

# 電磁気学的な先行現象研究の 過去・現在・未来

2012年9月13日

東海大学地震予知研究センター  
長尾年恭

1

## 結 論

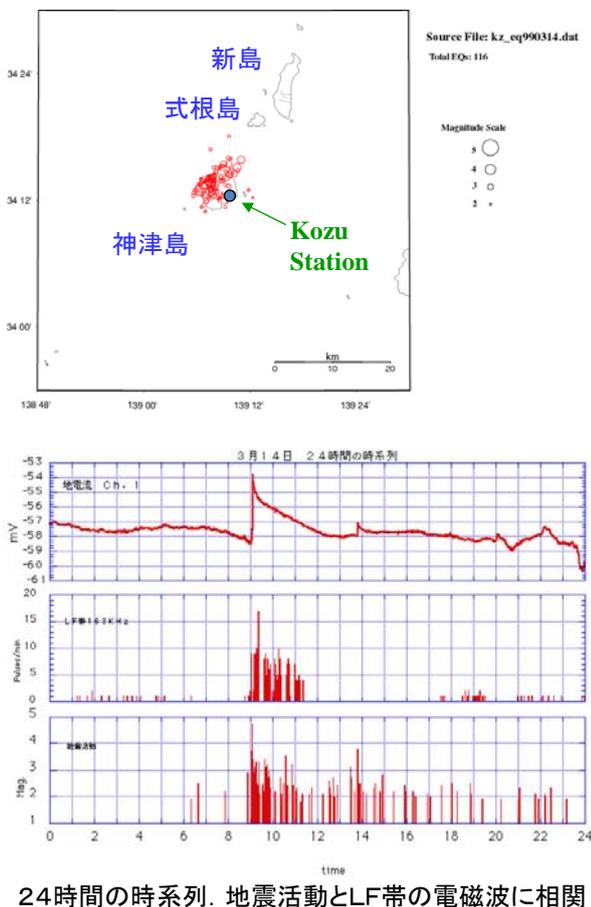
- 地震に先行する電磁気現象は存在する可能性が極めて高い(JGR等に統計的評価論文多数)
- 複数の周波数帯で異なる先行時間の先行現象が観測されていると考えられる
  - 電磁現象発現メカニズムは複数存在する
- 先行時間は数ヶ月から直前まで
- マグニチュードとの関係については、ギリシャのVAN法以外は、定量的な関係を見いだせているとは言えない
- そのほとんどは偶然発見されたもの
- 今後発生する南海トラフ沿い巨大地震の人的被害を考えると、直前予知研究(先行現象研究)は**驚異的なコスト・パフォーマンス**を持つ。1年1億円×10年程度の予算で短期予知が成功すれば、その効果は計り知れない

2

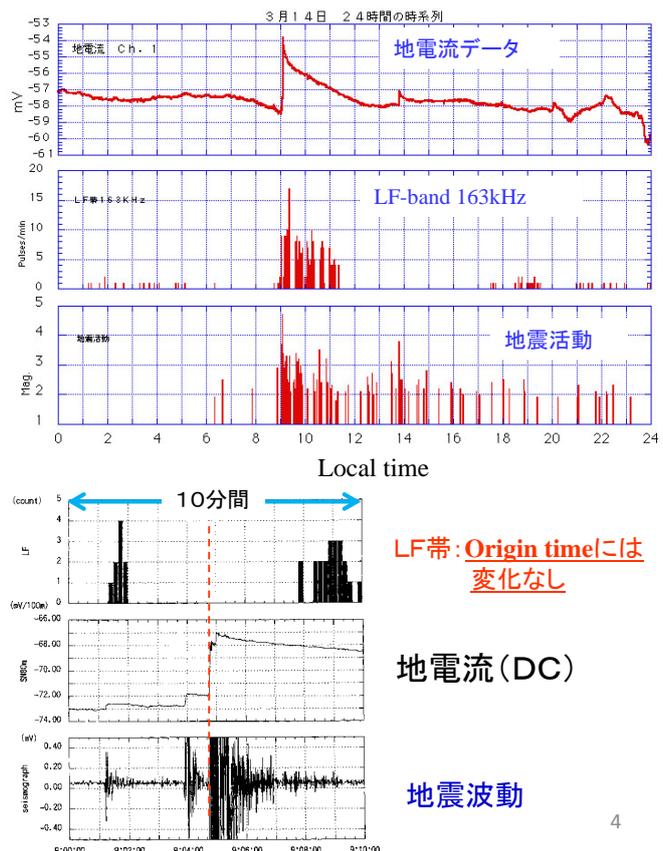
# 問題点

- 統計的有意性が示されているのは、電離層異常に関するものだけ (地上観測関係は事例が少ない)
- 電磁現象発現メカニズムには、マイクロクラック(微小破壊)を必要とするものが多い
  - マイクロクラックであれば地震計で観測可能
- (本震時に電磁異常が観測されない)
  - 最大の応力変化とは無関係
- 真の意味での電磁気学的先行現象の基礎研究の推進が困難な状況となっている(科研費の細目には「地震予知」は存在しない)

3



## EQ990314 神津島直下



4

## 課題・今後の方針

- 地震と電磁現象の関係解明(あたりまえ)
- 統計物理学の知見の導入(臨界現象, 長距離相関, 地震現象を第二種相転移とする等の考え方)
- 電磁気学的な地震誘発の可能性研究
  - 地震現象と電磁現象をつなぐミッシングリングか
- 小型衛星観測の推進(GPS掩蔽観測含む)
- 電磁現象発現メカニズム解明のための実験
- GPS-TEC観測等の統計的有意性の研究推進
- 地震電磁気研究者への「地震学」「固体地球電磁気学」の啓発

5

## 文書に記載された最初の例？

地震の前にラジオに雑音が入る!

→ 1945年の三河地震(M6.8)

当時は第2次大戦中であり, 空襲警報を聞くためにラジオの電源が常に入っていた. 余震の前にはラジオに雑音が入るので, 地震の発生を前もって予測できた.

1979年, ソ連によるアフガニスタン侵攻

→ ソ連軍はNATOの攻撃から身を守るため全天をレーダーで監視

→ 突然, ものすごい妨害電波を観測

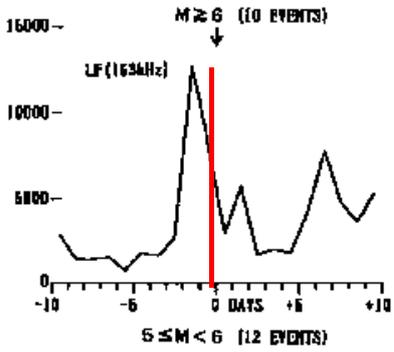
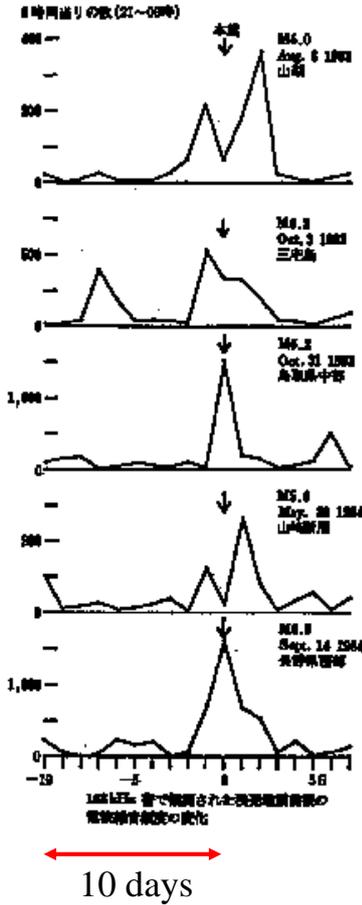
NATO軍の攻撃? 核戦争一步手前!

→ 2日後隣国のイランでM7.0の地震発生!

妨害電波消滅!

