

岩盤からの電磁波放射確認に向けての基礎実験

平成 23 年 5 月 13 日受付

筒 井 稔
京都産業大学 コンピュータ理工学部
柳 谷 俊、 加 納 靖 之
京都大学防災研究所 地震予知研究センター

要 約

京都産業大学構内での地中電磁波観測により「地震に伴い極めて短い持続時間の電磁波パルスを検出した」という事実から、その「励起機構は地球岩盤における圧電効果による」との仮説を立てた。その妥当性を検証するために、花崗岩からの電磁波放射実験を計画し、まず花崗岩に多く含まれている水晶からの電磁界発生状況を明確にするために、形状の異なる水晶に、瞬間的な圧力を印加し、電磁界の基本的振る舞いの計測を行った。この実験では自然界での励起条件を考え、水晶には検出用電極を一切貼り付けずに電磁界を計測した。その結果、計測された電磁界の波形には様々な周期成分の振動が現れたが、それらは水晶の形状に依存している事を確認した。水晶の寸法が大きくなれば、その中央部で振幅の大きな電磁界が励起される事を示した。また円柱状水晶内に生じた磁界成分の定在波から、水晶内での衝撃波の伝搬速度を求める事ができ、その速度は地震波の速度に合致している事等、詳細な電磁界励起メカニズムを明らかにできた。

地中電磁波パルス、水晶、衝撃的圧力印加実験、無接触電磁界計測、水晶内地震波

Abstract

From a fact that an electromagnetic (EM) pulse was detected by a sensor system installed in a borehole at Kyoto Sangyo University just when an earthquake occurred, we have a hypothesis that electromagnetic (EM) pulses, as one of strong candidates of earthquake precursors, should be radiated due to piezo-electric effect in earth crusts when large stress impacts were imposed to them. In order to confirm the validity of this hypothesis, we have carried out a laboratory experiment on electromagnetic emissions from two shapes of crystals without their fracture, in which no probe was directly contacted to the crystals. We have confirmed from the measurement results that detected periods of fluctuations of electric and magnetic fields could be well explained by dimension of the crystals, and that a standing waves of magnetic field formed in the columnar crystal provided a

phase velocity along the crystal axis, which is consistent with that of seismic waves in the earth.

earth-origin EM pulses, crystal, experiments of stress impact, simultaneous measurements of EM fields, seismic waves in crystal

1. はじめに

阪神大震災発生の直前に阪神高速道路を走行中のトラックの「カーラジオに急に強い雑音が混入した」との証言があった。この現象でまず考えられる原因の一つに、地下岩盤での強い衝撃的圧力変化による圧電現象に伴う電磁波の励起である。そこで、電磁波の研究をしていた京都産業大学の筒井はその真偽を確かめるため、これまでだれも試みていなかった地中での電磁波環境測定を開始した。それは地中に深さ 100m のボアホールを構築し、そこに電磁波センサを挿入し、地中に存在している電磁波を検出・調査する観測研究である。この研究で、地中においても特異な電磁波雑音のスペクトルを検出した [1] ので、地中起源の電磁波パルスが存在する可能性があるとの感触を得て、更なる調査を続けた。更に、電磁波パルスの到来方位決定のためのセンサ・システムを開発 [2, 3] し、それを用いた観測を行ったところ、2004 年 1 月 6 日に発生した熊野灘沖地震と同時に、コンピュータ画面には電磁波パルス波形とその到来方位を表示した。そこで、パルスの伝搬理論をこの検出した電磁波パルスの周波数の時間変化（分散特性）に適用して伝搬距離を算出し、それを到来方位に充てはめたところ、この電磁波パルスの波源位置は地震の震源域内にある事を示した。これにより、「検出された電磁波パルスは地震によって励起された」との結論に達した [4]。

この「地震に伴う地中電磁波パルスの励起」に関して、検出した電磁界の持続時間が数ミリ秒と極めて短いことから、その励起機構としての「地中岩盤における圧電効果による電磁波放射」を確認する必要があると考え、岩石を用いた衝撃印加実験を計画した。

岩石の破壊に伴う電磁波放射の実験に関しては、複数の研究者が報告している [5, 6, 7, 8] が、それらの実験で検出していたのは電界成分が主流であり、磁界の測定は行われていない。しかもそれらは全て破壊を伴っている。しかし、本研究者は破壊を伴わなくても、衝撃的圧力印加により、電磁波が励起されると考えており、そのような実験を計画した。そして検出として、電極を岩石に貼り付ける方法ではなく、空間を隔てて設置したセンサで電界と磁界の同時測定を実施する事にした。この実験は京都大学防災研究所地震予知研究センターの施設を使用する事で、共同研究の形で実施する事になった。

