

常時微動を利用した空洞探査手法の適用試験  
－坑道跡への適用－

2005年3月

中部電力株式会社  
技術開発本部 電力技術研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地 49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話:029-282-1122(代表)

ファックス:029-282-7980

電子メール:[jserv@inc.go.jp](mailto:jserv@inc.go.jp)

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute,

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

2005年3月

常時微動を利用した空洞探査手法の適用試験  
－坑道跡への適用－

上田 稔, 橋詰 正広 中部電力株式会社

要 旨

中部電力株式会社電力技術研究所では、管内に分布している垂炭坑採掘による地下空洞を効率的に探査する目的で、常時微動を利用した空洞探査手法を開発しているが、山岳部での適用実績が乏しいことから、人形峠環境技術センター夜次露天採掘場における空洞探査への適用性を検証するために現地調査を実施した。また、二次元モデルを用いた数値解析を用いて、当地点で得られた常時微動計測結果の再現を試みた。

調査結果から、埋め戻されている可能性の高い測線では、常時微動の速度スペクトルに変化傾向が見受けられなかったのに対して、埋め戻されていないと推定される測線においては、速度スペクトルに空洞上部（推定）を中心とした対称形の顕著な変動が確認され、数値解析結果とも調和的であった。

以上の結果から、当地点における坑道の崩落状況を、常時微動計測により判別可能であることを確認することができた。

---

本報告書は、中部電力株式会社が核燃料サイクル開発機構人形峠環境技術センター構内で実施した適用試験の成果に関するものである。

機構担当課室：環境保全技術開発部 環境計画課

March 2005

The Application Test of the Method for the Survey of Underground Openings  
using Microtremors  
— Application to Underground Openings of a Closed Mine —

Minoru Ueda, Masahiro Hashizume      CHUBU Electric Power Co.,Inc

Abstract

We are developing the method of prospecting underground openings using microtremors around our service area in order to prospect underground openings of closed lignite mines effectively at Electric Power Research & Development Center of CHUBU Electric Power Co.,Inc. We have few results in the mountainous area. So we made the field survey preliminary to inspection of the application of the method at the former Yotsugi open-pit in Ningyo- toge Environmental Engineering Center. We also tried two dimensions numerical analysis in order to reproduce results of measurement of microtremors there.

As a result it could be confirmed that the results of analysis were harmonious with those of measurements, in which velocity spectrums on measurement points changed remarkably in the symmetry shape with respect to the point above the openings along the measurement lines while they didn't change along the measurement lines with backfilled underground openings.

Therefore it could be confirmed that it was able to judge the situation of falling ground above openings on this point by using microtremors.

---

This work was performed by CHUBU Electric Power Co.,Inc in Ningyo- toge Environmental Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Environmental Planning Section

## 目 次

1. はじめに	1
2. 夜次露天採掘場跡の現状	2
3. 空洞探査手法の技術動向	3
4. 常時微動を利用した空洞探査	5
4. 1 探査手法の概要	5
4. 2 現地調査	9
4. 3 探査結果	10
5. 数値解析による探査手法のメカニズム解明	22
5. 1 解析モデルの概要	22
5. 2 解析結果	24
6. 考察	29
7. まとめ	30
参考文献	31
【巻末資料】	32
現地写真	33
フーリエスペクトル	34

## 【図目次】

図 2-1	露天採掘場跡地の概要	2
図 4. 1-1	計測システムの周波数特性	6
図 4. 2-1	常時微動計測位置図	12
図 4. 3-1	常時微動空洞探査結果①（速度スペクトル表示）	13
図 4. 3-2	常時微動空洞探査結果②（速度スペクトル表示）	14
図 4. 3-3	常時微動空洞探査結果③（速度スペクトル表示）	15
図 4. 3-4	常時微動空洞探査結果④（速度スペクトル表示）	16
図 4. 3-5	計測結果による空洞分布状況の推定（測線 1）	17
図 4. 3-6	計測結果による空洞分布状況の推定（測線 2）	18
図 4. 3-7	計測結果による空洞分布状況の推定（測線 3）	19
図 4. 3-8	計測結果による空洞分布状況の推定（測線 4）	20
図 4. 3-9	計測結果による空洞分布状況の推定（測線 A）	21
図 5. 1-1	地盤物性条件	22
図 5. 1-2	解析モデル	23
図 5. 1-3	ホワイトノイズ時刻歴	23
図 5. 1-4	ホワイトノイズのフーリエスペクトル	24
図 5. 2-1	解析結果（空洞なし）と計測結果との比較	26
図 5. 2-2	解析結果（ゆるみ領域考慮）と計測結果との比較	27
図 5. 2-3	解析結果（ゆるみ領域設定なし）と計測結果との比較	28

## 【表目次】

表 3-1	空洞探査手法の比較	4
表 4. 1-1	増幅器仕様	5

## 【写真目次】

写真 4. 1-1	常時微動計測システム	7
写真 4. 1-2	振動センサー設置状況	8
写真 4. 1-3	振動センサー設置	8
写真 4. 1-4	計測状況	8

## 1. はじめに

人形峠環境技術センター（以下、センターという）構内の夜次北地区では、昭和 32 年から昭和 35 年にかけて坑内採掘法によるウラン鉱石の採掘が行われた。その後、低品位鉱の開発を目的として夜次北地区において昭和 52 年から昭和 62 年にかけて露天採掘法による採掘が行われたり。

採掘後は中和処理された捨石を埋め戻した後に、3～5mの表土、1.5mのマサ土で覆土され、植栽が施されている。

坑道に関しては、露天採掘された箇所は採掘時に埋め戻しているが、露天採掘されていない箇所については残置されており、自然崩落している可能性が高いが、崩落状況は把握されていない。

埋め戻されていない坑道は、地下水の流動を予測評価する上でミズミチとなるため、その分布状況を詳細に把握する必要があることから、センターでは簡便で安価に地下空洞を探索する手法を模索していた。

中部電力株式会社電力技術研究所では、管内に分布している亜炭坑採掘による地下空洞を効率的に探索する目的で、常時微動を利用した空洞探索手法を開発している。

ただし、この手法は山岳部での適用実績が乏しいことから、上記坑道跡を対象として適用性を検証するために、現地調査を実施した。

また、二次元モデルで数値解析を行い、当地点で得られた常時微動計測結果の再現を試みた。

## 2. 夜次露天採掘場跡の現状

夜次露天採掘場跡地周辺の地質構造は、下層より花崗岩、風化花崗岩、礫岩、泥岩の層準で、採掘場跡地は礫岩、泥岩層が埋め戻された捨石、表土、マサ土に置き換わっている（図2-1参照）。

地表面は雑草により覆われているが、繁茂度は低いため、常時微動計設置箇所周辺を除草することにより計測は可能であった。

なお、法面については、木本類や草本類の伐採を行った後に、常時微動計を設置するための水平整形を行えば計測可能であるが、今回は可能性調査であるため作業効率の悪い法面部は、計測対象箇所から除外した。

また、常時微動計測に支障となる交通振動や工場振動が発生するような周辺環境ではなく、計測当日も微風であったため、計測環境としては理想的な状況であった。

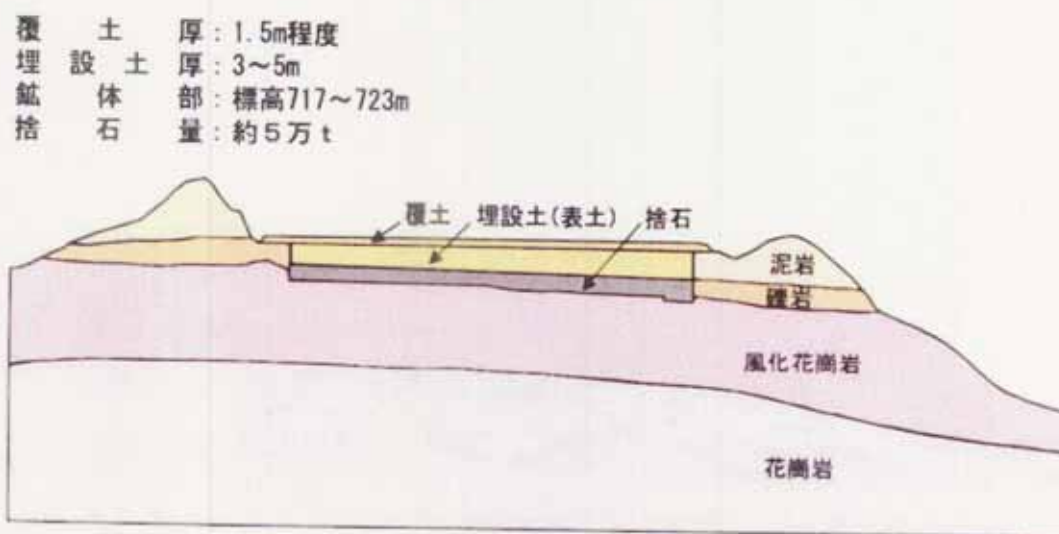


図2-1 露天採掘場跡地の概要<sup>1)</sup>



### 3. 空洞探査手法の技術動向



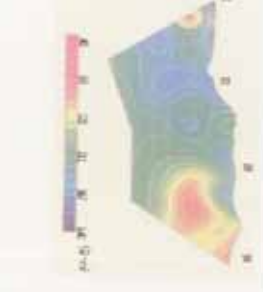


比較的浅部に位置する空洞を探査する手法を表3-1に示す。

各手法には一長一短があり、決定的な手法が存在しないのが現状である。

その中においても、常時微動を利用した空洞探査手法は、経済性、施工性の面で非常に優れているが、実績が乏しいことから确实性の面で劣っている。このため、現地調査による適用性の検証が本技術においては必須となっている。

常時微動を利用した空洞探査手法の概要とセンター内で実施した探査結果を次章に示す。

表 3-1 空洞探査手法の比較

探査手法	特徴	イメージ	課題	備考
常時微動探査	<p>地盤の常時微動を測定し、フーリエスペクトルの波形、スペクトル比等から空洞の有無を判断する。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 費用が安い</li> <li>② 測定方法が簡単 (短時間の計測)</li> <li>③ 1m程度の空洞まで探査可能</li> <li>④ 不陸地形でも探査可能</li> </ol>		<ol style="list-style-type: none"> <li>① 測点での空洞の有無しか判らない</li> <li>② 深度の確認は、ボーリング等が必要</li> <li>③ 振動の多い場所では測定が困難</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 新しい手法であり、実績は少ない</li> <li>● 垂坑、地下壕の調査で実績がある</li> </ul>
地中レーダー (電磁波探査)	<p>電磁波の地中での反射をとらえ空洞の位置を特定する</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 測線下のデータを2次元的に表現できる</li> <li>② 数10cmの空洞まで探査可能</li> <li>③ 空洞の規模 (水平方向)、深度を推定できる</li> </ol>		<ol style="list-style-type: none"> <li>① 探査深度が浅い (約5m)</li> <li>② 地下水下の測定は困難</li> <li>③ 平坦な場所ではできない</li> <li>④ 空洞と埋設物との区別が困難な場合がある</li> <li>⑤ 費用が高い</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 道路における空洞調査として実績が多い</li> <li>● 確実に空洞といえない場合が多く、サウンディングを併用する必要がある</li> </ul>
高密度電気探査 (二次元比抵抗探査)	<p>地盤の比抵抗を測定・解析し空洞の位置を特定する</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 測線下のデータを二次元的に表現できる</li> <li>② 広範囲・大深度の探査が可能</li> <li>③ 空洞の規模・形状・深度を推定できる</li> </ol>		<ol style="list-style-type: none"> <li>① 測線の測量が必要</li> <li>② 金属の埋設物がある場合、正確なデータが得られない</li> <li>③ 小さな空洞 (φ2m未満) は検出できない可能性がある</li> <li>④ 測線を調査地区外まで延ばす必要がある</li> <li>⑤ 費用はやや高い</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 空洞探査としての実績は比較的少ない</li> <li>● 大規模な空洞の調査で用いられることが多い</li> </ul>
ボーリング調査	<p>空洞の分布が予想される地点でボーリングを行い、空洞の有無を確認する</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 確実な確認ができる</li> <li>② 他の試験を併用できる</li> </ol>		<ol style="list-style-type: none"> <li>① 調査地点での空洞の有無・深度は確認できるが分布範囲は判らない</li> <li>② 分布を知るには複数箇所の調査が必要であるが、費用が高い</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 物理探査の確認の意味で実施されることが多い</li> <li>● 分布の目安がついている場合には有効な手法である</li> </ul>
資料調査・測量	<p>過去の資料・聞き取りによって空洞の位置を予測し、入口が判れば測量によって分布範囲を特定する</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 正確な分布が判る</li> <li>② 内部の状況が確認できる</li> </ol>		<ol style="list-style-type: none"> <li>① 入口が判り、人が入れるなどの特殊な場合に限られる</li> <li>② 落盤・有害ガスの発生など危険な作業となることがある</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 確実な分布がおさえられる</li> <li>● 実施が可能であれば最も有効な方法である</li> </ul>