6

1990年ごろまでのまとめ



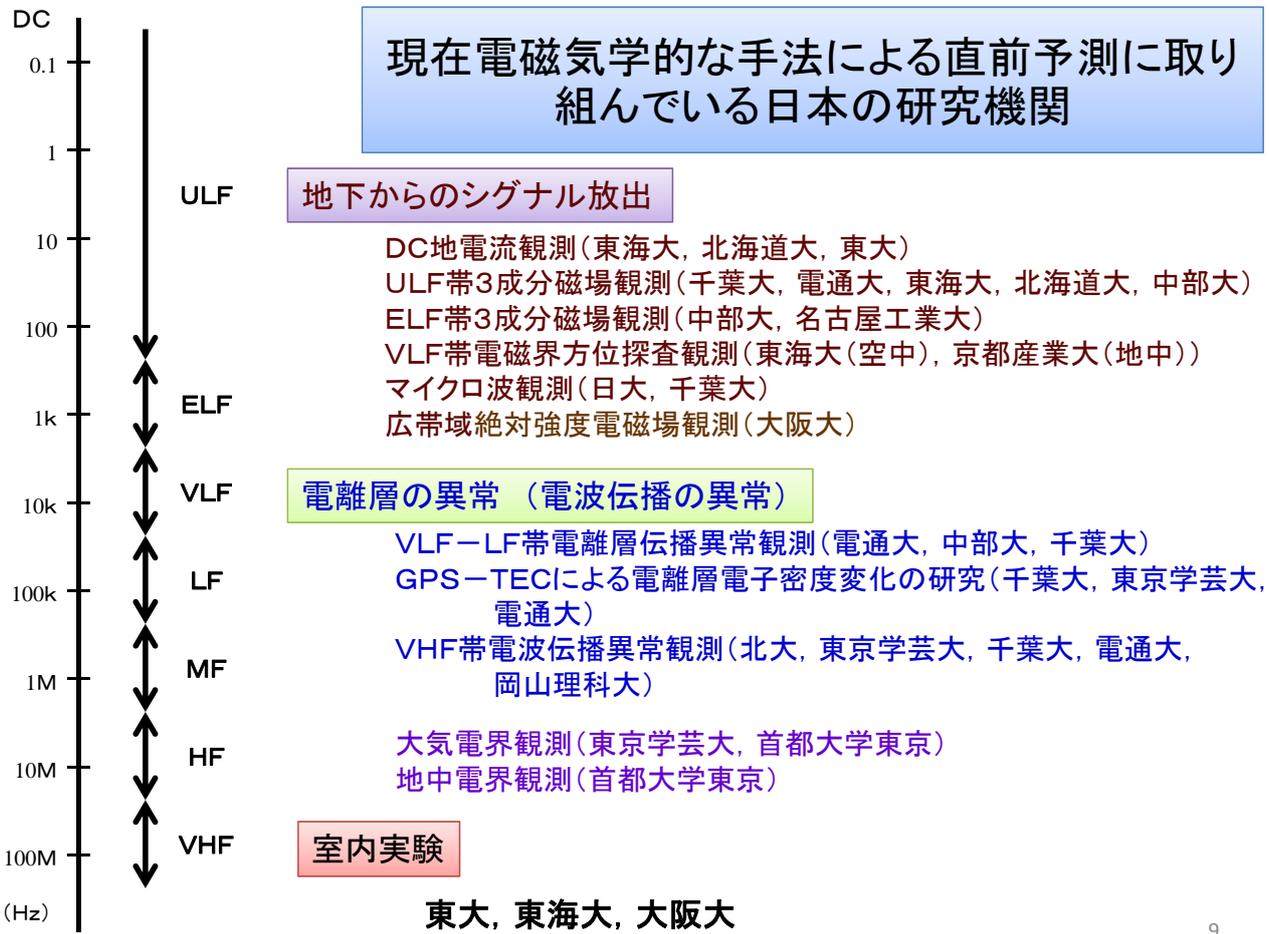
内陸地震  
M ≥ 5  
12 個

尾池和夫の先駆的結果

尾池らは163kHzのパルス状のノイズを数え、地震活動との相関を発見

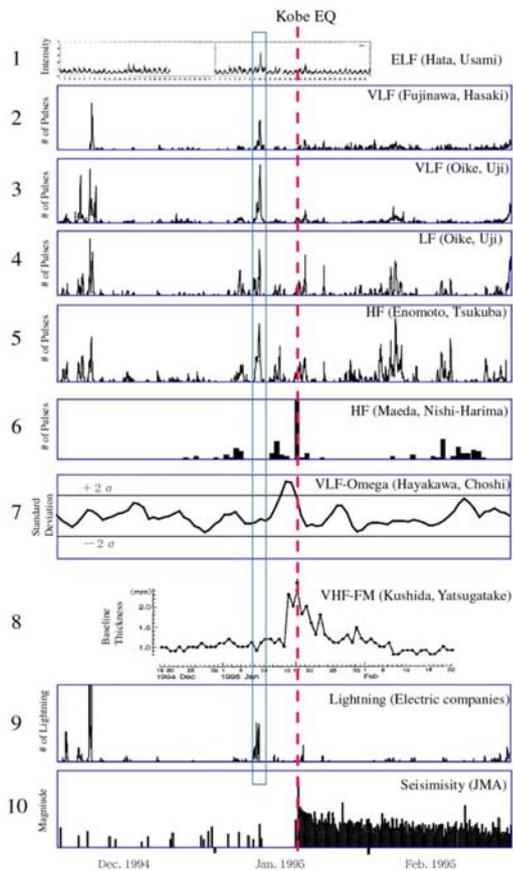
尾池和夫(京大)らによるVLF帯, LF帯パルス状電磁ノイズ発生 の仮説

1. 地震の発生の前兆現象として、震源域での微小破壊などの発生により電磁パルスが発生する。
2. 広い地域で応力が増大し、地表付近でも微小破壊などが発生して電磁パルスが発生する。
3. 上記1または2のしくみで荷電粒子が空気中に放出され、地震前に空電(雷)を誘発する。
4. 落雷があり、それによる地電流が岩盤の破壊を誘発して地震が発生する。
5. 前線の通過などで空電が増えるとともに集中的な降雨が活断層帯に増水をおこし水が地震を誘発する。
6. 大気中の電気伝導度などが変わり、普段観測されない遠方からの空電が観測されるようになる。



**兵庫県南部地震前に観測された各種異常**

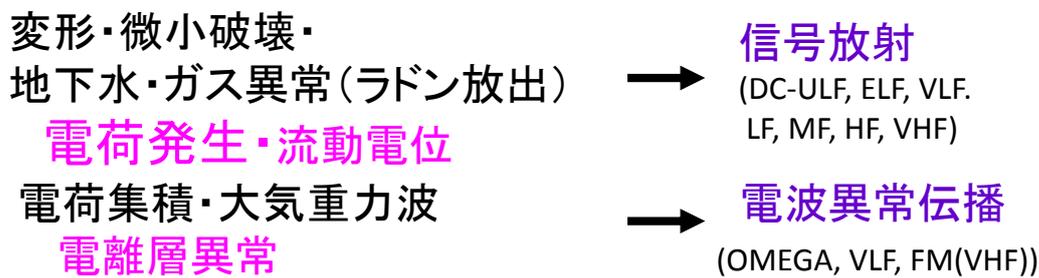
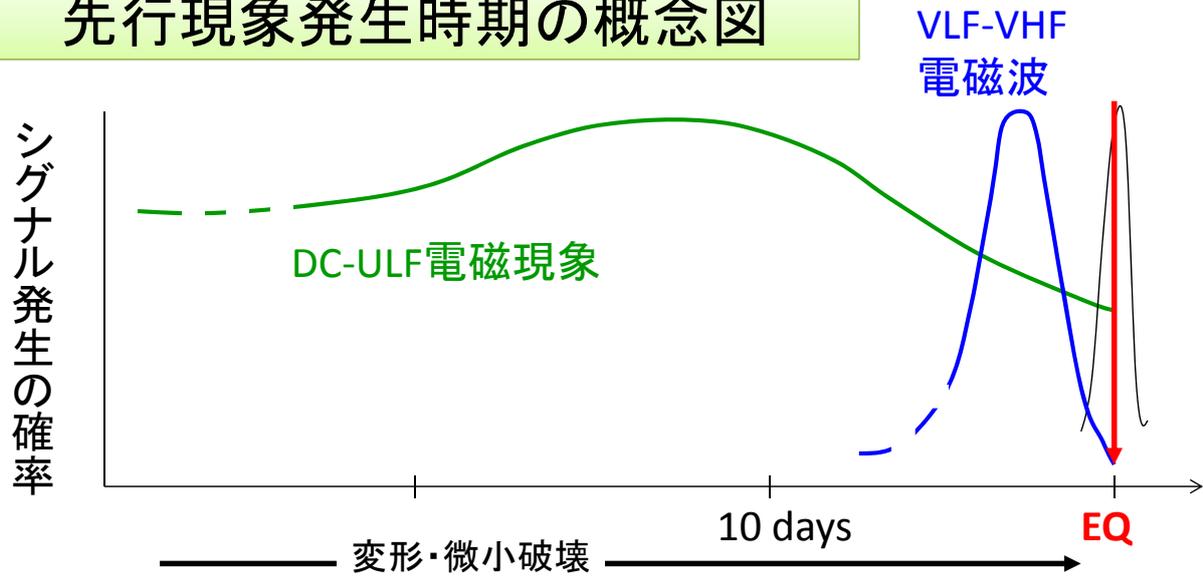
Nagao, T. et al., Electromagnetic anomalies associated with 1995 KOBE earthquake, J. Geodynamics, 33, 401-411, 2002.



