

行政要請研究

「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

平成 30 年 6 月

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

1. 本研究の目的

ずい道等建設工事においては「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日付基発第768号の2）」（以下、「ガイドライン」という）等に従って粉じん対策が実施されているところであるが、近年の工法の進歩や機械の大型化等の作業方法の変化により粉じんの発生の態様が多様化していることから、状況に応じた的確な対策の推進が引き続き求められている。今後、高濃度の粉じんが飛散している切羽付近の作業環境管理及び作業者の健康障害防止の推進のためには、粉じんの飛散状況を把握するための手法の選択肢を広げ、確立することが必要である。そこで本研究では、適切かつ実現可能なトンネル切羽付近の粉じん濃度測定・評価方法の検討に必要な知見を得ることを目的とした。

2. 研究実施内容及び実施体制

本研究は、トンネル切羽内で、個人サンプラー、定点、重機上など様々な位置で粉じん濃度の測定を行った。粉じん濃度測定は粉じんの質量濃度測定に加え粉じん計によるリアルタイム連続測定および粉じん中の遊離けい酸の測定も含む。

本研究の調査結果は、厚生労働省労働基準局安全衛生部長が設けた「トンネル建設工事の切羽付近における作業環境等の改善のための技術的事項に関する検討会」（以下、検討会という）において報告され、切羽付近における粉じん濃度測定方法を検討する材料となることから、調査内容については検討会事務局及び委員の意見に基づき計画した。

現場は、厚生労働省労働基準局安全衛生部化学物質対策課環境改善室が一般社団法人日本建設業連合会より紹介を受けた NATM（新オーストリアトンネル工法 以下 NATM と表記）掘削のトンネル現場より、工法の詳細（発破・機械掘削、ずりのダンプ搬出・ベルトコンベア搬出）、断面積に係る道路、鉄道の別などを考慮して選定した5カ所のトンネルで測定を行った。

本研究の実施は 労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所の研究者が行い、委託等はない。担当者は以下の通りである。

作業環境研究グループ 鷹屋光俊、萩原正義、中村憲司、山田丸、加藤伸之
建設安全研究グループ 吉川直孝
化学安全研究グループ 大塚輝人

3. 調査における測定方法の種類

本調査の対象は NATM により掘削している山岳トンネルを対象としている。NATM の行程は、トンネルによって細部が異なるが概ね

- 発破

発破—ズリだし—コソク—1 次吹きつけ—支保工組み立て—2 次吹きつけ—ロックボルト打設

- 機械掘削

掘削／ズリだし—1 次吹きつけ—支保工組み立て—2 次吹きつけ—ロックボルト打設

で 1 サイクルをなしている。

本調査では安全上近づけない発破作業を除いた NATM 1 サイクルの粉じん濃度を可能であれば作業毎に分けて測定することを目指した。特に粉じんが岩盤由来のズリ出しまでと吹きつけセメント由来の 1 次吹きつけ以降の作業についてなるべく分けて測定することを試みた。

本調査の結果はトンネル切羽付近における測定点の選択（定点・個人サンプラーの選択も含む）、併行測定（粉じん計の出力数値を粉じん濃度に変換するための質量濃度変換係数（K 値）を求めるために粉じん計の測定と質量濃度測定を同時に行う測定）の省略の可否などを判断するための重要な知見となることが期待される。そこで、本調査では以下に示すとおり、定点（建災防指針方式に準じた方法）、個人サンプラー、重機の運転台付近において粉じん濃度（質量濃度および相対濃度）測定を実施した。尚、実際には、定点の数、測定の分割などが現場の事情に併せて変更した。また、安全上の理由から作業者に個人サンプラーを取り付けず調査員が測定した現場もある。（現場 B）

(1) 建災防指針（S61）方式に準じた方法（A 測定方式）

切羽付近の粉じん濃度を把握して作業環境を評価するために、坑内に複数の定点測定点を設定して、デジタル粉じん計（市販の装置そのまままたは、吸入性粉じん用の分粒装置を取付け）による連続測定と吸入性粉じん用サンプラーによる作業毎の質量濃度測定を実施した。測定点は、切羽の高さや重機作業に支障のない範囲を考慮しながら、可能な限り切羽に近い位置に設定し。測定は、NATM 工法の 1 サイクル通して実施を原則とした。

(2) 作業に応じた測定

ア. 個人サンプラーによる測定

作業者の呼吸域における粉じん濃度を把握するため、作業者に個人ばく露測定用の吸入性粉じんサンプラーのみ、または粉じんサンプラーと粉じん計を装着して測定を

実施した。測定対象者は、粉じん濃度が高いと考えられる吹付け作業や掘削作業、ずり出し作業の従事者を優先して選定した。実際に作業している位置での作業毎の粉じん濃度を把握する測定と、作業者のばく露量を推定するための測定を併せて行うため、粉じん濃度が高いと考えられる作業だけではなく NATM 工法の 1 サイクル通して測定した。(一部現場では粉じんの種類を考慮して掘削/ズリだし(粉じんは主に岩盤)と吹きつけ(粉じんは主に吹き付けセメント)に分けて実施した。

イ. 重機内(運転台等)での測定

切羽付近での測定は重機作業の妨げとなる可能性が高いため、代替の方法として重機内に測定機器(粉じん計、サンプラー)を設置して可能な場合に実施した。

4. 各測定方法の詳細

(1) 建災防指針(S61)方式に準じた方法(A測定方式)

ア. 測定点の設定(図1参照)

計画段階では、以下の方針で測定点を選択することとした。尚、実際には切羽の 5m 点まで近づくことは困難であったことと、機器・人員の制限から、調査後半において、定点は 4 点を基本に変更した。(実際の定点選択については結果の項を参照)

- ① 測定点は切羽から 5、15、25m の両側、計 6 点を基本とする。ただし、肌落ちガイドラインを踏まえ、切羽の高さが 5m 以上ある場合は切羽から最も近い測定点を切羽の高さ以上離れた位置とし、最も遠い測定点を 25m、中間の測定点を両点の中間地点とする。切羽から 25m 以内に切羽から最も近い測定点を設定できない場合は、25m より後方にも測定点を設定し、空間的な分布を確認できることを目指した。ようにする。なお、重機と重なって測定位置を確保できない場合は省略可とする。
- ② トンネル内に測定点を 6 点設定することが困難な場合、1 サイクルを通して設置が可能な切羽から最も近い位置を第一の測定点に設定する。トンネルの両側面では濃度の差異があることが予想されるため、可能であれば第一の点と反対側の側面に第二の測定点を設定する。第三の測定点として、第一の測定点の 10m 程度後方に測定点を設定する。可能であれば、第三の測定点の反対側の側面に第四の測定点を設定する。
- ③ 特定の作業において第一の測定点よりも切羽の近傍において定点測定が可能な場合、個人サンプラーによる測定や重機内での測定と比較が可能であることを念頭に、測定点を設置する。第一の測定点と同じ側面を優先し(第五の測定点とする)、可能であれば反対側の側面にも測定点を設置する(第六の測定点とする)。

- ④ 優先順位の高い測定点は、第一の測定点および第五の測定点である。それ以外の測定点に関しては人員及び作業内容（空いているスペースや作業時間等）に応じて適宜実施の可否を検討する。

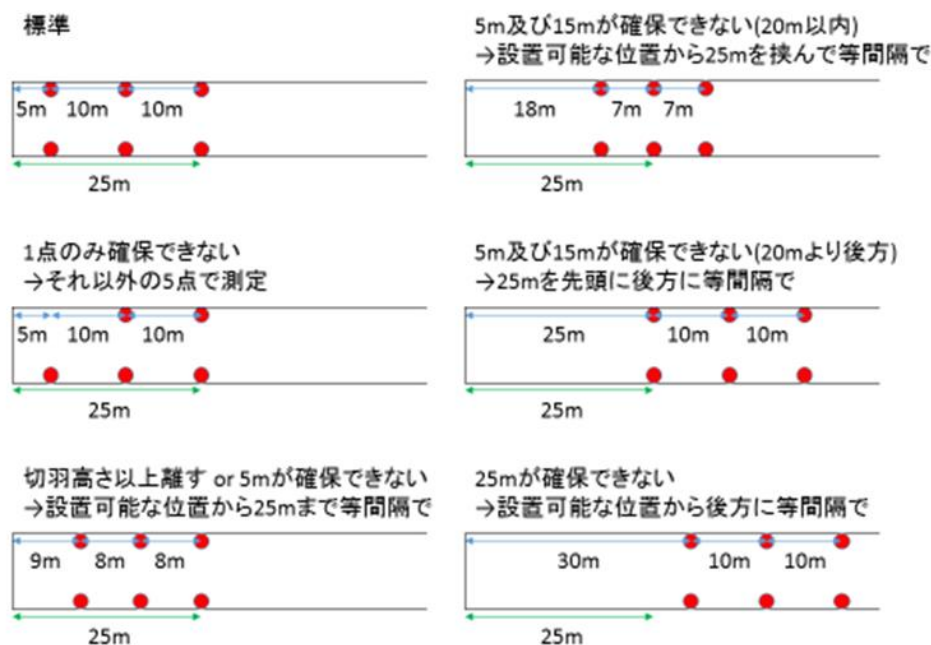


図1 測定点の設定例

イ. 測定項目

- ① 分粒装置付デジタル粉じん計による相対濃度測定
 - ・リアルタイム連続測定
 - 最低1点（上記第一の測定点において）
- ② デジタル粉じん計の併行測定（分粒装置の有無による比較）
 - 上記第一の測定点において
- ③ 吸入性粉じん用サンプラーによる質量濃度測定
 - ・各作業の質量濃度測定と質量濃度変換係数（K 値）の算出
 - 最低1点（上記第一の測定点において）
- ④ 各作業の遊離けい酸含有率の測定
 - （原則として、測定可能な粉じん量が得られた場合のみ）

※各測定点には、これらの機器を三脚に取り付けた形で設置した（図2参照）。ただし、現場からの要望により現場Eのみ専用の架台に機器を設置した（図18参照）。

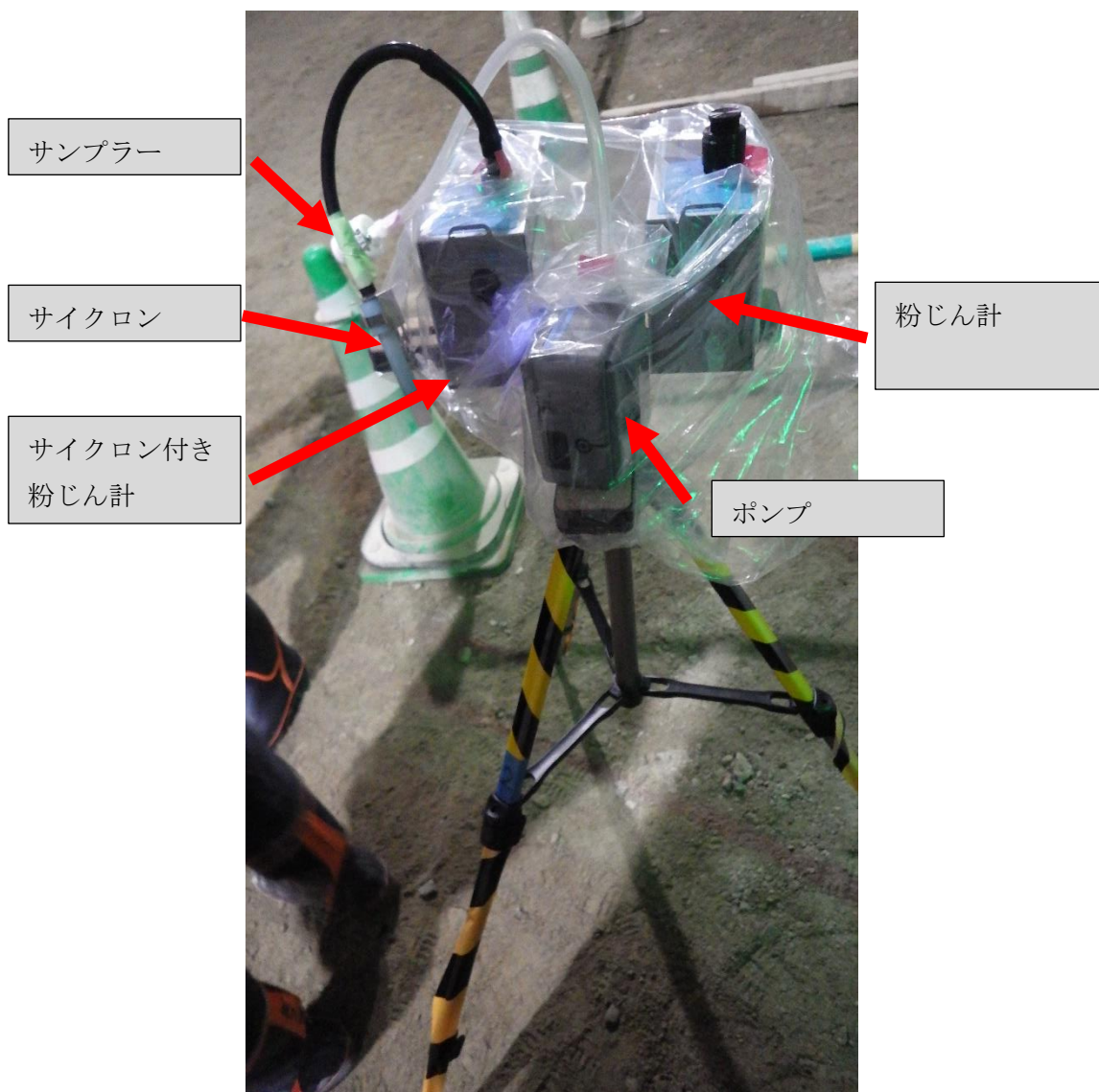


図 2 定点測定 of 機器の例

ウ. 測定時間

- ・粉じん計による測定は、NATM 工法の 1 サイクルを通して実施する。ただし、発破掘削を実施している場合は、発破後から次の装薬前までを 1 サイクルとする。
- ・サンプラーによる測定も 1 サイクルを通して実施する。作業中に定点に近づくことが可能な場合は、それぞれの作業毎の質量濃度を把握できるように、作業毎にサンプラーを交換した。
- ・特定の作業のみ測定可能な場合は 1 サイクル通しての測定は実施せず、それぞれの作業の開始・終了に合わせて測定機器の設置・撤収を行った。

