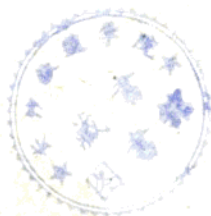


747621
SJT

物理探測

十周年特別号



物 理 探 鉱

第11卷 第4号

物理探鉱技術協会

序

物理探鉱技術協会は昭和23年5月に創立され、年とともに発展の途をたどり、わが国の物理探鉱界ひいては地下資源の開発、土木、電源開発関係の建設事業、農業その他の分野に広く貢献している。これは会員各位ならびに関係者の一致協力のおかげのものである。

本協会は創立されてから春、秋の2回の学術講演会ならびに毎年4回機関誌を刊行して、物理探鉱に関する研究・技術についての交換機関として使命を果たしてきた。

この間昭和28年の創立五周年にさいしては、これを記念して応用と技術の両面からわが国の物理探鉱を展望した「五周年特別記念号」を刊行した。その後多数の会員ならびに関係者より、物理探鉱の解説書の刊行を熱望されていたが、企画の困難さと多額の経費を必要とすることから実行することができなかったが、昭和33年5月をもって創立十周年を迎えるにさいし、これを記念する事業として、多年懸案であつた本特別号の出版を企画した。これに対し各界とくに資源開発関係の鉱業会社、建設事業関係その他から積極的な御支援のもとに、このたび第11巻第4号(38)を本特別号として刊行される運びとなつたのである。

本誌の編集方針についてはとくに設置した物理探鉱技術協会特別編集委員会において検討した結果、わが国における特有な地質条件ならびに今後の問題を考慮して、従来この種の刊行図書に見られなかつた現場技術者および管理者の日常の作業に役立つよう企画し、物理探鉱を方法別に基礎事項・探鉱装置・現場調査法・測定結果の取り扱いならびに結果解釈(解析)を主体とした基礎技術編と、石油・石炭・鉱山・土木・地下水・地熱・温泉等の多方面にわたり、多くの実例を基として、適用性、今後の問題等を主体とした応用編とに大別し、項目用語、記号を統一して、なるべく図表を多く用いる方針で執筆を依頼した。

編集にさいしては、委員会において数次にわたり検討した結果、各項を分担した著者の企画ならびに記述をなるべく尊重したが、内容の統一ならびに重複を避けるため、一部短縮、改編して内容の完璧に努力を払つたつもりである。なおこの種の企画の性格より充分でない点も多いと思われるが、幸に読者の批判を得てさらに完全なものの礎として本誌が貢献できることを願うものである。

執筆者は御多忙にもかかわらず心からこの企画に御賛同いただき、進んで資料の提出に、執筆に協力下され本誌ができたことは、特別編集委員会として心から喜びとするところである。この機会に、これら執筆各位に対し、また資料の提出に、出版費について御援助を下された各関係会社に対し深甚なる感謝の意を表する次第である。

昭和33年10月

十周年記念特別編集委員会

十周年記念特別編集委員会

委員長	淵田 隆門	(東京大学)
委員	林 一	(石油資源開発)
	金子 徹一	(地質調査所)
	牧野 直文	(電気試験所)
	佐藤 光之助	(地質調査所)
幹事	遠藤 源助	(早稲田大学)
	立石 哲夫	(アラビア石油)
	馬場 健三	(地質調査所)
	本莊 静光	(地質調査所)

執筆 者 (ABC順)

安達 幸夫	(日鉄鉱業)	松沢 明	(石油資源開発)
中条 純輔	(地質調査所)	百瀬 寛人	(日本鉱業)
遠藤 源助	(早稲田大学)	森 喜義	(地質調査所)
淵田 隆門	(東京大学)	室住 正義	(地質調査所)
長谷川 淳	(住友金属鉱山)	南雲 昭三郎	(地質調査所)
長谷川 博	(地質調査所)	中林 一孝	(三菱鉱業)
轟山 勉	(石油資源開発)	蜂川 親治	(地質調査所)
初田 甚一郎	(京都大学)	野口 高	(九州大学)
早川 正巳	(地質調査所)	落合 敏朗	(農業技術研究所)
兵頭 盛也	(石油資源開発)	小野 吉彦	(地質調査所)
飯田 汲事	(名古屋大学)	小野寺 清兵衛	(九州大学)
岩崎 章二	(地質調査所)	斉藤 友三郎	(地質調査所)
加来 一郎	(原子燃料公社)	佐野 浚一	(地質調査所)
賀来 秀三	(三菱金属鉱業)	佐々 憲三	(京都大学)
亀谷 卓也	(石油資源開発)	佐々木 恒郎	(石油資源開発)
金子 徹一	(地質調査所)	佐藤 久敬	(石油資源開発)
加藤 元彦	(帝国石油)	佐藤 光之助	(地質調査所)
加藤 愛雄	(東北大学)	柴藤 喜平	(地質調査所)
河田 英	(北海道地下資源調査所)	志村 馨	(農林省農地局)
清野 武	(京都大学)	陶山 淳治	(地質調査所)
神代 健夫	(電気試験所)	田治米 鏡二	(北海道大学)
熊谷 直一	(京都大学)	立石 哲夫	(アラビア石油)
九里 尚一	(東北大学)	矢作 文弥	(電力中央研究所)
栗原 重利	(宇部興産)	山口 久之助	(北海道地下資源調査所)
牧野 直文	(電気試験所)	吉村 雄三郎	(石油資源開発)
増田 秀夫	(電力中央研究所)	吉住 永三郎	(京都大学)
松田 武雄	(地質調査所)		

Preface

The Society of Exploration Geophysicists of Japan had the 10th anniversary of its foundation in May 1958.

The Society has endeavoured to develop and prevail the geophysical prospecting through the lecture-meetings in spring and autumn, and also by its quarterly journals.

A large number of engineers of industries has been interested in geophysical prospecting, because the satisfactory results of this method were revealed in the industrial world concerned.

Nevertheless, anywhere in Japan, there was no comprehensive textbook for the field engineers and staffs engaged in geophysical prospecting surveys. So the Society had an opportunity of publishing the textbook as the 10th anniversary volume.

This textbook was edited concisely to be understood by the engineers and staffs, and was planned to comprehend the advanced technics of geophysical prospecting.

The contents of the textbook are divided into two chapters, the fundamental and applied ones. The former is classified according to the various methods of geophysical prospecting, namely seismic, gravimetric, electric, magnetic and radioactive methods, and the fundamental course of geophysical prospecting, instruments, field surveys and technics, data process and interpretation of data. The latter is described about many examples of geophysical prospecting for coal and oil fields, metallic and nonmetallic mineral deposits, ground water, geothermal and hot spring areas, and engineering works. Furthermore, the adaptability and future perspective of geophysical prospecting are mainly discussed.

