

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」

令和元年度現場調査報告書（案）

令和2年1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。第9次粉じん障害防止総合対策においてもずい道等建設工事における粉じん障害防止対策が重点事項に挙げられており、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とされている。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（以下、「研究所」という。）では、最新の技術的な知見等に基づき実際の NATM（新オーストリアトンネル工法、以下「NATM」という。）によるトンネル建設工事現場において粉じん濃度測定方法について調査することで、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て、平成29年度にトンネル建設工事現場5か所において切羽付近の粉じん濃度測定を実施し、その結果を報告している。本年度調査は、平成29年度の調査結果を受け、新たな課題として併行測定を実施しない場合に利用する標準の質量濃度変換係数（K値）の妥当性及び新たな粉じん計（LD-6N2型）のK値の決定のためのデータ収集、遊離けい酸含有率の測定方法として簡易的に岩石の分類から推定する方法の検証、及び定点測定と個人サンプラーによる測定の測定結果の比較を主な目的として実施するものである。

2. 研究実施内容及び実施体制

(1) 研究実施内容

本調査は、NATMにより施工している山岳トンネルを対象としている。NATMの工程は、トンネルによって細部が異なるが概ね以下のような流れで1サイクルをなしている。

●発破掘削

発破—ずり出し—コソク—一次吹付け—支保工建込み—二次吹付け—ロックボルト打設

●機械掘削

掘削／ずり出し—コソク—一次吹付け—支保工建込み—二次吹付け—ロックボルト打設

平成29年度調査ではトンネル建設工事中の切羽付近で実施可能な粉じん濃度測定方法を検討するため、定点測定、個人サンプラーによる測定及び重機内での測定を実施した。今回の調査では、新たな課題を検証するための基礎データとして定点測定において粉じん質量濃度、K値及び遊離けい酸含有率の測定を実施する。これらは発生する粉じんの質や作業内容によって変化するため、作業を「掘削・ずり出し」と「吹付け・ロックボルト」と

大別してデータを取得する。掘削・ずり出し作業は主に土石由来の粉じんを対象と考え、掘削開始（発破掘削の場合は発破後入坑時）から1次吹付けの直前まで、吹付け・ロックボルト作業は主に吹付けコンクリート由来の粉じんを対象と考え、一次吹付けから支保工建込み、二次吹付け、ロックボルト打設までを含んでいる（ただし、測定に伴う設置・撤去等の都合上、ロックボルト打設の途中で測定を終了している場合がある。）。また、測定方法による濃度の差異を検討するため、掘削・ずり出し作業時の切羽近傍作業者に個人サンプラーを装着して質量濃度測定を実施した。

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資料となることから、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。本調査の結果より、検討会において標準のK値の妥当性及び新たな粉じん計（LD-6N2型）のK値の決定、遊離けい酸含有率の測定方法として簡易的に岩石の分類から推定する方法の検証、定点測定と個人サンプラーによる測定の測定結果の比較等が検討されることとなる。

(2) 研究実施体制

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 中村憲司、鷹屋光俊、萩原正義、山田 丸、高谷一成
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

(1) 定点測定

定点測定は、切羽付近の粉じん濃度の併行測定を行い、K値を時間的・空間的に把握して、相対濃度計の機種別（LD-5R、LD-6N2）の標準的なK値の設定に資するデータを収集するとともに、定点測定による切羽における粉じん濃度測定手法の妥当性を検証するために実施した。測定機器（粉じん計や小型サンプラー等）の設置位置は切羽から10~50m程度の範囲で、重機作業に支障のない範囲を考慮しながら両側に3転ずつ等間隔に計6点を配置した。測定は、それぞれの作業における質量濃度、K値及び遊離けい酸含有率を把握できるように作業毎にサンプラーを交換しながら、NATMの1サイクルを通して実施した。

ただし、LD-6N2 に関しては装置の構造上作業毎にフィルターを交換することが困難であるため、機器自体を作業毎に交換することとした。そのため、6 点全てで測定するには台数が足らず、最も切羽に近い 2 点においてのみ実施することとした。

併せて、切羽付近の粉じんの遊離けい酸含有率を確実に測定し、岩石の種類による遊離けい酸含有率の簡易推定の妥当性の検証に資するデータを収集するため、定点測定のうち切羽に近い 1 ないし 2 点において、大型のろ過捕集用サンプラーも設置した。

(2) 個人サンプラーによる測定

個人サンプラーによる測定は、定点測定との測定方法の違いによる系統的な測定値の差異に関する評価を行うために実施した。測定は、遊離けい酸含有率が高い掘削・ずり出し作業を対象とした。平成 29 年度調査で実施した粉じん計による測定は作業者の負担を軽減するために実施せず、ろ過捕集法による質量濃度測定のみとした。

4. 各測定方法の詳細

(1) 定点測定

ア. 測定点の設定 (図 1 参照)

原則として、測定点の位置は NATM の 1 サイクルを通して測定機器を設置できる位置とした。切羽から 10~50m の間に、三脚等に取り付けた測定機器を等間隔にトンネル両側に設置し、計 6 点を基本とする。ただし、等間隔に設置することが困難な場合はその測定点を省略する等、図 1 に例示するように臨機応変に対応する。換気方式に集じんもしくは送気を取り入れている場合、切羽から最も遠い測定点は集じんもしくは送気の位置（ダクトの吸引口の位置）よりも切羽側になるように設置する。

測定位置の設定例

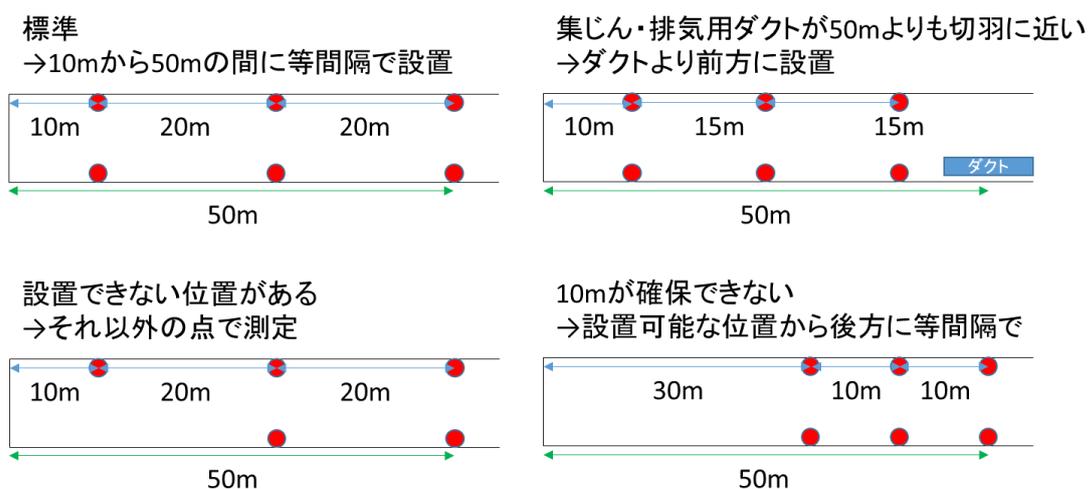


図 1 測定点の設定例

イ. 測定項目

- ・質量濃度測定
 - ・個人サンプラー用ホルダーPM4 NWPS-254 型によるろ過捕集（6点全て）
 - ・作業毎にサンプラーを交換
 - ・定点①及び定点②は NWPS-254 付 LD-6N2 型により捕集
 - ・分析可能であれば遊離けい酸含有率測定にも使用
 - ・分粒装置付デジタル粉じん計による相対濃度測定
 - ・Dorr Oliver サイクロン付 LD-5R 型による相対濃度連続測定（6点全て）
 - ・デジタル粉じん計併行測定（異なる分粒装置による比較）
NWPS-254 付 LD-6N2 型（切羽に近い2点）
PM4 サイクロン付 LD-5R 型（定点③）
 - ・遊離けい酸含有率測定
 - ・慣性衝突式分粒装置付きホルダーNW-354 型によるろ過捕集（切羽に近い2点）
 - ・作業毎にサンプラーを交換
 - ・遊離けい酸含有率測定にも使用
 - ・ラスカルサイクロンサンプラーによるろ過捕集（切羽に近い2点）

※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する（写真1参照）。
ただし、現場からの要望により設置方法を変更する場合がある。

ウ. 測定時間

- ・サンプラーによる質量濃度測定は、それぞれ作業の質量濃度、K 値及び遊離けい酸含有率を把握できるように、作業毎にサンプラーを交換しながら1サイクルを通して実施する。
- ・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。
- ・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。
- ・データ数を増やす観点から、可能な限り各現場で1サイクルを通じた測定を2回実施する。

