システム技術開発調査研究

2 0 - R - 8

平成20年度

ミュー粒子の工学応用による地中空洞化

調査システムに関する調査研究

報告書(要旨)

平成 21 年 3 月

財団法人機械システム振興協会 委託先 財団法人エンジニアリング振興協会



わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速 な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題 の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズ に適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人機械システム振興協会で は、財団法人JKAから機械工業振興資金の交付を受けて、機械システムに関する調査研究等補 助事業、新機械システム普及促進補助事業を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あ るいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に 総合システム調査開発委員会(委員長 東京大学 名誉教授 藤正 巖氏)を設置し、同委員会のご 指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を実施しております。

この「ミュー粒子の工学応用による地中空洞化調査システムに関する調査研究報告書」は、上 記事業の一環として、当協会が財団法人エンジニアリング振興協会に委託して実施した調査研究 の成果であります。今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の 成果が一つの礎石として役立てば幸いであります。

平成21年3月

財団法人機械システム振興協会

はじめに

本報告書は、自然宇宙線のミュー粒子を活用した探査機械システムの要素技術の確立を目指した調査研究の成果をとりまとめたものです。

近年、地下の人工的な交通施設、管路、地下工事などが地中の空洞発生を誘引し、この空洞の 成長が進行して地上の陥没に至る等の事例が多く報告されています。このため、地上の陥没を引 き起こす空洞の存在を明らかにし、災害を未然に防ぐことが求められています。また、地下の社 会インフラの管理者側からは、地下の社会インフラの上部地盤が健全であり、空洞発生の問題が ないということを確認したいという要求があります。

地下の空洞探査に対するニーズは高く、これまでにも様々な探査技術が考えられ、開発の努力 が重ねられてきました。しかし、既存の探査技術では測定限界や制限が多く適用範囲が限られて おり、現在に至るまで効果的な探査技術が確立されていないのが現状です。例えば、地中レーダー 探査(パルス波)の場合、分解能が高く、浅い深度の探査には非常に高い能力を発揮しますが、 探査深度が浅く3m程の深度までしか探査できません。また、その他にも電気探査や弾性波探査、 重力波探査などの探査手法もありますが、いずれも交通や工場の振動、外来電磁波などのノイズ の影響を受けて、特に都市部での探査では適用範囲が限られます。このため、陥没が発生する前 に地中空洞を探査し、陥没を未然に防ぐ対応をすることはなく、陥没が発生してから対処するこ とが多いのが現状です。

このような背景のもと、透過力が高く、都市部のノイズに影響を受けないミュー粒子を用いた 探査技術の調査研究を開始しました。既設の埋設管(空洞を模擬)を測定対象とした地下実験で は、ミュー粒子のカウント数の増加で空洞を捉えることができました。また、測定位置を移動し、 埋設管に対する測定位置の角度を変えて実施した測定でも、それぞれの位置においてミュー粒子 のカウント数の増加として空洞を捉えることができました。これによりトモグラフィー解析によ る地盤の可視化の可能性が確認されました。

地中の空洞を捉えることができるということは、地中に空洞がなく、地盤が健全な状態である ということを確認できるということであります。本測定技術の実現は、地中空洞を捉えて陥没を 未然に防ぐことができるだけでなく、地下の社会インフラの上部地盤の健全性を確認することが でき、安全・安心な社会の構築に大きく貢献できるものと考えられます。

最後に、本調査研究の成果が原位置測定システムとして実用化され、近い将来、地中空洞・地 盤健全性に関する一つの技術として産業界・社会に役立つことを切望する次第であります。

平成21年3月

財団法人 エンジニアリング振興協会

次

調査	研究の目的	•••••
2 調査	研究の実施体制	
3 調杏	研究の内容	
,	調査研究に至る経緯	•••••
第2章	空洞調査及び社会インフラモニタリング・ニーズの検討	
2.1	都市部における空洞調査ニーズ	
2. 2	空洞調査及び社会インフラモニタリング・ニーズの検討	
第3章		
3.1	物理探査技術の現状	
3. 2	ジオトモグラフィ技術	
3.3	現状技術のまとめと本研究の位置づけ	
第4章	ミュー粒子を利用した調査技術	•••••
4. 1	ミュー粒子の概要	•••••
4. 2	ミュー粒子を利用した既存の研究開発	
4.3	ミュー粒子を利用したトモグラフィ技術	
第5章	理論解析結果	•••••
5.1	解析の目的	
5.2	解析方法	•••••
5.3	解析結果	•••••
5.4	解析結果の評価	•••••
第6章	試作機の製作	•••••
6.1	設計	•••••
6.2	試作機の構成	•••••
6.3	外観等	•••••
第7章	地上における実験	•••••
/.1	試作機による誤差の検証	•••••
7.2	計測時間による再現性	•••••
7.3	検出器間の距離(空間分解能)と誤差の関係	•••••
7.4 7.5	至 <u>内</u> 夫颗	•••••
/.3) (上) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1	•••••
弗 õ 早 0 1	地下にわける夫衆 字段日的	•••••
0.1 0.2	天映日り 宝殿坦の畑亜	•••••
υ. Ζ ϼ ?	大峽吻 27風女 宝驗方注	•••••
0.0 8 /	大吹刀は	•••••
0.4	大阪中へ	•••••

1 調査研究の目的

地下の人工的な交通手段や管路、地下工事などが地中の空洞発生を誘引し、この空洞の成長が 進行して地上の陥没と事故を生じる例が近年多く報告されている。陥没を引き起こす地中の空洞 化は地表から調べる完全な方法が現状では存在しない。陥没事故を事前に発見する調査システム がなく、事故後に空洞充てんや修復が行われているのが現状である。特に、地中施設側からの探 査が困難である。一方、地上からの探査では産業施設、埋設管等の直下の探査は困難であるだけ でなく、都市部においては様々なノイズが問題となり、既存技術の適用が難しい面がある。本調 査研究はこれらの課題を解決するために、自然宇宙線のミュー粒子を利用した機械システムの要 素技術の確立を目指すことを目的とする。

2 調査研究の実施体制

本調査研究は、(財)機会システム振興協会の委託を受け、その中にある「総合システム調査開 発委員会」の審議を受けつつ、(財)エンジニアリング振興協会の中に「ミュー粒子の工学応用に よる地中空洞化調査システムに関する調査研究委員会」を設置し、調査研究目標の設定と研究計 画・実験計画の作成検討及び研究の解析に関する指導と評価を受けながら実施した。委員会のメ ンバーは、(独)産業技術総合研究所、東京大学工学部、東京地下鉄(株)、東京電力(株)、飛島建 設(株)、川崎地質(株)、以上産学の有識者により構成される。本調査研究の実施体制を図 2-1 に示す。委員会の指導のもと地下開発利用研究センター内の研究員より構成されたワーキンググ ループが中心に作業を実施した。本再委託業務は調査研究の内容のうち、現地実験、測定及び解 析などについて実施したものである。



図 2-1 本調査研究の実施体制

総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同·敬称略)

- 委員長
 東京大学
 藤 正
 巖

 名誉教授
- 委員 埼玉大学
 太 田 公 廣

 総合研究機構

 教授
- 委員 独立行政法人産業技術総合研究所 金丸正剛 エレクトロニクス研究部門 研究部門長
- 委員 独立行政法人産業技術総合研究所 志 村 洋 文 デジタルものづくり研究センター 招聘研究員
- 委員東北大学
 工学研究科
 中島一郎

 教授
- 委員東京工業大学大学院 廣田 薫

 総合理工学研究科

 教授
- 委員東京大学大学院
 藤岡健彦

 工学系研究科
 准教授
- 委員東京大学大学院
 大和裕幸

 新領域創成科学研究科

 教授

ミュー粒子の工学応用による地中空洞化調査システムに関する調査研究委員会 委員会名簿

(順不同・敬称略)

- 委員長 東京大学大学院 新領域創成科学研究科環境システム学専攻 徳永 朋祥 准教授
- 委員 東京大学大学院工学系研究室エネルギー・資源フロンティアセンター 松島 潤 准教授
- 委員 放射線地学研究所 湊 進 代表
- 委員(独) 産業技術総合研究所古宇田産学官連携コーディネーター
- 委員 東京地下鉄㈱ 鉄道本部 改良建設部改良建設企画課 大石 敬司 課長
- 委員 東京電力 電力流通本部工務部設備渉外・調整グループ 竹内 友章 マネージャー
- 委員 飛島建設㈱ 土木事業本部土木技術部重点分野推進グループ 高橋 工 部長
- 委員川崎地質㈱ 事業本部 探査技術部 久保田 隆二 部長
- オブザーバ 経済産業省 経済産業政策局地域経済産業グループ 小宮 康則 産業施設課課長補佐
- オブザーバ 経済産業省 製造産業局産業機会課国際プラント推進室 高井 久美子 プラント貿易調査係長
- 事務局 (財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 東谷 謙 技術開発第一部 主任研究員
- 事務局 (財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 加藤 猛士 技術開発第一部 主任研究員

