

# 発生時の無作為(ランダム)性から探る史料中の有感記録の完全性

公益財団法人地震予知総合研究振興会\* 石辺 岳男 松浦 律子

東京大学地震研究所† 佐竹 健治

Completeness of Felt Reports in Historical Documents Inferred from Randomness of Occurrence Times

Takeo ISHIBE, R.S. MATSUURA

Association for the Development of Earthquake Prediction

Chiyoda Build. 8F 1-5-18, Kanda-Sarugakuchō, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0064 Japan

Kenji SATAKE

Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0032 Japan

We conducted the Rydelek-Sacks test (Schuster's test) in order to investigate the completeness of felt reports described in historical documents "Shinkakuji-nikki (Earthquake Diary written by the chief priest of Shinkakuji temple)" and felt reports at Hirosaki, Hachinohe and Morioka compiled by Satake (2002) by focusing on the randomness of the occurrence times of earthquakes. As a result, the number of felt reports during the daytime is systematically larger than that during the nighttime, and the bias is statistically significant when slightly-felt data is included. The probabilities that the observed bias of occurrence times can be reproduced by chance from uniformly-distributed occurrence times are extremely low. On the other hand, felt reports with moderate or strong ground shakings have no statistically significant bias on their occurrence times. In a historical period, it is likely that ground shakings were more readily detected and/or recorded during the daytime when people were more active, than during the nighttime when people usually sleep. A correction would be required to properly reconstruct the seismic activity during historical periods from felt reports, especially when comparing the seismic activity in the historical periods with those for the modern instrumental observations.

Keywords: Completeness, Felt Reports, Randomness, Rydelek-Sacks Test (Schuster's Test), Historical Documents.

## § 1. はじめに

プレート境界で発生する大地震の平均再来間隔は、一般的に数十年～数百年のオーダー [例えば, Ishibe and Shimazaki (2009)] と、日本の活断層で発生する固有地震規模の地震の平均再来間隔は一般に数千年から数万年のオーダー [例えば, Ishibe and Shimazaki (2008, 2012)] と、それぞれ推定されている。一方で、日本で近代計器観測が始まってからは100余年に過ぎず、特に稠密地震観測網が日本全

国に展開されてからは四半世紀程度に限られる。大地震の繰り返し挙動ならびにその揺らぎ、多様性を理解するためには、計器観測時代以前に発生した歴史時代の地震の調査、さらには地形・地質学的調査は重要である。

日本には豊富な歴史資料が残されており、これらに基づき歴史地震に関する調査研究が行われてきた。これまでの歴史地震研究においては、主に大地震による被害に関する記述から震度分布を推定し、その

\* 〒101-0064 東京都千代田区神田猿楽町 1-5-18 千代田ビル 8F  
電子メール: ishibe@erc.adeq.or.jp; matsuura@adeq.or.jp

† 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1  
電子メール: satake@eri.u-tokyo.ac.jp

震源位置や規模に関する調査が行われてきた [例えば、松浦・中村 (2016, 2020, 2021), 宇佐美・他 (2013)]. これらの成果は地震調査研究推進本部地震調査委員会による活断層や海溝型地震の長期評価ならびに強震動・津波評価 [例えば、地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2022a, 2022b)] に活用されてきた. さらに、それぞれの地域で過去に発生した被害地震として、防災教育や啓発活動等に活用されている [例えば、五島・他 (2022)]. 一方で、被害記述に基づく歴史地震研究には、石辺・他 (2021) で述べられているように、課題も存在する.

史料中には顕著地震に対する被害記述の他に、地震の揺れを感じたとする記録 (有感記録) が残されていることがある. これらの大半は、発生日時とともに「地震」とだけ記述されているが、中には日毎の有感地震数やその震度等を詳細に記録したものも存在する. 史料中の有感記録に基づく既往研究については、石辺・他 (2021) に挙げられているが、有感記録が歴史地震の震源域推定や歴史時代の地震活動解析に十分に活用されてきたとは言い難い.

史料から抽出される有感記録に基づき、歴史時代の地震活動変化や誘発地震・群発的活動の発生を復元できる可能性がある. 石辺・他 (2021) は、有感記録に基づく歴史時代の地震活動解析に向けて、気象庁震度データベース [石垣・高木 (2000)] ならびに震度の距離減衰式 [Matsu'ura *et al.* (2020)] を用いた検討を行い、2011 年東北地方太平洋沖地震等の発生前に報告されている地震活動の静穏化 [例えば、Katsumata (2011a, 2011b)] や地震後の地震活動変化 [例えば、Hirose *et al.* (2011), Ishibe *et al.* (2011, 2015, 2017), Matsu'ura *et al.* (2022), Toda *et al.* (2011)] を有感記録から検出できる可能性、ならびに有感記録数の空間分布から大地震の震源域を制約できる可能性を示した.

近年、歴史時代における被害を伴わない有感記録に対する調査研究を円滑に推進するために、地震火山史料連携研究機構によって日記史料有感地震データベースの試作版が構築・公開された [Nishiyama *et al.* (2017), 西山・他 (2021)]. 日記史料有感地震データベースは、従来の被害記述に基づく調査研究とは異なった側面から、歴史時代における地震活動の復元や、顕著地震に対する震源像の再検討、偽地震 (幽霊地震) の同定等に資するものと期待される. 例えば、原田 (2021) は、近年翻刻されたものを含む同時代史料や上記のデータベースを用いた検討に

より、安政二年に豊後国で発生したとされる 2 つの被害地震 (六月二十四日の杵築地震、十一月二日の立石地震) が存在しない偽地震であったと結論付けている.

一方で、史料中の有感記録を用いて地震活動を解析するにあたり、有感記録の品質 (例えば均質性・完全性) について、調査する必要がある [石辺・他 (2021), 石辺・佐竹 (2021)]. 計器観測時代の地震カタログにおいても、マグニチュードの決定方法の変更や観測網の移設・廃止等によって均質性が保持されず、人為的な見かけ上の地震活動変化が生じる場合がある [例えば、Habermann (1987)]. また、カタログ (史料) には欠測期間が含まれている可能性があり、どの期間の有感地震が漏れなく記録されているのか、有感記録がない期間が単に欠測期間であったのか、検討する必要がある. Satake and Ishibe (2020) では、史料中に記述されている天気を拠り所として欠測期間について検討し、江戸～東京に至る 350 年間程度の有感記録の変遷について論じた. これとは別に、筆者が移動することによって記録地点が時間とともに変化することもあり [例えば、服部・他 (2020)], 有感の記録地点に関しても注意する必要がある.

