

日本地震予知学会

第 10 回学術講演会

アブストラクト集

日時：2023（令和 5）年

12月22日(金) 10時20分－17時10分

12月23日(土) 10時00分－15時20分

会場：電気通信大学

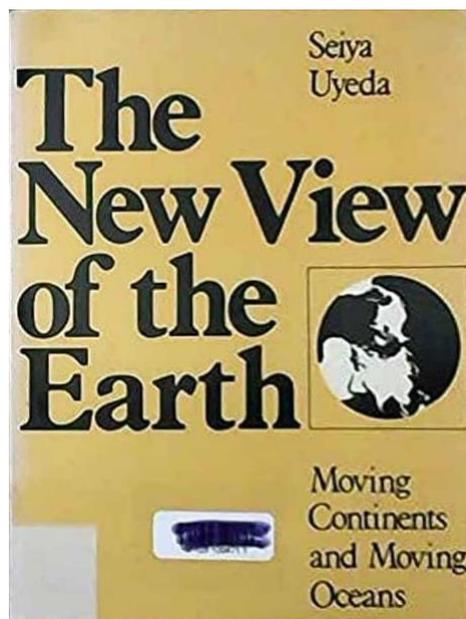
創立80周年記念会館3階ホールにて

現地 および Zoom併用

追悼



日本地震予知学会名誉会員の上田誠也先生が 2023 年 1 月 19 日ご逝去されました。93 歳の大往生でした。ここに改めてご冥福をお祈りいたします。



上田先生はプレートテクトニクス研究における世界のトップランナーの一人でした。特に顕著な業績として、プレート運動の原動力の大部分は周囲より重たいスラブが重力によって沈み込む事が支配的である事を初めて示しました (Forsyth and Uyeda, 1975)。

また 1971 年に初版が発刊された『新しい地球観』は、プレートテクトニクスの啓発書として、極めて良く書かれていました、日本でも最終的に 80 刷を超える増刷となっただけでなく、英語でも出版され、その後、19ヶ国語に翻訳されたと伺っています。これが『The New View of the Earth』です。

上田先生は東京大学地震研究所時代には、日本列島およびその周辺海域の熱的な構造・進化の研究を精力的に実施していました。いわゆる地球熱学という分野です。

地震予知研究開始のきっかけ

1980年当時、上田先生は *Tectonophysics* という学術雑誌の編集長を努めておられました。そこで上田先生の人生を変える論文と出会う事になったのです。これがギリシャの VAN グループとの出会いでした。

当時、地電流を用いた VAN グループの地震予知に関する論文が掲載判断を2年間保留されていました。その理由は「予知の結果が良すぎる」というものでした。上田先生は実際にギリシャを何度も訪問し、VAN グループと議論を行ない、「結果が良すぎる事は掲載拒否の理由にあたらぬ」「この論文は世の中に出すべきである」という結論に達したのです。そしてそこからの約40年間は地震予知研究に全精力を費やされる事になりました。

上田先生は地震学、地球熱学、地球電磁気学、さらには地質学にも造詣が深く、日本の地球科学の研究者として、最も国際的に広く認知されていた研究者でした。そのため、世界最大の地球物理学の国際団体である「国際測地学・地球物理学連合(IUGG), 1919年設立」の日本代表理事に就任されたり、4年に1回開催される総会を2003年、アジアで初めて札幌で開催する事に成功しました。そしてこの札幌大会の大会組織委員長が上田先生でした。開会式は天皇陛下・皇后陛下のご臨席もあり、大会は成功裏に開催されました。

また、2001年には、「電磁気学的な地震予知研究を国際的に推進すべき」という固い信念のもと、IUGG内に「地震・火山に関する国際ワーキンググループ(EMSEV)」を設立させ、初代委員長に就任しました。

2024年10月には、ギリシャ・クレタ島で EMSEV 総会が開催されます。この総会は短期・直前予知研究にまい進された上田先生のメモリアルの大会とする事がすでに決定しています。

参考資料

Forsyth, D. and S. Uyeda, On the relative importance of the driving forces of plate motion, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 43, 163-200, 1975.

上田誠也, 新しい地球観, 岩波新書, 1971.



一般社団法人 日本地震予知学会 第10回学術講演会

日時 12月22日(金)10時20分 — 23日(土)15時20分

場所 電気通信大学 創立80周年記念会館

住所 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1



- 京王線 調布駅下車 中央口より徒歩5分



・講演に際しての注意事項

・講演時間は質疑応答および講演者の交代時間(1分)を含みます。

・一般講演につきましては、基本的に講演15分、質疑応答4分、交代時間1分の合計20分をお願い致します。

プログラム

12月22日

開始	終了	時間			講演番号	発表
				座長:長尾年恭・芳原容英		
10:20	10:30	0:10	開会挨拶	長尾年恭		
10:30	10:50	0:20	地震直前後の大気電界と下部電離層の同時観測による大気波動仮説の調査	三須孝一郎・芳原容英・菊池博史(電気通信大)・早川正士(早川地震電磁気研究所)	23-01	会場
10:50	11:10	0:20	Precursor signals before large (M >7) earthquakes - summary from our study -	K.-I. Oyama (National Cheng Kung Univ.), C. H. Chen (Kyushu Univ), H. K. Juang (Academia Sinica), and U. Das (Indian Inst. of Info. Tech.)	23-02	会場
11:10	11:30	0:20	MF 帯放送波の受信可能時間遅延と地震発生との関連性解析	後藤悠希・本島邦行(群馬大)	23-03	会場
11:30	11:50	0:20	VHF 帯放送波の電波伝搬路に対する伝搬異常を伴った地震の分布	櫻井豪流・本島邦行(群馬大)	23-04	会場
11:50	12:00	0:10	休憩	座長:梅野 健・長尾年恭		
12:00	12:20	0:20	静止衛星を用いた地震直前のMSTID伝搬遅延および伝搬逆転の検出	津坂悠太・梅野 健(京都大)	23-05	会場
12:20	13:10	0:50	招待講演 地殻変動異常のリアルタイム検出法の検討	田中宏樹(京都大)	23-06	会場
13:10	14:10	1:00	昼食	座長:津坂悠太・田中宏樹		
14:10	14:30	0:20	時系列地殻変動に見られる地震発生の先行過程	荘司雄一(復建技術コンサルタント)	23-07	会場
14:30	14:50	0:20	リアルタイム高解像度電離圏トモグラフィの実現	米山 慧・梅野健(京都大)	23-08	会場
14:50	15:40	0:50	招待講演 2008年汶川地震直前の電離圏変化	日置幸介 (北大・中国科学院上海天文台)	23-09	会場
15:40	15:50	0:10	休憩	座長:児玉哲哉・古宇田亮一		
15:50	16:10	0:20	Temporal and Spatial variation of b-value at Kanto metropolitan area, Japan	Wenchao Li・C. Yoshino・K. Hattori (Chiba Univ.)	23-10	会場
16:10	16:30	0:20	花崗岩から放射される電場の検出に関する室内実験	筒井 稔(京都産業大)	23-11	会場
16:30	16:50	0:20	地震予知研究の発展方向を考える	中川 徹(大阪学院大)	23-12	会場
16:50	17:10	0:20	私の地震電磁気30年 —SEMS研究会から日本地震予知学会まで—	児玉哲哉(JAXA)	23-13	会場

プログラム

12月23日

開始	終了	時間			講演番号	発表
				座長:服部克巳・神山 眞		
10:00	10:20	0:20	地震前の海鳴りとキジの鳴き声に関する聞き取り調査	織原義明(東京学芸大)	23-14	リモート
10:20	11:10	0:50	招待講演 首都圏直下地震に伴うメタン起因のジオハザードリスク: —関東大震災で火災被害に学ぶ—	榎本祐嗣・山辺典昭(信州大)・長尾年恭(東海大)・近藤 斎(コンボン研)	23-15	会場
11:10	11:30	0:20	容量性円形平板アンテナを用いた地震前電磁放射の観測	太田悠一郎・三浦健伸・吉野千恵・服部克巳(千葉大)・今住則之(日本技術士会)	23-16	会場
11:30	11:40	0:10	休憩	座長:長尾年恭・水野 彰		
11:40	12:00	0:20	地中電磁波による高精度地震予知法の開発と適用: その1 全体概要	内山義英(ブレイン)	23-17	会場
12:00	12:20	0:20	前兆現象を用いた短期地震予測とその条件	服部克巳(千葉大)	23-18	会場
12:20	12:40	0:20	マルチチャンネル特異スペクトル解析(MSSA)を用いたULF帯電磁場観測データに含まれるノイズ除去法の開発 -広帯域データへの適用-	金子 柊・茂木 透・吉野千恵・服部克巳(千葉大)	23-19	会場
12:40	13:50	1:10	昼食	座長:小山孝一郎・田辺祐嗣		
13:50	14:10	0:20	GNSS 地殻ひずみの時空間変動にみられる被害地震発生前の予兆特性	神山 眞(東北工大)・三神 厚(東海大)・小出英夫・沢田康次・秋田 宏(東北工大)	23-20	会場
14:10	14:30	0:20	Volcanism of Mount Fuji and the 2011 Japanese large earthquakes	楠城一嘉(静岡県立大)	23-21	会場
14:30	14:50	0:20	地殻—電離層の電氣的結合モデルの一考察	水野 彰・高明慧・梅野 健(京都大)	23-22	会場
14:50	15:10	0:20	Geophysical and electromagnetic parameters to be studied - toward the prediction of large earthquake -	小山孝一郎(アジア宇宙環境研究コンソーシアム)	23-23	会場
15:10	15:20	0:10	連絡事項・閉会の辞	長尾年恭		

地震直前後の大気電界と下部電離層の同時観測による大気波動仮説の調査

三須孝一郎¹⁾, 芳原容英^{1,2)}, 菊池博史²⁾, 早川正士³⁾

1: 電気通信大学 情報理工学研究所 情報・ネットワーク工学専攻

2: 電気通信大学 宇宙・電磁環境研究センター

3. 早川地震電磁気研究所

要旨

近年、電通大グループにより、地震直前後に周期 20~40 分の大気電界変動とそれに同期する VLF 帯送信電波による下部電離層擾乱が確認されている[1]。これらの変動周期は、内部重力波 (IGW: Internal Gravity Wave) の周期範囲であるため、震央付近から IGW が発生し、上空へ伝搬することで大気電界変動と下部電離層擾乱を引き起こした可能性が示唆される。

本研究では、2016 年 11 月 22 日の日本時間の夜間に東北地方で発生した M5.7 の地震発生前後 12 時間の大气電界変動と下部電離層擾乱の多点同時観測データ解析を実施し、地震直前後の振幅波形とスカログラムから特徴的な波動の調査を行った。具体的には、ウェーブレット解析により得られたウェーブレットパワーの時間変化 $P(t, \Delta T)$ を用いて、(地震日を除いた) 地震発生前後 10 日の中央値を閾値とし、閾値を超えた変動を異常とみなした。解析の結果、地震前後に約 20~40、40~70、70~100 分周期の大気電界変動と下部電離層擾乱が確認された。次に、震央から下部電離層までの IGW 伝搬時間を導出し、VLF 観測点で異常が観測された時刻と比較したところ、観測された各周期帯の波動の伝搬時間差が理論値から予想される範囲内に収まることが分かった。さらに、本解析結果より IGW が地震発生約 1 時間前に震央付近から発生し、大気電界変動と下部電離層擾乱を引き起こしたことが示唆される。したがって、本解析地震では、地圏-大気圏-電離圏結合過程の大気波動説を支持する結果となった。

はじめに

地球大気上層には、太陽放射により大気の一部が電離された領域である電離層が存在する。下部電離層の監視・観測には、一般的に VLF 帯送信電波が用いられている。近年、地震に 1 週間~数日先行した下部電離層擾乱が地上からの大気重力波起源であるという報告がなされている[2]。直近では、電通大により地震直前後の大気電界変動や、同程度の周期(20~40 分)を有する VLF 帯送信電波変動が複数事例報告されている[1, 3]。観測された周期は、内部重力波の周期範囲内である。ゆえに、震央付近から発生した IGW が地上での大気電界変動と下部電離層擾乱を発生させた可能性が指摘されている。しかしながら、地上付近で観測された大気電界変動を引き起こす IGW について下部電離層までの伝搬過程についての定量的な調査は行われていない。そこで、本研究では、地震発生直前後の大気電界変動と下部電離層擾乱の多点同時観測データ解析を実施する。具体的には、観測された大気電界変動に基づく IGW の分散関係から地上から下部電離層までの波動の伝搬時間を理論的に導出する。次に、大気電界および下部電離層擾乱の観測時間差と波動の伝搬時間とを比較することで、大気波動仮説による、地圏-大気圏-電離圏結合過程の可能性を定量的に調査する。

観測データ

大気電界・VLF 観測データ

本研究で用いる大気電界は、電通大いわき観測点と気象庁柿岡地磁気観測所にて観測された連続時系列データを用いた。一方、VLF 帯送信電波電界振幅は、電通大 VLF 帯送信電波観測ネットワークより取得した。表 1、2 に各観測データの詳細を示す。

表 1. 大気電界データ

	いわき	柿岡
観測成分	大気電界	
時間分解能	1 s	1 min
使用周波数	2 Hz	1 Hz

表 2. VLF データ

観測成分	VLF 帯送信電波電界振幅
時間分解能	2 min
使用送信電波局	JJI(宮崎) : 22.2 Hz
	JJY(福島) : 40.0 Hz

地震データ

解析対象地震は、下部電離層の状態が安定している夜間 (12 : 00~19 : 00 (UT)) に発生した地震をとした (表 3).

表 3. 解析対象地震データの詳細

2016 年 11 月 22 日 14 時 03 分 (UT) 福島地震				
M	深さ [km]	緯度/経度 [°]	地震タイプ	天候
5.7	28	36.69 / 137.89	横ずれ断層	晴れ

解析手法

ウェーブレット解析

大気電界・VLF 帯送信電波電界振幅の時間波形データに連続ウェーブレット解析を用いた時間一周波数解析を実施し、地震直前後の振幅波形とスカログラムから特徴的な波動の調査を行った。

ウェーブレット解析により得られたウェーブレットパワーの時間変化 $P(t, \Delta T)$ を用いて、(地震日を除いた) 地震発生前後 10 日の $P(t, \Delta T)$ の中央値を閾値とし、閾値を超えた VLF 変動を異常とみなした。

IGW 伝搬速度の理論値導出と観測値との比較

観測された変動が IGW による異常であることを示すため、式(1)より IGW の群速度を導出し、伝搬時間を求め、予想される異常の観測時刻と実際の観測時刻との比較を行う。図 1 に IGW の伝搬速度と伝搬角度の関係図を、図 2 に本研究において仮定される IGW の伝搬過程の様子を示す。

$$V_{gz} = -C_g \frac{k_x k_z / k_g^2}{(1 + (k/k_g)^2)^{3/2}} \tag{1}$$

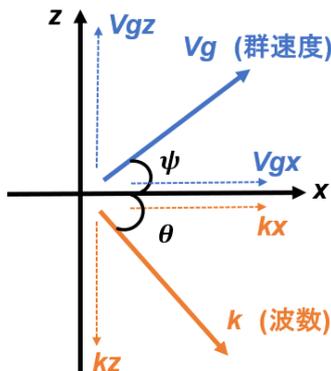


図 1. IGW 伝搬速度と角度の関係

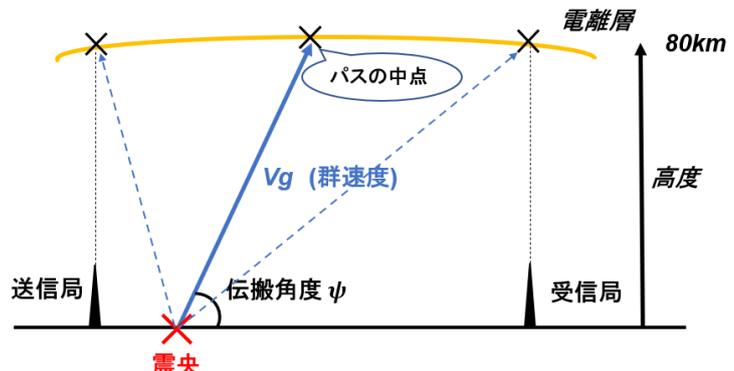


図 2. IGW 伝搬過程の様子

図 1 より IGW の群速度 V_g ベクトルは、 k (波面法線方向) におおよそ直交して伝搬する特徴を有しており、伝搬角度 ψ や波の周期に依存する。そこで IGW の下部電離層到達時間の導出のために、IGW が鉛直上向きに伝搬するときのエネルギーの伝搬速度 (V_{gz}) を導出する。図 2 のように電離層高度を 80 km と仮定し、震央から送信局上空のパス、パスの midpoint、受信局上空のパスまでの 3 つの伝搬角度 ψ における IGW の伝搬時間を計算する。

解析結果

本稿では、地震発生直前後に大気電界に同期した VLF 帯電波異常が確認された事例を示す。図 3 に震央と観測点の位置関係、図 4、5 に解析結果の一部を示す。

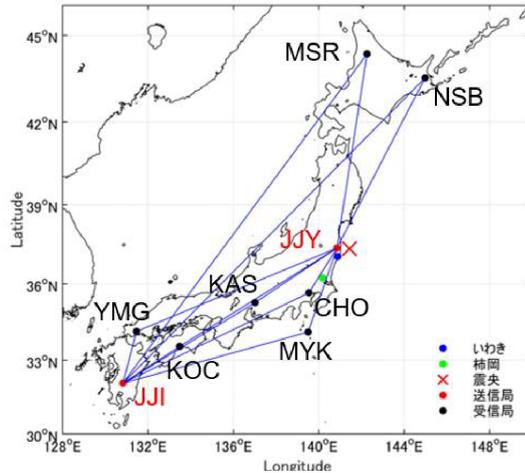


図 3. 震央と観測点の位置情報

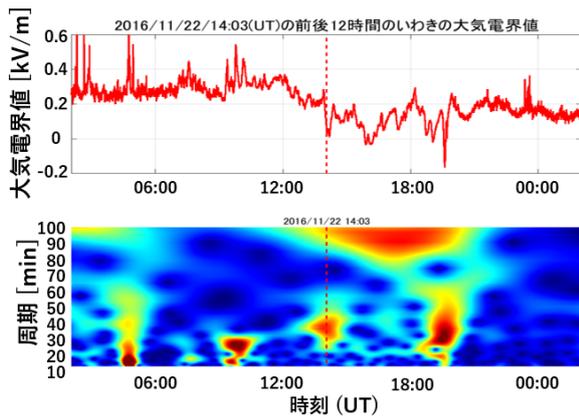


図 4. 地震発生前後 12 時間の
大気電界振幅(上)とスカログラム(下)

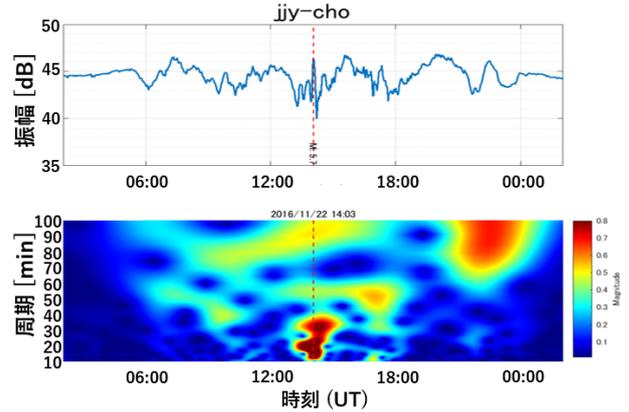


図 5. 地震発生前後 12 時間の JJY(福島)-調布-
VLF 帯送信電波電界振幅(上)とスカログラム(下)

図 4 より、いわきの大気電界観測点では地震発生前後 1 時間中に約 20~40 分、70~100 分周期を有する変動が確認できる。また、柿岡観測点では周期 40~70 分の変動も顕著である。図 5 より、VLF でも大気電界変動と同様の周期に強い変動が確認できる。特に、JJY (福島)-調布、JJY (福島)-三宅島、JJY (福島)-春日井の伝搬路では、地震発生前後 1 時間に周期 20~40 分、地震発生約 2 時間後に周期 40~70 分、約 7 時間後に周期 70~100 分の変動がそれぞれ確認できる。これらの $P(t, \Delta T)$ は、それぞれ閾値(地震前後 10 日の中央値)を超える変動であることが確認できた。さらに、これらの異常は、各パスにおいて同周期、同時間帯に発生している。

式(1)より得られた、IGW の理論的な擾乱発生時間と観測された異常発生時間の比較を行った。地震発生前後 12 時間の電離層擾乱発生時刻 (UT) と波の周期の関係を図 6 に示す。

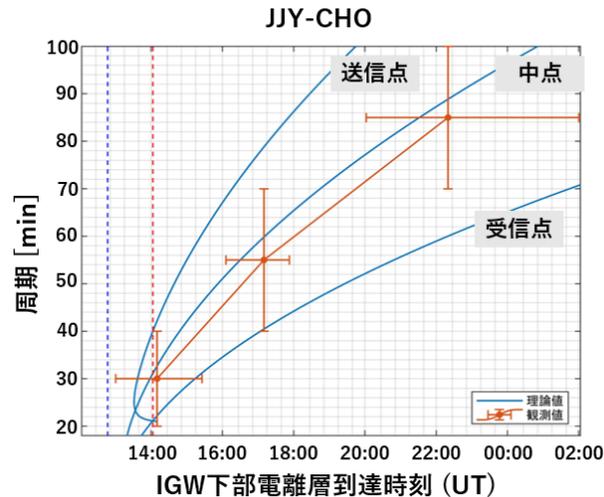


図 6. IGW の下部電離層到達時間の理論値と観測値

図 6 に JJY (福島) - 調布間の VLF 帯送信電波の伝搬路において、震央から発生した IGW の JJY (送信点) 上空、送受信点間の中点、調布(受信点)上空までの 3 通りの伝搬路を考慮した場合の下部電離層到達時間の理論値(青線)を示す。また観測された 3 つの周期帯 (約 20~40、40~70、70~100 分) の異常発生時刻 (橙線) と その周期幅 (縦軸エラーバー)、時間幅 (横軸エラーバー) を同図に示す。周期幅は、異常が観測された 3 つの周期帯 (約 20~40、40~70、70~100 分) を示し、時間幅は、地震当日の $P(t, \Delta T)$ が背景値 (中央値) を超えた時間である。また、赤破線は地震発生時刻を示す。観測された下部電離層擾乱のピーク時刻は理論値に沿う形となり、その周期範囲、異常時間も理論範囲と重なる結果となった。これらの結果から観測された異常は地震発生約 1 時間前 (青破線) に震央付近から発生したと考えられる。以上より、地震発生前に震央付近から発生した IGW が大気電界変動・下部電離層擾乱を引き起こしたことを示唆する結果となった。

まとめ

本研究では、地震発生直後に大気電界変動と同程度の時間周期 20~40、40~70、70~100 分を有する下部電離層擾乱の観測される事例が確認された。また、これらの観測された変動の時間周期は IGW の周期範囲内であり、周期が長くなるにつれごとに観測時刻が遅くなることが確認された。IGW の下部電離層到達時間の理論値と観測値を比較すると、観測値が理論値の範囲内に収まる結果が得られた。さらに、本解析結果から IGW が地震発生約 1 時間前に震央付近から発生し、大気電界変動・下部電離層擾乱を引き起こしたと考えられる。したがって、本解析地震では地震直前の異常においても、地圏-大気圏-電離圏結合過程の大気波動仮説を支持する結果となった。

参考文献

1. K. Misu, M. Watanabe, H. Kikuchi and Y. Hobara, Lower Ionospheric Fluctuations and Atmospheric Electric Field Immediately around Earthquake, URSI-JRSM2022, Tokyo, 1st Sep. 2022
2. T. Nakamura, V. Korepanov, Y. Kasahara, Y. Hobara, and M. Hayakawa, An evidence on the lithosphere-ionosphere coupling in terms of atmospheric gravity waves on the basis of a combined analysis of surface pressure, ionospheric perturbations and ground-based ULF variations, J. Atmos. Electr., 33, 53-68, doi: 10.1541/jae.33.53, 2013
3. Y. Hobara, M. Watanabe, R. Miyajima, H. Kikuchi, T. Tsuda, and M. Hayakawa, On the Spatio-Temporal Dependence of Anomalies in the Atmospheric Electric Field Just around the Time of Earthquakes, Atmosphere 2022, 13, 1619, doi.org/10.3390/atmos13101619, October 2022

Precursor signals before large ($M > 7$) earthquakes- summary from our study-
K.-I. Oyama^{2,3}, C. H. Chen¹, H. K. Juang^{4,5}, and U. Das⁶,

1. International Research Center for Space and Planetary Environmental Science,
Kyushu University, Fukuoka, Japan
2. Ltd. Asia Space Environment Research Consortium, Kanagawa, Japan
3. Department of Earth Science, National Cheng Kung University, Taiwan
4. Institute of Earth Science, Academia Sinica, Taiwan.
5. Department of Geosciences, National Taiwan University, Taiwan.
6. Physics Division, Indian Institute of Information Technology, Kaly

The paper overviews our earthquake study which is still continuing since 2005, and describes tasks to be done from now.

Precursor signals have been reported by many people so far. Dr. In 2005, Dr. Pulinetz, Russia, asked me to check the ionosphere before large earthquakes. I felt a little bit reluctant about the existence of the abnormal behavior of the ionosphere at that time. However, as his words were always in me, we started by the help of Prof. I. Kutiev, visiting from Bulgaria, to find the abnormal behavior (different from our common knowledge about ionosphere) of electron temperature (T_e) and electron density (N_e), which were measured HINOTORI satellite (inclination, 31° , perigee/apogee, 576km/644km, launched on 21 February 1981). We found the overshoot of T_e which usually appears in the afternoon from low to mid latitude partly disappears or totally disappears. Usually in the daytime ionosphere F region and Topside ionosphere, N_e increases causes T_e decrease. We found when overshoot of T_e disappears or partially disappears, no change of N_e in our study. However, this finding might not be used to identify the epicenter in the future., although we can tell roughly the epicenter, but not exact.

Data analysis observed with Dynamics Explorer 2 (DE 2) (3 Aug, 1981-15 Feb. 1983, Inclination 89.99° ; Periapsis 309 km, apoapsis, 1012 Km, <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>.) was conducted by Dr. Kakinami, currently Prof. of Hokkaido Information University. As the main scientific purpose of DE 2 satellite is to study high latitude phenomena, it was quite difficult to find the orbits which is useful for the earthquake analysis, because most of the earthquake often occurs in mid-and low latitude. Never the less, we could find 3 set of earthquake data which consists of Langmuir probe (N_e/T_e), Retarding Potential Analyzer (NO^+ , O^+ density, T_i), and drift meter (3 components of plasma drift).

Our study shows that the minimum of O^+ density occurs over the epicenter as well as geomagnetic equator. The minimum which is found far from the epicenter (but still under the influence of earthquake) gradually approaches the epicenter as the earthquake day approaches. The original minimum of Equatorial Ionization Anomaly (EIA) seems to be pulled back to the epicenter just before the earthquake. The study shows that the epicenter and the day of earthquake occurrence can be identified about 5 days before the earthquake. The essential point of the finding of the epicenter as well as the day of occurrence is that the height of the satellite orbit should be lower than 300 km, where neutral wind and natural electric field does not disturb the picture originally produced by the earthquake.

A giant earthquake which occurred on 11 March 2011 provides us a lot of information about the precursor.

We started the data analysis acquired by Defense Meteorological Satellite Program (DMSP), F15(Sunsynchronous 850km, 17 Dec 1999-18 Oct.2021) (<https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/dg4msp>, or <https://nssdc.gsfc.nasa.gov>).

In spite of the high-altitude orbit which we did not expect much, we found the followings; 1.the deepening of the midlatitude trough 2. its equatorward movement, and enhancement of O⁺ density over the geomagnetic equator.

After we finished satellite data analysis, we shifted our main tasks to study ionosphere observation from the ground, because low earth orbit satellite by which we can identify does not exist. Many reports have been published, especially about NmF2 and TEC. Most of the papers discuss the deviation from the averaged value with respect to the days. However, we found the following.

The precursor is not one day signal: very often the NmF2 precursor feature at one station shows the gradual increase before earthquake, and shows the peak and then reduces again, while another ionosonde station, the NmF2 shows a minimum on the day when NmF2 shows the peak. In order to confirm the precursor feature, many stations along the latitude, especially needed, together with space weather data, at least Dst, Kp and F10.7. One issue to be noted is that the period of two days appears in NmF2, depending on the geomagnetic latitude of the station.

After we get our own morphology on the ionosphere, we moved to try the mechanism of ionosphere disturbance. We have started the study of atmospheric temperature. According to the study of Wenchuan earthquake, the neutral temperature observed by TIMED satellite show the good relationship with NmF2. For Tohoku-Oki earthquake, the deviation of the temperature from the average height profile shows the maximum in the epicenter region as well as around the earth quake preparation period.

After we acquire the influence of the atmosphere parameters on the ionosphere, we moved to study the ground motion, because we believe that the ground motion is one strong candidate to disturb atmosphere. Recently we are studying the vertical ground motion by using Hi-Net data. The Power spectrum density calculated from the raw slant gauge data shows the good correlation with NmF2, suggesting the possible contribution to the atmosphere. What is not known yet is the evidence of the vertical ground motion which modify the electric field. We are now trying to find the ground motion which simultaneously moves in phase over the wide area by using GNSS data.

MF 帯放送波の受信可能時間遅延と地震発生との関連性解析

後藤悠希, 本島邦行

群馬大学大学院, 理工学府

要旨

日本列島は複数の海洋及び大陸プレートの境界線上に位置することから、世界有数の地震大国である。2011年に発生した東日本大震災をはじめ、大規模地震によって日本は人命や建造物に甚大な被害を受けている。このような地震による被害を最小限に食い止めるためには事前の避難などの対策が必要不可欠であり、そのためには地震の短期的予測の実現は極めて重要な課題である。地震の短期的予測として、電磁気学的現象と地震発生の関連性について数多くの結果が報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。群馬大学では、地震予測の実現のために多種多様な放送波を観測して伝搬異常と地震発生との関連性について探求している。

本稿では、群馬大学で観測している MF 帯放送波より伝搬異常を定義し、伝搬異常と地震発生の関連性について統計的に評価を行う。

1. はじめに

群馬大学では、見通し内 VHF 帯放送波や見通し外 MF 帯放送波の受信電力を観測することで、伝搬異常と地震発生との関連性を統計的に解析している⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。MF 帯放送波の伝搬には電離層が深く関係していることが知られている。また、電離層の D 層は夜間には消失することから、MF 帯放送波は昼間には受信不可能であった電波が夜間に E 層で反射され遠方にまで伝搬する。そこで本稿では、電離層 D 層の消失によって受信が可能となった時刻 (Receivable Time より以下、RT と称する) を定義し、RT が日没時刻よりも遅れる現象を伝搬異常と考え、地震発生との関連性について評価を行う。以下の図 1-1,1-2 に通常時と RT が遅れている場合の受信電力変化の比較を示す。

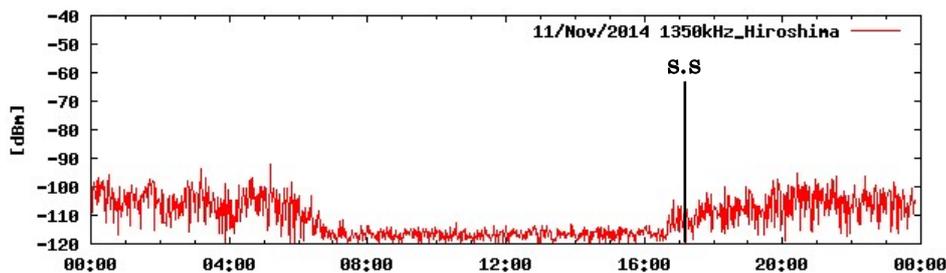


図 1-1 受信電力変化 (通常時) [1350kHz 広島県 RCC 中国放送 2014/11/11]

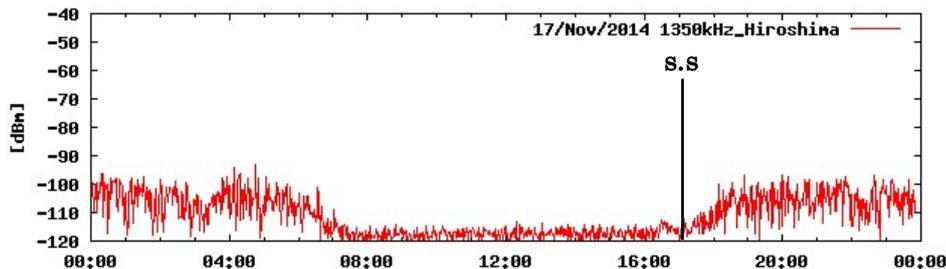


図 1-2 受信電力変化 (RT 遅延) [1350kHz 広島県 RCC 中国放送 2014/11/17]

図 1-1 においては日没時刻に既に電波が受信できているのに対し、図 1-2 では日没時刻を過ぎてから受信電力が上昇していることがわかる。このような現象が観測された 5 日後には長野県北部において M 6.7 の地震が発生している。本稿ではこのように日没時刻を基準に RT が遅延する現象と地震発生との関連性について統計的に評価する。

2. 観測データ

本稿では、広島県江田島市に置かれている中国放送沖美ラジオ送信所を送信点とした 1350kHz RCC 中国放送の受信電力を解析対象データとして取り扱った。また、解析期間は 2008 年 7 月 1 日から 2018 年 6 月 30 日までの 10 年間としているが、東日本大震災の計画停電による観測停止期間及び地震頻発のため、正当な解析ができなかった 2011 年 3 月 11 日から 2011 年 8 月 31 日までの期間を解析対象外とする。

3. 受信可能時刻 (RT : Receivable Time)

本稿の主題である受信可能時刻 (RT) を次のように定義する。

- 手順 1. 全解析期間の昼間 (09:00~15:00) の受信電力からノイズフロアの平均受信電力 (μ) を算出する。
- 手順 2. $\mu + 3\sigma$ の数値を閾値とし、受信電力がその数値を超えた場合をノイズフロアに対する異常と考え、記録する。
- 手順 3. 記録されたデータの内、あるデータから 30 分以内のものは連続した異常であるとする。
- 手順 4. MF 帯放送波において、往々にみられる日没時刻以前に一時的に受信電力が上昇する現象を取り除くために手順 3 の連続したデータ群の内、最初の値から最後の値が観測されるまでの時間が 2 時間半以上のもののみを抽出する (1 日 1 データごとに抽出される)。
- 手順 5. 手順 4 で抽出されたデータ群それぞれの初めの時間を受信可能時刻 (RT) とする。

4. 熊本地震の前兆現象

地震発生前に RT が遅延する現象について代表的な例として 2016 年に発生した熊本地震を挙げる。

熊本地震前後の日没時刻と RT との時間差 Δt [分] の日変化のグラフを以下の図 2-2 に示す。なお、日没時刻を 0 とし、RT が日没時刻以前のときを“-”、日没時刻以後のときの Δt を“+”とする。

また、送信点 (中国放送沖美ラジオ送信所) と受信点 (群馬大学桐生キャンパス) の位置関係を右図 2-1 に示す。

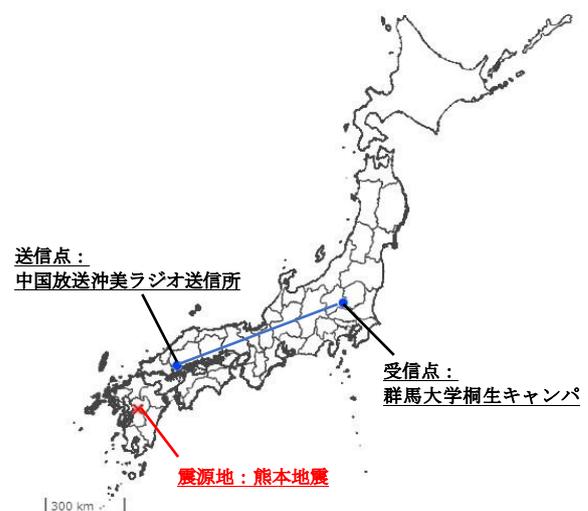


図 2-1 送受信点の位置関係

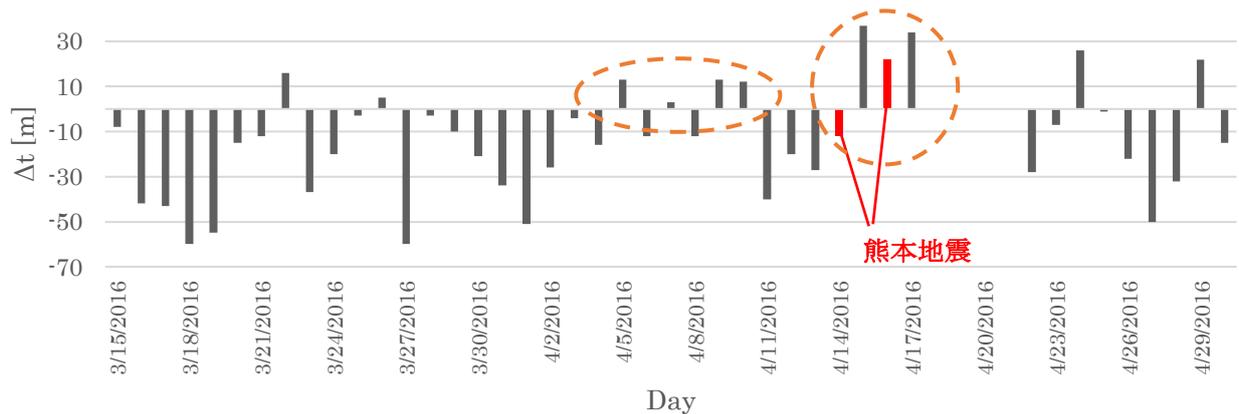


図 2-2 日没時刻と RT との時間差 Δt [分] の変動

図 2-2 より、熊本地震発生の 9 日前から RT が遅延する現象がたびたび見られていることがわかる。それに加え、地震発生後の 2016 年 4 月 15 日からの 3 日間は日没時刻から 20 分以上後ようやく電波が受信可能となっていることがわかる。