本研究は衝撃的圧力印加による地殻岩盤からの電磁波放射を検証する事が最終目標であるが、地殻岩盤の中でも強い圧電効果を引き起こす岩石としては、水晶の成分を多く含んだ花崗岩が最有力である事が判った。しかし花崗岩内では含まれている水晶は一様に分布しておらず、

水晶の部分とそうでない部分がまだら状態となっているため、電磁波励起の寄与する部分とそうでない部分についての予備実験をしたところ、やはり水晶部分が電磁波の励起に寄与している可能性が大きい事がわかり、先ず、その励起の基本的性質を明らかにする必要があった。そこで、本研究では水晶 (SiO_2) そのものからの電磁界の励起確認と、その水晶における形状依存性を明らかにする測定実験を中心に行った。

2. 水晶への衝撃印加による電磁界励起の基礎実験

水晶は強い圧電効果の性質を持っている代表的な物質である事は周知の事実であり、その応用は多岐に亘っており、水晶の応用研究は無数と言われる程行われてきた。ただし、その場合の実験での測定では、水晶に電極を貼り付けて電気信号を取り出す方法での特性測定であった。しかし、電極を取り付けた水晶とそうでない水晶とでは、圧電効果における電氣的等価回路は異なり、励起機構における電氣的特性も異なるので、本実験では水晶に電極を貼り付けずに電気信号を検出する方法を採った。しかも水晶を破壊する事無く、それより遥かに弱い衝撃圧力を印加した時の電磁界を検出する試みであり、これが本研究の大きな特徴である。

実験には直径 25 mm、厚さ 5mm の円盤形と直径 25mm 長さ 50mm の円柱形の 2 種類の水晶を用いて行った。それらの水晶の軸方向に衝撃圧力の印加に対して、電磁波の証拠となる磁界成分を検出する事を中心に測定した。

(1) 測定実験装置

水晶に衝撃的（瞬間的）応力を加える事により、水晶内部の分子に分極電荷を瞬間的に発生させ、それにより変位電流が流れるので、その周囲に磁界が瞬間的に発生するとの考え方に基づいて、その磁場検出のための実験装置を準備した。

a) 応力印加装置

水晶に衝撃的（瞬間的）応力を加える場合に注意しなければならない点は、水晶内で生じた分極電荷が外部に漏れ出さないようにしなければならない。そのため導電体である鉄製の応力装置との間に電氣的絶縁物を入れる必要があった。その絶縁物として本実験では、水晶と同じ直径 25mm のアルミナ円柱（長さ 50mm）を水晶の両側から挟む配置を採った。

瞬間的応力印加の方法に関しては、今回の実験では負の応力印加の方法を採った。即ち、強い圧力をかけておいて、瞬間的にその力を解放する方法である。それぞれの配置としては、下から直列に圧力センサ、アルミナ、水晶、アルミナと配置しておき、その上側のアルミナと圧力印加用ピストンとの間に直径 1mm のガラスビーズを挟み、圧力を増加していき、ある時点でガラスビーズが破壊される。この瞬間に水晶に掛っていた圧力は急激に解放される。これが負の圧力印加であり、この時も水晶内では分極電荷が発生する。

この実験ではガラスビーズを破壊するだけの力が有れば十分であるので、大型の応力印加装

置は必要がない事が判ったので、操作の簡単なボール盤の上下駆動部分を利用する事にした。即ちボール盤の針を取り付ける部分に直径 10 mm 程度の円柱状アルミナ製のピストンを取り付け、直径 25 mm の円柱状アルミナとの間にガラスビーズを挟んで圧力を加える方法を採用した。その測定実験の様子を写真 1 に示す。写真 1 (a) は直径 25 mm で厚さ 5mm の円盤形水晶を同一直径で長さ 50 mm の絶縁物である円柱状アルミナで挟んでおり、その上部に見える直径 10mm の棒状のピストン (アルミナ) で直径 1mm のガラスビーズに圧力を加えるようにしている。(b) は直径 25 mm, 長さ 50 mm の円柱形水晶を挟んだ時の実験状況を示している。

