

# αトラック法による活断層探査とその連続観測による地震予知

加藤 完 (環境地質部)  
Kan KATOH

## 1 はじめに

αトラック法による活断層探査とは 活断層の存在を探査し かつその活断層を評価する地球化学的手法の一つである。地下基盤岩中のウラン崩壊によって生じるラドンは気体であるため断層などの割れ目を通して地表部へ移動拡散すると考えられる。本手法は被覆土壌中のラドンの相対濃度分布を ラドンが放射するα線に感度を有する 硝酸セルローズフィルムにて測定し トラック (飛跡) 密度 (トラック数/cm<sup>2</sup>・day) のピークから活断層の位置を推定しようとするものである (第1図)。

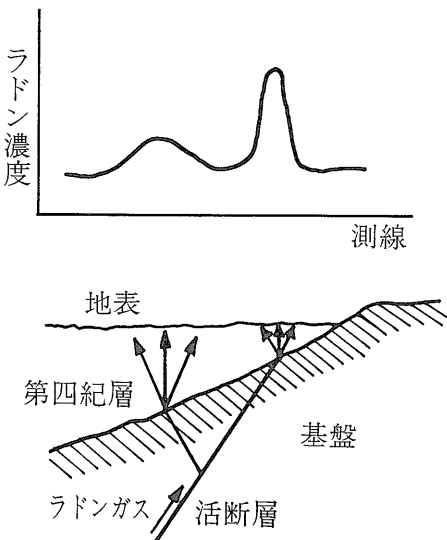
従来 活断層調査は地形学的 及び地質学的手法によって行われてきた。しかし これらの手法では ある断層が活断層であるか否か すなわち 第四紀後期における活動を確証し 活動度を求めることが不可能な場合がある。また 断層変位地形と組織地形との識別が困難な場合が少なくない。このような場合には αトラック法が活断層の分布やその活動度を解明するのに重要な手法といえよう。

また 活断層周辺に設置された定点における連続観測から ラドン濃度の変動を経時的に観測し それらの結果からその断層の活動の状態の評価 あるいは地震との対応から地震予知の一手法としての可能性の検討を行うことができよう。

## 2 粒子トラック法の歴史

粒子トラック法の歴史をみると 1896年に A. H. Becquerel が写真乾板の現像黒化によって放射線の入射を発見した。C. T. R. Wilson は水蒸気やアルコールなどの飽和蒸気の断熱膨張冷却により生じた 過飽和蒸気中をα線やβ線などの荷電粒子が通過すると その電離作用で生じたイオンのまわりに液滴を生じ その粒子トラックが観察できることを見出し 1911年にウイルソン霧箱が発表された。一方 気体より密度の高い液体の過飽和現象を利用すれば より高エネルギーで飛程の長い粒子の観察ができると考え 1952年に D. A. Glaser により泡箱が発表された。さらに密度の大きいトラック検出器として固体を利用することが考えられ 1936年ごろより C. F. Powell が写真会社と協力して原子核乾板を開発した。P. B. Price と R. M. Walker は各種の雲母を試料として化学的エッチングにより トラックを光学顕微鏡で観察を可能にし 簡便有用なトラック法の発展の道を拓いた。その発展のなかで 1963年ガラスや合成樹脂などのような非晶質固体でも エッチングでトラックが観察されることを R. L. Fleischer と P. B. Price は研究し 硝酸セルローズや酢酸セルローズのようなプラスチックによって α線のような軽粒子によるトラックでもエッチング法で観察可能となった。

そして 短年月にめざましく各分野への応用範囲を広げ 原子核物理 宇宙物理 原子力工学 保健物理 地質学 考古学など各方面に広く利用されるようになった (阪上・1973)。地質学分野では 硝酸セルローズフィルムを使用して ラドンが放射するα線を測定することにより ウラン探査・地下水探査・地沁り調査・活断層探査・地震予知などに利用されるようになってきた。



第1図 活断層とラドンガス発散機構模式図

### 3 測定原理

#### 3-1 荷電粒子と物質の相互作用

荷電粒子と検出材とは相互作用によって 荷電粒子はエネルギーを失い 検出材へそのエネルギーを付与する。それは阻止能  $(-dE/dx)$  として 一般に次式の内容をもつ。

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_e + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_n + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_r$$

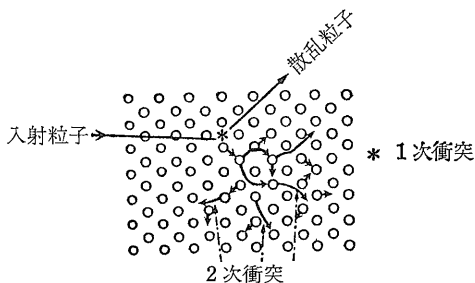
第1項  $(-dE/dx)_e$  は電子的過程によるもので 電子励起 第一次イオン化 さらにそれによる二次的に生ずる高速電子  $\delta$  線の二次的イオン化などによるエネルギーの損失付与を示す。

第2項  $(-dE/dx)_n$  は入射粒子と原子核の弾性衝突による項である。すなわち検出材中の原子が直接の変位をおこすことによるもので 原子阻止能とも呼ばれる。

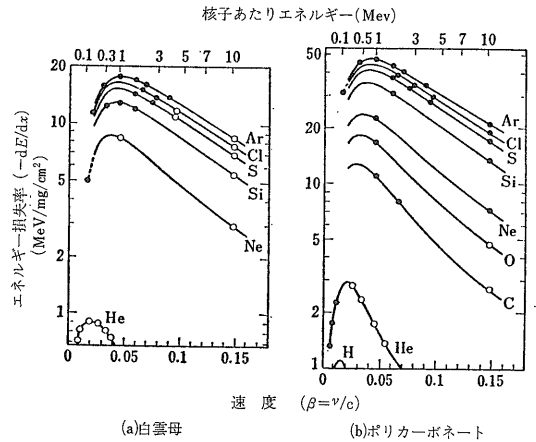
第3項  $(-dE/dx)_r$  は制動放射やチエレンコフ放射など 輻射過程によるものである。前者の強さは入射粒子の質量の二乗に逆比例するので電子のような軽粒子の場合とはかく それより重い粒子については問題にならない。後者も 粒子速度が媒体中の光速をこえる場合におこる現象なので 超高速粒子でないかぎりその寄与は少ない (阪上・1973)。

#### 3-2 トラック生成機構としきい値

前述式の値 とくに主たる役割となる第1及び第2項の大きさがどの程度以上ならば 固体検出材に後でエッチングして検出可能となる損傷を与えるかが問題となる。ただ注意すべきは 前述式の阻止能の値はあくまでも検出材との相互作用による荷電粒子そのもののエネルギー損失であることである。最終的には 固体検出材の各局所がどの程度のエネルギーをうけとり その値がいくら以上ならば損傷を受け 後でエッチングで検出可能なトラックを生ずるかということが 生成機構の関連ではとくに重要となる。



第3図 入射粒子の弾性衝突 (阪上・1973)



第2図 各種粒子のエネルギーとエネルギー損失率 (R. L. Fleischer, P. B. Price and R. M. Walker・1964)

入射荷電粒子の種類をかえ 雲母やポリカーボネートを検出材として エッチングトラック生成有無の実験が行われた。第2図 (a) (b)はこれらの実験結果をそれぞれの荷電粒子についての  $(-dE/dx)$  の理論的計算値の曲線との対応で示したものである。ある臨界値以上の場合 (黒丸) はトラックが記録されるが、それ以下 (白丸) では認められない。しかし これも雲母に入射したNeや ポリカーボネートに入射した  $\alpha$  粒子(He)の例などにみられるよう 明快なトラック生成の有無の判断の基準にならない。  $(-dE/dx)$  で示されるエネルギーを荷電粒子が失っても それが検出材中に広範囲に分散されれば トラックとなる局所的損傷をつくるにはエネルギーが不十分なことがある。

そこでこのように エネルギーの局所的付与の過程も考慮した説がトラック生成機構として提唱された。

#### 1) Displacement cascade (Spike) 説

入射粒子と検出材物質中の原子との直接衝突で 原子が格子点から叩き出され それがさらに他の原子を叩き出し 損傷がおこるといのである (第3図)。

#### 2) Electron thermal spike 説

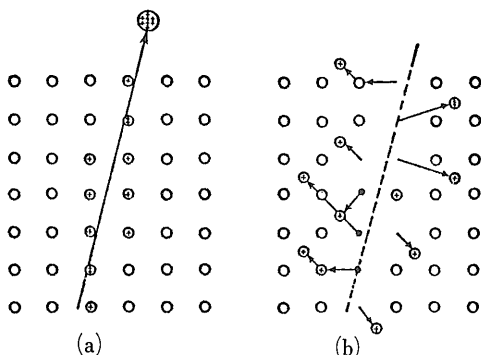
荷電粒子による電離を主とする電子的過程 すなわち前述式の  $(-dE/dx)_e$  によって検出材固体に付与されたエネルギーが その結晶格子に移り 局部的に高温状態が生まれ トラックが生成される。

#### 3) Ion explosion 説

正荷電粒子が結晶格子中を通過すると はげしいイオ

ン化によって各原子が核外電子をもぎとられて裸の高荷電イオンとなり、それが相互にクーロン力で爆発的に反発し、格子中に損傷を生ずるといのである (第4図)。

この説では、入射荷電粒子の通路に沿って、単位長さあたりに生成するイオンの数、すなわち一次イオン化率 ( $J=dI/dx$ ) を固体内の損傷生成の判断基準とする。第5図に、各種物質について実験より求められて粒子検出の下限の  $J_c$  値 (臨界値・しきい値) を示した。これからわかるように、硝酸セルロースのようなプラスチックでは感度が良く、 $\alpha$  粒子トラックを検出しうる。これに対し雲母は  $\alpha$  粒子などの軽粒子には感ぜず、それらがバックグラウンドのトラックを作らない。一方、重粒子の核分裂片ならば、 $J$  が十分に大きく  $J_c$  値以上となるので、損傷をうけ、その有効な検出器となる。



第4図 入射荷電粒子によるイオン化(a)とその相互反発(b) (阪上・1973)