この熊本地震のような事例が他の地震に対しても確認されたため、Molchan's Diagram を用いて両者の関連性を統計的に評価する⁽⁶⁾。

5. 解析対象地震

RT の遅延と地震発生との関連性を解析するために解析対象地震を定める。MF 帯放送波は、夜間に電離層で反射することで受信点まで伝搬する。電離層に影響を与える地震は、電離層反射点周辺且つ、規模が大きいものであるという前提のもと、「反射点からの距離：500 [km 以内]」、「マグニチュード：5.5 [以上]」の 2 つの条件を定めた。また、海洋域を震央とする地震は電離層への影響は少ないとして解析対象外とした。

6. 評価方法

本稿では、RT の遅延と地震発生との関連性について統計的に評価するために、横軸を警報分率(Alarm rate)、縦軸を予知率(Prediction rate)とした Molchan's Diagram を用いる。

警報分率(Alarm rate)とは、「総解析期間に対する総警報期間」の割合のことを指し、以下の式であらわされる。

$$\text{警報分率} = \frac{\text{総警報期間}}{\text{総解析期間}} \quad (1)$$

ここで言う警報期間とは、RT が可変閾値を超過した際に、前述の解析対象地震との関連の有無を図る期間のことを指し、本稿ではこの警報期間のことを Warning window と呼称する。また、各日の RT から Warning window までの期間を Lead time とする。

そして予知率(Prediction rate)とは、「解析対象地震数に対する伝搬異常を伴う地震数」の割合のことを指し、以下の式で表される。

$$\text{予知率} = \frac{\text{伝搬異常を伴う地震数}}{\text{解析対象地震数}} \quad (2)$$

7. 解析結果

以下の表 1 の条件のもと、日没時刻と RT との時間差 Δt を日没時刻 0 (基準) として可変閾値を設けることで得られた結果を以下の図 3-1, 3-2 に示す。なお、赤線は 97.5%信頼線を、青線は 2.5%信頼線を示しており、これらの線の間の区間が 95%信頼区間を示している。また、対角線で示している黒線 (対角線) は、ランダムな予測 (伝搬異常と地震が無関係) を示している。

表 1 解析条件

放送波	1350kHz 広島県 RCC 中国放送	
送信点	広島県中国放送沖美ラジオ送信所	
受信点	群馬大学桐生キャンパス	
解析期間	2008 / 07 / 01 ~ 2018 / 06 / 30	
解析対象外期間	2011 / 03 / 11 ~ 2011 / 08 / 31	
電離層での反射回数 [hop]	1	
地震条件	マグニチュード [以上]	5.5
	電離層反射点からの距離 [km以内]	500
	海岸線からの距離 [km以内]	0
対象地震数	19	
Lead time [日間]	5	
警報期間 (Warning window) [日目]	6 ~ 9	

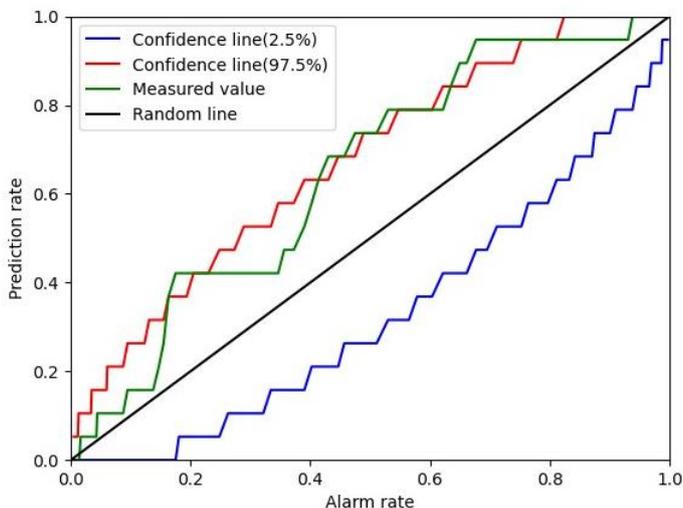


図 3-1 Molchan's Diagram

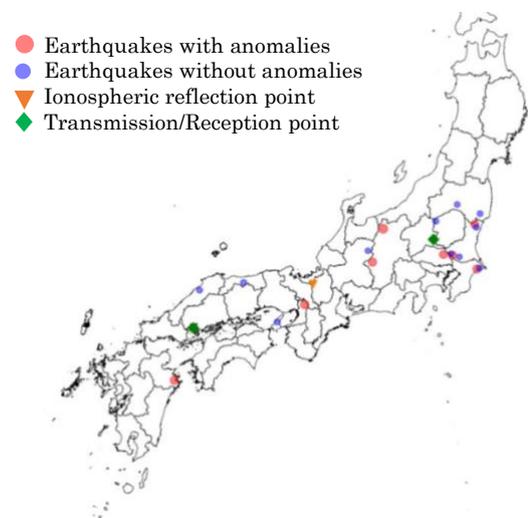


図 3-2 地震分布

図 3-1 より、97.5%信頼線を超える警報分率が存在することが確認できる。したがって、Molcahn's Diagram による確率的な評価においても RT の遅延と地震発生との間に関連性が存在すると考えられる。また、表 1 の Lead time と Warning window より、地震発生のおよそ 1 週間前に RT の遅延が生じていることがわかる。これは、前述の熊本地震の前兆現象とも一致している。

8. むすび

本稿では、MF 帯放送波の観測データから独自の手法により受信可能時間 (RT) を定義し、地震発生との関連性について検討した。第 4 節及び第 7 節より、MF 帯放送波の RT の遅延と地震発生との関連性を示唆する結果を得ることができた。本稿で取り上げた現象は電気通信大学の早川正士教授が VLF 波において発見されたターミネータ・タイムのずれに類似した現象ではないかと考えている⁽⁷⁾。今後の課題としては、本学で MF 帯放送波において従来解析を行っていた日没時刻前に生じる伝搬異常と統合した関連性解析などが挙げられる。

9. 謝辞

本研究で扱っている地震データは気象庁から拝借していることを付記し、関係者各位により心より感謝いたします。

10. 参考文献

- (1) Fujiwara, H., Kamogara, M., Ikeda, M., Liu, J.Y., Sakata, H., Chen, Y. I., Ofuruton, H., Muramatsu, S., Chuo, Y. J., and Ohtsuki, Y. H.: Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L17110, doi:10.1029/2004GL019865, 2004.
- (2) Hayakawa, M., Kawate, R., Molchanov, O. A., and Yumoto, K.: Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 241-244, doi:10.1029/95GL02863, 1996.
- (3) 本島邦行, “見通し内 VHF 帯伝搬異常と異常発生との統計的関連性”, *Journal of Atmospheric Electricity*, vol.31, no.1, 講演番号 37-49, 2011
- (4) 小池雄大, “見通し外 MF 帯放送波の伝搬異常と大規模地震の関連性解析”, 日本地震予知学会, 第 7 回講演番号 20-11
- (5) 竹澤直樹, “MF 帯放送波の日没時伝搬異常と地震発生との関連性解析”, 日本地震予知学会, 第 8 回講演番号 21-03
- (6) Peng Han et al., “Evaluation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kakioka, Japan by using Molchan’s error diagram” *Geophys. J. Int.*, vol.208, pp. 482-490, 2017.
- (7) HAYAKAWA, M. Precursory signature of the Kobe earthquakes on VLF subionospheric signal. *J. Atmos. Electr.* 1996, 16, 247-257

VHF 帯放送波の電波伝搬路に対する伝搬異常を伴った地震の分布

櫻井豪流、本島邦行

群馬大学大学院 理工学府

1, はじめに

日本列島はその地理的特徴から世界有数の地震大国として知ら、近年では東日本大震災や熊本地震などの巨大地震が甚大な被害をもたらした。地震の被害を抑える方法は様々な分野で研究されており、中でも短期的な地震の予測は人的、物的被害を低減できる有効な手段であるため、その実現を強く望まれている。

地震発生前の予兆現象の1つとして電波伝搬異常(以下、「伝搬異常」と呼称する)があり、これまでに地震との関連性を示唆する報告が多数行われている^{[1][2]}。群馬大学では、見通し内 VHF 帯放送の伝搬異常と地震の関連性を統計的に解析している^{[3][4]}。従来では解析に用いる地震の選定を、「伝搬路に近い地震が電波伝搬に影響を及ぼす」との仮定のもと選定してきたが、近年解析を進める中で従来想定された程このような傾向が強くはないことが判明してきた。

本稿では単一 VHF 帯放送波の伝搬路と伝搬異常を伴った地震の位置関係を明らかにし、その関係について報告する。

2, 従来解析の地震選定方法

従来における単一 VHF 帯放送波の伝搬異常と地震の関連性解析に用いる地震の選定方法を述べる。これまでは図 1-1 に示すような電波伝搬経路に対して等距離になるようなトラック状の選定範囲を用いて解析対象の地震選定を行ってきた。

一方で複数放送波の解析においては図 1-2 に示すような単一放送波の組み合わせの地震選定範囲を用いてきた。

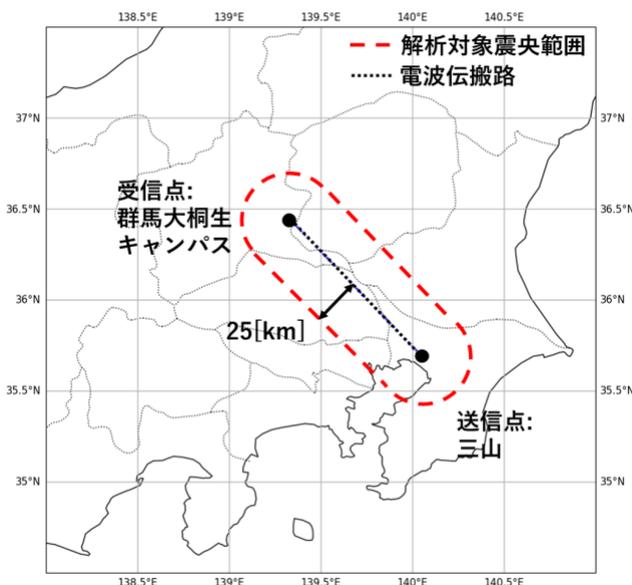


図 1-1, 単一放送波の地震選定範囲(従来法)

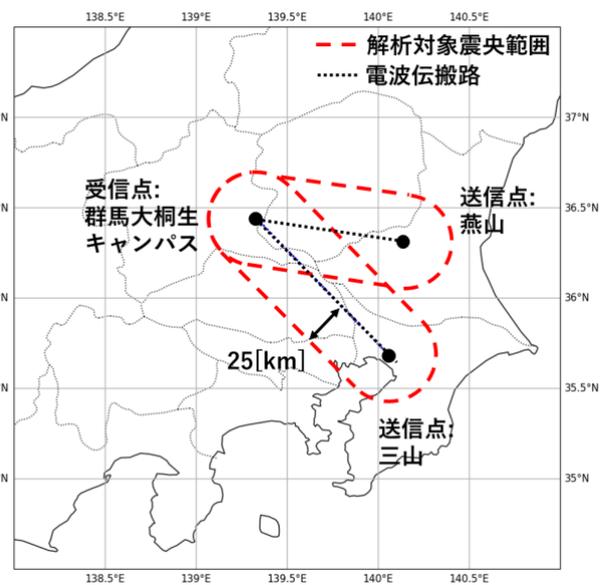


図 1-2, 複数放送波の地震選定範囲(従来法)

先行研究において複数放送波で同時に伝搬異常が生じた際の地震との関連性は単一放送波ほど強い関連性が見られないという結果が得られている^[5]。

このことから伝搬路に対して、従来の単一放送波の解析で用いた震央の選定対象範囲が選定範囲として適切ではない可能性が高くなった。このような背景から本稿では伝搬路と伝搬異常を伴った地震の位置関係を地図上にプロットすることで、両者に地理的な位置関係があるのか明らかにする。

3. 観測データ

観測データは全て群馬大学桐生キャンパスにて観測した結果であり、本稿では以下の表 1 に記載している放送波の伝搬路について、地震の分布を確認した。解析対象期間は 2016/1/1 から 2022/12/31 としている。

表 1,解析対象放送波

周波数[MHz]	放送局	送信所	伝搬距離[km]
80.0	FM東京	東京タワー	91.5
80.7	NHKFM千葉	千葉県三山	102.3
82.5	NHKFM東京	東京スカイツリー	89.7
83.2	NHKFM茨城	茨城県燕山	60.0

4. 伝搬異常の判定法

本稿では観測した受信電力が正規分布に従っていることを前提とした標準偏差(以下、 σ 値と呼称する)を用いた伝搬異常の判定法を採用した。本判定では正規分布における 3σ 区間を超えた受信電力の変動が連続して 1 時間以上続いたときに、その期間を伝搬異常と判定する手法である。図 2 は検出した伝搬異常の一例である。青線が受信電力、オレンジ線が $+3\sigma$ 線、緑線が -3σ 線である。なお σ 値は昼夜間で分散が異なるため、1 日を 5 分毎の時間帯に分け、各々の σ 値算出を行った。

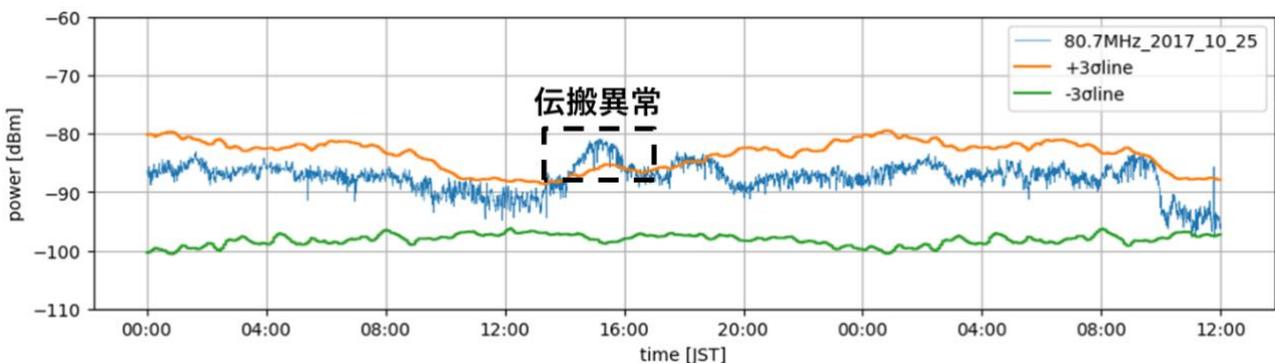


図 2,伝搬異常の一例(80.7MHz NHKFM 千葉 2017/10/25)

5. 解析対象地震の選定

伝搬異常と関連があると判断される地震の選定を行う。今回の目的は伝搬路に対する伝搬異常を伴った震央の分布を調べることであるため、2 節で述べたトラック形状の選定範囲内だけではなく、関東(1 都 6 県)内陸の地震全てを対象として選定を行った。また地震の選定条件としてマグニチュードは 4.5 以上、震源の深さは 150[km] 以浅で選定を行った。図 3 は解析期間内のマグニチュード 4.5 以上、震源の深さが 150[km] 以浅の地震の分布図である。対象となる地震数は 75 であり、大陸及び海洋プレートの分布上地震の発生する地域が偏っている。

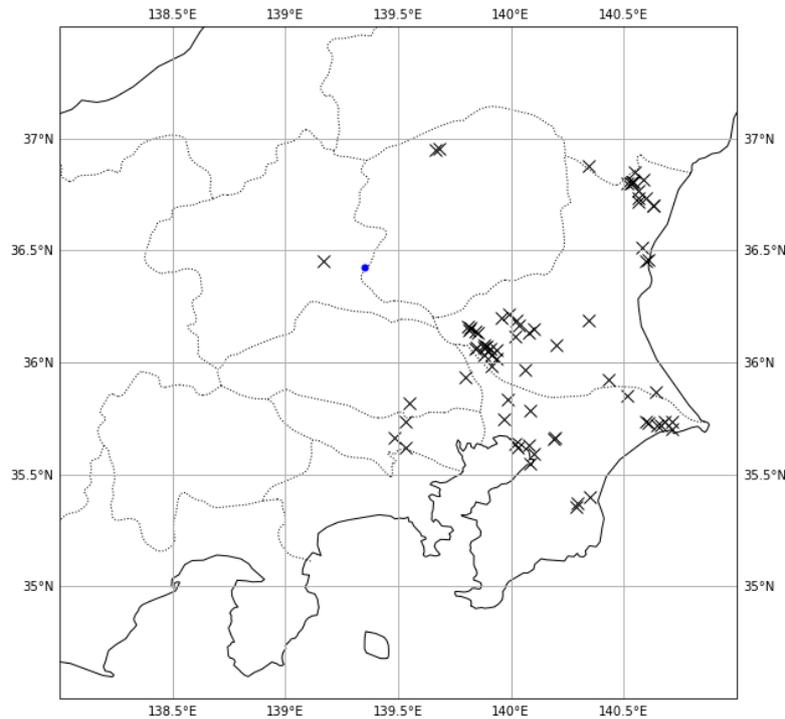


図 3, 解析対象地震の震央分布

6. 関連付け期間長と警報期間の設定

先行研究より伝搬異常が発生してから、数時間から数日が経過した後に地震の発生確率が高くなることが確認されている。そこで伝搬異常と地震を関連付ける関連付け期間長と警報期間を設定する。

まず関連付け期間長とは伝搬異常の終了時刻から、一定の期間内に地震が発生する仮定の下で設定される時間のことである。本稿においては関連付け期間長を 7 日に設定した。また伝搬異常の条件を満たした時刻から関連付け期間長の終了時刻までを警報期間とする。この警報期間内に地震が発生した場合、その地震を「伝搬異常を伴って発生した地震」と判断する。

7. 解析結果

本節では 3 節で示した 4 つの放送波について、各伝搬路と伝搬異常を伴った地震の分布を示す。解析の条件を表 2 に示す。解析対象の放送波は 2 節の表 1 の 4 波である。

表 2,解析条件

関連付け期間長	地震条件			対象地震数
	マグニチュード	選定範囲	震源の深さ[km]以内	
7日	4.5以上	関東(1都6県)	150	75

図 4 に各放送波の伝搬路と地震の分布を示す。黒×点は伝搬異常と関連のなかった地震、赤星点は伝搬異常を伴って発生した地震である。青点線が各放送波の伝搬路である。

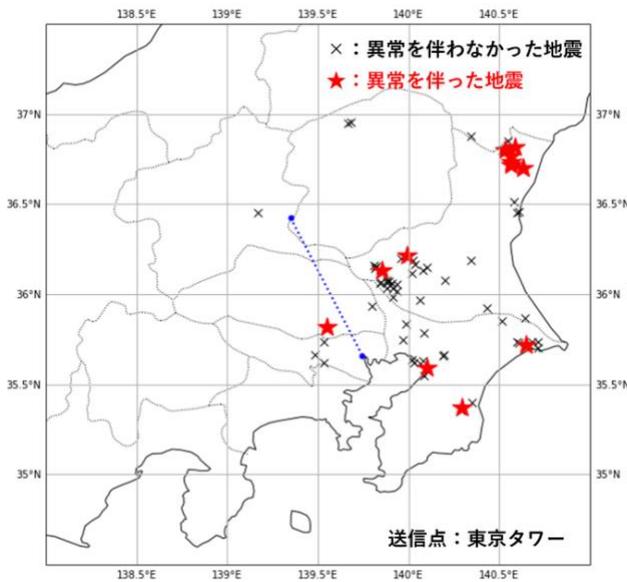


図 4-1,80.0MHz FM 東京

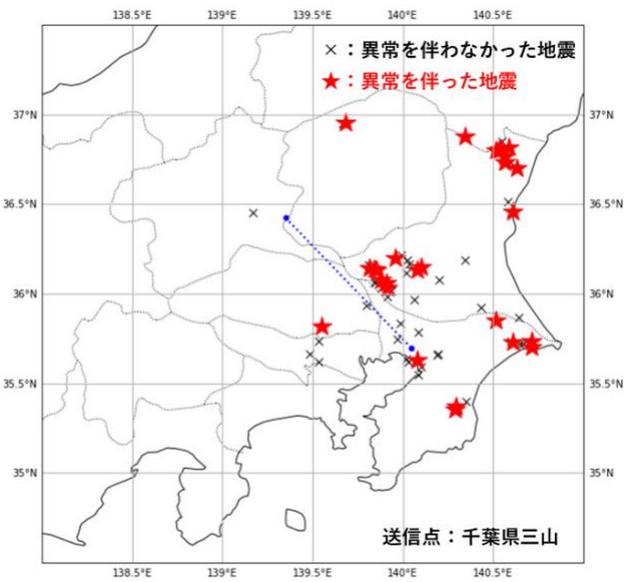


図 4-2,80.7MHz NHKFM 千葉

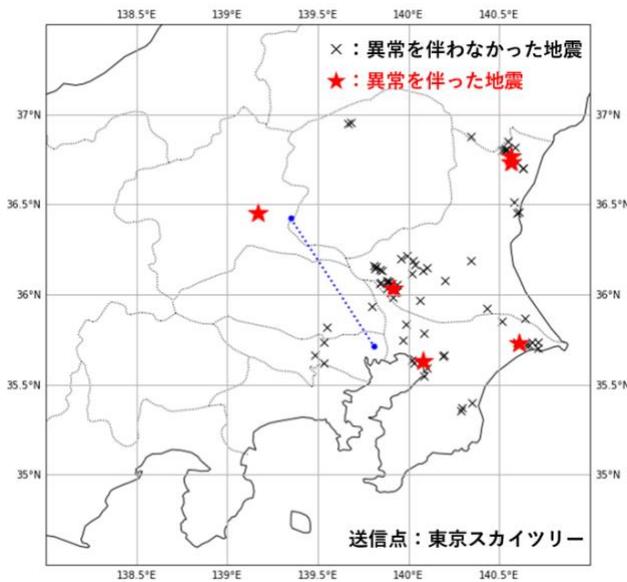


図 4-3,82.5MHz NHKFM 東京

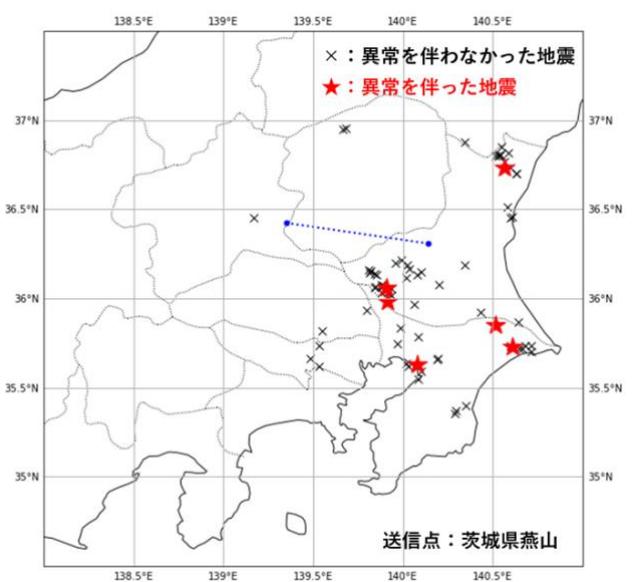


図 4-4,83.2MHz NHKFM 茨城

以上の結果より伝搬異常を伴った地震の数の違いはあるが伝搬路に対する地震の分布は従来想定されていた程、電波伝搬路近傍のエリアに対して集中していないことが見て取れる。従って伝搬路と伝搬異常を伴う地震の位置関係は、従来想定されていた程関連性が強くないと考えられる。

8. むすび

本稿では見通し内 VHF 帯放送波の受信データから 3σ 値を用いた異常判定法で伝搬異常を定義し、伝搬路と伝搬異常を伴った地震の間に地理的な位置関係があるのか確認した。本稿 7 節より、4 つの放送波についてこれを追求したが、いずれの放送波についても伝搬路と地震の間には従来想定されていた程の関連性は明確には見られなかった。

謝辞

本稿で扱った地震のデータは気象庁から拝借していることを付記し、関係者各位に心から感謝致します。

参考文献

- [1] Fujiwara, H., Kamogara, M., Ikeda, M., Liu, J.Y., Sakata, H., Chen, Y. I., Ofuruton, H., Muramatsu, S., Chuo, Y. J., and Ohtsuki, Y. H., "Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences", *Geophys. Res. Lett.*, 31, L17110, doi:10.1029/2004GL019865, 2004
- [2] Yoshio Kushida, Reiki Kushida, "POSSIBILITY OF EARTHQUAKE FORECAST BY RADIO OBSERVATIONS IN THE VHF BAND", *J. Atmos. electr.*, vol. 22, pp. 239-255, 2002
- [3] 本島邦行, "見通し内 VHF 帯伝搬異常と異常発生との統計的関連性", *Journal of Atmospheric Electricity*, vol. 31, No. 1, pp37-49, 2011
- [4] 小暮佑哉, "気象現象による影響を考慮した見通し内 VHF 帯放送波の伝搬異常と地震の関連性解析", 日本地震予知学会, 第 5 回学術講演会アブストラクト集 p39-42
- [5] 岩本正樹, "見通し内 VHF 帯放送波の伝搬異常と地震発生との関連性解析", 日本地震予知学会, 第 8 回公演番号 20-10

静止衛星を用いた地震直前の MSTID 伝搬遅延 および伝搬逆転の検出

津坂 悠太¹⁾, 梅野 健²⁾

1: 京都大学大学院 情報学研究科 tsusaka.yuta.64c@st.kyoto-u.ac.jp

2: 京都大学大学院 情報学研究科 umeno.ken.8z@kyoto-u.ac.jp

要旨

本研究では、2019 年から 2021 年にかけて発生した M6 以上の地震を対象に、中規模移動性電離圏擾乱、通称 MSTID の地震直前の伝搬の様子を解析する。その際、静止衛星 QZS-3 から得られる TEC の変動成分を抽出するために、相関解析法と band-pass filter をそれぞれ適用し比較することで、結果の整合性を確認した。観測の結果、2019 年 6 月 18 日に発生した山形県沖地震の約 1 時間前に、震央付近で MSTID の伝搬速度が減少していたことがわかり、また 2019 年 1 月 8 日の種子島沖近海地震の発生約 1 時間前には、小規模 TID の伝搬方向の逆転を検出した。これらの結果は、2016 年熊本地震の直前に観測された MSTID の伝搬遅延と同様の結果であり、地震直前の電離圏異常の一種のパターンであることを提案する。

1. 背景

移動性電離圏擾乱 (Traveling Ionospheric Disturbance: TID) は、電離圏電子密度の変動が伝搬する現象で、特に数十分程度の周期を持つ Middle-Scale TID (MSTID) は日本上空の電離圏で頻繁に観測される [1][2]。本研究の主たる先行研究として Umeno et al. 2021 では、2016 年熊本地震の約 40 分前に震源周辺で MSTID の伝搬遅延 (伝搬速度の変化) が発生していたことが報告され、またその速度変化を引き起こす電離圏電場の変化量が定量的に導出された [3]。一方で、Umeno et al. 2021 で報告された MSTID の伝搬異常は熊本地震の事例のみであり、サンプル数を増やし普遍的な現象であるかを検証する必要がある。また電離圏観測に用いられた TEC データは GPS 衛星から算出されているため、衛星軌道による影響を受ける可能性がある点も改善点として挙げられる。

本研究では、2018 年にサービスが開始された日本の準天頂衛星システム (QZSS) 「みちびき」に属する静止衛星 QZS-3 を使用し、衛星軌道の影響を排除する。さらに TID の定常的な伝搬を長時間観測できる状況下で、その伝搬異常の検出を試みる。解析対象は QZS-3 により観測可能な範囲で、2019 年から 2021 年に日本国内で発生した M6 以上の地震とする。

2. 手法

2.1 相関解析法 [4][5]

TEC の変動成分を抽出する方法として Iwata & Umeno 2016, 2017 で提案された相関解析法 (Correlation Analysis: CRA) を適用し、TID を観測する。CRA は複数の観測局データの相関を時間、空間の両方向で取ることによってデータのノイズを除去し、異常信号を抽出する方法である [4][5]。CRA の手順は以下の通りである。

- (i) 中心観測局(観測局 0)と M 局の周辺観測局 (観測局 $i, i = 1, 2, \dots, M$) のそれぞれの TEC 時系列データのサンプルデータとテストデータをそれぞれ $t_{sample}(=2 \text{ [h]})$, $t_{test}(=0.25 \text{ [h]})$ 分用意する。
- (ii) 観測局 i ($i=0, \dots, M$) のサンプルデータを n 次多項式でフィッティングする (本研究は $n=7$)。
- (iii) サンプルデータを近似した多項式から 0.25 [h] 分の予測データを計算し、観測局 i , 時刻 t におけるテストデータとの予測誤差を $X_{i,t}$ とする。
- (iv) 中心観測局の時刻 t における TEC 異常度を、下式のように周辺観測局との相関値 $C(t)$ で定義する。

$$C(t) = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^M \sum_{j=0}^{N-1} X_{0,t_0+t_{sample}+j\Delta t} \cdot X_{i,t_0+t_{sample}+j\Delta t}$$

$$t = t_0 + t_{sample} + t_{test}$$

なお、本研究では $M = 30$ とした。

2.2 Band-pass filter [6]

band-pass filter は先行研究でも TID を検出する手法として用いられている信号処理で、設定した band に対して、その band 内の周波数のみ通過させ他の周波数を遮断 (減衰) させる方法である [6]。図 1 は band-pass filter のイメージである。本研究では、多項式でトレンド除去した TEC に対して band-pass filter を適用し、CRA の結果の整合性を確かめ、さらに両手法の相違点を考察する。

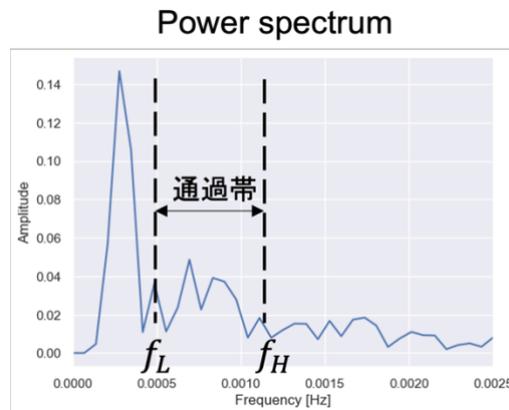


図 1. Band-pass filter の概要図

3. 結果

表 1 に対象地震とそれぞれの解析結果をまとめる。電離圏は太陽活動や磁気嵐に大きく影響されるため、Kp index, Dst index, および太陽活動に関するデータから地震発生前後に地磁気擾乱が発生していたと判断される場合は解析対象外としている。表 1 の対象地震 (2019 - 2021) 発生時に MSTID が観測された地震は 2019 年山形県沖地震のみであり、CRA によって地震発生約 1 時間前に震央付近でローカルに伝搬遅延が生じていたことが検出できた。

表 1. 解析対象の地震における、TID の発生状況と伝搬異常の有無

日付	震央地名	M	深さ	TIDの有無	伝搬異常の有無	Δv	ΔE	異常時間
2019-01-08	種子島近海	6	30 km	小規模TID	伝搬逆転	750.0m/s	12.5mV/m	約1時間前
2019-04-11	三陸沖	6.2	5 km	×				
2019-05-09	日向灘	6.3	25 km	× (8時間前まで)				
2019-06-18	山形県沖	6.7	14 km	MSTIDが発生	伝搬遅延	30.0 m/s	0.50mV/m	約1時間前
2019-07-27	三重県南東沖	6.6	393 km	×				
2019-08-28	青森県東方沖	6.1	21 km	×				
2020-04-19	宮城県沖	6.2	46 km	×				
2020-05-03	薩摩半島西方沖	6.2	9 km	×				
2020-06-24	千葉県東方沖	6.1	36 km	× (4時間前まで)				
2020-09-12	宮城県沖	6.2	43 km	×				
2020-12-20	青森県東方沖	6.5	43 km	× (12時間前まで)				
2021-03-20	宮城県沖	6.9	59 km	磁気嵐発生 (対象外とする)				
2021-09-13	東海道南方沖	6	385 km	小規模TID	伝搬遅延	107.0 m/s	1.78mV/m	約1時間前
2021-12-09	トカラ列島近海	6.1	14 km	×				

図 2 は CRA 及び band-pass filter による、山形県沖地震発生時の MSTID の伝搬の様子を示している。MSTID は南西方向へ伝搬していたため、図 2 の縦軸はある基準線からの南西方向への伝搬距離を表している。左図に示す CRA の結果から、MSTID の伝搬遅延（傾きの減少）が発生していたことがわかる。一方で、右図の band-pass filter では明らかな伝搬遅延は検出できず、他の band に対しても検証したが、同様に検出することはできなかった。減速前と減速後の TID を通過させる適切な band を設定できないことが原因として考えられる。

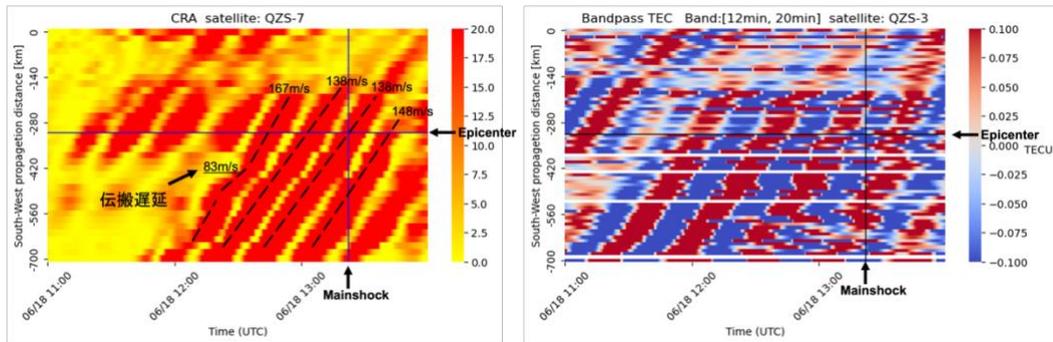


図 2. 2019 年山形県沖地震の発生直前の MSTID の伝搬の様子. 左図は CRA、右図は band[12min, 20min]における band-pass filter の結果である。縦軸は南西方向の伝搬距離である。

また、MSTID ほど TEC の変動幅が大きくはないものの、小規模な変動が地震発生時に伝搬していたものも存在していた。表 1 に示している 2019 年種子島近海地震及び 2021 年東海道南方沖地震がその地震で、2021 年東海道南方沖地震は伝搬遅延、2019 年種子島近海地震においては伝搬方向の逆転がそれぞれ約 1 時間前に発生していた。図 3 は CRA 及び band-pass filter による、2019 年種子島近海地震発生時の MSTID の伝搬の様子を示している。CRA の相関値（変動成分）が比較的小さい TID が、10:00 UT 周辺で南西方向へ伝搬する様子が見られた。さらに地震発生約 1 時間前に、その伝搬方向が震央周辺で逆転する現象が CRA と band-pass filter の両手法で検出できた。2019 年山形県沖地震の場合（図 2）とは異なり、band-pass filter でも伝搬異常（速度変化）が検出できた理由として、速度変化の前後で方向は逆転した一方で、速度の大きさが比較的

近い値だったため変化前後の TID を検出可能な band が存在したことが考えられる。以上より、適切な band を与えれば band-pass filter でも TID の速度変化を捉えられる場合もあるが、それが困難な場合もあるため、CRA は速度変化をより汎用的に検出できることができる手法であることが示唆される。この性質はリアルタイム観測の実装においても重要となる。

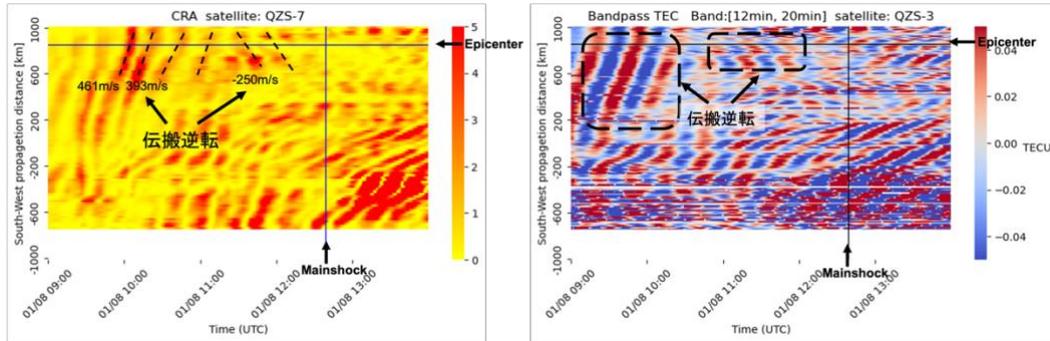


図 3. 2019 年種子島近海地震の発生直前の MSTID の伝搬の様子。左図は CRA、右図は band [12min, 20min] における band-pass filter の結果である。縦軸は南西方向の伝搬距離である。

4. 議論

本章では、山形県沖地震と種子島近海地震の場合で、TID の伝搬異常を引き起こすために必要な電離圏電場の変化量を推定する。Umeno et al. 2021 では、TID の定常速度からの変化量 Δv と電離圏電場の変化量 ΔE が、プラズマ方程式から近似的に式 (1) のように導出されている。

$$\frac{\Delta v}{\Delta E} = \frac{e}{m_i \Omega_i} \simeq 6 \times 10^4 \text{ T}^{-1} \quad (1)$$

式 (1) から推定した電場変化量は表 1 に示しており、山形県沖地震の例では約 0.50mV/m となっている。これは、Umeno et al. 2021 で報告された 2016 年熊本地震の 0.58mV/m や、2011 年東北沖地震の 0.50mV/m (Kelley et al. 2017 [7], Heki 2021 [8]) と同等であり、先行研究と一貫性のある結果となっている。

地震直前に電場が変化する原因については、地殻の応力変化に伴う圧電効果やラドン放出などの様々な仮説が提案されている。Mizuno & Umeno 2022 は、地殻内の水が高温高压下において超臨界状態になることにより、地殻層の電圧変化が生じることを提案している[9]。

今後も、継続的な観測や実験からメカニズムを解明していく必要があると同時に、リアルタイム検知などの社会実装も進めていく必要がある。

5. 結論

今回、2019 年山形県沖地震をはじめに M6 以上の複数の地震において、地震発生 1 時間前程度のタイムスケールで TID の伝搬速度変化を検出した。また、CRA と band-pass filter の結果を比較し、CRA は TID の速度変化の検出においてはより汎用的な手法であることを示した。本研究の結果も踏まえ、今後はメカニズムの解明やリアルタイム検知の実装が課題となる。