(2) 作業に応じた測定

ア. 個人サンプラーによる測定

(ア) 測定対象者の選定

粉じん濃度が高いと想定される作業（吹付け、ずり出し、掘削等）に従事する作業者を優先的に選択する。現場の状況を考慮しつつ、4名程度を目安とした。作業者が測定機器を装着することが困難な場合、研究所調査員等に装着して測定を実施した。

(イ) 測定項目

- ① 分粒装置付個人ばく露測定用デジタル粉じん計による相対濃度測定
- ② リアルタイム連続測定
- ③ 吸入性粉じん用サンプラーによる質量濃度測定
- ④ 各作業の質量濃度測定と質量濃度変換係数（K 値）の算出

両者を一体化した測定機器を、専用のベストもしくはバックプロテクターに取り付けて使用した（図 3 参照）

(ウ) 測定時間

粉じん計による測定は、NATM 工法の 1 サイクルを通して実施した。ただし、発破掘削を実施している場合は、発破後から次の装薬前までを 1 サイクルとした。

サンプラーによる測定も 1 サイクル通して実施を原則とした。一部の現場では作業毎の質量濃度を把握できるように、作業毎にサンプラーを交換した。

粉じん濃度が高く、NWPS-254 の衝突板に粉じんが多く堆積することが予想される場合、LD-6N2 のヘッド部分のみを交換して対応することで、作業を中断する時間が最小限となるようにすることも検討したが、実際には、トンネル内でこのような作業を行うのは困難であり、装置を組み付けた反射防止ベスト全体を交換した。

イ. 重機内での測定

(ア) 測定する重機の選定

切羽付近で作業する重機のうち、粉じん濃度が高いと考えられる掘削、ずり出し及び吹付け作業に使用するものを優先的に測定対象として選定した

(イ) 測定項目

- ① 分粒装置付デジタル粉じん計による相対濃度測定
- ② 吸入性粉じん用サンプラーによる質量濃度測定

(ウ) 測定時間

重機を動かす前に測定機器を設置し、作業者が乗り込むタイミングで測定を開始し、作業終了後、作業者が降りるタイミングで測定を終了した。



図3 個人サンプラー装着例（上）専用ベスト（下）バックプロテクター

（3）その他

り下記の情報の記録も行った。

- ・換気条件等の記録（換気方式、風管の位置等）
- ・作業内容の記録（作業内容、重機の位置、カメラによる撮影等）

5. 調査に使用した機器

(1) 現場使用機器等

本調査ではトンネル内では電源の供給を受けず全て乾電池または充電式電池で作動可能な機器を使用した。このため、定点においても個人サンプラーを粉じん捕集に使用した。

ア. デジタル粉じん計

(ア) 定点測定用

- ① LD-5R (柴田科学) 単三電池使用

(イ) 個人サンプラーによる測定用

- ① LD-6N 及び LD-6N2 (ともに柴田科学) 充電式ニッケル水素電池

(ウ) 重機測定用

- ① LD-5 (柴田科学) および LD-5R

使用環境の過酷さから LD-5 型が故障したため途中の現場 C より LD-5R を重機用にも使用し、それにより定点の数を減らした。

イ. 吸入性粉じん用分粒装置

(ア) 質量濃度測定用

- ① NWPS-254 (柴田科学 インパクト型、25mm φ のフィルター使用 2.5L/min)

(イ) LD-5R 及び LD-5 用

- ① Dorr Oliver Cyclone

本分級機は粉じん則に従った測定を行う際に必要な較正を受けていないが、粉じん計の改造を伴わず接続可能であるため選択した。 1.7L/min

(ウ) LD-6N 及び LD-6N2 用

- ① NWPS-254

ウ. 捕集用ポンプ

- ① MP-W5P (柴田科学) 単三乾電池使用
- ② AirCheck Touch (SKC) リチウム充電電池使用

エ. フィルター

- ① テフロンバインダー付ガラス繊維フィルター T60A20

(2) ラボ機器

ア. フィルター秤量

- ① メトラーマイクロ天秤 XP-2U 感量 0.1 μg
- ② メトラーマイクロ天秤 UMX2 感量 0.1 μg

イ. 粉末 X 線回折 (遊離けい酸濃度)

① リガク RINT2000 Cu K α 線

6. 調査の進め方

下記のスケジュールで実施した。現場によっては、事前説明を事業者本社のみで行い現場で実施しなかった場合。事業者本社と現場の両方で説明したことがある。

(1) 事前調査

本調査実施前に現場を訪問して調査内容と使用機器の説明を行い、現場の状況を伺いながら具体的な測定位置や個人サンプラーを装着していただく作業者の選定等を行った。

(2) 本調査

- 1 日目 調査内容の最終確認、装置の組み立て等
- 2 日目 調査 (NATM 1 サイクル測定)
- 3 日目 予備日 (装置の再梱包など)

7. 結果

(1) 現場調査の概要

表 1 に調査を実施した各現場の概要を示す。断面積は全て 50m² 以上で、いわゆる中小断面といわれる小さな断面のトンネルでは調査は実施していない。現場の選定において掘削方法については発破掘削と機械掘削の両方の現場を選ぶこととしていたが、それぞれ発破掘削 2 か所、機械掘削 3 か所で実施することができた。また、粉じん濃度に関連があると推測される項目としては、ずり運搬方法はタイヤ方式が 3 か所、ベルトコンベア方式が 2 か所、換気方式は送気・集じん機方式が 4 か所、送気方式が 1 か所であった。湧水の程度は、定量的に示すことが難しいと判断し、全 5 現場のうち湧水が多く底面がぬかるんで水たまりができているような状況を「多」、ほとんど湧水なく一部だけ水があるような状況を「少」、その中間程度を「中」として示した。

表 1 現場の概要（選定の時の資料から）

	現場 A	現場 B	現場 C	現場 D	現場 E
用途	道路	道路	道路	道路	鉄道
断面積	50-60 m ²	80-90 m ²	80-90 m ²	80-90 m ²	80-90 m ²
湧水の程度	少	中	多	少	多
掘削方法	発破	発破	機械	機械	機械
ずり運搬方法	タイヤ	タイヤ	ベルトコンベア	タイヤ	ベルトコンベア
換気方法	送気 集じん 機	送気 集じん 機	送気 集じん 機	送気	送気 集じん 機

各現場調査において実施した測定数や作業等については、表 2 に示すとおりである。当初の計画では定点測定の測定点は 1 サイクル通して 6 点を基本と考えていたが、現場での調整の結果、安全面から作業によっては設置することができず、表 2 に示す通り数を減らしての実施となった。切羽近傍の測定点については、ずり出し作業では重機の動線の確保のために三脚を設置することが困難であったが、コンクリート吹付け作業やロックボルト打設作業では設置可能とのことであったので 1 サイクル通してではなく可能な作業のみ測定点を設置した。ただし現場 E においては、作業の邪魔にならない専用の架台を用意することで 1 サイクル通しての測定が可能であった。また、個人サンプラーによる測定に関しては、作業毎に測定機器を交換することを計画していたが、最初の調査で実施してみたところ作業者への負担が大きかったことから、途中から原則 1 サイクル通しての測定とした。測定した作業の分類であるが、大きく分けて「掘削・ずり出し」と「吹付け・ロックボルト」の 2 つとした。掘削作業とずり出し作業をまとめているのは、それぞれの作業が同時に行われている場合があり、ずり出し作業中にサンプラーの交換が困難であったことなどによる。コンクリート吹付け作業とロックボルト打設作業は、ロックボルト打設作業の粉じん濃度が低く、また作業時間も短かったため秤量に必要な粉じん量が捕集されないことがあったためまとめることとした。

表2 各現場における測定の実施状況

	現場 A	現場 B	現場 C	現場 D	現場 E
定点測定の実施数※	5 (3)	4 (3)	4 (3)	4 (3)	4 (4)
個人サンプラーの実施数	4	3 (全て調査員)	3	6 (調査員 1)	6 (調査員 1)
重機測定の実施数	4	2	2	2	2
測定作業の分類	ずり出し 吹付け ロックボルト	ずり出し 吹付け ロックボルト	掘削・ずり出し 吹付け・ロックボルト	掘削・ずり出し 吹付け・ロックボルト	掘削・ずり出し 吹付け・ロックボルト
特記事項		安全上、作業員に個人サンプラーをつけず、測定データは全て調査員が装着したデータである。		ずり出し作業以外の時間帯に切羽近傍に定点を設置して測定を実施した。粉じん発生量の少ないコンクリート吹付け方法を実施している。	定点測定は4点とも1サイクルを通して実施した。定点は専用の架台に設置した。

※カッコ内は1サイクル通して設置した測定点の数

(2) 粉じん濃度測定結果

ア. 測定方法、作業による粉じん濃度の違い

粉じん質量濃度測定には、個人サンプラー用ホルダーPM4 NWPS-254 型（柴田科学）にフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルターT60A20（φ25mm、Pall）を装着したものをを用いた。フィルターの秤量には、最小表示 0.1μg のウルトラマイクロ天秤 XP2U 及び UMX2（ともにメトラートレド）を使用した。捕集された粉じんの質量は作業環境測定における粉じん測定に準じて、調査前の 2 回の秤量値と調査後の 1 回の秤量値から求めた。

図 4 に、フィルターサンプリングにより得られた作業毎の粉じん質量濃度を示す。なお、粉じん濃度に大きな影響を与えられとされるため、現場の換気方式の違いにより 2 つに分けて示している。ここで、「掘削・ずり出し」は発破掘削の現場

（A 及び B）においてはずり出し作業のみ、機械掘削の現場では掘削作業とずり出し作業を測定したデータである。また、「吹付け（・ロックボルト）」はロックボルト打設作業を個別に測定した 2 現場（A 及び B）においてはコンクリート吹付け作業のみを、それ以外の 3 現場（C、D 及び E）においてはコンクリート吹付け作業からロックボルト打設作業までを測定したデータである。また、現場 A の二次吹付け作業時の重機測定のデータは、測定後の衝突板及びフィルターの状況から適切な測定が実施できていなかったと考えられるため、図 4 には示していない。この点については、本節の末尾にて述べることとする。ロックボルト打設作業のみの測定で得られた粉じん質量については最大でも 20μg 程度であり、負の値となる測定結果もあった。調査前にフィルターを複数回秤量した際の標準偏差（σ）は平均で 1 μg 程度で、得られたデータの多くが 10σ（定量下限）未満であったことから信頼性の低いデータであると判断し、これ以降は参考値として扱うこととした。

ここで、図 4 において送気・集じん機方式の現場では掘削・ずり出し作業よりも吹付け作業で粉じん濃度が高く、送気方式の現場では両者が同程度であるように見られるが、この違いは、現場 D は吹付け工法に粉じん発生量が少ない工法を採用しているということが原因と考えられる。

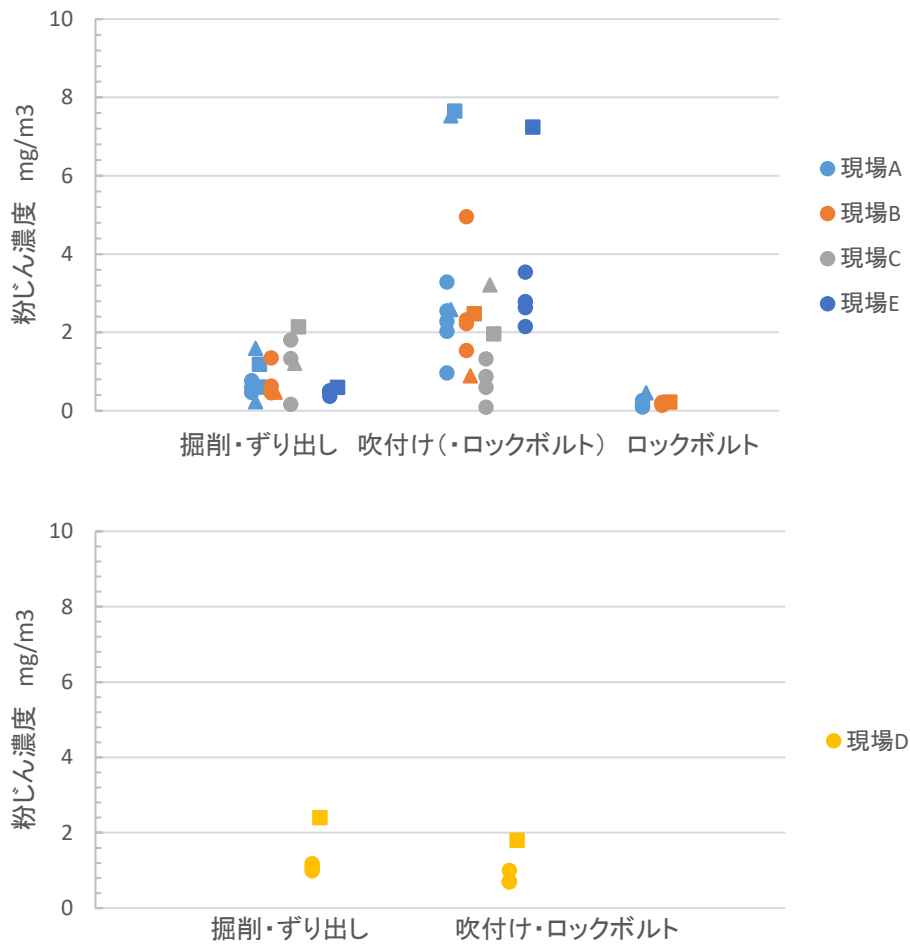


図4 作業毎に得られた粉じん質量濃度 (○：定点、△：個人、□：重機) (上) 送気・集じん機方式 (下) 送気方式

図5に、今回の調査で得られた各測定方法の1サイクル及び作業毎の粉じん質量濃度を示す。得られたデータの中で、1サイクル中にサンプラーを交換したデータについては合算した値を示している。また、一部の作業で測定が実施できていない切羽付近の定点測定の結果については1サイクルの結果には含めていない。作業毎のデータは、重機内での測定と比較できるように定点測定及び個人サンプラーによる測定の結果を粉じん計のデータを元に時間帯を合わせて計算した値である。そのため、粉じん計のデータが得られなかった測定については計算ができないため図5には入っていない。なお、図4と同様に現場Aの吹付作業時の重機測定のデータは適切な測定が実施できていなかったと考えられるため図5には示していない。

