

本州—四国連絡架橋海底地質調査の概要

—スパーカー法による地質調査—

小 野 寺 透*
今 井 勇**
新 谷 鏡 三***

1. ま え が き

建設省道路局では、昭和 34 年～37 年の 4 年にわたって、本州—四国連絡架橋の調査を実施することになり、昭和 34 年度においては、産業経済調査ならびに海底地質調査を行うことになった。

このような海底地質調査には従来から弾性波探査を行っていた。すなわち、爆破点を海中または海底に、受振器も特殊な水中用を用いて海底に、また記録器などの諸測定器具を船上に設置して行い、観測方法ならびに解析は走時曲線を作製して行うなど、陸上の場合と同じである。

しかしながら、受振器を一直線に並べたり、爆破点に正確にダイナマイトをおくことなどの困難があり、その上、海上であるためにダイナマイトによつて生ずる魚群に対する被害などで莫大な補償を払わなければならないなどの欠点があった。

今回実施したスパーカー法はこれらの欠点がなく、その上、記録そのままが連続的な地質断面**** としてその地域の地質構造の概略を知ることができるという有利な点がある。

たまたま、石油資源開発 K K が新潟、秋田沖の海底油田の地質調査にこの器械の所有者であるアメリカの Marine Geophysical Services Co. と契約して実施し、その調査で良好な結果を得ていることを知つたので、調査終了と同時に継続契約を行つて上記会社に調査を行わせた。この調査に参加した調査機関の構成は次のとおりである。

建設省道路局企画課（総括）

“ 土木研究所地質研究室（地質）

“ 近畿、四国、中国各地方建設局（産業経済調査ならびに地質調査準備、設営）

海上保安庁、第 5、6 管区海上保安本部水路部

（航跡測量）

なお本調査を実施するについて種々助言をいただいた石油資源開発 K K の岡物探部長、松沢物探部第一課長に

* 正員 理博 建設省土木研究所地質化学部長

** 正員 建設省道路局企画課課長補佐

*** 建設省土木研究所地質化学部地質研究室研究員

**** このように記録をとることから、スパーカーの装置の正式な名称を Continuous Seismic Profiler といつている。

対して感謝の意を表わす次第である。

2. スパーカー方法の原理

この方法は、海底測深機に類似しているが、本質的に異なる点は、低周波の音源を用いて海底からの反射に加えて、海底の下にある地層からの反射波をも記録できることである。すなわち、測定器をのせた船からスパーカーの発振によつて生じた弾性波は、受振器に直接に到達する波や、海面または海底からの反射波、海底下の地層からの反射波などとして受振器に記録される。そこで（約 4 ノットの遅い速度で）航行する船で、ある一定の時間間隔（1/2～1/16 sec）で発振しながら記録をとれば、航跡に従つた連続した地質断面が得られる。

3. 器械の概要

構成されている器械を大きく分類すると次のとおりである。

写真—1 電源部



1. 電源部
2. 発振部
3. 受振器ならびに水中電極
4. 増巾部
5. 制御部
6. 記録部

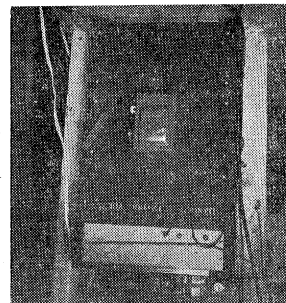
（1）電源部(写真—1)

器械全体の電源で、

60 cps, 110 Volt の 10 kW の発電機を用いている。機械全体の容量は 5 kW で十分であるが、供給される電圧および周波数はかなりの精度と安定度を要求している。

写真—2 発振部

（2）発振部(写真—2)



発振部はいわゆるスパーカーなる名称の由来するところから、A.C.120 Volt を 7000～12000 Volt に昇圧し、これを整流して大容量コンデンサーに充電し、水中電極ならびに調整用可動電極を通じて放電させる。水中電極に

