

東日本大震災・熊本地震以降の 地震予知研究の進展(1)

2016年10月13日

東海大学海洋研究所
地震予知・火山津波研究部門
長尾年恭

311以降の進展

- 確率利得(ゲイン)が1を超える先行現象と考えられる統計的有意性を持つ現象が複数見つかった(VHF帯電波伝搬異常、柿岡地磁気の異常、地震活動度変化を用いた予測手法(ETASを含む))
- M8.2以上の巨大地震に際し(現時点では)すべての場合に発生していた直前の現象が見つかった(GNSS-TEC変化)
- 地震活動度解析で統計物理学的なアプローチが活発化した(長距離相関という概念の導入)
 - 巨大地震は偶然には発生しない

中・長期的な先行現象の研究

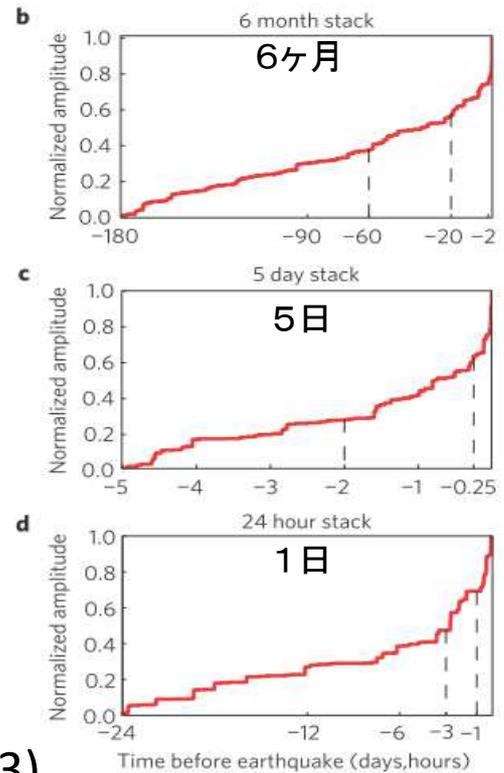
- 沈み込み帯のM6.5以上の地震前の特徴的な地震活動(明瞭な前震の存在、Bouchon et al., 2013)
- 余震だけでなく、前震も同様な空間分布を持っている(Lippiello et al., 2012)
- 地下水位の異常(Orihara et al., 2014)
- 地下水ラドンの異常(Tunomori & Tanaka, 2014)
- 大気中ラドンの異常(Hayashi et al., 2015)

- Bouchon, M., et al., 2013, The long precursory phase of most large interplate earthquakes, *Nature Geosci.*, 6, 299-302, doi: 10.1038/NGEO1770.
- Lippiello, E., W. Marzocchi, L. de Arcangelis, and C. Godano, Spatial organization of foreshocks as a tool to forecast large earthquakes, *Scientific Rep.*, 2, 846, doi: 10.1038/srep00846, 2012.
- Orihara, Y., M. Kamogawa, and T. Nagao, 2014, Preseismic Changes of the level and temperature of confined groundwater related to the 2011 Tohoku earthquake, *Scientific Rep.*, doi: 10.1038/srep06907.
- Tunomori, F. and H. Tanaka, Anomalous change of groundwater radon concentration monitored at Nakaizu well in 2011, *Radiation Measurements* 60, 35-41, 2014.
- Hayashi K. et al., Normal seasonal variations for atmospheric radon concentration: a sinusoidal model, *J. Environmental Radioactivity*, 130, 149-153, 2015.

明瞭な前震(本震前の地震活動の加速?)の存在

ここ数年の研究の急激な進展

- 先行現象に関する統計的有意性の確認
- 明らかな前震というものが存在
- 日本とアメリカの地震カタログを使いM6.5以上のプレート間地震31個のうち、25個で本震へ向けての地震活動の加速を検出

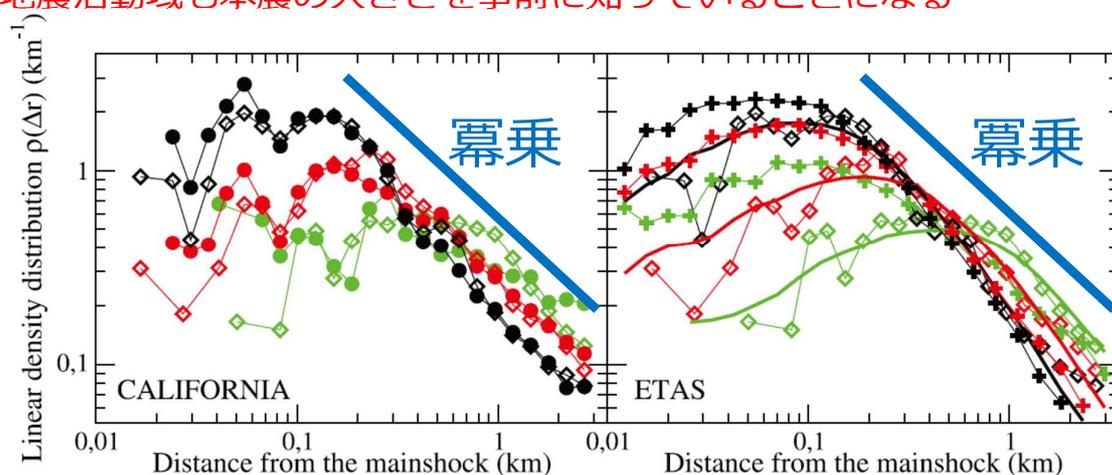


Bouchon et al., Nature Geoscience (2013)

地震密度解析 (Lippiello et al., 2012)

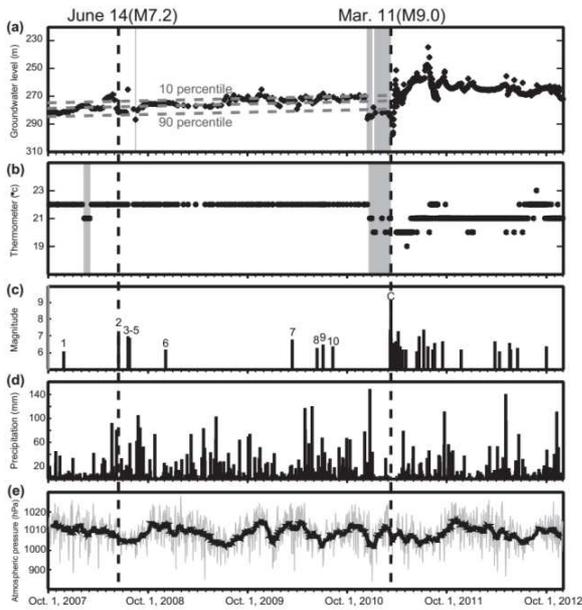
本震発生前後の地震活動の空間的広がりが同じという報告
→ 余震だけでなく、前震も同様な空間的性質を持っている

もしこの仮説が正しければ、余震域は本震の大きさを反映しているので、本震前の地震活動域も本震の大きさを事前に知っていることになる



- 余震：白抜き 前震：塗りつぶし
- 緑: $m=4-5$ の本震
 - 赤: $m=3-4$ の本震
 - 黒: $m=2-3$ の本震

準科学データを用いた2011年東北地方太平洋沖地震の先行現象 ～温泉・地下水データ(数ヶ月オーダーの現象)



岩手県・五葉温泉の水位低下。2011年東北地方太平洋沖地震の3ヶ月ほど前から10mを超える低下を観測
(Orihara, Kamogawa& Nagao, *Scientific Reports*, 2014)
温泉状況記録データを活用

