

マグニチュード 7 クラスの地震が発生するまでの 地震挙動に関する基礎的研究

甲村雄一^{1*}

¹ (株) 竹中工務店技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)

*E-mail: koumura.yuuichi@takenaka.co.jp

岩石の一軸圧縮試験や一軸圧縮クリープ試験では、岩石が巨視的なせん断破壊に近づくにしたがって AE(アコースティックエミッション)の発生量は増加する。地震は岩盤のせん断破壊の一種と考えられる。本研究ではマグニチュード 7 クラスの地震が発生するまでの約 10 年間の地震活動について考察する。まず、観測エネルギー量を定義する。次に、マグニチュード 7 クラスの地震に近づくにつれて観測エネルギー量は大きな値を示し、岩石の破壊直前の AE 発生量と類似した傾向を示すことがわかった。また、この傾向がマグニチュード 7 クラスの地震直前にのみ生じているかを確率論により考察した。

Key Words : large scale earthquake, the observation energy, probability

1. 緒言

岩石が巨視的な破壊に近づくにつれて、AE(アコースティックエミッション)の発生が顕著になる現象が知られている¹⁾。これは巨視的な破壊に近づくにつれて微視的な破壊が進行し、微視的な破壊によって生じる AE が観測されることが原因と考えられる。すなわち、巨視的な破壊の前兆現象として微視的な破壊による AE が発生するものと考えられる。筆者ら^{2)~4)}は岩石の一軸圧縮試験および一軸圧縮クリープ試験を実施し、岩石が巨視的なせん断破壊に近づくにしたがってひずみ発生量および AE 発生量が増加し、巨視的な破壊までの時間である破壊寿命との間には式(1)の関係を示すことを報告している。

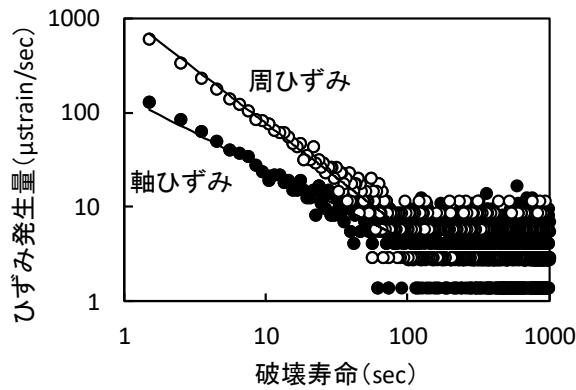
$$\log(H) = -a \cdot \log(T) + b \quad (1)$$

ここで、 H はひずみまたは AE の単位時間あたりの発生量、 T は破壊時刻を起点とし、これから遡ることによって求められる破壊寿命、 a および b は定数である。

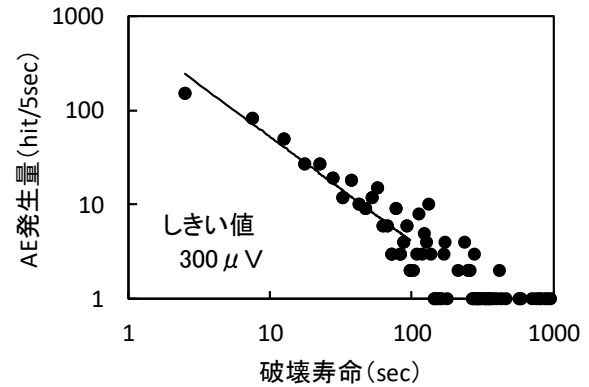
一方、地震は岩盤が地下のある面(断層)を境にずれる現象⁵⁾であり、岩盤のせん断破壊の一種と考えられる。地震に関する前兆現象については多くの研究が行われており、これらの研究は力武⁶⁾や長尾⁷⁾らによってまとめられている。前兆現象としては多くの項目が知られているが、その代表的なものとして、測地学的前兆現象、地震学的前兆現象および地球電磁気的前兆現象があげられる。測地学的前兆現象の例としては神山ら⁸⁾が報告して