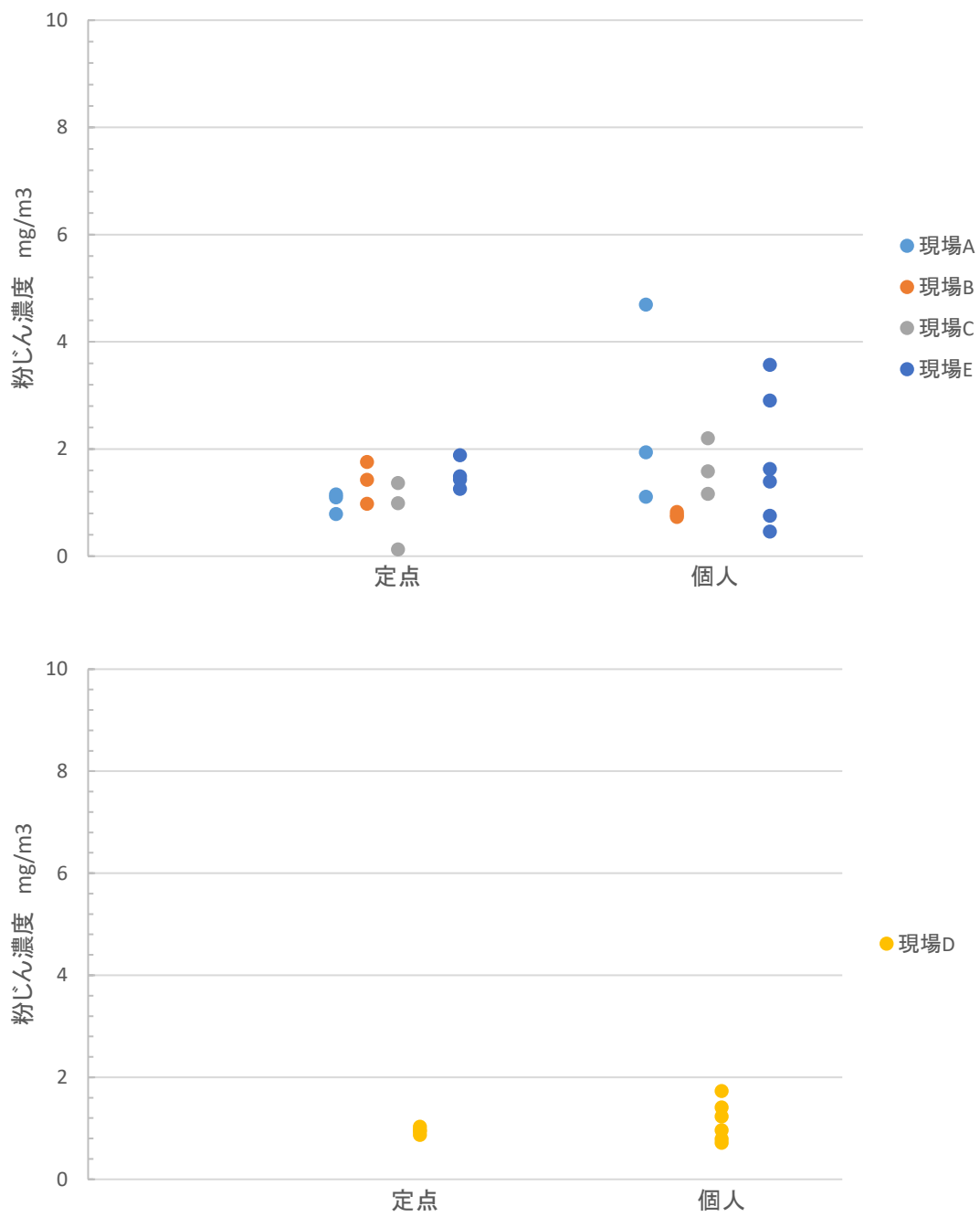


図 5(1) 測定方法毎の粉じん質量濃度 (1 サイクル) (上) 送気・集じん機方式 (下) 送気方式

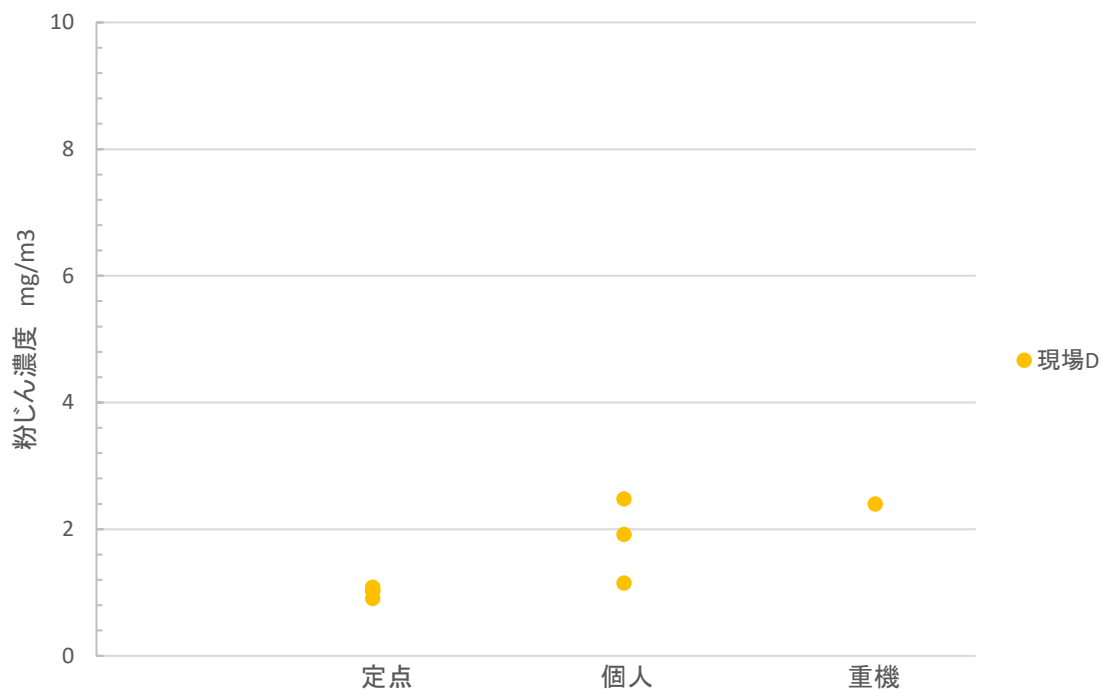
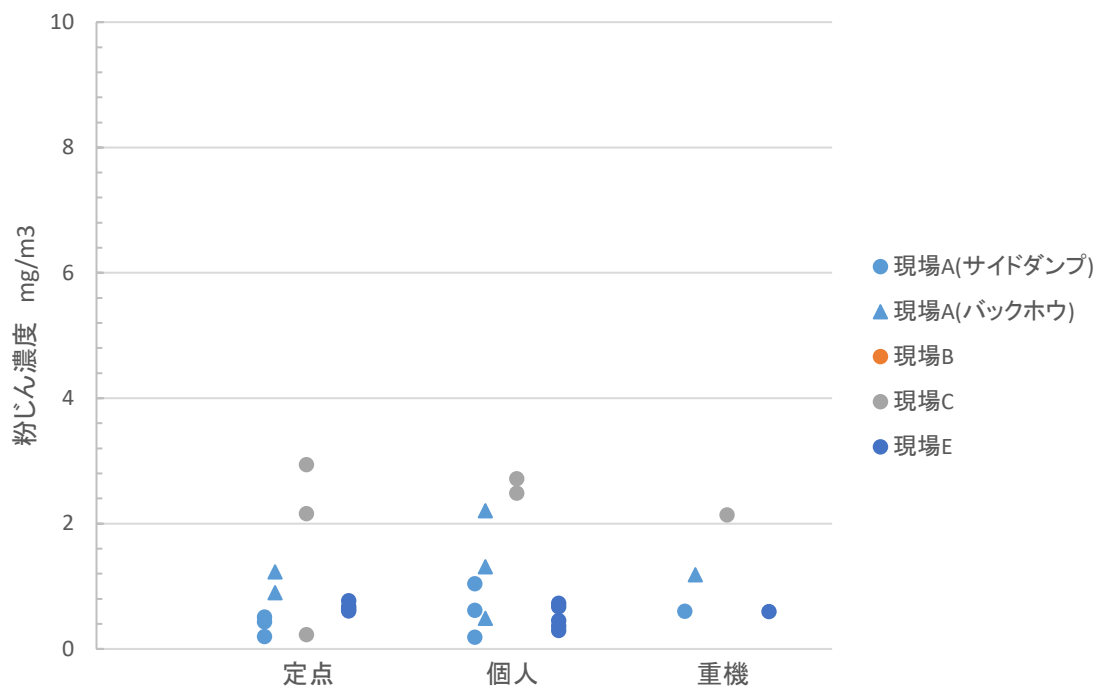


図 5(2) 測定方法毎の粉じん質量濃度 (掘削・ずり出し) (上) 送気・集じん機方式
(下) 送気方式

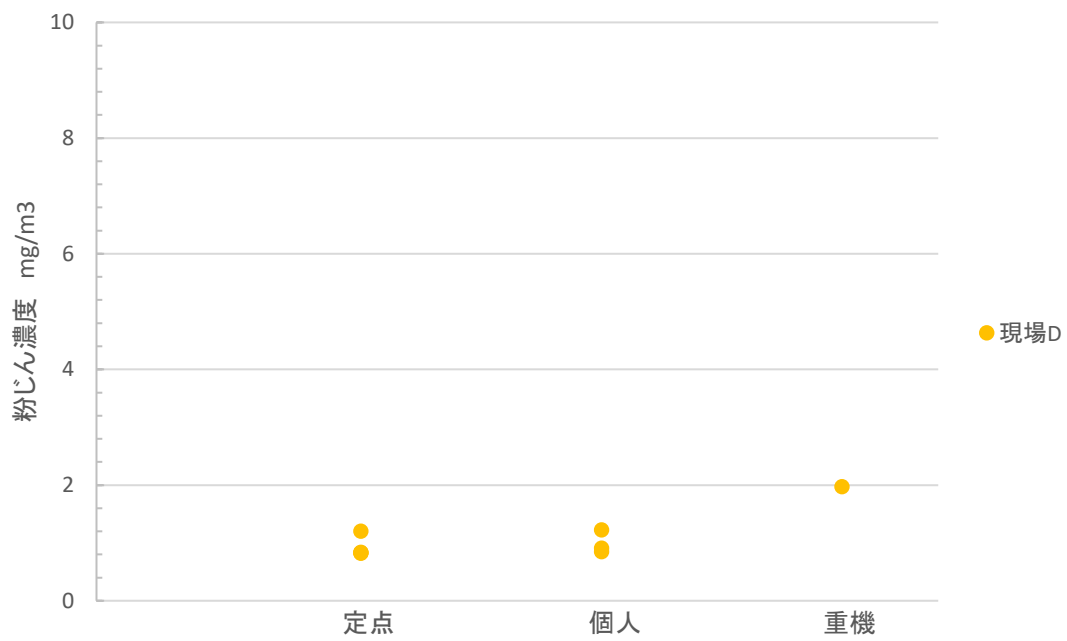
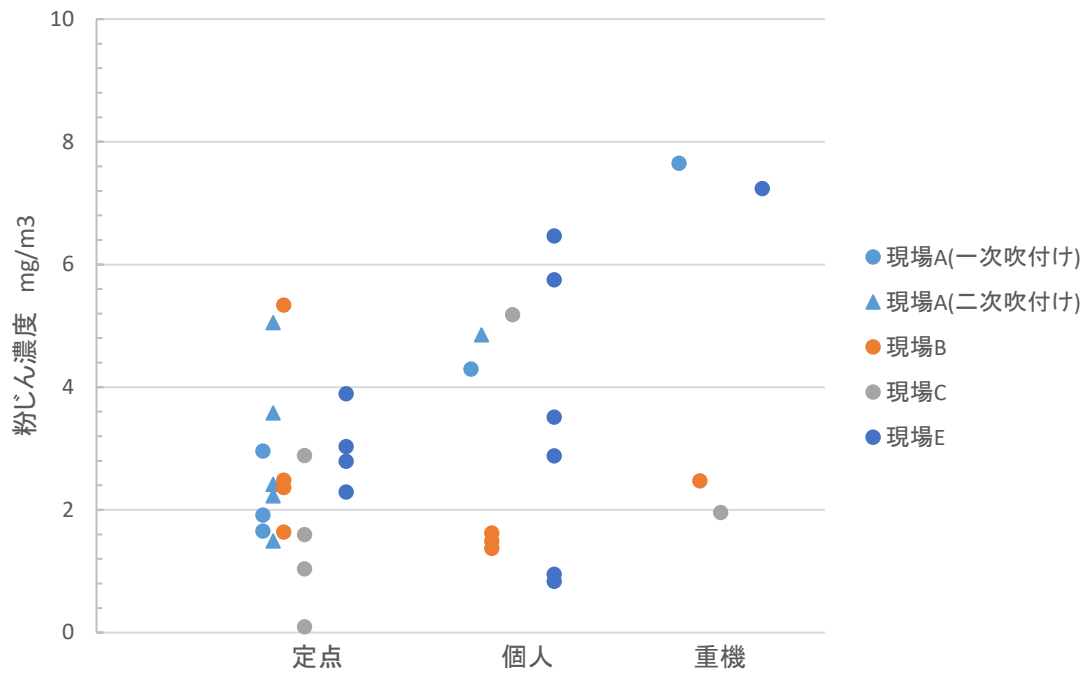


図 5(3) 測定方法毎の粉じん質量濃度 (吹付け) (上) 送気・集じん機方式 (下) 送気方式

図 6 に、切羽からの距離が離れるにつれて粉じん濃度がどう変化するかを確認するため、定点測定で得られた切羽からの距離と粉じん濃度の関係を示す。また図 7 に個人サンプラーと定点で得られた結果の関係を示す。

