

第7章 環境電磁波の強度に着目した地震 前兆検出手法

7.1 はじめに

日本は世界でも有数の地震国である。日本国政府の地震調査研究推進本部から 2009 年に発表された資料 [40] によると、マグニチュード (M)8 クラスの東海地震・東南海地震・南海地震が今後 30 年以内に発生する確率はそれぞれ高く、これらの地震が同時に発生した場合、死者は 25,000 人以上にのぼると予想されている。地震による被害を最小限に抑えるには、正確な地震予測の実現が急務である。

従来の地震予測は、活断層のトレンチ調査の結果や過去の地震の発生頻度に基づいて行われてきた。しかし、予測された発生時期には数年から数十年単位の誤差がある上に、予測の対象は特定の地域の地震のみである。発生時期の予測誤差が小さく、地域を限定しない地震予測を行うには、従来とは異なるアプローチが必要である。

工学的・機械的な予測手法の構築は、次のような段階を経る。

1. 前兆現象が表れるデータの観測
2. 経験則の取得と目視による判別
3. 判別基準の明確化・具体化と機械的判別手法の構築
4. 客観的な判別と定量的な評価

観測に関して述べる。地殻活動の前兆現象として、環境電磁波の異常放射が発生するとの報告が多くなされている [1]-[3]。その報告を受け、ELF 帯における環境電磁波が、全国において継続的に観測されている [4]-[7]。

経験則に関して述べる。これまでの研究 [41]-[44] で、M6 以上の大きな地震の場合は、地震発生の数時間から数週間前までに、震央に近い観測点における観測信号の強度が長時間にわたって上昇し、地震発生の直前に下降することが経験的に確かめられている。例えば、図 7.1 は過去の我々の研究において地震と関連していると判断した異常放射を観測した期間を示した図である。図の左側にある横棒がその期間を表し、図の右側は対応する地震である。また、図 7.2 は異常放射を観測した観測点と震央との距離を示した図である。縦軸は震央距

前兆電磁波出現



図 7.1: 地震前兆電磁波が観測された期間 [43]

離，横軸は地震の規模を表し，異常が観測された場合を○，されなかった場合を×，不明確だった場合を△で表している．また，M5程度の大きな地震の場合は，震央までの距離が約100 [km]以下の範囲において，その地震による異常放射が観測可能とされ，その距離はマグニチュードが1増えるごとにおよそ2倍になるとされている．すなわち，マグニチュード x の地震の場合，異常放射の検出可能距離を R としたとき

$$R = 100 \times 2^{(x-5)} \text{ [km]} \tag{7.1}$$

となる．

これらの経験則はあくまでも目視など人の経験的な判断に基づくものであったが，更なる研究と調査を経て，地震前兆を機械的に検出するための特徴量を模索する手法がこれまでに提案されてきた．例えば，観測信号の低周波成分に着目する手法 [45][46]，ウェーブレット解析 [47] を利用する手法 [48]，背景信号のケプストラム分析を利用する手法 [49]，ニューラル

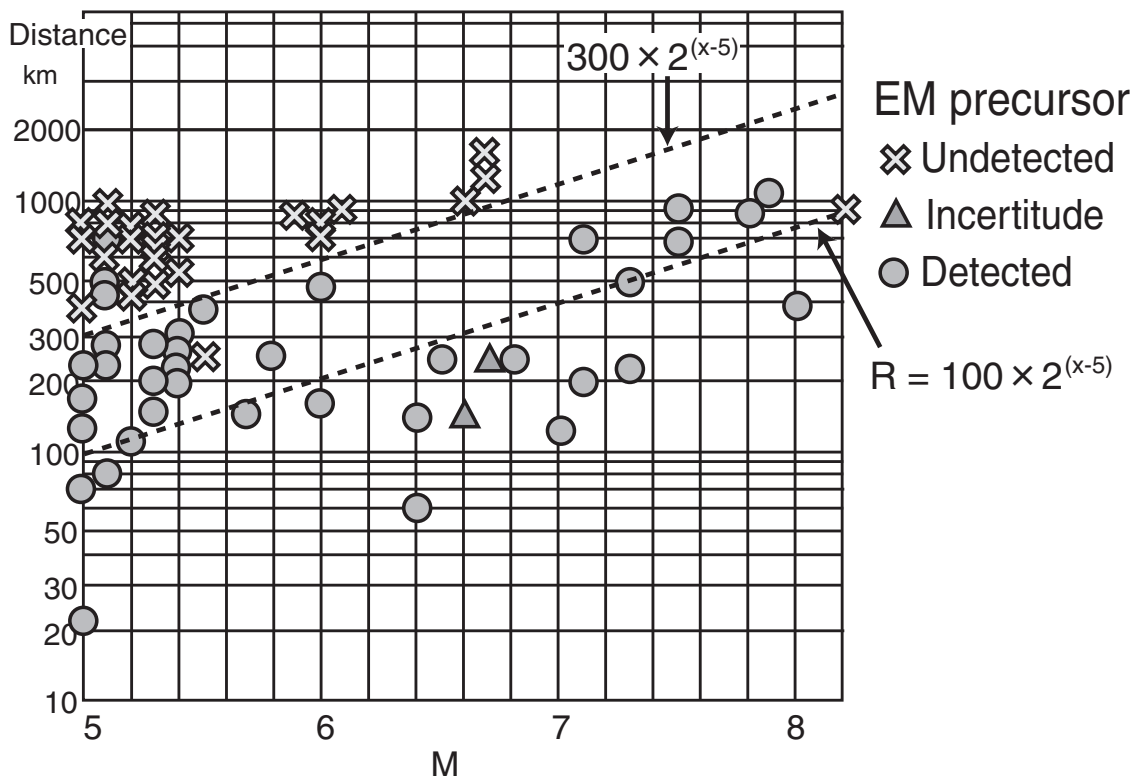


図 7.2: 地震前兆電磁波が観測された範囲 [43]

ネットによるパターン認識 [50] を利用する手法 [51][52] などが挙げられる。また、ULF(Ultra Low Frequency) 帯や VLF(Very Low Frequency) 帯の電磁波、地電流にも地震前兆に由来する異常放射の情報が含まれている [53]-[55] との観点から、それらの観測結果から地震前兆異常を検出する信号処理手法が提案されてきた [25][56]-[60]。

しかし、これらにおいては閾値など正常と異常との境界に関する議論がほとんど行われておらず、真に機械的な検出が実現したものではなかった。また、統計的な評価もほとんどなされていなかった。検出結果を機械的・定量的に評価することは重要である。

本論文では、地震と関係のある環境電磁波の異常放射を機械的に検出するための手法を提案するとともに、地震の前兆信号を強調し検出精度を向上させる手法を提案する [61][62]。また、異常放射を検出する条件に関する考察と、検出された異常と地震との関連性についての調査を、実際のデータと機械的かつ統計的な手法を用いて行う。

7.2 環境電磁波の強度に基づく地震前兆検出手法

実際に我々が観測した信号を図 7.3 に示す。図の縦軸は磁界強度、横軸は時間を表している。図 7.3(b) に示す長崎県雲仙の観測信号より、2005 年 3 月 17 日 0 時から 12 時にかけて磁

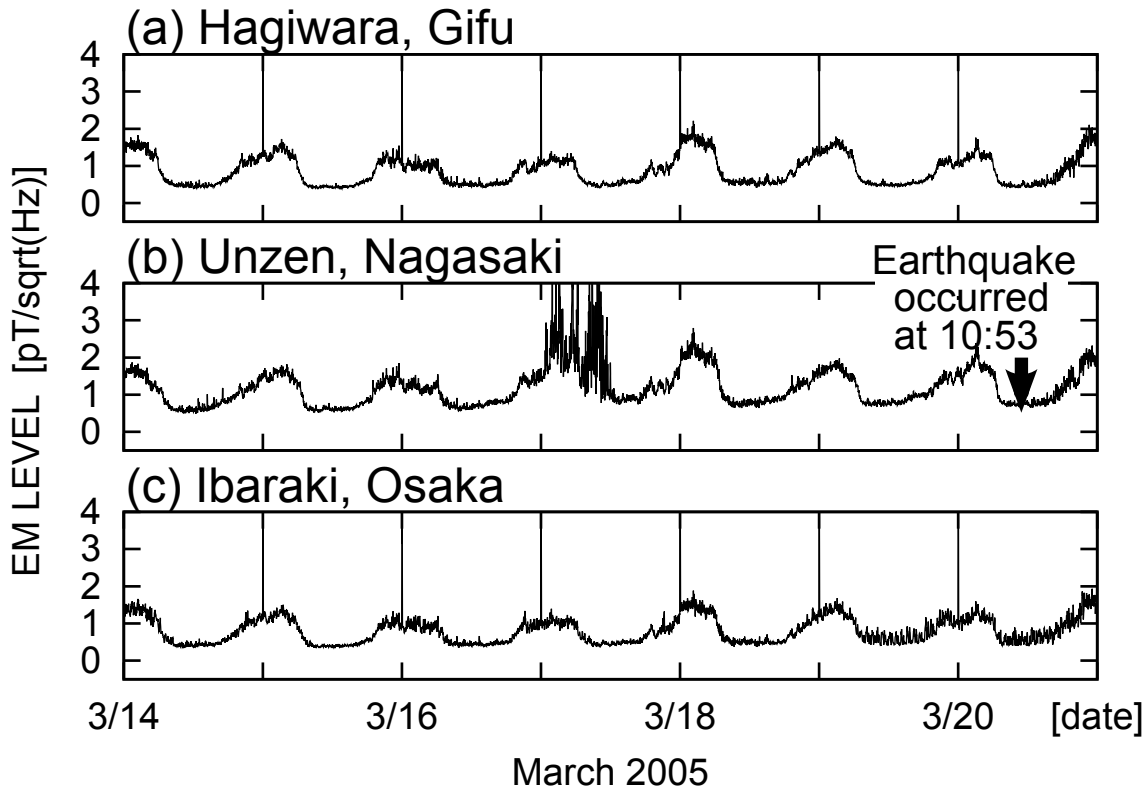


図 7.3: 2005 年 3 月 14 日～20 日の観測信号

界強度の上昇が確認できる。これは、日時(発生の3日前)と観測点の位置(震央距離:約112[km])から、3月20日に発生した福岡県西方沖地震の前兆であると考え得る。

しかし、この異常は目視で検出されたものであり、地震との関連づけも経験的な判断によるものである。本節では、異常の検出と関連づけを機械的に行う方法を考える。

7.2.1 異常の評価値の定義

地震に先駆けて環境電磁界の観測信号の強度が上昇することから、観測信号の強度の上昇を検出することで地震前兆を検出できると考えられる。ここで、遠方から伝播してきた電磁波は、東西方向・南北方向のそれぞれのアンテナに、入射角に応じた強度で観測される。よって、異常検出においては東西・南北の観測信号を総合的に評価するため、東西・南北の観測信号の強度の二乗和を評価することとする。

また、観測信号の強度が顕著に上昇する原因には、雷放電や雷雲からの電磁波放射も挙げられる。例えば、図7.4は京都における2005年6月末の観測信号であるが、観測信号の強度が上昇した時刻は、気象庁より京都で雷雲が報告[63]された時刻(矢印)と一致している。これらは地震前兆ではないため、誤って検出しないよう工夫が必要である。雷放電は強度が大きくとも単発的であり、雷雲からの電磁波放射は、ほとんどの場合、雷雲が観測点付近を通

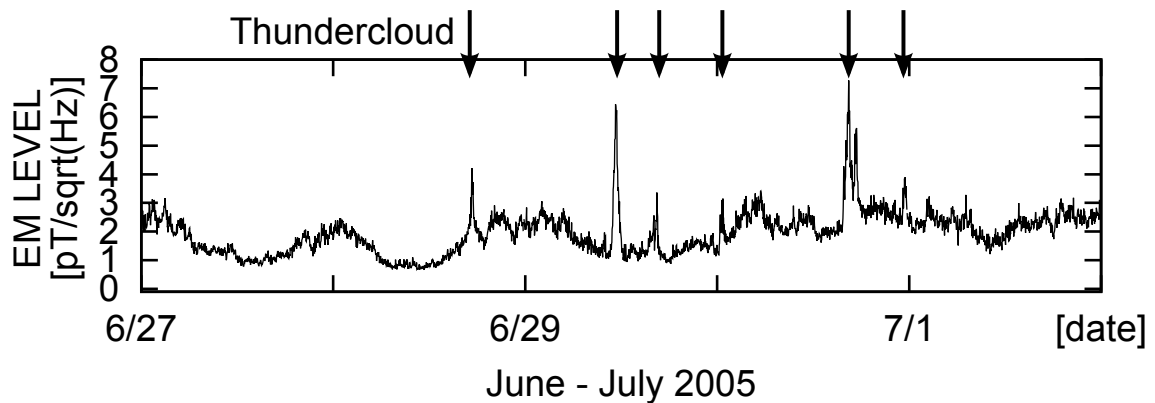


図 7.4: 2005 年 6 月 27 日～7 月 1 日の観測信号 (京都). 矢印は京都にて雷雲が報告された時刻

過する前後 1 時間以内で観測される (図 7.4). 一方, 地震に先駆けて起こる観測信号の強度の上昇は, 数時間から数日間に渡ることが多いとされる [41]-[43]. その違いに着目し, 観測信号を数時間ごとに区切り, その区間の代表値を評価することとする.

前述の要件より, 地震前兆による環境電磁界異常の評価値 $ac(t)$ を次のように定義する.

$$ac(t) \equiv \frac{1}{I_{3h}} \sum_{i=0}^{I_{3h}-1} \{x_{ew}^2(I_{3h}t+i) + x_{ns}^2(I_{3h}t+i)\} \quad (7.2)$$

ここで, I_{3h} は 3 時間分のサンプル数, x_{ew}, x_{ns} はそれぞれ東西・南北の観測信号の強度, t は時系列を表す. このときの $ac(t)$ は, 東西・南北の観測信号の強度を二乗和した時系列を 3 時間ごとに区切り, それぞれの区間において平均をとった時系列を意味する.

