5．地震の繰り返し発生の単純なモデルと東海地域の地殻変動

東京大学地震研究所　　島　崎　邦　彦

1．はじめに

プレート境界における地震の繰り返し発生の機械的モデルとして第1図のようなベルトコンベアモデルが考えられる。2つの極端な場合として、静止摩擦一定の場合と動摩擦一定の場合とをこの小論では考える。岩石実験・モデル実験・クリープ現象・小地震・大地震の場合にどちらがよくあてはまるかを調べてみた。その結果、概して静止摩擦一定のモデルがよりよく適合する傾向が見い出された。この場合、地震の発生時は前のスリップ量から予測が可能となり、原理的には長期予測の時間幅を狭めることが可能である。南海道地震の場合は、宝永・安政の地震時の室津における隆起量から、昭和地震の発生時は1952年と予測される（実際は1946年）。しかし、東海地震の場合には、このように信頼できる地殻変動量推定値が存在しないため、現状では地形・測地資料に基づく議論に止まらざるを得ない。

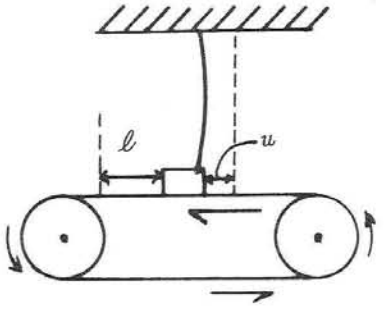
2．モデル

第1図でベルトコンベアの回転軸と上方の壁とは固定しているものとする。ベルト上の質点はベルトコンベアにより左方に移動していくが、板バネの力が質点とベルトとの間の静止摩擦力を越えたとき、右方にすべる。これをプレート間の地震とここでは考える。このすべりによって板バネはもとに戻っていくため板バネの力は減少し、その力が質点とベルトとの間の動摩擦力より小さくなった時にすべりは止る。

このモデルは弾性反発説とスティックスリップモデルに基づいており、多くの人々に用いられている。このモデルの2つのパラメターは静止摩擦応力（σ_s）と動摩擦応力（σ_k）とであり、実際にはバラツキを持つ量と考えられる。このモデルが適用可能であれば、両者の差は地震による応力降下量であり、プレート間の地震ではほぼ一定で約30バール程度であることが知られている。（例えば Kanamori and Anderson, 1975）。ここで2つの極端な場合を考えよう。