#### 4) Direct ionization damage 説

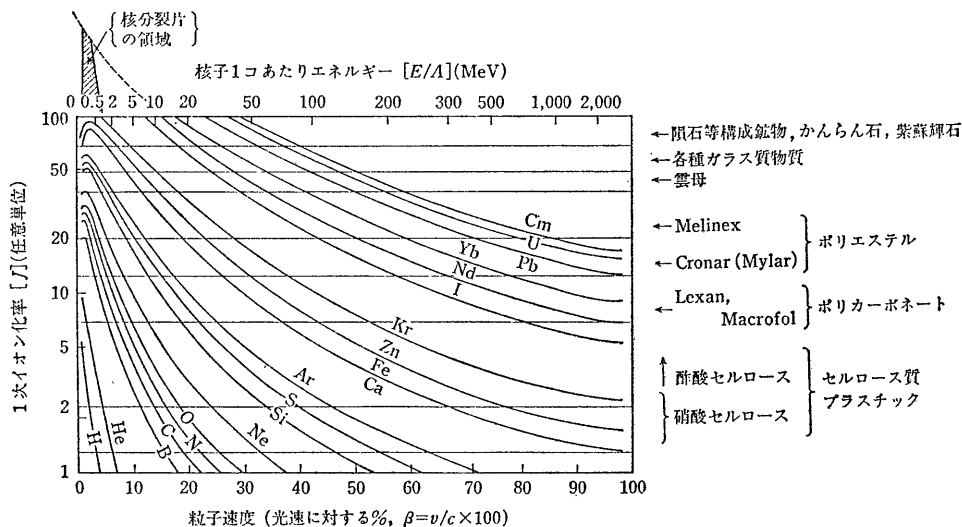
プラスチックなどの非晶質重合体については、必ずしも前説は合理的に説明できない。これらの固体では化学結合が弱いので、分子のイオン化、励起によっても結合の部分的切断が直接おこり、切断箇所がエッチング剤に対する活性の中心となって、敏感にエッチングされ、トラックが観察されるとした。

#### 5) 局所エネルギー損説

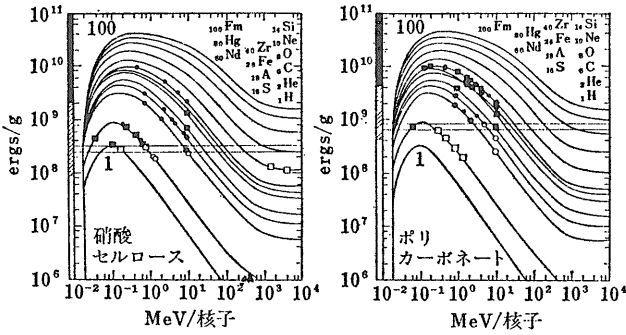
Electron thermal spike 説の機構で、一時的に考慮した  $\delta$  線によるエネルギー付与が、入射荷電粒子の通路の軸からある距離 (ほぼ  $20\text{\AA}$  と仮定) の範囲では、トラック形成に有効に作用する (第6図)。

#### 6) Restricted energy loss rate (REL) 説

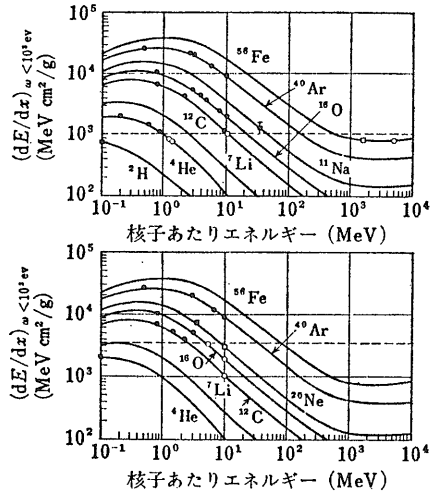
入射荷電粒子が、その通路にそって失うエネルギーのうち、一定のエネルギー以上の  $\delta$  線は、局所的な損傷をおこさないが、それより低エネルギーの  $\delta$  線については、通路近くで集中的にエネルギーを失うので、トラック生成に寄与するとして計算する。トラック生成に寄与する  $\delta$  線のエネルギー上限として  $1\text{ keV}$  を仮定し、各種の入射粒子の種々のエネルギーについて REL を計算し、それを実験結果との対応で示したものが第7図である。硝酸セルロースでは  $1.1 \times 10^8 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$  以上の REL でトラック生成がみられ、それ以下ではみられぬという規準、つまり臨界 REL 値が設定できる (阪上・1973)。



第5図 各種入射粒子のエネルギーと一次イオン化率及び各種絶縁体のトラック形成しきい値 (阪上・1973)



第6図 硝酸セルロース及びポリカーボネートにおける重イオンの核子当りのエネルギーに対する局所エネルギー損の変化とその曲線上に示された飛跡生成の有無 (R. Katz, E. J. Kobetich · 1968)



第7図 硝酸セルロース (上図) 及びポリカーボネート (下図) における重イオンの核子当りのエネルギーに対するRELの変化とその曲線上に示されたトラック生成の有無 (阪上 · 1973)

### 3-3 トラックに影響を及ぼす外的条件

#### 1) 温度

加熱によりトラックはまず短く小さくなり ついに消失して数が少なくなる いわゆる熱アニーリングによるトラック消滅がおこる。硝酸セルロースではエッチング前 85°C で一時間加熱するとトラックは消滅する。

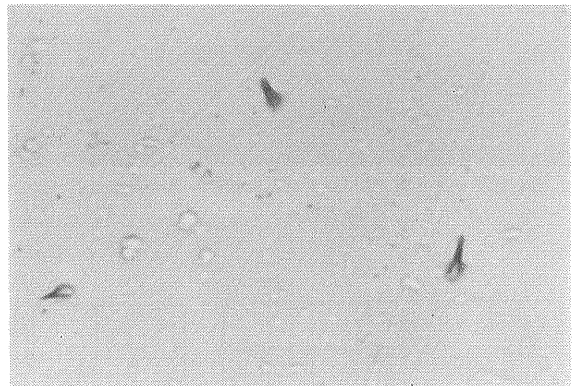
#### 2) 気体など化学的物質の影響

硝酸セルロースではα粒子など荷電粒子を照射するさい酸素ガス雰囲気中で行うと真空中や不活性ガス中のそれに比し著しく感度 エッチング速度が増加する。このことは酸素を空気に変えてもみとめられ水蒸気の内容も程度は少ないが影響を及ぼす。これは荷電粒子通過経路に沿ってつくられたプラスチックの分解生成物が酸素や水・過酸化水素などの二次反応で酸化などをうけて損傷が固定化され またエッチング溶液に溶解しやすくなるためと考えられる (阪上 · 1973)。

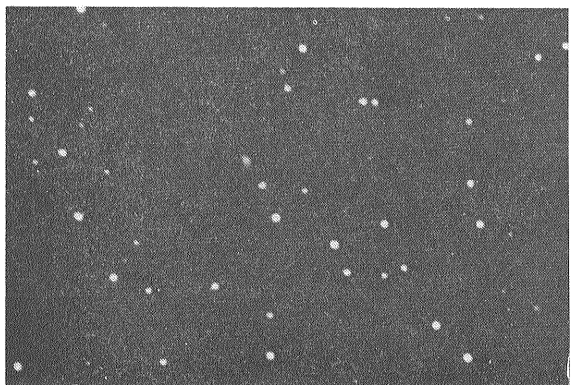
### 3-4 エッチング

エッチング過程は三段階に進むと考えられる。まず潜在トラック幅に相当するとみられる20Å (天然雲母) の部分がすみやかに反応する。つぎにエッチング反応生成物と新鮮な化学試薬の入れかわりに要する時間 (潜伏時間 材質により異なる) を経る。その後 ほぼ一定速度 (V<sub>T</sub>) で 潜在トラック周辺の損傷部分がエッチングされ拡大する。そして0.1 μm 以上にトラック幅が拡大するとトラックは可視光線に対してより散乱の中心となり 黒い像として通常の透過光の光学顕微鏡によって見えるようになる (第8・9図)。

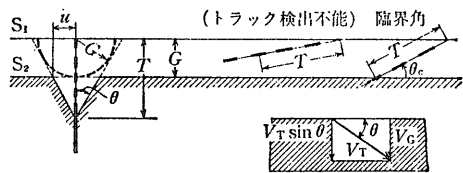
化学試薬によってトラックがエッチング拡大 (V<sub>T</sub>) するさい 検出材全体もその表面よりそれぞれの材質に



第8図 硝酸セルロースフィルム (コダック製 CA80-15) 上のエッチピット 直径 3 ± μm 丸い部分がフィルムの表面



第9図 硝酸セルロースフィルム (コダック製 LR 115-Type II) 上のエッチピット 直径 7 ± μm コーティング部を完全に蝕刻している



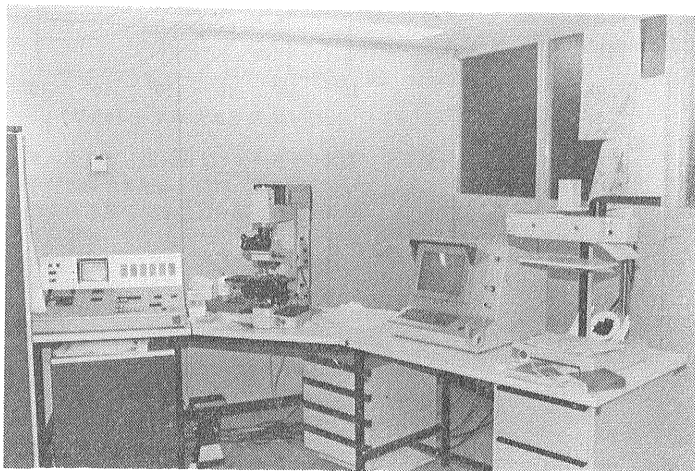
$G = V_G \cdot t$        $S_1$ : もとの表面  
 $T = V_T \cdot t$        $S_2$ : エッチング後の表面  
 $u$ : トラック幅の半径

第10図 エッチング速度と臨界角 (阪上・1973)

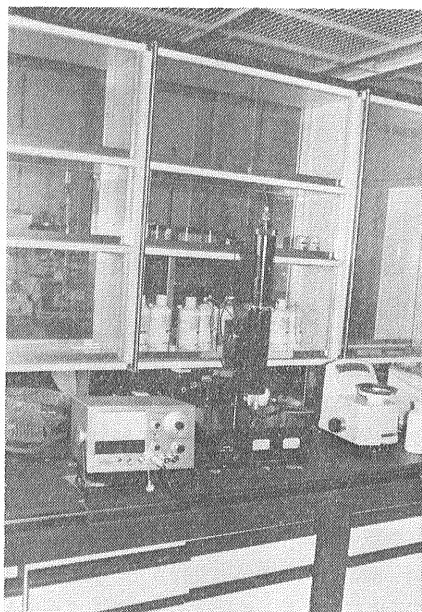
よってきまった速度 ( $V_G$ ) でエッチングされる (第10図)。このためある臨界角  $\theta_c (= \sin^{-1} V_G / V_T)$  より低角度で入射した粒子のトラックは消滅して観察されず 検出効率もこの要素によって左右される (阪上・1973)。

