

地磁気地電流法による女満別の 地下電気伝導度について

大和田真一

概 要

女満別付近の地下電気伝導度の推定のはじめの試みとして、地磁気観測所女満出張所の地磁気地電流の変化観測資料を用いて、Niblett and sayn-Wittgenstein による地磁気地電流法を適用して地下の電気伝導度を推定した。地電流に異方性があるので今回は E_z/H_y の振幅比のみを使用した。

その結果は 8~170 km を 3 層に分けて考えることが出来る。第一層 8~20 km, 第二層は 20~90 km, 第三層は 90~170 km である。

第一層の電気伝導度は $3 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-13}$ e.m.u., 第二層は $1 \times 10^{-14} \sim 2 \times 10^{-15}$ e.m.u., 第三層は $3 \times 10^{-14} \sim 2 \times 10^{-14}$ e.m.u. である。

§1 は し が き

現在地球内部の電気伝導度の分布を研究する手段として magnetic variations method と magnetotelluric method の二つの方法が、広く採用されている。後者については、基本は地表面の電場磁場の値から地下の電気伝導度を推測するもので Cagniard⁽¹⁾ により開発されて以来 Wait⁽²⁾, Price⁽³⁾ らにより改良がなされた。近年国際地球内部開発計画 (U.M.P.) などにより、地球内部の電気伝導度に関する研究が盛んに行なわれるようになった。外国では欧米⁽⁴⁾およびソ聯⁽⁵⁾により意欲的な研究が行なわれている。日本においても横山⁽⁶⁾が柿岡の地下電気伝導度の推測に Niblett and Sayn-Wittgenstein 法を適用して地下 385 km に不連続があることを示唆し、柳原⁽⁷⁾が関東地方東部の深層比抵抗の推測の際に人工電流による方法と magnetotelluric method によるものを比較し、相当よい一致をみており、大島⁽⁸⁾の鹿屋における Cagniard 法による地下電気伝導度に関する調査研究などがある。

著者は女満別出張所の地磁気変化度、地電流早回し観測および通常記録資料を用いて、地表面電場磁場の比を変化周期の関数として求め、これらを使用して Cagniard 法の一つの改良形である Niblett and Sayn-Wittgenstein 法⁽⁹⁾を適用して女満別における地下電気伝導度を推測した。

§2 算 出 法

ある幅の広い仮定のもとでは Maxwell の電磁方程式を応用することにより、地表面で測定した地球磁場と地電位差の測定値から深さの関数として電気伝導度を算出することが出来る。一様な伝導度の媒質内の電磁変化は

$$4\pi j = \text{rot } H \quad (1)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

で表わされる。

ただし

\mathbf{H} : 磁場ベクトル

\mathbf{E} : 電場ベクトル

\mathbf{j} : 電流密度

σ : 電気伝導度

である。

式はすべて e.m.u. で表わし、また透磁率は 1 であるとする。

磁場ベクトルの水平方向の傾斜は、鉛直方向の傾斜に比較して無視出来るとし、時間変化は周期的であるとする。

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t} = -\frac{2\pi i}{T} \quad (4)$$

座標の正の方向はおのおの北、東、下向きである。

$$j_z \ll (j_x^2 + j_y^2)^{1/2}, \quad H_z \ll (H_x^2 + H_y^2)^{1/2} \quad (5)$$

(4)と(5)が正しければ水平の傾斜は鉛直の傾斜に対して無視でき、 $\bar{\sigma}$ が Penetration depth Z に対する有効電気伝導度を表わすとすれば(1), (2), (3)から次の近似式を導くことが出来る。

$$-\frac{H_y}{Z} \approx 4\pi\bar{\sigma}E_x, \quad \frac{H_x}{Z} \approx 4\pi\bar{\sigma}E_y \quad (6)$$

$$-\frac{E_y}{Z} \approx \frac{2\pi i H_x}{T}, \quad \frac{E_x}{Z} \approx \frac{2\pi i H_y}{T} \quad (7)$$

