

博士学位論文

ELF帯環境電磁波の解析に適した
Blind Source Separationに関する研究

名古屋工業大学 大学院工学研究科

毛 利 元 昭

2011年1月

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本論文の目的	2
1.3	本論文の構成	3
第 2 章	ELF 帯環境電磁波の観測	5
2.1	はじめに	5
2.2	ELF 帯環境電磁波の発生要因	5
2.2.1	雷雲による電磁波放射	5
2.2.2	熱帯地域の雷雲による電磁波放射	6
2.2.3	太陽活動による電磁波放射	7
2.2.4	人間活動による電磁波放射	8
2.2.5	地殻活動による電磁波放射	8
2.3	ELF 帯環境電磁波の観測システム	9
2.3.1	観測周波数 223[Hz] の設定	9
2.3.2	観測装置	10
第 3 章	大域信号除去	15
3.1	はじめに	15
3.2	大域信号除去というアプローチ	15
3.3	大域信号除去の定式化	17
3.4	大域信号除去の基本手順	19
3.4.1	源信号の推定	19
3.4.2	推定された源信号からの大域信号の特定	19
3.4.3	大域信号に対する感度ベクトルの推定	21
3.4.4	観測信号からの大域信号の減算	21
3.5	大域信号除去の評価指標	21
3.6	まとめ	24
第 4 章	独立成分解析を用いた大域信号除去	29
4.1	はじめに	29
4.2	独立成分解析 (ICA) の概要	29
4.3	問題の定式化	30
4.4	推定アルゴリズム	33
4.4.1	Natural Gradient - Flexible ICA (NG-FICA)	33
4.4.2	Extended Infomax (ExInfomax)	36
4.5	大域信号除去への組み込み	36
4.5.1	使用観測点の選択	36
4.5.2	大域信号に対する係数ベクトルの推定	37
4.6	シミュレーション実験	38
4.7	ELF 帯環境電磁界観測データへの適用	50
4.7.1	選択数 r の設定	50
4.7.2	実験 1	50
4.7.3	実験 2	58
4.7.4	実験 3	65
4.8	まとめ	67

第 5 章	非負行列因子分解を用いた大域信号除去	73
5.1	はじめに	73
5.2	観測信号の数理モデルの置き換え	74
5.3	非負行列因子分解 (NMF) の概要	75
5.3.1	問題の定式化	75
5.3.2	推定アルゴリズム	75
5.3.3	時系列信号への適用	77
5.4	シミュレーション実験	79
5.5	ELF 帯環境電磁界観測データへの適用	81
5.5.1	分解のランク数 r の設定	81
5.5.2	実験 1	81
5.5.3	実験 2	88
5.5.4	考察	94
5.6	まとめ	94
第 6 章	擬似 L1 ノルム最小化に基づく非負行列因子分解を用いた源信号推定	99
6.1	はじめに	99
6.2	擬似 L1 ノルムを最小化する非負行列因子分解手法	99
6.3	源信号の推定精度の検証	102
6.4	ELF 帯環境電磁界観測データへの適用	111
6.5	まとめ	118
第 7 章	環境電磁波の強度に着目した地震前兆検出手法	121
7.1	はじめに	121
7.2	環境電磁波の強度に基づく地震前兆検出手法	123
7.2.1	異常の評価値の定義	124
7.2.2	異常の検出閾値の定義	125
7.2.3	検出された異常と地震との関連性の定義	126
7.3	異常検出の精度向上のための強調処理	126
7.3.1	線形予測分析を用いた強調処理	126
7.3.2	大域信号除去を用いた強調処理	128
7.4	異常検出の実験	129
7.4.1	機械的な異常検出の検証	129
7.4.2	大規模な検証と統計的評価	131
7.5	まとめ	134
第 8 章	結論	135
8.1	本論文の総括	135
8.2	本研究で残された課題	136
8.3	本研究の応用	137
付 録 A	大域信号除去の処理例	139
A.1	独立成分解析を用いた場合 (第 4 章に関する付録)	139
A.1.1	2005 年 4 月 6 日から 8 日	139
A.1.2	2006 年 3 月 27 日から 29 日	145
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)	151
A.2.1	2001 年 1 月 1 日から 3 日	151
A.2.2	2005 年 4 月 6 日から 8 日	156
A.2.3	2006 年 3 月 27 日から 29 日	161
A.3	Quasi-L1 NMF を用いた場合 (第 6 章に関する付録)	166
A.3.1	2001 年 1 月 1 日	166
A.3.2	2005 年 4 月 7 日	172
	謝辞	179
	参考文献	181

目 次

2.1	電離層・大地導波管伝播	6
2.2	太陽風と地球磁場	8
2.3	地震前兆電磁波の発生メカニズム(仮説)	9
2.4	観測周波数と各種要因の放射強度の概念図	10
2.5	観測装置の基本構成(旧)	11
2.6	観測装置の基本構成(新)	11
2.7	ELF 帯環境電磁波観測アンテナ	12
2.8	観測装置の設置状況(愛知県南知多町篠島)	12
2.9	観測装置の配置場所	14
3.1	2001年1月1日～3日の観測信号	17
3.2	信号の混合モデル	18
3.3	平均的な観測信号を用いた大域信号の識別	20
3.4	2001年1月1日～3日の平均的な観測信号	20
3.5	2001年1月1日～3日の観測信号から平均的な観測信号を減算した結果	22
3.6	作成した大域信号とその他の源信号	24
3.7	作成した理想的な局所信号	26
3.8	作成した観測信号の初期値	27
3.9	大域信号の振幅に対応する GIC と SN 比	28
4.1	ICA における信号処理のモデル	31
4.2	作成した源信号	39
4.3	作成した観測信号	40
4.4	理想的な局所信号	41
4.5	NG-FICA によって推定された源信号(全ての観測信号を解析)	42
4.6	NG-FICA を用いて推定された局所信号(全ての観測信号を解析)	43
4.7	NG-FICA によって推定された源信号(選択した観測信号を解析)	44
4.8	NG-FICA を用いて推定された局所信号(選択した観測信号を解析)	45
4.9	ExInfomax によって推定された源信号(全ての観測信号を解析)	46
4.10	ExInfomax を用いて推定された局所信号(全ての観測信号を解析)	47
4.11	ExInfomax によって推定された源信号(選択した観測信号を解析)	48
4.12	ExInfomax を用いて推定された局所信号(選択した観測信号を解析)	49
4.13	NG-FICA を用いた場合の ELF 帯観測信号選択数 r と推定局所信号の GIC の関係	50
4.14	ELF 帯環境電磁波の観測信号(2001年1月1日から3日, 振幅値利用)	52
4.15	平均的な観測信号(2001年1月1日から3日, 振幅値利用)	52
4.16	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, 振幅値利用)	54
4.17	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, 振幅値利用)	54
4.18	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, 振幅値利用)	55
4.19	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, 振幅値利用)	55

4.20	全ての観測信号から ExInfomax によって推定された大域信号 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 振幅値利用)	56
4.21	全ての観測信号から ExInfomax によって推定された局所信号 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 振幅値利用)	56
4.22	選択した観測信号から ExInfomax によって推定された大域信号 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 振幅値利用)	57
4.23	選択した観測信号から ExInfomax によって推定された局所信号 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 振幅値利用)	57
4.24	ELF 帯環境電磁波の観測信号 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 振幅値利用)	59
4.25	平均的な観測信号 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 振幅値利用)	59
4.26	全ての観測信号から NG-FICA によって推定された大域信号 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 振幅値利用)	61
4.27	全ての観測信号から NG-FICA によって推定された局所信号 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 振幅値利用)	61
4.28	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 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 振幅値利用)	62
4.29	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 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 振幅値利用)	62
4.30	全ての観測信号から ExInfomax によって推定された大域信号 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 振幅値利用)	63
4.31	全ての観測信号から ExInfomax によって推定された局所信号 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 振幅値利用)	63
4.32	選択した観測信号から ExInfomax によって推定された大域信号 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 振幅値利用)	64
4.33	選択した観測信号から ExInfomax によって推定された局所信号 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 振幅値利用)	64
4.34	ELF 帯環境電磁波の観測信号 (2001 年 1 月 4 日から 6 日, 振幅値利用)	66
4.35	平均的な観測信号 (2001 年 1 月 4 日から 6 日, 振幅値利用)	66
4.36	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 4 日から 6 日, 振幅値利用)	68
4.37	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 4 日から 6 日, 振幅値利用)	68
4.38	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 4 日から 6 日, 振幅値利用)	69
4.39	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 4 日から 6 日, 振幅値利用)	69
4.40	全ての観測信号から ExInfomax によって推定された大域信号 (2001 年 1 月 4 日から 6 日, 振幅値利用)	70
4.41	全ての観測信号から ExInfomax によって推定された局所信号 (2001 年 1 月 4 日から 6 日, 振幅値利用)	70
4.42	選択した観測信号から ExInfomax によって推定された大域信号 (2001 年 1 月 4 日から 6 日, 振幅値利用)	71
4.43	選択した観測信号から ExInfomax によって推定された局所信号 (2001 年 1 月 4 日から 6 日, 振幅値利用)	71
5.1	補助関数による最適化	77
5.2	時系列信号での NMF モデル	78
5.3	ISRA によって推定された源信号	79
5.4	ISRA によって推定された局所信号	80
5.5	ISRA を用いた場合の分解のランク数 r と推定局所信号の GIC の関係	81
5.6	ELF 帯環境電磁波の観測信号 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 二乗値利用)	83

5.7	平均的な観測信号 (2005年3月16日から18日, 二乗値利用)	83
5.8	全ての観測信号から NG-FICA によって推定された大域信号 (2005年3月16日から18日, 二乗値利用)	85
5.9	全ての観測信号から NG-FICA によって推定された局所信号 (2005年3月16日から18日, 二乗値利用)	85
5.10	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 (2005年3月16日から18日, 二乗値利用)	86
5.11	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 (2005年3月16日から18日, 二乗値利用)	86
5.12	ISRA によって推定された大域信号 (2005年3月16日から18日, 二乗値利用)	87
5.13	ISRA によって推定された局所信号 (2005年3月16日から18日, 二乗値利用)	87
5.14	ELF 帯環境電磁波の観測信号 (2001年1月4日から6日, 二乗値利用)	89
5.15	平均的な観測信号 (2001年1月4日から6日, 二乗値利用)	89
5.16	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4日から6日, 二乗値利用)	91
5.17	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4日から6日, 二乗値利用)	91
5.18	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4日から6日, 二乗値利用)	92
5.19	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4日から6日, 二乗値利用)	92
5.20	ISRA によって推定された大域信号 (2001年1月4日から6日, 二乗値利用)	93
5.21	ISRA によって推定された局所信号 (2001年1月4日から6日, 二乗値利用)	93
5.22	ISRA によって推定された, 大域信号以外の源信号 (2005年3月16日から18日, 二乗値利用)	95
5.23	ISRA によって推定された, 大域信号以外の源信号 (2001年1月4日から6日, 二乗値利用)	96
5.24	ISRA によって推定された混合行列 (2005年3月16日から18日, 二乗値利用)	97
5.25	ISRA によって推定された混合行列 (2001年1月4日から6日, 二乗値利用)	97
6.1	擬似絶対値距離関数	100
6.2	生成した源信号	103
6.3	生成した混合行列	103
6.4	生成した観測信号	104
6.5	ISRA によって推定された源信号	105
6.6	Quasi-L1 NMF によって推定された源信号	105
6.7	ISRA によって推定された混合行列	106
6.8	Quasi-L1 NMF によって推定された混合行列	106
6.9	理想的な局所信号	107
6.10	ISRA によって推定された局所信号	108
6.11	Quasi-L1 NMF によって推定された局所信号	109
6.12	ELF 帯環境電磁波の観測信号 (2005年3月17日, 二乗値利用)	112
6.13	ISRA によって推定された源信号 (2005年3月17日, 二乗値利用)	113
6.14	Quasi-L1 NMF によって推定された源信号 (2005年3月17日, 二乗値利用)	114
6.15	ISRA によって推定された混合行列 (2005年3月17日, 二乗値利用)	115
6.16	Quasi-L1 NMF によって推定された混合行列 (2005年3月17日, 二乗値利用)	115
6.17	推定された異常信号と岐阜県萩原の観測信号 (波形の下部を拡大)	116
6.18	ISRA によって推定された局所信号 (2005年3月17日, 二乗値利用)	117
6.19	Quasi-L1 NMF によって推定された局所信号 (2005年3月17日, 二乗値利用)	118
7.1	地震前兆電磁波が観測された期間 [43]	122
7.2	地震前兆電磁波が観測された範囲 [43]	123