3 調査研究の内容

本調査研究の主な実施内容は以下のとおりである。

(1)開発動向の調査及び測定対象の検討

- (2)計測システムの検討
- (3) 測定方法と解析技術の研究
- (4)要素技術の整理と実用化課題研究

これらのうち(1)については、第1章から第4章にかけて開発動向の調査及び測定対象の検討を行った。(2)については第5章の理論解析の結果に基づき第6章において試作機の製作についての検討を行った。(3)については、第7章及び第8章において実験結果をもとに測定方法と解析技術の研究を行った。(4)については4において調査研究の成果としてまとめるとともに5において課題の抽出を行った。

第1章 調査研究に至る経緯

(1)調査研究の独自性

これまでミュー粒子を工業的に利用する試みはほとんどなされていない。ミュー粒子の透過 力・直進性を利用すれば、放射線源不要・移動自由・安全無害な非破壊探査機械システムを構築 することが原理的に可能である。また、都市部における交通振動や電気的ノイズにも耐性があり、 信頼性が向上する。分解能についても従来技術と同等以上の確保できる可能性がある。地上から の探査では把握することが困難な地中空洞を地下施設側から探査し、トモグラフィ解析を応用し て地中の可視化技術を研究する。

(2)本調査研究テーマの位置付け

従来技術である比抵抗二次元探査法による空洞の探査は、水で飽和されている場合や、地下施設の直下の検出が困難である。弾性波探査(反射法)では分解能が不足する。両者とも都市における人工的(振動、電気)ノイズの影響も障害となっている。地中レーダは測定分解能が高いが深度数mが限界であり、その他の方法でも同様である。一方、本調査研究で開発しようとする技術はエネルギー損失が物質の密度のみに依存する量を扱うため、原理的には分解能とノイズ耐性の課題を解決し、有効な新技術となりうる。

(3)内外の調査研究・開発状況

ミュー粒子を利用した探査方法については、秋山ほか(1991)で大型構造物の非破壊検査を目的 とした機器調査が行われたが、可視化技術には至っていない。理学的な研究では火山体の内部調 査が試みられている(田中ほか、2008)が、地中の空洞を定量的に調査する研究は世界に例がな く、本調査研究は世界的な先進技術である。

1調査研究の背景と目的

特に都市域においては既存の地下道や下水管、洞道等の地下構造物上方で地盤がゆるみ、空洞 が発生成長し、地表の陥没を引き起こす、あるいは建物が傾くなどの被害が多く報告されている。 こうした例でも、建物や施設の下の空洞発生は、これらの建物がある限り地上からは調査できな いので、地中から調査する技術が実現すればこのような課題を解決することができる。 ②災害の現状一地盤陥没の発生条件と発生地域

都市の陥没を招き、安全を脅かしている地下の未知空洞の存在原因は下記に大別される。

①地下の施工に由来する地下地盤のゆるみ・空洞の発生と成長による空洞

②工業原材料及び燃料採取坑道その他未確認の空洞

③埋没谷や地下水の流動による空洞の発生

地中深くに発生・成長している空洞あるいは建物や工場等の地下に存在する空洞は、その位置

を特定することも難しい。都内の国道や都道(環七、環八、外堀通りなど)の陥没を事前にチェ ックすることも求められており、これらの陥没原因は地上から調査することが極めて難しい。そ こで、例えば幹線道路下の地下鉄や地下道、共同溝などを利用して調査する方法が必要となる。 地盤変状による災害を未然に防止するために、地表の陥没や変状を招く地下の空洞を調査診断

する技術システムとこれによる防災が経済産業省、地方整備局などの省庁と自治体等で求められ ている。しかし、これに対応する調査技術は下記に示すように、地表の舗装や地中埋設管・地下 水ならびに探査深度等により限界があるため、現状では有効な調査システムが実現していない。

本調査研究はこれまで工学的に利用されることのなかった自然宇宙線のミュー粒子を利用して、 地下空洞を調査する機械システム技術の実現を目指し、ミュー粒子の角度分布を測定する装置と その解析・可視化技術のブレークスルーを実現する。

第2章 空洞調査及び社会インフラモニタリング・ニーズの検討

2.1 都市部における空洞調査ニーズ

東京都建設局によれば、空洞調査により発見された路面化の空洞は平成17年度で82と報告されている(図2.1-1)。

空洞の発生原因は様々であるが、地下施設の老朽化などもその一因と考えられている。古い管路などでは亀裂などに土粒子が入り込み、長い年月の間に管路上部に空隙が発生し、やがて空洞に成長する。ひとたび空洞が発生すると空洞上部が崩れて徐々に地表近くに達し、陥没を引き起こす(図 2.1-2)。

管路や埋設物だけでなく、採掘跡などの空洞が風化や劣化して陥没を引き起こすこともある。 有名な事例では大谷石の採取場跡地における大規模陥没である(図 2.1-3)。陥没の原因は様々で あるが、地方都市においても空洞による陥没事故報告は後を絶たない(図 2.1-4)。

地下に発生する空洞は深さ数十 cm から地下施設のある深さ(~40m 程度)までであるが、災 害の原因となる地中の空洞を調査する技術は従来の延長上では様々な制約や限界が多く、適用範 囲が限られている。陥没を引き起こす原因となる地下の管路や地下道・洞道等を活用し、地中の 状況とそれによる空洞の存在を調査する機械システムが実現することにより空洞調査の問題点を 解決できる。さらに、建物や産業施設などの地下は、地中にどのような状態が発生しても、現状 技術ではボーリングも探査も適用できない。従って、従来の技術の延長とは根本的に異なる探査 手法が必要となっている。

老朽化した下水管などの内部から空洞を検知するには、管の周りのコンクリート中の鉄筋が障 害となって探査が困難である。管路に接している空洞のみは地中レーダ探査によって検出が可能 であるが、管路と地表との間の空洞化を調べる方法は現状では存在しない。直径の大きい下水の 幹線などではシールド工法を採用することが多く、この場合は鋼製のセグメントと呼ばれる殻が 障害となって地中レーダ探査も適用できない。



ミュー粒子を利用した地盤探査システムが実用化されれば、これらの課題を克服することが可 能となる。

http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/tokyotown/2006_9_10/feature.html

図 2.1-1 東京都建設局による空洞調査数量と発見された空洞数の履歴

東京都では、下水管の老朽化による陥没事故が年間約1,400件発生するなど、下水道施設の老朽化対策が問題 下水道の機能を維持するとともに施設の破損による不測の事態を防ぐため、計画的な改築・更新は不可欠



http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/data/02-07.pdf

図 2.1・2 下水管の老朽化による都内中心部での道路陥没事例



http://home.catv-yokohama.ne.jp/kk/cyuta/works/Ooya/Ooyaishi03.htm

図 2.1-3 大谷石採取場跡地の大規模陥没





A県における道路陥没事例(平成14年11月)

T市住宅地陥没事例(平成18年7月)



- 2008年5月17日 三重県津市で空き地陥没(約3m四方、深さ約2m)。
 亜炭鉱跡が原因? [読売新聞他]
- 2008年5月5日 大阪府阪南市の道路で陥没(幅4m、長さ8m、深さは最大3m)。
 <u>地下の雨水管が原因?</u> [産経新聞 他]
- ③ 2008年4月23日 埼玉県川口市 JR京浜東北線のレール下に円状の陥没 (直径45cm、深さ約1m)。近くの地下トンネル道が原因? [読売新聞]
- ④ 2008年4月15日 神奈川県川崎市 シールド工法で施工中の市道が陥没 (長さ40m、幅40cm、深さ2m)。 [日経新聞 他]



図 2.1-4 地方都市における空洞陥没事故報告事例

2.2 空洞調査及び社会インフラモニタリング・ニーズの検討

社会インフラとして整備されている地下鉄、電気・ガス・水道管などの管路、あるいは地下施設の老朽化により、地盤が空洞化して社会インフラに被害を及すことが多数報告されている。地下施設の管理者側からも空洞がない健全な状態を確認したいというニーズがある。しかし、現在の物理探査手法では、図2.2-2のような地下施設直下の空洞を調べる方法が現実的には存在しない。 ミュー粒子を用いた地盤探査システムが実現すれば、地下鉄や管路の上部に検出器を設置することで、社会インフラ・地下施設の健全性を確認し、長期にわたってモニタリングすることが可能となる(図2.2-1)。

また、図 2.2-2 のような地下施設下の空洞については、鉄筋コンクリートを透過しその下を調べる方法がない。

ミュー粒子は鉄筋コンクリートも透過するので、これを応用した空調化調査システムが実現す れば、このようなニーズに応えることができる。



図 2.2-1 社会インフラ・地下施設の健全性モニタリングの概念



図 2.2-2 既存施設地下の空洞調査方法

第3章 現状の地盤探査技術

3.1 物理探査技術の現状

地下の空洞調査に対してはこれまで様々な探査法が考えられ、開発の努力が重ねられてきた。 我が国は地盤調査技術が世界的にもリードするレベルで進歩を遂げてきた。しかし、未知の地下空 洞調査には万能かつ完全な方法が実現していないのが現状である。表 3.1-1 に空洞調査における 現状の物理探査技術の概要とその問題点を整理した。

