

サイスミック・マイクロゾーニングにおける 震度分布の評価手法について

—その3. 関東大地震における震度と震源距離・方向性・地形の関係—

望月 利男* 松田 磐余** 宮野 道雄***

要 約

広域地震防災の立場からある地方の地震危険度を考える場合、対象となる地震はある個性をもった幾つかに限定され、ある程度決定論的に議論ができると思われる。すなわち、南関東を対象とした場合、最も影響力の大きい地震は相模トラフ沿いの活断層、つまり関東大地震型の断層活動によるものである。さらに、一般にこのようなプレート間地震は return period が短い。したがって、かつてこの断層が活動した時の地震動の強さの分布を可能な限り詳細に明らかにしておくことは重要な課題である。

このような観点から、本報告では1923年関東大地震に際して活動したといわれている断層を有限な面震源と考え、その面からの最短距離・地形と被害、震度との関係を検討し、さらに断層の破壊の進行方向の効果による震度分布の方向性の有無についても考察した。

1. はじめに

近年の地震学の著しい発展により、地震学的にあるいは測地学的に既往の大地震の断層モデルが明らかにされてきた。また、それらの断層モデルから生成伝播する地震波に関する研究の進展にも目覚ましいものがある。

ところで、設計用入力地震動、あるいはある地域の地震危険度に関する従来の研究は平均的地震像をとらえ、それを人工地震波として表現するか、既往の地震資料を統計的に処理し、return period により期待される最大加速度などを示す等々の方法が一般的であったように思われる。

しかしながら、南関東といったある地域を対象として考える場合、最も影響力の大きい地震は相模トラフ沿いの活断層、すなわち関東大地震型の断層活動によるものであり、その他はたかだかM7ないしそれ以下の内陸型のものとして推測され、影響圏もかなり限定されよう。いずれにしろ、ある地方の地震危険度を考える場合、対象となる地震はある個性をもった幾つかに限定され、ある程

度決定論的に議論ができるのではないかと考えられる。

ところで、一般に海洋型巨大地震と呼ばれるプレート間地震は return period も短く、そのため常に監視の対象になっている。地震はそれぞれ特性 (dip angle, 破壊の始点と進行方向、高い stress drop をもつ部分の分布など) をもつと考えられるが、再来する地震がほぼそれに近い特性をもつものとするれば、それが活動した時の被害分布、いいかえれば地震動の強さの分布を可能な限り詳細に明らかにしておくことは重要な課題である。

このような立場から、本報告では1923年関東大地震に際して活動したといわれている断層を有限な面震源と考え、その面からの最短距離・地形と被害、震度との関係を検討し、さらに断層の破壊の進行方向の効果 (doppler 効果) による震度分布の方向性の有無についても考察した。

2. 震源断層モデルと震源距離並びに地形分類

関東大地震の断層モデルは金森・安藤 (1973) によ

* 東京都立大学都市研究センター・工学部

** 東京都立大学都市研究センター・理学部

*** 東京都立大学工学部研究生

り、それぞれ地震学的データおよび測地的データに基づくモデルが示されている。望月他(1978)は既上記測地モデルを用いて、この地震における木造住家全壊率と fault trace からの距離・地形の関係を検討した。また、この結果と比較するために、地震学的データに基づくモデルを用いて同様の検討を行い、測地モデルの方が上記関係をよく説明することを示した(望月他,1980)。この際、Sato(1975)の手法を用いて、地震モデルによる関東大地震の理論地震記象の最大変位分布を求めた結果(宮野,1979)より、距離補正を行うことも試みているが、かえって上記関係の対応性が低下することが知られた。(望月他,1980)。そこで、本報告では震源断層モデルとして測地モデルを用いることにした。

一方、断層から各地点までの距離は、望月他(1978,1980)においては、両断層モデルの fault trace からの距離(正確には、断層の長さ L を長軸、幅 W を短軸とする楕円を考え、その焦点内で trace への垂線で距離が計測できる範囲の地域は trace からの最短距離、また焦点外の地域は焦点からの最短距離)として求めている。しかしながら、この方法でも、trace が内陸にまでおよぶ低角逆断層型のこの地震における上盤側の距離の計測方

法としては充分とはいえない。すなわち、断層の傾斜角が小さい程、上盤側においては、fault trace からの距離より断層面からの距離の方がより短くなることが考慮されていない。したがって、本報告では上盤側および下盤側とも断層面からの最短距離(すなわち、下盤側については trace への垂線または trace す両端からの長さ、上盤側については断層面への垂線、dip 方向の側線または断層面の地下の両端からの長さ)として震源距離を求めた。

関東大地震のように、被災地が極めて広い範囲に分布している地震の被害と地盤の関係を検討する場合、地形学研究成果を利用し、地形から地盤を推定する手法(望月他,1978)が有効である。そこで、この地震の主な被災地域の地形分類を概観すると図-1のようになる。ここでは、地形を(a)砂泥質な沖積低地、(b)谷底低地・緩斜面、(c)海岸平野、(d)扇状地・沖積錐、(e)台地、(f)丘陵地(丘陵地斜面・台地斜面)、(g)山地、(h)火山地の8種類に分類した。ただし、被害(震度)と地形(地盤)の関係を検討する際には、火山地に存在する地点は、それぞれの地盤に対応する他の地形に分類した。すなわち、火山性の山地ならば(g)山地、火山性の丘陵地斜面な

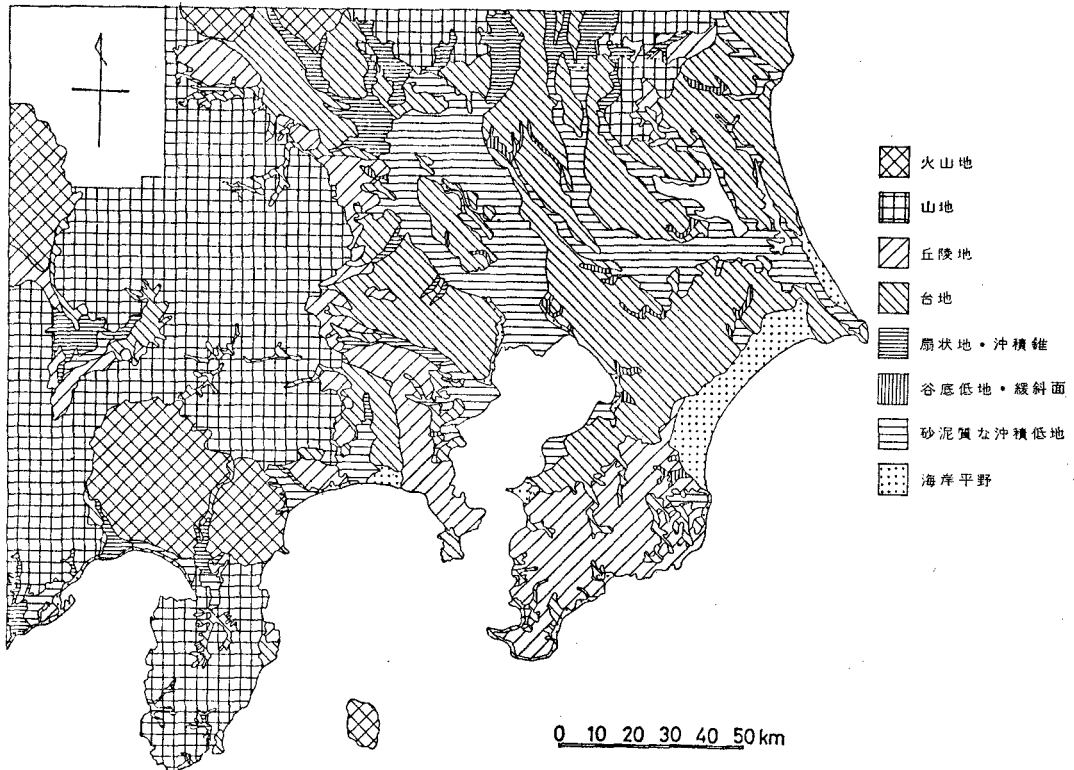


図-1 関東大地震による主な被災地域の地形分類図

らば(f)丘陵地・台地斜面、などとした。このようにして、以下に述べる各種検討は(a)~(g)の7種類の地形区分に基づいて行ったが、各地点の地形を決定する際には、国土地理院発行の2万5千分の1地形図を用いているため、図-1程度の地形分類図では表現しきれない詳細な地形判読(例えば、低地内の小規模な台地、および台地を刻む小規模な谷底低地など)を行っている。

