

JNC TH7400 2005-018

~~PNC PN7440 92-001~~

~~004~~

~~社内一般~~

~~本資料は2000年3月31日付けで登録区分
変更する。~~

~~東濃地科学センター【研究調整グループ】~~

図書室

平成3年度技術開発課年報

1992年4月

動力炉・核燃料開発事業団

中部事業所・技術開発課

~~本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部又は一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせ下さい。~~

~~〒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~~

~~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)
1992~~

~~この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついでに複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。~~

~~本資料についての問合せは下記に願います。~~

~~〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸959-31
動力炉・核燃料開発事業団
中部事業所 技術開発課~~

要 旨

本報告書は、中部事業所・技術開発課が平成3年度に実施した研究開発業務の成果を取りまとめたものである。

探鉱・採鉱に関連した技術開発の成果と、地層科学研究に係る技術開発の成果に大別して報告した。なお、安全部が所掌している安全評価研究の中の1テーマである「地質と環境放射線の変動要因に関する研究」は、探鉱・採鉱に関連した技術開発の成果の中に入れて報告した。

探鉱技術開発では、オーストラリア不整合関連型鉱床を対象とした物理探査手法の開発として、複雑地形での探査を効率的に進めるために周波数領域空中電磁（探査）法シュミレーションプログラムの作成と電磁探査解析用のプログラムTDEM2D出力部の機能強化を行ったほか、中国・遼東半島で鉱業事情調査の一部として実施したVLF-比抵抗法の適用試験結果を報告した。また、リモートセンシング技術開発として衛星からの反射スペクトルを解析するための画像処理システムの機能強化と、オーストラリア探査地区の岩石を反射スペクトル測定した同データカタログ作成について中間報告を行った。平成三年度に海外調査探鉱予算で更新したX線回折装置については、技術的な解説も含めて自動化された鉱物組成同定法を報告した。更に、東濃鉱山のインプレスリーチング跡地から湧出する坑水の処理プロセスを合理化する目的で実施した現場試験の成果についても報告した。採鉱技術開発に関する研究については、ラドン湧出抑制試験結果と探鉱エキスパートシステムの構築の2件について報告した。

地層科学研究に関する技術開発としては、分析技術に関するもの1件と物探技術に関するもの5件を報告した。東濃地域の花崗岩を対象にしたレーダー法クロスホール調査の解析結果と、調査した試錐孔の花崗岩コアによる比誘電率測定結果について電磁波速度分布と導電率の相関性などを報告した。同じく、物理調査技術開発のうち試錐孔を利用したジオトモグラフィ技術の開発として、弾性波トモグラフィ調査で得られたデータの解析プログラムの立ち上げと改良の成果についても報告した。また、地表からの物理調査法技術開発として、比抵抗トモグラフィ法のデータ解析精度を向上に関する研究と、電磁法データ解析統合プログラムの作成について報告した。分析技術開発に関する成果としては、深部地下水中の極微量成分を不攪乱状態で分析するために導入した高速液体クロマトグラフ装置のテスト分析結果について報告した。

なお、各成果の中で技術資料の登録（作成）または外部発表が既に終了しているものについては、目次の後ろに一覧表としてまとめ、その内容については省略した。

目次

1. はじめに	1
2. 探鉱・探鉱関連技術開発成果	3
A-1 放射線防護探鉱技術開発に関する研究（永崎）	3
－ラドン湧出抑制試験結果について（Ⅰ部）－	
－探鉱エキスパートシステム構築について（Ⅱ部）－	
A-2 地質と環境放射線の変動要因に関する研究（永崎）	11
－計数率から線射線量率への変換の試みについて－	
A-3 東濃鉱山坑水処理プロセスの合理化のための現場試験（宗藤，落合）	20
A-4 X線回析装置の導入（沖田）	43
A-5 中国・遼東半島地区のランドサットTMモザイク画像の作成	82
（山岸，小出）	
A-6 反射スペクトルデータカタログの作成（中間報告）（山岸，小出）	89
A-7 反射スペクトル解析のための画像処理システムの機能強化について	99
（山岸，小出）	
A-8 中国連山関ウラン鉱床におけるVLF－比抵抗法の適用試験について	110
A-9 TDEM2D出力部の機能強化（長谷川）	123
A-10 周波数領域空中電磁法シュミレーションプログラムの作成（長谷川）	127
A-11 IRESSの開発（仙波）	129
3. 地層科学関連技術開発成果	
B-1 高速液体クロマトグラフ装置のテスト分析と導入（落合）	138
B-2 東濃地域の花崗岩を対象にしたレーダー法クロスホール調査（仙波）	156
－反射波に着目した解析結果について－	
B-3 花崗岩供試体の比誘電率測定（仙波）	172
B-4 弾性波トモグラフィ・速度分布再構成プログラムの導入と改良（長谷川）	192
B-5 比抵抗トモグラフィ調査法データの解析精度向上に関する研究（長谷川）	211
B-6 電磁法データ解析統合プログラムの作成（長谷川）	213

平成3年度 技術開発課外部発表一覧

- 3年4月 『URANIUM-SERIES DISEQUILIBRIUM STUDIES IN THE TONO URANIUM DEPOSIT, JAPAN』
野原, 落合 [Radiochemica Acta]
- 3年6月 『立坑掘削影響試験 (I) -力学的・水理学的特性の変化-』
松井 [日本原子力学会1991年秋の大会]
- 3年9月 『ボアホールレーダーによる花崗岩岩盤特性調査』
-釜石鉾山原位置試験場における調査結果について-
仙波, 長谷川他 [日本応用地質学会]
- 3年9月 『ボアホールレーダーによる花崗岩盤特性調査』
仙波, 長谷川他 [日本応用地質学会]
- 3年10月 『堆積岩の地質学的特性及び透水係数、見掛比抵抗相互の関係とその水理地質構造モデル
化への適用-東濃ウラン鉾山を例として-』
尾方, 中野他 [応用地質学会誌]
- 3年9月 『パッカー式地下水サンプラーの開発』
柳澤, 中野他 [日本地下水学会]
- 3年10月 『堆積岩における水理学的特性調査 The Hydrogeological Investigation of Sedimen-
tary Rock Mass』
尾方, 中野他 [日本応用地質学会研究発表会]
- 3年12月 『地表ガンマ線測定による断層調査法について -4チャンネルカーボン-』
目黒 [鉾山保安研究会]
- 3年12月 『Present status and next approach of geophysical investigation as site charac-
terization technigue for the geological disposal of radioactive waste』
長谷川 [万国地質学会]
- 3年12月 『Preliminary results of study on excavation responses in sedimentary rock in
Japan』
杉原, 松井他 [万国地質学会]
- 4年1月 『東濃ウラン鉾床における天然ウラン系列核種放射非平衡研究』
-断層および割れ目に沿った核種の挙動-
野原, 落合 [原子力学会春の大会]
- 4年1月 『立坑掘削影響試験 -多点式変位計による岩盤の変位調査-』
佐藤, 松井 [原子力学会春の大会]
- 3年11月 『Application case studies of microcomputer - based favorability evaluation
system for uranium exploration』
小林, 仙波他

3年8月	『平成3年度 第9回技術研究会講演資料』	林 ゆかり
3年9月	『RUDALL PROJECT 物理探査(1991)解析結果報告書』	仙波 毅
3年8月	『ボアホールレーダーによる花崗岩岩盤特性調査－釜石鉱山原位置試験場における調査結果について－』	仙波 毅
3年9月	『ボアホールレーダーによる花崗岩岩盤特性調査』	仙波 毅
年 月	『土岐地区の環境放射能測定』	永崎 靖志
3年9月	『金属鉱山等保安規則改正に伴う測定結果報告と周辺監視区域外の実効線量当量評価(総括)自平成2年1月～至同年3月(第4四半期)』	花木 達美
3年10月	『水理的緩み領域計測装置の製作』	中野 勝志
3年4月	『難透水性岩石を対象とした室内透水試験』	中野 勝志
3年12月	『地表ガンマ線測定による地質構造調査』	目黒 昇
3年12月	『Present status and next approach of geophysical investigation as site characterization technique for the geological disposal of radioactive waste in Japan』	長谷川 健
3年12月	『土壌水分・地下水位観測システムの落電等に起因する異常電圧の防止対策に係わる保安機器の製作と据え付け』	中野 勝志
4年1月	『難透水性岩石を対象とした室内透水試験装置の開発』	中野 勝志
4年1月	『IRESSの開発(その4) 1.成果報告書, 2.システム設計書, プログラム設計書, ユーザーズマニュアル, 3.打ち合わせ議事録』	仙波 毅
4年1月	『花崗岩供試体の比誘電率測定』	仙波 毅
3年12月	『表層部における水収支の調査研究』	中野 勝志
4年2月	『平成2年度 技術開発課年報』	目黒 昇
4年3月	『電磁法データ解析統合プログラムの作成』	長谷川 健

1. はじめに

1. はじめに

本報告書は中部事業所技術開発課の平成3年度業務のうち研究開発業務について、その成果をとりまとめたものである。平成3年度は前年度に引き続き探鉱・探鉱関連の技術開発及び地層科学関連の技術開発を行った。

技術開発課の業務としてそのほか、岩石・水の分析業務、東濃鉱山の維持管理と東濃鉱山における第2立坑掘削工事に関わる一連の業務、図書及び技術情報管理関係があった。また、第2立坑掘削が終了したことにもない、施業案の変更申請、坑水処理、電気系統設備に関する認可変更や捨石たい積場の整備、捨石たい積場に起因する放射線の測定とその評価などを行った。

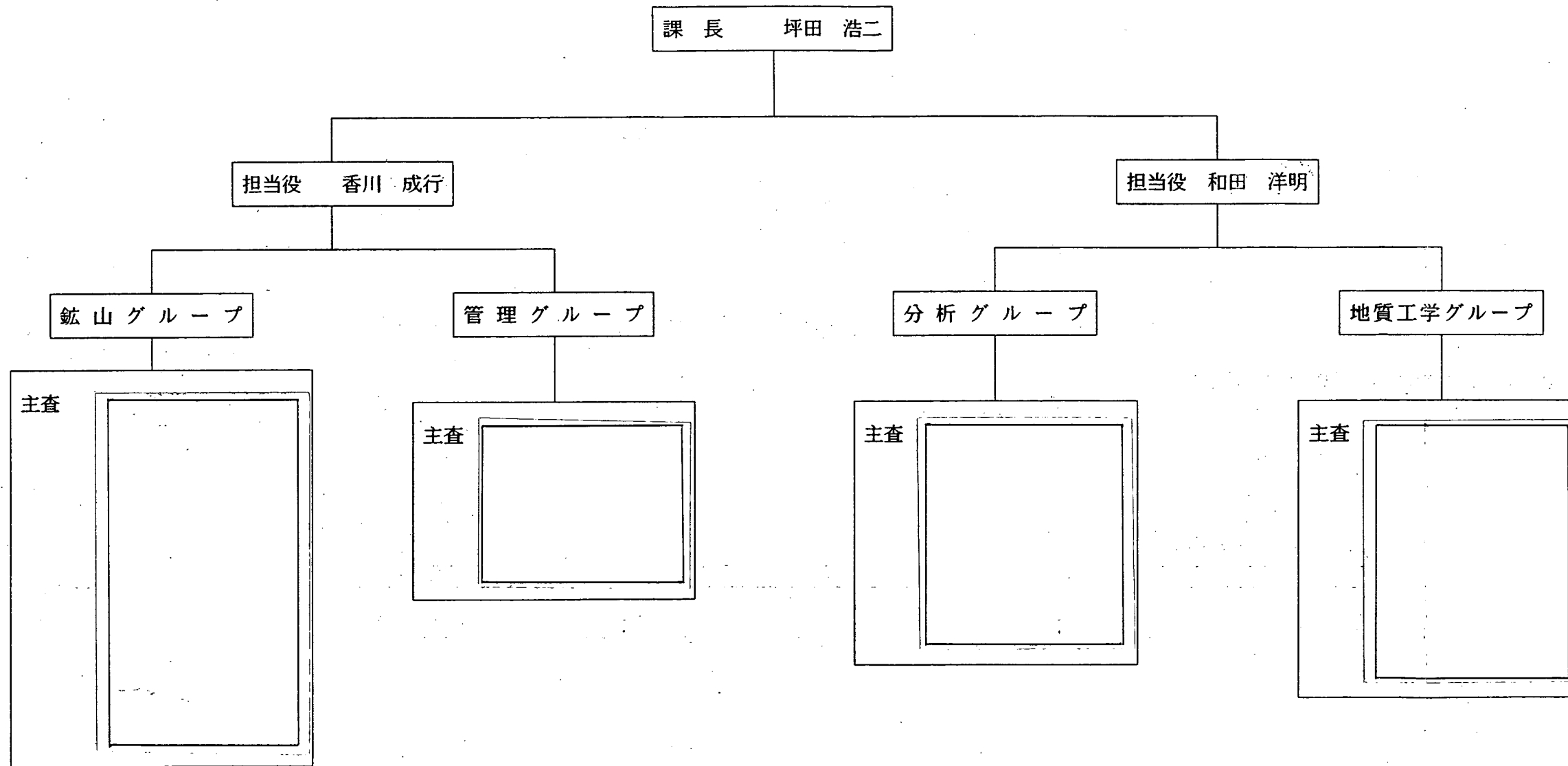
技術情報管理関係では平成3年1月1日より事業団の技術情報管理規定が改正され、技術情報に関する区分が変更になったほか、それまで事業団の技術情報管理について、本社で行われていた業務の一部が各事業所に移管され登録手続きは事業所で行われることになった。

また、探鉱・探鉱に関する研究開発の目的と長期計画を策定するためウラン資源探鉱開発に係る研究開発5ヶ年計画を策定した。このうち技術開発課が所掌する業務としては探鉱技術開発（地球物理学的探鉱システムの開発、探鉱データ処理・解析システムの構築）と探鉱技術開発（放射線防護探鉱技術の開発）となった。そのほか過去5年間の技術開発業務の実績について事業団の技術開発業務評価委員会による研究開発業務評価をうけた。リモートセンシング技術開発、物理探査技術開発、ウラン探査プロジェクト評価システム開発、高品位鉱床放射線防護探鉱技術開発の4つのテーマについて評価されたが概評はいずれも、B（良い）で、評価委員会から一層の資料化、権利化の必要性、内部のまとめの実施のほか予算の要求、評価システム対応に対する工夫が必要との指摘があった。これらについては、研究開発管理の改善や成果の資料化などを通じて確実な成果をあげてゆく方針である。

地層科学研究では本報告書にあげる業務のほか、第2立坑を利用した立坑掘削影響試験のうち岩盤挙動調査に係る試験研究、水理学的影響調査に係る試験研究、室内透水試験の実施、水理調査機器の開発などを環境地質課の兼務として行った。これらの成果は地層科学研究に係る研究成果として別途TRレポート、各種学会誌などに報告されている。

なお、平成3年度の技術開発課の組織は図に示すとおりである。

平成3年度技術開発課 組織図



注) (*)は環境地質課兼務
(**)は技術開発課兼務

2. 探鉱・採鉱関連技術開発成果

- A-1 放射線防護採鉱技術開発に関する研究
- A-2 地質と環境放射線の変動要因に関する研究
- A-3 東濃鉱山坑水処理プロセスの合理化のための現場試験
- A-4 X線回析装置の導入
- A-5 中国・遼東半島地区のランドサットTMモザイク画像の作成
- A-6 反射スペクトルデータカタログの作成（中間報告）
- A-7 反射スペクトル解析のための画像処理システムの機能強化について
- A-8 中国連山関ウラン鉱床におけるVLF-比抵抗法の適用試験について
- A-9 TDEM 2D出力部の機能強化
- A-10 周波数領域空中電磁法シュミレーションプログラムの作成
- A-11 IRESSの開発

A - 1 放射線防護採鉱技術開発に関する研究

－ラドン湧出抑制試験結果について（Ⅰ部）－

－採鉱エキスパートシステム構築について（Ⅱ部）－

（永 崎）

A-1 放射線防護採鉱技術開発に関する研究
— ラドン湧出抑制試験結果について (I部) —
— 採鉱エキスパートシステム構築について (II部) —

永崎靖志

(I部)

1. はじめに

ウランの娘核種であるラドンは不活性気体であり、物質と化学的反応を起こすことがないため比較的容易に物質中を移動することができる。そのため、ウラン鉱山の坑内壁面のみならず ^{226}Ra を含有する土壌や壁面などから相当量が開放されている。このようなラドンは壁面などと接した空間に蓄積され、換気などが不十分な場合はかなりの濃度になることが知られている。これらは、換気などによって減少させることができるが本質的には壁面からのラドンの湧出を抑制することが鉱山労働者の内部被ばく低減化の観点からは重要である。このため、壁面からのラドンの湧出を抑制するには適当な塗布剤により壁面を覆う方法が考えられる。

ここでは、このラドンの湧出に効果的な抑制力を持つと思われる複数の塗布剤についての試験結果について報告する。(1)

2. 実施内容

2.1 ラドン湧出抑制試験の方法

図-1、図-2に示す実験装置の中央段にラドンの湧出を抑制する抑制剤を塗布した試料板を固定し、下段の容器内にラドンの発生源であるウラン鉱石を置く。下段で発生したラドンは試料板を透過し、上段の容器内に蓄積するはずである。この場合、上段への透過量が少ないほど、効果的な抑制剤、所謂“ラドンバリアー”と言える。

抑制剤はセメントモルタル板に塗布するが、その前にセメントモルタル板のラドンの透過量を調べる必要があり、セメントと砂のみで製作したモルタル板についてラドン湧出量を測定した。下段容器にウラン鉱石を入れ試料板を取りつけ容器を密閉し、30分後、24時間後に下段容器と上段容器内の試料空気をルーカスセルに採取し、ラドン濃度の測定を行った。

また、各塗布剤はセメントモルタル板に塗り乾燥後塗布面の端とセメントモルタル板の周辺部の間にコーキング剤を塗布し、それをセメントモルタル板保持用の塩ビ製リングに試料面を下にして乗せ、さらにコーキング剤を周辺に塗布したうえ、測定容器の中央の段に試料面を下向きにセットし、ネジ止めをしさらにその上にコーキング剤を塗り、試料塗布面以外からのラドンのリークを防止した後、容器を密閉し上述の方法と同様にして測定した。

なお、下段容器中のラドン濃度は $3 \times 10^2 \text{ KBq/m}^3 \sim 6 \times 10^1 \text{ KBq/m}^3$ あった。

2.2 塗布剤について

選定した塗布剤はコンクリートの補修剤もしくは充填目地剤、ライニング剤などとして使用する2液(主剤: R、硬化剤: H)型の樹脂である。名称はDMレジン・PT200(東都

レジン化工株式会社)である。硬化時間は20℃で1～2日、配合比率はR/H=100/50である。また、過去に文献調査によってその効果が期待されていた、ミネラルパーマシールド、ウルトラパーマシールド、アクアパーマシールド、アイゾールも同様に使用した。

表-1に塗布の条件及びテストピースの厚さを示す。

表-1 ラドン湧出抑制塗布剤一覧

試験番号	分類	塗布の条件	テストピース厚さ
1	リーク試験	アルミ箔+ウルトラパーマシールド + PT 200	0.8 cm
2		ウルトラパーマシールド + PT 200	0.8 cm
3		コーキング材全面塗り	0.9 cm
4	セメント・モルタル	モルタルのみ	0.9 cm
5		アイゾール添加	0.8 cm
6	ミネラルパーマシールド 塗布	1度塗り	0.8 cm
7		2度塗り	0.8 cm
8	ウルトラパーマシールド 塗布	1度塗り	0.8 cm
9		1度塗り	0.8 cm
10	アクアパーマシールド塗布	1度塗り	0.9 cm
11		1度塗り	0.9 cm
12	PT 200 塗布 アイゾール添加	1度塗り	0.8 cm
13		1度塗り	0.8 cm
14		2度塗り	0.9 cm
15	PT 200 塗布	1度塗り	0.9 cm
16		2度塗り	0.9 cm
17		2度塗り・端部塗り	0.9 cm
18		1度塗り・裏面全面塗り	0.8 cm

2.3 測定結果

測定結果を表-2に示す。実験容器は十分な機密性を持たせていたが、締めつけボルトを通じてのラドンリークも予想されたため、テストピース上部にアルミ箔をつけたリーク試験を実施し、これを実験容器固有のリーク量を仮定した。(試験番号-1)

24時間後及び48時間後の湧出率の平均値は約5%であった。

このため、このリーク率を各試料の測定値から引き去り補正済値として表に示した。

ラドン湧出量として上段容器中のラドン濃度を下部容器中のラドン濃度で除した値を示す。

0.5時間後の湧出率はベースとしたセメントモルタル板自身が持つラドン濃度のみならず実験容器を密封する時の状態に変化する。従って参考値とした。

なお、24時間後及び48時間後の測定値が試験体の”ラドンバリアー”としての能力を示していると考えられる。

表-2 ラドン湧出抑制塗布剤の試験結果

試験番号	測定結果				
	ラドン湧出率 (%)			ラドンリーク率 (%)	
	0.5 時間後	24時間後	48時間後	平均値	補正済値
1	0.67	6.9	3.0	5.0	0
2	0.0005	3.5	6.6	5.0	0
3	0.36	5.8	5.3	5.6	1
4	1.92	27.5	—	28.0	23
5	1.32	40.0	—	40.0	35
6	4.12	36.7	35.5	36.1	31
7	3.62	13.8	15.7	14.8	10
8	0.88	3.6	—	4.0	0
9	0.85	6.1	19.0	12.6	8
10	3.3	32.1	—	32.0	27
11	0.21	6.0	15.2	10.6	6
12	1.1	6.9	—	8.0	3
13	3.2	9.4	12.6	11.0	6
14	4.4	9.6	13.0	11.3	6
15	0.82	9.7	—	11.0	6
16	0.61	7.9	14.4	11.2	6
17	1.9	10.3	7.0	8.7	4
18	0.003	2.7	5.6	4.1	*0

*参考値

3. まとめ

測定結果からは、パーマシールド系の塗布剤については、粘性のやや高いウルトラパーマシールドがある程度の効果を示していると考えられるが、必ずしも良い状態ではない。

また、PT200 については試験番号12と13、15と16のように2度塗りをしても殆ど差がない。これは試料保持用のリングへの取り付け部分の内側までPT200 を塗布せず、その間をコーキング剤で埋めたためと思われる。これに対して逆の面にPT200 を塗布しリングとの取り付け部分までカバーした例では平均値で4.1%であった。

この試験番号-18は裏面に全面塗りを施しており単純に補正値を引くことはできないが補正値を当てはめると0%となり、ほぼ完全にラドンが抑制されたことになる。

なお、今回の試験は冬季に行われたため、昼間と夜間の気温差が大きく、気温の低い状態で実験装置をセットすると気温の上昇により内圧が上がり、そのため上部の蓋から容器内の空気が漏出し、上部容器内の圧力はそれ程上昇せず、下部容器の圧力のみが高くなりラドンを含む空気が強制的に試料もしくは容器内のリーク箇所を通して下部から上部へ移動し、見かけ上ラドン湧出が増加した可能性がある。これは今後の検討材料としたい。

本測定結果は、あくまでも実験室規模での測定である。今後は東濃鉱山クロスカット内に設置できるような大型の試験容器での大面積テストピースを用いた試験を実施し、工業的な強度の確認等を含めた測定を実施する必要がある。

(Ⅱ部)

1. はじめに

近年、エキスパートシステムの開発が様々な分野で行われている。エキスパートシステムの目指すものは、専門家と同様な知識を持ち専門家にとって代われるようなシステムと言える。

専門家は、長年の経験に基づいて多くの知識を蓄積しているが、多くの場合、未整理のまま蓄積されており、そのことに本人も気付いていないことが多い。何らかの問題にぶつかると、比較的似たケースを選びだし、その時の経験に基づき対処するケースが多い。

ここでは、ウラン鉱山を開発しようとする場合に、最適な採鉱法を選択できるような機能を持つ、採鉱エキスパートシステムの構築について検討したので報告する。⁽²⁾

2. 実施内容

2.1 採鉱エキスパートシステム構築の考え方

採鉱エキスパートシステム構築にあたっては、現在まで学会等により発表、公にされている採鉱に関する文献を参考にした。^{(3)~(38)}

エキスパートシステムが比較的成功している分野は、殆ど例外なく知識の整理の進んだ学問分野といえるが、採鉱法は複雑な自然条件を相手とするものだけに知識の整理は難しく、前述のように経験を積んだ技術者の頭脳の中に種々の貴重な知識が未整理のまま詰め込まれている場合が多い。そこで、採鉱を専門分野としない一般の技術者が将来使用可能なエキスパートシステムの開発を目的とし、経験の深い採鉱技術者が何に注目し、どのように採鉱法を選択しているかを探りだすことに重点を置いた。

2.2 採鉱法選択方法について

採鉱法の選択に当たって、特に注目しなければならない点は以下の事項である。

- ・ 鉱床の形状
- ・ 鉱床の規模
- ・ 鉱石の品位
- ・ 鉱床の深さ
- ・ 岩盤の力学的性質

次にエキスパートシステムの利用者の応え易さに配慮しつつ、質問事項の検討を実施した。例えば、鉱石の品位に対する質問は、次の3分類の内一つを選択するという方法を採用した。

- ・ トン当たり1万円未満
- ・ トン当たり1万円から3万円未満
- ・ トン当たり3万円以上

鉱石の品位(価値)の評価の仕方は種々あるが、一般の技術者に答えやすく、それでいて最低限必要な情報が得られるよう配慮している。

2.3 エクスパートシステムプログラムの内容

使用計算機について、現在最も普及率の高い日本電気(株)NEC・PC-9801シリー

ズを選定した。

- ・フォーマット : MS-DOS 1Mバイト
- ・言語 : N88Basic

今年度は研究の初年度であるので、計算機プログラムは極く簡単なものとなっている。

3. まとめ

今年度、非常に簡単なものではあるが、採鉱エキスパートシステムを作成した。このシステムでは、鉱床の形状・規模、鉱石の品位、鉱床の深さ、鉱石の母岩の力学的特性を入力すると、相応し採鉱法が出力されるようになっている。今後の予定としては、本年度作成したプログラムを、既存の鉱山の例をとって試用し、その結果を踏まえて不備な点等を改良する事が第一であり、その後、より詳細な質問事項を付け加え、採鉱法の適・不適をより明確に示すシステムを目指すことが必要である。最終的には、経済性評価まで踏み込めたら画期的なシステムになるものと考えられる。

なお本研究について平成4年度以降は、鉱床解析室が所掌することになっている。

参考文献

(1)・(2)

資源・素材学会「放射線防護採鉱技術開発に関する研究」(動燃事業団・委託研究報告書) PNC TJ7552 92-002

(3) Hartman, H. L.: "Introductory Mining Engineering", Wiley (New York), 633 pages 1987.

(4) Wright, E. A. : "Open Pit Mine Design Models", Trans Tech Publications (Clauthal-zellerfeld), 187 pages, 1990.

(5) Nilsson, D. : "Open-Pit or Underground Mining", Sec. 1.5 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 70/87, 1982.

(6) 工業火薬協会編: "新・発破ハンドブック", 山海堂, 548 pages, 1989

(7) "Handbook on Surface Drilling and Blasting", TAMROCK, 310 pages

(8) Olofsson, S. O. : "APPLEX (Årla), 303 pages, 1988

(9) "Mining Activity in the Free World" および "Western World Coal and Lignite Mines" より収録.

(10) Noetstaller, R. : "Small-Scale Mining — A Review of the Issues", the World Bank (Washington), 77 pages, 1987.

(11) Stewart, R. M., and Kennedy, B. A. : "The Role of Slope Stability in the Economics, Design and Operation of Open Pit Mines", Chap. 2 in Stability in Open Pit Mining (Proc. 1st Int. Conf. on Stability in Open Pit Mining), pp. 5/21, 1970.

(12) 天野 勲三: "露天採鉱 —— 採鉱学各論", 秋田大学鉱山学部通信教育講座, 秋田大学鉱山学部(秋田), pp. 135/179, 1987.

- (13) Milton, T. P., and Roderick, K. D. : "Pit Planning and Design", Sec. 17.2.2 in SME Mining Engineering Handbook (ed. by Cummins, A. B., and Givens, I. A.), AIME (New York), pp. 17-10/19, 1973.
- (14) McClelland, J. F., et. al. : "Classification of Underground Metal-Mining Methods Sec. 10.25 in Mining Engineers' Handbook 3rd. Ed. (ed. by Peele, R.), Wiley (New York), pp. 10-1123/124, 1941.
- (15) Morrison, R. G. K., and Russell, P. L. : "Selecting a Mining Method: Rock Mechanics, Other Factors", Sec. 9 in SME Mining Engineering Handbook (ed. by Cummins, A. B., and Givens, I. A.), AIME (New York), pp. 9-1/22, 1973.
- (16) Hamrin, H. : "Choosing an Underground Mining Method", Sec. 1.6 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 88/112, 1982
- (17) 下村 弥太郎 : "坑内採鋳法 —— 鋳山読本第12巻第13集", 技術書院 (東京), 95 pages, 1962.
- (18) 天野 勲三 : "坑内採鋳 —— 採鋳学各論", 秋田大学鋳山学部通信教育講座, 秋田大学鋳山学部 (秋田), pp. 7/10, 1983.
- (19) 天野 勲三 : "坑内採鋳法 —— 大規模鋳床の採掘計画と現況", 日本鋳業会 (東京) pp. 7/10, 1983.
- (20) Bullrock, R. L. : "A Classification of the Room and Pillar Method of Open Stope Mining", Sec. 2.1-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.) AIME (New York), pp. 238, 1982.
- (21) Jeremic, M. L. : "Mine Pillar Structures", Chap. 8 in Ground Mechanics in Hard Rock Mining, A. A. Balkema (Rotterdam), pp. 211/256, 1987.
- (22) Lang, L. C. : "Vertical Crater Retreat: an Important New Mining Method", Sec 2-11 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 456/463, 1982.
- (23) Lyman, W. : "Introduction to Shrinkage Stopping", Sec. 3.1-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 485/489, 1982.
- (24) Mann, C. D. : "Introduction to Sublevel Stopping", Sec. 2.2-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 362/363, 1982.
- (25) Gardner, E. D., and Vandenburg, W. O. : "Square Set System of Mining", Sec. 3.4-2 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York) pp. 667/729, 1982.
- (26) Haffner, R. L., and Hoskins, J. R. : "Timbered Stopes", Sec. 12.9 in SME Mining Engineering Handbook (ed. by Cummins, A. B., and Givens, I. A.), AIME (New York), pp. 12-100/122, 1973.
- (27) Patchet, S. J. : "The Use of Fill for Ground Control Purposes", Chap. 11 in Rock Mechanics in Mining Practice (ed. by Budavari, s.), S. Afr. I. M. M. Johannesburg, pp. 241/255, 1982.

- (28) Rausch, D. O., and Stitzer, R. C. : "Filled Stopes and Combination Methods" ,Sec 12.16 in SME Mining Engineering Handbook(ed.by Cummins, A. B., and Givens, I. A.), AIME (New York), pp. 12-233/253, 1973.
- (29) Murray, J. W. : "Introduction to Undercut-and-Fill Mining" ,Sec. 3.3-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 631/638, 1982.
- (30) "Hanaoka Mine — Mining and Smelting in Japan" ,Mining Magazine, pp. 414/423 1984.
- (31) 津村 和宏, 西田 米治: " 花岡鉱山深沢坑 — 採鉱特集号", 日本鉱業会誌, Vol. 110, pp. 905/910, 1984.
- (32) Trent, R. H., and Harrison, W. : "Longwall Mining: Introduction", Sec. 3.6-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 790/823, 1982.
- (33) Trent, R. H., and Katen, K. P. : "Shortwall Mining", Sec. 3.7-1 in Underground Mining Methods Handbook(ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 850/857 1982.
- (34) Jakson, C. F. : "Mining by the Top Slicing Method", Sec. 3.5 in Underground Mining Methods Handbook(ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 758/789 1982.
- (35) Cokayne, E. W. : "Sublevel Caving:Introduction", Sec. 4.1-1 in Underground Mining Methods Handbook(ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 872/879 1982.
- (36) 吉留 久夫 他: " サブレベルケービング法 — 大規模鉱床の採掘計画と現況" 日本鉱業界 (東京), pp. 50/68, 1983.
- (37) Julin, D. E., and Tobie, R. L. : "Block Caving", Sec. 12.14 in SME Mining Engineering Handbook(ed. Cummins, A. B., and Givens, I. A.), AIME (New York), pp. 12-162/222, 1973. 36) 小島 康司, 岡本 明夫: " ブロックケービング法 — 大規模鉱床の採掘計画と現況", 日本鉱業界 (東京), pp. 69/78, 1983.
- (38) Tobie, R. L., and Julin, D. E. : "Block Caving:General Description", Sec. 4.2-1 in Underground Mining Methods Handbook (ed. by Hustrulid, W. A.), AIME (New York), pp. 967/972, 1982.

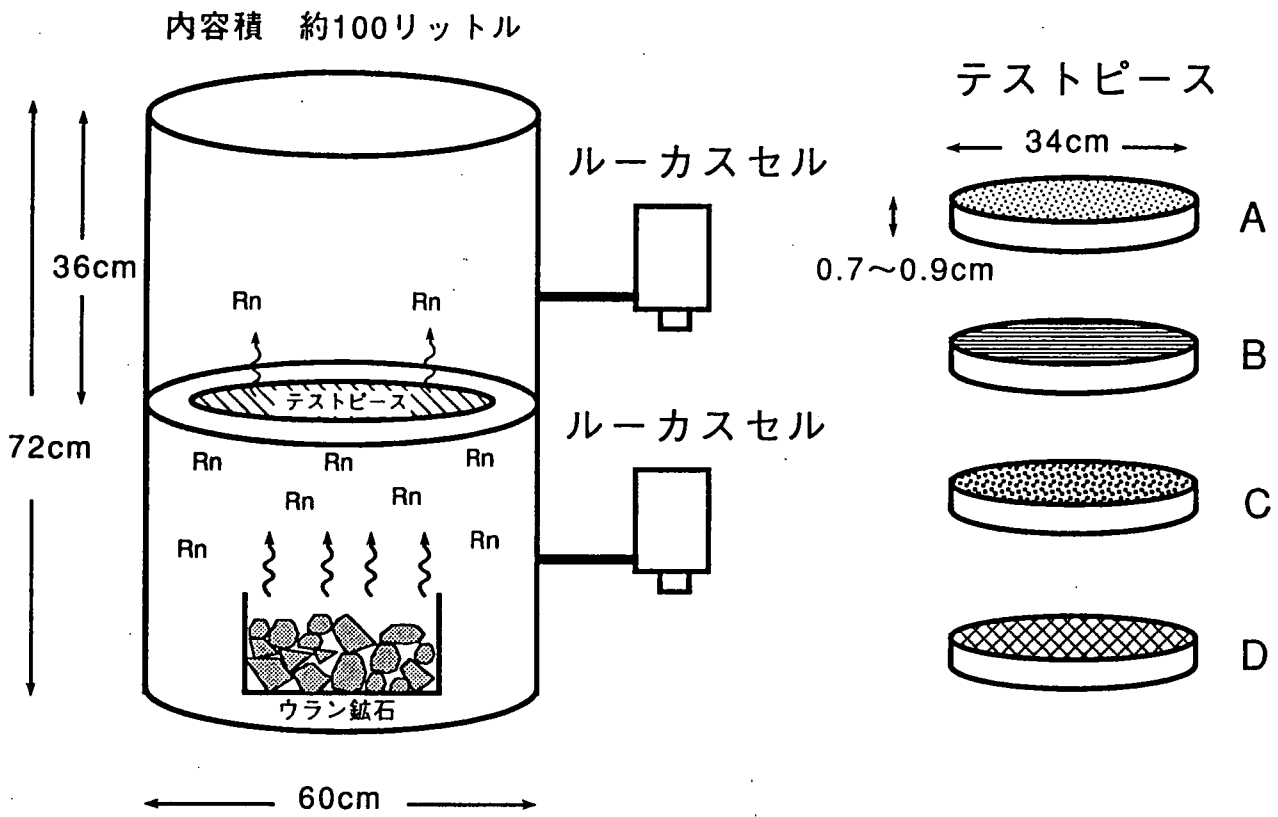
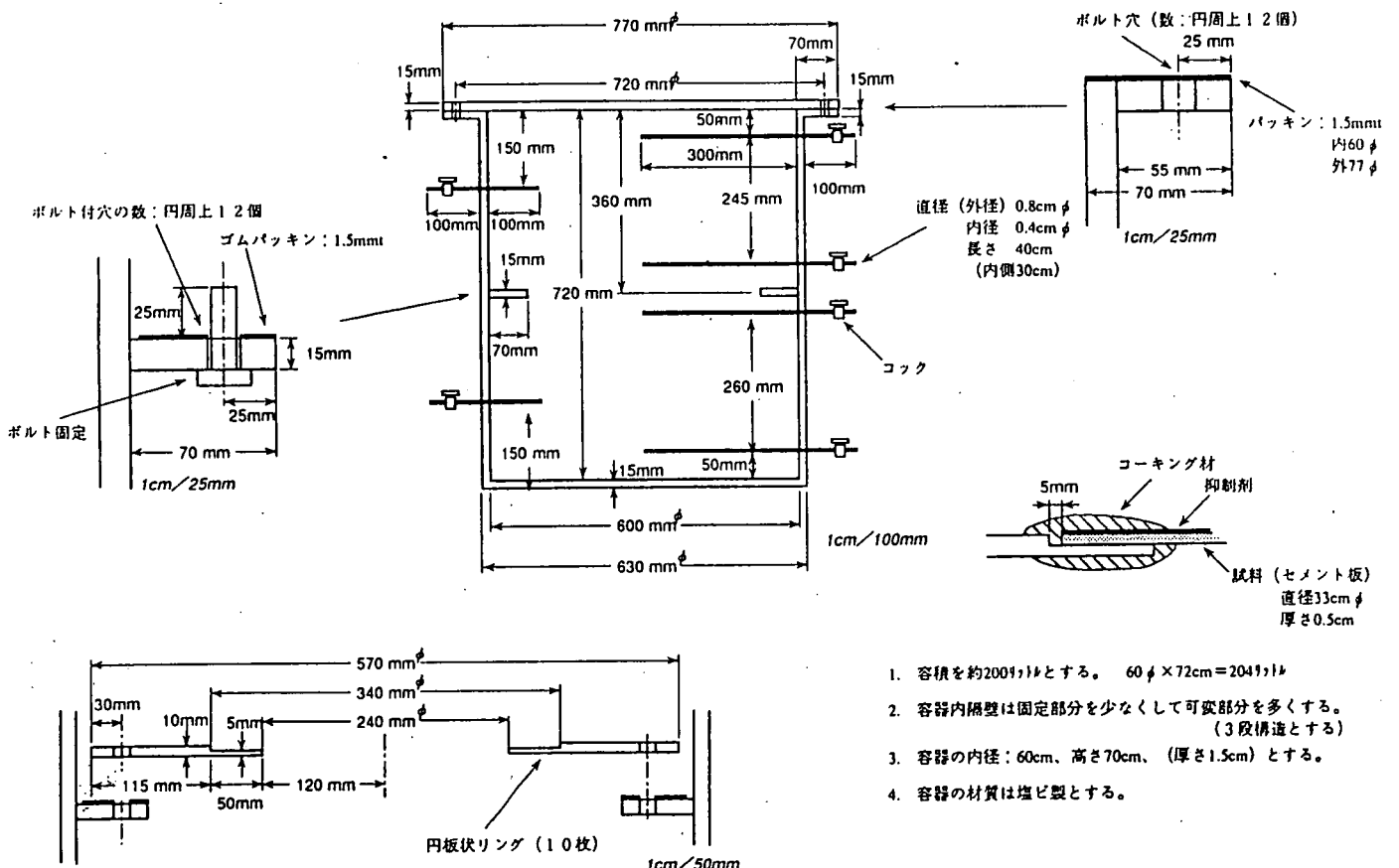


図-1 ラドン湧出抑制試験



1. 容積を約200リットルとする。60φ×72cm=204リットル
2. 容器内隔壁は固定部分を少なくして可変部分を多くする。(3段構造とする)
3. 容器の内径: 60cm、高さ70cm、(厚さ1.5cm)とする。
4. 容器の材質は塩ビ製とする。

図-2 ラドン湧出抑制試験容器

A - 2 地質と環境放射線の変動要因に関する研究

- 計数率から線射線量率への変換の試みについて -

(永 崎)

1. はじめに

原子力開発を進めるに当たって住民の理解を得ることが不可欠であるが、近年、放射線の危険性が過度に強調されている嫌いがある。国民線量評価の観点にたつて放射線被ばくを理解する上で、また、平常時及び緊急時における原子力施設に由来する放射線影響を評価する上で、バックグラウンドとしての自然放射線の分布や特性等に関する知見・データの把握及び線量評価が重要である。

本研究は、自然環境における自然放射線のレベルとその分布を把握する上で、地域的変動の大きな要因となっている地質に着目し、地質と放射線レベルの関連性について調査するものである。

現在、動燃事業団で使用されている4チャンネルカーボン車により空間ガンマ線による照射線量率の評価が可能になれば、過去に動燃事業団及び通商産業省工業技術院地質調査所のカーボン車により調査された一部の地域を再測定する事により（検出器の特性等が明確になっている比較的最近の調査結果が有用である。）、これまでの多くの調査データと照射線量率とを関連付ける事が可能となる。（図-1）

ここでは、兵庫県宝塚-六甲山系において4チャンネルカーボン車及び京都大学原子炉実験所（以後京大炉と呼ぶ）の空間ガンマ線測定器による同時測定を実施し、計数率対照射線量率換算関係の決定を試みたので報告する。⁽¹⁾

2. 実施内容

2.1 測定地域地質概要

同時測定は、兵庫県宝塚市から六甲山を経て六甲アイランドに至る地域である。（図-2）

本地域の基盤は、花崗岩、有馬層群（流紋岩類～流紋岩質凝灰岩、角礫凝灰岩）および部分的に分布する古生層より成る。これら基盤岩類と不整合、あるいは断層で新第三紀中新世の神戸層群（泥岩、砂岩、礫岩および凝灰岩より成る）が接している。

さらに、これを覆って鮮新～更新世の大阪層群（粘土、砂、礫）が六甲山地、三田盆地等に分布する。

なお、六甲山地周辺は大小数多くの断層系が見られ、E-W、NE-SW方向のものが卓越している。⁽²⁾

2.2 照射線量率測定器の精度

4チャンネルカーボン車の計数率とその場の照射線量率との関係を知るための基準測定器として、京大炉の3" φ球形NaI(TL)スペクトロメータ（以後NaIスペクトロメータ

と呼ぶ) と 4 気圧アルゴン電離箱 (以後アルゴン電離箱と呼ぶ) を用いた。

図-3 には、通商産業省工業技術院電子技術総合研究所 (以後電総研と呼ぶ) で値付けされた 1 m での照射線量率と NaI スペクトロメータによって得られた照射線量率との関係を示している。

図-4 には、アルゴン電離箱の校正結果を示す。線源には ^{226}Ra を使用し、線源-検出器間距離を 1 ~ 3 m の範囲で変化させた結果を示す。1 m における照射線量率は電総研で値付けされた $83.9 \mu\text{R/h}$ に近い値となっており、校正定数はほぼ 1 と考えられる。

2.3 4チャンネルカーボン車の感度の方向依存性

4チャンネルカーボン車の測定値から照射線量率を推定するには、得られる測定値がガンマ線の入射方向依存性を示さないほど良好な測定結果を与える。代表的なガンマ線の入射方向として、車の後方からと側方から照射した場合の測定値の変化を調査した。

照射方法は、4チャンネルカーボン車内の後方で 12 個の NaI 検出器が設置されているほぼ中央に NaI スペクトロメータを置き、 ^{60}Co 、 ^{226}Ra 線源を地上 1 m、検出器の中心から 2 m に置き実施した。

表-1 に感度の方向依存性の測定結果を示す。

表-1 4チャンネルカーボン車の方向依存性

入射方向	計数率 (c p s)	
	^{60}Co	^{226}Ra
後方	3 0 4 4	1 1 7 9 9
側方	3 4 3 6	1 3 1 0 2
後/側	1. 1 3	1. 1 1

測定結果から側方では感度が約 10% 程度高くなっているが、これは 4チャンネルカーボン車内に固定された 12 個の NaI 検出器の配置条件によるものと考えられる。

2.4 宝塚-六甲山系における同時測定

測定は宝塚市から六甲山系を經由して六甲アイランドに至る行程で実施した。測定点は図-2 に示したように特に地形と空間線量率の相違を考慮して選定しており、比較的平坦な場所やトンネル、片側が谷になっている道路など線源分布が多様になるよう選定した。

表-2 に各々の測定点での 4チャンネルカーボン車と NaI スペクトロメータによる測定結果を示す。

4チャンネルカーボン車は ^{40}K (1.46MeV)、 ^{214}Bi (1.76MeV)、 ^{208}Tl (2.61MeV) のそれぞれのガンマ線のピーク計数率と全計数率を示した。

表-2 4チャンネルカーボン車及び NaIスペクトロメータ測定結果

	4チャンネルカーボン					NaIスペクトロメータ
	K (c/20s)	Bi (c/20s)	Tl (c/20s)	全計数 (c/20s)	全計数 (c/s)	照射線量率 $\mu R/h$
宝塚S宅	5,223	809	939	221,407	11,070	8.31
盤滝トンネル	7,326	822	1,643	292,562	14,628	11.49
モトクロス場	7,010	1,046	1,451	269,348	13,467	11.86
展望台	3,825	697	768	204,970	10,248	7.15
一軒茶屋	5,273	1,019	1,468	244,329	12,216	10.46
極楽茶屋手前	4,830	644	906	209,062	10,453	6.68
灘大橋	1,682	344	315	147,497	7,374	3.57

3. 成果

3.1 計数率対照射線量率換算関係

全計数率対照射線量率の関係を図-5に示す。図に示された回帰直線は、

$$E_x = 1.29 \times 10^{-3} \cdot [T(\text{cps}) - 4791(\text{cps})]$$

と表せる。この式で照射線量率がゼロの場合の計数率 4,791cps は、検出器の校正のために内蔵されている ^{137}Cs に起因したものである。また、図-5の結果では相関係数が、

$$r = 0.972$$

となっており、極めて良好な結果となっている。このことは、空間放射線のエネルギー分布や方向分布が変化しても照射線量率当たりの計数率に与える影響が相対的にはそれほど大きくないことを示している。

4. まとめ

4チャンネルカーボン車によって得られる計数率情報から照射線量率を得るための換算関係を検討した結果、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 4チャンネルカーボン車の感度は後方と側方で約10%程度異なるが、空間ガンマ線の方向分布を考慮すると感度の相違による測定誤差はこれ以下になると思われる。
- (2) 計数率と照射線量率との間には、相関係数： $r=0.972$ と極めて1に近い相関が成立している。

今回の計数率から照射線量率への変換の試みは、上記に示すように一応の成果が得られており、本手法を用いた計数率から照射線量率への変換は高い精度で可能と思われる。

このため今後は、過去に動燃及び地質調査所で測定された地点を4チャンネルカーボン車で再測定し過去のデータとの換算関係を明らかにする事が必要である。

参考文献

- (1) 原子力安全技術センター「環境放射線の変動要因に関する研究(Ⅱ)」(動燃事業団・委託研究報告書) PNC PJ1545 92-003
- (2) 通商産業省鉱業技術院地質調査所編 : 地域地質研究報告 5万分の1図幅 須磨地域の地質(藤田和夫、前田保夫) 昭和59年

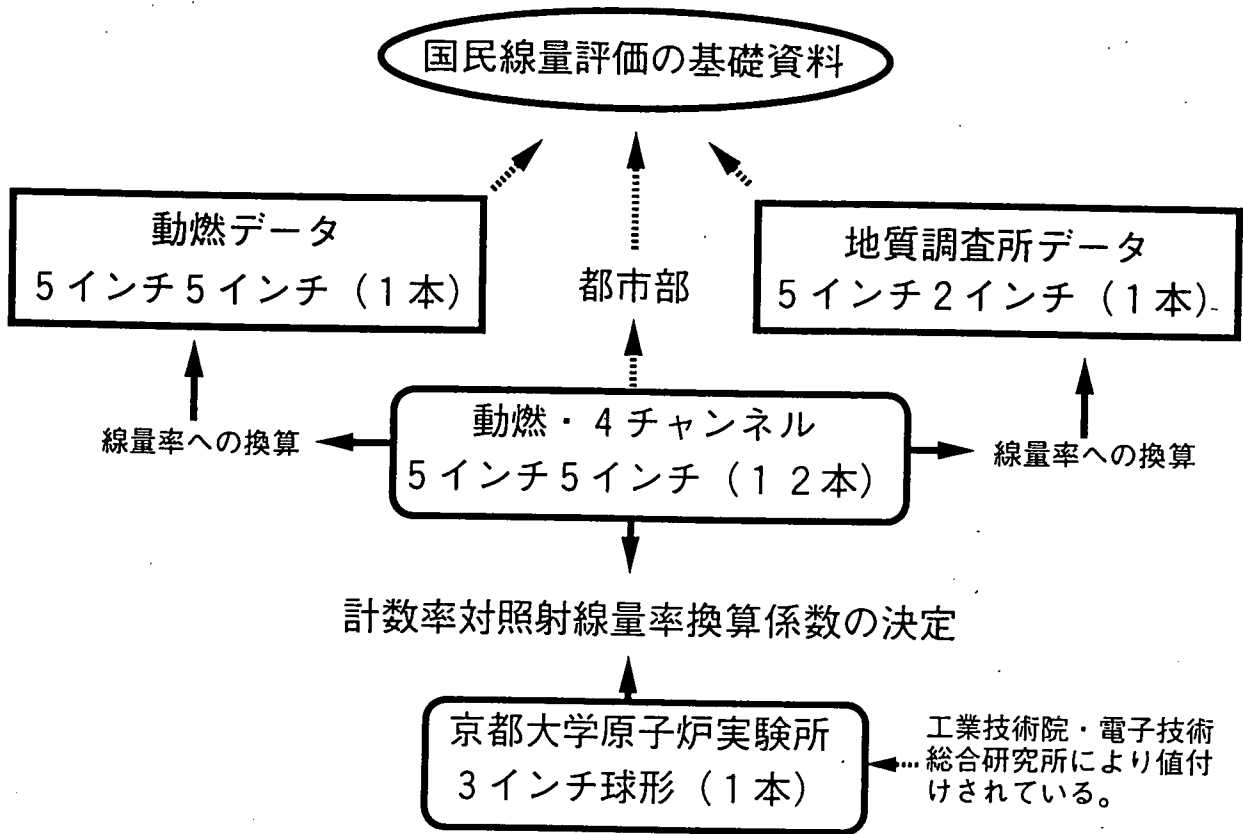


図1 計数率から照射線量率変換の試み

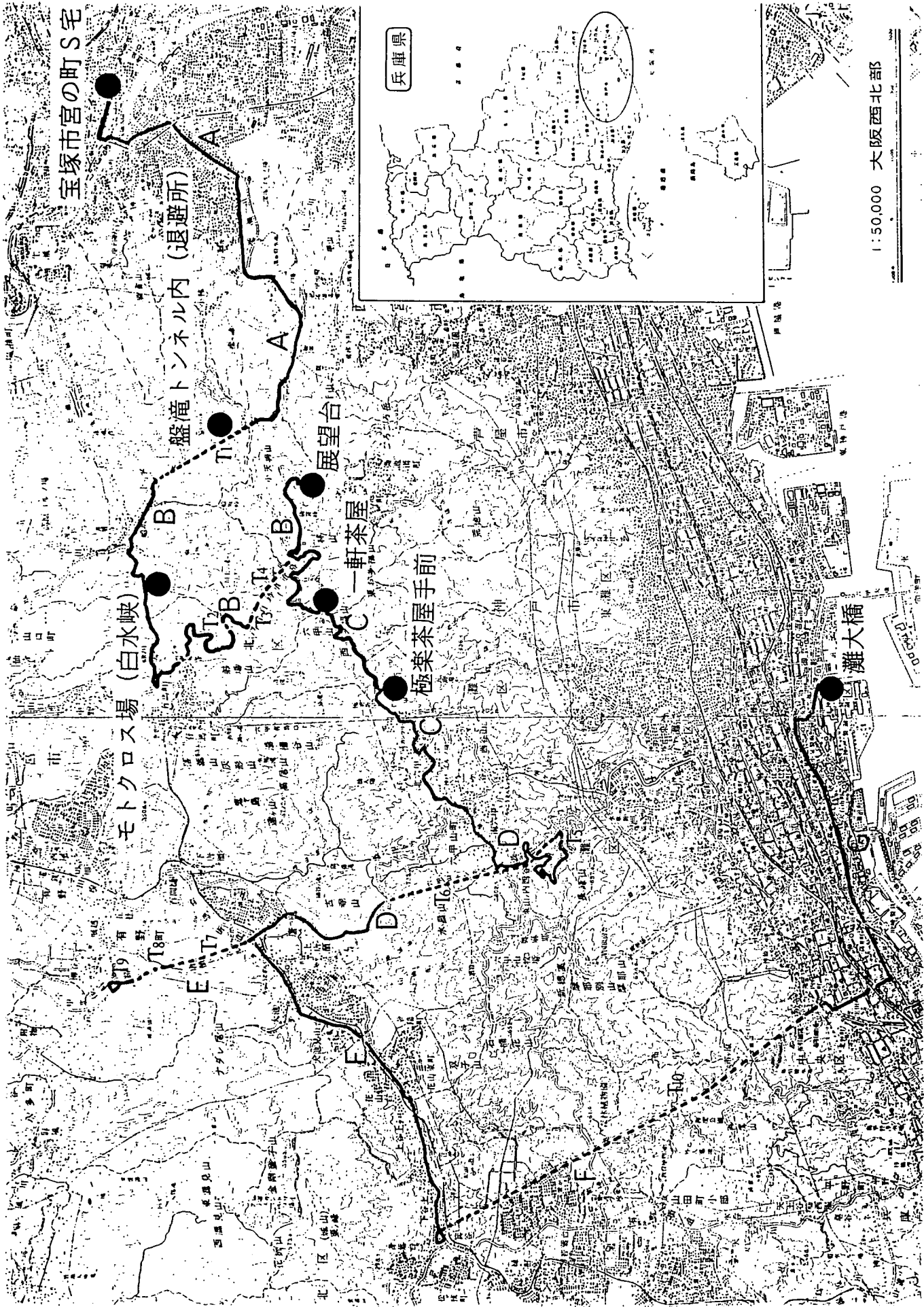


図2 同時測定地域

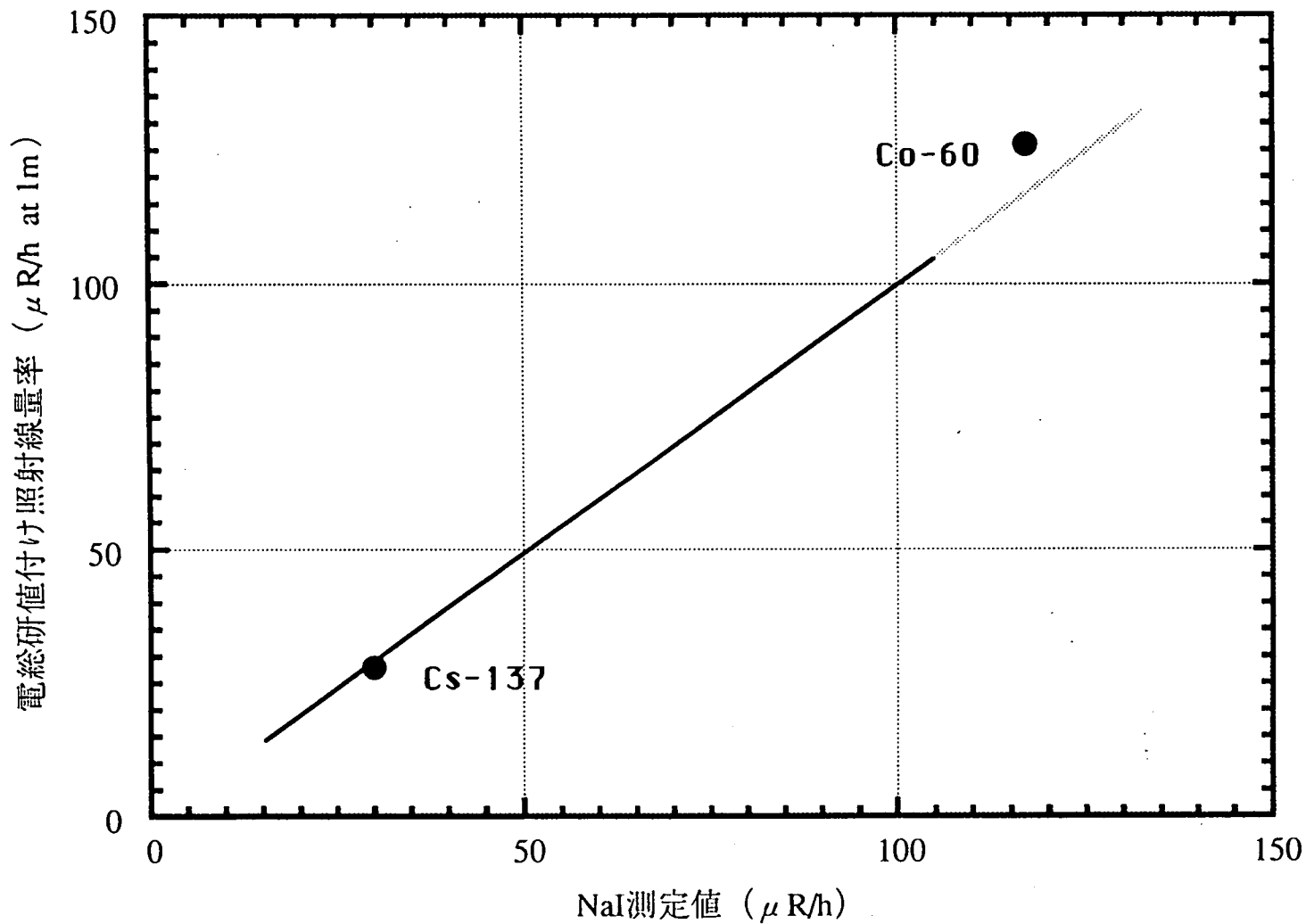


図3 NaIスペクトロメータの線源照射による校正

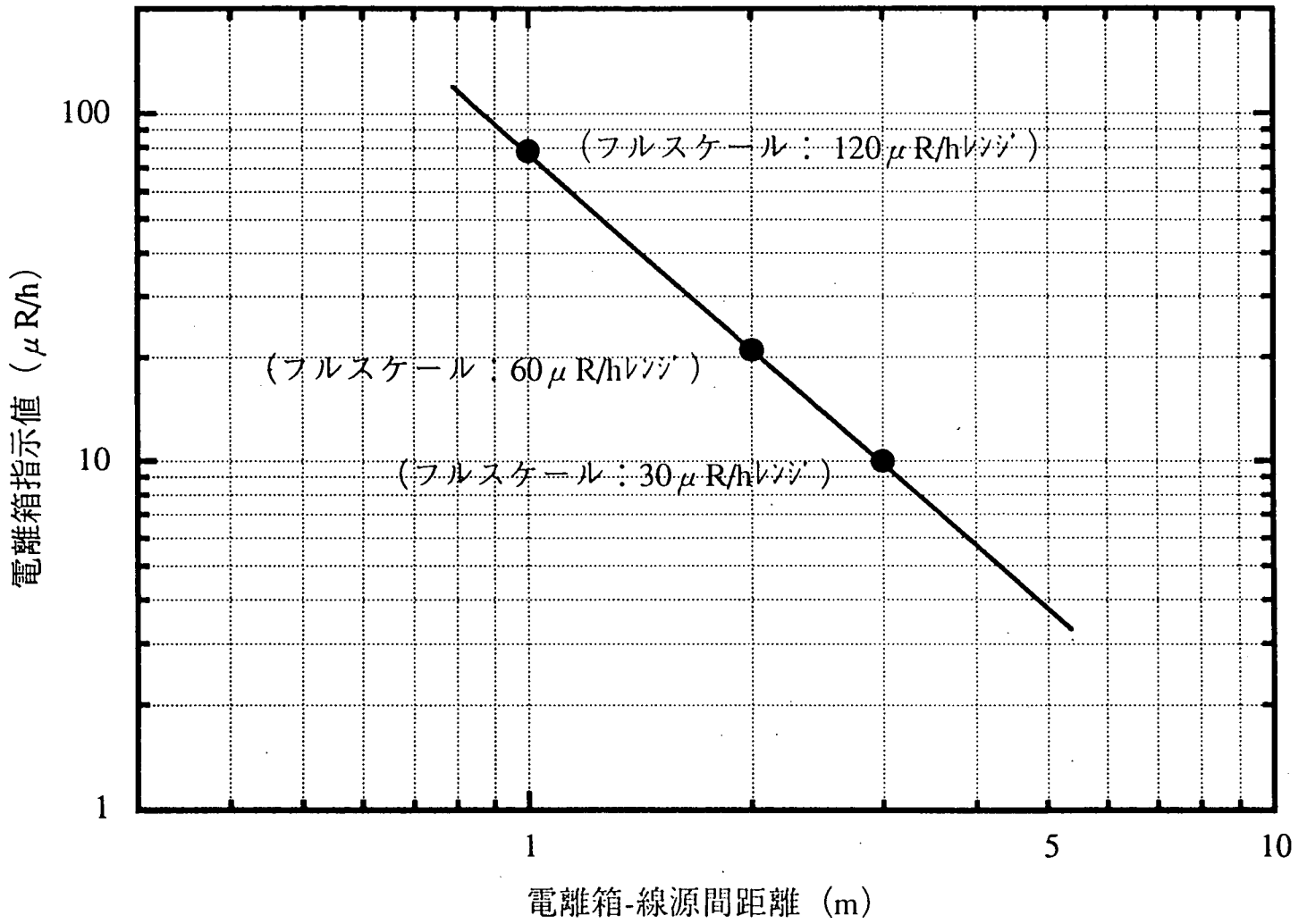


図4 4気圧アルゴン電離箱の線源照射による校正

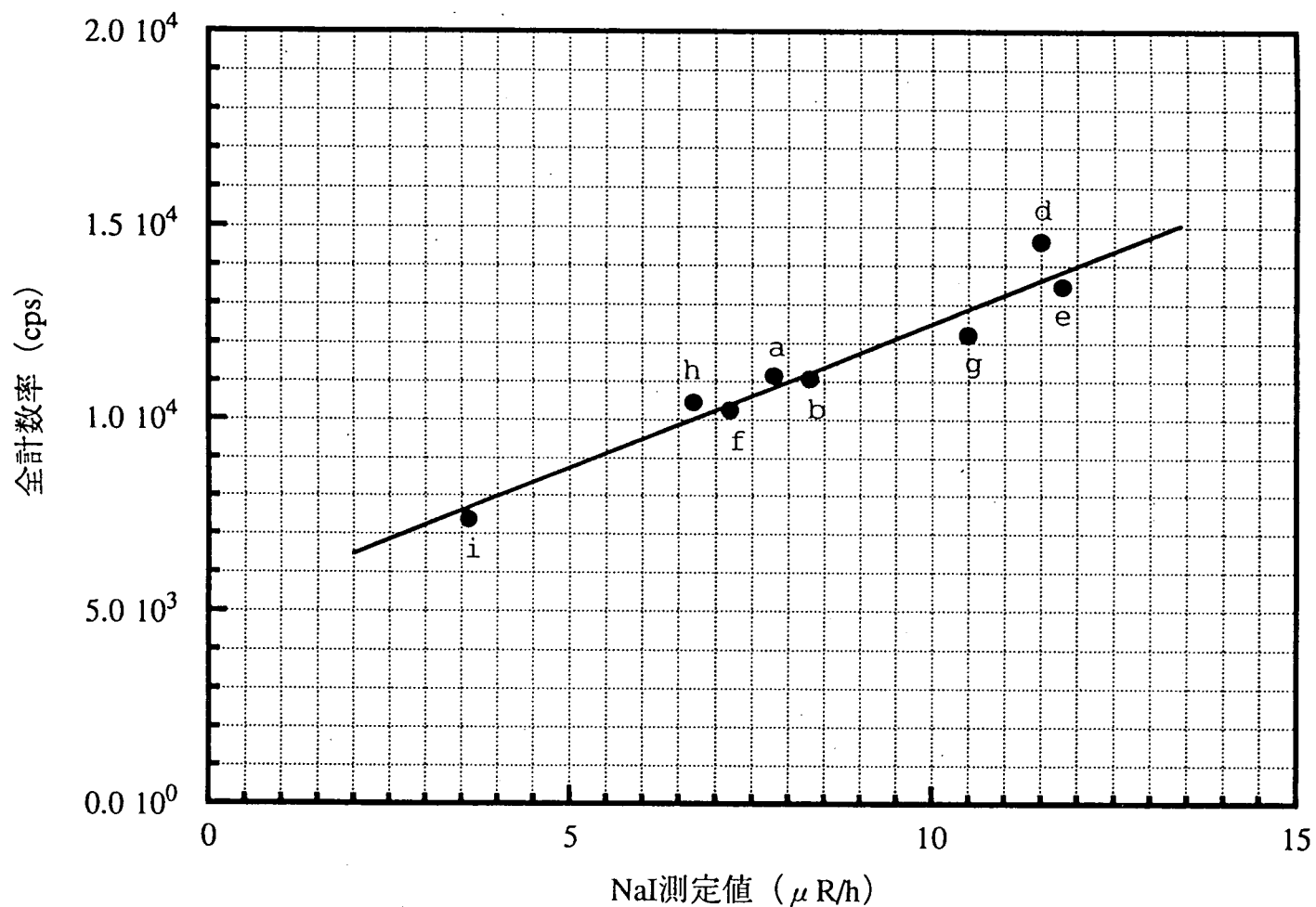


図5 4チャンネルカーボン車全計数率とNaIスペクトロメータによる照射線量率の関係

A - 3 東濃鉦山坑水処理プロセスの合理化のための現場試験
(宗 藤, 落 合)

1. はじめに

東濃鉍山の坑水処理施設は、ウラン採鉍技術開発試験として実施されたインプレースリーチングの坑内試験場から発生するウランリーチング液を処理するための付帯施設で、金属鉍山等保安規則に従い鉍害が発生しないようにするために設置されたものである。

東濃鉍山坑水処理系統を図-1および図-2に示した。インプレースリーチング試験場跡から発生したウランを含む坑水は、一般の坑内水排水系統とは別の坑廃水排水系統により坑外へ揚水され、いったん坑水処理施設の原水槽に貯水される。その後、ウランを除去するために砂濾過器を経てイオン交換塔に送られ、イオン交換塔でウランは陰イオン交換除去される。次に、この坑水中に含まれている炭酸イオン及び重炭酸イオンを除去するために、脱炭酸槽で pH 1.5 ~ 2.0 になるまで希硫酸を添加・攪拌して脱炭酸を行う。さらに処理液中に溶け込んでいる硫酸イオンを沈澱除去するために、中和槽で消石灰を添加して硫酸カルシウムを生成させる。次に混合槽に送られ、ここで凝集剤を添加した後、沈降槽で硫酸カルシウムを沈降分離させる。最後に pH 調整槽で処理水の pH 調整を行い、他の坑水と一緒に混合され沈澱池を経て公共河川に放流している。

東濃鉍山におけるインプレースリーチング技術開発現場適用試験は、昭和56年10月から開始され昭和60年4月で現場試験は終了したあと、引き続き試験鉍画の水洗、復元・跡処理を昭和63年3月まで実施して、すべての試験が完了した。このインプレースリーチング試験の経緯は次のとおりである。

- 昭和50年度 ビーカー試験
- 昭和51年度 ビーカー試験
- 昭和52年度 大型カラム試験, 本延坑道のルジオンテスト
- 昭和53年度 試験坑道掘削, 圧入装置設置, 240m北延のルジオンテスト
- 昭和54年度 水注入試験(ピラニン試験を含む), 廃液処理基礎試験
- 昭和55年度 通気立坑掘削, 坑水処理施設完成
- 昭和56年度 現場適用試験開始(アルカリ溶媒)
- 昭和57年度 注入孔増孔, 孔別特性試験
 - ↓ 現場適用試験(アルカリ溶媒)
- 昭和60年4月 現場適用試験終了 試験鉍画水洗
 - ↓
- 昭和63年4月 試験鉍画水洗復元および跡処理が完了

インプレース試験の現場適用試験が終了して以来すでに7年が経過した現在では、試験場跡からの坑水中に含まれているウランや重炭酸の濃度は、試験時の1/10~1/20程度まで減少している。従って、インプレース試験によってリーチングされたウランを除去し、あわせてアルカリ性であるリーチング液を中和処理する目的で設置された東濃鉍山の坑外坑水処理施設は、処理工程と規模を見直して合理的な坑水処理プロセスに改良することによ

って、東濃鉦山の維持・管理的業務を効率化する事が可能である。

平成2年度にはインプレース試験場跡からの坑水からウランを効率的に除去するための基礎的な室内試験と一部予備的な現場試験を実施した¹⁾。

引き続き平成3年度は、坑水処理プロセスのなかで最も重要なウラン除去工程を簡便かつ確実な方法に改良するために、調査坑道内の現場で検討試験を実施したので、この試験について報告する。

2. 試験を開始するに至った背景

- ① 鉦山廃水中の炭酸イオン及び重炭酸イオンに関する濃度規制値はないが²⁾ インプレース試験場跡からの坑水中に含まれている炭酸イオン及び重炭酸イオンの濃度は、試験時に比べると現在では、炭酸イオンは1/20～1/100 にまで、重炭酸イオンでは1/10～1/450 にまで低下してきている（図-3.4 および表-1 を参照）。現在のインプレース試験場跡からの坑水中に含まれている炭酸イオン及び重炭酸イオンの合計濃度は250ppb程度であるが、この濃度は東濃鉦山周辺の地下水に比べると約1.5～2倍にすぎない。この坑水は弱アルカリ性（pH=9～10）なので中和処理する工程は必要であるが、脱炭酸処理工程はもはや不必要と考えられる。
- ② インプレース試験場跡からの坑水中に含まれているウランについても同様に、試験時に比べると1/10～1/20以下まで減少してきており、現在のウラン濃度は約400ppbである。排水中のウラン濃度規制値³⁾（周辺監視区域の外側における濃度限度）は²³⁸Uと²³⁴Uの放射能比が1:4（実測値¹⁾）の時には200ppbとなる。従って、約十倍の水量がある一般坑内水と混合・希釈しただけでウラン濃度は40ppb程度になり、特にウランの除去処理をしなくても十分に排水濃度規制値をクリアできる。しかしこれまでの東濃鉦山における排水中のウラン濃度実績値は5～10ppb程度であるので、今後もこの程度の濃度を維持していくためにはウラン除去工程が必要であると考えられるが、それにしても現在の坑水処理施設におけるウラン除去設備は過大なものである。
- ③ 東濃鉦山用地の中に無重力実験施設の建設が進められようとしている。将来、実験管理棟、研究棟および機械設備棟などが建設されると、現在の敷地が手狭になることは確実である。東濃鉦山の敷地内を有効に利用するためには、無重力落下施設の位置に近接している現在の坑水処理施設を縮小・合理化することが先ず第一の方策である。
- ④ 現在の坑水処理施設は既に設置後12年以上経過し、これまで年間平均200日程度稼働している実績から、ポンプ類及び配管の腐食など施設全体の老朽化が著しい。もともとこの施設は殆ど自動無人運転に近い状態で運転できるように設計されているが、老朽化しているために保安上の理由から運転中は常に監視要員を配置している。さらに1日当たりに処理できる水量は10～15m³と、湧水量の8m³/日に比べると処理効率が低いために、作業日は殆ど毎日処理施設を運転しなければならない。東濃鉦山の維持・管理的業務を少しでも効率化していくためには、このように相当な労力を必要としている坑水処理施設の運転の現状を改善しなければならない。

以上のような背景から、東濃鉾山坑水処理プロセスの合理化にむけての現場試験を開始するに至った。

3. 既存データの整理

これまで東濃鉾山関係の水質試料分析は年間 500件から5000件も行われてきており、インプレース試験が開始された昭和56年から平成 2年までの10年間には、合計約 25000件もの水質試料が分析されている。さらにこれまで中部事業所や人形峠事業所では、鉾山排水に含まれるウランを効率的に吸着する各種樹脂の適性評価試験も実施されている^{1)・4)・5)}

インプレース試験場跡からの坑水処理工程を合理化するために必要なバックデータを収集する目的で、既存データの整理・解析を実施した。

これまでの分析データおよびウラン吸着試験データの整理・解析結果を以下に示す。

- ① インプレース試験場跡から排出される坑水中のウランを効率的に除去するには、工業用強塩基性ポーラスタイプ陰イオン交換樹脂であるダイヤイオンPA318(三菱化成製)が、性能および価格的に最も優れている。PA318 の化学的・物理的物性データ等を表-7に示した。
- ② このイオン交換樹脂PA318 のウランに対する貫通交換容量は約 20gU/リットル樹脂(実測値)である。従って、ウラン濃度が約200ppbで水量が 8m³/日程度である試験場跡からの坑水を処理するのに、PA318 を使用して貫通交換容量いっぱい吸着させるとすれば、わずか30リットルの樹脂で 1年間できる。この樹脂は2270円/1であるから、1 年間の樹脂費用は約 7万円となる。
- ③ ただしこの場合には、吸着した樹脂の放射能濃度を計算すると2500Bq/gとなって、届出を要する核原料物質濃度限度である370Bq/g を越えてしまう⁶⁾。核原料物質になると使用(取扱い, 運搬, 保管, 貯蔵)の方法や場所(施設の位置および構造も含む)について管理規制がかかる上に、在庫報告も必要になる⁷⁾。
- ④ アルファ線スペクトル分析の結果、インプレース試験場跡からの坑水中に含まれる²³⁴Uと²³⁸Uの放射能比率は現在は約 4:1 である。金属鉾山等保安規則では周辺監視区域の外側における水中の濃度限度は核種によって異なるので⁷⁾、坑水中の²³⁴U/²³⁸U放射能比率は、排水上限ウラン濃度を計算する上で必要となる値であり、定期分析項目に入れる事が望ましい。
- ⑤ インプレース試験場跡からの坑水中に含まれているラジウム(²²⁶Ra 以下同じ)は約 5×10⁻⁵Bq/ml であり、坑水処理工程の前後でこのラジウム濃度は変わらない。東濃鉾山周辺の地下水もラジウム濃度は10⁻⁵ Bq/mlのオーダーで、インプレース試験場跡からの坑水中に含まれているラジウム濃度と同程度である。保安規則で定められている周辺監視区域の外側における水中のラジウム濃度限度は3 ×10⁻³Bq/ml であるので⁷⁾、インプレース試験場跡からの坑水中に含まれているラジウムは規制値の約 1/100と十分に低い濃度になっている。
- ⑥ 鉾山から公共用水に排出される排水中に含まれる有害物質などの濃度については、

水質汚濁防止法で規定されている排水基準^{2) 8)}に従うことが、金属鉱山等保安規則で定められている(第295条)。カドミウム、水銀、砒素などの有害重金属およびPCBやトリクロロエチレンなどの有害有機物質は、もともと東濃鉱山に存在しないので東濃鉱山排水中にも全く検出されていない。亜鉛、鉄、マンガンなどは検出されているが許容限度に比較すると問題にならない濃度である。(表-8参照)

- ⑦ 水質汚濁防止法に係る排水基準に関して、東濃鉱山からの排水で注意をするべき分析項目としては、水素イオン濃度、浮遊物質およびフッ素含有量の3項目のみである。坑内水は弱アルカリ性(pH=9)であるので坑水処理工程においてpH調整が必要となる。また、坑内でボーリング作業や坑道掘削などを実施すると、坑水が濁って浮遊物質(SS)が増加するので、浮遊物質が沈澱池内で速やかに沈降するように凝集剤を添加しなければならない。許容値が15ppmであるフッ素に関しては、一般に花崗岩質の地層中の地下水ではその濃度が高く(ちなみに、東濃鉱山周辺で花崗岩中に掘削されている1000m深度のAN-1ボーリング孔地下水では25ppm)東濃鉱山の排水中にも数ppm存在する。図-10に東濃鉱山沈澱池放流水中のpHとフッ素濃度の年変化(昭和54年度から平成3年度まで)を示した。この図から、硫酸パックを添加してもフッ素濃度は減少しない事がわかる。

4. 坑水処理プロセスの合理化のための現場試験

4.1 試験の方法

地上の建屋内ではなく、ウラン濃度の比較的高い坑水が出ている調査坑道の下盤坑道内でウランを除去できれば、現在地上にある坑水処理施設のスペースを大幅に削減できる。また、現在は二系統である坑底からの排水システムを一本化できる。等々の理由から、調査坑道の下盤坑道で次の三種類のウラン除去試験を実施した。なお、(1)の側溝にイオン交換樹脂を設置する方法では、坑水中の有機物を除去して樹脂寿命を劣化させないようにする目的で樹脂の前に活性炭を入れた。また、樹脂の流失を防ぐために端部に細かい金網の堰を設けるとともに、樹脂を三段に分割して設置しウランのリークがないように工夫した。

これらの試験工程は表-2に示した。

- (1) 側溝の一部に樹脂を充填したウランの除去試験(図-5)
- (2) 簡易イオン交換によるウランの除去試験(図-6)
- (3) 開放型容器によるウランの除去試験(図-7)

4.2 試験の結果

工業用強塩基性陰イオン交換樹脂PA318を使用して、三種類の方法で行ったウランの除去試験結果を下表および表-3, 4, 5に示した。いずれの方法もウランをほぼ完全に除去することができた。なお、これらの表中でSvは空間速度(space velocity)と呼ばれるもので、一時間に樹脂量の何倍の容量を流したかを示す指標である。

i) 側溝を利用した場合 [樹脂設置寸法--- L;1050mm, W;200, H;150]

① イオン交換樹脂量

70ℓ

②	S v	1. 3 ~ 4. 8
③	原水ウラン濃度	3 3 0 $\mu\text{g}/\ell$
④	処理後ウラン濃度	1 $\mu\text{g}/\ell$
⑤	ウラン除去率	9 9. 7 %

ii) 簡易イオン交換塔の場合 [樹脂塔寸法--- D;150mm, H;1000]

①	イオン交換樹脂量	1 8. 4 ℓ
②	S v	1 9
③	原水ウラン濃度	1 0 6 $\mu\text{g}/\ell$
④	処理後ウラン濃度	1. 8 $\mu\text{g}/\ell$
⑤	ウラン除去率	9 8. 4 %

iii) 開放型容器の場合 [樹脂槽寸法--- L;1000mm, W;800, H;900]

①	イオン交換樹脂量	8 4 ℓ
②	S v	2. 2
③	原水ウラン濃度	9 2 $\mu\text{g}/\ell$
④	処理後ウラン濃度	0. 9 $\mu\text{g}/\ell$
⑤	ウラン除去率	9 9. 2 %

今回実施した三方法のうち、側溝を利用した方法が設備面からも簡便で、機器の運転や電力を全く必要とせず経済的で有利な方法である。インプレース試験場跡からの排水は一日当たり約 8 m^3 であるのに対して、一本の側溝では 2 m^3 / 日以上処理はできない。その改善案として考えられる点は、新たに並列に複数の排水溝を作って、出来るだけ断面積及び落差を大きくすることにより、処理能力を向上させることが可能である。

一方、簡易イオン交換塔と開放型容器による方法は、定量ポンプを使用するので流量調整が可能であり、現在の排水量 (8 m^3 / 日) 程度の処理は十分可能である。しかしこれらの方法でも、インプレース試験場跡からの坑水を一時的に貯留する下盤西バック槽の容量はわずかに 6 m^3 であるので、休日と夜間も運転する必要がある。これにともなって、停電やポンプの故障が生じた際の保安設備が不可欠になり、結局はかなり大がかりな設備となる。

5. 坑水処理プロセスの合理化案

以上の結果に基づいて、インプレース試験場跡からの坑水処理プロセスの合理化案を提示すると、以下ようになる。なお、この処理フロー合理化案は図-9に示した。

- ① インプレース・リーチング試験場跡からの坑水は、下盤坑道の側溝内に設置したイオン交換樹脂を使ってウランの除去したあと、本延坑道に送り他の坑内水と共に調査立坑坑底バックに送る。
- ② イオン交換樹脂を入れる側溝は、複数個を並列に大きい勾配で作って、一日当たり

7 m³以上の坑水が処理できるようにする。

- ③ 坑外にポンプアップした坑内水は、pHの調整と凝集剤の添加をしたあと沈澱池を経由して放流する。
- ④ 坑外の坑水処理施設としては、既存の原水槽、pH調整槽、および沈澱池のみを残して、その他の坑水処理関係設備は全て撤去する。
- ⑤ 新たに原水槽の上に予備の小型イオン交換カラムと送水ポンプを設置し、下盤坑道でのウラン除去プロセスにトラブルが発生した時に備える。
- ⑥ イオン交換樹脂へのウラン吸着量は貯蔵、運搬その他の取扱いに関してその細目を保安規定に定める必要のない74ベクレル/g未満⁹⁾にする。
- ⑦ このウランを吸着した樹脂は、ウランを希塩酸で溶脱させて再生使用する。
- ⑧ 溶脱させたウラン溶液は74ベクレル/g未満の濃度として、一定量になるまで一時保管したあと、コンクリート固化する。
- ⑨ 何度も再使用して吸着能力が劣化したイオン交換樹脂は、焼却減容したあと⑧のコンクリート固化の際に混ぜ入れる。

こうした合理化によって、坑水処理運転要員が約1名削減できる。また、設備の運転管理費として一年間に約650万円(概算内訳 機器整備費150万円, 副原料費150万円, 消耗品費80万円, 電力費70万円, 人件費200万円)程度の節約が可能できるものと思われる。さらに、既存の坑水処理施設そのものを約1/5程度にまで縮小することもできることから、東濃鉱山の鉱業用地を有効に活用できる。

6. 今後の方針

平成四年度は坑水処理工程および施設の合理化に向けて、名古屋通商産業局に施業案及び坑水処理施設認可変更の申請を行って認可を受ける。その後、一部の設備の撤去とpH調整装置などの付加工事を開始する。平成五年度に予算措置をして本格的な作業を行う。

7. 参考文献

- 1) 平成2年度技術開発課年報(1991), PNC PN7410 91-037 P148 ~164
- 2) 排水基準を定める総理府令. 昭和46年6月21日総令35, 昭和60年5月27日総令30
- 3) 通商産業省告示第八十三号. 平成元年二月
- 4) 坑内インプレースリーチング試験報告(1981), PNC SN 7410 68-001
- 5) ダム廃水からのウラン回収. 動燃技報 N054-9
- 6) 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令
- 7) 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律
- 8) 水質汚濁防止法施行令. 昭和46年6月17日 政令188
- 9) 金属鉱山等保安規則. 第312条12項

表 1 坑内水のウラン・炭酸・重炭酸濃度の推移 (平均値)