空洞調査における物理探査技術は、探査深度や分解能(この場合は、どれくらいの大きさの空 洞までとらえられるか)によって様々な探査手法を使い分ける必要がある。しかし、現状の探査技 術では、必要とする探査深度及び分解能を満足しない探査の空白域があるといわれている(図 3.1-1)。

探查手法	探查深度	分解能	都市部におけるノイズ耐性
①表面波探查	20m	探査深度の 1/3 以上の大	鉄道・道路交通や工場などの微振動
		きさの大空洞のみ対象	の影響を受けるので信頼性に制約が
		となる。	ある。
②電気探査	30m	数m~10m	金属類や地下水の他に、地中の迷走
		送電線、ガードレールや	電流などの影響を受ける。
		埋設管、地下水等の影響	
		による。	
③重力探查	50m	数 m~10m	振動(風を含む)や地形(大規模構造
		ごく大雑把な検知であ	物)の影響を受ける。
		る。	
④パルス波	3m	20cm、但し浅い空洞に	都市に通常存在する外来電磁波ノイ
地中レーダ探査		限る。	ズの影響を受ける。
⑤連続波	最大で 10m 程度、探査深	条件に恵まれれば	外来電磁波ノイズの影響を受ける。
地中レーダ探査	度の向上が進みつつあ	1m 程度の空洞も検出可	また導電性の高い地盤の中や鉄板・
	り、実用化に近い。	能な場合がある。	鉄筋の下方は検出できないことが課
			題である。
⑥弾性波探査	数十~100m	10m 程度以上の大規模	交通や工場などの振動の影響を受け
(反射法)		空洞に反応する。通常問	る。
		題となる空洞は検出困	
		難である。	

表 3.1-1 空洞調査における現状の物理探査技術較

※)探査深度・分解能は何れの手法も空洞調査を目的とした場合

各探査の概要

- ① 表面波探査:地表面を起振し、地表に設置した複数の地震計によって受振した表面波の位相速度から S 波の構造として地盤の深度方向の速度構造を求める。
- ② **電気探査**:地表に電極を設置して地中に電流を流して生じた電位差を測定して地中の比抵抗分布を求める。
- ③ 重力探査:重力計により重力分布を求め、地中の密度構造を求める。
- ④ パルス波地中レーダ探査:地中に電磁波(パルス波)を放射して地中の電気的特性が異なる境界面からの 反射波をとらえて空洞等を推定する。
- **⑤ 連続波地中レーダ探査**:周波数を変化させた電磁波を放射して反射波をとらえる。
- **⑥ 弾性波探査(反射法)**:地中に弾性波を発射し、地中の音響インピーダンスが異なる境界面からの反射波を とらえ、反射断面を求める。



出典;(社)全国地質調査業協会連合会、防災・維持管理分野における物理探査の適用、ワ ーキンググループの活動報告(2006.9.21)より抜粋

図 3.1-1 空洞調査における現状の物理探査の空白域

都市部においては、振動や電気ノイズなどにより物理探査の適用が限られるという問題もある。 例えば、表面波探査や弾性波探査反射法などは工場や交通の振動、電気探査では送電線による誘導 電流などがノイズとなる。あるいは埋設物が影響して目的が達成できない場合もある。

通常の物理探査は地表面から行うため交通規制を伴うため、特に都市部においては渋滞などを 引き起こすなどの課題も抱えている(図 3.1-2)。



地下施設の老朽化などにより空洞 の発生件数が年々増加している。

都市部においては道路面から10m 以上の深いところの空洞を調査す ることは非常に難しい。また渋滞を 引き起こすなどの弊害が生じてい る。

※ 路面下の空間を放置しておくと、時間の経過とともに大きくなって、道路の場合も道路俗役の原因となる。 3m以深の空同調査・調査方法は未確立であり、現状技術の中で最新の地中レーダ調査についてその有効性を 調査している。また、地上から調査する方法では、地上の道路交通章書やノイズ障害等の問題がある。 (写真:東京都建設局ホームページ http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/tech/02.html)

図 3.1-2 陥没予知のための空洞調査の現状実施状況

3.2 ジオトモグラフィ技術

ジオトモグラフィ(Geotomography)は、コンピュータ技術の発展に伴って、我が国では20年ほど前に実用化された。

医療におけるX線CT(Computed Tomography)に代表されるように、内部が不可視の対象 物を断層で切ったように画像化する技術をトモグラフィという。この技術によって人体をあたか も輪切りにしたかのような切断面画像を高い分解能で見ることができるようになった。

これを地盤に応用したのがジオトモグラフィである。ジオトモグラフィは地表部を使うことも あるが、通常はボーリング孔間で行われるものを指す。ジオトモグラフィは弾性波・電磁波・比抵 抗の3種類が一般的に使われ、それぞれ弾性波トモグラフィ、電磁波トモグラフィ、比抵抗トモグ ラフィと呼ばれる。

(1)ジオトモグラフィの概要

図 3.2-1 にジオトモグラフィの原理を示す。ボーリング孔間またはボーリング孔と地表を利用 して行われる。弾性波トモグラフィと電磁波トモグラフィでは弾性波(地震波と同じ)または電 磁波を地下に伝播させたときの到達時間と振幅(強度)を測定する。比抵抗トモグラフィでは電 流を流して、電位(電圧)を測定し、これを比抵抗に換算する。対象とする断面はセルと呼ばれる ブロックに分割され、各セルを通過する伝播時間(または振幅)を計算する。発振(または発信) 点と受振(または受信)点を結んだ線を波線という。



(2) ジオトモグラフィと医療用 CT 及びレントゲンとの相違

ジオトモグラフィと医療用 CT とは次のような点が異なる。

①人体の構造・物性値には個体差がほとんどないが、地盤は構造が多様で物性値も多様である こと

②人体を全方位から取り囲んで測定する。全方向から対象地盤を取り囲む測定は困難である。 ③X線は弾性波や電磁波等より波長が短く、分解能が高い。

④数万以上のデータを取得する X線 CT に対し、測定データ数に上限。

図 3.2-2 に示すように、ジオトモグラフィでは対象物を完全に取り囲むことができないため、デ ータの密度に偏りができ、これにより偽像が生じる場合もある。



図 3.2-2 医療用 CT とジオトモグラフィの違い(物理探査学会、2004)

CT と同様に人体を透視する技術としてレントゲンがある。X 線の発生装置(X 線源)からでた X 線が体を透過し、内部を透視することができる。しかし、CT と比べると図 3.2-3 に示すように 奥行き方向がわからないという欠点がある。

第4章に示すラジオグラフィはレントゲンと同様の技術であり、トモグラフィとは異なる。



空洞が奥行き方向のどこにあるかわからない →AとBの区別がつかない ⇔AでもBでも下の図のようになる

図 3.2-3 レントゲンの限界

3.3 現状技術のまとめと本研究の位置づけ

現状の物理探査技術とミュー粒子による空洞探査のイメージを図 3.3-1 に示す。ミュー粒子は 透過した媒質の密度と長さ及び鉛直からの角度(これを天頂角という)によって計数(カウント 数)が異なることが知られている。逆にカウント数と天頂角及び透過距離がわかれば密度を推定 することができる。

ミュー粒子による探査では、振動や誘導電流などの外部ノイズに左右されることなく探査を行 うことができる。また、ミュー粒子には直進性があるため、反射や屈折を考慮する必要がない。 そのため複雑な計算を必要とせず、トモグラフィ解析の計算時間も短くて済む。

探査深度は、原理的に 100m 以上が可能である(ただし、計測時間による)。分解能については 計測時間や計測方法にもよるが、0.5~1m を目標として研究開発を行う。これにより従来探査の 空白域となっていた領域の探査が可能となる(図 3.3-2)。



探査深度が深い、人工ノイズの影響がない





出典;(社)全国地質調査業協会連合会、防災・維持管理分野における物理探査の適用、ワ ーキンググループの活動報告(2006.9.21)に加筆 図 3.3-2 ミュー粒子探査による空白域の補間

図 3.3-3 に示すように、探査領域を網羅するような透過経路を設定して計測を行い、ジオトモ グラフィ技術と組み合わせることにより地下の空間より上の部分の断面画像を得ることができる。 さらに、ミュー粒子は透過した物質の密度のみに依存し、ジオトモグラフィ解析により密度分 布断面を得ることが原理的に可能である。他のジオトモグラフィでは土木設計に適用できる物性 値に換算する必要があるが、ミュー粒子による探査では設計に適用できる物性値を直接得ること ができる。



地表

図 3.3-3 ミュー粒子によるジオトモグラフィのイメージ

また、現状の物理探査技術では、空洞の内部が水で満たされているか、空気で満たされている かによって同じ探査結果でも判定が異なる(例えば、電気探査では空洞が水で満たされていれば 低比抵抗、空気の場合は高比抵抗としてあらわれ、地中レーダの場合には空洞内部が水か空気か で反射波の位相が反転する)。現状の物理探査技術では、空洞の判定には先見情報(特に地下水面 の位置・深度)が必要である。ミュー粒子を用いた地盤探査では密度を求めることができるため、 先見情報がなくても空洞内部が水か空気かに関わらず(いずれの場合でも空洞の密度は地盤より 小さい)検出が可能である。