計器観測による地震の検知能力は、人間活動等に伴うノイズレベルに強く依存する. そのため、一般に人間活動が活発でノイズレベルが高い昼間に比べ、夜間の方が地震の検知能力が高い. 検知漏れがある小規模地震まで含めた場合、夜間の地震数の方が昼間のそれよりも多くなる. 図 1 に、1997 年 10 月から 2019 年 12 月までに関東地方で発生した地震 (気象庁マグニチュード ( $M$ )  $\geq 0.5$ , 深さ 100 km 以浅) の震源分布、規模別頻度分布ならびに 3 つの異なる下限マグニチュードにおける発震時刻のヒストグラムを示す (気象庁一元化震源カタログによる). 地震の規模別頻度分布から検知漏れが示唆される微小地震を含めた場合、夜間における地震数の方が昼間に比べ顕著に多い. 一方で地震が漏れなく検知される均質限界マグニチュード [例えば、Nanjo *et al.* (2010)] 以上の地震に限った場合、発震時刻のヒストグラムに顕著な偏りは見出されない. なお、ヒストグラムにおける 12 時における突出は、多くの採石等に伴う発破が正午に行われている事に起因する. また、新型コロナウイルス感染症の蔓延防止のための緊急事態宣言下において、人間活動の抑制に伴うノイズレベルの低下が報告されている [例えば、Yabe *et al.* (2020), 林・酒井 (2021)].

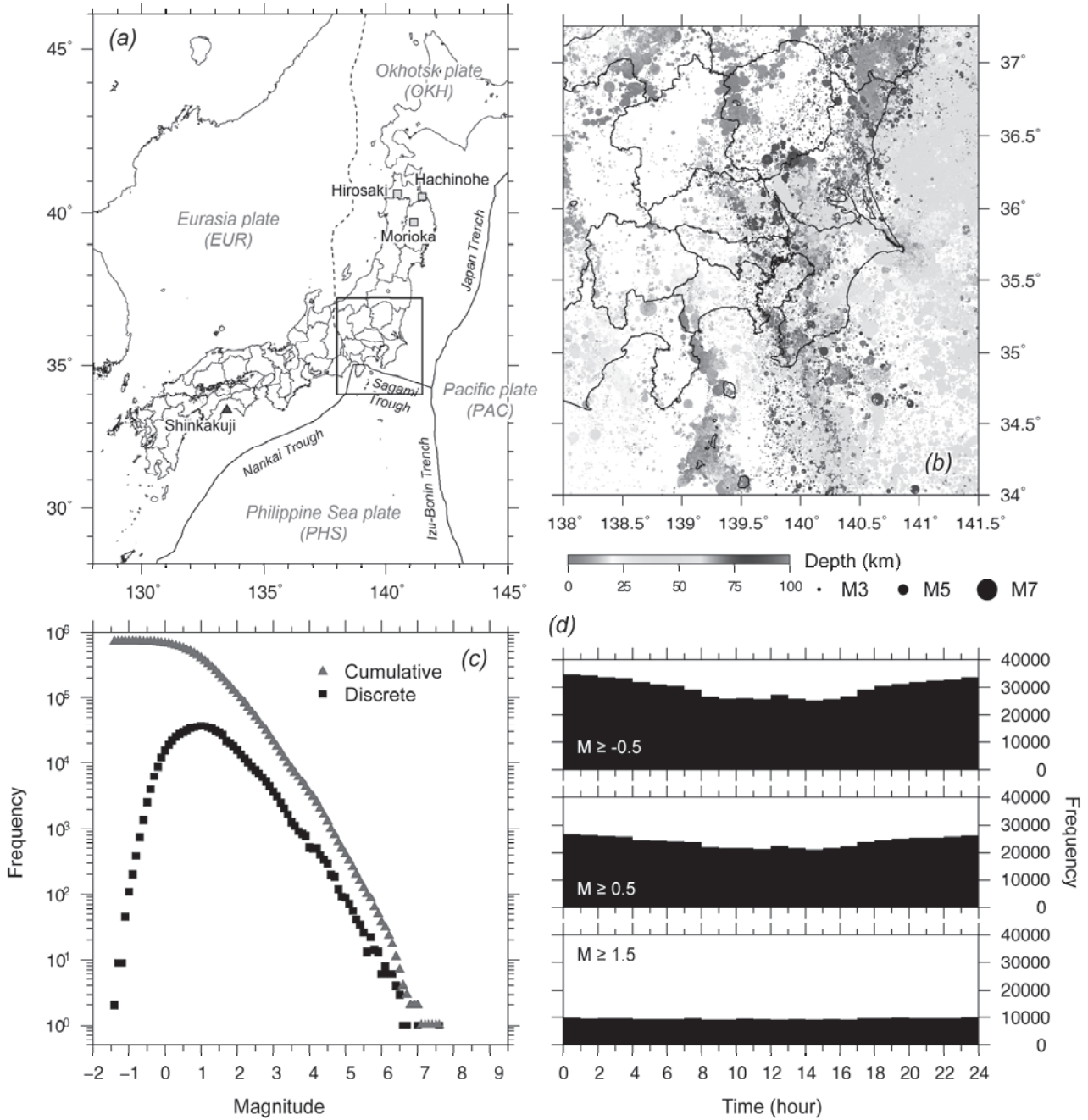


図 1. (a) 日本周辺のテクトニクスならびに日記記録地点. 真覚寺の位置を三角で, 弘前・八戸・盛岡の位置を四角でそれぞれ示す. (b) 気象庁一元化震源カタログ(1997年10月~2019年12月, M0.5以上, 深さ100 km 以浅)による関東地方((a)における矩形領域)における震源分布. 色は震源深さを表す. (c) 関東地方における地震の規模別頻度分布(赤三角:累積度数, 青四角:離散度数). (d) 3つの異なる下限マグニチュードにおける地震の発震時刻のヒストグラム.

Figure 1. (a) Tectonic setting of Japanese islands and the locations of the Shinkakuji temple (filled triangle), Hirosaki, Hachinohe, and Morioka (filled squares). (b) Hypocenter distribution of earthquakes in the Kanto region (rectangle region in (a)), Japan from the unified Japan Meteorological Agency (JMA) catalog (from October 1997 to December 2019,  $M \geq 0.5$ , 100 km depth or shallower). (c) Magnitude frequency distribution of earthquakes in the Kanto region (red triangle: cumulative, blue square: discrete). (d) Histogram of occurrence times for the three different magnitude thresholds.

地震が漏れなく検知されている均質限界マグニチュードよりも規模の小さな地震を含めた場合、昼夜間の地震数の比が統計的に有意に偏る点に着目し、Rydelek and Sacks (1989) はカタログの均質限界マグニチュードを推定する手法を提案するとともに、3つのカタログに対して適用した。また、Rydelek and Sacks (1992) は上記の手法を用いることで、Gomberg (1991) が指摘した均質限界マグニチュードが低い領域で発生している地震のうち、かなりの割合が人工地震である可能性を指摘した。

史料中に記述されている有感記録は体感に基づくものであり、一般に人間活動が活発な(覚醒時の)昼間の方が、不活発な(睡眠時の)夜間に比べ多い可能性がある。また、その特性は公文書であるのか、商人が記した日記であるのかといった史料の性質に依拠する可能性もある。更には、揺れに対する感度には個人差があり、どの程度の揺れをどの程度の割合で感知し、或いは記録しているのかについて調査することは、歴史時代において定量的に地震活動度を論じる上で必要不可欠である。

そこで本研究では、日記史料有感地震データベース(試作版)に収録されている『真覚寺日記』ならびに佐竹(2002)によって纏められている弘前、八戸、盛岡における有感記録を対象として、Rydelek and Sacks (1989) による手法(Schuster 検定, Schuster (1897); 以下, RS テストと略記する)を用い、発生時の無作為性から史料中における有感記録の完全性の検討を行うとともに、有感記録を用いて歴史時代の地震活動を復元する際の留意点について論じる。