7.3	2005年3月14日～20日の観測信号	124
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	125
7.5	線形予測分析のブロック図	127
7.6	線形予測分析を用いた異常検出のモデル	127
7.7	長崎県雲仙における異常検出結果(福岡西方沖地震, $\alpha = 2, \beta = 0$)	130
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)	133
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)	133
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)	140
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)	140
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)	141
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)	141
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)	142
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)	142
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)	143
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)	143
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)	144
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)	144
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)	146
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)	146
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)	147
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)	147
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)	148
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)	148
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)	149
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)	149
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)	150
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)	150
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)	152
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)	152
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)	153
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)	153

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)	154
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)	154
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) .	155
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) .	155
A.29 ELF 帯環境電磁波の観測信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 二乗値利用)	157
A.30 平均的な観測信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 二乗値利用)	157
A.31 全ての観測信号から 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, 二乗値利用)	158
A.32 全ての観測信号から 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, 二乗値利用)	158
A.33 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 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 二乗値利用)	159
A.34 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 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 二乗値利用)	159
A.35 ISRA によって推定された大域信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 二乗値利用) .	160
A.36 ISRA によって推定された局所信号 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 二乗値利用) .	160
A.37 ELF 帯環境電磁波の観測信号 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 二乗値利用) . .	162
A.38 平均的な観測信号 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 二乗値利用)	162
A.39 全ての観測信号から 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, 二乗値利用)	163
A.40 全ての観測信号から 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, 二乗値利用)	163
A.41 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 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 二乗値利用)	164
A.42 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 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 二乗値利用)	164
A.43 ISRA によって推定された大域信号 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 二乗値利用)	165
A.44 ISRA によって推定された局所信号 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 二乗値利用)	165
A.45 ELF 帯環境電磁波の観測信号 (2001 年 1 月 1 日, 二乗値利用)	166
A.46 ISRA によって推定された源信号 (2001 年 1 月 1 日, 二乗値利用)	167
A.47 Quasi-L1 NMF によって推定された源信号 (2001 年 1 月 1 日, 二乗値利用) . .	168
A.48 ISRA によって推定された混合行列 (2001 年 1 月 1 日, 二乗値利用)	169
A.49 Quasi-L1 NMF によって推定された混合行列 (2001 年 1 月 1 日, 二乗値利用)	169
A.50 平均的な観測信号 (2001 年 1 月 1 日, 二乗値利用)	170
A.51 ISRA によって推定された局所信号 (2001 年 1 月 1 日, 二乗値利用)	170
A.52 Quasi-L1 NMF によって推定された局所信号 (2001 年 1 月 1 日, 二乗値利用)	171
A.53 ELF 帯環境電磁波の観測信号 (2005 年 4 月 7 日, 二乗値利用)	172
A.54 ISRA によって推定された源信号 (2005 年 4 月 7 日, 二乗値利用)	173
A.55 Quasi-L1 NMF によって推定された源信号 (2005 年 4 月 7 日, 二乗値利用) . .	174
A.56 ISRA によって推定された混合行列 (2005 年 4 月 7 日, 二乗値利用)	175
A.57 Quasi-L1 NMF によって推定された混合行列 (2005 年 4 月 7 日, 二乗値利用)	175
A.58 平均的な観測信号 (2005 年 4 月 7 日, 二乗値利用)	176
A.59 ISRA によって推定された局所信号 (2005 年 4 月 7 日, 二乗値利用)	176
A.60 Quasi-L1 NMF によって推定された局所信号 (2005 年 4 月 7 日, 二乗値利用)	177

表 目 次

4.1	推定された局所信号の SN 比および GIC	39
4.2	大域信号除去結果の評価 (2001 年 1 月 1 日から 3 日, 振幅値利用)	51
4.3	大域信号除去結果の評価 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 振幅値利用)	58
4.4	大域信号除去結果の評価 (2001 年 1 月 4 日から 6 日, 振幅値利用)	65
5.1	推定された局所信号の SN 比および GIC	79
5.2	大域信号除去結果の評価 (2005 年 3 月 16 日から 18 日, 二乗値利用)	82
5.3	大域信号除去結果の評価 (2001 年 1 月 4 日から 6 日, 二乗値利用)	88
6.1	各手法における源信号推定精度 C_j	105
6.2	推定された局所信号の SN 比および GIC	110
6.3	大域信号除去結果の評価 (2005 年 3 月 17 日, 二乗値利用)	116
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	131
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)	139
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)	145
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)	151
A.4	大域信号除去結果の評価 (2005 年 4 月 6 日から 8 日, 二乗値利用)	156
A.5	大域信号除去結果の評価 (2006 年 3 月 27 日から 29 日, 二乗値利用)	161
A.6	大域信号除去結果の評価 (2001 年 1 月 1 日, 二乗値利用)	171
A.7	大域信号除去結果の評価 (2005 年 4 月 7 日, 二乗値利用)	177

第1章 序論

1.1 本研究の背景

地震の前駆的活動に伴って、発光現象や地電位の変化など多くの現象が指摘されており、電磁気的な異常現象も前兆現象の一つとして報告されている [1]-[3]. そこで、電磁気的な異常現象から地震を予測することを目的として、全国において ELF(Extremely Low Frequency) 帯環境電磁波の継続的な観測が行われている [4]-[8].

ELF 帯環境電磁波には、地殻活動だけでなく、雷雲や電離層、太陽活動など、様々な自然現象の情報が含まれている。これらの情報は、地震や落雷、磁気嵐などの自然災害予測の他、地球環境や宇宙に関する新たな知見を得ることへの利用が考えられる。しかし、これまでの電磁波の利用に関連する研究は情報通信の領域が主であり、人によって発信されたものを受信することが前提であった。自然環境から放射された電磁波を対象とした研究は、現在でも未開拓と言える領域であり、電磁波を手掛かりに自然現象に関する情報を得ることや、その実現には、大きな研究意義がある。

電磁波から情報を正確かつ詳細に得るには、対象としている発生要因からの電磁波のみを観測することが望ましい。しかし、実際に得られる観測信号は各種の電磁波が混合した状態である。混合した状態では、対象としている電磁波の特徴が不明瞭となるため、知見が得られていない電磁波に関しては、判別はもちろん、新たな知見を得ることも不可能となる。電磁波を手掛かりに自然現象に関する様々な情報をより詳細に得るためには、観測信号からそれぞれの発生要因に関連する成分を高い精度で推定することが求められる。

観測信号から発生要因ごとの成分(源信号)を推定することは Blind Source Separation (BSS)[9] と呼ばれ、これまでも数多くの研究がなされている。しかし、それらの多くは音声解析対象としている。ELF 帯環境電磁波の観測方法は一般的な音声の観測方法と大きく異なるため、観測によって得られた信号の性質も異なることが予想される。

また、通常、BSS が行うのは、成分の数理的な推定のみであり、推定された成分が何を発生要因としたものかの判別は、BSS とは別に行う必要がある。ELF 帯環境電磁波の成分に関する知見は未だ非常に少なく、現在までの知見でほぼ確実に判別可能である成分は、全ての観測点において共通して観測される、エネルギーの大きな背景信号(大域信号)のみである。

このような状況の中で、ELF 帯環境電磁波の観測信号に含まれる各種の成分を適切に推定する手法を模索していくことが求められている。

1.2 本論文の目的

本論文の目的は、ELF 帯観測信号から推定した源信号を数値的に評価し、その評価結果を手掛かりとして、ELF 帯環境電磁波の解析に適した BSS 手法を発見、もしくは新たに提案することである。

ELF 帯観測信号に BSS を適用することで、ELF 帯環境電磁波の源信号を推定できると考えられる。適用した BSS が ELF 帯環境電磁波の解析に適しているかを評価するには、推定された源信号がどの程度の精度で推定されているかを評価すればよい。しかし、一般的な BSS では複数の源信号が同時に推定され、源信号の推定精度の評価のためには、推定された源信号が何を発生要因としているかの判別と、その源信号の真の状態に関する知見が必要である。ELF 帯環境電磁波において、現段階で判別可能な成分は大域信号のみであり、その大域信号に関する知見も限定的である。よって、本論文では

1. 各種の BSS 手法を観測信号に適用することで、大域信号の推定を行う
2. 大域信号に関する現在までの知見をもとに推定精度の評価を行い、それを ELF 帯環境電磁波の解析に対する BSS 手法の適合性とみなす
3. 大域信号を観測信号から除去し、大域信号以外の信号に関する情報を得る

ことを行っていく。

BSS が推定した大域信号を数値的に評価することを考える。SN 比を求めるには、評価の対象となる信号の真の値を知る必要があり、実際のデータに関して検証することが不可能である。それは、判別が可能な大域信号においても同様である。また、各観測点における成分の観測感度も重要な情報であることから、大域信号の波形とともに観測感度も総合して評価する指標を、新たに導入することが求められる。

観測信号に含まれる大域信号の波形と観測感度が正しく推定された場合、観測信号から大域信号を取り除いた信号は、大域信号に特有の性質を失っているはずである。そこで、大域信号の除去結果について大域信号に特有の性質を数値化することで、大域信号の推定精度、ひいては源信号の推定精度を評価できると考えられる。

これらをまとめると、本論文では、ELF 帯環境電磁波における大域信号を観測信号から推定・除去する手法、および、除去結果を数値的に評価する指標を提案する。そして、その指標に基づいて ELF 帯環境電磁波の解析に対する各種の BSS 手法の適合性を調査し、最終的には、ELF 帯環境電磁波の解析に適した新たな BSS 手法を提案することを目指す。

1.3 本論文の構成

本論文は、ELF 帯環境電磁波の大域信号を手掛かりとして、その推定および除去手法の提案と推定精度の評価を行いつつ、ELF 帯環境電磁波の解析に適した Blind Source Separation 手法を模索していくものであり、全8章で構成される。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。

第2章では、本研究で扱う ELF 帯環境電磁波と、その発生要因について述べる。また、ELF 帯環境電磁波の観測の概要について述べる。

第3章では、まず ELF 帯観測信号から大域信号を推定および除去する手法の概要について述べる。続いて、SN 比による評価が不可能な実際のデータに関して、大域信号が全観測点に共通した情報であることから、相互情報量に着目して大域信号除去の精度を評価する指標 *GIC* (Global Information Criterion) を提案する。また、シミュレーション実験を行い、大域信号除去の評価指標として *GIC* が SN 比の代替になることを示す。

第4章では、最も一般的な BSS 手法である独立成分解析 (ICA; Independent Component Analysis)[10]-[12] と、ICA を用いた大域信号の推定と除去について述べる。また、観測信号に含まれる源信号の数が多の場合に ICA は推定精度が低下するため、観測信号を選別することで大域信号の推定精度を向上させる工夫についても述べる。さらに、擬似信号を用いたシミュレーション実験と、実際の ELF 帯観測信号から大域信号を除去する実験を行い、第3章で導入した評価指標 *GIC* を用いて結果を評価する。

第5章では、源信号に対する仮定が実際の ELF 帯観測信号の物理的な状態に即していると考えられる、非負行列因子分解 (NMF; Non-negative Matrix Factorization)[13][14] を用いた大域信号の推定と除去について述べる。まず、冒頭において、エネルギーの次元で混合している状態の ELF 帯環境電磁波に対し、従来研究においては振幅の次元を観測信号として記録していることを指摘する。同時に、信号の混合状態を BSS が前提としている状態に合致させるため、観測信号を二乗することでエネルギーに変換し、解析対象として再定義する。続いて、再定義された観測信号の解析に ICA が適していない可能性を指摘するとともに、解析に適していると考えられる NMF を導入する。さらに、擬似信号を用いたシミュレーション実験と、実際の ELF 帯観測信号を用いた実験による検証から、ICA より NMF を用いることが妥当であることを示す。