#### 4. 常時微動を利用した空洞探査

##### 4. 1 探査手法の概要

###### (1) 計測装置

常時微動の計測は、佐藤商事製(旧振動技研製)の常時微動計測システムを使用した。センサーは1秒以下ではほぼフラットな振動数特性を有する3成分速度計(水平2方向,鉛直1方向,固有振動数1秒)UP-255Sを使用した。増幅器はUPS-T3を使用した。この増幅器によって、常時微動計の振動数特性を5秒以下でフラットとなるよう設定することも可能である。増幅器の仕様および計測システムの周波数特性を表4. 1-1および図4. 1-1に、装置の外観を写真4. 1-1に示す。

電源はAC100Vもしくは自動車用12Vバッテリーを使用することができ、バッテリーを使用する際にはDC/ACコンバーターを介してAC100Vとし、増幅器およびデータ収録兼モニタ装置であるノートパソコンに電源を供給する。

振動センサーからの信号は増幅器で増幅し、A/D変換して記録およびモニタ表示する。モニタではリアルタイムの時刻歴波形とフーリエスペクトル表示することができ、計測状況を確認しながらの計測が可能である。

表4. 1-1 増幅器仕様

形式	UPS-T3
入力形式	差動入力
入力インピーダンス	3M $\Omega$
チャンネル数	3CH
アッテネータ(1)	1/1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128, 1/256
アッテネータ(2)	1/1, 1/10
特性切換	変位/速度
ローパスフィルタ	f <sub>c</sub> = 20Hz, -18dB/oct
センサー形式	UP-251S, UP-252S, UP-255S
固有周期切換	1秒/5秒
A/D変換機	12A/D-NL
較正	3チャンネル同時, サイン波10Hz
バッテリー警告	LED表示
オーバースケール警告	LED表示
電源	内部 6V(単1 $\times$ 4) 外部 6~12Vバッテリー
外形寸法	約 316 $\times$ 254 $\times$ 70mm
重量	約 2.7Kg

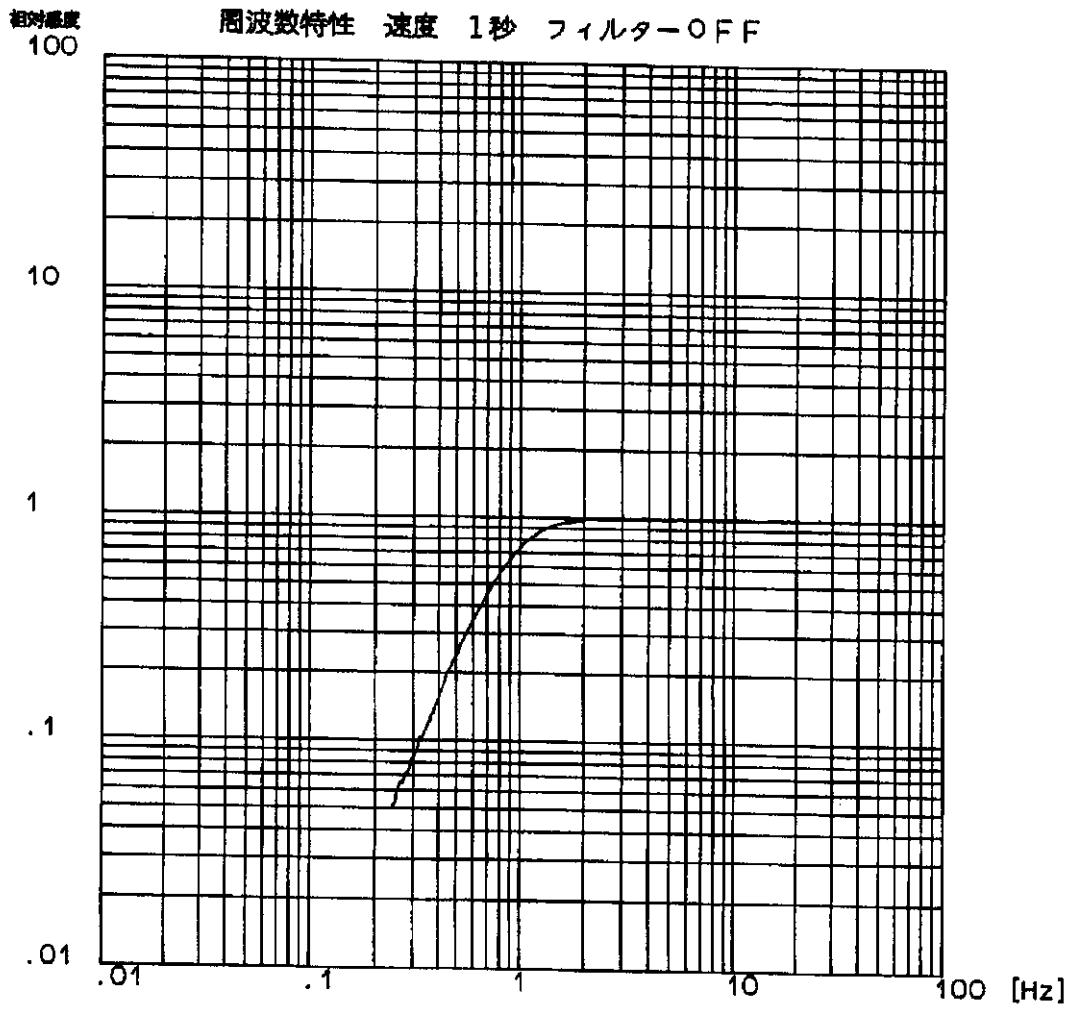


図4. 1-1 計測システムの周波数特性



写真4. 1-1 常時微動計測システム  
(上 増幅器と収録装置兼モニタ, 中 振動センサー 下 振動センサー (蓋を開けた状態))

## (2) 計測手順

常時微動計測は以下の手順で実施する。計測状況を写真4. 1-2～写真4. 1-4に示す。

### ①振動センサーの設置

振動センサーを調査地点に設置する。設置面に不陸が目立つ場合や接地面が軟弱な場合には整地して、固定針のついた設置台を地盤に打ち込み地盤と一体化させた上で振動センサーを設置する。

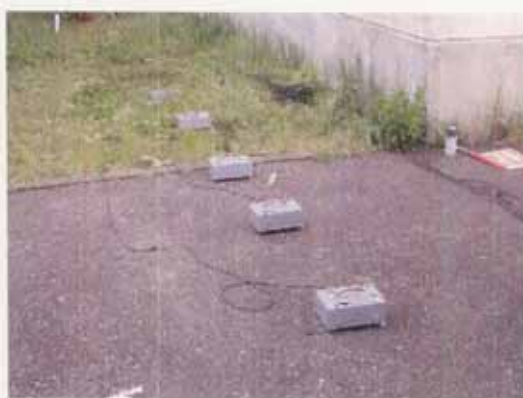


写真4. 1-2 振動センサー設置状況 (設置台上に設置)      写真4. 1-3 振動センサー設置状況

### ②増幅器の設定

増幅器の校正を実施した後、微動の振幅レベルに応じて増幅倍率を設定する。

### ③常時微動計測

振動センサーを設置した後に計測を開始する。振動の速度計測に当たって、サンプリング周波数は200Hzで実施するが、状況に応じて任意に設定可能である。計測時間は3分間を標準とし、状況に応じて同一地点で複数回計測するか、計測時間を延長し、定常な常時微動を記録するよう配慮する。



写真4. 1-4 計測状況

#### 4. 2 現地調査

##### (1) 調査日時

2004年11月26日(金) 9時～16時

##### (2) 調査時の気象

曇天、微風

##### (3) 調査者

中部電力(株)電力技術研究所土木建築グループ構築チーム

##### (4) 調査箇所

調査箇所としては、①坑道が確実に残置されている箇所、②坑道を確実に埋め戻した箇所、③坑道の埋め戻し状況が不明の箇所を対象とし、常時微動計測結果が①については空洞あり、②については空洞なしと判定するかによって、適用性を評価することとした。

測線1：陥没箇所よりも埋め戻しされていない側に6m離れた箇所を横断する測線である。ここは、夜次露天採掘場跡地内で坑道が残置されている可能性が最も高い箇所である。

測線2：過去に陥没が発生し、埋め戻しにより復旧した箇所を横断する測線である。ここは埋め戻し跡が目視により確認できることから、坑道を確実に埋め戻した箇所であるといえるが、埋め戻し不良等によって空洞化している場合はその影響が懸念される。

測線3：埋め戻しの実施が不明である箇所を横断する測線であるため、常時微動計測結果から空洞の有無の判定を試みた箇所である。

測線4：夜次露天採掘場跡地中央に位置し、埋め戻されている可能性の高い箇所を横断する測線である。ここも埋め戻しの実施状況が確実に分かっている箇所ではないことから、常時微動計測結果から空洞の有無の判定を試みた。

測線A：測線1の中央部と測線2の中央部を結んだ測線であり、坑道を縦断する測線である。空洞部と埋め戻されている箇所の境界を捉えることが可能であるか試みた。

図4. 2-1に示す5測線上に常時微動計を設置し、微動波形を取得した。

測線長は測線1～4が10mであり、測線Aが6mである。

測線1～4に関しては、始めに常時微動計を基準点である測線中心(0m)と+1m, +2m, +3m, +5mに設置し、5台同時に計測を行った(基準点から南側が+方向)。

次に0 m, -1 m, -2 m, -3 m, -5 mに設置し, 同様に5台同時計測を行った(基準点から北側が-方向)。

測線Aは, 測線1と測線2の基準点間を結ぶ測線であり, 常時微動計を測線1の基準点, +1.5m, +3.0m, +4.5m, 測線2の基準点(+6.0m)に設置し, 5台同時計測を行った。

#### (5) 計測時間

一箇所当たり3分間計測を2~3回実施した。なお, サンプルング周波数は200 Hzと設定した。

### 4. 3 探査結果

取得した微動波形から各測点におけるフーリエスペクトルを求め, 周波数毎の速度スペクトルに着目して, 測線内における各測点間の速度スペクトルの大きさを比較した結果を図4. 3-1, 2に示す。

