

地中岩盤内において観測された新潟県中越沖地震に伴う電界変動

大久保寛(首都大学東京), 竹内昭洋, 渡辺峻(秋田県立大),
石井孝夫(細倉金属株式会社), 竹内伸直(秋田県立大)

Electric Field Fluctuation Observed in Underground Bedrock with the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007

Kan OKUBO (Tokyo metropolitan university), Akihiro TAKEUCHI,
Shun WATANABE (Akita Prefectural University), Takao ISHII (Hosokura Metal Mining Co. Ltd)
and Nobunao TAKEUCHI(Akita Prefectural University)

Abstract

To date, there are a number of research groups that aim to clarify co-seismic electromagnetic signals. However, the successive result has been not reported. One of the possible reasons is that the water-saturated sedimentary layer in the ground surface zone shields the signals emitting toward observation systems on ground and in space. Here, we set the observation system in an underground room ~70 m below the ground surface in northeast Japan. After a while, at the occurrence of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 (Mw 6.6, focal depth ~17 km, epicentral distance ~240 km), our system recorded an anomalous signal in the vertical component of the electrostatic field. The result insists that this is a co-seismic electric signal from the focal region.

1. まえがき

地震現象と電磁気現象との因果関係を明らかにする研究が古くから行なわれているが^{(1), (2)}, その関係は現在においても依然あいまいなままであり, 中には単に地震前に観測された電磁変動現象が地震の前兆現象として報告される例も散見される。一方, 地震発生に伴う電磁変動現象は, 両者の因果関係は明らかであり, 地震現象の発生機構の解明やその電磁変動量の定量的評価を行なう上で重要である。それにもかかわらず, 詳細な観測に成功した例はほとんど報告されていない。

我々は, これまでに種々の地震発生時または地震波伝搬時の電磁変動現象(以下, コサイスミック電磁変動現象と呼ぶ)のうち, 特に電気変動現象についての観測を継続して行ってきた。すなわち, 地中電位差変動信号および大気電界変動信号などの観測である。この両者の信号については, 地震波が観測地点に伝搬して来た時にこれらの変動信号が観測されることを明確に示すことができている^{(3), (4)}。しかし, 地震発生時の信号については, 現在までその変動信号を明確に観測できておらず, 他でも報告された例はほとんどない。

ここでコサイスミック電界変動信号について考えてみると, たとえそのような信号が存在したとしても非常に微小と想定される。この微小な信号を観測するためには, 当然, 地震現象に関連した信号以外の信号がで

きるだけ小さいことが望まれる。たとえば、大気中の電界変動信号は多くの発生要因による信号の重ね合わせであり、観測信号は非常に複雑なものとなる。したがって、地表面に設置された観測機器による観測では、当然、各種の大気電気変動信号が大きく、それらが重なり合う非常に複雑な信号となって観測されてしまう⁽⁵⁾。地震現象と関連する微小信号を明確に示すためには、雷現象により発生する電磁波、雷雲による静電界、大気イオン粒子の動きによる電界変動および空地電流など大気電界変動現象により発生する信号の影響をできる限り除く必要がある。

このためには、地中にある一定規模の空間を確保し、観測システムを設置し観測を行なうことが考えられる。さらに、コサイスマック電界変動信号を検出するのに適した、これまで試みられていない新たな観測要素を導入することが望まれる。その一つとして、地中空間電界の観測が挙げられるが、地中空間で電界を観測した例はごく稀である。

微小なコサイスマック電磁変動が存在したとすると、この微小な信号を観測するためには、当然、大きな地震で震源が観測地点からあまり遠くないことが望ましい。平成19年7月16日に新潟県中越沖で発生した地震はマグニチュードが6.8と大きく、震央は我々の観測地点から240km以内であり、コサイスマック電磁変動現象の存在を確認するのに非常に都合のよい機会となった。

本論文では、まず、地中空間における電磁界変動を観測するために設置した観測室について述べる。次に、この地中観測室に設置した電界計、温度・湿度計およびイオン濃度センサーについて述べ、得られる観測信号の自動記録システムについて述べる。さらに、観測された中越沖地震時および平常時の地中電界変動信号について述べ、これについて検討した結果について述べる。

2. 観測システム

2.1 細倉地中電磁界観測室

地中空間の各種電磁界信号を観測するために、細倉地中電磁界観測室(以下、細倉観測室または単に観測室と呼ぶ)を宮城県北西部の栗原市鶯沢にある細倉金属鉱業株式会社が管理する休止鉱山(北緯38度48分、東経140度53分)に同社と共同で設置している。なお、この鉱山については、1987年の操業休止以降、鉱山から流出する水に含まれる重金属などによる河川の汚染防止など環境保全のため鉱山全体を同社が管理している。この観測室の設置場所を図1に示す。