場 所	項目・単位	58年度	59年度	60年度	61年度	62年度	63年度	平元年度	2年度
第1東ク ロス坑道 CNo-1E	pH	10.1	10.2	10.2	10.0	9.8	9.7	11.3	10.9
	U $\mu\text{g}/\ell$	3,702.5	11,509.4	15,961.7	8,430.0	1,793.3	2,620.0	492.0	781.0
	CO ₂ mg/ℓ	4,565.6	4,890.6	5,931.9	2,136.0	166.0	164.3	252.8	250.9
	HCO ₃ mg/ℓ	1,632.8	3,724.7	5,087.2	2,324.8	470.3	563.2	117.0	11.4
第2東ク ロス坑道 CNo-2E	pH	8.8	9.9	9.8	10.1	9.7	9.6	9.5	9.4
	U $\mu\text{g}/\ell$	2,280.3	2,444.3	9,546.8	7,771.0	1,373.0	1,490.0	1,399.0	950.0
	CO ₂ mg/ℓ	34.7	344.2	755.3	940.8	87.0	103.1	75.4	53.6
	HCO ₃ mg/ℓ	209.0	535.3	1,338.3	1,190.8	327	335.3	271.9	219.3
第3東ク ロス坑道 CNo-3E	pH	8.3	9.5	9.9	9.9	9.1	8.8	8.7	8.6
	U $\mu\text{g}/\ell$	844.3	1,405.1	4,148.9	7,166.7	736.7	751.0	1,477.5	1,180.0
	CO ₂ mg/ℓ	41.6	145.5	422.6	580.4	25.3	33.6	43.8	12.1
	HCO ₃ mg/ℓ	260.5	391.7	1,055.3	1,215.8	184.7	261.7	261.3	205.0
第1西ク ロス坑道 CNo-1W	pH	9.9	10.3	10.2	10.1	9.6	9.5	9.4	9.3
	U $\mu\text{g}/\ell$	1,896.7	5,832.1	9,974.5	6,945.0	3,126.7	1,027.9	1,092.2	910.0
	CO ₂ mg/ℓ	2,901.3	2,683.0	1,829.8	1,492.1	367.7	119.2	97.1	54.1
	HCO ₃ mg/ℓ	1,039.1	2,126.4	2,189.4	1,814.6	1,306.3	451.3	395.8	239.4
第2西ク ロス坑道 CNo-2W	pH	9.8	10.2	10.1	10.0	9.7	9.4	—	—
	U $\mu\text{g}/\ell$	6,009.4	14,734.0	23,629.8	19,354.2	7,975.5	3,382.6	—	—
	CO ₂ mg/ℓ	1,981.5	3,094.3	2,697.9	2,303.8	451.0	160.5	—	—
	HCO ₃ mg/ℓ	1,598.9	2,972.1	3,387.2	2,976.2	1,289.0	875.6	—	—
第3西ク ロス坑道 CNo-3W	pH	10.0	10.1	10.0	10.0	9.6	9.4	—	—
	U $\mu\text{g}/\ell$	7,340.9	30,507.5	50,304.3	30,337.5	9,652.3	9,511.1	—	—
	CO ₂ mg/ℓ	6,259.5	7,154.7	5,127.7	3,379.8	456.8	228.1	—	—
	HCO ₃ mg/ℓ	2,630.0	5,543.4	5,646.8	4,568.3	1,660.0	1,286.9	—	—

表-2 イオン交換樹脂によるウラン除去予備試験工程表

年 月	平成3年						平成4年							
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
試験項目														
排水溝を利用したウラン除去試験 ……準備……														
簡易イオン交換塔による試験														
開放型容器でのウラン除去試験														

表 - 3 排水溝を利用したイオン交換樹脂ウラン除去試験結果

*樹脂 PA-318 排水溝寸法 L : 1050 w : 200 H : 150

項目	月 日	1/8	1/16	1/22	1/29	2/5	2/12	2/19	平均	
原	U($\mu\text{g}/\ell$)	415	580	350	580	170	134	90	331.3	
	pH	9.3	9.3	9.4	9.4	9.2	9.4	9.2	9.3	
水	水量 m^3/d	2.6	4.17	1.38	1.3	0.5	0.63	0.75	1.62	
樹	U($\mu\text{g}/\ell$)	5.7	8.1	7.5	5.7	5.2	6.8	5.8	5.6	
	pH	9.3	9.2	9.3	9.3	9.2	9.4	9.2	9.3	
1	水量 m^3/d	2.6	1.5	1.38	1.3	0.5	0.63	0.75	1.2	
回	樹脂量 ℓ	18	18	18	18	18	18	18	18	
通	Sv	6.02	3.47	3.19	3.01	1.16	1.46	1.74	2.78	
過	除去率 %	98.6	98.6	97.9	99.0	96.9	94.9	93.6	98.3	
①	U除去量(g)	—	4.88	4.74	3.13	2.01	0.72	0.67	計16.2	
樹	U($\mu\text{g}/\ell$)	—	3.7	2.1	2.4	—	—	—	2.73	
	pH	—	9.2	9.3	9.1	—	—	—	9.2	
2	水量 m^3/d	—	1.5	1.38	1.3	—	—	—	1.39	
回	樹脂量 ℓ	12	12	12	12	12	12	12	12	
通	Sv	—	5.21	4.79	4.51	—	—	—	4.83	
過	除去率 %	—	99.4	99.4	99.6	—	—	—	99.2	
②	U除去量(g)	—	0.05	0.04	0.03	—	—	—	計0.12	
樹	U($\mu\text{g}/\ell$)	0.64	1.7	1.14	—	0.92	0.96	0.83	1.03	
	pH	9.2	9.2	9.2	—	9.2	9.3	9.2	9.2	
3	水量 m^3/d	2.6	1.5	1.38	—	0.5	0.63	0.75	1.23	
回	樹脂量 ℓ	40	40	40	40	40	40	40	40	
通	Sv	2.71	1.56	1.44	—	0.52	0.66	0.78	1.28	
過	除去率 %	99.8	99.7	99.7	—	99.5	99.3	99.1	99.7	
③	U除去量(g)	—	0.02	0.008	* 0.001 * 0.0 0.026					計0.055

*①、②の計 合計 16.37 g

表 - 4 簡易イオン交換塔ウラン除去試験結果

年月日	原水			第1樹脂塔					第2樹脂塔					推定除去量 (g)	
	pH	U μg/l	流量 m ³ /d	pH	U μg/l	樹脂量 ℓ	Sv	除去率%	pH	U μg/l	流量 m ³ /d	樹脂量 ℓ	Sv		除去率%
H 3.11.28	8.9	160	3.17	—	—	6.7	16.1	—	7.3	2.20	2.59	6.7	16.1	98.6	—
12. 4	8.9	141	3.80	—	—	9.2	18.9	—	8.6	4.40	4.17	9.2	18.9	96.9	3.89
12. 9	8.9	125	5.18	9.0	0.58	9.2	16.9	99.5	8.4	0.58	3.74	9.2	16.9	99.5	13.64
12.11	8.9	135	5.24	—	—	9.2	19.8	—	9.1	11.90	4.37	9.2	19.8	91.2	0.99
12.18	8.9	137	5.50	—	—	9.2	21.2	—	9.1	3.50	4.69	9.2	21.2	97.4	4.32
H 4. 1. 8	9.0	102	5.47	8.9	0.55	9.2	21.4	99.5	8.9	0.47	4.72	9.2	21.4	99.5	3.05
1.16	8.9	115	4.26	8.8	0.70	9.2	21.1	99.4	8.8	3.00	4.66	9.2	21.1	97.7	3.69
1.22	9.0	134	6.90	9.0	1.72	9.2	20.8	98.7	8.6	2.52	4.60	9.2	20.8	98.1	3.10
2. 5	9.3	182	6.68	9.2	1.10	9.2	17.6	99.4	9.2	1.70	3.88	9.2	17.6	99.1	7.19
2.12	9.4	146	7.60	9.4	1.05	9.2	18.6	99.3	9.3	5.70	4.10	9.2	18.6	96.1	5.06
2.19	9.2	90	0.75	9.2	1.68	9.2	19.5	98.1	9.2	0.81	4.30	9.2	19.5	99.1	4.37
2.26	9.1	108	8.20	9.0	1.08	9.2	13.3	99.0	9.1	0.61	2.88	9.2	13.3	99.4	1.80
3. 4	9.0	108	4.0	9.0	14.9	9.2	26.7	86.2	9.1	1.8	5.0	9.2	22.6	98.3	3.72
3.11	9.3	72	3.76	9.3	16.0	9.2	28.1	85.2	9.3	0.53	4.89	9.2	22.1	99.5	3.68
3.18	9.2	91	4.0	9.2	43	9.2	27.2	40.2	9.2	3.9	4.89	9.2	22.1	94.6	2.33
3.25	9.4	73.8	—	9.2	16.0	9.2	21.7	78.3	9.4	0.79	4.8	9.2	21.7	98.9	3.03
4. 1	9.6	80.6	—	—	—	9.2	17.6	—	9.6	0.68	3.88	9.2	17.6	99.2	1.99
4. 7	9.2	75.0	—	—	—	9.2	17.6	—	9.2	0.7	3.88	9.2	17.6	99.1	1.86
4.15	9.3	75.4	—	—	—	9.2	16.9	—	9.3	0.7	3.74	9.2	16.9	99.1	2.22
4.22	9.3	81.5	—	—	—	9.2	—	—	9.2	0.55	3.16	9.2	14.3	99.3	1.66
4.28	9.1	87.3	—	—	—	9.2	—	—	9.1	0.7	3.74	9.2	16.9	99.1	1.81
5. 6	9.2	87.5	—	—	—	9.2	—	—	9.2	0.9	4.32	9.2	19.6	99.0	3.00
5.13	9.2	94.2	—	—	—	9.2	—	—	9.2	0.7	3.88	9.2	17.6	99.2	2.36
5.20	9.2	95.6	—	—	—	9.2	—	—	9.2	1.0	4.32	9.2	19.6	98.9	2.82
5.27	9.1	97.3	—	—	—	9.2	—	—	9.1	0.7	4.32	9.2	19.6	99.3	2.87
6. 3	9.1	104	7.2	—	—	9.2	—	—	9.1	0.7	4.75	9.2	21.5	99.3	3.21
6.10	9.1	101	7.6	—	—	9.2	—	—	9.1	1.0	4.75	9.2	21.5	99.0	3.42
6.17	9.2	77.3	8.23	—	—	9.2	—	—	9.1	0.7	4.0	9.2	18.1	99.3	2.81
6.24	9.1	102	7.17	—	—	9.2	—	—	9.1	0.95	3.68	9.2	16.7	98.8	1.97
6.30	9.1	125	7.17	—	—	9.2	—	—	9.0	0.69	3.80	9.2	17.2	99.3	2.31
平均	9.1	106.8	5.59	9.1	8.20	9.2	19.5	90.2	9.0	1.84	4.15	9.2	18.9	98.4	98.17

表 - 5 開放型容器でのイオン交換樹脂

ウラン除去試験結果

年 月 日	原 水			樹脂塔						推定除 去量 (g)
	pH	U μg/ℓ	流量 m ³ /d	pH	U μg/ℓ	流量 m ³ /d	樹脂 量 ℓ	Sv	除去 率%	
H 4. 2.26	9.1	108	8.2	9.0	0.75	—	84	—	—	—
3. 4	9.0	108	—	8.6	2.1	2.73	84	1.35	98.1	1.7
3.11	9.3	72	—	8.8	0.50	2.59	84	1.28	99.3	1.9
3.18	9.2	91	—	9.3	0.75	2.59	84	1.28	99.2	1.3
4. 1	9.6	80.6	—	9.5	0.84	4.7	84	2.33	99.0	5.9
4. 7	9.2	75.0	—	9.2	0.7	4.83	84	2.40	99.1	2.3
4.15	9.3	75.4	—	9.3	0.70	5.47	84	2.71	99.1	3.3
4.22	9.3	81.5	—	9.2	0.56	6.48	84	3.21	99.3	3.4
4.28	9.1	87.3	—	9.1	0.60	5.4	84	2.68	99.3	2.6
5. 6	9.2	87.5	—	9.2	0.50	4.72	84	2.34	99.4	3.3
5.13	9.2	94.2	—	9.2	1.0	1.61	84	0.80	98.9	1.0
5.20	9.2	95.6	—	9.2	1.0	6.48	84	3.21	99.0	4.2
5.27	9.1	97.3	—	9.1	0.6	6.00	84	2.98	99.4	4.0
6. 3	9.1	104	7.2	9.1	0.78	5.40	84	2.68	99.3	3.6
6.10	9.1	101	7.6	9.0	0.6	5.40	84	2.68	99.4	3.9
6.17	9.2	77.3	8.23	9.2	0.7	5.40	84	2.68	99.1	3.8
6.24	9.1	102	7.17	9.1	0.75	3.88	84	1.92	99.3	2.1
6.30	9.1	125	7.17	8.9	0.69	3.98	84	1.97	99.4	2.4
平 均	9.2	92.4	7.60	9.1	0.87	4.31	84	2.26	99.2	計50.7

表-6

陰イオン交換樹脂の寿命

(A) 条件：(1) PA 318 マクロポーラス型陰イオン交換樹脂

(2) Sv 20 と現在の計算値

(B) 試験方法・ウラン濃度・流量・樹脂量・樹脂の寿命(平成4年6月30日現在)

試験方法	排水溝の利用		簡易イオン交換塔		開放型容器	
	計算	実績	計算	実績	計算	実績
平均ウラン濃度(μg/l)	330		105		92	
流量(m ³ /d)	2.0(831/h)	1.2	2.0	4.2	2.0	4.3
Sv	20	1.3	20	19	20	2.2
最低必要樹脂量(l)	4.17	—	4.17	—	4.17	—
設置樹脂量(l)	70		18.4		84	
使用可能日数	2,121	3,535	1,752	835	9,156	4,242
使用日数(実績)	—	42	—	215	—	125
樹脂残り寿命日	—	3,493	—	620	—	4,117

☆ 排水溝の利用の場合の計算例

◇ 樹脂 1l 当たりのウラン吸着量の計算

$$330 \mu\text{g}/\text{l} \times \text{流量 } 2.0 \text{ m}^3/\text{d} \times 10^3 \text{ l}/\text{m}^3$$

$$330 \times 2.0 \times 1,000 \mu\text{g} = 330 \times 2\text{mg} = 660\text{mg}$$

1 l の樹脂を使うとすれば、1 l で 20g 吸着するので

$$20\text{g} \times 10^3 = 20,000\text{mg} \quad , \quad 20,000\text{mg} \div 660\text{mg} = 330\text{日となる。}$$

設置樹脂の寿命は $70 \text{ l} \times 30.3 \text{ 日}/\text{l} = 2,121 \text{ 日}$ となる。

◇ 排水溝の場合

$$330 \mu\text{g}/\text{l} \times 1.2 \text{ m}^3/\text{d} \times 10^3 \text{ l}/\text{m}^3$$

$$330 \times 1.2 \text{ mg} = 396 \text{ mg} \quad , \quad 20,000\text{mg} \div 396\text{mg} = 50.5 \text{ 日}$$

$$\text{設置樹脂量 } 70 \text{ l} \times 50.5 \text{ 日} = 3,535 \text{ 日}$$

・ Sv について

1 時間当たり樹脂量に対し、何倍の流体を流すことができるかを知る基準である。

普通の流し方は Sv は 20 位である。

表-7 陰イオン交換樹脂 PA318の特性

製造元	三菱化成
特徴	スチレン系強塩基性陽イオン交換樹脂、I型。ポラスでありゲル型樹脂に比較して反応速度大、再生効率良好、耐有機汚染性良好、強度の向上等種々のすぐれた特徴を有している。
構造式	$ \begin{array}{c} \text{---CH---CH}_2\text{---CH---CH}_2\text{---CH---CH}_2\text{---} \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \\ \text{C}_6\text{H}_4 \qquad \text{C}_6\text{H}_4 \qquad \text{C}_6\text{H}_4 \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \\ \text{CH}_2\text{N(CH}_3)_3\text{Cl} \quad \text{---CH---CH}_2\text{---} \quad \text{CH}_2\text{N(CH}_3)_3\text{Cl} \end{array} $
イオン形	C1形
色および形	淡黄白色不透明球状
外観指数	95以上
見掛け密度 [g/l] (参考値)	680
水分含有量 [%]	42~48
交換容量 [meq/ml]	1.3以上
有効径 [mm]	0.4 ~ 0.6
均一係数	1.6以下
粒度範囲 [μ] (300μ以下 1%以下)	1190~297
真比重	1.10 ~ 1.16
耐用温度 [°C]	60以下(OH形) 80以下(Cl形)
有効pH範囲	0~14
価 格	2270円/リットル

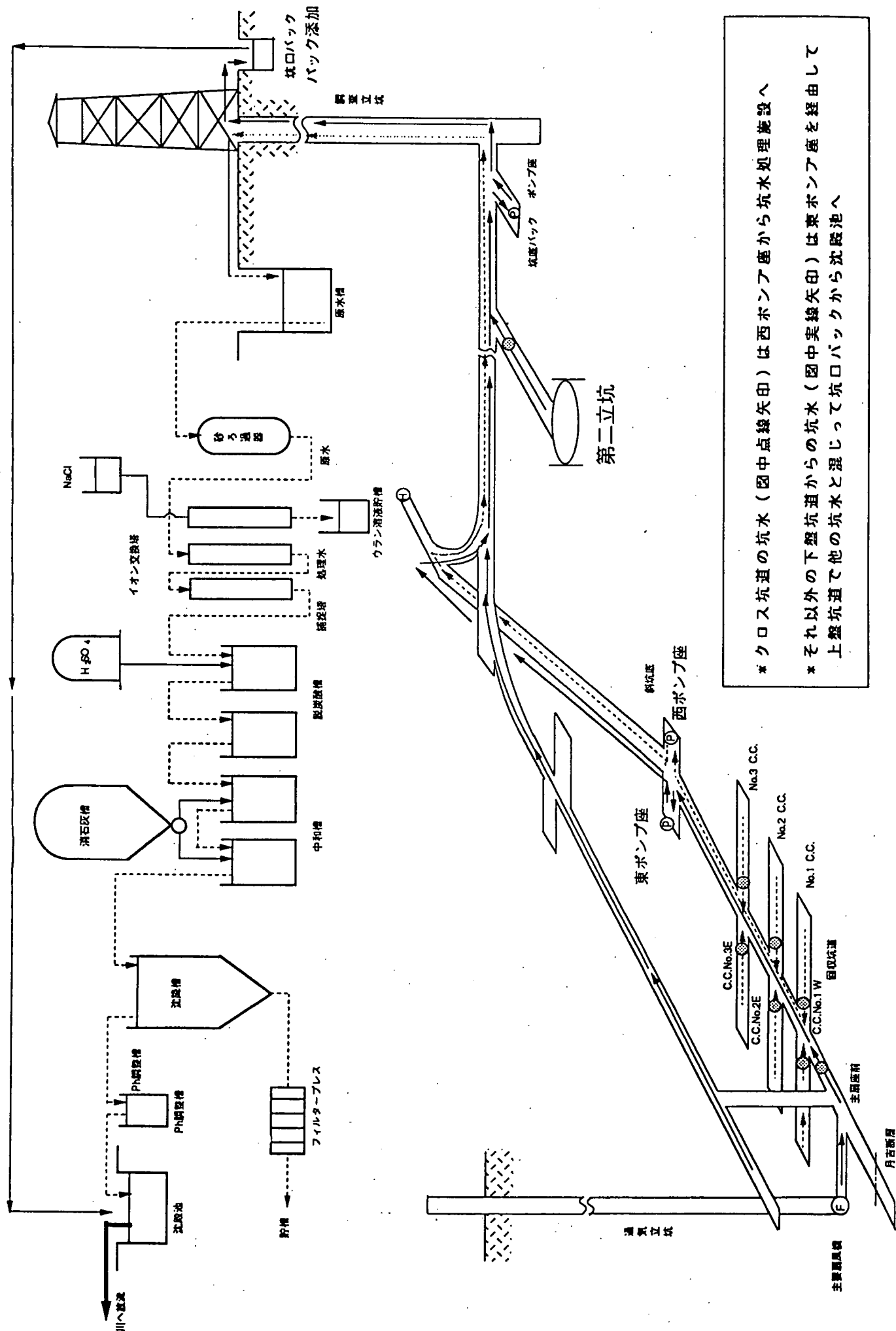
表一 8. 水質汚濁防止法の許容濃度と東濃鉾山排水中の濃度

項 目	許容濃度	東濃鉾山排水濃度 *
(有害物質)		
カドミウム及びその化合物	0.1 mg / l	< 0.005 mg / l
シアン化合物	1 mg / l	< 0.01 mg / l
有機磷化合物	1 mg / l	< 0.1 mg / l
鉛及びその化合物	1 mg / l	< 0.02 mg / l
六価クロム化合物	0.5 mg / l	< 0.04 mg / l
砒素及びその化合物	0.5 mg / l	< 0.01 mg / l
水銀及びその化合物	0.005 mg / l	< 0.0005 mg / l
アルキル水銀化合物	検出されないこと	< 0.0005 mg / l
PCB	0.003 mg / l	< 0.0005 mg / l
トリクロロエチレン	0.3 mg / l	< 0.0005 mg / l
テトラクロロエチレン	0.1 mg / l	< 0.0002 mg / l
(その他の汚染物質)		
水素イオン濃度	5.8 以上8.6 以下	7.5
生物学的酸素要求量	160 mg / l	< 1 mg/l
化学的酸素要求量	160 mg / l	2.1 mg / l
浮遊物質	200 mg / l	8 mg / l
ノルマルヘキサン抽出物質	5 mg / l	< 1 mg/l
— 鉾油類含有量 —		
フェノール類含有量	5 mg / l	< 1 mg/l
銅含有量	3 mg / l	< 0.025 mg / l
亜鉛含有量	5 mg / l	0.04 mg / l
溶解性鉄含有量	10 mg / l	< 0.1 mg / l
溶解性マンガン含有量	10 mg / l	0.06 mg / l
クロム含有量	2 mg / l	< 0.02 mg / l
フッ素含有量	15 mg / l	1.3 mg / l
大腸菌群数	3000個/ cm ³	12 個 /cm ³

(*) この分析値は平成 4年 5月21日に沈澱池オーバーフロー水を採取して
(財)東海技術センターに委託分析した結果である。

中部事業所内で毎月 1回定期的に実施している分析結果も同じである。

図一 1 東濃鉾山坑水処理系統図



* クロス坑道の坑水（図中点線矢印）は西ポンプ座から坑水処理施設へ
 * それ以外の下盤坑道からの坑水（図中実線矢印）は東ポンプ座を経由して上盤坑道で他の坑水と混じって坑口バックから沈殿池へ

図一 2 坑廃水処理系統図

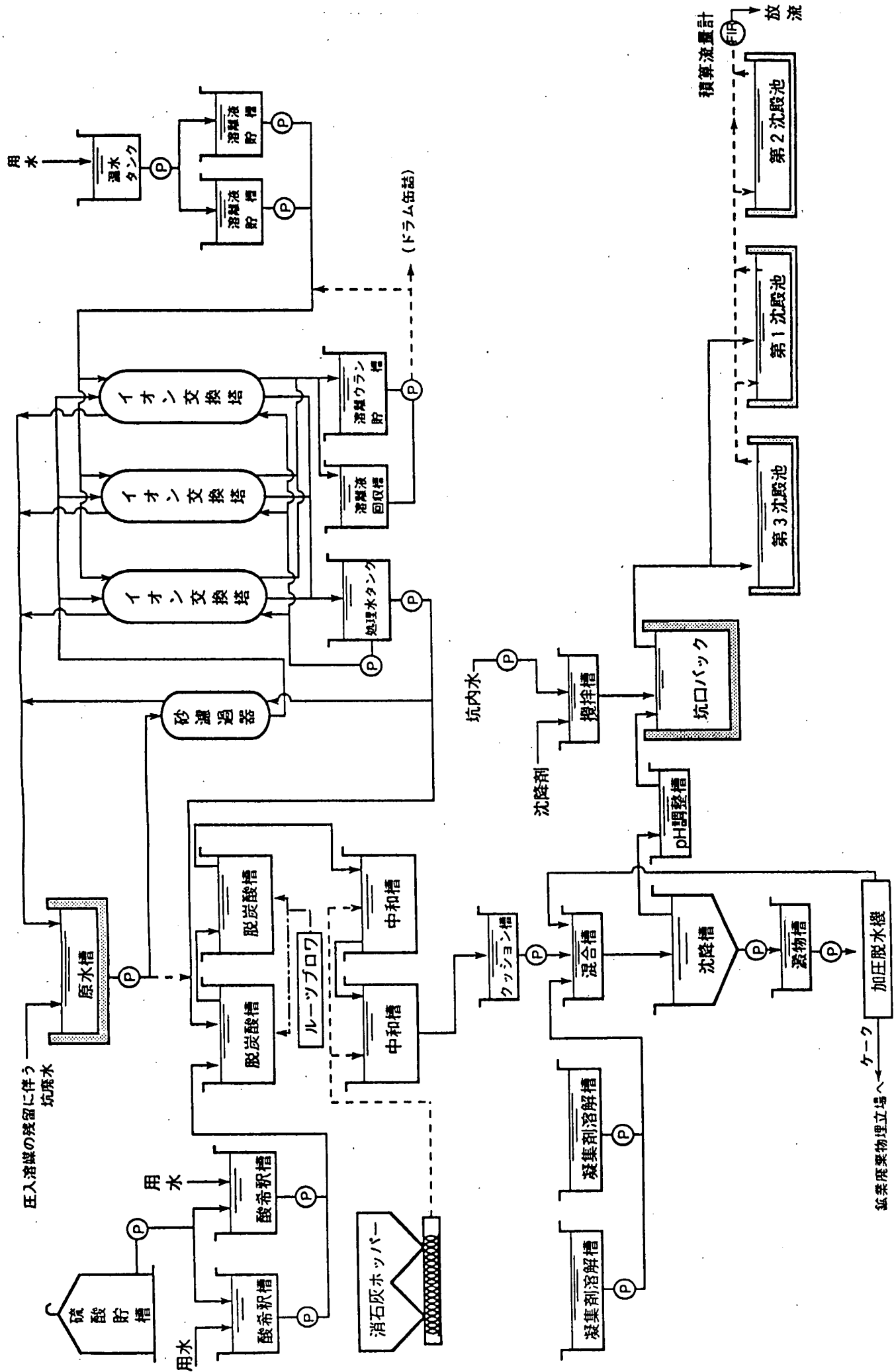
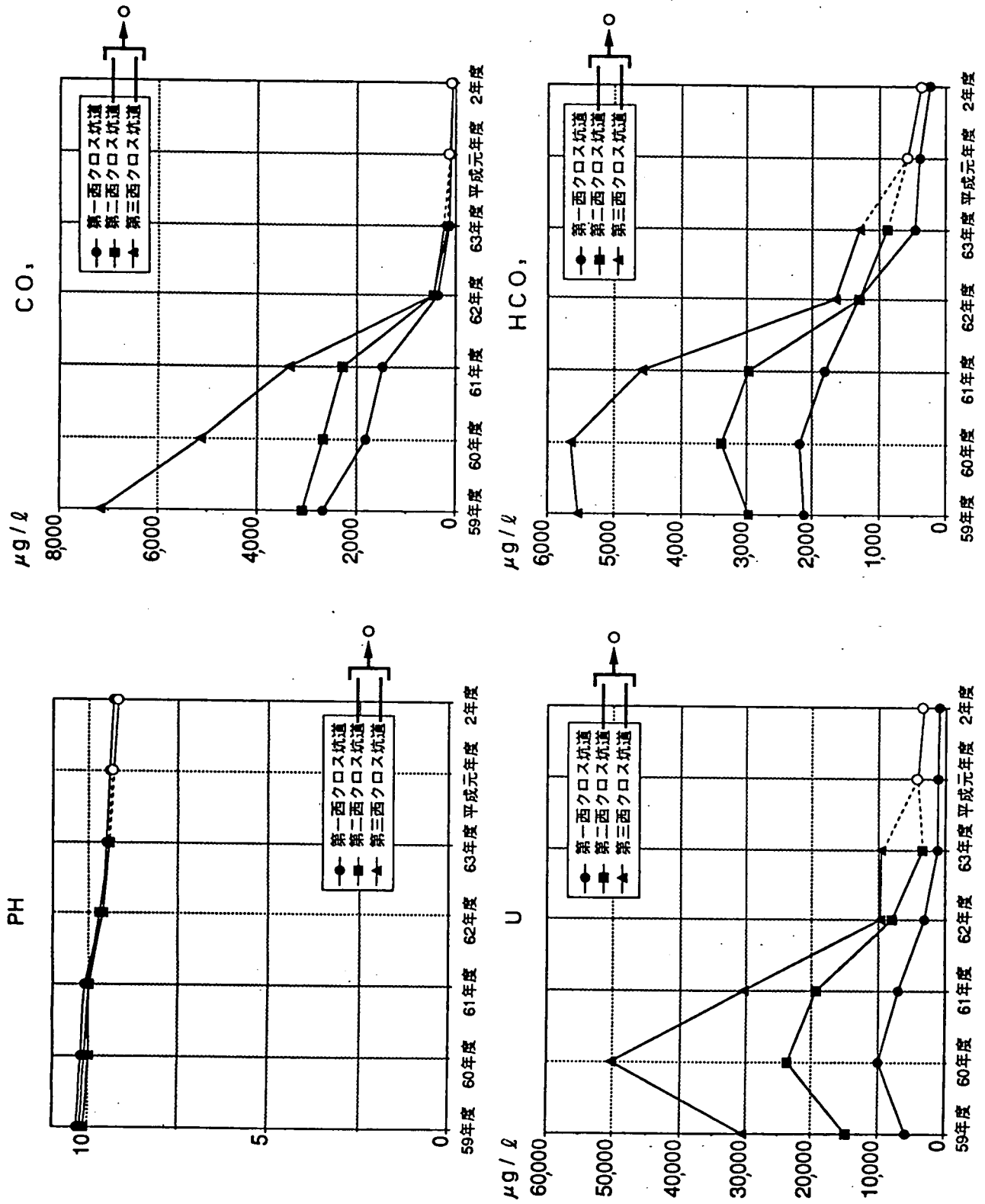
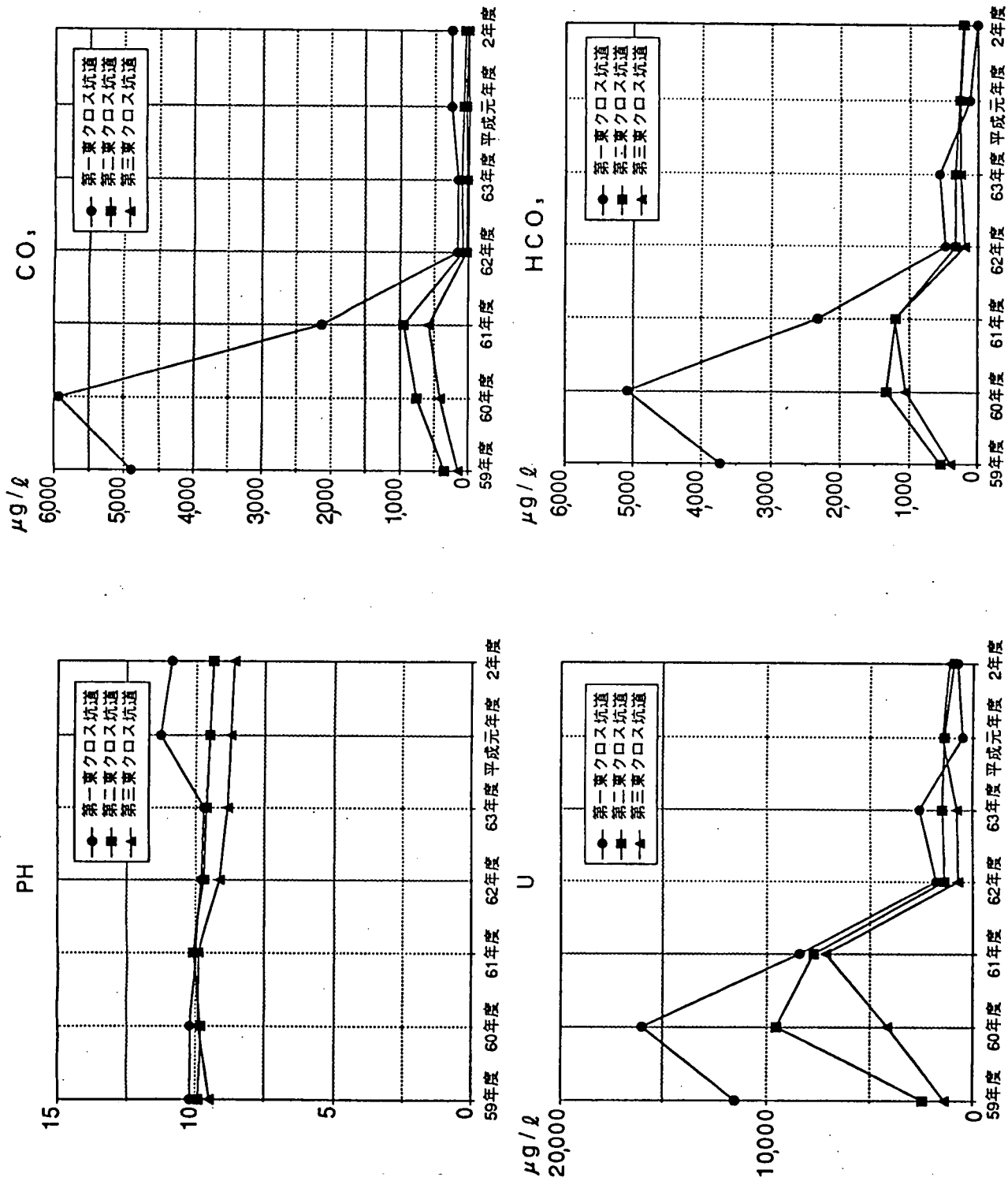


図-3 坑水中のウラン、炭酸及び重炭酸濃度の推移 [平均値]



図一 4 坑水中のウラン、炭酸及び重炭酸濃度の推移 [平均値]



図一 5 排水溝を利用ウラン除去試験位置図

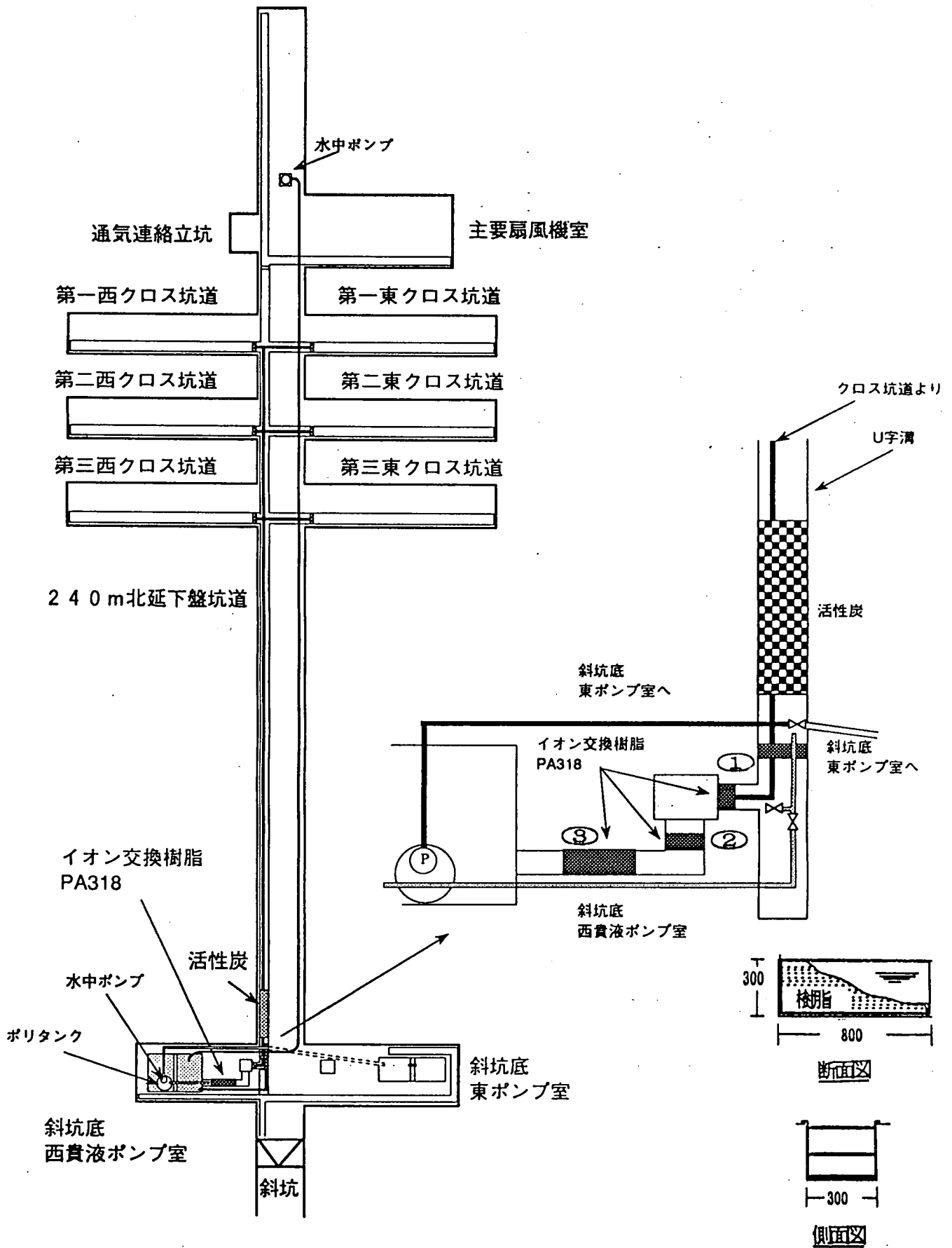
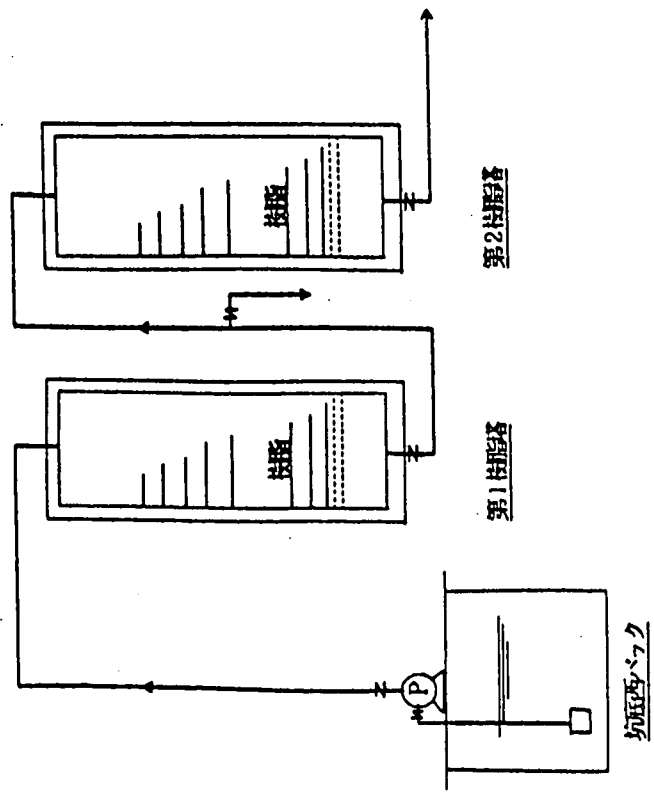


図-6 簡易イオン交換装置

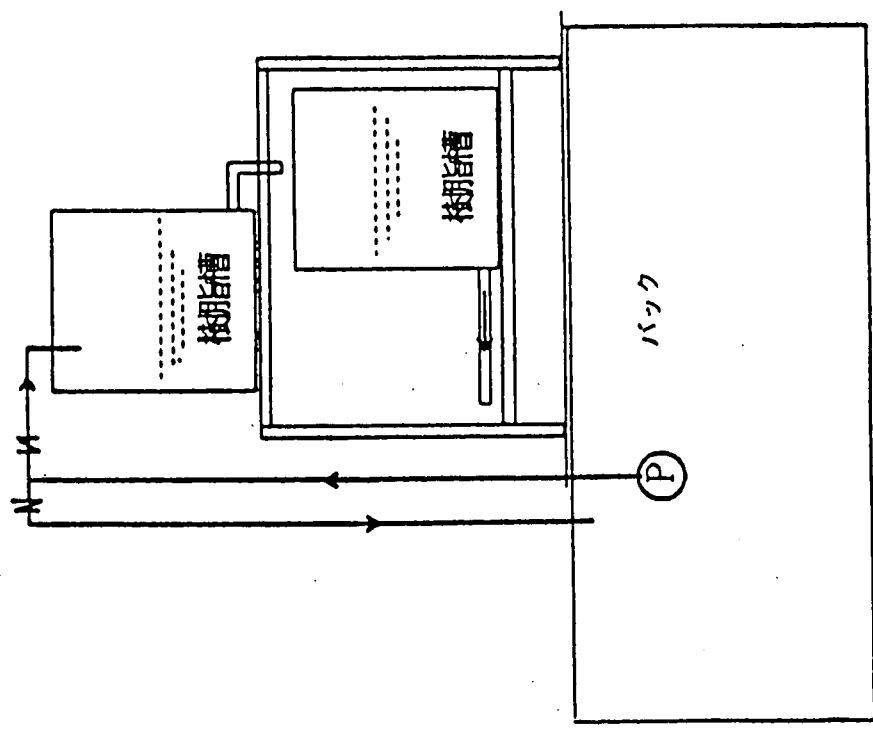


簡易イオン交換装置

単位: mm

機材名	型式	仕様	様
架台	アングルラック製	L 1000×W 1000×H 1300	アングル60×40
樹脂塔	アクリル管(透明)	径 150×H 1000	2本
送液ポンプ	CX BG-PL定量ポンプ	Max 9kgf/cm ² , Max 5.82L/min.	200V 0.75Kw
配管	SUS 306	1/2" . . . 3/4"	
流量計	STEC LF10-PTN	1.5 ~ 20L/min	デジタル型 2個
バルブ	ボールバルブ	1" 6個	
圧力計	—	0 ~ 15 Kg/cm ²	1個

図-7 開放容器での処理装置

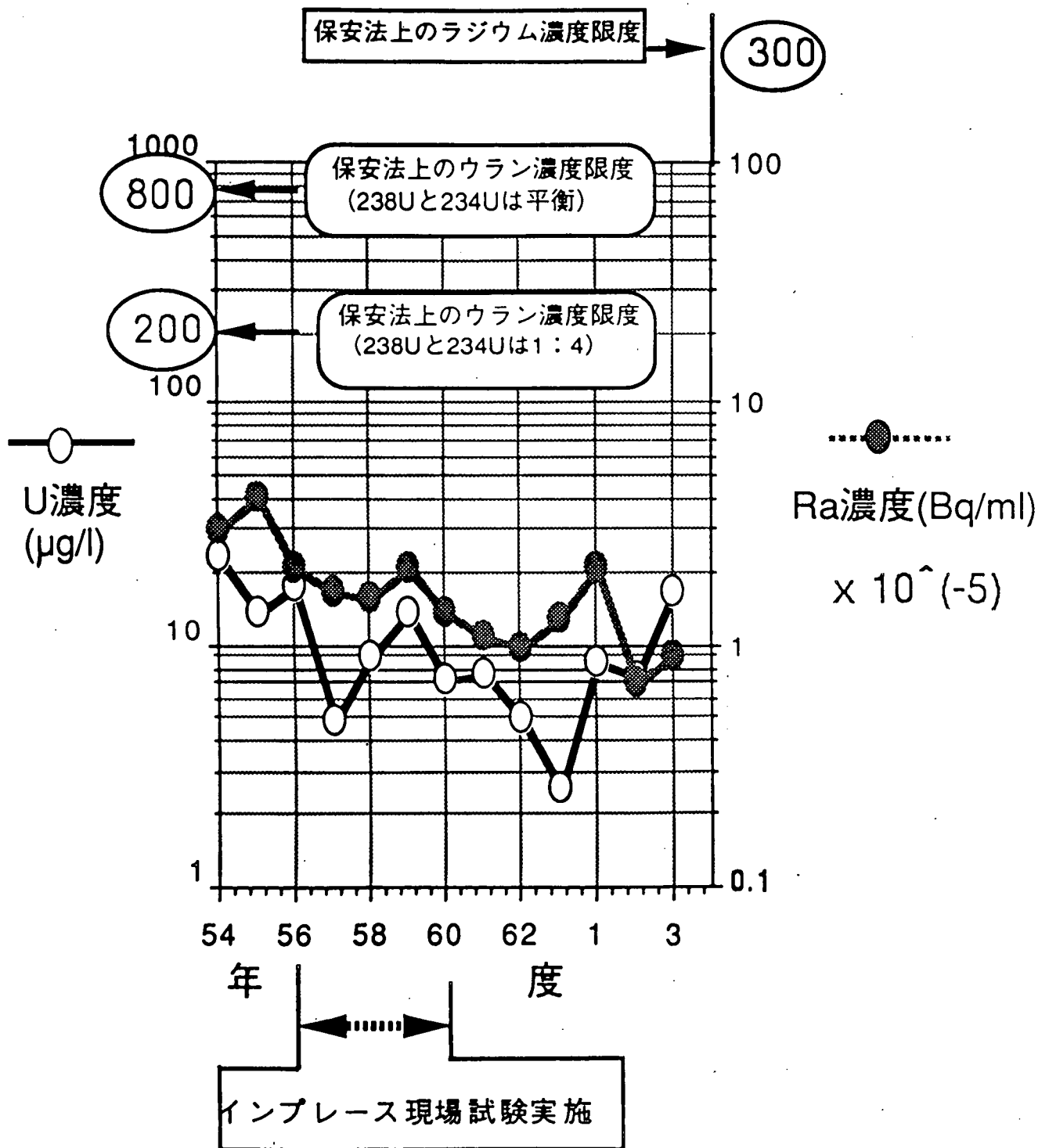


開放容器での処理装置

単位: mm

機材名	型式	仕様	様
架台	アングル製	L 1000×W 800 ×H 900	アングル 40×40
樹脂塔	塩化ビニール管	径 500×H 500	2本
送液ポンプ	水中ポンプ32DSA	Max 70L/min, Head 4.5m, 100v	0.3 Kw
配管	SUS 306	1" 3個	バルブ ポールバルブ 1"
流量計	積算型		径 25

図-8 東濃鉱山沈澱池放流水中のウランとラジウム濃度年変化
 (昭和54年度から平成3年度まで)



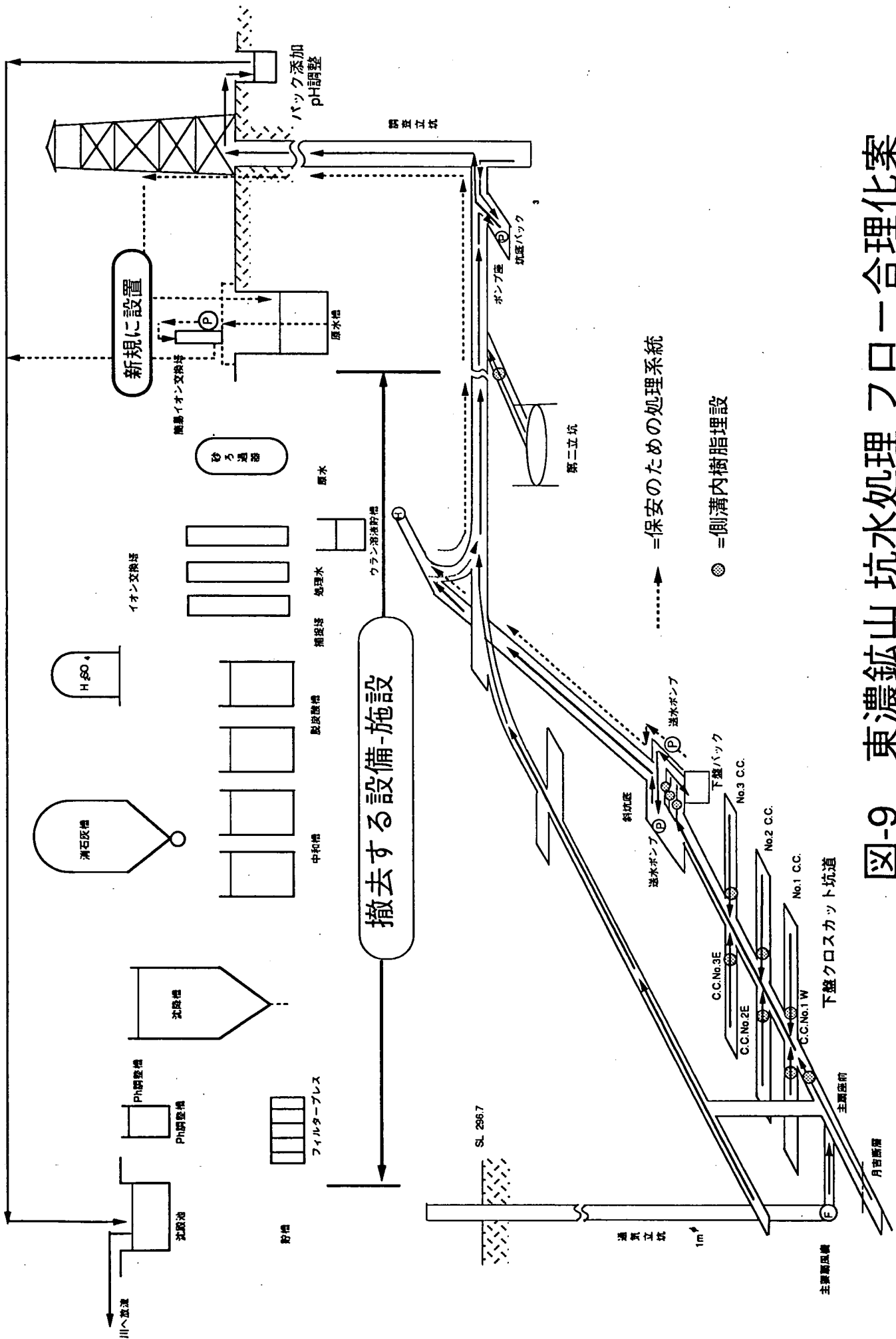
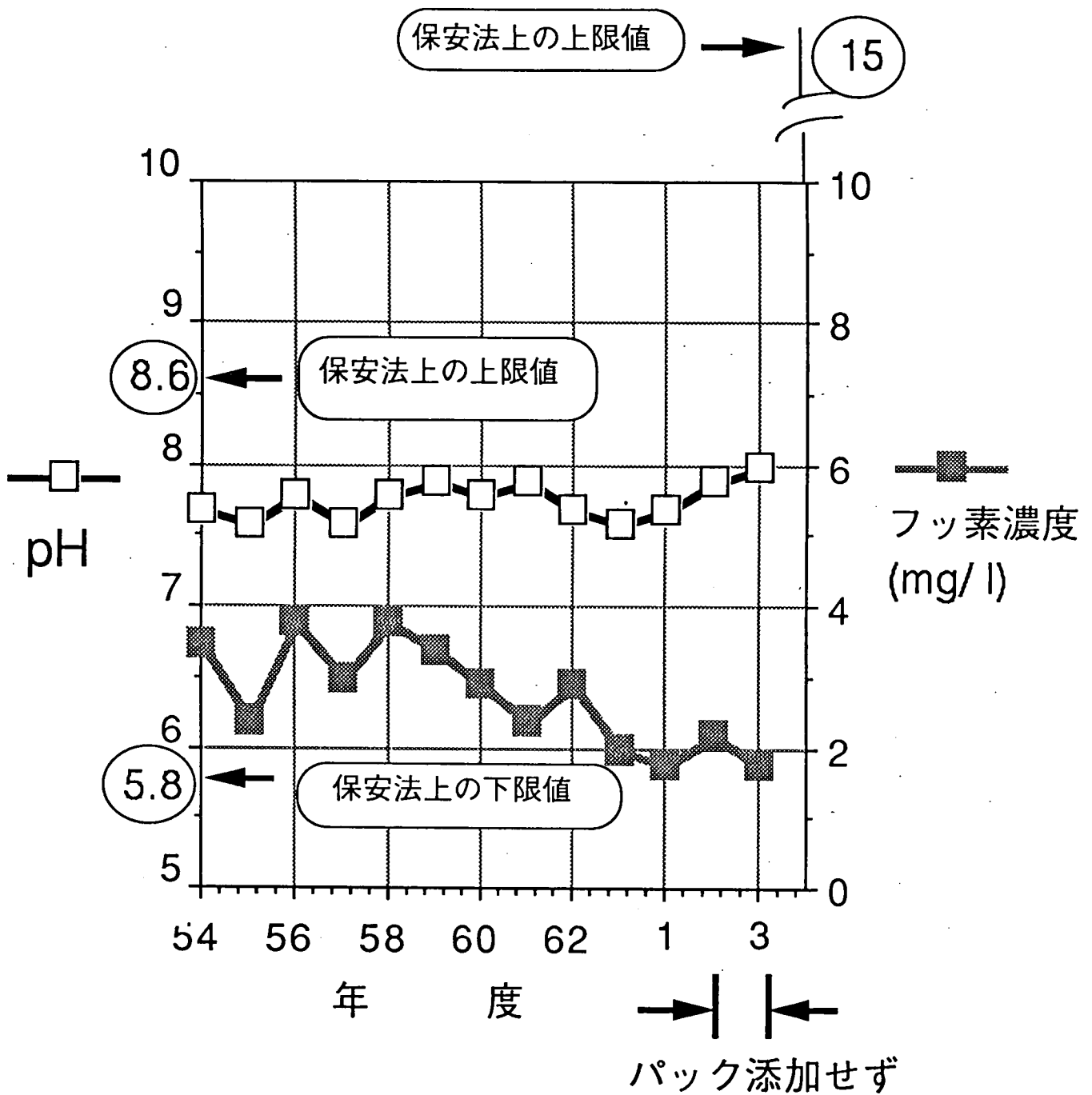


図-9 東濃鉱山 坑水処理フロ-合理化案



東濃鉦山沈殿池放流水中のpHと
フッ素濃度の年変化
(昭和54年度から平成3年度まで)

図-10

A - 4 X線回析装置の導入
(沖 田)

1. はじめに

粉末X線回折装置に対する多機能化や高性能化の要求は、ハードウェア、ソフトウェアの両面にわたって最近急激に高まっている。また操作の単純化の要求は更に強く、誰にでも操作できることが必須条件となってきている。

中部事業所では探査部門および深部地質環境調査研究の一助として、X線回折装置が益々有効利用されるものとする。本装置は従来の装置に比べゴニオメータの自動セッティング機構、スリットの自動機構、X線光学系の調整等々自動化が進み操作性が飛躍的に向上した、また管電圧・管電流の安定度は3倍以上向上し、これにより、回折線強度の高精度測定が容易になった。今後は、データの迅速な対応が図られるものとする。

X線は一般的には紫外線と γ 線の波長領域をつなぐ電磁波として取り扱われている。しかし今日最も普遍的なX線分析では波長 λ が0.1~100Åの間にあるX線が主として利用されている、紫外線や可視光線が原子の結合電子およびそれに近い軌道のエネルギー準位の差に基づいているのに対し、X線はK軌道やL軌道など原子核に近い電子のエネルギー準位の差に起因して、発生や吸収が起こるため、スペクトルが比較的簡単で、化学結合や試料の状態によって大きく左右されることがない、波長の大きさが、物質を構成する原子間距離と同程度であるために、特に原子や分子が規則正しい格子状に配列した結晶性の物質からは、これらの原子によって散乱された一定波長のX線が電磁波として互いに干渉し、いわゆる回折の現象を見せる、この回折の状態が、原子の配列状態と密接な関係をもつので、回折波の分布を解析することによって、物質の構造にもとづく分析が可能となる。

特に化学組成が同一で、原子配列の異なる物質の相互同定には有効な装置である。

この報告書では、X線回折装置の簡単な原理と解析データを中心に報告する。

2. 装置の原理および構成

2. 1 X線の性質

(1) X線 (X-rays) は、可視光線と同じ電磁波であり、波長は大略0. 01~100 Åである。 (図1に電磁波の分類を示す)

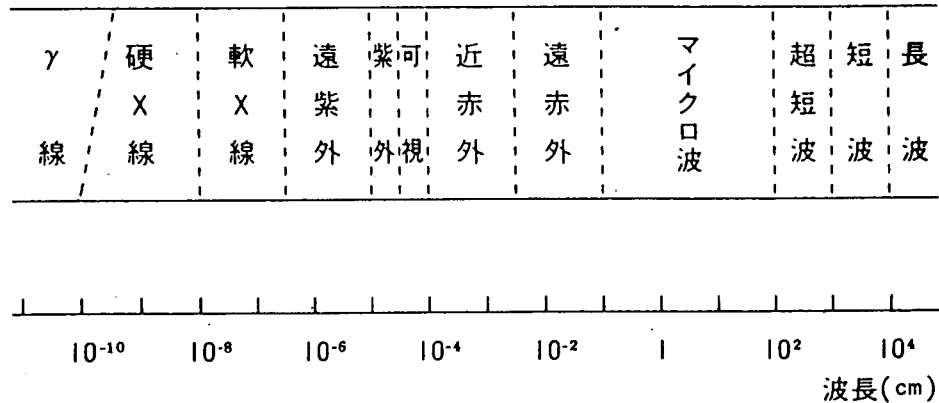


図1 電磁波の分類

X線は、光に比べ波長が極めて短いため類似した性質とともに、いくつかの異なった性質をもっている、光と類似した性質として真空中を光と同じ速度で進、また光と同様、ある時は波動として振る舞い、ある時は粒子として振る舞う。波動は波長 λ と振幅(電磁場ベクトルの大きさ)で特徴づけられ、回折(diffraction)現象を示す。粒子は一個一個数えられる性質で特徴づけられる。X線の粒子は(X線)光量子またはフォトン(photon)とよばれ、一個の光量子は波長 λ に反比例する光量子エネルギー(photon energy) E を持つ。 λ をÅで、 E をKeV(キロエレクトロンボルト)で表すと

$$E = 12.4 / \lambda, \quad \lambda = 12.4 / E$$

の関係がある。このように波動像と粒子像は λ と E の上記関係で結びつけられている。さらに、波動像における振幅の自乗はX線光量子の数に比例する量で、X線の強度(X-ray intensity)に比例する量である。

(2) その他の性質

a. 写真作用

b. 蛍光作用

ZnS, CdS, NaI などに照射すると蛍光を発する。

c. イオン化作用

X線の検出に利用される。

d. 屈折率はほとんど1に等しい

従って光のように、屈折を利用してX線を集中させることはできない。また全反射の臨界角は $10 \sim 30$ 分程度である。

e. 回折現象を示す

この場合は、結晶が回折格子の役割を演ずる。

f. 透過力が大きい

医療におけるレントゲン撮影、工業材料試験に用いられる。

2. 2 粉末法 (Powder method) の原理

粉末状の結晶、あるいは多結晶体を試料としてとりあつかうX線回折を粉末法とよぶ。この方法は試料の組成分析 (状態分析)、結晶粒子の状態、あるいは集合の様子などの研究に採用されている。原理は、粉末試料に単色の (波長 λ とする) 細いX線束 (X-ray beam) をあてた場合について考えてみる。試料中のある結晶粒子で面間隔 d の格子面 (hkl) が、入射X線に対してブラッグの式 (Bragg's formula) $2d \sin \theta = n\lambda$ を満足する角 θ (ブラッグ角) だけ傾いていたとすると、入射X線はこの格子面によって回折される。(格子面は可視光線における鏡にたとえられる。入射角=反射角が成り立つところが似ているからである。しかし、鏡は入射角、波長にかかわらず光を反射するのに対し、格子面はブラッグの式 $2d \sin \theta = n\lambda$ を満足しなければ、X線を回折しない) このとき回折線の方法は、図aのように格子面と角 θ 、入射X線の延長と角 2θ (回折角) 傾いている。

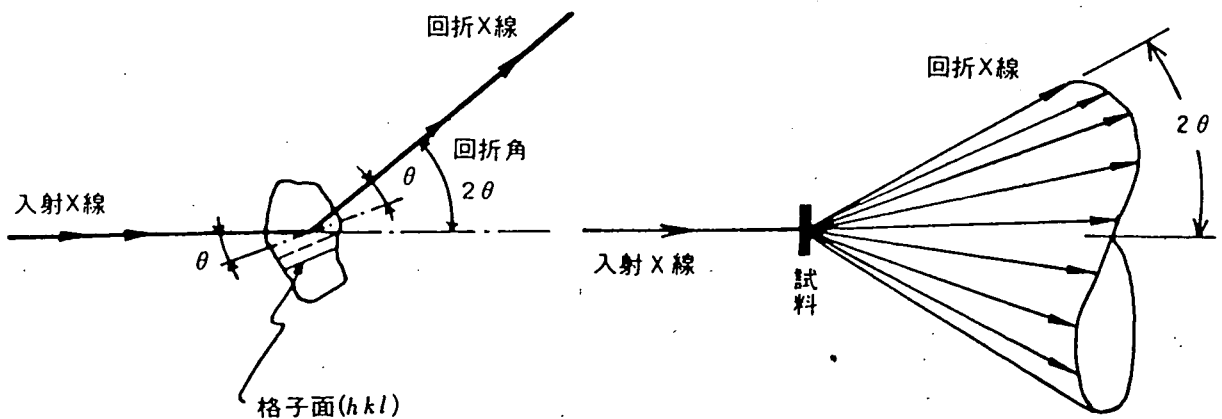
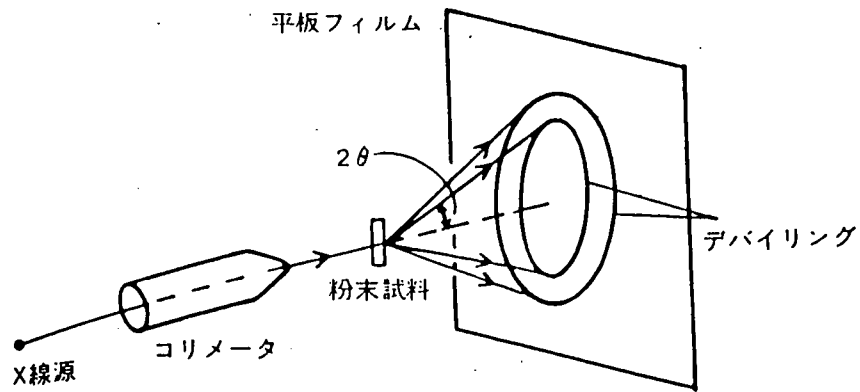


図 a 1つの結晶による回折

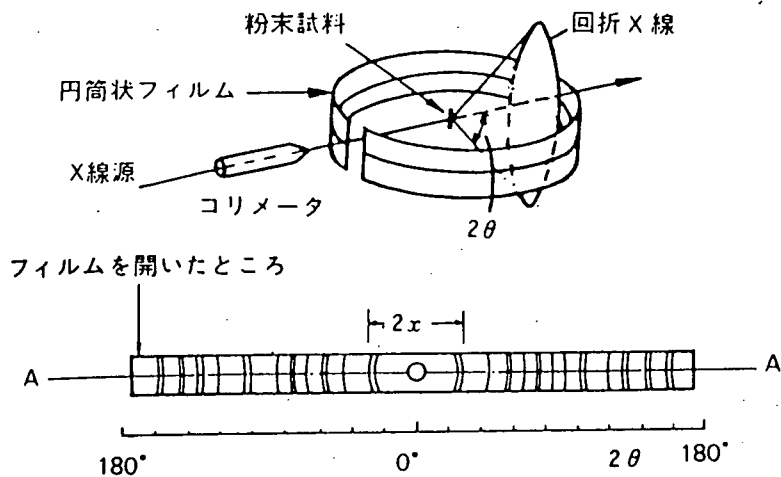
図 b 粉末による回折

試料中の結晶粒子の数が充分多くかつ、格子面の方向がランダム (random) になっているとすれば、どの格子面をとってみても、回折条件を満たすような角度 (入射X線とのなす角 θ) をもった格子面は必ず存在する。このため図bのように格子面 (hkl) によって回折されたX線は $2\theta < 90^\circ$ のときは半頂角 2θ 、 $2\theta > 90^\circ$ のときは半頂角 $180^\circ - 2\theta$ であるような円錐の母線に沿って進む。同様に、別の格子面間隔をもった格子面 ($h'k'l'$) による回折線は、半頂角 $2\theta'$ の円錐の母線に沿う。つまり、粉末による回折X線は中心角が異なる多数の円錐を形成する。(X線照射中の結晶粒子の数が非常に多ければ均一な強度をもった円錐となる。そうでなければ、

円錐の表面は均一な分布とはならず円錐すら形成されない場合もある)。このような円錐を平板フィルムで受けると図cのように、円筒フィルムで受けると図dのように、入射X線の位置を中心とする同心円状のデバイ・シェラー環 (Debye-Scherrer ring) または簡単にデバイ環 (Debye ring) とよんでいる。

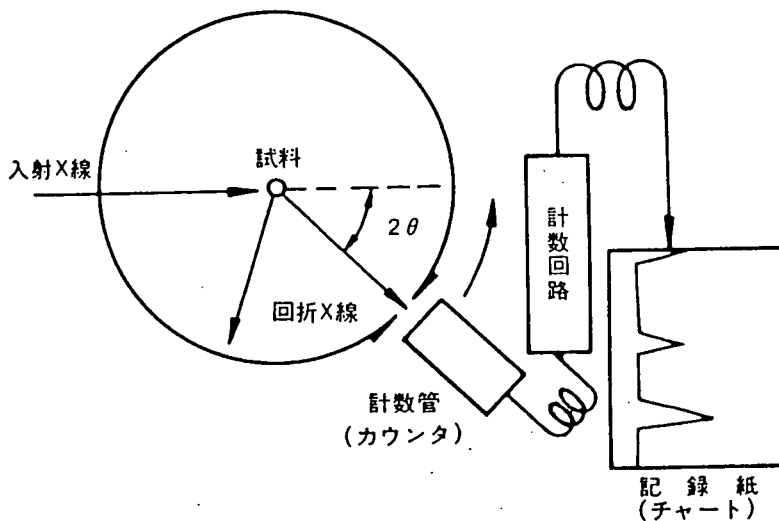


図c 平板法 (ラウエカメラ)



図d 円筒フィルム法 (デバイシェラーカメラ)

計数管を図dの円周AA'に沿って走査させることによって各デバイリングのX線強度を測定し、記録する装置がX線ディフラクトメータ (X-ray diffractometer, X線回折計) である。図eのように試料を中心とした円周に沿って計数管を回転させると、X線強度が計数管の角度 2θ の関数として記録紙上に記録される。格子面間隔 d は、測定値 2θ からブラッグの式 $2d \sin \theta = n\lambda$ を使って求



図e ディフラクトメータの基本原理

度を測定し、記録する装置がX線ディフラクトメータ (X-ray diffractometer, X線回折計) である。図eのように試料を中心とした円周に沿って計数管を回転させると、X線強度が計数管の角度 2θ の関数として記録紙上に記録される。格子面間隔 d は、測定値 2θ からブラッグの式 $2d \sin \theta = n\lambda$ を使って求

られる。

2. 3 装置の構成

X線回折装置は試料の状態により、粉末法と単結晶法用とに分類することができる。前者にはデバイシェラーカメラ、後者にはワイセンベルグカメラ、単結晶自動X線回折装置などがある。また、X線回折装置はX線の検出方法により、フィルムを用いた写真法によるものとカウンタ（計数管）を利用したカウンタ法によるものとに分けられる。前者にはデバイシェラーカメラ（パウダーカメラ）、後者にはディフラクトメータがある。カウンタ（計数管）による自動記録方式を用いるX線回折計のことをディフラクトメータ（Diffract meter）といい、主として粉末法用に広く利用されている。

ディフラクトメータは大きく分けてX線を発生させるX線発生装置（X-ray generator, XG）、角度 2θ を測るゴニオメータ（gonio meter）、X線強度を測定する計数（記録）装置（electronic circuit panel, ECP）、これらを制御し、計数値の演算を行う制御演算装置（control/data processing unit）の四つの部分からなる。その詳細を図-aに示す。

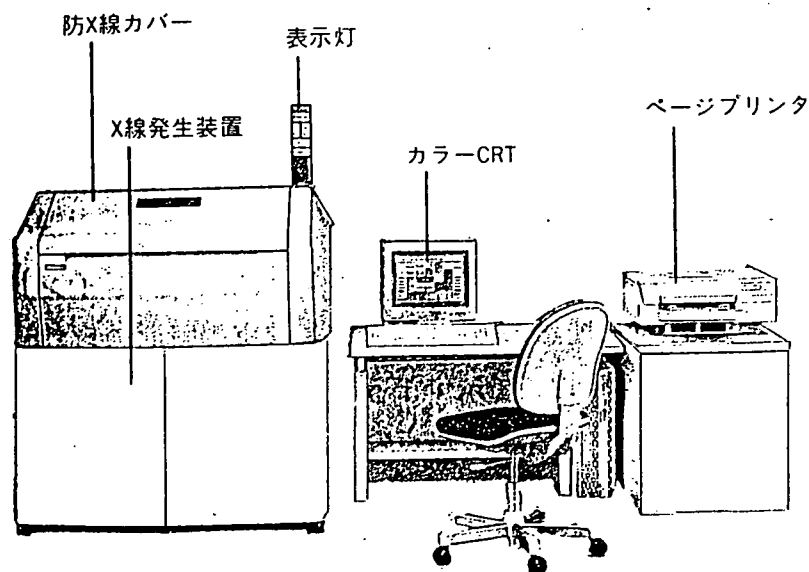
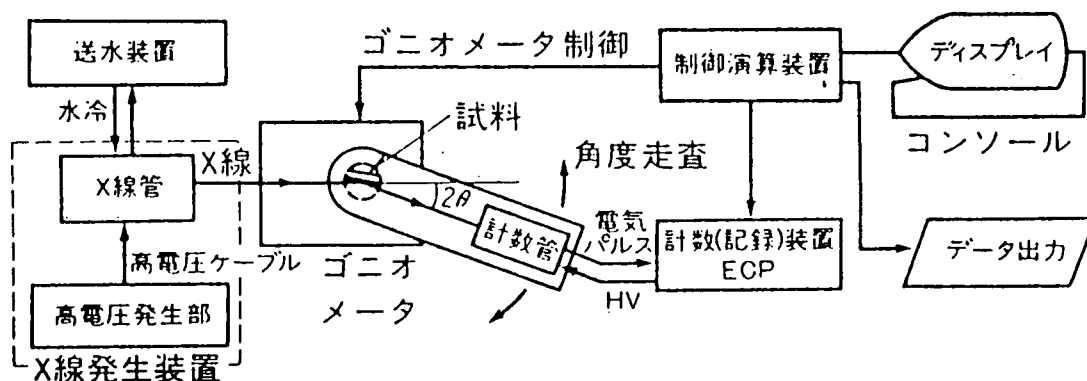


図-a

2. 3. 1 X線発生装置

(1) X線管球

X線管球は熱電子2極真空管の一種である。加熱された陰極（一般にはタングステンフィラメントを使用する）から出る熱電子を加速し、ターゲット（target, 対陰極）に衝突させてX線を放射させる。ターゲットへ向かう電子流は一般にひろがるので、ウェネルト円筒（Wehnelt cylinder）に適当な電場をかけて電子流の発散をおさえ、ターゲット上に必要な大きさの焦点を結ばせる。X線はターゲットの表面から、あらゆる方向に放射される。普通、ターゲットの近傍の管壁に窓がもうけられ、この窓よりX線が管外にとり出される。

a. 封入式管球（密閉管球, sealed-off X-ray tube）は真空タイプで使用法が簡便である。熱電子を放出するタングステンフィラメントの寿命を長くし、かつターゲット表面の汚染の進行を防ぐため、内部は $10^{-7} \sim 10^{-8}$ Torrの高真空になっている。

b. 冷却

電子のもつエネルギーの0.1%程度はX線に変換されるが、大部分は熱となって消耗される。このためターゲットの裏面を水で冷却する。裏面と水との熱交換率を上げるために水をジェット状に噴出させる。

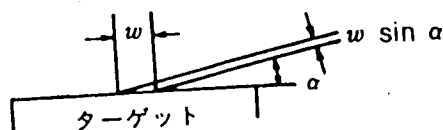
砂が冷却水に含まれているような場合は、あらかじめフィルタで濾過して使用する。封入管球ではジェットの内部にフィルタ（メッシュ）があるので、定期的にフィルタを掃除する。

c. X線管球の窓

X線を取り出す窓は、X線をよく通し、（吸収端を無視すれば一般に原子番号Zの小さい材料程またX線の波長 λ が小さい程、質量吸収係数は小さく、X線を透過しやすい。0.25mm厚のBeのX線透過率はCu $K\alpha$ で95%、Cr $K\alpha$ で80%程度である）高真空に耐えねばならない。この窓材としてBeは非常にすぐれた材料である。窓材はきわめてうすく（たとえばBeの厚さ0.25mm）、きずつきやすい。また、Beが酸化し、猛毒のBeOに変化している恐れもある。いかなる場合も窓には直接手をふれてはならない。

d. X線の取り出し

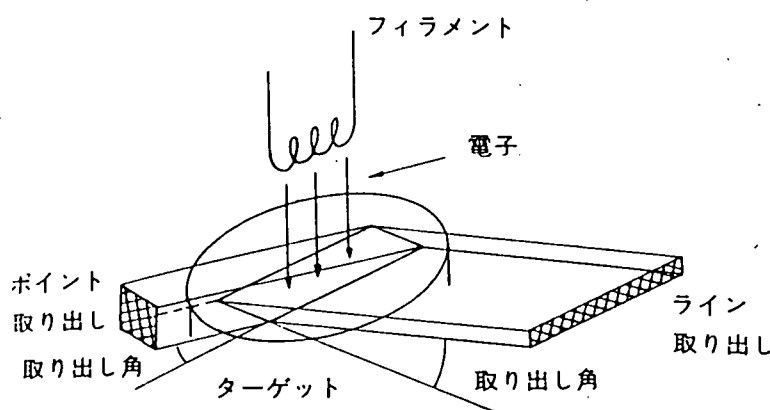
X線の取り出し角（take-off angle）〔ターゲット表面とX線の取り出す方向とのなす角で、見込み角（glancing angle）ともいう。図AのようにX線の取り出す方向のターゲット上での焦点（focus on the target; 実焦点, real focus）の大きさをW, 取り出す角度を α とすれば、みかけの焦点（実効焦点）の大きさは $W \sin \alpha$ で表される。 $\alpha = 6^\circ$ のとき実効焦点の大きさは実焦点の大きさの約1/10となる〕



図A X線の取り出し

は $3 \sim 12^\circ$ が可能であるが、強度と分解能の関係で、通常 6° に固定して使用される。

X線の取り出し方には、ライン (line) とポイント (point) の二種類あり、両者はX線束の断面の形で区別される。図Bで示すように、“ライン取り出し”とはX線のターゲット上の焦点の長手方向と直角方向にターゲット面すれすれに取り出す方法であり、スリットを使用する通常のディフラクトメータで使用される。これに対し、“ポイント取り出し”とは焦点の長手方向にターゲット面すれすれに取り出す方法で、ピンホールをもったコリメータを使用するX線カメラで使用される。



図B ライン取り出しとポイント取り出し

e. 管球の寿命

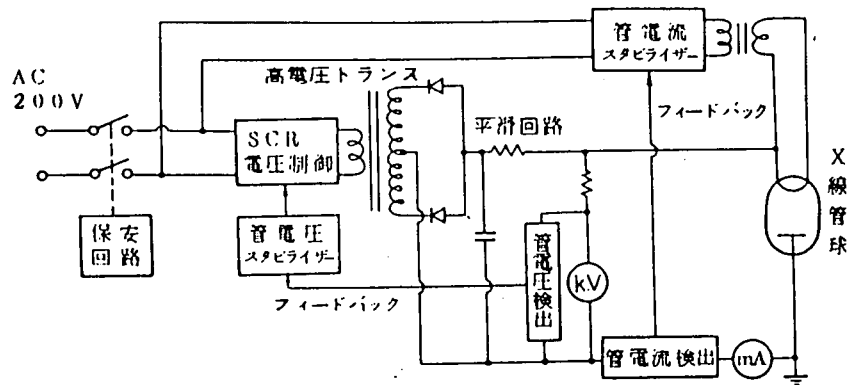
管球の寿命はターゲットの汚染、ターゲットの破損、管球の真空不良、フィラメントの断線などの原因でできる。フィラメントの断線による寿命到達は稀であり、ターゲットの汚染 (contamination) により事実上使用不能になる事が多い。汚染とは長時間の使用により、フィラメントのタングステンなどがターゲット表面に付着することをいう。この時、汚染物質による特性X線 (たとえば $W L \alpha$) がターゲットの特性X線と共に現れる。ターゲットの特性X線に対し、不純物線の強度が2%程度となる時間を寿命の目安とする。

(2) 高電圧発生部

高電圧発生部から高電圧ケーブルを通してX線管球に負の高電圧 (ターゲットを水冷している関係上、ターゲットをアース側にとり、フィラメントに負の高電圧をかけている) が供給される。封入管球の場合は $20 \sim 50$ kVの管電圧で、管電流は最大 50 mAのもの、回転対陰極管球の場合は $20 \sim 60$ kV、最大 200 mAのものが普及している。

高電圧発生部は高電圧 (昇圧) トランス・整流回路・平滑回路・管電圧安定回路・管電流安定回路などから成っている。小容量のものは単相両波整流平滑化 (コンスタントポテンシャル, constant potential) 方式がとられ、大容量のものは3相全波整流方式がとられている。

カメラ法の場合は測角範囲全体を同時測定するので、測定中発生しているX線強度はいくぶん不安定でもさしつかえない。しかし、一般に、ディフラクトメータでは、測角範囲にわたってカウンタが走査するので、発生しているX線強度は充分安定していなければならない。そこで、ディフラクトメータには電圧・電流とも安定するための制御回路が装置に内蔵されている。図Aにその一例のブロックダイヤグラムをあげる。



図A X線発生装置のブロックダイヤグラム

電圧・電流の安定度は発生装置の種類によってちがうが、 $\pm 0.1\%$ から $\pm 0.03\%$ のものが普及している。通常のX線回折の測定では $\pm 0.1\%$ の安定性を持つもので充分である。ちなみに、測定条件を考慮してみると、管球の窓から試料を経てカウンタまでのX線の通過距離は $30\sim 40\text{ cm}$ となるのが普通である。かりに 40 cm とすると、気温 1°C の変化でX線強度はCu $K\alpha$ で 0.16% 、Cr $K\alpha$ で 1.55% の変化をうける。したがって、 $\pm 0.1\%$ の安定度以上を要求する場合には測定のための環境条件を何らかの形でととのえなければならない。

(3) 各種保安回路

X線発生装置の保護および人体の安全のために各種の保安回路が組み込まれている。

a. 断水リミッタ (water cut-out limiter)

冷却水の断水や異物がジェットにつまった場合、ターゲットの過熱を防ぐため、装置の電源が切れるよう動作する。水量の下限は従来は水圧により間接的に検出していたが、最近では流量を直接検出している。また、水圧が高すぎる場合もリミッタが働くようになっている。

b. 過負荷リミッタ (overload limiter, OLL)

各ターゲットの許容負荷以上の負荷が生じた場合、装置の電源が切れるよう動作する。使用管球に対応した設定値で過負荷リミッタを使用する。

c. 高電圧リミッタ (high voltage limiter, HVL)

高電圧出力が使用X線管の最高電圧を越える場合、装置の電源が切れるよう動作する。

d. 低電圧リミッタ (low voltage limiter, LVL)

X線管球のフィラメント保護用リレーで、フィラメント加熱用出力がフィラメント定格を越える場合、装置の電源が切れるよう働く。

e. 警告灯 (warning light)

X線を発生させると、X線発生を表示する警告灯が点灯する。

f. X線シャッター (shutter)

安全のためX線シャッターは二重になっている。電磁シャッターのスイッチ。を“OPEN”にしても、手動シャッターが閉じていれば電磁シャッターは開かない。電磁シャッターが開くと表示ランプが点灯する。

g. 防X線カバー (radiation enclosure)

人体の安全のために、防X線カバーが用意されている。X線発生中、防X線カバーを開けると、X線が切れるようになっている。(フェイルセーフ機構, fail-safe device, FS機構)

2. 3. 2 ゴニオメータ

(1) 集中法の基本原理

図1にディフракトメータの光学系の原理図を示す。

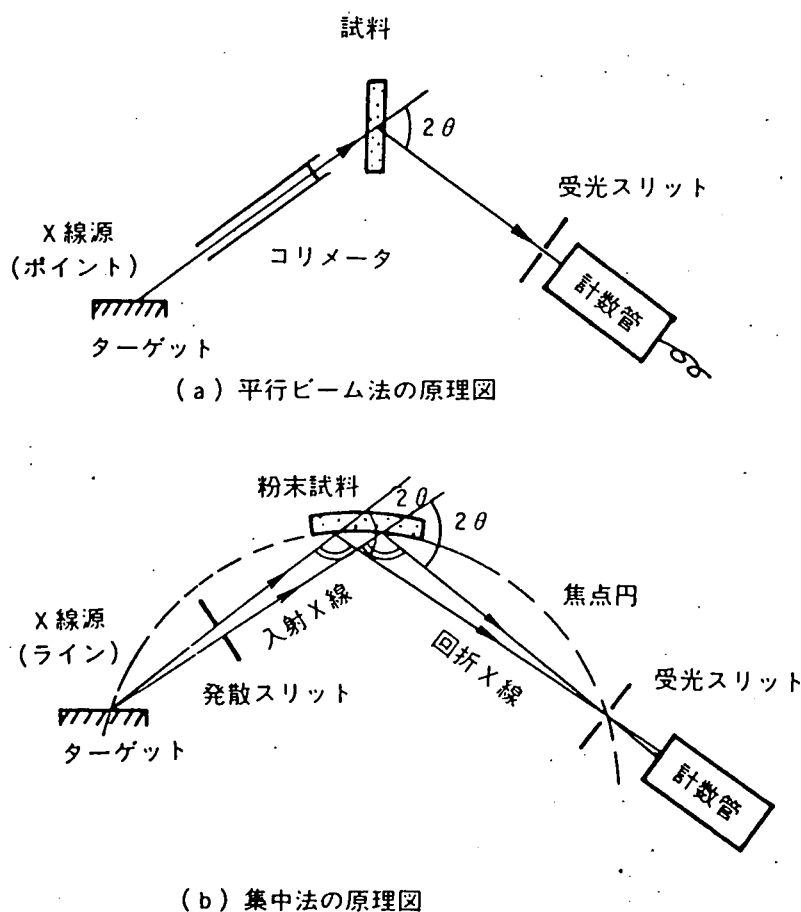


図1 ディフракトメータの基本的な光学系

試料が小さい場合やX線が透過する試料などにおいて(a)図のようにコリメータを用いた平行ビーム法(parallel beam method)がつかわれる場合があるが、一般には(b)図のような集中法(focusing method)が使われる。集中法は平行ビーム法に比べて分解能がよく、かつ回折X線の強度が強い。図の1(b)に示すように、焦点円(focusing circle, 集中円, Rowland circle)を仮想し、この焦点円に接するような曲面をもつ試料による回折を考える。焦点円上にあるX線源から発散したX線を試料に入射させる。試料からの回折X線は焦点円上の点(ここに受光スリットを置く)で集中する、これから述べるゴニオメータは任意の 2θ で集中条件が満足されるよう考慮されている(Bragg-Brentanoの集中法)。