において放電した場合の発振エネルギーおよび周波数成分は弾性波探査用電気雷管(規格 6~7 号電気雷管)とほぼ同じといわれている。調整用可動電極は見ながら調整できるようにとなつていて、A.C. Power Switch と連動してコンデンサーの両端子を短絡することのできる Safety Switch をそなえている。

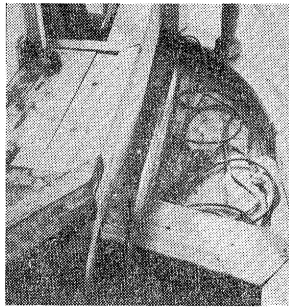


写真-3 受振部

(3) 受振器並びに水中電極 (Hydrophone & Spark Electrode) (写真-3,4)

受振器は写真のような木製の筒の中に磁歪型の圧力受振器 (Magnetostriction Hydrophone) が入っている。周波数特性は、器械の使用周波数範囲 (20~10 000 cps) 内で平坦であるが、感度その他については公表されていない。

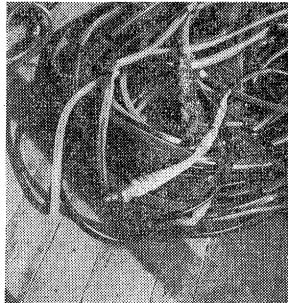
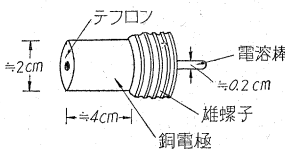


写真-4 水中電極

水中電極は直径 2 cm、長さ 4 cm 程度の円筒状のものである (図-1)。放電は電気溶接棒電極と円筒銅電極との間で行われる。

図-1 水中電極



(4) 増巾部

増巾部は前置増巾器 (Preamplifier) 可変帯域通過ろ波器 (Variable Band Pass Filter) 信号増巾器 (Signal Amplifier) からなつている。この増巾部は 2 チャンネルよりなつていて異なつた方法 (4. 参照) で 2 つの記録を同時にとることができる。

ろ波器は 0~9 600 cps までのどの帯域通過でもセットできる無抵抗型フィルターである。実際には記録は全部広帯域フィルターでとり、狭い帯域通過で記録することはほとんどない。これは反射パルスを正確に記録し、フィルターを通したことによる誤つた相関をさけるためである。

信号増巾器はフィルターからの出力を記録するのに適当なレベルにまで上げるために増巾するものである。これは信号に対する増巾制御をすべてふくんでいる。すなわち、入力減衰器 (Input Attenuator) と中間減衰器 (Interstage Attenuator) である。

増巾器の最終的制御の目的のために重要な整流スイッチがある。これは全波整流と半波整流の 2 つの位置をもつたスイッチである。水中受振器でとらえられ、る波、

増巾されてここまで進んできた電気的信号は必然的に交流信号である。しかし記録器は一方の信号のみしか記録しないから交流信号を半波整流にするか全波整流するようにしてある。

(5) 制御部

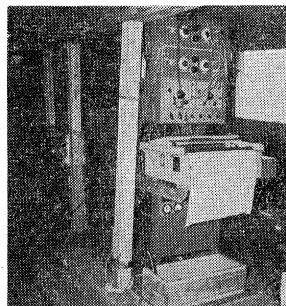
この部分には掃引時間スイッチ (Sweep Time Switch) 順序調整 (Program Control), 位相調整 (Phase Control) などがある。掃引時間スイッチは 4 位置があつて記録器ドラムの回転数を制御し、スパークを 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 秒の 4 種類に変化させることができる。これはドラムの 1 回転のための時間と同じでたとえば、掃引時間 1/4 秒ではドラムは 1 秒に 4 回転する。媒質中を伝わる弾性波の平均速度が 4 800 ft/sec (≒ 1 460 m/sec, 公称の水の速度) のとき、掃引時間の 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 秒はそれぞれ 150, 300, 600, 1 200 ft (46, 92, 183, 366 m) までの深さに相当する。つまりここまでの範囲で記録されることである。

