

**観測と数値計算による地震ダイナモ効果の考察**  
長岡信太郎・小川康雄・本蔵義守（東京工業大学）

**Observation and numerical simulation of seismic dynamo effect**  
Shintaro Nagaoka , Yasuo Ogawa and Yoshimori Honkura (TITECH)

Many observations have been reported on the electromagnetic field variations associated with earthquakes (Johnston, 1997; Uyeshima, 2007). Since the detection of pre-seismic signals can be used for the earthquake predictions, many studies on this field have been done. The seismic dynamo effect is one of the possible physical mechanisms to explain the electric and magnetic field variations associated with earthquakes (Honkura et al., 2000). In this paper, we try to understand the electromagnetic field variations associated with the earthquakes in terms of the seismic dynamo effect. The electromagnetic field variations from the origin time to the arrival of the seismic wave on Earth's surface are intensively studied from a numerical calculation and electromagnetic field observations using aftershocks of the 2007 Noto-Hanto Earthquake. The seismic dynamo effect has been studied only qualitatively so far and this paper is the first trial of the numerical evaluation of the seismic dynamo effect.

## 1. はじめに

地震波と連動した電場変動が報告されている。(Honkura et al., 2000; Mogi et al., 2000; Nagao et al., 2000; Matsushima et al., 2002; Honkura et al., 2002; Ujihara et al., 2003) また、磁場変動についても同様である。(Iyemori et al., 1996; Honkura et al 2000, 2002; Matsushima et al., 2002)

地震と連動した電磁場変動を説明するメカニズムとしていくつかの仮説が提唱されている。界面動電効果 (Mizutani et al., 1976; Ishido and Mizutani, 1981; Gershenson et al., 1993; Haartsen and Pride, 1997), 圧電効果 (Gershenson et al., 1993), 圧磁気(Stacey and Johnston, 1972; Sasai, 1980)などである。

これらの仮説の中に、Honkura et al. (2002)によって提唱された地震ダイナモ効果がある。この理論は電磁誘導に基づいている。地震により大地が速度を持ったとき、速度と地球磁場との外積でローレンツ力により大地中に起電力が発生するという理論である。大地は導体であるため、その起電力により電流が流れることになる。これらの電流は電磁波を発生させるため、観測点では地震波の到達に先行して電磁場変動が観測されるはずである。先行シグナルがあるとすればそれらは観測点に最も近い地震波の初動によって励起されたものであると考えられる。地震波初動は純粋な縦波であることが期待されることからモデル計算がし易いという利点がある。

本研究では地震波到達前の電場変動に注目し、観測値と計算結果を比較することにより地震ダイナモ効果を考察することを目的とした。

## 2. 観測

2007年3月25日に能登半島地震(M6.9)が起きた。私たちは3月31日から4月25日まで余震地域において地震動速度と電磁場変動(audio-MT)の同時観測を実施した。サイトマップを Fig.1 に、観測方法を Fig.2 に示す。地震動速度3成分は24-bit データロガー（白山工業 LS7000-XT）を用い、200Hz で記録した。データロガーには六つの入力端子があるため水平電場二成分もこれに記録した。地震データと電場

データを同じロガーで記録しているため、異なるロガーを用いることによる GPS タイムスタンプのズレがなく、地震波到達と電磁場変動の始まりを比較することができる。4月7日から25日までは地震動速度三成分と水平電場二成分のみを記録した。私たちは当初、余震の様々な震央によりP波初動の向きがそれに対応した水平成分を持つと期待していた。様々な水平成分のP波初動が観測されれば、その向きとその地震波によって励起された電場変動、また地震ダイナモ効果から期待される起電力の向きとを比較することができる。しかし、実際に観測された地震波初動は全て鉛直成分であった。また、先行シグナルも観測されなかった。観測した中で初動の最も大きい余震(M3.9)の観測データ(地震動速度と電磁場変動)を Fig.3-(a)と(b)に示す。

### 3. 計算

私たちは地震ダイナモ効果から期待される先行電場変動をグリーン関数法を用いて計算した。用いたグリーン関数は以下の半無限体媒質、周波数領域のものある。

$$\mathbf{G}_1^e(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \left( \mathbf{I} - \frac{1}{k^2} \nabla \nabla' \right) (G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'_i)) - 2zzG_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'_i)$$