いる2011年の東日本大震災時(M=9.0)におけるGEONET観測点の変位量の時間変動や、茂木⁹⁾による1944年の東南海地震時(M=7.9)の地殻変動の時間的な変化が知られている。地震学的前兆現象の例としては、1978年の伊豆大島近海地震(M=7.0)で顕著な前震が観測されたことが知られている¹⁰⁾。地球電気磁気的前兆現象の例としては地震直前に地電流が変化することが知られている¹¹⁾。一方、地震の発生を説明するモデルとしては、近年アスペリティモデルが提案され、地震の発生が統一的に理解されるようになってきたとの報告がある¹²⁾。

地震の発生が多い我が国においては、大規模な地震の発生を事前に予測して被害を軽減する技術の確立が望まれる。これまでに種々の研究が行われているが、決定的な地震予測技術の確立までには至っていないのが現状であろう。本研究の動機は地震が岩盤のせん断破壊の一種であれば、岩石のせん断破壊時に見られる AE 発生現象と同様な現象が大規模地震の発生前に起こっているのではないかという疑問によるものである。そこで本研究では地震の前兆現象のうち地震学的前兆現象に着目し、式(1)の考え方を大規模地震の前兆現象の説明に用いることを検討する。なお、マグニチュードが6クラスの地震については既に報告した¹³⁾。まず、2章で大規模な地震が発生するまでの観測エネルギー量を定義する。次に、3章において、1995年から2003年までの間に発生した3回のマグニチュード7クラスの地震に着目し、大規模な地震が発生するまでの日数と観測エネルギー量との関係について整理する。さらに、4章において大規模地震直前

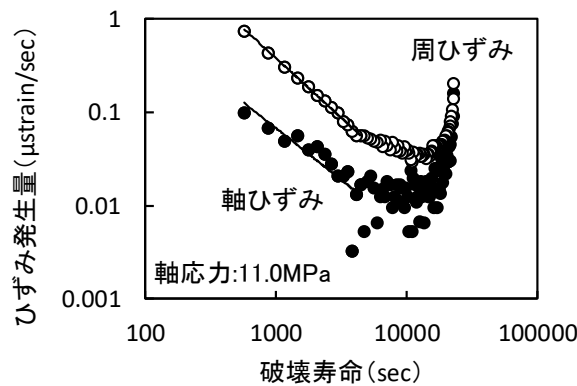


(a) 破壊寿命とひずみ発生量との関係

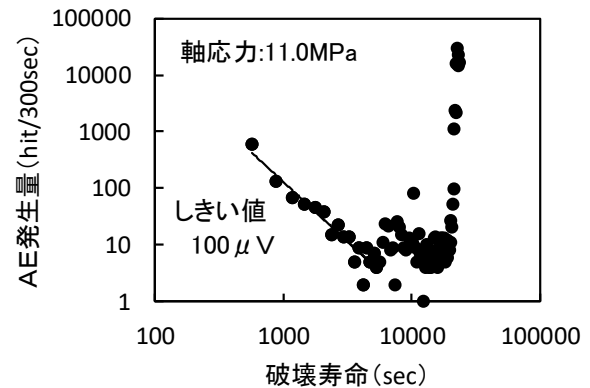


(b) 破壊寿命とAE発生量との関係

図-1 一軸圧縮試験の結果



(a) 破壊寿命とひずみ発生量との関係



(b) 破壊寿命とAE発生量との関係

図-2 一軸圧縮クリープ試験の結果

に観測される観測エネルギー量の増加の傾向について、確率論的な考察を実施した結果を述べる。

2. 観測エネルギー量の定義

図-1に凝灰岩を用いた応力速度一定条件(0.01MPa/sec)の一軸圧縮試験結果を示す⁴⁾。また、図-2には凝灰岩を用いた一軸圧縮クリープ試験の結果を示す⁴⁾。図の横軸には供試体の破壊時刻を起点として、これから遡ることによって求められる破壊寿命を示したが、破壊寿命が小さくなり巨視的な破壊に近づくにつれて単位時間あたりのひずみ発生量およびAE発生量は大きくなることからわかる。また、破壊寿命とひずみ発生量およびAE発生量との間には、前述の式(1)の関係が成り立つ。