五葉温泉と宮城県内の井戸の水位低下(1ヶ月平均値) 織原 (2015) 地下水位データを活用

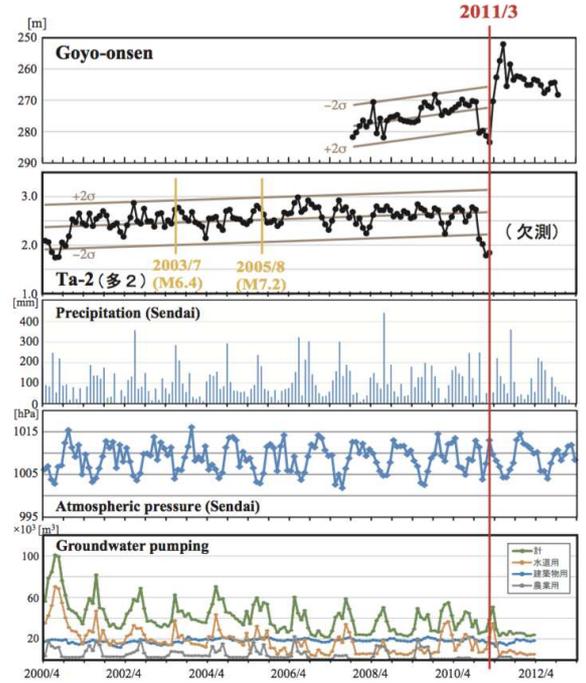
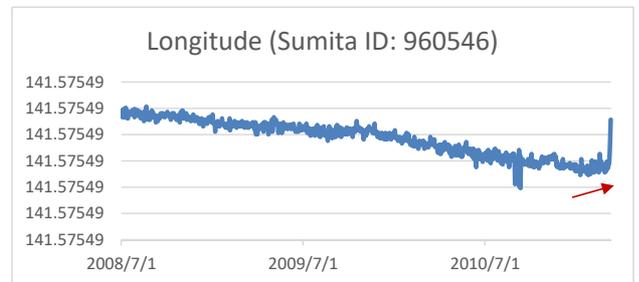
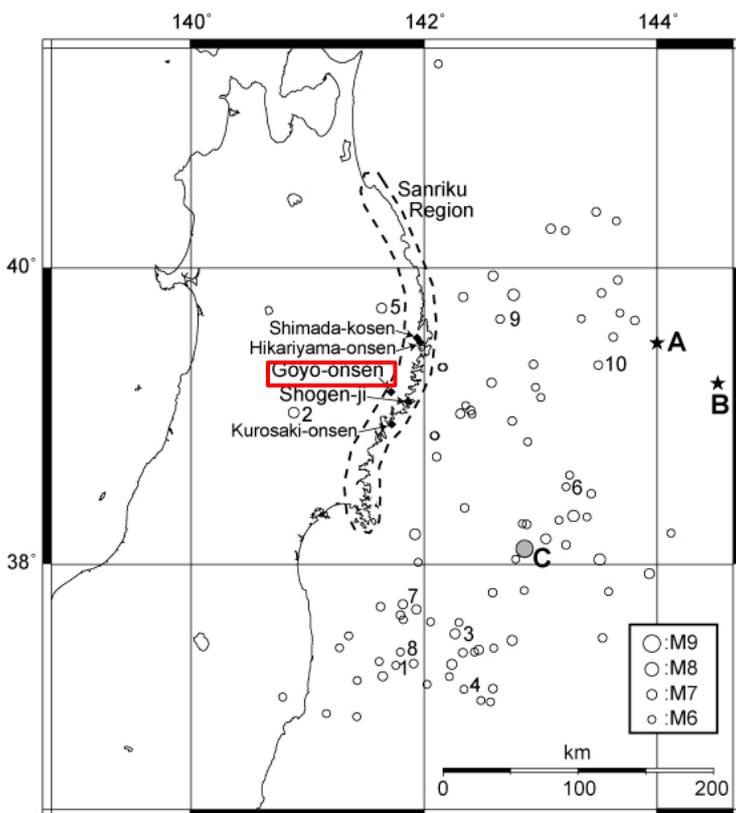
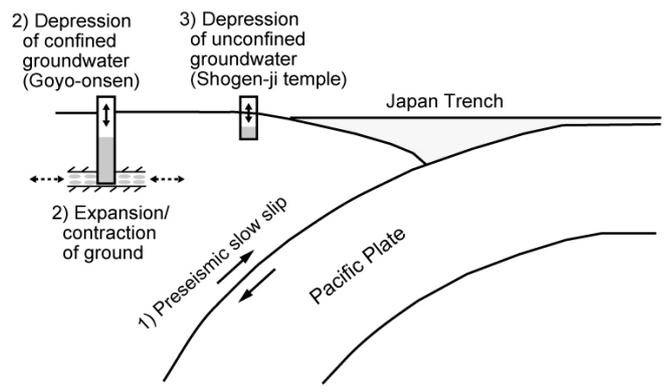


Fig. 5. 地下水位と降水量, 気圧, 地下水採取量の時系列変化
上から五葉温泉, 仙9観測井戸 (宮城県生活環境部, 2014), 多2観測井戸 (宮城県生活環境部, 2014) の月平均の水位変化, 仙台市の月別降水量 (JMA), 月別気圧変化 (JMA), そして, 宮城県公害防止条例に基づく指定地域内の地下水採取量 (宮城県生活環境部, 2014)

宮城県五葉温泉 温泉用井戸

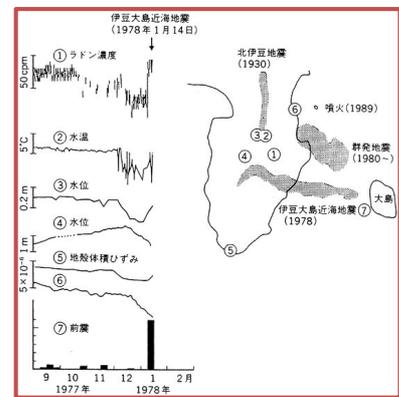
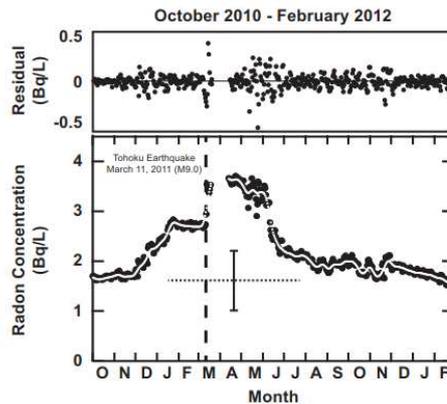
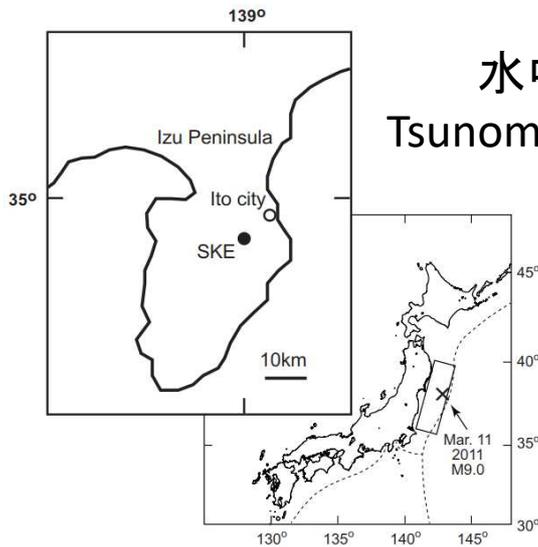


地下水位変動時のGPS測位変化は極めてわずか (井戸近傍のGPS観測点の経度変化)。

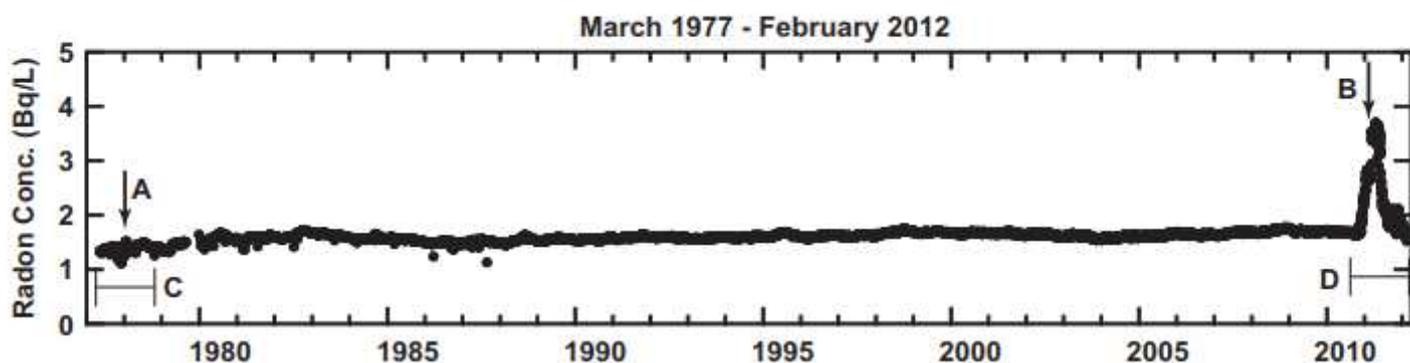


水中ラドンの異常

Tsunomori & Tanaka (2014)



