

9. 京都が震度 V 以上の地震に襲われる確率

地震研究所 宇佐美龍夫
 札幌管区気象台 久本壯一

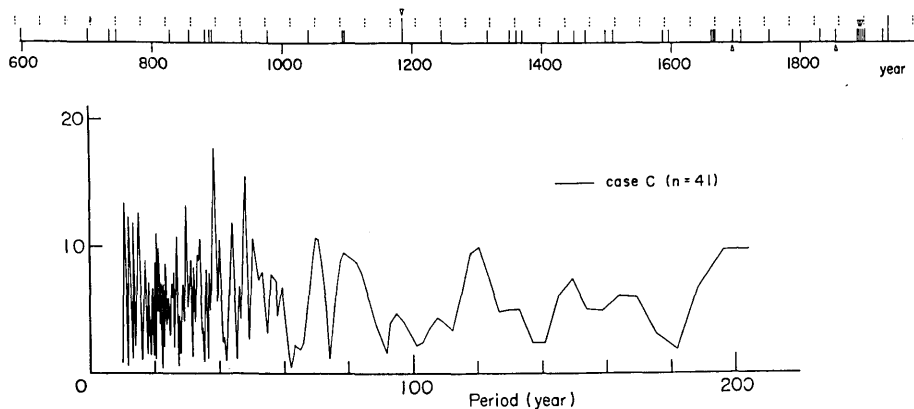
(昭和 45 年 9 月 22 日発表—昭和 45 年 12 月 22 日受理)

§ 1. はしがき

筆者ら (1970) は、さきに、東京が震度 V 以上の地震に襲われる確率を求めた。その際、17 世紀以降の地震を資料として用いたのは、江戸では、1600 年以前にさかのぼって、均質な資料が得られないと判断したからである。一方、京都は古くから開け、長期に亘って信頼できる資料があり大地震発生過程のモデルを推論することができると考え、前回同様に、河角 (1961, 1970) の方法と小河原 (1955) の方法を使つて調査をした。その他、地震が定常ランダムに生ずる (宇津 (1969)) というモデルの可否についても検討した。その結果に基づいて、数種の地震発生モデルを考え、乱数を使つて標本を発生させ、モデルの優劣を考察した。

§ 2. 資 料

第 1 表は有史以来の地震 (宇佐美 (1966)) のうちから、京都で震度 V 以上と思われる地震 44 を選び出したものである。明治以後の地震については京都地方気象台の資料によつた。1185 年 9 月 14 日の地震 (∇ 印) は震度 V と推定したけれども、その直前の 1185 年 8 月 13 日の地震の余震と考えられるので除いた。さらに濃尾地震の余震 2 つ (表中では ∇ 印で示してある) を除いた計 41 の地震を用いた場合を case C とし、そのうちから震度がやや小さいと思われる地震 (Δ 印) 2 つを除き、濃尾の余震二つを加えた 41 地震をとり扱つた場合を case A とし、A, C 二つの場合について考えたが、両者の差は小さ



第 1 図 上図: 京都における震度 V 以上の地震, 横軸は西暦年. 点線は周期分析の結果得られた 38.5 年周期の山の位置. Δ は震度がやや小さいと考えられる地震. ∇ は余震. 下図: 上図のフーリエ分析の結果.

