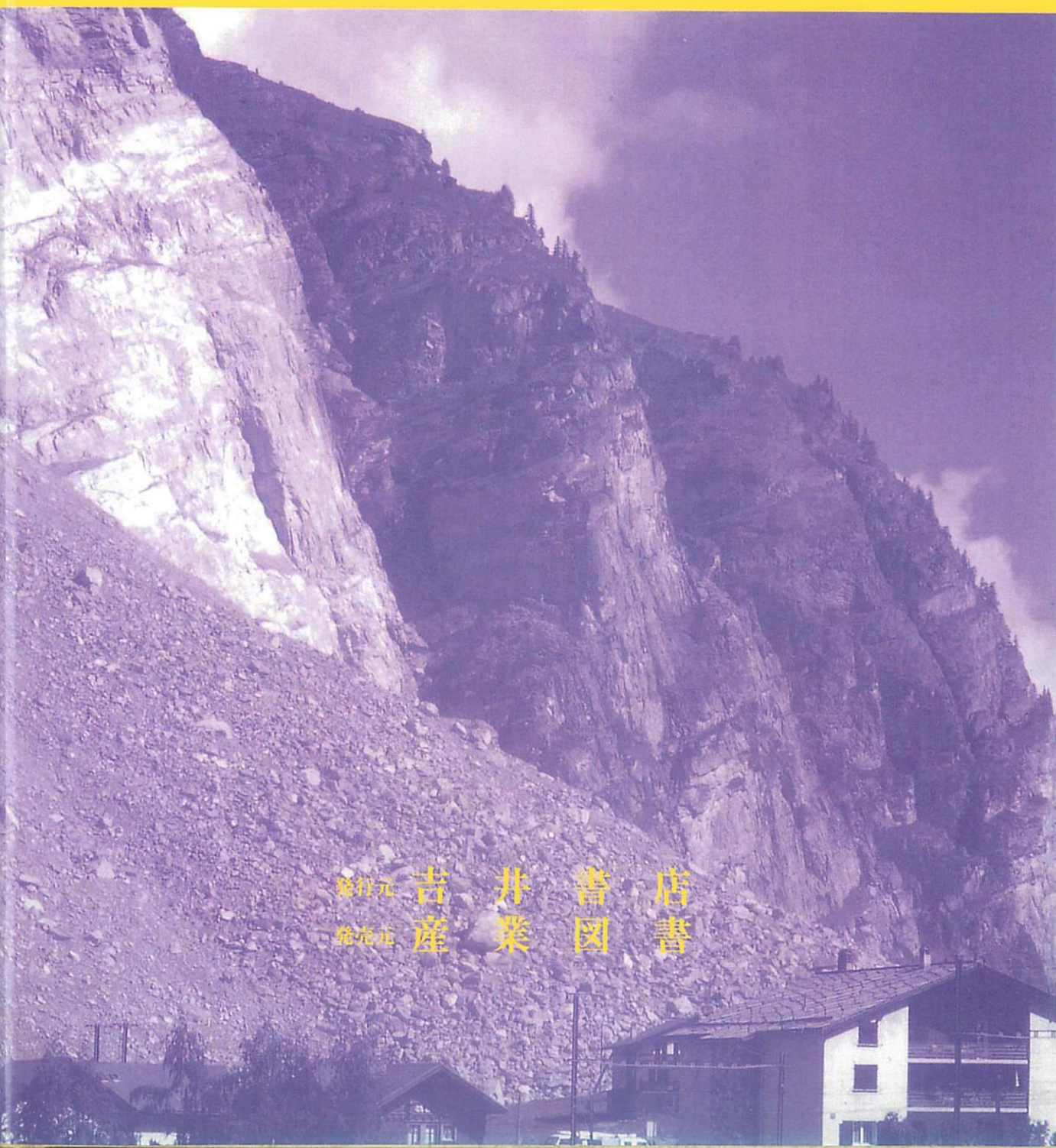


# 斜面調査のための物理探査 —地すべり・地下水・岩盤評価—

伊藤芳朗・楠見晴重・竹内篤雄 編

発行元 吉産 井業 書図 店書  
発売元 吉産 井業 書図 店書



# 斜面調査のための物理探査

—地すべり・地下水・岩盤評価—

伊藤 芳朗 編  
楠見 晴重  
竹内 篤雄

吉井書店

## 序 文

本書の内容は、これから物理探査法を学び始めようとしている技術者にも理解しやすいように、各種探査法の原理と実施方法および解析方法を解説するとともに、建設・防災分野の斜面調査に関係した実施例を数多く挙げて物理探査の有効性を示した。また、山地地盤ならびに急傾斜地の調査に物理探査を適用する際の有効な調査法の解説をしたつもりである。さらに、本書の大きな特徴は、物理探査実施・解析に関わるノウハウを数多く掲載したことである。

