寄 書

地震活動データを用いた 平常時の地震発生短期確率の簡便な計算法

京都大学大学院人間・環境学研究科* 加藤 護

A Simple Method for Short-Term Earthquake Probabilities Derived from Past Seismicity Data

Mamoru KATO

Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University
Yoshida-Nihonmatsu, Sakyo, Kyoto 606-8501, Japan

(Received December 16, 2015; Accepted February 2, 2016; published online on February 18, 2016)

§1. はじめに

「三寒四温」は冬の季語である。冬の中國大陸や朝鮮半島では寒い日が3日続けばその後温かい日が4日続く傾向を表現した語が由来とされる [山内 (1915)]。この周期性はシベリア高気圧の活動によるが太平洋高気圧の影響を受ける日本の本州付近では冬季に三寒四温が起きることはまれである。むしろ低気圧と高気圧が交互に到来する春季に三寒四温になることが多く [筆保・他 (2014)]、これは春の季語の「余寒」である。

日本では短期的な気象情報に高い信頼が寄せられているとの調査結果がある [気象庁 (2015a)]。天気予報は定期的に発表され数日の時間スケールで予測の成否が明らかとなるが、これを繰り返すことで経験的に情報の信頼性を評価することができる。例えば降水確率は確率的な短期予測であるが高い値が発表されていると外出時に傘を手にする人が多いのではないだろうか。類似の情報について Gigerenzer *et al.* (2005) はその受容が必ずしも情報の意味の理解に裏付けされていないと報告しているが、降水確率は科学的根拠に基づく確率予測が社会で受け入れられた一例と言えるだろう。

日本は地震が多い国であるが現在、いわゆる東海地震を除けば公的な機関が地震発生の短期予測を発表する体制はない。地震の直前予測は完成した技術とは言えず、よって現業としてあまねく短期予測を発表する合理性は

ない。他方、その科学的な根拠や信頼度が詳らかにされていないとは言いつらい地震予測が複数の事業者から発表されている [例えば織原・長尾 (2015)]。ここでは個々の事例に立ち入らないが、このような事業が成立する背景には地震の短期予測に対する高い関心があると考えられる。泊 (2015) は日本では大きな地震災害の後に地震予知への期待が高まることが繰り返されてきたと指摘している。

地震に関する高い関心は地震災害への関心とも言えるだろう。災害を引き起こす地震動の発生を事前に知る技術は緊急地震速報として実現している。気象庁では小さな有感地震についても緊急地震速報の予報を発表しているがこれは通信事業者などを通じて配信されており多くの利用者がいると推定されている [気象庁 (2015b)]。予報には大きく揺れないという安心情報の側面もあり、地震に関心を持つ人が積極的にこの情報を求めることは理解できよう。緊急地震速報の予報は発表回数も多く震度情報と比較することでその信頼性を経験的に検証することができる、という点で短期的な気象情報と似た性質を持つ。

本稿では地震発生に関する確率的な短期予測を行う簡便な手法を提案する。この手法では過去の地震活動の地震発生間隔の統計を用いて経験的な短期予測を行う。地震活動が平常であると想定したとき、数日以内に地震が起こる確率はどれぐらいかをおおまかに、かつ、経験的に求めようという試みである。ここで平常とは過去の活

* 〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町

動と似た状態を想定しており、本手法で求める確率は永年の発生率 [宇津 (1999), P. 746] に対応するものとも言える。

この手法を提案する理由は大きく2つある。ひとつは地震活動の時間的な特徴を知るという理科教育あるいは防災教育の視点である。日本の現在の義務教育課程では地震活動について深く学ぶ機会は保証されていない。しかし例えばわれわれは大きな地震はまれであることを経験的に知っている。この手法は過去の地震活動の時間的な特徴について体験的に学ぶ機会を提供する。またその知識を経験的に検証する機会が得られる。