第 1 表 京都で震度が V 以上の地震表

西暦年月日 (和暦年月日)	震央地名 (λ, φ)	M	震 度	記 事
599 V 28 (推古 7 IV 27)	大 和		V	倒壊家屋を生じた
701 V 12 (大宝 1 III 26)	135.4°E	7.0	V	若狭湾内の冠島水中に没す
734 V 18 (天平 6 IV 7)	136.1	7.0	V	民家倒壊圧死多し
745 VI 5 (天平 17 IV 27)	136.6	7.9	V	美濃大地震、摂津で余震 20 日中止まず
827 VIII 11 (天長 4 VII 12)	135.6	6.7	V+(VI?)	舎屋多くつぶれる
856 — (斉衡 3 —)	京 都	6.4	V+(VI?)	舎屋破壊し、仏塔傾く
881 I 13 (元慶 4 XII 6)	京 都	6.4	V	宮城の垣端、官庁、民家の損甚だし
887 VIII 26 (仁和 3 VII 30)	135.3	8.6	VI	京都の民家・官庁倒壊多く、圧死多数
890 VII 10 (寛平 2 VI 16)	京 都	6.2	V	家屋傾き、倒壊寸前
938 V 22 (天慶 1 IV 15)	135.8	6.9	VI	宮城内の建物、堂舎、仏像、東西両京の舎屋倒壊死あり
976 VII 22 (貞元 1 VI 18)	135.8	6.7	VII	宮城諸司、両京舎屋倒壊多く、死少なからず
1041 VIII 25 (長久 2 VII 20)	京 都	6.4	V+	法成寺の鐘楼倒る
1093 III 19 (寛治 7 II 14)	京 都	6.4	V	所々の塔破壊
1096 XII 17 (永長 1 XI 24)	137.3	8.4	VI	大極殿破壊、社寺の被害多し
1185 VIII 13 (文治 1 VII 9)	136.1	7.4	VII	閑院の皇居破壊、社寺の被害、民家築垣の倒壊破壊多し
v1185 IX 14 (文治 1 VIII 12)	京 都		V	
1245 VIII 27 (寛元 3 VII 27)	京 都	6.2	V	破壊少なからず
1317 II 24 (文保 1 I 5)	135.8	6.7	VI	白河辺の人家悉くつぶれ、社寺の被害多く、死あり
1350 VII 6 (正平 5 V 23)	京 都	6.2	V	祇園社の石塔の九輪落つ
1361 VIII 3 (正平 16 VI 24)	135.0	8.4	V	東寺の講堂傾く
1369 IX 7 (正平 24 VII 28)	京 都	6.1	V	東寺の講堂傾く
1425 XII 23 (応永 32 XI 5)	京 都		V-	築垣多くくずれ
1449 V 13 (宝徳 1 IV 12)	135.6	6.4	VI	洛中の堂塔、築地の被害多く、地裂、山崩あり
1466 V 29 (文正 1 IV 6)	奈良・京都		V	天満社、糺社の石灯笼倒れる
1498 IX 20 (明応 7 VIII 25)	138.2	8.6	V-	東海道大地震
1510 IX 21 (永正 7 VIII 8)	135.7	6.7	V-	大阪で被害大
1586 I 18 (天正 13 XI 29)	136.8	7.9	VI	飛騨地震、東寺、三十三間堂に被害

第 1 表 (つづき)

西暦年月日 (和暦年月日)	震央地名 (λ, φ)	M	震度	記 事
1596 IX 5 (慶長 1 閏 VII 13)	135.7° 34.8°	7.0	VII	伏見城天守大破, 社寺・民家の倒壊, 死者多し
1662 VI 16 (寛文 2 V 1)	136.0 35.3	7.6	VI	琵琶湖周辺で被害大, 京都の町屋倒壊 1000, 死 200
1664 I 4 (寛文 3 XII 6)	京都・山城	5.9	V	二条城, 伏見城の諸邸破損, 洛中の築垣くずる
1665 VI 25 (寛文 5 V 12)	京都	6.1	V	二条城の石垣くずれ, 二の丸殿舎破損
△1694 XII 12 (元禄 7 X 26)	丹 後	6.1	IV(V-)	丹後地震, 丹後で地割れ, 家屋倒壊
1707 X 28 (宝永 4 X 4)	135.9 33.2	8.4	V-	宝永大地震
1751 III 26 (宝暦 1 II 29)	京都	6.4	V	築地破損, 町屋も損ず
1830 VIII 19 (天保 1 VII 2)	135.7 35.0	6.4	VI	御所破損, 二条城本丸大破, 洛中の土蔵すべて破壊
△1854 XII 24 (安政 1 XI 5)	135.6 33.2	8.4	IV(V-)	南海大地震
1891 X 28 (明治 24 年)	136.6 35.6	8.4	V	濃尾地震
▽1892 I 3 (明治 25 年)	136.8 35.4	6.5	V	" 余震
▽1894 I 10 (明治 27 年)	137 35	7.4	V	" "
1896 V 7 (明治 29 年)	135.7 35.1	5.1	V	
1899 III 7 (明治 32 年)	136.0 34.2	7.6	V	奈良吉野郡
1927 III 7 (昭和 2 年)	135.1 35.6	7.5	V	北丹後地震
1936 I 8 (昭和 11 年)	135.8 35.1	4.4	V	
1936 II 21 (昭和 11 年)	135.7 34.5	6.4	V	大阪・奈良で多少の被害, 死あり