Special Editors

目 次

序	特別編集委員会	i
Preface	Special Editors	iii
総 論	澤田隆門	1 頁

基礎技術編

I 地震探鉱

第1章 歴 史	5
第2章 基礎事項	7
第3章 探鉱装置	61
第4章 調査法	84
第5章 測定結果の解釈	117

II 重力探鉱

第1章 歴 史	123
第2章 基礎事項	124
第3章 探鉱装置	134
第4章 現場調査法	138
第5章 測定結果の解釈	144

III 電気探鉱

第1章 歴 史	151
第2章 基礎的考察	154
第3章 自然電位法	161
第4章 比抵抗法	195
第5章 電磁法	232
第6章 電気検層法	241

IV 磁気探鉱

第1章 歴 史	257
第2章 基礎事項	259
第3章 探鉱装置	274
第4章 現場調査法	282
第5章 測定結果の解釈	286

V 放射能探鉱

第1章 歴 史	289
第2章 基礎事項	290
第3章 探鉱装置	298
第4章 現場調査法	302
第5章 測定結果の解釈	310

VI

第6章 放射性同位元素を利用する方法	315
--------------------------	-----

VI 地温探鉱

第1章 基礎事項	319
第2章 測定装置および測定方法	320

応用

VII 石油の探鉱

第1章 物理探鉱の適用	325
第2章 物理探鉱の活動状況	326
第3章 物理探鉱の効果	328
第4章 今後の課題	333

VII 石炭の探鉱

第1章 炭田における物理探鉱	335
第2章 物理探鉱の炭田調査への適用	335
第3章 今後の問題	344

IX 鉱山の探鉱

第1章 鉱山の物理探鉱の状況	345
第2章 物理探鉱の適用	347
第3章 調査法	353
第4章 探鉱の実例	356
第5章 今後の問題	375

I 土木の探査

第1章 日本における土木への応用	379
第2章 ダム地点に対する応用	379
第3章 隧道経過地に対する応用	380
第4章 橋梁および建物基礎に対する応用	381
第5章 地すべり地に対する応用	381
第6章 路盤その他に対する応用	382
第7章 探査の実例	382
第8章 岩盤内部の探査	386

II 地下水の探査

第1章 地下水の物理探査の状況	391
第2章 物理探査の適用	391
第3章 探査の実例	393
第4章 今後の問題	397

III 地熱・温泉の探査

第1章 地熱の探査	399
第2章 温泉の探査	401

総 論

われわれ人類の生存にとって、地下資源は必要欠くべからざるものとなっているが、それは地下の至る所にあるというのではなくて、所々にまとまった状態で存在するから、われわれの関心はとくにそういう所に向けられることになる。鉱床という語はわれわれが採掘して利用しうる地下資源がまとまって存在する部分という意味に使われるが、それは時と場所とを問わず、一定不変の規格を持っているものではない。たとえば石器時代には銅鉱や鉄鉱などはまだ有用なものではなかったし、銅器時代には銅鉱床なるものはありえても、鉄鉱床・鉛鉱床といったようなものは当時としては意義が少なかったのである。また時を現代にとってみても、割合に浅い所にあつて採取しやすい地下資源の集まりは鉱床となりえても、あまり深くて採取困難な場所に存在するものは、少なくともいま直ちには鉱床となりえないわけである。またたとえば貴鉱なるがゆえに昨日まで無価値であったものも、選鉱あるいは製錬技術の進歩に伴い、今日は立派な鉱床になるということもありうるのである。

鉱床を探す仕事は探鉱と呼ばれる。もちろん、それには鉱床の位置ばかりでなく形や価値を知ろうとする仕事内容をも含まれる。探鉱するには鉱床の存在に基づくなんらかの示徴を頼りとしなければならない。いわゆる露頭はもっとも明白な示徴であるが、地下資源の利用があまり盛んでなかった昔は古人の周囲にまだ沢山あつたであらう。したがって、そういう時代の人々はあまり苦勞しないで探鉱の目的を達したであらう。しかし身近にある露頭がだんだんと探掘つくされてくるに逆比例して、探鉱の重要性が漸次増大するに至つたことはいうまでもない。

二股になつた神杖と称する木片を持って歩き、その杖が自然にさがる所を探せば、そういう所には鉱脈が潜在しているという昔の外国の迷信や、わが国の山が野金山が、神の御告げによって発見されたというような伝説はわれわれの祖先たちが探鉱に関心を持っていたことを物語っている。もっとも必ずしも神だのみばかりではなく、それぞれの時代の知識水準にふさわしい程度の合理性をもつた探鉱法も行なわれたのである。アグリコラの著述とか佐藤家の山相学など、今日の科学からみても全面的に否定し去ることができないといわれているものもある。しかし探鉱法がほんとうに科学的なものになつたのは、地質学が発達してからであらう。

地質学はもとと岩石の分類記述から始めて、地殻の構造やその成因を研究する学問の一分科であつて、必ずしも応用を目的とするものではない。しかし古人の探鉱の熱意が、地質についての知識を追求することとな

り、この学問の発達に貢献したことも少なくないであらう。ともあれ地質学の知識を採り入れることによって、探鉱法は科学的に合理的なものへ体系づけられた。すなわち、広く山野を歩き廻つて全般的に地質を調べれば、鉱床の存在しそうな地域、すなわち鉱床地帯は相当に局限されたものであることがわかってくるから、新たに発見する探鉱家は古人のように無駄歩きを繰り返す必要はない。そして、かゝる鉱床地帯の崖や山腹などに出てくる鉱床の露頭を探したり、谷間の沢に沿つて歩いて鉱石の転石を探し、それを上流にたどつては鉱石を発見したりする。地形はもとより、土の色、鉱泉の性質、ある種の動植物の生態などのように、直接間接に地質と関連の深いことがらなども注意深く観察されることはいうまでもない。かくして、上述のような地表踏査による探鉱には充分な地質学的素養を必要とすることとなつた。すなわち地質学は探鉱法ではないが探鉱法には欠くことのできない知識となり、いわゆる鉱床学はこのような事情から派生したのである。

露頭が発見されれば、それに続く地下潜在部分の状態をも調べて、大きさ、品位などを知り、それがわれわれの利用の対象となりうるかどうかを判断しなければならぬ。しかし一般的には単なる地表地質調査、もっと具体的にほとくに鉱床について研究した鉱床学の知識と地表の資料のみによって充分にその目的を達しうることは少ない。ここにおいて必然的にボーリングや坑道掘進による地下の直接探鉱の必要が起つてきた。もっとも石灰岩ある種の層状鉱床などは、精密な地表地質調査のみによって地下の状態を比較的確に推測できる場合もあるが、やはり決定的なところは、ボーリング探鉱や坑道掘進法によらなければならない。坑道掘進は探鉱としては最終段階であつて、鉱山開発のための仕上げをなし、鉱床の位置、大きさ、形、品位、鉱量など、重要な資料を提供する。ボーリング探鉱や坑道掘進にさいしては、その位置の選定から結果の観察をするまで、充分な鉱床学の素養をなによりもまず必要とすることはもちろんであるが、ボーリングをし、坑道を掘進する技術そのものは、鉱床学的の、あるいはもっと広くいって地質学的のものではない。それらは現在の鉱山技術の分類からみれば、さく井法・坑道掘進法の技術である。したがって探鉱法は、その最後の仕上げにおいて、技術的にはさく井法・坑道掘進法とともに進むべき地質のものである。

地質学の発達以来、探鉱法は科学的に合理的なものとなつて、以前に較べてきわめて能率的となつた。それ以前の人たちが気付かなかつた新しい地域にも地質学的推論に基づいて新鉱床を探知したり、また古人が探掘し尽くしたと考えた鉱床にも、鉱床学的観察に基づいてその態

長があることを発見したりなどした。しかし、このような好能率もいつまでも続くわけにはいかなかった。すなわち、このようにして時がたつにしたがって、従来の方法だけで発見される鉱床は、だんだんと探掘し尽されてきたのである。

地表を踏査して肉眼をもって直接に地質を調べて探鉱の目的を達しようとする方法は、たとえ小規模の井戸を掘ったり、坑道をあけたり、あるいは掘削をきったりする補助的手段を併用したにしても、大きくみれば平面的探鉱法であって、早くいえば露頭探鉱の域をでなかった。また、たとえ鉱床学的見地からできる限りの検討を加えた上で、ボーリング探鉱や坑道探鉱を計画するにたところで、落鉱の確率の少ないことは実証的に否定できず、むやみにこのような高価な探鉱法を実施するわけにはいかなかった。もっとも、このことは対象となる鉱床の性状のいかんによって、事情はいくつの場合がありうることであるが、とにかくいづれにしても潜在鉱床の探鉱はけっして容易な要求ではなくなった。しかも地下資源を必要とする人類の要求はますます急で、潜在鉱床をもっと能率よく探知し、開発しなければならぬところまできたのである。ここにおいて従来の探鉱法は局面的展開をせまられることになった。今日物理探鉱法と呼ばれている方法は、このような時代の推移に伴う要求に応じて、比較的に新しく誕生した探鉱技術である。それは要するに、地下の潜在地質構造と直接、または間接に関連して、人為的にまたは自然的に生じている物理的現象を地表において観測し、その資料を検討することによって地下の状態を推測する探鉱法である。