(2) ゴニオメータ

ゴニオメータ(goniometer)の外観を図1に、光学系を図2に示す。

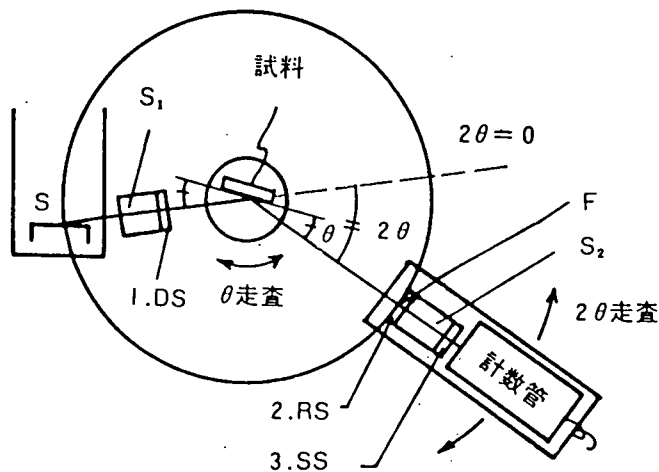
- a. ディフラクトメータでは一般にX線源Sとしてライン焦点(線焦点)を使用する。ターゲット上で $1 \times 10 \text{ mm}^2$ のノーマルX線管球を使用し、取り出し角を 6° にすれば、実効幅は 0.1 mm となり、 $0.1 \times 10 \text{ mm}^2$ の線状の線源となる。
- b. Sより発散するX線は、第1番目のスリットで水平面内の発散角が制限され、試料に照射される。このスリットは発散スリット(divergence slit, DS)とよばれており、 $1/6$, $1/2$, 1 , 2 , 4° の発散角のものとセッティング用に 0.05 mm 幅のものが用意されている。
- c. 試料で回折されたX線は収束し、Fで集中する。この位置に置かれるが、第2番目のスリットで、受光スリット(receiving slit, RS)とよばれている。 0.15 , 0.3 , 0.6 mm の幅のものが用意されている。
- d. 第3番目のスリットは空気散乱など試料以外のところからの散乱X線が計数管に入るのを防ぐもので、散乱スリット(scatter slit, SS)とよばれている。SSはDSと対になっており、DSと同じ発散角のものが用意されている。
- e. S_1 , S_2 はソーラスリット(soller slit)とよばれ、薄い金属板を等間隔に積み重ねたもので、入射X線および回折線の垂直方向の発散を制限する。図3のように、縦長の焦点から発生したX線は入射側のソーラスリット S_1 により、入射X線の垂直発散つまりデバイ環の縦方向の重なりを押さえられる。受光側ソーラスリット S_2 はデバイ環の中心部分のみをとり出す働きをする。ソーラスリットはソーラスリットボックスとよばれるケースに収められている。なお、このケースはb, c, dで説明したスリットのホルダーを兼ねている。
- f. Bragg-Brentano

標準的な集中法においては、次のような二つの条件を満足させなければならない。

- (i) X線源—ゴニオメータの回転中心(試料表面)間距離とゴニオメータの回転中心—受光スリット間距離を等しくする。この長さをゴニオメータ半径(goniometer radius)といい、たとえば 185 mm となっている。

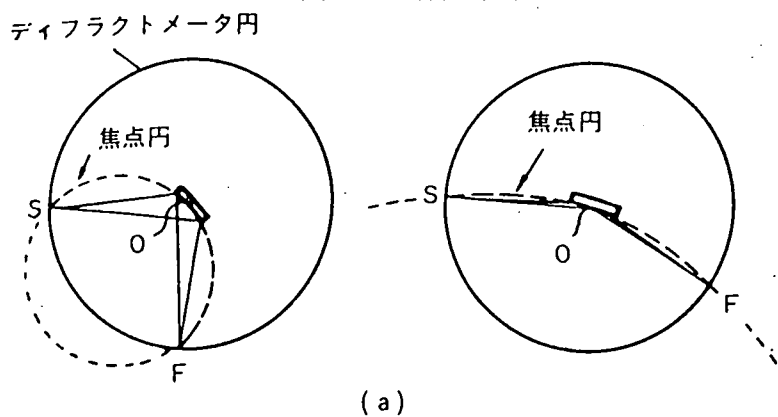
(ii) 試料は微粉末にして試料板につめ、表面が焦点円に接するように置く。焦点円 (focusing circle) はX線源S, ゴニオメータの回転中心O, 受光スリットFの3点を通る仮想的な円でその半径は図2 (a) のように回転角 2θ によって変わる。試料面が常に焦点円に接するためには, ダイレクトビームの中心と試料面とのなす角 (θ), ダイレクトビームの中心と回折X線とのなす角 (2θ) とが, 常に1:2に保たれればよい。これを満足するために, 試料と受光スリットが回転軸のまわりに1:2の速度比で回転するようになっている (倍角回転機構, $2\theta - \theta$ rotation mechanism)。

図1 ゴニオメータ



基本的構造

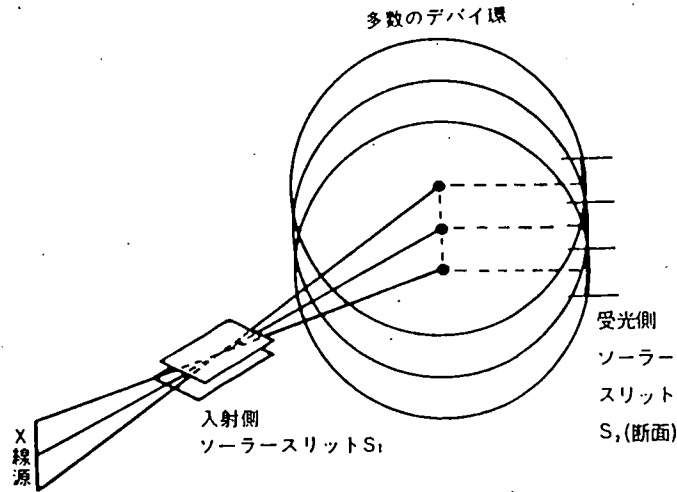
図2 X線光学系



(a)

(b)

図3 デバイ還の垂直発散



2. 3. 3 計数記録装置

(1) 構成

回折X線はスリット系を通してX線検出部に導かれるが、そこで、電気的な信号に変えられ、最終的にはレコーダのチャート上に書き表される。この途中の変換を行い、それをチャート紙に書く作業をする部分が計数（記録）装置（計数回路, electronic circuit panel, ECP）である。計数回路のブロックダイアグラムを図1に示す。

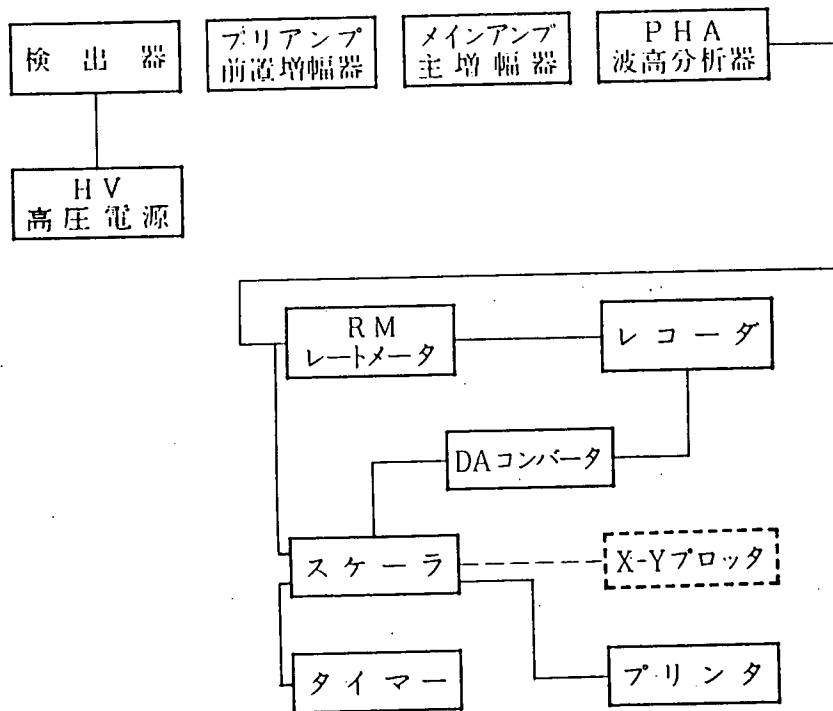


図1 計数回路のブロックダイアグラム

X線光量子（フォトン）は検出器（detector）によって電気的なパルスに変換される。このパルスはプリアンプ（preamplifier, 前置増幅器）でインピーダンス変換

され（通常一つの小箱の中に計数管とプリアンプが収められており、これをカウンタプローブまたは略してカウンタなどとよんでいる）、メインアンプ（main amplifier, 主増幅器）で増幅される。増幅されたパルスは波高分析器（pulse height analyzer, PHA）に入り、不要な波高（pulse height: パルス電圧の高さ）のものは電気的にとり除かれる。2進ユニット、10進ユニットによりパルスの数は適当に減減させられ、パルス信号は、レートメータ（ratemeter, RM: 計数率計）またはスケーラ（scaler, 計数計）に入る。レートメータでは、単位時間当たりのパルスの数（計数率, counting rate）に比例した直流電圧に変換され、レコーダに送られる。レコーダ（recorder, 記録計）は自記平衡型電圧計（ポテンショメータ）であり、計数率計部からの出力電圧に比例した図形をチャート（chart paper, 記録紙）上に書く働きをする。ゴニオメータからの角度マーク（angle mark, event mark）もチャート上に同時に記録できるようになっている。

レートメータはX線の強さを連続的にアナログ量として測定する場合に用いられる。一方、スケーラはX線の強さを設定された計数時間（fixed timeまたはpreset time）内に到達するパルスの数として数えるために用いられる。スケーラ動作の設定時間（プリセット時間）はタイマー（timer）によって決められる。スケーラで読みとられた計数値は、計数表示管にデジタル量として出力される。この値はプリンタに打ち出すことができる他、D/Aコンバータ（D/A converter）を経てレコーダに出力することも可能となっている。最近ではスケーラ値をデジタル量のままX-Yプロッタ（X-Y plotter）に出力する方法もとられている。

(2) 検出器 (detector)

ディフラクトメータの検出器として一般に比例計数管（proportional counter, PC）やシンチレーション計数管（scintillation counter, SC）が使用されている。以前はガイガー計数管（Geiger-Muller counter, GMC）が多く用いられたが、計数直線領域（linear region of counting rate）が狭く（GMCは不感時間“dead time”が長く、500 cps以上になると数え落としが目立つようになる）、寿命も短いことから現在は使われていない。

a. 比例計数管 (PC)

(i) ガスを封じ込めた計数管（封入型比例計数管 sealed proportional counter, S-PC）が使われる。

(ii) ガス封入管において、陽極の電圧に対する計数管の出力、すなわち陽極電圧によりガス中でイオンが増加される様子を、図2に示した。

1個のフォトンが、管内で数個のイオン対をつくったとする。負の電荷（電子）は陽極芯線へ、正の電荷は陰極の方へひかれる。両極間の電圧が低いときには電極までの走行中にイオン対は再結合し、イオン対の多くは電極まで到達しない（再結合領域）。

電圧をさらに高くすると電離箱領域に入る。この領域ではイオン化によってできたイオン対の再結合の機会は無視できる程少なく、ほとんどすべて電極に集められる。この領域では集められる電荷は電圧に無関係なので飽和領域とも

よばれる。電離箱はこの領域で使用される。

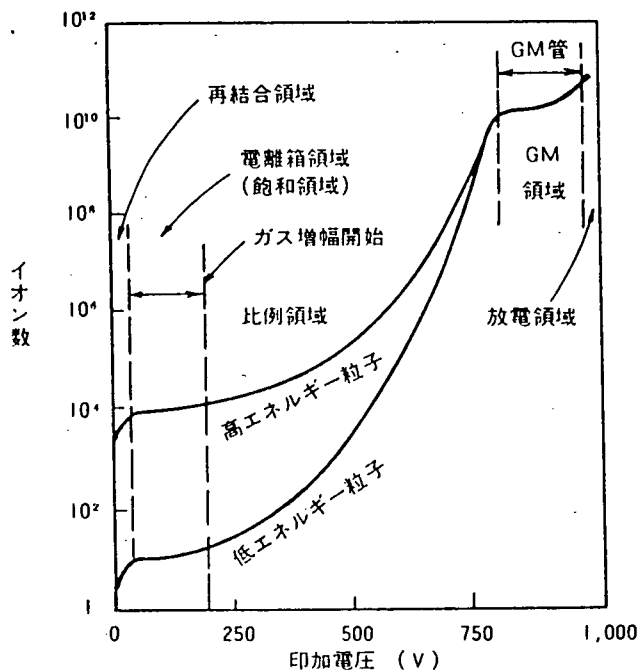


図2 電極間電圧とイオン対数との関係

さらに印加電圧を高くすると、電離電流は再び増加してくる。発生したイオン対の電子は陽極に達するまで充分加速されてガス原子に衝突し、つぎつぎにイオン化を行う。さらにこの二次の電離作用で作られた電子が、次の電離を行なうというように、つぎつぎに多数の電子が生じ、最後のものが電極に達するまで(0.2~0.5 μsecの短時間で)電子の増殖が続く、このような電子の増殖現象を電子なだれ (electron avalanche) という。

二次電子の発生には光子の放出(紫外線の発生)をとまなう。この光子による光電効果によりさらに電子は増加する。この現象をガス増幅 (gas amplification) という。いま、1個の一次電子が陽極に到達するまでに衝突によって生ずる電子の数の平均を n 、光電子効果によって光電子を生ずる確率を r とすると、1個のなだれから生ずる紫外線で発生する光電子の数は rn だから、最初1個あった電子が多数のなだれによって増殖される割合(気体増幅度) M は

$$M = n + rn^2 + r^2 n^3 + \dots = n / (1 - rn) \quad (rn < 1)$$

となる。 $rn < 1$ であれば M は有限の値をもち、したがって、電離電流は初めに入射粒子によって作られイオン対の数に比例することになる。このような範囲で使用する計数管を比例計数管という。実際に用いられる比例計数管では $rn \ll 1$ であるような電圧範囲で、このようなときには $M = n$ となり、なだれは1個しか生じない。

さらに陽極電圧を高くすると rn は次第に増加して1に近くなる。このとき陽極に達する電子は莫大な数にのぼり、(入射X線のエネルギーに関係なく)一定値に近づく。これが、ガイガー領域で、ガイガー計数管はこの領域で使用される。ガイガー計数管の出力されるパルスの波高は大きいが入射粒子エネルギー

ギーに無関係なので、粒子のもつエネルギー（線質）を知ることはできない。
 (iii) PC（比例計数管）に一定強度の単色X線をあて、計数管にかけられる印加電圧をかけて計数率をとると図3のような特性が得られる。

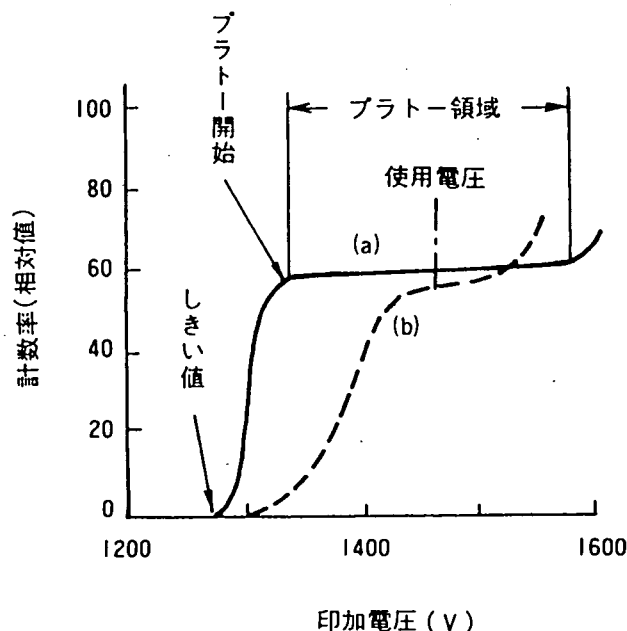


図3 比例計数管のプラトー曲線の例

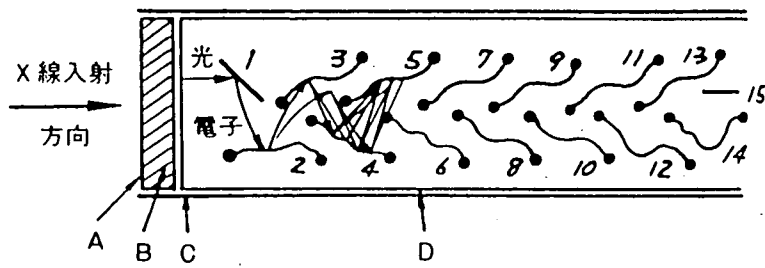
(a) 正常な計数管

(b) 特性が劣化した計数管

計数率の増加が非常にゆるやかなところをプラトー (plateau) とよぶ。一般にプラトーの終わりから計数率は増加する。これは増幅が大き過ぎ雑音がディスクリミネータ (discriminator, 選別器) レベルを越えてしまうためである。PCの印加電圧はプラトーの中心または、低い方からプラトー領域の1/3程度の電圧のところで使用される。定期的にプラトー特性を点検し、最適電圧で使用する。また、必要以上に強いX線を入射しないこと、強い機械的なショックを与えないこと、芯線付近には計数しないデッドゾーンがあるのでカウンタの方向に注意して使用することなどが必要である。

b. シンチレーション計数管 (SC)

比例計数管はガスのイオン化を利用した計数管であるが、シンチレーション計数管 (scintillation counter, SC) は固体の発光作用 (蛍光) を利用した計数管である。シンチレーション計数管の構造を図4に示す。発光体 (シンチレータ, scintillator) として微量のTlで活性化したNaI単結晶が一般に使われる。シンチレータはX線により励起されると、青紫色の光を発光する。この微弱な光を光電子増倍管 (photomultiplier, phototube) を用いて増幅する。シンチレータの青紫色の光が光電子増倍管の光電面 (ホトカソード) を刺激し、光電子 (一次電子) を放出する。この光電子を10段階程度積み重ねられたダイノードの二次電子放出によってねずみ算的に増加 (約 10^6 倍) させ、比例計数管と同程度 (数mV) のパルスとして出力させる。



- A : Be
- B : 発光体 (シンチレータ NaI)
- C : 遮光材料
- D : 光電子増倍管 (フォトマルチプライヤ)
- 1 : 陰極 (ホットカソード)
- 2 ~ 14 : ダイノード
- 15 : 陽極

図4 シンチレーション計数管 (SC)

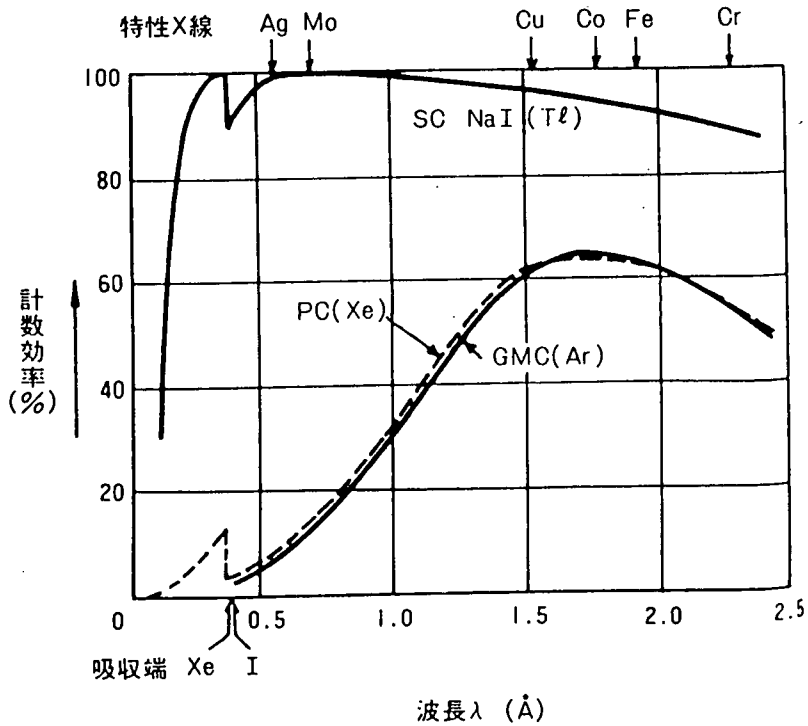


図5 カウンタの計数効率 (計算値)

計数管	長さ (mm)	窓材
Geiger Ar 550mm Hg	100	Mica 0.013mm
Proportional Xe 320mm Hg	20	Mica 0.013mm+Be0.13mm
Scintillaion NaI(Tl)	1	Be 0.13mm

シンチレータの発光量は、入射X線光量子のエネルギーに比例するので、エネルギー選別が可能である。しかし後述のようにエネルギー分解能は比例計数管に劣る。また、雑音が比較的多く、X線の波長が3 Å以上になると、シグナルの波高が雑音と同程度になり、両者を分離するのが難しくなる。

計数管の計数効率は変換されたパルス数を入射X線光量子の数で除した値で

表され、光量子吸収体および窓材の吸収係数と厚さに関する。計数効率のグラフを図5にあげる。SCはX線回折に用いる波長領域ではほぼ100%に近く、計数効率の点でアルゴンPCにまさる。

PCとSCの性質を表1に示した。

	検出器の原理	計数効率 (%)		エネルギー分解能 (%) Cu K α	PIIAを必要とするか	回折測定チャートにエスケープピークが現われるか	備考
		Cu K α	Mo K α				
P C (Ar 封入型)	電離とガス増幅	60	10	20%前後	不要	一般に現われない	電極の通っている中心付近は感度が悪いので、それを選んで使う。
S C	蛍光作用 光電効果と2次電子による増幅	100	100	40~70%	必要	現われる場合がある	比例計数管より雑音が多い。

(注) 数値はおよその目安である。

表1 PC (比例計数管) とSC (シンチレーション計数管) の性質

(3) 計数管のエネルギー分解能と波高分析器

a. エネルギー分解能

一定のエネルギーをもったX線 (単色X線) によって得られるパルスの波高値を波高分析器によって分析すると図6のような波高分布曲線 (pulse height distribution curve) が得られる。

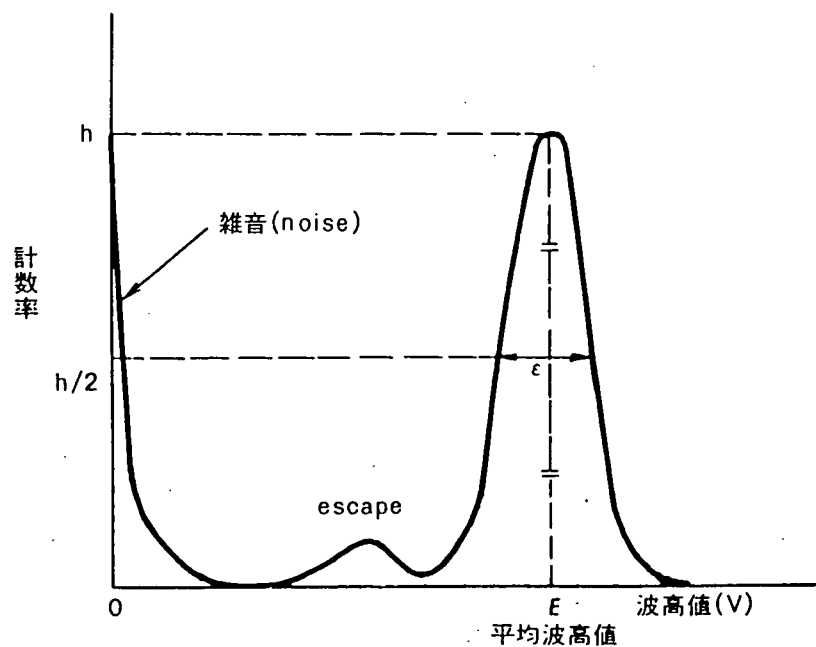


図6 比例計数管による波高分布曲線

η を計数管のエネルギー分解能 (energy resolution) とすると η は次式で表

わされる。

$$\eta = \varepsilon / E \times 100 \quad (\%)$$

ただし E : 平均波高値, ε : 波高のゆらぎの半価幅。平均波高値 (mean pulse height value) E は後述のように計数管の印加電圧, 増幅器の利得によって異なるが, エネルギー分解能は一定エネルギーの X 線に対してほぼ一定である。

単色 X 線を計数管に入射させても, 発生する波高値にゆらぎ (ひろがり) が生ずるのはなぜであろうか。これは X 線光子に変換される過程がランダムな現象つまり統計的な“ゆらぎ”があるからである。

たとえばアルゴン比例計数管に $\text{Cu K}\alpha$ (8 KeV) の光子が入ると, 発生する一次電子は約 300 個で, その統計的ゆらぎは $\sqrt{300} = 17$ 個で約 6% である。実際には電場の不均一性などからエネルギー分解能は 20% 前後となっている。一方 SC では光電子増倍管の光電子面で生ずる一次電子の数は $\text{Cu K}\alpha$ で 10~15 個でそのゆらぎは 30~40% である。実測されるエネルギー分解能は 40~70% である。

b. エスケープピーク

入射 X 線のエネルギーが計数管の光子吸収体 (たとえば Ar ガス) の吸収端エネルギーより大きくなると, 波高分布曲線にエスケープピーク (escape peak) があらわれる。エスケープピーク的位置は次式で表される。

エスケープピークのエネルギー = (入射 X 線のエネルギー) - (吸収体の特性 X 線エネルギー)

(例 1) アルゴン ($\text{Ar K}\alpha$ 2.96 KeV) を用いた比例計数管に $\text{Cu K}\alpha$ (約 8 KeV) が入射した場合, $\text{Cu K}\alpha$ のエスケープピークエネルギーは約 5 KeV に相当する。今 8 KeV が波高値 1 V (PHA のベースライン 200 目盛り) に調整されているとすれば, エスケープピークは約 0.625 V (125 目盛り) の位置に現れることになる。

(例 2) Na I ($\text{I K}\alpha$ 28.6 KeV) を用いたシンチレーションカウンタに, 40 KeV の連続 X 線が入射した場合, $\text{Cu K}\alpha$ (約 8 KeV) が 1 V (200 目盛り) に調整されているとすると, 連続 X 線のエスケープピークは 11.4 KeV, つまり 1.43 V (286 目盛り) に現れることになる。

エスケープピークは実際の回折測定チャート上にも (エネルギーの高い連続 X 線により) 2θ が $5 \sim 16^\circ$ 付近にブロードなピークとして認められることがある。例 2 に示したように, SC+PHA の組み合わせにおいて, 図 7 (b), (d) のように試料によって回折された短波長の連続 X 線によるエスケープがちょうど PHA のウィンドーを通過する波高となったときにエスケープピークが生ずる。管電圧をヨウ素の $\text{K}\alpha$ の励起電圧 (33.2 KV) 以下にするか, モノクロメータを使用するとエスケープピークは回折チャート上に現れない。

S-PC は SC と異なり, 短波長および長波長の連続 X 線に対して計数効率が悪いので, 図 5 でわかるように, カウンタ自ら不用な連続 X 線をカットする働きがある。このため, S-PC では PHA は通常省略される。この場合エスケープ

ピークは回折チャート上に現れない。

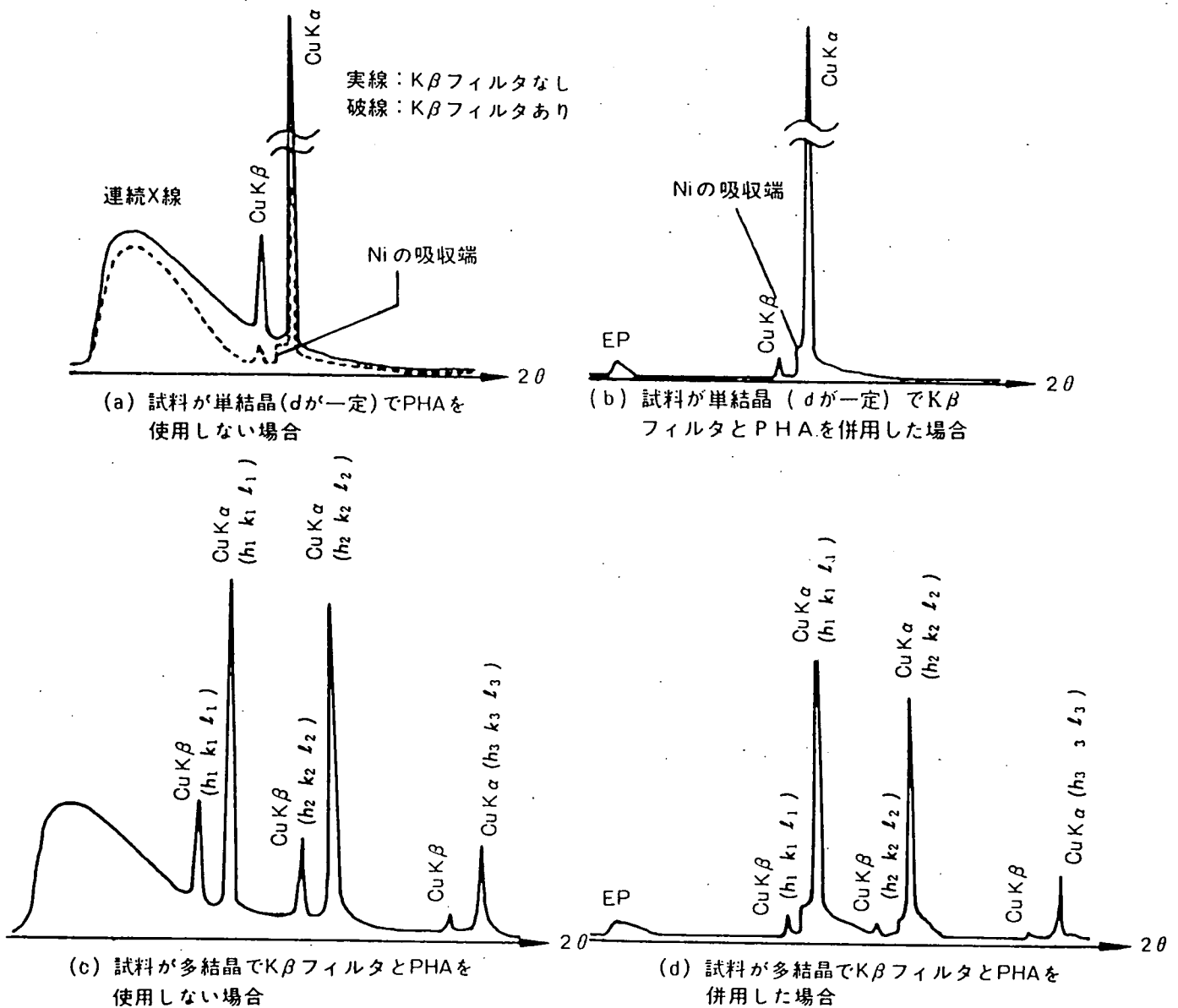


図7 回折チャートの模式図 (SCの場合)

c. 波高分析器 (pulse height analyzer, PHA)

検出器に入るX線は完全な単色でなく、試料から回折された特性X線の他に、連続X線、試料からの蛍光X線など不要なX線も混合している。検出器に生ずるパルス波高が、入射X線のエネルギーに比例することを利用して波高弁別をし、不要なパルス信号を電気的にカットするのが、波高分析器 (pulse height analyzer, PHA) である。

図8のように検出器に生ずるパルスの平均波高は入射X線のエネルギーすなわち $1/\lambda$ に比例する。PHAをターゲットの特性X線たとえばCu K α が通過するように設定すれば、Cu K α と大きく波長の異なるX線をカットすることができる。図8は大部分のCu K α (■部) はPHAを通過するが、たとえばMo K α 、Cr K α に相当するX線 (▨部) はPHAを通過しないことを示している。

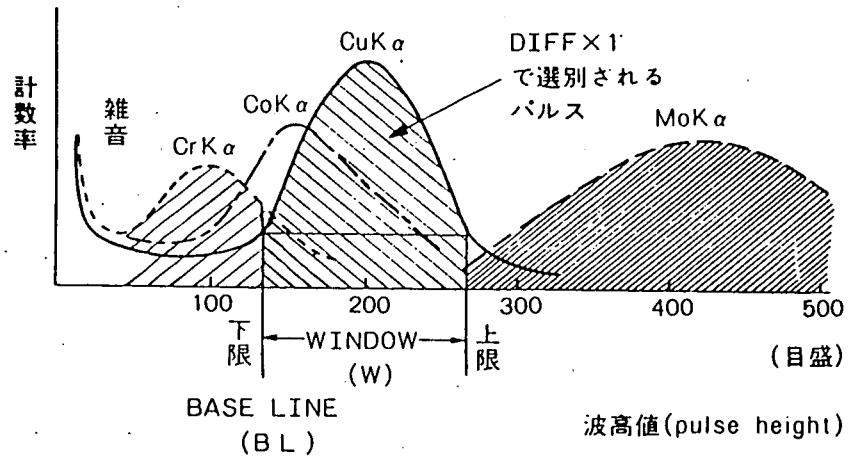
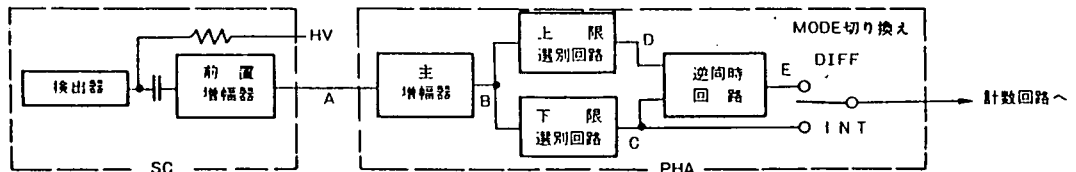
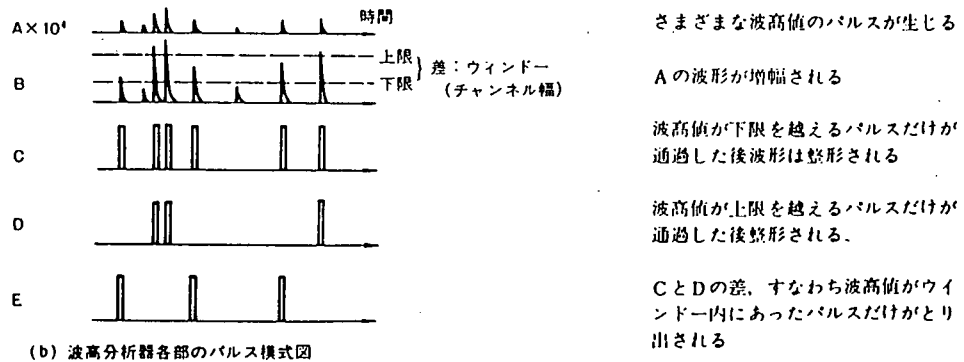


図8 波高値の選択

図9に波高分析器の原理を示す。



(a) 波高分析器を中心とするブロックダイアグラム



(b) 波高分析器各部のパルス模式図

図9 波高分析器の原理

SCに生じた数mVのパルスは比例増幅器で増幅され、選別器 (discriminators) に入り、波高選別される。

図10に波高分析器の働きを示す。

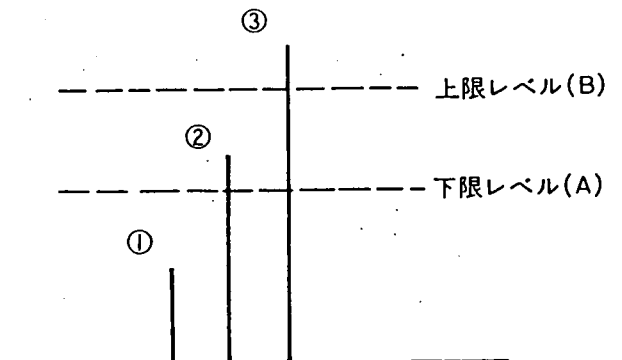


図10 波高分析器の働き

2つのディスクリミネータ (discriminator, 選別器) のうち, 低いレベルのものを下限ディスクリミネータ (lower level discriminator), 高いレベルのものを上限ディスクリミネータ (upper level discriminator) とよぶ。

さて, 波高の低いパルス①は両者のディスクリミネータを動作させないので出力を生じない。波高の高いパルス③は両者を働かせるが後続の逆同時回路でカットされやはり出力は生じない。パルス②はレベルAでは動作し, レベルBでは動作しない。このときのみ逆同時回路は動作して信号を送り出す。すなわち, PHAは上限, 下限のレベルの間に入る波高値をもつパルスのみを後続回路に伝達し, 波高選別を行う。

上限, 下限のレベルの間の幅 (window, channel widthともいう) を充分小さく一定にして, 下限のレベル (base line) を連続的にかえ計数すると, 図11のような入射X線の波高分布を得ることができる。

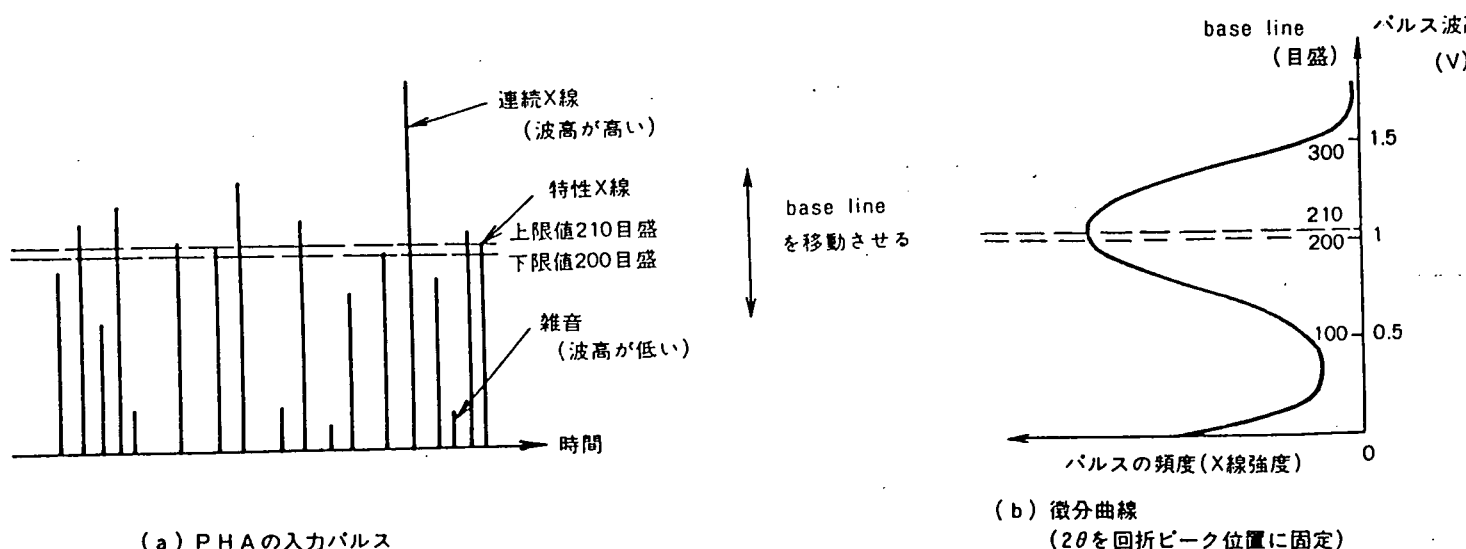


図11 微分曲線の模式図

これを微分曲線 (differential curve) という。上限レベルをなくし下限レベル (base line) のみを連続的に変化させると, 下限レベルより高い波高のものは常に計数され, ある波高値の範囲にわたって一定の計数を得, 入射X線の波高分布にさしかかると計数は減少しはじめ, 分布をすぎると計数は零となる。これを積分曲線 (integral curve) という。図12のように微分曲線と積分曲線は互いに微分, 積分の関係にある。

図13に一定強度の単色X線を計数管に入射し, base line, windowを一定にしたときの, HV-計数率曲線を示す。この図は図12をうら返したような曲線となっている。INTにしたときの (b) の曲線は図3 (比例計数管のプラトー曲線の例) に他ならない。

図14, 図15にPHAの動作をよりわかりやすく, 理解しやすい具体例をいくつか示した。

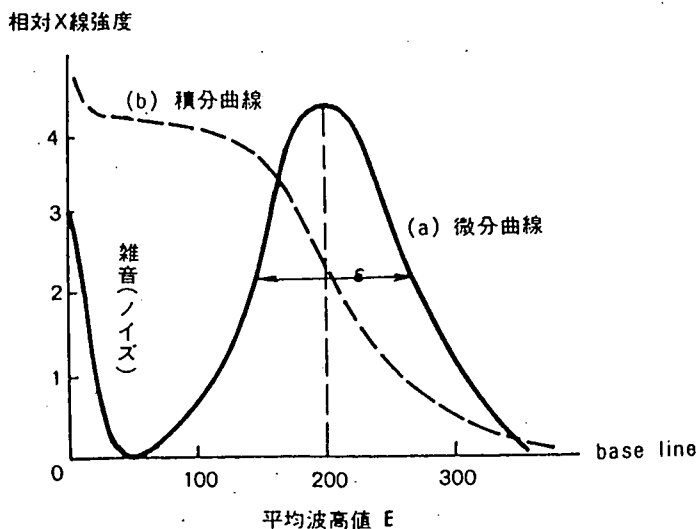


図12 微分曲線と積分曲線
(積分曲線の強度は微分曲線の強度の1/10に縮小してある)

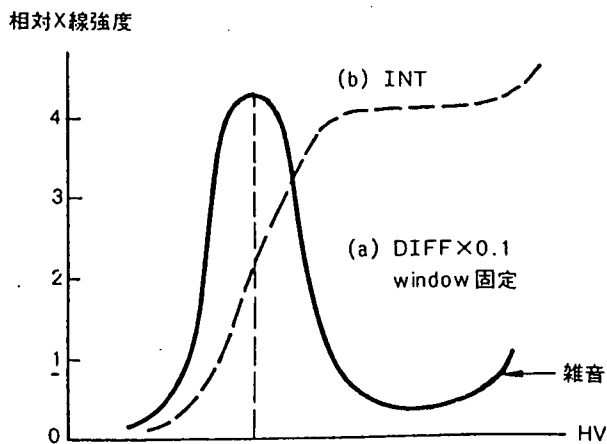


図13 HV—計数率曲線

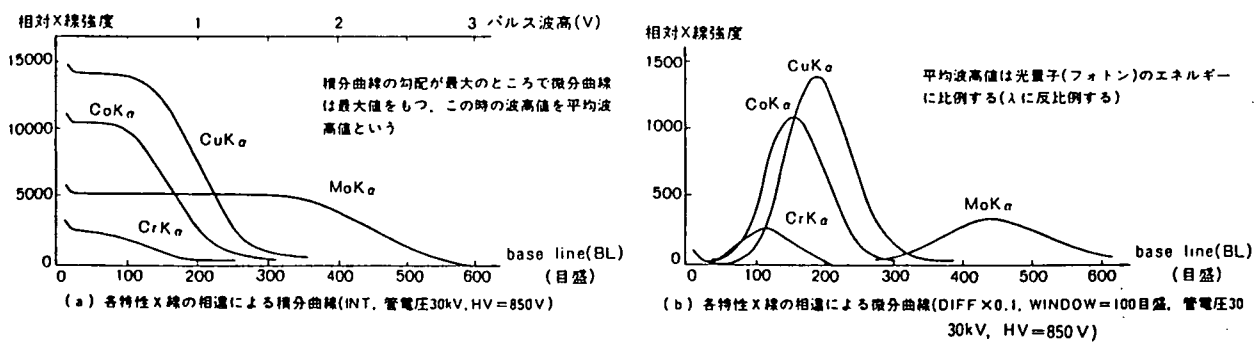
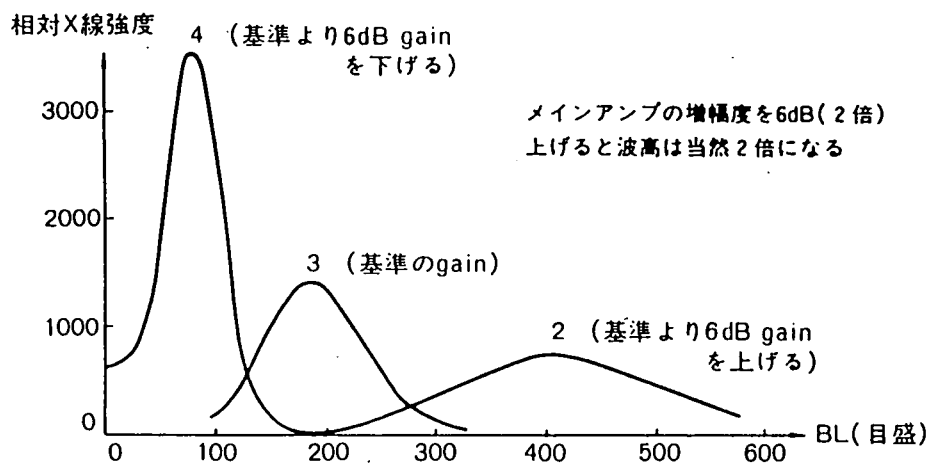
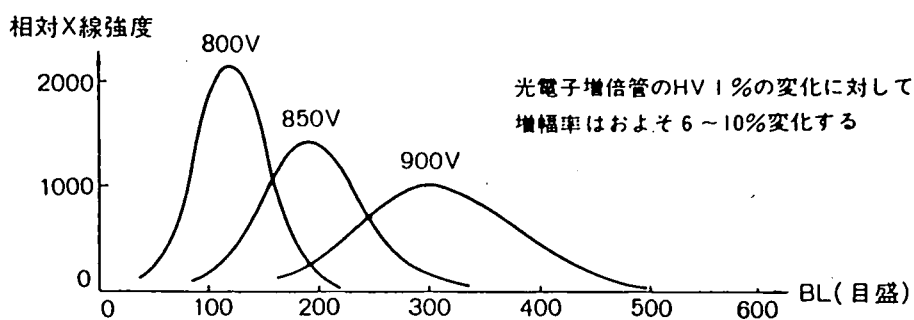


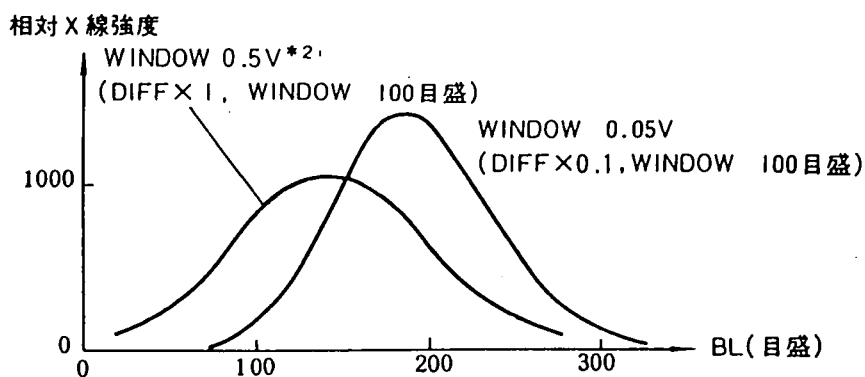
図14 特性X線の相違による積分曲線と微分曲線



(a) メインアンプのCOARSE GAINによる波高値の移動 (DIFF×0.1, WINDOW=100目盛, Cuターゲット, 30kV, HV=850V)



(b) HVによる波高値の移動 (DIFF×0.1, WINDOW=100目盛, Cuターゲット, 30kV)



(c) WINDOWの大小によるみかけの波高の移動*1 (Cuターゲット, 30kV, HV=850V)

図15 条件による微分曲線の変化

*1. WINDOW幅を大きくすると微分曲線は真の波高分布を示さなくなる。図のようにみかけ上、波高値の移動と、エネルギー分解能の低下として表れる。

*2. このときのX線強度は実測値の1/10に目盛っている。

また、誤解されやすい点について次に示した。

①波高とX線強度とを混同してはならない。波高とはパルスの電圧の高さであり、X線強度とは単位時間に生じるパルス数（パルスの頻度）である。

②平均波高はX線光量子（フォトン）のもつエネルギーに比例する。従ってλには逆比例する。また、波高は光電子増倍管にかかるHVおよびメインアンプのgain（利得）によって変わる。

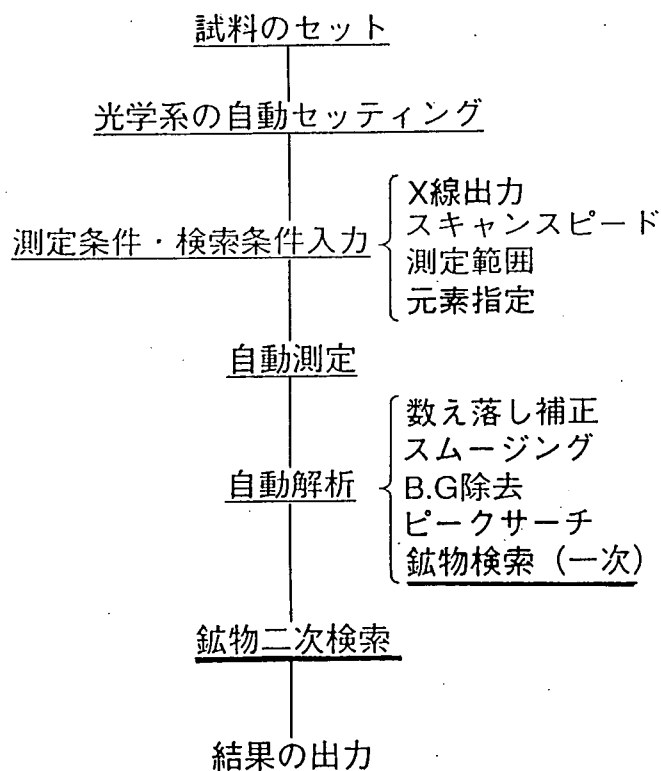
③増幅によってX線強度が増すと考えてはいけない。増幅は計数回路によるパルスの計数を容易にするため、パルス波高を大きくしているにすぎない。X線強度は単位時間あたりのパルス数であり、カウンタに入るX線量が一定ならば、X線光量子の吸収の度合い（量子計数効率）によって決まってしまう。

④計数回路内の1個のパルスは1μsec程度の時間的幅をもつ。X線の計数率が小さければ、各パルスは充分分離する。しかし、X線の計数率が20000cps（追加回路を組みこめば、約200,000cps）程度以上では、各パルスの重なりが、無視できなくなり、X線の数え落としが目立つようになる。

以上でX線回折装置についての原理の報告とする。

3. 実試料の測定解析データ

(1) X線回折装置による鉱物同定フロー（理学RINT 1000型、封入形2KWタイプ）



(2) 定性分析解析データ（7項目14ページ）

- | | | |
|------------------------|------|----|
| ①生測定データ | 図3-1 | 参照 |
| ②平滑化データ | 図3-2 | 参照 |
| ③バック除去データ | 図3-3 | 参照 |
| ④Kα ₂ 除去データ | 図3-4 | 参照 |

⑤ピークサーチデータ	図3-5-1～図3-5-5	参照
⑥一次検索データ	図3-6-1～図3-6-3	参照
⑦二次検索データ	図3-7-1～図3-7-2	参照

4. まとめ

X線回折装置の自動化には目を見張るものがある。省力化、時間短縮（従来一試料を測定後、鉱物の同定をするまでに数時間要したが現在は20～30分間で済む）は勿論、測定操作について、専門的知識、熟練というものは一切無用であり、分析作業の効率化、向上に大いに貢献できるものと期待する。

しかしながら、X線回折装置だけに頼るのではなく

①組み合わせによる最終鉱物組成判断が必要

EPMA, 薄片, 実体顕微鏡, 元素分析 等

②水ひ法, 重液分離法, 磁力選鉱法等の前処理操作を行いX線回折装置による鉱物の同定を行う。

5. 参考文献

1. 機器分析実験法 (日本分析化学会 近畿支部編: 化学同人)
2. X線回折の手引き (改定第四版: 理学電機株式会社)
3. 化学便覧 基礎編 (丸善)

定性分析(データ)

測定条件

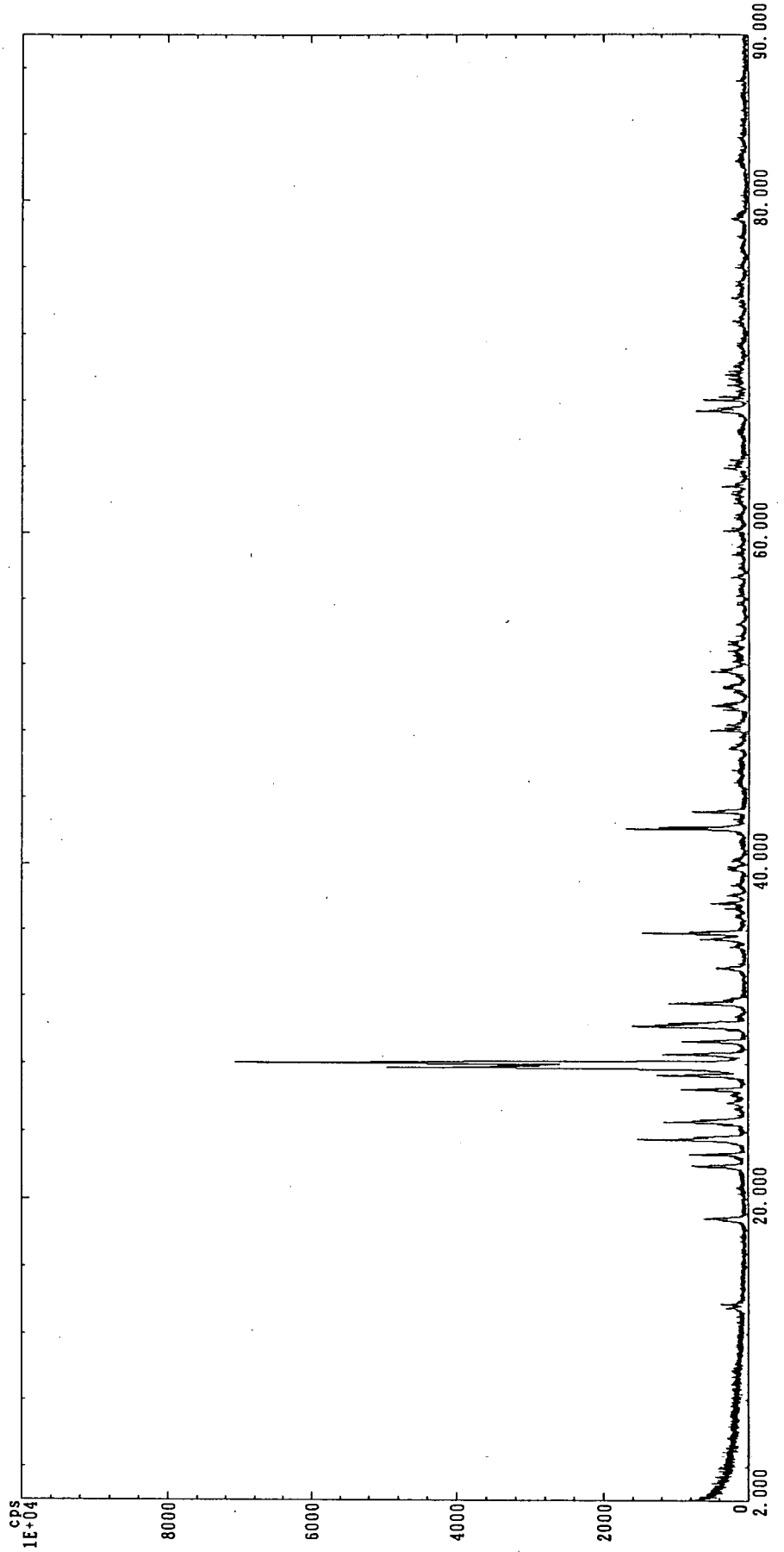
サンプル名 : Anorthite
 ファイル名 : st
 コント : Cu
 管球 : 40 KV
 管電圧 : 40 mA
 管電流 : 2 θ/θ
 走査軸

ゴニオメータ : 広角ゴニオメータ
 サンプリング幅 : 0.010°
 走査速度 : 4.000°/min
 発散スリット : 1°
 散乱スリット : 1°
 受光スリット : 0.15 mm
 θ オフセット角度 : 0.000°

アタッチメント : 標準試料ホルダ-
 回転速度 : 使用
 モノクロメータ : 0.80 mm
 受光スリット : 共通
 測定者 : 92-07-17
 測定日

処理条件

波長 : 1.54056 A
 平滑化点数 :
 ハックラント除去 :
 K α 2除去 :
 系統誤差補正 :



定性分析 (平滑化)

測定条件

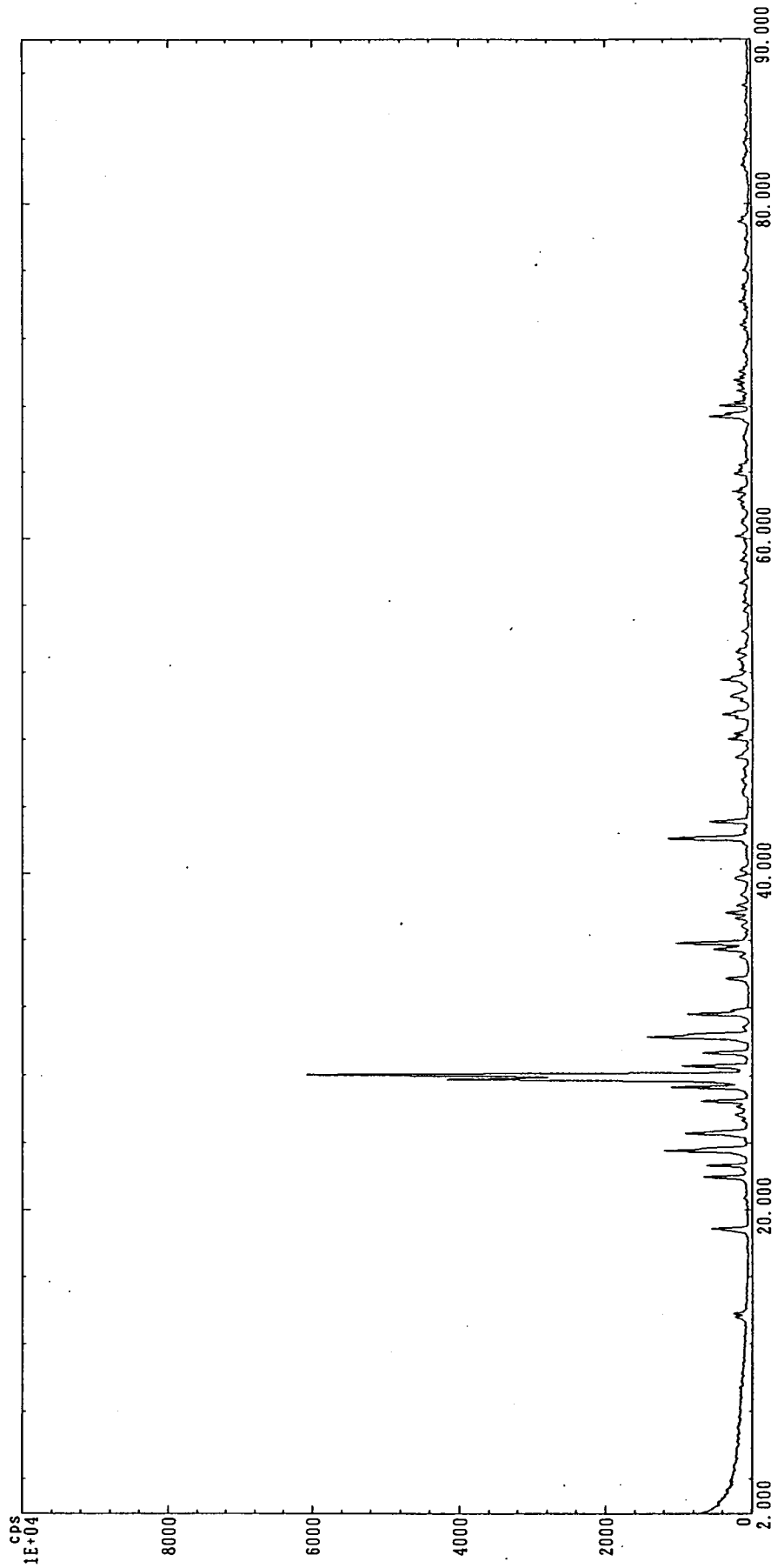
サンプル名 : Anorthite
 ファイル名 : st
 コント : Cu
 管球 : 40 KV
 管電圧 : 40 mA
 管電流 : 2 θ/θ
 走査軸 :

コニメータ : 広角ゴニメータ
 サンプリング幅 : 0.010°
 走査速度 : 4.000°/min
 発散スリット : 1°
 散乱スリット : 1°
 受光スリット : 0.15 mm
 θ スリット角度 : 0.000°

アタッチメント : 標準試料ホルダー
 回転速度 : 使用
 モノクロメータ : 0.80 mm
 受光スリット : 共通
 測定者 : 92-07-17
 測定日 :

処理条件

波長 : 1.54056 A
 平滑化点数 : 21
 ハックガード除去 :
 K α 2除去 :
 系統誤差補正 :



定性分析 (バック除去)

測定条件

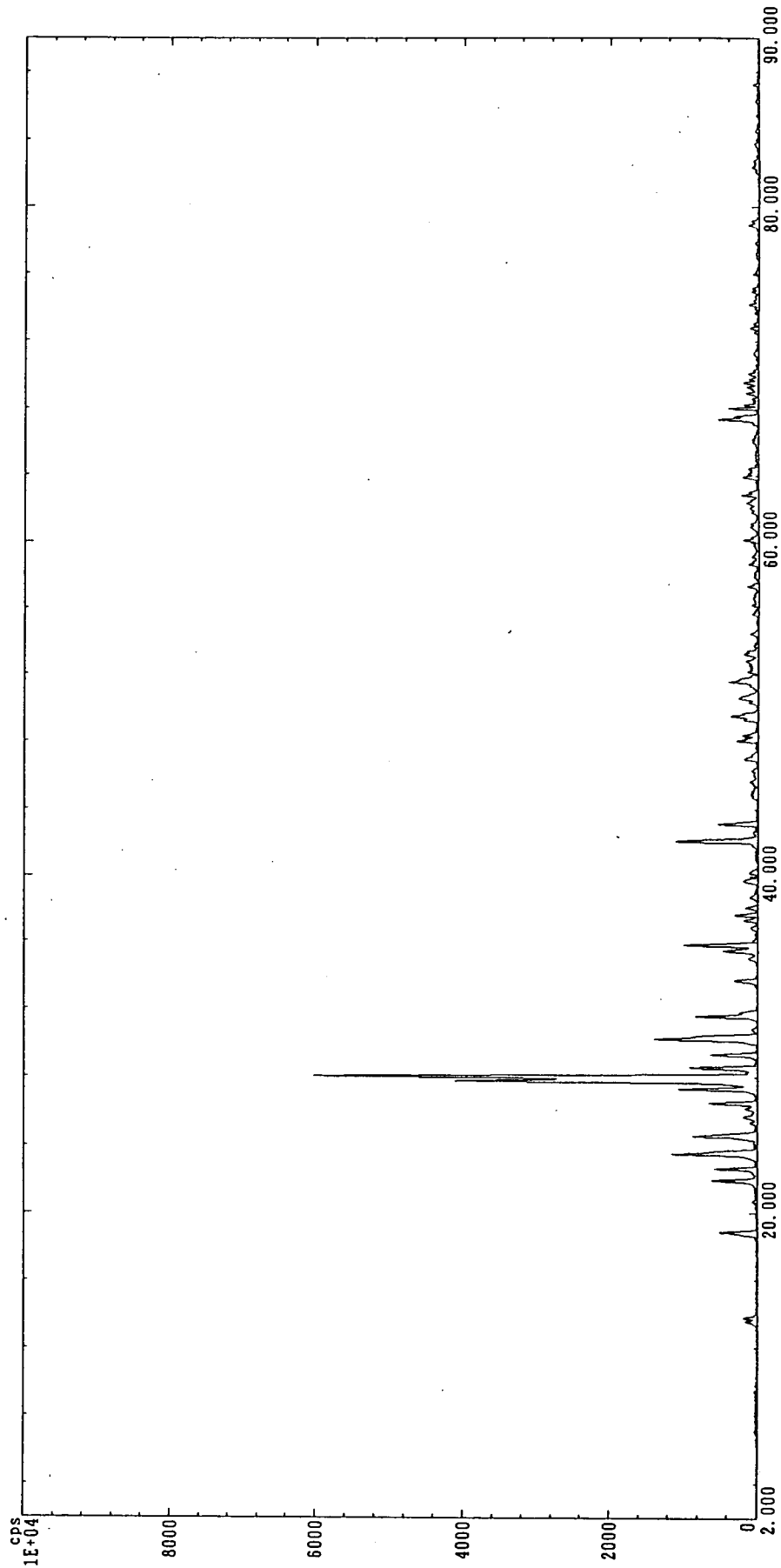
サンプル名 : Anorthite
 ファイル名 : st
 コント : Cu
 管球 : 40 KV
 管電圧 : 40 mA
 管電流 : 2 θ / θ
 走査軸 :

コニメータ : 広角ゴニメータ
 サンプリング幅 : 0.010°
 走査速度 : 4.000° / min
 発散スリット : 1°
 散乱スリット : 1°
 受光スリット : 0.15 mm
 θ スリット角度 : 0.000°

アタッチメント : 標準試料ホルダー
 回転速度 : 使用
 モクロメータ : 0.80 mm
 受光スリット : 共通
 測定者 : 92-07-17
 測定日 :

処理条件

波長 : 1.54056 A
 平滑化点数 : 21
 バックグラウンド除去 : 実行
 K α 2除去 :
 系統誤差補正 :



定性分析 (K α 2 除去)

測定条件

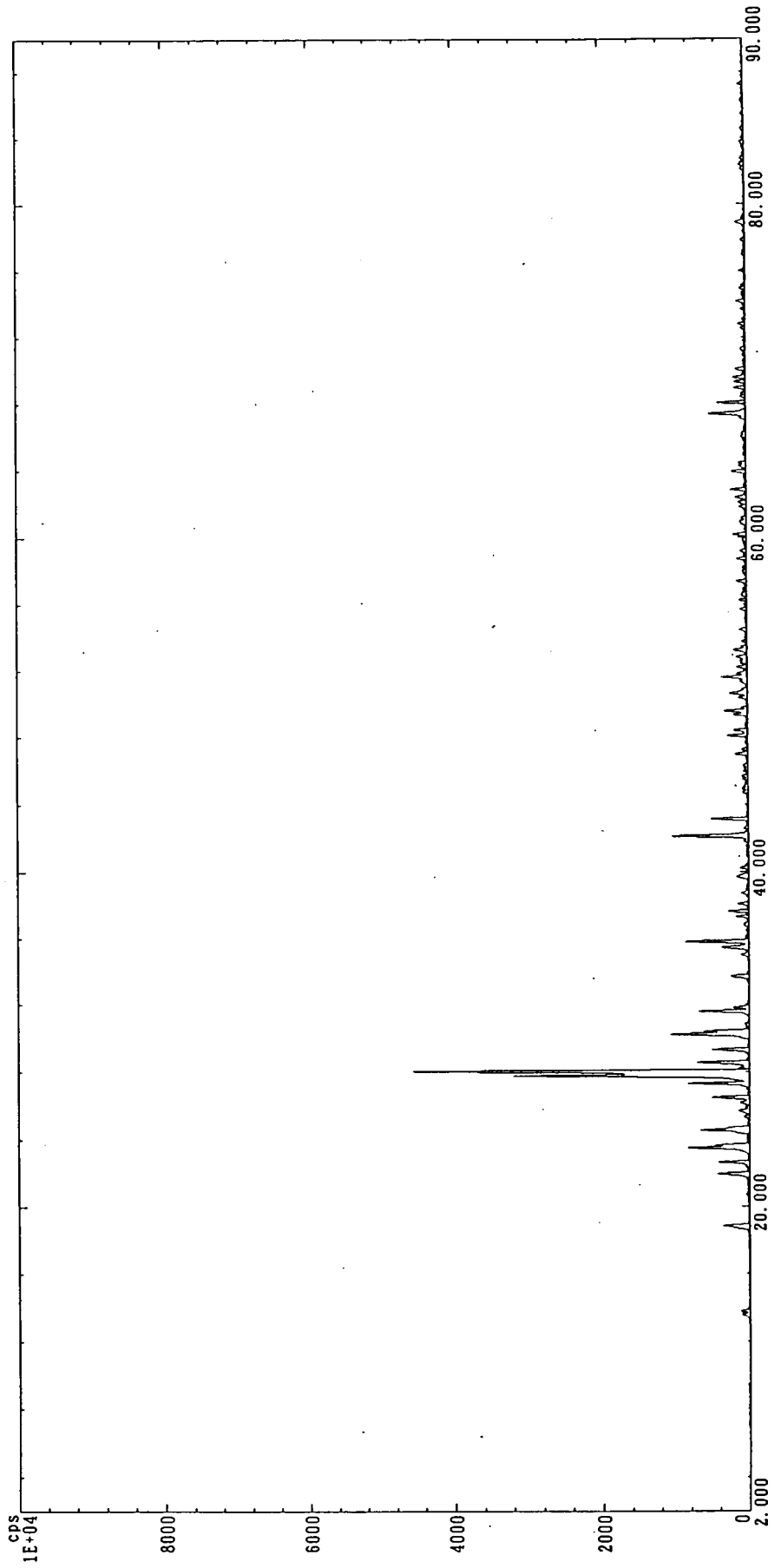
サンプル名 : Anorthite
 ファイル名 : st
 コント : Cu
 管球 : 40 KV
 管電圧 : 40 mA
 管電流 : 2 θ/θ
 走査軸 :

コニオメータ : 広角コニオメータ
 サンプリング幅 : 0.010°
 走査速度 : 4.000°/min
 発散スリット : 1°
 散乱スリット : 1°
 受光スリット : 0.15 mm
 θ オフセット角度 : 0.000°

7タッチメント : 標準試料ホタル -
 回転速度 : 使用
 モノクロメータ : 0.80 mm
 受光スリット : 共通
 測定者 : 92-07-17
 測定日 :

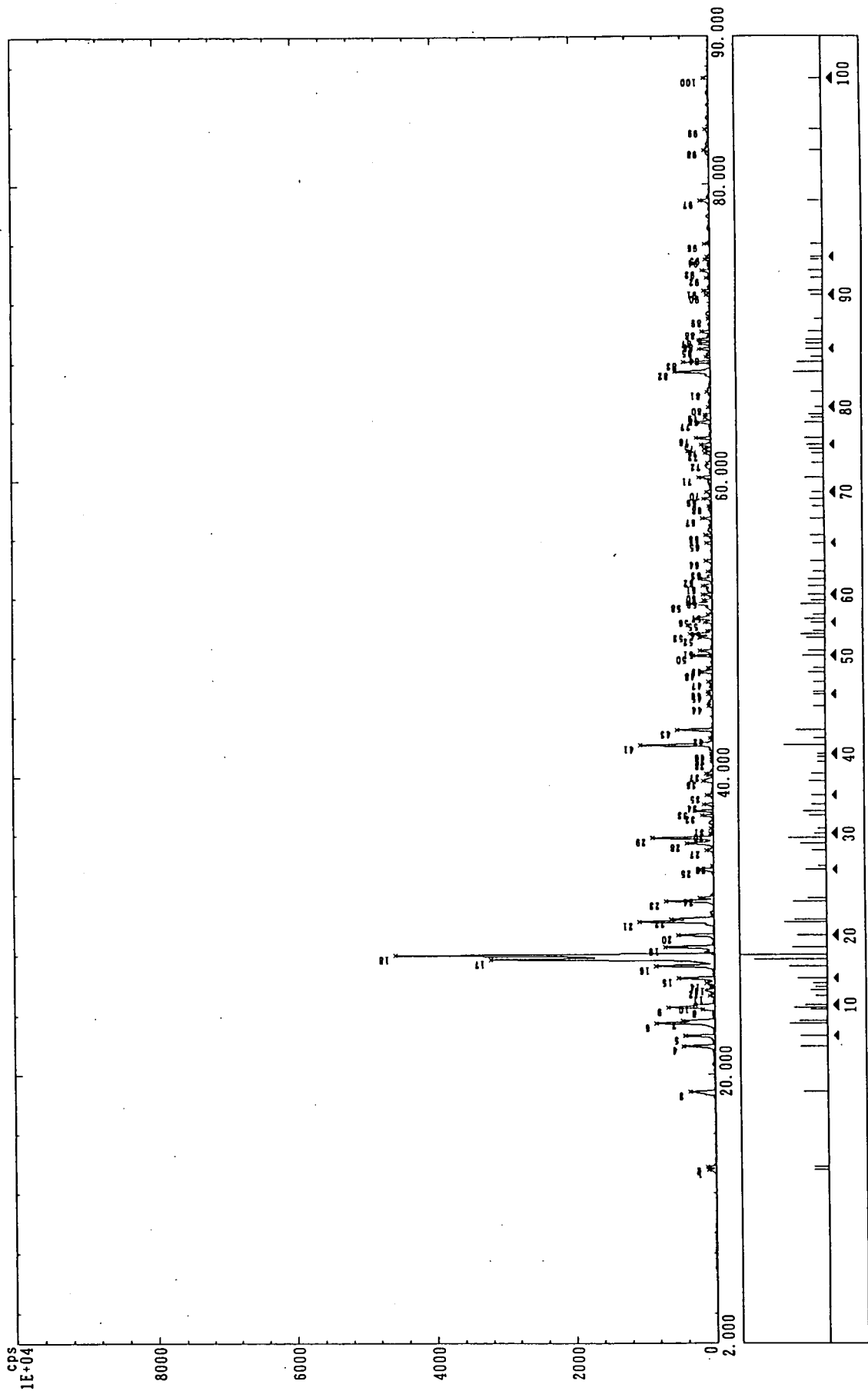
処理条件

波長 : 1.54056 A
 平滑化点数 : 21
 ハックラット除去 : 実行
 K α 2除去 : 実行
 系統誤差補正 :



定性分析 (ピークサーチ)

サンプル名 : Anorthite
 ファイル名 :
 コメント : st
 平滑化点数 : 21
 K α 2除去 : 実行
 ハウジングラント除去 : 実行
 系統誤差補正 :



定性分析 (ピークサーチ)

サンプル名 : Anorthite
 ファイル名 :

コメント : st

ピークNo.	2θ	面間隔	強度値	半価幅	I/Io	ピークNo.	2θ	面間隔	強度値	半価幅	I/Io
1	13.540	6.53423	110	0.165	3	31	36.470	2.46163	42	0.135	1
2	13.750	6.43490	127	0.180	3	32	37.310	2.40811	161	0.165	4
3	18.850	4.70382	360	0.135	8	33	37.630	2.38837	276	0.180	7
4	21.930	4.04965	447	0.195	10	34	38.080	2.36117	135	0.210	3
5	22.630	3.92594	425	0.195	10	35	38.710	2.32418	93	0.150	3
6	23.470	3.78730	839	0.180	19	36	39.660	2.27067	151	0.180	4
7	23.630	3.76201	460	0.120	11	37	40.190	2.24194	104	0.195	3
8	24.360	3.65090	174	0.120	4	38	40.960	2.20156	29	0.195	1
9	24.520	3.62744	661	0.135	15	39	41.310	2.18371	26	0.150	1
10	24.670	3.60573	277	0.105	7	40	41.500	2.17415	35	0.180	1
11	25.300	3.51735	72	0.180	2	41	42.080	2.14551	1041	0.195	23
12	25.670	3.46748	138	0.180	4	42	42.540	2.12337	50	0.195	2
13	25.860	3.44244	58	0.135	2	43	43.110	2.09661	511	0.180	12
14	26.150	3.40491	120	0.195	3	44	44.670	2.02694	65	0.165	2
15	26.460	3.36572	509	0.180	12	45	45.480	1.99271	70	0.180	2
16	27.280	3.26639	835	0.165	19	46	45.660	1.98527	78	0.180	2
17	27.720	3.21553	3204	0.165	70	47	46.300	1.95931	65	0.195	2
18	28.000	3.18401	4579	0.165	100	48	46.950	1.93368	168	0.150	4
19	28.520	3.12712	702	0.195	16	49	47.250	1.92210	68	0.180	2
20	29.300	3.04563	511	0.195	12	50	48.050	1.89195	282	0.180	7
21	30.190	2.95784	1064	0.165	24	51	48.390	1.87945	180	0.180	4
22	30.370	2.94072	614	0.180	14	52	49.300	1.84687	186	0.180	5
23	31.570	2.83162	686	0.180	15	53	49.530	1.83883	327	0.180	8
24	31.790	2.81252	199	0.165	5	54	49.730	1.83190	79	0.135	2
25	33.710	2.65659	232	0.210	6	55	50.340	1.81112	115	0.180	3
26	33.930	2.63987	26	0.135	1	56	50.580	1.80309	247	0.180	6
27	35.000	2.56158	102	0.210	3	57	50.880	1.79316	67	0.135	2
28	35.460	2.52939	377	0.195	9	58	51.580	1.77046	355	0.195	8
29	35.810	2.50547	870	0.180	19	59	51.810	1.76314	130	0.180	3
30	36.110	2.48534	47	0.135	2	60	52.200	1.75088	139	0.135	4

定性分析 (X線サチ)

物質名 : Anorthite

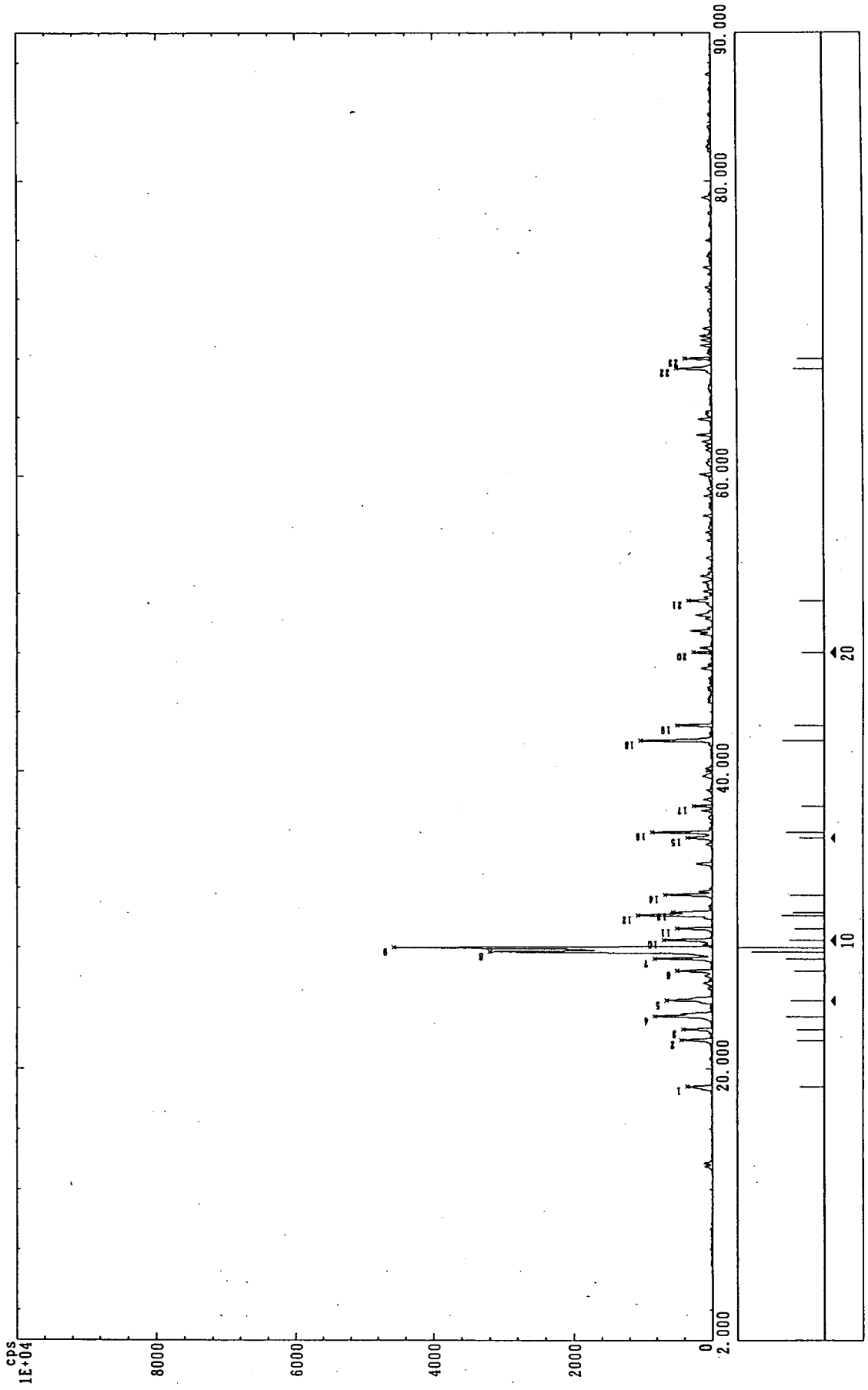
77名 :

単位 : st

ピークNo.	2θ	面間隔	強度値	半価幅	I/Io	ピークNo.	2θ	面間隔	強度値	半価幅	I/Io
61	52.810	1.73208	141	0.135	4	91	72.800	1.29804	98	0.180	3
62	53.250	1.71880	170	0.210	4	92	73.680	1.28470	59	0.150	2
63	53.750	1.70399	68	0.180	2	93	74.170	1.27742	118	0.150	3
64	54.460	1.68344	98	0.135	3	94	74.920	1.26648	77	0.135	2
65	55.660	1.64995	85	0.195	2	95	75.110	1.26374	47	0.135	2
66	56.200	1.63538	98	0.195	3	96	76.000	1.25114	87	0.150	2
67	57.340	1.60554	137	0.180	3	97	78.910	1.21214	134	0.150	3
68	58.200	1.58385	53	0.150	2	98	82.350	1.17000	76	0.135	2
69	58.680	1.57203	122	0.180	3	99	83.740	1.15408	59	0.165	2
70	59.160	1.56042	79	0.165	2	100	87.240	1.11656	78	0.180	2
71	60.160	1.53685	186	0.165	5						
72	61.160	1.51409	60	0.210	2						
73	61.800	1.49994	91	0.180	2						
74	62.110	1.49320	100	0.180	3						
75	62.400	1.48695	143	0.180	4						
76	62.850	1.47738	218	0.180	5						
77	63.920	1.45521	202	0.195	5						
78	64.260	1.44833	88	0.150	2						
79	64.440	1.44472	93	0.165	3						
80	64.930	1.43499	38	0.195	1						
81	66.000	1.41430	61	0.135	2						
82	67.370	1.38883	510	0.195	12						
83	68.030	1.37695	390	0.180	9						
84	68.390	1.37058	67	0.150	2						
85	68.920	1.36133	163	0.225	4						
86	69.280	1.35513	150	0.195	4						
87	69.560	1.35036	170	0.195	4						
88	70.070	1.34177	123	0.180	3						
89	70.920	1.32776	35	0.180	1						
90	72.530	1.30220	58	0.195	2						

定性分析 (ピークサーチ)

サンプル名 : Anorthite
 ファイル名 :
 コント : st
 平滑化点数 : 21
 K α 2除去 : 実行
 バックグラウンド除去 : 実行
 系統誤差補正 :



定性分析 (ヒークサーチ)

コメント : st

サンプル名 :

サンプル名 : Anorthite

ヒークNo.	2θ	面間隔	強度値	半価幅	I/Io	ヒークNo.	2θ	面間隔	強度値	半価幅	I/Io
1	18.850	4.70382	360	0.180	8						
2	21.930	4.04965	447	0.180	10						
3	22.630	3.92594	425	0.180	10						
4	23.470	3.78730	839	0.165	19						
5	24.520	3.62744	661	0.165	15						
6	26.460	3.36572	509	0.195	12						
7	27.280	3.26639	835	0.180	19						
8	27.720	3.21553	3204	0.165	70						
9	28.000	3.18401	4579	0.165	100						
10	28.520	3.12712	702	0.195	16						
11	29.300	3.04563	511	0.180	12						
12	30.200	2.95688	1072	0.180	24						
13	30.390	2.93883	571	0.165	13						
14	31.570	2.83162	686	0.180	15						
15	35.450	2.53008	366	0.210	8						
16	35.810	2.50547	870	0.180	19						
17	37.630	2.38837	276	0.180	7						
18	42.090	2.14503	1040	0.180	23						
19	43.110	2.09661	511	0.180	12						
20	48.050	1.89195	282	0.180	7						
21	51.580	1.77046	355	0.195	8						
22	67.370	1.38883	510	0.195	12						
23	68.030	1.37695	390	0.180	9						

定性分析 (一次検索)

測定条件

サンプル名 : Anorthite
 ファイル名 :
 コメント : st
 管球 : Cu
 管電圧 : 40 KV
 管電流 : 40 mA
 ゴニオメータ : 広角ゴニオメータ
 サンプル径幅 : 0.010°
 走査速度 : 4.000° /min

