

1 はじめに

我々は全国約 40ヶ所において東西, 南北, 垂直磁界方向で極超長波帯 (ELF)223Hz の電磁波を観測している. この周波帯の信号はレベルが強く不安定に変動する太陽活動や, 地球環境により放出される電波信号の影響を受けにくい観測対象としている. 観測電磁波信号には本来必要としている信号の他に様々な雑音が含まれている. 本論文では雑音除去と等価的に作用する仮想的なノイズを観測電磁波エネルギーに付加することで推定した大域雑音の妥当性を検討する.

2 ELF 帯観測電磁波信号

観測電磁波信号 (観測信号) は周期 6 秒でサンプリングされており, サンプル値は 6 秒間の平均値である. その強度単位は $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ の量である. 観測信号は主に, 観測点周辺の雷雲や地殻活動等による局所的な電磁波 (局所信号), 赤道付近の熱雷から伝播された全国で一定レベルで観測される大域雑音, 市街地・送電線等から発生する人工雑音が含まれる. 雷雲・地殻活動等の局所的な推定を行うためには局所信号が重要であり, 観測信号からレベルの強い大域雑音を十分に除去する必要がある.

3 局所電磁波信号の抽出方法・抽出結果

各観測点の観測装置の感度には周囲の気温等により差があることから, 感度の正規化をしなければならない. 正規化方法については, 直交回帰直線を用いた回帰分析による正規化を示す. 基準とする観測点是一年を通じて比較的安定に観測信号が得られる神奈川県湯河原を用いた. 正規化を施す観測点は観測装置が故障がない中部地方 24ヶ所を使用する. 正規化日時は 2000 年 11 月 2 日とする. 神奈川県湯河原の観測信号を x , 正規化を施す観測信号を y とすると, 直交回帰直線 $y = ax + b$ の各係数 a, b は式 (1), 式 (2) で求められる. ただし, σ_x^2, σ_y^2 は各々 x, y の分散, σ_{xy} は x と y の共分散を, \bar{x}, \bar{y} は各々 x, y の平均を示す.

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

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

直交回帰直線 $y = ax + b$ を $y = x$ へ写像する一次変換を観測信号 y に施すことで, 観測信号 y は神奈川県湯河原を基準として正規化される. 京都北区の正規化信号 (東西軸) を図 2 に示す. 大域雑音は全国で一定レベルの信号として観測されるため, 各時刻毎に全観測点の正規化信号をソートし, その最小値をその時刻の大域雑音と考える. よって, 観測点 24 点で正規化し得られる大域雑音は図 3 となる. 大域雑音を正規化信号から減じることにより, 各観測点の局所信号を抽出する. 京都北区の局所信号 (東西軸) を図 4 に示す.

2000 年 11 月 02 日 12 時 ~ 13 時 にかけて図 5 で見られるような雷雲が京都府付近で発生しており, この雷雲からの強い電磁波が図 4 における 12 時 ~ 13 時にかけてレベルが高くなっている要因であると思われる. 正規化に使用する観測点として, 多数の観測点を用いればその大域雑音として妥当であると思われるが, 動作不良の観測点が含まれるとレベルの低い大域雑音となる. 逆に少数の地域的に偏った観測点を用いれば大域雑音に局所信号が混入する危険性があり, 正規化に使用する観測点を精査しなければならない.

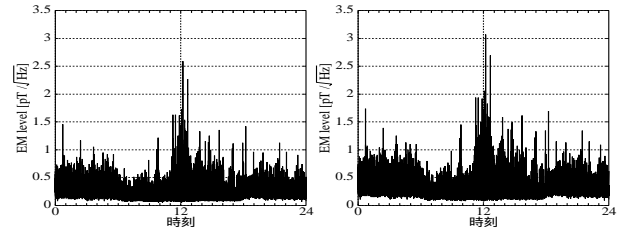


図 1: 京都北区観測信号

図 2: 京都北区正規化信号

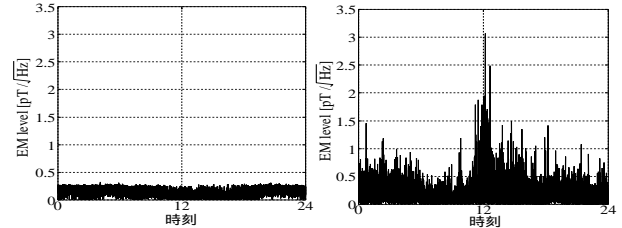


図 3: 大域雑音 (観測点 24

図 4: 京都北区局所信号

点)