物理探鉱法は、地表からは、眼で直接に見ることのできない地下深部を探知しようとする立体的探鉱手段たる点において、古くから行なわれてきたボーリング探鉱法や坑道探鉱法と同類とみてよい。しかし後者が地下の地質試料を直接採取し、したがって鉱床学的知識と直結しやすい性格のものであるのに反して、前者は物理的現象というものを仲介とする、間接的性格のものである点に本質的な相違がある。よって探鉱の最終の目的が、あくまでも鉱床の実体を確認するべきであるために行なわれるところのボーリング探鉱法や坑道探鉱法の役割を、物理探鉱法がそっくり代理しうる性質のものではないのである。しかば物理探鉱法はいかなる役割を持って生まれてきたか。さきに地表地質調査の資料だけから、鉱床学的にできるだけ検討を加えた上で、潜在鉱床を探す目的で行なうボーリングまたは坑道探鉱は、一般にはあまりにも高価なものにつくので、よほどの条件のよい成功率の高い場合でなければ、実用性が少ない意味のことを述べた。このことは要するに経済と技術の総合の見地からみて、地表踏査探鉱法とボーリングや坑道探鉱法と

の間に、なお空白が残されており、この空白を無視しては、一般に無理が多いということ物語るものであった。実は物理探鉱法はこの空白を埋める役割を帯びて登場していたものである。

物理探鉱法の出現によって、探鉱法は一段と近代科学的色彩を増した。事情によっては一部省略されることもあるが、地表踏査探鉱より物理探鉱、ついでボーリング探鉱および坑道探鉱、という順序の一連の探鉱技術とこれらを縦に貫く鉱床学とは、今日の探鉱法の定跡となったのである。

物理探鉱法は物理学的知識を第一の拠り所とする。とくに地殻圏に関する物理学的知識を必要とするのであって、その意味において地球物理学の探鉱法と称されることである。地球物理学は地球の気圏・地殻圏・水圏について、探査の物理学的立場から研究しようとする学問の一分科であるが、地殻圏に関する限り、研究の対象は地質学と同じで、要するに地球の実態をあらゆる意味においてきわめようとする点において、両者は共通のものである。たゞ、それぞれの方法、すなわち物理学的あるいは地質学的と呼ばれている方法が、いまのところまだ相当にかけはなれた性格のものであることと、地球の本質究明がまだ遙かのかたにあるという実状にあることのために、いまだに違った学問的体系のまゝにいるにすぎない。この関係はそれらの応用たる探鉱法の分野にも延長しようとする一応の傾向があるのはいない。すなわち世の中には従来の地表踏査探鉱法を地質学的探鉱法となし、それに対し物理探鉱法が併立し、それらの背景にそれぞれ地質学と物理学とがあるとみている人がないでもない。いわゆる地質学が地表踏査による地質調査を土台として成立し、また従来の探鉱法が専らその指導の下に科学的でありえたのに対し、新生の物理探鉱法は従来なおざりにされていた物理学的側面をとくにひき上げて登場したことが、表面的には著しい対照をなしていることから、そのような見方が行なわれるのも一筋は無理もないところである。しかし探鉱という最終の目的をもったものである以上、少なくとも現在においては地質学の一科たる鉱床学を離れた探鉱法というものは存立しえないのであって、その意味において、地質学的方法と物理学的方法とを同列に並べて云々することは、言葉としての表現が適当でないだけでなく、実状にもそぐわないのである。地表踏査探鉱法は2本の健脚とクリンメータとハンマとを唯一の道具とし、物理探鉱法は近代計器と、それを使いこなすに必要な物理学の素養とをよりどころとしているが、いづれにおいても鉱床学の知識は欠くことができないものである。

物理探鉱法は地殻についての物理学的知識を必要とする。しかし、このことは物理探鉱法の内容が、いわゆる

地球物理学に専ら依存しているという意味ではない。その生れたての頃は、なるほど地球物理学に手を引いてもらった幼児にすぎなかったかも知れないが、今日においては立派な大人になっているのであって、とくにそれが探鉱法という過去、現在、将来を貫く一本の指導精神によって導かれている関係上、その意味において独特の発展をしている。世の中には物理探鉱、すなわち地球物理学であると、あまりに簡単に考えている人もある。この見方を根底から否定することは、かえって当らないことではあるが、前者は後者より著しく地質学的でもなければならぬことを銘記すべきである。

近年地化学探鉱、もしくは単に化学探鉱と呼ばれる分野が発展してきた。このことは一見新しい方法が出現したようにみえるが、しかし、それは最近著しく進歩した化学分析法を積極的に活用して、従来以上に試料の分析の精度、ならびに能率をあげようとする点に特徴があるのであって、探鉱法としての本質は地表踏査探鉱の域を出ないものである。従来といえども、その時代時代の技術水準に応じ試料の化学分析はなされ、その資料は鉱床学的考察の基盤の一部となっているのであって、今日のいわゆる地化学探鉱の分析結果といえども、その間の事情は少しも変わらない。もっと本質的に表現するならば、地表踏査は地表における物質分布状態を明らかにするのを目的とするのであって、これと地下の状態とがいかに関連するかを明白にしてくれるのは鉱床学である。物質分布状態は従来すでに鉱床学的情報として追求されていたものであり、それが化学的手段の進歩に伴い、より豊富になればそれだけ鉱床学そのものが進歩するのである。したがって化学的手段の進歩は従来の要領と少しも違わない状態において、探鉱法の進展に寄与することになる。換言すれば、今日地化学探鉱法と呼ばれるものは、早晚鉱床学のなかへ溶けこんでいくであろう。

これに対し物理探鉱法は事情を異にしている。学問や方法の名称などは、どうせ人間が便宜上付けたものであって、自然の究明という大課題の前には、呼称などにとらわれる必要はないのであるが、今日物理探鉱法と呼ばれる方法の、探鉱法としての原理の特色をはっきり認識しておくことは重要なことである。物理探鉱法の探鉱法としての特徴はの潜在地下構造に関する情報で、遠隔的に地表において得られ、しかもそれがいわゆる従来の鉱床学のもの、性格的に異なっているために、探鉱上別個の情報を加えることになる点にあるのである。もちろん最終的には物理探鉱による情報も、鉱床学的に、消化されなければならないにしても、地化学探鉱による情報が消化される事情とは、非常に異なるのである。

いままでのところでは、地下資源の探鉱という問題に関して、物理探鉱の話を進めてきた。しかし、それは地

下資源探鉱にのみ限られているわけではなく、同様の事情において広く潜在地質探査の面においても活用されるに至っていることはいうまでもない。土木工事における基礎調査の如きがその例である。このような場合には物理探鉱の探鉱という呼称がふさわしくないと考えるのは無理のないところで、そのかわりに物理探査と呼ぶことを提唱する人がいまでもある。言葉としてはこの方が包含する内容が広いというわけである。しかし物理探鉱なる用語は、もともと探鉱技術界から生まれたものであって永い歴史を有し、しかもその方面の活用面が遙かに広く、また物理探鉱技術協会という固有名詞もできている現在であるから、いまさら呼称にこだわる時期でもないまいと考えられる。