### 3-5 トラックの観察と計数

トラックの計数は通常 トラック密度が  $10^2/\text{cm}^2$  程度



第11図 イメージアナライザー (Leitz T. A. S)



第12図  $\alpha$  トラック測定装置 (富士電機製)

U	$^{238}\text{U}, \text{U}_I$ (ウラン I) $4.51 \times 10^9 \text{ y}$	$^{234}\text{U}, \text{U}_{II}$ (ウラン II) $2.46 \times 10^5 \text{ y}$	
Pa	$^{234}\text{Pa}, \text{Pa}_{II}$ (パラウミウム) $4.51 \times 10^9 \text{ y}$	$^{234\text{m}}\text{Pa}, \text{Pa}_{III}$ (パラウミウム m) $1.16 \times 10^{-3} \text{ y}$	$^{230}\text{Th}, \text{Th}_{II}$ (チロウミウム) $1.16 \times 10^4 \text{ y}$
Th	$^{232}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $1.4 \times 10^{10} \text{ y}$	$^{230}\text{Th}, \text{Th}_{II}$ (チロウミウム II) $1.16 \times 10^4 \text{ y}$	
Ac		$^{226}\text{Ra}, \text{Ra}_I$ (ラジウム I) $1622 \text{ y}$	
Ra		$^{226}\text{Ra}, \text{Ra}_I$ (ラジウム I) $1622 \text{ y}$	
Fr		$^{223}\text{Fr}, \text{Fr}_I$ (フランシウム I) $21 \text{ m}$	
Rn		$^{222}\text{Rn}, \text{Rn}_I$ (ラドン I) $3.825 \text{ d}$	
At		$^{218}\text{At}$ (アトニウム) $\sim 2 \text{ s}$	
Po		$^{218}\text{Po}, \text{Po}_A$ (ポロニウム A) $3.05 \text{ m}$	$^{218}\text{Po}, \text{Po}_B$ (ポロニウム B) $3.1 \text{ m}$
Bi		$^{214}\text{Bi}, \text{Bi}_I$ (ビスマuth I) $19.7 \text{ m}$	$^{214}\text{Bi}, \text{Bi}_I$ (ビスマuth I) $19.7 \text{ m}$
Pb		$^{214}\text{Pb}, \text{Pb}_I$ (鉛 I) $26.8 \text{ m}$	$^{214}\text{Pb}, \text{Pb}_I$ (鉛 I) $26.8 \text{ m}$
Tl		$^{210}\text{Tl}, \text{Tl}_I$ (タリウム I) $1.32 \text{ m}$	$^{210}\text{Tl}, \text{Tl}_I$ (タリウム I) $1.32 \text{ m}$

ウラン系 (4n+2) 系

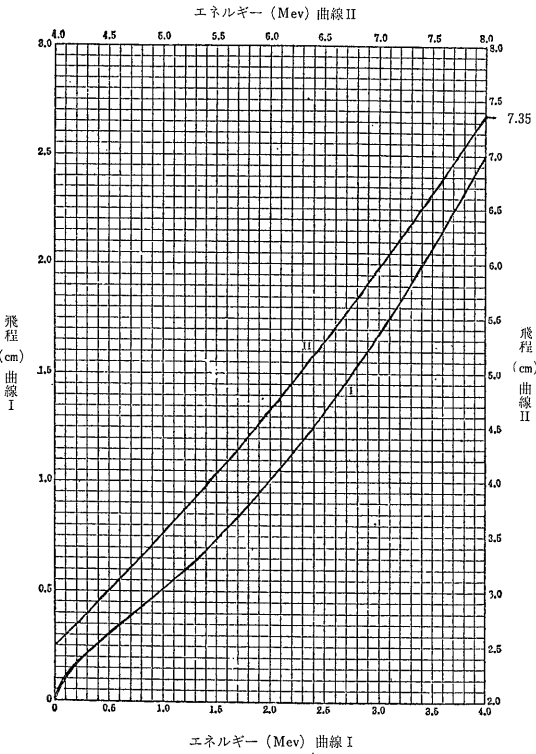
Th	$^{232}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $1.4 \times 10^{10} \text{ y}$	$^{228}\text{Th}, \text{Th}_{II}$ (チロウミウム II) $1.91 \text{ y}$	
Ac	$^{228}\text{Ac}, \text{Ac}_I$ (アクチニウム I) $6.13 \text{ h}$	$^{228}\text{Pa}, \text{Pa}_I$ (パラウミウム I) $3.82 \text{ d}$	$^{228}\text{Th}, \text{Th}_{II}$ (チロウミウム II) $1.91 \text{ y}$
Ra	$^{228}\text{Ra}, \text{Ra}_I$ (ラジウム I) $5.75 \text{ y}$	$^{228}\text{Ac}, \text{Ac}_I$ (アクチニウム I) $6.13 \text{ h}$	$^{228}\text{Th}, \text{Th}_{II}$ (チロウミウム II) $1.91 \text{ y}$
Fr		$^{223}\text{Fr}, \text{Fr}_I$ (フランシウム I) $21 \text{ m}$	
Rn		$^{222}\text{Rn}, \text{Rn}_I$ (ラドン I) $3.825 \text{ d}$	
At		$^{218}\text{At}$ (アトニウム) $\sim 2 \text{ s}$	
Po		$^{218}\text{Po}, \text{Po}_A$ (ポロニウム A) $3.05 \text{ m}$	$^{218}\text{Po}, \text{Po}_B$ (ポロニウム B) $3.1 \text{ m}$
Bi		$^{214}\text{Bi}, \text{Bi}_I$ (ビスマuth I) $19.7 \text{ m}$	$^{214}\text{Bi}, \text{Bi}_I$ (ビスマuth I) $19.7 \text{ m}$
Pb		$^{214}\text{Pb}, \text{Pb}_I$ (鉛 I) $26.8 \text{ m}$	$^{214}\text{Pb}, \text{Pb}_I$ (鉛 I) $26.8 \text{ m}$
Tl		$^{210}\text{Tl}, \text{Tl}_I$ (タリウム I) $1.32 \text{ m}$	$^{210}\text{Tl}, \text{Tl}_I$ (タリウム I) $1.32 \text{ m}$

チロウミウム系 (4n) 系

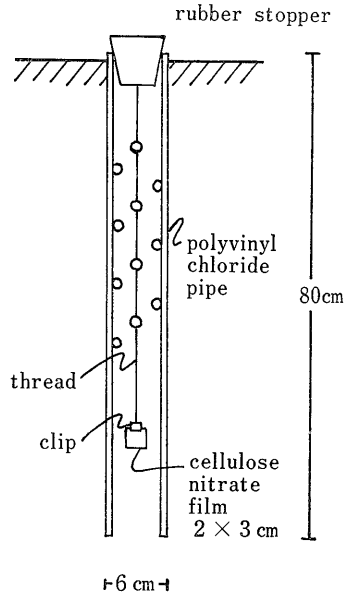
U	$^{235}\text{U}, \text{U}_{III}$ (ウラン III) $7.1 \times 10^8 \text{ y}$	$^{231}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $25.5 \text{ h}$	$^{231}\text{Pa}, \text{Pa}_I$ (パラウミウム I) $3.27 \times 10^4 \text{ y}$
Pa	$^{231}\text{Pa}, \text{Pa}_I$ (パラウミウム I) $3.27 \times 10^4 \text{ y}$	$^{231}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $25.5 \text{ h}$	$^{231}\text{Pa}, \text{Pa}_I$ (パラウミウム I) $3.27 \times 10^4 \text{ y}$
Th	$^{231}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $25.5 \text{ h}$	$^{231}\text{Pa}, \text{Pa}_I$ (パラウミウム I) $3.27 \times 10^4 \text{ y}$	$^{231}\text{Pa}, \text{Pa}_I$ (パラウミウム I) $3.27 \times 10^4 \text{ y}$
Ac		$^{227}\text{Ac}, \text{Ac}_I$ (アクチニウム I) $21.8 \text{ y}$	$^{227}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $18.1 \text{ d}$
Ra		$^{226}\text{Ra}, \text{Ra}_I$ (ラジウム I) $1622 \text{ y}$	$^{226}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $1.91 \text{ y}$
Fr		$^{223}\text{Fr}, \text{Fr}_I$ (フランシウム I) $21 \text{ m}$	$^{223}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $1.91 \text{ y}$
Rn		$^{222}\text{Rn}, \text{Rn}_I$ (ラドン I) $3.825 \text{ d}$	$^{222}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $1.91 \text{ y}$
At		$^{218}\text{At}$ (アトニウム) $\sim 2 \text{ s}$	$^{218}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $1.91 \text{ y}$
Po		$^{218}\text{Po}, \text{Po}_A$ (ポロニウム A) $3.05 \text{ m}$	$^{218}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $1.91 \text{ y}$
Bi		$^{214}\text{Bi}, \text{Bi}_I$ (ビスマuth I) $19.7 \text{ m}$	$^{214}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $1.91 \text{ y}$
Pb		$^{214}\text{Pb}, \text{Pb}_I$ (鉛 I) $26.8 \text{ m}$	$^{214}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $1.91 \text{ y}$
Tl		$^{210}\text{Tl}, \text{Tl}_I$ (タリウム I) $1.32 \text{ m}$	$^{210}\text{Th}, \text{Th}_I$ (チロウミウム I) $1.91 \text{ y}$

アクチニウム系 (4n+3) 系

第13図 天然放射性元素の壊変系列 (木村・1960)



第14図 α 粒子の空気中における飛程とエネルギーとの関係 (木村・1960)