ここで、

$$G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{\exp(ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}$$

$$G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'_i) = \frac{\exp(ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_i|)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_i|}$$

$$|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}$$

$$|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_i| = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z + z')^2}$$

$$k = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma}$$

である。このグリーン関数はソース電流と鏡像電流、それぞれの自由空間のグリーン関数が足し合わされることによって大地と大気境界条件を満たしている。 $G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ と $G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'_i)$ はそれぞれソース電流と鏡像電流のスカラーグリーン関数である。また、 $k$ は波数、 $\mathbf{r}$ は観測点の位置ベクトル、 $\mathbf{r}'$ は電流ソースの位置ベクトル、そして $\mathbf{r}'_i$ は鏡像電流の位置ベクトルである。

電磁波は光の速度を持ち、地震波の伝播速度は $10^3$ のオーダーであることから電磁波に対して地震波は止まっていると見なして計算している。また、計算で用いたパラメーター(Table.1)は余震観測で観測された地震データを用い、震源から観測点のある地表まで一定の値であると仮定した。

地震波のモデル化にあたってはP波S波ともに平面波であるとし、水平方向に半無限的に広がりを持ち、地表に対して垂直に伝播するとした。地震ダイナモ効果によると鉛直成分の速度は地球磁場南北成

分との外積で東西成分の起電力を励起することになる。よって、東西方向の電場が生成される。このように観測点に最も近い P 波初動は  $E_y$  を励起することから、S 波の速度は同様に  $E_y$  を励起する南北成分であるとした。

大地から大気に向けて電流は流ることができないため、観測点のある地表では電場鉛直成分は現れない。また、ソース領域が水平方向に半無限の広がりを持つことから電場南北成分も現れない。磁場に関しては、大地の比抵抗構造が均質であると仮定しているため現れない。よって、 $E_y$  のみを計算した。

三つの場合に分けて計算をした(Fig.4)。一つ目の Case 1 は P 波パルスが震源の深さ 10km から鉛直上向きに伝播するモデルである。二つ目の Case 2 は後続も含めた P 波を想定したモデルであり、あとは Case 1 と同様である。最後の Case 3 は Case 2 に加え、S 波による寄与も含めたモデルである。観測された地震データによると P 波 S 波とも波長は 400m であるため、地震波は 200m の矩形波とした。また、水平方向の計算領域は 20km×20km で平面波を近似した。この領域は 20km 以上に広げてもシグナルの値はほとんど変わらない。計算に用いたパラメーターを Table.1 に、計算結果を Fig.5 と Fig.6 に示す。Fig.5 は大地の電気伝導度が 10ohm・m の値を持ち、均質であると仮定した結果であり、Fig.6 は 100ohm・m であるとした結果である。

#### 4. 比較と考察

Case 1 と Case 2 の比較から先行シグナルは P 波初動により励起されたものであり、そのペアである逆向きの起電力によって初動によるシグナルが弱められていることが分かる。P 波初動が深い位置にあるとき、大地の電気伝導度が低い場合(Fig.6)の方が高い場合 ( Fig.5 ) よりもシグナルが大きい。これは電気伝導度が低い方が表皮深度が長く、深くからのシグナルがあまり減衰することなく伝わることを示している。対照的に P 波初動が浅い位置にあるときは、電気伝導度が高い場合 ( Fig.5 ) の方が低い場合 ( Fig.6 ) よりもシグナルが大きい。これは電気伝導度が多きい方が生成される電流ソースが大きいことを示している。

Fig.3-(b)に示した通り、余震観測ではノイズレベルを超える先行シグナルは観測されなかった。観測された能登半島でのノイズレベルは $\sim 0.1\mu\text{V/m}$  のオーダーである。また、計算から期待される先行シグナル  $E_y$  のオーダーは  $0.001\mu\text{V/m}$  のオーダーである。よって、地震ダイナモ効果によると先行シグナルはノイズに隠れてしまって検出できないということになる。つまり、先行シグナルが観測されなかったことは地震ダイナモ効果に矛盾しないと言える。

