

システム開発

21-F-1

平成 21 年度
ミュー粒子を利用した地中空洞化調査システム
に関するフェージビリティスタディ
報 告 書
一 要 旨 一

平成 22 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

KEIRIN



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

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、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あります。

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JKAから機械工業振興資金の交付を受けて、システム技術開発調査研究事業、システム開発事業、新機械システム普及促進事業を実施しております。

このうち、システム技術開発調査研究事業及びシステム開発事業については、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「ミュー粒子を利用した地中空洞化調査システム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、実施した成果をまとめたもので、関係諸分野の皆様方のお役に立てれば幸いです。

平成22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、自然宇宙線のミュオン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オン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、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、ミュオン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。本年度のフィージビリティスタディ（以下 F/S という）では平成 20 年度の成果に基づき、地下での測定を考慮し小型化を図った 2 台の試作機を製作するとともに、トモグラフィ解析による地盤の可視化を可能とするためのトモグラフィアルゴリズムの開発を行いました。また、既知の空洞（下水管）を測定対象とした地下実験を実施し、得られたデータからトモグラフィ解析を行い、地中空洞の可視化、三次元解析を可能とするトモグラフィ解析手法確立のための検討を行っております。

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もあります。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 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 22 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	1
3	F/S 成果の要約	4
	第1章 昨年度調査研究の成果と本 F/S の位置づけ	4
	第2章 試作機的设计・製作	5
	2.1 試作機的设计	5
	2.2 試作機の製作	8
	第3章 試作機の校正試験	9
	3.1 校正試験方法	9
	3.2 校正試験結果	10
	3.3 校正試験の成果	11
	第4章 トモグラフィ解析技術の検討	13
	4.1 解析アルゴリズムの検討	13
	4.2 解析アルゴリズムの妥当性の検証	16
	4.3 三次元トモグラフィの必要性	25
	第5章 地下実験	29
	5.1 試作機 A による地下施設での実験	29
	5.2 今年度試作機による地下施設での実験	36
	5.3 大谷石採取場跡地での実験	38
	第6章 実用化検討	42
	6.1 社会的ニーズの検討	42
	6.2 実用機的设计条件の検討	44
4	F/S の今後の課題及び展開	49

1 F/Sの目的

近年、地盤陥没の原因となっている地中の空洞発生・成長を計測することや、地下の社会インフラの上部地盤が健全であることを確認したいというニーズがある。これらのニーズに対して、平成 20 年度にはミュー粒子の物理特性を利用して問題を解決すべく実験機器を試作し実験を行い、地下の空洞を調査できることを明らかにした。本 F/S では、平成 20 年度の成果に基づき、計測器の小型化と地下空洞の可視化技術の検討を目的に、ミュー粒子によるトモグラフィ解析のためのプログラム開発、及び、計測器の小型化の整備を実施した。

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「ミュー粒子を利用した地中空洞化調査システムに関するフェージビリティスタディ委員会」を設置し、最適化設計条件の確立目標の設定と開発計画・実証実験計画の作成検討及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、東京大学工学部、(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、測定及び解析などについて実施したものである。

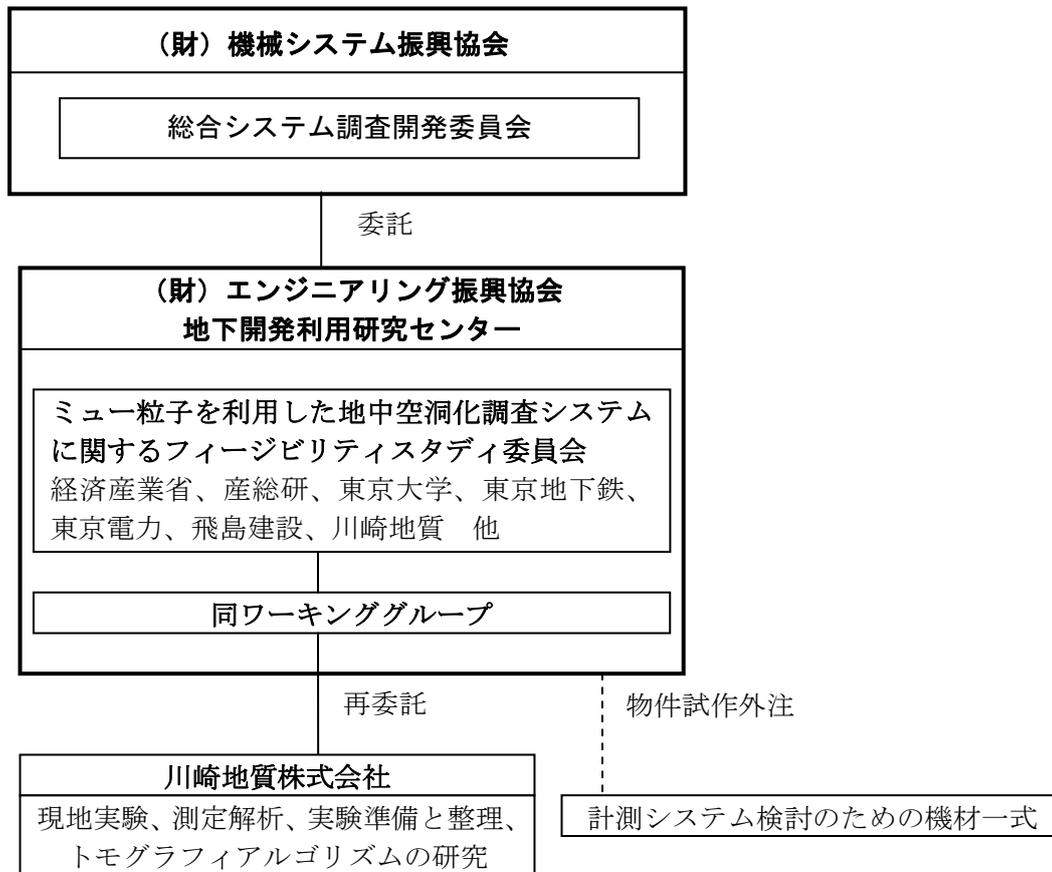


図 2-1 実施体制

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 デジタルものづくり研究センター 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

ミュー粒子を利用した地中空洞化調査システムに関するフェ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 准教授	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)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) 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 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	飛鳥建設(株) 土木事業本部土木技術部環境・リニューアルグループ 課長	高橋 工
委員	川崎地質(株) 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 製造産業局産業機械課国際プラント推進室振興係	松井 一記
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 研究理事	奥村 忠彦
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 技術開発第一部 主任研究員	東谷 謙
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 技術開発第二部 主任研究員	加藤 猛士

3 F/S 成果の要約

本 F/S の主な実施内容は以下のとおりである。

- (1) トモグラフィ解析技術の研究
- (2) 測定システムの開発研究
- (3) F/S の課題研究

これらのうち(1)については、第4章においてトモグラフィ解析アルゴリズムの検討・検証、及び三次元トモグラフィの必要性について検討を行った。(2)については、第2章において試作機的设计・製作についての検討を行った。(3)については、第3章と第5章において地下実験結果について考察を行うとともに、第6章において実用化検討を行った。

第1章 昨年度調査研究の成果と本 F/S の位置づけ

(1) ミュー粒子を用いた探査に関する理論解析とそれに基づく試作機的设计・製作

空洞探査を目的とした地下におけるミュー粒子のカウント数と検出分解能を検討するために、理論解析を行った。理論解析における空洞の大きさは0.5、1、2、4mとし、土被りを5、10、20、40mとした。解析の結果、概ね土被りの1/10程度の空洞を検出できることがわかった。また、計測位置と空洞との距離が近いほど、天頂角が小さいほど空洞を検出しやすい。計測時間が長く、土被りが小さいほど変動係数を小さくすることができるが、この解析結果を元に土被りに応じた最適な計測時間を設定することができる。

理論解析の結果と地下で使用するための大きさの制限などから試作機の大きさを設計した。二つの検出器間の距離は、最大2m、検出器の直径は350mmとした。これにそれぞれ光電子増倍管を取り付け、ミュー粒子を電圧として取り出すことができる。さらに、ミュー粒子以外のノイズ成分（主にガンマ線）を遮断するためのシンチレータの厚さとディスクリミネーション（波高弁別）レベルを検討した。装置は同時計数機能を有しており、全体の大きさは2000mm（幅）×800mm（奥）×1400mm（高さ）、重量は約70kgである。

(2) 地上における実験

試作機の性能を確認するために、地下での実験を行う前に地上にて、試作機の性能確認を行った。定点で連続計測を行い、再現性の確認を行った。また、建物内部で計測を行い、各階ごとの床厚に応じたミュー粒子カウント数の減少を確認した。

さらに首都高速道の橋桁近傍から角度を変えて計測を行い、橋桁によるカウント数の減少を確認するとともに、面密度（密度×長さ）の計算を行った。その結果、首都高橋桁の方向に、想定される面密度とほぼ同じ値の面密度が得られた。

(3) 地下室における実験

ジオトモグラフィによる空洞探査の可能性を示すために、地下室において測定地点を移動し、それぞれの地点で角度を変えた計測を行った。実験を行った地下室は土被り6.7mで、縦断方向にφ600mmの埋設管路が敷設されている。この埋設管路を空洞に見立て、横断方向の3地点で角度を変化させて計測を実施した。その結果、埋設管路によるカウント率の増加が認められた。

地盤密度についても変動係数3%以内の精度で推定することができた。さらに、周囲の建物によるカウント数の変化もとらえることができた。以上のことは、理論解析の結果とも整合していることがわかった。

以上のことから、角度を変えてミュー粒子のカウント数を計測することによって、トモグラフィ解析への適用可能性が示された。

第2章 試作機の設計・製作

2.1 試作機の設計

昨年度は検出器の直径を 35cm、検出器間の距離を最大 2m とした計測機を試作し、地下において実験を行い、地盤密度を推定し（変動計数 3%以内）、空洞に見立てたガス管を検出することを目的として解析を行い、ガス管の角度に応じたミュ粒子カウント数の増加が確認された。

今年度はトモグラフィ計測を行うための測定システムの最適化として、次の事項を行った。

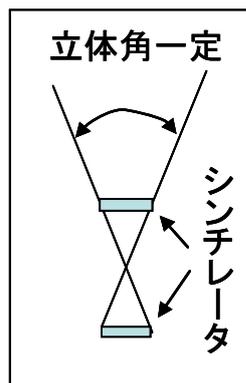
- ① ミュ粒子測定では土被りが厚いほど計測時間が多くかかることから、計測器を複数台使用して多点同時測定により測定時間を短縮する。このため昨年度試作機と同等性能の計測器を試作した。
- ② 地下空間での利便性を高め、汎用性を広げるため、昨年度試作機と同等性能でさらに小型の計測器を試作した。

これら二つの事項を実施するため、2 台の計測器を試作した。2 台の試作機は全て昨年度試作機よりも小型とし、①、②の両方の目的を兼ねるものとした。昨年度試作機と今年度の試作（2 台、B と C）の主な仕様を表 2.1-1 に示す。これ以降簡便のため昨年度試作機（検出器直径 35cm）を A、今年度の試作機をそれぞれ B（検出器直径 24.5cm）、C（検出器直径 17.5cm）と呼ぶ。

A（検出器直径 35cm）の検出器間距離 2m は、B（検出器直径 25cm）の検出器間距離 1.4m、C（検出器直径 12.25cm）の検出器間距離 1m と立体角では同等である。

表 2.1-1 試作機の主な仕様の比較

項目	H20年度		H21年度	
	試作機A	試作機B	試作機B	試作機C
検出器直径(cm)	35.0	24.5	24.5	17.5
検出器間距離(m)	2.0	1.4	1.4	1.0
立体角(sterad)	0.0239	0.0239	0.0239	0.0239
検出器面積(cm ²)	962	471	471	241
PS面積比	1.00	0.49	0.49	0.25
PS厚さ(cm)	3	5	5	5
PS重量(kg)	2.97	2.43	2.43	1.24
PS重量比	1.00	0.82	0.82	0.42



PS：プラスチックシンチレータ

(1) 小型化の検討

検出器の小型化を検討する場合、検出器の直径と検出器間の距離、測定時間及び変動係数を考慮する必要がある。図 2.1-1 に土被り 10m、密度 2.0g/cm³（面密度 20hg/cm²）のときの検出器直径と変動係数の関係を示す。変動係数 3%までは測定時間の増加とともに変動係数も減少するが、変動係数が 3%以下では時間をかけても低下する割合は少ないことがわかる。変動係数 3%以下を目標に設定することが実用的であると考えられる。

図 2.1-1 の検出器直径は、面積比がそれぞれ約 2 倍になる 6cm、8.5cm、12.25cm、17.5cm、25cm、35cm、50cm とした。測定時間は 24 時間(24h)と 48 時間(48h)、検出器間の距離は 50cm、100cm、200cm とした。検出器の直径が 15cm を下回ると急激に変動係数が増加することがわかる。変動係数を 3%に抑えた良好なデータを、一角度あたり 24~48 時間程度の測定時間で取得するには、10cm を下回る直径の検出器の場合、測定には長時間を必要とする。長期の健全性モニタリングなどの場合には、長時間の測定も考えられるが、空洞調査を目的とした場合には、現実的ではない。

検出器の直径と検出器間の距離を変えた場合の測定時間に対する変動係数を図 2.1-2 に示す。土被りと密度の値は、図 2.1-1 の場合と同じである。16 時間のとき変動係数は 3.6%、24 時間で 2.9%となり、一角度あたり 24 時間以上の測定時間が必要である。

図 2.1-1 と図 2.1-2 の結果から検出器の直径 25cm (A の半分の面積) と 17.5cm (A の 4 分の一) とし、検出器間の距離をそれぞれ 1.4m、1.0m とした。

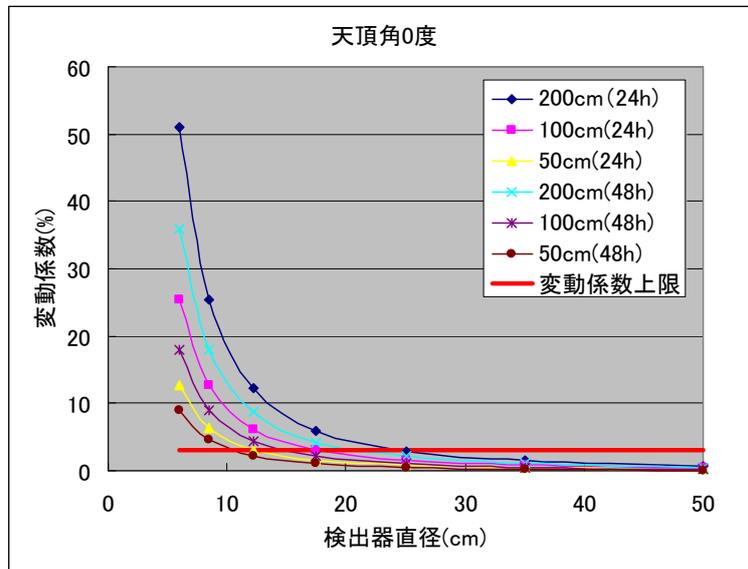


図 2.1-1 検出器直径に対する変動係数 (密度 2.0g/cm³、土被り 10m)

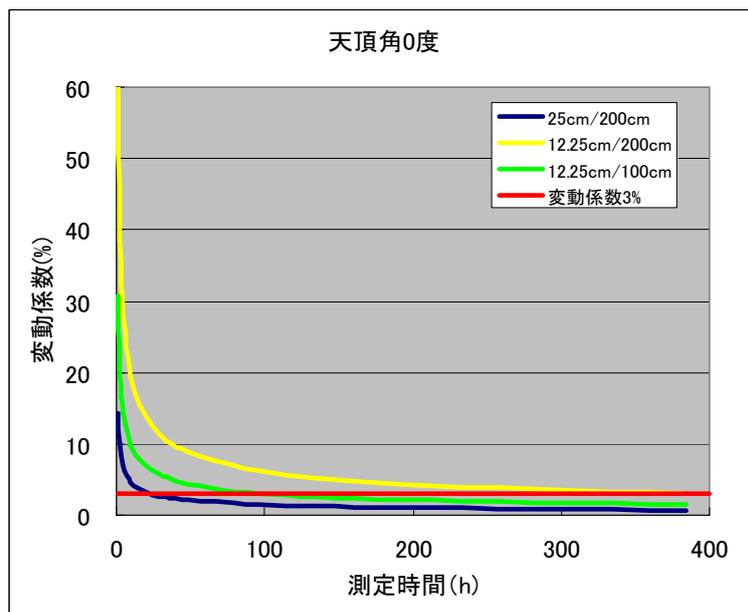


図 2.1-2 直径 25cm の検出器による測定時間に対する変動係数 (密度 2.0g/cm³、土被り 10m)

(2)プラスチックシンチレータの厚さについて

プラスチックシンチレータで計数する場合、低エネルギーの自然ガンマ線などを除去するためにディスクリミネータを使用しているが、現場の作業条件（温度や電源の不安定さ）により、ディスクリミネーション・レベルの分解能が低下する（図 2.1-3）。これを避けるためには、プラスチックシンチレータの厚さを厚くして、分解能の低下を避ける必要がある（図 2.1-4）。

B・Cの検出器の大きさはAの断面積の半分及び4分の一であるため、シンチレータ部分を厚くしても、Aより重くなることはない。プラスチックシンチレータの比重は1.03を与えた（加藤、1994）。