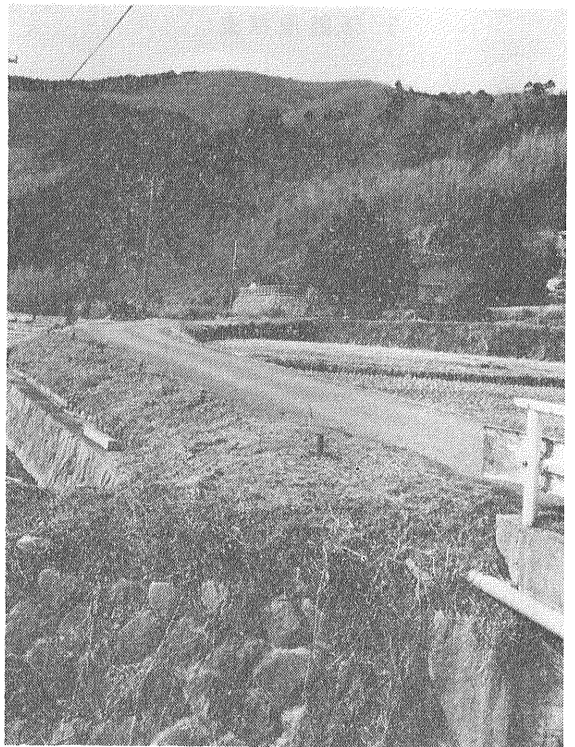
第15図 観測孔模式断面図

あるいはこれ以下の場合には 光学顕微鏡下で計数器でカウントする。トラック密度がそれ以上の場合には かなり面倒なので イメージアナライザー (画像処理装置) を用い ブラウン管上に種々の拡大率で示されるトラック像を 範囲を指定して その中の数を自動的に表示させる方法が行われる (第11図)。そのほか トラックの透過光量を光電子増倍管でうけ 直接増幅して電流値でトラック密度を読みとることも行われる (第12図)。

#### 4 測定方法

自然界では α 粒子は第13図のとおり ウラン・トリウム・アクチニウムの三つの嬗変系列及び自然放射性同位体から生ずる。それぞれの α 粒子の空気中における飛程とエネルギーとの関係は第14図のとおりである。α 粒子の最大エネルギーは  $^{212}\text{PoThC}'$  の 8.785 MeV でその飛程は約 8.6cm であるから 第15図のとおり 塩化ビニール管の孔無し部にフィルムを吊せばそれらの影響は無視できる。

また 気体であるラドンはウラン系列の  $^{222}\text{Rn}$  トリウム系列の  $^{220}\text{Rn}$  及びアクチニウム系列の  $^{218}\text{Rn}$  が存在す



第16図 観測孔配置図 細い塩ビ管は土壌ガス採取孔

る。しかしながら  $^{222}\text{Rn}$  以外は半減期が短かく  $^{219}\text{Rn}$  の自然界における存在は非常に少ないので  $^{222}\text{Rn}$  のみを考慮すればよいと考える。

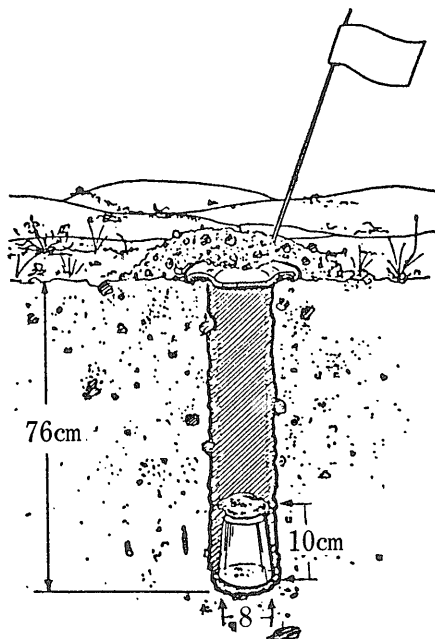
活断層探査の場合 断層を横切ると考えられる測線上に観測点を設定し 電動オーガーにて孔径 6 cm 深度 80 cm の観測孔を掘さくし 孔明塩化ビニール管を埋めこむ。硝酸セルローズフィルムは孔底の孔無し部に吊しラドンの  $\alpha$  線放射に曝露させ 一週間前後でこれを回収する (第15・16)。

なお フィルムのセットの方法は 第15図のとおり塩化ビニール管に吊す方法と 第17図のとおりプラスチック製のコップの中にフィルムをはり 土壌中に埋めこむ方法とがある。再現性のチェック及び連続観測ではフィルムの交換が容易である前者を使用している。

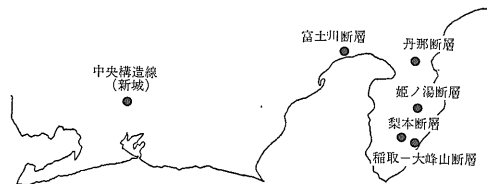
使用したフィルムは コダック製 CA80—15 と LR115—Type II である。回収したフィルムは水酸化ナトリウム溶液に 前者は30分間 後者は100分間浸してエッチングを行いトラックを拡大する。30分間の水洗後スライドガラス上にフィルムを置きカバーガラスで覆う。その後 フィルムに現われたトラックを光学顕微鏡にて計数し トラック密度 (トラック数/cm<sup>2</sup>・day) に換算して表示する。

### 5 活断層探査

地質調査所では1977年以来 地震予知研究の一環とし



第17図 観測孔模式断面図 (テラドックス パンフレット)



第18図 調査地位置図

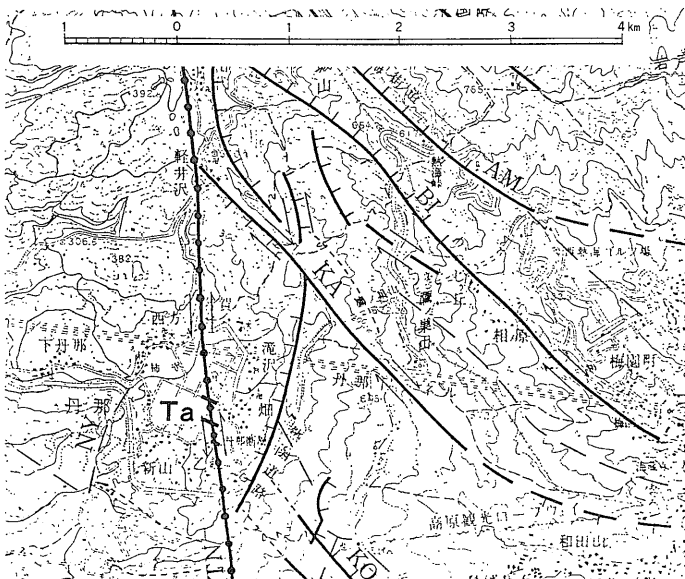
て 活断層を対象として  $\alpha$  トラック法による探査を行ってきた。その中で興味ある丹那及び梨本断層と中央構造線の例をあげて紹介する (第18図)。

#### 5-1 丹那断層

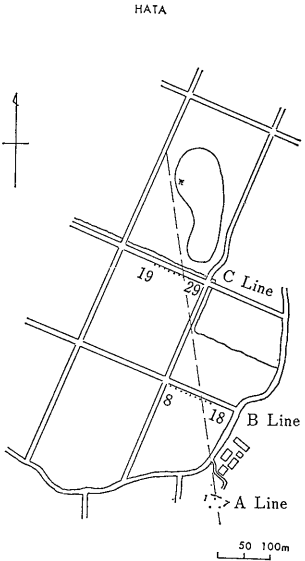
本断層及び後述する姫ノ湯断層は 1930年北伊豆地震 (M7.0) の時に 新たな変位を生じた丹那断層系に属する地震断層である。Ta 地点 (第19図) 付近における丹那断層の水平変位量は左ずれ2.5~3.5mに達する。垂直変位量は調査地付近が断層の蝶番部にあたるためゼロであり これより北側は東側隆起 南側は西側隆起である (松田・1972)。

観測孔は断層を横切る三測線上に A 測線では 2.5m 間隔で B 及び C 測線では 10m 間隔で 合計29孔設定した (第20図)。なお A 測線のすぐ南側には 文部省の立看板「天然記念物丹那断層」があり 断層のオフセットが保存されている。観測孔 No. 4 はその断層線上に位置している。

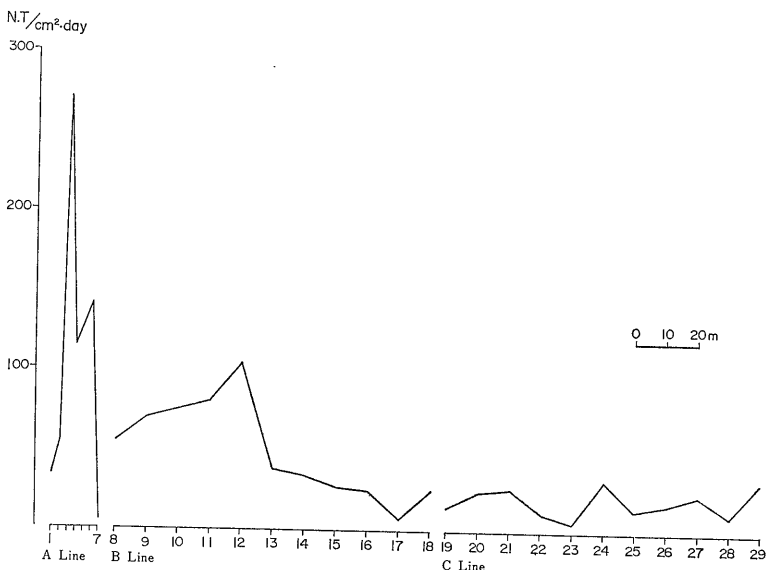
測定は 1979年12月に行われ その測定結果は第21図



第19図 丹那断層 (星野ほか・1978) と調査地点 Ta



第20図 調査地点 Ta における測線 A・B・C と観測孔配置図



第21図 調査地点 Ta における測線 A・B・C 上で観測されたトラック密度分布図

に示すとおりである。三測線上のトラック密度のピークを結ぶ線は伊豆半島活断層図に示された丹那断層の走向とほぼ一致する。しかし詳細にみると A 測線上のトラック密度のピークは地表に現われた断層位置 No. 4 から西側へ 2.5m 外れたところにある。B 及び C 測線上でもトラック密度のピークは地表に現われた断層線 (A 測線上の No. 4 と丹那盆地中央にある森の西縁を結ぶ

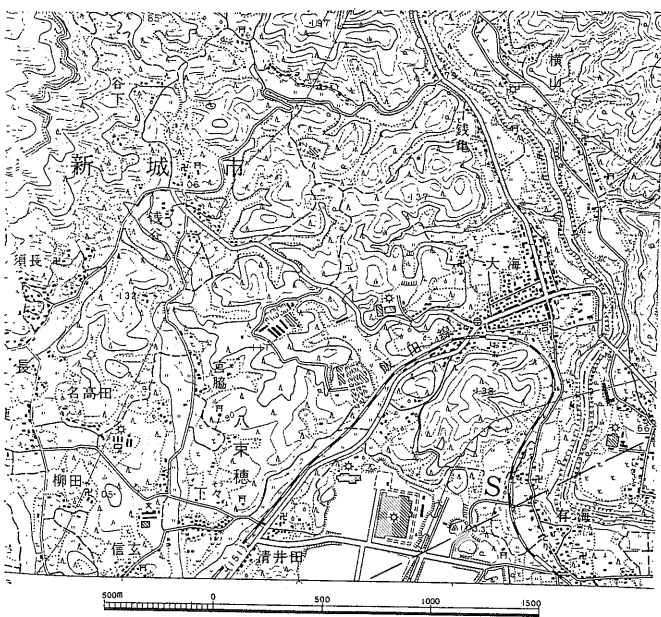
線) より西側へ 10 及び 20m 外れたところにある。丹那断層隧道工事誌 (1936) によれば C 測線北側で実施した丹那トンネル C 号試錐によって厚さ約 55m の湖成堆積物の存在が確かめられており B 及び C 測線はこの湖成堆積物上に位置している。また松田 (1972) によるとこの付近での断層面の傾斜は西へ 75~80 度である。これらの事実からラドンが断層面に沿ってあるところ

