

平成 26 年度 修士論文

地震先行 ELF/ULF 帯磁場異常の統計的研究

学籍番号 1331108

氏名 安江剛広

情報・通信工学専攻

電子情報システムコース

指導教員 芳原容英 教授

副指導教員 橋本 猛 教授

## 修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工 学研究科 情報・通信工学 専攻 博士前期課程		
氏 名	安江 剛広	学籍番号	1331108
論 文 題 目	地震先行 ELF/ULF 帯磁場異常の統計的研究		
<p><b>要 旨</b></p> <p>近年、地震による被害を防ぐため、地震先行現象の研究が活発に行われている。近年注目されているのが、電磁気学的手法を用いた研究である。これまで Van 法や ULF 帯磁場観測など、様々な手法が試されてきた。しかし、特定の手法に対しての解析例が少ないことや、それぞれの手法を単独で用いることによる、先行現象検出精度の限界などが問題点となっている。</p> <p>本研究では 2 手法を用いて先行現象検出精度向上を目指した。その 2 手法の 1 つは ELF 帯磁場放射と、もう 1 つは ULF 帯磁場減少である。これらを使用した研究はロシアで行われたことはあったが、日本においてこれらの手法が長期間の解析により試されたことはなかった。本研究では 2 手法を用い、事例解析と、統計解析の研究を行った。</p> <p>本研究の目的は、ELF 帯磁場放射と ULF 帯磁場減少の事例、統計解析による地震に先行した磁場異常特性の導出と比較を行うことである。最終目標は、将来起こる地震の短期予測である。</p> <p>時間重畳法を用いた解析では、2 手法において、地震が起こる何日程前から異常が見られるか、また、どのような地震に対して最も明確に先行現象が見られるかを調べた。ELF 帯磁場放射では地震が起こる 6 日前から異常が見られ、ULF 帯磁場減少では 3 日前から異常が見られるという結果が得られた。また、統計に使用する地震に条件を付け、観測点から震源までの距離と震源の深さを変化させ、観測点から震源までの距離 300 km 以下、震源の深さ 50 km 以下、マグニチュード 4 以上で、より明確に先行現象が見られることが分かった。</p> <p>次に、その結果を用いて、スレットスコアを用いて先行現象検出精度の定量的な評価を行った。2 手法を別々に用いた結果では ELF 帯磁場放射の方が ULF 帯磁場減少に比べ若干適中率が高いことが分かった。しかし、空振り率の割合が非常に高い結果となった。また、2 手法を組み合わせ場合のスレットスコアも算出した。結果は、2 手法を別々に用いた場合と比べ、見逃し率の割合が減少したが、適中率 2 割、空振り率 7 割程となった。この空振り率の高さが地磁気の影響ではないかという考えのもと、地磁気の影響が大きいと思われる日は統計結果から省き、再びスレットスコアを導出した。しかし結果は変化せず、地磁気の影響は関係がないことが分かった。</p> <p>今後の展望としては、空振り率の削減のため、他の手法も組み合わせることや、解析期間の延長、そして、より実用的な地震予測に向け、ELF 帯磁場を用いての、磁場の到来方向導出などにも、より力を入れることなどが考えられる</p>			

## 概要

近年、地震による被害を防ぐため、地震先行現象の研究が活発に行われている。その中でも近年注目されているのが、電磁気学的手法を用いた研究である。これまで Van 法や ULF 帯磁場観測など、様々な手法が試されてきた。しかし、特定の手法に対しての解析例が少ないことや、それぞれの手法を単独で用いることによる、先行現象検出精度の限界などが問題点となっている。

本研究では 2 手法の電磁気学的手法を用いて先行現象検出精度向上を目指した。その 2 手法の 1 つは ELF 帯磁場放射と、もう 1 つは ULF 帯磁場減少である。これらを使用した研究はロシアで行われたことはあったが、日本においてこれらの手法が長期間の解析により試されたことはなかった。これらを使用して日本での事例解析と、統計解析の研究を行った。

本研究の目的は、ELF 帯磁場放射と ULF 帯磁場減少の事例、統計解析による地震に先行した磁場異常特性の導出と比較を行うことである。最終目標は、将来起こる地震の短期予測である。統計解析では時間重畳法を用いた解析とスレットスコアを用いた解析を行った。

時間重畳法を用いた解析では、2 手法において、地震が起こる何日程前から異常が見られるか、また、どのような地震に対して最も明確に先行現象が見られるかを調べた。ELF 帯磁場放射では地震が起こる 6 日前から異常が見られ、 $\delta D$  では 3 日前から異常が見られるという結果が得られた。また、統計に使用する地震に条件を付け、観測点から震源までの距離と震源の深さを変化させ、観測点から震源までの距離 300 km 以下、震源の深さ 50 km 以下、マグニチュード 4 以上で、より明確に先行現象が見られることが分かった。

次に、その結果を用いて、スレットスコアという、主に天気予報の分野で使用される手法を用い、先行現象が見られたかどうか、そしてその後地震が起きたかどうかの定量的な評価をおこなった。2 手法を別々に用いた結果では  $\Delta S$  の方が  $\delta D$  に比べ若干適中率が高いことが分かった。しかし、空振り率の割合が非常に高い結果となった。また、2 手法を組み合わせ場合のスレットスコアも算出した。結果は、2 手法を別々に用いた場合と比べ見逃し率の割合が減少したが、適中率 2 割、空振り率 7 割程となった。この空振り率の高さが地磁気の影響ではないかという考えのもと、地磁気の影響が大きいと考えられる日は統計結果から省き、再びスレットスコアを導出したが、ほとんど変化せず、地磁気の影響はそれほど関係がないということが分かった。

今後の展望としては、空振り率の削減のため、他の手法も合わせていくことや、解析期間の延長、そして、より実用的な地震予測に向け、ELF 帯磁場を用いての、磁場の到来方向導出などにも、より力を入れることなどが考えられる。

## 目次

第一章 序論	1
研究背景	1
受動的観測手法	1
Van 法(職流の地電流測定)	1
ULF 帯電磁場観測	1
能動的観測手法	2
VLF・LF の標準電波観測	2
見通し外 FM 放送波観測	2
最新の研究	3
本研究の目的	5
第2章 地震先行電磁気現象	6
ELF 帯磁場放射	6
ULF 帯磁場減少	6
第3章 データ諸元	7
3.1 地震のデータ	7
3.2 ELF 帯電磁場データ	7
3.2.1 観測システム	7
3.2.2 ELF 帯電磁場データ諸元	9
3.3 ULF 帯電磁場データ	10
3.3.1 観測システム	10
3.3.2 ULF 帯電磁場データ諸元	11
第4章 解析方法	12
4.1 ELF 帯磁場放射	12
4.2 ULF 帯磁場減少	15
4.3 統計解析手法	15
4.3.1 時間重畳法	15
4.3.2 スレットスコア	15
第5章 解析結果	20
5.1 時間重畳法を用いた統計解析結果	20
5.2 スレットスコアを用いた統計解析結果	26
第6章 考察	32
第7章 結論と展望	33
謝辞	34
参考文献	35
発表実績	36
付録	37

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究背景

震源の周辺では地震の先行現象として数日から数週間前に磁場異常が起こることが報告されており、地震予測に関わる研究が行われてきた。

地震電磁気現象を観測する手法には大まかに分けて受動的手法と能動的手法の 2 種類がある。

### 1.1.1 受動的観測手法

受動的手法とは、震源及び震源域から直接到来する自然発生的な電磁気現象を観測する方法である。その発生メカニズムはいくつか考えられているが、その 1 つに圧電効果がある。圧電物質(水晶など)は、圧力を加えると電磁気が発生するということが知られている。クォーツ時計等についている水晶振動子が、電圧を加えると振動するという現象と逆の原理である。この原理に基づき、地震の発生前に地殻に圧力がかかり、それに伴い圧電物質から電磁気シグナルが発生し、その信号を捉えるという手法が受動的手法である。この方法は、地殻の変化に伴うシグナルを捉えていると考えられているため、発生機構は比較的考えやすい。しかし、震源からの雑音を観測していることを考慮すると、震源から離れるほどシグナルの強度は落ち、地震以外からの影響も大いに受けることが考えられる。例えば、家庭や工場の電化製品から出る電磁気雑音、直流電車から出る漏洩電流、地磁気嵐、雷などの影響を受けることを考慮しなくてはならない。従って、これらの地震とは関係のない電磁気シグナルをいかに分別するかが重要になってくる。

以下に、受動的観測手法の代表例を挙げる。

#### 1.1.1.1 Van 法(直流の地電流測定)

VAN 法とは、直流成分での地震に伴う異常を検出する方法である[Varotsos et al 1984]。Varotsos らは岩石に力を加えると破壊直前に電流が生じることを発見した。地震も岩盤の破壊現象であるので、同じように電流が発生するのではないかとの考えに基づいていた。直流成分の異常を検知すれば地震の前兆として地震予知につながると考えた。1980 年代初めから研究が開始され、地震の先行現象を見出し予側する目的として研究がすすめられているものとしては世界の先駆けとなるものである。すでにマグニチュード 5.5 以上の地震についてはその 70 %以上の予測に成功している。日本でも理研グループを中心に VAN 法の観測が行われたが、日本国内では直流電車などの雑音がきわめて強い場所が多く、良好な結果は数例しか得られていないのが実情である。

#### 1.1.1.2 ULF 帯電磁場観測

ULF 帯電磁場データの異常の観測の初頭に発生した報告として、スピクタ地震時の磁界 3 成分の観測結果[Kopytenko et al 1993]や、1989 年ロマ・プリエタ地震の磁界水平成分の観測結果の報告[Fraser-Smith et al 1990]などがある。最初に報告された地震に伴う ULF 磁場観測データの異常は、スピタク地震に伴うものである。この地震は 1988 年 12 月 7 日にマグニチュード 6.9 の地震で、その地震の前後期間において、震源から約 130 km 離れた場所で観測されていた ULF

帯磁場強度に異常な変動が現れた。続いて、ロマ・プリエタ地震はスピタク地震の約1年後の1989年10月17日にアメリカ合衆国カリフォルニア州で派生したマグニチュード7.1の地震である。この地震の前後期間において震源から7kmという直近の位置で観測されていたULF帯磁場強度に明らかな異常が見つかった。これら2つの地震はULF磁場観測データの強度変化に異常が発生した。また、グアム島やビアク島付近で発生した地震については、ULF帯磁場の偏波に異常が観測された。この後、最近では日本においても地震国際フロンティア研究により、ULF帯磁場データ観測点が各地に置かれ研究が進められてきた。

### 1.1.2 能動的観測手法

能動的観測手法とは、地震の前に送信局電波の伝搬の異常を検出するという手法である。この方法は、地震の前に対流圏や電離層に何らかの異常が発生し、その影響で通常受信できない電波が受信されたり、受信できていた電波が受信されなくなる現象や受信している電波の位相や振幅が変化したりするという現象を観測する手法である。この手法の特徴は、まず人工的な雑音の影響を比較的受けにくいという点にある。自然からの放射を直接観測する方法と異なり、人工的に作られた強度が強い電波を用いるため、S/N比が受動的手法に比べ高いことに利点がある。また、この手法は震源からの直接的な電波を観測しているのではなく、送信店と受信点間の伝搬経路上における異常の発生を検出する方法である。そのため、その伝搬経路上に異常を起こされる地震が多数発生すれば異常を検出できるため、受動的手法と異なり解析対象イベント数を蓄積することが容易である。これらの異常の発生メカニズムは未だ解明されていないが、地震が発生する地殻内と、異常が発生する大気圏及び電離層とを結合するメカニズムがいくつか提案されている。

#### 1.1.2.1 VLF・LFの標準電波観測

VLF・LF電波における伝搬以上の観測の初頭研究はGufeldらによって行われた。彼らは、M6クラスの地震に先行して、VLF帯電波の位相の変動異常を発見した。また、犬吠で観測されていた対馬のオメガ局の電波を解析し、兵庫県南部地震に対しての明確な前兆的電離層擾乱を発見した[Hayakawa et al 1996]。兵庫県南部地震の前後数日にわたって、日出日没時の位相の落ち込む時間(ターミネータータイム)が異常に変動したことを発見した。この方法をターミネータータイム法という。最近ではこの方法に加えて、夜間の振幅や位相の変動の異常を検出する方法も研究されている。また、最近では統計的手法による研究も行われており、VLF・LF伝搬異常と地震との因果関係を確認している。この方法は、少ない観測点で広い範囲の地震の異常を捉えられることができるため、地震短期予測の最有力候補の1つと考えられている。

#### 1.1.2.2 見通し外FM放送波観測

FM放送電波の研究はほかの研究に比べ、ごく最近始められた。主な観測としては串田氏が始めた串田法がある。この方法が始められたのは、八ヶ丘で見通し外のFM放送波を用いた流星の電波観測をしている際に、アナログ受信機についているSメーターの異常な変動を発見し、その異常を突き詰めていった結果、地震との関連性が認められたことにある。これを受け、電通大を含め、いくつかの大学で見通し外のFM放送波の強度観測が行われている。その中で、福元氏は

FM 放送波の受信強度だけでなく音声観測も同時に行った方法で観測を行った。彼らは、通常は受信不可能な仙台の FM 放送波を東京で受信する観測を行った。その結果、東京から仙台との間、特に茨城方面で地震が発生する約 1 週間前に放送波が到来することが報告されている。また、福元氏らは見通し外 FM 放送波の到来方向を測定する際に、各方向に向けた八木アンテナの強度を比較し、方向角及び仰角を測定していた。この手法を用いた結果、地震に先行して到来する見通し外 FM 放送波の到来方向が、地震の方向を向くことが報告されている。しかし、方位測定を目的とした場合、八木アンテナの半値幅は広いため、指向性が鋭くない。そのため、電波の到来方向の推定精度が低いことが欠点であった。そこで、最近では、干渉計を用いて電波の到来方向を測定する試みが行われている。この方法は発雷に伴う電磁波の到来方位測定に用いられていた方法でかなりよい精度で方向角を決定することが出来る。見通し外 FM 放送波を用いた方法は、今まで上げてきた方法の中でも、コストが抑えられる方法のため、観測点が急速に増えている方法である。しかし、地震に先行した有力な異常発生メカニズムは提案されていない。

### 1.1.3 最新の研究

今回の研究で行うのは受動的手法であり、本研究の先駆けとなった最新の研究について以下述べる。

磁場放射に関しては、震源からの ULF/ELF 帯磁場放射についての研究が発表された [A.Y.Schekotov et al 2007]。これはロシアの Karimshino 観測所で得られた磁場のデータを使用し解析を行ったものである。この研究では Karimshino 観測所の東西方向で多くの地震が起こることに着目し、観測所からより東西方向に近い方向から磁場放射があった場合に値が大きくなるパラメータ  $\Delta S$  をいくつか作り出した。そしてそれらのパラメータを用い実際に解析を行い、どのパラメータがより地震の先行現象に対し精度が良いかを試し、探し出した。

その後、改良したパラメータ  $\Delta S$  についての研究が発表された [A.Y.Schekotov et al 2008]。閾値を設定することにより、震源以外からの ELF 帯磁場放射(雷活動など)を解析対象から除外する方法を使用した。そうして閾値を設定した場合とそうでない場合の結果を比べ、閾値を設定した方法の優位性を示した。