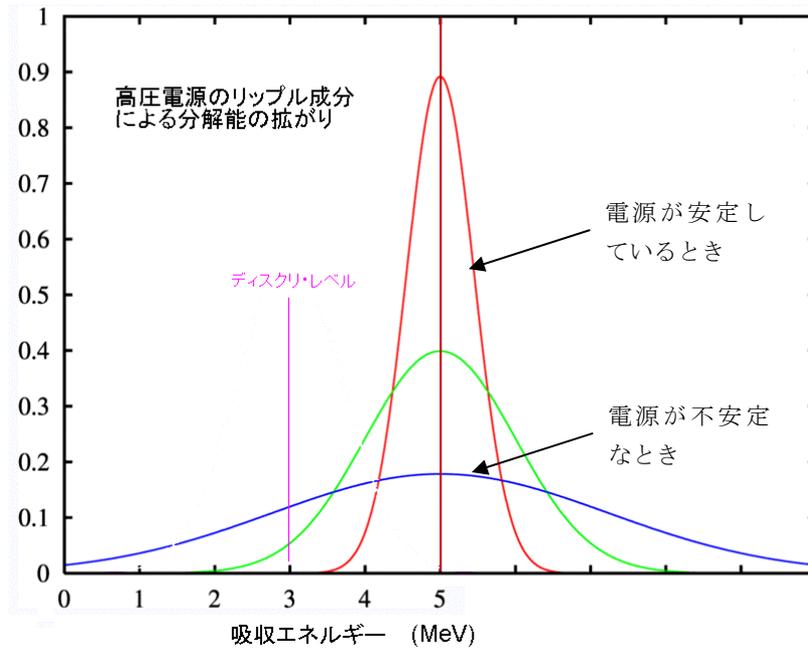


図 2.1-3 吸収エネルギーとディスクリミネータによる分解能の低下

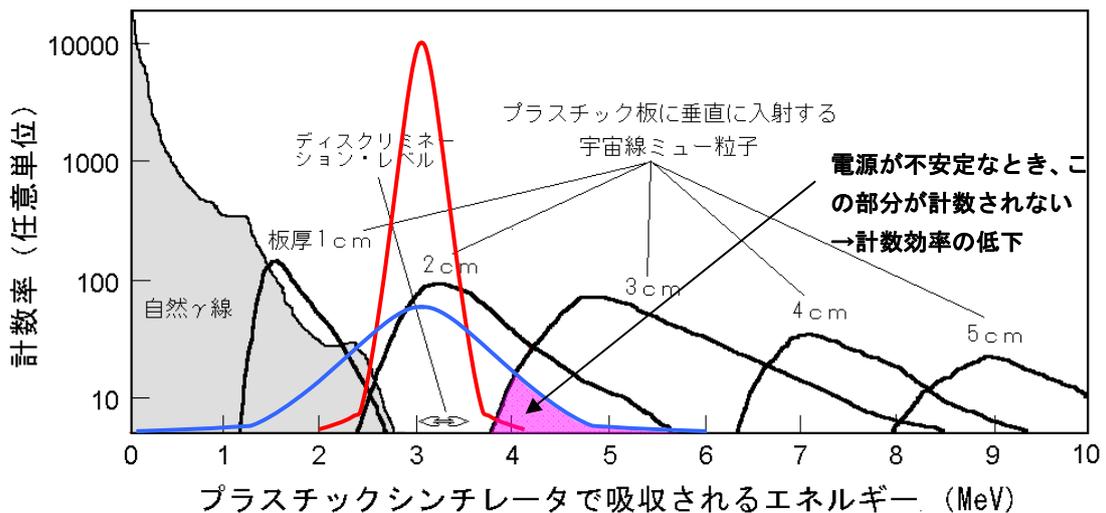


図 2.1-4 プラスチックシンチレータの吸収エネルギーとディスクリミネータの分解能

2.2 試作機の製作

(1) 外観

図 2.2-1 に製作した B と C の設計図をそれぞれ示す。

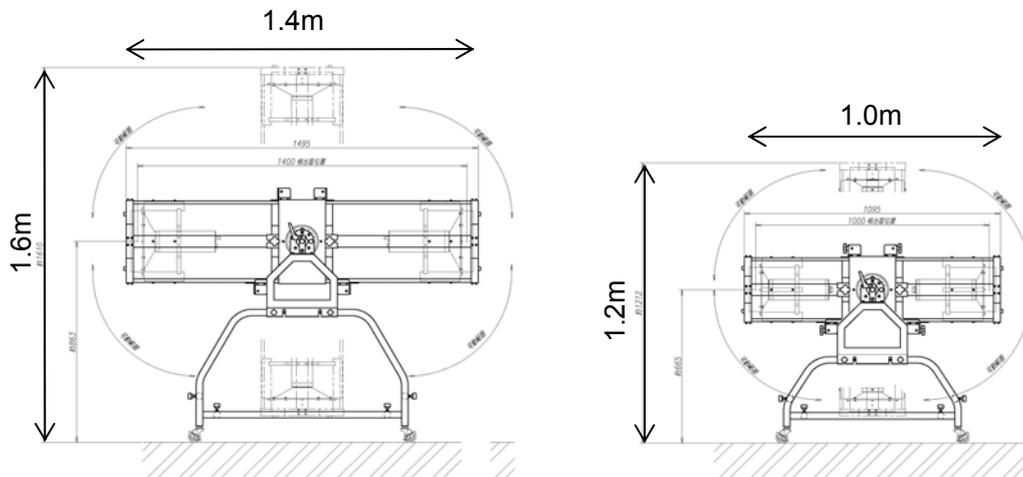


図 2.2-1 試作機 B・C 設計図面

(2) ブロック図

図 2.2-2 に試作機 B・C のブロック図を示す。

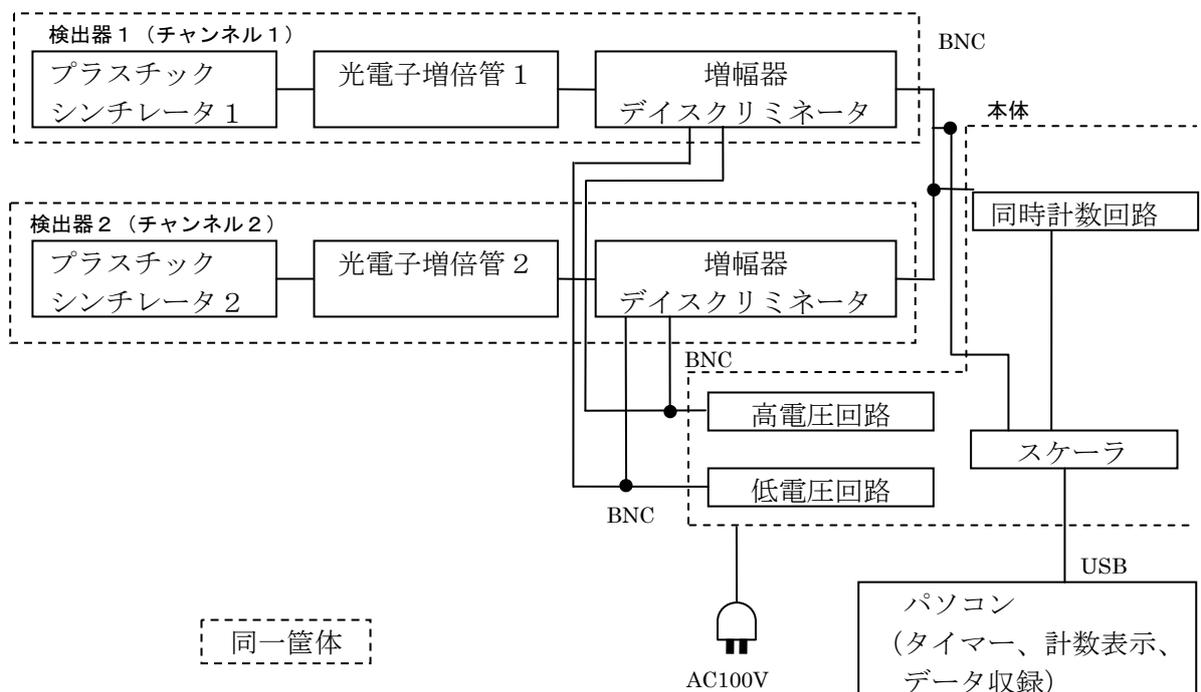


図 2.2-2 測定装置のブロック図

第3章 試作機の校正試験

3.1 校正試験方法

大型のプラスチックシンチレータ 2 枚を用いたミュオン粒子測定器は、個々の検出器のばらつきや二つの検出器の位置関係の誤差などによって計数効率が異なるため、個々の測定器の特性を知る必要がある。計数効率を得るには均質な密度の無限に広がった媒質の下で天頂角分布を測定することが理想であるが、現実的に難しい。そこで、空気中での天頂角分布測定を行って、計数効率を算出することとした。

実験は試作機 A・B・C を用いて、見通しのよい場所として川崎地質株式会社森ヶ崎倉庫ビル（4 階建て：大田区大森南三丁目）屋上にて行った。測定状況を写真 3.1-1 及び写真 3.1-2 に示す。昨年度実施した一の橋公園のデータは一角度あたり 15 分の測定であったが、今回は測定時間を 2 時間とし、天頂角は 0～90° まで 5° 刻みで計測した。測定時間を 2 時間とすることにより天頂角 30° 以下については変動係数を 3%以内に抑えることができた。



写真 3.1-1 試作機 A 校正試験状況



写真 3.1-2 試作機 B・C 校正試験状況

3.2 校正試験結果

ミュー粒子(μ)と電子(e)の理論値は湊(1992)、計数効率の計算方法は湊(2009)に従った。図 3.2-1 に天頂角ごとの解析結果を、表 3.2-1 に試作機ごとの計数効率をそれぞれ示す。計数効率が 1 を越えるのは図 3.2-2 に示すように、検出器の側面からの入射があるためと考えられる。表 3.2-2 に各試作機の立体角と側面を考慮した立体角の比率を示す。これ以降のデータは、全て計数効率の補正をしてある。

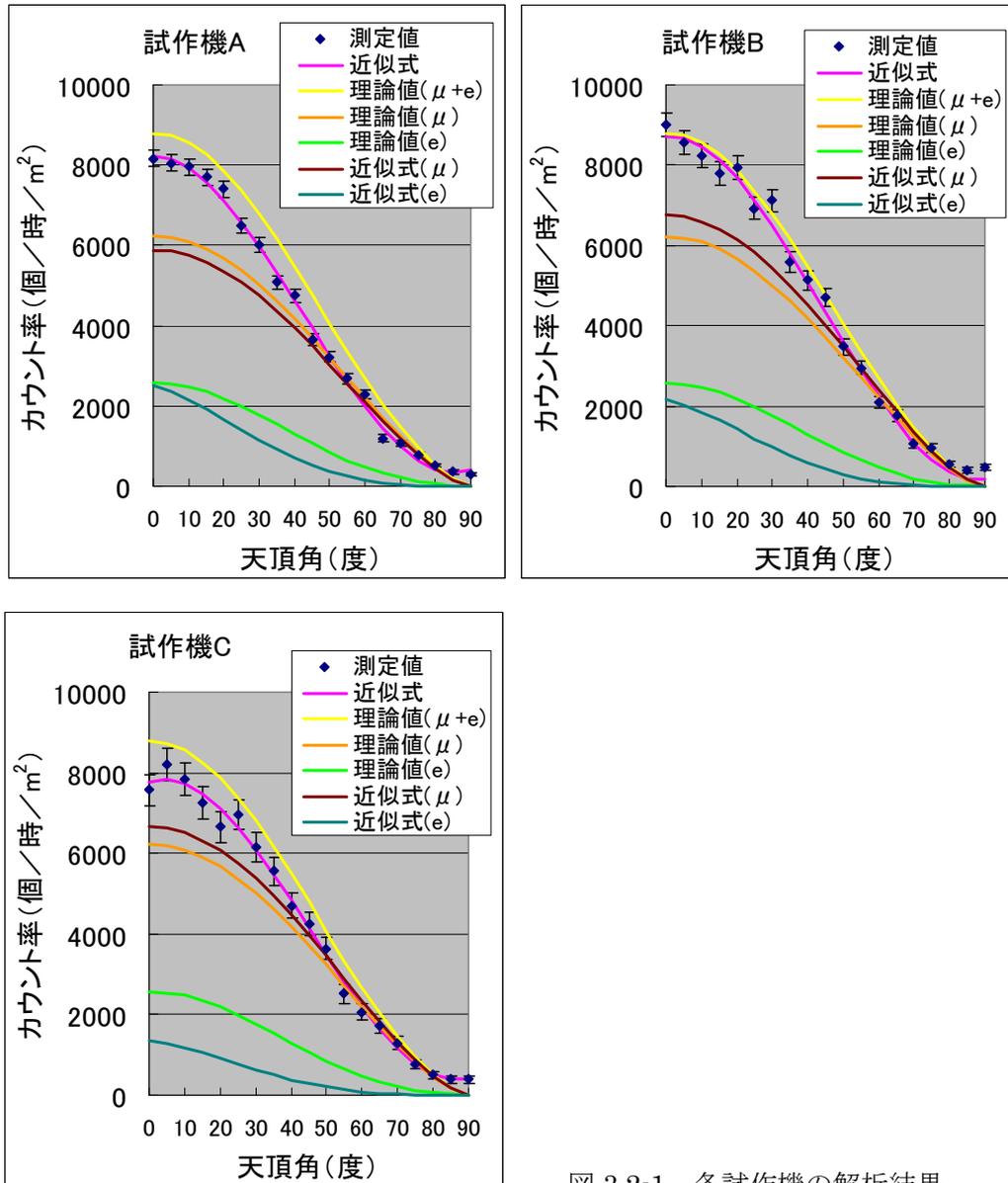


図 3.2-1 各試作機の解析結果

表 3.2-1 計数効率の解析結果

機器名	ミュー粒子計数効率	電子比率
試作機 A	0.945	$0.9785 - 0.0109 \theta$
試作機 B	1.084	$0.8499 - 0.0099 \theta$
試作機 C	1.070	$0.533 - 0.0059 \theta$

θ : 天頂角

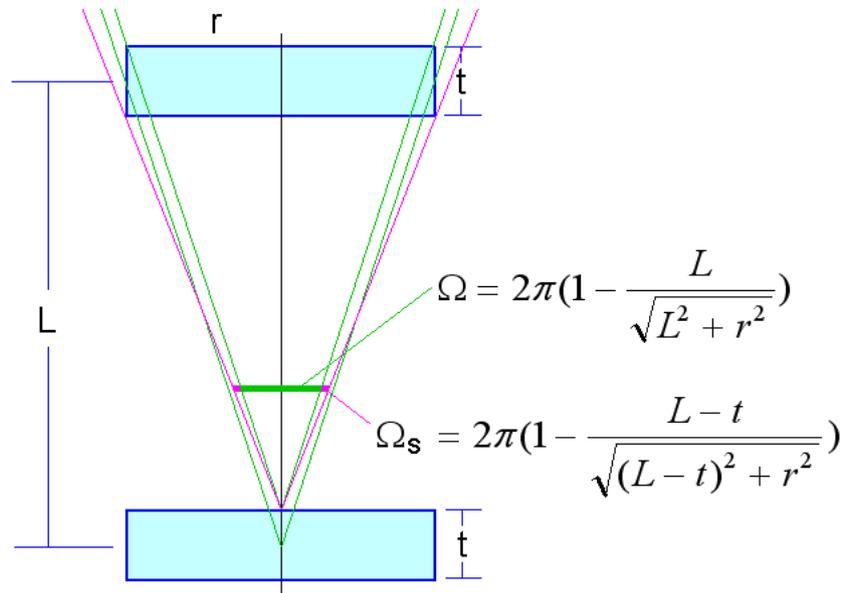


図 3.2-2 検出器側面への入射と側面を考慮した立体角

表 3.2-2 側面を考慮した立体角

機器名	試作機A	試作機B	試作機C
検出器径	35	24.5	17.5
r (cm)	17.5	12.25	8.75
L (cm)	200	140	100
t (cm)	3	5	5
Ω (sr)	0.0239	0.0239	0.0239
Ωs (sr)	0.0246	0.0257	0.0265
Ωs/Ω	1.031	1.075	1.107

3.3 校正試験の成果

校正試験により得られた計数効率を用いて、ビルの天井のコンクリートの厚さを推定するための実験を行った。校正試験を行ったビルの4階（屋上の直下）で2時間×24回の測定を行った。その結果、平均値1477（個/2時間）を得た。湊(1992)の式を用いて面密度を計算したところ、 0.55hg/cm^2 が得られた。天井の鉄筋コンクリートの密度を 2.4g/cm^3 と仮定すると、天井の厚さは23cmとなる。天井の厚さを実測すると22cmであり、実測値に近い値（誤差4%）が得られた（図3.3-1）。

さらに、平成20度の地下実験データを再解析し、密度を計算した。その結果を図3.3-2に示す。昨年度の計数効率値を用いた場合、密度の推定誤差は8%（約 0.1g/cm^3 の差）であった。今回の実験データから推定した密度の誤差は、4%（約 0.07g/cm^3 の差）であり、密度の推定精度の向上

が認められた。特に C 地点の値は、地盤を構成する各成分の密度と構成比から計算した推定密度と一致した。

以上の再解析の結果から、新たに試作機を製作した際には空気中における実験を行い、計数効率を正確に把握する必要がある。

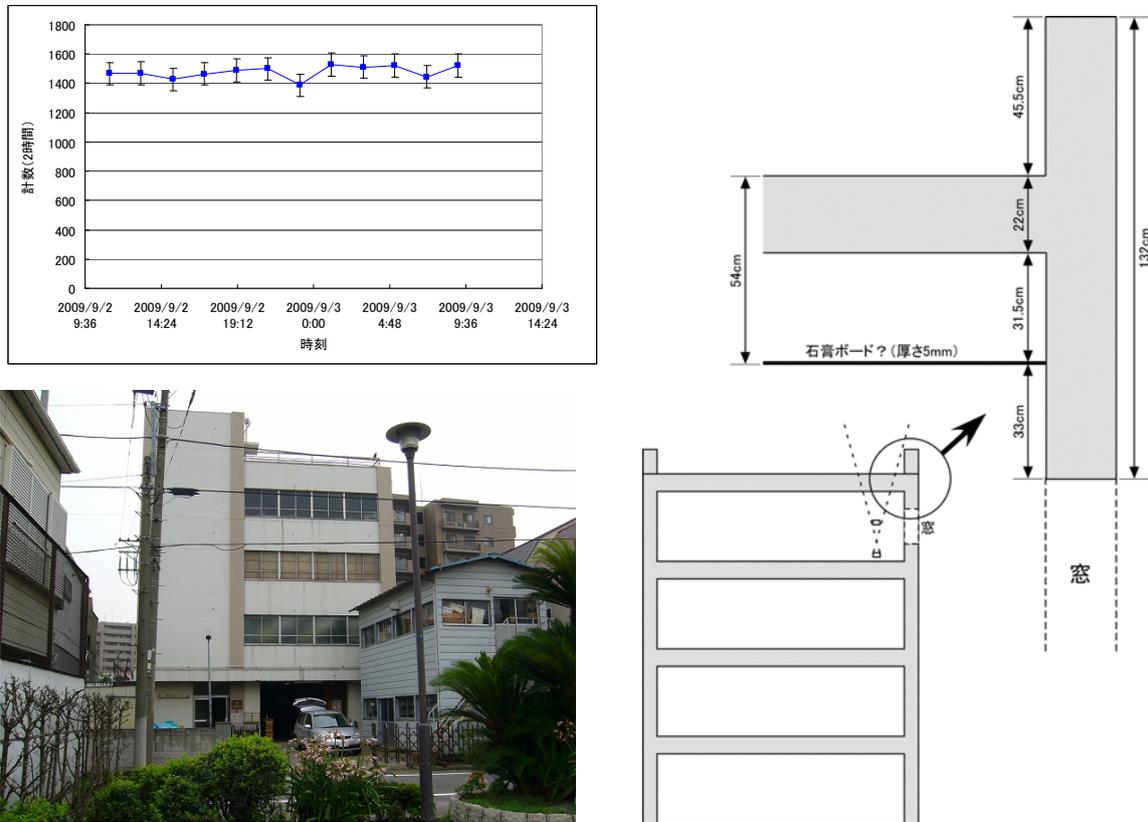


図 3.3-1 天井コンクリートの厚さ測定結果

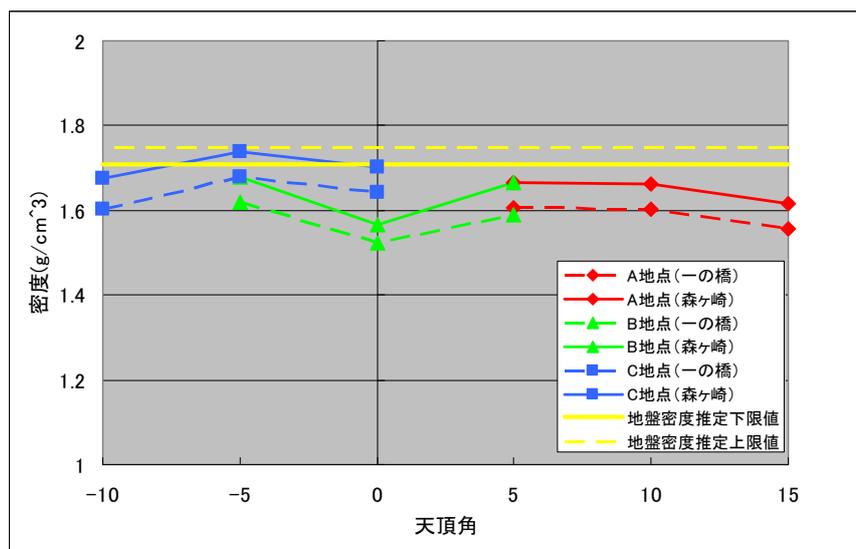


図 3.3-2 平成 20 年度地下実験再解析結果

第4章 トモグラフィ解析技術の検討

4.1 解析アルゴリズムの検討

(1)入射角依存性

図 4.1-1 に示すようにミュー粒子の計数には検出器に対する入射角依存性がある。二つの検出器を同時に通過するミュー粒子は検出器に対して垂直が最も多く計数され、入射角が大きくなるにつれて少なくなる。図 4.1-2 にモンテカルロシミュレーションによって求めた入射角に対する計数率を示す。ここに示した計数率は、全入射角で積分したときに1になるように正規化してある。

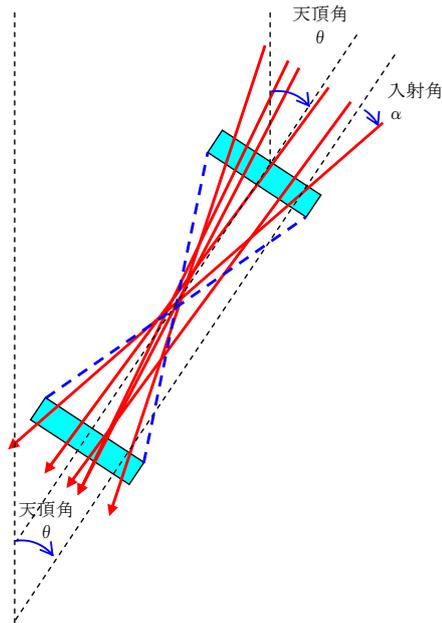


図 4.1-1 検出器による入射角依存性

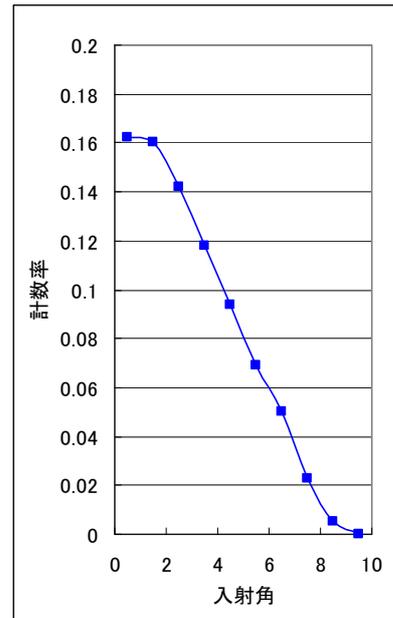


図 4.1-2 入射角依存性のシミュレーション結果

(2)天頂角補正アルゴリズム

(1)で検討した入射角を考慮して、各天頂角についての面密度を計算するためのアルゴリズムを検討した。その手順は以下のとおりである。

- ①検出器が張る立体角内にモンテカルロ法を利用してランダムに 1000 方向の透過経路を設定する。
- ②次にこの透過経路に対して入射角に応じた重みを掛け合わせる。
- ③全ての透過経路を足し合わせ、1000 で割って平均の透過距離とする。
- ④この透過距離を天頂角の余弦で割ったものと地盤の平均密度とを掛け合わせて面密度を求める。
- ⑤湊(1992)の式を用いて④で計算した面密度から、計測時間・立体角・検出器の面積・計数効率を掛け合わせて計数を求める。
- ⑥実測した計数と合うような密度を地盤の平均密度とする。

幾何学的な関係を図 4.1-3 に示す。

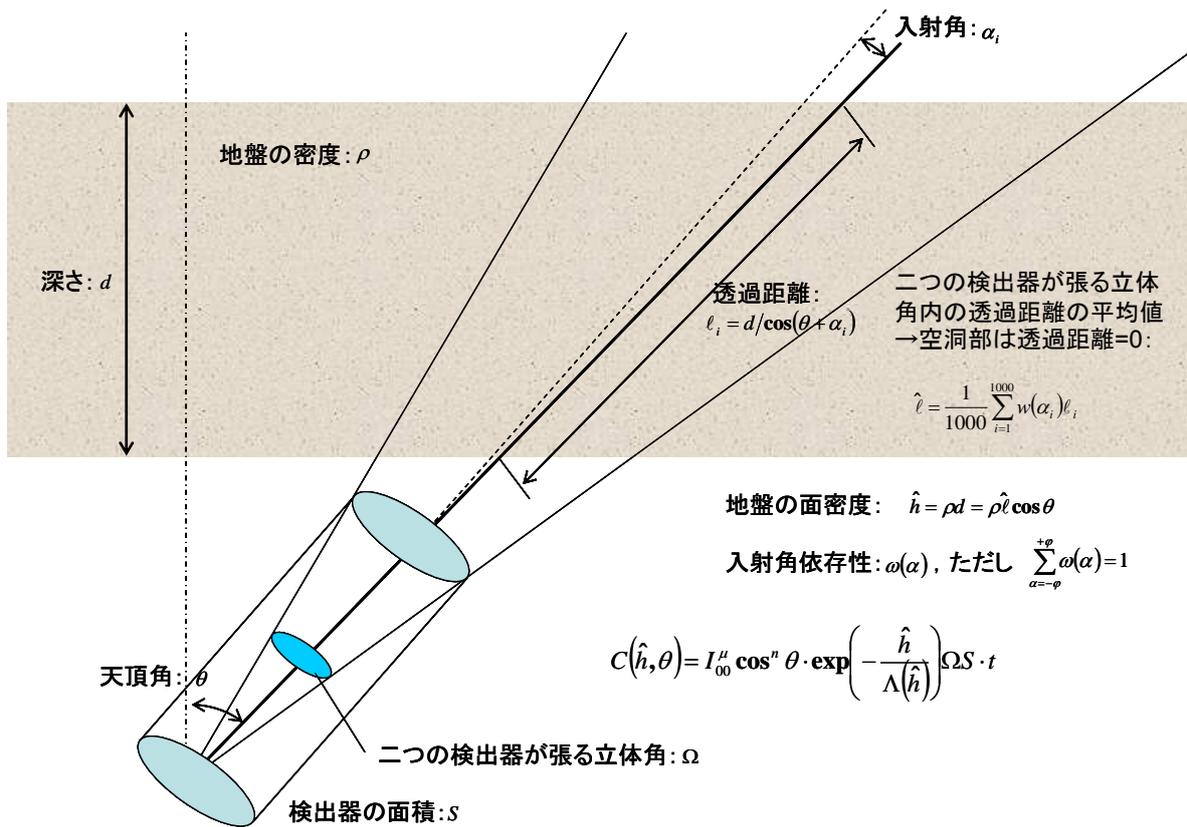


図 4.1-3 検出器・立体角・透過距離の幾何学的関係

(3) 重み関数の検討

図 4.1-4 に示すように、二つの検出器による入射角依存性は、同心円上の計数率を足し合わせたものである。二次元トモグラフィ解析にあたっては、入射角依存性を二次元に投影し、足し合わせることで二次元の入射角依存性とした。検出器によって張られる立体角の内部のセルに対して、投影した二次元の入射角依存性を重み関数として、トモグラフィ解析を行うこととした。図 4.1-4 に二次元に投影した重み関数をグラフと表で示した。