まで上昇しそこから垂直方向の経路を通して上昇するため地表において断層線より西側へピークが現われるものと考えられる。

A 測線におけるトラック密度は B 及び C 測線の上のそれに比べて高い値を示す。このことは A 測線は山地に位置し基盤が浅く B 及び C 測線は前述のように厚い湖成堆積物上にあるため基盤が深くラドンの上昇時間に差がありその間にラドンは 3.825 日の半減期で  $\alpha$  崩壊するため B 及び C 測線上のトラック密度は低い値を示すものと考えられる。

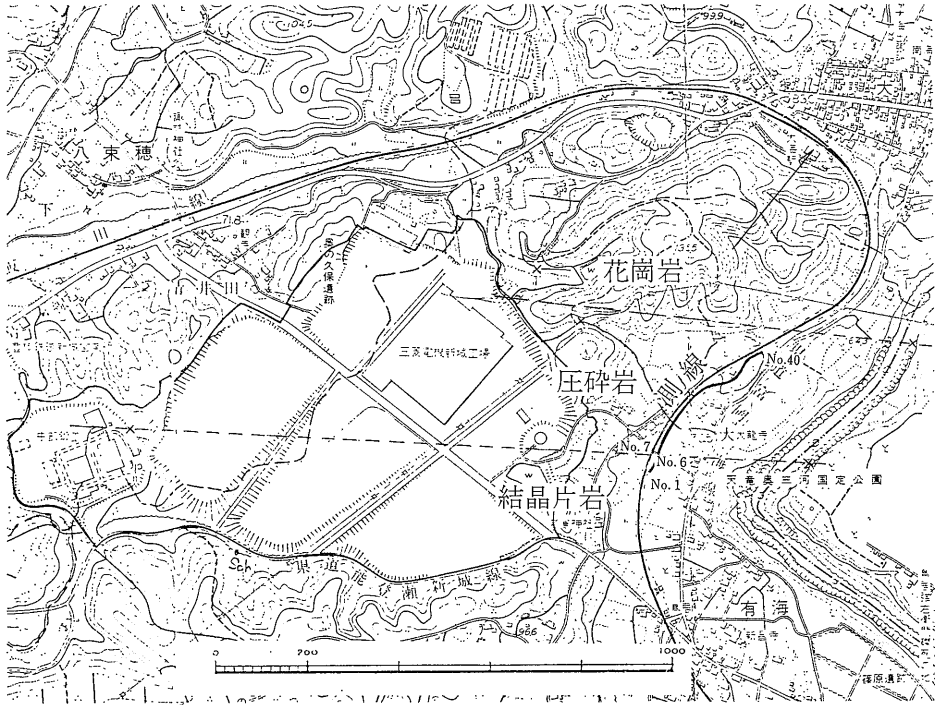
5-2 梨本断層

本断層は星野ほか (1978) によれば航空写真において線状構造として連続性が認められるが地表調査で断層面が観察できなかった推定活断層にあたる。本断層の調査は河津町荻の入 (第 22 図の N 地点) において荻の入川左岸河成段丘上で実施した。観測孔は川岸から山際



第22図 調査地点 S [この地図は 国土地理院発行の2万5千分の1地形図 (三河大野) を使用したものである]





第23図  
調査地点Sにおける  
測線と断層露頭

まで 45mの測線上に 5m間隔で10孔設定した。

測定は 地震予知研究の一環として 地震波速度変化に関する研究のため 地質調査所が1978年12月13日に実施した南伊豆爆破の前後に二回行い 測線上のトラック密度の分布と 爆破の前後におけるトラック密度の変化の有無についての検討を試みた。なお 爆破の規模は地震のマグニチュードに換算して1.8程度で 爆破点からN地点までの距離は約3kmである。

測定の結果は第23図にみられるように トラック密度のピークは二回とも川沿いの観測孔 No. 2 に現われ この点に断層が通っていることが推定された。しかしながら 爆破前後におけるトラック密度については 明瞭な変化は認められなかった。

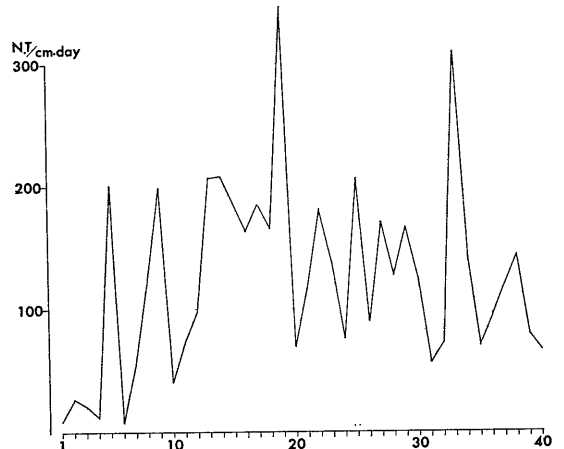
### 5-3 新城付近の中央構造線

西南日本を内帯と外帯に二分する中央構造線は 地帯構造上の大断層である。内帯側には 高温低圧の条件下で生じた領家帯の変成岩類や花崗岩類が広く発達し 調査地域ではこれらを覆って盆地状構造をもつ中部中新統の設楽層群がみられる。外帯側には 低温高圧の状態のもとで生じた三波川帯の結晶片岩類が分布する。

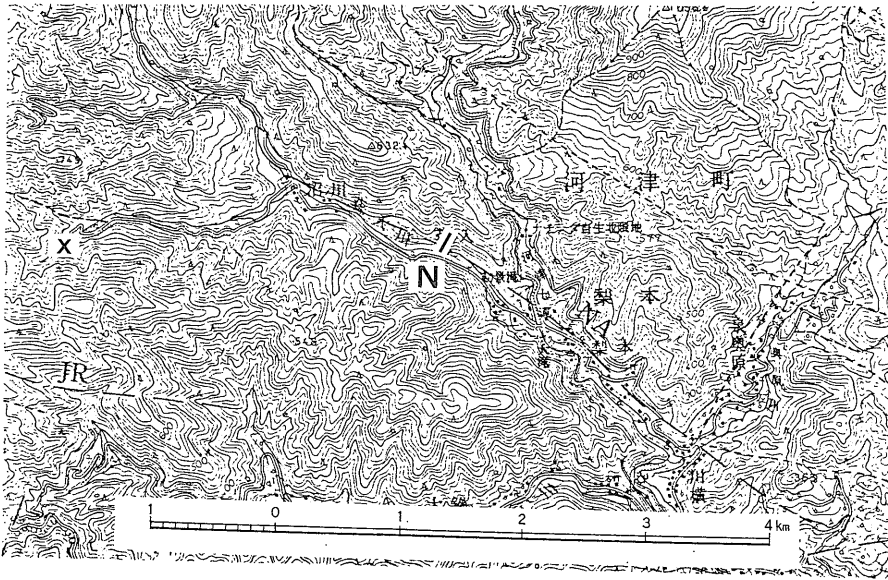
また 中央構造線に沿って圧砕岩帯がみられる。S地点(第24図)付近においては 中央構造線は段丘面や斜面を切断していないので その主な活動時期は第四紀中頃以前であったと思われる(岡田・1979)。

観測孔は結晶片岩と圧砕岩を横切る測線上に10m間隔で40孔設定した(第25図)。測定結果は第26図に示すとおり 観測孔 No. 1~No. 4 のトラック密度は No. 5~No. 40 のそれより低い値を示す。

豊川左岸の結晶片岩と圧砕岩との断層露頭と 中部鍛工裏のそれらの断層露頭を結ぶ線は No. 5 付近を通り 南側は結晶片岩北側は花崗岩起源の圧砕岩である(第25図)。金谷ほか(1980)によれば 各岩石・土壌に含まれるラジウム含有量と 放出率を合せ考えた場合の空气中へのラドン放出量は 花崗岩で最も大きい。これ



第24図 調査地点Sにおける測線で観測されたトラック密度分布図



第25図 梨本断層  
(星野ほか・1978)と  
調査地点N ×爆破地点

らの事実からトラック密度の差がみられる No. 5 付近に中央構造線が通っていることが推定される。

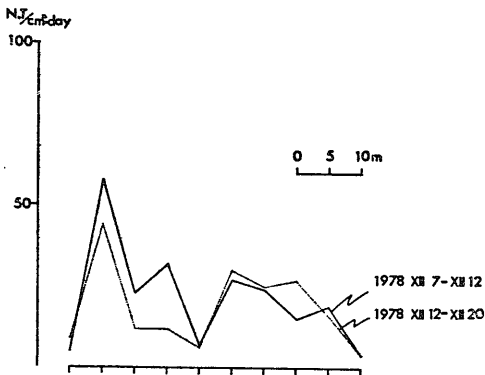
5-4 まとめ

αトラック法による活断層探査の可能性について総合的な検討を行った。その結果次のようなことが明らかになった。

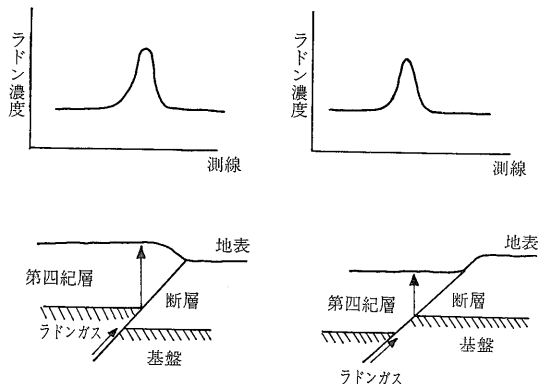
- 1) 調査したほとんど全ての活断層において 断層線上あるいはそれに近接してトラック密度のピークが現われた。そしていくつかの測線上のピークを結ぶ線は断層の走向線にほぼ一致する。このことから本方法が活断層探査及びそのマッピングの新しい手法として有効であることが明らかになった。
- 2) 断層面が傾斜する場合 その上盤側にトラック密度