1978年の伊豆大島近海地震は複数の“前兆”が観測されたとして、1995年頃までの大学の予知研究紹介の表紙を飾っていた



1978年の伊豆大島近海地震以降、30年ぶりに観測された地下水中のラドンの異常

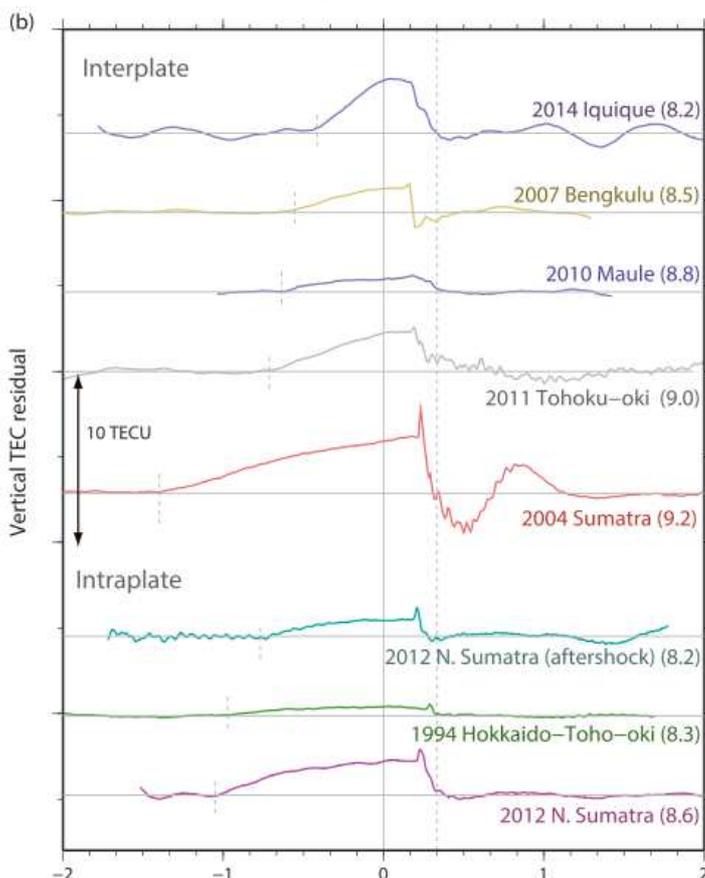
短期的な先行現象の研究 (1ヶ月未満)

- 電離層の異常(電波伝搬異常を含む, Heki & Enomoto, JGR, 2015, Le et al., JGR, 2011等)
- 地磁気観測についても統計的な有意性が示された (Han et al., 2014)
- OLR (Outgoing Long-wave Radiation)他の異常 (Ouzounov, et al., 2011)
 - Nagao et al., JDR (2014)に詳しい
- VHF帯電波伝搬異常、地震活動静穏化等の評価が進行中(2014-18年度、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(課題番号2501))
 - 異常マップから予測マップへの変換

- Le, H., J. Y. Liu, and L. Liu, A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002-2010, J. Geophys. Res., Vol.116, A02303, doi:10.1029/2010JA015781, 2011.
- Ouzounov, D., S. Pulinets, A. Romanov, A. Romanov, K. Tsybulya, D. Davidenko, M. Kafatos, and P. Taylor, Atmosphere-ionosphere response to the M9 Tohoku earthquake revealed by multi-instrument space-borne and ground observations: Preliminary results, Earthquake Science, Vol.24 557-564, 2011.
- Nagao, T., Y. Orihara, and M. Kamogawa, Precursory Phenomena Possibly Related to the 2011M9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Journal of Disaster Research, vol 9, No. 3, 303-310, 2014.
- Han et al., Statistical analysis of ULF seismomagnetic phenomena at Kakioka, Japan, during 2001–2010, JGR, Space Phys., 119, 4998–5011, doi:10.1002/2014JA019789, 2014.
- Heki, K. and Y. Enomoto, *M_w* dependence of the preseismic ionospheric electron enhancements, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, 7006–7020, doi:10.1002/2015JA021353, 2015.
- He, L. and Heki, K., Three-dimensional distribution of ionospheric anomalies prior to three large earthquakes in Chile, GRL, 43, 7287–7293, 2016.

日置らによる巨大地震(Mw8.2以上)のVTECの直前の折れ曲がりの

データの折れ曲がりをAICで
定量的に検出



- 東北地方太平洋沖地震の40分前に電離層電子密度が震源域上空で上昇
- フィッティングカーブのとり方による人為的な現象との批判
- そこでフィッティングカーブを用いる事なく、地震発生前のデータだけで折れ曲がりが存在する事を定量的に証明
- 現時点でGNSSデータが使えるMw8.2以上の地震では例外なくこの”折れ曲がり”が直前に出現
- 変化量はバックグラウンドTECとMwとに相関

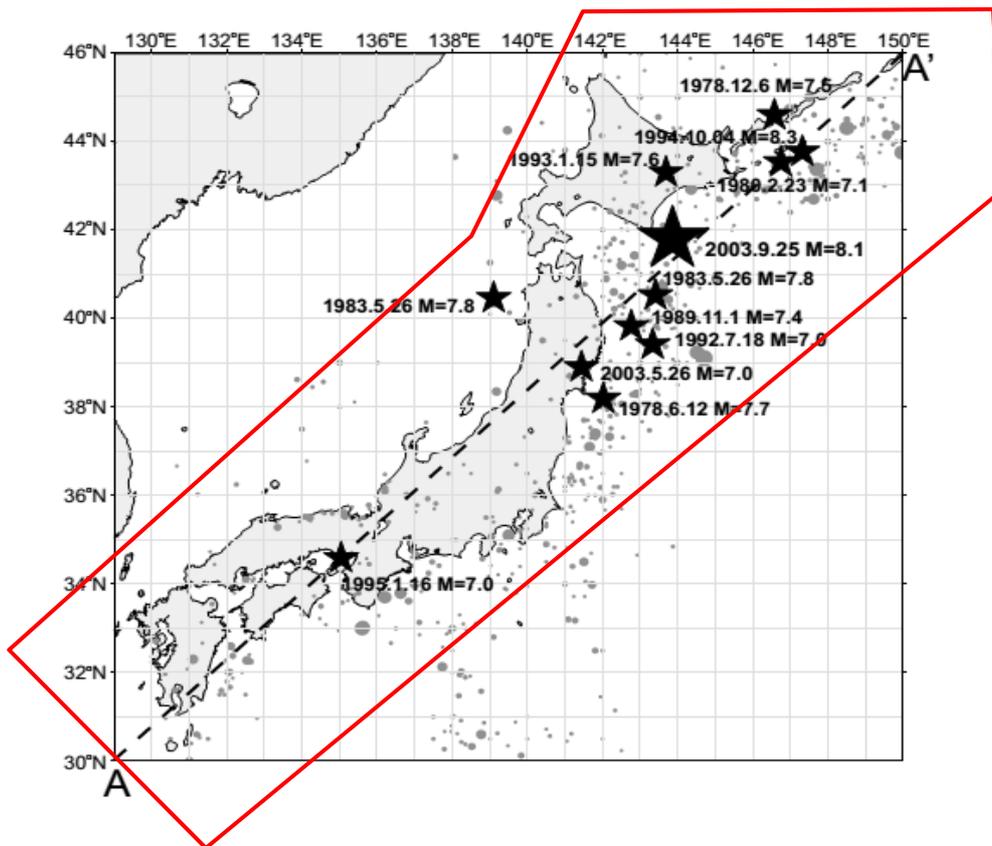
新しい概念による地震活動度解析

- 地震の発生順序には意味がある
- ナチュラルタイム(NT)解析の利点を確認(ギリシャグループの一連の発表)
- ETASモデル全盛であるが、臨界現象(長距離相関)を組み入れたモデルも有望 (Shebarin, 2012, EMSEV2012発表等)