順序調整、位相調整はスパークとドラムの回転の関係をきめたものである。この部分の最終調整はチャンネル選択スイッチ (Channel Splicing Switch) で、これは一方の増巾器からの信号を記録の方でチャンネル 1 と同様にチャンネル 2 にも入れるかどうかを決定する。チャンネル 2 にも入れた場合は上述の深さの 2 倍がえられるようになつている。

(6) 記録器

記録器は大きさ約 60×50×20 cm 程度のもので、ドラムには 370° まいたらせん状の針金が 2 つある。この針金は記録器における電気的接触の一方の電極をなし、記録紙をはさんで接触するもう一方の電極は、紙の上方に位置している薄いナイフ状のものである。電流がらせん状の針金からナイフ状の針金に通ずると記録紙の上に印がつく。記録紙は湿り気のある電気感光紙で、紙上へ白黒にうつる記録の強さは通つた電気的信号の強さに比例する。約 20 db の明暗が記録されるようにする。ドラムの回転数は 960~1 800 rpm で紙送りの速度は 2 in /min 程度であるが、前後に調整することができる。

写真-5 器械の据付け



以上器械の部分について簡単に述べたが、増巾部、制御部、記録器の据付けた状態を写真-5 に示した。

4. 測定作業ならびに方法

目的の海域に到達すると、それぞれ先端に発振用水中電極、受振器をとりつけたスパークケーブル、受振ケーブルを船の両舷側より投下する (写真-6)。投下

されたケーブルは浮子によつて浮いているが、その先端（約 200 ft）の水中電極、受振器は自重によつて海面から 3~5 ft (90~150cm) の辺に沈んでいる（図-2）。設置が終れば船を約 4 ノットで運航しながら航路測量を行う。この測量は、陸上から船の位置を測定するか、または船上より陸上の定点を測定して（写真-7）航跡図を作製する。この測量は 1~5 分間隔で観測し、記録上に同時に記入されるように固定コーススイッチがある。測定方法は調査目的および地域によつて異なるのはもちろんである。二

写真-6 投下されたケーブル
右側：受振器用 左側：水中電極用

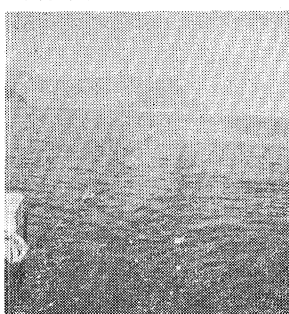


写真-7 航跡測量

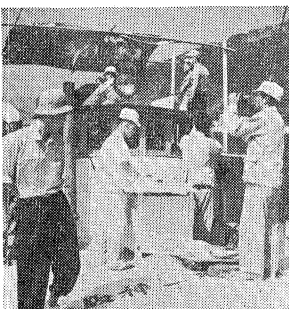
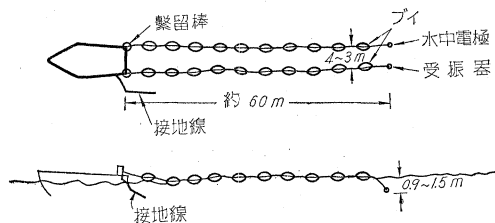