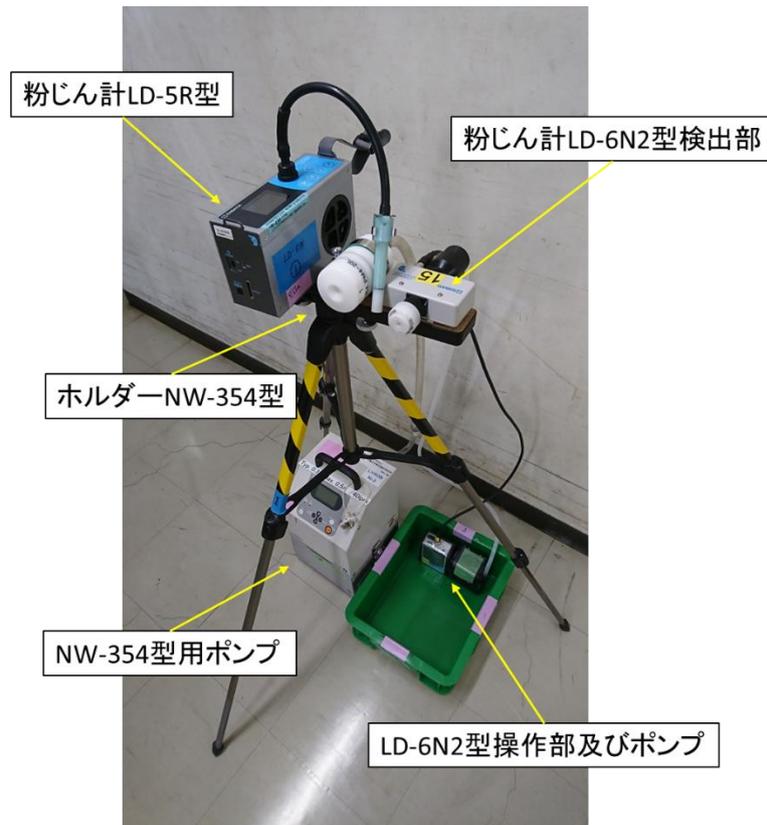


写真1 定点測定のための機器の設置イメージ

(2) 個人サンプラーによる測定

ア. 測定対象者の選定

- ・「掘削・ずり出し」作業時に（自由断面掘削機操縦等で）切羽付近にいる作業者
- ・可能な限り、該当者全員を測定対象とする。

イ. 測定項目

- ・質量濃度測定
- ・NWPS-254型によるろ過捕集

※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（写真2参照）

ウ. 測定時間

「掘削・ずり出し」作業に対して実施する。

(3) その他

- ・換気条件等の記録（換気方式、風管の位置、排风量等）
- ・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）



写真 2 個人サンプラー装着例

(左) 専用ベストに機器を取り付けた例

(中) 専用ベストの上からバックプロテクターを装着した例

(右) バックプロテクターに直接機器を取り付けた例

5. 調査に使用した機器等

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。

粉じん質量濃度測定には、慣性衝突式の吸入性粉じん用分粒装置である個人サンプラー用ホルダーPM4 NWPS-254 型（柴田科学製、吸引流量 2.5L/min、以下 NWPS-254 とする）を利用した。捕集に利用したフィルターは、直径 25mm のフッ素樹脂バインダーガラス繊維フィルターTX40HI20-WW（PALL 製）である。粉じん相対濃度測定に利用する粉じん計には、検討会での議論を基に吸入性粉じん用の分粒装置を取り付けることとなった。そのため、本研究ではデジタル粉じん計 LD-5R 型（柴田科学製）には LD-5R の吸引流量（1.7L/min）と合致する Dorr Oliver サイクロンを取り付け、外部吸引ユニットにより吸引流量が任意に変化させることが可能なデジタル粉じん計 LD-6N2 型には専用のユニットにより取り付け可能な NWPS-254 を取り付けることとした。LD-6N2 は外部吸引ユニットの後段にフィルターを設置することが可能であるため、同時に質量濃度の測定も実施した。また、分粒装置の機種による相対濃度への影響を確認するため、一部の測定で LD-5R に PM4 サイクロン（柴田科学製）を取り付け、Dorr Oliver サイクロンとの比較を行った。分粒装置を取り付けた関係で、現場においてゼロ点およびスパンのチェックが行うのが困難であったため、ゼロ点およびスパンチェックは測定前日現場に設置する前に実施した。

遊離けい酸含有率の測定では、質量濃度測定よりも多くの粉じん量が求められるため、吸引流量が大きなサンプラーとして慣性衝突式分粒装置付きホルダーNW-354型（柴田科学製、吸引流量 20L/min）とラスカルサイクロンサンプラー（Mesa Labs 製、GK4.162、吸引流量 9L/min）を利用することとした。遊離けい酸の分析に用いる粉末 X 線回折装置ではフィルター上の単位面積当たりの粉じん量が感度に影響するため、NW-354 は異径アダプター（柴田科学製）により使用するフィルターを 35mm から 25mm へと変更した。ラスカルでは、後段に IOM サンプラー（SKC 製）をつなぎ、25mm のフィルターに捕集できるように改良した。なお、TX40 は圧力損失が比較的大きなフィルターであったため、ラスカルによる捕集では PTFE バインダーフィルターTF98（柴田科学製）を利用した。

6. 調査の進め方

現場の選定に当たっては、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推薦を受け、NATM による施工のトンネル現場 3 カ所（機械掘削 1、発破掘削 2）で実施することができた。その際、調査が円滑に実施可能でデータの欠損が起こりにくい環境として、以下の条件を満たす現場を要望した。

- (1) 湧水の問題が少ないこと
- (2) 断面が比較的大きいこと
- (3) 機械掘削が望ましいこと（ずり出し時の測定を適切に測定するため。）
- (4) 主たる岩石の分類が火成岩のうち酸性岩、堆積岩、変成岩のいずれかであることが望ましいこと。
- (5) 個人サンプラーによる測定にご協力いただけること（個人サンプラーによる測定と定点測定の比較が検討課題になっているため。）

現場を紹介していただいたのち、下記のスケジュールで調査を実施した。現場によっては、事前説明を事業者本社と現場の両方で説明した場合もある。

・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。

・本調査

- 1 日目 調査内容の最終確認、翌日の作業内容と段取りの確認

- 2日目 調査（1サイクルを通じた測定を2回実施する。トンネル作業の進行上1日で2サイクル分の測定が実施できなかった場合、翌日に残りの工程の測定を実施する。）
- 3日目 予備日（前日に2サイクル分の測定が実施できなかった場合、残りの工程の測定を実施する。）

7. 測定・分析および解析方法

(1) 粉じん濃度およびK値

フィルター秤量は研究所内において、試料採取前、採取後ともに、マイクロ天秤 XP2U（メトラートレド製、感量 0.1 μg ）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。通常作業環境測定で使用される天秤よりも読み取り限界が2桁低く全く同じ秤量値は得られないため、調査前2回の秤量値を平均した値を用いた。なお、今回の調査で得られた調査前2回の秤量値の標準偏差はおおよそ 1 μg であり、作業環境測定の方法と比較しても精度よく秤量できていたものと考えている。

K値は、現場で読み取ったカウント値と粉じんの質量濃度より計算した。尚、粉じん計は LD-5R、LD-6N とともに、すべての現場において10秒事毎にカウント値を記録するログモードで運転しており、一部、カウント値が上限に達し桁あふれした可能性があるものに関しては、粉じん計のログと突合してカウント値を求め計算した。

(2) 遊離けい酸分析

遊離けい酸の測定は粉末 X 線回折（XRD）により行った。試料は粉じん質量濃度測定に使用したものと同一のテフロンバインダーガラス繊維フィルターを使用した。試料をまず $2\theta/\theta$ 範囲 $3.0^\circ\sim 70.0^\circ$ の範囲で定性を行った後、クリストバライトの主回折線付近の $21.0^\circ\sim 23.0^\circ$ および α 石英の主回折線付近の $25.5^\circ\sim 27.5^\circ$ の範囲の測定を行った。なお、すべての試料について、主回折線以外の回折線を明瞭に測定するほどの粉じん量がなく、試料鉱物の同定を行うことはできなかったため、 α 石英およびクリストバライトの主回折線付近のピークはすべて α 石英およびクリストバライトと見做して遊離けい酸濃度を計算した。

検量線は、2種類のフィルター（TX40 および TF98）それぞれに、米国標準技術研究所（NIST）が作成した α 石英(1878a)およびクリストバライト（NIST1879a）の1%懸濁液をフィルター上に添加する方法により 0、0.2、0.5、1.25 mg/cm^2 の面積濃度となる標準試料系列を作成し検量線を作成した。

装置運転条件等は下記の通りである。

(ア) 装置

リガク RINT2000

水平ゴーニオメーター／5 試料サンプルチェンジャー

X線管球 銅ターゲット

(イ) X線条件

Cu-K α 線 管球電圧/電流 36kV/20mA (定性)、40kV/20mA(定量)

(ウ) 測定

試料回転 毎分 30 回

走査軸 $2\theta/\theta$ $3^\circ \sim 70^\circ$ 連続 毎分 2° (定性)

$2\theta/\theta$ $21.0^\circ \sim 23.0^\circ$ 5秒ごとに 0.02° 移動

(クリストバライト)

$2\theta/\theta$ $25.5^\circ \sim 27.5^\circ$ 5秒ごとに 0.02° 移動

(α 石英)

XRD の測定結果は、標準試料系列、現場からの採取試料とともに市販のデータ解析ソフトウェア (Igor Pro ver 8.03 および付属の計算パッケージ Multipeak Fiting 2) でガウス曲線に近似し、ピーク高さを求め定量計算を行った。

8. 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 50m^2 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機械掘削が望ましいとしたが、厚生労働省からの依頼により、発破掘削と機械掘削の両方の現場で調査を実施することとなった。結果、それぞれ発破掘削 2 か所、機械掘削 1 か所で行うことができた。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 3 か所全てタイヤ方式、換気方法は送気・集じん機方式が 3 か所であった。湧水の程度は、定量的に示すことが難しいが、3 か所ともほとんど湧水はなく路面の一部だけ水があるような状況であった。平成 29 年度は 5 か所の現場で調査を実施し、現場名を A から E としていたので、今回の調査では現場名をそれぞれ F から H とした。

表 1 現場の概要

	現場 F	現場 G	現場 H
用途	道路	道路	道路
断面積	$50\text{-}60\text{ m}^2$	$70\text{-}80\text{ m}^2$	$80\text{-}90\text{ m}^2$
湧水の程度	少	少	少
掘削方法	発破	機械	発破
ずり運搬方法	タイヤ	タイヤ	タイヤ
換気方法	送気・集じん機	送気・集じん機	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 F においては日程変更等に伴い調査に参加できた研究所職員が 3 名と少なく、発破からずり出し作業開始までの短時間に機器を設置する時間が十分には確保できなかったこと等から、表 2 に示す通り定点測定数を減らしての実施となった。その他の 2 現場においては、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、掘削・ずり出し作業時に切羽近傍で稼働する重機（サイドダンプやバックホウ、ブレーカー等）を操作する作業員数によって測定数が表 2 に示す数となった。