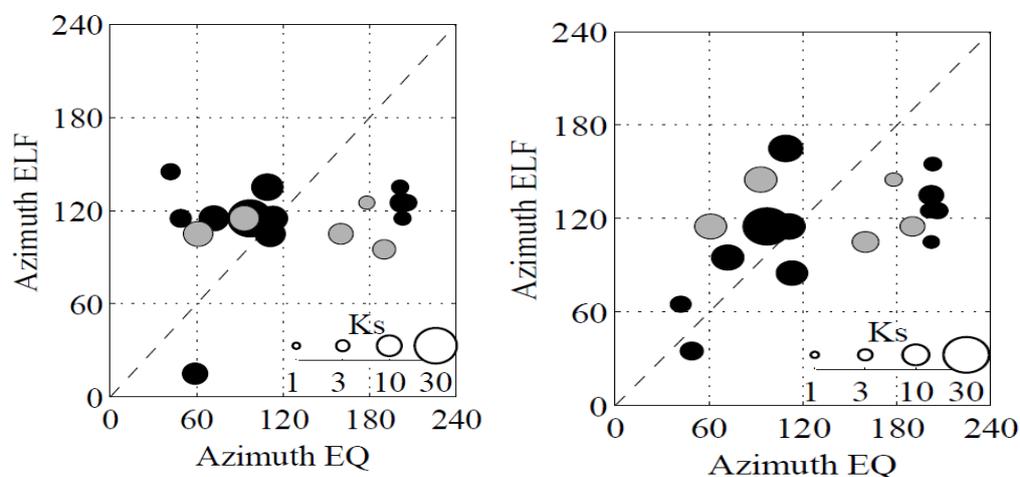


図 1.1 閾値を設定した場合(左)とそうでない場合(右)の結果の比較

さらに 2007 年でパラメータ  $\Delta S$  をいくつか作り、その中で最も高精度なものを選んだが、このパラメータは Karimshino 観測所から東西方向で地震が多く起きるという特殊な状況を前提として作られたものである。よってその他の方向からの磁場放射があった場合にはあまり有効性がない。そこでパラメータ  $\Delta S$  に座標変換を行い、偏波比を用い、どの方向から磁場放射があった場合でも有効性を失わぬよう改良した。

磁場減少に関しては、Karimshino 観測所で約 1 年間観測を行って得た磁場データを用い、そして磁場減少解析のためパラメータ  $\delta G_i$  を使用し、観測所付近で起きた地震の数日前に先行して起こる、周波数帯 0.003~0.1 Hz での磁場減少に関する研究を発表した[Molchanov et al 2003]。この研究により、0.01~0.1 Hz で先行現象が強く観測されることと、磁場減少が起こる原因が地上ではなく大気圏あるいは電離層にあることを発見した。また、日本と Karymshino の二か所の観測所を使用し ULF 帯磁場減少の研究を行った[A.Schekotov et al]。この研究では磁場の水平磁界成分で構成される磁場減少の程度を表すパラメータ  $\delta D$  が使われた。

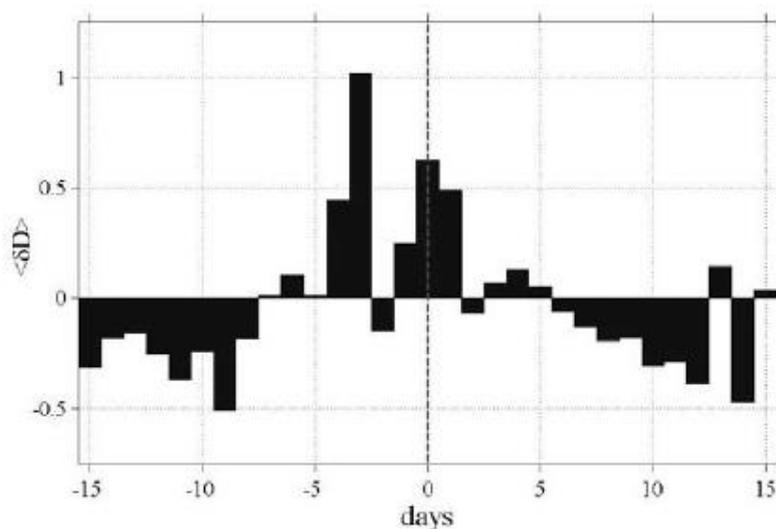


図 1.2 使用した全ての地震で平均した  $\delta D$  の解析結果

この研究では、地震のマグニチュードと観測点からの距離に依存する  $K_s$  指数の大小と  $\delta D$  の大小に正の相関関係があることが分かった。さらに 0.02~0.05 Hz の周波数範囲で磁場減少が最も強く観測されるということと、磁場減少は地震が起こる 3~4 日前の現地時間の深夜 12 時から  $\pm 1$  時間の間に最も多く起こることが分かった。

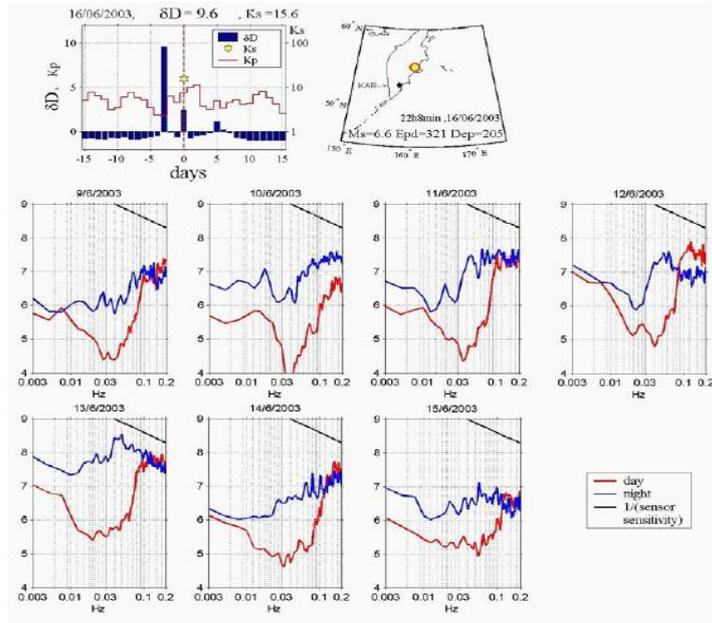


図 1.3 昼と夜の実験結果の比較

## 1.2 本研究の目的

本研究の目的は、ELF 帯磁場放射と ULF 帯磁場減少の事例、統計解析による地震に先行した磁場異常特性の導出と比較を行うことである。最終目標は、地震先行現象の検出精度向上である。

## 第2章 地震先行電磁気現象

### 2.1 ELF 帯磁場放射

3 kHz 以下の周波数の電磁波は ELF 帯電磁波と言う。震源周辺では ELF 帯磁場放射が見られる。そのメカニズムについてはいくつか仮説があるが、まだ確定していない。仮説の一つとして次のようなモデルが考えられている。

地震発生の前段階として地下地盤に強い圧力がかかる。その際に岩盤にゆがみが蓄積され、岩盤を徐々に破壊していく。そしてそのゆがみに耐え切れなくなった岩盤の破壊により地震が発生する。岩盤に対する圧力によって岩石に細かい割れ目が生まれることを微笑破壊(マイクロフラクチャ)と言う。地盤は圧電効果に伴い電子を放射する圧電対と家庭すると、電子は岩盤に生成された割れ目に従い運動する。その結果震源域は電磁波を発すると考察されている。

### 2.2 ULF 帯磁場減少

3 Hz 以下の周波数帯の電磁波は ULF 帯電磁波と言う。超高層からほぼ定常的に到来している磁場の変動(地磁気脈動)の静穏さが異常を見せる。メカニズムとしては電離層擾乱が、この地磁気脈動の伝搬を阻害してしまうため生じると考えられている。

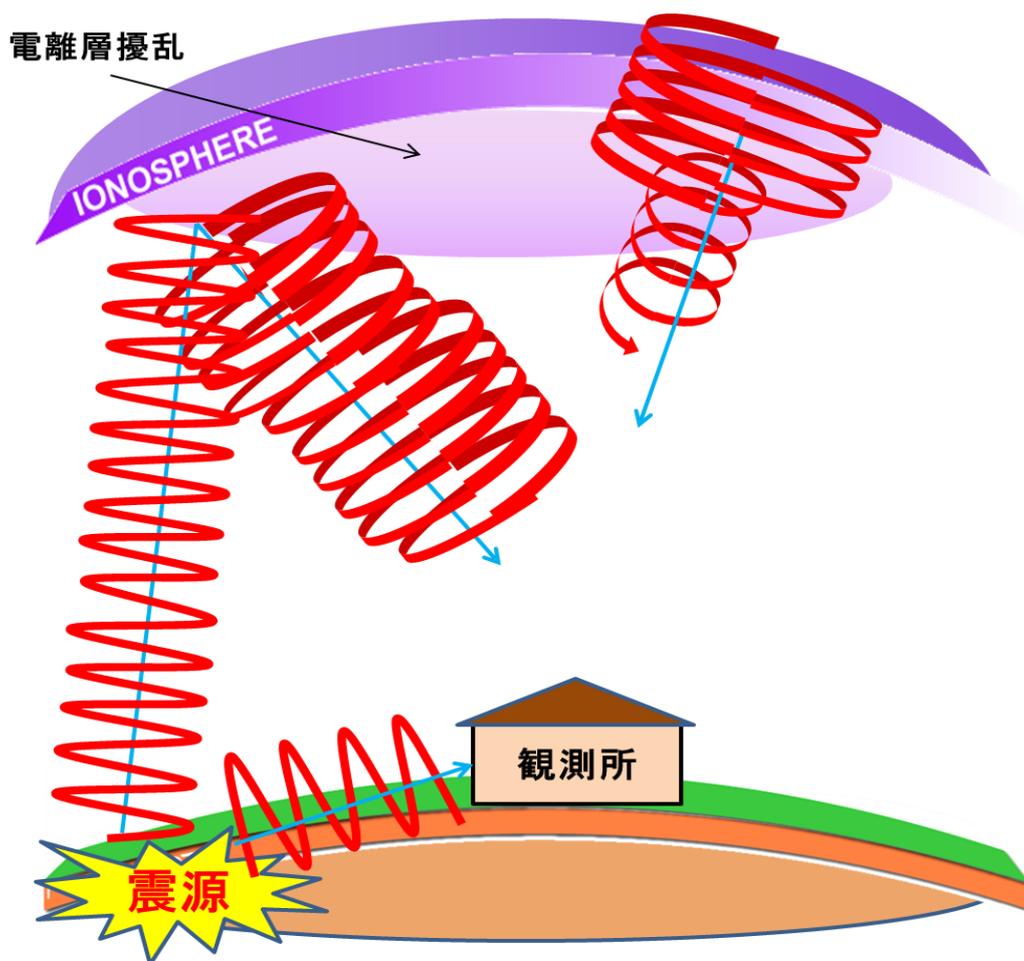


図 2.1 ELF 磁場放射と ULF 磁場減少

## 第3章 データ諸元

### 3.1 地震のデータ

解析期間は 2005 年 1 月 1 日～2009 年 12 月 31 日である。地震のデータは米国地質調査所 (USGS) のサイト (<http://earthquake.usgs.gov>) を利用した。

### 3.2 ELF 帯電磁場データ

#### 3.2.1 観測システム

図 3.1 は観測システムの概要を示している。

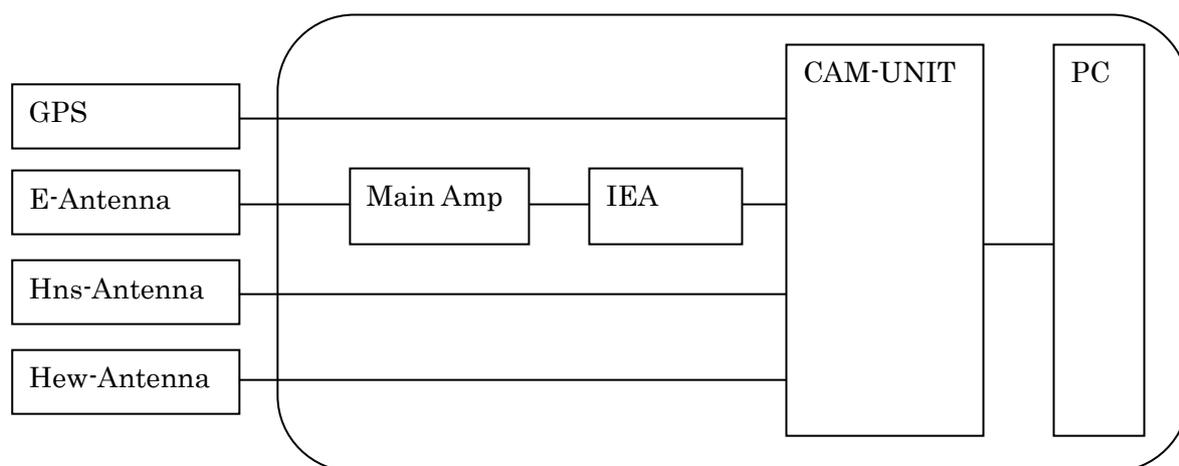


図 3.1 観測システム概要

電界アンテナはメインアンプと IEA を介して、磁界アンテナはアンテナから CAM-UNIT に接続されている。CAM-UNIT には GPS アンテナからのケーブルも接続されている。従って CAM-UNIT に入力された電磁界データと GPS データが、PC 内部に接続されている PCI ボード (DAQ) に入力され、PC にデータ保存されている。

電磁波の電界データを取得するため設置されているポールアンテナと関係機器は図 3.1 の用に接続されている。このポールアンテナに励起された電圧はプリアンプ、可変抵抗、メインアンプ、電力線高調波遮断フィルター (IEA) を通り、CAM-UNIT に入力される。メインアンプ内には 800Hz のローパスフィルタと 50Hz、100Hz、150Hz のノッチフィルタが内蔵されている。

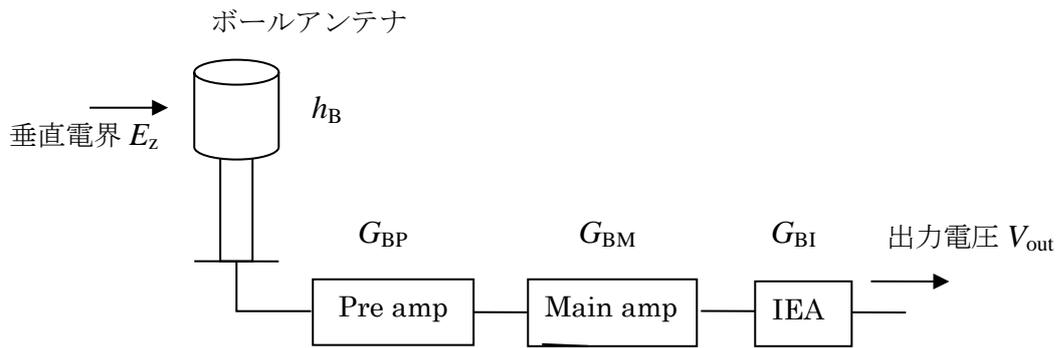


図 3.2 電界アンテナ観測システム

図 3.2 における  $G_{BP}$ 、 $G_{BM}$ 、 $G_{BI}$  はプリアンプ、メインアンプ、IEA の伝達関数を示し、また  $h_B$  はボールアンテナの特性長を示す。入力電界  $E_z$  と出力電圧  $V_{out}$  には以下の関係式が成り立つ。

$$V_{out} = G_{BI} \times G_{BM} \times G_{BP} \times h_B \times E_z$$

現行の磁界観測システムは水平磁界二成分を観測する二つの磁界アンテナ、GPS、DAQ(Data Acquisition)より構成されている。観測磁界アンテナは付属のプリアンプ内に 1300Hz のローパスフィルタが内蔵されており、全体としては 0.01-1000Hz まで観測可能な設定となっている。

### 3.2.2 ELF 帯電磁場データ諸元

表 3.1 母子里観測所データ諸元

北海道母子里観測所(本研究所)解析期間:2005年～2009年		
センサーの種類		コイル型
観測地点	緯度	44.29°
	経度	142.21°
観測成分		垂直電界成分
		水平磁場東西成分
		水平磁場南北成分
サンプリング周波数		4000 Hz
観測周波数		0.1～1000 Hz

### 3.3 ULF 帯電磁場データ

#### 3.3.1 観測システム

地磁気観測所で得られた地磁気データは、データ解析の基礎となるものであり、地磁気指数や磁場モデルもそれに基づいて作成されている。図 3.3.はそれぞれの要素を表している[7]。