7.2.2 異常の検出閾値の定義

異常評価値 $ac(t)$ がある閾値 $th(t)$ を超えたとき, 異常と判定することとする. ここで, 観測信号は夏に大きく冬に小さくなるという年変化を持っている. また, 観測装置の経年劣化などによって観測点ごとに感度が異なっている. そのため, 異常検出の閾値は逐次的かつ観測点ごとに定義する必要がある. 本論文では, 対象の直前 10 日間における $ac(t)$ の平均値と標準偏差の線形和

$$th(t) \equiv \alpha \times \mu_{10d}(t) + \beta \times \sigma_{10d}(t) \quad (7.3)$$

と定義する. ここで,

$$\begin{aligned} \mu_{10d}(t) &= \frac{1}{I_{10d}} \sum_{i=1}^{I_{10d}} ac(t-i) \\ \sigma_{10d}(t) &= \sqrt{\frac{1}{I_{10d}} \sum_{i=1}^{I_{10d}} \{ac^2(t-i)\} - \mu_{10d}^2(t)} \end{aligned}$$

であり、 I_{10d} は $ac(t)$ の 10 日間分のサンプル数を表す。また、 α と β は閾値を与える定数であり、その検討は 7.4.2 節で行う。

7.2.3 検出された異常と地震との関連性の定義

発生の 8 日前までに震央から R [km] 以内の観測点で検出された異常は、その地震の前兆によるものとみなす。逆に、それ以外で検出された異常は全て誤検出とみなす。また、地震発生の 8 日前までに検出可能距離内にあるいずれかの観測点で異常が検出された場合、その地震は前もって検出されたとみなす。逆に、その範囲で一度も異常が検出されなかった場合、地震の前兆を見逃したとみなすものとする。

7.3 異常検出の精度向上のための強調処理

我々は観測装置の設置場所や観測周波数などを工夫し、各種の雑音の影響が小さくなるよう配慮している。しかし、観測信号には地殻活動以外を要因とする電磁波信号も多く含まれるため、地震前兆を強調する必要がある。

例えば、図 7.3 で明らかなように、観測信号は全国的に酷似した 1 日周期の変化を持っていることが分かる。これは、赤道付近の熱雷雲から放射され、電離層と大地で形成される導波路を伝播してきた電磁波と考えられており、以後これを大域信号と呼ぶ。また、岐阜県萩原と大阪府茨木では、毎日 0 時にインパルス状の信号が観測されている。これは、アンテナの感度を調整するために観測装置が発している校正信号である。

これらのような地震とは関係のない異常は、検出されないことが望ましい。逆に、地震の前兆が他の信号に埋もれないことが必要である。そこで、強調処理によって地震に関する異常の検出精度を上げることが求められる。本節では、2 種類の強調処理を提案する。

7.3.1 線形予測分析を用いた強調処理

図 7.3 に示したように、平常時の ELF 帯観測信号は 1 日を周期とする変化を毎日繰り返す。そのため、観測信号の生成モデルは日によらず同一と見なせる。一方、地震の前兆電磁波を多く含んだ観測信号は、平常日とは異なるモデルで記述されることとなる。一般に、信号に合致しないモデルを適用させると大きな推定誤差を生む。すなわち、あらかじめ平常時の観測信号のモデルを作成し、そのモデルに基づいて観測信号を推定した場合、その誤差は地震に特有の異常が強調された信号となる。

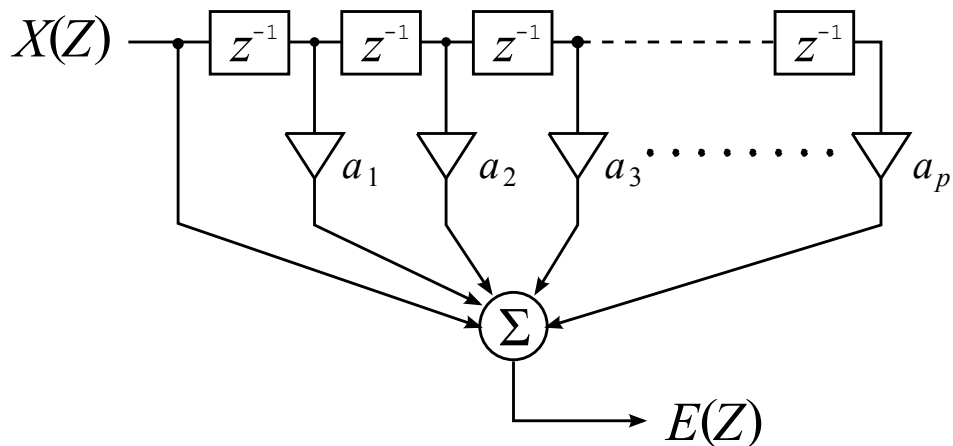


図 7.5: 線形予測分析のブロック図

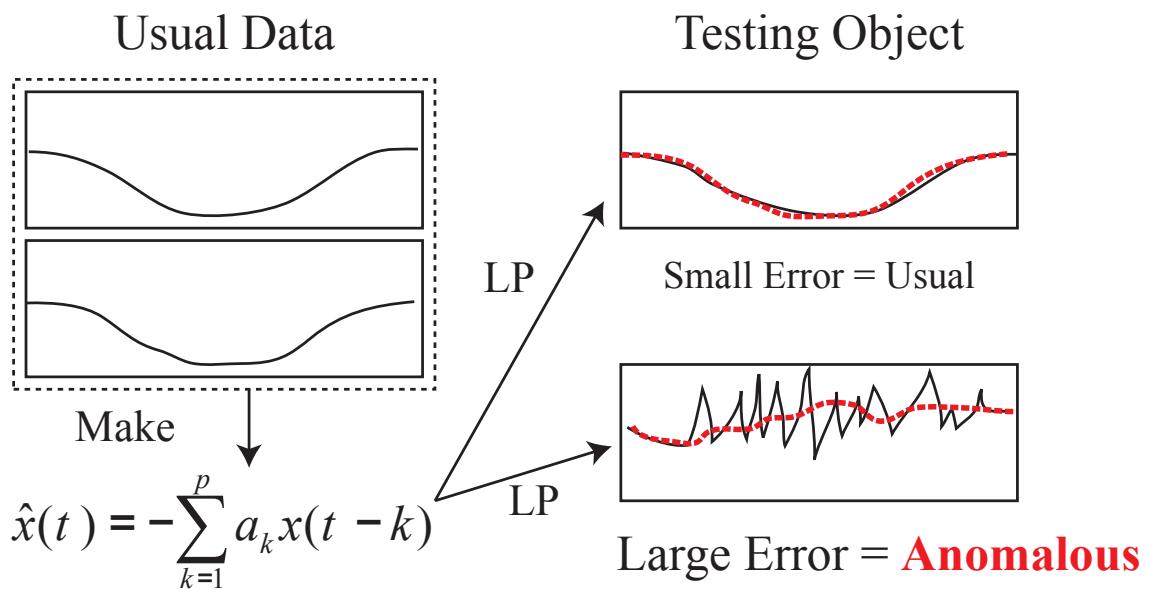


図 7.6: 線形予測分析を用いた異常検出のモデル

本論文では、信号生成モデルに自己回帰モデルを仮定し、モデル化に線形予測分析を用いる。線形予測とは、時系列データ $x(t)$ を

$$\hat{x}(t) = -\sum_{k=1}^p a_k x(t-k) \quad (7.4)$$

という漸化式にしたがって予測するものである (図 7.5)。ここで、 $\hat{x}(t)$ は $x(t)$ の予測値、 p は線形予測次数、 a_k は線形予測係数である。

線形予測分析を用いた強調処理の流れは次の通りである (図 7.6)。

1. 観測信号をそれぞれダウンサンプリングし、150 秒ごとのデータへ変換
2. 平常時の観測信号 20 日分について、それぞれ 10 次まで線形予測係数を算出

3. 得られた予測係数を、同じ次数ごとに平均化
4. 評価の対象となる日の東西・南北の観測信号 x_{ew}, x_{ns} を平均化予測係数を用いて線形予測し、 $\hat{x}_{ew}, \hat{x}_{ns}$ を算出
5. 誤差 $e_{ew} = x_{ew} - \hat{x}_{ew}, e_{ns} = x_{ns} - \hat{x}_{ns}$ を算出

ただし、線形予測に先立って、各データから平均値を減算しておくこととする。複数の平常データから得られた線形予測係数を平均化する理由は、実際のデータから推定したモデルに想定される、誤差や揺らぎを小さくするためである。

線形予測分析を用いた強調処理をした場合の異常評価値 $ac(t)$ は、式(7.2)中の x_{ew} と x_{ns} を、それぞれ e_{ew} と e_{ns} に置き変えたものとなる。

7.3.2 大域信号除去を用いた強調処理

観測信号から地震の前兆信号そのものを推定できれば、地震予測の精度の飛躍的な向上が期待できる。我々の観測信号は、環境電磁波の源信号の線形混合としてモデル化できる。具体的には、源信号ベクトル $\mathbf{s}(t)$ と混合行列 \mathbf{A} を用いて、観測信号ベクトル $\mathbf{x}(t)$ を次の式で表せる。

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) \quad (7.5)$$

地震前兆信号は源信号の1つとみなせるため、源信号 $\mathbf{s}(t)$ を推定、つまり、式(7.5)の逆問題を解くことで、地震前兆信号を推定できる。本論文では、Non-negative Matrix Factorization (NMF)[13][14]を用いて \mathbf{A} と $\mathbf{s}(t)$ を推定する。NMFとは、ある非負行列 \mathbf{X} を別の2つの非負行列 \mathbf{A} と \mathbf{S} の積

$$\mathbf{X} \approx \mathbf{A}\mathbf{S} \quad \mathbf{X}, \mathbf{A}, \mathbf{S} \geq 0 \quad (7.6)$$

で表現する手法である。入力が時系列信号 $\mathbf{x}(t) (t = 1, 2, \dots, T)$ の場合、式(7.6)は次のように表される。

$$\mathbf{x}(t) \approx \mathbf{A}\mathbf{s}(t) \quad \mathbf{x}(t), \mathbf{A}, \mathbf{s}(t) \geq 0 \quad (7.7)$$

これは、観測信号 $\mathbf{x}(t)$ から源信号 $\mathbf{s}(t)$ とその混合行列 \mathbf{A} を推定することに等しい。

しかし、地震前兆信号の特徴が現段階で不明であるため、仮に $\mathbf{s}(t)$ を正確に推定できたとしても、その中のどれが地震前兆であるかを正しく判断できない。そこで、まずは特徴が判明している信号を推定し、それを観測信号から取り除くことで、観測信号に含まれる地震前兆信号のSN比を向上させる。特徴が判明している信号の一つが大域信号である。本論文では、異常検出の強調処理として大域信号の推定と除去 [34] を行うこととする。

大域信号は源信号の1つとみなせるため、大域信号に着目すると、式(7.5)は次のように書き換えられる。

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{b}g(t) + \mathbf{l}(t) \quad (7.8)$$

ここで、 $g(t)$ は大域信号成分を、 \mathbf{b} は各観測点における大域信号の感度を表す。 $\mathbf{l}(t)$ は各観測点固有の信号を表すことから、局所信号ベクトルと呼ばれる。式(7.8)の場合、大域信号除去は次のように行う。

$$\mathbf{l}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{b}g(t) \quad (7.9)$$

大域信号除去を用いた強調処理をした場合の異常評価値 $ac(t)$ は、式(7.2)中の x_{ew} と x_{ns} を、大域信号除去後の l_{ew} と l_{ns} にそれぞれ置き変えたものとなる。

7.4 異常検出の実験

7.4.1 機械的な異常検出の検証

地震と関係している可能性の高い信号の検出について検証する。福岡県西方沖地震(発生時刻2005年3月20日10時53分、規模M7.0)の前兆と考えられる、2005年3月17日の0時から12時にかけて長崎県雲仙で観測された異常(図7.3を参照)を対象に異常検出を試みた。その結果を図7.7に示す。図の縦軸は異常評価値の強度を、横軸は時間を、実線が異常評価値 $ac(t)$ を、波線が $\alpha = 2, \beta = 0$ のときの閾値 $th(t)$ を表す。また、(a) 強調処理をしない場合、(b) 線形予測分析を用いた場合、(c) 大域信号除去を用いた場合である。

17日の0時から12時にかけて観測信号に見られた磁界強度の異常な上昇は、いずれの手法においても閾値 $th(t)$ を超えている。つまり、いずれの手法でも地震の前兆を検出できた。

結果を詳細に見てみる。まず、強調処理をしない場合、閾値 $th(t)$ が13から15の範囲、地震前兆によるピーク時の異常評価値 $ac(t)$ が約20となり、その比は約1.5倍であった。これに対し、強調処理をした場合は、閾値 $th(t)$ が0.8から1.1の範囲、地震前兆によるピーク時の異常評価値 $ac(t)$ が約10となり、その比は約10倍であった。また、強調処理をしない場合、異常評価値 $ac(t)$ は1日ごとに大きなピーク(約10)を持っており、それは地震前兆によるピークの約半分である。これに対し、強調処理をした場合は、1日ごとのピーク(約0.5)は地震前兆によるピークの約20分の1になっている。つまり、強調処理によって地震前兆が明確になり、閾値や1日ごとのピークとの比が大きくなることで、見逃しにくくなる。

さらに、強調処理をしない場合、19日の0時から未明にかけて異常評価値が上昇している。これに対し、強調処理をした場合は、同じ時間帯の異常評価値は上昇していない。ここで、その時間帯には観測信号の強度が全国的に上昇(図7.3)していたことから、その時間帯の異

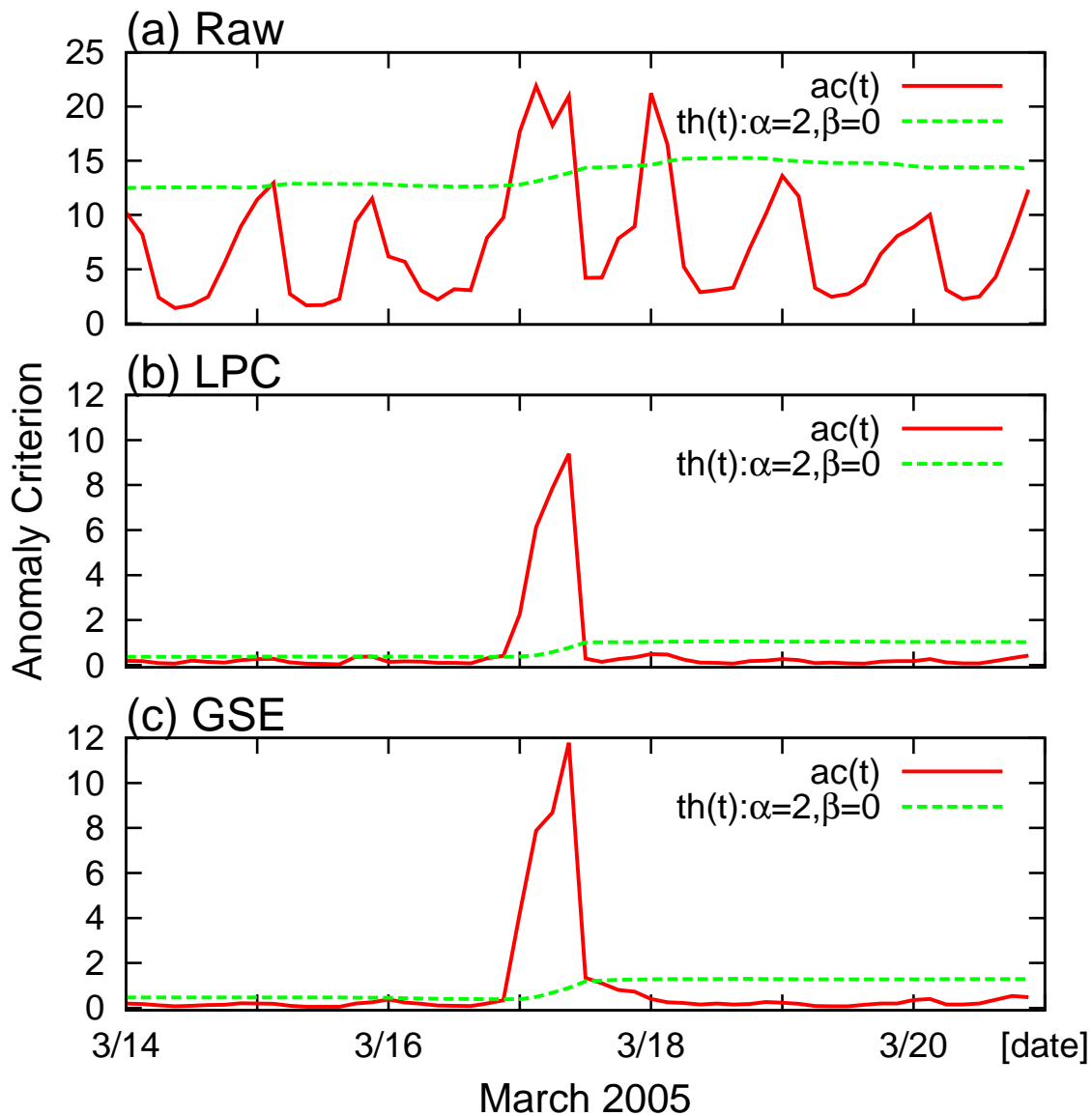


図 7.7: 長崎県雲仙における異常検出結果 (福岡西方沖地震, $\alpha = 2, \beta = 0$)