## §2. 『真覚寺日記』等へのRSテストの適用

『真覚寺日記』は、高知県土佐市宇佐町の真覚寺(図1)の住職であった井上静照が、嘉永七年(1854年)の南海トラフ地震発生から死去前年の明治元年まで、15年間の出来事を日記として残したものであり、「地震日記」9巻、「晴雨日記」5巻から構成される。日記史料有感地震データベースにはこのうち、嘉永七年十一月(1854)～安政四年十二月(1858)までの1,732件の有感記録が収録されており、本研究ではこれに依拠した。揺れの程度が「大」、「中」、「小」等に分類されており、すべて用いた場合、「小」のみを用いた場合、「大」・「中」を用いた場合に対してそれぞれRSテストを実行し、発生時が無作為であるとした場合に、その偏りが偶然に生じる確率を算出した。以下に、本研究における手法の概要を示す。

地震の発生時を0時ならびに24時が0°, 6時が90°, 12時が180°, 18時が270°として1日で1回転する位相角で発生時を表現し、ある地震が発生した際にその位相角に沿って1だけ進むとする。この際、原点を起点としてN個の地震発生後の位置Dは以下の様に表現される。

$$D = \sqrt{(\sum_{i=1}^N \cos\psi_i)^2 + (\sum_{i=1}^N \sin\psi_i)^2} \quad (1)$$

ここで、Nはイベント数、 $\psi_i$ はi番目のイベントの位相角である。また、発生時が無作為である場合にその偏りが偶然に発生する確率pは、以下で表される。

$$p = \exp\left(-\frac{D^2}{N}\right) \quad (2)$$

(2)式は、2次元ランダムウォークにより歩幅1でN歩進んだ時に原点からの距離がD以上となる確率に相当する。この検定によって得られるp値は、帰無仮説「地震発生時は無作為(ランダム)である」が棄却される危険率(有意水準)を表す。p値が低いほど統計学的に有意な地震発生時の偏りがあることを示しており、5%(0.05)や1%(0.01)がその有意性検定において用いられることが多い。なお、検定においては、イベント数Nが10以上であれば十分であるとされている[例えば、Heaton (1975)]。

史料中における有感記述は不定時法に則って時間幅を以て記録されており、日記史料有感地震データベースには定時法に変換された時刻が幅を以て記載されている。近代計器観測とは異なり、地震の発生時には一般に1刻程度の不確定性を伴うことが多い。そのため本研究では、上記の不確定性を考慮した検討を実施するため、それぞれの有感記録に対して定時法に換算された時間幅で一様に分布するボックス型の確率密度関数を仮定し、乱数により発生時を作成した。本研究では10000組のカタログを作成し、それぞれのカタログに対してRSテストを実行し、発生時が無作為である場合にその発生時の偏りが偶然に生じる確率を算出した。なお、屢々発生といった発生時が不明な有感記録は解析から除外した。また、ある時間幅に複数回の地震が発生したとする記述が主に嘉永七年(1854年)南海地震の発生直後に見られるが、本研究では1回と見做した。

図2に10000試行のうち任意の5試行に対する発生時のヒストグラムを、図3に図2に示す5試行の発生時に対して実施されたRSテストの結果をそれぞれ示す。また、すべての有感記録を用いた場合、揺れの程度が「小」のみを用いた場合、揺れの程度が

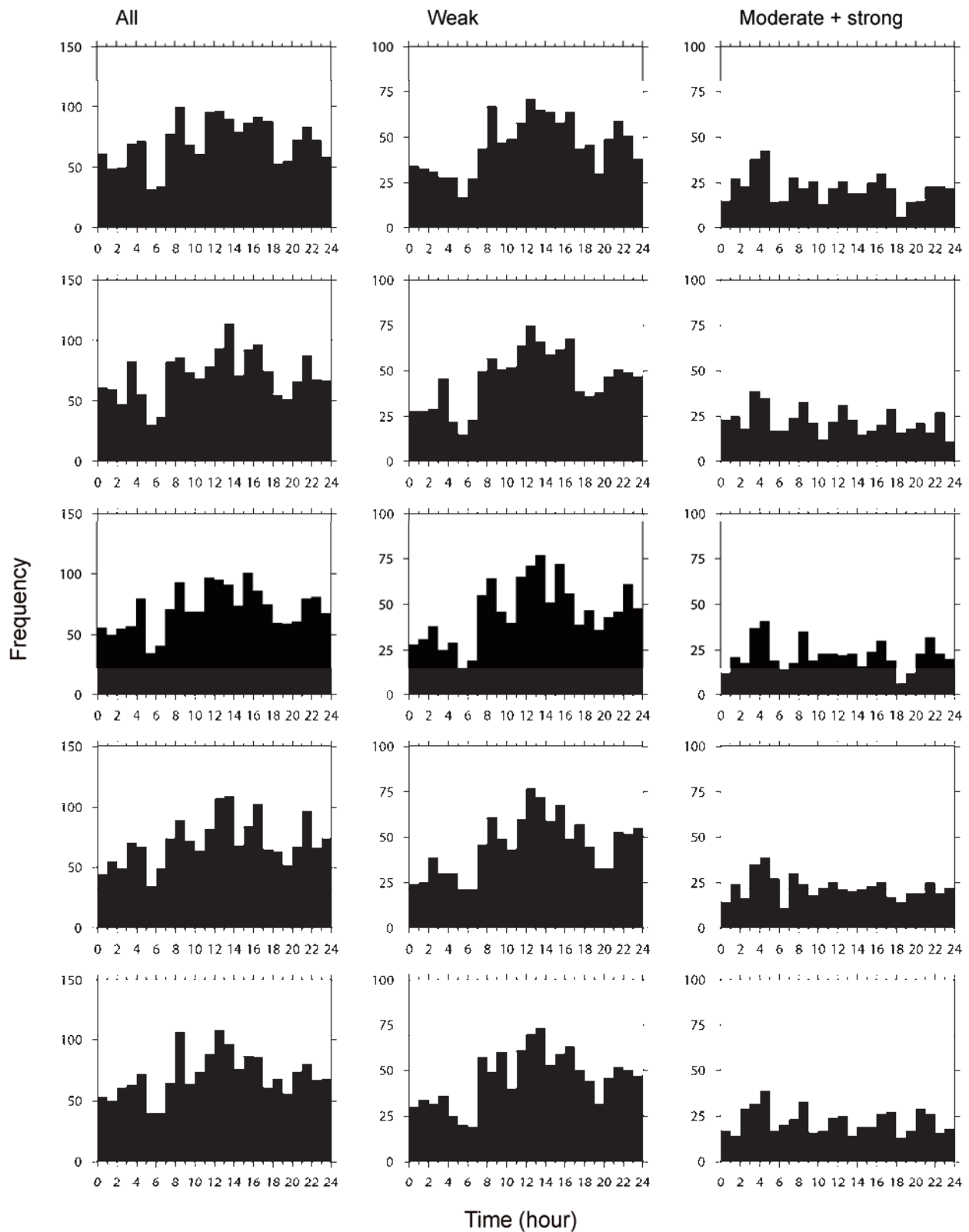


図 2. (左)すべての有感記録を用いた場合, (中央)揺れの程度「小」のみの有感記録を用いた場合, (右)揺れの程度「中・大」のみの有感記録を用いた場合に対する任意の 5 試行における発生時のヒストグラム.

