

## 12-6 平常的な地震活動と「予測」の価値—当たり前の地震について—

### Usefulness of "forecast" evaluated from the background seismicity -- noting "common" earthquakes

国土地理院 今給黎哲郎

Tetsuro IMAKIIRE (Geospatial Information Authority of Japan)

[はじめに]

地震予知連絡会で「予測実験の試行」を行うことは、2013年(平成25年)11月にとりまとめられた地震予知連絡会の将来検討WG報告に基づいて企画された。

「地震発生の予知・予測に関する研究の現状を社会に伝えることも、本連絡会の役割の一つであることが次期計画に明示されている」

社会的には、被害が出るような大地震の中短期的予測に対する期待がある一方、研究の現状あるいは予知・予測研究の実力が現時点でどのようなものなのかは具体的に認知されていないと思われる。これは、「実力」を「評価」するためのものさし(指標)とともに研究事例が紹介されることが少ないこともある。

よく知られた指標としては、「予知率」(alarm rate)と「適中率」(success rate)がある。これらは、どれだけ「見逃し」少ないか、あるいは「空振り」少ないか、という直感的に理解しやすい概念である。しかし、予測の価値は、そのような当たり・外れの確率だけでなく、どれだけ稀な(特別な)事象を予測できるかにもある。

なお、ここで言う予測の「価値」の評価基準は、予知・予測のもつ社会への影響を考えた場合のことであり、当該の手法が科学的に妥当かどうか、理論とモデルの調整を通じて予知率と適中率を向上させることができるかなどをを検討すること自体に、研究としての別の「価値」があることは、わけて考える必要がある。

背景の地震活動あるいは平常の活動からみて発生しても当たり前の事象を予測し、その予知率や適中率が高くとも、その「予測」にあまり意味はない。ランダムに予測した結果と比較して、有意な確率利得が認められるかが評価の指標となるべきであろう。

[定常ポワソン過程(Homogeneous Poisson Process)の導入]

実際には、地震の発生は全くのランダムな事象ではなく、特定の領域である程度の期間内に限定してみれば、ほぼ固有的な周期で発生する場合や、ある時期に続発するなどの場合もあるが、ある程度の広さ以上の領域、ある程度の長さ以上の期間を取ると、擬似的にランダムな事象と見なすこともできる。例えば「全国地震動予測地図 2014年版」(地震調査研究推進本部地震調査委員会、2014)では、震源断層をあらかじめ特定しにくい地震の評価を行う際に、地域ごとに過去の地震カタログから地震活動度を求めた上で、「地震の発生時系列は、定常ポワソン過程に従うと仮定」して今後30年などにおける確率評価を行っている。

定常ポワソン過程は、

- 1)対象の地震はランダムに発生する
- 2)発生の確率は常に一定である。
- 3)過去の発生履歴は次の発生の確率に影響しない

というモデルであり、ある領域においての平均的発生頻度が与えられれば、対象の期間におけるイ

ベント発生確率は単純に計算できる。

ここで、ある地震の平均的発生頻度を1年にm回とする。このとき、ある時点において今後x年間に最低1回の地震が発生する確率（累積確率:cumulative probability）を求めるとすると、平均発生間隔  $T=1/m$  を用いて以下の式で表される。

$$P(t \leq x) = 1 - \exp(-x/T)$$

単純計算すると、平均年1回発生する事象が今後1年間に1回以上発生する確率（あるいは次の発生が1年以内である確率）は以下のようなになる。

$$P(t \leq 1) = 1 - \exp(-1) = 0.632\dots$$

すなわち、63.2%の確率で1回以上の事象が発生すると推定される。同様に、平均発生間隔が1ヶ月の事象であれば、今後1ヶ月に次の事象が発生する確率は63.2%である。