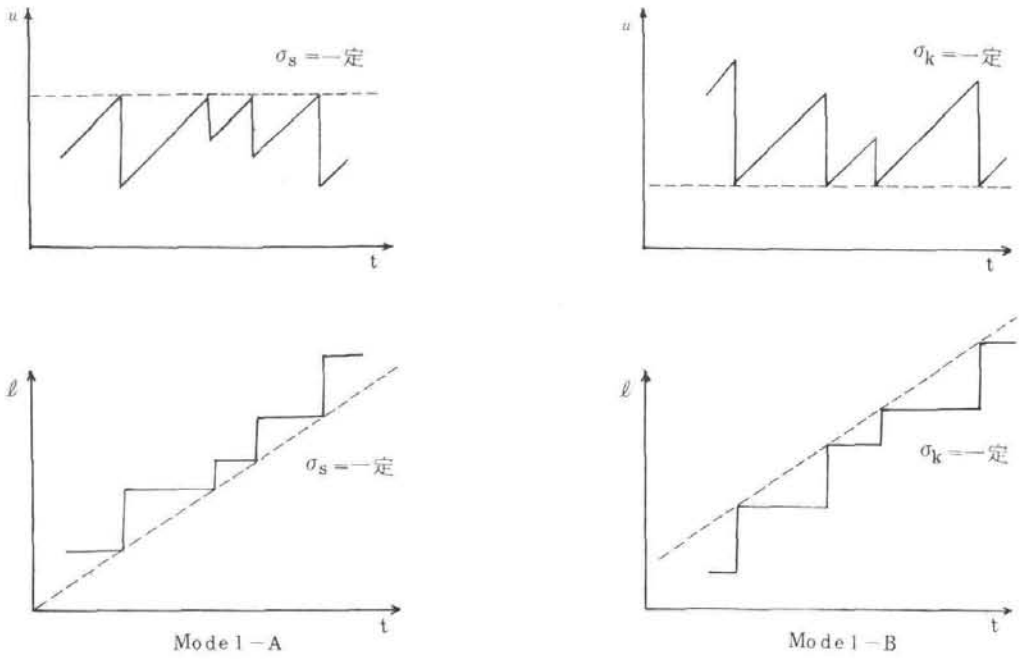
1) モデルA　静止摩擦応力一定

2) モデルB　動摩擦応力一定



第1図 ベルトコンベア・モデル。

プレート境界近傍の点を、同一プレート内の或る点から



第2図　変位量u，l（第1図）の時間的変化。
σ_s：Static frictional stress，σ_k：Kinetic frictional stress.
Model A：σ_s＝const，Model B：σ_k＝const.

の変位で表わした場合（第1図　u；第2図上部）と、相手側のプレート内の点からの変位で表わした場合（第1図　l；第2図下部）に分けて、両モデルについて模式的に第2図に示した。

海溝沿いの巨大地震の繰り返し発生のモデルとして、モデルBは広く用いられてきた。（例えば、宇津，1972；力武，1974；瀬野，1977）この場合、地震後の応力あるいは歪の状態は、いつも等しい。（地震後の歪量をとり除けば）歪はいつも0から蓄積を始めると考えることができる。また地震時の変位量は、その前の地震から当地震までの時間間隔に比例する。よって、地震時の変位量を、前の地震時からの経過時間に基づいて予測することができる。

一方、Bufe et al.（1977）はサンアンドレアス断層の支断層であるカラバレス断層の一部で、モデルAを用いている。この場合地震直前の応力あるいは歪の状態がいつも一定となり、地震後の状態は等しいとは限らない。地震時の変位量は、当地震から次の地震までの時間間隔に比例する。よって前の地震時の変位量にもとづいて、次の地震の発生時を予測することができる。実際、Bufe らは小地震（M＝3.2）の予知に成功した。

3. 実　例

幾つかの実例において、どちらのモデルがよく成り立っているかを以下に検討してみよう。一般に第2図のような形で文献にあらわれていることが多いので、図ををみることにより、大まかな判断が可能である。別の方法として、変位量と地震の時間間隔との関係を図

にプロットすることにより比例関係からのバラツキの度合いを判断することができる。あい続く地震の時間間隔はモデルAが成り立てば、前の地震時の変位量に比例し、モデルBが成り立てば後の地震時の変位量に比例する。第4図や第5図のように横軸に変位量、縦軸に時間間隔をとれば、比例関係を示す直線の傾きは、平均変位速度の逆数となる。