Figure 2. Histogram of occurrence times that were generated from the felt reports in historical documents for five trials (left: all data, center: only weak ground shaking, right: moderate or strong ground shaking).

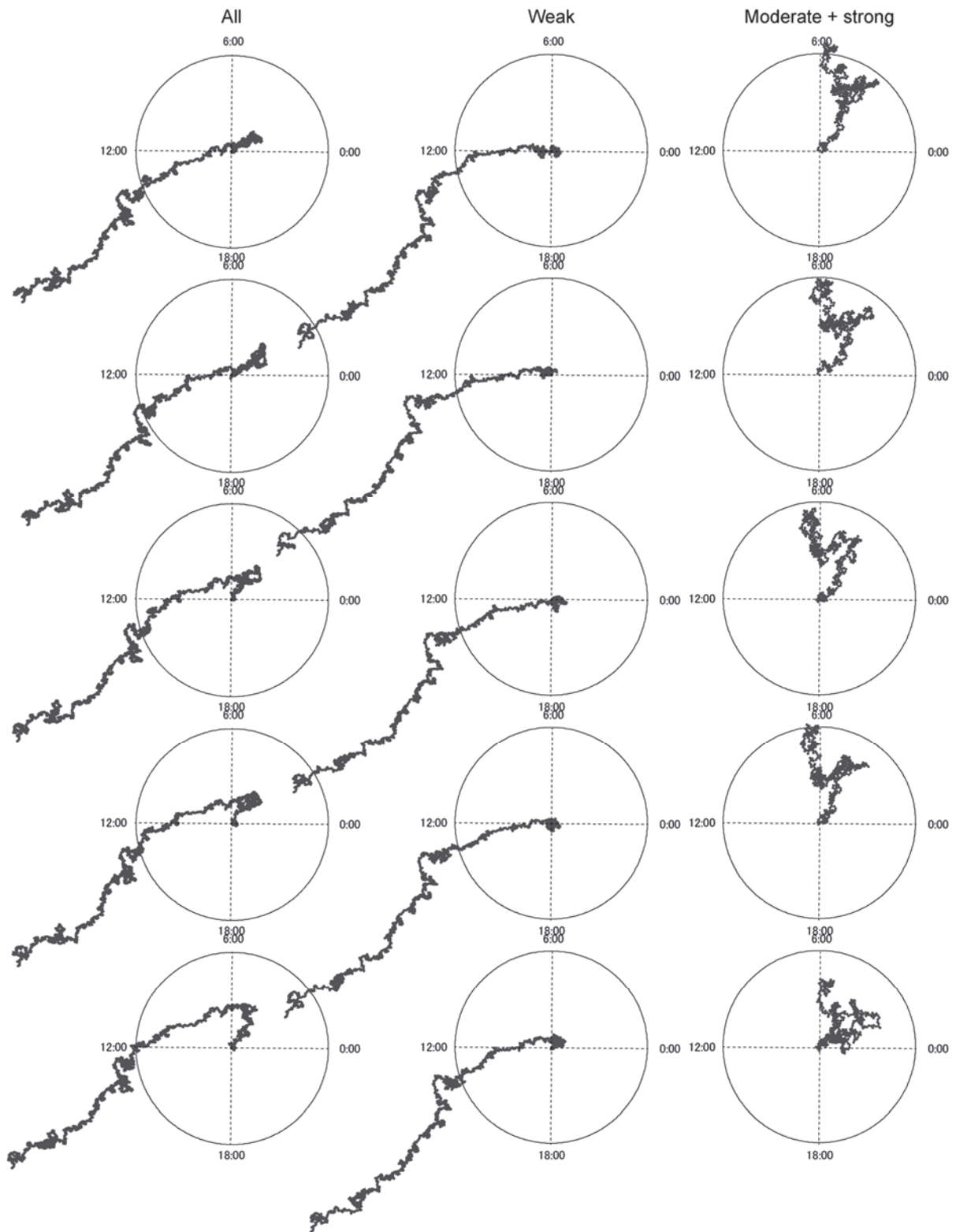


図 3. (左)すべての有感記録を用いた場合, (中央)揺れの程度「小」のみの有感記録を用いた場合, (右)揺れの程度「中・大」のみの有感記録を用いた場合に対する図 2 に示す 5 試行における RS テストの結果. 円は発生時が無作為であるとした場合にその発生時の偏りが偶然生じる確率が 0.05 (5%)となる半径を表す.  
 Figure 3. The results of the RS test for five trials shown in Figure 2 (left: all, center: only weak ground shaking, right: moderate or strong ground shaking). The circles indicate the radii that the bias of occurrence times are reproduced from uniformly-distributed occurrence times with the probability of 0.05 (5%).

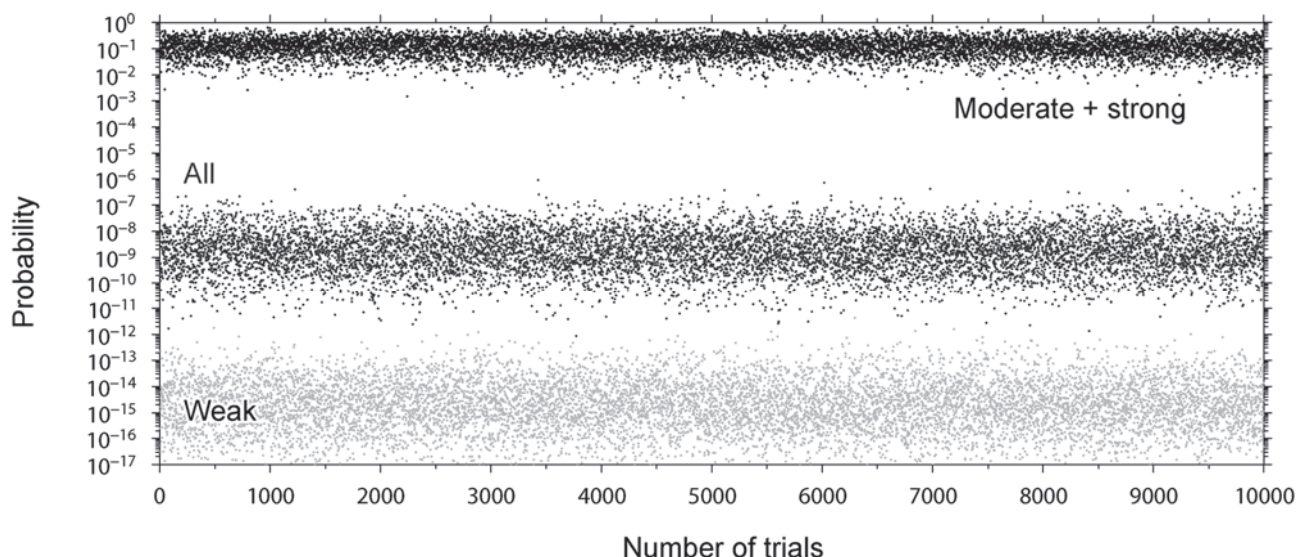


図 4. (赤)すべての有感記録を用いた場合, (緑)揺れの程度「小」のみの有感記録を用いた場合, (青)揺れの程度「中・大」のみの有感記録を用いた場合に対して, 発生時が無作為である場合にその発生時の偏りが偶然に生じる確率. 横軸は試行回数を, 縦軸は発生時の偏りが偶然に生じる確率をそれぞれ表す.