また, 基準となる測線中央の速度スペクトルと他の測点における速度スペクトルの比で対比した結果を図4. 3-3, 4に示す。

各図を元に, 各測線下部における空洞の有無を判定した結果について以下に示す。

#### (1) 測線1 (図4. 3-5 参照)

測線1は埋め戻しが行われていないと思われる坑道を横断する測線である。坑道直交成分の解析結果によると, 坑道中心よりも1 m外側でスペクトルが低下する周期帯が多く見受けられたこと, また, 3 m外側では境界付近の反射によるものと考えられるスペクトルの上昇が見受けられたことから, 測線下部における空洞の存在が示唆された。

同様に坑道平行成分の解析結果においても, 坑道中心から1 m (一部2 mも) 外側でスペクトルの低下が確認された。

#### (2) 測線2 (図4. 3-6 参照)

測線2は陥没に伴う埋め戻しが行われている坑道を横断する測線である。坑道直交成分の解析結果で特徴的なものとしては, 測線1と逆の傾向を示していることである。

(坑道中心を挟んで1 mの箇所ではスペクトルが高く, 2 mの箇所では低くなっている。)これは上述したものと同様の境界付近における反射が生じていると思われるため, 埋め戻しが不十分であるか埋め戻した箇所と原地盤の境界が緩くなっている可能性がある。

なお, 坑道平行成分についても類似した傾向が見受けられた。

#### (3) 測線3 (図4. 3-7 参照)

測線3は埋め戻しの実施が不明な坑道を横断する測線である。解析結果によると, 坑道直交成分, 坑道平行成分共にスペクトル比が0.5倍~1.5倍の範囲に収まってお



り、顕著な傾向は確認できなかった。

(4) 測線4 (図4. 3-8 参照)

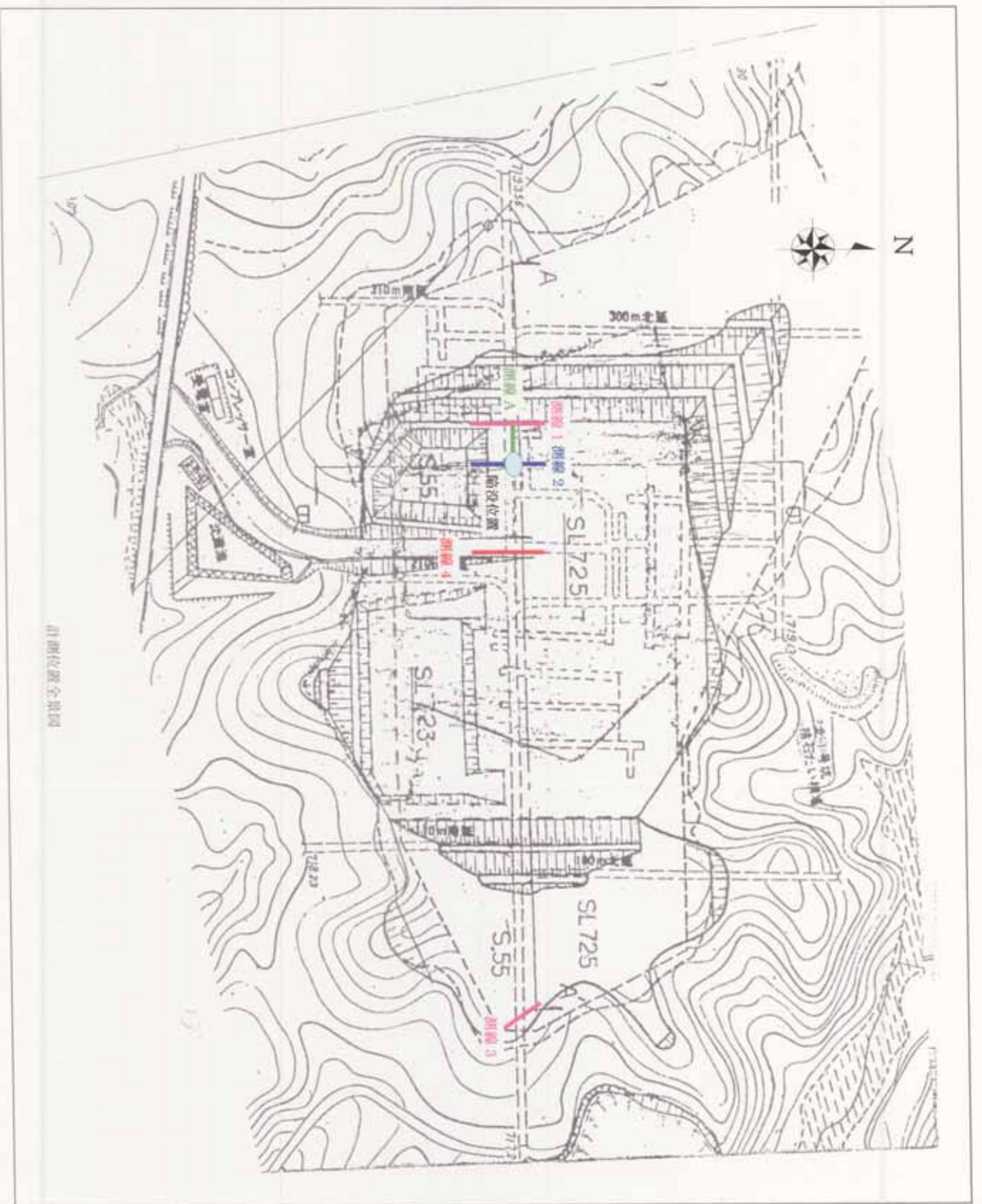
測線4は埋め戻された可能性の高い坑道を横断する測線である。解析結果によると、坑道直交成分、坑道平行成分共に基準点から北側2mの周辺でスペクトルの差が大きくなっており、この位置が坑道跡地である可能性が高い。また、測線2と類似した傾向を示していることから、埋戻しは行われているが、何らかの要因により空隙が生じている可能性がある。

なお、自動車による交通振動を与えて計測したデータを用いた解析結果によると、坑道による顕著な差異を確認することはできなかった。

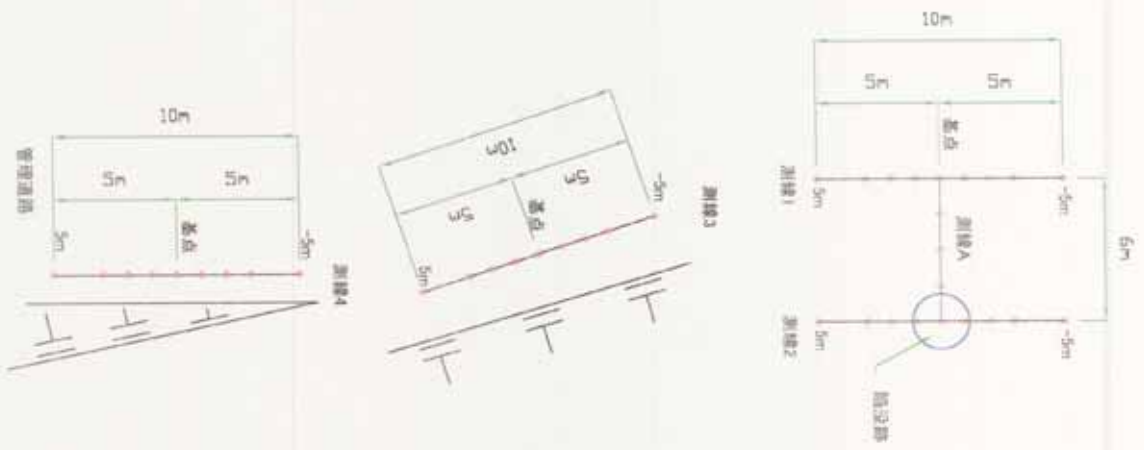
(5) 測線A (図4. 3-9 参照)

測線Aは陥没に伴う埋め戻しが行われている箇所から埋め戻しが行われていない箇所を縦断する測線である。坑道直交成分、坑道平行成分共に、埋め戻し実施箇所から実施していない箇所に向けてスペクトルが低下する傾向を確認することができた。

また、坑道直交成分については陥没箇所中心から1m西側においてスペクトルが高くなっていることから、この周辺が埋め戻されていない箇所との境界である可能性が高い。



詳細位置全景図



観測点位置図

図 4. 2-1 常時稼働計画位置図

図 4. 3-1 密時微動空間探索結果① (速度スケルトン表示)

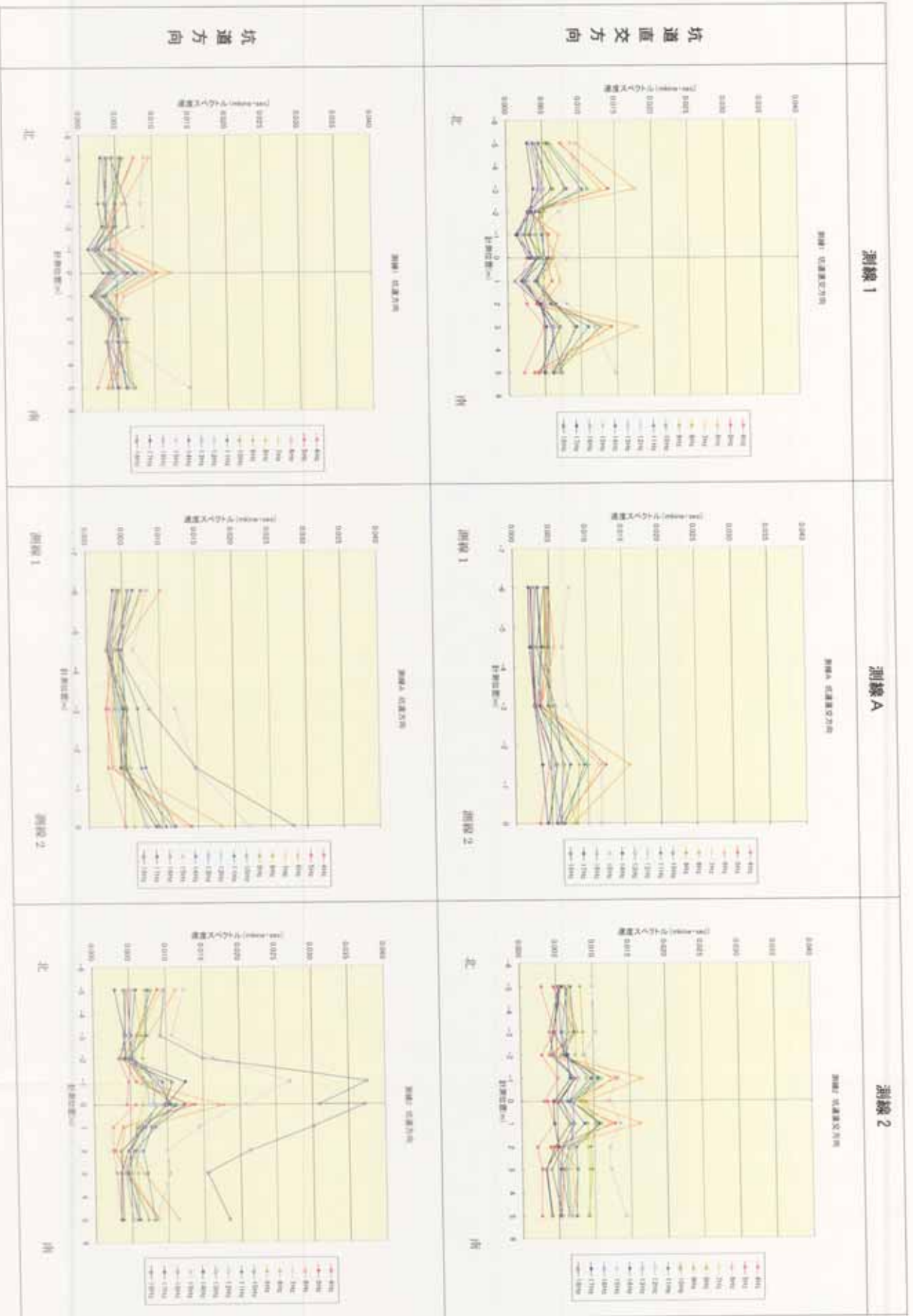


図4. 3-2 常時微動空洞探査結果② (速度スケトル表示)