物理探査法の初期は資源開発を目的として実施されていた。しかし、この手法は時を経ずして建設分野に関連する基礎調査、すなわちダムの岩盤調査、トンネルの破碎帯調査、あるいは橋梁の基礎調査など、比較的狭い範囲に適用された。これが土木構造物の建設に際して、地盤調査に物理探査を適用させた第一歩であり、それは年を追うごとに増加し、また対象とする範囲も法面施工に伴う地質調査などにも広がっていった。この傾向は、防災分野についても同様であり、地すべり地帯の地下水、すべり面調査や自然斜面の調査などに利用されるようになった。当初は測定器械の精度と解析技術の未熟などの問題もあり、良好な解析結果を得るまでには幾多の試練があった。

時も過ぎ、器械が改善され解析手法の研究が進むにしたがってその精度も向上し、高度成長期にあわせるように物理探査法は、建設分野の地下水・地盤調査における有力な手法として急速に各方面へ広がっていった。当初は、調査対象が丘陵部に多く、地質的には洪積層あるいは一部に沖積層であることが多かった。従って、地盤構成はほぼ地表面と平行であると推定して解析を行っても、大きな問題は生じなかった。一部にはトンネル建設のための地質調査として弾性波探査法がよく利用されていたが、丘陵地平野部と異なり、時々ボーリング結果と合致しないことが生じていた。

その後、狭い国土を有効に利用するために、多くの生活・都市機能施設は起伏の激し

い丘陵地、山地部へと伸びていった。この時点で多くの物理探査技術者が直面した地盤は、トンネル建設に伴う弾性波探査でみられたように、成層構造を基にした解析結果とボーリング調査と合致しないことを経験し、建設・防災分野における物理探査法は、その精度面において、不十分であることが認識された。その結果として、「物探は地盤調査の役には立たない」という酷評が一部に発生した。

では、何故この様な事態になったのか？これまでに集積された調査結果に基づいて、その原因を探ると次のような点があきらかになってきた。

山地地盤は崩積土、風化岩、軟岩、硬岩等が3次元的に複雑に分布している。その中に断層・破碎帯などが混在し、地盤構成をさらに混沌とさせている。また、山地地下水の存在状態に目を向けると、平野部の地下水とはかなり異なった流動特性を示している。つまり、崩積土層、風化岩などの透水性のよい部分、あるいは硬岩の亀裂部分を選んで選択的に流れる地下水流動の挙動が明らかにされつつあった。

このように山地地盤の地質構造あるいは地下水の流動は非常に複雑であるために、物理探査だけでは十分に解明できない部分があること、また各種探査法には適用性と限界があることを明確にしていなかったところに建設・防災分野における物理探査法の信頼性が、低下した原因があるものと思われる。

もう少し詳細に山地地盤調査の報告書を分析すると、一部には現地測定法にも問題があり、データは正しく得られていても、データから結果を導く解析およびその解釈の方法に誤りがある報告書が多く認められた。つまり、現地の状況を十分に把握せずに、教科書的な数値に拘わりすぎた解析・解釈が目立ち、現場の地盤状況と測定結果とを総合的に判断した解析がなされていないものが多い。もちろん費用的な側面も考慮する必要があると考えられるが、調査結果を未知の地下構造の解明という謙虚な観点に立って、基本に忠実に実施し、現地の状況を十分に把握して解析していれば、精度の高い調査結果が得られていたに違いない。その根本的な原因は物理探査法の手法や解析法が悪いのではなくて、それを行っている人の物理探査の山地地盤への適応性に関する知識と理解の度合いにあったと言える。