注目している期間xに対して平均発生間隔Tが非常に長い、もしくは期間x中の平均発生頻度が非常に低い事象に対しては、 $x/T$ が十分に小さい ( $x/T \doteq 0$ ) 場合の近似式  $\exp(-x/T) \doteq 1 - x/T$  を用いて以下のように表せる。

$$P(t \leq x) = 1 - \exp(-x/T) \doteq x/T$$

たとえば平均500年に1回起きる事象( $m=0.002$ )については、今後1年に起きる確率はほぼ0.002。100年(1200ヶ月)に1回起きる事象( $m=0.01$ )については、今後1ヶ月に起きる確率はほぼ  $P = m/12 = 0.00083$  となる。すなわち、平均発生間隔で今後の予測期間を単純に割った割合が、定常ポワソン過程を仮定した場合の発生確率の近似値である。

定常ポワソン過程を仮定した場合、巨大地震の長期評価で通常用いられているBPT(Brownian Passage Time)分布による更新過程とは異なり、地震発生が「満期に近づく」とか「切迫する」ということは生じないことに留意する必要がある。これは、定常ポワソン過程の「発生の確率は常に一定である」、「過去の発生履歴は次の発生の確率に影響しない」という性質による。すなわち、サイコロを振るとき1の目が出る確率は6回に1回であるが、5回続けて1以外の目が出ても、6回目に1の目が出る確率は高くなるわけではない、ということと同じである。

#### [当たり前の度合いの評価]

直近の地震活動から、日常の時間感覚で理解しやすい程度の期間(数ヶ月程度)を対象に、どの程度の規模の地震がどれくらいの頻度で発生するかを定常ポワソン過程で評価することで、「当たり前に発生する地震」の事例を示すことを考える。この事例を参照することで、個別の予測情報がどの程度稀な現象を扱っているのかを感覚的に理解することの手助けになる。

例えば宇津(2001)によれば、「永年的なサイスミシティから考えても当然に近いことを述べているような予報、たとえば“1月以内に関東地方でM4以上の地震が起こる”というような予報はほとんど確実に当たるが価値はない。」とあるように、当たり前の事象の予測は、あまり意味はないという評価になる。しかしながら専門家が「当たり前」と認識する事象がどのようなものかについて、明瞭な説明が社会に伝わっているかは不明確である。

ここで、上記の「関東地方で M4 以上の地震が起こる」という事象を例にとって、定常ポワソン過程から評価してみることを行った。

関東地方のサイズシシティ（地震活動度）は、2011 年の東北地方太平洋沖地震後に高まった状態となり、2015 年の段階でも 2010 年以前と比較するとやや高めで推移している。2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が発生した直後の余震活動が非常に活発な時期は除き、2010 年以前の状況に基づく評価と、本震以降 2 年以上経過した時期から現時点まで状況での評価とをそれぞれ試みた。

図 1 a および図 1 b はそれぞれ 2001 年 1 月 1 日から 2010 年 12 月 31 日までの 10 年間 [期間 A] と、2013 年 7 月 1 日から 2015 年 6 月 30 日までの 2 年間 [期間 B] について、関東地方における M4.0 以上の地震（震源の深さ 180km 未満）をプロットしたものである。発生数はそれぞれ 798 回（月平均 6.65 回）、192 回（月平均 8.00 回）となっている。

大地震の発生していない期間の地震活動は、ほぼ定常ポワソン過程で近似できると考えられる。一方、大地震直後は余震の影響などがあって定常ポワソン過程からは外れた活動状況となるが、本震直後の地震活動の時間変化が大きい時期を過ぎた後は、短期間であれば地震の発生頻度はほぼ一定とみなすことができ、定常ポワソン過程で近似できる。ここでは期間 A も期間 B も定常ポワソン過程で近似できると仮定すると、月平均 6.65 回発生する事象が今後 1 ヶ月以内に発生する確率は  $P = 0.9987$  となる。この 99.87% の確率は、「ほとんど確実に当たる」予報と呼んでも誰も異論がないであろう。月平均 8.00 回発生する定常ポワソン過程では  $P = 0.9997$  であり、確率はさらに高くなる。

