

平成 22 年度
ミュー粒子を活用したマルチ計測機器の開発
に関するフィージビリティスタディ
報 告 書
－ 要 旨 －

平成 23 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



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<http://ringring-keirin.jp>

序

我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、都市、防災、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、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す。

このような社会情勢の変化に対応するため、財団法人機械システム振興協会では、財団法人J K A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を実施しております。

これらを効果的に実施するために、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推進しております。

本「ミュー粒子を活用したマルチ計測機器の開発に関するフィージビリティスタディ」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、実施した成果であります。関係諸分野に関する施策が展開されていくうえで、本フィージビリティスタディの成果が一つの礎石として、皆様方のお役に立てれば幸いです。

平成23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フィージビリティスタディの成果を取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地下数メートルから 10m 程度の深度についての探査が可能でかつ分解能 1m 程度の空洞検出能力を有する探査手法は確立されていません。また、既存の探査技術は、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るため、特に都市部での探査では適用範囲が限られています。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は期待できず、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ず、また、高い分解能が期待できる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。平成 20 年度の調査研究では、試作機（A）の開発ならびに既設の埋設管（空洞を模擬）を測定対象とした地下実験において、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。平成 21 年度のフィージビリティスタディ（以下「F/S」という。）では、地下での測定を考慮し小型化を図った 2 台の試作機（B、C）を製作するとともに、地盤の可視化を可能とするための二次元トモグラフィ解析アルゴリズムを開発しました。

本年度 F/S では、過去 2 年間の成果に基づき、計測効率化のためのマルチ計測機器を開発し、地下実験によりデータの品質を保持した上で、計測時間を 1/5 に短縮できることを実証しました。また、二次元トモグラフィ解析より高精度の解析結果が得られる三次元トモグラフィ解析アルゴリズムを開発しました。既知の空洞（下水管）を対象とした実測データに適用して解析した結果、地盤中の空洞を三次元で捉えることができ、地下の構造（密度分布）を高精度で三次元可視化することが可能となりました。さらに、本探査システムのユーザーへのヒアリング調査により、ユーザーのニーズを明らかにするとともに、実用化に向けた技術的課題をとりまとめました。

最後に、本 F/S 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 23 年 3 月

財団法人 エンジニアリング振興協会

目 次

序

はじめに

1	F/S の目的	1
2	F/S の実施体制	4
3	F/S 成果の要約	8
第 1 章	これまでの成果と本 F/S の位置づけ	10
第 2 章	マルチ計測器の設計・製作	12
2.1	マルチ計測器の設計	12
2.2	マルチ計測器の製作	15
第 3 章	計測誤差の検討	17
3.1	空気中における宇宙線の時間変動	17
3.2	地下におけるミュー粒子の時間変動	19
3.3	試作機 A によるカウント数誤差の検討	20
3.4	カウント数の誤差が面密度の計算値に与える影響	24
3.5	偶然同時計数	25
3.6	計数誤差についてのまとめと考察	26
第 4 章	マルチ計測器の動作確認試験	29
4.1	室内試験	29
4.2	地下計測	30
第 5 章	現地計測	33
5.1	二次元・三次元トモグラフィデータの取得	33
5.2	計測データ例	35
5.3	二次元トモグラフィ解析結果	39
5.4	現地計測結果の評価	41
5.5	大谷石採取場跡地における計測	44
第 6 章	三次元トモグラフィ解析技術の検討	47
6.1	三次元トモグラフィの必要性	47
6.2	解析アルゴリズムの開発	47
6.3	解析アルゴリズムの数値モデル解析	49
6.4	現地計測データによる解析結果	50
第 7 章	実用化検討	52
7.1	社会的ニーズの検討	52
7.2	実用機の設計条件の検討	54
7.3	ミュー粒子を利用した空洞探査の優位性	56
7.4	F/S により得られた成果のまとめ	57
4	F/S の今後の課題および展開	58

巻末【資料編】

・引用文献

1 F/S の目的

(1) 背景と目的

都市部におけるインフラの老朽化により、道路下や用地地下の地下空洞によって地盤が陥没する事故が発生し、社会問題になっている。また、地下が複雑に利用されてきたため、地下の健全性を確保する社会ニーズも高まってきた。これらの背景に基づいて、平成 20 年度から調査研究を開始し、ミュー粒子を一对のシンチレータ検出器(特許出願中)で計測し、ジオトモグラフィで二次元表示する地下空洞調査技術を開発してきた。

地中の空洞化を調べるには、物理探査がある。しかし、都市部においてはノイズや分解能・探査深度の点で万全な調査方法がないのが現状である。本フィージビリティスタディ(以下、「F/S」という。)は、現状技術の課題を解決し、空洞探査の精度向上や適用範囲の拡大を目指すものである。

本 F/S の成果は、空洞探査だけでなく、社会インフラ施設周辺地盤の健全性をモニタリングする手法としても応用が可能である。さらに本手法は、地盤だけでなくダムなどの大型構造物の劣化診断や斜面調査にも応用できる可能性がある。

本 F/S では、従来の物理探査の課題となっている探査深度 10m 以上、分解能 1m 程度、振動や電気ノイズに影響を受けない空洞探査手法を確立することを目標とする。そのため、ミュー粒子のマルチ計測器を開発し、その効果を確認する実験を行う。

(2) 技術的背景と新技術の必要性

本 F/S では、上に 1 個、下に 5 個のシンチレータを備えたマルチ計測器を新規に開発し、5 点を同時計測することによって、計測時間を 1/5 に短縮する。5 点を同時に計測する計測機は世界的にも初めてである。さらに本技術は、三次元のジオトモグラフィ技術を新規に開発して、地下空洞を三次元画像で可視化する点に独自性がある。

既往の非破壊的な物理探査(地中レーダ・電気探査・反射法地震探査など)による地下空洞調査では、地下数メートルから 10m 程度の探査可能深度、0.5m 程度の空洞検出能力を有する探査手法が皆無であり、このような領域は「探査空白域」と呼ばれている。

ミュー粒子は地下 10m 以深でも十分な透過能力があり、かつ 0.5m 程度の空洞検出能力を有することが平成 21 年度までの研究成果で明らかになっている。従って、従来の物理探査で検出できない領域を本計測機器では計測できることがポイントである。さらに、実用的な計測時間まで短縮できれば、地下空洞調査を大きく前進させることができる。

ミュー粒子を利用した探査技術では、地盤内部の密度分布を推定することができる。地盤の密度を直接的に推定できる手法としては重力探査があるが、空洞探査として使うには難しい面がある。また、ミュー粒子を利用した探査技術として火山体のラジオグラフィがある。火山体ラジオグラフィでは、火山体を透過してきたミュー粒子を計測し、浅間山などの内部構造を探査している。地盤以外では、製鉄所高炉内部の遠隔監視などの研究も実施されている。この方法はレントゲンと同じような方法である。しかし、ミュー粒子の到来方向において奥行き方向に積分した(足し合わせた)情報しか得られない。そのため、ラジオグラフィでは対象物の奥行きがわからないという欠点がある。図 1-1 にレントゲン

と火山体ラジオグラフィの原理を示す。両者とも X 線またはミュー粒子の透過経路を足し合わせた平均密度の分布が得られる。ミュー粒子を使用して地下空洞をジオトモグラフィ技術で三次元表示した事例は今までにない。本 F/S ではミュー粒子の角度分布測定とジオトモグラフィ技術を応用することで、CT と同じような断面情報を得るための技術を開発する。図 1-2 に CT と本 F/S によるマルチ計測器によるトモグラフィの原理を示す。表 1-1 に本 F/S によるマルチ計測器と火山体ラジオグラフィの比較を示す。空間分解能についても火山体ラジオグラフィが 20～30m であるのに対し、本 F/S では空間分解能 1m～数メートルを目標にする。

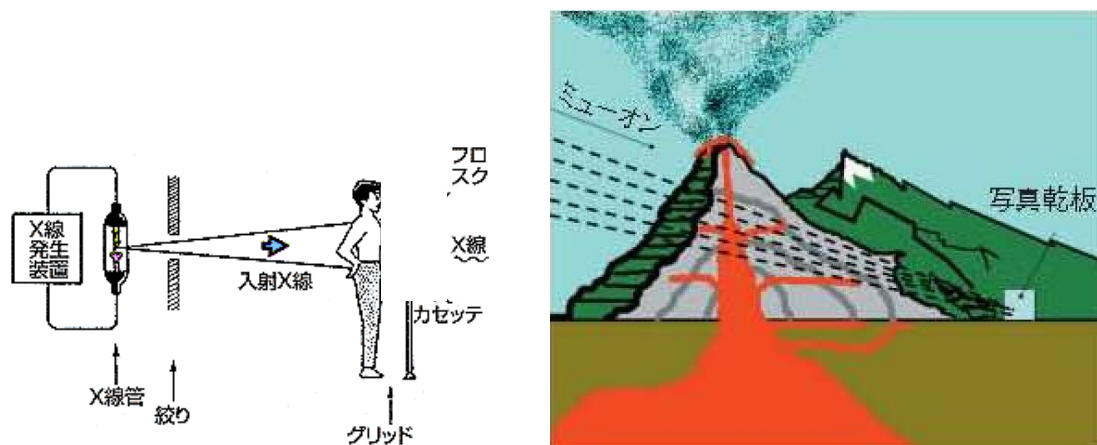


図 1-1 人体のレントゲンと火山体ラジオグラフィの原理

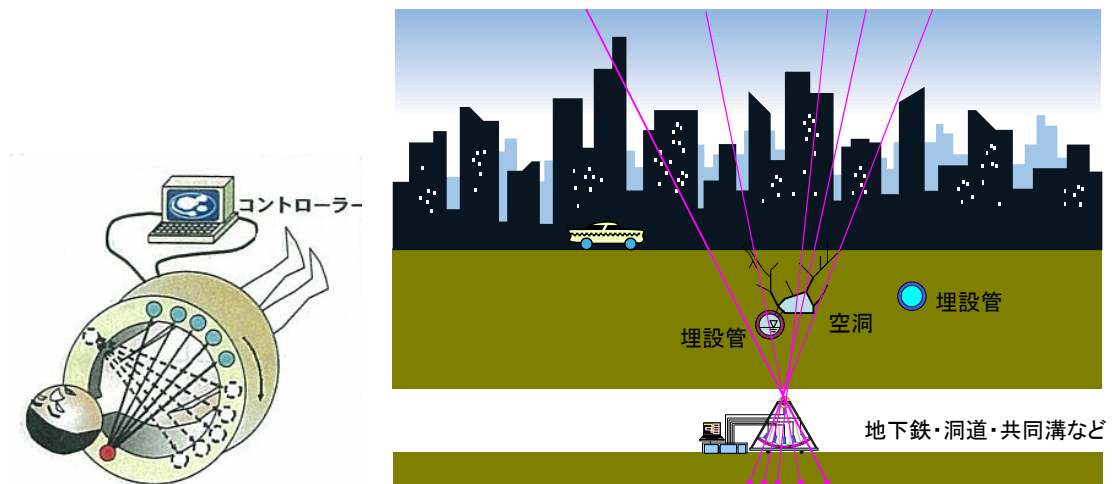
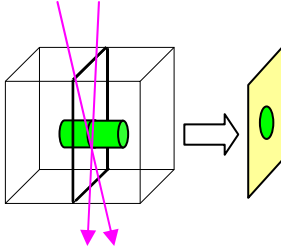
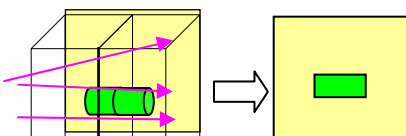


図 1-2 人体のCTとマルチ計測ミュー粒子トモグラフィ

表 1-1 マルチ計測器と火山体ラジオグラフィの比較

	本 F/S マルチ計測器	火山体ラジオグラフィ
目的	空洞探査・地盤探査	火山体内部構造
対象深度・規模	0～150m	500～2000m
装置の大きさ	1.6m×2.2m（最大）	2m×2m×2 台
分解能	1m	20～30m
検出器数	6 個	48 個
ミュー粒子の到来方向	鉛直に近い	水平に近い
ミュー粒子カウント率	多い	少ない
測定時間	数週間～2 ヶ月	4～6 ヶ月
解析方法	ジオトモグラフィ(CT) 	ラジオグラフィ（レントゲン） 
解析結果	密度断面	密度断面
適用実績	地下鉄 2 箇所(6.7m、11.1m) 大谷石採石場(15～40m) 地下発電所(最大 150m)	浅間山 昭和新山 薩摩硫黄島

2 F/S の実施体制

本 F/S では、(財)機械システム振興協会内に「総合システム調査開発委員会」を、また(財)エンジニアリング振興協会の中に「ミュー粒子を活用したマルチ計測機器の開発に関するフィージビリティスタディ委員会」を設置し、実用化開発目標の設定と開発計画・実証実験計画の作成検討および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、東京大学、(独)産業技術総合研究所、東京地下鉄(株)、東京電力(株)、飛島建設(株)、川崎地質(株)等の産学の有識者により構成される。本 F/S 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、測定解析、実験準備と結果整理およびトモグラフィ解析のプログラム開発などについて実施したものである。

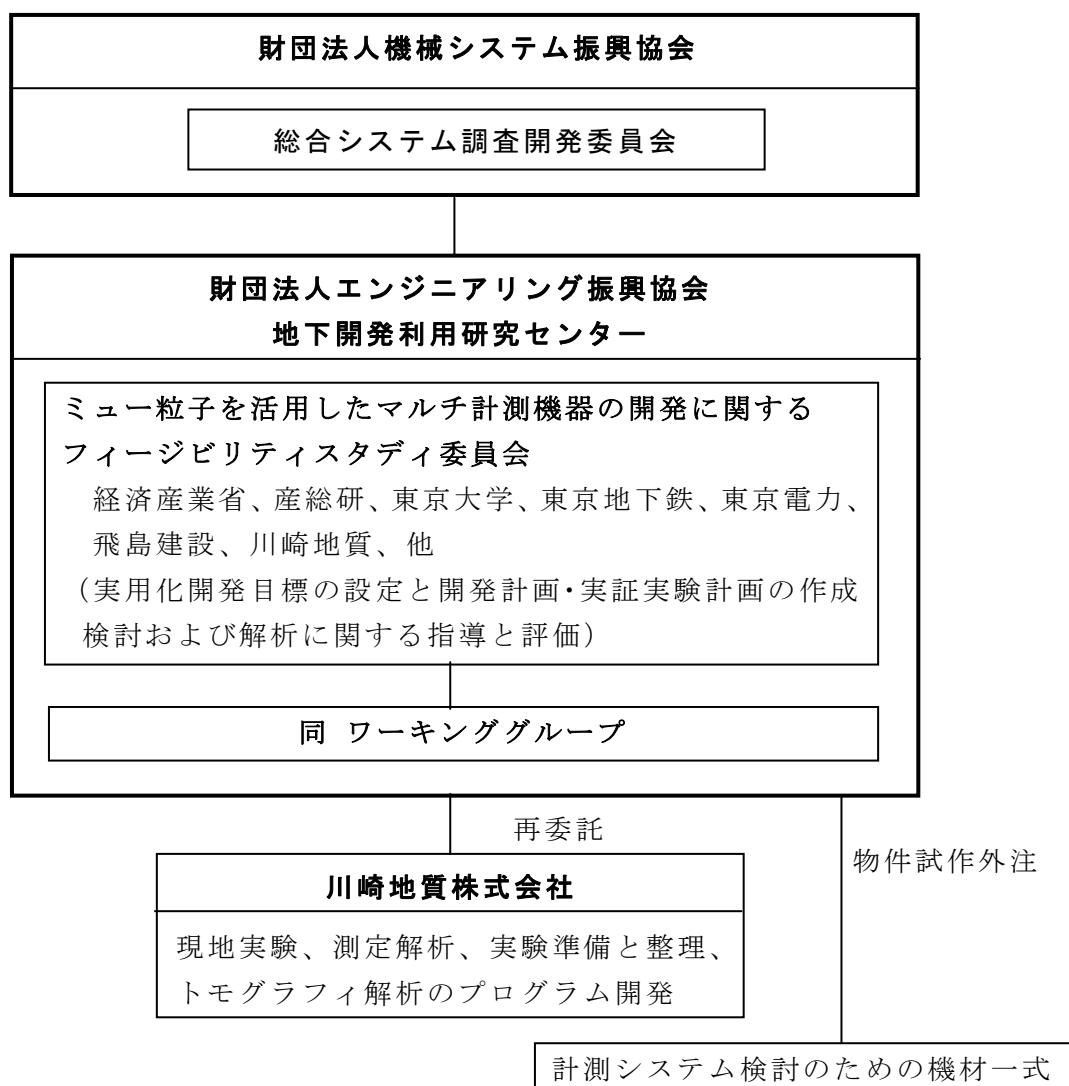


図 2-1 実施体制

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 名誉教授	藤 正 巖
委員	埼玉大学 総合研究機構 教授	太 田 公 廣
委員	独立行政法人産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 研究部門長	金 丸 正 剛
委員	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 招聘研究員	志 村 洋 文
委員	早稲田大学 研究戦略センター 教授	中 島 一 郎
委員	東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授	廣 田 薫
委員	東京大学大学院 工学系研究科 准教授	藤 岡 健 彦

ミュー粒子を活用したマルチ計測機器の開発に関するフィージビリティスタディ委員会
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 教授	徳 永 朋 祥
委員	東京大学大学院 工学系研究科 エネルギー・資源フロンティアセンター 准教授	松 島 潤
委員	放射線地学研究所 代表	湊 進
委員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携コーディネーター	古宇田 亮 一
委員	東京地下鉄株式会社 鉄道本部 改良建設部 改良建設企画課 課長	大 石 敬 司
委員	東京電力株式会社 電力流通本部 設備渉外・調整グループ マネージャー	竹 内 友 章
委員	飛島建設株式会社 土木事業本部 土木技術部 設計グループ 部長	津 川 優 司
委員	川崎地質株式会社 取締役 執行役員 事業本部長	油 野 英 俊
委員	川崎地質株式会社 執行役員 事業本部 探査統括部長	久保田 隆 二

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 産業施設課 課長補佐	小 宮 康 則
オブザーバ	経済産業省 製造産業局 国際プラント推進室 プラント貿易企画一係 係長	萬 上 俊 隆
オブザーバ	応用光研工業株式会社 執行役員 計測機器部 部長	渡 井 勝 範
オブザーバ	川崎地質株式会社 事業本部 探査技術部 技術開発グループ 課長	鈴 木 敬 一
オブザーバ	飛島建設株式会社 土木事業本部 土木営業部 営業企画グループ兼民間営業グループ 部長	小 島 龍 介
事務局	財団法人エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 研究理事	奥 村 忠 彦
事務局	財団法人エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第二部 研究主幹	和 田 弘
事務局	財団法人エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第一部 主任研究員	浅 沼 博 信
前事務局	財団法人エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第一部 研究主幹	青 柳 教 之
前事務局	財団法人エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター 技術開発第一部 主任研究員	東 谷 謙

3 F/S 成果の要約

平成 20 年度調査研究では計測技術確立のための実験機を製作し、地下で実験を行った。ミュー粒子の角度分布測定を実施し、トモグラフィ解析の予備的な検討を行った。

平成 21 年度の F/S では、機器の最適化のために大きさの異なる 2 台の試作機を製作した。同時に二次元トモグラフィ解析アルゴリズムを開発した。地下の実験でトモグラフィデータを取得し、開発したアルゴリズムを用いて地盤の可視化を試みた。

今年度は、効率化のためのマルチ計測器を開発し、計測時間の効率化（従来の 5 倍）を実現した。さらにミュー粒子の三次元的な効果を考慮し、分解能の向上を目指すとともに、実用化にあたっての課題を抽出した。

図 3-1 に平成 20～22 年度調査研究および F/S の流れを示す。

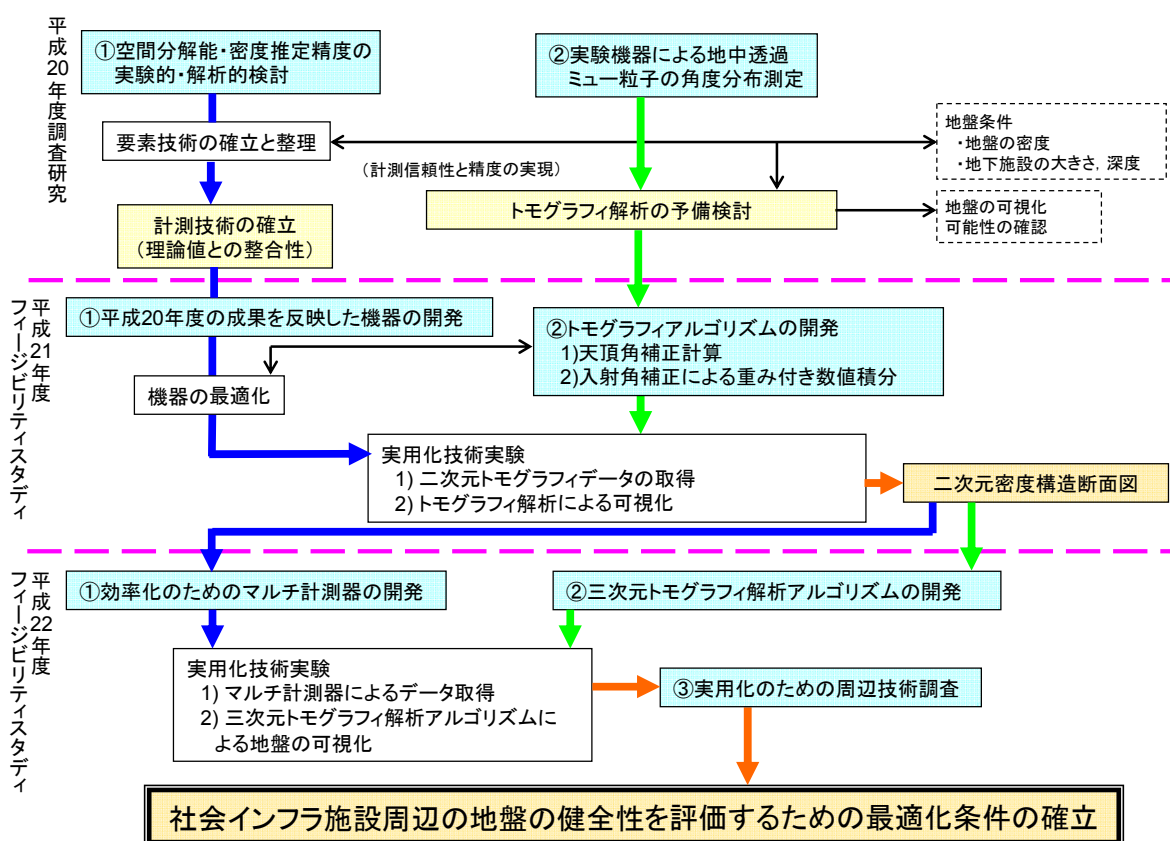


図 3-1 平成 20～22 年度調査研究および F/S の流れ

(1) マルチ計測器の開発

1) マルチ計測器の試作

平成 20 年度は、実験設備として直径 ϕ 35cm、長さ 2m の装置を開発した。平成 21 年度には、小型化のために直径 ϕ 24.5cm、長さ 1.4m の装置と直径 ϕ 17.5cm、長さ 1m の装置を開発した。本 F/S では、上部に 1 個、下部に 5 個の検出器を配置し、5 つの方向についての同時計数を一度に行う。また、6 個の検出器のほかに、マルチディスクリミネータ（マルチ弁別器）とマルチ同時計数回路を開発した。

このシステムを試作し、地下で実験を行い、計測時間を 1/5 に短縮(1 点の計測：10 日から 2 日に短縮)できることを実証した。これによりデータの品質を保持したまま計測時間の短縮化ができることを確認した。

2) 地下実験

マルチ計測器を用いてトモグラフィ解析用のデータを取得することを目的に、既知の空洞（埋設管等）を測定対象とした地下実験を実施した。実験場所は、地下 10m 前後の深さで、測定を行う地盤の状況（埋設管の位置・大きさ等の情報、地盤密度に関する情報）についてなるべく情報が多いことを条件に検討し選定した。

また、この実験よりもさらに深い位置（地下 20m 以上）においてマルチ計測器を用いたミュー粒子測定が可能であることを確認することを目的に、宇都宮市の大谷石採石場跡においても地下実験を実施した。

(2) 三次元トモグラフィ解析アルゴリズムの開発

平成 21 度は二次元トモグラフィアルゴリズムを開発した。ミュー粒子検出器で計測されるミュー粒子の飛来軌跡は、三次元的に広がりをもっている。そのため、地盤中の三次元構造や、周囲の建物の影響を受けることになる。これらの三次元的な広がりを考慮したジオトモグラフィ解析技術を研究することにより、高精度の解析結果が得られるアルゴリズムを開発した。

ミュー粒子の測定は、三次元構造の影響を受けており、探査結果の精度向上のためには三次元トモグラフィ解析技術の開発が必要である。地下の密度分布の差が三次元で表示できれば、地下施設周辺の地盤の健全性モニタリングなどにも適用できる。

(3) 実用化のための周辺技術調査

地下環境に適した計測機器とするために、ミュー粒子計測技術に付随する周辺技術の調査を行う。例えば、電源装置などの防滴対策、計測機器の防塵対策を検討した。また、地上と地下の計測地点との位置関係を明示するために、GIS を活用した地下位置情報システムなどについても検討した。最終的に実用化マルチ計測器の設計条件を確立した。

第 1 章 これまでの成果と本 F/S の位置づけ

(1) 平成 20 年度成果のまとめ

初年度である平成 20 年度は、直径 35cm、検出器間隔 2.0m の試作機 A を試作した。その性能確認のため、地上および地下で実験を行った。地上実験では、高速道路の下で計測することにより、その影響を確認した。さらに空気中での天頂角分布を測定し、試作機の特性を把握した。

地下実験では土被り 6.3m の地点で計測し、空洞とみなした直径 60cm のガス管を対象に、天頂角を変えて計測し、地下空洞を計測できることを示した。このときの地盤の密度は施工記録などから計算し、ミュー粒子による結果を対比したところ、地盤の密度は変動係数 2.8% で計測していることを確認した。さらに 3 地点における計測により、トモグラフィ適用の可能性を確認した。

(2) 平成 21 年度成果のまとめ

平成 21 年度は、試作機 A を小型化した試作機 2 台を製作した。試作機 A と比較して断面積を 1/2、1/4 とした直径 24.5cm、検出器間隔 1.4m の試作機 B と、直径 17.5cm、検出器間隔 1.0m の試作機 C を製作した。ただし、立体角は一定とした。

平行して二次元トモグラフィ解析アルゴリズムを開発し、数値実験により検証した。試作機 B・C の製作と平行して、試作機 A により二次元トモグラフィデータを取得し、開発した二次元トモグラフィ解析アルゴリズムにより、地盤の密度分布を可視化することに成功した。このときの土被りは 11.1m である。さらに試作機 A により土被り 15m 以上の地点で計測を行い、土被りの増加に伴う計数の減少を確認した。