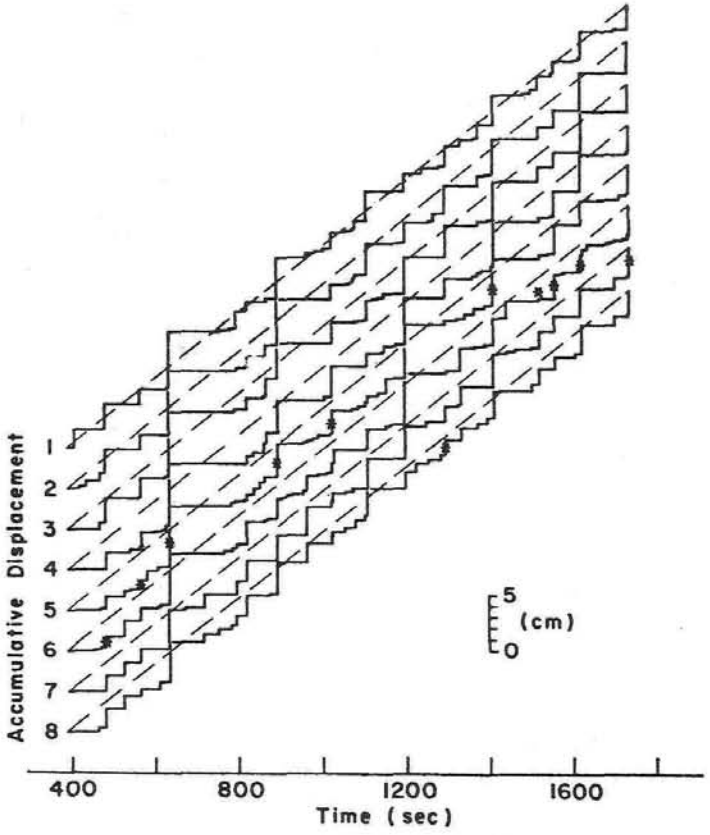
(イ) 岩石実験

地殻・マントルに存在すると考えられる岩石を試料に用いた実験では最初の数サイクルで両摩擦力ともバラツキが大きい。その後やゝ安定するようであるが、特にどちらのバラツキが小さいともいえないようである。(例えば、Brace, 1972)。

(ロ) モデル実験

King (1975)は回転する円板上に8つのジュースかんをバネによって取り付けて、地震現象を再現するモデル実験を行なった。隣り合うかん同志はバネでつながれている。一つのかんの動きが隣りに伝わることにより、同時に幾つかのかんがすべる場合がある。これは大地震の発生と似ている。

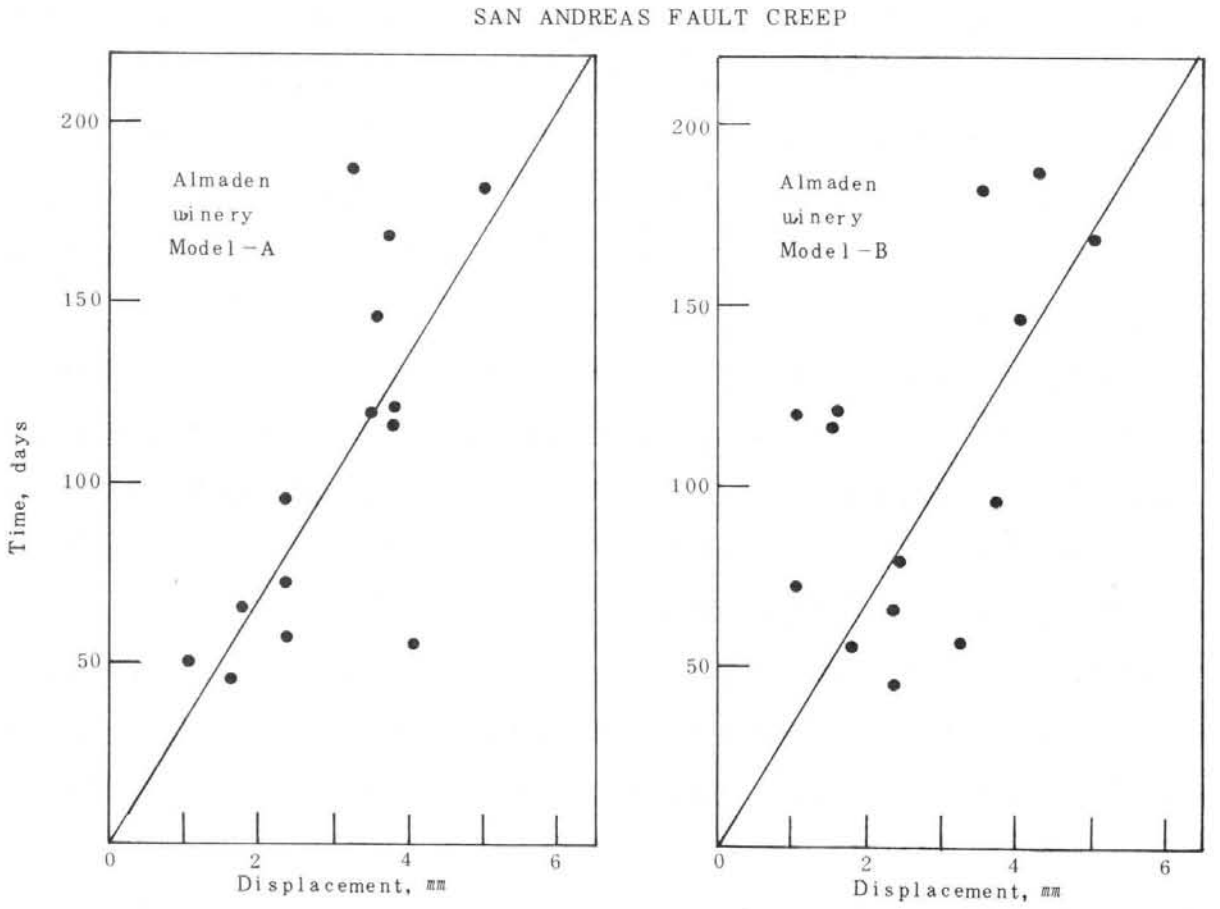
第3図は8つのかんのそれぞれの変位量の時間的経過を示している。これは第2図の下段に対応しており、モデルAで期待される動きを示している。このような動きは単にかん一つ一つと床面との摩擦の性質によるものではなく、かん同志がつながっていることによる集合効果ではないかとKing (1975, 私信)は考えている。