細倉鉱山は市街地の平坦な土地から急斜面を持つ丘陵が始まる地点にある。現在、鉱山内の坑道は、ほとんどが地下水により水没している。しかし、地表面レベルにある主坑道(通洞坑)やその上のレベルの坑道がいくつか維持管理されている。なお、地下水面はこの地表面レベルより約10m下にある。細倉観測室⁽⁶⁾は通洞坑の坑口から山腹を貫いて約1.5km奥にあり、地表面からの深さは約70mである。観測室は鉱山の採鉱事務所跡で凝灰岩/安山岩の岩盤を掘削したものであり、広さ約15m×12m、高さ約2.5mの空間がある。観測室入り口付近には地表面から垂直に立坑が貫通しており地中深くまで達しているが、地下水面以下は水没している。観測室全体は厚く岩盤に覆われているが、地表面近くは岩盤よりも導電率の高い堆積層が覆っている。

観測室は地中深くあり、その室内温度は殆ど変動しないが、室内環境をできるだけ一定に保つため、電熱器により室内の温度をほぼ一定に保っている。この観測室周囲の状況を図2に示す。なお、この観測室には雷や地震により発生する電磁界変動信号を検出するために他の各種のアンテナやセンサーが設置され

ている。

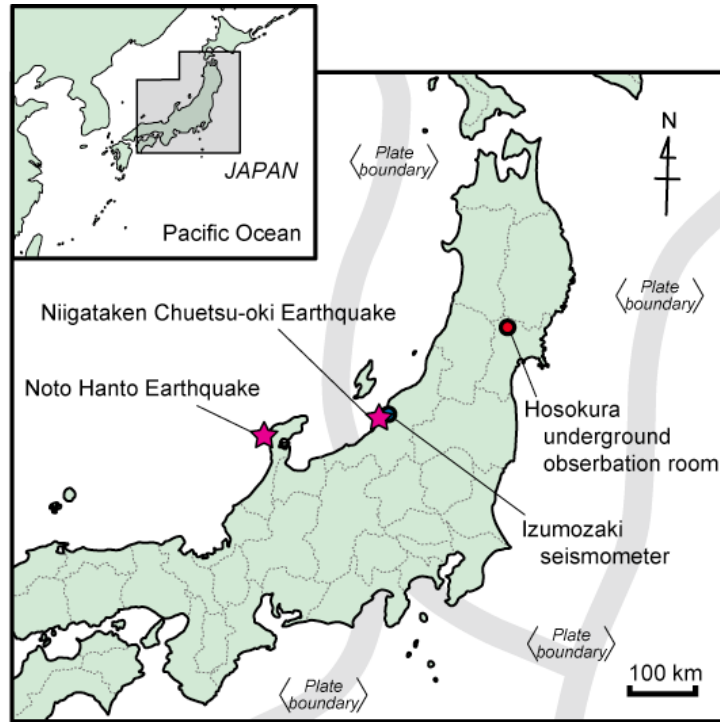


図1 観測地点および震央

Fig. 1 Location of the observation site and the epicenter of the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007