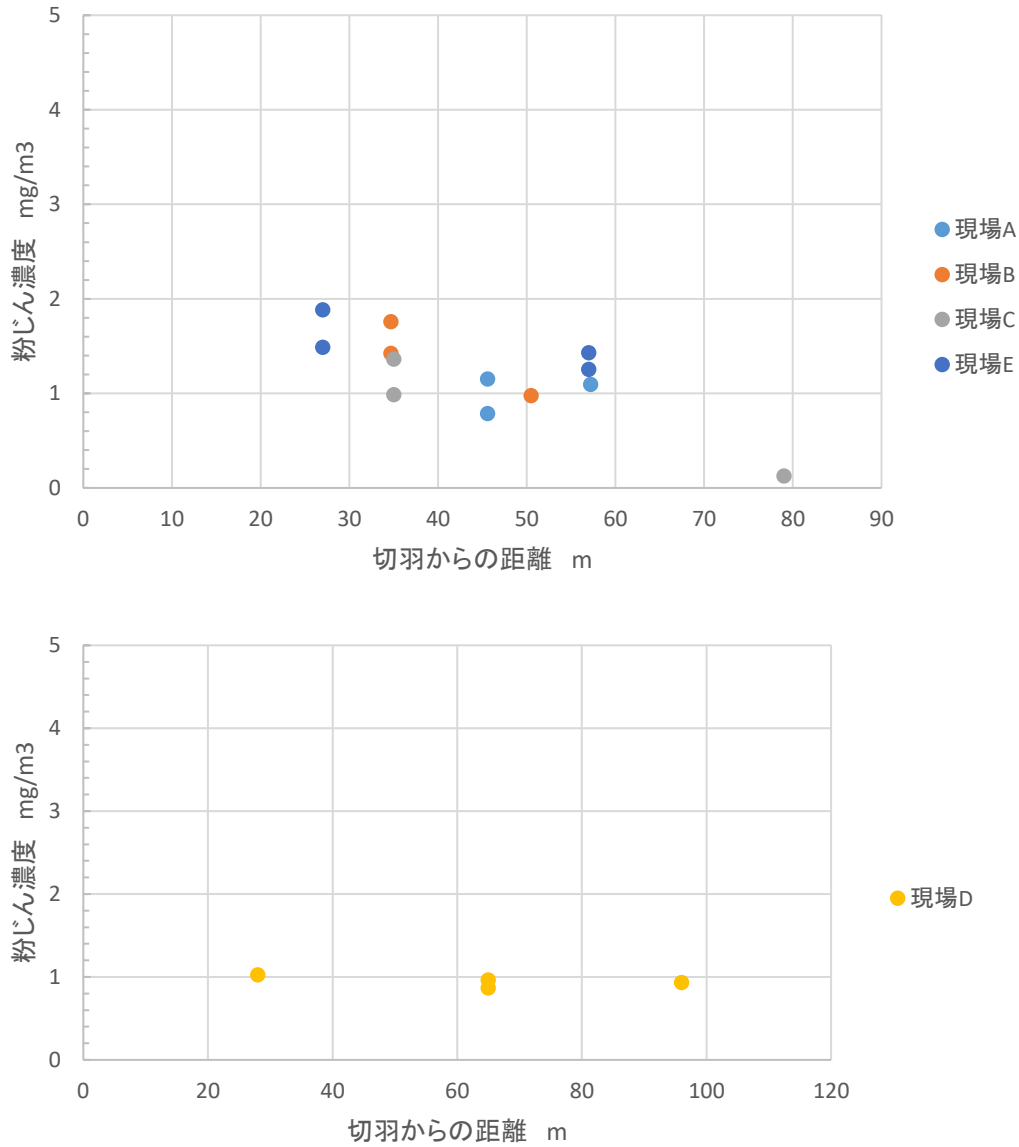


図 6(1) 定点測定における粉じん濃度の距離減衰 (1 サイクル) (上) 送気・集じん機方式
(下) 送気方式

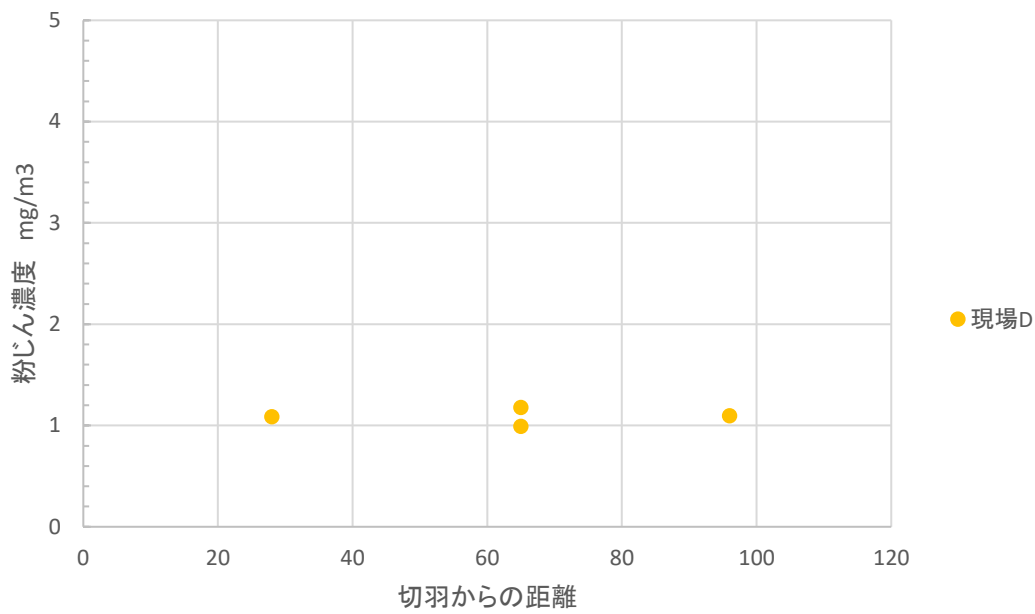
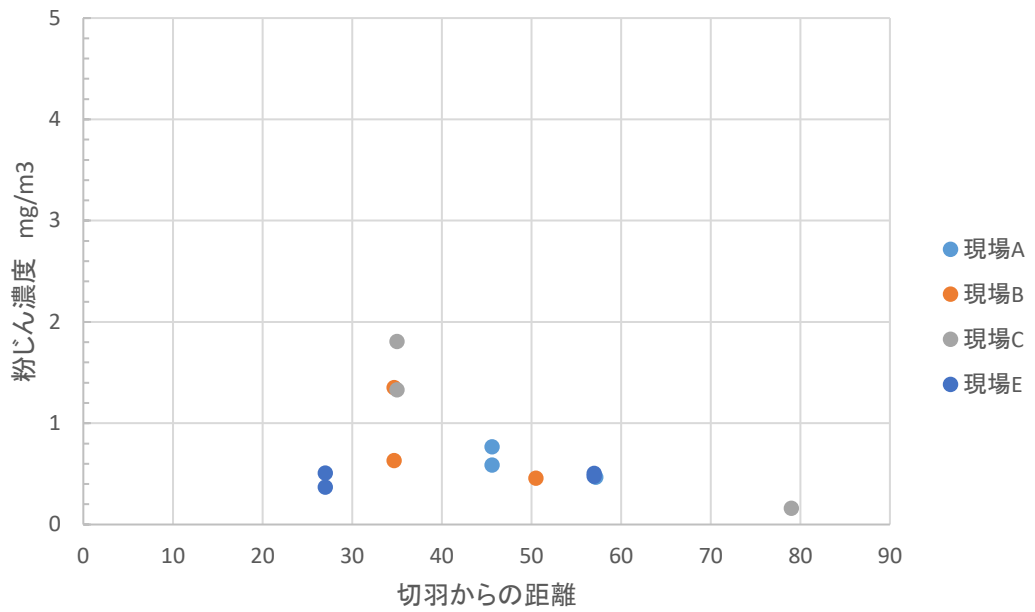


図 6(2) 定点測定における粉じん濃度の距離減衰（掘削・ずり出し）（上）送気・集じん機方式（下）送気方式

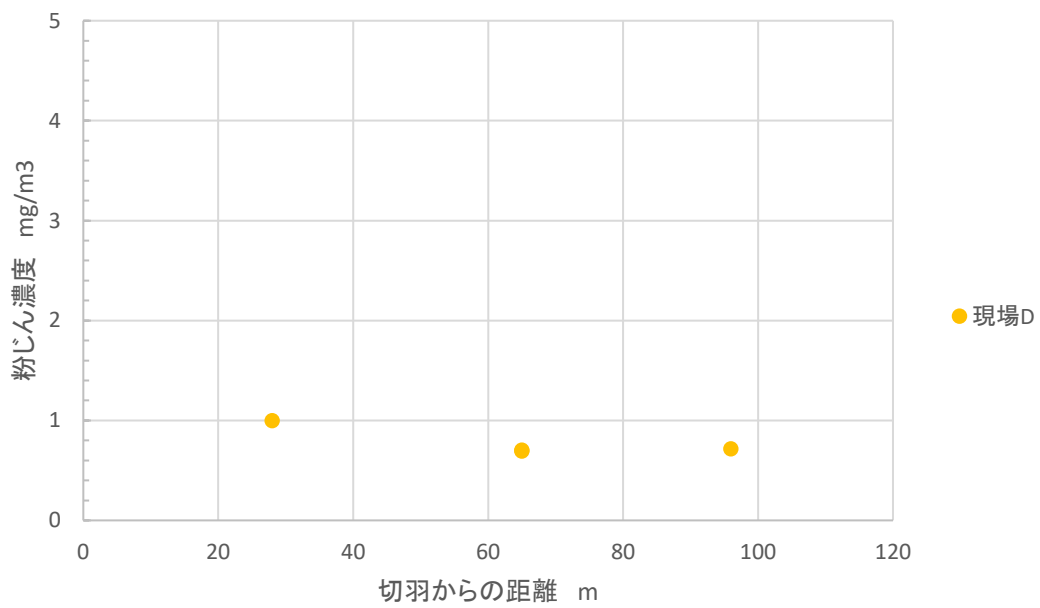
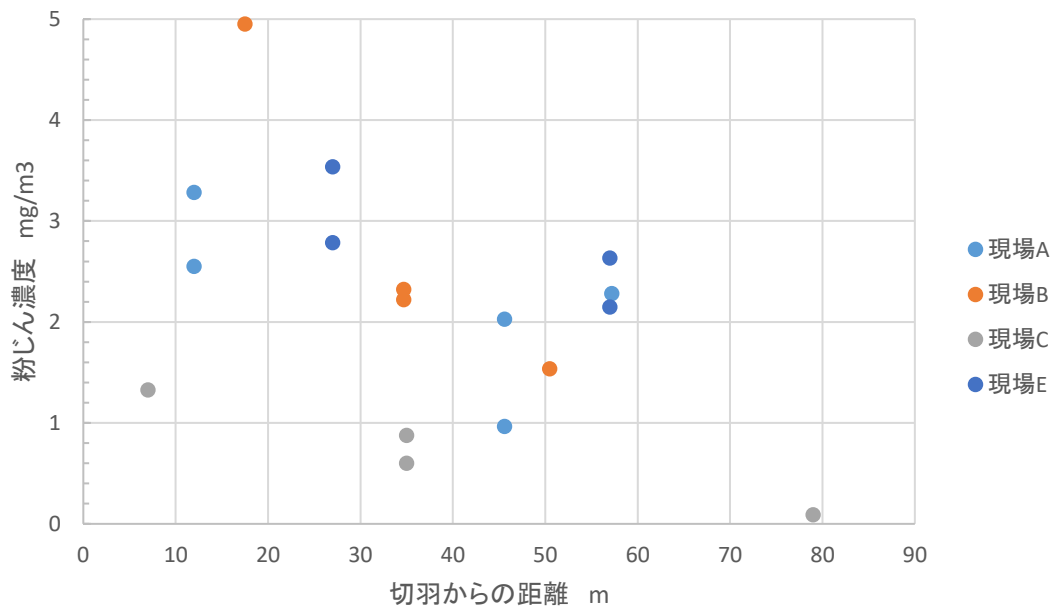


図 6(3) 定点測定における粉じん濃度の距離減衰 (吹付け・ロックボルト) (上) 送気・集じん機方式 (下) 送気方式

全体として作業別では吹付け作業において粉じん濃度が高い傾向が見られたが、図 4 で触れた通り、測定後の衝突板及びフィルターの状況から一部のデータでは適切に分粒されていないために過大評価している可能性がある。以下に、高濃度事例の状況について説明する。

慣性衝突式の分粒装置である NWPS-254 型では、サンプラー内にシリコン油を塗布した衝突板を配し、粗大な粒子はここで捕らえられる。微小な粒子は空気の流れに乗って衝突板の隙間から後方に配されたフィルターの方へ流れていき捕集される。図 7 に現場 A の二次吹付け作業時に重機の測定で使用した衝突板とフィルターの写真を示す。この測定で得られた粉じん濃度は 44 mg/m^3 と非常に大きな値となったが、フィルターの写真から明らかなように目視できるほど大きな粒子がフィルター上に存在していることがわかる。粉じん濃度が高すぎたために衝突板で粗大粒子を捕えきれず、本来であれば微小な吸入性粉じんのみが捕集されるはずのフィルターで捕集されていたと考えられる。この粗大粒子の混入により濃度が高くなっていった可能性が高いことから、粉じん濃度が高いことは間違いないとは言えるが濃度の数値としては過大評価となっており、信頼性が低いと考えられる。このような高濃度の原因は、設置した位置にあると考えられる。この測定と同じ時間帯に測定された個人サンプラーの値は 5 mg/m^3 であることから、重機測定を行う場合、適切な位置に機器を設置することが重要であることがわかる。



図 7 現場 A 二次吹付け作業時の重機の測定で使用された衝突板（左）及びフィルター（右）

同様の例は他の現場でも見られたので、参考として現場 E の個人サンプラーによる測定の衝突板及びフィルターの写真を図 8 に示す。こちらもフィルター上に粗大な粒子を確認することができる。また、衝突板には図 8 と同様に大量の粒子が捕集されていることが確認できる。このように衝突板に大量の粒子が捕集されている例は他にもあり、特に粉じん濃度の高い吹付け作業において多く見られた。そのた