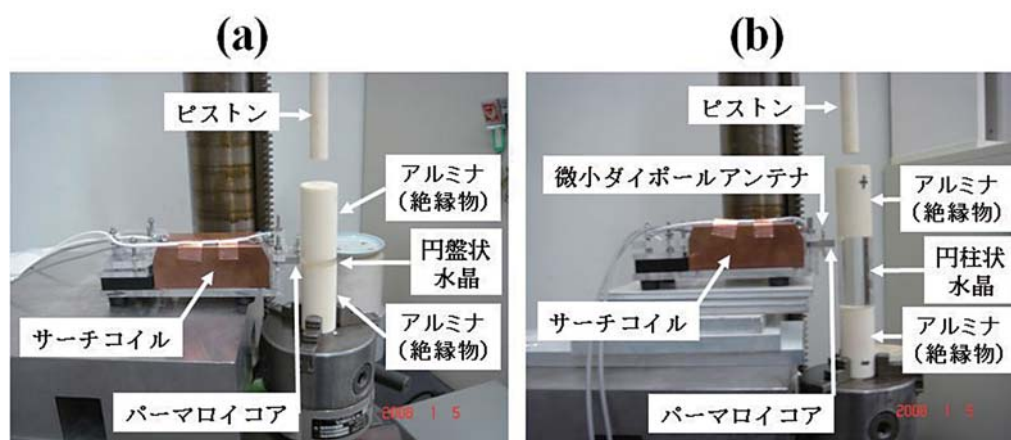


写真 1 衝撃印加による測定実験のための各部配置と直線状パーマロイコアによる電磁界検出状況。

(a) 円盤形水晶での計測 (b) 円柱形水晶での計測

b) 磁界検出センサ

圧力印加時に発生したパルス性磁界を検出する方法として磁界サーチコイルを用いた。それは直径 10mm、長さ 80 mm のボビンの周囲に線径 0.2 mm の銅線を 1 万回巻き、その芯には断面が 5 mm x 5 mm のパーマロイ合金からなる強磁性コアを通したコイルであり、水晶の局部での検出感度を上げるようにした。

b-1) 直線状パーマロイコアを用いた磁界サーチコイル

この磁界サーチコイルでは強磁性パーマロイコアとして長さ 100 mm の直線状のものを使用し、コイル片側から 2 cm 突き出た状態として、その先端を応力が加えられる円盤形あるいは円柱形水晶の側面に対して直角に向けて、水晶局部から発生する微弱な磁界を検出するようにした。その実験配置状況も写真 1 に示している。そこでは、強磁性パーマロイコアが円盤形水晶 (a) および円柱形水晶 (b) の側面から 3 mm の位置まで接近させた状態が示されている。これを測定実験 1 で使用している。

b-2) 長円形パーマロイコアを用いた磁界サーチコイル

この磁界サーチコイルの強磁性パーマロイコアとしては直径 25 mm の水晶の半周を取り巻く

ような長円形を形成させ、1万回巻きコイルにはこの長円形コアの直線100mm部分を挿入している。これは水晶の周囲に沿って発生する磁界成分を効率良く検出する事を目的としている。写真2はその磁界サーチコイルの芯部に挿入された長円形パーマロイコアが水晶の半周を取り巻いている様子を示している。この磁界サーチコイルを測定実験2において使用している。

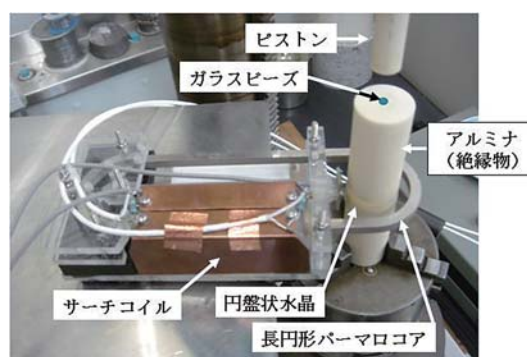


写真2 長円形パーマロイコアを挿入したサーチコイルを用いた水晶の周囲磁界成分の検出実験状況。

c) トリガー用の電界センサと波形データの記録

測定では衝撃力の印加時の極めて短時間の波形を取得する必要があるので、発生した電磁界成分の内の電界波形をトリガーとして、その電界成分と磁界成分の波形をデジタル・オシロスコープに取得・表示する方式を採った。検出された電磁界成分はプリアンプ（100倍）を介して、デジタル・オシロスコープ上に表示し、そのデータ（波形画像およびその数値データ）をGP-IBを介してパーソナルコンピュータに記録するようにした。

これら波形取り込みのためのトリガー用電界の検出には、長さ5mmの直線状素子対からなる微小ダイポールアンテナを製作した。それを円柱形水晶の側面から5mm離れた位置で、その向きは水晶の軸と平行になるように配置した。その様子も写真1に見える。

3. 測定実験結果

(1) 測定実験1

この実験では、写真1に示す磁界検出センサを用いた。サーチコイルの直線状パーマロイコアの軸を水晶側面に向け（水晶の電気軸（＝圧力印加軸）に対して直角に配置）して測定を行った。

a. 円盤形水晶での実験

ここでは厚さ5mm、直径25mmの円盤形水晶に対する衝撃力印加実験を行った。検出した電磁界成分の電圧波形を図3-1に示す。図の縦軸は電圧であり、横軸は時間である。

以下の図で共通している事であるが、図中青色はトリガー信号として使っている水晶軸に平行な電界成分の波形であり、赤色は水晶の側面で同時に検出された磁界成分の波形を示している。また水平から徐々に下降している黄色の曲線は水晶に加わる圧力の変化を示している。それぞれの信号に対して、1div当たりの電圧が左枠内に記されている。時間目盛りは20 μ sec/divで示されている。