表 2 各現場における測定の実施状況

	現場 F	現場 G	現場 H
定点測定の実施数※	4 (2)	6 (6)	6 (6)
個人サンプラーの実施数	2	2	2
測定作業の分類	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	ずり出し 吹付け・ロックボルト

※カッコ内は 1 サイクル通して設置した測定点の数

定点測定における機器の設置方法について、当初の計画では定点測定では測定機器を三脚に取り付けた形でトンネルの両側に設置することとしていたが、事前説明の段階で三脚による設置の許可が得られたのは現場 F のみであった（写真 3）。それ以外の現場 G 及び現場 H では、次のような代替案を現場から提案していただけたため、それに従って設置した。現場 G では、支保工にアングルを溶接してそこに機器を吊り下げる方法を提案していただき、写真 4 のような方法で設置することとした。現場 H では、トンネル側面のコンクリートに穴を空けてそこに鉄筋を挿し（写真 5 左）、その上に機器を載せる方法を提案していただき、写真 5 右のような方法で設置することとした。



写真3 現場 F における定点測定機器設置の様子

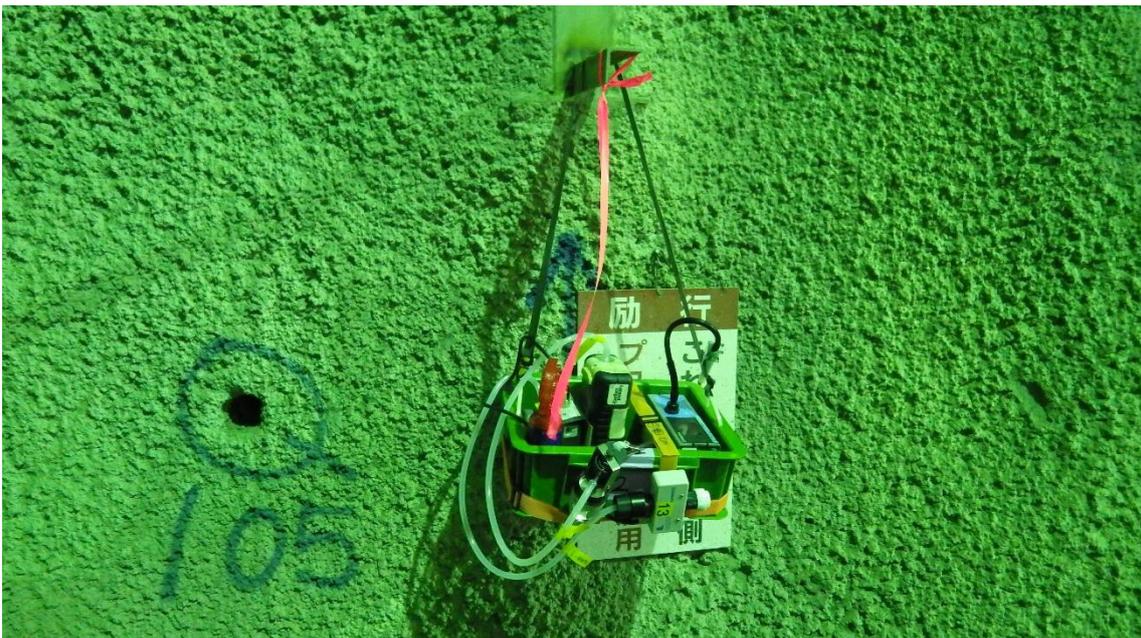


写真4 現場 G における定点測定機器設置の様子



写真5 現場 H における定点測定機器設置の様子

(2) 粉じん濃度測定結果

ア. 作業、測定方法による粉じん濃度の違い

図2に、ろ過捕集-質量分析方法により得られた定点測定における作業毎及び1サイクルの粉じん質量濃度を示す。ここで、「掘削・ずり出し」は発破掘削の現場（F及びH）においては発破後に測定を開始しているためずり出し作業のみ、機械掘削の現場（G）では掘削作業とずり出し作業を測定したデータである。ただし、どちらの場合もコソク作業があった場合は測定に含まれている。また、「吹付け・ロックボルト」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。1サイクルの粉じん濃度は両者の粉じん捕集量と吸引空気量を合算して、時間加重平均として求めている。そのため、どちらかが欠けている場合は除いている。各現場のデータで左側のマーカーが1サイクル目、右側のマーカーが2サイクル目に得られた濃度を示している。図中の赤線は現行の粉じん濃度目標レベルである 3 mg/m^3 を示している。

各現場とも吹付け作業時に粉じん濃度が高い測定点があり、現場Gでは目標レベルを超えている測定点もあったが、1サイクルの濃度として計算すると全ての測定点で 3 mg/m^3 よりも低い結果となった。

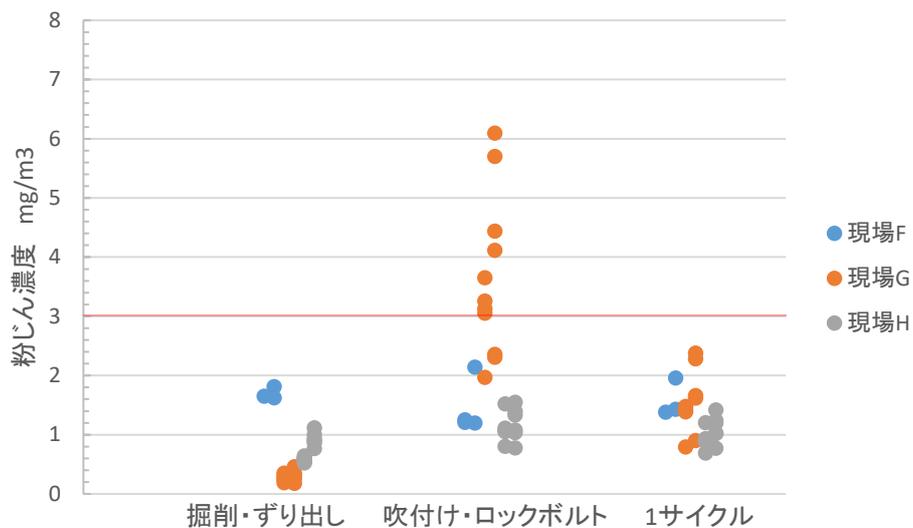


図2 定点測定で作業毎に得られた粉じん質量濃度

図3に、定点測定における濃度分布について切羽からの距離を基に示す。切羽からの距離による濃度減衰はほとんどなく、現場Gにおいては切羽に最も近い定点①と定点②（距離18m）で最も濃度が低く、より後方の定点③から定点⑥の濃度が高かった。このような濃度分布が生じた原因は不明であるが、必ずしも切羽に近いほど粉じん濃度が高いわけではないという結果は測定点を定める上で重要な知見といえる。30m地点より後方で距離減衰がほとんど見られない理由は、今回の3現場がいずれも集じん装置を切羽から50m地点よりも後方に設置して集じんしていたためであると推定される。吸入性粉じんの粒径では重力沈降速度は小さく、換気による拡散により平均化されていると考えられる。

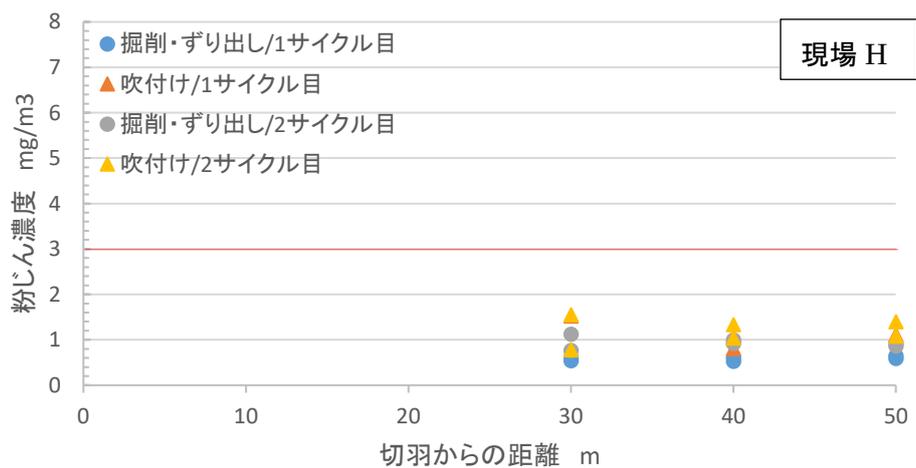
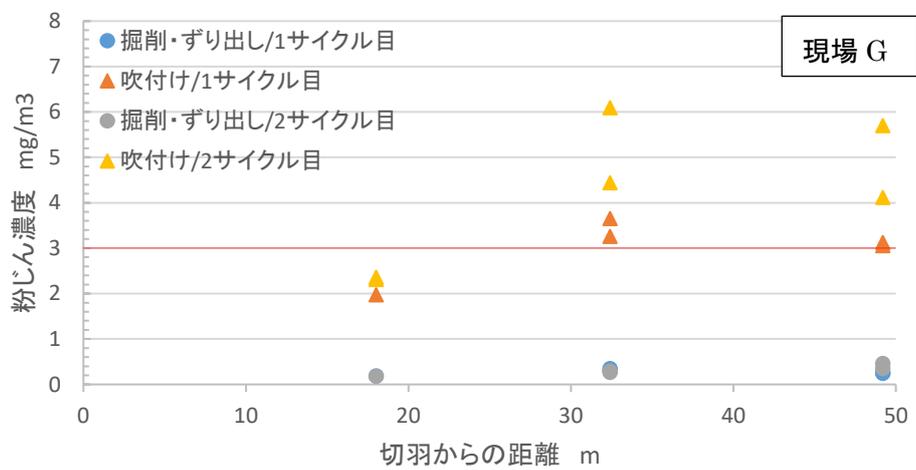
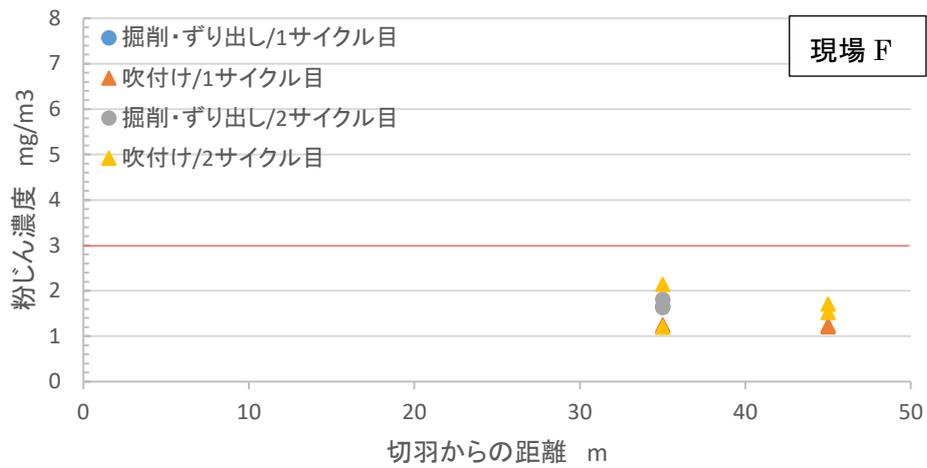