地震時においてこのような考え方を適用するために、観測エネルギー量を定義する。地震のマグニチュードとエネルギーの関係式は式(2)が知られている¹⁴⁾。

$$\log E = 4.8 + 1.5M \quad (2)$$

ここで、 E はエネルギー(単位: J)、 M は地震のマグニチュードである。大規模地震の震源を中心に、ある領域

を考える。大規模地震が起こるまでにこの領域内で発性した i 番目の地震について、観測エネルギー量を単位時間当たりのエネルギーとし、式(3)のように定義する。

$$K_i = E_i / ((t_i - t_{i-1}) \cdot 10^6) \quad (3)$$

ここで、 K_i は i 番目の地震の観測エネルギー量(単位: MJ/day)、 E_i は i 番目の地震のエネルギー(単位: J)、 t_i は i 番目の地震の発生時刻(単位: day)、 t_{i-1} は $i-1$ 番目の地震の発生時刻(単位: day)である。式(2)と式(3)から、 K_i は式(4)で求められる。

$$K_i = 10^{(4.8 + 1.5M_i)} / ((t_i - t_{i-1}) \cdot 10^6) \quad (4)$$

ここで、 M_i は i 番目の地震のマグニチュードである。式(4)で求められる観測エネルギー量が、式(1)と同じ形の式(5)のような関係にあるのではないかと推察する。

$$\log(K) = -c \cdot \log(T) + d \quad (5)$$

ここで、 K は観測エネルギー量、 T は大規模地震までの日数、 c および d は定数である。式(4)で定義した観測エネルギー量は地震のマグニチュードが大きくなると大きな値を示す。また、地震のマグニチュードが同じであれば地震の発生間隔が短くなると大きな値を示す。次章で

表-1 本研究で取り扱う大規模地震の概要

CASE	日時	発生地点	大規模地震の震源		マグニチュード M	過去10年の 地震発生回数
			北緯	東経		
1	1995/01/17 05:46	兵庫県南部	34° 35.90'	135° 02.10'	7.3	2911
2	2001/03/24 15:27	安芸灘	34° 07.94'	132° 41.62'	6.7	2210
3	2003/05/26 18:24	宮城県沖	38° 49.26'	141° 39.04'	7.1	7802