$\partial/\partial Z$ を $1/Z$ に置換え、 E_x, E_y, H_x, H_y を周期 T の変化とする。(6)と(7)から

$$\bar{\sigma} \approx \frac{1}{2 \left| \frac{E}{H} \right|^2 T} \quad (8)$$

$$Z \approx \frac{1}{2\pi} \left| \frac{E}{H} \right| T \quad (9)$$

となる。(9)により定義した Penetration depth は通常の $1/e$ の代わりに $1/2$ の減衰係数を使用した。

もし電気伝導度が表面から最大の Penetration depth まで深さの有限の関数であると考えると、次のとおりである。

$$\sigma = f(z) \quad (10)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{Z} \int_0^z f(z) dz = \frac{1}{Z} g(Z) \quad (11)$$

(11)式は深さの有効電気伝導度を表わす。種々の深さにおける伝導度は次式から算出出来る。

$$\sigma = \frac{dg(Z)}{dZ} = Z \frac{\bar{\sigma}}{dZ} + \bar{\sigma} \tag{12}$$

§3 地電流および地球磁場の測定法

地電位差測定は基線長が東西 350m, 南北 400m, 電極はナショナル製品 M-4 炭素棒 2 本を 1 組として、深さ約 2.5 m にうづめたもので土質は火山灰でその下は粘土層である。接地抵抗は東西 270Ω, 南北 160Ω, 遅回しの感度は東西 1.94mv/km/mm, 南北 2.06mv/km/mm で、早回しは遅回しの回路に並列に接続し時定数制御器 (30kΩ, 200μF の CR カップリングフィルター) を直列に入れてある。早回し交流感度は東西成分 0.61 mv/km/mm, 南北成分 0.40mv/km/mm (周期20秒) で、記録計は横河電機製の検流計で、プロマイドに記録される。記録紙速度は早回し 6mm/min, 遅回しは 15mm/hour である。

地球磁場の測定は早回し (変化度) は有効面積, 南北成分 X: 1.49 × 10⁸cm², 東西成分 X: 1.49 × 10⁸cm², 鉛直成分 Z: 2.00 × 10⁸cm² の空心コイルを地中に埋設したもので、記録計の検流計は感度が dx/dt: 0.075γ/sec/mm, dy/dt: 0.069γ/sec/mm, dz/dt: 0.025γ/sec/mm である。遅回しは KM 型変化計で寸法値は H: 2.80γ/mm, D: 2.43γ/mm, Z: 1.90γ/mm, 記録計速度は早回し 12mm/min, 遅回し 20mm/hour である。

§4 女満別における深さにとまなう電気伝導度の変化

振巾比 E_x/H_y の値を1965年4月より8月の5ヶ月間、周期約20秒から19分 (1140秒) の

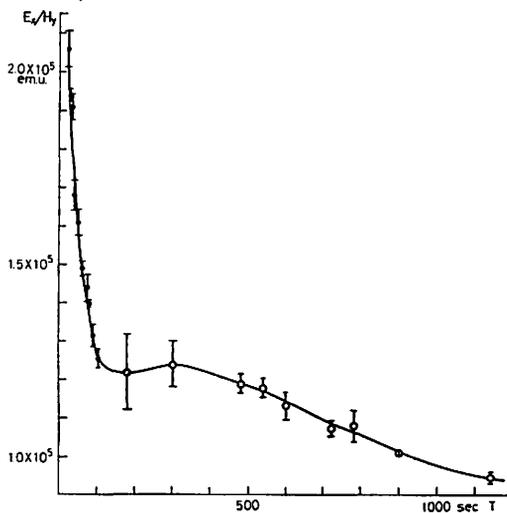


Fig. 1-1. Mean amplitude ratio E_x/H_y vs. T at Memambetsu. (Apr.-Aug. 1965)

● Papid run ○ Normal

The vertical bar indicates the probable error.