発散スリット : 1°
 散乱スリット : 1°
 受光スリット : 0.15 mm
 アタッチメント : 標準試料ホルダー
 回転速度 :
 モノクロメータ : 使用
 受光スリット : 0.80 mm
 測定者 : 共通
 測定日 : 92-07-17

処理条件

波長 : 1.54056 Å
 平滑化点数 : 21
 バックグラウンド除去 : 実行
 K α 2除去 : 実行
 系統誤差補正 :

検索条件

検索ファイル : 鉱物ファイル
 検索方法 : ファイル1だけ検索する。

元素指定方法 : 無指定。

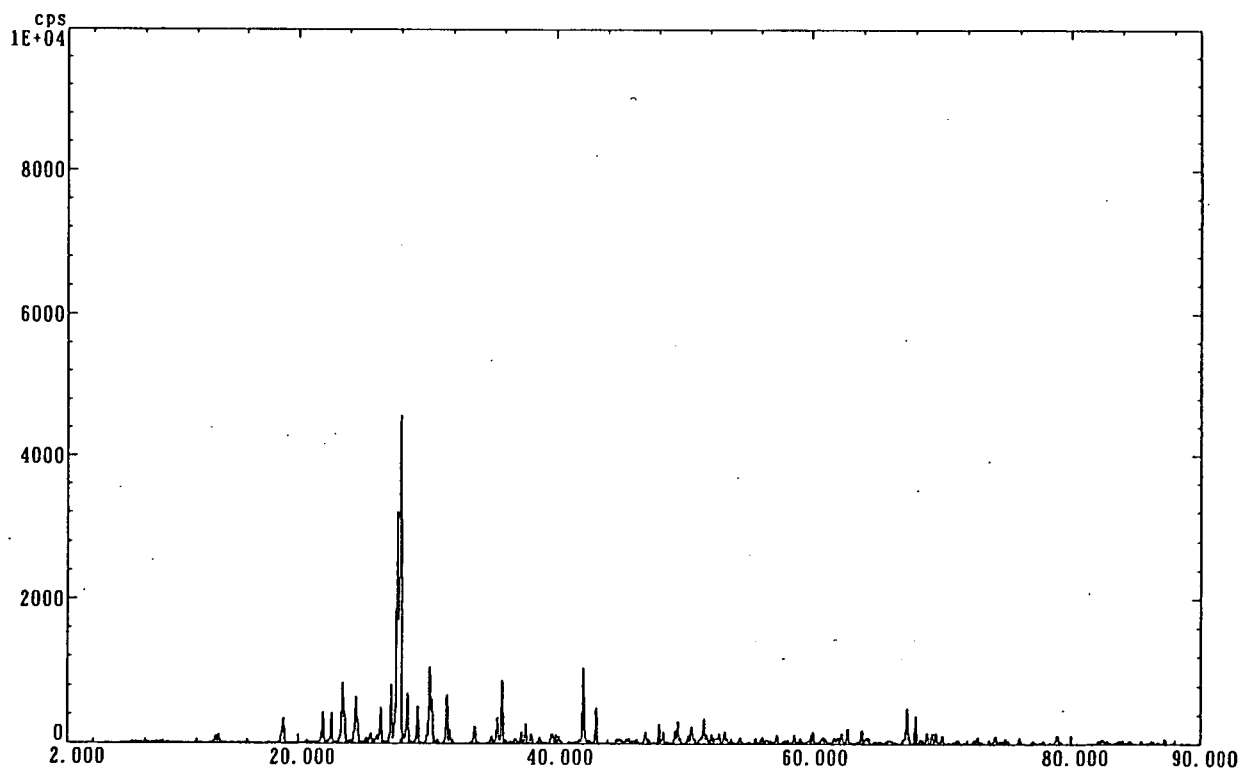
主成分 :
 微成分 :
 不確定成分 :

信頼性係数計算方法 : 角度因子のみ用いる。

信頼性係数再評価 : 行う。

最低一致本数 : 2 最低一致率 : 10 % 出力枚数 : 100

一致判定許容幅 : 3 信頼性係数閾値 : 10 検索結果枚数 : 100



定性分析 (一次検索)

サンプル名 : Anorthite

ワイルド名 :

コメント : st

No.	カード No.	化学式	元素	標準ピーク本数	一致本数	信頼性係数
1	20-0020	Anorthite, ordered	C	18	18	874
2	41-1486	Anorthite, ordered	*	18	18	752
3	20-0528	Anorthite, sodian, ordered	C	18	16	543
4	41-1481	Anorthite, sodian, disordered	I	18	16	507
5	18-1202	Anorthite, sodian, intermediate	I	18	15	311
6	20-0572	Albite, ordered	C	18	14	295
7	10-0393	Albite, ordered	*	18	14	285
8	9-0465	Anorthite, sodian, ordered		18	15	265
9	38-0456	Gerasimovskite	O	5	3	118
10	41-1480	Albite, calcian, ordered	I	18	12	112
11	38-0358	Donpeacorite	I	18	10	110
12	37-0483	Cornetite	I	18	9	103
13	33-0782	Queitite	I	18	10	103
14	19-1184	Albite, ordered	I	18	12	99
15	34-0172	Sengierite	C	18	10	97
16	21-1198	Tantite, syn	I	18	13	89
17	20-0554	Albite, ordered	C	18	9	86
18	26-1143	Tranquillityite	I	18	11	79
19	12-0448	Montebrasite		18	9	68
20	41-1420	Amstallite	I	18	9	68
21	37-0457	Lithosite		18	11	66
22	9-0466	Albite, ordered	*	18	10	66
23	41-1494	Realgar	*	18	9	66
24	29-0564	Junoite		18	11	65
25	33-1225	Serandite	C	18	10	62
26	22-0648	Fuloppite	I	18	10	58
27	9-0457	Albite, calcian, ordered	I	18	12	55
28	26-1110	Skinnerite, syn	I	18	9	55
29	30-1343	Imhofite	C	18	9	45
30	19-0393	Bellingerite	I	18	9	45
31	40-0508	Moydite-(Y)	I	18	9	45
32	34-1260	Oboyerite	O	18	9	42
33	39-0396	Zhonghuacerite-(Ce)	O	9	4	40
34	35-0599	Derbylite	I	18	9	38
35	29-0111	Phosphammite, syn	I	18	9	37
36	38-0434	Canfieldite, syn	*	18	11	36
37	20-0560	Veenite		18	9	36
38	25-0559	Terlinguaite, syn	I	18	9	35
39	24-0184	Tilleyite	I	18	9	34
40	35-0563	Metakoettigite	I	15	10	34
41	37-0446	Chalcosiderite	*	18	9	33
42	34-0153	Bariumpharmacosiderite-8Q [NR]	*	18	9	31
43	35-0458	Paranatrolite		18	10	28
44	41-1455	Villyaellenite		18	9	27
45	34-0151	Augelite	I	18	11	26
46	38-0387	Grischunite		18	9	25
47	41-1366	Actinolite	I	18	9	25
48	33-0494	Rajite	I	18	11	24
49	34-1297	Cuprotungstite		17	8	23
50	14-0260	Tridymite-20H, syn	I	18	10	22

[元素] ○ : 主成分元素 , △ : 微成分元素 , × : 不確定成分元素

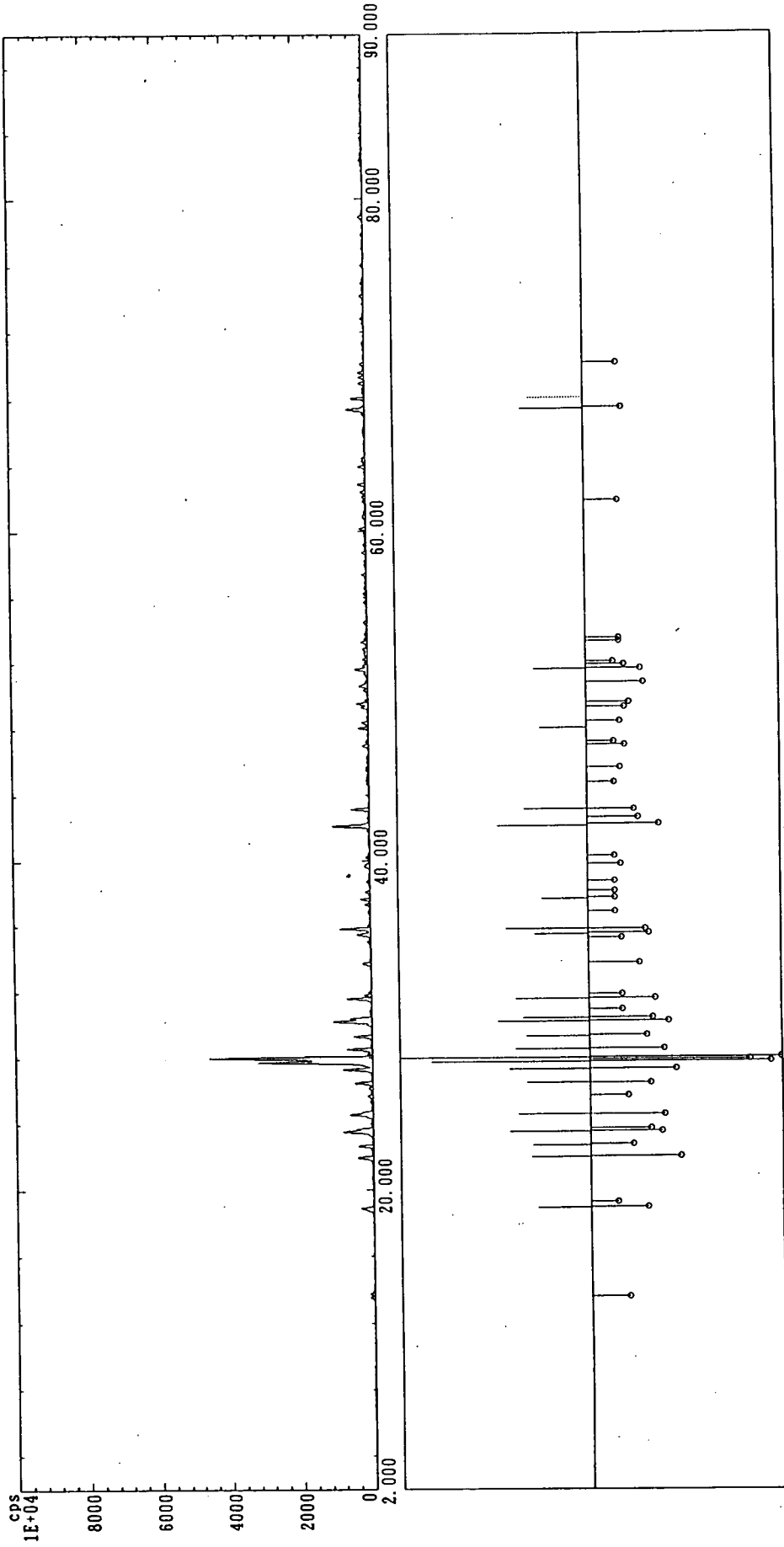
定性分析 (一次検索)

サンプル名 : Anorthite		ファイル名 :		コメント : st		
No.	カードNo.	化学式	元素	標準ピーク本数	一致本数	信頼性係数
51	31-1434	Tanteuxenite-(Y), heated	0	6	3	21
52	35-0561	Devilline	I	18	9	21
53	35-0537	Unnamed mineral [NR]	0	18	10	20
54	12-0187	Paragonite-2M#1		18	11	19
55	41-1356	Brewsterite	*	18	9	19
56	21-0942	Dadsonite	I	18	11	19
57	35-0462	Schneiderhoehnite	I	18	10	19
58	21-1170	Chlorocalcite, syn [NR]	*	18	10	19
59	24-0869	Carnallite	*	18	10	19
60	33-0888	Armangite	C	18	9	19
61	34-0144	Roemerite	C	18	10	17
62	35-0465	Brabantite	I	18	9	16
63	24-1159	Cliffordite	C	18	10	16
64	38-0445	Giessenite	I	18	9	16
65	16-0411	Roeblingite		18	9	16
66	33-0638	Gormanite	I	18	10	15
67	29-0380	Reinhardbraunsite, syn	I	18	10	15
68	19-0926	Microcline, ordered	*	18	10	15
69	36-0415	Izoklakeite	I	18	12	14
70	35-0541	Cascandite	I	18	10	14
71	39-0365	Ramsbeckite	I	18	9	13
72	41-0593	Spheniscidite		18	10	13
73	38-0422	Caryopilite-1M	I	18	9	13
74	23-0495	Magnesio-arfvedsonite		18	10	13
75	39-0353	Gaidonnayite, potassian	I	18	9	12
76	21-1018	Robinsonite, bismuthian	0	18	9	12
77	22-1138	Amblygonite	I	18	10	12
78	39-0408	Steacyite	I	18	8	12
79	13-0294	Cordierite, syn	I	18	10	12
80	29-1424	Paravauxite	I	18	10	12
81	8-0116	Ginorite		18	10	12
82	21-0463	Robinsonite, syn	I	18	9	11
83	23-0959	Djurleite, syn	I	18	10	11
84	39-0339	Kirkiite		18	10	11
85	25-0536	Seamanite		18	9	11
86	22-0660	Molybdophyllite		18	9	10
87	26-1384	Umbozerite, heated	0	11	6	10
88	39-1350	Dewindtite	*	18	11	10
89	38-0375	Kipushite		18	9	10
90	18-0692	Demesmaekerite	I	18	10	9
91	38-0437	Dadsonite	I	18	11	8
92	35-0558	Dwornikite	I	18	11	8
93	33-0492	Villamaninite, syn	0	6	3	8
94	33-1202	Wardite	*	18	11	8
95	8-0174	Latiumite		18	9	8
96	28-2013	Kladnoite, syn		18	9	7
97	21-0974	Dwornikite, syn	*	18	10	7
98	11-0293	Brushite		18	8	4
99	12-0411	Meyerhofferite	I	18	12	4
100	13-0259	Montmorillonite-14A	0	7	4	1

[元素] ○ : 主成分元素 , △ : 微成分元素 , × : 不確定成分元素

定性分析 (二次検索)

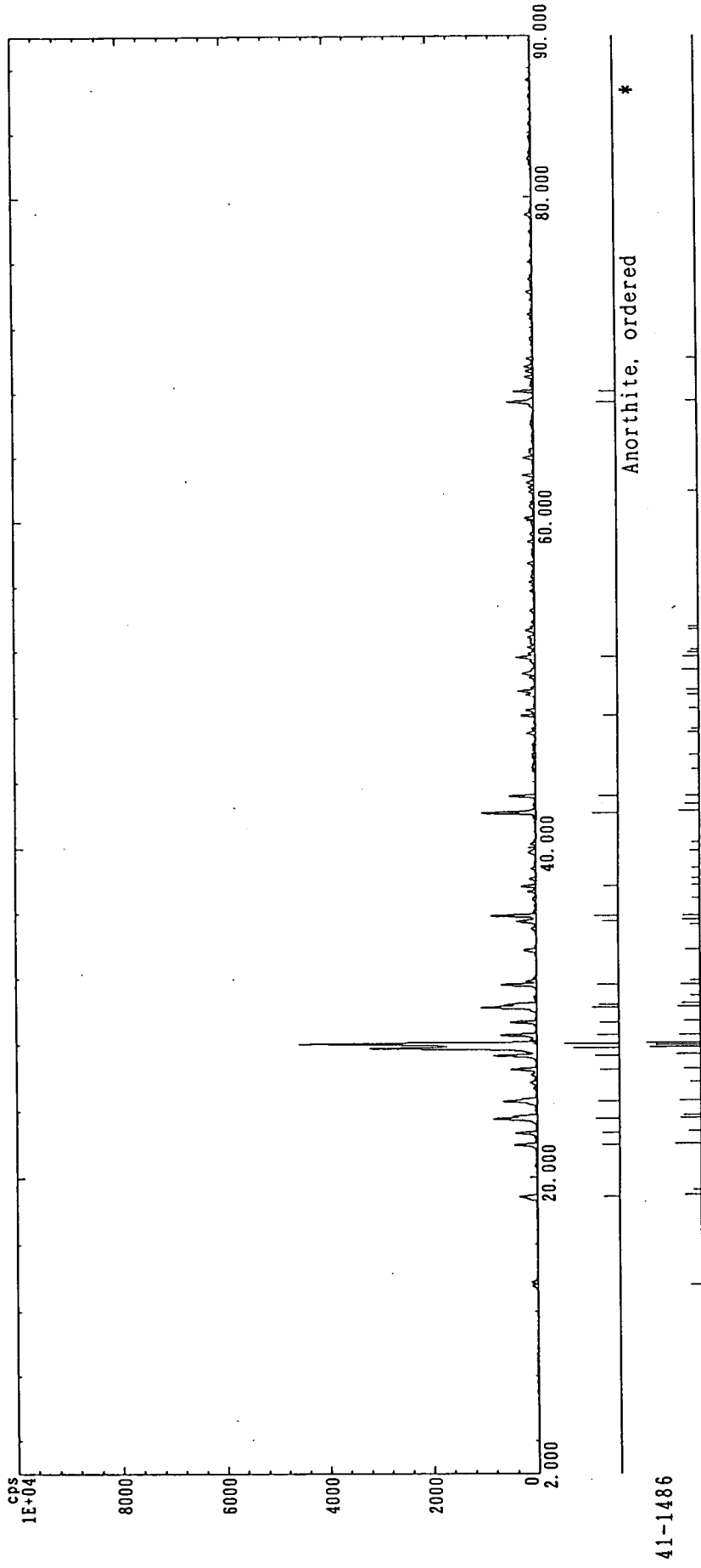
サンプル名 : Anorthite
 ファイル名 :
 コメント : st
 平滑化点数 : 21
 バックグラウンド除去: 実行
 K α 2除去 : 実行
 系統誤差補正 :



○ ——— 41-1486 Anorthite, ordered *

定性分析 (二次検索)

サンプル名 : Anorthite
 ファイル名 :
 コメント : st
 平滑化点数 : 21
 ハットカット除去: 実行
 K α 2除去 : 実行
 系統誤差補正 :



A - 5 中国・遼東半島地区のランドサットTMモザイク画像
の作成

(山 岸, 小 出)

A-5 中国・遼東半島地区のランドサットTMモザイク画像の作成

担当：山岸明子，小出馨

1. はじめに

本作業は、平成3年度より開始された中国・遼寧省遼東半島地区の鉱業事情調査の一環として海外調査探鉱課から依頼されたものであり、対象地区の地質解析用の画像をランドサット衛星のセマテックマッパー（TM）データから作成した。作成された画像は、現在、海外調査探鉱課および事業団と共同研究を行っている九州大学において対象地区の大規模地質構造の解析に利用されており、また、調査現場においても地形図の代替物として活用されている。

2. 実施内容

2.1 解析の目的

遼東半島地区のウラン鉱床胚胎のポテンシャル評価において重要な要素である褶曲構造、断層、破碎帯、貫入岩といった地質・地質構造を把握するための地質解析用の画像を作成する。

2.2 解析対象地区

中国・遼寧省遼東半島（北緯40° 40' ~ 41° 20'、東経 123° 10' ~ 124° 10'）の約80km×80kmの範囲（図-1）。

2.3 解析対象データ

ランドサット5号 TMデータ（磁気テープ）

パス・ロウ： 119-31（北）および119-32（南）

記録形式：BILフォーマット（6250BP1）バルク補正済

観測日：1986.11.14（119-31）および1987.10.16（119-32）

受信局：日本・鳩山受信局

2.4 画像処理システム

本解析における画像処理作業は、すべて中部事業所・技術開発課所有の画像処理システム（ハードウェア HP9000model840、ソフトウェア（CREST））によって行った。なお、画像処理システムの詳細については、「昭和62年度探査及び探鉱技術開発の現況（1988）PNC N7440-880003」を参照されたい。

2.5 処理内容

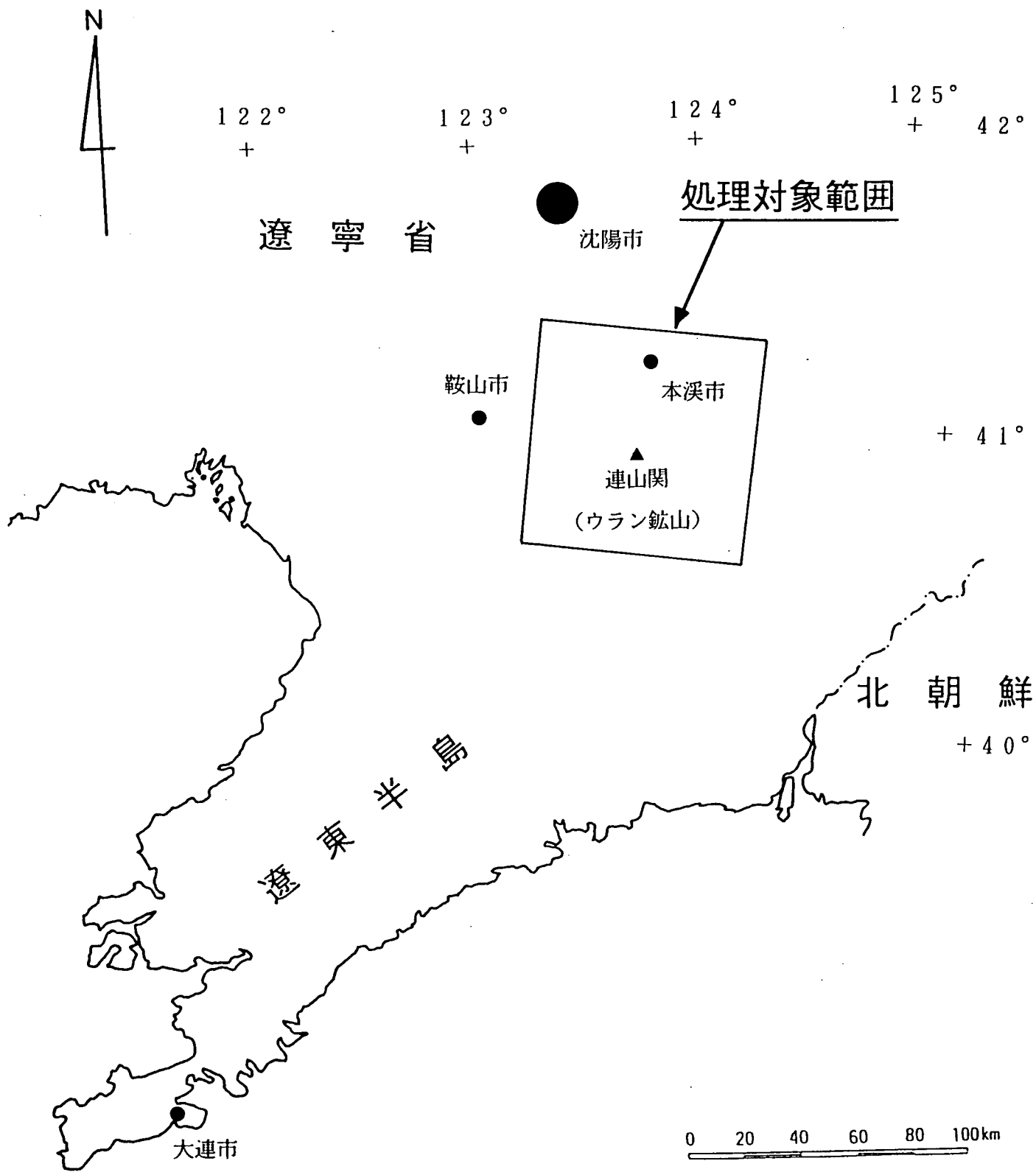
今回の処理作業は、以下の手順で実施した。

①対象地域の評定

100万分の1の航空地形図上で処理対象範囲を評定し、本地区をカバーするランドサットデータを決定した。

②磁気データのフォーマット変換

リモートセンシング技術センターから購入した2シーン分のランドサットTM磁気



図一 1 遼寧省遼東半島地区処理対象範囲位置図

テープ（CCT）データを画像処理システムで処理できるようにするため、フォーマット変換を行った。なお、今回の処理はフォールスカラー画像を作成するので、7つある波長帯（表-1）の内、バンド2、バンド3およびバンド4のデータのみを対象に処理を行った。

表-1 ランドサットTMセンサーの観測波長帯と応用分野¹⁾

バンド	波長帯 (μm)	主な応用分野
1	0.45～0.52	<ul style="list-style-type: none"> 沿岸水のマッピング 土壌と植物の区分 落葉樹と針葉樹の区別
2	0.52～0.60	<ul style="list-style-type: none"> 植物の活力度
3	0.63～0.69	<ul style="list-style-type: none"> 植物の種類を決定するためのクロロフィル吸収
4	0.76～0.90	<ul style="list-style-type: none"> バイオマス調査 水塊分布
5	1.55～1.75	<ul style="list-style-type: none"> 植物水分測定 雪と雲の区分
6	10.4～12.5	<ul style="list-style-type: none"> 植物のヒートストレス測定 温度のマッピング
7	2.08～2.35	<ul style="list-style-type: none"> 熱水作用（粘土鉱物）のマッピング

③データの切り出し

フォーマット変換済のデータから処理の対象となる範囲を2つのデータから切り出した。なお、今回はモザイク処理をする関係上、100ライン程度がオーバーラップするように切り出し範囲を決定した。

④基準点の抽出

モザイク処理を正確に行うために、2つのデータのオーバーラップ部分から幾何学的補正（位置的ズレの補正）のための基準点を10点抽出した。

⑤幾何学的補正

抽出した基準点を用いて、幾何学的補正を行った。補正式は疑似アフィン変換（式-1）を用い、北側の画像を基準に南側の画像を補正した。

$$U = a_1 + a_2X + a_3Y + a_4XY \quad (\text{式-1}) \quad (U, V): \text{基準座標} \quad (X, Y): \text{補正対象画像の座標}$$

$$V = b_1 + b_2X + b_3Y + b_4XY \quad a_1 \sim a_4, b_1 \sim b_4: \text{変換係数}$$

⑥コントラスト強調

オリジナルのデータの殆どは、データの取り得る範囲である256階調中の低い部分に集中している。したがって、この状態で画像を作成した場合、明度とコントラストの低い画像になってしまう。そこで、画像全体の明度とコントラストを向上させるために、画像データ値の分布を平均が128、 σ ユニットが2.5の正規分布に変換した(図-2)。

⑦色調合わせ

今回使用したデータは、北側が1986年11月、南側が1987年10月に受信されたものであり、観測時期が異なることから、両データ間で色調の違いが認められた。そこで、モザイク時の不自然さを緩和するために、オーバーラップ領域における裸地の部分のヒストグラムを取り、南側のデータのヒストグラムを北側のデータのヒストグラムに合わせることによって色調を合わせた。その結果、時期による色調の変化の少ない裸地の部分においては、殆ど色調の差は無くなった。

⑧モザイク処理

⑦の処理により、南北のデータ間の色調差はかなり改善されたが、植生で覆われた山地部分での色調の差は補正しきれていない。そのため、2つのデータを単純に直線的に接合すると接合線が目立ち、その後の地質解析に影響を与える恐れがある。そこで、接合線を目立たなくするために、データのオーバーラップ部分の範囲で両データをジグザグ状に接合し、かつ、接合点近傍において平滑処理を施した。

⑨エッジ強調

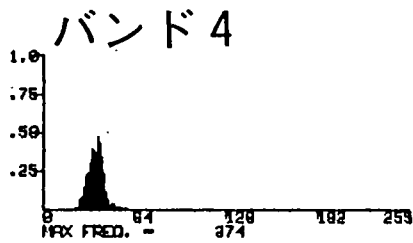
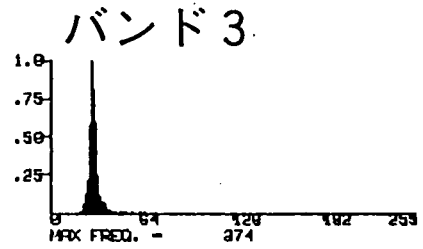
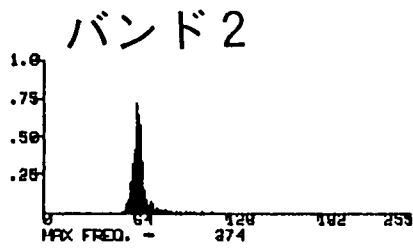
地形の輪郭(陵線, 河川, 道路の境界等)を明瞭にするため、エッジ強調を行った。使用した空間フィルターは 3×3 のマスクで、周辺要素を-1に設定し、中心要素の値はエッジ効果をディスプレイ上で確認しながら決定した。

⑩後処理

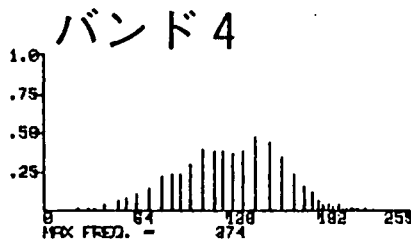
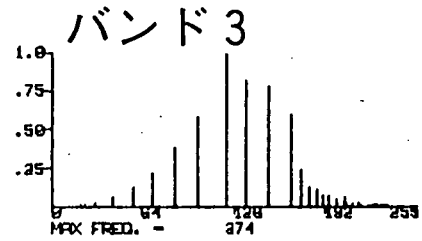
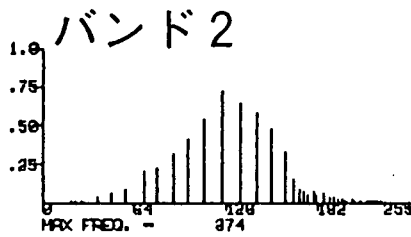
処理した画像データに衛星名、パス・ロウ、観測日、緯度・経度、スケール等の必要な情報を画像データの周辺部に書き込んだ。

3. 成果品

処理した画像データから写真を作成するために業者にポジカラーフィルムの出力を依頼した。このポジカラーフィルムを用いて、成果品として1/70万(密着焼き)、1/25万および1/10万のフォールスカラー画像(図-3)を作成した。



処理前



処理後

図-2 コントラスト強調の処理前と処理後のヒストグラムの比較

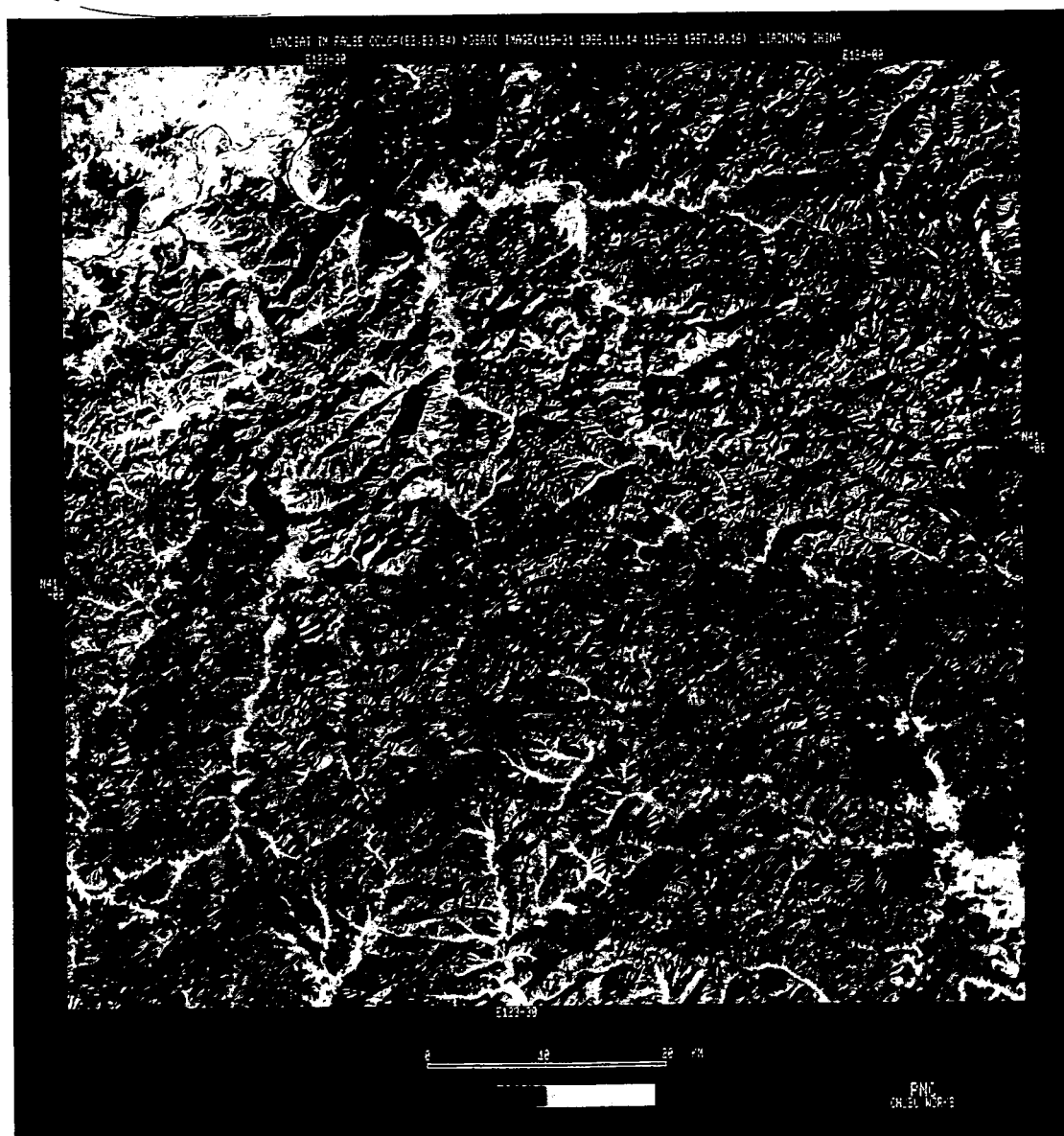


図-3 ランドサットTMモザイク画像

4. 成果品の使用状況

今回作成した1/10万の処理画像は、現在、海外調査探鉱課および事業団と共同研究を行っている九州大学において対象地区の大規模地質構造の解析に利用されているとともに調査現場においても地形図の代替物として使用されており、今後も地質解析用として活用される予定である。

5. 参考文献

- 1) (財) リモートセンシング技術センター「地球観測データ利用ハンドブックーランドサット編・改訂版ー」1986, P. 1-22

A - 6 反射スペクトルデータカタログの作成 (中間報告)
(山 岸, 小 出)

担当：山岸明子，小出馨

1.はじめに

技術開発課は平成元年度より、岩石の反射スペクトルデータ（分光反射率）から解析の対象となるリモートセンシング用光学センサーのデータをシミュレーションし、特定岩種の抽出法等の検討を可能とするシステムの構築を行っている。これまでの経緯としては、平成元年度に中国・北票地区およびオーストラリア・ルーダル地区、タナマイ地区、また、平成2年度にはアーネムランド地区においてウラン探査対象層の岩石の反射スペクトルを測定した。さらに反射スペクトル解析プログラム¹⁾を平成2年度に作成し、反射スペクトルデータの解析環境の整備を進めている。

本報告は、岩石の反射スペクトル特性に関する研究の一環として平成2年度から実施している岩石の反射スペクトルデータカタログの作成について中間報告するものである。

2.実施の目的

鉱物資源探査分野におけるリモートセンシング解析の基礎的データとなる岩石の反射スペクトル特性を把握することを目的とし、特定岩種の抽出法の検討やリモートセンシング用光学センサーの評価等に利用できるデータカタログ集を作成する。

3.反射スペクトルデータカタログの諸元

3.1 反射スペクトルデータカタログの作成方針

- ・岩石の反射スペクトル特性を記述するだけでなく、可能な限り岩石サンプル採取地点の写真や衛星画像を用いて地表状況に関する情報を提供する。
- ・海外法人の利用を考慮し、和文・英文の併記とする。

3.2 基本構成

(1)データソース

- ①ルーダル、タナマイ、アリゲータリバー地域で採取した岩石サンプルの反射スペクトルデータ（反射分光特性曲線図）
- ②同、岩石サンプルのX線分析による鉱物同定結果
- ③同、現地調査メモおよび地表写真、衛星画像

(2)項目

- ①経緯
- ②目的
- ③方法（反射スペクトルの測定方法、X線分析の内容等）
- ④主要岩石の反射スペクトル特性の記述
- ⑤各岩石サンプルの反射スペクトル特性の記述

3.3 各項目の内容

(1) 主要岩種の反射スペクトル特性の記述

- ① 各地域の地勢、気候、地質概要
- ② 各地域の位置図と衛星画像
- ③ 地域別、時代別、岩種別（火成岩、堆積岩、変成岩、その他）の順に構成する。
- ④ 各岩種の代表的な反射分光特性曲線図とその説明文

(2) 各岩石サンプルの反射スペクトル特性の記述

- ① 地域別、時代別、岩種別（火成岩、堆積岩、変成岩、その他）の順に構成する。
- ② 地域毎のサンプル採取地点位置図および衛星画像
- ③ サンプル毎の記述内容
 - ・ 岩石名
 - ・ サンプル番号
 - ・ 採取地点名
 - ・ サンプルの写真
 - ・ サンプルの表面特徴の記述
 - ・ X線分析結果の記述
 - ・ X線分析結果（チャート）
 - ・ 反射分光特性の記述
 - ・ 反射分光特性曲線図
 - ・ 採取地点の地表写真
 - ・ 採取地点の地表状況の記述

3.4 反射スペクトルデータカタログの対象地域および対象岩種

反射スペクトルデータカタログの対象地域は、事業団の海外ウラン探査プロジェクトであるオーストラリア・北部準州のアリゲータリバー地域、同・西オーストラリア州のルーダル地域およびタナマイ地域であり（図-1）、これらの地域に分布している始生代から原生代の火成岩、堆積岩および変成岩を対象にしている。これらの地域に存在するウラン鉱床タイプは、経済性の高いウラン鉱床が期待できる不整合関連型ウラン鉱床であり、また、アリゲータリバー地域の一部を除き、植生の被覆率が低く、かつ、乾燥した地域であることからリモートセンシング解析に適した地域といえる。

4. 平成3年度の実施作業内容

4.1 岩石サンプルの反射スペクトル測定

資源探査分野におけるリモートセンシング解析には、基礎データとして各種岩石表面の反射スペクトルデータが必要不可欠である。反射スペクトルデータとは、光の波長毎の反射率であり、これを分光反射率という。このデータを用いて波長を横軸に、反射率を縦軸にして描いた曲線が反射スペクトル特性曲線であり、含まれる鉱物によって特徴的な吸収（反射率の低下）が現れる²⁾。この吸収の位置、大きさ、吸収部分の曲線の形状によって岩石に含まれる鉱物の種類を推測することができ、また、特定の岩種を抽出するための手

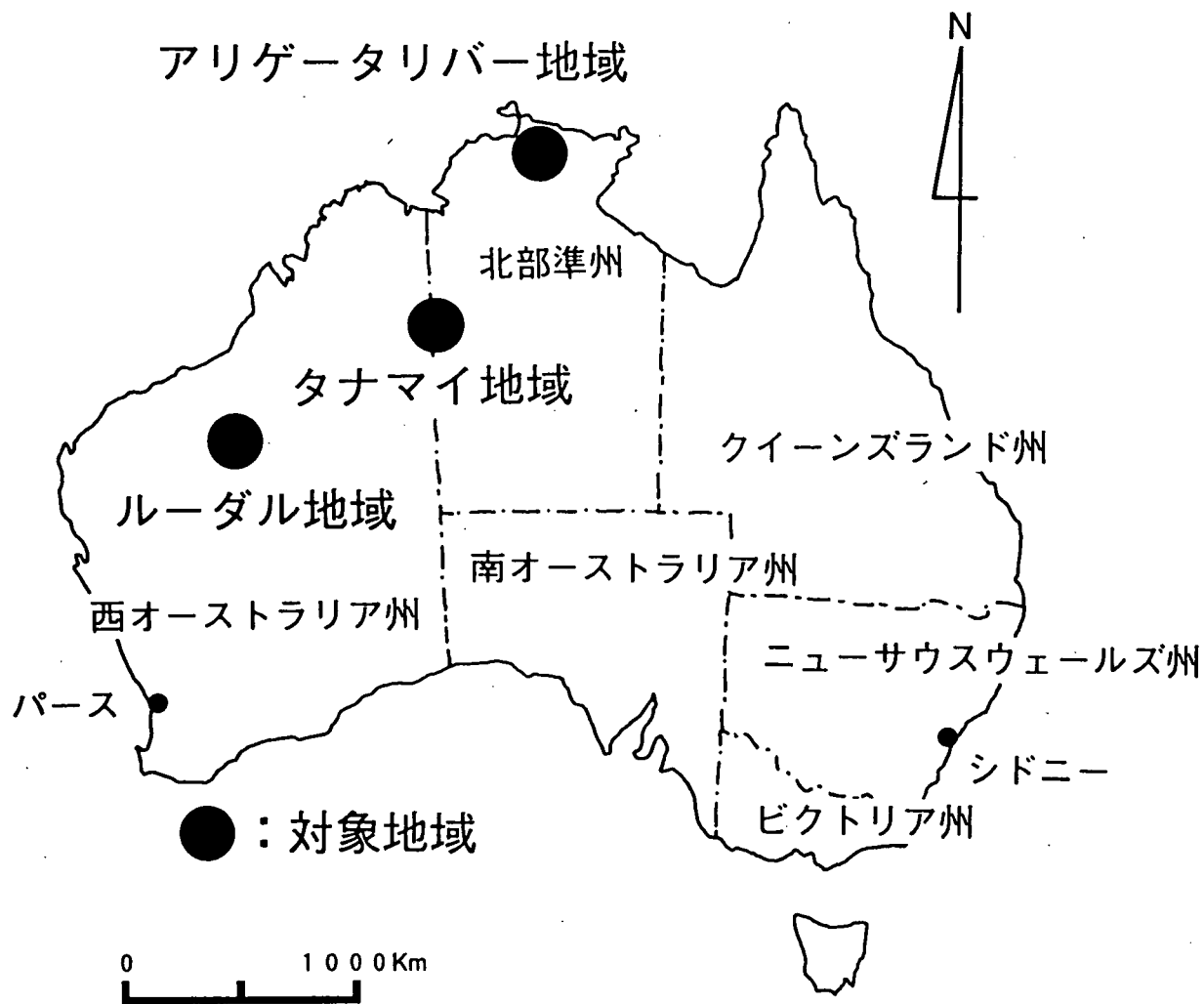


図-1 反射スペクトルデータカタログ
対象地域

法を検討する際の手掛かりとなる。

以上のことから、オーストラリアの各地域で採集した143個の岩石サンプルについて反射スペクトルの測定を行い、各岩石サンプルの反射スペクトル特性曲線図(図-2)を作成した。また、各岩石サンプルについて同時にX線分析による鉱物同定(図-3)を行った³⁾。なお、各地域における採集サンプルの数量は、表-1の通りである。

表-1 岩石サンプルの採取位置および数量

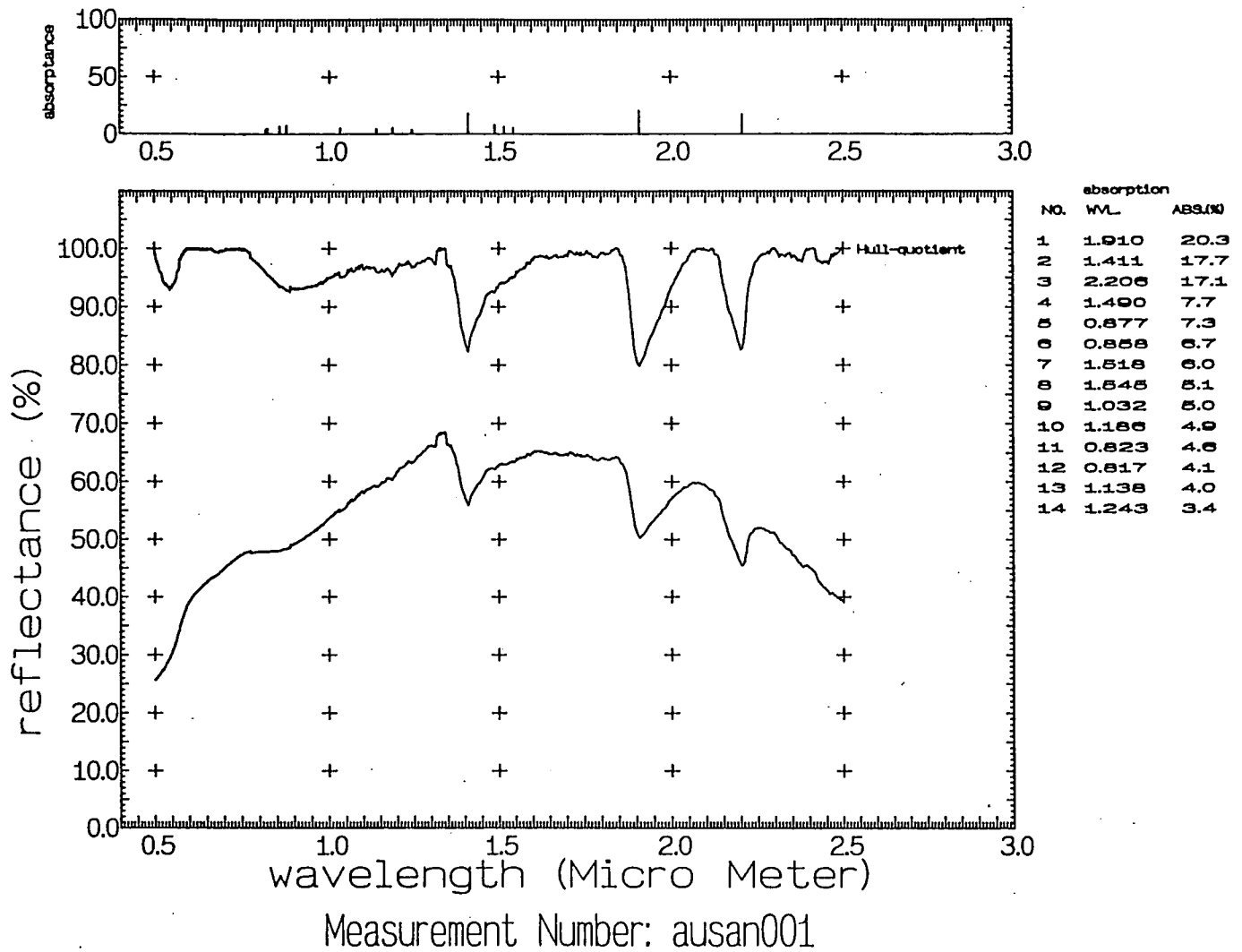
地域名	地区名	数量(個)
アリゲータリバー	アーネムランド	22
	ジャビルカ鉱床区	2
	クンガラ鉱床区	7
	トルマー	8
	ラムジャングル	7
タナマイ ルーダル	キンタイヤ鉱床区	13
	その他	7
	その他	7
合計		143

4.2 岩石サンプル採取地域の衛星画像の作成

岩石の反射スペクトル特性の記述だけではなく、可能な限り岩石サンプルの採取地点の地表状況に関する情報を提供するため、岩石サンプル採取地域の衛星画像を作成した(図-4~図-6)。画像処理した各衛星データの諸元は以下の通りである。

表-2 衛星画像データの諸元

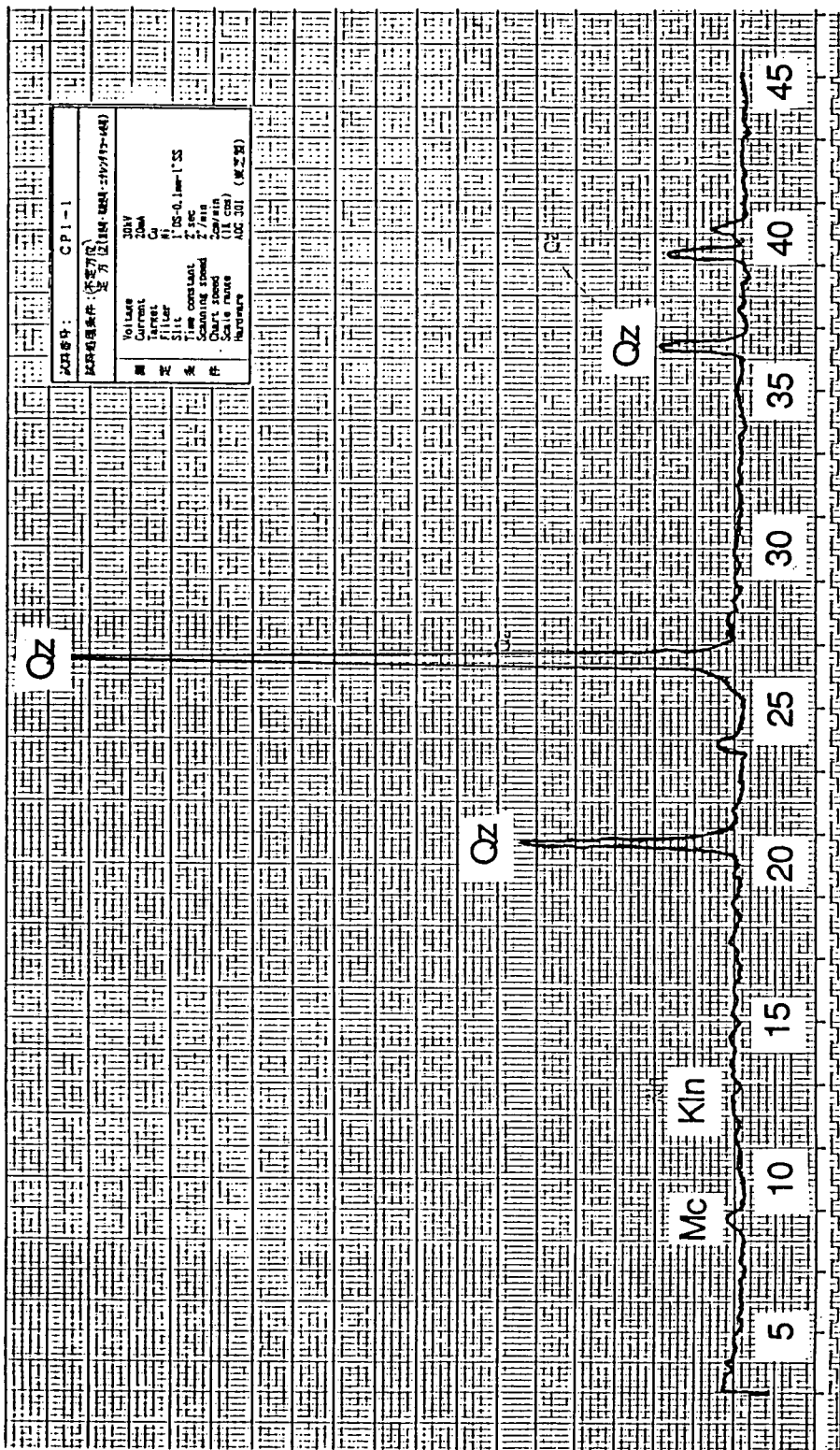
地域名	センサー名	パス・ロウ	観測日	受信局
アリゲータリバー-西方域	MSS	113-69	27/FEB/1984	アリス・スプリングス
タナマイ (北)	T M	106-73	30/MAY/1987	''
タナマイ (南)	T M	106-74	''	''



岩石名: 石英砂岩

反射率20~70%の範囲で、1.4 μ m付近を中心にした山なりの反射スペクトルを示す。1.41および1.91 μ mに中程度の吸収が、また、2.21 μ mに強い鋭い吸収が見られる。これらの吸収は白雲母によるものである。2.21 μ mの吸収の短波長側(2.16 μ m)に見られるノッチは、カオリナイトの吸収によるものであり、この強い吸収は、白雲母とカオリナイトとの吸収が合成されたものと思われる。また、0.9 μ m付近を中心にした浅い吸収は褐鉄鉱によるものである。

図-2 反射スペクトル特性曲線の一例



図一 3 X線分析結果の一例 (X線回折チャート)

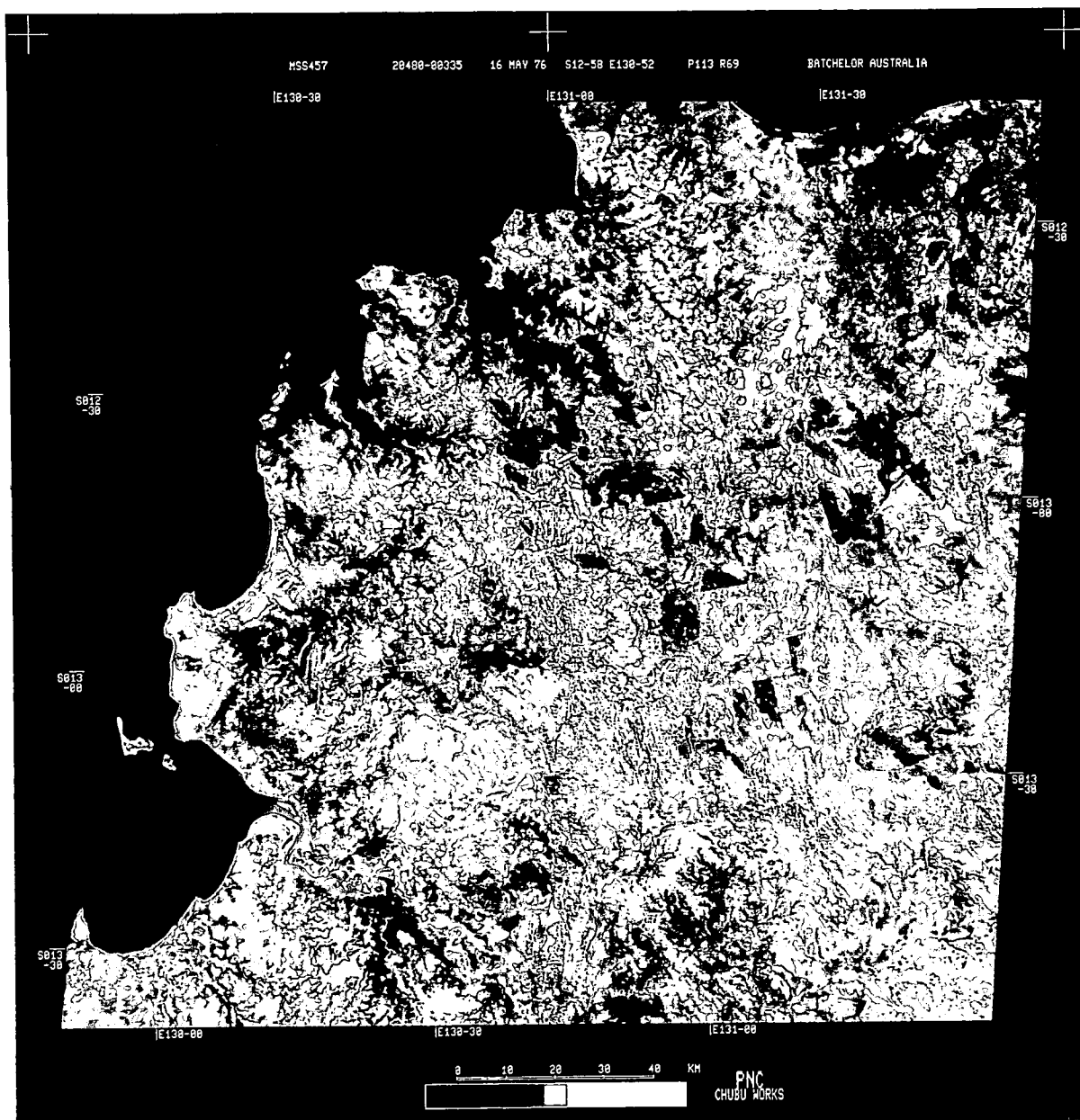
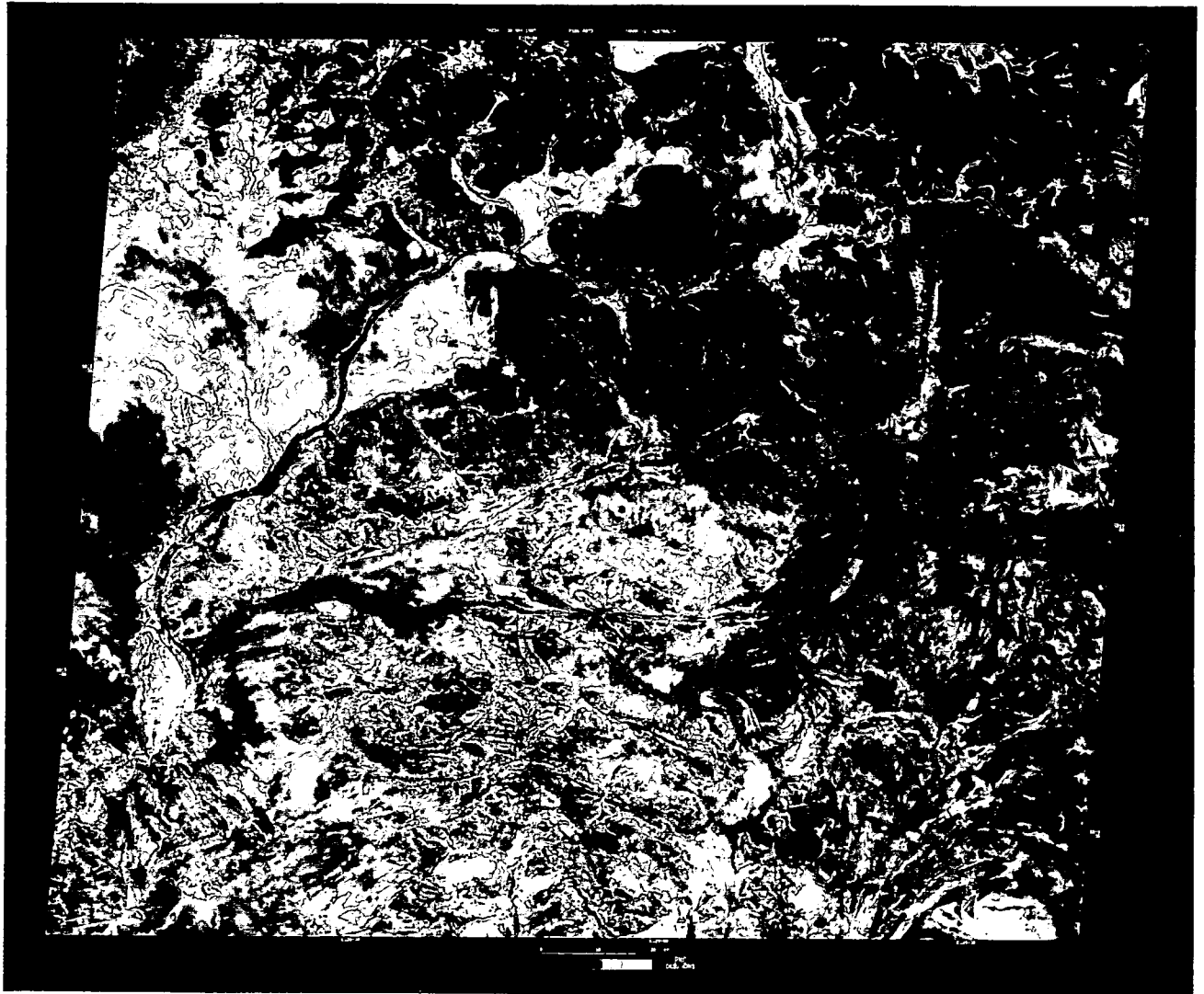


図-4 アリゲータリバー西方域のランド
サットMSSフォールスカラー画像



図ー5 タナマイ地区（北）のランドサット
TMフォールスカラー画像

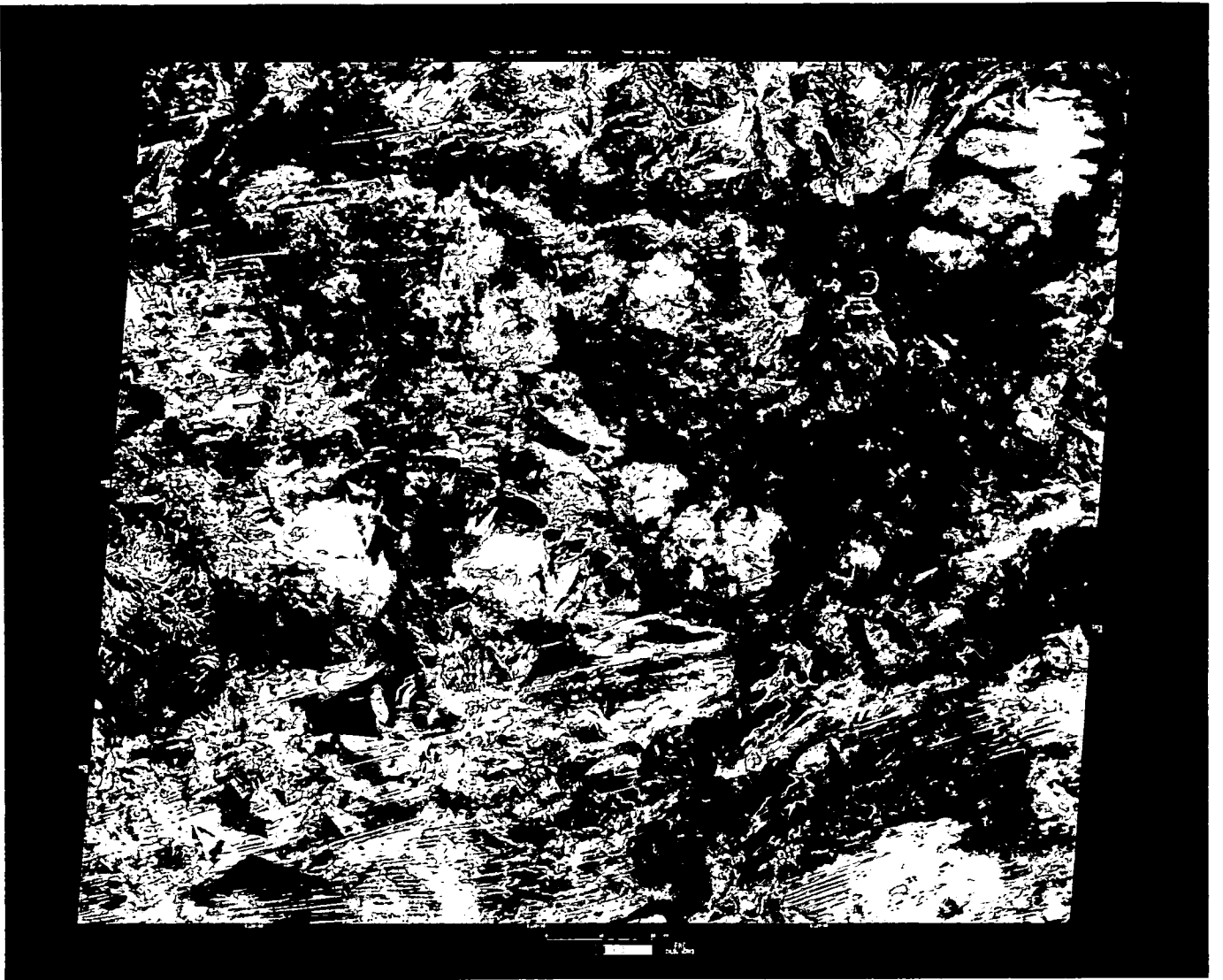


図-6 タナマイ地区（南）のランドサット
TMフォールスカラー画像

5. 今後の予定

平成4年度は、各データのまとめを行い、反射スペクトルデータカタログを完成させる予定である。

6. 参考文献

- 1) 動燃事業団「岩石の反射スペクトル特性に関する研究－解析システムの構築とアリゲータリバー地域の岩石の分光反射特性－」平成2年度技術開発課年報, 1991, P. 82～102
- 2) G. R. Hunt 「Near-infrared (1.3～2.4 μm) spectra of alteration minerals -Potential for use in remote sensing」GEOPHYSICS, 1979, Vol. 44, No. 12, P. 1974～1986
- 3) 動燃事業団「ウラン鉱床地域の主要岩石を対象としたX線分析結果 PNC ZN7434 91-001」1991

A-7 反射スペクトル解析のための画像処理システムの
機能強化について

(山 岸, 小 出)

担当：小出馨

1. はじめに

米国の地球観測衛星ランドサット1号の成功によって一般化した衛星リモートセンシングは、現在、ランドサット4号から搭載されたTMセンサーや仏国の地球観測衛星スポットのHRVセンサーに代表される高分解能、多バンド（観測波長帯の拡大と波長分解能の向上）の光学センサーが主力となっている。これらの第二世代と呼ばれる光学センサーの中で、ランドサットに搭載されているTMセンサーは、粘土鉱物や炭酸塩鉱物の抽出に有効とされている $2\mu\text{m}$ 帯¹⁾の波長の光を観測できるため、金属鉱床探査の重要な探査ターゲットである熱水変質帯の抽出に有効とされている²⁾。また、1992年2月に打ち上げられた国産資源探査衛星「ふよう1号」の光学センサーには、短波長赤外域($1.3\sim 2.5\mu\text{m}$)に4つのバンドが設定されており、TMセンサーと比較してさらに詳細な岩石区分ができることを期待されている。

このように衛星に搭載される光学センサーは、地上分解能の向上と共に波長分解能の向上が図られており、鉱物資源探査の分野においてもリモートセンシングデータが本来持つ地表物の反射スペクトル情報を利用した解析が実用になりつつある。

技術開発課は、リモートセンシング用光学センサーの技術動向を踏まえ、岩石の反射スペクトル特性に関する研究を平成元年度から始めており、ウラン探査の対象となる岩種の反射スペクトルデータの取得や解析のための環境整備を進めてきた。

本報告では、反射スペクトルデータ解析のための解析環境整備の一環として平成3年度に実施した画像処理システムの機能強化の内容について紹介する。

2. 画像処理システムの機能強化の目的と内容

岩石の反射スペクトル解析の目的は、リモートセンシングデータの値から岩石名あるいは鉱物名を直接推定することであり、そのためには、各岩種の反射スペクトル特性とリモートセンシングデータの値との関係を明らかにする必要がある。しかし、リモートセンシング用光学センサーのデータは、地表からの反射光の強度を量子化（一般に、6bit（64階調）～8bit（256階調））し、記録したものであり、反射スペクトルデータとは物理量が異なるため、直接両者を比較することができない。したがって、両者を比較検討するためには、どちらか一方の物理量をもう一方の物理量に変換する必要がある。そこで、平成元年度においては反射スペクトルデータを放射量（ラジアン）に変換することにより、岩石の反射スペクトルデータからランドサットのTMセンサーデータをシミュレーションし、両者を比較検討した³⁾。しかし、この方法では放射量への変換式や光学センサーの各バンドの感度特性などが公表されていないリモートセンシングデータには適用できず、また、大気散乱による放射量を把握できないと正確な放射量が得られないといった問題がある。

そこで、光学センサーの詳細な特性データを必要とせず、岩石の反射スペクトルデータ

とリモートセンシングデータとを対比できるようにするため、Logarithmic Residual法とLeast Upper Bound Residual法による変換プログラムを作成した。

3. Logarithmic Residual法とLeast Upper Bound Residual法

Logarithmic Residual法およびLeast Upper Bound Residual法は、オーストラリアの国立の研究機関CSIROのスタッフであるA. A. Green等によって開発された手法⁴⁾である。Logarithmic Residual法は、光学センサーで観測された放射量が地表物の反射率、地形効果および照射効果の3者の積の形で表現されているとの仮定に基づき、リモートセンシングデータの各バンドと各画素（画像データを構成する最小単位）の幾何平均によって放射量を正規化し、バンド間の応答パターンを反射率のパターンに類似したものに変換する方法である。この方法の利点は、反射率に変換する際に地上における放射量測定等のデータを必要とせず、与えられたリモートセンシングデータの値のみから反射率に類似したパターンに変換できる点である。換言すれば、対象範囲の平均値がほぼ平坦な反射率パターンを示すような場合に最も適した手法である。しかし、対象地域の反射率の平均が平坦でない場合は、真の反射率パターンとは異なった結果が得られる。このような場合は、Least Upper Bound Residual法を用いることが提案されている⁴⁾。

なお、Logarithmic Residual法とLeast Upper Bound Residual法との相違点は、前者がスペクトルの平均を用い、後者はスペクトルの最大値を用いる点である。これらの手法は以下の式⁴⁾で表現できる。

求める結果をRとすると、

$$\log(R) = \log X_{i,b} - X_{i,b} - X_{..} \quad (\text{式-1})$$

$$\text{ここで } X_{i,b} = \frac{1}{N} \sum \log X_{i,b} \quad (\text{式-2})$$

$$X_{..} = \frac{1}{MN} \sum \sum \log X_{i,b} \quad (\text{式-3})$$

R	: みかけの反射率
$X_{i,b}$: bバンドのi画素目の画像データ値
M	: 各バンドの画素数
N	: バンド数

Logarithmic Residual法の場合、

$$X_{i,b} = \frac{1}{M} \sum \log X_{i,b} \quad (\text{式-4})$$

Least Upper Bound Residual法の場合

$$X_{i,b} = \max (\log X_{i,b}) \quad (\text{式-5})$$

4. プログラムの仕様

Logarithmic Residual法およびLeast Upper Bound Residual法による画像データの変換プログラムを作成するにあたり、今後、航空機搭載の光学センサー（例えばGeoscan社のAMSS-Mk-1：13バンド）の利用やNASAが1995年に打ち上げを予定しているHIRIS(High Resolution Imaging Spectrometer:192 バンド)⁵⁾への対応を考慮し、プログラムで処理できるデータサイズをランドサットTM全シーン・全バンド数（1ライン当たり約6300画素×7バンド：約0.04Mbyte）のデータとし、最大バンド数を200バンドとした。なお、本プログラムの作成は、技術開発課所有の画像処理システム⁶⁾の開発元であるセントラル・コンピュータ・サービスに委託した。

5. テスト解析

5.1 対象範囲

テスト解析を実施するにあたり、平成2年度に現地調査を実施したオーストラリア北部準州アーネムランド地域内にある事業団鉱区（EL3597, EL4015）周辺の38Km×30Kmの範囲をテストエリアとした（図-1）。本地区は、中部原生代の石英砂岩が広く分布しており、岩石の露出状態は良い。また、植生は谷部に密生しているが、台地上にはユーカリ等の樹木が疎らに生えている程度で植被率は比較的低い地区である。

5.2 使用データ

テスト解析には、ランドサットTMデータを用いた。このデータの諸元は以下の通りである。

衛星名：ランドサット5号 データ形式：B I Lフォーマット磁気テープデータ（1600bpi）

パス・軌道：104-69 撮影日：1987年10月7日

受信局：アリススプリングス

解析には7つあるバンド（表-1）の中からバンド1からバンド5およびバンド7の合計6つのバンドを使用した。

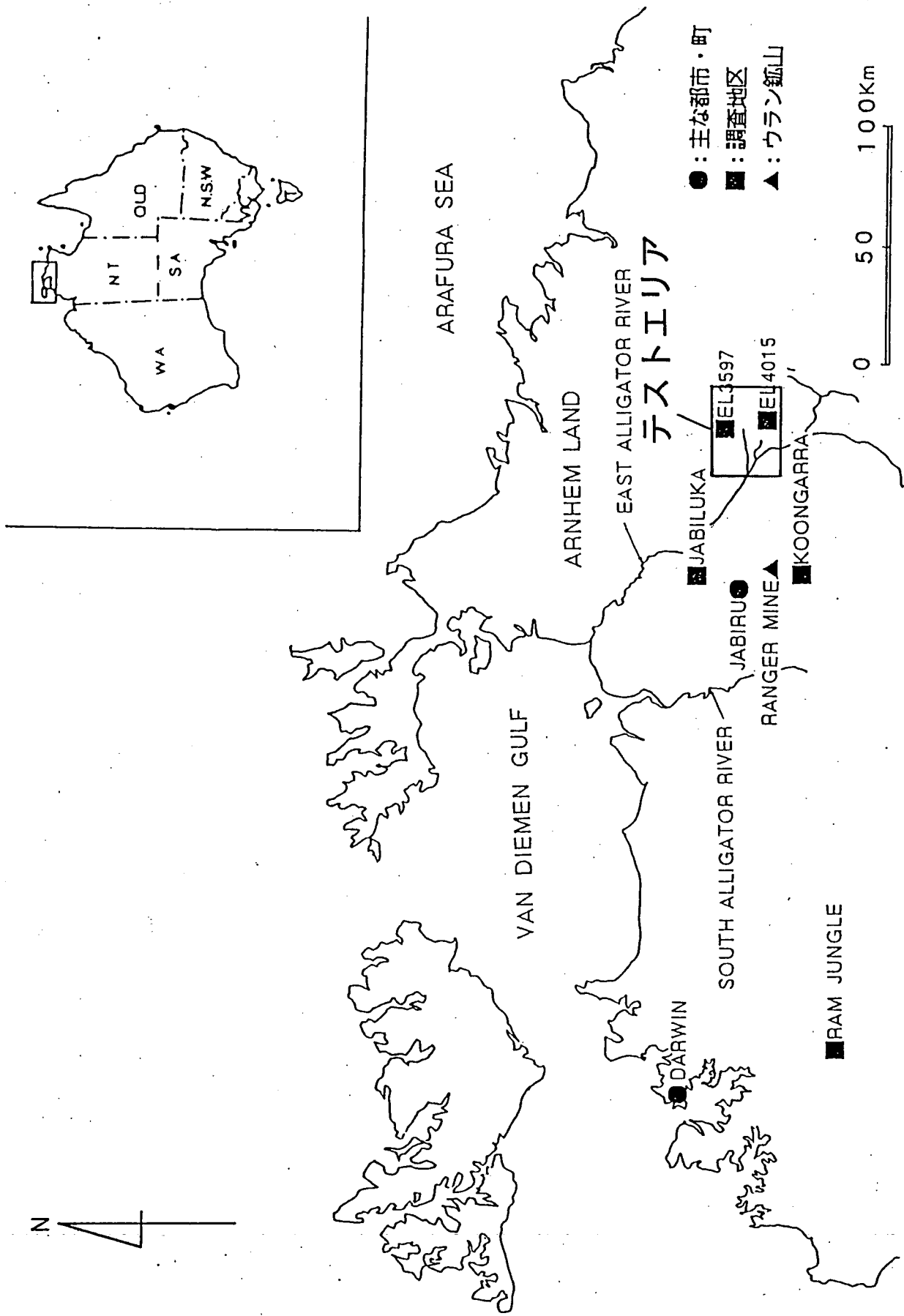
5.3 テスト解析の結果

上記のデータからテストエリアを切りだし、解析用の画像データ（1280画素×1020ライン×6バンド：約8MByte）を作成した。図-2はテストエリアのランドサットTM画像であり、画像上の白色～明灰色部分が石英砂岩の露出域、また、赤色の部分は植生である。この画像データを対象にプログラムのテスト解析を以下の手順で実施した。

①解析用画像データを対象にLogarithmic Residual法およびLeast Upper Bound Residual法によるデータ変換を行い、疑似反射率データを作成した（一回当たりの処理時間は約35分）。

②Logarithmic Residual法、Least Upper Bound Residual法による疑似反射率データおよびオリジナルのデータから石英砂岩と植生の部分の各バンドのデータ値を抽出し、反射スペクトル特性曲線図を作成した（図-3、図-4）。

③②で作成された反射スペクトル特性曲線図と実際に石英砂岩（現地調査で採取）および植生（桜の葉：事業所構内）をスペクトルラジオメータ（GER社製）で実測した反射ス



図一 1 解析対象範囲位置図

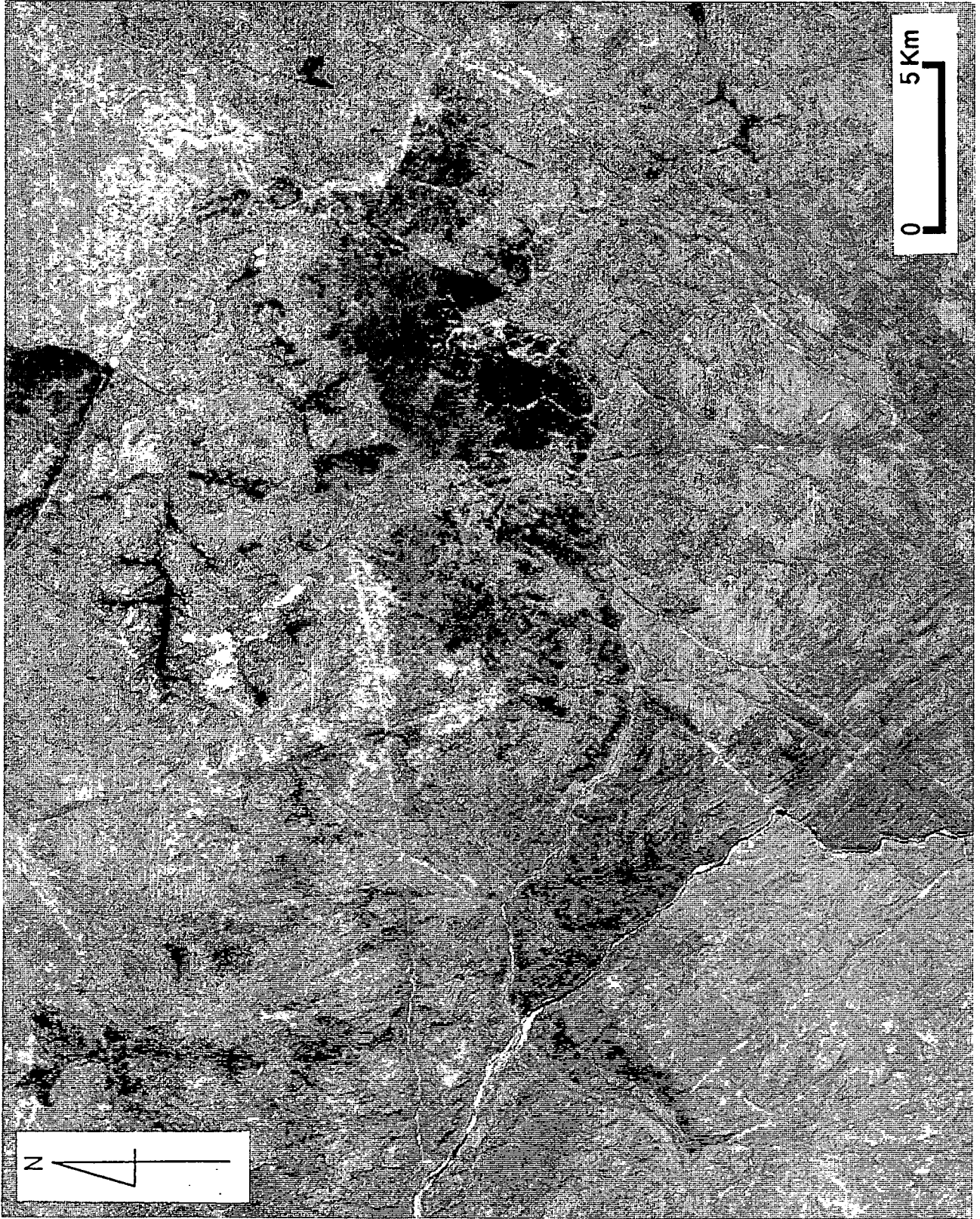
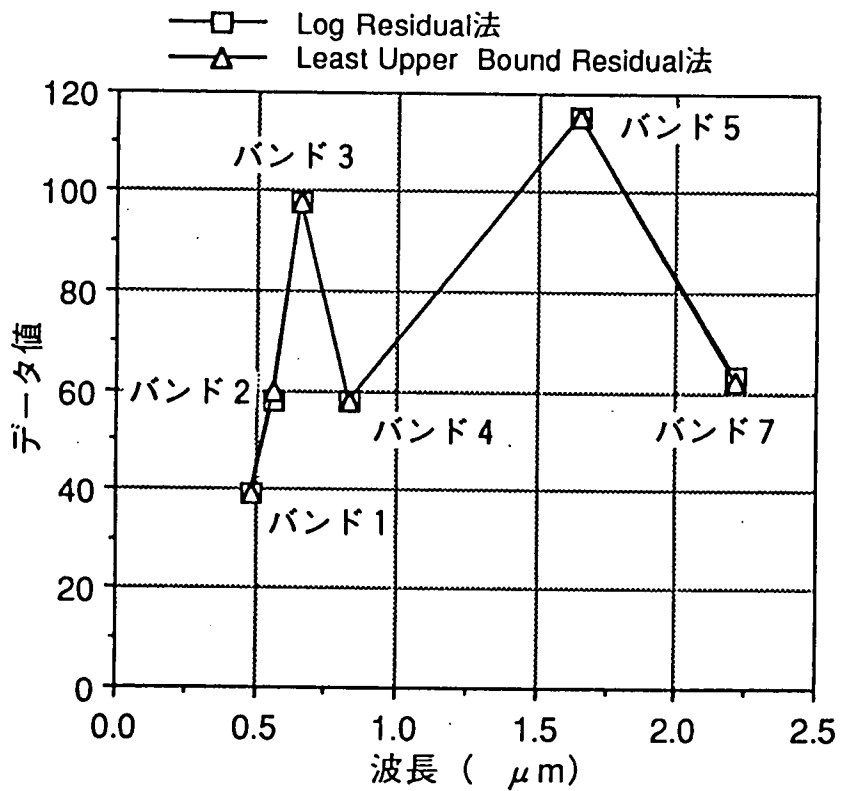
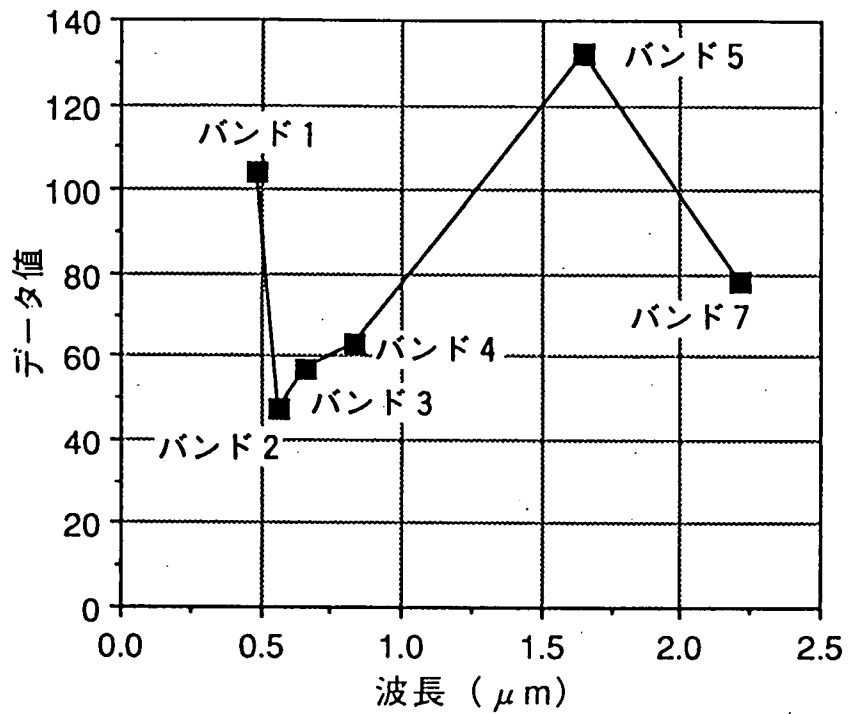