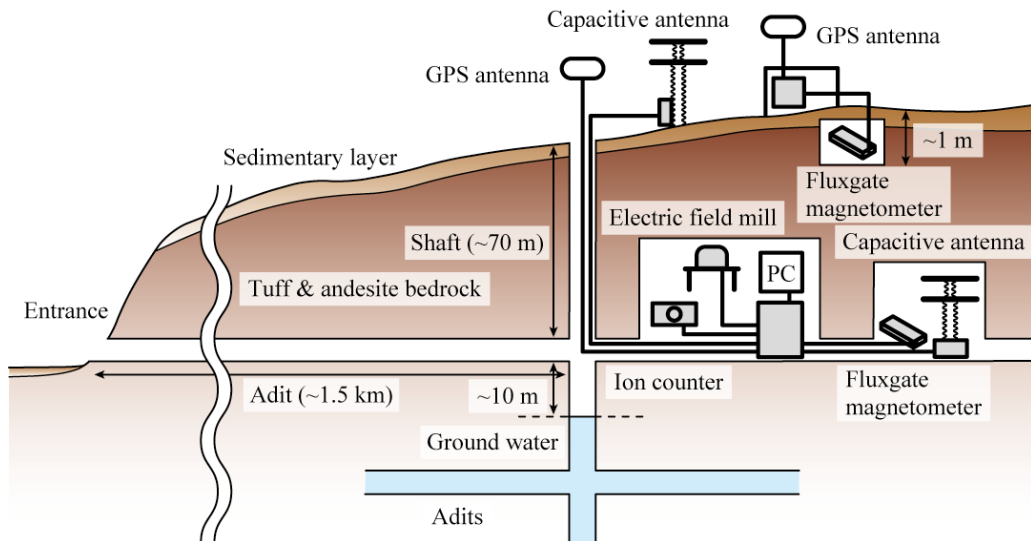


図2 細倉電磁界観測室状況図

Fig.2 Hosokura observation room and its circumstances

2.2 観測センサー

観測は以下の各要素について行なっている。

(1) 地中空間電界

地中空間電界を観測するため、テラテクニカ製空中電気観測装置 EF-308T を使用している。これは、フィールドミル電界計であり、床面から 0.4m の高さに設置されており、電荷を逃がすための接地は坑道水にとっている。なお、床面に正電荷がある時、電界計の出力が正となる。観測は平成 18 年 10 月から開始している。

(2) 加速度センサー

加速度を計測するため、観測室の床面に上下方向の加速度変動信号を計測する加速度センサーを設置している。この加速度センサーは、TEAC 社製の圧電型 710 であり、その周波数特性は 0.1 から 10kHz まで一様である。観測は平成 15 年 10 月から開始している。

(3) 負イオン濃度

負イオン濃度を観測するため、キョウリツエレクトロニクス製イオンカウンター KEC-900 を使用している。これは、ファンで周辺の空気を吸引し、2 枚のプレート間の微小電流を計測し、イオン濃度に換算する。大気中には種々のイオンが存在するため、各イオンの濃度を全体として平均したような値しか求められない。観測は平成 16 年 8 月から開始している。

(4) 温度・湿度

観測室内の温度と湿度を記録するため、バイサラ製湿度温度プローブ HMP45A を使用している。この性能は、湿度精度 2% (20) および温度精度 ± 0.2 である。観測は平成 17 年 1 月から開始している。

2.3 記録システム

上記の各観測要素について、サンプリング時間 0.5 秒で約 2 ヶ月データを記録できる。観測室の入り口付近にある立坑を通してケーブルにより地表面の GPS アンテナからの信号により時刻較正を行っており、時刻精度 0.01 秒を確保している。図 4 に観測システム図を示す。

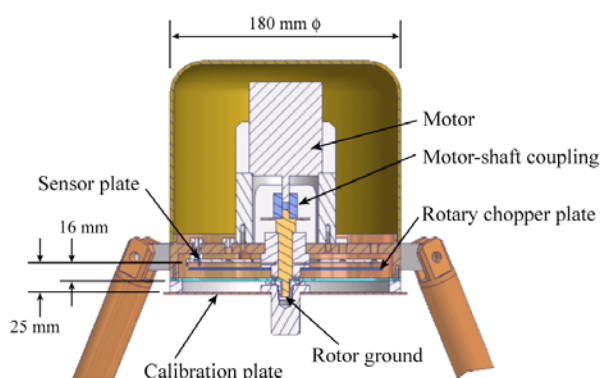


図3 フィールドミル電界計
Fig.3 Electric field mill

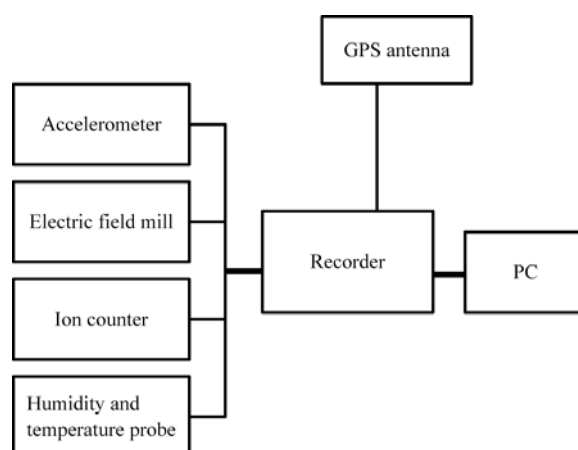


図4 観測システム
Fig4. Observation system

3. 観測波形

3.1 平成19年新潟県中越沖地震

平成19年7月16日、日本時間10時13分ころ、新潟県上中越沖の深さ約17kmを震源とするマグニチュード6.8の地震が発生し、新潟県の長岡市、柏崎市、刈羽村と長野県の飯綱町で震度6強を、新潟県の上越市、小千谷市と出雲崎町で震度6弱を観測したほか、北陸地方を中心に東北地方から近畿・中国地方にかけて震度5強～1を観測した。総務省消防庁によると、この地震による被害は、死者10名、負傷者1,842名、住宅全壊953棟、住宅半壊726棟などであった。図1に細倉観測地点と同時に、この地震の震央の位置を示すが、観測地点との距離は約240kmである。