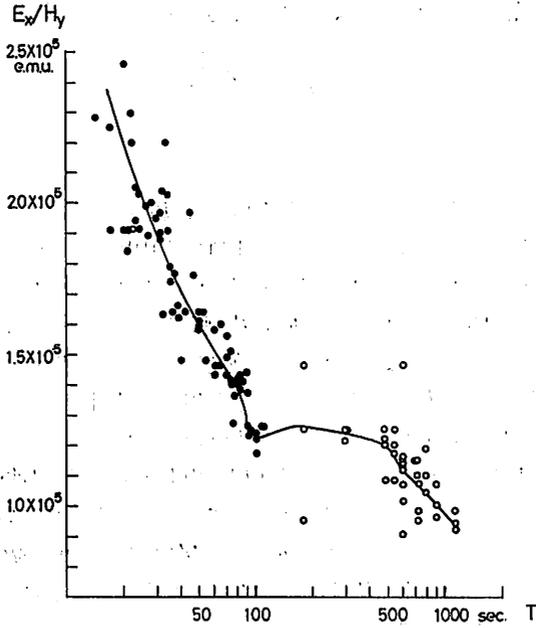


Fig. 1-2. Individual amplitude ratio E_x/H_y vs. T at Memambetsu. (Apr.-Aug. 1965)
 ● Rapid run ○ Normal

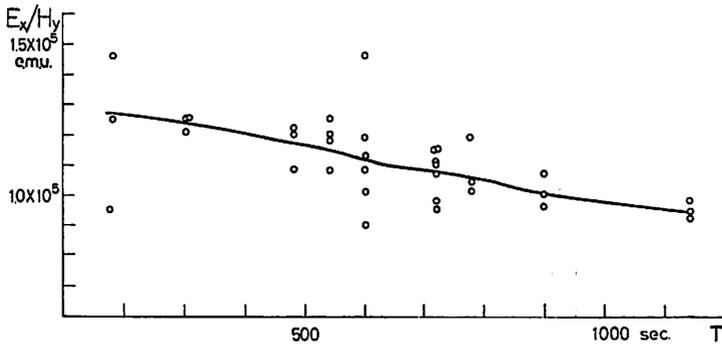


Fig. 1-3. Individual amplitude ratio E_x/H_y vs. T at Memambetsu for the period range from 100 sec to 1200 sec. (Apr.-Aug. 1965)
 ○ Normal

範囲について求めた。周期は100秒程度までは早回し記録より、それ以上の周期のものについては遅回し記録より、特別周期分析はしなかったが、地磁気と地電流の両方の変化の対応が確認出来、HとEの両方の変化が正弦波をしているものを選びだした。

E_x/H_y の値は周期15秒から35秒までは5秒毎、36から105秒までは秒毎、以下周期の長い

方は1分毎にその周期範囲について平均した。そして平均振幅比を平均周期について表わしたものを Fig. 1-1 に示した。グループ内の振幅比の値の確率誤差と元の値との相対値は周期3分では±10%でその他は約±5%以内である。

Fig. 1-2, および Fig. 1-3 は Fig. 1 の分散の度合を詳細に見せるために個々の観測値を示したものである。(E_x, E_y: 地電位変化の南北, 東西成分。H_x, H_y: 地磁気変化の南北, 東西成分を表わし, Tは現象の周期を表わす。)●は早回しを記録, ○遅回し記録によるものを示し, Fig. 2~Fig. 4 も同様な表示を使用した。

E_y/H_x についても調査したが E_x/H_y に比較して, T について変化の分散が大きく異方性あるいは不均一な媒質として考えねばならないので今後の問題として今回は E_x/H_y のみを図示することにした。

