

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

平成24年3月

一般財団法人 エンジニアリング協会
地下開発利用研究センター

日本が生んだ世界のスポーツ

KEIRIN



この事業は、競輪の補助を受けて実施しています。

<http://ringring-keirin.jp>

序

本報告書は、財団法人JKAから機械工業振興資金の補助金を受けて、一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センターが、平成23年度「ミュー粒子を応用した地盤危険性探査技術の実用化に関する調査研究」として検討を進め、その成果を取りまとめたものです。

近年、地下の交通施設、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は、社会的にも急務であります。

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。しかしながら、既存の探査技術では地下数m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、未だ確立しておりません。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、陥没の発生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、地下開発利用研究センターでは、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宇宙線ミュー粒子を用いた探査技術の調査研究を平成20年度から開始しました。平成20～22年の3ケ年は、財団法人機械システム振興協会からの委託事業として調査研究ならびに、フィージビリティスタディを実施し、4台の試作器を開発するとともに、地盤中の空洞を三次元で可視化することに成功しました。本年度は、厳しい地下環境への対応として、防滴機能を向上させるための新たな計測機能の改善と、解析精度向上のための実験的検討、多様なニーズ毎の測定方法を整理するなど、調査研究を進めたことにより、本探査システムが実用化に一步近づくことができました。

本調査研究は、当センターに、産学の有識者からなる「ミュー粒子を応用した地盤危険性探査技術の実用化に関する調査研究委員会（委員長 東京大学 教授 徳永 朋祥氏）」を設置し、活動に関するご指導と評価を受けながら実施してまいりました。

本調査研究にご協力いただいた関係各位に対して心から謝意を表するとともに、本報告書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24年3月

一般財団法人 エンジニアリング協会
理事長 久保田 隆

ミュー粒子を応用した地盤危険性探査技術の実用化に関する調査研究委員会
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	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 部長	竹内友章
委員	飛島建設株式会社 建設事業本部 設計グループ 主席設計員	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
委員	財団法人電力中央研究所 名誉研究顧問	駒田広也

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（造水担当）	松 本 康 男
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 課長補佐	出 沼 輝 男
オブザーバ	財団法人機械システム振興協会 理事 技術統括役	水 上 淳 二
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 探査部 部長	大 沼 寛
オブザーバ	川崎地質株式会社 事業本部 探査部 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 建設事業本部 営業部統括部 営業第2グループ 部長	小 島 龍 介
オブザーバ	飛島建設株式会社 名古屋支店 建設事業部 施行グループ 工事チーム 担当部長	坂 本 昭 夫
事務局	一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター 所長	奥 村 忠 彦
事務局	一般財団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター 技術開発部 主任研究員	浅 沼 博 信

目 次

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

第 1 章 調査研究の概要

1.1 調査研究の背景と目的

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

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

1.2 調査研究の経緯

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

一方、物理探査の分野では密度を測る方法としては重力探査しかなく、小規模な空洞探査には分解能の点で不足する。ミュオン粒子を利用することで、地盤の密度を高分解能で測ることができる。このような探査方法は今までに開発されていない。また、ミュオン粒子は自然に存在するものであり、放射線源などを使用することなく、安全に探査することが可能となる。

ミュオン粒子を非破壊検査に利用した試みは、いくつかの事例があるが、工業的利用は世界的に全く図られておらず、今日に至るまで、実用性の高い探査方法として開発されていないため、本テーマは世界的に新規性の高いテーマと言える。

空洞が地表付近まで到達した場合には、地表に亀裂や凹みなどが生じ、陥没前に空洞の存在が予測できる場合もあるが、その場合は手遅れになる可能性もある。通常は、物理探査などの探査技術により空洞を探査する。しかし、探査深度や分解能（解像度）という点で万全の技術が無い。都市部においては振動や電気などのノイズにより従来の物理探査の性能が十分に発揮できないことも多い。

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

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

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

1.3 調査研究の成果概要

平成 20～22 年の 3 ケ年、(財) 機械システム振興協会の委託事業として自然宇宙線ミュオン粒子を活用した地下空洞調査技術の開発に関する調査研究ならびにフィージビリティスタディを実施してきた (図 1.3-1)。

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

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

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

本年度は(財) J K A の自転車等機械工業振興補助事業で調査研究を進めるものであり、下水道の幹線や導水路などをターゲットとした実用化システムとして、防滴・防塵加工を施すことにより、これを実現する。表 1.3-1 に今年度の実施内容を示す。

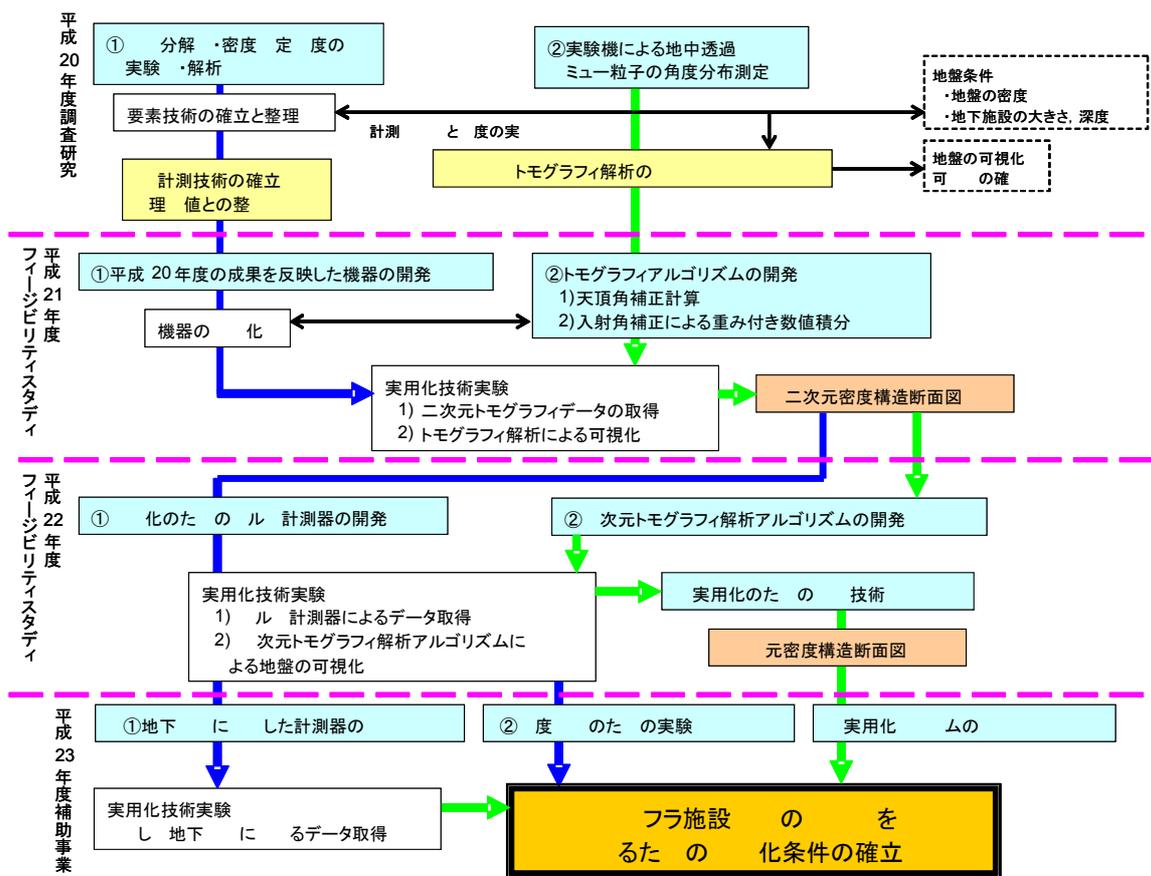


図 1.3-1 平成 20～23 年度調査研究および F/S の流れ

表 1.3-1 実施内容一覧表

調査研究項目	内容
①地下環境に対応した計測器の改良	
・改良型マルチ計測器の開発	防水コネクタ等防水対策の開発・製作
・性能確認試験	工場試験として防滴試験(JIS C0920)を実施 厳しい地下環境での実験
②精度向上のための実験的検討	
・改良型マルチ計測器(試作器B・C)によるデータ取得	地盤の可視化データを蓄積する。
・試作器Aによるミュール粒子時間変動計測	長期間、定点での地下計測実験を実施。
・三次元トモグラフィ解析	上記取得データを踏まえて、精度の向上や実用化に向けた計測点数と解析精度の関係等を検討
③実用化システムの検討	文献調査・ヒアリング調査や②の検討結果を受けて、実用化システムの検討する
④成果のとりまとめ	研究成果とりまとめ、報告書作成

第2章 改良型マルチ計測器の設計・製作

図 2-1、写真 2-1 に昨年度製作したマルチ計測器の外観を示す。今年度はこれに防滴対策を施し、地下の過酷な環境にも耐えられるものとする。現在のメーカーの保証する環境は、湿度 90%までである。今までのニーズ調査によれば、導水路など高湿度環境での使用を想定する必要性が生じている。導水路などでは湿度だけでなく、天井からの水滴なども考えられる。そのような環境では、計測器に防滴対策を施す必要がある。具体的な対策としては以下のような項目が挙げられる。

- ・ 接続コネクタを防滴・防塵仕様に交換する。
- ・ 検出器のコネクタフランジを総て防滴・防塵仕様に交換する。
- ・ 計測部は新たに製作する防滴ケースに収納し、防滴ケースに防滴・防塵仕様を取り付ける。

写真 2-1 には本調査研究にて改良する部分を示している。

計測器の改造を行ったのち、工場試験として防滴試験(JIS C0920)を行い、性能を確認する。改造後には現地での性能確認実験として、下水管や導水路など厳しい環境でのデータ取得を行う。

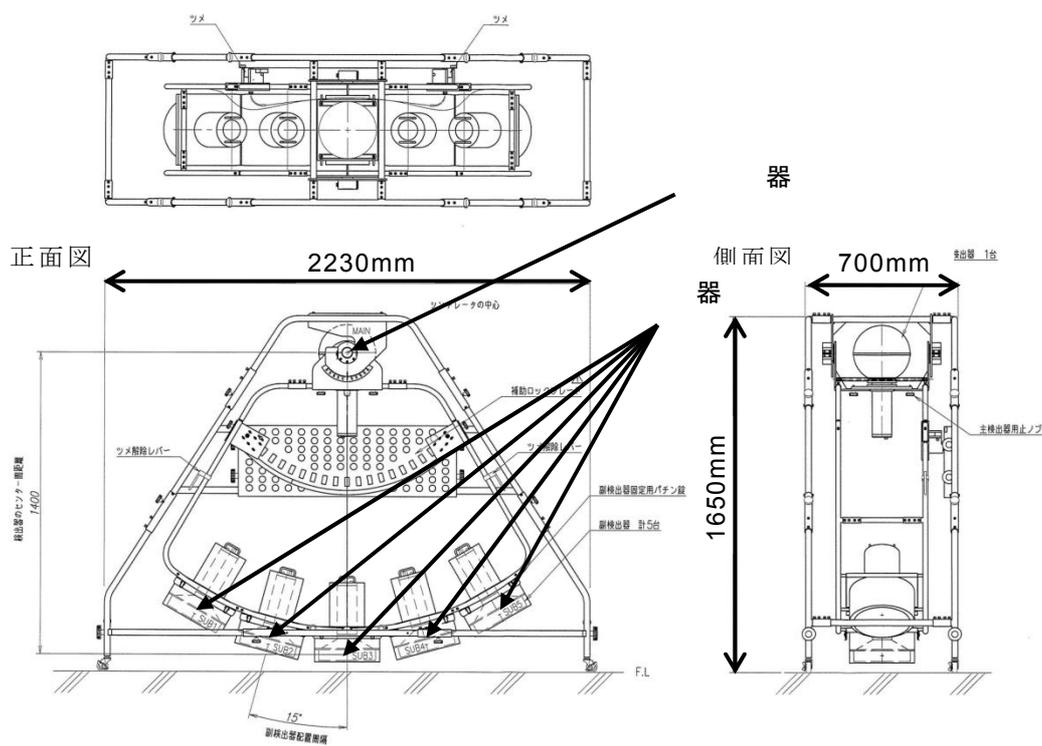
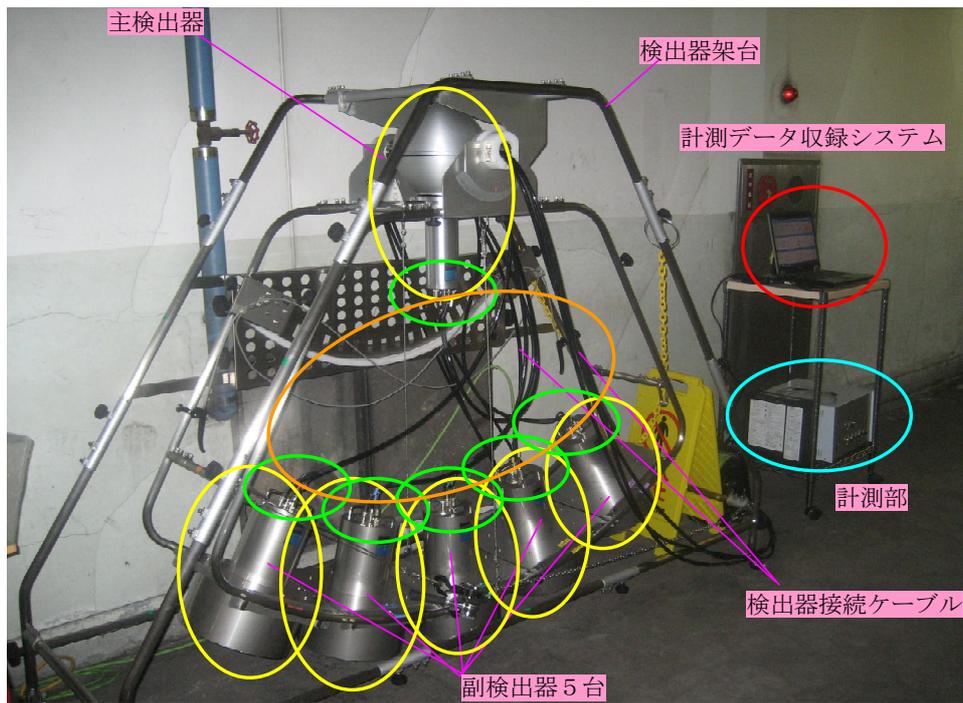


図 2-1 マルチ計測器の外観図



計測データ収録システム	防滴加工品に交換
計測部	防滴ケースに収納
主検出器及び副検出器5台	防滴加工を施す
コネクタ	防滴コネクタに交換
接続ケーブル	コネクタ交換に伴いケーブルも交換

写真 2-1 マルチ計測器の外観

2.1 改良型マルチ計測器の設計

2.1.1 設計概要

- ①主検出器 1 台および副検出器 5 台の防滴化改造
- ②計測器防滴ケースの製作
- ③検出器用ケーブル 6 本の新規製作
- ④防滴仕様のパーソナルコンピュータの導入

2.1.2 機器構成および数量

(1) 改造対象機器

- ①主検出器(S-2866C) : 1 台
- ②副検出器(S-2866B) : 5 台
- ③計測部(S-2924) : 1 台
- ④検出器用ケーブル : 6 本

2.1.3 製作仕様

(1) 主検出器および副検出器改造

概要：主検出器および副検出器の検出器信号コネクタ、リアパネル、ハウジングを防滴仕様とするため部品交換および改造を行う。

保護等級：検出器に検出器用ケーブルを接続した状態で JIS C 0902:2003、IPX2 に準拠する。

検出器信号コネクタ：使用コネクタ：NJW-2012-RM（七星科学）、12 極オスピンチェック端子類の保護：チェック端子類全面を保守パネルにて塞ぎ防滴する。

機構：ハウジング、リアパネルを防滴仕様に設計したものを製作し、交換する。

(2) 計測部改造

概要：計測部(S-2924)に追加部品を取り付け、この計測部を格納できる保護ケースを製作し、これに格納して防滴仕様にするため部品交換および改造を行う。

保護等級：保護ケースに計測部を入れた状態で、JIS C 0902:2003、IPX2 に準拠する。

保護ケース：防滴仕様に設計した保護ケースを製作し、計測部をこのケースに入れる。

計測部本体：保護ケースと取り合う固定金具と取り出し用の取手を計測部に取り付ける。

質量：保護ケースに計測部を入れ、約 20 kg とする。

(3) 検出器用ケーブル

概要：主検出器および副検出器の検出器信号コネクタを防滴仕様にし、長さを改造前の 5 m から 8 m に延長したケーブルを新規製作する。

保護等級：検出器側コネクタ部を JIS C 0902:2003、IPX2 に準拠する。

検出器側信号プラグ：NJW-2012-PF12（七星科学）、12 極メス

計測部側プラグ：信号用 BNC-P-62U(TDC)
高圧用 SHV-P-59U(TDC)
低圧用 RM12BPE-3PH(71)(HRS)

ケーブル：複合ケーブル

ケーブル長：約 8 m

(4) 収録用パソコン

概要：防滴仕様のパーソナルコンピュータを購入し、収録プログラムをインストールする。

サイズ：ノート型コンピュータ

OS：WINDOWS 7

CPU：Intel Core i5-520M

メモリ：2 GB

HDD：160 GB

ディスプレイ：13.1 インチ TFT カラー液晶 XGA(1024×768)

その他：RS-232C シリアルポート付属

2.2 改良型マルチ計測器の製作

主検出器、副検出器および計測部の製作図面を図 2.2-1~3 にそれぞれ示す。主検出器・副検出器とも光電子増倍管および電子回路を収納したハウジングを防水型に変更するとともに、コネクタを防滴構造に変更した。さらに保守パネルに防滴構造のカバーを取り付けた。

計測部本体は、上部からの滴水でも内部に浸水がないように新たにカバーを取り付けた。ケーブル類は下部から引き込む構造とした。

収録用 PC は防滴対策が施された機種に変更し、収録プログラムをインストールした。

主検出器・5 台の副検出器・計測部・6 本の検出器ケーブルの改造前後の比較を写真 2.2-1~6 に示す。

製作した各機器は、改造後に性能が低下していないことを確認し、次章に示す工場試験を行って、各機器の防滴対策の効果を確認した。

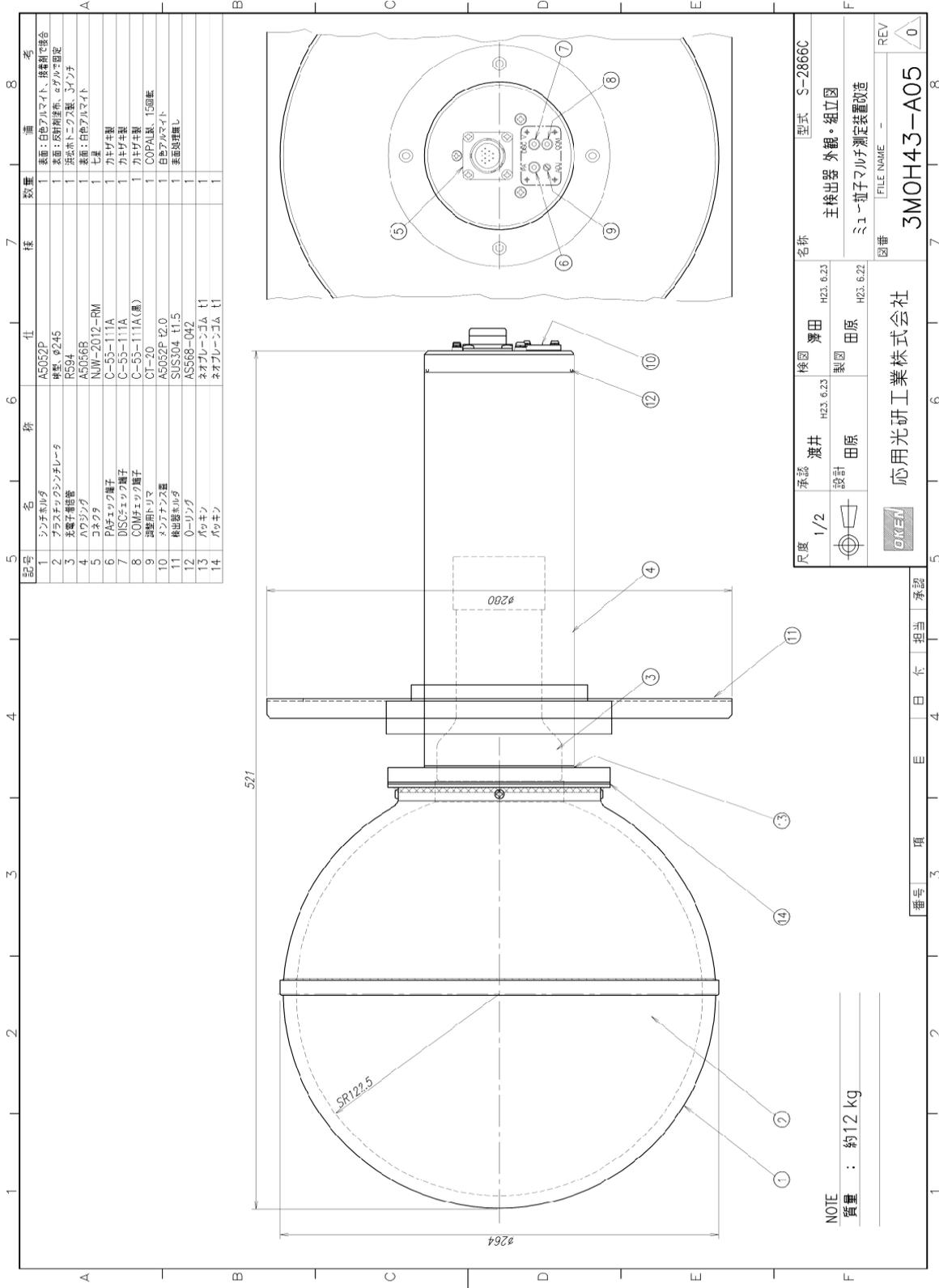


図 2.2-1 主検出器の製作図面

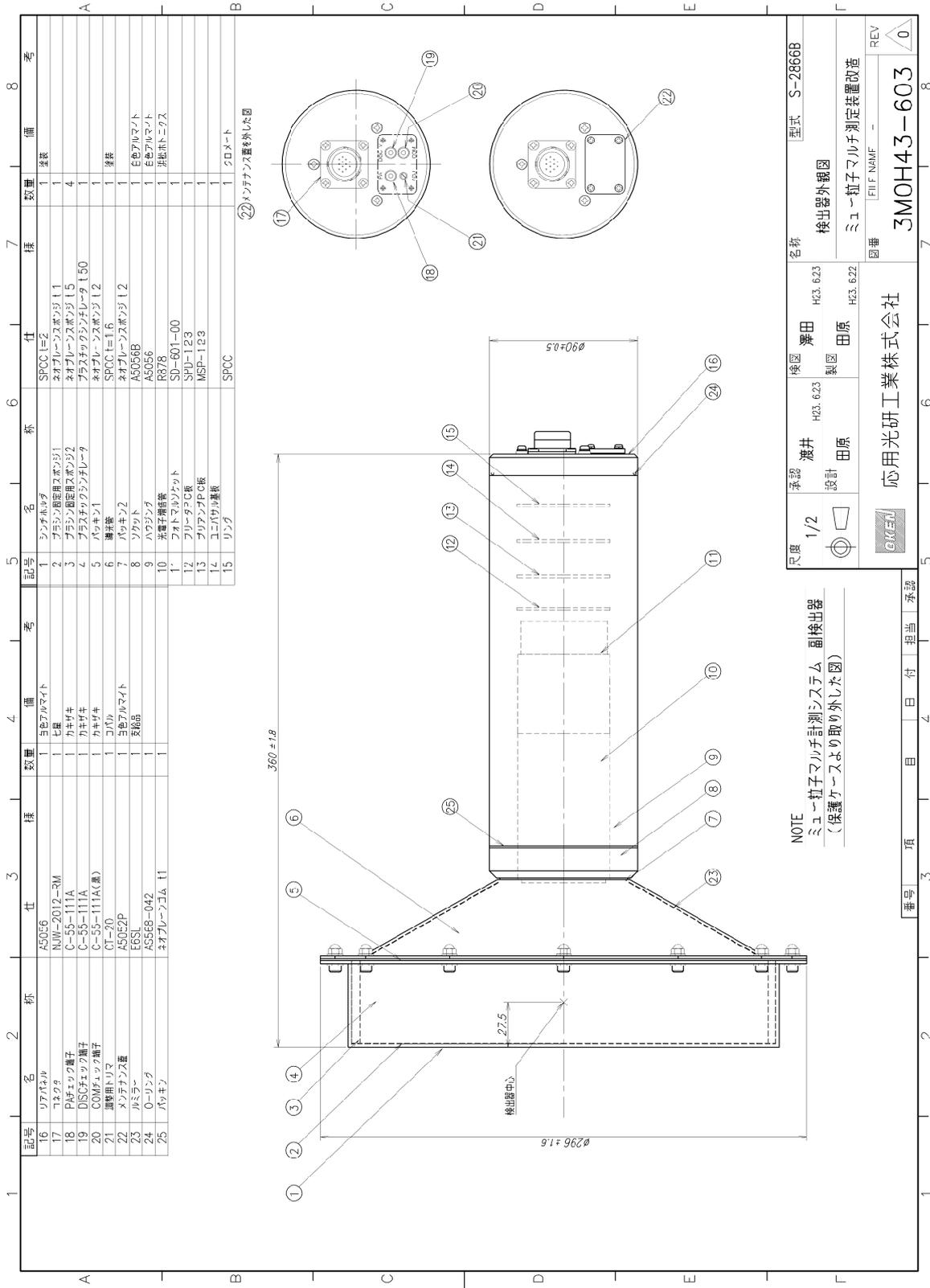


図 2.2-2 副検出器の製作図面

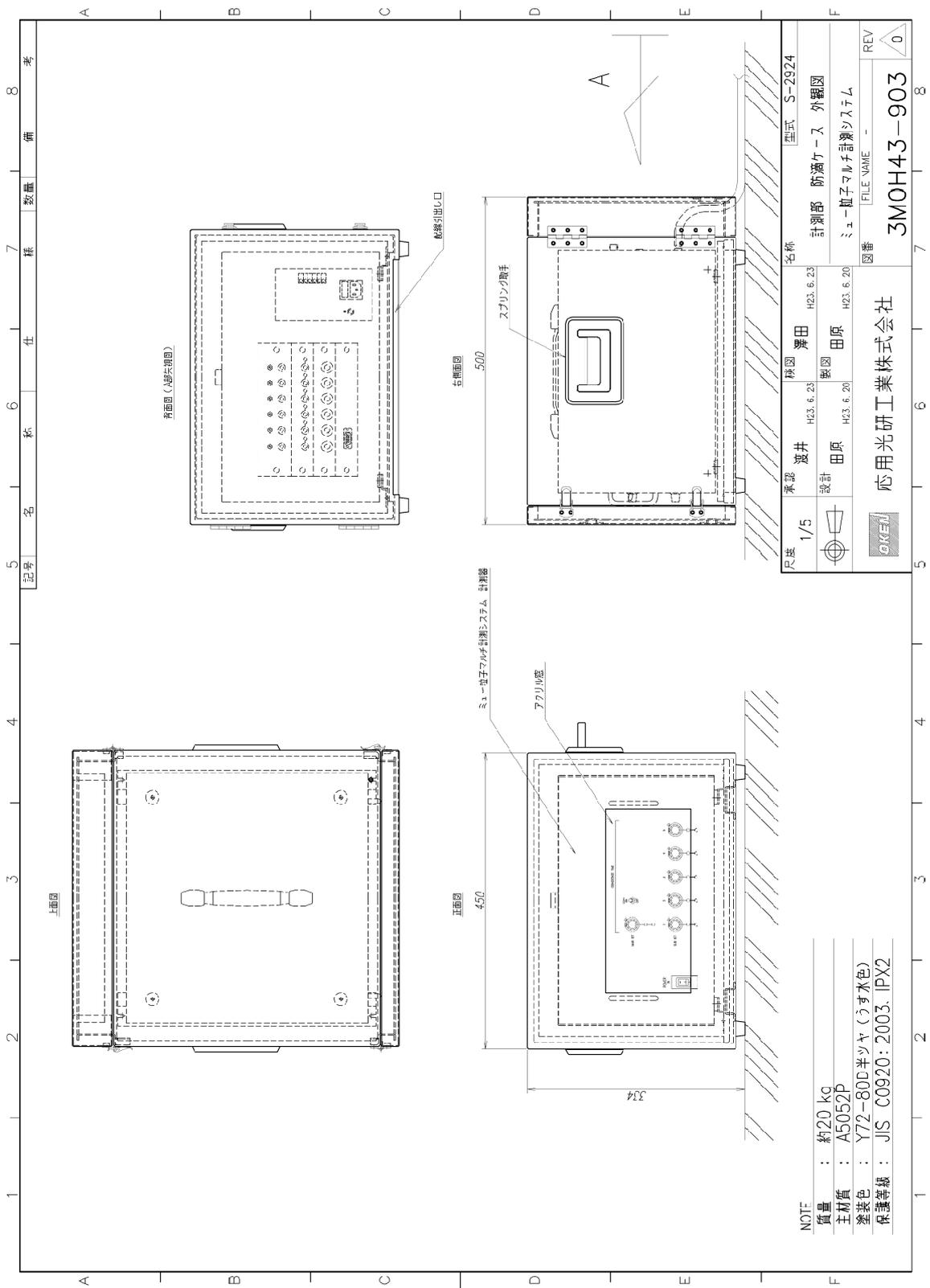
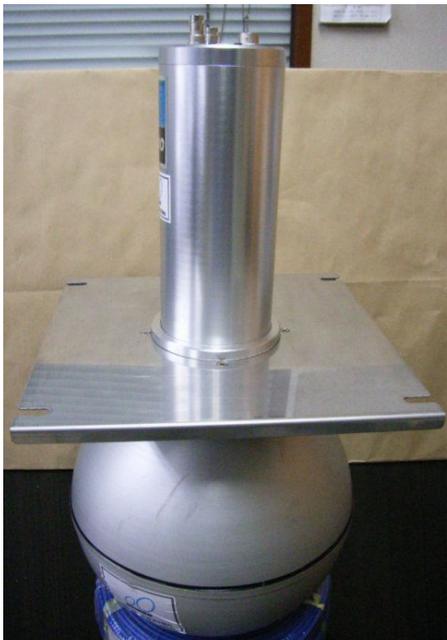


