

平成 20 年度

トンネル建設工事における粉じん測定に関する検討

報 告 書

平成 21 年 3 月

(社) 日本作業環境測定協会

目 次

	頁数
1. 趣旨・目的	1
2. 委員会の開催	2
3. 個人サンプラーを使用した測定法	3
4. 粉じん濃度測定用サンプラーを使用した測定手法	9
5. 現場調査の実施方法	12
6. 分析方法等	15
7. 現場調査の実施と測定結果	16
8. 考察と今後の課題	30

1. 趣旨・目的

作業現場における測定は、その作業場の状況を的確に把握し、必要な対策に反映させることが本来の目的であるが、トンネル建設工事においては、重機が稼動している中で、様々な作業が錯綜して行なわれており、いわゆる、作業環境測定が困難であることから、現在は、①適切な換気の実施と、②呼吸用保護具の常時着用を原則とした上で、その換気が適切であるかどうかを判断するための測定が、義務付けられている。

しかし、上述の通り、測定の本来の意義・目的に照らせば、作業員の粉じんへのばく露状況を適時、的確に把握して、必要な対策に繋げる必要がある。

このような考え方に立って、トンネル建設工事における測定のあり方とそれを実現するために必要な事項として、個人にサンプラーを装着して粉じん濃度を測定した場合、

① ずい道等建設工事現場におけるガイドラインに示されている50m地点の粉じん濃度とどの程度濃度が異なっているかを検証する。

② 各作業工程別で粉じん濃度にどの程度違いがあるかを確認する。

ことを中心に現場調査を実施し、個人サンプラーを使用した測定方法（個人ばく露濃度測定、作業環境測定等）を検討するための基礎的データの収集を行ない検討することとした。

1.1 検討の方向

(1) 個人サンプラーを使用した測定（個人ばく露濃度測定、作業環境測定等）を行なう場合の測定の目的に対応したデザイン及び評価手法について検討を行う。

(2) (1) の測定方法と現行の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による測定の関係について検討する。

2. 委員会の開催

2.1 トンネル建設工事における粉じん測定に関する検討委員会

表1に示す検討委員会を設置して、検討項目を審議することとした。

表1 トンネル建設工事における粉じん測定に関する検討委員会名簿

	氏名	所属
委員長	名古屋 俊士	早稲田大学理工学術院 創造理工学部
委員	小西 淑人	(社)日本作業環境測定協会 調査研究部
委員	芹田 富美雄	独立行政法人 労働安全衛生総合研究所 環境計測管理研究グループ
委員	小松 敏彦	前田建設工業(株) 土木本部 土木技術部
委員	長沢 教夫	(株)間組 土木事業本部 技術部
委員	松原 利之	飛島建設(株) 土木事業本部 技術統括部
オブザーバー	柏葉 清志	経済産業省 原子力安全・保安院石炭保安室長
厚生労働省	半田 有通	労働基準局安全衛生部環境改善室長
	奥村 伸人	労働基準局安全衛生部環境改善室 副主任中央労働衛生専門官
	杉山 彰浩	労働基準局安全衛生部環境改善室係長

(順不同 敬称略)

2.2 委員会の開催状況

表2のとおり3回委員会を開催し、トンネル現場における粉じんの測定方法について検討し、現場調査を実施した。

表2 委員会の開催経過

開催日	実施内容
第1回 平成20年5月16日(金)	1. 現行規制の状況と研究の方向性について 2. 個人ばく露濃度測定の現状と課題 3. その他
第2回 平成20年6月16日(月)	1. トンネル現場における粉じんの測定方法について 2. 現場調査の選定について 3. その他
第3回 平成20年12月22日(月)	1. ずい道建設現場の実施結果について 2. 検討報告書(案)について 3. その他

3. 個人サンプラーを使用した測定手法

3.1 個人ばく露濃度測定

3.1.1 NIOSHマニュアル (OCCUPATIONAL EXPOSURE SAMPLING STRATEGY MANUAL) による方法

(1) サンプリング方法 (概要)

個人ばく露濃度の測定の測定時間については、NIOSHのマニュアルの中のガイドラインには、1日の作業時間におけるばく露量を把握するための測定であるため、8時間（昼休みを含む）全体の測定が基準となる。

8時間サンプリングの方法には、4通りある。

① 全時間単一サンプル

作業開始から作業終了までの時間を1つのサンプラーで実施する方法

1日の時間荷重平均のみが測定されるため、時間的に濃度変動があってもその情報は得られない。

② 全時間分割サンプル

8時間を何回かに分けてサンプリングする方法である。①と比較すると濃度の時間的な変動がわかるので、より多くの情報が得られる。NIOSHのマニュアルでは、午前と午後の2回に分けて測定する方法が推奨されている。

③ 部分時間分割サンプル

1日8時間のうち一部を何回かに分けてサンプリングする方法である。

全部の時間をカバーしていないので、TWAを推定するには好ましい方法とは言えない。

④ ランダム (クラブ) サンプル

瞬間またはきわめて短時間に得られるサンプルを基準期間内で繰り返し採取する方法である。連続的にサンプリングをしないので、特に濃度変動が大きな作業については、8時間のばく露濃度を推定する場合にはリスクが大きく、望ましい方法とは言えない。ばく露濃度の平均値が低く、従業員の作業とばく露状態が1日を通じて比較的安定している場合のみ統計学的に正しいTWAを推定することができる。この場合、統計学的に信頼できるデータを得るためには、少なくともランダムに8から11個のサンプルを取る必要がある。

(2) 評価方法

評価指標はTLV-TWAとし、粉じんとしての質量濃度ではなく、結晶質シリカの質量濃度で時間加重平均 (TLV-TWA) は $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ である。

判定文書の比較となる指標については、許容ばく露限界値 (PEL)、アクションレベル (AL) 許容ばく露限界値の1/2の濃度がある。

① $AL > \text{ばく露濃度測定値}$

② $\text{ばく露濃度の測定値} > PEL$

③ $AL < \text{ばく露濃度の測定値} < PEL$

の3種類の指標により比較して、③については、実際に個人ばく露濃度の測定を実施することとしている。

3.1.2 日本産業衛生学会による方法

(1) サンプルング方法 (概要)

個人ばく露濃度の測定結果を評価するためのばく露限界値として日本では、日本産業衛生学会が「許容濃度」を勧告している。許容濃度は、労働者が有害物質にばく露される場合、当該物質の空气中濃度がこの数値以下であれば、ほとんどすべての労働者に健康上の影響が見られないと判断される濃度である。

- ① 労働者が1日8時間、週40時間程度、肉体的に激しくない労働強度で有害物質にばく露される場合に、当該有害物質の平均ばく露濃度がこの数値以下であれば、ほとんど全ての労働者に健康上の悪い影響が見られないと判断される濃度である。
- ② 労働時間が作業内容・作業環境場所・ばく露の程度に従って分割され、各分割における平均ばく露濃度あるいは推定値がわかっている場合は、それらの時間の重みかけた平均値をもって、全体の平均ばく露濃度あるいは、推定値とすることができる。

なお、粉じんをサンプルングする場合は、吸入性粉じんの定義が 5μ 50%カット特性の分粒装置を使用して測定をすることとなっている。

(2) 評価方法 (概要)

評価指標としては、吸入性結晶質シリカは、 $0.03\text{mg}/\text{m}^3$ 、吸入性粉じんは、遊離けい酸含有率が10%未満は、第2種粉じんとなり、許容濃度は $1\text{mg}/\text{m}^3$ 、遊離けい酸含有率が10%以上の場合は第1種粉じんとなり $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ である。

アクションレベル (AL) : 許容濃度の1/2の濃度

PEL : 許容濃度

- ① $AL > \text{ばく露濃度測定値}$
- ② $\text{ばく露濃度の測定値} > PEL$
- ③ $AL < \text{ばく露濃度の測定値} < PEL$

の3種類の指標により比較する。

3.1.3 個人ばく露濃度測定に関する調査委託研究

平成9年度、10年度労働省委託研究「個人用ばく露濃度の測定に係わる調査研究」を（社）日本作業環境測定協会に受託し、検討を行なった。その時のサンプリング方法と、評価方法の概要を示した。