いので、主として case C について計算を進めた。

§ 3. 河角の方法

第 1 上図は第 1 表の地震を年代順に並べたもので、これから ▽ 印の 3 地震を除いたものが case C である。また点線は周期分析の結果求められた 38.5 年周期成分の山の位置を示す。この第 1 上図をフーリエ分析した結果が同下図で、それを整理したのが第 2 表

第 2 表 河角の方法による結果

n	case C						
	41						
周期 (年)	29.8	38.5	48	71	78	120	148
確率 (W)	0.014	0.(3)5	0.0025	0.075	0.109	0.088	0.254
$Y(\omega)$ 実測値	13.3	17.7	15.7	10.3	9.57	9.97	7.49
" 期待値(20.5).....						
$\sqrt{\xi^2}$ 実測値		7.82					
" 期待値	5.34	6.96	8.67	12.8	13.9	21.3	26.7

である。同表にはフーリエ振幅の山の周期とその高さ $Y(\omega)$ 並びに現象が出鱈目に生じた場合に山の高さが $Y(\omega)$ になる確率 W が記されている。周期 38.5 年の山は最も起きにくいものであり、河角の論法に従つて、京都で震度 V 以上の地震は 38.5 年の周期をもつとする。

現象が周期の山から ξ 年ずれて生ずる確率を

$$p(\xi)d\xi = \frac{1}{T_0} \left(1 + \cos \frac{2\pi}{T_0} \xi \right), \quad T_0: \text{周期} \quad (1)$$

と考えたときのフーリエ振幅 $Y(\omega)$ と $\sqrt{\xi^2}$ の期待値と実測値も第 2 表に示した。 $\sqrt{\xi^2}$ の実測値を求めるに当つて $T_0=38.5$ 年とした。これによると $T_0=38.5$ 年の周期で $Y(\omega)$ と $\sqrt{\xi^2}$ の実測値と期待値の一致が最もよい。したがつて 38.5 年の周期があると考えられる。

§ 4. 小河原の方法

この方法の概略は前報 (宇佐美・久本 (1970)) に示してある。

第 1 表は、資料としての質が一樣と考えられるなら、資料を全部使うことができる。あい隣る地震の時間間隔 τ のうち不連続的に大きなものがあつて、古い時代の“記録もれ”が懸念される場合には、それ以前の資料はあつかえない。実際に第 1 表から得られる τ の値には特にとびはなれて大きい値はないようである。 $x = \log(\tau + a)$ が正規分布に従うとして棄却検定を試みても x の最大値は棄却されない。すなわち全資料が用いられる。

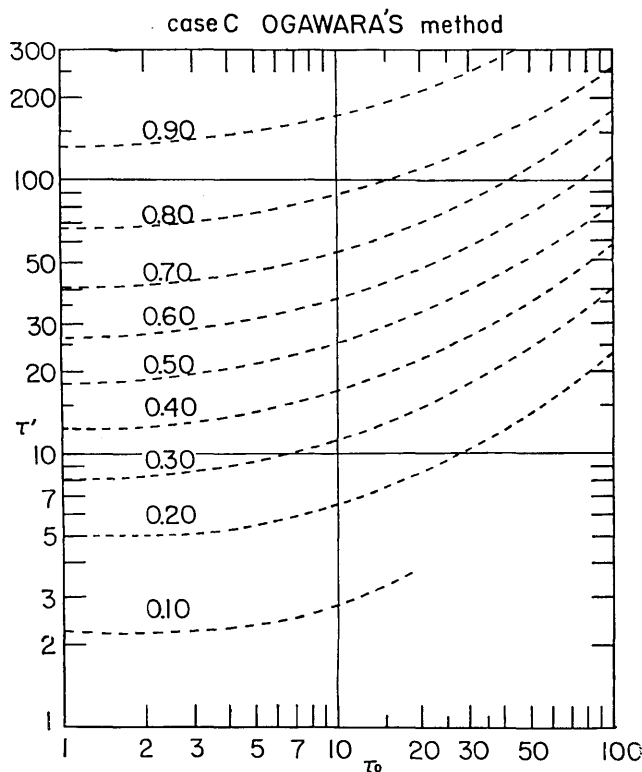
$x = \log(\tau + a)$ が正規分布に従うものと仮定したが、適合度検定を行なつて正規性の認められることを見た。 a として 0, 3, 5, 8, 12 カ月の各場合について行なつたが大差はない。さらに case A と case C の差は僅少なので case C で $a=0$ についての結果を第 3 表にまとめた。