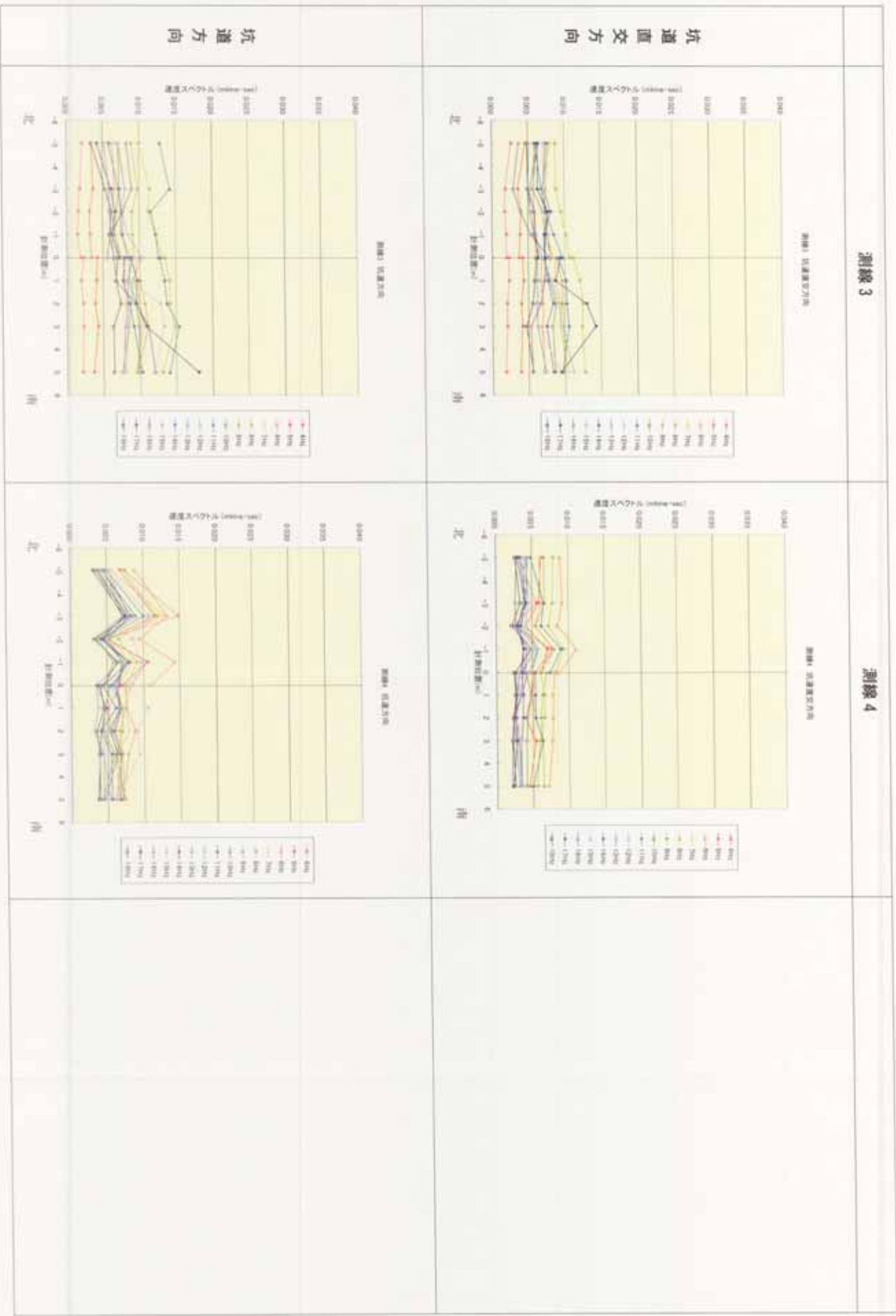


図 4. 3-3 常時微動空洞探査結果③ (ヌベクトル比表示)

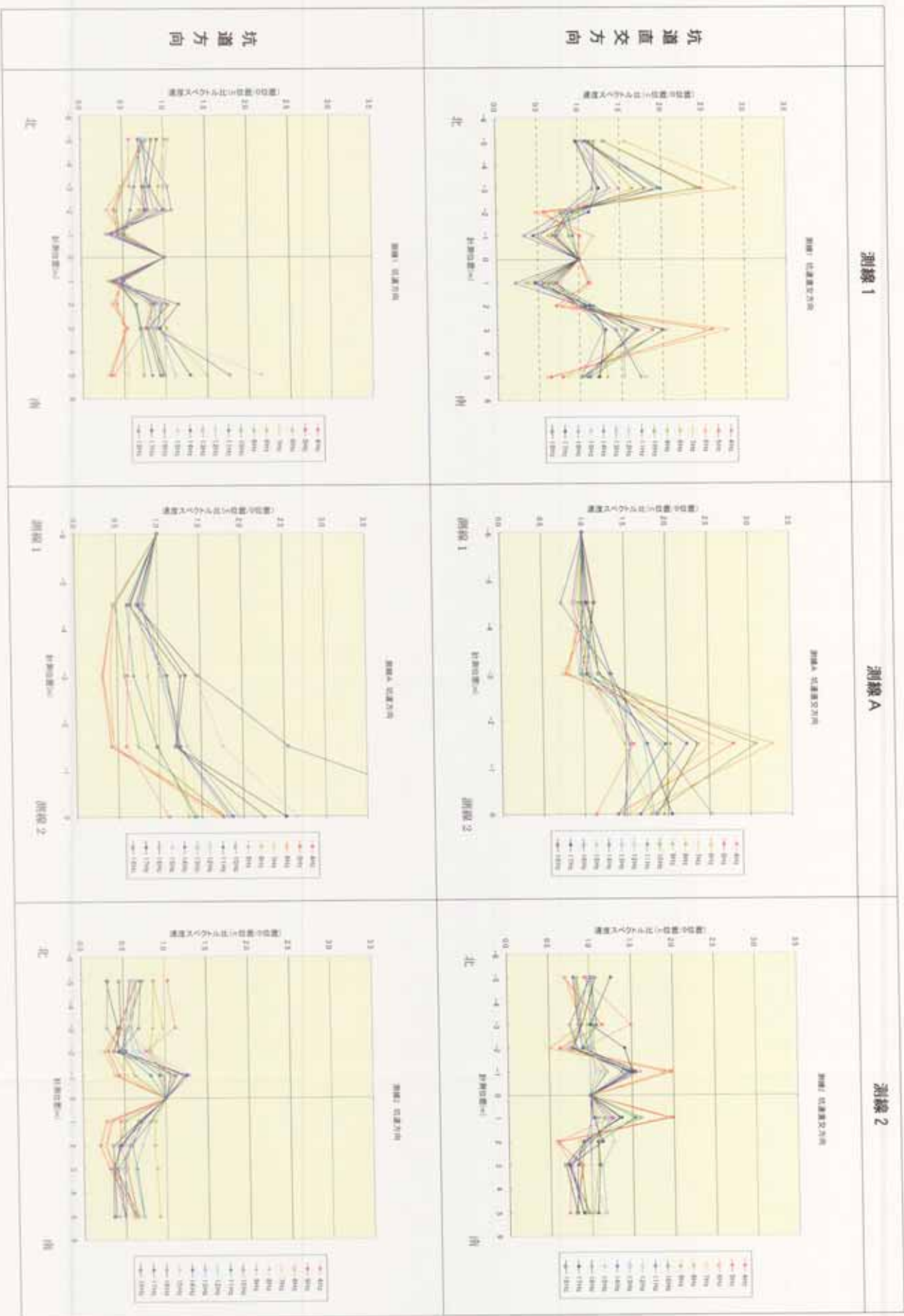


図4. 3-4 常時微動空洞探査結果④ (スベクトル比表示)