以上の検討からミュー粒子による探査では

- ① 従来の探査技術ではできなかった空洞探査の空白域の探査が可能となる
- ② 反射や屈折を考慮した複雑な解析が必要ない

③ 土木設計に適用できる密度を直接的に得ることができる などの現状技術にはない優位性を期待することができる。

第4章 ミュー粒子を利用した調査技術

4.1 ミュー粒子の概要

ミュー粒子(muon)は、素粒子のひとつで宇宙から降り注ぐ自然放射線(宇宙線)に含まれている。宇宙空間には、ほとんどが a 粒子(ヘリウムの原子核)や陽子からなる一次宇宙線が飛び交っている。これが大気に入射すると、大気中の分子と衝突して様々な素粒子を発生させる。図 4.1-1 に示すように、シャワーが降り注ぐように見えるため、「宇宙線シャワー」と呼ばれる。

このうちミュー粒子はエネルギーが高い(電子の約200倍)上、寿命も長いので、地表あるい は地中にまで到達する。ミュー粒子は電子と同じ大きさの電荷を持つ荷電粒子(ただし、正と負 の両方が存在)であるため、地球磁場に引き寄せられる。また、上空に行くに従ってその数が増 える。そのため、高緯度ほど、高地ほどその量が増加する。



図 4.1-1 宇宙線シャワー(http://www.ysc.go.jp/ysc/info/g4740.html に加筆)

表 4.1-1 に代表的な素粒子の物質中の透過距離を示す。電子や X 線の透過距離は最大でも数 m であり、非破壊検査や医療用に利用されている。物質中の陽子・中性子・π 中間子は数m程度の 距離を透過するが、不安定であり、検出も難しい。ニュートリノは地球をも透過するほどのエネ ルギーを有しているが、検出することが難しい。一方、ミュー粒子は 100m 以上の透過距離を実 現でき、検出することも容易である。具体的な物質中の素粒子の透過距離を表 4-1.2 に示す。ミ ュー粒子の透過能力が格段に優れていることがわかる。

粒子	透過距離(m)
電子·X 線	数mあるいはそれ以下
陽子・中性子・パイ中間子	10m以下(不安定、検出困難)
ニュートリノ	地球規模(検出困難)
ミュー粒子	100~1000m(検出容易)

表 4.1-1 代表的な素粒子の相互作用と透過距離(Nagamine, 2003 より)

物質名	粒子	透過距離(m)		
鉾	ミュー粒子	100m 以上		
<u>ж</u> л	陽子·電子	0.1m		
出去	ミュー粒子	1000m 以上		
灰米	陽子·電子	0.5m		
74	ミュー粒子	5000m 以上		
	陽子·電子	1m		

表 4.1-2 素粒子の透過能力

ミュー粒子は、常に存在する放射線であり、人体には全く無害である。放射線を取り扱うため の法の規制を受けることなく、安定した線源として利用することが可能である。

ミュー粒子は、地表付近での強度が既知であり、日本の海抜ゼロメートルでは、図 4.1-2 に示 すとおりである。太陽の活動や超新星の爆発などにより宇宙線の量は変動するが、海抜ゼロメー トル付近で±5%以下であり、一定と考えてよい。

またミュー粒子は、物質中でも直進するため、屈折や反射などを考える必要がない。コンクリ ート中の鉄筋などのように極めて微小な散乱が生じることもあるが、地下の計測においてはその 効果を考慮する必要はない。



図 4.1-2 日本の海抜ゼロメートルでのミュー粒子強度(湊ほか、1983)

4.2 ミュー粒子を利用した既存の研究開発

(1) ピラミッドでの探査

ミュー粒子を利用した探査で最も有名なものは、Alvarez により行われたエジプト・ギザ大地の 三大ピラミッドでの事例である(Alvarez et al., 1970)。ピラミッドの未知の空間を探査するため に、地下の広間に検出器を置いて数ヶ月間計測した。結果的に未知の空間は見つからなかった。

(2)ミュー粒子による非破壊検査技術

図 4.2-1 に名古屋工業技術試験所の屋内と屋外でミュー粒子を計測した事例を示す。計測器は 全方位からのミュー粒子を測定し、理論曲線と比較することにより、建物のかさ密度 0.5g/cm³を 得ている。



図 4.2-1 建物での計測結果(Minato, 1986)

②地下鉄での測定

図 4.2-2 に名古屋市営地下鉄での計測事例を示す。ミュー粒子の強度と地下鉄の深度が対応し ている。



図 4.2-2 地下鉄での計測結果(湊、1992)

(3)火山体ラジオグラフィ

火山体を透過したミュー粒子を検出して火山体内部を透視する試みが行われている。直交する 2 方向に配置したシンチレーションカウンタを使用し、交わったところで検出されたミュー粒子 の位置から、火山体内部を透視する。ミュー粒子を使った巨大なレントゲンである(図 4.2-3)。



直交する2方向を組み合わせ、鉄板2枚を挟む



図 4.2-3 火山体ラジオグラフィの原理と観測装置(田中、2007;田中、2008)

(4)高炉内観察技術

高炉内部の溶融状態や炉底の耐火煉瓦の劣化状況などを把握するため、ミュー粒子を利用した 内部観察技術が考案されている。浅間火山のシステムと同様のラジオグラフィ技術である。図 4.2-4 に装置の概要と密度の推定結果事例を示す。



図 4.2-4 高炉内観察装置(左)と密度推定結果(松崎ほか、2007)

(5)土壌水分量の推定

ミュー粒子を利用して土壌水分量を計測する試みも行われている。2 つの検出器の間に土質試料を挟んで、同時計数を行う。空隙を水分が満たすと密度が増加するため、ミュー粒子のカウント数が増加する性質を利用している。

(6)高密度物体での散乱を利用したラジオグラフィ

ウラン、タングステン、鉛など特定の高密度物質内部でミュー粒子の微小な散乱を利用し、内 部を透視するための数値シミュレーションが行われている。車載された核物質や危険物を検知す ることを目的として研究が行われている。

(7)ミュー粒子角度分布測定

大型の構造物の非破壊検査用にミュー粒子の角度分布の測定を利用した試みも報告されている。 図 4.2-5 にその結果を示す。土被りに応じたカウント率(図中では計数率)の理論値が、実測値 と整合していることが示された。



図 4.2-5 トンネル内でのミュー粒子角度分布測定事例(秋山ほか、1991)

4.3 ミュー粒子を利用したトモグラフィ技術

以上紹介した既存技術は、そのほとんどがラジオグラフィというレントゲンに近い技術であり、 トモグラフィ解析まで行っている事例は現時点では報告されていない。ラジオグラフィは、見え ないところを可視化する技術として非常に有効な技術であるが、医療用レントゲンと同様に奥行 き方向の情報が得られないという課題がある。

本調査研究では、既存のミュー粒子の計測技術とトモグラフィ解析技術を組み合わせることに より、CTと同様の効果を狙い、最終的に三次元的な地盤の可視化を実現することを目的としてい る。

第5章 理論解析結果

5.1 解析の目的

図5.1-1に、一様な地盤中に空洞がある場合の計数と天頂角の関係を示す。空洞がある方向では、 地盤によるミュー粒子の吸収がないため計数が増加する。空洞がない場合には、天頂角に応じた 計数があらわれる。

本理論解析では、空洞を検出することができるカウント数と測定時間の関係を明らかにすること、 空洞の大きさと土被りの関係から、空洞の検出分解能を検討することを目的として、理論値の計 算を行う。



図 5.1-1 ミュー粒子による空洞検出の原理

5.2 解析方法

(1)解析理論

計数の解析には湊(1992)及び三宅(1979)を用いた。便宜上、前者を湊の式、後者を三宅の式と呼ぶことにする。

湊の式は次式であらわされる。

$$I_{\mu}(h,\theta) = I_{\mu 00} \cos^{n} \theta \cdot \exp\left(-\frac{h}{\Lambda(h)}\right)$$
(5-1)

ここで、 $I_{\mu}(h,\theta)$ (/cm²/s/sr)は単位面積、単位時間、単位立体角あたりのミュー粒子計数、hは面 密度(hg/cm²)、 θ は天頂角である。 $\Lambda(h)$ 及びnは次式であらわされる。

$$\Lambda(h) = A + Bh + Ch^2$$

$$(5-2)$$

 $n = \alpha + \beta h$

(5-1)、(5-2)式の係数は以下で与えられる。

 $I_{\mu 00} = 0.00723$, A = 17.61, B = 0.1404, $C = -7.069 \times 10^{-5}$, $\alpha = 1.495$, $\beta = 0.002018$

