

## 1 はじめに

地震予知を実現するためには、その前兆現象を捕らえることが不可欠である。前兆現象の一つとして電磁界の異常現象が報告されており、我々の研究グループでは全国約 40 箇所で大域超長波 (ELF) 帯環境電磁波の 24 時間連続観測を続けている。

観測電磁波データには地殻活動以外の要因による電磁波が含まれるため、電磁波発生源の推定には観測電磁波データから不要な大域雑音成分を除去しなくてはならない。しかし従来の大域雑音除去法では十分に雑音除去がなされておらず、その結果、夜間の電磁波発生推定についてはおもわしい結果が得られていなかった。そこで本論文では夜間についてもより正確な推定結果を得ることを目標とし、従来の大域雑音除去法の改善を試みた。

## 2 ELF 帯観測電磁波データ

我々の研究グループでは太陽の照射エネルギーの変動による大気環境雑音や雷電波の影響が最も少ないと考えられる極超長波 (ELF) 周波数である 223Hz での電磁波を観測している。

観測電磁波データは周期 6 秒でサンプリングされており、サンプル値はその 6 秒間の観測強度の平均値である。また強度単位は  $pT/\sqrt{Hz}$  で表される量である。

観測電磁波データは大きく分けて局所信号、人工雑音、大域雑音からなる。局所信号は雷雲や地殻異常などが原因の、局所的に現れる電磁波である。大域雑音はどの観測点でも同傾向で観測される電磁波でデータ成分の大部分を占め、電離層の日変動の影響で日中低く夜間高いレベルで観測される。

## 3 局所異常電磁波の抽出

観測電磁波データには大域雑音が含まれていること、各観測点の感度には差があることから局所的な異常電磁波推定に用いるためには感度を正規化し、局地的な電磁波を抽出する必要がある。

正規化は直交回帰直線を用いた回帰分析を行うことで実現する。基準となる観測電磁波データは一年を通じて観測値が比較的安定している神奈川県湯河原のものを採用する。

基準とする観測点の観測データを  $x$ 、正規化を施す観測点の観測データを  $y$  とすると、直交回帰直線  $y = ax + b$  の各係数は式 (1)、(2) で求められる。

$$a = \frac{-(\sigma_x^2 - \sigma_y^2) + \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}}{2\sigma_{xy}} \quad (1)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (2)$$

ただし  $\sigma_x^2, \sigma_y^2$  はそれぞれ  $x, y$  の不偏分散、 $\sigma_{xy}$  は  $x$  と  $y$  の共分散を、 $\bar{x}, \bar{y}$  はそれぞれ  $x, y$  の平均を表す。求めた回帰直線を  $y = x$  に写像する一次変換を散布点に対し施すことで正規化を行う。

大域雑音は全国で同傾向で観測されるため、各時刻毎に全観測点の正規化観測データをソートし、最小値から 4 番目の値をその時刻の大域雑音と考え、正規化後のデータから減じることで局所信号を抽出する。例として 2001/1/1~7 に観測された静岡県

伊東宇佐美の観測電磁波データと局所電磁波データを図 1, 2 に示す。

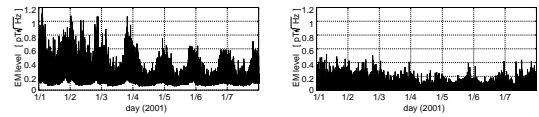


図 1: 観測電磁波データ 図 2: 局所電磁波データ

## 4 電磁波発生源推定方法と例

3 節の手法で得られた東西方向と南北方向の局所電磁波データの二乗和を観測点の電磁波エネルギーとし、電磁波発生源推定を行う。

推定ではまずモデルとして電磁波のエネルギー密度は距離の二乗に反比例して減衰するという仮定を採用し、観測点  $P_i$  で受信されるエネルギー密度の理論値を求める。 $A_i$  と  $P_i$  で観測された電磁波エネルギー  $M_i$  との誤差は発生源位置の推定誤差に対応する。 $M_i$  と  $A_i$  の誤差の二乗和を推定の評価関数  $f$  とし、 $f$  を最小とする点を最適推定値として求める。その条件は式 (4) で表される。

$$f(x_0, y_0, A_0) = \sum_i (M_i - A_i)^2 \quad (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial A_0} = \frac{\partial f}{\partial x_0} = \frac{\partial f}{\partial y_0} = 0 \quad (4)$$