Fig. 2 には振幅比を 1/√T について示してある。図に示されるように E_x/H_y は三つの直線により適合出来ることがわかる。

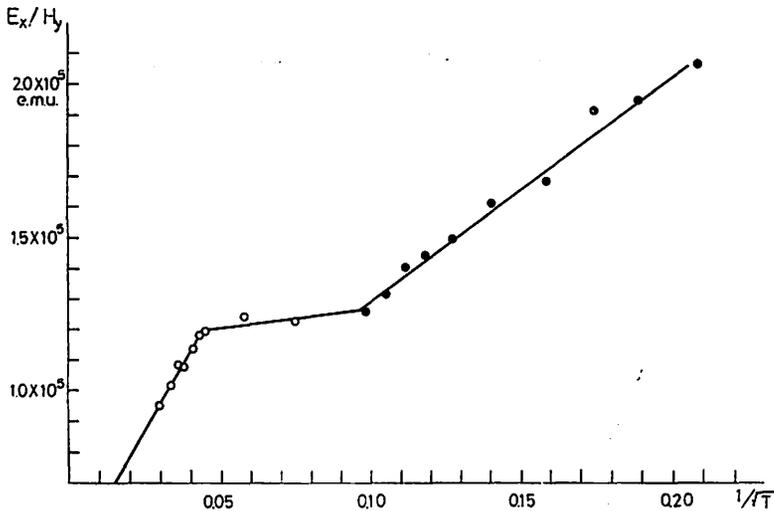


Fig. 2. Mean amplitude ratio vs. $T^{-1/2}$ at Memambetsu.

$$\begin{array}{ll}
 E_x/H_y = A_1 + B_1/\sqrt{T} & 1/\sqrt{T} \text{ 0.209} \sim \text{0.098 の範囲について} \\
 E_x/H_y = A_2 + B_2/\sqrt{T} & 1/\sqrt{T} \text{ 0.098} \sim \text{0.046} \quad \text{"} \\
 E_x/H_y = A_3 + B_3/\sqrt{T} & 1/\sqrt{T} \text{ 0.046} \sim \text{0.029} \quad \text{"}
 \end{array}$$

各直線の常数はおのおの最小二乗法で決定し, 次のように値をえた。

$$\begin{array}{ll}
 A_1; 0.620 \times 10^5 & B_1: 6.89 \times 10^5 \\
 A_2; 1.153 \times 10^5 & B_2: 1.05 \times 10^5 \\
 A_3; 0.494 \times 10^5 & B_3: 15.62 \times 10^5
 \end{array}$$

この計算した直線は Fig. 2 に実線で示した。次に振幅比を $E/H = A + B/\sqrt{T}$ の形で表わ

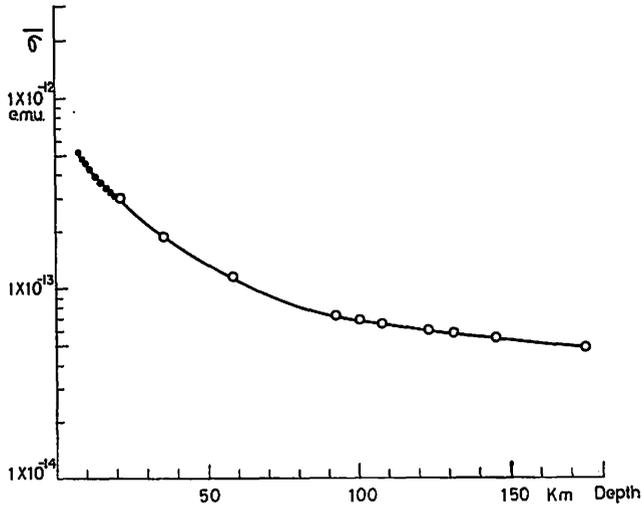


Fig. 3. Effective electrical conductivity vs. depth Z at Memambetsu.