#### 5. まとめ

計算結果からソースの周波数が低く、大地の比抵抗が高いときに先行シグナルが大きくなることが分かる。低周波数、高比抵抗では表皮深度が長くなるため、この結果は当然である。一般的に規模の大きい地震は小さい地震に比べて、卓越周波数が低く、速度振幅が大きいため、ノイズレベルを超える先行シグナルが観測される可能性が高いと言える。また、人口ノイズや MT シグナルが小さくなる深さで観測を行うことにより、規模の小さい地震でも先行シグナルを観測できる可能性がある。

## 引用文献

- Gershenzon, N. I., M. B. Gokhberg, and S. L. Yunga, On the electromagnetic field of an earthquake focus, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **77**, 13–19, 1993.
- Haartsen, M. W. and S. R. Pride, Electrostatic waves from point sources in layered media, *J. Geophys. Res.*, **102**, 24745–24769, 1997.
- Honkura Y., A. M. Isikara, N. Ohshiman, A. Ito, B. Ucer, S. Baris, M. K. Tuncer, M. Matsushima, R. Pektas, C. Cerik, S. B. Tank, F. Takahashi, M. Nakanishi, R. Yoshimura, Y. Ikeda, and T. Komut. Preliminary results of multidisciplinary observations before, during and after the Kocaeli (Izmit) earthquake in the western part of the North Anatolian Fault Zone, *Earth Planets Space*, **52**, 293-298, 2000.
- Honkura Y., M. Matsushima, N. Ohshiman, M. K. Tuncer, S. Baris, A. Ito, and A. M. Isikara. Small electric and magnetic signals observed before the arrival of seismic wave, *Earth Planets Space*, **54**, e9-e12, 2002.
- Honkura, Y., H. Satoh, and N. Ujihara, Seismic dynamo effects associated with the M7.0 earthquake of 26 May 2003 off Miyagi Prefecture and the M6.2 earthquake in northern Miyagi Prefecture, NE Japan, *Earth Planets Space*, **56**, 109-114, 2004.
- Ishido, T. and H. Mizutani, Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its application to geophysics, *J. Geophys. Res.*, **86**, 1763–1775, 1981.
- Iyemori, T., T. Kamei, Y. Tanaka, M. Takeda, T. Hashimoto, T. Araki, T. Mizutani, H., T. Ishido, T. Yokokura, and S. Ohnishi, Electrokinetic phenomena associated with earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **3**, 365–368, 1976.
- Johnston M. J. S. Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity. *Survey in Geophysics*, **18**, 441-475, 1997.
- Matsushima, M, Y.honkura, N, Ohshiman, S. Baris, M, K. Tuncer, S. B. Tank, C. Cerik, F. Takahashi, M. Nakanishi, R. Yoshimura, R. Pektas, T. Komut, E. Tolak, A. Ito, Y. Iio, and A. M. Ishikara. Seimoelectromagnetic effect associated with the Izmit earthquake and its aftershocks, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 350-360, 2002.
- Mogi, T., Y. Tanaka, D. S. Widarto, E. M. Arsadi, N. T. Puspito, T. Nagao, W. Kanda, and S. Uyeda, Geoelectric potential difference monitoring in southern Sumatra, Indonesia —Co-seismic change—, *Earth Planets Space*, **52**, 245–252, 2000.
- Nagao, T., Y. Orihara, T. Yamaguchi, I. Takahashi, K. Hattori, Y. Noda, K. Sayanagi, and S. Uyeda, Co-seismic geoelectric potential changes observed in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1535–1538, 2000.
- Stacey, F. D. and M. J. S. Johnston, Theory of the piezo-magnetic effect in titanomagnetite-bearing rocks, *Pure Appl. Geophys.*, **97**, 146–155, 1972.
- Uyeshima, M., EM monitoring of Crustal Processes Including the Use of the Network-MT Observations, *Geophysics*, **28**, 199-237, 2007.
- Ujihara, N., Y. Honkura, and Y. Ogawa, Electric and magnetic field variations arising from the seismic dynamo effect for aftershocks of the M7.0 earthquake of 26 May 2003 off Miyagi Prefecture, NE Japan, *Earth Planets Space*, **56**, 115-124, 2004.