物理探査に関する専門教育を受けた人が、建設・防災分野の会社に数多く所属していれば問題は少ないと思われる。しかし、実際にはその人数は非常に少数の場合が多く、



それらの人は建設・防災分野に勤めるよりはむしろ資源開発分野に就職する人が多いことも一因となっている。とくに、地質調査を専門とする会社で実際に物理探査に携わっている人の中で、大学などで物理探査の専門教育を受けた人は非常に少ない。この点はこの種の仕事を発注する側においても同様である。また、一般に市販されている物理探査関係の書物や関連学会の難しい論文を読んで勉強することは、それなりの知識を得ることができるが、実地調査には不十分な場合が多い。

地すべり、斜面調査の物理探査法の長所は、地表面もしくは1本ないし数本のボーリング孔から地盤内の詳細な情報が得られることにある。とくに山地地盤における法面、自然斜面あるいは地すべり地などでは、ボーリングによる局部的な試料とともに、全体を通じた地盤情報が必要であることから、物理探査は最も有効な調査法である。近年、トモグラフィ技術の進歩により、さらに高い精度の物理探査が可能となっているが、経済性の面と斜面や地すべり地のような地すべり面や薄層の検出には、まだ問題が残されていることから、一般的に普及されていないのが実状である。

本書は、今までの物理探査技術を基にして、主な調査対象を斜面や地すべり地に適用させたときの問題点や適用法についてまとめたものである。また、できるだけ多くの現場例を載せて、わかり易く解説したものである。さらには、単独の手法では調査できなかったものが、複数の探査法を用いることによって可能となった事例などについてもわかり易く解説し、また、現場からの言葉としてノウハウを収録し、若手技術者はもちろんのこと多くの建設、防災技術者に対しても十分役立つ書であることを確信するものである。

1998年1月

編者

### 「斜面物探研究会」名簿（ABC順）

- 青木 聡：明治コンサルタント株式会社  
 古市周二：大和探査技術株式会社  
 伊藤芳朗：自然工学研究所，関東学院大学名誉教授  
 岩崎智治：国際航業株式会社  
 小林芳正：広島工業大学環境学部  
 ◎楠見晴重：関西大学工学部  
 三好達明：日本物理探査株式会社  
 南雲政博：株式会社 興和  
 内藤光雄：川崎地質株式会社  
 中山健二：川崎地質株式会社  
 篠原俊憲：カナン地質株式会社  
 竹内篤雄：京都大学防災研究所  
 田中英幸：中央開発株式会社  
 辻本勝彦：株式会社 東京ソイルリサーチ  
 上野将司：応用地質株式会社  
 浦上俊治：株式会社 ダイアコンサルタント  
 ◎：代表

### 編集委員名簿（ABC順）

- 古市周二：大和探査技術株式会社  
 岩崎智治：国際航業株式会社  
 三好達明：日本物理探査株式会社  
 中山健二：川崎地質株式会社  
 ◎竹内篤雄：京都大学防災研究所  
 田中英幸：中央開発株式会社  
 辻本勝彦：株式会社 東京ソイルリサーチ  
 上野将司：応用地質株式会社  
 ◎：編集幹事

### 執筆者名簿 (ABC 順), 末尾の数字は執筆担当部

足立幾久：大和探査技術株式会社	課長	1 部
青木 聡：明治コンサルタント株式会社	課長	4 部
古市周二：大和探査技術株式会社	技術顧問 技術士	1, 2, 5, 6 部
伊藤芳朗：自然工学研究所 関東学院大学名誉教授	所長 理学博士	2, 4, 5 部
石川浩次：中央開発株式会社	常務 工学博士・技術士	2 部
岩崎智治：国際航業株式会社	技術士補	2, 5 部
楠見晴重：関西大学工学部	助教授 工学博士	2 部
三好達明：日本物理探査株式会社	部長 技術士	1 部
南雲政博：株式会社 興和	部長 技術士	1, 2, 5 部
内藤光雄：川崎地質株式会社	部長 技術士	3, 5 部
中山健二：川崎地質株式会社	課長 技術士	5, 6 部
篠原俊憲：カナン地質株式会社	社長	1 部
竹内篤雄：京都大学防災研究所	理学博士・技術士	2, 3, 4, 5, 6 部
田中英幸：中央開発株式会社	課長 技術士	2, 5 部
辻本勝彦：株式会社東京ソイルリサーチ	課長 技術士	5 部
上野将司：応用地質株式会社	部長 技術士	1, 2, 5, 6 部