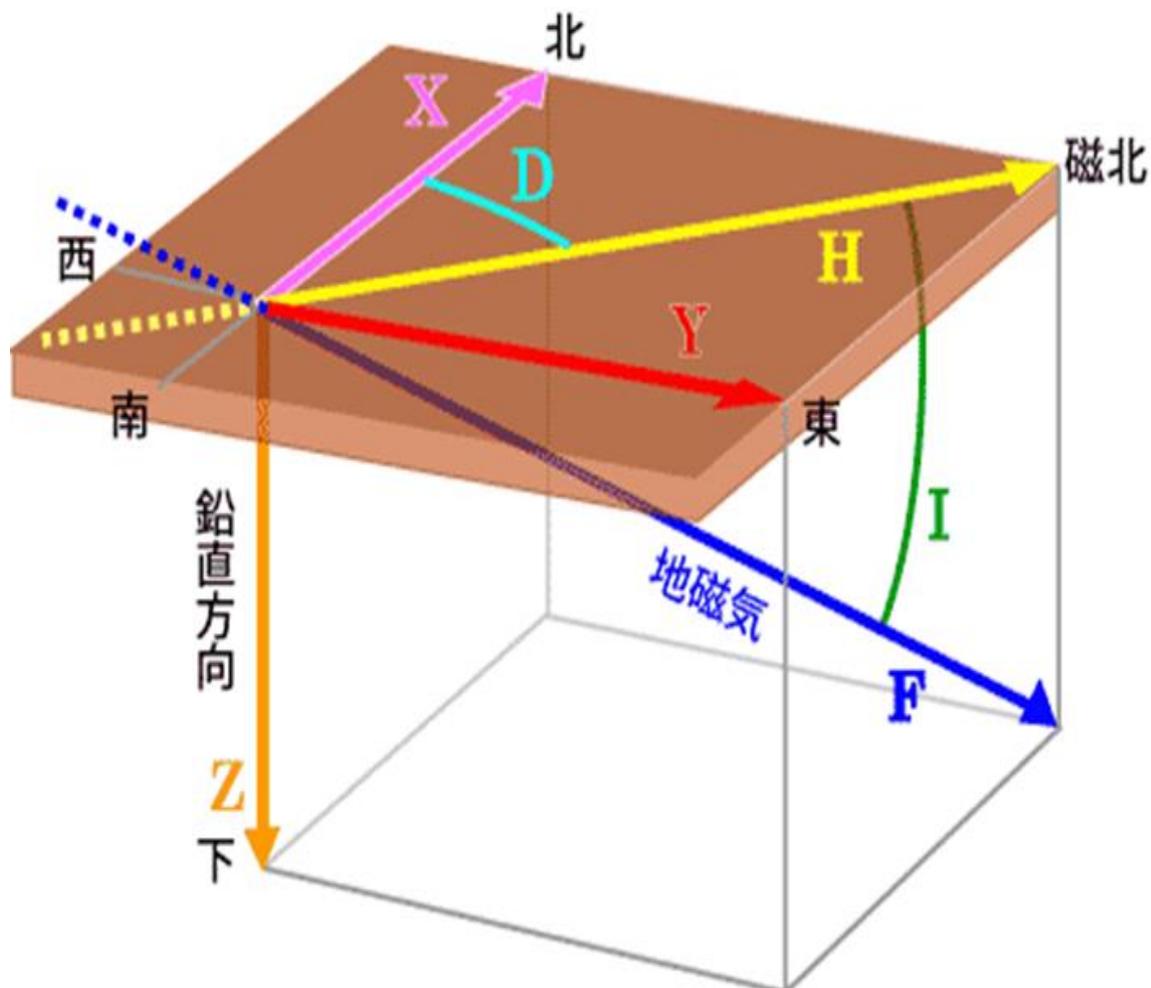


図 3.3 地磁気の要素

地磁気の要素（地磁気成分ともいう）には全磁力（強さ、Total intensity, F）、北向き成分（Northward component, X）、東向き成分（Eastward component, Y）、鉛直下向き成分（Vertical component, Z）、水平成分（Horizontal component, H）、偏角（真北から東向きに測った角度、Declination, D）、伏角（水平面から下向きに測った角度、Inclination, I）の7つがある。なお、X,Y,Z,H は地磁気のそれぞれの方向への強さであるので、北向き分力、東向き分力、鉛直（下向き）分力、水平分力とも呼ばれる。また、伏角は Dip angle とも呼ばれる。次元は、F,X,Y,Z,H では磁束密度、D,I では角度で、通常それぞれ nT（ナノテスラ、 $10^{-9}$ テスラ、CGS 単位系では  $10^{-5}$ ガウスあるいは 1 ガンマ）単位、度+分または分単位（ただし、多くの数表は 0.1 分単位）で表現される。

各地磁気要素の値について成り立つ主な関係式には以下のものがある

$$F=(X^2+Y^2+Z^2)^{1/2}=(H^2+Z^2)^{1/2}$$

$$H=F*\cos(I), X=H*\cos(D), Y=H*\sin(D), Z=F*\sin(I)$$

地磁気は向きと強さをもつベクトル量であるので、その表現には独立な 3 つの要素の値が必要であり、HDZ, XYZ あるいは FDI といった組み合わせがよく用いられる。

### 3.3.2 ULF 帯電磁場データ諸元

次に ULF 帯電磁場のデータ諸元について説明する。表 3.2 は北海道女満別のデータ諸元である。センサーの種類はフラックスゲートであり、観測成分は、南北成分、東西成分、垂直成分である。ただし垂直成分は解析には使用していない。時間分解能は 1 秒値となっている。

表 3.2 北海道女満別データ諸元

北海道女満別観測施設 解析期間：2005 年～2009 年		
データ元：地磁気一秒値プロット・データ出力		
< <a href="http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/shplt/index-j.html">http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/shplt/index-j.html</a> >		
センサーの種類		フラックスゲート
観測地点	緯度	43.54 °
	経度	144.11 °
観測成分		南北成分
		東西成分
		垂直成分
時間分解能		1 秒値

## 第 4 章 解析方法

### 4.1 ELF 帯磁場放射

ELF 帯磁場データに関しては、データの容量が大きいため 50 Hz にダウンサンプリングを行った後で解析を行った。

ELF 帯磁場放射の解析には(1)式の $\Delta S$ というパラメータを使用する。

$$\Delta S = \frac{P_{xx}/P_{yy}-1}{\text{rms}(\tan \beta)} \quad (1)$$

$$P_{xx} = P_{hh} \cos^2 \theta + P_{dd} \sin^2 \theta + \text{Re}P_{hd} \sin 2\theta \quad (2)$$

$$P_{yy} = P_{hh} \sin^2 \theta + P_{dd} \cos^2 \theta - \text{Re}P_{hd} \sin 2\theta \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arcsin \left\{ \frac{\text{Im}(P_{dh}-P_{hd})}{[(P_{hh}-P_{dd})^2+4P_{hh}P_{dd}]^{\frac{1}{2}}} \right\} \quad (4)$$

図 4.1 が(1)式の理解の助けになる。

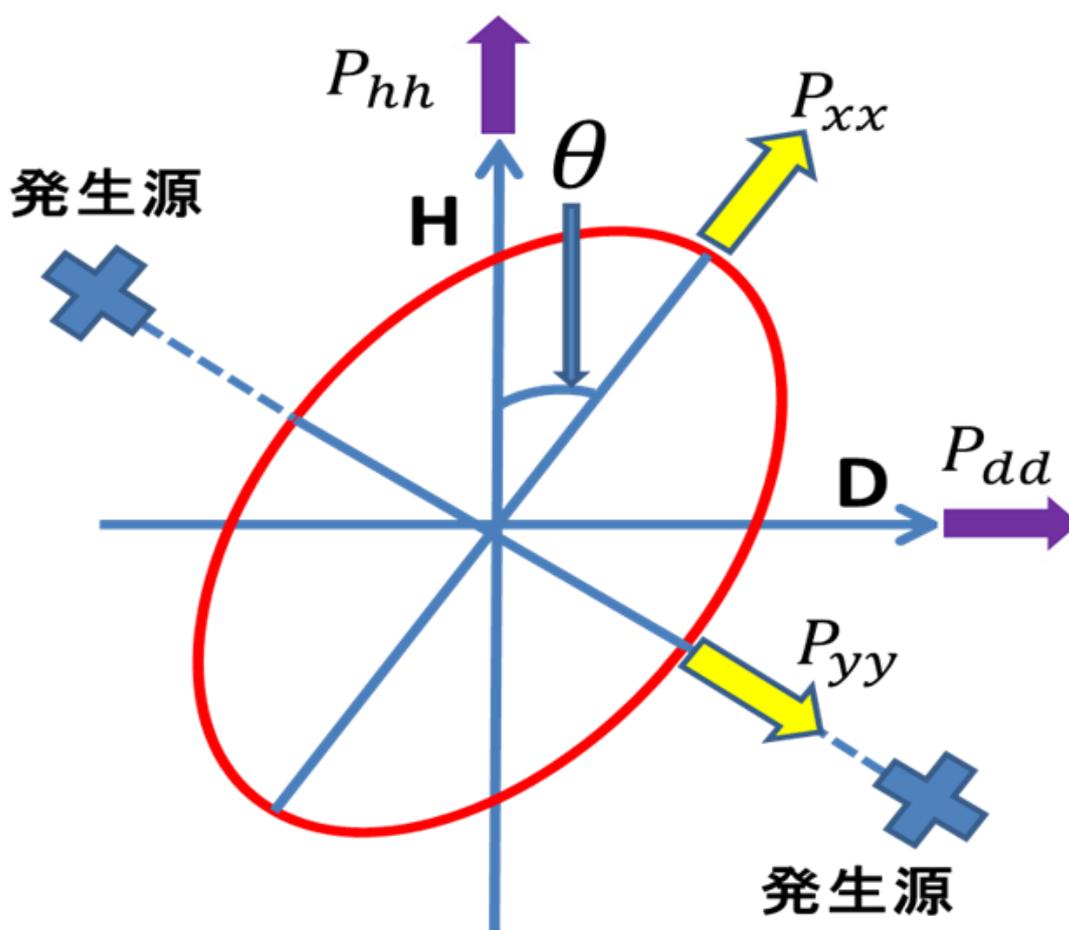


図 4.1 磁場の水平成分の楕円偏波

図 4.1 は、到来した ELF 帯磁場の観測点における磁場の南北成分と東西成分の軌跡を描いたも

のである。そして描かれた楕円の長軸が磁場の向きとなり、磁場の向きとその到来方向は垂直をなすという電磁波の性質より、楕円の短軸が磁場の向きになる。ただし、この場合、磁場の向きに直角をなす方向が到来方向ということしか分からないので、図の短軸のどちら側が発生源かは、少なくとも2点観測点を用いた交会法を使用しないと分からない。

図の $P_{hh}$ 、 $P_{dd}$ はそれぞれ磁場の南北成分と東西成分のパワースペクトルを表し、式(4)の $P_{dh}$ 、 $P_{hd}$ はクロススペクトルを表している。(1)式の分子の $P_{xx}$ は(2)式で表され、 $P_{yy}$ は(3)式で表される。 $P_{xx}$ は図の楕円の長軸方向の成分であり、 $P_{yy}$ は図の楕円の短軸方向の成分である。

(1) 式の性質を理解するため、(1)式の分母と分子についてそれぞれみていく。

(1) 式の分子より $P_{xx}$ 成分が $P_{yy}$ 成分に比べて大きいとき、(1)式の値は大きくなる。

また、(1)式の分母の $\beta$ は、正の値をとれば右偏波、負の値をとれば左偏波、0 ならば直線偏波の電磁波が到来したことをそれぞれ表す。 $\tan\beta$ は楕円の長軸と短軸の比率を表す楕円率である。そしてrmsは分散を表し、同じ発生源から磁場放射があるならばその分散値は小さくなり、結果(1)式の分母が小さくなるので、(1)の値は大きくなる。

つまり、到来した電磁波の軌跡がより直線偏波に近い形となり、かつ一定の到来方向からの電波が卓越しているときに(1)の値は大きくなる。

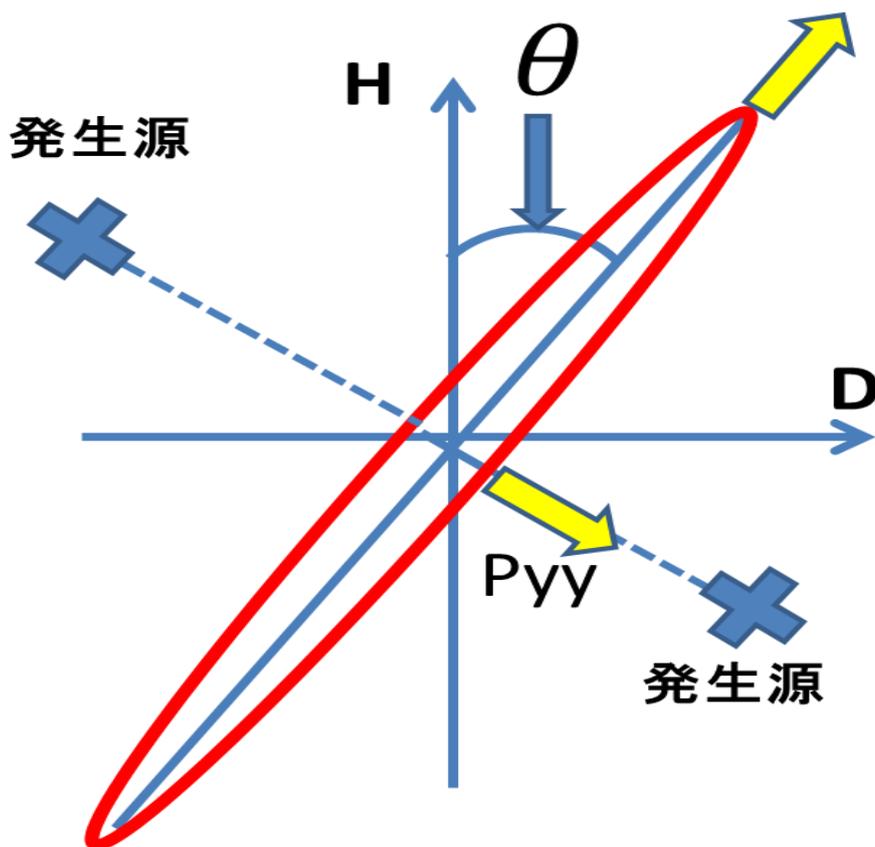


図 4.2  $P_{xx}$  成分が  $P_{yy}$  成分に比べて大きいときの楕円

図 4.2 は  $P_{xx}$  成分が  $P_{yy}$  成分に比べて大きいときの図である。先ほどの楕円とは異なり、直線偏波に近い形となり、磁場の向きと一致する長軸に垂直な短軸が磁場放射の到来方向と分かる。

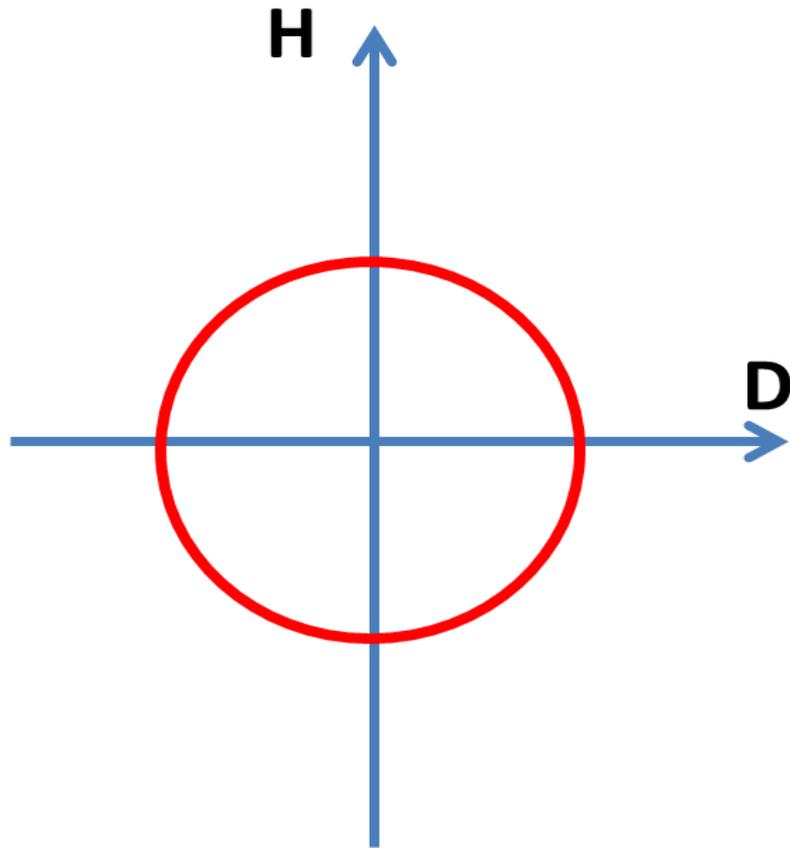


図 4.3 磁界が水平面内で円偏波のとき

図 4.3 は  $P_{xx}$  成分が  $P_{yy}$  成分と等しい時の図である。これは楕円の短軸と長軸の長さが等しい状態を意味するため、軌跡は円を描き、今までのように到来方向は定まらない。このとき  $\Delta S$  は 0 の値をとる。