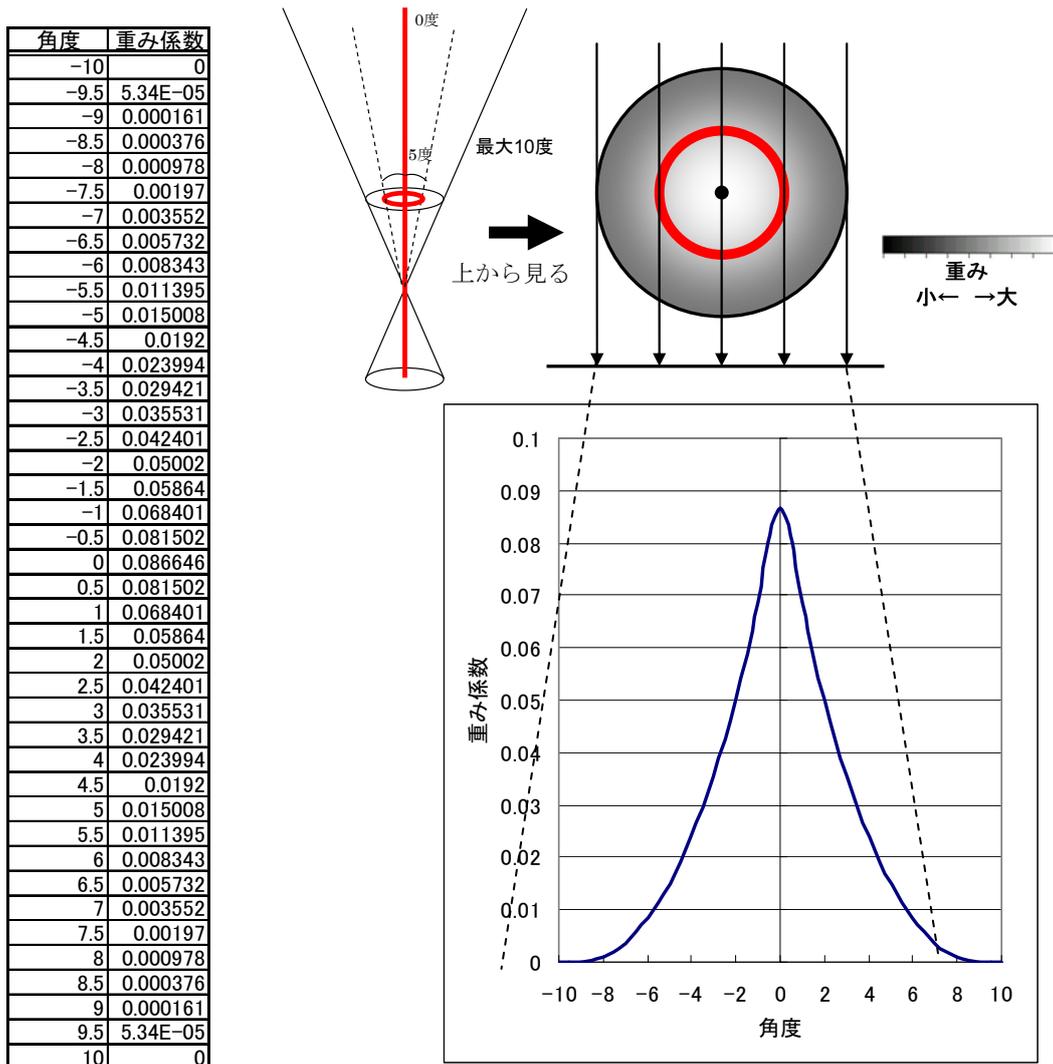


図 4.1-4 入射角依存性の二次元投影重み係数

(4) 数値積分方法の検討

天頂角と重み関数の関係を図 4.1-5 に示す。トモグラフィ解析にあたっては解析断面を格子状に分割する。分割された格子状の四角形をセルという。ある層を透過する経路に沿う密度は、経路の中心が位置するセルの密度で代表させる。ただし、ある層内での経路に沿う細かな分割は考慮しない。入射角に対しては $-10^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$ の範囲で 0.5° 刻みで分割する。任意の入射角 (j 番目の入射角 α_j) に対する k 番目の層内 (代表のセルを i 番目のセル) の面密度寄与分 h_{ij} は、面密度の定義より

$$h_{ij} = \frac{w_j \rho_i \ell_j}{\cos(\theta + \alpha_j)} \rightarrow h_{ij} = w_j \rho_i dz$$

であらわされる。

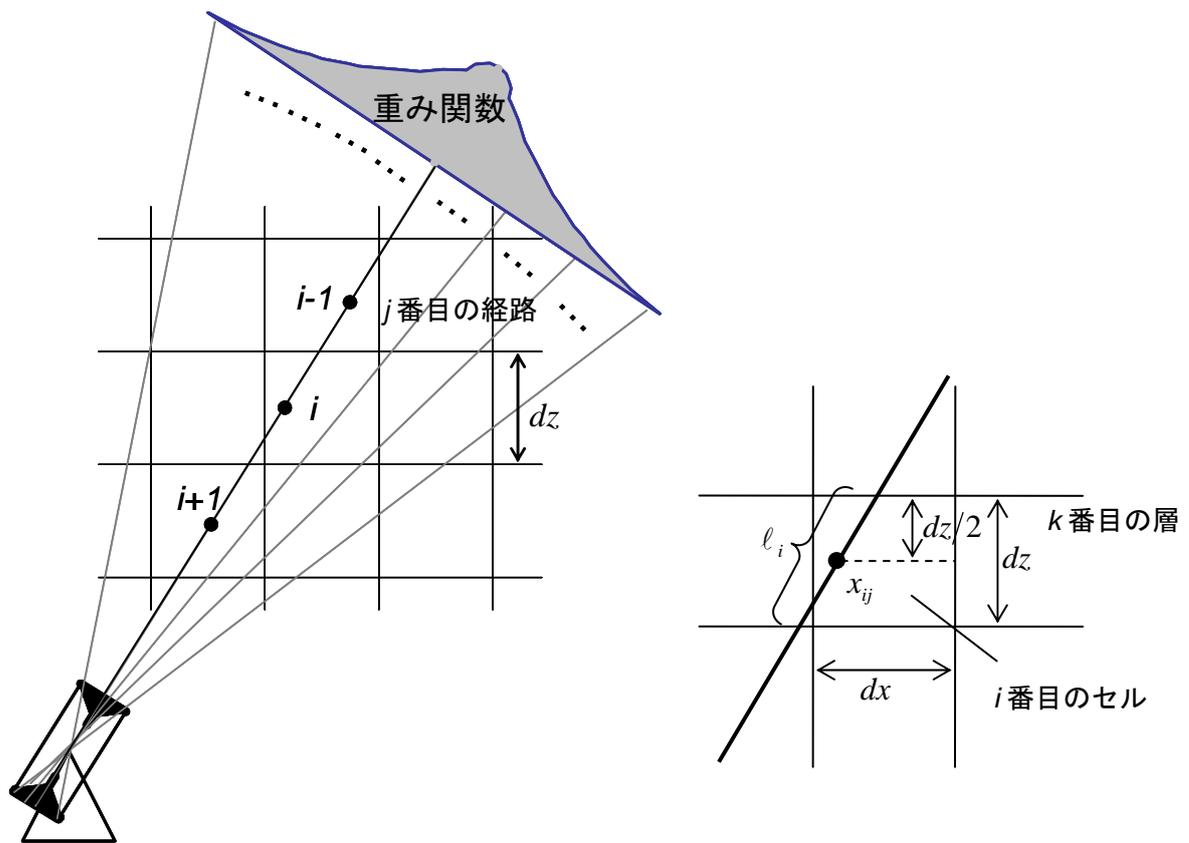


図 4.1-5 天頂角と重み関数

この h_{ij} を要素面密度と仮定すると、 i 番目のセルが面密度の観測値に寄与する分は、

$$\left(\sum p_{ij} w_j \right) \rho_i dz$$

であらわされる。ただし p_{ij} は経路が i 番目のセルを通れば 1、通らなければ 0 となる。このとき観測される面密度は、

$$h = \sum \left(\sum p_{ij} w_j \right) \rho_i dz$$

となる。

4.2 解析アルゴリズムの妥当性の検証

トモグラフィ解析の精度を確認するため、図 4.2-1 に示すような数値モデルを与えて計算を実施した。与えた数値モデルは単一空洞の場合については、空洞直径が 2m、1m、0.5m の三通りとした。深さ 10m、水平距離 20m（距離程-10~10m）の断面の中央に空洞を配置した。空洞が複数の場合は二通りの場合（空洞が 2 個の場合と 3 個の場合）を計算した。なお、地盤と空洞の密度はそれぞれ $2.0 \times 10^3 \text{g/cm}^3$ 、 $0.0 \times 10^3 \text{g/cm}^3$ とした。

図 4.2-2 に透過経路図を示す。-10m 地点から +10m 地点まで、0.5m 間隔の測定点を設けた。1 地点あたりの天頂角は 5 度刻み、最大を 50 度までとした。トンネル天端と検出器の中心との距離は 2m とした。

計算精度の検証には、はじめに湊(1992)の式を用いて数値モデルの各測点でのカウント数から各測点・各天頂角の面密度を求める。この場合、1 回あたりの測定時間を 8 時間とし、カウント数の変動係数を 3% 以下に抑えている。これを用いて前述のように重み付きの数値積分を行い、湊(1992)による結果と比較した。代表的な例として水平距離 0m、-2m、-7m、-10m のときの計算

結果を図 4.2-3~4.2-6 に示す。面密度 $20\text{hg}/\text{cm}^2$ に対して $0.1\text{hg}/\text{cm}^2$ 程度 (0.5%) の精度で整合性を確認することができた。

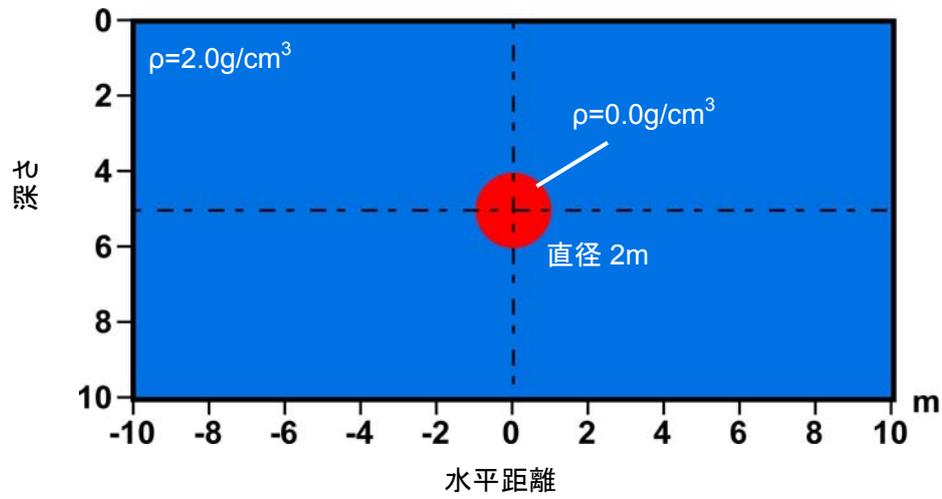


図 4.2-1 数値モデル (空洞直径 2m の場合を図示。1m、0.5m についても実施)

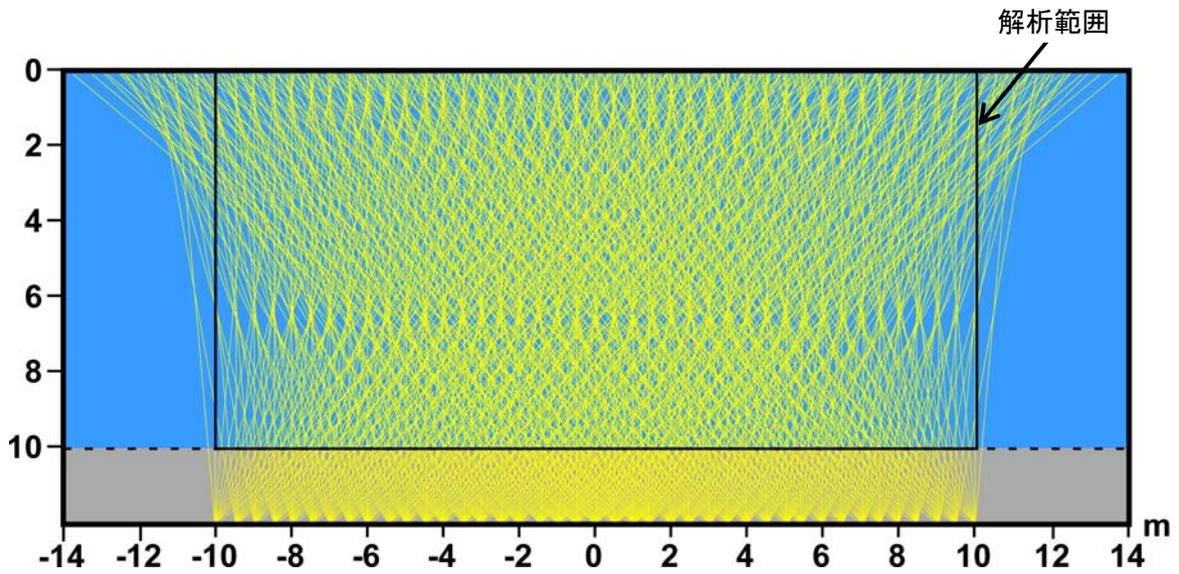


図 4.2-2 数値モデル透過経路図

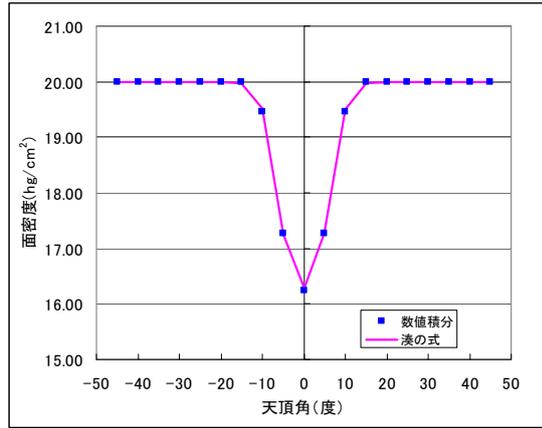
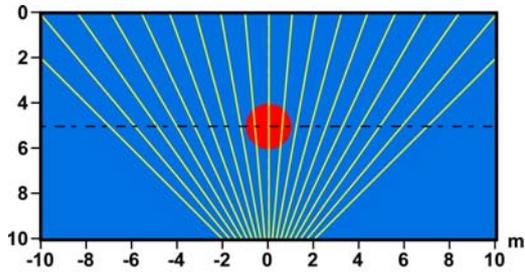


図 4.2-3 水平距離 0m のときの計算結果の比較

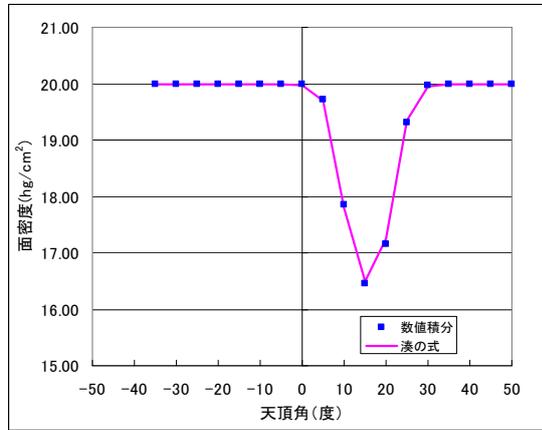
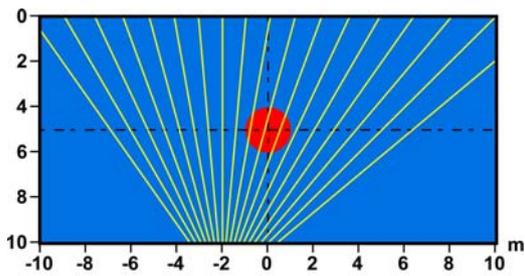


図 4.2-4 水平距離 -2m のときの計算結果の比較

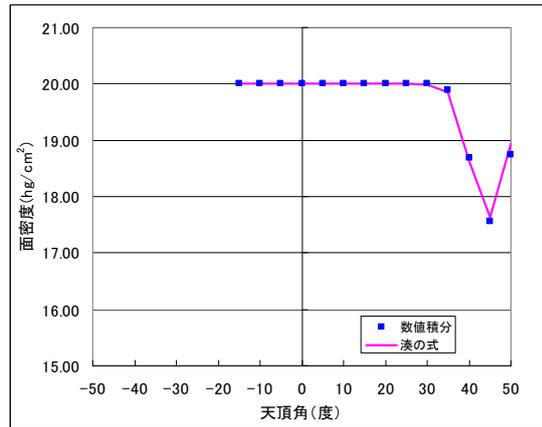
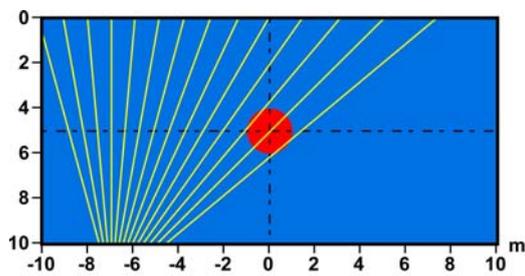


図 4.2-5 水平距離 -7m のときの計算結果の比較

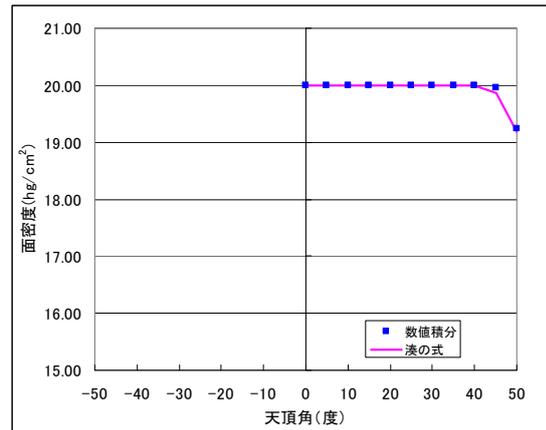
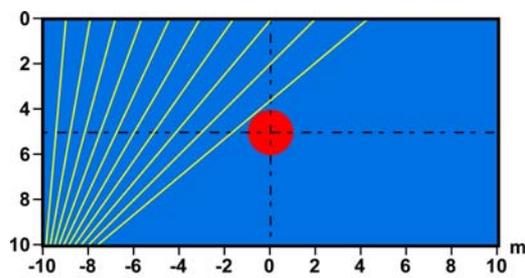


図 4.2-6 水平距離-10m のときの計算結果の比較

次にこの数値モデルを用いてトモグラフィ解析を行った。直径 **2m** の単一空洞の場合の解析結果を図 4.2-7 に示す。波線経路の幾何学形状に起因する偽像が若干見られるが、空洞の中心付近の密度は 0g/cm^3 となっていることが確認でき、数値モデルを再構成することができたと考えられる。図 4.2-8 には直径 **1m** の単一空洞の場合の結果を示す。空洞の中心付近の値は、 0.5g/cm^3 程度であるが、空洞の有無は判定できるものと考えられる。図 4.2-9 には直径 **0.5m** の単一空洞の場合の解析結果を示す。空洞中心の密度は周りの地盤との値に近づくが、密度の小さい部分が認められる。空洞の検出限界の大きさは **0.5m** 程度であると考えられる。

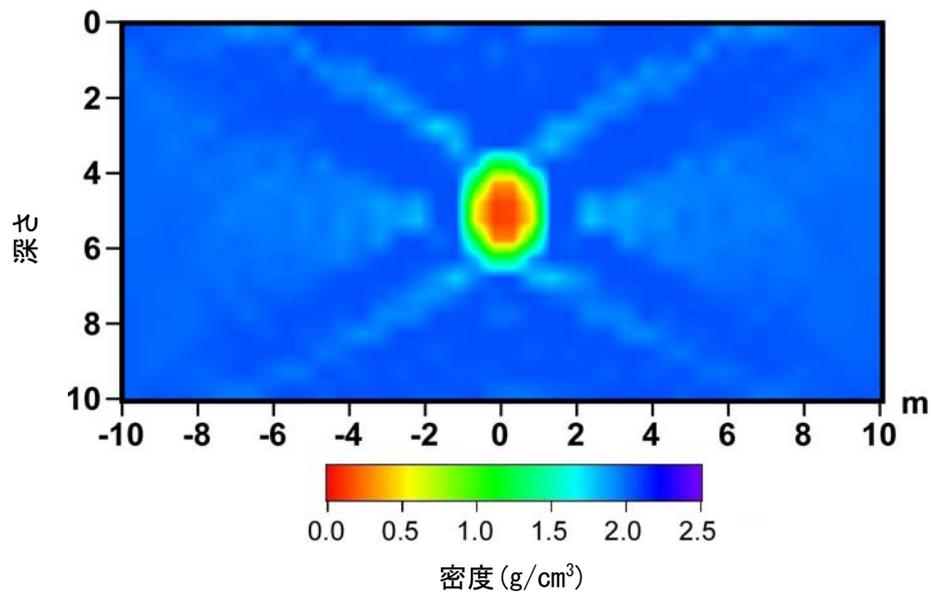
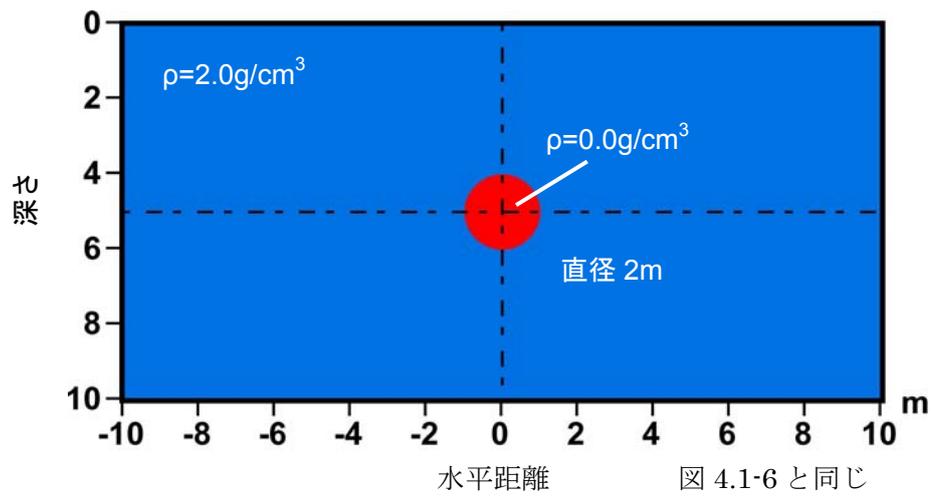