Figure 4. Probability that the bias of occurrence times are reproduced by chance from uniformly-distributed occurrence times for each trial (red: all data, green: only weak ground shaking, blue: moderate or strong ground shaking).

表 1 『真覚寺日記』ならびに佐竹(2002)による弘前・八戸・盛岡の有感記録に対する RS テスト結果.

Table 1. Results of the RS test for occurrence times of felt reports documented in “Shinkakuji-nikki”, and Hirosaki, Hachinohe and Morioka compiled by Satake (2002).

	Number	X*	Y*	R*	Phase (degree) †	R (0.05) ‡	R (0.01) ‡	Probability ¶
Shinkakuji-nikki (Values for the trial with the median probability)								
All	1704	-150.8422	-107.8641	185.4401	215.5678	71.4474	88.5845	$1.72 \times 10^{-9}$
Weak	1102	-146.3907	-126.4000	193.4095	220.8087	57.4569	71.2383	$1.81 \times 10^{-15}$
Moderate and strong	530	6.1951	33.0129	33.5891	79.3717	39.8464	49.4038	$1.19 \times 10^{-1}$
Satake (2002)								
Hirosaki	1411	-153.4385	44.2939	159.7039	163.8979	65.0152	80.6095	$1.41 \times 10^{-8}$
Hachinohe	390	-40.4995	37.6847	55.3204	137.0619	34.1809	42.3794	$3.91 \times 10^{-4}$
Morioka	1022	-164.9467	-52.5711	173.1217	197.6779	55.3321	68.6038	$1.80 \times 10^{-13}$

\* X, Y, R: RS テストにおける最終位置(横軸を X, 縦軸を Y とする)ならびに原点からの距離 (R)

† Phase: RS テストにおける最終位置の位相角

‡ R(0.05), R(0.01): 発生時が無作為である場合に確率 0.05, 0.01 で原点から到達する距離(半径)

¶ Probability: 発生時が無作為である場合にその発生時の偏りが偶然に生じる確率

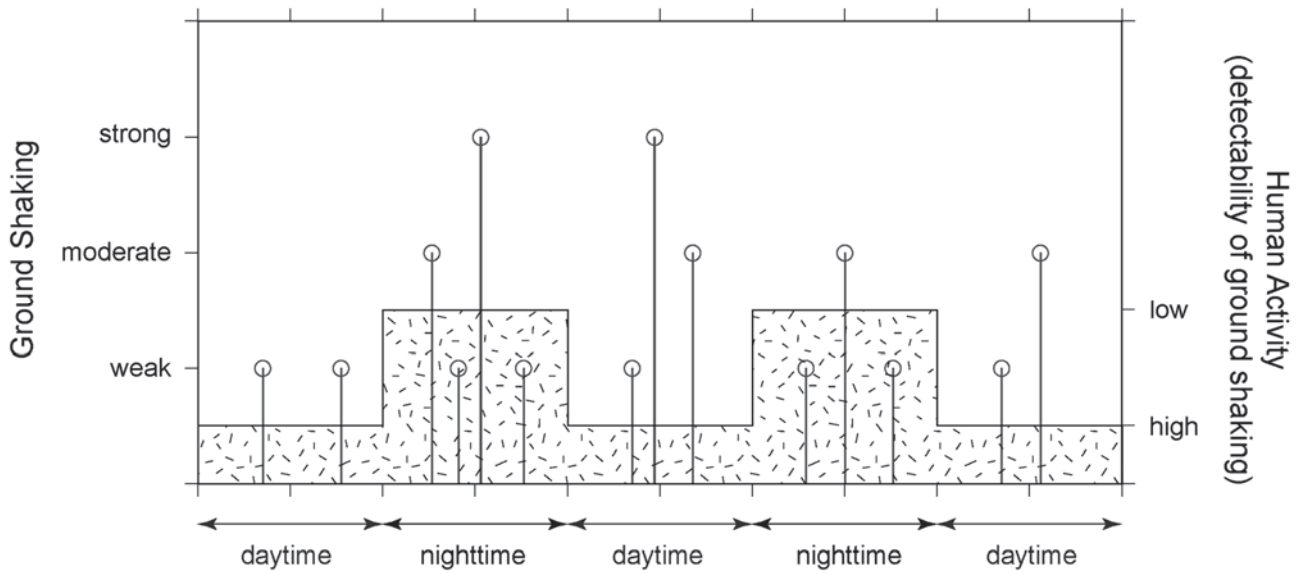


図 5. 昼夜間の地震動(揺れ)に対する検知能力ならびに人間活動度の変化に対する模式図. 人間活動度が低下する夜間(睡眠時)においては揺れの程度が小さい(低震度の)有感地震の検知漏れが生じる.

Figure 5. Schematic illustration for changes in detectability of ground shaking during daytime and nighttime. The weak ground shakings in the shaded area (during nighttime) are not always recorded in historical documents due to the relatively low human activity.

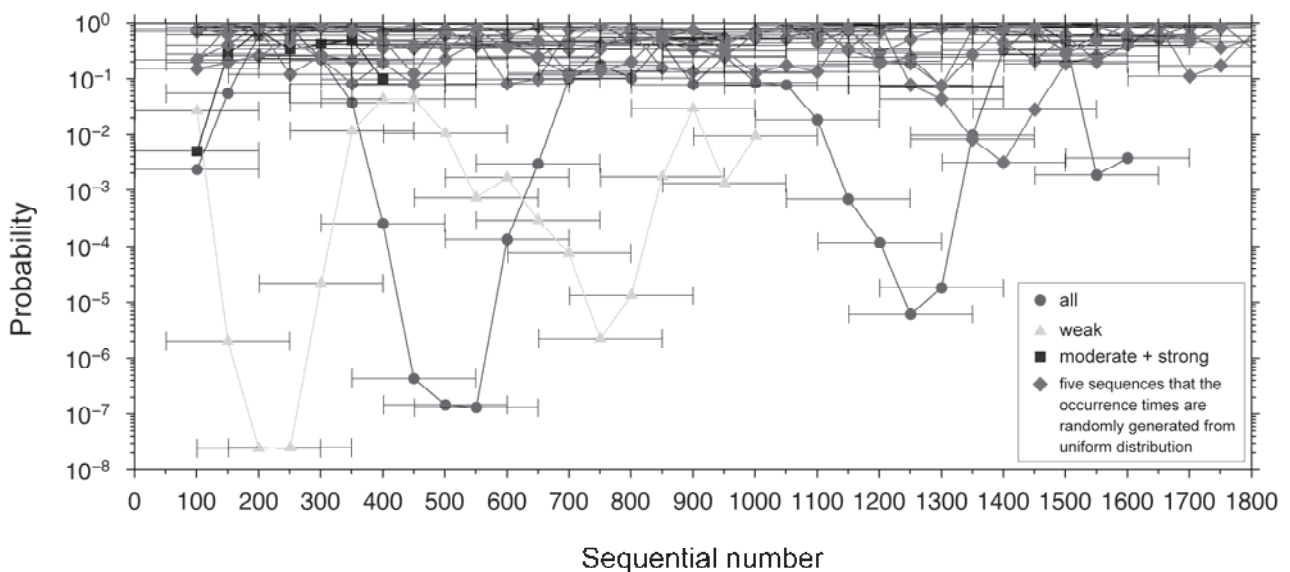


図 6. 移動窓を用いた発生時の偏りが偶然に生じる確率の時間的変化. 灰色ダイヤモンドは一様分布から発生時を無作為に生成した 5 地震系列に対する上記の確率を表す.

