

氏名・(本籍)	さわ だ よし ひろ 澤 田 義 博
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 第 9 0 2 号
学位授与年月日	平成元年1月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最終学歴	昭和41年3月 東北大学理学部卒業
学位論文題目	岩盤における観測に基づく強地震動の特性に関する研究
論文審査委員	(主査) 教 授 高 木 章 雄      教 授 平 澤 朋 郎 教 授 浜 口 博 之 教 授 大 竹 政 和 助 教 授 長 谷 川 昭

## 論 文 目 次

### 緒 言

### 第1章 強地震観測網の展開

#### 1.1 観測点配置

#### 1.2 観測計器

#### 1.3 各観測地点の地盤特性

### 第2章 強地震観測とデータの概要

#### 2.1 1978年伊豆大島近海地震 (M=7.0)

#### 2.2 1978年青森県岩崎村付近の群発地震

#### 2.3 1980年伊豆半島東方沖地震 (M=6.7)

#### 2.4 1983年日本海中部地震 (M=7.7)

#### 2.5 1983年山梨県南東部の地震 (M=6.0)

#### 2.6 1987年福島県沖の地震 (M=6.6, 6.7)

2.7 1987年千葉県東方沖地震 (M=6.7)

第3章 強地震動特性－各種既往実験式との比較

3.1 最大加速度の距離減衰

3.2 最大加速度のマグニチュード依存性

3.3 既往スペクトルによる検討

第4章 強地震動特性－震源特性との関係

4.1 断層モデルによる検討

4.2 最大加速度と震源パラメータ

4.3 スケーリング則の検討

4.4  $f_{max}$  の検討

4.5 継続時間

第5章 議 論

5.1 観測した地震のテクトニクス的意義

5.2 テクトニクスが規定する地震発生の場合

5.3 今後の強地震予測に向けて

結 語

謝 辞

参考文献

# 論文内容要旨

## 緒言

災害を生ずる恐れのある地震について、これによる地震動を適確に予測することは、地震に対する対策を講じ災害を極力軽減するうえでとりわけ重要な課題である。このためには、地形や地質の影響が少なく、かつ震源に近い観測データに基づく強地震動の性質や震源特性との関係を明らかにすることが必要である。本論文では、この観点から岩盤での強地震観測網を展開し、これにより得られたデータに基づき、まず、従来からの統計的（経験的）予測・評価法を検証しその適用性を明らかにする。次いで、経験的手法では十分評価できない強地震動の特性も震源特性を考慮することにより評価できることを示すと同時に、各地震の震源特性と強地震動特性の関係を検討し、テクトニクスの背景の強地震動への反映についての考察と合わせ、今後の強地震動予測へ向けて提言を行うものである。

## 第1章 強地震観測網の展開

岩盤の強地震観測網を展開するにあたっては、伊豆半島や房総半島周辺、福島県の太平洋沿岸など、地震活動の活発な地域や強地震観測点のない地域を考慮して設置した。観測点の設置は1977年頃より開始し、1986年までに合計35の観測点を全国的に配置した(図-1)。強地震観測システムは、観測の時期や観測地点に応じ数種類が用いられてきているが、いずれも地震計は全て加速度計とし、レコーダー部はアナログあるいはデジタル記録方式を用いている。各観測地点の岩盤は花崗岩や安山岩、玄武岩、泥岩などがあるが、このうち主な地点について簡易な弾性波試験を行い、軟弱な表層や風化などの影響がないことを確かめた。また、泥岩の一部の観測点ではS波速度( $V_s$ )が0.5km/sec程度と低いが、これ以外の測点は、概ね $V_s$ が1 km/sec以上の速度値を示している。従来の強震計が多く設置されている堆積地盤の表層は $V_s$ が0.1~0.2km/sec程度であるので、ここに展開した強地震観測点はこれに比べかなりよい地盤であるといえる。

## 第2章 強地震観測とデータの概要

新たに展開した強地震観測網により、1977年以降我が国に発生した被害地震の大部分のデータを観測することができた。その多くは震源に最も近いデータを与えている。これらのデータの概要は次の通りである。(1)1978年伊豆大島近海地震(M7.0)；伊豆半島内の2ヶ所の観測点において、震源距離( $r$ )が10kmおよび30km程度、マグニチュード(M)が1~5.7の範囲の前震を含む多数の余震記録を得た。(2)1978年青森県岩崎村付近の群発地震； $r$ が5~8 kmの至近距離でMが2.3~3.9の群発地震を多数記録した。(3)1980年伊豆半島東方沖地震(M6.7)；本震は震源に最も近い観測点( $r \sim 17$ km)で最大加速度約173galを記録したのをはじめ、多数の余震記録も得ることができた。(4)1983年日本海中部地震(M7.7)；本震および最大余震(M7.1)