図 4.2-7 単一空洞（直径 2m）の数値モデルによるトモグラフィ解析結果

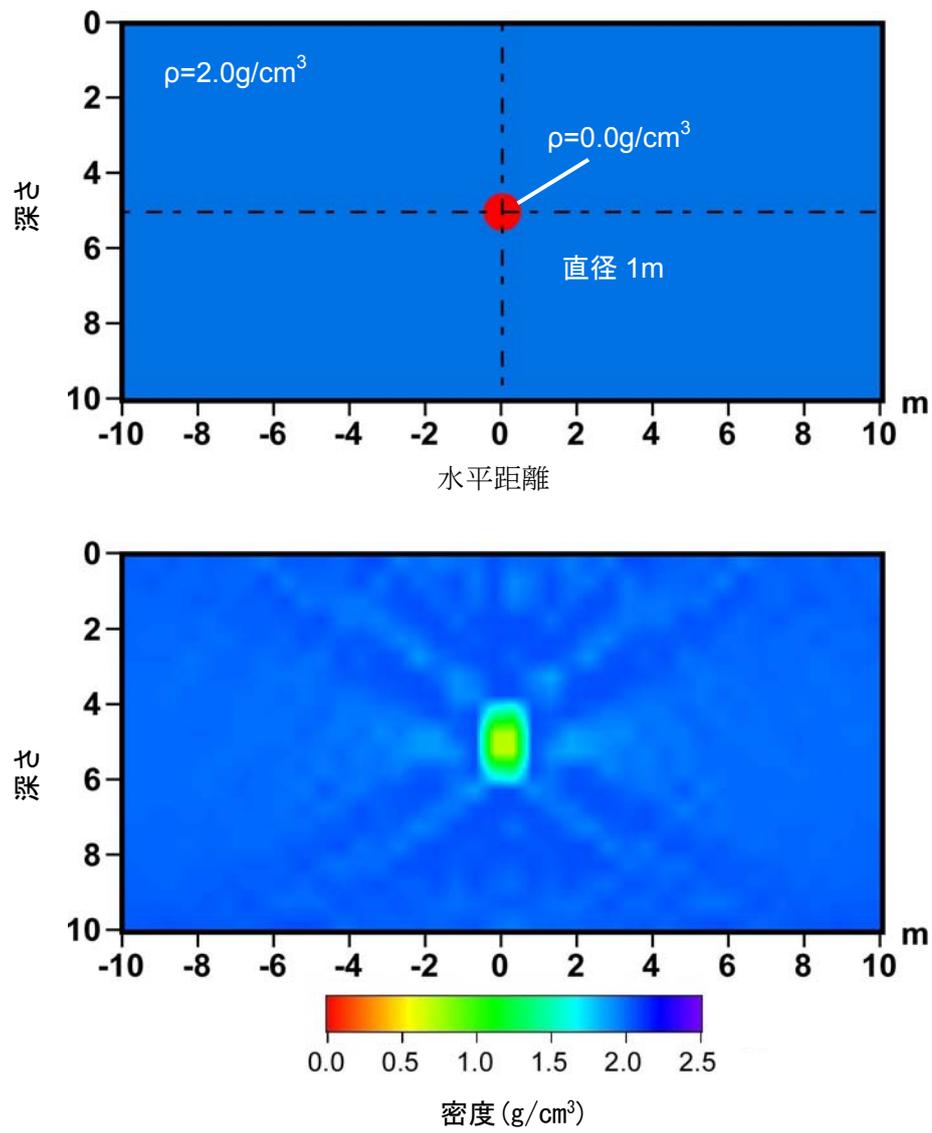


図 4.2-8 単一空洞（直径 1m）の数値モデルによるトモグラフィ解析結果

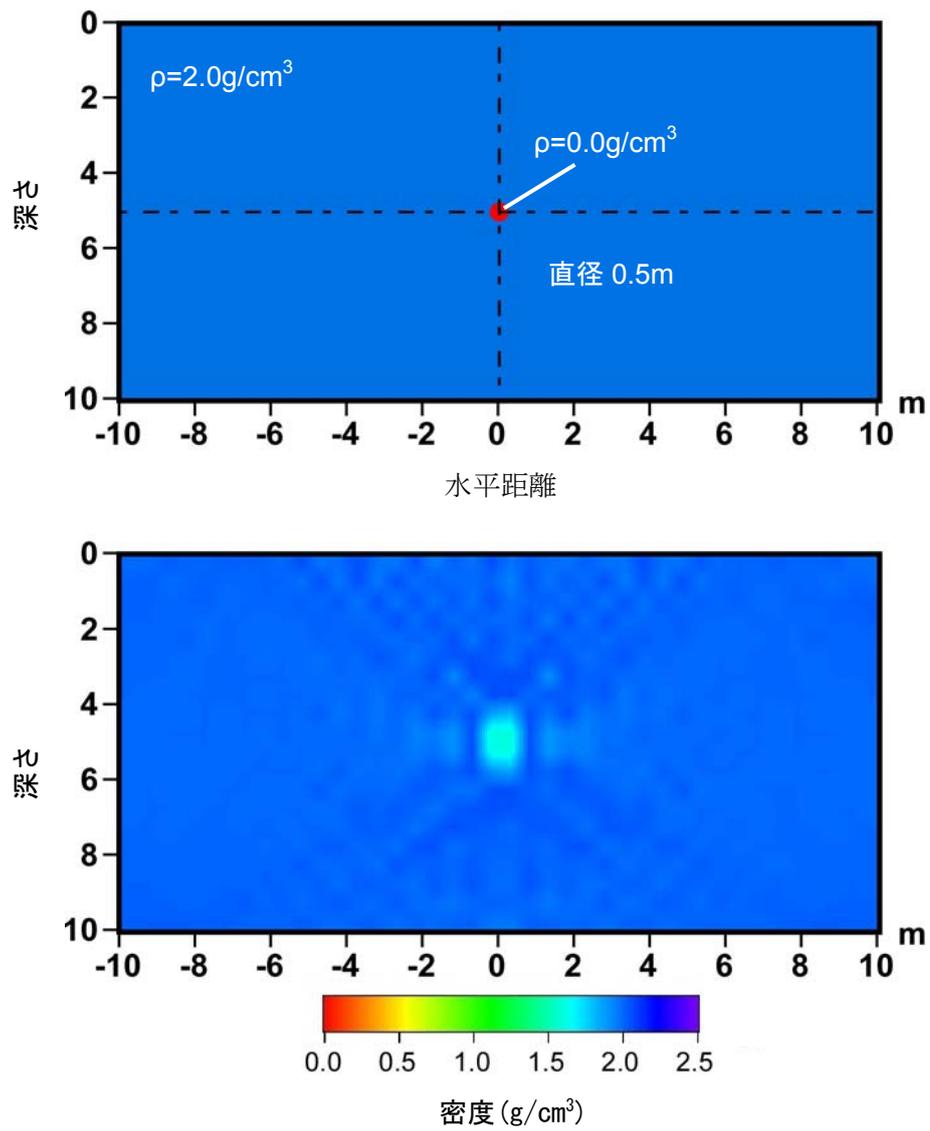


図 4.2-9 単一空洞（直径 0.5m）の数値モデルによるトモグラフィ解析結果

図 4.2-10 に空洞直径が 1m と 2m で、両者の中心距離が 7m の場合の解析結果を示す。単一空洞の場合と同様に、空洞の再構成ができています。図 4.2-11 には空洞を三つに増やし、直径 1m の空洞を上下に配置した数値モデルの解析結果である。三つの空洞が分離され上下の空洞の分離も良い。ただし、上下の空洞を比較すると、上の空洞の方が密度の誤差が大きくなっている。

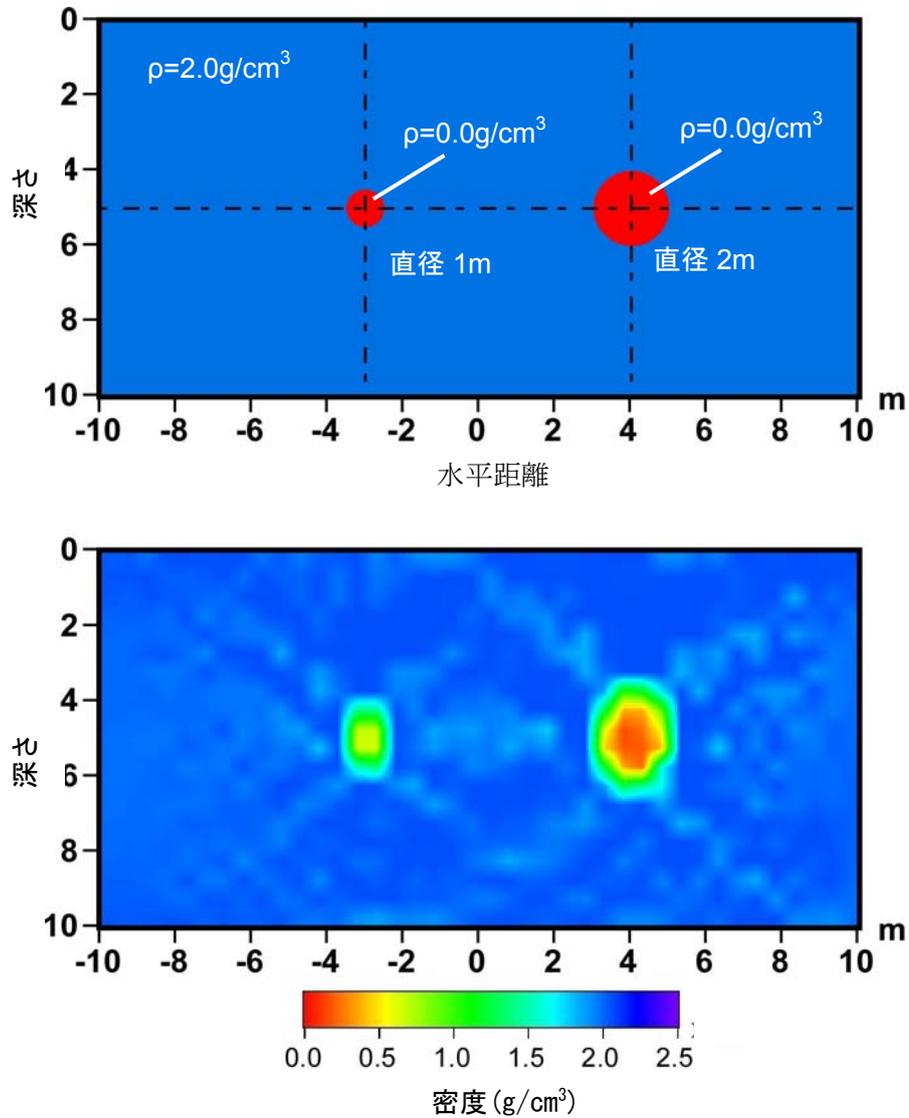


図 4.2-10 空洞が二つの場合の数値モデルによるトモグラフィ解析結果

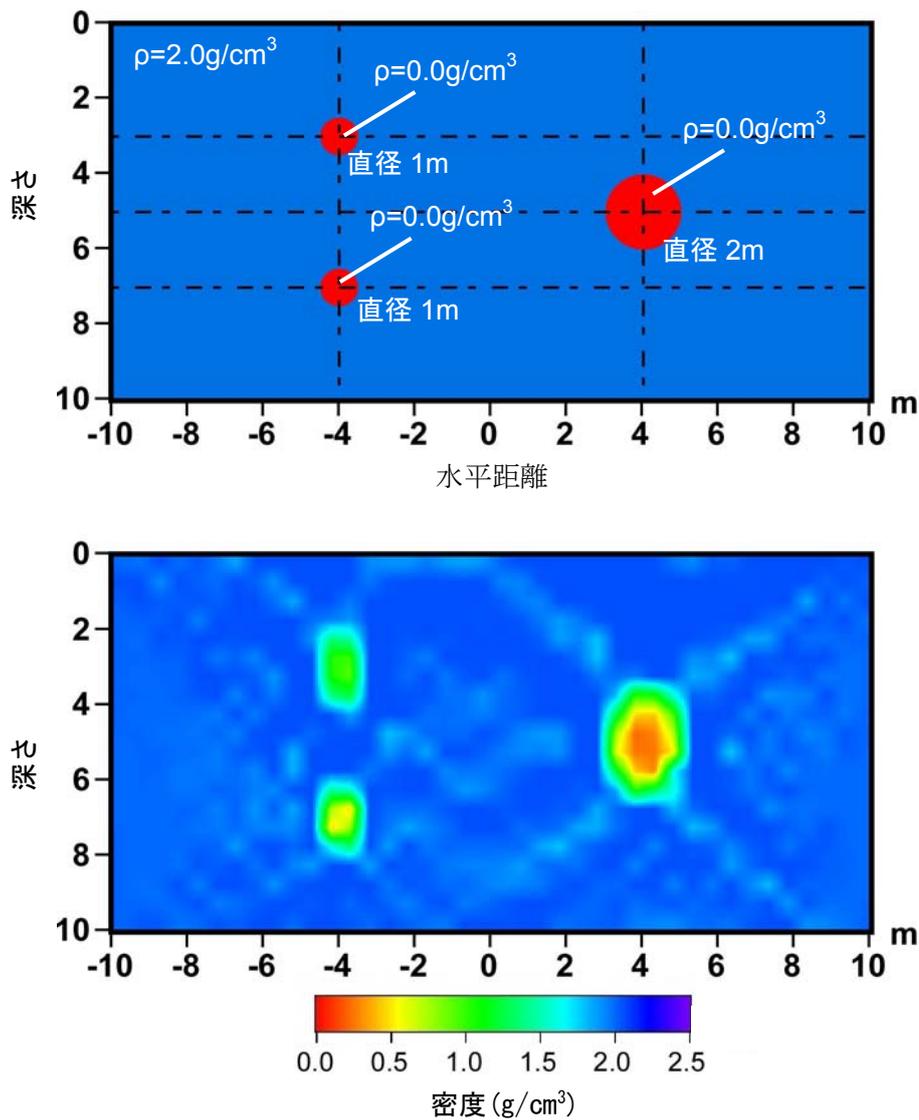


図 4.2-11 空洞が三つの場合の数値モデルによるトモグラフィ解析結果

以上の検討結果から以下の知見を得た。

- ① 数値積分方法の計算方法を提案した。
- ② 数値積分方法と湊の式による比較を行い、0.5%程度の精度を確認した。
- ③ 数値モデルに対してトモグラフィ解析を行い、直径 0.5m 程度までの空洞を検出できることを確認した。
- ④ 同一断面内に複数の空洞がある場合にも適用できることを確認した。

4.3 三次元トモグラフィの必要性

(1) 数値モデル

トモグラフィ解析において、空洞の三次元的な位置による効果を検討するため、空洞を球として面密度の理論計算を実施した。与えたモデルは図 4.3-1 に示すように、土被り 10m、空洞の直径は 2m の球形、空洞の中心の深さを 5m、検出器の中心深さは 12m である。地盤の密度は 2.0g/cm^3 、空洞の密度は 0.0g/cm^3 である。検出器の縦断方向の位置は、-10m から +10m まで、1m 間隔とした。天頂角は、 $-50^\circ \sim +50^\circ$ （本来天頂角は正の値で表現され、天頂角の負の値は方位角 180 度として表現される。ここでは便宜上、天頂角を正負の符号を用いてあらわすこととする）、測定間隔を 5° とした。図 4.3-2 に示すように球形空洞は縦断面に中心がある場合（0m と表記）、縦断面から横断方向に垂直に 1m ずらした位置（単に 1m と表記）及び横断方向垂直に 2m（単に 2m と表記）とした。

計数率の計算方法は、空洞が円筒形であることを除いては、昨年度の理論解析と全く同じである。

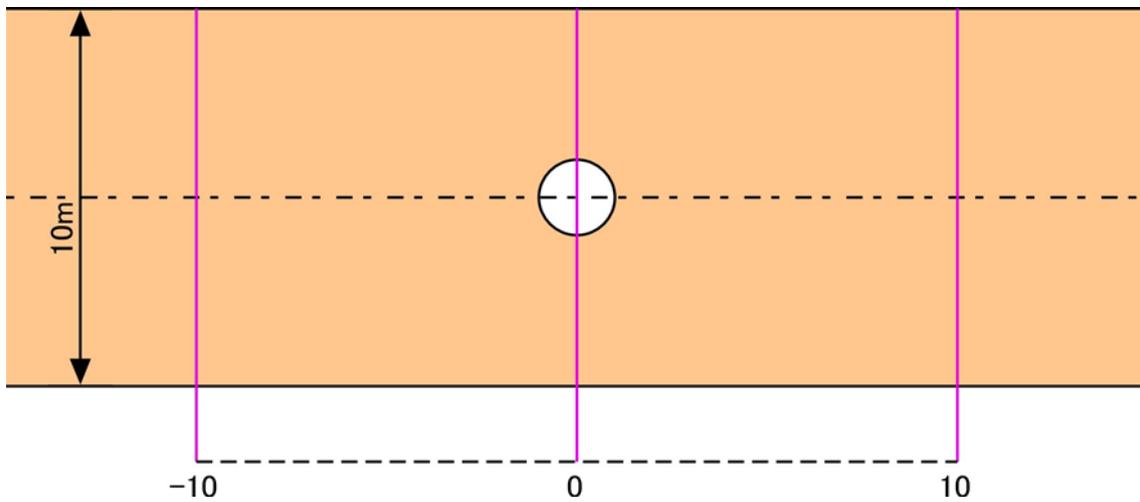


図 4.3-1 縦断方向断面

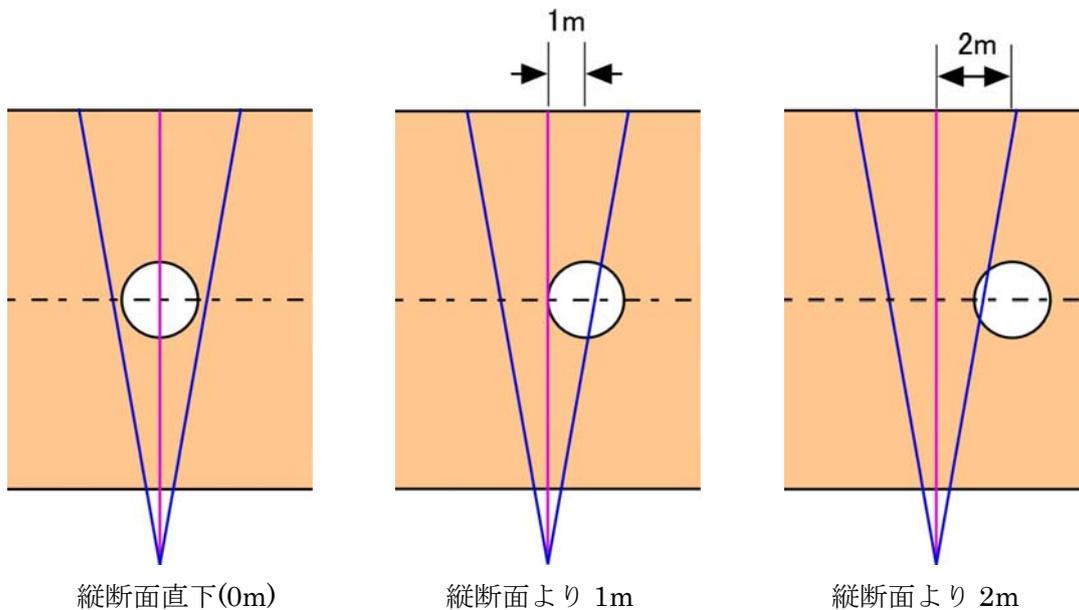


図 4.3-2 横断方向断面

(2)解析結果

図 4.3-3、図 4.3-4 に面密度の計算結果を示す。なお、縦断方向 1~10m の結果は、-10~-1m の結果を折り返したものと同一であるため割愛する。

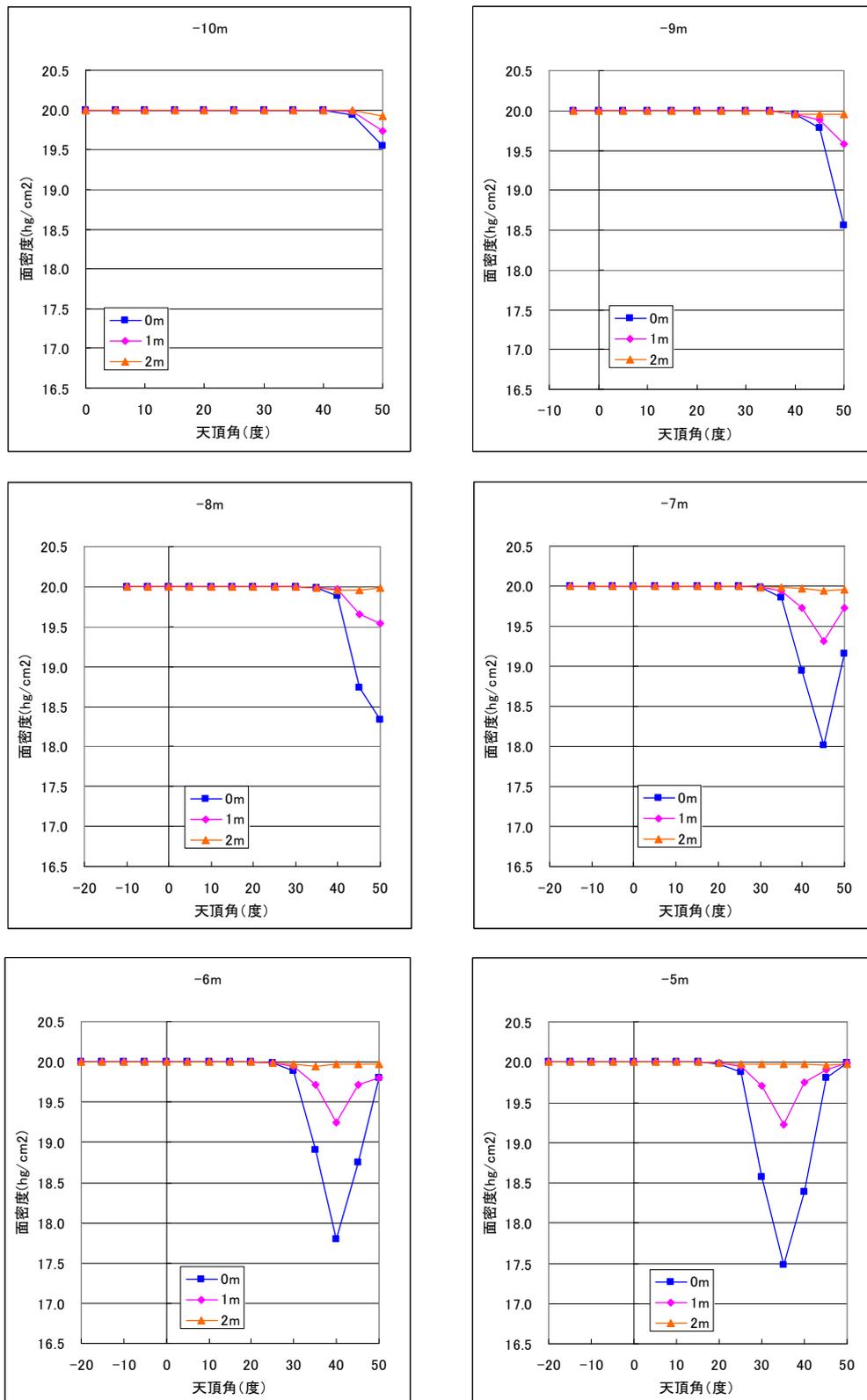


図 4.3-3 球形空洞による面密度計算結果 (縦断方向-10~-5m)