第 3 表 小河原の方法による結果

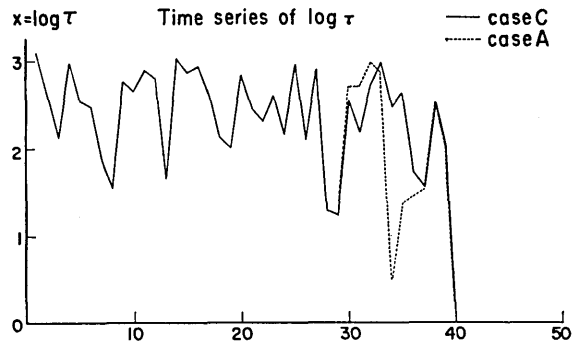
case C,	$\alpha=0$ (month)	$N=40$			
$\bar{x}=2.343,$	$s=0.620$				
$\gamma_1=0.284,$	$\gamma_2=0.111,$	$\gamma_3=0.207,$	$\gamma_4=0.043,$	$\gamma_5=0.221$	

次に統計的モデルを選定するために系列相関係数 r_i を計算した。第 3 表の下部にその算出値を示した。 r_i の危険率 5% の有意水準は 0.26 であり、危険率 1% の有意水準は 0.36 であるから、モデルの採用にあたって r_i は懸念される値である。小河原 (1955) は「予報の見地からは、もし多くの資料があるならば、有意ではなくても、ありそうな相関はできるだけ取り入れて、モデルを構成するほうがよいが、少数例では、それがかえって予報精度を悪くする」と述べ、また「一般にモデルが複雑なほど現実に近いはずであるが、少数例では複雑なものほど推測の精度が落ちる」と注意している。ここでは有意水準を 1% にとり、定常独立過程とみなして小河原方式による予報の計算を試みた。

第 2 図はこうして求めたもので、最後の地震後すでに τ_0 年経ち、この間に地震がおこらなかったという条件のもとに、これからさき τ' 年以内に地震のおきる確率 $G(\tau_0, \tau')$ を



第 2 図 小河原の方法による $G(\tau_0, \tau')$ の図。単位は年。



第 3 図 $x = \log \tau$ (τ は隣り合う地震の時間間隔) の時系列.

示す. また, 参考のために第 3 図に $a=0$ の場合の x の時系列を示す. さらに第 4 図には資料から求めた τ の分布 (白丸, 黒丸) と $a=0$ の場合の x の正規分布を τ の分布に変換したもの (実線) を掲げてある.

§ 5. 宇津の分布

宇津 (1969) によると地震発生は定常ランダム過程として理解される. 本論文のように, 一観測点で観測される地震の系列にも, このモデルが当嵌まるかどうか調べてみた. 定常ランダム過程の場合, 隣り合う地震の時間間隔 τ の分布は指数分布

$$\phi(\tau) = \nu e^{-\nu\tau}, \tag{2}$$

であり, τ の平均は $\bar{\tau} = 1/\nu$ で与えられる. case C について χ^2 -検定 (自由度 3) を行なうと第 4 表のようになり, 自由度が 3 の場合の 5% 点 $\chi^2_{0.05} = 7.815$ より小さいので合格する. そしてわれわれの資料は, 地震回数が時間に関して一様分布とみてよいことも適合度検定の結果言えるので, 定常ランダム過程からの標本とみなせる. また, このとき