すでに説明したように、物理探鉱は直接に眼で見ることのできない潜在地質構造と関連して自然的に発現するか、あるいは、人工的に発生せしめたいろいろの物理的現象を観測することに基礎をおくわけであるから、物理的現象の種類によって、いろいろの方法に細分される。このようにしてとくに注目すべきことは、手掛りとなる物理的現象が自然的であるか人工的であるかによって、探鉱法としての性格が左右されるということである。すなわち、前者の場合はわれわれが入手しうる情報は、いかに観測に念をいれてみても自然のままのもの以上に出ることはできないので、たとえばそれが探鉱目的の立場から、充分に意に満たないものであっても、それだけではどうにもならない性格のものであるのに反して、後者の場合は必要に応じ適当に人為的くふうを加え、理論上はいくらでもわれわれの入手しうる情報を増しうる性格のものである。しかし一方、たとえば重力や地球磁気現象のように、規模が大きい自然現象の場合は、それだけ深部の反映度の大きい情報が比較的僅少の経費で得られるのに反し、人工的現象は経費、保安その他の条件によって制約を受けて、探鉱上欲するがままに規模を大げしたり、あるいは、探鉱条件を変えたりして資料を集めることの困難な事情もある。また、われわれが入手しうる情報は地表に現れたもので、つまりどんなに豊富に集めても二次元的のものであるが、これを資料として地下状態を推測するにあたり、それぞれの物理的現象の原則により、宿命的に支配される推測能力の限界というものがある。換言すれば各方法の地下構造分解能にはいろいろの程度があるのである。このような事情や潜在地質構造の持つ固有の事情などによって、探鉱のために利用される物理的現象の適応性の程度というものがきまってくる。すなわち物理的現象の種類によって分類される各種方法の実用分野というものがきまってくる。本書においては、各方法別にそれぞれの技術的内容が基礎的に解説され、また実用分野の面から各方法の応用の事情が解

説される。次の表は物理探査法の内容をきわめて簡単に
 総括したものである。

複雑とは、もちろん相対的意味で述べているのであって
 われわれが知ろうと欲している地下の状態が呈する情報

方 法	現 象	物質または状態		おもな応用分野
地震探査	弾性波動現象	伝播速度	人 工	石油・石炭・その他一般地質構造・基礎 地盤・特殊鉱床
重力探査	万有引力現象 (重力界)	密 度	自 然	石油・石炭・その他一般地質構造・特殊 鉱床
電気探査	電気分極現象	分 極	自 然	一般鉱床
	定常電流現象	比 抵抗率	人 工	地下水地質構造
	電 磁 現 象	透 磁 率 誘 電 率	自 然	基礎地盤
磁気探査	静磁気現象 (地球磁界)	透 磁 率 残 留 磁 気	自 然	磁性鉱床・特殊地質構造
放射能探査	放射能現象	放 射 能	自 然 人 工	放射性鉱床・特殊地質構造 放射能追跡子の利用
地温探査	熱 現 象	発 熱 率 熱 伝 導 度	自 然	地熱源・温泉・特殊鉱床
物理探査機	坑井内の物理探査 (電気探査・放射能探査・温度探査・速度探査) (電気探査・放射能探査・温度探査・速度探査)			地質構造・石油層・石炭層・鉱床の確認 等

これによってわかっており、物理探査法は光の現象以
 外のほとんどすべての物理的現象を利用している。そし
 て各方法間の関連については、それぞれが拠り所とする
 物理的現象の性格からみて、原理的にはきわめて疎遠で
 あることがわかる。このことは各方法それぞれが専門分
 野として独歩でき、かつ、それらが提供する地下の情報
 が互に独立であることを意味している。そして、さらに
 実用的には、いくつかの方法を適当に重畳適用すれば、
 それだけ視角の異なる情報が増し、地下の推測をより確
 かにするには役立つことを意味している。

物理探査の各方法はそれぞれある一定の物理的現象を
 取り扱う。したがって観測から結果解説までの全段階
 を通じて、その現象についての物理がよく把握されてい
 ることが必要であり、かつ最も能率的成果をあげるため
 には諸事を進めるに際し、数理的手段や実験的手段が、
 探査的にみて無駄のないよう最も効果的に活用されるこ
 とが望ましい。物理学における現象解明の手段は数理的
 ならびに実験的に大別される。前者の代りによく理論的
 という語が使われるが、それでは後者に理論がないよう
 な印象を与えるばかりでなく、物の理というものはず
 ども数式によらなければ理解または表現できないわけ
 ではないし、むしろ直観的に把握されるべきものとの観点
 に立て、こゝでは上述の用語によっている。さて物理
 探査はあくまでも地盤、それも一般にきわめて浅くて岩
 石の分布も複雑を極めている部分を対象とする物理を取
 り扱う。このことは物理探査技術者としてまず第一に
 頭裏にきざむべき事項であると考えられる。こゝでいう

に較べて、知らなくてもよいというよりは、邪魔になる
 ような情報を発するような他の状態が併存するような場
 合を表現している。このような条件下に往々にしてあや
 まちやすいことで警戒しなければならないことは、事態
 を無視してというよりは、十分に認識しないで見掛上単
 純化した考え方、もしくは取り扱いかいをやりすぎること
 である。もとより原則の理解のために単純化した場合か
 ら出発するのは当然のことであって、大いに必要なこと
 であるが、われわれの駆使しうる手段の能力限界に制約
 を受けて、無算にも自然をわれわれの方へ近づけようと
 し、結果において自然の実態をまげて認識または推測す
 るという危険におもひらないよう、自戒することが望ま
 しい。と同時に、以上は一般論であり、場合場合によ
 って事情には大幅の相違があることも忘れないことが望ま
 しい。

読者は、本書によって現在の物理探査法に関する知識
 をきわめて効果的に吸収されるものと信ずる。しかし人
 類の知識は日進月歩しており、物理探査の分野も例外た
 りえない。そして、それを推進する者は他ならぬ読者自
 らであることを改めて自覚していただく必要はない。
 人類の生存に欠くことのできない地下資源の開発はいよ
 り強化せざるをえないであろうし、反面、旧式の技術
 をもってしては困難の度合は急上昇するであろう。読者
 は先賢から受継いだ技術を伸ばしてゆくというばかりで
 なく、新しい技術を創造するという意気込みをもって邁
 進し、しかもそれを実現していただくなくてはならない。
 それこそ諸君の責務であると考えられる。

第1章 歴 史

今から約100年前(1861)にイギリスの R. Mallet が火薬を爆破して人工地震を起こし、花崗岩および砂岩層内を伝わる波の速度を測った。続いて1876年に H. L. Abbot は約20トンの爆薬を使って、測線の長さ 20km にも及ぶ大爆破探査をやっている。しかし当時の測定計器はまだ精度が充分でなく、よい結果は得られなかった。1907~10年にドイツの E. Wiechert およびその門下の人々が大地震の走時曲線を解析して、地球の内部構造を推定する研究を完成し、これによって人工地震波を使って地下構造を推定する方法が示された。

たまたま第1次世界大戦中に敵の大砲の発射位置を、発射の反動による地震動を測って決める研究がなされた。ドイツの L. Mintrop は Wiechert の指導で上記目的のために光学的な拡大装置を使った野外測定用地震計を作った。この方法は、地下構造が複雑なために大砲の位置決定には失敗したが、有用鉱物の探査には役立つとの自信を得たのか、戦後 Mintrop は1919年に屈折法による地震探鉱の特許をとり、1923年には地震探鉱会社を作り翌1924年にはアメリカのテキサス州に岩屋ドームを発見し、石油鉱業界で地震探鉱が重要視されるとぐちを開いた。同じ頃アメリカの J. C. Karcher 一派は地震探鉱計の改良考案に力をそそぎ、まもなく真空管増幅器をもった電磁式地震探鉱装置を作った。これによって探鉱精度が昇ったうえに探鉱作業が非常に楽になり、石油鉱業界での利用がますます増大した。やがてアメリカにおける浅い含油層地域の探鉱が一通り済んで、深い地層構造の探査が必要になるに及んで、屈折法の欠点——測線の長さが大きくなり、それに伴う爆薬量が多量に必要となり、経費、探鉱努力、探鉱期間が増大する——にぶつかった。そこで1914年 R. Fessenden が海の深さを音波の反射を利用して測る方法の特許をとり、海深測定にひろく使われていた方法を地震探鉱にとり入れる反射法の研究が急に盛んになり、1927年に Oklahoma で反射法による油田探鉱が成功して後、急速に同法を使う探鉱隊が増加し、現在では油田の地震探鉱の80%近くが反射法を使っている。