- 1 **ELF帯狭帯域3成分磁場観測**
- 2 **VLF帯ポアホールアンテナ電界観測**
- 3 **VLF帯電磁ノイズ観測**
- 4 **LF帯電磁ノイズ観測**
- 5 **HF帯鉛直地電流観測**
- 6 **HF帯電磁ノイズ観測**
- 7 **VLF帯電離層伝播異常観測**
- 8 **VHF帯電波伝播異常**
- 9 **電力会社による落雷データ**
- 10 **地震活動**

1994年12月から1995年2月までの3ヶ月間の記録<sup>30</sup>

# 先行現象発生時期の概念図



# 提唱されているメカニズム(1)

モデル	必要な仮定	機構
流動電位	応力勾配・間隙水	岩石表面との電気的な相互作用により岩石中の空隙を圧力勾配によって流れる間隙水が電荷を運ぶ
クラック形成による電磁放射(Molchanovなど)	応力変化	クラック形成に伴い電荷分離が生じることによって電流が流れる
AE放出による誘導効果 (Sukov, 1997)	応力変化・導体	微小破壊によって放出された弾性波がトリガーとなり地殻(導体)が地磁気中で振動する。このとき、導体中に誘導起電力が生じて電流が流れる
圧電分極の補償電荷 (Ikeya, 1997)	応力変化・圧電物質・導体	圧電物質に応力が加わると分極が生じ、この分極を遮蔽するために自由電荷が再配置される。応力がなくなると、この自由電荷の対消滅によって電磁波が放出される
圧力誘導電流 (Varotsos, 1998)	応力変化・格子欠陥	価数の異なる不純物イオンによって、結晶中に電気双極子が生成される。圧力が高くなるとこの双極子が回転し易くなり、ある圧力のとき外部電場の方向に向きが揃う。このとき、双極子の回転にともなって電流が流れる

## 提唱されているメカニズム(2)

モデル	必要な仮定	機構
転位の移動による電気双極子 (Slifkin, 1996)	応力変化・刃状転位・不純物イオン	帯電したジョグは不純物イオンなどによって遮蔽されている。応力変化に刃状転位は素早く追従できるが、不純物イオンは出来ないために電気双極子が生成される
欠陥電子 (Fruend, 1993)	格子欠陥・応力変化・結晶間隙水	岩石を構成する結晶 (MgOなど) に水が浸透していくと $H_2$ と $O_2^{2-}$ が生じる。 $O_2^{2-}$ は応力変化によって2つの欠陥電子 $0^-$ に分解され拡散していく。 $H_2$ は $0^-$ よりも早く拡散するので過渡的に結晶内部がプラスに帯電する
脱水を伴う構造相転移 (Lazarus, 1996)	応力変化・刃状転位・結晶間隙水・不純物イオン	応力変化によって脱水にともなう構造相転移が結晶に生じる。この相転移は、体積変化を伴うので刃状転位や不純物イオンが再配置する。このとき、5と同じ機構で電気双極子が生じる。また、脱水によって生じた水は断層へ流入し、これを脆弱化し地震を起こしやすくする

13

## 提唱されているメカニズム(3)

モデル	必要な仮定	機構
プラズモン (Kamogawa & Ohtsuki, 1999)	地殻内部に (比較的自由に動ける電荷の存在)	微小破壊時に放出されたエキソ電子が縦波のプラズマの波を励起する。地中を伝播した縦波が地表でこぼこによって、横波の電磁波に変換される。
フラクトエミッション (榎本&橋本, 1990)	荷電粒子放射・エキソ電子活性	新しい固体表面が生成するとき発生するエキソ電子により高い周波数の変動が発生
正孔電荷キャリア (Fruend and Sornette, 2007)	格子欠陥・過酸化架橋・応力変化	SiO <sub>2</sub> 結晶中の過酸化架橋は、positive hole pair (PHP)ともよばれ、加圧により正孔電荷キャリアが発生することにより電流が流れる
鉄の電気化学反応 (畑)	2価および3価の鉄の酸化還元反応	鉄イオンの酸化還元反応による電池と同様の反応が地中で発生し、電荷を放出

その他 Litostatic-Isostatic圧力解消仮説(榎本祐嗣:命名は長尾による)

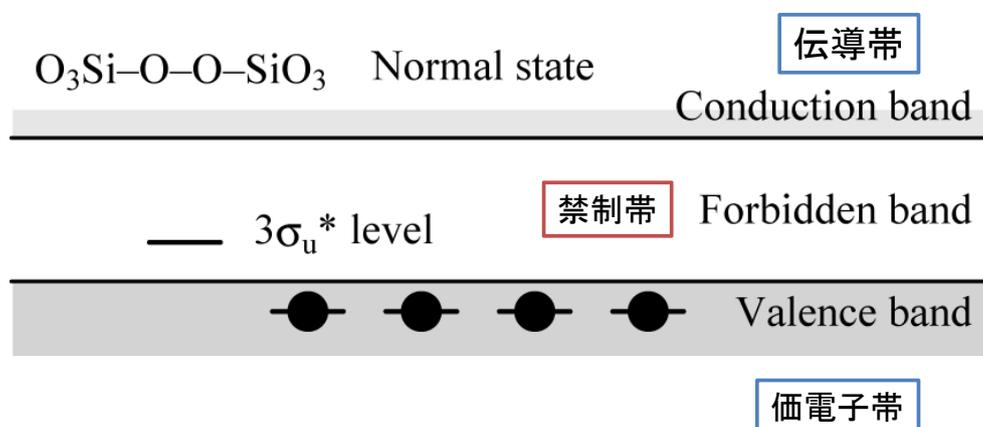
14

## 地震電磁現象発現メカニズムとしての正孔 (positive hole) 拡散仮説

- 微小破壊(micro crack)を必要としない
- 変形のみで電流を発生
- 地表を正に帯電させられる
- 多くの先行的変化を定性的に説明可能(赤外放射(温度上昇), 電離層中の電子密度増加等)
- ただし問題点もある(岩石がウエットだとメカニズムが効率的に働かない)

15

## 活性化メカニズム

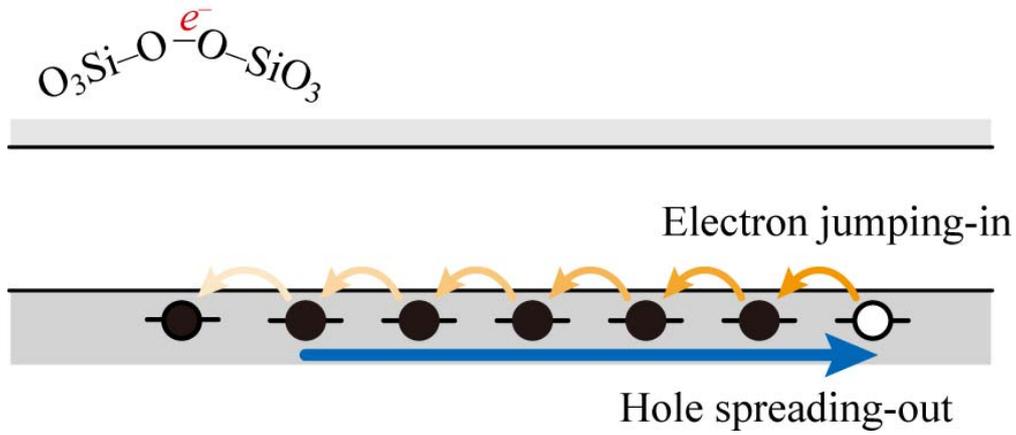


Takeuchi, A., Y. Futada, K. Okubo, N. Takeuchi, Positive electrification on the floor of an underground mine gallery at the arrival of seismic waves and similar electrification on the surface of partially stressed rocks in laboratory, Terra Nova, 22 (3), 203-207, 2010  
[doi:10.1111/j.1365-3121.2010.00935.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2010.00935.x)

