

音波探査とは

～音波探査の音源～

森 喜 義

音波探査の音源

119号の記事で音波探査は一種の垂直ソーナー(SONAR Sound Navigation and Ranging の略)であり また見方によっては小規模な反射地震探査と何ら変わらないことは諒承されたと思う。音波探査の一番大きな特長はその音源が地震探査における火薬爆発のようにただ1回の発振でなく一定の時間間隔をおいて繰り返し発振することである。またこのことから音波探査を地震探査とあえて区別したともいえる。この音波探査の音源としてはどのようなものを選ぶべきか? この問題は音波探査の研究の中でも最も重要な課題である。地下探査を目的とする以上地下深くまで浸透する強力な音源を求めることは当然であるが同時に細かな地下構造まで忠実に探査できるような音源であることも目的によっては必要になってくる。しかしこの2つの機能を同時に1つの音源に持たせることは相反する性質を同時に音源に持たせるようなことになって実際にははなはだ困難な問題なのである。

音波が媒質中を伝わる場合その強度は距離の2乗に逆比例するので(音圧は距離に逆比例する)音源のエネルギーは大きければ大きいほど多くの情報が期待できる。このことは間違いない。もし大きすぎて困るとすれば魚が死ぬこと位なものである。音波の強度が距離の2乗に逆比例するという考え方は波の伝ばんに伴ってエネルギーの吸収減衰が全くないと仮定したうえで成り立っている。実際にある音源からある距離を隔てた点における音波の強度は上の関係よりさらに小さくなってしまふ。ところがこの音波エネルギーの吸収減衰は音波の周波数の増大に伴って激しくなる性質がある。したがって音波を深部まで伝えるためにはなるべく周波数が低いほどよいということになる。

しかし周波数をあまり下げると音波に指向性を与えることがむずかしくなり方式によっては送信電力も大きくなってくる。そして都合の悪いことには波長に対して小さな構造まで分解することができなくなってくる。このように考えると可探深度が深くかつ構造に対する分解力も高いという機能を同一の音源に持たせることははなはだ容易でない。したがって現状では調査目的に適合する適当な強度と周波数を持つ各種の発振法をそ

の都度使い分けて利用しているのである。

音源の性質についてもう1つ重要な問題がある。それは音源の波形としてはなるべく単純でなくてはならないことである。波形があまり複雑では反響パルスに良好な情報を乗せることがむずかしくなってくる。つまりどれがほんものの反射波でどれが雑音であるかの識別が容易でなくなってくるからである。このほかに音波探査の音源としては探査装置としての簡便さ安定性等が問題になることは当然である。以上の事がらを考慮すれば音波探査における理想的な音源とはだいたい次のような機能を満足するものであろう。

- i) 大出力であること
- ii) 周波数制御が容易で目的により適当な周波数選択ができること
- iii) 単純な波形であること
- iv) 装置が小型で操作が簡単であること
- v) 発振が安定で再現性のあること

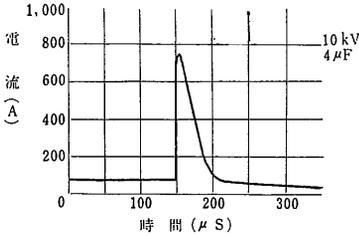
現在利用されている発振法

i) 磁歪振動子による発振

音源として磁歪振動子群を用いているので周波数が比較的高く4kc前後のものが多く用いられている。単一周波数の連続波を断続発射している点は測深機の場合と同様であるがこの方面の装置としては特長とされている。周波数が高いので地層中におけるエネルギーの吸収減衰が大きく可探深度は海深100m以内の海域で海底下50m前後である。最近はわが国においても装置の改良により漸次大出力のものが得られつつあり可探深度も増加している。一方この方法は微細な構造まで分解できる特長があるので浅い部分を詳細に調査する場合に適している。ソノプローブと呼ばれる装置はこの発振法によっている。

ii) 水中放電による発振

直流高圧をコンデンサーに蓄電しこの電荷を制御回路を経て水中の電極で放電しこの際発生する音波を利用する方法である。スパーカー ジェオソーナー等の名称がある。1回の放電に要する電気エネルギーが200ジュールの場合約 $\frac{1}{2}$ 気圧の音圧パルスが発生する。周波数は100~4,000 cpsにわたっておりこのうち