3. 木造住家全壊率と震源距離・地形の関係

木造建物は我が国各地の種々の地形(地盤)上に最も普遍的に分布しており、その被害はそれぞれの地域に作用したであろう地震動の強さの目安を与えてくれる。この地震による木造住家の市町村(旧東京市内は区)別全壊率の資料は、かなり広い範囲にわたって豊富に残され

ている(震災予防調査会, 1925b)。図-2はこの資料を用いて木造住家全壊率分布を示したものであり、前述した震源断層の測地モデルの位置も併記した(図中の×印は初動P波の発震位置)。図-1より地形の大略を考慮して図-2をみれば、全壊率分布に特に方向性があるとは思われない。

本報告では前述のように、震源距離を断層面から各地点までの最短距離として計測しているが、その距離(X km)と木造住家全壊率(P%)の関係を地形毎に示したものが図-3(a)~(g)である。上記Xの計測手法によれば、各種地形ともP-X関係の断層の両側における差異はほとんどみられない。したがって、図-3(a)~(g)では断層の上下両盤側の全壊率データを合わせ、各種地形毎にPについてXの5 km 毎の区間平均を行ってP-X関係を表わした。その結果、各地形に共通していえること

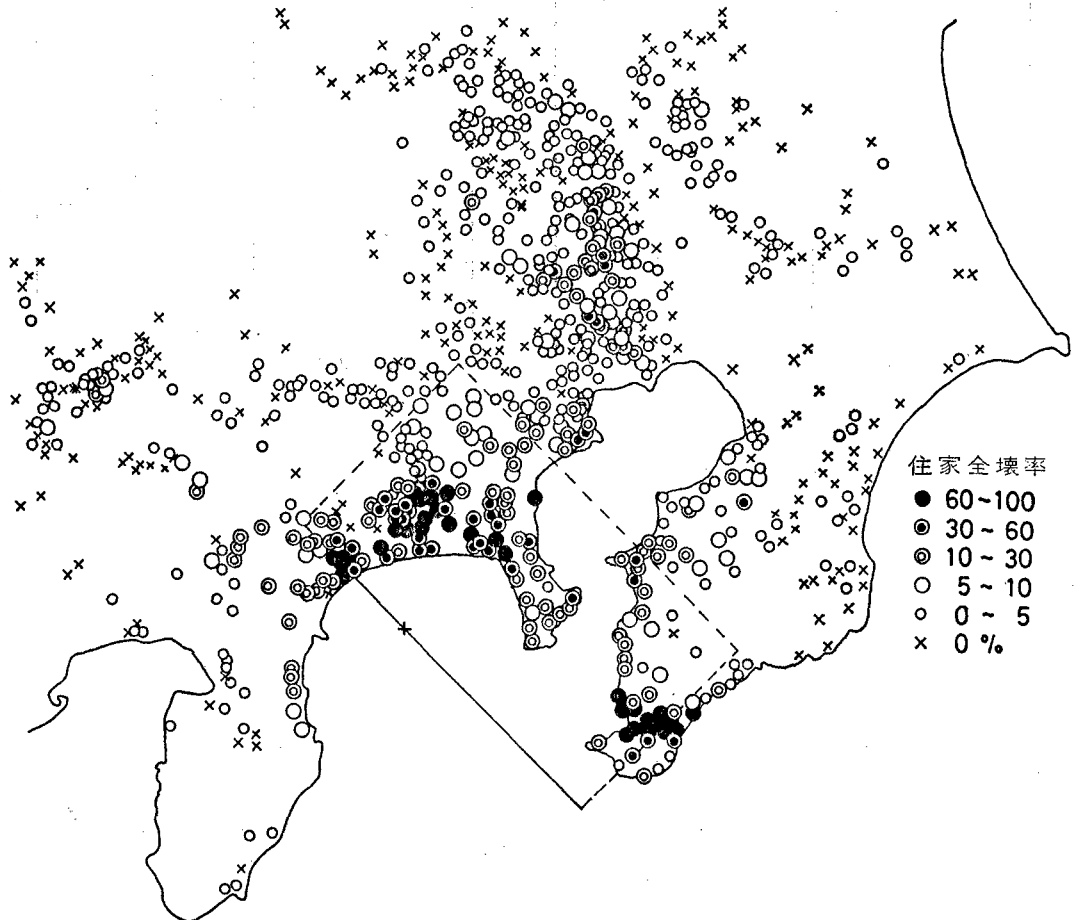


図-2 木造住家全壊率分布および断層モデル

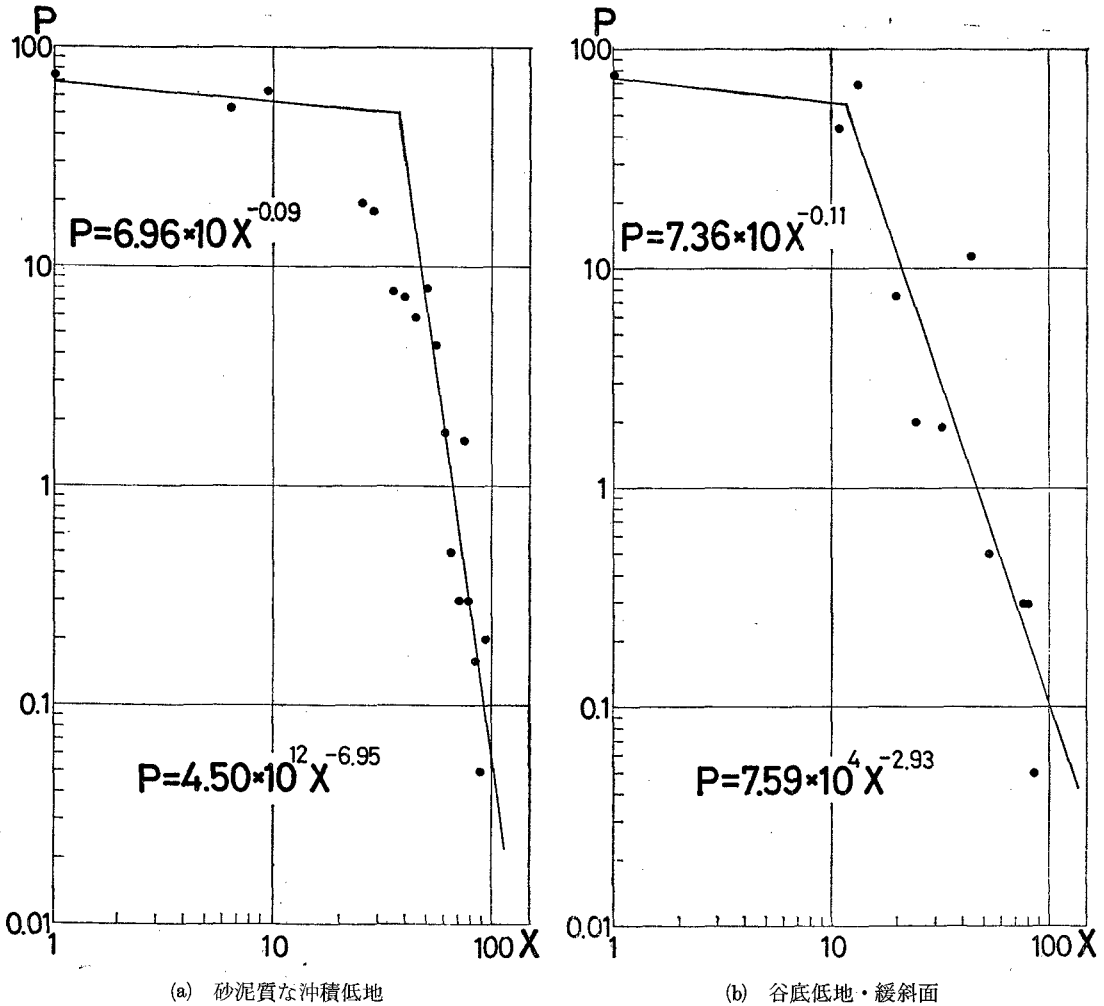


図-3 各種地形における住家全壊率Pと震源距離Xの関係

は、断層面からの距離が小さいある範囲とそれ以上とでは、P-X関係にかなり異った傾向が認められることである。そのため、各地形とも勾配の変化する付近で範囲を分けて、 $P=aX^b$ で表わされる関数を最小自乗法を用いて求めた。

4. 墓石による震度と木造住家全壊率の関係