もうひとつは地震の短期予測の信頼度をはかるものさしを提供するという視点である。地震の発生数は多いのでランダムに出した予測が偶然に当たる可能性はゼロではない。ここで提案する手法はこの偶然に予測が当たる確率に相当する数字を与える。この値と短期予測的中率 (適中率) [宇津 (1977)] とを比較することでその予測法を評価することができる。これは確率利得 [Aki (1981)] に基づく比較とも言える。

以降では気象庁の地震カタログを用いた具体例を示してこの手法を説明するが、本稿では算出の簡便さを重視する。教育や学習の機会に広く使われるためにはそれぞれの関心に合わせて気軽に活用できる手法であるのが望ましい。なお地震活動の時空間的な特徴を発生予測につなげる研究には ETAS モデルに基づく一連のものがよく知られており [統計数理研究所 (1998, 2014), Ogata (2011)], この成果を用いた地震発生確率の推定は可能となっている。

§2. 手法と結果

この手法の基本的な考え方は地震調査研究推進本部が発表する長期予測 (30 年確率) と同じである [地震調査研究推進本部 (2001)]。地震の発生間隔がある確率密度関数に従うと仮定したうえで、前回の地震発生から現在までに地震が起きていないことを考慮し、今後の一定期間内に地震が発生する確率を条件付き確率として求める。求まるのは長期予測と同じように時間依存する確率であるが、その平均などを目安の値として採用することもできる。管見の限りこのような短期予測手法の提案はかつてない。

地震の発生間隔の確率密度関数は経験的に推定する。長期予測では特定の断層や断層群に着目し、活動履歴が分かる場合はその間隔を適当な関数で近似し求めている。本手法では対象地域の過去の地震の発生間隔の頻度分布を求め、これを適当に正規化することで経験的な確率密度関数を求める (ただし後述の計算過程を考えると

本手法の範囲では正規化は必要ではない)。つまり将来の地震の発生間隔の統計が過去の発生間隔の統計と似ると仮定している。

地震発生間隔の頻度分布が基本的に指数分布に従うことは例えば宇津 (1969) が整理して示している。ただし発生間隔の短いものの頻度がより高くなりこれは余震活動による。一般に地震活動は大森・宇津式で表現される余震活動 (続発性の強い活動) とバックグラウンドの活動 (続発性の弱い活動) の組み合わせで表現できると考えられる [例えば Ogata (1988, 1992)]。また定常的でランダムな (ポワソン過程の) イベント発生間隔の頻度は指数分布に従うことが知られている。実際のデータには指数分布に従わないケースもあり非定常な活動を見ているなどと解釈されている [宇津 (1969)]。このような場合でもバックグラウンドの活動はロングテール型の分布を示す例が多い。なお、ここで提案する手法では地震発生間隔の頻度分布が指数分布で近似できることは必ずしも必要ではない。理科教育の場合などでは地震活動が上述の2つの活動の組み合わせでおおむね表現できると示す意味はあるだろう。

本稿で提案する手法の手順は以下の通りである。1) まず対象となる地域と地震の規模を設定し、地震カタログから該当する地震を選び出す。2) 次に選び出した地震の発生頻度間隔を計算し、その頻度分布を求める。3) 最後にこの頻度分布が確率密度関数に比例すると仮定し、条件付き確率の考え方を使って短期の地震発生確率を求める。以下では、数日以内に日本で気象庁マグニチュード5以上の地震が起こる、という短期確率を求める例を示す。Fig. 1 は2001年から2010年までに日本で

Fig. 1. Frequency distribution of time intervals between earthquakes with $M \geq 5.0$ in Japan area for the period of 2001-2010. Events are chosen from Japan Meteorological Agency (JMA) unified catalog.