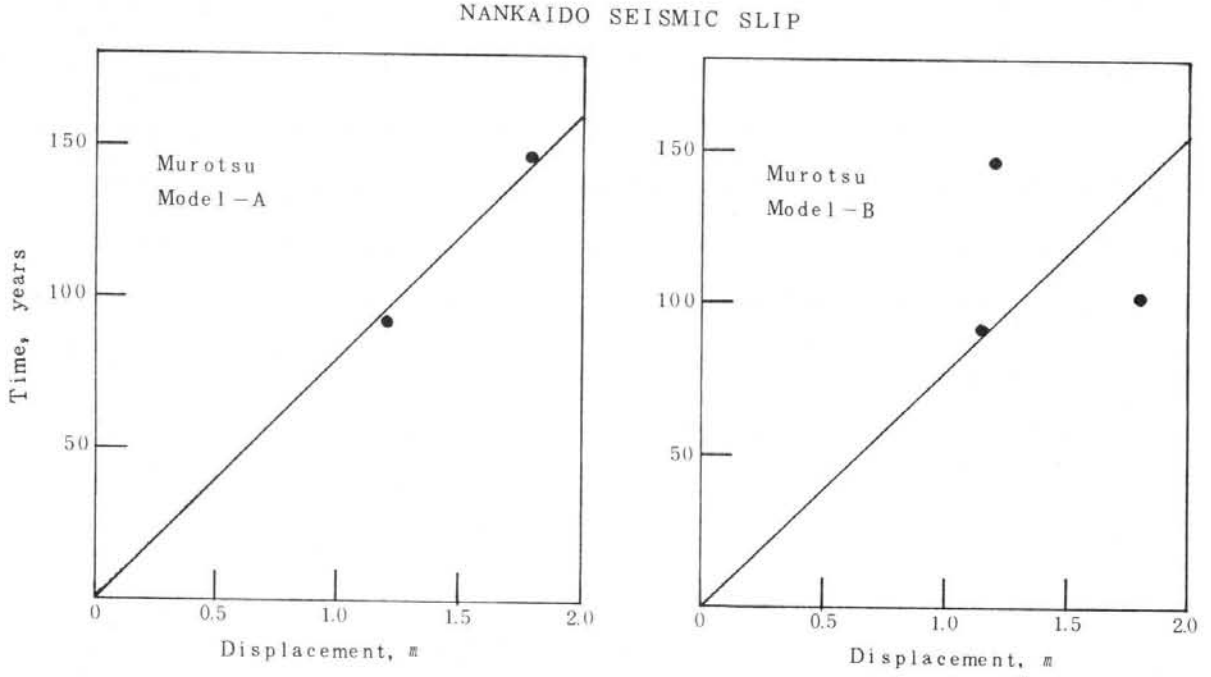
第3図 8つのかんの累積変位量の時間変化
(King, 1975 による)。

(ハ) クリープ現象

サンアンドレアスおよびその支断層沿いにみられるクリープの多くは定常的なずれを生じているのではない。ほとんどずれを生じない期間(数ケ月)をはさんでクリープイベントと呼ばれる数日間で