1891年濃尾地震以来、我が国で発生した被害地震の多くに対し、墓石の転倒調査より震度を推定する試みがなされてきた。これは、各地に普遍的に存在する墓石を簡易地震計として利用しようとする考えに基づくものである。この地震でも物部、中村（震災予防調査会、1926c、1925a）がその調査を行っている。しかしながら、両者

の資料を合わせても、前述の地形毎に分類し、震源距離Xについてプロットするには数が少なく、また調査地点も偏在しているため、地形間の差異および距離減衰の傾向がぼらつきの中に埋没し、十分明瞭には現われない。

一方、墓石などの転倒による震度Kと木造住家全壊率Pがある程度一般性をもって関係付けられれば、豊富な資料の残されている木造住家の全壊率分布（図-3(a)~(g)で示されるP-X関係）から、地震動の強さ（震度）の分布をかなり工学的な活用性をもたせて推定することができる。物部（1933）は、P-K関係を(1)式のように表わした。

$$P = \frac{100}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^h y e^{-h^2 y^2} d(hy) \text{-----(1)}$$

ただし、 $y=K-K_0$ 、K：震度、 K_0 ：木造建物の標準耐

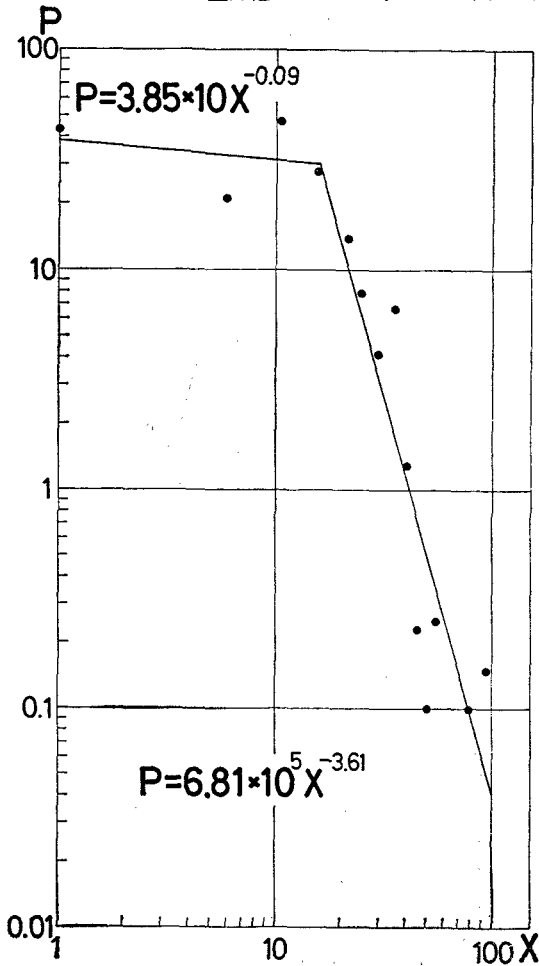


図-3 (c) 海岸平野

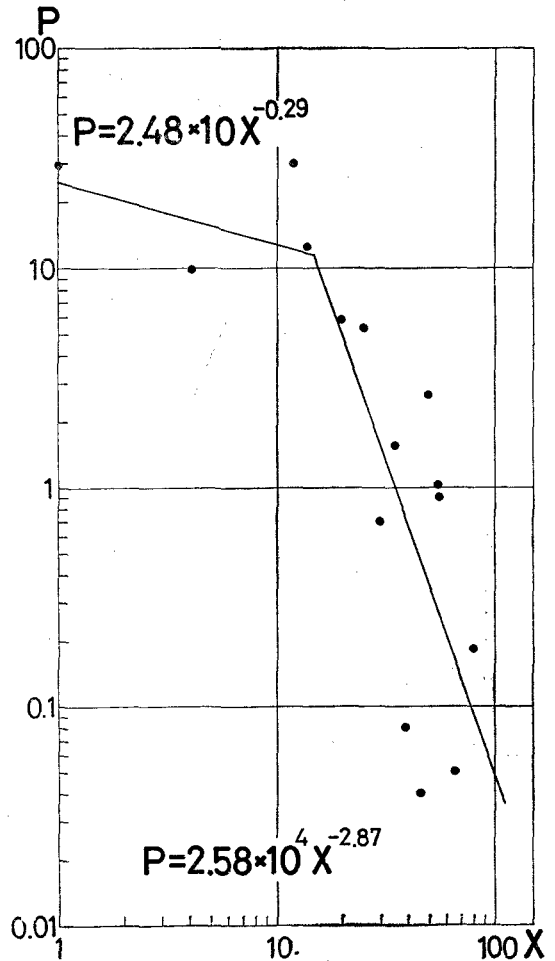


図-3 (d) 扇状地・沖積錐

震力(震度)。h: 建物の耐震性の一様さを示す指数。

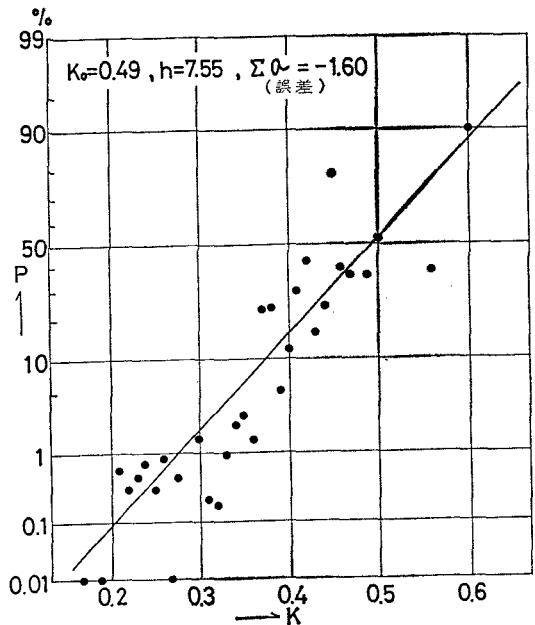
物部は関東大地震における K_0 は、0.45~0.50, h は7~10と推定している。

そこで、本報告では前述の物部、中村による震度資料を用いて、(1)式で誤差の和を最小にする条件の下で K_0 と h を決定し求めた P-K 関係(図-4)から、P の得られている各地の K を推定した。このようにすれば、基石資料の不足および調査地点の偏在による問題点は大幅に改善できると考えられる。