図 2.2-3 計測部の製作図面

改造前



改造後



ハウジングを防滴仕様に改造



リアパネルを防滴仕様に改造

写真 2.2-1 主検出器の改造前後の比較

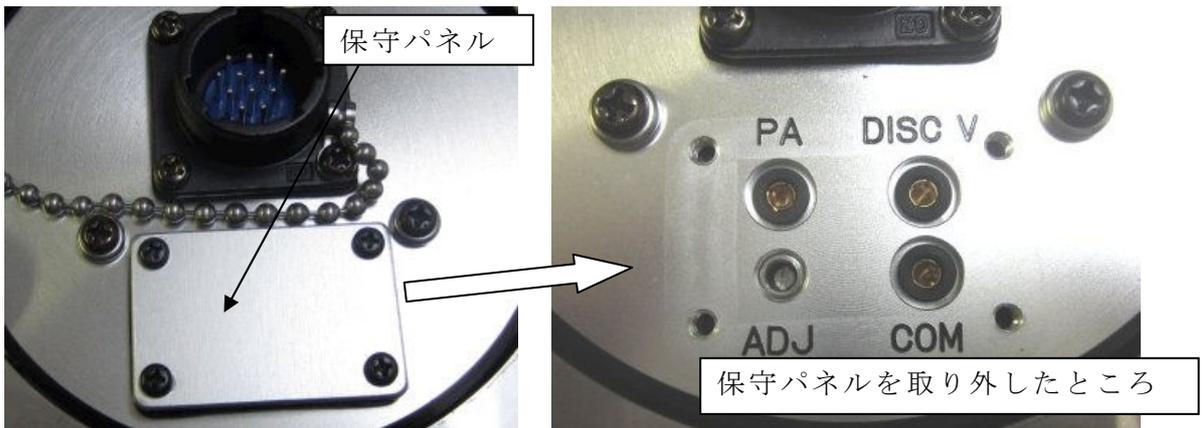


写真 2.2-2 主検出器の改造後の保守パネル取り付け状況

改造前



改造後

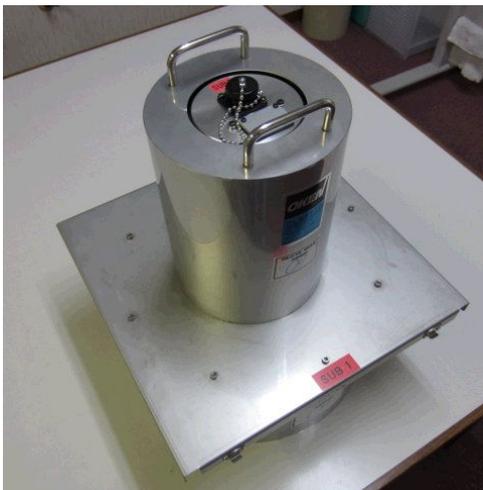


写真 2.2-3 副検出器の改造前後の比較

改造前



改造後



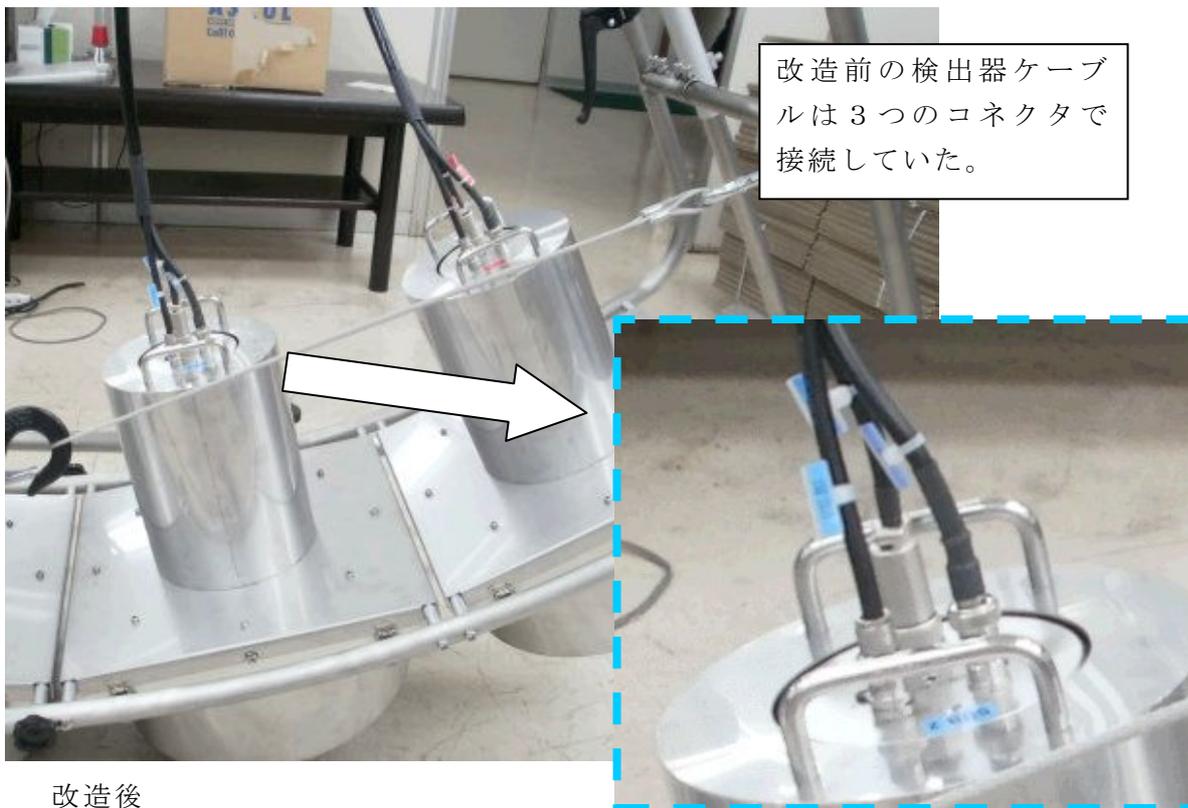
写真 2.2-4 計測部の改造前後の比較



(左) 全面扉を開けたところ、(右) 後面 (ケーブル接続側) を開けたところ

写真 2.2-5 計測部の改造後の内部状況

改造前



改造後

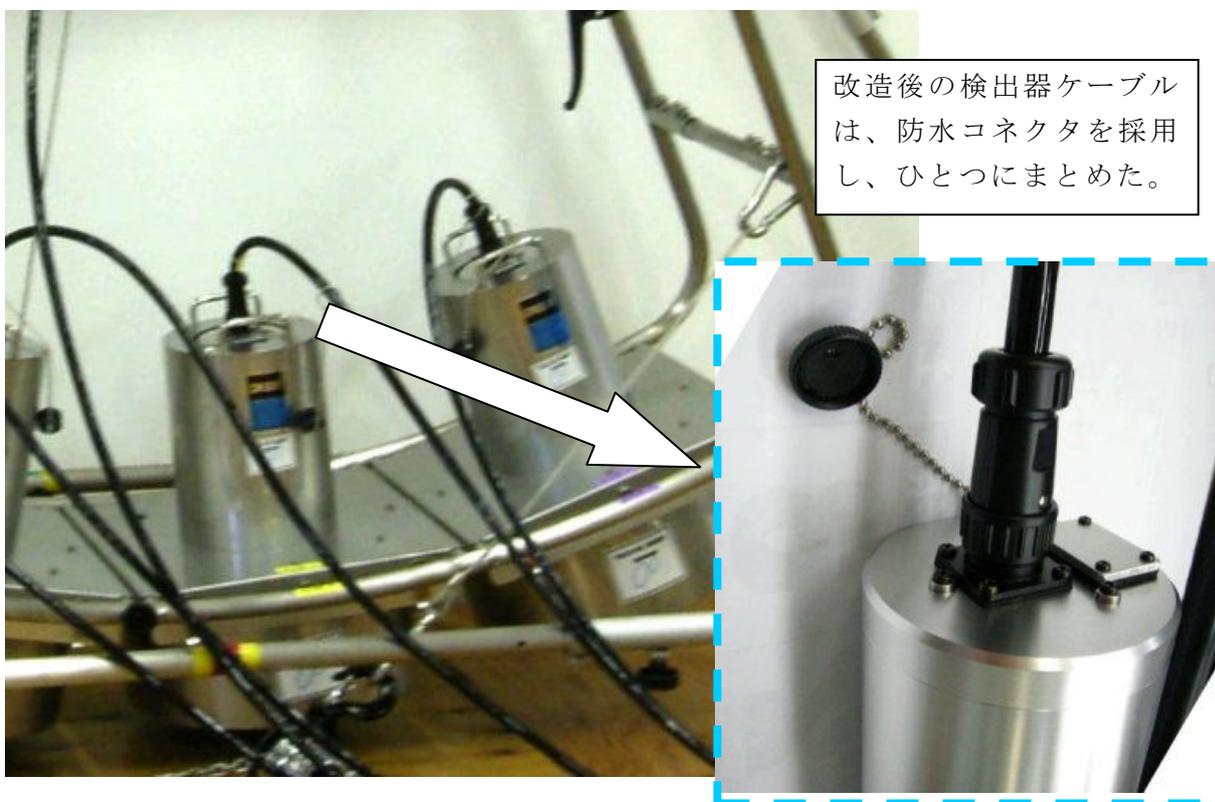


写真 2.2-6 検出器ケーブル改造前後の比較

第3章 改良型マルチ計測器の工場試験

3.1 試験方法

JIS C 0902:2003、IPX2 に準拠する滴水試験機（写真 3.1-1）を製作し、検出器 6 台、保護ケースに入れた計測部 1 台に対し滴水試験を行った。

JIS C 0902:2003（IPX2（防滴 II 形））試験は、鉛直から 15 度の範囲で落ちてくる水滴による有害な影響がないことを確認する試験である（日本工業調査会、2003）。製作した防滴試験器を傾斜台にて試験体（主検出器、副検出器、計測部）を 15° 傾け、上面より滴水する。試験体上面より 200 mm 上方より滴水し、90° ごとに試験体位置を変え、各 2.5 分間、合計 10 分間滴水する。その後、試験体内部に浸水がないことを目視で確認する。



写真 3.1-1 製作した防滴試験器

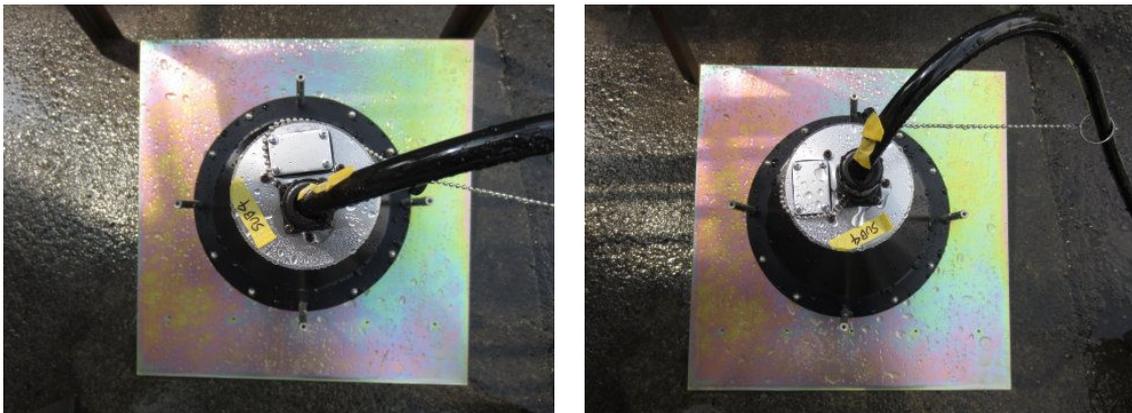
3.2 試験結果

写真 3.2-1 に副検出器の試験状況を示す。15 度傾け、かつ方向を 90 度ずつ変えて滴水した。

写真 3.2-2 に副検出器の内部目視検査の状況を示す。ハウジングを外して分解して調べたところ、浸水がないことが確認できた。ケーブルについても防滴コネクタの効果が確認できた。

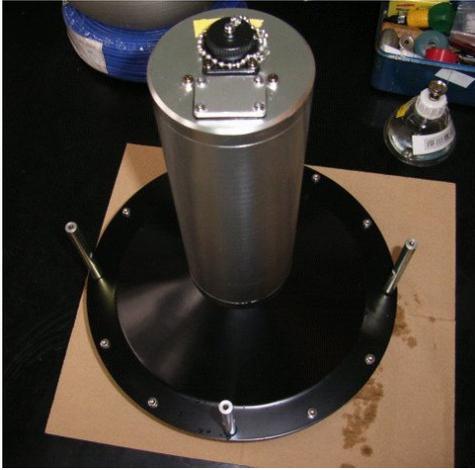


15 度傾けた状態での滴水状況

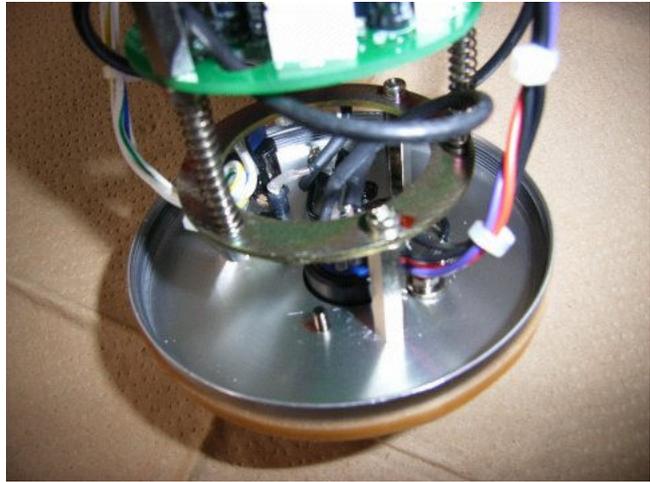


90 度ごとに向きを変える

写真 3.2-1 副検出器の試験状況



保守パネル内に浸水なし



ハウジング内部の回路にも浸水なし

写真 3.2-2 目視による滴水試験後の内部検査状況

写真 3.2-3 に計測部本体の内部目視検査の状況を示す。内部に浸水がなく、計測部を外してみたところ浸水は確認できなかった。



試験後の外観



計測部を取り外したところ

写真 3.2-3 計測部の内部目視検査状況

3.3 試験の成果

JIS C 0902-2003 (IPX2) に基づく防滴試験により、各機器の防滴性を確認することができた。

ただし、本試験は短時間の試験であり、実際の環境下において長時間の試験を行う必要があると考えられる。そのため、次章に示す湿潤環境下での試験を行った。

第4章 改良型マルチ計測器の湿潤環境下試験

4.1 試験方法

(1) 試験の目的

今年度改造した防滴仕様のマルチ計測器については、工場試験（JIS 試験）を行い、性能を確認した。JIS 試験は、長期にわたる試験ではないことや実際の作業環境などを反映していないところもある。そのため、実際の使用環境に近いところで1週間以上の期間をかけて装置を動作させ、正常な動作とデータ取得の安定性などについて確認する。

(2) 試験場所

実験を行うために必要な条件を次に示す。

- ① ある程度安定した電源が確保できること。
- ② 装置を置くスペースがあること。
- ③ 土被りが数 m 程度（以上）あること。

などである。上記の条件を満たす場所として、**図 4.1-1** に示す坑道を選定した。地質は、新第三系中新統中期～後期であり、岩質はスコリア質粗粒砂岩である。地層の走向は東北東－南南西あるいは北東－南東方向で、傾斜は 12～14° N である。**写真 4.1-1** に実験場の露頭を示す。

測量の結果、坑道底盤の標高 2.1m であった。従って、土被りは 10m 弱と推定される。実験場の内部を**写真 4.1-2** に示す。坑壁は湿潤していないが、アルミ製の扉や蛍光灯などの金属あるいはガラス製品は水滴が落ちるほど結露している。

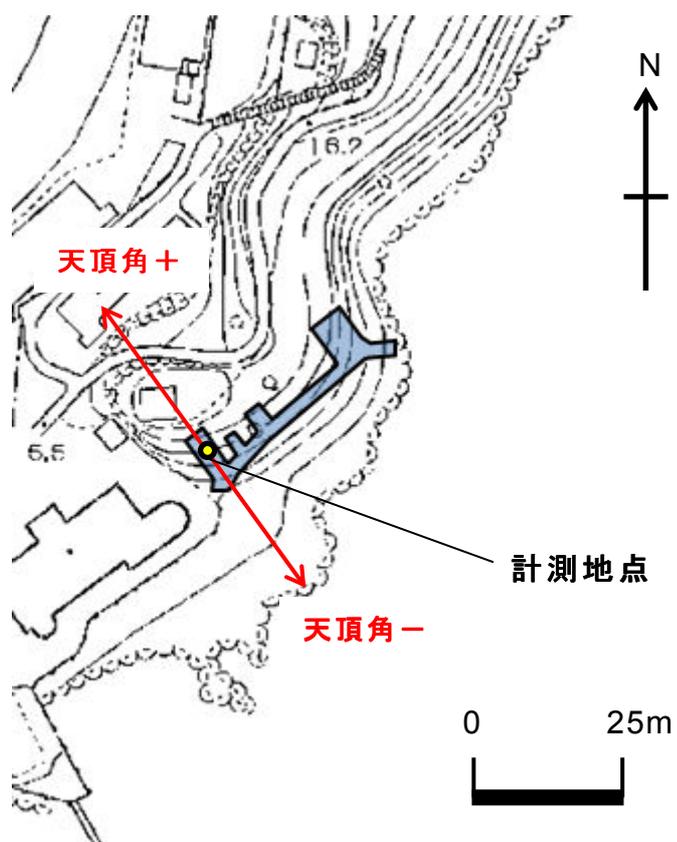


図 4.1-1 実験場位置図



写真 4.1-1 実験場の露頭



壁面は湿潤していない



扉や蛍光灯などは結露し、水が滴っている状態

写真 4.1-2 実験場内部の様子

(3) 実験方法

観測坑内で改良型マルチ計測器を設置し、高湿度かつ水滴のある状態で安定してデータを取得することを確認する。

図 4.1-2 に示すように改良型マルチ計測器を 1 カ所に設置し、1 回あたり 12 時間の計測を 1 週間程度ごとに行った。角度についても 5° 刻みで 3 回計測した。表 4.1-2 に計測期間を示す。中心にある副検出器 3 の角度を、 0° 、 -5° 、 -10° とした。この場合、副検出器 1~5 は天頂角 -40 度から $+30$ 度を 5 度刻みで計測することになる。計測日数はそれぞれ 7.5 日・13 日・10 日とし、全部で 30.5 日の計測を行った。

温度・湿度ロガー（LASCAR 製、EL-USB-2）を用いて温度と湿度のモニタリングも同時に行った。写真 4.1-3 に外観を示す。USB 端子を PC に接続して計測間隔を設定するだけで温度と湿度のデータをメモリに収録する。測定間隔を 1 時間にしても 11 ヶ月以上の測定を行うことができる。

改良型マルチ計測器の設置にあたっては、ビニール袋に乾燥剤を入れ密封し、坑内に搬入した。その後 3 時間以上放置してから組み立て・電源投入を行ったところ、正常に動作

した。写真 4.1-4 に組み立て状況を、写真 4.1-5 に設置完了状況をそれぞれ示す。電源は、近傍の建物から仮設の電力線を坑内に引き込み、商用 100V を使用した。

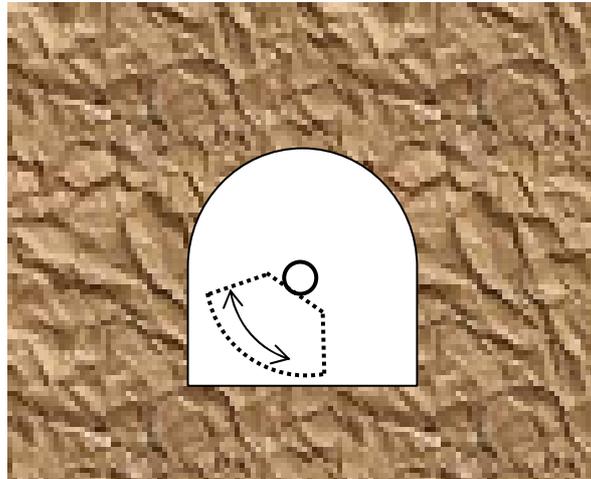


図 4.1-2 実験方法の概要

表 4.1-2 計測期間

計測期間	計測日数	計測回数	副検出器 3 の角度
平成 24 年 1 月 16 日 ～1 月 24 日	7.5 日	15 回	0°
平成 24 年 1 月 24 日 ～2 月 6 日	13 日	26 回	-5°
平成 24 年 2 月 6 日 ～2 月 16 日	10 日	20 回	-10°
合 計	30.5 日	61 回	全 15 方向



写真 4.1-3 使用した温度・湿度計



写真 4.1-4 組み立て状況

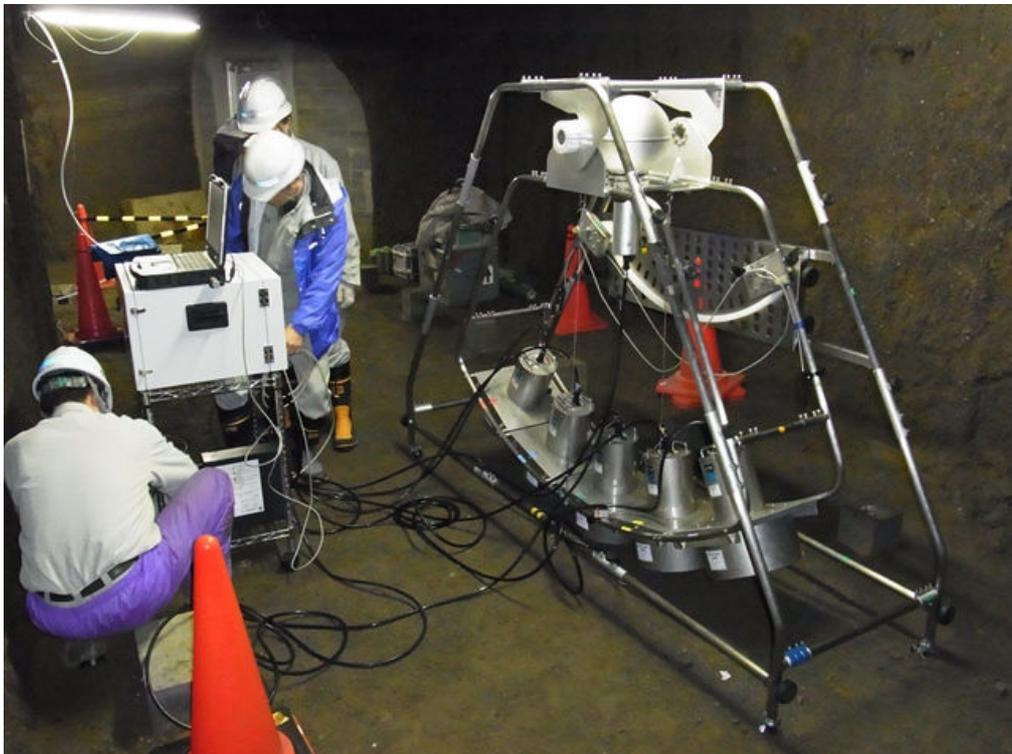


写真 4.1-5 設置状況

4.2 試験結果

写真 4.2-1 および写真 4.2-2 に検出器の結露状況を示す。特に写真 4.2-2 に示す副検出器のコネクタ部は結露が著しいが、正常に動作し、その後 1 ヶ月間順調にデータを収録した。

図 4.2-1 に温度と湿度の計測結果を示す。計測開始時と途中 2 回のデータ回収時に温度計に触ったため、1℃程度温度が増加している。それ以外は 17.5℃で一定している。

湿度は、計測開始時には 80%程度であったが、1 日くらいで落ち着き、95~98%で推移している。計測データを検出器ごとに図 4.2-2~7 に示す。平均値の計数誤差 $\pm 1\sigma$ と $\pm 2\sigma$ の線を併記した。 $\pm 2\sigma$ は計数値の約 95%がこの範囲に入ることを示している。すなわち 20 回に 1 回程度の割合で、 $\pm 2\sigma$ から外れることがあり得ることになる。副検出器については、 $\pm 2\sigma$ を超えるのは、全て 20 回に 1 回以下である。しかし、主検出器に関しては、3 回目の-10 度のときに $\pm 2\sigma$ を超える回数が増えている。これについては今後の検証が必要であると考えられるが、概ね安定したデータが取得されていると考えられる。

図 4.2-8 に天頂角ごとのカウント数と土被りの解析結果を示す。土被りの計算には岩盤のかさ密度を 2.1g/cm^3 とした（地震調査研究推進本部(1995)ではこの地域の密度を 2.1g/cm^3 としている）。土被りの厚さは最大 9m であり、地形図から読み取れる土被りにほぼ等しい。天頂角マイナス側の土被りの形状は滑らかである。プラス側は 10 度まではほぼ平坦であるが、その後急激に薄くなっている。図 4.1-1 に示した地形図と比較すると天頂角プラス側（北側）は崖になっていて、急激に土被りが薄くなっていることが確認できる。また、北側は谷状の地形になっており、天頂角の大きいところでは見かけの土被りが大きくなっている。これは、谷状地形の影響を示すと解釈できるが、今後詳細な地形データを取得し、検証する必要がある。