Figure 6. Changes in the probability that the bias of occurrence times of felt reports are reproduced by chance from uniform distribution obtained from the moving window method. Grey diamonds indicate changes in the probability for five sequences that the occurrence times are randomly generated from uniform distribution.



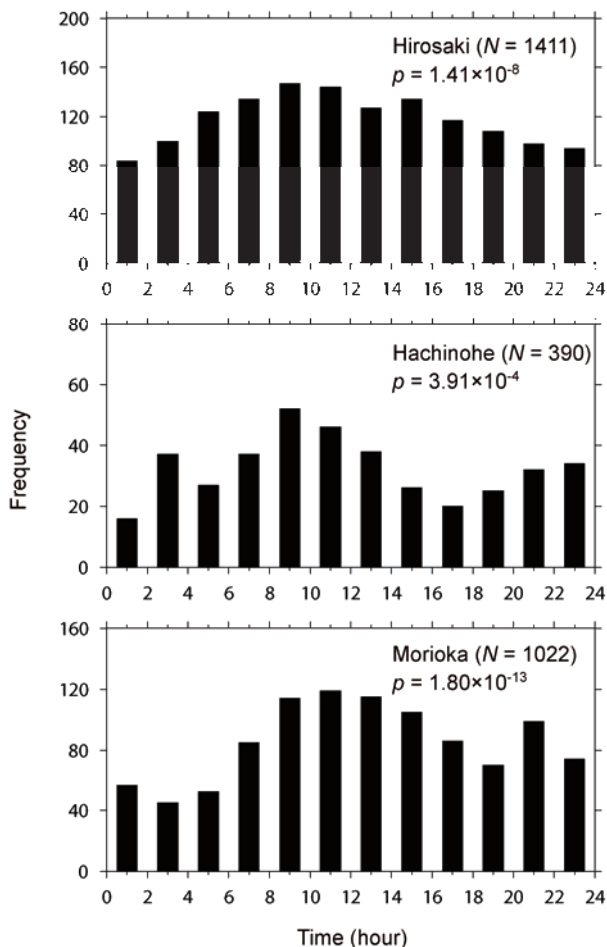


図7. 『津軽藩御国日記』や『盛岡藩雑書』等から推定された(上)弘前、(中)八戸、(下)盛岡における有感地震の発生時のヒストグラム [佐竹 (2002)] ならびに発生時が無作為である場合にその偏りが偶然に生じる確率。

Figure 7. Histogram of occurrence times of felt reports at (top) Hirosaki, (middle) Hachinohe, and (bottom) Morioka derived from historical documents [Satake (2002)]. The probabilities that the bias of occurrence times of felt reports are reproduced by chance from uniformly-distributed occurrence times are also shown.

「中・大」のみを用いた場合に対する 10000 試行の結果として、得られた発生時が無作為であるとした場合にその発生時の偏りが偶然生じる確率を図 4 に示す。図 3 に示される円は、(2)式にイベント数ならびに確率  $p$  に 0.05 を代入することで得られる、発生時が無作為であるとした場合にその発生時の偏りが偶然に生じる確率が 0.05 (5%) となる半径を表す。発生時が無作為である場合、原点を起点とした緑線は原点から大きく離れることはなく、原点付近をうろうろとする。一方

で発生時に偏りがある場合には、原点からその位相角に向かって大きく離れ、円外へと移動する結果となる。

揺れの程度が小のものを含めたすべてを用いた場合、昼間の有感記録数の方が夜間に比べ多い傾向が顕著に認められた(図 2 左)。RS テストからは、この発生時の偏りが偶然生じる確率は、 $10^{-7} \sim 10^{-11}$  程度と極めて低い値となった(図 3 左ならびに図 4)。同様の傾向は、揺れの程度が「小」のみを用いた場合、更に顕著に認められ(図 2 中央)、上記の確率は  $10^{-13} \sim 10^{-17}$  程度と更に低い値となった(図 3 中央ならびに図 4)。一方で、揺れが「中」または「大」と比較的高震度の有感記録を用いた場合には、ヒストグラムに顕著な発生時依存性は見られず(図 2 右)、また RS テストからも統計学的に有意な発生時の偏りは認められない(図 3 右ならびに図 4)。また、揺れが「中」または「大」の有感記録数は、若干朝に多い傾向が認められるが、嘉永七年(1854 年)南海地震の発生直後の期間において、比較的大きな揺れを伴う地震が朝に偏って発生していることに起因する可能性がある。

これらの結果は、『真覚寺日記』においては、図 5 に模式的に示したように、中または高震度データに関しては昼夜間を問わずほぼ漏れなく検知・記録されていると考えられるが、低震度の有感データに関しては、夜間に検知あるいは記録漏れが生じている可能性を示唆する。なお、Rydelek and Sacks (1989) には同様の模式図が示されているが、Rydelek and Sacks (1989) における網掛け部分はノイズレベルであり、図 5 に示されている人間活動度(揺れに対する検知能力)とは異なる。

今回対象とした『真覚寺日記』の期間中には、嘉永七年(1854 年)南海地震が発生し、その余震活動が多分に含まれている。ある特定の期間に発生した地震が解析期間全体に影響を及ぼした結果、見かけ上、発生時に偏りが生じた可能性を否定できない。そこで、移動窓を用いて  $p$  値の時間変化について調査した。具体的には、有感記録を発生順に 200 個ずつ抽出し、50 個ずつずらしていく形でそれぞれの窓で抽出された有感記録に対して RS テストを実施し、 $p$  値を算出した(図 6)。なお、図中には参考のために、一様分布から発生時を無作為に生成した 5 地震系列に対する確率も示している。

その結果、揺れの程度「小」を含めた場合の RS テストは、ある特定の期間に限らず、系統的に発生時の偏りの統計的有意性が示唆される結果となった。例

えば、揺れの程度「小」のみを用いた場合、解析期間を通じて、発生時の偏りが偶然に生じる確率が 0.05 (5%)を下回る。このことから、揺れの程度「小」を含めた場合に見られる発生時の偏りは、大地震発生とその直後の余震活動による一過性のものではないと考えられる。