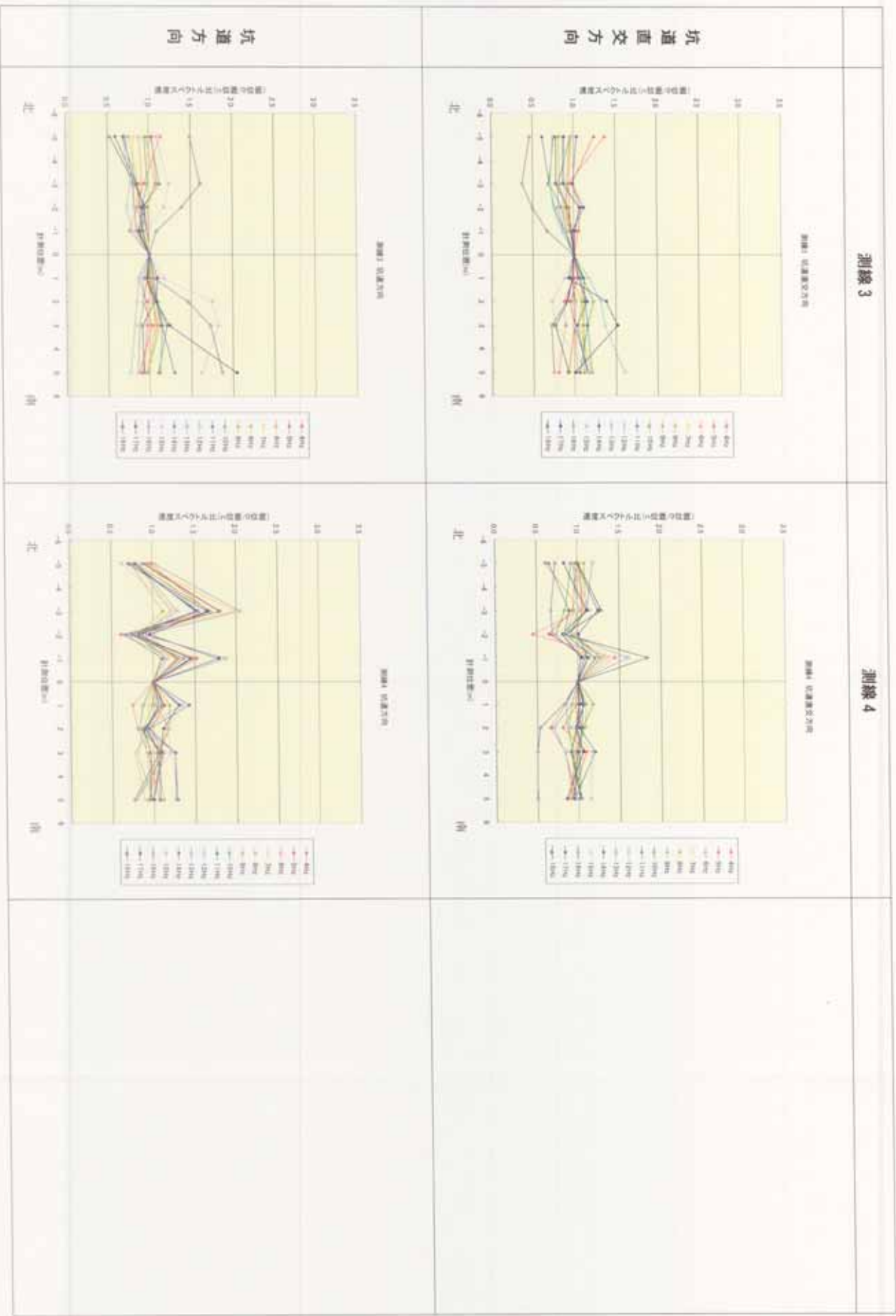
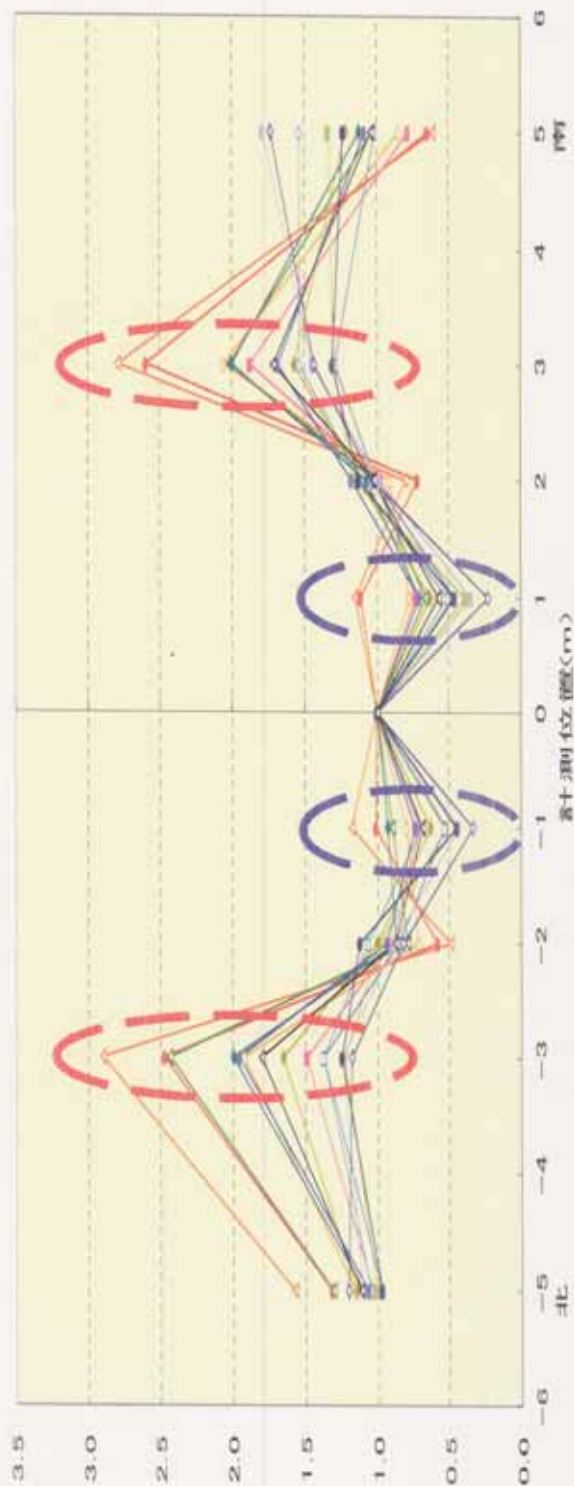


図4.3-5 計測結果による空洞分布状況の推定(測線1)



空洞体積

表土

岩盤



空洞の存在が  
示唆される

図4.3-6 計測結果による空洞分布状況の推定(測線2)

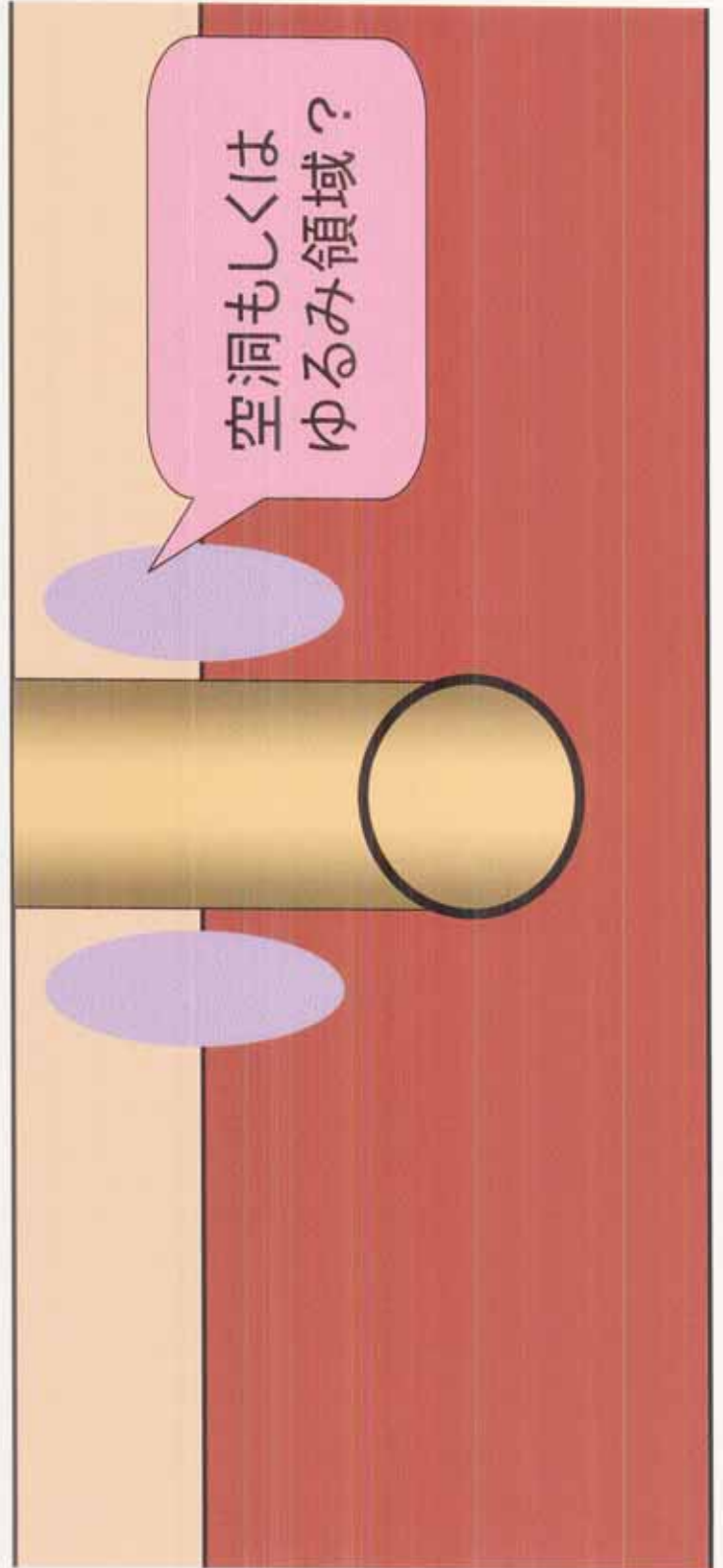
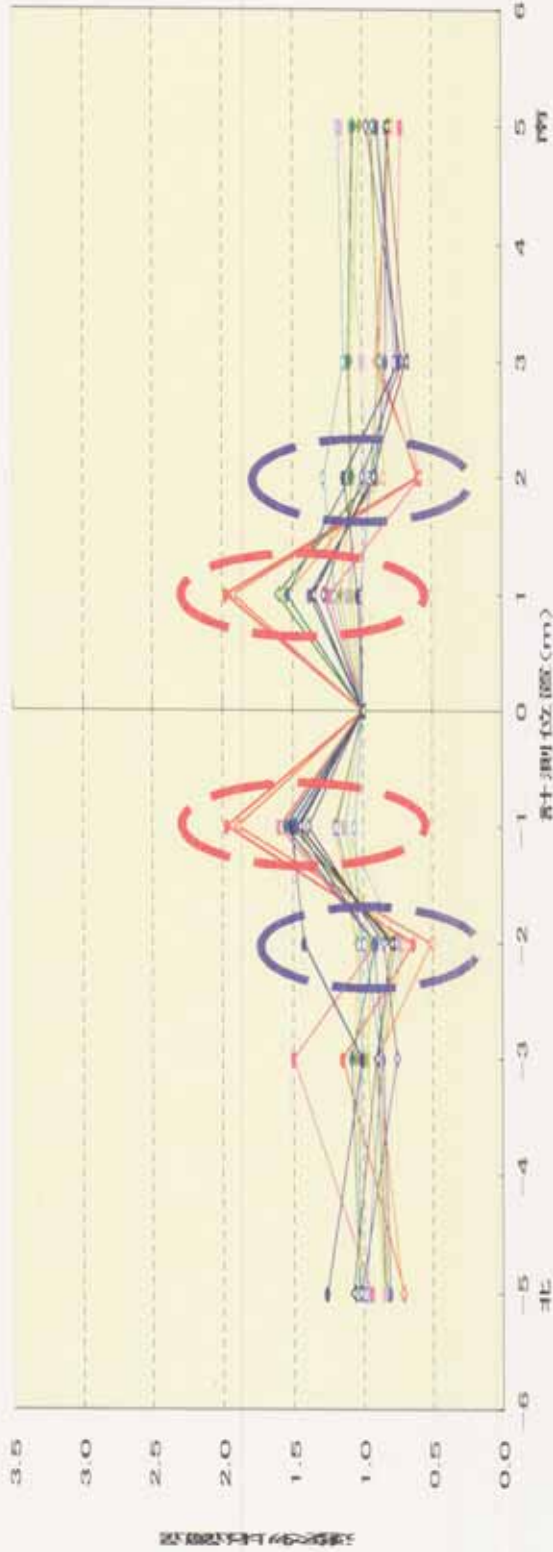




図4.3-7 計測結果による空洞分布状況の推定(測線3)