### ノウハウ提供者名簿 (ABC 順)

青木 聡：所属前出	西 隆：中央開発株式会社
土居幹夫：株式会社 相愛	大賀一秀：カナン地質株式会社
古市周二：所属前出	酒井 番：株式会社 相愛
伊藤芳朗：所属前出	篠原俊憲：所属前出
岩崎智治：所属前出	竹内篤雄：所属前出
楠見晴重：所属前出	谷口正人：明治コンサルタント株式会社
三好達明：所属前出	辻本勝彦：所属前出
南雲政博：所属前出	上野将司：所属前出
内藤光雄 (故)：所属前出	山辺康晴：株式会社 興和

## 目 次

## 序 文

## 第 1 部 弾性波探査

第 1 章 弾性波探査法の原理および調査法 .....	1
1-1 弾性波探査の現状 .....	1
1-2 弾性波速度と物性値 .....	3
1-3 山地, 斜面の弾性波探査 .....	3
1-4 弾性波探査屈折波の適用上の限界 .....	4
1-4-1 測定技術上の限界 .....	4
1-4-2 解析上の限界 .....	5
1-4-3 結果を解釈する上での限界 .....	5
第 2 章 屈折波法の解析法 .....	6
2-1 解析法の概要 .....	6
2-2 走時曲線のチェックと調整 .....	7
2-3 “拡張ハギトリ法”による解析 .....	8
第 3 章 現地測定法 .....	12
3-1 測定作業手順 .....	12
3-2 留意事項 .....	12
第 4 章 調査実施例 .....	16
4-1 山地地形 .....	16
4-1-1 凸型地形 .....	16
4-1-2 凹型地形 .....	18
4-2 地すべり地帯 .....	19
4-2-1 御荷鉾帯 .....	19
4-2-2 三波川帯 .....	22
4-2-3 泥岩地帯 .....	24
4-2-4 温泉地帯 .....	28
4-2-5 岩盤すべり .....	30
4-3 破碎帯 (低速度帯) .....	33
4-3-1 破碎帯-トンネルの例- .....	33
4-3-2 破碎帯-造成地の例- .....	33
4-4 地下水 .....	36
4-5 ブラインド層・はさみ層 .....	38
4-5-1 ブラインド層 .....	38



4-5-2	はさみ層	41
4-6	未固結層が基盤岩を被覆する場合の解釈	41
第5章 弾性波探査法とそれに準ずる事項		46
5-1	浅層反射法	46
5-1-1	反射法地震探査の原理	46
5-1-2	浅層反射法の実施例	46
5-1-3	今後の問題点	48
5-2	レイリー波探査法	50
5-2-1	探査原理	50
5-2-2	探査方法	52
5-2-3	解析方法	54
5-2-4	レイリー波探査の利用	56
第6章 弾性波探査の最近の動向と今後の展望		57
6-1	探査法	57
6-2	解析法	58
6-3	解析結果の解釈	58

## 第2部 電気探査

第1章 電気探査法		61
1-1	電気探査の概要	61
1-2	地盤、岩盤の電気的特性	62
第2章 比抵抗法		65
2-1	概説	65
2-1-1	比抵抗	65
2-1-2	電位	66
2-2	各種測定法	68
2-2-1	ウェンナー法 (Wenner method)	68
2-2-2	他の電極配置による方法	69
2-2-3	地質構造と各電極配置の見かけ比抵抗曲線	69
2-3	高密度電気探査	72
2-3-1	測定法	72
2-3-2	2極 (ポール・ポール) 法の特徴	72
2-3-3	測定計画	74
2-3-4	測定時の注意点	75
2-3-5	測定時の自然条件	77