写真 4.2-1 主検出器の結露状況



写真 4.2-2 副主検出器リアパネルおよび防滴コネクタの結露状況

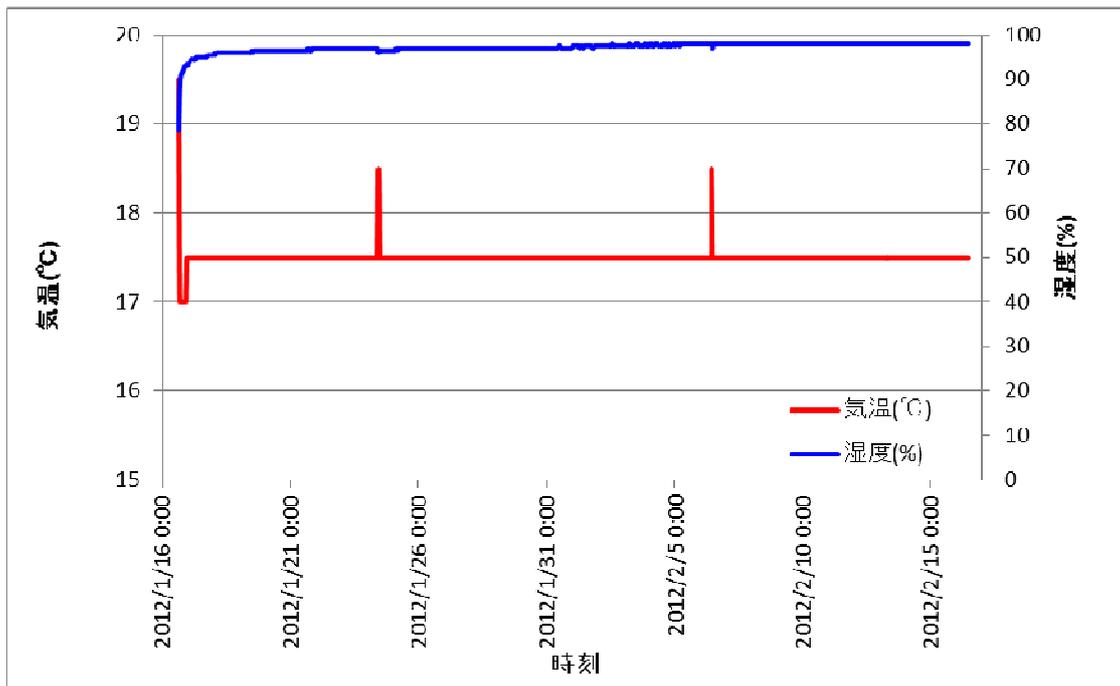


図 4.2-1 温度と湿度の計測結果

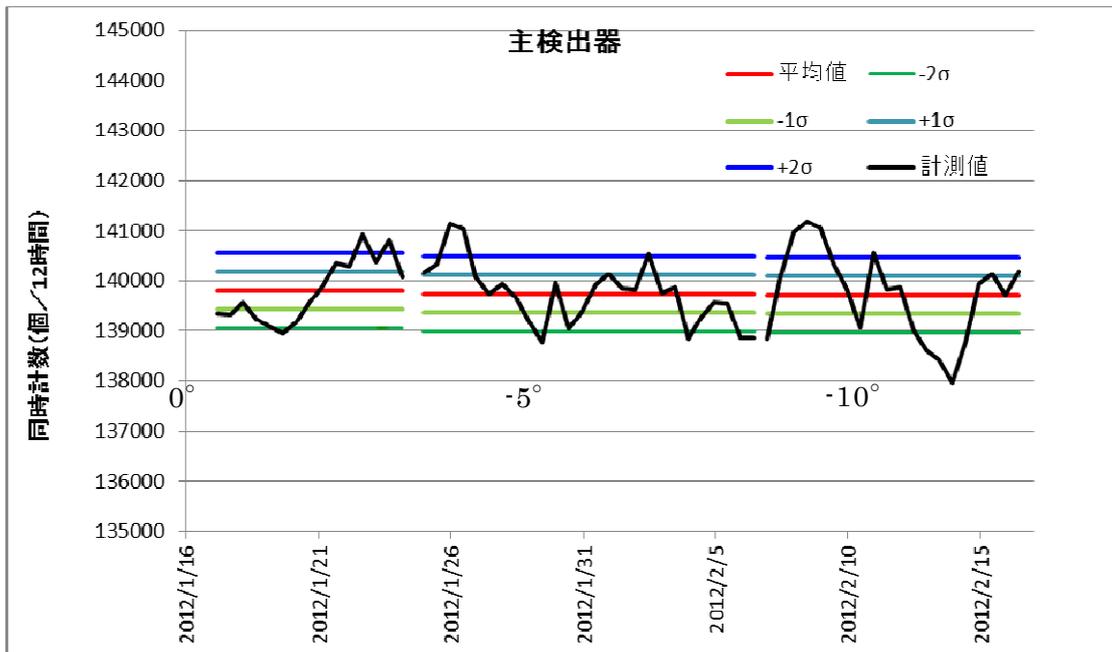


図 4.2-2 主検出器の計測結果

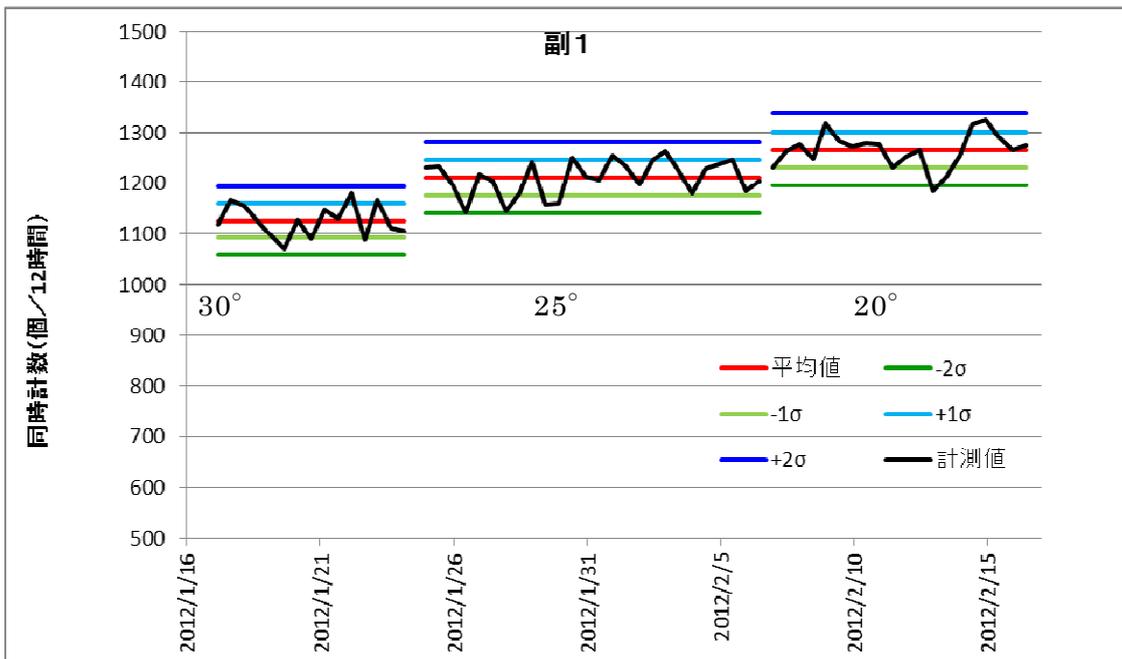


図 4.2-3 副検出器 1 の計測結果

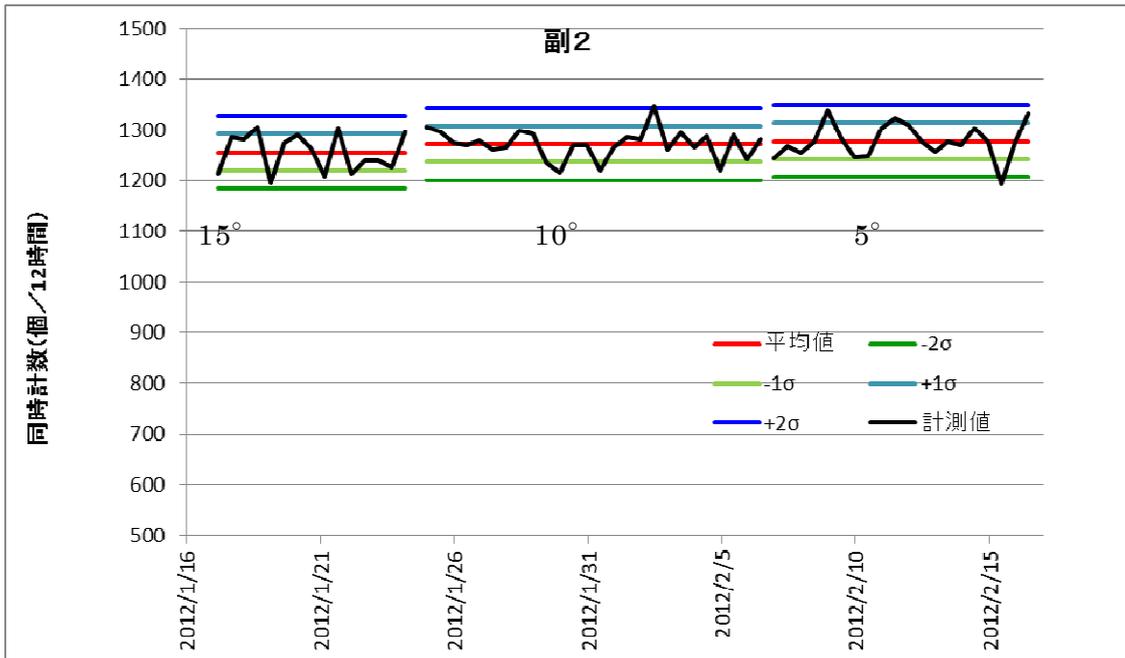


図 4.2-4 副検出器 2 の計測結果

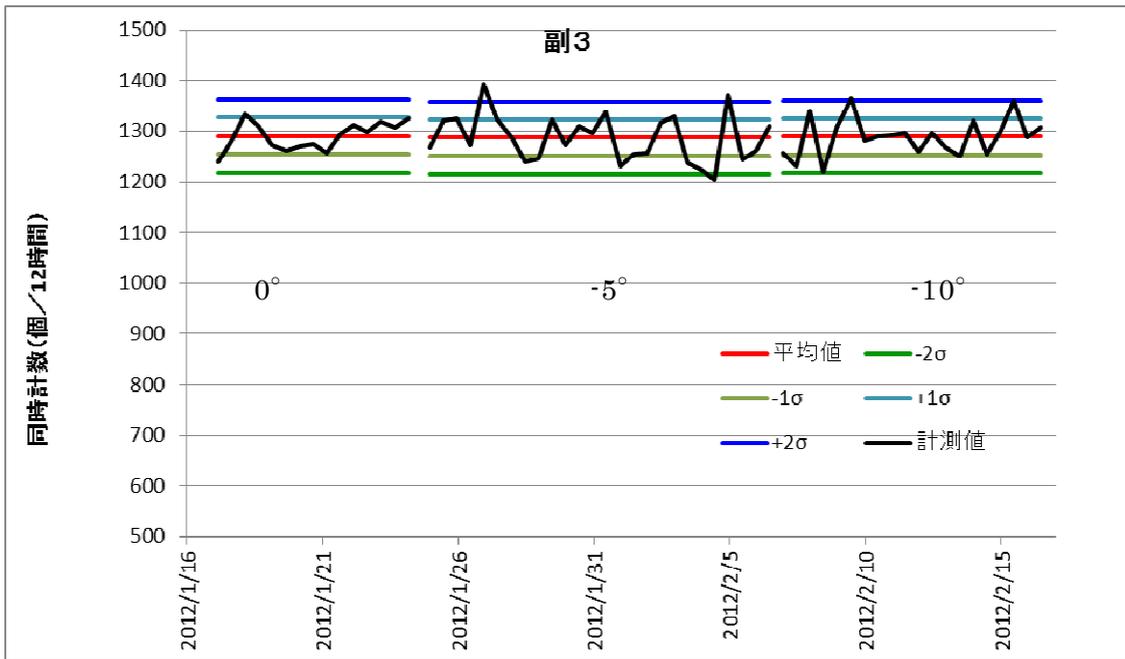


図 4.2-5 副検出器 3 の計測結果

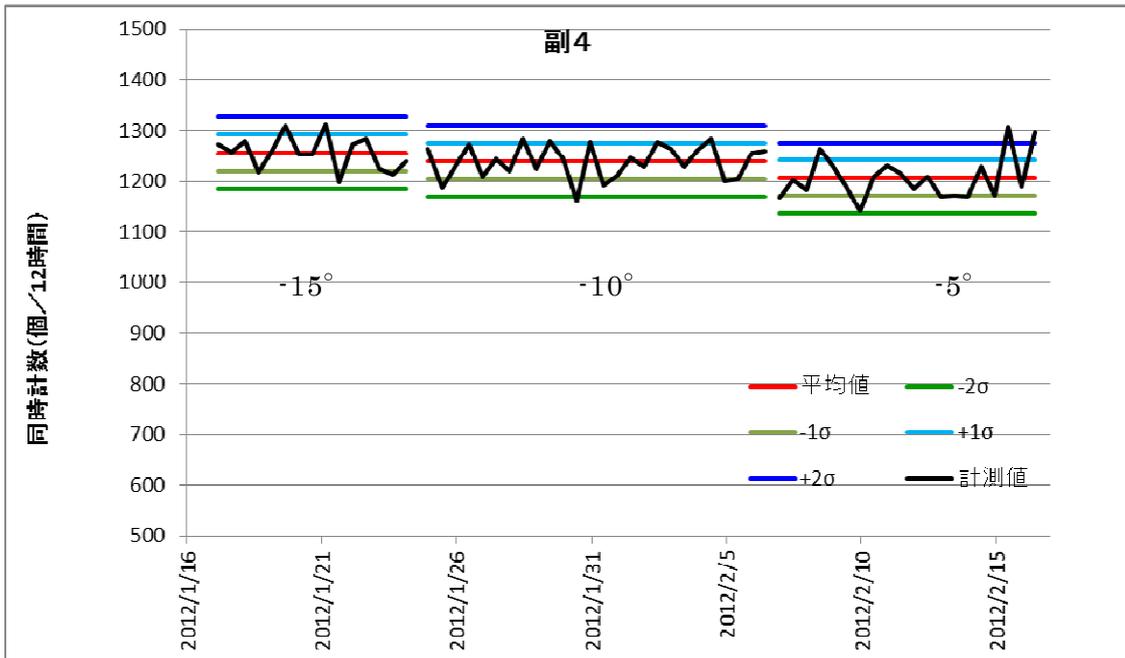


図 4.2-6 副検出器 4 の計測結果

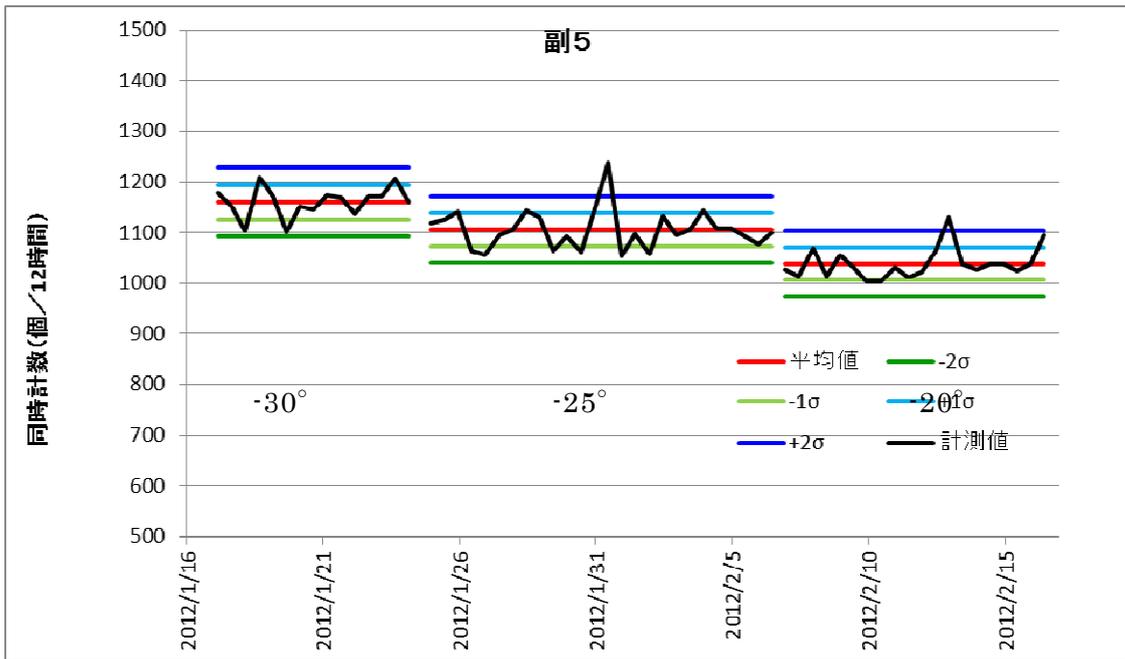


図 4.2-7 副検出器 5 の計測結果

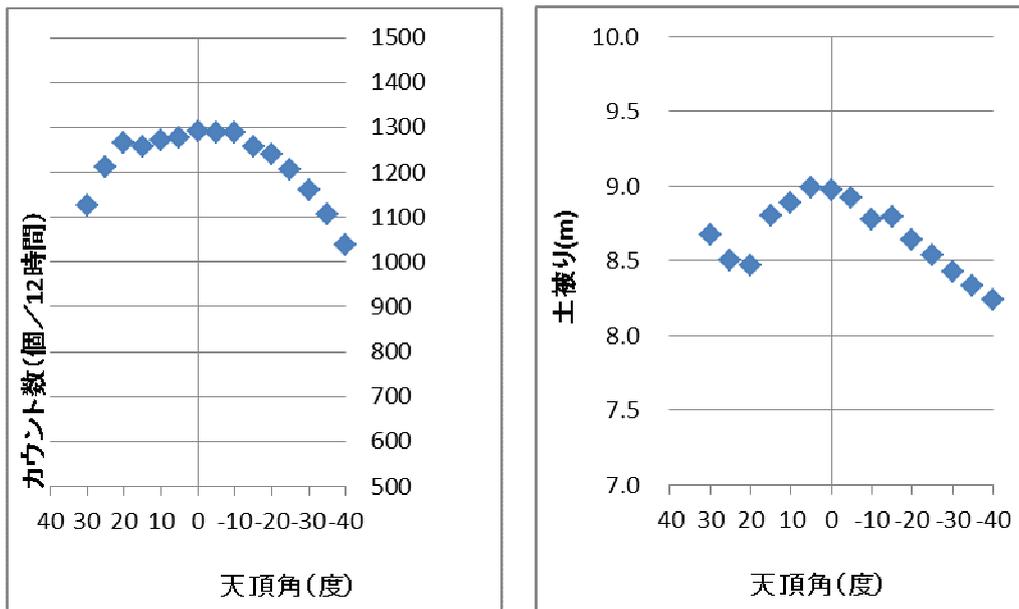


図 4.2-8 カウント数（12 時間）と土被りの解析結果

4.3 試験の成果

高湿潤下における試験の結果、改良型マルチ計測器の改良効果を確認することができた。計測データも1ヶ月以上、安定して取得できた。また、カウント数から土被りを計算したところ、地形図との整合性も定性的には良いことが示された。この結果から、下水管や導水路などでの適用が可能なことが実証できた。

第5章 現地計測

5.1 試作器 B・C、改良型マルチ計測器による地下施設での実験

地下計測実験場の平面図および断面図を図 5.1-1 に示す。

今年度は、改良型マルチ計測器および試作器 B・C を用いてトモグラフィデータを取得し、地盤の可視化データを蓄積することを目的に実験を行った。

また、取得したデータから三次元トモグラフィ解析を行い、精度の向上、実用化に向けた解析精度（特に初期モデルの設定について）の検討を行った。

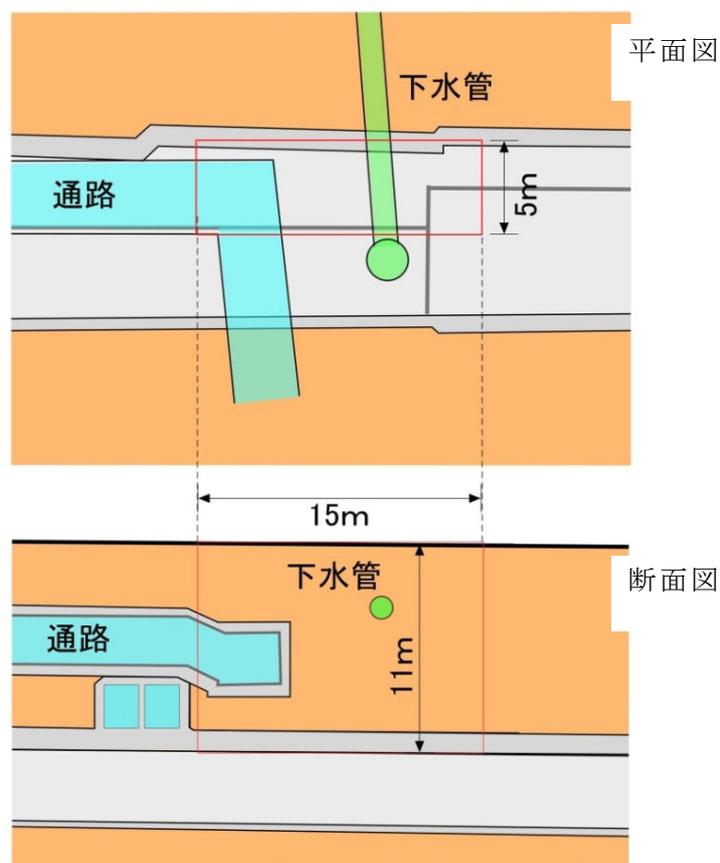


図 5.1-1 三次元データ取得実験場の平面図と断面図

図 5.1-2 に測線平面図を示す。昨年度データを取得した測線の間には 2 本の測線を設けて、三次元可視化データの精度向上を図る。改良型マルチ計測器については、検出器を直角方向に向けた測定を行う。

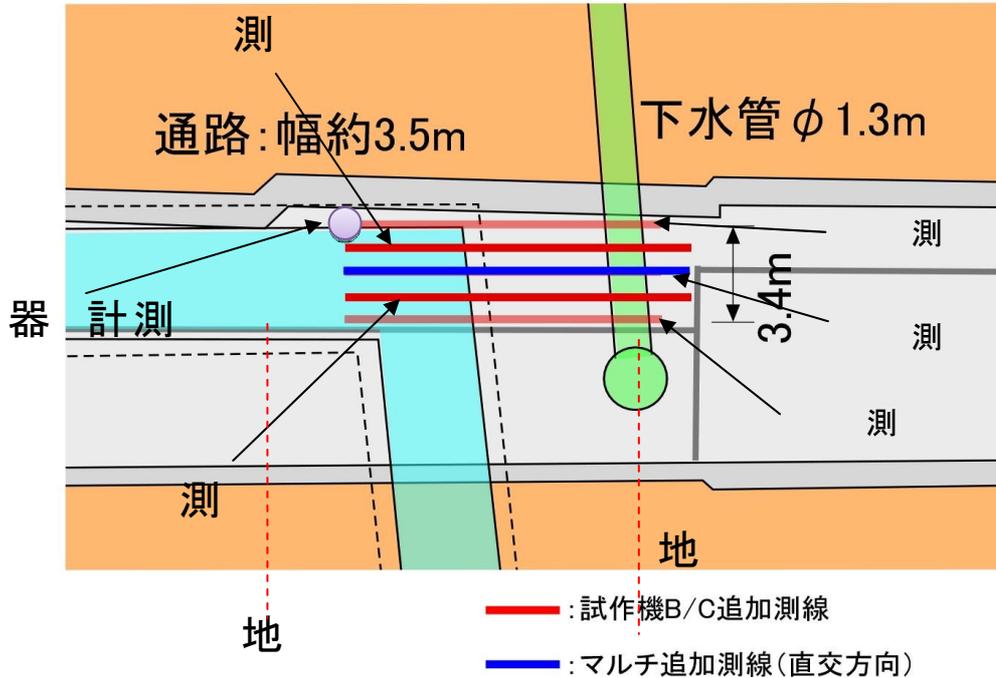


図 5.1-2 地下実験の測線配置平面図

地下計測の工程を表 5.1-1 に示す。計測期間は、試作器 B・C によるデータ取得は 7 月 7 日から 12 月 16 日、改良型マルチ計測器については 9 月 5 日から 12 月 7 日までである。ミュー粒子の時間変動を目的とした試作器 A による計測は、7 月 7 日から実施した（継続中）。試作器 A による実験については 6.2 節に示す。

実験の状況を写真 5.1-1 に示す。

表 5.1-1 計測工程表

	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	...	3 月
試作器 B・C 測線 4、5	7/7 ←					12/16 →		
試作器 A 測線 1 の X 地点	7/7 ←						-----	→
改良型マルチ計測器 測線 2			9/5 ←			12/7 →		

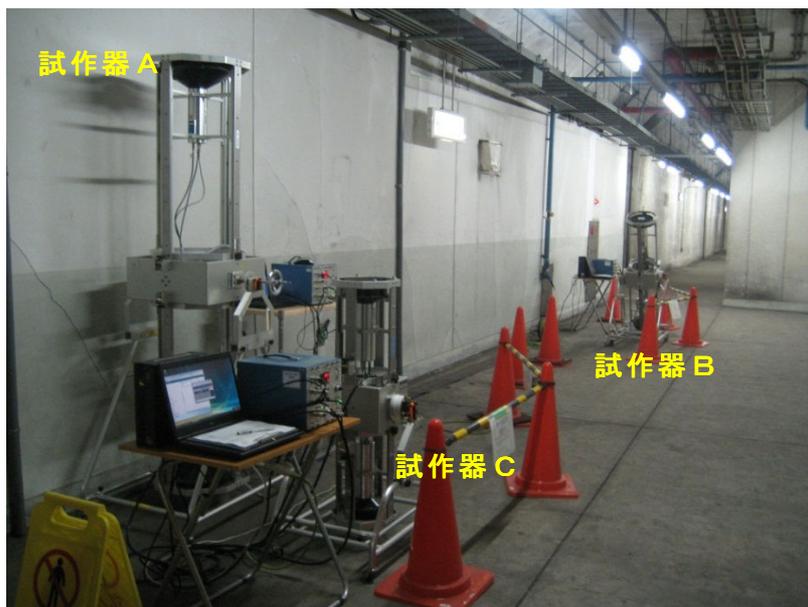


写真 5.1-1 実験状況

5.2 計測結果

試作器 B・C による No.5 測線の計測例を図 5.2-1 に、改良型マルチ計測器による No.2 測線直交方向の計測例を図 5.2-2 にそれぞれ示す。いずれも 4m ごとの天頂角分布である。

8m・12m 地点は通路のないところであり、見かけ密度 1.7g/cm^3 程度の値を示し、大きな密度の変化は認められない。0m・4m 地点は通路の真下であり、見かけ密度が 1.5g/cm^3 を下回る部分が認められ、これは通路の影響によるものと考えられる。

改良型マルチ計測器の 0m 地点地点では明らかな低密度が認められる。天頂角のプラス側では通路がその方向に屈曲し、延長しているため、天頂角分布の左右が非対称になっている。

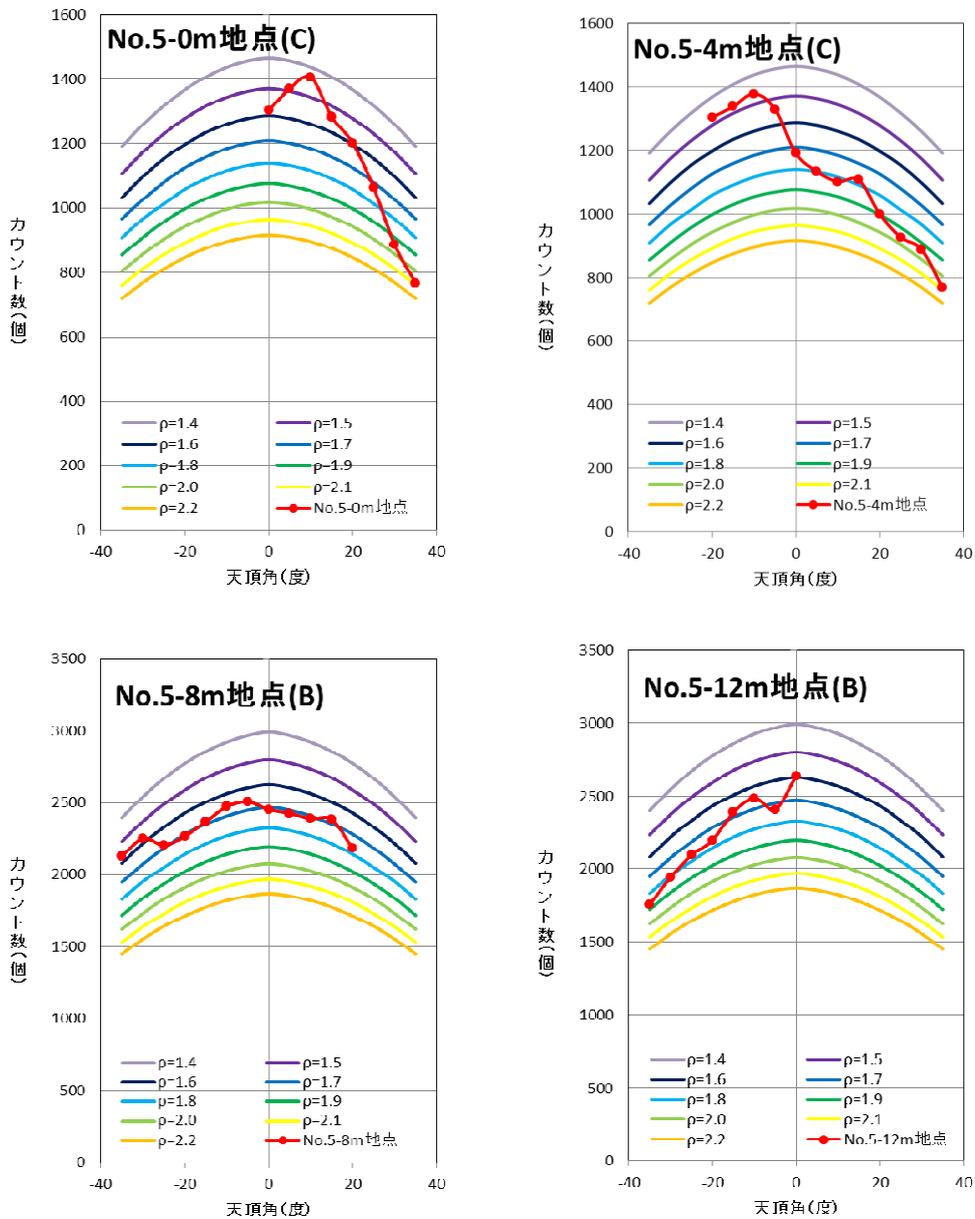


図 5.2-1 No.5 測線の計測例 (試作器 B・C)

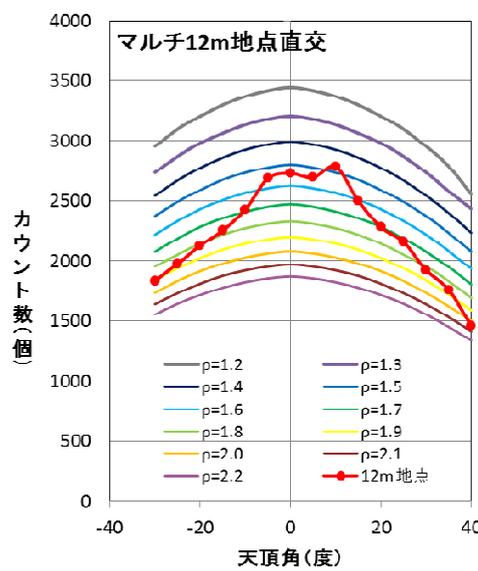
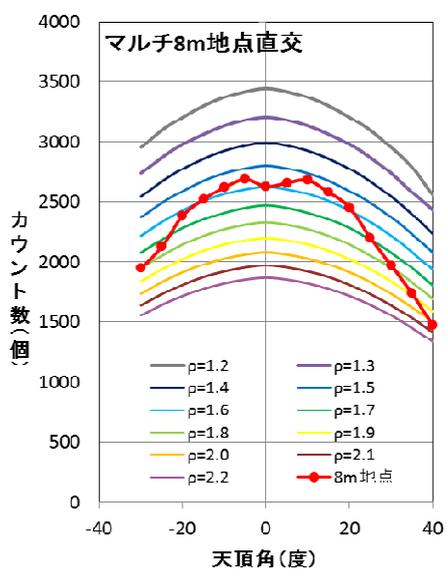
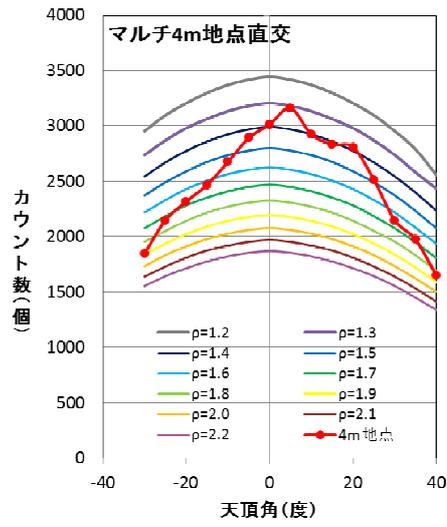
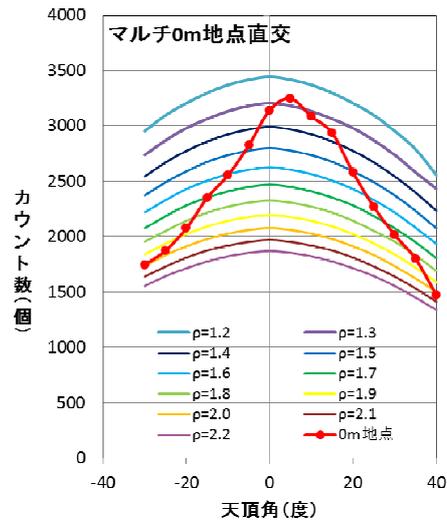


図 5.2-2 改良型マルチ計測器による計測例

図 5.2-3 に改良型マルチ計測器による見かけ密度マップを示す。見かけ密度は、面密度を土被りで割った値である。左には通路が見えている。通路は途中で折れ曲がっているように見えるが、建物の影になって途中で見えにくくなっている。同マップの右側には人孔による低密度が認められる。トモグラフィ解析を実施しなくても空洞の推定が可能性なことを示している。

これを検証するために理論計算を行った。図 5.2-4 に検証に用いた三次元モデルを示す。改良型マルチ計測器による計測は一定の立体角を持っているため、測定点の外側にも解析領域を設ける必要がある。この領域は縦断方向 35m、横断方向 25m である。

図 5.2-5 に理論計算の結果を示す。図 5.2-3 と同じカラースケールで示した。実測値と比較すると周囲の建物の影響は同じようには認められないものの、通路と人孔による低密度が実測値とほぼ同じ値で再構成されている。