第4図　ホリスターにおけるクリープイベントのずれの量と時間間隔の関係。



第5図　室津における隆起量と時間間隔との関係

数mmのずれが起る。数点での観測の結果、このイベントは同時に発生するのではなく、1～10 km／日で伝播することがわかっている（例えば、King et al., 1973)。断層運動の速度は、地震とクリープイベントで、10^5 程度のオーダー異なる。

σ_k , σ_s のバラツキがプレート間のクリープイベントと地震とで共通の性質を示すかどうかは明らかではない。しかしどちらもプレート境界面での断層運動である点を考えれば、クリープイベントの例は十分参考となるであろう。

1964 年8月～ 1965 年9月のホリスターにおけるサンアンドレアス断層のクリープのデータ（Talwani and Kovach, 1972のFig. 2）を階段状に近似して、発生間隔とずれの量を第4図に示した。モデルAが成り立てば発生間隔は前のクリープイベント時のずれの量と比例し（左側の図）、モデルBが成り立てば発生間隔は後のイベント時のずれの量に比例する（右側の図）。

最小自乗法で求めた直線の傾きは両者でほとんど変らないが、バラツキは明らかにモデルAの方が小さい。推定分散値の比は 1.8 である。しかし、この値は $F_{0.10}$ (13, 13) の値 2.1 よりは小さく、信頼度 90 %でも分散の違いは有意とはならない。

(二) 小地震

Bufe et al. (1977) はサノゼ市東方のカラベラス断層で繰り返し起きたM＝3クラスの地震を調べ、断層面上のある一定面積（1 km× 5 km）の部分が繰り返しすべることによって発生したものと考えた。一定面積であるから、地震モーメントはすべりの量に比例する。時間に対してプロットされた累積モーメントの図（Bufeら, Fig. 2）はモデルAに合う階段状(第2図下段)を示している。これに基づき、彼らはM＝3.5±0.5 の地震が、 1977 年1月1日±48日　北緯37° 17.0′±2.0′、西経121° 39.0′±2.0′、深さ4.7 ±1.0 km　に起きると予測した。論文投稿後 1976 年12月8日にM＝ 3.2 の地震が 37° 16.1′N、121° 38.1′W、深さ 4.5 kmに発生した。偶然に予測が当る確率は 20 ～ 25 %と推定されている。このような予測が再び適中すれば、かなり有意なものと考えることができる。

(ホ) 大地震

大地震の繰り返し発生間隔が長いため、このような目的に合うデータを得ることは困難である。幸いに土佐室津では港役人によって潮位測定がされており、過去の南海道地震の際の隆起量を知ることができる。宝永（ 1707 年）の地震で 150 cm、安政（1854年）の地震で 120 cm、（今村、 1930 ）、昭和（ 1946 年）の地震で

115 cm（沢村、1953）といわれている。

しかし、宝永の地震の場合は、地震後の測定は宝暦九年に行なわれている。（宝暦は宝永の誤りかとも思われるが、年号は正徳となったため、宝永九年は存在しない。）これは地震から52年後の測定であり、沈降速度5～7mm／yr（国土地理院、1972）を用いれば、52年間に26～36cm沈降したものと思われる。よって宝永の地震の室津での隆起量は180cm程度と考えた方が良いであろう。

隆起量と時間間隔との関係を第5図に示した。標準偏差推定値はモデルAで5年、Bで47年、推定分散値の比は86.8となり、モデルAの方がより良く合っている。$F_{0.05}(2,1)=199.5$，$F_{0.10}(2,1)=49.5$であるから、信頼度95％ではバラツキの違いは有意ではないが、90％で有意となる。10回に1回の誤りを恐れずにいうならば、モデルAの方がBより良く合っているといえる。