対象とする地震の規模を大きくすると、平均発生頻度が下がるため、定常ポワソン過程で予測される発生確率も連動して低下する。図 2 は定常ポワソン過程で基準期間における平均発生頻度に対応した発生確率を示した図である。例えば平均発生頻度が月 1 回であれば、横軸目盛「1」に対応する確率 63.2% がこれから 1 ヶ月以内に事象が発生する確率である。関東地方において M5.0 以上の地震は月平均 1 回程度、期間 A で月平均 0.87 回、期間 B で月平均 1.17 回の発生頻度である。横軸で「0.87」と「1.17」に対応する確率は「58.0%」と「68.9%」で、「関東地方で今後 1 ヶ月以内に M5.0 以上の地震が発生する確率は？」と言う問いには、「約 6 割前後」と一般化して答えることができる。または、「東日本大震災前であれば 6 割弱と答えるところだったが、最近なら 7 割弱」と言うことで、現在はややサイズシシティが高い状態を表現することも可能である。

ここで同じグラフを、基準期間に 1 回起きる事象が、予測期間を変化させたときに発生確率が変わることを示している図であると読み替えることもできる。例えば、横軸の目盛を「2.3」にとると、確率は 90% になるが、これは平均発生頻度が月 1 回の事象でも、今後 2.3 ヶ月の期間を対象にすると発生確率は 90% に達すると言うことを示している。同様に横軸目盛「0.7」には確率 50% が対応する。これは 0.7 ヶ月以内に対象の事象が発生する確率が 50% であることを意味する。

このように、平均発生頻度を目安として、特定の事象が特定の対象期間に発生することが「当たり前」のことなのか「珍しい」ことなのかを判断する参考となる確率の値を簡易的に計算することができるのが、定常ポワソン過程を仮定するひとつの利点である。

このことを応用して、地震の発生でなく「地震動」（地震の揺れ）の予測についても簡易的に適用することができる。地震調査研究推進本部では、調査研究の成果として「全国地震動予測地図」を作成し公表している。これは、活断層調査や海溝型地震の津波堆積物調査などを通じて個別の震源域における地震発生の長期評価を行い、震源断層モデル、地盤増幅率などを使って 250m メッシュごと、それぞれの固有地震について地震動を推定、あわせて震源を特定しにくい地震については領域ごとにポワソン過程で評価して地震動も推定し、それら全てを統合した結果をまとめた資料である。全国のあらゆる場所における地震動と確率を、例えば「今後 30 年間に震度 6 弱以上の揺れに

見舞われる確率」のように表現している。これは空間的には非常に高い分解能で予測を行っている例であるが、時間的には対象期間が日常感覚と比較して長過ぎるので、直感的にはイメージしにくい。

ここで、日常的に体験するあるいはニュースなどで見聞きするレベルの事象として、震度 5 弱の揺れを地方レベルで扱うことを考える。これは、空間的分解能を大きく下げることになるが、テレビ・ラジオでの地震速報が「関東地方でやや強い地震を感じました」といった表現で第一報が流されることから、日常的なとらえ方としては理解しやすい範囲と言える。

震度データは、震度計が設置されている地点の地盤によって揺れやすい（震度が大きめに出る）観測点もあれば、揺れにくい（震度が小さめに出る）観測点もある。またサイスミシティが高い領域に近い観測点もあれば、遠い観測点もある。しかし、「関東地方」といった広い領域を対象に考えたときに、ある強さ以上の揺れを感じるイベントは時系列として擬似的にランダムに発生すると見なして評価することを試みる。

