのその処理が必要となるし路盤を荒らしたりする。また、一般的に大型で重量が大きく高価であり、維持管理にも費用がかかるようである。

5-1 集じん装置の原理と概要

集じん機は粉じん粒子に作用する力が、重力・慣性力・熱力・拡散力・電気力・音波力等の何れかということと、湿式・乾式のどちらを用いるかという捕集原理により分けられる。一般には、複数の作用力が組み合わされて、集じん機の機能が果たされている。

技術研究部で開発した新集じん装置は、湿式で、作用力は電気力を主とし、慣性力・拡散力・重力を組み合わせた集じん機である。装置の概要を Fig. 8 に示す。

この装置の原理は、技術研究部クリーンルームで開発中の西松式静電捕集装置 (NESSY) と同様で、 $0.1\mu\text{m}$ 以下のじん埃を捕集することも可能である。詳細な原理については、技報当号の「高性能静電液滴捕集と排液処理技術の開発(第1報)」に譲る。

なお、今回開発の装置を「荷電噴霧式集じん装置」と呼称している。

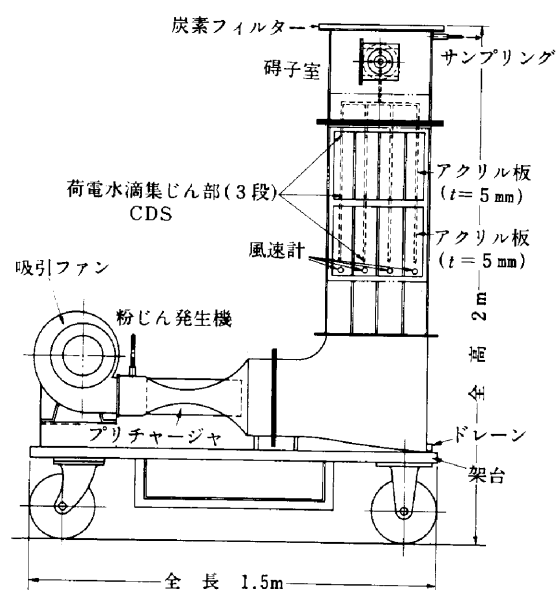


Fig.8 集じん装置の概要図

5-2 室内実験

開発当初、クリーンルームで行った基礎実験で以下のことがわかった。

- (1) CDS (Charged Droplet Scrubber)に印加する静電気は負で電圧の高いほど粉じんの捕集率が高い。
- (2) 処理風量の増減は、電圧の増減ほど捕集率に影響を及ぼさない。
- (3) プリチャージャが捕集率に及ぼす相乗効果は、現在のところ数%である。

なお、ここでいう捕集率とは集じん装置に吸入された粉じん量に対する、集じん装置内で捕集された粉じん量の比である。

次に前述の成果をもとに、試験ダストの種類、濃度、処理風量と風速等の関係を求める実験を行った。結果を Table8 に示す。

Table 8 室内実験の条件と測定結果

	試験用ダスト		濃度	処理風量	プリチャージャ部風速	プリチャージャの作動	捕集率 (%)
	種類	中位径					
1	フライ アッシュ	5.1 μm	10.0 mg/m^3	7.2 m^3/min	12.6 m/sec	なし	89.8
2				12.0	20.0	あり	89.8
3						あり	80.7
4						あり	80.3
5	関東 ローム	8.0	7.0	12.0	20.0	あり	68.4
6	タルク	7.0	5.0	12.0	20.0	あり	90.5
7	ケイ砂	8.0	4.0	12.0	20.0	なし	70.4
8						なし	74.5

この結果から、要因間の明瞭な関係は見出せなかったが、クリーンルームの基礎実験においていくつかの似かよった性状がみられた。すなわち、処理風量、試験ダストの粒径分布の影響は認められるようである。捕集率は要因の組み合わせによって変動はあるが、概ね90%以上となっている。

本装置は CDS とプリチャージャに高電圧を印加してコロナ放電を起こさせる関係から、微量のオゾンが発生する。オゾン濃度を活性炭の織布を用いて、米国政府工業衛生学術協議会の示す100ppb以下に処理するためには、圧損が大きくなって処理風量が減少するので、活性炭をハニカム状に形成したフィルタを用いたところ、大きな圧損も生じなく100ppb以下に落とすことができた。

なお、室内実験方法の詳細については、クリーンルームの報告に記すもの(前掲)と同様なので、そちらの報告を参照されたい。

5-3 現在実験

室内実験では、マイクロフィーダの能力から粉じん濃度を $10\text{mg}/\text{m}^3$ までしか設定できないことと、現場の粉じんの粒径分布と室内実験に用いた試験用ダストの粒径分布は異なることが予想されることなどから、現場実験を計画した。

吹付け作業時とずり出し作業時に集じん装置を作動して、装置周辺の粉じん濃度を測定した。

(1)実験条件

対象としたトンネルは山陽自動車道関戸トンネルで、上半先進で掘削している。岩質は粘板岩で発破工法で掘削している。換気は送気式で約 $500\text{m}^3/\text{min}$ であり、坑内風速は $0.1\text{m}/\text{sec}$ 前後である。吹付け作業時とずり出し作業時の主要使用機械は以下のとおりである。

①吹付け作業時

- ・自走式ロボット吹付け機(タイヤ式アリバ-304)
- ・吹付け機(アリバ-260)
- ・合材運搬車(6 m^3)
- ・セミバッチャプラント(CM250)

②ずり出し作業時

- ・トラクタショベル(CAT963)
- ・バックホー(0.7m^3)
- ・ダンプトラック(11トン)