図5に中越沖地震発生時に細倉観測室で観測された加速度、負イオン濃度、温度、湿度及び電界を示す。また、同図には震央から11km離れた新潟県出雲崎町米田での加速度上下成分信号も並べて最上段に示している。同図より発震時刻の約7秒後、P波到達時刻の30秒前に静電界レベルが急激に減少し始め、約8分かけて元のレベルに回復した。その変化量は約0.5V/mに及ぶ。一方、イオン濃度や温度・湿度に顕著な変化は見られず、落雷も確認されていない。

気象庁が公開しているホームページによると、この地震の際には幾つかのアスペリティが断続的に滑ったと考えられている。検出されたシグナルは、それらアスペリティのどれかが滑った際に、または最も激しく滑っている際に発生したのではないかと考えられる。この場合は、電界は変化しているが、イオン濃度、気温、湿度のすべてに全く変化が生じておらず、また、坑内巡視員が観測室を巡回した記録も無い。したがって、ドアを開けるというような外部からの擾乱による影響は考えられず、地中空間内の電界のみが変化したと考えられる。

次に、地中空間電界波形と地震波波形などを比較してみた結果、地震発生時に観測された地中空間電界波形は以下の2つの大きな特徴を持つことが分かる。

(1) 電界信号発生時刻の地震発生時刻からの遅れ

図5の震央から11km離れた新潟県出雲崎町米田での加速度上下成分信号との比較より明らかなように、発震時刻から7秒遅れて地中空間電界が立ち下がっている。すなわち、地中空間電界は地震発生から数秒の時間遅れがあって発生している。しかし、同図の細倉観測室における加速度波形と比較が示すように、観測地点に地震波が到達する時刻(発震時刻より約40秒後)よりかなり前に電界の変動が始まっている。

(2) 数分の時定数での減衰

図6に、気象庁のホームページに載っている近地地震波形を用いた震源過程解析結果による震源時間関数(名古屋大学)、出雲崎町の計測震度(5秒間で算出、気象庁)および我々が観測した電界信号を示す。この震源時間関数を採用すると、断層運動の継続時間は約30秒となる。震源域での断層運動エネルギーが、震源時間関数に対応する時間のみ発生しているとすると、震源時間関数が0になっても(発震時刻から約30秒後)、地中空間電界が観測されており、しかも、数分の時定数で減衰していることが分かる。

なお、地中空間電界が発生し始める時刻は発震時刻から7秒ほど過ぎているが、この時刻に出雲崎町の観測地点で計測震度が最大となっている。出雲崎町の観測地点は震央から11kmしか離れておらず、地震波が伝わるのは2秒以下と考えられ、ほぼ震源域での揺れの強度を示していると考えられる。すなわち、地

震が一番強くゆれ始めた時、なんらかの機構により急激に起電力が大きくなり、それに対応した地中電界が発生すると考えることが可能であろう。

5. 考察

5.1 地中空間電界発生時刻の地震発生時刻からの時間遅れ

この遅れ時間を説明するモデルとして以下のように考えることが可能であろう。すなわち、地中起電力は地震断層運動エネルギーに単に比例して増加するのではなく、起電力は運動エネルギーの例えばべき乗にしたがって増加する非線形な関係と考えられる。このような場合、図 6(a)に示すように、地中起電力は地震発生直後からある時間までは非常に小さいが、震源断層運動エネルギーがあるレベルを超えると急激に増加するため、結果として地中電界の発生に時間的遅れが生じているように見える。一方、図 6(b)に示すように、地震の規模が小さい場合、断層運動エネルギーが小さく、あるレベルを超えない場合は、地中電界はほとんど発生しないことになる。