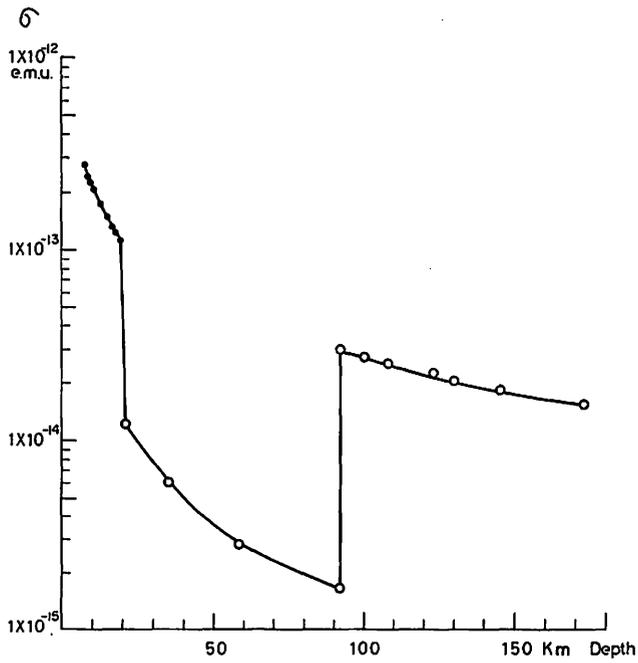


Fig. 4. Variation of estimated electrical conductivity with depth at Memambetsu.

すと(8)と(9)式は

$$\bar{\sigma} = \{2(A^2T + 2AB\sqrt{T} + B^2)\}^{-1} \quad (13)$$

$$Z = \frac{1}{2\pi}(AT + B\sqrt{T}) \quad (14)$$

となる。上記の計算値を採用して得た $\bar{\sigma}$ と Z との関係を Fig.3 に示した。また(13)と(14)より T を消去することにより

$$16\pi^2 A^2 Z^2 \bar{\sigma}^2 - (8\pi AZ + 2B^2)\bar{\sigma} + 1 = 0 \quad (15)$$

をうる。そして(12)と(15)より

$$\sigma = \frac{B^2 \bar{\sigma}}{B^2 + 4\pi AZ(1 - 4\pi AZ \bar{\sigma})} \quad (16)$$

をえ、これは深さの関数として伝導度を示している最終の曲線である。 $\bar{\sigma}$, Z および A_1, \dots, B_1, \dots , を使用して σ を算出し Fig. 4 に示した。

§5 考 察

地磁気地電流法による地下電気伝導度の推定は、その理論も非常にモデルを単純化して相当広大な範囲に地下構造が一様で電磁気現象も広範囲に一様でしかもフィールドベクトルの水平の傾斜は垂直の傾斜に比して無視出来る程小さいと仮定している。

赤道とオーロラのエレクトロ・ジェットより遠い磁気中緯度では外部地磁気変化は一般に広い範囲にわたって一様である。女満別は栲岡に比較して垂直磁場の比は小さいので、水平の傾斜は垂直の傾斜より小さいということは云えるが、一方水平電場は日本のように地質構造の複雑な所ではこれらの複雑な分布によって地電流に著しい局所性があることが知られている。今回の場合も E_x/H_y に比較して E_y/H_x は相当分散が大きく、これは異方性あるいは不均一な媒質として考慮が必要であろう。今回は地電流の卓越方向の成分を採用した E_x/E_y のみによるものである。

以上のような疑問点も存在するが、一応推定された結果は、Fig. 4 にあるように地表面の下数 km から 20km 付近までは $\sigma: 2 \times 10^{-13}$ (e.m.u.) で伝導性の良い地下構造で深さとともに悪くなり、20km 付近より急に $\sigma: 1 \times 10^{-14} \sim 2 \times 10^{-15}$ (e.m.u.) という約10~100倍の伝導性の悪い構造になり、90km 付近で再び中間の $\sigma: 3 \times 10^{-14}$ (e.m.u.) となっていると考えられる。(20km 付近の伝導度急変の部分は丁度資料については早回しと遅回しの境めの点に当たっている。) これは柳原の関東地方の結果 (30km以深) と異っている。これは中央日本の特性とも考えられるので今後調査をさらに進めたい。