しかし式 (4) から解析的に解を求めるのは困難であるため、本州上を格子に分割し、評価関数  $f$  を最小にする格子点を探索、得られた最適点付近を更に細かい格子点に分割し探索を繰り返すことで絞り込みながら最適点の推定を行う。

### 4.1 雷雲位置と推定電磁波発生源の比較

雷雲は強い電磁波を放射する。そこで 2000/11/2 12:00~13:00 の間に発生した異常電磁波のエネルギー分布を推定し、推定期間内に発生した雷雲のレーダー観測による分布を比較した。以降、エネルギー分布は本州を 25[km] 間隔の格子に区切り、各格子毎に格子内に推定された電磁波発生源のエネルギーを積算することで表す。図 3, 4 に推定結果及びレーダー観測結果を示す。

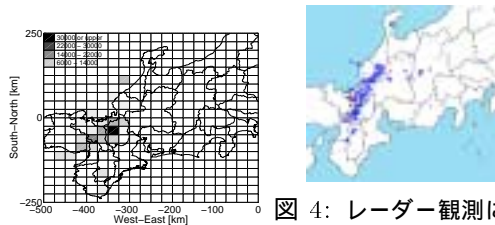


図 3: 推定電磁波エネルギー分布 (2000 年 11 月 2 日 12:32)

図 3, 4 より、多少のずれはあるが雷雲は広範囲であること等を考慮すると発生源推定結果とレーダー観測結果はよく一致しており、雷雲位置推定ができていると考えられる。

### 4.2 震源と推定電磁波発生源の比較

発生源推定が行い得ることを示したので、2001 年 1 月 6 日 11:48 に愛知県と岐阜県の県境付近で発

生した M4.6 の地震発生前後の異常電磁波に対し発生源推定を行い実際の地震源との比較を行った。

まず 1/3 と 1/5 のエネルギー分布を図 5, 6 に示す。この結果より 1 月 3 日には山梨付近で電磁波が強く発生しているが、地震発生前日の 1 月 5 日には伊勢湾付近強い電磁波が検出されていることがわかる。推定発生源と実際の震源とは 50km 程度の誤差があるが、推定の精度は観測点の配置や観測データに含まれるノイズの影響で変動することを考慮すると、検出された異常電磁波は地震の前兆であった可能性を示唆しているといえる。

次に 1 月 5 日 00:00~01:00, 10:00~11:00 での電磁波エネルギー分布を図 7 ~ 8 に示す。これより日中は震源付近で強い電磁波放射が推定されているが、夜間は地震源と異なる地域でも震源付近と同程度のエネルギーが放出されており、日中のようにはっきりした特徴を見いだせない。発生源推定は失敗といえる。

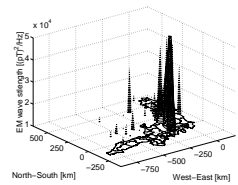


図 5: 1/3 のエネルギー分布

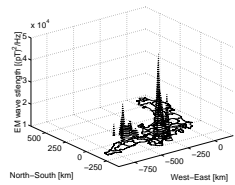


図 6: 1/5 のエネルギー分布

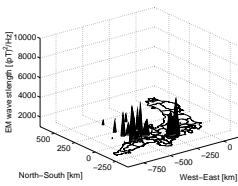


図 7: 1/5 00:00~01:00 のエネルギー分布

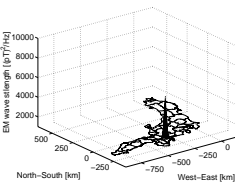


図 8: 1/5 10:00~11:00 のエネルギー分布

## 5 提案する大域雑音除去法

夜間における電磁波発生源推定が失敗する要因として、特に夜間の大域雑音除去が不十分であることが考えられる。大域雑音は一日周期の変動として現れるので局所電磁波データには一日周期の変動は現れないはずだが図 2 には日変動成分がみられることから雑音除去が不十分であることがわかる。