検出された電磁界の波形を見ると、電界成分には約 6μ 秒の周期を持つ変動が周期 $25 \sim 30 \mu$ 秒の変動に重畳して現れている。磁界成分については、電界よりも短い約 3μ 秒周期の変動が電界と同様に $25 \sim 30 \mu$ 秒の変動周期に重畳して現れている。

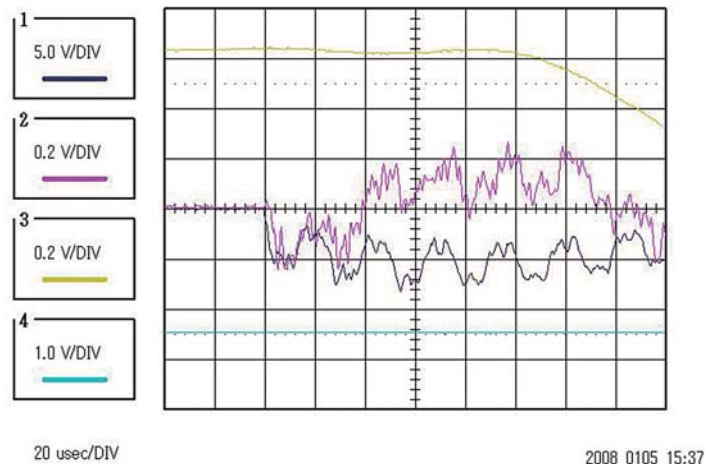


図 3-1 円盤形水晶の軸方向に衝撃力を加えた時に、円盤周辺部で検出された電磁界波形の時間変化。Ch1 (青) は電界、Ch2 (赤) は磁界、Ch3 (黄) は印加圧力の各出力電圧。

b. 円柱形水晶での実験

次に、直径 25mm、長さ 50mm の円柱状の水晶の軸方向に衝撃的圧力を印加する実験を行った。電界および磁界用センサの向きは円盤形水晶の測定の時と同じで、それらの測定位置をまず円柱の中央付近に採った。この時検出した電界・磁界成分の電圧波形の結果を図 3-2 (a) に示す。この測定実験で検出した電界成分の変動は円盤形水晶の時のそれに比べて少し長い $8 \sim 12 \mu$ 秒の周期的変動が 50μ 秒程度の大きな周期変動に重畳して検出されている。磁界成分については、円盤形水晶の測定の時に見られた 3μ 秒程度の短い周期変動は見られず、 $8 \sim 12 \mu$ 秒程度の変動が周期約 20μ 秒の変動に重畳している。これら電磁界成分は更に長い周期成分に重

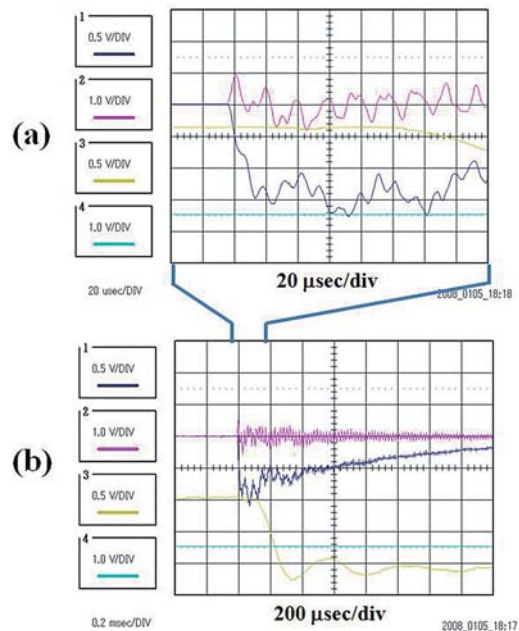


図 3-2. 円柱形水晶の軸方向に衝撃力を印加した時の円柱中央部側面で検出された電磁界成分の時間変化。(a) は 20μ sec/div 表示、(b) は 200μ sec/div 表示。

畳している傾向が見られるので、時間軸を圧縮した状態での測定を行った。その測定結果を図 3-2 (b) に示す。この図において、電界成分は 50μ 秒の周期変動が、磁界成分は 20μ 秒の周期変動が約 200μ 秒の長い周期変動に重畳しており、その長い周期変動成分の振幅は指数関数的に減衰している様子が見られる。