常評価値の上昇は大域信号によるものであり、検出されないことが望ましい。つまり、地震前兆信号の強調処理によって、誤検出を抑制できた。

これらの結果から、提案手法によって地震前兆と考えられる異常を検出でき、さらに、強調処理を行うことで検出の精度が向上すると考えられる。

表 7.1: 2007 年から 2008 年に検出距離内で発生した M5 以上の地震

日時	規模	北緯	東経	深度	場所
2007年2月17日09:02	M:6.2	41.73°	143.72°	40km	十勝沖
2007年3月25日09:41	M:6.9	37.22°	136.69°	11km	能登半島沖
2007年3月25日18:11	M:5.3	37.30°	136.83°	13km	石川県能登地方
2007年3月26日07:16	M:5.3	37.17°	136.49°	0km	能登半島沖
2007年4月15日12:19	M:5.4	34.79°	136.41°	16km	三重県中部
2007年7月16日10:13	M:6.8	37.57°	138.61°	17km	新潟県上中越沖
2007年7月16日15:37	M:5.8	37.50°	138.64°	23km	新潟県上中越沖
2007年7月16日23:17	M:6.7	36.87°	135.10°	374km	京都府沖
2007年7月28日17:55	M:5.0	34.04°	137.55°	335km	遠州灘
2007年8月1日17:15	M:5.5	33.99°	136.77°	383km	三重県南東沖
2007年8月22日16:26	M:5.4	41.97°	140.80°	122km	渡島支庁東部
2007年11月26日22:51	M:6.0	37.30°	141.76°	44km	福島県沖
2007年12月25日23:04	M:5.6	38.48°	142.15°	40km	宮城県沖
2008年4月17日04:19	M:5.8	39.04°	140.23°	166km	秋田県沿岸南部
2008年4月29日14:26	M:5.7	41.46°	142.11°	62km	青森県東方沖
2008年5月8日01:45	M:7.0	36.23°	141.61°	51km	茨城県沖
2008年5月31日23:28	M:5.0	40.06°	142.72°	28km	岩手県沖
2008年6月5日02:03	M:5.7	41.53°	139.22°	201km	北海道南西沖
2008年6月14日08:43	M:7.2	39.03°	140.88°	8km	岩手県内陸南部
2008年6月14日09:20	M:5.7	38.89°	140.67°	7km	宮城県北部
2008年6月14日12:27	M:5.2	39.14°	140.94°	10km	岩手県内陸南部
2008年6月16日23:14	M:5.3	39.00°	140.84°	7km	岩手県内陸南部
2008年7月19日11:39	M:6.9	37.52°	142.26°	32km	福島県沖
2008年7月21日20:30	M:6.1	37.14°	142.34°	27km	福島県沖
2008年8月9日00:53	M:5.4	41.14°	142.28°	51km	青森県東方沖
2008年9月11日09:20	M:7.1	41.78°	144.15°	31km	十勝沖
2008年9月22日16:31	M:5.6	41.54°	140.57°	152km	津軽海峡
2008年10月30日00:48	M:5.1	38.05°	141.73°	86km	宮城県沖
2008年12月4日08:16	M:6.1	38.53°	143.22°	24km	三陸沖
2008年12月20日19:29	M:6.6	36.53°	142.70°	0km	関東東方沖

7.4.2 大規模な検証と統計的評価

提案手法の地震前兆検出精度を、2007年から2008年のデータを用いて検証する。2007年から2008年に日本およびその近海で発生した地震は3901件あり、その中で、震央から検出可能距離内に稼働中の観測点があった地震は403件、さらにその中で、M5以上の地震は30件あった(表7.1)。

地震予測において重要な、M5以上で検出可能な地震を対象に検証を行った。ここでは、異常評価値の平均・標準偏差それぞれに着目した閾値の傾向を見るため、 α を変化させ β を0に固定した場合と、 β を変化させ α を1に固定した場合について、正検出率と検出された地震数を比較する。

なお、正検出率の定義は

$$\text{正検出率} \equiv \frac{\text{地震前兆による異常のサンプル数}}{\text{ac}(t) > \text{th}(t) \text{ となったサンプル数}} \quad (7.10)$$

とし、地震前兆による異常の定義は第7.2.3節で定義したものとする。また、検出された地震数に関しても第7.2.3節で定義したものとする。

図7.8に、 α を変化させ β を0に固定した場合の、(a)正検出率と(b)検出された地震数を示す。実線は強調処理をしない場合、破線は強調処理に線形予測分析を用いた場合、点線は強調処理に大域信号除去を用いた場合の値であり、図の横軸は閾値を与える α を表す。

まず、閾値と正検出率との関係を見る。図より、強調処理をしない場合は α の増加に対して正検出率が減少するのに対し、線形予測分析を用いた場合はほぼ横ばい、大域信号除去を用いた場合は上昇する。これは、異常評価値 $ac(t)$ を大きくする要因が地震とは無関係な場合もあることを示すと同時に、そのような要因からの影響が、強調処理によって軽減されることを示す。つまり、検出された異常と地殻活動との関連は、強調処理によって強まったと判断できる。さらには、大域信号除去を用いた場合の異常評価値 $ac(t)$ が、地震と明らかな相関を持っていることを意味する。

次に、閾値と検出された地震数との関係を見る。 $\alpha \leq 1.4$ においては、強調処理の有無にかかわらず30件の地震全てが検出された。 $\alpha > 1.4$ においては、 α の増加に対して単調減少したが、強調処理をした場合は強調処理をしない場合より減少が緩やかであった。これは、提案した強調処理が見逃しを減少させる働きを持つことを示す。前節の実験でも見られたように、地震前兆による異常評価値のピークと閾値の比が、強調処理によって大きくなったためと考えられる。

図7.9に、 α を1に固定し β を変化させた場合の結果を示す。図の見方は図7.8とほぼ同様であるが、横軸は β となっている。 β の増加に対する傾向は、 α を変化させ β を0に固定した場合と基本的に同様の結果となった。ここで、 α を変化させ β を0に固定した場合(図7.8)と比較して、 α を1に固定し β を変化させた場合は大域信号除去を用いた場合の正検出率の向上がより大きくなった。また、検出された地震数の減少がより小さくなった。このことから、最適な検出閾値を考えるには、直前期間の標準偏差に着目するとよいと言える。

現段階における正検出率は5%前後と低い水準である。しかし、例えば、地震ハザードステーション[64]で公開されている全国地震動予測地図では、30年間という長期間においての

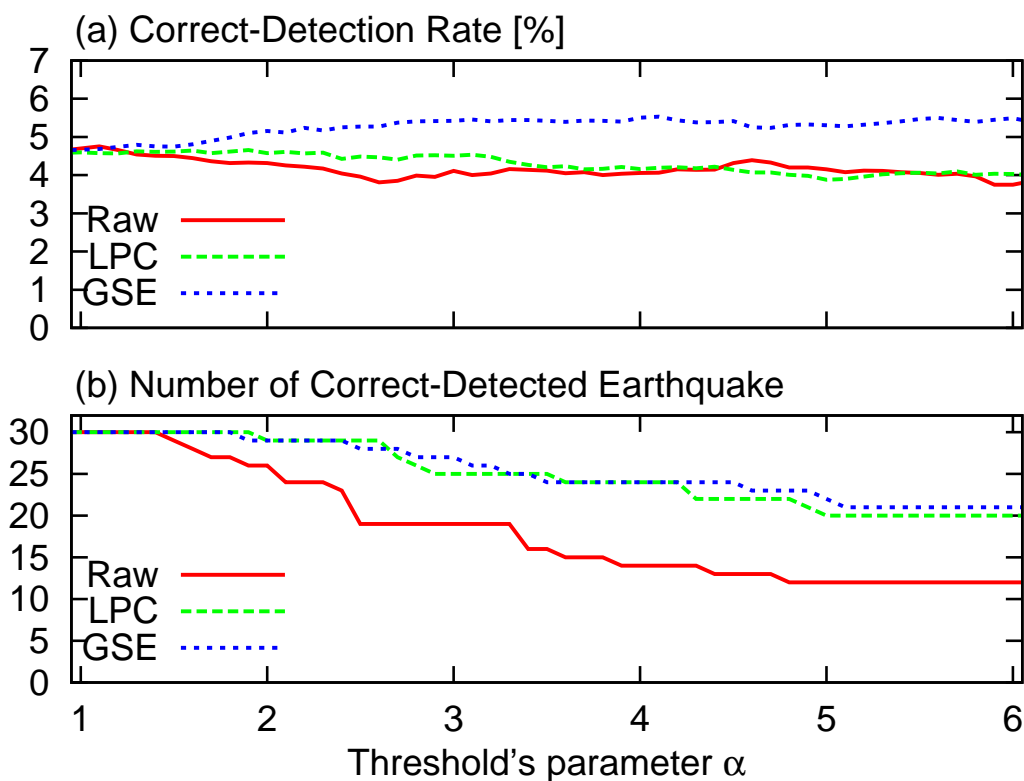


図 7.8: 2007 年～2008 年における M5 以上の地震の検出結果 (α を変化, β を 0 に固定)

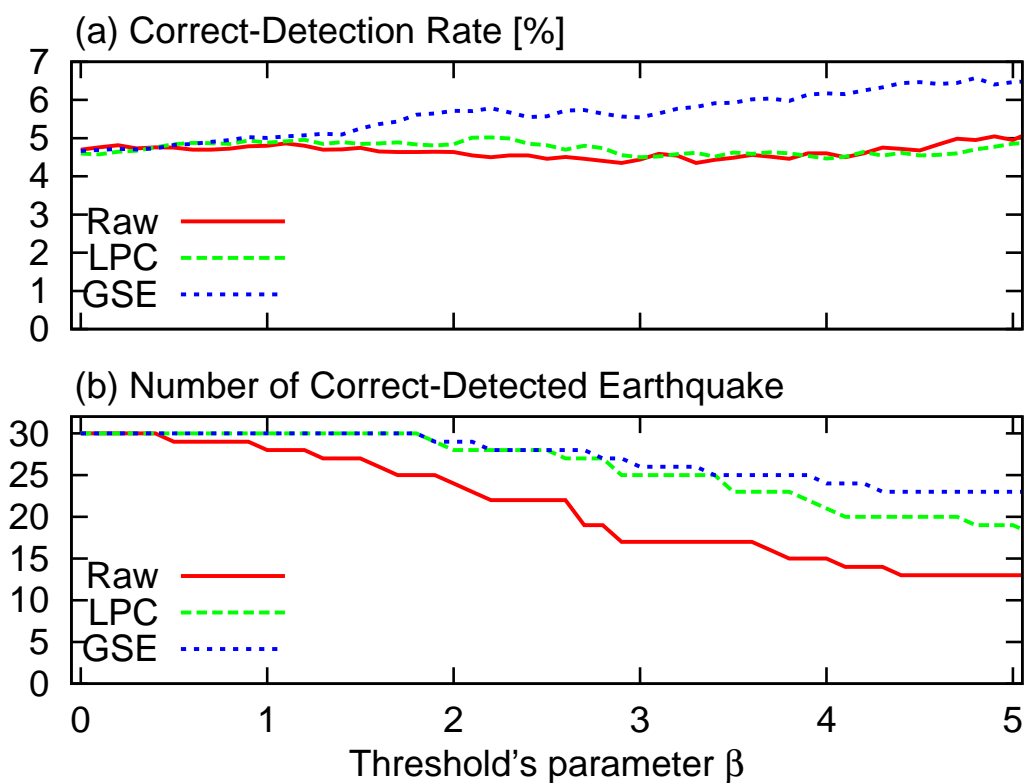


図 7.9: 2007 年～2008 年における M5 以上の地震の検出結果 (β を変化, α を 1 に固定)

発生確率を6%未満と見積もっている地域がほとんどである。単純な比較はできないものの、提案手法では8日間という短期間においての見積もりであり、5%前後でも大きいと言える。

正検出率が5%前後となった原因は、M5未満の地震を対象としていないためもあるが、提案手法では環境電磁波の強度上昇のみを手掛かりにしており、依然として地震とは無関係な電磁波放射を検出する機会が多いためと言える。今後は、環境電磁波の強度上昇以外の特徴・共通項や、強度が上昇しても「地殻活動による異常」として扱われなかった場合についての調査・研究を十分に行い、地震に関連する信号のさらなる強調手法や検出された異常の分別手法を構築していく必要がある。

7.5 まとめ

本論文では、ELF帯環境電磁波の観測信号の強度に着目し、地震と関係する異常放射を機械的に検出するための手法を提案した。地震と関連している可能性の高い異常信号が、提案手法によって実際に検出され、強調処理によって誤検出を抑制できることを示した。

さらに、2007年から2008年のデータを用いて大規模な実験を行い、強調処理の種類や検出閾値を比較し考察を行った。M5以上の地震を対象とした場合、大域信号除去を用いた強調処理を行うことで異常の検出精度が向上し、閾値の上昇が検出精度の向上に繋がった。特に、直前期間の標準偏差に基づいて閾値を上昇させた場合に、精度の向上が大きいことがわかった。これらの事実は、我々の異常検出手法が地震予測の手がかりとなり得ることを意味している。

今後の課題には、提案手法の正検出率が未だ低い水準であることから、検出精度を向上させるための更なる工夫がまず挙げられる。例えば、地震と無関係な信号を観測信号からさらに除去する処理や、検出された異常の分別処理である。そのために、NMFなどで推定された他の源信号について、特に発生要因との関連を丹念に調査すること、地震の直前期間に観測された信号の特性を調査することが重要である。

第8章 結論

8.1 本論文の総括

本論文では、ELF 帯環境電磁波の解析に適した Blind Source Separation について、大域信号を手掛かりに模索した。

第1章では、本研究の背景である、環境電磁界観測データを解析することで自然界の情報を得ることの重要性について述べた。また、実際の環境電磁界観測データは多くの電磁波が混在した状態であり、有用な信号を高い精度で取り出すことが求められることについて述べた。それを実現する手段として Blind Source Separation に着目し、現時点で判別可能な成分が大域信号のみであることから、大域信号を手掛かりに、ELF 帯環境電磁波の解析に適した手法を模索することを、本論文の目的として述べた。

第2章では、地殻活動による電磁波放射のメカニズムをはじめ、雷や人間活動など環境電磁波の発生要因について述べた。また、本研究で解析の対象とする ELF 帯環境電磁波の観測の概要について述べた。

第3章では、本論文を通して使用する大域信号除去について述べた。大域信号除去手法については、大域信号の推定に BSS を用いること、推定された複数の減信号から大域信号を判別する方法を述べた。大域信号除去の評価指標については、実際のデータを用いる場合には SN 比を計算できないこと、相互情報量に着目し、その減少幅が大域信号除去の指標となりうることを示した。

第4章では、BSS の一つである独立成分解析 (ICA) について説明し、それを用いた大域信号除去について述べた。また、大域信号の除去精度を向上させるため、大域信号の推定に使用する観測信号を限定する工夫について述べた。実験より、実際に大域信号の推定ができること、解析する観測信号を限定することで、大域信号の推定・除去精度が向上することを示した。

