

## 高出力化音波探査装置の試作

駒井 二郎\*

**A High Power Sparker System and Some Acoustical  
Characteristics of Underwater Electric Discharge**

By

Jiro KOMAI

Abstract

Much interest is now being exhibited in a steady growth of non-explosive marine seismic sources throughout the geophysical industry.

The trend toward greater use of this sophisticated technology indicates that there have been extensive technical advances in designing a variety of new transducers, as well as the tremendous effort devoted to the research of digital data processing with the advent of modern computer facilities, since the earliest years of the art.

Among the various systems, it is widely recognized that the so-called "sparker", one of the forerunners in the field of non-dynamite method, can particularly offer a good deal of versatility in controlling power spectra of sound pulses by its very nature.

For many years, improvements in the signal-to-noise ratio and penetrability of seismic signals generated by electric discharge beneath the sea surface have been a continuing project with the geophysicists of Geological Survey of Japan, following the development of low-energy prototype in 1960.

Later experience and theoretical investigation showed that increasing of storage capacitor bank in a straightforward manner could provide the simplest way in accomplishing these goals, keeping pace with the endeavour to be done for implementing data processing techniques.

In the following will be presented an outline of the high power sparker version (maximum stored energy: 60,000-joule at a repetition period of 4 sec) evolved recently in our laboratory; however, we have confined ourselves to a cursory description thereof because major concern is centered around the potentiality of frequency control, which makes possible tailoring the pulse shape for the best display of recordings, by regulating the electrical parameters incorporated in the whole system, and associated acoustical characteristics of underwater electric discharge. Although most of the analyses are those of the electric circuit theory, not from acoustical point of view, it is often the case that the actual waveforms of sound pressure can be, to a large extent, approximated by the current flowing the electrode, and the validity of this assumption is supported satisfactorily by powerful evidences.

Never have so many features been combined in a single equipment, and hence, a compromise between resolving power and penetrability is usually made with respect to a given driving source. A qualitative remedy for this problem is proposed on the value of energy concentration in an effective portion of waveforms in terms of time and frequency domains; it is suggested that careful attention should be paid to choosing the repetition period so as to maintain the highest power consumption at sparking electrode.

---

\* 物理探査部

The selectivity of frequency control is especially beneficial in difficult areas and permits one to target more precisely on specific objectives such as a desired reflection event or reduction of ambient noise.

Also commented is an experimental study of adaptability of conventional coaxial electrode for applying in fresh water in view of the fact that there exists a real need in earth sciences for surveying such water-covered areas as lake, river, lagoon, etc.

As the multiplicity of capacitor bank, electrodes and detectors is increased to cope with still more difficult situations, however, we are eventually confronted with an inherent limitation even though encouraging results are being worked out. Further research and development are, therefore, required to yield better quality of recordings and in extracting weak signals.

Attempts are continuing, and this is a progress report of limited success we have had up to date.

## 1. 緒言

その出現当時、海底下の地質構造がさながらパノラマを見るかのように美しく展開される連続記録の演出により広く、一般の地学関係者に新鮮なショックを与えた音波探査も、今、十数年の歴史を経由し、日進月歩の改良、進歩はさらに加速の度を早めつつ、すでに海上物理探査技術の主流としてゆるぎない地歩を築くにいたっている。この間、石油・石炭・土木等、地下資源開発にあるいは国土保全の応用諸分野に多くの華々しい成果を挙げるとともに、海洋地質学、地球物理学などの純学術的な方面にもとどまるところなき進出を示し、従来の地震探査の領域に食い込み、一面、融合しながらも、むしろ、これを駆逐しつつあるのが現況といえよう。

地質調査所では1959年、M.G.S.社の来日を契機とし、わが国で初の水中放電式音波探査装置(スパーカー)の国産化試作に成功したが、以来、関連技術の開発に、また内外の要請に応じての各海域の調査研究に少なからぬ努力を結集してきた。当初、充電エネルギーは200ジュール(10kV, 4 $\mu$ F)を以って発足し、海底下100m前後までの構造を対象とする限り、ほぼ満足すべき性能を発揮したが、その後、海洋開発の飛躍的進展とともに、より深部からの、より質の高い情報検出に対する要求の増大は必然的な成り行きであった。

一口に音波探査といっても、その包含する範囲は非常に広汎、かつ多岐にわたっている。私見によればすべての物理探査法の研究の主体は解析理論も含めて畢竟、広義のS/N比の向上にはかならないと思われるが、その実現の手段として大きく分ければ2つの面からのapproachが指摘される。すなわち、拡張された意味での、いわゆる“金物”と“やわ物”であり、それぞれ独立して歴大な領域を網羅していると同時に、両者は相互に密接な依存関係で結ばれ、いい古された表現ではあるが車

の両輪として1つの体系を形成している。近年、急速に成長して今や、最先端の技術が結晶されているデジタルデータ処理システムはあらゆる見地からみてまことに魅力的な存在であるが、時流に眩惑されての盲目的な導入が真にそれにふさわしい効果を挙げうるかは充分、慎重な検討が必要とされよう。今、かりに高度に洗練された(そして高価な)ソフトウェアによりなにかのS/N比が改善されたとしても、同程度の改善は技術的にはごく幼稚な、たとえばスパーカー送信機のコンデンサ1コの追加によって達成し得るかも知れない。したがって両者は本来、並行しての開発が理想ではあるが、目標を1本にしぼった時、まず発振源の出力増加という、一見、単純な面においてこそ第一になされるべき点が多いはずであり、しかるのち、多重反射の除去、CDP等、後者でなくしては至難な分野、もしくはより、柔軟に効率よく処理できる対象についてその本領が発揮されるべきであろう。事実、いかなるエネルギー変換方式をとるにせよ、発振源の大容量化、高能率化には当然、ある程度の限界が予期されるのに反し、ソフトウェアの進歩は無限の可能性を提供しうるにはちがいないが、特に種々の現実的な条件に制約される場合、手順の重要さは重ねて強調されてよい。

以上の観点から、地質調査所では国産1号機の開発以後、次の目標として水中放電式音波探査装置の大幅なパワーアップによる有効探査深度の増大を柱とし、併せて送受両面にわたる関連技術の諸問題点の解明を指向した。本概報は昭和41年度より3カ年にわたって実施された同計画の経緯と概要であるが、音波探査に関する論文、解説は地質調査所関係に限っても既発表のものが少なくないので共通する事項は冗長をさけるため極力、割愛した。また音波探査のいわば第二、第三世代ともいうべき多彩な商品名を冠せられた最新の各種非爆薬震源の紹介も散見されるので、これらについての考察もいっさい