参考文献

- [1] Tsugawa, T., Kotake, N., Otsuka, Y., and Saito, A. (2007, March). Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS receiver network in Japan: A short review. *GPS Solutions*, 11 (2), 139–144. doi: 10.1007/s10291-006-0045-5
- [2] Otsuka, Y., Suzuki, K., Nakagawa, S., Nishioka, M., Shiokawa, K., and Tsugawa, T. (2013, February). GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe. *Annales Geophysicae*, 31 (2), 163–172. doi: 10.5194/angeo-31-163-2013
- [3] Umeno, K., Nakabayashi, R., Iwata, T. and Kao, M.H. (2021), Capability of TEC correlation Analysis and Deceleration at Propagation Velocities of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances: Preseismic Anomalies before the Large Earthquakes, *Open Journal of Earthquake Research*, 10, 105-137. <https://doi.org/10.4236/ojer.2021.104008>
- [4] Iwata, T. and Umeno, K. (2017), Preseismic ionospheric anomalies detected before the 2016 Kumamoto earthquake, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 3602–3616, doi:10.1002/2017JA023921.
- [5] Iwata, T., and Umeno, K. (2016), Correlation analysis for preseismic total electron content anomalies around the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 8969–8984, doi:10.1002/2016JA023036.
- [6] Pedatella, N. M., Lei, J., Thayer, J. P., and Forbes, J. M. (2010). Ionosphere response to recurrent geomagnetic activity: Local time dependency. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A2).
- [7] Kelley, M. C., Swartz, W. E., and Heki, K. (2017). Apparent ionospheric total electron content variations prior to major earthquakes due to electric fields created by tectonic stresses. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(6), 6689-6695.
- [8] Heki, K. (2021). Ionospheric disturbances related to earthquakes. *Ionosphere Dynamics and Applications*, 511-526.
- [9] 水野彰, 梅野健 (2022) 地殻-電離層の電氣的結合モデルの一考察. 日本地震予知学会 2022 年度学術講演会

地殻変動異常のリアルタイム検出法の検討

田中宏樹

京都大学大学院情報学研究科

要旨

電離圏異常の検出に用いられる相関解析の方法を地殻変動解析に適用し、地殻変動の異常をリアルタイムに検出する方法について、特にその前後の地震活動と統計的に比較した結果を中心に報告する。本講演は[1]における既発表を元にした内容となっている。

1. Introduction

地震発生予測はその先行する期間の長さに応じて長期・中期・短期のように区分される[2]。このうち長期予測はよく整備された地震観測網により蓄積される地震活動データをもとに更新過程[2,3]や点過程モデル[4,5]といった確率論を基盤としてリスク評価を行うもので、防災・減災の観点からも地震予測の中で重要な位置を占めている。一方で、地震の短期的予測は、地震という断層面上での高速破壊に短期に先行して現れるかもしれない何かしらの現象を事前に捉えるという、より地震発生そのもののプロセスに着眼した決定論的な発想に基づいている。そのような短期的先行現象と思われる事象がこれまで多数報告されており[6,7]、それらを理論的に説明する試みとして、ダイラタンシー拡散理論[8,9]や、破壊核形成過程[10]に基づいた決定論的な描像[11,12]が提案されてきた[13]。しかし、いずれも妥当性が不確かで[9,11,12,13]、現状では、有望であると思えるものは存在するものの、地震発生との結びつきを理論的に説明できるような確実な先行現象はない。

そのような状況で、ある事象が地震の先行現象であることを示すためにはそれらの事象の精度良い検出と統計的な評価が必要になる。統計的に示される先行現象と地震発生との経験的な結びつきが明らかになれば、両者の理論的な結びつきが明らかでなくとも、先に述べた長期予測にそれらを確率利得の形で上乗せして短期的なリスクの評価を行うことはできる[5,11,12]。しかし、先行現象の生じる原因の理解なくしては短期的な地震予測が説得力を持つことは難しく、各種先行現象の関連とそれらを考察することによる物理メカニズムの理解を目指すことが重要であると考え。

地震の短期的先行現象と考えられる事象のうち特に顕著なものに、地震発生の40分程度前に電離圏の電子数(Total Electron Content, TEC, ある地上観測点と衛星の間の通信が通過する電離圏における電子数)に現れる異常があり[14]、様々な大地震で確認されている[15]。TECの異常を地震発生前の時系列のみ用いて精度を向上させて検出する方法として相関解析法がある[16-19]。相関解析法では、ある衛星に対して複数の観測局($i = 0$ を中心とし、その周辺を $i = 1, \dots, M$ で添数づける)における地震発生前のTECの時系列を用いる。時間間隔 Δt で離散的に得られるTECの時系列を $x_{i,j}$ (j は時刻 $t = j\Delta t$ を表すための添数)とする。ある長さ $T (= (N - 1)\Delta t)$ の時間区間における、過去のTEC時系列から推定したTECの変動を $r_{i,j}$ とする。時間区間 T において実際のTECの変動 $x_{i,j}$ と過去の傾向から推定した変動 $r_{i,j}$ との差 $\varepsilon_{i,j} (= x_{i,j} - r_{i,j})$ が大きいとき、観測点 i において時間区間 T の間にTECの異常が見られたとする。着目する観測点($i = 0$)だけでなくその周辺の観測点($i = 1, \dots, M$)も含めて以下の相関値 $C(T)$ を計算する[16-19]。この $C(T)$ が大きいとき、着目する観測点と衛星との間の電離圏で異常が起きている。

$$C(T) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=0}^{N-1} \varepsilon_{i,j} \varepsilon_{0,j}$$

このように、相関解析は複数の観測局の時系列情報を用いることで異常検出の精度を向上し、地震発生前の情報のみを用いることでそれをリアルタイムに行うことを可能にした[16-19]。さらに、MSTID の速度変化の形で異常が現れることも指摘されている[19]。これらの TEC 異常は電離圏におけるおおよそ 0.5mV/m 程度の電場変化[19, 20]に起因すると考えられているが、そうした電場の変化が地震発生に関連して生じるメカニズムについては圧電効果や界面動電効果[21]、地下流体の超臨界状態による断層面付近での電荷の分離[22,23]などの仮説があるがよくわかっていない。地震の短期予測に向けたリアルタイムな電離圏異常の検出の説得力を高め、そのメカニズムの解明に取り組む上で、(少なくとも電離圏よりは)断層面により近い地殻の変動における異常をリアルタイムに検出することが有効であると考えられる。

現在では GNSS を用いて地殻変動の様子を直接観測でき、公開されているそれらの時系列データ[24,25]を用いて解析が行われる[26]。地殻変動データにはノイズが多く含まれ、TEC 解析の場合と同様にそれらの影響をできるだけ排して解析を行うことが重要となる。最近、世界の多くの大地震に先行するプレスリップが地震発生の 2 時間程度以内に地殻変動解析から見出されたことが報告された[27]が、一方でその解析手法の問題点が指摘されている[28]。また、該研究の解析手法では大地震の本震発生位置が予めわかっている必要があり、リアルタイムに地殻変動解析を行う短期予測においては有効性に疑問がある[29]。

本研究では、TEC 解析で用いられる相関解析法を地殻変動の公開データに適用し異常を検出した。検出された異常と地震活動との相関を条件付き確率により統計的に検討した。最後に、電離圏異常との対応について簡単に触れ、特にリアルタイムな異常検出に関して今後のありうる研究方針について述べる。

2. 方法

地殻変動の時系列に相関解析を適用する方法について述べる。時刻 $\{j\Delta t\}_{j=s}^{s+\Delta N-1}$ の時間窓での地殻変動の時系列を考える。異常検出の対象となる観測点 ($i = 0$) とその周辺の観測点 ($i = 1 \sim 7$) における時系列を $x_{i,j}$ 、参照とする観測点 ($r = 1, \dots, R$) の時系列を $r_{i,j}$ とする。時間窓の初期時刻 ($s\Delta t$) からの変動をそれぞれ $\Delta x_{i,j}^s (:= x_{i,j} - x_{i,s})$ 、 $\Delta r_{k,j}^s (:= r_{k,j} - r_{k,s})$ とする。これらは電離圏異常検出における実際の TEC 変動の時系列と推定された時系列にそれぞれ対応する。参照とする観測点群と比較して異常検出の対象となる観測点における変動がどの程度異なる傾向を示すかを相対位置 $\varepsilon_{ik,j}^s (:= \Delta x_{i,j}^s - \Delta r_{k,j}^s)$ により評価する。この相対位置を用いることで、日本全域でのグローバルな変動の傾向を除外し、対象とする観測点付近でのローカルな変動を取り出すことができる。

この $\varepsilon_{ik,j}^s$ に対して相関解析を行う。相関値は以下のようにして計算する (Σ はデータが一部抜けている場合を考慮した総和を表す)。この相関値が参照とする観測点群に対する着目観測点の相対的な地殻変動の異常を表す。

$$C_0(s) = \frac{\sum_{k=1}^R \sum_{i=1}^7 \sum_{j=s}^{s+\Delta N-1} \varepsilon_{ik,j}^s \varepsilon_{0k,j}^s}{\sum_{k=1}^R \sum_{i=1}^7 \sum_{j=s}^{s+\Delta N-1} 1}$$

相関解析を適用する地殻変動データとしては、日本全域における 2011/01/30 から 2011/03/11 の本震発生直前までの時間間隔 $\Delta t=30$ 分の時系列(PPP 解)[24]と、2004/01/01 から 2021/12/31 の国土地理院の $\Delta t=1$ 日の F5 解[25]を用いた。参照観測点を九州全域の観測点とし、九州とその付近を除いた他の観測点における相関値を求めた。

3. 結果と議論

発表では特に東西方向の地殻変動について上記の相関値を求めた結果を示す。これらの相関値は九州全域での地殻変動に対する相対的な変動を求めたものであり、全国の相関値の分布、平均 $\langle C \rangle_s$ は時間変動する。各時間窓ごとに相関値の分布を平均値でスケールしなおすと時間窓によらない同様の分布になることから、地殻変動の異常度を $C_A := C / \langle C \rangle_s - 1$ で定義する。この異常度により、ある観測点・ある時間における地殻変動がどの程度ローカルな異常を示しているかを定量的に評価する。

こうして求まる C_A が前後の地震活動とどのように関係しているかを統計的に調べるため、地震活動の発生レート(λ)を観測点周辺における地震活動の代表量とし、両者の間の条件付き確率を求めた。その結果、1 日間隔の F5 解では、地殻変動に異常がみられる前後の地震活動が活発になる傾向があることが示された。また、30 分間隔の東北地震前データの解析では、地殻変動異常に引き続く地震活動が活発化する傾向が見られた。すなわち、短期であっても活発な地震活動に先行して地殻変動の異常が、リアルタイムに(本震の発生を参照する必要なく)検出できる可能性が示唆された。

本研究では最も短くても 30 分間隔の地殻変動時系列を解析することとどまった。電離圏の異常は本震発生前の 40 分程度であるため、電離圏異常との対応をより詳しく検討するためにはさらに短い間隔での地殻変動データを用いた解析が必要となる。本研究で用いた相関解析法は TEC の異常検出と基本的には同様の仕方で計算しているため、TEC と地殻変動データを共にリアルタイム解析することで先行現象としての異常検出の精度をさらに高められるか検討することが重要と思われる。両者の異常を直接統計的に比較することは電離圏異常のメカニズム解明における示唆が得られる可能性があり、これも今後の課題である。



図 1 電離圏・地殻変動異常のリアルタイム検出と両者の比較の概念図

References

- [1] 田中宏樹, 梅野健, 相関解析を用いた地殻変動における異常検出, 日本地震予知学会, 2022; 田中宏樹, 梅野健, Detection of Anomalous Crustal Deformation by CoRelation Analysis, JpGU, 2023; H. Tanaka and K. Umeno, A Study of a Method for Detecting a Local Anomaly in Crustal Deformation and Statistical Analysis on Its Relation to Seismicity Activity, AGU Fall Meeting, 2023 (予定).
- [2] C. H. Scholz, The Mechanics of Earthquakes and Faulting (Cambridge University Press, 2002) 2nd ed., Sect. 7.
- [3] The Headquarters for Earthquake Research Promotion
[https://www.jishin.go.jp/reports/research_report/choukihyoka_01b/].
- [4] D. Vere-Jones, Int. J. Forecasting 11, 503–538, 1995.
- [5] 尾形良彦, 地震の確率予測の研究—その展望, 統計数理, 63, 3–27, 2015.
- [6] M. Nakatani, J. Disaster Res., 15(2), 112–143, 2020.
- [7] T. Nagao, Y. Orihara, and M. Kamogawa, J. Disaster Res., 9(3), 303–310, 2014.
- [8] C. H. Scholz, L. R. Sykes, and Y. P. Aggarwal, Science, 181(4102), 803–810, 1973.
- [9] 井出哲, 絵でわかる地震の科学, (講談社, 2017), p. 160–161.
- [10] M. Ohnaka and L. F. Shen, J. Geophys. Res.: Solid Earth, 104(B1), 817–844, 1999.
- [11] 中谷正生, 階層的アスペリティを前提とした短期前兆のメカニズムについて, 地震予知連絡会会報, 105, 500–504, 2021.
- [12] 中谷正生, 経験則による地震予知—どの程度の予測なのか?, 地震予知連絡会 50 周年記念企画公開シンポジウム「地震予知研究の現状と今後の展望」, 2019.
[<https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/sympo/kicho1.pdf>]
- [13] 宇津徳治, 地震学 (共立出版, 2012), p.329–330.
- [14] K. Heki, Geophys. Res. Lett., 38(17), L17312, 2011.
- [15] K. Heki, Ionos. Dyn. Appl., 511–526, 2021.
- [16] T. Iwata, K. Umeno, J. Geophys. Res.: Space Phys., 121(9), 8969–8984, 2016.
- [17] T. Iwata, K. Umeno, J. Geophys. Res.: Space Phys., 122(3), 3602–3616, 2017.
- [18] S. Goto, R. Uchida, K. Igarashi, C. H. Chen, M. Kao, and K. Umeno. J. Geophys. Res.: Space Phys., 124(11), 9239–9252, 2019.
- [19] K. Umeno, R. Nakabayashi, T. Iwata, and M. Kao, Open J. Earthquake Res., 10(4), 105–137, 2021.
- [20] M. C. Kelley, W. E. Swartz, and K. Heki, K, J. Geophys. Res.: Space Phys., 122(6), 6689–6695, 2017.
- [21] 吉田慎吾, 岩石破壊に伴う電気シグナルの発生メカニズム, 月刊地球 20, 608–614, 1998.
- [22] 水野彰, 梅野健, 地殻—電離層の電氣的結合モデルの一考察, 日本地震予知学会, 2022.
- [23] 梅野健, 大地震発生直前の異変を確実に捉える —その日までに、そして直前の 1 時間に我々は何かできるか?—, 関西サイエンスフォーラム, 2023.
- [24] <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/index.php?page=pppdata>.
- [25] <https://terras.gsi.go.jp>.

- [26] M. Kamiyama, M. Sugito, M. Kuse, A. Schekotov, and M. Hayakawa, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 471–492, 2016.
- [27] Q. Bletery, J. -M. Nocquet., *Science*, 381(6655), 297–301, 2023.
- [28] https://drive.google.com/file/d/1OuJdjrT5Lbr_1dElZxveuUK0q81Mgzg5/view
- [29] R. Bürgmann, *Science*, 381(6655), 266–267, 2023.

時系列地殻変動に見られる地震発生の先行過程

莊司雄一¹⁾

1) 正会員 復建技術コンサルタント, 博士 (工学)

要旨

GEONET データを用いた局所定常 AR モデル (locally stationary AR model) 時系列データ解析を実施した。LSAR 解析の結果, 特徴的な変化点(MAICE)が検出された。LSAR 解析から得られる変化点 (MAICE) は, プレート間の結合度 (結合の強さ、弱さ) で説明できることが知れた。

1. はじめに

GEONET¹⁾データには有益な情報が含まれていることが報告されている²⁾³⁾。本研究では GEONET データを用いた時系列データ解析を実施し, その結果について考察する。なお, 時系列データ解析は, 中期的視点(Medium-term perspective)から地震前約 1 年間を対象とした。dE (EW 方向) 時系列データに対して, 局所定常 AR モデルを適用し, Ozaki and Tong⁴⁾の巧みなアイデアを取り入れた時系列データ解析を行った。繰り返し起こる地震前の地殻変動の変化を, 日向灘の地震を例に報告する。図 1 に解析の対象とした 2004 年から 2022 年までに発生した日向灘における地震の震央と, 観測ステーションを示す。

2. LSAR解析結果

2.1 2022 年 1 月 22 日 日向灘 M6.6

2019 年 5 月 10 日に日向灘の深さ 25 km で M6.6 の地震 (最大震度 5 強) がフィリピン海プレート内部で発生した。愛南(041133)の地殻変動を図 3 に示す。最初に緩やかな西側への漸変傾向が認められる。その後漸変傾向が停止し, 6 月 1 日を境に西側への漸変傾向が強まり西側への急勾配が見てとれる。変化点(MAICE) (6 月 1 日) が, 漸変傾向が急変する日と符合していることがわかる。図 4 に大分佐伯(940090)の地殻変動の様子を示す。変化点(MAICE) (6 月 1 日) 以降には同様の傾向が見てとれる。また, ハッチングしてある地震発生直前を観察すると, 東または西への漸変傾向が停止していることがわかる。これは多くの地震に見られる地震発生直前の共通の特徴である。

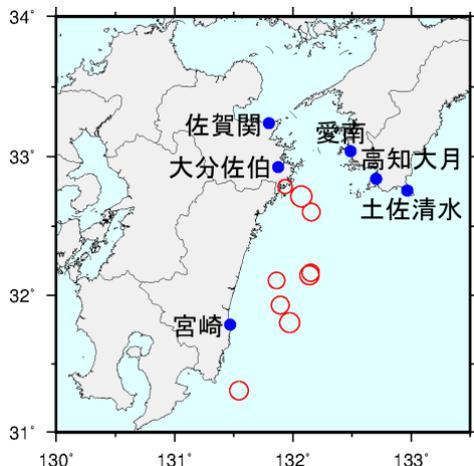


図 1 日向灘における地震の震央及び観測ステーション

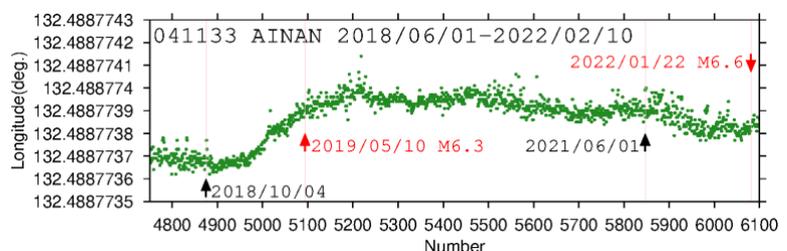


図 2 観測ステーション愛南の地殻変動

図 2 には、愛南(041133)における地殻変動をやや長期的な視点から 2018 年 6 月 1 日から 2022 年 2 月 10 日までプロットしてある。また変化点(MAICE)と地震発生日も付け加えてある。この図から変化点(MAICE)が、いずれも漸変傾向が急変する日と符合していることがわかる。

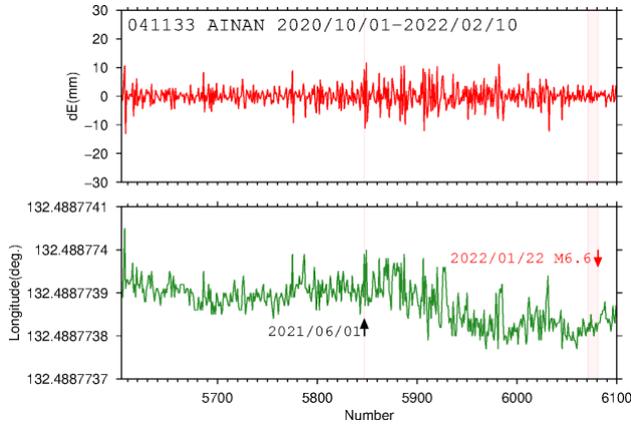


図 3 観測ステーション愛南の地殻変動

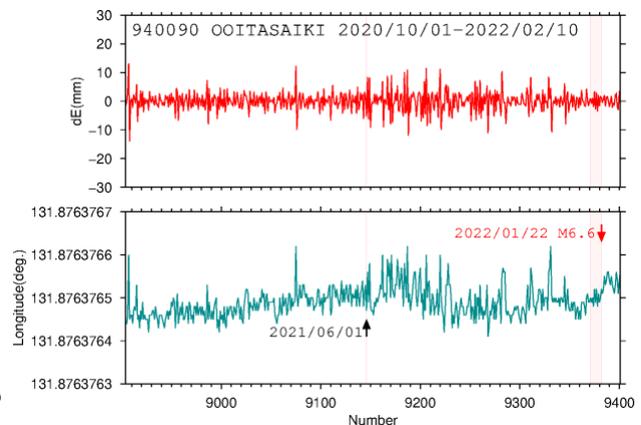


図 4 観測ステーション大分佐伯の地殻変動

2.2 2019 年 3 月 27 日 日向灘 M5.4, 5 月 10 日 日向灘 M6.3

2019 年 3 月 27 日に日向灘の深さ 15 km で M5.4 の地震 (最大震度 3) がフィリピン海プレートと陸プレートの境界で発生した。2019 年 5 月 10 日に日向灘の深さ 25 km で M6.3 の地震 (最大震度 5 弱) がフィリピン海プレートと陸プレートの境界で発生した。愛南(041133)の地殻変動を図 5 に示す。変化点(MAICE) (10 月 4 日) を境に急激に東側への漸変傾向を示す。その立ち上がり方から結合度が急激に強まる様子が見てとれる。変化点(MAICE) が、プレート間の結合度が極端に弱いスリップ状態から、プレート間の結合度が強くなるターニングポイントと符合していることがわかる。図 6 の大分佐伯(940090)では、変化点(MAICE) (10 月 28 日) が異なるが、同様の傾向が見てとれる。地震発生直前をハッチングしてあるように、東または西への漸変傾向が停止していることが確認できる。

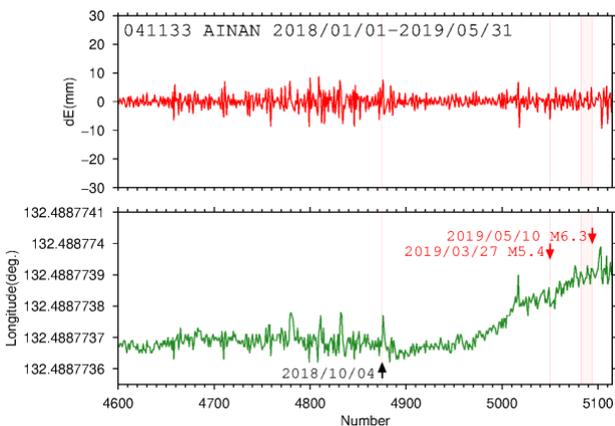


図 5 観測ステーション愛南の地殻変動

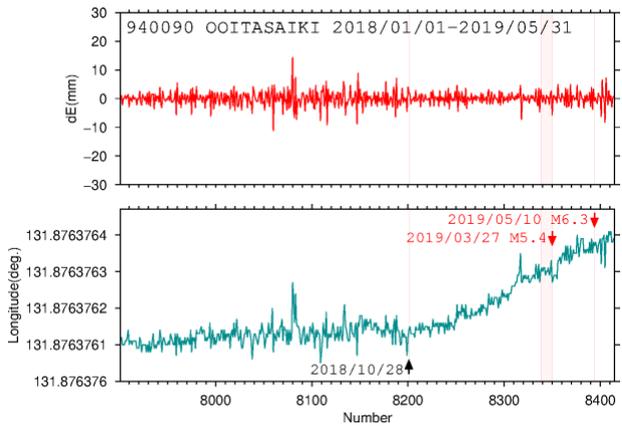


図 4 観測ステーション大分佐伯の地殻変動

2.3 2016 年 10 月 22 日 大分県南部 M4.4

2016 年 10 月 22 日に日向灘の深さ 25 km で M4.4 の地震 (最大震度 4) がフィリピン海プレート内部で発生した。愛南(041133)の地殻変動を図 7 に示す。図には 2016 年 4 月 14 日, 16 日の熊本地震の影響が確認できる。変化点(MAICE) (5 月 22 日) を境に、西側への漸変傾向が停止し、停滞する様子が見られ、プレート間の結合度がやや弱くなったと考えられる。その後西側への漸変傾向が回復する様子が見てと

れる．変化点(MAICE) が，プレート間の結合度がやや弱い状態となるターニングポイントと符合していることがわかる．土佐清水(940085)の地殻変動を図 8 に示す．変化点(MAICE) (5 月 3 日) が異なるものの，同様の傾向が確認できる．地震発生直前をハッチングしてあるように，東または西への漸変傾向が停止していることがわかる．

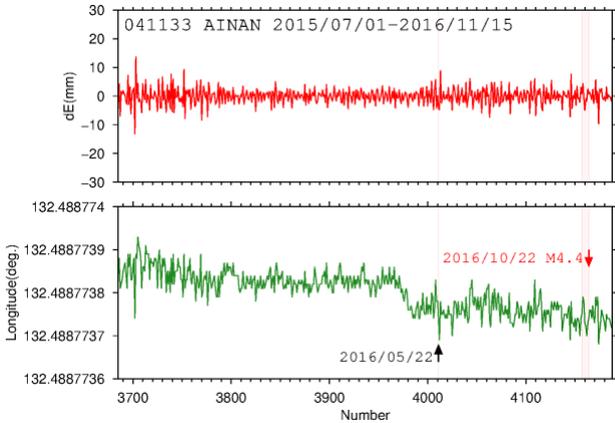


図 7 観測ステーション愛南の地殻変動

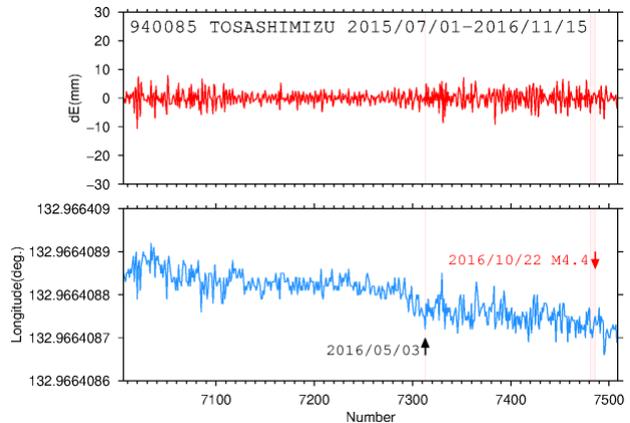


図 8 観測ステーション土佐清水の地殻変動

2.4 2015 年 8 月 26 日 日向灘 M5.2

2016 年 10 月 22 日に日向灘の深さ 34 km で M5.2 の地震（最大震度 54）がフィリピン海プレート内部で発生した．愛南(041133)の地殻変動を図 9 に示す．図を丹念に観察すると，変化点(MAICE) (5 月 15 日) を境に，それ以前の西側への漸変傾向から東側へ急変し，漸変傾向が停止し，停滞する様子が見られる．変化点(MAICE) が，プレート間の結合度が極端に弱いスリップ状態となるターニングポイントと符合していることがわかる．図 10 に宮崎(021088)の地殻変動を示す．東側への漸変傾向から変化点(MAICE) (5 月 12 日) を境に，さらに東側へ急変する様相が見られる．地震発生直前をハッチングしてあるように，東または西への漸変傾向が停止していることが認められる．これは地震発生直前の共通の特徴である．

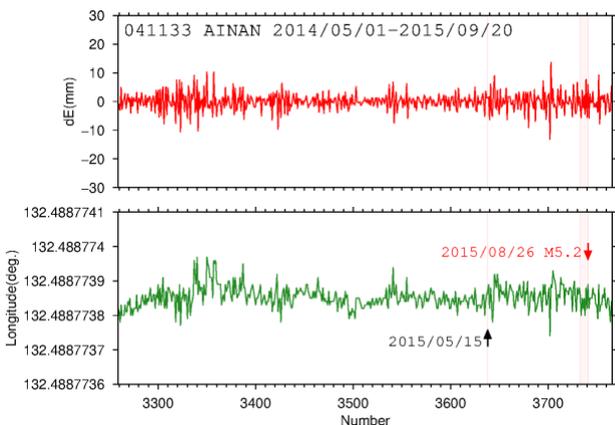


図 9 観測ステーション愛南の地殻変動

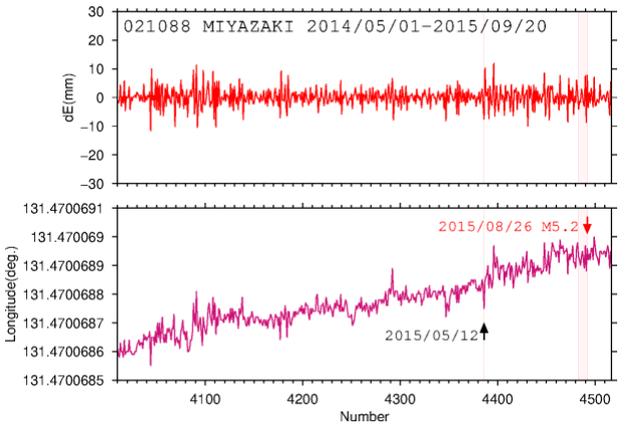


図 10 観測ステーション宮崎の地殻変動

2.5 2014 年 8 月 29 日 日向灘 M6.0

2014 年 8 月 29 日に日向灘の深さ 18 km で M6.0 の地震（最大震度 4）がフィリピン海プレートと陸プレートの境界で発生した．愛南(041133)の地殻変動を図 11 に示す．変化点(MAICE) (6 月 16 日) を境にそれ以前は東側への緩やかな漸変傾向を示し，その後は西側へ急変することが見てとれる．その後東

側へ反発する様子も確認できる。変化点(MAICE) (6月11日)が地殻変動の勾配が変化する日と符合している。大分佐伯(940090)の地殻変動を図12に示す。愛南(041133)の地殻変動と同様の傾向が求められる。地震発生直前をハッチングしてあるように、地震発生直前の共通の特徴と同様に漸変傾向が停止していることがわかる。

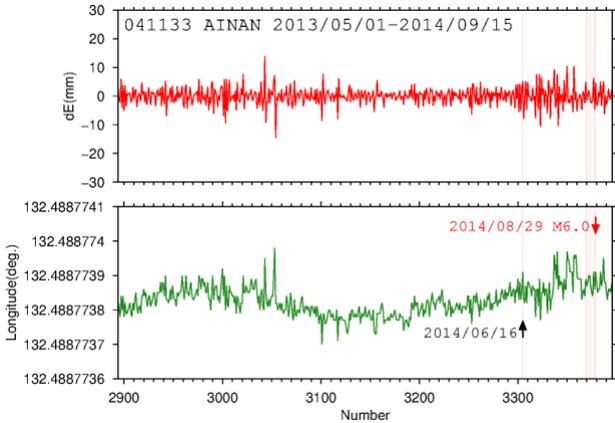


図11 観測ステーション愛南の地殻変動

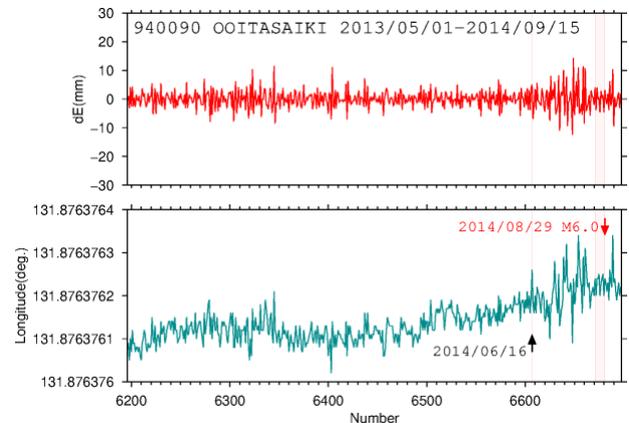


図12 観測ステーション大分佐伯の地殻変動

2.6 2009年4月5日日向灘地震 M5.6

2009年4月5日に日向灘の深さ28kmでM5.6の地震(最大震度4)がフィリピン海プレートと陸プレートの境界で発生した。愛南(041133)の地殻変動を図13に示す。全体に西側への漸変傾向が見られる。やや停滞した後に、変化点(MAICE) (10月25日)を境に、一旦東へ変位し、すぐに西側への漸変傾向が回復していることが確認できる。その前は東側への緩やかな漸変傾向を示し。その後は西側へ漸変することが見てとれる。その後東側へ反発する様子が確認できる。図14に示す宮崎(021088)の地殻変動は、全体に東側への漸変傾向から変化点(MAICE)を境に、東へ急変し、その後停滞する様子が見られる。その後また東へ急変し、ゆっくりと東側への漸変傾向を示している。いずれも変化点(MAICE)が地殻変動のターニングポイントと符合している。また地震直前をハッチングしてあるように、漸変傾向が停止していることがわかる。

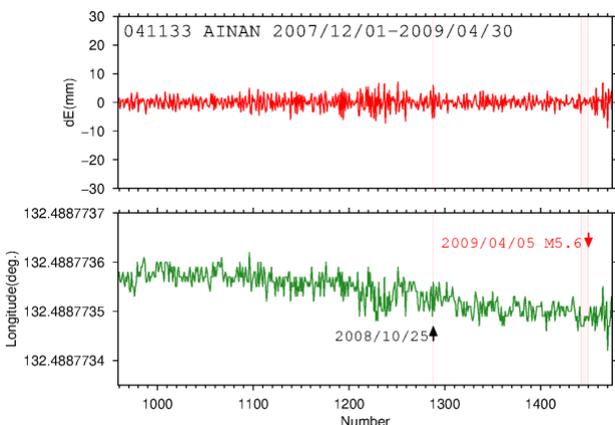


図13 観測ステーション愛南の地殻変動

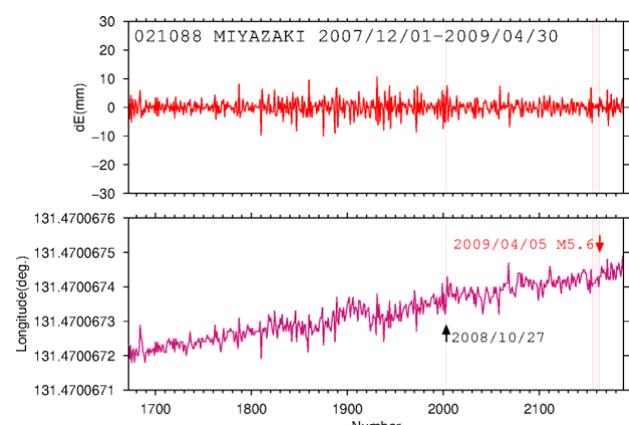


図14 観測ステーション宮崎の地殻変動

2.7 2006年3月27日日向灘 M5.5

2006年3月27日に日向灘の深さ35kmでM5.5の地震(最大震度5弱)が発生した。大分佐伯(940090)の地殻変動を図15に示す。変化点(MAICE) (10月6日)を境に、漸変傾向が停止した状態から、東側

への漸変傾向が強まる様子が見てとれる．これはプレート間の結合度が強くなったと考えられる．変化点(MAICE) が，漸変傾向の勾配が変わる位置と符合し，プレート間の結合度が弱い状態から，強くなるターニングポイントと符合していることがわかる．図 16 に示す佐賀関(950473)の地殻変動も同様の様相であることがわかる．地震発生直前をハッチングしてあるように，東または西への漸変傾向が停止していることがわかる．これは多くの地震に見られる地震発生直前の共通の特徴である．

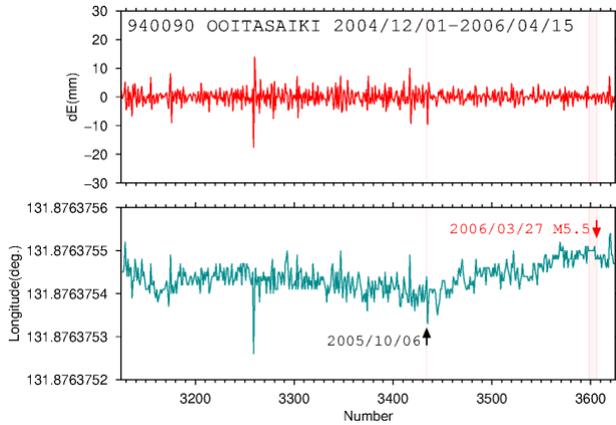


図 15 観測ステーション大分佐伯の地殻変動

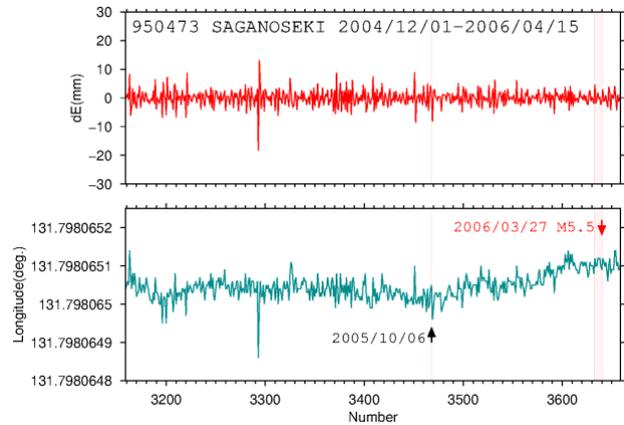


図 16 観測ステーション佐賀関の地殻変動

2.8 2005 年 5 月 31 日 日向灘 M5.8

2006 年 3 月 27 日に日向灘の深さ 29 km で M5.8 の地震（最大震度 4）が，フィリピン海プレートと陸プレートの境界で発生した．図 17 に大分佐伯(940090)の地殻変動を示す．変化点(MAICE) (9 月 12 日)を境に，漸変傾向が停止し停滞する様相から西側への漸変傾向に転じる様子が見てとれる．プレート間の結合度が強くなったと考えられる．変化点(MAICE) が，プレート間の結合度が弱い状態から強い状態へ転じるターニングポイントと符合していることがわかる．図 18 の高知大月(950449)も同様の傾向が認められる．また地震発生直前をハッチングしてあるように，東または西への漸変傾向が停止していることが認められる．

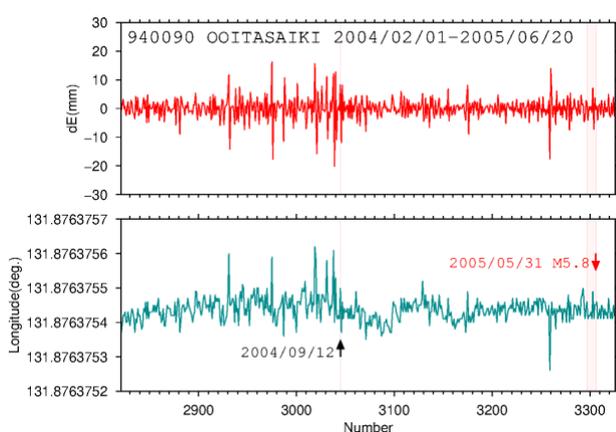


図 17 観測ステーション大分佐伯の地殻変動

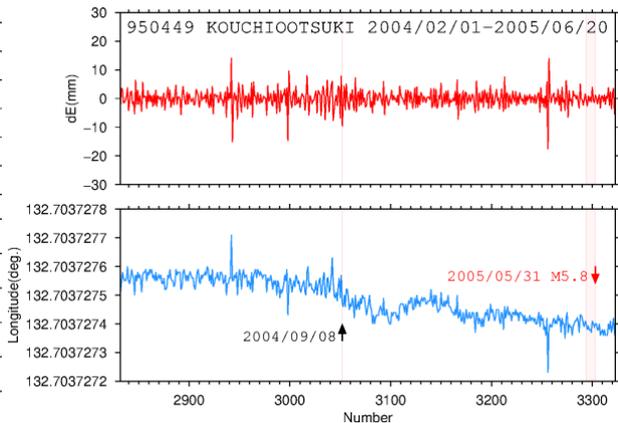


図 18 観測ステーション高知大月の地殻変動

3. むすび

本研究では，中期的視点，地震に関する物理モデルを持たない時系列データ解析の視点から，地震前の地殻変動の変化と地震発生との関係を考察した．得られた結論は以下のようになる．

前日に対する変動量 dE (EW 方向) と，経度(Longitude)データを対比することで，LSAR 解析から求ま

る変化点(MAICE)は、プレート間の結合状態、結合度の強弱で説明できることが知れた。変化点(MAICE)はプレート間の結合度が強から弱、あるいは弱から強へ変わるターニングポイントと符合することがわかった。調べた限りでは地震前の1年間のどこかで必ず変化点(MAICE)が検出されることも知れた。

謝辞

本論文の作成に当たっては国土地理院が提供している GEONET の日々の座標値 F3 解を利用させていただいた。図作成にはマッピングツール GMT(Generic Mapping Tools)⁵⁾を使用させていただいた。関係者の日頃の尽力に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土地理院測地観測センター：電子基準点1,200点の全国整備について，国土地理院時報，第103集，pp.1-51, 2004.
- 2) 神山 眞，杉戸真太，久世益充：震災を踏まえた技術者への提言 地殻変動にみる3.11巨大地震の予兆，土木学会誌,Vol.97,No.3, pp.119-123, 2012.
- 3) 神山 眞，小出英夫，沢田康次，秋田 宏，千葉則行：GPS観測による地震時地盤ひずみと地震被害との関係，日本地震工学会論文集 第15巻，第7号（特集号），428-443，2015.
- 4) Ozaki, T. and Tong, H. : On the fitting of non-stationary autoregressive models in time series analysis, Proceedings of the 8-th Hawaii International Conference on System Science,, pp.224-226, 1975.
- 5) Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. F. Luis, and F. Wobbe, Generic Mapping Tools: Improved version released, EOS Trans. AGU, 94, pp.409-410, 2013.