図-2 テストエリアのランドサットTM画像



図一 3 石英砂岩のランドサットTMデータ値（上）と変換後（下）の反射スペクトル特性曲線図

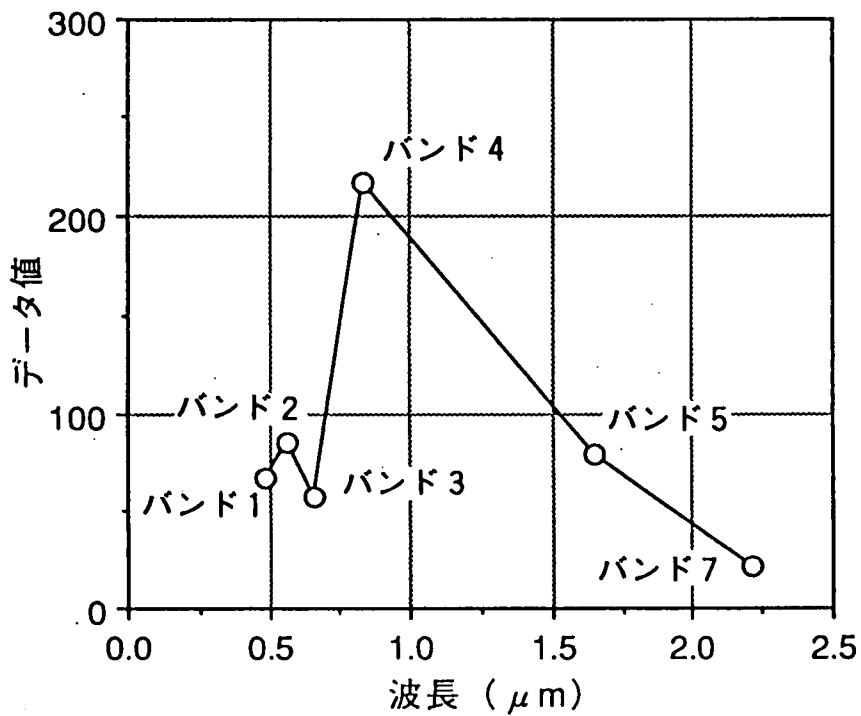
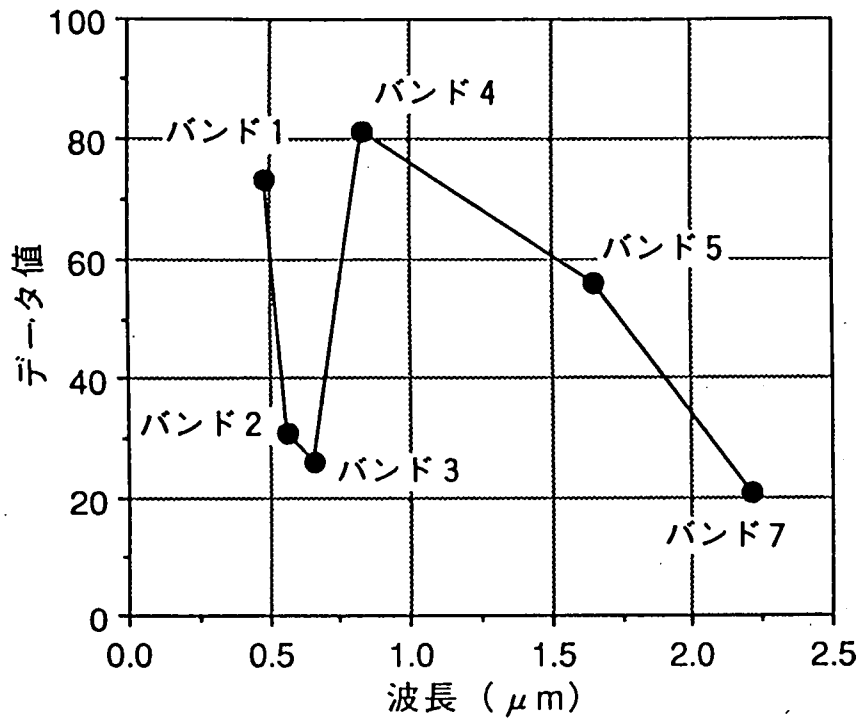


図-4 植生のランドサットTMデータ値（上）と変換後（Log Residual法，下）の反射スペクトル特性曲線図

ペクトル特性曲線図とを比較して、両手法の有効性を確認した（図-5、図-6）。

表-1 ランドサットTMセンサーの観測波長帯と応用分野⁷⁾

バンド	波長帯 (μm)	主な応用分野
1	0.45～0.52	・沿岸水のマッピング ・土壌と植物の区分 ・落葉樹と針葉樹の区別
2	0.52～0.60	・植物の活力度
3	0.63～0.69	・植物の種類を決定するためのクロロフィル吸収
4	0.76～0.90	・バイオマス調査 ・水塊分布
5	1.55～1.75	・植物水分測定 ・雪と雲の区分
6	1.04～1.25	・植物のヒートストレス測定 ・温度のマッピング
7	2.08～2.35	・熱水作用（粘土鉱物）のマッピング

テスト解析の結果は以下の通りである。

- ①図-3からわかるように、Logarithmic Residual法およびLeast Upper Bound Residual法による違いは、今回の解析では認められなかった。
- ②石英砂岩の場合、実測の反射スペクトル特性曲線に見られるバンド1からバンド3までの急な反射率の上昇部分は、Logarithmic Residual法による反射スペクトル特性曲線にも見られ、また、バンド5の値とバンド7の値の大小関係も保持されている。しかし、バンド4の部分で両者に違いが見られ、Logarithmic Residual法による反射スペクトル特性曲線では、この値がバンド3の値より小さな値となっている（図-5）。
- ③植生の場合、Logarithmic Residual法の反射スペクトル特性曲線は実測のものと同様なパターンを示しており、植生の反射スペクトル特性曲線の特徴であるバンド3の吸収（反射率の低下部分）も良く表現されている。

以上ことから、Logarithmic Residual法およびLeast Upper Bound Residual法は、リモートセンシングデータの反射率への変換に対し有効な手法であることが確認された。また、

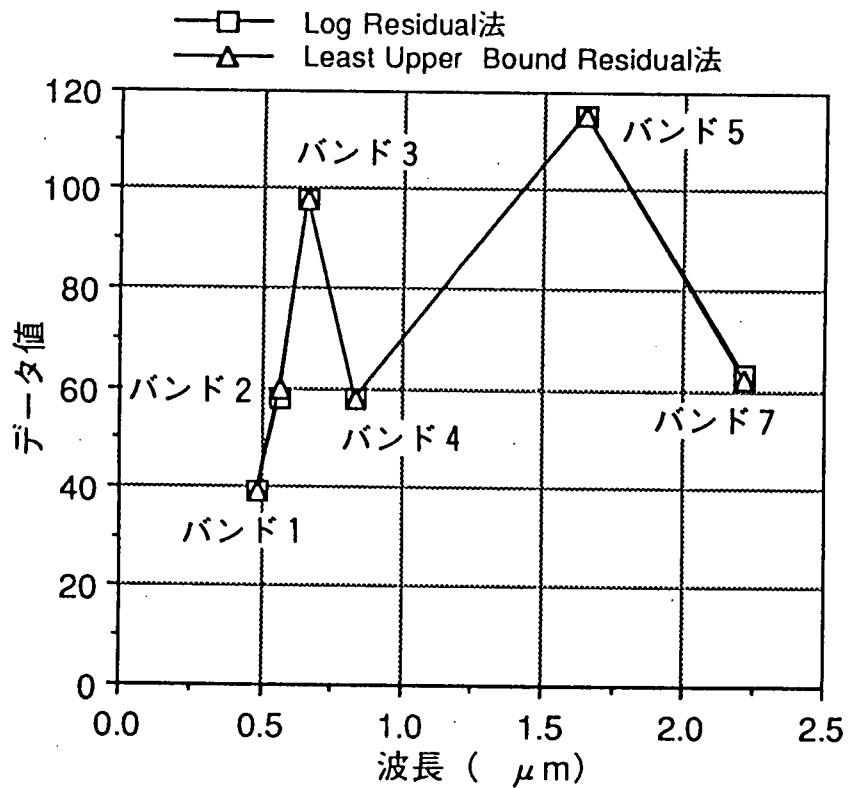
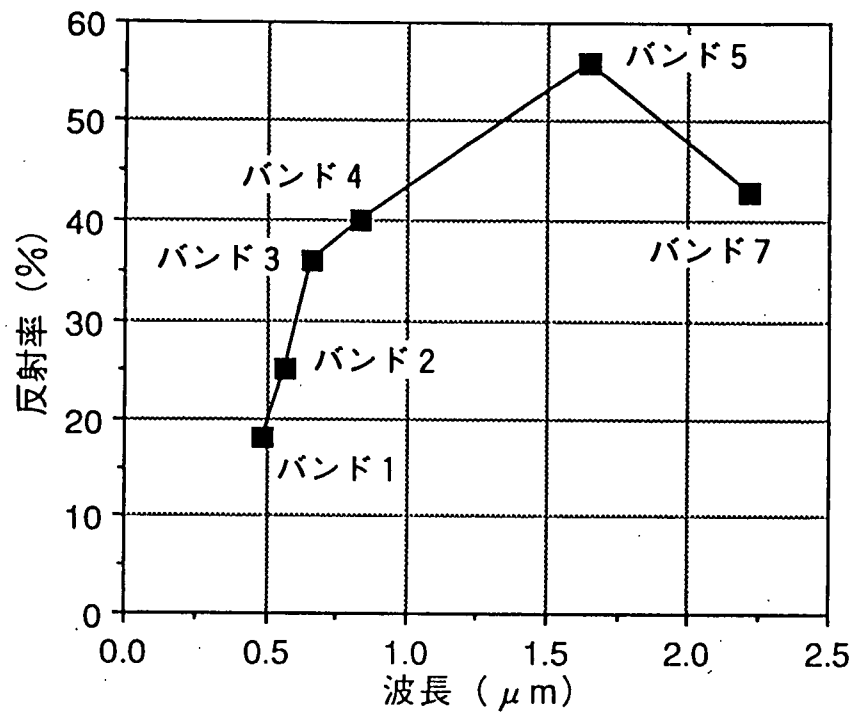
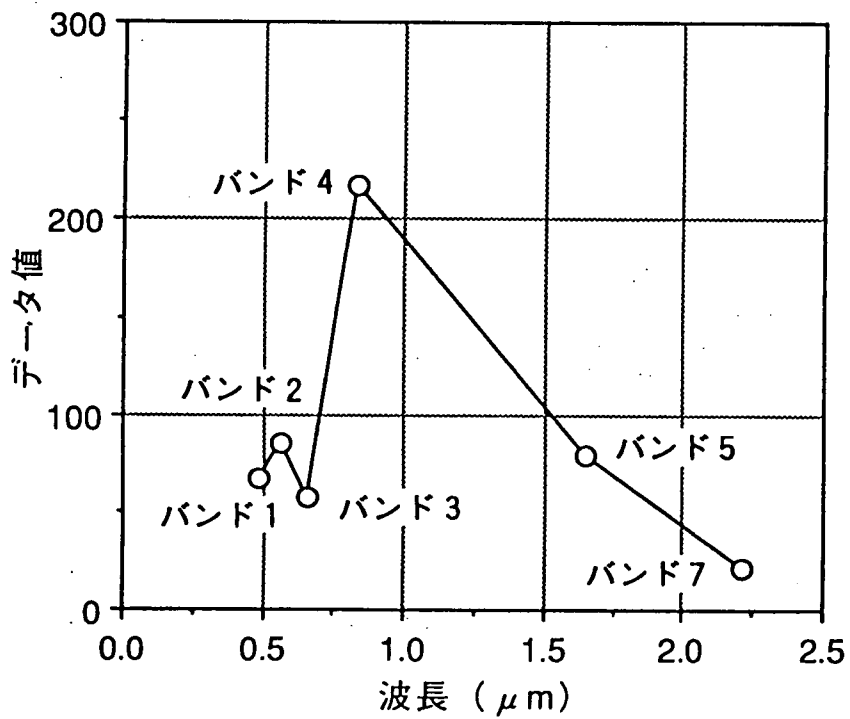
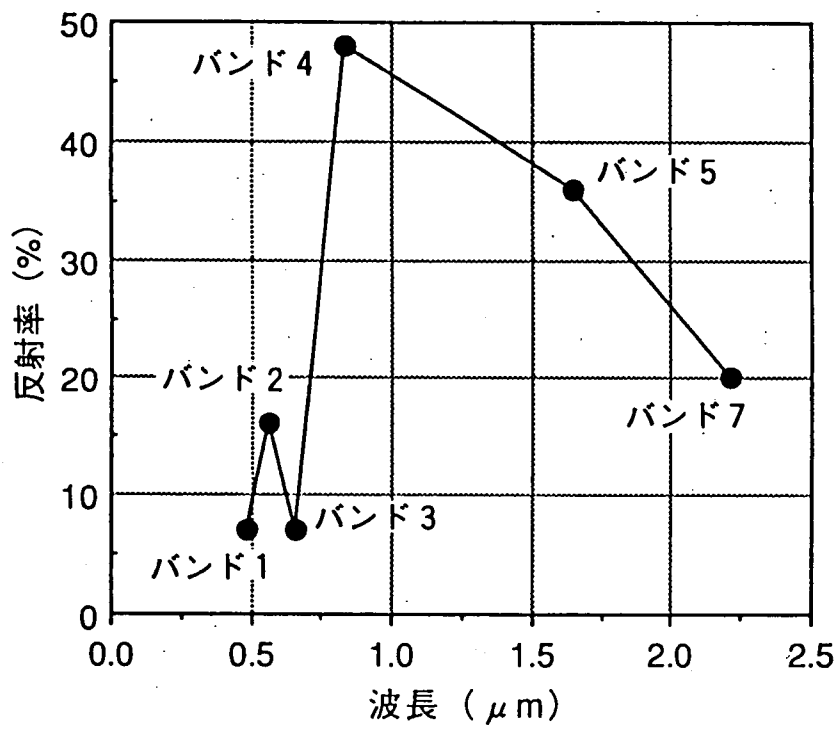


図-5 実測の反射スペクトル特性曲線図 (上) との比較 (石英砂岩)



図一六 実測の反射スペクトル特性曲線図 (上)
との比較 (植生, Log Residual法)

石英砂岩のように実測の反射スペクトル特性曲線と異なるパターンが生じたことにより、これらの手法がどのような条件下でも適用できるものではないことも今回のテスト解析で明らかになった。この異なるパターンが生じた原因としては次のようなことが考えられる。Logarithmic Residual法は、各バンドの幾何平均に基づいて各画素の値を正規化しており、もし、幾何平均が平坦な反射スペクトル特性に対応しているのなら、変換後の各画素のバンド間の応答パターンは実測の反射スペクトル特性曲線に近いものになる。一方、幾何平均が平坦でない場合は、実測の反射スペクトル特性曲線と異なるパターンが生じる恐れがある。今回の解析ではLogarithmic Residual法による石英砂岩のパターンにおいて、バンド4つまり近赤外域での値の低下が生じたが、これは幾何平均のパターンが植生の反射スペクトル特性曲線のパターン（近赤外域の反射率が最も高い）に近いものになっていた可能性が高い。したがって、バンド4の幾何平均が他のバンドに比べ高い値に設定され、植生に比べバンド4の値の低い石英砂岩がその影響を受け、変換後のバンド4の値が低くなったものと考えられる。

6. 今後の予定

今回のテスト解析によって、解析対象範囲の地表物の構成によって、結果が左右されることが明らかになった。特に、植生による影響が大きかったことから、今後は、より植被率の低い地区（例えば、西オーストラリア州ルーダル地区）を対象に、より多くの岩種について本手法を適用し、その有効性と限界を明らかにしていく予定である。

7. 参考文献

- 1) G. R. Hunt 「Near-infrared (1.3~2.4 μ m) spectra of alteration minerals -Potential for use in remote sensing」 GEOPHYSICS, Vol. 44, No. 12, P. 1974~1986, 1979
- 2) 井上, 他 「リモートセンシングによる地熱変質帯の抽出」 応用地質, 25巻, 4号, P. 8~20, 1984
- 3) 小出 「中国・北票地区のランドサットTMデータ解析」 平成2年度技術開発課年報, 動燃事業団, P. 39~51, 1990
- 4) Green, 他 「ANALYSIS OF AIRCRAFT SPECTROMETER DATA WITH LOGARITHMIC RESIDUALS」 Proceedings of the Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, P. 111~119, 1985
- 5) NASA 「High-Resolution Imaging Spectrometer: Science Opportunities for the 1990s」 EARTH OBSERVING SYSTEM, Vol. IIc, 1987
- 6) 小出 「画像処理システムの導入とテスト処理結果について」 昭和62年度探査及び採鉱技術開発の現況, 動燃事業団, P. 56~84, 1988
- 7) RESTEC 「地球観測データ利用ハンドブックーランドサット編・改訂版ー」 P. 1-22, 1986

A - 8 中国連山関ウラン鉱床におけるV L F - 比抵抗法の
適用試験について

1. はじめに

動燃事業団では、中国におけるウラン探鉱プロジェクトを効率的に進めるために、共同調査の実施主体である「中日地質調査合作隊」を中心に、物理探査の積極的活用を図りつつある。その一貫として、連山関ウラン鉱床においてVLF-比抵抗法のテスト調査が実施された。測定は中国側スタッフが実施し、解析および適用性の評価は中部事業所技術開発課が実施した。なお、このテスト調査は中国遼東鉱業事情調査の一部として実施されたものである。

2. テスト調査

2.1 目的

- (1) 既知鉱床上で電磁探査法の一つであるVLF-比抵抗法のテスト調査を実施し、その適用性を検討する。
- (2) 中国側スタッフにVLF-比抵抗法に関する技術を取得させる。

2.2 連山関ウラン鉱床

連山関ウラン鉱床は共同調査の鉱区内にあるウラン鉱床で、同タイプの鉱床も調査対象となっていることから、この鉱床がテスト調査対象として選ばれた。図1は連山関ウラン鉱床の位置を示したものである。

連山関ウラン鉱床はラドン調査と試錐調査によって1960年代の初めに発見された鉱床であり、坑道探鉱がすでに終了している。鉱量は約1千トン U_3O_8 とされている。図2は連山関ウラン鉱床付近の地形図であり、図中の●は鉱化が確認されている試錐孔の位置である。図2には測線の位置を重書きしてある。鉱化帯は地表から2～3百メートルの深度に胚胎しているが、その形態は塊状ではなく傾斜が急なレンズ状を呈している¹⁾。

2.3 VLF-比抵抗法の原理と特徴

VLF-比抵抗法はMT法の一つであるが、電磁界源としてVLF局から送信される電磁界を用いるので、受信信号強度が強かつ安定している。従って、小型の測定装置で短時間に質の高いデータを取得することができる。ただし、MT法では周波数の高低で探査深度をコントロールするが、VLF局の送信周波数は20kHz前後の値に固定されている。よって、VLF-比抵抗法では見掛比抵抗のマッピングは行えるが、深さ方向に対する情報はほとんど得られない。

2.4 テスト調査結果および考察

測定は平成3年9月から10月にかけて実施された。測定器はGeonics社製のEM16R（

中部事業所所有) であり、測定にはオーストラリアの VLF局を使用した。図3は地形図に地質図と測線の位置を重ね書きしたものであり、図4は得られた見掛比抵抗値をコンター表示したものである。

得られた見掛比抵抗コンター図(図4)の特徴を大きくみると、測点100N~200Nの北側と南側で見掛比抵抗値が大きく異なっており、北側で高く南側で低くなっている。通常、未固結の堆積物は電気抵抗が低く、MT法調査をはじめとする電磁法調査の場合に地質ノイズとなりやすいのであるが、見掛比抵抗コンター図に現れている低見掛比抵抗域と地質図(図3)に示された未固結堆積物の分布域には特に関係は認められない。一方、地質図では測点100N~200N付近にミグマタイトと石英片岩の境界が位置していることから、この見掛比抵抗の違いはそれぞれの岩相を反映しているものと考えられる。ただし、地質図にはグリッドの南端に斑レイ岩が現れているが、見掛比抵抗コンター図にはこの特徴は特に現れていない。

次に、見掛比抵抗コンター図の細かな特徴を調べると200Ωmよりも低い値を示す部分が北側の高見掛比抵抗分布域の中に1ヶ所、南側の低見掛比抵抗分布域の中に3ヶ所現れている。地質図にはこれらの低見掛比抵抗異常と対応するような岩相分布や構造は記載されていない。図2より、鉍化が確認された試錐孔はBase Line付近に集中していることがわかるが、Base Lineのすぐ南側にこの低見掛比抵抗異常の一つが位置しており、この異常がウラン鉍床と何らかの関係があることが示唆された。ただし、図2からもわかるようにテスト調査地域の地形はかなり急峻であり、地形が急峻な場合は見掛比抵抗値は地形の影響を大きく受けることが指摘されている²⁾ので、低見掛比抵抗異常の原因を考察する前に、見掛比抵抗に対する地形の影響を評価しておく必要がある。

以上の結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) VLF-比抵抗法による調査で、ミグマタイト分布域と斑レイ岩分布域を区別できることが確認された。
- (2) VLF-比抵抗法で得られた低見掛比抵抗異常がウラン鉍床と何らかの関係があることが示唆された。
- (3) 低見掛比抵抗異常の原因を考察する前に、地形の影響を評価しておく必要がある。

3. モデリングによる解析

2次元有限要素法に基づくモデリングプログラム³⁾を用いて以下に示す検討を行った。

- (1) テスト調査地域の地形が見掛比抵抗値に与える影響を評価する。
- (2) 低見掛比抵抗異常を与える低比抵抗体の深度を検討し、ウラン鉍床との関係を考察する。

3.1 地形の影響の評価

図2の地形図に基づき各測線毎に南北の地形断面図を作成し、それを有限要素法のメッシュに表現した。図5(a)は測線0の地形モデルとメッシュを示したものである。モデリングは、まず土地の比抵抗が1000Ωmで均質である場合(地形モデル1)について行った。

図6はモデリングで得られた見掛比抵抗値とテスト調査結果を比較したものである。テスト調査とモデリング結果のコンターの形状はよく似ており、地形が見掛比抵抗の測定値に大きな影響を与えていることがわかる。しかし、200Ωmよりも低い値を示す低見掛比抵抗異常は地形モデル1では説明できない。

次に、ミグマタイトに相当する部分に1000Ωmの比抵抗を斑レイ岩に相当する部分に400Ωmの比抵抗を与えた場合（地形モデル2）についてモデリングを行った。図5(b)は地形モデル2の測線0の地形モデルとメッシュを示したものである。図7はモデリングで得られた見掛比抵抗値と実測結果を比較したものである。地形モデル2では、測線200Wから100Wの測点100N付近に見掛比抵抗が200Ωm以下を示す低見掛比抵抗異常が現れている。このモデルで与えた比抵抗は1000Ωmと400Ωmであるから、この低見掛比抵抗異常は偽像であることがわかる。ただし、このモデルを用いても他の低比抵抗異常を説明できない。

以上より、テスト調査で得られた低見掛比抵抗以上の大部分は地形の影響では説明できないことが明らかになった。

3.2 低見掛比抵抗異常を与える低比抵抗体の深度の検討

どのような低比抵抗体が地下に存在すればテスト調査で得られたような低見掛比抵抗異常が現れるのかを検討した。図8(a)はモデリングに用いたモデルを示したものである。低見掛比抵抗以上の幅が50m~100mであることから低比抵抗体の幅を50mに設定し、簡単のためにその厚さも50mとした。低比抵抗体の比抵抗値としては50Ωmを与えた。（理由：粘土変質化が進むと岩石の比抵抗は減少するが、変質が進み過ぎると試錐調査でコアとして採取できなくなる。カナダ・シッソンスルツ南プロジェクトでのコアの比抵抗測定の結果、非常に変質が進んだコアの比抵抗値は約80Ωmであり⁴⁾、このことからコアとして採取できる変質部の比抵抗の最低値は数十Ωmであることが推定された。連山関ウラン鉱床での試錐の結果ではコアが採取できないような変質帯は捕捉されていないので、低比抵抗体の比抵抗の最小値と考えられる50Ωmを与えた。）そして、低比抵抗体の上部の深度dを変化させて、それが見掛比抵抗に与える影響を求めた。図9はその結果をグラフ化したもので、低比抵抗体の深度が変わると見掛比抵抗曲線がどのように変化するかを示したものである。低比抵抗体上部の深度が20m以浅であれば見掛比抵抗は低比抵抗体の直上で200Ωm以下の値をとるが、その深度が50mになると見掛比抵抗の変化は極わずかとなる。このことは、テスト調査で得られた低見掛比抵抗異常はその上部深度が数十m以浅である低比抵抗体に起因していることを示している。

次に、低比抵抗体の厚さが見掛比抵抗に与える影響について検討した。図8(b)が検討に用いたモデルで、低比抵抗体の上部深度を10m、その比抵抗を50Ωmとし、その厚さtを変化させてそれが見掛比抵抗に与える影響を求めた。図10はその結果をグラフ化したもので、この図は低比抵抗体の厚さが数十m以上あれば見掛比抵抗曲線はほとんど変化しないことを示している。

以上の結果をまとめると、テスト調査で得られたような低見掛比抵抗異常はその上部の深度が数十メートル以浅である低比抵抗体に起因するものであり、その厚さについては数十mよりも厚いことになる。従って、テスト調査で得られた低比抵抗異常が連山関ウラン

鉍床の鉍化体を取りまく変質帯であるとするならば、その変質帯は地表近く（地表から数十m以内）まで発達していなければならないことになる。しかし、試錐調査ではそのような結果は得られておらず、テスト調査で得られた低見掛比抵抗異常がウラン鉍化と直接関係のある変質帯のようなものに起因しているとは考えられない。

4. まとめ

連山関ウラン鉍床においてVLF-比抵抗法のテスト調査を実施した。さらに、その結果を2次元モデリングを用いて検討した。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) VLF-比抵抗法による調査で、ミグマタイト分布域と斑レイ岩分布域を区別できることが確認された。
- (2) テスト調査の結果得られた低見掛比抵抗異常は、ウラン鉍化帯とは直接関係ないことが明らかになった。

ただし、テスト調査の結果得られた低見掛比抵抗異常は何らかの地質構造を反映しているわけであるから、その地質構造がウラン鉍床と何らかの関連性を持っている可能性もある。さらに詳しい現地調査が望まれる。

参考文献

- 1) THE GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND METALLOGENETIC CONTROL FACTORS OF THE LIANSHANGUAN URANIUM DEPOSIT, NORTH EAST CHINA (1988) ; ZHONG JIARONG and GUO ZHITIAN, Precambrian Research 39, p.51-p.64
- 2) MT法における地形の影響について(1985) ; 岡崎金雄, 吉村雄三朗, 物理探鉍, vol. 38, no. 6, p.20-p.31.
- 3) The Topographic Effect in Electromagnetic Fields(1973) ; C.C.KU, M.S.HSIEH and S.H.LIM, Can. J. Earth Sci., 10, p.645-p.656
- 4) Geophysical exploration for Unconformity-Related Uranium Deposits in the Northeastern Part of the Thelon Basin, Northwest Territories, Canada(1990) ; Ken HASEGAWA, Gordon I. Davidson, Peter Wollenberg and Yoshimasa Iida, Mining Geology, 40(2), p.83-p.95

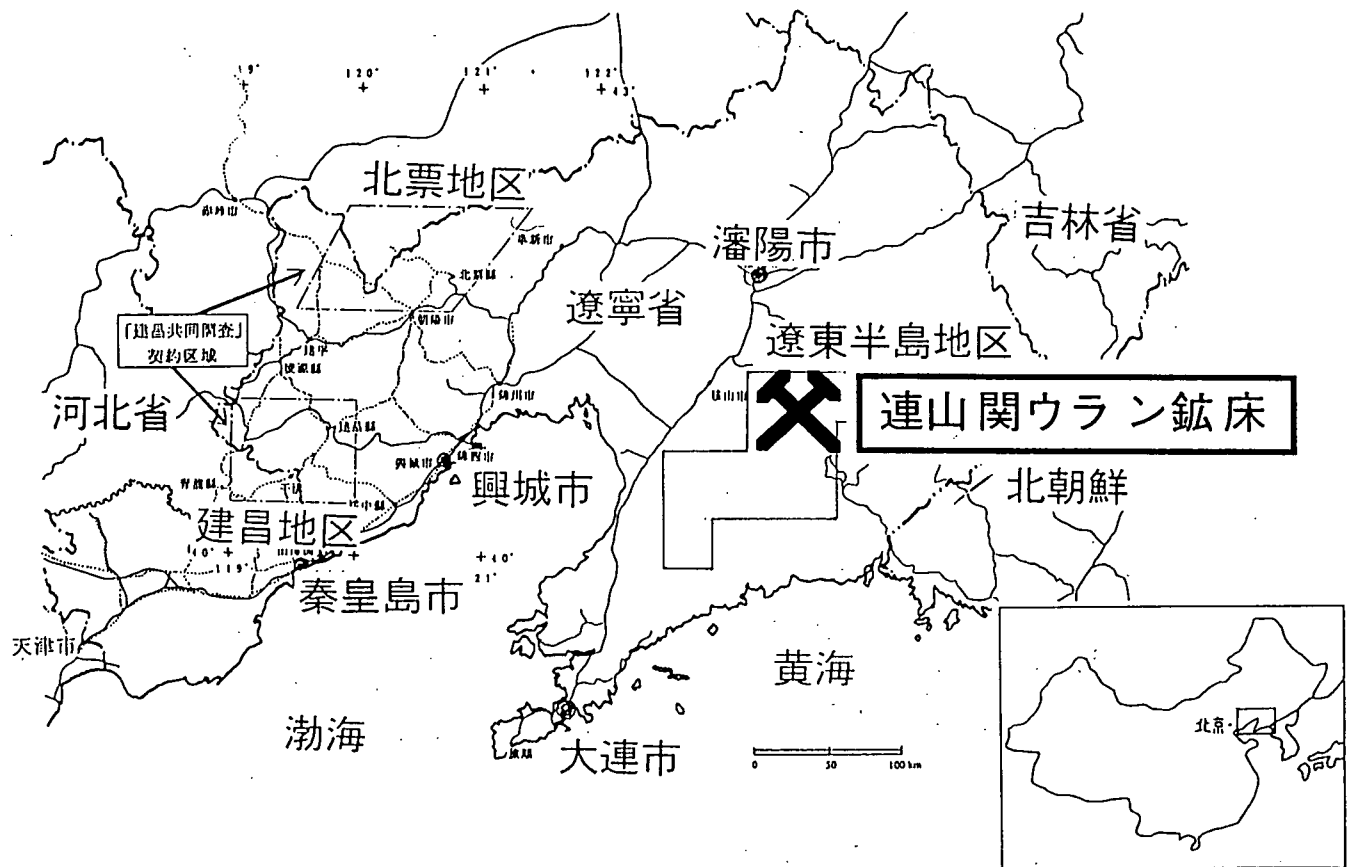
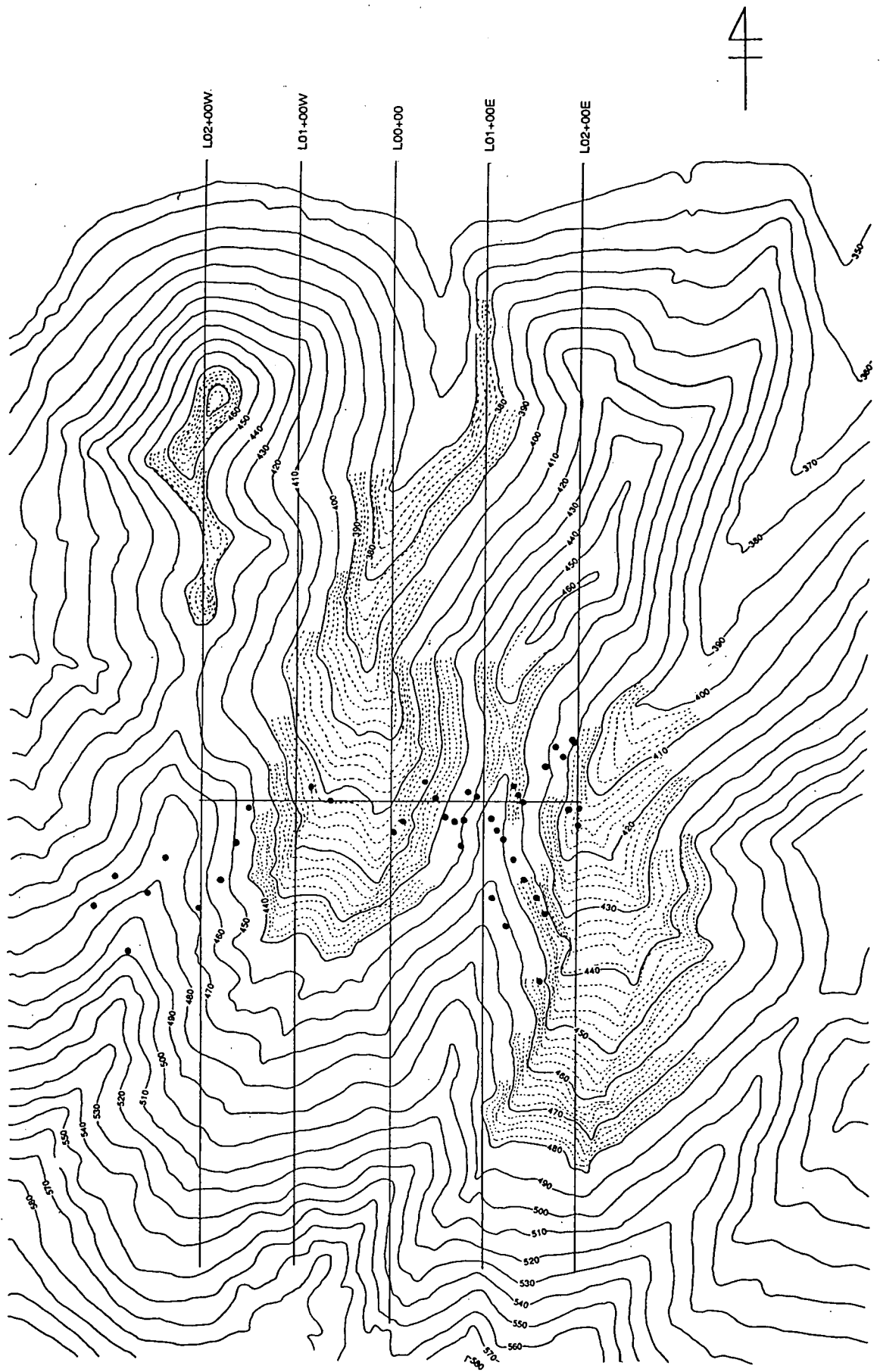


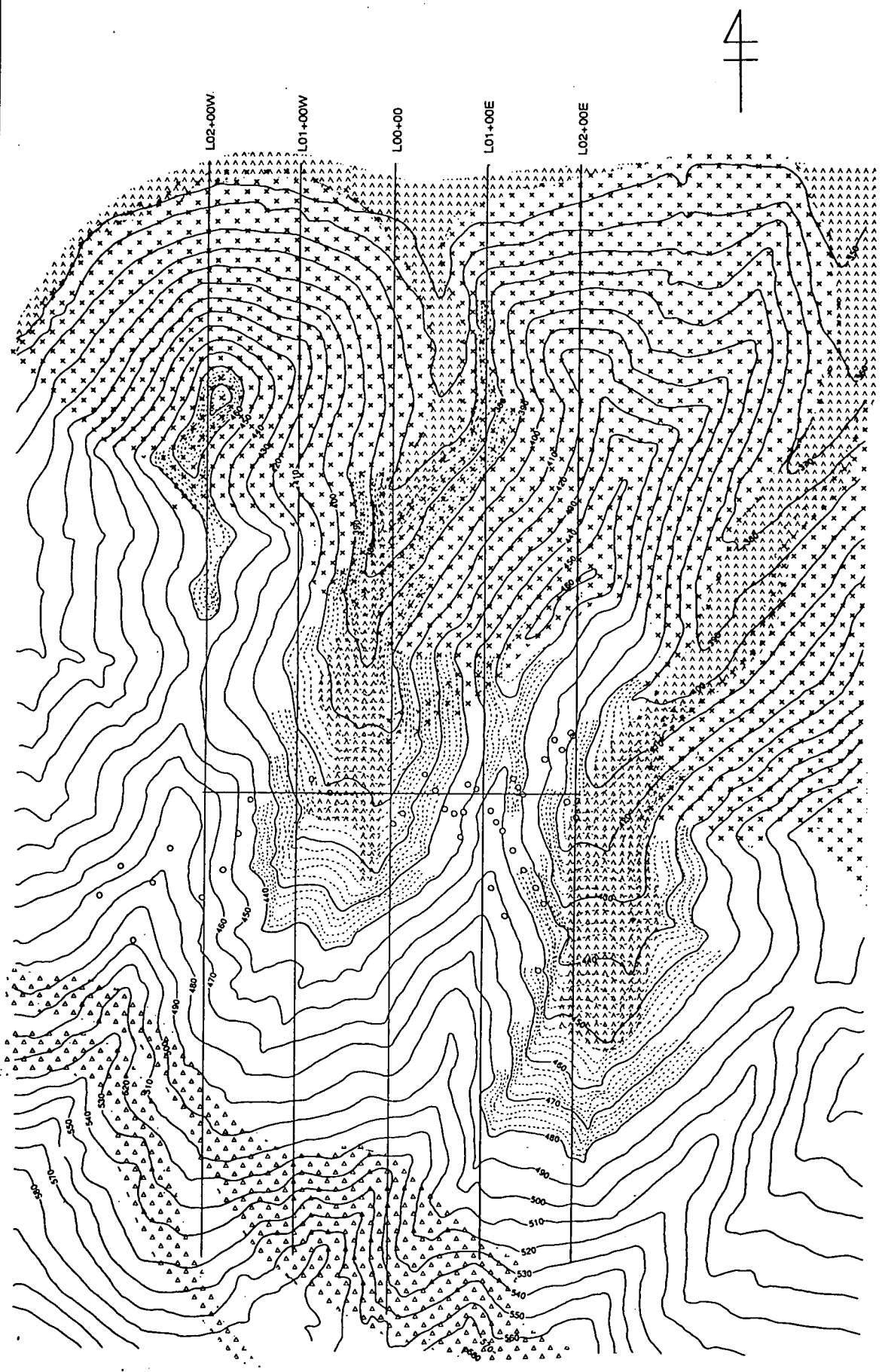
図1 連山関ウラン鉱床位置図







0 100 m


動燃事業団中部事業所 連山関ウラン鉱床付近 地形図

図2 連山関ウラン鉱床付近の地形図



-  ミグマタイト
-  斑レイ岩
-  石英片岩
-  未固結堆積物

0 100 m



動燃事業団中部事業所
連山関ウラン鉱床付近
地形図

図3 連山関ウラン鉱床付近の地質図

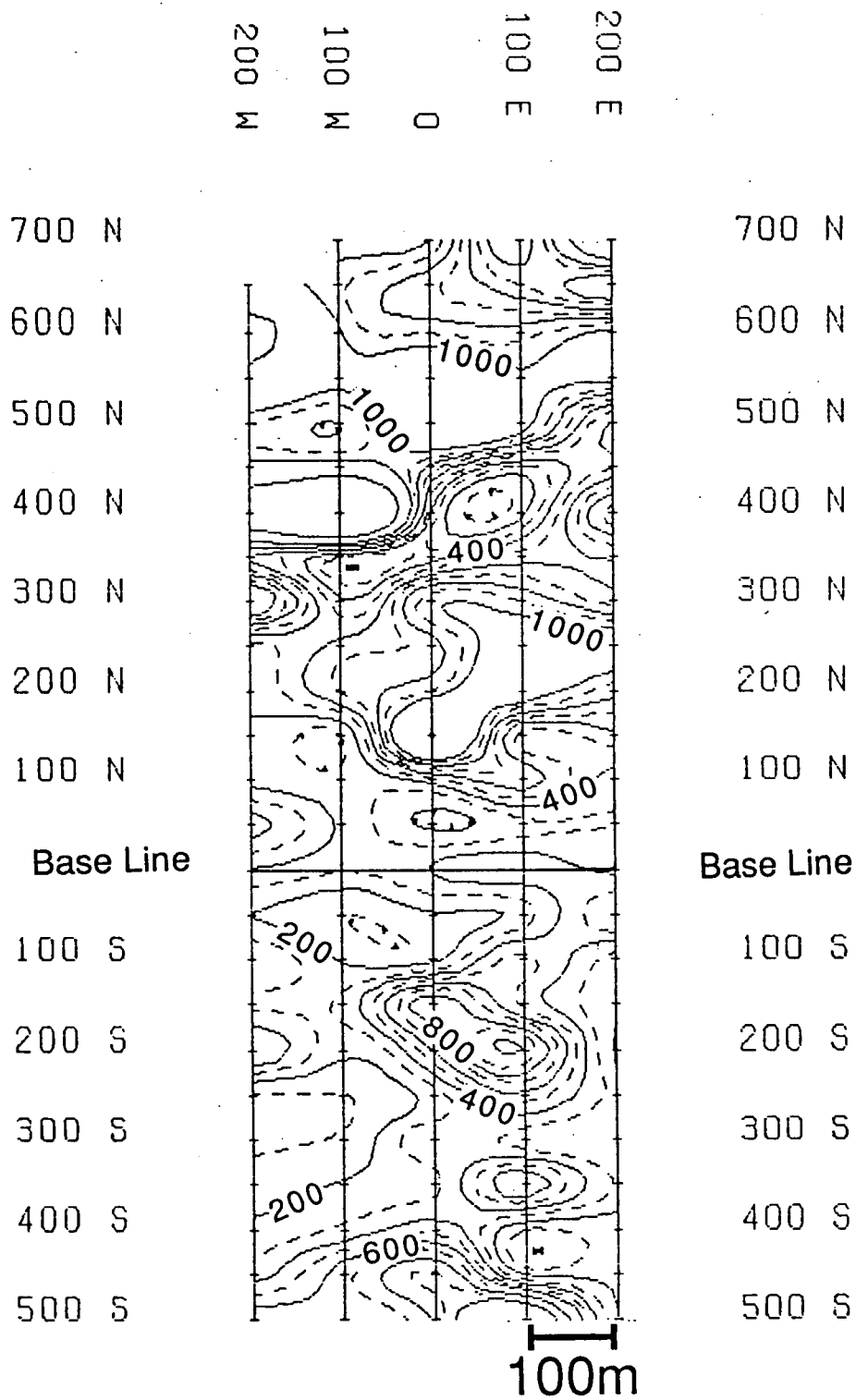
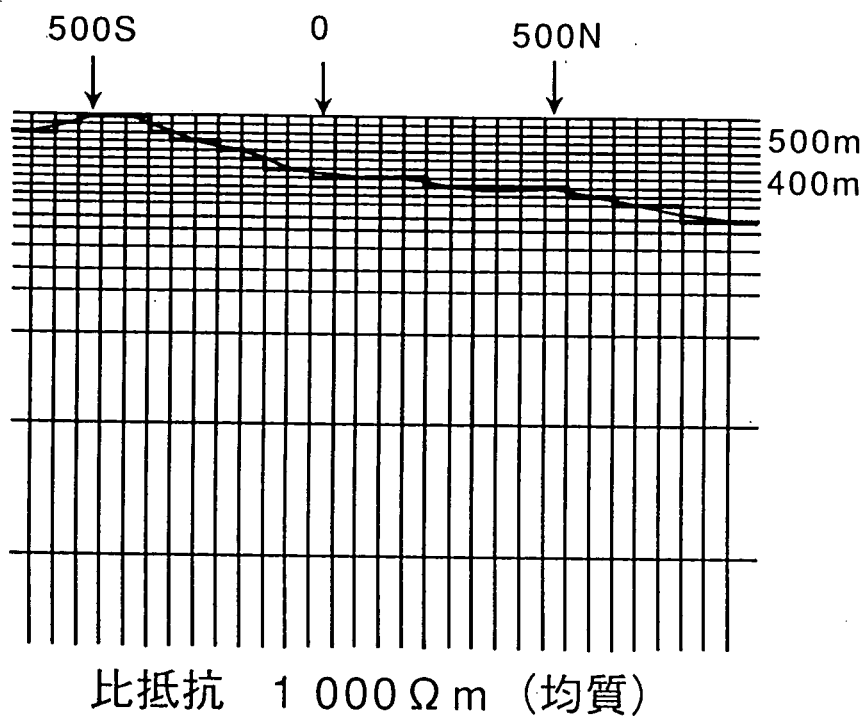
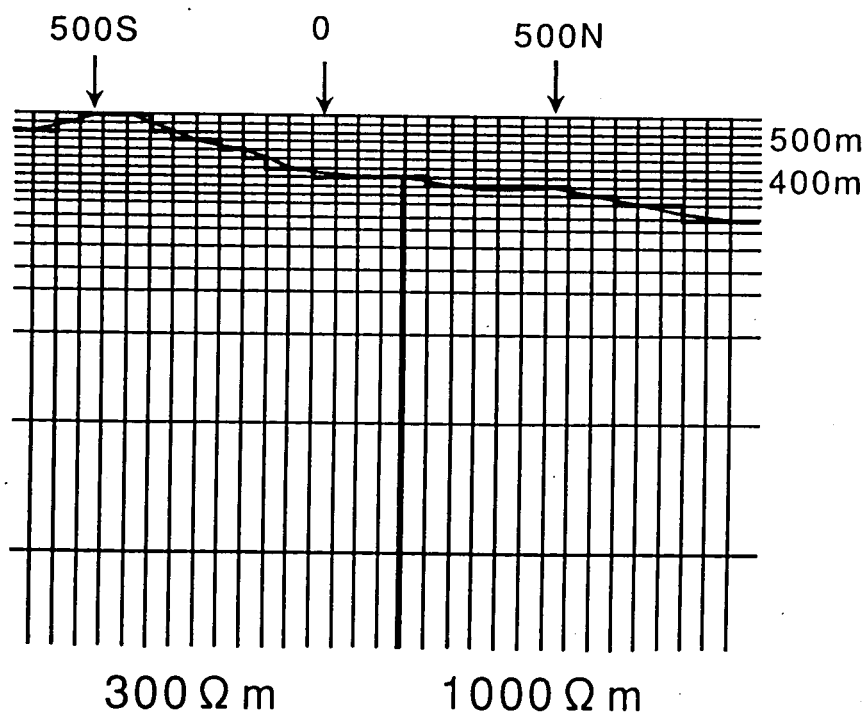


図4 VLF-比抵抗法テスト調査で得られた見掛比抵抗コンター図

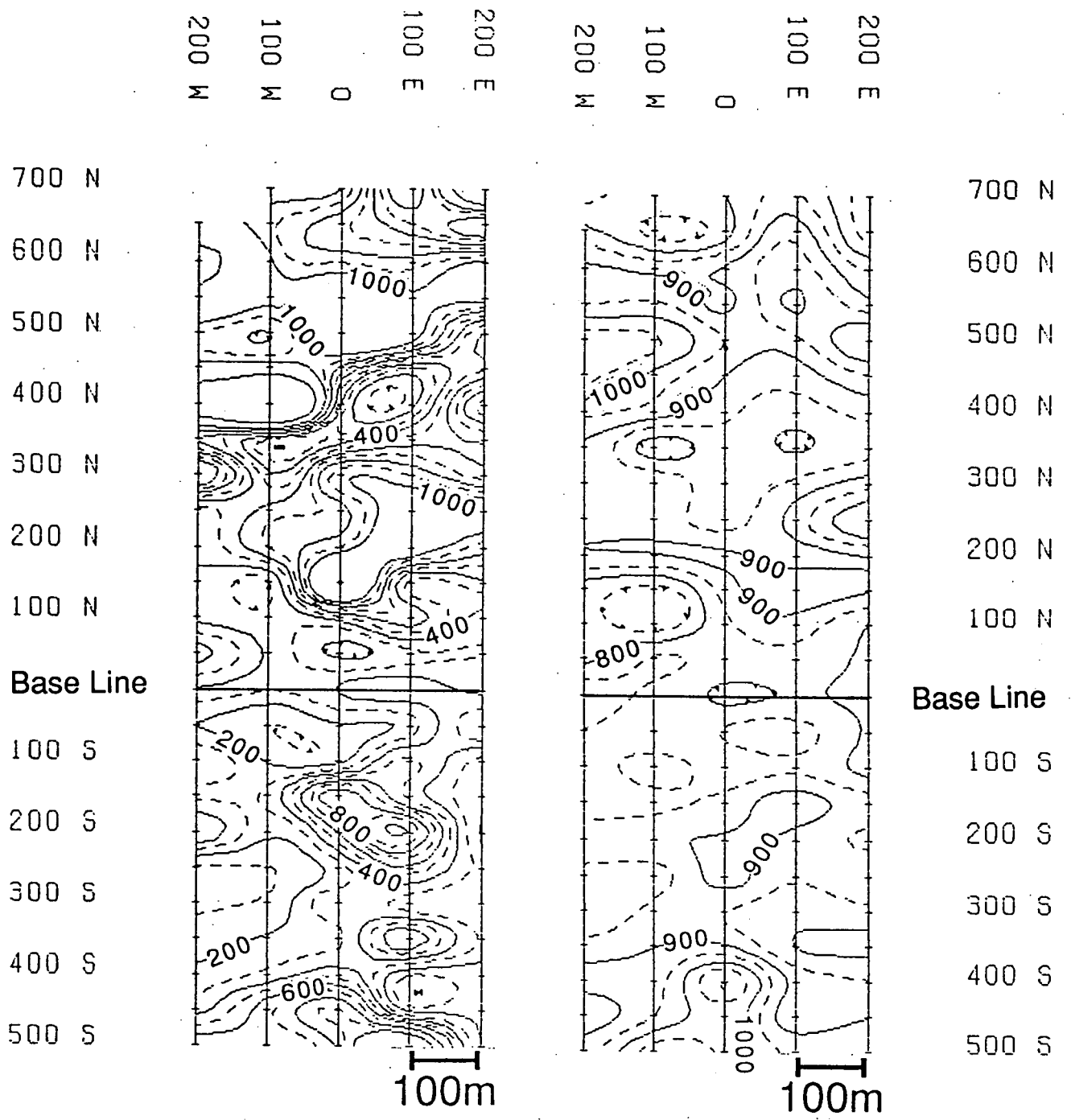


(a) 地形モデル 1



(b) 地形モデル 2

図 5 測線 0 の地形モデル

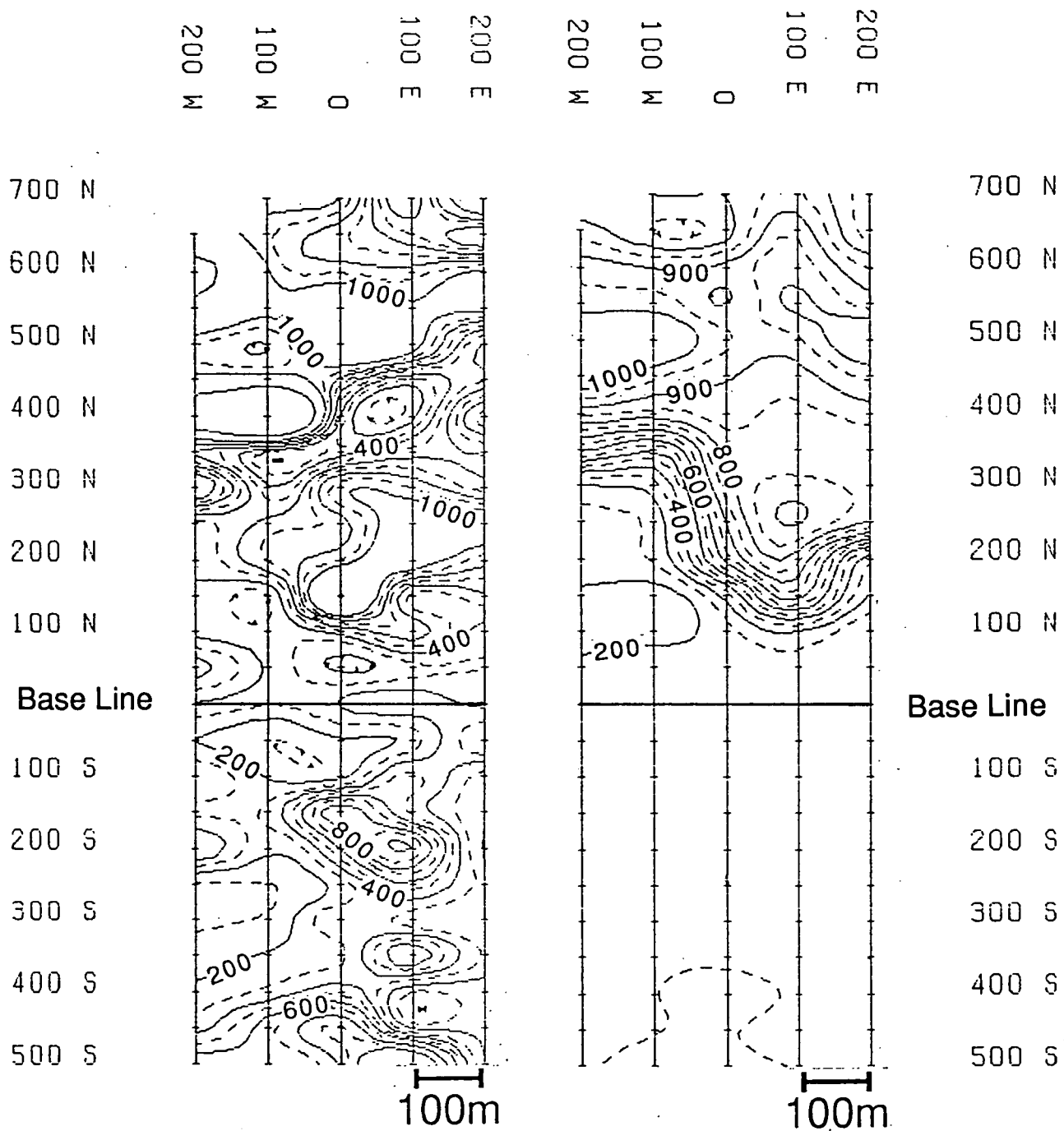


テスト調査結果

モデリング結果 (地形モデル1)

VLF-比抵抗法見掛比抵抗コンター図 (Ωm)

図6 テスト調査結果とモデリング結果の比較

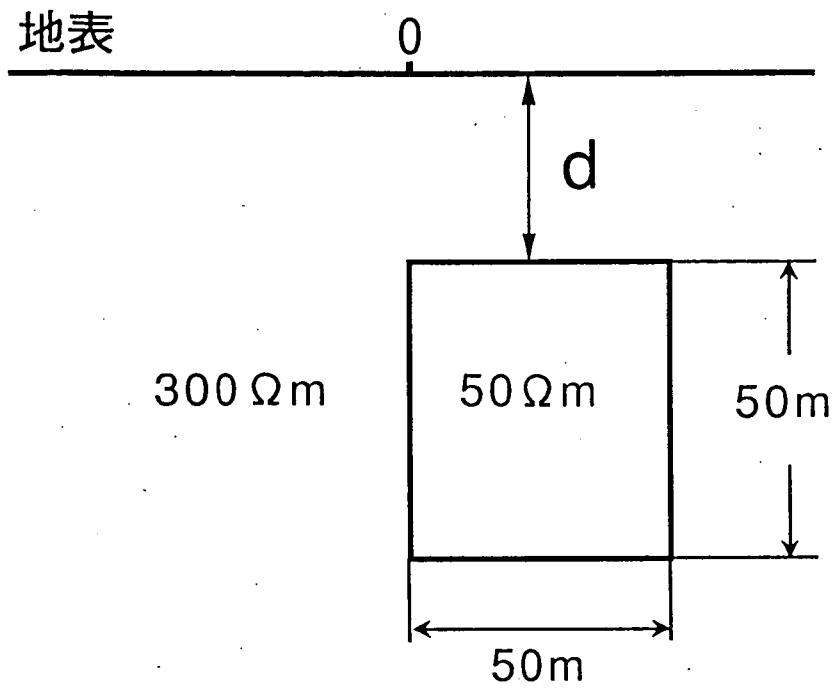


テスト調査結果

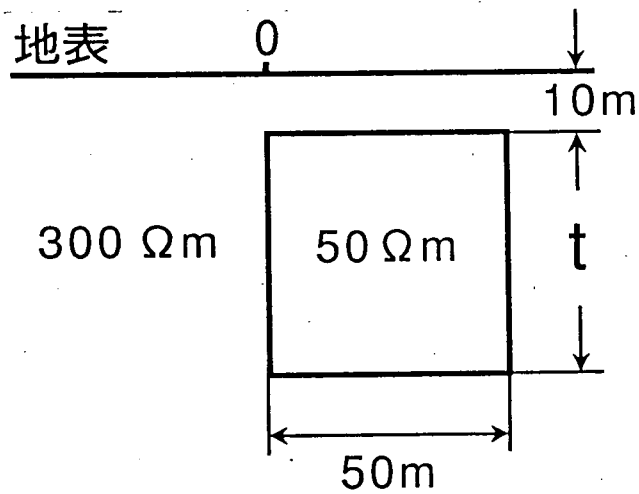
モデリング結果 (地形モデル2)

VLF-比抵抗法見掛比抵抗コンター図 (Ωm)

図7 テスト調査結果とモデリング結果の比較



(a) 低比抵抗体モデル 1



(b) 低比抵抗体モデル 2

図 8 モデリングに用いた低比抵抗体モデル

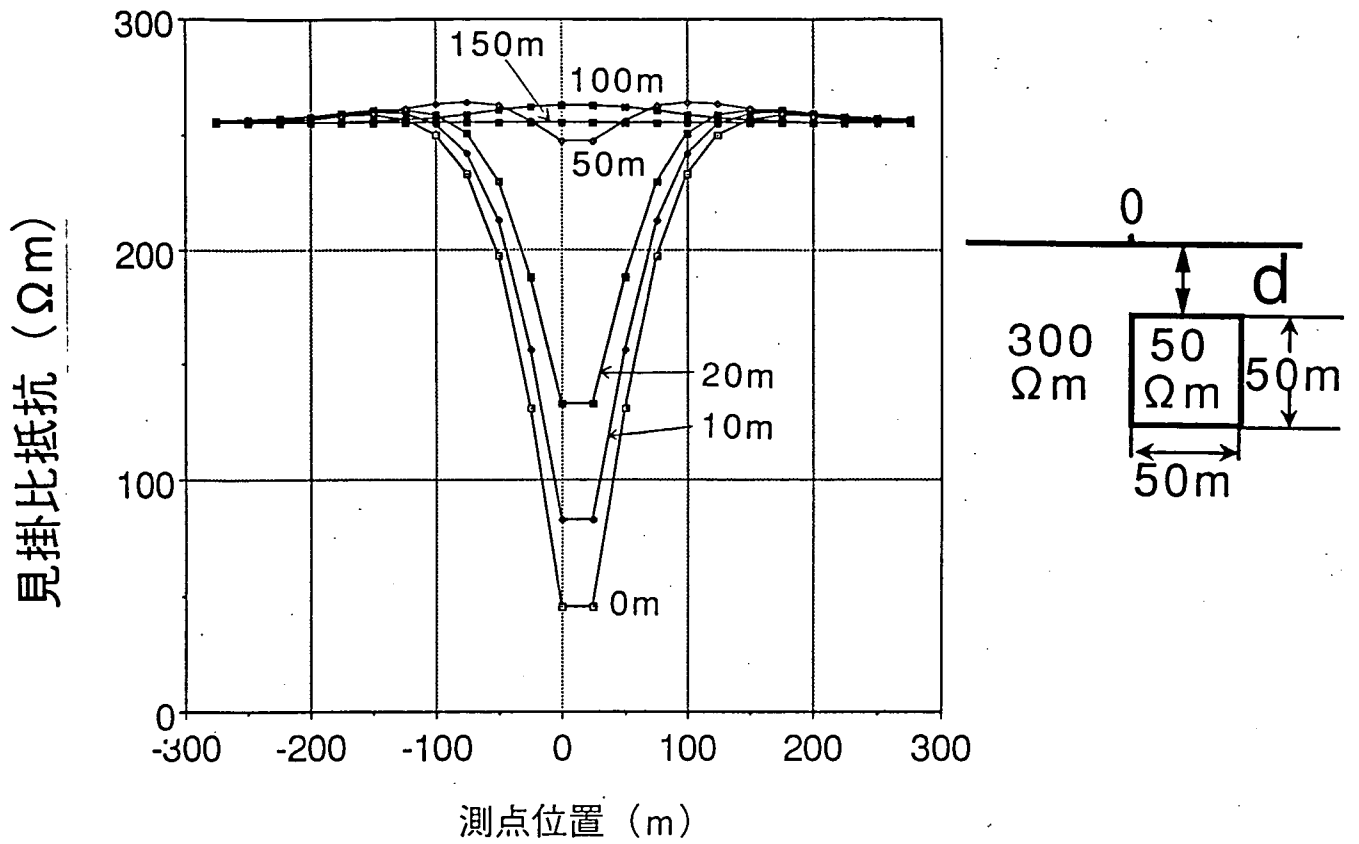


図9 低比抵抗体の深度による見掛比抵抗曲線の変化

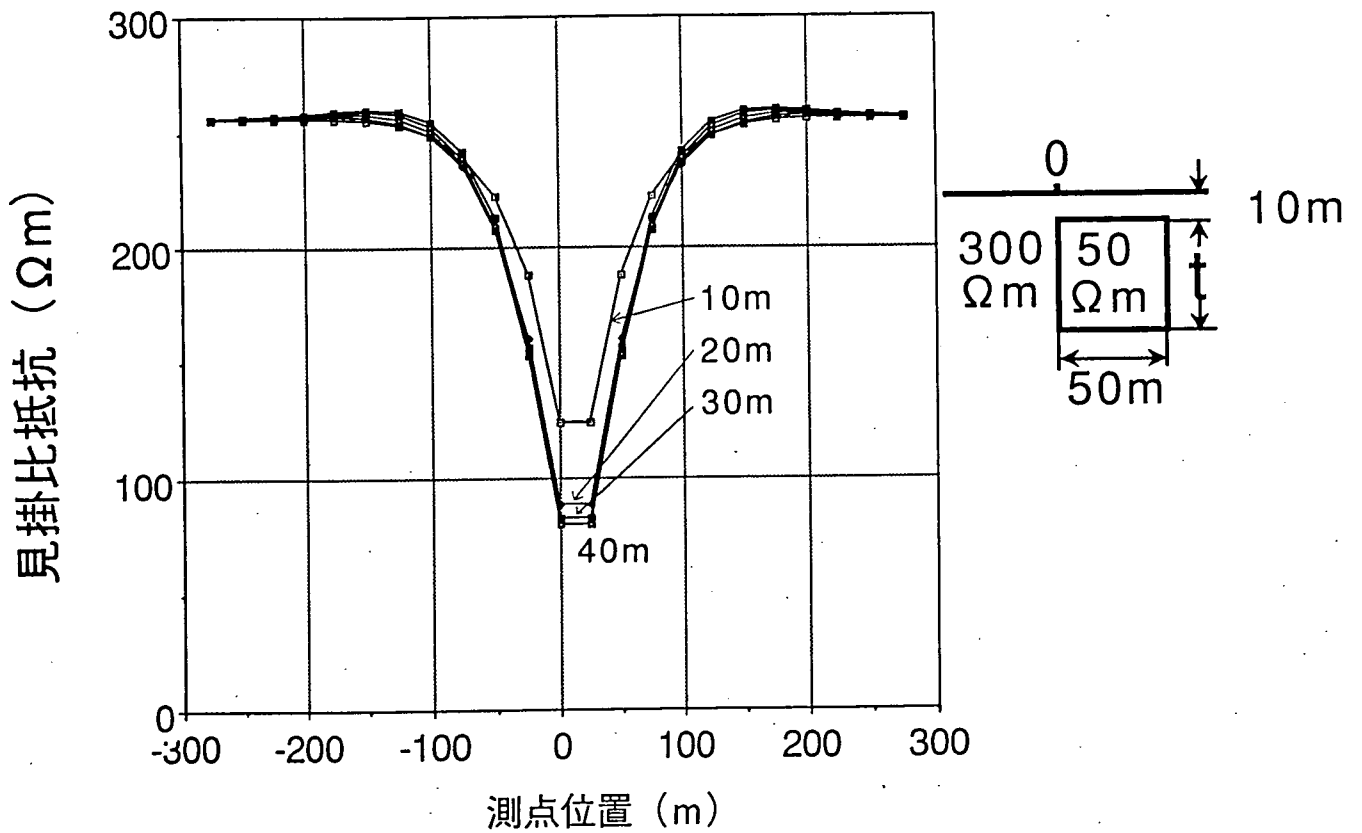


図10 低比抵抗体の厚さによる見掛比抵抗曲線の変化

A - 9 TDEM 2D出力部の機能強化
(長谷川)

1. はじめに

技術開発課では「ウラン資源探鉱開発に係わる研究開発5ヶ年計画」に基づき、各種物理探査法のシミュレーション手法の開発を行っている。TDEM2Dは時間領域電磁法固定ループ法¹⁾の2次元シミュレーションプログラムであり、そのシミュレーション業務をさらに効率的に進めるために出力部の機能強化を行った。

2. 出力部の機能強化の必要性

TDEM2Dは時間領域電磁法固定ループ法の2次元シミュレーションプログラムである。このプログラムは、カナダ・アサバスカ地域のグラファイトコンダクターの電磁応答のシミュレーションに用いられ、同地域の不整合関連型ウラン鉱床の探査上必要な多くの知見を提供してきた。さらに、オーストラリアで時間領域電磁法固定ループ法を適用する際には、低比抵抗表土層の影響のシミュレーションに使用され、その適用性の評価に必要な多くのデータを提供した²⁾。今後は、オーストラリアの不整合関連型ウラン鉱床の電磁応答のシミュレーション等に利用する計画である。

TDEM2Dは本来は大型計算機用に開発されたプログラムであり、中部事業所のワークステーションで実行可能であるが、このプログラムはシミュレーション結果を数値ファイルとして出力するだけで、その結果をグラフ表示する機能は持っていない。それで、今までは出力ファイルをパーソナルコンピュータ（東芝J-3100）に転送し、BASICで書かれたデータ表示プログラムを用いて結果を画面表示させ、そのハードコピーをプリンターに出力していた。従って、データの表示に労力を要するという問題点と出力結果がパソコン画面のハードコピーであるため質が悪いという問題点があった。

3. データ表示部の機能

データ表示プログラムはワークステーション上で実行可能であり、TDEM2Dの出力ファイルを直接読み込み、その結果を画面に図形表示できる。さらに、画面に表示された結果をXYプロットに出力することができる。図1は出力結果の一例である。

データの処理に必要なコマンドはメニュー形式で選択できるように設計されているため、使用マニュアルが無くても簡単に使用できる。データ処理の流れを図2に示す。

4. まとめ

TDEM2Dのシミュレーション結果を図形出力させるためのプログラムを作成した。このプログラムを用いれば、シミュレーション結果の表示が非常に効率よく行え、シミュ

レーション作業全体の効率化が期待できるものと思われる。

参考文献

- 1) カナダ、サスカチュワン州、アサバスカベースンのウラン鉱床探査—クリスティーレイク地区の探査活動をケーススタディーとして—(1989)；黒沼長助，長谷川健，鉱山地質，39巻2号，P.95-P.106
- 2) モデリング解析を用いた、電磁探査法への低比抵抗表土層の影響評価(1991)；長谷川健，PNC PN 7440 91-002

TDEM2D *** m102c1.out ch 6 - ch 10 ***

Memo : output test of TDEM2D

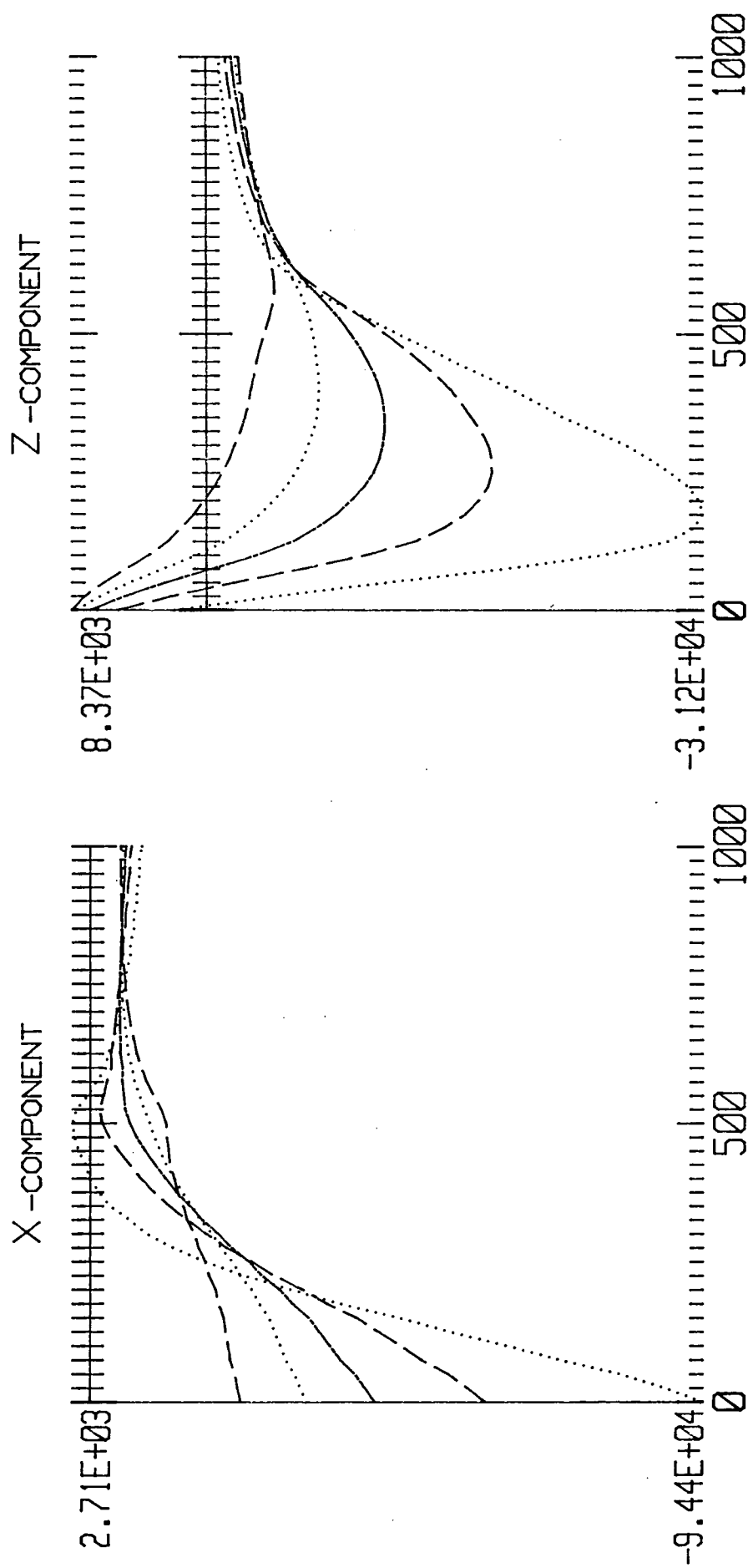


図1 出力結果例

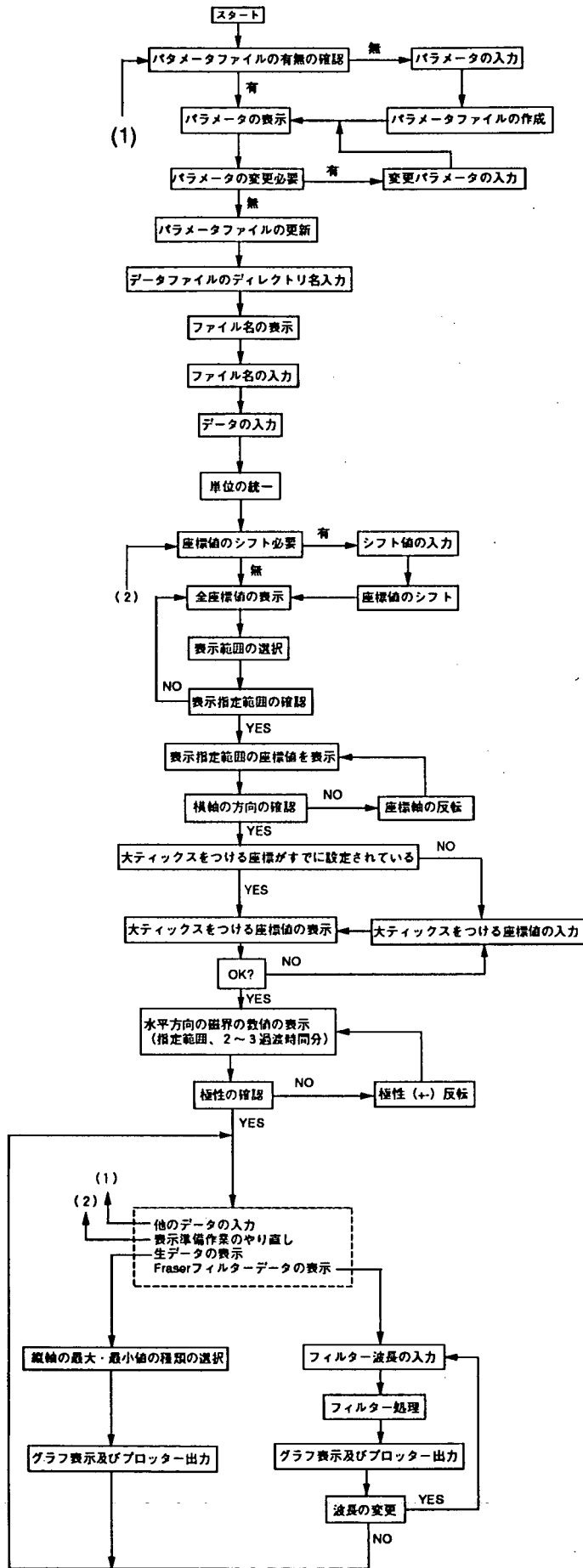


図2 データ処理の流れ

A - 10 周波数領域空中電磁法シュミレーションプログラムの作成

(長谷川)

1. はじめに

技術開発課では「ウラン資源探鉱開発に係わる研究開発5ヶ年計画」に基づき、各種物理探査法のシミュレーション手法の開発を行っている。その一環として、平成3年度、周波数領域空中電磁法のシミュレーションプログラムを作成した。本プログラムの詳細については、報告書「周波数領域空中電磁法シミュレーションプログラムの作成」(PNC ZJ 7303 92-001)に述べられている。

2. 周波数領域空中電磁法シミュレーションプログラムの必要性

周波数領域空中電磁法は、航空機(通常ヘリコプター)を用いて土地の電気比抵抗のマッピングを行う手法である。この手法は、カナダ北西準州のシーロン盆地周辺でのウラン鉱床探査において、鉱床の周囲に発達する熱水変質に伴う低比抵抗帯の抽出手法として用いられ、めざましい成果をあげている¹⁾。ただし、この地域で周波数領域空中電磁法が成果をあげられた理由の一つに同地域の比抵抗構造の特殊性があり、同手法が他地域で同等の成果をあげられるかどうかは不明である。

他の地域において、周波数領域空中電磁法が適用できるかどうかは、その地域の比抵抗構造に大きくかかわってくる。特に、地表付近に比抵抗の低い層が存在すると、この層が地下深部の電磁応答を覆いかくしてしまう可能性が高い。ウラン鉱床からの電磁応答や低比抵抗表土層の電磁応答のような地質ノイズをシミュレーションできるプログラムがあれば、このような地域での周波数領域空中電磁法の適用性の評価を調査に先だてて実施することができ、物理探査フローの立案に大いに寄与できることになる。

3. プログラムの概要

平成3年度に作成したプログラムは、水平多層構造モデルの電磁応答をシミュレーションできるプログラムである。水平多層構造の各層の比抵抗・層厚や使用する周波数・飛行高度は自由に設定できるようになっている。シミュレーション結果は数値ファイルの形で出力される。数値ファイルには、各周波数における磁界の同相成分、離相成分および見掛比抵抗の値が出力される。出力結果の1例を図1に示す。

このプログラムの完成により、低比抵抗表土層の電磁応答の絶対値が計算できるようになった。

4. 今後の課題

現在のプログラムでは、2次元構造や3次元構造の電磁応答のシミュレーションができ

ず、例えば低比抵抗表土層の下に塊状の低比抵抗体が存在するような場合の電磁応答のシミュレーションができない。よって、2次元構造や3次元構造の電磁応答のシミュレーションが可能なプログラムの開発を行う必要がある。

参考文献

- 1) Geophysical Exploration for Unconformity-Related Uranium Deposits in the Northeastern Part of the Thelon Basin, Northwest Territories, Canada (1990); K.Hasegawa, G.I.Davidson, P.Wollenberg and Y.Iida, Mining Geology, 40(2), p.83-p.95

PROGRAM DIGRES1D
=====

DIGRES1D Model Data

Number of frequencies/coil pairs :

1

Coil orientation code and frequency

1 56000.0

Coil Tx-Rx separation and height of coil pair above ground :

8.0 30.0

Station : 500.0

Model Layers	Resistivity	Thickness
Layer 1	100.0	20.0
Layer 2	1000.0	30.0
Layer 3	10.0	50.0
Layer 4	1000.0	

Frequency	Orientation	In-Phase	Quadrature	Resistivity	App.Depth	Cen.Depth
56000.0	CP	322.0	287.9	122.8	-1.7	11.6

図1 出力ファイルの一例 (一部)

A - 11 I R E S S の 開 発

(仙 波)

1. はじめに

近年資源開発分野において、探査プロジェクトの評価を行うエキスパートシステムの開発が試みられている¹⁾。

動燃事業団では、探査を行う専門家の研究や調査を幅広く支援することを目的として、昭和58年度からウラン資源エキスパートシステムの開発に取り組み、PROSPECTOR²⁾を手本とした有望度評価エキスパートシステム“プロスペクター”の開発を行い、昭和62年度にはプロスペクター開発のために作成した開発ツールを汎用評価エキスパートシェル“コギト”を発売した³⁾。

昭和63年度からは、専門家がウラン鉱床探査に関する研究を行う上で必要な推論機能を持つほか、鉱床成因に関する知識や探査手法に関する知識などの専門的知識、ウラン鉱床や地球化学に関するデータベース、さらに数学的処理を行う演算機能と表示機能などを実現するツール群からなるウラン資源探査における知的支援環境「IRESS (Intelligent Research Environment and Support System)」の開発を開始し³⁾、IRESSの基礎的検討を実施した。

平成元年度は、昭和63年度の検討結果をもとにIRESSの一機能として、米国地質調査所のMcCammon等が提案した「Data-directed Numerical Method (以下、DdMとする)」⁴⁾に基づくウラン資源探査有望度評価システムの開発を行った。このシステムを用いれば、地質学的事実や探査データを直接多変量解析的に処理し、資源量を見積もることができる。使用するコンピュータはユーザインターフェイスが比較的容易に利用でき、コンピュータに関する深い知識の無い評価者でも容易に操作できるという理由からマッキントッシュが選ばれた。

平成2年度には、「DdM」に基づくウラン資源探査有望度評価システムを完成させ、これをMicro-DdM (Microcomputer-based System for the Estimation of Uranium Endowment Using a Data-directed Numerical Method) とよぶこととした。また、オーストラリア北部準州アーネムランド地域のデータを用いてシステムの実証試験を行った。このとき使用した探査データファイル (Micro-DdMの入力データ) は、幾つかのユーティリティープログラムと市販アプリケーションを用いて一時的な作業として作成したものであり、探査データファイルの作成作業環境を整備する必要性が生じた。また、図幅から読み取った標本データが探査指標として有効か否かを客観的に判断するために χ 二乗検定を用いたが、これについても一時的に手作業で行ったものであり、Micro-DdMに組み込む必要性が生じた。

平成3年度は、探査データファイル作成機能と χ 二乗検定機能をMicro-DdMに組み込み、またオーストラリア・キングリバー地域を対象としたMicro-DdMの適用試験を実施した。

本稿では、昭和63年度から平成3年度までのIRESSの開発に関する成果についてま

とめた。

2. 実施内容および成果

2. 1 昭和63年度⁵⁾

- (1) 知識構造のコア・システム（核部分）の検討
- (2) 対象領域知識のインプリメント手法の検討
- (3) 知識入力インタフェースのプロトタイプ of 検討
- (4) 地化学現象の時間順序決定を目的とするルールベース・システムの検討

IRESSを構築する基盤となるコア・システムとそのうえでの要素機能の検討として以上の4点について行った。

ここで検討されたIRESSの演繹推論機能は、DdMに基づくウラン資源探査有望度評価を行う場合に重要となる、探査指標候補を選定する部分に適用するように図られた。

成果物

- ・成果報告書 PNC SJ7559 89-002
- ・その他関連作成資料 PNC SJ7559 89-002 Vol-2

2. 2 平成元年度⁶⁾

- (1) 「DdM」に基づくウラン資源探査有望度評価システム（有望度評価まで）の開発前半部（有望度評価まで）をシステム化した。このシステムは、評価者が容易に操作することができ、しかも試行錯誤を繰り返すことができるようにされている。

- (2) 「DdM」の拡張に関する調査

Finch等⁷⁾の Genetic-Geological Model（成因モデル）に基づく資源評価手法に関する検討等を行う。

調査の結果、以下の知見を得た。

- (2-1) Genetic-geological Modelは鉱床の存在が明かな地域で鉱床形成過程を明かにすることには有効であるが、資源の有望度を評価することには有効でない。
 - (2-2) DdMは客観的に解析を行えるが、多量のデータを取り込むことができるため解析結果の解釈が曖昧になる。
 - (2-3) Genetic-geological Modelでの鉱床形成に関する過程に対して重みを経験的に決定していく方法論の開発が必要。
- (3) 「DdM」の拡張に必要な基礎的鉱床成因に関する知識の調査

特にグラントツ砂岩型鉱床に関連した鉱床探査におけるウランの地球化学と鉱物学に関する調査を行う。

調査の結果、グラントツ地域のトレンドタイプの鉱化作用については、地質学的・地球化学的必要条件に加えて、温度・pH・塩濃度などの化学的条件を把握することが必要であることがわかった。

成果物

- ・成果報告書 PNC SJ7359 90-001 Vol-1
- ・システム設計書 PNC SJ7359 90-001 Vol-2
- ・ユーザーズマニュアル PNC SJ7359 90-001 Vol-3
- ・プログラム設計書 PNC SJ7359 90-001 Vol-4
- ・打ち合わせ議事録 PNC SJ7359 90-001 Vol-5
- ・その他関連資料 PNC SJ7359 90-001 Vol-6

2. 3 平成2年度⁹⁾

- (1) 「DdM」に基づくウラン資源探査有望度評価システムの開発（継続）
同システム（資源量評価まで）を完成させた。
- (2) オーストラリア北部準州アリゲータ・リバー地域における鉱床文献調査
アリゲータ・リバー地域の地質・地史およびウラン鉱床に関連した鉱床探査における地球化学と鉱物学に関する調査を行い、その結果以下の知見を得た。
(2-1) 鉱床域の層状炭酸塩は海水起源であり、石英脈生成に関与した熱水溶液は天水起源と示唆された。
(2-2) 熱水変質が本質的に閉鎖系内でおきたことが示唆された。
(2-3) アリゲータ・リバー地域における鉱液の起源を解明するためにはカナダ・アサバスカ地域におけるBray等の研究⁹⁾と同種の研究が必要である。
- (3) オーストラリア北部準州アーネムランド地域のデータを用いた「DdM」に基づくウラン資源探査有望度評価システムの実証試験
試験結果については3章で述べる。

成果物

- ・成果報告書 PNC SJ7359 90-002 Vol-1
- ・システム設計書 PNC SJ7359 90-002 Vol-2
- ・ユーザーズマニュアル PNC SJ7359 90-002 Vol-3
- ・プログラム設計書 PNC SJ7359 90-002 Vol-4
- ・打ち合わせ議事録 PNC SJ7359 90-002 Vol-5

2. 4 平成3年度¹⁰⁾

- (1) χ 二乗検定機能の付加
各種図幅から読み取った標本データが探査指標として有効か否かを客観的に判断するための機能をMicro-DdMに付加した。この作業はマッキントッシュ上で（株）アスキー製Wingzを用いて行う。
- (2) 探査データファイル作成機能の付加
探査データファイルを効率的に作成できる機能をMicro-DdMに付加した。この作業はマッキントッシュ上で（株）アスキー製Wingzを用いて行う。
- (3) アフリカ・フランスビルおよびカッパーベルト地域を対象とした鉱床文献調査
今後、Micro-DdMを用いて適用試験を行うと考えられるフランスビルおよびカッ