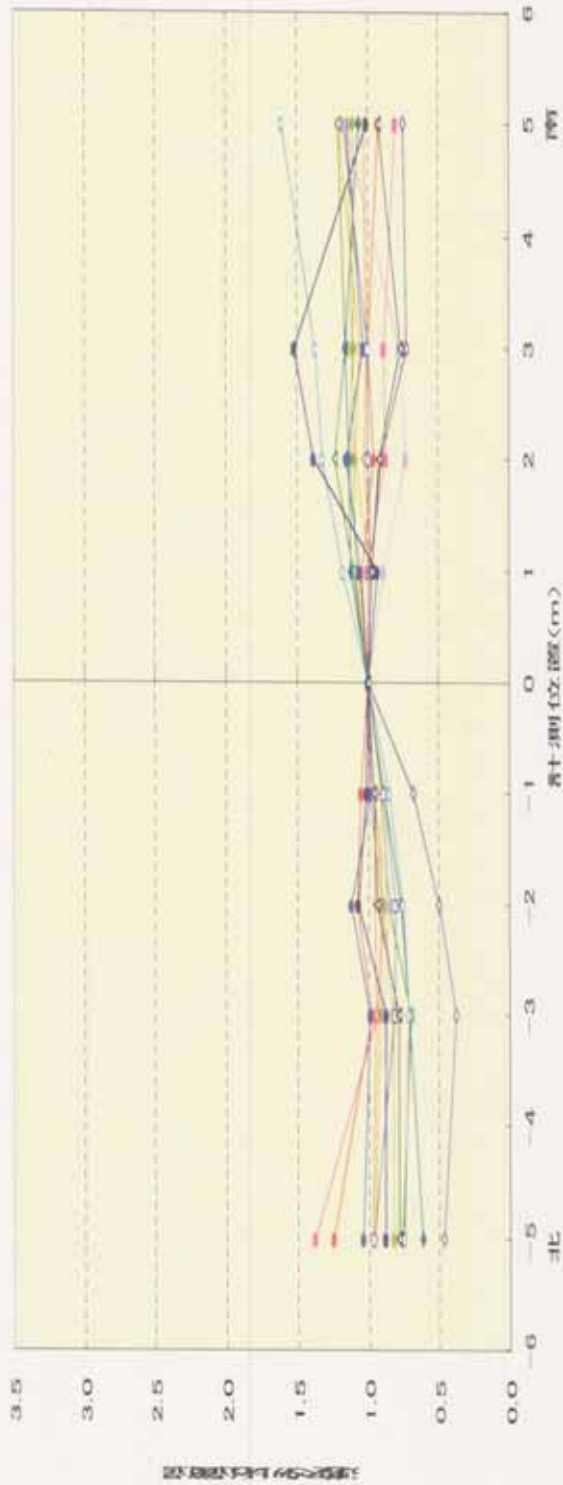
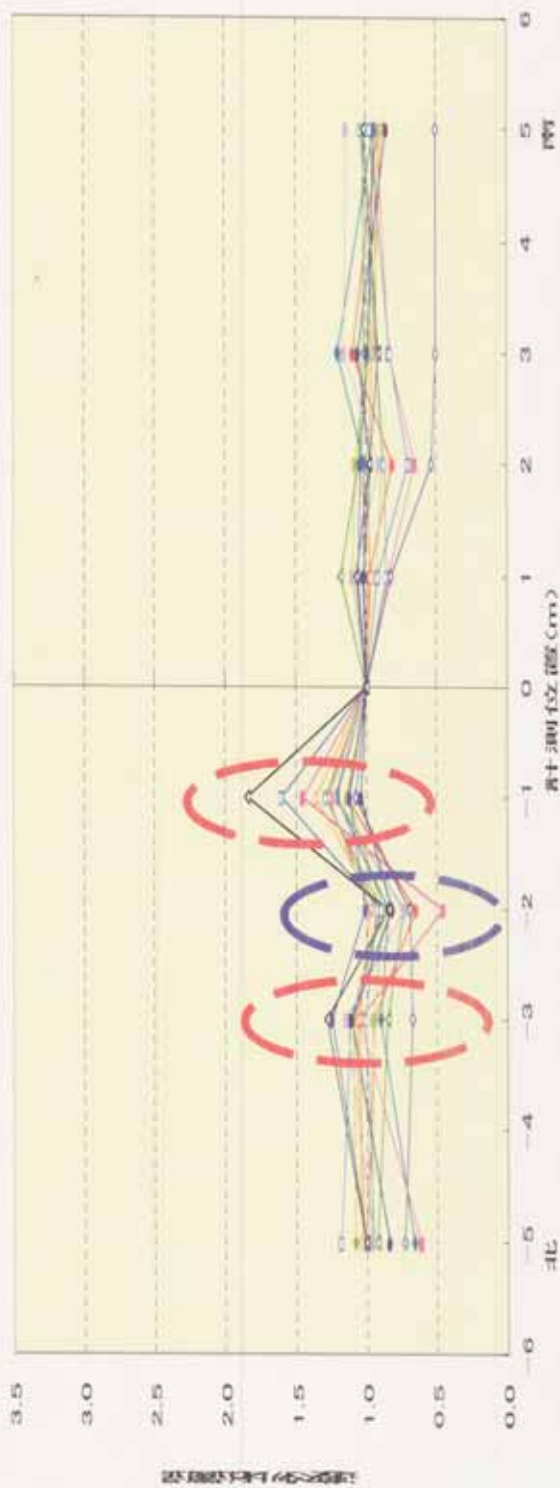
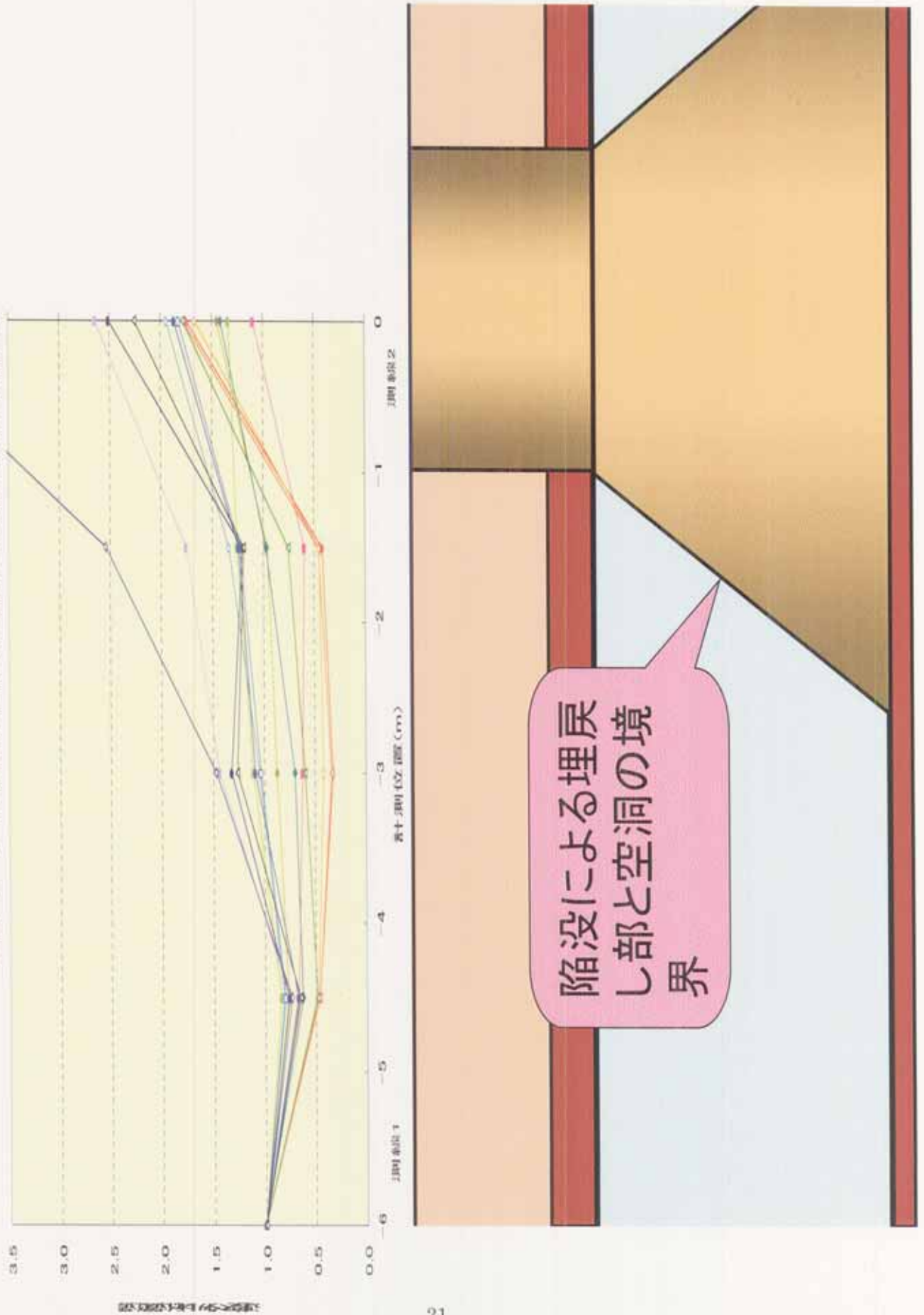


図4.3-8 計測結果による空洞分布状況の推定(測線4)



埋戻しされている  
が空隙がある  
可能性が示唆

図4.3-9 計測結果による空洞分布状況の推定(測線A)



## 5. 数値解析による探査手法のメカニズム解明

探査結果により確認された様な空洞端部における速度スペクトルの低下傾向やその外側における速度スペクトルの増加傾向の妥当性を検証するために、数理モデルによる再現解析を行った。

### 5. 1 解析モデルの概要

解析に当たっては、当地点における地盤物性、空洞の規模（2 m×2 m）等を参考にし、図5. 1-1, 2に示す二次元モデルを作成した。

微振動の入力位置は解析領域の最下部における空洞直下とし、図5. 1-2, 3に示すホワイトノイズを与えた。

なお、空洞上部については、陥没の事例があることから、ゆるんでいる可能性がある。このため、解析に当たっては、空洞上部における地盤の剛性を1/3とした場合とゆるませない場合の2ケースを再現した。