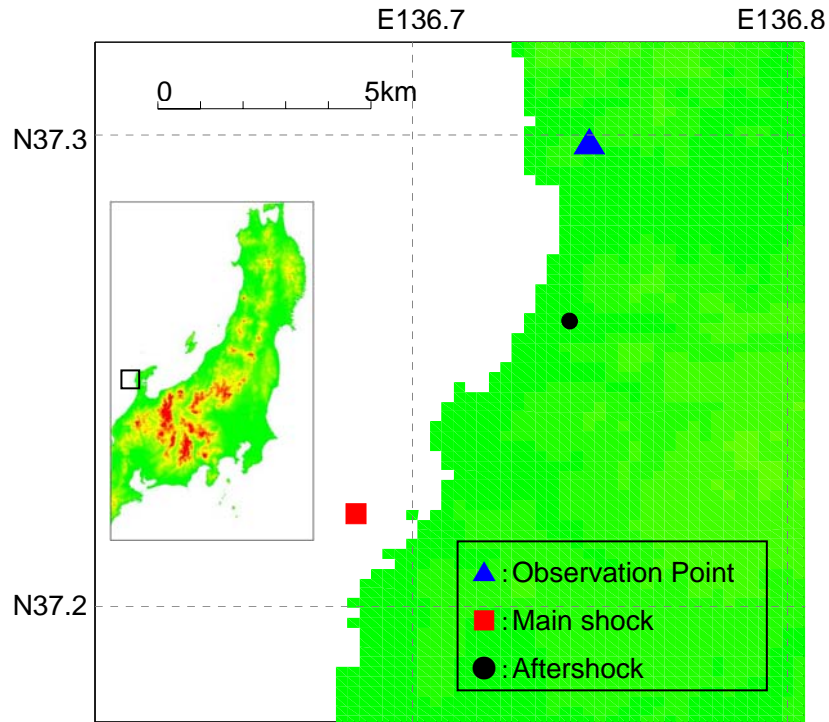


Fig.1: Observation Point, Main shock and aftershock (M3.9) of the 2007 Noto-Hanto Earthquake.