リアルタイム高解像度電離圏トモグラフィの実現

米山慧¹⁾, 梅野健¹⁾

1: 京都大学大学院情報学研究科数理工学コース

要旨

東日本大震災が記憶に新しいように、日本では数年から数十年に一度巨大地震が発生し、そのたびに莫大な人的・物的被害をもたらしている。今後数十年以内に南海トラフ地震や首都直下型地震の発生が確実視されている中、大地震発生予測は被害を抑えるためにも重要である。

一方で大地震発生の数日前から数十分前にかけて、地震が発生する領域上の電離圏に異常が発生する可能性が示唆されている。その様態は電子数密度の変化、移動性電離圏擾乱(TID)の伝搬速度変化など様々なものが提案されているが、その再現性やメカニズムは未だ明らかになっていない。今後電離圏異常の詳細なメカニズムを解明し大地震の予測システムを作るためには、精度の良い情報をリアルタイムでできるほどの低時間コストで推定できることが重要である。

本発表では、GNSS 衛星から得られる TEC データから高解像度な電離圏トモグラフィをリアルタイムで実現する手法について提案し、この手法が電離圏の状態変化を捉えることができることを確かめる。国土地理院が運営する GEONET から得られる GNSS-TEC データは 1300 以上の受信局からのデータが 30 秒間隔で記録されている。この GNSS データの量は莫大であり、リアルタイムで電離圏トモグラフィを通して三次元データを推定するためには、アルゴリズムに工夫が必要である。本研究ではデータの疎行列性、時間的連続性、解像度連続性の 3 つの特徴に着目し、これらの特徴を活かした解法アルゴリズムを開発した。

その結果、従来数万個(解像度でいえば東西南北に 1° のスケール)のボックスで行われていたトモグラフィを数十万個(解像度でいえば東西南北に 0.2° のスケール)のボックスで行うことが十分に可能であることがわかった。また、このアルゴリズムで推定された三次元データから得られた MSTID のパラメータは 2DTEC マップなどを用いたモデルから得られている結果と矛盾のない結果が得られ、精度の面でも問題がないことが確かめられた。

2008 年汶川地震直前の電離圏変化

日置 幸介^{1,2)}

1: 北海道大学理学研究院 Hokkaido Univ., Japan

2: 中国科学院上海天文台 Shanghai Astr. Obs., China

要旨 大地震に伴う電離圏擾乱は GNSS 受信機によって電離圏全電子数(TEC)の変化として観測される。地震約 10 分後に生じる音波擾乱が広く知られるが、本震直前に生じる TEC 変化(e.g., Heki, 2011) も多く報告されている。今回は、2008 年汶川(Wenchuan)地震(M_w 7.9)の約半時間前に、震源数百キロ以内で TEC 変化の傾きが変わり、累積異常が地震直前に背景の~5%に達したことを報告する。これらの値は M_w 7.3-9.2 の約 20 の過去の地震で見出された経験則に矛盾しない。大規模地震が発生するたびに経験則から予測された異常の存在を確認し、それを繰り返すことによって地震前兆としての信頼性は向上するだろう。なお本報告は Heki et al. (2023)の内容を抜粋したものである。

データと手法 2008 年 5 月 12 日 6:28UT に発生した汶川地震(M_w 7.9)は、チベット高原の東端、四川盆地の西北縁を走る龍門山断層を破壊した。地震時の電離圏擾乱については Jin et al. (2010)等の報告があるが、元データの入手困難のため、地震前に生じた電離圏変化はこれまで研究されていない。本研究では四川盆地と周辺山岳部に展開された 20 局の連続 GNSS 観測局の TEC データを解析した(Fig.1)。なお、Fig.S1 に示すように、地震発生当時の地磁気活動は静穏であった。

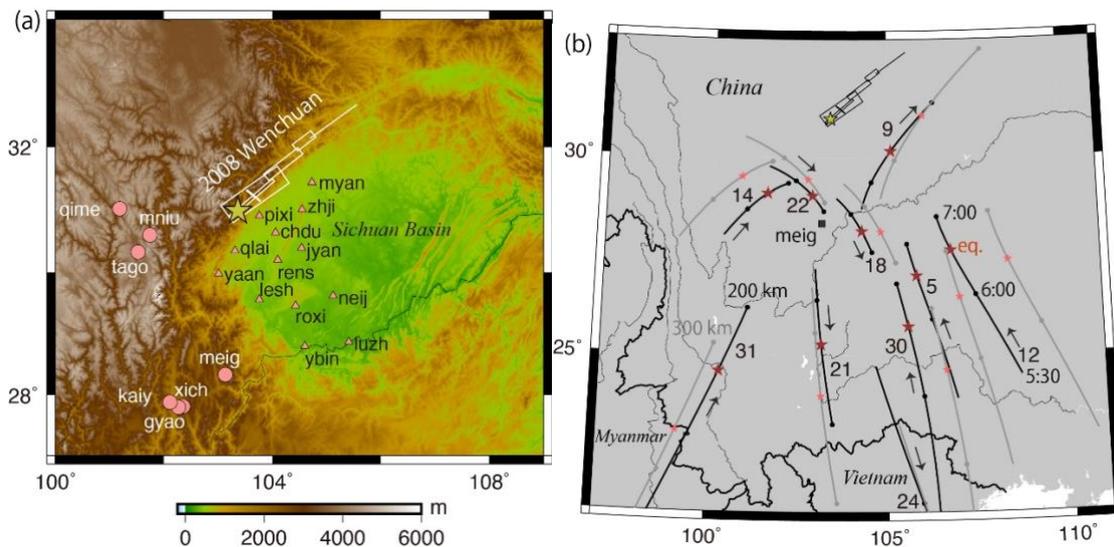


Fig. 1. (a) Continuous GNSS stations around the faults of the 2008 Wenchuan earthquake. Yellow star shows the epicenter and white rectangles are surface projections of the ruptured faults after Furuya et al. (2010). Large circles and small triangles show stations with and without the data after the earthquake, respectively. (b) Ground projections of the ionospheric piercing point (IPP) tracks of the line-of-sight at the altitude 200 km (black) and 300 km (gray) from the **meig** station 5:30-7:00 UT.

本研究では、Minimum scalloping (Rideout & Coster, 2006) によって位相データのバイアスを取り除いた。Heki & Enomoto (2015)の手法で、meig-G09 のペアの鉛直 TEC(VTEC)曲線を用いて、赤池情報量基準の変化量を手掛かりに正の折れ曲がり地震約 37 分前 5.85UT に生じたことを見出した(Fig.2a)。基準曲線を、5.85-7.0UT を除外して多項式として推定したが、L-curve からその最適次数を 2 とした (Fig.3d)。なお除外する時間帯を動かしても基準曲線は安定であった(Fig.3a,b)。jyan-G22 ペアのように地震後のデータが失われている場合は、二次係数の値を 0 の回りに拘束して安定化させた。

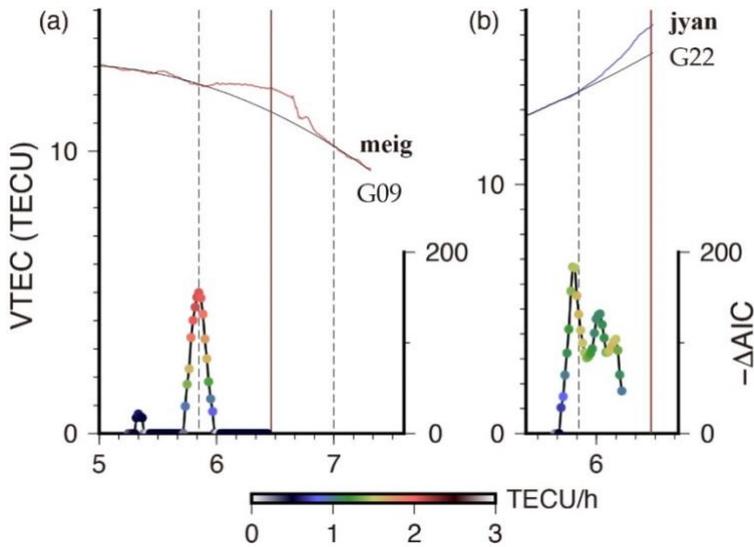


Fig. 2. VTEC curves of the meig-G09 (a) and jyan-G22 (b) pairs. We detected positive bending of the VTEC curves using the AIC drop by assuming a break in the middle of the 30-minutes moving window. Color denotes changes of the VTEC trends at the assumed epochs. Both cases showed significant positive bending at ~ 5.85 UT, used as the start of the exclusion window in subsequent calculations.

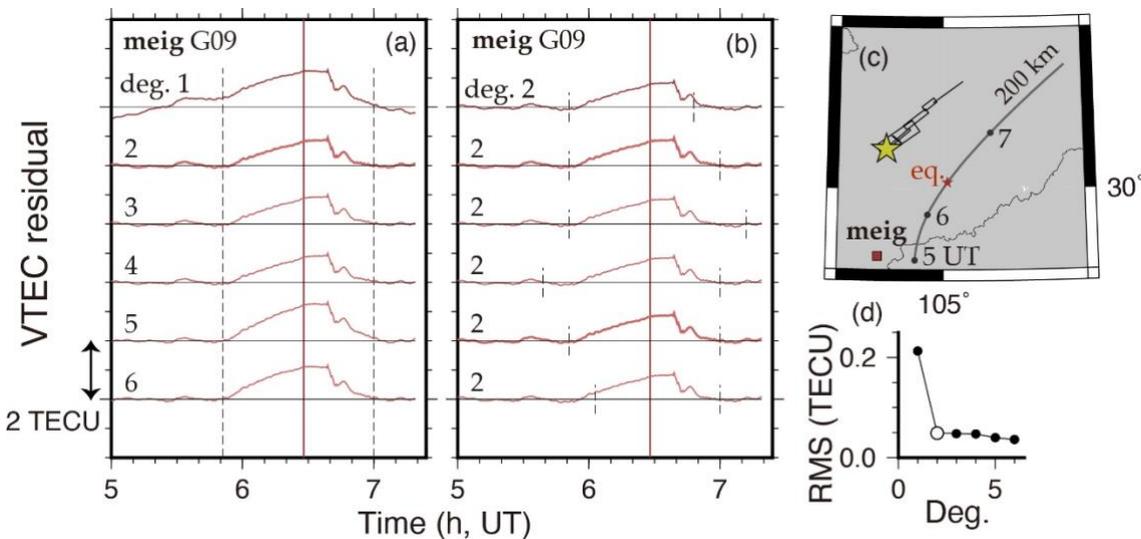


Fig. 3. VTEC residuals for the meig-G09 pair. (a) shows the residual from reference curves with different polynomial degrees. The L-curve (d) suggests that the optimal degree is 2. In (b), we compare the residuals based on reference curves estimated using different end (upper 3 curves) and start (lower 3 curves) times of the exclusion window (vertical dashed lines).

結果 G09, G22 の 2 衛星を用いた地震直前の TEC の正の異常を様々な局で比較する(Fig.4)。異常が震源の南側に出るのは、地表の正電荷の作る電場によって電離圏電子が磁力線(ここでの伏角は約 49 度)

に沿って降下すると考えるモデル(He & Heki, 2018; Muafiry & Heki, 2020)と調和的である。様々な地上局と衛星のペアによる震源近傍の TEC 異常を Fig.5 に比較する。正の TEC 異常は震源南側、震源からの距離は約 400 km ほどまで及ぶ。また地震直前の正異常の大きさ(基準曲線からのずれ)は、地震時の震源上空の VTEC の約 5%に相当する。

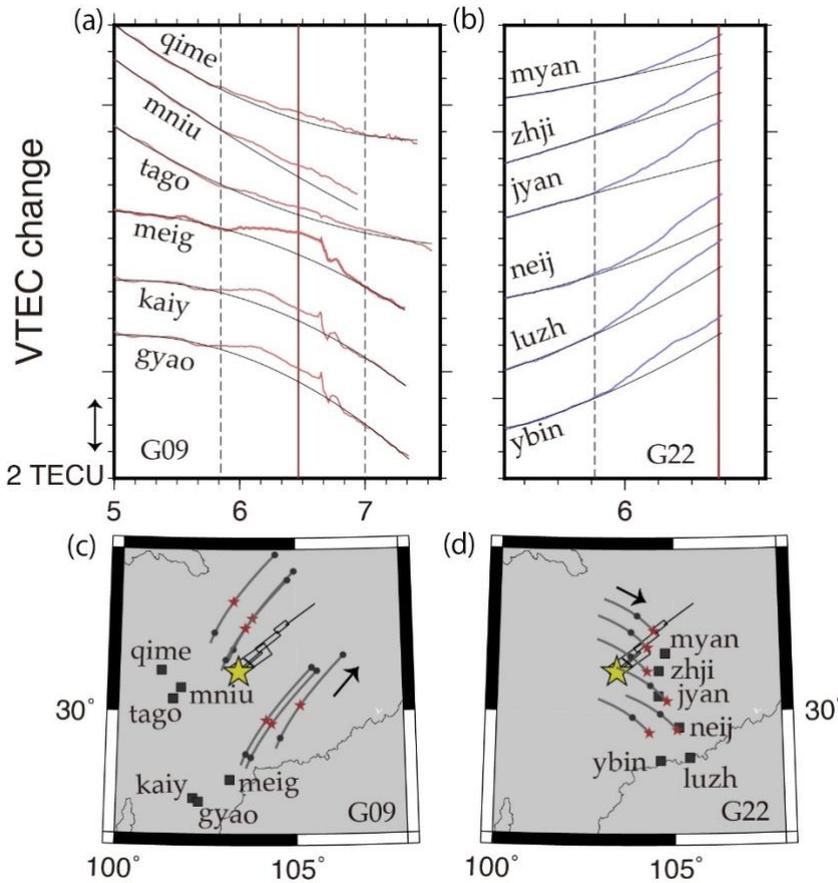


Fig. 4. VTEC change 5.0-7.4 UT with satellite G09 and six stations to the west of the epicenter (a). We used the exclusion window between the two dashed lines and polynomial degree 2. Clear preseismic positive trend changes are seen to the south of the epicenter. In (b), we show the VTEC changes observed to the east of the epicenter using satellite G22. (c) and (d) show ground projections of IPP tracks for G09 and G22, respectively, assuming a thin ionosphere at altitude 200 km.

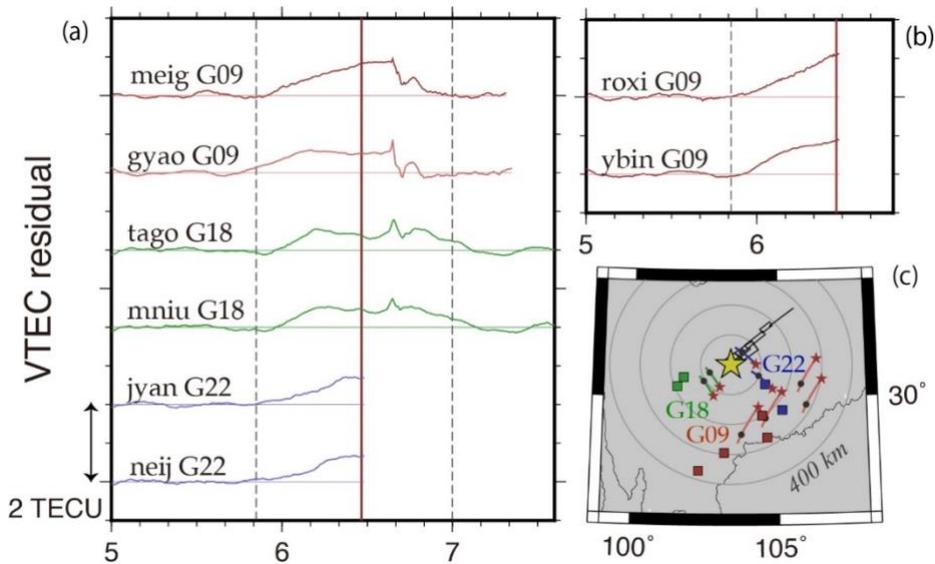


Fig. 5. VTEC residuals at 8 stations with three different satellites with various azimuths and distances from the epicenter (a, b). For the data with G18, we used the optimal polynomial degree 4 for the reference curves. The ground tracks of the 200 km IPP from 5.85 UT to the earthquake time are shown in (c).

考察 最後に、今回の地震で得られた先行時間(約 37 分)と地震直前における異常の大きさ(背景の約 5%)を、He & Heki (2017)や Heki (2021)がまとめた約 20 の過去の事例と Fig.6 に比較する。先行時間と異常の大きさのいずれも過去のトレンドに比べるとやや大きめであるが、経験則と大きく矛盾しないことがわかる。先行時間はプレート内地震 (Fig.6 の青色丸) がプレート間地震より長くなる傾向が知られているので、その傾向と調和的である。また振幅がやや大きめなのは、この地震が海域から遠く離れた内陸部で生じたため、電気伝導度の高い海水を通じた電荷の拡散が抑えられたことが原因かも知れない。

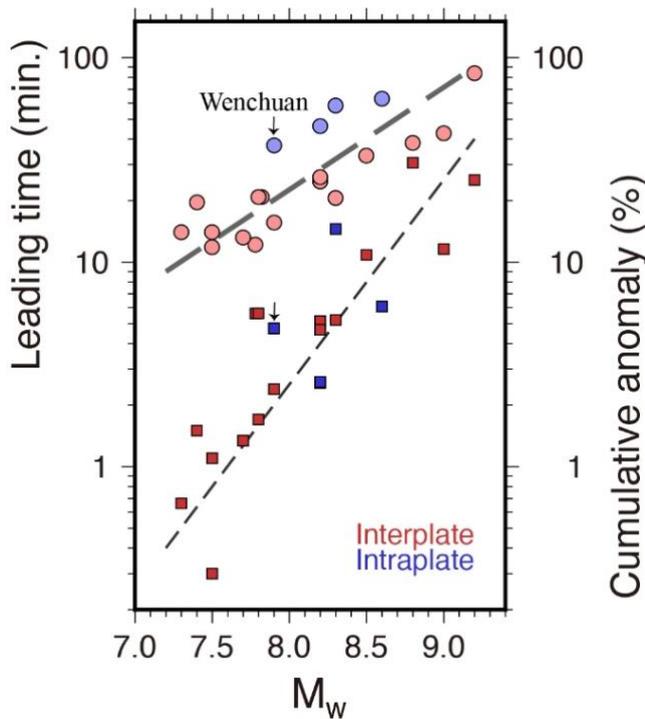


Fig. 6. Leading times (circles) and cumulative anomalies at the time of the earthquake occurrences (squares) for past earthquakes compiled by Heki (2021). Their slopes appear proportional to the power of 1/3 (thick dashed line) and 2/3 (thin dashed line) of the energy. The brand-new data of the 2008 Wenchuan earthquake (meig-G09) are marked with small arrows. Inter- and intra-plate earthquakes are discriminated using red and blue symbols, respectively.

先行時間が断層長に、異常の大きさが断層面積に比例するスケーリング則(Fig.6)は、この現象が断層面を片側から反対側に向かって進行する何らかのプロセス (正電荷を可動化するプロセス) を反映していることを示唆する。時間スケールの類似から Bletery & Nocquet (2023)の主張する地震直前フェーズとの関連も考えられる。

References

- Bletery, Q. & J.-M. Nocquet (2023), The precursory phase of large earthquakes, *Science*, **381**, 297-301.
- Furuya, T., T. Kobayashi, Y. Takada, & M. Murakami (2010), Fault source modeling of the 2008 Wenchuan earthquake based on ALOS/PALSAR data, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **100**, 2750-2755, doi:10.1785/0120090242.
- He, L. & K. Heki (2017), Ionospheric anomalies immediately before M_w 7.0-8.0 earthquakes, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **122**, 8659-8678, doi:10.1002/2017JA024012.
- He, L. & K. Heki (2018), Three-dimensional tomography of ionospheric anomalies immediately before the 2015 Illapel earthquake, central Chile, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **123**, doi:10.1029/2017JA024871,
- Heki, K. (2011), Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L17312, doi:10.1029/2011GL047908.
- Heki, K. (2021), Chapter 21: Ionospheric Disturbances Related to Earthquakes in Ionospheric Dynamics and

- Applications, *Geophys. Monograph*, **260**, edited by C. Huang, G. Lu, Y. Zhang, and L. J. Paxton, pp.511-526, Wiley/American Geophysical Union, ISBN:978-1-119-50755-0, doi:10.1002/9781119815617.ch21.
- Heki, K. & Y. Enomoto (2015), M_w dependence of preseismic ionospheric electron enhancements, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **120**, 7006-7020, doi:10.1002/2014JA020223.
- Heki, K., M. Nakatani, & W. Zhan (2023), Ionospheric changes immediately before the 2008 Wenchuan earthquake, *Adv. Space Res.*, submitted.
- Jin, S.G., W. Zhu, & E. Afraimovich (2010), Co-seismic ionospheric and deformation signals on the 2008 magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake from GPS observations, *Int. J. Remote Sens.*, **31**(13), 3535-3543, doi:10.1080/01431161003727739.
- Muafiry, I.N. & K. Heki (2020), 3D tomography of the ionospheric anomalies immediately before and after the 2011 Tohoku-oki (M_w 9.0) earthquake, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **125**, e2020JA27993, doi:10.1029/2020JA027993.
- Rideout, W., & A. Coster (2006), Automated GPS processing for global total electron content data, *GPS Solutions*, **10**, 219–228. doi:10.1007/s10291-006-0029-5

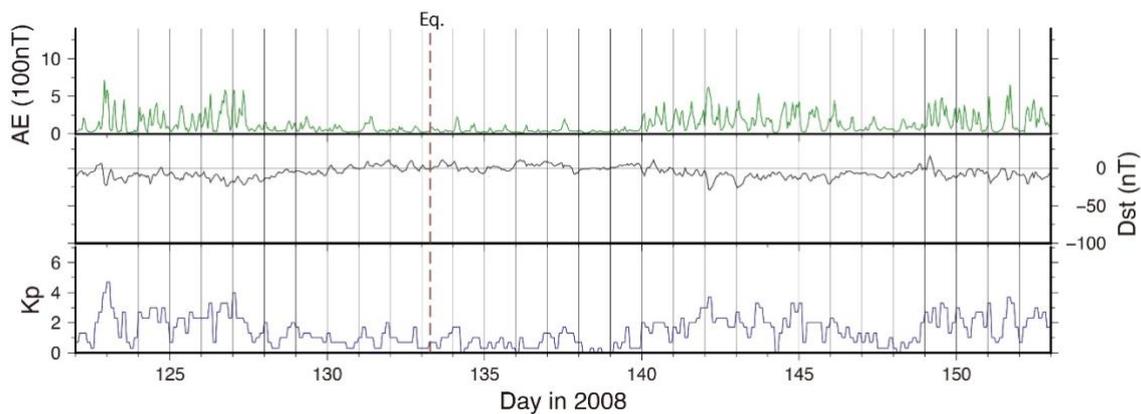


Fig. S1. Space weather indices over the whole 2008 May from NASA/Omniweb (omniweb.gsfc.nasa.gov). Geomagnetic activity was calm on the day of the earthquake (day 133).

Temporal and Spatial variation of b -value at Kanto metropolitan area, Japan

Wenchao Li¹⁾, Chie Yoshino²⁾, Katsumi Hattori^{2, 3, 4)}

1: Graduate School of Science and Engineering, Chiba University, Japan

2: Graduate School of Science, Chiba University, Japan

3: Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Japan

4: Research Institute of Disaster Medicine, Chiba University, Japan

Abstract:

In Kanto area, Japan, the Philippine Sea Plate subducts under the Metropolitan area, and it causes thrust earthquakes such as the 1703 Genroku Kanto earthquake (M8.0) and the 1923 Taisho Kanto earthquake (M7.9). This year (2023) is the 100th memorial year of the 1923 Taisho Kanto earthquake. Also, there were some earthquakes with magnitude 7 class happened in this region (namely, the metropolitan area). Regarding the southern Ibaraki Prefecture in the region, M7.2 and M7.0 earthquakes occurred in 1895 and 1921, respectively, directly under the capital. Therefore, the possibility of an earthquake of M7 or greater occurring in this region is currently feared to be high. This study aims to investigate the statistical characteristics of seismicity of Gutenberg-Richter b -value, near Kakioka, Kanto, Japan. The previous researches show that the Gutenberg-Richter frequency-magnitude distribution of earthquakes has become well-established.

$$\log_{10}N(M) = a - bM$$

The above formula shows that the slope of the relationship between the frequency and the magnitude is the b -value. In particular, the b -value have been studied in spatial-temporal and the b -value anomaly reflects the indicator of the occurrence of large earthquakes, and the b -value is an important parameter used in earthquake prediction. As the selection of magnitude of completeness (M_c) in the catalog has significant impact on the results of b -value, in this study, the maximum curvature (MAXC) technique and the bootstrap approach is applied to calculate M_c value. Then the b -value is estimated by the Aki-Utsu maximum likelihood estimation. Also, the Akaike Information Criterion (AIC) with the bootstrap approach is introduced to statistically assess the temporal variation of b -values and quantify the significance level. In this presentation, I will apply the method to the Kanto region, and get the temporal and spatial variation characteristics of b -value. The details will be shown in the presentation.

In my future research, I will focus on incorporating the Epidemic-Type Aftershock Sequence (ETAS) model with seismic and non-seismic data to delve deeper into the spatiotemporal evolution of seismic activity. The ETAS model incorporates the Gutenberg-Richter Law with widely application. The ETAS model is the most popular model used to describe earthquake occurrence, to

forecast earthquakes and to detect signals or induced seismicity. By evaluate the ETAS model and its parameters, we could gain a better insight into the earthquake process.

Keywords:

Gutenberg-Richter b-value, bootstrap, maximum likelihood estimation, Epidemic-Type Aftershock Sequence model

花崗岩から放射される電場の検出に関する室内実験

筒井 稔

京都産業大学 名誉教授

要旨

地中で電場が検出されるかどうかを確認する為に、2021年4月から、和歌山県紀伊大島内の電磁波観測棟内にある深さ150mのボアホール内に長さ100mの線形ダイポール型のDC電場検出用センサーを挿入して観測を行ったところ、2つの異なった形態の電場変動を検出した。形態1は高周波電場雑音群からなり、40分程度持続時間を持ち、その55分後にこの観測点から770km遠方でM6.8の地震が発生していた。一方、形態2はそれまで静穏であったDC電場のレベルが急に増加を始め、その8時間程度後に観測点から98km離れた地点でM3.7の地震が発生した。これら両者で興味ある点として、震源の深さは両者共に50kmであった。これらの事を昨年の当学会で発表したが、重要となるのが、「本当に地中で電場が励起されるのか」即ち「地殻を構成する主要な岩石である花崗岩に圧力が掛かると本当に電場が発生するのか」という事である。それを確認する事ができれば、地震と上記の電場観測結果との関係が明白になる。そのために今回はその確認実験を開始する事にした。そこで重要となるのが、花崗岩からの電場放出を確認するためのDC電場センサーである。丁度その時に、同時並行して上記地中観測で使用した線形ダイポール型のDC電場センサーの妥当性を確立させる作業を行っており、そのセンサーシステムの電氣的等価回路のパラメータ依存性を自然界の電場観測データを利用して明らかにする事に成功し、そのパラメータの最適値を決定する事で、センサー出力電圧からセンサー周囲の電場を精度よく算出できる方法を確立した。これを基に、室内実験で使用するための超小型の電場検出用センサーをも完成させたので、それをを用いて室内実験を始めた。ここでは、花崗岩に掛かる圧力により、花崗岩が破壊に至るまでの過程における圧力変化に対する検出電場強度の変化を得る事ができたので、その結果を報告する。

1. はじめに

日置氏[1]が発見した「地震発生の1時間程度前から電離層電子密度の日変化からずれて上昇する」と言う現象について、「その原因は電場が関与しているだろう」と言う意見に対して、それを確かめるために、2021年4月から筆者はそれに沿った観測研究を行って来た。観測開始から約10日間はDC電場レベルに何の変化も見られなかったが、ある時点で急に高周波電場雑音（形態1）を検出し、その55分後に遠方で地震が発生していた事を確認した。一方では、静穏な状態を続けていたDC電場が急激な増加とその緩やかな変動（形態2）を検出していた。そしてその、急激な増加から8時間後に観測点から95km離れた地点で地震が発生していた事を確認した。これらの異なる検出形態では電場励起機構が異なっていると考えられる。形態1ではDC電場に変動が見られない事から、それは震源から遠く離れた電場観測点で検出された状況を示唆しており、形態2では震源近傍での岩盤内での圧力変動に依存した電場変動であると考えられる。しかも両形態が見られる現象は震源が地下50km程度であったという事から。緻密な岩盤内では電場が励起される事が十分に考えられるとの感触を得ていた。しかし、それらを検証するためには、花崗岩そのものからの電場励起を検証する事が必要であったので、各種の花崗岩を準備する事と、信頼できる超小型の電場センサーが必要であった。

花崗岩に関しては、これまで様々な励起実験で使用してきたものがあるので、これを組み合わせ

る事にした。一方、電場センサーに関しては、その検出機能の妥当性を証明する必要があったので、前回の報告以降に、センサーの詳細な理論的機能と観測結果との関連で矛盾の無いものにするための時間を要した。その詳細は下で述べるが、開発した電場測定用の線形ダイポール型の DC 電場センサーシステムはこれまで広く利用されてきたセンサー（Field mill type）に比べ極めて精度が良く、電場値を表出できる事が判り、長さの異なる 2 本の線形ダイポール素子を持つセンサーシステムによる同一時刻における自然界電場現象の観測を行った結果、同一の電場強度が得られた事を確認したので、その超小型センサーを製作し、室内実験でそれを使う事になった。

2. 花崗岩からの電場放射を確認するための実験装置

図 1 はその実験装置の全般を表している。花崗岩に圧力を印加するために製作した木製の台の上の右端には圧力印加用の手動式ジャッキを寝かせて置き、その左には少し大きめの花崗岩柱を寝かせて置き、圧力の掛かる高さを限定し、その左に狭い空間を挟んで、別の花崗岩柱を垂直に立てている。これらの直交する 2 本の花崗岩柱により挟まれた空間に被測定用の小さな花崗岩を置く事により、それに均一の圧力が掛かるようにしてある。今回の実験では、被測定花崗岩は直径 3 cm、長さ 10 cm の円柱を用いた。以前に試みた実験では電場の励起の確認には成功しなかった。その原因は、信頼できる電場値を検出できるセンサーが存在しなかった事と、花崗岩を任意に配置し、任意の花崗岩に圧力を集中

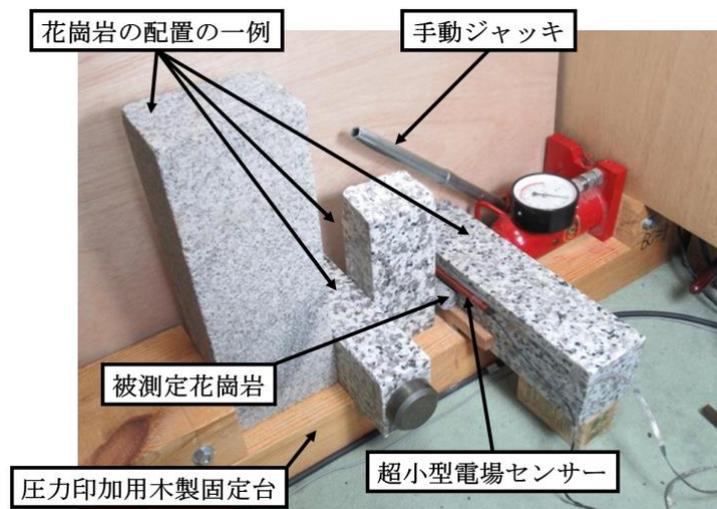


図 1. 花崗岩からの電場放射を確認するための実験装置。

励起された電場を歪ませる事無く検出するために、花崗岩周辺には導電体を置く事は出来ないので、花崗岩を固定する構造物としては木造の台を使用した。右端に見える赤色の装置は手動のジャッキで、印加する力を示すメータがある。様々な向きに置かれた花崗岩柱は電場励起を生じさせる小さな花崗岩に力が集中するように空間を確保するために配置されている。

し、破壊に至るまでの経過をモニターできる精度の良い強力な圧力印加装置が無かったためである。今回の実験は、先ず花崗岩からの電場励起を確認する事が目的であったので、花崗岩を破壊するまで圧力を印加する事ができ、その過程での励起電場の大きさを測定する事であったので、任意の空間における電場値を精度よく測定できる超小型の DC 電場用センサーシステムを完成させる事であったがその開発では、開発してきた線形ダイポール型のセンサーシステムの等価回路のパラメータに対し、自然界の電場データを関連づけることにより、センサー出力電圧と空間電場の値を明確に示す事が出来る関係式を導き出す事に成功し、それを長さの異なる 2 本のダイポールセンサーシステムに適用して、自然界の電場を測定したところ、両者の値が一致したので、新たなセンサーとして確立できた。その成果を論文として投稿し、現在その審査結果を待っているところである。そこで、この間を利用して、上記室内実験を実現するために、開発した線形ダイポール型の電場センサーの超小型化に挑戦

し、この度、そのセンサーを完成させることが出来、本実験に使用する事になった。図2は図1に示された水平に置かれた花崗岩柱と垂直に置かれた花崗岩柱に挟まれた狭い空間に、電場を励起させるための小さい花崗岩柱（直径3 cm、長さ10 cm）と開発した超小型 DC 電場センサーを取り付けた状態を示している。一般に、圧電現象を発生する結晶内では、圧力に関する軸と電気を発生する軸とは異なっているので、今回の実験では円柱花崗岩の径方向に圧力を加えた場合、その直角となる円柱軸に沿う方向に電場が励起されると考えて、円柱花崗岩に均一に力が加わるように、横たえた四角柱花崗岩に平行に配置して

いる。円柱花崗岩の側面と四角柱の側面とでは、面で接しているのではなく線で接触しているために、その部分に強大な力が掛かる事になり、円柱花崗岩は破壊に至るまでの過程での電場励起を見る事ができ、本来の目的を達する事が出来ると期待して実験を行った。

本実験の事前調査測定によると、花崗岩柱の周囲にセンサーを近づけると、そのセンサー出力は変動が激しく、定常状態に安定させる事が出来無かった。この事から花崗岩表面には電荷がランダムに存在している可能性がある事を考え、これを安定化させる必要があった。いろいろ試行錯誤しながら、その対策を探した結果、円柱花崗岩の上側に DC 電場センサーを設置し、その更に上側の角柱花崗岩の面に接地線を張り付ける事で、センサー出力電圧が安定する事が判ったので、図のような配置となった。この図では、線形ダイポール型センサー素子には絶縁円筒カバーが被せてある。これも電荷がセンサー素子表面に飛び込み、出力電圧の変動を防止する為である。この絶縁カバーを外した時の超小型 DC 電場センサー素子の写真を図3に示す。