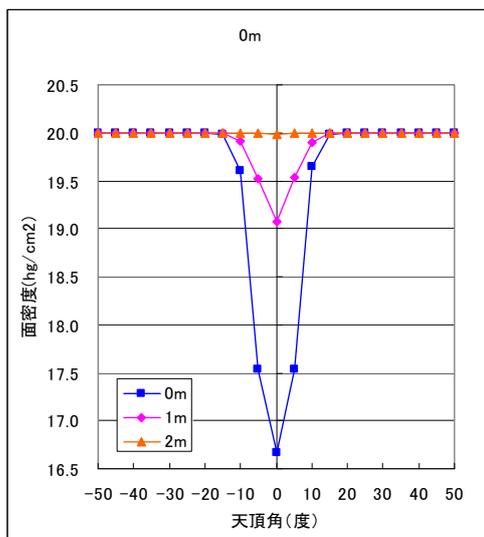
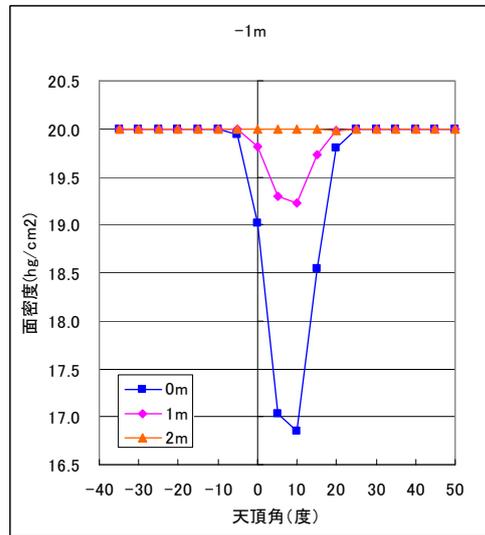
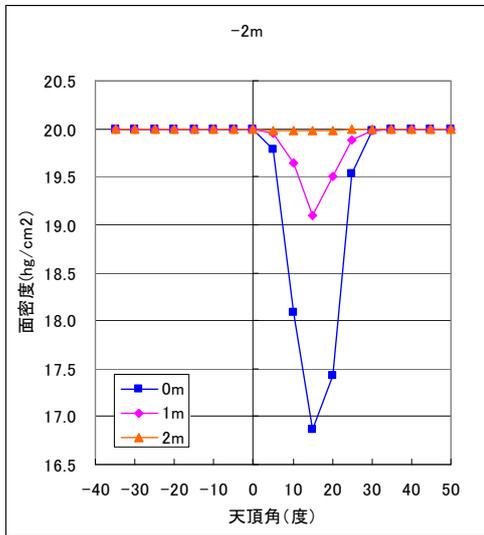
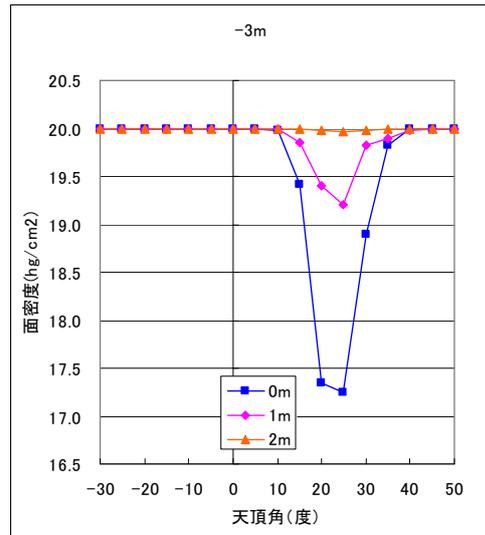
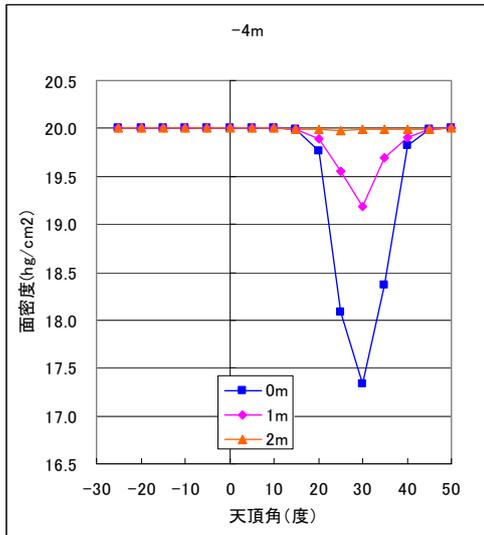


図 4.3-4 球形空洞による面密度計算結果 (縦断方向-4~0m)

(3)解析結果の評価

- ① 球形空洞による計算の結果は、昨年までの円筒空洞による結果と同様である。すなわち、検出器からみた空洞の天頂角が大きい(縦断方向の検出器の位置が中心から離れる)ほど、面密度の差が小さくなるため、検出が難しくなる。
- ② 空洞の天頂角が大きい場合、円筒の場合より面密度の差が出にくくなる。円筒空洞の場合は、横断方向にも低密度の空洞部分が存在するが、球形空洞の場合にはこれがないためと考えられる(図 4.3-5)。
- ③ 空洞の直下に検出器がある場合には、円筒空洞との差はほとんどない(図 4.3-5)。
- ④ 球形空洞の中心が縦断面より外れると、球形空洞による面密度の差は、円筒空洞の場合ほどではなくなり、空洞の検出が困難となる。
- ⑤ 球形空洞の場合、検出器がその直下にある場合には検出が容易である。
- ⑥ 球形空洞の場合は、トモグラフィ解析を三次元へ拡張する必要があることを示唆している。

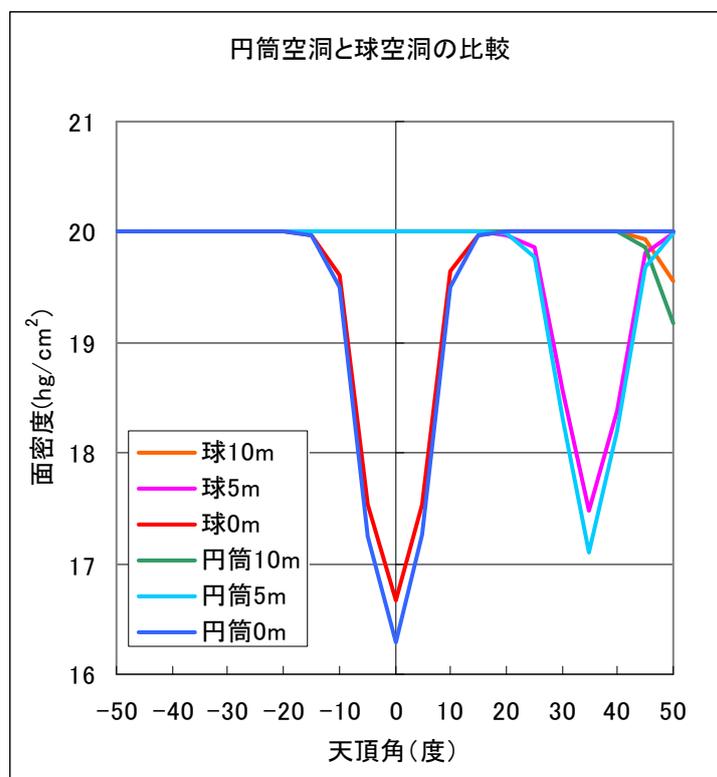


図 4.3-5 円筒空洞と球空洞の場合の比較 (縦断方向-10m の面密度計算値)

第5章 地下実験

5.1 試作機 A による地下施設での実験

(1) 目的

試作機 A を用いてトモグラフィ解析用のデータを取得するため、昨年度より土被りの大きい地点での計測を実施し、トモグラフィ解析を行う。

(2) 実験場の概要

実験場の断面を図 5.1-1 に示す。土被りは鉄筋コンクリートなどの構造物も含めて 11.1m である。測定範囲は、水平方向 12m を 1m 間隔で、同図の左側から A 点、B 点、・・・、M 点までの 13 測点を設けた。各測点での天頂角は 5 度刻みとした。測定点は全部で 159 点である。

図 5.1-2 に平面図を示す。データ取得範囲の左端には通路があり、3m 角程度の空間となっている。

H 点付近の深度 3.45m に直径 1.3m の下水管が横断している。これを空洞と考え、この空洞による計数の差を確認する。

(3) 実験方法

写真 5.1-1 に実験の状況を示す。予め土被りから想定した面密度より計数率を計算し、計数の変動係数が概ね 3% 以下になるように各点での測定時間は 8 時間とした。表 5.1-1 に実験工程を示す。9 月末から測定を開始し、12 月下旬で終了した。

(4) 実験結果

図 5.1-3 に A 地点（上段）と H 地点（下段）での計数結果を示す。各段の左側のグラフは、計測によって得られたカウント数と地盤の面密度を $20\text{hg}/\text{cm}^2$ （密度 $1.81\text{g}/\text{cm}^3$ ）としたときの理論値を示している。各段の右側は理論値との差を示している。A 地点の天頂角 0 では、カウント数の大きい値が認められる。これは通路による影響と考えられる。理論値との差が負になっているのは、地上の周囲にある高い建物の影響である。A 地点の 30～35 度付近に埋設管の影響が出るはずであるが、建物の影響に埋まっていてこのままでは確認できない。H 地点の -5～0 度ではカウント数が大きくなっており、埋設管の影響と考えられる。この角度では周囲の建物の影響はない。

全てのデータについて、開発したトモグラフィ解析アルゴリズムを用いて解析を行った。図 5.1-4 は既存資料から想定した初期モデルである。通路と埋設管に低密度を与え、鉄筋コンクリートには高密度 ($2.35\text{g}/\text{cm}^3$ 、固定値) を与えた。

解析の条件は、以下のとおりである。

- ① セルサイズ：0.5m×0.5m
- ② 鉛直方向：11m（22セル）
- ③ 水平方向：15m（30セル）
- ④ 逐次近似回数：1000回

図 5.1-5 にトモグラフィ解析結果を示す。通路と埋設管の部分に低密度が再現されている。断面中央のコンクリート背面に低密度が検出されているが、この付近に通路などはないとされている。

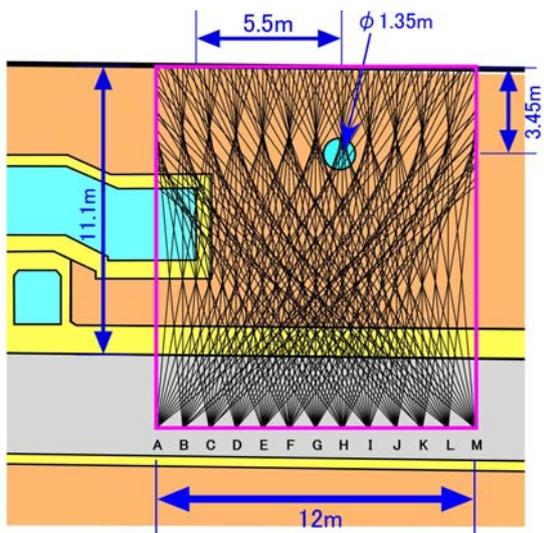


図 5.1-1 透過経路図

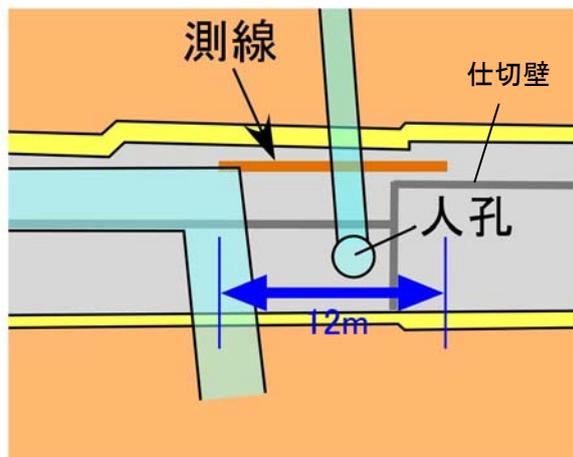


図 5.1-2 平面図



写真 5.1-1 試作機 A による実験状況

表 5.1-1 実験工程

測定点A			測定点B			測定点C			測定点D			測定点E		
月	日	角度	月	日	角度	月	日	角度	月	日	角度	月	日	角度
9月	29日	0	10月	5日	-5	10月	11日	-10	10月	17日	-15	10月	23日	-20
	30日	5		6日	0		12日	-5		18日	-10		24日	-15
		10		7日	5		13日	0		19日	-5		25日	-10
10月	1日	15		8日	10		14日	5		20日	0		26日	-5
	2日	20		9日	15		15日	10		21日	5		27日	0
	3日	25		10日	20		16日	15		22日	10		28日	5
	4日	30		25		20		25	29日	10				
	35		30		25		30	30日	15					
	40		35		30		35		20					
	45		40		35		40		25					
	50		45		40		45		30					
			50		45					35				
										40				

測定点F			測定点G			測定点H			測定点I			測定点J		
月	日	角度												
10月	30日	-25	11月	6日	-30	11月	16日	-35	11月	23日	-40	12月	29日	-40
	31日	-20		7日	-25		17日	-30		24日	-35		30日	-35
		-15		8日	-20		18日	-25		25日	-20		1日	-25
11月	1日	-10		9日	-15		19日	-10		26日	-15		2日	-15
	2日	-5		10日	-5		20日	-5		27日	-10		3日	-10
	3日	0		15日	0		21日	0		28日	-5		4日	-5
	4日	5	16日	5	22日	5		0	5日	0				
	10		10		10		5		5					
	15		15		15		10		10					
	20		20		20		15		15					
	25		25		25		20							
	30		30		30		25							
	35													

測定点K			測定点L			測定点M		
月	日	角度	月	日	角度	月	日	角度
12月	5日	-45	12月	11日	-50	12月	17日	-50
	6日	-40		12日	-45		18日	-45
	7日	-35		13日	-40		19日	-40
	8日	-30		14日	-35		20日	-35
	9日	-25		15日	-30		21日	-30
	10日	-20		16日	-25		22日	-25
	11日	-15		17日	-20		23日	-20
		-10			-15			-15
	-5		-10		-10			
	0		-5		-5			
	5		0		0			
	10		5		5			

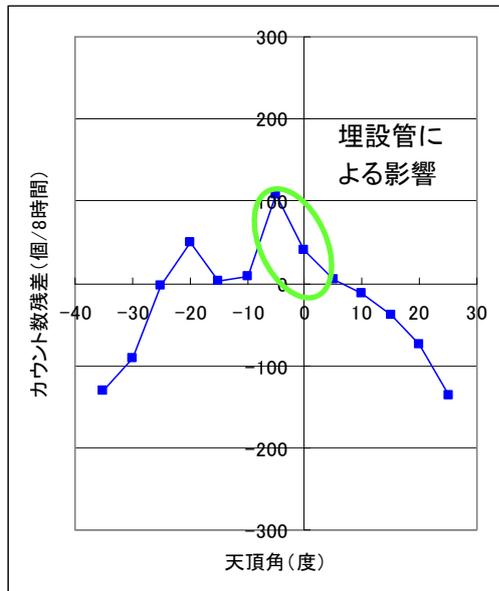
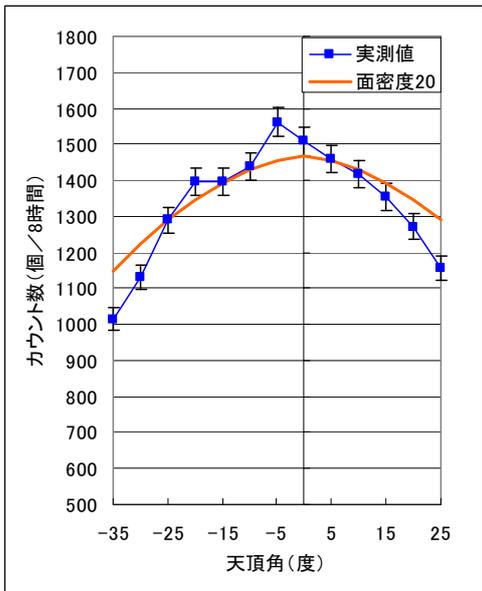
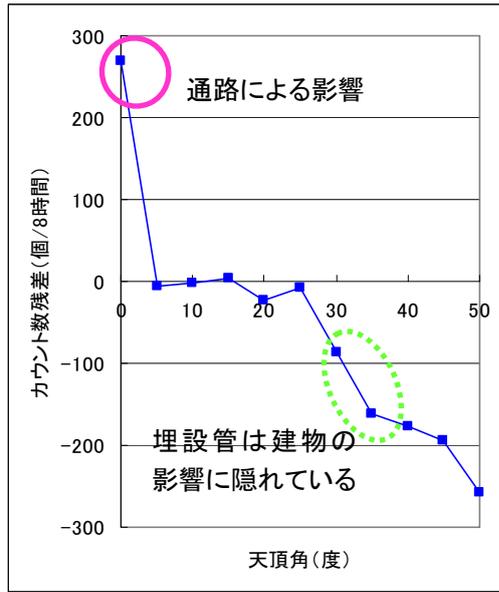
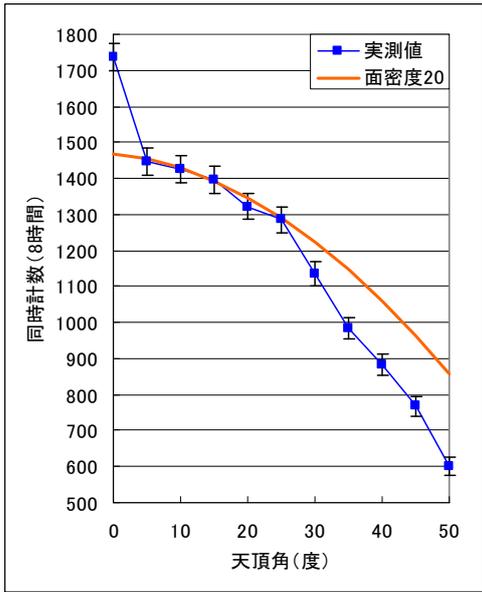