なお、面密度の補助単位 h はヘクト(100 倍)である。面密度 h は、単位面積あたりの重量

 $h = \rho \ell \tag{5-3}$

であらわされる。ただし、ρは密度、ℓは透過距離(m)である。例えば、水(密度 1.0g/cm³)で あれば、面密度 1h/cm²は 1m の水深、密度 2.0 g/cm³の岩石では 0.5m に相当する。湊の式は、 浅い部分での実測値と良く整合することが知られている。

地中深い場合は、三宅の式を用いた。

$$I_{\mu}(h,\theta) = \frac{A_{M}}{h+H} \left(h\sec\theta + a\right)^{-\alpha} \cdot \exp\left(-\beta h\sec\theta\right)$$
(5-4)

ただし、

 $A_{M} = 174$, H = 400, a = 11, $\alpha = 1.53$, $\beta = 8 \times 10^{-4}$

である。浅い場合と深い場合の区分は鉛直距離の面密度 h_pが

 $h_D = 6.613 \exp(0.02\theta)$ (5-5)

より小さい場合は湊の式、以上の場合は三宅の式を用いた。

計算方法は、モンテカルロ法(乱数を用 いて行う数値計算法)を用いて、検出器が 張る立体角内で1000方向を乱数で選んで 計算した。ただし、計算の簡略化のために ミュー粒子の波線は検出器の中心を通る ように設定した。

空洞を横切るパスの長さの計算には近似 はいっさい使われておらず、厳密に検出 器立体角の円錐が円筒を切り取る形の 平均的長さで計算した(図 5.2-1)。



(2)地盤モデル(空洞及び幾何学的条件)

都市部の地下空間で計測することを考慮して、本解析では土被りを 40m までとし、空洞の直径 を 0.5m から最大 4m とした(ただし、土被り 5m に対して空洞の直径を 4m とするのは現実的で ないので割愛した)。空洞の形状は円筒形とし、空洞中心位置は土被りの 1/4、1/2、3/4 とした。 空洞の位置は、観測坑道の真上だけでなく天頂角 30 度と 60 度の方向についても検討した。なお、 地盤の密度は 2.0g/cm³、空洞の密度は 0.0g/cm³、観測坑道の直径は 2m とした。図 5.2-2 に地盤 モデルを示す。天頂角の範囲は 0 度から 80 度までの範囲を 5 度刻み、測定時間は各点 24 時間と した。天頂角は真上を 0 度とし、水平に近づくほど大きな値で表される。また、空洞がない場合 についても解析を行い、空洞がある場合と比較した。理論解析モデルの一覧を表 5.2-1 に示す。 全部で 139 通りである。

検出器は後述する試作機に合わせて、直径 ϕ 350mm、検出器間距離 2m とした。



図 5.2-2 地盤モデル

表 5.2-1	理論解析モデルー	·覧
---------	----------	----

										土袖	皮り								
				5	m			10)m			20)m			40)m		
				空洞の	り深度	-		空洞の深度			空洞の深度			空洞の深度					
			1	無	1.25	2.5	3.75	無	2.5	5	7.5	無	5	10	15	無	10	20	30
	無	-	-	0	—	_	—	0	_	_	-	0	_	_	_	0	-	-	_
	I	角	0°	—	0	0	0		0	0	0	_	0	0	0		0	0	0
	♦ 0.5m 空洞天頂1	洞天頂	30°	_	0	0	0		0	0	0	_	0	0	0	1	0	0	0
		玜	60°	_	0	0	0		0	0	0		0	0	0	1	0	0	0
		角	•0	—	0	0	0		0	0	0	_	0	0	0		0	0	0
tu	∲ 1m 闹天頂	洞天頂	30°	_	0	0	0		0	0	0		0	0	0	1	0	0	0
司の大き		玜	60°	_	0	0	0		0	0	0	_	0	0	0		0	0	0
		角	•0	_	0	0	0		0	0	0	_	0	0	0		0	0	0
	φ 2m	洞天頂	30°	_	0	0	0	_	0	0	0	_	0	0	0	_	0	0	0
		弫	60°	_	0	0	0	_	0	0	0	_	0	0	0	_	0	0	0
		角	0°	_	_	_	_	_	0	0	0	_	0	0	0	_	0	0	0
	φ 4m	洞天頂	30°	_	_	_	_	_	0	0	0	_	0	0	0	_	0	0	0
		苙	60°	_	_	_	_	_	0	0	0	_	0	0	0	_	0	0	0

5.3 解析結果

空洞がない場合との差(残差)を図 5.3-1 に示す。2σを越えた場合を空洞検出可能と判断した。 グラフ上には空洞の断面図と、検出できた空洞を赤丸で、できなかった空洞を色の薄い赤丸で示 した。



図 5.3-1 土被り 10m の残差

5.4 解析結果の評価

(1)空洞検出能力の評価

カウント数の残差が、複数の天頂角で 2σ を越えた場合に空洞検出可(〇)、1 点だけが超えた場合を検出可能性あり(Δ)と判定し、下回った場合は不可(×)としたた。表 5.4-1 にまとめて示す。

			上被り												
					5m			10m			20m			40m	
			空洞の深度		空洞の深度			空洞の深度			空洞の深度				
			1.25	2.5	3.75	2.5	5	7.5	5	10	15	10	20	30	
		角	00	\bigtriangleup	0	0	×	×	\bigtriangleup	×	×	×	×	×	×
	$\substack{\phi \ 0.5 \\ m}$	间天頂	30°	×	\bigtriangleup	\bigtriangleup	×	×	×	×	×	×	×	×	×
			60°	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		角	0°	0	0	0	\bigtriangleup	0	0	×	×	×	×	×	×
	∲1m 空洞天頂	洞天頂	30°	0	0	0	\bigtriangleup	\bigtriangleup	0	×	×	×	×	×	×
さき		鉙	60°	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
空洞の		角	00	0	0	0	0	0	0	\bigtriangleup	0	0	×	\times	\times
	∲ 2m 闹天頂	洞天頂	30°	0	0	0	0	0	0	\bigtriangleup	\bigtriangleup	0	×	×	×
		铅	60°	0	0	0	×	0	0	×	×	×	×	\times	\times
		角	0°		_		0	0	0	0	0	0	\bigtriangleup	\bigtriangleup	0
	φ 4m	洞天頂	30°	_	_	_	0	0	0	0	0	0	×	\bigtriangleup	0
			60°	_	_	_	0	0	0	\bigtriangleup	0	0	×	\times	×

表 5.4-1 空洞検出能力一覧

*)この結果は、今回与えた地盤モデルと計測時間 24 時間/角度のときの 評価あり、計測時間が異なる場合は結果が異なる可能性もある。

この表から、以下に示すことがわかる。

①何れの深度でも天頂角 60 度にある空洞は検出が難しい。

②土被りが大きい場合、観測坑道から近い空洞ほど検出し易く、離れると検出し難い(土被 りが小さい場合はほとんど影響がない)。

③土被り 10m で 1m 以上、20m で 2m 以上、40m では 4m 以上(土被りの 1/10)の洞は検出できる(計測時間 24 時間/1 点の場合)。

観測坑道と空洞との距離により検出能力は 若干異なるが、以上をまとめると図 5.4-1 となる。



図 5.4-1 土被りと天頂角に対する空洞検出分解能

(2)計測時間と土被りの関係

空洞がない場合の天頂角とカウント数の関係を土被りごとに図 5.4-2 に示す。土被りが 2 倍に なるとカウント数は約半分になることがわかる。

図 5.4-2 を土被りに対するカウント数としてあらわしたのが図 5.4-3 である。 天頂角が大きくなり、特に 50 度を越えるとカウント数は著しく少なくなる。

9000

8000

7000

イン 4000 イン 3000

2000

1000

٥

0

図 5.4-3

•

10

20

土被り(m)

土被りとカウント数の関係

₩ 4000 0度

10度

20度

30度

40度 50度

60度

70度

80度

40

30

図 5.4-4 には図 5.4-3 のカウント数から計算した変動係数を示す。



図 5.4-2 天頂角とカウント数の関係



図 5.4-4 土被りとカウント数から計算した変動係数

いま、カウント数に対する変動係数 (Cv= σ/N)を3%以下に設定すると、カウ ント数1000が必要である。カウント数が 1000を越える測定時間を土被り20mま でに対して天頂角ごとに示したのが図 5.4-5である。計測時間は土被り5m、天 頂角50度までの場合、1点あたり3~5 時間となる。トモグラフィ解析を行うに あたっては、天頂角の大きいデータより 50~60度程度までに留めて、測定間隔 (計測器を置く間隔)を短くし、計測点 数でデータ数を増やすことも検討する必 要がある。



図 5.4-5 変動係数 3%のときの土被りと計測時間の関係

第6章 試作機の製作

6.1 設計

(1)計測原理

ミュー粒子の計測原理は以下のとおりである(図 6.1-1)。
①ミュー粒子はシンチレータに入射すると発光する。
②発光した光を、光電子倍増管で電気信号に変換・増幅する。
③ディスクリミネータでミュー粒子を選別する。
④2つのシンチレータで同時に検出したミュー粒子を計数する。
⑤2つのシンチレータの間隔を一定に保って、角度を変えることにより指向性データを取得