参考のため計算値のカラースケールを変更したものを図 5.2-6 に示す。この表記では人孔だけでなく埋設管も確認できる。一方、図 5.2-7 には実測値を図 5.2-6 と同じカラースケールで示した。このデータだけでは埋設管のような細かい対象物は検出できていないが、人孔や通路などの大きな空洞は判定できる。なお、図 5.2-5 と図 5.2-6 は、5%のランダムノイズを付加している。

短時間で大きい空洞やゆるみ領域を把握する場合などはこのような横断方向の配置により、トモグラフィ解析を行わなくても空洞やゆるみの有無を判定できる可能性がある。また、このマップを用いることにより初期モデルがない場合でも、三次元トモグラフィ用の初期モデルを構築することができると考えられる。これについては 6.3 節で検討する。

図 5.2-8 は昨年度取得した No.2 測線の見かけ密度マップである。通路による低密度は認められるものの、直交方向の場合のように直接通路の形状を推定するような形にはなっていない。計測の方向が縦断方向であり、通路の影響が横断方向に比べて緩やかになっていると考えられる。実際にこのようなマップが得られることを確認するため、図 5.2-4 に示した数値モデルを用いて、図 5.2-8 の計測と同じ計測を行った場合の理論計算を行った。その結果を図 5.2-9 に示す。図 5.2-5、図 5.2-6 と同様に 5%のランダムノイズを付加している。絶対値は異なるが、ほぼ実測値に近いところに低密度があらわれている。このことから、通路はほぼ図面の位置にあると考えられる。

図 5.2-10 と図 5.2-11 は今年度取得した試作器 B・C による見かけ密度マップである。No.4 測線は、通路の屈曲位置から離れているため、通路の影響による低密度は明瞭ではない。No.5 測線は、通路の影響が明瞭に現れている。

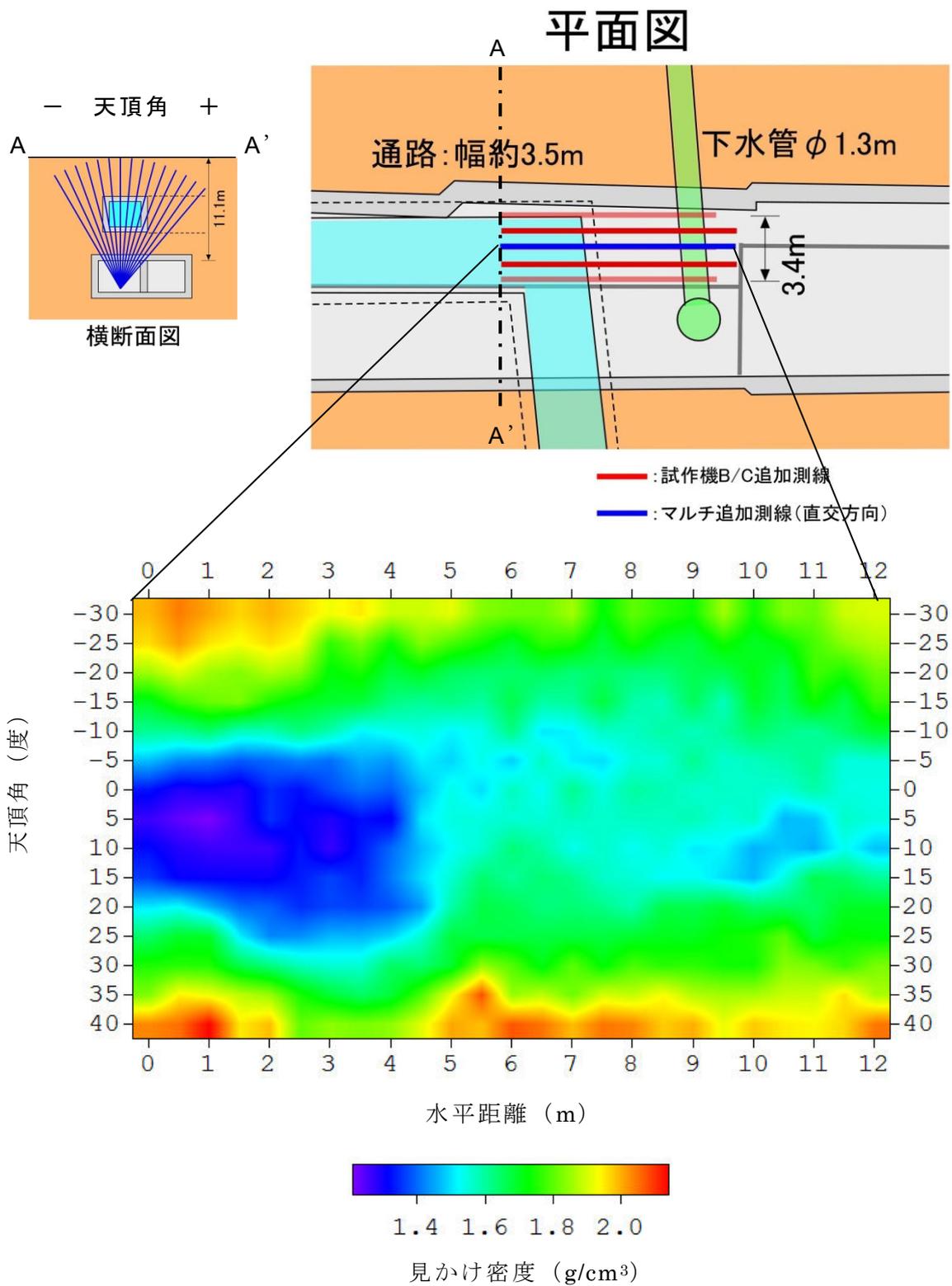


図 5.2-3 改良型マルチ計測器 No.2 測線直交方向見かけ密度マップ

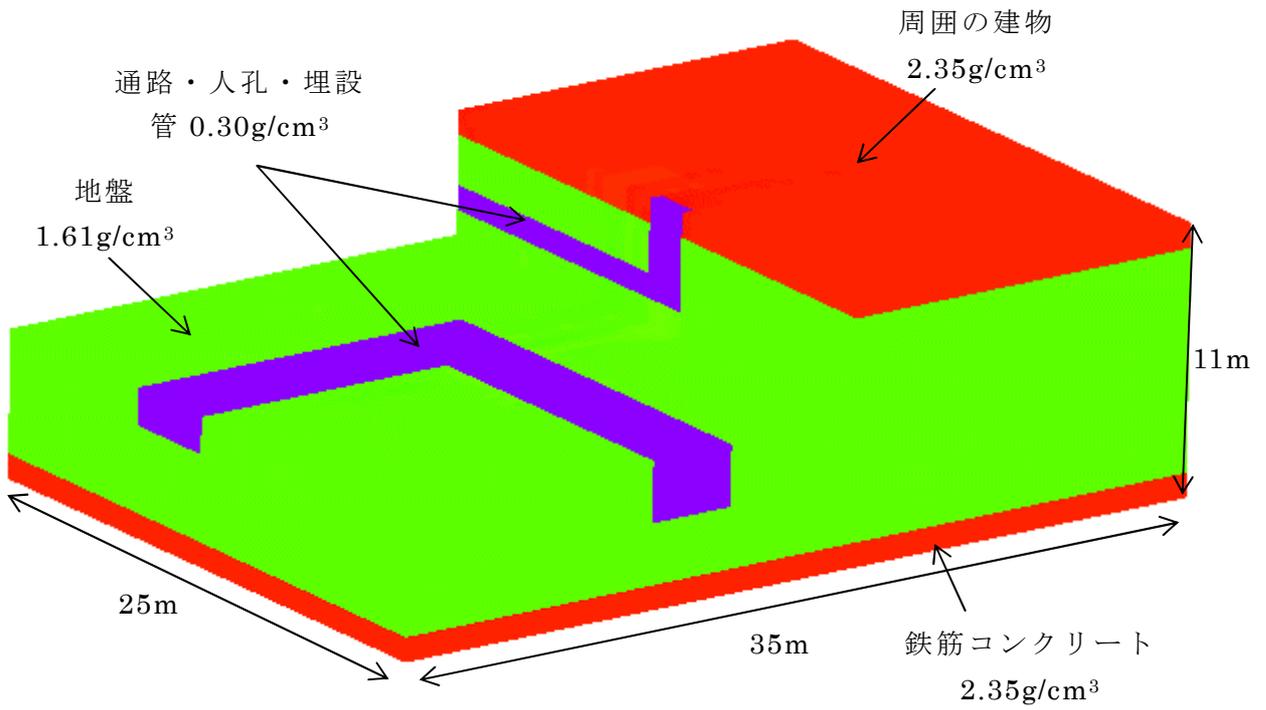


図 5.2-4 検証に用いた三次元モデル

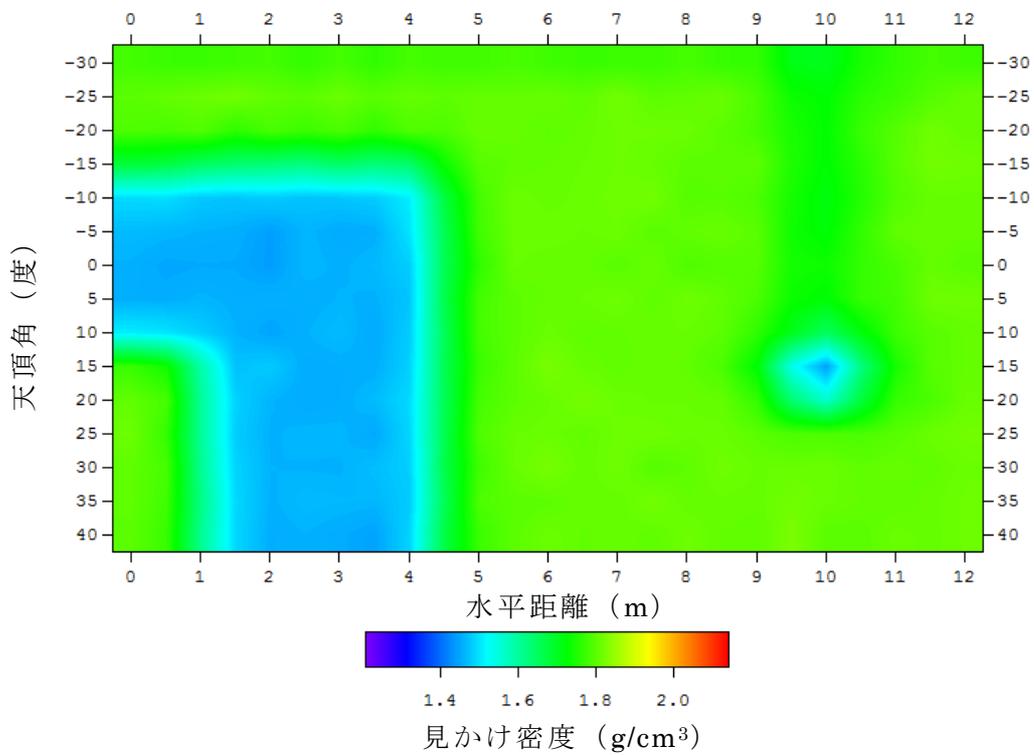


図 5.2-5 三次元モデルから計算される密度分布計算値

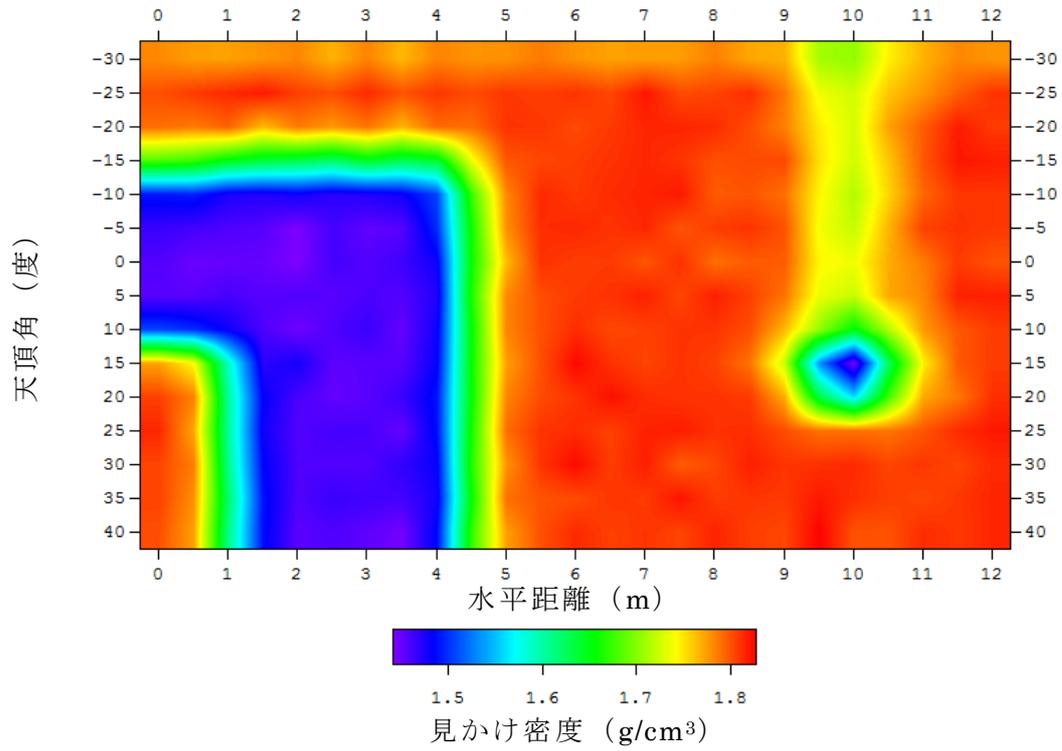


図 5.2-6 三次元モデルから計算される密度分布計算値 (カラースケール変更)

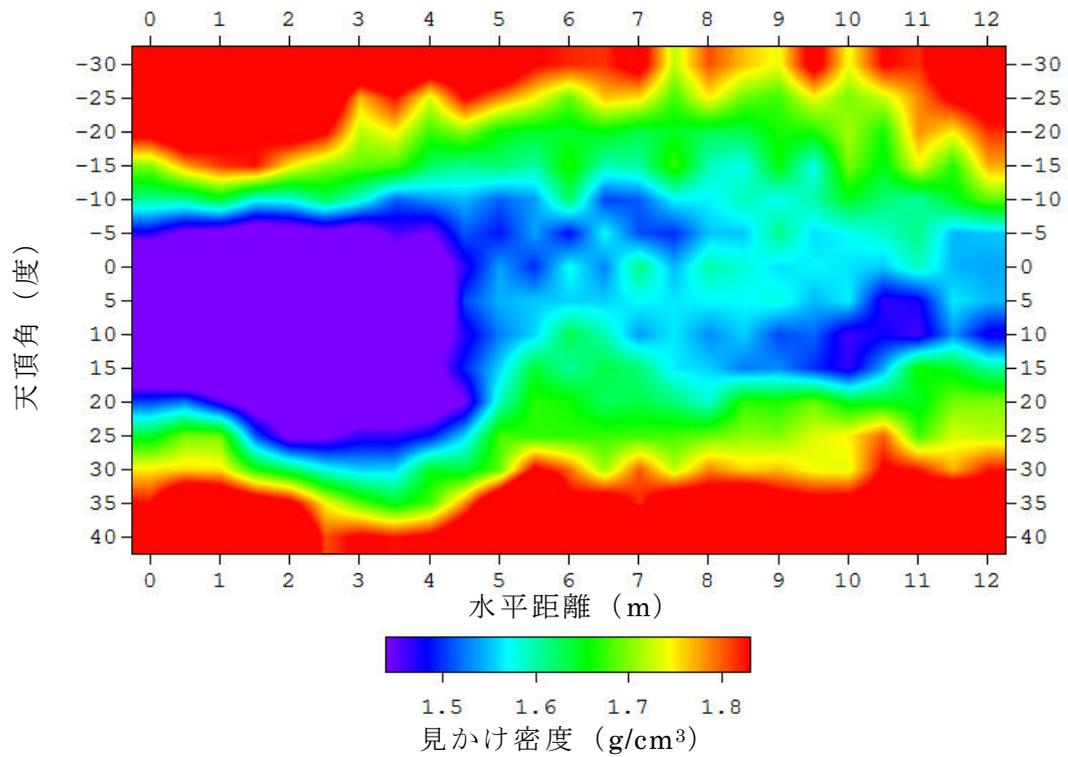


図 5.2-7 見かけ密度マップ実測値 (カラースケール変更)

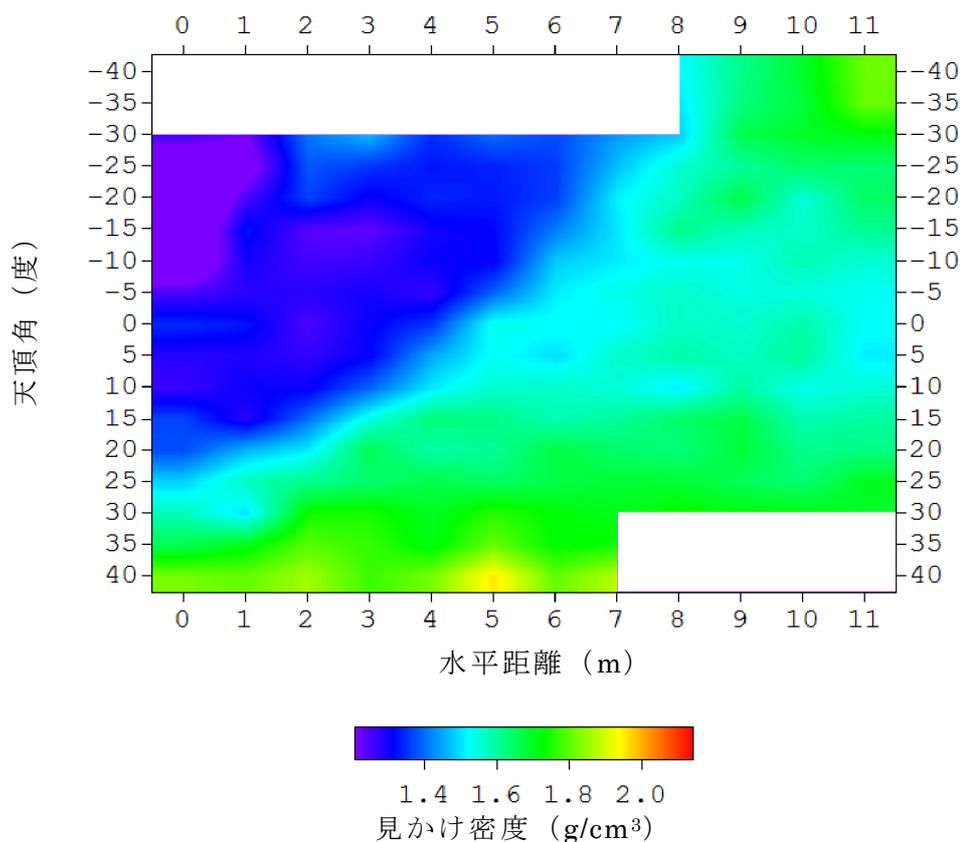


図 5.2-8 マルチ計測器 No.2 測線縦断方向見かけ密度マップ (平成 22 年度)

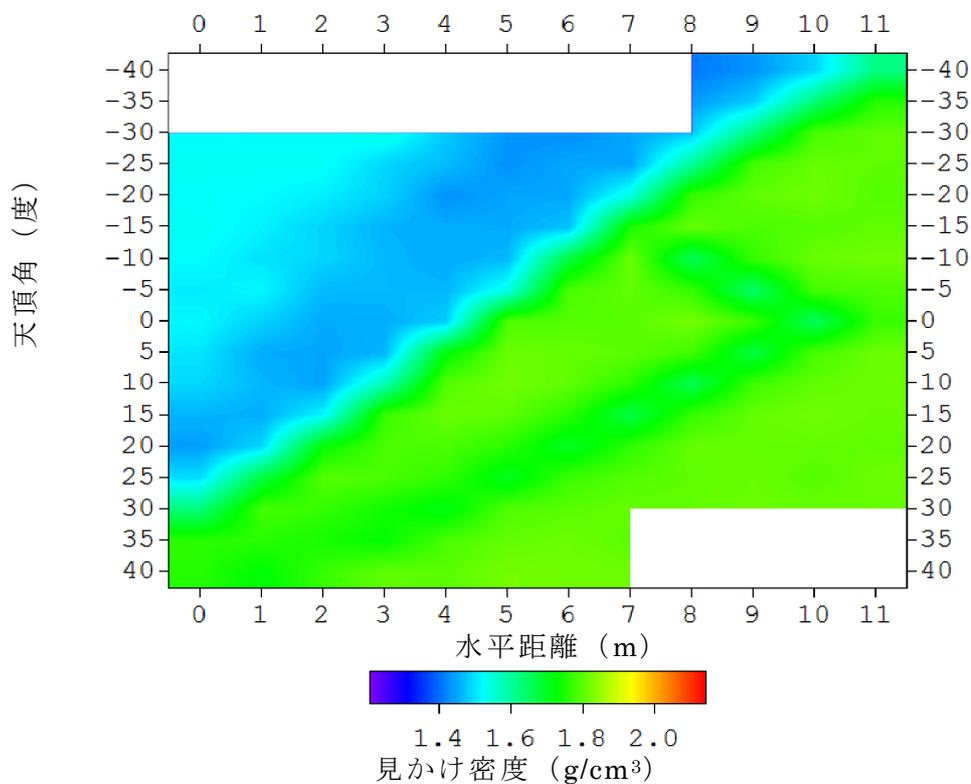


図 5.2-9 マルチ計測器 No.2 測線縦断方向見かけ密度マップ (理論計算)

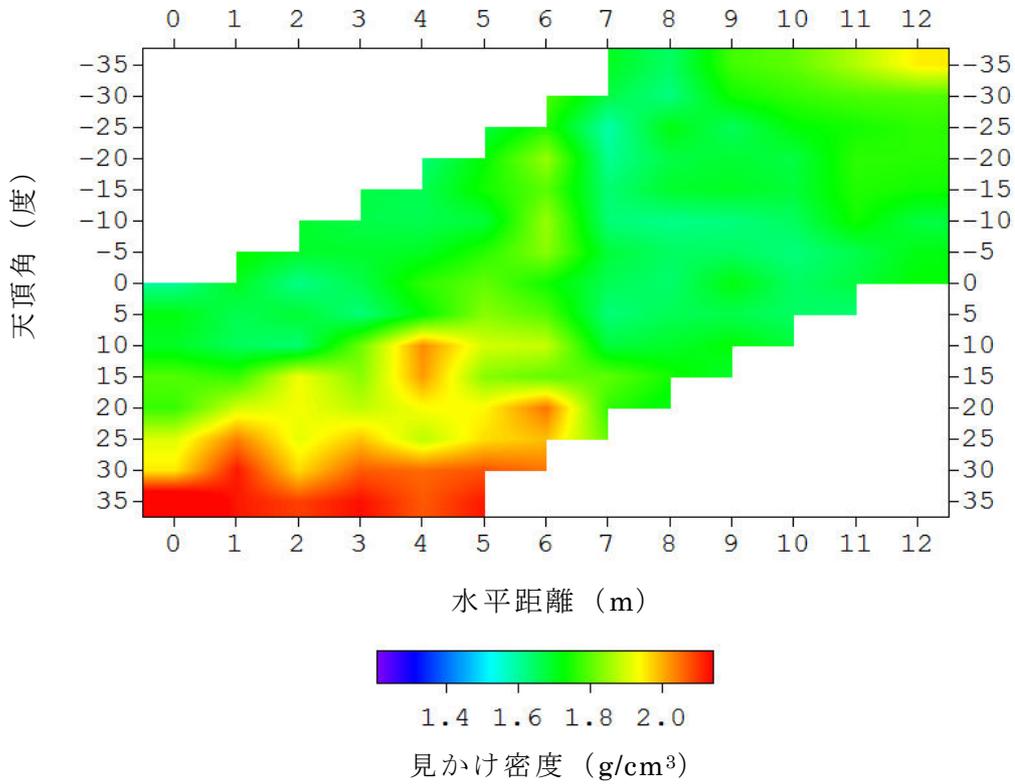


図 5.2-10 試作器 B · CNo. 4 測線縦断方向見かけ密度マップ

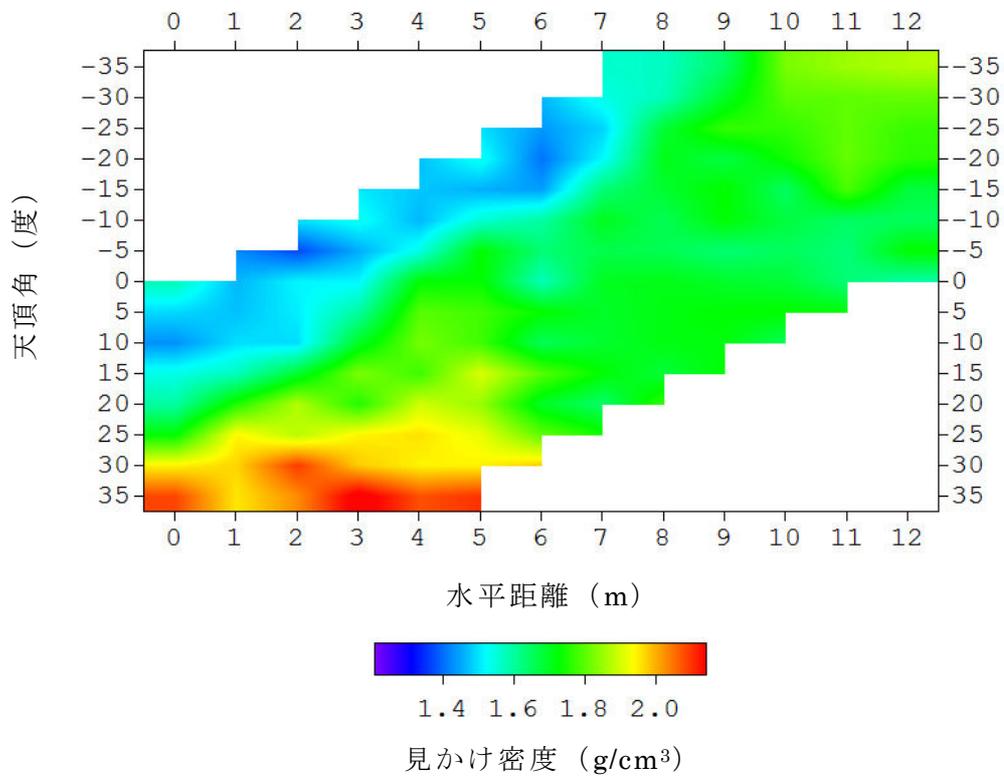


図 5.2-11 試作器 B · CNo. 5 測線縦断方向見かけ密度マップ

図 5.2-12 に三次元トモグラフィに使用した初期モデルを示す。通路と埋設管を空洞と考え、密度を 0.3g/cm^3 とした。地盤の密度は 1.81g/cm^3 とし、断面の上部と下部にはそれぞれ 2.35g/cm^3 を与えた。前者は、建物の影響を吸収するため、後者は鉄筋コンクリートを想定している。平成 22 年度は、この二次元断面が紙面に垂直方向に連続していると考えて三次元解析を実施した。

図 5.2-13 に平成 22 年度と平成 23 年度のデータによる三次元解析結果を並べて示す。両者とも通路と埋設管が再構成されている。しかし、地盤の密度には違いがある。平成 22 年度の場合の地盤密度に比べて、平成 23 年度の方が若干高くなっている。

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 5.2-14 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 $1.24\sim 2.44\text{g/cm}^3$ （平均値 1.612g/cm^3 、標準偏差 0.202、変動係数 12.5%）である。