図 5.1-3 A 地点 (上段) と H 地点 (下段) での計測結果

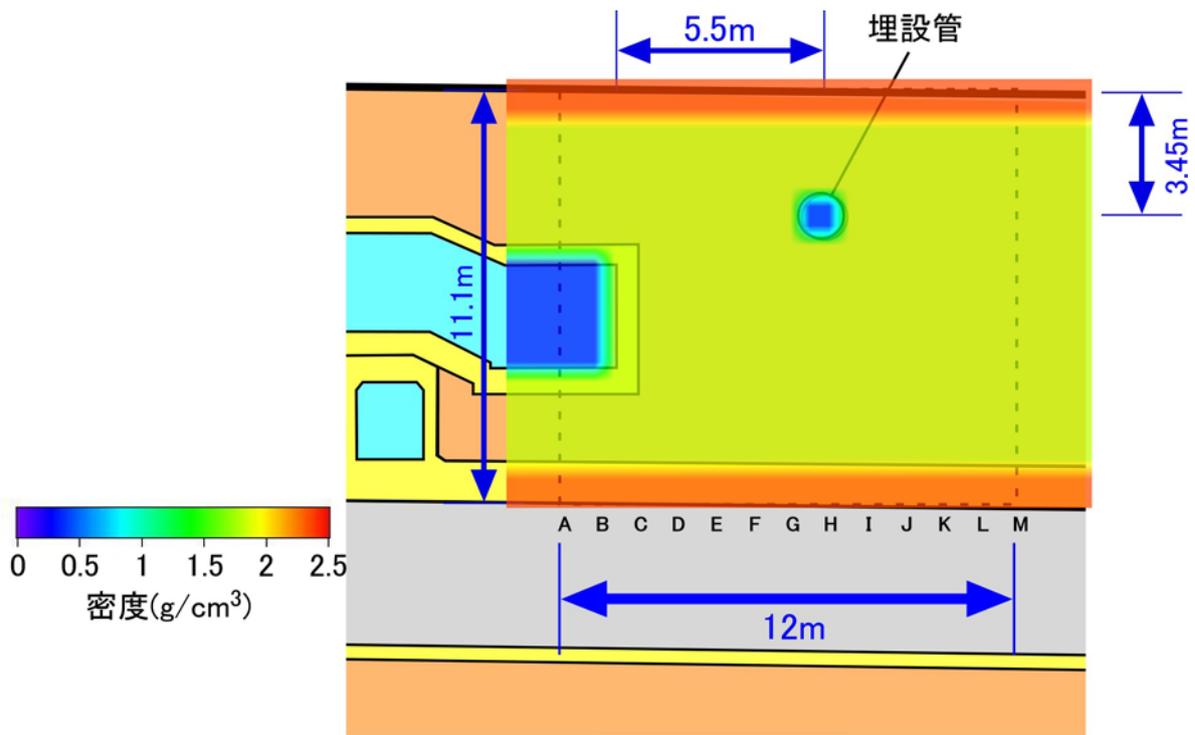


図 5.1-4 初期モデル

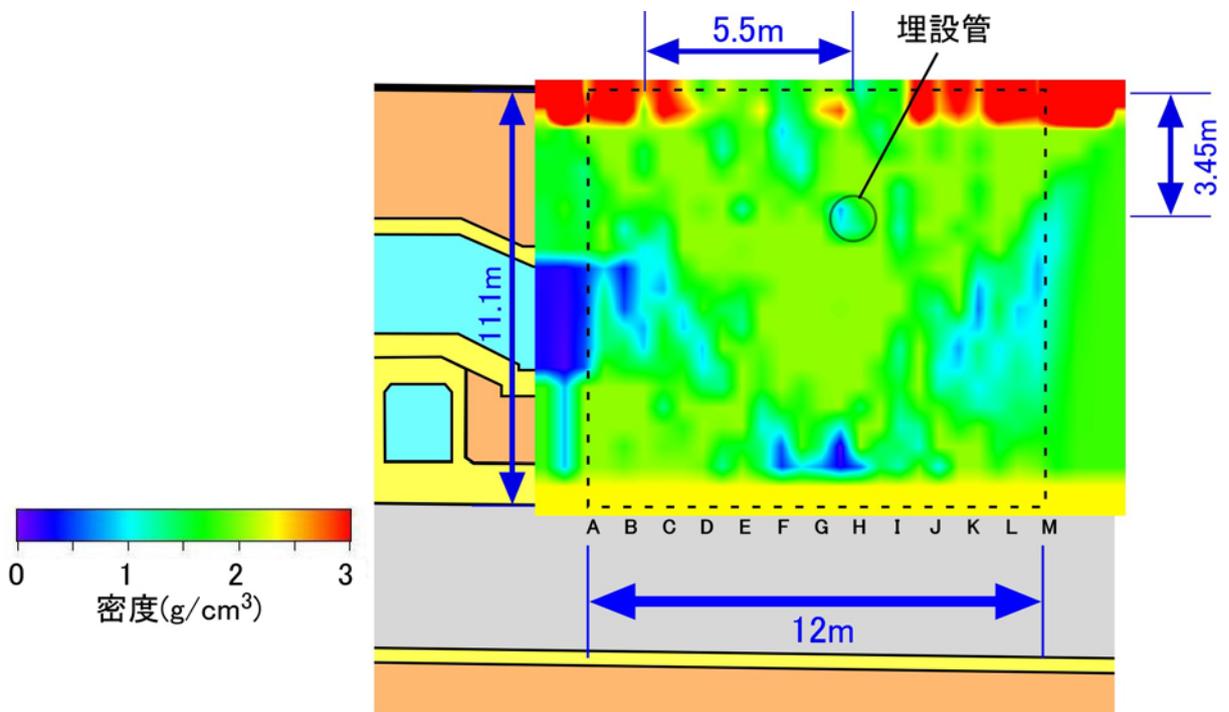
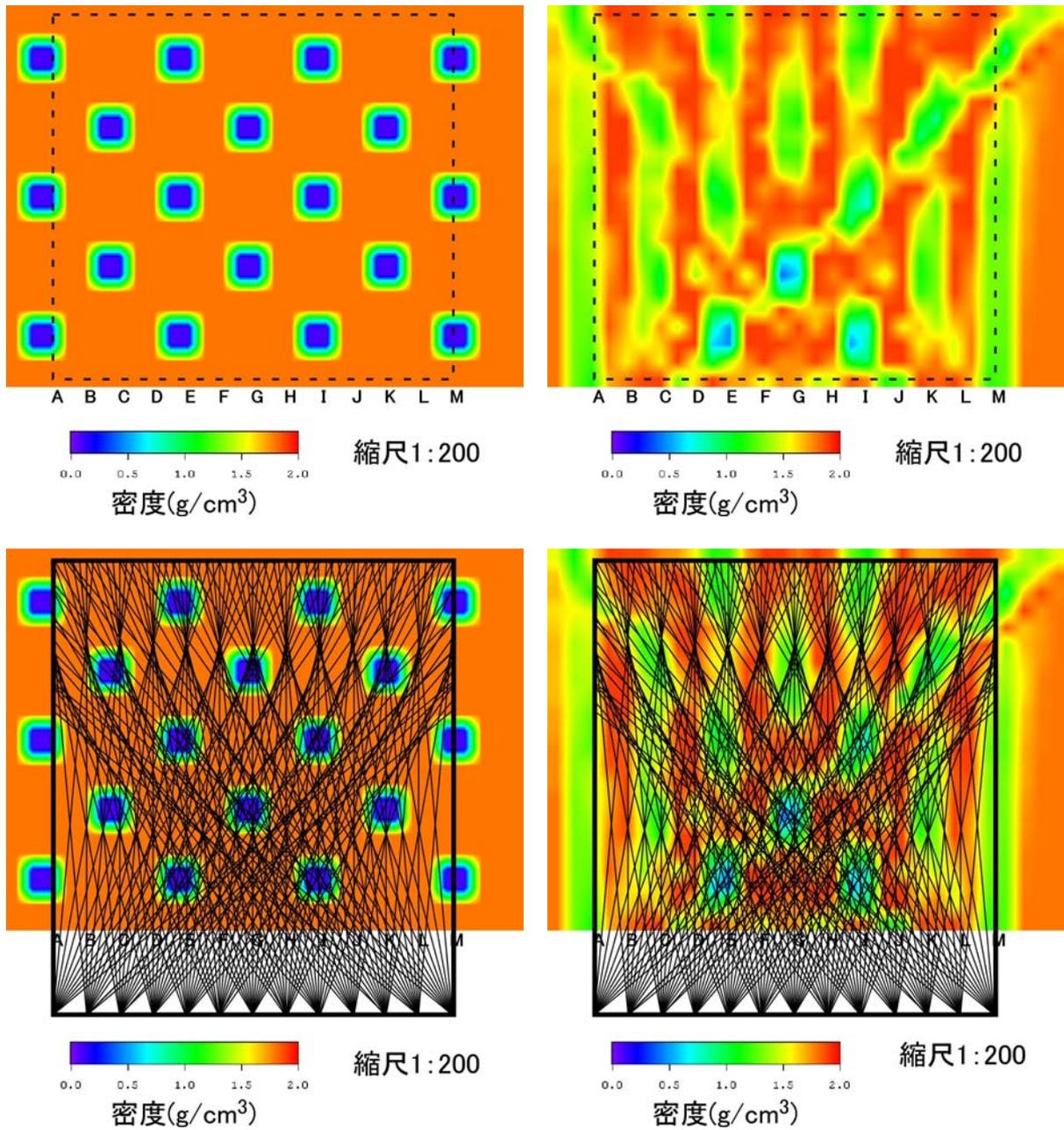


図 5.1-5 トモグラフィ解析結果

断面の左右両端に近い部分に斜めあるいは鉛直方向の縞模様が見られる。この原因を調べるためにパッチテストを実施した。図 5.1-6 上段左が計算に使用したモデルである。低密度領域を同一深度で等間隔に、深度ごとでは互い違いになるように配置した。図 5.1-6 上段右がその結果である。断面の中央の下部分は空洞に相当する低密度が再構成されているが、浅くなるに従って解

像度は低下し、断面の両側の端では鉛直方向、あるいは斜めの縞模様の偽像が現れている。図 5.1-6 下段には透過経路を重ねて示した。これを参照すると透過経路が偏り、透過経路の密度が低くなっているところは解像度が低下していることがわかる。



左上：パッチテストモデル、右上：パッチテスト結果
 左下：パッチテストモデルと透過経路図との重ね合わせ
 右下：パッチテスト結果と透過経路図との重ね合わせ

図 5.1-6 パッチテスト結果

トモグラフィ解析結果については初期モデルを適切に選ばば、ある程度の断面の再構成ができた。特に地表直下に周囲の建物と等価な高密度領域を予め設定しておくことは有効と考えられる。

鉛直や斜めの偽像あるいは断面の周囲の解像度の低下を改善するには、データを高密度で取得する必要がある。データを高密度で取得するには測定間隔をより細かくするなどの必要がある。

さらに、測定位置精度や、天頂角の設定誤差なども計測精度を左右すると考えられる。これらの位置精度については、より高精度の位置測定装置を付加するなどの対策が必要である。

地盤の密度の不均質についても検討する必要がある。実験場付近（約 1.5km 四方）の公表されている土質試験結果から得られた地盤の密度を図 5.1-7 に示す（東京都土木技術研究所、1977）。試料数は 122、深さは 2.3~28m まで（平均値 11.7m）である。これによると地盤密度は 1.24~2.44g/cm³（平均値 1.612g/cm³、標準偏差 0.202、変動係数 12.5%）である。このような密度不均質も解析結果にあらわれているものと考えられる。火山体ラジオグラフィでは、岩盤の不均質性を押さえ込むようなデータ処理を行っている。

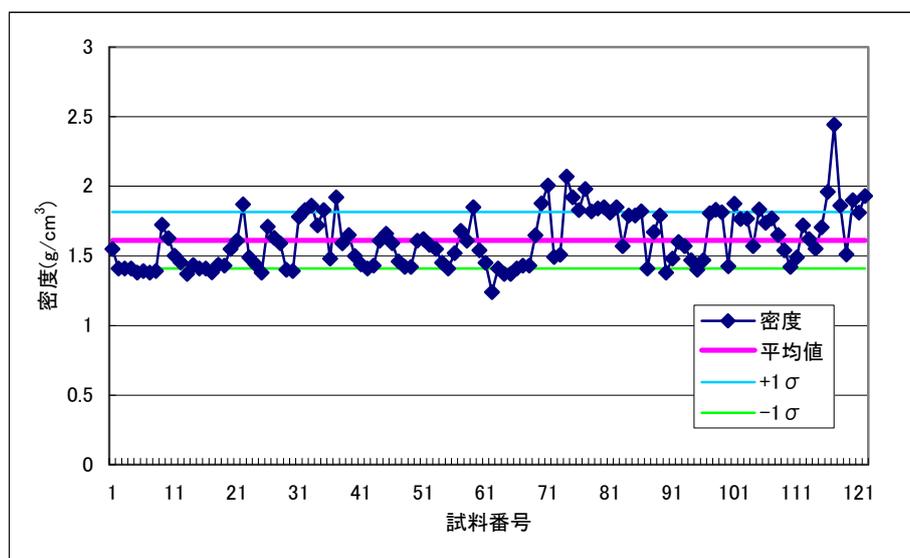


図 5.1-7 実験場付近の密度分布

以上の課題をまとめると、

- ① 高密度トモグラフィデータの取得
- ② 初期モデルの与え方
- ③ 三次元の影響
- ④ 地盤の不均質性

である。これらの課題を解決するためには、

- ① マルチチャンネル化による同時多点計測
- ② データの蓄積
- ③ 三次元解析アルゴリズムの開発
- ④ 地盤密度の不均質性に対する解析アルゴリズム

などについても検討する必要がある。

測定位置と天頂角の精度についても、精度良く決定できるようなジャイロセンサや傾斜計などを搭載し、位置精度の再現性を確保する必要がある。

5.2 今年度試作機による地下施設での実験

(1) 目的

試作機 B・C により埋設管による影響を確認する（試作機 A と同等の性能を確認）。

(2) 実験位置

実験位置は試作機 A と同じ測線上で、C 地点と F 地点とした。

(3) 実験方法

試作機 A と同じように天頂角 5 度刻みでデータを取得した。実験の状況を写真 5.2-1 に示す。



写真 5.2-1 試作機 B・C による計測状況

(4) 実験結果

C 地点での実験結果を図 5.2-1 に示す。上段は試作機 B、下段は試作機 C のものである。各段の左側は、計測値と平均面密度を与えたときの理論値、右側は計測値と理論値の差である。試作機 B・C とも天頂角 10 度の方向に埋設管があり、カウント数の大きい値が検出されているのが確認できる。

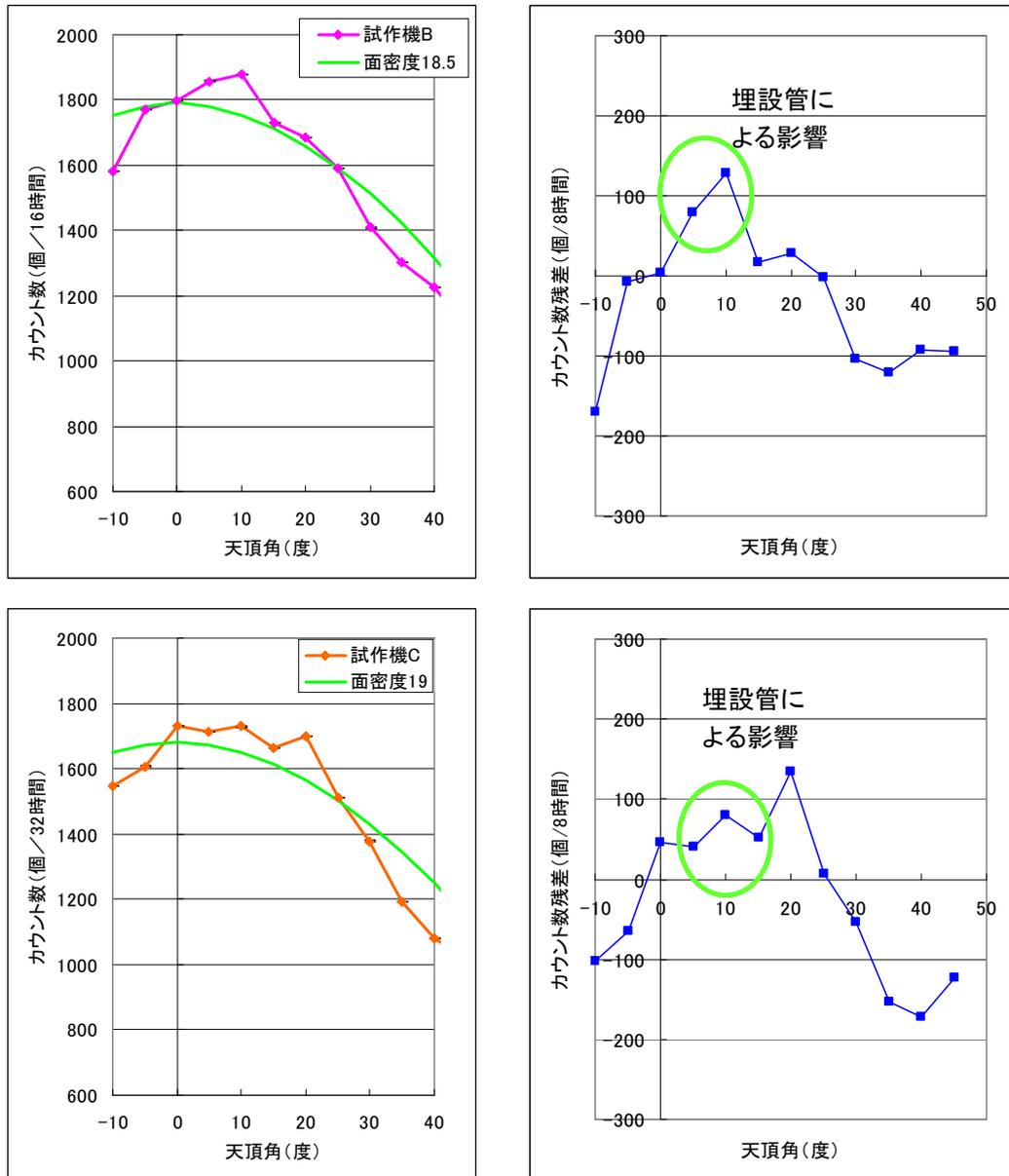


図 5.2-1 試作機 B・C による C 地点での実験結果

5.3 大谷石採取場跡地での実験

(1) 目的

平成 21 年度の地下実験は土被り 6.3m、今年度地下実験は土被り 11.1m である。これら 2 箇所より深い 15m 以上の土被りでの計測と土被りの異なる場所でのカウント数の違いを確認する。

(2) 実験場の概要

都市部での土被りの大きい場所を検討したが、地下鉄のプラットフォームなど第三者の通行する場所などしかなかったため、宇都宮市大谷地区の大谷石採取場跡地とした。大谷石採取場跡地は過去に大谷石の採掘された跡地として、多くの地下空間が存在している。実験場所の条件としては、

- ①土被りが 15m 以上あること
- ②人の出入り、機材の搬入や設置が困難でないこと
- ③電源が確保できること

などである。図 5.3-1 に実験場の平面図を示す。赤色の実線が採掘跡である。安全性の確保ができ、かつ土被りができるだけ大きい場所を選定した。図 5.3-2 には A-E 断面と E-G 断面の実測値（実線）を示す。破線の部分は推定である。

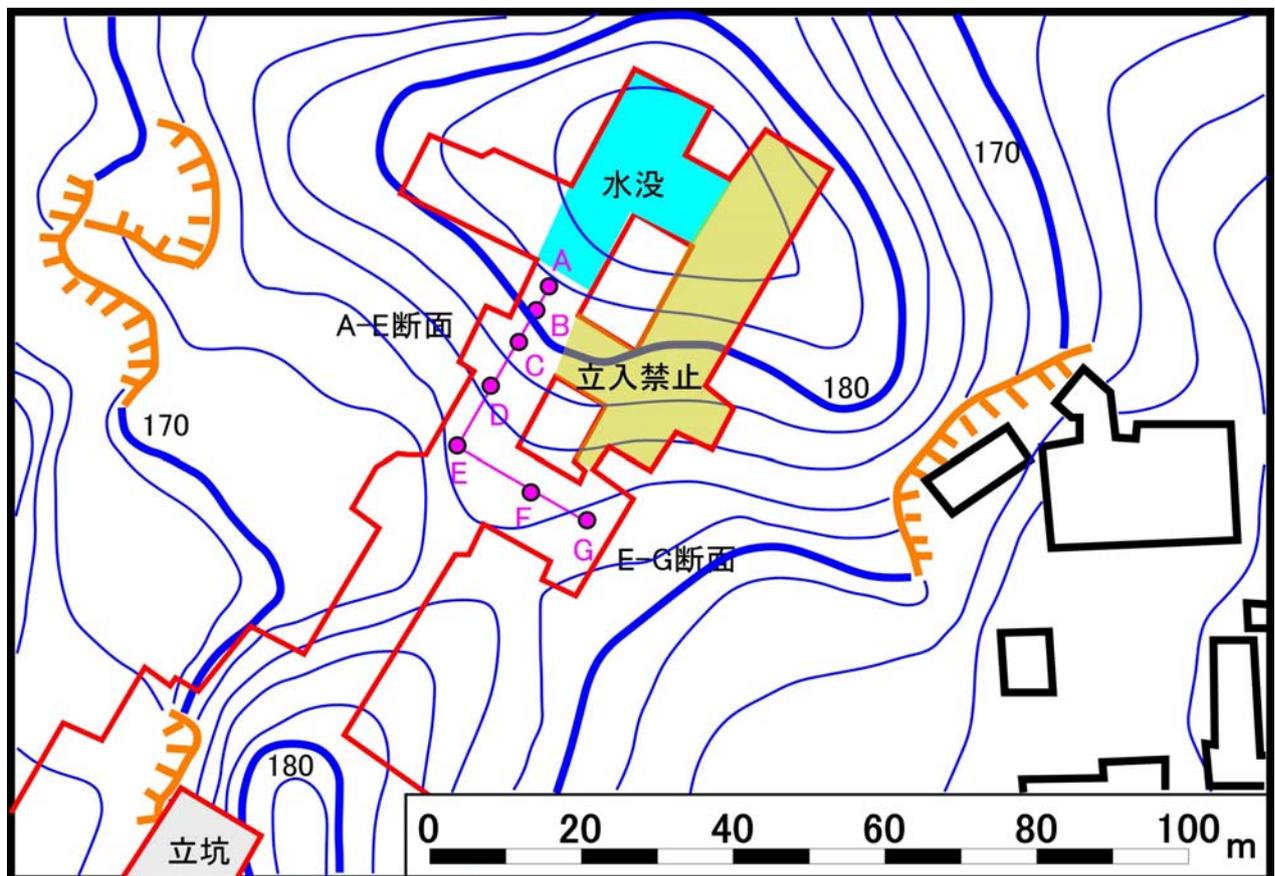


図 5.3-1 大谷石採取場跡地実験場の平面図

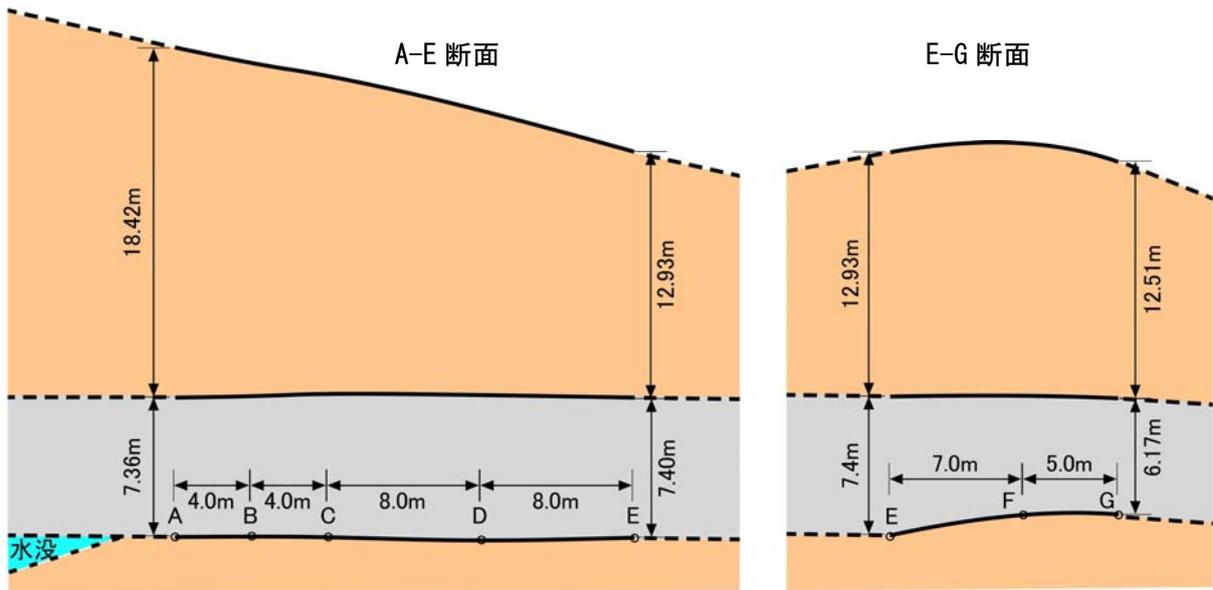


図 5.3-2 大谷石採取場跡地実験場の断面図

(3) 実験方法

大谷石の密度を 2.0g/cm^3 と仮定し、土被りを 10m、20m、40m とした（実際には面密度をそれぞれ 20、40、 80hg/cm^2 として計算している）。図 5.3-3 に土被りに応じた天頂角とカウント数の関係を、図 5.3-4 にその時の変動係数をそれぞれ示す。変動係数がほぼ同じになるように測定時間を 8 時間（土被り 10m）、24 時間（土被り 20m）、48 時間（土被り 40m）とした。変動係数を 3%程度に抑えるためには、土被り 20m 規模では一角度あたりの測定時間を 24 時間に必要がある。