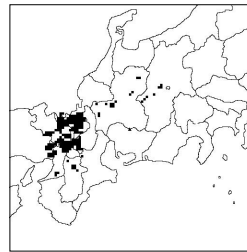
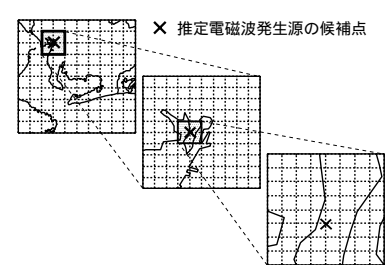


図 5: 雷雲分布

図 6: 推定誤差関数 f を最小とする格子点の探索

4 異常電磁波発生源推定

4.1 推定手法 1

東西, 南北磁界方向の局所信号の二乗和を観測電磁波エネルギー (観測エネルギー) とする. これを $M_i [(\text{pT})^2/\text{Hz}] (> 0)$ とし発生源推定に用いる. 発生源推定を行うため電磁波減衰モデルを仮定する. このモデルでは, 発生源 $O(x_0, y_0)$ から単位距離の地点でのエネルギー密度 A_0 に対し, 発生源からの距離 R_i 離れた観測点 $P_i(x_i, y_i)$ でのエネルギー密度の理論値 A_i は R_i の 2 乗に反比例して減衰する (式 (3)).

$$A_i = \frac{A_0}{R_i^2} = \frac{A_0}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}^2} \quad (3)$$

観測エネルギー M_i には除去しきれない信号が混入しており, A_i と M_i には誤差が生じる. よって, 推定誤差関数 f (式 (4)) を最小とする (x_0, y_0, A_0) を式 (5) のように偏微分し導出する. 式 (6) で A_0 の算出は可能となる. しかし, (x_0, y_0) を解析的に求めるのは困難であるため, 計算機により発生源付近を格子状に分割し, 式 (4) を最小とする格子点を探索する (図 6).

$$f(x_0, y_0, A_0) = \sum_i (M_i - A_i)^2 \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0} = \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{y=y_0} = \left. \frac{\partial f}{\partial A} \right|_{A=A_0} = 0 \quad (5)$$

$$A_0 = \left(\sum_i \frac{A_i}{R_i^2} \right) / \left(\sum_i \frac{1}{R_i^4} \right) \quad (6)$$

4.2 推定手法 2 (ノイズを考慮した発生源推定)

観測エネルギー M_i に除去しきれない信号が混入している場合には、それを打ち消すノイズ Δn [(pT)²/Hz] を付加することで推定精度が向上すると考えられる。 Δn を付加した観測エネルギー \hat{M}_i を式 (7) とする。しかし、付加する負のノイズを増やすと \hat{M}_i が負値となり、推定に使用できなくなる。よって、正の \hat{M}_i が 6 点以上となる Δn の範囲で推定を行う。観測点数が変化するため、式 (8) のように m で平均した推定誤差関数 g を定義する。

$$\hat{M}_i = M_i + \Delta n \quad (7)$$

$$g(x_0, y_0, A_0) = \sum_i (\hat{M}_i - A_i)^2 / m \quad (8)$$

4.3 推定対象と推定条件

図 7 では、推定に使用する観測点を ○、推定対象とする雷放電源を × で示す。雷放電の発生時刻は①: 2000年02月17日11時46分51秒, ②: 2000年09月12日04時23分21秒, ③: 2000年11月02日12時01分07秒, ④: 2001年01月03日12時28分04秒である。ノイズの付加範囲は $-0.300 \leq \Delta n \leq +0.300$ で、0.001 刻みで付加する。大域雑音除去では中部地方の観測点 24 点により行い、そのうち推定では図 7 の 9 点を使用した。

4.4 推定結果・検討

図 9~ 図 12 では、負のノイズを付加した \hat{M}_i による推定発生源の軌跡を青線、正のノイズを付加した \hat{M}_i による推定発生源の軌跡を赤線、観測エネルギー M_i そのもので推定した推定発生源を黒い +、雷放電源を黒い × で示す。表 1 において、 L は M_i での推定発生源と雷放電源との距離誤差である。また、大域雑音除去を行う前の正規化信号と、その信号内の残留雑音 (大域雑音 + Δn) との SN 比 (SN1) を求めた。ここで、 Δn の値は、推定発生源が雷放電源に最も近付いたときの値とした。さらに、SN2 として大域雑音を除去した局所信号と、その信号内の残留雑音 (Δn) との SN 比を示す。