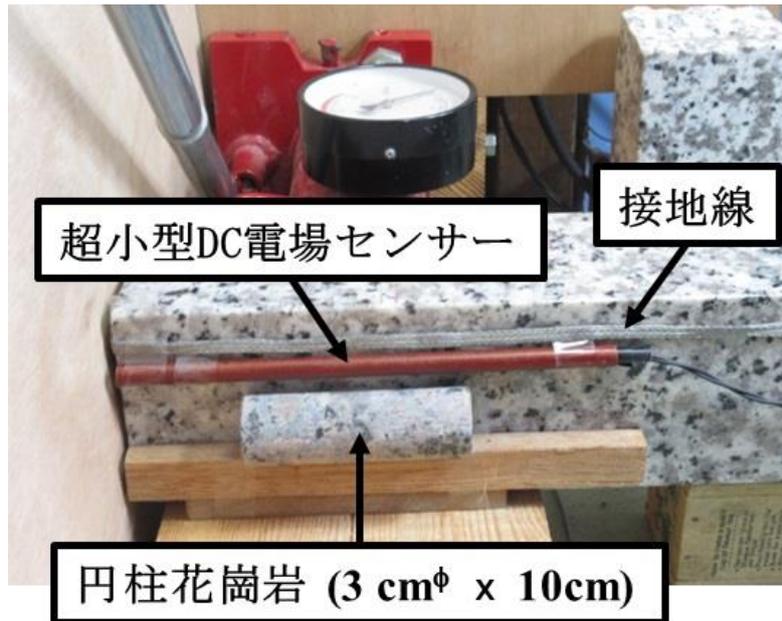


図2 水平及び垂直の矩形花崗岩柱に挟まれた空間に配置された円形花崗岩柱とそのすぐ上の超小型 DC 電場センサーを示している。超小型 DC 電場センサーの上部には接地線が矩形花崗岩柱の側面に張られていつが、これにより、電場センサーの出力電圧は比較的安定した定常的な電圧を示す事が判った。



図3、本実験用に製作した、超小型線形ダイポール型の DC 電場センサー。直線状に配置された2本の円筒状のセンサー素子（直径3 mmφ、長さ10 cm）は互いに GND に対して電氣的平衡が保たれているため、その検出精度は極めて良好と考えられる。

3. 花崗岩から励起された電場の検出実験結果

図4は花崗岩に圧力を印加した時に、超小型の DC 電場センサーで検出された差動増幅器の出力電圧（縦軸で、その単位は V）の時間変化を示している。横軸が時間で 2023 年 11 月 26 日の 11 時 12 分から 12 時 20 分までのデータを記録している。

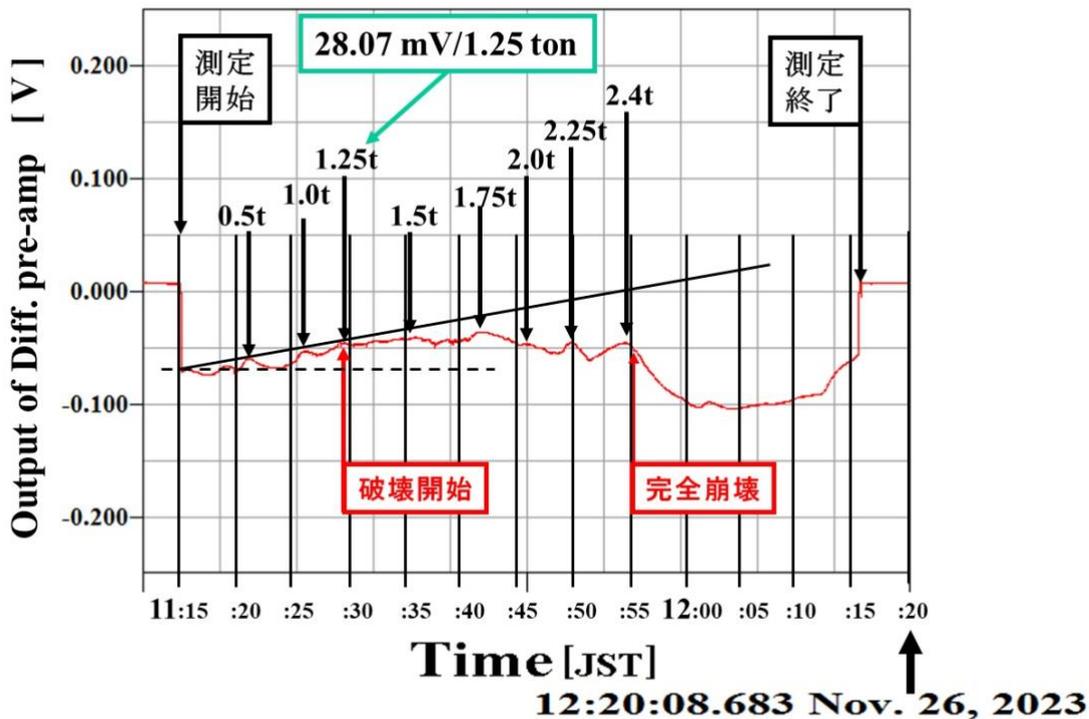


図4. 円柱花崗岩に圧力を印加した時のその近傍に現れた DC 電場によるセンサー出力電圧（縦軸で、単位は V）。実験は 11:15 から開始し、その時点から水平に示した点線のレベルが、実験開始前のセンサー出力の定常レベルを示しており、約 5 分毎に花崗岩に圧力を印加している。実験開始後の 11:20 と 11:25 までは 0.5 ton 毎の増加であったが、その後は 0.25 ton 毎にジャッキのメモリを見ながら手で圧力を増加させている。1.25 ton を印加した直後に円柱花崗岩に破壊が始まった。

実験はジャッキの圧力メータを見ながら手で設定し、最初は 5 分ごとに 0.5 ton 毎増加させていたが、圧力計のメモリに達しても、ジャッキの性能上、すぐに応力が下がってしまう。そのため、記録波形では指定応力以外のところでは窪んだ形を示している。しかしジャッキの応力が下がった時にもそれに比例して電場強度も下がっている事を示唆しており、圧力と電場強度は比例しているものと考えられる。それは 1.25 ton まで印加した圧力のピークを結ぶ斜めの直線がその関係を示している。しかし 1.25 ton を越えた直後に花崗岩に破壊が生じた事を確認した。そしてそれ以上の圧力を加えても、発生す電場強度は印加圧力とは比例していない事をこの実験記録は示している。特に 2.4 ton を加えた 11:55 直後には円柱花崗岩は完全崩壊をしてしまい、急激に電場強度は減少している事を示している。この時の状態を実際の地下岩盤では、硬い岩盤状態であった場所が、崩れて礫状態になって

いと想像できる。その後 12:05 以降は圧力を加えていないにも関わらず、電場強度が増加しているが、これは破壊された花崗岩の周辺の岩盤に電荷が移動している様子を示唆している。

4. 考察

4-1 花崗岩から放射された電場強度

図 4 に示した測定結果から岩盤が破壊されるまでは、発生する電場強度は圧力に比例する事が判明した。今回の実験の場合で、1.25 ton までの圧力に対する励起電場の値を試算してみる。現在投稿中の論文で示している DC 電場センサー出力電圧と検出したセンサー周辺の電場の値 E (単位 V/m) を示す関係式は

$$E = \frac{V_{ab}(R_{opt})}{2Lm}$$

で表される。ここで $V_{ab}(R_{opt})$ とは、センサー素子長 L を持つ線形ダイポール型の DC 電場センサーシステム内の差動増幅器の 2 つの差動入力端子 a および b に挿入する対地抵抗を R_{opt} とした時の差動増幅器 (その増幅率を m とする) の出力電圧である。実際の観測では $R_{opt}=10\text{ M}\Omega$ とすれば、正しい電場値を示す事が自然電場の観測実験結果で証明されているので、それを用いている。

今回の室内実験で使用したセンサーシステムの他のパラメータは $L=0.1\text{ m}$ 、 $m=500$ で、その測定結果は、圧力を印加する前でのセンサー出力値から 1.25 ton を印加した時の出力電圧値までの電圧差は 28.07 mV であったので、それを $V_{ab}(R_{opt})$ として代入すると、 $E = 28.07\text{ [mV/m]}$ が得られた。即ち、1.25 ton の応力を加えた時には 28.07 mV/m の電場が発生した事を示している。

4-2 紀伊大島で検出された地中電場強度との関係

紀伊大島で検出された地中電場の内、2021 年 5 月 6 日 13:32 に地下 50 km で発生した M3.7 の地震前の 06:30 頃の電場強度は $2\text{ }\mu\text{V/m}$ の上昇がみられた。しかし今回の室内実験で得られた花崗岩近傍で検出された電場強度は 1000 倍も桁違いに大きな 28.07 mV/m であった。

この地震時の電場観測と室内実験での検出電場強度の違いについては、地震時の電場励起場所とセンサー位置との距離関係等の検出装置周囲の環境の違いについて考えると妥当な値かもしれないので、それらについて今後詳しく調べる必要がある。

5. 結論

今回の室内で行った花崗岩から放射されたとされる電場強度の測定実験では、花崗岩が破壊されるまでは、花崗岩に加えられた圧力に対して、検出される電場強度も比例的に変化していることから、地下岩盤に地殻変動により加わる圧力により電場が発生する事は大いに有り得ることが示された。この事は電離層で観測される電子密度の変化は地中岩盤で励起された電場が影響している事の証拠と考える事が出来る。今後、様々な花崗岩配置でのこの室内実験を行う事により、その印加圧力と検出電場強度変化の関係と、多点での地中電場の観測を行い、両者で得られた電場強度の時間変化関係を詳しく調べる事により、地震の短期予知は十分可能であると感じている。

参考文献

[1] Kosuke Heki, Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2011GL047908, 2011.

地震予知研究の発展方向を考える

中川 徹（大阪学院大学 名誉教授）

要旨： 近年の地震学は、プレートテクトニクス理論を土台にして、地震計のネットワークによる地震動解析と測地衛星による地殻移動測定などを使い、地震の長期/中期の確率論的予測を可能にできたが、短期/直前予知は不可能として忌避している。しかし、「地震の減災のために、短期/直前予知をぜひ可能にしたい」というのが、国民の願いであり、われわれ日本地震予知学会の目標である。本編はその目標実現の方法論を考察する。基本は「前兆現象を捉える」こと。第一の方針は、(理論先行でなく) 観測実験を基にして実証する「実験科学」のアプローチであり、第二の方針は、(力学的現象よりも) 電磁気学的現象に注目する。特に、「地中電場の変動現象」で顕著な実測データが得られた〔筒井稔(2022)〕ことに注目し、「複数サイトで同時観測し、これが前兆現象の一つであることを実証するプロジェクト」を提案する。

1. はじめに： 本発表の趣旨

私は、地震（予知）研究の専門家ではありません。物理化学、情報科学、創造的問題解決の方法論（特に TRIZ）を研究してきました。2015 年 2 月に日本地震予知学会の会員となり、当学会の学術研究発表をずっと聴いてきました。国民の一人として、専門外の研究者の目から、地震予知研究の重要性と進め方について、考えるところを述べます。

2. 地震研究・地震予知研究・地震減災（防災）対策

日本は全国各地で、ずっと昔からつい最近も度々、大きな地震の災害を受けてきた。その地震の被害をなんとか減らしたい（減災）というのが、全国民の願いである。そのためには、まず、いままでどんな地震が起きたのか、なぜ起こるのか、今後どんな地震が起こりそうか、などを科学的に知ること（地震学の研究）が大事である。さらに、近い将来（短い時間の後に）、どこでどんな地震が起こりそうかを、知ること（短期地震予知）ができれば、減災に役立つ。これらの広域的/地域的な、地震の長期予測と短期予知をベースにして、どうすれば人的/物的/社会的な地震被害を減少できるかを考え、実施する（減災対策）ことが必要である。

予測/予知の研究と減災対策は車の両輪である。予測/予知ができないでも、減災対策はある程度可能だが効率が悪い。予測/予知ができて、減災対策が整っていなければ、効果がない。予測/予知ができ、減災対策の備えがあれば、初めて効果的に減災ができる。

2.1 地震学の研究

地震学は、すでに起こった地震の解析をベースにして、地震のしくみの物理学的解明を目指す。プレートテクトニクス理論の出現により、地震の世界的分布と、地震の機構の理解がずっと明確になった。

地震計により、3 軸方向の地震波が常時連続的に観測されている。多数配置された地震計ネットワークのデータから、一つひとつの地震の震央/滑り方向/滑りの性質/エネルギー/津波の可能性などを知ることができる。同時進行の分析と、後からの分析が行われている。地層/断層/堆積物などの分析や、古文書の解析により過去の地震に関する知識も集積されてきている。また、地震前後の異常現象の（事後）収集と解析も一部に行われている。さらに、人工衛星による（GNSS などの）観測により、（全世界の）地殻の変動が精密かつ定期的に測定できるようになった。この結果、プレート間やプレート内断層における地殻の相対的移動が分かり、地殻内の歪、ストレスの蓄積が明確になってきた。

これらの研究と観測から、どの地域のどの断層において、歪のエネルギーが蓄積しており、過去の地震の記録と勘案して、大/中規模の地震が（近い）将来に起こる可能性がある／高いといった指摘（地域

を指定した地震の長期/中期予測)が(ある程度)できるようになった。ただし、地震を起こす断層間のエネルギー蓄積の時間(数千年~数十年)に比べて、断層間の破壊である地震の時間(数秒~数分)は極めて短いから、その破壊がいつ起こるかを予測することが、極めて困難である。このため、従来の地震学では、長期/中期の地震の確率論的予測をもたらすが、短期/直前の地震予知は不可能であり、実際、いままで失敗してきた。

阪神大震災(1995年)および東日本大震災(2011年)以後、日本地震学会および政府は、「地震の短期/直前予知は現在不可能であり、当面、**地震予知の研究に注力しない(忌避する)**」と表明した。

一つの大きな救いは、現行の「**緊急地震速報**」である。「緊急地震速報」は、地震が発生したことを、震央に近い位置の地震計で観測し、その情報を電信によって広域に伝えて警告し、地震波(揺れ)の到来までのわずかの時間差を利用して、社会に減災の備えをさせる。地震が起こってから速報だから、情報は確実であり、震源、マグニチュード、揺れの強度と地域、津波の可能性などを、比較的高い信頼性で警告できるのが長所である。交通機関をはじめ、人々が防備する(身構える)時間がえられ、安心に大きな寄与をしている。警告から、地震の揺れが襲うまでの時間は、震源からの距離に依存し、距離が近いと、極めて短時間(数秒)しかない(避難の間に合わないこともある)のが短所である。

従来の地震学が、基本的に「**力学的**」な観点の情報を、観測/解明/利用してきたことに留意したい。

2.2 地震の短期/直前予知の研究

地震の数秒前ではなく、数日前とか数分前とかに、(確実な) **地震予知の注意報/警報**が出れば、緊急の防備をし、避難できてきつと有効だ、というのが人々の期待である。どんな大きさの地震が、どこで、いつ頃起こるかを、その地震の起こる数ヶ月~数分程度前に、予知し、減災/避難のために(適切なプロセスとタイミングで社会に)広報することが期待される。しかし、(大きな)地震が今から起こるだろうという「地震予知注意報/警報」は、地震が起こった事実を観測して緊急に伝える「地震緊急速報」よりも、はるかに困難でデリケートな課題である。

それでも、地震の短期/直前予知は、減災のためには大いに有効であり、国民の期待/願望は大きい。「地震予知」は、実用のために、科学として追求すべき研究課題である。この認識から、「**地震の短期/直前予知**」の科学研究(とその実用化)を目指して設立されたのが日本地震予知学会である。

2.3 地震の減災の研究と対策

日本全国で、また世界各地で、歴史時代以来たびたび、人々は地震で大きな被害を受けてきた。地震を起こさなくすることはできないから、その被害を減らすこと(「防災」でなく「**減災**」)がわれわれの目標である。地震の減災のためには、今までの無数の地震の被害を調査/分析し、いろいろなタイプの被害を無くす/減らす方策を取る必要がある。

地震被害のタイプは、国や地域や時代によってさまざまである。地形/地質に関わるものでは、断層のずれ、山崩れ、土石流、地盤の液状化、などがあり、土木工事/植林などの対策が必要である。また、津波も大きな問題で、地域ごとに被害の歴史を知り、集落や設備の高台移転、防潮堤、緊急避難などの対策を取る。住居/建築に関わるものでは、揺れによる倒壊/損壊、その後の火災、生活インフラの停止などの被害がある。耐震設計が必要であり、都市計画などの地域的な減災対策が必要である。社会/インフラに関わるものでは、交通と通信の寸断、電気/水道/ガスなどの停止、生産や物流の混乱、社会の諸機能の混乱などが起こり、経済的損害が甚大になることがあり、影響が長引く。人々の意識は、事前の地震減災対策のすべてに関わっており、直前の緊急避難、地震時と直後の行動などが、人的被害の大小にも関わる。事前の全般的な防災意識の社会的普及が大事な対策である。これらのすべての被害タイプに対する対策は、全社会での長期間の政策/対策/実施/活動が必要な大事業である。

地震研究/地震予知研究は、これら全ての防災/減災活動に適切な基礎と方向づけを与える使命を持つ。

3. 地震予知のアプローチ：「前兆現象」が満たすべき条件

地震予知の基本的なアプローチは、地震が起こる少し前（数ヶ月～数分程度前）に起こる何らかの特微的な現象（「前兆現象」）を捉えて、地震が起こることを予知しようとするものである。

しかしその前に、地震学からの一般的知識と個別的な情報を得ておくことは、必須で有用である。まずこれらを整理しておく（3.1, 3.2）。

3.1 地震学からの知識/情報の利用と限界

日本全国（と周辺）の、地震に関わる地殻の構造（プレートの配置や沈み込み、各地の断層構造など）、過去の地震の履歴（年代、大きさ、被害など）の基本情報がベースになる。地震には、プレート間で起こるもの、プレート内で起こるものの違いだけでなく、さまざまな違いがあり、同一地域でも異なる型の地震が起こり、その間隔も多様で周期性が認められないことが多い。日本全国に地震計（強震計および高感度の地震計）が設置されており、ネットワークを構成し、その常時観測データが蓄積/公開されている。複数の地震計データの（リアルタイムの）解析から、（ある程度大きい（ $M \geq 4$ ））地震の、震央/震源域/マグニチュード/震度分布予想/津波発生予想が推定され、速報として広報されている。測地衛星（GNSS）などにより、地殻の移動が（全国的に）地域的に随分精密に観測/公表されてきており、断層間の歪の蓄積と、地震が起こる長期/中期の予想がはっきりしてきている。以上のような知識と情報にもかかわらず、短期/直前の前兆現象の認定と、地震の短期予知の方法は未解明である。

3.2 地震の物理的モデルからのアプローチ

地震研究から期待されるもう一つのアプローチは、地震の起こる**具体的な物理モデル**から、地震の過程（準備段階、前段階、破壊段階、後段階）を解明して、地震予知に利用することである。地下の断層の種々の性質に関して、何らかのモデル（仮説）をつくり、（室内実験やコンピュータシミュレーションで）その挙動を知り、実地状況に対応させようとする。

特に直前の段階でどのような現象が起こりうるのか、を解明することが期待される。この**前段階の現象**は、第一義的には、力学的現象であり、（高感度地震計や歪計などで）どのような特徴的な事象が観測されるのかを、見つけられるとよい。さらに大事なのは、力学的な事象からの**二次効果**として、どのような電磁気学的な事象が発生しうるのかを解明することである。このような二次効果は力学的効果に比べて数桁小さいであろうが、震源域の広大さと、電磁気学的な現象の観測の感度の高さが、はるかに有効に働くと期待される。電磁気学的な現象が、周辺/遠隔地の地中、近傍/周辺/遠隔地の地上や、大気圏や電離層/成層圏などに、どのように伝播して、観測されうるのかが、解明されるとよい。

地震の多様性は、地震断層の物理的モデルの多様さを必要とし、地下数～百数十 km に対応するモデルの構築と実験/実証は容易でない。まだまだ未解明である。

3.3 何らかの「前兆現象」（の候補）を観測して、地震の短期/直前予知を試みるアプローチ

このような状況の中で、地震予知の試みは、何らかの「前兆現象」（と思われるもの）を観測して、経験的/帰納的/実証的に、地震予知を実現していこうとしている。

まずすべきことは、古来より（民間で）語られているいろいろな「異常現象」や、最近に（科学的手段で）観測されているいろいろな現象を収集して、「前兆現象」（の候補）として検討に値するものを（優先順位を付けて）選び出すことであろう。「異常現象」といわれるものには、諸動物の異常行動、特異な雲や発光現象、地下水位の変化、などさまざまなものがある。（科学的手段による）観測では、「前震」や微小震動の一時的鎮静などの力学的なもの他に、地中や地上の電場/磁場/電磁波の観測、電波の電離層反射の観測、人工衛星を使った成層圏の電子密度の観測、などさまざまに研究されている。

3.4 「前兆現象」と確認され、かつ予知に有効であるための諸条件

基本条件は、「その現象 X が明確に観測（測定）でき、種々の人工/自然起因の類似現象（ノイズ）か

ら区別でき、そのいくらかの後（数週～数分後）に地震が起こるという（**相関**）**関係がある**」こと。具体的には、一つの地震に対して、現象 X が複数の場所や装置で、ほぼ同時/同様に観測され、震源に近いほど強いこと。また、多数の別の地震に対して同様に観測され、その後地震が起こった割合が高い（「空振り」の率が低い）こと。さらに実用上望ましいのは、自動的に安定した連続測定が可能で、地震が発生するだろう時、所、規模などに関する手がかりを含むことである。だから、現象 X を「前兆現象」として確立するには、多数の地震について観測しなければならず、当然長い年月を要する。

ここで注意すべきことは、**地震は多様**だから、地震に付随する「**前兆現象**」も**多様**（でありうる）ことである。（ほぼ）同一地域の地震、（一見）繰り返す地震に対してさえ、研究が進むに連れて「地震の多様性」の認識が進んでいる。だから、すべての地震が現象 X を起こすと仮定してはいけない。現象 X の出現確率が高いことが望ましいが、（それがすべてのタイプの地震で前兆として現れるという）万能性を前提にはいけない。

（前兆現象）と認められ、実用に耐えるためのこれらの条件は、随分厳しい。「**前震**」でさえ、これらの条件を満たしていない。今起こった一つの地震（とその後の小さい余震）の後に、もっと大きい「**本震**」がいつ来るのかどうかを、現状ではよく判断できないのだから。この判断には、今起こった地震と、その地域（と周辺）で起こる可能性がある（ストレスの蓄積がある）地震との、関係（大小、震源域など）の理解が必要である。ただそれでも、それらの情報は次に起こる地震を（短期的に）予知できるとは言えない。結局、「**本震**」が起こった後で初めて、先行した「**前震**」があったと理解される。

1989 年と 1997 年に、国際地震学・地球内部物理学連合（IASPI）の地震予知小委員会が行った世界的レビューでは、40 件の申請のうち 5 件が、「有意の前兆現象」のリストに採択されたが、どれも広範囲/多数の検証を欠いており、（地震のタイプに応じた）実証と実地適用法を示すものではなかった[1]。

ある現象 X が「前兆現象」であると本当に明確にできるのは、曖昧性の残る「相関関係」だけでなく、（ある種の）地震のメカニズムが明確になり、現象 X との**因果関係**が明らかにされたときであろう。

4. 観測/実験を先行させる地震予知研究の方法論

上記のように、従来の地震学は、力学的観点の観測と解析に頼ってきて、長期/中期の地震予測はできても、短期/直前の地震予知の手がかりが得られず、地震予知の研究を忌避する立場をとっている。また、地震のメカニズムを解明する研究はまだ充分発達していず、「前兆現象」を明示するまでに至っていない。この状況において、「地震予知研究」を行うのに、われわれは**どんな方法論**を採用すべきか？

4.1 観測実験を積み上げて実証的に「前兆現象」を捉える

われわれの「地震予知研究」の方法論の第一の側面は、「（理論的推測を主にするのでなく）**観測実験を積み上げて、実証的に「前兆現象」を捉える**ことである。観測実験のためには、ある種の仮説/推測が必要であるが、その仮説の正否や根源のメカニズムの理解は、観測実験の後に初めて次第に明らかになるものとする。これは「**実験科学**」の基本的な方法論である。すでに起こった地震の解析・研究から地震予知の方法が出てくるのを待つ（だけ）でなく、予知する方法の研究を進めることが、地震予知の方法を確立するために必要である。

4.2 電磁気学的な現象の中に「前兆現象」を見つける

われわれの「地震予知研究」の方法論の第二の側面は、「**「前兆現象」を（力学的現象よりも）電磁気学的な現象の中に見出そうとする**」ことである。その趣旨の一つは、力学的な現象による短期/直前予知の研究が行き詰まっており、電磁気学的な現象による研究はまだ未開拓な部分が多く新しい可能性があるからである。また、地震においては、電磁気学的な現象は二次的な現象であることを承知のうえで、電磁気学的な現象の多様性、普遍性、観測の容易性や高感度性などの長所が大きいことを認識しているからである。科学や技術の全般において、**力学的方法から電磁気学的方法への移行**が、科学技術の発展

の最重要の方向であるとの認識が、我々の方法論を後押ししてくれる。

これら二つの側面を持つ方法論は、**日本地震予知学会が設立当初から掲げてきたものである。**

4.3 地震予知研究の方向(1) 地中の電場の変動の観測[2]

日本地震予知学会の学術発表の中で、特に明確なデータを観測し、地震予知研究の将来性を示している（と私が思う）のは、筒井稔京都産業大学名誉教授の**地中電場の変動の観測**である[2]。狙いは、地中の垂直電場を高感度で連続観測し、震源域での電場の地震前後の変動を、地殻内の電気信号として遠隔で捉える。そのデータの解析から、地震の前兆現象を見出すことである。岩盤内の圧電効果によって、電場の発生が期待され、二次効果としては（磁場や電磁波よりも）直接的で、伝搬過程も直接的である。また、その電場の変動は、震源域で平均したものを観測するので、直流成分の測定が適している。

著者が最大限に努力しているのは、地震源からの信号の**S/N比を上げる**ために、測定装置の感度をあげ、ノイズを減らすことである。測定の素子には、長さ 100m の線形ダイポール型 DC 電場センサーを自作し、差動増幅器や AD 変換器等を介して、PC に記録している。ノイズの低減のためには、（これまでの多年の実験から）電車はもちろん、人家を避け、地形をも考慮して、紀伊半島南端近くの小さな島の神社の一隅を選んだ。さらに、人工的な雑音や雷などの自然の雑音の影響を避けるために、地中設置を選択し、内径 10cm 深さ 150m のボアホールを作って設置した。前述の差動増幅器は（温度変化の小さい）地下 20m に設置し、電源周波数を除去する 60Hz ノッチフィルタとローパスフィルタも備えている。信号は 1 秒間隔でサンプリングして、PC に記録しており、ノイズは $0.5 \mu\text{V/m}$ で定常的である。

また、同じ敷地の地上 8m に、東西・南北各方向 5m の**水平電場観測センサー**を設置し、地中センサーと同時並行で観測している。

装置が稼働した 2021 年 4 月～7 月の 2 ヶ月半の**実測データ**から、2 形態の貴重な情報が得られた。

形態 1 は、2021 年 5 月 1 日のもので、08:50 から 46 分間、そして 19:00 から 68 分間、 $10 \mu\text{V/m p-p}$ 以上の**顕著で激しい±の変動**が観測された。10:27 に宮城県沖深さ 50km で M6.8 の地震が発生しており、本件データには同時刻に鋭いスパークが観測されていた。他方、19:00 からの変動に対応するような地震発生の情報はない。地上の水平電場センサーでは、東西・南北の両方向で、上記二つの時間帯で同様の変動が観測されたが、電離層電場の日周変化による緩やかな変動と重なっている。

形態 2 は、2021 年 5 月 6 日のもので、05:25 から**平均電場が $+2 \mu\text{V/m}$ まで上がって約 5 時間持続**し、一旦ほぼ 0 電位に下がって約 3 時間持続、13:30 に瞬間的に $+2 \mu\text{V/m}$ に跳ね上がり、その後（少々の変動を伴い）約 6 時間かけて 0 電位に戻っていった。13:30 には、紀伊水道の深さ 50km で M3.7 の地震が発生していた。

これら 2 形態の顕著な観測データが、地震の発生と関係しており、前兆現象であり、かつ地震の挙動を考察する手がかりを与えている、と考えられる。

4.4 地中電場の変動の観測を「前兆現象」として確立するための考察

今回の学術研究会で、著者筒井稔名誉教授から素晴らしい続報が発表されるものと期待している。

ここには、「前兆現象と認められるための条件」(3.4) に照らして、今後（筒井教授に協力して）展開するとよいと考えることを記述する。

本方法は、「地中電場の変動という現象」を、（極めて）明確に、人工/自然のノイズを（大いに）低減して、高い S/N 比で、1 秒間隔で連続して、観測している。極めて高度な実測方法である。今後の課題は、**地震との相関関係を実証すること**と、観測データから、**起こるだろう地震の、時・所・大きさ・挙動などを予め推定する方法**を創り出すことである。

これらの目的のために、第一にするべきことは、**複数（5-6 程度）の同種（または改良版）の装置を、ある程度（200~500km）離して設置し、同時観測すること**である。それらのデータを解析すれば、ほぼ同

時刻に同様の変動事例が観測されるであろう。それらは、局地的なノイズではないことを示し、信号の到達時間の差と、信号の大小関係から、信号源（震源）の（大まかな）地域と信号の大きさを推定することができる。もし一部の装置だけで（同様の）変動が観測された場合には、信号源が比較的近く局所的であるか、信号源からの信号に異方性があるか、信号経路の一部に減衰領域があるか、などが推定されよう。もし、一つの装置だけで変動が見つかった場合には、その近辺での人為的/自然的原因のノイズ、あるいは装置の不備が推定されるかもしれない。同時観測している、地上の東西・南北 2 方向の水平電場のデータも、信号源の位置と大きさの推定に大いに役立つ。

これらの複数装置から推定された信号源の位置と（信号の）大きさと、その後に観測された地震とが対応すれば、相関の可能性を示す一つの有力なデータになる。あるいは、データから推定されたものに対応するような地震が見当たらない場合もあろう。それは非相関の一データである。

これらの**相関/非相関のデータを多数積み上げる**ことによって、この「地中電場の変動現象」と地震の相関関係が次第に明確になる。特に、電場変動の挙動の違いと、（地震動解析から知られる）地震の性格との対応関係、また、現象観測の（地震からの）先行時間も重要な情報である。非相関のデータは、地震の多様性との関係で、注目/検討すべきである。あるタイプの地震でこの現象が観測されないと分かれば、その理由を考えると同時に、別の現象を使った地震予知の方法が必要になる。

要するに、**一つの装置/サイトで N 年掛けて明確になることよりも、N 個の装置/サイトで 1 年間で明確になることの方が、はるかに多く、説得力があることである。**

4.5 地震予知研究の方向(2) 人工衛星による成層圏/電離層の観測

第二に注目するのは、人工衛星を使って、成層圏や電離層の電磁氣的性質を（全球規模で）観測し、その変動から（**大規模**）地震を予知しようとする方法である。甚大な被害をもたらす大規模 ($M \geq 7$) 地震は、日本全体でわずかしこ起こらないから、局所的な方法(例:4.3)を適用して検証できる機会は少ない。しかし、全世界では発生数が一桁多く、新しい方法を創り、実証・適用を速やかに発展させられる。

圧電効果により地震が地中に電場をつくり、それが大気圏から成層圏へと伝わるとともに、地殻の微小な上下変化が大気圏・電離層・成層圏などの電氣的性質に影響を与えたと考えられている。そこで、世界各国（米・仏・中など）のプロジェクトと協力しつつ、人工衛星を用いて全世界的な観測を行おうとする。日本では、JAXA をはじめ産総研などが推進して、国のプロジェクトが準備されつつある。注目しておくべきことと思うが、当学会が独自に進められる規模でないから本発表の計画には含めない。

5. おわりに： 今後の課題

上記(4.3)の「地中電場の変動現象」は、地震の「前兆現象」として最有望で発展性のある事例だと考える。このような研究を確実にかつ速やかに推進していくことが、近い将来の減災のために重要である。そのために、**日本地震予知学会として、テーマや方針を討論・判断し、研究プロジェクトを立ち上げる**とよい。当面の目標は、複数の観測サイトを作り、観測装置を設置し、それらの観測データをリアルタイムで総合的に記録・監視できるネットワークを備えること。研究プロジェクトは、複数年の研究計画を立て、研究協力者/協力グループを集め、研究資金を得る必要がある。一足跳びの計画ではなく、成果を実証しつつ、資金についても人についても、地道に着実に獲得・拡大していくやり方を採用する。日本地震学会と政府が、地震予知研究を忌避している困難な状況であるが、「減災のために、地震予知をぜひ実現してほしい」という多数の国民の願いが、われわれを支援してくれる。この国民の願いが、「地震予知研究」の基盤であり、それを推進するのがわれわれの責務であると思う。

[1] Max Wyss: Second Round of Evaluation of Proposed Earthquake Precursors, Pure appl. geophys. 149 (1997) 3-16.