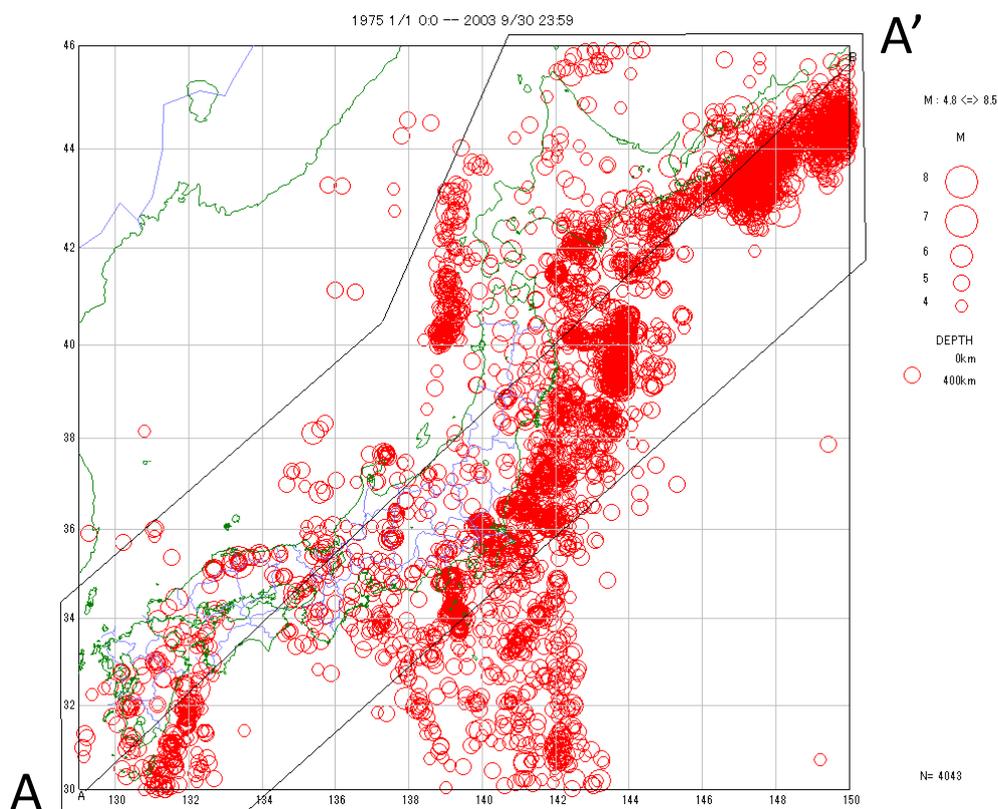
→地震活動度解析に長距離相関という概念を取り入れると、通常地震活動と臨界状態に近い地震活動を区別できる

- Shebalin, P., Increased correlation range of seismicity before large events manifested by earthquake chains, *Tectonophysics*, 424, 335–349, 2006.
- Shebalin, P., V. Keilis-Borok, I. Zaliapin, S. Uyeda, T. Nagao, and N. Tsybin, Advance short-term prediction of the large Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, M = 8.1 A case history, *EPS*, 56, 715-724, 2004.
- <http://www.emsev-iugg.org/2012program/index.html>
- Saris, N. et al., Minimum of the order parameter fluctuations of seismicity before major earthquakes in Japan, *PNAS*, 110, 13734–13738, 2013.
- Saris, N. et al., Spatiotemporal variations of seismicity before major earthquakes in the Japanese area and their relation with the epicentral locations, *PNAS*, 112, 986-989, 2015.