発生した M5 以上の地震の発生間隔の日単位の頻度分布である（東経 125 度～148 度，北緯 25 度～48 度，深さ 0～700 km）。ここでは発生間隔は発震時の分と秒の情報を切り捨てて計算しているがさらに細かく計算しても同様の結果が得られる。Fig. 1 には宇津 (1969) が示したものと同一傾向が確認できる。つまり横軸の右側に向かって頻度はほぼ指数関数的に低くなり，横軸の左端では明らかにこの傾向から期待されるよりも頻度が高くなる。

気象庁マグニチュード 5 以上の地震を対象として，前回の地震から N 日後の時点でそれから M 日以内に同様の地震が起こる確率を経験的に求めるにはこの頻度分布を用い，発生間隔が N 日以上 $N+M$ 日未満であった回数を発生間隔が N 日以上であった回数で割ればよい（例えば前回の地震から 5 日目に 3 日以内に地震が起きる確率は発生間隔が 5 日から 7 日までだった回数を 5 日以上であった回数で割ればよい）。このように求めた日本で気象庁マグニチュード 5 以上の地震が N 日後の時点で 3 日以内に発生する確率を Fig. 2 に示す。 N が小さいときに大きな確率となるのは余震は本震後に多く発生するからである。余震数は大森宇津の式に従って減少するので N が少し大きくなると（Fig. 2 の例では $N=2$ あたりから）バックグラウンドの活動の影響が支配的になる。 N が大きくなると確率が大きくなるがこれはサンプルサイズが小さいため生じた推定のばらつきと考えられる。まれな事象の頻度は低く，またこの確率は除算で求めるためにデータのばらつきが強調されやすい。こ

Fig. 2. Empirical probability that an earthquake with $M \geq 5.0$ occurs within 3 days in Japan as a function of the time from the latest such event. The probabilities are computed from data in Fig. 1 in a similar way that Headquarters for Earthquake Research Promotion of Japan produce National Seismic Hazard Maps but for a much shorter period.

のために $N+M$ ($M=3$) が最大値 (Fig. 1 では 27 日) に近づく場合の計算を取りやめている。過去の頻度が低くなるような大きな N については取り扱わないのが実用的な解決策かもしれない。なおこのようなデータの特徴は頻度分布を正規化しないほうが確認しやすい。

この計算結果から時間依存しない代表値を求めることもできる。例えば最小値である 0.43, Fig. 2 で示した範囲の単純平均である 0.51 などを探ることもできるが，確率が 0.45 から 0.50 程度になることが多く，また現在の降水確率が 10% 刻みで発表されることを考えるとおよそ 40% から 50% という値を採用することもできるだろう。

より定量的なアプローチとしてこのグラフを 2 つの関数で近似して確率密度関数を求める方法もある。例えば余震の発生間隔がべき分布であると仮定し [友田 (1954), 千秋 (1959), 宇津 (1969)], これと指数分布を組み合わせることで頻度分布を近似することができる。指数分布のみで十分近似できる領域ではその無記憶性により予測の確率は常に一定値になる。Fig. 1 の場合，この値は先に求めた時間依存しない確率の代表値 40% から 50% に近くなると予想される。

§ 3. 議 論

本手法によって求められる短期予測の精度は経験的に推定された確率密度関数の精度によって決まるだろう。この精度はサンプルサイズが大きくなると高くなると期待される。データの期間を長くする，小さな地震まで考慮するなどによりサンプルサイズは大きくなる。期間を長くすると地域によっては火山性地震など特殊な活動をサンプルに含むことも考えられるが，このような場合異常であると考えられる期間のデータを除いて推定する立場もあるかもしれない。またデータセットによっては観測網の年代変化などを考慮する必要もあるだろう。地震活動は続発性の強弱が異なる 2 つの活動の組み合わせであることを考慮すると，Fig. 1 や宇津 (1969) の事例のようにこれが確認できる場合には本手法の適用が可能と言えるかもしれない。

地震の発生が少ない地域では本手法のような経験的な手法の適用は難しい。しかしその発生間隔に注目して地震活動を整理することはできる。例えば地震の発生は周期的であると言われることが多いが，一般に地震は繰り返し発生していても周期的ではないことが多い [例えば 宇津 (1999), P. 489]。周期的な活動がある場合特定の間隔の頻度がきわめて高くなると予想され，これは Fig. 1 のような頻度分布を描くことで確認できる。

社会で地震の発生が認知されるのは有感地震となった

Fig. 3. Frequency distribution of time intervals between felt earthquakes in JMA catalog for the period of 2001-2010.