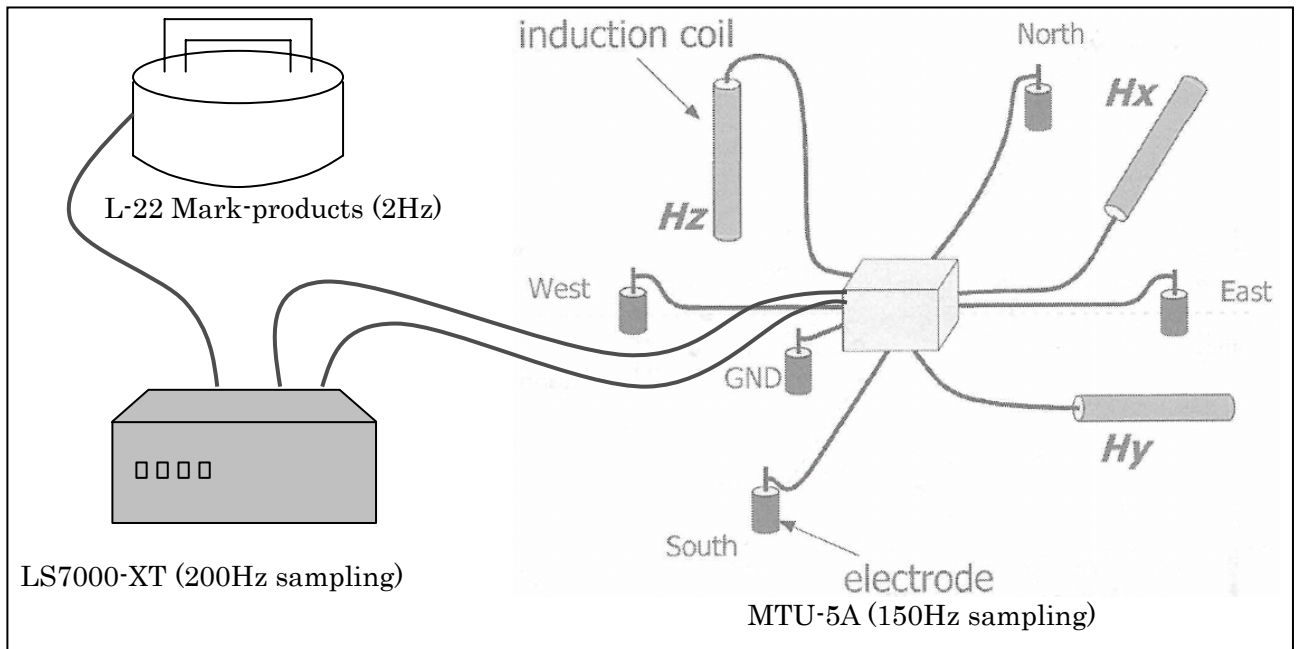


Fig.2: Sketch of the observation arrangement. The electromagnetic signals (three magnetic and two horizontal electric components) and the three-component seismic signals were simultaneously recorded by 150 Hz and 200 Hz, respectively.

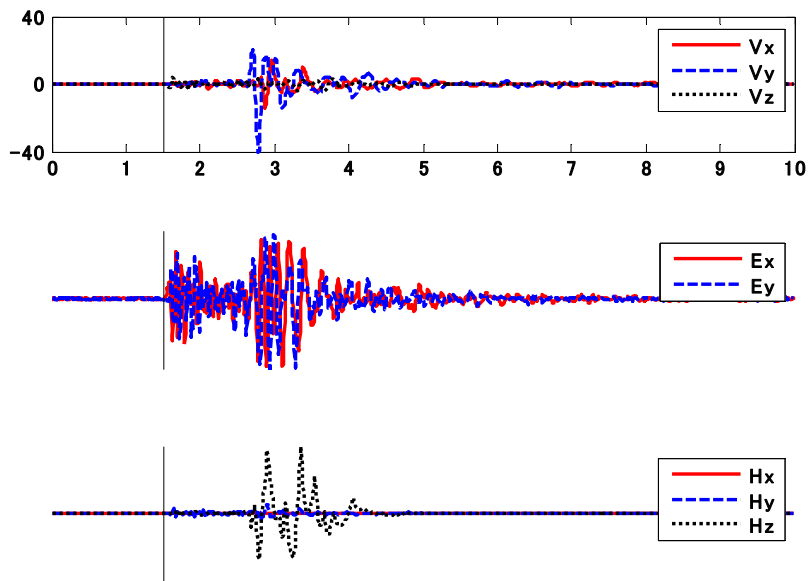


Fig.3-(a): Velocity, electric and magnetic field variations for one of the aftershocks of the 2007 Noto-Hanto Earthquake of March 25<sup>th</sup>, 2007. The units are mm/s,  $\mu\text{V/m}$  and nT, respectively. This is the aftershock (M3.9) which has the largest first motion and occurred at 08:18 44.8 on April 4<sup>th</sup>, 2007. In the figure  $t=0$  means the origin time. Here we take Cartesian coordinate with x northward (magnetic) positive, y eastward positive and z downward positive, following the convention in geomagnetism. The vertical line means seismic wave arrival.

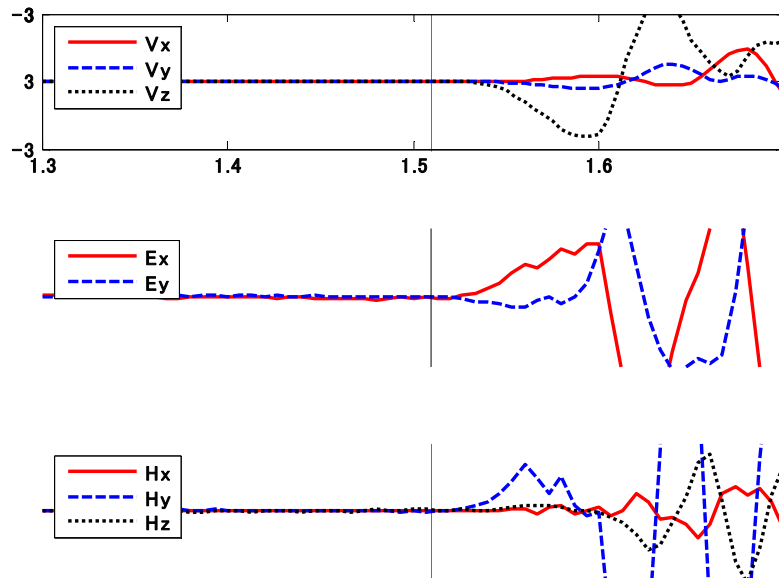


Fig.3-(b): The zoomed image at 1.3-1.7 second of Fig.3-(a).