(1) サンプリング方法（概要）

①測定対象者

原則として当該作業者の全員を対象

②サンプリング時間

原則として、昼休み等の休憩時間を除く作業開始から作業終了までの連続した時間とする。但し連続サンプリングが困難な場合は全時間分割サンプリングを行う。

作業開始から終了までの連続した場合は、値はそのままとするが、全時間分割サンプリングした場合は、時間加重平均とする。

③分析方法

分析方法は、作業環境測定基準に準じた方法とする。

(2) 評価方法（概要）

①評価指標は、「許容濃度」とする。

②評価区分

評価区分は、区分1から区分3の3段階に分けて評価する。

区分1 許容濃度の $1/2 >$ 個人ばく露濃度の結果

区分2 許容濃度の $1/2 \leq$ 個人ばく露濃度の結果 \leq 許容濃度

区分3 許容濃度 $<$ 個人ばく露濃度の結果

3.2 個人サンプラーを使用した環境中の濃度測定

3.2.1 個人サンプラーを使用した環境中の濃度測定の労働省委託事業

平成 12 年度に労働省委託事業として「屋外作業場等におけるばく露低減のための推進事業」を（社）日本作業環境測定協会に受託し、検討を行なった。その時のサンプリング方法と、評価方法の概要を示した。

(1) サンプリング方法（概要）

①測定点の選定

労働者を測定点とすること。被測定者は、1 作業グループ内において 5 名以上とする。5 名未満の場合は、1 名の労働者に対して繰返し測定を行なう。

②測定時間、測定実施日

1 サンプルの測定時間は、継続した 10 分以上とし、1 日測定する。

③測定方法

作業環境測定基準における試料の採取方法及び分析方法に準じて行なう。

(2) 評価方法（概要）

測定の結果の評価にあたっては、諸外国の状況についても検討したが、我が国における実測データが少なく、ただちに新たな評価方法を確立することは困難であり、当面は現行の作業環境測定基準に準じた測定を行うこととする。（事業報告書より抜粋）

①評価指標は、「管理濃度」とする。

②評価方法

作業環境測定基準に準じて各グループごとに第 1 管理区分から第 3 管理区分に区分する。

第 1 管理区分：第 1 評価値 < 管理濃度

第 2 管理区分：第 2 評価値 ≤ 管理濃度 ≤ 第 1 評価値

第 3 管理区分：第 2 評価値 > 管理濃度

3.2.2 工事現場における人造鉱物繊維ばく露環境濃度測定マニュアル

人造鉱物繊維製造の2団体（ガラス繊維協会とロックウール工業会）が、建築現場等のばく露環境における人造鉱物繊維の測定方法について平成7年4月付けで定めており、このマニュアルに示されている測定手法等を示す。

(1) サンプルング方法（概要）

①測定対象場所

測定対象場所は、建築現場、プラント工事現場、ガラス繊維、ロックウールを取り扱っている場所とする。

②測定位置

作業従事者の胸より上の適当な位置とする。

③測定回数、時刻

測定は必要に応じて行なう。

測定は定常な作業が行なわれている時間帯とする。

④吸引流量とサンプルン時間

・繊維数濃度測定用

原則としてサンプルング時の吸引流量は1L/minとし、サンプルング時間は1作業当たり15分以上とする。

・質量濃度測定用

原則としてサンプルング時の吸引流量は2.5L/minとし、サンプルング時間は1作業当たり、120分以上とする。

(2) 評価方法

評価指標、評価方法については、明確には示されていない。

3.2.3 屋外作業場等における作業環境管理に関するガイドライン (以下「屋外測定ガイドライン」と略)の場合

測定は、屋外作業場等において取り扱う有害物質の濃度が最も高くなる作業時間帯において、高濃度と考えられる作業環境下で作業に従事する労働者に個人サンプラーを装着して行う。

(1) サンプリング方法 (概要)

①測定時間

測定点における試料空気の採取時間は、別表第1に掲げる管理濃度又は基準濃度(以下「管理濃度等」という。)の10分の1の濃度を精度良く測定でき、かつ、生産工程、作業方法、当該物質の発散状況等から判断して、気中濃度が最大になる時間帯を含む10分間以上の継続した時間とすること。

②試料採取方法及び分析方法

試料採取方法及び分析方法は、測定の対象となる物質の種類に応じて作業環境測定基準(昭和51年労働省告示第46号)に定める試料採取方法及び分析方法とすること。

(2) 評価方法 (概要)

作業環境の測定の結果の評価は、各測定点ごとに、測定値と管理濃度等とを比較して、測定値が管理濃度等を超えるか否かにより行うため、遊離けい酸含有率を求め、管理濃度の式に代入して粉じんの管理濃度を求める。

4. 粉じん濃度測定用個人サンプラー

4.1 個人ばくろ濃度測定に使用可能なサンプリング機器

トンネル建設工事現場で粉じんの個人ばくろ濃度測定のために個人に装着することが可能と考えられるサンプリング機器の主なものを示した。いずれのサンプラーも環境中の空気を捕集するための分粒装置とフィルターホルダーに吸引用のサンプリングポンプを連結して使用する。

4.1.1 レスピコンパーティクルサンプラー

1993年に欧州規格委員会(CEN)で $4\mu\text{m}$ 50%カット特性を有する分粒装置を使用して測定された粉じんを吸入性粉じんとして取り扱っており、その後国際統一規格(ISO7708)に合致した分粒装置付サンプラーである。吸引性粉じん($100\mu\text{m}$ 50%カット)、咽頭通過性粉じん($10\mu\text{m}$ 50%カット) 吸入性粉じん($4\mu\text{m}$ 50%カット)3段階のカット特性の粉じんの質量濃度を同時に測定することが可能である。

使用するろ紙は、 $\phi 37\text{mm}$ のセンターに $\phi 4\text{mm}$ の穴あきのろ紙を2枚と $\phi 37\text{mm}$ のろ紙1枚の計3枚をフィルターホルダーに充てんして毎分3.11Lの吸引流量でサンプリングを行なう。



写真1 レスピコンパーティクルサンプラーの概観

4.1.2 10mmナイロン Dorr Oliver サイクロン付サンプラー

10mmナイロン Dorr Oliver サイクロン方式の分粒装置付のサンプラーで、分粒特性は吸入性粉じんとして $3.5\mu\text{m}$ 50%カットであるが、米国ACGIHのTLV_s^R and BEI_s^Rの「付録D」粒子状物質サンプリングのための分粒装置の基準書の中で、ISO/CENの吸入性粉じん($4\mu\text{m}$ 50%カット)のデータと、ほぼ近似していることが判明し同等のカット特性として取り扱われている。使用するろ紙は $\phi 25\text{mm}$ で毎分1.7Lの吸引流量でサンプリングを行う。

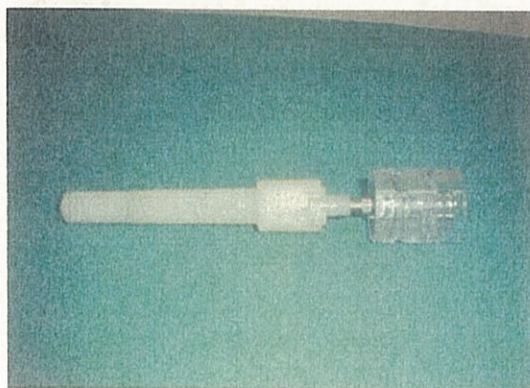


写真2 10mmナイロン Dorr Oliver サイクロン分粒装置とフィルターホルダーの概観

4.1.3 SKC 社製サイクロン方式分粒装置 GS-3

4.1.2 と同じサイクロン方式の分粒装置付サンプラーで、使用するろ紙は、 $\phi 25\text{mm}$ のグラスファイバーろ紙 1 枚装着し毎分 2.75L の吸引流量でサンプリングを行なう。



写真3 サイクロン方式分粒装置 (GS-3) とフィルターホルダーの概観

4.1.4 慣性衝突式分粒装置付きサンプラー (NWPS-254 : 柴田科学(株)製)

慣性衝突方式の分粒装置で分粒特性は $4\ \mu\text{m}50\%$ カットである。使用するろ紙は、 $\phi 25\text{mm}$ のグラスファイバーろ紙を装着し毎分 2.5L の吸引流量でサンプリングを行なう。

この分粒装置は日測協で分粒特性試験を実施し、分粒装置型式認定を受けた分粒装置である。

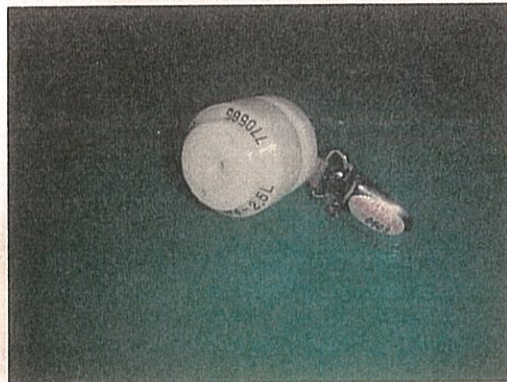


写真4 慣性衝突式分粒装置付きサンプラー (NWPS-254) の概観

4.2 粉じん環境測定用リアルタイム相対濃度計

4.2.1 相対濃度計 (LD-2 型 : 柴田科学(株)製)