[2] 筒井稔「地中における電場観測による地震予知の可能性」(日本地震予知学会 2022 年度学術講演会)

私の地震電磁気 30 年
—SEMS 研究会から日本地震予知学会まで—
児玉 哲哉
宇宙航空研究開発機構

要旨

1990 年代に筑波で様々な地球観測衛星システムの検討に勤んでいた頃、筑波研究コンソーシアムで機械技術研究所の榎本祐嗣先生の地震電磁気現象の話聞き、それは衛星で観測できるのではないかと思ったのが全てのはじまりでした。早速上司に地震電磁観測衛星のシステム検討を提案・即却下されたが、1994 年に宇宙開発事業団の諮問委員会である地球環境観測委員会の固体地球サイエンスチームに、古宇田亮一先生を座長とした地球電磁場ミッション調査サブグループを設置、上田誠也先生や早川正士先生らを委員とし、地球電磁環境モニター衛星 ELMOS の提案書が完成した¹⁾。

1995 年に発生した阪神淡路大震災を契機に、力武常次先生らの主導で SEMS 研究会が設立され、科学技術庁は傘下の特殊法人による地震総合フロンティア研究を開始、理化学研究所は地震国際フロンティア研究、宇宙開発事業団は地震リモートセンシングフロンティア研究を担当することになり、六本木の地球観測研究センターに勤務することとなった²⁾。

特殊法人改革の影響で地震フロンティア研究は終了したが、2001 年には地球物理学の最大国際組織である国際測地学・地球物理学連合に、地震・火山噴火に伴う電磁気研究:EMSEV なる国際ワーキンググループが設立され、上田誠也先生が初代委員長を務めた³⁾。

地震フロンティア研究の終了後は筑波勤務に戻り、2003 年から宇宙科学研究所の小山孝一郎先生や東京学芸大学の鴨川仁先生らの協力により、1981 年に打ち上げられた太陽観測衛星ひのとりが取得した高精度の電離圏電子密度・電子温度データを用い、地震の影響を検討したところ、地震 5 日前から震央上空の電子温度が低下し、地震後 5 日で通常に戻る現象が発見された⁴⁾。

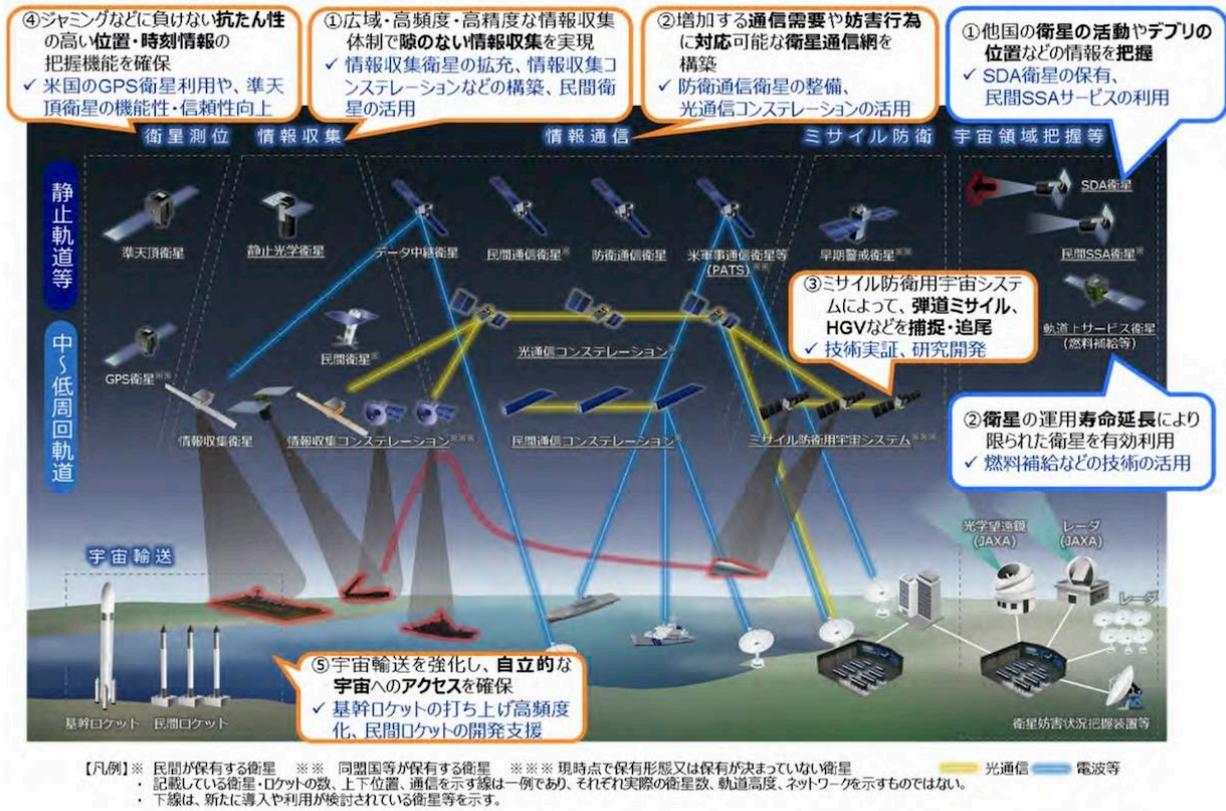
2008 年には宇宙理学委員会に ELMOS ワーキンググループが設置され、衛星の実現に向けた活動が始まり、2010 年に地震先行現象立証を目的の1つとした大気圏・電離圏を総合的に観測する小型衛星群計画で再提案したが、WG 継続は認められなかった⁵⁾。

2011 年に発生した東日本大震災では様々な電離圏変動現象が報告され、翌年の EMSEV2012 開催にこぎつけるとともに、小型衛星群の実現に向け奔走したが、情報収集衛星や準天頂衛星の拡充により、とても立ち上がる状況とはならなかった^{6,7,8)}。

2014 年には早川正士先生らの主導で日本地震予知学会が設立され、第一期の理事を務めさせていただいた。

2015 年に地球観測研究センターから研究開発部門に異動となり、鴨川研究室の協力で DEMETER 搭載電場センサーの開発研究を開始、2018 年から地震先行現象検証超小型衛星 Prelude 開発のために、地震研究所の公募予算を獲得し、今年度は日本大学山崎政彦先生を筆頭に公募研究に採択された^{9,10)}。

超小型衛星 Prelude は、今年 2 月に JAXA のイプシロンロケットの相乗り衛星として選定されたが、2022 年 10 月のイプシロンロケット 6 号機の失敗、2023 年 3 月の H3 ロケット初号機の失敗及び 7 月のイプシロン 2 段モーター地上試験中の爆発により、宇宙開発計画全体の遅延が始まっている¹¹⁾。



我が国の宇宙利用の将来像(内閣府宇宙開発戦略推進事務局)

参考文献

- 1) 地球電磁場環境観測ミッション ELMOS: Electric and Magnetic field Observation Satellite, 宇宙開発事業団 特別報告 NASDA-SPP-950002, 1995
- 2) 児玉:衛星による地震予知の可能性を求めて, 宇宙先端, 13(4), 1997
- 3) 上田:地震予知研究の歴史と現状, 學士會会報, 865, 2007
- 4) 地震が電離圏に及ぼす影響を「ひのとり」のデータで研究, ISASトピックス, 2008
- 5) 児玉他:小型衛星群:ELMOS Constellation の現状, 第 8 回宇宙環境シンポジウム, 2011
- 6) 報告書 地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析, 地球観測 TF 地球科学研究高度化 WG, 2016
- 7) 地球電磁気・地球惑星圏学会:地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来, 2018
- 8) 児玉:新世紀地震フロンティア研究:地上-衛星連携による地震先行現象の確立, パリティ, 33(5), 2018
- 9) 児玉他:地震先行現象検証超小型衛星:Prelude, 第 6 回小型衛星の科学教育利用を考える会, 2018
- 10) 児玉・山崎・鴨川:地震先行現象検証衛星 Prelude の現状, 第 16 回宇宙環境シンポジウム, 2019
- 11) 児玉:地震電磁衛星 30 年:ELMOS から Prelude まで, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 2023

地震前の海鳴りとキジの鳴き声に関する聞き取り調査

織原義明¹⁾

1: 東京学芸大学

■要旨

地震前に海鳴りがある、キジが鳴くといった言い伝えを実際に経験した人がいるかどうか、三陸地方で聞き取り調査を行った。海鳴りに関しては、地震前に聞いたことがある人は一人もいなかった。また、海鳴りを「沖の荒れた天候によって生じた波浪が崩れる際に出す大きな音」と認識している人は少なく、海鳴りといった言葉自体を知らない人もいた。一方、キジの鳴き声については、地震前に鳴くといった回答が多かったことから、言い伝えはある意味事実と考えられる。その理由は、キジが鳴くのは揺れの直前であり、地震の数日前に鳴くといった証言は得られなかったからである。

■はじめに

前年度の発表で、地震や津波に先行する海鳴りのことを取り上げた。インフラサウンドによる海鳴り観測について話したところ、会員の方々から色々とおアドバイスをいただいた。

インフラサウンドによる海鳴り観測の可能性を探るべく、インフラサウンド・モニタリング・ネットワーク (<https://micos-sc.jwa.or.jp/infrasound-net/observed/>) の観測点がある岩手県大船渡市から宮城県気仙沼市で、海鳴りに関する聞き取り調査を実施した。その際、東日本大震災前に気仙沼市で海鳴りとともにキジの鳴き声があったとの報告があったことから (河北新報, 2011)、地震前のキジの鳴き声についても調査した。

■調査について

期間：2023年3月20, 21, 29, 30日の計4日間

場所：岩手県大船渡市、陸前高田市および宮城県気仙沼市の漁港を中心に計31ヶ所

調査人数：58名

調査項目の「地震前に海鳴りを聞いたことがあるか」については、58名全員に尋ねたが、「地震前にキジの鳴き声を聞いたことがあるか」については、19ヶ所34名に尋ねた。

■結果

海鳴りとは一般的に、沖の荒れた天候によって生じた波浪が、崩れる際に出す大きな音とされる。それが厚く低い雲と海面に反射して、沿岸まで伝わると考えられている。しかし、今回の調査で海鳴りをこのように理解していた (と思われる) 人は、58名中7名しかいなかった (12%)。海のことをよく知っていると思われる漁業関係者を中心に聞き取り調査を行ったにもかかわらず、海鳴りに対する認知度は低かった。

以下に回答内容ごとの人数と割合を示す。

- ・海鳴りを実際に聞いたことがある人：1名（2%）
- ・海鳴りを知っているが聞いたことはない人：7名（12%）
- ・荒天時に波が岩場に強く打たれる際の音を海鳴りと解釈していた人：27名（47%）
- ・海鳴りが何なのかを知らない人：19名（33%）
- ・地震前に地鳴りを聞いたことがある：24名（41%）
（そのうち、地震前の地鳴りを海鳴りとして解釈していた人：4名）

次に、キジの鳴き声に関する調査結果を以下に示す。（34名対象）

- ・キジは地震前や地震時に鳴く：23名（68%）
（そのうち、揺れの前、地鳴りと同時に鳴く：20名）
- ・キジは地震時以外でも鳴く：14名（41%）
（そのうち、季節的なもの：4名）
（そのうち、天敵に遭遇したとき：2名）

■考察とまとめ

本調査の当初の目的は、インフラサウンドによる海鳴り観測の可能性を探ることであった。そこで、海のことをよく知っていると思われる漁業関係者の方を中心に聞き取りを行った。しかし、いわゆる海鳴りを実際に聞いたことがある人は一人だけだった。その方は元漁師で、海上で数回聞いたことがあると話していた（ただし、地震前ではない）。また、漁業関係者であっても、海鳴りを知らない人が少なからずいた。このようなことから、海鳴りは極めて珍しい現象なのかもしれない。もしくは、海鳴りそのものを認知していないことから、仮に海鳴りがあったとしても、それと気づいていないのかもしれない。

河北新報（2011）によれば、「東日本大震災前日の3月10日、宮城県気仙沼市波路上地区の住民が、激しい海鳴りとキジの鳴き声を2回ずつ聞いていた。地区では経験的に海鳴りの後にキジが鳴くのは地震の予兆とされていた。」とある。しかし、今回の調査にご協力いただいた気仙沼市波路上地区の住民8名は、誰も同様の経験をしていなかった。調査人数は少ないが、地域住民との交流機会が多い方にも話を伺っている。そのような方であっても、新聞記事は知っていたものの自ら同様の経験はしていなかった。また、誰かから経験談を聞いたこともないとのことだった。したがって、河北新報の記事は、波路上地区の一部に限られたことだったのかもしれない。

キジの鳴き声については、地震の揺れの前に鳴くとした人が6割弱（20名）いた。なかには、キジが鳴いたら地震が来る、といつも身構えている人もいた。今回得られた証言から、キジはP波到来時に地震を感知している可能性が考えられる。また、キジが鳴く地震は、震度3 or 4以上の地震と答えた方が2名いた。ある程度大きな地震でないとは反応しないらしい。さらに、そのうちの地学に詳しい1名は「P波到来前に鳴いているかもしれない」と答えた。一方、地震の1日前や2日前などに鳴くといった証言は得られなかった。これは、仮にキジが地震の数日前に鳴いていたとしても、地震直前のことのほうが印象として強く記憶されるため、数日前のことは地震と関連づけされずに忘れてしまっているのかもしれない。

今回の現地調査からは、岩手県大船渡市から宮城県気仙沼市にかけての三陸地方で、海鳴りは一般的に認知されている現象ではない、と推測される。そのようなことから、地震との関連については明らかにならなかった。一方、地震前にキジが鳴く、といった言い伝えについては、多くの体験談があり、事実と考えられる。ただし、それは地震の揺れが到達する直前のことである。また、地震前以外にも鳴くといった証言が複数あることから、地震前に限った現象とは言えないようである。

<謝辞>

本研究は東京大学地震研究所共同利用(2020-KOBO08 および 2023-KOBO30)の援助を受けました。

<引用文献>

“大震災前日に激しい海鳴り・キジの鳴き声 経験上は直後に地震”, 2011年9月1日河北新報・朝刊・社会面, 26 ページ

首都圏直下地震に伴うメタン起因のジオハザードリスク： —関東大震災でのビル火災被害に学ぶ—

榎本祐嗣*¹⁾, 山辺典昭¹⁾, 長尾年恭²⁾, 近藤 斎³⁾

1: 信州大学上田キャンパス, 上田市常田 3-15-1 ; 2: 東海大学, 静岡市清水区折戸 3-20-1 ; 3:
(株)トヨタコンポン研究所, 名古屋市西区則武新町 4-1-35

* e-mail: enomoto@shinshu-u.ac.jp

要旨

関東大震災なみの首都圏直下地震の発生が懸念されている。現状、発生時期の予知は難しいであろうが、震源や規模はある程度想定できる。となれば発生しうる被害の実像の予測が適正な防災・減災策を講じる上で重要である。東京都が実施した「地震に関する地域危険度特定調査」では関東大震災時に発生した火災域内の多くが地域危険度 1（危険性が低い）と評価されている。耐震性・耐火性の社会基盤整備が進んでいることが危険度を低くしているという評価なのだが、果たしてそれでよいのだろうか？ 地震は社会基盤がよって立つ地盤を揺さぶる。東京低地帯の地盤は南関東ガス田に由来する脆弱性があるが、このリスクが考慮されていない。実際、東京低地帯の土木建設工事現場では南関東ガス田に由来する表面ガス徴候（上ガス）のため、しばしばメタン噴出事故が起きている。関東大地震なみの地震が発生すれば工事現場での地盤破壊をはるかに超えた地変が発生して、メタン湧出・自然着火そして火災被害が発生しかねない。関東大震災での日本橋区の耐震・耐火性の大層高層の多くは震動に耐えたが、数時間から十数時間ののち焼失した。首都圏の社会基盤の防災・減災を考えるうえで、このときの実像と真摯に向かい合う必要がある。

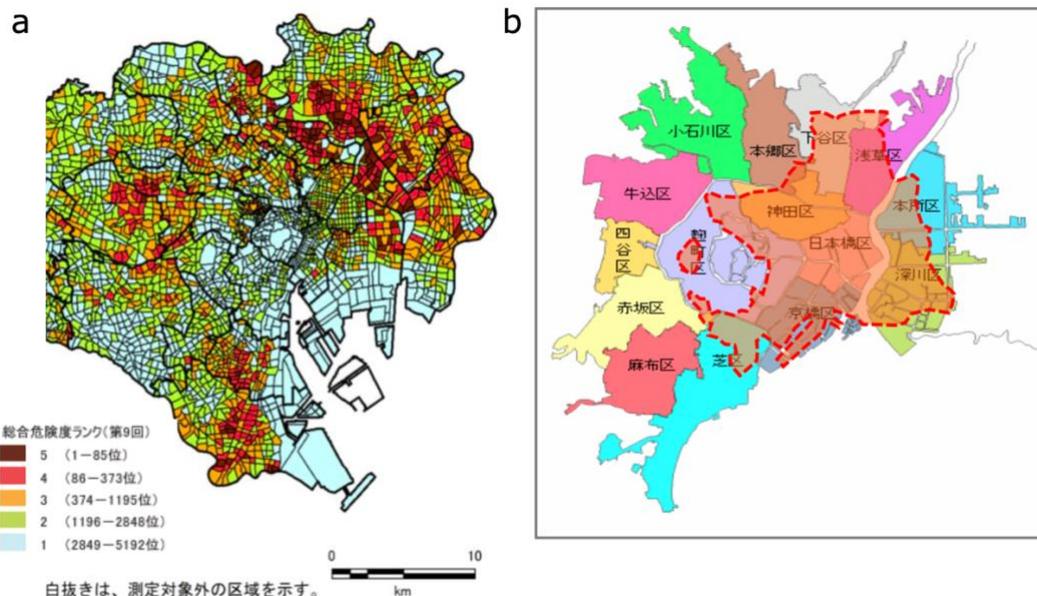
はじめに

地震先行現象の観測から“いつ・どこで・どれくらいの規模”の地震が発生するのを知ることが、地震国日本が負う科学技術の高い目標の一つである。一方、首都圏直下地震や南海トラフ地震など繰り返し発生する大地震は、発生時期の直前予知はできないまでも、震源や規模はある程度予測できる。となれば地震発生の予知・予測だけでなく、どのような被害が発生するかの予測、予測に対しての備えをえた防災・減災のため何をすればよいか重要な課題になる。

関東大震災の発生から 100 年となる今年、首都圏直下地震に関連した話題がさまざまなネット情報、シンポジウムやTV特番などで取り上げられ、警鐘が鳴らされた。東京都都市整備局による「地震に関する地域危険度測定調査（第9回）、最終更新日：令和5（2023）年2月22日を公表も防災・減災対策の一環として提示されている。その主な内容は、都内の市街化区域における地震

に関する危険性を①建物倒壊危険度（建物倒壊の危険性）、②火災危険度（火災の発生による延焼の危険性）、③災害時活動困難係数及び④総合危険度（①と②の指標を合算し、③を乗じて総合化したもの）が5段階で示されている（図1a）。ところが関東大震災時の火災域の限界内（図1b）の広い範囲でもっとも危険度が低い1となっている。この地域には、社会基盤の耐震・不燃化が進んでいるとの見立てから、そのような評価になっている。結果として超高層ビルが林立し、昼間人口が膨らみ、地震時に近くの避難場所では収容しきれないため“地区内残留地区”（地区の不燃化が進んでおり、万が一火災が発生しても、地区内に大規模な延焼火災の恐れがなく、広域的な避難を要しない区域）に指定されている。しかしこの防災計画には懸念すべきことがある。図1aは建物など社会基盤の耐震性・耐火性に着目した評価であって、それらが拠って立つ地盤の南関東ガス田に由来する脆弱性が全く考慮されていない。関東大震災クラスの地震が発生すれば東京低地帯の地盤は大きく破壊され、天然ガス表面微候の見られる低地帯でメタン湧出ゆえの火災発生のリスクがある。このリスクの考慮なくして地震総合危険度評価とは言い難いのではないか？

関東大震災時にも旧日本橋区などに耐震・耐火性の大廈高楼はあった。その多くは大震動には耐えた。しかし地震から数時間から十数時間あとに激しい火災に見舞われ多くは焼失した。果たして耐火性のビルが延焼で焼失したのか、日本橋区の大廈高楼で起きた火災の実像に迫ってみる。



a) 地震に関する地域危険度測定調査[第9回] 総合危険度（出典：東京都都市整備局,最終更新 2023年2月）,b)東京市の区割りと関東地震による火災域と出火地点（点線域内）。

日本橋区で発生した火災の概要

「日本橋、京橋の方は地盤がいいとみえて倒壊家屋が少なく、従って出火も少なかった。だから地震後数時間は火事の心配をしなかった。」（和辻,手記「地異印象記」1923）。しかし数時間～

十数時間あと猛火が発生，翌日未明には日本橋区の殆どが焦土と化した（図 2a,b）．東京市 15 区の焼失率は，日本橋区 99.3%，本所区 96%，神田区 94%，京橋区 86%，深川区 85%であった．

『日本橋区史』によると，地震直後に日本橋区本町三丁目 15 薬品問屋 小西惣七（午後零時十分頃出火）ならびに同区本石町三丁目 薬品商 小島義忠（午後零時十五分頃出火）から出火，そののち図 2b の火災動態図の矢印で示すように四方に延焼していった．「この火が日本橋川の南へ飛火したのは，午後五時半頃で日本橋郵便局の付近であった．一方西河岸町の方も午後七時半頃麴町区方面からの飛火を受け，前記の飛火と相合して南方へ延焼」，日本橋通筋を南下した．しかし延焼を受け難いはずの大廈高樓の火災被害について『日本橋区史』の記事は触れていない．

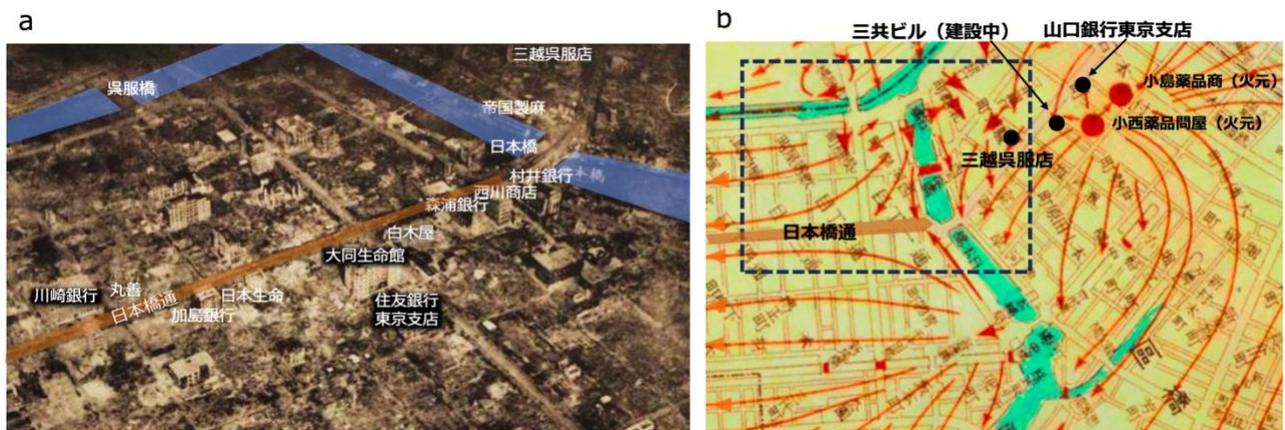


図 2 a)震災後の日本橋通の航空写真（出典：『大正震災写真集』関東戒厳司令部編，1924），ビル名などを加筆．b) 日本橋通付近の火災動態図（『日本橋区史』，1937），点線枠は図 2 の範囲．

日本橋区の大廈高樓の火災被害の事例

「日本橋の橋を渡って本石（ほんごく）町へ出て行っただが，丁度三越の前に差し掛かったとき，にんべんのあった横町通りで，一件のビルディングの高い窓の一つ一つから，火焰が外に吹き出していた．その凄まじさに誰も手をつけようとしていない異常な風景が，おののいた私の心に恐ろしさをそそった．」当時丸善で店員をしていた作家佐多稲子の震災体験である（佐多，『私の東京地図』，1953）．“にんべん”の横に並ぶビルは当時工事中であった**三共ビル**（鉄筋コンクリート構造 7 階建）である．地震直後，この付近で黒煙を上げる光景が撮られていた（図 3a）．黒煙が強い風で煽られている様子は見て取れない．このビルの被害の状態について，「震害絶無と言ってもよいくらいである．焼害も又殆ど言うに足らず．僅かに只階下に於いて燻った跡を見るのみであった，壁体又は床板の罅裂（カレット），化粧材料の剥落などは全く無い」（『関東震火災視察記』1924）．ということだから，これは佐多が見た火焰が噴き出していたビルではないようだ．

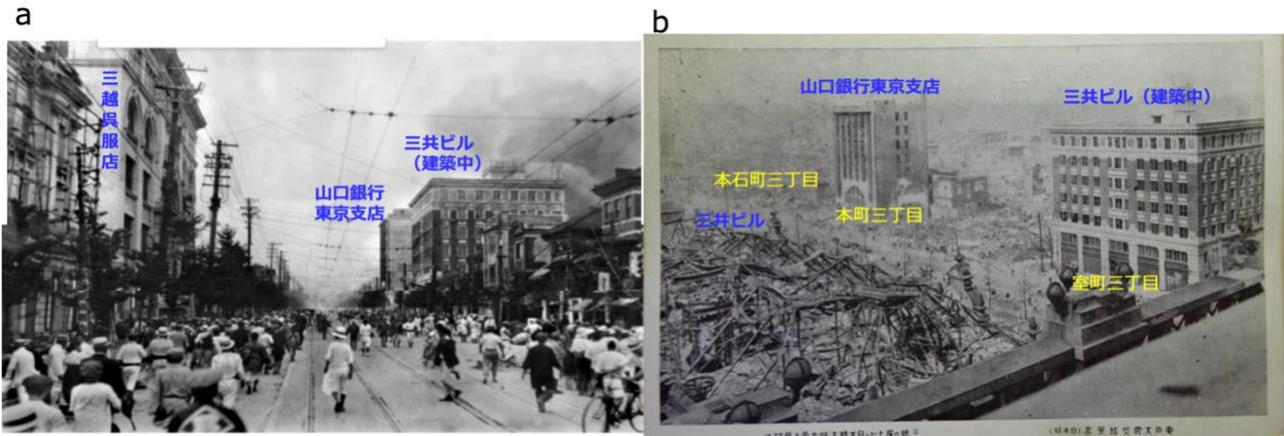


図3 a)地震発生から間もない日本橋室町の大通り。三共ビル（当時建築中でほぼ完成）もしくは付近で黒煙が立つ。三井ビルの背後にある小西薬品商から立ち上る黒煙を思われる。b) 三越呉服店からみた震災あとの室町通り。都立復興記念館 蔵)

三共ビルの近くに室町通りに面して**山口銀行東京支店**（鉄筋コンクリート七階建）が建つ（図 3a,b）。住所は前述の出火点となった小西惣七薬種商と同じ本町三丁目、山口銀行は「西、北の二方が道路に接している」ということだから北側の道路の向いは上記の小島薬品商のある本石町三丁目である。「斯の建物（山口銀行）の震災の被害は殆ど認められない」（同上）。付近は焼失したが、「この銀行は一階の営業室及び其周囲の各室は火災を免れたけれ共、上層の各室は全部焼失した」また「外部化粧の損害は極めて少なく、白色貼附煉瓦の少しく燻ったのと、南側の壁の一部が剥落しているのみである。窓硝子は火災の為に悉く破壊されていた」（同上）。おそらく上層階で激しい火災が発生し窓を破壊して火焰が噴き出したと推測する。となれば佐多が見た光景はこの銀行の火災ではなかったか。この銀行は外部からの延焼の影響を受けていなようなので、推測になるが、空気より軽い可燃性ガスがビル内の上階に溜まり爆発的な燃焼が起きた可能性が考えられる。そうであれば瓦斯管からの漏洩ガスか、南関東ガス田に由来する上ガスが火源の候補として考えられる。当時東京市内の都市ガスの需要家は日本橋区が最も多かった。

その可能性は斜め向かいの**三越呉服店**の火災のもあてはまりそうだ。三越呉服店の火災の状況を伝えた記事を列挙する。なお下線は筆者らによる。

- ① 「震害としては、電車通りに接する旧館（東館）と称する方には殆んど認められないが、新館（西館）と称し西側正金銀行に面する方の側壁の震害甚だしく（中略）大災に関しては内部が悉く焼失し、屋上硝子屋根の鉄骨は、猛火の為に其の強度を失ふて屈曲垂下した。「ワイヤーグラス」は、氷柱の如くに溶解して、鉄骨に附着し在るを見受けた」（『関東震災視察記』1924）。
- ② 「大地震の当日は恰も土曜日の事とて相当の顧客もあり食堂の如き満員の有様であったため叫喚と混乱警（たと）ふるにものなくそれでも一同先づ屋外に立退き附近の火の手も此の建物には

及ばず午後五時半頃まで無難でもあったが、午後五時半俄然屋内より火を発生して東洋無比のデパートメントも此の大災厄には勝ち難く遂に数千萬円の損害を算して日本橋畔哀れにも痛ましい残骸を曝すことになった」（『関東大震火災記念号』第壹巻（歴史写真会,1923）。

- ③（中央气象台の石垣の上から藤原咲平が見た光景）「（9月2日）午前三時頃三越から吹き出した焰の如きは太陽の色に近き程の白光であった」（藤原,科学知識 震災号,1923）
- ④「七階建の宏壮な三越も、玄関の両側に控えて、来客を迎えていたライオンだけが、今でもあの恐ろしい顔を往來に向けているだけで、玄関から七階の天井を透かして大空が覗ける始末である。」（『大正大震災記』時事新報社,1923）。
- ⑤「三越呉服店にては白金（融点 1768.3℃）が溶解したのであるから、其の温度の恐るべく高いことが分かる」（『大正震災志』上,内務省社会局編,1926）
- ⑥「商品全部を一物も搬出せずことごとく灰塵に帰せしめしこと遺憾千万なり」,「当店の自動車乗用貨車合計 15 両と丸の内別館内地下室のガソリン庫は難を免れたる事は復興の上に大俚諺を齎（もたら）したり」（『株式会社三越 100 年の記録:1904-2005』2005）。

以上を要約すると、周辺からの延焼ではなく 1 日 5 時半頃に内部で発火し、一物も持ち出せないほどほど火の回りが早かった。特に翌日午前三時ころ白色の火焰が吹きあがったときの火焰はかなり高温で、このとき白金を溶かし天井が焼け落ちたと推察できる。

帝国製麻ビルは日本橋川の畔に建つ鉄筋コンクリート四階建てで、「外観に於て何等の被害がなかったようである。火災としても、僅に四階（最上階）の内部と塔屋を焼失したに過ぎなかった」（『関東震火災視察記』1924）。

以上に紹介した大廈高樓は、外部からの延焼を受けたとは考えにくく、内部で最上階に充満した可燃性ガスの高温燃焼が疑われる。

一方、日本橋通 1-3 丁目の日本橋通筋のビル：**村井銀行**、**森村銀行**、**西川商店**、**加島銀行**、**白木屋**などは周辺の火災による外部損傷が甚だしく、内部に延焼して焼失した。特に白木屋は火災発生からわずか 15 分で焼け落ちた（『白木屋三百年史,1957』。しかしながら白木屋の斜め前にあった**住友銀行東京支店**のみ火災被害を免れ、翌日にも業務が再開できるほどであった。

一方日本橋筋 通三丁目の**丸善本社**（鉄骨煉瓦造三階建（一部四階）は「実に無残な倒壊振りを示していた」（図 4a）。鉄骨は飴のように曲がり崩れた（図 4b）。「斯の倒壊は、地震直接の原因ではなくして、火災から起こった」「當時斯の建物を襲。ふた猛火の如何に兇暴であったかを痛感したという（8 関東震火災視察記）,1924）。丸善嘱託社員の翻訳家内田魯庵の手記『灰塵十万巻（丸善炎上の記）』1997）に詳しい状況が記してあった。「ケサミセヤケタ」の電報を受け取り、半信半疑のまま直ちに現地に駆けつけた。そこで聞いたことは「今暁四時半、隣家の富田洋服店の火熨斗（ひのし）場から発火して、一間と離れない丸善の二階に直ぐ燃付いて、瞬く中に仮営業所の

全部に火が廻って到頭（とうとう）隣家の二三軒までも焼け落ちて了（しま）った」。宿直の三名，寄宿の小僮十名は全員無事で「火さき早いし，手は廻らず，一番重要な書類を漸とこさ持ち出しただけで，商品は殆ど全部が焼けて了った」。

鉄骨を熱変形・溶解させるに十分な，おそらく 1000℃をゆうに超える高温の炎がまたたくまに広がったようだ。だから単に隣接の火熨斗場からの延焼による崩落とは考えにくい。というのも内部には書籍など可燃物が豊富にあったが，室内は酸素不足になるため火焰温度は高々数百度，外気が流入してフラッシュオーバーが発生しても 1000℃強である（平沢ら，消防科学研究所報，1994）。それゆえ鉄鋼が飴のように溶解するほどの高温が継続することは考え難い。

丸善と道路を隔てて隣り合う川崎銀行本店は「工事中でコンクリートを打ち終り，漸く外部腰石の花崗岩を一階に於ける窓口の邊まで据へ附けた位の程度であった。コンクリートの面に何等の損傷あるを見受けなかった」。すなわち丸善ビルが焼け落ちた原因は局所的に発生した可燃ガスの激しい燃焼によると推測する。



図4 a)震災後の丸善本社（右）と建設中の川崎銀行(左),b)横網公園に展示してある丸善本社の「溶解した鉄柱」

まとめ

東京低地帯には南関東ガス田に由来する表面メタンガス徴候があり，首都直下型地震時に火災誘発のリスクとなっている。土木・建築分野では『施設整備・管理のための天然ガス対策のガイドブック』（営繕工事における天然ガス対応のための関係官公庁連絡会議，2006）はあるが，果たしてそこでの指摘が防災・減災対策に活かされているだろうか。関東大震災でのビル火災の事例に学べば，地区内残留地区にある耐震耐火性のビルが天然ガス火災に対して安全であるとは言い切れない。また避難場所でのメタン監視もない。これら社会基盤がよって立つ地盤の強靱化も防災減災対策の視野にいれなければならないのではないか。具体的には東京低地帯におけるメタン湧出の常時監視と国土強靱化のための地中ガス抜きは喫緊の課題ではなかろうか。

容量性円形平板アンテナを用いた地震前電磁放射の観測

太田悠一朗¹⁾, 三浦健伸²⁾, 吉野千恵³⁾, 服部克巳^{3,4,5)}, 今住則之⁶⁾

- 1: 千葉大学融合理工学府
- 2: 千葉大学理学部地球科学科
- 3: 千葉大学大学院理学研究院
- 4: 千葉大学環境リモートセンシング研究センター
- 5: 千葉大学災害治療学研究所
- 6: 日本技術士会千葉県支部

要旨

近年、LF 帯に関連した地震前兆現象が報告されている。その一例が、1996 年の Yamada and Oike による兵庫県南部地震前の宇治観測点における LF パルス数の増加の報告である。しかし、増加したパルスの一部は、後に Izutsu(2007)によって雷活動によるものであると報告されている。地震に関連した LF 帯電磁放射の観測から雷活動を識別することは困難である。一方、当時と比較して ICT や GPS の技術が発達した現在では、干渉計の開発が可能である。そこで、LF 帯電磁波源の時空間推定が可能な LF 帯広帯域干渉計の開発に着手した。干渉計素子アンテナとして、容量性円形平板アンテナ（直径 33cm、アルミ製、時定数 30 μ s、下限周波数 5.3kHz）を用いた。円形平板アンテナは、詳細な波形観測にノイズとなるコロナ放電が発生しにくいという利点がある。受信信号は 500 kHz のローパスフィルターを通過し、サンプリング周波数 4 MHz、分解能 16 bit で AD 変換される。2022 年 10 月 4 日から千葉大学理学部屋上（北緯 35.63 度、東経 140.10 度）において、1 台の干渉計素子による予備試験観測を実施した。観測中、2022 年 11 月に観測点から半径 100km 以内で M4.9 の地震が 2 回発生した。本研究では、この 2 回の地震に伴う LF 信号の検出を試みた。まず、1 つの干渉計素子を用いて波形とパルス数の調査を行い、対地雷放電に起因するとは考えにくい地震前のパルス数の増加と、その時間帯の典型的な波形を検出した。また、スペクトログラムにより波形の特徴を調べた。また、干渉計システムとして 3 つの干渉計素子の性能を評価し、各素子間で精確に同期できていることを確認した。詳細は発表で述べる。

地中電磁波による高精度地震予知法の開発と適用:その 1 全体概要

内山義英¹⁾

1:ブレイン 代表

要旨

筆者らは、地震の短期予知及び直前予知の精度向上と地震予報への適用を目的として、地震学に加え電磁気学、音響学、振動工学、破壊力学などを複合した地震予知学の一手法を構築し、地中電磁波（地磁気・地電流）、低周波音及び前震活動からなる 3 種類の地震前兆を用いた高精度な地震予知法「3 種前兆地震予知法」を開発し、これを地震予報配信ネットワークに適用し実用化した。

1. はじめに

地震の短期予知及び直前予知は、人的被害のみならず社会的損害を軽減する上で極めて重要な技術である。しかしながら、従来の単一の前兆現象又は単一の学問領域に基づく予知方法では、予知精度の確保が困難であった。このため筆者らは、地震学に加え電磁気学、音響学、振動工学、破壊力学などを複合した地震予知学の一手法を構築し、地中電磁波（地磁気・地電流）、低周波音及び前震活動からなる 3 種類の地震前兆を観測・検知し、これらを総合的に分析・判定する高精度な地震予知法「3 種前兆地震予知法」(TOP 法: Triple Occurrence Prediction)を開発した。この高精度地震予知法を世界に配信する地震予報ネットワークに適用し実用化したので、以下その全体概要を報告する。

2. 3 種前兆地震予知法の概要

本地震予知法で採用した 3 種類の前兆現象のうち、低周波音は、地震発生 of 1 ヶ月～2 ヶ月程度前に発生するため、もっぱら中長期地震予知に用いる。地磁気・地電流異常は、地震発生 of 1 週間～2 週間程度前に発生するため、地震発生 of 1 週間～2 週間前までの短期地震予知に適用する。前震活動は、地震発生 of 数時間～数日程度前に発生するため、数日前までの直前地震予知に適用する。

ここでは特に、地磁気・地電流異常を用いた短期地震予知手法は、高精度な地震予報に直結し、避難や備蓄などの地震防災活動において有用で中心的となり得るため、以下これについて説明する。

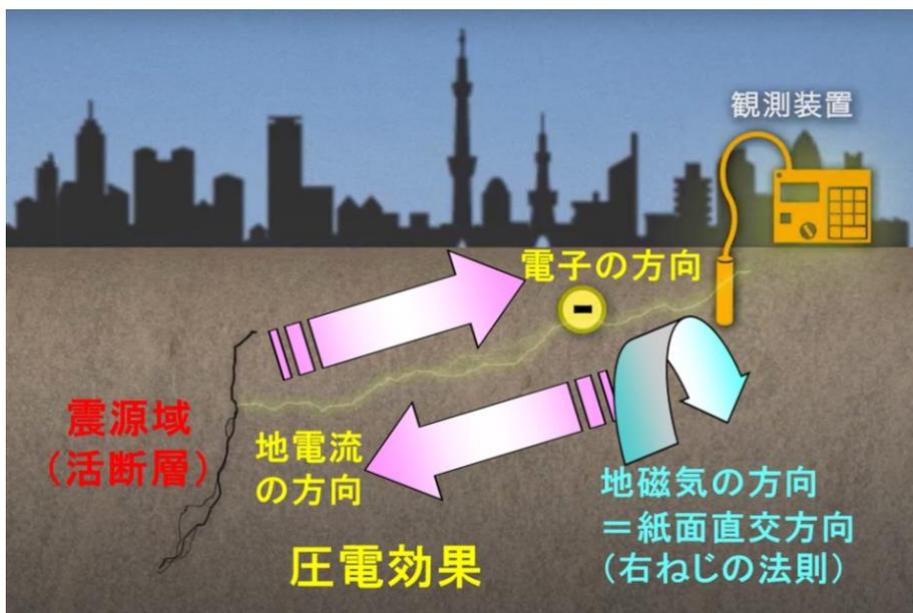


図 1 地磁気・地電流異常の原理

地磁気・地電流の異常（図 1）は、トラフや断層を構成する岩石が破壊する直前に「圧電効果」と呼ばれる原理により発生することが、岩石破壊実験や地震観測などにより確認されている¹⁾。この現象は、岩石破壊現象の初期過程そのものであるため、地震発生とはほぼ 100%の相関性があり、前兆現象として必要十分条件であると言える。これを前兆現象の 1 つとして採用することで、地震発生の 1 週間～2 週間前までの短期予知精度が大幅に向上した。

3. 地磁気・地電流異常による短期地震予知方法

地磁気・地電流の観測は、全国 18 ヶ所に観測データ網を構築し、観測データを一元的に集約し、分値をベースとしてデータ解析、地震予知分析及び地震予報の発信を行っている（図 2）。

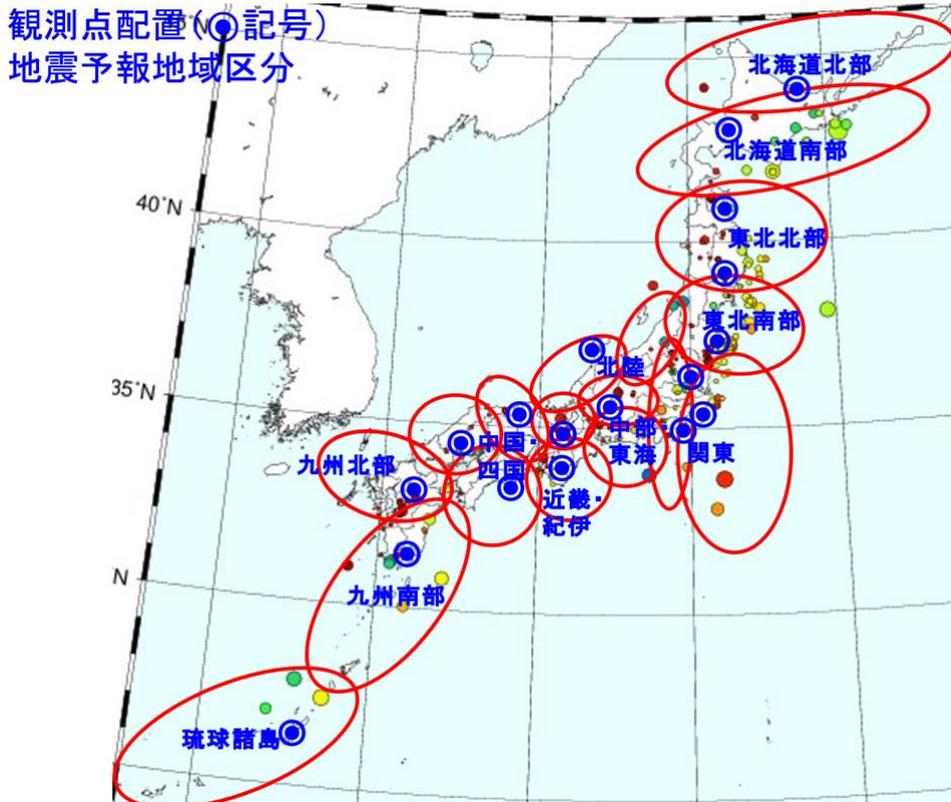


図 2 観測点配置、地震予報地域区分

ただし観測結果の生データのままで、地震の前兆現象とともに不要なノイズを含んでいる。ノイズの原因となる事象としては、落雷、電車・自動車・機械などの人的なもの、太陽の磁気嵐、火山活動、地球の自転運動などがある。ノイズ波形は、その種類ごとに特定の振幅や周期特性を持っているため、独自の波形解析技術を用いてノイズをキャンセル・除去し、正味の観測点波形を抽出する。