2-4	調査実施例	80
2-4-1	地すべり地帯	80
2-4-2	破碎帯	90
2-4-3	地下水調査	93
2-4-4	反復法による地下水排除効果判定	100
第3章	自然電位法	106
3-1	土地の電気, 電位差	106
3-2	大地にみられる3種の電気	107
3-3	土地の自然電位 (self potential, 昔は spontaneous polarization, 略して SP)	108
3-3-1	流動電位 (streaming potential)	109
3-3-2	山地, 斜面, 地すべり地における流動電位	109
3-3-3	山地, 斜面における腐蝕電池, 鋳体電池, 濃淡電池	110
3-3-4	自然, 人工の水の流動による流動電位発生	111
3-4	自然電位法 (SP法)	114
3-4-1	自然電位法とは	114
3-4-2	電極, 電圧計	114
3-4-3	測定法	116
3-5	測定結果の解析方法	120
3-5-1	等電位法	120
3-5-2	電位勾配法	121
3-5-3	平面ベクトル法	123
3-5-4	三次元ベクトル法	124
3-6	再現性の問題	125
3-7	探査実施例	129
3-7-1	地すべり地の地下水流動経路	129
3-7-2	埋設抑止杭の検出	130
3-7-3	擁壁のクラックと SP	130
3-7-4	クラック, 断層, 土質における SP の特徴	130
3-7-5	斜面のヒューム管を流れる水による SP	131
3-7-6	空洞の探査	131
3-7-7	平面ベクトル法による斜面の地下水経路の検出	131
3-7-8	三次元ベクトル法による地下水の垂直移動の検出	131
3-8	自然電位法における展望と問題点	133
第4章	比誘電率法	135
4-1	概 説	135
4-1-1	探査原理	135
4-1-2	測定装置	135
4-1-3	比誘電率 $\epsilon_r$ と地盤状況	136

4-2	測定方法と測定時の注意点	137
4-3	調査実施例	139
第5章	電気探査の最近の動向と今後の展望	142

## 第3部 1 m 深地温探査法

第1章	1 m 深地温探査による地下水流脈調査の必要性	143
第2章	地温測定による地下水調査法の原理	145
第3章	測定時の条件と測定方法	146
3-1	1 m 深地温探査の実施時期	146
3-2	1 m 深地温探査の実施方法	147
3-2-1	測点設定方法	147
3-2-2	測定方法	148
第4章	1 m 深地温探査の解析の方法	151
第5章	解釈の方法	153
第6章	1 m 深地温探査の実施例	156
6-1	地すべり	156
6-1-1	地下水流脈の存在位置を立体的に推定した例	156
6-1-2	地下水流脈の盛衰と土塊活動	159
6-2	伏流水	161
6-2-1	旧小河川の伏流水流動経路調査例	161
6-2-2	伏流水調査の再現性	163
6-3	小さな「水ミチ」探査	165
6-3-1	集水井排水管掘削位置の調査例	165
6-3-2	暗渠埋設位置探査例	167
第7章	1 m 深地温探査の最近の動向と今後の展望	169

## 第4部 自然放射能探査

第1章	土地の放射能	171
-----	--------	-----

1-1	地表付近の放射能, 三つのグループ .....	171
1-2	宇宙線, バックグラウンド .....	172
第2章 斜面, 山地における自然放射能 .....		173
2-1	斜面, 山地における断層, クラック, 地下水の検出と自然放射能 .....	173
2-2	斜面, 山地における放射能の一般的分布, 挙動 .....	174
2-3	断層, 断層破碎帯, 深いクラックにおけるラドンガス濃度の増加 .....	174
2-4	断層上でのラドンガス濃度の減少の場合 .....	175
2-5	放射線強度の極大と断層線との不一致 .....	175
2-6	クラックと放射能 .....	176
2-7	斜面, 山地の地層水, 裂隙水 <sup>れつすい</sup> と放射能 .....	176
第3章 斜面, 山地における $\gamma$ 線トータル法による測定と, その解析, 解釈 .....		178
3-1	地表において観測される地中からの $\gamma$ 線の線源 .....	178
3-2	$\gamma$ 線トータル法, $\gamma$ 線サーベイメーター .....	178
3-3	$\gamma$ 線サーベイメーターの感度, 特性 .....	179
3-4	地表面における $\gamma$ 線測定はどんな成分を測っているのか .....	180
3-5	斜面, 山地における $\gamma$ 線の測定 .....	184
3-6	測定作業要領 .....	187
3-7	$\gamma$ 線測定結果の解析 .....	188
3-8	斜面, 山地における $\gamma$ 線強度測定による探査例 .....	189
3-8-1	$\gamma$ 線強度が温泉脈上では極小, 断層では極大, 地質境界では不連続 .....	189
3-8-2	$\gamma$ 線強度異常がみられない陥没地形と地下水脈 .....	190
3-8-3	丹那断層にみられる $\gamma$ 線強度の増大と減少 .....	191
3-8-4	地すべり地帯における $\gamma$ 線強度の断面図, 分布図 .....	192
第4章 斜面, 山地におけるラドン濃度の定量法 (ラドン法) による測定と, その解析, 解釈 .....		194
4-1	ラドン濃度測定の方法 .....	194
4-2	$\alpha$ トラック法 .....	194
4-3	電離箱 (ラドン計, 泉効計) による測定 .....	196
4-4	$\alpha$ シンチレーションカウンター .....	197
4-5	液体シンチレーションカウンター (LSC) .....	198
4-6	斜面, 山地におけるラドン濃度測定による探査例 .....	198
4-6-1	断層における $\alpha$ トラック法 (ラドン濃度) と $\gamma$ 線トータル法の同時測定 .....	198
4-6-2	ラドン計によるリニアメントのラドン濃度の測定 .....	200
4-6-3	ラドン計による $Rn+Tn, Rn/Tn$ と断層 .....	201