場合であることが多い。また有感地震の発生予測を発表している事業者もある。Fig. 3は気象庁で2001年から2010年までに報告された震度1以上の有感地震の間隔の頻度分布を1時間単位で求めたものである。有感地震の発生間隔の頻度分布も続発性の強弱で特徴づけられる2つの活動の組み合わせで示することができる。なおこの例では後者の頻度分布は指数分布と言いつらいがロングテール型の特徴は備えている。このような頻度分布を用いて有感地震の発生を確率的に短期予測することもできるだろう。

地震の短期予測手法の検証は前兆とされる現象と地震との対応関係を用いて行われることが多い[例えば宇津(1977)]。予測の結果が当たり(前兆があり地震が起きる)、空振り(前兆はあったが地震が起きない)、見逃し(前兆はなかったが地震が起きる)のいずれであるかは個々に判断される。この他に第2種の当たり(前兆はなく地震も起きない)が起き得るがこの回数を直接数えることは難しく、このために2×2表を用いた統計的検定を地震予測手法の検証に適用することが妨げられる。また適中率(的中率)や予知率[宇津(1977)]がどの程度高くあるべきかを決めるには科学の範囲を越える議論が必要となるだろう。なお発表に至った判断基準が不明瞭な予測情報も多く、このような場合は第三者による検証は難しい。

本稿で提案する手法を用いて地震予測情報の有効性を検証することはまず関係性を明らかにするという疫学の立場に近い[中村(2012)]。この種の検証には因果関係を重要視し、その現象と地震発生をつなぐ物理プロセスやその定量性を重視する立場もあるだろう。しかし例えば未知の物理プロセスがあるなどの主張を完全に否定す

ることはできない(いわゆる悪魔の証明)。「何が起きているかはさておき、まずその現象と地震発生との関連性を確認しましょう」という手続きはどのような現象や予測にも適用できる。その関連性の大小をはかる目安として本手法で求められる確率を用いることができるだろう。

§4. ま と め

本稿ではある地域の過去の地震発生間隔の統計を用い経験的に今後数日以内に地震が発生する確率を簡便に求める手法を提案した。対象となる地域の地震カタログが手に入る場合、地震発生時間差の頻度分布を求めて経験的に地震発生間隔の確率密度関数を推定することが可能になる。またこれまでと同じような活動が続くとき、同じ属性を持つ地震が発生する短期確率を計算することができる。この予測を手にした上で地震活動の情報に接することによりその確率の妥当性を経験的に検証できる。この一連の過程は地震活動の特徴を知る試みと言えるだろう。

地震調査研究推進本部が出す長期予測は30年を基本の期間としているが、この予測精度を個人が経験的に検証することは不可能に近い。例えば東海地震説は最も長い時間が経過した長期予測といえるかもしれない。また2011年東北地方太平洋沖地震は長期予測されていなかった地震の代表例とも言えるだろう。このような事例を考えると社会に対して長期予測の信頼性をどう示すかは難しい問いである。本手法は簡便に短期的予測を出すことができる方法である。またその予測の信頼性は経験的に評価することができる。このような評価を経験することが必ずしも他の地震情報の評価につながらないかもしれない。他方、われわれは地震観測などによって地震活動の特徴に関する知見を得ており、本手法はその知見の活用事例と位置付けられる。科学の成果として分かっていることをその範囲で社会に伝えるという意義は大きく、その観点に立って本手法のようなデータの活用法を提案する意味は小さくないと私は考える。