平成 22 年度は地盤の密度が若干低めに現れているが、平成 23 年度の解析結果では、より現実的な値になっている。

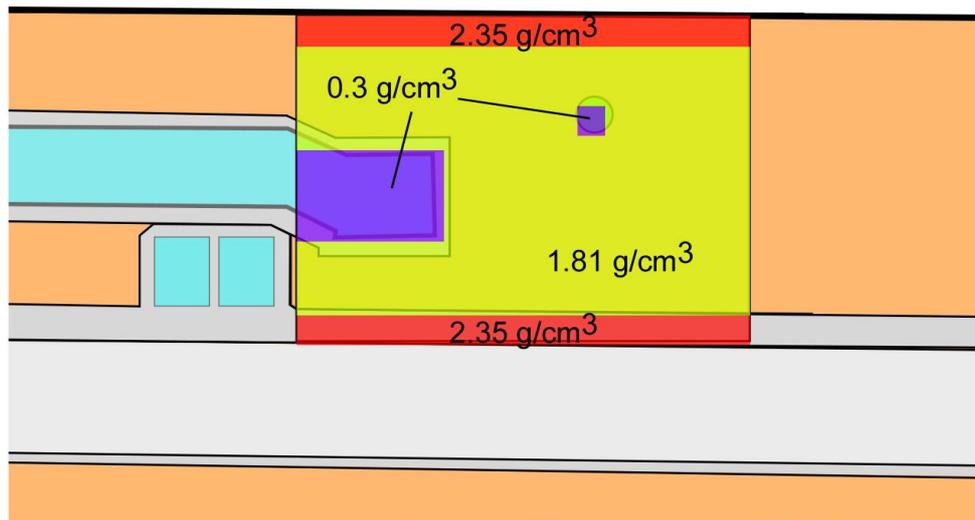


図 5.2-12 三次元トモグラフィに使用した初期モデル

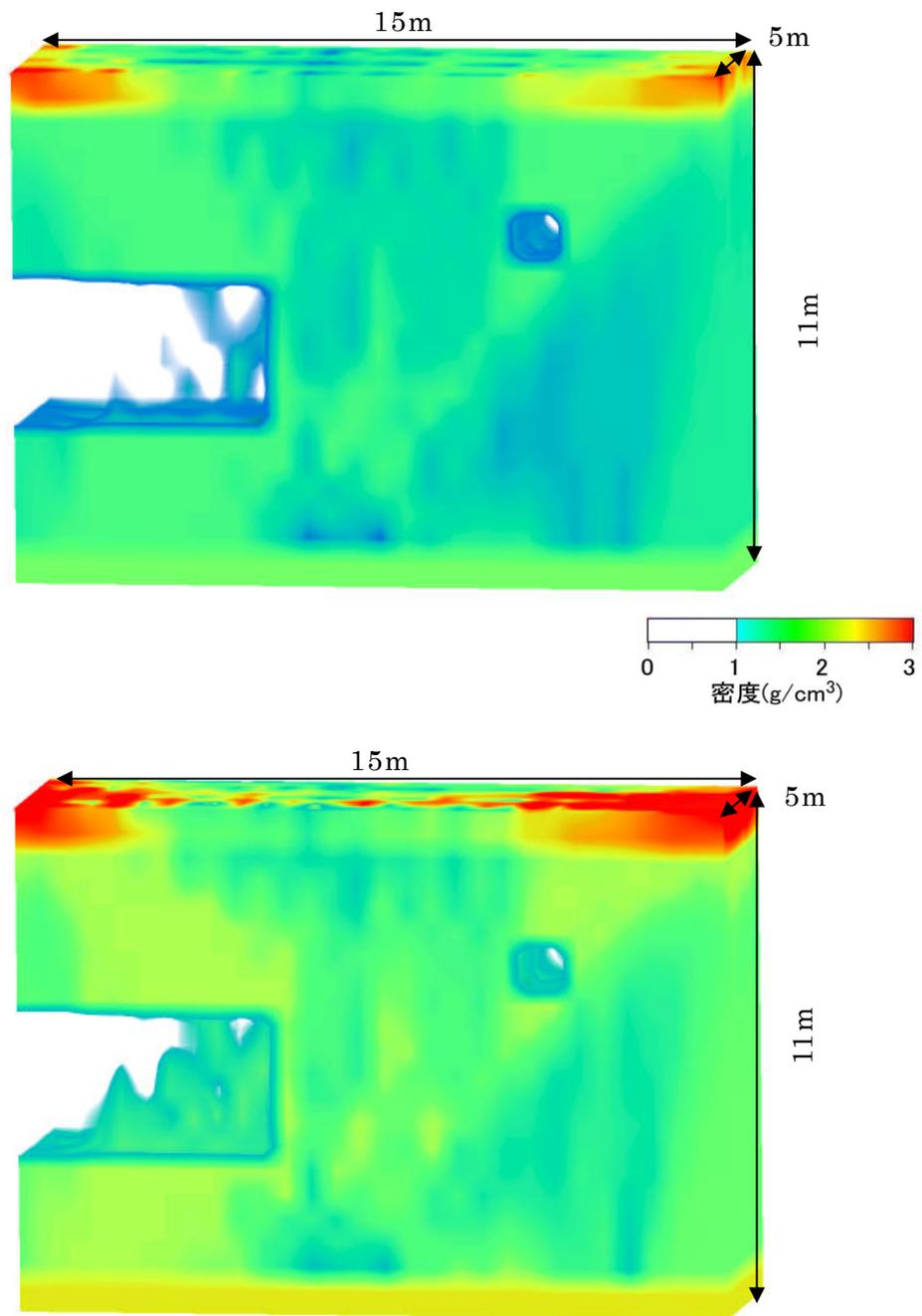


図 5.2-13 三次元トモグラフィ解析結果（上：平成 22 年度、下：平成 23 年度）

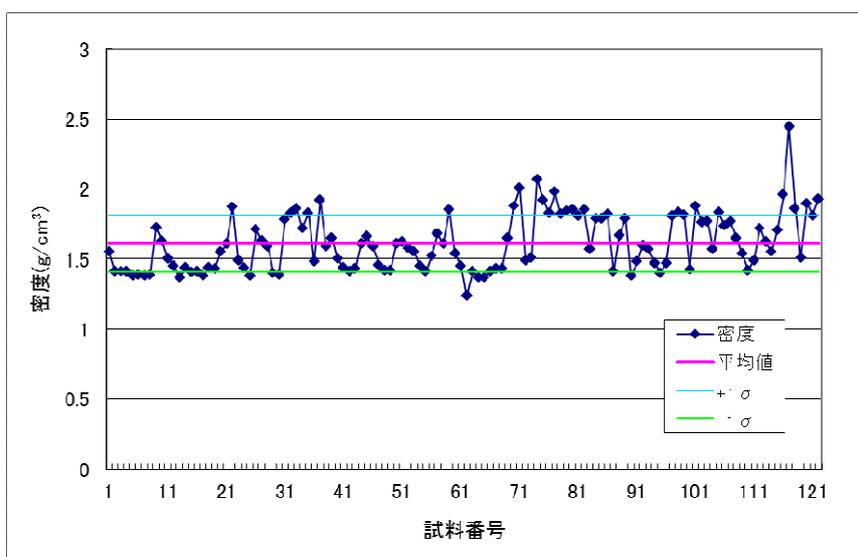


図 5.2-14 実験場付近の密度分布（東京都土木技術研究所，1977）

以上の解析結果は、解析領域を $15\text{m} \times 5\text{m} \times 11\text{m}$ とした場合であるが、平成 23 年度のデータは横断方向に展開した改良型マルチ計測器によるデータも取得している。そのため、横断方向に展開したデータのうち、天頂角の大きいデータは解析領域をはみ出してしまふ。この場合、天頂角の大きいデータは計算に使えなくなる。そこで、解析領域を広げて計算を行った。図 5.2-12 に示した断面を、縦断方向に延長し 35m とし、さらに紙面に垂直方向に 25m に拡大した。その結果を図 5.2-15 に示す。

図 5.2-13 と比較すると、建物の影響による地表付近の高密度範囲が狭まり、斜めの偽像などが低減されている。しかし、縦方向の幾何学模様が若干現れている。

図 5.2-16 は図 5.2-4 に示したモデルを初期モデルとして、三次元トモグラフィ解析を実施した結果である。図 5.2-15 に見られる縦縞状の偽像がほとんど見られない。また、通路の奥側の壁も再構成されている。初期モデルにできるだけ先見情報を入れることが、より良い解析結果を与えるが、解析領域を広げて天頂角の大きいデータも活用することでトモグラフィ解析の精度を向上させることができる。ただし、この場合は計算量が膨大になるため、解析に要する時間も増加するという欠点がある。

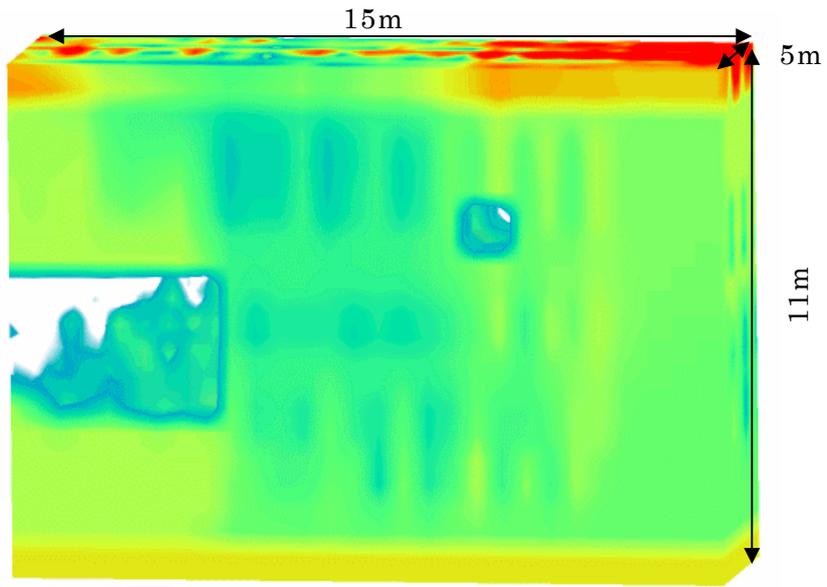


図 5.2-15 解析領域を拡大した三次元トモグラフィ解析結果

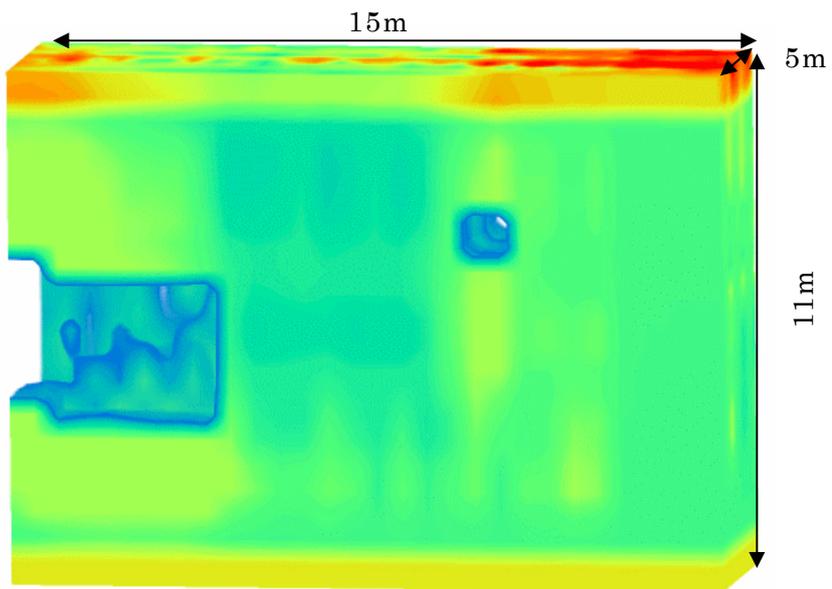


図 5.2-16 三次元構造を考慮し、解析領域を拡大した三次元トモグラフィ解析結果

第6章 解析精度向上のための実験的検討

6.1 マルチ計測器の計数効率

マルチ計測器の計数効率を把握するため、試作器 A・B・C と同様に空気中でデータを取得した。計測の状況を写真 6.1-1 に示す。



写真 6.1-1 空気中計測状況

マルチ計測器の空気中天頂角分布を図 6.1-1 に示す。近似曲線は、5つの検出器に共通する次式であらわされる。

$$C = 0.00258\theta^3 - 0.32576\theta^2 + 0.04116\theta + 839.6$$

個々の検出器のばらつきもほとんどないものと考えられる。この結果に基づき、湊(2009)の方法を用いて計数効率を検討する。図 6.1-2 に近似式と理論値を示す。理論値は試作器 B (口径 $\phi 24.5\text{cm}$) の計数効率を求めるときに使った値を用いた。電子の計数効率 k_e は、

$$k_e = \frac{C - k_\mu C_\mu}{C_e} \quad (6.1-1)$$

このとき、束縛条件として「天頂角 0° から 45° までの k_e を直線であてはめたとき、 90° で $k_e = 0$ になる」を用いて k_μ を選ぶが、ここでは k_μ は試作器 B と同じ値を用いた。すなわち、

$$k_\mu = 1.084$$

である。この理由は、第 5 章の実験で、試作器 B とほとんど同じ値が得られたことによる。この値を用いて k_e を求めた結果が図 6.1-3 である。このとき、 k_e は次式であらわされる。

$$k_e = 0.8865 - 0.00985\theta$$

試作器 B の場合は,

$$k_e^B = 0.8499 - 0.0099\theta$$

であった。マルチ計測器と試作器 B との電子成分の計数効率の違いは、表 6.1-1 に示すとおりである。天頂角 50 度までの両者の電子成分は 90%以上一致する（実際の計測において天頂角 50 度以上は行っていない）。電子成分の寄与はもともと少ないため、面密度を求めるための天頂角補正アルゴリズムの計算結果には、ほとんど影響を与えないものと考えられる。この結果からマルチ計測器の計数効率は試作器 B と全く同じであることが示された。

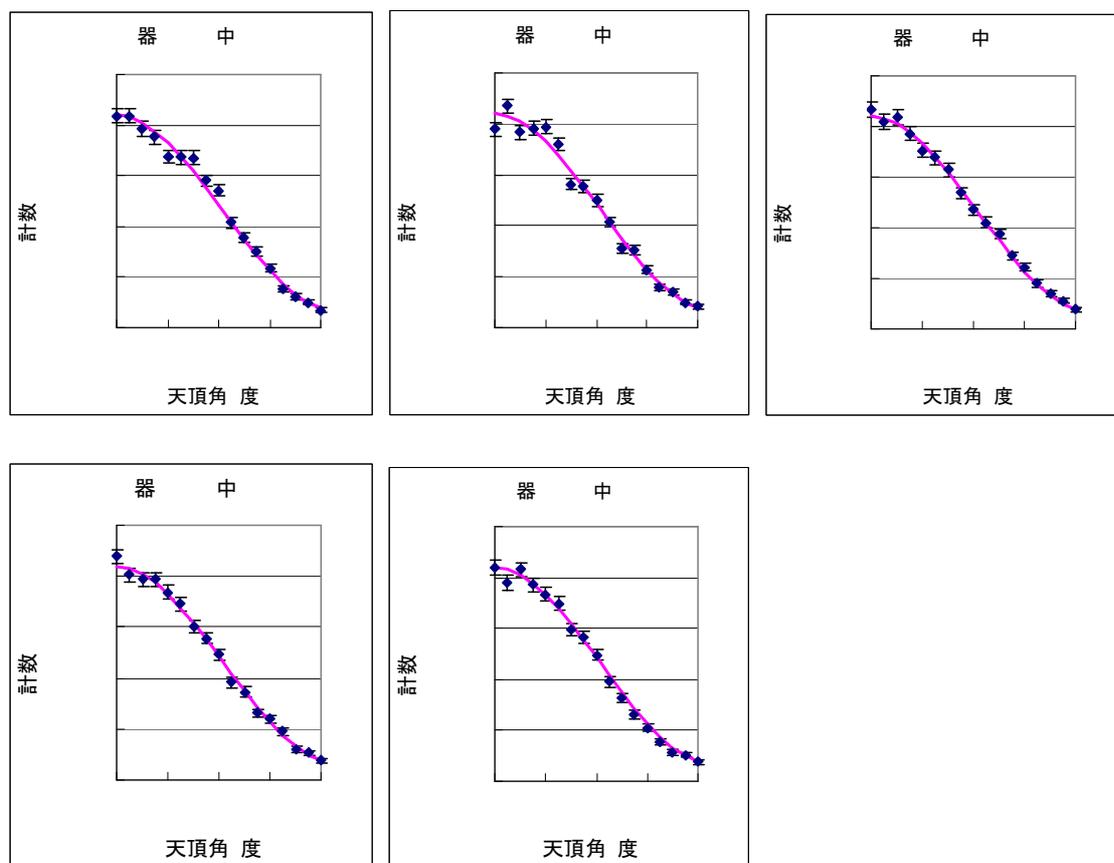


図 6.1-1 各検出器の空气中角度分布および近似式

6.2 ミュー粒子の長期変動が解析結果に与える影響について

昨年度までの調査研究ならびに F/S により、ミュー粒子の計測精度が確認できた。しかし、本年度の調査研究により、ミュー粒子の時間変動があることが判明した。ミュー粒子の時間変動を把握することにより、さらに精度の高い計測が可能と考えられる。

ミュー粒子の時間変動については、地表面あるいは宇宙空間などを対象とした場合のデータは、文献などで公表されている。しかし、地下のミュー粒子の変動については、データがほとんどない。そこで、試作器 A を用いて、一地点での地下のミュー粒子時間変動を長期間にわたって計測し、その変動を把握し、計測精度への影響を検討した。計測位置については図 5.1-2 に既に示した。

ミュー粒子の誤差や変動の原因には大きく分けると 4 つの原因がある。第一に計数誤差であり、これは既に平成 20 年度に検討をしている。第二は太陽磁場強度（太陽の活動に伴う地球磁場の変動、Sato *et al.*, 2008）によるものである。第三は大気の変化（気圧と気温）による効果である。小田(1982)によれば、気圧が増加すると大気密度が増加するのと同じ効果がある。密度が増加すれば、ミュー粒子の数は減少する。一方、大気圧が一定の場合、気温が上昇すると大気は膨張し、同じ密度であっても、透過距離が延長する。そのため、ミュー粒子は減少する。ただし、これらは比較的エネルギーの低いミュー粒子の場合であり、地下では高エネルギーのミュー粒子もある。この場合は、大気圧や気温とは正の相関を示すことがある。ミュー粒子の時間変動は気圧や気温と関係していると考えられるが、実際には複雑な挙動を示すと考えられる。第四の変動要因は、計測機器の温度効果である。一般的には $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$ の変動があるといわれている（田中、2012）。

これらの変動を把握することは、計測が長期間にわたる場合、あるいは長期モニタリングによる地盤の健全性を検討する場合に重要と考えられる。本調査研究では、試作器 A を用いて、トモグラフィデータを取得した場所で長期の計測を行うこととした。測定位置は、図 5.1-2 に示したように No.1 測線（平成 22 年度実施）の 0m 地点である。天頂角を 0 度に設定し、移動させずかつ天頂角を変えることなく、1 回 12 時間の計測を連続して行った。

試作器 A による全方位、同時計数の定点計測結果を図 6.2-1、図 6.2-2 にそれぞれ示す。7 月 7 日から 2 月 6 日までを示している。1 回の計測時間は 12 時間であり、全部で 294 回分のデータである。両者とも計数誤差である 2σ を大きく超えているところがある。全体としてみるとこの変動は $\pm 4\sim 5\%$ の変化である。現在の計測方法では、計数誤差（変動係数）は 3%程度以下であるため、この変動は無視できない量である。長期間の計測、特に長期モニタリングを想定した場合、これを補正する必要がある。

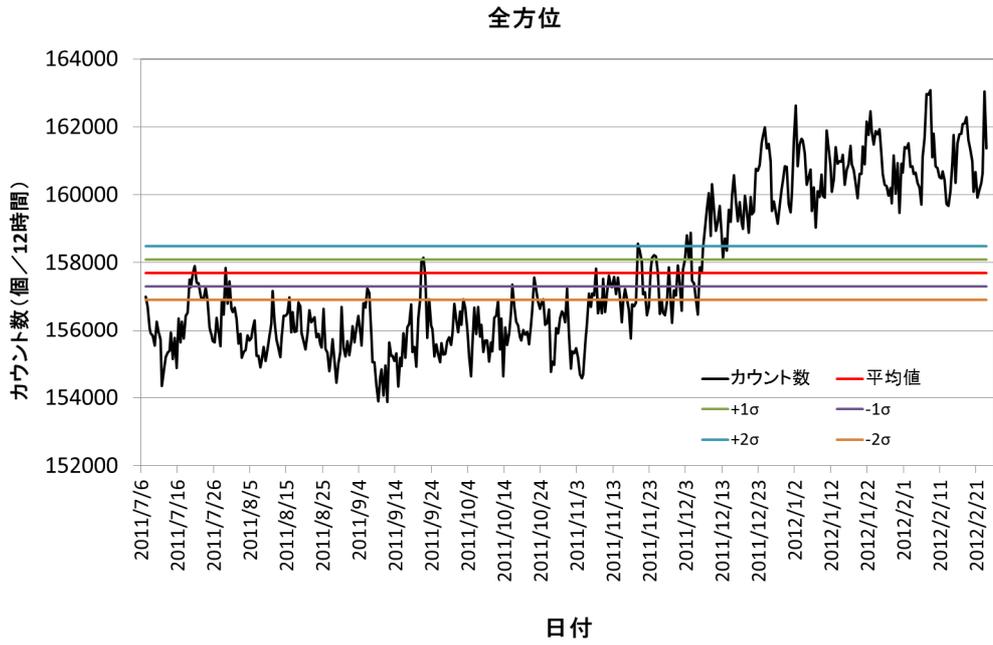


図 6.2-1 全方位時系列データ

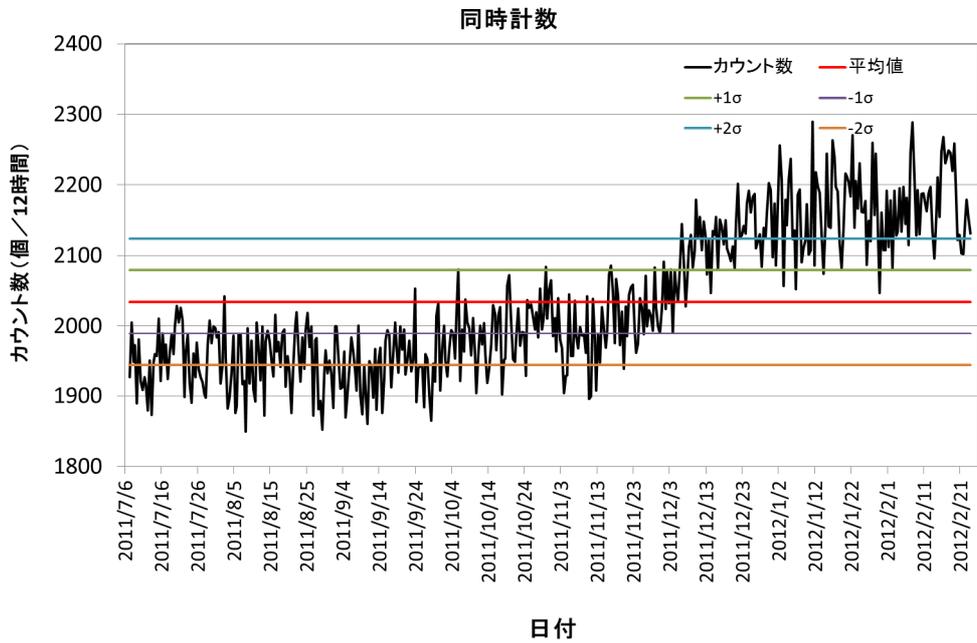


図 6.2-2 同時計数時系列データ

この変動は以下に示す要因によって生じると考えられている。

- ① 気圧
- ② 気温（正確には気温の鉛直分布）
- ③ 太陽磁場強度

この他にランダムな変動要因として計数誤差、系統的な変動として計測機器の温度特性が上げられる。ここでは、気圧・気温・太陽磁場強度について検討する。

気圧および気温と比較するために、ミュー粒子の12時間あたりのカウント数を1日あたりのカウント率に換算するために図6.2-3に示す方法を用いた。計測は、午前9時と午後9時の毎正時にデータを収録するため、1日あたりに換算するときにはデータは3回にわたることになる。そのため午前0時から午前9時までの値、午前9時から午後9時までの値、午後9時から午前12時までの値を3つのデータから比例配分して1日あたりのカウント率とした。

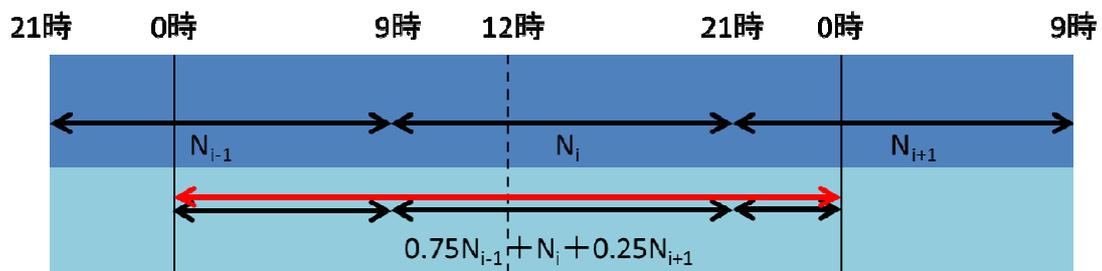


図 6.2-3 時系列データの1日あたりのカウント率への換算

図 6.2-4 は、全方位データを 24 時間にした上、午前 0 時から計測を開始したように比例配分した値と、1 日の大気圧の平均値である。大気圧の平均値は、気象庁の HP から東京観測点の値を用いた。

図 6.2-5 は大気圧に対するカウント率（1 日あたり）である。明瞭な相関関係は認められない。

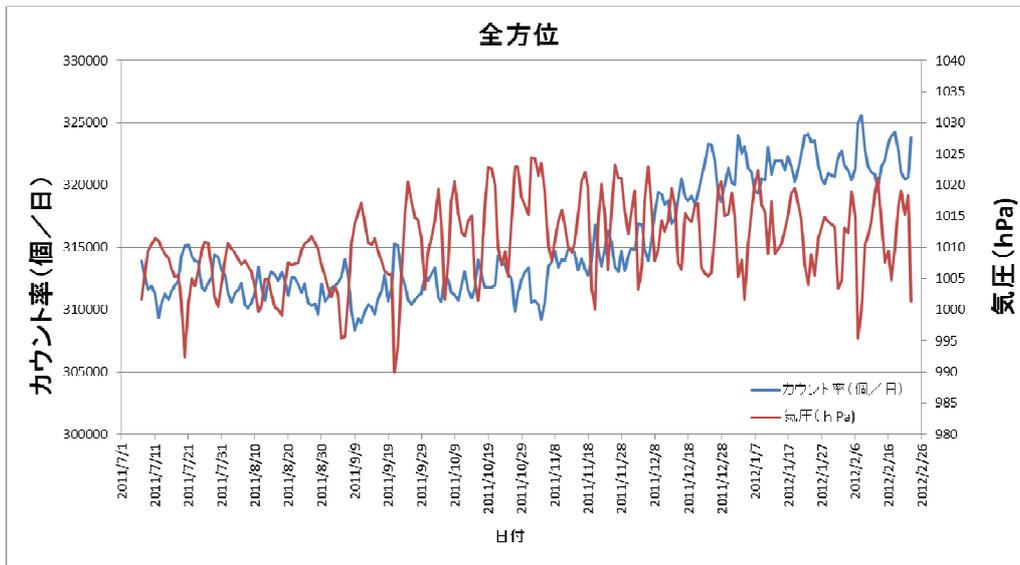


図 6.2-4 全方位カウント率と 1 日の平均気圧

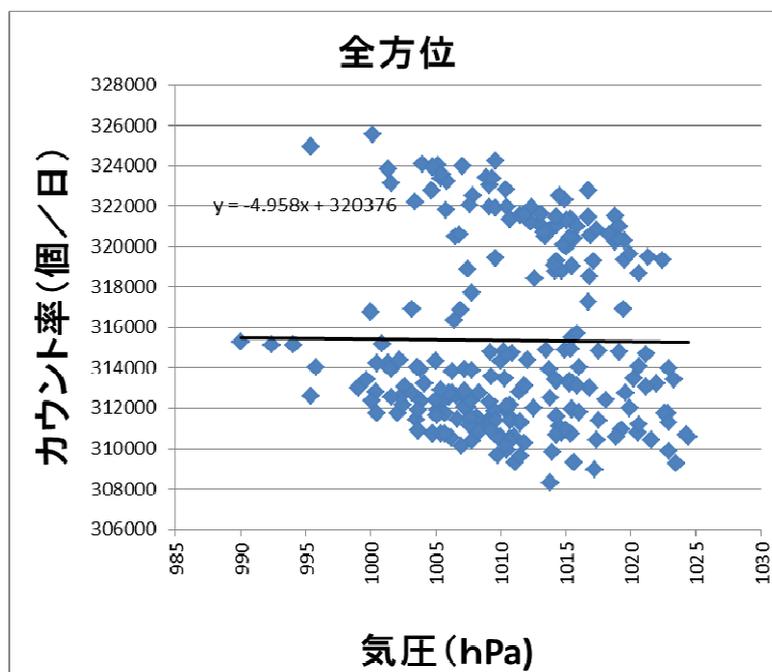


図 6.2-5 全方位カウント率－気圧

図 6.2-6 は、同様に時刻補正した同時係数のカウント率、図 6.2-7 は大気圧に対する同時係数カウント率（1日あたり）であり、弱い正の相関を示す。

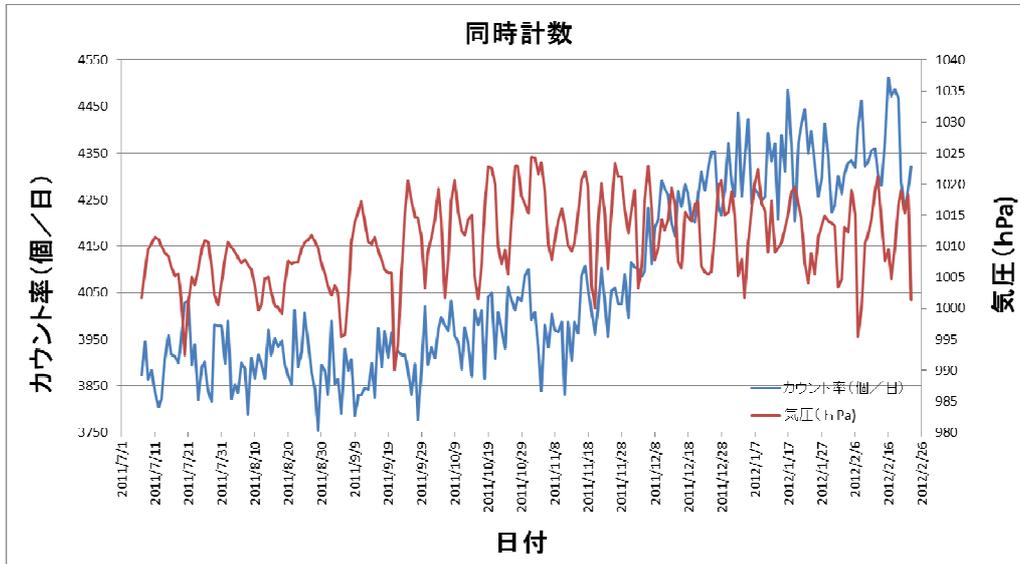


図 6.2-6 同時計数カウント率と1日の平均気圧

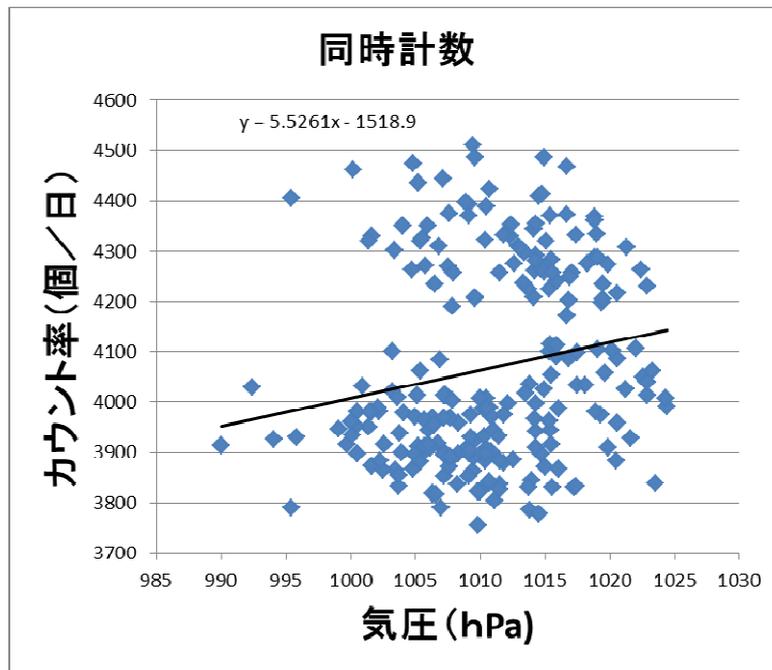


図 6.2-7 同時計数－気圧

図 6.2-8 は全方位カウント率と 1 日の平均気温、図 6.2-9 は平均気温との相関関係である。明瞭な逆相関が認められる。

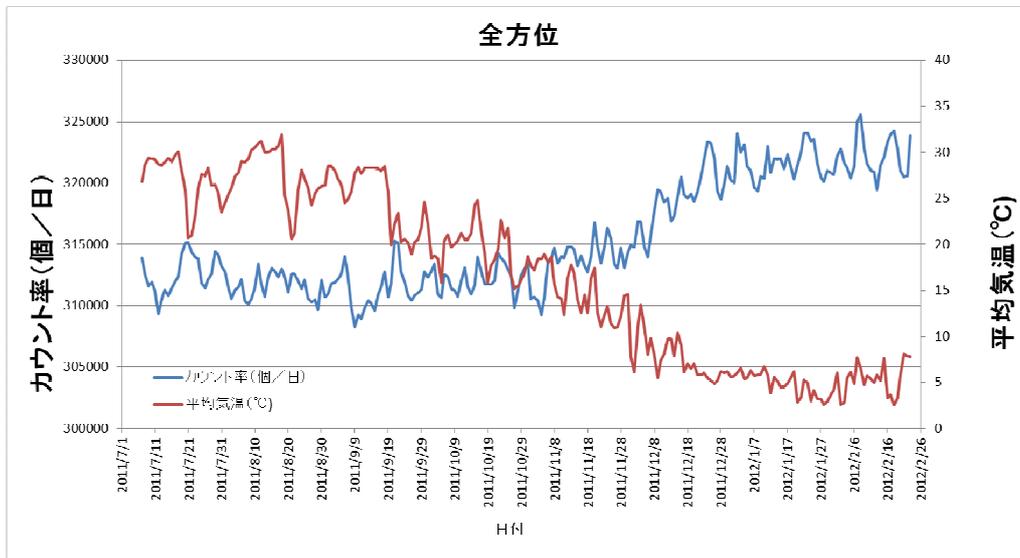


図 6.2-8 全方位カウント率と 1 日の平均気温

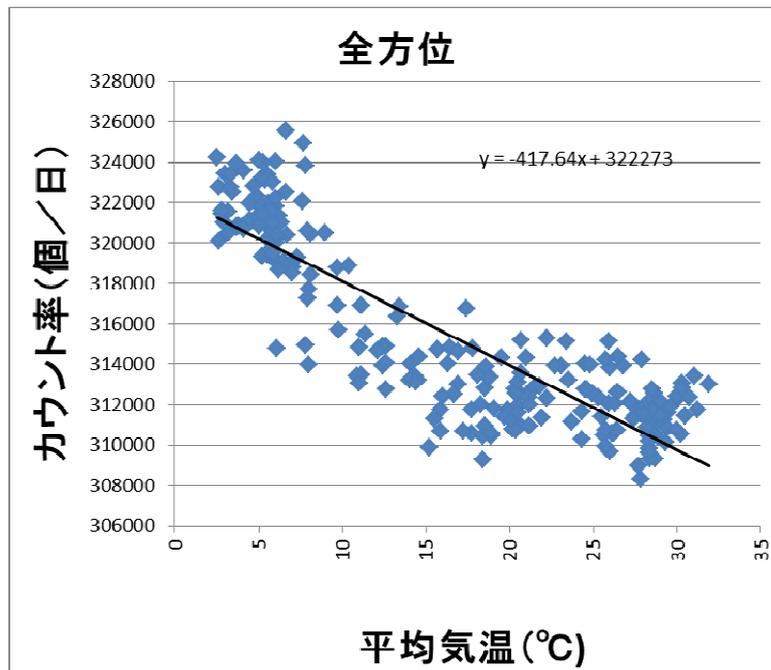


図 6.2-9 全方位カウント率－平均気温

図 6.2-10 は同時計数カウント率と 1 日の平均気温のグラフである。全方位の場合と同じような結果になっている。図 6.2-11 は同時計数カウント率と平均気温との相関関係である。同時計数と同様に逆相関になっている。