5. 震度と震源距離・地形の関係

図-4 のようにして、全壊率 P と震度 K の関係を求めれば、図-2 に示した各地の P を K に変換できる。図-

図-4 住家全壊率 P と震度 K の関係→



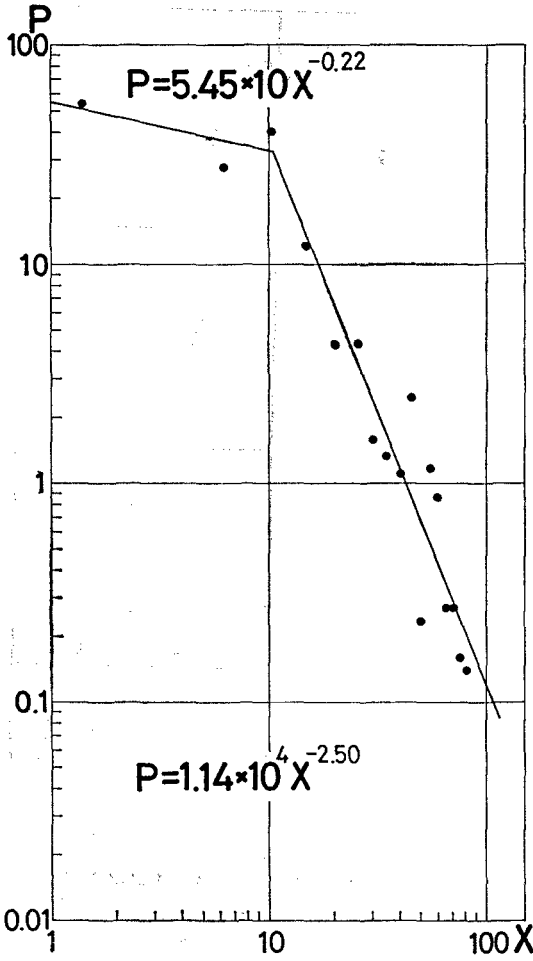


図-3 (e) 台地

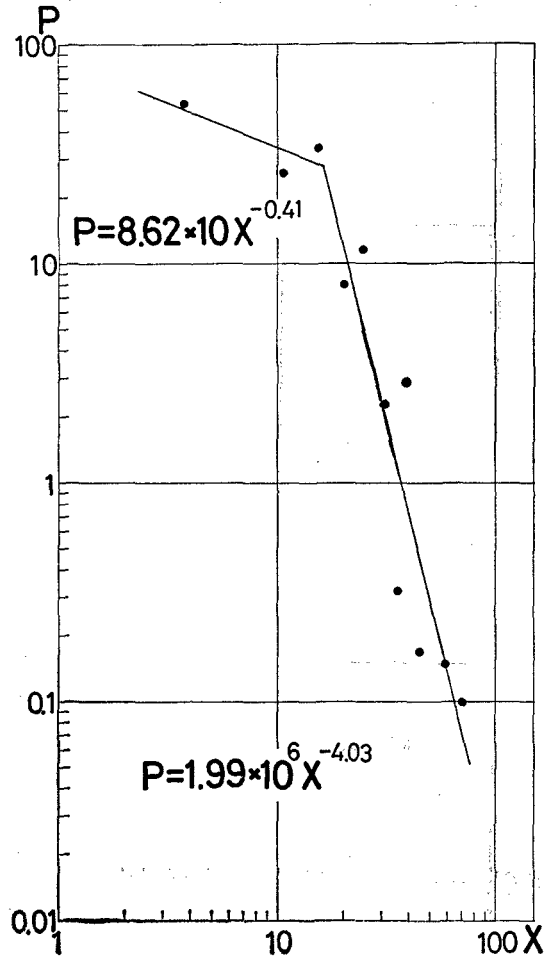


図-3 (f) 丘陵地・台地斜面

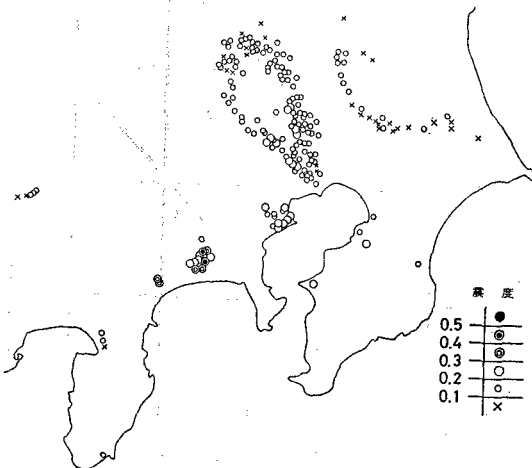


図-5 各種地形における震度分布
(a) 砂泥質な沖積低地

5(a)~(g)はこのようにして推定した図-2の各地のKを6段階に区分し、地形毎にその分布をみたものである。地形によってはかなり片寄りをもつようにみえるものもあるが、図-1より地形全体の分布を考慮すれば、被災地域は断層面上とその周囲に大体満遍なく分布している。つぎにこれら各地のKを用いて、地形毎に震源距離Xに関して5km刻みで平均化し、プロットしたものが図-6(a)~(g)である。図中の直線はK-X関係を $\log K = a + bX$ の関数型に近似し、最小自乗法によりa, bを決定して求めたものである。一見ばらつきが大ききみえる地形もあるが、総じて相関係数Rは高い。また、このようにして求められた地形毎の $\log K = a + bX$ の関係を同一紙上に示したものが図-7である。同図によれば、幾つかの地形でK-X曲線は交錯しているが、全体的にみてほぼ妥当な震度と震源距離・地形の関係が得られたと考えられる。すなわち、自然堤防、三角州などから成