## 4.2 ULF 帯磁場減少

ULF 帯磁場減少には(5)式の $\delta D$ というパラメータを使用する。

$$\delta D = (D - \langle D \rangle) / \langle D \rangle \quad (5)$$

$$D = \left\langle \frac{1}{H_{ns}} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{1}{H_{ew}} \right\rangle^2 \quad (6)$$

午前3時±2時間の間に、0.03~0.04 Hzの周波数を使用し解析を行った。(5)式中のDは、(6)式で表されるように、磁場の南北成分 $H_{ns}$ と磁場の東西成分 $H_{ew}$ の逆数の二乗の和をとることで求められる。(5)式中の $\langle D \rangle$ は磁場減少の月平均を表している。磁場の減少程度が大きいほど、 $\delta D$ は正の大きい値を取る、というパラメータになっている。

## 4.3 統計解析手法

### 4.3.1 時間重畳法

統計解析には時間重畳法を用いた。以下の説明は $\Delta S$ の統計解析方法についてであるが、 $\delta D$ に関しても全く同様に解析をおこなった。まず、観測点から震源までの距離と、震源の深さと、マグニチュード、のそれぞれの条件を変え、統計に使用する地震を選び出した。ただし、統計に使用する地震は、上記の条件を満たし、かつそれぞれの地震が起きた日から-15日以内に、条件を満たした他の地震が起きていないもののみである。そして、地震が起きた日を中心とし、その日から±15日間全ての日にちにおいて(7)式の $\Delta S/\sigma$ を算出し、最終的にすべての地震の平均を取った。

$$\frac{\Delta S}{\sigma} = \frac{\Delta S - \overline{\Delta S} (\Delta S \text{ の過去 15 日の平均})}{\sigma (\Delta S \text{ の過去 15 日の標準偏差})} \quad (7)$$

### 4.3.2 スレットスコア

スレットスコアとは、主に天気予報において、予報があったかどうか、そして実際に予報通りの現象が起きたかどうかを考慮し、その精度を評価するものである。

表 4.1 スレットスコアについて

		地震	
		あり	なし
先行現象	あり	<b>A</b> (適中)	<b>B</b> (空振り)
	なし	<b>C</b> (見逃し)	/

本研究では、地震先行現象検出精度の評価を行うため、表 4.1 のように、先行現象が見られたかどうか、そして実際に地震が起きたかどうかを評価した。表 4.1 の A は、先行現象が見られ、かつその後地震が起きたパターンであり、これを「適中」と定義した。また、B は先行現象が見られたにもかかわらず、その後地震が起きなかったパターンであり、これを「空振り」と定義した。さらに C 先行現象が見られなかったにもかかわらず、その後地震が起きたパターンであり、これを「見逃し」と定義した。

$$N = A + B + C \quad (8)$$

$$\text{適中率} = \frac{A}{N} \quad (9)$$

$$\text{空振り率} = \frac{B}{N} \quad (10)$$

$$\text{見逃し率} = \frac{C}{N} \quad (11)$$

検出精度を定量的に判断するために、(8)~(11)式を用いた。(8)式中の A は適中のパターンの数を表し、B は空振りパターンの数を表し、C は見逃しのパターンの数を表している。それら全パターンの合計を N で表した。そして、「適中」、「空振り」、「見逃し」のそれぞれの数を N で割り、それらを順に適中率、空振り率、見逃し率と定義した。これらを使用し、 $\Delta S$  の手法を単独に用いた場合のスレットスコアと  $\delta D$  の手法を単独に用いた場合のスレットスコアと  $\Delta S$  と  $\delta D$  を組み合わせた場合のスレットスコアの、計 3 種類を算出した。

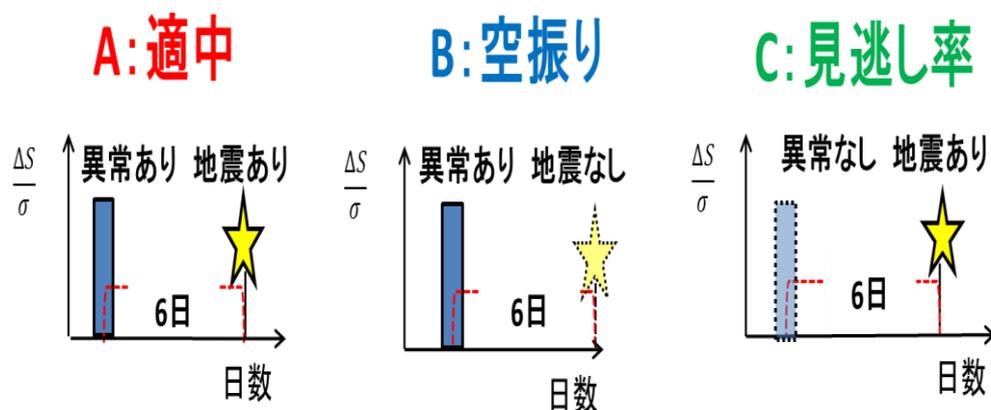


図 4.4  $\Delta S$  の手法を単独で用いた際のスレットスコアの分類法

まず、 $\Delta S$  の手法を単独に用いた際の、適中と空振りと見逃しの見分け方を説明する。図 4.4. は見分け方を表したものである。横に 3 つの図が並んでいるが、それぞれの縦軸は式(7)で算出した値を表し、横軸は日にちを表している。青の棒状は、(7)式で求めた値が閾値を超えた場合を表しており。黄色の星は、条件を満たした地震が起きた場合を表している。青の棒状の図や黄色い星が、点線で囲まれ、色も薄くなっているものは、異常あるいは地震が起きなかった場合を表している。一番左側のパターンは適中のパターンである。地震が起きた日の前日から 6 日前の間で  $\Delta S/\sigma$  の値が閾値を超えた日が少なくとも 1 日以上存在する場合は適中のパターンと判断し、適中のパターン図に 1 を足した。また、真ん中の図は空振りのパターンである。 $\Delta S/\sigma$  の値が閾値を超えた

日の翌日から6日後の間に、観測点から震源までの距離や震源の深さなどの条件を満たした地震が一度も起こらなかった場合に空振りのパターンと判断し、空振りのパターン数に1を加えた。さらに一番右の図は見逃しのパターンである。地震が起きた日の前日から6日前の間に $\Delta S/\sigma$ の値が閾値を超えた日が一日もなかった場合に見逃しと判断し、見逃しパターンに1を加えた。以上のようにカウントする際は、一度リードタイムに含まれた異常はその後の計算には使用しないという方法を取った。例えば、図4.4の一番左の適中のパターンにおいて地震が起きる5日前と6日前に $\Delta S/\sigma$ が閾値を超えた場合、6日前の日を適中のパターンに追加し、5日前の日の異常は、地震が起きてから6日前の間のリードタイムに含まれているため、その日は適中にカウントせず、以降カウントする際にも使用しない。

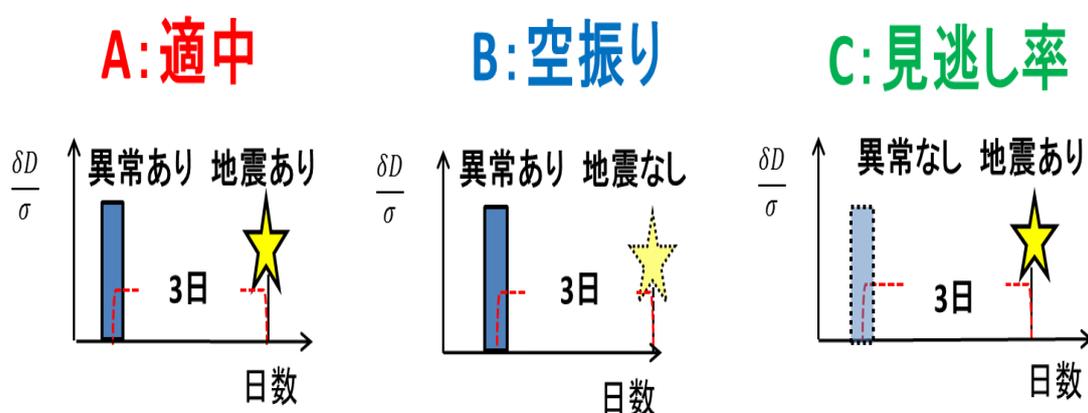
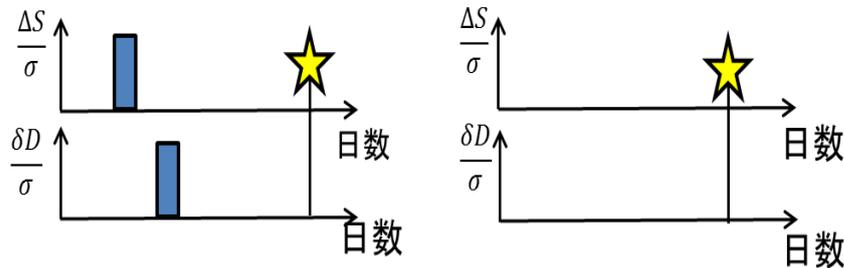


図 4.5  $\delta D$  の手法を単独で用いた際のスレットスコアの分類法

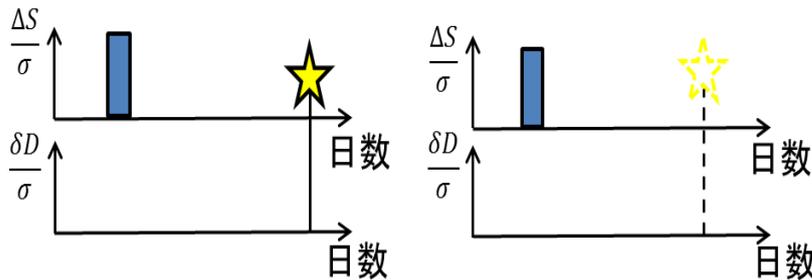
次に  $\delta D$  の手法を単独で用いた際の、適中、空振り、見逃しの見分け方について説明する。図 4.5 はその見分け方を表したものであるが、基本的には  $\Delta S$  の手法を用いた場合の見分け方と同じであり、唯一異なるのが、 $\Delta S$  の場合はリードタイムが6日間であったのに対し、 $\delta D$  の場合は3日間になっているという点である。

最後に  $\Delta S$  と  $\delta D$  の手法を組み合わせた場合の見分け方について説明する。

- ①  $\Delta S$ あり、 $\delta D$ あり、地震あり    ④  $\Delta S$ なし、 $\delta D$ なし、地震あり



- ②  $\Delta S$ あり、 $\delta D$ なし、地震あり    ⑤  $\Delta S$ あり、 $\delta D$ なし、地震なし



- ③  $\Delta S$ なし、 $\delta D$ あり、地震あり    ⑥  $\Delta S$ なし、 $\delta D$ あり、地震なし    ⑦  $\Delta S$ あり、 $\delta D$ あり、地震なし

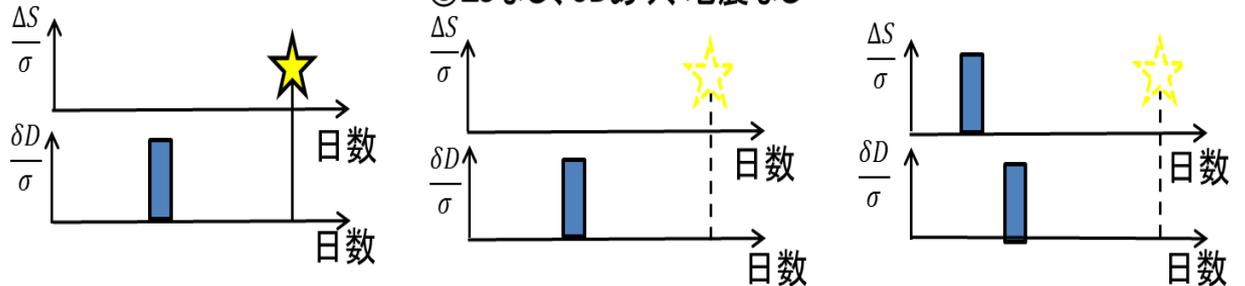


図 4.6  $\Delta S$  と  $\delta D$  の手法を組み合わせた場合のスレットスコアの分類法

図 4.6 は 2 手法を組み合わせた際の分類を示したものである。地震が起きた日の前日から 6 日前の間に  $\Delta S/\sigma$  が閾値を超えた日があるかどうか、そして地震が起きた日の前日から 3 日前の間に  $\delta D/\sigma$  が閾値を超えた日があるかどうかを考慮し、①～④のパターンを分類した。①は地震が起こる前に 2 手法で異常が見られたパターンであり、②は地震が起こる前に  $\Delta S$  の手法のみに異常がみられたパターンであり、③は地震が起こるまえに  $\delta D$  の手法のみに異常が見られたパターンであり、④は地震が起こる前に 2 手法のどちらにも異常が見られなかったパターンである。⑤、⑥、⑦のパターンに対しては、2 手法でリードタイムが異なることを考慮に入れ、以下のように分類を行った。

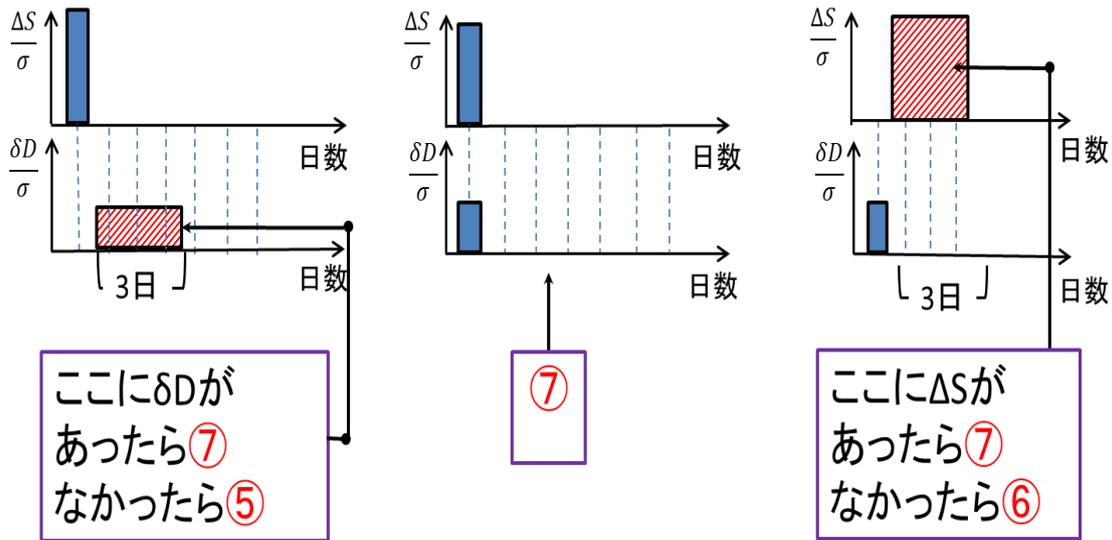


図 4.7 2手法を組み合わせた場合の⑤～⑦のパターンの分類法

図 4.7 は、2手法を組み合わせた場合に⑤～⑦のパターンに分類する際のやり方を示している。一番左の図は、ある日に  $\Delta S$  の手法で異常がみられた場合に、その異常が見られた日の翌日から 3 日以内に  $\delta D$  にも異常が見られた場合には、2手法両方で異常が見られ、かつその後地震が起こらなかった⑦のパターンに分類し、そうでなければ  $\Delta S$  の手法のみに異常が見られ、かつその後地震が起こらなかった⑤のパターンに分類することを表している。真ん中の図は、ある日に、2手法両方で異常がみられ、かつその後 6 日以内で地震が起こらなかった場合を表し、このパターンは 2手法で異常がみられその後地震が起こらなかった⑦のパターンに分類することを表している。一番右の図は、ある日に  $\delta D$  の手法のみに異常が見られた際にそのリードタイムである 3 日間の間に  $\Delta S$  の手法にも異常が見られた場合は⑦のパターンに分類し、そうでなければ  $\delta D$  のみに異常が見られ、その後地震が起こらなかった⑥のパターンに分類することを表す。