省略する。ただ、以下の本文と密接な関連をもつ点につき簡単に展望すると、最大の焦点は各方式間の格差、優劣とみる。現在、各種各様の着想と原理にもとづくトランスデューサが実用化されているが、各機種の消長、隆替は実にめまぐるしく、新たな構想のもとに登場した機器もせいぜい、数年もすれば陳腐化してみえるほど新陳代謝が激しい。アイデアとして独創性にいかに卓抜していても、はなはだ実際的な使用条件に束縛される以上、おのずから格差が生ずるのもやむを得ない。たとえシステムとして完全に確立されている、調査の目的と要求に応じた適否は明らかに存在するが、一方、厳密な意味での各種方式間の比較、たとえば同一地域においての全方式の比較実験は実際問題として不可能と考えられる。また仮にそれが可能としても、種々の作業条件(装置の重量、体積、取扱いの難易、所要消耗品費等)によるランニングコスト、受信データ処理方式との関連、あるいは装置の価格と情報量の価値などの諸要素をどのように評価するかは意見の分かれるところであろうし、所詮、各方式間の得失に関してはかならず、主観的、経験的な色彩を帯びてくるのは免れない。一般に装置が大型、高価なもの理由の一部とみられるが、多くの会社、研究所でそれぞれ独自に開発している関係からか、陸上用非爆薬震源については2,3の報告があるものの、海上用では種類が多い割にはこの種の試みがほとんどなされていないようである。唯一の例外は陸上用から海上用にも転用され、エアガンと並んで急速にシェアを拡大しつつある Vibroseis で、これは他方式と全く趣きを異にした原理に基づき、理論的にもその卓越した長所が立証されているが、現時点で判断する限り、なお、その特色が十二分に生かしつくされているとは速断できない。ただ、周波数制御がスムーズに行なえる数少ない例であり、今後の動向が注目される。今のところ、エアガンが可探深度の面で最高の検出能を誇り、Vibroseis と Dinoseis がわずかの差でこれに続いているが、現在、伸び悩んでいるかにみえる方式も爆発的な進展をみせる可能性を常に秘め

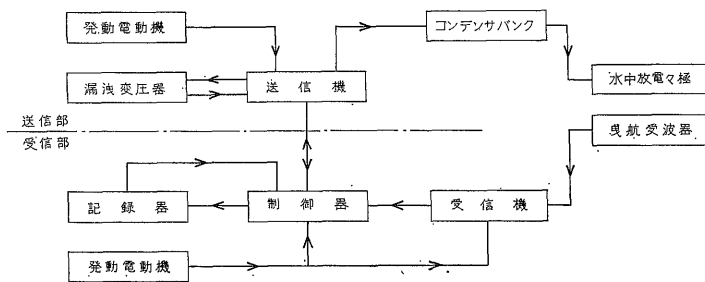
ており、なお、予断を許さない。もちろん、上記の諸要素を棚上げすれば、定量的な各種音源の性能評価は一応、可能であり、基準として発生音圧のパワースペクトルをとるのがさしあたり、妥当である。しかし、肝心の地中伝播特性が不明な地域性をもつ以上、調査海域により最適機種が異なることもまた、想像に難くないところである。

これら各種音源の多様性にもかかわらず、地質調査所が一貫して水中放電方式に固執してきたのは、M.G.S.社による刺激もさることながら、やはり、他の化学エネルギーを利用する音源に比し、電気エネルギーのもつ利点が最大限に発揮し得るのではないかという見通しによるものであった。非爆薬震源の発祥以来、少なくともわが国においては磁歪振動子方式と並んでこの分野における先駆者としての映像があり、その適応性と限界については何らかの結論を迫られる段階に立っている。

## 2. 試作装置の概要

設計の基本方針としては実用化を必ずしも急がず、基礎実験を着実に積重ねてのち、最終的な調査用への移行を配慮した。したがって多少の曲折を経たが、現在、十分な信頼性に支えられた60,000ジュール(繰返し周期4秒)の試作装置を完成し、なお、必要に応じてさらに大容量の増設に対しても自信ある技術的裏付けを得ることができた。

第1図に全観測系の系統図を、第2図に送信機主要部分の概略を示す。基本的概念としては各部の構成、機能はこれまでの200ジュール型と大差ないが、コンデンサバンクの大容量化に伴い、送信部関連系統は内容、外観、ともに一変した。以下に試作装置一式の性能概略とおもな問題点についての簡単な考察を列記する。当然ながら全装置の大型化、重量化は不可避であり、塔載船舶も諸条件により一律には論じられないが最低40トン以上は必要とされ、艀装、撤去工事などに要する日数も無視し得ぬ作業量となって調査計画自体も相当、根本的な変



第1図 全系統図



ンデンサに充電が開始され、一サイクルの終了となる。したがってこの方式では三点ギャップは補助的な役割に終始し、主放電々はイグナイトロンが負担する。イグナイトロンの取扱い、保守にはやや、注意を要するが、動作は期待どおり、きわめて安定であり、高価な部品だけに問題はやはり、寿命であろう。また、今回、主ブリッジ整流器として以前の真空管(2H28)に代り、初めてシリコン整流器を使用して一層の堅牢化、長寿命化を図る一方、発電機電源を主充電回路用と受信、制御関係用に分離して充電時の突入電流による電圧降下の悪影響を防いでいる。

## 2.2 漏洩変圧器

主放電の際、二次側はほとんど短絡状態になるため次の充電々流が突入して電源に大きな負担をかけることから、従来の方式をもし、そのまま踏襲すると直列保護抵抗の増加による著しい損失の増大が、電源系統（特に発電機）の巨大化が避けられないが、漏洩変圧器の負特性を利用することによって解決された。これはもちろん、大出力型のみに限らず、広く普遍的に転用できる改良点であるが、その原理から規定値以上の電流は阻止されるので前記の直列抵抗を不要とすることができる。この直列抵抗は体積としてもかなりの空間を占有し、周知のように充電時にはコンデンサに蓄えられるエネルギーと同量を消費するから、特に今回のような場合、損失自身はともかく発熱源として無視できず、設計上、まったく厄介な存在となっていたものである。

## 2.3 コンデンサ

蓄積エネルギーを短時間に放電するコンデンサの用途は放電加工、爆発成形、プラズマの研究などますます拡大しているがこの種の使用法に対する機能の変化はようやく問題視されてきた段階であり、放電回数の増加による容量値の減少が認識されている程度である。

一般の送配電用でもこのような間欠的充放電の需要は決して少なくはないが、通常、その間隔は数十秒以上の範囲内にあり、われわれの場合のように数秒以内の間隔での充放電特性に関してはほとんど今後の研究に残されている模様である。特に寿命、信頼性については内外ともにまだ規格化の段階に達していない。したがって、いかなる技術上の分野においても機器の性能、形状、価格等は選定にあたって常に重点的に考慮されねばならない要素ではあるが、素子としてのコンデンサがスピーカー装置一式中に占めるウエイトは生命とするエネルギー源としてきわめて大きいといえるものの、あまり、この設計に神経質になっても得るところは少ないのではあるまいか。音波探査用としては、筐体に組み込まれる軍用、民

生用ほどの小型、軽量化が要求される訳ではなく、せいぜい、観測船の選定に多少の影響を与える程度と考えられる。もとより、このことは、機器の体積、重量の軽減化への努力が等閑に付されてよいと主張している訳では決していないが、調査の性格から考えてむしろ、もっとも重要視されねばならないのは信頼性であろう。しかし、これとてもたとえば marginal checking 等の保守技術でかなりの程度まで予防できる問題である。少なくとも長期間の寿命は犠牲にしてでも信頼性を高める方が得策な筈で、したがって、量産体制下において高度のQC, RCを受ける高級量産品を選ぶ方が特殊仕様を試みるより賢明と考えられる。