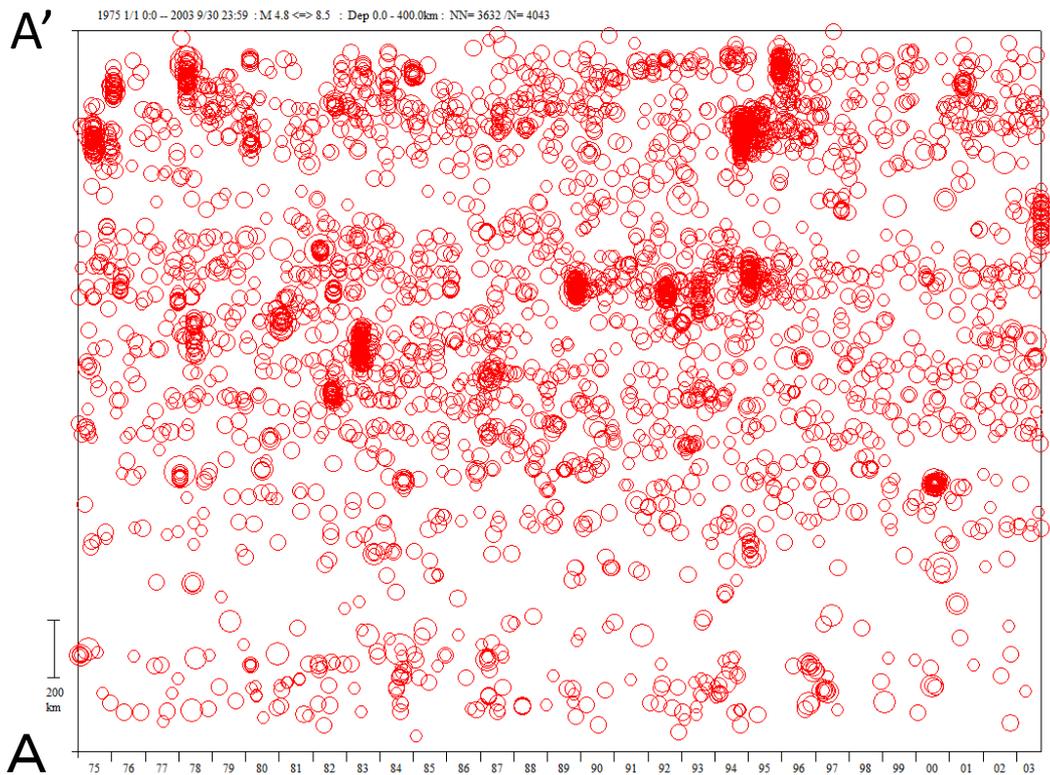
Shebalin ほか2004, EPS



定常的に地震活動が発生しているように見えるが、そこに長距離相関の考えを導入

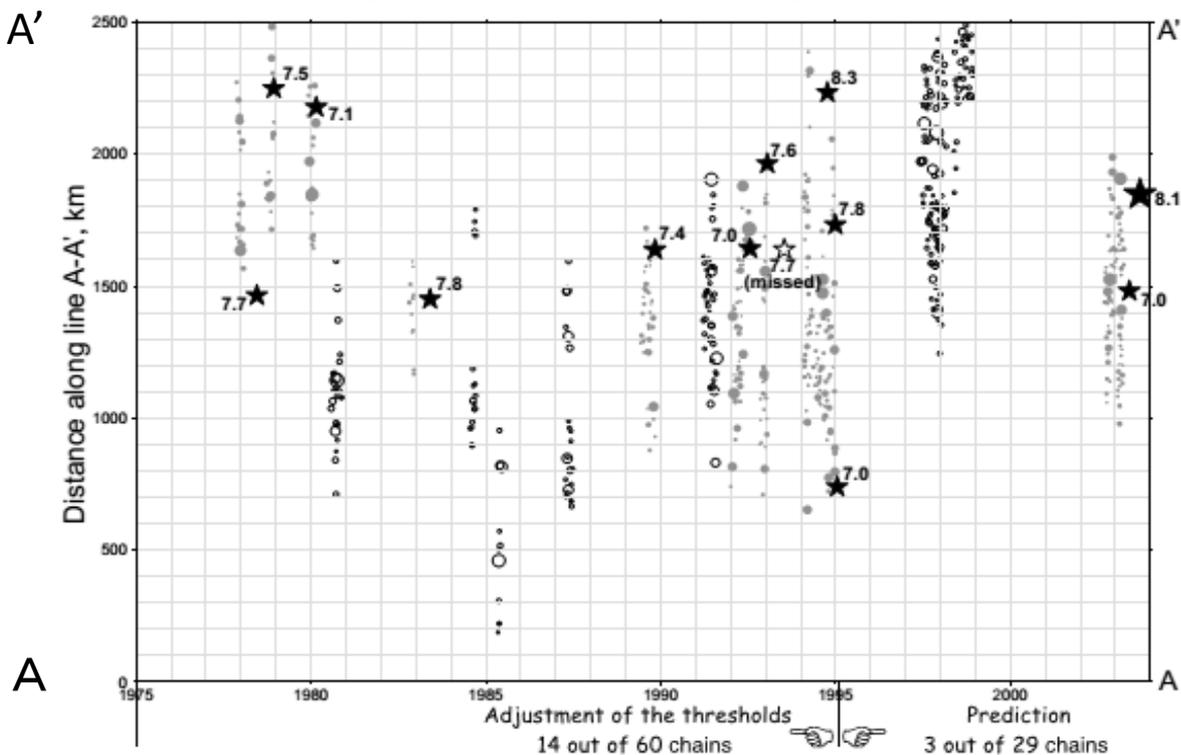


実際には地震はこのように発生している



長距離相関を取り入れると地震活動はこれだけになってしまう

Japan, 1975-2003, 11+1 earthquakes $M \geq 7.0$



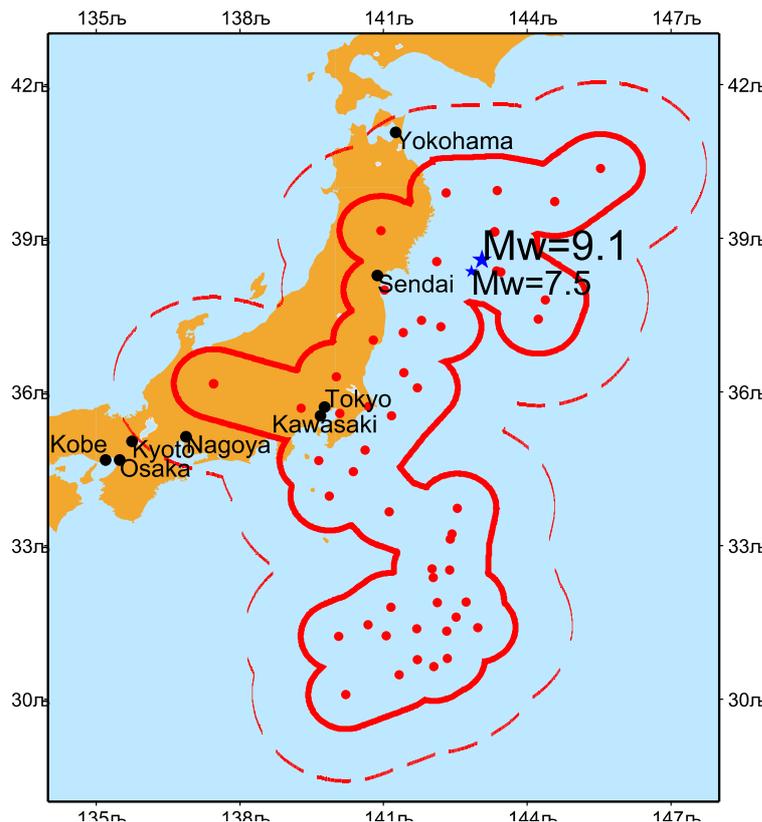
Shebalinらによる“Chain”の定義

$$r = r_0 10^{c(m-2.5)}$$

Table 1
Parameters of the chains supposed to be precursors of target earthquakes with $M \geq M_{\text{target}}$

Region	M_{target}	Catalog used	Period from	M_{min}	τ_0 (days)	r_0 (km)	c	k_0	l_0 (km)
<i>1. Regions of the test of the RTP algorithm</i>									
(1) Southern California	6.4	ANSS	1965	2.9	20	50	0.35	6	175
(2) Central California	6.2	ANSS	1980	2.9	30	50	0.35	10	250
(3) Eastern California	6.2	ANSS	1965	2.9	30	50	0.35	8	175
(4) Northern California	6.4	ANSS	1975	2.9	25	50	0.35	6	175
(5) Honshu–Hokkaido–S. Kurils	7.2	JMA	1980	3.5	20	50	0.33	25	800
(6) Eastern Mediterranean	6.5	GII	1983	3.0	40	50	0.35	8	175
(7) Po valley, Alps, Northern Dinarides, Central Apennines	5.5	PDE	1970	2.9	45	50	0.35	6	165
<i>2. Other regions and target earthquakes</i>									
(8) California	7.4	ANSS	1965	3.4	20	60	0.35	15	350
(9) Honshu–Hokkaido–S. Kurils	8.0	JMA	1980	3.8	20	50	0.33	25	1800
(10) Kurils–Kamchatka	7.2	ANSS	1975	4.0	12	50	0.35	6	400
(11) Aleutians–Alaska,	7.2	ANSS	1985	3.5	16	50	0.35	10	400
(12) NE Pacific	7.2	ANSS	1980	4.0	34	50	0.35	7	250
(13) Worldwide	8.2	ANSS	1976	5.5	60	30	0.5	10	4000
(14) Vrancea	5.2	NIEP	1994	2.5	30	50	0.35	25	90

Japan, March 2011



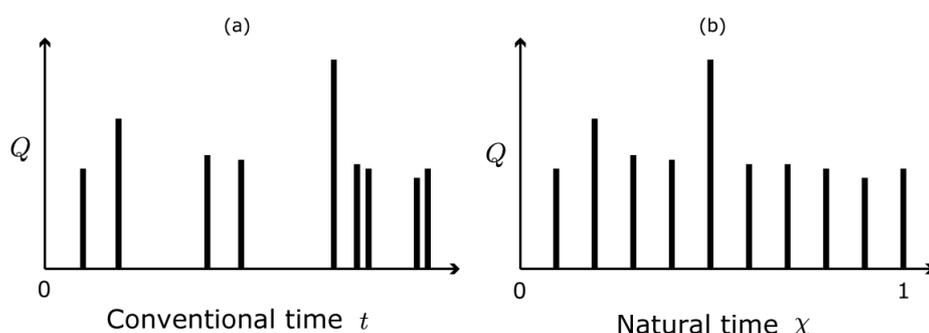
RTPアルゴリズムを適用して抽出された地震活動の“Chain”

ギリシャグループが主張するナチュラル・タイム解析

- 1987年以降のJMAマグニチュードで7.6以上の地震をすべて等しく解析し、時間・空間的な先行的変化をすべての場合で検出
- ここで監視していた β というパラメータは多くの κ_1 を計算したときの分散に相当
- κ_1 が臨界に近づくというのはイジングモデル等では照明されている
- ギリシャのグループは地震を第2種相転移で説明できると考えている
- 大地震の前に β のミニマムが出現する。→時間的な解析
- それは311の前に最小となった(1本目の論文)
- さらに空間的にどこがcriticalとなっていたか(場所の推定が2本目の論文)

→ 現時点では最適にチューニングされた結果なのでうまくいっているとも判断できるが、統計物理学のアプローチは今後慎重にテストされるべきテーマと認識している

Natural Time (NT)とは



$$\chi_k = \frac{k}{N}$$

k : k th event
N : total number of events

$$\kappa_1 = \sum_{k=1}^N p_k \chi_k^2 - \left(\sum_{k=1}^N p_k \chi_k \right)^2 \equiv \langle \chi^2 \rangle - \langle \chi \rangle^2$$