一方で、揺れの程度「中・大」を用いた場合、嘉永七年(1854年)南海地震の発生直後の期間においては、低い確率を示すが、その後の期間は一様分布から発生時を無作為に生成した地震系列に対する確率と同程度である。揺れの程度「中・大」のみを用いた場合において、朝の時刻が若干多くなっている原因として、南海地震の発生後におけるクラスタリングの影響が考えられる。なお日記史料有感地震データベース(試作版)に収録されている『真覚寺日記』における最初の有感地震は、嘉永七年十一月四日朝五ツ時の揺れの程度が「中」の地震であり、安政東海地震に相当すると思われる。また、2番目の記録は、嘉永七年十一月五日七ツ半時の「近代未曾有の大地震」と記述されている安政南海地震本震に対する揺れ(揺れの程度「大」)である。

同様の発生時の偏りの統計的有意性は、佐竹(2002)において『津軽藩御国日記』や『盛岡藩雑書』等から推定された弘前、八戸および盛岡における有感地震回数に対しても見られた(図7)。これらの地点においても、昼間における有感地震回数の方が夜間に比べ多い傾向が認められる。これらの偏りが偶然に生じる確率は、弘前、八戸、盛岡でそれぞれ、 $10^{-8}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-13}$ 程度と極めて低い(表1, 図7)。本研究で対象とした史料では、夜間の小さな揺れが必ずしも検知あるいは記録されていない可能性が示唆され、近年における有感地震回数と比較する際などには注意を要する。

### §3. 歴史時代における地震活動解析への示唆

『真覚寺日記』, ならびに Satake (2002)による弘前、八戸、盛岡における有感記録へRSテストを適用したところ、昼間に比べ夜間の有感記録数が統計学的に有意に少ない可能性が強く示唆された。このことは、当時の人間活動は昼間を中心としており、夜間(睡眠時)に発生した揺れの程度が小さい有感地震が必ずしも検知あるいは記録されていないことを示している。特に近代計器観測によるデータとの類似性の議論[例えば、石辺・他(2015)]や比較にあたっては、夜間の検知漏れを鑑みて議論するか、或いは何らかの

補正が必要であると思われる。

『真覚寺日記』において、例えば当時、人間活動が活発であると考えられる8:00~20:00と、相対的に不活発な20:00~翌8:00に分けると、揺れの程度が「小」における昼夜間の比は中央値で概ね1.52程度(95%信頼区間で1.46~1.59程度)になった。仮に8:00~20:00においては有感地震が漏れなく記録されており、昼夜間の比が有感検知能力による見かけ上のものであるとすると、20:00~翌8:00では3割強程度に及ぶ低震度の有感地震を検知していないことになる。このことから、揺れの程度が小さいデータに関して、実際の有感地震数は史料に記録されている有感記録数のおよそ1.2倍程度であったと概算される。近代計器観測時代における有感地震数との比較においては、史料中の有感記録数に定数倍を乗ずるなど、何らかの嵩上げ(補正)を行った上で実施することが望ましい。または、近代計器観測時代の地震カタログにおいても、均質限界マグニチュード以下の地震を地震活動解析から除外するように、解析に使用可能な有感記録数は少なくなってしまうものの、低震度データを除いた議論をする必要があると思われる。

『真覚寺日記』に関しては、宇佐美(1975)は嘉永七年(1854年)南海地震に伴う9年間にわたる余震活動と1946年昭和南海地震のそれとを比較し、両者にかなり異なった特徴があることを指摘している。例えば、嘉永七年(1854年)南海地震(本震)のおよそ2ヶ月後の大晦日に発生した顕著余震による地震動が、真覚寺(高知県土佐市宇佐町)においては本震に劣らぬ程強く、その直後から長期間にわたって継続した有感地震の数が昭和南海地震の場合の高知市における有感地震数の約3倍に達することを指摘した。また、岡野・他(1984)は、高知県土佐市宇佐町(『真覚寺日記』)と高知県高知市(『地震日記木屋本』)における有感記録数の比較等に基づき、嘉永七年(1854年)南海地震の本震の震源位置が土佐湾沖であったとすると、種々の現象を矛盾なく説明することができるとした。

一方で、本研究で示唆されたように、『真覚寺日記』において、夜間の有感地震の検知・記録漏れがあった場合、地震活動度が過小評価され、実際の有感地震数は更に多かった可能性がある。有感記録に基づく顕著地震の震源位置や規模に関する検討、歴史時代の地震活動の復元にあたっては、それぞれの日記の特性を注意深く検討した上で実施する必要がある。

#### §4. おわりに

本研究では、史料中の有感記録に基づく歴史時代の地震活動復元に向けた完全性の検討において、発生時の無作為(ランダム)性に着目して統計学的検定を実施した。その結果、特に揺れの程度が「小」の記録を含めた場合、昼間の有感記録数が夜間に比べ多い傾向が認められ、この偏りが統計学的に極めて有意であることが示された。この傾向は、地震検知能力がノイズレベルに依拠する近代計器観測とは逆の傾向にあり、歴史時代においては人間活動が活発な昼間の方が、睡眠時の夜間に比べ揺れを漏れなく検知・記録しやすい可能性が考えられる。

史料の特性や記録者によって、検知率や完全性が大きく異なる可能性があり、歴史時代の地震活動を論じるに先立って、史料のカタログとしての品質を精査することは重要であろう。今後は、様々な日記史料等へ適用することで、より一般的な議論を試みたい。

#### 謝辞

本研究では、気象庁による一元化震源カタログならびに地震火山史料連携研究機構による「日記史料有感地震データベース(試作版)」における有感記録を使用させていただいた。また、図の作成には Generic Mapping Tools [Wessel and Smith (1998)] を、地震の抽出には地震活動解析システム [鶴岡(1998)] をそれぞれ使用させていただいた。本稿は匿名の査読者ならびに平井敬編集委員による貴重なご意見により、大幅に改善された。ここに記して感謝申し上げる。なお、本研究は、文部科学省受託「地震調査研究推進本部の支援事業」の一環として実施された。

対象地震: 嘉永七年(安政元年)南海地震

#### 文献

Gomberg, J., 1991, Seismicity and detection/location threshold in the southern Great Basin seismic network. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, **96** (B10), 16401-16414.

五島朋子・丹羽淑博・石辺岳男・佐竹健治, 2022, 地域の実情に特化した教材制作と教職員に対する防災研修の実践—福岡県大牟田市の高等学校における取組み—, *安全教育学研究*, 22(1).

Habermann, R.E., 1987, Man-made changes of

seismicity rates, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **77**, 141-159.

原田智也, 2021, 実在しない 2 つの安政二年(1855年)豊後国「被害地震」, *地震第 2 輯*, **74**, 87-93.

服部健太郎・中西一郎・大邑潤三, 2020, 日記の筆者が地震動を感じた地点の時間変化: 近江八幡「市田家日記」の場合, *地震第 2 輯*, **73**, 65-68.

林能成・酒井慎一, 2021, 地震計を用いた新型コロナウイルス感染症による社会活動変化の評価—関西大学千里山キャンパスにおける観測事例—, *社会安全学研究*, **11**, 151-160.

Heaton, T.H., 1975, Tidal triggering of earthquakes. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **43**, 307-326.

Hirose, F., K. Miyaoka, N. Hayashimoto, T. Yamazaki and M. Nakamura, 2011, Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (*M*<sub>w</sub> 9.0) – Seismicity: Foreshocks, mainshock, aftershocks, and induced activity—, *Earth, Planets and Space*, **63**, 513-518, doi:10.5047/eps.2011.05.019.