第5章では、ELF 帯環境電磁波観測データの解析に対し、ICA が最適ではない可能性を示すとともに、より適した解析手法として非負行列因子分解 (NMF) を導入した。実験より、解析する観測信号を限定する必要のあった ICA に対し、NMF は全ての観測信号を解析しても同程度の精度で大域信号を推定・除去できることを示した。

第6章では、NMFの基本的なアルゴリズムであるISRAが外れ値を多く含む信号の解析に失敗する場合があることを指摘し、その解決方法として、L2ノルムではなく近似的L1ノルムを最小化するアルゴリズムを提案した。実験より、大域信号と外れ値を多く含む異常信号の推定精度が向上すること、外れ値を多く含む観測信号からも大域信号が適切に除去されることを示した。

第7章では、環境電磁波の強度に着目した地震前兆電磁波の検出手法とともに、その前処理として大域信号除去を用いることについて述べた。実験より、地震前兆電磁波を検出できること、大域信号除去によって誤検出が抑制されることを示した。

8.2 本研究で残された課題

本論文では、知見の少なさから、地震前兆電磁波の直接的な抽出を行わなかった。しかし、ISRAやQuasi-L1 NMFでは、大域信号以外にも有意な源信号を推定できている。源信号とその要因、特に地震との関連付けを丹念に行い、地震前兆電磁波に関する知見を増やすとともに、信号の要因を機械的に判別する方法について研究を行う必要がある。

また、本論文の第5章において、ELF帯環境電磁波の物理的な性質について再考し、解析する信号の数理モデルを変更した。しかし、変更後の数理モデルでも不完全な可能性がある。例えば、推定の対象とした大域信号の日変化は電離層の日変化の影響であるが、電離層の日変化には厳密には観測点によって時差が存在する。これは、時不変を想定していた混合行列 \mathbf{A} が、実際には時変であることを意味する。また、現在は大域信号の放射源を単一として扱っているが、夏季には雷放電の頻発する地域が他にも出現している可能性がある。今後、ELF帯環境電磁波の源信号や局所信号の推定精度をさらに向上させるには、時変性を考慮したモデルの導入や、大域信号放射源を複数想定することが必要となると考えられる。

加えて、環境電磁界の観測手法そのものを見直すことも考える必要がある。現在は、アナログ回路で構成された従来の観測システムとともに、PCを導入した新観測システムが運用されている。新観測システムではPCによる柔軟なデジタル処理が可能であるため、環境電磁波の解析により適した処理を、観測の段階においても考えることが可能である。

また、本論文において用いたISRAおよびQuasi-L1 NMFでは、特異値分解を用いて行列の初期化を行っている。これにより、大域信号などエネルギーの大きい源信号の推定精度が向上し、解も一意に定まっている。しかし、乱数を用いて行列を初期化した場合、源信号の推定精度が低下し、解も一意に定まらなくなる。つまり、現段階では推定結果が初期値に大きく依存することになる。これを解決すべく、新たな工夫を導入する必要がある。例えば、非負の信号における独立性の指標を模索し、アルゴリズムに組み込むことが考えられる。

本論文の第7章では、環境電磁波の強度に着目した地震前兆電磁波の検出を試みたが、正検出率は低い水準であった。推定した局所信号や源信号をさらに解析し、異常の分別手法を構築することが求められる。

8.3 本研究の応用

本論文ではELF帯環境電磁波データを解析の対象としていたが、本論文で提案したQuasi-L1 NMFはELF帯環境電磁波の解析に特化しているわけではない。つまり、一般的なNMFが適用可能であれば、Quasi-L1 NMFも適用可能である。そのため、様々な問題への広い応用が期待できる。例えば、音声の特徴抽出や混成画像の分離、集合知におけるデータマイニングに応用できる。Quasi-L1 NMFが他のどのような問題を解くのに適しているのか模索するなど、本研究の成果を利用した、より多く社会貢献を目指していく。

付録 A 大域信号除去の処理例

A.1 独立成分解析を用いた場合 (第4章に関する付録)

A.1.1 2005年4月6日から8日

2005年4月5日には、秋田県など東北地方において頻繁な雷放電が報告されている [63].

表 A.1: 大域信号除去結果の評価 (2005年4月6日から8日, 振幅値利用)

データ	<i>GIC</i>
観測信号	0.2132
推定された局所信号	
平均的な観測信号	0.1276
NG-FICA (全ての観測信号を解析)	0.1458
NG-FICA (選択した観測信号を解析)	0.0782
ExInfomax(全ての観測信号を解析)	0.0902
ExInfomax(選択した観測信号を解析)	0.0764

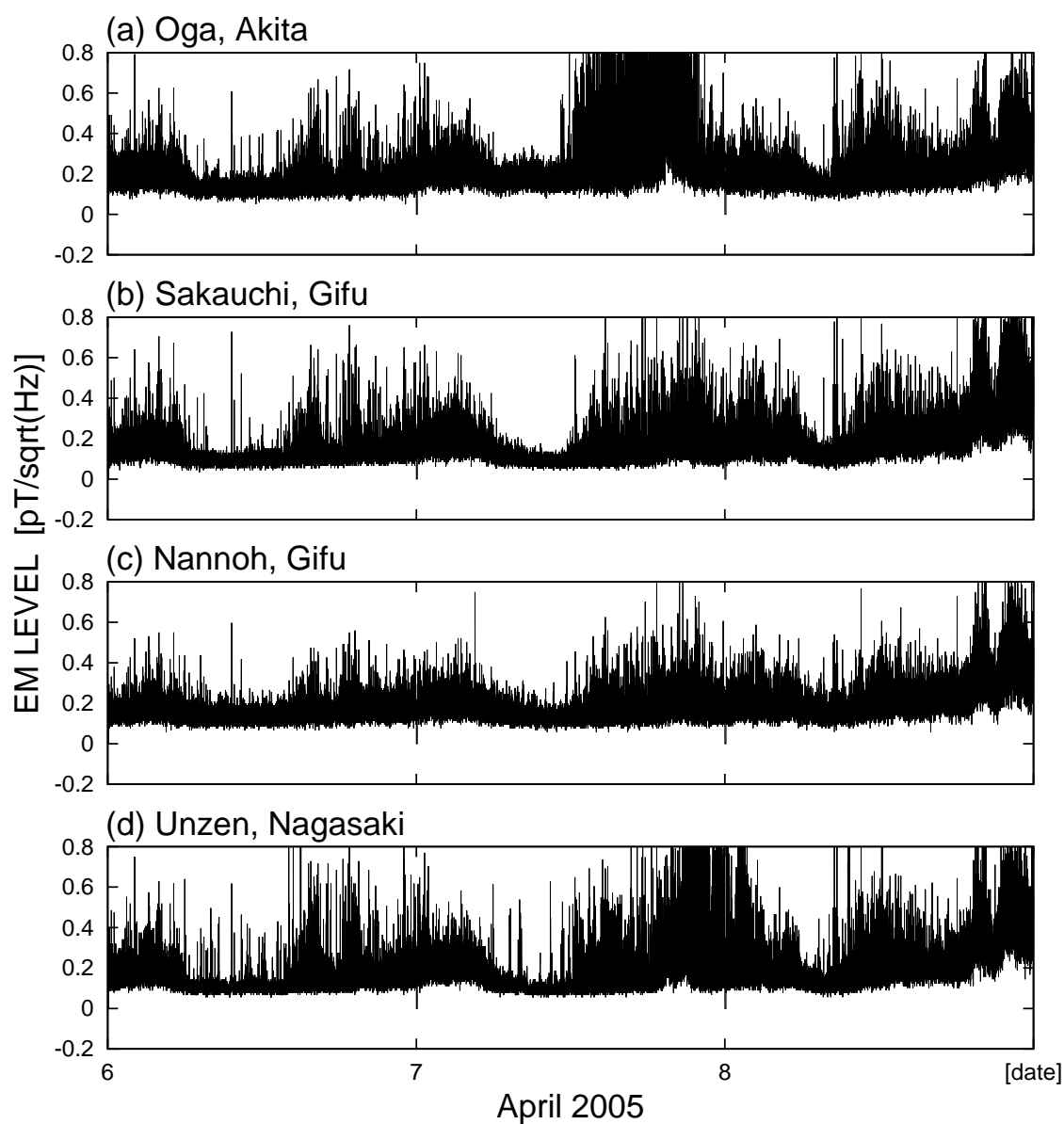


図 A.1: ELF 帯環境電磁波の観測信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 振幅値利用)

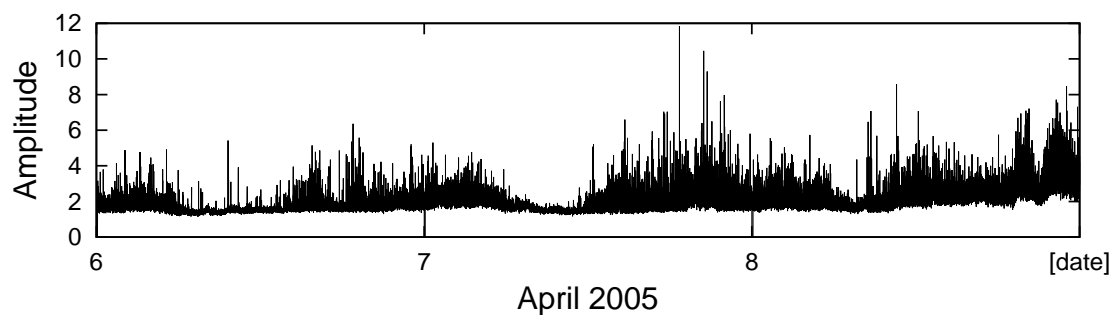


図 A.2: 平均的な観測信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 振幅値利用)

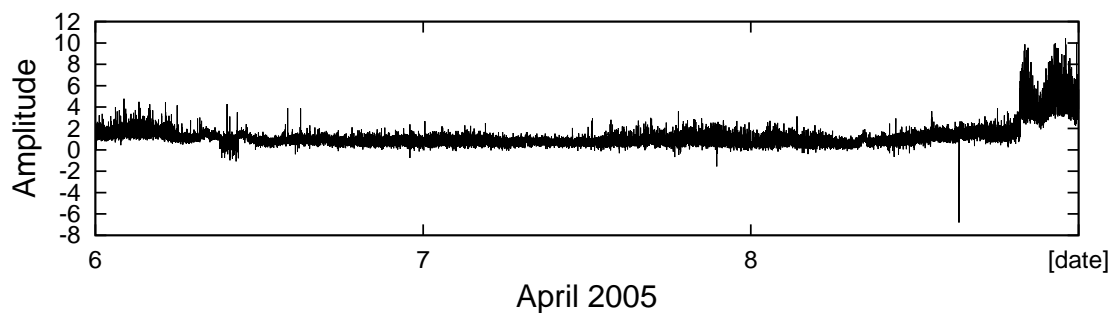


図 A.3: 全ての観測信号をから NG-FICA によって推定された大域信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 振幅値利用)

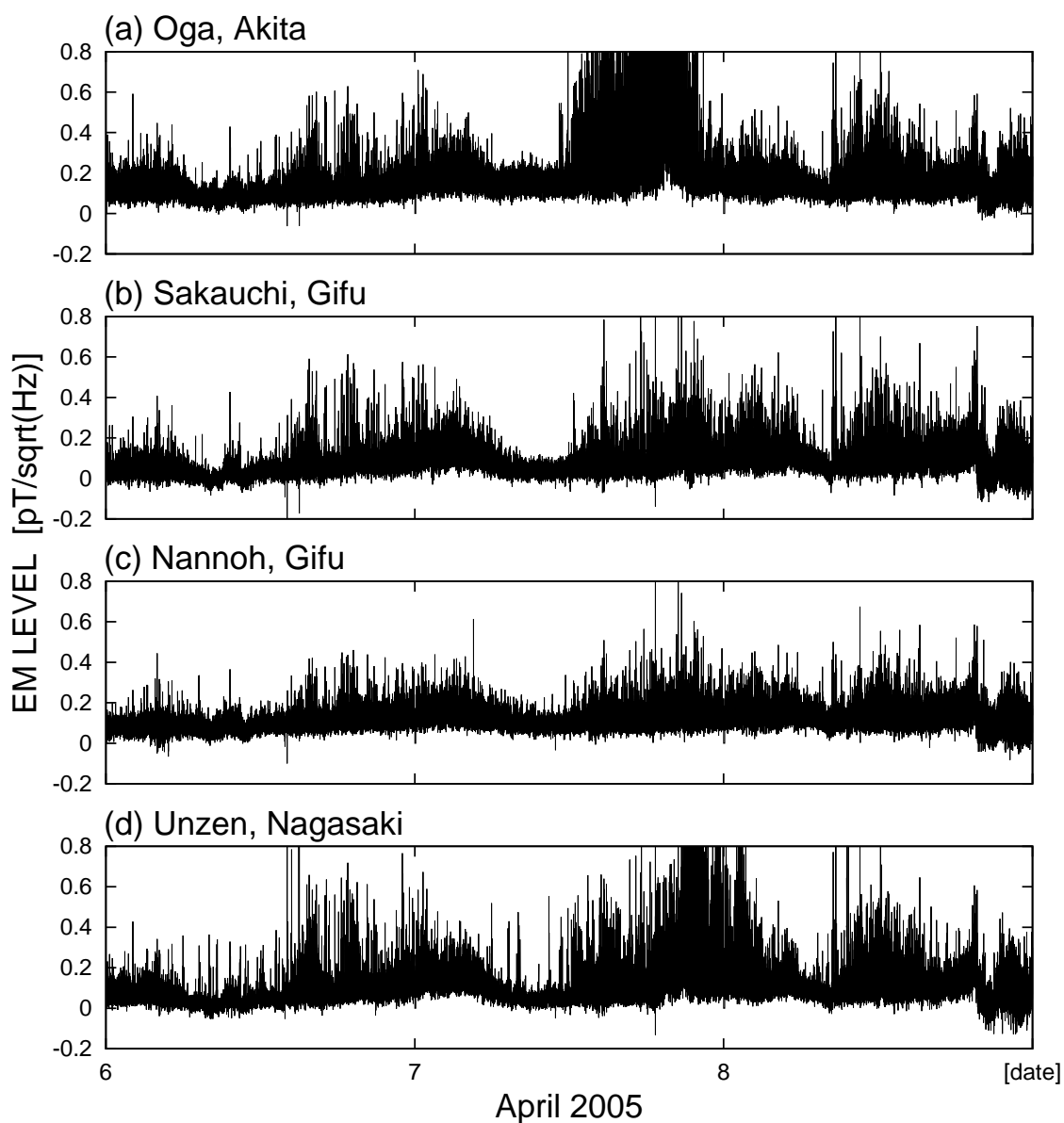


図 A.4: 全ての観測信号をから NG-FICA によって推定された局所信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 振幅値利用)

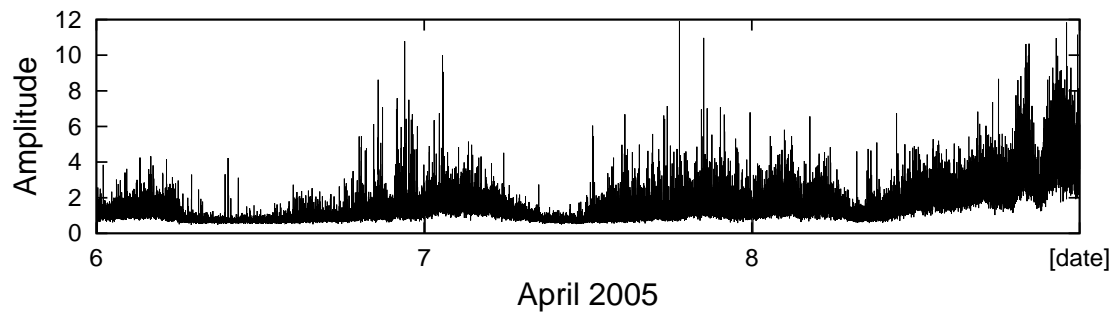


図 A.5: 選択した観測信号をから NG-FICA によって推定された大域信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 振幅値利用)

