

平成 23 年度  
ミュー粒子を応用した地盤危険性探査技術の実用化に関する調査研究報告書  
目 次

|         |                              |    |
|---------|------------------------------|----|
| 第 1 章   | 調査研究の概要                      | 1  |
| 1.1     | 調査研究の背景と目的                   | 1  |
| 1.2     | 調査研究の経緯                      | 2  |
| 1.3     | 調査研究の成果概要                    | 3  |
| 第 2 章   | 改良型マルチ計測器の設計・製作              | 5  |
| 2.1     | 改良型マルチ計測器の設計                 | 7  |
| 2.2     | 改良型マルチ計測器の製作                 | 9  |
| 第 3 章   | 改良型マルチ計測器の工場試験               | 17 |
| 3.1     | 試験方法                         | 17 |
| 3.2     | 試験結果                         | 18 |
| 3.3     | 試験の成果                        | 21 |
| 第 4 章   | 改良型マルチ計測器の湿潤環境下試験            | 23 |
| 4.1     | 試験方法                         | 23 |
| 4.2     | 試験結果                         | 28 |
| 4.3     | 試験の成果                        | 34 |
| 第 5 章   | 現地計測                         | 35 |
| 5.1     | 試作器 B・C,改良型マルチ計測器による地下施設での実験 | 35 |
| 5.2     | 計測結果                         | 38 |
| 第 6 章   | 解析精度向上のための実験的検討              | 51 |
| 6.1     | マルチ計測器の計数効率                  | 51 |
| 6.2     | ミュー粒子の長期変動が解析結果に与える影響について    | 54 |
| 6.3     | 計測点数が解析結果に与える影響              | 70 |
| 6.4     | 初期モデル構築手法の検討                 | 71 |
| 第 7 章   | 実用化システム構築に向けた検討              | 73 |
| 7.1     | 計測器の小型化に関する検討                | 73 |
| 7.2     | 自動計測に関する技術的検討                | 78 |
| 7.3     | 社会的ニーズの開拓                    | 79 |
| 第 8 章   | まとめと今後の課題                    | 87 |
| 8.1     | 調査研究のまとめ                     | 87 |
| 8.2     | 今後の課題                        | 88 |
| 引用文献    |                              | 89 |
| 巻末[資料編] | 現場記録データシートおよび処理データ           | 91 |

## 【要 約】

### 1. 調査研究の背景と目的

社会インフラの老朽化により、地下水で運ばれた土粒子が吸い込まれて、その上部に空洞が発生する。空洞はさらに地下水の流れなどにより成長し、地表付近まで到達し、その結果陥没を引き起こす。地盤の陥没は、道路や建物に被害を与えるだけでなく、最悪の場合人命が失われることもありうる。地盤内部に発生する空洞による被害はあまり公にされていないが、鹿児島県の大隈半島では防空壕の上部が陥没し、人が飲み込まれた事故が報道されている。兵庫県の海岸でも小学生が空洞に飲み込まれた。何れも人命が失われている。このような陥没事故を未然に防ぐためには、地盤内部の空洞を調査する必要がある。これにより安全・安心な社会の実現に貢献できる。

本研究では宇宙から地表面に自然に降り注ぐミュー粒子を利用して、従来技術の課題(探査深度・分解能・ノイズ)を克服することができる地盤調査システムの実用化を目指す。昨年度まで計測技術や地盤可視化技術(トモグラフィ)の基礎技術を培ってきた。実用化にあたっては計測時間の短縮化や地下の悪条件への対応(防滴)が必要である。本研究では、下水道の幹線や導水路などをターゲットとした防滴対応のための実用化システムを開発する。これらの空洞は下水道や地下鉄などの社会インフラ施設の周辺で生じている。これをインフラ施設の内部から探査できれば、陥没事故を未然に防ぐことができる。

### 2. 調査研究の経緯

ミュー粒子を工学的に利用し、成功した事例は皆無である。理学的には火山体についてのレントゲンのような手法(ラジオグラフィ)で浅間山のマグマの通り道を計測した例が報告されている(東京大学地震研究所)のみである。これは長期モニタリングの巨大な空間を対象としており、工業的利用とは異なっている。本研究は、レントゲンではなく、方向性を持って計測するため、CT スキャンのように三次元で立体的に計測し、可視化する点に特徴がある。また、ミュー粒子は自然に存在するものであり、放射線源などを使用することなく、安全に探査することが可能となる。

地盤陥没前に陥没の危険を予測する事業は道路における地中レーダ探査が一部行われているが、地下1~2m程度の極浅部のみの探査に留まっている。電気探査や地震探査では、探査震度は満足するものの分解能の点で課題がある。一方、物理探査の分野では密度を測る方法としては重力探査しかなく、小規模な空洞探査には分解能の点で不足する。このように地下10m程度までを高分解能で探査できる手法はミュー粒子を利用することで実現できる。

平成20~22年の3ケ年、(財)機械システム振興協会からの委託事業として自然宇宙線ミュー粒子を活用した地下空洞調査技術の開発に関する調査研究ならびにフィージビリティスタディを実施し、それを実験的かつ理論的にも示してきた。