5.2 数分の時定数での減衰

観測室内の電界は時定数を持ち減衰しているが、室内のイオン濃度などには全く変動が見られない。このため、室内の電界変動は室外の地中電界の変動によるものと考えられる。すなわち、断層運動が停止(今回の場合は継続時間が約 30 秒)しても、地中電界は消失することなく、時定数が数分のゆっくりした減衰をすることになる。この原因としては、地中誘導分極効果の可能性が高いと考えられる。誘導分極は、震源から観測地点までの地中領域全体にわたって電界が発生し電流が流れた時、この地中電流により、大地を構成する岩石や鉱物の電気化学的性質に起因する分極現象が起こり、その分極が時間的に減衰する現象である。これにより、観測室の岩壁に誘導分極による分極電荷が現われ、地中空間電界が発生するが、その後、地中電界と同時に減衰する。

6. まとめ

鉱山内部に地中電磁界観測室を設置し、地中空間電界の観測を行なった。約1年間の観測を行なったが、この期間中に発生した新潟県中越沖地震の発生に伴い地中空間電界の変動が観測された。

この地中空間電界変動信号は、地震発生時刻から約 7 秒遅れて観測されたが、地震波到達時刻より30 秒以上早かった。

地中空間電界の大きさは、約 0.5V/mであった。

地震発生時における明確な地中電界変動の存在を確認することができたと考えられる。

発震時刻から数秒遅れて地中電界が発生することは、地震断層運動エネルギーがあるレベルを超えたとき地中電界が急激に増加し、顕著になることを示唆する。

断層運動が終了しても、地中空間電界は直ちに消滅するのではなく、数分の時定数をもって減衰している。その理由として、地中誘導分極効果が考えられる。地震発生時の地中電界発生モデルを検討したが、現時点では決定できていない。