従来からもある種の新分野では、たとえば電源については機能として蓄電池、あるいはエンジン駆動の発電機が適当な場合、経費として一見、割高でも特に機動性や調査能率を重視する時は乾電池を使い捨てにする傾向が時にみられた。同様の思想を音波探査用コンデンサのような、比較的、高額な部品に適用するのは暴論のそしりを免れまいが、少なくとも方式全体の基本設計に当たっては念頭においてよい概念と考える。

## 2.4 水中放電々極

当初、実用性がすでに充分、立証されている従来の同軸円筒切断面型を多少、大型化するのみで差支えないように見られていたが、実際には大エネルギーになるにつれ、放電時に受ける衝撃力のため中心電極が飛び出し、長時間の連続使用に耐え難い。もともと、種々の形状による音圧波形、電気音響変換能率などの変化は理論的にも実験的にも興味をそそる課題であるが、実験の結果、結局は Caulfield らの電極とほぼ、同一のものに到着かざるを得なかった（写真1）。電気音響の特性に多少、すぐれていても、実際面からは機械的堅牢性、経済性、取扱いの容易さなど、副次的ともいえる現場的要求に大きく左右される。同じ条件の下、同じ目標を追求する場合、どうしてもある程度、似たような結果に到達するのはやむを得ない。

ただ、この形状の電極でも陽、陰極部分の面積、その比率、間隔などの寸法諸元に関しては当然、最適値の存在が予測され、われわれの関心も主としてこの点に向けられた。特に、電極面積を縮小して電流密度を増せば発生音圧も大きくなるのではないかと仮説的期待をもったが、2種類の陽極直径(9 m/m, 15 m/m)についての実験結果はかえって否定的であった。さらに電流密度を増せば異なった結果が得られることも考えられないではないが、機械的強度の方から制限を受けることになり、この問題にさらにこれ以上、深入りするほどの魅力は少な

くとも、今のところ感じられていない。

水中放電々極に関連する重要な問題の一つに気泡振動による後続パルスの消去がある。スーパーカーにせよ、他の種類の音源にせよ、発振部の先端にある種のチャンパーを取付ければ何らかの面白い効果が期待できそうなことは自然な発想で、ガス爆発法の場合には LEROY e tal., 木村が、水中火花放電では中條が試み、第1パルス振幅の多少の犠牲によっていずれも成功している。特に前二者は種々の形状、寸法の変種を詳細に実験しているが、ある場合には無害無益にとどまらず、有害な持続振動を発生することもあり得ることを示している。この種の研究は水中火薬爆発については遠く、Cole, Knudsen にさかのぼり、近年では Cage shooting の開発でほぼ、完成の域に達した感があるが、調査の目的にもよるが、筆者はバブルパルス、必ずしも有害とは思っていない。分解能の低下はたしかに痛いけれども、反面、信号の認識、決定に際しては何らかの有効な冗長度を付加している筈である。

なお、大出力化により、発振素子の多連化も必然である。一個の電極のみで所要の全エネルギーを消費しようとすれば形状が大型化して実用上、不便であり、また電気音響変換能率も低下するので写真に見るように10コの電極で全エネルギーを等配分した。これは単にパワーアップに伴う分担エネルギーの分散のみが目的で地震探査反射法の多孔爆破のような意味をもたせた訳ではないが、この多連化により、意外なところに別の可能性を生じた。すなわち、1本の電極で大電力を負担する場合、気泡効果による第二、第三パルスの生ずる時刻がパワーに応じてのびてゆく傾向が見られるが、多連化によって全パワーを分散させればこの間隔は1本の場合と変わらず

保たれ、振幅のみが加算されるので逆に、この現象を利用すれば、電極水深の調整によらずして発振波形の周波数制御ができることになり、さらに、各電極に対し振幅、位相の両面から適当な“重み”をつければ、一層、多様性に富む自在な制御への道が開かれるであろう。

### 2.5 曳航受波器

受信機 (AGC, 増幅, 汙波), 制御部, 記録部に関しては特記すべき変化はないが、設計上からも実地の operation からも、目に見えない形での小改良, 工夫が徐々に積み重ねられてきていることも事実である。

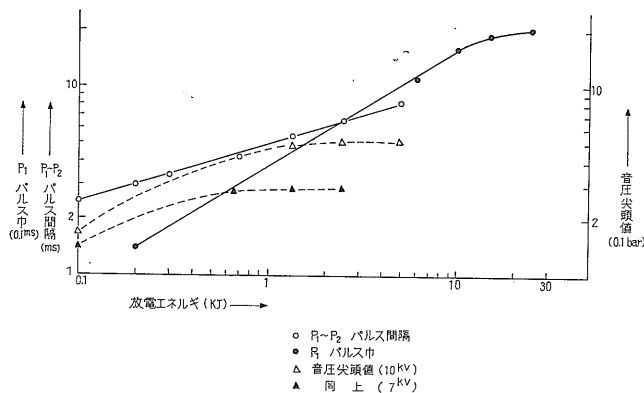
特に、曳航受波器は初期の頃の単素子型がすでに60年代前半に多素子による Array型にほぼ、代替される気運にあったが、本装置ではチタバリ円筒型電極素子11コによる直線型配列により、半減角 $24^\circ$  (300 Hz) の指向性をもたせている。このハイドロホン列の研究も興味ある分野であるが、海上では実用上、直線配置以外のパタンはちょっと、考えにくく、おのずから限界があるため決定的な役割を果すとは考えられていない。

### 3. 放電特性

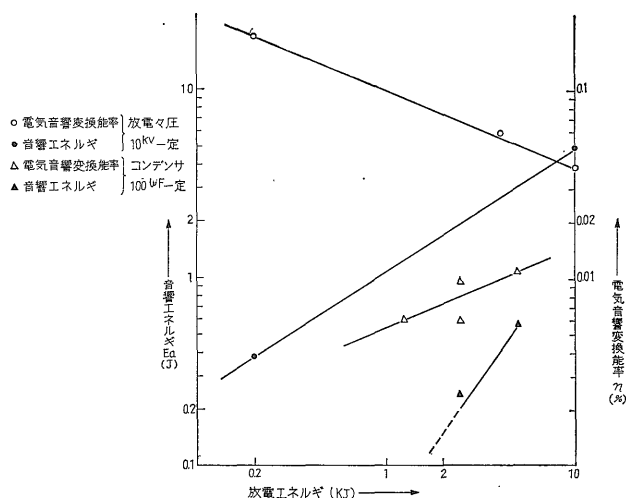
大エネルギー化に付随して生じる諸現象も、結局はそれによって発生音圧がどのように変化するかという問題に帰着する。

写真2に大エネルギー放電下の音圧波形の典型的な一例、第3図に放電エネルギーの増加に対する第1パルス  $P_1$  の尖頭値、および  $P_1 \sim P_2$  間の時間々隔の変化を示す。音圧はすべて電極より前方1mの距離に換算されている。測定は適当な水深下、電極と標準ハイドロホン (57 TA, 感度:  $-105$  dB) 間、3mの距離を保って行なった。

充電々圧一定の条件下ではコンデンサのある限界以上



第3図 放電エネルギーによるパルス幅 ( $P_1$ ) とパルス間隔 ( $P_1 \sim P_2$ ) の変化



第4図 放電エネルギーと音響エネルギー，電気音響変換率の関係

は $P_1$ の尖頭値はほぼ、一定となり、一方、大エネルギーになるほど $P_1$ の波形は放電々流波形と酷似してくる。 $P_2$ 以下の気泡収縮時に発生する後続パルス列の様子は小エネルギー時の放電とほとんど変わっていないが、その生成機構から考えて不自然ではない。