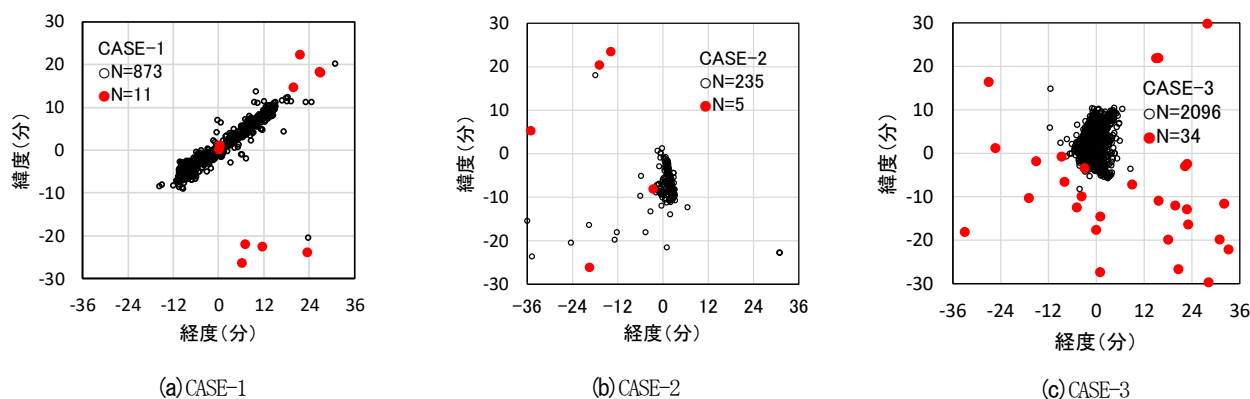


図-3 大規模地震後1日間の地震の震源の分布

は、大規模な地震が発生するまでの日数と観測エネルギー量との関係等を整理する。

3. 大規模地震の発生までの観測エネルギー量

(1) 着目した大規模地震

本研究では、3つのマグニチュード7クラス(マグニチュードが6.7～7.3)の3個の地震に着目した。各地震の詳細を表-1に示す。データの収集はこれらの地震発生前の10年間に期間を統一した。地震断層の研究によると、地震のマグニチュードMと地震断層線の長さL(km)の関係は、日本の内陸を対象として式(6)が提案されている¹⁵⁾。

$$\log L = 0.6M - 2.9 \quad (6)$$

マグニチュードを7.3として式(6)により地震断層線Lを求めると30.2kmとなる。大規模地震の地震学的前兆現象を検討する場合、少なくともこれらよりも広い範囲に着目する必要があると考える。ここでは各地震について、震源を中心とした約100km平方(緯度=1°，経度=1.2°)の領域に着目し、過去10年間の地震を気象庁地震月報カタログ編¹⁶⁾から抽出した。

大規模地震の余震に関して、本震直後(およそ1日以内)の余震は、一般的にほぼ本震の破壊領域(本震の震源域)を表すと考えられている¹⁶⁾。各ケースについて、大規模地震の震源を基準として、大規模地震から1日間に発生した余震の震源を白丸印(○)でプロットしたものを

図-3(a)～(c)に示した。なお、赤丸印(●)については4章で説明するが、式(5)の関係が成り立つと考えられるデータである。CASE-1～CASE-3のマグニチュード7クラスの地震においては、余震は大規模地震の震源付近を中心として生じており、震源域と推測される余震の発生領域は、約100km平方(緯度=1°，経度=1.2°)よりは小さい。

(2) マグニチュードの頻度分布

大規模地震発生前の各ケースでのマグニチュードの頻度分布を図-4(a)～(c)に白丸印(○)のプロットで示した。マグニチュードのデータは0.1刻みの値で与えられているため、図ではこの刻み間隔でデータを整理している。

一般に、ある一定の地域、一定の期間に生じる地震のマグニチュードMと地震発生数n(M)の間には式(7)に示すグーテンベルグ-リヒターの関係¹⁷⁾が成り立つものと推察される。

$$\log n(M) = e - fM \quad (7)$$

n(M)はマグニチュードがMにおける地震の発生数、eおよびfは定数である。なお、式(7)のfは一般にb値¹⁷⁾と呼ばれる定数である。本研究では式(5)に示した大規模地震までの日数と観測エネルギー量との関係を検討する。