第6章では、NMF の代表的なアルゴリズムである ISRA (Image Space Reconstruction Algorithm)[15][16] が外れ値を多く含む観測信号の解析にロバストでないことを指摘し、その解決として、外れ値に対しロバストな L1 ノルムを評価関数へ近似的に導入した新しい NMF アルゴリズム: Quasi-L1 NMF を提案する。また、シミュレーション実験と実際のデータを

用いた実験による検証から，提案手法が ISRA と同等の源信号推定ができる上に，外れ値に対しロバストであることを示す．

第7章では，観測信号の二乗平均値に着目して地震前兆電磁波を検出する手法を提案する．続いて，検出精度を向上させる前処理として，線形予測誤差を用いる方法と大域信号除去を用いる方法を提案し，大域信号除去が地震前兆信号の検出精度を向上させることを検証する．

第8章では，本論文を総括するとともに，本研究における今後の課題，および，本研究の様々な応用について述べる．

第2章 ELF帯環境電磁波の観測

2.1 はじめに

本章では、本論文で解析の対象とする ELF 帯環境電磁波と、その観測について述べる。まず、ELF 帯環境電磁波の主な発生要因について解説し、次に、ELF 帯環境電磁波を観測するシステムと観測データについて説明する [4]-[7]。

2.2 ELF帯環境電磁波の発生要因

ELF 帯環境電磁波の発生要因として、主に次のようなものが挙げられる。

1. 雷雲による電磁波放射
2. 熱帯地域の雷雲による電磁波放射
3. 太陽活動による電磁波放射
4. 人間活動による電磁波放射
5. 地殻活動による電磁波放射

2.2.1 雷雲による電磁波放射

雷雲とは雲粒子どうしの摩擦などで電気を帯びた雲であり、その電気を蓄えきれなくなつて放電する現象が雷である。放電は、大地との間で起こる落雷以外にも、雲の中だけで起こる雲内放電、別の雲との間で起こる雲間放電があり、雷放電の約7割は雲内放電と雲間放電であると言われている [17]。

雷放電は、空気中に電流の通る道筋(放電路)ができ、そこを短時間に大電流が流れる現象である。この放電路がアンテナの役割をして、電磁波が放射される。放電にはいろいろな種類があり、電流は一定でなく、放電路の形状も折れ曲がっていたり枝分かれしていたりであるため、放射される電磁波も複雑である。周波数で見た場合、数 [Hz] から数 [GHz] までの広い範囲に渡っており、そのスペクトル強度は 100[kHz] 程度までであれば周波数にほぼ反比例しているとされる。

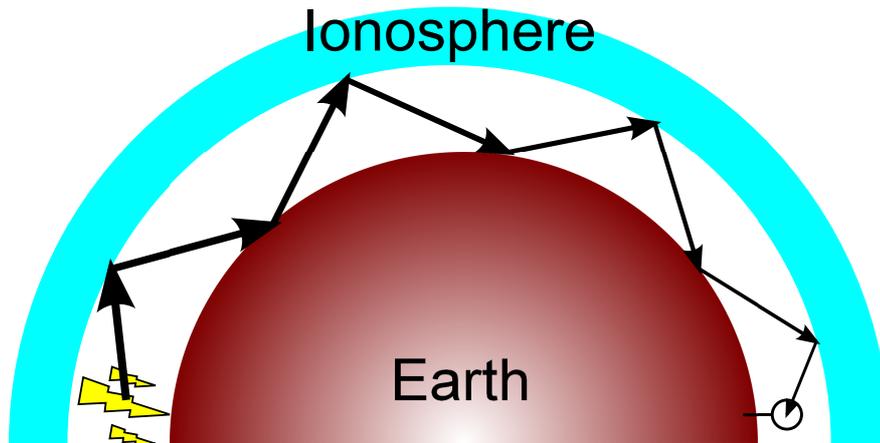


図 2.1: 電離層・大地導波管伝播

1回の雷放電において、電流は数万～数十万 [A]、電圧は1億～10億 [V]、電力換算で平均約900[GW]に及ぶ。しかし、時間にすると1/1000秒程度でしかないため、エネルギーに換算するとおよそ900[MJ]である。電磁波は三次元的に伝播するため、一般に、そのエネルギー密度は放射源からの距離の二乗に反比例する [18][19]。例えば、磁束密度で考えると、

$$|B| = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \text{ [T]} \quad (\text{ただし } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}) \quad (2.1)$$

より、1[km]離れた場所で起きた1回の雷放電による電磁波の観測値は、数 [pT] となる。放射源からの距離の二乗に反比例することから、多くの場合、雷との距離が10[km]程度以内にある観測点でのみ大きく受信され、それよりも遠い観測点では観測されることがあっても小さな値となる。よって、国内の各観測点で差が生ずることになる。

放電を活発に行いながら雷雲が移動するとき、観測信号は数十分程度の期間に渡る大きな三角状の先鋭的な放射ピークをもち、また、到達方位が時間とともに変化する特徴を持つ。規模の大きな前線雷が停滞する場合には、継続的に前線雷が通過するため、数日に渡って観測結果が乱れる場合もある。

2.2.2 熱帯地域の雷雲による電磁波放射

熱帯地域では雷雲が大量に発生しており、頻繁な雷放電によって電磁波が常時放射されている。熱帯地域の雷雲から放射された電磁波は、電離層と大地に挟まれた空間を伝播するため(電離層・大地導波管モード伝播：図2.1)、遠く離れた日本でも観測される [20]。

電離層・大地導波管モード伝播について説明する。雷放電による電磁波は、当初三次元方向に伝播するが、放射された角度によっては電離層を完全に抜けずに反射され、また、大地に向かう電磁波も反射される。このように電離層と大地の間で反射しながら電磁波が伝播する

様は、導波管内における伝播と同様であることから、電離層・大地導波管モード伝播と呼ばれる。電離層・大地導波管伝播する場合は距離に反比例してエネルギー密度が低下し、更に、地球サイズオーダーの遠方では、地球の反対側から回り込んで伝播する電磁波成分が加わるため距離の平方根に反比例してエネルギー密度が低下する。したがって、日本のように熱帯地域から十分に離れた場所においては、エネルギー密度の観測点による差がほとんどない。

電離層・大地導波管モード伝播する電磁波は、電離層の影響を強く受ける。例えば、夜間は電離層の下位層が消失するため、伝播距離当たりの反射が減少することに伴い、電磁波のエネルギー減衰が低減される。よって、電離層・大地導波管モード伝播した電磁波は、昼間と比較して夜間の観測レベルが大きくなる。つまり、日変化の性質を持つ。また、地電流や地表の帯電が電離層の擾乱を招くことによって、電磁波の伝播異常が引き起こされることもある。

ELF 帯環境電磁波を観測した場合、その成分の大部分は熱帯地域の雷雲から放射されたものである。熱帯地域から見て日本は非常に遠方であり、減衰の少ない電離層・大地導波管モード伝播であっても、本来の観測値は微弱である。しかし、定常的な無数の雷放電によって無数の電磁波が重畳することで、平常的な観測信号において支配的な成分となる。また、それらは不可分な1つの源信号として振る舞う。この信号は、全ての観測点においてほぼ一様に観測されることから、**大域信号**と呼ばれる。

2.2.3 太陽活動による電磁波放射

太陽は全体がプラズマ状態になっている。太陽の表面温度は摂氏 6000 度だが、その外側には、コロナと呼ばれる不規則な形のガスが数 100 万 [km] もの範囲に広がっている。コロナから太陽の重力圏を離れて吹き出してくるプラズマは、太陽風と呼ばれる。太陽面爆発（フレア）など黒点周辺における表面活動が活発になると、磁力線を伴ったところ長須が激しく上昇するようになり、黒点对上層で磁力線の再結合が起こる。磁気中性点の反対側では、磁力線を閉じ込めた大きなプラズマ雲が、1000 [km/s] 近くのスピードで宇宙空間に放出される。強力な磁石である地球はその N 極から S 極から流れる磁力線によって強力な磁場を形成しており（図 2.2）、太陽から飛んできたプラズマの流れが地球磁場にぶつかると、地球の磁気圏が激しく変動する。このとき、地磁気が大きく乱れるとともに電磁波が発生し、ELF 帯電磁波として観測される。

太陽活動による電磁波放射も、全ての観測点においてほぼ一様に観測されるため、現段階においては熱帯地域の雷雲による電磁波放射と不可分である。そこで、太陽活動による電磁波放射も大域信号の成分の一部とみなしている。

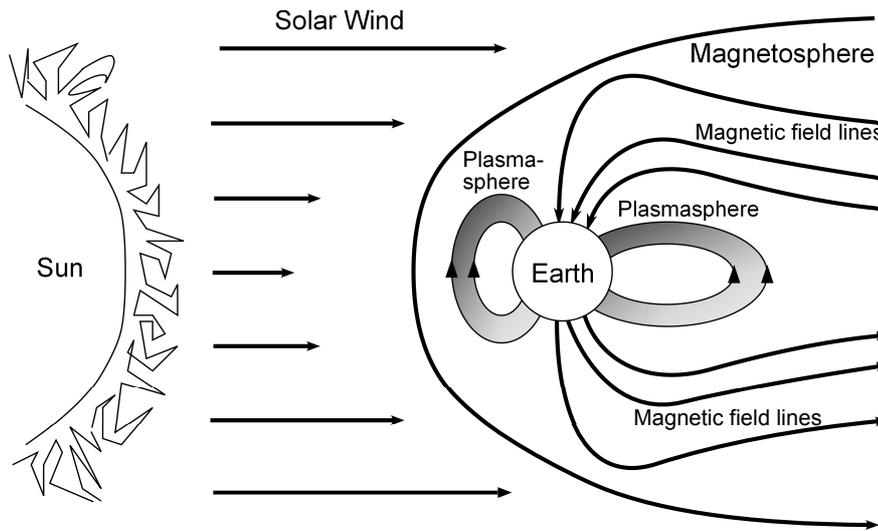


図 2.2: 太陽風と地球磁場

2.2.4 人間活動による電磁波放射

工場の操業や電子機器など，人間の活動によっても電磁波が放射される．人間活動による電磁波放射は，他のものと比べて放射エネルギーが小さいため，検出範囲は極めて局所的なものとなる．よって，ある地点で人間活動による電磁波が観測されても，そこから数 [km] 離れた地点ではほとんど検出されることがない．また，商用電源など，あらかじめ周波数が分かっているものは，フィルタリングなどの処理で抑えることができる．

2.2.5 地殻活動による電磁波放射

地震の前駆的活動など，地殻活動による電磁波の異常放射が報告されている [1]-[3]．これまでの観測結果においても，直下型の地震の場合の多くは，約 1 週間前から震源域周辺の観測点において異常な電磁波放射がみられる．規模の大きな地震の場合は，その発生の数週間程度前から観測されることもある．

地殻活動によって電磁波が放射される仕組みとしては，ピエゾ磁気起因する全磁力変化，土地比抵抗変化，地電流変化などが考えられているが，電磁波が長期間にわたって放射されることから，地殻活動によって引き起こされた電気化学的な電池効果が有力である (図 2.3)[21]-[24]．まず，還元性のある地下深部物質は，地殻活動によって生じたマグマ・熱水・ガスの作用で溶解され，その一部が地表近くの地中にリークする．地表近くには地下水などによってもたらされた酸素が豊富に存在しており，これらの酸素によって地表近くに漏れ出した還元性の金属イオンが酸化され，その電気化学的作用によって生じた電荷によって放電