作業環境測定用として市販されている相対濃度計のうち、個人ばく露濃度測定に使用可能な小型化された粉じん計として写真5に示す LD-2 型がある。

原理は暗箱中の浮遊粉じんにレーザー光を照射したとき、粉じんの系が同じなら粉じんによる散乱光量は質量濃度に比例することを利用している。

この粉じん計には、データロガーが内蔵されており、1 秒毎のリアルタイムデータや測定時間に対応したデータを得ることが可能であり、リアルタイムデータは、測定終了後、PC 出力することによりグラフ化して記録できる。



写真5 相対濃度計 (LD-2 型) の概観

5. 現場調査の実施方法

5.1 現場調査内容

現場調査を実施するにあたり、3.「個人ばく露濃度の測定の考え方」を参考にして次の方法に従って実施することとした。

個人サンプラーを使用する方法として NIOSH のマニュアル」と「屋外作業場等における作業環境管理に関するガイドライン（以下「屋外ガイドラインの測定」と略す）に示されている吸入性粉じんの定義である $4\mu\text{m}50\%$ カット特性の分粒装置を使用してサンプリングを実施した。

5.2 個人サンプラーによる測定

5.2.1 サンプラーの装着対象者

原則として可能な限り、切羽作業者全員とした。作業者全員への装着が困難な場合は、吹付けオペレーター等の作業者は必ず装着することとした。

5.2.2 装着する分粒装置付きサンプラー

- ① 分粒装置付きサンプラー（10mmナイロンドールオリバーサイクロン）を使用した測定方法

サンプリングポンプ、ろ紙、分粒装置（10mmナイロンドールオリバーサイクロン）を装着したものを使用する。写真6に装着例を示した。

- ② 分粒装置付きサンプラー（慣性衝突式分粒装置（NWPS-254）を使用した測定方法

サンプリングポンプ、ろ紙、分粒装置（慣性衝突式分粒装置（NWPS-254））を装着したものを使用する。写真7に装着例を示した。

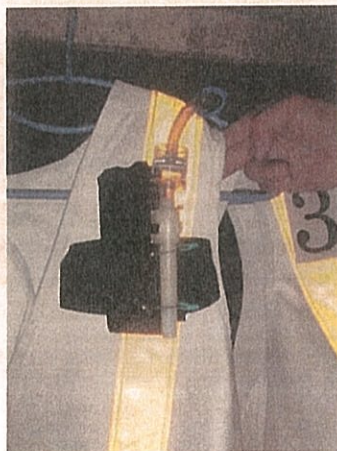


写真6 装着例

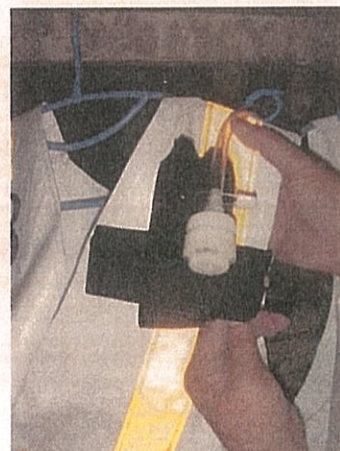


写真7 装着例

- ③ 分粒装置付サンプラーと相対濃度計を組合せた測定方法

粉じんの作業環境測定で相対濃度計を使用する場合には、単位作業場所の1箇所に併行測定点を設置して、ろ過捕集方法と相対濃度計を同時に測定し、K値（質量濃度変換係数）を求める必要がある。ろ過捕集方法と写真5の相対濃度計は、併行測定用としても使用が可能であるが、相対濃度計自身には、吸入性粉じんを捕集するための分粒装置がないこと、当該粉じん計の吸引用ファンモーターでは、外付けで分粒装置を装着した場合、一定の流量を確保でき無いため、写真8に示すように相対濃度計のファンモーターを取外し、外部ポンプ

を接続することで、流量の確保を行ない、ろ紙を装着する構成を行なうことで、併行測定を同時に実施することが可能となり、個人サンプラーとしての使用も可能である。

写真8にサンプリング装置を、**写真9**に個人サンプラーとして作業者に装着した例を示した。

作業者に分粒装置、ろ紙ホルダー、相対濃度計、サンプリングポンプを装着することによって、質量濃度以外に、質量濃度と相対濃度計の相対濃度からK値（質量濃度変換係数）を求めることが可能になるとともに4.2.1で示した相対濃度計は、得られたデータを一定時間ごとに記憶させる機能が内蔵されている。この機能を使用することによって、相対濃度計に記憶されたデータをパソコンに取り込み個々のデータにK値（質量濃度変換係数）を掛けることによって質量濃度が求められ、リアルタイムの粉じん濃度変化を記録することが可能になるため、切羽の各作業工程別の粉じん濃度の飛散状況が把握できる。

今回は10mmナイロン Dorr Oliver サイクロンに相対濃度計（LD-2型）とサンプリングポンプを写真9に示すように接続し、作業者の口元付近の粉じん測定を実施した。

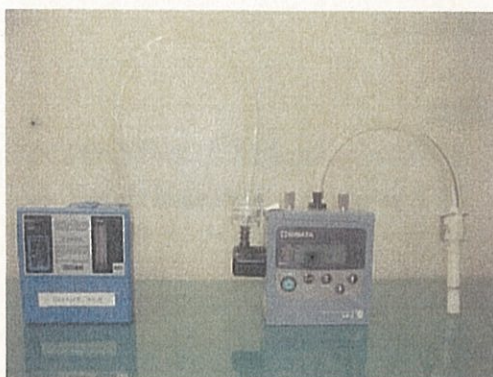


写真8 分粒装置と相対濃度計を組合せたサンプリング装置例

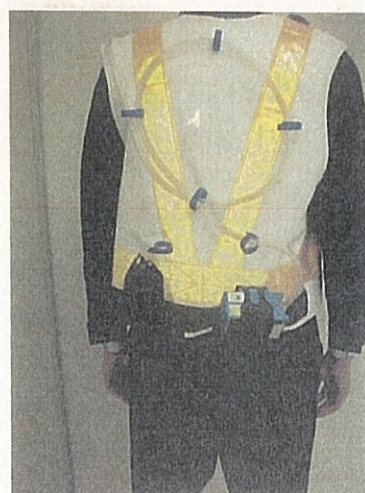
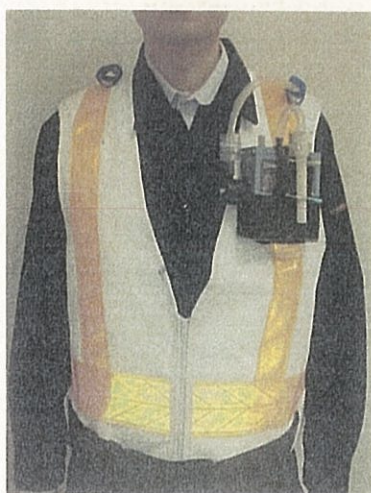


写真9 分粒装置と相対濃度計を組合せたサンプリング装置装着例

各個人サンプラーを使用した粉じん濃度は、読み取り限度 0.01mg の天秤 (ME215P ザルトリウス社製) を用いてサンプリング前後の秤量差から採じん量を求め、吸引空気量で除して質量濃度を求めた。

5.2.3 測定時間

切羽作業工程の1サイクルを測定対象時間とした。(例えばサンプリング開始が掘削ならば次に掘削を実施する前までの作業が終了するまでの時間を測定対象時間とした。)

5.2.4 測定位置

個人サンプラーを作業者の呼吸域付近に装着した。

5.3 相対濃度計を使用した 50m地点の粉じん濃度の測定 (ガイドラインによる測定)

粉じん濃度が最も高濃度となることが予測される吹付け作業時に LD-3K2 型 (柴田科学社製) の相対濃度計を使用して 50m地点の粉じん計の相対濃度を測定し、ガイドラインに示されている K 値を掛けて質量濃度を求めた。