(3) 長期の検討

まず、検討期間が10年間の比較的長期(以下長期と呼ぶ)の検討を行うこととした。この場合、データ数が膨大であるためデータを絞り込む必要があると考えられる。

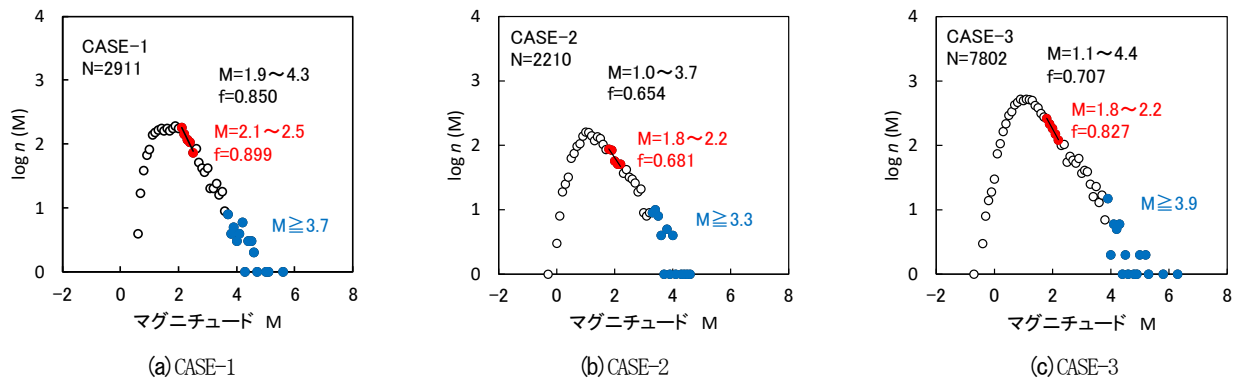


図-4 マグニチュードの頻度分布

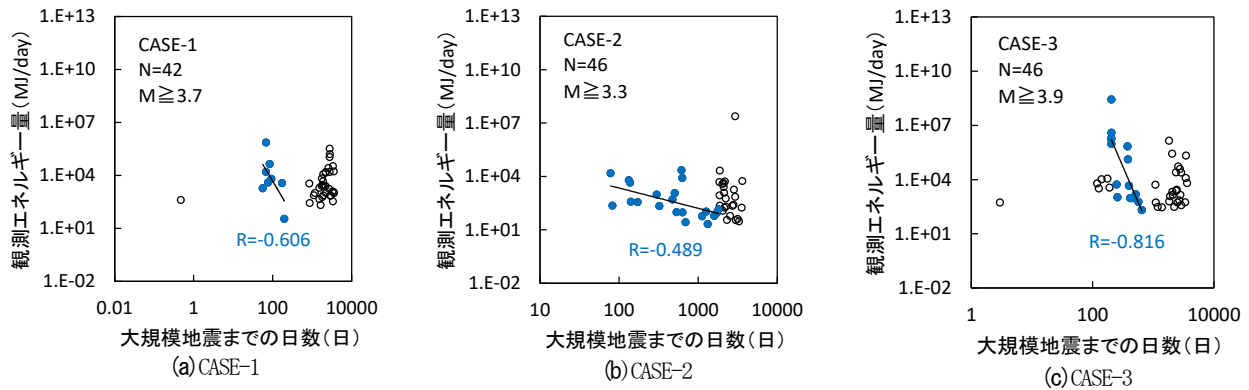


図-5 長期の検討結果

長期を対象とする場合、マグニチュードの大きな地震に着目することが適切と考えられる。ここでは、各地震について、試行錯誤の結果、地震の総数が50を超えない範囲でマグニチュードが大きい方から地震を選択し、大規模地震までの日数と観測エネルギー量との関係を求めることとした。選択した地震を図-5(a)~(c)に青丸で示した。青丸印(●)の範囲で観測エネルギー量は大規模地震までの日数が短くなるのに伴い増加し、両対数グラフ上で直線関係を示しているようである。なお、青丸の範囲を直線近似した場合の相関係数を青字で示した。

(4) 中期の検討

検討期間が10年間の長期に着目した検討において、例えばCASE-1では大規模地震の56.0~197日において、大規模地震までの日数と観測エネルギー量との関係は式(5)の関係がみられる可能性が高いという結果となった。このことから、CASE-1においては中期の検討は56.0日以内のデータに着目すべきことにした。このように各ケースについて大規模地震の前に式(5)の関係がみられる最短日以内に着目した検討を中期の検討と呼ぶこととする。

図-4(a)~(c)に示した地震のマグニチュードの頻度分布は、一般的に式(7)に示したグーテンベルク-リヒターの関係が成り立つものと考えられる。中期である程度絞り込まれたデータの検討を行う場合、グーテンベルク-リヒターの関係が成り立っている範囲のデータに着目すべ

きと考えた。

グーテンベルク-リヒターの関係が成り立っている範囲を厳密に評価することは難しい。このため、まず、データ数が最大値を示すマグニチュードから最初にデータ数が最小値の1 ($\log n(M)=0$)を示すマグニチュードまでの間で f の値を計算した。