ノイズ波形の周期帯は半波長当たりの目安値として、落雷は 5 秒以下、電車・自動車・機械などの人的なものは開始時と終了時が 30 秒以下で継続時間は該当物が停留した場合その時間数、太陽の磁気嵐は 12 時間～48 時間程度、火山活動は 3 時間～12 時間程度、地球の自転運動は 24 時間となる。M5.0 以上の地震の前兆波形の周期帯は、観測点から震源域までの距離に依存して、10 分～12 時間程度であるため、ノイズ波形のうち火山活動を除いてほぼ周期帯が異なるため除去される。

火山活動によるノイズの発生は、マグマの流動に伴う流動誘電現象によると考えられるため、別途全国の火山噴火活動を照査し、経験値として 1 日の噴火・爆発回数が 5 回以上又は火山性地震回数が 10 回以上の場合、マグマ流動によるノイズとして除去する。また落雷及び太陽の磁気嵐に関しては、周期特性による除去に加え、別途これらの発生情報を照査・確認し、バックチェックを行う。

ノイズを除去し抽出された各観測点の観測点波形に基づいて、予測される地震の発生地域、規模 M (マグニチュード)、発生時期の 3 要素を、独自の波形解析技術及び判定基準によって分析・決定する。具体的な分析手順例として、地磁気波形を用いた分析手順を以下に示す。

- ① 地震発生頻度が比較的少ない特定の観測点波形（北陸、中国西部など）を基準波形とし、これと各観測点波形との差分（偏差量）を各観測点の地震前兆波形とする。
- ② 各観測点の地震前兆波形において、地震規模 $M \geq 5.0$ を満たす異常偏差量が見られる観測点の周辺地域を、地震予測地域とする（図 2 に地震予測地域と対応する予報円を示す）。
- ③ 地震規模 M を判定する偏差量の基準値は、地磁気 H 成分又は F 成分の基準波形からの偏差量の絶対値が、 20nT で $M5.0 \pm 0.5$ ($M \geq 5.0$)、 30nT で $M6.0 \pm 0.5$ 、 40nT で $M7.0 \pm 0.5$ 、 50nT で $M8.0 \pm 0.5$ 、 60nT で $M9.0 \pm 0.5$ （中間値は線形補間）とする。なおこれらの基準値は、観測点ごとに地域差があるため適宜補正を行う。
- ④ 発生時期は原則として、地震前兆現象が発現した時点（予測可能となった時点）より 1 週間～2 週間以内である。ただし、台風や低気圧の通過・停滞、他国での大地震・火山大噴火の発生などの自然現象や外部環境条件が影響する場合或は規模 M が 7 クラス以上に大規模化すると、地震発生が遅延する傾向があるため、予報期間を 3 週間～最長で 1 ヶ月間まで延長することがある。
- ⑤ 地震前兆波形の H 成分又は F 成分及び D 成分を用いて、右ねじの法則により地電流が流れる方向（電子の発生源＝震源域の方向）を予測し、発生地域分析のバックチェックを行う（図 1）。
- ⑥ 海洋に近い観測点（北海道北部、琉球諸島など）では、地震前兆波形の周期成分が震源までの距離を表し、レイリー散乱の原理により、距離が長い（短い）ほど波形が長周期化（短周期化）するため、発生地域分析のバックチェックとする。例えば北海道北部の地震前兆波形では、周期帯が 30 分以下で地震発生地域は北海道北部、30 分～1 時間で北海道南部、1 時間～2 時間で東北北部、2 時間～3 時間で東北南部、3 時間～6 時間で関東、6 時間以上で伊豆諸島と予測される。
- ⑦ ⑤及び⑥により、②の結果である震源域までの距離が修正された場合、距離減衰効果を考慮し前兆波形の時間積分値を等置する²⁾よう偏差量の補正を行い、改めて③より地震規模 M を修正する。

4. 大地震の予知・予報事例（北海道胆振東部地震）

2018 年 9 月 6 日に発生した北海道胆振東部地震の前兆現象として、同年 8 月 26 日 16 時頃（JST）から北海道南部及び東北北部で、地磁気・地電流の大きな異常が観測された。地磁気異常値は、北海道南部と北陸間での F 成分の偏差量が 40.8nT であり、東日本大震災以来の大きさであった（図 3）。

この異常波形が落雷や磁気嵐などのノイズではなく、卓越周期 45 分（北海道南部の周期帯）を確認し、その異常レベル及び方向性により、北海道南部又は南東部（又はそれらの沖合い）において $M7.0$ 前後の大地震発生が予知されたとして、8 月 27 日 17 時 02 分に短期予報として臨時地震予報を発表した（図 4）。過去の地震検証結果及び経験則より、発生時期は地磁気・地電流異常の観測から 1 週間～2 週間以内であり、大気圧などの外部環境条件が平常状態であったため、予報期間を 10 日間とした。

臨時地震予報の内容は、以下の各項目である。

- ・臨時地震予報 2018 年 8 月 27 日 17 時 02 分（JST）
- ・地域：北海道南部（同沖）、根室半島沖～色丹島・択捉島沖
- ・規模：マグニチュード 7.0 ± 0.5
- ・最大震度：5 弱～6 弱 ・最大津波波高：1m
- ・予報期間：10 日間

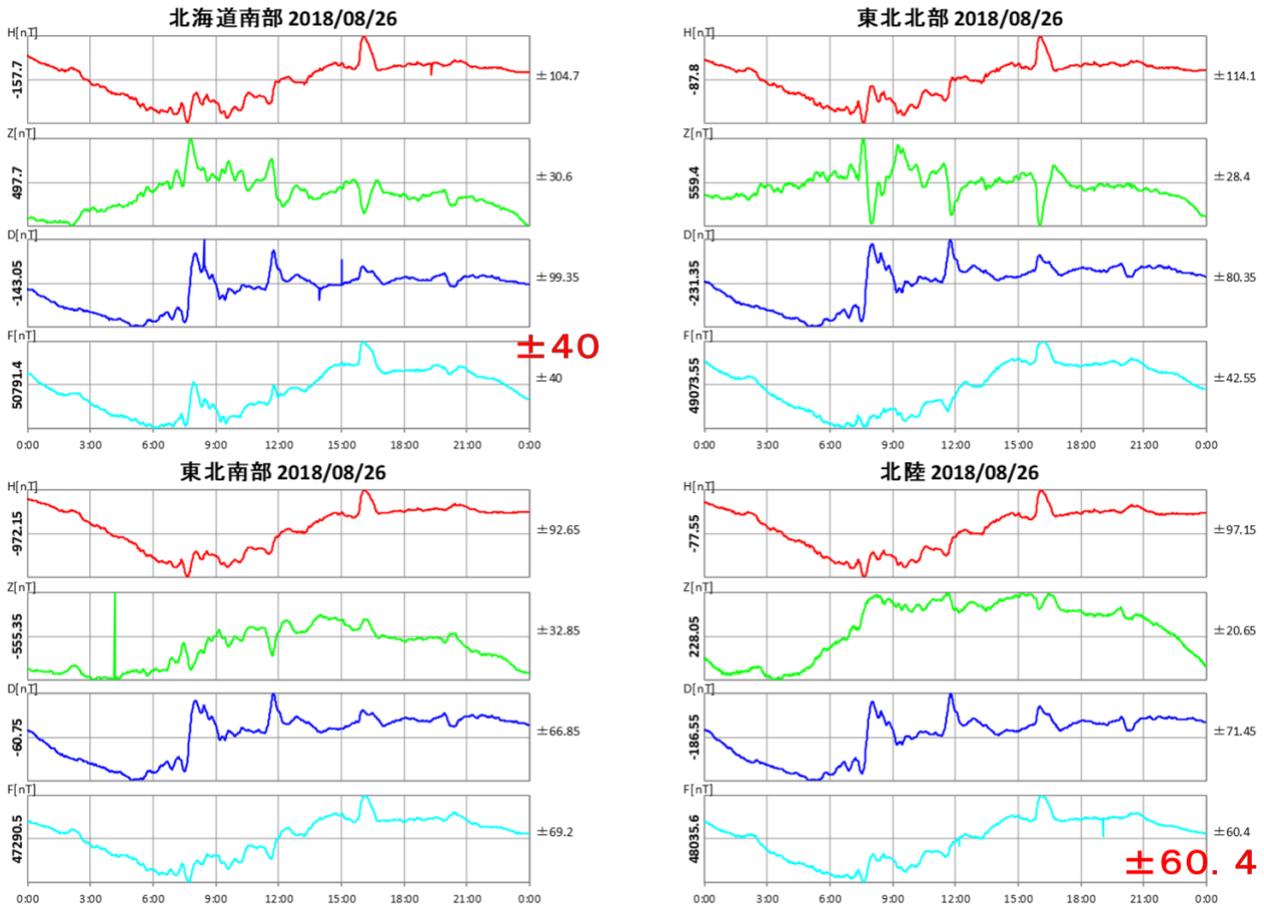
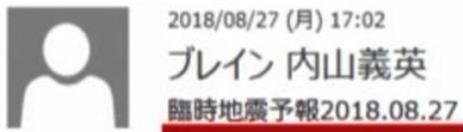


図3 北海道胆振東部地震発生前の地磁気異常 (2018年8月26日 (UTC))



ブレイン地震予報 2018.08.27 第211号

現在、大地震（7≦マグニチュード）発生の可能性がある地域は、北海道南部（同沖）、根室半島沖～色丹島・択捉島沖、マグニチュード7、0±0.5、最大震度5弱～6弱、最大津波波高1mです（予報期間10日間）。

今後、この地震予報に関連する情報につきましては、随時お知らせします。

図4 臨時地震予報 (2018年8月27日 17:02)

実際に発生した北海道胆振東部地震本震は、以下のとおりである。

- ・震源域：北海道胆振地方中東部
- ・日時：2018年9月6日3時08分頃 (JST)
- ・規模：Mj6.7 (Mw6.6)
- ・最大震度：6強→7に訂正された。 ・最大津波波高：津波は発生しなかった。

震源域が陸域であったため、津波は発生せず、最大震度は想定より大き目ではあったが、地震規模M、発生地域及び発生時期の3要素は予測・予報の範囲内であった。

M7クラス大地震の予報事例としてはこの他に、2016年4月の熊本地震本震 Mj7.3 (最大震度7)、2021年5月の宮城県沖地震 Mw7.0 (最大震度5強)、2022年9月の台湾島東部地震 Mj7.3 (最大震度6強) などがある。

番号	地域名	8月					9月				10月			
		8月3日 ~ 8月10日	8月10日 ~ 8月17日	8月17日 ~ 8月24日	8月24日 ~ 8月31日	8月31日 ~ 9月7日	9月7日 ~ 9月14日	9月14日 ~ 9月21日	9月21日 ~ 9月28日	9月28日 ~ 10月5日	10月5日 ~ 10月12日	10月12日 ~ 10月19日	10月19日 ~ 10月26日	10月26日 ~ 11月2日
1	北海道北部													
									Mw5.0	Mw6.2	Mw5.3	Mw5.1		
2	北海道南部													
				Mw5.5 Mw5.7										
3	東北北部													
			Mj6.2		Mj6.0			Mj5.2			Mb5.4 Mb5.0	Mw5.0 Mw5.1	Mb5.0	
4	東西南部													
			Mw5.1		Mw5.1		Mb5.5	Mw5.9	Mw5.2 Mw5.2					
5	関東													
			Mw5.1		Mb5.0	Mw5.0	Mj5.0	Mw5.2 Mw5.8 Mw5.2	Mw5.7 Mb5.0 Mb5.0			Mw5.2		
6	北陸・信越													
7	東海・中部													
8	近畿・紀伊													
9	中国・四国													
10	九州北部													
11	九州南部													
		Mw5.5												
12	琉球諸島													
		ML5.0 ML5.0	ML5.0 ML5.9 Mb5.1			ML5.5	ML6.7	ML5.0 Mw6.6		Mw5.7	ML5.8	Mj5.0 ML5.3 Mw5.7 Mw5.0	Mw5.9 ML5.1	Mw5.0

*1:地震予報の規模表示で、 はM5級地震(M5.5±0.5)を示し、 はM6級地震(M6.5±0.5)を示す。

*2:Mjは気象庁マグニチュード、Mbは実体波マグニチュード、Mwはモーメントマグニチュードを表す。

*3:赤字は予報成功地震、黒字は予報不成功地震を表す(予報対象はM≥5.0又は震度5弱以上とし、火山性地震を除く)。

*4:発生地震は10月31日分までを表示する。

5. 地震予知・地震予報の実績及び精度

2016年熊本地震以降に国内で発生した M5.0 以上又は震度 5 弱以上の地震（火山性地震を除く）に関する地震予報精度は、2023年9月30日現在で予報地震発生数 912 件／地震発生数 974 件＝93.6%であった。本年 8 月からは本地震予報ネットワークを出典として、世界初*の大規模定期地震予報となる「週間地震予報」が、毎週 1 回発行部数約 150 万部の新聞紙上で定期連載されている（図 5）。予測規模を M5 級～M9 級の 5 段階表示とした詳細予報により、8 月 3 日の連載開始から 10 月 31 日までの 3 ヶ月間で、M6 級地震 5 件を含む予報地震発生数 49 件／地震発生数 50 件で予報成功率＝98.0%、9 月 1 日～10 月 31 日までの 2 ヶ月間では 36 件／36 件で予報成功率＝100%を達成した（表 1）。

週間地震予報		*ギリシャの VAN 法 ³⁾ では、公的機関よりその地震情報が公表されているが、概ね M5.5 以上の強地震が予測された際に 1 年に 1 回程度公表される不定期的な予報であり、その予報成功率は 60%～70%程度と報告されている ⁴⁾ 。予報成功率 90%以上の高精度地震予報が、100 万部を超えるマスメディアで定期連載されるのは、世界的に前例のない実用化事例である。
北海道北部	地震注意報M 6	
北海道南部	安全安心予報	
東北北部	地震注意報M 5	
東北南部	地震注意報M 5	
関東	地震注意報M 5	
北陸・信越	安全安心予報	
東海・中部	安全安心予報	
近畿・紀伊	安全安心予報	
中国・四国	安全安心予報	
九州北部	安全安心予報	
九州南部	安全安心予報	
琉球諸島	地震注意報M 6	

M＝マグニチュード／琉球諸島は震度 5 弱以下の見込。台風と低気圧通過後の地震発生に要注意。出典：ブレイン地震予報

図 5 週間地震予報（2023 年 9 月 7 日）

6. まとめ・今後の課題

従来、単一の学問領域では高精度な地震予知は困難と言われていたが、地震学に加え電磁気学、音響学、振動工学及び破壊力学を複合することで、科学的な原理・根拠及び予知ロジックに基づいて中規模地震から大地震を高精度に予知する、「3 種前兆地震予知法」を開発した。本地震予知法の特徴は、従来の VAN 法などとは基本的に異なり、地震前兆波形の周期特性及び振幅量（とその偏差量）を中心パラメータとした、比較的簡明な原理及び予知ロジックに基づく独自手法である。これにより精度が高い地震予報が可能となり、世界へ向けた高精度地震予報配信ネットワークとして実用化した。

今後、地中電磁波のメカニズム究明結果、予知の 3 要素を決定する各基準値及びノイズ判定値に関する定量的統計データ及び中長期検証結果などを含めた、詳細な続報を報告する予定である。

筆者らは、本地震予知法に基づく高精度地震予報を、地震被害、特に人的被害を大幅に低減する上での有用な防災技術と位置付け、地震予知技術の更なる精度向上並びに予報実績の蓄積を図るとともに、社会的認知向上と地震防災活動への有効な反映を図ってゆく所存である。

参考文献 1) 吉田真吾「岩石破壊に伴う電気シグナルの発生メカニズム」月刊地球 20, 1998, 608-614

2) 上田誠也「地震予報に成功した国－ギリシャ－」地震 第 2 輯 第 44 巻特集号, 1991, 391-405

3) Varotsos, P.A. (2005) The Physics of Seismic Electric Signals. TERRAPUB, Tokyo, 338p.

4) 石橋明「ギリシャ式地震予知に関する EOS 誌上での最近の討論について」, 日本地質学会, e-フェンスター, コラム, 2010

前兆現象を用いた短期地震予測とその条件

服部 克巳^{1,2,3}

1. 千葉大学大学院理学研究院
2. 千葉大学環境リモートセンシング研究センター
3. 千葉大学災害治療学研究所

要旨

2023 年は 1923 年に発生した大正関東大震災からちょうど 100 年目にあたる。関東大震災は、その発生日である 9 月 1 日が「防災の日」と定められているように、近代日本の首都圏に未曾有の被害をもたらした特筆すべき災害で、日本における災害対策の出発点となっている。この大正関東地震は相模トラフで発生した巨大海溝型地震である。相模トラフでは繰返して大規模な海溝型地震、いわゆる関東地震が発生し、1703 年には元禄関東地震が発生し、大きな被害が発生したことがわかっている。一方、首都圏では直下型地震も懸念されている。内閣府の発表では今後 30 年以内に約 70%の確率で首都圏直下型地震が発生するとされている。地震防災はどちらかというと事象発生後の対応に重きをおいた対策となっている。事前の対策は建物や構造物の震災に対する強靱化が主で、気象の豪雨災害のように事象の発生が不確実ながら、事前情報に基づいて、能動的に発災前に避難行動をするような仕組みはない。これは危機回避行動の意思決定者に適切に情報が伝わり、リスクマネージメントができていることを示している。これは意思決定者の経験と事前情報の精度によると考えられる。日本の豪雨災害の場合、毎年どこかで台風や梅雨、ゲリラ豪雨（最近では線状降水帯という言葉もあるが）が発生し、事前・事後の時空間的事象の知識や知見が蓄積されていく。また、事象の観測技術も進み、レーダー画像などによる現在の状況の把握も可能である。一方地震の情報についてはどうであろうか？発震後については、十分とはいえないまでもハザードマップなどの整備が進んできた。事前情報については、長期予測以外は政府見解としては成立していない。被害をおよぼす大規模地震の時間スケールと人間の生命的な時間スケールがマッチせず、知見や景観が効率的に蓄積していない。先祖代々土着している住民が多い地域では、伝承として残存はしている。

安全を確保するための危機回避の行動を促す、リスクマネージメントを効果的に作成・運用するには事象の精度良い情報が必要である。危機回避行動や避難行動のためには事前情報の活用が重要である。地震では、過去の地震発生履歴に基づいて統計的に将来を予測する長期予測（30 年以上）、地震の発生を表現する物理モデルに基づき、実際の観測データと比較をしながら将来の地震発生を定量的に予測する中期予測（年のオーダー）、地震の発生が近づくると発生しやすくなる現象（前兆現象）をとらえることにより予測する短期予測（月・週・日のオーダー）がある。人間生活に対して最も有効な予測は短期予測であることは疑い大であろう。前兆現象の検知は様々な観測データの地震に関連する異常変動を精度よく検出することである。しかし、すべての地震に先行してデータの異常が存在するわけではない。また、データの異常が発生しても、必ずしもその後地震が発生するわけではないことが問題である。そこで、統計的な有意相関と前兆性の検証が必要不可欠で、このアプローチは薬が効くかどうかを判定する手続きと類似している。すなわち疫学的なアプローチによって予測を評価する。これはデータ駆動型予測科学の範疇で、異常と地震の時空間相関を詳細に調査することによって、その物理的メカニズムを解明していく戦略をとる。この手法の欠点は、特にビッグデータを扱う場合、相関するデータセットやシーケンスが多数存在するが、必ずしも因果関係がないことである。実際に統計的な有意相関と前兆性の検証が担保された観測パラメータは複数確認されている（地震前兆はあると学会に認識されたことは重要）。しかし、地震準備過程は複雑なので、現象を定量的に説明可能な統一的な物理機構モデルがまだ提案されていない。本講演では、懸念される首都圏直下型地震への備えが喫緊の課題であると認識されるなか、前兆現象を用いた短期予測による地震災害軽減研究（短期予測研究）の方向性について提案する。

マルチチャンネル特異スペクトル解析 (MSSA) を用いた
ULF 帯電磁場観測データに含まれるノイズ除去法の開発 -広帯域データへの適用-

A development of noise reduction method for ULF band electromagnetic data
using Multi-channel Singular Spectrum Analysis (MSSA)
- Application to the wide band data -

金子 柊¹・茂木 透²・吉野 千恵²・服部 克巳^{2,3,4}

1. 千葉大学大学院融合理工学府
2. 千葉大学大学院理学研究院
3. 千葉大学環境リモートセンシング研究センター
4. 千葉大学災害治療学研究所

Shu Kaneko¹, Toru Mogi², Chie Yoshino², Katsumi Hattori^{2,3,4}

1. Graduate school of Science and Engineering, Chiba University Japan
2. Graduate school of Science Chiba University, Japan
3. Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Japan
4. Disaster Medicine Research Institute, Chiba University, Japan

要旨

地震活動に関連した電磁気現象が幅広い周波数帯で確認されている。特に ULF 帯電磁場変動 ($f < 10$ Hz) はその表皮深度が数 10 km に達することから、地殻内部やプレート境界で発生する地震に関連した電磁場変動 (地震電磁気信号) を直接観測する手法として期待されている。しかし、観測データは地震電磁気現象に加え、太陽地球間相互作用に起因する波長数 1000 km のグローバルスケールの磁場変動や、その磁場変動により地中で生じる誘導電場変動、また直流電車からの漏洩電流といった観測点近傍の人間活動に起因する電磁場変動などを含む。しかし、地震電磁気信号はこれらのノイズ成分と比較してそのエネルギーが小さいことから、適切な信号弁別が不可欠である。

短期地震予測は人口密集地でより効果的であるが、一方でそのような地域では人間活動に起因するノイズの影響が大きいので、人間活動が低下する時間 (例えば JST 2-4) に対象を絞って解析が試みられている。つまり、1 日のうち、1/10 程度のデータしか有効利用できておらず、昼間に発生した地震電磁気信号は見逃している可能性がある。したがって、より効果的に地震電磁気信号を検証するには、人工ノイズの影響で SN 比が悪いデータでも有効な信号弁別法が不可欠である。そこで、我々は房総での ULF 帯電磁場変動での信号弁別にも適用されている特異スペクトル解析 (SSA) を多チャンネルに拡張したマルチチャンネル特異スペクトル (MSSA) を用いた信号弁別法を開発している。

SSA では、まず観測時系列 (データ長 N) を窓長 WL で切り取り、部分時系列を作成する。次に部分時系列を 1 データずつずらして作成し、切り取った順に並べた軌道行列 ($(N-WL+1) \times WL$ 行列) を作成する。この軌道行列とその転置行列を掛け合わせ、得られた行列を固有値分解することで、固有値、固有ベクトルを作成する。したがって、この固有値・固有ベクトルを組み合わせることで、 WL 個の主成分に分解できる。この主成分の寄与率や相関などに注目することで、任意の時系列を取り出

すことが可能である。MSSA では C チャンネルのデータを並べて作成した軌道行列 ($C \times (N \cdot WL + 1) \times WL$ 行列) について同様の操作をし、各チャンネルの観測時系列をそれぞれ $C \times WL$ 個の主成分に分解する。この過程で、軌道行列では窓長より小さい周期の信号が繰り返し現れるため、MSSA は各チャンネルに共通する信号の分解に適している。

本研究で開発している MSSA を用いたノイズ除去法では、対象観測点の電磁場 5 成分（水平磁場 2 成分、鉛直磁場、水平電場 2 成分）と、対象観測点から数 100 km 以上離れた位置にある参照磁場観測点（水平磁場 2 成分）を用いた 7 成分に共通する信号をグローバル信号として除去し、対象観測点固有の信号を抽出する。本発表では周期 30~10000 秒程度の信号を対象として房総半島で取得した実データに適用した結果を報告する。

GNSS 地殻ひずみの時空間変動にみられる被害地震発生前の予兆特性

神山 眞¹⁾, 三神 厚²⁾, 小出英夫³⁾, 沢田康次⁴⁾, 秋田 宏¹⁾

1): 東北工業大学名誉教授, 同大学客員研究員

2): 東海大学建築都市学部土木工学科教授

3): 東北工業大学工学部都市マネジメント学科教授

4): 東北大学名誉教授, 東北工業大学名誉教授

要旨

連続型 GNSS で観測される地表各点の地殻変位に対して三角網 FEM 解析を適用して算定される地殻ひずみの時空間変動には被害地震発生前に明確な予兆的先行現象が存在する。この予兆的先行現象は誰が見ても疑いのない明白に異常な時空間変動として出現する。本稿では最近の凡そ 5 年以内に発生した被害地震のうち三つの内陸地殻内地震の時空間変動が代表例として紹介される。ここで紹介される地殻ひずみの時空間変動における予兆的特性は変動パターン, 変動開始時期, 変動出現期間長などに地震ごとの個性が認められる。また, 対象とされる地震はいずれもそれらの震央が FEM 三角網でカバーされる地域に存在して, 地震メカニズムは逆断層タイプ, 地震規模は凡そ $M_j6.0$ 以上という特徴を有する。

1. はじめに

筆者らは連続型 GNSS 観測システムの国土地理院 GEONET による地殻変動観測データから算定される地殻ひずみ (ここでは GNSS 地殻ひずみと略称) には地震予知に資する有用な情報が含まれていること, およびその具体的な事前解析(prospective analysis)への適用例として被害地震発生予測マップの作成などを発表した¹⁾。その後も関連の考察を継続的に加えてきているが, 新型コロナ禍の影響があり, この学術講演会での発表は間をおくことになった。本稿では上記の予測マップ作成以降の継続研究として, 本邦で最近発生した 3 つの代表的な内陸被害地震を対象に, それらの発生前に観測された予兆的な先行現象としての GNSS 地殻ひずみ累積過程を紹介する。地震予知における 3 要素(where, when, what size)のうち, 上記の事前解析¹⁾では where のみに力点を置いて GNSS 地殻ひずみの時空間変動解析を行なったが, 本稿では where に加えて when と what size にも意を用いて GNSS 地殻ひずみの時空間変動特性を考察する。

2. 連続型 GNSS から算定される地殻ひずみ解析の有用性

周知のように地震は地殻内に存在する潜在断層における滑り破壊現象の結果である。したがって, 滑り破壊現象を物理的に構成する応力, ひずみは地震発生およびその予兆現象を考察する上で最も直接的かつ合理的なパラメータと考えられる。応力とひずみのうち, 直接的な観測が困難な応力に比してひずみは地殻変位の空間微分として求められるのでデータ取得が比較的容易である。ここで, ひずみの評価には大別して二つの手法が考えられる。一つは, strain gauge のような観測機器を地中に埋設して直接的にその時空間変動を観測する方法である。この方法は精度良くジャストポイントでのひずみを得ることができる。ただし, 地中設置には技術的な課題が多く, それらの空間的配列も容易でない。その結果, 比較的古くから試みられているにも関わらず, この種のひずみ観測システムの構築は展開領域に限界があり, 発生場所の未知な地震に起因するひずみ観測およびその地震予知への応用という面で十分な成果が得られていない現状である²⁾。これに対して, 地表で広域的に展開される GNSS 観測による変位データを多くの地点で同時に観測し, これらに空間的微分処理を施して間接的に地殻ひずみを算定する方法が第 2 の手法として考えられる。この方法は地点のジャストポイントでのひずみ算定には不向きで

あるが、変位観測領域の平均的なひずみ算定が可能であり、地震という発生場所の事前特定が困難な事象に対して GNSS のアレー観測という特徴を活かしてひずみを広域的にかつ網羅的に評価対応できる利点がある。筆者らは後者の手法の特徴を活用し、連続型 GNSS の観測システムである国土地理院 GEONET により得られる地殻変位に三角網 FEM 手法を適用することにより各種のひずみ成分を算定して、日本全国に展開される約 2,500 地点における地殻ひずみの時空間変動を統一的に算定処理する半自動システムを構築するとともに¹⁾、関連のデータ処理システム³⁾の充実に努めてきている。

3. 地殻変位、累積地殻ひずみ量の時空間変動解析に関する手法概要

GEONET データを利用した地殻ひずみの時空間変動は大略、以下の方法で解析する。

(1) 日本全国の約1,300箇所で展開されるGEONET観測点を対象にデローニ三角網を構成して水平成分変位、鉛直成分変位ごとに三角形有限要素法 (FEM)により各種のひずみ成分を算定する。

(2) 水平成分変位、鉛直成分変位は日毎に得られるF5解により特定観測点を固定点として、かつ2011年東北地方太平洋沖地震の発生翌日を起点として、その累積量を2011年3月12日から2023年7月1日の時点まで日にち毎の変動データとして求める。なお、文献1)の解析ではF3解を日々の座標値として採用していたが、その後、国土地理院がF5解を新たに公開し始めたことにより、日々の座標値としてF5解を用いている。このような日変動データとして与えられる累積変位からFEMで求められる各種ひずみ成分をデローニ三角網の三角エレメント毎に算定する。さらに、各日の各種ひずみ成分データから座標変換によりひずみ不変量である水平面内での工学的最大せん断ひずみ(γ_{max})、体積ひずみ(dilatation, $\epsilon_{dilatation}$)、およびひずみ主軸方位を求めて各日毎に時空間変動として整理する。また、参考として鉛直成分変位の累積量 v を対象に鉛直ひずみ相当成分として $\partial v / \partial x$ 、 $\partial v / \partial y$ (ここに x :東西方向、 y :南北方向)を同様に各日毎の時空間変動として算定して整理する。なお、これらの算定ひずみはデローニ三角網における個々の三角エレメント領域内での平均ひずみを意味する。ここでは算定されたひずみを個々の三角形重心点座標での値として整理する。なお、ここで求める二つのひずみ成分 γ_{max} および $\epsilon_{dilatation}$ は後述の地震断層すべり現象の構成則であるRSF摩擦則⁴⁾に密接に関与するパラメータであるとの認識に基づき求められる。

(3) これらの整理された二つのひずみ成分はFEM三角エレメント毎に日変動の時系列データとしてプロットされる。また、これに加えて2011年3月12日から2023年7月1日までの期間で二つに分けた小期間 (2023年7月1日から遡る直近の1年間およびそれ以前の期間)において、これらのひずみ成分の時系列変動を対象に線形回帰分析を実施してそれぞれのひずみ時系列変動の回帰係数を算定する。これらの日変動の時系列データのプロット図と回帰係数の算定結果は後述のようなひずみ日変動履歴における異常変動の一次探索として利用される。なお、ここでの回帰分析の詳細は文献1)を参照されたい。

4. 最近の代表的被害地震における地殻ひずみ累積過程にみられる予兆的変動特性

GEONET 観測点を対象としたデローニ法により構成された三角エレメント網を図1に示す。三角形エレメン

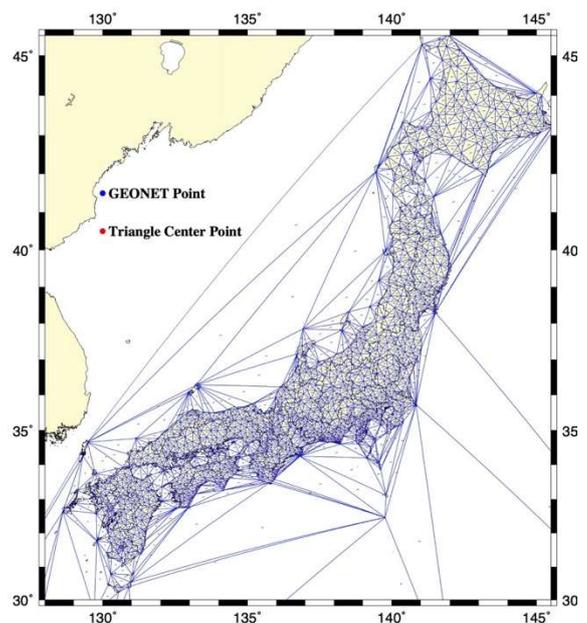


図1 デローニ法による三角網

ト総数は 2,473 に及ぶ。これらの三角エレメントは海上にも展開され、三角形状もその大きさも多種多様であるが、FEM 解析の精度保障の観点から実際の考察では適宜取捨選択を行い、相応しくない三角エレメントは考察の対象としない。また、三角エレメントの各点を構成する観測点で変位データの日々の値が種々の理由で欠測となる場合があり、その場合は同エレメントでのひずみ算定が不能となることから考察対象外とされる。結局、本稿執筆時点で有効とされた三角形エレメント総数は 2,152 である。

本稿では文献 1) の解析を閉じた 2018 年 7 月以降から本稿解析をまとめた 2023 年 7 月 1 日までの各三角エレメントにおけるひずみ成分 γ_{max} および $\epsilon_{dilatation}$ の日変動にみられる時空間変動と被害地震発生との関係を考察する。この期間に発生して気象庁が被害地震と認定している地震は合計 23 である。これらの地震を地震規模 M_J と震源深さを付して図 2 に示す。GNSS ひずみで地震発生の予兆を把握するためには感度レベル保障の観点からひずみ算定地点が地震発生領域をカバーしていることが望ましい（「カバー条件」と仮称）。本稿ではカバー条件を満足し、かつ、図 2 の地震のうち最も被害が甚大であった地震とそれに次ぐ被害のあった地震の二つの地

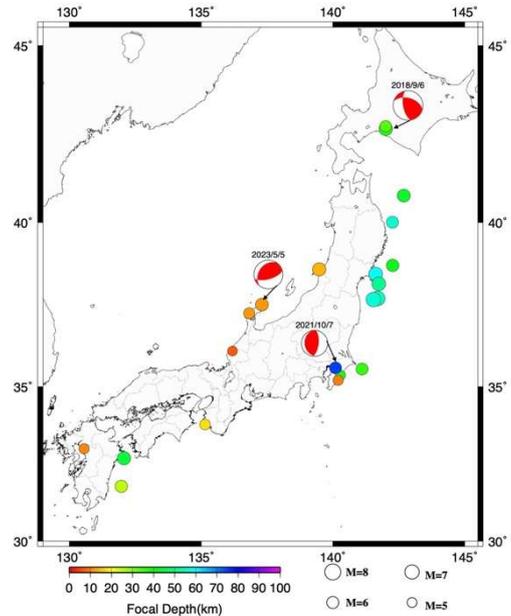


図 2 被害地震の分布と考察対象地震

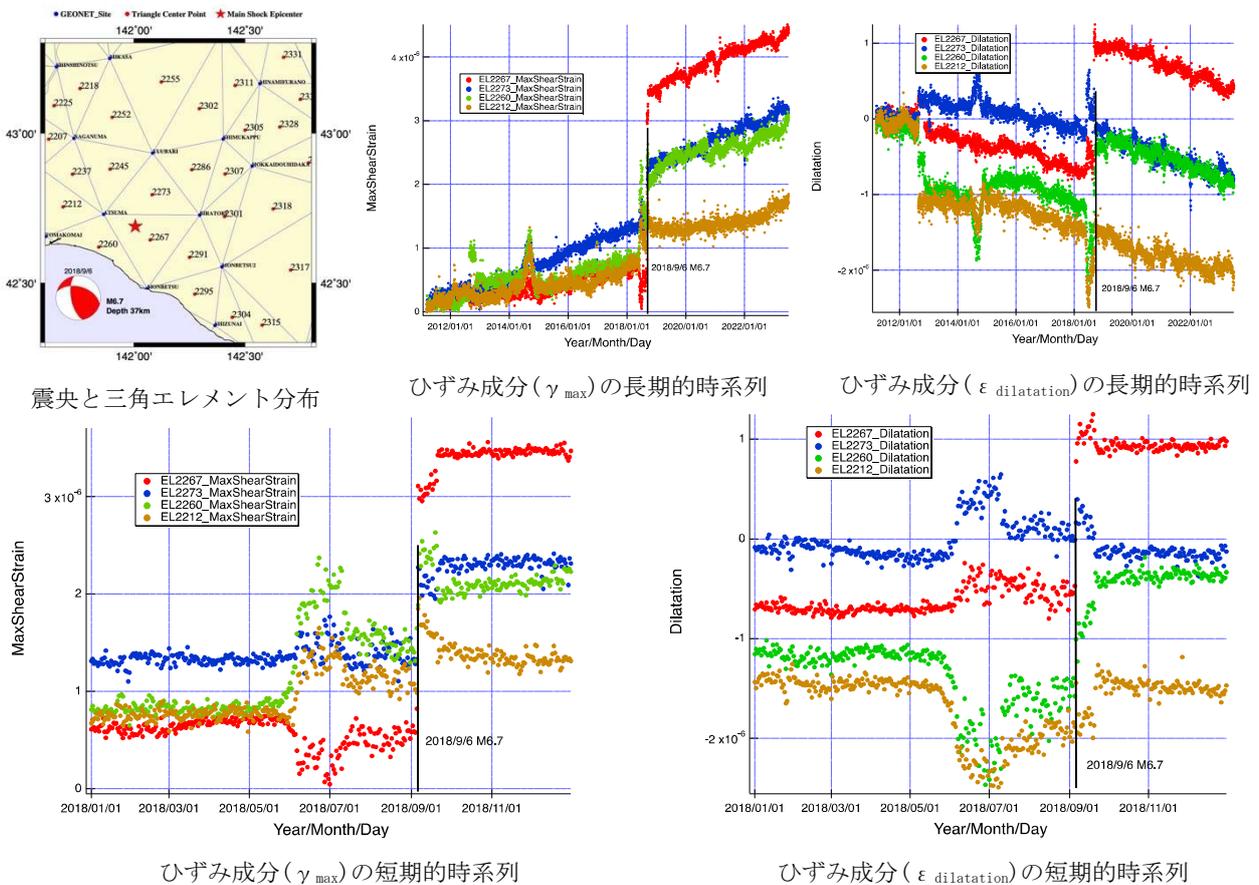
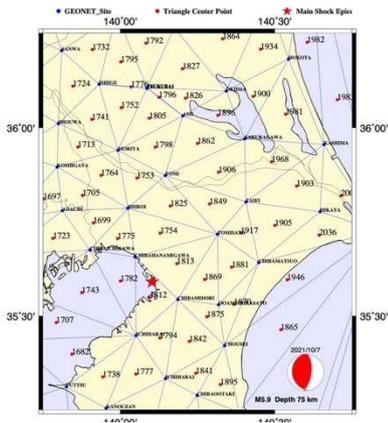
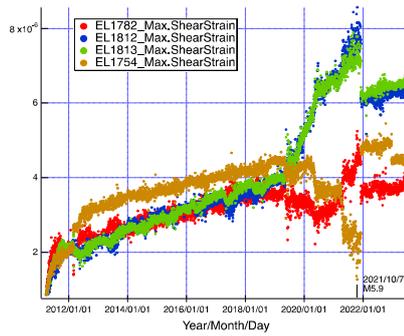