第 4 表 定常ランダム過程

case	ν^*	N	χ^2
C	0.26	40	0.831

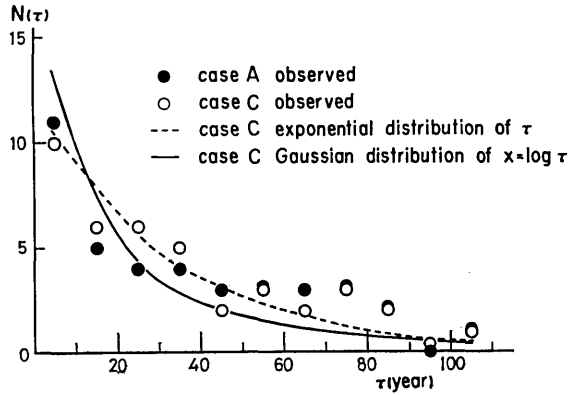
$$G(\tau_0, \tau') = 1 - e^{-\nu\tau'} \tag{3}$$

ν^* は τ を 100 カ月単位としたときの値 となり τ_0 によらない. つまり地震発生の確率は過去の歴史に無関係で τ' のみによる.

(3) 式によれば case C における G の値は次のようになる.

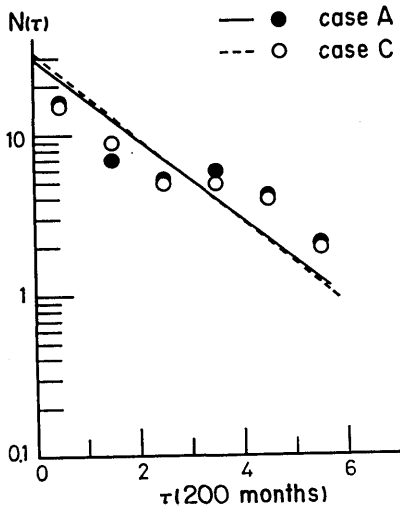
$\tau' = 1$ 年	$G = 0.032$
5	0.150
10	0.277
20	0.477
30	0.622
50	0.802

第 4 図には資料から推定した τ の指数分布を点線で示す. また, 第 5 図は同様な分布を片対数グラフに示したもので, この分布と観測資料の一致のよいことがわかる. とくに

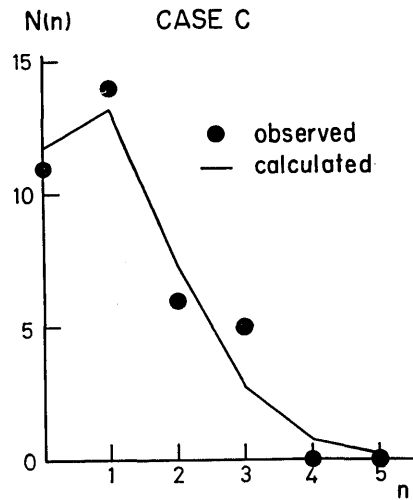


第 4 図 τ の頻度分布. 実線は小河原の場合, 点線は指数分布の場合.

第 4 図によれば定常ランダム過程の方が小河原のモデルよりも観測との一致がよいことが認められる.



第 5 図 $N(\tau)$ の分布, 直線は指数分布に当嵌めた場合, τ の単位は 200 カ月.



第 6 図 1 周期 ($T_0=38.5$ 年) 内の地震数 n の分布, 実線は資料に当嵌めたポアソン分布を示す.