$V_p$	$=4$ (km/sec)	:P-wave propagating velocity
$V_s$	$=2$ (km/sec)	:S-wave propagating velocity
$V_z$	$=1$ (mm/sec)	:P-wave vibration velocity
$V_x$	$=20$ (mm/sec)	:S-wave vibration velocity
$f_p$	$=10$ (Hz)	:Frequency of P-wave
$f_s$	$=5$ (Hz)	:Frequency of S-wave
$p$	$=400$ (m)	:Wave length of P-wave
$s$	$=400$ (m)	:Wave length of S-wave
	$=0.01$ (S/m)	:Conductance of the Earth
$B_x$	$=3.5 \times 10^{-5}$ (T)	:Earth's magnetic field of x-component
$B_z$	$=3.5 \times 10^{-5}$ (T)	:Earth's magnetic field of z-component

Table 1: Parameters used in calculation

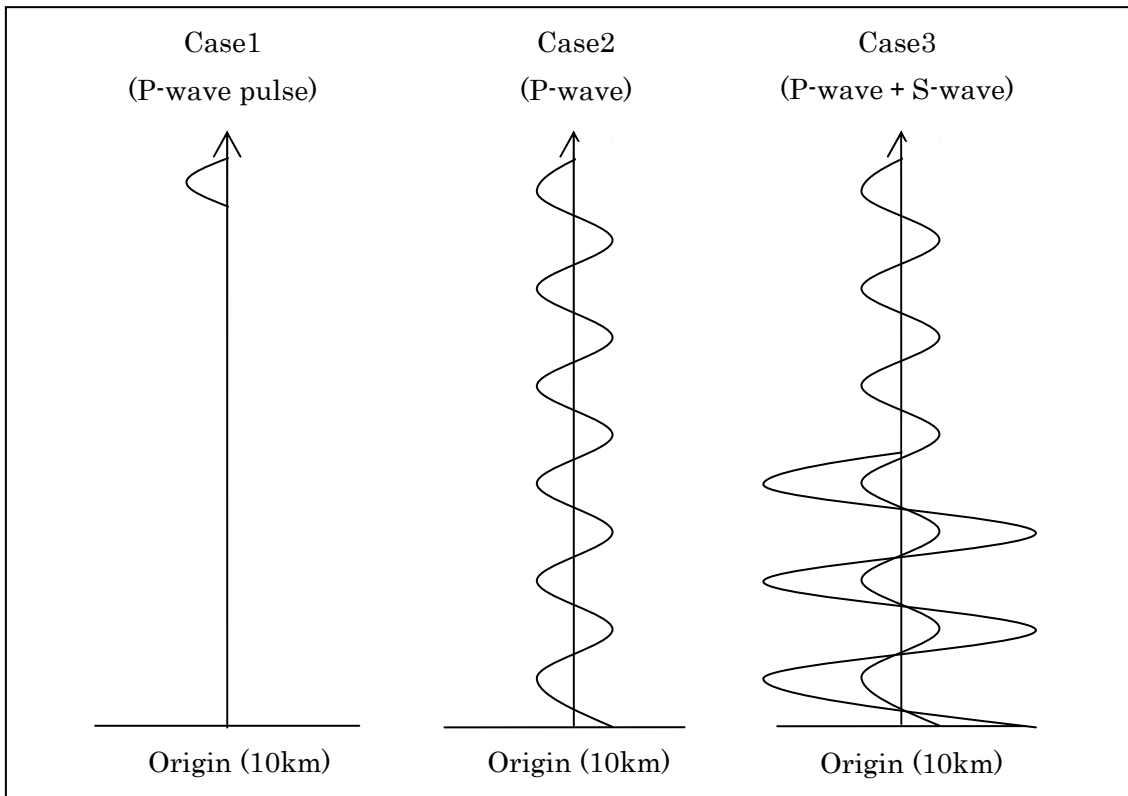


Fig.4: Three cases for the seismic waves, which induces the electromotive forces.