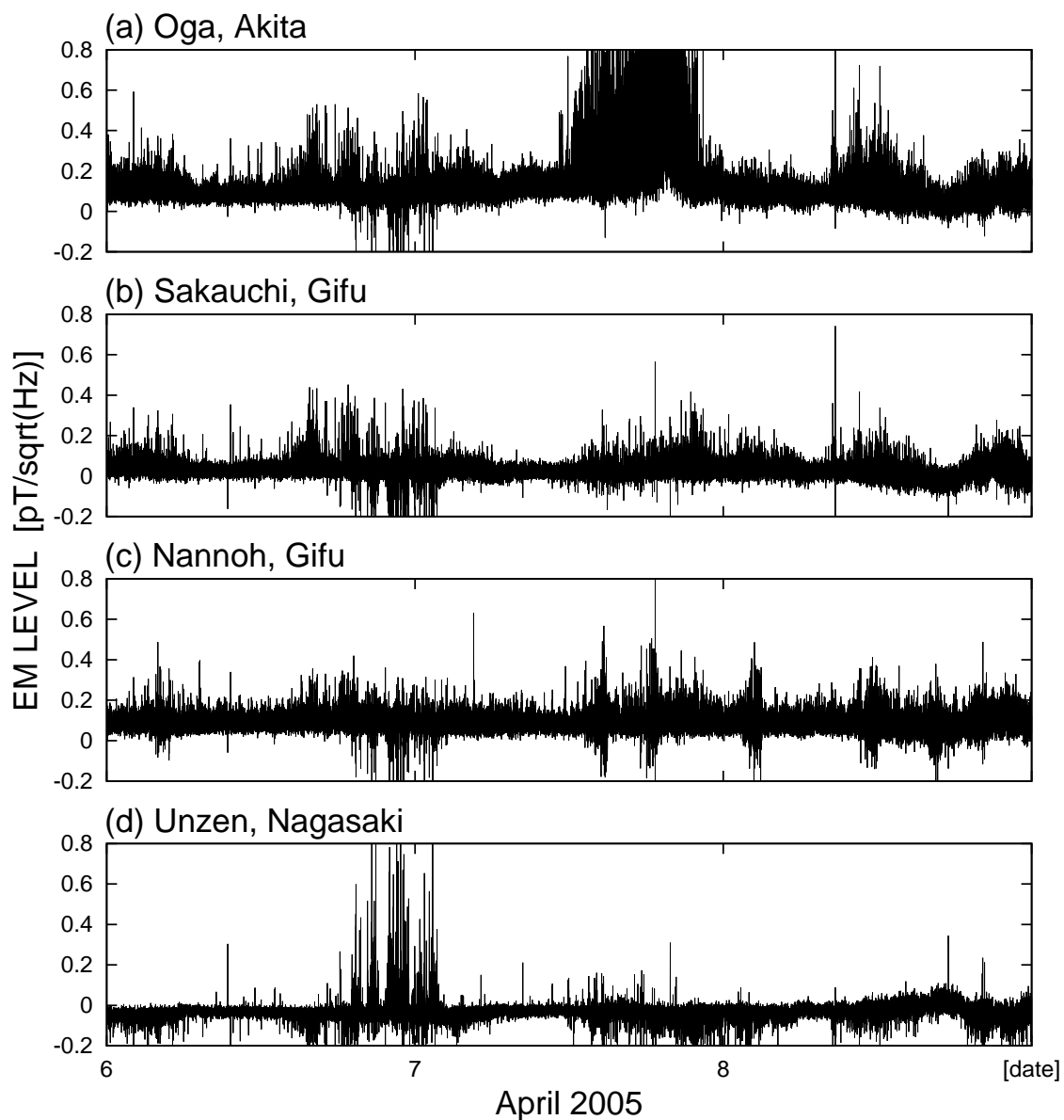


図 A.6: 選択した観測信号をから NG-FICA によって推定された局所信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 振幅値利用)

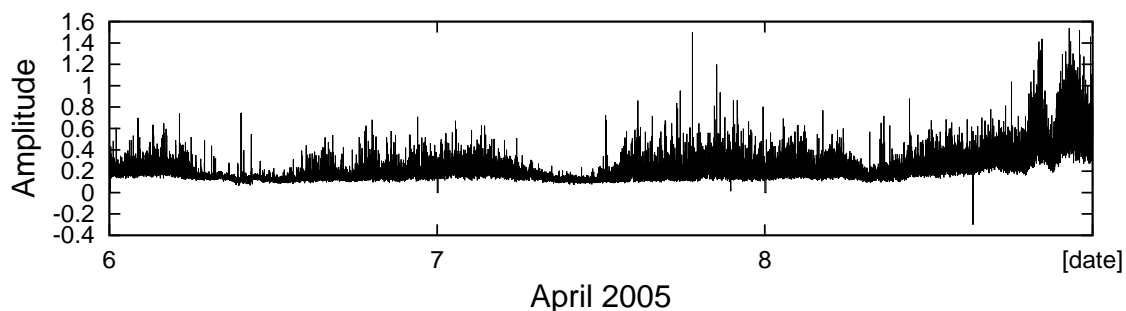


図 A.7: 全ての観測信号をから ExInfomax によって推定された大域信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 振幅値利用)

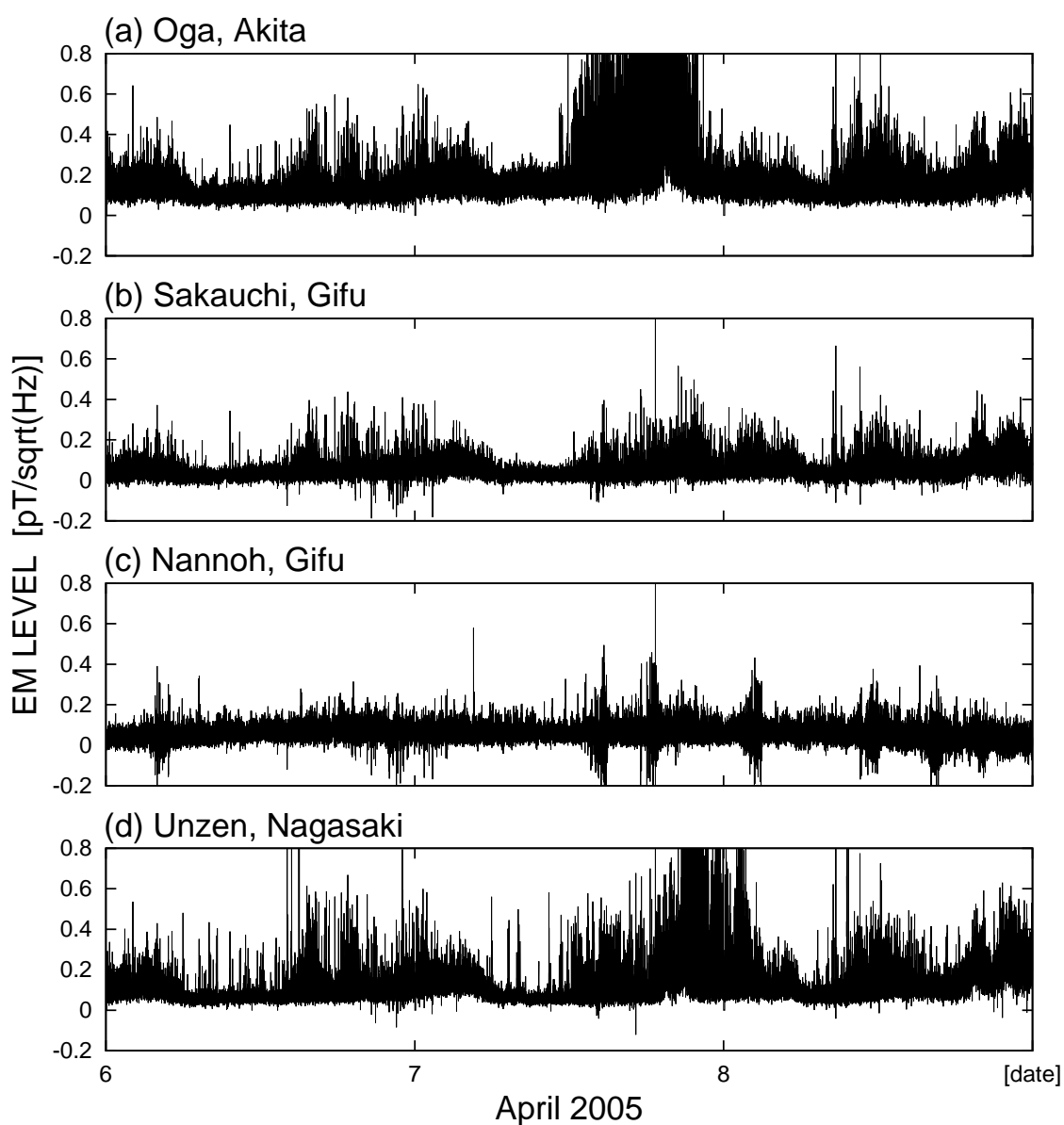


図 A.8: 全ての観測信号をから ExInfomax によって推定された局所信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 振幅値利用)

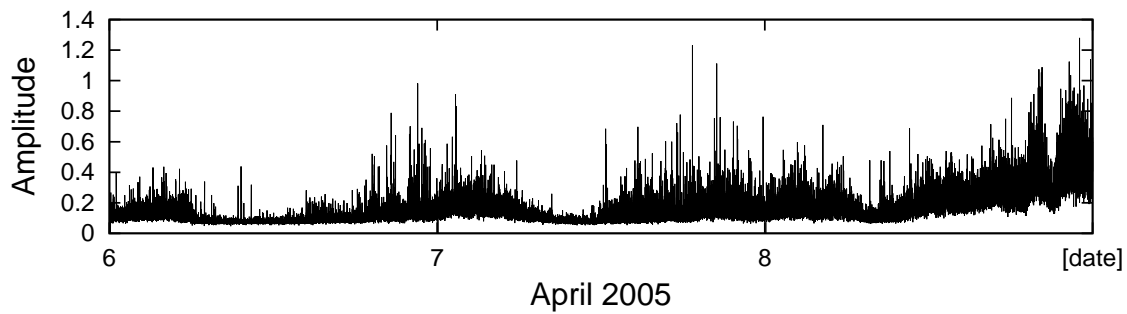


図 A.9: 選択した観測信号をから ExInfomax によって推定された大域信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 振幅値利用)

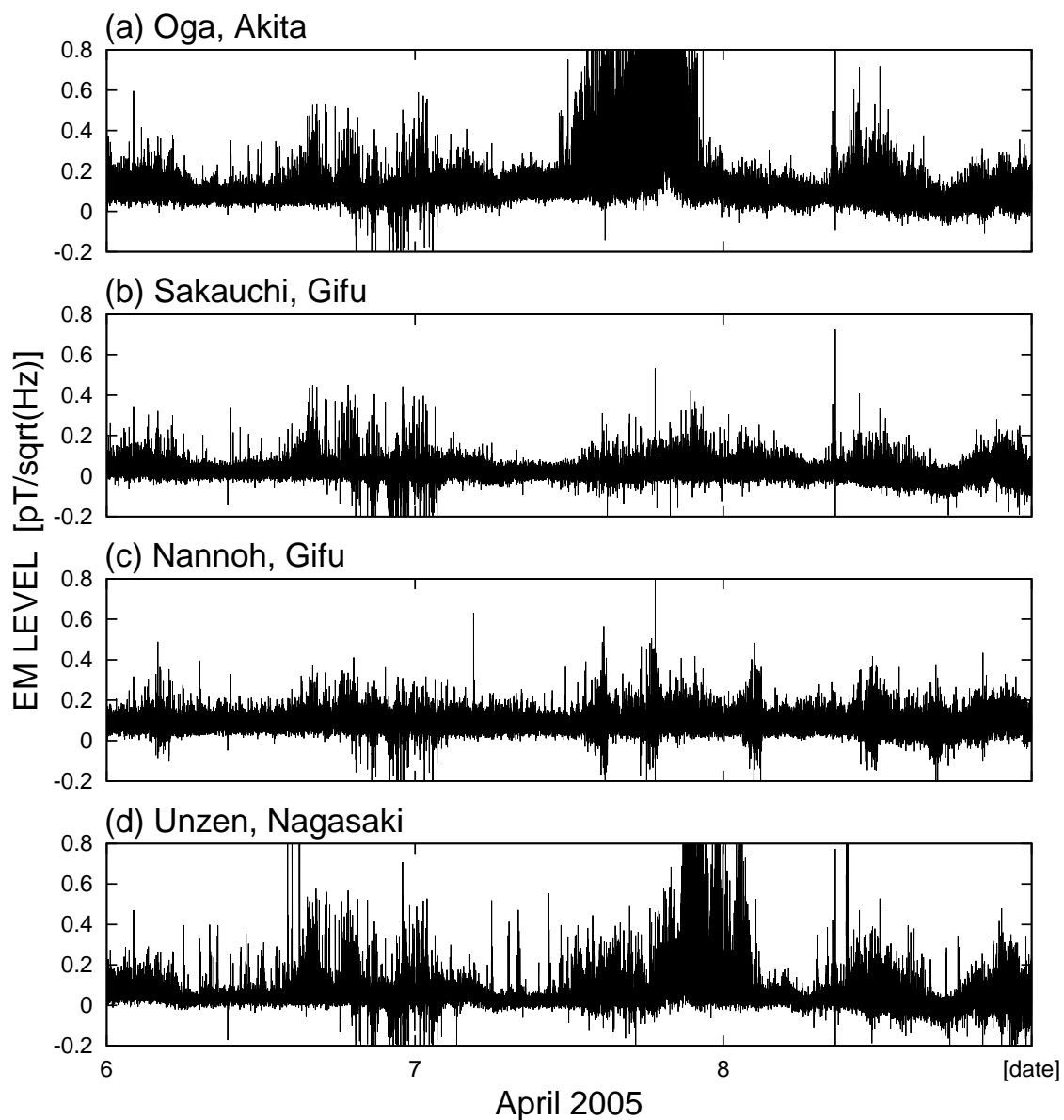


図 A.10: 選択した観測信号をから ExInfomax によって推定された局所信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 振幅値利用)

A.1.2 2006年3月27日から29日

2006年3月28日には、大阪府など関西地方において頻繁な雷放電が報告されている [63].