5.4 切羽から 50m地点での定点測定

50m地点に、分粒装置と相対濃度計を組合せた機器を設置して、個人サンプラーの測定と同時刻にサンプリングを実施した。

5.5 粉じんの粒度分布測定

レスピコンを使用して、切羽から 50m地点における粉じんの粒度分布測定を実施し、吸引性粉じん (100 μ m 50%カット)、咽頭通過性粉じん (10 μ m 50%カット) 吸入性粉じん (4 μ m 50%カット) に区分した粉じん濃度を測定した。

6. 分析方法等

6.1 粉じん中の結晶質シリカの含有率分析

併行測定で使用したフィルタを使用して、X線回折分析法により結晶質シリカの定性、定量分析を実施し、粉じん中の結晶質シリカ含有率を算出した。使用したX線回折装置は、XRD 6100（島津製作所社製）で、分析条件は表3のとおりである。

表3 X線回折分析装置の分析条件

測定条件	定性分析	定量分析
対陰極	Cu	
管電圧(kV)	40	40
管電流(mA)	40	30
走査速度(° /min)	1.0	0.5(1/2)
発散スリット(°)	1	
散乱スリット(°)	1	
受光スリット(mm)	0.3	

6.2 画像データの作成

PEDイメージングシステムを使用して作業者の作業実施状況の映像に同時刻の粉じん濃度リアルタイムデータを合成し、今後の検討用の画像データを作成した。

7. 現場調査の実施と測定結果

平成20年9月に表4に示す2現場において現場調査を実施した。

表4 調査実施日と現場名一覧

実施日	現場名
平成20年9月12日	Aトンネル (岩手県)
平成20年9月18日	Bトンネル (新潟県)

7.1 Aトンネルの測定結果

平成20年9月12日に実施したAトンネルの測定結果は以下の通りであった。

7.1.1 Aトンネルの概要

表5にトンネルの概要を図1にAトンネルの概略図を示した。

測定対象とした切羽での1サイクルの作業概要は、穿孔作業、装薬作業、ずり積み作業、ずり出し作業、吹付け作業、ロックボルト作業の順であった。

表5 Aトンネルの概要

用途	地質	内空断面 (m ²)	工区全長 (m)	掘削工法	掘削 方法	運搬方式	換気 方法
道路	チャート	66	1992	NATM 補助ベンチ	発破	バルコン	送気式

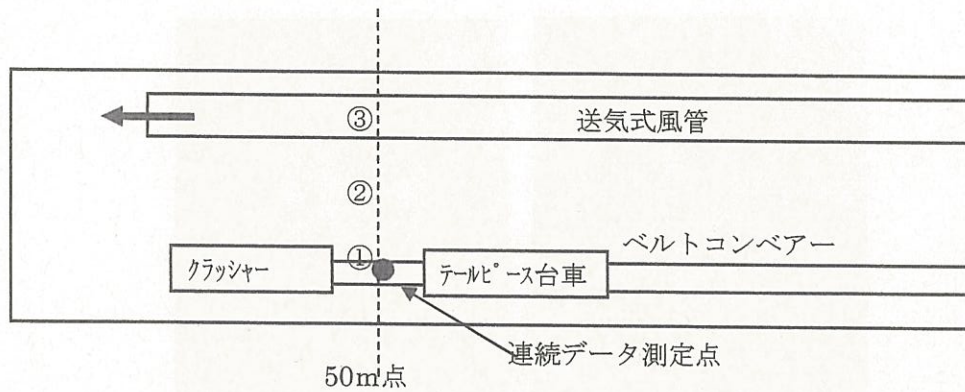


図1 Aトンネルの概略図

7.1.2 個人サンプラー装着例

個人サンプラー装着例を写真 10～12 に装着例を示した。



写真 10 10mmナイロン Dorr Oliver サイクロン付きサンプラーと LD-2 型粉じん計を接続したときの装着写真



写真 11 分粒装置に 10mmナイロン Dorr Oliver サイクロン付きサンプラーを使用したときの装着写真

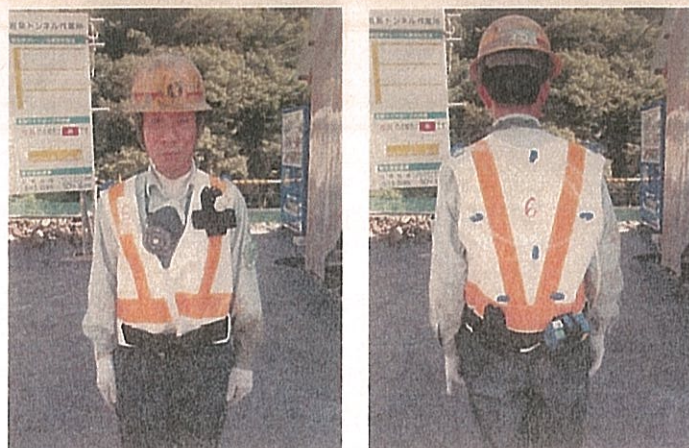


写真 12 慣性衝突式分粒装置付きサンプラー (NW-254) を使用したときの装着写真

7.1.3 遊離けい酸含有率測定結果

表6に遊離けい酸含有率の測定結果を示した。

表6 遊離けい酸含有率の測定結果

遊離けい酸含有率(%)
15.1

7.1.4 管理濃度

管理濃度の式 $E = 3.0 / (0.59Q + 1)$ に7.1.3の遊離けい酸含有率15.1%を代入して計算した結果、管理濃度は 0.30 mg/m^3 であった。

7.1.5 粉じんの粒度分布測定

レスピコンを使用して、切羽から50m地点における粉じんの粒度分布測定を実施した結果は、表7に示した。

吸引性粉じん(100 μm 50%カット)は $12.46(\text{mg/m}^3)$ 、咽頭通過性粉じん(10 μm 50%カット)は $6.38(\text{mg/m}^3)$ 、吸入性粉じん(4 μm 50%カット)は、 $1.98(\text{mg/m}^3)$ であった。総粉じんに対する吸入性粉じんの割合は9.5%であった。

表7 レスピコンによる粉じんの粒度分布測定結果

粒 径	質量濃度(mg/m^3)
吸入性粉じん(4 μm 50%カット)	1.98
咽頭通過性粉じん(10 μm 50%カット)	6.38
吸引性粉じん(100 μm 50%カット)	12.46

7.1.5 個人サンプラーを使用した粉じん濃度の測定結果

個人サンプラーを使用した粉じん濃度の測定結果を表8に示した。表8より3人の粉じんの質量濃度は0.27～0.84 mg/m³であった。

また、評価方法については、仮にガイドラインに基づく評価方法を適用した場合は、表9より区分1が1名、区分2が2名であった。

表8 個人サンプラーを使用した粉じん濃度の測定結果

作業者	分粒装置の種類	吸引流量 (mL/min)	測定時間(分)	質量濃度 (mg/m ³)	作業者の主な作業概要
A (2)	10mm Dorr Oliver サイクロン	1.7	9:13～12:00 12:45～17:25 (467分)	0.58	吹付けオペレーター、穿孔作業見張り、火薬運び
B (5)	10mm Dorr Oliver サイクロン	1.7	9:30～11:59 12:44～17:27 (382分)	0.27	穿孔作業、装薬作業、ショベルカー運転、吹付け作業補助
C (6)	慣性衝突式 NW254	2.5	9:30～11:59 12:44～17:27 (382分)	0.84	穿孔作業、装薬作業、ショベルカー運転、吹付け作業補助

表9 ガイドラインに基づく評価方法による評価結果

作業者	質量濃度 (mg/m ³)	管理濃度	評価結果
A	0.58	0.30	区分1
B	0.27		区分2
C	0.84		区分1

7.1.6 切羽から50m地点の粉じん濃度測定結果

50m地点の粉じん濃度測定結果を表10に示した。50m地点の粉じん濃度は、0.91 mg/m³であった。

表10 50m地点の粉じん濃度測定結果

	分粒装置の種類	吸引流量 (mL/min)	測定時間(分)	質量濃度 (mg/m ³)	作業概要
50m	10mm Dorr Oliver サイクロン	1.7	9:44~11:03 13:04 ~ 16:36 (291分)	0.91	穿孔、装薬作業、ずり積み、ずり出し、吹付け作業

7.1.7 相対濃度計を使用した切羽から50m地点の粉じん濃度測定結果

(ガイドラインによる測定)

LD-3K2型(柴田科学社製)の相対濃度計を使用して50m地点の粉じんの相対濃度を測定し、ガイドラインのK値を掛けて質量濃度を求めた。ずり積み、ずり出し作業と吹付け作業を測定した結果を表11~13に示した。いずれも目標値の3mg/m³より低い値であった。