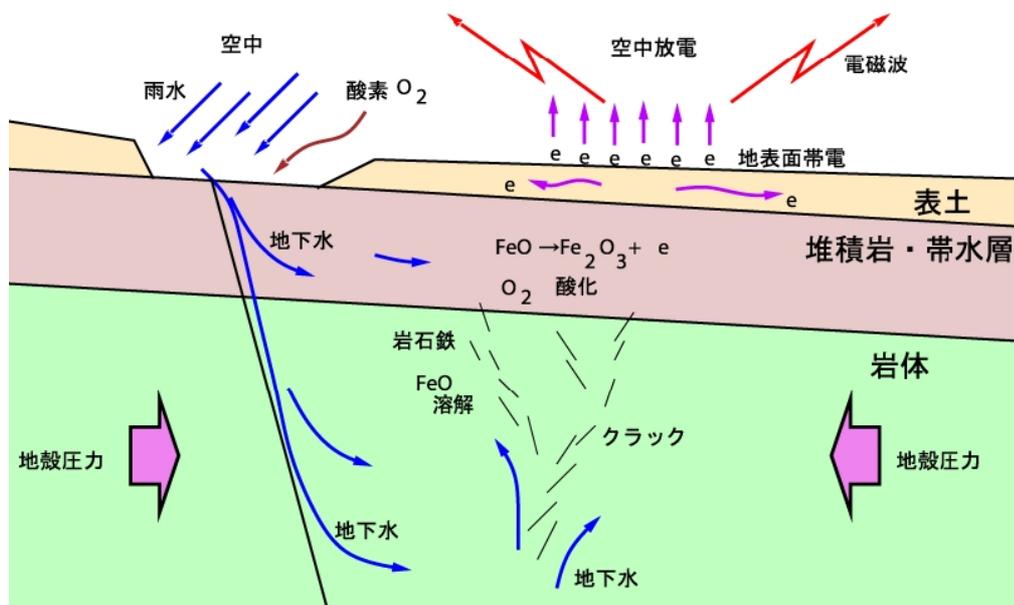


図 2.3: 地震前兆電磁波の発生メカニズム (仮説)

現象が生じる。地殻活動が活発になると還元性物質の溶解と地表付近へのリークが促進されるため、エネルギーの大きな電磁波が長期間にわたって放射される。

2.3 ELF 帯環境電磁波の観測システム

2.3.1 観測周波数 223[Hz] の設定

観測を行う周波数の選定は、対象とする電磁波を高い精度で捉える上で非常に重要である。空中には様々な周波数の電磁波が飛び交っており、これらの中から特定の電磁波信号を検出するには、その信号が持つ特定の周波数を選択して観測する必要がある。逆に、観測対象ではない電磁波のエネルギーが大きな周波数は避ける必要がある。本研究で用いる観測システムは、本来は地殻活動による電磁波放射を検出することを目的として設計されたものである。よって、観測周波数の選択の基準は地殻活動による電磁波放射の強度とする。

図 2.4 は、観測周波数と各種要因の放射強度の概念について示したものである。図より、1[Hz] 以下では、磁気圏の影響のため磁力線のたわみ等の振動エネルギーが強い。よって観測周波数として不適である。8[Hz] から数十 [Hz] では、地球と電離層間における電気共鳴現象で閉じ込められた電波エネルギーが強く存在し、局地的な地殻活動の観測には適していない。また、1[kHz] より高い周波数においては電離層と地表間を伝搬する雷電波の強度が大きく、電離層の状態による伝搬特性の変動が大きいため不安定となる。

以上の理由から、本研究の ELF 帯環境電磁波観測システムでは、太陽の照射エネルギーの

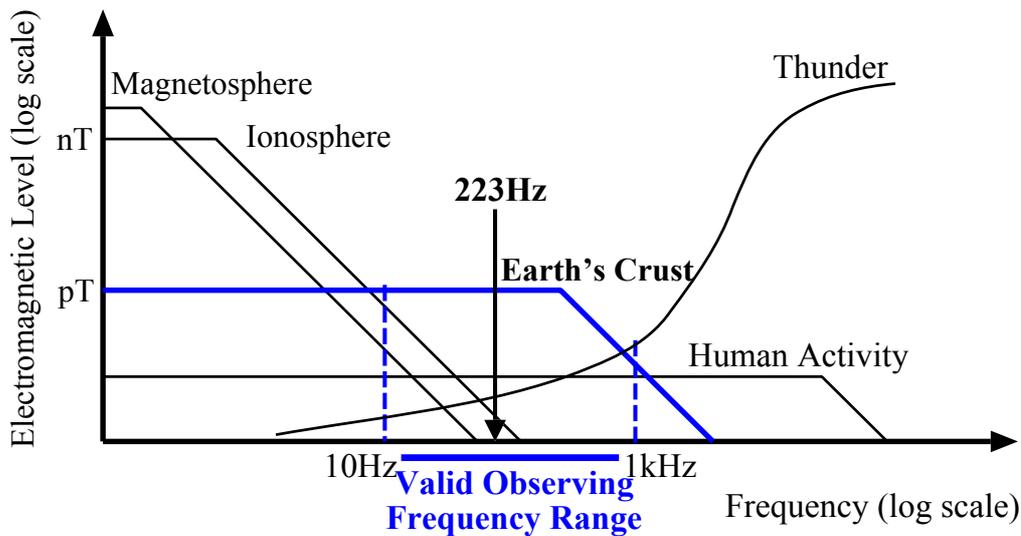


図 2.4: 観測周波数と各種要因の放射強度の概念図

変動による大気環境からの電磁波や雷からの電磁波の影響が最も少ないと考えられる周波数領域にあたる、極超低周波数の 223[Hz] を観測周波数として選定している。

2.3.2 観測装置

ここでは、実際の環境電磁波の観測方法と観測装置本体について述べる。観測装置の基本構成を図 2.5 に示す。

アンテナ

本研究では、銅線を直径 45[cm] の円形に 7000 回巻いた、ループコイルアンテナを用いる。風雨などによる腐食を防ぐため、アンテナの表面は樹脂でコーティングしてある。また、アンテナの直近にトップアンプを設け、外部からの誘導雑音の混入を防止している。このアンテナを東西・南北・鉛直の 3 軸方向に向けてそれぞれ設置することにより、電磁界 3 軸成分の観測を行っている (図 2.7, 図 2.8)。

フィルタ回路

フィルタ回路では、目的の周波数を持つ信号を抽出する。アンテナから送られてきた信号は RC フィルタを通り、50/60[Hz] の商用電源周波数成分が除去される。次に、多段ノッチフィルタによって、その高調波¹成分が除去される。ここでは、帯域除去フィルタ (Band Reject Filter; BRF) および帯域通過フィルタ (Band Pass Filter; BPF), 223[Hz] の帯域通過アンプ

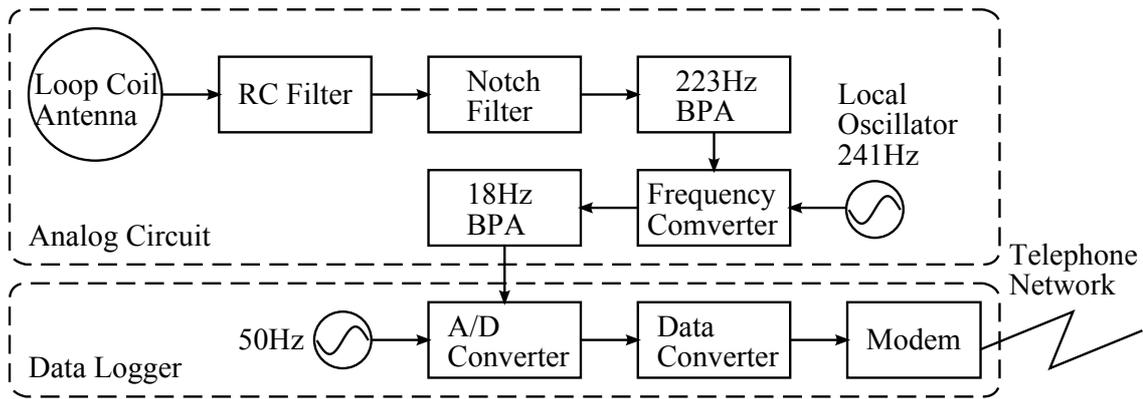


図 2.5: 観測装置の基本構成 (旧)

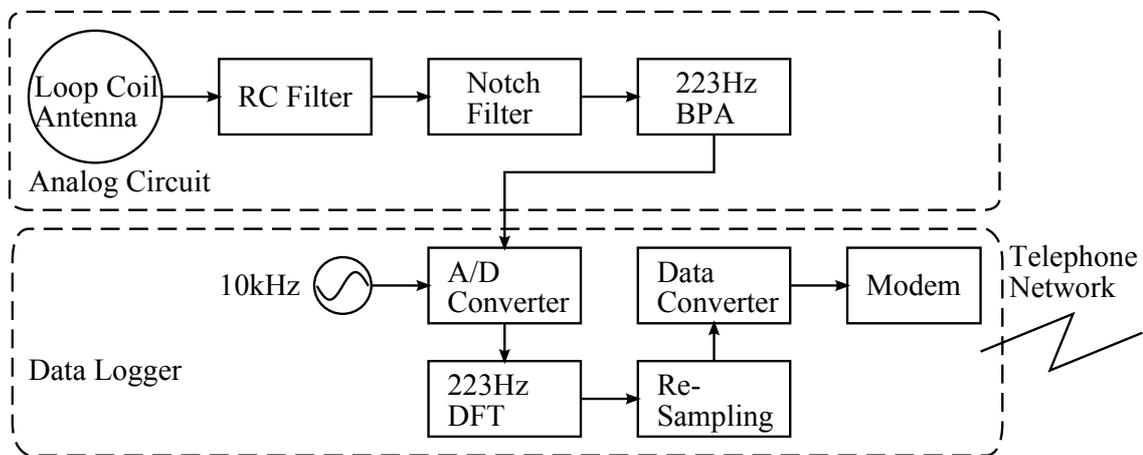


図 2.6: 観測装置の基本構成 (新)

(Band Pass Amplifire; BPA) を組み合わせることにより、アンテナから得られた信号から 223[Hz] の信号を抽出する。

周波数変換回路

旧観測システムでは、50[Hz] でサンプリングを行っている。サンプリング周波数より高い 223[Hz] の周波数帯を観測するためには、周波数変換を行う必要がある。周波数変換回路では、入力信号が持つ周波数のスペクトル分布を変化させずに、その分布の中心を局部発信器の周波数分だけ変化させる。フィルタ回路が出力した 223[Hz] の信号は、局部発信器 (Local Oscillator) が出力した 241[Hz] の信号と周波数変換回路によって、18[Hz] の信号に変換される。

¹ある周波数の正弦波を基本としたとき、その整数倍の周波数の正弦波を高調波という。ここでは、基本波 (50,60[Hz]) の第 2 高調波 100, 120[Hz]、第 3 高調波 150, 180[Hz]、… となる。