次に音響エネルギーと電気音響変換率は同一電気エネルギー下でも印加電圧とコンデンサ容量の組合せで異なった結果となる(第4図)。これらの誘導に用いた関係式は次のとおり。

$$E_a = \int_0^{\tau} 4\pi r^2 \frac{P(t)^2}{\rho c} dt \doteq \frac{4\pi r^2}{\rho c} \cdot \frac{P_{\max}}{3} \tau \times 10^{-7} J$$

( $P_1$ を三角波で近似)

$$\eta = \frac{E_a}{\frac{1}{2}cV^2} \times 100 \quad (\%)$$

ここに  $P(t)$  = 音圧,  $P_{\max}$  = 同尖頭値,  
 $C$  = コンデンサ容量,  $V$  = 印加電圧  
 $c$  = 音の水中伝播速度,  $\rho$  = 密度  
 $r$  = 電極~受波器間隔,  $\tau$  = 継続時間

注目されるのは $V$ 一定で $C$ を変えた場合、 $\eta$ が減少するのに対し、 $C$ 一定で $V$ を上げた場合には絶対値こそ低いが逆に増加の傾向がみられることであり、これは小エネルギーの場合にもすでに共通して認められていた。

装置の小型化などの観点からは $C$ によるよりは $V$ による放電エネルギーの調節が望ましいように感じられるが、特に海上での使用には絶縁に難点があり、無理に上げようとすれば機器の所要絶縁量は使用電圧のほぼ、自乗に比例して増加するからかえって好ましくない結果を招く。現在のところ10~15kVを手頃な限度とする線は

変わっていないが、絶縁技術の今後の改善に待つところが大きい。

さて、発生音圧に対してもっとも支配的に作用する要素はもちろん、 $C$ と $V$ ではあるが、影響因子としてはこのほか、全系統に含まれる抵抗分(放電々極抵抗、三点ギャップ間抵抗、コンデンサ内部抵抗、およびケーブル抵抗等)とケーブルおよびコンデンサの内部インダクタンスがある。 $C$ にしても主コンデンサのそれのほかにケーブルの浮遊容量も存在する。これらのうち、いくつかは量的にも微小で無視することができるが、とにかく等価的には合成された抵抗分とインダクタンスが残り、次章で簡単に解析するが、実験的にこれらの素子の及ぼす影響はわれわれの場合も、Caulfieldの結果と疑念をさしはさむ余地のないほど良好な一致を示した。以下にその要点をまとめると、

(1) 印加電圧は周知の関係からエネルギーには自乗で利いてくるが、放電々流、音圧ともに尖頭値は直線的に変化する。

(2) コンデンサ容量の増減により尖頭値はほとんど影響を受けない。立上り時間も同様であるが、指数関数で近似した場合の減衰の速さは明らかに $C$ に逆比例する。

(3) インダクタンスの増加は音圧尖頭値を減少させる。抵抗分も同じ傾向を示すがインダクタンスの方がより、顕著である。

以上の諸現象は後述の(1)式よりすべて合理的に説明することができる。たとえば前記の電気音響変換率の場合

合、 $V^2$ の上昇に対して  $\text{Sinh}^2 \tau t$  の変化がきわめて緩慢であることによる。このことは電氣的等価回路が定量的にも非常によく実際の諸現象を近似し、実用価値のある波形の予測が行なえることを示している。

ところで音圧波形の制御が自由に行ない得るとしても、問題はそれが実際の調査においてどのように有効に生かされるかということである。よく知られているように分解能と可探深度はともに相容れない要求でありながら常に、最大限の効率を望まれてきた。分解能を高めるためにパルス幅をせまくすれば受信帯域が広がって雑音指数の低下をきたし、その分だけパワーを増そうとすれば電源の許容尖頭電力で押えられる。そこでパルス幅もスペクトル幅も両立させる思想で直線周波数変調と相關技術を徹底的に利用した chirp radar が発達し、物理探査の分野では Vibroseis として、独特の進展をとげつつあるが、発振波形をインパルス型に限定した場合にも最適の波形は存在し得ることが予想される。とにかく、発生音圧波形の有効度は受信方式と媒質の伝播特性を抜きにしては論じられないものである。

そこで当面、運用上の立場からこれを考えてみる。もともと、一発当たりの放出エネルギーでは火薬に比しはるかに劣る非爆薬震源が、ともかく通常の測深器と火薬爆発との間隙を埋めて地下よりの微弱な応答を検出できるのはもっぱら、繰り返し発振回数を多くすることによって得られる積分効果に負うところが大きい。これは繰り返しが多いほどよく利いてくる訳であるが、無制限に多くしたところでその割に改善されるとも思えない。特にその有効度を視覚に頼るような場合、定量的にこれを評価することは困難で、たとえば記録紙の送り速度まで影響するほど主観的である。一方、個々の音響出力はもとより、大きいにはしくはない。しかし、電源出力に制限がある以上、この両者を妥協させる最適点がある筈である。少々、無理な発想ではあるが放電々力を基準にとった時、これを最大とする発振間隔を求めてみよう。

発振間隔を  $T$ 、コンデンサの充電々圧を  $V$ 、電源電圧を  $E$  とすれば、 $V$  は周知のとおり、

$$V = E(1 - e^{-\alpha T}) \quad \alpha = 1/CR$$

( $R$ : 充電回路抵抗)

単位時間内に消費される放電エネルギーの平均値がすなわち放電々力  $W$  であるから

$$W = \frac{1}{2T} C E^2 (1 - e^{-\alpha T})^2$$

$W$  を最大ならしめる  $T_0$  を求めるため、 $dw/dt=0$  とし、整理すれば次の超越方程式を得る。

$$2\alpha T_0 = e^{\alpha T_0} - 1$$

これを数的に解けば

$$T_0 = 1.3/\alpha = 1.3 CR$$

したがってこの  $T_0$  に発振間隔をえらべば、とにかく与えられた電源回路からもっとも能率よく電力を引き出すことができる。個々の発振は充分に時間をかけて充電した方が大出力を得られるが、積分効果の方で割り引かれるから総合的には果して得策かどうか疑問である。実際、 $V$  は  $3 CR$  秒で約  $0.95 E$  に達してしまう。かりに 200ジュール型の装置に例をとると、 $C=4\mu F$ 、 $R=25 k\Omega$  で  $T_0$  は 0.13秒となり、通常、経験的に好まれている 1秒前後の発振間隔に対し相当、短い。これは積分効果よりはやはり、一発を大きくする方がより、効果的であることを意味する。もちろん、水中放電々極の電気音響変換能率は放電々力によって異なるし、その他の諸条件(電源部の出力容量の限界、目標深度から定まる最小掃引時間等)も複雑な影響を及ぼすから、上記のような粗雑な考察から最適発振間隔は決められないが、一応の目安として基本的な考え方を示したまでである。

終りに、実験中、東京湾で得られた記録の一例を Plate 2の1に示す。もとより可探深度は充電エネルギーの増加に応じて直線的に上る訳ではない。地下構造は種々の反射面が重積し、音響的には多くの不連続体の結合されたもので、音響的諸係数の算定は困難なため、調査例をとおして観測事実を積み重ねてゆくのが結局は最善の道と思われる。