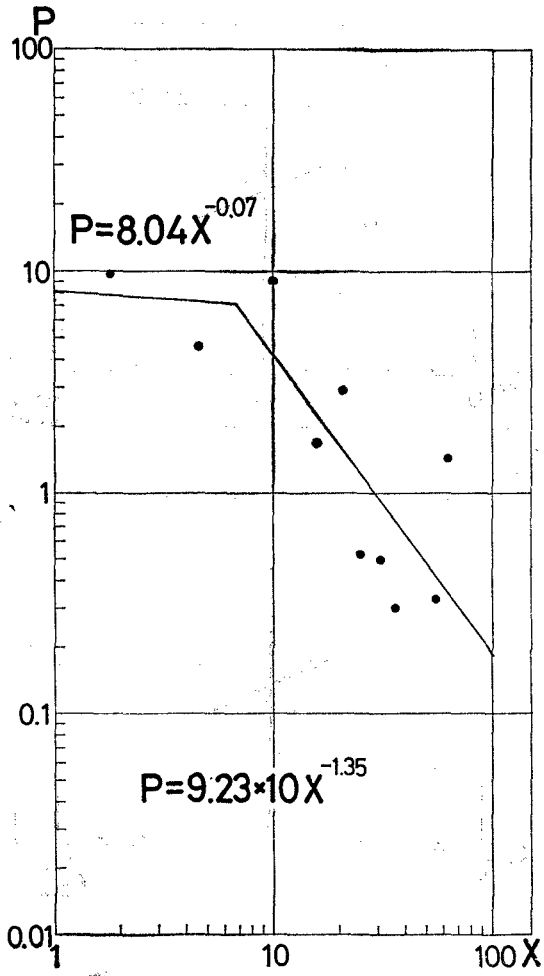


図-3 (g) 山地

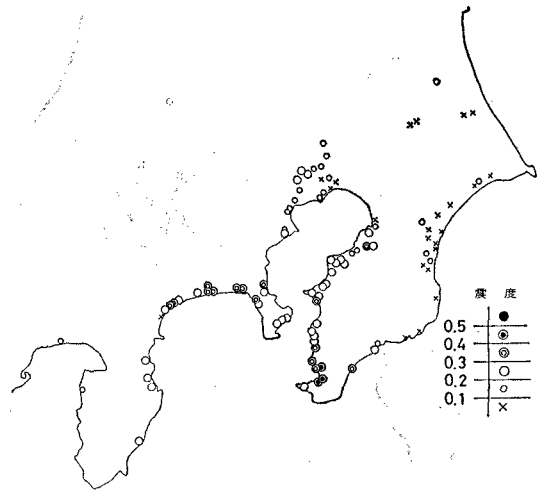


図-5 (c) 海岸平野

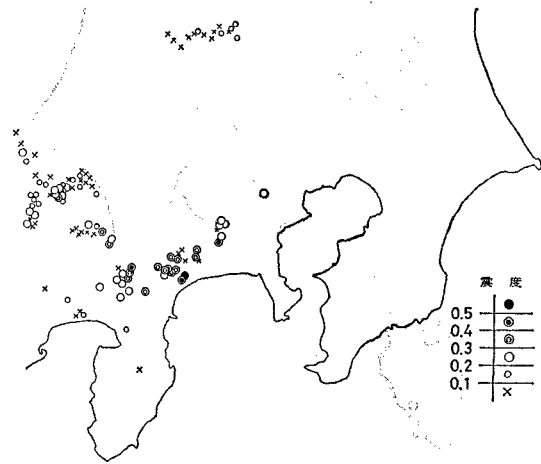


図-5 (d) 扇状地・沖積錐

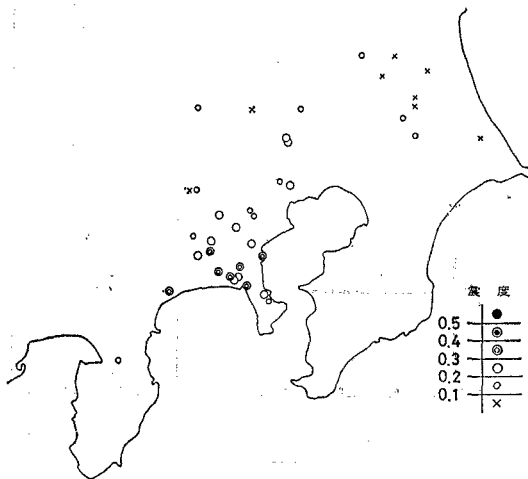


図-5 (b) 谷底低地・緩斜面

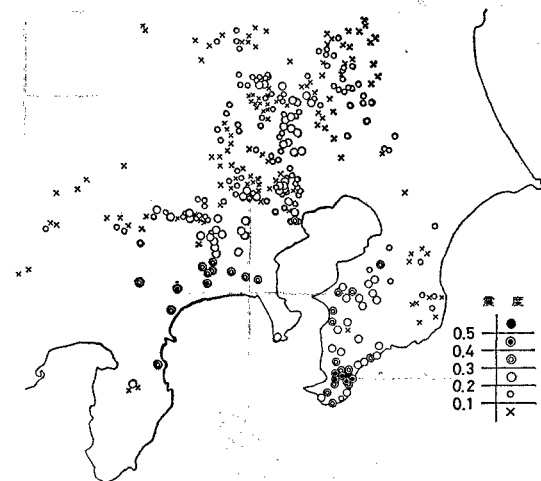


図-5 (e) 台地

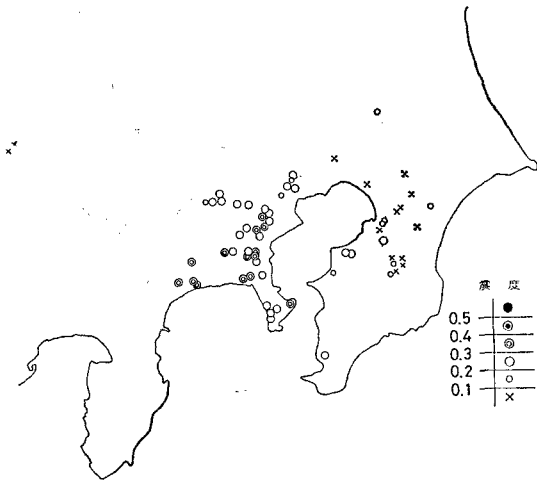


図-5 (f) 丘陵地・台地斜面

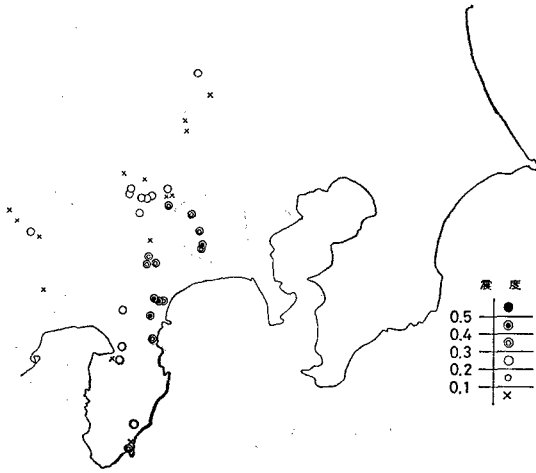
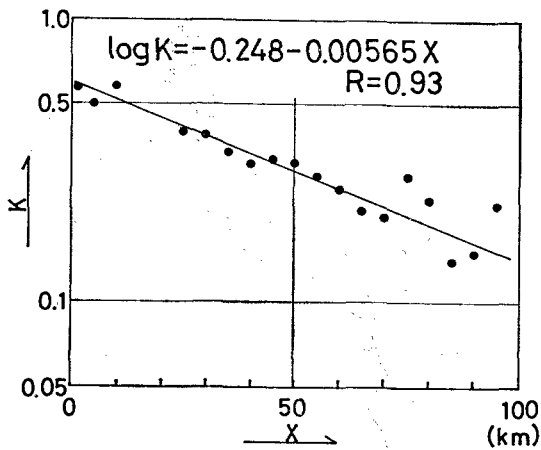