次に、上記範囲内で連続する5区間を順次取り出し f の値を順次計算し、最初に図-4(a)~(c)に赤丸印で示すように上記の f の値を上回る区間よりマグニチュードが大きい領域でグーテンベルク-リヒターの関係が成り立っているものとして、これよりマグニチュードが小さいデータは除外して中期の検討を行うこととした。

中期における大規模地震までの日数と観測エネルギー量との関係をCASE-1で求めた結果を図-6(a)~(c)に示す。図に赤丸印(●)で示した範囲で式(5)の関係が成り立っているようである。

4. 考察

(1) 式(5)の関係の発生確率の考察

上述したように3ケースにおいて大規模地震の発生前には観測エネルギー量と大規模地震までの日数との間には式(5)の関係が成り立っているようである。もし、このような関係が大規模地震発生前に成り立っているので

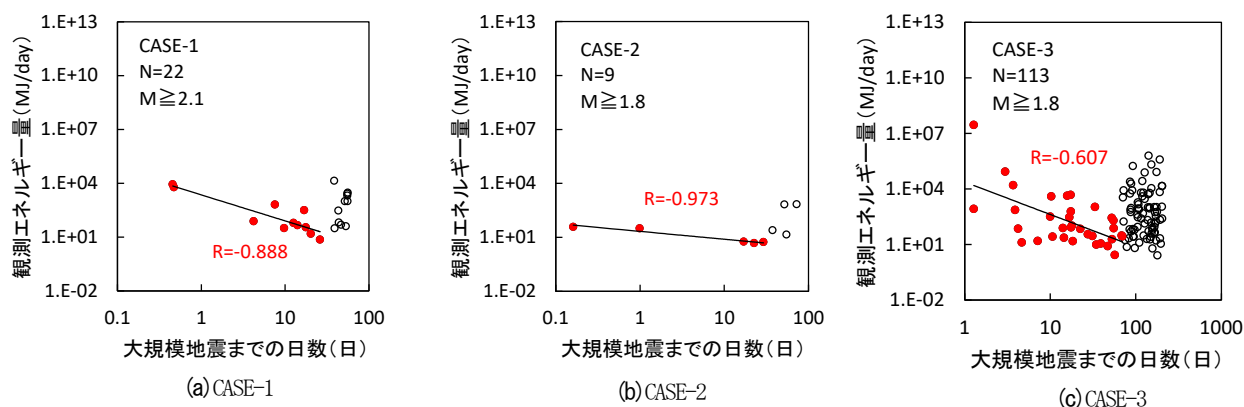


図-6 中期の検討結果

表-2 検討結果のまとめ

CASE		A列	B列	C列				D列	E列	F列	G列	H列	I列	J列
		マグニ チュード の下限値	検討期間 (日)	着目した地震データ				総地震 回数 :N	相関係数 を求めた 地震回数 :N'	$\Sigma \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i}$	正規分布 による 確率 :P1	地震1回 あたりの 平均日数 :g(日/回)	発生確率 :P2 (日/回)	検討期間 あたりの 発生回数 (回)
				期間(日)		回数 (回)	相関係数							
				最短日	最長日									
1	長期	3.7	3650	56.0	197	8	-0.606	42	2	-	1.00	86.9	3650	1.00
	中期	2.1	56.0	0.457	26.1	11	-0.888	22	1	-	1.00	2.55	56.0	1.00
2	長期	3.3	3650	78.4	1820	21	-0.489	46	12	3.22	0.0138	79.3	22000	0.166
	中期	1.8	78.4	0.161	29.3	5	-0.973	9	1	-	1.00	8.71	78.4	1.00
3	長期	3.9	3650	204	650	15	-0.816	46	7	0.50	0.0798	79.3	6530	0.559
	中期	1.8	204	1.27	69.7	34	-0.607	113	50	1.22	0.00131	1.80	3120	0.0653