ここで、 $p_k = Q_k / \sum_{n=1}^N Q_n$

At criticality:

$$\kappa_1 \Rightarrow 0.07$$

ナチュラルタイム (Natural time) という新しい時間概念

この概念を時系列解析に適用すると、従来知られた臨界現象だけでなく、ライスパイルモデル (Rice pile model) における大崩や大地震、心電図による心臓発作などの臨界点近傍を推定できると主張している。ナチュラルタイムの概念は、事象はその過程に固有の“セルフクロック (self clock) あるいはインターナルクロック (internal clock)”ともいふべき時間によって進行するのであって、通常的时间 (Conventional time) に支配される理由はないという考えに根ざしている。そのため、時間は事象が起こったときのみ進むとしている。

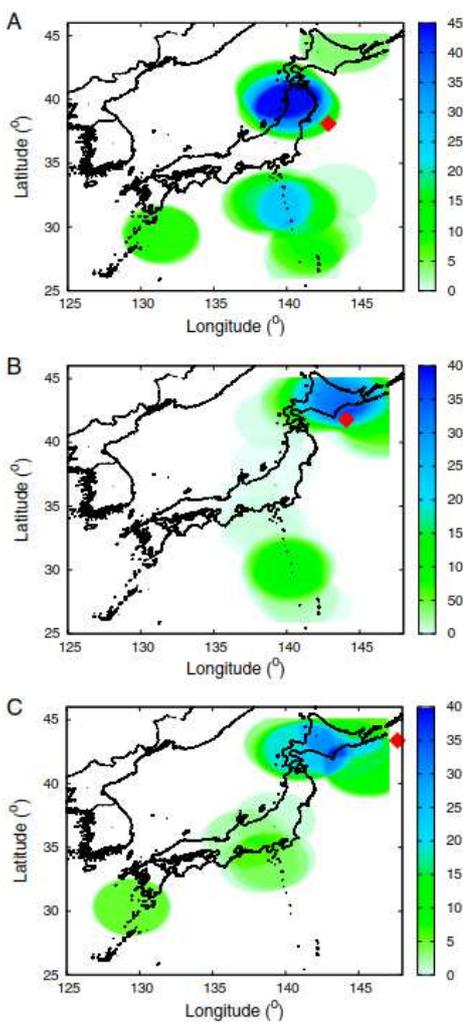


Fig. 3. Color contours of the number $n_e(x,y)$ for EQs of magnitude 8.0 or larger: (A) 2011 Tohoku EQ, (B) 2003 Off-Tokachi EQ, and (C) 1994 East-Off Hokkaido EQ. Solid diamonds are epicenters.

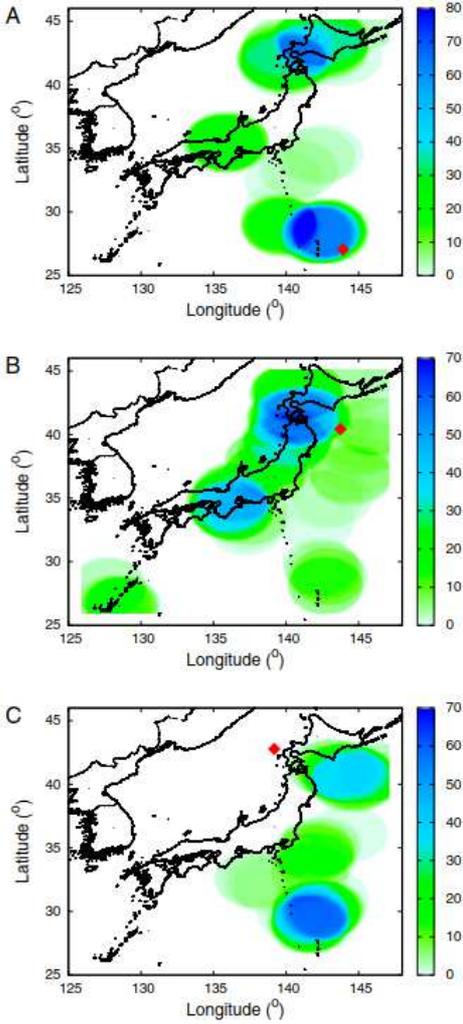


Fig. 4. Color contours of the number $n_e(x,y)$ for EQs of magnitude between 7.6 and 8.0: (A) 2010 Near Chichi-jima EQ, (B) 1994 Far-Off Sanriku EQ, and (C) 1993 Southwest-Off Hokkaido EQ.

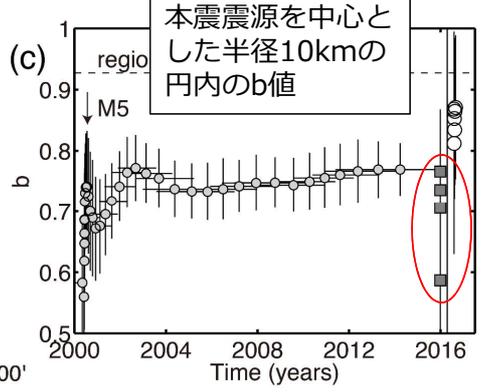
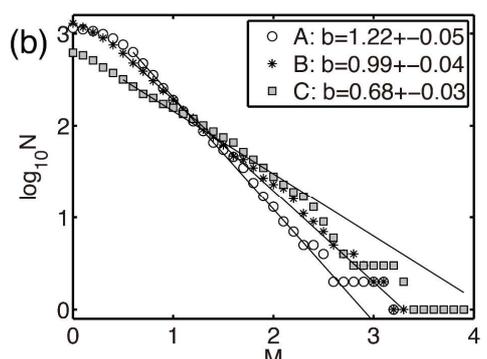
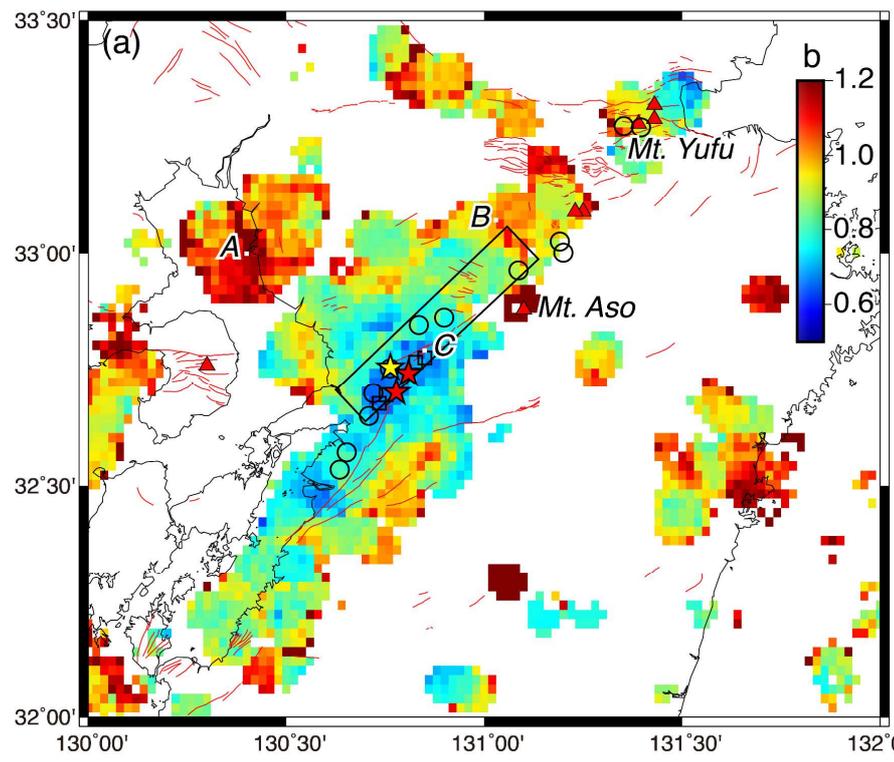
場が臨界に近くな
たかを判別できると
著者らが主張してい
る β という $k=1$ の分散
が小さい場所で
M7.6以上の地震が
発生している(気象
庁カタログによる)