(2) 測定実験 2

水晶に衝撃力を印加した場合、その方向に電荷対として分極し、すぐに再結合する状況を繰り返す場合、その軸方向に繰り返して瞬時的に変動する変位電流が流れ、その電流の周囲にはアンペールの法則に従って、瞬時的に磁界が発生する事が予想される。この変位電流の周囲に発生する磁界を検出するために、写真 2 に示すような長円形コアを用い、水晶の半周を取り巻く長円形パーマロイコアからなるサーチコイルを用いた磁界測定を行った。

a. 円盤形水晶での実験

円板形水晶の半周をパーマロイコアで取り巻いた状態での測定結果を図 3-3 に示す。図に示された電界成分 (青) の縦軸の目盛りは 2.0 V/div であり、磁界成分 (赤) の縦軸の目盛りは 1.0 V/div であり、それらの表示感度は測定実験 1 での測定 (図 3-1) に比べて、電界の場合で、2.5 倍に上げてある。これは測定点を水晶から、離す必要があったからである。磁界については $1/5$ に落している。両成分には $4 \sim 6 \mu$ 秒程度の短い変動成分が約 22μ 秒の周期成分

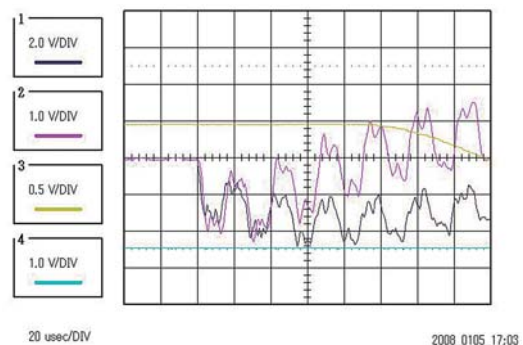


図 3-3 円盤形水晶の周囲を半円形に取り巻くコアからなるサーチコイル (赤) と線形微小ダイポールアンテナ (青) で測定された電磁界波形。

波形に重畳している。その 22μ 秒の周期変動成分の振幅について、測定実験 1 の結果と比較すると、電界はほぼ同じであるが、半円形コアで測定した磁界の検出強度は線形コアでの測定時に比べて約 10 倍も強くなっており、周回磁場が卓越している事を示唆している。

b. 円柱形水晶での実験

b-1) 円柱形水晶の中央部分での測定

円柱状水晶の周囲を取り巻く長円形パーマロイコアを挿入したサーチコイルによる磁界検出では水晶全体の軸方向に流れる変位電流を検出したものと考えられる。そこで円柱形水晶の中央部をコアで半周を取り巻いた状態での測定結果を図 3-4 (a) に示す。この測定結果では、円盤形水晶での実験 (図 3-3) の時の電界・磁界に見られた $4 \sim 6 \mu$ 秒の短い周期成分は見られなくなっており、磁界では 20μ 秒の周期成分が卓越している。一方、電界では磁界変動の半分の 10μ 秒周期成分が卓越している。更に電界波形には約 50μ 秒の、磁界成分には更に長周期の変動傾向が見られたので、これらの変動傾向を見るために、時間的に圧縮した電磁界波形を図

3-4 (b) に示す。

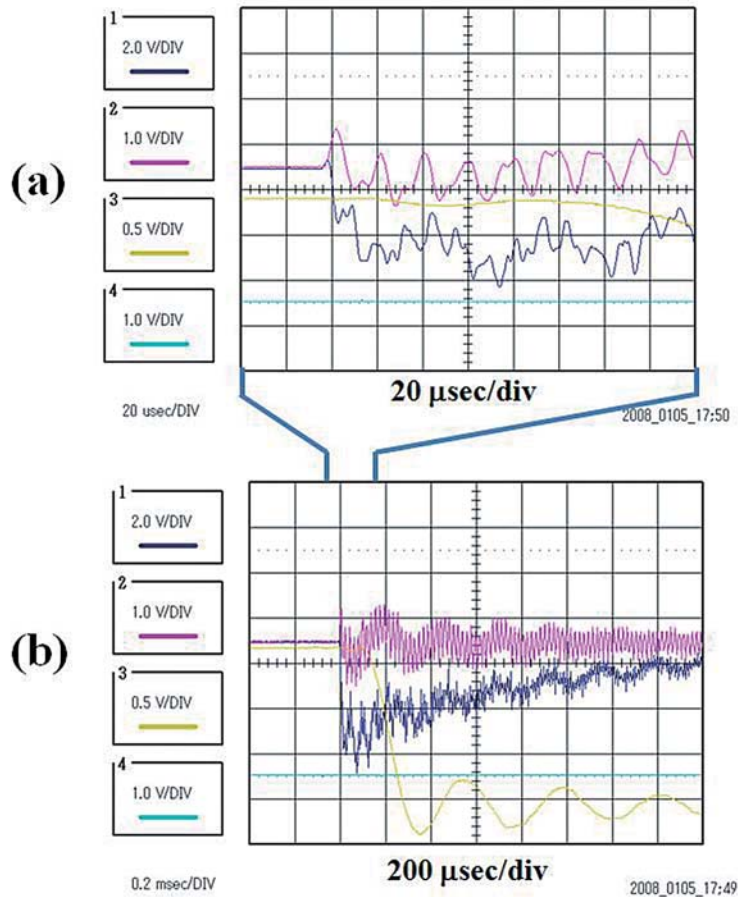


図 3-4 円柱形水晶の中央部の半周を取り巻くパーマロイコアを持つサーチコイル（赤）と線形微小ダイヤモンド（青）で測定された電磁界波形。（(a) は 20 μ sec/div 表示、(b) は 200 μ sec/div 表示）。