製作した試作機 B・C については土被り 11.1m の地点での計測を行い、埋設管による影響を確認した。さらに空気中にて校正試験を行い、機器の性能を確認し、試作機 A と比較し、より計数効率が向上したことを確認した。

(3) 本 F/S の位置づけ（残された課題と今年度実施内容）

2 年間の調査研究および F/S によりミュー粒子を利用した空洞探査の基礎技術を築いた。しかし、実用化を目指した場合、以下のような課題が抽出された。

1) 計測時間の短縮化

ミュー粒子の計測では、密度が大きいあるいは土被りが大きくなると、単位時間あたりのミュー粒子の数が減るため、計測誤差が生じる。そのため一定以上のカウント数が必要となる。平成 21 年度までは、一地点ごとに計測する装置であったため、計測に時間がかかった。そこで、同時に多点を計測することができるマルチ計測器により同時に 5 点の計測を行い、計測時間の短縮化を図ることとした。

2) 試作機 B・C での二次元トモグラフィデータの取得と解析

昨年度製作した試作機 B・C についてはトモグラフィデータの取得までには至らなかったため、トモグラフィデータを取得し、解析を実施する必要がある。

3) トモグラフィ解析の三次元化

ミュー粒子の計測においては、ある立体角をもった範囲を計測している。そのため、計測値には、三次元的な効果が含まれている。また、空洞の広がりをつかえるなどのニーズに対応するには三次元解析が必要である。今年度は三次元解析を行うための解析アルゴリズムを開発する。

4) 社会的ニーズの検討

昨年度は机上検討を行い、社会的ニーズについてまとめた。今年度は道路や構造物などの施設管理者にヒアリング調査を行い、より具体的なニーズを検討した。

5) より具体的な実用化検討

昨年度は地下の厳しい環境に対応するための課題を抽出した。今年度はそれに対応するために、より具体的な技術の検討を進める。

6) 計測の再現性、安定性

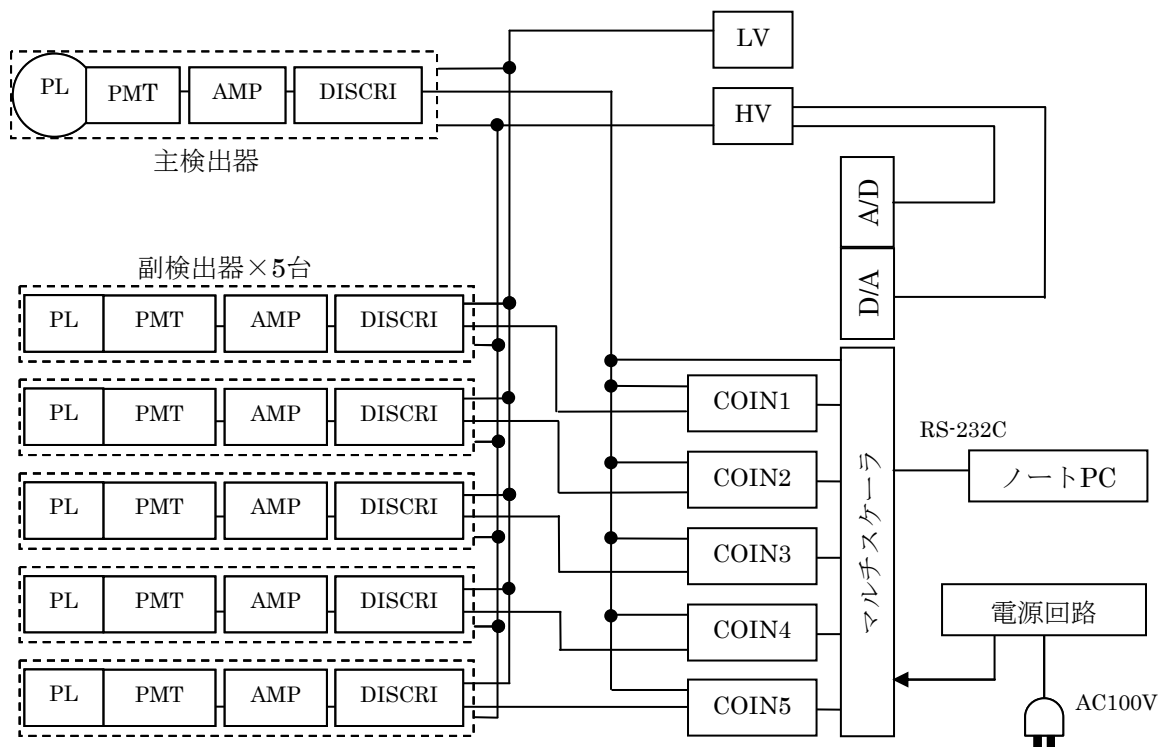
昨年度までの計測およびデータについて、①計測値の再現性、②データのばらつきや誤差の検証、などについて疑問があった。今年度は、計測データに基づいた詳細な検討を行い、空洞探査への影響性を調べる。

第2章 マルチ計測器の設計・製作

2.1 マルチ計測器の設計

計測時間短縮のため、検出部は1台の大型球形プラスチックシンチレーション検出器(以下、「主検出器」という。)と、主検出器に対して 15° の等角度で配置された5台の円筒型プラスチックシンチレーション検出器(以下、「副検出器」という)で構成され、これら6台の検出器を保持して回転可能な架台、および検出器への高・低圧電源の供給、および信号の計数処理を行う計測部で構成されている。図2.1-1にマルチ計測器のブロック図を示す。

図2.1-2にマルチ計測の動作原理を示す。それぞれの検出器はミュー粒子が通過すると電圧パルスを発生する。図2.1-2の例では、最上段の主検出器と2段目の副検出器1とで同時に出力されたパルスのみを同時計数として出力する。副検出器2についても同様であり、図2.1-2の例では、副検出器1は3個、副検出器2は4個のミュー粒子をカウントしたことになる。同時計数回路からの出力パルスは、RS-232Cを介して、パソコンにインストールされた計測プログラムで収録する。



PL : プラスチックシンチレータ、PMT : 光電子増倍管
AMP : 増幅器、DISCRI : ディスクリミネータ
LV : 低圧電源、HV : 高圧電源、COIN : 同時計数回路
A/D : アナログ／デジタル変換器
D/A : デジタル／アナログ変換器

図 2.1-1 マルチ計測器のブロック図

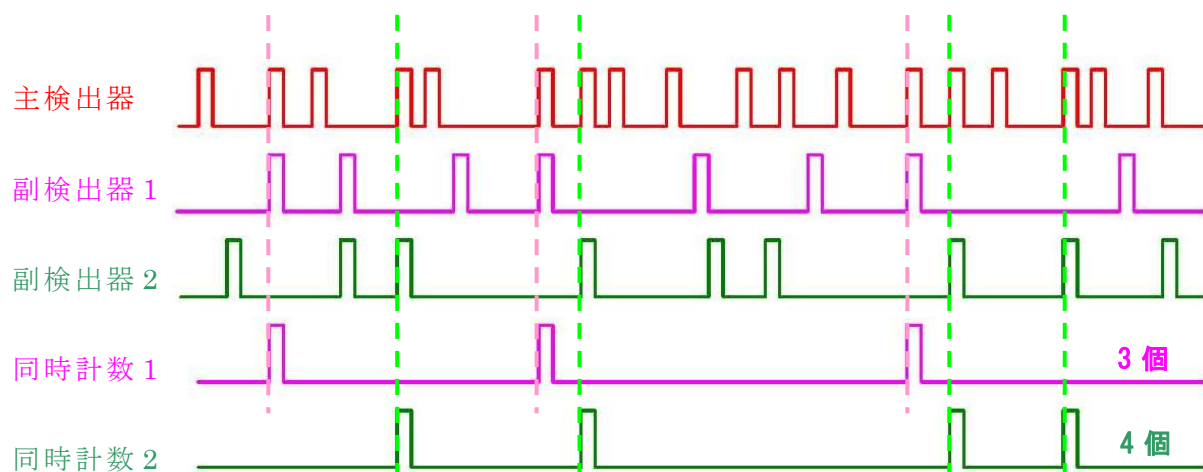


図 2.1-2 マルチ計測器同時計数動作原理

試作したマルチ計測器の仕様（抜粋）を以下に示す（詳細は報告書 p14～p17 参照）。

(1) 架台

- 1) 機能：主検出器 1 台と副検出器 5 台を取付可能
- 2) 検出器間距離：主検出器－副検出器間：1400mm
- 3) 構造および材質：SUS 製パイプ溶接構造
- 4) 外形寸法：約 2230(W)×700(D)×1650(H)mm
- 5) 質量：約 50kg

(2) 主検出器

- 1) シンチレータ：φ 245mm 球形プラスチックシンチレータ
- 2) 光電子増倍管：φ 3”サイズ
- 3) ディスクリレベル：多回転トリマ抵抗により 3～3.5MeV まで調節可能
- 4) 材質：主要部分はアルミ材
- 5) その他：検出器運搬時には周囲に保護フレームを取付け、検出器を保護する。
- 6) コネクタ：信号用(UG-625/U)、高圧用(SHV-BR)、低圧用(RM12BRD-3P)
- 7) 所要電源：高圧電源(500～1200V)、低圧電源(±24V)、
- 8) 外形寸法：約 φ 264×L520mm
- 9) 質量：約 20kg

(3) 副検出器

- 1) シンチレータ：φ 245×t50mm 円筒型プラスチックシンチレータ
- 2) 光電子増倍管：φ 2”サイズ
- 3) ディスクリレベル：多回転トリマ抵抗により 3～3.5MeV まで調節可能
- 4) 材質：主要部分はアルミ材
- 5) その他：検出器運搬時には周囲に保護フレームを取付け、検出器を保護できるようにする。

- 6) コネクタ：信号用(UG-625/U)、(高圧用；SHV-BR)、低圧用(RM12BRD-3P)
- 7) 所要電源：高圧電源(500～1200V)、低圧電源(±24V)
- 8) 外形寸法：約 $\phi 296 \times L360\text{mm}$
- 9) 質量：約 12kg

(4) 計測部

- 1) 検出器用電源：高圧電源(0～1200 V)、低圧電源(DC±24V)
- 2) コインシデンス回路：主検出器と 5 台の副検出器のコインシデンス信号を出力
- 3) スケーラ：入力使用チャンネル(6ch)、計数容量(24bit/ch)
インターフェース；RS-232C
- 4) 所要電源：AC100V、50/60Hz、約 1A
- 5) 外形寸法：約 380(W)×370(D)×250(H) mm
- 6) 質量：約 10kg

(5) 接続ケーブル

- 1) 検出器－計測部用：複合ケーブル； 5m×6 本
- 2) 計測部－PC 間：RS-232C ストレートケーブル；3m×1 本

(6) 計測データ収録システム

パーソナルコンピュータで WINDOWS XP 又は WINDOWS 7 の OS 使用可能なシステム

- 1) メディア：CD-R×1 枚
- 2) 主な機能：A.画面構成：1 画面
B.データ取込み数；6ch
C.計数容量；1～999999 カウント/ch
D.プリセット時間：1～9999sec または min
E.繰返し回数：1～99 回
F.表示書換え時間：1sec
G.画面表示：現在日付時刻
H.外部制御：スケーラの制御(START／STOP／RESET)
I.データの保存：保存形式；CSV 形式

(7) 品質検査

検査は以下の項目について実施した。

- 1) 員数・外観・寸法
- 2) 消費電流 (AC)
- 3) 動作試験
- 4) ディスクリレベルによる積分曲線(-0.5 から-1.5V まで 0.1V 刻みの主検出器
1 台と副検出器 1 台の単体およびコインシデンス計数)

2.2 マルチ計測器の製作

製作したマルチ計測器の写真を写真 2.2-1 に、図面を図 2.2-1 にそれぞれ示す。

上部に主検出器、下部に副検出器が 5 個配置してある。主検出器・副検出器とも直径は 24.5cm であり、検出器間の距離は平成 21 年製作の試作機 B と同じ(1.4m)である。主検出器と 5 台の副検出器で同時計数法によって計測し、5 つの方向を同時に計測することで計測時間を 1/5 に減らすことができる。

マルチ計測器の幅は約 2.2m、奥行きは 70cm、高さが 1.65m、全重量は 120kg である。マルチ計測器は、分解することが可能であり、最も重い部品（主検出器）で 12kg である。平坦かつ十分なスペースがあれば 1 人でも組立・分解が可能であり、各部品は 1m 以内に分割されている。そのため、途中が狭くなっている空間でも搬入が可能である。

上部の主検出器の形状を図 2.2-2 に示す。シンチレータを球形とすることにより 5 つの方向から見た断面積を同じにしている。副検出器は試作機 B と全く同じである（取り付け金具等があるため、外観は若干異なる）。

副検出器はシンチレータの上部に光電子増倍管があるが、ミュー粒子は非常にエネルギーが高いため、この程度の大きさの物体は計測には影響しない。試作機 A・B・C についても同様である。



写真 2.2-1 マルチ計測器の外観

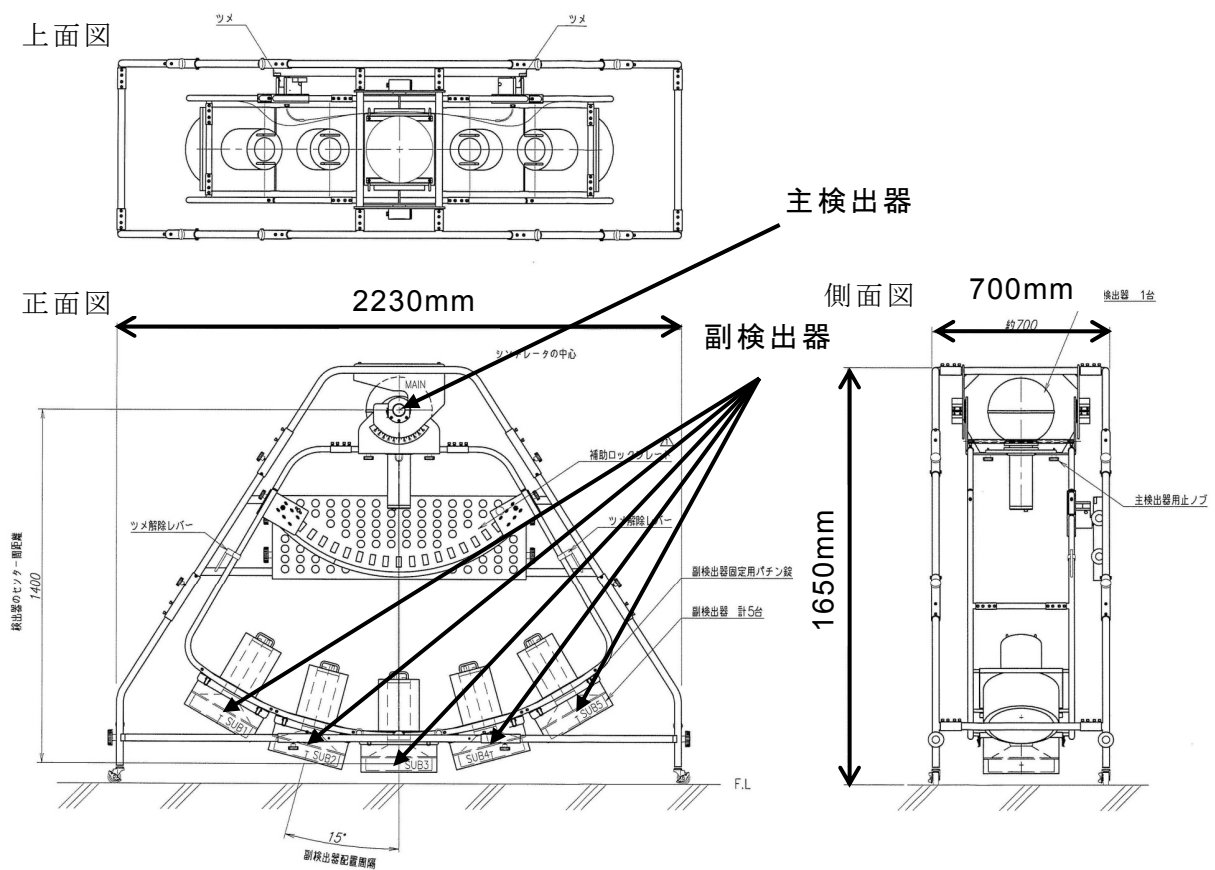


図 2.2-1 マルチ計測器の図面

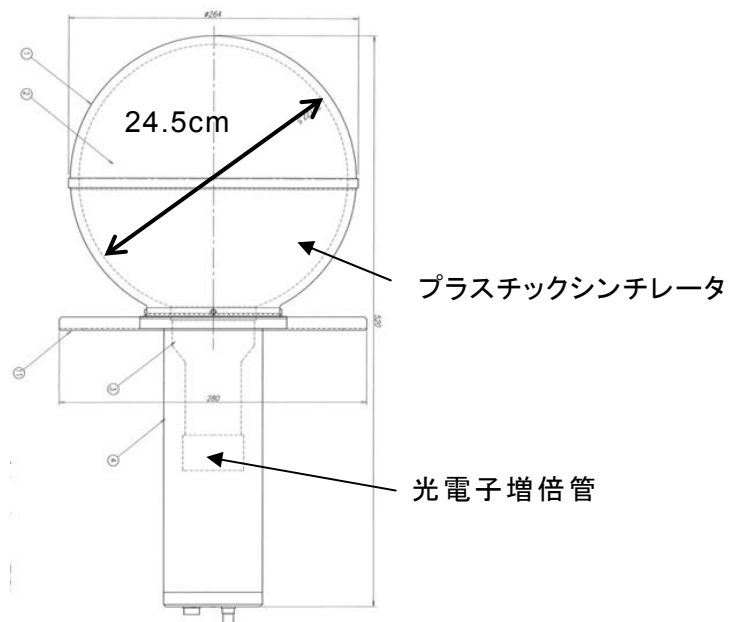


図 2.2-2 主検出器の図面

第3章 計測誤差の検討

3.1 空気中における宇宙線の時間変動

ミュー粒子の元となる宇宙線の量は太陽の活動（黒点数）と関係があり、黒点数の変動周期は11年である。図3.1-1は地表に到達する宇宙線のうち中性子成分の変化を示すグラフである（片岡，2010）。中性子の変動幅は最大で10%程度である。磁気嵐によって宇宙線強度が一時的に減少するフォーブッシュ現象による変動もある（英語では **Forbush decrease** というため、「フォーブッシュ減少」という訳語もある）。これは-10~-20%程度であり、1年に数回程度発生する（図3.1-2）。ただし、これらの変動幅は緯度経度により異なることが知られている。

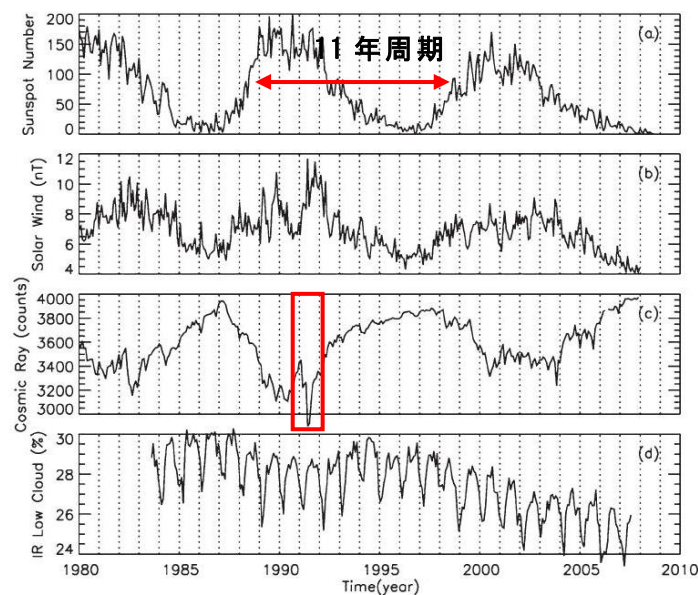


図1 (a) 太陽黒点数, (b) 太陽風磁場強度, (c) 宇宙線フラックス, (d) 全球平均低層雲量の太陽周期変化。

Fig.1 Long-term variations of (a) sun spot number, (b) magnetic field of the solar wind at the Earth, (c) neutron monitor (NM) counts at Oulu, and (d) low cloud amount.

図3.1-1 宇宙線の時間変動（片岡(2010)に加筆、四角は図3.1-2の範囲）

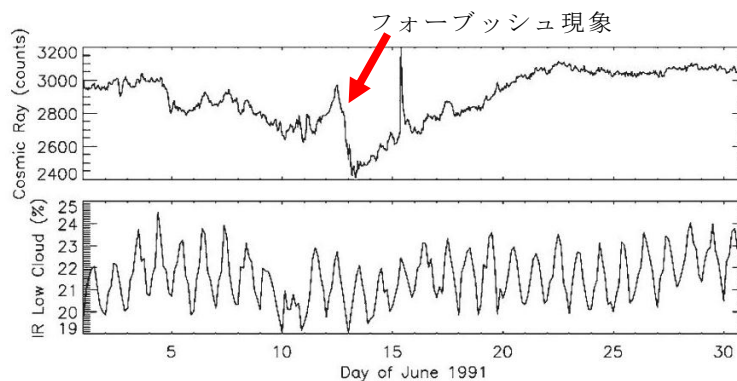


図3 1991年6月の宇宙線フラックス（上）と低層雲量（下）。

Fig.3 NM counts (top) and low cloud amount (bottom) during Forbush decrease in June 1991.

図3.1-2 1991年6月の宇宙線時間変動（片岡，2010）

図 3.1-3 に大気圧の効果による変動を示す。これは NaI 検出器で宇宙線の低吸収エネルギー成分 (3~7MeV) を測定したものである。計数誤差も含めて $\pm 5\%$ 程度の変動を示している。この期間の大気圧変動は $\pm 1\%$ 以内であり、ミュー粒子数と大気圧とは逆相関の関係にある。

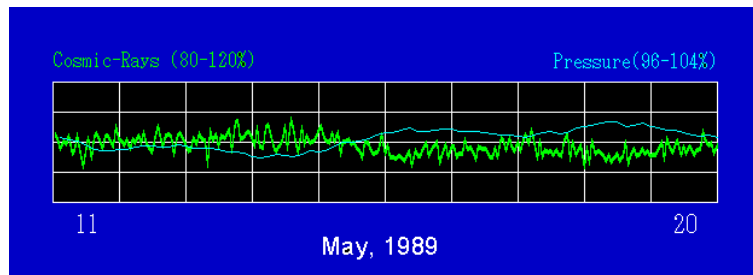


図 3.1-3 ミュー粒子の大気圧効果(Minato, 1992)

図 3.1-4 に 1989 年 4 月から 1990 年 3 月までの 1 年間のミュー粒子の時間変動の計測例を示す(平成 20 年度第 1 回委員会資料また <http://www3.starcat.ne.jp/~reslnote/AI8.htm>)。ミュー粒子の時間変動は最大 $\pm 5\%$ であるが、大気圧の効果を補正すると $\pm 2\%$ 程度となる。1989 年 10 月 20 日付近と 11 月 28 日付近に 3%程度急激にミュー粒子数が低下している。これがフォーブッシュ現象によるミュー粒子の変動である。このデータからミュー粒子のフォーブッシュ現象による変動は最大 3%程度であることがわかる (図 3.1-2 は中性子成分)。

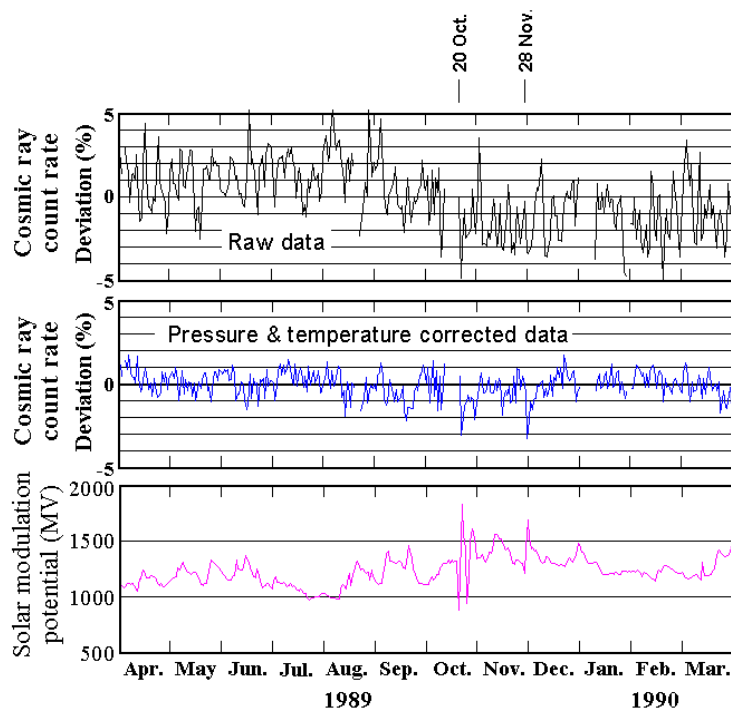


図 3.1-4 ミュー粒子のフォーブッシュ現象による変動

(<http://www3.starcat.ne.jp/~reslnote/AI8.htm>)

ミュー粒子についての空気中での長期間のデータは文献では見当たらなかったため、JAEA の HP で公開されている EXPACS というプログラムを用いて、2010 年 1 月 1 日から 6 月 30 日までの 181 日間について計算を実施した。EXPACS は宇宙線に含まれる α 粒子・中性子・陽子・電子・陽電子・光子 (γ 線)・ミュー粒子のそれぞれの成分を緯度経度および太陽活動から計算するプログラムである。ここではミュー粒子のみを示した。他の成分についても一次宇宙線の変動に依存するため、絶対数は異なるものの、変動幅はミュー粒子と同程度であると考えられる。計測機器は、マルチ計測器に搭載されている主検出器（直径 24.5cm の球形プラスチックシンチレータ）を想定した。

計算の結果を図 3.1-5 に示す。ミュー粒子の変動は 2%程度であり、半年間で徐々に減少しているように見える。これらのカウント数の平均値・標準偏差・変動係数は表 3.1-1 に示すとおりである。