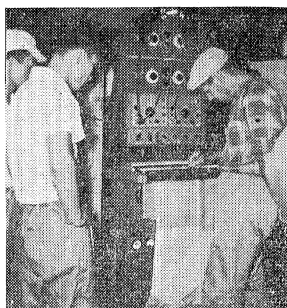
図-2 受振器と水中電極の関係



体のチャンネルという形式を利用して、第1チャンネルでは海面より 1/8, 1/4, 1/2 秒という垂直時間の範囲内の反射を記録するために使い、第2チャンネルでは第1チャンネルより深度をのぼして記録することもできる。すなわち、第1チャンネルでは 0~1/4 秒（約 0~270 m）を記録したとき、第2チャンネルでは 1/4~1/2 秒（約 270~540 m）を記録するのに使用できる。また第1チャンネルと同じ深度までのものを同じ受振器からとつて目的に応じてこれをいろいろに組み合わせることもできる。たとえば第1チャンネルでは 0~400 cps のフィルターでとり、第2チャンネルでは 300~600 cps のフィルターでとることもできる。また第1チャンネルを半波整流し、第2チャンネルを全波整流してみることもできる。また受振器と水中電極を移動させて観測し、地層の速度を計算することもできる。測定は調査地域の航海に適したものならばどんな船からでも測定できるほど、機械の据付けは簡単である。写真-8 は測定作業中のものである。

5. 記 録

写真-8 測量作業



前記の方法でえられた記録は、本質的に観測船の航跡下の地質構造の断面である。写真-9 上半分は半波整流、下半分は全波整流）水平方向は時間の目盛であると同時に観測船の速度に応じた距離の目盛でもある（したがつて船への速度を一定にすることが望ましい）。垂直に入つた線は、海上で船の位置を測量した点を固定コースで記録したもので、これらの印は海図上の番号に対応している。

垂直方向の目盛は時間の目盛で、その 0 は常に水中におけるスパークパルスの始まりに対応する。水中受振器とスパーク電極との間隔が 3~4 m で、海の深さなどにくらべて小さいから、記録上の垂直目盛は本質的に垂直時間の目盛と考えてよい。また媒質の弾性波速度がわかつていれば、この目盛はまた垂直深度目盛にもなる。

半波整流の記録（上半分の部分をみると、海面のすぐ下に縞状をした 3~4 本の線がある。これはスパークによつてできた反射波で、これは電極から直接に受振器にくる波や、電極から発振された波が、海面に反射して受振器に到達した波や、また気泡によつてできたものである。また海底面すぐ下にも同じような現象がある。これは発振された波が海底面に反射して受振器に到達する以外に、一度海面に反射して受振器に到達するというような反射現象である。

また、半波、全波整流した記録とも、海底面より深い部分にこれと同じ形をしたものがある。これは海面と海底との間で重複反射である。最初の海底反射の時間間隔の 2 倍である。

記録は垂直反射であるから、急傾斜の面からの反射に対してはある程度の補正が必要である。すなわち、傾斜している面に対しては、この反射径路はもちろん、海面に対して垂直なものでない。しかし、スパーカーの記録においては、反射はあたかもそれが海面から下方で海面に垂直的におこつたように記録されている。そのためスパーカー記録に現われている反射に対し、その真の地質的位置を決定するための補正を行わねばならない。

