

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04635

研究課題名（和文）針状物質を含む浮遊粉塵の簡易識別システムの開発

研究課題名（英文）Development of a simple identification system for floating dust containing acicular material

研究代表者

進士 正人（SHINJI, MASATO）

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：40335766

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：トンネル建設作業時の良好な作業環境の維持のため、特別な現場計測を要求されるアスベストのような針状鉱物を簡便に発見し定量化する方法を研究した。既往研究では、針状物質のミー散乱は、後方散乱に近い170度での散乱光の偏光が円柱粒子と球状粒子で大きく異なることが明らかとなっているため、フラッシュ光による散乱画像から粉じん量を測定する研究を進展させ、針状形状に起因する特有の散乱光画像を得ることをめざした。その結果、波長の短いレーザー光やフラッシュライトを光源として利用すると共に、AIによる撮影画像中に映り込む画像中の粉じんの識別やアスベスト判別方法を取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アスベストは、極めて細かい針状の無機繊維鉱物である。この物質を多量に吸引すると、肺胞深部に蓄積され、中皮腫や肺機能障害などの健康被害の原因となる。また、アスベストを産出する岩石であるクリソタイルを有する蛇紋岩中を掘削するトンネル工事では、針状浮遊粉じんの発生の有無は工事進行に大きな影響を及ぼし、従来のガイドラインに基づく単位空間あたりの粉じん重量の規制だけではなく、単位空間あたりの本数の規制であるアスベストの飛散防止に関する規制を順守する必要が生じ、トンネル建設工事を安全に進めるには極めて大きな影響を及ぼす。そのため、簡便にアスベスト浮遊の有無を識別できる計測手法の開発が望まれている。

研究成果の概要（英文）：The good working environment during tunnel construction is an extremely important research issue. In this study, we focused on dust measurement among the working environment items and investigated a simple method to detect and quantify needle-like minerals such as asbestos, which require special handling. Based on the principle of Mie scattering of floating dust, previous research has shown that the polarization of scattered light at 170 degrees, which is close to backscattering, differs greatly between cylindrical particles and spherical particles. We have developed a method for the identification of suspended needle-like particles by obtaining scattered light images that are unique to asbestos due to its needle-like shape. For this purpose, we used laser light and flash light with short wavelengths as light sources, and also worked on methods for identifying dust in images taken by AI and discriminating asbestos.

研究分野：トンネル工学，岩盤工学，安全工学

キーワード：安全工学 トンネル工学 土木工学

## 1. 研究開始当初の背景

石綿と総称されるアスベストは直径 0.02~0.35  $\mu\text{m}$  と、極めて細い針状の無機繊維鉱物である。このアスベストを誤って多量に吸引すると、肺胞深部に蓄積され、中皮腫や肺機能障害などの健康被害が引き起こされることが大きな社会問題となり、全国的にその除去工事が進められている。しかし、その除去工事に伴うアスベストの飛散が問題となっている。また、アスベストを産出する岩石であるクリソタイルを有する蛇紋岩中を掘削するトンネル工事において、クリソタイルによる針状浮遊粉じんの発生の有無は工事進行に大きな影響を及ぼす。従来の「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」に基づく単位空間あたりの粉じん重量 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) の規制だけではなく、単位空間あたりの本数の規制であるアスベストの飛散防止に関する規制 ( $\text{本}/\text{m}^3$ ) を順守する必要が生じ、トンネル建設工事を安全に進めるには極めて大きな影響を与える。そのため、簡便にアスベスト浮遊の有無を識別できる計測手法の開発が望まれていた。

研究代表者は、これまで数多くのトンネル坑内で切羽写真を撮影してきた。しかし、坑外での設定のまま、誤ってフラッシュを使ってトンネル坑内を撮影すると、トンネル内に浮遊する粉じんに光が反射し、画像に白斑が写ってしまう経験をした。このような白斑が画像に写る現象は、浮遊する物質に対しフラッシュ光がミー散乱現象を引き起こすことにより発生する現象であることが知られている。

そこで、従来のトンネル技術者はフラッシュを使わずトンネル切羽をきれい撮影する技術を体得するように写真撮影をしてきた。それに対し、研究代表者は発想を転換し、写真の白斑度から粉じん濃度を測定する着想を得た。そして、その着想を基に、トンネル坑内で簡便に粉じん濃度を計測する技術開発を行ってきた。