第1図 放電瞬時の電流波形

300 cps 付近が最も卓越している。探査深度は電気エネルギーが200ジュールの時100m前後であるが地下の条件がよいと200m位まで浸透する。

iii) ガス爆発による発振

酸素プロパンの混合気体を点火爆発した際に発生する音波を利用する方法で標準の放電式音源より一般に大きな音響パルスが発生する。周波数は低く30~200 cpsにわたり地震波に近づいている。したがって音波の伝ばには最も都合よく可探深度は400m程度である。しかし構造に対する分解能は悪くガス機構部の操作もやや煩雑である。米国ではRASS (Repeatable Acoustic Seismic Source の略) という名で呼ばれている。

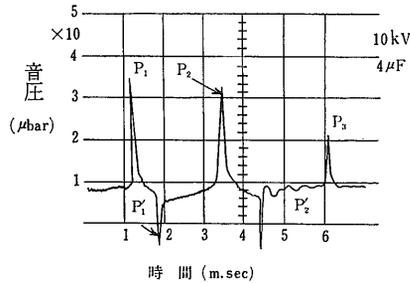
iv) 電磁誘導を利用する発振

放電式音源と同じように蓄電器放電を利用し水中におかれたコイルに瞬間大電流を通ずればコイルの周辺に強力な磁場が発生する。この磁場とコイルに近接して設けられているアルミ板中に発生する渦流との間に生ずる反撥力を利用して音波を発生する方法である。反撥力は電流の2乗に比例し周波数は電流の2倍およびその高調波が卓越する。したがって周波数制御が比較的容易な方法である。ブーマーと呼ばれる装置がこの方法を用いている。

水中放電による音波の発生

コンデンサーにたくわえられた10kV程度の直流高圧を水中電極間で火花放電をさせると塩水の場合瞬間的に800アンペア位の電流が流れる。その継続時間は50μ秒程度でコンデンサーに蓄電された電荷はまたたく間に消滅してしまうのである。

第1図はこの電流の波形をシンクロスコープで撮影したものである。実験の当初われわれはほぼこの波形に近い音響パルスが発生するものと期待したのであるが実際に得られた音圧波形は第2図に示すような波形で



第2図 放電による音圧波形

大電流が流れることにより陽電極の周辺が発熱し急激に温度が上昇して気泡を発生しこの際音圧を発生するものと考えられる。事実このことは後に菊池清水等によって行なわれた高速度シネカメラ撮影の実験により確かめられている。発生した気泡は膨脹しやがて冷却によって収縮をはじめ。すなわち気泡は一種の振動をはじめするのである。そして収縮の極に達するとP2を発生。毎回の放電に対してP1 P2の振幅および時間間隔はほとんど一定である。これに対してP3以後は振幅も出現時刻もはなはだ不規則で一定しない。これは最初の放電によって発生する気泡はほぼ球体に近い形であるが2回目の膨脹からは気泡の形が乱れあるいは分裂するためである。逆位相に現われているP1' P2'はそれぞれP1 P2による海面からの反射である。

電気エネルギーと音響エネルギー

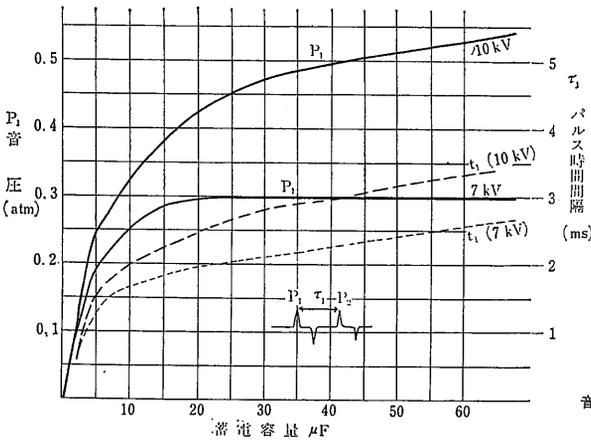
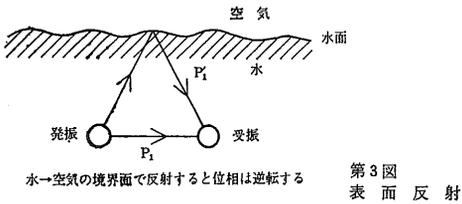
スピーカーの場合でもブーマーの場合でも蓄電器放電を電源として利用する場合の電気エネルギーは $\frac{1}{2} CV^2$ の形で定まる。すなわち蓄電容量Cか電源電圧Vを増してやればエネルギーを増大することができる。しかし電圧の方は装置に使用する部品の絶縁性によって制約され10~15kVが実用の限度のようである。普通の装置では電圧10kV容量4μF程度のもを用いているので電気エネルギーとしては200ジュール程度である。この場合の音響エネルギーを音圧波形から計算すると1.5~2.0ジュールで音響エネルギーは電気エネルギーの1%にすぎない。第4図および第5図は電圧および蓄電容量と発生音圧の関係を示すものである。音圧はいずれも尖頭値で音源の前方1mに換算した値である。またエネルギーは音圧のほかパルスの継続時間が関係してくる。容量の増した場合音圧はある値から飽和した形になっているがパルスの継続時間は延びてくるので実際のエネルギーは増加している。発生音波の周波数は各パルスの時間幅とパルス間隔によって支配される。したがって第5図で見られるように電気エ