表11 ずり積み、ずり出し作業の粉じん濃度測定結果(1回目)

測定点	相対濃度 (CPM)	ガイドラインのK値 0.002 (mg/m ³ /cpm)による質量 濃度 (mg/m ³)	平均粉じん濃 度 (mg/m ³)	評価区分
測定点①	1395.3	2.79	1.95	評価値<3 (mg/m ³)
測定点②	907.5	1.82		
測定点③	622.2	1.24		

表12 ずり積み、ずり出し作業の粉じん濃度測定結果(2回目)

測定点	相対濃度 (CPM)	ガイドラインのK値 0.002 (mg/m ³ /cpm)による 質量濃度 (mg/m ³)	平均粉じん濃 度 (mg/m ³)	評価区分
測定点①	1220.4	2.44	1.93	評価値<3 (mg/m ³)
測定点②	845.2	1.69		
測定点③	834.3	1.67		

表13 吹付け作業の粉じん濃度測定結果

測定点	相対濃度 (CPM)	ガイドラインのK値 0.002 (mg/m ³ /cpm)による 質量濃度 (mg/m ³)	平均粉じん濃 度 (mg/m ³)	評価区分
測定点①	1110.2	2.22	2.83	評価値<3 (mg/m ³)
測定点②	1296.7	2.59		
測定点③	1837.2	3.67		

7.1.8 粉じん連続データ結果

ずい道等建設工事現場の作業者は、例えば吹付けオペレーターをする作業者であっても、吹付け作業以外工程においては、他の作業を実施している。このため、高濃度の粉じんにはばく露される可能性がある吹付けオペレーターの作業がある作業者に個人サンプラーを装着し、粉じんを連続測定したデータを図2に、50m地点の粉じんを連続測定したデータを図3に示した。また、図2と図3を重ね合わせた図を図4に示した。

さらに、図4から吹付けオペレーターの作業がある作業者の個人サンプラーを使用した粉じん測定濃度と50m地点の粉じん濃度を各工程別に分けたものを表14に示した。

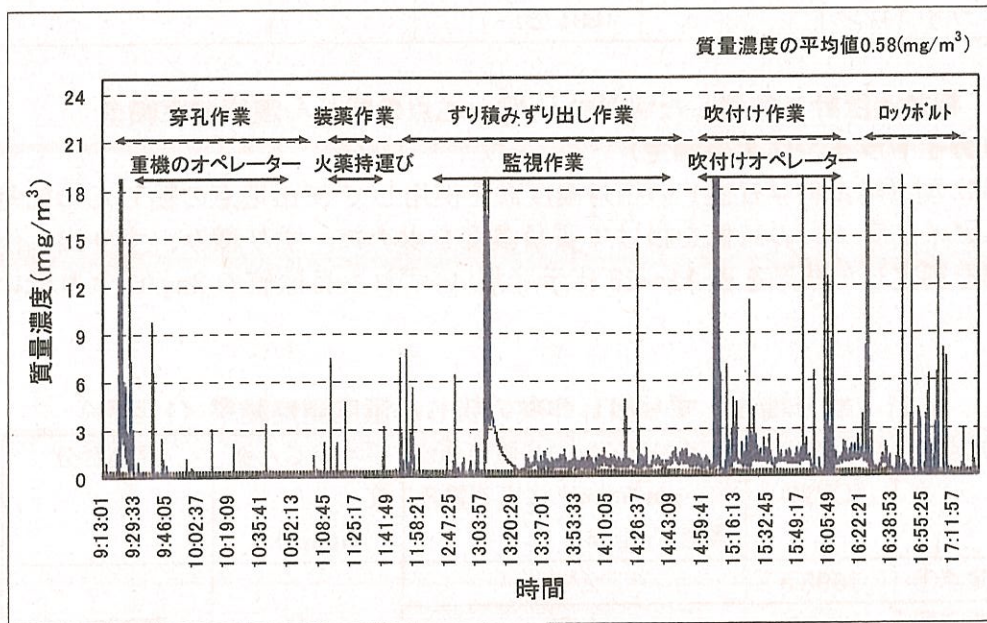


図2 吹付けオペレーター作業がある作業者の個人サンプラーによる粉じん濃度連続データ

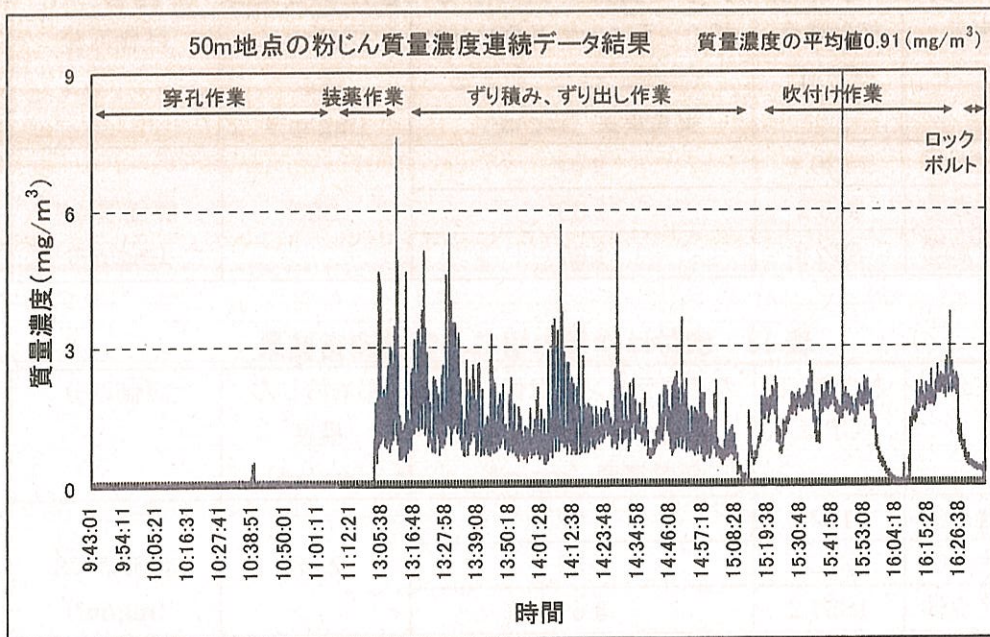


図3 50m地点の粉じん連続データ

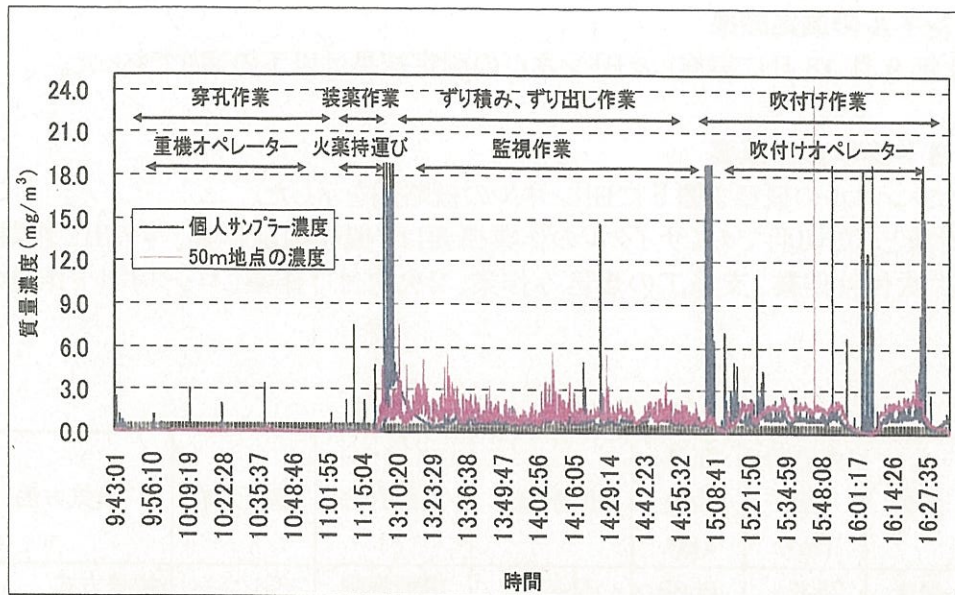


図4 吹付けオペレーターの作業がある作業者の個人サンプラーを使用した粉じん濃度と50m地点の粉じん粉じん連続データの関係

表14 各作業工程別の粉じん濃度の関係

	穿孔作業	装薬作業	ずり積み ずり出し 作業	吹付け 作業	ロックボ ルト作業
吹付けオペレーターの作業がある作業者の個人サンプラーによる粉じん濃度測定結果 (mg/m ³)	0.06	0.07	1.04	1.04	0.60
50m地点の粉じん濃度 (mg/m ³)	0.05	0.004	1.27	1.44	0.49