表 1 は、前項で地震発生についての統計を取った期間 A および期間 B について、「全国」、「東北地方」および「関東地方」で震度 4 以上、および 5 弱以上となった地震数を気象庁の震度データベースに基づき集計したものである。「東北地方」は東北 6 県内の震度観測点、「関東地方」は 1 都 6 県の震度観測点を対象としているが、「東京都」でも伊豆諸島・小笠原の点は除いている。一カ所でも当該震度以上を観測した地点があればカウントし、地点数の多少は区別していない。結果をみると、「全国」では震度 5 弱以上をどこかの点で感じた地震の発生頻度が期間 A で 8.9 回/年、期間 B で 10.0 回/年であり、「東北地方」では期間 A で 1.9 回/年、期間 B で 3.0 回/年、「関東地方」では期間 A で 1.5 回/年、期間 B で 4.0 回/年である。「全国」では期間 A と B の発生頻度にあまり差がないという結果がやや意外であるが、これは 2000 年以降 M7 級の地震が全国各地で発生していることを反映していると言える。なお、震度観測点の数は 2000 年以降経年的には微増しているが、その影響については定量化することが難しいのでここでは考慮していない。

この発生頻度から定常ポワソン過程で確率的な評価をすると、「全国」に対して期間 B であれば、平均発生間隔が 1.2 ヶ月となり、この 2.3 倍の時間すなわち約 2.5 ヶ月を対象とすれば 90%の確率で震度 5 弱以上の揺れをどこかで感じるという評価ができる。同様に、「東北」「関東」の期間 B では、9.2 ヶ月および 6.9 ヶ月を対象とすれば 90%の確率で震度 5 弱以上を体感するという評価となる。また、「今後 1 ヶ月に〇〇地方で震度 5 弱以上の揺れに見舞われる確率」を計算すると、「東北」では 22.1%、「関東」では 28.4%という数字になる。

#### [考察]

定常ポワソン過程で将来の地震発生を確率評価するということは、過去の平均的な地震活動度のみを先験的情報としているため、最小限の情報に基づく「予測」をしているという言い方ができる。ある領域に対して、何らかのモデルに基づき地震発生の予測情報を出し、それが適中した（あるいは外れた）ことがどれくらい意味があるかどうかを考える場合、定常ポワソン過程との比較が参考になると思われる。以下に事例を挙げて考える。

例えば「関東地方で今後半月の間に M5.0 以上の地震が発生する」という予測情報を、半月ごとに更新しながら毎回出し続けたとする。サイスミシティが最近（期間 B）の状況と変わらないでいるならば、月平均発生回数 1.17 回に対応する定常ポワソン過程による 0.5 ヶ月の発生確率は 0.442 である。したがって、長期的にこれを繰り返せば、この予測手法による全体の適中率は 0.442 となる。定常ポワソン過程の場合、確率は時間によらないので、「毎回」はこの半月予測情報を出さず



に、ランダムに予測情報を出したり出さなかったりしても、長期的に集計すれば、適中率は同じ 0.442 になる。なお、予知率は予測を出さなかった期間の数に応じて低下する。

この考察の意味するところは、特定のモデルに基づく地震発生予測情報の適中率が、長期的あるいは相当数の事例に対して定常ポワソン過程による確率予測と同程度であれば、そのモデルの予測能力には確率利得が認められない、ということである。ここで「確率利得」とは、地震の確率予測が基準の確率に対してどれだけ高くなるのか、という指標である。基準の確率として定常ポワソン過程を仮定したときの確率をあてれば、その適中率  $p_0$  に対して、提案された特定の手法による適中率  $p$  の比、すなわち  $p/p_0$  が確率利得となる。前兆現象などを全く考慮しない定常ポワソン過程より適中率が高くなければ、モデル(予測)の価値は高いとは言えない。

ここで示した例では、半月単位で予測をすれば、それがデタラメであっても 2 回に 1 回程度は適中するので、意味があるように見えるかもしれないが、それは当たり前の地震が発生していることを示すに過ぎない。