測線は浦賀水道の久里浜東南方約 4 km の沖合で、いわゆる東京海底谷の北端を東西に横断したものである(充電エネルギー: 25 kJ, フィルタ帯域幅: 0~350 Hz, 掃引時間: 記録紙全幅 400m (水中相当距離)。湾床にみられる層状堆積物は側壁に onlap している葉山層でもあろうか。この付近は古東京川と海底谷との接合部の延長に当たるが、土砂流によるV字谷の埋立てにしては深すぎ、かつ遠すぎる。この種のほぼ、水平な谷床での堆積は相模湾底でも観測されている(南相模層)。

西側の水深約 340m 付近の谷壁に傾斜の変換点があり、湾床堆積物の一部が薄く存在している。類似の記録は水深においてはるかに深いが、城ヶ島沖より沖の山堆にかけての横断測線でも認められている。また、湾底中央部の比高約 30m に達する突起地形も興味深い。

#### 4. 周波数制御

水中発音源としての分類からは、他の類似機器(ソーナー、レーダー等)と同様、パルス変調波とインパルスに区別されるが、大出力を目指す場合には後者の方がはるかに発生容易である。前述のように数あるエネルギー



変換方式のなかで、われわれが水中放電式に対してもっとも期待したのは、それが現象を等価電気回路としてほぼ、完全に近似表現することができ、かつ、その故に理論的解析が他の化学エネルギー音源に比し、容易、正確に行なえて実際の発生音圧の予測と設計を合理的に行なえるのではないかとこの点にある。

本計画の発足当時、地質調査所には国産第1号機の開発以来、すでに5年にわたる経験の蓄積があった。これら既存技術の、ともすれば安易な延長に墮するおそれもなしとはしない強力スパーカー方式を次の研究対象として選定するには若干の抵抗が感じられたが、結局は電気系定数による発生音圧の連続的周波数制御の誘惑に抗し切れなかったのである。

今、厳密を欠くが、放電時の電極間抵抗を  $1 \Omega$  前後の固定抵抗として近似すれば、充放電系の等価回路はコンデンサバンクをはさんでの簡単な RLC 回路で表わされ、放電電流  $I$  は過渡現象論の示すとおり、各素子間の相互関係により、振動的、非振動的、および臨界制動の3通りに異なった状態を呈する。

一般には送信ケーブルを数百米、船尾より延長して曳航するケースが多いと予想されるので、その抵抗のみでも数オームに達し、他の各種抵抗と合成されて  $R > 2\sqrt{L/C}$  の条件はおおむね満足されているものと思われる。したがって、非振動的な場合のみについて取扱えばよい。すなわち、

$$I = \frac{2CVe^{-\alpha t}}{\sqrt{R^2C^2 - 4LC}} \cdot \sinh \gamma t \dots \dots \dots (1)$$

ここに

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \gamma = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

この場合、電流尖頭値  $I_{max}$  および全エネルギー  $E_0$  のみを考察の対象とするのは適切でないと考えられる。なるほど信号検出の面からは受信波形の尖頭値こそが第一の関心事にはちがいない。事実、S/N 比の定義にも信号尖頭値を用いていることが多いが、電流、およびそれに対応する音圧波形、ともに  $I_{max}$  を与える  $T_{max}$  以降、指数関数形に漸近してゆく反面、地中の伝播特性が総じて低域通過形のフィルタ特性を呈することを考え合わせれば、尖頭部のみが毛のように細い大振幅を有するとも S/N 比の改善にさして寄与するとは思えない。一方、無限大時間まで積分した全エネルギーがいかに大きくとも、そのみでは効果的な時間波形とはいきまじまい。単に電荷の蓄積能力からみれば同体積の乾電池に比し、せいぜい、 $10^{-6}$  程度の能力をもつにすぎないコンデンサがこの種用途に多用されるのは、静電エネルギーをきわ

めて短い時間に動電的な電流に変換し得るからであり、エネルギーの集中作用こそがこの場合の生命といえよう。全エネルギーのみは大きい、ダラダラと間延びした波形が何ら、有益な情報に貢献し得ないことは明らかである。

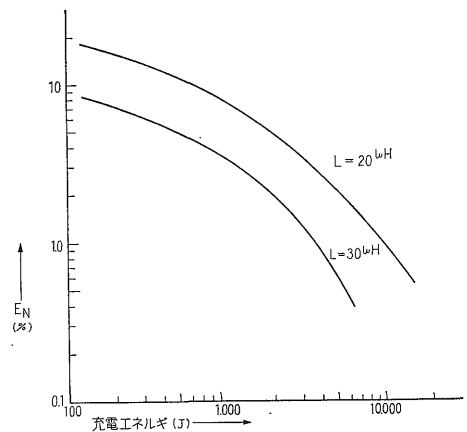
周波数領域では Edelman が有効な上限周波数を 80 Hz に限って論じているが、同様な見地からの検討は時間領域においても適用されてよい。

この有効な時間上限を  $T$  とすれば、0 から  $T$  までの時間域に含まれる電流パルスのエネルギー  $E_T$  は、 $R_s$  を電極抵抗として

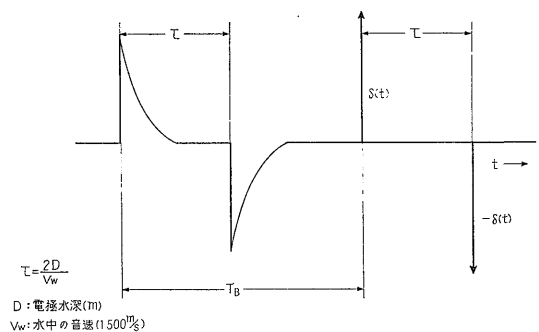
$$E_T = \int_0^T I^2 R_s dt$$

$$= \frac{C^2 V^2 R_s}{R^2 C^2 - 4LC} \left[ \frac{1}{2(\gamma - \alpha)} \left\{ e^{-2(\alpha - \gamma)T} - 1 \right\} - \frac{1}{2(\gamma + \alpha)} \left\{ e^{-2(\gamma + \alpha)T} - 1 \right\} + \frac{1}{\alpha} \left\{ e^{-2\alpha T} - 1 \right\} \right] \dots (2)$$

換言すれば、 $T$  以内に含まれる分はたとえ、振幅が小さくとも信号検出に寄与しているとみなすことであり、



第5図 インダクタンスによる有効時間内エネルギーの調整



第6図 発振波列モデル

不自然に異常な波形を想定しない限り、尖頭値は基底部のペDESTALに支持されて成立しているという前提に立っている。

各パラメータのうち、 $C$ を増大すれば $E_T$ も自動的に増加するから、 $E_T$ を全エネルギー $E_0$ で正規化する。 $(R=全抵抗)$

$$E_N = \frac{E_T}{E_0} \times 100 (\%), \quad E_0 = \frac{1}{2} CV^2 \times \frac{R_g}{R}$$

いうまでもなく、波形制御のために損失の増加を招く $R$ を大きくすることは邪道に近いから、 $R$ による調整は最初から除外される。第5図は $L$ と $C$ の変化に対する $E_N$ の一例である。 $(R_g=1\Omega, R_0=R-R_g=3\Omega, V=10\text{ kV})$