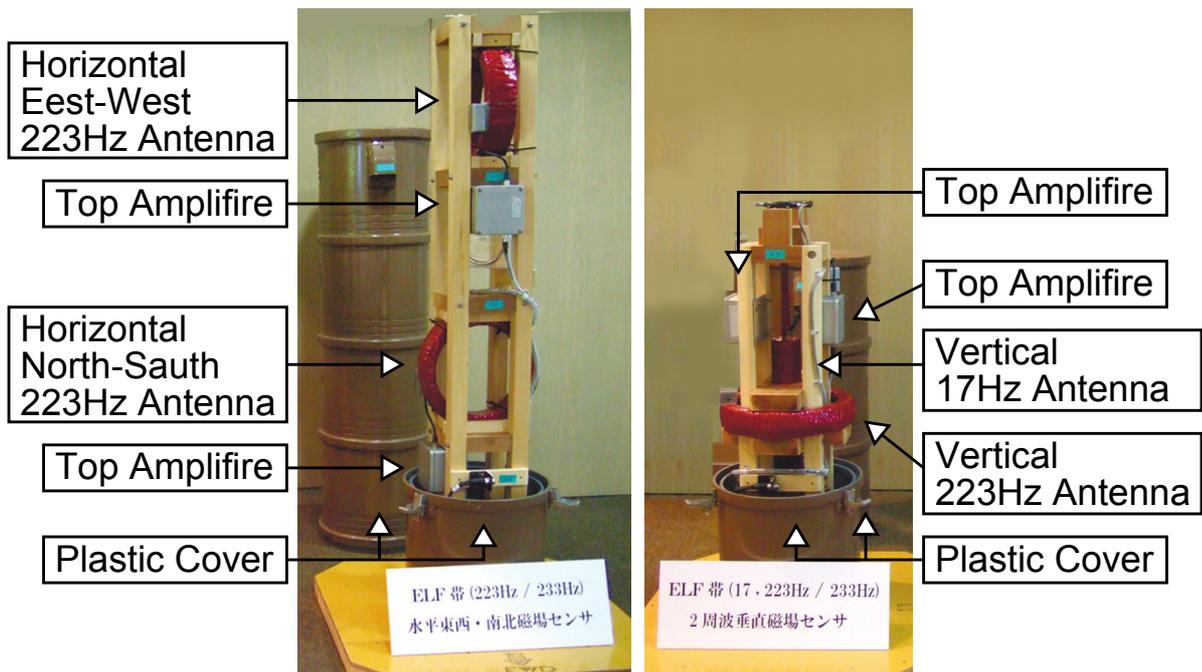


図 2.7: ELF 帯環境電磁波観測アンテナ

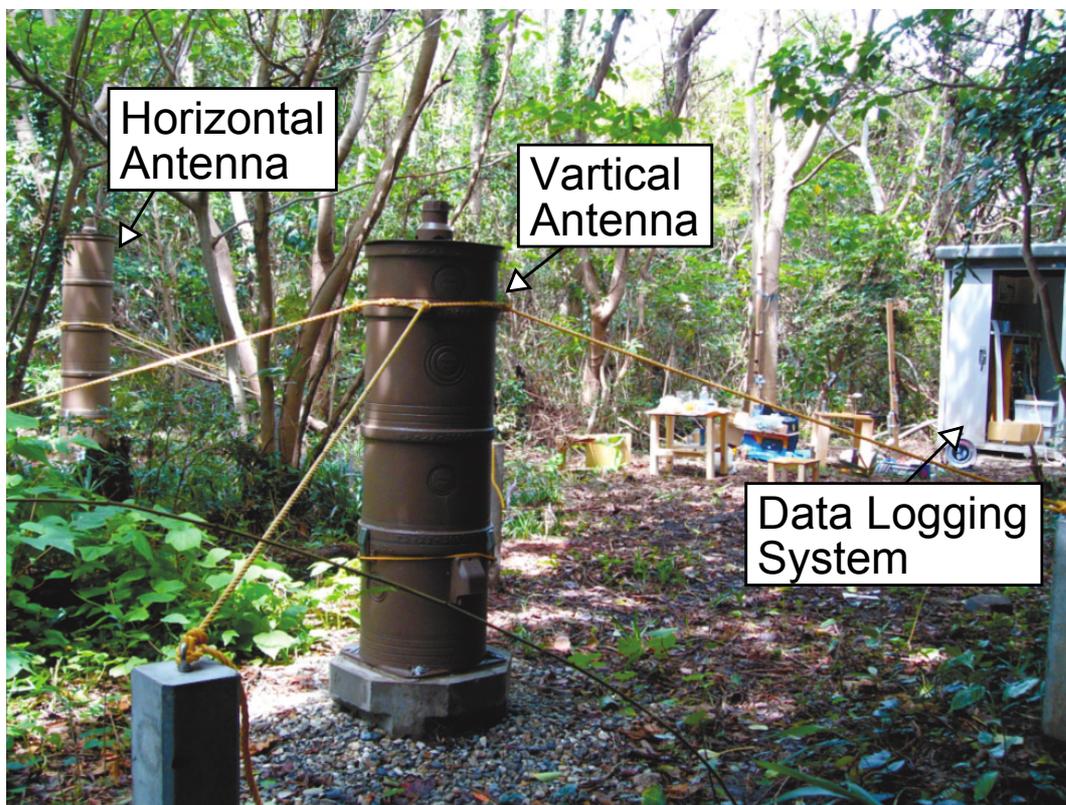


図 2.8: 観測装置の設置状況 (愛知県南知多町篠島)

データ収集回路

旧観測システムにおいて、アナログ部(3軸分-3系統)において得られた18[Hz]のアナログ信号は、A/D変換回路によってデジタル信号に変換される。このときのサンプリング周波数は50[Hz]であり、検波方式はダイオード検波(絶対値検波)である。データコンバータでは、デジタルに変換された信号について、6秒間ごと(50×6=300サンプル)に平均を取ることで時間積分する。この積分値を環境電磁波の強度レベル(単位 pT/√Hz)として記録している(6秒データと呼ぶ)。これは、全波整流された正弦波交流の短時間の平均値を記録しているということである。最大値 V_{MAX} 、周期 T の正弦波交流において、その平均値(絶対値平均) V_{AVE} は

$$V_{AVE} = \frac{1}{T} \int_0^T |V_{MAX} \sin \omega t| dt = \frac{2}{\pi} V_{MAX} \quad (2.2)$$

となり、実効値(二乗平均の平方根) V_{RMS} は

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_{MAX} \sin \omega t)^2 dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{MAX} \quad (2.3)$$

となる。つまり、正弦波交流の平均値は実効値の定数倍($\pi/2\sqrt{2}$ 倍)である。このことから、観測装置は223[Hz]環境電磁界の短時間の実効値を記録しているともいえる。

新観測システムでは、サンプリング周波数が10[kHz]であるため、A/D変換前に周波数変換を行っていない。また、データ収集をPCによって一括処理している。具体的には、12秒分の観測値(120,000サンプル)について、223[Hz]のsin波にhanning窓をかけた波形との内積、および223[Hz]のcos波にhanning窓をかけた波形との内積をそれぞれ計算し、その二乗和の平方根を6秒ごとに記録している。またこれは、223[Hz]環境電磁界の短時間の実効値である。

以上のように蓄積されたデータは、1日1回公衆電話回線を通して、大学のホストコンピュータに転送される。このため、データロガー部はモデムによって電話回線に接続されている。大学においては、6秒データからさらにダウンサンプリングを行った150秒データも作成している。

観測装置の設置場所

現在、全国約40箇所においてELF帯環境電磁波の観測を行っている。観測装置の設置場所について図2.9に示す。頻繁な地震や巨大な地震が予想される、伊豆半島と中部地方に多く設置されている。

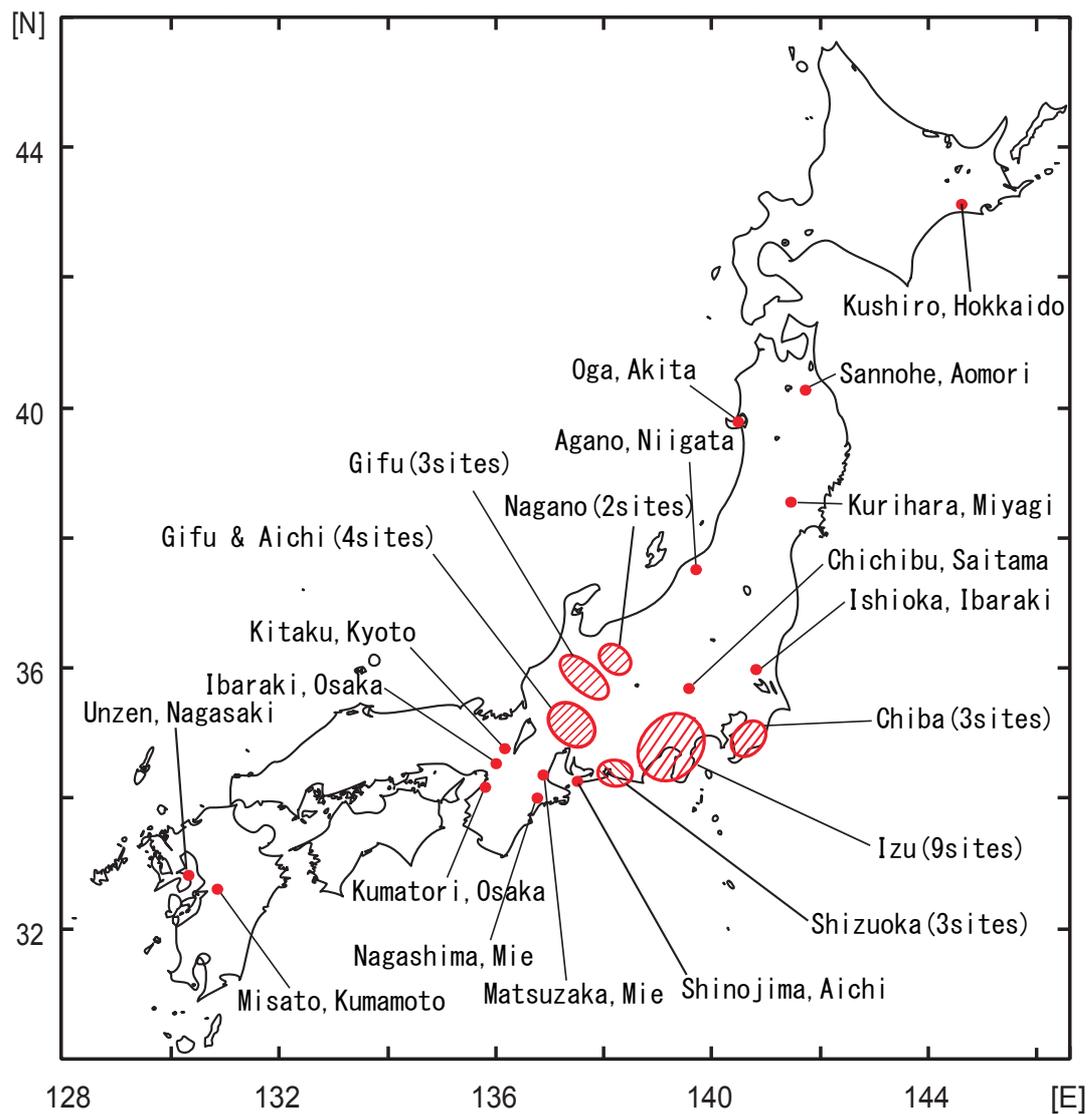


図 2.9: 観測装置の配置場所

第3章 大域信号除去

3.1 はじめに

前章において、地殻活動を要因として電磁波が放射されること、電磁波の発生要因が自然界には数多く存在することを述べた。地震発生の予測を電磁波に着目して行うに当たっては、地震と関係のある電磁波を精度よく観測することが求められる。しかし、実際の観測信号は、地震と無関係な電磁波によって、地震と関係のある電磁波が不明瞭な状態である。そのような観測信号から、地震と関係のある電磁波成分を精度よく推定することが求められる。

本章では、ELF 帯環境電磁波の観測信号に含まれる、地震と関係のある電磁波成分の精度を向上させる手段として、大域信号と呼ばれる地震と無関係な信号を観測信号から除去することについて述べる。また、実際の信号に関する大域信号除去の精度を評価する指標を提案し、その妥当性をシミュレーション実験によって検証する。

3.2 大域信号除去というアプローチ

ELF 帯環境電磁界は、地殻活動を要因とする電磁波をよく観測できると考えられている。しかし、前章で述べたように、自然界における電磁波の発生要因は数多く存在し、実際に得られた観測信号には、地震とは関係のない様々な電磁波による信号も多く混合している。地震と無関係な信号は、地震と関係のある信号を不明瞭にし、地震予測の精度を低下させるものである。地震前兆の詳細な知見を獲得し、正確な地震予測を行うには、混合状態の観測信号から地震と関係する信号を正確に推定する必要がある。

混合状態の信号から混合前の信号(源信号)を推定するという問題設定は、Blind Source Separation (BSS)[9] と呼ばれる。BSS 問題を解く手法は世界中で研究が行われており、中でも研究が特に活発なのが、独立成分解析 (Independent Component Analysis; ICA)[10]-[12] と、非負行列因子分解 (Non-negative Matrix Factorization; NMF)[13][14] である。本研究においても、ELF 帯環境電磁界の源信号を推定する際には、ICA や NMF を用いる。

しかし、一般的に、ICA や NMF は源信号を推定するのみであり、推定された源信号が何を発生要因としたものなのかの判別は行わない。ICA や NMF による推定結果を工学的に利

用するには、推定された信号の特徴や性質を分析し、その結果をこれまでに得られている知見と照らし合わせるなどが必要となる。ここで、地震の発生後であれば、その地震の震央と推定された源信号を多く含む観測点との位置関係や、地震の発生時刻と推定源信号の振幅の変化時刻との関係などから、推定源信号と発生した地震との関連を主張することは可能である。しかし、地震を予測するためには、地震の発生前に源信号の判別を行う必要があり、地震と関係のある信号について現在までに得られている知見では、その判別を行うことが不可能といえる。そこで、現段階において発生要因の判別が可能な信号の中で、地震と無関係な信号を観測信号から取り除くことで、地震と関係のある信号の精度がより高い信号を得ることを考える。