火薬爆破で人工地震波を生成すると、深い地層からの反射波よりも、おもに地表層に沿って伝わる表面波群等が遙かに大きな振幅で記録されて、肝心の反射波が識別できないことが多いので、反射波と騒乱波の周期および伝播経路の相違に着目して、騒乱波の振幅を押え、反射波を強調するような装置ならびに測定方法が研究され、次第に今日見られるようないろいろな周波数帯域の選定が容易な探鉱機が生まれ、方法としては多数の爆発孔を同時に使用する多孔爆発法および多数の受振器を一群と

して一受振点に配置して受振するいわゆる群設置法が発達した。

最近における探鉱機の変わった面は、磁気録音方式の採用である。これは1954~58年頃から急速な発展を示し、1957年には世界中の地震探鉱機の約半数はこの装置をもつものとなっていると推定される。また磁気記録方式の特徴を生かして、種々の総合解析機が発達してきた。

海上における反射法による地震探鉱が行なわれるようになったのは15年前頃からであるが、その後技術的にも急激な発展をとり、世界各地で盛んに行なわれるようになった。またごく最近には、震源として火薬を使用しない方法によって、音響測深機と類似の連続した記録断面を作る一種の反射地震探鉱法が行なわれるようになった。このような方法は、主としてアメリカにおいて発達しつつあり、4 KC 程度の音波を断続的に発射する方法をとっている Sonoprobe があり、また水中での電気スパークを震源としている Subsurex、あるいは Sparker が知られている。これらの方法は今のところ普通海底下 300m 程度の深さまでの地質構造を探索することができるにすぎないが、その能力も次第に改善されつつあり、将来の発展が望まれている。

わが国では明治初年、お備い教師として日本へきていた Milne および Gray が1880年に、人工地震波を使って土地を伝わる弾性波の速度を測っている。その後日本の地震学の研究は世界の学界において常に第1級の位置を占めつけてきたが、その知識を直ちに地震探鉱に応用する機運にめぐまなかった。この不幸なことがらの原因は、日本の地下構造が特別に複雑なことと、鉱山業界に進んで新しい研究を取り入れて、それを助長する気風に乏しかったことによるかと考えられる。したがって20年前までは、地震探鉱の研究ならびに実験、実施は、おもに東京大学・京都大学および地質調査所の人々によって、はそぼそとなされてきた。

東京大学では、昭和の初めに今村明恒の指導で、那須信治・波江野清蔵が探鉱用の機械式や電気式地震計の研究試作にとりかかり、1929年に初めて秋田県黒川油田で屈折法による試験的調査を行なった。翌年には岡野町油田で波江野清蔵のラジオ地震計を使って探鉱をやり、その後も計器の研究改良に努めた。

1932年から青山秀三郎との共同研究が行なわれ、後に青山・松沢武雄の共同研究の形で日本学術振興会の事業として第2次大戦の終わるまで、多くの探鉱が実施された。

東京大学地震研究所は1938年、東北線白河駅構内での地震探鉱が最初で続いて石本三郎・藤原尊礼・表俊一郎らによって、計器および走時曲線解析方法に新しい研究をつぎつぎに完成した。なかでも萩原のな

しどけた動線輪型微動計、ペングラフ型微動計の考案、および基盤の傾斜が一般でない場合の解析法は特記すべきものである。また1986年に岡門海峡陸道予定地の地質調査に地震探鉱法を実施して、予期以上の成果をあげ、土木方面でも地震探鉱の利用が必要であることを天下に明示した。

京都大学理学部では、1938年に工学部藤田基象と共同研究の形で、佐々木三・林一が2万倍電磁微動計を使って秋田県花岡鉱山で実験し、走時曲線の解析のほか初期振幅の減衰差異に注目して、二層構造のおおのの速度ならびに密度を算出したのが始まりである。その後4万倍1/2成分電磁直結式地震探鉱装置や反射用地震探鉱器を研究製作した。それを使って走時のほかに振幅の減衰係数および周期を詳細に吟味して、地下の微細構造特定の研究に主力を傾け、金属鉱床・石炭層・土木工事基礎調査等に対し、独特の探鉱方法によって相当の成果を収めた。この研究に参加したのは、佐々木・横川弘二・西村英一・吉川宗治・久保寺章らである。

東北大学理学部では加藤愛雄により地震探鉱が実施されてきたが、加藤・高木章雄が行なった超音波による弾性波伝播の模型実験の成果は、地震探鉱の走時解析に対し多くの示唆を与えた。

北海道大学理学部では1966年、田沼米次郎が秋田大学から移って後、地震探鉱の研究に力をそそぎ多くの新しい研究をなしたことが、なかでも田沼氏の表面波の弥波長則の確立は特記に値するものである。

地質調査所は1937年に波江野が技師として入所以来、引続き探鉱計器と解析方法および探鉱作業の効率化の研究に力を入れ、多くのすぐれた成果をあげている。他方国内の石油・石炭・金属・土木建設等、各方面に地震探鉱が企業的に有利であることを、探鉱実績をもつて示してきた。この功績を日本の地震探鉱関係者は忘れてはならない。如上のことにとくに精力を傾けたおんな人々は、波江野亡き後、飯田政事・早川正巳・金子徹一らである。

日本物理探鉱会社は、1942年に渡辺寛が設立し、鈴木武夫・服部保正らによって、主として土木関係の探鉱成果を向上するための特殊問題に対して多くの新しい研究をした。地震探鉱が企業として成り立つことを証明した点において、渡辺の努力はたいしたものである。その後日本国土開発会社・応用地質調査事務所でもそれぞれ地震探査班をもち、主として土木方面の調査を業務としている。

日本鉱業株式会社は1939年にハイランド反射用地震探鉱装置を導入し、油田の反射法探鉱に先鞭をつけたが、1942年にその油業部は分離して帝国石油株式会社に吸収され、さらに1986年その物理探鉱部門は石油資源開発株

式会社に移った。このように会社組織は移り変わったが、地震探鉱関係者は変わらず、林一を長として、兵頭盛也・玉野俊郎・佐々木恒郎・龜谷卓也・倉山勉らが主になって終始油田の反射法探鉱器の改良と、調査法および解析方法の研究に精力的な活動をみせ、多くの成果をあげた。同時に、困難な日本の油田開発にも貢献する所とすることが多く、今や東南アジア油田の開発にまで踏み出せる下地を作った。

一方帝国石油株式会社では、地震探鉱部門を石油資源開発株式会社に転出させた後、新たに物理探査課を設け加藤元彦が中心となって主として地震探鉱を実施している。これら民間会社の成果に力を得てか、近時石炭・金属の各鉱山および土木・農林の建設界に地震探鉱班をおく所が年々増加する機運になった。石炭鉱業においては、戦後行なわれた全国埋蔵炭量調査を契機として、地震探鉱の利用の機運が高まり、まず海上に広く鉱区をもつ宇部興産株式会社では昭和28年地質調査所から炭原重利を迎えて地震探鉱班を設立した。その後宇部沖の海上地震探鉱を実施し、炭田開発に多大の貢献をした。また日鉄鉱業株式会社は新たに有明鉱区の開発に当り現地に調査事務所を設けるとともに地震探鉱班を作り(安達幸夫・山口勉・竜神正夫)、石炭方面としてはわが国として最も組織的な調査を実施した。この他近年三井鉱山株式会社は三池炭鉱に、三菱鉱山株式会社は高島炭鉱に、それぞれ主として海底炭田の調査を目的とする地震探鉱班が設けられている。