パーベルト地域の地質・地史、構造規制および岩層変化についてまとめた。その結果以下の知見を得た。

(3-1) フランスビル地域

- ・ 鉱体は、デルタ成のF A累層砂岩層に発達。
- ・ ウラン鉱床には一般的に酸化的瀝青物質を伴い、これらはウラン鉱石沈澱の重要な還元剤の役割をはたしている。
- ・ ウラン鉱床探査を行う場合、比較的単純なベーズン分析が中心となる。

(3-2) カッパーベルト地域

- ・ 鉱床はすべてLufilian弧内に分布し、特にOre Share とよばれる泥質シルト岩、珪質炭酸塩岩中に胚胎し、堆積盆周辺部で基盤岩と接する位置に集中する。
- ・ 鉱床は断裂帯やドーム状褶曲等の構造規制を受け、高品位鉱床はLufilian造山運動の変成・変形作用による再移動により生成されたと推定される。
- ・ ウラン鉱床探査を行う場合、Lufilian弧内の構造地質学的手法が重要となると考えられる。

(4) オーストラリア・キングリバー地域を対象としたMicro-DdMの適用試験 試験結果については3章で述べる。

成果物

- | | |
|-------------------------------|-------------------------|
| ・ 成果報告書 | PNC ZJ7359 91-002 Vol-1 |
| ・ システム設計書、プログラム設計書、ユーザーズマニュアル | PNC ZJ7359 91-002 Vol-2 |
| ・ 打ち合わせ議事録 | PNC ZJ7359 91-002 Vol-3 |

3. 試験結果

3. 1 平成2年度、オーストラリア北部準州アーネムランド地域のデータを用いた「DdM」に基づくウラン資源探査有望度評価システムの実証試験⁹⁾

対象領域は

東経132° 30' ~134° 00'

南緯 11° 30' ~ 13° 00'

とし、経度・緯度とも120分割した。

セル数は120×120である。

鉱床生成に関する規制要因と考えられる以下の標本データは、主として市販の広域地質図から読み取った。

- a. 母岩候補
- b. ウラン供給源
- c. ウラン供給源からの距離
- d. 断層密度

- e. リニアメント密度
- f. ジョイント密度
- g. 特定方位の断層の存否
 - g-1 N系
 - g-2 NW系
 - g-3 NE系
 - g-4 E系
- h. ドレライト分布
- i. ドレライトからの距離
- j. 否定的な層
- k. マグネの傾斜

以上の中から既知の鉱床・鉱床有望地（モデルセル）と明瞭な相関が認められる以下の4つの探査指標と否定的な層の合計5つの探査指標を特徴変数とし、Nanambu複合岩体中の鉱床（以下Nanambu系とする）とMyra falls変成岩体およびNimbuwah複合岩体中の鉱床（以下Myra falls系とする）の2通りについてウラン資源探査有望度評価を行った。

- a. 母岩候補
- b. 断層密度
- c. ウラン供給源からの距離
- d. ドレライトからの距離

(3-1) Nanambu系

三値化フィルターは表3-1に示すものを「1」とした。

表3-1 三値化フィルターの設定 (Nanambu系)

ウラン供給源からの距離	1 km以上、4 km以下
断層密度	1以上
ドレライトからの距離	0 km以上、4 km以下
否定的な層	Phn, Phk2b, Phg, Phk2, Pha1, Pha2, Bwb, Bwr, Bwm, Apn
母岩候補	Pkb, Psk, Po, Pc2, Pc, Pclc, Pclb, Pcl1a, Pcl1

重みベクトルを計算した結果、ウラン供給源からの距離の制約が最も大きく有望地域は帯状の分布を呈した。

有望地域は、有望度の高い順に以下の通りである。

- ・ East Alligator River河口付近およびNabarlekの南のCahill累層の存在する領域
- ・ Oenpelli 付近

(3-2) Myra falls系

三値化フィルターは表3-2に示すものを「1」とした。

表3-2 三値化フィルターの設定 (Myra falls系)

ウラン供給源からの距離	1 km以上、4 km以下
断層密度	1 以上
ドレライトからの距離	0 km以上、4 km以下
否定的な層	Phn, Phk2b, Phg, Phk2, Pha1, Pha2, Ewb, Ewr, Ewm, Apn
母岩候補	Pxg, Pxnt, Pxng, Pxn, Pxm, PxnM, PXm2, PXm1 Pkb, Psk, Po, Pc2, Pc, Pclc, Pclb, Pcl1a, Pcl1

重みベクトルを計算した結果、断層密度の制約が最も大きく、有望地域はかなり狭い範囲となった。

有望地域は、有望度の高い順に以下の通りである。

- ・ 東経133° 20'、南緯12° 付近の断層に沿う領域。
- ・ Goomadeer 南東

3. 4 平成3年度、オーストラリア・キングリバー地域を対象としたMicro-DdMの適用試験¹⁰⁾

対象領域は、

東経133° 00' ~133° 45'

南緯 11° 30' ~ 12° 45'

とし、経度・緯度とも120分割した。

セル数は120×120である。

鉱床生成に関する規制要因と考えられる以下の標本データは、

10万分の1基盤地質図

10万分の1 表層地質図

10万分の1 構造地質図

から以下について読み取った。

- a. 母岩候補
- b. ウラン供給源
- c. ウラン供給源からの距離
- d. 断層密度
- e. 特定方位の断層の存否
 - e-2 NW系
 - e-3 NE系
- f. ドレライト分布
- g. ドレライトからの距離
- h. 否定的な層

Micro-DdMは、鉱床・鉱床有望値（モデルセル）が無い場合には探査指標の重みの計算が不可能なため、有望度を計算することができない。また、モデルセルが存在しても、資源が発見されていなければ資源量を推定することができない。平成3年度も適用試験領域には既存鉱床は無く、鉱徴地点が1点存在するのみであったため、平成2年度の試験領域内の鉱床・鉱徴点のデータをモデルセルとして加え、ウラン資源探査有望度評価を実施した。なお評価は、①鉱床と主要鉱徴点15セル、鉱床と全鉱徴点59セルの2ケースについて行った。

三値化フィルターは表3-3に示すものを「1」とした。

表3-3 三値化フィルターの設定

断層密度	1以上
ドレライトからの距離	3 km以下
否定的な層	花崗片麻岩が存在する 厚い堆積層が存在する
母岩候補	Pc1, Pc1a, Pc1b, Pc1c, Pc, Pc2, Pxm2, Pxm

重みベクトルを計算した結果、断層密度とドレライトからの距離の制約が大きく、有望地域の範囲を決定する要因となった。

4. まとめ

昭和63年度から平成3年度までの4ヶ年で以下の成果を得た。

- (1) マッキントッシュ上で操作可能な「DdM」に基づくウラン資源探査有望度評価システム (Micro-DdM) を開発し、ウラン資源探査の有望度を客観的に評価することができ、また有望地点が一目でわかるようになった。
- (2) χ 二乗検定の機能により、さらに客観的な評価が可能となった。
- (3) 探査データファイル作成機能を組み込むことにより、有望度評価を効率的に行うことが可能となった。

Micro-DdMを用いれば、誰にでも容易に有望度評価を行うことが可能であるが、三値化フィルターの設定およびしきい値の設定時には地質専門家の知識が必要不可欠であり、今後もMicro-DdMによる有望度評価を行う際には、地質専門家の協力が必要不可欠である。

以上本稿では、昭和63年度から平成3年度までの成果をまとめた。平成4年度からは、I R E S Sの開発は鉱床解析室で行われる。

参考文献

- 1) 山田康夫、坪田浩二、則竹和光、和田洋明 (1991) : 資源探査の有望地評価システムの開発とオーストラリア・ウラン鉱床地帯への適用例、鉱山地質、第41巻、(2)、p. 95~p. 108
- 2) Duda, R. O., Harat, P. E., Barrett, P., Gaschnig, J. G., Konolige, K., Reboh, R. and Slocum, J. (1984) : Development of the Prospector Consultation System for Mineral Exploration. Final Report, SRI Projects 5821 and 6415, Stanford Research Institute International, Menlo Park, California.
- 3) 坪田浩二 (1990) : ウラン資源探査へのAI技術の応用、動燃技報、No. 76、p. 108~p. 115
- 4) McCammon, R. B., Finch, W. I., Kork, J. O. and Bridges, N. J. (1986) : Estimation of Uranium Endowment in the Westwater Canyon Member, Morrison Formation, San Juan Basin, Using a Data-directed Numerical Method, in a basin analysis case study, The Morrison Formation Grants Uranium Region, New Mexico, AAPG, studies in geology No. 22, p. 331~p. 354
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団、(株)情報数理研究所 (1989) : I R E S Sの開発、PNC SJ7559 89-002
- 6) 動力炉・核燃料開発事業団、(株)情報数理研究所 (1990) : I R E S Sの開発 (その2)、PNC SJ7359 90-001
- 7) Finch, W. I., Granger, H. C., Lupe, R. (1980) : Research on Interactive Genetic-geological Models to Evaluate Favorability for Undiscovered Uranium Resources, IABASM-239/39, p. 447~p. 462

- 8) 動力炉・核燃料開発事業団、(株)情報数理研究所 (1991) : IRESSの開発 (その3)、PNC SJ7359 90-002
- 9) Bray, C. J., Spooner, E. T. and Longstaffe, F. J. (1988) :
Unconformity-related Uranium Mineralization, McClean deposits, North Saskatchewan, Canada: Hydrogen and oxygen isotope geochemistry. Can. Mineral., 26, p. 249 ~268
- 10) 動力炉・核燃料開発事業団、(株)情報数理研究所 (1991) : IRESSの開発 (その4)、PNC ZJ7359 91-002

3. 地層科学関連技術開発成果

- B-1 高速液体クロマトグラフ装置のテスト分析と導入
- B-2 東濃地域の花崗岩を対象にしたレーダー法クロスホール調査
- B-3 花崗岩供試体の比誘電率測定
- B-4 弾性波トモグラフィ・速度分布再構成プログラムの導入と改良
- B-5 比抵抗トモグラフィ調査法データの解析精度向上に関する研究
- B-6 電磁法データ解析統合プログラムの作成

B-1 高速液体クロマトグラフ装置のテスト分析と導入

(落 合)

1. はじめに

高性能ポンプ、高性能カラム、検出器などが組み合わされて装置化した高速液体クロマトグラフ装置が、1976年に米国のダイオネックス社から市販されるようになって以来、各種の装置が市販され現在に至っている。また、かつてはレコーダーに記録されたクロマト波形を手作業で解析・処理していたが、最近では高速液体クロマトグラフ装置にも小型データプロセッサが装備されて、ピーク波形処理、面積計算、濃度計算、報告書作成など一連の作業が自動化されるようになってきており、高速液体クロマトグラフ装置が高感度かつ高能率の使いやすい分析機器になってきている。

このようなことから、水質分析の公定法にも高速液体クロマトグラフ法が採用されるようになってきた¹⁾。我が国では1986年にJIS M 0202(坑水廃水試験方法)が改正された際に、高速液体クロマトグラフ法の中の一つの方法であるイオンクロマトグラフ法が初めて塩化物イオンと硫酸イオンの定量法として採用された。その後1990年にJIS K 0556(超純水の陰イオン試験法)では、塩化物、亜硝酸、リン酸、臭化物、硝酸、硫酸などのイオンを分析する方法として、イオンクロマトグラフ法が採用された²⁾。

中部事業所では深部地質環境調査機器開発の一環として、地下500m~1000m程度の深部から地下水を採取する採水装置の開発が進んでいる。この技術開発と歩調を合わせて、地下深部から空気に触れることなく採取された地下水中に含まれている微量の各種化学種を空気に触れない状態で迅速に分析する技術も確立する必要がある。これは深部地下水中には硫化水素、二価の鉄などの還元性のイオンが含まれており、これらのイオンが空気に触れると酸化されて別の化学種に変化してしまうからである³⁾。

いっぽう、高速液体クロマトグラフ装置の一般的な優れた特徴としては、1. 化学種の分析ができること 2. 検出感度が従来の比色法よりも1~3桁高感度であること 3. 多成分の同時分析ができることの3点があげられる。このほかに高速液体クロマトグラフ装置では、分析試料の導入方法がマイクロシリンジと呼ばれる注射器により注入する方式をとっているため、そのままだでも完全ではないが空気に触れなくて分析することができる大きな利点もある。更に、採水器ボトルと試料導入部の間を改良工夫することによって、完全に空気に触れないクローズドシステムで分析できる可能性がある。高速液体クロマトグラフ装置がもっているこれらの優れた特徴は、深部地下水にごく微量だけ含まれている(ppbオーダー)硫化水素や鉄イオンなどを、空気に触れさせないで高感度で迅速に同時分析するという目的に、最も適した分析装置であることを示している。

平成二年度に技術開発課で作成した「地層科学研究のための分析体制強化」方針に基づいて、空気に触れると酸化変質してしまう深部地下水中の極微量成分を不攪乱状態で迅速にできる機器分析装置である高速液体クロマトグラフ装置を、平成三年度は導入することにした。この報告書では、平成三年度に実施した高速液体クロマトグラフ装置の導入に向けてのテスト分析結果を中心にして報告する。

2. 装置の原理および構成

2.1 歴史と原理⁴⁾

(歴史)

液体クロマトグラフ法は、今世紀の初めに、ロシアの植物学者Tswettが植物中に含まれる色素類の分離識別を目的として考案したものであり、分離・分析法としては長い歴史をもっている。吸着剤の粉末(シリカゲル, アルミナ, マグネシアなど) をガラス管につめてカラムを作り、その上部から分離しようとする試料を加え、適当な溶媒を流して展開させ、試料中に含まれる各成分と吸着剤との吸着力の差異を利用して、それぞれの成分毎に分割して集めるという基本的な手法は、現在も変わっていない。そして、移動相が液体のものを液体クロマトグラフ法と呼び、その内で吸着剤としてイオン交換樹脂を用いるものを、特にイオンクロマトグラフ法と呼んでいる。

かつての液体クロマトグラフ法では、移動相が液体であるために分子拡散速度が遅く分離に要する時間が長いという問題があった。液体クロマトグラフ法を高速化する研究が1970年代から始められ、カラム充填剤を細かい均一の球形にしたり、充填剤の表面に薄層状に固定相をつけて拡散距離を短くする方法が開発され、液体クロマトグラフ法の高速化が進められた。高速液体クロマトグラフ法は液体クロマトグラフ法を高速化した方法であり英語ではHigh Performance Liquid Chromatography(略してHPLC) という。

(原理)

高速液体クロマトグラフカラム中で生じている分離の状態を模式図に示すと図-1のようになる。成分A, Bの混合溶液がカラム入口に注入すると、異なった分配係数($K = \text{固定相中の濃度} / \text{移動相中の濃度}$)をもつAとBは移動相(溶離液)とともにカラム中を移動する。カラムの中では移動相と固定相(カラム内の充填剤)の界面をとおして、A, Bは分配される。 $K_A < K_B$ とすると、B成分の方が固定相により多く分配されるので、カラム中でAとBが相互に分離される。カラムを出た移動相中の各成分は、検出器で濃度が測定される。検出器には数多くの種類があるが、最もよく使われている検出器は可視・紫外分光光度計, 電気化学検出器, 電気電導度検出器, 質量分析計である。

2.2 装置の構成

高速液体クロマトグラフ装置は基本的に図-2に示したような構成で、大きく分けて分離部と検出測定部から成り立っている。移動相を貯めておく容器である移動相貯槽の吸引口には、ごみや異物が入らないようにテフロン製のサクションフィルターが取り付けられている。ポンプは分析精度を左右する重要な構成要素であり、脈流がなく正確な流量の制御が可能であることと、耐溶媒性に優れていることが必須要件である。次に試料注入装置は、注入の再現性の良いループインジェクター式が現在では広く使われている。ステンレス管の両端にフィルターを取りつけ、内部にシリカゲルなどの充填剤を詰めたものがカラムである。本分析装置の性能は第一義的にカラムの良し悪しに依存している。カラム温度が変化すると保持時間が著しく影響を受けるので、カラムは恒温槽に入れて ± 0.5 °C以内に保

たれている。高速液クロ用の検出器に必要な要件としては、感度が高いこと、および応答の直線性の範囲が広いことが上げられる。各種の検出器の開発が現在でも精力的に進められており、分析対象成分と濃度範囲が分かれば最適な検出器は経験的に選択できる。表1に高速液体クロマト用検出器の分析対象と感度を示した⁵⁾。ちなみに、地下水に含まれている ppm～ ppbレベルの二価と三価の鉄イオンを検出するには可視・紫外分光光度計が最適である。一方、同程度の濃度範囲の硫化水素イオンを検出するには電気化学検出器が適している。

3. テスト分析

高速液体クロマトグラフ装置の導入に先立って、装置の性能（感度，選択性）および操作性を確認する目的で島津製作所，横河電機，日本ダイオネックスの三社について、テスト分析を実施した。なお国内には現在、大小合わせて約十社あまりの高速液クロ装置メーカーがあるが、実績のあるメーカーのある程度評価の定まった機種が望ましいこと、アプリケーションソフトに関する技術情報を豊富に持つメーカーであること、等々を考慮して上記の三社でテスト分析を実施した。

3.1 テスト分析の方法

高速液体クロマトグラフ装置の検出感度，選択性，再現性などの性能は、ポンプ，試料注入装置，検出器などの各メーカー毎の装置固有のハード的性能だけでなく、カラム充填剤の種類，移動相の液性，測定条件などのソフト的な性能にも左右される。そこでテスト分析は、次のような手順で行った。

- ①鉄イオン（二価と三価）および硫化水素イオンを分析するための標準試薬をそれぞれ島津，横河，ダイオネックスのメーカー三社に送付して、ppb レベルの各々イオンを分析するのに最も適した機種構成（ハード）をメーカーに選定させた。
なお、一定濃度に溶解した標準溶液ではなく、試薬（固体状）のままで送付した理由は、鉄イオン（二価）と硫化水素イオンが空気中では酸化され易く、特に極微量濃度の溶液では非常に不安定であるため、送付から分析までの間にイオン種が変化するからである。
- ②メーカー毎の最適のハード構成を使って、ppb レベルの鉄および硫化水素イオンを高感度で測定するための、カラムの種類（充填剤の種類，サイズ），移動相の液性（組成，イオン強度，pH），測定条件（分光光度計設定波長，発色試薬濃度，カラム恒温槽設定温度，電気化学検出器設定電位）等々のソフト的な分析条件の最適化作業をメーカー三社に依頼した。
- ③この最適化作業が完了したあと、各メーカーに出張して性能テストと操作性のテストを実施して、総合的な機能確認を行った。

3.2 テスト分析の結果

3.2.1 島津製装置

ダイオネックス社は世界最初に高速液体クロマトグラフ装置を製品化した会社であり、長年の実績と経験により世界第二位の高速液クロ装置メーカーになっている。テスト分析に使われた機種は10年程前にモデルチェンジされたままの型式であるため、他の二社に比較すると大型で操作が煩雑である。しかし、データの解析はコンピューター化されており、他の二者となんら遜色がない。

4. 装置の購入

装置の購入に際して、検討すべき要因はつぎの4項目に集約される。

- ① 目的成分に関する因子（濃度，安定性）
- ② 装置の性能に関する因子（感度，選択性）
- ③ 装置の保守・管理に関する因子（耐久性，アフターサービス）
- ④ 経済性に関する因子（価格，消耗品費）

テスト分析によって上記の①，②の検討は実施できた。③のアフターサービスについては、島津，横河，日本ダイオネックスの三社とも実績のある大手メーカーであり、修理・保守の専門サービス員がほぼ24時間以内に対処できる体制が確立している。日本ダイネックスの高速液体クロマト装置は米国にあるダイオネックス社からの輸入製品であるので、修理部品の供給に要する時間が長いこと、詳細な取扱いマニュアルが英語版であることなどのなどの難点がある。

④の経済性に関する因子については競争入札で購入先を選定する方式を取り、上記の三社のなかで最も安価であった島津製作所の装置を購入することになった。なお、日本ダイオネックスの装置の入札価格は島津の約2倍であり、横河の入札価格は島津の約1.5倍であった。

平成四年二月二十日，二十一日の両日に、島津製の高速液体クロマトグラフ装置が中部事業所水質分析室で据え付け・調整され、その後約一週間にわたって取扱い方法，トラブル時の対応法などに関する教育が実施された。

5. まとめ

環境地質課で進められている地下深部からの地下水採水装置の開発と歩調を合わせて、深部地下水採水装置によって採水された地下水をそのままの状態ですぐに高感度分析する技術を開発する目的で、平成三年度に高速液体クロマトグラフを導入することにした。

高速液体クロマトグラフ装置は次のような大きな特徴を持っており、深部地下水に極微量だけ存在し不安定な硫化水素イオンや鉄（二価）イオンを、空気に触れないで迅速に分析するには最も適した機器分析装置である。

- ① 化学種を分析できる。（状態分析ができる）
- ② 検出感度が従来法よりも1～3桁程度高い。
- ③ 同時に多成分を分析できる。
- ④ 採水容器と高速液クロ装置試料インジェクターの間の連結方法を改良・工夫すれば、完全に空気に触れないで分析できる。

納入実績が多くアプリケーションソフトに関する技術情報を豊富に持っている大手メーカー三社（島津，横河，日本ダイオネックス）に対して、動燃事業団の使用目的，目的成分の種類と濃度範囲，試料の種類と共存成分など装置構成を選択する上で必要な情報を伝えて、各メーカーに最適な機器構成を選択した上で分析条件（分離カラムの種類およびサイズ，移動相の液性，発色試薬の種類および濃度，検出器の測定条件など）の最適化を実施させた。そのあと各メーカーに出張して機器性能および操作性などの機能確認試験を行った。鉄イオン（二価，三価）の検出限界濃度は100ppb程度であり、硫化水素イオンでは1ppbと三社とも非常に高い感度を持っていることが確認できた。また、各社ともクロマトグラムの解析ソフトが充実しているので、定量結果がワンタッチ操作で出力できるようになっている。高速液クロ装置を実際に操作してみて、分析作業の省力化にも大きな威力を発揮することも確認することができた。

テスト分析を実施した三社間での競争入札によって、購入先は(株)島津製作所に決定され平成四年二月に納入された。

6. 今後の計画

すべての分析機器に共通のことであるが、装置の機能をフルに発揮させて信頼性のある分析値を得るには、構成要素毎の作動原理を理解した上で正しい取扱い方法のもとより、使用前後の保守・管理方法およびトラブル時の処置方法にもよく精通していなければならない。とくに高速液クロ装置のような高感度分析装置において、検出限界近傍の極微量の濃度を定量する際には必須要件である。

従って、平成四年度には各種のパラメーター試験（カラムサイズ，カラム温度，移動相組成，試料注入量，検出条件など）を行い、最適の分析条件を追試して確認する作業を通じて、装置の取扱い方法や保守・管理法をもマスターしていきたい。また、これらの作業と並行して分析操作マニュアルを作成する予定である。

本装置は地下水採水装置の採水容器と直結して、空気に全く触れないで迅速に溶存化学種を定量分析することが目的である。平成五年度には、この目的に合致するように試料導入部を改良する作業を実施する計画である。

7. 参考文献

- 1) 坂本勉 ; ぶんせき, vol 1, p. 85 ~87, (1990).
- 2) JIS K0556, 超純水中の陰イオン試験方法(1990).
- 3) 日本分析化学会北海道支部編 ; 水の分析(1972). 化学同人
- 4) 日本分析化学会関東支部編 ; 高速液体クロマトグラフィーハンドブック(1985). 丸善
- 5) 石井大道, 後藤正志ほか ; 高速液体クロマトグラフ法 (1986). 共立出版

表-1 高速液クロ用検出器の分析対象および感度

検出器の種類	対象の試料	感度 (g)	適用性
紫 外	紫外吸収をもつ化合物	10^{-10}	選択的
赤 外	赤外吸収をもつ化合物	10^{-5}	選択的
けい光	けい光を発する化合物	10^{-12}	選択的
原子吸光	無機および有機金属化合物	10^{-8}	選択的
光散乱	光を散乱する溶質	10^{-6}	選択的
R I	すべての溶質	10^{-7}	一般的
誘電率	すべての溶質	10^{-7}	一般的
電気化学	酸化・還元性のある化合物	10^{-12}	選択的
電気伝導度	イオン性化合物	10^{-6}	選択的
MS	有機化合物	10^{-10}	一般的
放射能	放射活性種	10^{-1}	選択的
F I D	有機化合物	10^{-8}	一般的
E C D	電子を捕獲しうる化合物	10^{-10}	選択的
吸着熱	すべての溶質	(10^{-4} F)	一般的
E S R	ラジカル	10^{-4}	選択的
化学発光	リン、硫黄、窒素などを含 む化合物	$10^{-5} \sim 10^{-11}$	選択的
	蛍光物質	$10^{-15} \sim 10^{-18}$	選択的
流動電流	すべての物質	10^{-8}	一般的

図1 AB2成分のカラム中での分布

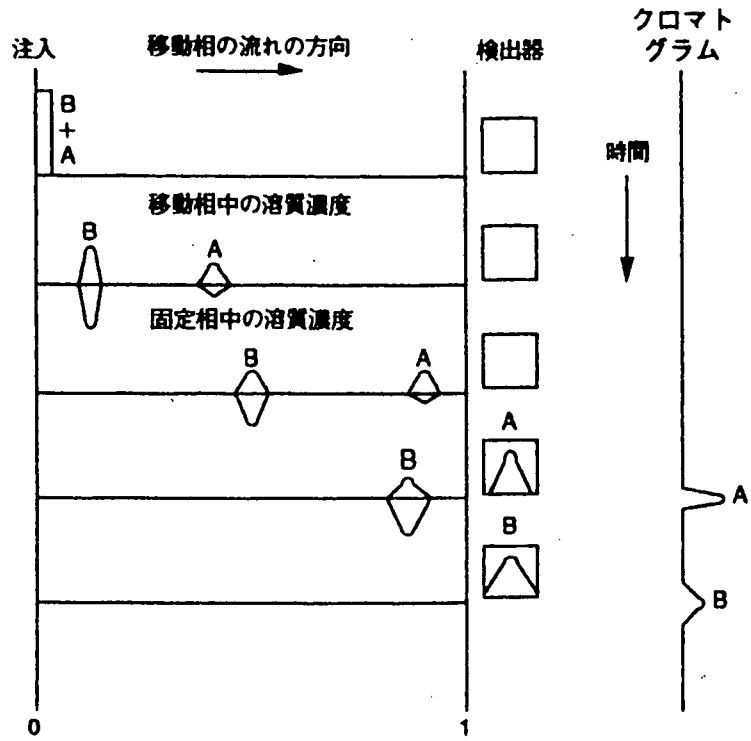


図2 簡単なHPLC装置の構成

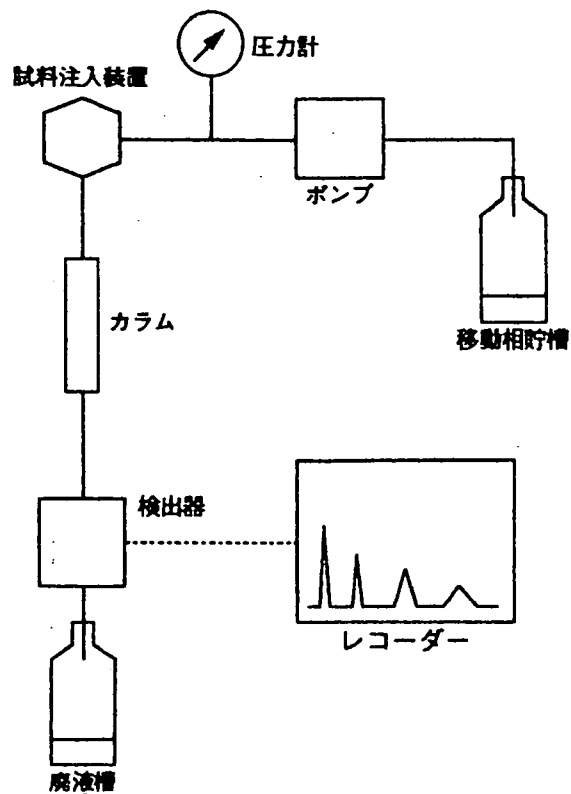
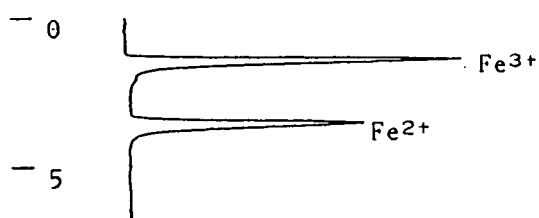


図-3 鉄イオン（2価、3価）100ppbのクロマトグラム（島津）



** 定量計算結果 **

CH	PKNO	TIME	AREA	HEIGHT	MK	IDNO	CONC	NAME
1	4	1.429	279976	18511	S	1	50.7359	Fe ³⁺
	7	3.569	209910	12912		2	49.2641	Fe ²⁺
TOTAL			489886	31423			100	

図-4 硫化水素イオン10ppb,100ppbのクロマトグラム（島津）

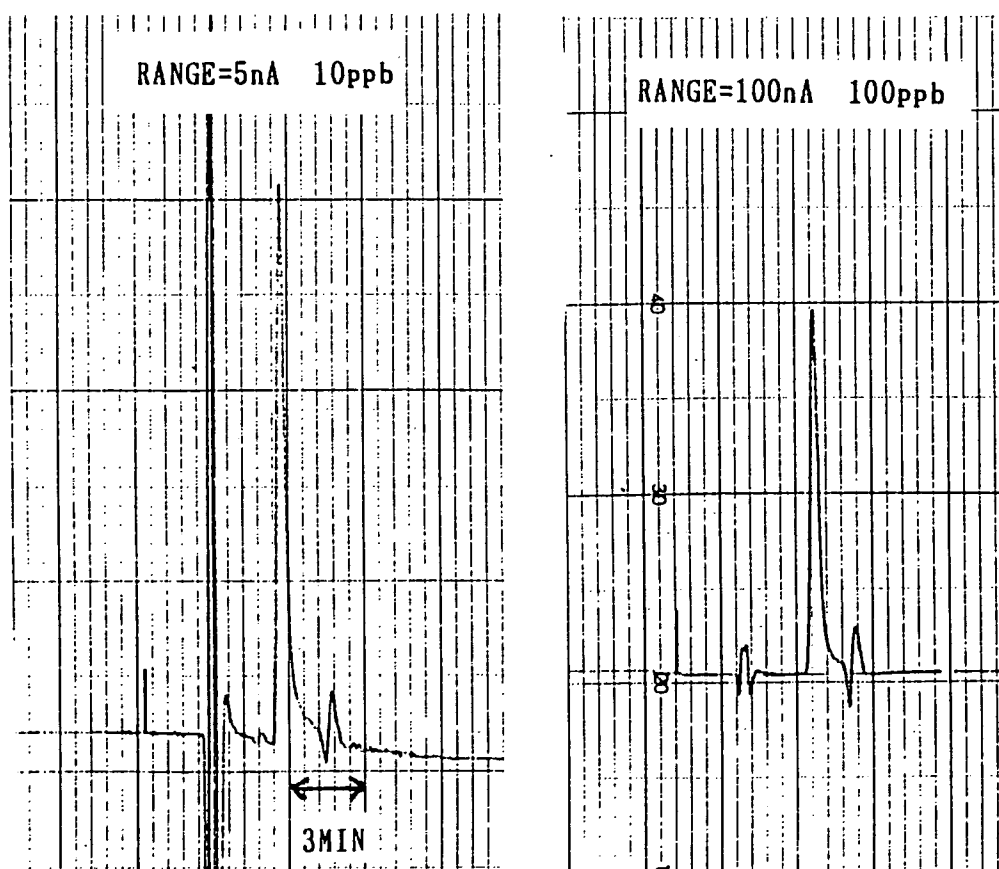


図-5 硫化水素イオンの検量線 (島津)

(10ppbから100ppbまで)

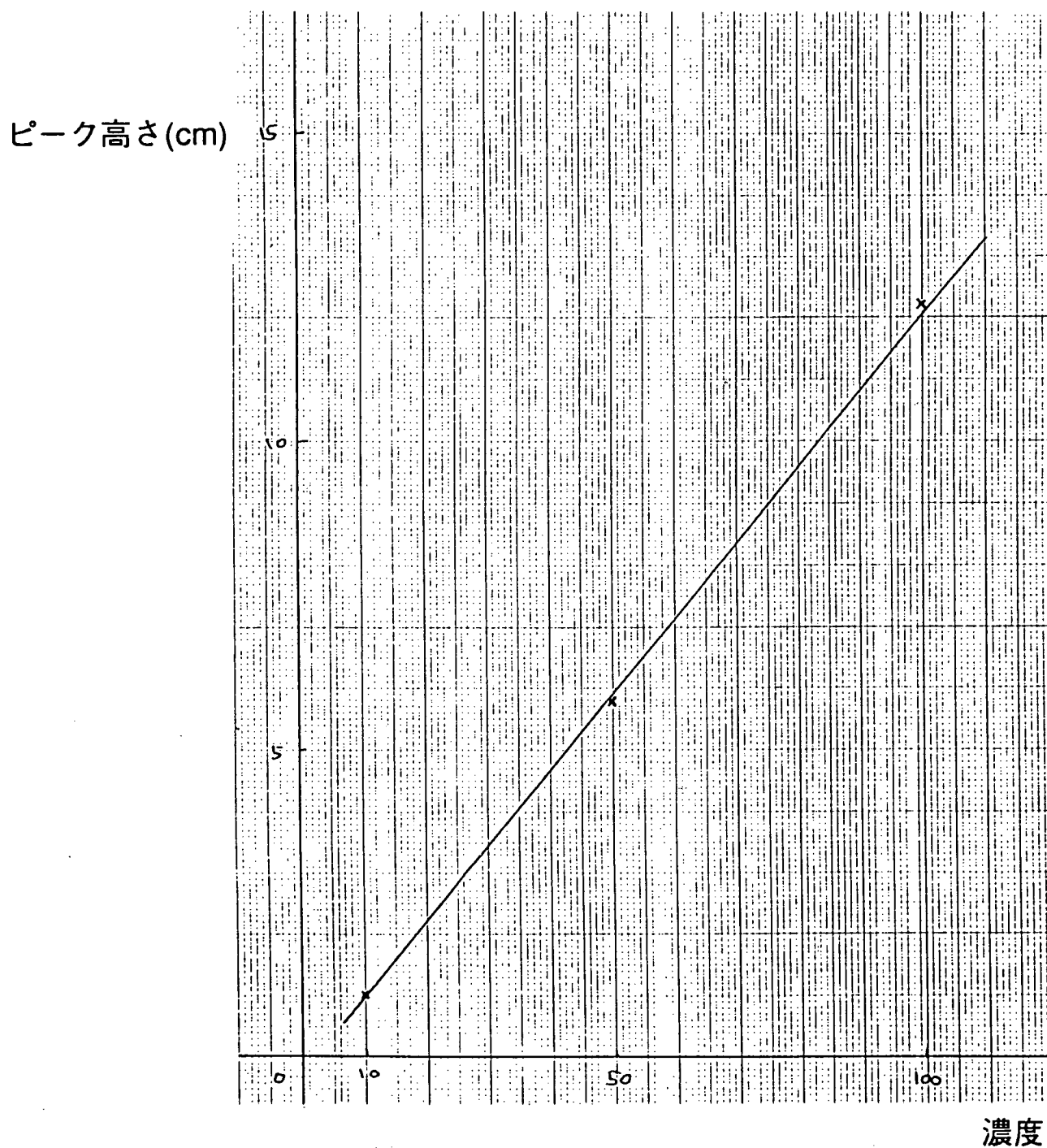


図-6 鉄イオン（2価、3価）5ppmのクロマトグラム（横河）

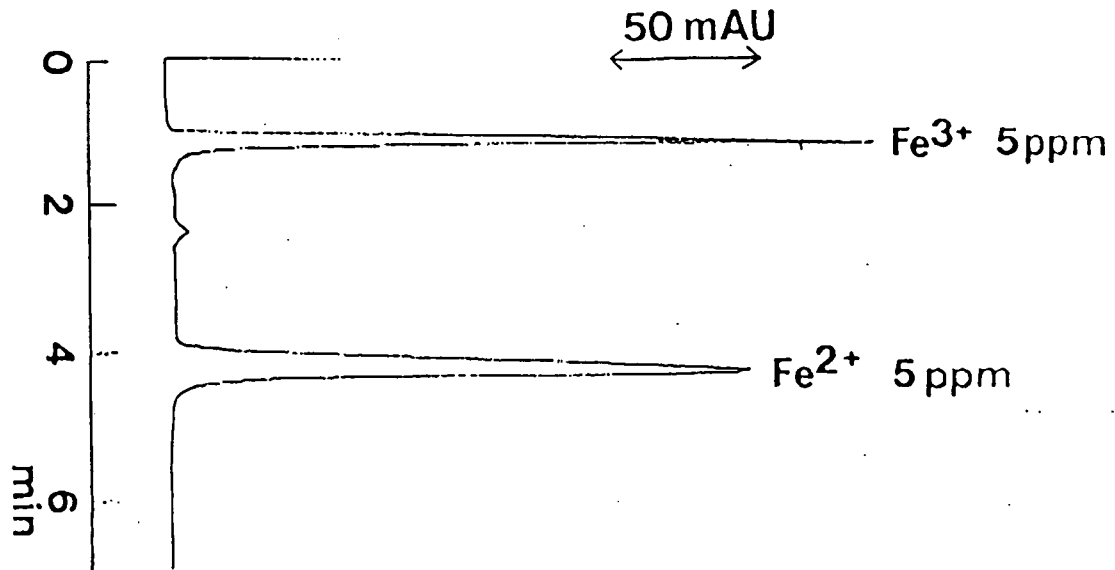


図-7 硫化水素イオン10ppbのクロマトグラム（横河）

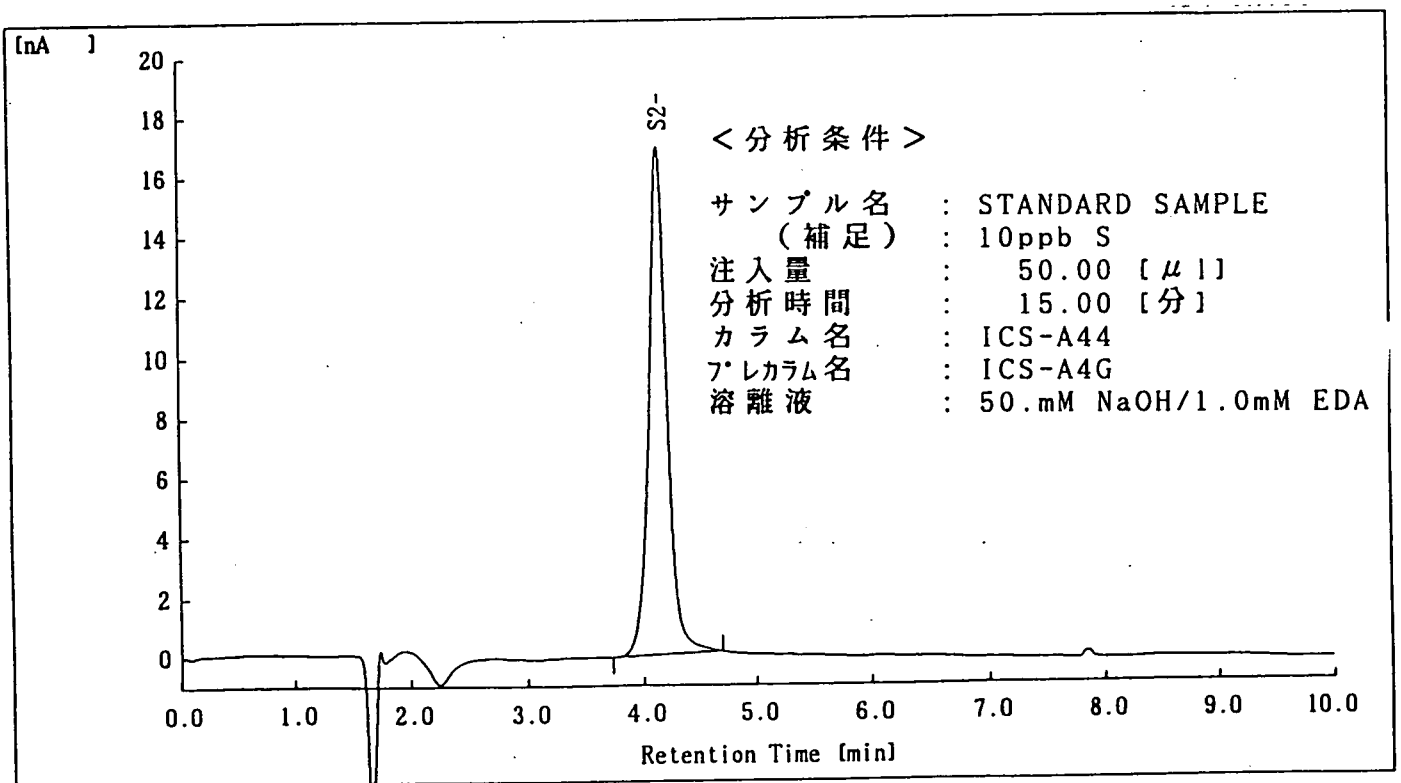
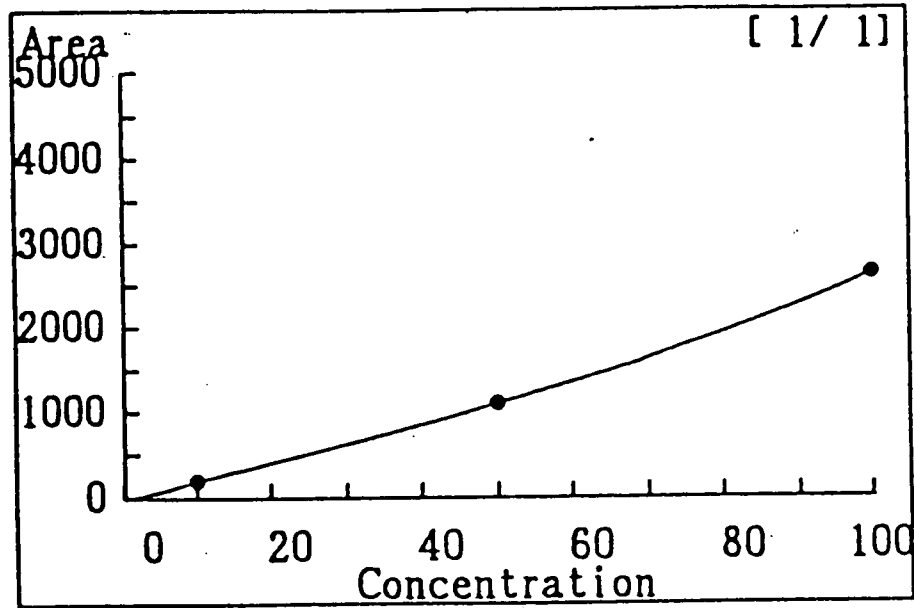


図-8 硫化水素イオンの検量線 (横河)

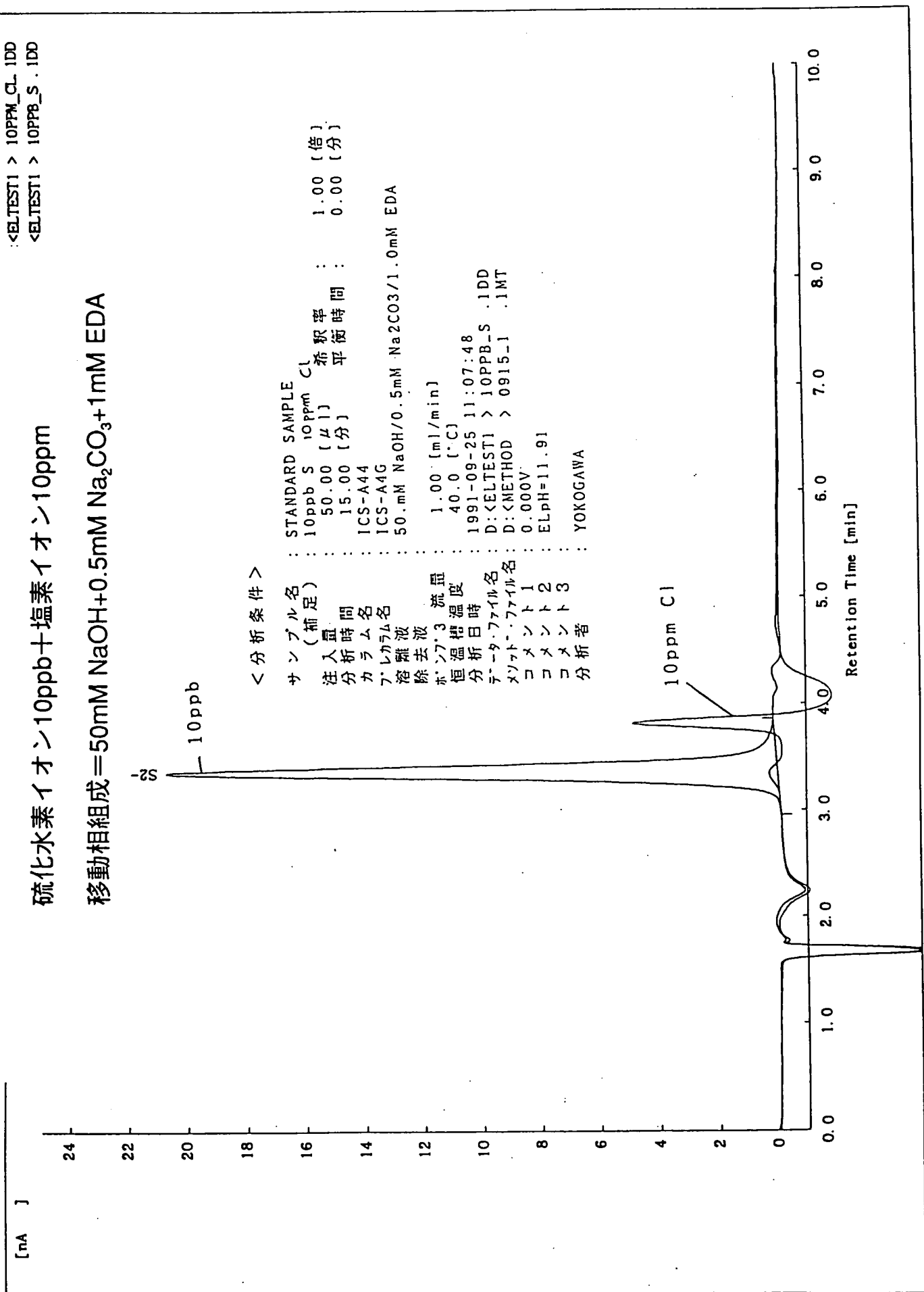
(10ppbから100ppbまで)



成分名 : S2- 検量線次数 : 二次曲線
 保持時間 : 4.14 [分] 面積 / 高さ : 面積
 ピーク指定 : 原点 : 除外
 近似式 : $X = aY^2 + bY + c$ $r^2 = 1.00000$
 パラメータ : $a = -4.7314E-06$ $b = +0.05022$ $c = +0.8021$

時間 (min)	濃度 (ppb)	ピーク面積
4.14	100.00	2623.94
4.15	50.00	1092.00
4.16	10.00	186.43

図-9 硫化水素イオン定量時の塩素イオンピークの妨害-1



<ELTEST1 > 10PPM_CL .IDD
<ELTEST1 > 10PPB_S .IDD

硫化水素イオン10ppb+塩素イオン10ppm
移動相組成=50mM NaOH+0.5mM Na₂CO₃+1mM EDA

< 分析条件 >

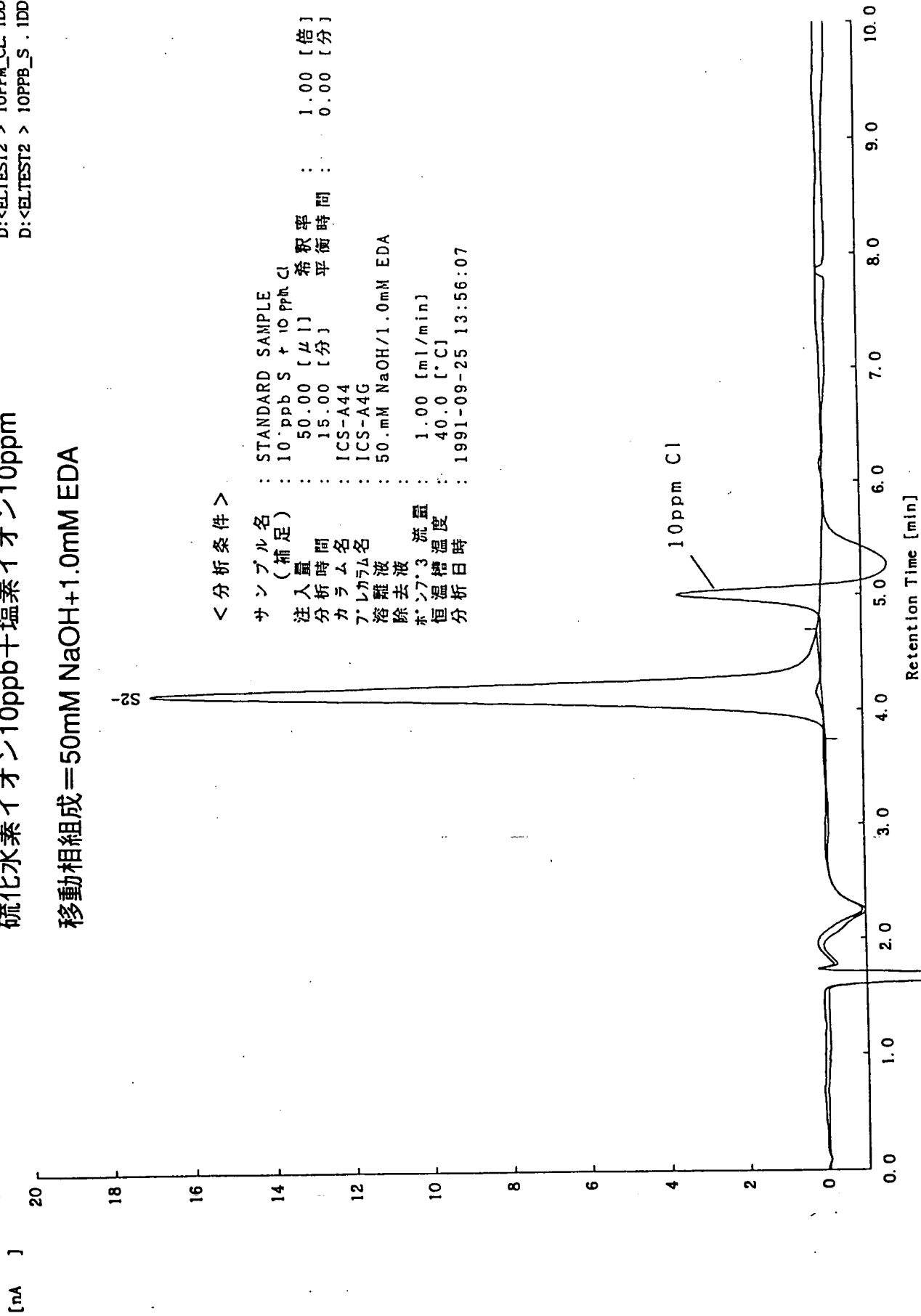
サンプル名 : STANDARD SAMPLE
 (補足) : 10ppb S 10ppm Cl
 注入量 : 50.00 (μl)
 分析時間 : 15.00 (分)
 カラム名 : ICS-A44
 プレカラム名 : ICS-A4G
 溶離液 : 50. mM NaOH/0.5mM Na₂CO₃/1.0mM EDA
 除去液 :
 ホンブ3 流量 : 1.00 (ml/min)
 恒温槽温度 : 40.0 (°C)
 分析日時 : 1991-09-25 11:07:48
 データファイル名 : D:<ELTEST1 > 10PPB_S .IDD
 メソッドファイル名 : D:<METHOD > 0915_1 .1MT
 コメント1 : 0.000V
 コメント2 : ELPH=11.91
 コメント3 :
 分析者 : YOKOGAWA

希釈率 : 1.00 (倍)
 平衡時間 : 0.00 (分)

図-10 硫化水素イオン定量時の塩素イオンピークの妨害-2

硫化水素イオン10ppb+塩素イオン10ppm
 移動相組成=50mM NaOH+1.0mM EDA

D:<ELTEST2 > 10PPM_CL.1DD
 D:<ELTEST2 > 10PPB_S.1DD



<分析条件>

サンプル名 : STANDARD SAMPLE
 (補足) : 10 ppb S + 10 ppm Cl
 注入量 : 50.00 [μl] 希釈率 : 1.00 [倍]
 分析時間 : 15.00 [分] 平衡時間 : 0.00 [分]
 カラム名 : ICS-A44
 プリカラム名 : ICS-A4G
 溶離液 : 50. mM NaOH/1.0mM EDA
 除去液 :
 ホン7.3 流量 : 1.00 [ml/min]
 恒温槽温度 : 40.0 [°C]
 分析日時 : 1991-09-25 13:56:07

図-11 鉄イオン（2価、3価）100ppbのクロマトグラム（ダイオネックス）

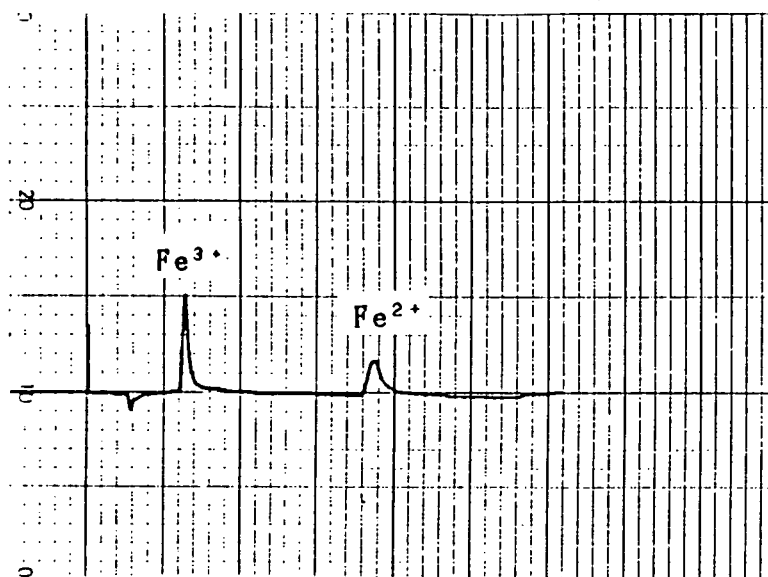


図-12 硫化水素イオン10ppb,100ppbのクロマトグラム（ダイオネックス）

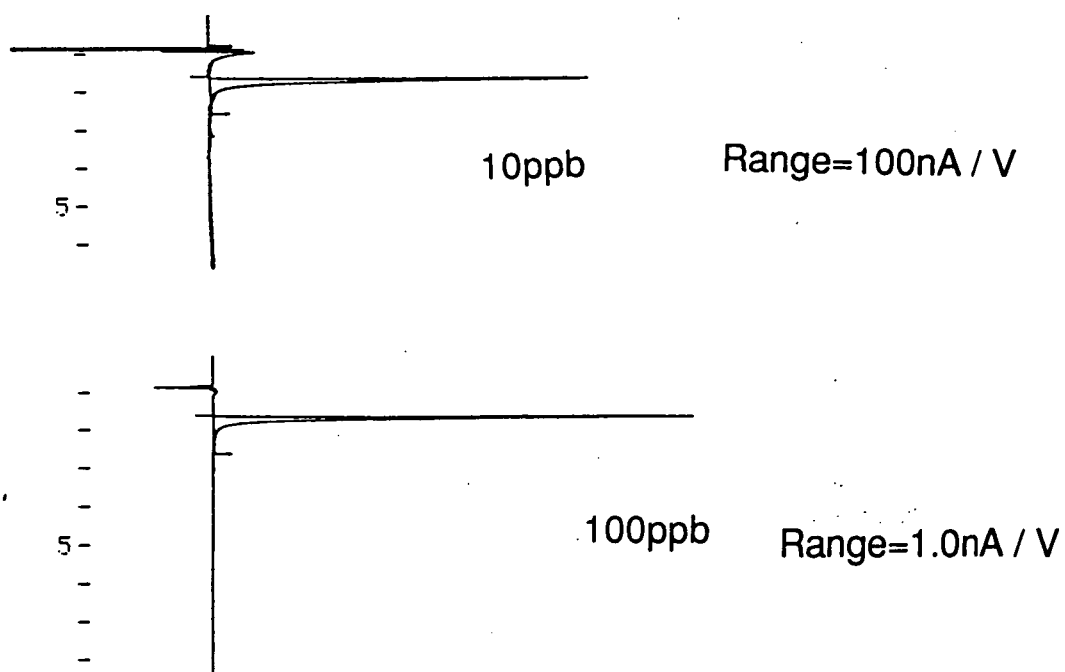
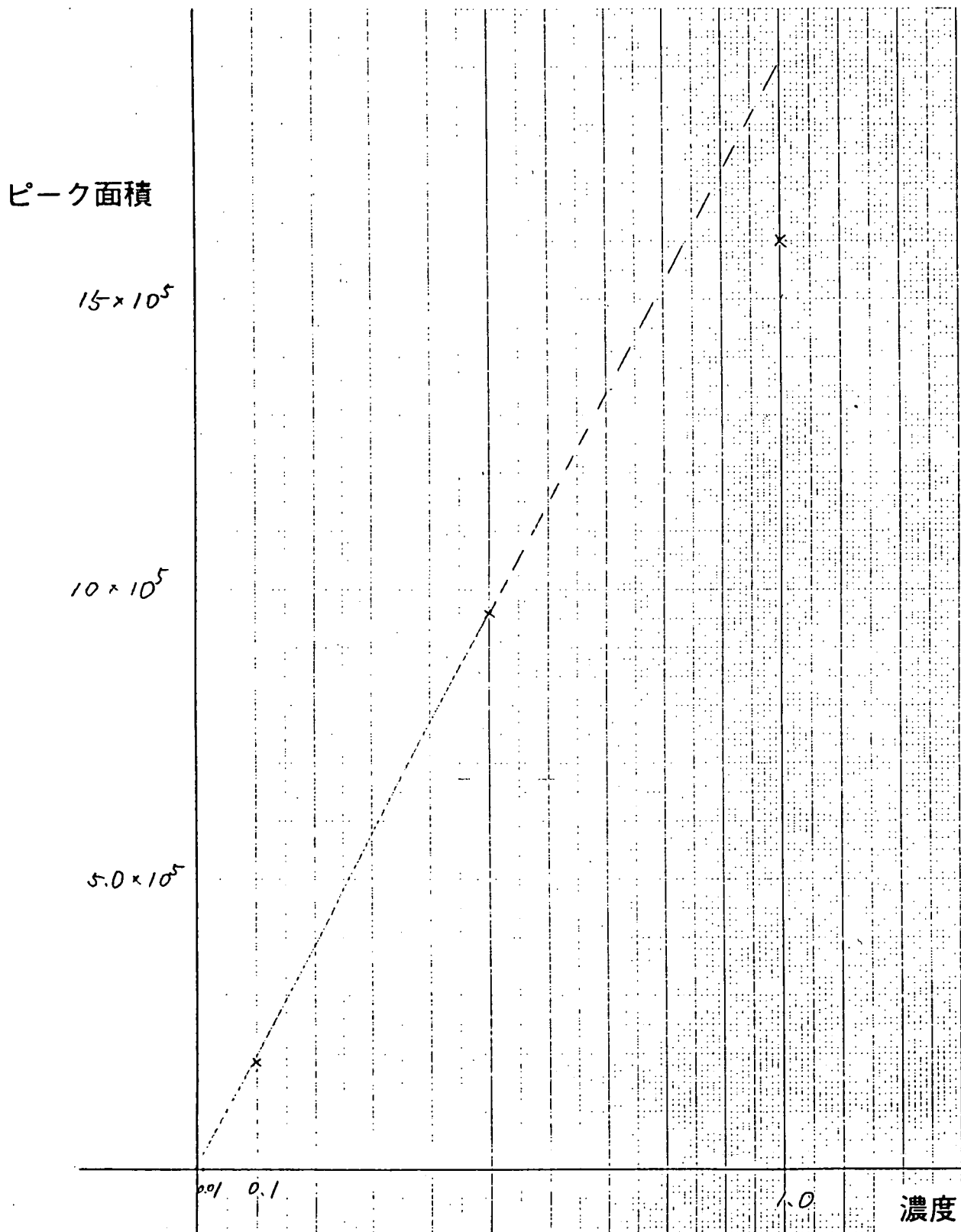


図-13 硫化水素イオンの検量線 (ダイオネックス)

(10ppbから1.0ppmまで)



B-2 東濃地域の花崗岩を対象にしたレーダー法
クロスホール調査

－反射波に着目した解析結果について－

(仙 波)

B-2 東濃地域の花崗岩を対象にしたレーダー法クロスホール調査 - 反射波に着目した解析結果について -

仙波 毅

1. はじめに

結晶質岩盤中では地下水は主に割れ目を流れると考えられ、結晶質岩の水理地質特性を評価するためには、割れ目や割れ目帯すなわち「水みち」の位置・規模・その透水性を把握することが必要である¹⁾。これらを把握するための調査手法の一つに試錐孔を利用したレーダー法がある。

レーダー法は波長の短い電磁パルスを送信させ、電磁波の速度や減衰特性の変化に着目して、非破壊で岩盤の不均質性や不連続面等を調べる手法である。レーダー法で得られる情報は岩盤の電気的な特性に関するものであり、岩盤の電気的な特性は岩盤の含水量や水の電気比抵抗と密接な関係がある。岩盤中に割れ目等が発達していると、その部分の含水量が多くなり、含水量が多くなると電磁波の速度は遅く、減衰は大きくなる。このような含水量の違いに起因する電磁波の速度や減衰の特性の変化から、岩盤の水理地質特性に深く関連している、割れ目や割れ目帯の3次元分布を推定することが可能となる²⁾。レーダー法には、1本だけの試錐孔を用いるシングルホール調査と、2本の試錐孔を用いるクロスホール調査の2種類がある。クロスホール調査の場合、レシーバで受信されるデータは、トランスミッタから直線的に伝播した波（直接波）と割れ目帯等の電磁波を反射させる面（反射面）で反射した波（反射波）等の合成波である。トモグラフィ解析では直接波のみを用いて解析を行うため、得られる情報は2本の試錐孔を含んだ2次元平面に関するものである。トモグラフィ解析結果を用いて岩盤の割れ目や割れ目帯を3次元的に評価するためには、3本以上の試錐孔を3次元的に配置する必要がある。一方、反射波は、試錐孔周辺全域の反射面から反射してきたものであるため、これを解析することにより2本の試錐孔で得られた情報から反射面の広がりや3次元的に推定することができる³⁾。

本稿では、岐阜県東濃地域の花崗岩に掘削された試錐孔を用いて、反射面を3次元的に把握するためにレーダー法クロスホール調査を行ったので、その結果について報告する。

2. 調査位置

調査に用いた試錐孔（AN-1号孔およびAN-3号孔）は、岐阜県瑞浪市の正馬様洞試験サイトに掘削されている（図-1）。これらは地表から垂直に掘削されており、試錐孔間距離は36mである。試錐孔周辺の地質模式図を図-2に示し、調査を行った範囲を図-2中の枠で示す。図に示した通り、調査はすべて不整合面の下部の花崗岩中で実施している。

3. 測定方法および解析方法

3. 1 測定方法

クロスホール調査は、トランスミッタとレシーバを別々の試錐孔に挿入して測定を行う(図-3)⁴⁾。図-4に示すように、レシーバで受信される波には、トランスミッタで発信され直線的にレシーバへ到達する直接波と試錐孔周辺の反射面で反射しレシーバへ到達する反射波がある。この調査で得られたデータのうち、直接波を用いてトモグラフィ解析を、反射波と直接波を用いて反射面の抽出を行った。

今回のクロスホール調査では、トランスミッタ、レシーバとも2m間隔で移動させた。測定に用いたアンテナの中心周波数は20MHzである。表-1に測定仕様を示す。ただし、測定深度は、各孔口からの深度で示してある。各プローブの3次元的位置は、試錐孔の孔曲りデータを用いて決定した。

3. 2 トモグラフィ解析方法

トモグラフィ解析は、クロスホール調査で得られたデータのうち直接波を用いて行う。トモグラフィ解析では、試錐孔間の岩盤を幾つかのセルに分割し、各セル内の電磁波の速度は一定と仮定して、試錐孔間の電磁波速度分布を求めた。今回の解析は2.5m×2.5mの正方形セルを用い、CG法を用いて計算を行った^{5) 6) 7)}。

3. 3 反射面の走向・傾斜の求め方

クロスホール調査で得られるデータの概念図を図-5に示す。図では、トランスミッタを一定点に固定し、レシーバを順次移動し、それぞれの点において測定を行った結果を示している。直接波は、トランスミッタとレシーバの距離が短くなれば電磁波は速くレシーバに到達するようになる。反射波は反射面で反射してからレシーバに到達するため、直接波より遅く到達するが、レシーバと反射波が交差する位置で到達時間が一致する。この点から反射面のレシーバと交差する深度を求める。

反射面の走向・傾斜は、直接波と反射波がレシーバに到達する時間差から求める(図-6)。この時間差から考えられる反射面の走向・傾斜を下半球ステレオ投影し、ウルフネットを用いて走向・傾斜を求める。

図-7に下半球ステレオ投影の概念図を示す^{9) 10)}。投影面は球(基準球)の中心Oを通る水平面である。図中Fは、基準球の頂点である。ここで平面Pの法線ベクトルは、OからPの垂線を降ろしたとき基準球と交差する点CとFとを結んだ線分が、投影面と交差する点Bに投影される。

反射面の走向・傾斜を下半球ステレオ投影したときの概念図を図-8に示す。あるトランスミッタとレシーバの深度における直接波の到達時間と反射波の到達時間との差から考えられる反射面の走向・傾斜を下半球ステレオ投影すると図-8中実線のような軌跡が得られる。別のトランスミッタの深度(レシーバ深度は前と同じ)における直接波と反射波の到達時間の差から考えられる反射面の走向・傾斜を下半球ステレオ投影すると図-8中破線のような軌跡が得られる。この2つの曲線の交点から、ウルフネットを用いることにより反射面の走向・傾斜を求める。

4. 解析結果

4. 1 トモグラフィ解析結果

図-9が解析の結果得られた電磁波速度分布図である。この図では、寒色系は電磁波速度が速いことを表し、暖色系は電磁波速度が遅いことを表しており、左側がAN-3号孔、右側がAN-1号孔、縦軸は深度である。解析結果では、電磁波速度の速い部分と遅い部分が有ることが確認できた。

岩盤中を伝播する電磁波の速度は岩盤の比誘電率によって決定され、岩盤内の空隙率が大きくなったり割れ目が発達して含水量が多くなれば、岩盤の比誘電率が大きくなり、電磁波速度が遅くなる¹¹⁾。そのため、トモグラフィ解析結果で電磁波速度の遅い部分は、岩盤の含水量が多い部分であると考えられ、2本の試錐孔間の含水量の多い部分と少ない部分を把握することができた。

4. 2 反射面抽出結果

今回のデータからは4本の反射面を抽出することができた。反射面の走向・傾斜は、図-8に示すように、それぞれの反射面について2通りが考えられる。このうちどちらを採用するかは、トモグラフィ解析結果と比較し、電磁波速度分布と整合性のあるものとした。

表-2に反射面の深度および走向・傾斜を、図-10に反射面を3次元的に表した結果を示す。このように、2本の試錐孔から、反射面の位置や広がりをも3次元的に推定できることがわかった。

5. トモグラフィ解析結果と反射面の比較

解析した反射面を図-9中の実線で示す。図に示すとおり、反射面はトモグラフィ解析で得られた電磁波速度の異なる境界面と良く一致している。前述したように、電磁波速度は岩盤の含水量に大きな影響を受けるため、電磁波速度の異なる境界面は岩盤の含水量の異なる境界面であると考えられ、2本の試錐孔でレーダー法クロスホール調査を行い、反射波に着目した解析を行うことにより、この境界面の位置や広がりをも3次元的に把握することがわかった。

このように、岩盤の含水量の異なる境界面の位置や広がりをも把握することがわかったが、トモグラフィ解析結果で認められる含水量の異なる境界面で必ずしも反射面が抽出されるとは限らない。この理由の一つとして、反射波は直接波と比較してその振幅が小さいため、岩盤の含水量の多い部分で減衰することによりノイズに隠れてしまうことが考えられ、岩盤の含水量が少ない部分にトランスミッタとレシーバがあるとき、反射面が抽出されやすいと考えられる。

6. まとめ

正馬様洞の花崗岩を対象として掘削された試錐孔を利用して、レーダー法クロスホール調査を行い、そのデータを用いてトモグラフィ解析と反射面の抽出を行い、その結果を比較した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) トモグラフィ解析の結果、花崗岩中の電磁波速度の遅い部分と速い部分の分布を把握することができた。
- (2) 今回のデータから4つの反射面を抽出することができた。
- (3) 反射面はトモグラフィ解析結果の、電磁波速度の異なる境界面と良く一致した。岩盤中を伝播する電磁波の速度は岩盤の含水量が多くなるほど遅くなることから、反射面は岩盤の含水量の異なる部分の境界面と考えられ、この境界面の位置や広がりを3次元的に推定できることがわかった。

以上、本稿において、2本の試錐孔を用いたクロスホール調査で得られたデータから反射面を抽出することにより、岩盤の含水量の異なる部分の境界面の位置や広がりを3次元的に把握できることを示した。

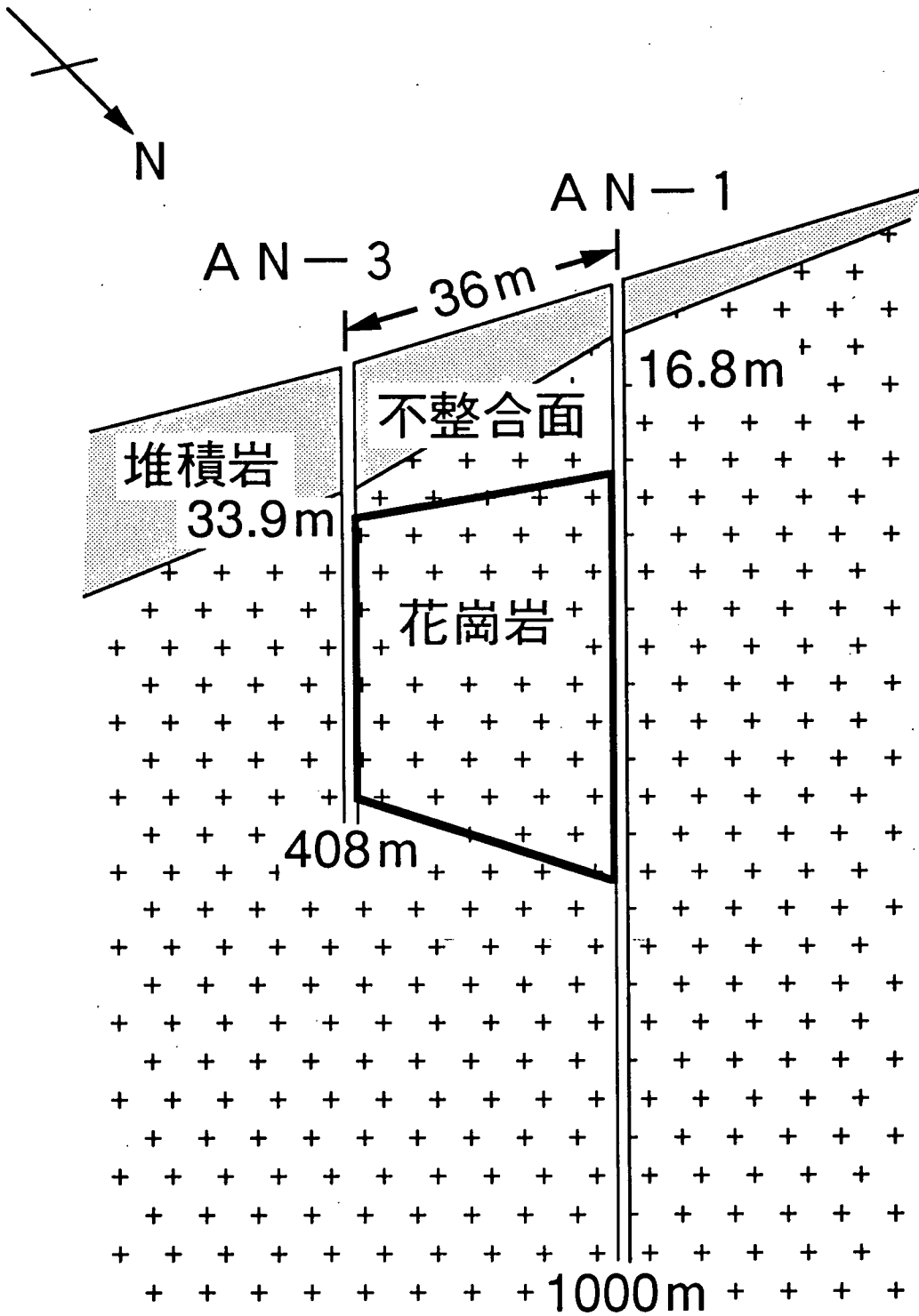
7. 今後の予定

釜石鉱山で行ったレーダー法クロスホール調査で得られたデータを用いたトモグラフィ解析の結果、電磁波速度の遅い部分は地下水を含む割れ目や割れ目帯であることが推定されたが¹²⁾、今後は釜石鉱山で得られたレーダー法クロスホール調査で得られたデータを用いて電磁波速度の遅い部分で反射波が抽出できるかを確認し、さらに、レーダー法の結果とコア観察結果、物理検層結果、透水試験結果による総合的解析を行い、岩盤の水理学的特性を3次元的に評価する手法を開発する。

参考文献

- 1) 渡辺邦夫, 柳沢孝一, PUSCH, R., 佐久間秀樹, 藍沢稔幸, 山本肇, 神田信之 (1990) : 蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定 (その2) -現場計測-, 応用地質, 31巻, 1号, pp.1-11
- 2) 仙波毅, 尾方伸久, 長谷川健, 岩崎浩, 渡辺邦夫 (1992) : ボアホールレーダーによる花崗岩岩盤特性調査-釜石鉱山原位置試験場における調査結果について-, 応用地質, 32巻, 6号, pp.34-42
- 3) OLSSON, O., FALK, L., FORSLAND, O., LUNDMARK, L., SANDBERG, B. (1987) : Crosshole Investigations -Results from Borehole Radar Investigations, Stripa Project TR 87-11, SKB, Stockholm, Sweden

- 4) 佐久間秀樹, 坪田浩二 (1988) : 土岐花崗岩における R A M A C システムの適用試験について、物理探査学会第78回学術講演論文集、pp.305-309
- 5) IVANSSON, S., (1984) : Crosshole investigations -Tomography and its application to crosshole seismic measurements, Stripa Project TR 84-08, SKB, Stockholm, Sweden
- 6) 坪田浩二, 則竹和光, 伊東慎司, 落合竜夫 (1989) : Geotomography における再構成手法評価 (その1) 、物理探査学会第79回学術講演論文集、pp.49-54
- 7) 坪田浩二, 則竹和光, 伊東慎司, 落合竜夫 (1990) : Geotomography における再構成手法評価 (その2) 、物理探査学会第80回学術講演論文集、pp.36-41
- 8) 2) と同じ
- 9) GOODMAN, R. E. (1984) : わかりやすい岩盤力学、大西有三, 谷本親伯共訳、鹿島出版会、pp.234-243
- 10) 3) と同じ
- 11) 2) と同じ
- 12) 2) と同じ



図一 2 調査に用いた試錐孔周辺の地質断面図

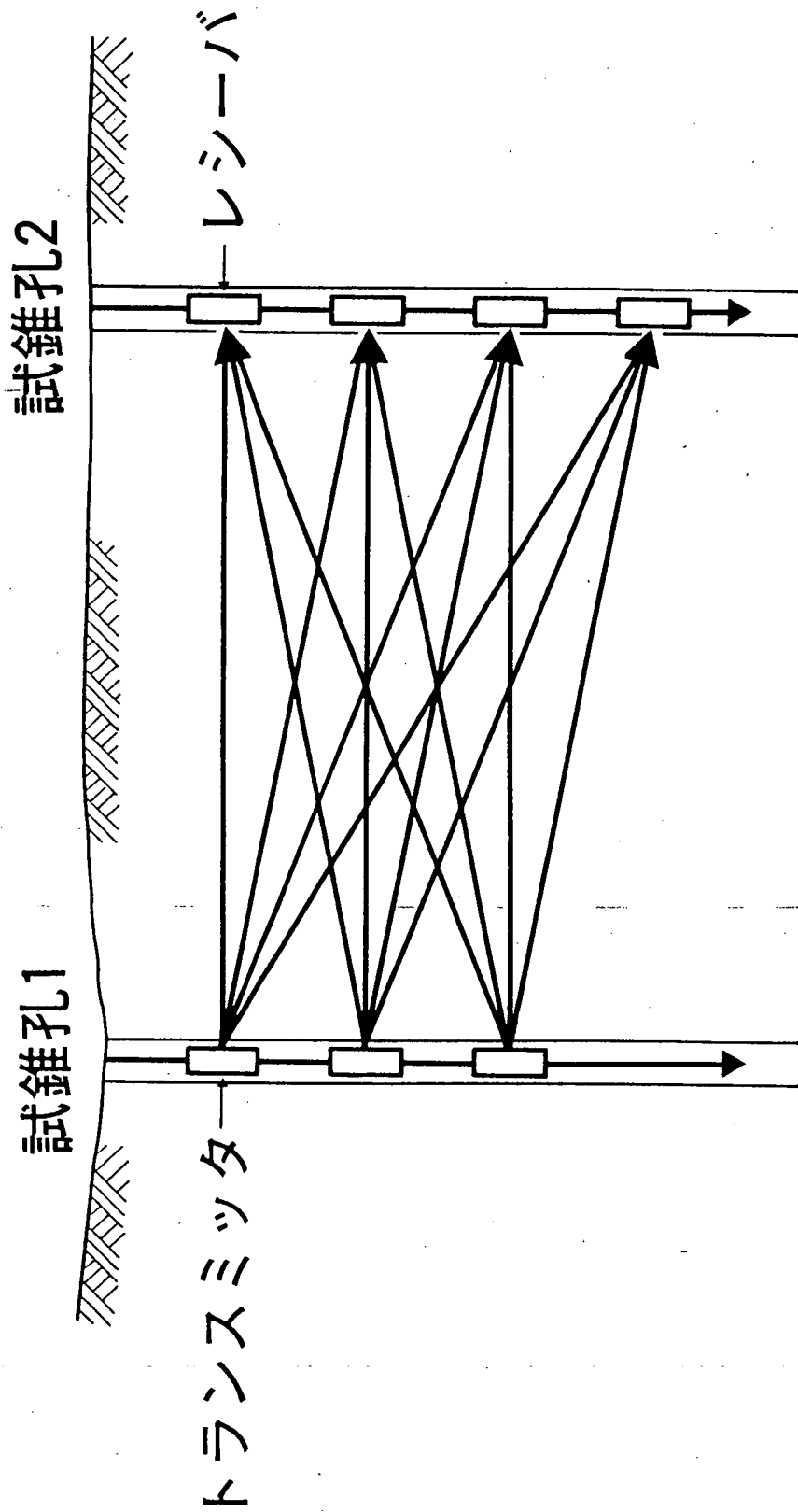
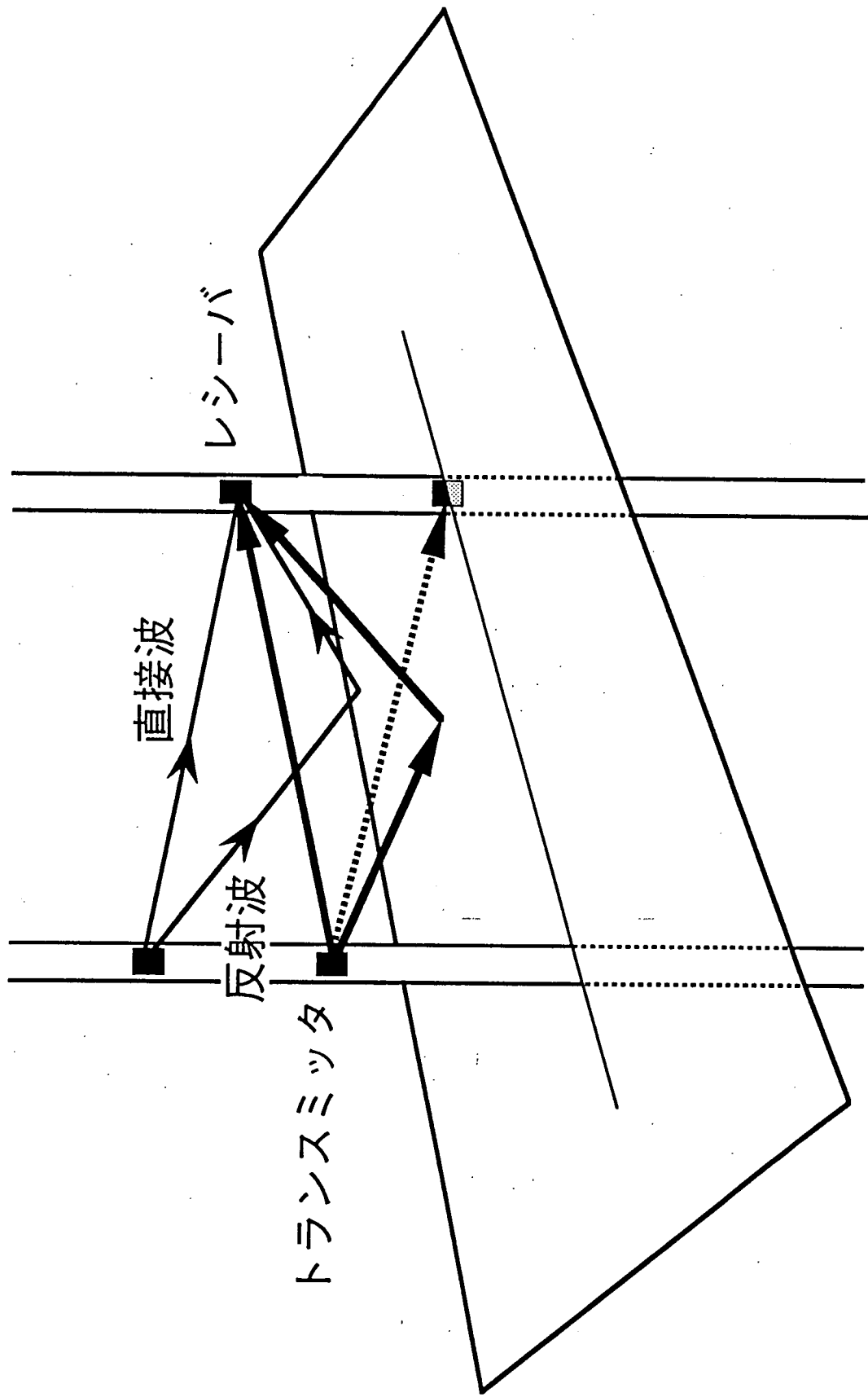