6. 調査箇所ならびに測線

今回の調査は、明石海峡、鳴門海峡、高松一日比、坂出一下津井、今治一尾道の 5 箇所で行つた（図-3, 4, 5）。

明石海峡は本州側が西垂水、淡路島側は岩屋である。測線は 8 本、測線長は約 36 km である。

鳴門海峡は、淡路島側が門崎、四国側は大毛島先端の裸島である。この地区は有名な“鳴門のうず潮”にあつた

図-3 明石—鳴戸海峡測線図

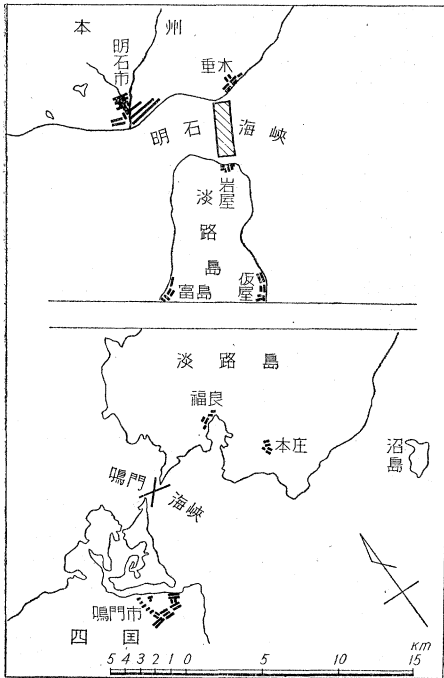
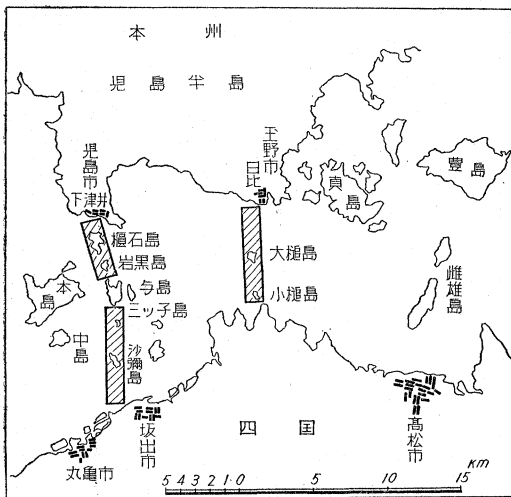


図-4 高松—日比, 坂出—下津井測線図

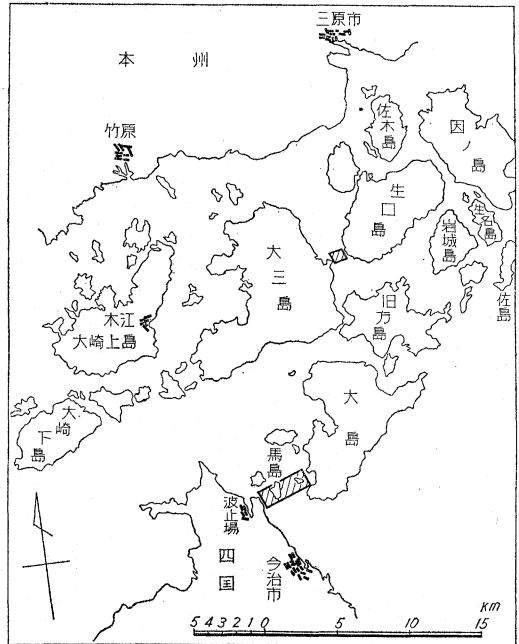


るので、船の運航を考慮して図のごとく斜十字にとり、また潮流の最高時をさけて調査した。この地区の測線は4本、測線長約7.5 kmである。なおこの地区は大毛島との四国鳴門市間もふくめて調査した。測線は4本、測線長約2.3 kmである。

高松—日比間は、四国側を高松西方約11 kmの“大崎の鼻”を起点とし、小槌、大槌の両島を通り、本州側を児島半島の日比とした。測線は11本、測線長約22.5 kmである。

坂出—下津井間は、四国側坂出市より、沙弥島、児島、樫石島を通り児島半島下津井に至る間で、測線は20本、測線長約33.8 kmである。

図-5 今治—尾道測線図



今治—尾道間の地区には多くの島が存在している。その島の間隔が短いので、調査箇所を四国側来島海峡、すなわち今治市西方約6 kmの地点より馬島を通り大島へ、次の地点を大三島の多々羅崎と、生口島間とした。測線数は36本、測線長約25.5 kmである。