ナチュラルタイム
(NT)を用いた解析

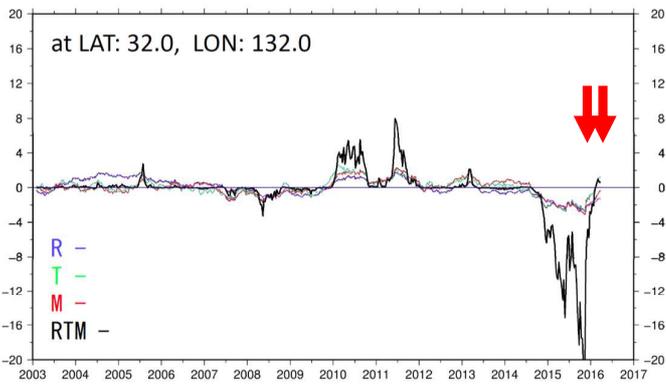
Saris et al., PNAS, 2015

熊本地震に先行現象はあったのか？

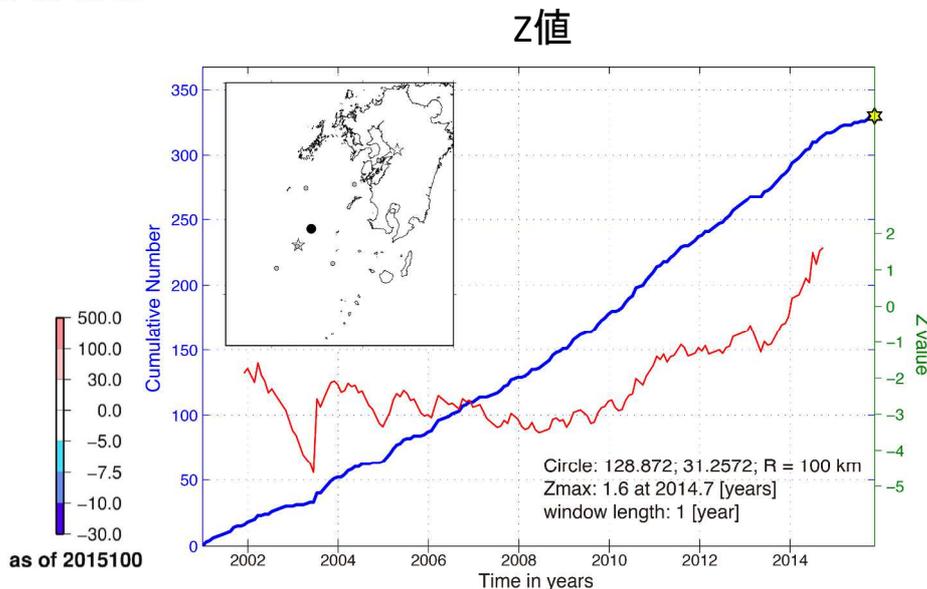
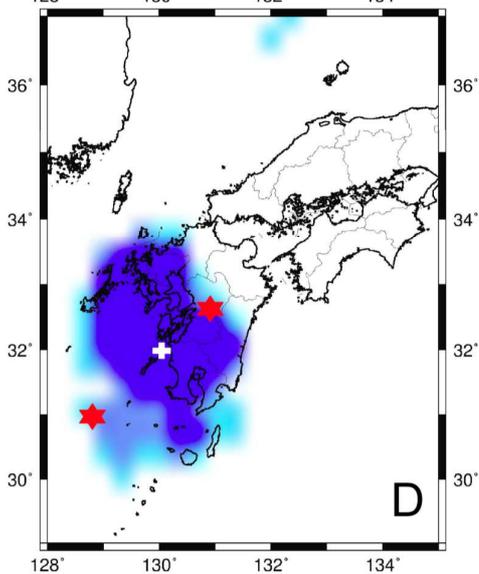
b 値の異常 震源付近で極めて小さな値となっていた