金属鉱床に地震探査を利用することは、前記のように研究が進められてきたが、昭和31年日本鉱業株式会社は新たに地震探鉱器を購入し、主として層状含銅硫鉱床の探鉱に利用している。

土木方面の地震探鉱の利用に対しては、前述のような各物理探鉱会社のほかに、中央電力技術研究所においては増田秀夫らによりダム調査などの研究が進められており、また農林省農地局においては農業土木の調査を、鉄道技術研究所においては鉄道工事に関連のある調査が実施されている。

さらに研究面においても、1982年に、北海道・秋田・東北・東京・中央・名古屋・京都・大阪工業の各大学および地質調査所・石油資源開発株式会社・運輸技術研究所・科学博物館に属する多くの研究者が相寄って「地震探鉱実験グループ」を結成して、年々大がかりな共同実験研究を続けている。その研究報告はすでに1,000頁にもなり、新しい基礎的研究がつつきづきに完成されつつある。

以上わが国における機関別の地震探鉱の動向をたどったが、以下少しく技術面の進歩のあとをたずねてみよう。探鉱器としては第2次大戦前は数成分程度のものであ

ったが、戦後は12成分程度が一般的なものとなり、1952年に14成分のものが標準となった。またわが国でも1957年から磁気録音式の探鉱器が用いられるようになった。

反射法においては今日多孔爆発および受振器の群設置法が一般に採用されている。群設置法はすでに1940年頃から実験的には行なわれており、戦後は次第にその数も増加して、とくに石油の探鉱にあっては近頃10数個の受振器の群設置が通常作業に用いられている。多孔爆発法は1954年頃から行なわれるようになり、今日では10孔程度までの多孔爆発法が常用されている。

海上地震探鉱については、わが国ではすでに述べたように相当古くから主として屈折法により土木関係および石炭の探鉱に用いられてきた。他方1966年石油資源開発株式会社は秋田沖の石油の探鉱のためアメリカの Geophysical Service International を招き、始めて海底曳航方式の反射法による能率的な地震探鉱を実施した。以来同社のほか、日鉄・三菱・宇部・三井などの諸会社が浮遊曳航法による調査を行なっている。

文 献

Wetherby, B.B., 1940, The History and Development of Seismic Prospecting, Geophysics 5, 3, p.215~230

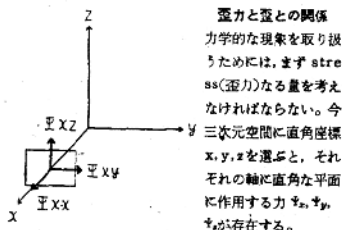
物理探鉱編纂委員会, 1948, 本邦における物理探鉱の回顧と展望, 物理探鉱, 1, 1

第2章 基礎事項

2.1 地震波

(1) 地震波の性質

媒質のない处にはいかなる波も存在しない。こゝで問題にする地震波は弾性体の表面、または内部を伝わる力学的な波のことである。



1.1図

しかるにこれらの力は1.1図に示すように、さらにそれぞれ x, y, z 軸に平行な3つの成分に分解して考えることができる。すなわち $(\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz})$, $(\sigma_{yx}, \sigma_{yy}, \sigma_{yz})$, $(\sigma_{zx}, \sigma_{zy}, \sigma_{zz})$ であって、これらの9つの量は scalar 量である。これに反し、

先の力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ はそれぞれ vector 量である。ところで、今述べた9つの scalar 量は全部が独立な量というわけではなくて、次の3つの関係がある。

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx}, \sigma_{yz} = \sigma_{zy}, \sigma_{xz} = \sigma_{zx} \quad (1.1)$$

ゆえに σ の独立な成分は結局6つとなる。このように、6つの独立した成分を有する量を tensor という。従って σ は stress tensor である。

さて弾性体に stress が作用すると strain (歪) ϵ を生じる。両者の関係については弾性体の種類とか、変位量の大小とかによって、もちろん種々の関係が予想されるが、最も簡潔な関係としてはいわゆる Hooke の法則がある。これは「stress と strain とは互いに比例する」という観測事実であって、厳密には完全弾性体で、しかも変位がきわめて小さい時だけにしか通用しない法則である。しかし、幸いにしてわれわれの直面する岩石は、現今要求されている地震探鉱の観測精度では完全弾性体とみなしてさしつかえない場合が多く、また爆発点のごく近傍を除けば、変位はきわめて小さい。ゆえに目下のところでは、特殊な観測目的を除けば、地震探鉱においては Hooke の法則の上に立った地震波動論で充分間に合う場合がまだ非常に多い。

Hooke の法則

そこで Hooke の法則を数式で表現しやすい形でい直すと「stress tensor の成分と strain tensor の成分とが一次的な関係にある」ということになり、次のように書かれる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= C_{11}\epsilon_{xx} + C_{12}\epsilon_{yy} + \dots + C_{16}\epsilon_{xy} \\ \sigma_{xy} &= C_{61}\epsilon_{xx} + \dots + C_{66}\epsilon_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

すなわち stress と strain とは今の場合、36個の定数 $C_{11}, C_{12}, \dots, C_{66}$ によって関係づけられている。これらの定数は stress と strain との関係の仕方を示すものであって、種々な弾性体の特色を表現する量、すなわち弾性定数である。今 Hooke の法則という非常に簡単な法則を認めているにもかかわらず、なおかつ一般の完全弾性体内の現象を表現するためには、36個の弾性定数を考えなければならぬ。しかしこのように複雑な現象を厳密に調べるよりも前に、まず地震波の大筋の性質を理解することの方がわれわれにとっては大切である。

弾性定数

完全弾性体にも種々な軸性が存在し、それに応じて弾性定数 $C_{11}, \dots, C_{66}$ が実測される。しかし最も簡単な性質を有する完全弾性体を選ぶとすれば、それは等方体である。等方体では上に挙げた36個の定数のうち、あるものは0となり、またあるものとお互いに関連してなくなり、独立な定数は結局2つだけになる。すなわち等方体の弾性的性質を規定するためには2つの

弾性定数が必要であり、またそれで充分である。この2つの弾性定数の選び方は独立でありさえすれば、どのような組み合わせでもよい。

ヤング率と剛性率、剛性率とポアソン比、体積弾性率と剛性率、その他種々な組み合わせ方がある。しかし数式を扱う場合には、式の表現が最もきれいになる理由で Lamé の定数 λ および μ が用いられている。 λ は incompressibility の程度を表わす量にあたっており、また μ は剛性率と同じである。

運動方程式

以上のように等方体の場合には、Laméの定数を用いて (1.2) を vector 記号でまとめると、stress と strain との関係は次のように書くことができる。(田治米 1986 a)。

$$\tau = \lambda \nabla \cdot \mathbf{E} + 2\mu \mathbf{E} \quad (1.3)$$

ここで $\mathbf{E}$ はすぐ後にでてくるように、変位の divergence であり、 $\mathbf{E}$ は affiner の単因子である。しかしながら変位 vector $\mathbf{u}$ と strain tensor $\mathbf{E}$ とは記号上次の関係で結びつけることができる。

$$2\mathbf{E} = \nabla \mathbf{u} + \mathbf{u} \nabla \quad (1.4)$$

一方において、変位と stress とには物理的に次の関係がある。

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (1.5)$$

ただし ρ は密度、 t は時間である。

ゆえに (1.3)、(1.4) および (1.5) からすおよび $\boldsymbol{\tau}$ を消去すれば変位 $\mathbf{u}$ のみの方程式が得られる。すなわち vector 算法

$$\boldsymbol{\tau} = \lambda \nabla \cdot \mathbf{u} + \mu \nabla \times \mathbf{u}$$