図3 定点測定における粉じん濃度の分布 (○：掘削・ずり出し、△：吹付け・ロックボルト)

図4に、測定方法毎の粉じん質量濃度について示す。個人サンプラーによる測定は掘削・ずり出し作業時のみ実施したため、図4中の定点測定についても掘削・ずり出し作業時のデータのみ示している。

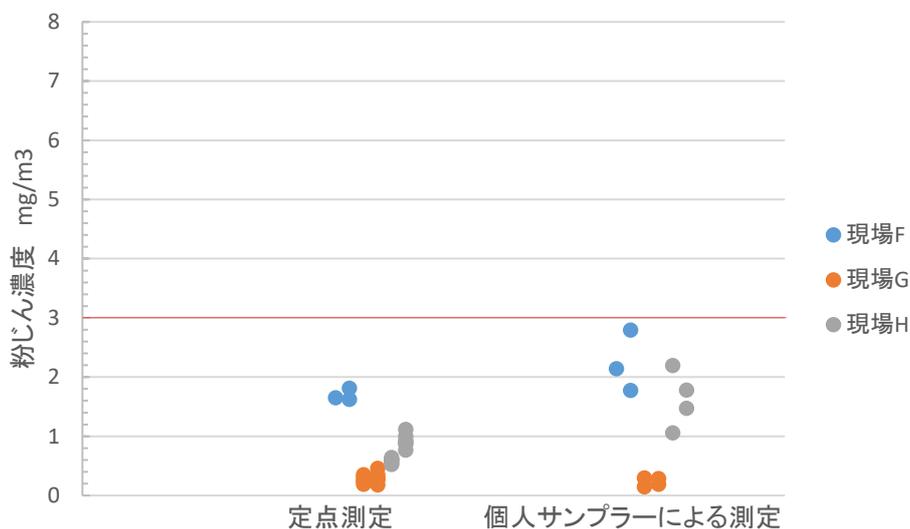


図4 測定方法毎の粉じん質量濃度（掘削・ずり出し作業時）

現場Fと現場Hでは、定点測定に対して個人サンプラーによる測定の方が粉じん濃度が高い結果となった。個人サンプラーを装着した作業者の行動する範囲で実際に粉じん濃度が高かったことが考えられるが、以下のことを考慮する必要がある。

まず、定点測定の位置を考慮する必要がある。切羽に最も近い定点測定点は現場Fで35m、現場Gで18m、現場Hで30mであり、現場Gと比べて現場Fと現場Hは距離が少し遠いため差が出た可能性がある。次に、現場Fの定点測定と個人サンプラーによる測定の濃度差については測定時間のずれに起因している可能性がある。最も高濃度となった現場F個人②2サイクル目の質量濃度は2.79 mg/m³であったが、この測定は作業が早く終了したため他の測定点よりも30分ほど早く終了している。現場F2サイクル目の定点①及び定点②における質量濃度測定結果はそれぞれ1.62 mg/m³及び1.81 mg/m³であったが、粉じん計による相対濃度測定結果から個人②と同じ測定時間帯の濃度を推定すると、それぞれ2.27 mg/m³及び2.68 mg/m³と個人②の濃度に近い値となる。このことから、図4で示された濃度差には測定時間の差が大きく影響していたことがわかる。また、発破掘削の現場である現場F及び現場Hにおいて両測定によって得られた粉じん濃度に差があるのは、発破直後の高濃度粉じんにどのようにはく露されていたかに依存している可能性もある。現場Fにおいては測定を実施する都合上、個人サンプラーによる測定を5分程度早く開始していた。作業者は研究所員が機器を設置して測定を開始するまでの間後方で待機をしていたが、後方に流れた発破直後の高濃度の粉じんに曝されていれば濃度は

高くなる。発破直後の粉じん濃度が高い時間帯にどの位置で待機していたかが粉じんばく露リスクに影響を与える可能性は大きく、ばく露防止のためにはガイドラインにもある通り発破後粉じんが適当に薄められた後に切羽付近に立ち入ることを徹底することが重要であるといえる。

今回の調査では測定対象として NATM における 1 サイクルを基本として、その中でそれぞれの作業毎の濃度も把握するために定点測定では可能な限り測定が途切れることのないようにサンプラーの交換を実施している。一方、個人サンプラーによる測定については切羽近傍での作業が終了した時点で測定が終了となるため、測定時間に関する考え方に差異がある。測定の開始及び終了のタイミングにより濃度は変わり得るものであり、特に作業毎に測定を実施する際には測定する時間帯をどのように設定するかが重要となる。また、1 サイクル通した測定と作業毎の測定を比較する際には、測定した時間帯に実施されていた作業内容についても把握しておかなければならない。

イ. 測定方法、作業による K 値の違い

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、今回使用した粉じん計の場合以下のような式で表される。

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

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。現行の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の K 値として示されており、50 m 位置で測定されたデータを元に定められている。切羽付近において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、今後新たな測定方法に対して一律に 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。今回の調査では、Dorr Oliver サイクロン付 LD-5R の K 値を 53 点、NWPS-254 付 LD-6N2 の K 値を 15 点得ることができた。表 3 に作業毎に得られた K 値の平均値を示すとともに、図 5 に今回の調査で得られた分粒装置付粉じん計による K 値を測定方法及び作業毎に示す。また、定点測定における K 値の分布について切羽からの距離を基に図 6 に示す。

LD-5R の K 値と比較して LD-6N2 の K 値が小さい結果となったが、これは LD-6N2 に関しては各現場で最も切羽に近い定点 1~2 か所においてのみ測定したためである。図 6 からわかるように、今回得られた LD-5R の K 値の中で現場 G の後方 4 点の値が大きく、それらを含んでいたかどうかは平均値の差として現れたと考えている。なお、LD-5R の K 値と LD-6N2 の K 値の比較については、次節で詳細に述べる。

今回の調査では粉じん計に吸入性粉じん用分粒装置を取り付けている。そのため、現行のガイドラインによる測定方法と比較すると相対濃度は小さくなり、K 値としては大きくなる。平成 29 年度の調査結果からは、1.5 倍程度の差が生じる可能性が示されている。より大きな値になると予測される中で今回得られた K 値は、現在告示されている LD-5R の K 値である 0.002 mg/m³/cpm とほぼ同等の結果となった。分粒装置付きと分粒装置無しで同じ値になったが、0.002 とは 0.0015 以上 0.0025 未満であるため、単純に平均した際にその幅の中に入ったということである。なお、現在の告示値と今回の調査結果では、以下のような差異があったことを指摘しておく。まず現在の告示値は現行のガイドラインに沿った測定で得られた K 値を基に決められているため、今回の調査とは測定方法が異なることが挙げられる。また、現在の LD-5R の K 値が決められた際の資料（平成 22 年度第 2 回管理濃度等検討会資料 2-9）によると、ほとんどのデータが吹付け作業時に測定されたものであり、掘削・ずり出し作業を含む K 値として算出した今回の結果とはこの点も異なる。その他、掘削方法や換気方法等の変化により粉じん濃度や粒度分布が変化した可能性もある。

表 3 今回の調査で得られた K 値の平均値（単位は mg/m³/cpm）

	粉じん計	データ数	K 値（算術平均）	標準偏差	変動係数
掘削・ ずり出し	LD-5R	24	0.0018	0.0006	31%
	LD-6N2	8	0.0014	0.0002	15%
吹付け・ ロックボルト	LD-5R	29	0.0021	0.0007	33%
	LD-6N2	7	0.0016	0.0004	24%
1 サイクル	LD-5R	23	0.0021	0.0007	33%
	LD-6N2	5	0.0016	0.0003	17%