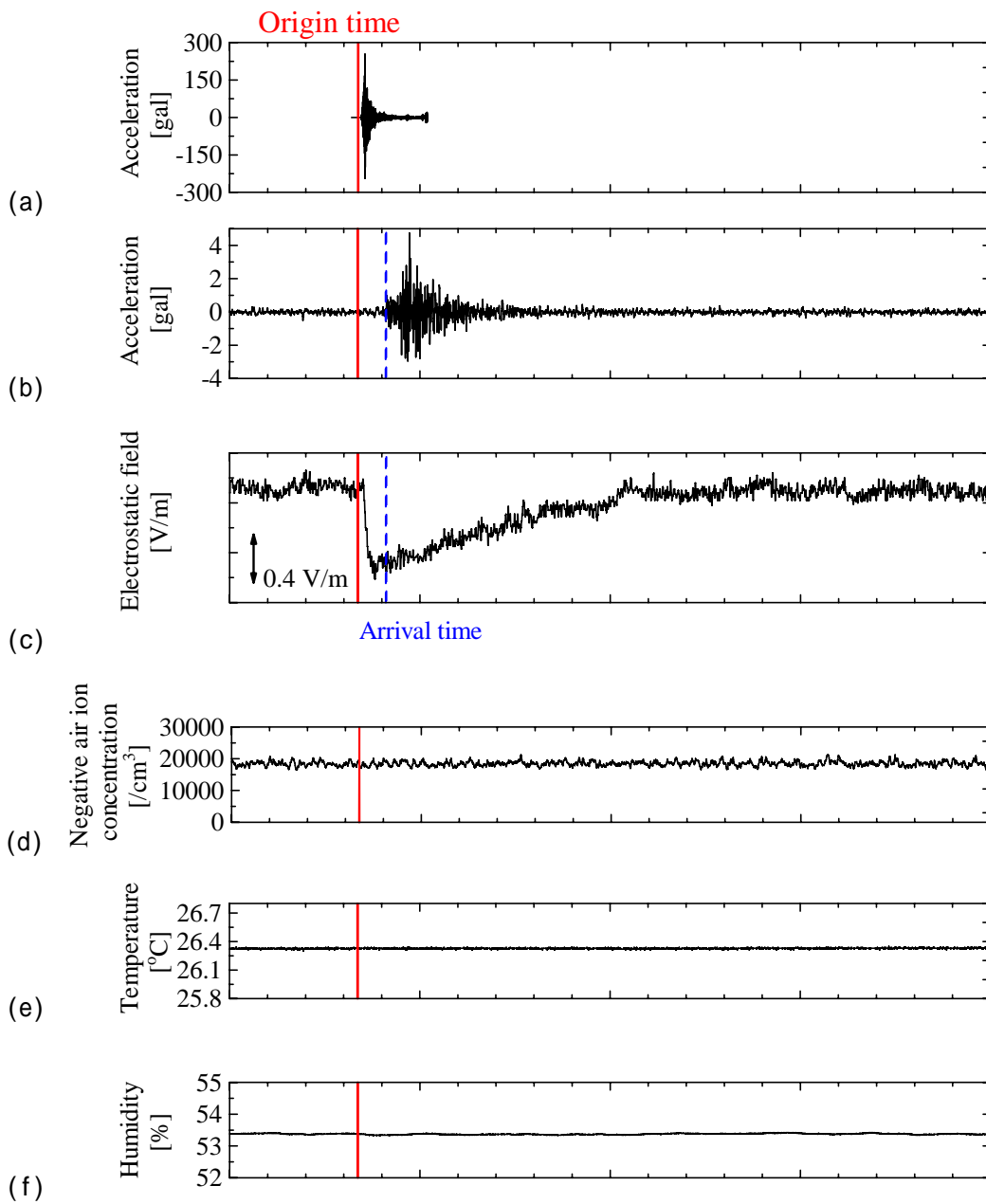


図 5 地震発生時の(a)新潟県出雲崎町米田での加速度上下成分信号(気象庁) (b)加速度, (c)電界, (d)負イオン濃度, (e)温度, (f)湿度

Fig.5 The case in occurrence of the earthquake, (a)Up-down acceleration in Izumozakicho (from JMA) , (b)Up-down acceleration in Hosokura, (c) electric field, solid line shows the origin time, (d) negative ion concentration (e)room temperature (f)humidity.

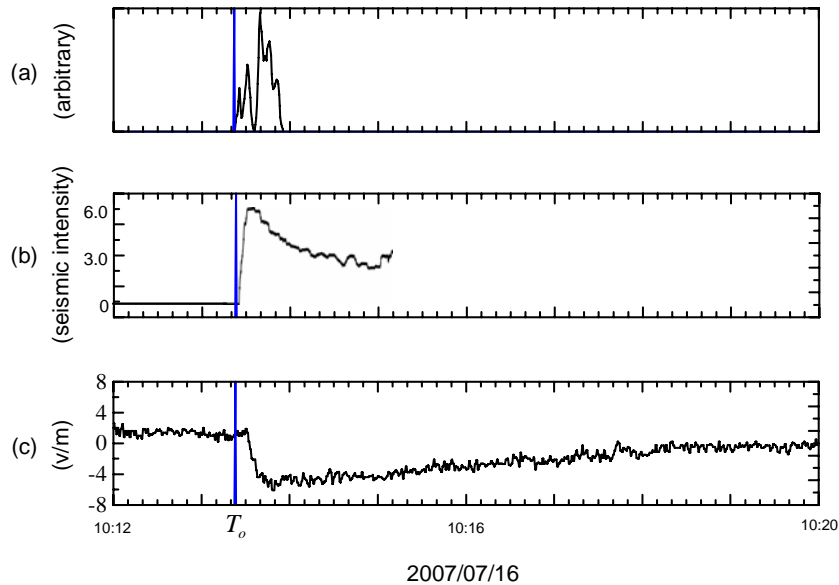


図6 震源時間関数と電界波形 (a)震源時間関数(名古屋大学), (b)出雲崎町における計測震度の時間変化(気象庁), (c)電界信号, T_0 は発震時刻

Fig.6 Focus energy and electrical field (a) moment-rate function (from Nagoya University) (b) Seismic intensity in Izumozakicho (from JMA) (c) Electric field in Hosokura, T_0 is the origin time.

文 献

- (1) M.Hayakawa, Y.Fujinawa, "Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction", Terra Scientific Publishing: Tokyo;1994
- (2) M.Hayakawa, " Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes ", Terra Scientific Publishing: Tokyo;1999
- (3) N.Takeuchi, N.Chubachi, K.Narita: "Observation of Earthquake Wave by Vertical Potential Difference Method" Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol.101 pp.157-161,1997
- (4) K. Okubo, M. Takayama and N. Takeuchi, "Electrostatic Field Variation in the Atmosphere Induced by Earth Potential Difference Variation during Seismic Wave Propagation," IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 49, No. 1 , pp.163-169, Feb. 2007 ,
- (5) G.Kondo, " The Variation of the Atmospheric Electric Field at the time of Earthquake " MEMORIES OF THE KAKIOKA MAGNETIC OBSERVATORY, Vol.13, No.1, pp.11-24, 1968
- (6) K. Okubo, S. Sato, T. Ishii, N. Takeuchi, "Observation of Atmospheric Electricity Variation Signals during Underground Seismic Wave Propagation , " IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering , vol.1, issue 2, pp.182-187, August 2006 ,