のピークが現われる傾向がある。この場合地表に現われた断層線からピークを示す位置までの距離は断層の傾斜角度ならびに表層堆積物あるいは風化帯の厚さに関連する(第27図)。

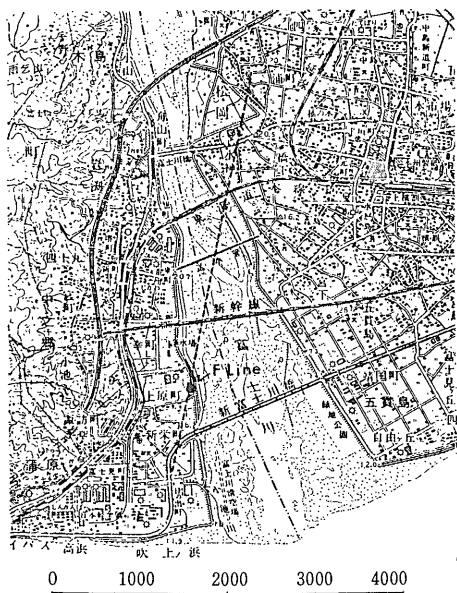
- 3) 同一断層においては 表層堆積物の薄い場所のトラック密度は 厚い場所のそれより高い値を示す。このことは表層堆積物中を通過するラドンの上昇時間の差に起因する。
- 4) 岩質の違いによるウラン含有量の差があるならそれはトラック密度に差として現われ その位置を地質境界と推定することができる。
- 5) 地質学的未観察推定活断層(星野ほか 1978)においてもトラック密度のピークが確認され 推定活断層



第26図 調査地点Nにおける測線で観測されたトラック密度分布図



第27図 活断層のタイプとラドンガス発散機構模式図



第28図 富士川断層（仮称名）とF測線〔この地図は 国土地理院発行の2万5千分の1地形図（吉原）を使用したものである〕  
 …富士川断層(推定) — 測線F ● 蒲原ラドン観測井

を探索する手法の一つとして  $\alpha$ トラック法の適用の可能性が得られた。

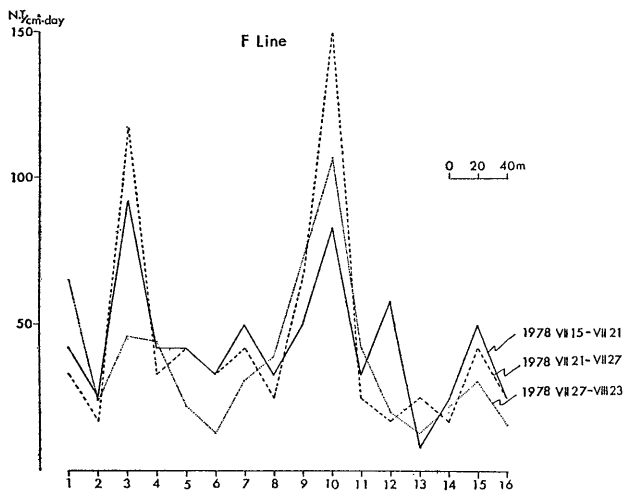
## 6 活断層活動度の測定による地震予知

前述したように 活断層の直上付近において 土壌中から放出されるラドン放出量が 周辺より高いことが明らかになった。もしダイラタンシー等に起因して地殻内の状態変化が ラドン放出量に変化をもたらすとすれば その変化は断層破砕帯において増幅されることが期待される。

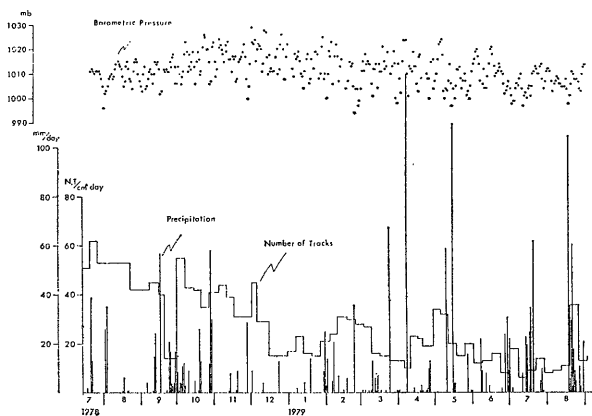
地質調査所では1978年以來 8ヶ所の活断層上の定点において 一週間毎の連続観測を行っている。その中で興味ある富士川・姫ノ湯及び稻取一大峯山断層の例と アメリカのサン・アンドレアス断層の例をあげて紹介する（第18図）。

### 6-1 富士川断層

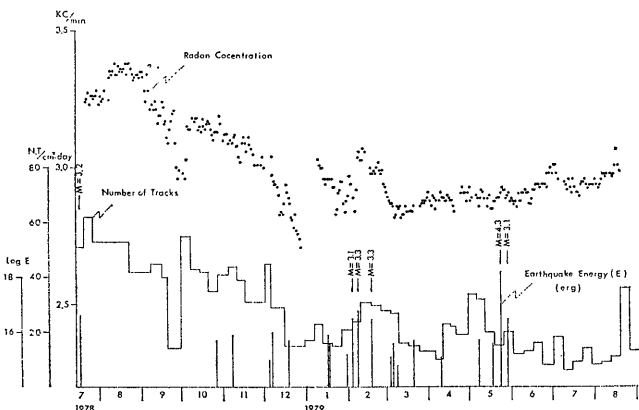
本断層は 1854年安政東海地震 (M8.4) の時に富士川河口付近で新たな変位を生じたと推定され 羽田野ほか(1979)によると 駿河トラフ西縁～蒲原・松岡地震山の東側～入山瀬・大宮断層と続く大構造線（西上り逆断層）の一部を構成する。ま



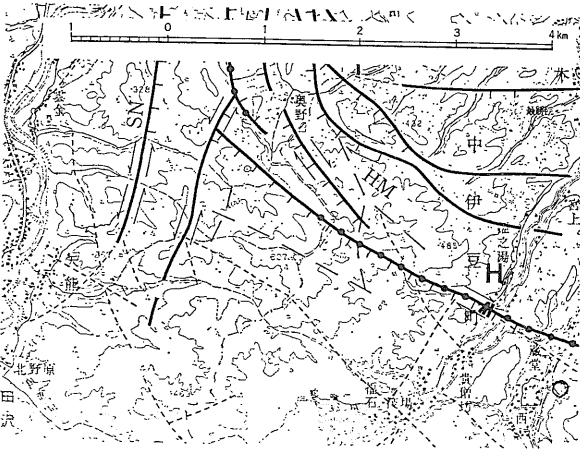
第29図 F測線で観測されたトラック密度分布図



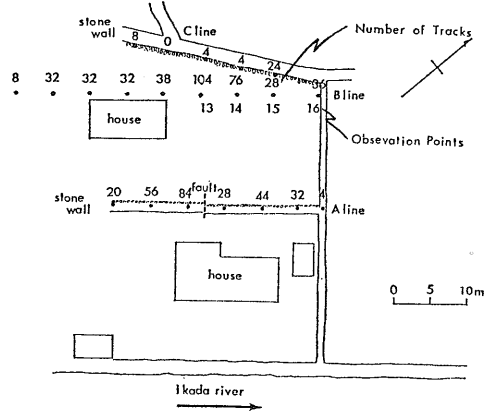
第30図 トラック密度と清水地区地下水観測井の一日平均気圧と降水量



第31図 トラック密度と蒲原ラドン観測井の一日平均水中ラドン濃度と静岡地方を震源とするM3以上の地震と一日当りの放出地震エネルギー



第32図 姫ノ湯断層 (星野ほか・1978) と調査地点H



第33図 調査地点Hにおける測線A・B・Cと観測孔配置図 数字はトラック密度を示す

た 山崎 (1979) によれば推定される垂直変位量は100m 平均変位速度は 7m/1,000年であって 本邦で最大級の活断層である。

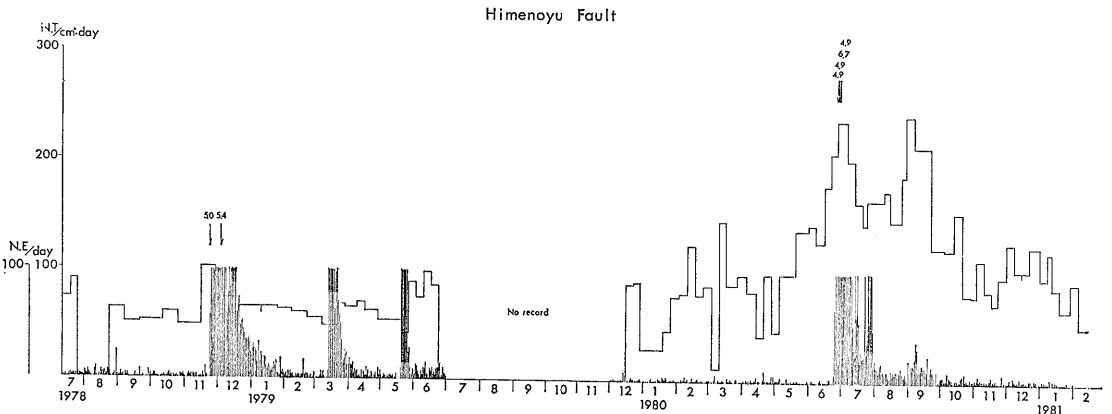
測線は 蒲原町蒲原地先の富士川右岸堤防の内側 蒲原及び松岡地震山を通る富士川断層 (仮称名) 推定線を横切る位置に設定した (第28図)。観測点は延長300mの測線上に20m間隔で設定し 観測結果の再現性を検討するため三回の反覆観測を行い 活断層の伏在が推定される区間に位置する F2・3・4 及び 8・9・10・11の7点を定点に選定した (第29図)。

なお定点F2の西南約100mの地点 蒲原町上水道配水場敷地内には 東海地方東部の地震予知観測のため 静岡県が蒲原ラドン観測井を設置し 水中ラドン濃度の自動観測を行っている。