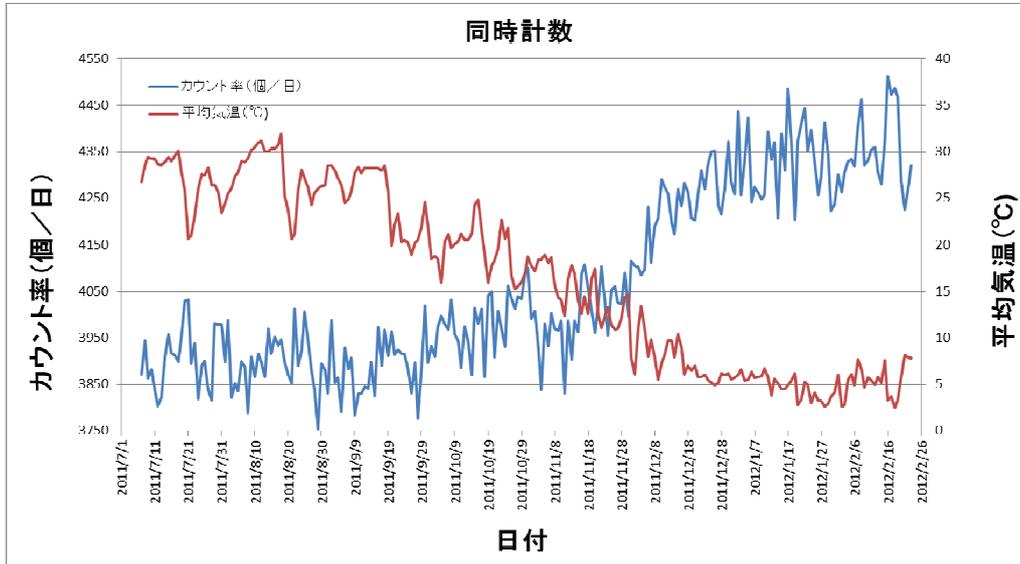


図 6.2-10 同時計数カウント率と 1 日の平均気温

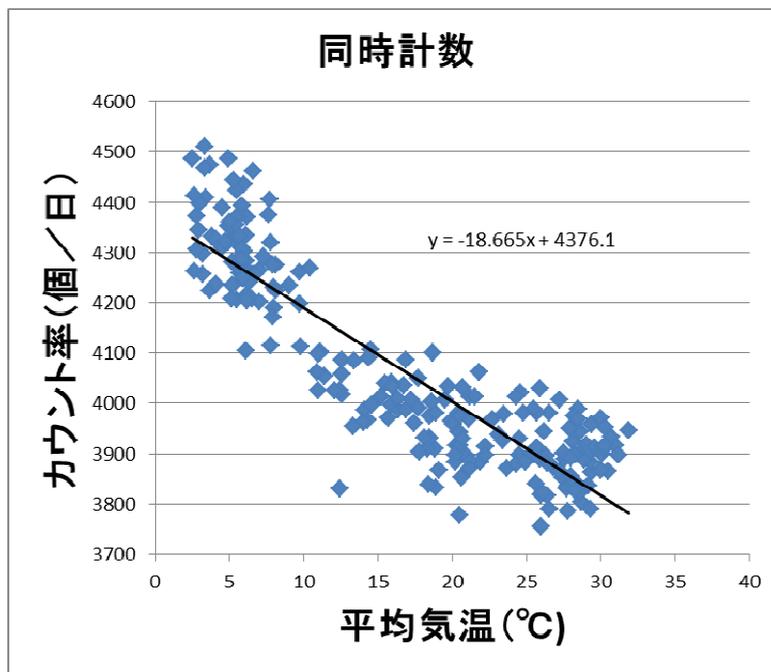


図 6.2-11 同時計数カウント率－平均気温

図 6.2-12 は全方位カウント率と太陽磁場強度、図 6.2-13 は太陽磁場強度との相関関係である。弱い逆相関が認められる（太陽磁場強度のデータは、中性子モニターのデータから計算したもので、放射線地学研究所の提供による）。

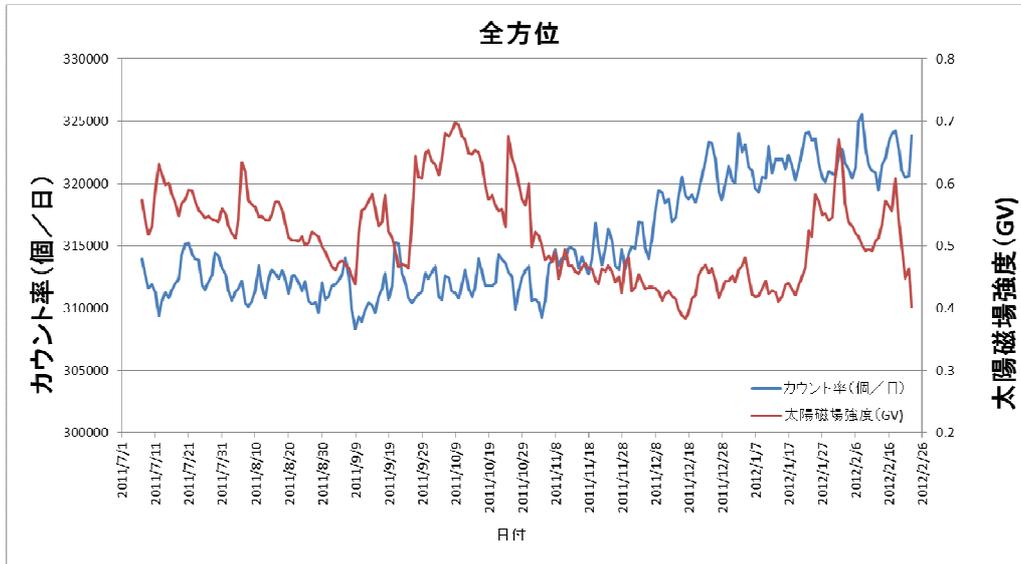


図 6.2-12 全方位カウント率と太陽磁場強度

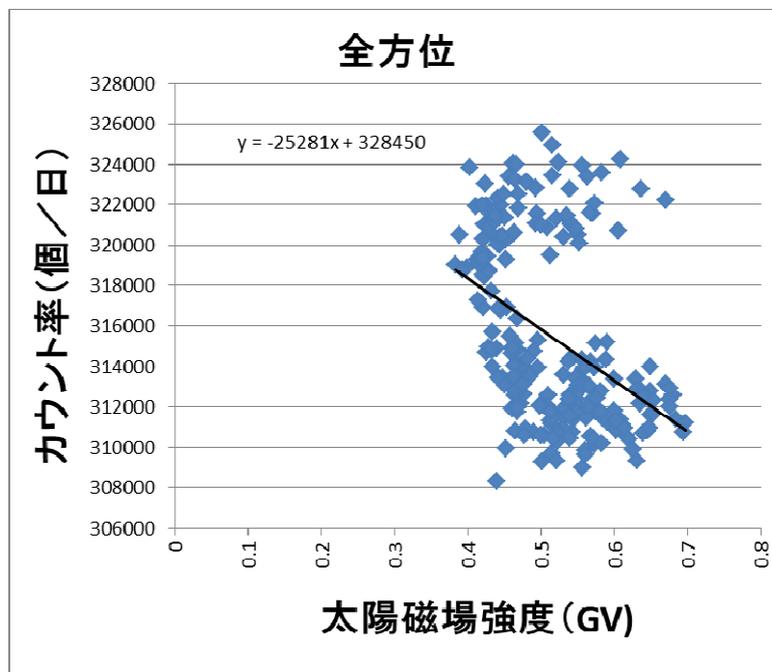


図 6.2-13 全方位カウント率－太陽磁場強度

図 6.2-14 は同時計数カウント率と太陽磁場強度、図 6.2-15 は太陽磁場強度との相関関係である。弱い逆相関が認められる。

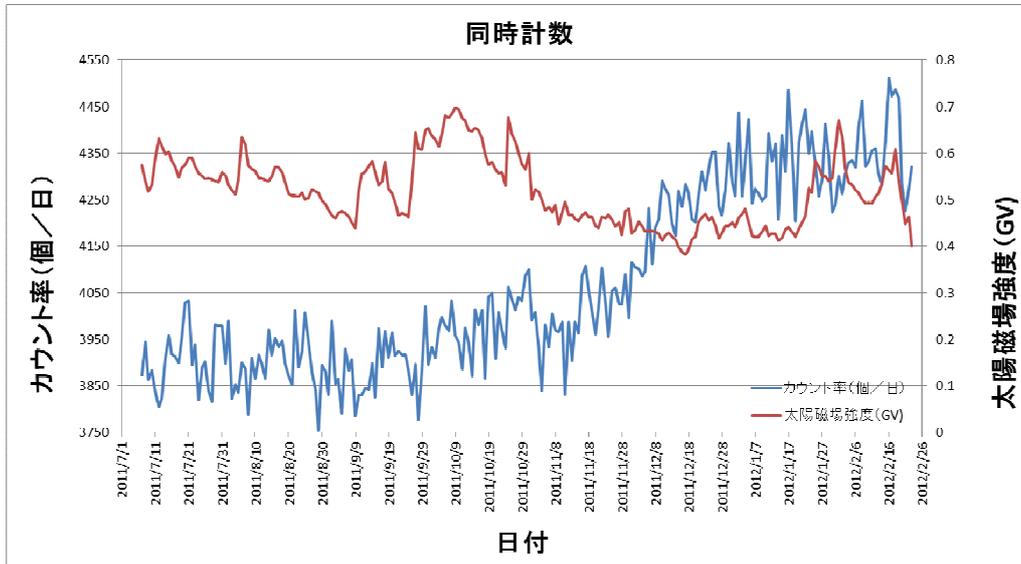


図 6.2-14 同時計数カウント率と太陽磁場強度

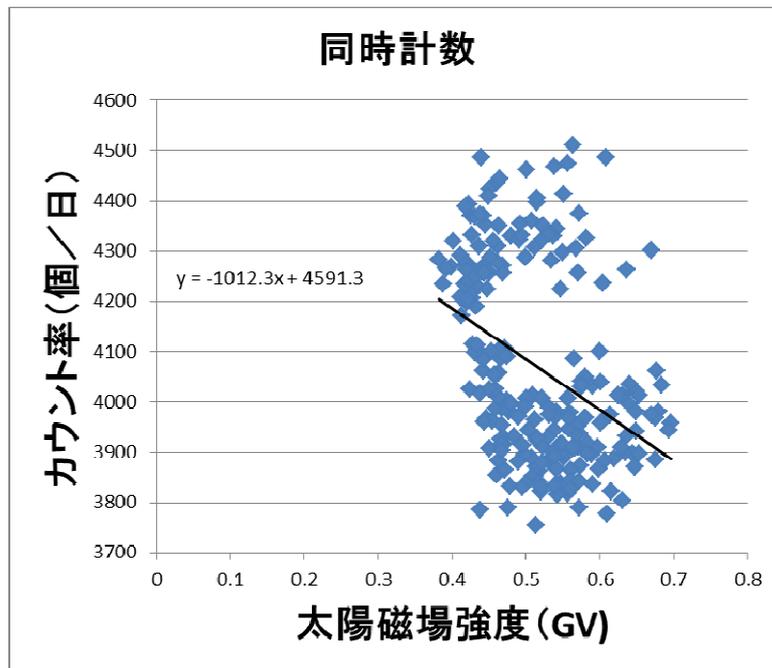


図 6.2-15 同時計数カウント率－太陽磁場強度

全方位の計測値に対して、気圧 P と気温 T および太陽磁場強度 R の 3 つのパラメータを用いて重回帰分析を行った。その結果、次式を得た。 C_{omni} は全方位の計数率 (個/日) である。

$$C_{omni} = 611043.2 - 283.884P - 494.723T - 1022.64R \quad (6.2-1)$$

計測値に対して(6.2-1)式を用いて計算した値を図 6.2-16 に示す。図 6.2-17 には重回帰式の値と計測値とのクロスプロットを示す。 R^2 値は 0.895 であり、整合性は良い。

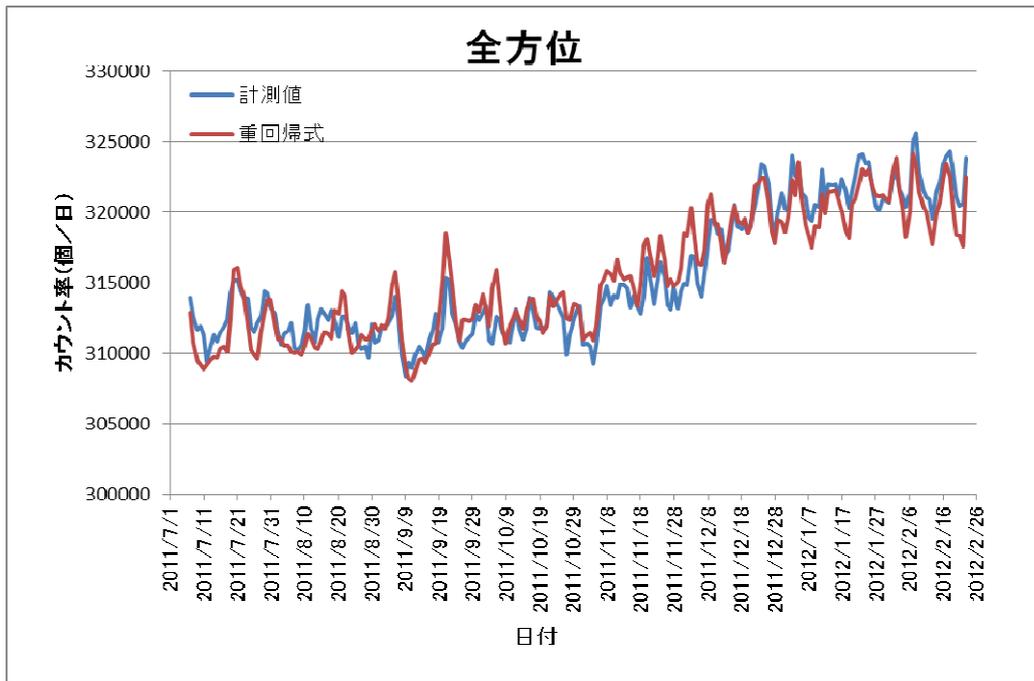


図 6.2-16 全方位計測値と重回帰分析との比較

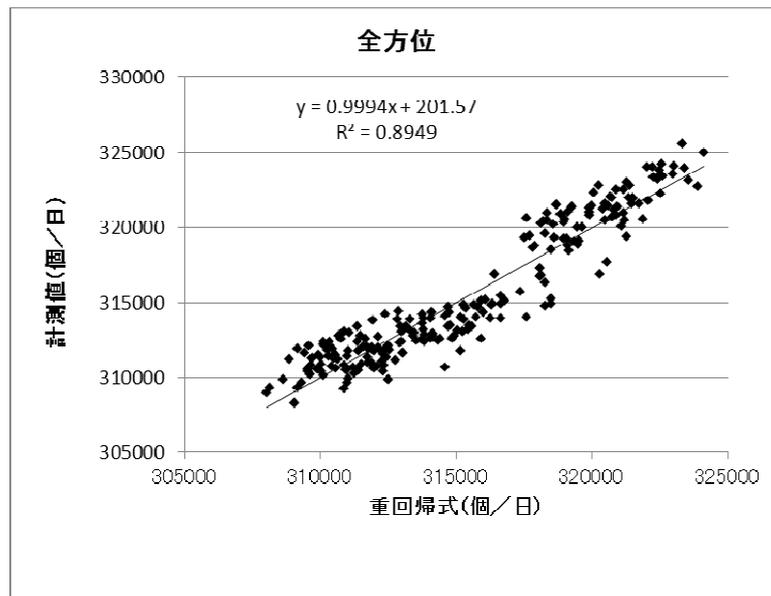


図 6.2-17 全方位計測値と重回帰分析とのクロスプロット

同様に、同時計数 C_{coin} についても重回帰分析を行い、次式を得た。

$$C_{\text{coin}} = 10368.6 - 5.94414P - 20.6648T + 95.73349R \quad (6.2-2)$$

全方位と同じように、図 6.2-18 と図 6.2-19 に 2 つのグラフを示す。 R^2 値は 0.83 である。

今後、さらにデータを収集して回帰式の精度を向上させることで、気象によるミュー粒子の変動を補正できる可能性がある。

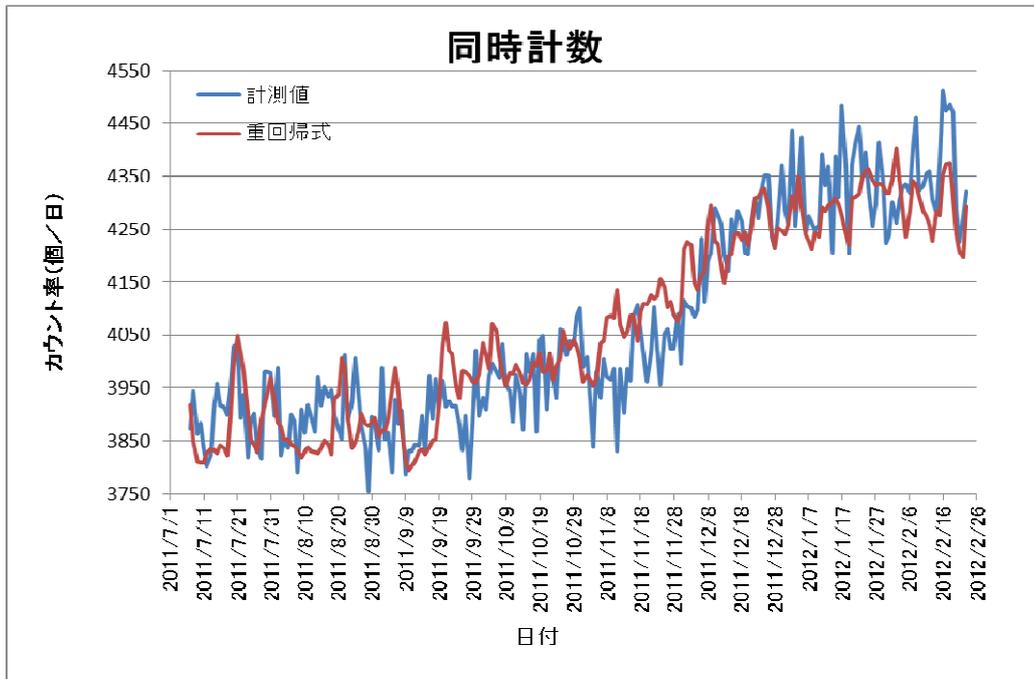


図 6.2-18 同時計数計測値と重回帰分析との比較

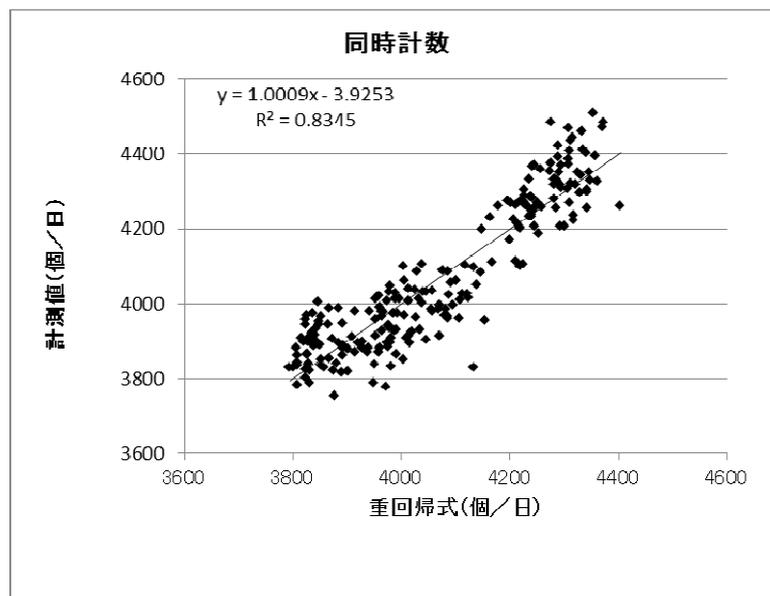


図 6.2-19 同時計数計測値と重回帰分析とのクロスプロット

補正方法としては例えば次のような手順を考える。全方位計数値は計数誤差が小さいため、ここでは全方位の重回帰式を用いることにする。

- ① (6.2-1)式で示したように、重回帰式から気圧 P ・気温 T ・太陽磁場強度 R の係数を求める。
- ② 基準値として $P=1,013(\text{hPa})$ 、 $T=20(^{\circ}\text{C})$ 、 $R=0.5(\text{GV})$ のときの全方位計数率を求める。(6.2-1)式による計算値を用いると、計数率は 313,063 (個/日) となる。これを C_b とする。
- ③ 気象データなどから P ・ T ・ R を参照して、そのときの計数を計算する。例えば、 $P=990(\text{hPa})$ 、 $T=20.0(^{\circ}\text{C})$ 、 $R=0.40(\text{GV})$ の場合、計数率 C_{cal} は 319,695 (個/日) となる。 C_b との比 $\alpha = C_b / C_{\text{cal}}$ ($=0.979$) を求める。
- ④ これに同時計数の観測値 C_{obs} を掛けて補正值 C_{cor} とする。例えば、 $C_{\text{cor}} = \alpha C_{\text{obs}} = 4,250 \times 0.979 = 4,162$ (個/日) となる。

気象データから直接補正することも考えられるが、観測点が少ない上、測定間隔も粗いため、実際には難しい面がある。当面は、このような方法が実用的であると考えられる。なお、(6.2-1)式および(6.2-2)式は、データが途中であることと、太陽磁場強度の値が推定値であることなどから、1年以上のデータを取得し、かつ太陽磁場強度の正確な値が公表された後、正確に求める必要がある(本報告書作成時には未公表)。

また、トモグラフィデータの取得中に、本調査研究と同様の定点観測を別の機器を用いて計測しておき、上記に示した様な方法で補正することで、密度の決定精度の向上が期待される。

【参考データ】

参考のため、Berkov *et al.*(2010)による大気と気温の効果に関するデータを図 6.2-20 に示す。このデータは1年間のデータを示している。気温については、上空の温度分布を考慮している。この例のように、上空の温度分布の精密なデータがあれば、気圧および気温の補正を正確に行うことができる。しかし、上空温度分布の観測点が少ない上(表 6.2-1)、1日2回のデータしか取得されていない。従って、前ページに示したような方法で補正することが現実的であると考えられる。

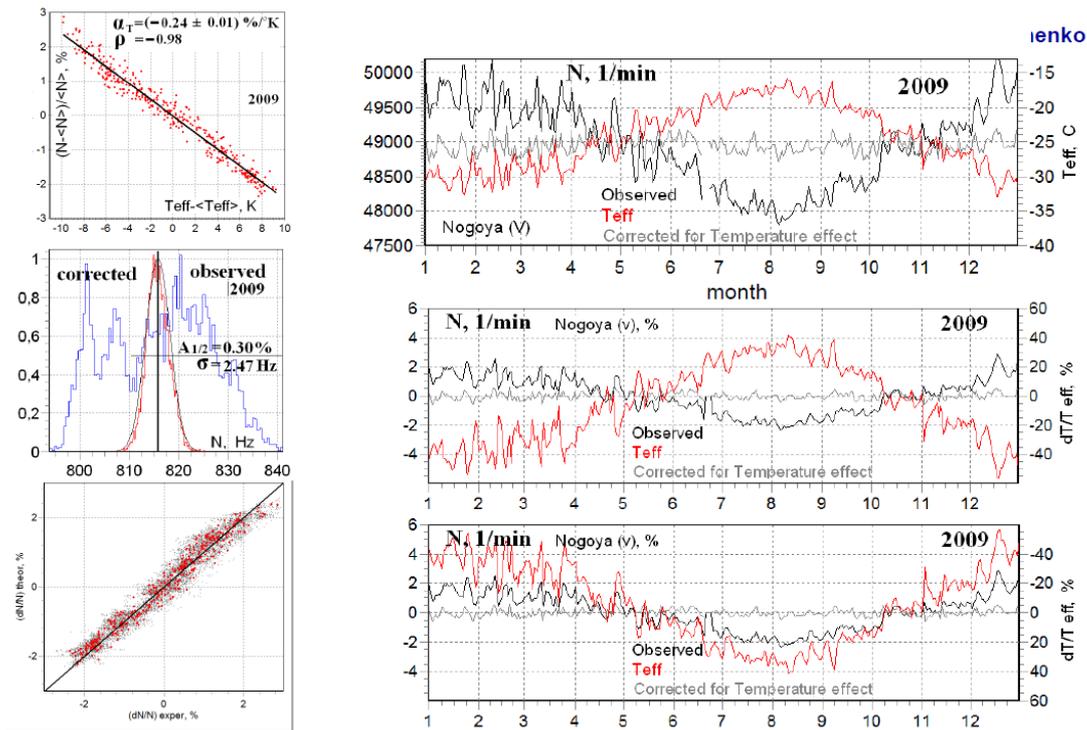


図 6.2-20 地表ミュオン（ミュー粒子）強度の対する大気気温効果の例 (Berkov *et al.*, 2010)

表 6.2-1 上空の気象観測点一覧

地方	観測点
北海道	稚内、札幌、釧路、根室
東北	秋田、仙台
北陸	輪島
関東	館野、八丈島、父島、南鳥島
関西	潮岬
中国	松江、米子
九州・沖縄	福岡、鹿児島、名瀬/本茶峠、石垣島、那覇、南大東島
南極	昭和基地

【参考データ】

参考のためφ3インチ×長さ3インチのNaIシンチレータにより名古屋で計測されたミュー粒子成分(3.2~7.0MeV)のデータについても以下に示す(放射線地学研究所提供、未発表)。計測は1989年4月1日から1990年3月31日まで行われた。本調査研究の試作器(マルチ計測器を含む)は3.0MeV以上の全てのミュー粒子を計測しているので、エネルギー範囲が異なる。直接比較することは難しいが、今後の検討を進めるに当たって参考になると考えら得るので、ここに記載する。