地震と関係のある電磁波をはじめ、ほとんどの電磁波は放射源からの距離に応じて急激に減衰していき、有効値での観測が可能なのは、その放射源の近隣のみである。しかし、実際の観測信号は、基本的に目視で確認できるほど全国で同期の取れた変化をしている。例として、図3.1は2001年1月1日～3日のELF帯環境電磁界観測信号の一部を示す。横軸は時刻[日]、縦軸は磁束密度 $[pT/\sqrt{Hz}]$ を表している。秋田県から長崎県の観測装置に共通して、夜は高く昼は低いといった1日周期の変化(日変化)が見られる。これは、日常的に観測される信号の大部分が、地震と無関係であり、かつ、日本から十分遠方において放射された高エネルギーの電磁波で占められていることを意味する。また、そのような信号は、日常的に観測される信号と比較することで判別が可能である。そこで、本研究においては、この日常的に観測される信号を**大域信号**と呼び、観測信号から取り除く対象とする。ULF帯における大域信号に関しては、Inter-Station Transfer Functionを用いた推定手法が原田らによって研究されている[25]が、それはWaveletを用いた時間・周波数領域での推定である。本研究では時間領域での高精度な推定を目指す。

なお、大域信号の主な要因は、太陽活動および熱帯地域の雷雲と考えられる。その理由を以下に述べる。太陽活動の場合、広範囲を対象とする高エネルギーの電磁波放射であり、それは地球全体に影響を与え、日本全国ではほぼ一様に観測可能となる。また、熱帯地域の雷雲から放射された電磁波の場合、定常的に発生する無数の雷放電によって放射された電磁波であり、電離層・大地導波管モード伝播によって日本まで到達する。このとき、日本国内の観測点に関して、放射源である熱帯地域からの距離はほぼ等しいため、その電磁波の強度はほぼ等しくなる。さらに、ほとんどの観測点は電磁波を放射する人工物の少ない山間部に設置されており、近接雷の発生も限定的であることから、観測される電磁波の大部分は、太陽活動および熱帯地域の雷雲から放射された電磁波によるものとなる。つまり、太陽活動および熱帯地域の雷雲から放射された電磁波は、日本に設置された全ての観測点でほぼ等しく観測され、その強度はほとんどの観測信号において支配的であるため、大域信号の条件とよく

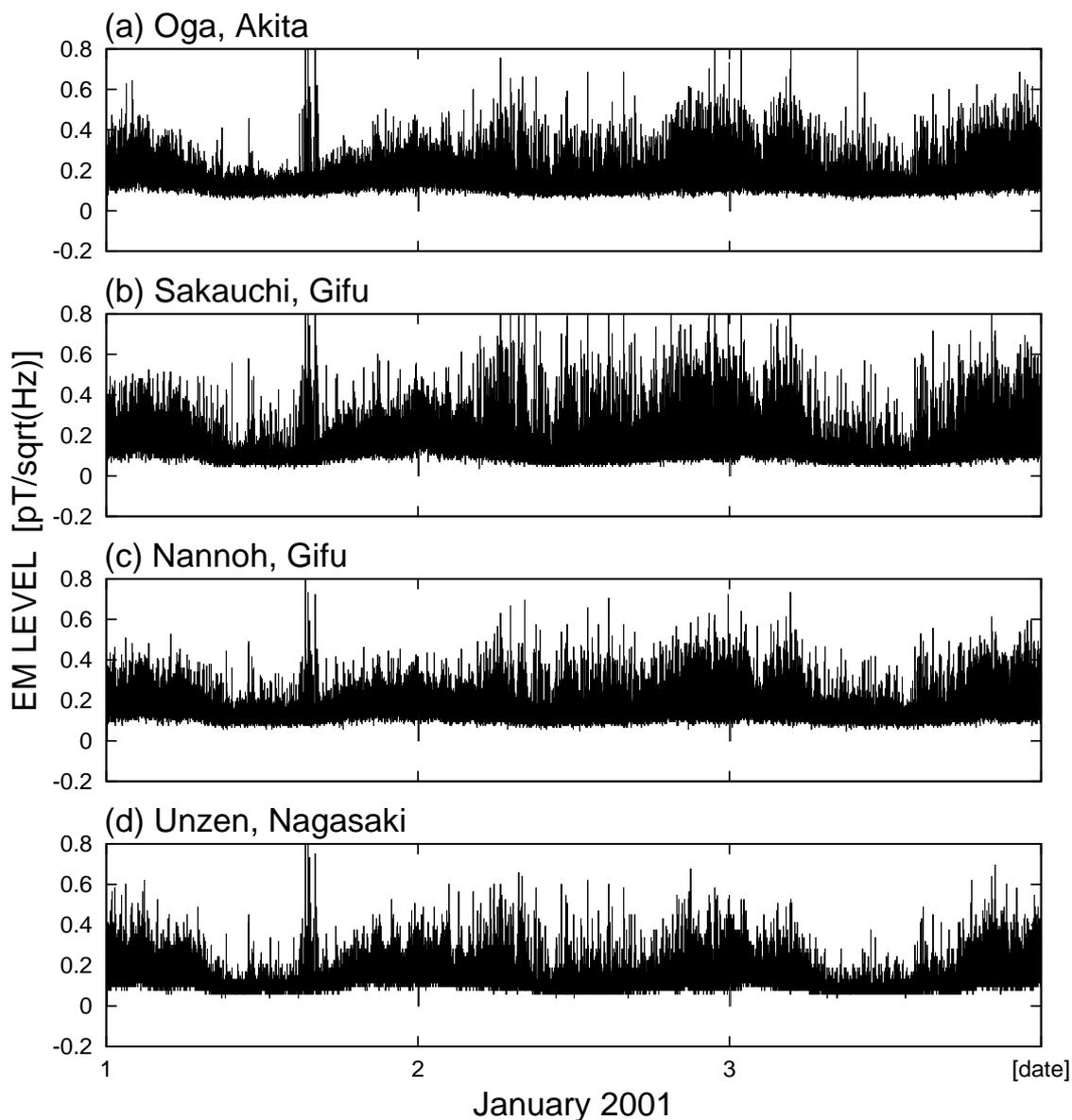


図 3.1: 2001 年 1 月 1 日～3 日の観測信号

合致する。

3.3 大域信号除去の定式化

これまでも述べたように、大気中には異なる様々な放射源から放射された電磁波が伝播している。そして、放射源と観測点の位置関係など、それぞれの伝播過程に応じて減衰した状態が観測される。このときの観測信号は、源信号が線形に混合したものとして数理的にモデル化できる(図3.2)。具体的には、 n 個のセンサで観測された信号 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ は、 m 個の発生源からの源信号 $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t)]^T$ と $m \times n$ の混合行列 \mathbf{A} を用い

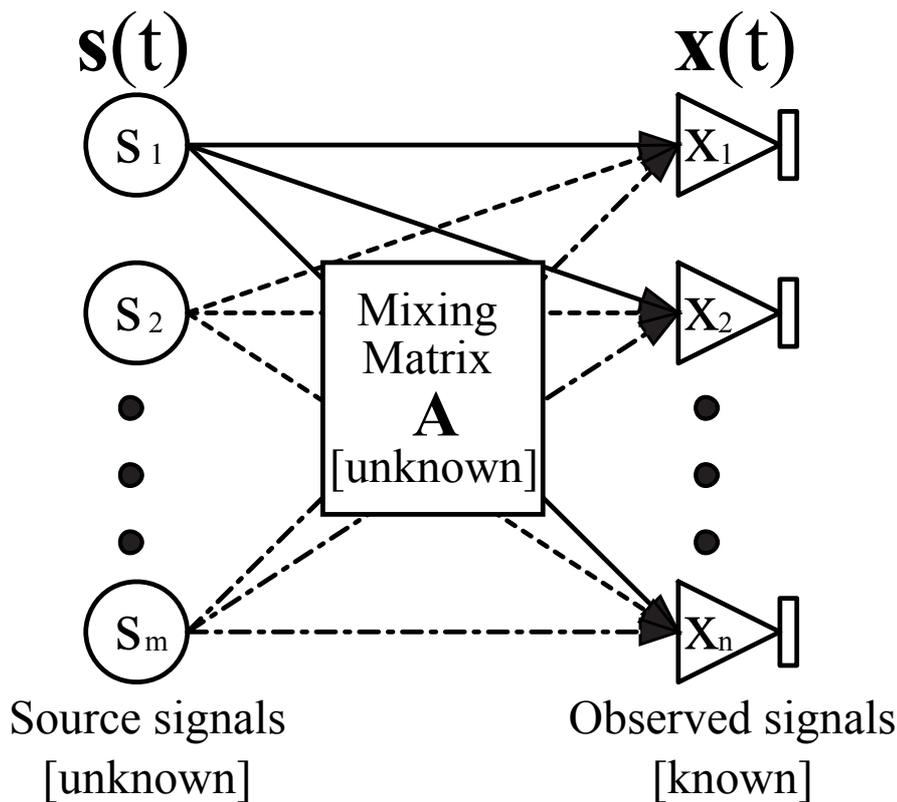


図 3.2: 信号の混合モデル

て、次の式で表すことができる。

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) \quad (3.1)$$

地震前兆信号はある特定の源信号であるため、地震前兆信号の推定は、 \mathbf{A} と $\mathbf{s}(t)$ の推定、つまり、式 (7.5) の逆問題を解くことで達成できると考えられる。しかし、この逆問題を正しく解いた場合でも、現時点では地震前兆信号を判別することが不可能であることから、本研究では判別可能な大域信号に着目する。

前章において、ELF 帯環境電磁界の大域信号は太陽活動や熱帯地域の雷雲から放射された電磁波を要因とする可能性を述べた。これは同時に、大域信号の放射源が厳密には複数存在することを意味している。しかし実際には、大域信号を単一の源信号とみなすことが可能である。その理由は、放射源から観測点までの距離が非常に大きく (小さくとも数千 [km] のオーダー)、それぞれの観測点における差 (大きくとも数百 [km] のオーダー) は誤差のレベルであり、減衰の程度の差も誤差のレベルとなるためである。また、現在の BSS アルゴリズムでは、減衰係数の相関が非常に高い複数の源信号を分離することが、事実上不可能である。よって、本研究においても、大域信号を単一の源信号とみなす。

大域信号に着目すると、たとえば $s_g(t)$ を大域信号成分とする場合、式 (7.5) は次のように

書き換えられる.

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}_g s_g(t) + \mathbf{A}_L \mathbf{s}_L(t) \quad (3.2)$$

となる. ここで, \mathbf{A}_g は混合行列中の $s_g(t)$ に対応するベクトルを, $\mathbf{s}_L(t)$ は大域信号成分以外の $m-1$ 個の源信号を, \mathbf{A}_L は混合行列中の \mathbf{s}_L に対応する $(m-1) \times n$ の行列を意味する. これをさらに整理すると, 次のように書き換えられる.

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{b}g(t) + \mathbf{l}(t) \quad (3.3)$$

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. またこのとき, $\mathbf{l}(t)$ は各観測点固有の信号を表すことから, 局所信号と呼ぶこととする. 式(3.3)の場合, 大域信号除去は次のように達成できる.

$$\mathbf{l}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{b}g(t) \quad (3.4)$$

3.4 大域信号除去の基本手順

大域信号除去は, 基本的に次のような手順で行えばよい.

1. 源信号の推定
2. 推定された源信号からの大域信号の特定
3. 大域信号に対する感度ベクトルの推定
4. 観測信号からの大域信号の減算

3.4.1 源信号の推定

大域信号は源信号の1つであるため, 観測信号から源信号を推定することで, 大域信号も推定される. 源信号の推定には, 本研究ではICA[10]-[12]やNMF[13][14]を用いる. ICAやNMFについての詳細は, 後の章で述べる.