## 2. 研究の目的

本研究は、フラッシュ光による散乱画像から粉じん量を測定する研究を進展させ、アスベスト特有の性質である針状形状に起因する特有の散乱光画像を得ることによる針状浮遊物識別法を開発する。すでに浮遊粉じんのミー散乱の発生原理から、後方散乱に近い 170 度での散乱光の偏光が円柱粒子と球状粒子で大きく異なることが明らかとなっている。そのため、フラッシュライトや波長の短いレーザー光を光源として利用し、あわせて撮影画像の処理方法を工夫することにより、円形と異なる散乱光固有の画像や円形白斑の画像が得られれば極めて簡便なアスベスト判別方法となる。

空間内の浮遊粒子をリアルタイムに検出する方法として、外部から計測器内に空気を吸引し、管中に浮遊物質を通過させたところにレーザー光を照射し、その散乱光を検出する測定器が考えられている。光散乱理論では、それだけでは通常粒子と針状粒子を分離できず、後方散乱に近い 170 度での散乱光の偏光が円柱粒子と球状粒子で大きく異なることを利用したアスベスト計測機器も提案されているがきわめて高価である。

## 3. 研究の方法

可視光をはじめ波長の短いレーザー光やブラックライトを組合せ光源として利用し、撮影位置を後方散乱が撮影できる場所など工夫することにより、浮遊粒径の違いや、浮遊形状の違いによる散乱光固有画像や円形白斑の空間分布の違いを明らかにする。それと共に、計測器ではなくトンネル坑内やアスベスト除去現場全体に適用できる簡便な浮遊粉塵識別法を開発する。そのうえで、撮影画像を AI によるディープラーニングに適用し自動的にアスベストの本数やアスベストを含む粉じん濃度を画像から測定するソフト開発をおこなう。

## 4. 研究成果

### 平成 30 年度

この年度は、浮遊粉じんの違いによる散乱強度の変化状況の把握を目的として研究を進める中で、トンネル坑内で通常使用される粉じん測定器より 1 台 5000 円以下と極めて安価で市販されている簡易粉じん測定器の利用可能性を検討した。簡易粉じん測定器とは、空気清浄機の粉じん濃度センサーとして開発されたものを簡易粉じん測定器として市販されているものである。しかし、通常の室内環境測定を目的としてこの測定器が開発されたので、そのままでは感度が高すぎて適用を想定しているトンネル坑内のような高濃度な粉じん濃度環境下では適用できないことが最初から想定された。そこで、電子回路を調査し散乱光の光量を下げる方向で調整することで感度を低下させることができることがわかった。この改良を行ったうえで、山口大学では小型室内粉じん実験装置を製作し、装置内で香取線香を発生粉じんとして浮遊状況を再現し、高濃度でも測定できることを確認した。

この結果をもとに、労働安全衛生研究所内の小型チャンバー試験装置を使って、粒径加積曲線も明らかな標準粉じんを使用した長時間粉じん測定実験を複数台の簡易粉じん測定器による同時測定と従来の粉じん測定器との比較実験を実施し、簡易粉じん測定器の個体誤差の確認および長期安定性について検討した。

その結果、簡易粉じん測定器の個体差は低く、適用性の高さが明らかとなった。しかし、簡易粉じん測定器はフォトダイオードトランジスターによる反射光量測定のため粉じん形状の違い

に関する検討には限界があることも明らかとなった。

粒径による散乱強度の違いの確認に関して、山口大学での蚊取り線香を用いた粉じん測定と労働安全衛生研究所での標準粉じんを用いた簡易粉じん測定器による粉じん測定により確認できた。そのため、ほぼ順調に推移していると判断した。今後は、簡易粉じん測定器内部の粉じん測定ユニットを改良して、フォトダイオードトランジスターを画像カメラに置き換える検討を行い、光源波長による散乱強度の違いを調べる。浮遊粉じん形状の違いに関しては、実験施設の整備状況とも合わせて柔軟に対応している。