そして、2手法を組み合わせた場合の適中率と空振り率と見逃し率は以下の 3 式によって算出する。ただし数字を○で囲ったものは、その数字で表されるパターンのカウント数を表す。

$$\text{適中率} = \frac{\textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3}}{\textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3} + \textcircled{4} + \textcircled{5} + \textcircled{6} + \textcircled{7}} \quad (12)$$

$$\text{空振り率} = \frac{\textcircled{5} + \textcircled{6} + \textcircled{7}}{\textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3} + \textcircled{4} + \textcircled{5} + \textcircled{6} + \textcircled{7}} \quad (13)$$

$$\text{見逃し率} = \frac{\textcircled{4}}{\textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3} + \textcircled{4} + \textcircled{5} + \textcircled{6} + \textcircled{7}} \quad (14)$$

## 第5章 解析結果

### 5.1 時間重畳法を用いた統計解析結果

初めに、時間重畳法を用いた際に使用した地震の位置とマグニチュードの大きさを示す。

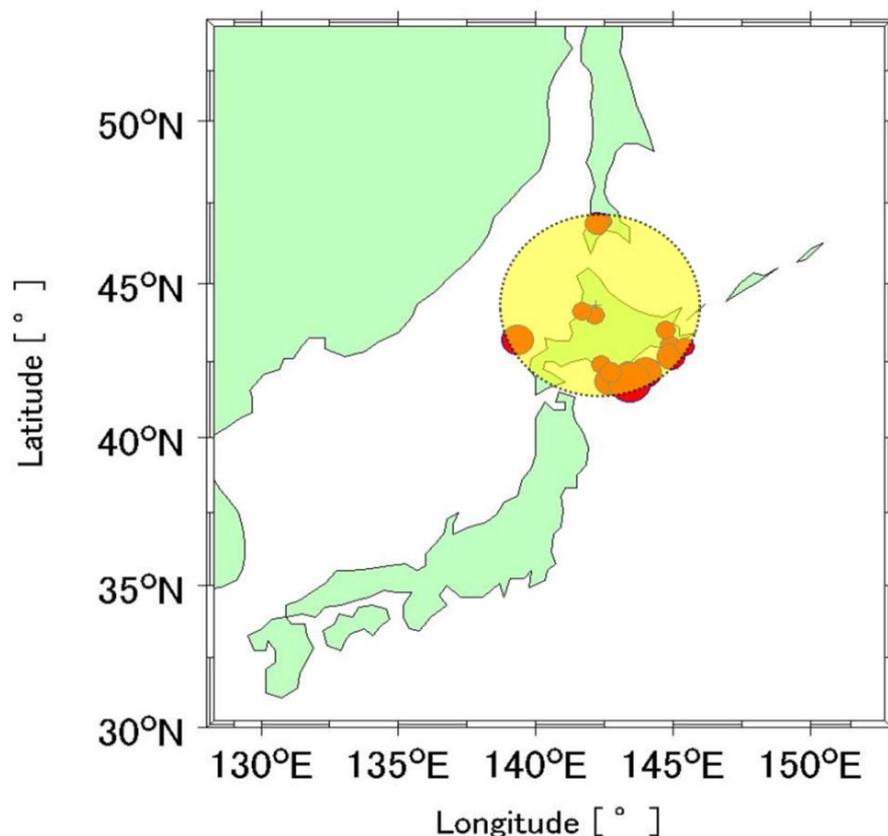


図 5.1.1 地震の位置とマグニチュード(距離 300 km 以下、深さ 50 km 以下、M4 以上)

図 5.1.1 は地震の位置とマグニチュードの大きさを示したものである。青い十字で表されるのが ELF 帯磁場データを取得している、北海道母子里観測所である。また、赤で塗りつぶされた円は地震を表しており、その円の大きさはマグニチュードの大きさに対応している。黄色で薄く塗りつぶされている円は、北海道母子里観測所を中心とし、そこから距離 300 km 以下の範囲を表している。計 16 イベントの地震が示されているが、同じ日に、条件を満たした複数の地震が起きている場合、その中の 1 イベントのみ表示している。

次に、時間重畳法を用いた統計結果を示す。

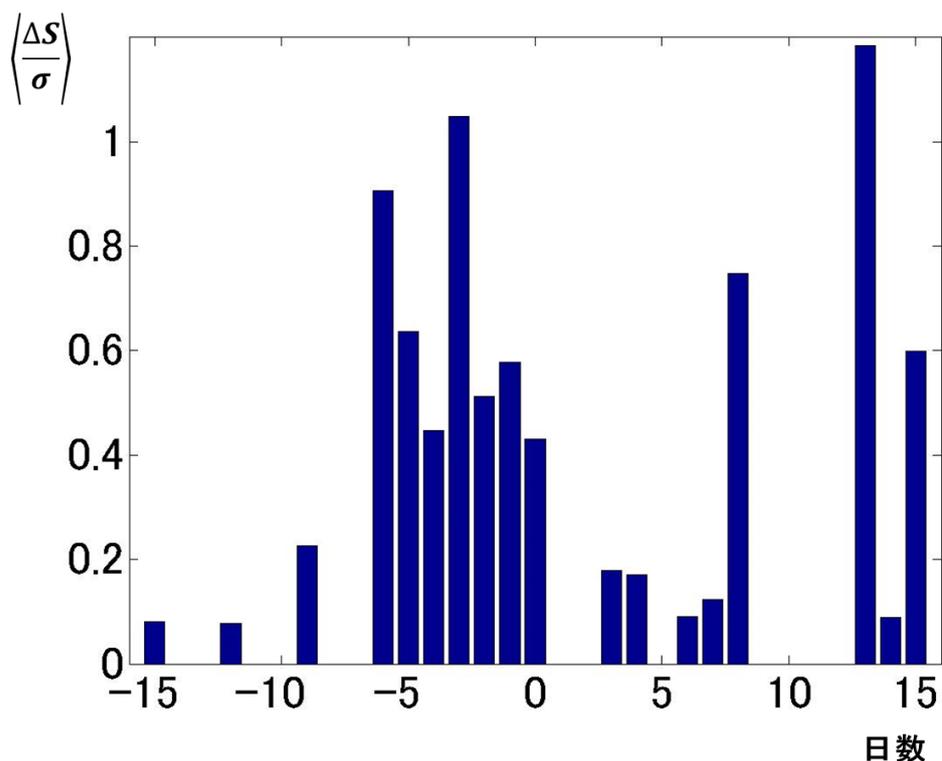


図 5.1.2  $\Delta S$  の統計解析結果(距離 300 km 以下、深さ 50 km 以下、M4 以上)

図 5.1.2 は時間重畳法を用いて導出した  $\Delta S$  の統計解析結果である。縦軸は  $\langle \Delta S / \sigma \rangle$  を表し、横軸は一日刻みの日数を表している。地震が起きた日を中心の 0 とし、その日から  $\pm 15$  日が表示されている。解析に使用した地震は、観測点から震源までの距離 300 km 以下かつ震源の深さ 50 km 以下かつマグニチュード 4 以上という条件を満たす地震である。図 5.1.2 より、 $\langle \Delta S / \sigma \rangle$  が高い値を示しているのは、地震が起きる 6 日ほど前から当日にかけてであり、地震後にも非常に高い値を示している日があることが分かる。ただし、連続的に高い値を示し続けているのは地震が起こる 6 日前から当日にかけての間だけである。よってこれは地震先行現象だと考えられる。

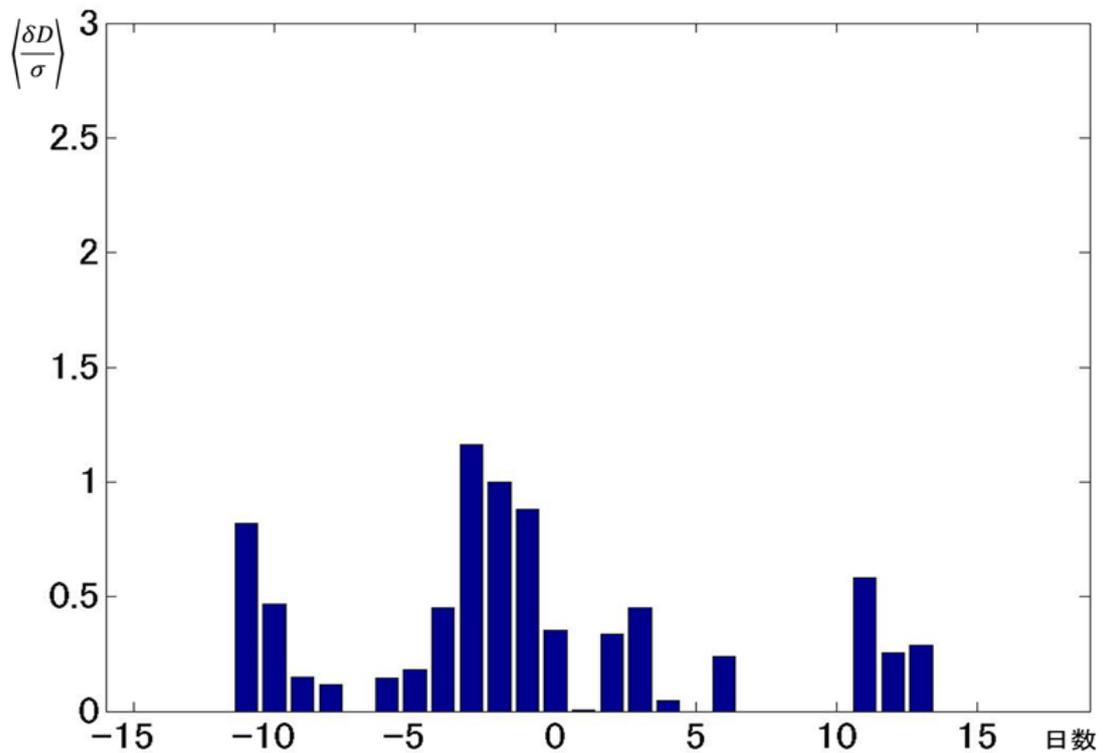


図 5.1.3  $\delta D$  の統計解析結果(距離 300 km 以下、深さ 50 km 以下、M4 以上)

図 5.1.3 は  $\delta D$  を用いた統計解析結果である。統計に使用した地震は、図 5.1.1 に赤い円で示されている。この図より、地震が起きる 3 日ほど前から地震が起きる前日にかけて、連続的に  $\langle \delta D / \sigma \rangle$  が高い値を示していることが分かり、その期間に地震先行現象が検出されたと考えることができる。

次に、先行現象検出精度に対する、距離依存性と震源の深さ依存性を示すため、条件をいくつか変えて導出した結果を表示する。

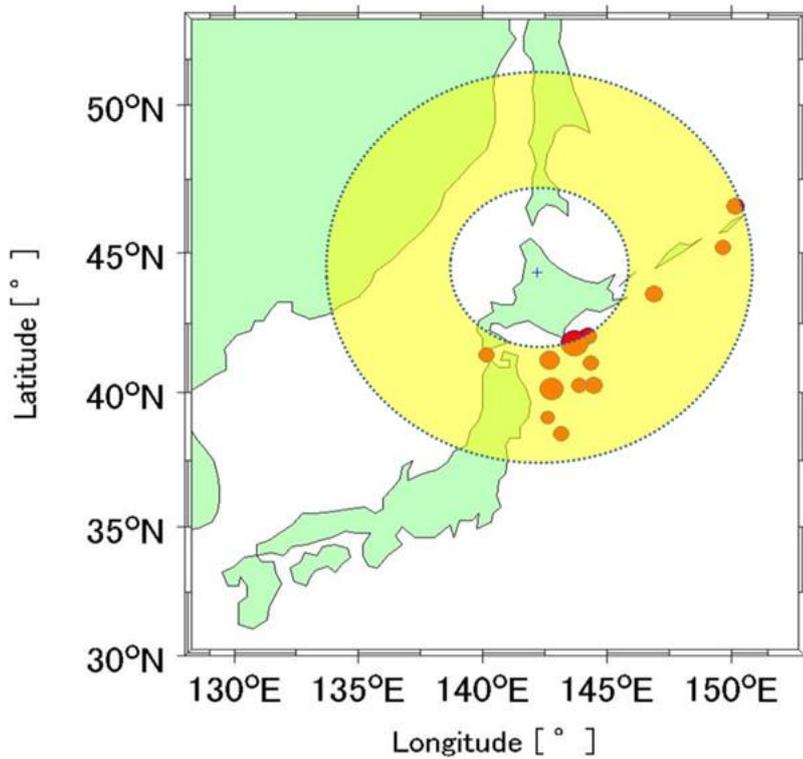


図 5.1.4 地震の位置とマグニチュード(距離 300 km 以上 700 km 以下、深さ 50 km 以下、M4 以上)

図 5.1.4 は、観測点から震源の距離 300 km 以上 700 km 以下、震源の深さ 50 km 以下、マグニチュード 4 以上の条件を満たす地震が示されており、計 13 イベントが該当した。

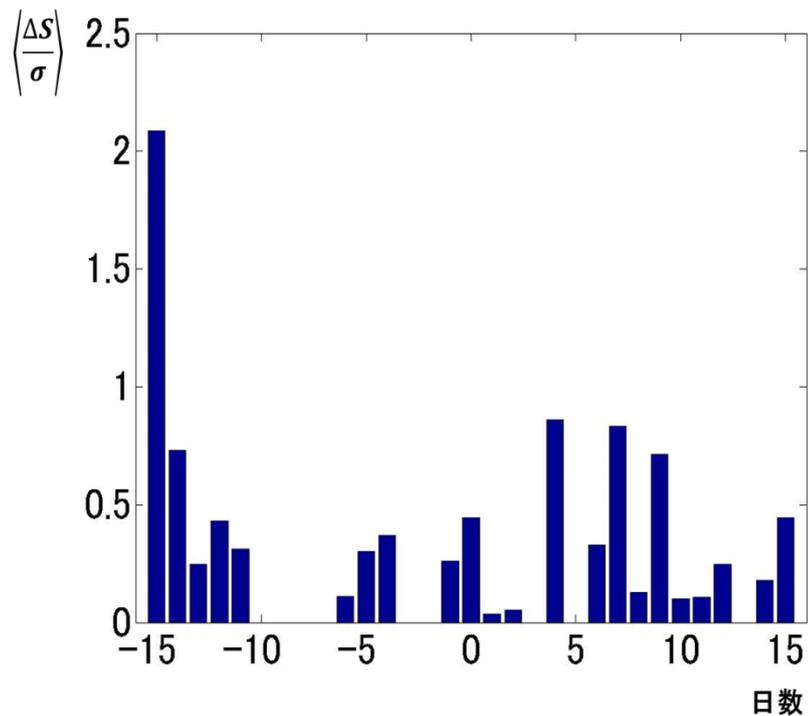


図 5.1.5  $\Delta S$  の統計解析結果(距離 300 km 以上 700 km 以下、深さ 50 km 以下、M4 以上)