以上の5箇所の調査日数は6月23日より7月4日までの12日間で、移動、準備、撤去日数をのぞき、実働日数は7日間であつた。なお使用した船は福徳丸35 tである。

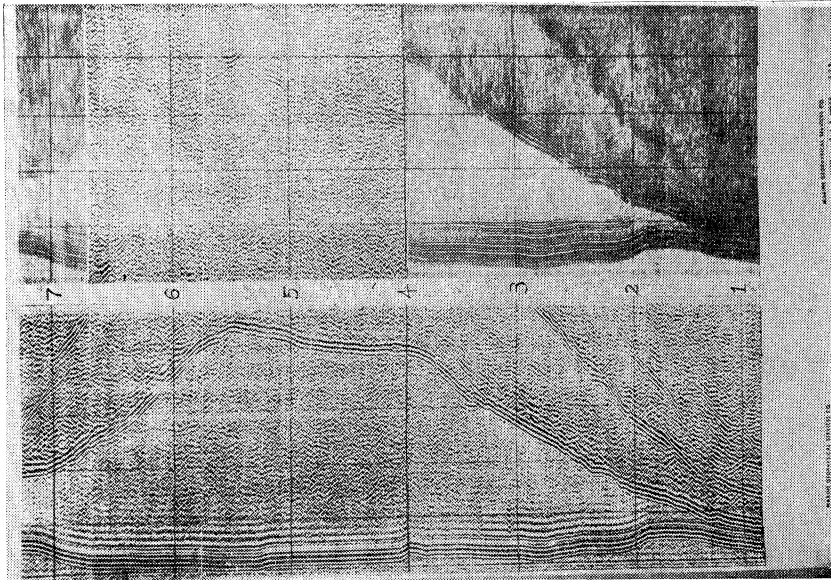
7. 調査結果

スパーカー法は密度の変化が記録に現われているから、そのような点を選び出し解析する。写真-9の記録を解析の例とすると、海底面道の深さは次のようになる。No. 4の地点では、垂直目盛は4目盛の点である。この記録では掃引時間は1/8秒であるので、No. 4の点では、 $1/8 \text{ 秒} \times 4/5 = 1/10 \text{ 秒}$ (垂直目盛は5等分してある)で、これは反射してかえつてきた時間であるから、海底面までは海面より $1/10 \text{ 秒} \times 1/2 = 1/20 \text{ 秒}$ で到達したことになる。今海水の弾性波の速度を約1500 m/secとすると、 $1500 \times 1/20 = 75$ 、すなわち、No. 4の地点では75 mの深さがあることがわかる。このようにして各地点の深さを計算することができる。海底面下の状態は、記録の左方をみると、海底面の形にたものが2~3あることがわかる。これは前にも述べたように海底面の重複反射である。密度の異なつた所では、記録を斜または横よりみると、同一と思われる密度の連続がわかる。これが明らかに異なつた地層であれば記録を普通にみてもす

写真-9 記録の一例

Sweep Time 1/8 sec
Filter 1.300~600 cps
" 2.360~900 "

注: No. 4 から No. 6 と No. 7 の間まではチャンネルIIを
全波整流から半波整流になおし掃引時間を 1/4 sec にした。



チャンネルI (半波)

チャンネルII (全波, 半波)

ぐわかるのである。この写真-9の地区がカコウ岩地帯であつたので、カコウ岩特有の同化をおこして密度が漸移的に変わつてゐるので、あまりはつきりとは判定しにくい。

以上の方法で各記録について解析を行つたが、岩質の硬軟、岩石の構成物質などは判明しないので、これらの事からは付近の地質状況より推定するよりはかはない。

各地区別に調査結果は次のようになつてゐるが、各地区について一測線の断面図をあげた。

(1) 明石、鳴門海峡 (図-6,7)

明石海峡では、付近の地質より3層の存在が想定されていたが、海底下の状況は明らかではなかつた。この調

図-6 明石海峡

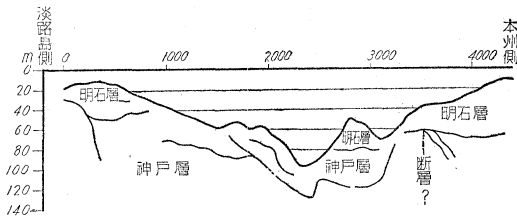
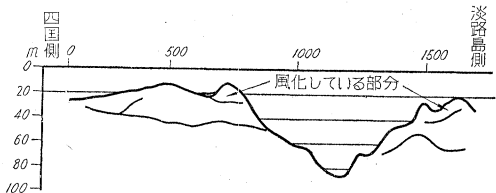