16

# 活性化メカニズム

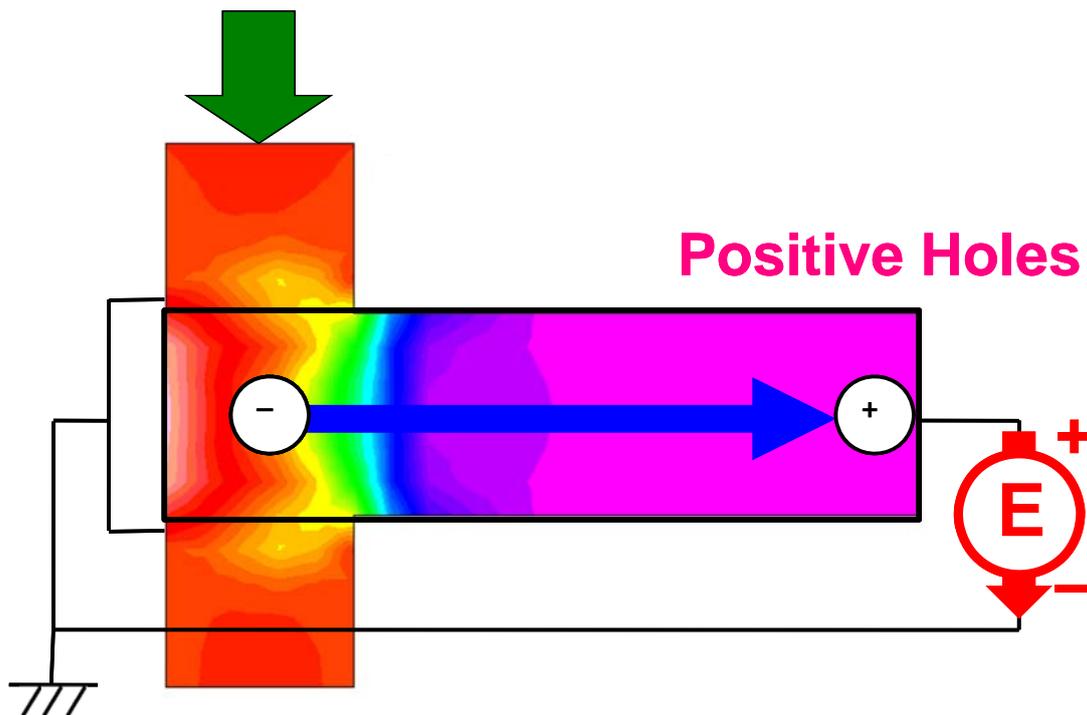
## P-type 半導体



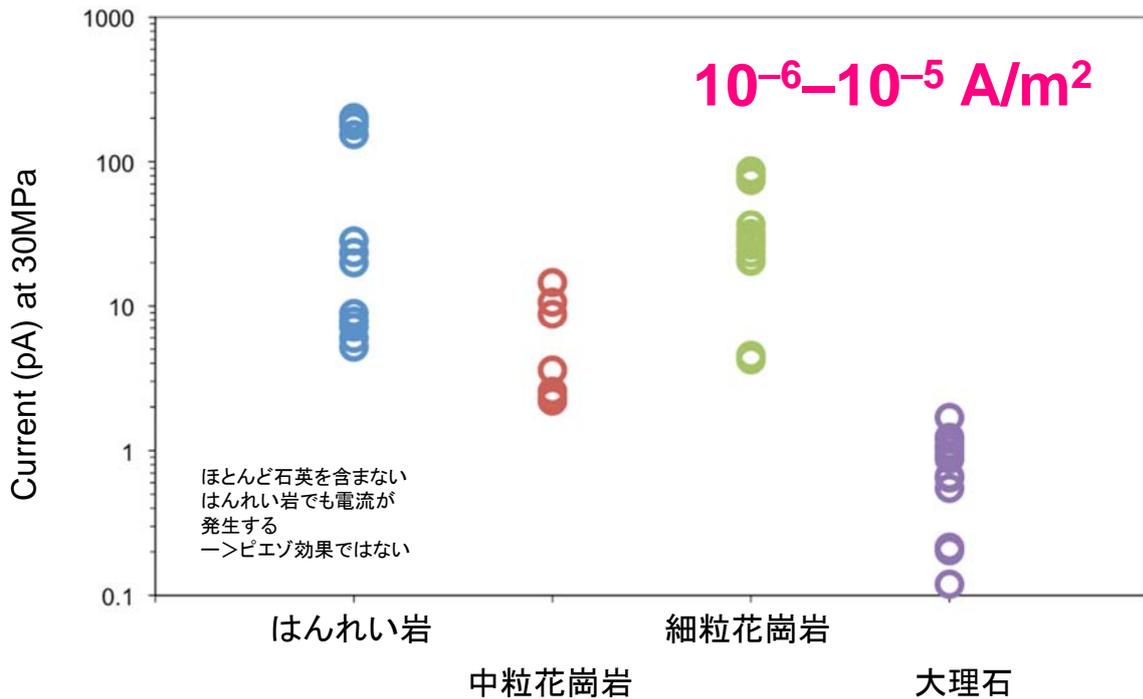
変形により禁制帯のエネルギー順位が低下

From Takeuchi *et al.* (2010)

# 考えられるメカニズム

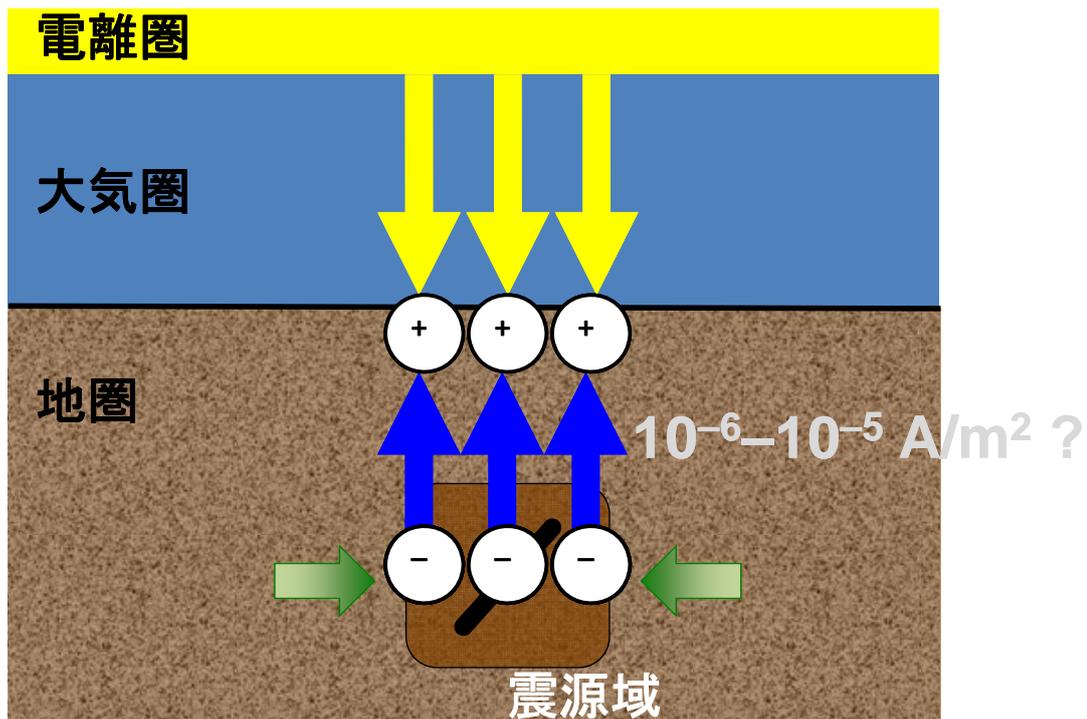


# 電流強度の比較



19

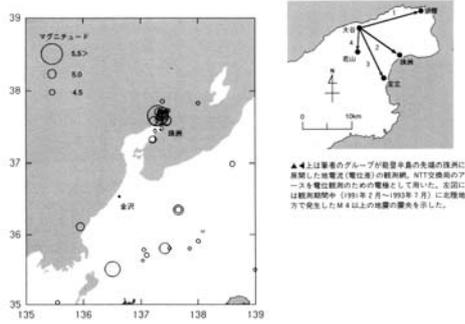
# 実際の地球では？



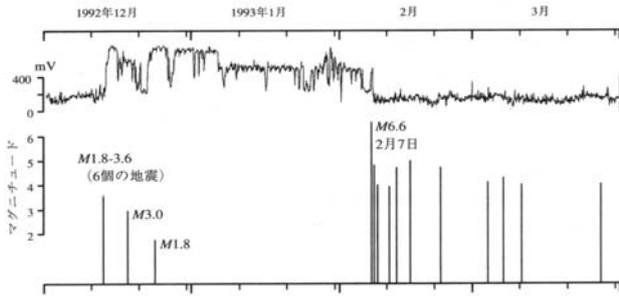
Takeuchi, A., B.W.S. Lau, F.T. Freund, Current and surface potential induced by stress-activated positive holes in igneous rocks, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31 (4-9), 240-247, 2006 [doi:10.1016/j.pce.2006.02.022](https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.022)