図 5.1.5 は、図 5.1.4 で示される地震を用いて、時間重畳法による統計解析を行った結果である。図 5.1.1 で地震を抽出する際の条件は、観測点から震源の距離 300 km 以下であったが、今回は距離 300 km 以上 700 km 以下という条件に変えている。震源の深さやマグニチュードは変えていない。図 5.1.5 を見ると、地震が起こる前に連続して高い値を示している日はなく、明確な先行現象と呼べるものは見られない。

次に、これと同じ条件で  $\delta D$  に関して行った統計解析結果を示す。

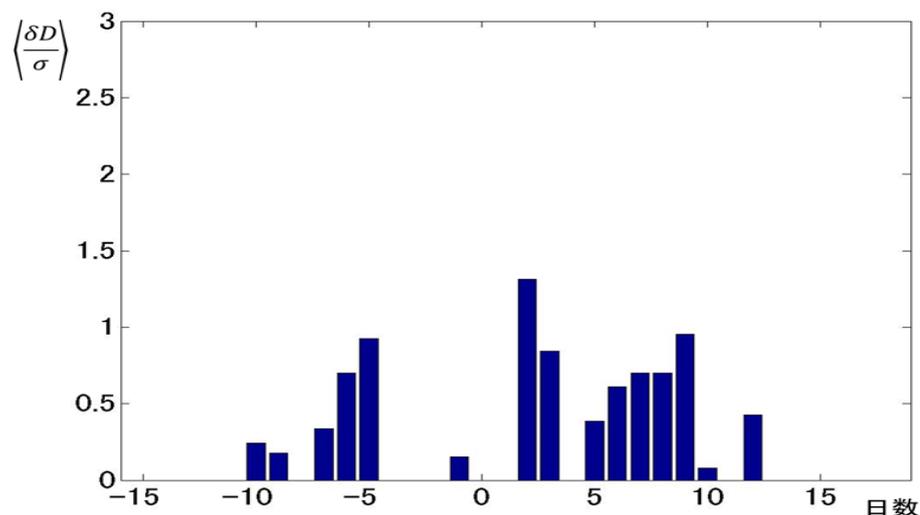


図 5.1.6  $\delta D$  の統計解析結果(距離 300 km 以上 700 km 以下、深さ 50 km 以下、M4 以上)

図 5.1.6 を見ると地震が起きる前に明確な先行現象はみられない。ただし地震後にいくつか高い値を示している日があることが分かる。

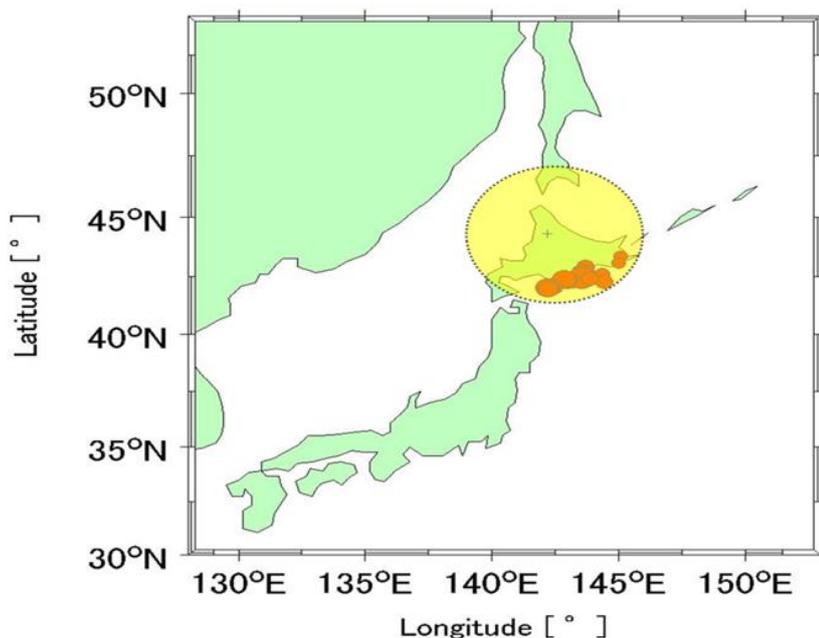


図 5.1.7 地震の位置とマグニチュード(距離 300 km 以下、深さ 50 km 以上 100 km 以下、M4 以上)

図 5.1.7 は、観測点から震源の距離 300 km 以下、震源の深さ 50 km 以上 100 km 以下、マグニチュード 4 以上の条件を満たす地震が示されており、計 13 イベントが該当した。

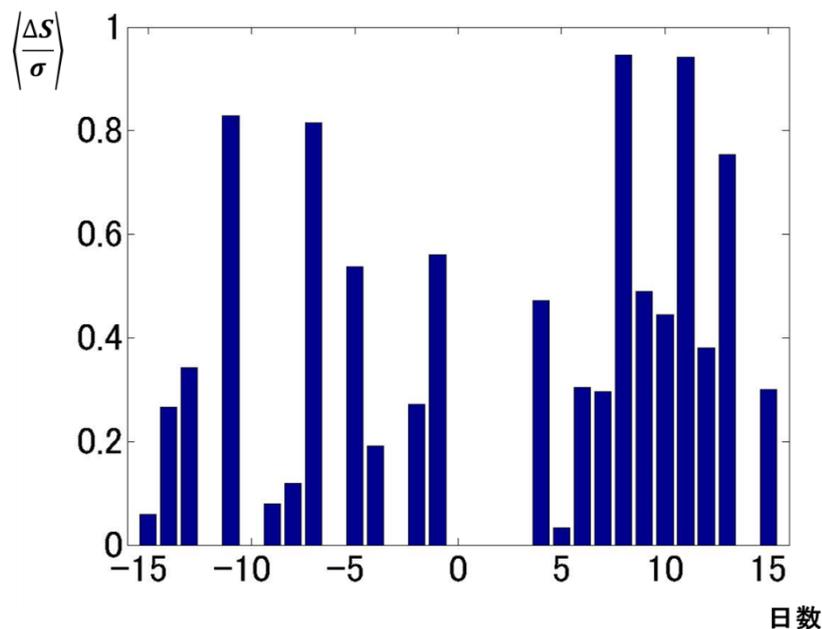


図 5.1.8  $\Delta S$  の統計解析結果(距離 300 km 以下、深さ 50 km 以上 100 km 以下、M4 以上)

図 5.1.8 は図 5.1.7 でしめされる地震を用いて  $\Delta S$  の統計解析を行った結果である。今回は震源の深さの条件のみを 50 km 以上 100 km に変えた。この図を見ると地震発生日から ±15 日の間で高い値を示している日があるいくつかあり、地震が起きる前の日に着目してみた場合、明確に先行現象が見られているとは言い難い。

次に、これと同じ地震の条件を用いて行った  $\delta D$  の統計解析結果を図 5.1.9 に示す。

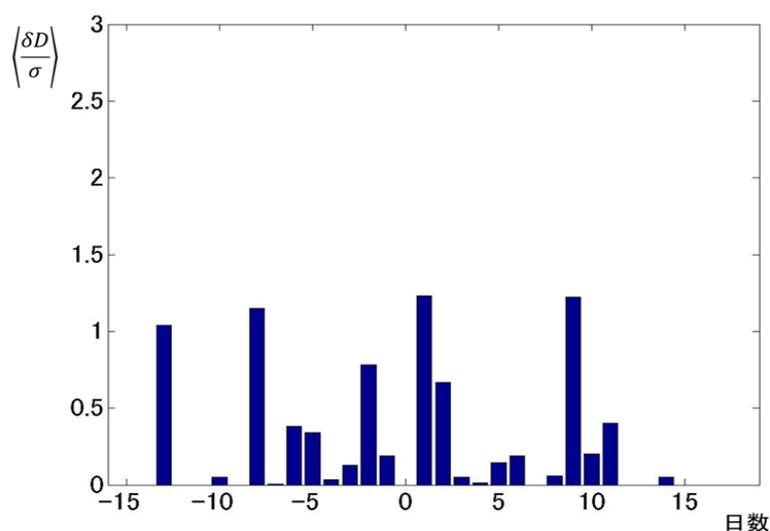


図 5.1.9  $\delta D$  の統計解析結果(距離 300 km 以下、深さ 50 km 以上 100 km 以下、M4 以上)

図 5.1.9 を見ると、地震が起こる前日～数日前の間に、明確な先行現象が見られているとは言い難い。

## 5.2 スレットスコアを用いた統計解析結果

次に、ELF 帯磁場放射と ULF 帯磁場減少の 2 手法別々に算出した、スレットスコアの結果を示す。まずは ELF 帯磁場放射( $\Delta S$ )の結果を示し、その後、ULF 帯磁場減少( $\delta D$ )の結果を示し、その後 2 手法を組み合わせた場合の結果を示す。

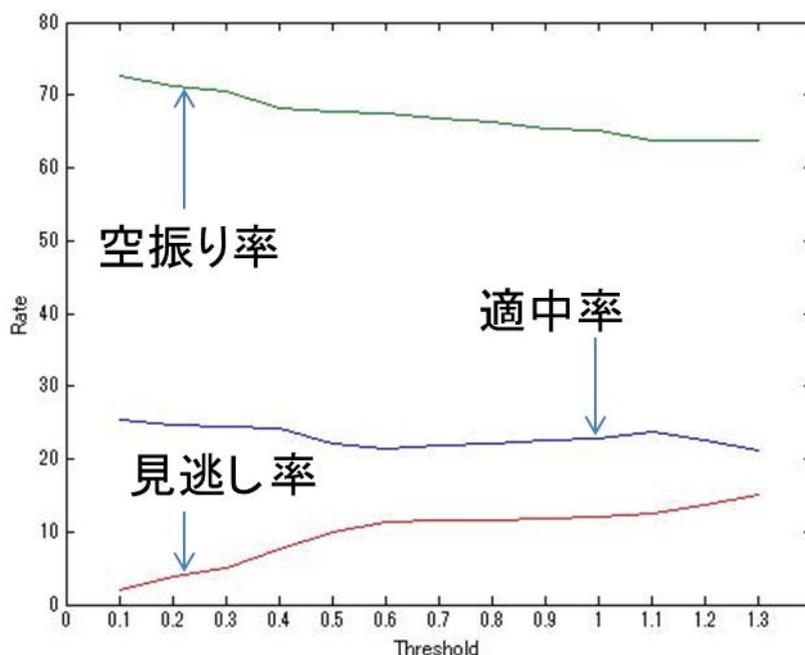


図 5.2.1  $\Delta S$  のスレットスコア

図 5.2.1 は  $\Delta S$  のスレットスコアの結果である。横軸は  $\langle \Delta S / \sigma \rangle$  の閾値を表し、縦軸は、適中率と空振り率と見逃し率それぞれの割合を表している。緑の実線が空振り率を表し、青の実線が適中率を表し、赤の実線が見逃し率の変化をそれぞれ表している。この図を見ると、閾値が上がるにつれて、空振り率がゆるやかに減少し、見逃し率がゆるやかに増加していることが分かる。また、適中率に関しては、全体を通して 20~25% の間に収まっており、それほど大きな変化は見られないことが分かる。次に  $\delta D$  の結果を示す。

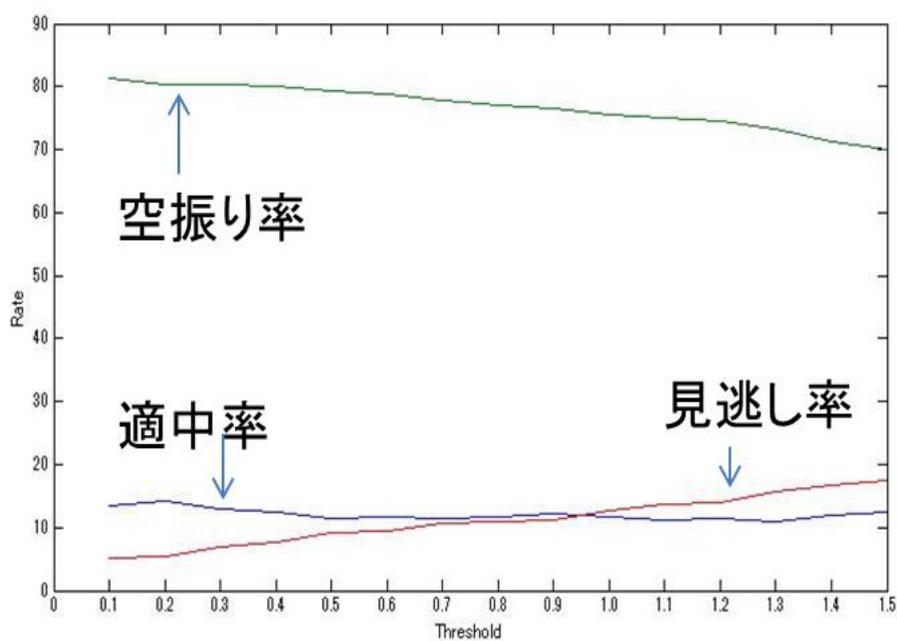


図 5.2.2  $\delta D$  のスレットスコア

図 5.2.2 は  $\delta D$  のスレットスコアの結果である。閾値が上がるにつれて、 $\Delta S$  の場合と同様に空振り率が減少、見逃し率が増加傾向にあることが分かる。また適中率に関してはあまり変化が見られず、10～15%程度の中に収まっている。

次に、2 手法を組み合わせた場合のスレットスコアの各パターンとそれぞれのパターンのカウント数を示す。その後、別々に算出したものと合わせて、適中率、空振り率、見逃し率の各割合の結果を示す。

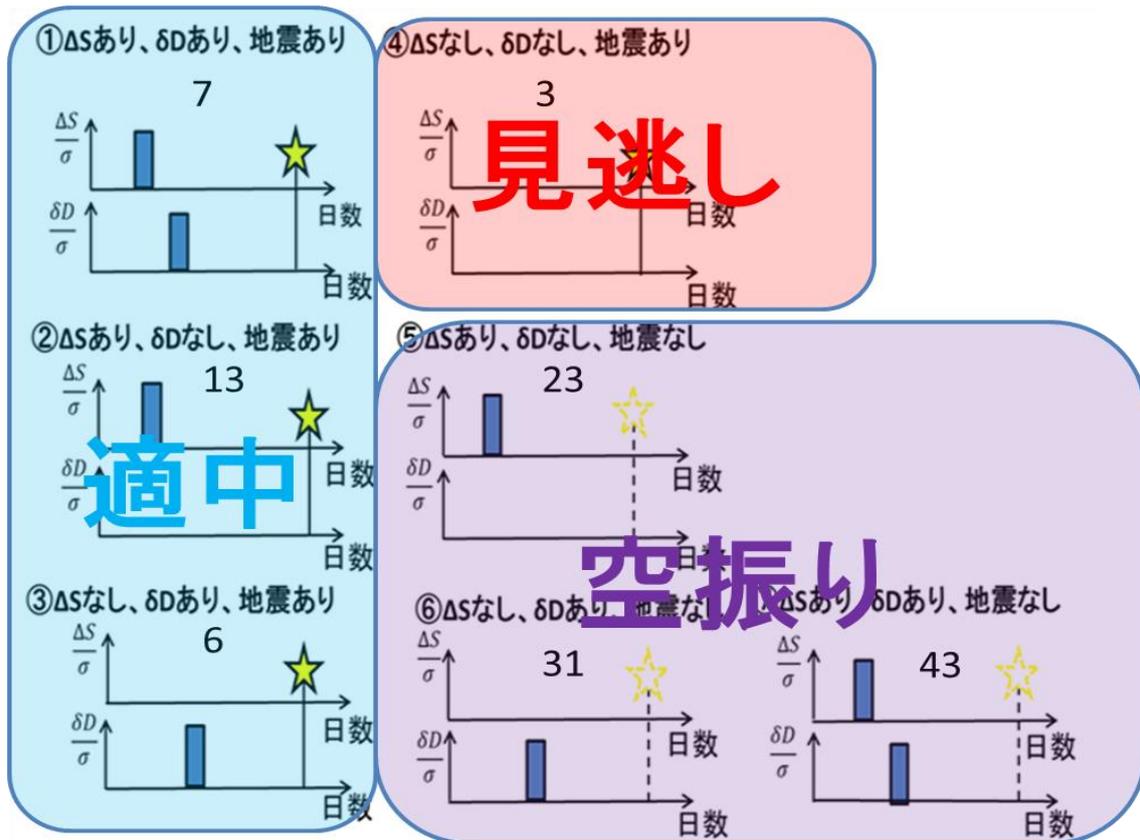


図 5.2.3 2手法組み合わせた際の各パターンと、カウント数( $\Delta S$  閾値 : 0.5  $\delta D$  閾値:0.8)