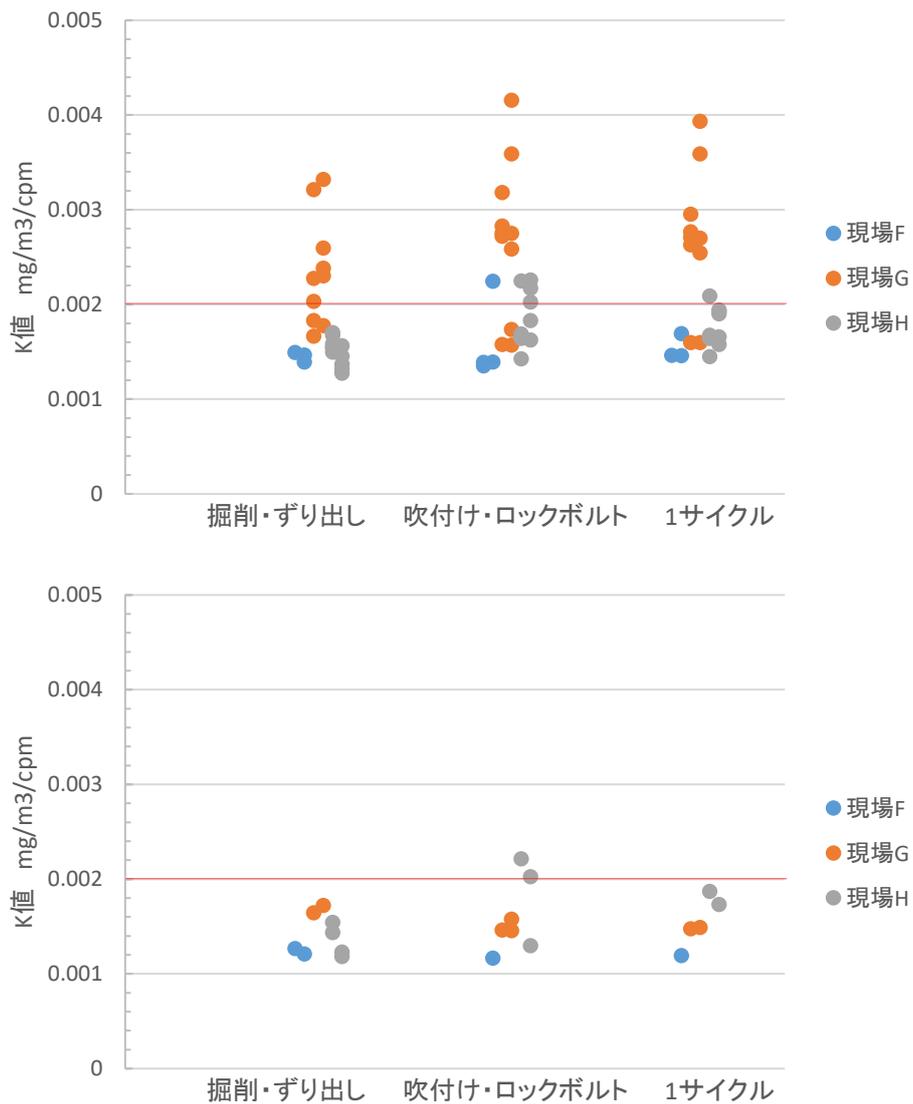


図5 定点測定において作業毎に得られたK値（上：LD-5R、下：LD-6N2）

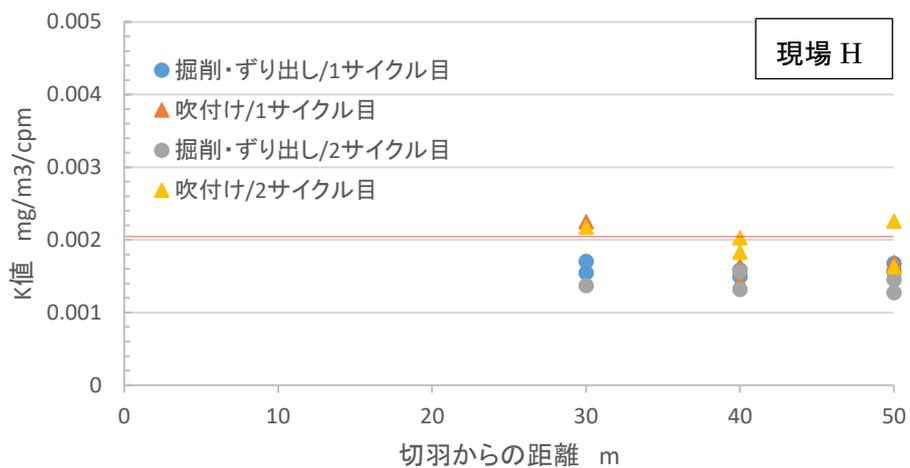
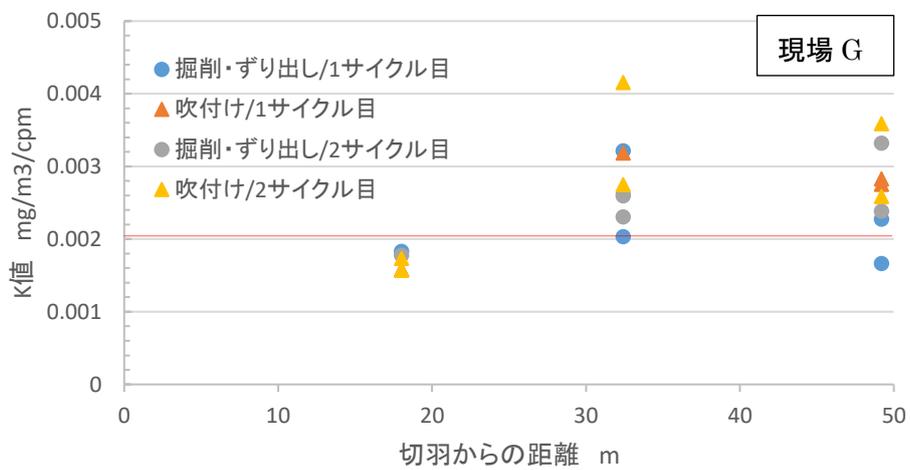
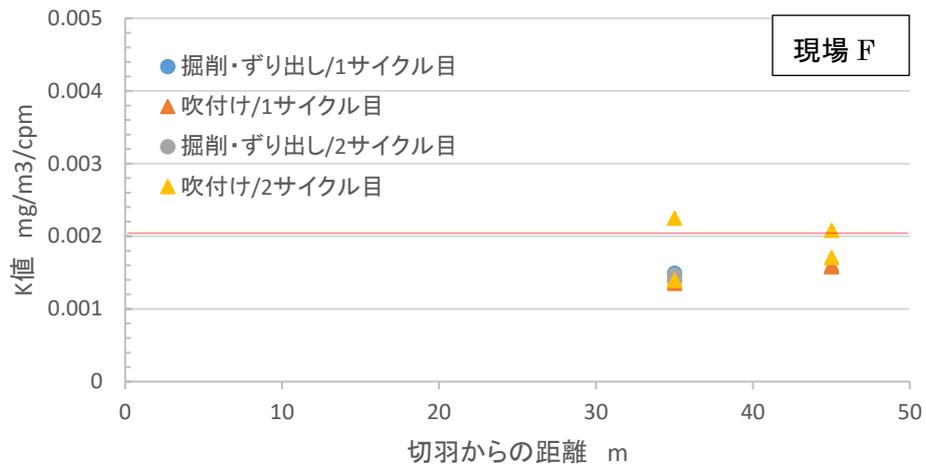


図 6 定点測定における LD-5R の K 値の距離変動 (○：掘削・ずり出し、△：吹付け・ロックボルト)

ウ. 粉じん計や分粒装置の種類による 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、分粒装置を取り付けることを規定していない。そのため、粉じん計に分粒装置を取り付けたことによる相対濃度への影響については知見が乏しい状況である。前節で触れたように、全データでみると LD-5R の K 値と比較して LD-6N2 の K 値が小さい結果となったが、これは両者の測定点数に差があるためであり、両粉じん計の結果を比較するには測定点を揃えることが適当である。

そこで、両者の K 値が得られた測定点のみで比較を行った結果を図 7 に示す。図 7 は K 値算出に用いたそれぞれの相対濃度（図 7 上）及び K 値（図 7 下）をそれぞれ比較したものである。NWPS-254 付 LD-6N2 で得られた相対濃度は Dorr Oliver サイクロン付 LD-5R で得られた相対濃度よりも 1 割ほど大きく、その結果として K 値は 1 割ほど小さくなっていった。同時に測定が実施された点のみで比較を行っているため、表 4 ほど大きな差は現れていない。

本調査の結果から、分粒装置を取り付けた同系統の装置であっても、相対濃度に差が生じることが確認されたため、本調査で使用した装置以外を用いる場合には本調査の K 値を流用すること無く併行測定を行う必要がある。

図 8 は、同じ分粒方式を採用している 2 種類の製品による比較として Dorr Oliver サイクロン付 LD-5R と PM4 サイクロン付 LD-5R の結果を 1 分値で比較したものである。現場 F では実施ができなかったため、現場 G 及び現場 H の 2 か所のデータである。両者とも相対濃度がほぼ一致していたことから、この 2 つのサイクロン式分粒装置に関してはほぼ同一な結果が得られていたことが明らかとなった。

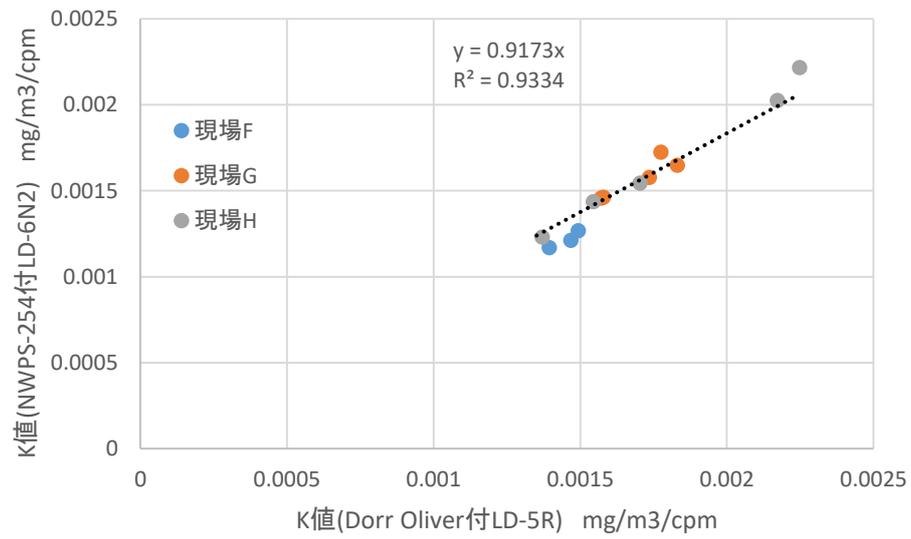
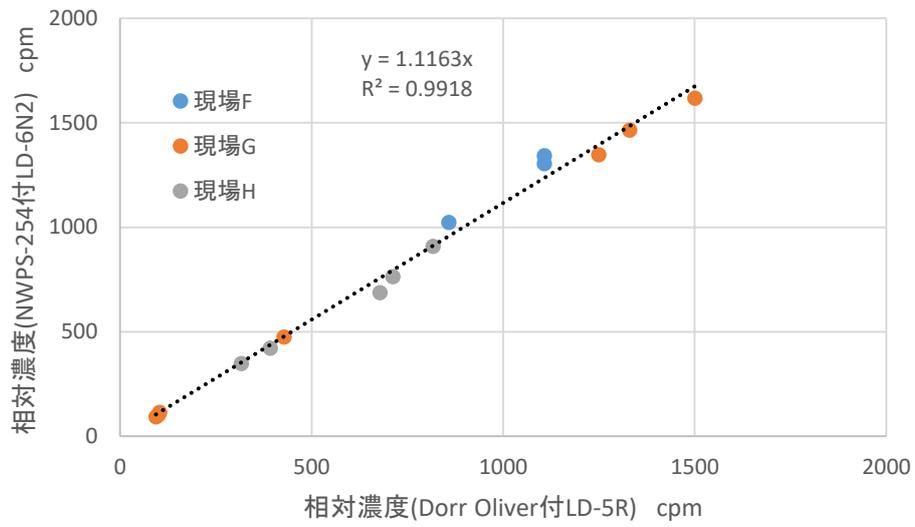