表 A.2: 大域信号除去結果の評価 (2006年3月27日から29日, 振幅値利用)

データ	<i>GIC</i>
観測信号	0.1944
推定された局所信号	
平均的な観測信号	0.1341
NG-FICA (全ての観測信号を解析)	0.1483
NG-FICA (選択した観測信号を解析)	0.0633
ExInfomax(全ての観測信号を解析)	0.1756
ExInfomax(選択した観測信号を解析)	0.0586

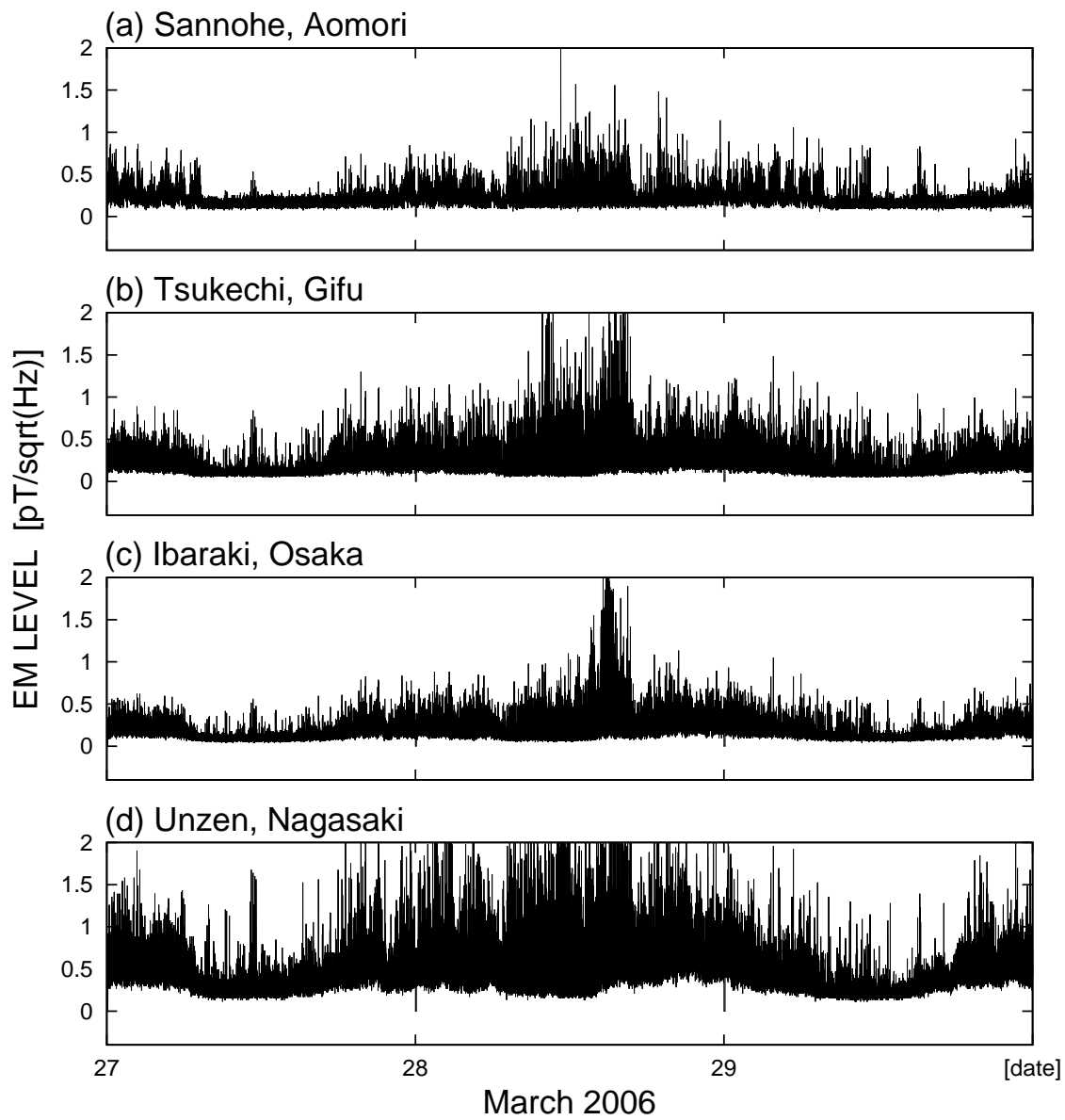


図 A.11: ELF 帯環境電磁波の観測信号 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 振幅値利用)

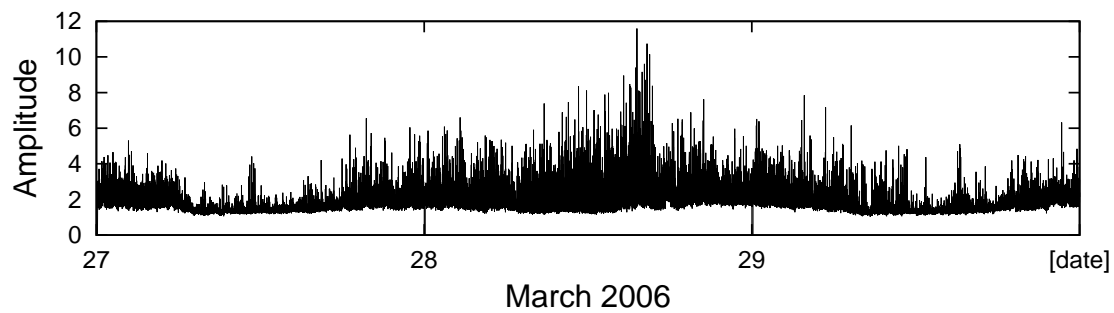


図 A.12: 平均的な観測信号 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 振幅値利用)

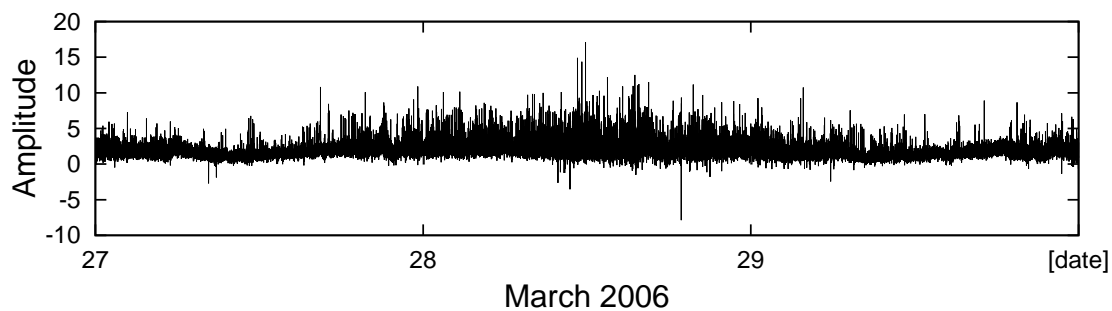


図 A.13: 全ての観測信号をから NG-FICA によって推定された大域信号 (2006年3月27日から29日, 振幅値利用)

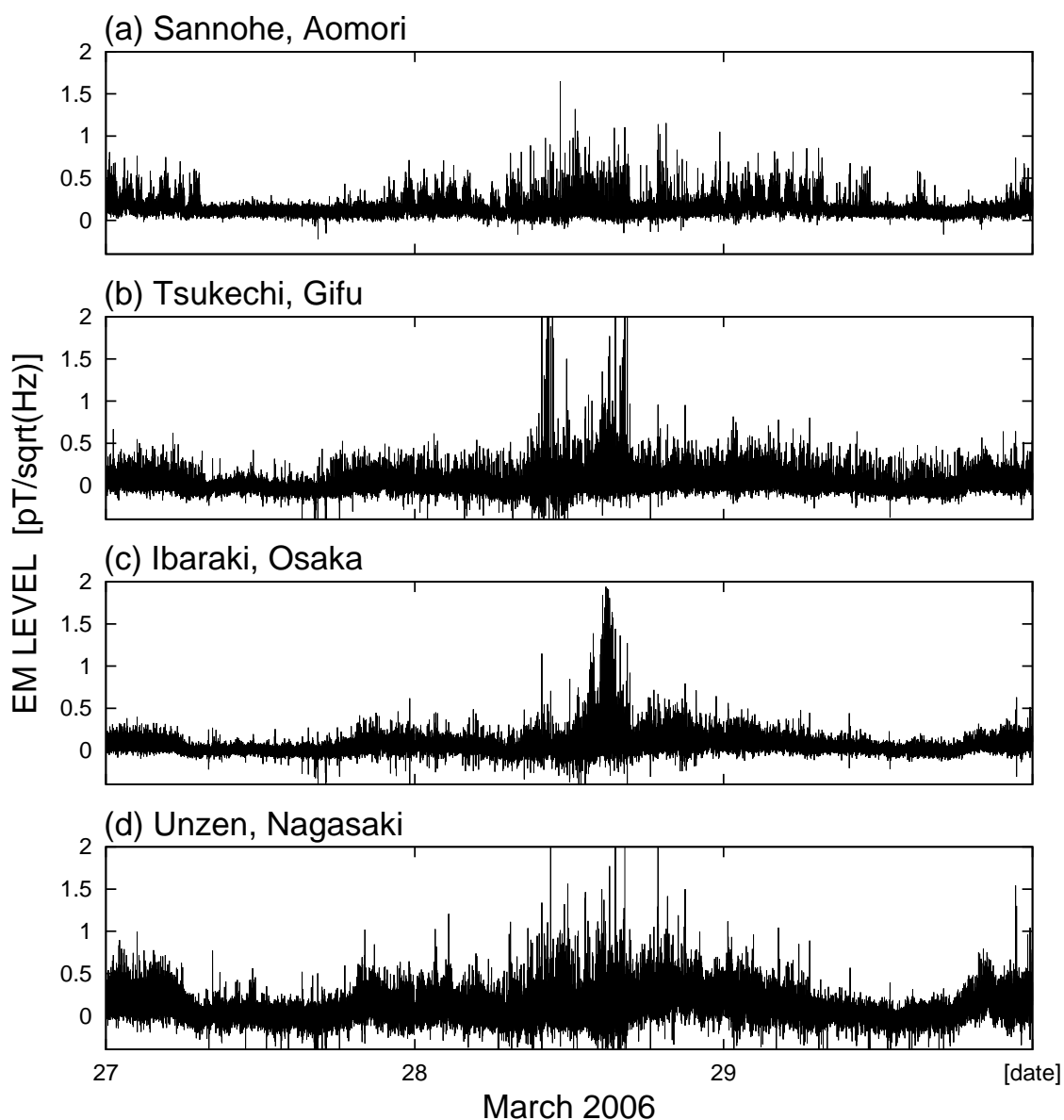


図 A.14: 全ての観測信号をから NG-FICA によって推定された局所信号 (2006年3月27日から29日, 振幅値利用)

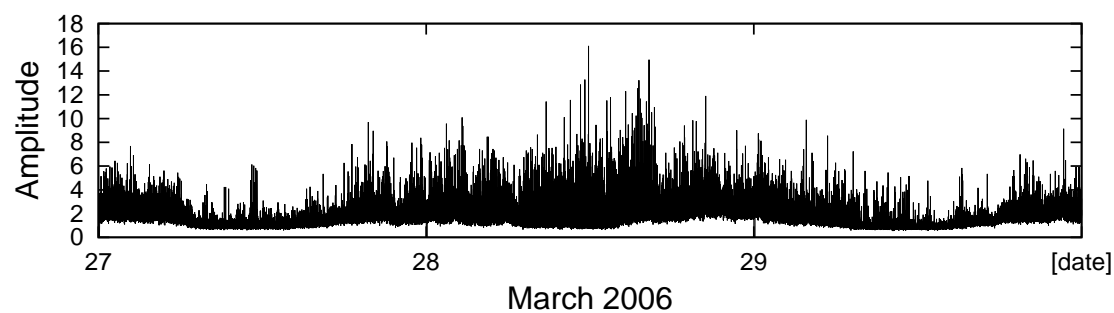


図 A.15: 選択した観測信号をから NG-FICA によって推定された大域信号 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 振幅値利用)

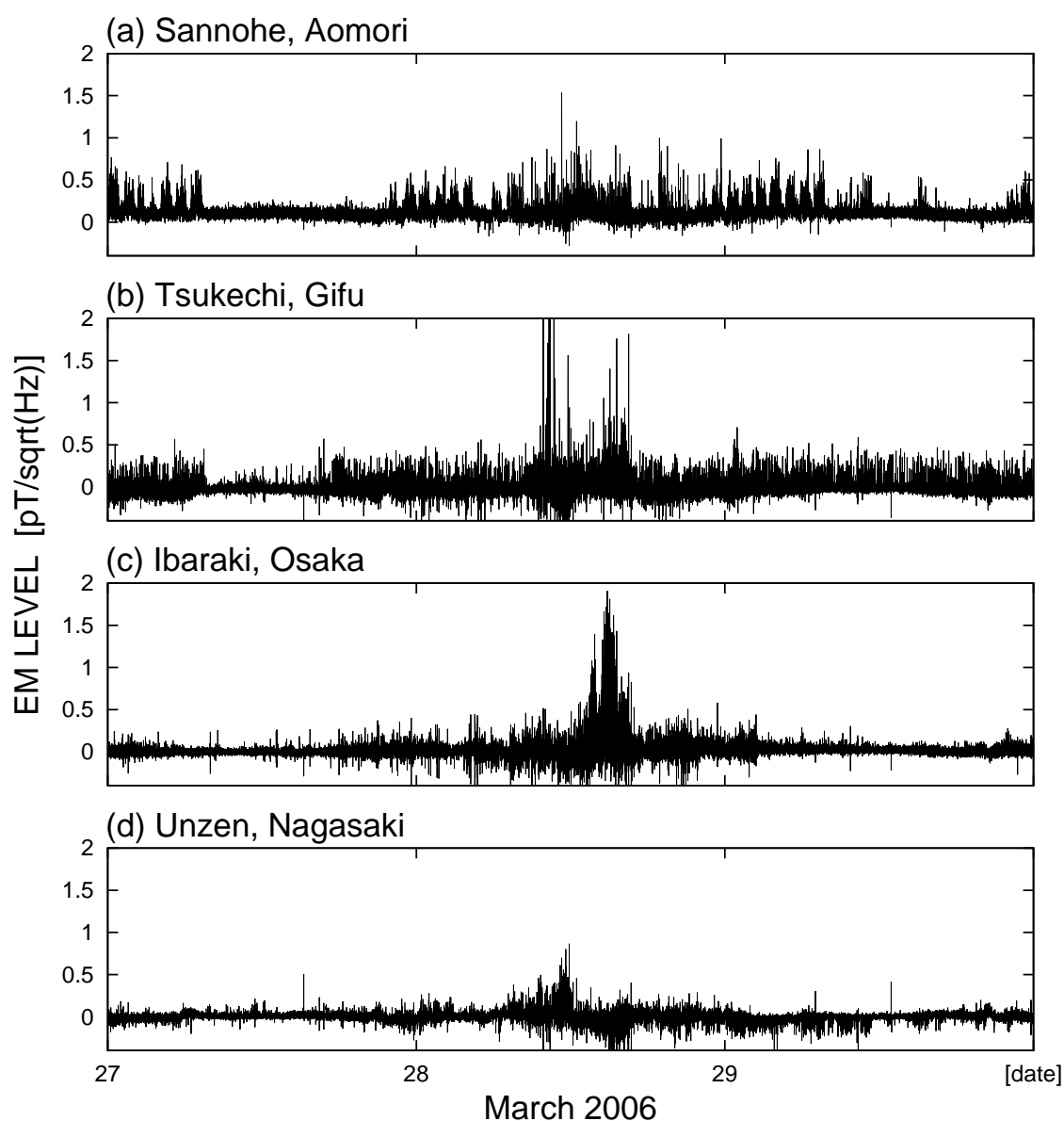


図 A.16: 選択した観測信号をから NG-FICA によって推定された局所信号 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 振幅値利用)