$L$ の挿入によって臨界条件にもっていけば充電回路に関する限り、波形の立上りはたしかに早くなるが、放電回路ではたとえ無損失の $L$ といえども有効時間帯域へのエネルギー集中の面からは何ら、得るところないことが看取される。微細な波形の調整よりも変換能率の激減を防ぐ方が実際的と考えざるを得ない。

$T$ は所要の分解能を考慮して定められるべきであるが、一方、Penetrabilityに関しては周波数領域からの観察が適当であり、また、表面反射、気泡効果等の考慮も時間領域以上に必要とされる。

$I_{max}$ に達するまでの立上がり時間はきわめて短いから、現象のモデル化としては第6図のように考えるのがもっとも適切と考えられる。

Edelmann は四発のパルスすべて時間おくれをもった $\delta(t)$ の合成として解析しており、小エネルギーの場合

はたしかにそれでよいが、大パワーとなると写真に見るようにエネルギー的には第一パルスの占める割合は圧倒的であり、気泡振動による後続波連の影響は無視できると考えられるので、ここでは最初の二発(二発目は表面反射)のみをとる。

全波連の周波数スペクトル $P(j\omega)$ 、および上限周波数 $\omega_0$ までを含むエネルギー $W$ は

$$P(j\omega) = \frac{1}{\alpha + j\omega} (1 - e^{-j\omega\tau})$$

$$W = \int_0^{\omega_0} |P(j\omega)|^2 d\omega$$

$$= 2 \left\{ \frac{1}{\alpha} \tan^{-1} \left( \frac{\omega_0}{\alpha} \right) - \int_0^{\omega_0} \frac{\cos\omega\tau}{\alpha^2 + \omega^2} d\omega \right\}$$

ただし、 $\alpha = 1/CR$

時間領域の時と同様、全エネルギー $W'$ で規格化すれば

$$W_N = \frac{W}{W'} \times 100 (\%), \quad W' = \frac{\pi}{\alpha} (1 - e^{-\alpha\tau})$$

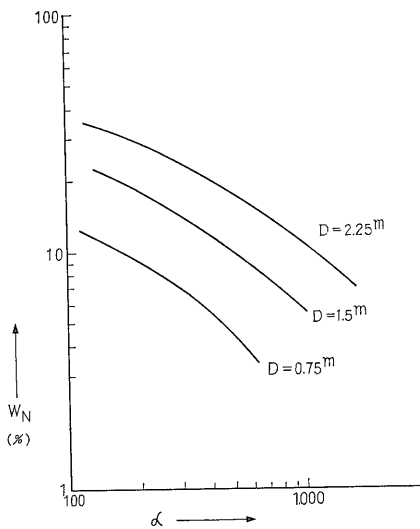
第7図は $\frac{\omega_0}{2\pi} = 80\text{ Hz}$ でおさえた時の $W_N$ の一例である。

$C$ と $\tau$ の利き方には明瞭な差異が見られる。 $E_N$ と同様、この $W_N$ も一種の変換能率とみなせるが、 $C$ を増加しても絶対値はともかく、能率としては低下する一方であり、電極水深 $D$ の調節の方がはるかに有効である。一般に、エネルギー増加の割に可探深度があまり伸びない原因の一端はこの辺にあるものと思われる。

第5図と第7図は時間領域と周波数領域の両面、あるいは分解能と可探深度の両面からみた場合の各因子の影響度であるが、いずれも放電電流と実際の音圧波形とが、よい一致を示すという前提に立っており、事実、この前提なくしては水中放電式による周波数制御は定量性を失ってしまう。しかし、波形の細部にわたってはやはり、多少の相違がみられるのであって、特に放電現象そのものが、ミクロに見れば、確率に支配されるランダムな不安定性を示すことは注意されねばならない。

したがって変換能率に関してはともかく、波形制御に関する限り等価回路をいたずらに詳細にいじり回してみても精密な合成は結局のところ無理で、収穫は少ないように考えられる。その点、エアガンのような化学エネルギー音源がどの程度の再現性、安定性をもつか、非常に興味深いものがある。

しかし、もともと複雑な大地を相手にしてのことであり、受信方式に送信側と対応した特別な注文をつければ別であるが、通常の使用方をしている限り、波形の精密合成に対する要求は必ずしも強くはないのではないかと考えられる。分解能と可探深度はそれぞれの調査の目的に応じ、経験その他の要素から適当な妥協が図られるのが常であるが、統一的な取扱いについては別の機会に



第7図 電極水深とコンデンサによる有効周波数帯の調整

検討する。

また、前記のように複数コの電極による同時発振、あるいは位相制御を電氣的制御に組み合わせて、より広範囲な周波数制御の可能性も期待され、エアガンが放出空気量の異なる複数チャンバーを同時放出させる“同調配列法”に相当する効果が想起される。

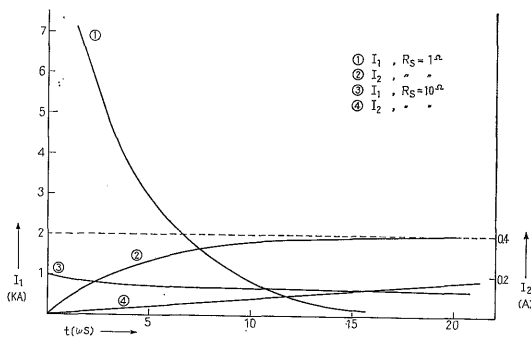
もっとも望ましいのは目標深度その他の条件を勘案して数種の音源を組み合わせ併用することであるが、調査計画自体の抜本的な再検なくしては無用の混乱を招くおそれが強い。全システム中、一局部のみの性能改善は当然、限度があり、たとえば多重反射による妨害などは震源のみを巨大化しても前進はあり得ない。

もともと、送信源に対する要求はきわめて単純なものであり、所望のパワースペクトルをもち、より大振幅の音圧を能率よく放射することにつきるのであるが、所詮、震源の側からの S/N 比の改善は早晚、壁に突当る。

ここで根本にさかのぼって反省してみる。火花放電、電磁誘導型等、いくつかの変種が包含される水中放電式音源に対する期待は、つまるところ、電気エネルギーのもつ長所にほかならぬ。すなわち、1つは等価理論による現象近似の適合性であり、これまで再三、言及してきたところであるが、他の1つは一般電力工学の場合と同様、エネルギーの遠距離伝送の容易さに求められる。発音源という電力消費の負荷がかなりの距離を以って船尾よりの曳艀を必要とされる時、後者による利点はたしかに大きい、装置一式が大容量化、高圧化してくるとこの長所が急速に失われてくるように思われてならない。水中放電式の限界は電気音響の特性よりはむしろ、この辺から定められてくるのでなかろうか。

### 5. 淡水域での適応性

水中放電のメカニズムを分析することも最終的には電気音響変換能率の向上を第一の目標とするものである



第8図 充放電回路の過渡状態

が、やや、趣きを異にした応用面としては淡水中でのスパーカー調査がある。

わが国にも琵琶湖をはじめ、淡水、もしくは汽水域に属する湖沼、河川が少なくなく、これらの水域で音波探査を実施した場合、水中放電が海水中におけると同様、安定に行ない得るか、あるいは何らかの特異性を示すかは早くから関係者間の話題を賑わしていた。