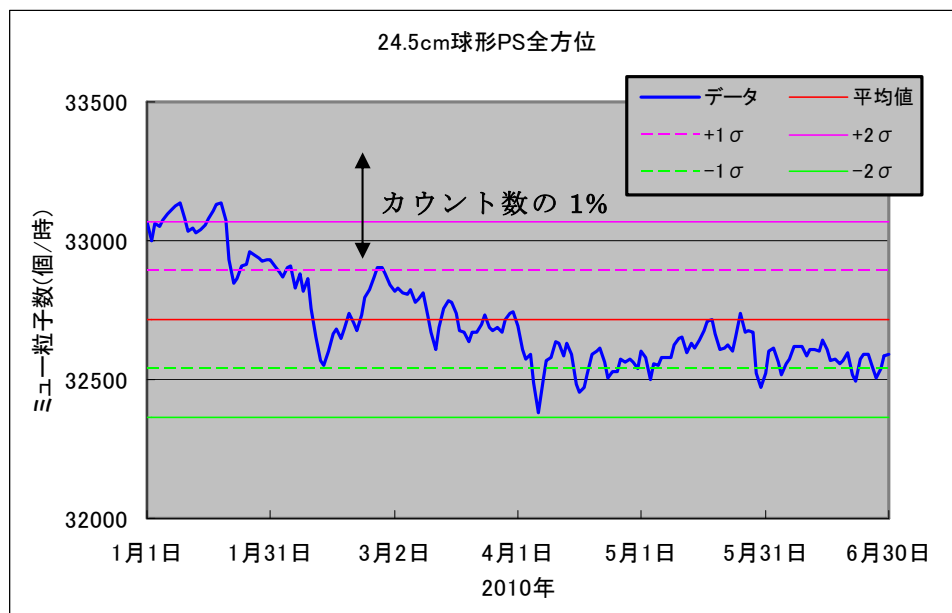


図 3.1-5 2010 年前半の地表面でのミュー粒子数変動

表 3.1-1 2010 年前半の地表面でのミュー粒子数の平均値・標準偏差・変動係数

平均値(個/時)	32,714
標準偏差	176.21
変動係数(%)	0.54

3.2 地下におけるミュー粒子の時間変動

面密度 50hg/cm² の場所（密度を 2.5g/cm³ とすれば深さ 20m）で測定した 1971 年 9 月 15 日から 28 日までのミュー粒子の計測例を図 3.2-1 に示す(Ichinose *et al.*, 1972)。この研究はミュー粒子の異方性（方角による違い）を研究することが目的である。V は鉛直、N・E・W・S はそれぞれ天頂角 40 度方向の同時計数法によるものである。縦軸は正規化されていて、両矢印が 0.2%を示す。参考のため一番下には気圧の変化が示されている。

このデータからは、方位による違いは認められるもののフルスケールの変動幅は 0.5% 程度であることがわかる。

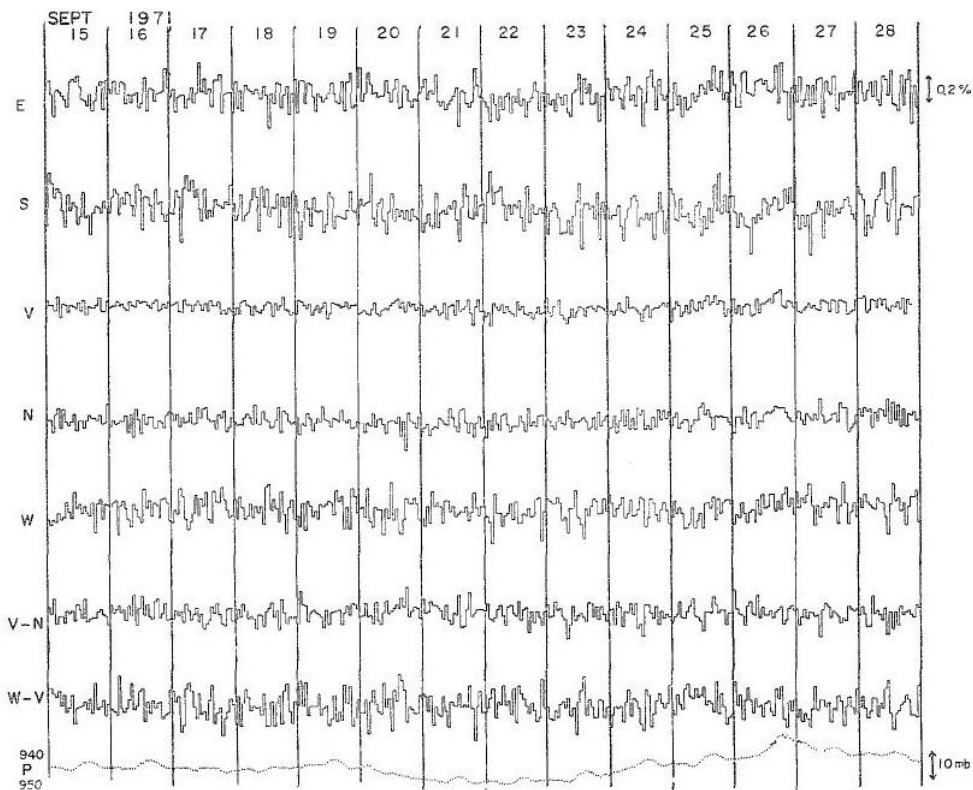


図 3.2-1 密度 2.5g/cm³、深さ 20m におけるミュー粒子の変動(Ichinose *et al.*, 1972)

3.3 試作機 A によるカウント数誤差の検討

図 3.3-1 都内の鉄筋コンクリートビルの 6 階で計測した全方位の時系列データである。装置は試作機 A であり、1 回の計測を 2 時間とし、24 回繰り返したものである。平均値と標準偏差の 1 倍と 2 倍の和と差の線も示している。これをカウント数の昇順に並べ替えたのが図 3.3-2 である。

図 3.3-3 は同時計数データの時系列データ、図 3.3-4 はその昇順に並べ替えたものである。

図 3.3-5～3.3-8 は平成 20 年度の現地計測（土被り 6.7m）における同様の時系列データである。

これらのデータを標準偏差との関係でまとめたのが表 3.3-1 である。カウント数±標準偏差の範囲の計測数は、理論的には 68.27%である。実測値では、62.50～78.13%であり、ほぼ理論値と整合している。カウント数±標準偏差の 2 倍以内の計測回数は理論的には 95.44%である。実測値では、93.75～95.83%であり、概ね理論と一致している。

参考のため表 3.3-2 に試作機 A による 2 箇所の計測データの平均値・標準偏差・変動係数をまとめた。平均値の平方根も併記したが標準偏差の値にほぼ等しくなっている。

以上のデータからカウント数 N のばらつきは、理論どおり $N \pm \sqrt{N}$ であることが示された。

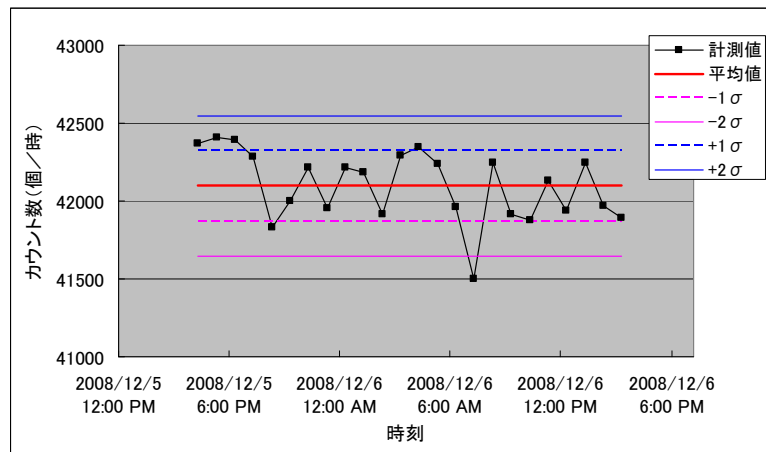


図 3.3-1 鉄筋コンクリートビル 6 階全方位計測値（時系列）

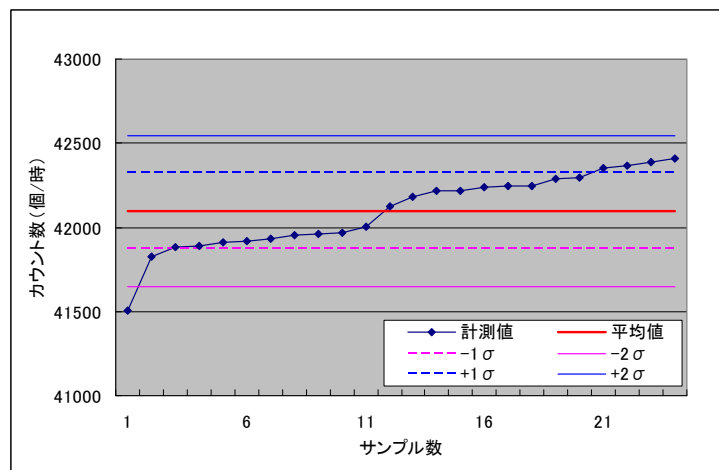


図 3.3-2 鉄筋コンクリートビル 6 階全方位計測地（昇順並べ替え）

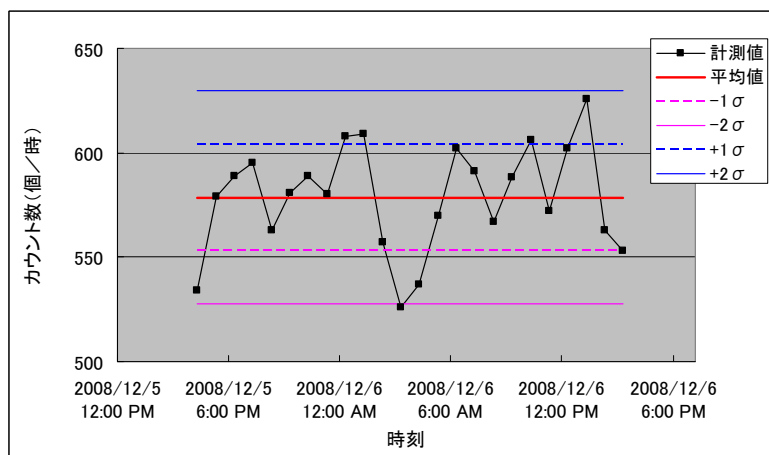


図 3.3-3 鉄筋コンクリートビル 6 階同時計数（時系列）

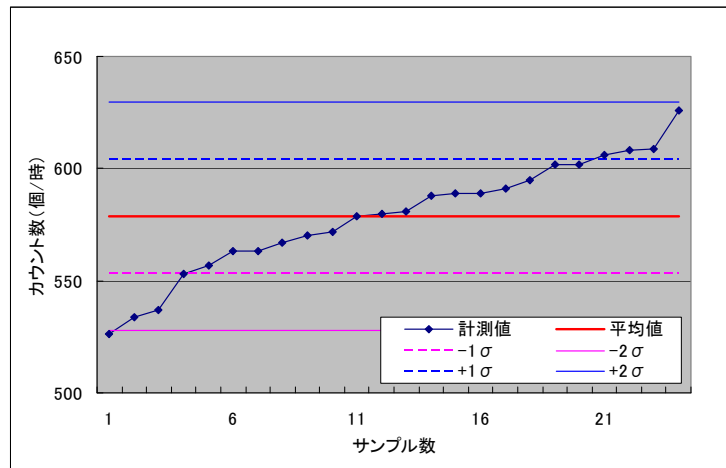


図 3.3-4 鉄筋コンクリートビル 6 階同時計数（昇順並べ替え）

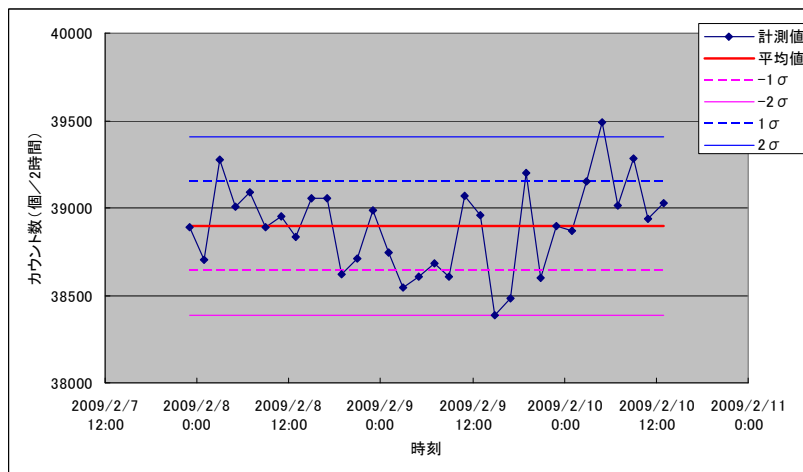


図 3.3-5 平成 20 年度地下計測全方位データ（時系列）

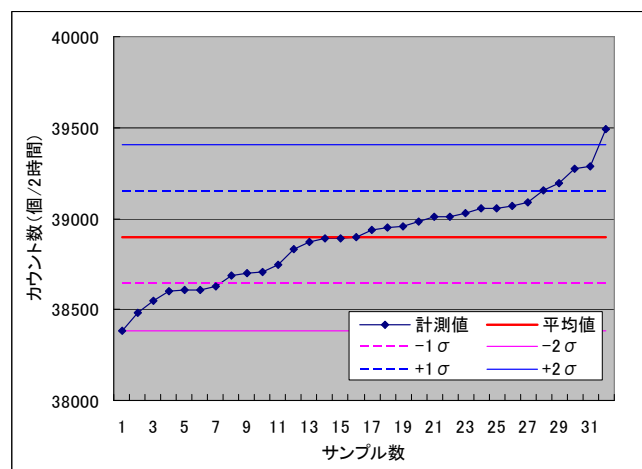


図 3.3-6 平成 20 年度地下計測全方位データ（昇順並べ替え）

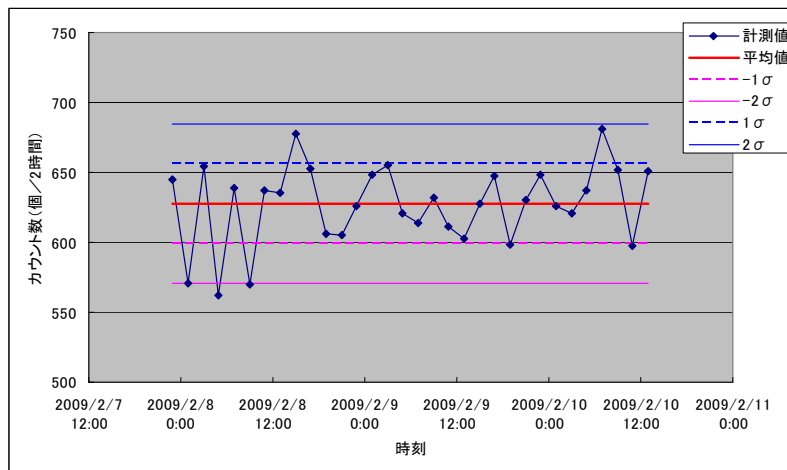


図 3.3-7 平成 20 年度地下計測同時計数（時系列）

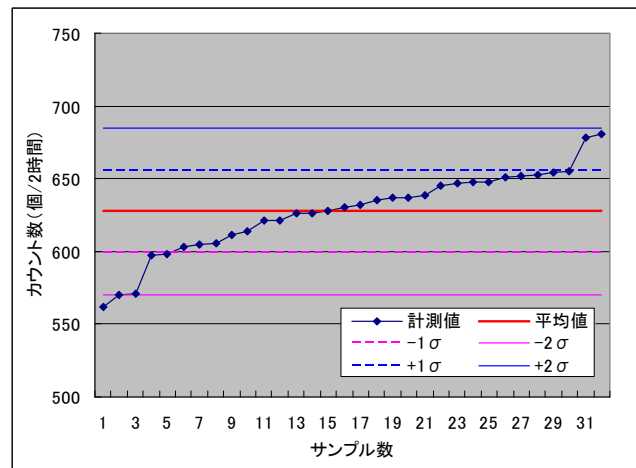


図 3.3-8 平成 20 年度地下計測全方位同時計数（昇順並べ替え）

図 3.3-9 はカウント数と変動係数の関係を示したグラフである。グラフの軸は両対数になっている。変動係数はカウント数の増加とともに減少する。しかし、カウント数 1000 以下になると、計測時間がかかるわりに変動係数は低下しない。変動係数 3% から 1% に下げるには、カウント数 1000 のときの 10 倍の時間を必要とする。

一方、図 3.1-5 に示したように半年間のミュオン粒子の地表面（空气中）の変動は最低でも 2% 以上である。土被り 20m 程度の地下では 1% 以下に変動幅は低下する事例が報告されているが、このデータは 2 週間程度の短いものである。半年間の計測データでは 2% 程度の変動が生じる可能性がないとはいえない。

以上のことから、計測誤差は変動係数 2～3% 程度以下（カウント数では 1000～2500 程度以上）を計測時間とすることが現実的であると考えられる。

表 3.3-1 屋内および地下における連続計測結果のまとめ

測定場所	測定方法	測定回数	外れた個数		割合(%)	理論割合(%)	差(%)
鉄筋コンクリート ビル 6 階	全方位	24	8	$\pm 1 \sigma$	66.67	68.27	1.60
			1	$\pm 2 \sigma$	95.83	95.44	-0.39
	同時計数		8	$\pm 1 \sigma$	66.67	68.27	1.60
			1	$\pm 2 \sigma$	95.83	95.44	-0.39
H2O 地下計測 データ	全方位	32	12	$\pm 1 \sigma$	62.50	68.27	5.77
			2	$\pm 2 \sigma$	93.75	95.44	1.69
	同時計数		7	$\pm 1 \sigma$	78.13	68.27	-9.86
			2	$\pm 2 \sigma$	93.75	95.44	1.69

表 3.3-2 屋内および地下における連続計測結果の平均値・標準偏差・変動係数

	鉄筋コンクリートビル 6 階		H2O 地下計測データ	
	全方位	同時計数	全方位	同時計数
平均値	42,097.13	578.63	38,894.91	627.53
標準偏差	225.06	25.51	254.93	28.57
変動係数(%)	0.53	4.41	0.66	4.55

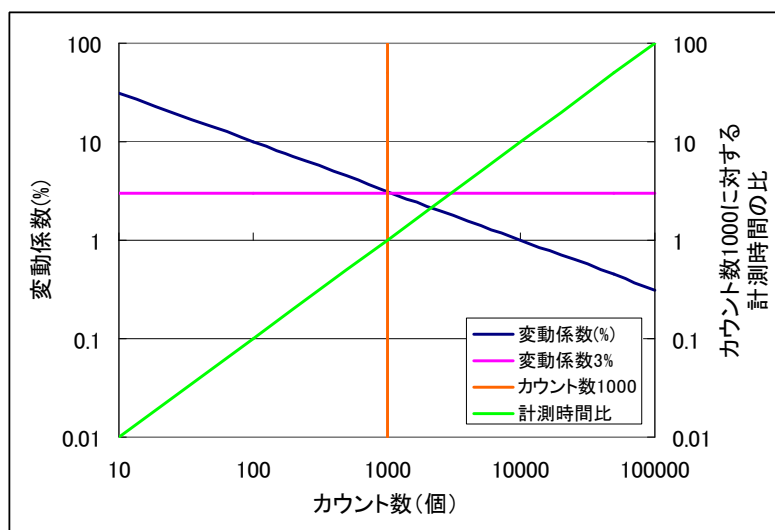


図 3.3-9 カウント数、変動係数および計測時間比との関係

3.4 カウント数の誤差が面密度の計算値に与える影響

図 3.4-1 にカウント数と変動係数 ($\sqrt{N}/N \times 100(\%)$) の関係を示した。この変動係数が土被りの誤差に与える影響についても併記した。この誤差は、カウント数 N に対して、 $N \pm \sqrt{N}$ のときの面密度を湊(1992)の式で計算し、 $N - \sqrt{N}$ のときの面密度 h_- と $N + \sqrt{N}$ のときの面密度 h_+ との差の半分 $\Delta h (= (h_- - h_+)/2)$ を、カウント数 N のときの面密度 h_n で割ったもの ($\Delta h/h_n \times 100(\%)$) である。この誤差をカウント数誤差が面密度に与える影響と考えることにする。

土被りが一定の場合、面密度の誤差の割合は、土被りの誤差そのものである（あるいは土被りが一定であれば、密度の誤差と考えることもできる）。カウント数の変動係数が下がっても、土被りの誤差は 2% で底打ちとなり、それ以上は下がらないことがわかる。

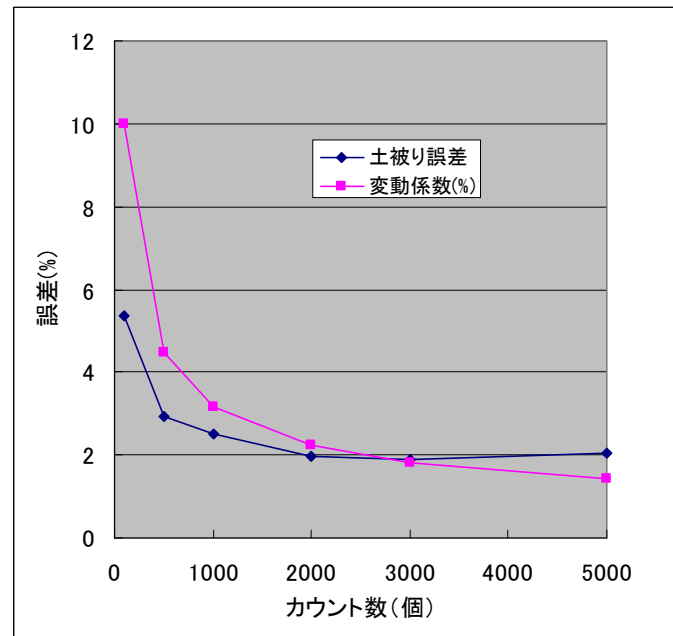


図 3.4-1 カウント数と誤差の関係

3.5 偶然同時計数

同時計数法には二つの検出器に同時に別のミュー粒子が通過することがある。これを偶然同時計数（チャンス・コインシデンス）という。これを評価するには次式を用いる。

$$C = 2N_1N_2\Delta t \quad (3.5-1)$$

ここで、

C : 偶然同時計数

N_1 : 1 秒あたりの検出器 1 のカウント数

N_2 : 1 秒あたりの検出器 2 のカウント数

Δt : 同時計数回路の時間幅

である（Kinoshita, 1997）。

今年度の現地計測においては、試作機 A の場合、15 時間の計測時間に対して、検出器 1 のカウント数は約 240,000 である。検出器 2 のみのカウント数は表示されないが、検出器の形状は全く同じであり、距離も近いことから、検出器 1 と同じと考えてよい。同時計数回路の時間幅は 600ns (1ns=10⁻⁹s) である。これらの値を(3.5-1)式に代入すると、偶然同時計数は 2.37×10⁻⁵ 個/s である。計測時間あたりに換算すると 1.28 個となり、ほとんど偶然同時計数は起こっていないことがわかる。試作機 B・C の場合は検出器が小さいため $N_1 \cdot N_2$ が小さくなり、従って偶然同時計数も小さくなる（表 3.5-1）。

表 3.5-1 試作機ごとの偶然同時計数

試作機	カウント数	計測時間（時）	1s あたり 偶然同時計数	計測時間あたり 偶然同時計数
A	240,000	15	2.37×10^{-05}	1.28
B	140,000	23	3.43×10^{-06}	0.28
C	70,000	23	8.58×10^{-07}	0.07

3.6 計数誤差についてのまとめと考察

- (1) 自然宇宙線の変動は最も大きいもので 11 年周期であり、その変動幅はミュー粒子の場合半年程度の期間では 2%程度であり、時間変動に一定の傾向があるように見える。
- (2) フォーブッシュ現象によるミュー粒子の時間変動は、数日間におよび変動幅は最大 3%である。
- (3) 地下におけるミュー粒子の変動は 0.5%程度である。
- (4) 試作機 A による連続測定データのばらつきは、統計誤差の理論（ポアソン分布に従う）と整合していることがわかった。
- (5) カウント数 1,000～2,500（変動係数約 2～3%）以上が実用上必要なカウント数と考えられる。
- (6) カウント数の統計誤差（変動係数）を低下させても、土被りの誤差は 2%までしか下がらない。
- (7) 試作機（A・B・C）による地下実験の計測時間の場合、偶然の同時計数は全くデータに影響を及ぼさない。

このうち計数値およびトモグラフィ解析に影響を及ぼす可能性のあるものは①および②である。これを調べるために、試作機 B について、図 3.6-1 に示すような条件で数値計算を行った。後述する現地計測の土被りと埋設管を配置した。埋設管の内径は 1.35m である。測点は 1m 間隔とした。地盤の平均密度は 1.81g/cm^3 である。

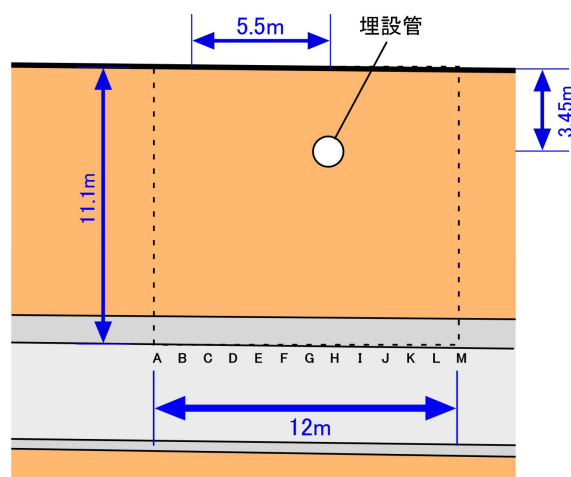


図 3.6-1 ミュー粒子の時間変動の影響を調べるために使用した数値モデル

図 3.6-2 は A 地点から M 地点までの天頂角ごとの面密度の分布（以降、面密度マップと呼ぶ）である。計数誤差として 2% のランダム・ノイズを加えたものが図 3.6-2 の左上である。図の左下から右上に向けて低面密度（青色）が確認できる。

これに計測開始から終了までに 2% 減少するように計数を調整した上で、作成した面密度マップが同図右上である。A 地点から計測を開始し、M 地点まで順に計測したため、埋設管による低面密度は、左の図と比べると、M 地点側で明瞭に見える。これに H 地点計測時にフォーブッシュ現象が発生したと仮定した面密度マップが図 3.6-2 の左下である。H 地点で面密度が若干増加しているのが確認できる。面密度マップはそれぞれ異なっているように見えるが、埋設管を見落とすことはないものと考えられる。