およそ電流波形とは異なった形のものであった。電気エネルギーが音響エネルギーに変換される機構はかなり複雑な過程を経ることがこのことから推察される。第2図においてPと印されたパルスは確かに電流が流れた瞬時に発生するようである。これは

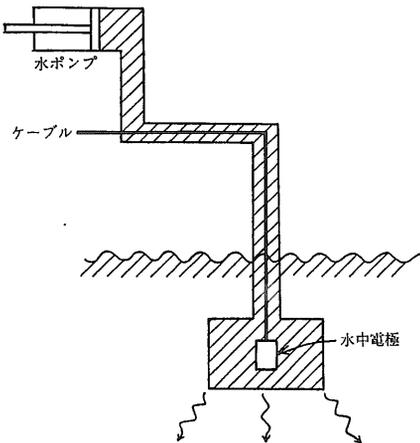
エネルギーの増加に伴ってパルスの時間間隔(t_1)が延びると周波数も変化し 実際には低周波になってくる。このように時間間隔が延びるのは 電気エネルギーの増加に伴って放電により発生する気泡の直径が大きくなりしたがって気泡が収縮の極に達するまでの時間も延びるためである。

静水圧と音圧との関係

気泡の振動 すなわち膨脹や収縮により発生する音響

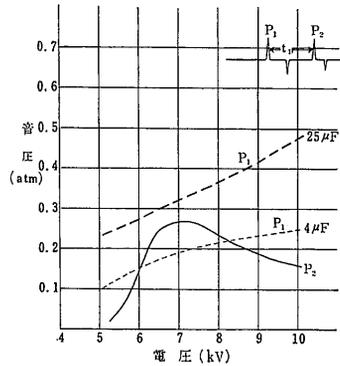


第5図 蓄電容量と音圧の関係

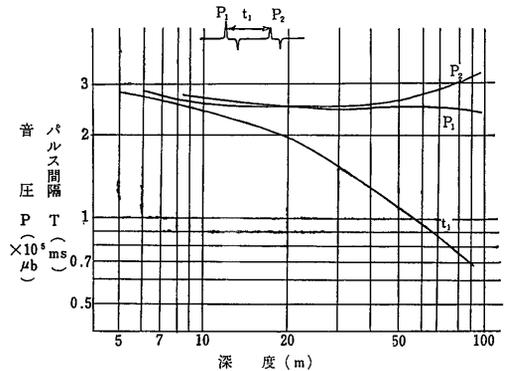


第7図 このような装置で電極周辺の水圧を上げれば放電により発生する音波の周波数は高くなる

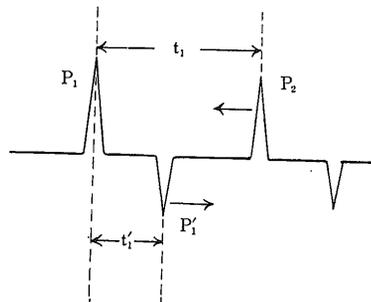
パルス P_1 P_2 の時間間隔 (繰り返し周期) は静水圧によっても影響される。第6図は 200ジュール音源を用いた場合のこの関係を示したもので 水面から水中電極までの深度の増加に伴って 繰り返し周期は短くなっている。これは電気エネルギーを一定すると静水圧の増大するほど 気泡の直径が小さくなるので 気泡が収縮するまでの時間も短縮するからである。前記のように発生音波の周波数スペクトラムがパルス間隔 t_1 に支配され この値が大きくなるほど 波は低周波化することと関連して この現象は非常に興味あることである。たとえば第7図のように水中電極を 膜面を有する容器の中に入れて水を充滿し 水ポンプで圧力を加減してやれば周波数を制御することができることになる。 曳行