昭和36年から37年にかけて、琵琶湖で行なわれた実験はこの課題の解決を一つの柱としたものであった。海水中と全く同じ諸条件を保ちつつ、放電を起こさせると三点ギャップ間に火花というよりも紫色のグロー、もしくはアークが安定して生じ、大電流が継続的に流れて発電機に対する非常な過負荷となる事態が発生した。もともと、塩分濃度の減少により、放電が多少不安定となる傾向は以前から注意されていたが、正常な運転を阻害するほどとは予期されていなかった。この現象を電極間抵抗の非線形性に起因するある種の異常性として納得すればそれまでであるが、現在、与えられている定性的な説明は次のとおりである。

今、放電時の電極間電流を  $I_1$ 、電源より流入する全電流を  $I_2$  とすれば ( $R_0$ : 電源直列抵抗,  $R_s$ : 等価電極抵抗)

$$I_1 = I_0 \left( 1 + \frac{R_0}{R_s} \cdot e^{-2t} \right), \quad I_2 = I_0 (1 - e^{-2t})$$

ただし

$$I_0 = \frac{V}{R_0 + R_s}, \quad P = \frac{R_0 + R_s}{CR_0 R_s}$$

第8図は海水と淡水中の  $R_s$  をそれぞれ  $1\Omega$  と  $10\Omega$  に仮定した時の  $I_1, I_2$  である。

本来は単なる開閉素子として補助的な意味でしかない三点ギャップも、間欠放電を維持し得るか否かの境界では主役を演じることになるのであるが、正常動作の際、すでに通電路が確保され、電源も接続されているにもかかわらずこれが自動的に切断、消弧されるのは、直列抵抗、すなわち、この場合は電極間抵抗  $R_s$  による垂下特性のため、ギャップ間端子電圧が降下してアーク維持に必要な最低値を割るためと解釈される。

ところが、図から明らかなように、全エネルギーが同じでも  $R_s$  が小なら大振幅の初期値から急速に減衰するからよいが、淡水中のように  $R_s \rightarrow$  大になると減衰がゆるいため、アークがなかなか切れず、そのうちに電源よりの供給が増加してアークの維持に都合のよい平衡状態に落ち着いてしまうことになる。

この等価抵抗の大小による解釈は現象をいささか、単純化しすぎているきらいがあるが、実験的にも普通の同軸円筒型電極の放電間隙を  $5 \sim 6$  m/m 短縮するという、きわめて初歩的な工作によって安定な間欠発振を繰り返

すことに成功した。実用面からはこれで十分な解決をみたものと信じられている。

蛇足ながら、上記とは別の線に沿ってさらに素朴な説明も提出された。無限に長い同軸円筒型電極の最大電位傾度  $V_g$  は内側電極の表面に生じ、これもよく知られているように

$$V_g = \frac{V}{r \cdot \log \frac{R}{r}}$$

で与えられる。ここに  $V$  は印加電圧、 $r$ ,  $R$  はそれぞれ、内側電極と外側電極の半径である。

放電現象論はコロナ発生のための必要条件が  $R/r \geq e$  によって規制されることを教えている。音波探査用電極は三次元体であり、今、問題にしている現象は同じ持続放電形式といっても、明らかに通常、定義されているコロナ放電ではないけれども、実験結果からみる限り、単に偶然としては片づけられないほどよい一致を示していることに気がつく。もともと、この条件はコロナ放電に対して、というよりもむしろ、一度、開始された局部電離によって最大電位傾度が増加し、ますます、電離を進行させて過渡的な火花放電に移行せしめないための条件を求めたものであるから、良好な関連性があっても不思議はないと思われるのである。この推論によれば、電極間抵抗という形での淡水は直接的には寄与しないが、実際の現象としては上記のような、数種類の機構が混在しているのかも知れない。

さて、再言するが、実用上からは電極間隙を短縮することによって何ら、支障ない淡水中の動作が約束されている。電極交換を避けなければ三点ギャップに、シャ断器に使われているような磁気吹消の消弧機構を附加することも一案であるし、さらに姑息な手段ではあるが、たとえばビニール袋で通常型の電極を包み、内部に塩水を満して放電させても、一応の用は足りることが実験によりたしかめられた。より、本質的な放電機構の究明は前駆現象、極性効果等、種々の面白い現象が観測されているが、バブルの消去、電気音響変換率の改善などに関連して今後に残された課題である。

## 6. 結 語

技術格差の大きい分野での機器の国産化には本来、疑問が残る。究極的には国立試験研究機関の理念と使命にさかのぼる問題ではあろうが、直接的な merit か、何らかの波及効果が期待できない限り、当面、低い投資効率はさげられず、もし、同等の精力が輸入機器の下、他の方面に差向けられた時、おそらくはより実りある収穫が

得られたのではないかと推測は一概に否定し難い。本計画が一応の終止符を打つ段階にあたり、ここ数年間の主たる努力が諸般の事情によりほとんど、送信系の開発に集中され、近年、digital revolution の旗印の下、革新的な新天地を日々、拡大しつつあるデータ処理技術に一指をも染め得なかつたことは何としても心残りであった。また、送信系のみに限っても、たとえば、WASSP あるいは Implosion 等、一見、奇抜とさえ感じさせる独創的な着想について、ことごとく諸外国の後塵を拝したことはまことに遺憾である。少なくとも、結果的には大部分の仕事が追試の域をでなかつた実情は深く反省しているが、本計画が技術的植民地性からの脱却にささやかなりとも貢献し得れば、当事者として望外の喜びであり、かえりみて、もとより充足感にはほど遠いが、一応、われわれなりの所期の目標はほぼ、達成し得たものと信じている。

なお、本概報はいわば総論として、やや、断片的ではあったが全般を展望した。関連して重点的に行なわれた個々の研究課題に関しては、近日、別に稿を改める予定である。

謝辞 本研究については、物理探査部の鎌田清吉、細野武男および森 喜義(元所員)には多大の援助をうけ、また陶山部長、中条応用地球物理課長には一貫して指導を仰いだ。ここに厚くお礼申し上げる。

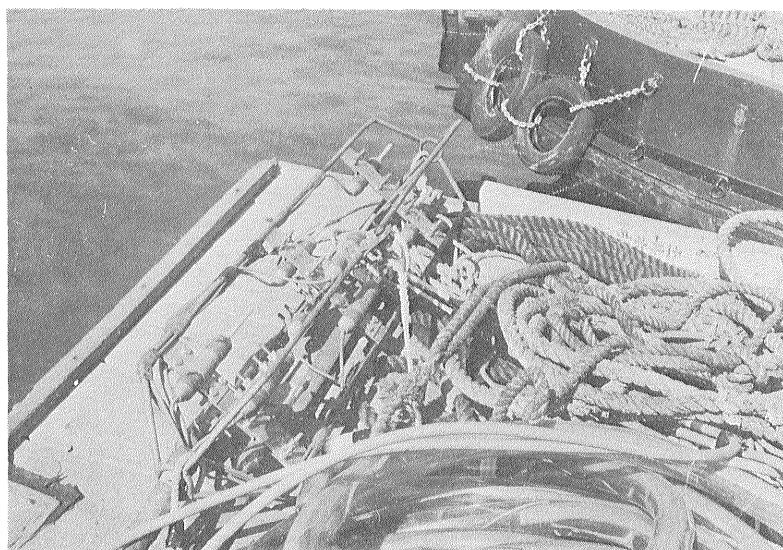
さらに、装置の製作にあたった日本電気株式会社の西村鉄雄氏をはじめとする技術者諸氏に深甚の敬意を表する次第である。(昭和44年11月25日脱稿)