20

# 古典的事例



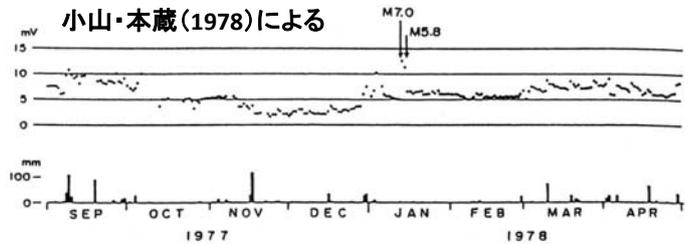
▲4とは東海グループが能登半島の先端の浅所に設置した地電位(電位差)の観測点。67交換後のデータを観測期間のための補綴として用いた。55には観測期間中(1991年2月~1993年7月)に北陸地方で発生したM4以上の地震の震央を示した。



能登半島沖地震前後の地電流の記録

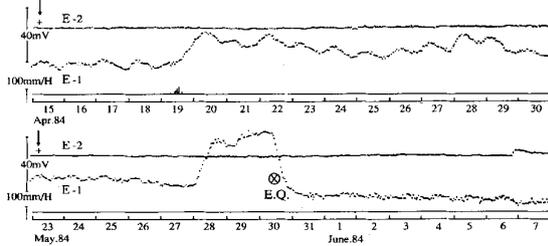
異常は本震発生まで続き、本震後約2時間かけて通常のレベルに戻った。

Nagao, T., Uyeda, S., Asai, Y. and Kono, Y. (1996): Recently observed anomalous changes in geoelectric potential preceding earthquake in Japan. in Critical Review of VAN (ed. Sir James Lighthill), World Scientific, London, Singapore, 292-300.



小山・本蔵(1978)による伊豆大島近海地震(M=7.0, 1978年1月14日)前後の静岡県中伊豆における地電流(上)と降水量(下)との関係

## 宮腰による山崎断層での測定



1984年5月30日に山崎断層観測点のほぼ直下で発生したM5.5の地震に先行したと考えられている地電流の変化

## 地電流の異常

# 土地比抵抗の変化(構造変化)

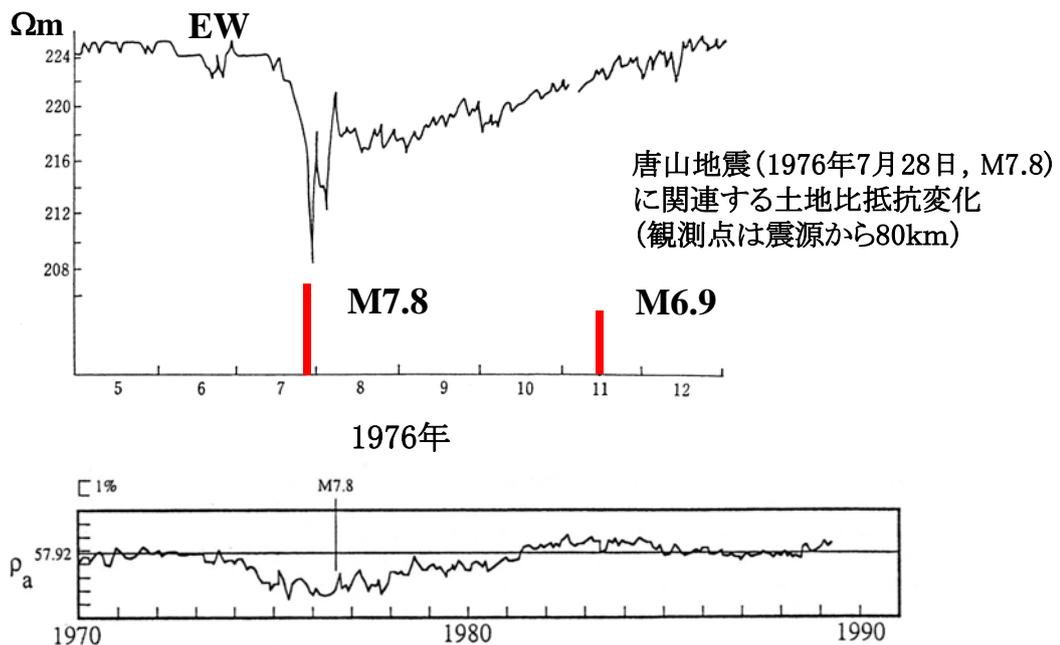
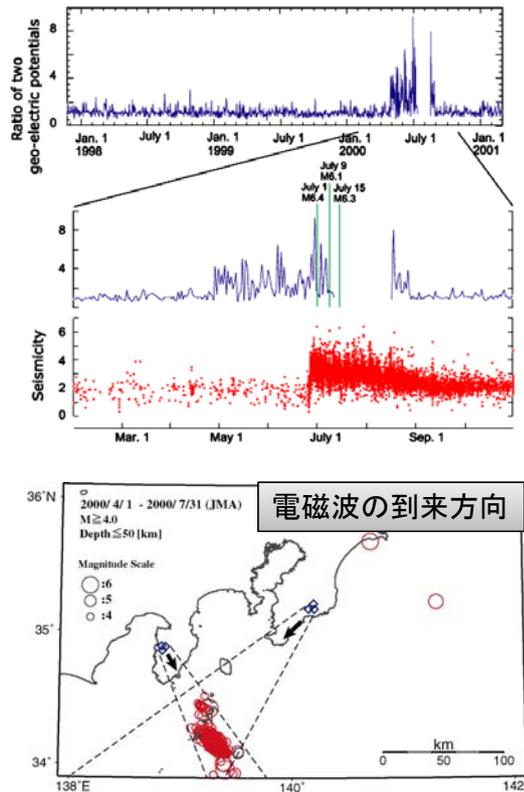
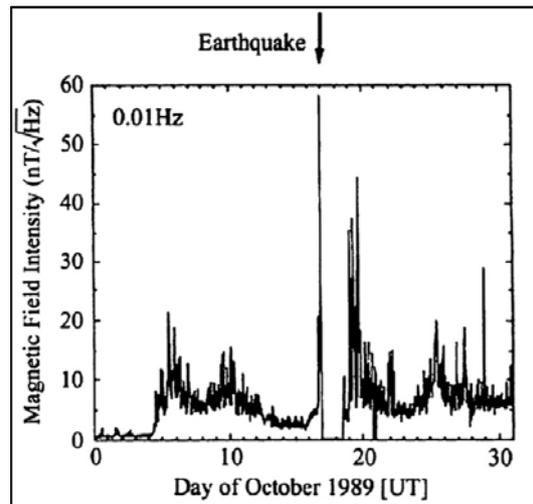


Figure 3. Resistivity variations measured with electrodes in a fixed Schlumberger configuration in China [after Zhao et al., 1991b]. Note the gradual decrease several years prior to the 1976 Tangshan earthquake (M 7.8) and the gradual increase afterward. These data were taken at a distance of 80 km from the epicenter, and error bars are approximately 0.4% for the monthly means of resistivity.