実験の状況を写真 5.3-1 に示す。天頂角は全て 0 度とし、A～G までの 7 箇所計測を実施した。図 5.3-1 に示したように、尾根と平行な縦断測線（A-E 断面）とそれと直交する横断測線（E-G 断面）を設定した。

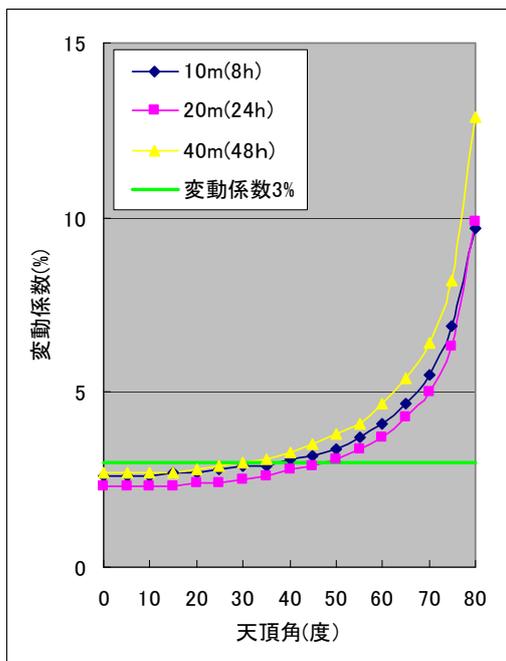


図 5.3-3 土被りと変動係数

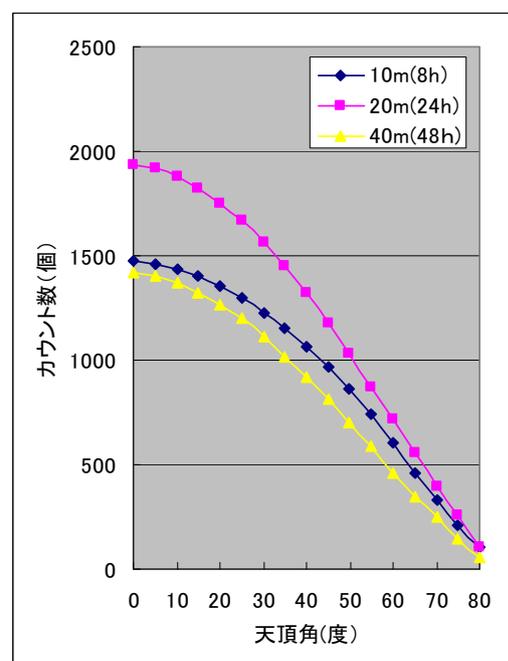


図 5.3-4 土被りとカウント数の関係



写真 5.3-1 大谷石採取場跡地実験場

(4) 実験結果

図 5.3-5 にカウント数を示す。土被りに応じてカウント数が増加していることが確認できる。A から E までは地形に応じてカウント数が増加している。F 地点では E・G 地点に比べて土被りが厚く、カウント数も少なくなっている。図 5.3-6 にミュオン粒子の計数率から計算した面密度を、土被りの実測値で割って求めた各地点の密度を示す。密度の平均値は 1.54g/cm^3 であり、大谷石の平均密度 1.80g/cm^3 (ほとんどの大谷石が $1.79\sim 1.81\text{g/cm}^3$ の範囲) より小さめになっている。実際には表土があるため、密度は 1.7g/cm^3 程度と推定されるが、それより 0.16g/cm^3 小さい。土被りの違いに応じたカウント数が得られているが、絶対値の評価については課題が残る。

平均密度 1.54g/cm^3 を与えたときとのミュオン粒子から計算した値と土被りの実測値との比較を図 5.3-7 に示す。土被りの実測値と計算値との相対誤差を図 5.3-8 に示す。実測値との相対誤差は 4%以内である。

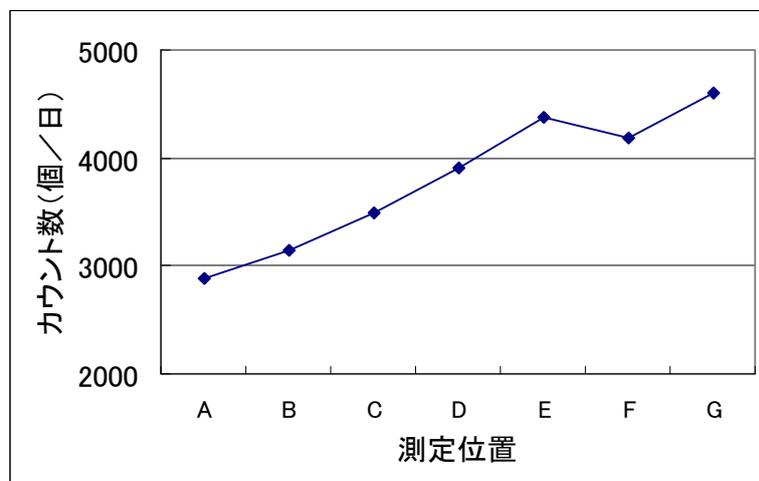


図 5.3-5 計測結果

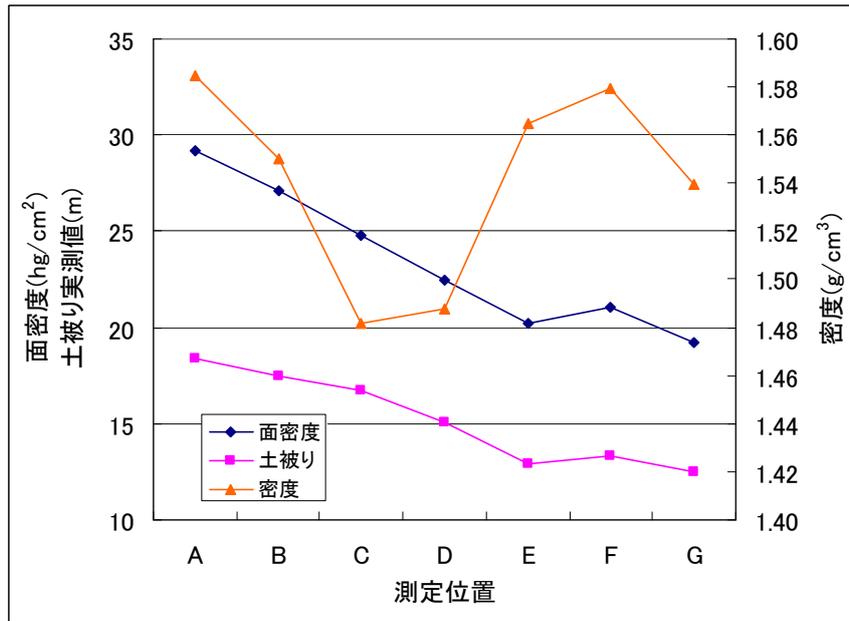


図 5.3-6 土被りの実測値と面密度計算値及び密度計算値

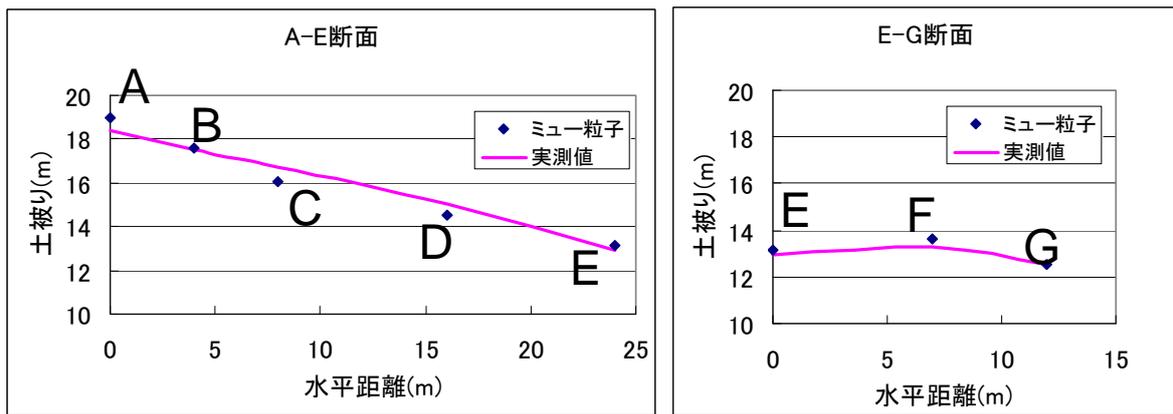


図 5.3-7 土被り実測値と解析値との比較

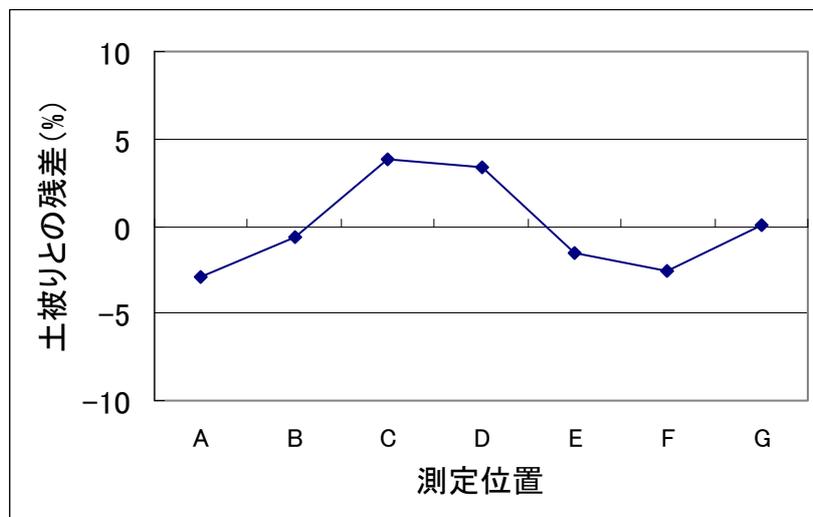


図 5.3-8 実測値と計算値との相対誤差

第6章 実用化検討

6.1 社会的ニーズの検討

有名な陥没事故として、岐阜県御嵩町の亜炭の採掘坑道跡での例を図 6.1-1 に示す。また、表 6.1-1 に地下構造物の周囲にできる空洞の大きさや発生原因などをまとめた。表 6.1-2 には採掘後などの人工的な空洞と鍾乳洞などの自然の空洞の大きさや陥没の危険性についてまとめて示した。

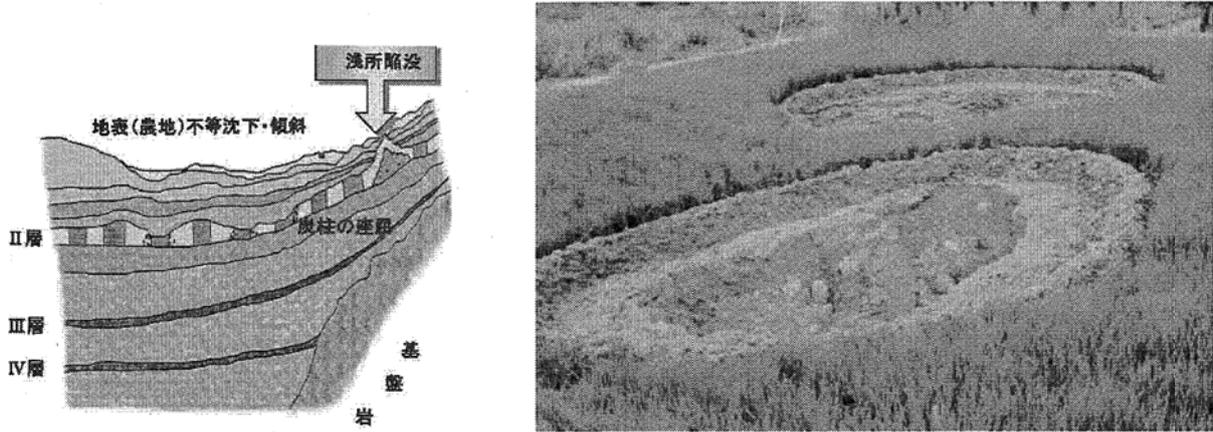


図 6.1-1 亜炭採掘跡の陥没原因と実際に地表にあらわれた陥没

表 6.1-1 地下構造物周辺に発生する空洞

構造物の種別	施工方法			元の空洞断面の大きさ	陥没する空洞の大きさ (構造物は周辺に発生する空洞の大きさ)	主な空洞発生原因	備考
	開削	シールド	山岳				
道路トンネル	○	○	○	50~150m ²	中規模	(開削工法、シールド工法、山岳工法の施工法による)	
鉄道トンネル	○	○	○	40~70m ²	中規模		
地下鉄	○	○		40~70m ²	中規模		
地下街	○			100m ² ≤	中規模		
共同溝	○	○		10~20m ²	小規模~中規模		
電力洞道	○	○		10~20m ²	小規模~中規模		
下水道	○	○		0.05~20m ²	小規模~中規模	・下水道管の継ぎ手部の止水性が低下し、あるいは管の破損により周辺土砂が下水道管の中に取り込まれて空洞が発生	
上水道	○			0.05~2m ²	小規模~中規模	・水道の水漏れにより周辺土砂が流されて空洞が発生	
ガス管	○			0.01~0.2m ²	小規模		
構造物	開削工法			10~100m ² ≤	小規模~中規模	・都市部では埋設物が多く、埋め戻し時の転圧不足、充填不足により陥没が発生 ・土留め壁と構造物の隙間の埋め戻し時の転圧不足、充填不足により陥没が発生 ・トンネル構造物周辺の地下水が流動し周辺土砂が流されて空洞が発生	→施工完成直後から2~3年は頻繁に陥没の可能性あり →施工完了後数年後に陥没
	シールド工法			3~180m ²	中規模	・掘削時に土砂を取り込みすぎて空洞が発生 ・掘削後の空隙へのグラウト注入不足により空洞が発生 ・トンネル構造物周辺の地下水が流動し周辺土砂が流されて空洞が発生	→土被りが浅い場合は施工完成直後から2~3年で陥没の可能性あり →施工完了後数年後に陥没
	山岳工法			4~150m ²	中規模	・掘削後の覆工コンクリート施工時に地山側に空洞が残る。 ・覆工コンクリートの地山側の地下水が流動し周辺土砂が流されて空洞が発生 ・トンネル周辺の地山が緩むことで空洞の発生を誘発	→土被りが浅い場合は施工完成直後から2~3年で陥没の可能性あり →施工完了後数年後に陥没

表 6.1-2 人工的及び自然の地下空洞

地下空洞の種類別	元の空洞断面の大きさ	主な空洞発生原因	備考
人口空洞	地下採石場跡 数十m ² ～数千m ²	<ul style="list-style-type: none"> 建材の材料として凝灰岩などを地下から採掘した跡の空洞 宇都宮市大谷地区の採石場跡や福井市足羽山の採石場跡のように特定の地域に存在 空洞の高さは数m～数十mに及ぶ。 	<ul style="list-style-type: none"> 大谷では1990年と1991年に直径百数十m、また足羽山では2005年に直径約30mの大規模な陥没事故が発生
	石炭鉱山廃坑 数m ² ～数百m ²	<ul style="list-style-type: none"> 地下の石炭を採掘した跡の空洞 一般に切削機械を移動させながら全面的に掘削する長壁式採掘法で採炭された。その際、支保工を移動させるため後山が落盤し、この落盤範囲に残った空隙やゆるみが原因で長期間経過後にも地表面に沈下や陥没が発生することがある。 	<ul style="list-style-type: none"> 長崎県では一昨年、昨年と高速道路建設に先立ち充填工事が行われた。
	亜炭鉱山廃坑 数m ² ～数十m ²	<ul style="list-style-type: none"> 地下の亜炭（炭化程度の低い石炭の一種）を採掘した跡の空洞 岐阜県、愛知県、三重県、宮城県、岩手県などに多く存在 主に残柱式または柱房式採掘法により手作業で掘削 長期間経過後に残柱や天盤が劣化して落盤し、地表面に沈下や陥没が発生することが多い。 	<ul style="list-style-type: none"> 東海地方では採掘を終えて40数年を経た今日でも各地で年間10件程度の陥没事故が発生 東海地方では、区画整理事業等で各地で充填工事が行われている。
	金属鉱山廃坑 数m ² ～数十m ²	<ul style="list-style-type: none"> 地下の金属資源を採掘した跡の空洞 その多くに、坑内からの排水による重金属や酸性坑水等による鉱害が発生 	<ul style="list-style-type: none"> 陥没はまれ
	磨き砂採掘跡 数m ² ～十数m ²	<ul style="list-style-type: none"> 明治～昭和にかけて、鍋や釜などを洗うための砂（凝灰岩）を採掘した跡の空洞 主に残柱式や坑道状に掘削 内面の劣化等で落盤し、地表面に沈下や陥没が発生することがある。 	<ul style="list-style-type: none"> 2006年、津市で道路が陥没する事故が発生
	地下壕 数m ² ～十数m ²	<ul style="list-style-type: none"> 戦時中の空襲等から避難するために掘られた空洞 軍事工場や司令本部が避難した空洞は規模が大きく、特殊地下壕と呼ばれる。 主に坑道状に掘削 全国各地に放置された地下壕が約1万箇所存在するが、特に鹿児島県にその3分の1が集中 地質で多いのは、軟岩、シラス、関東ローム 坑道面の劣化や地下水の影響で落盤し、沈下や陥没が発生することがある。 	<ul style="list-style-type: none"> 2000年、鹿児島県の道路で長さ数十mの陥没事故が発生し、車が転落して主婦が死亡 国交省等の調査によると、全国に危険な地下壕が約1200箇所存在
自然洞窟	鍾乳洞 数m ² ～十数m ²	<ul style="list-style-type: none"> 石灰岩の主成分である炭酸カルシウムが二酸化炭素の溶解した地表水や地下水に溶けて浸食され、その内部に生じた空洞 各地の石灰岩地帯に存在 	<ul style="list-style-type: none"> 陥没はまれ
	火山洞 数m ² ～十数m ²	<ul style="list-style-type: none"> 表面が冷却・固結している溶岩流の中央部に形成されるトンネル状の空洞 風穴など火山地帯にできる自然空洞 	<ul style="list-style-type: none"> 陥没はまれ
	風化洞 数m ²	<ul style="list-style-type: none"> 岩石が受ける温度差・浸透水による内部浸食などによって形成された洞窟 日本では緑色凝灰岩地帯で確認されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 陥没はまれ

*)人口空洞の崩壊に対する危険度は、空洞の大きさ、土かぶり、湛水の有無、天盤・残柱・壁等を構成する岩盤の経年変化による劣化の進行程度、断層の有無、地震動などに関係するが、この他にも掘削時の支保の有無やまた部材としての健全性によって変化する。

6.2 実用機の設計条件の検討

(1) 地下空間の環境

図 6.2-1 にトンネルの施工方法と土被りとの実測値を示す。これらをまとめて示したのが図 6.2-2 である。開削工法は、土被りは浅いが断面積は大きい。山岳工法では断面積が小さいが、土被りは大きく、シールド工法はその中間的な範囲である。

ミュール粒子の計測の場合、検出器を大きくすればするほど計測時間を短縮することができる。しかし、実際の地下構造物は浅いほど大きく、深いほど小さい。また、空洞ができた場合には浅いところほど陥没が発生しやすいため、短時間の計測が要求される。そのため、深いところについては空洞が発生した場合でも、陥没を引き起こすような空洞に成長するには長い年月がかかる。そのため長時間の計測となっても対応が可能と考えられる。