3.4.2 推定された源信号からの大域信号の特定

ICAやNMFは通常, 複数の信号成分を推定し, 源信号として出力する. そこで, 推定された複数の源信号の中から大域信号を特定する必要がある. 大域信号は観測信号の大部分を構成していることから, 推定された源信号の中で, 平均的な観測信号に最も類似したものが

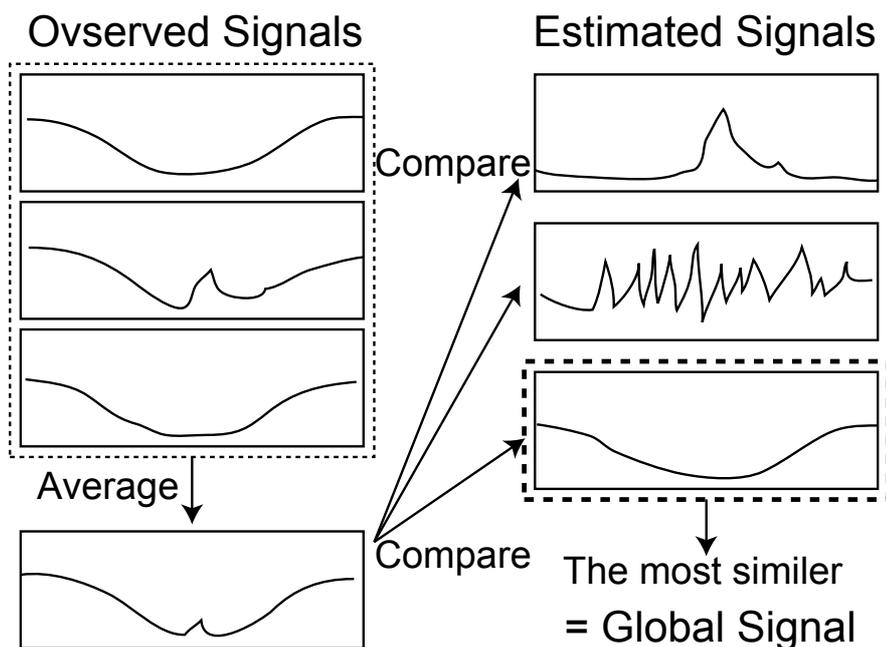


図 3.3: 平均的な観測信号を用いた大域信号の識別

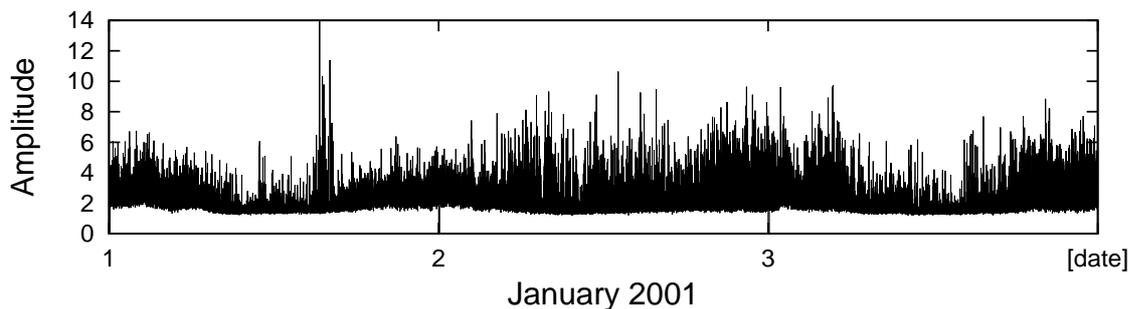


図 3.4: 2001年1月1日～3日の平均的な観測信号

大域信号といえる (図 3.3). そこで, まず観測信号の特徴をおおまかに表現する信号 $\tilde{x}(t)$ を次の式 (3.5) で算出する.

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{n} \sum_i \frac{x_i(t)}{\sqrt{E[(x_i(t) - E[x_i(t)])^2]}} = \frac{1}{n} \sum_i \frac{x_i(t)}{\sigma_{x_i}} \quad (3.5)$$

ここで, n は観測点の総数, $x_i(t)$ は i 番目の観測点における観測信号, σ_{x_i} は $x_i(t)$ の標準偏差を表す. つまり $\tilde{x}(t)$ は, 分散1に正規化した各観測信号を時刻ごとに平均したものである. 例えば, 図 3.4 は図 3.1 で示した 2001 年 1 月 1 日～3 日の平均的な観測信号である. 観測信号の大まかな特徴を捉えていることが分かる.

定義より, 観測信号の概形である $\tilde{x}(t)$ と最も強い相関を持つ源信号が大域信号である. 一般に 2 変量 x, y 間の相関係数 r_{xy} は, x, y それぞれの平均を \bar{x}, \bar{y} とした時, 次のように定義

される.

$$r_{\tilde{x}y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[(x - \bar{x})(y - \bar{y})]}{\sqrt{E[(x - \bar{x})^2]} \sqrt{E[(y - \bar{y})^2]}} \quad (3.6)$$

そこで, 推定された源信号 $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_r(t)]^T$ の中から, 次の式 (3.7) で定義される $|r_{\tilde{x}y_j}|$ を最大とする成分 $y_j(t)$ を大域信号とする.

$$|r_{\tilde{x}y_j}| = \left| \frac{E[(\tilde{x}(t) - \bar{\tilde{x}})(y_j(t) - \bar{y}_j)]}{\sqrt{E[(\tilde{x}(t) - \bar{\tilde{x}})^2]} \sqrt{E[(y_j(t) - \bar{y}_j)^2]}} \right| \quad (3.7)$$

式 (3.5) で定義される平均的な観測信号を推定大域信号とみなし, 最小二乗法などで観測信号から減算することも, 大域信号除去の一手法と言える. 実際に, 減算結果においては共通成分が大幅に減少していることが, 目視でも確認できる (図 3.5).

しかし, 平均的な観測信号は最も多種の源信号が混合している信号であり, 大域信号をはじめとする源信号の推定・分離という目的からは離れている. 大数の法則と源信号どうしの無相関性から, 数多くの観測信号を平均することで大域信号を推定できることも予想されるが, 本研究において使用可能な観測点は高々 40 箇所, 実質は 30 箇所程度であるため, 平均的な観測信号に混入している源信号の大きさは無視できない. 特に, 地震前兆信号や近接雷など, 有用でエネルギーが大きい源信号成分が含まれる場合, その成分を観測信号から減ずることにも繋がり, 避けるべきである.

3.4.3 大域信号に対する感度ベクトルの推定

大域信号に対する感度は観測点ごとに若干異なっている. よって, 観測点ごとの大域信号に対する感度ベクトル \mathbf{b} を推定する必要がある. その方法は, 大域信号の推定手法によって異なるため, 後述する.

3.4.4 観測信号からの大域信号の減算

式 (7.9) に基づき, 推定された大域信号 $y_j(t)$ と推定された感度ベクトル $\hat{\mathbf{b}}$ を用いて, 推定局所信号 $\hat{\mathbf{l}}(t)$ を次の式 (3.8) で求める.

$$\hat{\mathbf{l}}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{b}}y_j(t) \quad (3.8)$$

3.5 大域信号除去の評価指標

大域信号除去の目的は, 観測信号から地震前兆信号をより高い精度で推定することである. その結果の評価を行う場合, 本来であれば処理の前後における SN 比を比較すればよい. し

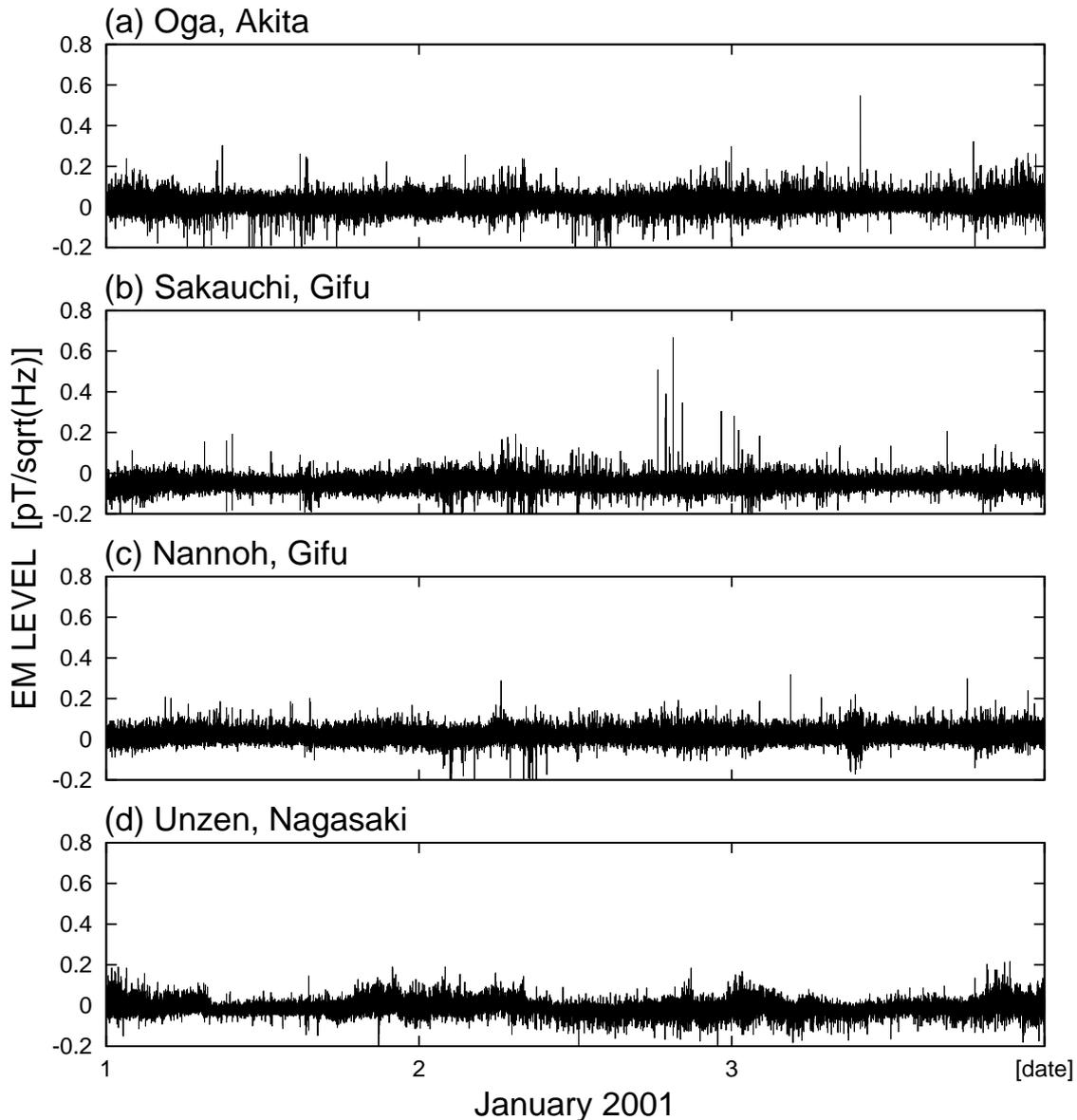


図 3.5: 2001 年 1 月 1 日～3 日の観測信号から平均的な観測信号を減算した結果

しかし、SN 比を計算するには抽出対象となる地震前兆信号の理想状態が必要である。ELF 帯電磁波データなど、実際に観測された信号に関して、その理想状態を我々が知ることは不可能であることから、実際の観測信号を用いた場合には SN 比による評価ができない。したがって、SN 比とは別の評価指標を導入する必要がある。

大域信号は全ての観測信号に一樣に含まれる信号であり、観測信号における共通情報といえる。逆に、大域信号が除去された局所信号は、共通情報を失っているといえる。例えば、観測信号どうしの相互情報量は大きいですが、局所信号どうしの相互情報量は小さくなる。そこで、相互情報量をもとにした大域信号除去の評価指標を提案する [26]。

平均相互情報量とは、各周辺分布の積と結合分布との間の“隔たり”の期待値のことであ

る. ある2つの事象系確率変数 X と Y の平均相互情報量 $I(X;Y)$ は次のように定義される.

$$I(X;Y) = E \left[\log \frac{P(X,Y)}{P(X)P(Y)} \right] = \int \int P(X,Y) \log \left(\frac{P(X,Y)}{P_X(X)P_Y(Y)} \right) dXdY \quad (3.9)$$

ここで, $P(\cdot)$, $P(\cdot, \cdot)$ はそれぞれ周辺確率密度関数, 同時確率密度関数を表す. 平均相互情報量を厳密に計算するには, 真の確率密度関数が必要となる. しかし, 真の確率密度関数は不明であるため, それぞれの信号から得られたヒストグラムによって, それぞれの確率密度関数を近似する. すなわち, 相互情報量を次のように再定義する.

$$I(X;Y) = \sum_{n_X} \sum_{n_Y} P[n_X, n_Y] \log \left(\frac{P[n_X, n_Y]}{P_X[n_X]P_Y[n_Y]} \right) \quad (3.10)$$

ここで, n_X , n_Y はそれぞれ X , Y の量子化された領域の番号を表す. 確率密度関数をよく近似するには量子化幅を適切に設定する必要があるが, 本研究では信号の標準偏差の1/5としている. この相互情報量を用いた大域信号除去の評価指標 GIC (Global Information Criterion) を, 次の式 (3.11) で定義する.

$$GIC = \sum_{i,j (i \neq j)} \frac{I(L_i; L_j)}{N(N-1)} \quad (3.11)$$

ここで, L_i , L_j ($i, j = 1, 2, \dots, N$) は局所信号 l_i , l_j を生起させる確率変数, N は観測点の総数である. GIC は相互情報量を全ての信号ペアについて算出し平均したものであるため, 値が小さいほど, 大域信号が除去されていることを意味する.