図-5 (g) 山地



(a) 砂泥質な沖積低地

図-6 各種地形における震度Kと震源距離Xの関係

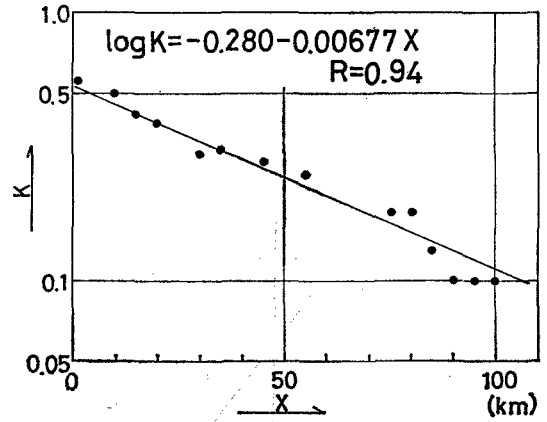


図-6 (b) 谷底低地・緩斜面

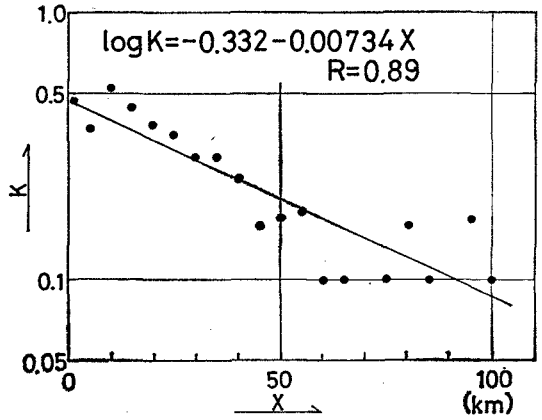


図-6 (c) 海岸平野

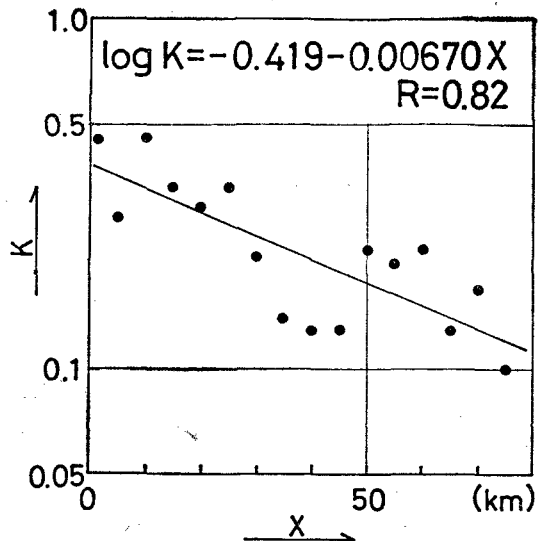


図-6 (d) 扇状地・沖積錐

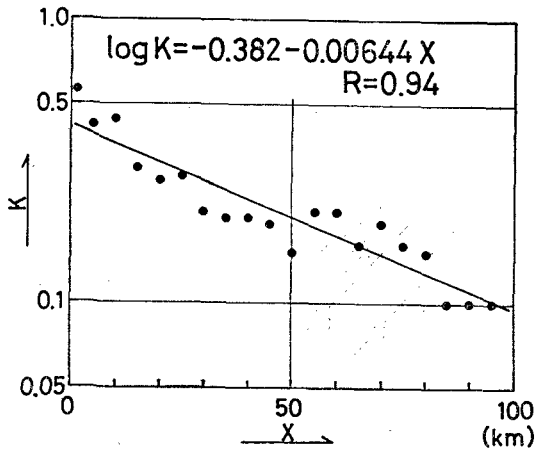


図-6 (e) 台地

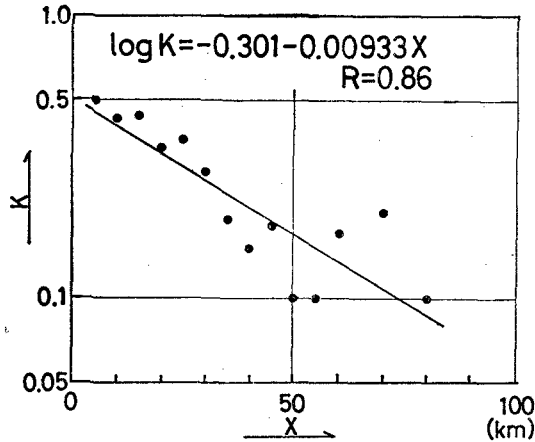


図-6 (f) 丘陵地・台地斜面

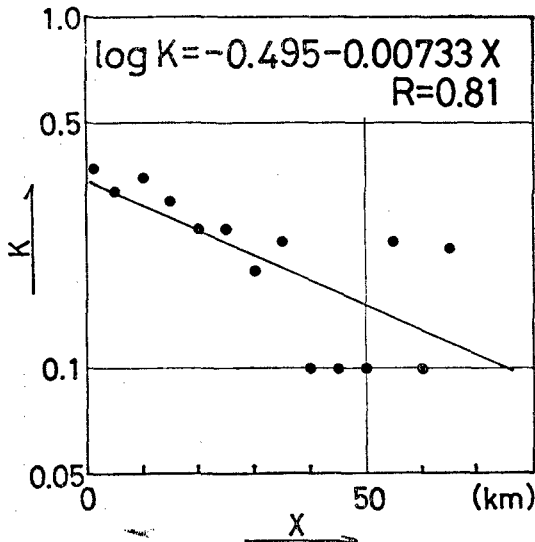


図-6 (g) 山地

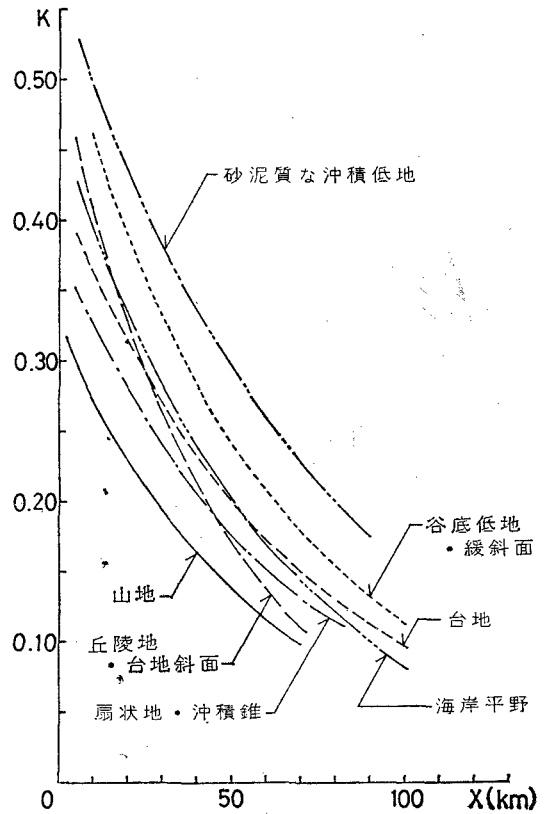


図-7 各種地形におけるK-X曲線

る砂泥質な沖積低地が最も高いKを示し、以下谷底低地・緩斜面、海岸平野、扇状地・沖積錐のように、低地における地形が泥質から砂・砂礫質になるにつれて低いKを示す傾向にあることは、ほぼ妥当なものといえる。また、山地のKは少なくともデータの得られた距離の範囲内で、最も低いレベルを示し、砂泥質な沖積低地と比べると震度で0.1~0.2の差異がある。

6. 地形効果を補正した場合の震度分布

図-6(a)~(g)および図-7は各地形の距離Xにおける地震動の強さの表層地盤における平均的な増幅率の差異を表わしたものとみることができ。一方、ここで用いている震源距離Xは断層面からの最短距離と定義しているが、その妥当性は検討されていない。そこで、本論文における地形区分のうち、最も地震基盤にその性状に近い山地地形のK-X関係を用いて、地形効果を補正した場合の震度分布を求め、Xの検討をすることにした。すなわち、山地のK-X関係(図-6(g)、図-7)を規準にして、その各距離XにおけるKで等距離の他の地形の