#### [まとめ]

このような定常ポワソン過程による評価を行うには、議論の最初に提示したように、「ある程度の広さ以上の領域、ある程度の長さ以上の期間を取ることで、地震の発生が擬似的にランダムな事象と見なせる」、という近似が成り立っている必要がある。そのため、発生頻度が極端に低い事象には適用できないが、発生頻度がそれなりに高い、1ヶ月から1年に1回程度発生するような事象が対象であれば、当たり前のことについては当たり前と言えるための目安を提供できる考え方と言えよう。震源データベースや震度データベースは公開されているので、対象地域と対象期間を設定することで、誰でも容易に計算を行うことができる。数ヶ月といった日常生活でイメージしやすい期間において数十%という想像可能な確率で起きる「当たり前の地震」というものを理解することは、地震への日頃の備えを考える上での第一歩となる、参考になる情報と思われる。

#### 謝辞

本稿のとりまとめに当たっては、滋賀県立大学の小泉尚嗣教授との議論が非常に有益であった。また、東北大学大学院理学系研究科の松澤暢教授（地震予知連絡会副会長）には貴重なご意見をいただき文章・数式表現についての改善に役立った。ここに記して感謝したい。震源情報の集計に当たっては石川有三氏・中村浩二氏による SEIS-PC、震度データの集計に当たっては石井嘉司氏による KAIYUKAN を使用させていただいた。それぞれの開発者および利用に当たって便宜を図っていただいた各位に感謝する。

#### 参考文献

宇津徳治：地震学(第3版)、共立出版、318-320、2001

地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図2014年版

～全国の地震動ハザードを概観して～、付録1、14-37、2014

石川有三・中村浩二：SEIS-PC for Windows95、地球惑星科学関連学会1997年合同大会予稿集、78、1997

石井嘉司：地震解説資料作成支援システムについて。気象庁研究時報52巻別冊、2001

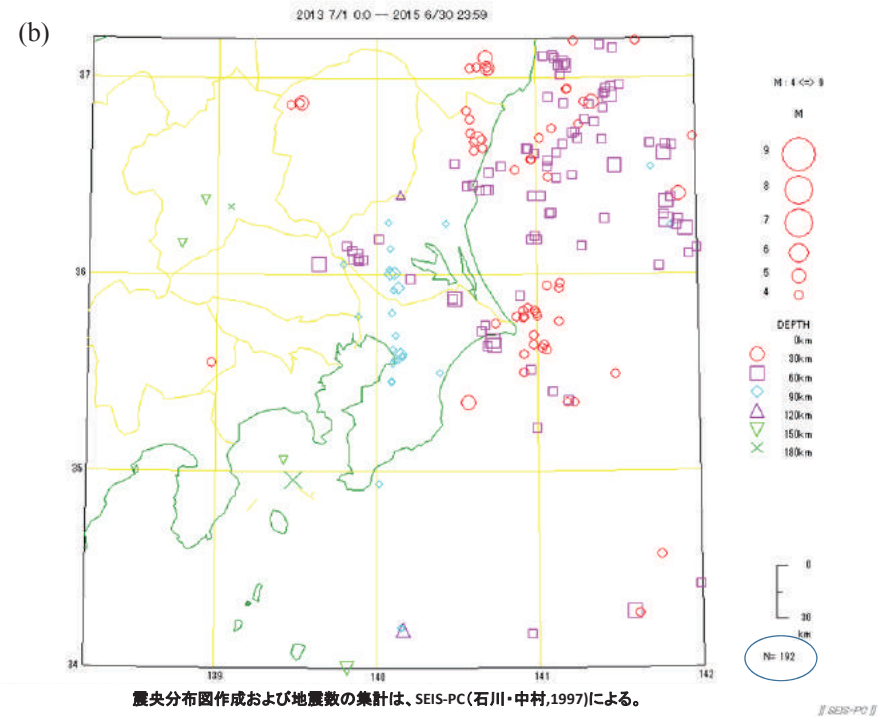
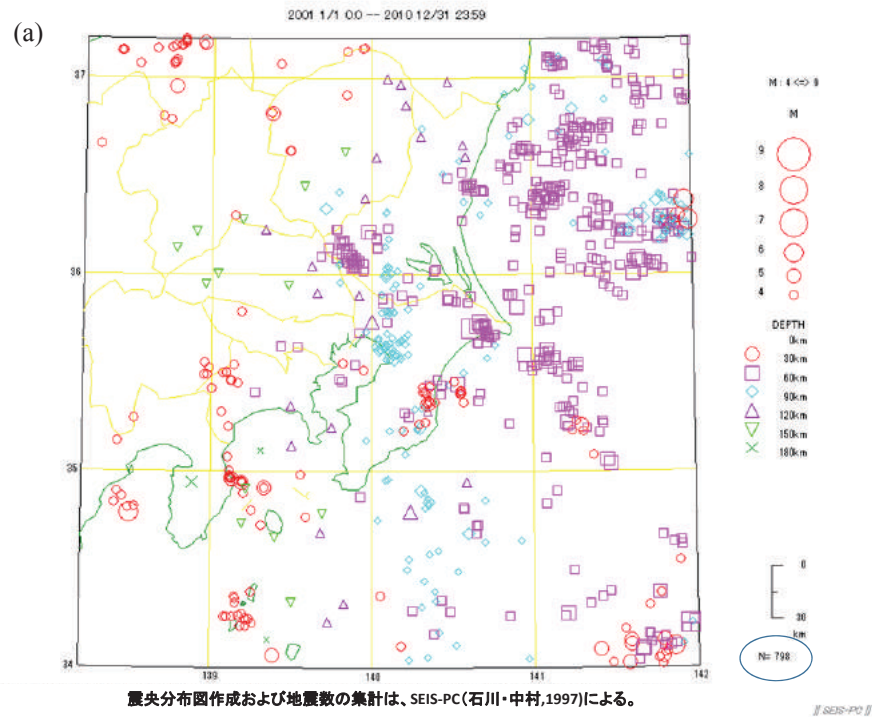