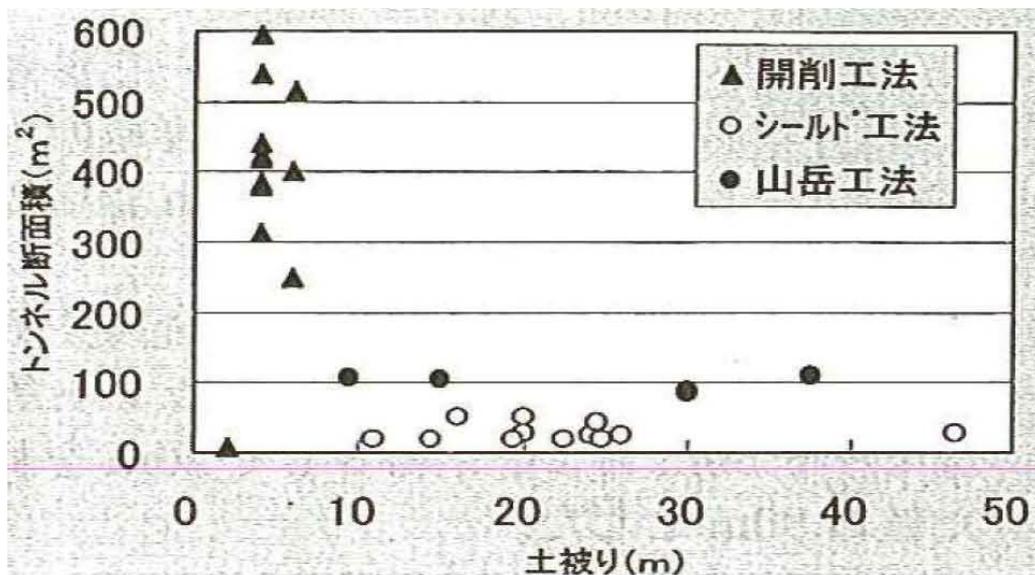


図 6.2-1 トンネルの施工方法と土被りの実測値

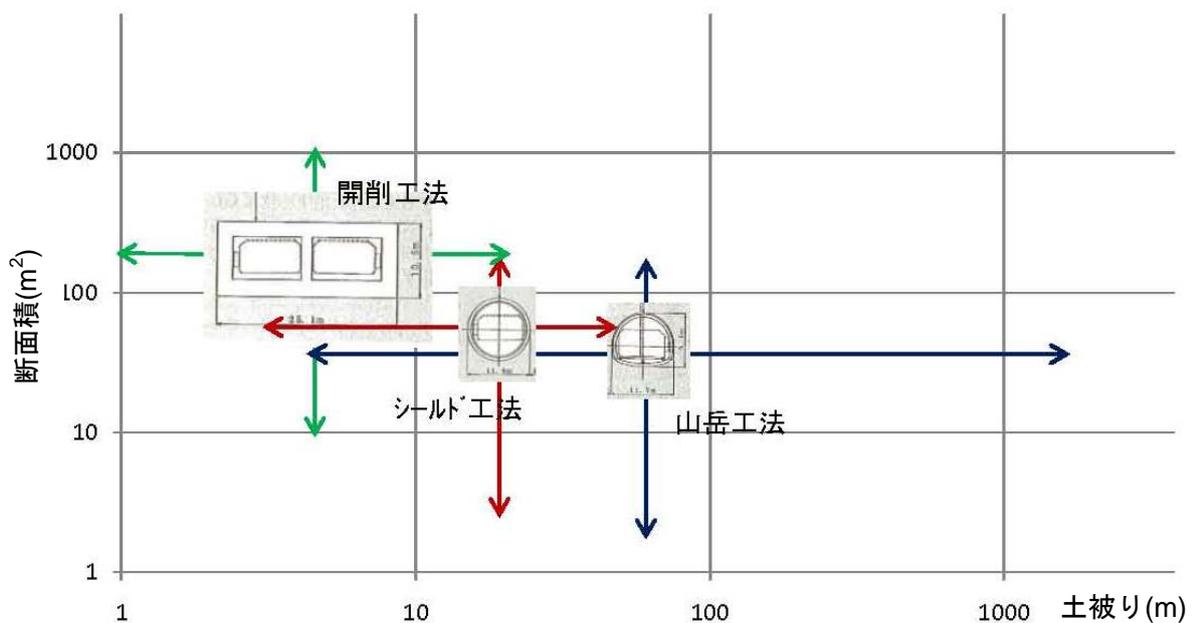


図 6.2-2 トンネルの施工方法と土被りの関係

上下水道やガス管などの場合、極浅部の地下構造物も存在する。図 6.2-3 はその一例である。このような構造物は断面積も小さいため、現状の試作機では内部に設置することができない。より小型化を検討する必要がある。しかし、小型化した場合、計測時間が大幅に必要となるため、より探査時間で計測できるマルチチャンネル化などを検討する必要がある。

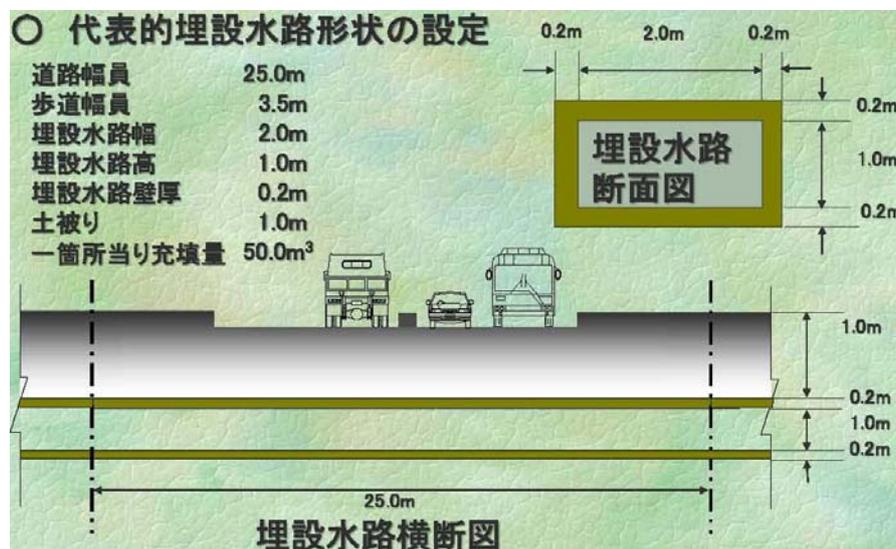


図 6.2-3 浅所の地下構造物の例

トンネル内に機器類を設置する際に、環境によっては機器類に影響を及ぼすことが予測される。以下に施工中と共用時とに分けて、トンネルや地中のライフラインなどの作業の環境について示す。

(2) トンネル施工中

① 粉じん

トンネル施工作业中の粉じんは主に以下の作業により発生する。

- ・ 発破作業
- ・ 穿孔作業
- ・ 重機械類の排気ガス
- ・ コンクリート吹き付け作業

図 6.2-4 は道路トンネルの吹き付けコンクリート施工中の発生源付近での粉じん濃度測定事例であり、10~16mg/m³となっている。トンネル施工中に空洞調査を実施する場合には機器類への粉じんの影響は上記数値程度までであると考えた方が良い。

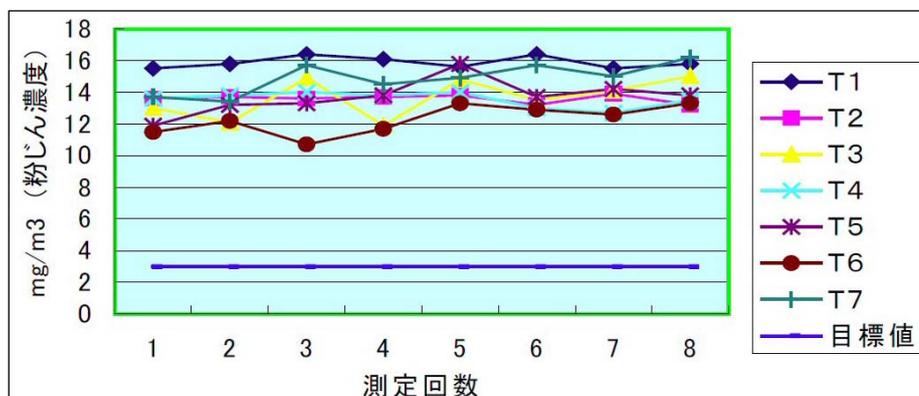


図 6.2-4 トンネル内部の粉じんの実態

出典：平成 15 年度 吹き付けコンクリート施工時に発生する粉じんの低減化に関する研究報告書；
(社) 岐阜県特殊工事技術協会 トンネル技術委員会・岐阜社会基盤研究所

②温度

トンネル施工中の坑内温度は概ね外気温と同じと考えてよいが、まれに温泉地帯などのトンネルや夏季には作業温度が高くなるため、労働安全衛生法では 37℃以下とするように定められている。

③湿度

トンネル施工中の覆工コンクリートの養生時にはコンクリートを湿潤状態に保つため、噴霧して湿度を保つことなどが行われる。

(2)供用中

①硫化水素・硫酸

下水道施設では下水中や汚泥中の硫化イオンに起因する硫化水素の発生や硫酸の生成が行われる(図 6.2-5)。硫化水素 (H₂S) 濃度は最大 1000ppm 以上(汚泥消化層脱離液ピット)となる場合も報告されている。下水中の硫酸イオン濃度は 300mg/l を超えるかなり高い値を示すことがあると報告されている。

②塩素・塩酸

上水道では上水の消毒のために塩素を注入している。この塩素が気中に放散され、水滴と結合することで塩酸となり、水道施設の腐食の原因となっている。

③水圧

上水道の配水管には管内水の静水圧 0.735Mpa (7.5kg/cm²) と水撃圧が作用する。水撃圧は瞬間的な流水の遮断やポンプの稼働時に発生するため、送水中の配水管内に空洞調査機器類を設置する場合には静水圧と瞬間的に発生する水撃圧(正負)に対しての耐圧性能が要求される。

硫黄酸化細菌(Thiobacillus 属等)が生成する硫酸による下水道施設に特有なコンクリート腐食は、

- ①嫌気性状態の下水中及び汚泥中での硫酸塩還元細菌による硫酸塩(SO₄²⁻)からの硫化物(H₂S、HS⁻、S²⁻)の生成(生物学的作用)
- ②液相から気相への H₂S(硫化水素)ガスの放散(物理学的作用)
- ③密閉されたコンクリート構造物気相部内面の結露水中での好気性の硫黄酸化細菌等による硫化水素からの硫酸の生成(生物学的作用・化学的作用)
- ④硫酸とコンクリートの成分との反応によるコンクリートの劣化(化学的作用・物理的作用)

の順に進行する生物反応、化学反応、物理作用が複合した現象である(図 2-1 参照)。このため、水温、下水中の硫酸イオン濃度や施設の構造等の地域性に大きく影響を受け、気相部の H₂S ガス濃度、湿度、気温等の腐食環境により、コンクリートの腐食速度が大幅に異なる。

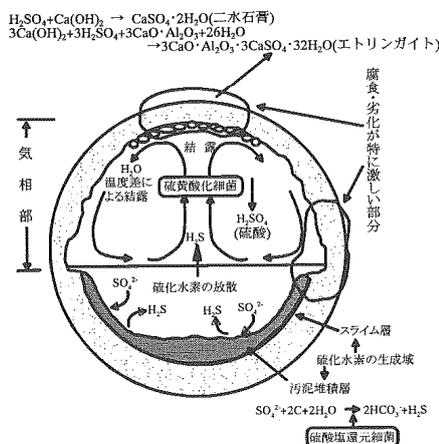


図 6.2-5 下水道施設に特有な硫酸によるコンクリート腐食
 出典；下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル；日本下水道事業団

これまでに試作した試作機は、いずれも以下の条件で使用できる。

- ① 温度；0～40℃
- ② 湿度；90%RH 以下

この中で温度については、現在の装置でもクリアしているが、その他の環境条件については使用する環境に応じて機器に対策を施す、あるいは専用の器具や機器が必要となる（表 6.2-1）。

表 6.2-1 地下空間における空洞探査の環境条件

使用環境	環境条件	測定機器に対する対策
トンネル施工中	防塵	保護カバー
	湿度	防滴・防水コネクタの使用 保護カバー
下水道	硫化水素	防錆対策（メッキ、塗料）
上水道	塩素	防錆対策（メッキ、塗料）
	水圧	防水コネクタ、防水加工

(2)電源の安定確保

これまで製作してきた試作機の電源は、全て AC100V の商用電源による駆動である。地下の空間を利用した計測の場合、必ずしも商用電源が確保できるとは限らない。そのため、バッテリーなどによる電源供給方法を検討する必要がある。

電池は一次電池と二次電池に区分でき、一次電池は乾電池などのように充電できない電池である。一方、二次電池（充電できる電池）には自動車のバッテリーとして使用されている鉛蓄電池やドライバッテリーがある。これらのエネルギー密度は 50Wh/kg 程度である。現在の試作機の消費電力は約 200W であるから、1 日当たりの消費電力量は 4.8kWh である。従って、バッテリー重量は 96kg（普通自動車用バッテリー10 個分）となる。現在最も効率の良いバッテリーは電気自動車用のリチウムイオン電池であり、そのエネルギー密度は 70Wh/kg である。これを用いた場合、バッテリー重量は 68kg となり 70%の節約になる。

これら二次電池を使用した場合、充電などの手間がかかる。充電の手間を省いた電池に燃料電池がある。燃料電池のエネルギー密度は鉛蓄電池と同程度である。

また、充電の手間を省くため、太陽光発電と組み合わせて二次電池を使用することも考えられる。ただし、太陽光発電の場合、ソーラーパネルを設置するために広い場所が必要となる。

商用電源以外で、現段階で考えられる安定した電源としては、リチウムイオン電池または燃料電池であるが、両者とも高価であるというデメリットがある。さらに長時間計測のためには、ミュー粒子計測器本体の省電力化も検討する必要がある。

4 F/S の今後の課題及び展開

(1) 今後の課題

本 F/S に残された課題は、

- ①計測時間の短縮化（マルチチャンネル化）
- ②試作機 B・C でのトモグラフィデータの取得と解析
- ③計測データの三次元的な取り扱いの検討
- ④トモグラフィ解析の三次元化
- ⑤地下環境に耐えられる対策をした実用機的设计条件の確立

計測技術については計測時間の短縮化が必要となる。そのため図 4-1 に示すような、マルチ計測器を開発する必要がある。同図に示した計測器の場合、5 つの方向を同時に測ることができるため、計測時間を 5 分の一にすることが可能である。なお、図 4-1 は試作機 B と同じ検出器の大きさをを用いた場合の、おおよその大きさを示している。

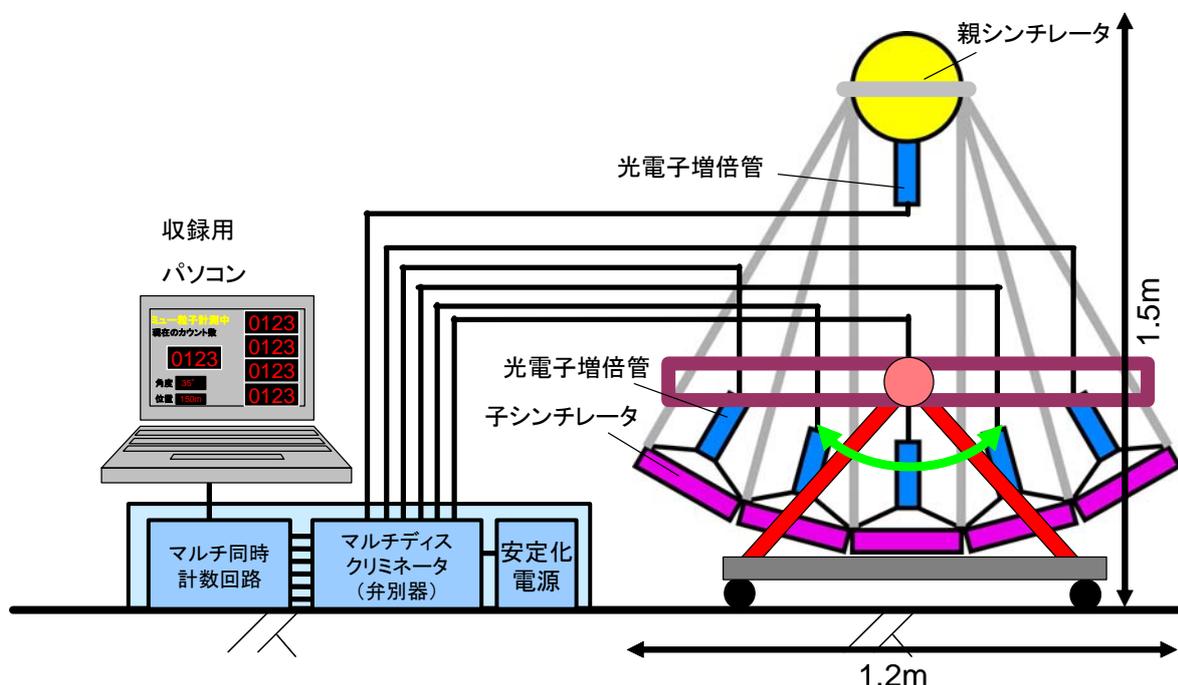


図 4-1 マルチ計測器の概念図

試作機 B・C についてはトモグラフィ解析を行うためのデータ取得を引き続き行い、トモグラフィ解析を実施する必要がある。

ミュオン粒子は計測器によってできる円錐状の立体角内に入射したミュオン粒子を計測する。取得したデータは初めから三次元的な影響を受けている。そのため、三次元に拡張した場合のデータの取り扱いを検討するとともに、全方位の計測値も同時に測っているため、このデータの活用方法も検討する必要がある。

本 F/S ではミュオン粒子計測の特徴に着目し、新たな解析アルゴリズムと既存の二次元トモグラフィ解析技術を合わせて適用することで、地盤の可視化を実現した。しかし、実際の地盤や周囲の建造物や地下構造物は三次元的であるため、二次元トモグラフィ解析では限界があることも示された。今後三次元のトモグラフィ解析を行うことにより、さらに高精度の解析技術にする必要がある。

実際に使用する地下構造物や空洞などの地下の環境は、温度・湿度が地上とは異なる、あるいは埃や塵などの飛散する環境、さらに水中なども考えられる。今後はそのような環境に耐えうる計測器の開発も必要となる。

(2)成果の展開

本 F/S で研究した成果は、地盤の空洞探査だけでなく、大型の土木構造物の非破壊検査にも適用可能である。

例えば、ロックフィルダムにおいて図 4-2 に示すようにダム下部の監査廊にミュール粒子の測定器を設置することにより、築造後の密度管理ができる。

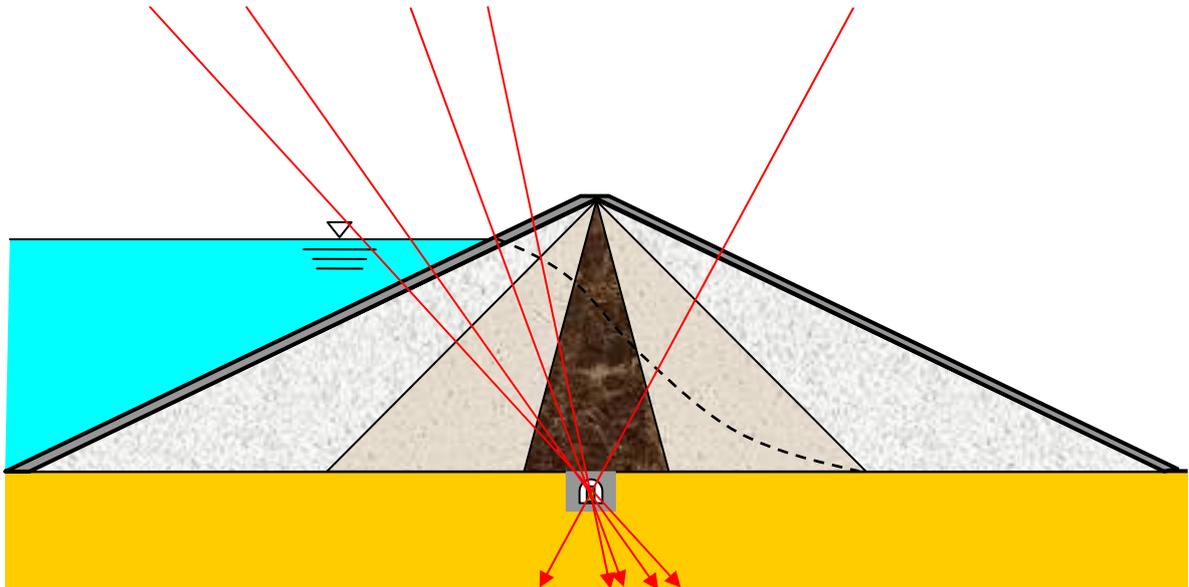


図 4-2 ロックフィルダムの密度管理

トンネルの掘削時には、断層破碎帯などの岩盤の脆弱部が問題となる。図 4-3 に示すように、ミュール粒子のマルチ計測器をトンネル掘削機に取り付けて、掘削機と同時に進行することにより、トモグラフィデータの取得が可能となる。

さらに(1)に示した課題を解決することにより、様々な空洞調査あるいは社会インフラ周辺の健全性モニタリングなどへの適用が可能となると考えられる。

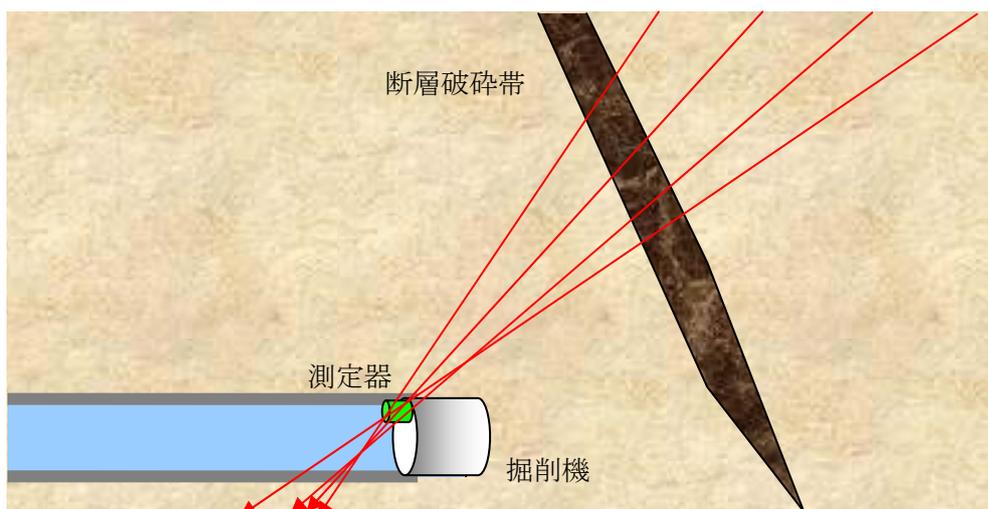


図 4-3 トンネル掘削時の前方探査

現状で実用化されているジオトモグラフィ（弾性波・電磁波・比抵抗）により P 波速度（ V_p ）・S 波速度（ V_s ）・比誘電率・比抵抗という物性値が得られる。一方、土木工学的に必要な物性値は一軸圧縮強度・N 値・含水比・間隙率・密度などである。物理探査（ジオトモグラフィを含む）から得られる物性値と土木工学的な物性値との関係は、定性的には表 4-1 に示すような関係にある。定量的な取り扱いとしては岩石物理学として体系化されている（例えば、Mavko, 1998）。特に V_p 、 V_s については詳しく調べられて、実用化されている。しかし、土木工学的物性値が直接得られるわけではないため、精度の面からの問題も生じている。表 4-1 からわかるように物理探査で地盤の密度と相関性の高い探査方法は、重力探査以外にはない。ミュー粒子を利用した探査では密度を直接得ることができるため、広い範囲での土木工学的な応用が期待できる。

表 4-1 物理探査により得られる物性値（ENAA、1997）

	V_p	V_s	比誘電率	比抵抗
一軸圧縮強度	◎	◎		
静弾性係数	◎	○		
N 値		◎		
引張強度	△	△		
静ポアソン比	○	○		
含水比			△	△
間隙率	○	○	○	◎
密度	○	△		

◎：かなり相関がある。

○：相関がある。

△：少し相関がある。

システム開発 21-F-1

ミュー粒子を利用した地中空洞化調査システム
に関するフェージビリティスタディ
(要 旨)

平成 22 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 03-3502-3671