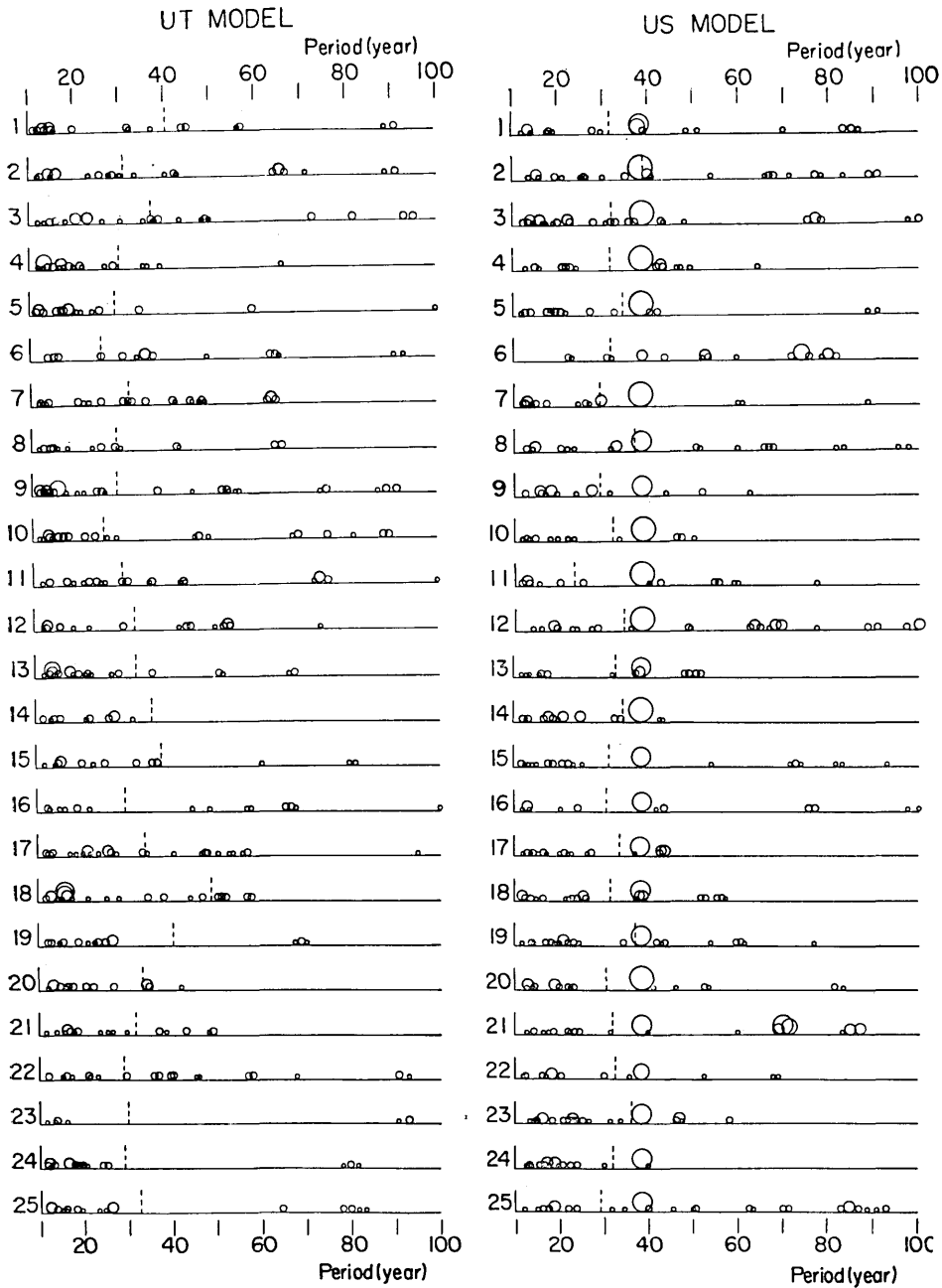
§ 6. 地震発生の母集団モデル

第 3, 4, 5 節において, 京都における震度 V 以上の地震の発生過程を説明するモデルを考えた. この三つのモデルの中には相反する性質をもつものもある. そこで前 3 節の結果に基づいて地震発生過程の母集団モデルを考え, 乱数を使ってサンプルを発生し, どのモデルが最適であるか考える.