GIC の妥当性を検証するため, ELF 帯環境電磁波データを模した擬似信号を用いて次のような実験を行った.

1. 大域信号 $g(t) = s_1(t)$ と感度ベクトル $\mathbf{b} = \mathbf{A}_1$ を作成. このとき, \mathbf{b} の各値はほぼ同値.
2. 大域信号以外の3つの源信号 $\mathbf{s}_L(t) = [s_2(t), s_3(t), s_4(t)]^T$ と, 乱数による疎な混合行列 $\mathbf{A}_L(t) = [\mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \mathbf{A}_4]$ を作成
3. 局所信号 $\mathbf{l}(t)$ を $\mathbf{l}(t) = \mathbf{A}_L \mathbf{s}_L + \mathbf{e}(t)$ のように作成 ($\mathbf{e}(t)$ はガウス雑音の絶対値).
4. 観測信号の初期値 $\mathbf{x}(t)$ を $\mathbf{x}(t) = \mathbf{b}g(t) + \mathbf{l}(t)$ のように作成.
5. $\mathbf{x}(t)$ の GIC と SN 比を計算.
6. $\mathbf{x}(t) \leftarrow \mathbf{x}(t) - 0.05\mathbf{b}g(t)$
7. 5に戻る.

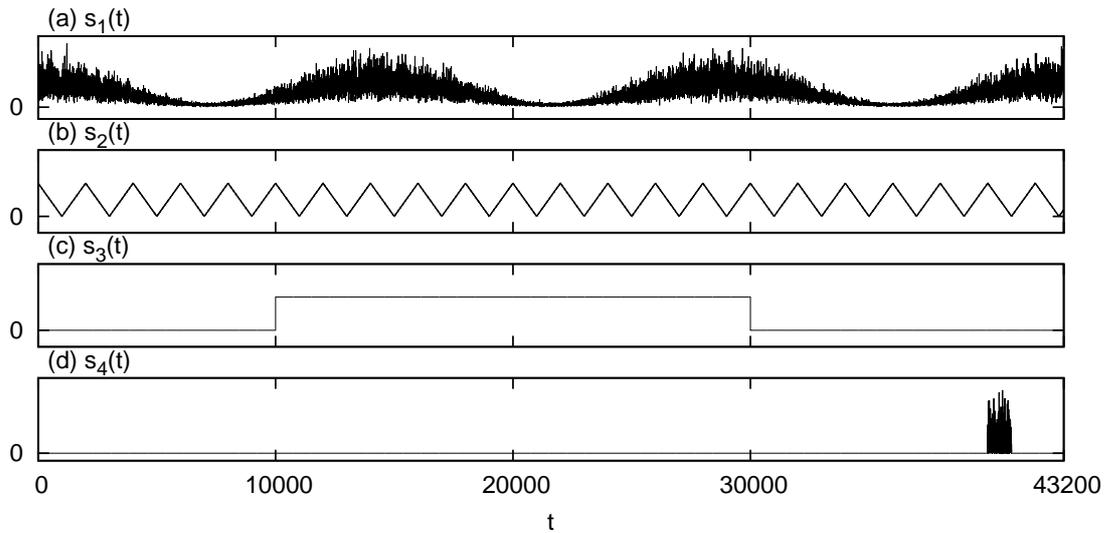


図 3.6: 作成した大域信号とその他の源信号

図 3.6 に示すは, (a) 大域信号と (b)-(d) それ以外の源信号である. 縦軸は振幅, 横軸は時系列に相当する t を表している. これらを以下に示す行列 \mathbf{A} で混合することで, 観測信号や局所信号を作成する.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1.0151 & 0.0555 & 0.0000 & 0.2294 \\ 1.1204 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1043 \\ 1.0185 & 0.0000 & 0.0019 & 0.0000 \\ 1.1892 & 1.3968 & 0.0039 & 0.5161 \\ 1.0895 & 0.0000 & 0.0015 & 0.0000 \\ 1.0228 & 0.0098 & 0.0972 & 0.9991 \\ 1.2059 & 0.0067 & 1.3036 & 0.1044 \\ 1.0489 & 0.7501 & 0.0154 & 0.0000 \\ 1.0164 & 0.0092 & 0.0000 & 0.7375 \\ 1.0028 & 0.0000 & 0.0000 & 0.6062 \\ 1.0130 & 0.1012 & 0.0005 & 0.0152 \\ 1.0069 & 0.0029 & 0.0000 & 0.0177 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

図 3.7 は理想的な局所信号, 図 3.8 は観測信号の初期値を表している. 図 3.9 は, 大域信号の振幅に対応した GIC および SN 比を表している. 左の縦軸は GIC の値を表し, 右の縦軸は SN 比を [dB] で表している. 横軸は大域信号の振幅を表し, 左端が観測信号の初期値となっている. 図より, SN 比が大きくなるほど GIC は小さくなり, 大域信号が含まれていないときに GIC は最小値をとっている. このことから, 大域信号除去の評価において, GIC は SN 比の妥当な代替となりうる.

3.6 まとめ

本章では, 環境電磁波観測データから大域信号を除去する手法について述べた. まず, ELF 帯環境電磁波観測データの信号モデルについて説明し, 地震前兆信号の抽出が BSS の問題に

帰着できることを示した。次に、現在までに得られている知見では、分離された源信号が何を要因としているかを判別することが困難であるため、地震前兆信号を直接抽出するのではなく、地震と無関係な大域信号を除去することを提案し、その手順について述べた。また、大域信号を除去した信号の評価指標 GIC を提案し、 GIC が SN 比の妥当な代替となることを示した。

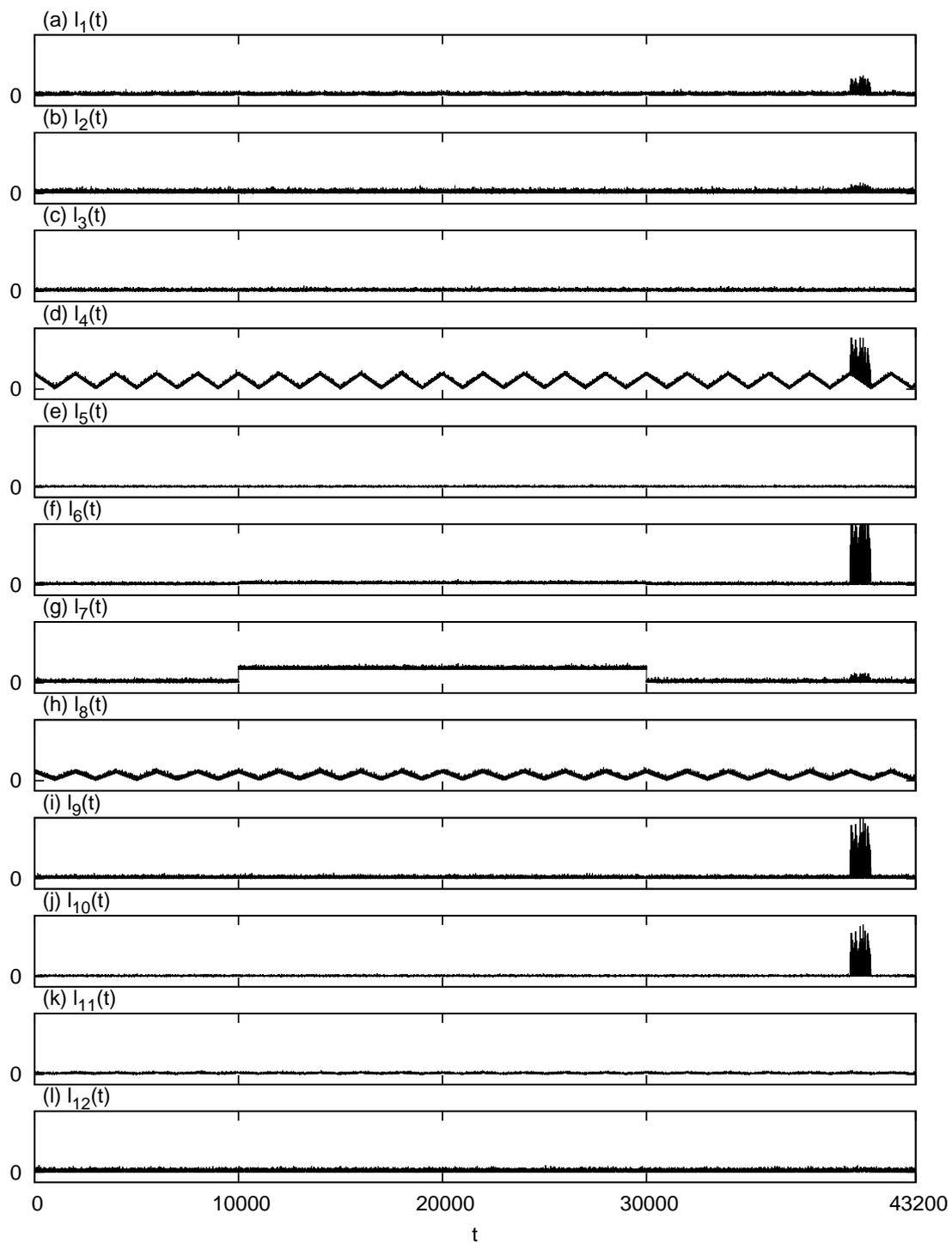


图 3.7: 作成した理想的な局所信号

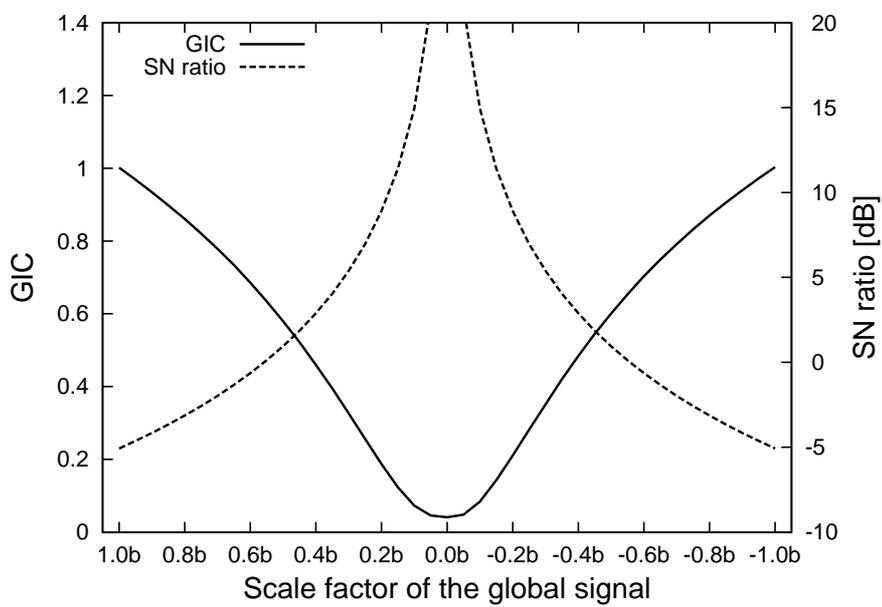


図 3.9: 大域信号の振幅に対応する GIC と SN 比