## 2000年三宅島噴火，伊豆群発地震の前に観測された電磁気の異常



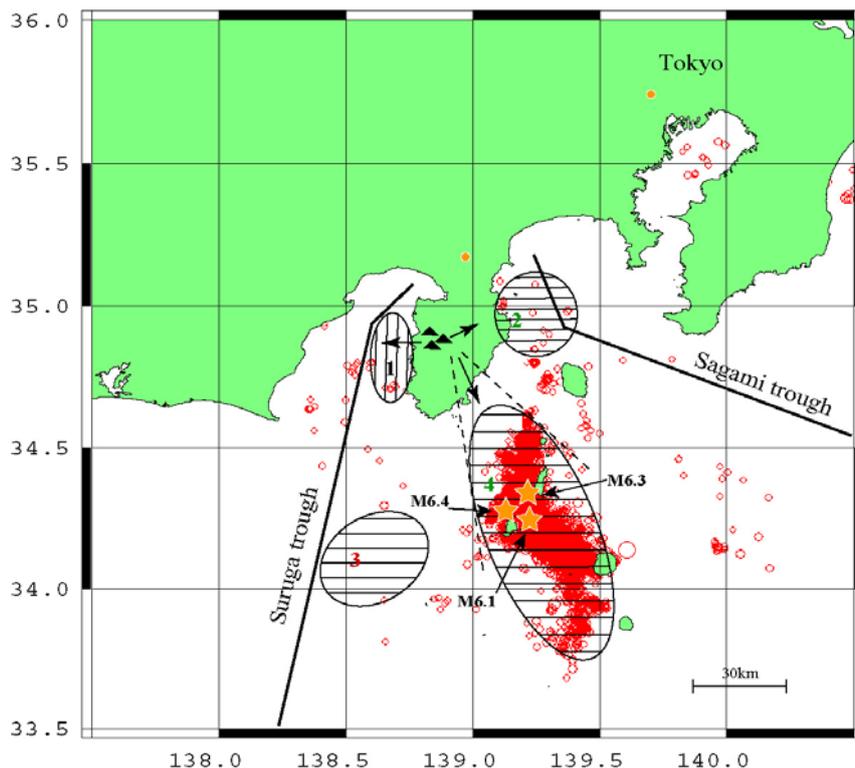
## カリフォルニア・ロマプリータ地震前の地磁気の異常



Fraser-Smith, A. C., A. Bernardi, P. R. McGill, M. E. Ladd, R. A. Helliwell, and O. G. Villard, Jr., 1990, Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1465-1468.

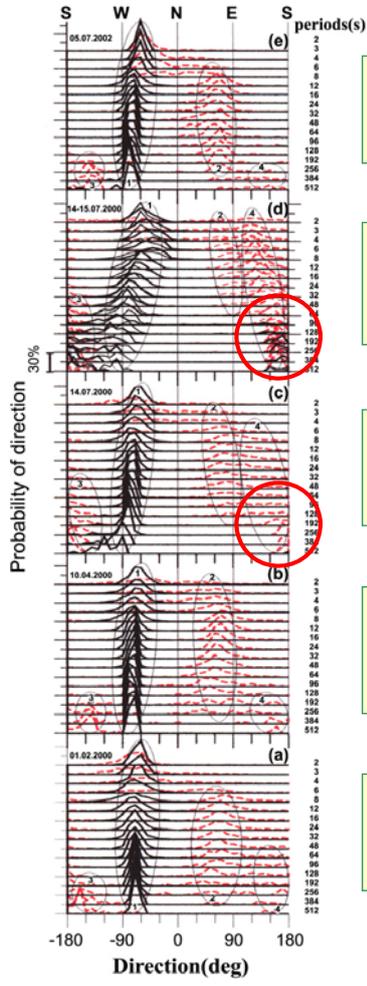
Uyeda, S., M. Hayakawa, T. Nagao, O. Molchanov, K. Hattori, Y. Orihara, K. Gotoh, Y. Akinaga, and H. Tanaka, Electric and magnetic phenomena observed before the volcano-seismic activity 2000 in the Izu Island Region, Japan, *The proceeding of the National Academy of Sciences*, 23 USA (PNAS), vol. 99, No. 11, 7352-7355, 2002.

## 2000年 三宅島噴火および伊豆諸島群発地震



電磁気学的な異常の到来方位が観測できようになった!<sup>24</sup>

詳細なスペクトル解析による前駆的シグナルの到来方向



2002年7月5日  
群発活動約2年後

2000年7月14-15日  
地震群発活動期間内

2000年6月14日  
群発活動約12日前

2000年4月10日  
群発活動約2.5ヶ月前

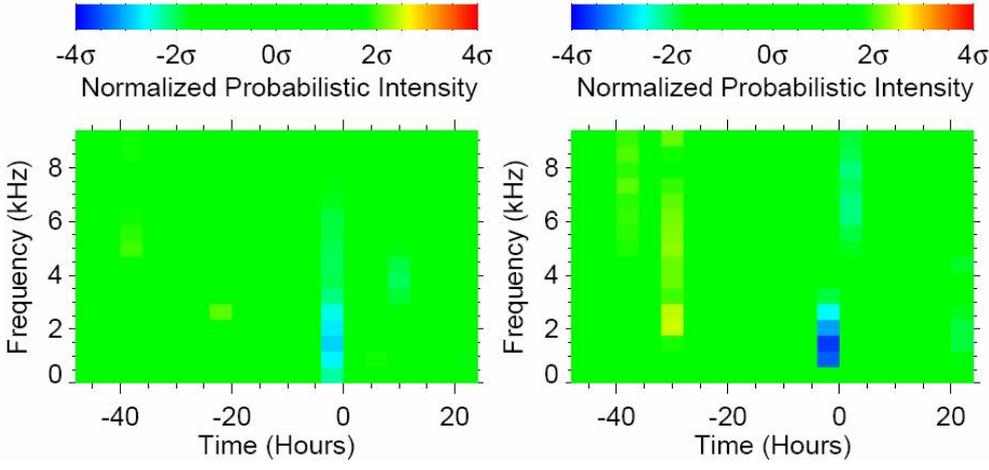
2000年2月2日  
群発活動約4.5ヶ月前

群発地震活動の直前と最中のみ4の領域から強い電磁波が到来

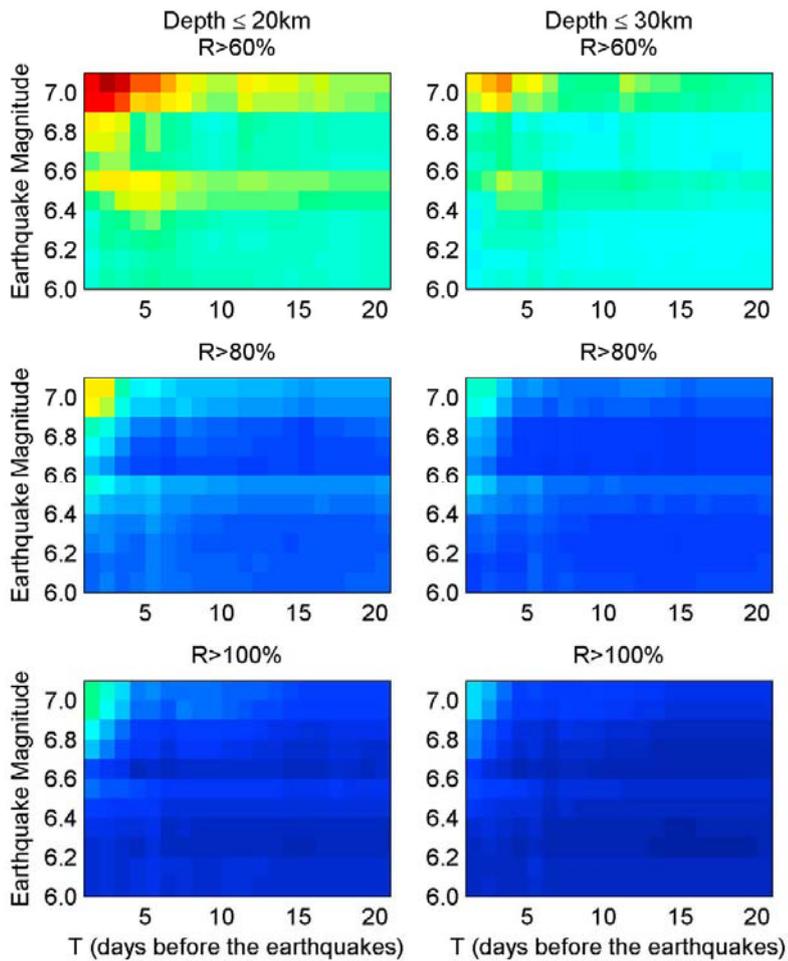
# DEMETER衛星の結果

## VLF帯の電波強度低下

Němec, F., O. Santolík, M. Parrot, and J. J. Berthelier (2008), Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05109, doi:[10.1029/2007GL032517](https://doi.org/10.1029/2007GL032517).