謝 辞

京都大学全学共通科目「地球科学実験A」の受講者から寄せられた多くの質問が本研究のきっかけとなりました。気象庁と文部科学省が協力してデータを処理した一元化震源カタログ、気象庁が防災科学技術研究所や地方公共団体等と協力して発表した震度情報カタログを使用しました。また震源データ解析では鶴岡(1999)を利用しました。2名の匿名査読者と亀伸樹編集委員のコメントにより本稿は大きく改善されました。記して謝意を表します。

文 献

- Aki, K., 1981, A probabilistic synthesis of precursory phenomena, in "Earthquake Prediction, an International Review" ed. by D.W. Simpson and P.G. Richards, Maurice Ewing Series, **4**, AGU, Washington, D.C., 566-574.
- 筆保弘徳・岩槻秀明・今井明子, 2014, 気象の図鑑, 技術評論社, 127 pp.
- Gigerenzer, G., R. Hertwig, E. van den Broek, B. Fasolo, and K.V. Katsikopoulos, 2005, "A 30% chance of rain tomorrow": How does the public understand probabilistic weather forecasts?, *Risk Analysis*, **25**, 623-629.
- 地震調査研究推進本部, 2001, 報告書「長期的な地震発生確率の評価手法について」<<http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/01b/chouki020326.pdf>>, (参照 2015-12-11).
- 気象庁, 2015a, 「気象情報等の利活用に関する調査結果」, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1503/24b/26manzokudo_data.pdf>, (参照 2015-12-11).
- 気象庁, 2015b, 「緊急地震速報評価・改善検討会(第6回) 資料6 緊急地震速報(予報)の利用拡大について」, <<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/eev-hyoka/06/shiryou6.pdf>>, (参照 2015-12-11).
- Ogata, Y., 1988, Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *J. Am. Statist. Assoc.*, **83**, 9-27.
- Ogata, Y., 1992, Detection of precursory relative quiescence before great earthquakes through a statistical model, *J. Geophys. Res.*, **97**, 19845-19871.
- Ogata, Y., 2011, Significant improvements of the space-time ETAS model for forecasting of accurate baseline seismicity, *Earth Planets and Space*, **63**, 217-229.
- 織原義明・長尾年恭, 2015, 地震前兆現象を科学する, 祥伝社, 232 pp.
- 中村好一, 2012, 基礎から学ぶ楽しい疫学 第3版, 医学書院, 227 pp.
- 千秋鋭夫, 1959, 余震間隔の分布に関する確率論的考察, *地震* **2**, **12**, 149-161.
- 泊 次郎, 2015, 日本の地震予知研究 130 年史: 明治期から東日本大震災まで, 東京大学出版会, 268 pp.
- 友田好文, 1954, 地震の時間間隔の分布, 及び之と地震動の最大振幅の分布との関係に関する統計的記述, *地震* **2**, **7**, 155-169.
- 統計数理研究所, 1998, 最近 30 年の大地震発生と指定地域について, *地震予知連絡会会報*, **79**, 12-1.
- 統計数理研究所, 2014, 大地震の確率予測と統計モデル, *地震予知連絡会会報*, **91**, 12-6.
- 鶴岡 弘, 1999, WWW を用いた地震活動解析システムの紹介, *日本地震学会ニュースレター*, **11**, 8-9.
- 宇津徳治, 1969, 地震の時間的分布に関連する諸問題(その1) —地震の回数と時間間隔の分布について—, *北海道大学地球物理学研究報告*, **22**, 73-93.
- 宇津徳治, 1977, 地震予知の適中率と予知率, *地震* **2**, **30**, 179-185.
- 宇津徳治, 1999, 地震活動総説, 東京大学出版会, 876 pp.
- 山内安太, 1915, 所謂三寒四温, *気象集誌* **1**, **34**, 324-334.