7.2 Bトンネルの測定結果

平成20年9月18日に実施したBトンネルの測定結果は以下の通りであった。

7.2.1 Bトンネルの概要

表15にトンネルの概要を図5にBトンネルの概略図を示した。

測定対象とした切羽での1サイクルの作業概要は、機械掘削作業、ずり出し作業、ずり積み作業、1次吹付け作業、支保工の建込み作業、2次吹付け作業、ロックボルト作業の順であった。

表15 Bトンネルの概要

用途	地質	内空断面 (m ²)	工区 全長 (m)	掘削工法	掘削方法	運搬方式	換気方法
鉄道 (新幹線)	泥岩 砂岩	75.0~ 80.0	2560	NATM 補助ベンチ	機械掘削	バルコン 式	排気方式 (伸縮風管使用)

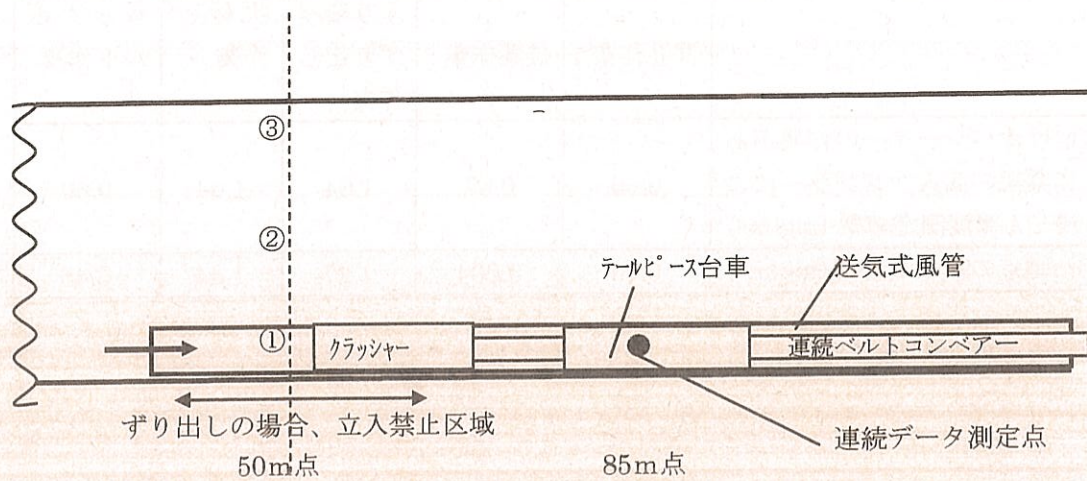


図5 Bトンネルの概略図

7.2.2 個人サンプラー装着例

個人サンプラー装着例を写真13～15に装着例を示した。

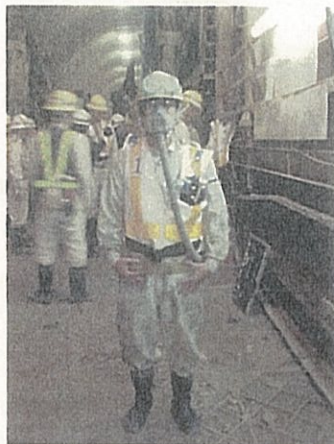


写真13 10mmナイロンDorr Oliver サイクロン付きサンプラーとLD-2型粉じん計を接続したときの装着写真

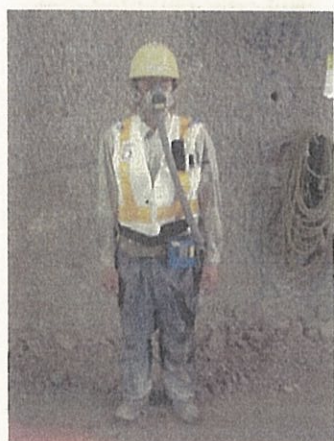


写真14 分粒装置に10mmナイロンDorr Oliver サイクロン付きサンプラーを使用したときの装着写真



写真15 慣性衝突式分粒装置付きサンプラー (NW-254)を使用したときの装着写真

7.2.3 遊離けい酸含有率測定結果

表 16 に遊離けい酸含有率の測定結果を示した。

表 16 遊離けい酸含有率の測定結果

遊離けい酸含有率(%)
0

7.2.4 管理濃度

管理濃度の式 $E = 3.0 / (0.59Q + 1)$ に 7.2.3 の遊離けい酸含有率 0% を代入して計算した結果、管理濃度は 3.0 mg/m^3 であった。

7.2.5 粉じんの粒度分布測定

レスピコンを使用して、切羽から 85m 地点における粉じんの粒度分布測定を実施した結果は、表 17 に示した。

吸引性粉じん ($100 \mu\text{m}$ 50% カット) は 2.45 mg/m^3 、咽頭通過性粉じん ($10 \mu\text{m}$ 50% カット) は 1.64 mg/m^3 、吸入性粉じん ($4 \mu\text{m}$ 50% カット) は、 0.64 mg/m^3 であった。総粉じんに対する吸入性粉じんの割合は 13.5% であった。

表 17 レスピコンによる粉じんの粒度分布測定結果

粒 径	質量濃度 (mg/m^3)
吸入性粉じん ($4 \mu\text{m}$ 50% カット)	0.64
咽頭通過性粉じん ($10 \mu\text{m}$ 50% カット)	1.64
吸引性粉じん ($100 \mu\text{m}$ 50% カット)	2.45

7.2.5 個人サンプラーを使用した粉じん濃度の測定結果

個人サンプラーを使用した粉じん濃度の測定結果を表 18 に示した。表 18 より 3 人の粉じんの質量濃度は $0.14 \sim 1.21 \text{ mg/m}^3$ であった。

また、仮に屋外ガイドライン測定による評価をした場合として結果を表 19 に示した。7.2.4 より管理濃度は 3.0 mg/m^3 であり、評価結果は全員が区分 1 であった。

表 18 個人サンプラーを使用した粉じん濃度の測定結果

作業 者	分粒装置 の種類	吸引流量 (mL/min)	測定時間(分)	質量濃度 (mg/m^3)	作業者の主な作業概要
A (1)	10mm Dorr Oliver サイクロン	1.7	11:22~14:14 (172分)	0.14	掘削作業、吹付け作業、支保工 作業、ロックボルト作業
B (5)	10mm Dorr Oliver サイクロン	1.7	11:35~14:16 (161分)	1.21	ずり出し作業、吹付け作業補 助、ロックボルト作業
C (3)	慣性衝突式 NW254	2.5	11:33~14:07 (154分)	0.73	支保工作业、コンクリート車運 転、ロックボルト作業補助

表 19 ガイドラインに基づく評価方法による評価結果

作業者	質量濃度 (mg/m ³)	管理濃度	評価結果
A	0.14	3.0	区分 1
B	1.21		区分 1
C	0.73		区分 1

7.2.6 切羽から 85m地点の粉じん濃度測定結果

85m地点の粉じん濃度測定結果を表 20 に示した。85m地点の粉じん濃度は、0.11 mg/m³であった。

表 20 85m地点の粉じん濃度測定結果

	分粒装置の種類	吸引流量 (mL/min)	測定時間(分)	質量濃度 (mg/m ³)	作業概要
85m	10mm Dorr Oliver サイクロン	1.7	11:13~13:55 (162分)	0.11	掘削作業、ずり出し作業、1次吹付け作業、支保工作業、2次吹付け作業、ロックボルト作業

7.2.7 相対濃度計を使用した切羽から 50m地点の粉じん濃度測定結果 (ガイドラインによる測定)

LD-3K2 型 (柴田科学社製) の相対濃度計を使用して 50m地点の粉じんの相対濃度を測定し、ガイドラインのK値を掛けて質量濃度を求めた。ずり積み、ずり出し作業と吹付け作業を測定した結果を表 21 に示した。いずれも目標値の 3mg/m³ より低い値であった。

表 21 吹付け作業の粉じん濃度測定結果

測定点	相対濃度 (CPM)	ガイドラインのK値 0.002 (mg/m ³ /cpm) による質量濃度 (mg/m ³)	平均粉じん濃度 (mg/m ³)	評価区分
測定点①	119.7	0.24	0.24	評価値<3 (mg/m ³)
測定点②	122	0.24		
測定点③	—	—		