20年度は空間的分解能や密度推定精度の実験的検討および解析的検討を実施した。同時に実験器を試作し、地下の実験場でミュー粒子の角度分布を測定し、空洞に見立てたガスパイプを検知することを確認するとともに、測定位置を変えて測定することでトモグラフィ解

析の適用可能性を実験的に示した。

21 年度は試作機の最適化を検討するために仕様の異なる小型の試作器を 2 台製作した。同時にトモグラフィ解析アルゴリズムを開発するとともに、地下計測実験を実施し、取得したデータに適用させて二次元密度構造断面図による地盤の可視化に成功した。

22 年度は、計測効率を向上させるために同時に 5 方向のデータを取得できるマルチ計測器を開発した。データの品質を低下させることなく、計測効率を向上させることを実験により確認した。同時に三次元トモグラフィ解析アルゴリズムを開発し、地盤の三次元密度構造断面図を得た。さらに実用化のための周辺技術調査を行い、実用化課題を明らかにした。その結果、実用化にあたっては計測時間のさらなる短縮化や地下の悪条件への対応（防滴）が必要であることが判明した。

残された課題が、地下環境で使えるように、防塵、防滴対策等をして、実用化することである。これまでの調査研究で開発してきた技術を基に、23 年度は（財）J K A の自転車等機械工業振興補助事業として、地下環境への対応（防滴・防塵等）を図るための新たな計測機器の開発を進めるとともに、地中空洞探査のニーズが多い下水管や導水路等を対象とした実用化システムを開発することに特徴がある。本調査研究によって、実際の地下で使用できる実用機を世界で初めて開発する。

### 3. 調査研究のまとめ

今年度の調査研究は、① マルチ計測器の改良、② 改良後の工場試験、③ 改良後の現地試験、④ データの蓄積、⑤ 精度向上のための検討、⑥ 実用化のための検討、を行った。以下、各項目のまとめを示す。

#### ① マルチ計測器の改良

マルチ計測器を防滴構造に改良するために、検出器のハウジングを改良すると共に、コネクタを防滴構造とした。計測部本体には防滴構造のケースで覆い、収録用 PC は防滴型に交換した。

#### ② 改良後の工場試験

JIS 規格に基づき、各機器の工場試験を行い、防滴加工の効果を確認した。

#### ③ 改良後の現地試験

結露を伴うような厳しい湿潤条件において、長期の試験を行い、データの安定性について確認した。

#### ④ データの蓄積

平成 22 年度の測線にさらに 2 本を追加した上、改良型マルチ計測器を用いて、測線と直交する方向で天頂角分布を測定した。また、試作器 A を用いた長期定点計測を実施した。

#### ⑤ 精度向上のための検討

④ で取得したデータを用いて見かけ密度マップを作成したところ、ラジオグラフィ（レントゲン方式）と同じような画像が得られた。これを初期モデルとすることで、既知情報がなくても初期モデルを構築することができる。

長期にわたる計測（特に長期モニタリング）の場合、ミュー粒子の時間変動が問題となる。地下での定点観測の結果、気象条件や太陽活動に伴う地球磁場の変動や装置

の温度変化などが、長期的なミュー粒子時間変動の原因であることがわかった。今後、さらにデータを蓄積して、密度の決定精度の向上や長期健全性モニタリングなどへの適用可能性が拓けてきた。

生データに近い見かけ密度マップにより、空洞の有無を判定することができることが示された。この場合の分解能は土被りの 1/10 程度になると考えられる。

#### ⑥ 実用化のための検討

小型三次元マルチ計測器や自動測定、長期の電源確保に関する検討を行った。さらに社会的ニーズの調査を行い、これまでの 3 年間の調査研究およびフィージビリティスタディの結果も踏まえて、社会的ニーズのとりまとめと、個々の課題などについて抽出した。

### 4. 今後の課題

平成 20 年度から 23 年度の 4 年間で得られた調査研究およびフィージビリティスタディにより、計測および解析技術に関して以下の成果が得られた。

- ① マルチチャンネル化により計測効率を向上させることができる
- ② 計測機器に防滴構造を用いることで、厳しい地下環境でも計測が可能であること。
- ③ 三次元トモグラフィ解析技術により地下の密度分布を可視化することができること。

社会的ニーズを考慮すると以下の課題が考えられる。

- ① 浅い下水道管の場合、1m 以下の細いものが多く、これに入れられる様な大きさの計測機器が必要である。
- ② 一方、計測機器の検出器を小さくすると計測に時間がかかるという問題がある。
- ③ 計測時間の短縮にはマルチチャンネル化と台数を増やす方法がある。

これらのことを考慮すると、小型かつチャンネル数の多い計測機器の開発が望まれる。さらに、現在のマルチ計測器では、位置を移動する、あるいは角度を変える作業を人力で行っている。そのため、測定作業員を現地に常駐させるなどの必要があり、コストがかかる。そのため自動で移動し角度を変える装置を付加する、あるいはインターネットや携帯電話を介してデータ転送を行う装置の付加が必要となる。