図 5.2.3 は、 $\Delta S$  と  $\delta D$  の 2 手法を組み合わせた際のスロットスコアのパターン分けとそれぞれのカウント数を示した結果である。 $\Delta S$  と  $\delta D$  の閾値を決定する際には、図 5.1.2 と図 5.1.3 図と 5.2.1 と図 5.2.2 を参考にし、 $\Delta S$  の閾値を 0.5、 $\delta D$  の閾値を 0.8 とした。①～⑦の計 7 パターンあり、①～③の適中のパターンを青の網掛けで囲い、④の見逃しのパターンを赤で囲み、⑤～⑦の空振りを紫の網掛けで囲い、それぞれの分類を示している。またそれぞれパターンの図中に書かれている数字は、そのパターンがカウントされた数を表している。

次に、 $\Delta S$  の閾値を 0.5 とし、 $\delta D$  の閾値を 0.8 に設定した際の、2 手法別々で算出した結果と、組み合わせた場合の結果を示す。

表 5.2.1 閾値( $\Delta S$ :0.5,  $\delta D$ :0.8)を設定した際の 2 手法別々の場合と組み合わせた場合のスロットスコア

	適中率	空振り率	見逃し率
$\Delta S$	22.22%	67.78%	10.00%
$\delta D$	11.43%	79.29%	9.29%
2 手法組み合わせ	20.63%	76.99%	2.38%

表 5.2.1 は適中率と空振り率と見逃し率のそれぞれの割合を表している。空振り率が高い割合を示しているのに対し、適中率は 2 割あるいは 1 割ほどとなっている。

この空振り率の高さの原因が、地磁気の影響による可能性が考えられるため、以下、地磁気の影響が高いと思われる日を統計から省いた際のプロセスと結果を示す。

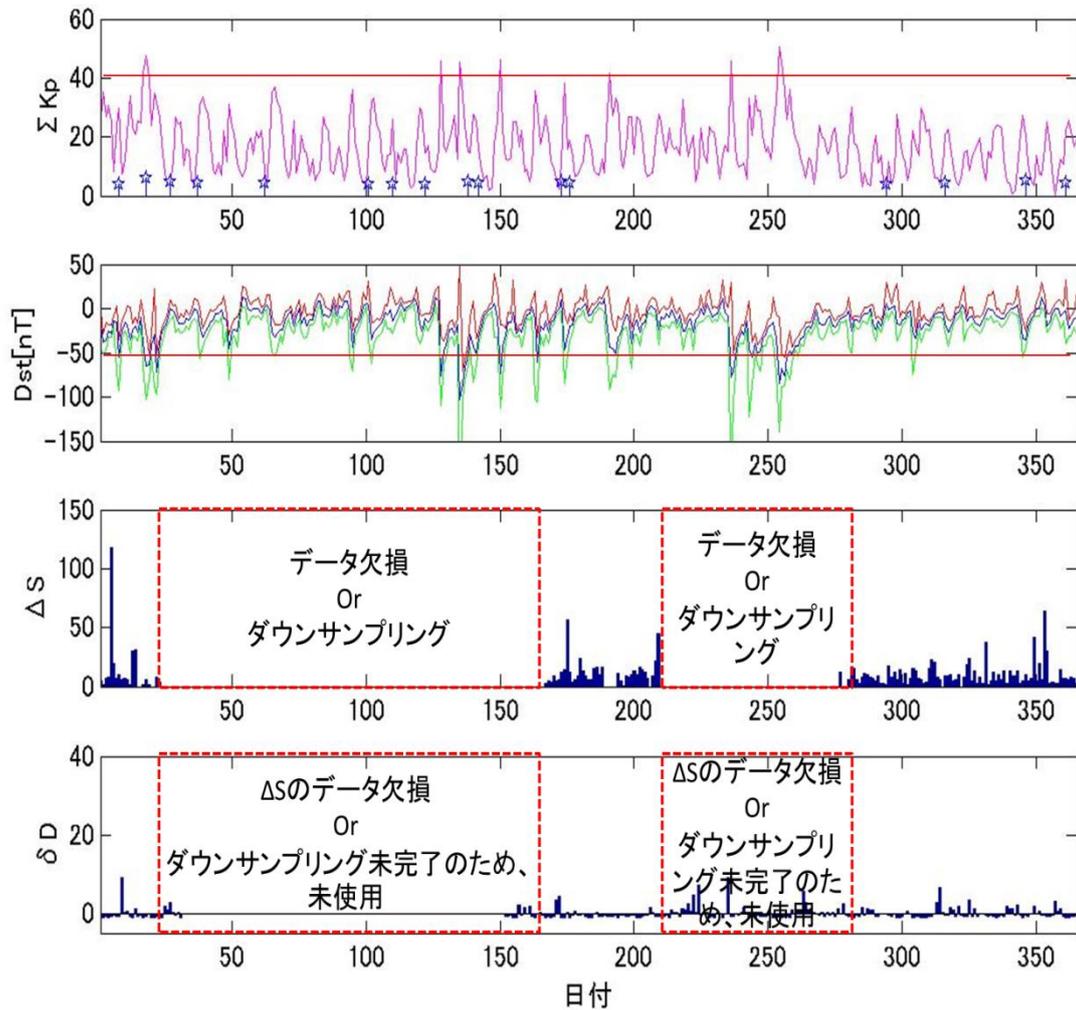


図 5.2.4 2005 年一年間の  $\Sigma Kp$  と  $Dst$  と  $\Delta S$  と  $\delta D$  のプロット

図 5.2.4 は地磁気と  $\Delta S$  と  $\delta D$  を表示したものである。一番上の図は  $\Sigma Kp$  を表している。ただしその値を数値として扱いやすいように、例えば「+3」の値を「 $3+\frac{1}{3}$ 」として変換ものが縦軸になっている。その下の図は  $Dst$  指数を示している。赤い実線が、 $Dst$  の 1 日の最大値であり、青い実線が一日の平均値を表し、緑の実線が一日の最小値を表している。その下が  $\Delta S$  の値を表し、その下が  $\delta D$  の値を表している。 $\Sigma Kp$  の値が 40 以上または  $Dst$  が -50 nT 以下になった日を統計から省いた。

以下、地磁気の影響を省いて導出したスレットスコアの結果を、ELF 帯磁場放射、ULF 帯磁場減少、2 手法を組み合わせた場合、の順に示していく。

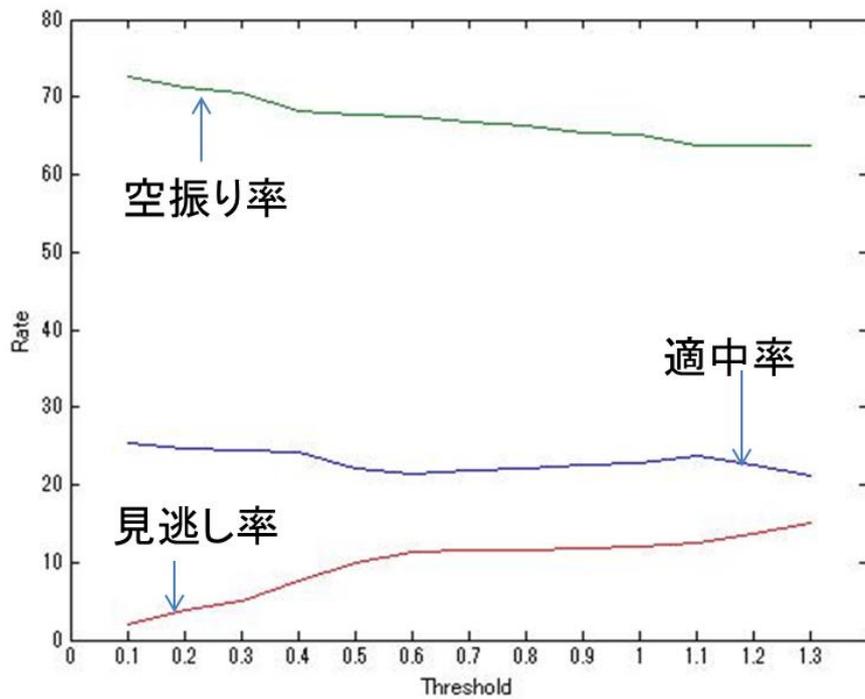


図 5.2.5 地磁気影響省いた後の  $\Delta S$  のスレットスコアの結果

図 5.2.5 は地磁気の影響を省いた後の  $\Delta S$  のスレットスコアの結果である。図 5.2.1 のそれぞれの割合と比較してみると、まったく変化がみられない。

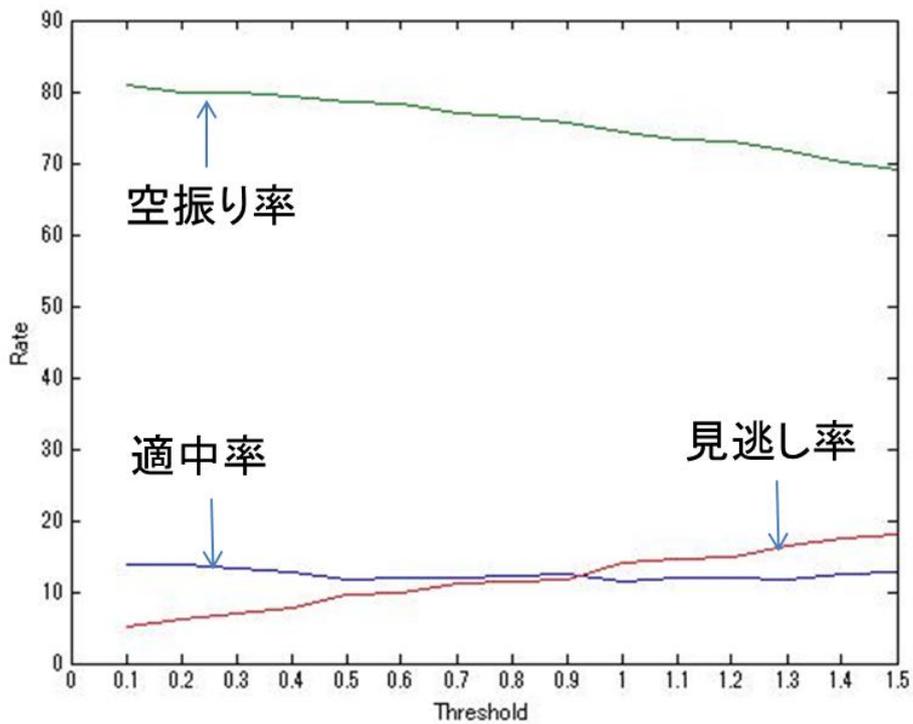


図 5.2.6 地磁気影響省いた後の  $\delta D$  のスレットスコアの結果

図 5.2.6 は地磁気の影響を省いた後の  $\delta D$  のスレットスコアの結果である。図 5.2.2 と比較する

と見た目には差はないが、実際の値を比較すると、わずかだが、それぞれの割合に変化があった。  
次に組み合わせた場合の結果を示す。

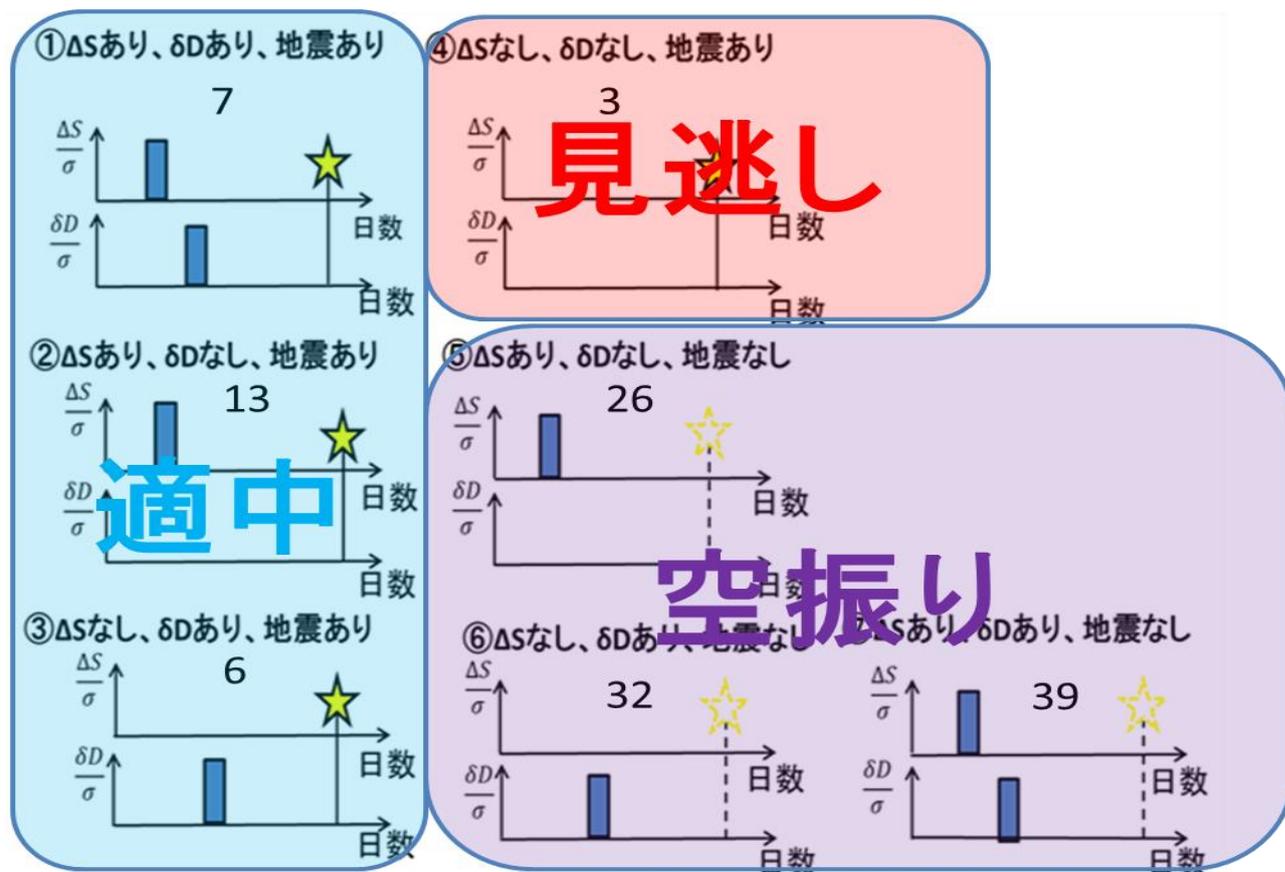


図 5.2.7 地磁気の影響省いた後の 2 手法組み合わせた際の各パターンと、カウント数( $\Delta S$  閾値: 0.5  $\delta D$  閾値:0.8)

図 5.2.7 は地磁気の影響省いた後の 2 手法組み合わせた際のスレットスコアの各パターン数を示した結果である。地磁気の影響を省く前と比較すると、適中率と空振り率と見逃し率のそれぞれの割合については全く変化がないが、空振りとしてカウントされている⑤～⑦のパターン数に変化がみられる。

次に、地磁気の影響を省いた後に、閾値( $\Delta S$ :0.5,  $\delta D$ :0.8)と設定した際の、2 手法別々に算出した結果と組み合わせた場合の結果を表にまとめる。

表 5.2.2 地磁気の影響を省いた後の、閾値( $\Delta S$ :0.5,  $\delta D$ :0.8)を設定した際の 2 手法別々の場合と組み合わせた場合のスレットスコア

	適中率	空振り率	見逃し率
$\Delta S$	22.22%	67.78%	10.00%
$\delta D$	11.76%	78.68%	9.56%
2 手法組み合わせ	20.63%	76.99%	2.38%