する。



図 6.1-1 同時計数測定方法

試作機の設計にあたり、以下の項 目を検討した。 ①装置全体の大きさの制約

②シンチレータの材質

③ノイズ対策 (シンチレータ厚さ)

④検出器の直径

⑤検出器の直径と検出器間の距離⑥同時計数時間分解能

(2)装置全体の大きさの制約

試作機は、地下にある空間(例えば共同溝や地下の通路)で使うことを考え、検出器間の距離 を最大 2m とする。

(3)シンチレータの材質

プラスチックシンチレータは、大型のものも容易に製作できる、軽い、形状の制約がない、な ど地下で使用するには最適であることから、本調査研究ではプラスチックシンチレータを採用す ることとする。

(4)ノイズ対策

自然γ線は、ミュー粒子を測定する場合には、ノイズとなる。

図 6.1・2 に示すように、自然 γ線のエネルギースペクトルは 3MeV 弱である。プラスチックシ ンチレータの厚さを 3cm とすれば、自然 γ線とミュー粒子を完全分離することができ、さらにデ ィスクリミネーション・レベルを 3~3.5MeV とすることで、完全に自然 γ線とミュー粒子を分離 することが可能となる。



(5)検出器の形状

本調査研究では、地中を透過した数少ないミュー粒子を確実に捕らえるため、軸対称な円形を 採用することとする。

(6)検出器の直径と検出器間の距離

図 6.1-3 に 2 つの検出器による立体角 d Ω の定義を示す。断面が円形の検出 器の半径を r、距離を L とすれば、検出器の中心点に上(または下)の検出器 が張る立体角(以下単に立体角)は、

$$d\Omega = \frac{dS}{(L/2)^2} = \frac{4\pi r^2}{L^2}$$

であらわされる。

立体角は、ミュー粒子の計測においては、空間分解能に相当する。検出器の 面積 dS を大きくすれば d Ω は大きくなり、空間分解能は低下する。距離 L を 大きくすれば、d Ω は小さくなり、空間分解能は向上する。

一方、検出器の面積(半径)は、大きければ大きいほど効率が良く、短時間 で計測できる、あるいは同じ時間で計測した場合の密度推定精度が向上する。

本調査研究では、空間分解能を向上させ、かつ測定時間にできるだけ影響を与えない検出器の面積(半径)と距離を検討した。

図 6.1-3 立体角の定義

面積:d8

₩44 : r



 ・2.2 CV、具体的に計算を実施する。設定条件は次のとおりである。

 設定条件

 (1)深さ=20m
 (2)地盤の平均密度=2.2g/cm³
 (3)天頂角=30°
 (4)計算に用いる式: 5-1 式 (湊、1992)

図 6.1-4 に検出器の直径とカウント数の計算結果を示す。検出器間の距離は、1m、1.5m、2m に設定した。これに秋山ほか(1991)の最も空間分解能が高い状態の値を示した(赤丸)。検出器の 直径が 30cm 以下の場合、極端にカウント数が低下し、同じ時間で計測した場合の密度推定精度 は低下する。地下で使用することを考慮すると、検出器はできるだけ小さいことが望ましい。



図 6.1-4 検出器の直径とカウント数の計算結果

図 6.1-5 には検出器の直径と立体角(空間分解能)の計算結果を示す。秋山ほか(1991)と同様の 空間分解能を得るには、検出器の直径 35cm のとき、同じ計測時間での密度推定精度は低下する ものの検出器間の距離は 1.5m で良い。

カウント率は 50 個/時間以上(20 時間で 1000 個以上)、空間分解能 0.05 ステラジアン以下(検 出器から 5m 離れたところで空間分解能 1.25m²) 程度にしないとトモグラフィ解析に耐えうるデ ータが得られないと考えられる。



図 6.1-5 検出器の直径と立体角の計算結果

上述の(2)~(6)の検討結果から、試作機の主な仕様を以下のとおりとし、試作機の構成を図 6.1-6 に示す。

- ① シンチレータの材質はプラスチックとする。
- ② シンチレータの厚さは 3cm とする。
- ③ 検出器の直径は 35cm とする。
- ④ 検出器の最大距離は2mとする。
- ⑤ 光電子倍増管はシンチレータの間に配置する。



6.2 試作機の構成

試作機の構成を図 6.2-1 に示す。



図 6.2-1 試作機のブロック図

6.3 外観等

(1)外観図

外観図を図 6.3-1 に示す。天頂角 90 どのときの状態を示しているが、このときの横幅は 2m 強、 奥行き方向は約 80cm、高さは 1.4m である。天頂角 0 にすると高さ 2m 強となる。重量は約 70kg である。2 つの検出器の間の距離は 1.0m、1.5m、2.0m に可変できる。

(2)外観写真

外観写真を図 6.3-2 に示す。黒く見える円盤状の部分が \$\phi 350mm×t35mm のプラスチックシンチレータである。遮光のため黒く塗られている。シンチレータで発光した光を漏斗上の部分(これをライトガイドという)で光電子倍増管まで導き、ここで電気信号に変換・増幅し、同軸ケーブルで本体に運ばれ、ミュー粒子の数として計数を行う。

(3)収録画面

装置を組み立て、角度を設定したら、プログラムを立ち上げると、図 6.3-2 のような収録画面 がパソコンの画面上にあらわれる。



図 6.3-1 試作機の外観写真

🌇 711-7 RemoteCont	rol Program -	
ファイル(E) スケーラの設定(S)	チャンネル名の変更(<u>A</u>) ウイントウ(<u>W</u>) ^∥/フ°(<u>H</u>)
CycleCount F	rogressed Time Preset Tim 10.0 [sec]	10 [sec]
CHANNEL.1	CHANNEL.2	計数開始
-counts 84[Cnts]	0[Cnts]	印刷(P)
クリックで残り時間を表示しま	.च	11

- 図 6.3-2 計数中の画面
 - 繰り返し回数の設定
 - ② 計測中の経過時間
 - ③ プリセット(設定)時間
 - 後出器1の計数
 - ⑤ 同時計数値
 - ⑥ 計測開始ボタン

第7章 地上における実験

7.1 試作機による誤差の検証

試作機を用いて、都内のビルの 6 階で 1 時間の定点観測を 24 回連続して行った。その結果を 図 7.1-1 に示す。図中の Nは平均値、 σ は標準偏差、Cvは変動係数(= σ/N)である。バラツキが あるが、そのほとんどが誤差範囲(2σ 以内)に収まっていることが確認できる。



図 7.1-1 1時間×24 回定点観測結果

7.2 計測時間による再現性

7.1 と同じ場所で計測時間を6時間に設定して3回の計測を行った(図7.2-1)。全てのデータは1σ以内に収まり、計測精度が向上していることが認められる。変動係数も1.7%に低下している。



図 7.2-1 6時間×3回定点観測結果

7.3 検出器間の距離(空間分解能)と誤差の関係

上記二つの実験と同じ場所で、検出器間の距離(空間分解能)を変えて各2時間の計測を3回 繰り返して行った。その結果を図7.3-1に示す。各数値は3回の平均値である。空間分解能を低 下させればカウント数が増加し、変動計数は減る。空間分解能と変動係数とは相反関係にある。



図 7.3-1 検出器間距離とカウント数及び誤差の関係

7.4 屋内実験

建物によるミュー粒子カウ ント数の変化を調べるために、 各階で計測を実施した。計測は 階段室で行い、各計測時間は2 時間とした。

計測結果を図 7.4-1 に示す。 1階から7階までは各フロアの 厚み分だけ、ミュー粒子のカウ ント数が減少していることが 確認できる。8 階(エレベータ シャフトの手前側)と9階は 建物の形状及び斜めの屋根部 分の影響を受けているため、カ ウント数が減少していると解 釈される。理論解析結果からも 明らかなように、計測位置に近 いものの影響を受けやすい。



図 7.4-1 屋内実験結果

7.5 屋外実験

港区立一の橋公園で、野外実験を実施した。図 7.5-1 に計測地点の見取り図を示す。A 地点は 橋桁のない方向に向けて天頂角 0 度から 90 度(水平)まで、B 地点では橋桁の直下で-90 度から +90 度まで、それぞれ 10 度刻みで計測を実施した。なお、B 地点について直上に橋桁のない方向 を正、橋桁のある方向を負として表示する(以下この表記を用いる)。A 地点では空気中の角度分 布を把握し、B 地点では橋桁の影響を確認することを目的とする。

図 7.5-2 に A 地点、図 7.5-3 に B 地点での計測方向を示す。この方向は、試作機のシンチレータの中心を結ぶ線であり、以降これを透過経路と呼ぶことにする。



図 7.5-1 計測地点の平面図



図 7.5-2 A 地点透過経路

図 7.5-3 B 地点透過経路

A:空気中角度分布

B: 橋桁の影響確認

各角度での計測時間はA地点では15分、B地点では30分とした。 図 7.5-4に計測結果を示す。エラーバーは2σを示す。なお、A地点の値は2倍し、このときの

 $\sigma_{\scriptscriptstyle A30}$ は計測値を $N_{\scriptscriptstyle 15}$ として、

$$\sigma_{A30} = \sqrt{N_{15}} \times \frac{30}{15} = 2\sqrt{N_{15}}$$
(7-1)