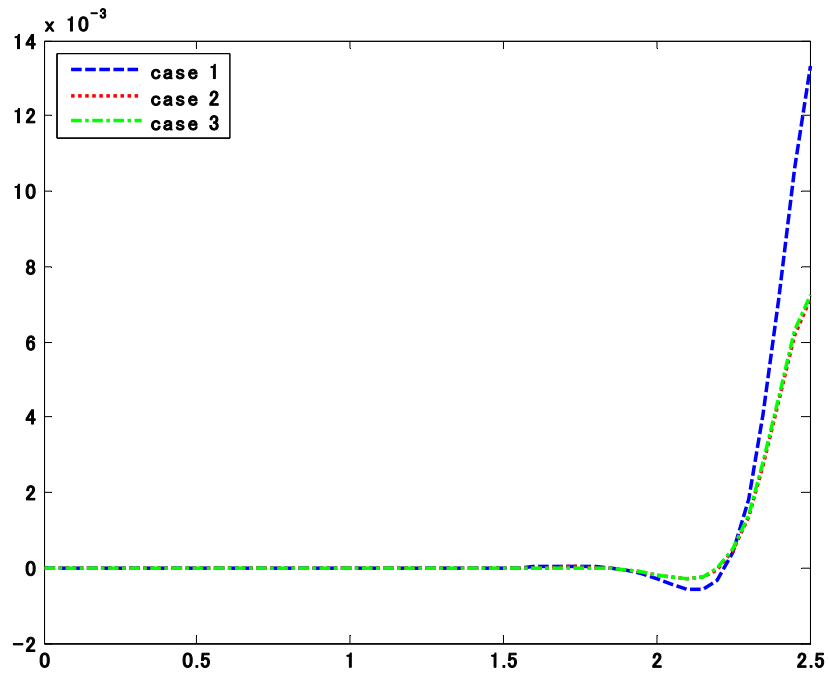


Fig.5: Calculated results of the electric field variation of y-component with Earth's resistivity of  $10 \Omega \cdot m$ . Result of Case2 overlaps with Case 3. In the figure  $t=0$  means the origin time and  $t=2.5$  means the seismic wave arrival.

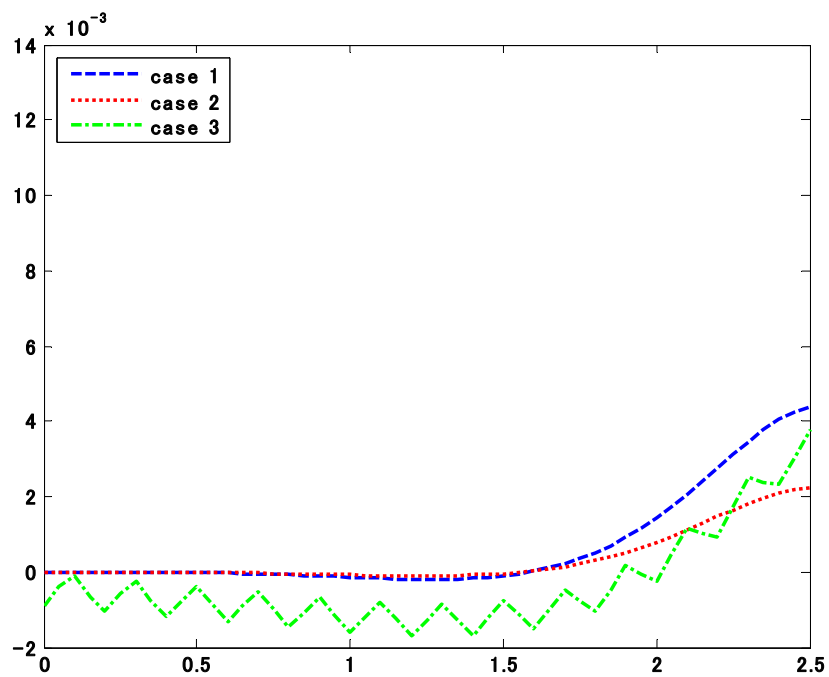


Fig.6: Calculated results of the electric field variation of y-component with Earth's resistivity of  $100 \Omega \cdot m$ . In the figure  $t=0$  means the origin time and  $t=2.5$  means the seismic wave arrival.