図1 関東地方周辺における震源分布図

図の範囲は 34.0~37.2°N, 138.2~142.0°E

M4 以上かつ 深さ 180km 以浅 の地震について表示し総数 N を集計

(a)期間 A : 2001 年 1 月 1 日~2010 年 12 月 31 日

(b)期間 B : 2013 年 7 月 1 日~2015 年 6 月 30 日

Fig.1 Hypocenter distributions in and around the Kanto region.

Earthquakes with  $M \geq 4.0$  shallower than 180km depth in a area of 34.0-37.2N latitude and 138.2-142.0E longitude are plotted.The numbers(N's) of earthquakes in the figures are discussed in the text.

(a) Term A: from January 2001 to December 2010.

(b) Term B: from July 2013 to June 2015.

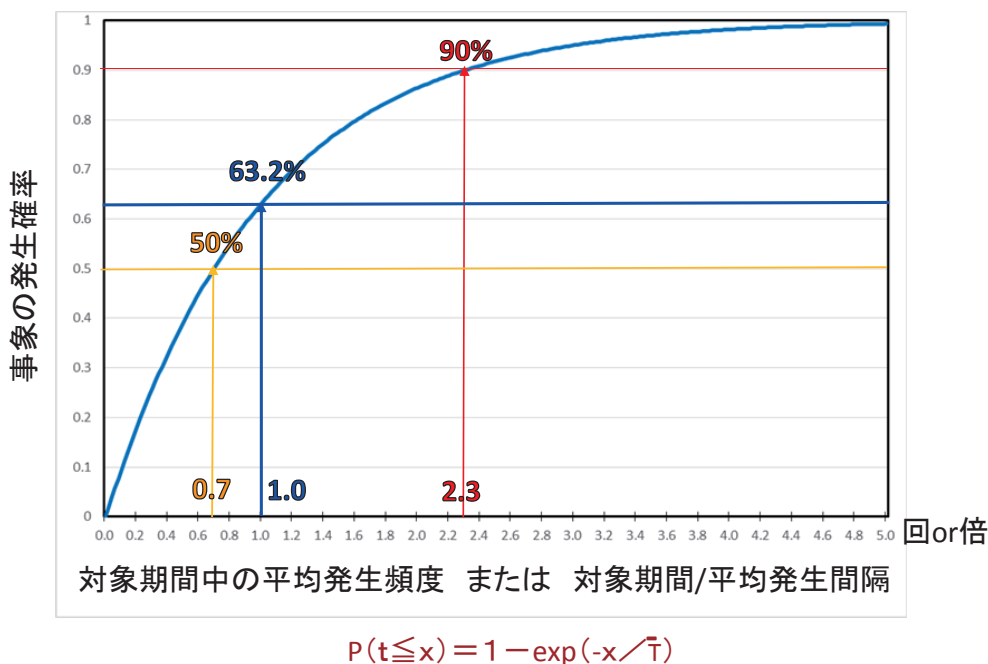


図2 定常ポワソン過程による地震発生確率

横軸の数値を月平均発生回数と見なしたときには、縦軸は1ヶ月間に地震が発生する確率を表す。

横軸の数値を平均発生間隔を1とした予測期間と見なしたときには、縦軸は予測期間に対応する発生確率

Fig.2 Cumulative probability distribution for the homogeneous Poisson process (exponential distribution).

When the horizontal axis is regarded as expressing the occurrence rate for a unit period, the vertical axis can be treated as expressing the probability of the occurrence within the unit period. When the horizontal axis is regarded as expressing the ratio of the time period to the mean reoccurrence time, the vertical axis can be treated as expressing the probability of occurrence within the time period.

表1 震度データベースによる対象地域で特定震度以上の揺れを観測した回数の集計表

東北地方：青森県、岩手県、宮城県、福島県、秋田県、山形県内の震度観測点が対象

関東地方：東京都（伊豆諸島・小笠原を除く）、埼玉県、神奈川県、千葉県、茨城県、栃木県、群馬県内の震度観測点が対象。

期間A：2001年1月1日～2010年12月31日

期間B：2013年7月1日～2015年6月30日

Table 1 Numbers of the earthquakes felt stronger than the indicated intensity levels in respective regions. Tohoku region includes the seismic intensity observation sites in Aomori, Iwate, Miyagi, Fukushima, Akita and Yamagata prefectures.

Kanto region includes the seismic intensity observation sites in Tokyo (excluding those in Izu islands and Ogasawara islands), Saitama, Kanagawa, Chiba, Ibaraki, Tochigi and Gunma prefectures. Term A is from January 2001 to December 2010 and Term B is from July 2013 to June 2015.

集計対象地域	対象期間	期間中の地震回数					年平均地震回数				
		震度3以上	震度4以上	震度5弱以上	震度5強以上	震度6弱以上	震度3以上	震度4以上	震度5弱以上	震度5強以上	震度6弱以上
関東地方 (1都6県、伊豆諸島・小笠原除く)	期間A	334	93	15	3	0	33.4	9.3	1.5	0.3	0.0
	期間B	122	37	8	1	0	61.0	18.5	4.0	0.5	0.0
東北地方 (東北6県)	期間A	548	122	19	7	7	54.8	12.2	1.9	0.7	0.7
	期間B	164	44	6	4	0	82.0	22.0	3.0	2.0	0.0
全国	期間A	1898	494	89	41	20	189.8	49.4	8.9	4.1	2.0
	期間B	399	108	20	8	1	199.5	54.0	10.0	4.0	0.5

期間A: 2001/1/1~2010/12/31

期間B: 2013/7/1~2015/6/30

気象庁震源データベースから石井嘉司氏作成のプログラムKAYUKANIにより集計