この測定で、電界成分（青）の縦軸の目盛は 2.0V/div で表示しており、測定実験 1（図 3-2）でのそれ（0.5 V/div）より表示感度を 1/4 に落としていることから、電界成分が強く現れており、磁界成分については図 3-2 とは同じ感度で測定しているが、20 μ 秒の周期変動成分の振幅は約 2 倍の強さになっている様子が見られる。この原因は、印加圧力（黄）が図 3-2 中に見られる印加圧力に比べて約 2 倍近く強かったためと思われる。また、200 μ 秒の長周期変動に関しては、直線コアのサーチコイル（図 3-2 (b)）と長円形コアのサーチコイル（図 3-4 (b)）の両方で検出された。磁界の波形は図 3-2 と同様の時定数で指数関数的に減少しているが、電界の振幅成分はもっと長い時定数で減少しているように見える。

b-2) 水晶からの励起電磁界波形の円柱に沿った分布

長円形コアのサーチコイルで測定した周期 $T = 200 \mu$ sec の電磁界の時間変化に関して、円柱

形水晶の中央での測定結果を図 3-4 に示したが、磁界（赤）の 20μ 秒周期の成分が大きな振幅で重畳しており、周期 $T=200 \mu$ sec の変動が明瞭に見える。そこで円柱形水晶の軸に沿っての分布を調べた。その結果、図 3-5 (a) (b) (c) が得られた。

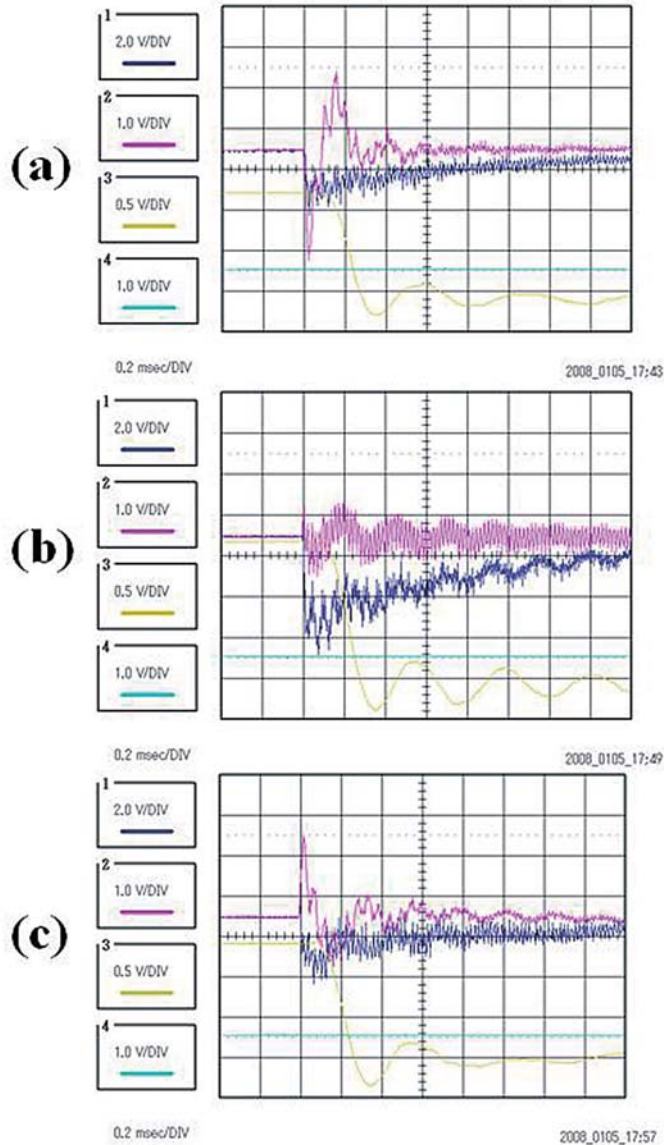


図 3-5. 円柱形水晶の (a) 円柱上部、(b) 円柱中央、(c) 円柱下部で検出された電磁界波形。

20μ 秒の周期成分に注目すると、円柱形水晶の上下端で検出した時の波形の振幅が小さいのに反して、中央部で振幅が大きく現れている。この事は、水晶内を軸方向に伝搬する衝撃波（圧電現象を伴っている）が水晶の上下端で反射を繰り返した結果生じた定在波と考えられる。

200 μ 秒の磁界の周期成分の変動に着目すると、水晶上下端での測定波形にも、その変動が見られる。その変動は水晶の上下端で位相が逆である事が分かる。この現象が何に起因しているかは今のところ不明である。