であらわされる。以下同様に計測時間の異なるデータを比較するときには同様に計測値の平方根 を比較する時間当たりに換算した値を σ とする。 橋桁や障害物などのない天頂角 40~90 度では、A 地点、B 地点ともほぼ同じ値を示し、カウント数の再現性が認められる。天頂角 0~30 度では一致しないが、これについて以下に考察する。 空気中の計測においては、2 次宇宙線の中にミュー粒子以外の電子成分が存在する。ミュー粒子成分とミュー粒子と電子成分を合わせた値を図 7.5-5 に示す。天頂角の小さい(鉛直に近い方向)では電子成分が多く含まれていることが認められるが、理論値より計測値が小さくなっている。 これは以下のように解釈される。

プラスチックシンチレータに入射した電子は、シンチレータ内部で散乱し、進行方向を変える。 このときエネルギーの低い軟成分はシンチレータで吸収されてしまうが、エネルギーの高いノッ クオン電子などは方向を変えながらも、シンチレータを透過する。これが同時計数に影響を与え、 理論どおりの結果が得られない原因のひとつと考えられる。空気中の実験では、電子成分を評価 する必要があるが、地下においては軟成分の寄与はほとんどないと考えてよい(Minato,1986)。



図 7.5-4 一の橋公園計測結果



図 7.5-5 A 地点での電子成分の評価

図 7.5-6 に B 地点での計測値を天頂角 0 度で折り返したグラフを示す。橋桁のある方向(0~-30 度)のカウント数はエラーバーを越えて低くなっていて、首都高の橋桁の影響を受けていると考えられる。



図 7.5-6 B 地点測定結果 (天頂角 0 での折り返し)

図 7.5-7 に(5-1)式を用いて計算した天頂角に対する面密度を示す。天頂角+10~50 度では面密 度が 0hg/cm²であり、空気の値を示す。天頂角-10~-40 度では面密度が約 1 hg/cm²である。この 値は、首都高速道路一の橋ジャンクションの詳しい構造が不明であるが、概ね表 7.5-1 に示すよ うな値であると考えられ、今回の計測結果にほぼ等しい。また天頂角 0 度では、試作機の立体角 内に半分だけ橋桁がかかるので、半分値となっている。

図 7.5-8 には天頂角方向に面密度の値を棒の長さで示したグラフ(図 7.5-7 と同じ値)を示す。 首都高速道路の方向は面密度約 1 hg/cm²、天頂角の大きいところには精度が悪いもののマンショ ンなどの影響があらわれているのが確認できる。



図 7.5-7 一の橋公園解析結果

表 7.5-1 首都高速道路の面密度推定値

名称	物質	密度(g/cm ³)	厚さ(cm)	面密度(hg/cm ²)
舗装	アスファルト	2	10	0.2
床版	鉄筋コンクリート	2.35	20	0.47
橋桁	鋼鉄	7.8	5	0.39
		合計	35	1.06



第8章 地下における実験

8.1 実験目的

地下におけるミュー粒子の角度分布を測定し、空洞(人工構造物)の影響を確認する。人工構 造物の深さや位置、大きさは既知とし、実測値と理論値との比較を行い、試作機の精度を検証す る。測定する位置を変えてトモグラフィ解析への適用性を検討する、

8.2 実験場の概要

実験場の選定には以下の条件を満たす場所を選定した。

- ① 土被りが 10m 以内であること
- ② 試作機を設置でき、かつ複数箇所での計測ができること
- ③ 実験場の直上に構造物(埋設管など)があること
- ④ 通行人など第三者への安全を確保できること
- ⑤ 安定した電源が確保できること



図 8.2-1 実験位置見取り図



図 8.2-2 実験場断面



8.3 実験方法

理論解析の結果から本実験場において 1000 カウント以上の計数値を得るには、図 8.3-1 赤丸印 に示すように、天頂角の小さいところで 1 点あたり 4~5 時間、天頂角の大きいところでは 7~8 時間を必要とする。計測時間は、理論計算の約 2 倍とした。天頂角 0~20 度は 8 時間、天頂角 25 ~45 度は 15 時間とし、両者を組み合わせて 1 日 2 方向の計測を行った。

図 8.3-2 に透過経路(2つの検出器の中心を結んだ直線)を示す。

中央の B 地点においては比較のため道路に平行な方向(以下縦断方向と表記する)の計測を実施した。天頂角の表記は南側を正(+)とした。また、密度の決定精度を確認するため、B 地点の天頂角 0 度において、2 時間×32 回の連続計測を実施した。



図 8.3-1 天頂角・土被りに対する Cv=3%の計測時間



8.4 実験結果

(1)連続計測結果

図 8.4-1 に連続計測の結果を示す。地上実験による結果と同様にバラツキがあるが、計測値は ほとんど 2 g の範囲内に収まっている。時間帯や曜日などによる傾向は認められない。

図 8.4-2 にカウント数から(5-1)式を用いて計算した推定密度を示す。平均値 ρは 1.64g/cm³、σ =0.0953、Cv=5.8%である。







図 8.4-2 密度推定結果

(2)地盤平均密度の計算

実験場築造時の工事記録から図 8.4-3 に示す 数値を得た。なお、路盤の砕石と鉄筋コンクリ ートについては一般的な値を用いた。地盤の平 均密度 ρ は、各層の密度 ρ_i に全体の厚さDに 対する各層の厚さ d_i の割合 $(=d_i/D)$ を掛け合 わせて足し合わせて計算した。すなわち、

$$\rho = \sum_{i} \frac{d_i}{D} \rho_i \tag{8-1}$$

である。これにより、 $\rho = 1.71 \sim 1.75 \; (g/cm^3) \, \epsilon$ 得た。



図 8.4-3 地盤構成及び密度既存データ

(3)横断測線計測結果

図 8.4-4 に A 地点での計測結果を示す。数値は全て1日あたりのカウント率に換算している(以下同様)。(5-1)式を用いて、天頂角5~15度に最も整合する地盤の密度を計算したところ1.62g/cm³が得られた。天頂角0度及び20~45度の計測値はビルの影響によりカウント率が低下している。 エラーバーは計測時間により規格化してある(以下同様)。参考のため、(2)で計算した地盤平均密度 1.75g/cm³を用いて計算した理論値も示した。

図 8.4-5 に B 地点での計測結果を示す。天頂角-10~10 度で最も整合する地盤密度として 1.58g/cm³を得た。図 8.4-6 に天頂角 0 度で折り返したグラフを示す。プラス側よりマイナス側の 方のカウント率が大きくなっている。これについては次節で考察する。

図 8.4-7 に C 地点の計測結果を示す。天頂角 0~10 度の値を用いて計算した密度は 1.65g/cm³ である。天頂角が 15 度より大きい領域では、建物の影響があらわれている。

図 8.4-8 に B 地点縦断方向の計測結果を示す。天頂角-20~+20 度の値に最も整合する密度として 1.68g/cm³が得られた。



図 8.4-4 A 地点計測結果







図8.4-6 B地点計測結果(天頂角0度で折り返し)



図 8.4-8 B 地点縦断方向計測結果

8.5 実験結果の評価

(1)地盤密度の推定

3つの地点で得られた推定密度の一覧を表8.5-1に示す。平均値は1.63g/cm³であり、σ=0.037、 Cv=2.3%である。図8.4-3で得られた地盤平均密度とは0.12の差があり、ミュー粒子による計測 結果とは絶対値で約8%の誤差があるものの、地盤情報がない場合でも、ミュー粒子の計測値だけ から密度を推定できることが示された。

図 8.4-6~8 に示した理論値は地表面が土被り 6.7m と仮定した場合の値である。天頂角が大き い部分の実測値との差は建物の影響であり、この値を用いて建物のかさ密度を計算した。図 8.5-1 に建物 A、図 8.5-2 に建物 B の結果をそれぞれ示す。建物 A の値は 0.47g/cm³であり、他の研究 結果(Minato,1986;図 4.2-1)による値 0.5g/cm³とも整合的である。建物 B のかさ密度は建物 A の約半分になっている。この理由は、計測時に建物 B の隣が工事中であり、計測した立体角内 に半分くらいが建物、残り半分が工事中でわずかの鉄骨しか存在しないためであると解釈される (図 8.5-3、図 8.5-4)。

地点	推定密度
А	1.62
В	1.58
С	1.65
B縦断	1.68
平均值	1.63

表 8.5-1 推定密度一覧



図 8.5-1 建物 A のかさ密度計算値



図 8.5-2 建物 B のかさ密度計算値



図 8.5-3 実験場付近の地表部状況



図 8.5-4 計測時の立体角と地表(水平)面との交線

(2)埋設管の検出

A 地点における計測値は図 8.5-5 に示すように建物 B による影響を受けている。そのため、この部分の建物の影響を取り除いて理論値を計算したのが図 8.5-6 である。理論解析の結果からは、 天頂角 0 の場合、土被りに対して 1/10 程度でカウント率異常があらわれ、天頂角 5 度ではほとん ど差があらわれないという結果が得られている。図 8.5-6 も理論解析と同様になっていることが 確認できる。同様に B 地点、C 地点についても建物の影響を取り除いた結果を図 8.5-6 の中段、 下段にそれぞれ示した、天頂角が大きくなるほどカウント数の異常が減っているのが確認でき、 これも理論解析と整合する結果となっている。