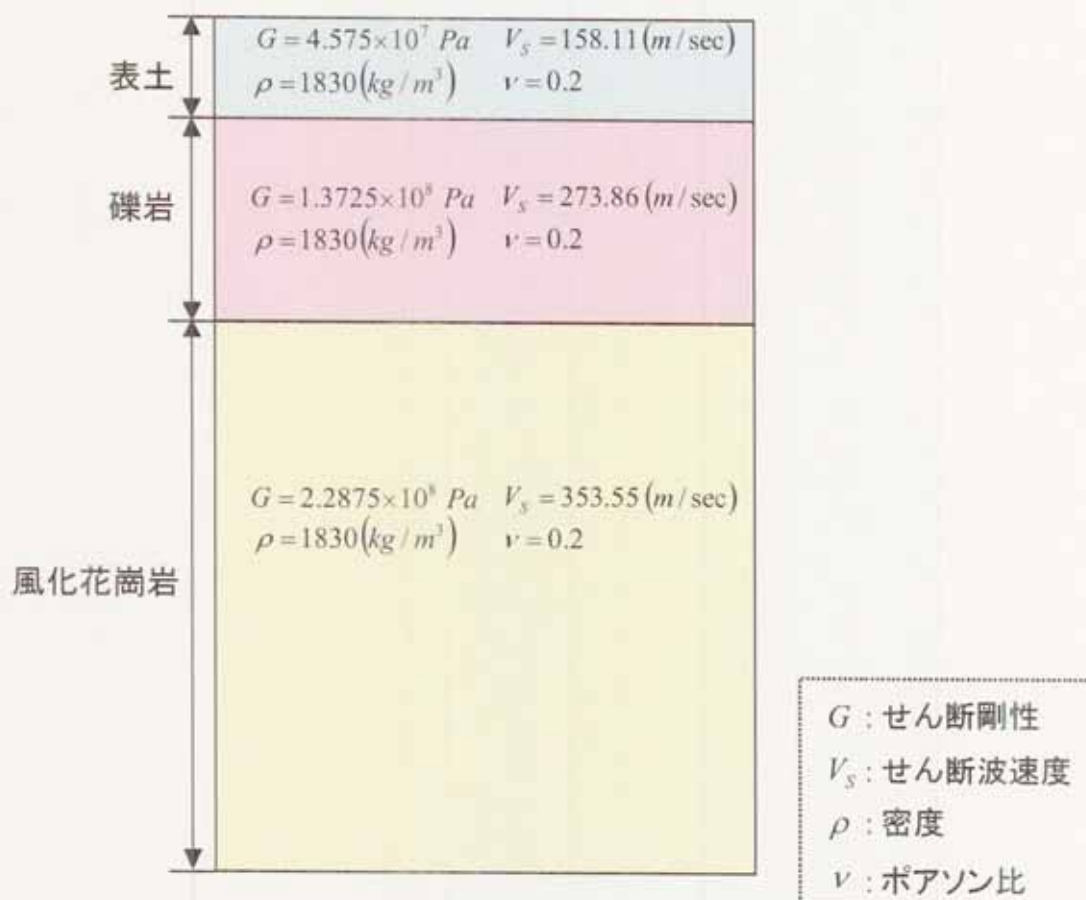


図5. 1-1 地盤物性条件

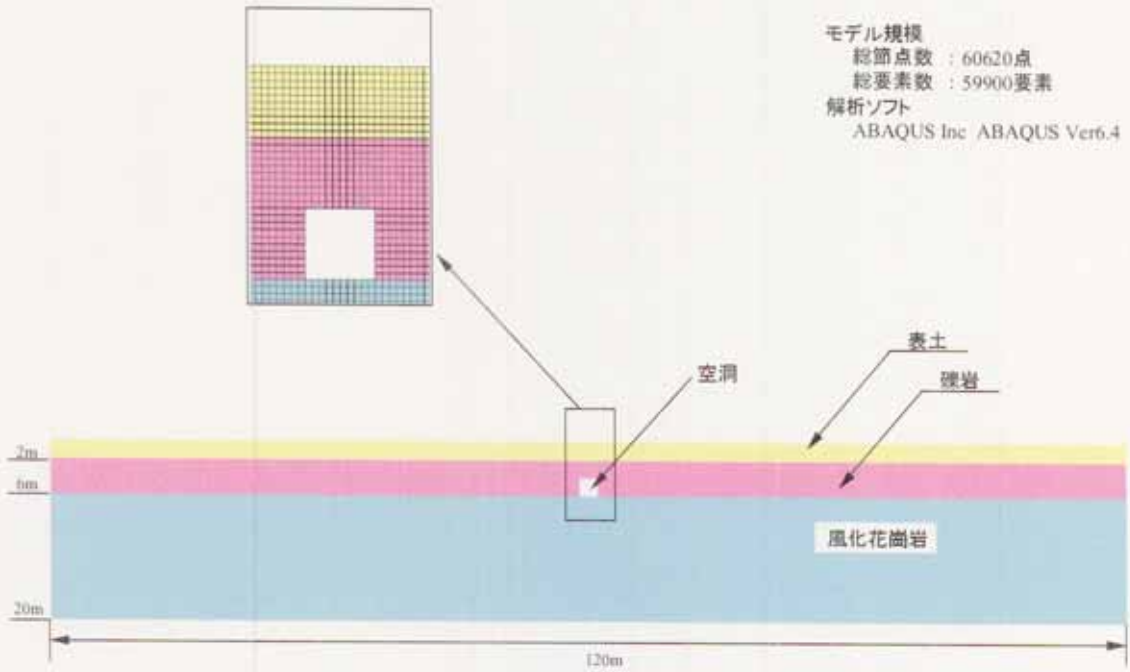


図5. 1-2 解析モデル

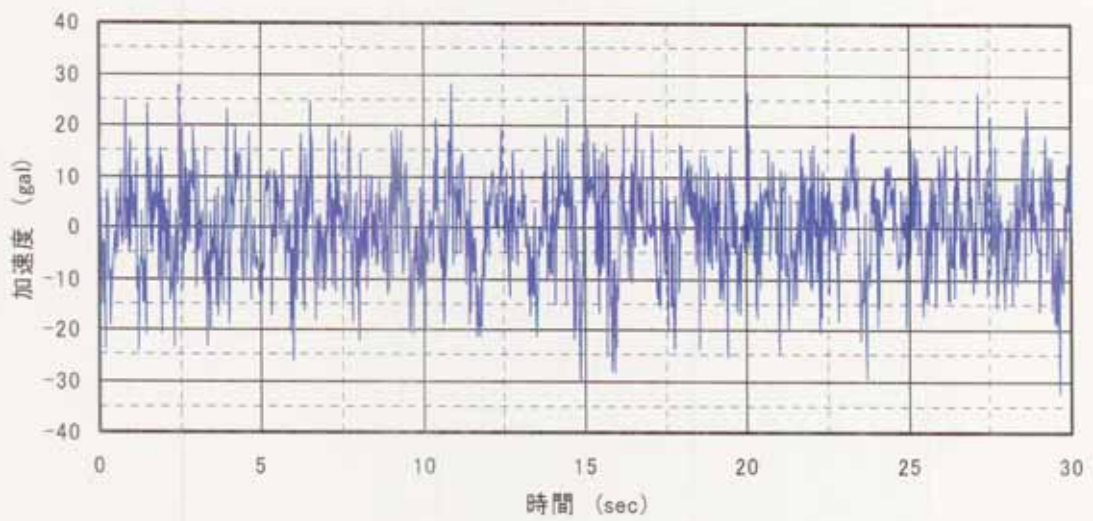


図5. 1-3 ホワイトノイズ時刻歴

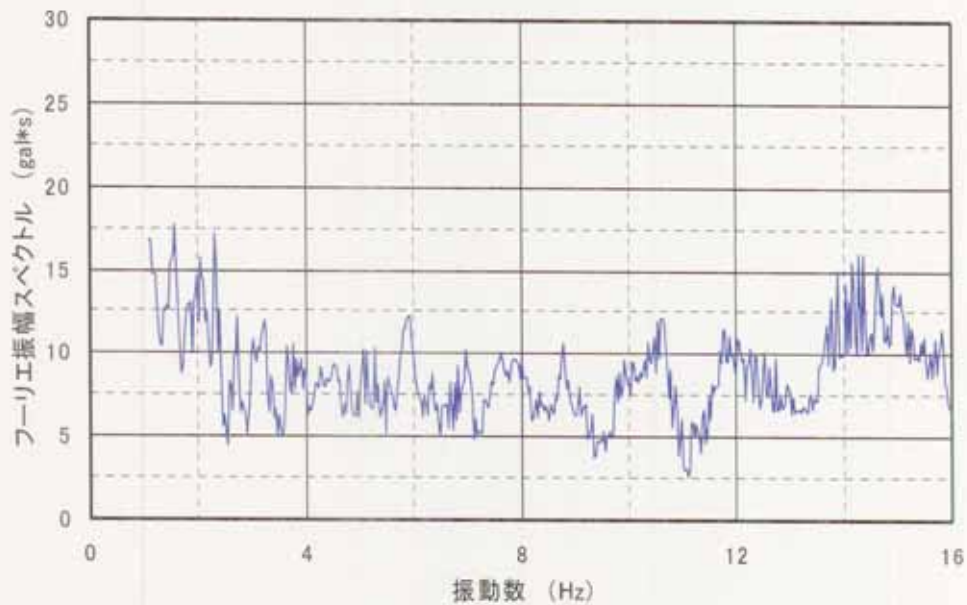


図5. 1-4 ホワイトノイズのフーリエスペクトル

## 5. 2 解析結果

### (1) 空洞が存在しない場合

解析結果を図5. 2-1に示す。周波数帯によっては、加振位置から離れるに従って速度スペクトルの上昇もしくは低下傾向が見受けられるものの、全体的には速度スペクトルは一定である。

これは、測線3の計測結果と調和的であることから、測線3には空洞が存在していない可能性が高いと思われる。

### (2) ゆるみ領域を考慮した場合

解析結果を図5. 2-2に示す。解析結果によると、空洞境界である±1mの位置において、基準点(0m)よりも速度スペクトルの低下傾向が見受けられる。さらに空洞から離れると、±3~5mの位置までは基準点より大きくなっているが、±7m以遠では基準点とほぼ同等の値に収束している。

これは、測線1の計測結果と調和的であることから、測線1の空洞上部はゆるんでいる可能性が高いと推定される。

### (3) ゆるみ領域を考慮しない場合

解析結果を図5. 2-3に示す。ゆるみ領域を設定した上記検討結果と異なり、空洞

境界である±1 mの位置における速度スペクトルの低下傾向は見受けられない。

空洞から離れると、±5 mまで徐々に大きくなっており、それ以遠では低下傾向を呈している。

これは、測線2の計測結果と傾向としては調和的であることから、測線2は過去に陥没が生じたのだが、その後の埋戻しに伴い剛性が復活している可能性が高いと思われる。

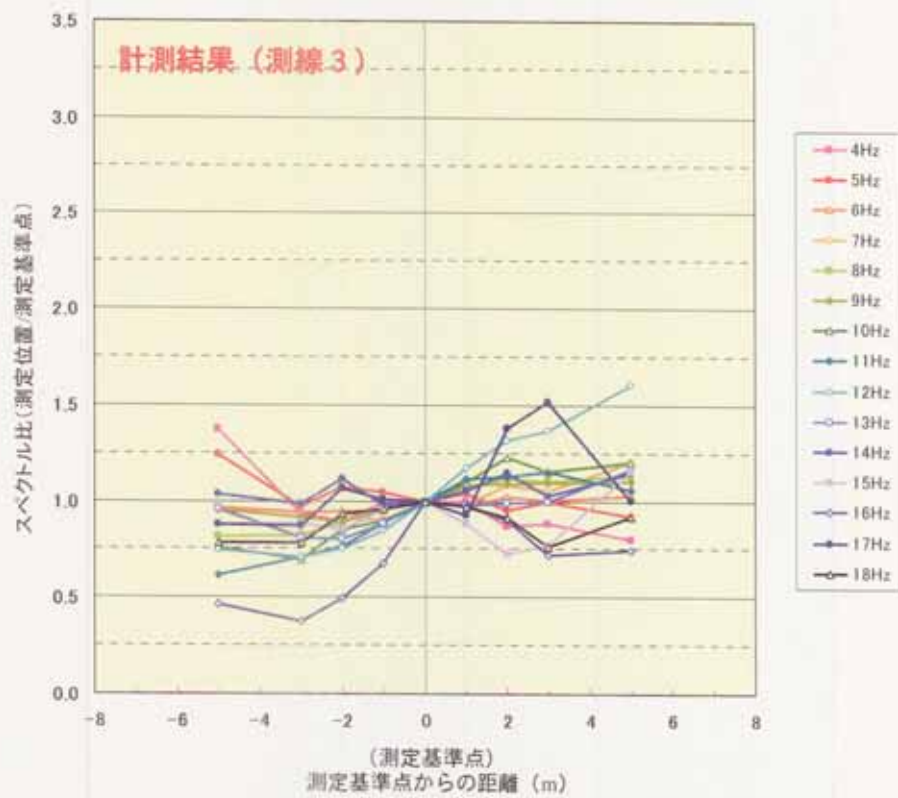
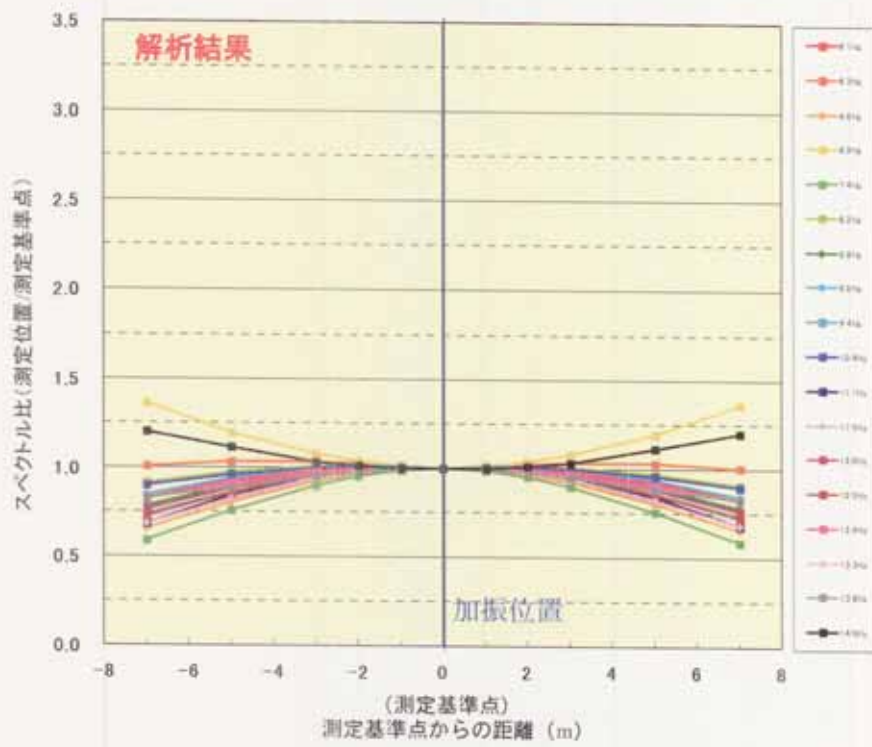