ただし、ここで用いた値のもつ誤差を考慮に入れる必要がある。特に安政の地震の隆起量は、測定時が明らかではなく、測定単位も尺（宝永地震の場合は寸まで）であるから、一番不正確であると考えられる。昭和地震の直後にみられたような沈降（回復運動）が安政の地震直後に起きたかどうか、その沈降量が前記の値に含まれているかどうかも問題である。このような点を考慮するならば、モデルAに対する標準偏差推定値5年は、測定値のもつ誤差よりも小さく求まっているといえよう。

このような誤差に関する考慮を一応除外し、昭和地震の隆起量を115cmとして、機械的に次の地震までの年数を求めれば、92年となる。t分布を用いて信頼区間を推定すると、信頼度90％で次の地震は2038±36年で起ることになる。時間巾が36年と大きくなるのは標本数が少いので標準偏差推定値のバラツキが大きいためである。

次に、宝永地震と安政地震の時の隆起量のみから昭和地震の発生年を予測してみると、1952年となる。誤差は6年であり、この値も測定値の精度から予想される誤差よりも小さい。

4. 東海地域の地殻変動

前節で概してモデルBよりもモデルAの方が実際のデータに良くあてはまる傾向がみられた。現実はより複雑であり、AB両極端のモデルにはあてはまらず、その中間にあるのであろう。しかし、モデルAにより近いように思われる。モデルAは本来発生時の予測が可能なモデルであり、長期的予測として、モデルBに基づく場合より時間巾を狭めることが原理的に可能である。しかし、用いるデータの精度が十分でないために制約を受けることは前に示した通りである。以下、東海地域のデータについて考えてみる。

(イ) 宝永地震時の隆起量

今村（1943）によれば、この地震による御前崎での隆起量は110 cmであるという。これは穿孔貝の孔の行列が平均海水面上50 cm（安政の地震によるものと考える）と160 cmとにあることに依っている。しかし、単に 160−50 という計算では宝永から安政の地震までの沈降分が無視されている。仮に5 mm／yr（佐藤、1977）の沈降速度を仮定すれば、宝永地震の隆起量は、ほぼ180 cmとなる。ただし宝永地震の直前から、安政地震の直前までに110 cmの隆起があったとすると、その隆起速度は地形資料から得られる値より一桁大きくなってしまう。一段上の穿孔貝の孔の列を宝永地震によるものとするのは無理があるかもしれない。

御前崎西南西25 kmの横須賀では宝永の地震によって土地が隆起し、城下の良港が廃港となった。今村によると、現在の水田面の平均海水面上の高さとして、石津の北2尺、丸池3尺、御城前4.5尺とされている。しかし、これらの土地が宝永地震前にどのような高度にあったのか明らかではない。仮に海水面上にあったものとして、沈降速度を4 mm／yr と仮定すると、宝永および安政両地震による隆起量の合計は、それぞれ150、180、230 cmとなる。安政地震による隆起量を仮に80～90 cmとすると、宝永地震によるそれは、それぞれ、60～70、90～100、140～150 cmとなる。

(ロ) 安政地震時の隆起量

御前崎では"3～4尺"（静岡県地震報告其二、羽鳥、1976）隆起したと考えられる。なお羽鳥は1 m、石橋（1977）は0.8～1.2 mとしている。大浜（横須賀の東南東約10 km）では"およそ3尺"（同報告）である。

(ハ) 平均隆起速度および平均沈降速度

これらは瀬野（1977）の $\overline{v}_{up}$、$\overline{v}_{sub}$ にそれぞれ相当する。佐藤（1977）によれば御前崎から駿河湾西岸で、$\overline{v}_{sub}$ = 5 mm／yrである。瀬野は4～6 mm／yr を用いている。$\overline{v}_{up}$ は沼面高度より（垣見、1977）1.6 mm／yr、瀬野は0.6～1.0 mm／yrとしている。