図7 Dorr Oliver サイクロン付 LD-5R と NWPS-254 付 LD-6N2 の相対濃度と K 値の関係

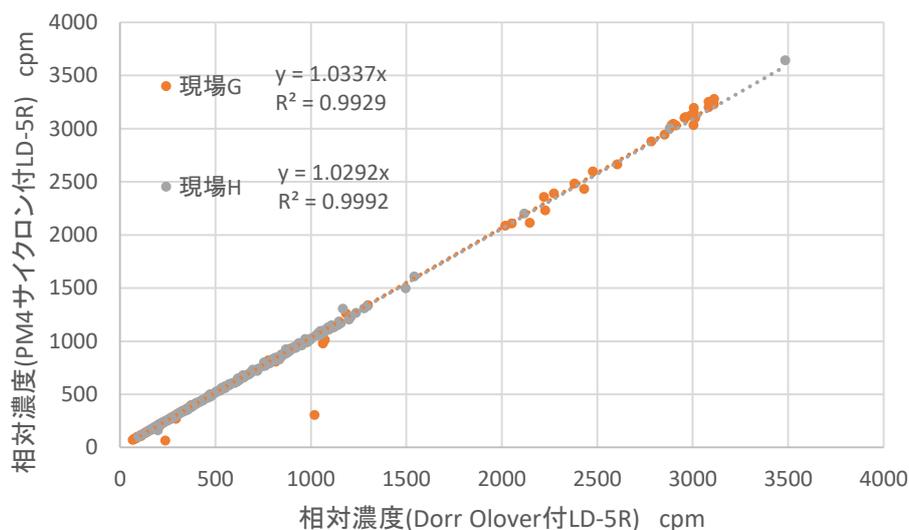


図8 Dorr Oliver サイクロン付 LD-5R と PM4 サイクロン付 LD-5R の相対濃度の比較

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 線回折法 (XRD) により、粉じんの遊離けい酸濃度の測定を実施した。

(ア) 試料

平成 29 年度の調査では NWPS-254 により捕集したが、フィルター上の粉じん捕集量が少なく分析が困難な試料が多かった。そのため、今回の調査では捕集量を増やすために吸引流量の大きな NW-354 及びラスカルサイクロンサンプラーにより捕集したフィルターを分析試料とした。今回の調査の目的は遊離けい酸含有率の測定方法として簡易的に岩石の分類から推定する方法の検証であるため、分析対象は掘削・ずり出し作業時に捕集されたフィルターとした。

(イ) 定性結果

図 9 は現場 F、G、H で採取した粉じん試料の XRD (定性) 測定結果である。現場 F については、クリストバライトおよび石英の主回折線付近にピークが認められるが現場 G ではピークが明瞭に見つけることは困難で、現場 H についても石英のピークと思われるものが認められただけである。また、現場 F についても試料の鉱物の同定に必要な明瞭な回折パターンは得られていない。

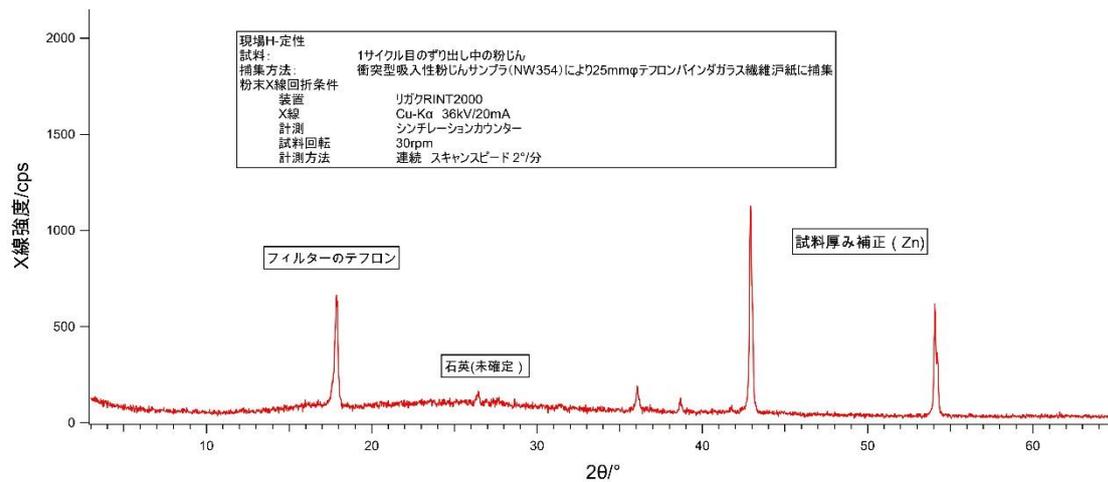
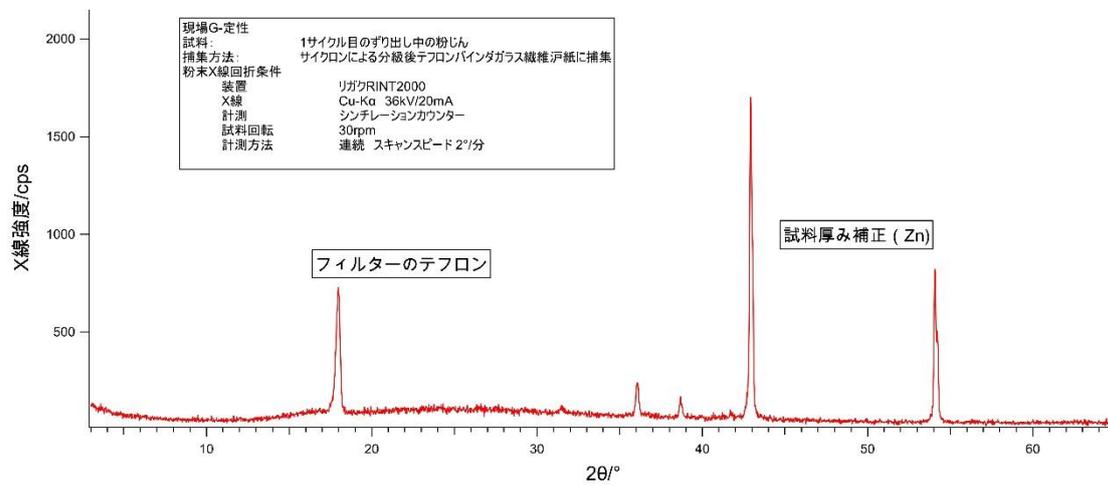
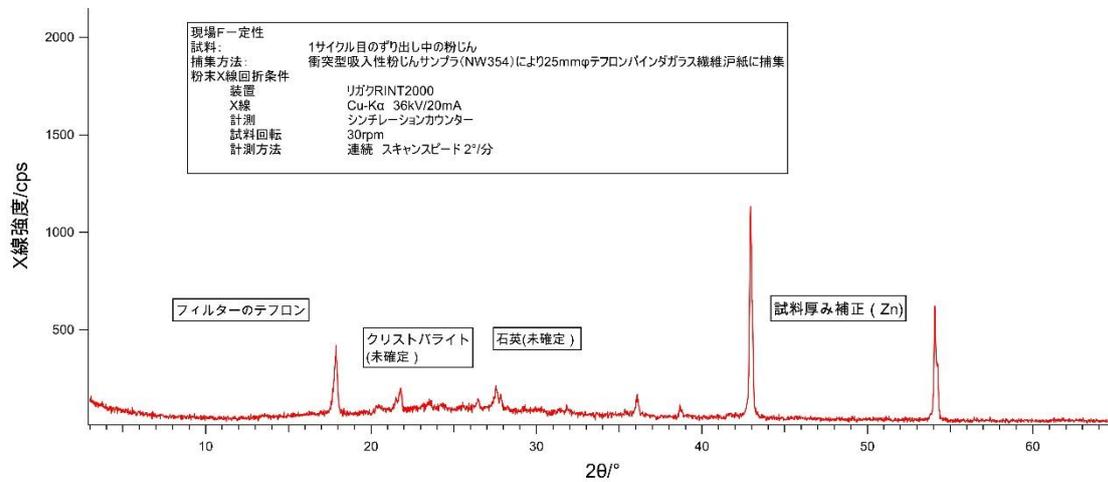


図9 現場 F、G、H の定性分析結果

(ウ) 定量用測定結果

図 10 は、各現場で得た試料による定量用の測定結果例である。粉じん試料量が少なく、定性用の測定条件でピークの検出が行えなかった現場 H についてもクリストバライトの回折線付近の測定結果ではピークがあることがわかる。