図5. 2-1 解析結果(空洞なし)と計測結果との比較



## 解析モデル



## 解析結果

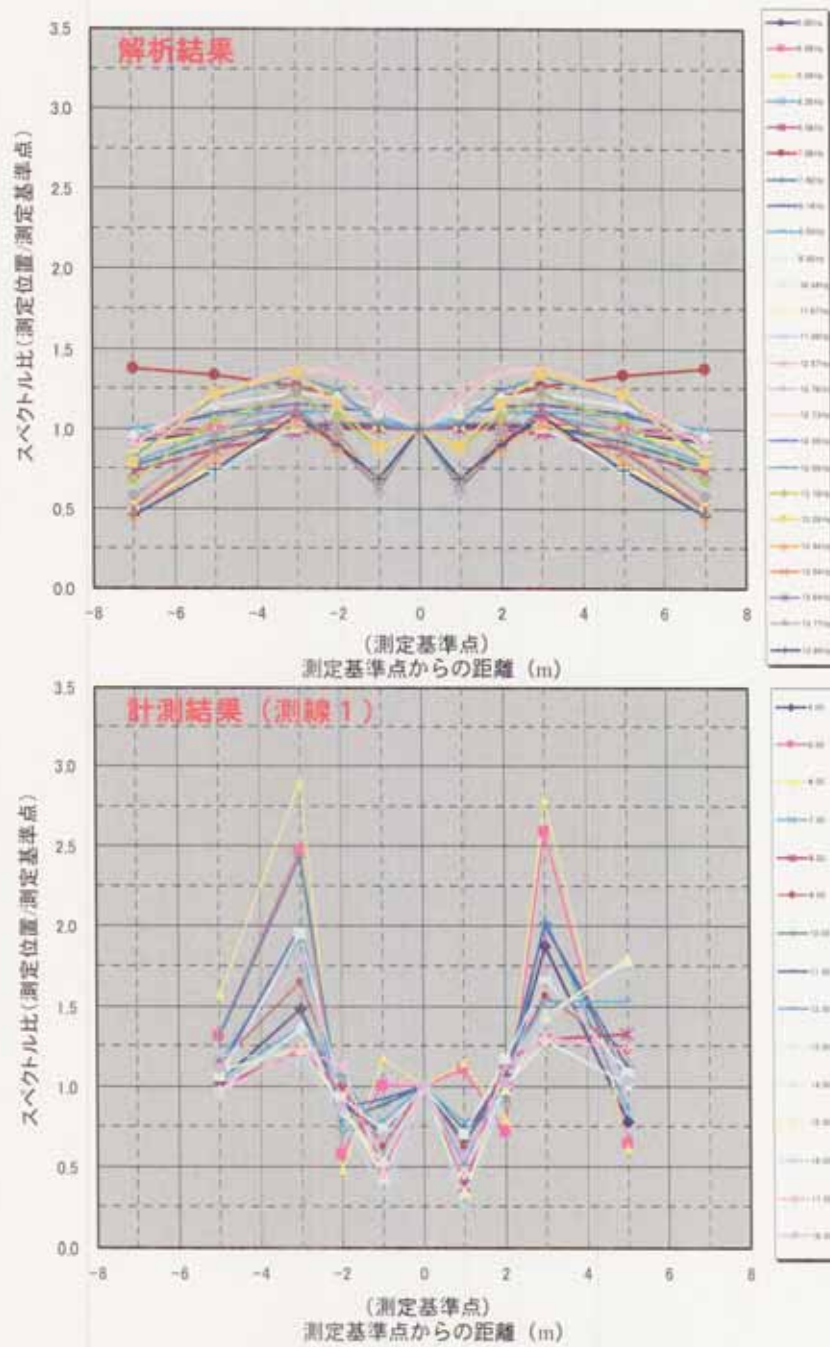


図5. 2-2 解析結果（ゆるみ領域考慮）と計測結果との比較

## 解析モデル



## 解析結果

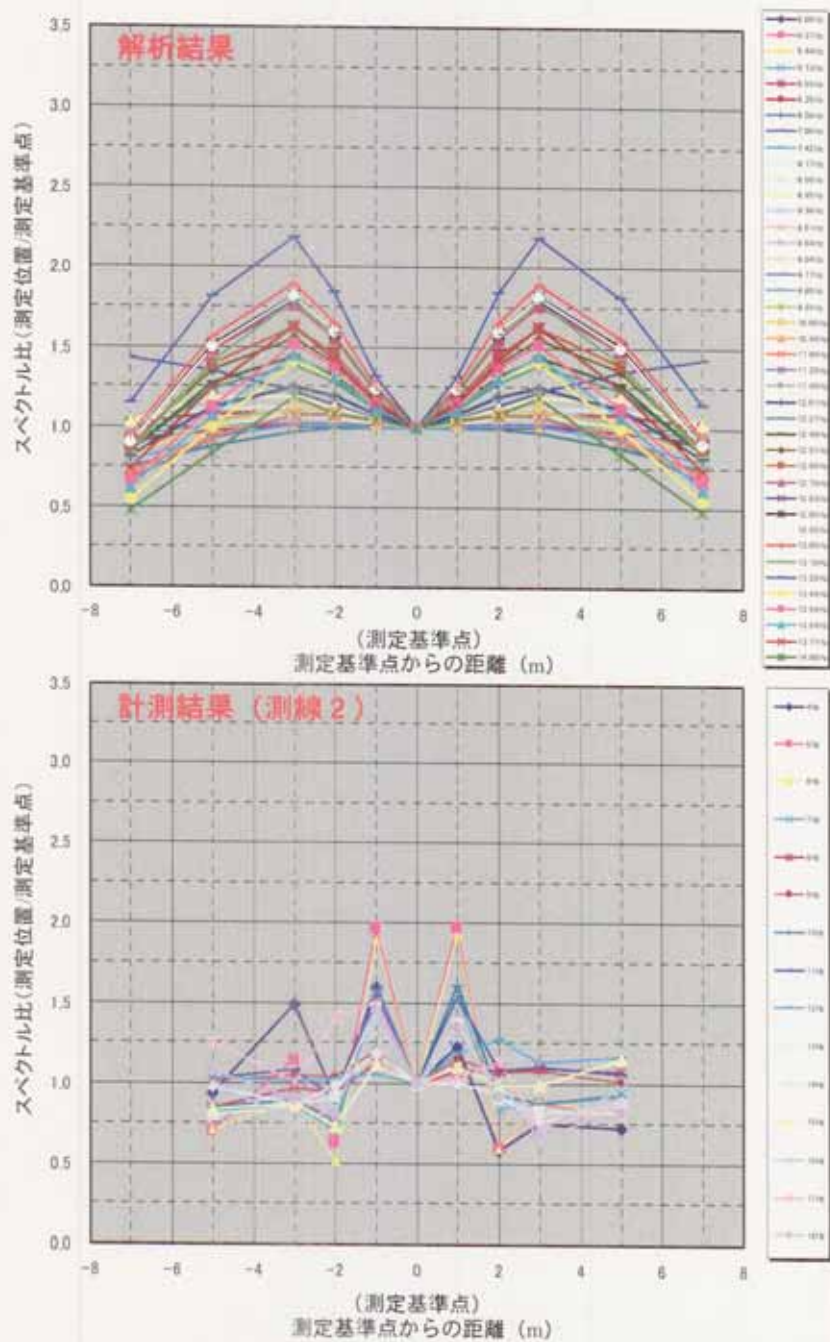


図5. 2-3 解析結果 (ゆるみ領域設定なし) と計測結果との比較

## 6. 考察

- (1) 坑道平面図、陥没箇所等から推定される空洞が残置されていると思われる箇所において常時微動計測を実施した結果、空洞周辺において、その影響と思われる速度スペクトルの変動が見受けられた。また、空洞が埋め戻されている可能性の高い箇所については、坑道のない箇所と同程度の速度スペクトルを呈しており、顕著な変動を確認することはできなかった。以上のことから、常時微動を利用した空洞探査手法により、当地点における空洞の有無を判定することが可能であると思われる。
- (2) 空洞を横断する測線においては、空洞よりも外側で一般部よりもスペクトルが高くなる傾向が見られた。この現象は他地点（岩盤地点で土被りが少ない箇所）でも確認されており、反射等によるものと想定される。
- (3) 空洞を縦断する測線においては、埋め戻し箇所から未埋め戻し箇所に向かうにつれてスペクトルが低下する傾向が見られた。坑道上部を縦断的に計測することにより、埋め戻し箇所の境界の推定も可能になるとと思われる。
- (4) 数値解析によると、空洞境界部は空洞上部がゆるんでいる場合にスペクトルの低下傾向が見受けられた。これを用いることにより、陥没危険箇所の判別が可能になると考えられる。

## 8. まとめ

今回は過去に発生した陥没箇所に着目し、①陥没した箇所であるため、復旧工事により空洞が埋め戻されている箇所、②陥没箇所よりも露天掘りを行っていない側であるため、空洞が残置されている可能性が高い箇所、③陥没箇所よりも露天掘りを実施した側であり、空洞が埋め戻された可能性が高い箇所を対象として常時微動計測を実施した。

計測結果から、埋め戻されている可能性の高い測線では、常時微動の速度スペクトルに変化傾向が見受けられなかったのに対して、埋め戻されていないと推定される測線においては、速度スペクトルに空洞上部（推定）を中心とした対称形の顕著な変動が確認された。

また、計測結果の再現を試みた二次元モデルを用いた数値解析によると、計測結果と同様の速度スペクトルの変動を確認することができた。

以上の結果から、当地点における坑道の埋め戻し実施の有無が、常時微動計測により判別可能であることを確認することができた。

なお、今回の評価結果をより確実なものとするために、今回実施した計測ポイントと坑道との位置関係を測量により明らかにすることが望まれる。

同様に、今回の調査結果の精度検証を行うために、微動計測地点においてボーリング調査や弾性波探査等により埋め戻しの有無やゆるみ領域を確認する必要があると思われる。

#### 参考文献

- 1) 人形峠環境技術センター：“人形峠環境技術センターにおける鉱山跡の措置に関する基本計画”，JNC TN6410 2002-001 (2002)，pp. I-10