第4図 電源電圧と音圧の関係



第6図 静水圧と音圧およびパルス間隔の関係

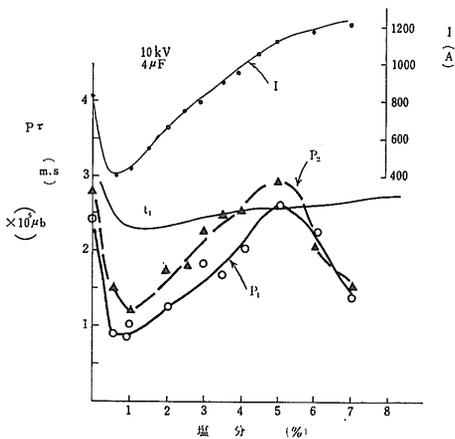


第8図 電極の水深を深くすると P' と P_2 はそれぞれ矢印の方向に移動する

する電極の水深を変えれば同様に周波数が変わってくる。しかしこの場合の周波数変化はやや複雑である。水深を深くした場合 第8図のように P_1 と P_2 の間隔が静水圧によって短くなる一方 P_1 と P_1' による表面反射 P_1' までの間隔 t_1' は逆に延びてくるからである。電気エネルギーが200ジュール前後では P_1 と P_2 のパルス幅はだいたい同じ程度であるが、5,000ジュール程度にエネルギーを上げると P_1 P_1' に比べて P_2 のパルス幅はきわめて小さくなるので表面反射による影響の方が大きく発生音波の周波数を左右することになる。したがってこのような場合水中電極の深度を深くしてやると周波数は低くなる。実験の結果この深度は200ジュール音源の場合で海面下1.5~2.0mが適当なようである。

塩分濃度と音圧の関係

第9図は200ジュール音源を用いた場合の塩分濃度と音圧 電流 パルス間隔の関係を示すもので音圧は音源の前方1mに換算した値である。海水(塩分濃度3%)より塩分濃度を増していくと音圧は次第に高まり約5%で極大になる。さらに濃度を増すと音圧は再び減少する。海水より塩分濃度が低いと音圧は減少していくがさらに低く淡水に近づくくと急激に音圧は高まってくる。しかし淡水に近づくにしたがって水中放電は不安定になってくる。音圧が急に高まる付近から水中を通ずる電流も急激に増加している。これは放電の領域そのものがこの付近を境にして変わるためである。暗室の中でこの放電の様相を観察すると塩分濃度が2~5%の場合には水中電極の中心電極周辺に菊花状の放電が見られるが淡水に近づくるとこの様相は一変して



第9図 塩分濃度と音圧 電流およびパルス間隔との関係

イナヅマ型の放電になる。塩分濃度は水中電極間の電気抵抗に直接きいてくるので電流密度や水中放電の機構に影響してくるのであるがこれらの関係ははなはだ複雑で難解な現象である。いずれにしろ淡水中での放電は普通の電極を用いる限りはなはだ不安定になるのでこの方法により湖沼 河川等の水域を調査する場合には何らかの対策を講じる必要がある。淡水域の音波探査については別の機会にもう少し詳しく紹介する予定である。

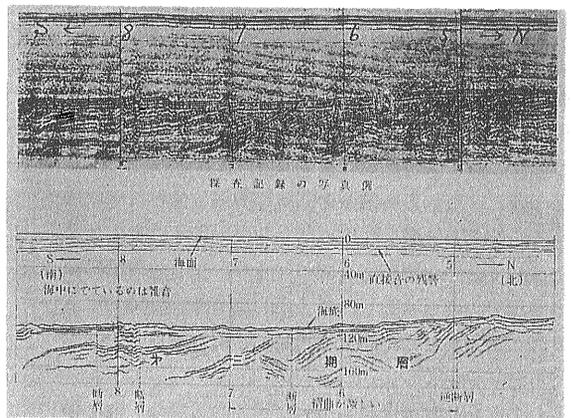
強力発振装置の研究

従来の音波探査は作業能率や精度の点で多くの特長を持ちながら探査可能な深度が浅く100m前後であるためにこれらの特長をじゅうぶん各方面に利用することができなかった。もし火薬の爆発に代わるような強力な音源が得られたならこの方法の利用範囲はさらに拡大するであろう。

このような目的から地質調査所では強力な音響パルスを発生する各種の発振装置の研究を続けている。

その一つである放電式発振機では最近5,000~10,000ジュールの電気エネルギーを利用することが可能になってきた。この装置では従来の200ジュールに比べて25~50倍にエネルギーを増加したわけである。もちろんこの割で可探深度が増加するわけではないが実験の結果平均500m 地下の音響的条件がよいと800m程度まで音響エネルギーは浸透している。5,000ジュールのエネルギーを得るためには100μFの蓄電容量を必要とするので蓄電に要する時定数等に関して多少の問題はあるがこれらも漸次解決されつつあるのでその実用化も遠くないものと思われる。

(筆者は物理探査部)



第10図 探査記録の写真とその説明図