あれば、この関係を利用して大規模地震の発生を予測できる可能性が考えられる。しかし、大規模地震発生よりも以前の期間においても同様に式(5)の関係が成り立っている可能性がある。ここではこの可能性を検討するために、大規模地震発生から地震を順次さかのぼり、式(5)で近似した際の相関係数の値を求め、まず、相関係数の分布を検討することとした。

具体的には、1個づつ地震を順次さかのぼっていき、式(5)の関係が成り立っていると考えられる最長日から最短日の一つ前の地震の時刻を差し引いた期間において、地震数が表-2のC列に示した地震回数を上回り、地震活動が式(5)の区間よりも活発な場合について、式(5)で近似した際の相関係数を求めた。最短日より一つ前の地震とした理由は、一つ前の地震発生時刻を0と定義したためである。また、データの後半部においては、最長日から最短日の一つ前の地震の時刻を差し引いた時刻に満たない期間の領域が発生するが、この領域については検討から除外した。

表-2のD列には検討対象期間の総地震回数を、E列にはこのうち相関係数を求めた回数を示した。CASE-1の長期では10年間に42回の地震が観測されているが、これらの地震に順次着目し、前述した方法で相関係数を求めたのは2回であった。相関係数の値は+1から-1の範囲でばらつく。この範囲を6区間に等分割し、相関係数が正規分布を示すと仮定した場合についてについて χ^2 検定を行った結果を表-2のF列に示す。自由度についてはデー

タの区間数から1を減じるとともに、正規分布の理論度数を標本平均と標本分散の2つを用いて推定したためさらに2を減じ、自由度は6-3=3である。 χ^2 分布の有意水準5%の α パーセント値¹⁸⁾は7.81に対してすべてのケースで小さい。よって、正規分布であることが有意水準5%で妥当であると判断できる。

CASE-2の長期において大規模地震直前の相関係数は-0.489、正規分布の平均値および標準偏差は-0.003および0.220であったため $(-0.489 - (-0.003)) / 0.220 = -2.209$ となり、標準正規分布表から平均値-2.209 σ を超える確率P1は表-2のG列に示したとおり0.0138と求められる。

CASE-2の長期においては表-2のD列に示したとおり地震発生前の10年間(3650日)に46回の地震が観測されている。これから10年間における地震1回あたりの平均日数gは表-2のH列に示したとおり $3650 \div 46 = 79.3$ 日/回と求めることができる。正規分布による確率P1および地震1回あたりの平均日数g、10年間の総地震回数Nおよび相関係数を求めた地震回数N'から大規模地震の発生確率P2(日/回)を式(8)で求めた。

$$P2 = g / (P1 / (N/N')) \quad (8)$$

このようにして、各ケースにおいて大規模地震直前に式(5)の傾向が観測される地震発生確率(日/回)を求めたものを表-2のI列に示した。また検討期間をこの値で除した検討期間あたりの発生回数を表-2J列に示した。J列の値が1以下であると式(5)の関係は大規模地震発生前にの

みみられる可能性が高いと考えられる。

なお、相関係数が求められたものが3個以内と少なく、統計的に取り扱うにはデータが少ないと判断したものについては、すべてのケースで大規模地震直前で相関係数の絶対値が最大値を示していたため、確率P1は1として計算した。

今回検討を行った3ケースにおいて、検討期間あたりの地震発生回数の値が1以下であるものはすべてであった。これらのことから、式(5)の関係はは大規模地震が発生する直前にのみ生じている可能性が高いものと推察される。

(2) 大規模地震前の地震の震源分布

各ケースにおいて長期よりも中期の方が大規模地震の前兆現象として地震の予測により役立つものと考えられる。中期について、式(5)の関係が成り立っていると考えられる地震の震源分布を図-3(a)~(c)に赤丸印(●)で図示した。白丸印(○)で示した大規模地震の震源域の付近で発生している地震もあるが、大部分はこれよりかなり離れた位置で発生しているものが多いことがわかる。