図 9, 図 11, 図 12 では負のノイズを与えた \hat{M}_i により推定発生源が雷放電源へ向って移動している。これは、大域雑音除去が不十分であったことを意味する。表 1 の①, ④のサンプルでは Δn の大きさが比較的小さい。この場合、十分な大域雑音除去が行われていると考えられる。大域雑音除去により①の場合で 1.8[dB], ④の場合で 3.3[dB] と SN 比が向上している。その SN 比の向上により、距離的な誤差 L が小さい推定結果が得られた。また一方、図 11 はもとの観測値の SN 比 (表 1③ SN1) が低く、大域雑音除去が容易でない。SN2 は 2.1[dB] までしか向上していない。距離的推定誤差 L も 124[km] と大きい。

図 10 では正のノイズを付加することで、推定発生源が雷放電源へと向かう。これは、大域雑音除去が過度に行われたことを意味する。SN 比は 1.58[dB] 劣化した。

表 1 に示された、距離的な誤差 L と SN2 の関係から大域雑音除去後の観測値の SN 比が低いと、推定発生源が信頼できない。したがって、大域雑音を正確に推定することが重要である。

次に、9 点の観測点 (図 7) で大域雑音を抽出した結果を図 8 に示す。この 9 点の観測エネルギー M_i を使用した推定発生源と雷放電源との距離的な誤差 L は、①で約 14[km], ②で約 18[km], ③で約 32[km], ④で約 14[km] となった。表 1 の L と比較すると、全てのサンプルで雷放電源に近い推定発生源を得たことになる。しかし、 \hat{M}_i で推定実験を行うと適切な付加ノイズ Δn は正であった。つまり、局所的な信号が大域雑

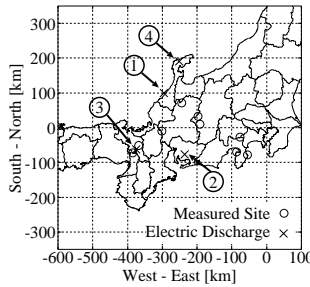


図 7: 各観測点 (9 点)

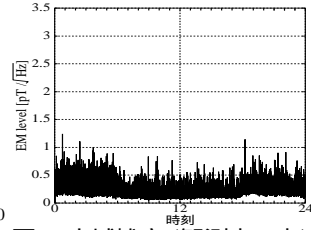


図 8: 大域雑音 (観測点 9 点)

表 1: Δn と各 SN 比 (観測点 24 点使用)

	L [km]	SN1 [dB]	SN2 [dB]	Δn [pT ² /Hz]
図 9(①)	24	4.21	6.03	-0.034
図 10(②)	29	5.85	4.27	0.080
図 11(③)	124	1.57	2.11	-0.286
図 12(④)	14	3.36	6.68	-0.003

音として一部除去されており、それを補正することになった。よって、地域的に偏った少数の観測点による大域雑音除去は局所的な信号を除去する傾向が強い。

5 まとめ

本論文では大域雑音除去の重要性を明確に示すとともに、除去結果と発生源推定結果を評価した。今後、他の大域雑音除去手法について評価を行い、雑音除去手法の確立を行いたい。

参考文献

[1] S.Saito, et.al., International Geoscience And Remote Sensing Symposium(IGARSS'03), Toulouse France, INT_E01_06, July 2003.

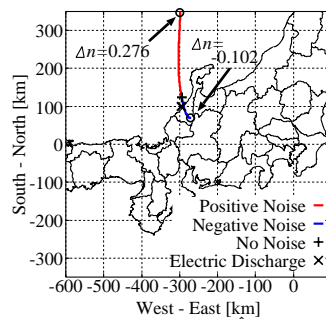


図 9: 雷放電源①と M_i による推定発生源の軌跡

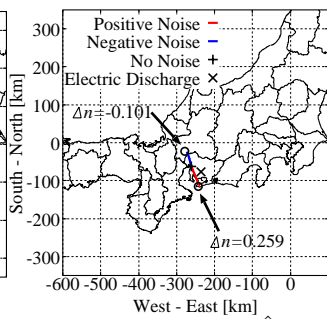


図 10: 雷放電源②と M_i による推定発生源の軌跡

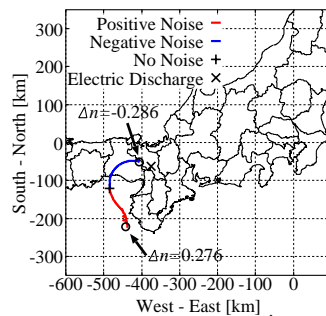


図 11: 雷放電源③と M_i による推定発生源の軌跡

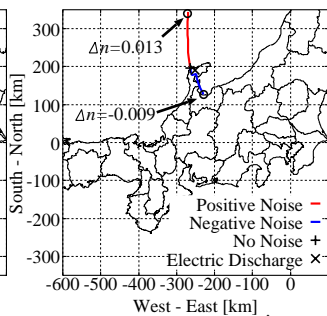


図 12: 雷放電源④と M_i による推定発生源の軌跡