1) UT モデル. 定常ランダム過程. 母集団における τ の分布は

$$\phi(\tau) = \nu e^{-\nu\tau}, \quad \nu = 0.03142 \tag{4}$$

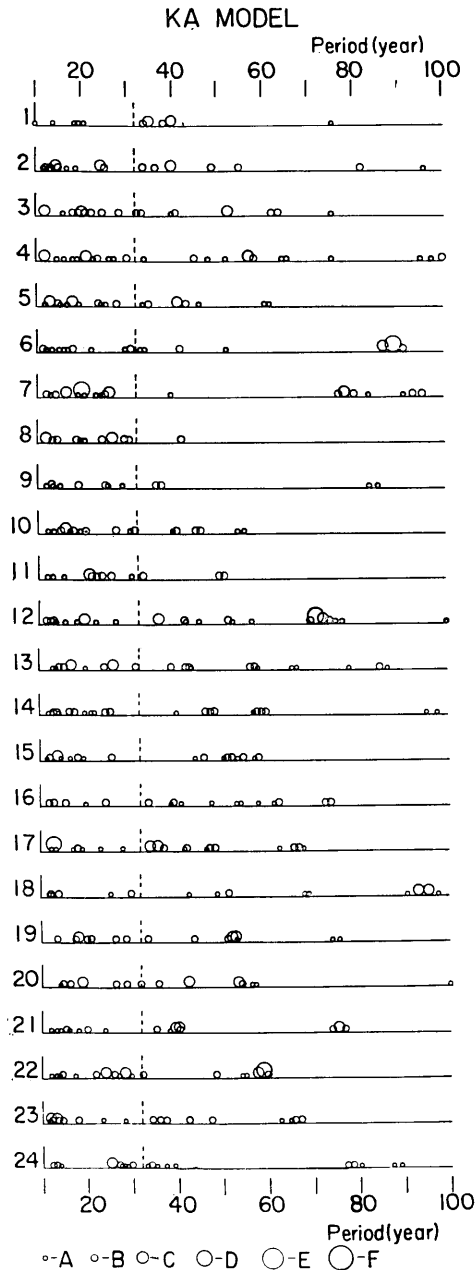
単位は年. 一様矩形乱数を使つて, 25 の標本を作つた. 各サンプルで第一番目の地震は西暦 599 年にあるとし, 各標本で $\sum_{i=1}^N \tau_i \leq 1370$ を満す最大の N に 1 を加えたものが標本



第 7 図 各種モデルからの標本を周期分析した結果. フーリエ振幅の大きい所を○印で示
本文参照. 大きいもの程フーリエ振幅が大きい. 横軸は周期, 左端の数字はサンプル番

内の地震数になる。したがって、地震数は標本ごとに異なる。

2) US モデル. 河角の方法から得られた周期からだけでは、モデルを作り難い。第 6 図は西暦 599 年 - $(11 + \frac{38.5}{2})$ 年 = 569 年を起点とし (11 年は 38.5 年周期成分の位相),



す。○印の大きさについては本図及び
号, 点線は各サンプルごとの平均周期。

各周期内に生じた地震数の分布を示したもので実線はこれに当嵌めたポアソン分布

$$\phi(n) = \nu^n e^{-\nu} / n! \quad (5)$$

を示す。ν は平均値で、ν = 1.194 である。χ²-検定を行なうと、自由度 4 で χ² = 2.412 となり、5% 点における χ²_{0.05} = 9.448 より小さいので実測値はこの分布に従うと考えられる。つまり、現象は周期を単位として考えると定常ランダムに生じていると言える。そこで、各周期ごとの地震数 n は上記ポアソン分布に従い、各周期の中では (1) 式にしたがつて、地震が発生すると考える。このモデルに基づいて一様矩形乱数をつかい 25 の標本を発生させた。西暦 569 年を起点として 36 周期 (=1386 年間) を考えた。

3) KA モデル. Y_i を 599 年を起点として i 番目の地震までの年数であるとし、この Y_i の分布が一様と考え各標本ごとに一様矩形乱数 41 を選びこれを 1370 年間にわりあてた。したがって、この場合のサンプルごとの地震数は一定で 41。総計 24 のサンプルを発生させた。このモデルは河角の方法でフーリエ振幅が Y(ω) である確率 W (第 2 表参照) を算出する基礎になっている出鱈目に起こる現象を示すものとして考えた。

なお、小河原の分布は第 4 図に見られるように、観測値と理論値の一致が多少劣るので、これに基づく標本は作らなかつた。

資料から見出された定常ランダム性と 38.5 年周期性を現象に固有の性質と考え、この二つの属性を満すかどうか調べる目的をもつて以上の各標本について、

1) UT モデル ((4) 式) に従うかどうか

かの χ^2 テスト

2) フーリエ分析

を行なった。その結果 (4) 式を 5% の危険率で満足すると考えられる標本の割合は, UT, US, KA の各モデルで 19/25, 22/25, 21/24 である。どのモデルも定常ランダム性を示していると考えられる。

周期分析の結果は第7図の通りである。点線は τ の平均で丸印の大きさは、河角の方法に従って現象が出鱈目に生じたときにフーリエ振幅が Y になる確率 W によつて次のように分類した。