図-3 クロスホール調査概念図



図一 4 直接波・反射波説明図

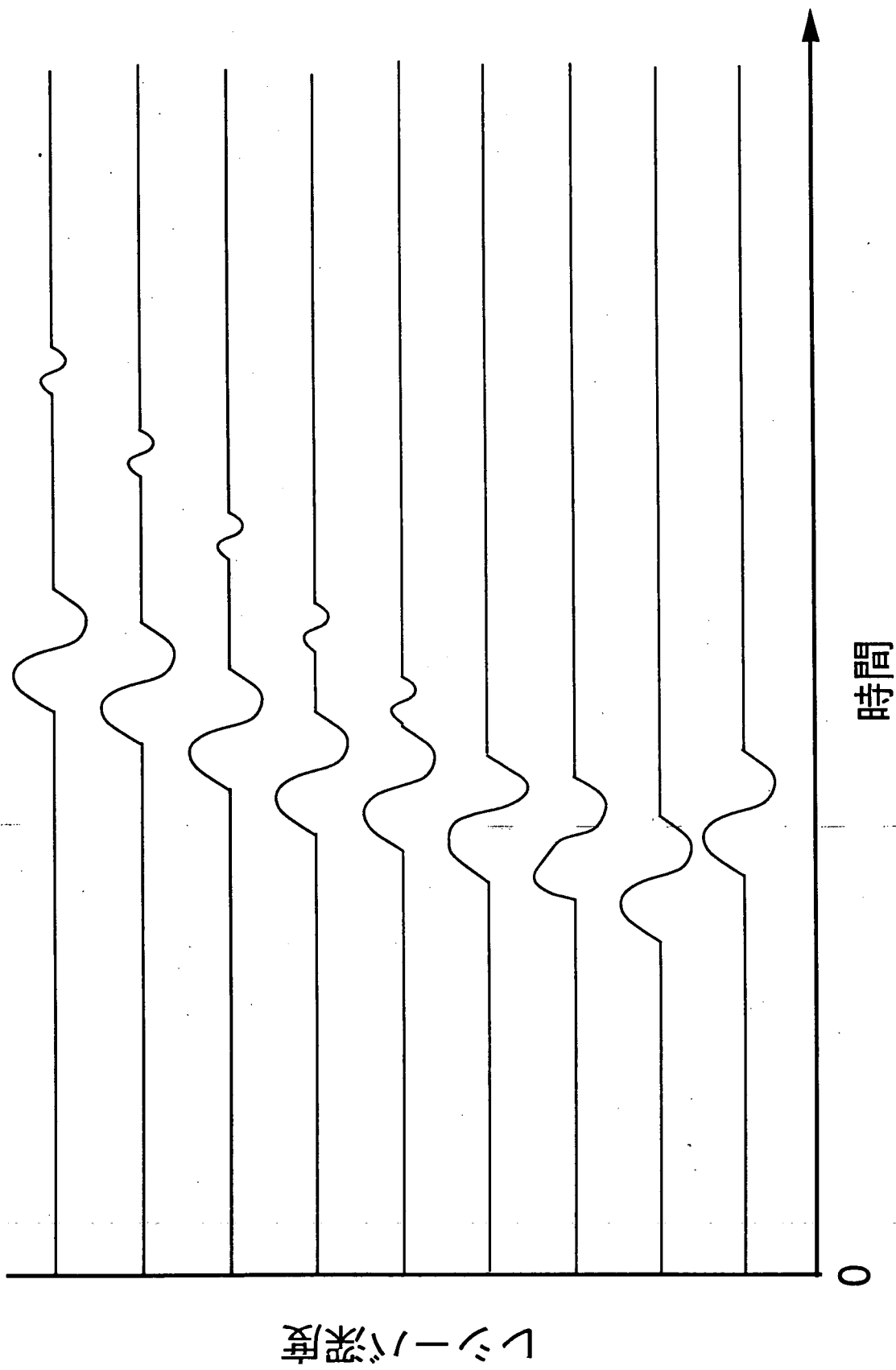
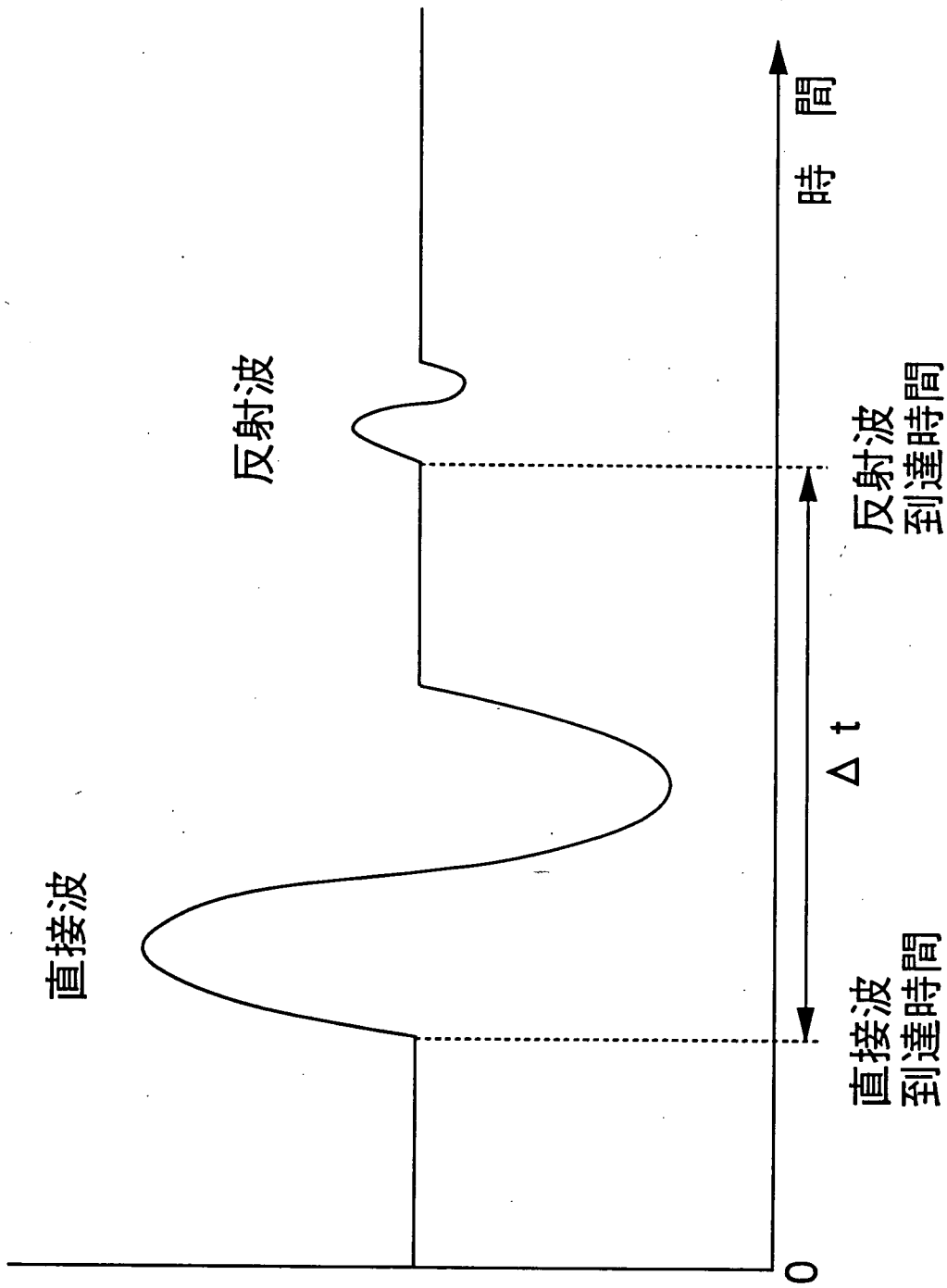
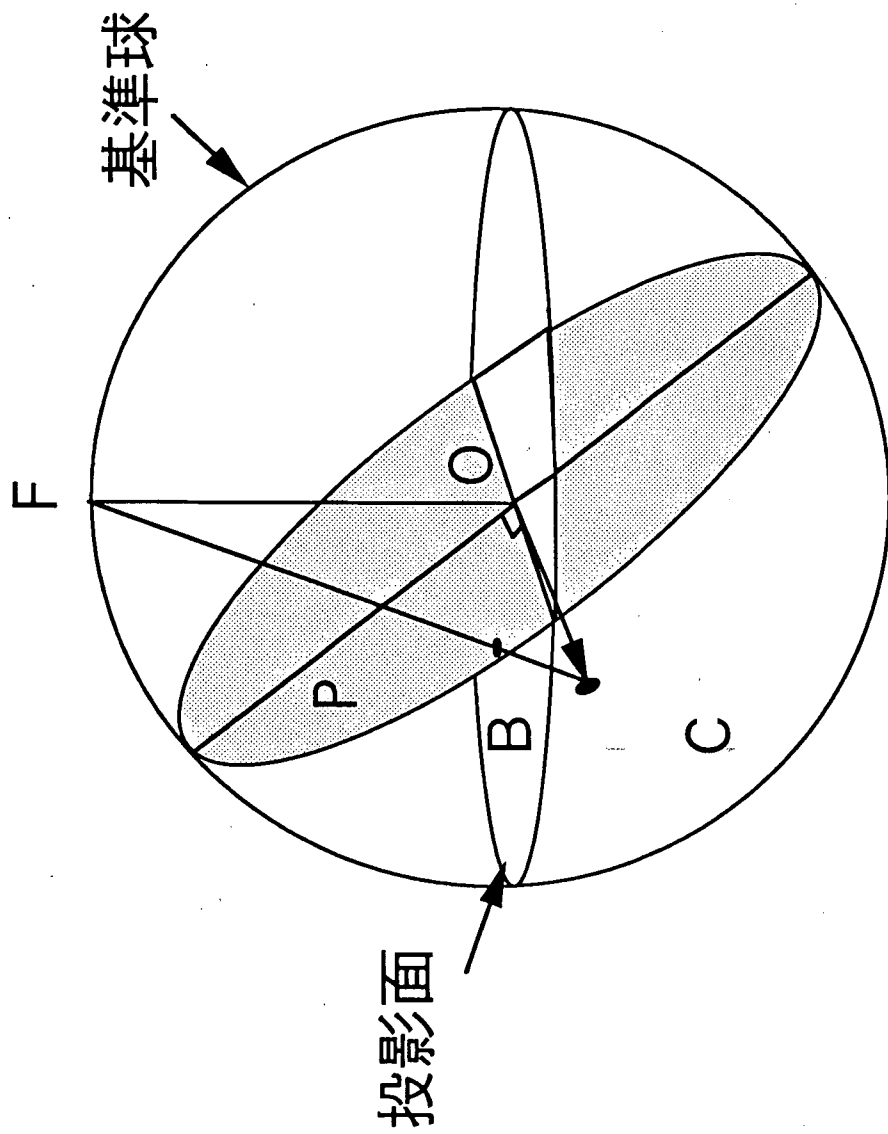


図-5 クロスホール調査で得られるデータの概念図



Δt は直接波と反射波の到達時間差

図-6 直接波と反射波の到達時間説明図



図一七 下半球ステレオ投影概念図

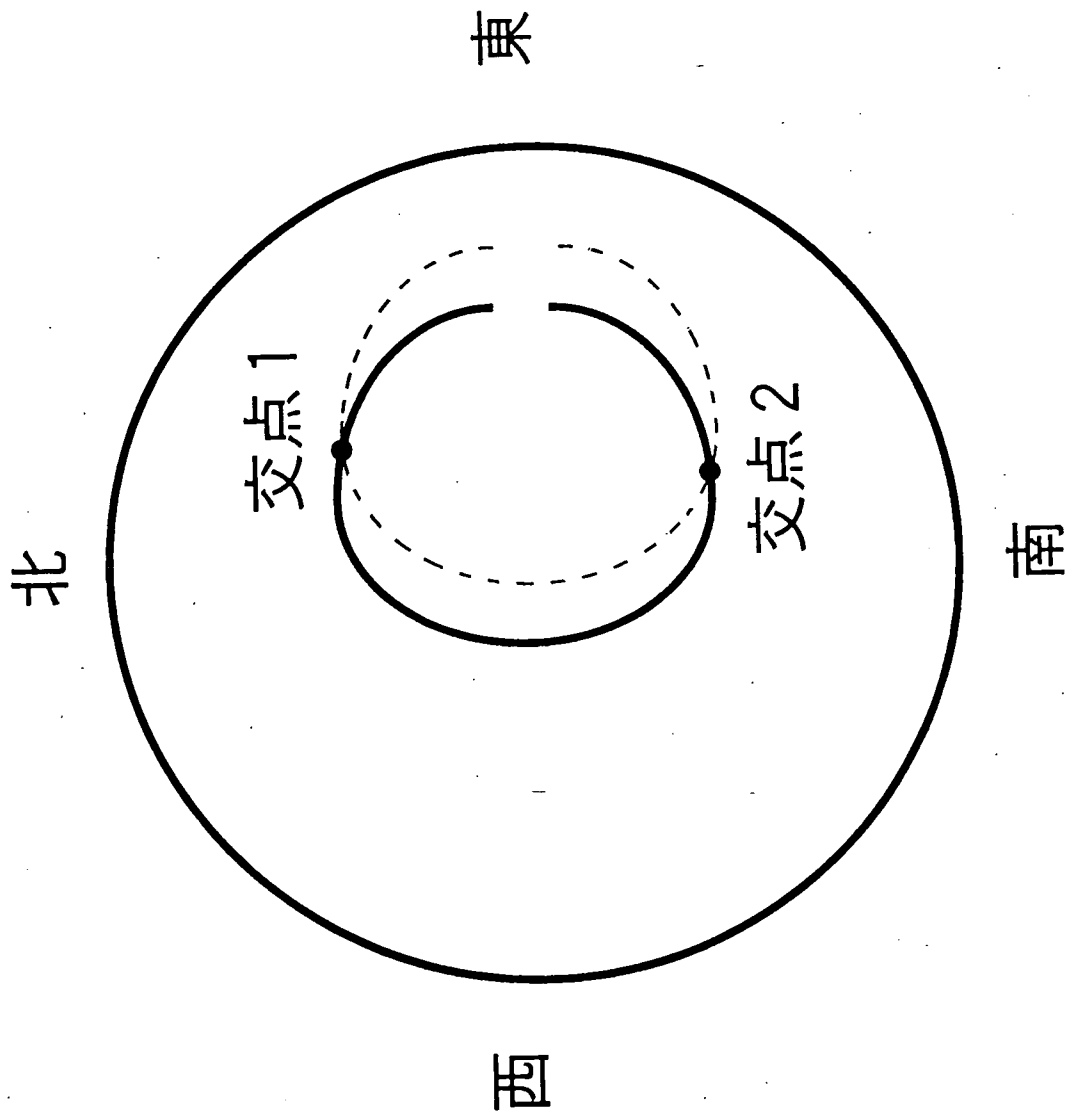


図-8 反射面のデータをステレオ投影した結果

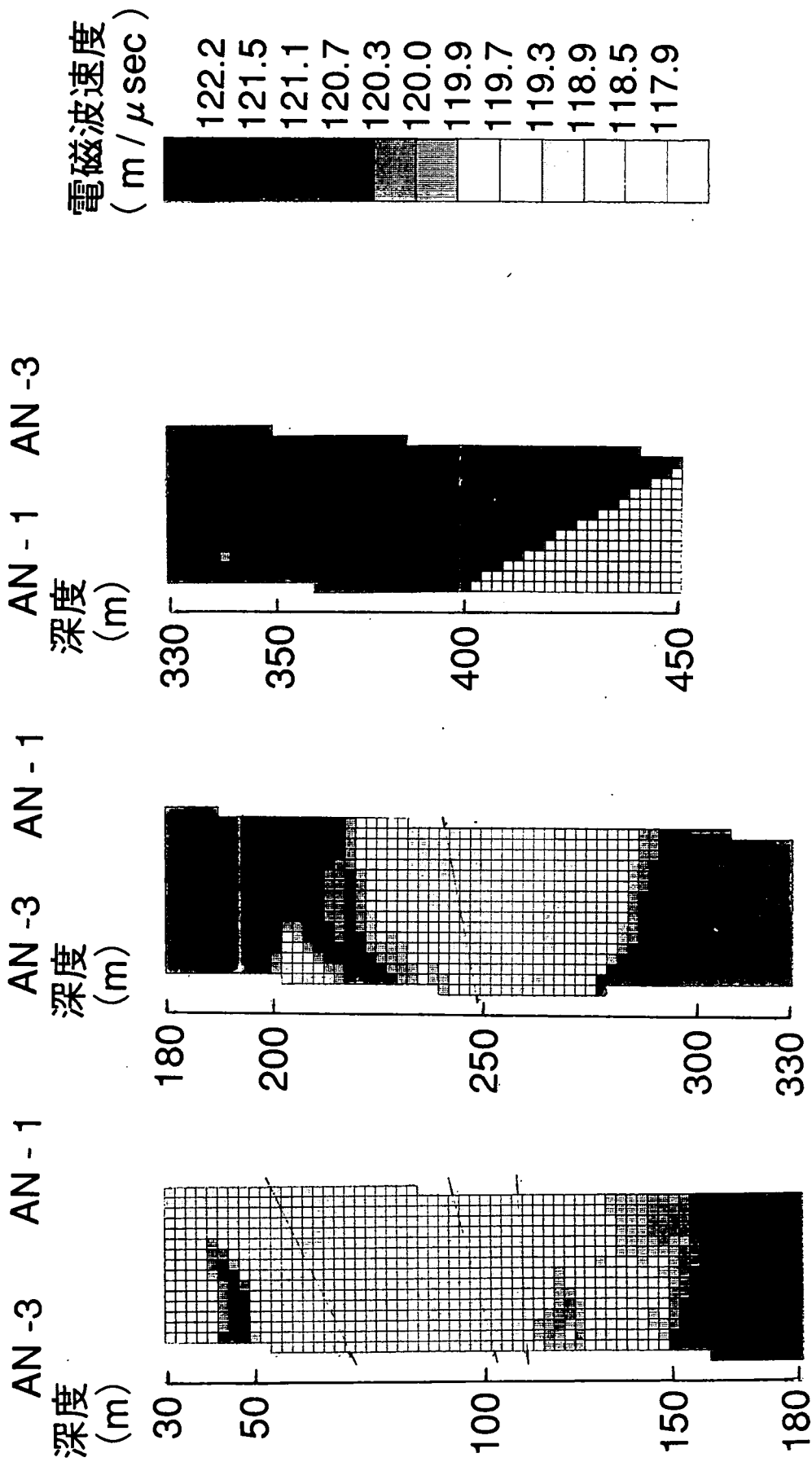
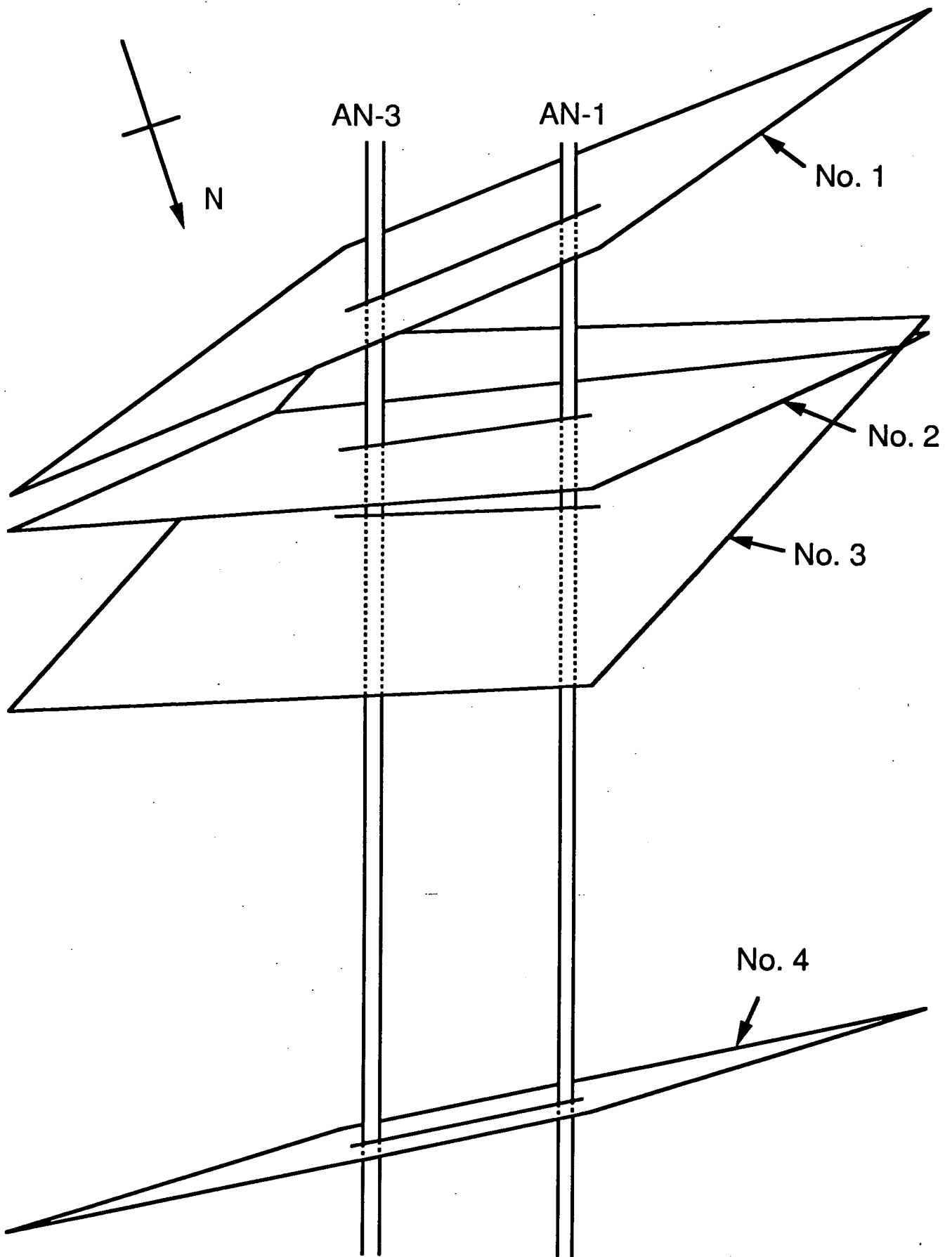


図-9 トモグラフィ解析結果

図中実線は反射面



図一10 反射面を3次元的に表示した結果

表一 1 測定仕様

電磁パルスの中心周波数	20 MHz
サンプリング周波数	230 MHz
測定深度 トランスミッタ レシーバ	40 m~400 m (A N-3 号孔) 30 m~454 m (A N-1 号孔)
測定波線の総数	7820
サンプル数*	512
スタッキング数	128

*1 レコード中のデータ数

表一 2 反射面抽出結果

反射面 No.	レシーバとの交差深度 (m)	走向	傾斜
1	54	N50° W	36° E
2	98	N68° W	15° E
3	116	N87° W	42° E
4	240	N21° W	14° E

B-3 花崗岩供試体の比誘電率測定
(仙 波)

1. はじめに

結晶質岩盤中では地下水は主に割れ目を流れると考えられ、結晶質岩の水理地質特性を評価するためには、割れ目や割れ目帯すなわち「水みち」の位置・規模・その透水性を把握することが必要である。これらを調査する手法の一つに試錐孔を利用したレーダー法がある。レーダー法で得られる情報は岩盤の電気的な特性に関するものであり、岩盤の電気的特性はその含水量や水の電気比抵抗と密接な関係がある。岩盤中を伝播する電磁波の速度は岩盤の比誘電率により決定され、岩盤の比誘電率は岩盤内の空隙率が大きくなったり割れ目や割れ目帯が発達して岩盤の含水量が多くなれば、大きくなる¹⁾。地下水位面下の岩盤においては空隙内は水で飽和されていると考えられるから、岩盤の空隙率と水で飽和した岩盤の比誘電率の関係を明らかにすることにより、レーダー法で得られた電磁波速度に関するトモグラフィ解析結果から、直接岩盤の空隙率分布を推定できると考えられる。

本稿では、結晶質岩盤の空隙率とその比誘電率の関係を明らかにするために、花崗岩中に掘削された試錐コアを用いて実験を行ったので²⁾、その結果について報告する。

2. 実施内容

実験に用いたコアは、岐阜県瑞浪市の正馬様洞試験サイト（図-1）のAN-1号孔のものである。以下に実験手順を示す。

2.1 コアの抽出

AN-1号孔では、深度17.15m~1010mで直径6.3cm程度のコアが取得され、20cm程度の長さに分けられ保管されている。この中から、昭和62年度に行われた空隙率測定の結果をもとに、実験においてコアの空隙率の値が分散するように、20個のコアを抽出した。抽出したコアの深度を表-1に示す。

2.2 コアの空隙率測定

抽出した20個のコアの空隙率が実際に分散しているかどうかを確認するために、飽和・浮力法による空隙率・密度試験法に関するISRMの指針に従い、それぞれの空隙率を測定した。その結果を表-1に示す。

2.3 供試体の成形

20個のコアを用いて、実験に使用することができる大きさとなるように供試体を成形した。供試体は、コアの両端から各1個と中間部から2個の計4個をそれぞれのコアから円

た。供試体は、コアの両端から各1個と中間部から2個の計4個をそれぞれのコアから円柱形に切り抜き、計80個について表-2の仕様に基づいて成形した。

2. 4 供試体の空隙率測定

供試体の空隙率とその比誘電率の関係を調べるためのデータとして使用するために、成形した80個の供試体について空隙率を測定した。なお、測定はコアの空隙率を測定に準じて行っている。

2. 5 供試体の比誘電率測定

供試体の空隙率とその比誘電率の関係を調べるためのデータとして使用するために、成形した80個の供試体について比誘電率を測定した。測定は、以下の手順で行った。

(1) 供試体の破損部及び供試体表面の割れ目観察

それぞれの供試体について、破損状況と表面の割れ目の観察を行った。

(2) 銀ペーストの塗布

それぞれの供試体に、電極となる銀ペーストを塗布した。

(3) 供試体の含水飽和

1章でも述べたように、地下水位面下の岩盤の空隙内は水で飽和されていると考えられるので、それぞれの供試体を800 Pa以下の真空で1時間水浸し、含水飽和状態とした。

(4) 供試体の比誘電率測定

含水飽和状態とした供試体の比誘電率を測定した。測定に使用した電磁波の周波数は1MHzから40MHzまで1MHz毎とした。さらに供試体の導電率についても同時に1MHzから40MHzまで1MHz毎に測定した。また、測定の前と後での水の蒸発量を調べるために、比誘電率測定前後で供試体の空中重量を測定した。

(5) 測定した各物性値の比較

測定した、供試体の空隙率と比誘電率・導電率の関係を明らかにするために各測定値の相関図を求めた。

3. 試験結果

測定した各物性値の関係を調べるにあたり、まず比誘電率と導電率の周波数特性を把握し、その後物性値間の比較を行った。

3. 1 比誘電率の周波数特性について

図-2に各周波数における比誘電率測定結果の一例を示す。この図は深度567.7m~567.88mのコアの、下端部から抽出した供試体の結果であり、横軸が周波数、縦軸が比誘電率である。この図によると、測定に使用した電磁波の周波数が10 MHz以上では比誘電率はほぼ一定となり、10 MHz以上では比誘電率は周波数に依存しないことがわかる。

10 MHz以上の周波数におけるすべての供試体の比誘電率は、5.8 ~ 8.7の範囲内におさまっていた。

3. 2 導電率の周波数特性について

図-3に各周波数における導電率測定結果の一例を示す。図は、図-2と同じ供試体（深度567.7m~567.88mのコアの下端部）の結果であり、横軸が周波数、縦軸は導電率の常用体数の値で示してある。図によると、測定に使用した電磁波の周波数が10 MHz以上では導電率は周波数が増加するにしたがい増加し、片対数グラフ上で一次関数で近似できることがわかる。

10 MHz以上の周波数におけるすべての供試体の導電率は $10^{-3.6} \sim 10^{-2.2}$ (S/m) の範囲内におさまっていた。

3. 3 空隙率と比誘電率の関係について

図-4は空隙率と電磁波の周波数が20 MHzの場合の比誘電率の関係を示したものであり、横軸が空隙率、縦軸が比誘電率である。図によると、比誘電率は空隙率が増加するにしたがい増加する傾向にあるがデータのばらつきが大きい。

成形した供試体のうちの幾つかは、供試体の縁が欠けていたりあるいは割れ目が存在するものがある。花崗岩のマトリックス部の空隙率と比誘電率の関係を調べるために、それらのデータを除き、欠けや割れ目の無いもののみを使った。この結果を図-5に示す。横軸は空隙率、縦軸は比誘電率である。この結果によると、両者の関係が2つのグループに分けられることがわかる。この原因を調べるために、各供試体の深度と比誘電率の関係を求めた。この結果を図-6に示す。横軸が供試体番号、縦軸が比誘電率で、番号の大きな供試体ほど深度が深い。供試体番号と供試体抽出深度の関係は表-3に示す。表中のUはコア上部、Lはコア下部から抽出した供試体であることを示し、中間部から抽出した供試体のうちMUは上部のものを、MLは下部のものをそれぞれ示し、コアの残試料から成形した供試体のうちコアの上部から抽出したものを1Aまたは1B、コアの下部から抽出したものを2Aまたは2Bで示す。

図-6によると、供試体番号23と24の間で比誘電率値が変わっているが、この間で供試体を抽出した深度が変わっている（表-3）。この結果から、供試体を抽出した深度によって図-5中に2つのグループが得られたものと考えられる。図-7は供試体の抽出した深度がすべて100mより浅いもの（以後、100m以浅とする）、図-8は供試体を抽出した深度がすべて500mより深いもの（以後、500m以深とする）の結果をそれぞれ示したものであり、横軸は空隙率、縦軸は比誘電率である。2つの図に示すとおり、深度をもとにデータを分けることにより、空隙率と比誘電率の間に良い相関関係を得ることができた。

3. 4 空隙率と導電率の関係について

図-9は空隙率と電磁波の周波数が20 MHzの場合の導電率の関係を示したものであり、横軸が空隙率、縦軸が導電率である。図は、供試体に欠けや割れ目が存在しないデータのみで比較を行った結果である。図によると、空隙率と導電率の常用対数の間には正の相関が認められるが、大きく2つのグループに分かれている。そこで、各供試体の深度と導電率の関係を求めた結果、供試体を抽出した深度により2つのグループに分けることができたので（図-10）、100m以浅と500m以深の2通りに分けて比較した。図-10の供試体番号は図-6の供試体番号と同じである。深度により分けた結果を図-11と図-12に示す。図

－11が100m以浅、図－12が500m以深の結果であり、どちらも横軸が空隙率、縦軸が導電率である。図－12によると、500m以深では空隙率が増加するにしたいが、導電率は増加する傾向が認められるが、図－11によると、100m以浅で空隙率と導電率の間に明瞭な関係は認められない。

3. 5 比誘電率と導電率の関係について

図－13は電磁波の周波数が20 MHzの場合の比誘電率と導電率の関係を示し、横軸が比誘電率、縦軸が導電率を示す。図は、供試体に欠けや割れ目が存在しないデータのみで比較を行った結果である。この結果によると、比誘電率が増加するにしたいが導電率の常用対数は増加する傾向を示す。このことは、レーダートモグラフィ解析で岩盤内の電磁波速度分布を求めることにより、岩盤内の導電率分布を求めることができるという可能性が見いだされていることを示している。

4. まとめ

花崗岩中に掘削された試錐孔コアから抽出した供試体を用いて空隙率・比誘電率・導電率を測定し、それらの関係を調べた結果、以下の点が明らかになった。

- (1) 比誘電率は電磁波の周波数が10 MHz以上ではほぼ一定となり、今回測定を行った10 MHz～40 MHzでは比誘電率は周波数に依存しない。
- (2) 導電率は、電磁波の周波数が10 MHz～40 MHzでは周波数が増加するにしたいが増加し、片対数グラフ上で一次関数で近似できる。
- (3) 測定した供試体の比誘電率は、供試体を抽出したコアの深度により2つのグループ(100m以浅、500m以深)に分けることができた。それぞれのグループについて空隙率と比誘電率を比較した結果、両者に良い正の相関が認められた。
- (4) 測定した供試体の導電率は、測定に使用した周波数が20 MHzの場合、供試体を抽出したコアの深度により2つのグループ(100m以浅、500m以深)に分けることができた。500m以深では空隙率が増加するにしたいが、導電率は増加する傾向が認められるが、100m以浅で空隙率と導電率の間に明瞭な関係は認められなかった。
- (5) 電磁波の周波数が20 MHzの場合の比誘電率と導電率の関係を調べた結果、比誘電率が増加するにしたいが導電率は増加する傾向を示した。このことは、レーダートモグラフィ解析で岩盤内の電磁波速度分布を求めることにより、岩盤内の導電率分布を求めることができるという可能性が見いだされていることを示している。

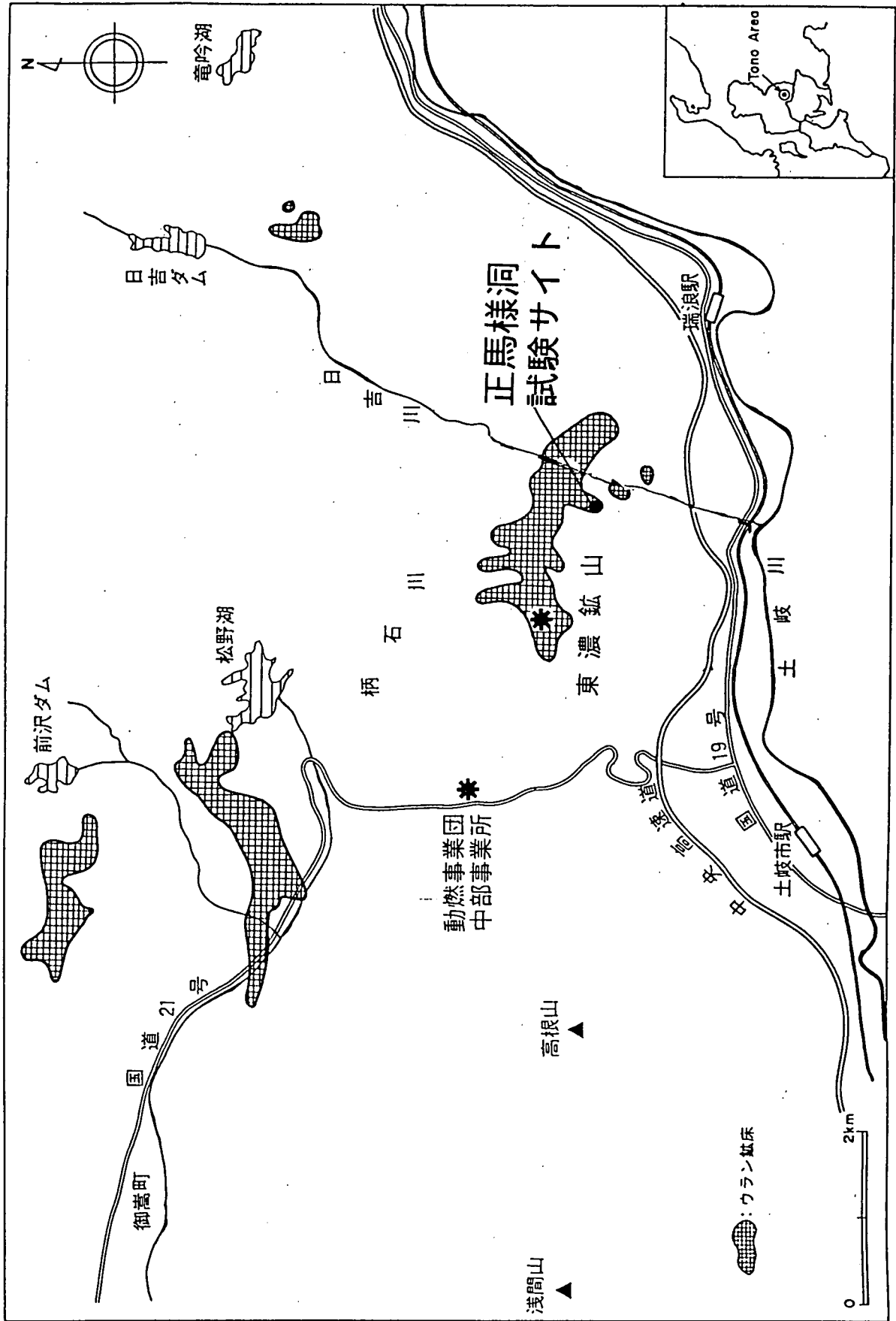
上記のように、比誘電率と導電率は深度によって2つのグループに分けることができたが、この理由の1つとして、鉱物組成の違い³⁾が考えられる。このように、岩盤の比誘電率は岩盤の空隙率のみで決定されないことが明らかになった。トモグラフィ解析で得られた電磁波速度分布から岩盤の空隙率を求めるためには、比誘電率が深度によって2つのグループに分かれた原因を明らかにする必要がある。今回の供試体で得られたデータのみで

この原因を明らかにすることができない場合は100m～500mの空隙率と比誘電率の関係は100m以浅や500m以深での関係と異なっているものと考えられるため、100m～500mのコアや他地域に掘削された試錐コアを用いて測定を行ってデータを蓄積し検討をしていく必要があると考えられる。

今後は、比誘電率が深度によって2つのグループに分かれた原因を究明し、必要であれば上記データを取得し検討を行い、これらの結果をもとにトモグラフィ解析結果から得られた電磁波速度分布から岩盤の空隙率を求め、岩盤内の含水量を定量的に把握する手法を構築していく予定である。

参考文献

- 1) 仙波毅、尾方伸久、長谷川健、岩崎浩、渡辺邦夫 (1992) : ボアホールレーダーによる花崗岩岩盤特性調査—釜石鉱山原位置試験場における調査結果について—、応用地質、第32巻、第6号、pp. 34-42
- 2) 動力炉・核燃料開発事業団、川崎地質 (株) (1991) : 花崗岩供試体の比誘電率測定、PNC PJ7374 91-002
- 3) 動力炉・核燃料開発事業団 (1988) : 東濃鉱山周辺における花崗岩の水理学的特性調査 (その2) —AN-1, 3号孔の割れ目特性調査—、PNC SN7420 89-009



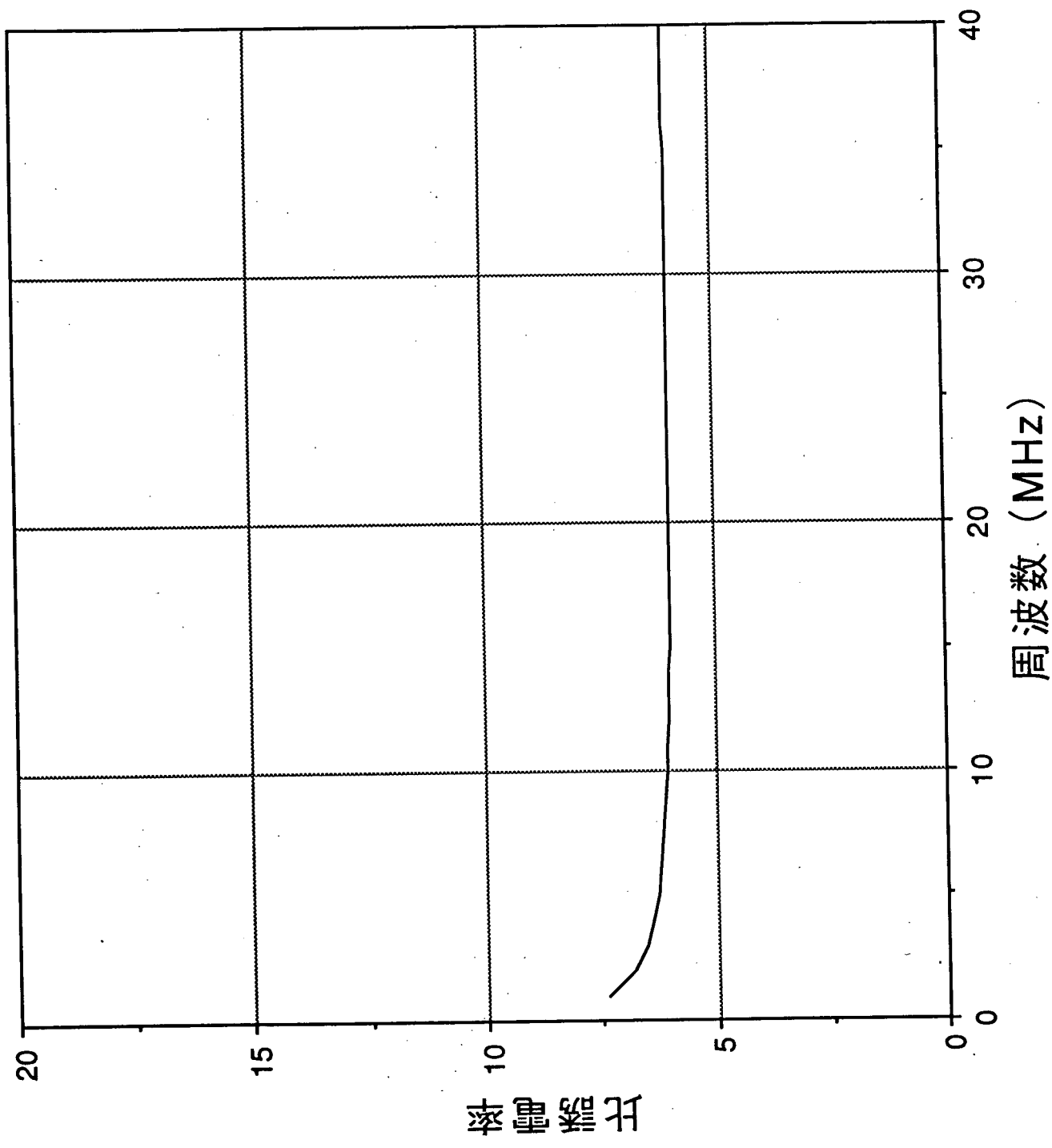
図一1 正馬様洞試験サイト位置図

表一 1 実験に用いたコアの深度および空隙率

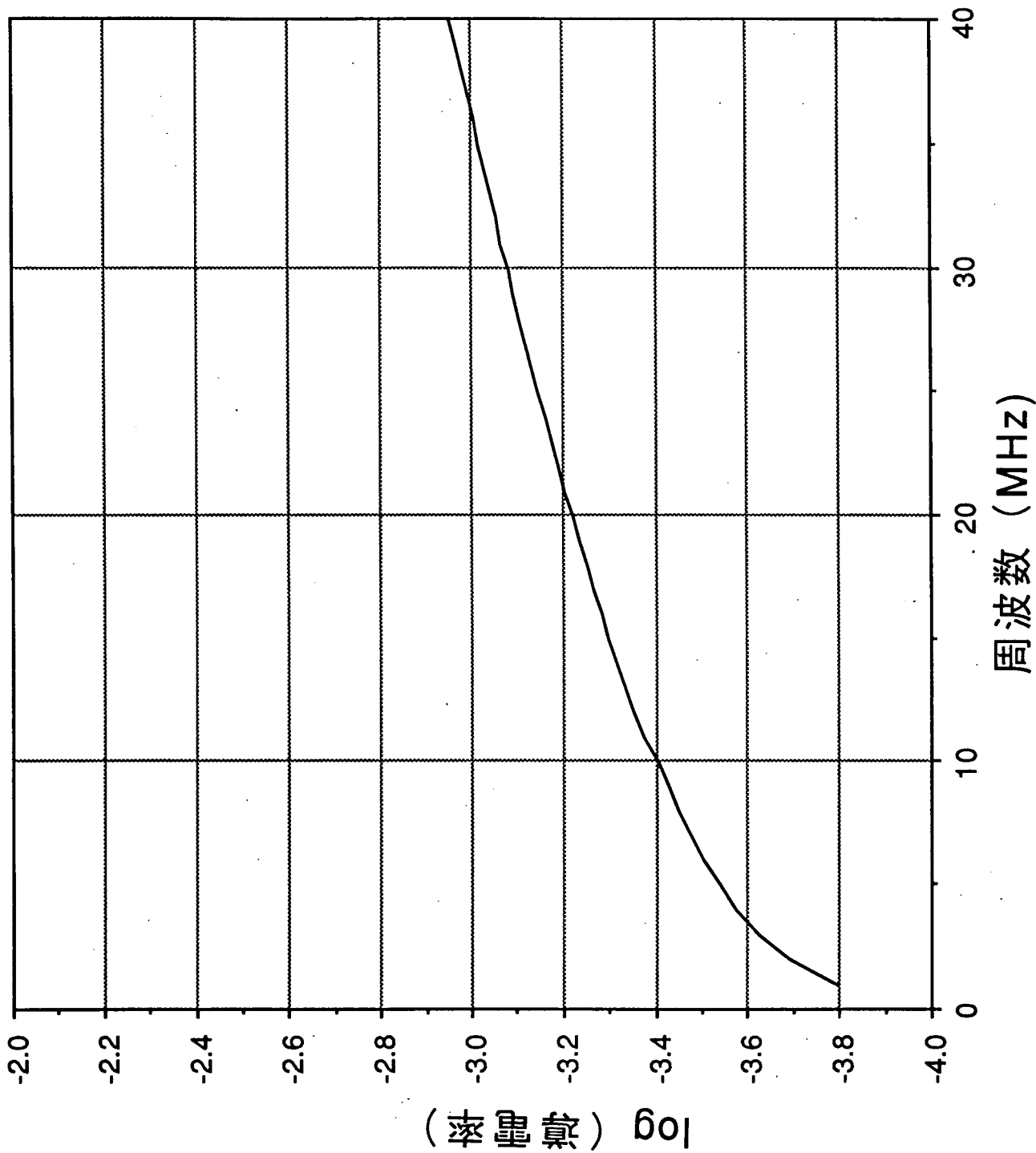
供試体深度 (m)	空隙率 (%)	供試体深度 (m)	空隙率 (%)
17.15~17.40	12.59	71.30~71.45	2.52
19.10~19.30	6.03	71.45~71.60	2.46
20.65~20.85	10.23	567.70~567.88	1.42
21.25~21.65	6.29	618.80~618.98	1.29
21.65~21.95	5.64	799.75~799.90	1.70
28.30~28.50	4.14	821.80~822.00	3.12
29.00~29.20	1.65	827.25~827.41	3.52
33.15~33.35	2.78	837.40~837.60	0.87
49.65~49.85	2.28	858.95~859.15	0.99
70.35~70.55	1.66	877.75~877.95	0.99

表一 2 供試体仕様

仕上げ	円柱形
直径	25 mm ϕ
厚さ	4 ~ 4.5 mm
平行度	0.1 mm 以下



図一 2 各周波数における比誘電率測定結果例
 (深度567.7m~567.88mのコアの下端部の供試体を用いた結果)



図一 3 各周波数における導電率測定結果例

(深度567.7m~567.88mのコアの下端部の供試体を用いた結果、縦軸は常用対数値)

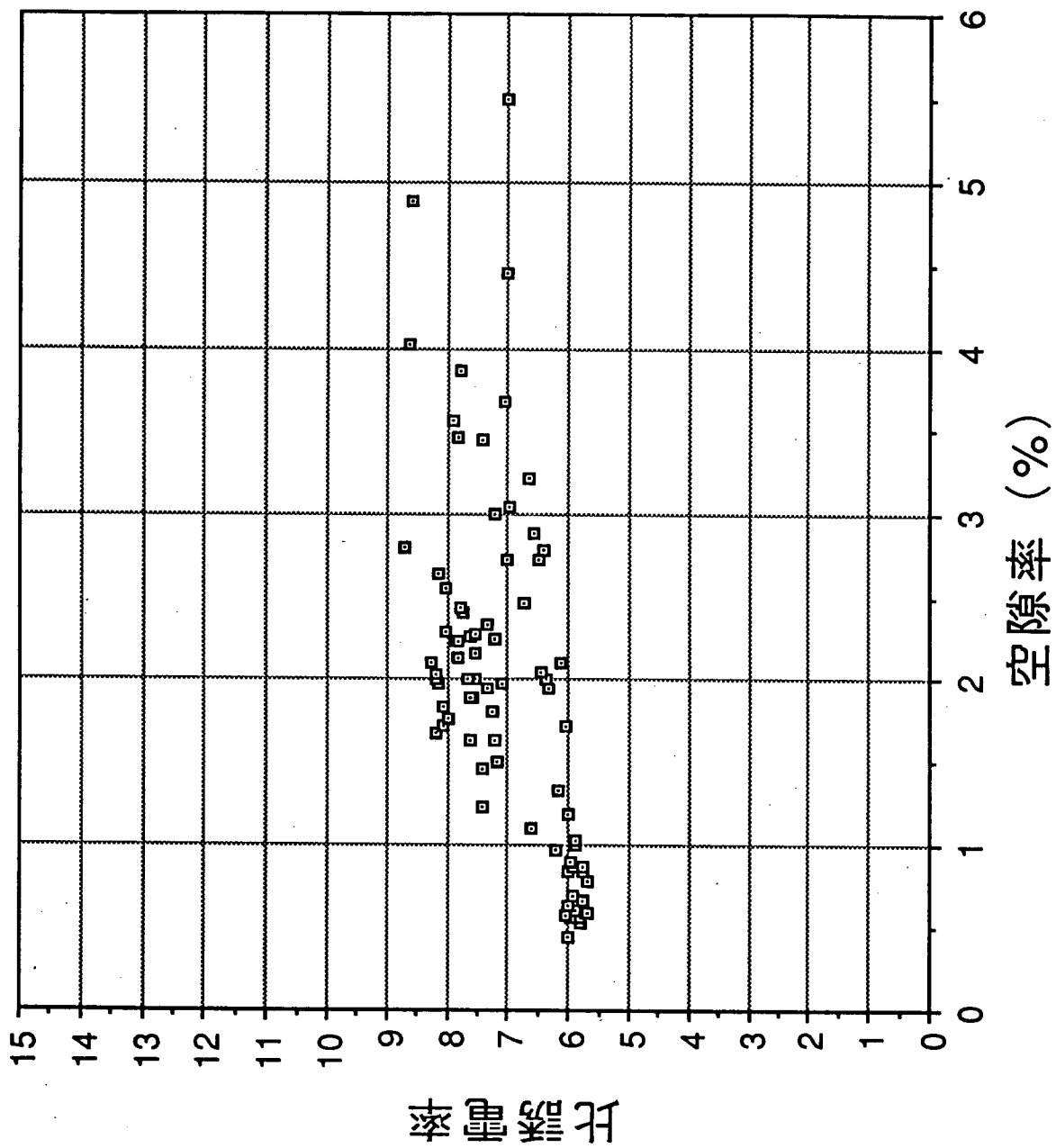
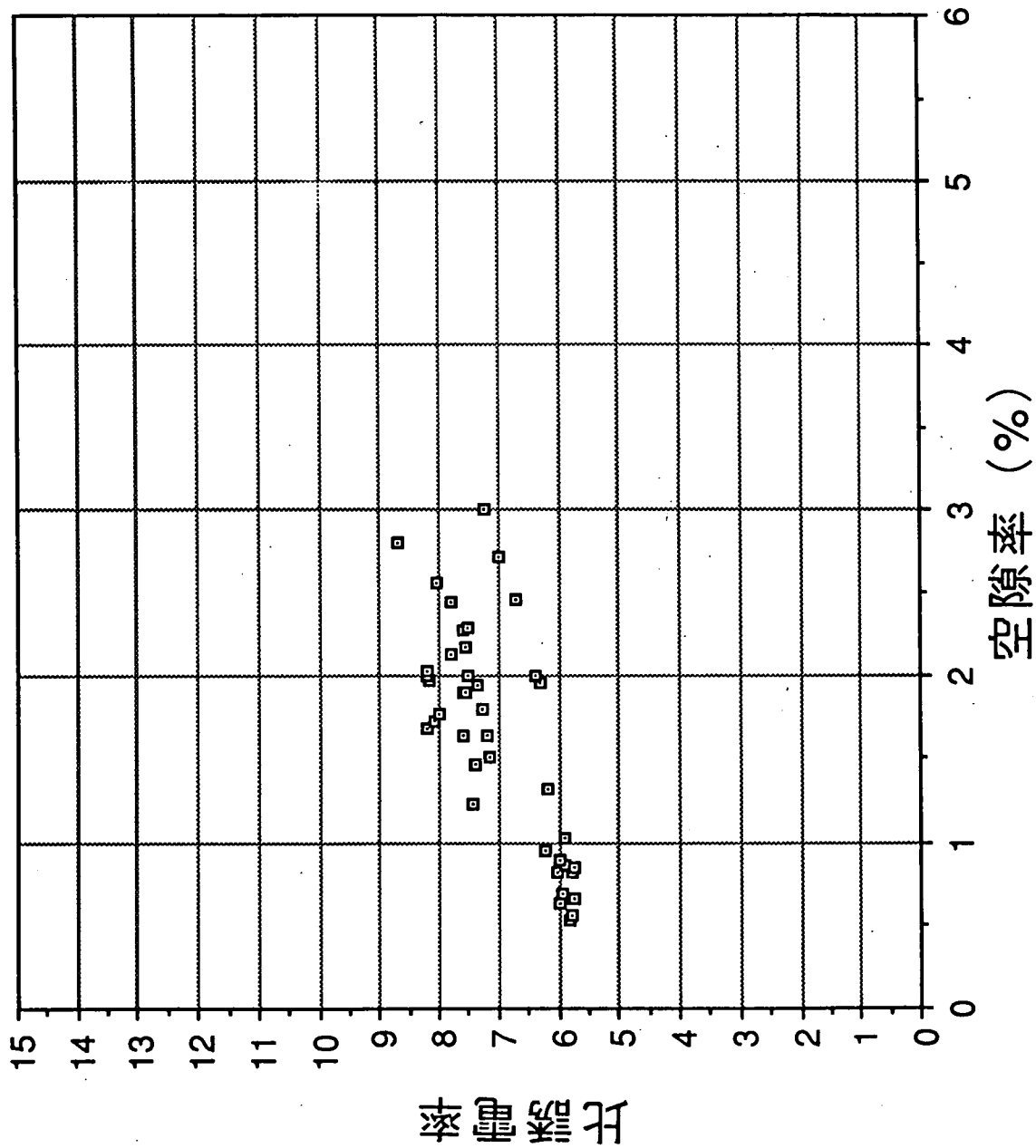
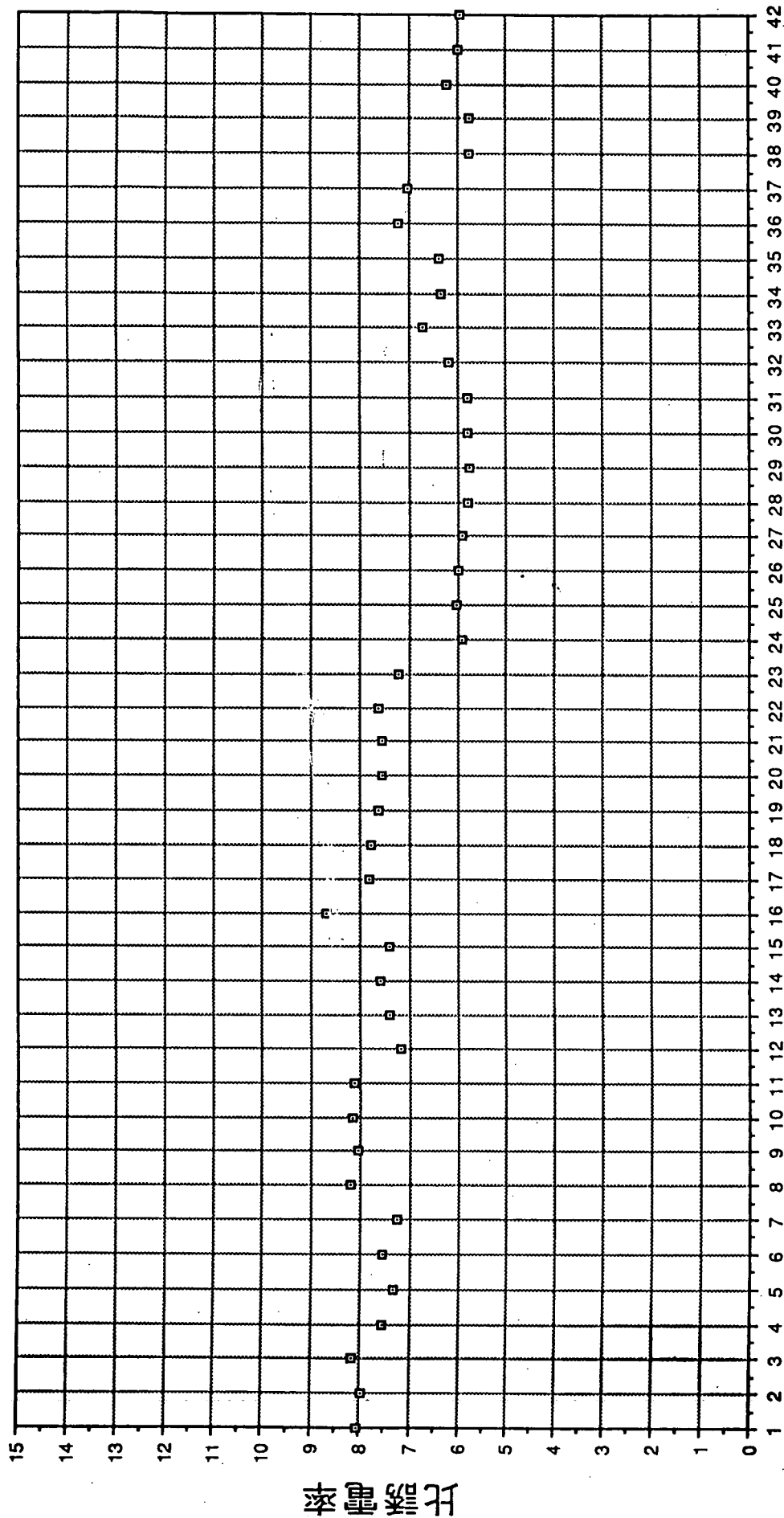


図-4 空隙率と比誘電率の関係
(すべてのデータを用いた結果)

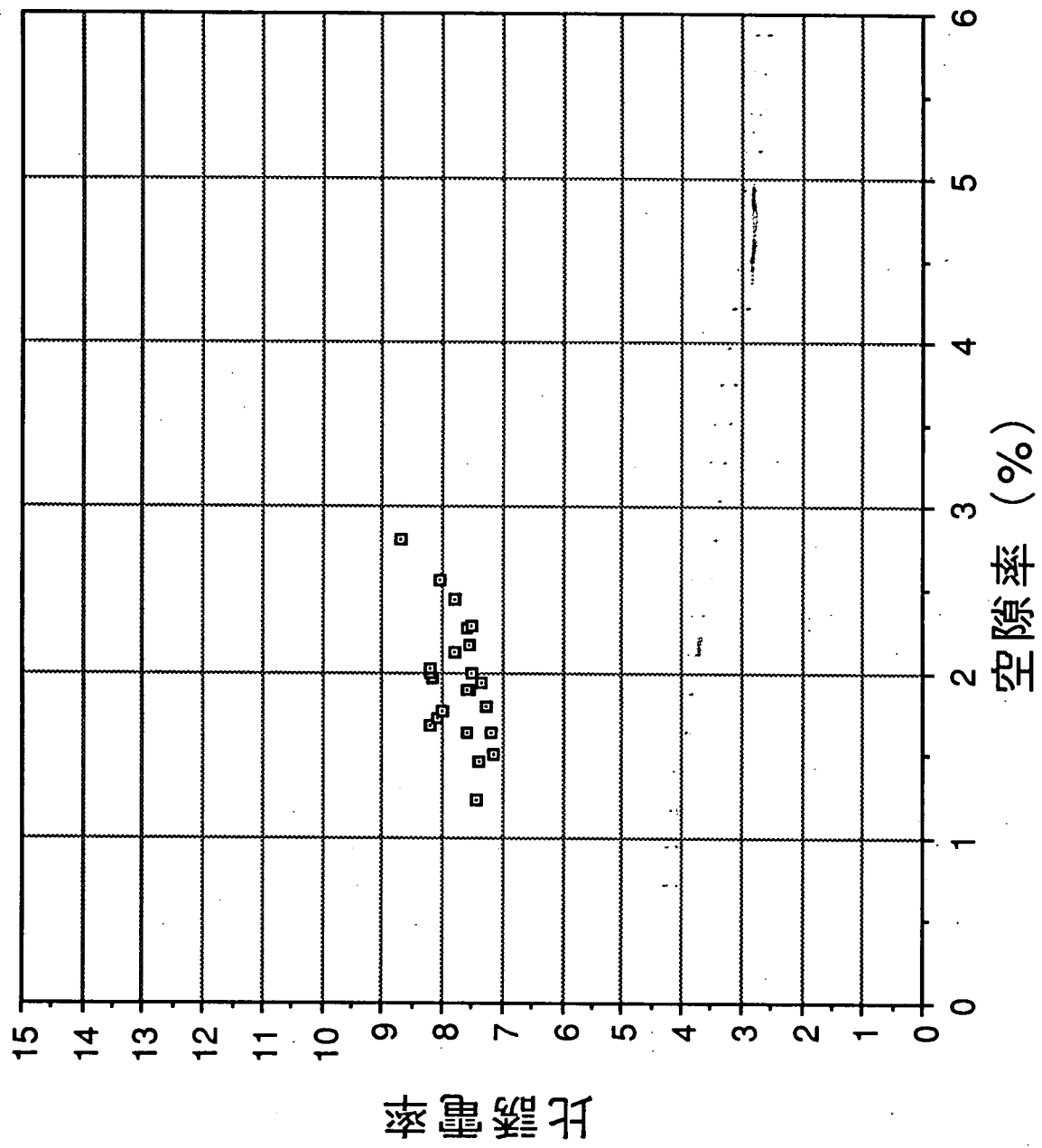


図一5 空隙率と比誘電率の関係
(欠け・割れ目のない供試体のデータを用いた結果)

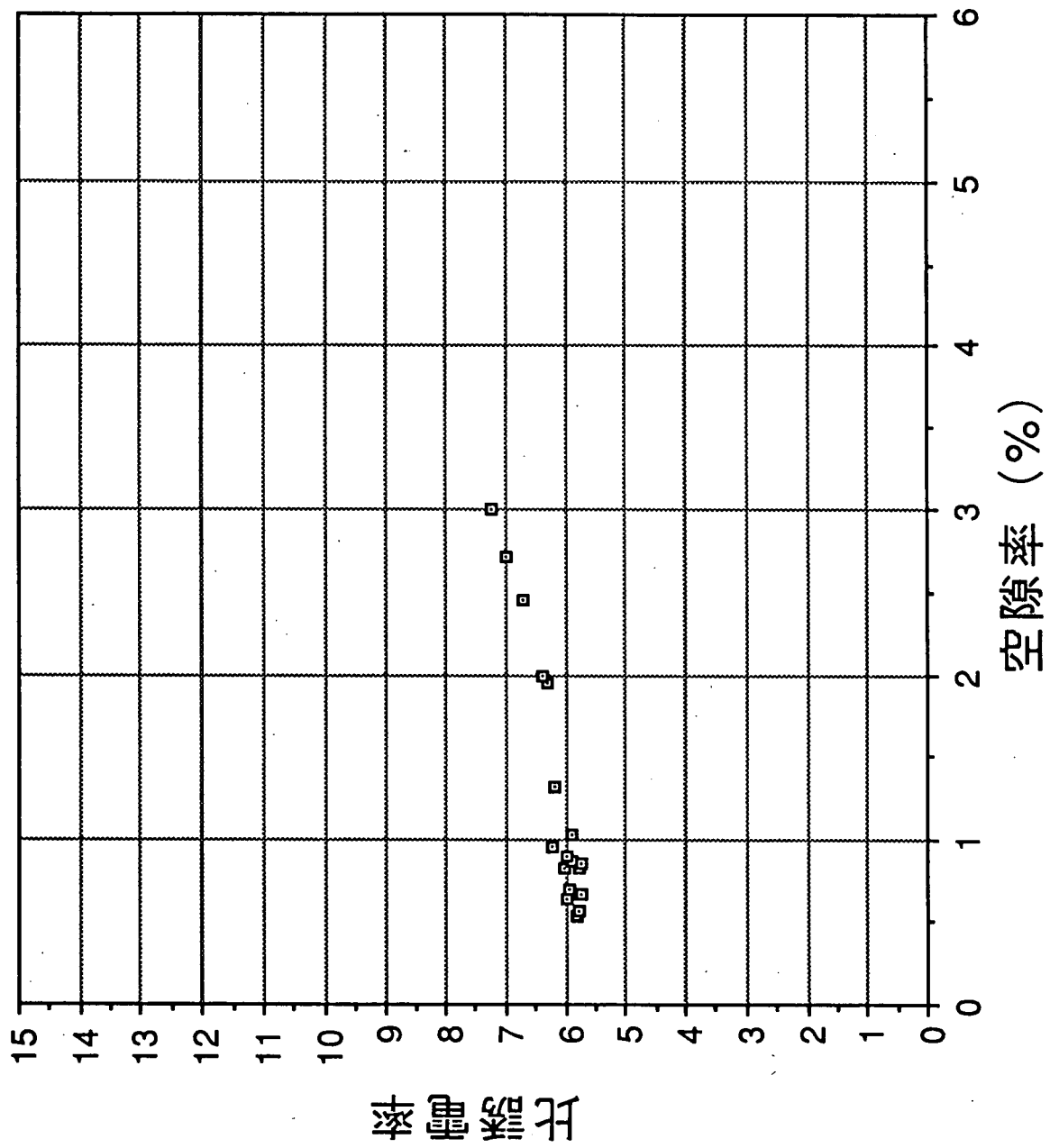


供試体番号

図一六 各供試体の深度と比誘電率の関係



図一七 空隙率と比誘電率の関係
 (欠け・割れ目のない、100m以浅の供試体を用いた結果)



図一八 空隙率と比透電率の関係
 (欠け・割れ目のない、500m以深の供試体を用いた結果)

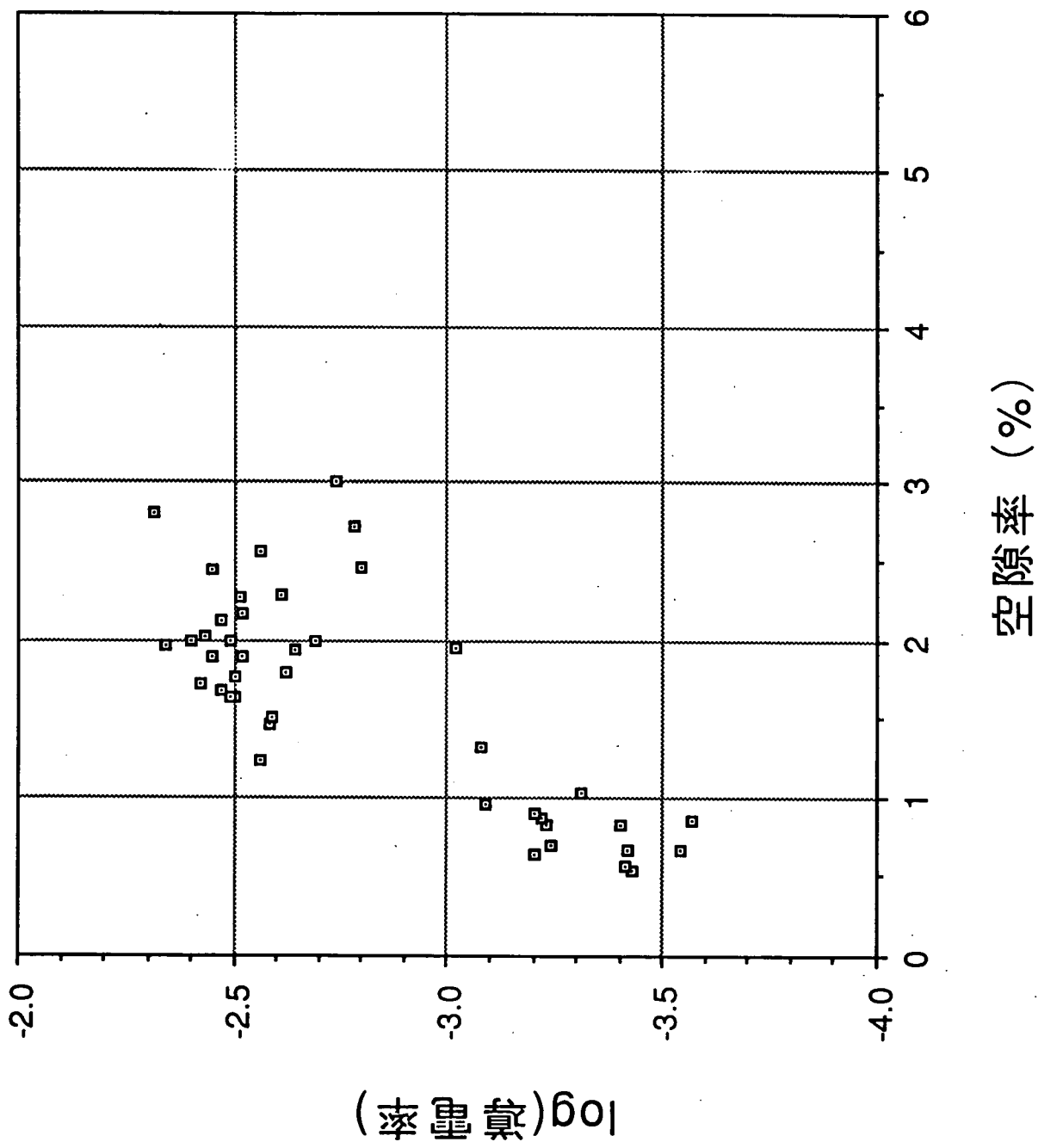
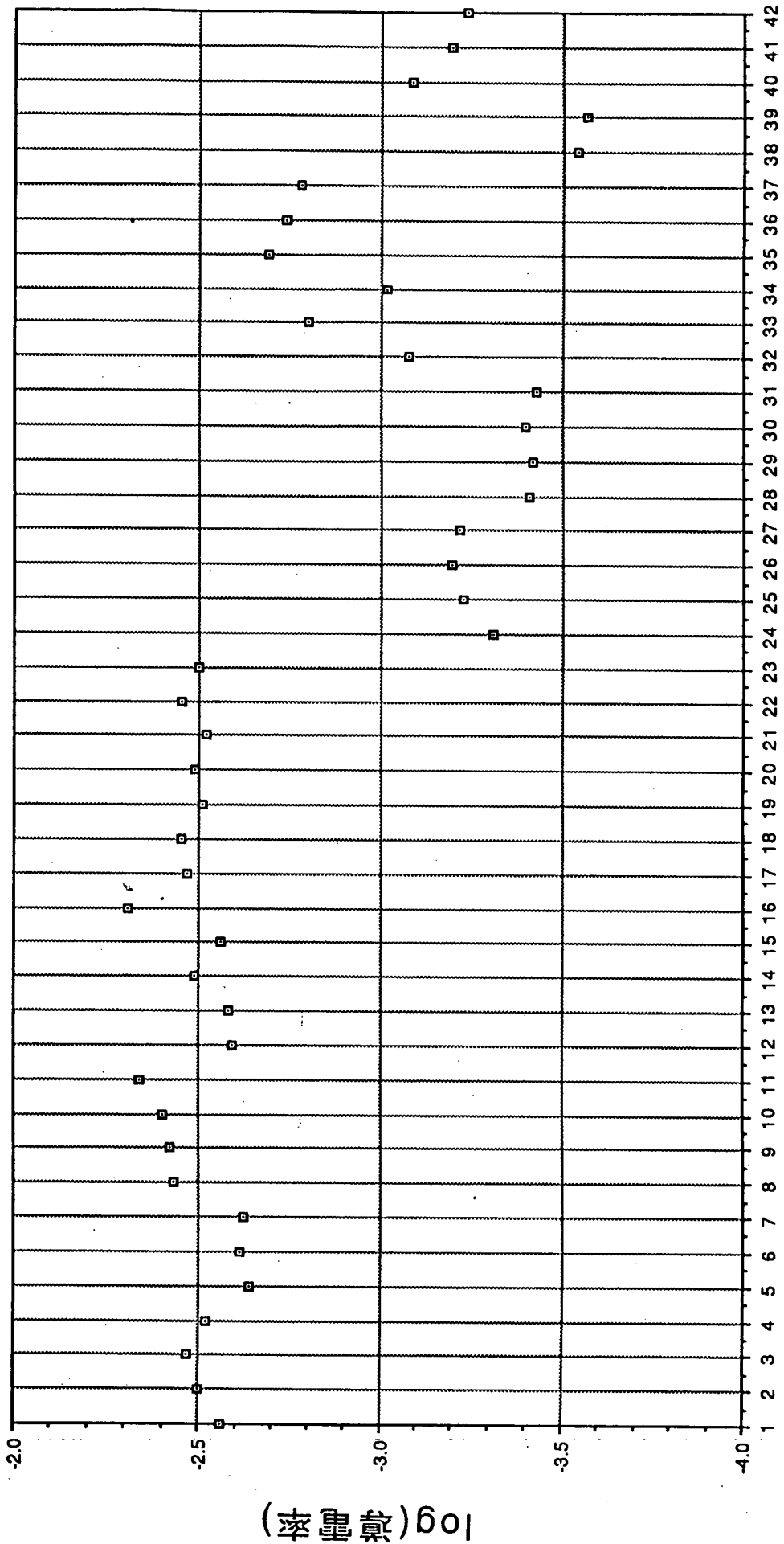


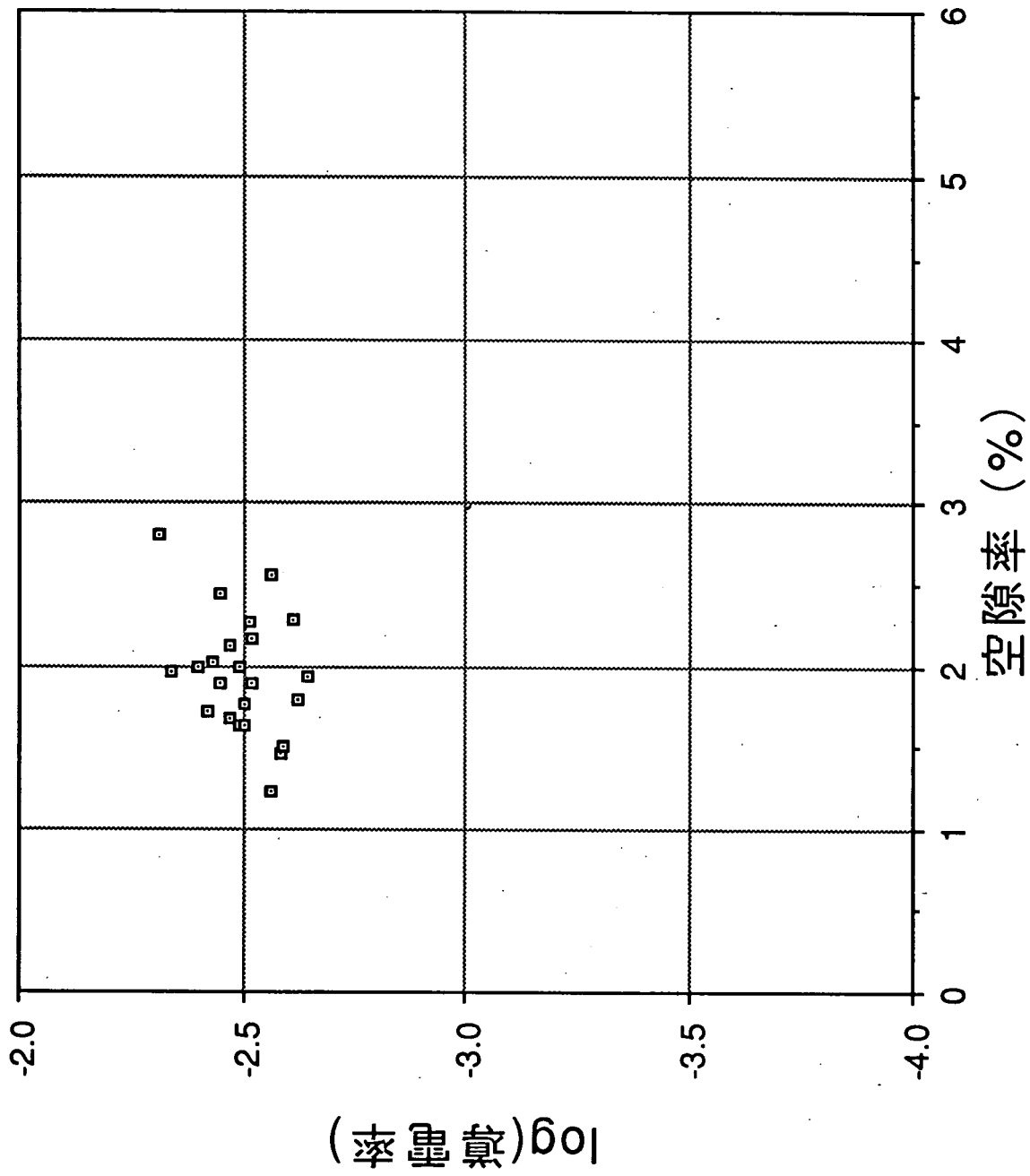
図-9 空隙率と導電率の関係

(欠け・割れ目のない供試体のデータを用いた結果、縦軸は常用対数値)



供試体番号

図一10 各供試体の深度と導電率の関係
(縦軸は常用対数値)



図一11 空隙率と導電率の関係

(欠け・割れ目のない、100m以浅の供試体を用いた結果、縦軸は常用対数値)

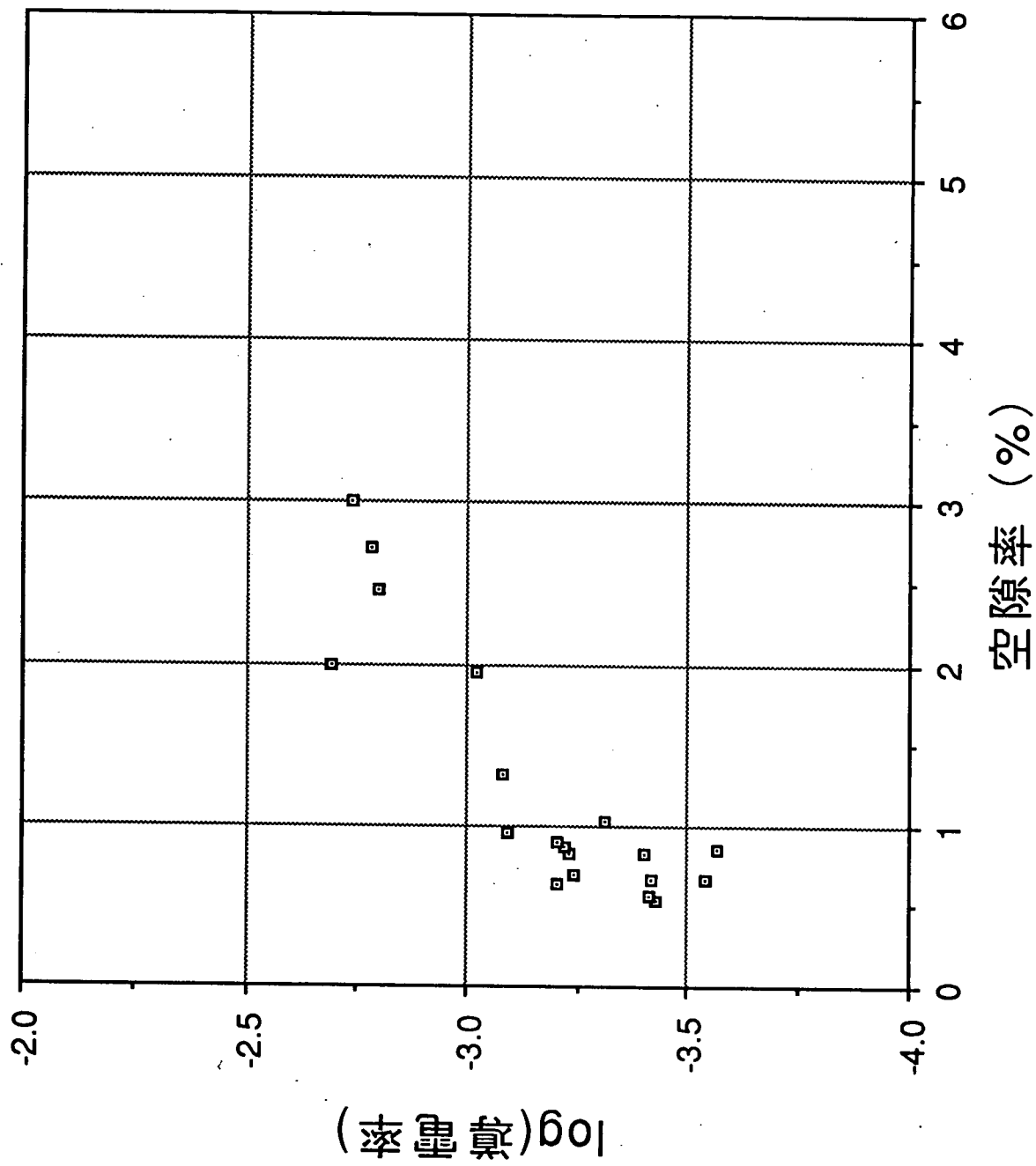


図-12 空隙率と導電率関係

(欠け・割れ目のない、500m以深の供試体を用いた結果、縦軸は常用対数値)

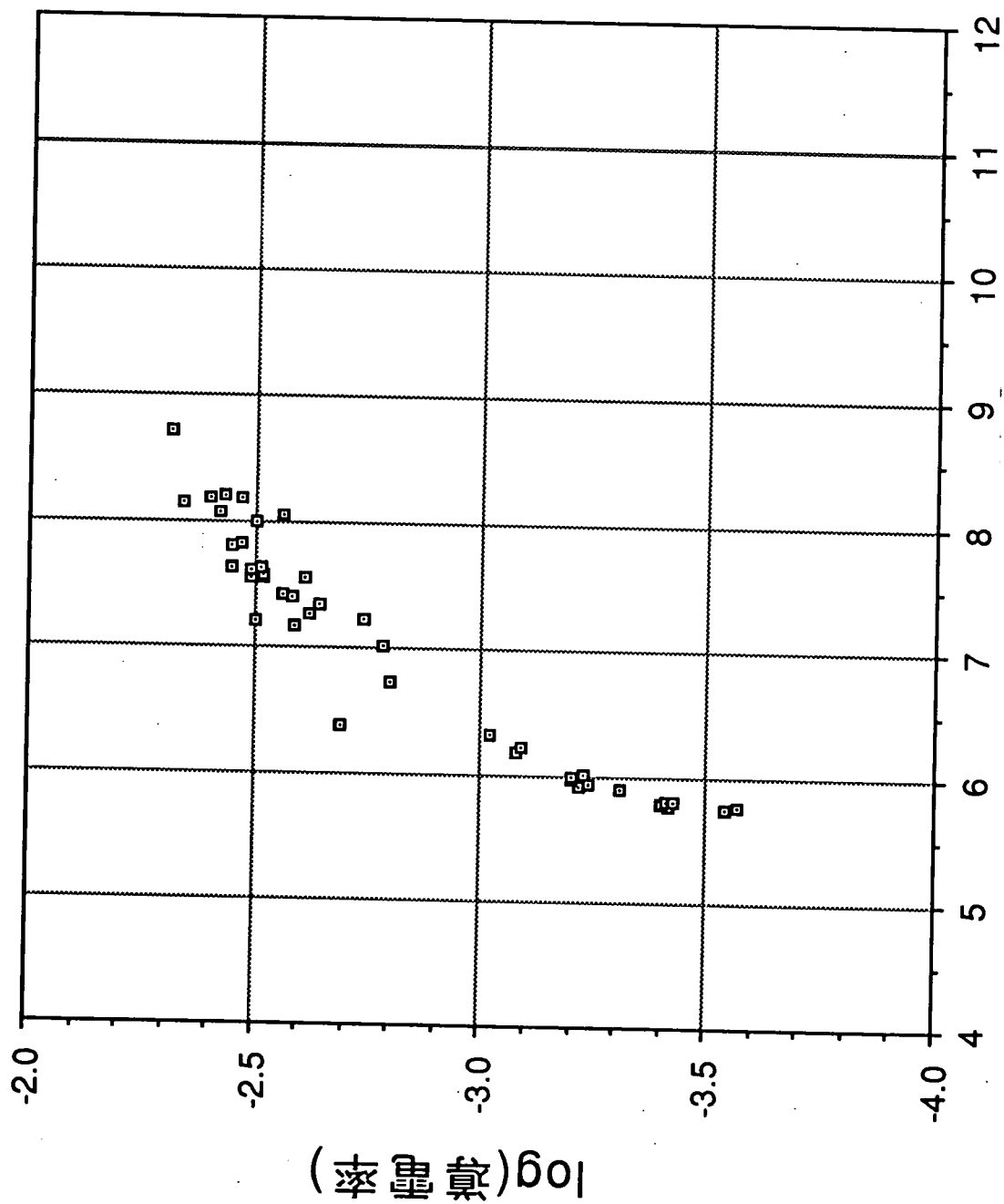


図-13 比誘電率と導電率の関係

(欠け・割れ目のない供試体のデータを用いた結果、縦軸は常用対数値)