図6.2-21に1年間の変動データを示す。気象データとの関係についても図6.2-22~23に示した。この中で太陽磁場強度、平均気温とは弱い相関が、平均気圧とは強い相関が認められる。その他の気象条件はほとんど相関性が見られない。

1日100mmの雨を降らせる雲があっても、面密度に換算すれば0.1hg/cm²程度であるから、カウント数にはほとんど影響がないものと考えられる。ミュー粒子の速度は光速に近いので、風速などは全く影響しない。

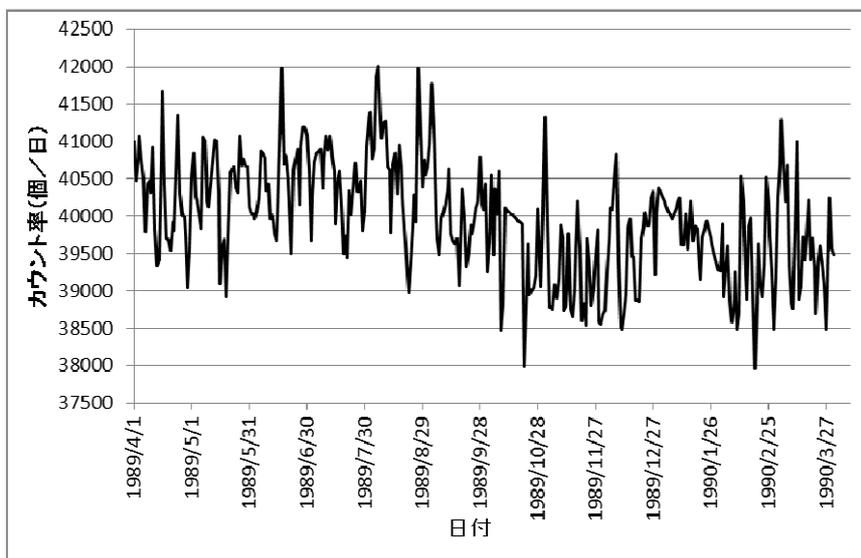


図 6.2-21 1989年のミュー粒子の変動

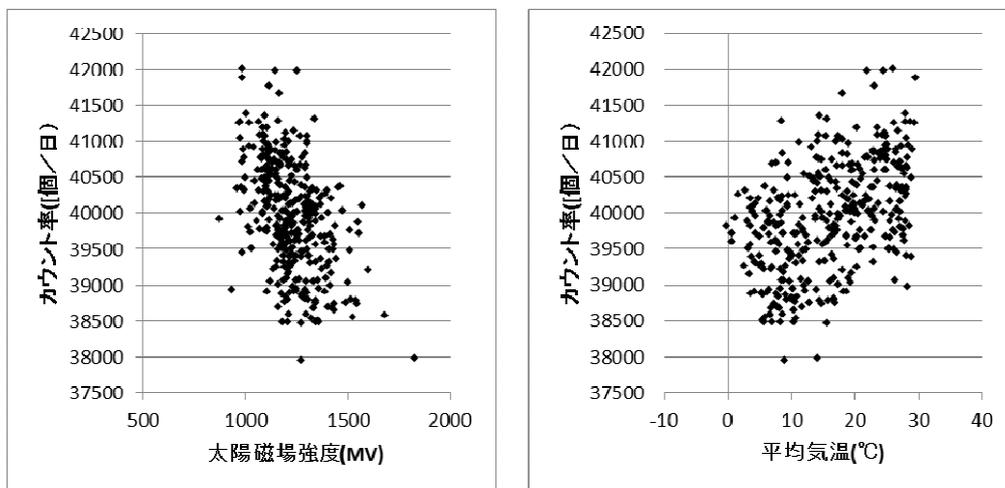


図 6.2-22 気象データとの比較(その1)

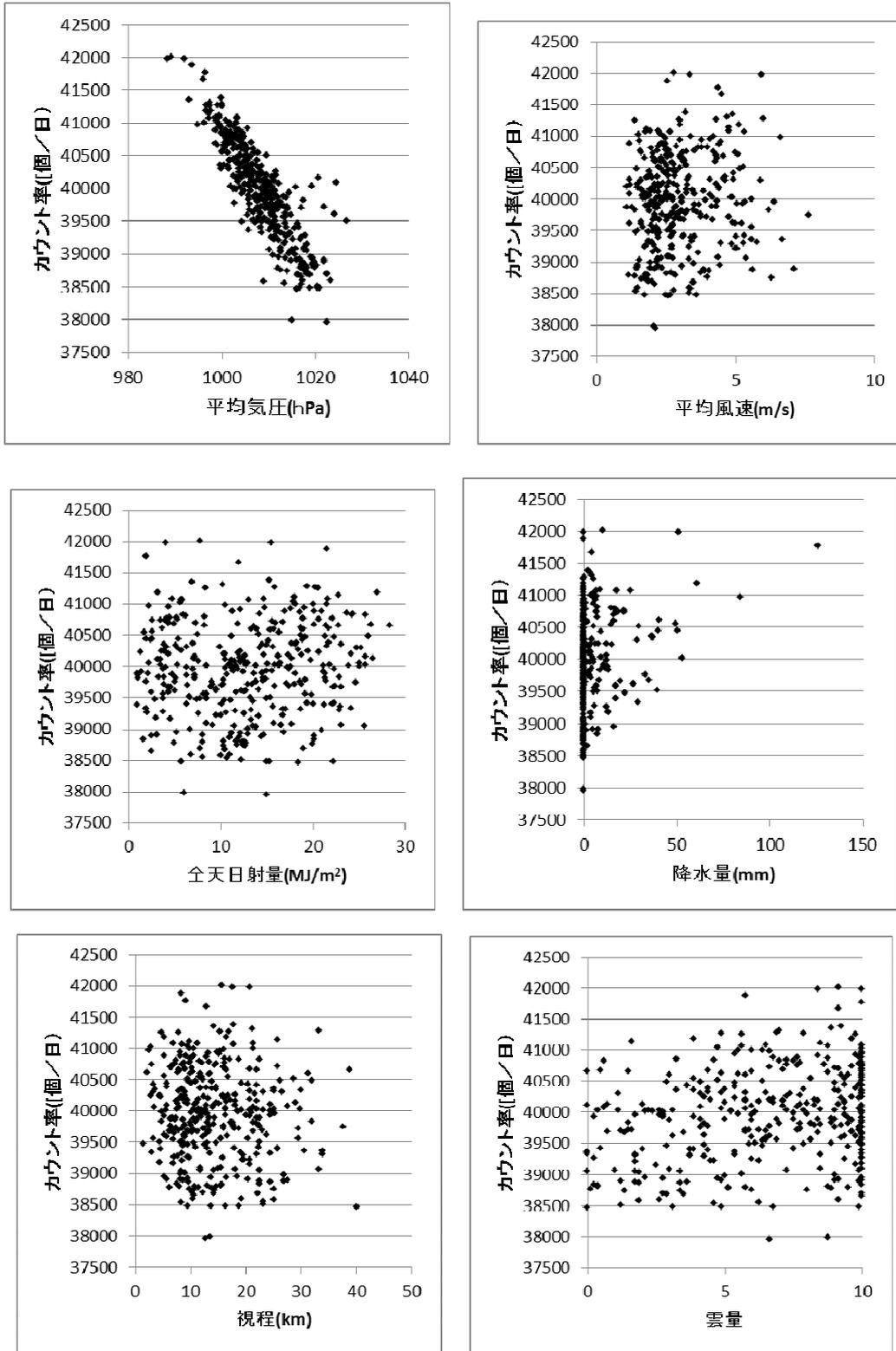


図 6.2-23 気象データとの比較 (その2)

【参考データ】

計測機器本体の温度特性も計測値に影響する可能性がある。光電子増倍管の温度特性は-0.2%/℃といわれている（田中,2012）。本調査研究の計測機器そのものではないが、同様の計測機器の温度特性を図 6.2-24 に示す（応用光研工業提供）。この結果からは、温度特性は-0.087~-0.088%/℃となっている。

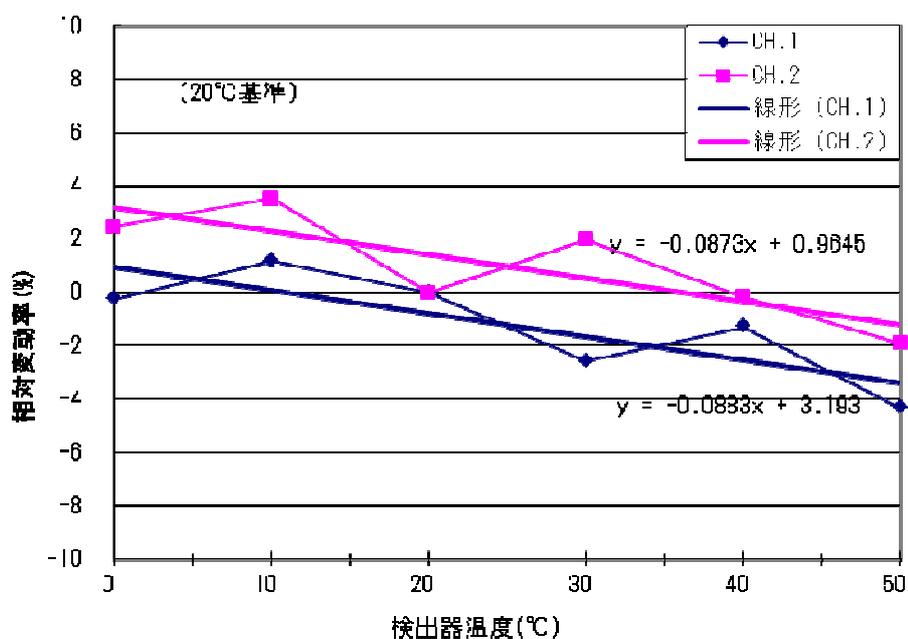


図 6.2-24 プラスチックシンチレータβ線検出器の計数値の温度変動率

6.3 計測点数が解析結果に与える影響

図 5.2-3 に示したように、生データに近い見かけ密度マップでもある程度空洞の有無を推定することができる。図 5.2-3 は、天頂角 5 度刻みで -30~+40 度、計測間隔 50cm である。これと天頂角を 15 度刻みで天頂角 -30~+30 度（マルチ計測器を回転させないで測定することに等しい）、計測間隔 1m に間引きしたデータを比較したのが図 6.3-1 である。通路と人孔があることは確認できる。空洞の有無を平面的に判定するだけであれば、この方法が簡便である。分解能も 1m 程度は確保できていると考えられる。土被りが約 11m であるから、土被りの約 1/10 の分解能であることが示された。

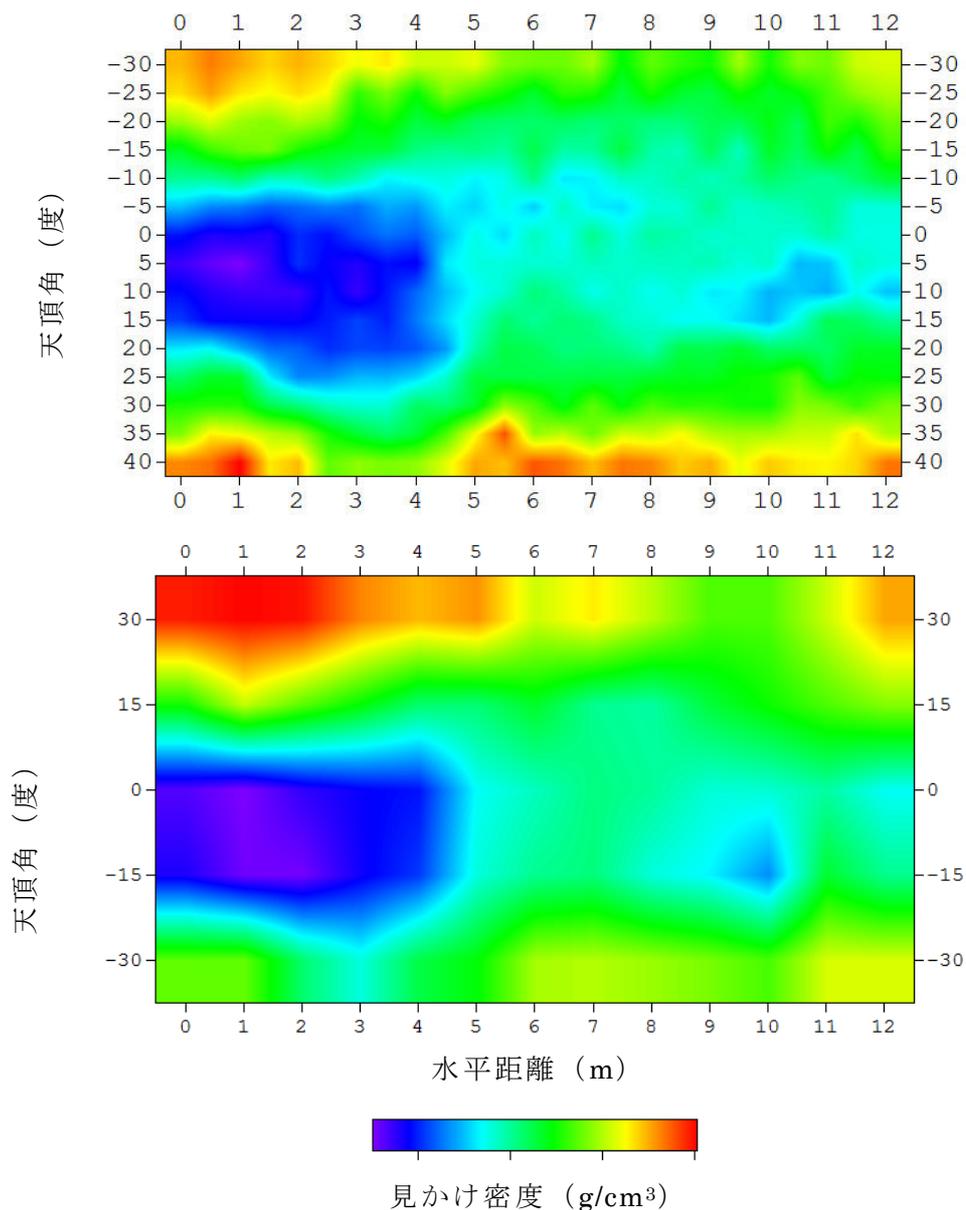


図 6.3-1 データの密度による見かけ密度マップの比較

6.4 初期モデル構築手法の検討

図 6.4-1(a)は面密度を土被りで割って求めた見かけ密度マップである。同図(b)は、天頂角-30~+40度の間を10等分し、密度を抜き出し、深さ方向に同じ値を並べて作成した初期モデルである。ただし、最上層の左右と最下層には、それぞれ鉄筋コンクリートの密度と建物の影響を吸収させるために 2.35g/cm^3 を入れてある。それ以外は、生データに近い見かけ密度の値であり、既存の図面などには頼らないモデルである。トモグラフィ解析の結果を同図(c)に示す。埋設管は検出されていないが通路の部分の低密度は不完全ながらも再構成されている。現段階での検討は不十分であるが、既存資料がない場合のために、このような方法も今後検討を進める必要がある。

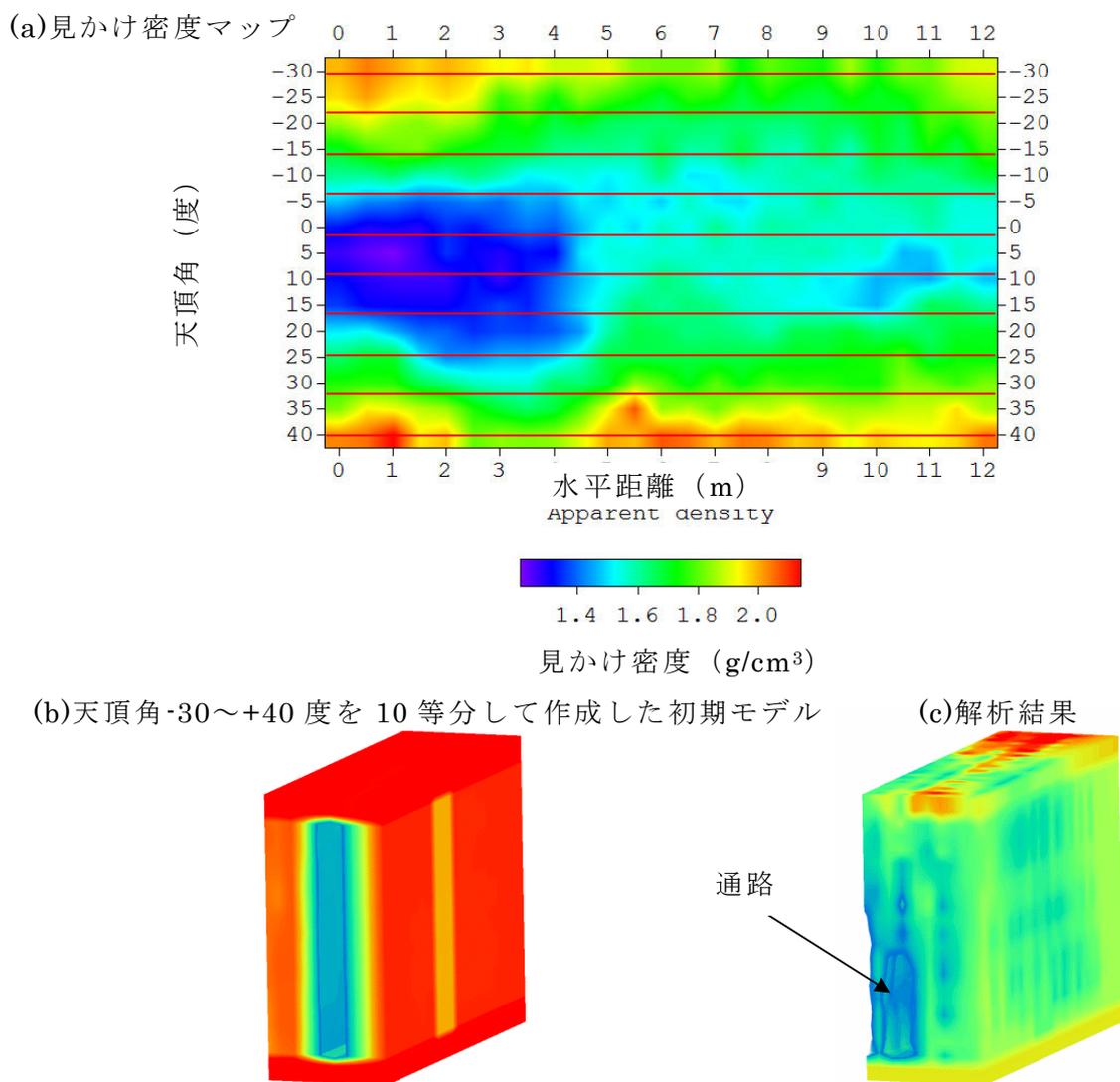


図 6.4-1 見かけ密度マップ（平面図）から作成した初期モデルと解析結果

第7章 実用化システム構築に向けた検討

7.1 計測器の小型化に関する検討

平成20年度はできるだけ効率良く（短時間で）データを取得することを目的に、直径30cm、長さ2mの試作器Aを製作した。平成21年度には小型化を検討するために直径24.5cm・長さ1.4mの試作器Bと、直径17.5cm・長さ1mの試作器Cの2台製作した。共に地下で実験を行い、その性能を確認した。平成22年度には計測時間の短縮化を図るために、試作器Bをベースにマルチ計測器を製作した。これにより5方向同時計測ができるようになり、三次元トモグラフィデータの取得が可能となった。

一方で、昨年度の社会的ニーズ調査の結果から、下水管や導水路などで使用できる湿潤環境対応の計測のために、平成23年度にはマルチ計測器を湿潤環境下でも使用できるように改良を加えた改良型マルチ計測器を製作した。これにより湿潤した場所でも安定して計測できることが可能となった。

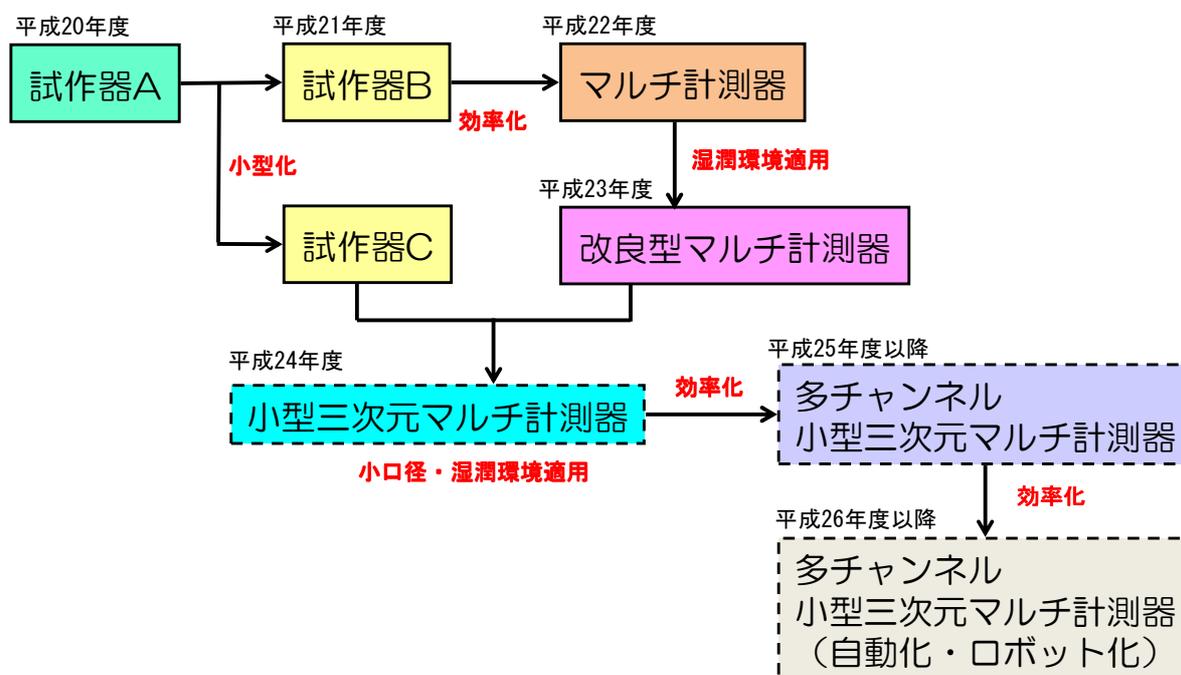


図 7.1-1 試作器製作の流れ

下水管の老朽化に伴う空洞は、下水管の被りが数mと浅く、内径が1m程度の場合に多く発生する。そのようなニーズに対応するため、狭小空間での計測と計測効率向上を目的にした装置を開発する必要がある。平成24年度に提案する小型三次元マルチ計測器の概念図を図7.1-2に示す。

球面上の上部に3台、下部に9台の検出器を配置し、27方向同時計測が可能な機器とする。これにより小型化と効率化を同時に図ることができる。今までのマルチ計測器が5方向であったのに対し、5倍以上の方向を同時に計測できる。ただし、検出器の断面積が小

さくなるため、計測時間を必要とする。円錐の頂角は従来と同じ 10 度程度とするために、検出器の直径は 3 インチ、検出器間の距離は、43cm 程度とする。ただし、マルチ計測器のように全ての円錐頂角が同じにはならないが、各検出器に組み合わせによってできる立体角は計算できるので、補正が可能である。

直径 3 インチの場合、断面積は 45.58cm^2 であるから、従来のマルチ計測器の 490.625cm^2 (直径 24.5cm) と比べて約 10 分の 1 である。従って、計測効率はマルチ計測器と比べると、 $27/5 \times 45.58 / 490.625 = 0.5$ となる。効率は、マルチ計測器より低下するが、装置全体の高さを 70cm 程度に抑えることができるため、内径の小さい下水管などにも設置することができる(従来のマルチ計測器は高さ 1.65m であるから半分以下になることが期待される)。

表 7.1-1 に平成 20 年度からの装置の比較一覧を示す。

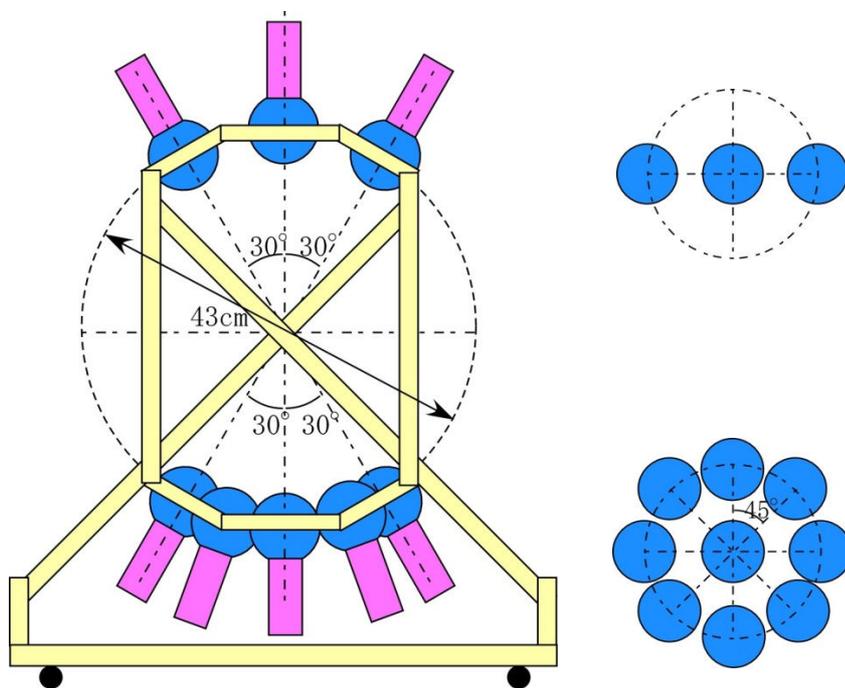
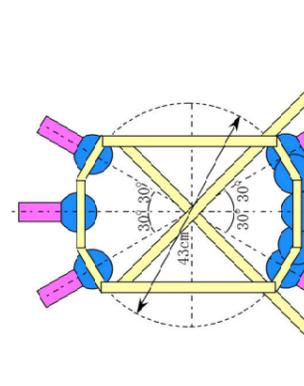
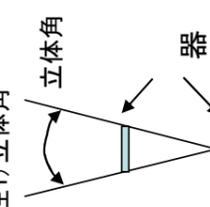


図 7.1-2 平成 24 年度提案の小型三次元マルチ計測器

表 7.1-1 試作器の一覧表

	試作器 A (H20)	試作器 B (H21)	試作器 C (H21)	マルチ (H22、H23)	小型三次元マルチ (H24予定)
写真/図					
特徴	上部、下部に1つづ検出器を配置し、同時係数法によりミュオン粒子を計測する。取得データをを用いて、三次元トモグラフィ解析により地盤中の空洞を捉えることができる。			計測効率向上のため、上部に球形検出器を1台、下部に5台の検出器を配置し、5方向同時計測を可能とした。	狭小空間での計測と計測効率向上を目的に、球面上の上部に3台、下部に9台の検出器を配置し、27方向同時計測が可能となる機器とする。
立体角 ^(注1)	10 (°)	10 (°)	10 (°)	10 (°)	10 (°)
検出器直径	35.0 (cm)	24.5 (cm)	17.5 (cm)	24.5 (cm)	7.6 (cm)
検出器間距離	200 (cm)	140 (cm)	100 (cm)	140 (cm)	43 (cm)
検出器面積	962 (cm ²)	491 (cm ²)	240 (cm ²)	491 (cm ²)	45 (cm ²)
計測方向数	1 (方向)	1 (方向)	1 (方向)	5 (方向)	27 (方向)
計測効率 ^(注2)	4	2	1	10	5
備考	(注1) 立体角  (注2) 計測効率は、最も計測効率の劣る試作器Cマルチを『1』とした場合の比率を示す(理論値の比率)。				

3×9個の小型三次元マルチ計測器の開発に成功すれば、最終的には図 7.1-3 に示すような、9×9個の多チャンネル小型三次元マルチ計測器の開発も可能で、この場合計測効率、現在の改良型マルチ計測器の 1.5 倍の効率を実現することができる（平成 23 年度特許出願済み）。

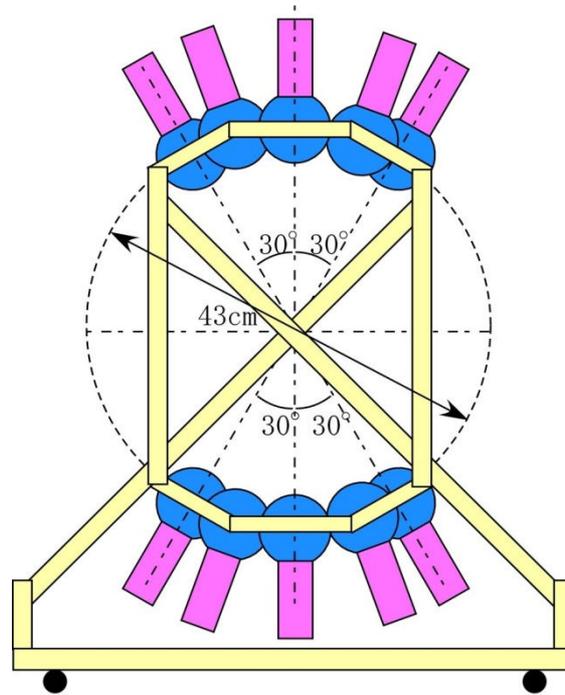


図 7.1-3 多チャンネル(9×9)小型三次元マルチ計測器の概念図

7.2 自動計測に関する技術的検討

現在の装置は手動で角度を変える、あるいは計測器を移動するため作業員が計測器の設置場所まで定期的に出向く必要がある。これを自動化することにより、調査費用のコスト縮減が可能となる。

自動計測に必要な付属装置は以下のとおりである。

- ① 計測器の移動
- ② 角度の変更
- ③ データの転送

計測器の移動と角度の変更は、パルス信号により正確な制御が可能なステッピングモータを用いることが考えられる。ステッピングモータは、デジタル制御回路との相性が良く、コンピュータ制御ではよく使われる。回路構成も比較的簡単であるが、速い動作には向かないとされている。ミュー粒子計測機の場合は、速い動作を必要としないため、ステッピングモータの適用が可能である。データの転送は、地上であれば携帯電話やインターネットが使えるが、地下ではこれが使えない場合がある。後述するように、電源ケーブルを敷設するとき同時にデータ転送用ケーブルを敷設することも検討する必要がある。