A	$0.1 > W > 0.05$	D	$0.001 > W > 0.0001$
B	$0.05 > W > 0.01$	E	$0.0001 > W > 0. (4) 1$
C	$0.01 > W > 0.001$	F	$0. (4) 1 > W$

これによると UT モデル, KA モデルでは、周期とその振幅はサンプルごとに異なり法則性は見出せない。しかし、 $W < 0.01$ の山が 25 標本の中にひんぱんにみえるということは、河角のいう W はある周期を与えたときその振幅が Y 以上になる確率を示し、どれかの周期の振幅が Y 以上になることを示していないことと対応している。河角の依拠している Rayleigh (1945) の論旨を参照すれば容易に理解される。したがつて、われわれが周期分析をする場合、あらかじめ周期についての知識はないのだから、その結果たとえば周期が T' となりその山が図の C に相当するからといつて、その振幅が現われる確率は 0.01 と 0.001 の間にあるとは考え難い。河角の方法による W (第2表) の値の取扱いには慎重を要する面がありそうである。

US モデルでは、ほとんどの標本で $T_0=38.5$ 年に大きな山が見られる。このモデルは実際の標本から推定される二つの属性を満足する。

§ 7. 結 語

京都の歴史的な地震史料をつかつて、京都における震度 V 以上の地震の発生確率と発生過程を調べた。発生確率については第3図および第4節の G の値を参照していただきたい。

資料から得られる2属性(定常ランダム性と周期性($T_0=38.5$ 年))を満す発生過程を考え、第6節のUSモデルを得たがこのモデルが唯一のものとは言い難い。1周期単位で考えれば定常ランダムであることを仮定すると、1周期内での発生確率分布をいろいろに変えても満足すべきモデルが得られるのではないかと期待される。また、このモデルにはかなり人工的なきらいがあり、これが自然現象をあらわしているとは言い難い。また、宇津(1969)による結果、つまり余震を除くと地震の発生は定常ランダムであるという事実との関連について精査する必要がある。したがつて、ここでは資料から得られる2属性(定常ランダム性と38.5年周期性、とくに後者を認定する方法には問題点があることを前節に述べておいた。)を認めれば、UT, KA, USの3モデルのうちではUSモデルが最もよくこの属性を説明するというにとどめたい。

おわりに明治以後の地震の資料の調査をして下さつた京都地方気象台の方々に感謝する。

文 献

- 河角広, 1961, 地震力の期待値について (特に鎌倉を対象として), 高徳院国宝銅造阿弥陀如来修理
工事報告書 (高徳院, 昭和 36 年), 81-88.
- 河角広, 1970, 関東南部地震 69 年周期の証明とその発生の緊迫度ならびに対策の緊急性と問題点,
地学雑誌, 78, 115-138.
- 小河原正己, 1955, 東京における次の有感地震の確率, 験震時報, 20, 81-92.
- Rayleigh, J. W. S., 1945, *The Theory of Sound*, Dover ed., § 42 and § 42a.
- 宇佐美龍夫, 1966, 日本付近のおもな被害地震の表, 地震研究所彙報, 44, 1571-1622.
- 宇佐美龍夫, 久本壮一, 1970, 東京が震度 V 以上の地震に襲われる確率, 地震研究所彙報, 48,
331-340.
- 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, 北大地球物理学研究報告, 22, 73-93.

9. *Future Probability of a Coming Earthquake with Intensity
 V or more in the Kyoto Area.*

By Tatsuo USAMI,
Earthquake Research Institute
and Soichi HISAMOTO,
Sapporo District Meteorological Observatory

The probability of a future earthquake with intensity V or more in the Kyoto area was studied using historical data from 599 A.D. to the present. Following Kawasumi's method, the periodicity with 38.5 year period was detected. Ogawara's method was also examined. Stationary random process was found to be acceptable.

Assuming that the two characteristics, namely, the periodicity with 38.5 year period and stationary randomness are intrinsic to the sequence of big earthquakes in the Kyoto area, a trial is made to find a model of earthquake occurrence satisfying the two characteristics. Among the three models employed the one, in which the number of earthquakes in one period (38.5 year) follows the Poisson's distribution and the probability density of earthquake occurrence in one period follows cosine law (see equation (1)), satisfies the two characteristics.