表一 3 供試体番号と供試体深度の相関表

供試体番号	供試体抽出深度	供試体番号	供試体抽出深度
1	29.00～29.20U	22	71.45～71.60 2A
2	29.00～29.20LM	23	71.45～71.60 2B
3	29.00～29.20L	24	567.70～567.88U
4	29.00～29.20 1A	25	567.70～567.88UM
5	29.00～29.20 1B	26	567.70～567.88LM
6	33.15～33.35UM	27	567.70～567.88L
7	33.15～33.35L	28	618.80～618.98U
8	49.65～49.85U	29	618.80～618.98UM
9	49.65～49.85UM	30	618.80～618.98LM
10	49.65～49.85LM	31	618.80～618.98L
11	49.65～49.85 1B	32	799.75～799.90UM
12	70.35～70.55U	33	821.80～822.00 1A
13	70.35～70.55UM	34	827.25～827.41 1A
14	70.35～70.55LM	35	827.25～827.41 1B
15	70.35～70.55L	36	827.25～827.41 2A
16	71.30～71.45U	37	827.25～827.41 2B
17	71.30～71.45UM	38	837.40～837.60UM
18	71.30～71.45LM	39	837.40～837.60L
19	71.45～71.60U	40	858.95～859.15U
20	71.45～71.60LM	41	858.95～859.15UM
21	71.45～71.60L	42	877.75～877.95UM

B-4 弾性波トモグラフィ・速度分布再構成プログラムの
導入と改良

(長谷川)

1. はじめに

中部事業所技術開発課では高レベル廃棄物処分研究開発の内、岩盤の特性を調べるための調査技術・機器開発の一環として、各種ジオトモグラフィ技術の開発を行っている。その内の弾性波トモグラフィについて、平成3年度、京都大学工学部資源工学科探査工学研究室で開発された弾性波速度分布再構成アルゴリズムを導入した。そして、中部事業所所有のワークステーションで実行可能なようにプログラムを改良し、その立ち上げを行った。さらに、それを用いて数値実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 弾性波トモグラフィとその問題点

医学の分野で盛んに用いられているX線CT(Computed Tomography)はX線の透過強度を測定し、得られたデータをコンピュータ処理して人体の断面を描き出すものである。弾性波トモグラフィは図1に示したように、このX線の代わりに弾性波を用いて地下の弾性波の速度分布を再構成する技術であるが、両者は以下に示す大きな違いがある。まず、X線は人体内を直進するとみなすことができるためX線の伝搬経路は既知である。これに対し弾性波トモグラフィでは弾性波を用いるため、発信点と受信点の間に音響インピーダンスの異なる物質があると波動は屈折または回折する。従って、その伝搬経路は発信点と受信点を結んだ直線とは限らず、伝搬経路は未知となる。次に、X線CTの場合は人間が装置の中に入るので、全方向からの投影データが取得できるのに対し、弾性波トモグラフィの場合は受信点と送信点を置く場所は地表・試錐孔・坑道内に限られており、全方向の投影データを取得できない場合が多い。従って、X線CTで用いられているデータ解析手法をそのまま弾性波トモグラフィに適用することはできず、弾性波速度分布を再構成するためにはそれに適した解析技術を用いる必要がある。

なお、弾性波トモグラフィには波線トモグラフィと回折トモグラフィの2種類があるが、現時点では波線トモグラフィが実用的であることから、技術開発の対象として波線トモグラフィを取り上げた。

3. データ解析のアルゴリズム

今回採用したアルゴリズムは以下に示す原理および前提に基づいている。

- 1)波線経路の決定(レイトレーシング)はホイヘンスの原理に基づいて行う。
- 2)対象領域をいくつかのセルに分割し、実測データから最小二乗法を用いて各セルの弾性波速度を決定する。

3-1 ホイヘンスの原理と波線経路の決定¹⁾

波の伝搬経路を知るということは、等位相波面が空間を移動する様子を知ることと等しい。今、ある瞬間の波面の形状が既知である時、次の瞬間における波面の形状は次のようにして求めることができる。図2のように、ある瞬間（時刻 t ）における波面の形状が L であったとすると、その波面 L 上のすべての点は新たな波源となって要素波を送り出し、その要素波の波面の包絡面が微小時間 Δt 後の波面 L' となる。これがホイヘンス (Huygens) の原理である。実際の計算では、ある点に弾性波が到達したとすると、図3に示したようにその点が新たな点波源となって要素波を送り出す。ある1点に複数方向から弾性波が到達した場合は、その中でその節点に到達するのに要した時間が最も短いものを正しい波線とする。ホイヘンスの原理では要素波はあらゆる方向に向かって伝搬していくが、現実の計算では有限の方向へしか要素波は出せない。今回は、図3に示したように要素波の射出方向が48方向である点波源を採用した。

ただし、この方法で求めた波線経路は要素波の射出方向が有限であるため、同一媒質中であるにもかかわらず波線が折れ曲がる等の不都合が生じる場合がある。そこで、図4に示したように射出方向が有限であることに起因する波線の折れ曲がり修正するアルゴリズムを組み入れた。

3-2 最小二乗法

最小二乗法の数値解法は大きく分けると次の3種類になる²⁾。

- (1) 正規方程式を経由する方法
- (2) 観測方程式の係数行列をそのまま用いる方法
 - (a) 係数行列の Householder変換、あるいはQR分解を用いる方法
 - (b) 係数行列の特異値分解を用いる方法

このうち特異値分解を用いる方法は係数行列が非正則に近い場合でも安定な解が得られることから、この方法を採用した。特異値分解法のプログラムについては B. S. GARBOW によるサブルーチンを採用した³⁾。

3-3 データ解析のフロー

波線経路は弾性波速度分布が既知でないと決定できない。しかし、データ解析の際の未知数はその速度分布そのものである。そこで、実際にデータを解析する場合は、まず初期モデル（第一次近似モデル）を与え、このモデルについて波線経路を求め、その波線経路に従って初期モデルの速度分布を修正する。次に、修正されたモデルについて波線経路を決定し、再び速度分布を修正する。この過程を観測走時と計算走時との差が十分小さくなるまで繰り返し、弾性波速度分布を再構成する。これを図で示すと図5のようになる。

4. レイトレーシングのテスト

今回採用した「要素波の射出方向が48方向である点波源」を用いた場合、計算される走時（弾性波が発信点から受信点に到達するのに要する時間）にどれくらいの誤差が生じるのかを検討した。検討に用いたモデルは図6-1から図6-8に示した2層構造および3層構造モデルで、50m × 50mの正方形領域を10×10~50×50のメッシュに分割し、図に

示した送信点・受信点の組み合わせについて、それぞれ走時の計算を行った。理論走時（走時の真値）については、スネルの法則に基づいた解析解を用いて求めた。誤差は下式を用いて計算した。

$$\text{誤差 (\%)} = (\text{計算走時} - \text{理論走時}) / \text{理論走時} \times 100$$

計算結果は、メッシュ数を20×20以上にすれば走時の計算誤差はほぼ0.2%以内に収まることを示しており、今回採用したレイトレーシングの手法が実用上十分な計算精度を有していることが明らかになった。

5. 弾性波速度分布再構成のテスト

図7-1から図7-8に示したモデルについて弾性波速度分布再構成のテストを行った。送・受信点の配置については実際の調査を想定し、地表および試錐孔に送・受信点を展開した。

5-1 2層構造モデル（モデル111, モデル112）

図7-1および図7-2からわかるように、高速度層、低速度層ともかなり正しく再構成されている。ただし、モデル112では領域の下部に実際の速度よりも高い速度を示す偽像が現れている。

5-2 ブロックモデル

5-2-1 モデル121, モデル122

図7-3および図7-4からわかるように、高速度ブロック、低速度ブロックともかなり正しく再構成されている。ただし、低速度ブロックの右下にあたかも中間の速度を示す別のブロックが存在するかのような偽像が現れている。

5-2-2 モデル131, モデル132

図7-5および図7-6からわかるように、高速度ブロックおよび低速度ブロックの位置と大きさは再構成されているが、その速度は正しく再現されていない。さらに、ブロックの周囲に偽像が現れている。

5-2-3 モデル141, モデル142

図7-7および図7-8からわかるように、高速度ブロックおよび低速度ブロックが存在する位置はわかるが、その大きさや速度は正しく再現されていない。さらに、ブロックの周囲にかなり広範囲に偽像が現れている。

5-3 考察

上で示した数値実験の結果、弾性波速度分布の再構成結果について、(1)一般に波線の密度が小さい部分ほど偽像が発生しやすい、(2)波線の密度が大きくても同一方向の波線

が多い場合は偽像が発生しやすい、という傾向があることがわかった。従って、再構成された速度分布を評価する際には、波線経路図を用いて各セルの再構成速度の信頼性を確認する必要がある。

6. まとめと今後の課題

弾性波トモグラフィ調査で得られたデータから弾性波速度分布を再構成するためのプログラムの立ち上げと改良を行い、中部事業所所有のワークステーションで実行可能な実用的なプログラムに仕上げることができた。

現時点では、収束の判定は「走時残差二乗和の減少が見られなくなる」という基準で行っているが、実測データの解析の場合は走時残差二乗和の小さな解が必ずしも真の解ではないことが報告されており⁴⁾、今後は赤池の情報基準量⁵⁾といった統計量を導入し収束判定を行うルーチン等を付加する必要がある。

参考文献

- 1) 弾性波トモグラフィの精度向上に関する研究(1990)；山田雅行，京都大学修士論文
- 2) ジオトモグラフィにおける数値解法(1989)；斎藤正徳，ジオトモグラフィシンポジウムテキスト（物理探査学会），p.39-p.41
- 3) 計算機のための数値計算法；森正武訳，日本コンピュータ協会
- 4) 弾性波トモグラフィの現位置岩盤調査への適用(1991)；渡辺俊樹，佐々宏一，資源・素材学会誌，vol.107, no.13
- 5) 最小二乗法による実験データ解析；中川徹，小柳義夫，東京大学出版界

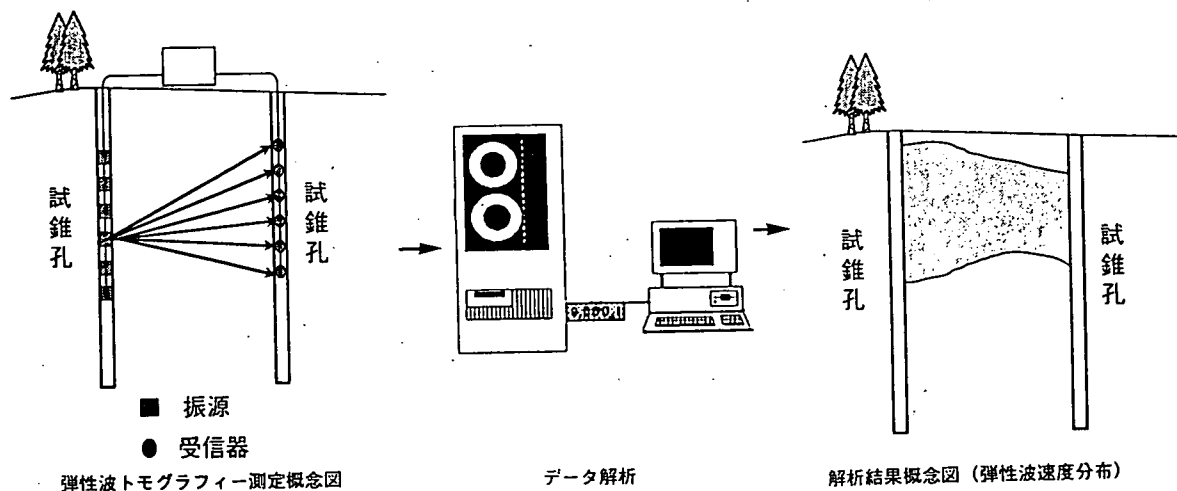


図1 弾性波トモグラフィー調査概念図

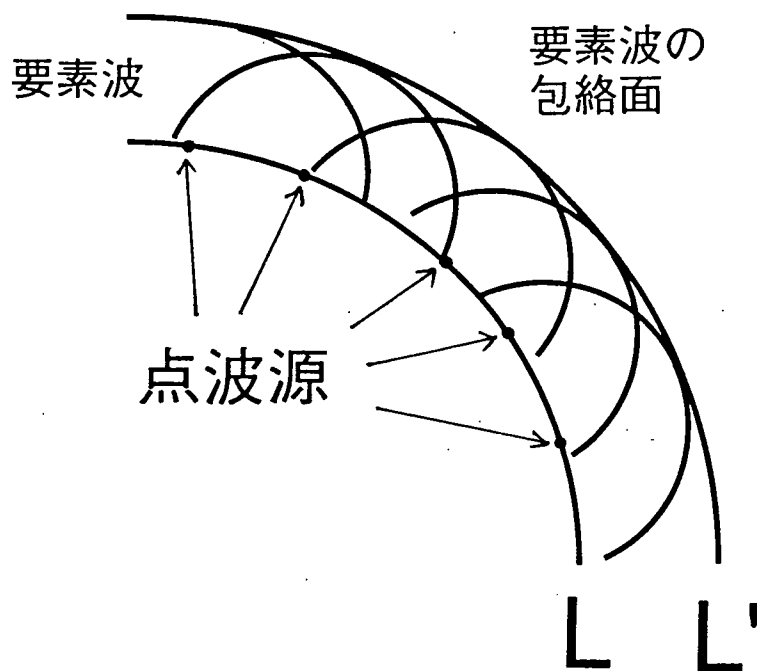


図2 ホイヘンスの原理

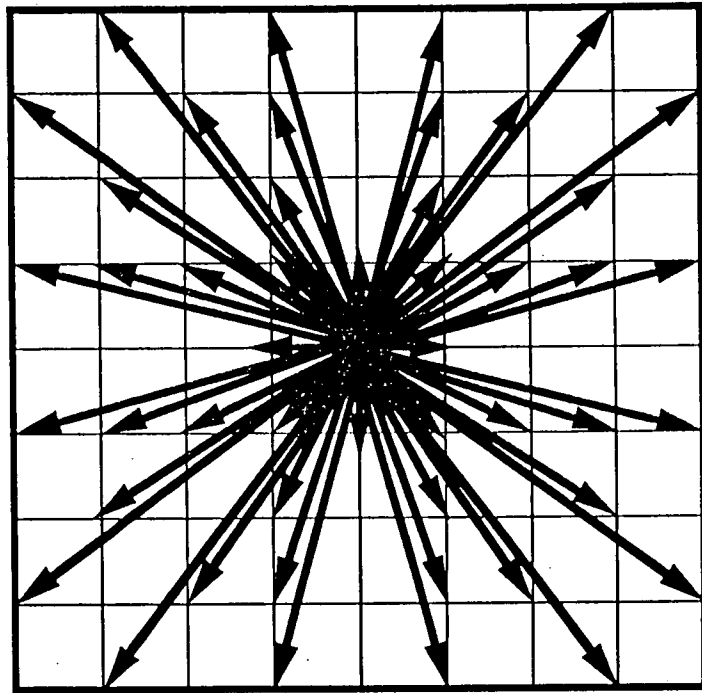


図3 48方向射出点源

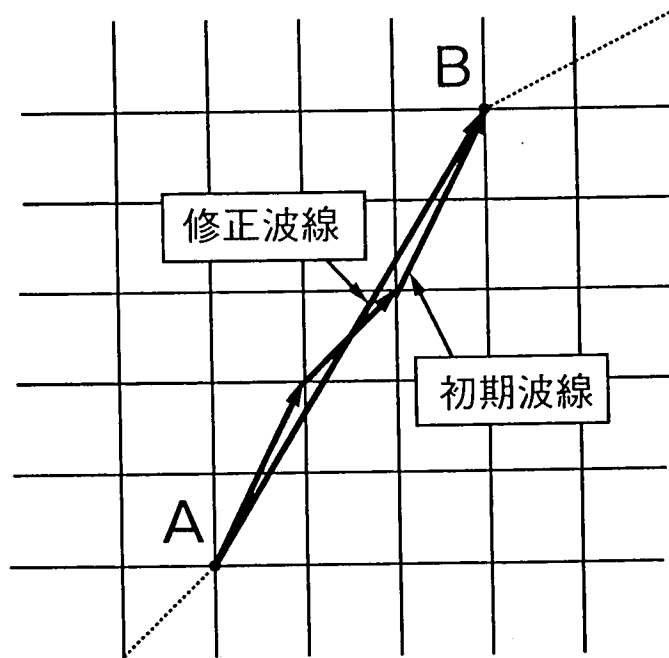


図4 波線修正の概念図

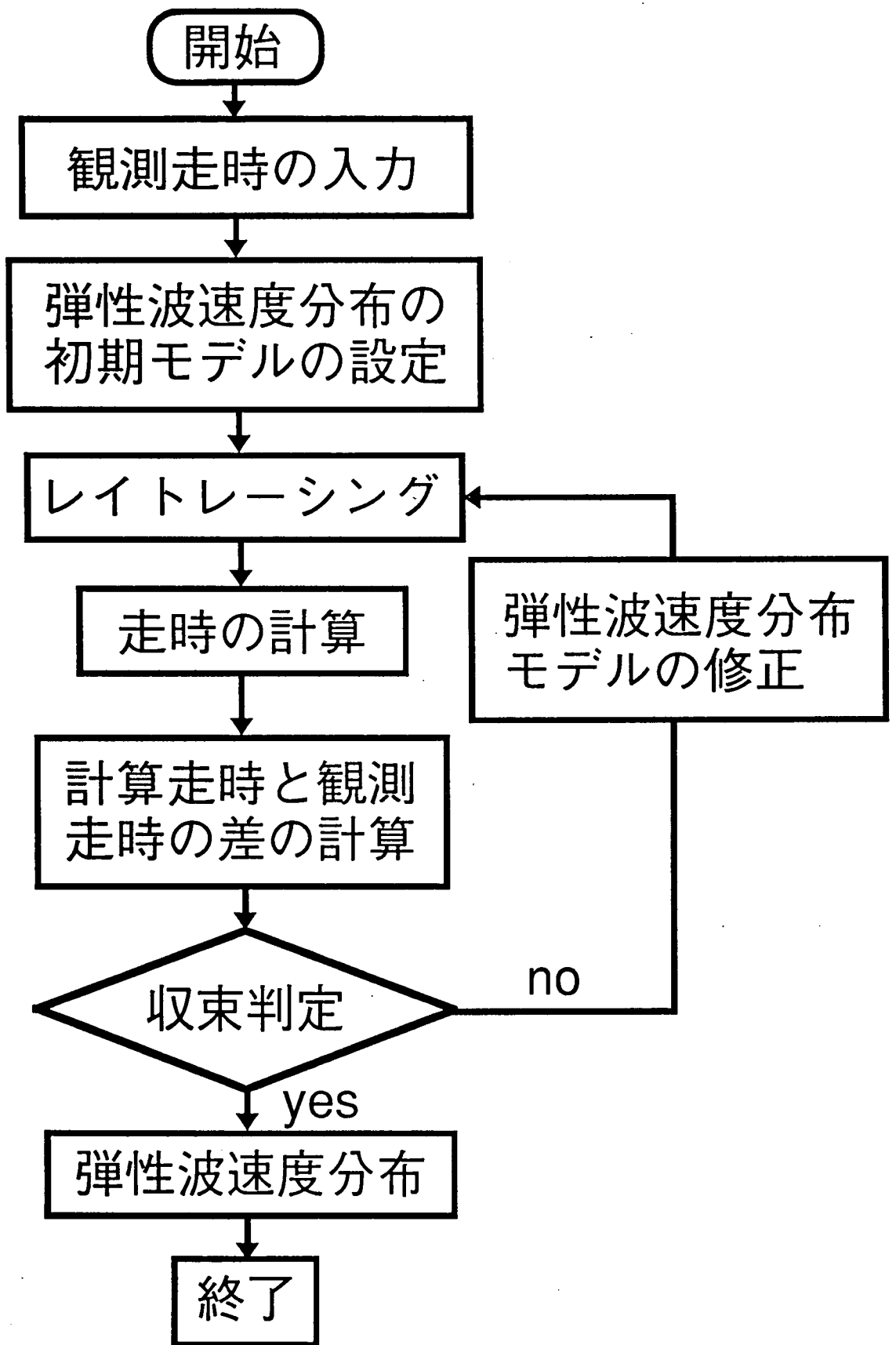
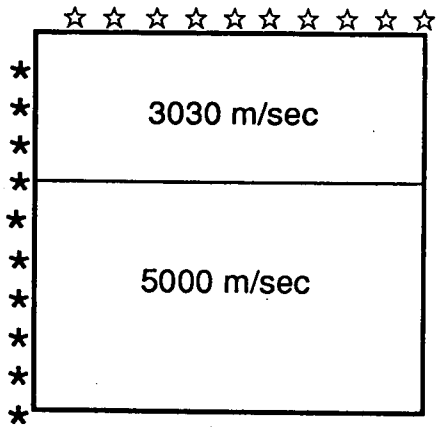


図5 弾性波速度分布再構成のフローチャート

モデル 11

50 m x 50m



* 発信点
☆ 受信点

モデル11

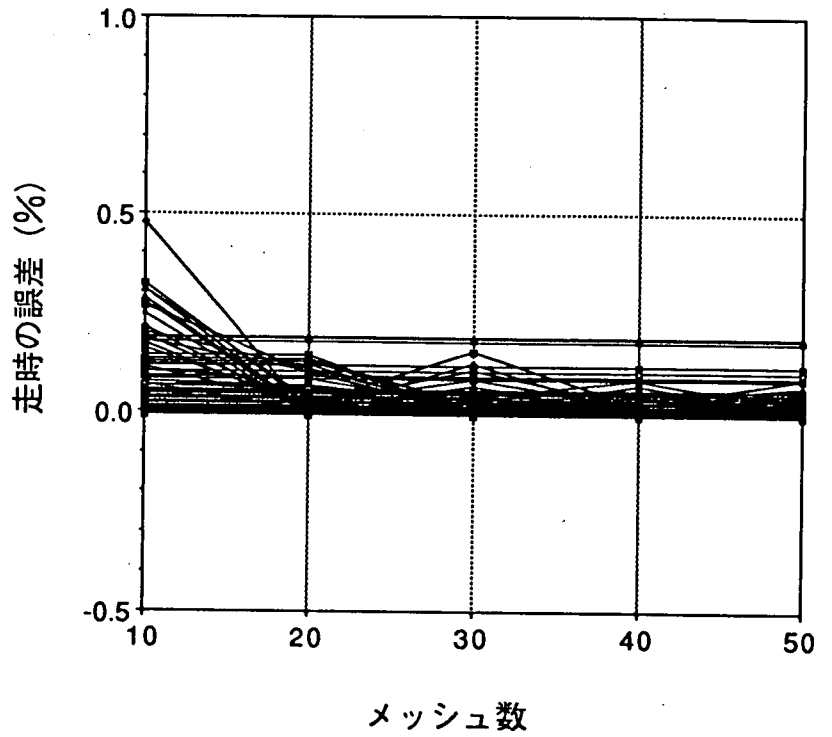
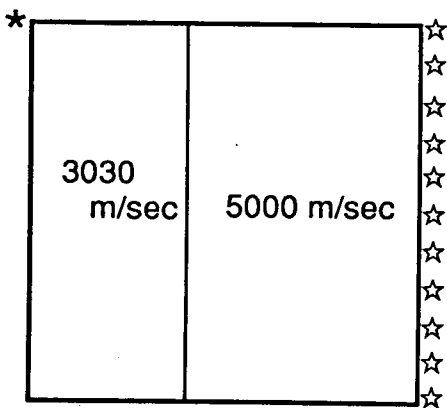


図 6 - 1 走時誤差とメッシュ数の関係(モデル11)

モデル 12

50 m x 50m



* 発信点
☆ 受信点

モデル12

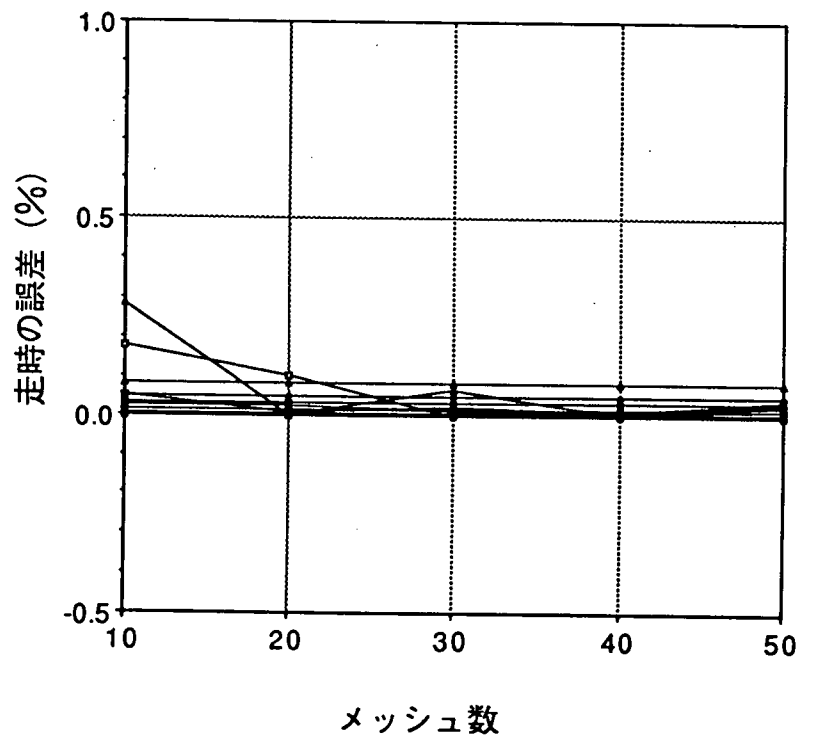
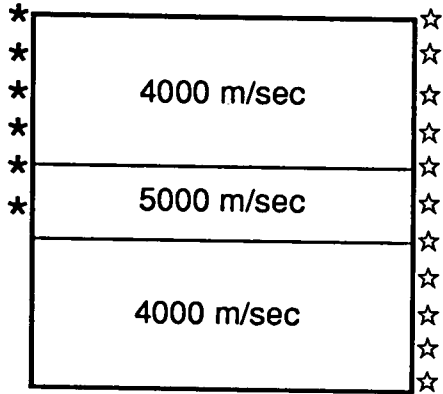


図 6 - 2 走時誤差とメッシュ数の関係(モデル12)

モデル 21

50 m x 50m



* 発信点
☆ 受信点

モデル21

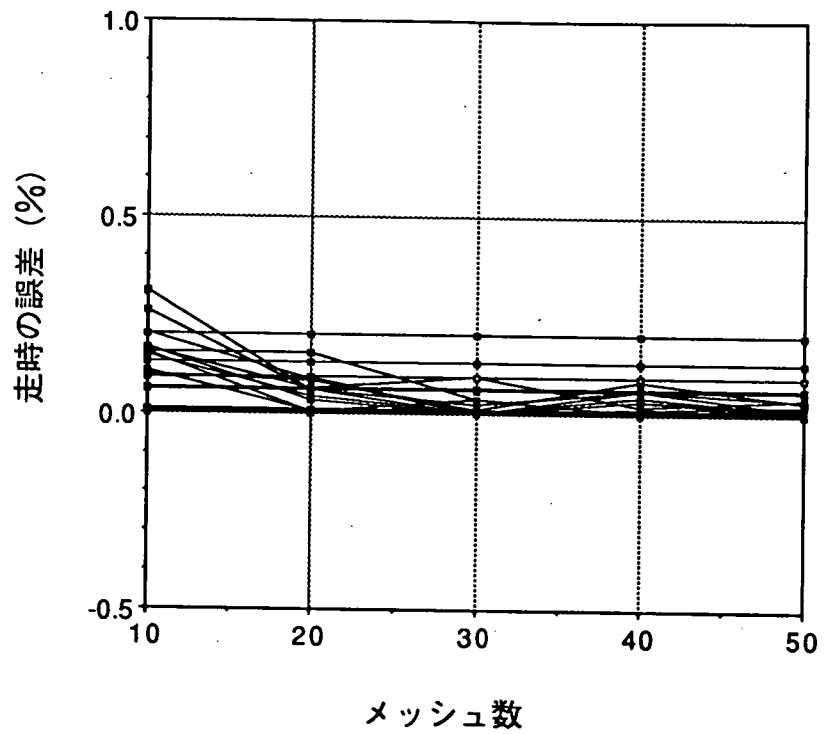
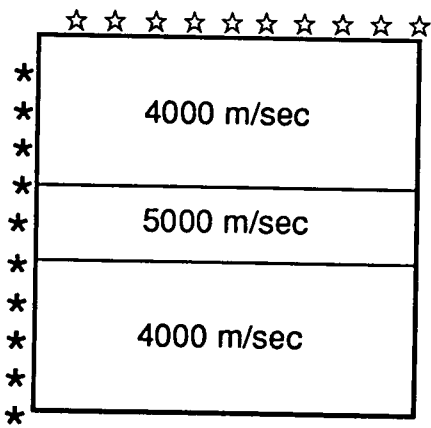


図 6 - 3 走時誤差とメッシュ数の関係(モデル21)

モデル 22

50 m x 50m



* 発信点
☆ 受信点

モデル22

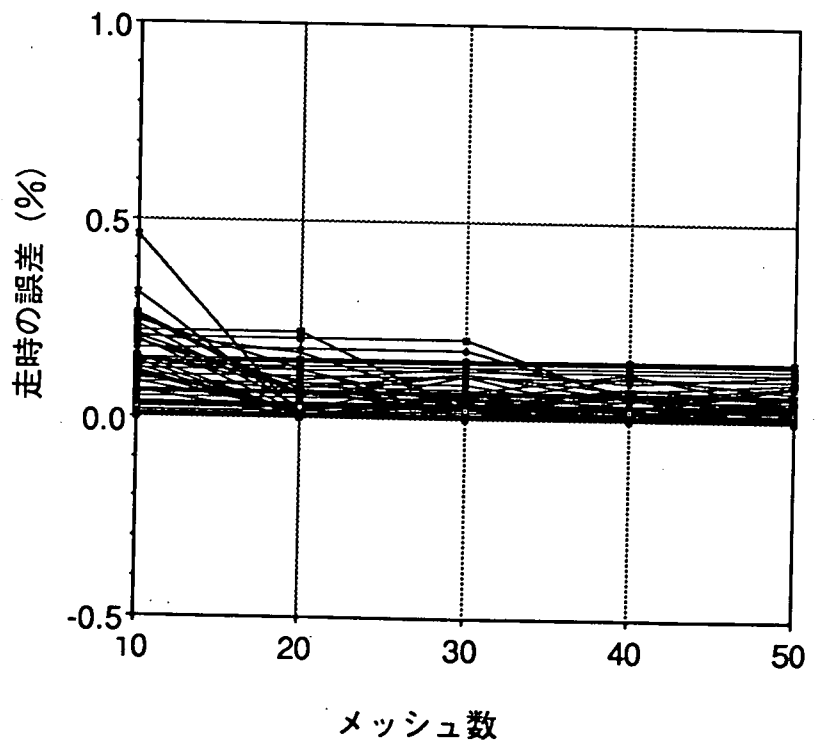
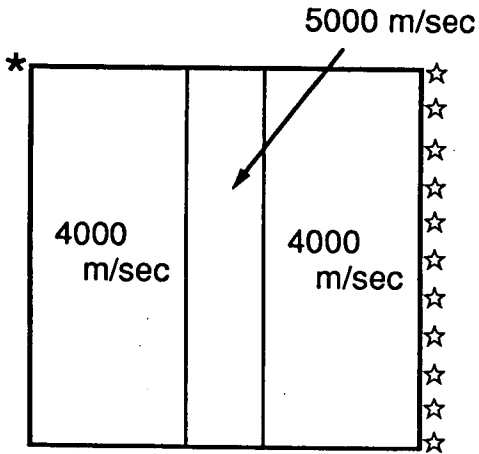


図 6 - 4 走時誤差とメッシュ数の関係(モデル22)

モデル 23

50 m x 50m



- * 発信点
- ☆ 受信点

モデル23

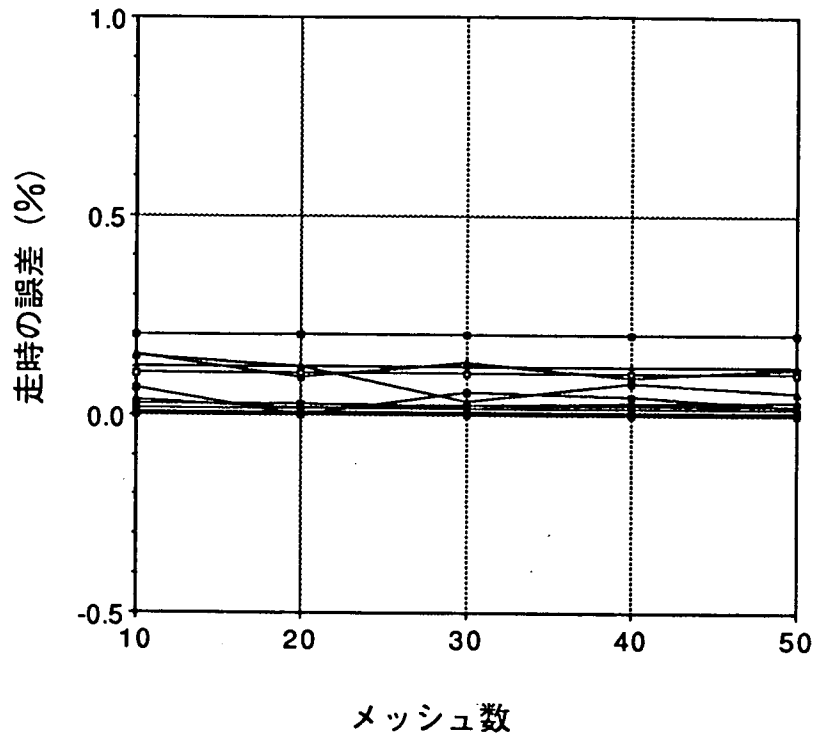
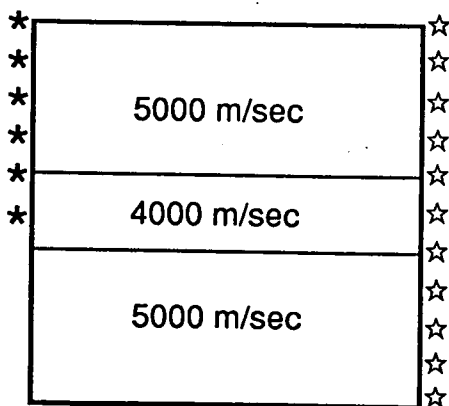


図 6 - 5 走時誤差とメッシュ数の関係(モデル23)

モデル 31

50 m x 50m



- * 発信点
- ☆ 受信点

モデル31

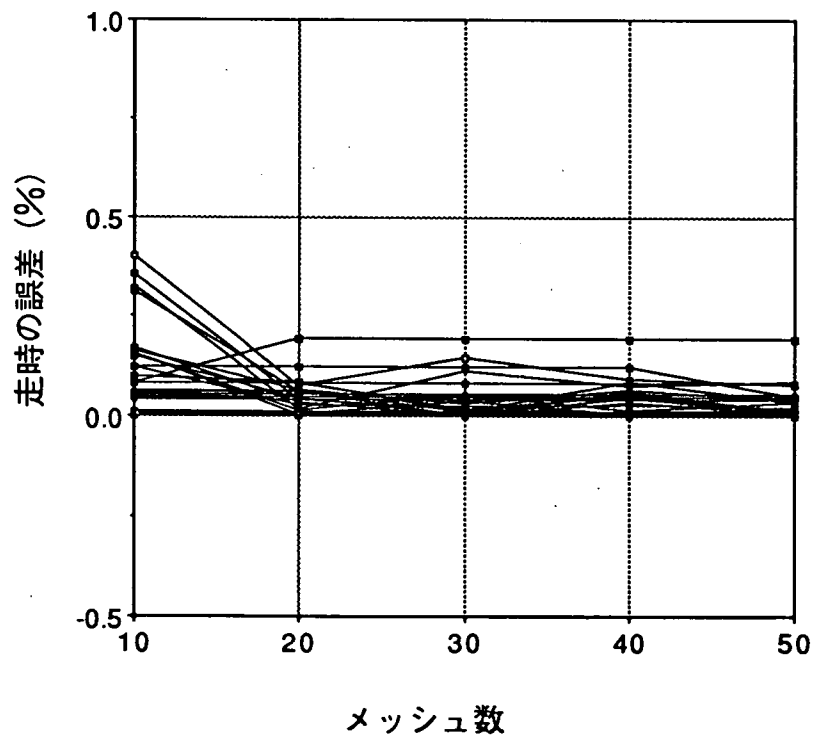
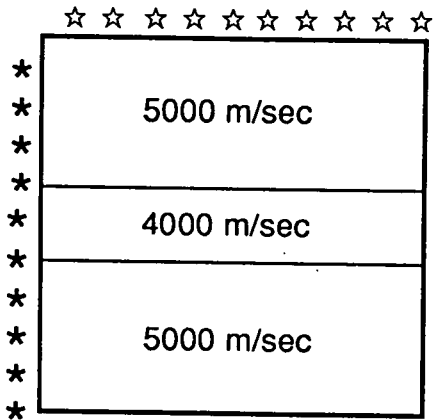


図 6 - 6 走時誤差とメッシュ数の関係(モデル31)

モデル 32

50 m x 50m



* 発信点
☆ 受信点

モデル32

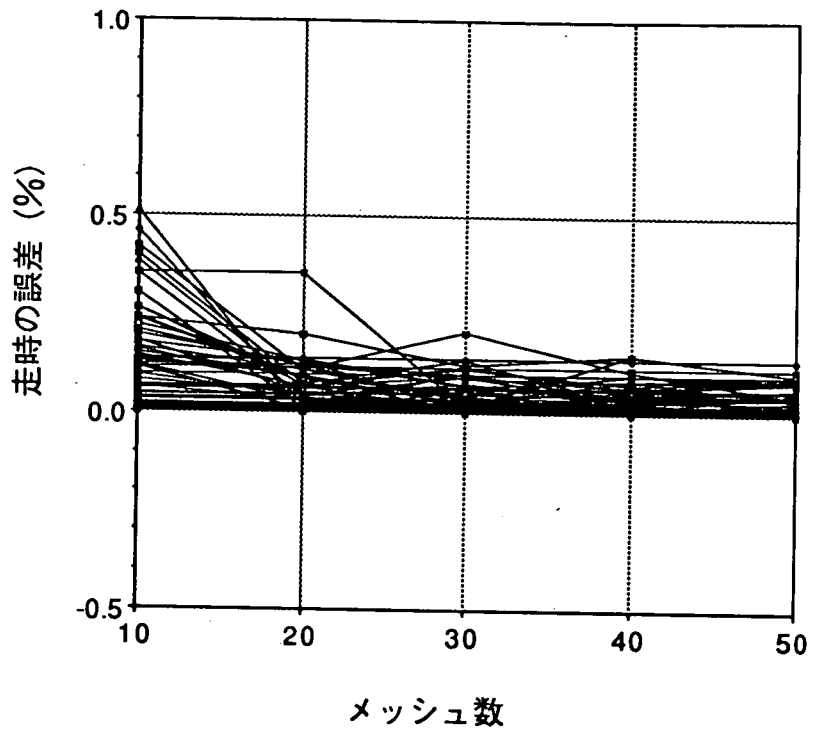
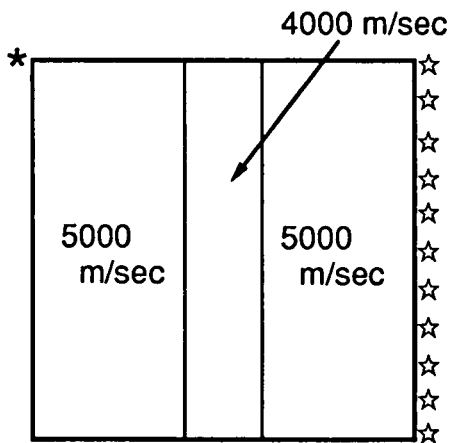


図 6 - 7 走時誤差とメッシュ数の関係(モデル32)

モデル 33

50 m x 50m



* 発信点
☆ 受信点

モデル33

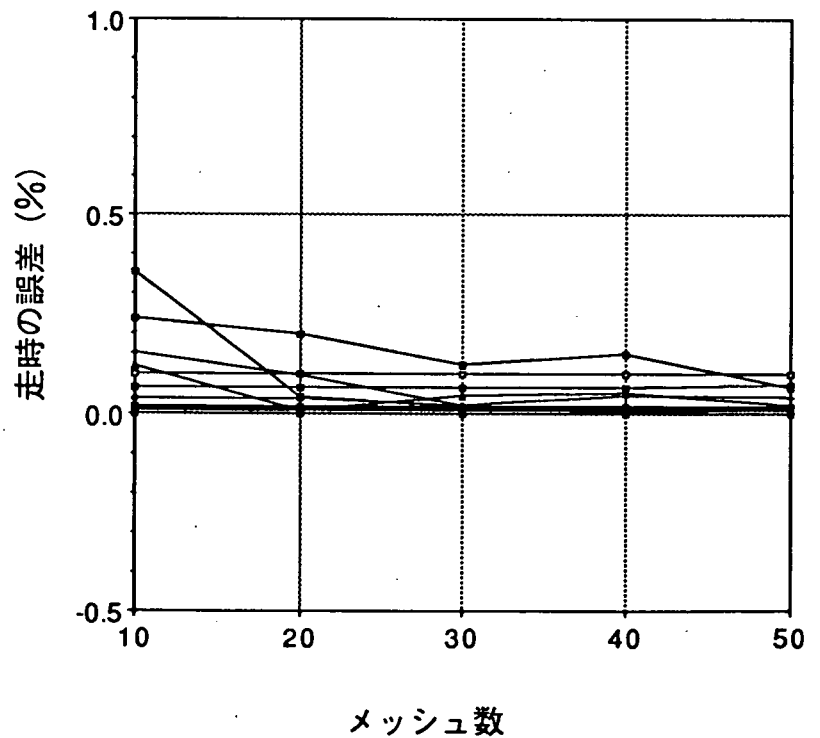
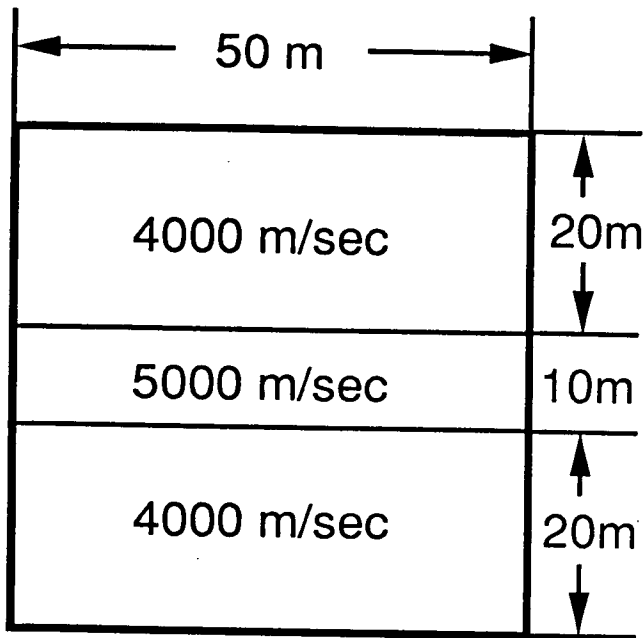
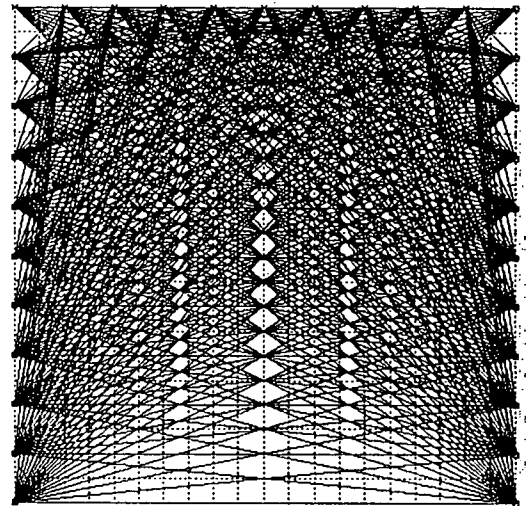


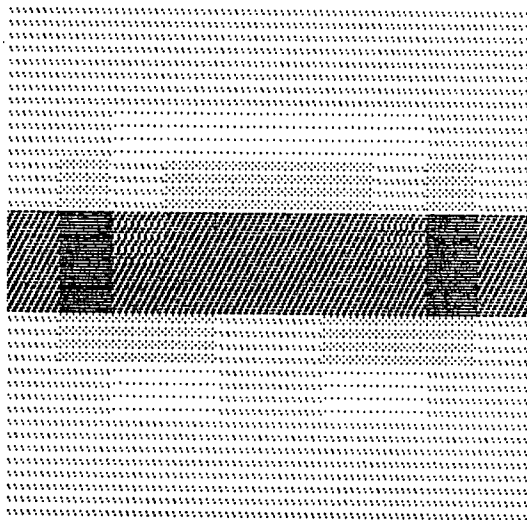
図 6 - 8 走時誤差とメッシュ数の関係(モデル33)



数値モデル

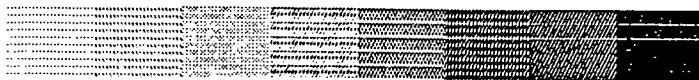


発信点・受信点の組み合わせ

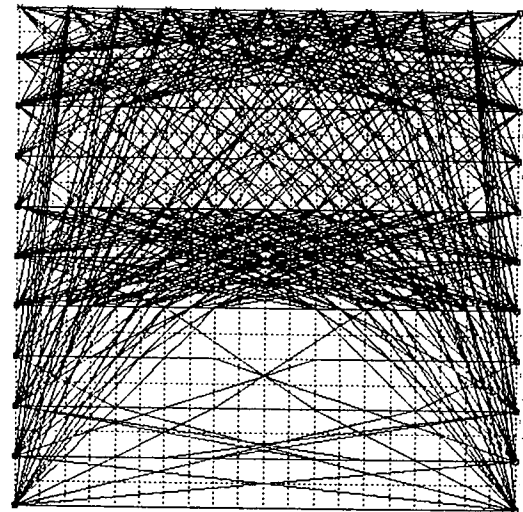


弾性波速度 (m/sec)

3800 4000 4200 4400 4600 4800 5000 5200

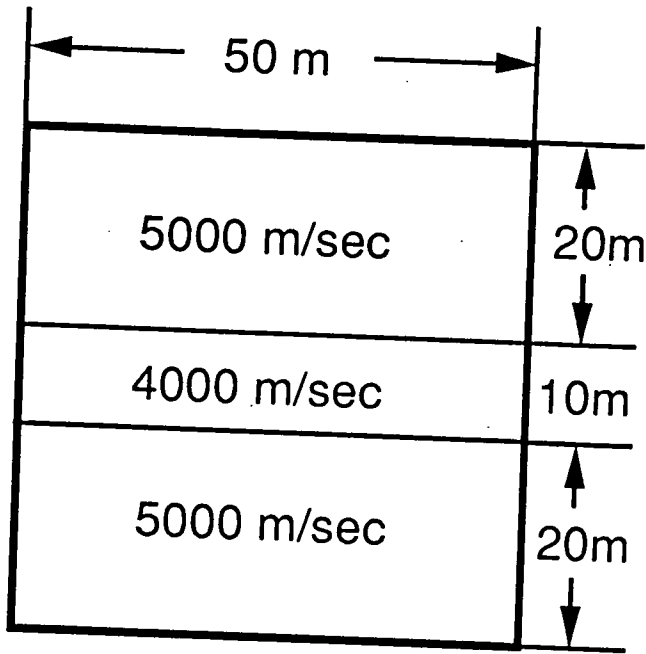


弾性波速度分布の再構成結果

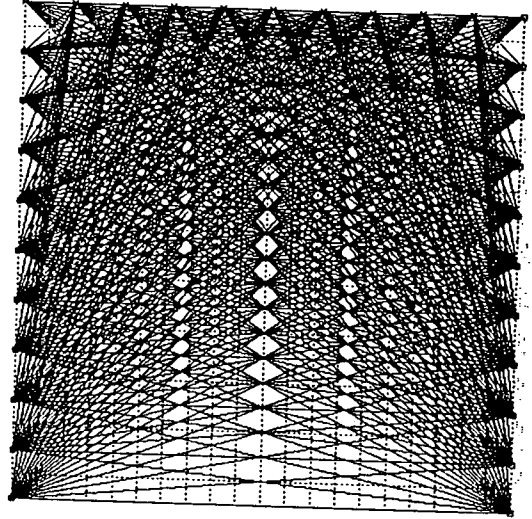


計算された波線経路

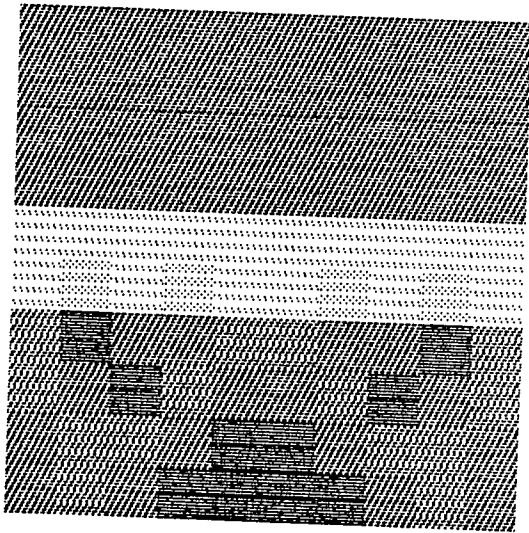
図7-1 弾性波速度分布再構成のテスト結果(モデル111)



数値モデル

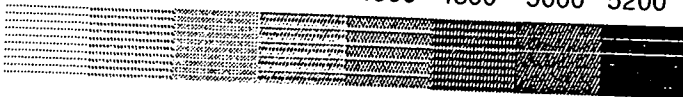


発信点・受信点の組み合わせ

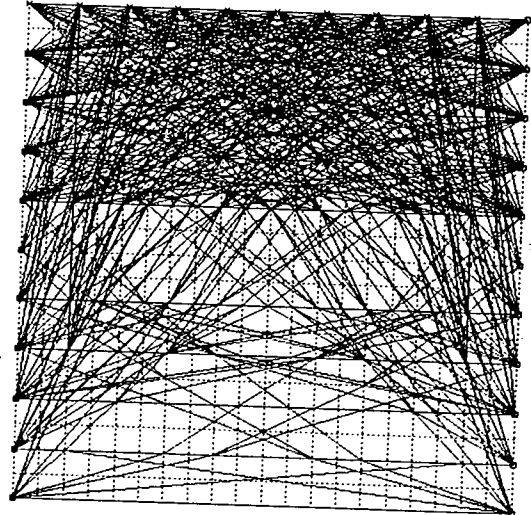


弾性波速度 (m/sec)

3800 4000 4200 4400 4600 4800 5000 5200

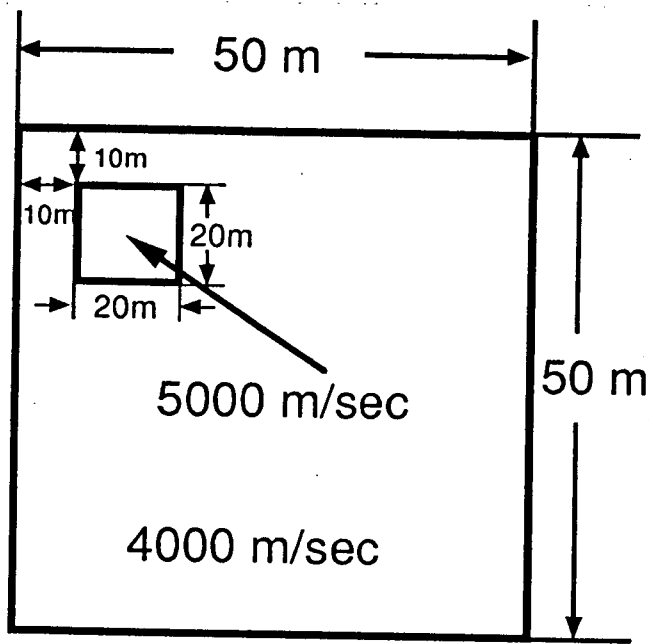


弾性波速度分布の再構成結果

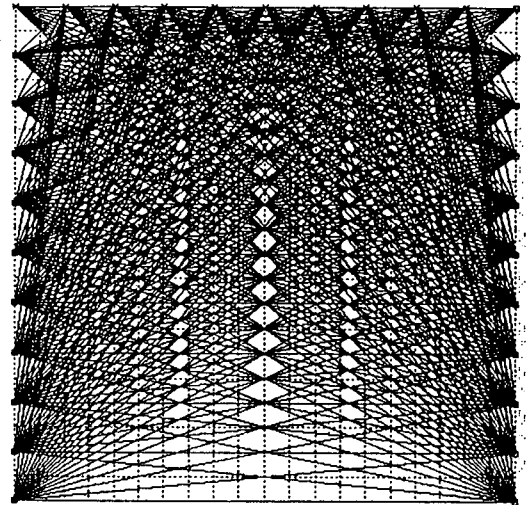


計算された波線経路

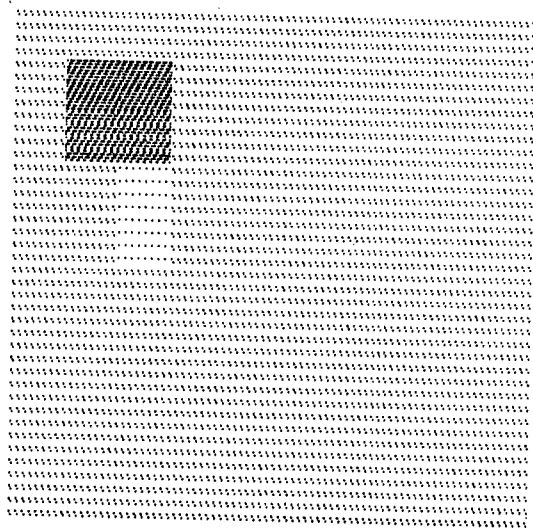
図 7 - 2 弾性波速度分布再構成のテスト結果(モデル112)



数値モデル

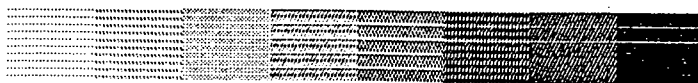


発信点・受信点の組み合わせ

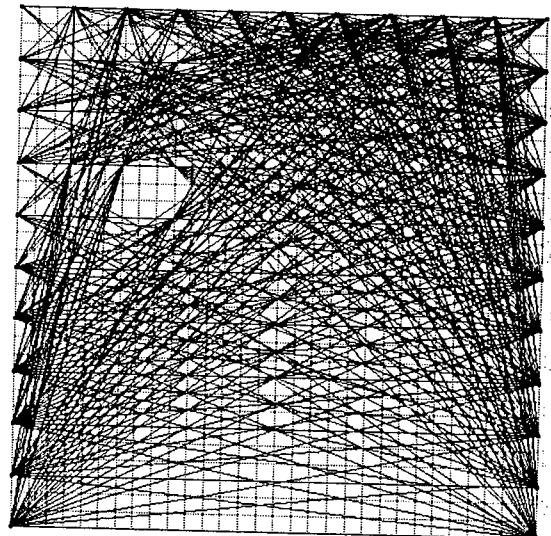


弾性波速度 (m/sec)

3800 4000 4200 4400 4600 4800 5000 5200

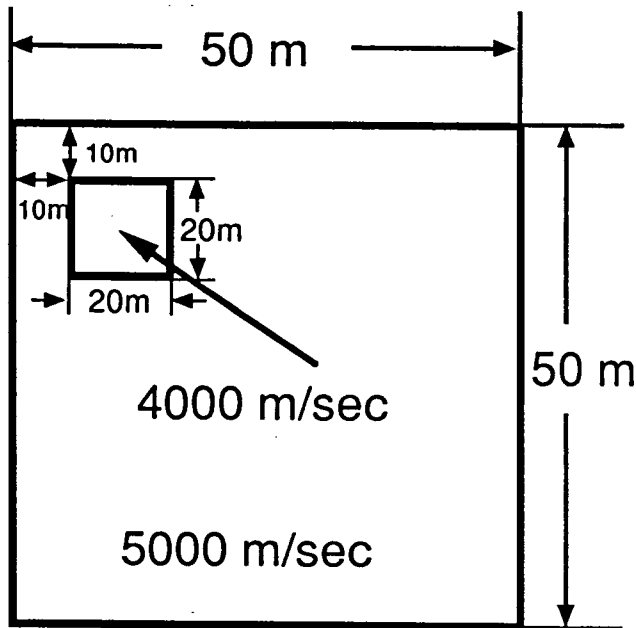


弾性波速度分布の再構成結果

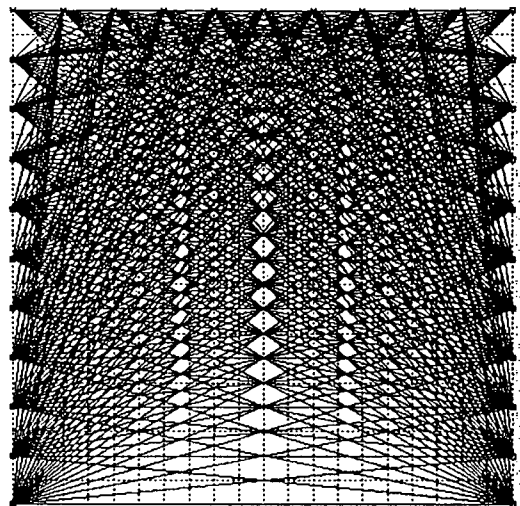


計算された波線経路

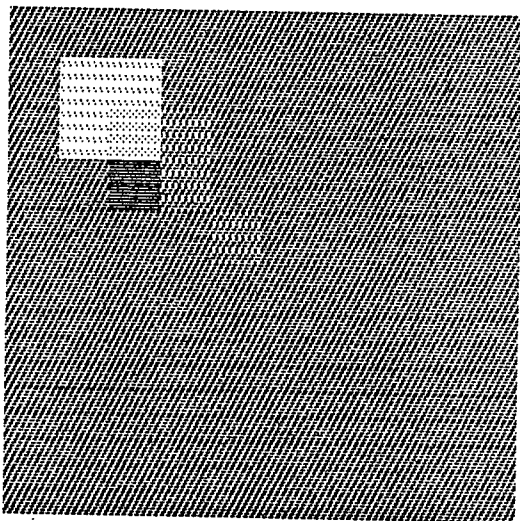
図 7 - 3 弾性波速度分布再構成のテスト結果(モデル121)



数値モデル

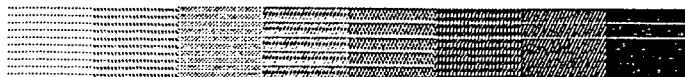


発信点・受信点の組み合わせ

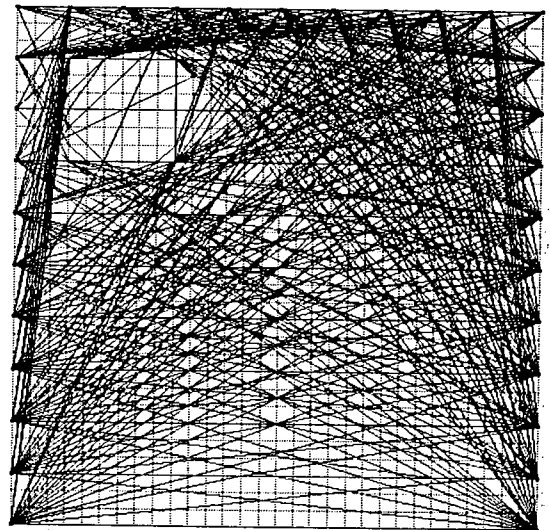


弾性波速度 (m/sec)

3800 4000 4200 4400 4600 4800 5000 5200

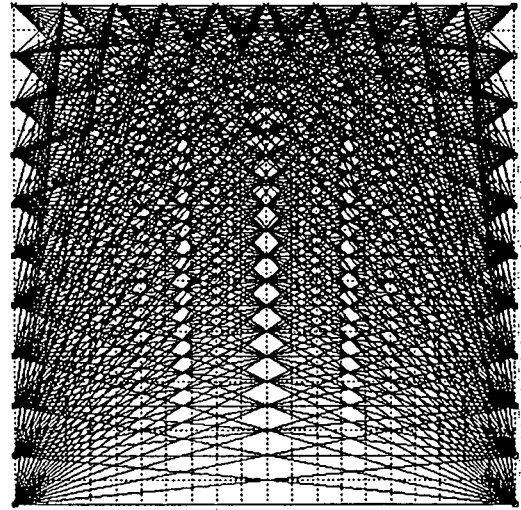
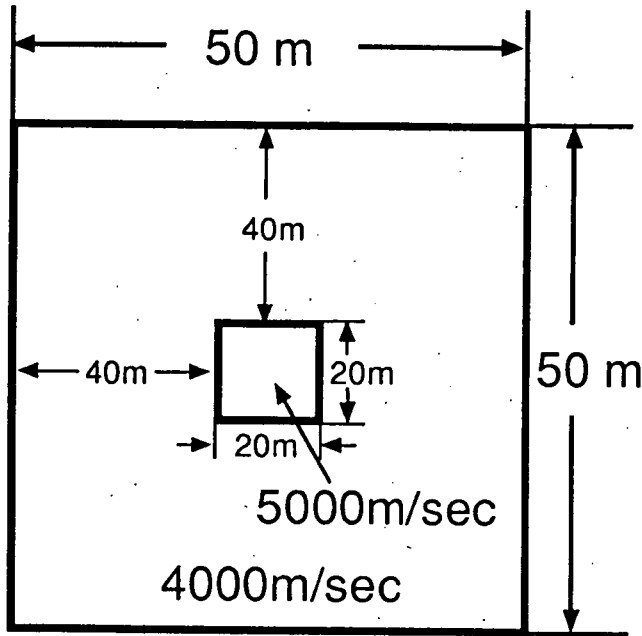


弾性波速度分布の再構成結果



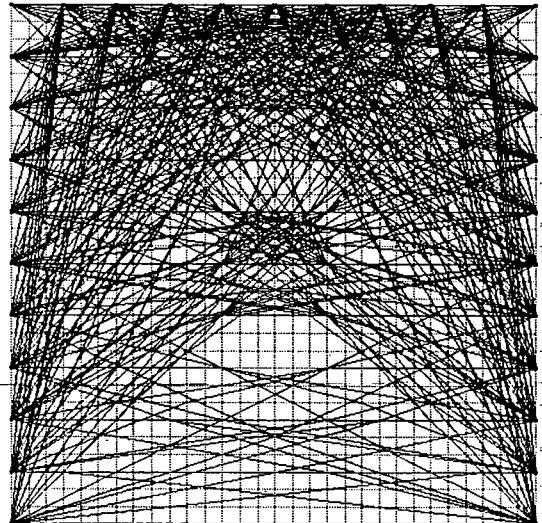
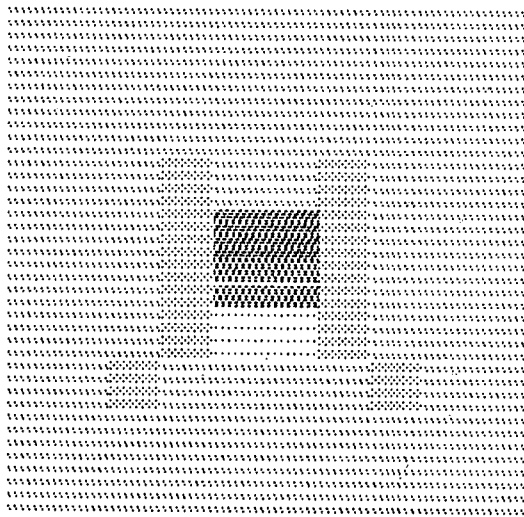
計算された波線経路

図 7 - 4 弾性波速度分布再構成のテスト結果(モデル122)



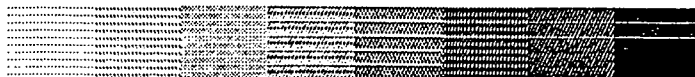
数値モデル

発信点・受信点の組み合わせ



弾性波速度 (m/sec)

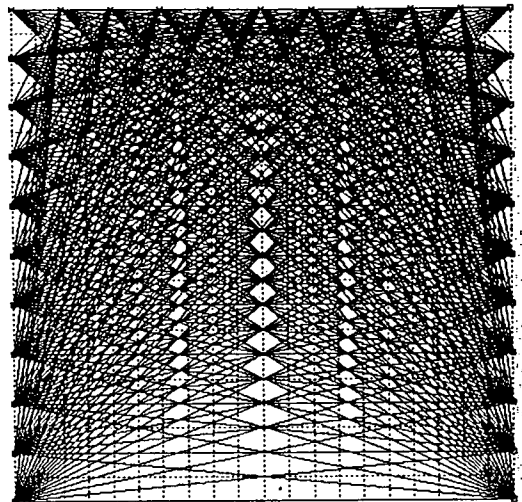
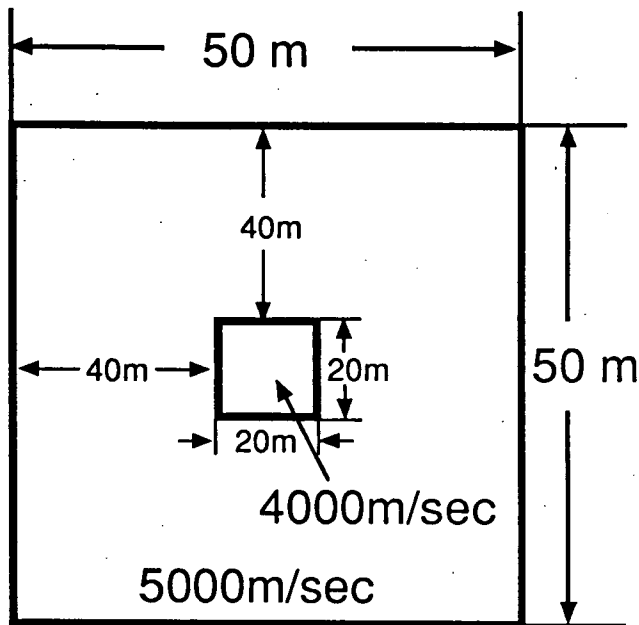
3800 4000 4200 4400 4600 4800 5000 5200



計算された波線経路

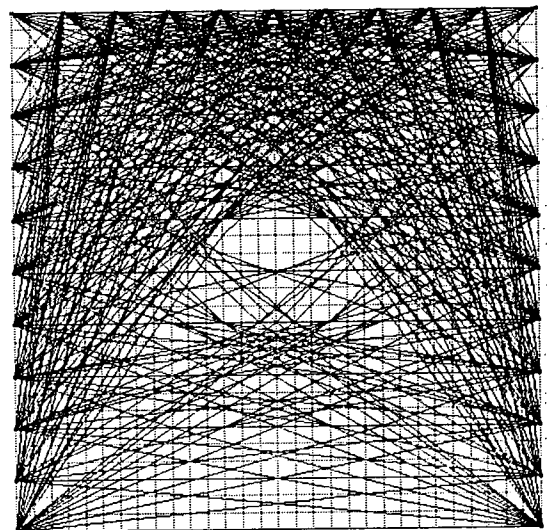
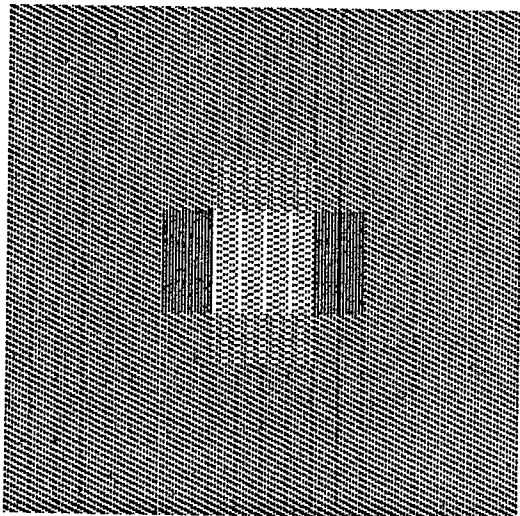
弾性波速度分布の再構成結果

図 7 - 5 弾性波速度分布再構成のテスト結果(モデル131)



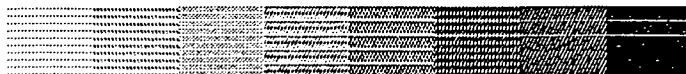
数値モデル

発信点・受信点の組み合わせ



弾性波速度 (m/sec)

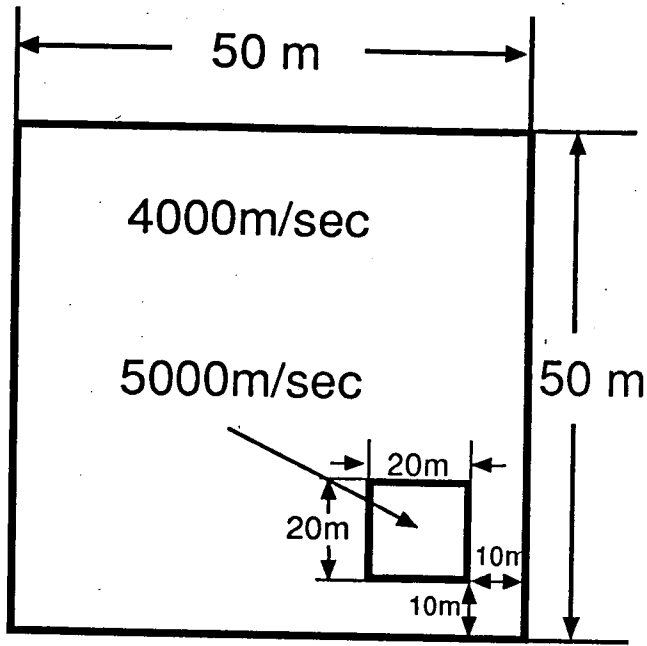
3800 4000 4200 4400 4600 4800 5000 5200



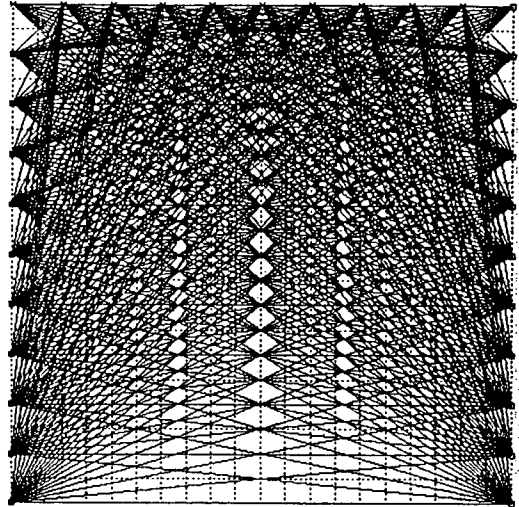
計算された波線経路

弾性波速度分布の再構成結果

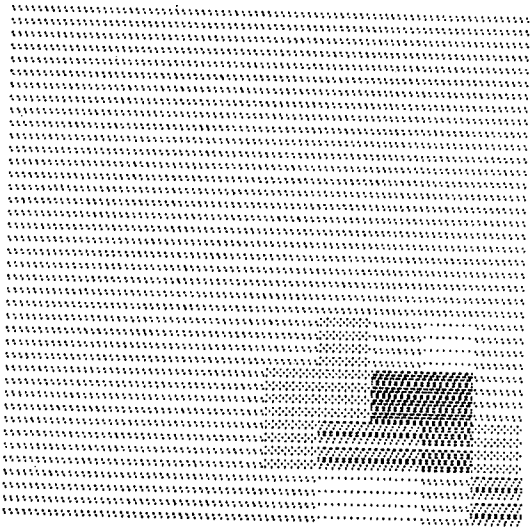
図 7 - 6 弾性波速度分布再構成のテスト結果(モデル132)



数値モデル

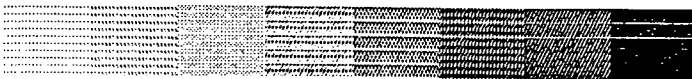


発信点・受信点の組み合わせ

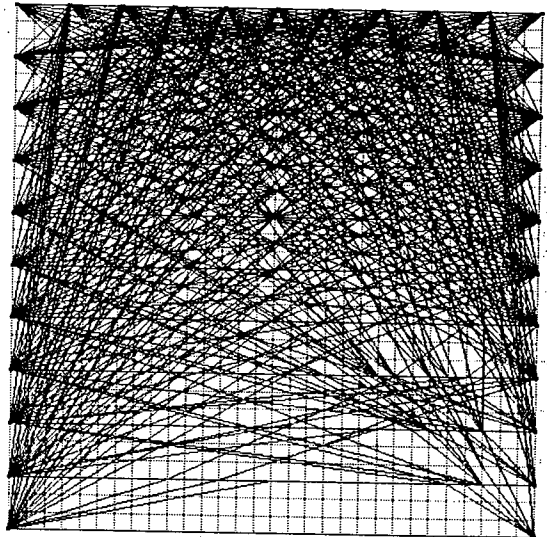


弾性波速度 (m/sec)

3800 4000 4200 4400 4600 4800 5000 5200

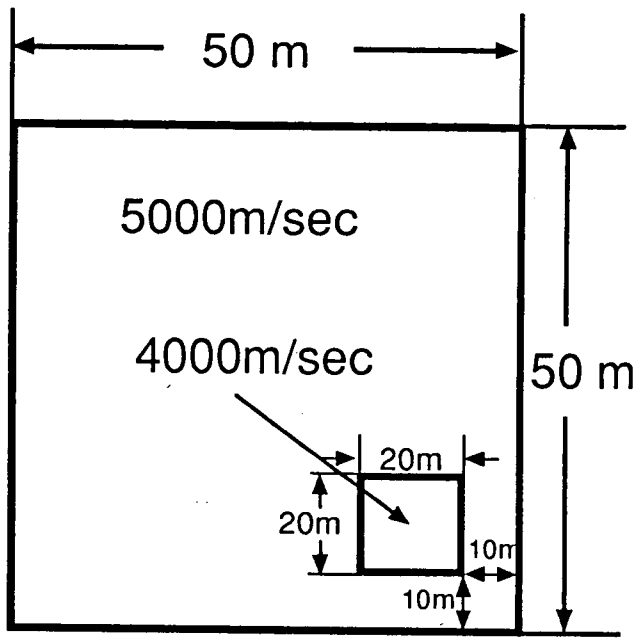


弾性波速度分布の再構成結果

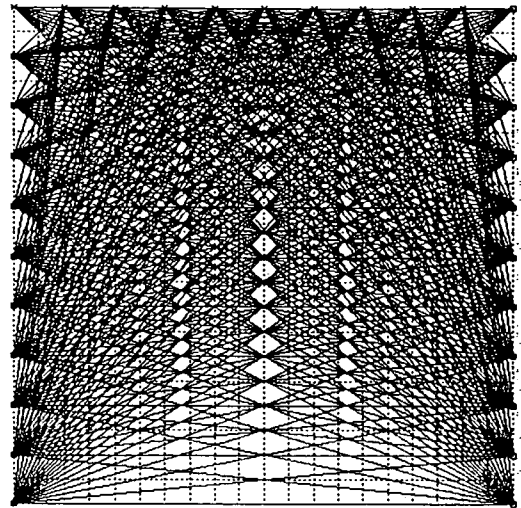


計算された波線経路

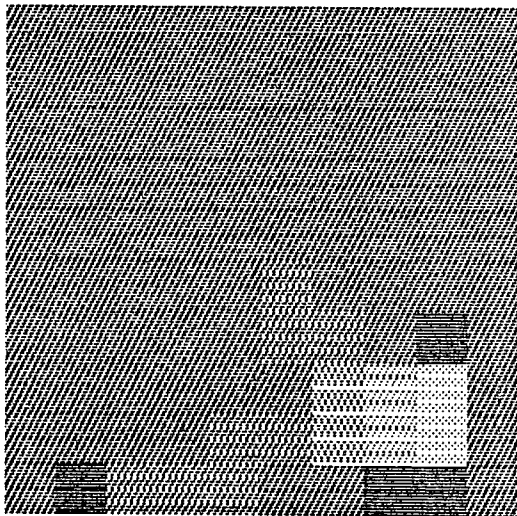
図 7 - 7 弾性波速度分布再構成のテスト結果(モデル141)



数値モデル

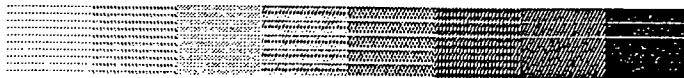


発信点・受信点の組み合わせ

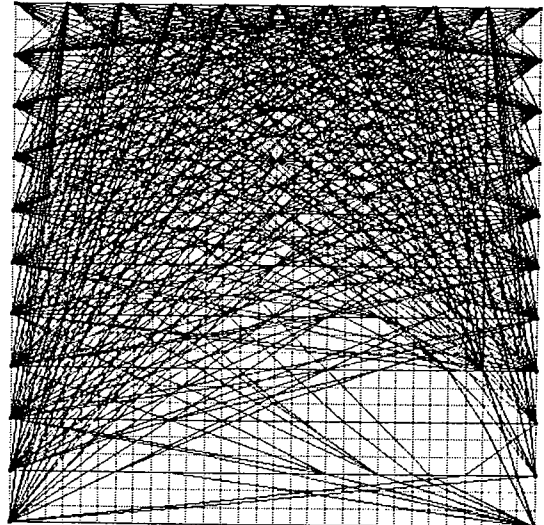


弾性波速度 (m/sec)

3800 4000 4200 4400 4600 4800 5000 5200



弾性波速度分布の再構成結果



計算された波線経路

図 7 - 8 弾性波速度分布再構成のテスト結果(モデル142)

B-5 比抵抗トモグラフィ調査法データの解析精度向上に
関する研究

(長谷川)

1. はじめに

中部事業所技術開発課では高レベル廃棄物処分研究開発の内、岩盤の特性を調べるための調査技術・機器開発の一環として、各種ジオトモグラフィ技術の開発を行っている。その内の比抵抗トモグラフィについて、平成3年度、データの解析精度向上に関する研究を九州大学工学部資源工学科探査工学研究室に委託した。その研究成果の概要について報告する。

なお、委託研究の成果は報告書「比抵抗トモグラフィ調査法データ解析精度向上に関する研究(その1)(PNC ZJ1606 92-002)」にまとめられている。

2. 成果の概要

比抵抗トモグラフィは、弾性波やレーダートモグラフィが調査に必ず試錐孔を必要とするのに対し、地表あるいは坑道壁面のみを用いた調査が可能である。従って、調査の初期の段階からその適用が可能であり、地球物理学的調査によるサイト特性調査を行うに際し、重要な技術の一つとなるものと考えられる。

平成3年度は、調査の初期段階である地表あるいは坑道壁面のみが使用可能な場合について、データ解析精度を向上させることを目的として、改良マルカート法を用いた非線形最小二乗法に基づく2次元インバージョンの数値実験を行い、本調査法が持つ地下分解能を明らかにするとともに、解析精度を向上させるための調査仕様およびデータ解析仕様について検討した。さらに、地形に起因する地質学的ノイズの除去および3次元インバージョンの適用性について検討した。

解析精度を向上させるためにはデータは空間的に高密度にサンプリングする必要があるという考えから、高密度電極配列について検討し、分解能・解析精度ともに優れた電極配列を選定できた。また、インバージョンにおいてはダンピング係数の選定が重要であり、ノイズと同レベルの値が妥当なダンピング係数であることが明らかになった。

地形効果については、解析断面に地形を組み入れることにより除去できることが確認された。また、測定データに地形補正を行った後、平坦な地表を仮定して解析する方法も次善策として有用であることも確認された。

3次元インバージョンは実現可能であることが確認できたが、依然として大規模な計算を必要とするため、今後も計算の高速化、記憶領域の低減化について研究する必要がある。

3. 今後の方針

現在の深部地質環境調査において、地表と一本の試錐孔を用いて割れ目帯や変質帯の3次元的広がりを明らかにできれば、地質構造を今までよりも詳細に把握できることになる。

そこで平成4年度は、地表あるいは坑道壁面と試錐孔が一本のみ使用可能な場合について、コア観察や検層で確認された割れ目帯や変質帯の3次元広がりを比抵抗トモグラフィ調査で明らかにするための調査仕様・データ解析仕様の検討ならびに解析分解能の把握を目的とした委託研究を、本年度に引き続き実施する予定である。

B-6 電磁法データ解析統合プログラムの作成
(長谷川)

1. はじめに

中部事業所技術開発課では高レベル廃棄物処分研究開発の内、岩盤の特性を調べるための調査技術・機器開発の一環として、地表調査法の技術の開発を行っている。その内の電磁法調査について、平成3年度、電磁法データ解析統合プログラムを作成したので、その成果の概要について報告する。

なお、本プログラムの詳しい内容については、成果は報告書「電磁法データ解析統合プログラムの作成(PNC PJ7187 91-002)」(三井金属資源開発株式会社)にまとめられている。

2. 開発の必要性

電磁法は電磁誘導現象を利用して地下の電気比抵抗値の分布を調査する手法の総称であり、特に深部の調査に適した手法である。実際に調査を行う場合には、調査仕様の詳細を決定するためにモデル計算を行う必要があり、さらに得られたデータを解析するためにはデータを解析処理するソフトウェアが必要となるが、電磁法は日本に導入されてからからまだ日が浅く、このようなソフトウェアが一般化していないのが現状であるため、今回これらのニーズに対応できるソフトウェアの開発を行った。

3. プログラムの概要

開発されたプログラムは、米国地質調査所の Dr. Anderson らによってコード化された電磁法解析プログラムに基づいている。ただし、これらのコードはメインフレーム用に開発されたものであるため、現地調査に持ち込み可能なパソコン(東芝J-3100)上で使用可能なように改良し、さらにグラフィックスの機能等を付加し、使いやすいものとした。

プログラムは大きくフォワードモデリングプログラム(モデル計算プログラム)とインバージョンプログラム(データ処理解析プログラム)に分けられ、表1および表2に示す各手法や送・受信器の組み合わせに対応可能となっている。

4. まとめ

今回開発されたプログラムは、現在一般に利用されている電磁法のほとんどすべてに対応可能であり、今後の電磁法調査の迅速化、及びデータ解析作業の迅速化・高精度化が期待される。

表一 1 フォワードモデリングプログラムの計算対象

モジュール名	対応できる手法あるいは送・受信器の組み合わせ	モード	モデル
FWDPW	MT法, CSAMT法, PLMT 法	周波数領域	水平多層構造
FWDTHC	水平ループ・ループ法	時間領域	水平多層構造
FWDTCI	中心誘導ループ法	時間領域	水平多層構造
TRANSP	電流ダイポール法	周波数/時間	水平多層構造

表一 2 インバージョンプログラムの計算対象

モジュール名	対応できる手法あるいは送・受信器の組み合わせ	モード	モデル
NLSPW	MT法, CSAMT法, PLMT 法	周波数領域	水平多層構造
NLSTHC	水平ループ・ループ法	時間領域	水平多層構造
NLSTCI	中心誘導ループ法 電流ダイポール法	時間領域	水平多層構造

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@jnc.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