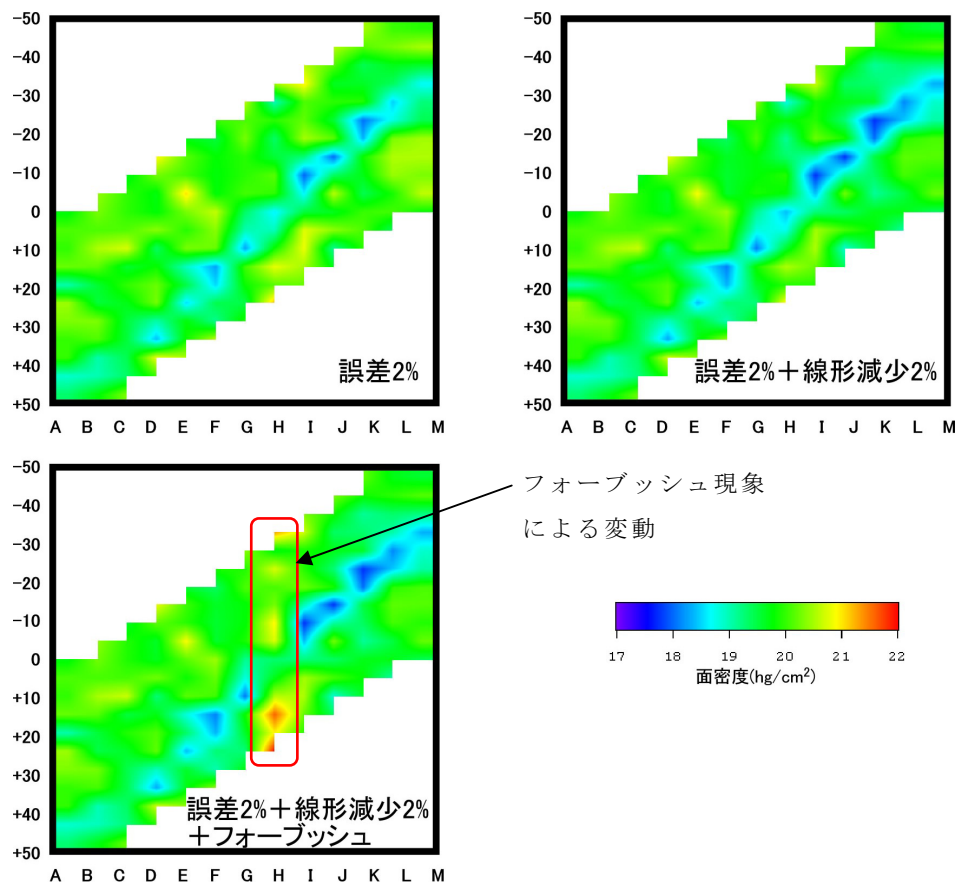


図 3.6-2 時間変動調査用面密度マップ

この面密度の値を使って二次元トモグラフィ（平成 21 年度開発）アルゴリズムで計算を行ったのが図 3.6-3 である。同図左上は計数誤差 2%、右上はそれに線形に 2% 減少するモデル、左下はさらにフォーブッシュの効果を入れたもの、右下が初期モデルである。これらの結果を比較したものが表 3.6-1 である。地盤に相当する範囲の密度の平均値と誤差 2% の密度平均値との差についても併記した。線形の誤差やフォーブッシュによる誤差との差は、1% 以内であり、トモグラフィ解析に与えるミュー粒子の 2~3% 程度の時間変動の影響はほとんどないものと考えられる。

以上の議論からミュー粒子の時間変動は、空洞探査に与える影響はほとんどないものと考えられる。しかし、より精密な計測の場合には、ミュー粒子の時間変動を考慮する必要がある可能性はある。地下において長期間の連続計測のデータを取得するなど、今後検討をする必要がある。

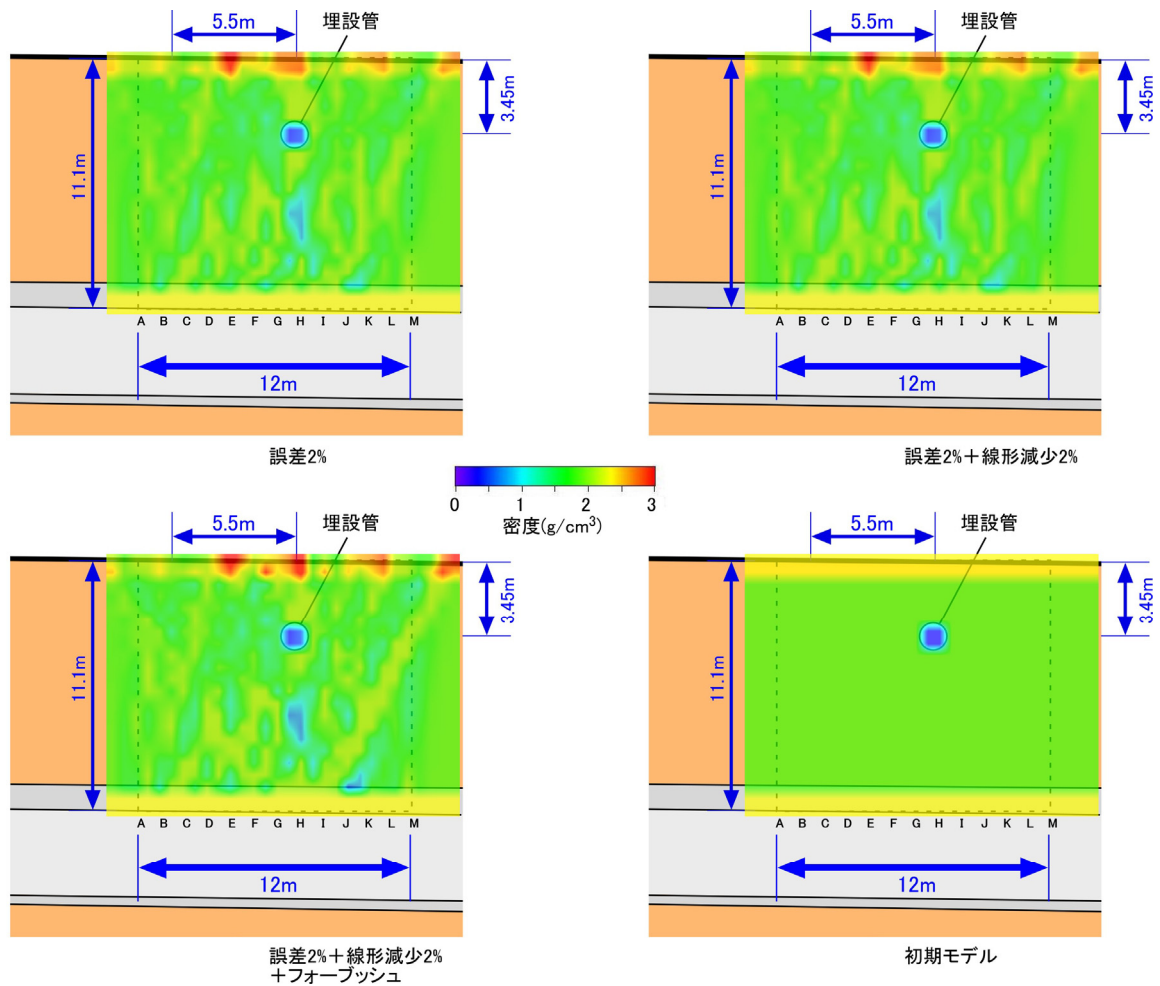


図 3.6-3 時間変動調査用二次元トモグラフィ初期モデルと解析結果

表 3.6-1 密度の平均値と誤差 2%のときとの差

	密度平均値 (g/cm ³)	誤差2% との差
誤差2%	1.708	-
誤差2% +線形2%	1.692	-0.957
誤差2%+ 線形2%+FB	1.696	-0.738

第4章 マルチ計測器の動作確認試験

4.1 室内試験

現地計測に持ち込む前に動作確認試験を兼ねて、鉄筋コンクリートビル6階で2時間の連続計測を12回（計24時間）行った。図4.1-1は検出器ごとの時系列データである。主検出器のみカウント数が大きいため、縦軸は右側に別に設定した。エラーバーは 2σ を示す。

表4.1-1に連続計測の結果を示す。左右の対称な検出器の値が異なっているのは、建物の中心から外れたところで計測しているためである。2時間後の計測値は概ね 2σ の範囲に入っているが、それを超える値も計測されている。 2σ を超える誤差は20回に1回程度は生じるため、統計誤差であると考えられる。

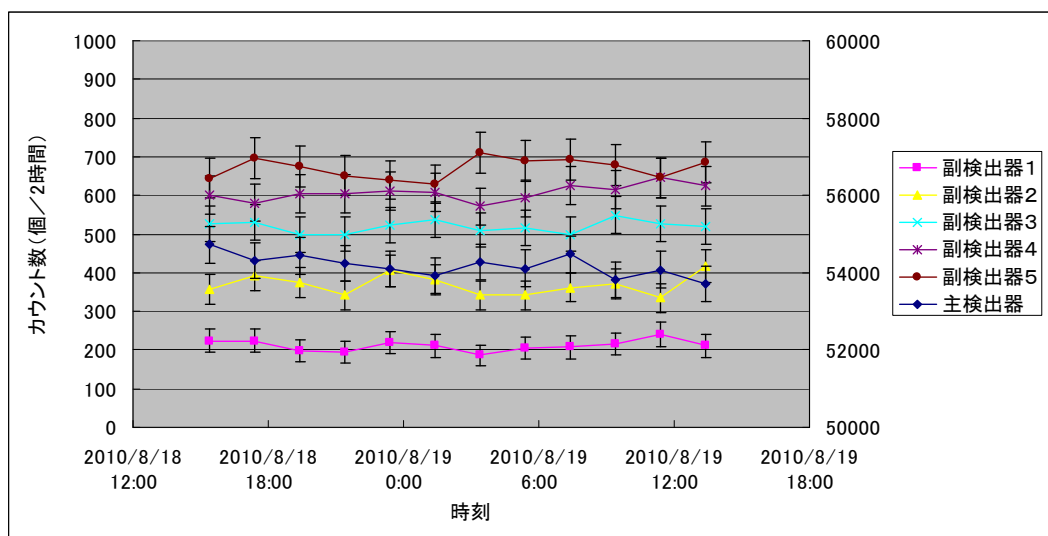


図 4.1-1 鉄筋コンクリートビル6階での連続計測結果

表 4.1-1 鉄筋コンクリートビル6階での連続計測結果一覧

	主検出器 (全方位)	副検出器 1	副検出器 2	副検出器 3	副検出器 4	副検出器 5
全カウント数	65,0208	2,531	4,421	6,235	7,283	8,035
2時間平均値	54,184.00	210.92	368.42	519.58	606.92	669.58
標準偏差	290.36	14.80	27.08	16.08	19.87	26.21

次に副検出器のばらつきを調べるために、同じ場所で角度を変えて測定を行った。中心にある副検出器3の天頂角を+30度、+15度、0度、-15度、-30度に設定して、2時間×12回（=1日）の計測を行った。図4.1-2にその結果を示す。カウント数は、1日分の集計である。エラーバーは 2σ を示す。同じ角度で別の副検出器の場合でも、ほぼ同じ値が得られており、天頂角-45度以外は個々の計数値は、エラーバーの範囲内にある。従って、副検出器のばらつきはほとんどないものと考えられるが、空気中のデータなどで検証する必要がある。

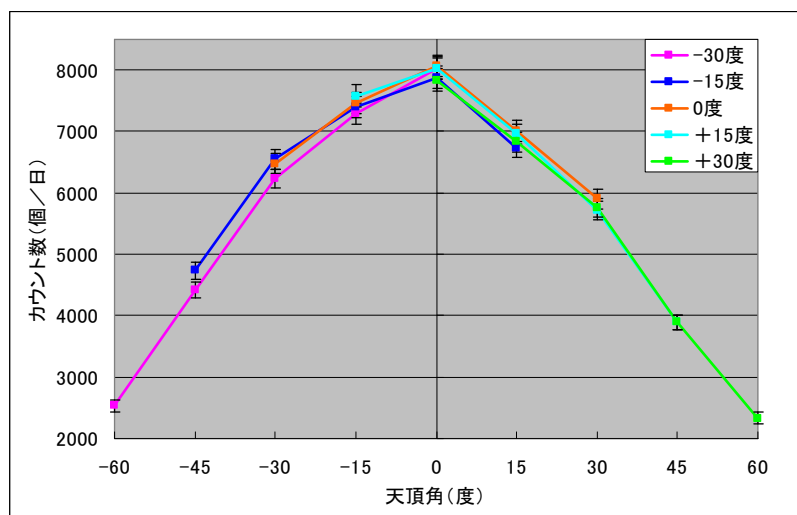


図 4.1-2 同じ場所で角度を変えたときの計測結果（1日の集計）

4.2 地下計測

(1) 連続計測

後述する地下計測を行った地点においてもトモグラフィ計測の前に動作確認を兼ねて、2時間×8回の連続計測を行った。その結果を図 4.2-1 および表 4.2-1 にそれぞれ示す。それぞれの検出器の時系列とエラーバー(2σ)を示した図は報告書 p34～p35 参照。第3章で検討したように、計測値は概ね 1σ の範囲に入っている。

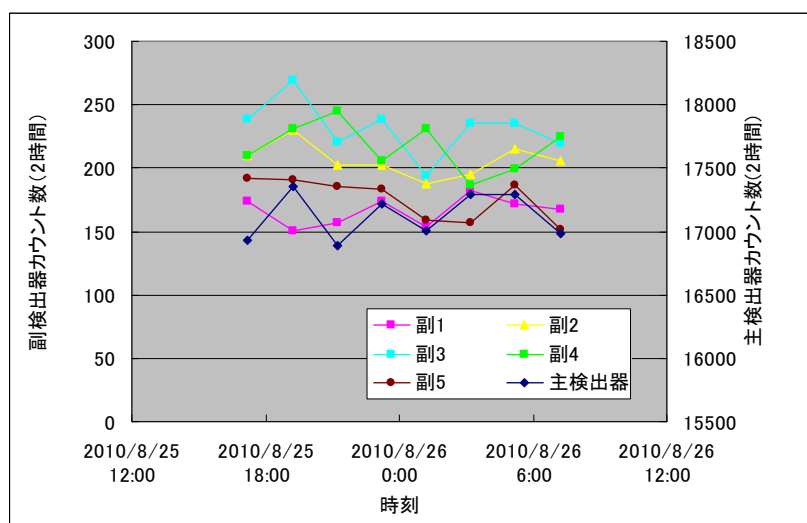


図 4.2-1 地下連続計測結果

表 4.2-1 地下連続計測結果一覧

	主検出器 (全方位)	副検出器 1	副検出器 2	副検出器 3	副検出器 4	副検出器 5
全カウント数	136,975	1,332	1,649	1,849	1,734	1,407
2時間平均値	17,190.67	174.00	205.33	229.67	203.67	165.33
標準偏差	188.22	11.16	12.78	21.46	19.40	16.81

(2) 試作機 B との比較

前述のとおり、マルチ計測器は試作機 B と同じ断面積・立体角である。従って、同じ場所同じ時間の計測では、同じカウント数が得られるはずである。地下計測の No.1 測線 H 地点（位置関係は後述）における計測結果を図 4.2-2 に示す。エラーバーは 2σ を示している。試作機 B による計数値は、マルチ計測器の 2σ のエラーバーの範囲内にあり、ほぼ同じカウント数が得られているといえる。従って、両者は同等の性能であることが確認できた。

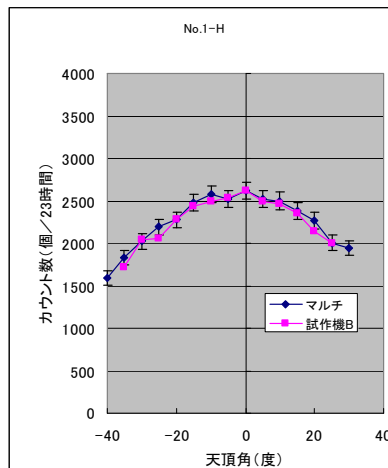


図 4.2-2 マルチ計測器と試作機 B による同一地点での計測結果

(3) 左右の検出器のばらつき

マルチ計測器の各検出器のばらつきを室内試験で調べ、ほとんどばらつきがないことを確認した。従って、マルチ計測器の左右を入れ替えても同じデータがとれるはずである。

地下計測の No.3 測線 X 地点において左右を入れ替えたときの値を図 4.2-3 に示す。エラーバーは 2σ を示す。天頂角 15 度付近では 2σ を少し越えている値が認められるが、20 回に 1 回程度は 2σ 以上の違いが生じることは第 3 章で検討したとおりである。そのそれ以外は、ほとんどの角度で計測値は良く合っている。

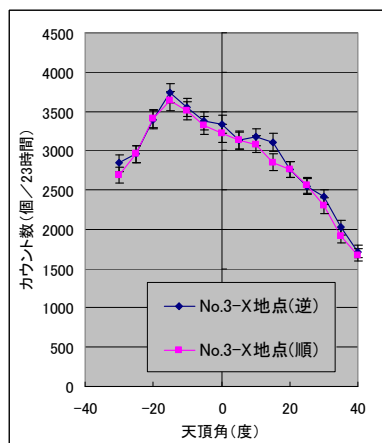


図 4.2-3 マルチ計測器と試作機 B による同一地点での計測結果

(4) 計測時間の短縮

試作機 B では各天頂角を一点ずつ計測している。現在の計測時間は一地点あたり 23 時間であり、試作機 B で 15 点を計測するには、15 日必要となる。一方、マルチ計測器は一測定点あたり 3 日 (23 時間) で 15 点の計測を行っている。すなわちマルチ計測器の場合、試作機 B に比べて計測時間は 5 分の 1 に短縮されたことになる。データの品質についても試作機 B と同程度であり、マルチチャンネル化により、データの質を低下させずに計測時間の効率を 5 倍に向上させたことが示された。

第5章 現地計測

5.1 二次元・三次元トモグラフィデータの取得

試作機 B・C について昨年度は 2 地点のデータ取得のみであり、トモグラフィ解析には至っていない。今年度は、昨年同様に試作機 A と同じトモグラフィデータを取得し、昨年度開発した二次元トモグラフィ解析アルゴリズムを用いて、可視化することを試みた。

今年度試作したマルチ計測器については、後述する三次元トモグラフィ解析アルゴリズムを適用するために 3 本の平行な測線を配置し、三次元的なデータを取得した。

図 5.1-1 に断面図を、図 5.1-2 に平面図をそれぞれ示す。二次元トモグラフィの測線は昨年度と同じであり、A 地点から M 地点まで 1m ピッチのデータと、データの密度を上げるためにその間に 0.5m 間隔にも測点を配置した。試作機 B・C による二次元トモグラフィの測線は、図 5.1-2 に示す青色の線である。測線長は 12m である。

マルチ計測器による測線は図 5.1-2 に示す赤色の線である。計測地点の都合で、No.2 測線と No.3 測線は J～M 地点にマルチ計測器を設置することができなかった。そのため、A 地点の左側に 3 点（X・Y・Z 地点）を設け、I 地点までとした。測点間隔は 1m であり、測線長は 11m である。No.1 のみ試作機 B・C との比較のために M 地点まで測点を設けた。表 5.1-1 に各測線の説明をまとめた。測定状況写真を図 5.1-2 に示す。

測定は試作機 B・C は平成 22 年 3 月初旬から開始し、平成 22 年 12 月末まで、マルチ計測器は、製作完了後平成 22 年 8 月下旬から平成 23 年 1 月下旬まで行った（作業工程は、報告書 p40～p44 参照）。

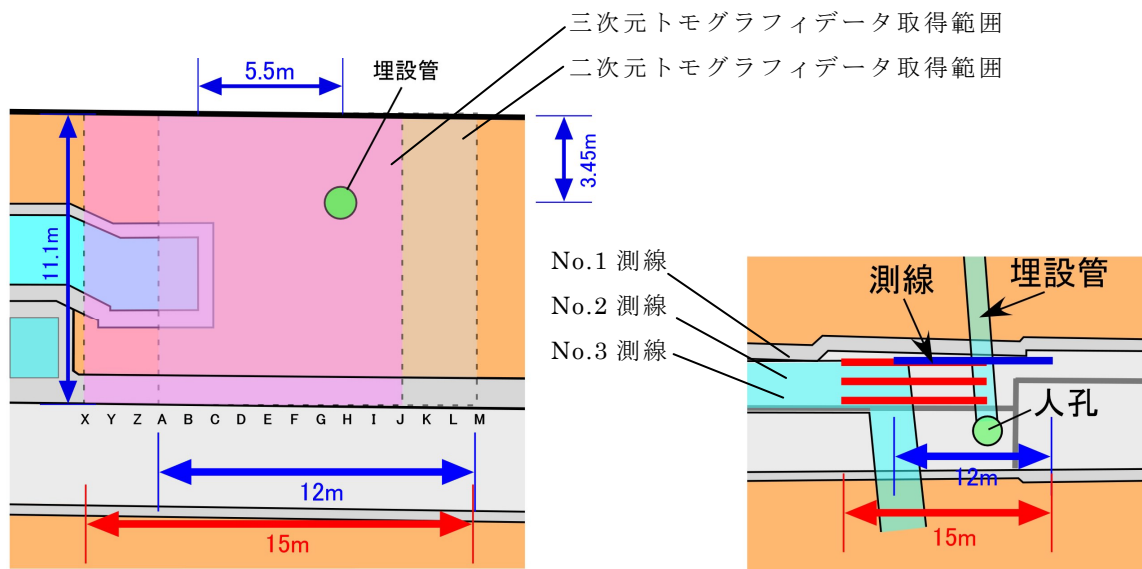


図 5.1-1 測線配置断面図

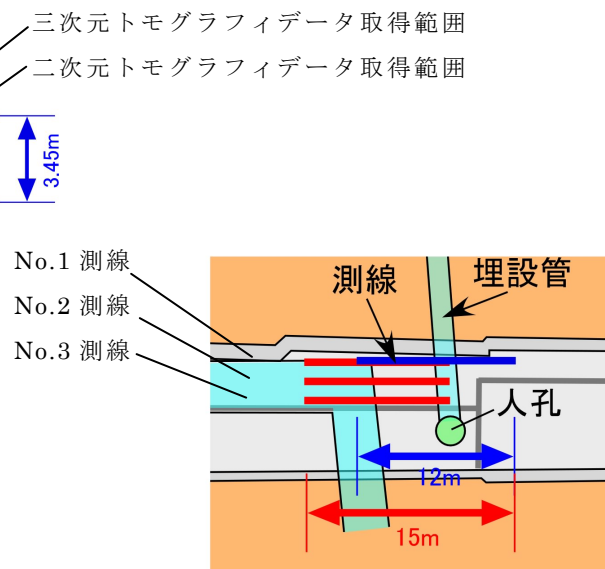


図 5.1-2 測線配置平面図

表 5.1-1 各機器による測線配置

測線名	試作機 B	試作機 C	マルチ計測器	備考
No.1	目的： 二次元トモグラフィ データの取得 測点：A～M 地点を 0.5m 間隔	目的： 二次元トモグラフィ データの取得 測点：A～M 地点を 0.5m 間隔	目的： 三次元トモグラフィ データの取得 測点：X～M 地点を 1m 間隔	平成 21 年度は試作 機 A で No.1 測線 A ～M 地点において 1m 間隔のデータを 取得
No.2			目的： 三次元トモグラフィ データの取得 測点：X～I 地点を 1m 間隔	
No.3			目的： 三次元トモグラフィ データの取得 測点：X～I 地点を 1m 間隔	



写真 5.1-1 試作機 B・C による計測状況

5.2 計測データ例

(1) 試作機 B・C による取得データ

図 5.2-1 に A～M 地点における試作機 B による 1m 間隔の計測データを示す。天頂角に対して左右対称の分布を示している。図 5.2-1 の右側は面密度（＝密度×土被り）を計算した結果である。天頂角が大きいところは面密度が大きくなっている。これは、地表にある建物などの影響であると考えられる。地盤の平均面密度は $18\sim19\text{hg/cm}^2$ 程度である。土被りが 11.1m であるから、地盤の密度は、 $1.62\sim1.72\text{g/cm}^3$ である。