を使って最終結果を表現すれば

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{u} \quad (1.6)$$

これが運動方程式である。ただし $\nabla \cdot \mathbf{u}$ は divergence、 $\nabla \times \mathbf{u}$ は rotation であって、弾性体の変位 $\mathbf{u}$ は、これでわかるように、divergence による変位と rotation による変位とから成り立っている。液体の場合には $\mu = 0$ であるから (1.6) の右辺の第2項は消えて、運動は divergence による変位のみになる。もちろんこの場合には数式の扱い方は (1.6) よりもずっと簡単になる。

波動方程式

ところで (1.6) の両辺に $\nabla \cdot$ なる演算を施すと

$$\rho \frac{\partial^2 (\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}) \quad (1.7)$$

また $\nabla \times$ なる演算を施すと

$$\rho \frac{\partial^2 (\nabla \times \mathbf{u})}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 (\nabla \times \mathbf{u}) \quad (1.8)$$

これらはいずれも波動方程式と呼ばれている微分方程式の形になっていて、位相速度はそれぞれ $v_p = \{(\lambda + 2\mu)/\rho\}^{1/2}$ および $v_s = (\mu/\rho)^{1/2}$ である。 v_p はすなわち P 波の速度、 v_s は S 波の速度である。

ここで注意すべきことは $\nabla \cdot \mathbf{u}$ および $\nabla \times \mathbf{u}$ はそれぞれ波動方程式を満足させるが、 $\mathbf{u}$ そのものは、波動方程式の解ではない点である。このように変位そのものが支配される方程式 (1.6) は波動方程式よりも複雑であって扱いにくいので、こゝになんらかの工夫がなされなければならない。

変位 potential

さて弾性体が2軸に垂直な平面で焼かれているような問題においては、平面波を考えるのが最も便利である。この場合、 y 軸の方向にはなんの変化はないものと考えることができる。ゆえに

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 u \quad \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 v \quad (1.9)$$

なる関係を満たす変位 potential ϕ および ψ を導入すると、

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (1.10)$$

とおけば (1.10) の u, v は (1.6) を満足させることができる。すなわち ϕ をもって P 波を代表させ、 ψ をもって SV 波を代表させるのである。一方 (1.10) と別に (1.6) の両辺の y 成分をとってみると直ちに

$$\rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \psi \quad (1.11)$$

なる関係が得られる。これすなわち SH 波である。このように P 波と SV 波とは互いに切り離すことができないのに反し、SH 波のみは他とは全く関係なしに存在しうる。このことは P 波や SV 波は反射・屈折のさいに必ず他の一方を伴うのに反し、SH 波は反射・屈折のさいに SH 波だけしか生じないことを意味している。

ゆえに SH 波の反射・屈折は液体の波とか、光の反射・屈折の様子と大差ない。これに反し、P 波や SV 波の反射・屈折の様子は全く地震波に特有なものである。もちろん前者に較べて後者は複雑である。このために、電磁波とか音波とかの研究に較べて地震波の研究が遅れているのである。これはわれわれにとって大変都合の悪いことである。しかし反面においては、複雑であるからこそ、他の波にはみられない興味ある現象が地震波においてのみ観測されることもある。その1つが Rayleigh 波である。これは半無限に広がっている弾性体の表面を伝わる表面波であって、P 波と SV 波とが干渉し合せて生じた波である。その速度は S 波の速度よりやや小さいが、一般に観測される振幅は、P 波や S 波の振幅よりも著しく大きい。すなわちその成り立ちは地震波に特有のものであるとともに、地震記録紙上において最も優勢な波である。

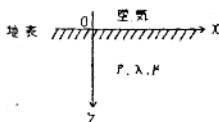
(2) 地震波の伝播

無限に広がっている等方一様な弾性体内では (1.9)

または(1.11)によって与えられるP波,SV波またはSH波がそれぞれに固有な速度 v_p および v_s で弾性体の内部を直進するだけである。これは実際にわれわれが地震波を観測する時の条件とは著しく異なりすぎている。

半無限弾性体

まず地球には地表が存在する。しかも地震探鉱においては、地球の中心付近で起こる現象よりも地表付近で起こる現象の方が大切である。一般の地震探鉱の規模においては、地表は平面と考えてもさしつかえない。ゆえに1.2図に描いたように $x=0$ を境にして $x>0$ の間に半無限



1.2図

弾性体を考えることにする。 $x<0$ の側は空気である。弾性体の密度 ρ , 弾性定数 λ および μ に比較し、空気のそれはいづれも0と考えることができる。ゆえに、 $x=0$ なる面に作用する stress は0である。これが半無限弾性体と考えたために生じた条件であって、数式によって次のように表現することができる。

$$\left. \begin{aligned} \psi_{xx} = 0, \quad \psi_{xz} = 0 : \text{P, SV波} \\ \psi_{xy} = 0 : \text{SH波} \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

これが $x=0$ における境界条件である。

今時間的に定常な運動を考えることにすれば(1.9)の特解を次のように書くことができる。

$$\left. \begin{aligned} \phi &= e^{i(\omega t - kx)} (A e^{i\alpha z} + B e^{-i\alpha z}), \\ \psi &= e^{i(\omega t - kx)} (C e^{i\beta z} + D e^{-i\beta z}), \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

ただし、

$$k = \omega/v_p, \quad h = \omega/v_s, \quad k^2 = h^2 - \alpha^2 = h^2 - \beta^2 \quad (1.14)$$

すると(1.3), (1.4), (1.10), (1.13)および(1.12)から次の関係を得る(田泊米, 1966b, 1968):

$$\left. \begin{aligned} (k^2 - 2\beta^2)(A e^{i\alpha z} + B e^{-i\alpha z}) + 2\beta^2(C e^{i\beta z} + D e^{-i\beta z}) &= 0 \\ 2\beta^2(A e^{i\alpha z} - B e^{-i\alpha z}) - (k^2 - 2\beta^2)(C e^{i\beta z} + D e^{-i\beta z}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

もしもP入射波のみを考えると、上式において $C=0$ である。ゆえにDまたはBを消去すると、 $P \rightarrow P$ または $P \rightarrow S$ 反射係数が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{B}{A} &= -\left[\left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2 - 1 \right]^{-1} \left[4 \frac{\alpha}{\beta} - \frac{\beta}{\alpha} \right] / M, \\ \frac{D}{A} &= 4 \frac{\alpha}{\beta} - \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2 - 1 \Big/ M, \\ M &= \left[\left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2 - 1 \right]^{-1} \left[4 \frac{\alpha}{\beta} - \frac{\beta}{\alpha} \right], \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

次にSV入射波のみを考えて $A=0$ とおくと、

$S \rightarrow P$ または $S \rightarrow S$ 反射係数が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{B}{C} &= -4 \frac{\beta}{\alpha} \left[\left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2 - 1 \right] / M, \\ \frac{D}{C} &= \frac{B}{A} \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

震源から射出される地震波

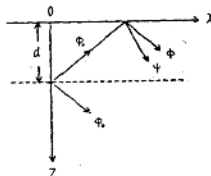
さて $x=d$ なる深さにある震源から射出されるP波のrayを

$$\phi_0 = e^{i\alpha(d-x)} \quad x \geq d \quad (1.18)$$

と書く。1.3図のように $x=0$ 面で反射して二次的に生じるrayは、振幅に関しては(1.18)に求めた反射係数が作用し、その上に震源から計った位相の遅れを考慮しなければならないので、

$$\phi = (B/A) e^{-i\alpha(d+x)}, \quad \psi = (D/A) e^{-i(\alpha d + \beta x)} \quad (1.19)$$