第5章 斜面, 山地における $\gamma$ 線スペクトル法の測定方法と その解析, 解釈	202
5-1 $\gamma$ 線トータル法からスペクトル法	202
5-2 $\gamma$ 線スペクトルメーター ( $\gamma$ 線スペクトロメーター)	202
5-3 $\gamma$ 線スペクトルメーターによって測定される自然放射性核種	202
5-4 斜面, 山地, 平地における $\gamma$ 線スペクトル測定の探査例	203
5-4-1 阿寺断層におけるラドン濃度と $\gamma$ 線スペクトルの同時測定	203
5-4-2 青森県の山地における断層の $\gamma$ 線スペクトル	206
5-4-3 宇治市の断層におけるトータル法とスペクトル法との対比	208
5-4-4 岩盤地すべり地における $\gamma$ 線スペクトル	209
第6章 斜面, 山地における自然放射能探査法の展望	212
第5部 各種物理探査法による併用探査	
第1章 併用探査の必要性	213
第2章 併用探査の実施例	214
2-1 地すべり地における地下水流脈の検出	214
2-2 地すべり地における移動土塊の把握	215
2-3 地すべり地における地下水排除工施工位置決定	217
2-4 ため池漏水箇所を検出	220
2-5 活断層の位置決定	223
2-6 温泉湧出機構の解明	227
2-7 地すべり地での4種の物理探査による「水ミチ」調査	230
2-8 切土斜面の安定性	234
2-9 軟岩分布地域での地山評価	236
2-10 クラスタ解析による併用探査(地下水調査)総合解析	238
第3章 併用探査の今後の展望	241
第6部 各種物理検層法	
第1章 概要	243
第2章 測定方法と山地・斜面への適用	246

2-1	速度検層 .....	246
2-2	電気検層 .....	247
2-3	温度検層 .....	248
2-4	多点温度検層 .....	249
2-5	キャリパー検層 .....	252
2-6	密度検層 .....	253
2-7	検層を行う場合の孔内洗浄の必要性 .....	256
2-8	ケーシングが挿入された状態での検層の必要性 .....	258
第3章 調査実施例 .....		260
3-1	速度検層による岩盤評価 .....	260
3-2	電気検層による岩盤評価 .....	262
3-3	温度検層による地下水流動層の検出 .....	264
3-4	多点温度検層による地下水流動層の検出 .....	266
3-5	キャリパー検層によるすべり面の検出 .....	268
3-6	密度検層による地山評価 .....	269
3-7	各種検層の併用による地山評価 .....	270
3-8	検層と流動・自然電位法の併用による地下水流動層，流向流速の推定 .....	274

## 第7部 ノウハウ集

第1章	探査全般に関わるノウハウ .....	277
第2章	弾性波探査に関わるノウハウ .....	290
第3章	弾性波探査（表面波法）に関わるノウハウ .....	301
第4章	電気探査（比抵抗法）に関わるノウハウ .....	303
第5章	電気探査（自然電位法）に関わるノウハウ .....	309
第6章	電気探査（比誘電率法）に関わるノウハウ .....	312
第7章	1 m 探査地温探査に関わるノウハウ .....	313
第8章	自然放射能探査に関わるノウハウ .....	321
第9章	各種検層に関わるノウハウ .....	323



## 第 8 部 文献集

第 1 部 弾性波探査に関する文献	325
第 2 部 電気探査に関する文献	329
第 3 部 1 m 深地温探査法に関する文献	343
第 4 部 自然放射能探査に関する文献	351
第 6 部 検層関係に関する文献	355
あとがき	359