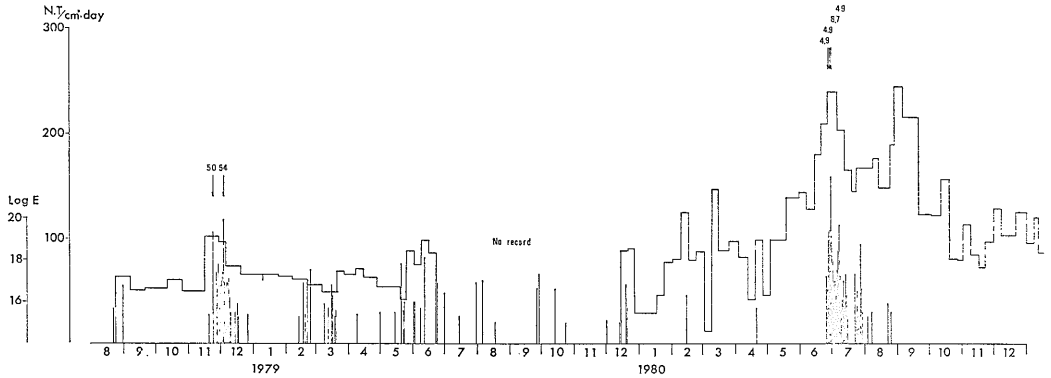
観測は1978年7月から開始され 第30図に上記7定点のトラック密度の平均値と 地質調査所清水地区水位観測井 (西南約17kmに位置する) における 一日の平均気圧

及び降水量を示した。第31図に同じトラック密度の平均値と 蒲原ラドン観測井の一日の平均水中ラドン濃度と 静岡地方 (伊豆半島を除く) を震源とするマグニチュード3以上の地震 (気象庁地震速報による) 及び地震速報より計算した 一日当りの放出地震エネルギーとの関係を示した。地震のエネルギーとマグニチュードの関係式は グーテンベルグとリヒター (1956) の  $\text{Log } E$  (エルグ) =  $1.5M + 11.8$  を用いた。

土壌ガス中のラドン濃度と気圧及び降水量との関係について 初田 (1953) は ラドン濃度は低気圧時と無降水期に増加すると報告している。また 杉崎 (1980) は断層ガスは地球潮汐の日変化と一致して変動すると報告している。しかし 第30図から トラック密度の変化と気圧変動及び降水量との関係は特に認められない。この理由として トラック密度は一週間の平均値であり その間における気圧変動及び降水量の影響が平均化されてしまうためと考えられる。



第34図 姫ノ湯断層におけるトラック密度と一日当りの地震回数



第35図 姫ノ湯断層におけるトラック密度と伊豆半島を震源とする M4.9 以上の地震と一日当りの放出地震エネルギー

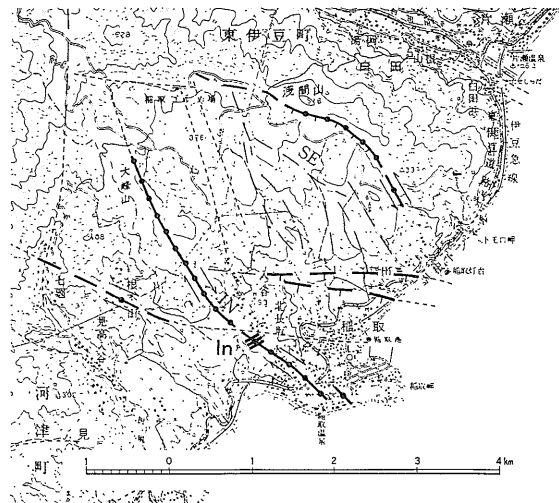
第31図からトラック密度の変化とマグニチュード3以上の地震及び放出地震エネルギーとの関係ははっきりしない。一方トラック密度と水中ラドン濃度とは1978年8月と1979年2月に両者とも増加し1978年9月と12月に両者とも減少するなど両者の間にはよい相関が認められる。

6-2 姫ノ湯断層

H地点(第32図)付近における姫ノ湯断層は北側隆起で右ずれ約1mの変位を示し衝上性の断層とされている(松田・1972)。

測線は中伊豆町姫ノ湯で断層が筏川を横切る左岸段丘上に三本設定し定点として姫ノ湯断層が伏在すると推定される区間に位置するH13・14・15・16の4点を選定した(第33図)。

1978年7月観測開始以来1981年1月までの上記4定



第36図 稲取一大峰山断層(星野ほか・1978)と調査地点In

点におけるトラック密度の平均値と気象庁伊東市鎌田高感度地震観測所で観測された一日当りの地震回数(S-P6秒以内100回以上は100回で打ち切り)を第34図に示した(1979年7~12月間は土木工事のため観測中止)。

第35図には同期間のトラック密度と1980年11月までの伊豆半島を震源とするマグニチュード4.9以上の地震(気象庁地震速報による)ならびに地震速報より計算した一日当りの放出地震エネルギーとの関係を示した。

両図から1978年11月・1979年3月と5月及び1980年6月の伊豆半島東方沖群発地震の一日当り地震回数とその放出地震エネルギーはトラック密度に対応しているようにみえる。すなわち地震回数あるいは放出地震エネルギーの増加に引き続きトラック密度は増加し次いで減少するという傾向を示している。

1978年11月15~28日間におけるトラック密度の著しい増加は群発地震に先行しているかのようであるがトラック密度は二週間の平均値であり群発地震は11月23日からであって両者の前後関係は不明である。ところが1980年6月15~21日間におけるトラック密度の著しい増加は明らかに6月24日からの群発地震に先行している。

6-3 稲取一大峰山断層

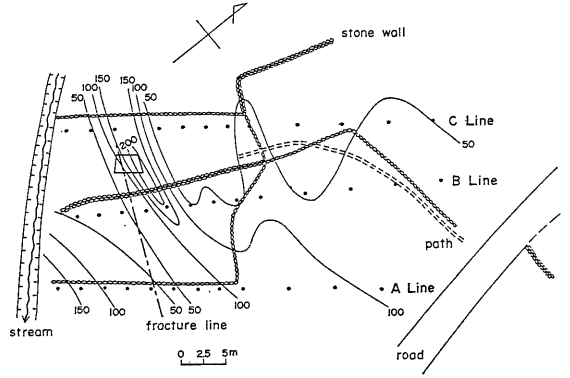
本断層は1978年伊豆大島近海地震(M7.0)の時に新たな左横ずれ(最大約1.2m)の変位を生じた地震断層である(山崎ほか・1979)。

測線は東伊豆町稲取で地表に現われた亀裂を横切る三本を設定し定点としてa1・3・5・7・9・10・11の7点を選定した(第36・37図)。

1978年5月観測開始以来1981年1月までの上記7点におけるトラック密度の平均値と気象庁伊東市鎌田高感度地震観測所で観測された一日当りの地震回数

(S-P 6秒以内 100回以上は100回で打ち切り)を第38図に示した。第39図には同期間のトラック密度と 1980年11月までの伊豆半島付近を震源とするマグニチュード4.9以上の地震(気象庁地震速報による)ならびに地震速報より計算した一日当りの放出地震エネルギーとの関係を示した。

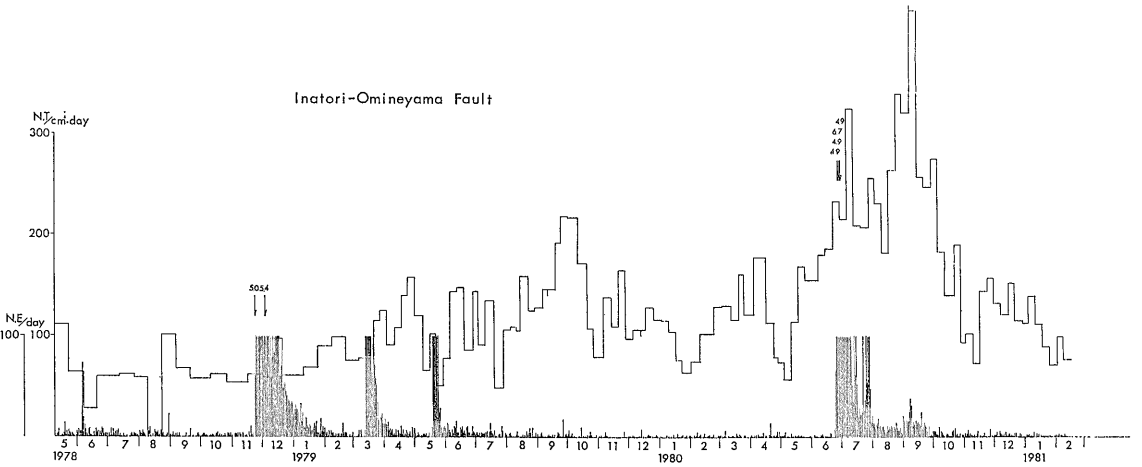
両図から 群発地震時の地震回数と放出地震エネルギーは トラック密度に対応しているかにみえる。すなわち 地震回数と放出地震エネルギーの増加に引き続きトラック密度は徐々に増加し 1~2ヶ月後にピークに達し 次いで徐々に減少するという傾向を示している。



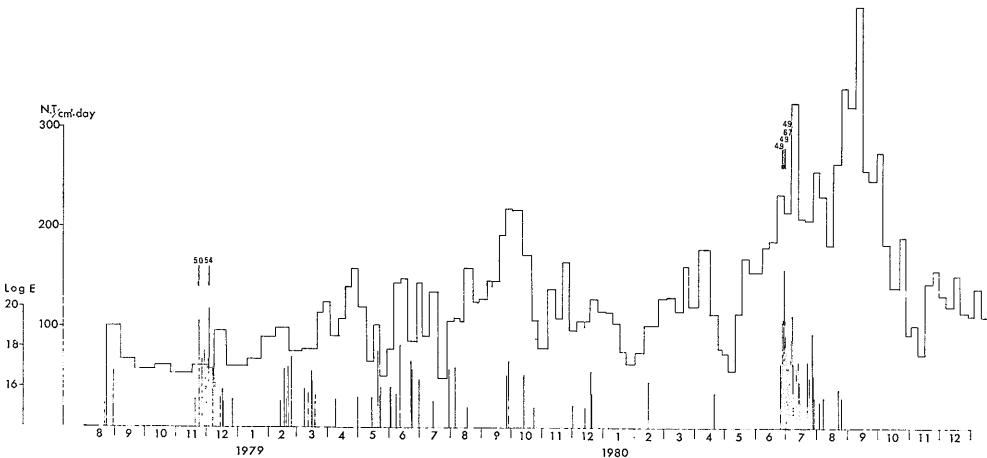
第37図 稲取一大峯山断層におけるトラック等密度線図

6-4 サン・アンドレアス断層

米国地質調査所では 1975年以来中部カリフォルニアのサン・アンドレアス断層の活動部 60km に20ヶ所の観測点を設け αトラック法による連続調測を行っている



第38図 稲取一大峯山断層におけるトラック密度と一日当りの地震回数



第39図 稲取一大峯山断層におけるトラック密度と伊豆半島付近を震源とするM4.9以上の地震と一日当りの放出地震エネルギー

(第40図)。

本断層系は全長1,000kmにおよぶ大断層であり 同時に世界で最も活発な活断層である。この断層系ではM8級の巨大地震を起す地震性断層運動を行う区間やクリープ性断層運動を行っている区間など 断層の動き方の異なるいくつかの区間に分かれている。とくにホルスターから南東200km (観測地域を含む) の区間では断層が1〜4 cm/年のクリープ速度で動くクリープ性断層運動が目立つ地域である (小出ほか1979)。