9000個のM4.8以上の地震(左)及びM5.0以上の地震との統計解析結果(右) Mが大きくなると異常も大きくなる

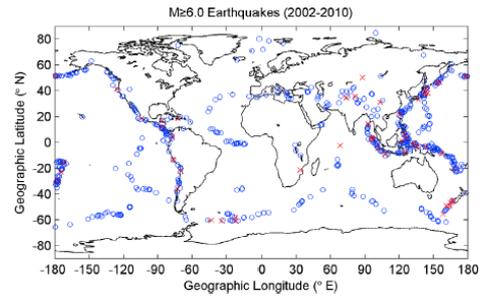


## 電離層電子密度の異常

2002年から2010年までの736個のマグニチュード6以上の地震で孤立して発生したものをすべて解析

### その結果

- ・異常は0-7日前に集中
- ・浅い地震ほど異常が大きい
- ・大きな地震ほど異常が大きい



Le et al., JGR, Vol. 116, A02303, doi:10.1029/2010JA015781, 2011

## 世界の地震電磁気観測衛星・ミッション

### 打上げ

- 2001.12.10 Kompass (IZMIRAN: **ロシア**)
- 2003.06.30 Quakesat (Quakefinder: **アメリカ**)
- 2004.06.29 DEMETER (CNES: **フランス**)
- 2004.12.24 Variant/Sich-1M (NKAU: **ウクライナ**)
- 2005.02.28 LAZIO-SiRad (INFN: **イタリア**)
- 2006.05.26 Kompass-2 (IZMIRAN: **ロシア**)
- 2006.06.15 Arina/Resurs-DK1 (RKA: **ロシア**)
- 2006.09.18 Vsplesk Experiment (Energia: **ロシア**)
- 2009.07.29 POISE/UK-DMC2 (SSTL: **UK**)
- 2009.09.17 ETP/Tatiana II (MSU: **Russia**/NCU: **台湾**)
- 2012.07.23 Kanopus-Vulkan 1 (RKA: **ロシア**)

- 2001-056B
- 2003-031F
- 2004-025C
- 2004-052-A → decayed
- ISS (国際宇宙ステーション)
- 2006-019-A → decayed
- 2006-021A
- ISS (国際宇宙ステーション)
- 2009-041C
- 2009-049D
- 2012-039-A

### 打上げ予定

- 2012.11.12 UNAMSAT-3 (UNAM: **メキシコ**)
- 2012 IONOSATS (NKAU: **ウクライナ**)
- 2013 Kanopus-Vulkan 2 (RKA: **ロシア**)
- 2013 TechDemoSat-1 (SSTL: **英**)
- 2014 CSES (CNSA: **中国**)
- 2015 TwinSat (UK- **ロシア**)

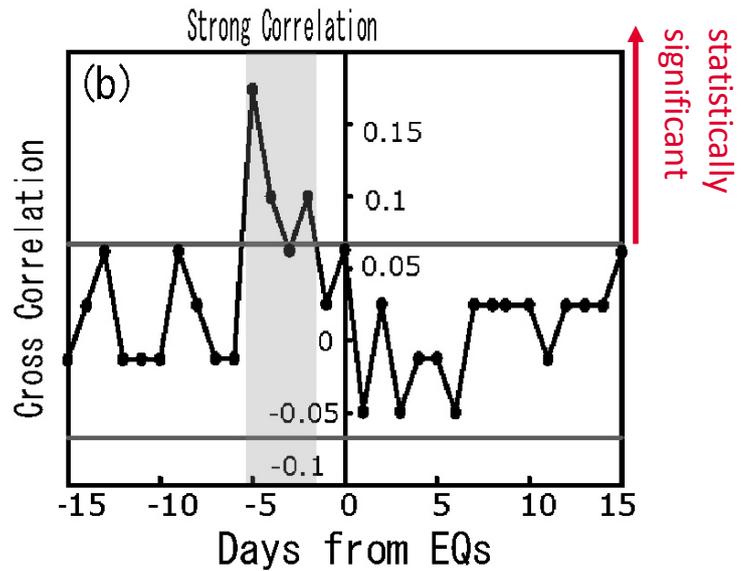
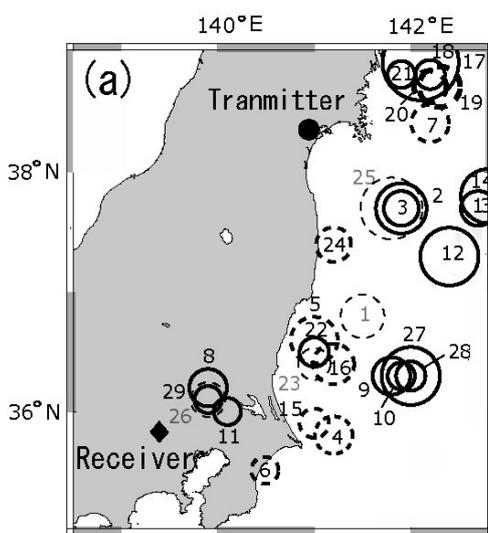
2017年までに2機追加  
Micro&nanosatellite

### 提案中

- OMIR (**カザフスタン**)
- Esparia (INFN: **イタリア**) この他ペルー、イラン及び韓国が計画中

\* 太字は300kg以上の衛星・他はマイクロ衛星もしくは大型衛星や宇宙ステーションの搭載機器

Fujiwara, Kamogawa et al., 2004, Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences, Geophys. Res. Lett., Vol. 31, L17110, doi:10.1029/2004GL019865

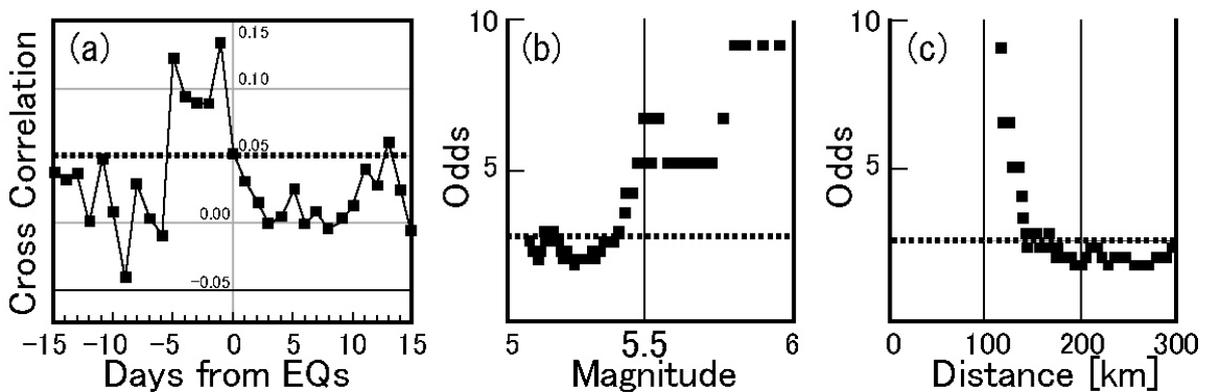


### Cross-Correlation between Anomalies and EQs

VHF帯の電波伝搬異常と東北沖の地震活動との相関1日前から5日前にかけて有意

29

Liu et al., 2006, A statistical investigation of pre earthquake ionospheric anomaly, JGR Vol. 111, A05304, doi:10.1029/2005JA011333



416 Anomalies  
307 Precursors  
**M ≥ 5.0**

電離層電子密度の異常の統計的研究, 大きな地震ほど, 近くで発生した地震ほど, オッズが高い

30

# VLF帯磁場観測

EQ961005, M4.4

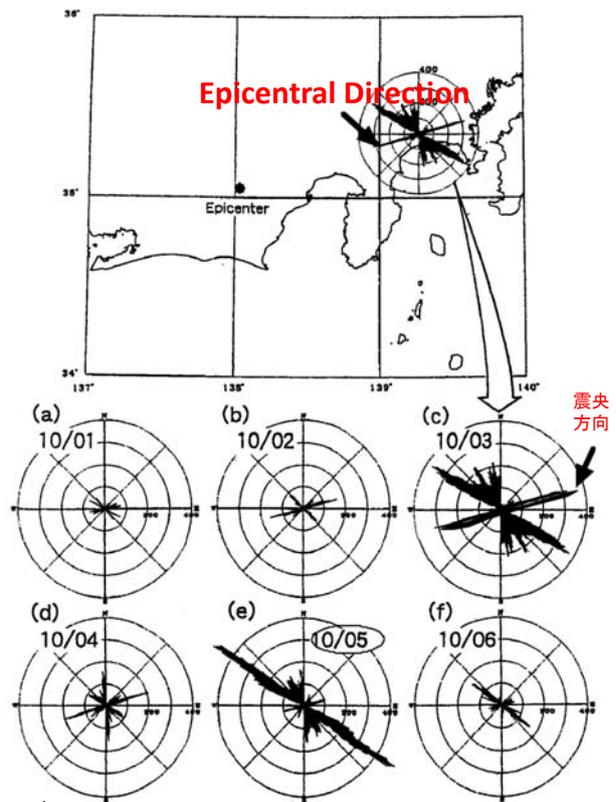
## 方位探査(馬場・浅田方式)

### 特徴

電磁波の見かけ到来方位を決定  
波形記録から震央方向から到来する  
電磁波の特徴を抽出

### 「地震電磁波」の特徴

- ・数日前から震央方向から到来し、動かない  
→ 雷活動は前線とともに移動
- ・内陸の浅い地震に有効
- ・海域で発生する地震では感度が低い  
陸域でも海洋プレート内部の地震では  
検知困難か
- ・シグナルの強度は雷に比べて1ケタ小さい
- ・観測点から100km程度, M4.5以上



Asada, T., H. Baba, M. Kawazoe, M. Sugiura: An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes. Earth Planets Space, 53, 52-62, 2001.