となる。ただし(1.18)および(1.19)には $\exp\{i(\omega t - kx)\}$ なる係数が省略してある。



1.3図

しかるに $x=d$ なる深さにある線状震源から射出される円環波を(1.18)のような平面波の寄せ集めで表現する方法がLamb (1908)によって発見されている。形式的には上に書いた平面波に単に $\int_{-\infty}^{\infty} d\xi/\alpha$ なる演算を施すだけでよい。ゆえに線状震源を与えた場合の半無限弾性体におけるP波およびSV波のポテンシャルは、結局次のように表現される。

$$\left. \begin{aligned} \phi_0 + \phi &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i(\omega t - kx)} e^{-i\alpha d}}{M} \left[M e^{i\alpha x} - \left\{ \left(\frac{\beta^2}{\alpha^2} - 1 \right)^{-1} - 4 \frac{\alpha}{\beta} - \frac{\beta}{\alpha} \right\} e^{-i\alpha x} \right] \frac{d\xi}{\alpha}, \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i(\omega t - kx)} e^{-i\alpha d}}{M} \left[M e^{i\alpha x} - \left\{ \left(\frac{\beta^2}{\alpha^2} - 1 \right)^{-1} - 4 \frac{\alpha}{\beta} - \frac{\beta}{\alpha} \right\} e^{-i\alpha d} \right] \frac{d\xi}{\alpha}, \quad x > d, \\ \psi &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i(\omega t - kx)} e^{-i\beta d}}{M} \left[4 \frac{\alpha}{\beta} - \left(\frac{\beta^2}{\alpha^2} - 1 \right) \right] e^{-i\beta x} \frac{d\xi}{\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

半無限弾性体内の線状震源からP波が発射された場合に観測されるすべての地震波は、(1.20)のなかに含まれている。ただしこのまゝではそれぞれの波の分離もできていないし、観測波形を直観することもできない。このような積分値の評価はcontour積分法によって行なうのが定路である。contour積分法においては特異点のみ

が問題になる。なんとすれば特異点を含まない閉曲線を一周した線積分の値は0になるからである。ところで(1.20)の各積分はそれぞれ $\alpha=0$, $\beta=0$ に対応する ξ において2個の分枝点と $M=0$ に対応する $\xi=\pm\kappa$ において極を有する。すなわち問題にすべき特異点は3つあって、それは

$$\xi = \pm\kappa, \quad \xi = \pm\kappa \quad \text{及び} \quad \xi = \pm\kappa \quad (1.21)$$

である。

特異点の周りの積分のうち、極に関するものは最も計算がやさしい。ゆえにまずこの計算を行なうと次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} [\psi_0 + \psi] M = 0 & \quad \alpha = e^{i(\omega t - \kappa x)} e^{-\alpha z} e^{-i\beta y} \\ [\psi] M = 0 & \quad \alpha = e^{i(\omega t - \kappa x)} e^{-\alpha z} e^{-i\beta y} \end{aligned} \right\} (1.22)$$

ただし $\alpha = -i\kappa$, $\beta = -i\beta$ であって、いずれも正の実数、これらは $V_R = \omega/\kappa$ なる速度で x 方向に伝播する波を表わしていて、Rayleigh 波の変位 potential である。これを変位に直したい場合には単に(1.10)の演算を行なえばよい。(1.22)によれば Rayleigh 波の変位振幅は地表で最も大きく、地下に入るに従って exponential に小さくなるのがわかる。

次に分枝点の周りの積分は、積分路の選び方によって近似の良否が決るので、実は厄介である。ここでは単に定性的な説明に止めよう。すると(1.20)から結局次のような表現が得られる。

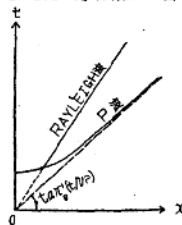
$$[\psi_0 + \psi] M = 0, \quad [\psi] M = 0 \quad \alpha = e^{i(\omega t - \kappa x)} \quad (1.23)$$

$$[\psi_0 + \psi] M = 0, \quad [\psi] M = 0 \quad \alpha = e^{i(\omega t - \kappa x)} \quad (1.24)$$

ただし $r^2 = x^2 + (z \pm d)^2$

これらはそれぞれ r 方向へ ψ_0 および ψ_1 の速さで進む波であって、それぞれP波およびSV波である。

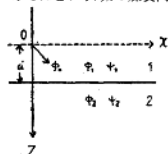
以上述べたように、地震波においては、最初にはP波だけしか発射されなかったにもかかわらず、一度境界面にぶつかるとたちまちもう一種の実体波、すなわちSV波をも生じる。さらにこのためにP波とSV波との干渉によって、Rayleigh 波を生じる結果となる。この点が他の音波とか光波とかと非常に異なっている。地中にある震源からP波が発射された場合に地表で観測されるP波と Rayleigh 波との走時関係は1.4図のようになり、



1.4図

平面で埋められた2種の半無限弾性体

2種の弾性体が $z=d$ なる平面で境われている場合を考える。1.5図に示したとおり、第1媒質内にある震源の



1.5図

位置を空間座標の原点とする。第1および第2媒質に属する量にそれぞれ添字1および2を付けて区別すれば、(1.18)と同じ形の特解がそれぞれの媒質内で考えられる。

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= e^{i\omega t} e^{-i\kappa x} (A_1 e^{\alpha_1 z} + B_1 e^{-\alpha_1 z}), \\ \psi_2 &= e^{i\omega t} e^{-i\kappa x} (C_1 e^{\beta_1 z} + D_1 e^{-\beta_1 z}), \\ \psi_3 &= e^{i\omega t} e^{-i\kappa x} (A_2 e^{\alpha_2 z} + B_2 e^{-\alpha_2 z}), \\ \psi_4 &= e^{i\omega t} e^{-i\kappa x} (C_2 e^{\beta_2 z} + D_2 e^{-\beta_2 z}) \end{aligned} \right\} (1.25)$$

ただし震源が第1媒質内にある場合、第1媒質内からやってきた波に対しては、 $z > d$ には不連続面がないので、第2媒質内には x 方向の後進波は存在しない。従って $A_2 = C_2 = 0$ である。

今 $D_1 = 0$ とし、 $B_1 \exp\{i(\omega t - \kappa x - \alpha_1 z)\}$

なるP波が第1媒質と第2媒質との境界面にぶつかった場合を考えると、境界面における境界条件は、変位および歪力がそれぞれ連続であるべきなので、

$$\left. \begin{aligned} (\psi_1)_1 &= (\psi_2)_1, \quad (\psi_3)_1 = (\psi_4)_1, \\ (\psi_{xx})_1 &= (\psi_{xx})_2, \quad (\psi_{xz})_1 = (\psi_{xz})_2 \end{aligned} \right\} (1.26)$$

ゆえに(1.26)に(1.25)を代入すると、 A_1/B_1 , C_1/B_1 , B_2/B_1 , D_2/B_1 なる4つの未知数に対し、4つの方程式が得られる。ゆえに今述べた4つの量はそれぞれ $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ のみで表わすことができる。実は $A_1/B_1, \dots, D_2/B_1$ はそれぞれ第1媒質側からみたP→P, P→S反射係数およびP→P, P→S屈折係数である。同様に、 $D_1 \neq 0$, $B_1 = 0$ として A_1/D_1 , C_1/D_1 , B_2/D_1 , D_2/D_1 を求めれば、S→P, S→S反射係数およびS→P, S→S屈折係数が得られる。ただし今度の反射係数および屈折係数の表現式はいずれも(1.16)に比較しきわめて複雑である。

さて(1.18)と同じ original wave を考えると、第1媒質内には $\psi_0 + \psi_1$ および ψ_2 、第2媒質内には ψ_3 および ψ_4 が存在することになる。 $B_1 = D_1 = A_2 = C_2 = 0$ において(1.18), (1.25)を(1.26)に代入すると、 A_1, C_1, B_2, D_2 の値はそれぞれ $\bar{A}_1(\xi)/M(\xi)$, $\bar{C}_1(\xi)/M(\xi)$, $\bar{B}_2(\xi)/M(\xi)$, $\bar{D}_2(\xi)/M(\xi)$ の形に求まる。従ってこれらを(1.25)に代入し、 $\int_{-\infty}^{\infty} d\xi/\alpha_1$ なる演