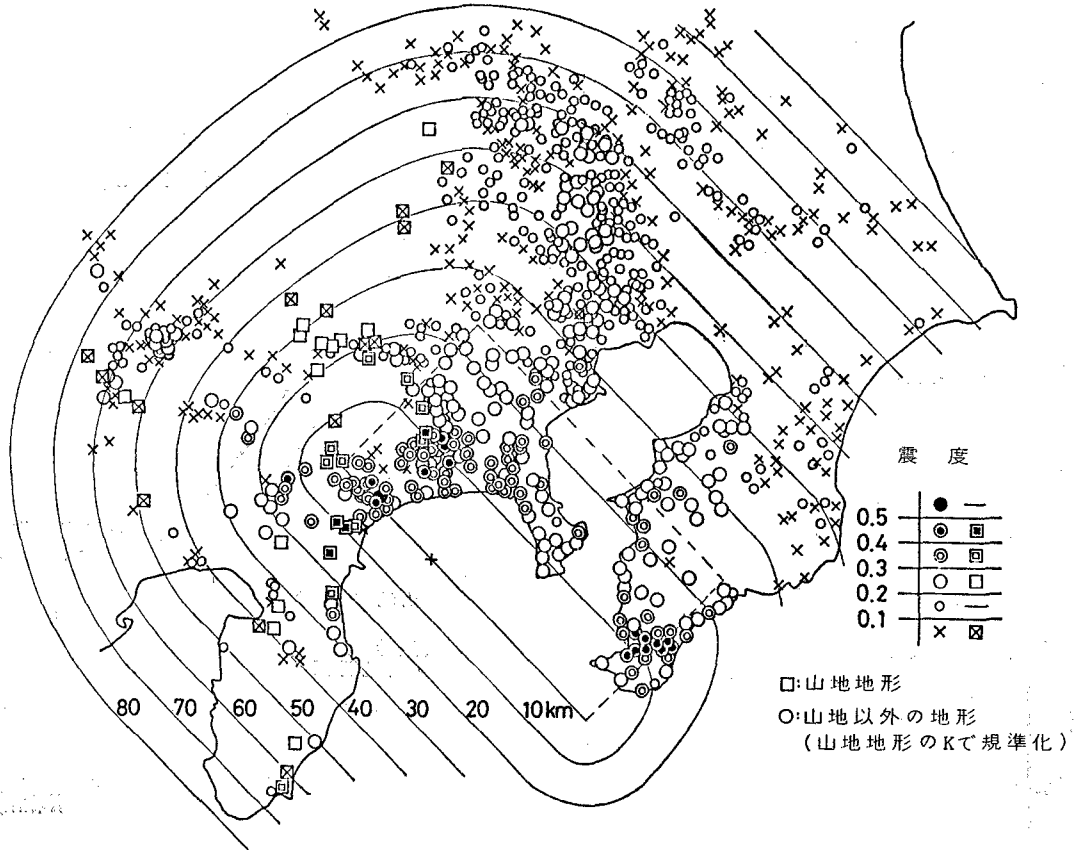


図-8 規準化した震度分布および断層面からの最短距離等値線

Kを normalize する（山地のKに対する他地形のKを応答倍率の差異とみなし、各Xにおける他地形のKをその応答倍率で除する）ことにより、全ての地形のK分布を近似的な地震基盤のK分布に置き換える。そして、その結果からここにいるXの定義の妥当性が証明されれば、この地震における地震動の強さの分布をマクロにみた場合、方向性はないことになる。また、各地形の距離Xにおける表層地盤の増幅率が量的に推測される。

図-8は、上述のようにして求めたK分布である。図-5(a)~(g)が各地形の増幅率そのままにK分布を示したのに対し、図-8はそれら増幅率を除去した、近似的な地震基盤のK分布である。なお、同図上で山地のKは□印で示し、他の地形（○印）と区分してある。また、断層面からの最短距離のコンターも併記してある。凡例に示すように、震度は6段階に区分しているが、個々の地点のKのばらつきはかなり著しい。しかしながら、 $K \geq 0.4$ の地点はほぼ $X = 10\text{km}$ 内外に分布しており、 K が0.3台を示す地点はほぼ $X < 30\text{km}$ 内にある。ただ、大宮台地とその周辺の低地は、Xが大きいにもかかわらず

Pが大きいため、normalize してもなお比較的大きいKの地点が集中している。これは、大宮台地が他の周辺の台地に比べて軟い表層堆積物から成ること、並びにその

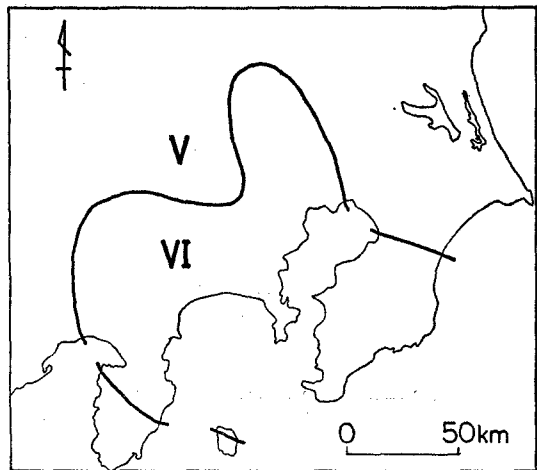


図-9 J. M. A. Intensity の震度分布

周辺の低地では液状化が多発している（建設省土木研究所，1974）ことによると推察される。一方，図-9に J. M. A. Intensity の震度分布（宇佐美，1975）を示すが，同図と図-8とを比べると，震度階ⅥとⅤの境界は北部の凸凹を除けば，ほぼ $X=40\text{km}$ のコンターラインと一致することがわかる。そして，この凸凹はそれぞれ関東山地，秩父山地および上述の大宮台地周辺の地形に対応して生じたものと考えることができる。

ところで，図-8によれば，山地地形に対応する地点は断層の西側に偏在している。しかしながら，全地形（7種）を対象とすれば，断層上およびその周囲にかなりの広がり分布しており，マクロにみればKの評価できる被災地域の偏在はほぼ無視することが可能である。また，全体的にみて，Xの増加とともにKが減衰することがわかる。したがって，図-8の normalize されたKとXの関係（分布）を統計的に処理し，得られたK-X関係が図-6(g)，図-7に示した山地のK-X関係にどの程度対応するかを検討する。図-10は図-8の全地点（山地を除く）を $X=10\text{km}$ 刻みで区分し，それぞれの

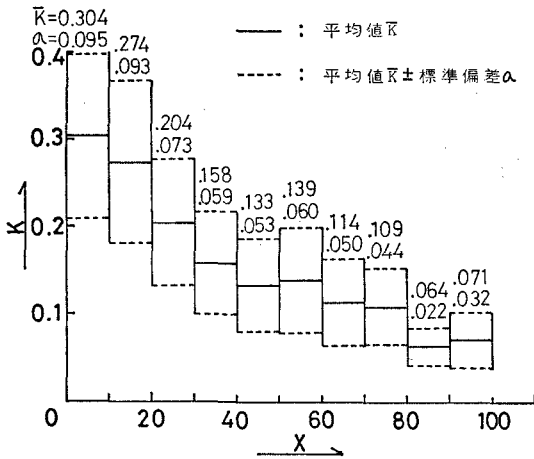


図-10 距離区間毎の平均震度 \bar{K} と標準偏差 σ

距離区間内の全地点の平均震度 \bar{K} と標準偏差 σ を求めたものである。このようにして得られた各距離区間の \bar{K} をそれぞれの平均距離にプロットし，最小自乗法により求めた近似曲線 ($\log K = -0.494 - 0.00726 X$) を実線で，かつ図-6(g)，図-7に示した山地のK-X関係 ($\log K = -0.495 - 0.00733 X$) を一点鎖線で併記したものが図-11である。同図より，両者の相関性は極めて高いことがわかる。このことは，墓石転倒による震度と木造住家全破壊率を関係付けることによって得られたK（地震動の強さ：必ずしも最大加速度を意味しないが）の近似的にみた地震基盤における分布は，この地震の場合，ほぼ断層面からの最短距離で定まり，マクロにみれば，その

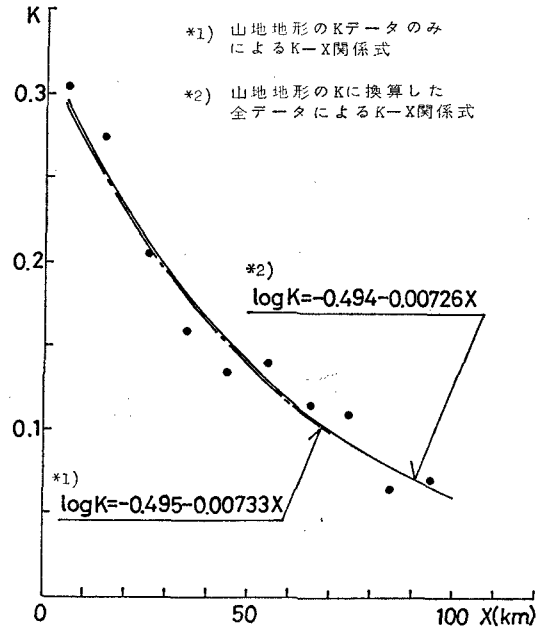


図-11 K-X関係式の比較

強さの分布にほとんど方向性は認められないことを示す。したがって，平均的にみれば，各地形のKも方位に関係なくこのXで決定でき，両者は図-6(a)~(g)，図-7に示した関係をもつ。さらに，これらの図における山地と他の地形のKの差異が，上述の地震動の強さのそれぞれの地形における表層地盤のおおよその増幅倍率の違いを量的に表わす。