室内実験の結果から、プリチャージャの印加電圧は $+13\text{kV}$ 、CDSの印加電圧は -27kV とした。処理風量はハニカム状のカーボンフィルタと交換したことで、 $15\text{m}^3/\text{min}$ に増大した。使用水量は $1\text{ l}/\text{min}$ である。実験装置の配置図を Fig. 9 に、実験状況写真を Photo 2 に示す。

(2)測定方法

Fig. 10 に示すように、実験装置は切羽から 61m の位置にあり、コントラファンの送気口の影響は受けない位置である。同図中の(◎)点にローボリュウムエアサンプラ、アンダーセン型サンプラ、デジタル粉じん計を設置し、作業開始後、実験装置の周辺の粉じん状態が一定状態に達したと判断してから測定を始め、作業終了まで続けた。

その間、他の2台のデジタル粉じん計で全測点をランダムに測定した。測定回数は、作業時間の制約もあり各測点1～5回である。

坑内の温度は 31°C 、風速 $0.05\sim 0.1\text{m}/\text{sec}$ 、湿度 100% であった。

(3)実験結果

Fig. 10 に吹付け作業時の測定結果を示す。吹付け作

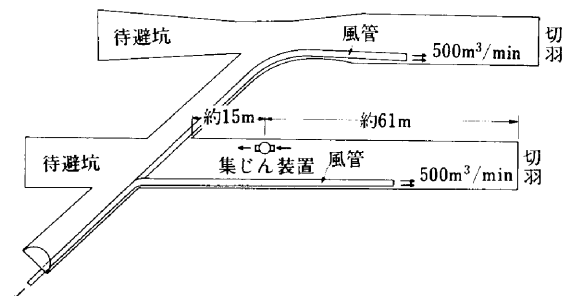


Fig.9 集じん装置位置図

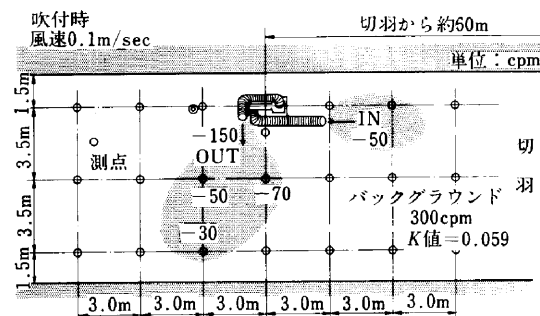


Fig.10 測定結果



Photo1 K値測定中のTRサンプラとデジタル粉じん計

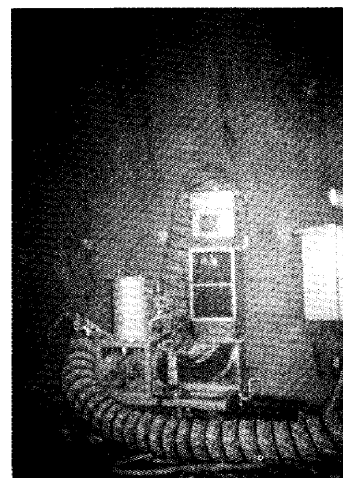


Photo2 実験中の集じん装置

業時の測定箇所のバックグラウンドは300cpm (K 値 0.059~17.7mg/m³)である。実験装置の処理能力とコントラファン能力から、測定対象区域全体での効果は認められないので、Fig. 10 中には数字を記していない。局部的に明瞭に効果が認められた測定の値のみ、バックグラウンドからの減少値を cpm で記した。

図では示さないが、ずり出し作業時においても大同小異の傾向であった。局部的な効果は認められたものの、今回の条件下における実験装置の捕集効率等は求められなかった。

(4)今後の展望

トンネル断面に対する実験装置の規模から、装置の効果を確信するまでには至らなかった。その要因と考えられる事項を以下に記す。

- ①室内実験における試験ダストとの相異、つまり粉じんによらず湿度が捕集効率に影響を与える。
- ②①と同じく、試験用ダスト及びトンネル坑内粉じんの電気抵抗の差異が、捕集効率に影響を与える。
- ③使用前に調整が必要である。

今回開発の装置は、現場で実際に使用するうえで大型化することはできないが、使用エネルギーの少ない定期保守もほとんど必要ないクリーンな集じん装置といえる。上記の問題点はいずれも解決可能なものなので、装置の適性を考えた使用方法を検討したい。

§6. おわりに

粉じんの性質、人体に与える影響、許容濃度、粉じん測定、粉じん対策を総括的に述べた。トンネル施工における粉じん対策は、従来軽く考えられる傾向にあり、最近になって注目を浴びるようになったものである。ここで述べたことが、粉じん対策の一助になれば幸いである。

現在実験でご協力頂いた当社関戸（出）の伊藤所長他の方々と、室内実験のデータを提供して頂いた技術研究部クリーンルームの安達副課長ならびに研究員の方々に深謝致します。また、トンネル坑内の粉じん測定は、当社の「トンネル委員会」の活動の一部として実施されたものであることを申し添えます。

参考文献

- 1)井伊谷鋼一 「集塵技術マニュアル」
昭48, 5 日刊工業新聞社
- 2)安全工学技術シリーズ編集委員会編 「ほこり—粉じんの科学」 昭56, 1

- 3)「地下工事における換気設備等に関する技術基準報告書」 昭和54, 3 (社)日本トンネル技術協会
- 4)労働省 「作業環境の評価に基づく作業環境管理の推進について」 昭59, 2
- 5)労働省安全衛生部労働衛生課編 「作業環境測定ガイドブック1」 昭58, 8 (社)日本作業環境測定協会
- 6)「第3回トンネル技術シンポジウム—NATMにおける吹付コンクリート工—」 昭58, 3 (社)日本トンネル技術協会