RTMアルゴリズム



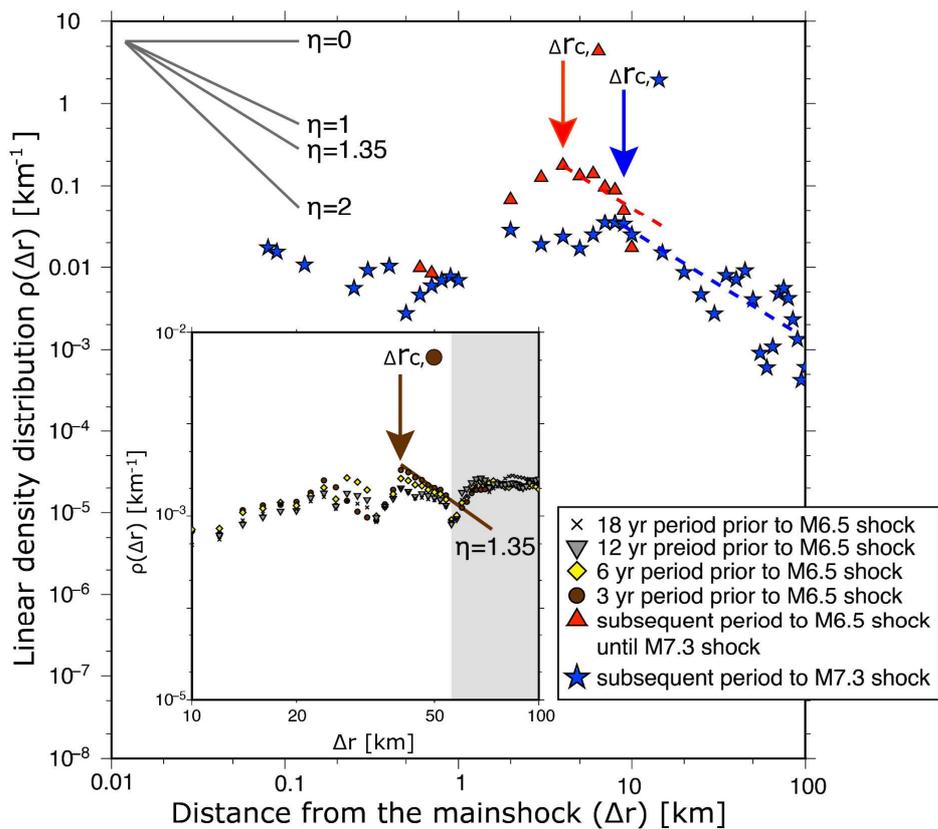
熊本地震前 の静穏化



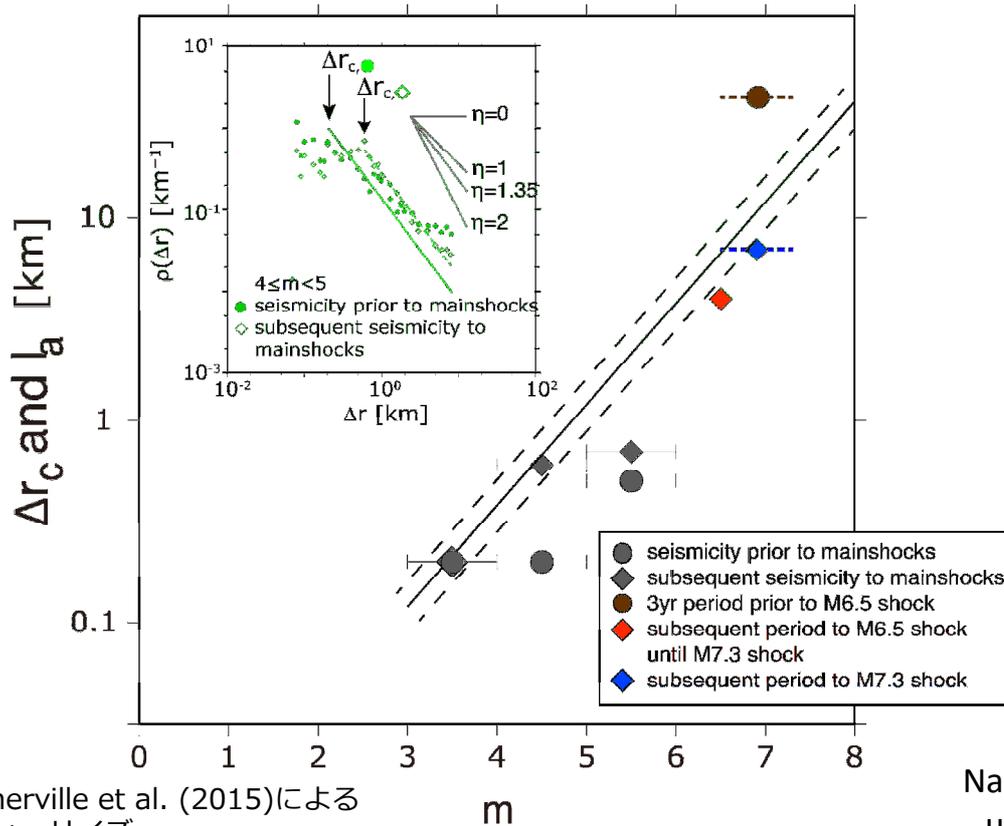
地震密度解析

熊本地震前後の地震密度に冪乗関係

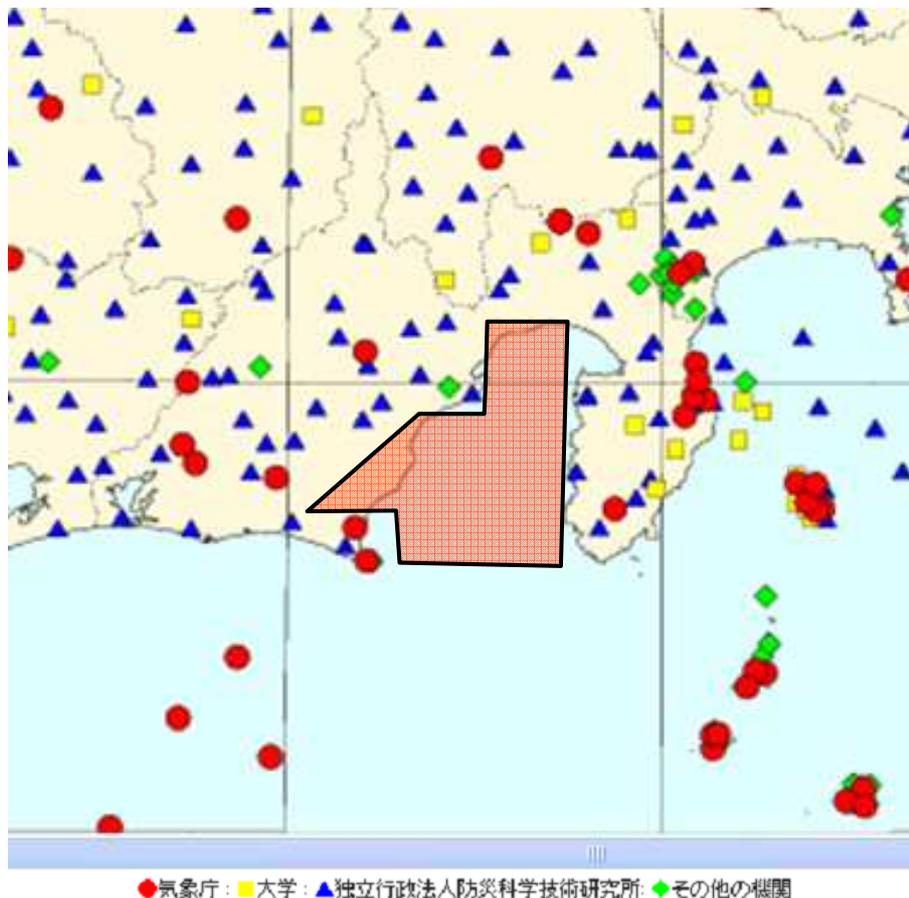
- 熊本地震後の地震密度(m7.3以降の地震)について $\Delta r > \Delta r_c = 8\text{km}$ で冪乗関係 (★印)
- 熊本地震前の地震密度(m6.5以前の地震)について $\Delta r = 40\text{-}60\text{km}$ ($\Delta r_c = 40\text{km}$)で冪乗関係 (挿入図)。三年前から明瞭 (●印)
- 参考として、前震(m6.5からm7.3間の地震)についても冪乗関係は見える



特徴的距離と呼ぶ Δr_c 以上の距離でべき乗（指数1.35）を示す図 (inset)。この図では、 Δr_c とアスペリティの大きさはコンパラであることを示している。



東海地域における地震観測点 (●: 気象庁 ▲: 防災研)

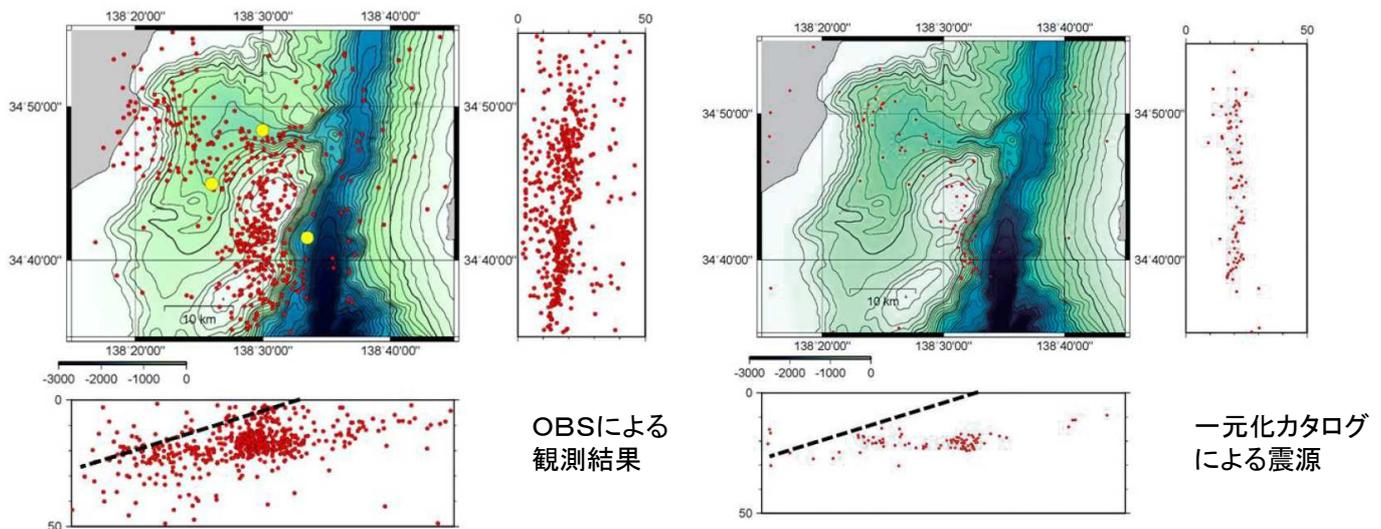


● 気象庁 ● 大学 ● 独立行政法人防災科学技術研究所 ● その他の機関

駿河湾には海底ケーブル式地震計が置かれた事はない

東海大による駿河湾内でのOBS観測

ETASモデルを適用するためにはバックグラウンドのサイズシティーがある程度高い必要がある(同一期間で15-20倍ほどの地震を観測)



東海大学の小型観測船とOBSを用いた駿河湾内での微小地震観測。駿河湾はHi-netで十分カバーされていると考えられているが、同一観測期間内で3点のOBSを併用した場合には約10倍の地震数を検知している。先行的な地震活動変化を抽出するためにも、今後オンライン化が望まれる(2012年10月から13年5月まで。気象研究所と東海大学との共同研究の一環として実施)。

(馬場ほか、自己浮上式海底地震計(OBS)を用いた駿河湾石花海周辺海域における連続地震観測
東海大学海洋研究所報告, 36, 23-29, 2015.)

http://www.scc.u-tokai.ac.jp/~289077/bulletin/files_for_bulletin/36_23-29baba.pdf

今後の予知研究にむけて

- 地震活動度研究で、静穏化現象や長距離相関という考え方を組み合わせると発生時期および場所を絞れる可能性がある
- 地震密度解析やb値解析は将来の本震発生場所をより精度よく特定できる可能性がある
- GNSS-TEC(日置ら)の結果は、偶然では説明できない。当初言われたフィッティングカーブの問題も克服。警報時間が極めて短いのも特徴
- 電磁気学的先行現象の研究およびその発現メカニズムの研究はもちろん重点的に行う(次回資料)
- 駿河湾は実は地震観測の空白域