(3)建物の影響

各地点の各天頂角に対する面密度を図 8.5-7 に示す。建物のない天頂角の小さいところでは面 密度が小さく、建物のある方向で密度が大きくなっていることが確認できる(図 8.5-8)。



図 8.5-5 A 地点における天頂角 0 のときの立体角と建物の関係







図 8.5-7 各地点の面密度分布



図 8.5-8 面密度分布と建物の関係

(4)B 地点縦断方向

図 8.5-9 に縦断方向の計測結果から面密度を計算した結果を示す。天頂角±20~25 度では一定 の値を示すが、天頂角の大きいところでは面密度が大きくなっている。これは周囲の建物の影響 による可能性がある。天頂角-10 ではかさ密度が小さくあらわれている。この異常を横断する埋 設管の大きさに換算すると \$ 700mmの大きさに相当する(計測値では 7533 個/日、理論値では 7525 個/日)。図 8.5-10 に B 地点縦断方向の天頂角-10 度の方向付近の地表面の状況を示す。対 向する縁石にグレーチングがあり、横断方向に伸びる直径 \$ 200~300mm 程度の塩ビ管と思われ る埋設管が確認でき、この密度の差はこの埋設管の影響の可能性が考えられる。



図 8.5-9 B 地点縦断方向の面密度計算結果



図 8.5-10 В 地点縦断方向天頂角-10 方向にある埋設管

(5)まとめ

以上の考察から、以下のことが示された。

- ①方向を変えることで埋設管に対するカウント率が変化し、埋設管の存在する方向にカウント率の差があらわれる
- ②この差は、理論解析と同様の結果である
- ③方向を変えて測定することにより、トモグラフィ解析への適用可能性が示された
- ④ミュー粒子のカウント数から地盤の密度が推定できる
- ⑤今回の実験では変動係数は3%以下であり、理論解析の結果とも整合している
- ⑥建物による影響も計算どおりにあらわれている

4 調査研究の今後の課題及び展開

本調査研究が目指すミュー粒子を用いた空洞探査システムには、様々な特性要因が考えられる (図 5-1)。本調査研究では主にミュー粒子の計測技術に重点を置き、調査研究を進め、地下にお いて角度を変えてミュー粒子を計測できることを示し、トモグラフィ解析への適用可能性を示し た。



図 5-1 ミュー粒子を用いた空洞探査システム特性要因図

今後は、計測機器の最適化とトモグラフィ解析アルゴリズムの開発を行う必要がある。

本調査研究では \$350mm のシンチレータ 2 台と、両者の間隔を最大 2m として試作機を製作 したが、より実用に近い機能・大きさを実験的に検討する必要がある。

本調査研究で試作した装置は、天頂角を手動で設定したが、タイマーをセットして自動で天頂 角を設定できる機能(ロボット化)や、計測位置の測量機器など付属機能あるいは防滴加工を施 した高湿度条件でも計測可能なシステムの検討も必要である。

地下構造物内(ビルの地下室、地下鉄の構内、導水路、下水管路など)での計測の場合は、施工 時において詳細な位置が設計・管理されている。従って、計測地点の位置出しについては施工図 面上の基準となる点(距離程など)を基準に通常の測量を行えば十分である。しかし、洞窟や古 い坑道については空間内に基準点がないため、観測時に観測地点の位置を正確に求めなくてはな らない。その方法としては、トンネル工事などで一般的に用いられている坑内測量手法が最適で あると考えられる。手順としては、坑口の位置を GPS 測量(図 5-2)で求めて基準点を設置し、 そこから観測点までの坑内についてはジャイロ測量(図 5-3)などが考えられる。







<u>http://www.rex-system.jp/mes02/mes0207.htm</u> <u>http://www.oura.co.jp/rental.html</u> <u>http://www.nichiei-sokuryou.com/gpssokuryou.htm</u> 図 5-2 GPS 測量の例



<u>http://www.ultimate-method.jp/z-3.htm</u> <u>http://www.tsstanaka.com/survey/gyro_duction.html</u> 図 5-3 ジャイロ測量の例

高湿度下における使用に耐えうるシステムとするには以下のような改良が必要である。

- ① シンチレータにパッキンなどを使用して防水する
- コネクタに防水コネクタを使用する
- ③ 湿度に弱い回路をひとまとめにし、かつ省電力化する

トモグラフィアルゴリズムについては図5-5に示すように

- (a) 地質情報の入力(初期モデルの設定)
- (b) 天頂角補正アルゴリズム
- (c) 空間分解能補正アルゴリズム

などを検討する必要がある。

トモグラフィ解析を行うにあたっては、地盤の平均密度を初期のモデルとして与えて空洞探査 を行うことも可能であるが、既存の地質断面図、地質密度断面などから初期モデルを設定するこ とにより、現実的な地質情報を得ることが可能となる。

通常のジオトモグラフィでは、波線の距離のみ計算し、角度については考慮しない。ミュー粒 子を利用する場合には、ミュー粒子強度に天頂角依存性があるため、これを考慮する必要がある。

また、検出器から離れるに従って空間分解能が低下するため、これを補正する方法を検討する 必要があり、従来のジオトモグラフィとは異なるアルゴリズムが必要である(図 5-4)。図 5-5 に 今後の開発フローを示す。

これらの新しいアルゴリズムを開発することにより、最終的に図 5-6 に示すような二次元ある いはそれの重ねあわせた擬似三次元(あるいは三次元)可視化技術を実現することが可能である。



図 5-4 平成 21 年度トモグラフィアルゴリズムの検討



図 5-5 地盤探査システム開発フロー



図 5-6 最終成果図イメージ

図 5-7 に示すように、空洞探査や地下の社会インフラ施設上部の地盤の健全性を調べることが できれば、「安全・安心な社会」を構築することができる。また、社会インフラ施設の施工中に計 測を行うことで施工中の安全確保(空洞によるトンネル内の崩落や地表の陥没)を未然に防止す ることも可能である。さらに施工計画に反映させることにより工期の短縮やコストの縮減にも貢 献できる。

地盤内部の空洞化の発生メカニズムは様々な研究が行われているが、未知の領域も多い。空洞 化を長期に渡ってモニタリングできれば空洞化の発生メカニズムも解明でき、空洞化を未然に防 止することにも役立つものと考えられる。

以上のようなことが実現できれば、産業・社会資本の健全性を確保するとともに、新たな機械 産業振興として測定機器製造ビジネスの可能性が拓ける。



図 5-7 期待される成果

また、より具体的な展開としては以下のような応用が考えられる。

地盤に関係したところでは、斜面での土砂災害(図 5-8)の予測も可能である。斜面の下から 探査することで、地下水の移動やキレツの発達に伴う密度変化を検出して、災害を未然に防ぐこ とが可能となる。

山岳トンネルについては施工中に石灰岩の自然空洞(鍾乳洞)が問題となっている。あるいは 岩盤内部の破砕帯を探査により事前に予測できれば崩落による人身事故や掘削機械の破壊といっ た事故を未然に防ぐことができる。

ミュー粒子を利用した技術として高炉のラジオグラフィが提案されているが、レントゲンと同様の方法であるため、奥行き方向の情報が得られない。人が近づけないような高温溶融物や危険物管理のためのより高精度な遠隔監視技術も実現できる。

また、ダムなどの大型構造物の老朽化診断も可能である。例えば図 5-9 に示すようなコンクリート式重力ダムは、表面あるいは極浅い部分については試料採取などの方法により老朽化を診断することができるが、中心部までは診断ができない。ダムには監査廊というメンテナンス用の通路があるためこれを利用してダム全体を非破壊的に診断することも可能である。

以上のような目的に対応した探査技術は、現状技術では適用困難な場合がほとんどで、ミュー 粒子による探査技術が新しいフロンティアを切り拓くシーズとなりうると考えられる。



図 5-8 岩手宮城内陸地震による土砂災害 http://www.kge.co.jp/Iwate-Miyagi-Nairiku -Jishin/Iwate-Miyagi-EQ-2008-3.htm



図 5-9 ダムの老朽化診断 土木学会編(1992):ダムの岩盤掘削、pp.172

-禁無断転載-

 システム技術開発調査研究 20-R-8
 平成 20 年度 ミュー粒子の工学応用による 地中空洞化調査システムに関する調査研究 (要旨)
 平成 21 年 3 月
 作 成 財団法人機械システム振興協会 東京都港区三田一丁目4番28号 TEL 03-3454-1311
 委託先名 財団法人エンジニアリング振興協会 住 所 東京都港区西新橋一丁目4番6号 TEL 03-3502-4441