め、それらの値は濃度が高いことは確実であろうが、数値としては過大評価している可能性があることに注意が必要である。

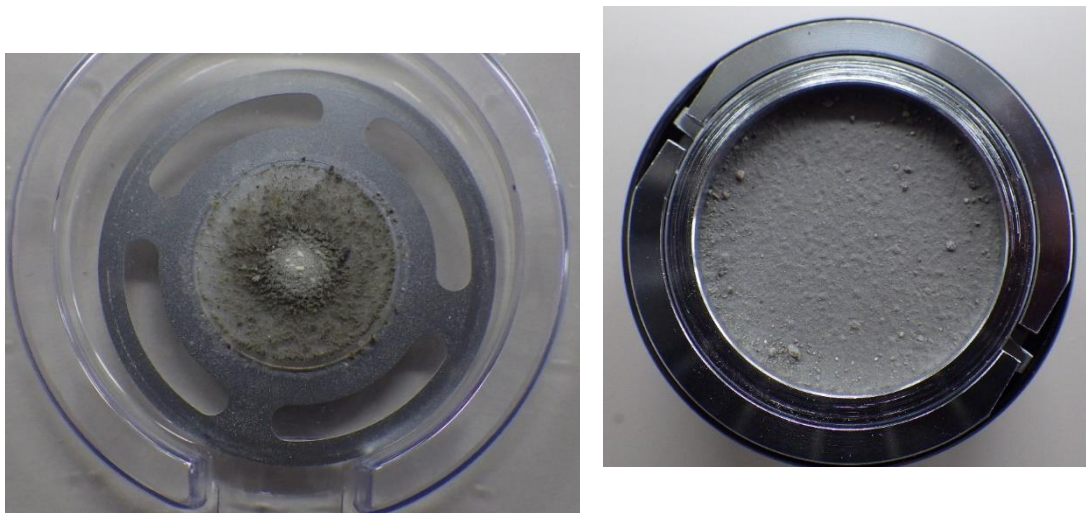


図8 現場 E 個人サンプラーによる測定（個人②）で使用された衝突板（左）及びフィルター（右）

イ. 測定方法、作業による K 値の違い

質量濃度変換係数（K 値）は、相対濃度指示法であるデジタル粉じん計のカウント値を質量濃度に変換するために用いる数値であり、以下の式で表される。

$$K = C / (R_D - D)$$

ただし、K：質量濃度変換係数 (mg/m³/cpm)

C：質量濃度 (mg/m³)

R_D：1 分間の計数値 (cpm)

D：バックグラウンド値 (cpm)

作業環境測定における粉じん測定では実際の現場で質量濃度との併行測定を実施して K 値を決めるが、ずい道等の建設作業現場においては測定を簡便に実施するため予め与えられた値を用いることとなっている。ガイドラインでは切羽から 50 m の位置で粉じん測定を実施するため、その位置での K 値として定められていることには注意が必要であり、切羽付近で測定方法や測定位置、作業内容等によって K 値がどの程度変動するかは、今後一律に K 値を与えることが可能かどうかを検討する上で重要な情報である。ここでは、今回の調査で得られた分粒装置を取り付けた粉じん計の相対濃度に対する K 値を、測定方法及び作業毎（図 9-11）に示す。

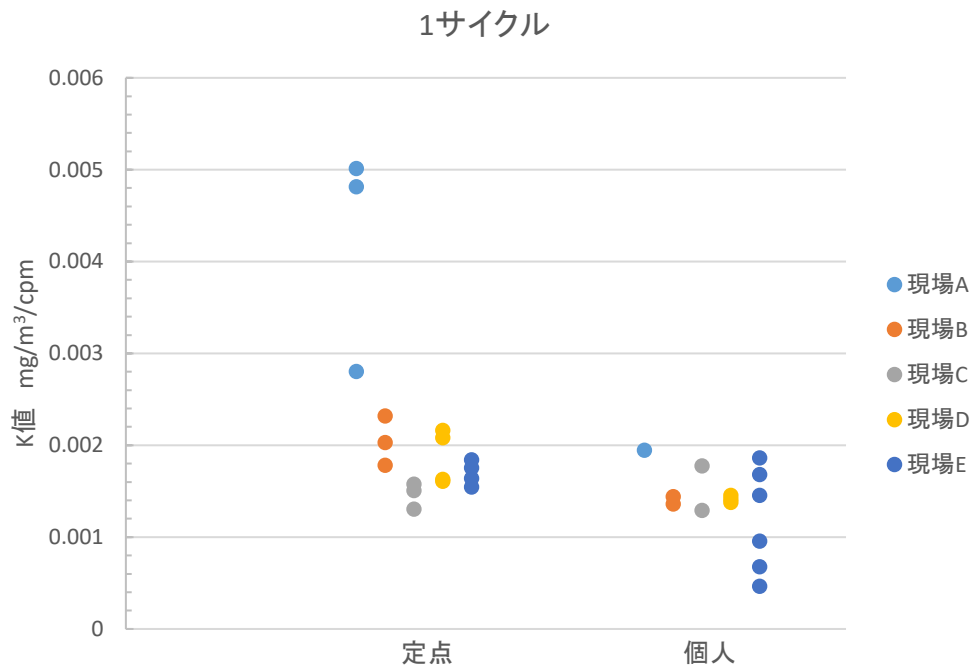


図9 測定方法毎の NATM 1 サイクルでの K 値

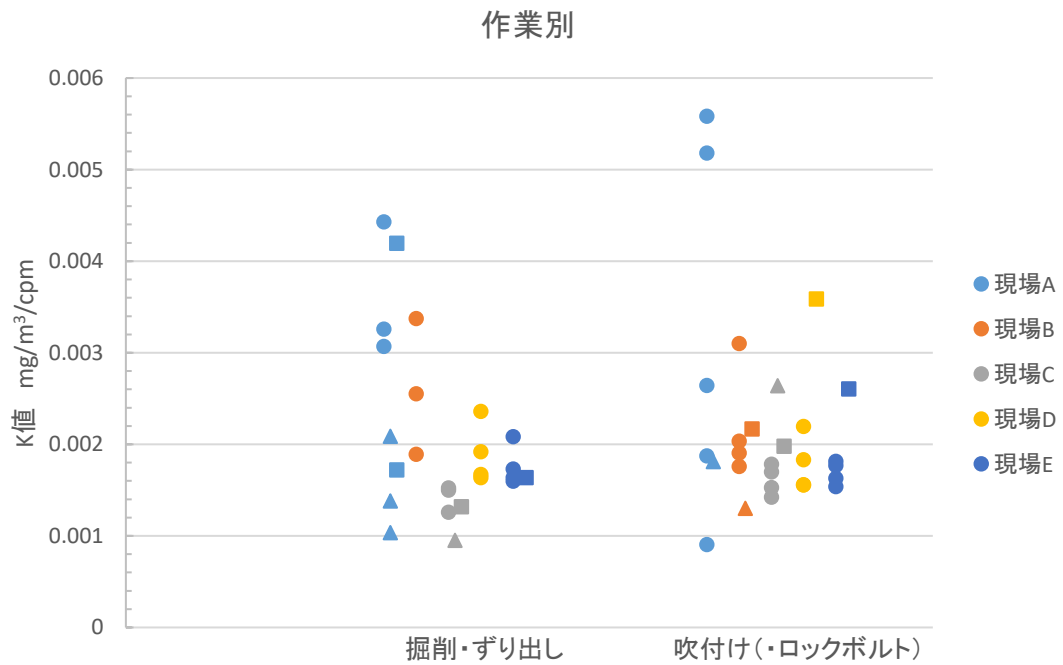


図10 作業毎に得られた K 値 (● : 定点、▲ : 個人、■ : 重機)

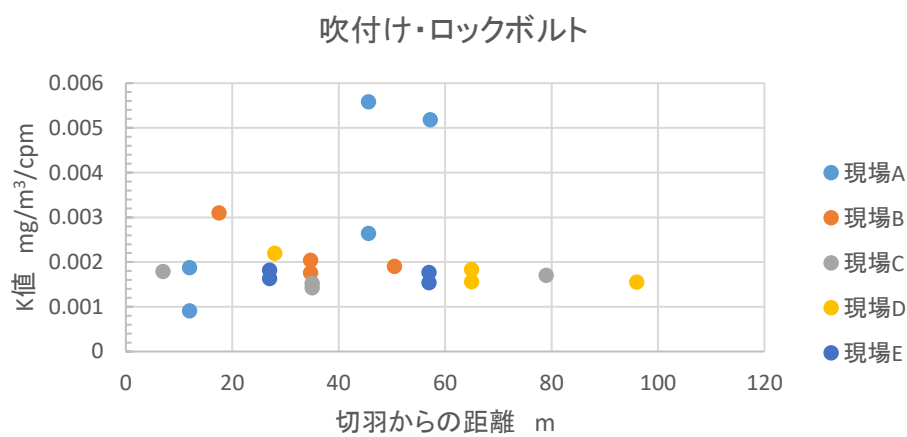
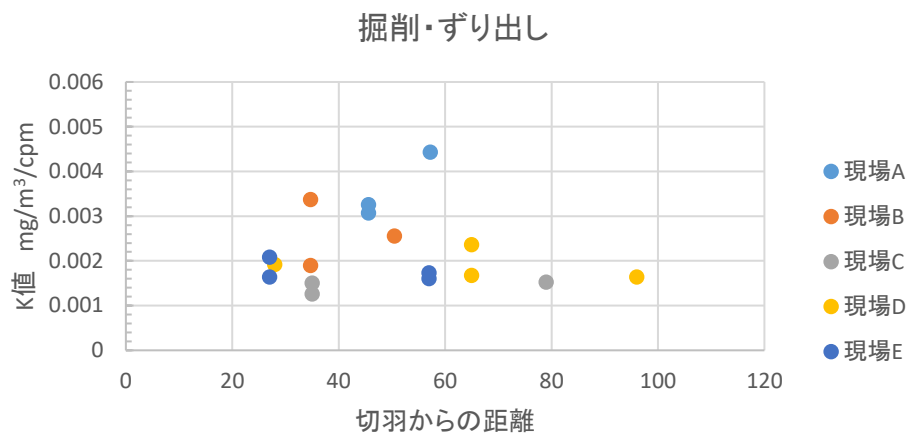
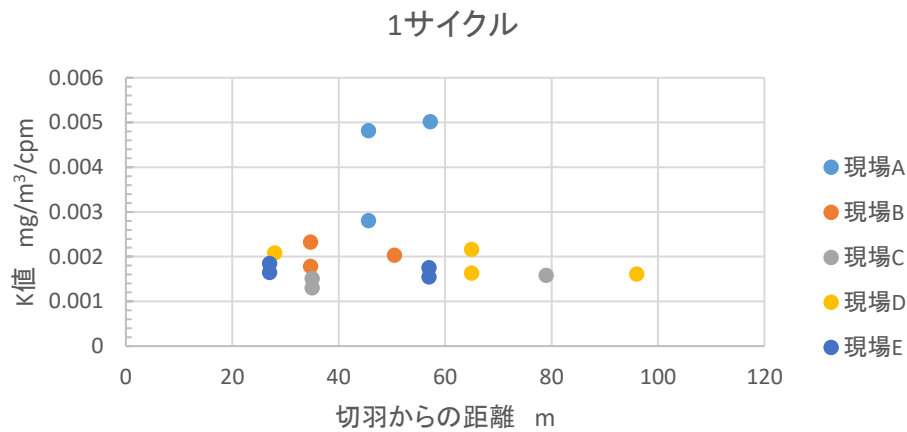


図 11 定点測定における作業毎の K 値の距離変動

ウ. 分粒装置の有無による K 値の違い

今回の調査では、原則として分粒装置を取り付けた粉じん計を使用してデータを取得した。これは、検討会事務局の原案を元にしてのことであるが、通常の作業環境測定やガイドラインにおける粉じん測定においては、4 μm カットの分粒装置を取り付けることを規定していない。そのため、分粒装置を取り付けることの効果の検証やこれまでの測定結果との整合性を確認するために、各現場において定点測定のないしは2測定点において、吸引口に分粒装置を取り付けた粉じん計と通常の吸引口の粉じん計の併行測定を実施した。その結果を図 12 および図 13 に示す。

質量濃度変換係数の定義より、分粒装置を取り付けた粉じん計で相対濃度が低くなることを反映して K 値は大きくなる。図 12 の全点から計算される傾きは、およそ 1.5 であった。図 13 から、K 値は切羽からの距離に対して大きな変動はなく、どちらの粉じん計も同じような挙動であった。