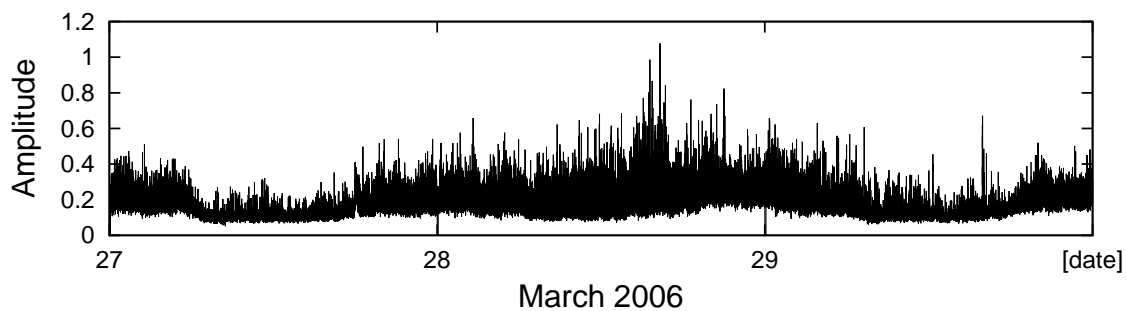


図 A.17: 全ての観測信号をから ExInfomax によって推定された大域信号 (2006年3月27日から29日, 振幅値利用)

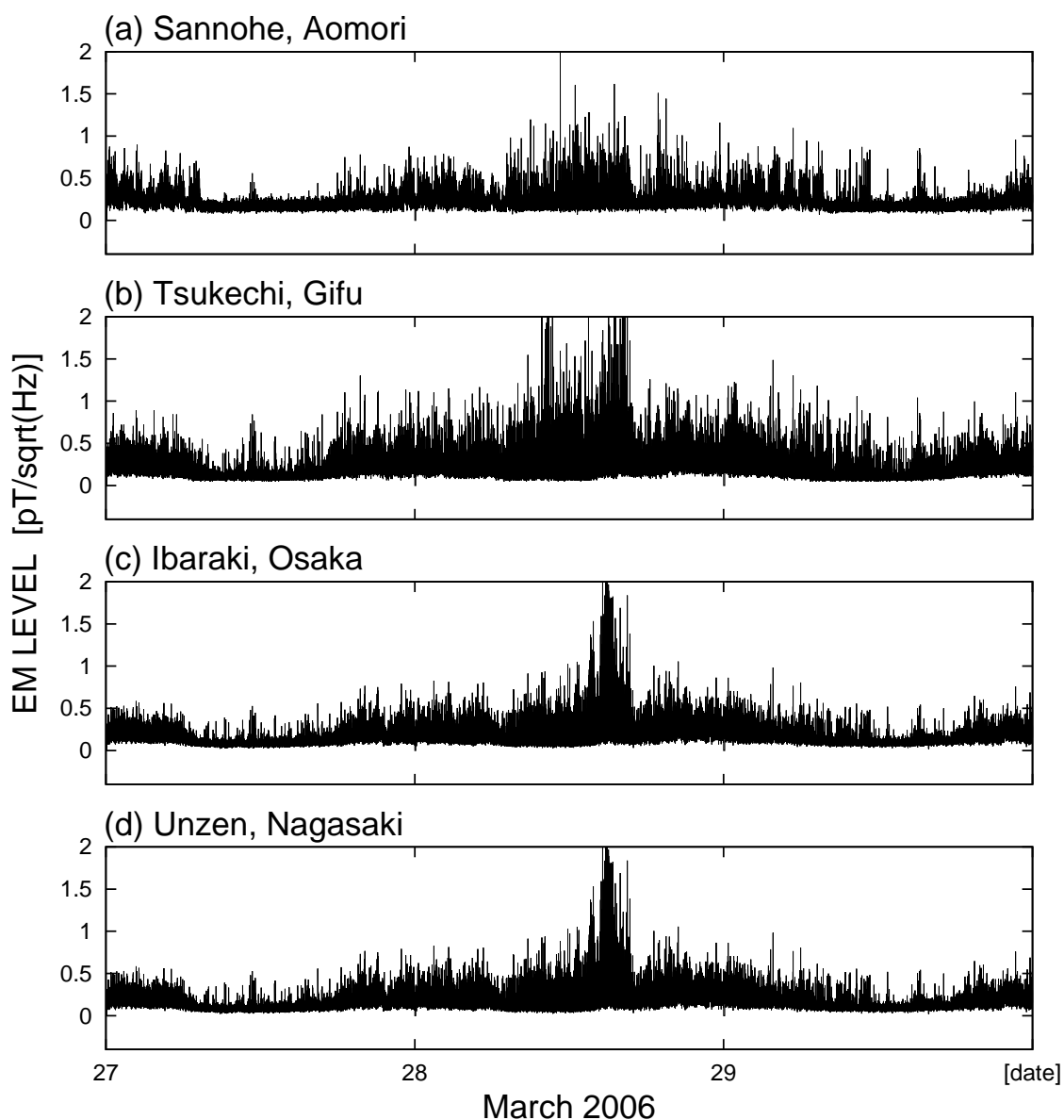


図 A.18: 全ての観測信号をから ExInfomax によって推定された局所信号 (2006年3月27日から29日, 振幅値利用)

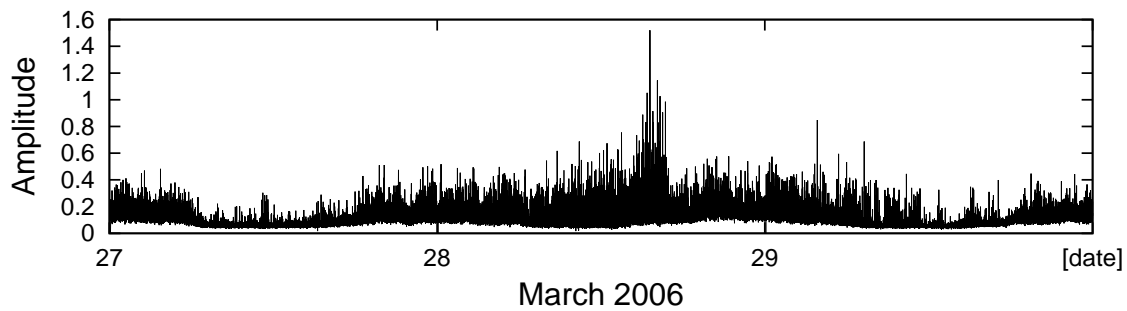


図 A.19: 選択した観測信号をから ExInfomax によって推定された大域信号 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 振幅値利用)

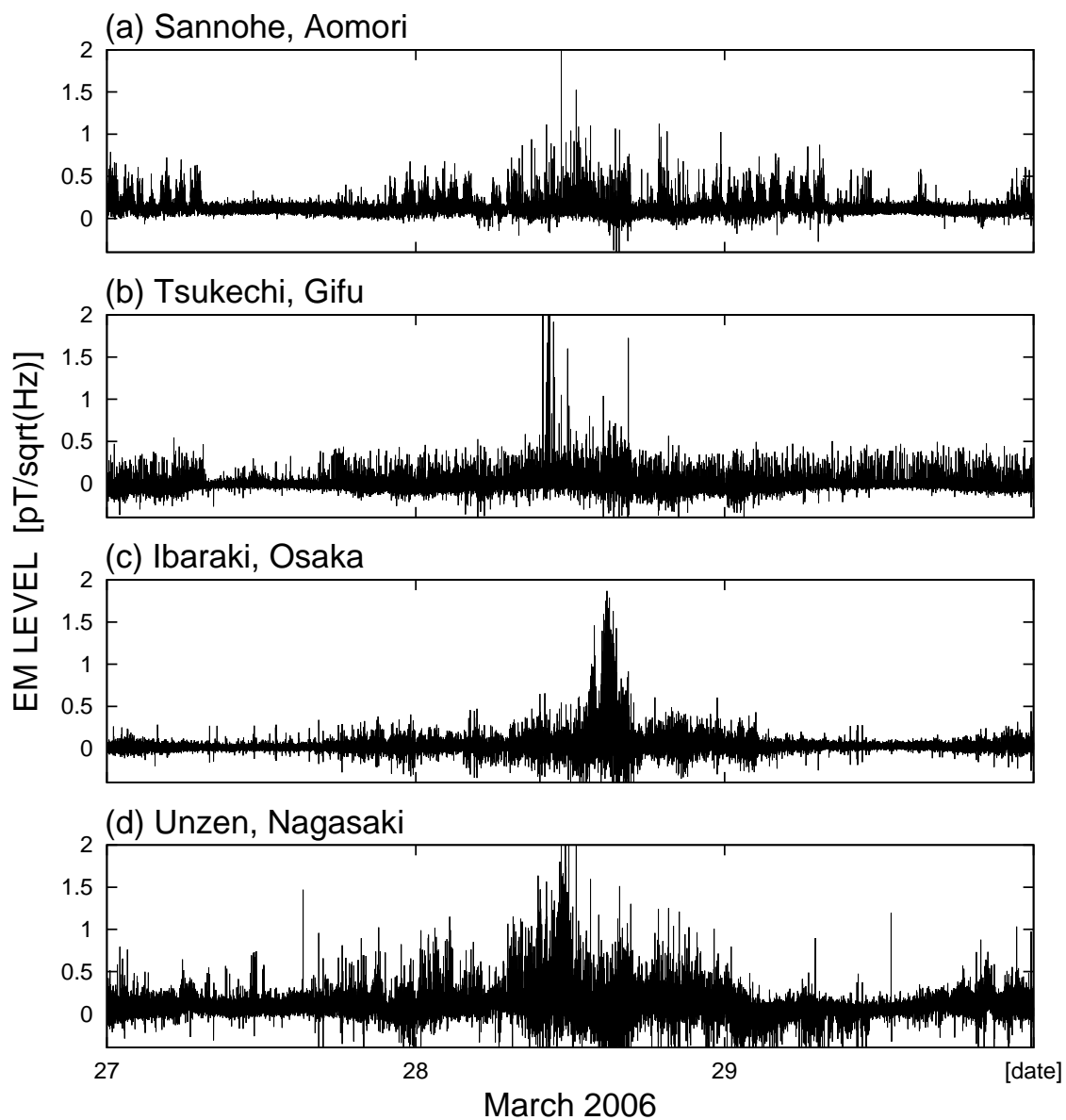


図 A.20: 選択した観測信号をから ExInfomax によって推定された局所信号 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 振幅値利用)

A.2 非負行列因子分解を用いた場合 (第5章に関する付録)

A.2.1 2001年1月1日から3日

2001年1月1日から3日には、地震と関連付けられる異常電磁波や頻繁な雷放電は報告されていない。

表 A.3: 大域信号除去結果の評価 (2001年1月1日から3日, 二乗値利用)

データ	<i>GIC</i>
観測信号	0.2892
推定された局所信号	
平均的な観測信号	0.1225
NG-FICA (全ての観測信号を解析)	0.3463
NG-FICA (選択した観測信号を解析)	0.1094
ISRA (全ての観測信号を解析)	0.1107

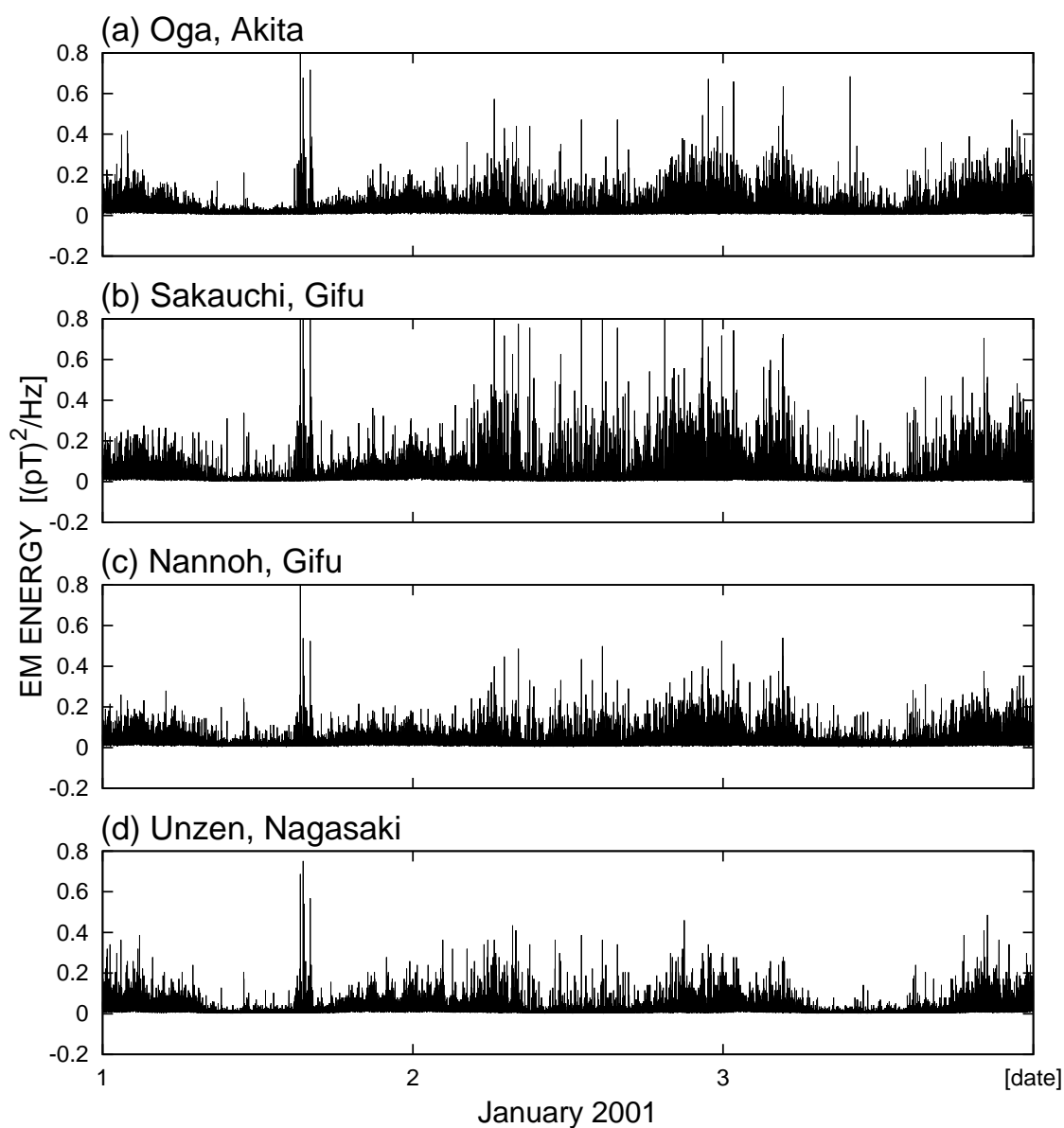


図 A.21: ELF 帯環境電磁波の観測信号 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 二乗値利用)

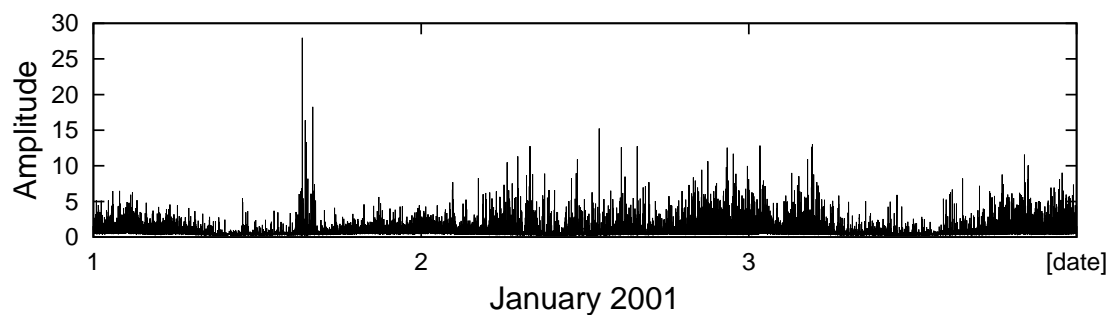


図 A.22: 平均的な観測信号 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 二乗値利用)