ところで，山地を規準とした場合の増幅倍率とXの関係は，図-6(a)~(g)，図-7からわかるように，必ずしもXに関して一定ではなく（海岸平野のみ一定，約1.46倍），一般にXが大きくなるとそれは増加する傾向がある。ただし，丘陵地・台地斜面のみは逆の傾向を示す。この理由としては，震源近傍において，これらの地形の被害パターンが他の地形と異ったこと（斜面崩壊など振動被害以外の被害の多発など）も考えられる。なお，上述の増幅倍率の増加傾向は一般にさほど大きなものではないが，最も地盤の悪い砂泥質な沖積低地におけるそれは無視できない。これには，木造建物の破壊のメカニズムが関係していることが考えられる。すなわち，砂泥質な沖積低地においては，比較的長周期な地盤の周期特性が，例え絶対加速度がかなり低くても，この種の構造物に不利に作用すると思われる。あるいはまた，液状化などの効果も考慮する必要がある。

7. 結論

本報告ではまず、1923年関東大地震の際の墓石転倒調査により得られた震度 K と木造住家全壊率 P を結合し、各種地形における K と震源距離 X の関係を求めた。さらに震源距離として、断層面からの最短距離 X を採用することの妥当性を検討し、近似的な地震基盤における K 分布の方向性の有無について考究した。得られた結果および若干の考察を述べれば以下のようなものである。

(1) 震源距離 X を断層面からの最短距離として計測することにより、住家全壊率 P と X の関係に断層の上盤側と下盤側とにおける差異がほとんどなくなり、各種地形ごとの P と X の平均的な関係は、図-3(a)~(g)のように得られた。

(2) 物部・中村(震災予防調査会, 1926c, 1925a)による震度 K の調査結果と、 K の得られた各地点の P とを結合させることにより、豊富に残されている P の資料から K を推定することが可能になった。各種地形毎の平均的な $K-X$ 関係は、図-6(a)~(g)に示されるように、かなり良い相関で得られた。また、各種地形間における K の X の増加に伴う減衰傾向も妥当なものといえる。

(3) 図-6(a)~(g)および図-7によれば、近似的な地震基盤とみなし得る山地地形における $K-X$ 関係を基に、他の各地形上での距離 X における K の増幅率が量的に得られた。

(4) 断層西側に偏在する山地地形の $K-X$ 関係($\log K = -0.495 - 0.00733X$)、および断層周囲に分布する他地形の K を山地地形の K に換算して得られた全地形の $K-X$ 関係($\log K = -0.494 - 0.00726X$)が極めて良い一致をみたことから、震源距離として断層面からの最短距離を採用することの妥当性、また近似的な地震基盤上での K 分布に断層の破壊進行方向に伴う方位効果がみられないことが大体明らかになった。

単体の動的挙動に関する解析(望月他, 1976)によれば、本報告で対象としたような、墓石などを転倒させ、木造建物を破壊するのに十分な加速度とエネルギーをもつ地震動の強さは、その周期成分が震源近傍では0.5~0.6秒程度ないし、それより長周期側の加速度に相当すると考えられる。したがって、震源近傍では、発生したであろう、より短周期の最大加速度を、本報告の手法では表現しえないことになる。しかしながら、表他(1979)によれば、震央(震源)近傍の墓石転倒による推定加速度を電気分野の実効値とみなし、それに $\sqrt{2}$ 倍してアメリカなどで観測されている震央近傍の強震計の記録およびそれによる実験式に適合させる補正が可能である。一方、J.M.A.の震度階ならびにそれに対応する加速度が、木造建物等の被害から評価されてきた実

状を考慮すれば、本報告で扱った K はそれに相当するものであり、その分布、地形による増幅の差異をより詳細に、かつ定量的に評価したと考えられる。

また、関東大地震の断層破壊は、図-2のtrace上の \times 印付近で発生、進行したbi-lateral型のものといわれている(Ando, 1974)。したがって、破壊型は対称ではなく、通常の断層理論により波の生成と伝播を計算すれば、地震動の分布は非対称になると思われるが、本報告で得られた K 分布には特に方向性はみられなかった。その理由としては、Das & Aki(1977)およびBouchon(1978)のbarrier modelの考え方が参考になる。すなわち、本報告で用いたモデルの断層面上で、barrierがあまり片寄らずに分布していたと仮定すれば、比較的短周期の大きな加速度のphaseは破壊frontがbarrierに遭遇したとき、あるいはそれを破壊しないしり越えたときに生じ、破壊進行方向の著しい効果はむしろ相殺されると思われる。

文献一覧

宇佐美龍夫

1975 『資料日本被害地震総覧』東京大学出版会
表俊一郎・三宅昭春・楢橋秀衛

1979 「大地震時の震央域に於ける地動最大加速度(転倒墓石による最大加速度と強震記録との対比)」『日本建築学会大会学術講演梗概集』, pp. 463~464。

金森博雄・安藤雅孝

1973 「関東大地震の断層モデル」『関東大地震50周年論文集』, pp. 89~101。

建設省土木研究所

1974 「明治以降の本邦の地盤液状化履歴」『土木研究所彙報』第30号。

震災予防調査会

1925 a 「関東大地震調査報告」『震災予防調査会報告』第100号, 甲, pp. 94

1925 b 同上 第100号, 甲, pp. 165~231。

1926 c 同上 第100号, 丁, pp. 15~16。

宮野道雄

1979 「関東大地震の理論地震波計算による最大変位分布と被害分布の対応性」『土木学会第34回年次学術講演会講演概要集』第1部, pp. 300~301。

望月利男・小林計代

1976 「単体の運動から地震加速度を推定するための研究—単体の動的挙動の解析—」『日本建築学会論文報告集』第248号, pp. 63~70。

望月利男・宮野道雄

1980 「地震被害に及ぼす地盤の寄与」『第8回地

- 盤震動シンポジウム』, pp. 43~48。
 望月利男・宮野道雄・松田磐余
 1978 「1923年関東大地震における木造家屋の被害
 の検討—震央距離・地形と全壊率の関係—」
 『日本建築学会論文報告集』第270号,
 pp. 81~90。
 物部長穂
 1933 『土木耐震学』常磐書房, pp. 48~50。
 Ando, M.
 1974 "Seismo-tectonics of the Kanto Earthquake"
 Journal of Physics of the Earth, Vol. 22 :
 pp. 263~277。
 Bouchon, M.
 1978 "A dynamic source model for the San
 Fernand Earthquake" Bull. Seism. Soc.
 Am., Vol. 68 : pp. 1555~1576。
 Das, S. and Aki, K.
 1977 "Fault plane with barriers ; a versatile
 earthquake model" J. Geophys. Res., Vol.,
 82 : pp. 5658~5670。
 Sato, R.
 1975 "Fast computation of theoretical seimog-
 rams for an infinite medium. Part 1.
 Rectangular fault" Journal of Physics of
 the Earth, Vol. 23 : pp. 323~331。

ON THE METHOD TO EVALUATE DISTRIBUTION OF SEISMIC INTENSITY IN THE SEISMIC MICROZONING

Part 3 : Relationships among Hypocentral Distance ·
 Radiation Pattern · Landforms and Seismic Intensity of
 the Great Kanto Earthquake

Toshio Mochizuki*, Iware Matsuda* and Michio Miyano**

Comprehensive Urban Studies, No. 11, 1980, pp. 127—139

This report investigates the relationships among hypocentral distance, landform, damage to wooden buildings and seismic intensity of the 1923 Great Kanto Earthquake. Moreover, the radiation pattern of seismic intensity following the effect of fault rupture is considered. In this report, hypocentral distance is defined as the shortest distance from the fault plane to each town (village).

* Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

** Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University