バッテリーの使用については、平成 21 年度に検討したが、まだ実用的に使えるようなものがないのが現状である。長期にわたる場合、当面は図 7.2-1 のような仮設電柱により商用電源を引っ張り、その後キャブタイヤケーブルなどを敷設して現地まで電源を供給する。

今後は、計測器の省電力化を図り、バッテリーなどでも長期に計測できるシステムを開発する必要がある。

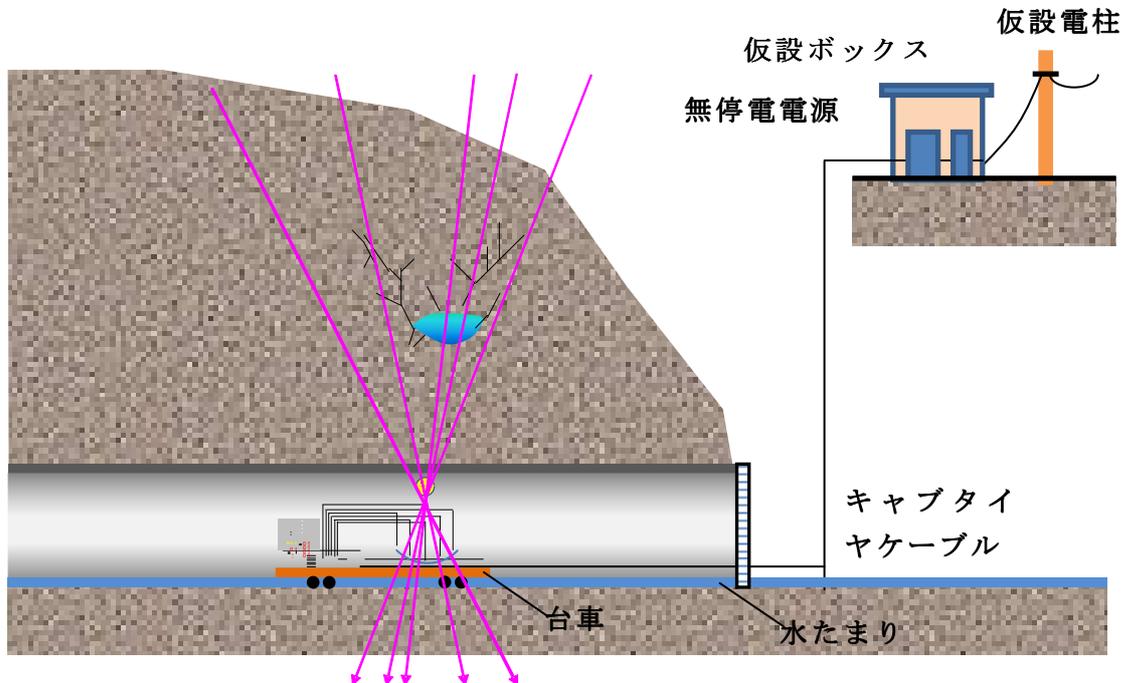


図 7.2-1 電源確保の方法（断面図）

7.3 社会的ニーズの開拓

平成 20 年度の調査研究の理論検討により、土被りの 1/10 以上の大きさの空洞が検出できることがわかっている。これは、ノイズとして計数誤差のみを考慮していた。しかし、今年度の研究により±4～5%程度の時間変動があることがわかった。

空洞探査を目的とし、比較的短期間で計測できる場合は、時間変動による誤差の影響は少ないと考えられるが、計測が長期にわたる場合あるいは長期の健全性モニタリングの場合は、長期時間変動を考慮する必要がある。

本調査研究の成果は、従来の探査技術とは全く異なる方式であり、新たな探査装置として新規事業の展開が期待される。また、地下における探査位置や姿勢制御あるいはデータの伝送技術の開発など、他分野の工業技術との連携も可能である。また、それによって、計測の自動化が可能となり、安価な調査を行うことができる。都市部における地下道・洞道や下水道、特殊地下壕（いわゆる防空壕）、地下水流などによって道路や敷地の陥没事故が多発している。しかし、地上の施設や建物などの地下に生じる場合は地上からこれらを探査することは現状技術では困難となっている。社会インフラ以外にも鉱山や防空壕などの人工的な空洞、あるいは鍾乳洞などの自然空洞によっても陥没事故が発生する。一方、空洞が生じないまでも、インフラ施設周辺の健全性をモニタリングしたいというニーズもある。ミュオン粒子は通過媒体の密度と通過距離により減衰することから、岩盤のモニタリング、揚水発電所等の水位モニタリング、汚染土壌等の溶融処理モニタリングなど、さまざまな展開が期待できる（図 7.3-1）。調査研究が完了した後、新たなミュオン粒子を活用した計測機器の製造、地下空洞の計測等の新規ビジネスに発展することが可能であり、機械工業振興に大きく貢献する。

東日本大震災後には、仙台市内で液状化によって空洞化が発生し、負傷者も出ている（読売新聞 2011 年 11 月 25 日）さらに、宮城県内では震災に関連した空洞化が宮城県内で 660 カ所という報道もされている（日経ケンプラッツ 2012 年 3 月 9 日）。

また、地熱貯留槽の探査にミュオン粒子探査技術が使える可能性が指摘されている。村岡(2009)によれば、ミュオン粒子を利用した探査技術の特長として以下をあげている。

- ① 地殻密度のイメージングには理想的。
 - ② ミュオン粒子の直進性が弾性波や電磁波にない高分解能イメージングを約束する。
 - ③ 従来の探査とは異なる地下物性情報を与えるため、両者を組み合わせれば画期的。
- さらに、原子炉内の透視技術としての提案もされている（読売新聞 2012 年 1 月 7 日）。

表 7.3-1～3 に社会的ニーズとミュオン粒子による測定方法の提案を示す。インフラ、土木構造物、防災、原子力、重工業、資源、学術調査など幅広い応用が考えられる。

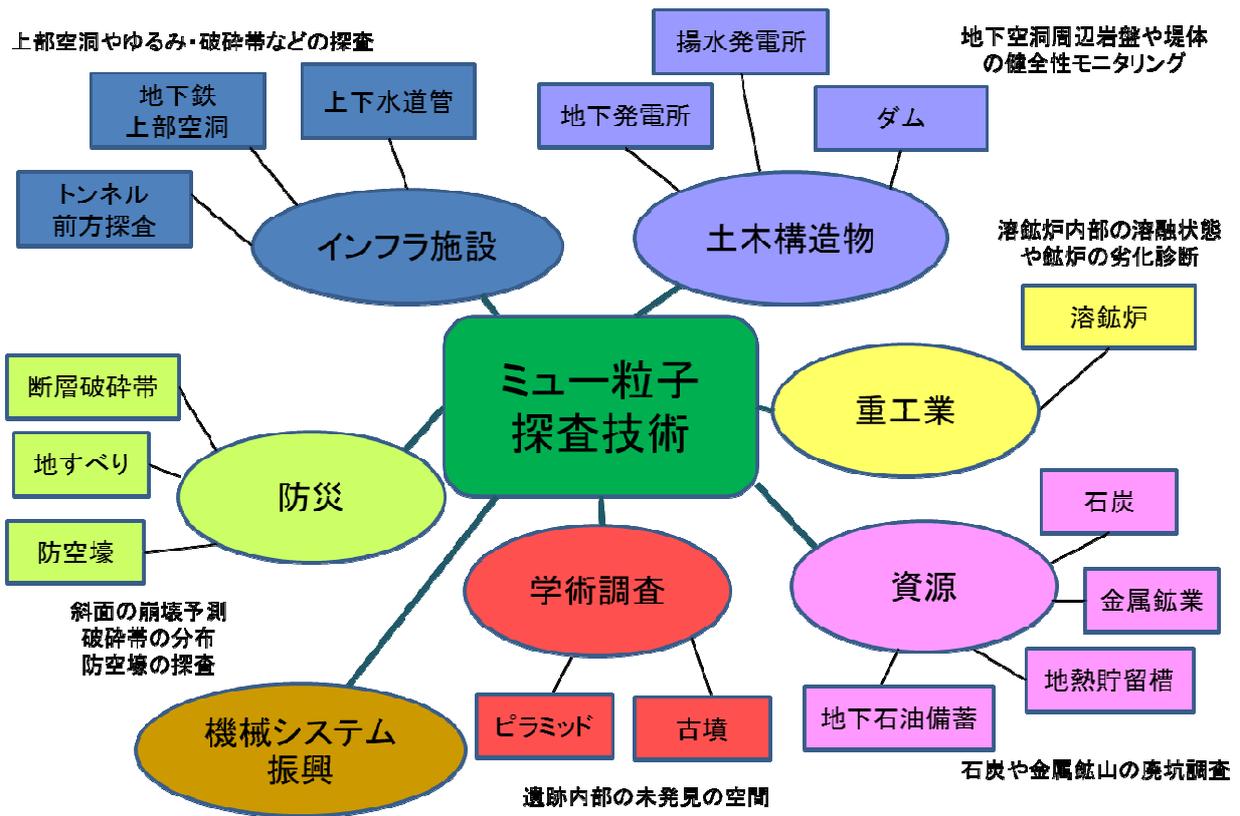


図 7.3-1 ミュー粒子探査技術に対する社会ニーズ

表 7.3-1 社会的ニーズとミュニ粒子による測定方法の提案（その1）

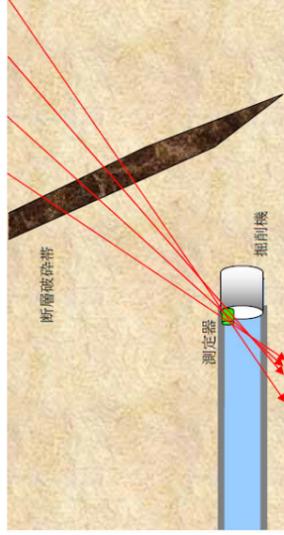
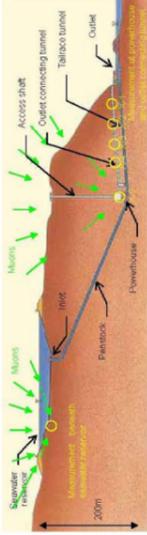
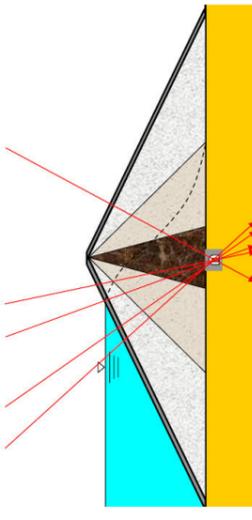
分野	目的/対象	測定方法	特徴と課題	適用可能性	イメージ図
インフラ	上下水道	下水道管上部空洞	下水道の場合埋設深度が浅い場合の空洞が問題となっている。 防水だけでなく硫化水素に対する防錆対策も必要。自動化が必要。 対水圧および対塩素対策が必要。	○	 <p>仙台市営地下鉄の液状化空洞による陥没事故</p>
		上水道管上部空洞	実際に上水道管に入れるのは難しく、上水道管の下にあるインフラ施設から計測する。	△	
	地下鉄				
	地下河川				
インフラ	道路トンネル	液状化による空洞	東日本大震災の仙台市営地下鉄で液状化空洞による陥没が発生し、負傷者が出る。	○	 <p>トンネル前方探査方法</p>
	電力・通信トンネル 共同溝	測定時間の短縮が必要。 マルチチャネル化および複数台による時間短縮。			
土木構造物	トンネル掘削中の前方探査	シールドトンネル前方のゆるみ・空洞 岩盤トンネル前方の空洞（鍾乳洞など）と断層破砕帯	土被りが厚い場合は、測定時間が多くなり掘削速度に追いつかない可能性もある。	○	 <p>海水揚水発電所での実施例</p>
	地下発電所・揚水発電所	地下空間周辺の岩盤の健全性 長期モニタリング	密度変化の精度が必要であり、今後長期間変動の補正方法などの検討が必要となる。 海水揚水発電所での実施例あり。	△	
土木構造物	重力式コンクリートダム	重力式ダムの健全性やフィルダムの密度管理など		△	 <p>フィルダムの密度測定</p>
	フィルダム		密度変化の精度が必要であり、今後長期間変動の補正方法などの検討が必要となる。 海水揚水発電所での実施例あり。		

表 7.3-2 社会的ニーズとミュオン粒子による測定方法の提案（その2）

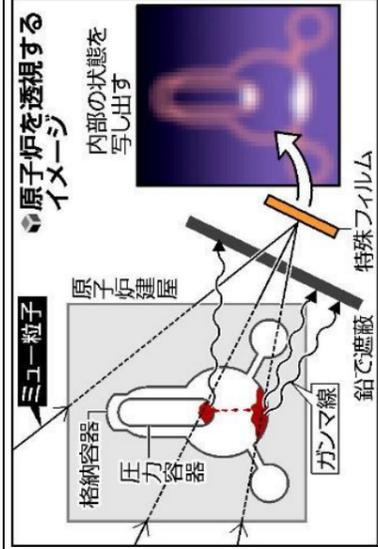
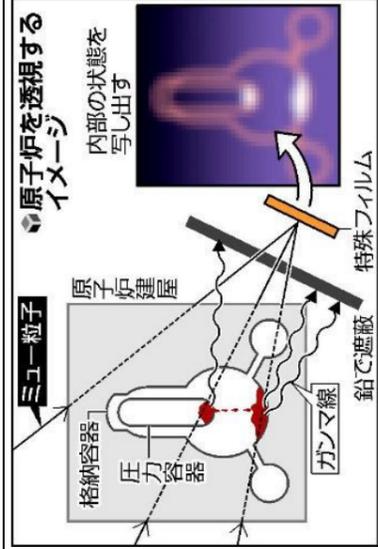
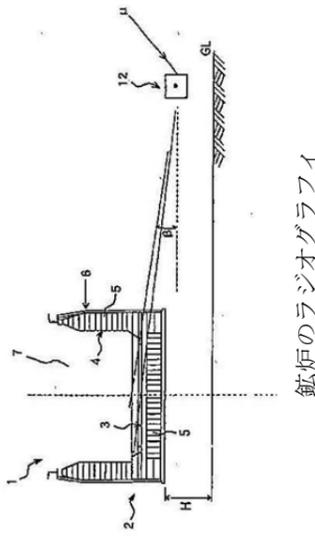
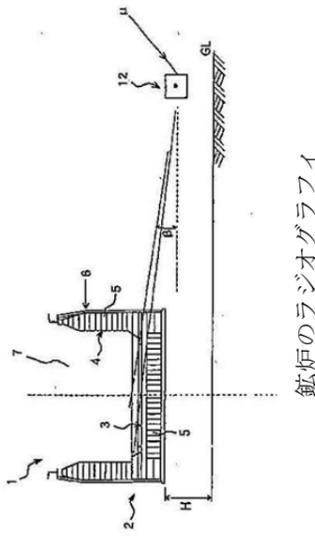
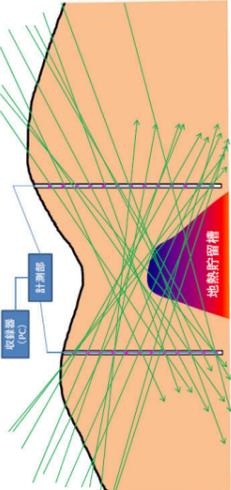
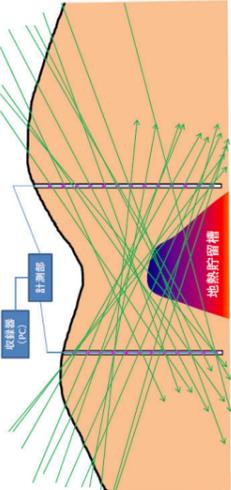
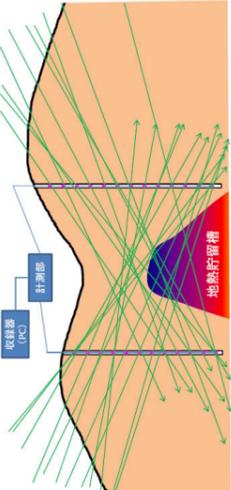
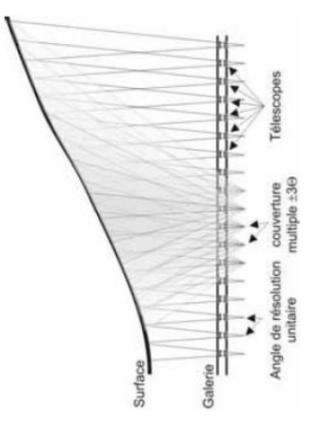
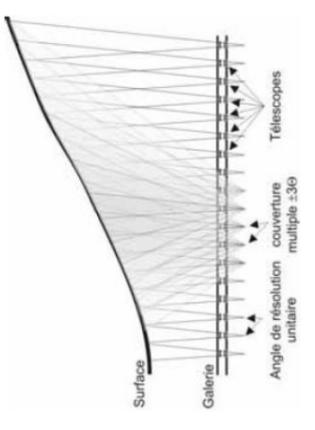
分野	目的/対象	測定方法	特徴と課題	適用可能性	イメージ図
防災	地すべり	斜面の下に設置するあるいはボーリング孔やトンネル（横孔）を利用する。	密度変化の精度が必要であり、今後長期間変動の補正方法などの検討が必要となる。ダムサイトで実施する計画がある。	△	
	断層破砕帯	斜面下から測定する。あるいはボーリング孔を利用する。	東大グループによりラジオグラフィが試みられている。	○	
	防空壕	既知の防空壕からその上部あるいは斜め上の防空壕を探索する。あるいは斜面を利用して測定する。	過去には陥没による死亡事故も発生している。	○	地震による斜面崩壊と防空壕による陥没 
原子力	原子炉	原子炉内部の構造（燃料棒の位置）推定	名古屋大学でラジオグラフィの検討が進められている。原子炉からのガンマ線を遮断する技術が必要。	○	
	放射性廃棄物地層処分	上部岩盤の健全性長期モニタリング	密度変化の精度が必要であり、今後長期間変動の補正方法などの検討が必要となる。	△	
重工業	溶鉱炉	溶鉱炉の下に計測機を設置できればトモグラフィは可能。	過去にラジオグラフィが試みられたことがある。奥行き方向がわからないという欠点がある。	○	

表 7.3-3 社会的ニーズとミュー粒子による測定方法の提案（その3）

分野	目的/対象	測定方法	特徴と課題	適用可能性	イメージ図
資源	石炭・亜炭の採掘跡の空洞調査	既知の防空壕からその上部あるいは斜め上の防空壕を探索する。あるいは斜面を利用して測定する。	大谷での基礎実験データがあり、これが参考になる。	○	
	鉱山跡廃坑	廃坑から漏れ出る地下水による重金属汚染が問題となっている。しかし、廃坑がわからなくなっている	大深度であるため、ボーリング孔を用いる必要がある。小型かつ耐熱・耐圧のマルチ計測機が必要。	△	
学術調査	地熱貯留槽	地熱貯留槽の分布把握	原理的には可能であるが、計測が長期になるため時間変動の検討が必要である。	△	
	地下石油備蓄	上部岩盤の健全性長期モニタリング	アクセストンネルなどの空間から測定可能。	△	
	火山噴火予知	火山の内部構造（マグマや火道の位置）推定	地表設置型では、ミュー粒子以外のノイズを除去する技術が必要。	○	
	考古学	ピラミッドや古墳の内部構造調査（空間や石棺の位置）	内部の通路などから測定が可能。あるいは斜面の下に設置する。	○	
	地下実験施設	フランス LSBB 計画（地下低雑音実験施設）やリアニョライダーなどの施設上部の密度把握	アクセストンネルなどの空間から測定可能。	○	

※適用可能性：○・・・実用化可能、△・・・原理的な詰めが必要（変動補正など）

注）過去の事例は、ラジオグラフィ（レントゲン方式）であり、トモグラフィ解析（CT方式）までは行われていない。

第 8 章 まとめと今後の課題

8.1 調査研究のまとめ

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

① マルチ計測器の改良

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

② 改良後の工場試験

JIS 規格に基づき、各機器の工場試験を行い、防滴加工の効果を確認した。

③ 改良後の現地試験

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

④ データの蓄積

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

⑤ 精度向上のための検討

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

長期にわたる計測（特に長期モニタリング）の場合、ミュー粒子の時間変動が問題となる。地下での定点観測の結果、気象条件や太陽活動に伴う地球磁場の変動や装置の温度変化などが、長期的なミュー粒子時間変動の原因であることがわかった。今後、さらにデータを蓄積して、密度の決定精度の向上や長期健全性モニタリングなどへの適用可能性が拓けてきた。

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

⑥ 実用化のための検討

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

8.2 今後の課題

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

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

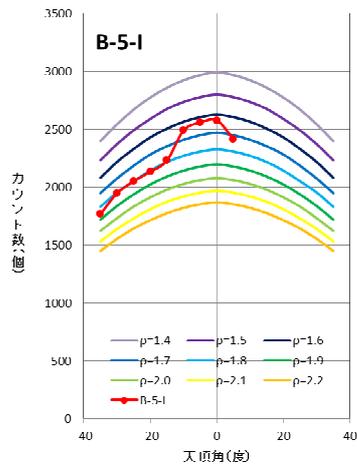
社会的ニーズを考慮すると以下の課題が考えられる。

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

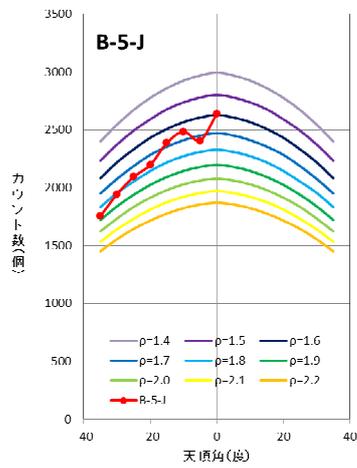
これらのことを考慮すると、小型かつチャンネル数の多い計測機器の開発が望まれる。さらに、現在のマルチ計測器では、位置を移動する、あるいは角度を変える作業を人力で行っている。そのため、測定作業員を現地に常駐させるなどの必要があり、コストがかかる。そのため自動で移動し角度を変える装置を付加する、あるいはインターネットや携帯電話を介してデータ転送を行う装置の付加が必要となる。

引用文献

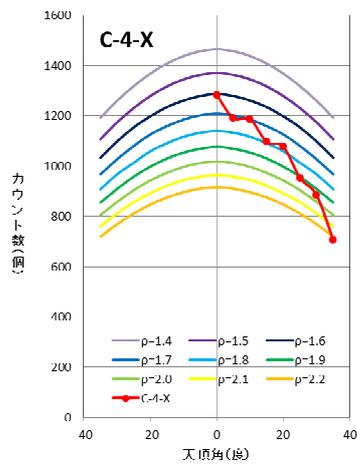
- Berkova, M., Belov, A, Eroshenko, E. and Yanke, V.(2010): Temperature effect of muon component and practical questions of its account in real time, Abstracts of the 22nd European Cosmic Ray Symposium, 125.
- 川本 朧万(2005)：地盤陥没災害と地下空洞調査について、*物理探査*、第 58 巻、589-597.
- 地震調査研究推進本部(1995)：平成 7 年度横浜市・立川断層－活断層調査報告書、
<http://www.hp1039.jishin.go.jp/danso/Yokohamafrm.htm>
- 日本工業標準調査会(2003)：JISC0920 電気機械器具の外郭による保護等級(IP コード)、
<http://www.jisc.go.jp/app/pager?id=12278>
- 湊(2009)：宇宙線角度分布測定器の計数効率，放射線地学ノート SCS-0052，pp.1-10
<http://www3.starcatt.ne.jp/~reslnote/L5.htm>
- 小田 稔(1982)：宇宙線、裳華房
- 日経ケンブリッジ 2012 年 3 月 9 日：道路の下に 660 カ所の空洞の疑い－宮城県、
<http://kenplatz.nikkeibp.co.jp/article/const/news/20120307/560970/>
- 村岡弘文(2009)：パラダイム転換としての地熱開発推進、Gate Day Japan シンポジウム
講演資料、
http://staff.aist.go.jp/toshi-tosha/geothermal/gate_day/presentation/AIST3-Muraoka.pdf
- Sannomiya,A.(2011): Introduction of a test measurement for a monitoring technology inside a large-scale civil engineering structure using muon radiography, International workshop on high energy geophysics 2011.
- Sato, T., Yasuda, H., Niita, K., Endo, A. and Sihver, L.(2008): Development of PARMA: PHITS-based analytical radiation model I the atmosphere, *Radiation research*, **170**, 244-250.
- 田中宏幸(2012)：ミューオグラフィの現状と将来、平成 23 年度物理探査学会物理探査セミナー講演資料
- 東京都土木技術研究所(1977)：東京都総合地盤図 I、東京都地質図集 3、土質試験結果一覧表、技法堂出版
- 読売新聞 2011 年 11 月 25 日：被災地の路面下、多数の空洞…陥没で負傷者も、
<http://www.yomiuri.co.jp/homeguide/news/20111125-OYT8T00217.htm>
- 読売新聞 2012 年 1 月 7 日：宇宙からの素粒子利用、福島原発炉心の透視作戦、
<http://www.yomiuri.co.jp/science/news/20120107-OYT1T00500.htm>



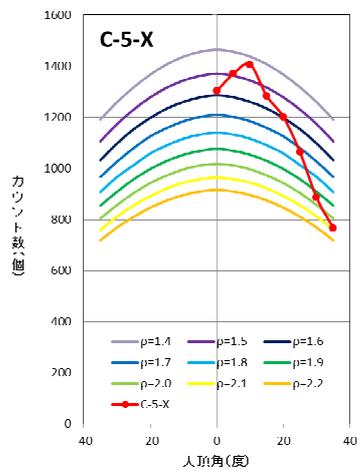
天頂角	計数	数	面密度	密度



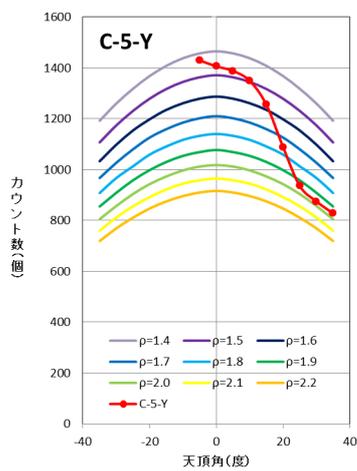
天頂角	計数	数	面密度	密度



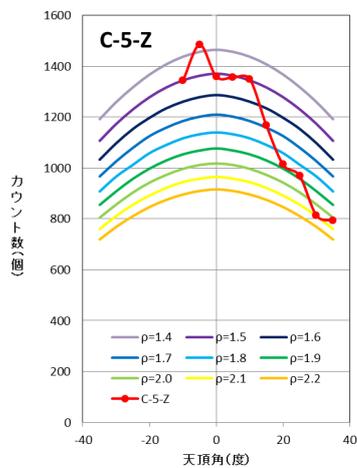
天頂角	計数	数	面密度	密度



天頂角	計数	数	面密度	密度



天頂角	計数	数	面密度	密度



天頂角	計数	数	面密度	密度

3. 改良型マルチ計測器によるトモグラフィ解析用データ

(1) 現場記録データシート

測定条件 器角度 度			測定条件 器角度 度			測定条件 器角度 度		
付			付			付		
測定開			測定開			測定開		
リ ト 分			リ ト 分			リ ト 分		
数			数			数		
設定値			設定値			設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定 果			測定 果			測定 果		
数	測定		数	測定		数	測定	
	器角度 度			器角度 度			器角度 度	

測定条件 器角度 度			測定条件 器角度 度			測定条件 器角度 度		
付			付			付		
測定開			測定開			測定開		
リ ト 分			リ ト 分			リ ト 分		
数			数			数		
設定値			設定値			設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定 果			測定 果			測定 果		
数	測定		数	測定		数	測定	
	器角度 度			器角度 度			器角度 度	

測定条件 器角度 度			測定条件 器角度 度			測定条件 器角度 度		
付			付			付		
測定開			測定開			測定開		
リ ト 分			リ ト 分			リ ト 分		
数			数			数		
設定値			設定値			設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定 果			測定 果			測定 果		
数	測定		数	測定		数	測定	
	器角度 度			器角度 度			器角度 度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分 数 設定値			リト分 数 設定値			リト分 数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分 数 設定値			リト分 数 設定値			リト分 数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度		
付 測定開		
リト分 数 設定値		
ト	地	度
測定果 数	測定	
	器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
		器角度度			器角度度			器角度度

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
		器角度度			器角度度			器角度度

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
		器角度度			器角度度			器角度度

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分 数 設定値			リト分 数 設定値			リト分 数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分 数 設定値			リト分 数 設定値			リト分 数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度		
付 測定開		
リト分 数 設定値		
ト	地	度
測定果 数	測定	
	器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
		器角度度			器角度度			器角度度

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
		器角度度			器角度度			器角度度

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
		器角度度			器角度度			器角度度

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付 測定開			付 測定開			付 測定開		
リト分			リト分			リト分		
数 設定値			数 設定値			数 設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果 数	測定		測定果 数	測定		測定果 数	測定	
	器角度度			器角度度			器角度度	

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付			付			付		
測定開			測定開			測定開		
リト分			リト分			リト分		
数			数			数		
設定値			設定値			設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果			測定果			測定果		
数	測定		数	測定		数	測定	
		器角度度			器角度度			器角度度

測定条件 器角度度			測定条件 器角度度			測定条件 器角度度		
付			付			付		
測定開			測定開			測定開		
リト分			リト分			リト分		
数			数			数		
設定値			設定値			設定値		
ト	地	度	ト	地	度	ト	地	度
測定果			測定果			測定果		
数	測定		数	測定		数	測定	
		器角度度			器角度度			器角度度

測定条件 器角度度		
付		
測定開		
リト分		
数		
設定値		
ト	地	度
測定果		
数	測定	
		器角度度

4. 改良型マルチ計測器による湿潤環境下試験データ

(1) 現場記録データシート

天頂角	数	み取	器					
度								
度								
度								

— 禁無断転載 —

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

発行 平成 24 年 3 月
一般財団法人 エンジニアリング協会
〒105-0001
東京都港区虎ノ門三丁目 18 番 19 号 虎ノ門マリビル 10 階
TEL 03 (5405) 7201 (代表)

印刷 東洋美術印刷株式会社