## 文 献

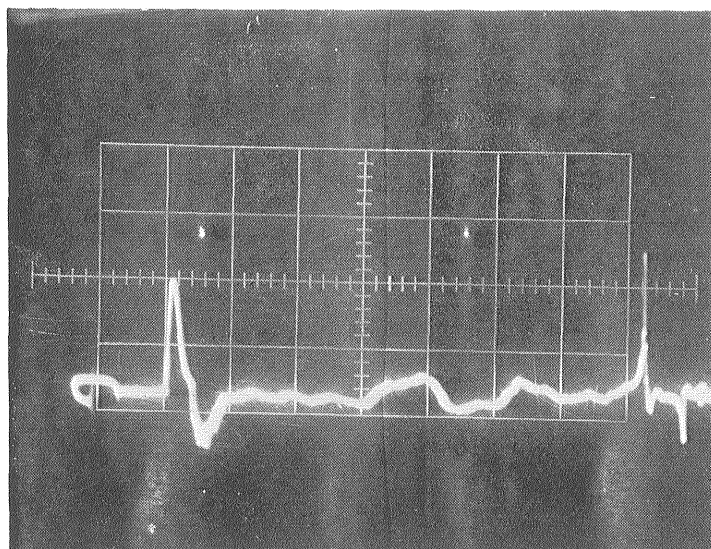
- 中條純輔・森喜義(1968): 最近における物理探鉱の進歩, 物理探鉱技術協会
- 中條純輔(1962): 東京海谷の音波探査, 地質調査所月報, vol. 13, no. 8
- 中條純輔・森喜義(1964): 音波探査講座, 第1回~第6回, 地質ニュース, no. 119, no. 121, no. 123, no. 125, no. 127, no. 128
- CAULFIELD, D.D. (1962): Predicting Sonic Pulse Shapes of Underwater Spark Discharges, *Deep Sea Research*, vol. 9, July.
- CAULFIELD D.D. et al. (1965): Improvements in the Continuous Seismic Profiler, *Geophysics*, vol. 30, no. 1.
- EDELMANN, H. (1968): An Underwater Sound Source with Higher Seismic Efficiency, *Geophysical Prospecting*, vol. 16, no. 4.

高出力化音波探査装置の試作（駒井二郎）

- 加賀美英雄・他4名(1968)：相模湾底の南相模層について，東京大学海洋研究所業績集，vol. 7
- 木村重正(1968)：深部構造音波探査音源としてのプロパン酸素ガス爆発について，物理探鉱，vol. 21, no. 4
- 黒岩敦(1968)：最近における物理探鉱の進歩，物理探鉱技術協会
- 黒岩敦(1968)：非爆薬震源による地震探鉱，石油学会誌，vol. 11, no. 10
- LEROY, C.C. et al. (1963)：Some Acoustical Characteristics of Underwater Explosion of Hydrogen-Oxygen Mixtures, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 35, no. 2.

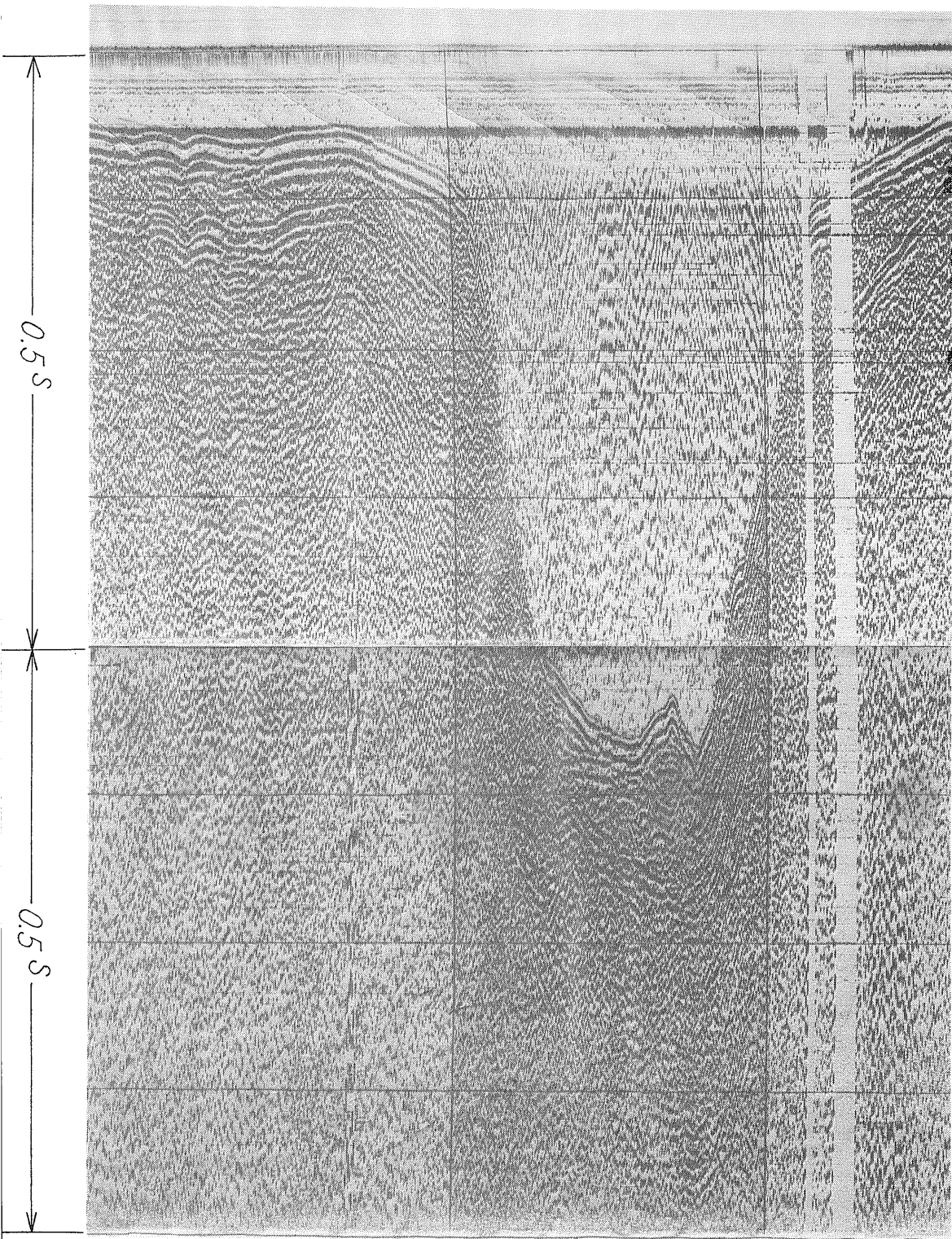


1. 多成分水中放電々極



2. 音圧波形の一例 (時間軸: 0.5 ms/div)





1. 東京海底谷横断記録 (久里浜東南方約 4 km)