Ishibe, T. and K. Shimazaki, 2008, The Gutenberg-Richter relationship vs. the Characteristic Earthquake Model: Effects of different sampling methods, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **83**, 131-151.

Ishibe, T. and K. Shimazaki, 2009, Seismicity in source regions of large interplate earthquakes around Japan and the characteristic earthquake model, *Earth, Planets and Space*, **61**, 1041-1052.

Ishibe, T., K. Shimazaki, K. Satake and H. Tsuruoka, 2011, Change in seismicity beneath the Tokyo metropolitan area due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth, Planets and Space*, **63**, 731-735.

Ishibe, T. and K. Shimazaki, 2012, Characteristic Earthquake Model and Seismicity around Late Quaternary Active Faults in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**, 1041-1058, doi:10.1785/0120100250.

Ishibe, T., K. Satake, S. Sakai, K. Shimazaki, H. Tsuruoka, Y. Yokota, S. Nakagawa and N. Hirata, 2015, Correlation between Coulomb stress imparted by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and seismicity rate change in Kanto, Japan, *Geophysical Journal International*, **201**, 112-134, doi:10.1093/gji/ggv001.

石辺岳男・佐竹健治・村岸純・鶴岡弘・中川茂樹・酒

- 井慎一・平田直, 2015, 関東地方において計器観測初期に発生した地震の調査のための近年の地震データの収集・整理と 1922 年浦賀水道付近の地震への予察的適用, 歴史地震, **30**, 109-127.
- Ishibe, T., Y. Ogata, H. Tsuruoka and K. Satake, 2017, Testing the Coulomb stress triggering hypothesis for three recent megathrust earthquakes, *Geoscience Letters*, **4:5**, doi:10.1186/s40562-017-0070-y.
- 石辺岳男・松浦律子・古村美津子・赤塚真弓・岩佐幸治・田力正好・佐竹健治・榎原雅治, 2021, 有感記録ならびに震度の距離減衰式に基づく歴史時代の地震活動解析に向けて—気象庁震度データベースを用いた予察的検討—, 歴史地震, **36**, 111-125.
- 石辺岳男・佐竹健治, 2021, 江戸・東京における有感地震回数の変遷—歴史時代の地震活動解析へ向けて—, 地震ジャーナル, **72**, 1-13.
- 石垣祐三・高木朗充, 2000, 気象庁震度データベースの整備及び活用例について, 験震時報, **63**, 75-92.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2022a, 日向灘及び南西諸島海溝周辺の地震活動の長期評価(第二版), 令和 4 年 3 月 25 日公表, 111pp.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2022b, 日本海南西部の海域活断層の長期評価(第一版)—九州地域・中国地域北方沖—, 令和 4 年 3 月 25 日公表, 99pp.
- Katsumata, K., 2011a, A long-term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake ( $M = 9.0$ ), *Earth, Planets and Space*, **63**, 709-712, doi:10.5047/eps.2011.06.033.
- Katsumata, K., 2011b, Precursory seismic quiescence before the  $M_w=8.3$  Tokachi-oki, Japan, earthquake on 26 September 2003 revealed by a re-examined earthquake catalog. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **116**, B10307, doi:10.1029/2010JB007964.
- 松浦律子・中村操, 2016, 詳細震度検討による 1703 年元禄地震の新地震像(速報), 歴史地震, **31**, 9-16.
- 松浦律子・中村操, 2020, 近世・近代初期の歴史地震の系統的解析—20 年間のまとめ, 歴史地震, **35**, 221-224.
- 松浦律子・中村操, 2021, 近世・近代初期の歴史地震の系統的解析—20 年間のまとめ(改訂), 歴史地震, **36**, 235-239.
- Matsu'ura, R.S., H. Tanaka, M. Furumura, T. Takahama and A. Noda, 2020, A New Ground-Motion Prediction Equation of Japanese Instrumental Seismic Intensities Reflecting Source Type Characteristics in Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **110**, 2661-2692, doi: 10.1785/012018033.
- Matsu'ura, R.S., A. Hashima and T. Ishibe, 2022, The delayed quiescence with complete disappearance of the ETAS effect in the backarc region of northeastern Japan due to the  $M_9$  Tohoku earthquake in 2011. *Earth, Planets and Space*, in revision.
- Nanjo, K.Z., T. Ishibe, H. Tsuruoka, D. Schorlemmer, Y. Ishigaki, and N. Hirata, 2010, Analysis of the Completeness Magnitude and Seismic Network Coverage of Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, 3261-3268, doi:10.1785/0120100077.
- Nishiyama, A., M. Ebara, A. Katagiri, Y. Oishi and K. Satake, 2017, Development of historical earthquake and volcanic activity database using historical diaries, IAG-IASPEI 2017 joint assembly, S04-P-01.
- 西山昭仁・水野嶺・吉岡誠也・片桐昭彦, 2021, 日記史料有感地震データベース(試作版). <http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/HEVA-DB/>(最終閲覧日, 2023 年 2 月 6 日)
- 岡野健之助・木村昌三・川谷和夫, 1984, 安政南海地震の余震活動, 地震第 2 輯, **37**, 99-108.
- Rydelek, P.A. and I.S. Sacks, 1989, Testing the completeness of earthquake catalogues and the hypothesis of self-similarity. *Nature*, **337**(6204), 251-253.
- Rydelek, P.A. and I.S. Sacks, 1992, Comment on "Seismicity and detection/location threshold in the Southern Great Basin Seismic Network" by Joan Gomberg. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **97**, 15361-15362.
- 佐竹健治, 2002, 江戸時代の千島海溝の地震活動を東北・関東の史料から推定する, 歴史地震, **18**, 18-33.
- Satake, K. and T. Ishibe, 2020, Toward homogeneous estimation of long-term seismicity from historical materials: number of felt earthquakes in Tokyo since 1668, *Seismological Research Letters*, **91**, 2601-

- 2610, doi:10.1785/0220200060.
- Schuster, A., 1897, On lunar and solar periodicities of earthquakes. *Proceedings of the Royal Society of London*, **61** (369-377), 455-465.
- Toda, S., R.S. Stein and J. Lin, 2011, Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M=9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer. *Geophysical Research Letters*, **38**, L00G03, doi: 10.1029/2011GL047834
- 鶴岡弘, 1998, WWW を用いた地震情報検索・解析システムの開発. *情報処理学会研究報告;データベースシステム* 115-9, *情報学基礎*, **49-9**, 65-70.
- 宇佐美龍夫, 1975, 安政元年南海地震の余震－歴史的地震の余震の減り方－, *地震研究所彙報*, **50**, 153-169.
- 宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子, 2013, *日本被害地震総覧 599－2012*, 東京大学出版会.
- Wessel, P. and W.H.F. Smith, 1998, New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans., AGU*, **79**, 579.
- Yabe, S., K. Imanishi and K. Nishida, 2020, Two-step seismic noise reduction caused by COVID-19 induced reduction in social activity in metropolitan Tokyo, Japan. *Earth, Planets and Space*, **72**:167, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01298-9>.