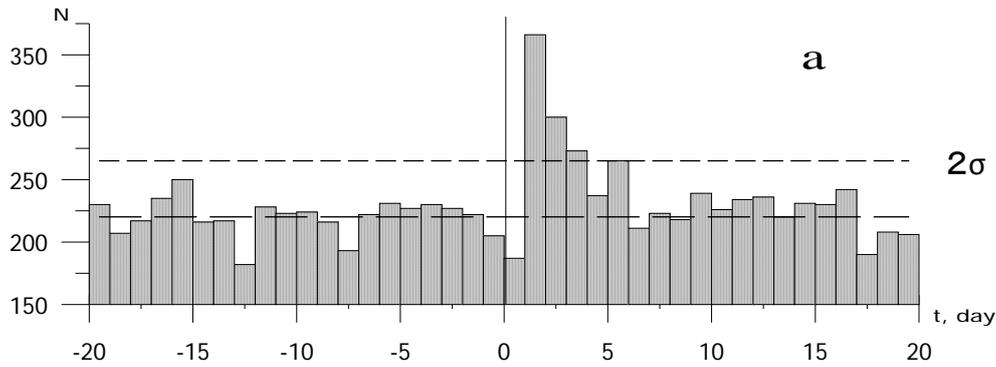
31

EQ961005

## キルギスにおける能動監視・ 地震誘発実験 (予知から制御へ・究極の地震防災)

- 1980年代後半からMHD発電機を用いた実験が行われた
- 目的は発電の基礎研究+軍事目的
  - Star Wars  
Short Pulse を作るため, “光の弾丸”
  - 潜水艦との交信
- その後, 固体地球研究に活用(物理探査)
- MHDは1989年に稼動停止
- MHDはロシア独自の技術

32



- 地震の発生数は送信後2日目に最大となり、その値はバックグラウンド・レベルの1.7倍.
- 最大値のあと数日かけて通常の値に戻る.

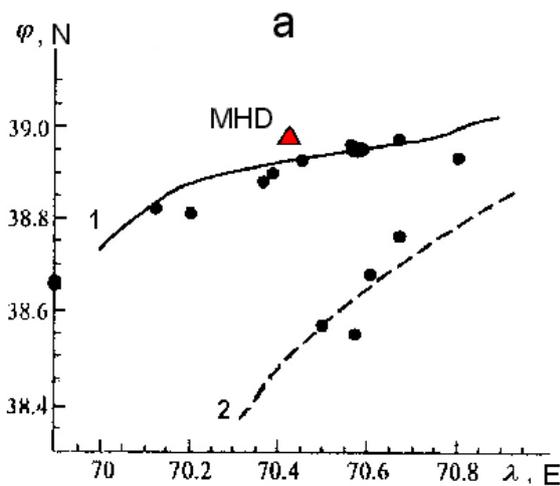
電磁パルスが、送信後2～6日かけてローカルな地震の発生数を高めたことを示唆.

送信前20日間で送信後20日間で発生した地震の総エネルギーを比較すると、送信後は  $2.03 \times 10^{15}$  Jであった. 一方、MHD発電機から送出されたエネルギーは、 $1.1 \times 10^9$  Jと、地震エネルギーの増加分よりも6桁小さい. つまり、電磁パルスが増加した地震のすべての原因ではない.

MHD送信によって通常のテクトニクス場において地殻に蓄えられたエネルギーの解放が加速したものと思われる. つまり、電磁パルスは **一種のトリガー** の役目を果たすと考えられる.

33

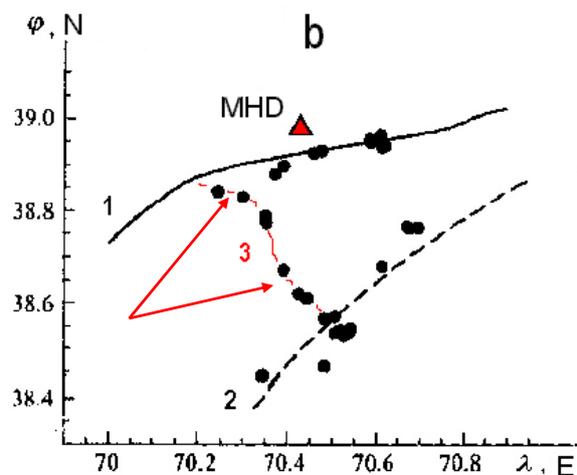
## MHD実験により発見された潜在活断層 $M_b \geq 3.4$ and $h \leq 5$ km of Garm region



a) before MHD generator runs

既知の断層

- 1) Petrovskiy
- 2) Darvaz-Karakulskiy



b) after MHD generator runs

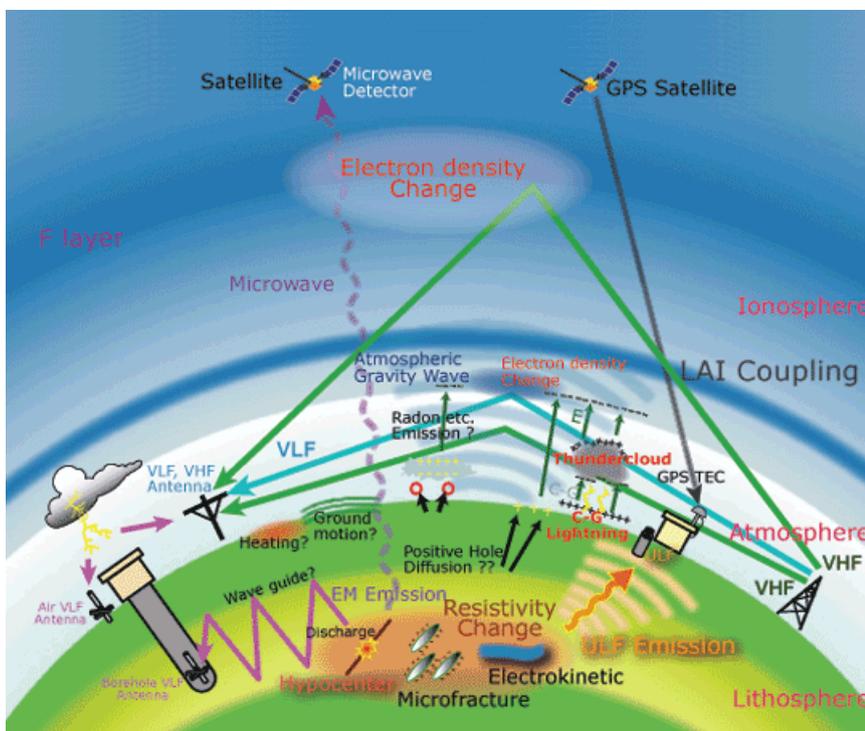
3) MHD実験によって発見された断層

34

# 国際的な動向

- 国際測地学・地球物理学連合(IUGG)はEMSEV(地震火山現象に関する国際ワーキンググループ)を2001年に設立
- アメリカは予知に悲観的だが、少しずつ変わりつつある(Tom Jordanがリーダー)
- イタリア(EU)、インドは短期予知のための電波伝搬異常監視の観測網を展開
- 統計物理学からのアプローチ(地震活動解析、物理学者の参入)
- 人工衛星観測の推進(短時間で大量のデータ取得が可能)

35



国際測地学  
地球物理学連合: IUGG  
(IAGA-IASPEI-IAVCEI)  
Inter Association Working  
Group on  
Electromagnetic  
Studies of  
Earthquakes and  
Volcanoes  
(EMSEV)  
<http://www.emsev-iugg.org/emsev/>

地圏—大気圏—電離圏結合

第1回国際地震電磁気観測衛星  
ワークショップ(JAXA, 2008)