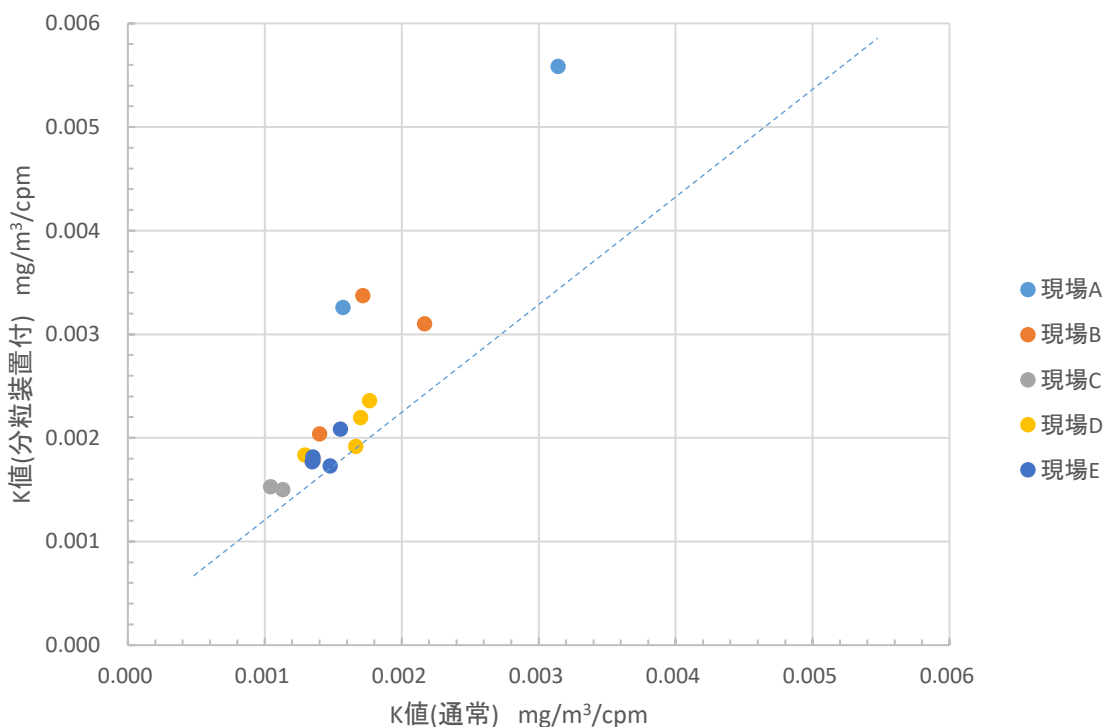


図 12 通常の粉じん計と分粒装置を取り付けた粉じん計の K 値の関係

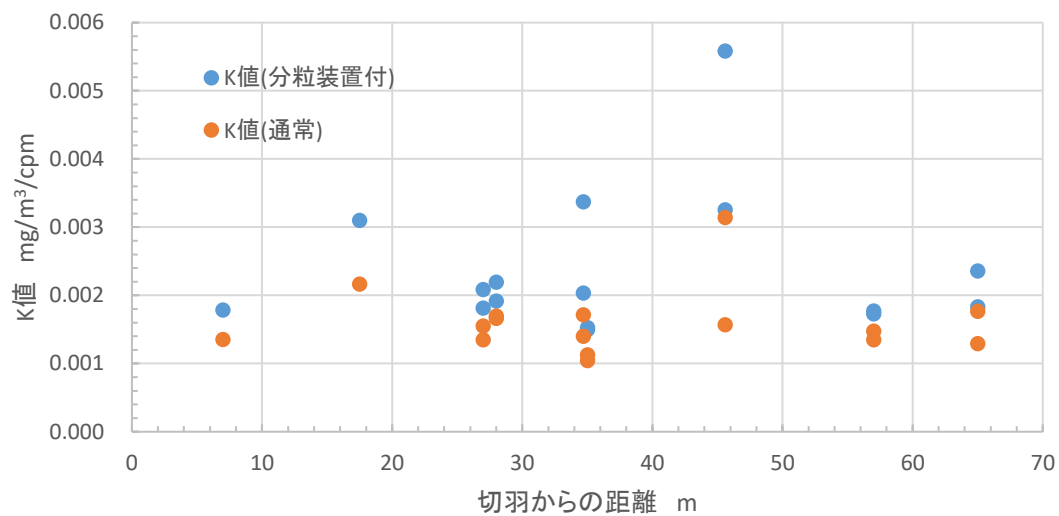


図 13 通常の粉じん計と分粒装置を取り付けた粉じん計の K 値の切羽からの距離による変化

エ. 遊離けい酸測定

粉じんの質量濃度測定の測定のために捕集した粉じんについて粉末 X 線回折 (XRD) により、粉じんの遊離けい酸濃度の測定を試みた。

(ア) 方法

フィルターおよび捕集粉じんの厚み補正用の亜鉛板の上にフィルターを置き、粉末 X 線回折計 (リガク RINT2000) で測定した。

① 測定条件 (定性)

X 線 Cu K α 36kV/20mA

試料 毎分 30 回転 (均質化のため)

走査 軸 $2\theta/\theta$ 範囲 $3^\circ \sim 70^\circ$ 連続 毎分 2°

② 測定条件 (定量)

X 線 Cu K α 40kV/30mA

試料 毎分 30 回転 (均質化のため)

走査 軸 $2\theta/\theta$ 範囲 $15^\circ \sim 45^\circ$ 1 秒ごとに 0.02° 移動させる

FT(固定時間)法

(イ) 試料

定点・個人・重機から、掘削/ずり出し・吹きつけがまんべんなくなり、かつ粉じん採取量が比較的多かった試料を各現場から 5 試料ずつ抽出し測定した。

(ウ) 結果

図 14 に今回用いたフィルターと同じ T60A20 に、石英標準試料 (日本作業環境測定協会が配布しているもの) を作業環境ガイドブック 1 粉じん が推奨する $0.2\text{-}1.2 \text{ mg/cm}^2$ の濃度でのせた標準系列の XRD パターン。図 15 に各現場の測定結果を示す。図 15 より、作業によっては岩石・セメント由来のピークが観測された。

定性的には作業の種類と粉じんの成分について説明可能な結果が得られたが、一方で、図 14 の標準系列のピーク高さからの比較からわかるように、定量は難しいと考えられる試料が大半であった。

定性の結果を受けて、石英の主回折線付近を中心に走査方法を帰るとともに、特定の角度での測定時間を長くすることにより、S/N 比を向上させ、定量を試みた。その結果を図 15 に示す。図 15 の結果から、結果の確度等に問題が残るものの、岩盤由来の粉じんが大半でかつ、粉じん濃度が高い試料についてのみ、遊離けい酸濃度を推定を試みた。その結果は表 3 の通りだが、1 点の例外を除いて石英の回折線付近にピークが観測できる場合においてもブランクフィルターのバックグラウ

ンド値のばらつき (σ) の 10 倍未満であり、定量限界を下回っていた。従って表 3 の数値は遊離けい酸含有率の傾向を反映しているが、この濃度をもって作業場のリスクを評価することはできない。遊離けい酸濃度の測定を行うためには、フィルター上に捕集する粉じん試料の量をより多く擦る必要がある。そのためには、捕集時間を長くする必要がある。しかし、すでに述べたとおり、今回の粉じん捕集量であっても、粗大粒子を除くための衝突板の容量がすでにオーバーフローしており捕集時間を長くすることは困難である。従って、個人サンプラーによる捕集では、気中粒子の遊離けい酸測定を確実に実施することは困難であると考ええる。この他の方法として S/N 比の N (ノイズ) 側を改善する方法として、フィルターをよりバックグラウンドの少ないメンブランフィルターを用いることが考えられるが、粉じん濃度測定の精度が下がるため、作業者に 2 種類のサンプラーを装着してもらう必要があるという問題がある。より採気量の大きい捕集装置を使用するとしても、もっともデータが欲しいズリ出し作業中に切羽の近くに定点を置くのは今回の経験上困難であり、あらかじめ岩質に応じた遊離けい酸濃度値を示すなどの方法も検討する必要があると考える。

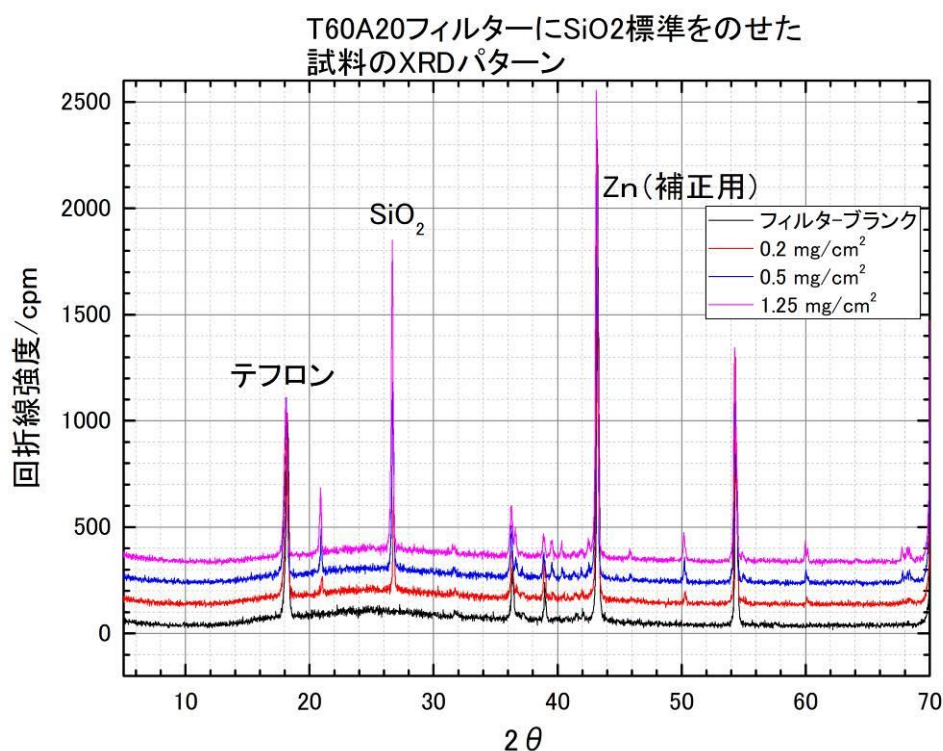
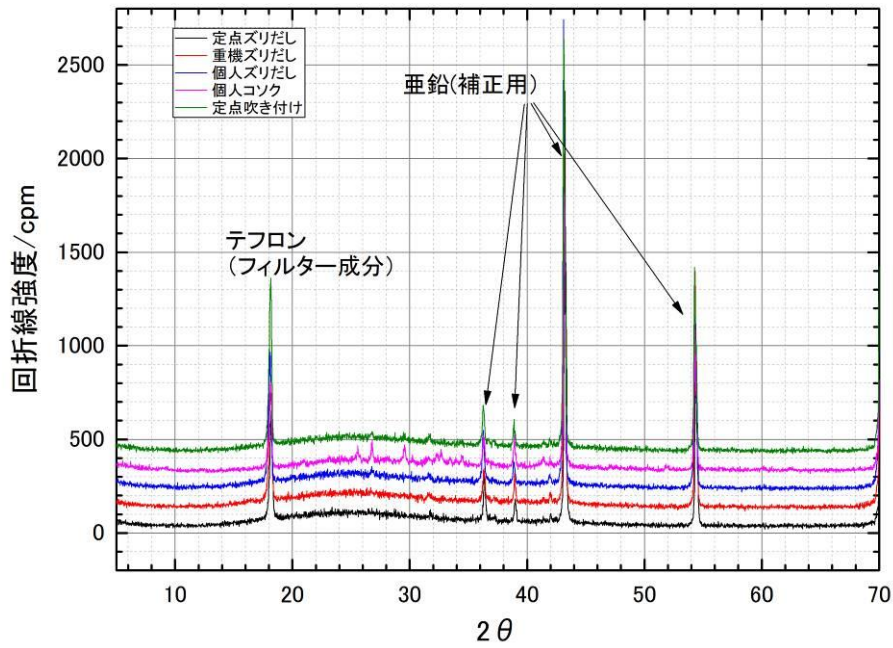


図 14 標準試料 (石英) の粉末 X 線回折パターン

現場Aの粉じん 粉末X線回折による定性



現場Aの粉じん 粉末X線回折による定性(拡大)

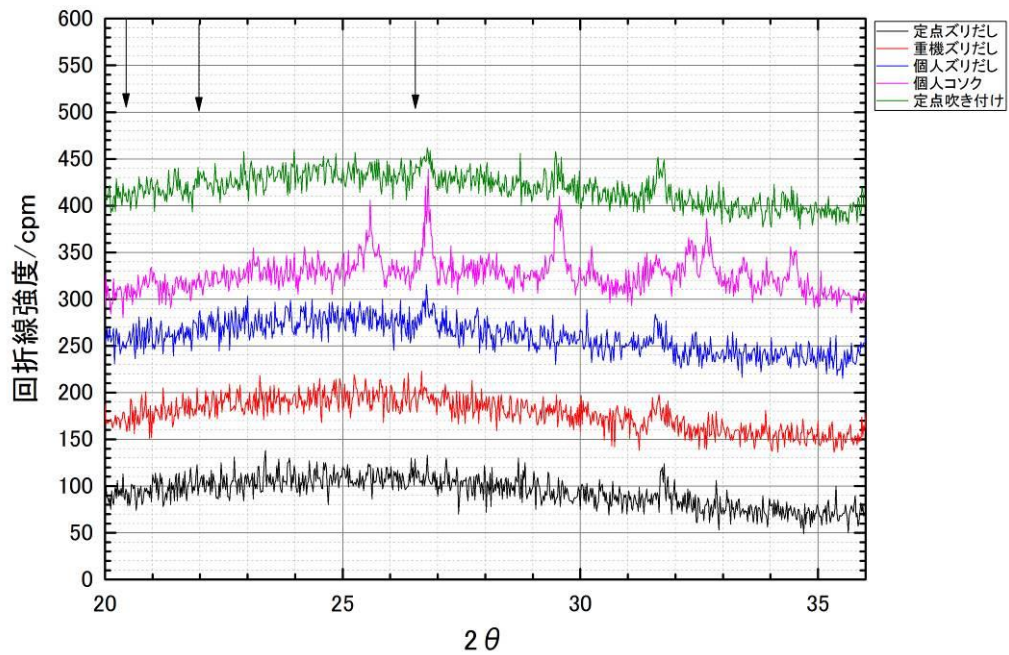
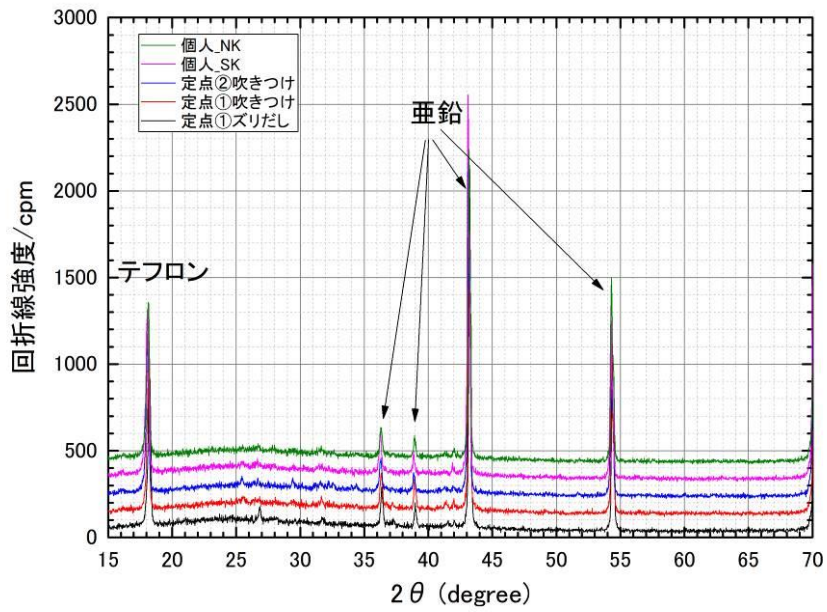