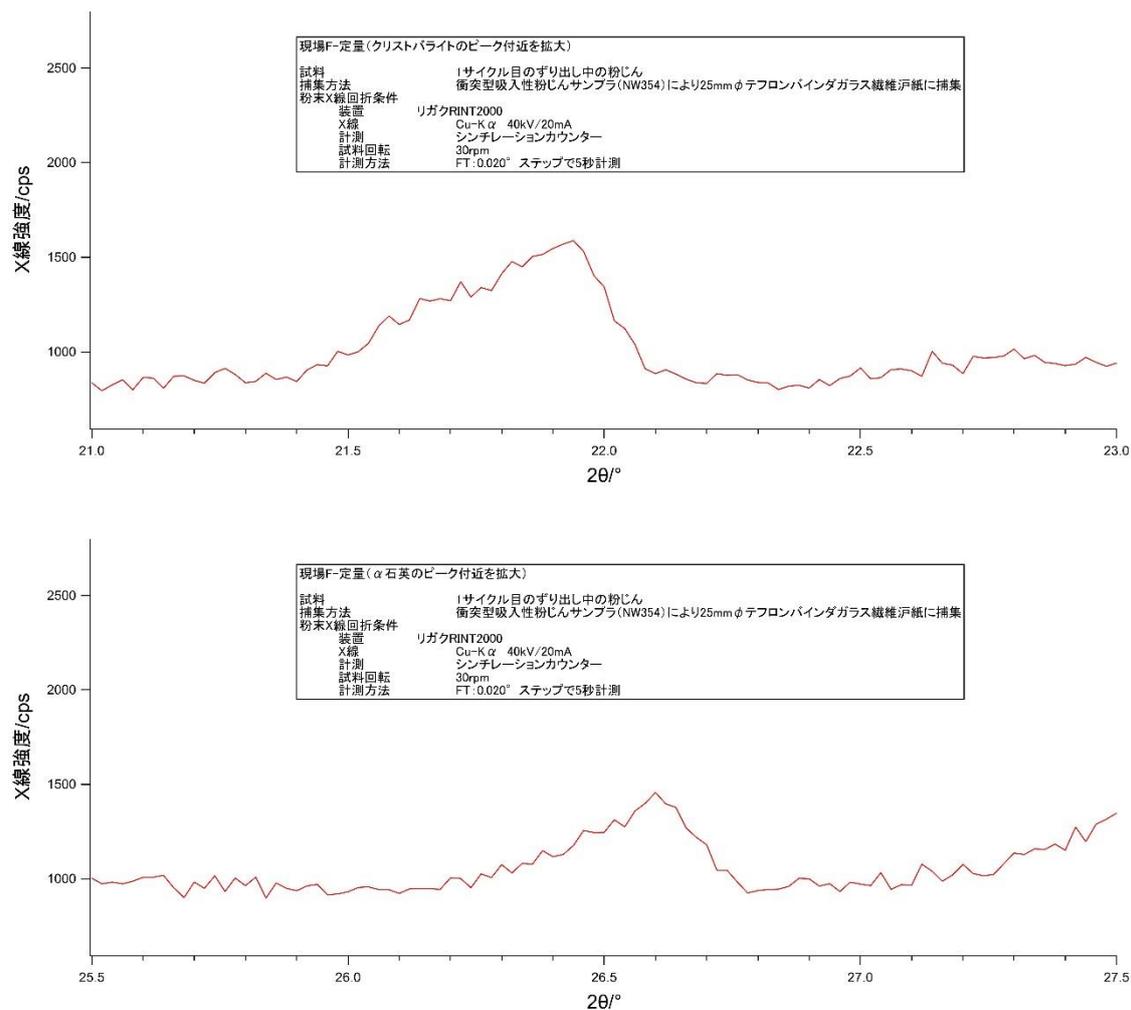


図 10(1) 定量分析結果の例 (現場 F)

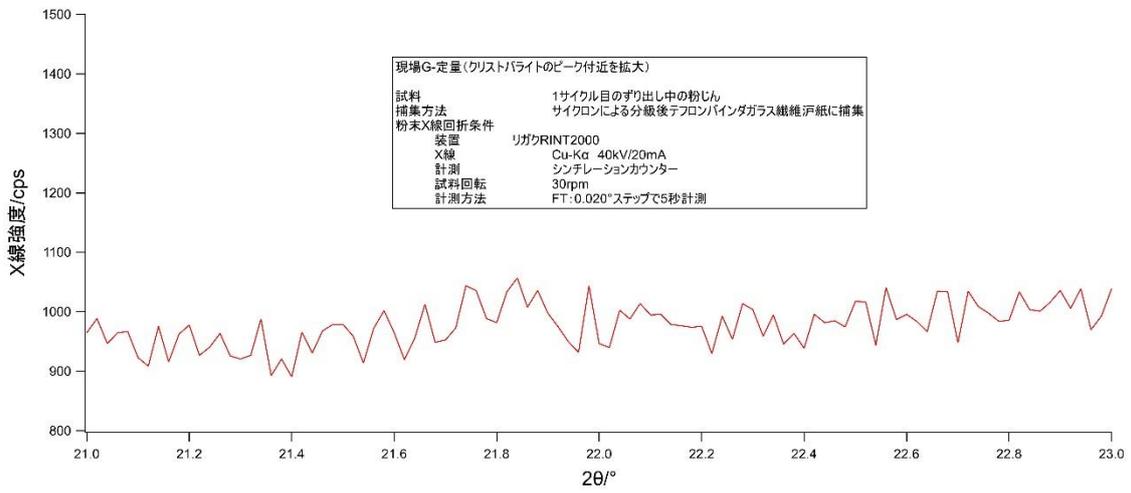
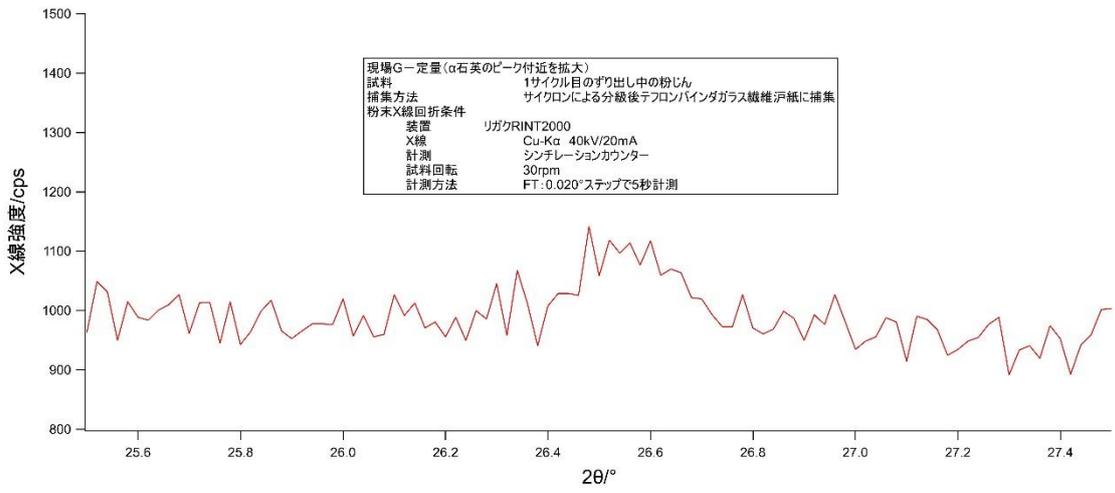


図 10(2) 定量分析結果の例 (現場 G)

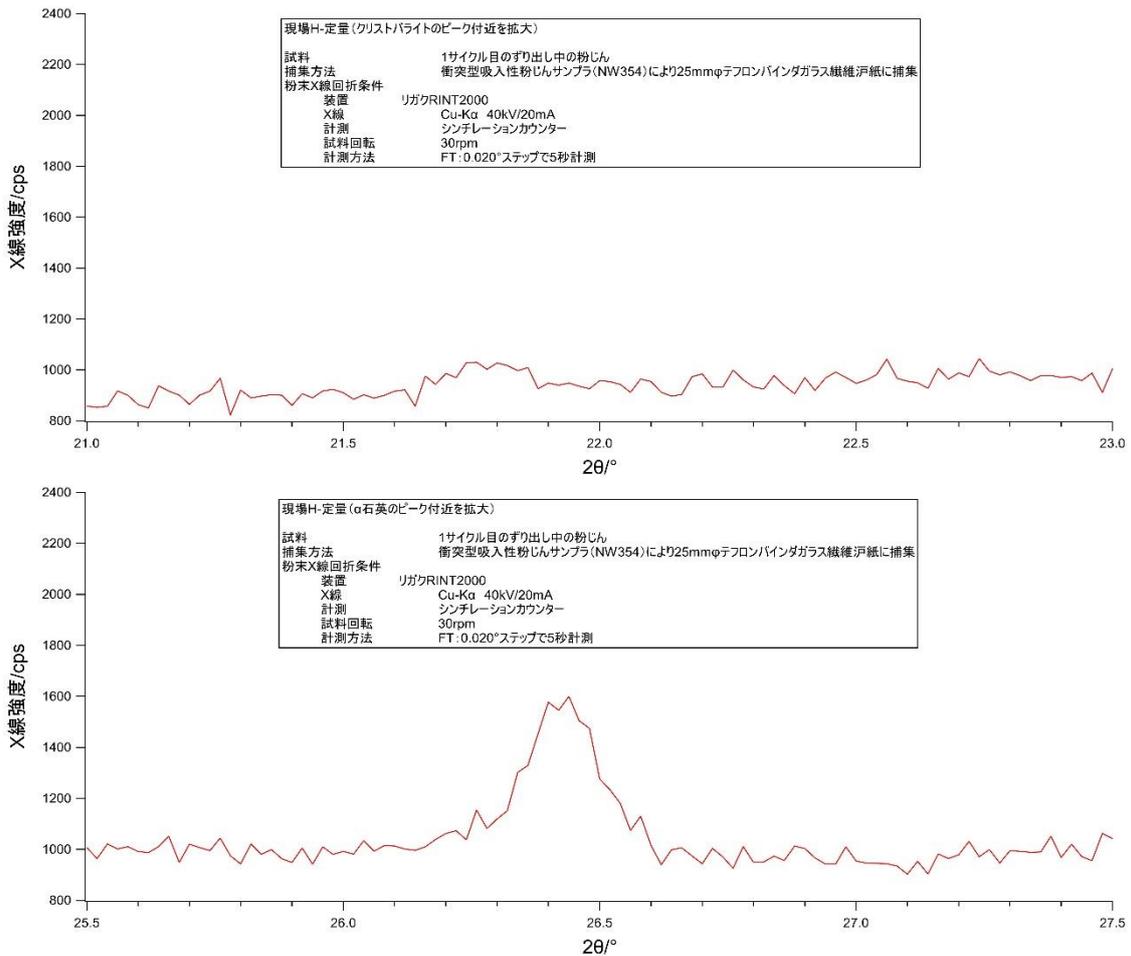


図 10(3) 定量分析結果の例 (現場 H)