第41図に一週間毎の上記20ヶ所の相対ラドン濃度・放出地震エネルギー・最高及び最低気温・降水量を示した。この図から 気温や降水量などの気象的条件の影響はないようである。この期間に断層近くで起きた二つの地震 (M4.3・4.0) 時に 相対ラドン濃度のピークが現われたが 小さな地震活動には相対ラドン濃度は増加しないようである。相対ラドン濃度の増加は いずれも地震前に現われるため 地震振動によるものではなく 地殻の変動によるものとする (KING・1978)。

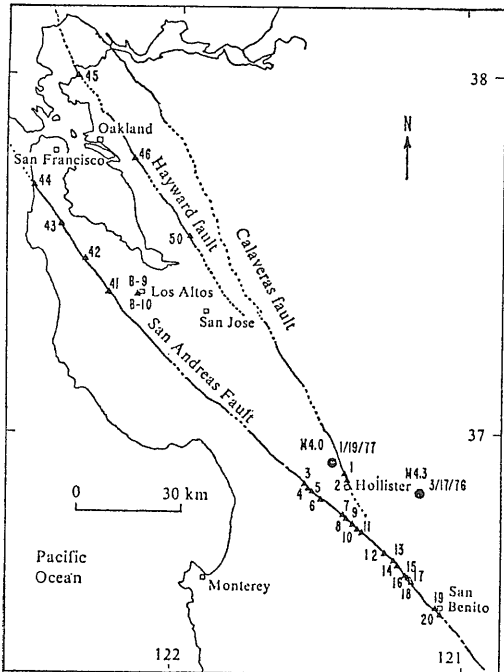
6-5 まとめ

富士川断層の定点におけるトラック密度の経時変化は近接するラドン観測井の水中ラドン濃度の変動と極めてよく相関している。このことは フィルムの設置・回収処理・計数等の問題の解決が可能であれば ラドン濃

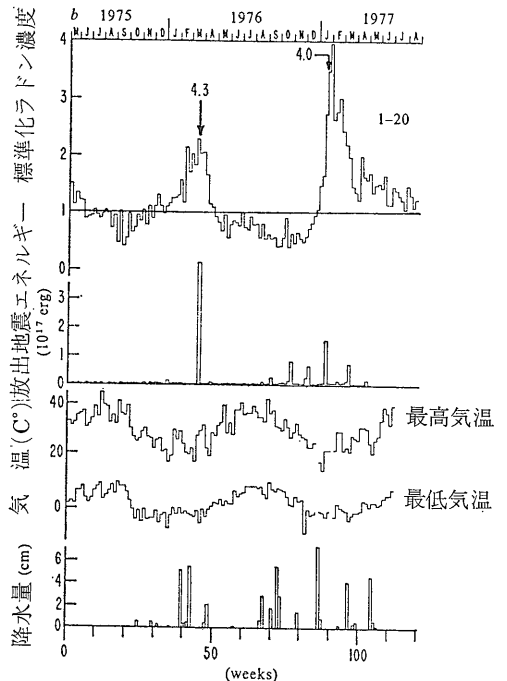
度の経時変化の監視法として 極めて簡便なものといえよう。

姫ノ湯及び稲取一大峯山断層の定点におけるトラック密度の変動と 伊豆半島東方沖群発地震の一日当りの地震回数とその放出地震エネルギーとの関係をみると 両断層とも群発地震の震源断層と関係なく また震央域から約20 及び25 kmと離れた地点にあるにもかかわらずともによく相関しているといえる。

しかしながら 変動のパターンは若干の差異が認められる。すなわち 姫ノ湯断層においては 群発地震活動とほぼ同時にトラック密度が増加し 地震活動の減少とともにトラック密度も急速に減少する傾向がある。これに対し 稲取一大峯山断層においては 群発地震活動とともにトラック密度は徐々に増加し 1〜2ヶ月後にピークに達し その後徐々に減少するという経過をたどっているように見える。地震活動に対するトラック密度の反応パターンの違いのメカニズムについては 現在のところ不明であるが 次のように考えることもできる。個々の活断層は その発達段階 (TSUNEBISHI et al. 1975) ・ (小出ほか・1979) あるいは成熟度 (KAKIMI and KINUGASA・1976) に応じて 断層形態・断層の破壊度・地震の起り方など違いがあると考えられる。もともと活断層近傍でトラック密度が周辺より高いのは 地下に



第40図 サン・アンドレアス断層と観測点 (KING・1978)  
▲観測点 ●震源位置・発生年月日



第41図 相対ラドン濃度と一週間当りの放出地震エネルギーと最高及び最低気温と降水量図 (KING・1978)

おけるラドンが断層破砕帯を通じて上昇する効果による  
と考えられるので 地震活動に対するトラック密度の反  
応パターンは 断層の破砕度を反映しているといえよう。

このような見方によれば 稲取一大峯山断層は未成熟  
の段階にあり 地下ではラドン上昇経路となる断層破砕  
帯が未だ充分形成されていないため 地表におけるトラ  
ック密度の増加は 地震活動よりも遅れて現われてくる  
と考えられる。これに対して 姫ノ湯断層は相対的に  
やや成熟した段階にあるため トラック密度の増減は地  
震活動の増減に敏感に反映しているものと考ええる。さ  
らに成熟した段階と考えられるサン・アンドレアス断層  
では トラック密度は地震活動前から増加し地震後に減  
少することは このような考え方で説明できるのではな  
からうか。

以上のような考え方によれば 地震予知のために土壌  
中のラドン濃度の経時変化を観測する場合 前兆的な地  
殻変動をより敏感に反映することが期待される 成熟度  
の高いそして地震の発生が予想される活断層上に観測点  
を設定することが望ましい。

本方法により得られたデータは いくつかの定点にお  
ける一週間毎の連続観測値の平均値であるため スポッ  
トサンプリングによるデータに必然的に伴う 気圧・降  
水量や地球潮汐等の 短周期で現われる現象の影響が平  
均化されるので 結果として無視できるという利点があ  
る。逆にこのことは 同時に短周期で現われるかもしれ  
ない地殻の状態変化を見逃すことにもつながる。し  
たがって本方法は 連続観測の完全な代用にはなり得な  
いが 簡便安価な本方法の有効な適用範囲を明らかにし  
て 地震予知の一手法として役立たせていきたい。

## 7 おわりに

本研究にさいし 観測点及び定点設置の土地の貸与を  
いただき 本観測に御協力をいただいた関係各位に厚く  
御礼申し上げます。

また 本文の粒子トラックの歴史及び測定原理につい  
ては 阪上正信博士の「粒子トラックとその応用」を参  
考とした。

## 引用文献

熱海建設工事事務所編 (1936) 丹那隧道工事誌, 土木学会,  
p. 75-88.

CHI-YU, K (1978) Radon Emanation on San Andreas  
Fault. Nature, 271, p. 516—519.

GUTENBERG, B. and RICHTER, C. F. (1956) Magnitude  
and Energy of Earthquake. Ann Geofis, 9, p. 1—15.

羽田野誠一・津沢正晴・松島義章(1979) 駿河湾北岸の完新世  
垂直運動と測地的上下変動. 地震予知連絡会報, 21, p.  
101—103.

HATUDA, Z. (1953) Radon Content and its Change in  
Soil Air near the Ground Surface. Memoirs of the  
College of Science, University of Kyoto Series B,  
XX, No. 4 Article 6, p. 285—306.

星野一男・橋本知昌・松田時彦(1978) 伊豆半島活断層図 構  
造図 4, 地質調査所.

KAKIMI, T and KINUGASA, Y (1976) A Geologic Sign  
ificance of Irozaki Earthquake Fault, Viewed from  
“Maturity” of the Faulting, Journal of the Geode  
tic Society of Japan, 22, No. 4, p. 278—279.

金谷 弘・池田喜代治・阿部喜久雄(1980) 川崎市の地盤隆起  
と地下水のラドン濃度変化について 地調月報 Vol. 31,  
No. 9, p. 447—460.

加藤 完・伊藤吉助・永田松三(1979) 稲取地区における $\alpha$ ト  
ラック法による地震断層調査 地調特別報告 No. 7, p. 65  
—70.

加藤 完・伊藤吉助・永田松三(1979) 伊豆半島及び富士川周  
辺における $\alpha$ トラック法による活断層調査 地震 第2輯  
Vol. 32, No. 4, p. 435—449.

加藤 完・永田松三・伊藤吉助(1980)  $\alpha$ トラック法による活  
断層周辺のラドン濃度の変動測定 地震 第2輯 Vol. 33,  
No. 3, p. 289—302.

加藤 完・池田喜代治・高橋誠・永田松三・柳原親孝・伊藤吉  
助(1981)  $\alpha$ トラック法による伊豆半島の活断層調査 地  
調月報 Vol. 32, No. 4, p. 199—212.

小出 仁・山崎晴雄・加藤碩一(1979) 地震と活断層の本 国  
際地学協会 123 p.

木村建二郎(1960) 放射線データブック 地人書館 p. 70—75,  
p. 132—135.

松田時彦(1972) 1930年北伊豆地震の地震断層 伊豆半島 東  
海大出版会 p. 39—43.

岡田篤正(1979) 愛知県の地質・地盤(その4) 愛知県防災会  
議地震部会 p. 39—43.

阪上正信(1973) 粒子トラックとその応用 南江堂 198 p.

杉崎隆一(1979) 地球化学的地震予知に関する研究(2) —断  
層ガス組成変動の要因 地震学会講演予稿集 1979, No.  
2, p. 88.

TSUNEISHI, Y., YOSHIDA, S. and KIMURA, T. (1975) Fault  
—forming Process of the Komyo Fault in Central  
Japan Bull. Earthq. Res. Inst, 50, p. 415—442.

山崎晴雄(1979) プレート境界部の活断層 地球 1(8)p. 570  
—576.

山崎晴雄・小出仁・佃栄吉(1979) 「1978年伊豆大島近海地震」  
の際現われた地震断層 地調特別報告 No. 7, p. 7—35.