図 5.2-2 に 1m 間隔の計測点の間に 0.5m ずらして設けた AB～LM の計測値を示す。面密度は図 5.2-1 と同様の値となっている。

図 5.2-3、図 5.2-4 に試作機 C による A～M 地点、AB～LM 地点のデータをそれぞれ示す。面密度の値は、試作機 B と同様の値になっている。

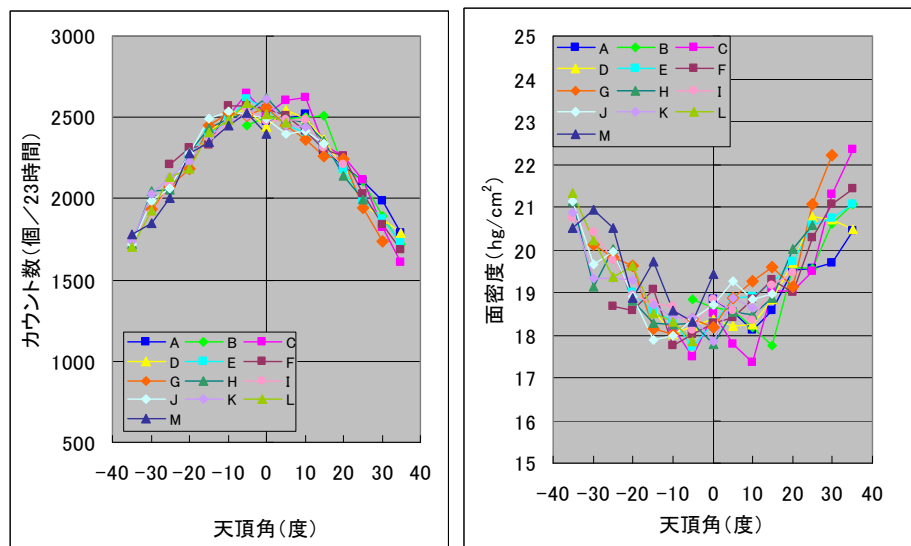


図 5.2-1 試作機 B による A～M 地点の計測データ（カウント数、面密度）

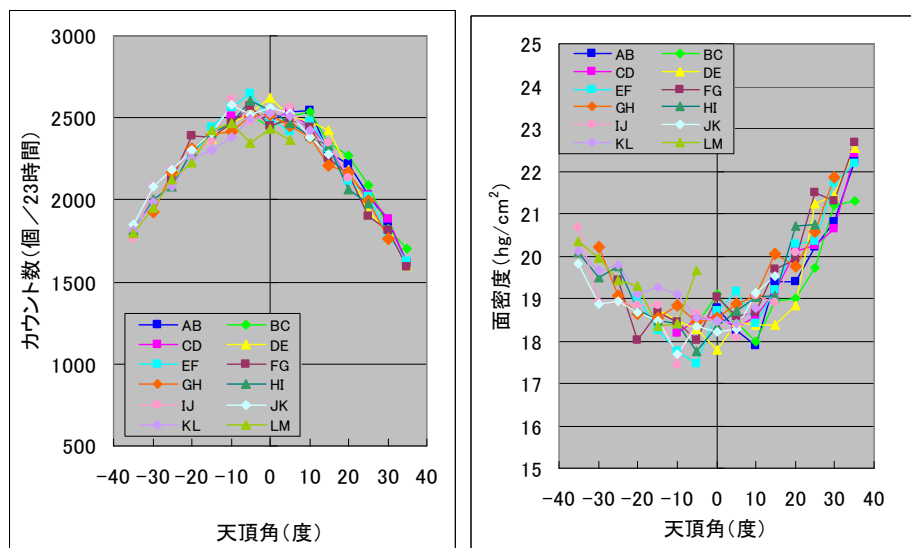


図 5.2-2 試作機 B による AB～LM 地点の計測データ（カウント数、面密度）

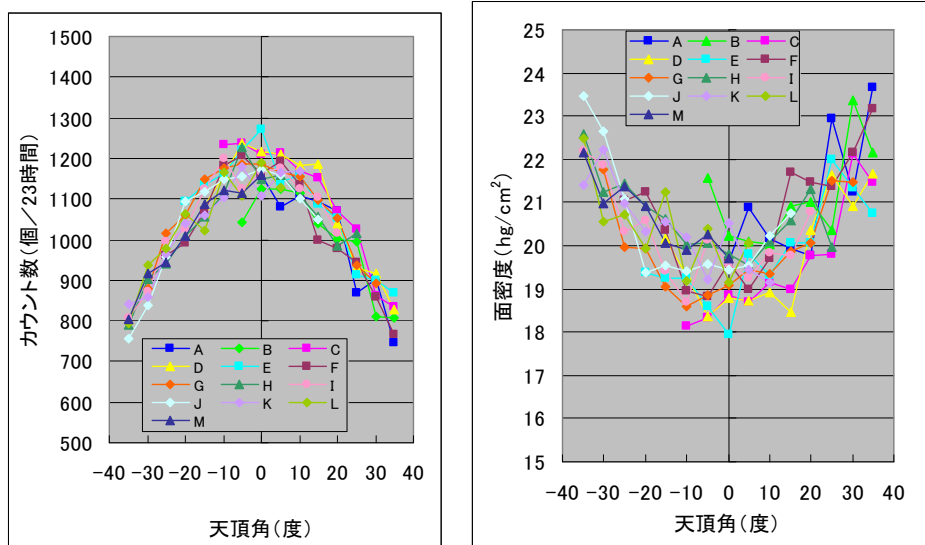


図 5.2-3 試作機 C による A~M 地点の計測データ（カウント数、面密度）

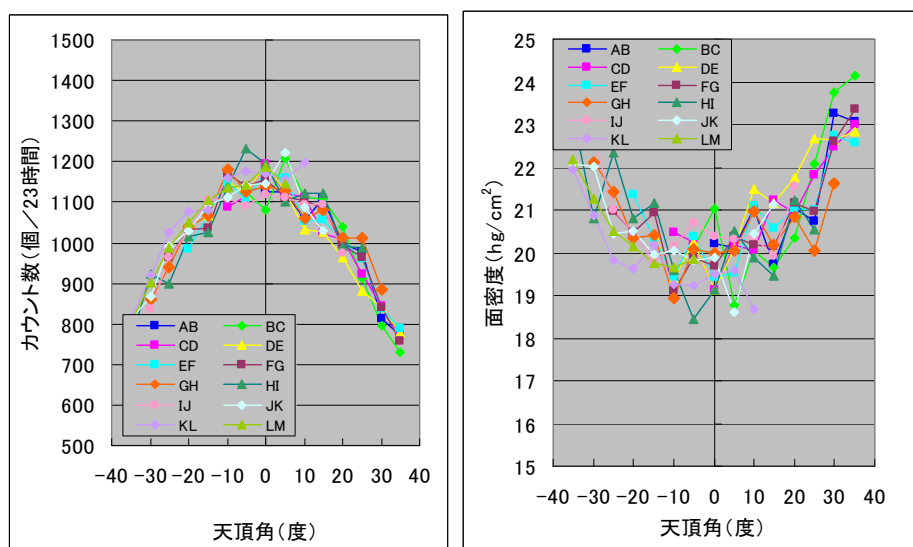


図 5.2-4 試作機 C による AB~LM 地点の計測データ（カウント数、面密度）

(2) マルチ計測器による取得データ

図 5.2-5 にマルチ計測器による各地点の計測データ（かさ密度）を示す。各測線とも No.3 測線では X・Y・Z 地点など測線の左側でかさ密度が小さくなっている。これは通路の影響と考えられる。測線の右に行くに従って通路から遠ざかるため、かさ密度も徐々に大きくなっている。

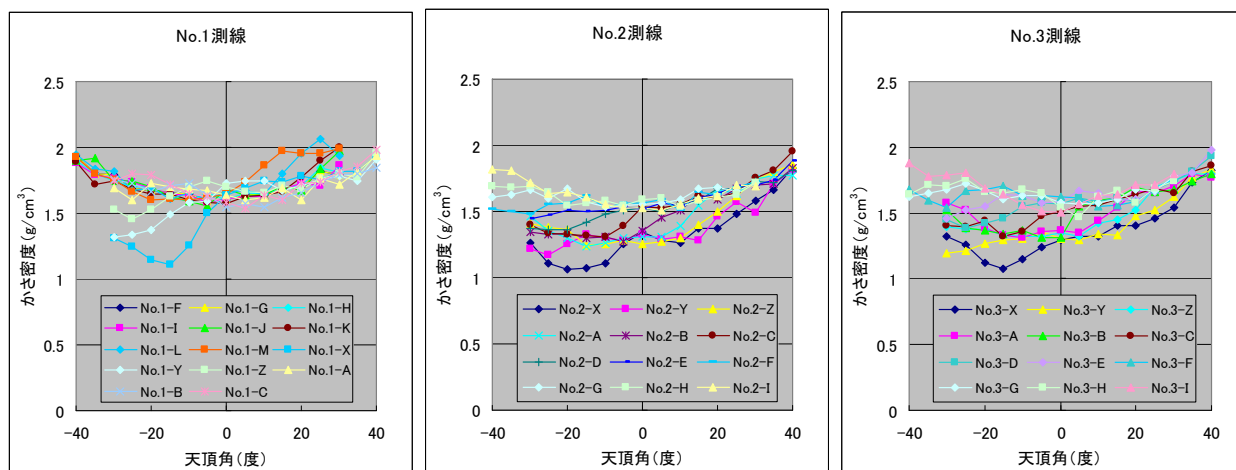


図 5.2-5 マルチ計測器によるかさ密度分布

No.1-M 地点と No.3-X 地点でのマルチ計測器によるデータの比較を図 5.2-6 に示す。エラーバーは 2σ を示している。明らかにカウント数、かさ密度とも有意な差が認められ、通路の影響を捕らえているといえる。カウント数から面密度を計算し、土被りで割ってかさ密度を求めると、両者の間には 0.4g/cm^3 程度の差が認められる。この差が通路の空洞部分によるものと考えられる。地盤の密度は No.1-M 地点の天頂角 $-20 \sim 0$ 度の比較的平坦な部分、 1.6g/cm^3 程度と推定される。No.3 測線の天頂角 15 度は最もかさ密度が低い。この方向には換気用のダクトがあるため、その影響があらわれたものと考えられる。

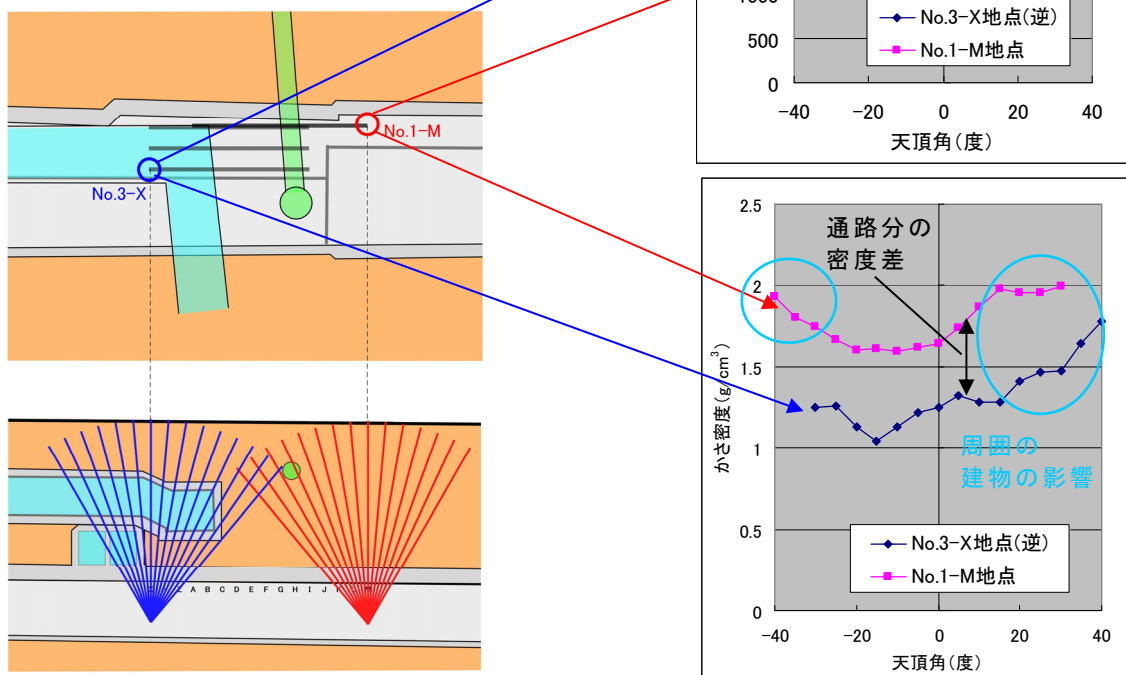


図 5.2-6 No.1-M 地点と No.3-X 地点でのマルチ計測器によるデータの比較

図 5.2-7 に天頂角 0 度と 40 度の場合の、検出器が張る立体角による円錐の幾何学的関係を示す。地表面と円錐との交線は建物と交わらないが、上空 20m では建物が円錐内に入ってくるのがわかる。この影響により天頂角の大きいところがかさ密度が大きくなっているものと考えられる。

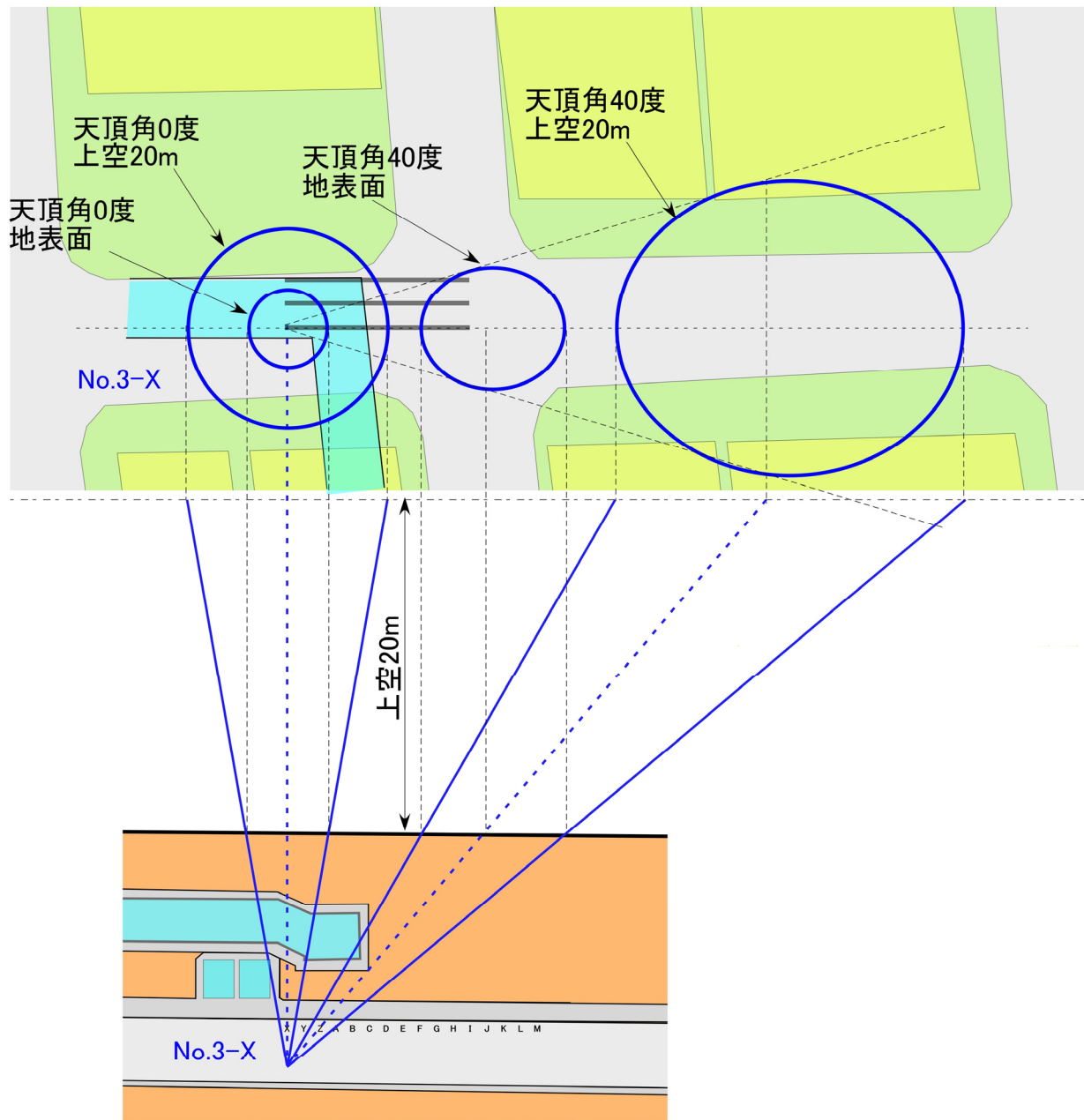


図 5.2-7 周囲の建物の影響

5.3 二次元トモグラフィ解析結果

5.2節で示したデータを用いて平成21年度に開発した二次元トモグラフィ解析アルゴリズムにより密度分布断面を計算した。図5.3-1に空洞（通路および埋設管）を初期値として入力したモデル（初期モデル）を示す。

参考のため図5.3-2に昨年度実施した試作機Aの空洞モデルありの場合の解析結果を示す。通路および埋設管による低密度が再構成されている。その他にも低密度部分があるが、図面上はこの付近に低密度の原因となる埋設管などは存在しない。

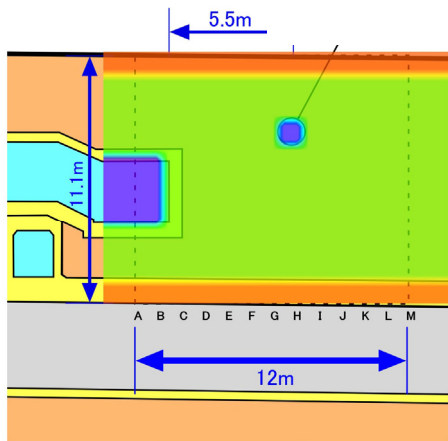


図 5.3-1 二次元トモグラフィ解析用初期モデル（空洞モデルあり）

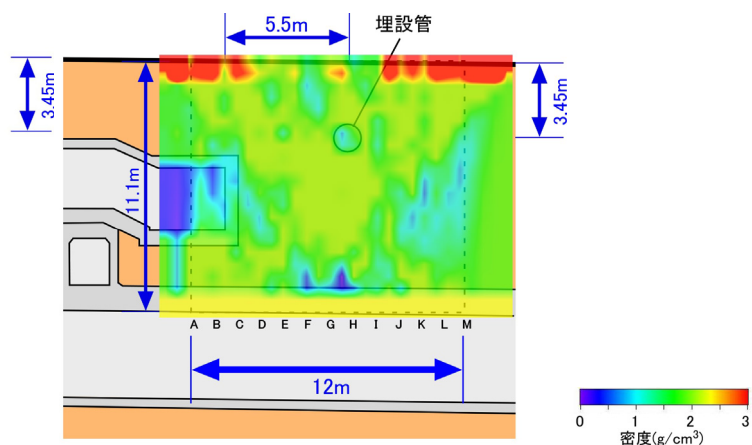
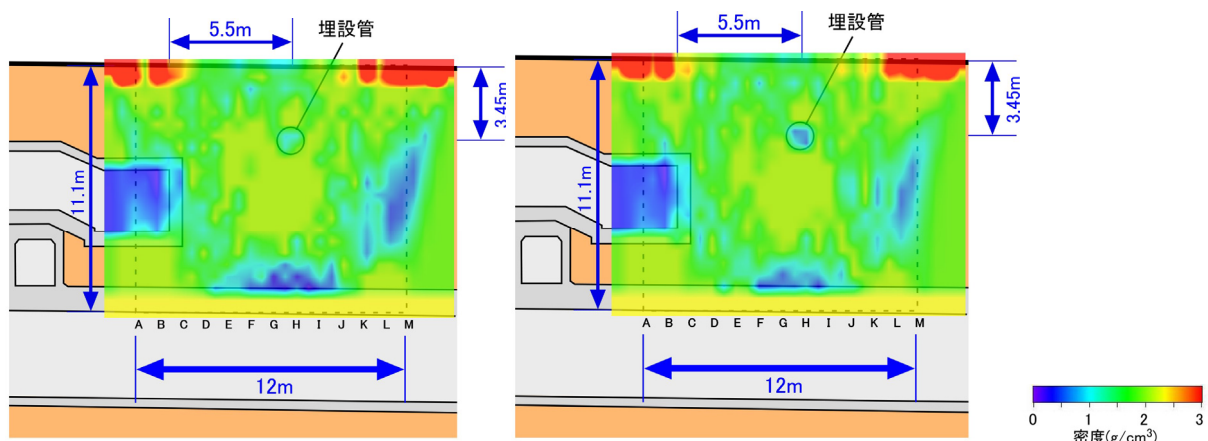


図 5.3-2 昨年度試作機 A による解析結果（空洞モデルあり）

図5.3-3に試作機Bによる50cmピッチならびに1mピッチの計測データによる空洞モデルありの場合の、二次元トモグラフィ解析結果を示す。この結果だけを参照すると、0.5mピッチより1mピッチの解析結果の方が、埋設管および通路による低密度をうまく再構成しているように見える。試作機Aと比較すると、通路および埋設管をはっきりと確認することができる（空洞モデルなしの場合の解析結果は、報告書 p51 参照）。



(a)50cm ピッチ

(b)1m ピッチ

図 5.3-3 試作機 B による二次元トモグラフィ解析結果（空洞モデルあり）

図 5.3-4 に試作機 C による 50cm ピッチならびに 1m ピッチの計測データによる空洞モデルありの場合の、二次元トモグラフィ解析結果を示す。両者とも通路による低密度は確認できるが、埋設管による低密度はほとんど確認できない（空洞モデルなしの場合の解析結果は、報告書 p53 参照）。

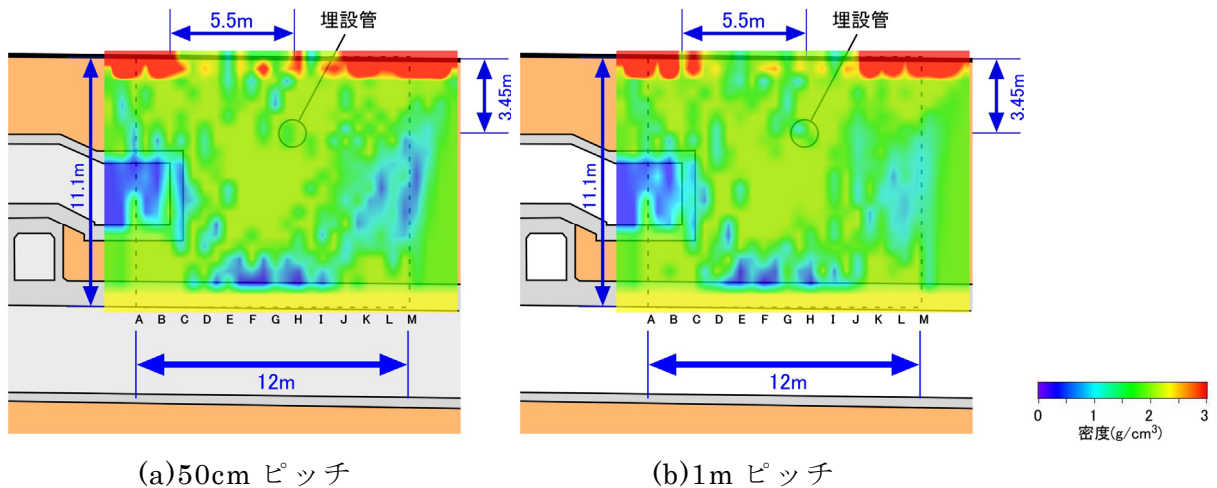


図 5.3-4 試作機 C による二次元トモグラフィ解析結果（空洞モデルあり）

マルチ計測器の測定ピッチは全て 1m である。図 5.3-5 にマルチ計測器による No.1 測線、No.2 測線、No.3 測線の空洞モデルありの場合の二次元トモグラフィ解析結果を示す。

いずれの測線も通路および埋設管による低密度がうまく再構成されている（空洞モデルなしの場合の解析結果は、報告書 p55～p56 参照）。

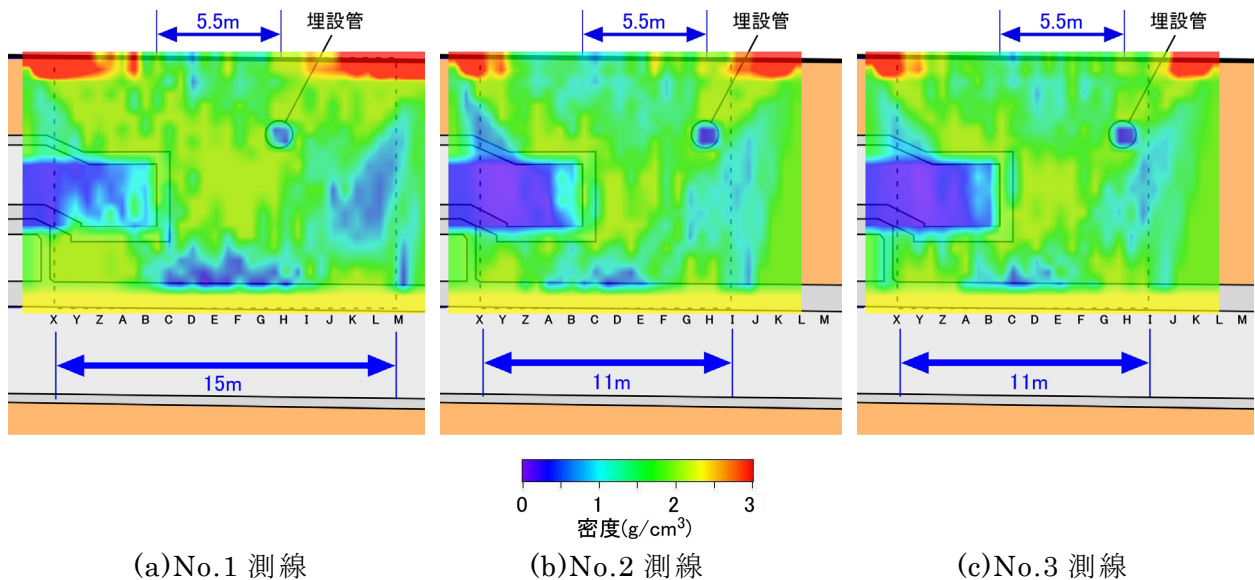


図 5.3-5 マルチ計測器による二次元トモグラフィ解析結果
（1m ピッチ、空洞モデルあり）

5.4 現地計測結果の評価

二次元トモグラフィ解析においては、通路は明瞭に捉えられたものの、埋設管については判断が難しいところがある。その理由は、二つあると考えられる。第一の理由は、土被りの10分の1以下の大きさの空洞は捉えにくいことである。また、対象が下水管であり、内部に水が入っている可能性がある。そのため、地盤との密度差がガス管などに比べて小さいことなどが第二の理由である。

初期モデルに空洞（この場合は通路と埋設管）を先見情報として与えた場合、空洞はうまく再構成されている。そのため、初期モデルにはできるだけ先見情報を考慮することが必要である。先見情報とは以下のような地盤の密度に関する情報のことである。

- (1) ボーリング柱状図や土質試験結果から得られる地盤の密度
- (2) 地質断面図や地盤図
- (3) 地下埋設物や構造物の位置・大きさ
- (4) 地下埋設物や構造物の施工記録

ミュー粒子を活用した計測の場合、地下の施設などで計測を行うため、これらの情報は比較的入手できることが多い。特に、都市部などでは地盤情報は地盤図として公開されている。また、独立行政法人土木研究所では国土交通省などで実施したボーリング調査の柱状図および土質試験結果はホームページ(<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/index.html>)上で公開されているので、これを活用することも可能である。

建物の影響も先見情報に入れる必要がある。しかし、実際には建物の大きさを正確に測量することは現実的には難しい。そのため、図 5.4-1 に示すような建物の影響を評価するための補正用計測機器を用いるなどの方法も考えられる。地下の計測機器と補正用計測機器との差分が地中の密度によるものであるから、同時に行うことにより精度の良い計測が可能である（理論上時間変動による誤差は生じない）。

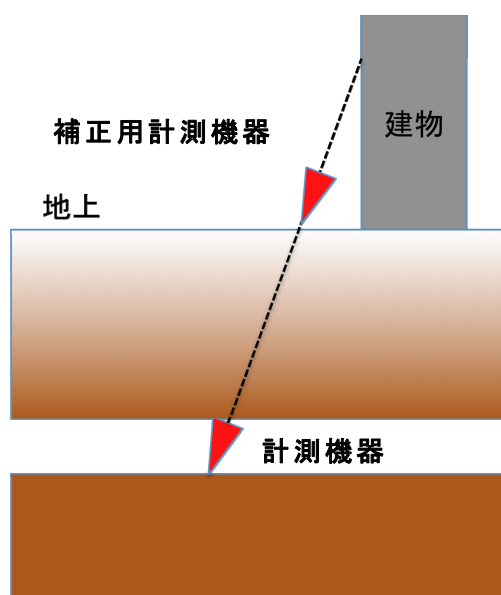


図 5.4-1 補正用計測機器による建物の影響評価方法

二次元解析結果を参照すると初期モデルの空洞の有無に関わらず、断面の左右に近い部分において斜め方向の偽像と考えられる低密度が確認できる。これはミュ粒子の透過経路が限られているために生じる偽像であり、ジオトモグラフィの場合には避けられない現象である。測線の中央ではあまり偽像を生じていないと考えられる。従って、トモグラフィの測線を設定する場合には、対象物が中央になるように測線を配置する必要がある。

図 5.4-2 は横軸に測定地点、縦軸に天頂角をとった面密度のカラーコンター図である。以下、この図を面密度マップという。

試作機 B では H～K 地点の天頂角 0～15 度に低い面密度が確認できる。この位置に対象とする埋設管が存在している。試作機 C ではあまり明瞭ではない。両者の違いは計数の誤差（変動計数）である。試作機 B は概ね誤差 2%程度で計測できているのに対し、試作機 C では誤差 3%程度である。計測時間はいずれも 23 時間であるが、計数値としては前者が概ね 2,500 以上であり、後者は 1,000 以上である。この計数誤差の違いが埋設管の検出の可否を決定した可能性がある。