測定点③については、重機の往来があり、危険のため測定実施していない。

7.2.8 粉じん連続データ結果

吹付け補助の作業を含む作業者の個人サンプラーを使用した粉じん測定の結果を 図 6 に、85m地点の粉じん連続データを 図 7 に示した。また、図 6 と図 7 を重ね合わせた図を 図 8 に示した。

さらに、図 8 から吹付け補助の作業を含む作業者の個人サンプラーを使用した粉じん濃度測定と 85m地点の粉じん濃度を各工程別に分けたものを表 22 に示した。

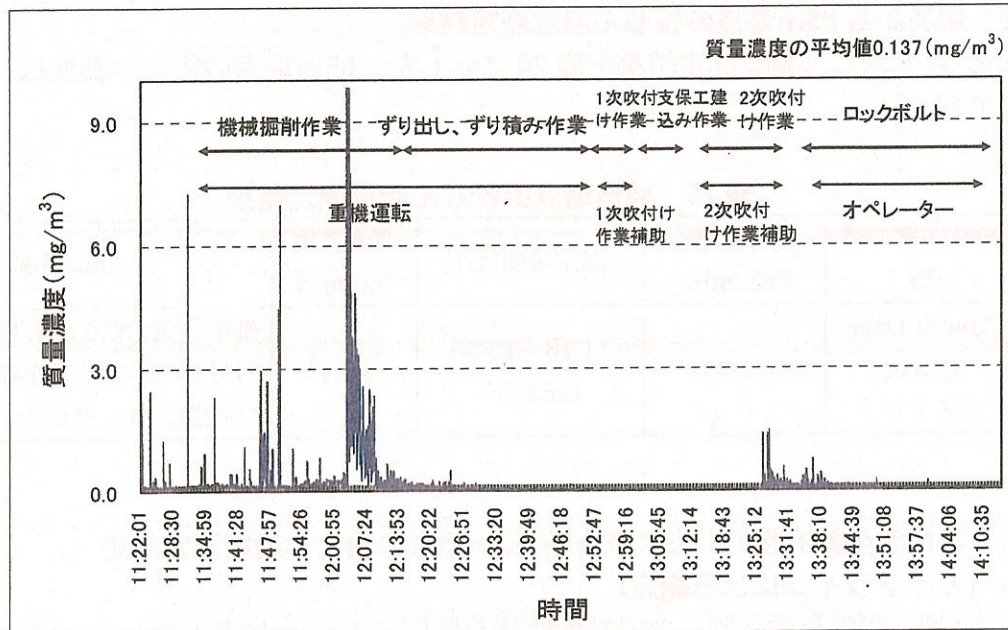


図 6 吹付け補助作業を含む作業者の個人サンプラーを使用した粉じん濃度の連続データ

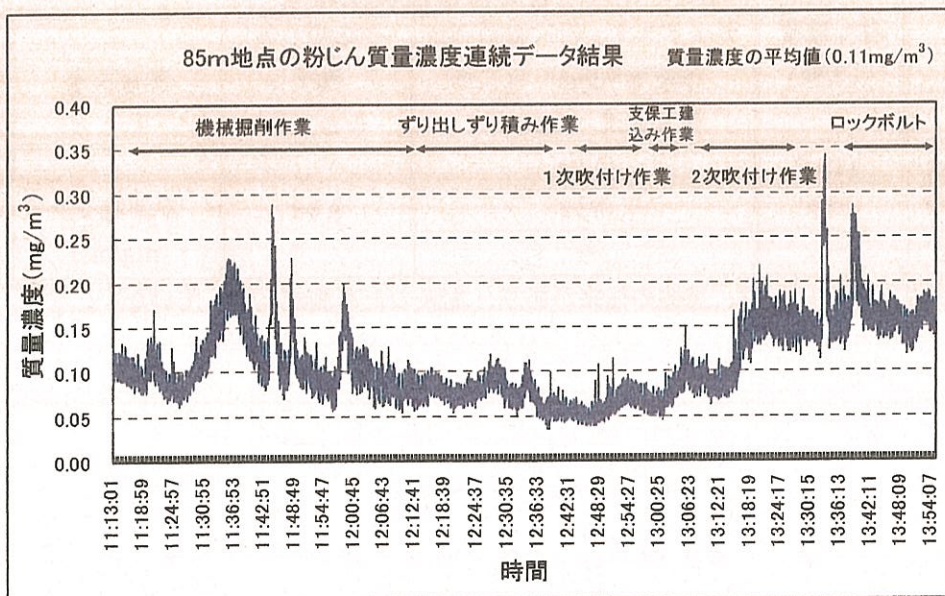


図 7 85m地点の粉じん連続データ

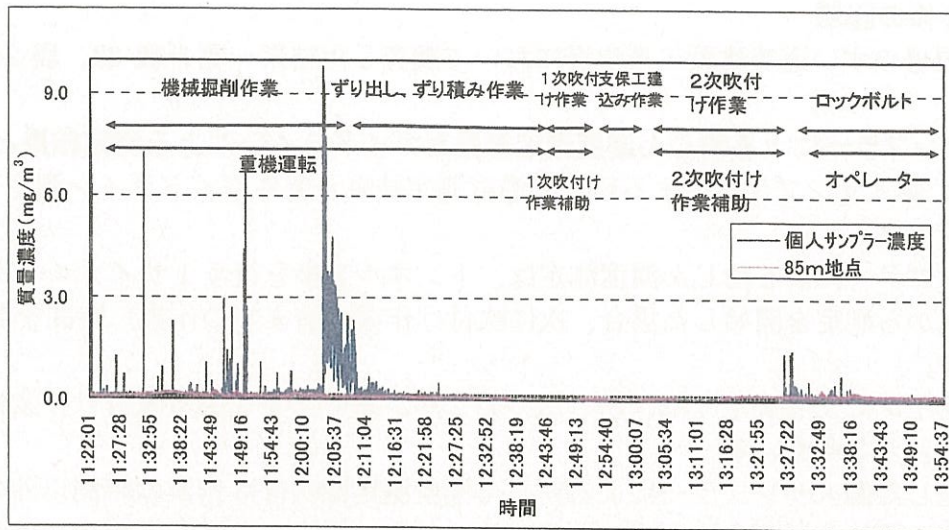


図8 吹付け補助作業を含む作業者の個人サンプラー濃度と85m地点の粉じん連続データの関係

表22 各作業工程別の粉じん濃度の関係

	機械掘削作業	ずり積み ずり出し 作業	1次吹付け作業	支保工の 建込み作業	2次吹付け作業	ロックボルト作業
作業員Aの個人サンプラーによる粉じん濃度測定結果 (mg/m ³)	0.55	0.05	0.01	0.01	0.03	0.01
85m地点の粉じん濃度 (mg/m ³)	0.10	0.07	0.05	0.07	0.11	0.16

8. 考察と今後の課題

今回 2 現場のずい道等建設工事現場において調査した結果一覧を表 23、表 24 に示した。

8.1 個人サンプラーによる粉じん濃度測定結果とガイドラインによる測定結果との比較

表 23 は、個人サンプラーによる粉じん濃度測定結果と屋外ガイドライン測定（50m地点）の比較である。

個人サンプラーによる粉じん濃度測定は、トンネル工事を行う 1 サイクル（例えば、吹付け作業から測定を開始した場合、次に吹付け作業の前までの作業）時間を測定した結果である。

ガイドラインによる測定では、粉じんの発じんが多い作業である吹付け作業において実施することとなっている。

今回実施した個人サンプラーによる粉じん濃度測定は吹付け作業の時間以外の工程においても連続的にサンプリングするため、他の工程で粉じんの発じんが少なければ、時間加重平均によって求められる値は平均化され、低い結果が得られる。

表 23 より A 現場は、ガイドラインによる測定結果である吹付け作業の値が、個人サンプラーによる粉じん濃度測定よりも高い結果であった。

しかし、B 現場においては、個人サンプラーによる粉じん濃度測定結果のほうが、作業者によってはガイドラインによる測定結果より高い結果が得られた。

この理由は、換気方法の違いによるものと思われる。A 現場は、切羽に風を送気することによって抗口の方へ風の流れを作る方式である。このため、粉じん量は、切羽と 50 m 地点では、濃度に著しい差は見られない。