#### 平成 31 年、令和元年度

この年度は、浮遊粉じんの違いによる散乱強度の変化状況の把握を目的として研究を進める中で、昨年度の研究成果として開発した簡易粉じん測定器の長期計測の可能性の検討や信頼性の検討を行った。簡易粉じん測定器とは、昨年度の研究により適用を検討した市販の安価な空気清浄機での粉じん濃度センサーとして開発されたパーツを改良しトンネル坑内用粉じん測定器として改良・使用できるように工夫したものである。ここまでの研究成果の進展に基づき、共同研究者と合同で土木研究所の所有する実サイズ実験トンネルでトンネル掘削時の状況をシミュレーションし、切削粉じんや吹付粉じんの浮遊状況を正確に把握する多点粉じん濃度計測を計画した。しかし、新型コロナウイルスの蔓延防止のために県外出張ができなくなり、実サイズ実験トンネルでの計測が延期となった。

そのため、大学内で室内実験を再度実施し、多点粉じん濃度計測を行うため製作した 6 台の簡易粉じん測定器の感度のばらつきや長期室内粉じん計測による測定孔の付着汚れの把握をおこなうと共に、清掃方法の考案、清掃後の測定感度確認などを実施し、来年実施予定の実規模トンネルでの現場実験に備えることとした。

室内実験の結果、簡易粉じん測定器それぞれの個体差は低く、そのばらつきは十分適用範囲であることが明らかとなった。測定孔周りの粉じんの付着汚れは確実に付着し粉じん計測に影響を与えることがわかった。しかし、エアブロー等で付着粉じんを吹き飛ばすことで初期感度に復帰することも合わせて明らかとなった。

#### 令和 2 年度

コロナ禍の影響を受け、建設現場での針状物質の検出実験を実施することが困難であったため、2 か所のトンネル建設現場での多点粉じん濃度実験を実施した。さらに、厚生労働省による粉じん障害防止規則並びに労働安全衛生規則の一部改正が令和 3 年 4 月 1 日に施行され、新しい粉じん濃度測定位置と測定方法が提案されることがわかったため、1 例目の建設現場では、従来の換気方法に準拠して坑外に主換気ファンを設置し送気風管を用いてトンネル切羽に向けて送気を行う拡散希釈方式を採用している建設現場で、針状物質を含む可能性を有する発破粉じんや吹付粉じんを多点で計測した。計測に合わせて、3 次元流体解析を用いて粉じんの発生状況を数値シミュレーションしたところ計測値と解析値がよく一致した。すなわち、トンネル坑内のような閉塞環境は 3 次元流体解析で事前予測が可能であることがわかった。この結果を受けて、2 例目の建設現場では、吸引捕集式を追加採用されているトンネルで簡易粉じん測定器を用いて粉じん濃度測定実験を実施した。簡易粉じん測定器とは、昨年度の研究により適用を検討した市販の安価な空気清浄機での粉じん濃度センサーとして開発されたパーツを改良しトンネル坑内用粉じん測定器として改良・使用できるように工夫したものである。その結果、簡易粉じん測定器それぞれの個体差は認められず、そのばらつきは十分適用範囲であることが明らかとなった。

しかし、昨年度と同様に測定孔周りの粉じんの付着汚れは確実に付着し粉じん計測に影響を与えることもわかった。これらの結果から、現場適用に当たっては、一定のレンタル期間を設定し簡易粉じん測定器を回収し、清掃、感度調整を行うビジネスモデルが有効であることがわかってきた。

#### 令和 3 年度

研究期間を 1 年間延長したにも関わらず、今年度もコロナ禍の影響を強く受け、アスベスト発生現場での針状物質を検出する現場実験を実施することが困難であった。そのため、前年度に引き続き、トンネル建設現場での粉じん濃度測定実験を実施した。吸引捕集式を追加採用されているトンネルにおいて、一昨年度から開発してきた簡易粉じん測定器を用いて粉じん濃度測定実験を実施した。簡易粉じん測定器とは、一昨年度の研究により適用を検討した市販の安価な空気清浄機での粉じん濃度センサーとして開発されたパーツを独自に改良しトンネル坑内用粉じん測定器として使用できるように工夫したものである。その結果、簡易粉じん測定器それぞれの個体差は認められず、そのばらつきは十分適用範囲であることが明らかとなり、多点でトンネル坑内での粉じん濃度計測ができることを再確認した。しかし、簡易粉じん測定器の、測定孔は数ミリと小さく、孔周りの粉じんの付着汚れは確実に発生し、長期間の粉じん計測に強く影響を受けることもわかった。

そのため、今年度は、吹付コンクリート打設中のトンネル建設現場での撮影装置に使用するLED光源を工夫し、Mie散乱の原理により浮遊粉じんを画像撮影することでより識別しやすいようにしたうえで、撮影画像を背景差分したうえで機械学習で識別し、より精度よく浮遊個数を計数する方法を考案した。この手法はアスベストの管理基準が基準体積中の浮遊本数という定義であるため、必須の開発項目である。