4. 実験結果に対する検討

(1) 圧電素子の電氣的等価回路と機械電気結合

一般の圧電素子の電氣的等価回路は図 4-1 (a) のように示される。ここで C_d は圧電素子の電気軸の両端面（図中 A および B 相当する部分）に電極が貼り付けられた時に現れる静電容量で、その値はその電極板の面積と極板間の距離によって決まる。しかし本研究では電極板を一切貼っていないので、その時の電氣的等価回路は図 4-1 (b) のようになる。そして、衝撃圧力印加により発生する電荷対は C_i の両端に分離生成されるが、それは媒質の持っているインダクタンス L_i との直列共振回路により、そのエネルギーのやり取りが行われ、電気振動が発生する。そして、このエネルギーのやり取りの過程で媒質の持っている電氣的抵抗 R_i によって消費される。

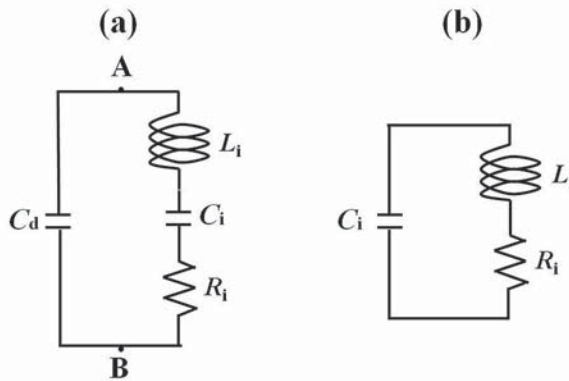


図 4-1 圧電素子の電氣的等価回路。(a) A および B に電極を接続した場合。(b) 電極を接続しない場合（本研究に該当）。

るため、その振動振幅は指数関数的に減衰している。図 3-4 に見られる減衰振動はこれを表わしている。

そこで、検出された電磁界と機械的振動との関係を明らかにする為に、圧電素子における電氣的特性を調べる。回路中の等価的静電容量 C_i およびインダクタンス L_i を電氣機械結合係数 k を用いて表わすと、次のように表される。

$$C_i = \frac{8}{\pi^2} C^T k_{33}^2$$

$$L_i = \frac{\rho l w t}{8} \left(\frac{s_{33}^E}{w d_{33}} \right)^2$$

ここで、 C^T は円柱状の圧電素子の断面積 lw と厚さ（または長さ） t によって決まる自由容量で

$$C^T = \frac{lw}{t} \varepsilon_{33}^T$$

で与えられる。ここで ε_{33} は圧電素子の材質の誘電率である。その他の記号については、 s_{33}^E はヤング率 Y^E の逆数で、応力 T に対する歪み S の比で表され、

$$s_{33}^E = \left(\frac{S}{T} \right)_{E=0} = \frac{1}{Y^E}$$

であり、 d_{33} は圧電歪定数とよばれ、印加電界 E により生ずる歪 S により決まり、

$$d_{33} = \left(\frac{S}{E} \right)_{T=0}$$

であり、また k_{33} は圧電素子の電気機械結合係数とよばれ、

$$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^T s_{33}^E}}$$

で現される。

図 4-1 (b) における共振周波数 f_a は L_i と C_i を用いて $f_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i C_i}}$ で表されるので、上

の L_i と C_i を代入するが、圧電素子における電気機械的における共振周波数は、円盤状の径方向振動に対しては

$$f_a = \frac{\eta}{\pi D} \sqrt{\frac{Y^E}{(1 + \sigma^E)(1 - \sigma^E)\rho}}$$

で、円柱状の軸方向振動に対しては

$$f_a = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{Y^E}{\rho}}$$

で与えられている。ここで η は共振周波数の基準化周波数で、 D は円盤の直径、 ρ は圧電素子の体積密度、 l は円柱の長さ、 σ^E は軸方向応力によって生じる横歪みと縦歪みの比（ポアソン

比)である。

これらの電気機械結合パラメータは圧電素子の材質に依存しているが、本実験では水晶を使ったので、それらの値は

$$\begin{aligned}\eta &= 2.08 \\ D &= 0.025 \quad \text{m} \\ Y^E &= 8.5 \times 10^{10} \quad \text{N/m}^2 \\ \sigma^E &= 0.35 \\ \rho &= 2.5 \times 10^3 \quad \text{kg/m}^3 \\ l &= 0.05 \quad \text{m}\end{aligned}$$