図 5.4-3 は試作機 B の 0.5m ピッチと 1m ピッチの面密度マップである。埋設管の有無を面密度マップから読み取るには、明らかに 0.5m ピッチの計測データの方が優位である。

図 5.4-4 は、埋設管の密度を 1.0g/cm^3 として計算した面密度マップである。ランダム誤差を 0%から 5%まで 1%刻みで与えている。このデータを見ても、埋設管の影響を判定するには計数誤差を 2%程度にする必要があると考えられる。

図 5.4-5 はマルチ計測器による面密度マップである。通路による低い面密度がはっきりと認められる。No.1 測線は測線直上が通路の端にあたっているため、No.2・No.3 測線に比べて、その範囲が狭くなっている。No.2 が低い面密度の領域が最も広がっていて、この付近に通路の中心があることがわかる。通路のように大きな空洞はトモグラフィ解析をしなくても空洞の位置を判定できる。また、H 地点の No.3 測線では埋設管がはっきりと捕らえられている。

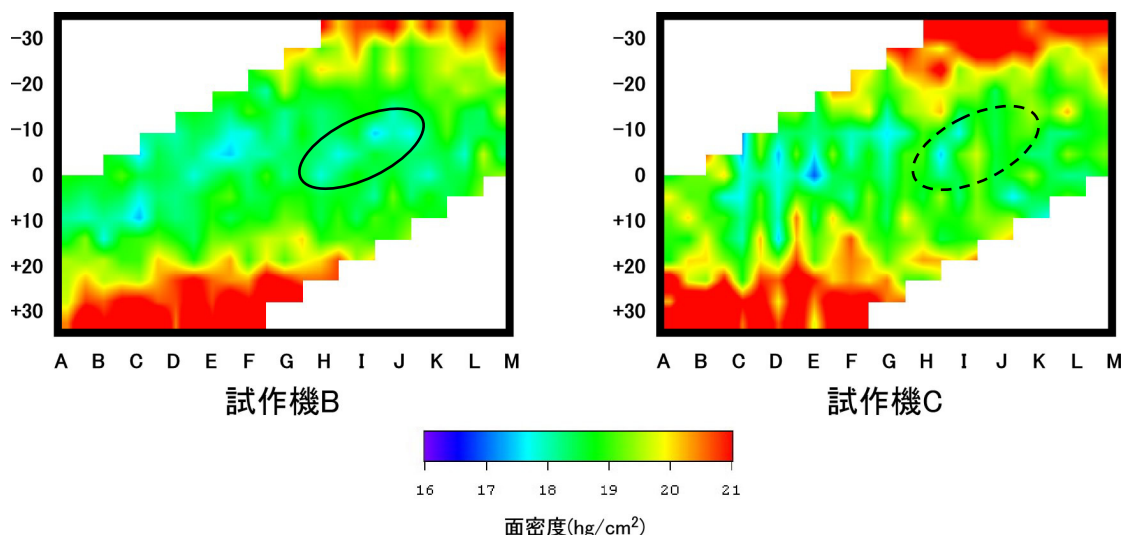


図 5.4-2 試作機 B・C によって得られた面密度マップ

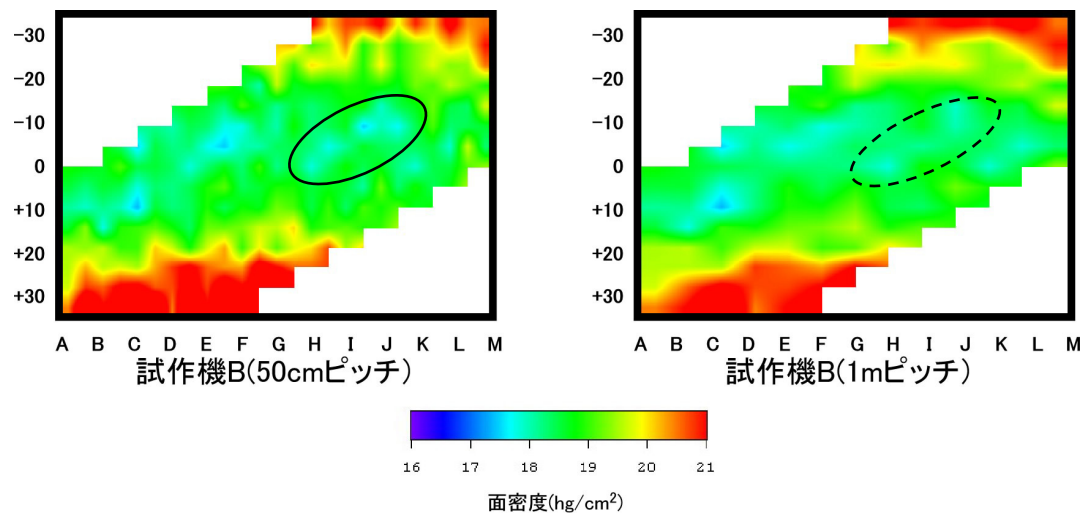


図 5.4-3 試作機 B の測定ピッチによる面密度マップの違い

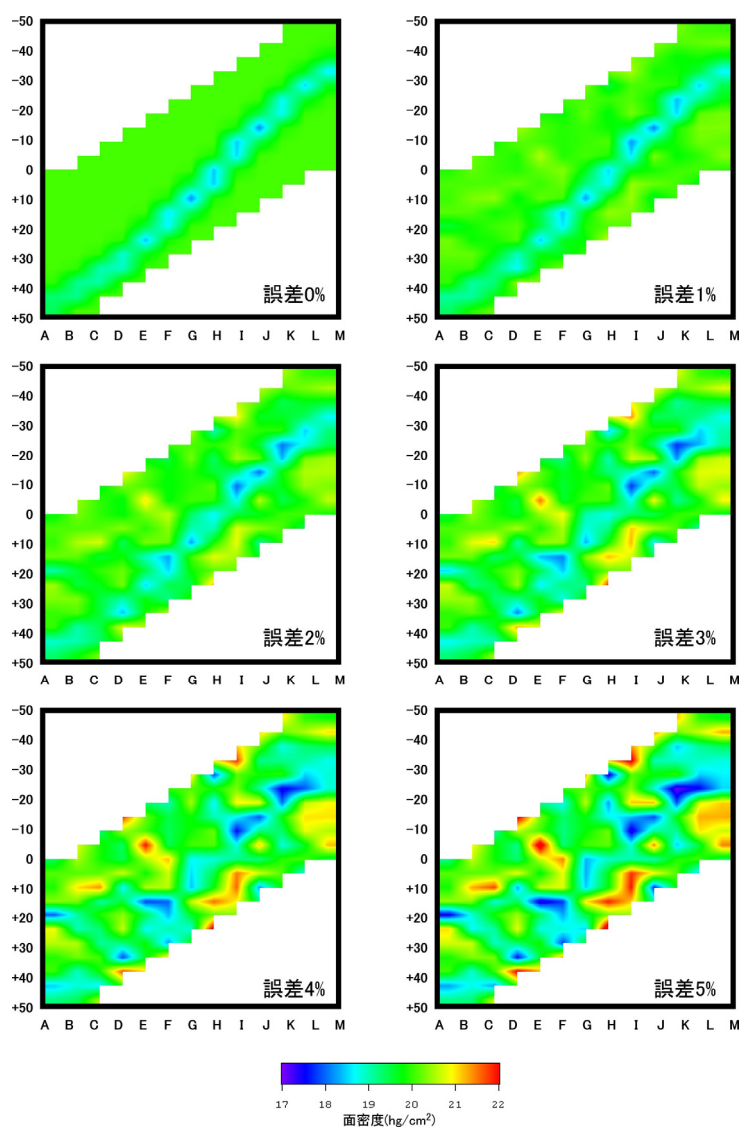
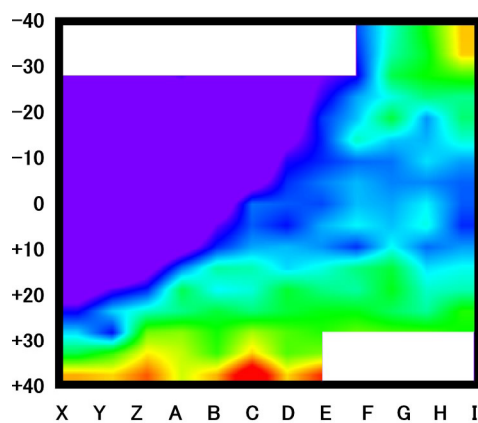
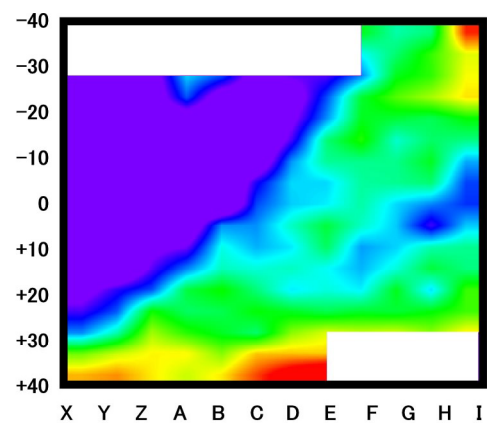


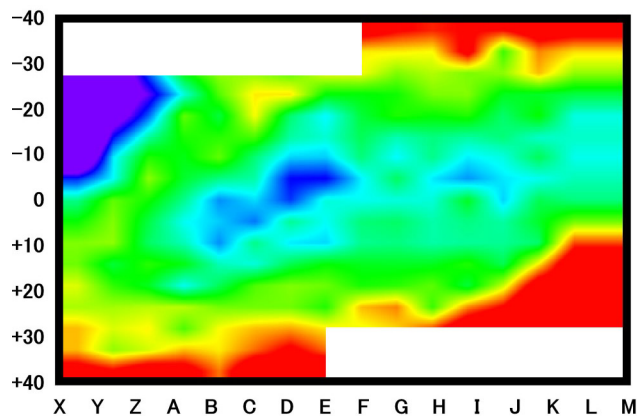
図 5.4-4 埋設管による面密度と誤差（変動計数）の影響



マルチNo.2測線



マルチNo.3測線



マルチNo.1測線

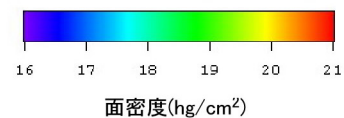


図 5.4-5 マルチ計測器によって得られた面密度マップ

5.5 大谷石採取場跡地における計測

平成 20 年度は土被り 6.7m、平成 21 年度は土被り 11.1m と 18.4m で計測を実施した。今年度はさらに深い場所で計測し、土被り（地形）や空洞による影響を調べることにした。

昨年同様に、実験場は大谷石採取場跡地とした。ただし、図 5.5-1 に示すように土被りは 30m 以上の場所を選定し、上部に空洞の存在する地点を選定した。

実験に使用した機器は試作機 A である。天頂角 -40 度から +40 度まで 5 度刻みで、17 回の計測を実施した。

実験の状況写真を写真 5.5-1 に示す。計測期間は平成 22 年 10 月 13 日から 12 月 12 日の約 2 ヶ月にわたって計測を実施した（作業工程は、報告書 p62 参照）。

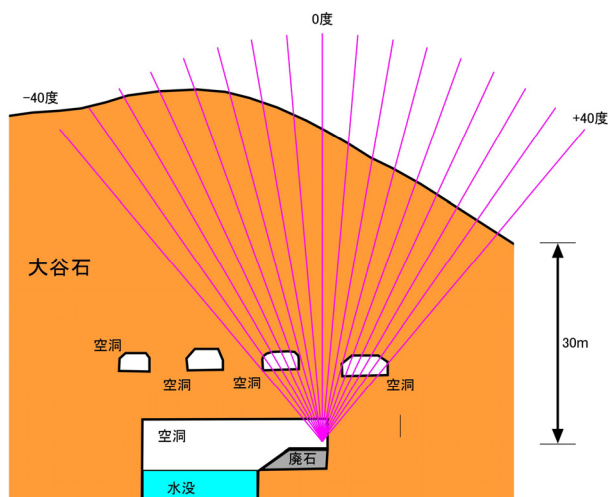


図 5.5-1 実験場断面図と計測方法



写真 5.5.1 試作機 A による実験状況

図 5.5-2 に天頂角に対するカウント数（角度分布計測値）を示す。天頂角のマイナス側では地形に応じた計数值（土被りが大きいほどカウント数が少なくなる）が得られている。天頂角プラス側も地形に応じたカウント数が得られているが、天頂角+20 度付近にカウント数の大きいピークが認められる。これは空洞の影響による（見かけの土被りが小さくなっている）ものと考えられる。

次に、カウント数から面密度を計算し、昨年の実験で得られた大谷石の密度 1.55g/cm^3 を用いて土被りを計算した。図 5.5-3 にその結果を示す。地形に相当する土被りの値が得られている。25～30 度の凹んでいる部分は右側の空洞の影響によるものと考えられる。左側の空洞の影響は現れていない。

これは図 5.5-4 に示すように、土被りの 10 分の 1 以下の空洞は検出が難しいことが数値計算上も示されている（平成 20 年度調査研究結果による）。すなわち、右側の空洞は土被り約 30m に対して空洞の大きさは 3～4m 程度、一方の左側の空洞は土被り 40～50m に対して空洞の大きさが 3～4m 規模であるため、検出ができなかったものと考えられる。図 5.5-4 に両方の空洞に対する土被りと空洞の大きさとの関係を示した。

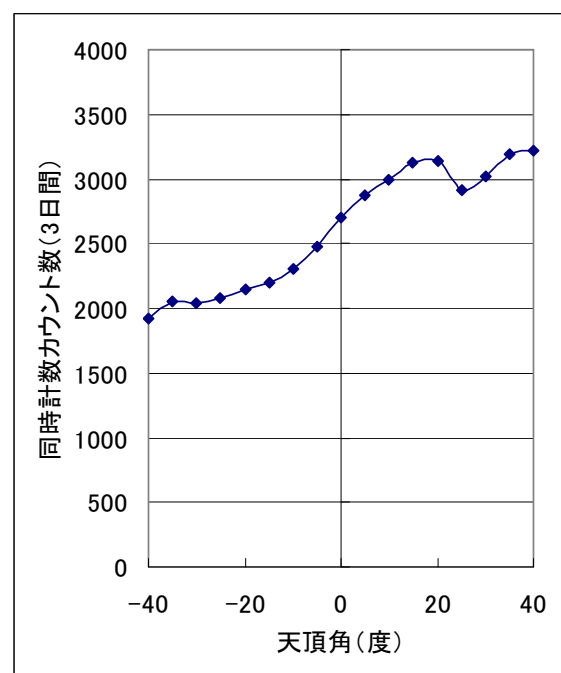


図 5.5-2 大谷石採取場跡地における角度分布計測値作機 B

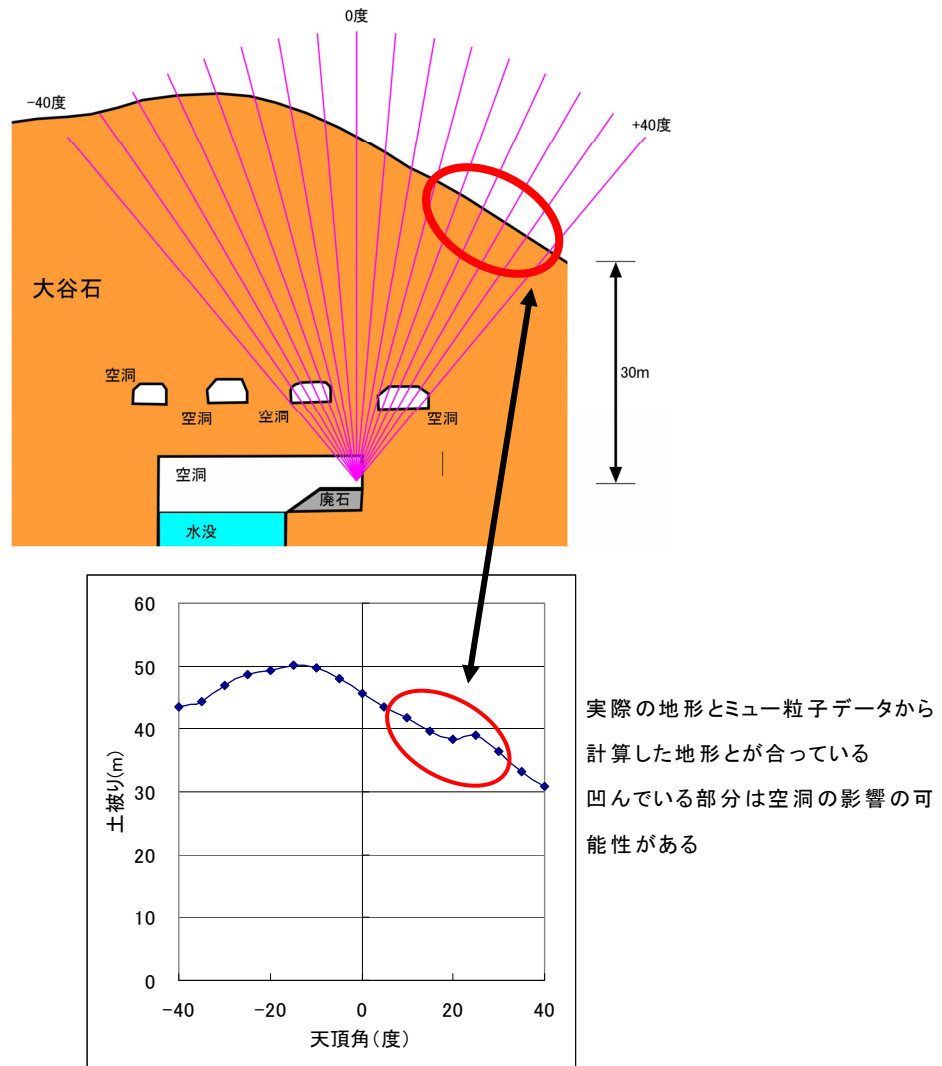


図 5.5-3 大谷石採取場跡地データの解析結果

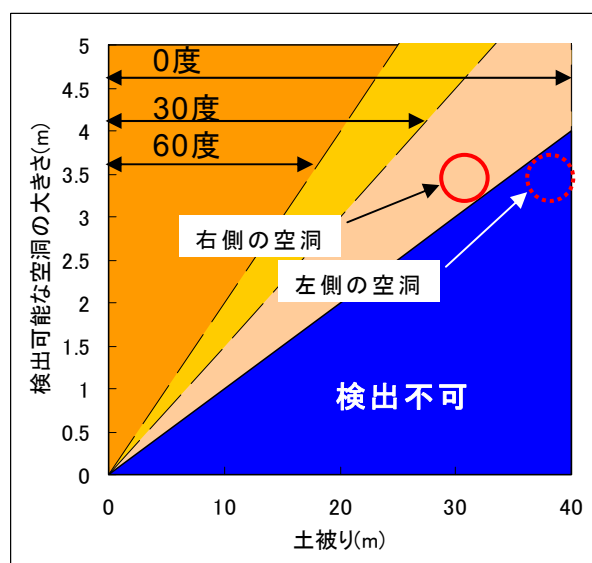


図 5.5-4 土被りと天頂角に対する空洞検出分解能（平成 20 年度報告書に加筆）

第6章 三次元トモグラフィ解析技術の検討

6.1 三次元トモグラフィの必要性

図 6.1-1 に深さ 5m の地点に直径 2m の球形の空洞がある場合の二次元断面を示す。球形空洞の中心が測線の直上にある場合と、1m、2m ずれた場合を図 6.1-1 の下段に示した。球形空洞が測線の直上にある場合とずれた場合とでは、見かけの面密度（すなわち密度）が変ってしまうため、二次元解析では空洞の大きさを正しく解析することができない。そのため三次元のトモグラフィ解析が必要である。

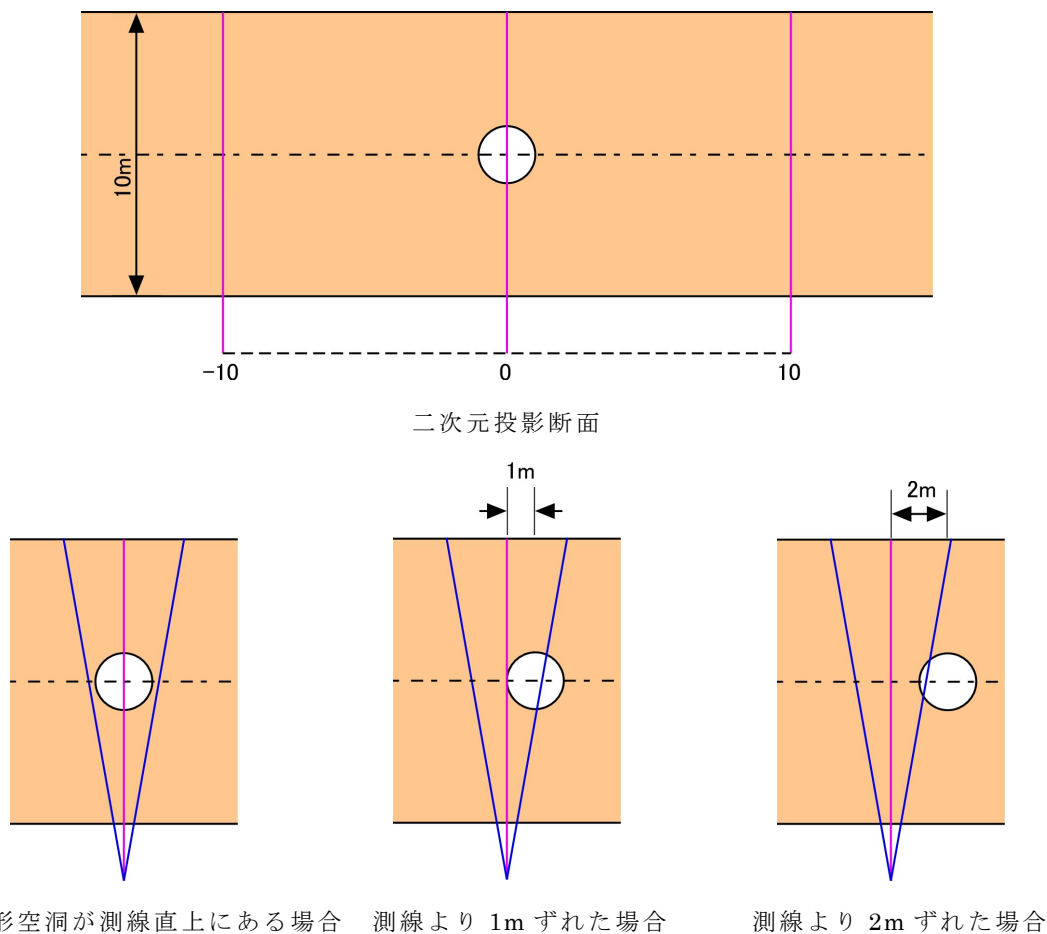


図 6.1-1 空洞が球の場合の測線位置による影響範囲の違い

6.2 解析アルゴリズムの開発

昨年度の二次元トモグラフィ解析アルゴリズムでも検討したとおり、検出器のミュー粒子入射角（検出器の鉛直からの角度）による計数は一定ではなく、方向性がある。これをモンテカルロシミュレーションで計算した結果に基づき入射角依存性を調べた（図 6.2-1）。

また、ミュー粒子の計数から計算される面密度（透過距離×密度）は検出器への入射角によって計数率が異なる。すなわちカウント数から計算した面密度には入射角による重みが含まれている。二次元解析ではこの重みを投影した重みを用いてトモグラフィ解析を行った。

図 6.2-2 は二次元解析と三次元解析の場合の、ミュー粒子の入射方向を示したものである。二次元解析の場合、10 度の範囲を 0.5 度刻みに 21 方向を考える。三次元の場合は、立体的に 1,550 方向の経路を仮定して計算するため、計算量が 70 倍以上 ($=1,550/21$) となる。そのため、効率の良い計算手順を検討する必要がある。図 6.2-2 の右側の図は実際の透過経路が検出器と交わる点を示したものである。

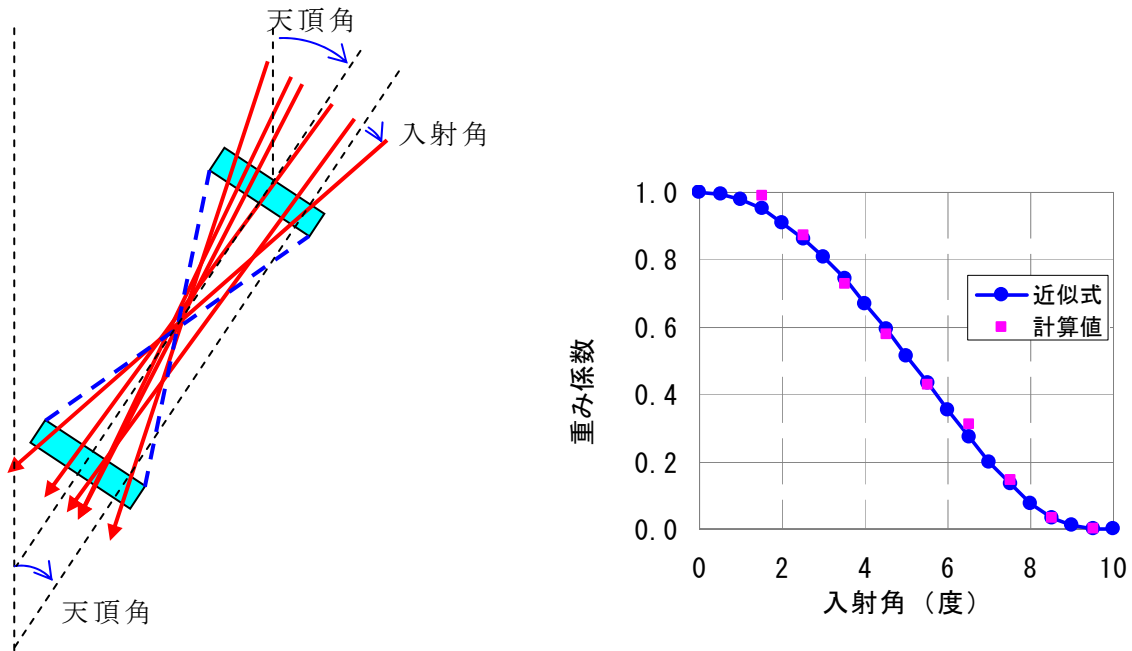


図 6.2-1 ミュー粒子の入射角依存性

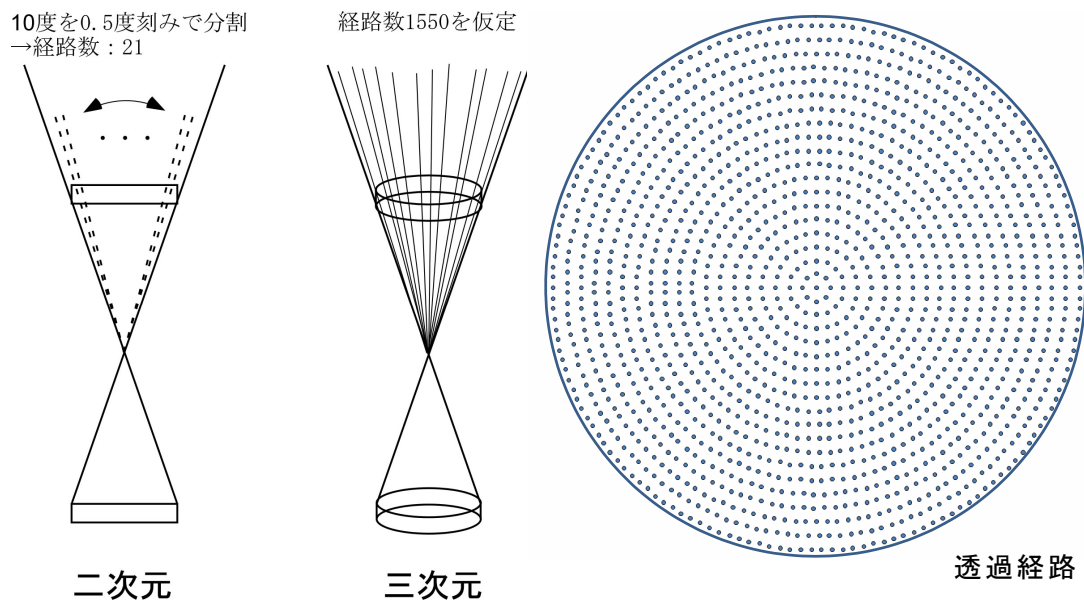


図 6.2-2 二次元と三次元の経路数の違いと透過経路

6.3 解析アルゴリズムの数値モデル解析

開発した三次元解析アルゴリズムの妥当性を検証するために数値解析を行った。解析の条件は以下のとおりである。

- ・地盤の平均密度： 2.0g/cm^3
- ・土被り：10m
- ・縦断方向：20m
- ・横断方向：10m
- ・空洞の大きさ：直径 2m
- ・空洞の位置：直方体の中心