## 第6章 考察

時間重畳法を用いた統計解析では、距離依存性と深さ依存性についてそれぞれ結果を出して比較した。地震が起きる数日前に、ある程度連続して異常が見られるかという点と、地震発生後にそれほど異常が見られないという点の2点に着目すると、観測点から震源までの距離 300 km 以下、震源の深さ 50 km 以下、マグニチュード 4 以上の条件で地震を抽出した際に、 $\Delta S$  と  $\delta D$  の 2 手法両方で最も明確な異常が見られた。このことより、観測点から震源までの距離が短く、震源の深さが浅い地震ほど、異常が見られやすい傾向があると考えられる。また  $\Delta S$  の統計では地震発生の 6 日前から異常が見られ、 $\delta D$  の統計では 3 日前から異常が見られることが分かった。ただし、条件を変えた際に、地震が起きて数日後に高い値を示している統計結果もいくつか見られた。この原因として考えられるのは、本震と比べ、マグニチュードが小さい余震の影響が関係しているのではないかと考えられる。

2 手法を別々に用いたスレットスコアの結果に対しては、 $\Delta S$  の適中率が 20~25%ほどに対し、 $\delta D$  の適中率が 10~15%ほどという結果になり、 $\Delta S$  でより高い的中率が見られる結果となった。これは、 $\Delta S$  のリードタイムが 6 日と、 $\delta D$  のリードタイムより長いことが要因の一つであると考えられる。

次に、2 手法を組み合わせ、同様にスレットスコアを算出した。見逃し率に関しては 2 手法を独立に用いた場合より改善された。しかし、やはり空振り率が高いままという結果になった。これは、 $\Delta S$  や  $\delta D$  が頻繁に高い値を示しているためであり、この空振り率を減らすことが重要となる。空振り率の高さの原因の一つが地磁気の影響ではないかと考え、その影響が大きいと考えられる日を統計から省き、再度スレットスコアを導出したが、結果はほとんど変化しなかった。よって地磁気の影響は、統計にそれほど影響を及ぼさないことが分かる。他の原因として雷の影響が考えられ、その影響も省くことで空振り率を減らせることが可能ではないかと考えられる。また、 $\Delta S$  や  $\delta D$  で一日でも異常に高い値が出た場合、統計結果に及ぼす影響を無視できないため、実際の磁場波形が正常なものなのか、という確認をすることも有効ではないかと考えられる。さらに磁場の影響を一切受けない GPS を用いた手法なども取り入れることで、これまで検出できなかった異常を検出できるようになり、精度向上に繋がる可能性があると考えられる。

## 第7章 結論と展望

本研究では、まず時間重畳法を用いた統計解析を行い、ELF帯磁場放射( $\Delta S$ )とULF帯磁場減少のそれぞれにおいて、地震の前に異常が見られるか、また見られる場合、異常が見られるのは地震発生の何日程前かを調べた。その後、時間重畳法を用いて算出した結果を用い、地震先行現象の検出精度を定量的に判断するため、スレットスコアと呼ばれる方法を使用した。2手法別々に用いた場合と、組み合わせた場合のそれぞれについて、適中率と空振り率と見逃し率を算出した。

時間重畳法を用いた統計解析では、 $\Delta S$ では地震が起こる6日前から、また $\delta D$ では3日ほど前から明確な異常が見られた。しかし、スレットスコアの現時点での結果を見る限り、適中率が約2割に対し、空振り率約7割と、適中できない確率のほうが高いため、実用的であるとは言えない。ただ、2手法を組み合わせることで、他の手法が検出できない異常を検出し、結果、精度向上に繋がる可能性は十分考えられる。また、高い値が頻繁にみられるため、結果空振り率が非常に大きくなるので、この割合を少しずつ減らしていくことが有効であると考えられる。

今後の展望としては、以下が挙げられる。

- ・解析期間の延長により、より正確な統計結果を得る
- ・空振り率の削減のため、他の手法も合わせていく
- ・実用的な地震予測に向け、ELF帯磁場を用いての、磁場の到来方向導出なども考慮に入れる

## 謝辞

本研究を行うにあたり、日頃より御指導を賜った電気通信大学情報・通信工学専攻芳原容英教授に心より感謝を申し上げます。また、プログラムの説明を下された A.Y.Schekotov 先生、日頃からの確かな指導をいただいた先輩方、共に支えあった仲間と芳原研究室、そして誰よりも応援してくれた家族に感謝します

## 参考文献

- (1) A. Y. Schekotov<sup>1</sup>, O. A. Molchanov<sup>1</sup>, M. Hayakawa<sup>2</sup>, E. N. Fedorov<sup>1</sup>, V. N. Chebrov<sup>3</sup>, V. I. Sinitsin<sup>3</sup>, E. E. Gordeev<sup>4</sup>, S. E. Andreevsky<sup>1</sup>, G. G. Belyaev<sup>1</sup>, N. V. Yagova<sup>1</sup>, V. A. Gladyshev<sup>1</sup>, and L. N. Baransky<sup>2</sup>(2008) : 「About possibility to locate an EQ epicenter using parameters of ELF/ULF preseismic emission」 Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 1237–1242, 2008
- (2) A. Y. Schekotov, O. A. Molchanov, M. Hayakawa, E. N. Fedorov, V. N. Chebrov, V. I. Sinitsin, E. E. Gordeev, G. G. Belyaev, and N. V. Yagova (2007) 「ULF/ELF magnetic field variations from atmosphere induced by seismicity」 RADIO SCIENCE, VOL. 42, RS6S90, doi:10.1029/2005RS003441, 2007
- (3) O. Molchanov<sup>1</sup>, E. Fedorov<sup>1</sup>, A. Schekotov<sup>1</sup>, E. Gordeev<sup>2</sup>, V. Chebrov<sup>3</sup>, V. Surkov<sup>1</sup>, A. Rozhnoi<sup>1</sup>, S. Andreevsky<sup>1</sup>, D. Iudin<sup>4</sup>, S. Yunga<sup>3</sup>, A. Lutikov<sup>3</sup>, M. Hayakawa<sup>5</sup>, and P. F. Biagi<sup>6</sup>(2004): 「Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as governing mechanism for preseismic short-term events in atmosphere and ionosphere」 Natural Hazards and Earth System Sciences (2004) 4: 757–767  
SRef-ID: 1684-9981/nhess/2004-4-757
- (4) V. Gladyshev<sup>1</sup>, L. Baransky<sup>1</sup>, A. Schekotov<sup>1</sup>, E. Fedorov<sup>1</sup>, O. Pokhotelov<sup>1</sup>, S. Andreevsky<sup>1</sup>, A. Rozhnoi<sup>1</sup>, Y. Khabazin<sup>1</sup>, G. Belyaev<sup>1</sup>, A. Gorbatikov<sup>1</sup>, E. Gordeev<sup>2</sup>, V. Chebrov<sup>2</sup>, V. Sinitsin<sup>2</sup>, A. Lutikov<sup>3</sup>, S. Yunga<sup>3</sup>, G. Kosarev<sup>3</sup>, V. Surkov<sup>4</sup>, O. Molchanov<sup>1</sup>, 5, M. Hayakawa<sup>6</sup>, S. Uyeda<sup>7</sup>, T. Nagao<sup>7</sup>, K. Hattori<sup>7</sup>, and Y. Noda<sup>7</sup>(2001) : 「Study of electromagnetic emissions associated with seismic activity in Kamchatka region」 Natural Hazards and Earth System Sciences (2001) 1: 127–136
- (5) O. Molchanov<sup>1</sup>, A. Schekotov<sup>1</sup>, M. Solovieva<sup>1</sup>, E. Fedorov<sup>1</sup>, V. Gladyshev<sup>1</sup>, E. Gordeev<sup>2</sup>, V. Chebrov<sup>3</sup>, D. Saltykov<sup>3</sup>, V. I. Sinitsin<sup>3</sup>, K. Hattori<sup>4</sup>, and M. Hayakawa<sup>5</sup>(2005) : 「Near-seismic effects in ULF fields and seismo-acoustic emission: statistics and explanation」 Natural Hazards and Earth System Sciences (2005) 5: 1–10  
SRef-ID: 1684-9981/nhess/2005-5-1
- (6) Hobara, Y et al. Characteristics of ULF magnetic anomaly before earthquakes, Phys. Chem. Earth, 29, 437-444, (2004)
- (7) World Data Center for Geomagnetism, Kyoto  
<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/element/eleexp-j.html>

## 発表実績

(1) 全著者名、安江剛広、芳原容英、A.Y.Schekotov

論文題目：地震に先行する ELF 帯磁場放射と ULF 帯磁場減少の比較および統計的研究

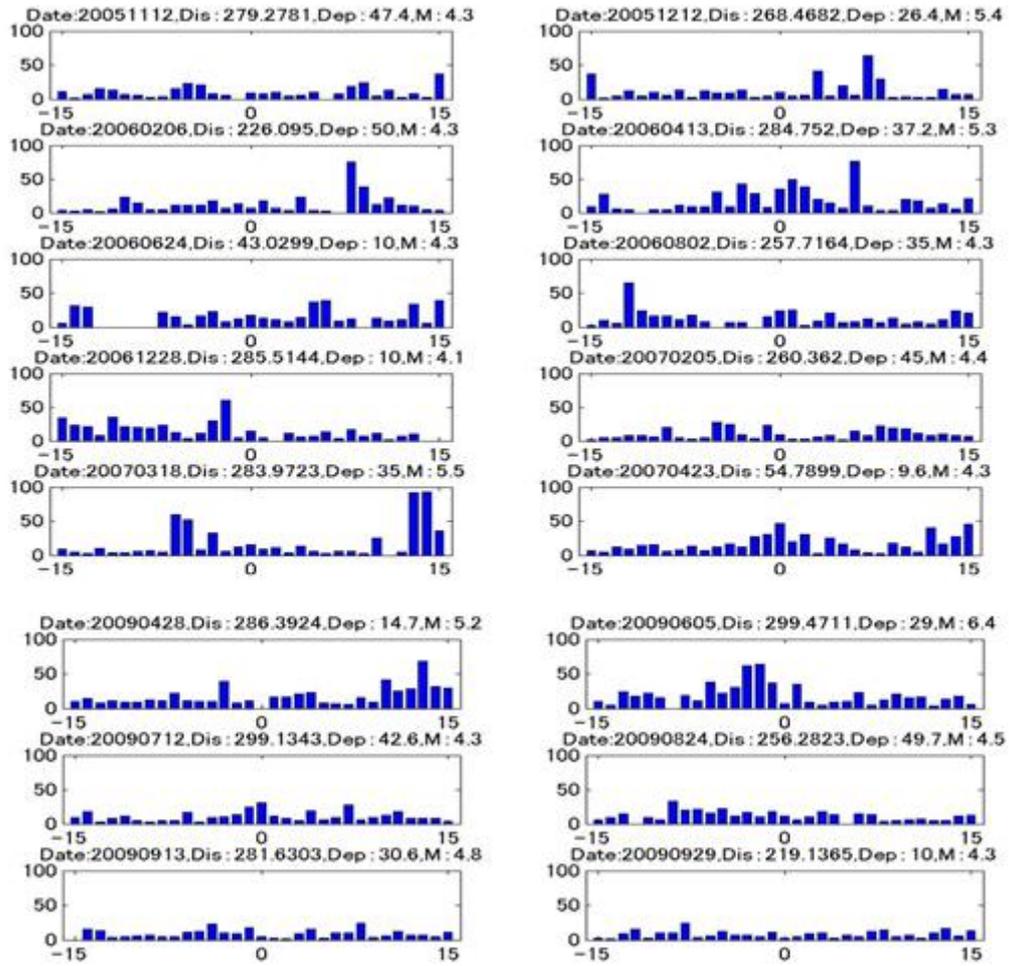
日本大気電気学会第 89 回研究発表会、Jul,2013

(2) 全著者名、安江剛広、芳原容英、A.Y.Schekotov

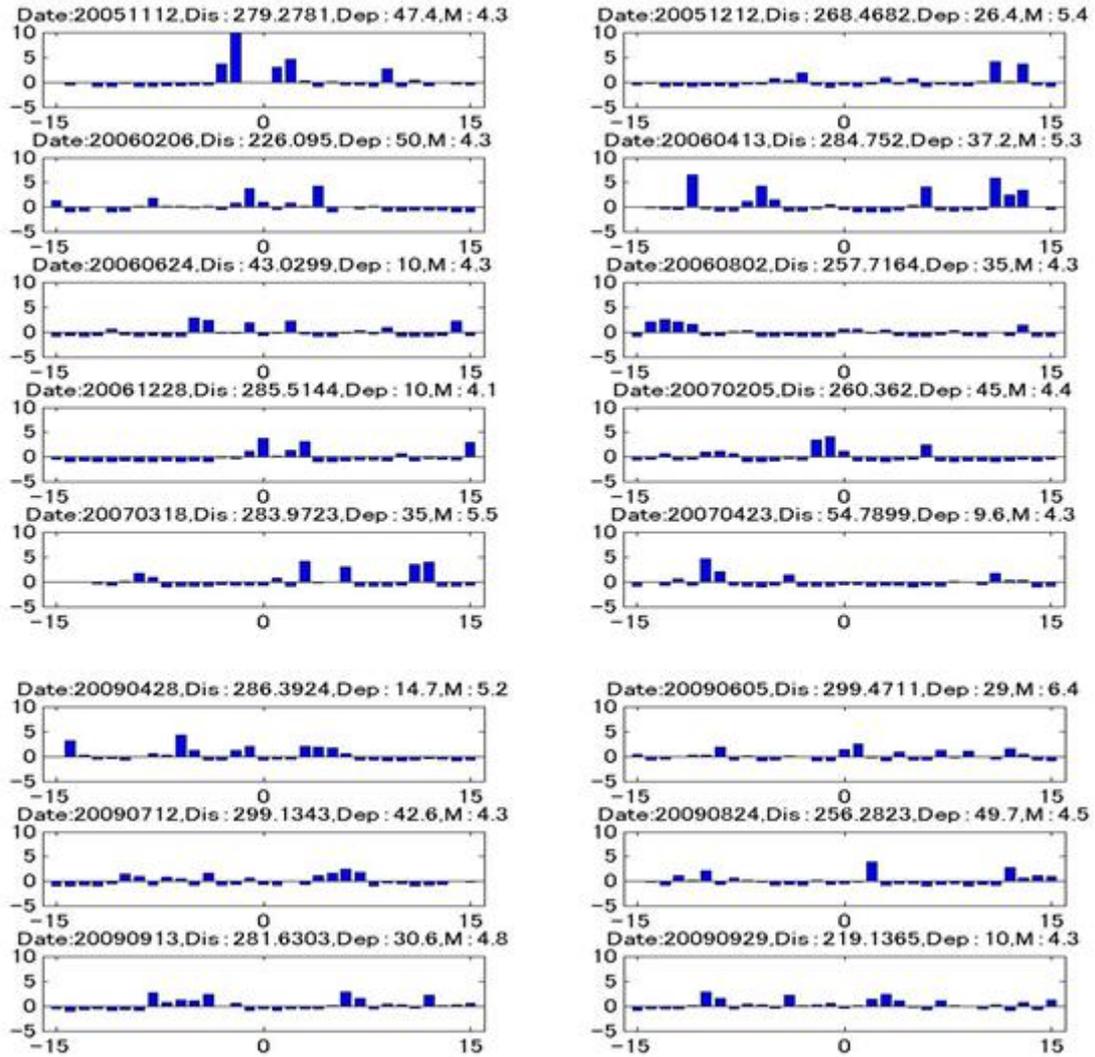
論文題目：地震先行 ELF/ULF 磁場異常の統計的研究

日本大気電気学会第 90 回研究発表会、Jan,2014

# 付録



付録図1 観測点から震源の距離 300 km 以下、震源の深さ 50 km 以下、マグニチュード 4 以上の全イベントの±15 日の $\Delta S/\sigma$



付録図 2 観測点から震源の距離 300 km 以下、震源の深さ 50 km 以下、マグニチュード 4 以上の全イベントの±15 日の $\Delta D/\sigma$