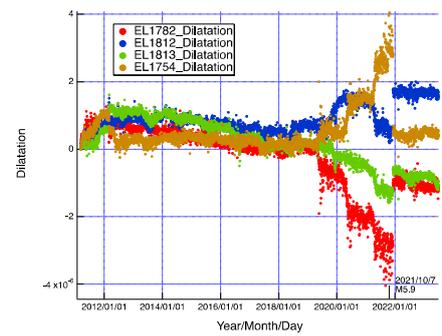
図 3 2018 年北海道胆振東部地震における GNSS ひずみの時空間変動



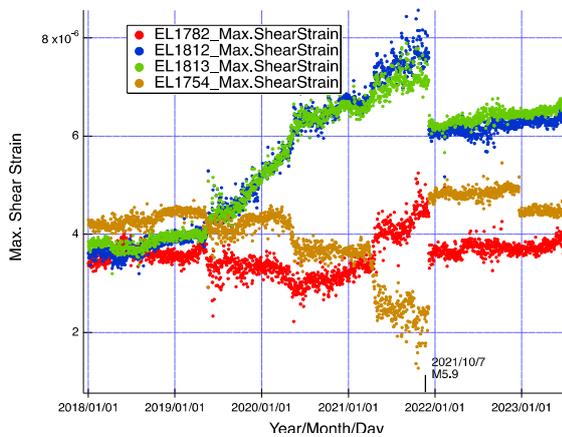
震央と三角エレメント分布



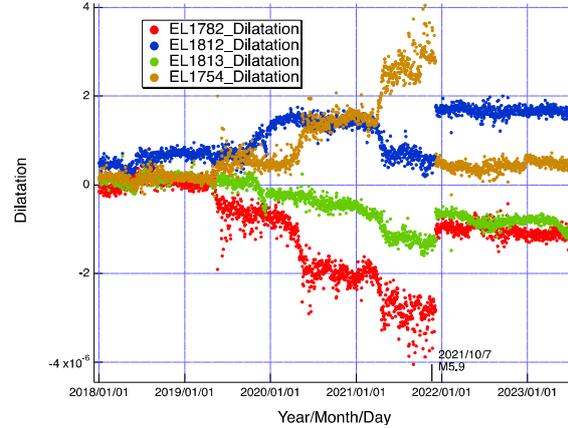
ひずみ成分 (γ_{max}) の長期的時系列



ひずみ成分 ($\epsilon_{dilatation}$) の長期的時系列



ひずみ成分 (γ_{max}) の短期的時系列



ひずみ成分 ($\epsilon_{dilatation}$) の短期的時系列

図4 2021年千葉県西北部の地震におけるGNSSひずみの時空間変動

震を含めて内陸で発生した3地震のGNSS地殻ひずみの累積過程を代表例として示す。それらの被害地震は図2において気象庁データによる初動メカニズム解が震央に付随してプロットされている3地震である。いずれも逆断層メカニズムを有し、地震規模のマグニチュード M_J はおよそ6.0以上、記録された揺れの強さは震度階5強以上である。これらの地震は①2018年9月6日発生の平成30年北海道胆振東部地震 (M_J 6.7, 最大震度階7), ②2021年10月7日発生の千葉県北西部の地震 (M_J 5.9, 最大震度階5強), ③2023年5月5日発生の石川県能登地方の地震 (M_J 6.5, 最大震度階6強) である。これらの被害程度など地震の詳細は気象庁のWebSiteを参照されたい。

図3～図5に上記の各地震における工学的最大せん断ひずみ成分 γ_{max} および Dilatation ひずみ成分 $\epsilon_{dilatation}$ の日変動履歴を統一した形式で示す。表示されるのは、(1)地震震央、初動メカニズム解およびひずみ評価の三角エレメント(エレメント番号付き)の分布図、(2)震央近傍の4個の三角エレメントでのひずみ成分 γ_{max} の約12年間にわたる長期期間の日変動履歴、(3)震央近傍の4個の三角エレメントでのひずみ成分 $\epsilon_{dilatation}$ の約12年間にわたる長期期間の日変動履歴、(4)震央近傍の4個の三角エレメントでのひずみ成分 γ_{max} の地震発生直前の短期期間の日変動履歴、(5)震央近傍の4個の三角エレメントでのひずみ成分 $\epsilon_{dilatation}$ の地震発生直前の短期期間の日変動履歴である。これらの各ひずみ成分の日変動履歴で被害地震発生の年月日は横軸(年月日軸)に縦黒線として示されている。ここで、長期期間と短期期間の時系列を別途に示す理由は地震発生に至る過程と事後の過程における把握が長期期間の

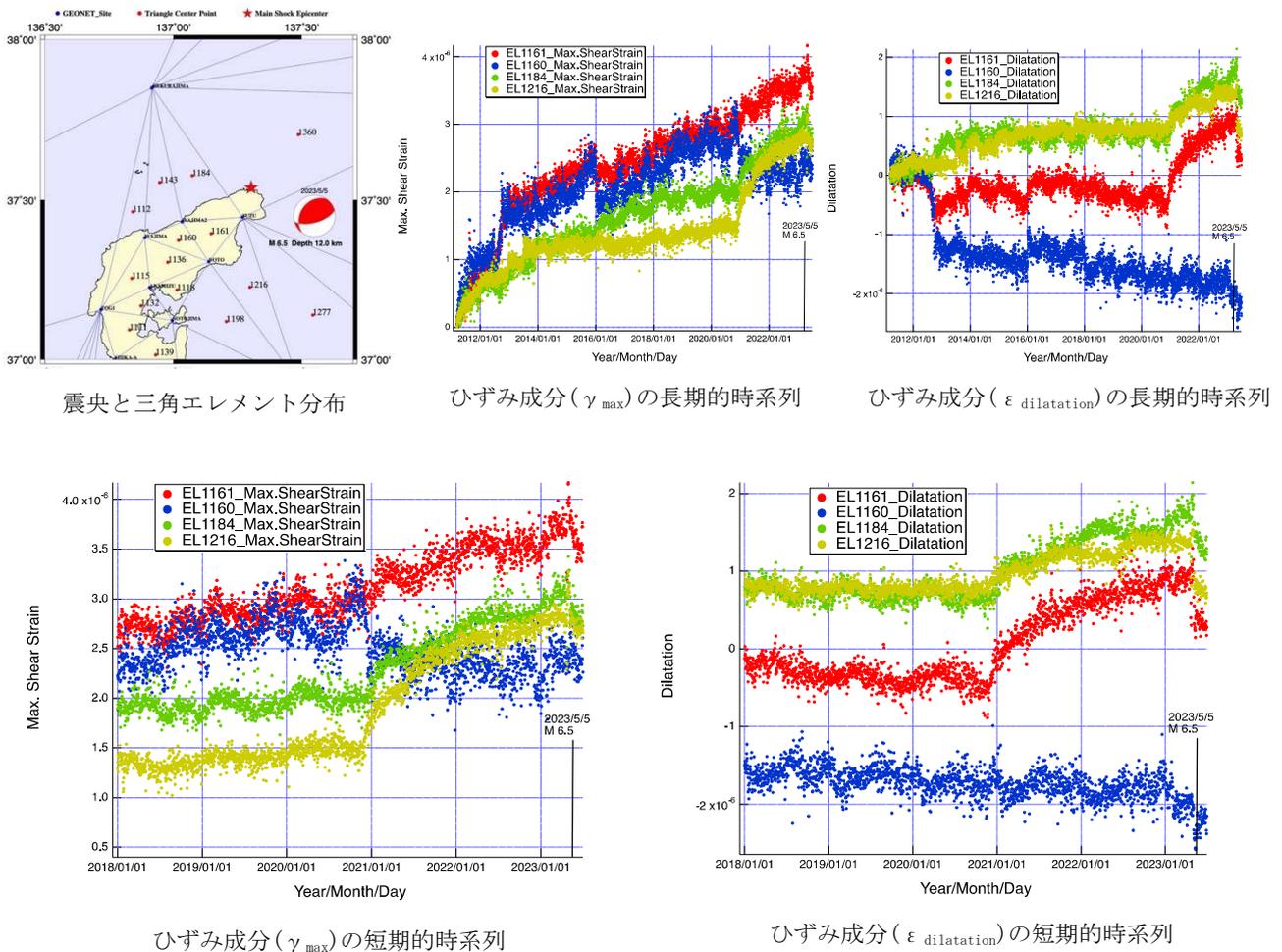


図 5 2023 年石川県能登地方の地震における GNSS ひずみの時空間変動

視点と短期期間の視点で異なるという理由による。例えば、図 3 の平成 30 年北海道胆振東部地震の場合、同地震の地震発生前の各領域でのひずみ時系列変動の詳細は短期期間におけるプロットで把握しやすいのに対して、長期間におけるプロットでは同地震が当該地域で繰り返し生じる地震現象 (Sequences of Earthquakes⁵⁾) の一つであり、今後も同様な被害地震の発生が予想されることを把握できるなど、それぞれのプロットの利点がある。

5. 予兆的変動特性の考察とまとめ

図 3～図 5 にみられる GNSS 地殻ひずみの時空間変動の予兆特性には多くの特徴が認められる。それらは箇条的に次のようにまとめられる。すなわち、1) 被害地震発生前に「誰がみても疑いのない程度に明白」な異常変動がみられ、その変動は AI などを援用した高度な異常検知システムに頼るまでもなく把握できる時系列の「顕著な異常」の様相を示す。2) 異常出現の開始時期は地震毎に異なり、ここで対象とする 3 地震では地震発生前の約 3 年～約 3 ヶ月に分布している。3) 異常変動の時系列は段階的で、開始、発展、停留、終息のような状態が存在して、その変動パターンは地震毎に大きく異なる。4) 異常変動の時系列はひずみ振幅レベル、ひずみ振幅レベルの日変動率(rate)、ひずみ振幅レベルの日々のバラツキ(日変動分散)などに特徴があり、長期的予兆、直前的予兆など多様な様相がみられる。5) 地震予知に必須の where, when, what size の要素に対して GNSS 地殻ひずみの時空間変動では異常発生の三角エレメント分布から where、各エレメントでのひずみ時系列から when、異常発生のエレメント

数から what size が予測できる。6) ひずみ成分の時空間変動は工学的最大せん断ひずみ成分 γ_{\max} および Dilatation ひずみ成分 $\epsilon_{\text{dilatation}}$ で異なり、とりわけ Dilatation ひずみ成分 $\epsilon_{\text{dilatation}}$ では震央近傍の領域で膨張、収縮と空間象限で特徴的に分布する変動を示す。これから上記の地震予知 3 要素のみならず、地震の発生メカニズムについても事前予知の可能性が示唆される。

以上のような GNSS 地殻ひずみの被害地震発生前における予兆特性は従来、理論的考察や室内でのモデル実験のみで知られてきた地震核生成過程(Earthquake Nucleation Process)⁶⁾を現地で具体的に実測把握したものと考えられる。ここでの各ひずみ成分の予兆特性は日数をかけて漸増、漸減する段階的時系列の特徴があり、震源断層における地震発生(不安定すべり⁶⁾)に起因して瞬時に大きく生じるひずみ(Coseismic strain)と明らかに異なる。むしろ、その漸次性から震源断層における安定すべり(ゆっくり滑り)⁶⁾に要因を有すると考えられる。このような解釈も含めて、ここで得られた 3 地震のひずみ成分における時空間変動は Dieterich⁷⁾の研究に端を発した摩擦すべりの RSF 構成則⁴⁾による地震断層でのすべり発生過程で理論的に説明可能である。RSF 構成則のパラメータである(a-b)係数の正負を含めた不均質、非一様な大きさと分布特性の影響がここでの 3 地震における発生前の各ひずみ成分の予兆変動の違いに具体的に現れていると考えられる。本震前の多様な予兆特性を有する時空間変動は RSF 構成則を考慮した震源断層における地震生成の数値シミュレーションでも得られている⁸⁾。

6. おわりに

本稿で例示した 3 地震における予兆特性の因果関係に関する詳細な理論的考察を含めて図 2 で示した他の被害地震、および今後生じる被害地震の同様な考察は今後の課題である。継続的に解析と考察を進めたいと考えている。また、ここで例示したような「顕著な異常変動」が出現した時の被害地震の発生確率は今のところ 100%、つまり誤検知(false positive)の確率はゼロであることから、今後の継続的なひずみ成分の時空間変動解析の監視で同様な異常が発生した時の情報発信も検討課題となろう。

謝辞 ここでの地殻変位の GEONET データは国土地理院の提供による。日頃からのご協力に感謝する。

参考文献

- 1) M. Kamiyama, et al.: A Detection Analysis of Impending Earthquakes in Japan Based on the Estimate of Crustal Strains Using GNSS Data, *Memoirs of the Tohoku Institute of Technology*, No. 41, (2021).
- 2) M. J. S. Johnston et. al.: Continuous Borehole Strain in the San Andreas Fault Zone Before, During, and After the 28 June 1992, Mw 7.3 Landers California, Earthquake, *BSSA*, Vol.84, No.3, (1994).
- 3)小出英夫, その他: GEONET システムの GPS データ自動取得処理システムの構築, 平成25年度土木学会東北支部技術研究発表会, March, (2014).
- 4) J. Rice, et. al.: Rate and state dependent friction and the stability of sliding between elastically deformable solids, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 49, (2001).
- 5) B. A. Erickson et. al.: The Community Code Verification Exercise for Simulating Sequences of Earthquakes and Aseismic Slip (SEAS), *Seismological Research Letters*, Volume 91, No. 2A, (2020).
- 6) M. Ohnaka: Earthquake source nucleation: A physical model for short-term precursors, *Tectonophysics*, Volume 211, (1992).
- 7) J. H. Dieterich: Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.* 84, no. B5,1979.
- 8) Q. Meng and B. Duan: Dynamic Modeling of Interactions between Shallow Slow-Slip Events and Subduction Earthquakes, *Seismological Research Letters*, OCTOBER 17, (2022).

Volcanism of Mount Fuji and the 2011 Japanese large earthquakes

K. Z. Nanjo¹⁾, Y. Yukutake²⁾, T. Kumazawa³⁾

1: University of Shizuoka

2: The University of Tokyo

3: Institute of Statistical Mathematics

The relation of earthquakes to volcanic eruptions has been widely discussed. A magnitude (M)-9-class Hiei earthquake in 1707 paired with the eruption of Mount Fuji 49 days later. Motivated by this pairing, previous studies investigated its effect on Mount Fuji after both the 2011 M 9 Tohoku-Oki earthquake and the triggered M 5.9 Shizuoka-Tobu earthquake 4 days later at the foot of the volcano, but reported no potential to erupt. Even though consequences to society caused by the next eruption are already being considered, and more than 300 years have already passed since the 1707 eruption, the implications for future volcanism are still uncertain. Here we show how volcanic low-frequency earthquakes in the deep part of the volcano revealed unrecognized activation after the Shizuoka-Tobu earthquake (Fig. 1). It is also shown that despite an increase in the rate of occurrence of low-frequency earthquakes, these did not return to pre-earthquake levels, indicating a change in the magma system. It is demonstrated that the Shizuoka-Tobu earthquake reactivated the volcanism of Mount Fuji, implying that this volcano is sufficiently sensitive to external events that are considered to be enough to trigger eruptions (Nanjo et al., 2023).

References: Nanjo, K.Z. et al., Sci Rep 13, 10562 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-37735-4.

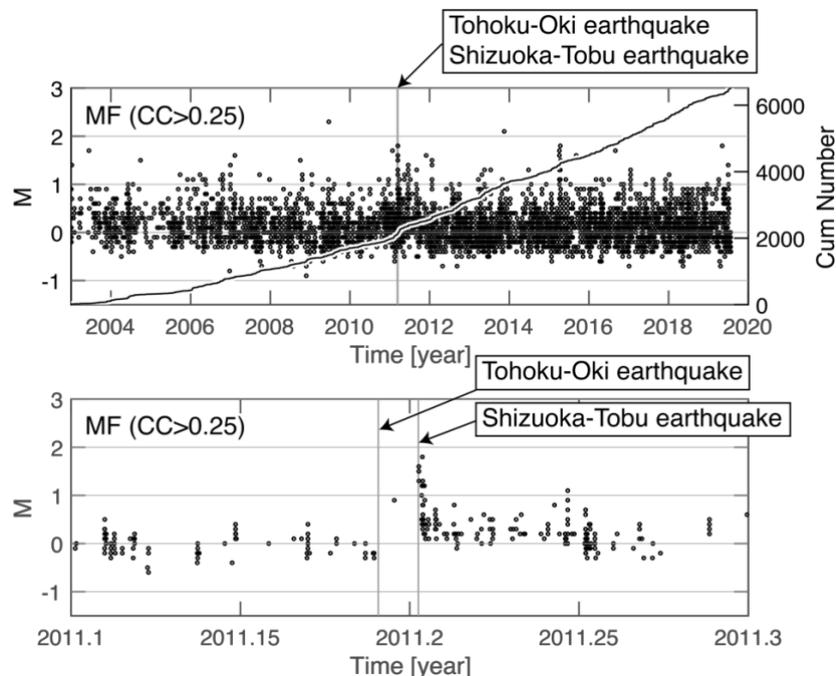


Fig. 1. Top panel: M -time diagram of low-frequency earthquakes. Overlapped is the cumulative number of low-frequency earthquakes as a function of time since 2003. Bottom panel: Same as the top panel for a zoom-in plot at times before and after both earthquakes from 2011.1, as a decimal year (Feb. 6, 2011, 12:00:00) to 2011.3, as a decimal year (Apr. 20, 2011, 12:00:00).

地殻—電離層の電氣的結合モデルの一考察

水野 彰、高 明慧、梅野 健

京都大学大学院情報学研究科 物理統計学分野

Akira Mizuno, Minghui Kao and Ken Umeno

Department of Applied Mathematics and Physics, Graduate School of Informatics,

Kyoto University, Kyoto, Japan

要旨：地震予兆として電離層下面が 20 km 程度低下すること、電離層電子数の増減、および MSTID の速度が変化すること、が報告されており、その原因である地殻—電離層の電磁氣的結合に関して種々の議論がなされている。今回我々は、地殻内部での薄い破碎層が水分を含んでいると超臨界状態になり、その過程で超微粒子の生成が起こり、帯電する可能性があること、また超臨界状態では電気抵抗率が高くなり、破碎層内に電圧が発生しやすく、また最大値はこれまで知られている放電開始電圧の最低値である 300 V 程度で、破碎層上部の地表面の電圧もその分上昇する。なお、その電圧を越すと、破碎層内部で放電が発生する。破碎層の間隙を 10^{-5} m と見積もると、 1m^2 あたりの破碎層の静電容量は約 10^{-6} F/m²、蓄えられる電荷量は 3×10^{-4} C/m² となる。電離層下部までの距離を 100 km と仮定すると、電界強度は 3 V/km である。この低下に必要な仕事は、最低でも、この中に含まれている電子が電界中を動く必要があり、電離層の電荷密度を 10^{11} /m³ とすると、仕事量は 0.96×10^{-6} J/m²、動いた電子の電荷量は 0.32×10^{-4} C/m² である。破碎層に蓄えられるエネルギー 9×10^{-2} J/m²、電荷量 6×10^{-4} C/m² であり、電離層下部を動かすことができると考えられる。また MSTID の伝搬速度にも上記のレベルの電界により影響を与える可能性を有している。

1. はじめに

電離層が M6 程度以上の地震の 1 時間ほど前から異常を示すことが報告されてきており [1-3]、地震予知に役立つ可能性がある。この異常が地震発生直前の地殻の破壊により引き起こされているとすれば、地殻破壊により発生する電磁場が電離層に影響を与えているはずである。これまでに、地震の前兆として電磁波の発生が観測されている [2]。このことは地殻の破壊に起因して電流が流れていることを示しており、地殻破壊時に電荷が発生していることは間違いないと考えられる。これまでに電荷発生の原因として、地殻内部の高圧力により岩石中の正孔が地表に移動する正孔電荷キャリアの生成と拡散、圧電効果、熱電効果、あるいは水分が動くことによる流動帯電などの仮説が提案されている [2, 4]。

最近の大きな地震の震源付近の地質調査から、プレートの境界面には、すべりやすいスメクタイトが存在しており、また水分も含まれている可能性が指摘されている [5, 6]。その境界面の弱い部分でスロースリップが発生し、強く固着している部分にひずみを残すことで、そこが急激に破壊して地震を引き起こしている可能性が指摘されている。

ところで、電離層の電子数の増減が東北沖地震の 1 時間程度前から発生していたことが報告されてい

る[7, 8]。また、熊本地震の際にも、本震発生直前に電離層内を伝搬する波 (MSTID: Middle Scale Travelling Ionospheric Disturbance) の速度異常が見出されている[9]。また電離層下部の低下に伴い、電波の伝搬異常が発生することはすでに多くの報告がある[10]。これらの現象は、水を含む粘土質の地殻が破壊される際に電圧が生じている可能性を示している。

地殻内部の破壊層の静電容量は、地表から電離層下部までの静電容量に比して極めて大きいため、破壊層内で電圧が発生すれば、静電容量結合で電離層に影響を与え得ることを考察したので以下に報告する。

2. 破碎層内部の温度上昇と超臨界への移行

地殻が横方向の力により破壊するとき、破壊部分 (破碎層) は薄い層になる。本震前の小さな地殻破壊の開始直後は、破碎層が何層かになる可能性も考えられるが、大きく破壊する本震では一つの破碎層で滑ると考えられる。

破碎層は、数 100 気圧の圧力を受けており、そこが滑るため、摩擦熱により高温となる。200°C以上になっている可能性が破断面のボーリング調査から指摘されている[5]。

運動エネルギーが熱に変換されるため、温度上昇は以下のように概算できる。例えば、1 m x 1 m の面積が破壊して、横方向に 10^{-2} m 動くとする。破壊層の厚さは 10^{-5} m、圧力 1000 気圧と仮定する。

垂直方向の力 ; 10^7 kg/m²

まさつ係数; 0.1 とすると、横方向に移動させるために必要な力は 10^6 kg

10^{-2} m 横方向に動くとする、必要なエネルギーは

$$10^6 \times 9.8 \times 10^{-2} = \text{約 } 10^5 \text{ J}$$

このエネルギーが熱に変換される。すなわち、体積 10^{-5} m³ に 10^5 J のエネルギーが注入される。上記仮定のもとでは、2000 °Cを越す高温になり得る値である。

スメクタイトなどの粘土質には水分が含まれており、温度上昇に伴って水分が膨張し、圧力が高くなり、超臨界状態になる。この時、圧力上昇は数 100 気圧に達するはずで、破碎層内で膨張し、破碎層の間隙が大きくなり、より滑りやすくなると考えられる。

3. 高温・超臨界条件での電荷発生

水のイオン積は温度上昇に伴って増加し、250°C付近で最大値となり、超臨界状態ではまた低下する。また、比誘電率は温度上昇とともに低下し、超臨界では 2 程度となる[11]。

破碎層内は摩擦により高温となるため、水分が存在すれば超臨界状態に移行すると考えられる。また破碎総周辺の地殻面は熱が逃げていくため、温度が破碎層の中心部分よりは低くなると考えられる。250°C付近の亜臨界ではイオン積が大きくなっており、スメクタイト中に含まれているイオンなどが溶け込みやすいと考えられる。また亜臨界では電気伝導度も超臨界に比べて大きいいため、電荷キャリアが流れやすいはずである。

破碎層内部の摩擦は全面で均一に起こるのではなく、摩擦面のぶつかり合う点、Hot Spot で起きて

おり、ここでは極めて高温になると考えてよい。Hot Spot ではスメクタイトは破砕されて微粒子化する。スメクタイトからイライトへ変化することも観察されている[5]。また、250°C付近の亜臨界で水に溶け込んだイオンが Hot Spot 付近の超臨界領域で析出し微粒子が生成する[12]。これらの微粒子同士も摩擦するため、微粒子表面にも Hot Spot が存在する。

スメクタイトは、それを構成しているケイ酸塩層の間に正イオンを取り込みやすいことが知られており、これらの正イオンは高温のために離脱しやすいと考えられる。スメクタイトが微粒化するとケイ酸塩層断面の負極性部分に正イオンが結合し、スメクタイト微粒子が正極性を帯びる可能性がある。また、Hot Spot からの電子放出が発生する可能性も高いと考えられる。このとき放出された電子は低温側に動き地殻に吸収され、スメクタイトあるいはイライトの微粒子は正電荷を帯びる可能性が考えられる。

4. 破砕層内での電圧の発生

帯電した微粒子が破砕層の内部に存在すると、層間に電圧 $V(d)$ が発生する。層間に存在する帯電微粒子の電荷量（1 m²あたりの電荷量）を Q_0 とする。層間の距離を d とすると、1 m²あたりの静電容量 C_0 は、

$$C_0 = \frac{Q_0}{V(d)} = \epsilon_0 \epsilon_s \frac{1}{d} \left(\frac{F}{m^2} \right)$$

$$\epsilon_0 = 10^{-11} F/m \quad \epsilon_s = 2 \quad \text{とすると、} C_0 = 2 \times \frac{10^{-11}}{d} \quad V(d) = 5 \times 10^{10} Q_0 d \quad \text{である。このよう}$$

に層内の電荷量が一定の場合、層の厚さが大きくなるほど、層間電圧は高くなる。破砕層間の電荷密度が十分高くなり、層間電圧が閾値を超えると、絶縁破壊が発生する。

電極間の絶縁破壊は、Paschen の法則に従うとすると、極短間隙では高電界による電子放出がトリガとなるため、10 μm 程度以下の間隙において約 300 V 程度で絶縁破壊が発生すると考えられる。超臨界水中でも、破砕層の極短間隙での絶縁破壊は同程度の電圧で発生する可能性が高いと思われる。但し、超臨界中の電離係数や付着係数、ならびに電子放出係数が不明なため、今後実験的に明らかにする必要がある。破砕層が多層に存在する場合には各層ごとに最大 300 V の電位差が生じるので、破壊層の数だけ発生電圧が高くなる。

層間電圧最大値を 300 V、層間距離 10⁻⁵m と仮定すると、単位面積当たりの静電容量と電荷量は

$$C_0 = 2 \times 10^{-6} \left(\frac{F}{m^2} \right)$$

$$Q_0 = 6 \times 10^{-4} \left(\frac{C}{m^2} \right)$$

発生した電荷は、破砕層周辺部の導電性の地殻を通して放電する。加えて、層間の電圧値が高くなり絶縁破壊を起こせば電磁波を発生する。また本震の始まる前は破砕層の動きが間欠的に発生している可能性が高く、動きが止まると破砕層内部の温度が低下し、内部の水の導電性が高くなるため、破砕層の電荷が放電する。観測されている電磁波はこれらの放電現象によるものと考えられる。

5. 地殻と電離層の静電容量結合等価回路

破碎層の厚みは小さいため、静電容量は極めて大きく、蓄えられるエネルギーも大きい。このため、地表面と電離層との間の大気の等価的な静電容量を介して、破碎層に蓄えられた電気エネルギーが電離層の電荷を動かすことが可能となる。図 1 に静電容量結合の模式図を示す。

破壊層の厚さを 10^5 m、層内部の比誘電率を 2、破碎層の絶縁破壊電圧を 300V と仮定すると、単位面積当たりの静電容量 C_0 および電荷量 Q_0 は式 (1)、(2) のようである。模式図に示すように破碎層上部の電位が地表面の電位となる。仮に破碎層下部の電位を 0 とすると、地表面の電位は 300V である。

地表と電離層下部との距離を 10^5 m とし、それを 10 等分し、 10^4 m の厚さの大気を作る静電容量が直列に接続されているとする。厚さ 10 km の大気層の単位面積当たりの静電容量 Ca は

$$Ca = \epsilon_0 \frac{s}{L} = 10^{-15} \text{ F/m}^2$$

この時、電離層に影響を与える可能性がある大気中の現象は雷雲であり、これは地表付近の等価静電容量の電圧を変化させる。

ところで地震前の TEC 異常では電離層が 20 km 程度低下したことが報告されている [7]。また電波伝搬の異常も電離層下面が低下しているためと考えられている。地殻の破碎による電荷が電離層に与える影響は、電離層下面の引き下げである。このための仕事量を概算してみる。

電離層下部 E 層の電子密度を $n_e = 10^{11} \text{ m}^{-3}$ と仮定する。電離層を電界で下部に引き下げるには、まず動きやすい電子を引き下げることで、それに追従して正イオンが移動する。地表面の電位上昇を 300V と仮定すると、平均電界強度は $E_i = 300/10^5 \text{ V/m}$ であり、電子を 20 km 引き下げる仕事量は、最低でも断面積 1 m^2 あたり、 $n_e e E_i \times 2 \times 10^4 = 0.96 \times 10^{-6} \cong 1 \mu\text{J/m}^2$ また 20 km 引き下げたときに移動する電子の電荷量は $Q_{ie} = n_e e \times 2 \times 10^4 = 3.2 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$

破碎層に蓄えられる電荷のエネルギー E_0 は $V = 300 \text{ V}$ として、 $E_0 = \frac{1}{2} C_0 V^2 = 9 \times 10^{-2} \text{ J/m}^2$ また蓄えられた電荷量は $6 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$ であり、破碎層内に蓄えられた電荷によって作られる電界が電離層下部の電子を 20 km 程度移動する仕事量を有している。

一方、大気で発生する雷の電離層に与える影響を概略見積もってみる。雷雲の電位差を 10^8 V と仮定すると、 $Ca = 10^{-15} \text{ F/m}^2$ に蓄えられる単位面積当たりの電荷量は 10^{-7} C/m^2 である。この値は、電子層下部の電子が 6 m 移動すると相殺される値であり、電離層を大きく引き下げるだけの働きはできない。

破碎層からの電界は電離層下部に達するが、平均電界強度は 3 V/m であり、MSTID の速度変化を引き起こすには十分な値である。また破碎層上部の地表からの電界は電位変化の起こっている周辺部では垂直ではなく発散するため、電離層中の磁力線との相互作用により電子の動く向きが逆転し、電離層が持ち上がる可能性も考えられる。

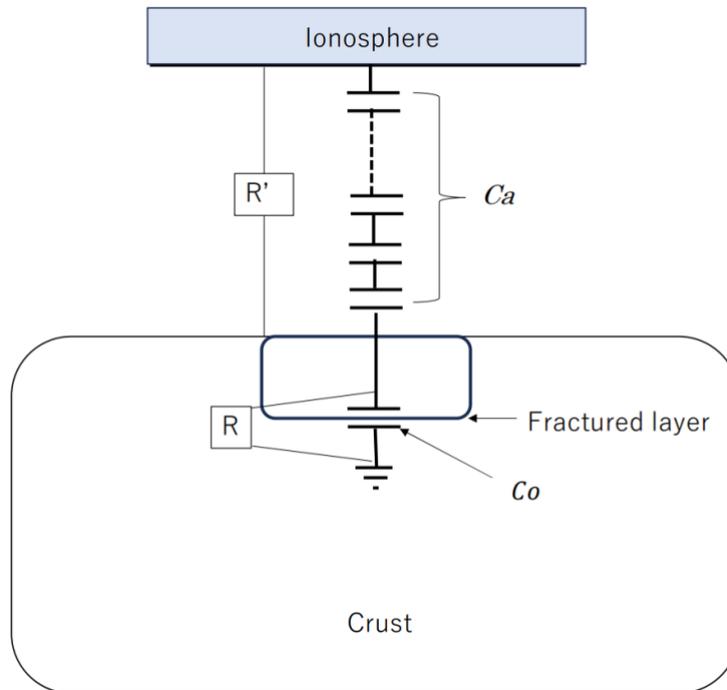


図1 地殻—大気—電離層の静電容量結合模式図

6. 結言

地震発生の前駆現象として、水分を含む滑りやすいスメクタイト層の破壊による超臨界状態への移行による微粒子発生と帯電による電圧発生の可能性についての考察を行った。破碎層内は極めて高い圧力下で摩擦をするため、水分を含む場合には超臨界状態となると考えられ、水分が膨張することにより破碎層の間隙が広がり滑りやすくなることに加え、微粒子の発生も促進されると考えられる。

高温高压で電子放出などで微粒子が帯電することで、破碎層間に電圧が発生する。破碎層の静電容量は地表面から電離層までの静電容量に比べてはるかに大きいため、破碎層間の電位差が地表と電離層下部の電位差となる。その電界の値は3V/m程度であり、電離層下部の低下、あるいは地震の前駆現象として報告されているMSTIDの速度変化35 m/sを生じるだけの電界強度変化分0.58mV/mを電離層内に生じさせられる可能性があると考えられる。また、電離層下部を20 km程度低下させるために必要な電荷量、およそ $3.2 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$ と同程度の電荷が破碎層内で発生している可能性を否定できない。今後精密な実験で、地殻の破壊層内の高温・高压条件下での微粒子生成メカニズムの解明と帯電量の見積もりを行う必要がある。

参考文献

- [1] M. Hayakawa, K. Hattori, and K. Ohta, "Monitoring of ULF (Ultra-Low-Frequency) Geomagnetic Variations Associated with Earthquakes," *Sensors*, vol. 7, pp. 1108-1122, 2007.
- [2] S. Uyeda, T. Nagao, and M. Kamogawa, "Short-term earthquake prediction: Current status of

- seismo-electromagnetics," *Tectonophysics*, vol. 470, pp. 205-213, 2009/05/29/ 2009.
- [3] M. Hayakawa and A. Schekotov, "On the ionospheric perturbation for the 1995 Kobe earthquake: revisited," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 7, pp. 278-286, 2016/01/02 2016.
- [4] F. T. Freund, A. Takeuchi, and B. W. S. Lau, "Electric currents streaming out of stressed igneous rocks – A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 31, pp. 389-396, 2006/01/01/ 2006.
- [5] G. Kimura, Y. Hamada, S. Yabe, A. Yamaguchi, R. Fukuchi, Y. Kido, *et al.*, "Deformation Process and Mechanism of the Frontal Megathrust at the Nankai Subduction Zone," *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 23, p. e2021GC009855, 2022.
- [6] T. Nishikawa, S. Ide, and T. Nishimura, "A review on slow earthquakes in the Japan Trench," *Progress in Earth and Planetary Science*, vol. 10, p. 1, 01/03 2023.
- [7] M. C. Kelley, W. E. Swartz, and K. Heki, "Apparent ionospheric total electron content variations prior to major earthquakes due to electric fields created by tectonic stresses," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 122, pp. 6689-6695, 2017.
- [8] K. Heki, "Ionospheric Disturbances Related to Earthquakes," in *Ionosphere Dynamics and Applications*, ed, 2021, pp. 511-526.
- [9] K. Umeno, R. Nakabayashi, T. Iwata, and M. Kao, "Capability of TEC correlation Analysis and Deceleration at Propagation Velocities of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances: Preseismic Anomalies before the Large Earthquakes," *Open Journal of Earthquake Research*, vol. 10, pp. 105-137, 2021.
- [10] 早川正士, "VLF 電離層・大地導波管伝搬電波を用いた地震予知法（新方式の提案）," *Journal of Atmospheric Electricity*, vol. 16, pp. 19-28, 1996.
- [11] 小野巧 and 猪股宏, "超臨界水の物性とその可能性," *応用物理*, vol. 80, pp. 875-880, 2011-10 2011.
- [12] 阿尻雅文, "超臨界水熱合成法による連続大量ナノ粒子合成ーナノ粒子合成・コンポジット材料合成・界面制御触媒ー," *粉砕*, vol. 60, pp. 24-32, 2017.

Geophysical and electromagnetic parameters to be studied
- toward the prediction of large earthquake -

K.-I. Oyama^{1,2}

1. International Research Center for Space and Planetary Environmental Science,
Kyushu University, Fukuoka, Japan
2. Ltd. Asia Space Environment Research Consortium, Kanagawa, Japan

Our final goal is to predict large earthquake before the earthquake occurrence at the latest 10 days. Since we started toward this final goal in 2005, we have many geophysical and electromagnetic parameters to be studied in our mind. Most of them are acquired from the ground observations, because number of the satellites is still limited. As the continuous watching of the ionosphere is not possible by satellite, we list up geophysical parameters, which we can observe from the ground as followings, and the stations and the instruments currently exist:

1. Ionospheric NmF2, TEC, and even fmin have been studied by many scientists. According to our study NmF2 shows two days period for a week just before large earthquake ($M > 7$). These parameters need to be studied together with h'F, or real maximum height calculated by TEC tomography
2. Magnetometer data shows the change, which seems to suggest that dynamo current changes as well as the change of the ground condition.
3. Plasma drift: although no body reported plasma drift measured from the ground, the information is useful to study the behavior of ionosphere parameters. There are at least two facilities in Japan, one from Chiba University, another from Kyushu University. I am now asking one scientist to study plasma drift for Kumamoto Earthquake (16 April 2016).
4. Airglow observation: one report exists that intensity of night glow shows the periodic fluctuation.
5. Vertical Ground motion: the possible ground motion which influence the ionosphere has been discussed very recently. We are also studying Hi-net (slant gauge) which provides us the tilting of the ground at the location of the station.
5. Ground motion: Hi-net is useful to watch the rock-breaking process, but not good to detect the ground motion which moves in a wide range in phase. GNSS data might be useful to find the common ground motion in large scale, which also might provide new useful information to us.
6. Emission form the hypocenter region
7. VLF propagation
8. atmospheric temperature up to about 50 km

Other than these listed above, we surely need satellite constellation

Ground based observation is limited in small area if we try to predict the earthquake outside Japan. We need the satellite by two reasons; 1. we can study worldwide earthquakes, 2. We can contribute people of other countries through our observation.

Toward the earthquake prediction we need to work together by bringing the data above. Information from the seismologists needs to be combined. Although this team task is urgently needed, it is extremely difficult to establish the group. Our effort should be directed toward establishing this team.

一般社団法人 日本地震予知学会
第 10 回学術講演会講演予稿集
2023年 12 月 20 日発行
発行者 日本地震予知学会
info@eqpsj.jp