図 6.3-1 にその結果を示す。横断方向鉛直スライスを参照すると横断方向の空洞の広がり改善されていることがわかる。鉛直方向に縦長に歪んで見えるのは、鉛直方向に近い透過経路が多い（透過経路が偏っている）ためである。また、空洞の周りには透過経路の偏りによる空洞で交差するような、少し密度の高い部分が認められる。ジオトモグラフィの場合、医療用の CT とは異なり、対象物の全周を取り囲むような透過経路を確保できないため、このような偽像が現れることが知られている。本解析アルゴリズムもジオトモグラフィ特有の偽像が、同じように現れている。

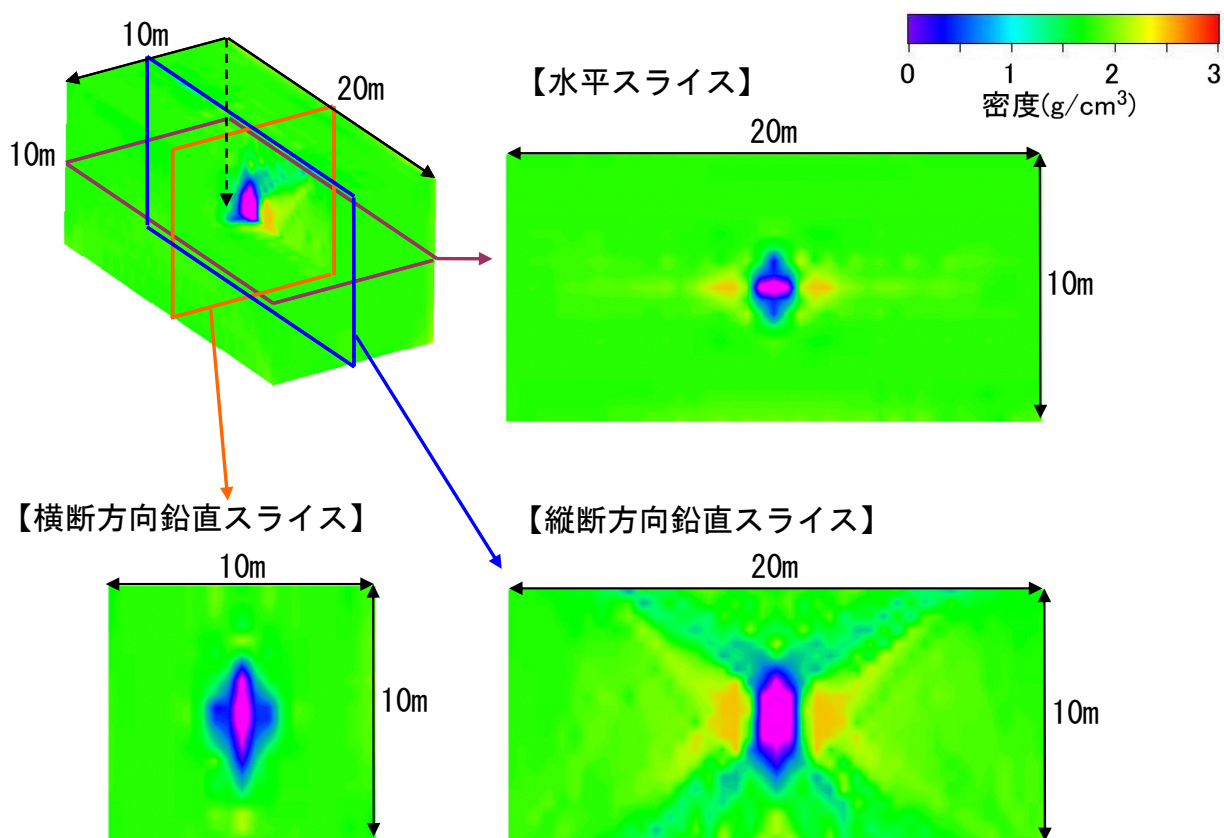


図 6.3-1 三次元アルゴリズム数値解析結果

6.4 現地計測データによる解析結果

マルチ計測器による三次元トモグラフィデータを用いて、本 F/S で開発した三次元トモグラフィ解析アルゴリズムによる結果を図 6.4-1 に示す。三次元の大きさは縦断方向 15m、横断方向 5m、鉛直方向 11m である。

図 6.4-1 の左側は斜め上からの鳥瞰図であり、一部を切除している。右側上段は深度 3.5m における水平のスライス断面である。埋設管 ($\phi 1.3\text{m}$) が検出されている。同図右側の中段は深度 5.5m の水平スライス断面である。通路による低密度が確認できる。二次元トモグラフィに比べると、通路や埋設管の低密度がより空洞に近い値となっている。これは三次元解析の効果のあらわれと考えられる。測線配置による格子状の偽像などが現れているが、これは今後の課題として検討する必要がある。また、解析直方体の端の密度の高い部分は、建物の影響と考えられるが、二次元解析のときより影響が少なくなっている。二次元解析の場合、三次元の入射角依存性を便宜上解析断面に投影する操作を行っている。そのため、建物の影響が強く現れたと考えられる。三次元解析の場合、正しく三次元的に面密度が再構成されているため、建物の影響も横断方向に振り分けられ、その結果として建物による高密度の影響が少なくなっていると考えられる。

図 6.4-2 は、別の角度からの鳥瞰図である。ただし、密度 1.0g/cm^3 以下を透明に表示している。通路および埋設管がより空洞らしく見える。三次元データの場合、解析結果は最終的に二次元表示とすることになるが、表示方法を工夫することにより、感覚的にも理解しやすくなる。今後、このような表示方法についても検討を進め、よりわかりやすい表示を開発する必要がある。

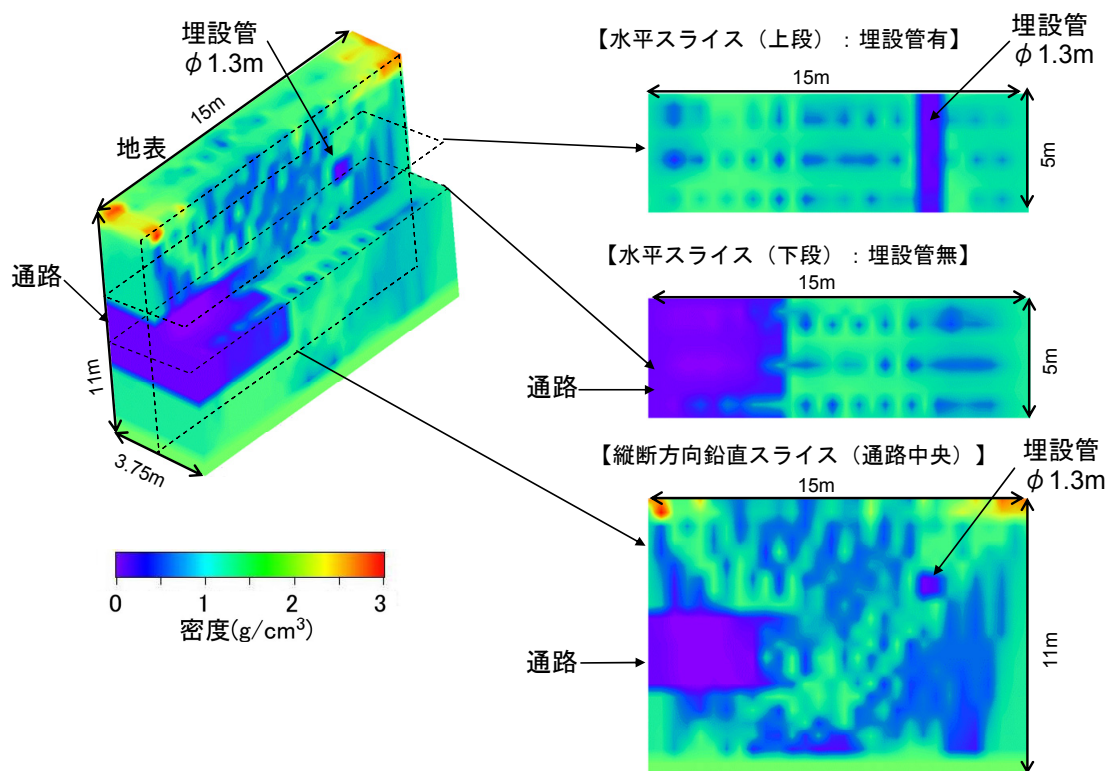


図 6.4-1 三次元アルゴリズムによる実データ解析結果

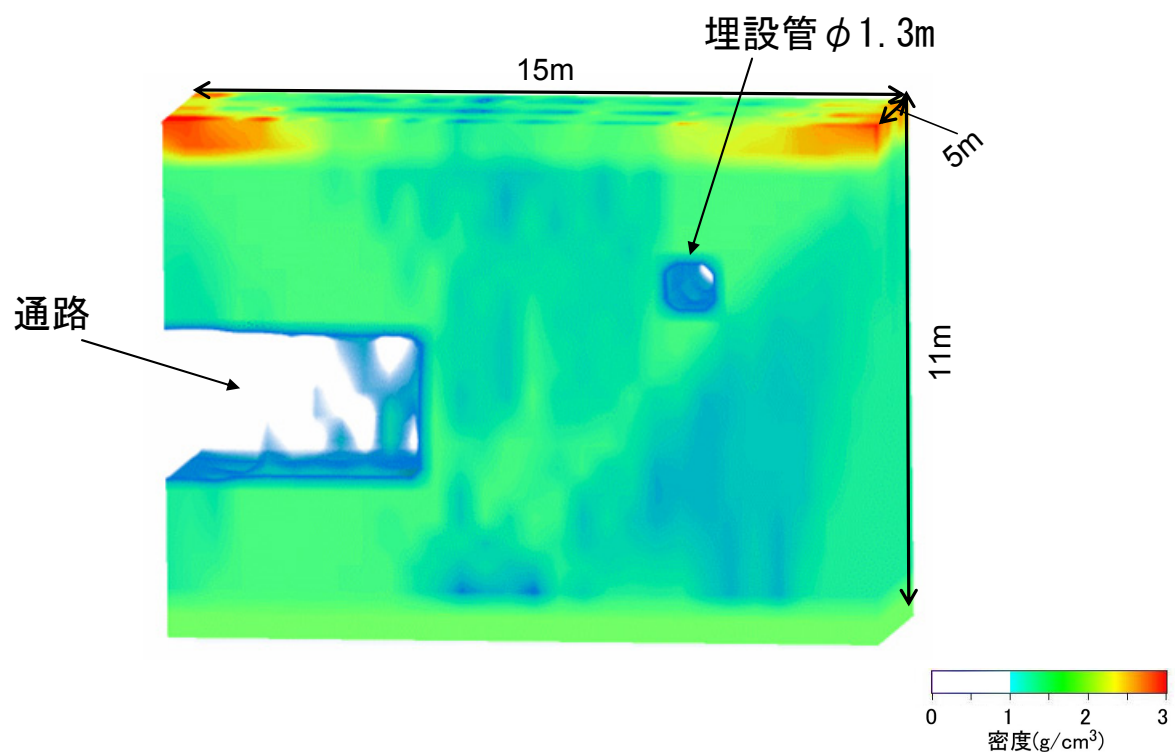


図 6.4・2 三次元アルゴリズムによる実データ解析結果(密度 1.0g/cm³ 以下を透明に表示)

第7章 実用化検討

7.1 社会的ニーズの検討

昨年度の F/S では、ニーズ調査として対象となる地下空洞の規模や成因などについて研究を進めた。ここではそれをさらに推し進め、事業化を視野に入れた実用化イメージを検討する。

まず、社会的ニーズを具体的に検討するためにヒアリング調査を行った。ヒアリング先は下水道管理者と共同溝管理者である。その結果、以下のようなニーズがあることがわかった。

- (1) 下水道の場合、管路の取り付け部（本管と枝管の接合部）周辺に発生する空洞が問題となっている。
- (2) 埋設深度が浅く（1～3m）、小口径（ $\phi 100\sim 150\text{mm}$ ）の陶管が老朽化し、破損して空洞が発生し、その結果陥没を引き起こしている。
- (3) 道路上からの空洞調査では地中レーダを適用しているが、空洞の上面のみを捉えるので、空洞の広がりまではわからない。それがわかる技術があると良い。
- (4) シールドトンネルの覆工コンクリートなどコンクリート構造物の厚さの計測ができるとう良い。
- (5) トモグラフィによる可視化は時間がかかるので、変状（空洞やゆるみなどの地盤密度の異常箇所・範囲）がある程度推定できるだけでも良い。
- (6) ヒューム管には鉄筋があるため、管路内部からの調査においては地中レーダが適用できないので、それに替わる技術が必要である。
- (7) 時間がかかるということであれば長期にわたるモニタリングや、空洞やゆるみの進行状況をモニタリングする目的であれば適用できる可能性がある。

(1)～(3)については、計測する場所の大きさや土被りに応じた計測機器を開発し、できるだけ効率の良い検出器の形状および配置を検討することにより、実用化は可能である。

(4)については、既知情報がない場合は、実現が難しいが、設計からのズレなどは確認できる可能性がある。

(5)については、計測のマルチ化をさらに推し進めるとともに、時間を要する三次元トモグラフィ計算をしないで、面密度マップなどのように生データに近い状態で判定する方法などを検討する必要がある。

(6)の鉄筋コンクリートの影響は、ミュー粒子の場合ほとんどない（今年度の地下計測で実証済み）ので、ミュー粒子を活用した空洞探査は、適用可能である。

(7)は最もミュー粒子の計測技術が活用できるニーズであると考えられる。土被りや空洞の進行速度にもよるが、例えば 1 日あたり、1 週間あたり、1 ヶ月あたりのミュー粒子の計数をモニタリングし、明らかな密度低下（例えば 2σ を超えるような計数値）を検知して、アラームを作動させるなどの利用方法が考えられる。

次に、計測機器の実用化イメージについて検討する。

図 7.1-1 は下水道の種類とその断面を示したものである。本管といわれる下水管は人が中に入れるほどの直径であるため、今まで試作してきた大きさの装置でも十分に対応可能である。ただし、下水道の場合は湿度や水滴への対応が必要である。

支管や枝管と呼ばれる小口径の場合は、防水加工や人が入れないためロボット化などの対応を検討する必要がある。上水道の場合には、水圧や塩素への対応を検討する必要がある。

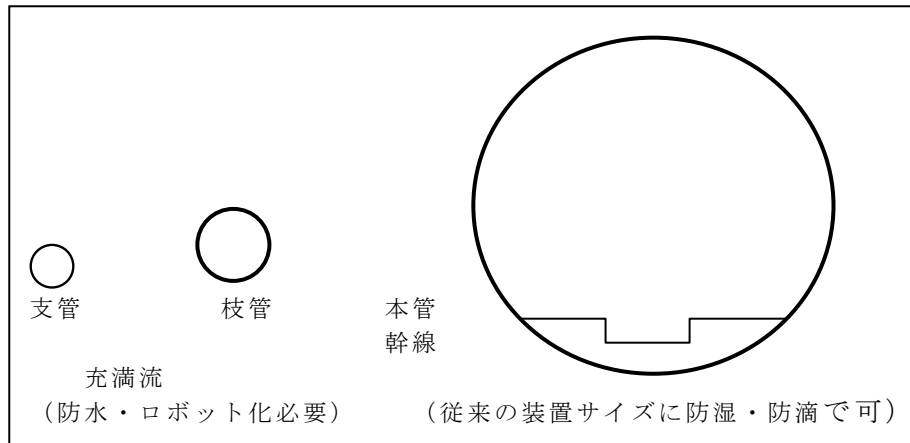


図 7.1-1 下水道断面図

地盤を可視化するためにはトモグラフィ解析をする必要がある。しかし、緊急性を要する空洞調査の場合、計測時間がかかることが障害となって適用できない可能性もある。そのため、全方位や立体角を大きくして、多少の分解能を犠牲にしても時間をかけずに空洞の有無を判定する方法についても、今後検討する必要がある。

図 7.1-2 は土被りを一定と考えたときの計測時間と解像度（空洞の大きさまたは密度の変化）の関係を定性的に示したものである。解像度を落とせば計測時間を短くすることができる。対象範囲を概略的に調査し、絞り込んだ上で、精査を行うなどの段階的な調査も検討する必要がある。また、小型の空洞や長期のモニタリング（密度の微小変化）などを考える場合には、長期間にわたる計測となる。

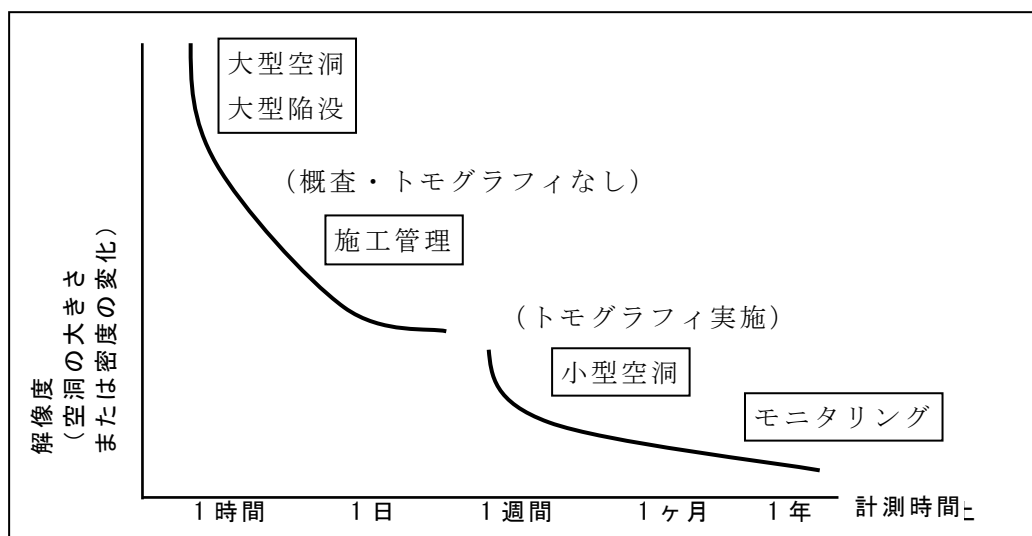


図 7.1-2 ニーズ対応イメージ

7.2 実用機的设计条件の検討

実用化への課題としては平成 20 年度、平成 21 年度とも概略の検討を進めてきた。実用化・事業化にあたっては、より具体的な検討が必要である。検討項目としては以下に示すことが挙げられる。

- (1) 計測効率の向上
- (2) 地下環境への対応

(1) 計測効率の向上

現在のマルチ計測器でも一度に計測できるのは 5 点である。試作機 B と比べると 5 倍の計測効率の向上を図ることができた。トモグラフィ解析を行うには、数百程度のデータ量が必要である。例えば今年度の三次元データ（15m×11m×5m）を取得するために、正味の計測日数は 102 日を要した。これをさらに短縮するために、上部シンチレータを 2 個追加し、 $3 \times 5 = 15$ 点を同時に測ることができれば（図 7.2-1、図 7.2-2）、平成 21 年度の 15 倍、平成 22 年度の 3 倍の計測効率を実現することが可能である。この場合、今年度同様のデータ量を取得するには 34 日で済むことになる。重量も重くなり不安定になることが想定されるので、検出器を回転させないで、水平方向の移動のみで測定する。測定ピッチを細かくするなど、高密度のデータの取得が可能である。ただし、左右の主検出器と副検出器との立体角が変わってしまうため、幾何学的な補正が必要となるため、新たな計測機器の設計条件を検討する必要がある。

現在の計測機器はデータの吸い上げを作業員が現地へ赴いて行っているが、携帯電話やインターネットを通じてデータを伝送することおよび自走機能を付加することにより自動測定が可能となり、低コストの計測が可能となる（図 7.2-3）。

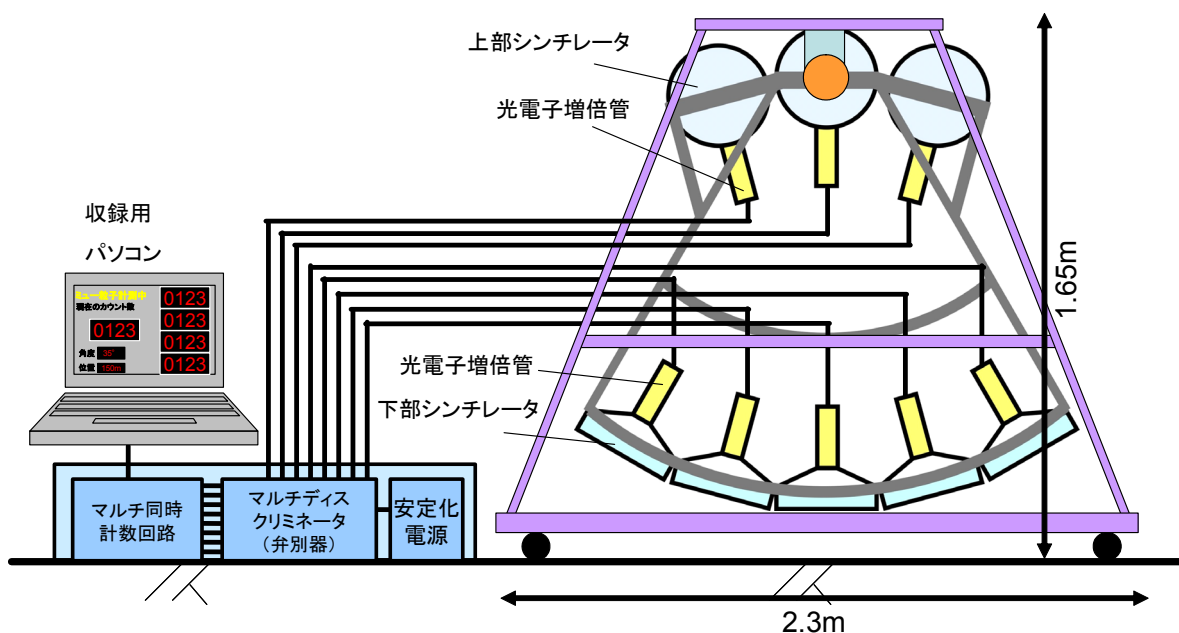


図 7.2-1 改良型マルチ計測器の概要

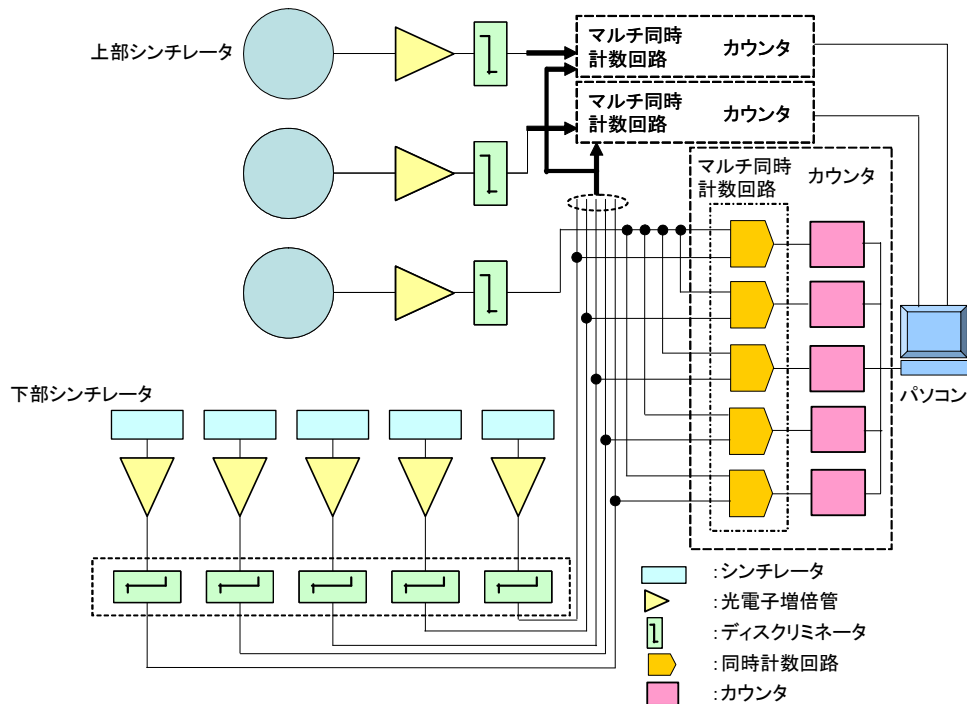


図 7.2-2 改良型マルチ計測器のブロック図

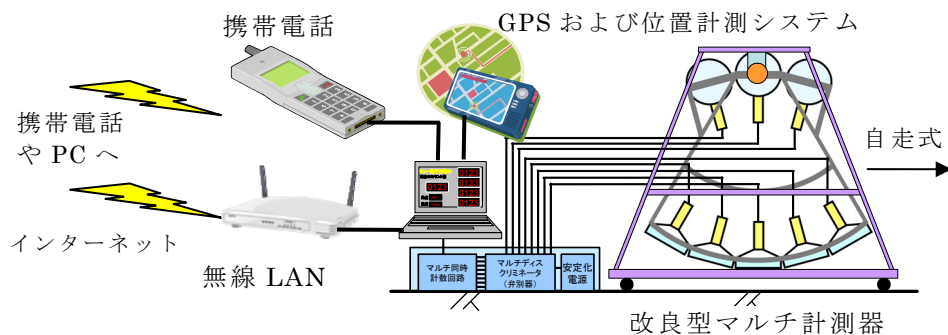


図 7.2-3 位置計測およびデータ転送機能の付加

(2) 地下環境への対応

昨年度、計測機器の地下環境への対応について検討した。主な課題と対策は以下のとおりである。

- 1) 粉じん（トンネル施工中）：保護カバー
- 2) 温度：冷却装置
- 3) 湿度：防滴コネクタ
- 4) 硫化水素・硫黄（下水道）：防錆対策（メッキ・塗料）
- 5) 塩素・塩酸（上水道）：防錆対策（メッキ・塗料）
- 6) 水圧（上水道）：防水・耐圧加工
- 7) 電源の安定確保：高性能バッテリー、燃料電池、ソーラー・パネルなど
- 8) 廃坑など崩落の危険などがある場所で移動するための無人化（ロボット化）