大島⁽⁶⁾が鹿屋の資料を使用して推論した結果によれば 30km 付近に比抵抗の大きな不連続があり、またこの深さが鹿屋付近のモロビッチ不連続面の深さとして地震波速度、重力のブーゲー異常分布より推定される値と良く一致しているのでこれと関連があるのではないかと述べている。

今回の結果は20km付近の伝導度の急変化は鹿屋の例と order は異なるが不電導層の点で一致しているように考えられ、女満別付近のホモ層とはほぼ一致していると考ええる。

以上 Cagniard 法の一つの改良形である Niblett 法を女満別に適用したものについて述べた。さらに問題になっているいくつかの点については、今後調査をつづけたい。

謝 辞

この調査について柳原所長の種々有意義な御指導に深く感謝し、女満別出張所で資料をつくられた職員各位にお礼申し上げます。

文 献

- (1) Cagniard, L. (1953): Basic Theory of the Magneto-Telluric Method of Geophysical Prospecting, *Geophysics*, Vol. 18, 3, 605-635.
- (2) Wait, J. R. (1954): On the Relation Between Telluric Currents and the Earth's Magnetic Field, *Geophysics*, Vol. 19, 2, 281-289.
- (3) Price, A. T. (1962): The Theory of Magnetotelluric Methods When the Source Field is Considered, *J. G. R.*, Vol. 67, 5, 1907-1918.
- (4) Srivastava, S. P., J. L., Douglass and S. H., Ward (1963): The Application of the Magnetotelluric and Telluric Methods in Central Alberta, *Geophysics*, Vol. 28, 3, 426-446.
- (5) Tikhonov, A. N., N. V. Lipskaya and B. M. Yanovsky (1964): Some Results of the Deep Magneto-telluric Investigations in the U.S.S.R., *Journ. Geomag. Geoelec.*, Vol. 15, 4, 275-279.
- (6) Yokoyama, I. (1962): Relations between the short period changes in geomagnetism and in telluric currents (continued), *J.F.S. Hokkaido University Series VII*, Vol. I, 6, 393-403.
- (7) 柳原一夫(1965): 柿岡附近の深層比抵抗の推算, 地磁気観測所要報, 12, No. 1, 115-122.
- (8) 大島汎海(1971): 鹿屋附近の地下の電気的構造について, 地磁気観測所要報, 14, No. 2, 87-92.
- (9) Niblett, E. R. and C. S. Wittgenstein (1960): Variation of Electrical Conductivity with Depth by the Magneto-Telluric Method, *Geophysics*, Vol. 25, 5, 998-1008.

On the subterranean Electric Conductivity near Memambetsu deduced by the Magneto-telluric Method

Shinichi OWADA

Abstract

The theory of Niblett and Sayn-Wittgenstein is applied to data of geomagnetic and earth-current variations at Memambetsu as the first step of investigation to estimate the subterranean electric conductivity. Ratio of amplitude E_x/H_y only are used to estimate the subterranean electric conductivity, because the earth-current at Memambetsu shows intense anisotropy. The vertical distribution of electric conductivity at Memambetsu is estimated. It is found out that the subterranean electrical structure near Memambetsu may be made of 3 layers for the depth from 8 km to 170 km. The first layer lies in the depth from 8 km to 20 km, the second one from 20 km to 90 km, and the third one from 90 km to 170 km. The electric conductivity in each layer varies from 3×10^{-13} to 1×10^{-13} e.m.u. in the first layer, from 1×10^{-14} to 2×10^{-15} e.m.u. in the second one and from 3×10^{-14} to 2×10^{-14} e.m.u. in the third one, respectively.