5. 結論

本研究では、観測エネルギー量を定義し、マグニチュード7クラスの3ケースの地震について、大規模地震までの日数と観測エネルギー量との関係を検討するとともに、この関係の確率論的な考察を行った。本研究で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

約10年間という期間に着目し、長期および中期を定義して大規模地震までの日数と観測エネルギー量との関係に式(5)の関係がみられるかを検討した。各ケースとも大規模地震の前にのみこの関係が成り立っている可能性が高いことが分かった。

本研究は数多いマグニチュード7の地震のうち、3つの地震について検討したものである。他の地震についても

同様の傾向が得られるかどうかについては課題として残されている、

参考文献

- 1) 石田毅：岩盤破壊音の科学，近未来社，p.38，1999.
- 2) 甲村雄一，下河内隆文，岩本宏，上田貴夫：凝灰岩の圧縮応力下での破壊に伴うAE発生特性，土木学会第54回年次学術講演会，Ⅲ，pp.632-633，1999.
- 3) 甲村雄一，下河内隆文，岩本宏：AEを予知因子に用いる脆性材料の破壊時期の予測方法，特許第3687386号
- 4) 甲村雄一：岩盤の破壊予測に関する基礎的研究，愛媛大学学位申請論文，pp.128-132，2006.
- 5) 日本地震学会地震予知検討委員会編：地震予知の科学，東京大学出版会，pp.17-19，2007.
- 6) 力武常次：地震前兆現象—予知のためのデータベース，東京大学出版会，1986.
- 7) 長尾年恭：地震予知研究の新展開，近未来社，2001.
- 8) 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，土木学会誌，Vol.97，No.3，pp.119-123，2012.
- 9) 茂木清夫：1994年東南海地震直前の前兆的地殻変動の時間的变化，地震(2)，Vol.35，pp.145-148，1982.
- 10) 気象庁地震課，地震予知情報室：1978年伊豆大島近海地震について，
http://cais.gsi.go.jp/KAIHOU/report/kaihou20/03_07.pdf#search=%E6%B0%97%E8%B1%A1%E5%BA%81%E5%9C%B0%E9%9C%87%E8%AA%B2+%E5%9C%B0%E9%9C%87%E4%BA%88%E7%9F%A5%E6%83%85%E5%A0%B1%E5%AE%A4+1978
- 11) 前掲7)，pp.66-80
- 12) 前掲5)，pp.76-87
- 13) 甲村雄一：「マグニチュード6クラスの地震が発生するまでの地震挙動に関する基礎的研究」，第15回岩の力学国内シンポジウム講演集，pp.499-504，2021.
- 14) 国立天文台編：平成25年理科年表，丸善，p.714，2012.
- 15) 松田時彦：「活断層から発生する地震の規模と周期について」，地震，第28巻，pp.269-283，1975.
- 16) <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqcv/data/bulletin/hypo.html>
- 17) 宇津徳治，嶋悦三，吉井敏尅，山科健一郎：地震の辞典＜第2版＞普及版，朝倉書店，pp.180-182，2011.
- 18) 伊藤学，亀田弘行訳：「土木建築のための確率・統計の基礎」，丸善，p.380，1977.

A FUNDAMENTAL STUDY OF EARTHQUAKE BEHAVIOR BEFORE MAGNITUDE 7 CLASS EARTHQUAKE

Yuichi KOHMURA

Occurrence count of AE (acoustic emission) of rock increases with the approach of macroscopic fractures in a uniaxial compression test and a uniaxial compression creep test. An earthquake is considered to be a kind of shear fracture of a rock mass. In this study, about 10 years of seismic activities before generation of magnitude 7 class earthquakes are examined. Firstly, the observed energy is defined. The observed energy increases with the approach of a magnitude 7 class earthquake, and it was found that the tendency of the observed energy is similar to that of the AE before destruction of rock. In addition, it was considered by probability theory whether this tendency occurs only immediately before magnitude 7 class earthquakes.