図-7 鳴門海峡



査の結果で、海底下にも神戸層、明石層、段丘堆積層の3層が存在していることがわかつた。神戸層はアルコーズ砂岩、礫岩を主とした堅いものであり、明石層は青灰

色シルト岩、砂岩などの軟かいものである。また段丘堆積層は礫岩、砂岩の非常に軟かいものと思われる。これらの地層名はもちろん付近の地質より推定した。

神戸層は海峡中央部(水深約90~100m)に露出し、本州側の明石層との境界に断層らしきものが記録された。この神戸層の中央部(海峡中央部)付近にカコウ岩の存在があると、先年国鉄の底質調査結果が報告されたが、本調査記録には存在が認められない。なお海峡中央部の突起部分には明石層が認められた。

鳴門海峡は、同一岩質(付近の地質状況から和泉砂岩であろう)で構成されているようである。この地域は中央構造地帯にふくまれているため、構造線の影響をうけていると思われるが、記録には密度の変化、すなわち、上部が同化されているようにあらわれている。

(2) 高松一日比 (図-8)

この地区の基盤は、小槌、大槌島の露頭から推定して黒雲母カコウ岩と思われる。この二島の頂部付近は安山岩でおおわれているが、この調査では海底下に安山岩らしきものは認められない。基盤を構成しているカコウ岩は風化していて、2, 3層構造のように記録では認められた。この2, 3層構造は他の坂出一下津井、今治一尾道の各線にも認められるが、これはカコウ岩特有の漸移的な風化で密度の差によつて記録されたものである。

(3) 坂出一下津井 (図-9)

この地区も黒雲母カコウ岩のようであるが、中央部の与島のみは角内石黒雲母カコウ岩と思われる。このことは地質図より知つた。このカコウ岩も前の高松一日比と同じく漸移的に風化していて、2, 3層構造のように記録より推定される。この黒雲母カコウ岩と角内石黒雲母