B 現場は、換気方法が排気方式のため、切羽付近の粉じんを吸引して排気する方式のため、50m 地点では粉じん濃度は低くなったものと考えられる。

全体的に見るとガイドラインによる測定を行なって、粉じんレベルを抑制すれば、個々の作業者のばく露は、一定レベルに以下に抑制することが可能であるが、B 現場の作業者 B、C のように 50m 地点の濃度より高濃度になる場合もある。作業者のばく露を一定レベル以下に抑制するには、やはり個人レベルでのばく露測定（個人サンプラーによる粉じん濃度測定）が必要である。

表 23 個人サンプラーによる粉じん濃度測定結果とガイドラインによる 50m 地点の測定結果との比較

	個人サンプラーによる 粉じん濃度測定結果			ガイドラインによる測定 50m 地点 (LD-3K2 型を使用)	
	作業者 A	作業者 B	作業者 C	吹付け作業	ずり積み・ずり出し作業 (参考)
A 現場	0.58 (mg/m ³)	0.27 (mg/m ³)	0.84 (mg/m ³)	2.83 (mg/m ³)	1.94 (mg/m ³)
B 現場	0.14 (mg/m ³)	1.21 (mg/m ³)	0.73 (mg/m ³)	0.24 (mg/m ³)	

8.2 作業工程別の個人サンプラーによる粉じん濃度測定と 50m地点の粉じん測定結果の比較

表 24 は、吹付け作業者と 50m地点の両方で、ろ過捕集方法と相対濃度計による併行測定を実施し、それぞれ質量濃度変換係数を求めた結果である。相対濃度計のデータは、1秒ごとにデータを取り込んで測定したため、各作業工程の開始時間と終了時間を把握することで各工程別の粉じん質量濃度を集計することが可能である。

なお、B現場においては、50m地点が立入り禁止区域であったため、85m地点の結果である。

併行測定に使用した相対濃度計は LD-2 型粉じん計で、質量濃度変換係数(K値)は、Aトンネルの個人サンプラーによる測定が $1.47\text{mg}/\text{m}^3/\text{mg}/\text{m}^3$ 、50m地点が $1.935\text{mg}/\text{m}^3/\text{mg}/\text{m}^3$ であり、Bトンネルの個人サンプラーによる測定が $0.75\text{mg}/\text{m}^3/\text{mg}/\text{m}^3$ 、50m地点が $1.02\text{mg}/\text{m}^3/\text{mg}/\text{m}^3$ であった。

A現場、B現場ともガイドラインに定められている目標値を守り換気装置の風量を管理していたため、個人サンプラーによる粉じん濃度測定結果と 50m又は 85m地点の粉じん濃度結果に大きな差は見られなかった。

しかし、当然ながら個人ばく露のレベルは作業によって大きく異なっており、トンネル建設工事における個人ばく露測定については、測定時期、期間を慎重に検討する必要がある。

表 24 各作業工程別の粉じん濃度の関係(併行測定によりK値を求めて算出した場合)

		穿孔作業	装薬作業	ずり積み ずり出し作 業	吹付け作業	ロックボルト作業
A 現場	吹付けオペレーター作業を含む作業者の個人サンプラーによる粉じん濃度測定結果	0.06 (mg/m^3)	0.07 (mg/m^3)	1.04 (mg/m^3)	1.04 (mg/m^3)	0.60 (mg/m^3)
	50m地点の粉じん濃度	0.05 (mg/m^3)	0.004 (mg/m^3)	1.27 (mg/m^3)	1.44 (mg/m^3)	0.49 (mg/m^3)
B 現場	吹付け補助作業を含む作業者の個人サンプラーによる粉じん濃度測定結果	0.55 (mg/m^3)	0.05 (mg/m^3)	0.01 (mg/m^3)	0.03 (mg/m^3)	0.01 (mg/m^3)
	85m地点の粉じん濃度	0.10 (mg/m^3)	0.07 (mg/m^3)	0.05 (mg/m^3)	0.11 (mg/m^3)	0.16 (mg/m^3)

8.3 まとめおよび今後の課題

表 25 にずい道等建設工事現場における各測定方法の考え方の比較を示した。

今回 2 現場のみしか実施していないため、全てのトンネルにあてはまるかが不明であるが、「地下工事における粉じん測定の手引」により測定する仮定した場合、重機の往来で、定点に測定機材を置いて一定時間測定することは非常に難しいと考えられる。

B 現場は、ガイドラインの測定は、50m 地点で測定を実施したが、この地点が立ち入り禁止区域であったことから、本来粉じん計で 10 間測定すること 1 分間測定しかできなかったことと、重機がこの地点に停車していたため、3ヶ所の測定点うち、2ヶ所しか測定ができない状況であった。

ずい道等工事現場におけるガイドラインによる測定は、粉じん計を使用して現場担当者が測定を実施する。ガイドラインで示されている質量濃度変換係数をかけて、質量濃度を求め、目標値と比較して高い場合は、換気設備の能力を上げて粉じん濃度を抑制することとしており、その場で対策を講ずることが可能であるが、切羽付近を作業環境測定単位作業場所として考えた場合、平均的な作業環境の状態が不明なことと各作業者が粉じんばく露の程度ばく露されているかが不明である。

個人サンプラーを使用した粉じん濃度測定については、作業者にサンプラーを装着するため、定点で実施する場合と比べると作業員（測定点）に対する問題は無く、各個人の粉じんばく露量を把握することが可能である。

しかしサンプリング、分析については、作業環境測定士等の専門知識の資格者が実施しなければ精度を保つことができない。このため測定実施者が分析機関に検体を持ち帰り、分析することになり、測定結果が得られるまでに時間を要することが考えられる。

また、もし粉じん濃度が高い値が得られたとしても、その場で対策を講ずることができない欠点がある。

今回の現場調査では、作業工程別に粉じん濃度がどの程度異なっているかについて作業員の呼吸域付近と 50m 地点で粉じん濃度を比較したことと、データ結果より「屋外ガイドライン測定」による評価方法で、ずい道等建設現場の現状の把握を行なった。

今後の検討項目としては、切羽付近を単位作業場所として作業環境測定として考えた場合、例えば

- (1) 作業員を移動する A 測定点として考え、5 人以上にサンプラーを装着して、結果を統計処理して作業環境評価基準に基づき評価する。
- (2) 各作業員を B 測定点として考え、評価指標と比較して評価する。

の 2 通りの考え方を精査して、NIOSH の OCCUPATIONAL EXPOSURE SAMPLING STRATEGY MANUAL による個人ばく露濃度測定の方法と屋外ガイドライン測定による方法を参考にして

- ①測定対象者
- ②サンプリング時間の考え方
- ③評価指標
- ④評価方法
- ⑤その他の条件

についてさらに検討し、条件の異なる現場調査（例えば換気方法、掘削方法等）でデータを収集し、検証する必要がある。

表 25 ずい道等建設工事現場における測定方法の考え方の比較

測定方法	測定の概要	測定実施者	測定実施者の危険性	測定結果が得られるか。	評価指標	評価区分	結果が得られるまでの時間	対策、改善
建災防方式による測定「地下工事における粉じん測定の指針」による測定	切羽から 5m、10、15m 地点で、各 3 点ずつ合計 9 点をで、ろ過捕集方法で実施する。	作業環境測定機関	非常に高い	×	管理濃度	作業環境評価基準に従った方法	長い	結果が判明した時には、当時の測定地点より、先を掘削しているので、対策や改善にあまり役立てられない。
個人サンプリャーによる測定 (NIOSH による方法) (屋外ガイドライン測定による方法)	作業者の口元付近にサンプリャーを装着してろ過捕集方法で実施する。	作業環境測定機関	低い	×	ばく露濃度評価値 管理濃度	NIOSH のマニュアルに基づき評価する 管理濃度と比較	長い	結果が判明した時には、当時の測定地点より、先を掘削しているので、改善対策や改善にあまり役立てられない。作業方法を改善するには有効な指標である。
ずい道等工事現場におけるガイドラインによる測定	切羽から 50m 地点で 3 点測定する。測定機器は、ガイドラインで K 値 (質量濃度変換計数) が示されている粉じん計を使用して行う。	現場担当者	低い	○	3mg/m ³	3mg/m ³ と比較する。	短い その場で対応可能	送気、排気のパーンの風量を調製することにより、その場で対策を講ずることが可能である。

平成 20 年度
トンネル建設工事における粉じん測定に関する検討報告書

平成 21 年 3 月 31 日発行

(社) 日本作業環境測定協会
〒108-8372 東京都港区芝 4-4-5
三田労働基準協会ビル 3 階
電話 03-3456-0444