7.3 ミュー粒子を利用した空洞探査の優位性

空洞探査を目的とした物理探査には様々な手法があるが、探査深度や分解能（解像度）の点で不十分な領域（探査空白域）がある。（図 7.3-1 参照）。本 F/S により、探査深度は 10m から数十メートルまでの土被りに応じた空洞を探査することが可能であることが示された。ただし、分解能に関しては土被りの 10 分の 1 程度である。従って、現状のミュー粒子を活用した探査技術の探査深度と分解能の関係は図 7.3-1 の太線で示した部分となる。本 F/S により従来探査できなかった探査空白域の半分程度の領域について空洞探査が可能となることが示された。

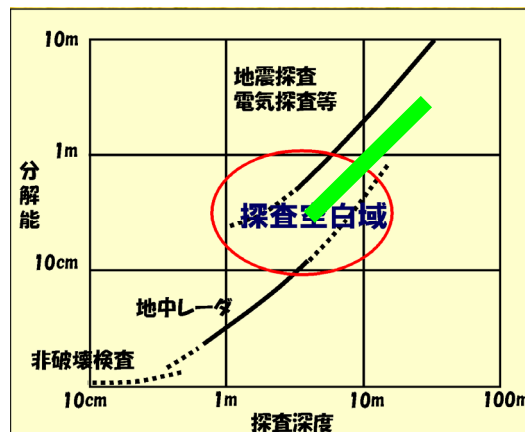


図 7.3-1 物理探査手法による空洞探査の探査深度と分解能の関係図

（http://www.zenchiren.or.jp/up/siryu_pdf/06.pdf に加筆）

都市部においては交通や工場の振動ノイズ、電線などの電気ノイズにより従来の物理探査が適用できないことがある。ミュー粒子ではこれらのノイズに影響されることなく探査が可能となる（図 7.3-2）。また、密度を直接得ることができるという探査方法は重力探査以外にはないため、工学的応用範囲も広がるものと考えられる。

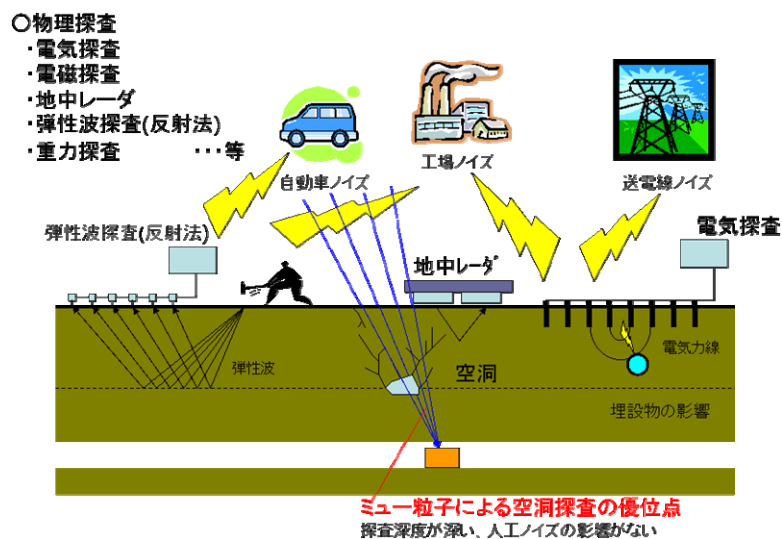


図 7.3-2 都市部における物理探査の弊害となるノイズ

7.4 F/Sにより得られた成果のまとめ

ミュー粒子を活用したマルチ計測機器により、データの品質を低下させずに昨年度の試作機Bより5倍速く計測することができた。データのばらつきについても統計誤差の範囲内にあることが確認された。ミュー粒子は半年程度の期間においては時間変動が2～3%程度あることがわかった。これを補正する必要があると考えられるが、実際に時間変動を考慮してトモグラフィ解析を実施したところ、空洞探査に関してはほとんど影響がないことが示された。しかし、精密な計測（例えば岩盤の健全性長期モニタリング）においてはミュー粒子の時間変動を考慮する必要があるかもしれない。

三次元トモグラフィにより、地下の空洞（通路と埋設管）を可視化することができた。しかし、三次元トモグラフィは、計測および解析に時間がかかるという弱点がある。これらを解決する方法としては、①マルチ化をさらに進める、②計測機器の数を増やす、③三次元トモグラフィの計算方法を高速化する、④トモグラフィ解析を行わずに空洞を判定する、などの方策を検討する必要がある。③については面密度マップの活用などが考えられる。

実用化については、厳しい地下環境への対応が求められる。特に①防滴・防塵対策、②電源の安定確保、③温度・湿度、④硫化水素や塩素、などである。中でも①については下水道や導水路などでの空洞調査ニーズがあるため、早急な対応が必要となる。

また、平成20年度の調査研究から現在まで、4台の試作機を製作したが、いずれも立体角は一定である。立体角は、空間分解能と計測時間（カウント数誤差）とに関わる。数値的な検討は平成20年度に概略の実施を行ったが、今後は実験的な検討を進めて、実用化のための基礎資料を得る必要がある。

4 F/S の今後の課題および展開

(1) 今後の課題

空洞調査においては緊急性が求められる場合がある。そのため、さらに計測時間を短縮化することが課題となる。例えば、マルチ計測器の検出器を増やして効率化を図る、あるいは計測機器の台数を増やして同時に計測を行うなどの対応が考えられる。

地下環境への対応としては防滴・防塵対策が必要であり、これについては下水道や導水路などのニーズがあるため、早急に検討を進める必要がある。同時に、地下において長期間計測可能な安定した電源の確保も検討する必要がある。

現在まで、4 台の試作機を製作したが、いずれも立体角は一定である。立体角は、空間分解能と計測時間（カウント数誤差）とに関わる。数値的な検討は平成 20 年度に概略の実施を行ったが、今後は実験的な検討を進めて、実用化のための基礎資料を得る必要がある。

計測機器の小型化については、目的と使用場所に応じた大きさの計測機器の設計・開発と実証実験などを行う必要がある。ニーズ調査によれば地下インフラ施設の大きさや内部の環境は様々であり、それに対応した計測機器を個別に開発することを検討する。

さらに、解析時間の短縮として解析アルゴリズムの効率化の検討や、トモグラフィを用いない地盤密度の推定方法の検討などを行う必要がある。また、トモグラフィ解析においては初期モデルの与え方を検討する必要がある、例えば面密度マップから初期モデルを構築する方法なども検討する必要がある。

(2) 成果の展開

地下空洞の可視化技術が実用化されれば、従来の探査技術では調査できなかった地中数 m 以深の空洞を、信頼性の高い分解能で調査することが可能となる。このような技術は世界でも初めての技術である。

また、地下環境に合致した計測機器の設計条件を確立して、従来になかった新しい調査ビジネスおよび計測機器の製造産業を創造することが可能となる。

経済産業省製造産業関連の「新しい成長をめざして」の基本認識・目標として、「環境問題の解決や国民生活の安全・安心の確保に繋がるものづくりの実現、我が国の強みである高信頼性を強みとする次世代産業群の創出、「完成価値」の創造等を通じた差別化・高付加価値の促進などをめざす」としている。さらに、重点施策として、「安全・安心な経済社会の構築」「高信頼性を強みとする次世代産業群の創出」を挙げている。本 F/S は、これらの政策に合致したテーマで、空洞調査をすることによって、未然に地盤の陥没事故を防ぎ、安全・安心な社会の実現に貢献できる。また、新しい調査機械を製造する新産業の創出につながり、次世代産業群の創出に貢献する研究である。

また、本 F/S は(財)JKA の平成 22 年度補助方針における国等の事業との役割分担において、「②国による本格的な研究開発の前段階に当たる技術シーズの研究」に該当する。道路下の地下空洞によって道路や産業インフラ等の地盤が陥没する事故が多発しており、こうした空洞は地下の工作物やインフラなどの健全性が関わっている場合があるので、地下

空洞を調査する社会ニーズは高く、国が手がける前に、先端的な技術シーズであるミュー粒子の活用によって空洞調査技術を開発する。

同じく「1. 補助対象事業」では、「(1) 機械工業における構造改革の推進のための事業環境の整備」の中の「①先端的な技術開発を推進する事業」に該当し、成果の展開によって「新規事業の創出」につながる。「2. 補助対象重点項目」においては、「(2) 我が国産業の国際競争力強化につながる、新産業分野、次世代有望分野等における先端的な研究開発」に該当する。ミュー粒子を活用した地下空洞調査技術は世界でも初めての研究であり、先端的な研究開発と言える。

(財)機械システム振興協会の「平成 22 年度調査開発事業に係る基本方針」では、「機械システム開発のためのフィージビリティスタディ」で、重点分野としては、「1. 先端的技术による社会ニーズへの対応」に該当する。ミュー粒子を活用した地下空洞調査技術は世界に例がない極めて先端的技术で、最近多発している地下空洞による道路陥没や用地地盤等の陥没を未然に防ぐため、あるいは導水路・地下洞道、その他地下構造物の健全性モニタリングなど安全・安心社会の構築という社会ニーズに対応する技術である。

我が国の経済産業の環境は、中期的な経済産業のあり方において、今後、少子高齢化と人口減少を迎える我が国が持続的な成長を実現するためには、国民に夢を与える連続的な技術革新の創出等が極めて重要とされている。この技術は社会資本の防災に役立つのみならず、原理的に、これまでプラント内部の溶融状態が測定困難とされて多勢の経験者の熟練と操業の技能蓄積に頼ってきた精錬、金属リサイクル、汚染土壌溶融処理など高温、溶融、遠隔プラントの内部状況を可視化しうる要素技術の提供となるので、この技術の応用発展は我が国プラント操業の省力化に寄与するフロンティア技術を提供できる。

「科学技術創造立国」の実現に向けて、世界最高の技術革新等の拠点として新しい価値を世界に発信することが可能となる。

1) 診断技術・遠隔監視への応用

本 F/S で得られる実用化開発の成果は、地下社会インフラの健全性モニタリングに適用可能であり、安全・安心な産業経済社会の構築に貢献する。また、人が近づくことができない高温・溶融プラント等の遠隔監視や、取水や発電用の各種ダムなど大型構造物の劣化診断にも適用可能である。特に老朽化が危惧されている重力式コンクリートダムでは、監査廊などの通路があるためこれを利用することが可能である。

地下発電所などの大深度の岩盤においても、岩盤の健全性をモニタリングすることが求められている。実際に、沖縄の海水揚水発電所でミュー粒子の計測が試みられた(図 4-1、Shirotori *et al.*, 2010)。この事例では最大深度 150m の岩盤での計測が行われたが、さらに大深度での計測も可能であると考えられる。例えば、高レベル廃棄物地層処分場(図 4-2)の上部岩盤や地下発電所(図 4-3)あるいは地下石油備蓄基地(図 4-4)周辺の岩盤の健全性のモニタリングにも適用できる可能性がある。

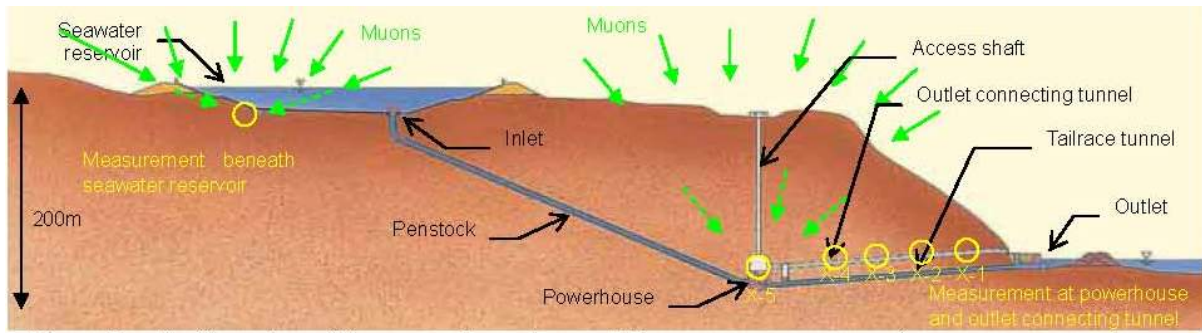


Figure 2 Configuration of the measuring points at Okinawa seawater pumped storage power station

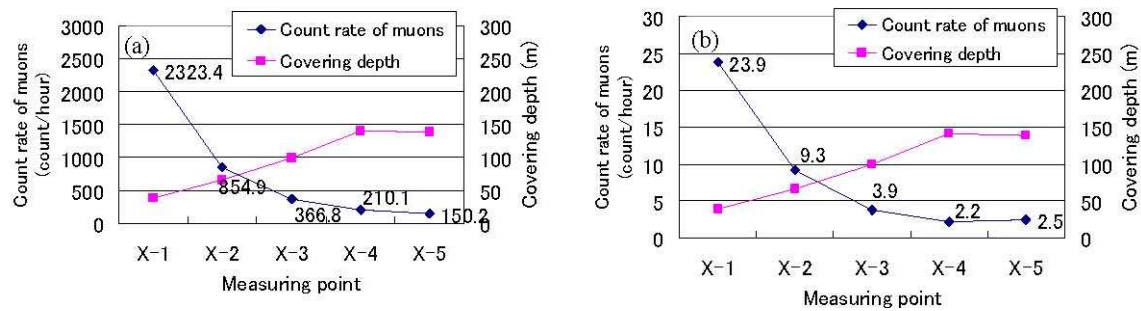


Figure 9 Count rate of muons at powerhouse and outlet connecting tunnel
(a) Omnidirectional counting, (b) Coincidence counting

図 4-1 地下発電所におけるミュー粒子の観測事例(Shirotori *et al.*, 2010)
(土被りに応じた計数率が得られている)

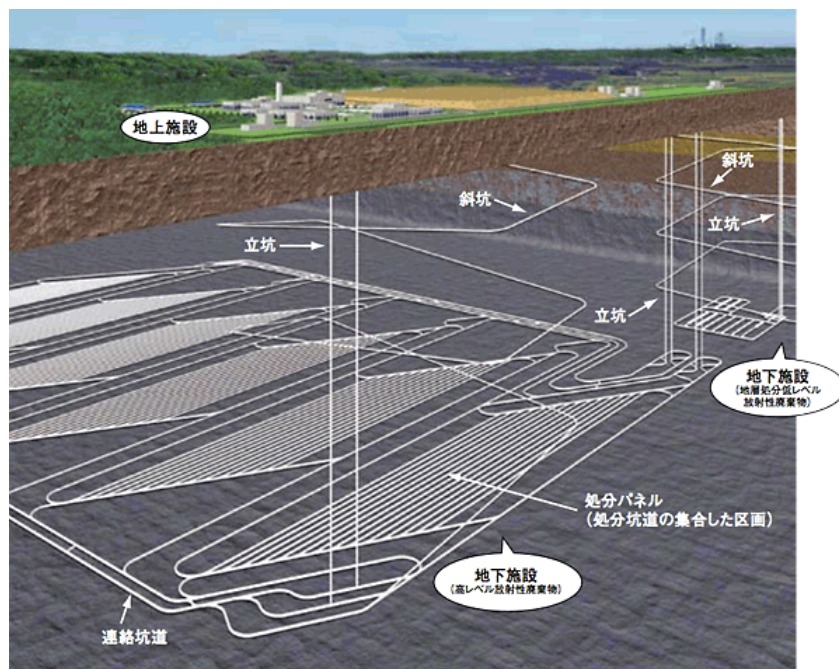


図 4-2 高レベル廃棄物地層処分場の概念図(http://www.numo.or.jp/q_and_a/03/01.html)

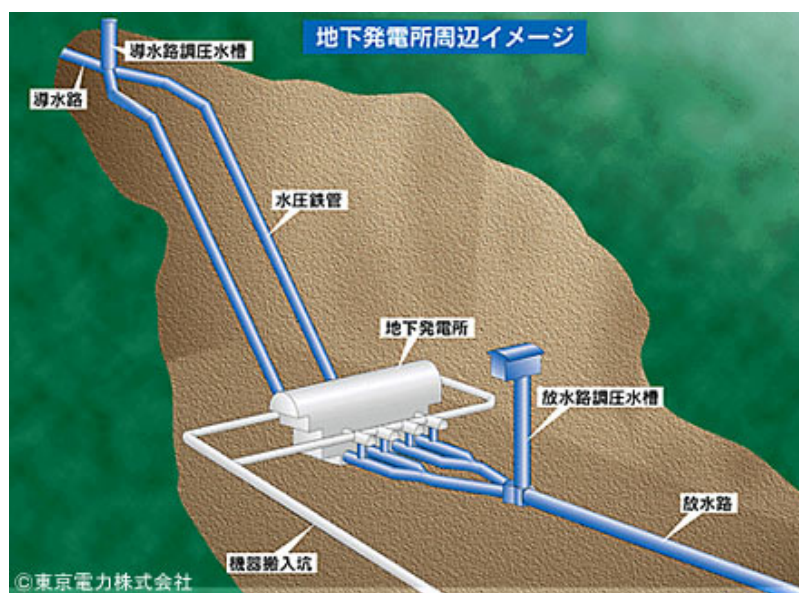


図 4-3 地下発電所の概念図(<http://www.tepco.jp/kanna-gawa/gaiyo-3-j.html#top>)

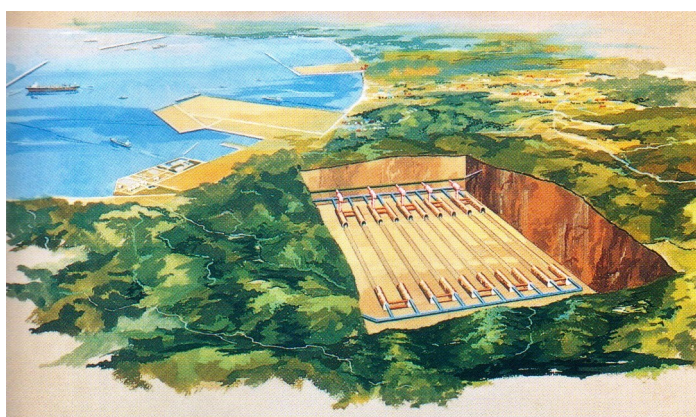


図 4-4 地下石油備蓄基地の概念図(<http://www.ena.or.jp/GEC/active/gecnews/181.htm>)

フランスでは図 4-5 に示すように山地の地下にトンネル（ギャラリー）を掘削し、その中で低雑音の実験を行うプロジェクトの計画がある(<http://lsbb.oca.eu/?lang=en>)。英語では Low Noise Underground Laboratory と表されるが、フランス語では Laboratoire Souterrain à Bas Bruit と表記され、その頭文字をとって LSBB 計画と呼ばれている。実験の対象分野は素粒子物理学から、地磁気・地殻変動まで多岐にわたっている。このプロジェクトの中ではトンネル上部の密度構造を把握するために図 4-6 のようにミュオン粒子を活用したトモグラフィ技術が検討されている（実用化はまだしていない）。この技術が実用化されれば CO₂ 地中貯留や高レベル放射性廃棄物の地層処分、溶岩円頂丘のモニタリング、あるいは考古学的な空洞調査にも応用できるとされている。溶岩円頂丘のモニタリングは既に我が国でも実用化に近い段階の成果が得られている（Tanaka *et al.*(2010)など）。ただし、その方法はトモグラフィではなくラジオグラフィである。考古学的な空洞調査では既に Albarez *et al.*(1970)がピラミッド内部で実際に計測を行っている。吉村(1993)などでも考古学へのミュオン粒子探査技術の応用可能性が指摘されている。

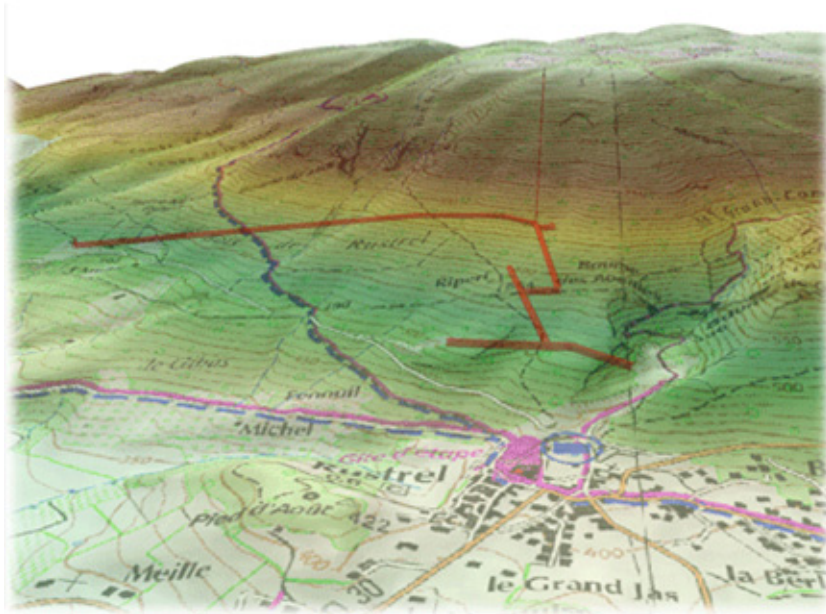


図 4-5 フランスにおける LSBB プロジェクトの概要(<http://lsbb.oca.eu/?lang=en>)

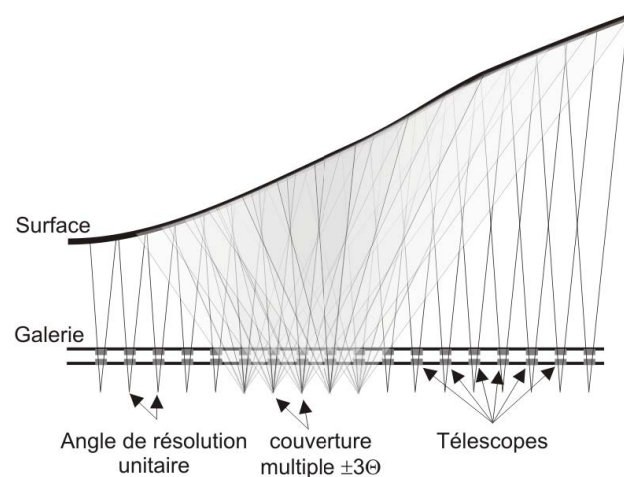


図 4-6 LSBB プロジェクトにおけるミュ粒子トモグラフィの概念
(<http://lsbb.oca.eu/?lang=en>)

2) 地盤調査への応用

本 F/S で得られる実用化開発の成果は、産業および都市地盤の空洞探査に適用可能であり、従来の物理探査が適用できなかった条件下（例えば、ノイズ・交通規制や地上部の施設などの設備により地上からの測定が不可能な場合など）でも適用が可能となる。地中管路・地下道路・洞道なども地中空洞発生の原因と目されているが、施設側から空洞を調査する方法が現実的には難しい。本 F/S によりこれらの状況にも対応できる調査が可能となる。また、造成地の土砂災害予測や、山岳トンネルにおける空洞・破砕帯調査等への適用も考えられる。さらに、全く新しい物理探査手法となるため新たな機械システム産業を振興することが可能となる。

[資 料 編]

引用文献

- Alvarez, L. W., Anderson, J. A., El Bedwei, F., Burkhard, J., Fakhry A., Girgins, A., Goneid, A., Hassan, F., Iverson, D., Lynch, G., Miligy, Z., Moussa, A. H., Sharkawi, M. and Yanozolino, L. (1970): Search for hidden chambers in the Pyramids, *Science*, **167**, pp.832-839.
- 片岡龍峰(2010): 宇宙線と雲形成－フオーブッシュ現象で雲は減るか？－, *地学雑誌*, **119**, 3, pp.519-526
- Ichinose, M., Mori, S., Sagisaka, S. and Yasue, S. (1972): Continuous measurement of cosmic-ray intensity with multi-directional muon telescope 50 m.w.e. underground at Matsumoto, *信州大学教養学部紀要 (第二部自然科学)*, **6**, pp.9-30
- JAEA ホームページ : <http://phits.jaea.go.jp/expacs/jpn.html>
- Kinoshita, D.(1997): Zenith angle dependence of cosmic ray,
<http://s3b.astro.ncu.edu.tw/~daisuke/jp/res/phys/CosmicRay/CosmicRay/>
- Minato, S. (1992): Some observations of time variations in cosmic-ray intensities with a 3" ϕ $\times$ 3" NaI(Tl) scintillation spectrometer, *Nucl. Sci. J.*, **29**, pp.97-105.
- 湊 進(1992): 宇宙線透視像、*放射線*, **19**、1、pp.49-56.
- Shirotori, Y., Momoshima, A. and Suzuki, K. (2010): Possibility of application to rock around opening of measuring technique that uses cosmic - ray muons, *EIT – JSCE Symposium on Engineering for Geo-hazards*, pp.31-36
- Svensmark, H. (1998): Influence of cosmic rays on earth's climate, *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 5027.
- Tanaka, H. K. M., Uchida, T., Tanaka, M., Shinohara, H. and Taira H.(2010): Development of a portable assembly-type cosmic-ray muon module for measuring the density structure of a column magma, *Earth Planets Space*, **62**, pp.119-129.
- 吉村作治(1993): モダンテクノロジーの考古学に於ける応用－早稲田大学古代エジプト調査隊の例－, *早稲田大学人間科学研究*, **6**, 1, pp.157-168.

－ 禁無断転載 －

システム開発 22-F-1

ミュー粒子を活用したマルチ計測機器の開発
に関するフィージビリティスタディ
(要 旨)

平成 23 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 2 8 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 03-3502-3671
印 刷	日本設計サービス株式会社