図-8 高松一日比間

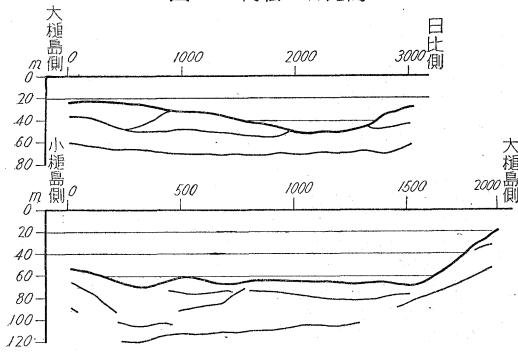


図-9 坂出一下津井間

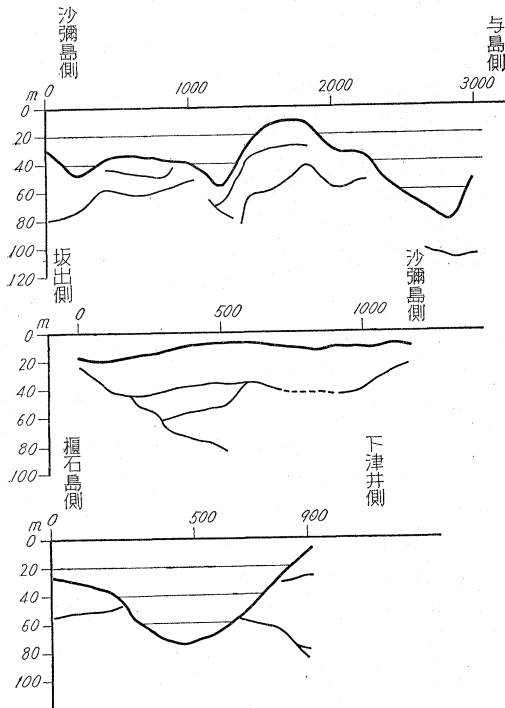
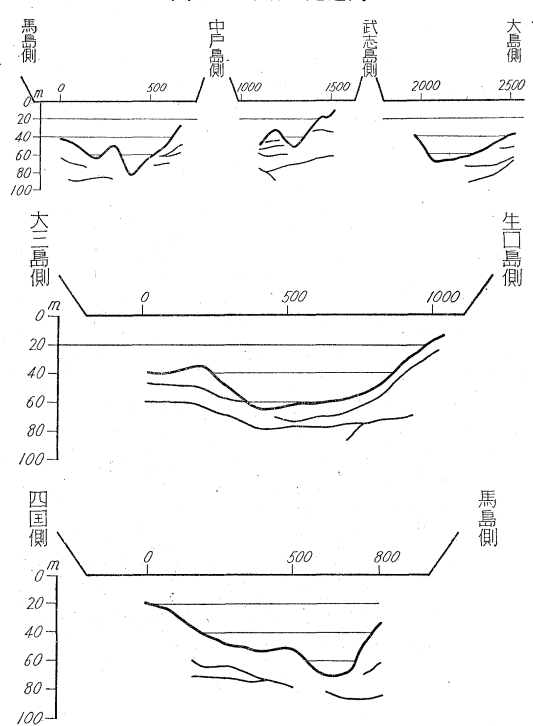


図-10 今治一尾道間



地質調査（地表踏査，ボーリングなど）を来年度以降に実施する予定である。このスーパーカー方法では前に述べたように岩石の種類，強度などを知ることは不可能であり，また海面または海底より生ずる重複反射波のために，海底下約 5 m 付近の部分の状態を知ることができないという欠点があるが，調査地域の地質概念をつかむことには非常に役立つことがわかった。この調査をとりまとめてみると次のとおりである。

- 1) 明石，鳴門両海峡を除いた地域は基盤がカコウ岩で，基盤の上部（約 10 m 内外）は風化されている。一般に密度の変化によつて 2，3 層構造を示しているが，第一の風化層を除くと，漸移的に風化してはいるが，風化はたいして進んでいないようである。
- 2) 明石海峡は第二，第四紀層で，第三紀の神戸層と明石層との境界に断層らしきものが存在している。
- 3) 鳴門海峡は中生代の岩石で，上部は部分的に風化している。
- 4) 全地域ともに重複反射のため海底下約 5 m までの浅い部分の状態は判明しない。

なおこの方法をわが国で使用したのが今回が初めてであるので，解析等が未熟である。今後なお研究を続行する予定であるので，この調査結果についてなお追加できることもあること，またこれに限らず一般の物理地下探査は付近の地質踏査によつて精度を高めなければならないことを付記する。

今回の調査は地域の地質の総括的予備段階の調査であつて，構造物設計のための調査はべつに計画される。

カコウ岩の境界は記録ではあまりはつきりしないが，風化の度合から推定して三ツ子島の南までは角内石黒雲母カコウ岩と思われる。この 2 つのカコウ岩の物理的性質の差異は実験していないが，他の地区の風化の度合と比較して異なつた風化の状況を示していたので，この両者の境界を推定した。また与島の北方ではこの両者の境界は判然としなない。

(4) 今治一尾道 (図-10)

この地区の基盤も黒雲母カコウ岩であるが，この地域に存在する島は変質された粘板岩，砂岩であるが，海底下には存在しないようである。この地区のカコウ岩も前二者と同じく 2，3 層構造のように現われた。

8. むすび

スーパーカー法という新しい調査方法によつて海底下の地質構造の概略を知ることができたが，なお，くわしい