図 15(A) 現場 A の粉じん（捕集量が多かった試料）の粉末 X 線定性結果（下図は遊離けい酸の定量に使う領域、↓は遊離けい酸定量のピーク位置）

現場Bの粉じん 粉末X線回折による定性



現場Bの粉じん 粉末X線回折による定性
拡大図

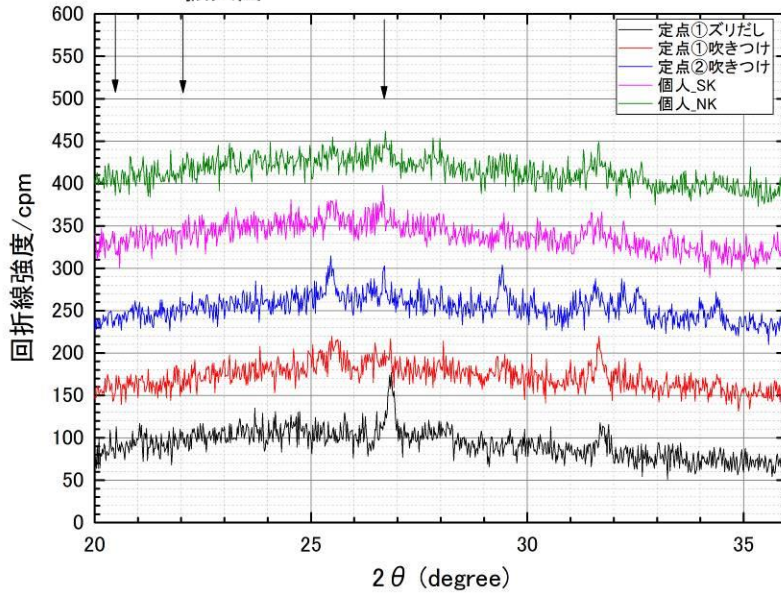
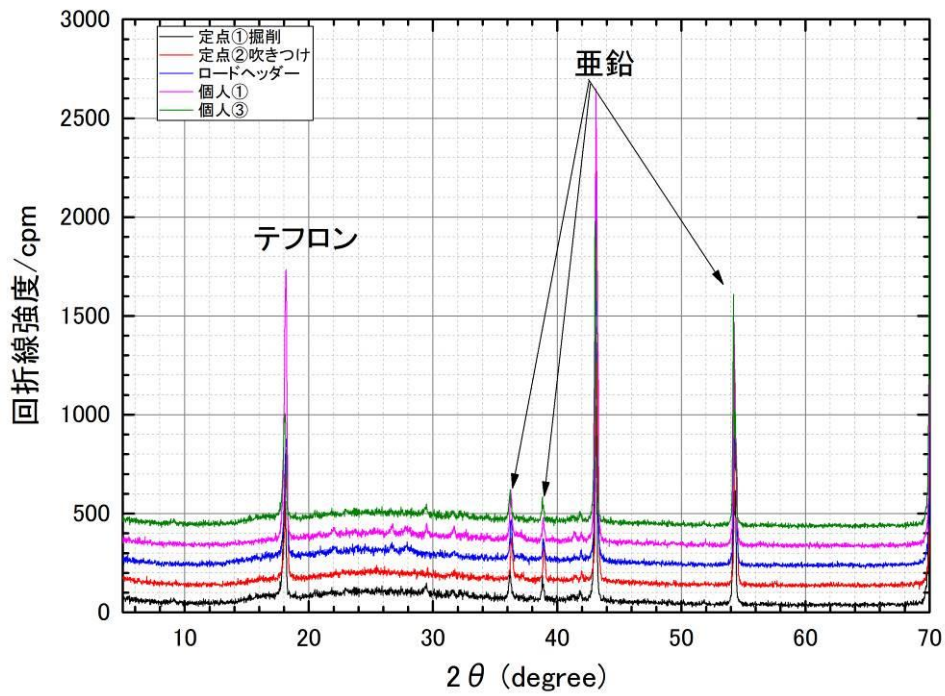


図 15(B) 現場 B の粉じん（捕集量が多かった試料）の粉末 X 線定性結果（下図は遊離けい酸の定量に使う領域、↓は遊離けい酸定量のピーク位置）

現場Cの粉じん 粉末X線回折による定性



現場Cの粉じん 粉末X線回折による定性(拡大)

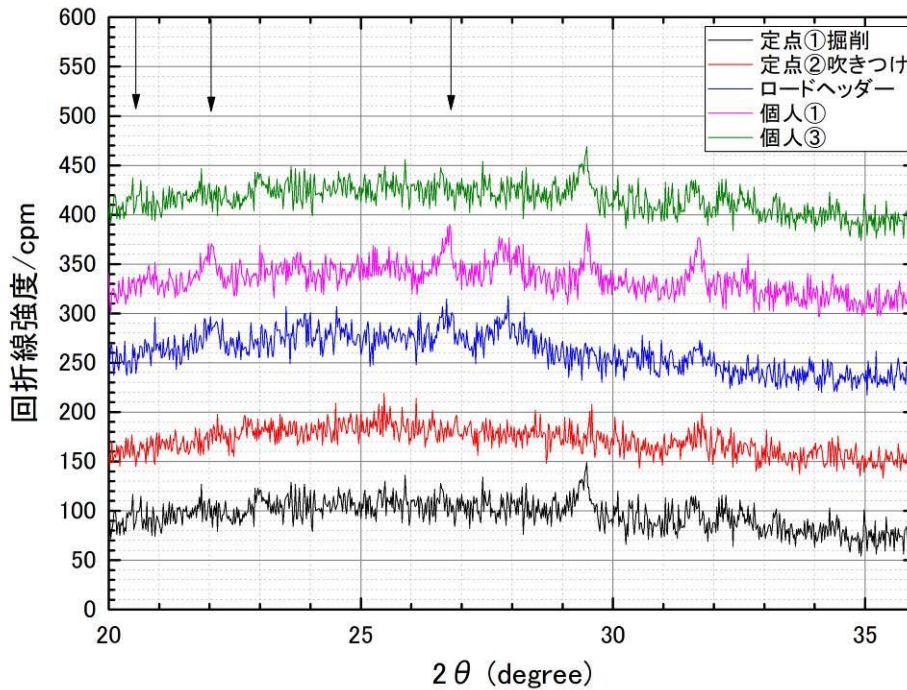
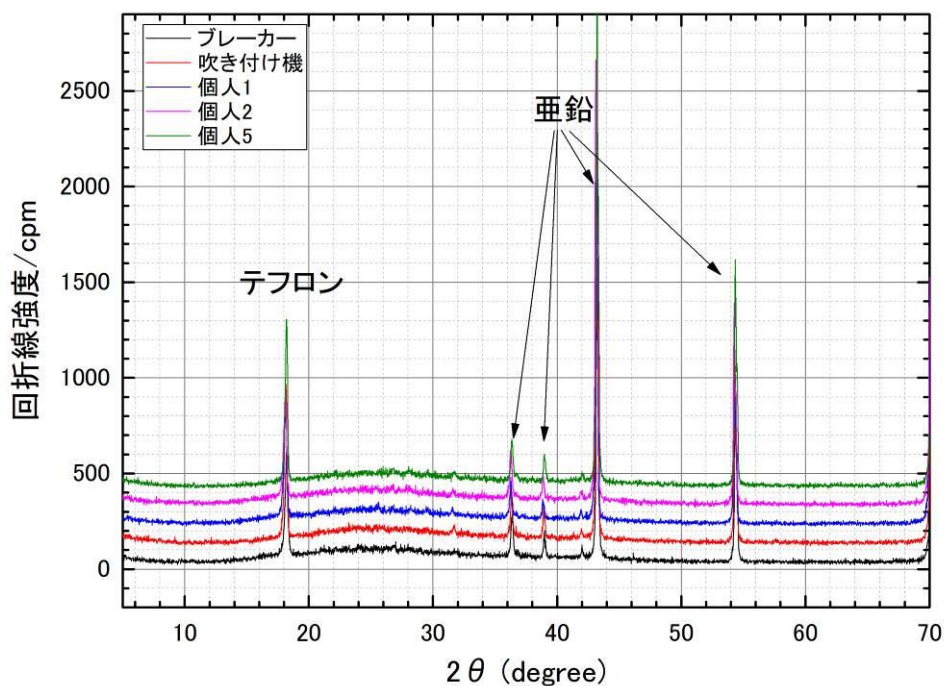


図 15(C) 現場 C の粉じん（捕集量が多かった試料）の粉末 X 線定性結果（下図は遊離けい酸の定量に使う領域、↓は遊離けい酸定量のピーク位置）

現場Dの粉じん 粉末X線回折による定性



現場Dの粉じん 粉末X線回折による定性(拡大)

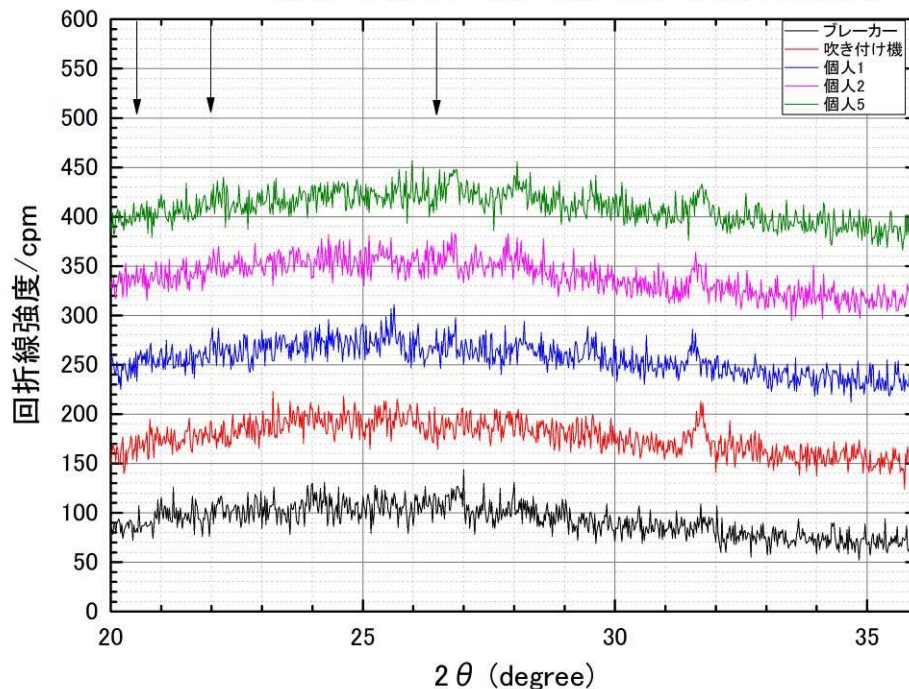
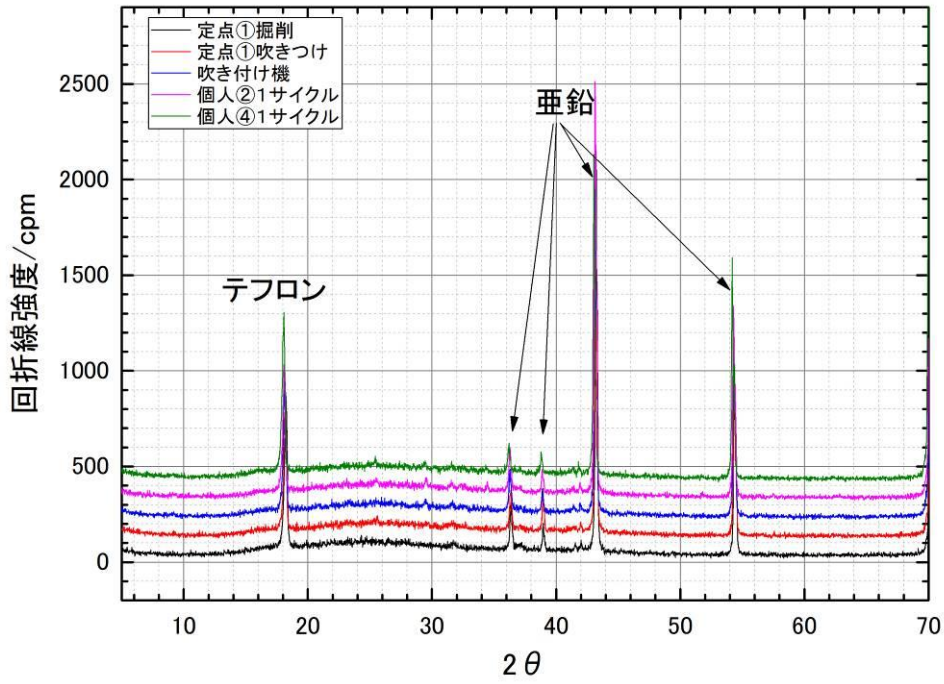


図 15(D) 現場 D の粉じん（捕集量が多かった試料）の粉末 X 線定性結果（下図は遊離けい酸の定量に使う領域、↓は遊離けい酸定量のピーク位置）

現場Eの粉じん 粉末X線回折による定性



現場Eの粉じん 粉末X線回折による定性(拡大)