そこで大域雑音除去の手法として大域雑音の日変化を反映するよう短時間毎に回帰直線を逐次計算する方法を提案する。具体的には時系列に 1 分間で得られる散布点 10 点毎に回帰直線を逐次引く。回帰直線は 10 散布点の平均点と原点を通る直線として定義する。

この手法で直交回帰直線を計算すると 1 分毎にその傾き  $a$  が得られるが、傾き  $a$  は分散点の影響等により、通常激しく振動する (図 9)。この傾き傾向をそのまま使用すると局所信号を大域雑音の変動として扱い、正規化で局所データが除去される可能性がある。また二観測データ間の相関は大域雑音の日変動の影響を受けて緩やかに変化すると予想されるため、得られた傾き  $a$  に前後 30 分間の計 61 分の幅のメディアンフィルタをかけることで  $a$  の変動をなだらかにし (図 10)、局所的な信号を残したまま全体のレベルを基準となる観測点の観測値に合わせるよう正規化を行う。

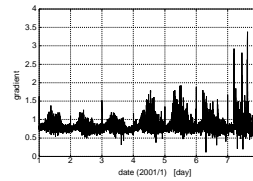


図 9: メディアンフィルタリング前の傾き傾向

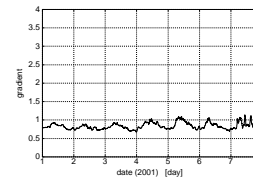


図 10: メディアンフィルタリング後の傾き傾向

## 6 提案手法と従来手法の比較

提案手法で発生源推定を行った結果を図に示す。図 12 より愛知-静岡県境で強いエネルギー放射が推定されていることがわかる。これは図 6 とは異なるエリアだがどちらも地震源から 50[km] 程度距離があり、従来法と提案法ではその結果に大きな差がなく、提案方法の結果から愛知-静岡県境付近で検出された異常電磁波が地震の前兆を示唆している可能性があると考えられる。

また、一時間のエネルギー分布についてみると図 14 から日中のエネルギー分布は図 12 とほぼ同様のエリアでピークを示していることから日中の推定は良好な結果が得られていることが確認できる。

さらに図 13 より、従来法では特徴がみられなかった夜間に強いピークが推定されている。このピークは日中のピークと同位置であることから夜間も日中と同様の推定結果を得られたと判断できる。提案法によれば昼夜に関わらず短時間での電磁波発生源の推定が行いうるといえる。

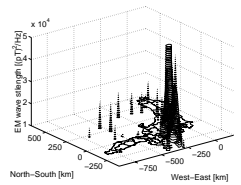


図 11: 1/3 のエネルギー分布 (提案手法)

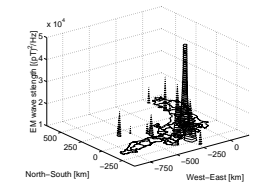


図 12: 1/5 のエネルギー分布 (提案手法)

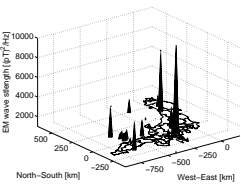


図 13: 1/5 00:00~01:00 のエネルギー分布 (提案手法)

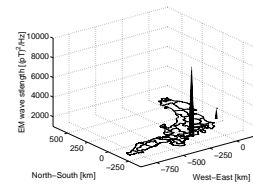


図 14: 1/5 10:00~11:00 のエネルギー分布 (提案手法)

## 7 まとめ

本研究では従来の大域雑音除去法では十分に除去できなかった夜間の大域雑音を除去するため、回帰直線の逐次的な計算法を提案した。

また、従来手法と提案手法とを用いて地震発生前後の電磁波発生源推定を推定し、夜間についての結果を実際の地震源と比較した。その結果、提案方法が夜間や短時間での異常電磁波発生源の推定に提案方法が適用しうることを示した。

## 参考文献

- [1] 志村, 白田 他, “ELF 帯電磁波の異常放射源推定について”, 第 24 回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.623-626