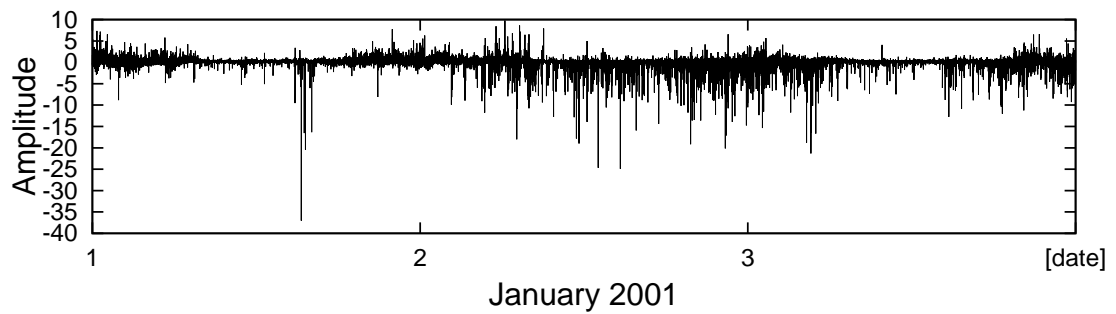


図 A.23: 全ての観測信号から NG-FICA によって推定された大域信号 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 二乗値利用)

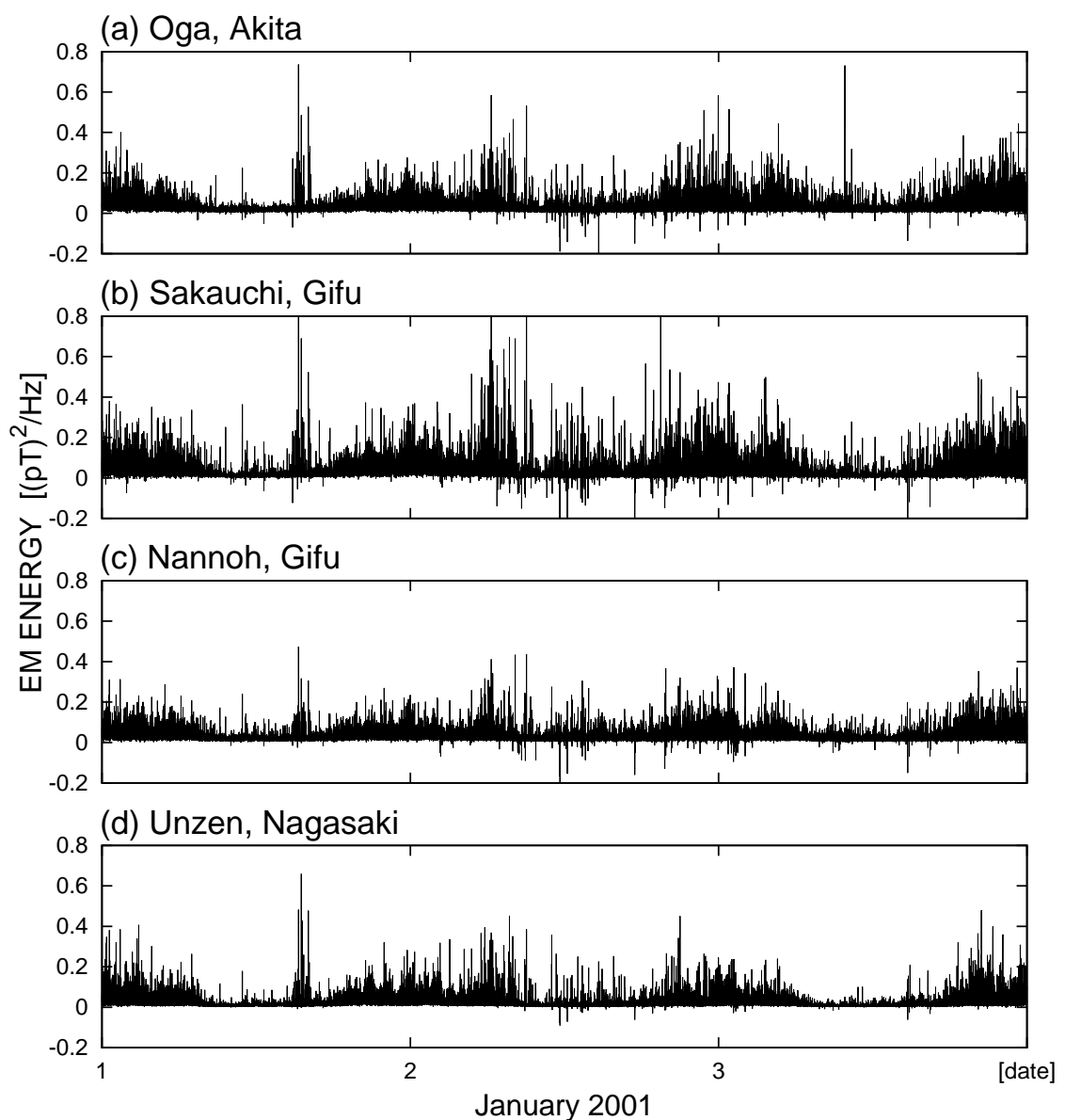


図 A.24: 全ての観測信号から NG-FICA によって推定された局所信号 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 二乗値利用)

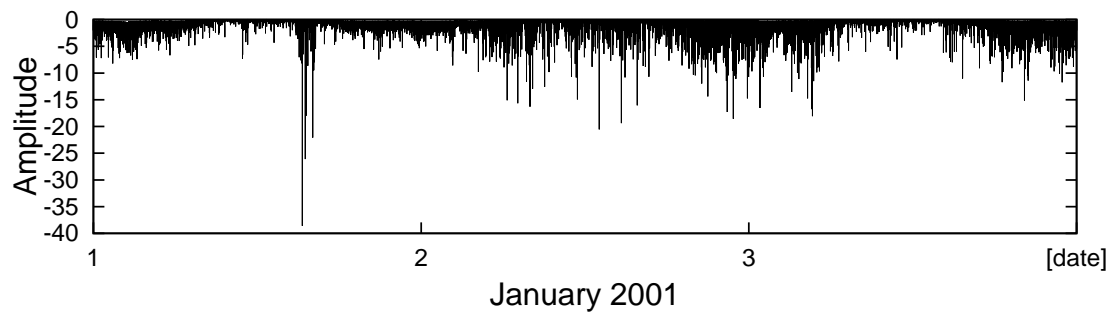


図 A.25: 選択した観測信号から NG-FICA によって推定された大域信号 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 二乗値利用)

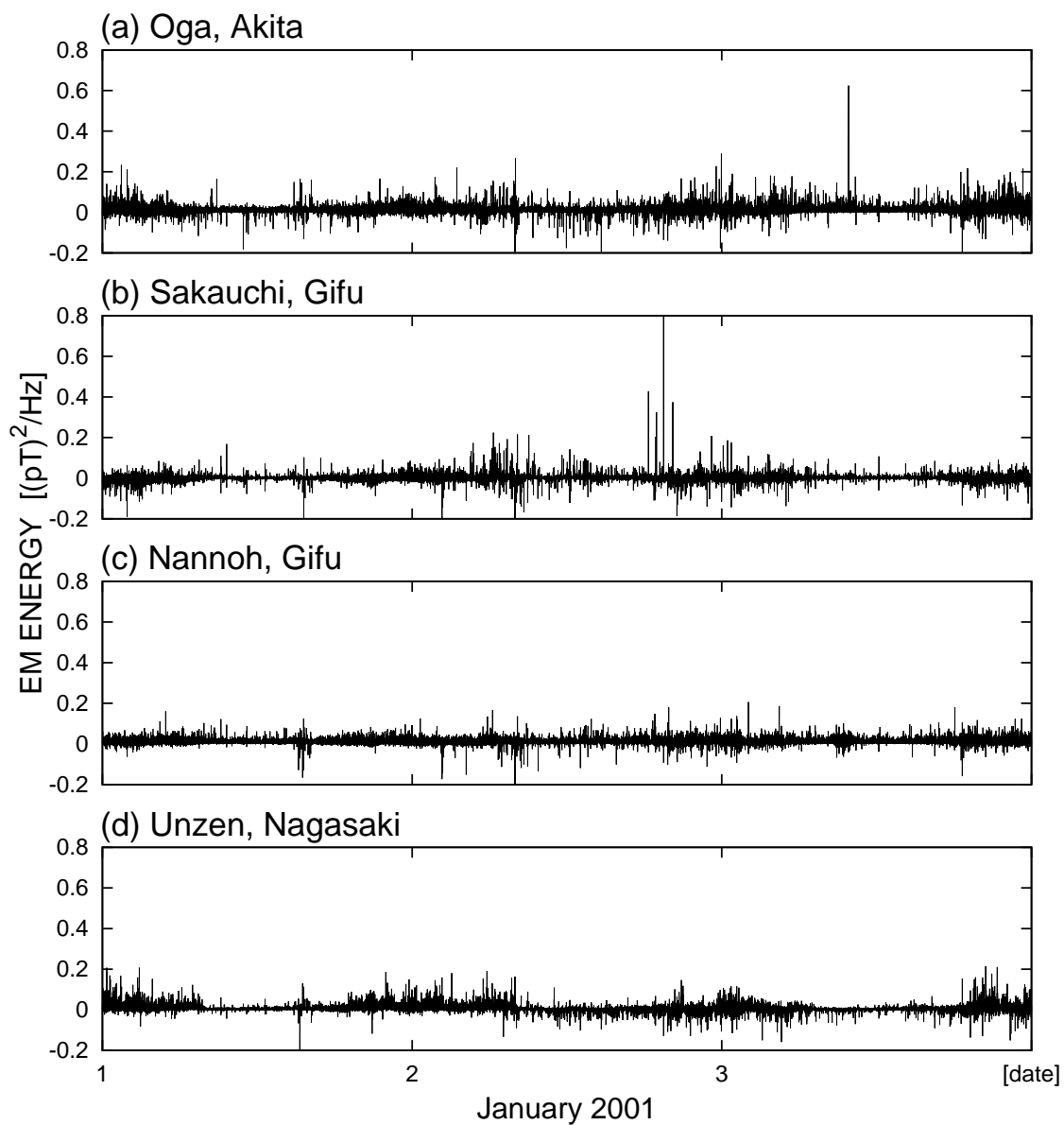


図 A.26: 選択した観測信号から NG-FICA によって推定された局所信号 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 二乗値利用)

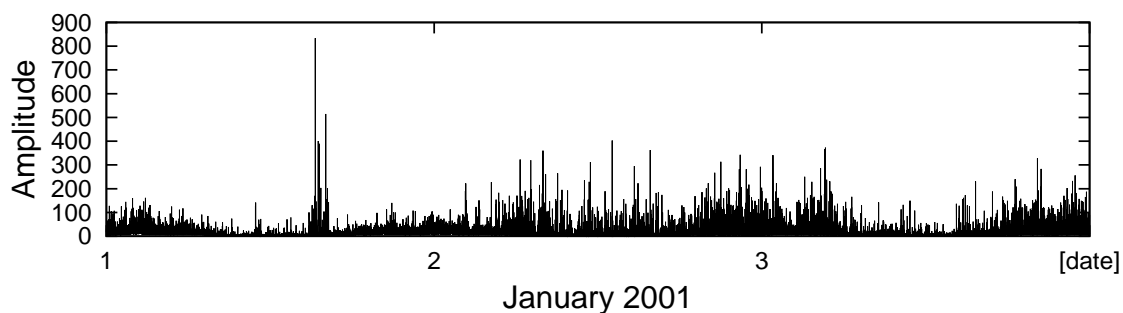


図 A.27: ISRA によって推定された大域信号 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 二乗値利用)

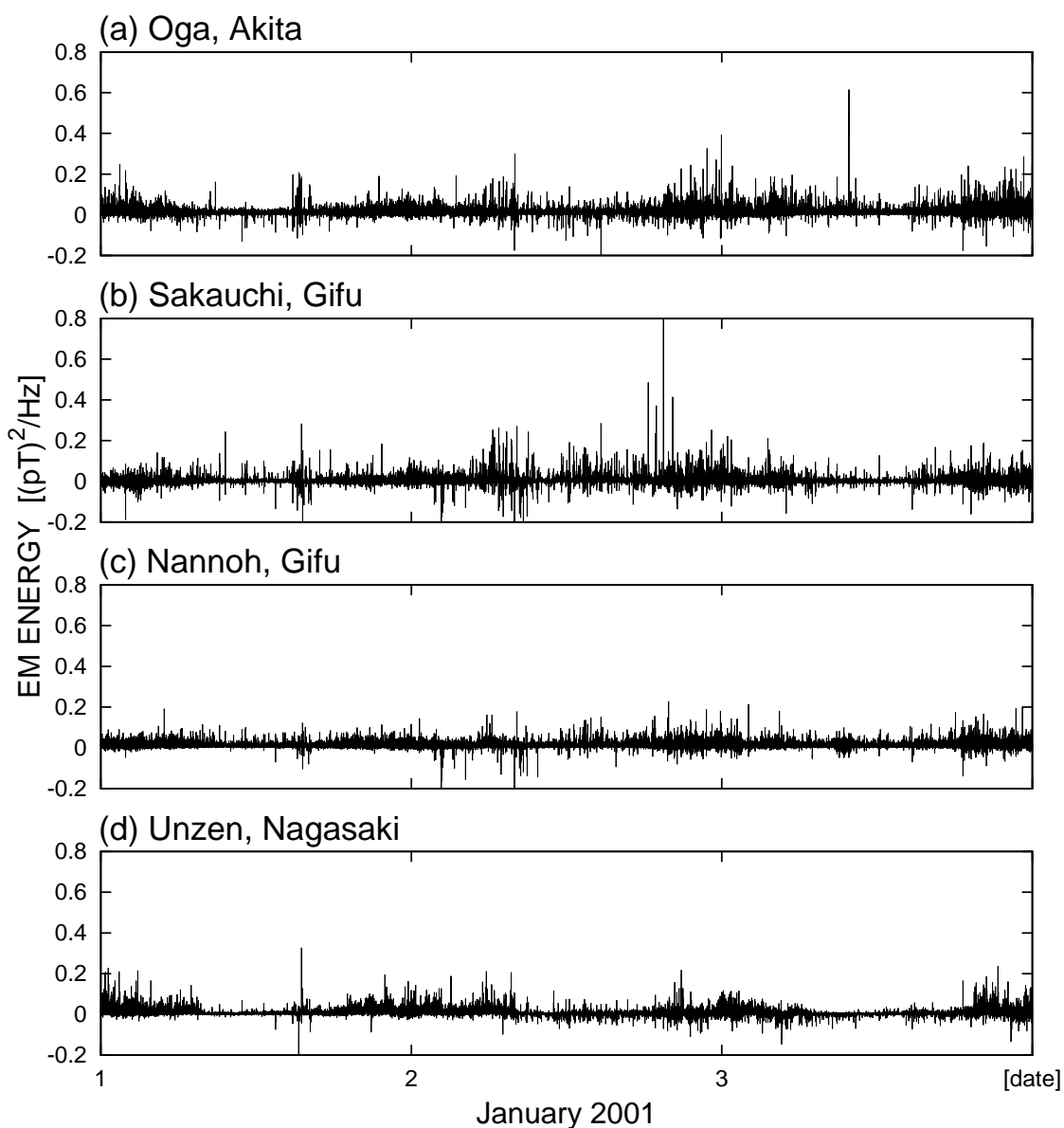


図 A.28: ISRA によって推定された局所信号 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 二乗値利用)