である。これらを代入すると直径 25mm の円盤形水晶の共振周波数 f_{rd} は

$$f_{rd} = 166 \quad \text{kHz} \quad (\text{周期 } 6 \mu \text{ 秒})$$

が得られ、円柱形水晶の共振周波数 f_{rt} は

$$f_{rt} = 55 \quad \text{kHz} \quad (\text{周期 } 18 \mu \text{ 秒})$$

となった。この値を参考にして、本実験で得られた結果について以下で述べる。

(2) 検出された振動周波数成分

上記に示した電気機械結合での振動成分の試算結果に基づいて、実験結果の検討を行う。

- a. 直径 25mm、厚さ 5mm の円盤形水晶で発生した電磁界振動（図 3-1）の内、電界成分にみられる周期 6 μ 秒の振動は円盤の径方向振動と考えられる。
- b. 直径 25mm、長さ 50mm の円柱状水晶で発生した電磁界振動（図 3-2）で、基本的に周期 20 μ 秒付近の振動は水晶軸方向の電気機械結合による振動成分をあらわしている事になる。
- c. 図 3-1 に見られる周期 3 ～ 6 μ 秒程度の短い振動は直線状コアを円盤形水晶の側面に近づける事により検出され局部的機械振動により生じた電磁界振動と思われる。
- d. 長さ 50 mm の水晶柱の中央部で磁界振幅が最大であり、両端で振幅が最小である事から、波長 λ が 10cm の定在波とみなされる。その定在波を形成している波の周期 T は 20 μ 秒であるので、そこから水晶内における衝撃波の位相速度 V_p は

$$V_p = \frac{\lambda}{T} = \frac{0.1}{20 \times 10^{-6}} = 5 \times 10^3 \quad \text{km/sec}$$

となり、これまで通説となっていた地震波（衝撃波）の伝搬速度に等しい値となっている事を実験的に確認できた。

5. 結論

衝撃的圧力印加による地殻岩盤からの電磁波放射の確認実験を検証する事を目指して、地殻

岩盤の中でも圧電現象を引き起こす水晶を多く含む花崗岩での電磁波放射の基本的性質を明らかにするために、電極を貼り付ける事なく、形状の異なる水晶に対しての衝撃的圧力によって発生する電磁界の性質を調べた。その結果、

1) 円盤形および円柱形水晶の側面の各部分での電磁界の振動成分については、圧電現象としての機械電気結合による振動成分である事を確認した。特に円柱形の水晶では、軸方向の中心部で電磁界の強度が大きくなっている事が確認できた。これは水晶内での衝撃応力が定在波となっている事を示唆しており、岩石中に含まれる水晶部分が大きい場合は電磁界励起が強くなる事を示唆している。しかし、検出された振動周波数の中には特定ができない変動成分もあるので、更に詳細な解析を行う必要がある。

2) 測定は非接触状態での測定である事から、空間での電磁界を測定した事になるので、水晶からそれらが放射に至る状況を示している。

以上、水晶からの電磁界放射のメカニズムが明らかとなったので、今後は花崗岩そのものへの衝撃的応力印加に伴う電磁界の放射状況を調べる必要がある。特に花崗岩中に含まれている水晶の分布の程度により励起される電磁界強度の違いを調べ、岩盤から放射される電磁波の強度の妥当性を調べる必要がある。さらに励起された電磁界パルスが実際に地中媒質中を伝搬する状況に関して、媒質中における電界と磁界の位相関係を明確にする事、距離に対しての減衰率等があるので今後の更なる実験で検証して行いたい。

謝辞

本研究は京都大学防災研究所の共同研究（19-G14）の研究費の配分を受けて実施した。本研究の実験データ取得時のコンピュータ上でのデータ表示とデジタルデータ保存に関する処理プログラムは京都産業大学の研究室で使用していたものを改造した。この改造を担当してくれた学生に対して謝意を表します。

参考文献

- [1] M. Tsutsui, Detection of earth-origin electric pulses, *Geophys Res Lett*, **29**, 1194, doi:10.1029/2001GL013713, 2002.
- [2] 筒井稔、小長谷重雄、香川忠興、周波数分散特性をもったパルス電磁波の到来方位測定法、信学論文誌 B, Vol. J89-B, No.1, pp.1-9, 2006.
- [3] M. Tsutsui, S. Konagaya, T. Kagawa, A method of direction finding for dispersive electromagnetic pulses, *Electronics and Communication in Japan, Part 1*, **90**, 23-32, 2007.
- [4] M. Tsutsui, Identification of earthquake epicenter from measurements of electromagnetic pulses in the earth. *Geophys Res Lett*, **32**, L20303, doi:10.1029/2005GL023691, 2005.
- [5] U. Nitsan, Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks, *Geophys. Res. Lett.*, **4**, 33-336, 1977.

- [6] T. Ogawa, K. Oike and T. Miuram, Electromagnetic radiation from rocks, J. Geophys. Res., 90, 6245-6249, 1985.
- [7] S. Yoshida and T. Ogawa, Electromagnetic emissions from dry and wet granite associated with acoustic emissions, J. Geophys. Res., 109, B09204, doi:10.1029/2004JB003092, 2004.