<引用文献>

- 1) 阿部玲子, 佐々木 雄紀, 進士 正人; “動画処理に基づくネットワークカメラによる簡易粉塵濃度測定法”, *土木学会論文集 F1(トンネル工学)*, Vol. 70, No. 1, pp.15-25 2014.
- 2) 酒井健二, 小林大輝, 谷純平, 森本真吾, 進士正人, “室内風洞実験によるトンネル建設時の粉じん捕集効率の向上に関する研究”, *土木学会論文集 F1(トンネル工学)*, Vol. 74, No.1, pp.15-24, 2018, <https://doi.org/10.2208/jscejte.74.15>.
- 3) 掛谷幸士朗, 林久資, 鷹谷光俊, 山田丸, 大塚輝人, 吉川直孝, 進士正人, “非定常CFD解析による換気方式の違いによるトンネル建設時の坑内粉濃度の変化”, *土木学会論文集 F1(トンネル工学)*, Vol. 78 No.1, pp.13-25, 2018, <https://doi.org/10.2208/jscejte.74.15>.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 K. KAKEYA , H. HAYASHI , T. OTSUKA , K. NAKAMURA , M. SHINJI	4. 巻 -
2. 論文標題 Study on Application of Simple Dust Sensor to Tunnel Construction Site	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Prof. of he ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC2020 and 46th General Assembly Kuala Lumpur, Malaysia	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 掛谷幸士朗, 林久資, 進士正人	4. 巻 56, 10号
2. 論文標題 トンネル建設現場における多点粉じん濃度測定のための簡易粉じん測定器の適用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 建設機械	6. 最初と最後の頁 53～58
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 KAKEYA Koshiro, HAYASHI Hisashi, OTSUKA Teruhito, NAKAMURA Kenji, SHINJI Masato	4. 巻 75
2. 論文標題 STUDY ON APPLICATION OF SIMPLE DUST SENSOR TO TUNNEL CONSTRUCTION SITE	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. F1 (Tunnel Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_12～I_19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejte.75.2_I_12	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 掛谷幸士朗, 林久資, 進士正人	4. 巻 72
2. 論文標題 簡易粉じん測定器のトンネル建設現場での環境測定への適用に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 建設機械施工	6. 最初と最後の頁 72～77
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 酒井健二, 小林大輝, 谷純平, 森本真吾, 進士正人	4. 巻 Vol.74, No.1
2. 論文標題 室内風洞実験によるトンネル建設時の粉じん捕集効率の向上に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集F1(トンネル工学)	6. 最初と最後の頁 15,24
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejte.74.15.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計7件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 掛谷幸士朗, 林久資, 進士正人
2. 発表標題 3次元流体解析による多点・多頻度粉じん濃度測定のプロ案
3. 学会等名 土木学会, 第30回トンネル工学研究発表会, 報告I-37
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 掛谷幸士朗, 林久資, 進士正人
2. 発表標題 簡易粉じん測定器によるトンネル坑内の多点粉じん濃度測定のための基礎研究
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会(VI-487)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 掛谷幸士朗, 林久資, 進士正人
2. 発表標題 トンネル建設現場における簡易粉じん濃度測定器の適用性の検討
3. 学会等名 令和2年度第72回土木学会中国支部研究発表会(-1)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 掛谷幸士朗，林久資，進士正人
2. 発表標題 トンネル建設現場における粉じん濃度測定への簡易粉じん濃度測定器の適用性の検討
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 掛谷幸士朗，林久資，進士正人
2. 発表標題 トンネル建設現場における簡易粉じん濃度測定器の適用
3. 学会等名 土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井健二，岸田展明，中村憲司，大塚輝人，進士正人
2. 発表標題 トンネル工事における通風換気システム評価のための中規模実験
3. 学会等名 土木学会第28回トンネル工学研究発表会「報告 -48」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大塚輝人，酒井健二，片谷篤史，岸田展明，中村憲司，板垣晴彦，進士正人
2. 発表標題 トンネル工事における通風管理システム評価
3. 学会等名 安全工学会第51回安全工学研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	林 久資  (HAYASHI HISASHI)  (30633614)	山口大学・大学院創成科学研究科・助教    (15501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------