(エ) 計算例

図 11 は、実際の計算例として、ピークデータをもとに解析ソフトウェアが抽出したピークの例を示す。今回は恣意的な判断を入れず、装置に機械的にピークを検出させた。この図の例で言えば石英のピークは十分定量下限以上であるが、クリストバライトは検出下限より大きいものの S/N から言えば定量下限以下である。しかし、今回安全（遊離けい酸含有率が高くなる）側の推定を行うこととし、このようにノイズに埋もれた状態からもピークが抽出された場合はそのピーク高さからクリストバライトあるいは石英量を推定して遊離けい酸濃度に加えることとした。

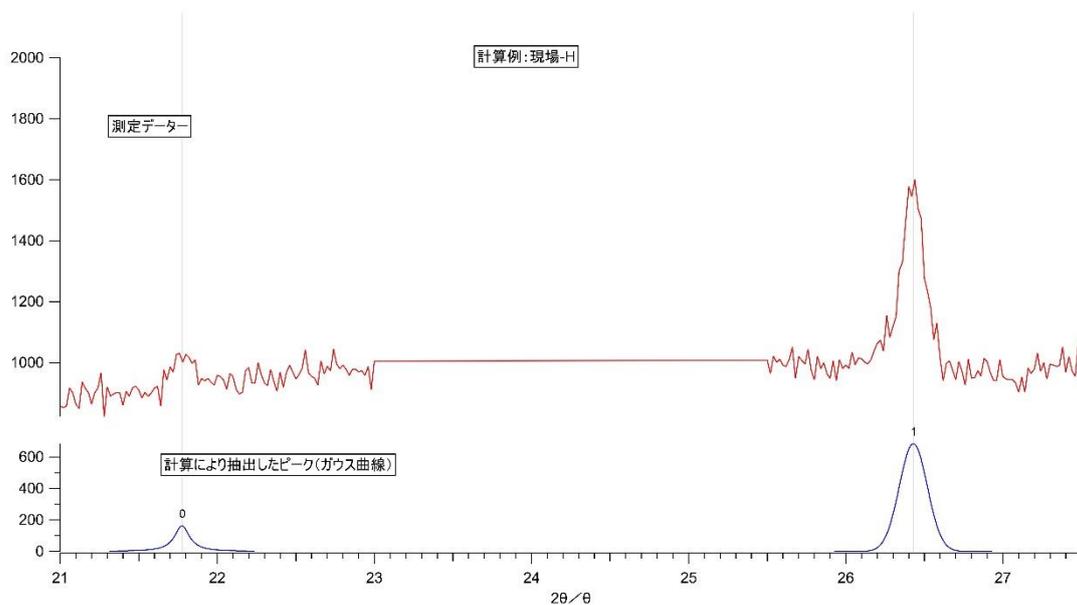


図 11 解析ソフトウェアにより抽出されたピークの例

(オ) 計算結果

表 4 に今回の現場 F、G、H における遊離けい酸含有率の計算結果を示す。

表 4 遊離けい酸含有率の測定結果

	主な岩石	試料数	算術平均(%)	標準偏差(%)	変動係数
現場 F	安山岩	6	19.9	3.4	17.3 %
現場 G	細粒砂岩	4	16.0	4.0	25.0 %
現場 H	花崗閃緑岩	8	19.1	4.8	25.4%

9. 測定を実施する上での課題

(ア) 定点測定

- ・ 定点測定では、機器をいつ、どこに、どのように設置するのかという問題が最大のものであった。今回の調査において三脚による設置が許可されたのは1つの現場のみで、他の2現場はそれぞれ独自の方法を提案していただいた。現場の裁量に任せるということで良いとは思われるが、設置に係る注意点や三脚以外の標準となるような設置方法を検討する必要があるのではないかと。
- ・ 今回の調査では、切羽から10-50 mの範囲に定点を設置することとしていたが、最も切羽に近い測定点として設置した中で最も切羽から遠かった点は切羽から35 m離れていた。特に掘削・ずり出し作業時は、安全確保の観点から切羽近傍に設置することは困難であった。1サイクルを通じて測定を実施する場合に、より切羽に近い測定

点を設置するためにはどのような工夫が必要か、粉じん計もしくは質量濃度測定のみであればより近い位置に設置が可能であるか、あるいは切羽から多少距離があった場合に補正する方法（例えば個人サンプラーや重機内での測定との組み合わせ）等についても検討が必要と思われる。

(イ) 個人サンプラーによる測定

- ・ 平成 29 年度調査の際には質量濃度測定に加えて粉じん計による相対濃度測定も実施したが、作業員への負担を軽減するために今回の調査では質量濃度測定のみを実施した。その結果、個人サンプラーによる測定に対して否定的な反応は少なかった。ただし、機器装着時の安定性等には改善の余地があり、作業員の負担の少ない測定方法については今後も検討されるべき課題である。
- ・ 質量濃度測定の場合、得られる値は測定時間帯の平均濃度である。1 サイクルを通して測定を実施する場合、作業員が切羽付近にいない時間帯も含まれることになる。切羽付近の粉じん濃度を把握し、適切な対策を実施することを目的とするならば、切羽付近にいた時間を把握して評価に反映させることが必要である。切羽付近での作業内容によって遊離けい酸含有率も異なるので、過大評価もしくは過小評価にならないように注意しなければならない。
- ・ 1 サイクル通しての測定を実施する場合、慣性衝突式の分粒装置ではグリスを塗布した衝突板が飽和してしまい、正しい測定が行えない可能性がある。高濃度な環境で長時間測定するにはサイクロン式の方が優れていると考えられるため、個人サンプラーへの利用について検証が必要である。

(ウ) 共通

- ・ 作業毎のデータを比較すると、濃度及び K 値に差がある現場も見受けられる。1 サイクル通しての測定は測定の負担が軽減される利点があるが、粉じん計で記録していない場合はどの作業でどの程度粉じん濃度が高いかが把握できず、対策につなげにくい面がある。1 サイクル通しての測定と作業毎の測定は、適宜組み合わせる測定、評価及び対策を実施できるようにするべきではないか。
- ・ 粉じん計と分粒装置の組み合わせによる相対濃度及び K 値の変化については、より多くの知見が必要である。今回の調査で実施した以外の組み合わせについては異なる結果になる可能性もあるため、実際に現場で測定する際には事前に確認しておくことが望ましい。
- ・ 質量分析に供するためのフィルターは総じて圧力損失が大きいため、遊離けい酸分析のために吸引流量の大きなポンプを利用して粉じん捕集量を増そうとすると、高負荷がかかり途中でポンプが停止してしまう恐れがある。確実に分析に必要な粉じんを捕集するためには、使用するフィルターの捕集量の上限を把握して粉じん濃度

に対する捕集時間を設定する必要がある。

10. 結論

本研究は、新たな課題として併行測定を実施しない場合に利用する標準の K 値の妥当性及び新たな粉じん計（LD-6N2 型）の K 値の決定のためのデータ収集、遊離けい酸含有率の測定方法として簡易的に岩石の分類から推定する方法の検証、及び定点測定と個人サンプラーによる測定の測定結果の比較を主な目的として実施した。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、8 章で示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 併行測定を実施しない場合に利用する標準の K 値の妥当性及び新たな粉じん計（LD-6N2 型）の K 値の決定のためのデータ収集

今回の調査では、Dorr Oliver サイクロン付 LD-5R の K 値を 53 点、NWPS-254 付 LD-6N2 の K 値を 15 点得ることができた。1 サイクルの平均では、それぞれ 0.0021 mg/m³/cpm および 0.0016 mg/m³/cpm と、LD-5R の現行の K 値である 0.002 mg/m³/cpm に近い値となった。サイクロン型の分粒装置（2 種）と LD-5R 型の組み合わせに関しては同等の値が得られているが、その他の組み合わせを行った場合は、今回の K 値を使用するのではなく併行測定が必要である。

② 遊離けい酸含有率の測定方法として簡易的に岩石の分類から推定する方法の検証

3 か所の現場で遊離けい酸含有率を分析することができ、岩石の種類から遊離けい酸含有率を推定するためのデータを得ることができた。吸引流量の大きなサンプラーを使用したことで平成 29 年度調査よりも多くの試料を分析することができたが、大型のポンプを使用することで測定の負担が増加したことや、圧力損失による測定停止等により当初の計画通りに測定できないことがあった。当該推定方法の検証には今後より多くのデータが蓄積されていくことが望ましく、確実な測定方法が求められる。

③ 定点測定と個人サンプラーによる測定の測定結果の比較

現場 F と現場 H では、定点測定に対して個人サンプラーによる測定の方が粉じん濃度が高い結果となった。個人サンプラーを装着した作業者の行動する範囲で実際に粉じん濃度が高かったことが考えられるが、測定位置や時間帯に差がある測定結果もあり、粉じん計の測定結果から同じ時間帯で推定すると両者ほぼ一致する結果になった測定点もあった。