(ニ) モデルAのあてはめ

宝永地震の隆起量は御前崎・横須賀どちらの場合も十分信頼できる値とはいい難い。このため南海道地震の場合のような推定は困難である。仮に、御前崎で宝永180 cm、安政120 cmを用いれば、T = 98年となる。横須賀で宝永140 cm、安政90 cmとするとT = 94年となる。どちらの場合も安政地震以後の経過年数123年よりもかなり

短い値となってしまう。横須賀における宝永地震の隆起量を90cmとすると、$T=147$年となる。どの値も根拠ある値とはいい難い。この問題については横須賀における隆起量をより確実に推定することが一つの重要なポイントとなる可能性がある。

宝永の地震の隆起量が使えない場合には、第4図、第5図にみられる直線の傾きを地形・測地資料から推定する他はない。その試みはすでに瀬野(1977)、垣見(1977)によってなされている。モデルAに基づく場合には、V_A(瀬野、1977)として安政地震の隆起量を与えればTは、来るべき地震と安政地震との時間間隔を与える。垣見は$V_A=1.2$ mを与え、御前崎の沼面高度より$T=182$年を得た。瀬野は$V_A=1.2$ mを与え、$T=150\sim300$年を得た。ただし安政地震の際の御前崎の隆起量が1mであれば、上記の値は2割程度小さく見積る必要がある。

5. 問題点とまとめ

(イ) 問題点

モデルAがどのような場合に成り立つのかを知る必要がある。果して集合効果によるものかどうか、隣のブロックでの運動の影響はどうかなどである。また、プレート間の運動のうち地震の受け持つ量が小さい場合、果してモデルAが成り立つかどうか疑わしい。

(ロ) まとめ

地震の繰り返し発生の簡単なモデルとして2つの極端を考えることができる。それは静止摩擦一定の場合と動摩擦一定の場合とである。現実のデータに適用すると静止摩擦一定のモデルの方がよく合う傾向がある。このモデルをあてはめて将来の地震発生時を予測するには少くとも過去2回の地震による同一場所での変位量を知る必要がある。南海道地震の場合には隆起量の推定値の持つ誤差よりもみかけ上精度良く昭和の地震の発生時が予測された。しかし、東海地震の場合には、宝永の地震時の隆起量が精度良く推定されていないため、現状では測地・地形資料にもとづく議論に止まらざるを得ない。例えば、横須賀における宝永と安政の両地震時の隆起量を精度良く求めることができれば、東海地域の地震発生時の長期予測に役立つ可能性がある。

〔謝辞〕南海道地震の発生間隔がモデルA的であることを指摘されたのは津村助教授であり、この小論は同助教授との数年前の会話に多く負っている。ここにお礼を申し上げる。

文　　献

Brace, W. F., 1972, *Tectonophysics* **14** 189−200

Bufe, C. G., P. W. Harsh, and R. O. Burford 1977, *Geophys Res Lett.*, **4** 91−94

国土地理院 1972, 地震予知連絡会会報 **7** 45−46

羽島徳太郎 1976, 地震研究所彙報 **51** 13−28

今村 明恒 1930, 地震 **2** 326−328

今村 明恒 1943, 地震 **15** 215−229

石橋 克彦 1977, 地震予知連絡会会報 **17** 126−132

垣見 俊弘 1977, 地震予知連絡会東海部会資料

Kanamori, H., and D. L. Anderson 1975, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **65** 1073−1095

King, C., 1975, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **65** 245−259

King, C., R, D. Nason, and D. Tocher. 1973, *Phil. Trans. R. Soc. London, A.*, **274** 355−360

Rikitake, T., 1974, *Tectonophysics* **23** 299−312

佐藤 裕 1977, 地震予知連絡会地域部会報告 **1** 19−27

沢村 武雄 1953, 高知大学学術研究報告 **2** NO.15, 1−46

瀬野 徹三 1977, 地震 第2輯 **30** 25−42

Talwani, P., and R. L. Kovach, 1972, *Tectonophysics*, **14** 245−256

宇津 徳治 1972, 地震予知連絡会会報 **7** 7−13