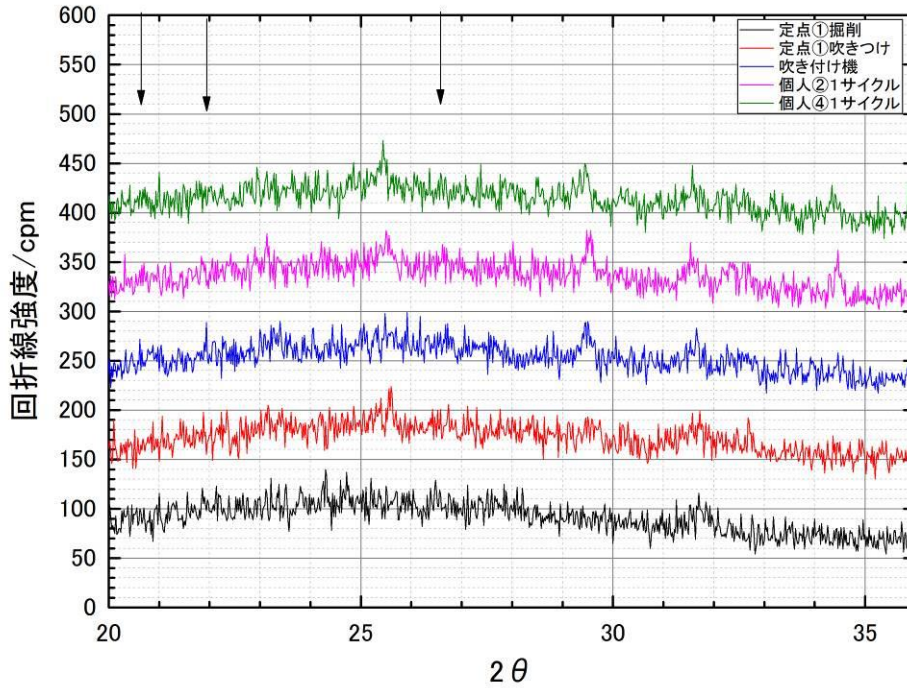


図 15(E) 現場 E の粉じん（捕集量が多かった試料）の粉末 X 線定性結果（下図は遊離けい酸の定量に使う領域、↓は遊離けい酸定量のピーク位置）

現場A の遊離けい酸定量

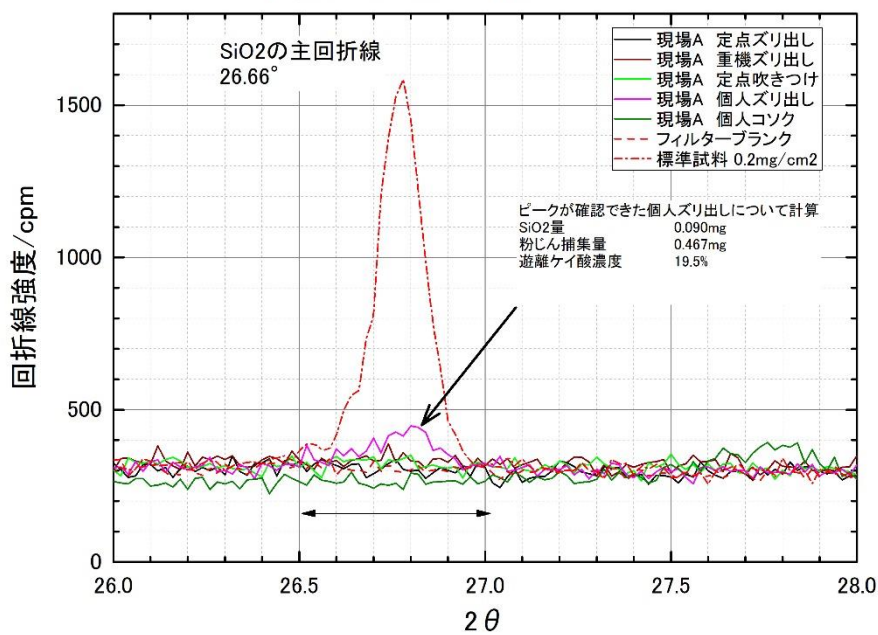


図 16(A) 現場 A の遊離けい酸定量結果

現場B の遊離けい酸定量

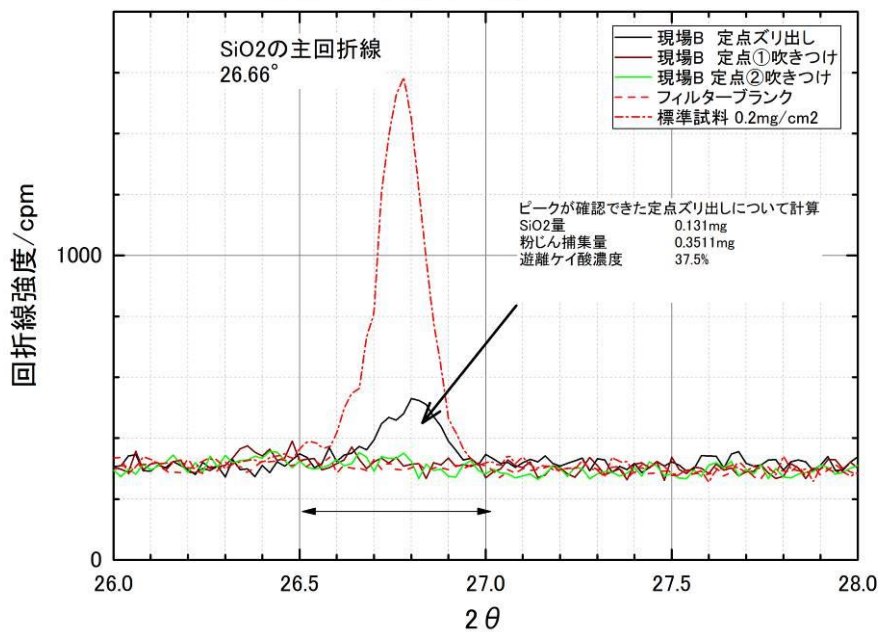


図 16(B) 現場 B の遊離けい酸定量結果

現場C の遊離けい酸定量

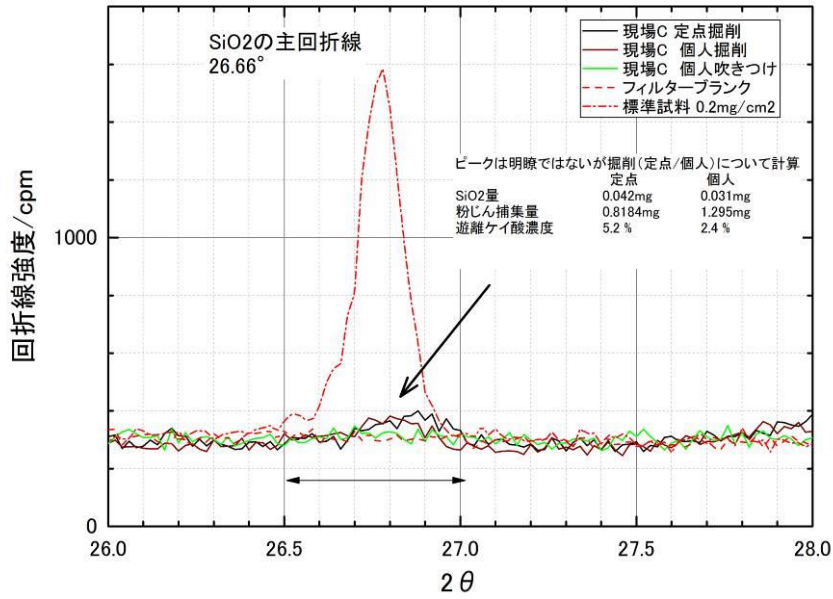


図 16(C) 現場 C の遊離けい酸定量結果

現場Dの遊離けい酸定量

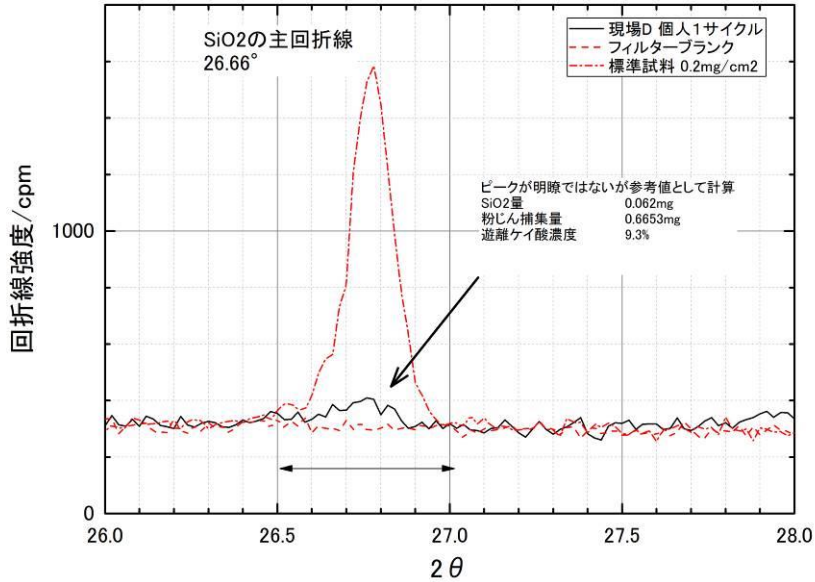


図 16(D) 現場 D の遊離けい酸定量結果

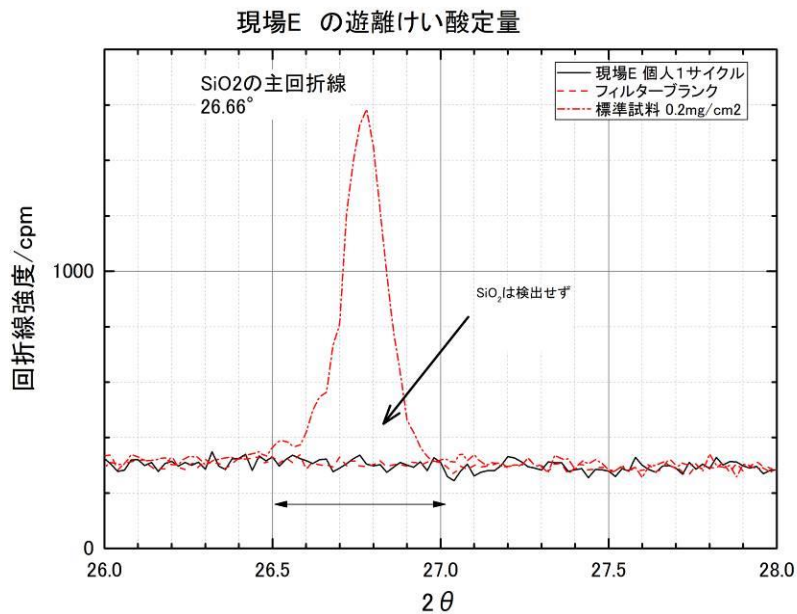


表 3 遊離けい酸濃度の測定例

現場	試料	遊離けい酸濃度/ %
A	個人サンプラー ずり出し	19.5*
B	定点 ずり出し	37.5
C	定点 掘削	5.2*
C	個人サンプラー 掘削	2.4*
D	個人サンプラー NATM 1 サイクル	9.3*
E	個人サンプラー NATM 1 サイクル	検出せず

*ピーク高さがピーク近傍のblankフィルターの測定値のばらつき σ の 10 倍未満なので定量下限未満の参考データである。

8. 測定上の問題点

(ア) 定点

定点は、定点の設置場所をいつ、どこに設置するのかという問題が最大のものであった。建災防指針にある定点を 6 点等間隔に設置するという方法は、重機作業に著しい制限を及ぼすために現在の作業方法の中で 1 サイクル通して実施することは困難であった。

発破作業を行う場合測定者だけではなく、機器そのものの防爆性能と、発破の衝撃による破損から待避場所に置いておく必要がある。

発破後、切羽付近へ立ち入り可能になってから一次吹きまでは、肌落ち事故防止の観点からもいわば時間の勝負であり、ここに定点を設置するために作業を中断するのは現実的ではない。

機械掘削の場合も、掘削、ズリ出しを行っている場合は、ベルトコンベアないし、サイドダンプからダンプトラックにズリを積み替えする作業空間（切羽から 50m 以上離れる場合も多い）に三脚を設置できる条件は極めて限定的である。

ただし、現場 E で実施したようなトンネル壁面に治具をもうけ、そこに測定器を設置することは可能であると考えられ、壁面の測定の影響も考慮しつつ検討の余地があると考えられる。

掘削・ズリ出しに比べ吹きつけ作業時は比較的切羽近く（それでも 15m 程度）まで近づき定点を設置することは可能であった。しかしこの場合も三脚を用いるとすれば、吹きつけマシンが所定の位置についてからとなるため、一部の作業について測定できないということはある。

(イ) 個人サンプラー

個人サンプラーの問題点は、最大の問題は着用の負担である。単に重量の問題だけではなく、電線、チューブなどが作業の邪魔になる可能性がある。また、切羽作業者は、背中にバックプロテクターを着用する場合があるが、バックプロテクター自身の装着負担の問題からバックプロテクターを着脱する場合と、常時着用する場合があり、常時着用する場合はバックプロテクターにサンプラーを取り付けることもあり得るが、基本的にはバックプロテクターの下につける反射防止ベストに取り付けることになる。いずれにしても、バックプロテクターや反射防止ベストを着脱する際に装置のチューブや電線も着脱する必要がある。そのためには、着用する作業員自身がある程度装置について習熟する必要がある。今回は、作業後との粉じん濃度や K 値に関する情報を得ることも目的として、作業を細分化して測定したが、現実には NATM の 1 サイクルを通して測定することになる。その場合においても、

防爆の観点から装薬から発破終了までは測定器を着用できないのは当然だが、そのほかにも、測定器保護の点から測定器を着用したままの作業を行うのは難しい場合がある。一例として、ロックボルト打設作業においてセメントミルクが付着して、使用不能となった装置の写真を図 17 に示す。



図 17 作業中にセメントミルクが付着して使用不能となった装置

(ウ) 重機

重機については、重機の種類によるが装置の大きさに比べ、設置できる場所が限られているという問題がある。また設置する場所によって濃度が異なる可能性が高く、適切な設置場所をどのように設定するかが課題となる。

9. 結論

本研究は、検討会に必要な情報を提供するという性格上、断定的な結論を示すのは差し控えるが、6章でしめしたデータに加えて実際の測定を行った経験を加えてまとめると、以下のことがいえるのではないかと考える。

- ① 吹きつけ作業時に定点を設置することは比較的容易である。大型重機の動きが激しい機械掘削作業やズリ出し作業では工夫を要する。
 - ※ 三脚を立てるのではなく現場 E で行った壁面に治具をつける方法等を行えば可能である。(図 18)



図 18 治具を使用して定点を設定した例

- ② 切羽から 20m 程度より近くの定点測定は困難。
- ③ 作業者への個人サンプラーの着用可否については、現場毎の作業の進め方（例えばバックプロテクターを常時着用するか、都度脱着するかなど）に依存する。
- ④ 重機の測定については重機側に測定器を設置する用の場所を用意するなどの改善があれば有望なのではないか。
- ⑤ 現状のインパクト式の分級装置では粗大粒子の飽和の問題があり、長時間の使用は粉じん濃度を過大評価してしまう可能性がある。特に遊離けい酸濃度の測定が可能な量を捕集するまで行うのは困難である。