の記録を日本海側の陸域で震源域に最も近い観測点 ( $r \sim 50\text{km}$ ) と太平洋側の観測点で得た。前者の観測点では  $M$  が 4 クラスから 6 クラスの余震記録も得ている。(5)1983年山梨県南東部の地震 ( $M6.0$ )；震源に最短の観測点 ( $r \sim 25\text{km}$ ) で約118galの波形を記録したほか、 $M$  が 2.5~4.5の余震も十数個観測されている。(6)1987年福島県沖の地震 ( $M6.6,6.7$ )；特に、1987年4月7日の  $M6.6$  では震源に最も近い福島県の太平洋沿岸の観測点で約196galの最大加速度が観測された。(7)1987年千葉県東方沖地震 ( $M6.7$ )；震源域に最短の観測点 ( $r \sim 28\text{km}$ ) で約365galの記録が得られた。また、この観測点では  $M$  が3.6~5.2の十数個の余震記録も得た。

### 第3章 強地震動特性—各種既往実験式との比較

強地震動の実用的な予測手法として、現在のところ過去のデータに基づく各種の既往実験式による評価方法が多く用いられている。そこで、まずこれらの既往実験式の適用性を検証するため、本章では前章のデータに基づき強地震動の距離減衰やマグニチュード依存性およびスペクトル特性について検討した(図-2, 3, 4)。

まず、最大加速度(速度)の距離減衰について、伊豆半島東方沖、日本海中部、山梨県南東部、福島県沖および千葉県東方沖の各地震データにより検討した結果、福島県沖の  $M6.6$  の地震と千葉県東方沖地震の震源に最も近い観測点の最大加速度は既往式による期待値よりかなり上回っているが、これらを除くと、振巾の距離に対する減衰係数は最大加速度の場合1.5~2.0程度を示し、既往実験式が採用してきた値(1.7程度が多い)とあまり変わらないことを確認した。次に、最大加速度のマグニチュード依存性に関し、伊豆大島近海地震の前・余震、岩崎村群発地震や伊豆半島東方沖地震など震源に近い所でのデータを用いて調べたところ、 $M$  の係数は0.43~0.72に分布し、平均値は0.58であり、この値も従来提案されている  $M$  の係数値とほぼ同程度であることが判明した。一方、震源規模や伝播特性が総合的に反映されるスペクトル形について、既往の提案スペクトルと震源に最も近い観測点での観測値を比較した。これより、既往スペクトルは震源域に近い所では距離として断層からの最短距離を用いることにより観測値との適合性をより改善できることが明らかとなった。しかし、今回の観測データのうち、伊豆半島東方沖地震は既往スペクトルを下回るのに対し、福島県沖の  $M6.6$  の地震および千葉県東方沖地震はこれを大巾に上回る値を与えており、適合性が必ずしも良くない。この原因としては震源特性や断層と観測点の位置関係などが考えられるため、次章において強地震動と震源特性の関係を詳しく調べた。

### 第4章 強地震動特性—震源特性との関係

本章ではまず、既往式との差異を生じた地震に関し、その原因を震源特性から究明し、次いで、最大加速度と応力降下量、加速度スペクトルのスケーリング則と高周波限界( $f_{\max}$ )など、強地震源と震源特性の関係を検討した。

すなわち、既往スペクトルを下回った伊豆半島東方沖地震、これを大中に上回った福島県沖の M6.6 の地震および千葉県東方沖地震の強地震動波形を簡単な断層モデルによる理論波形と比較して震源過程を検討した。この結果、伊豆半島東方沖地震の規模は M にして 6.3 程度で、気象庁の M に比べ小さく、この場合の既往スペクトルは観測値との一致がより良好になること、千葉県東方沖地震では観測点が丁度断層の破壊が伝播する方向に位置し、方位依存性の影響が顕著に現れた結果と考えられること、さらに福島県沖の M6.6 の地震では方位依存性の効果に加え、断層の平均くいちがい量や応力降下量の相違も影響していることが明らかとなった。従って、強地震動の予測には断層の伝播方向や破壊の伝播方向や破壊の伝播速度などの震源過程を十分に考慮することが重要である。

次に、伊豆大島近海地震の前・余震、岩崎村群発地震および伊豆半島東方沖地震の余震記録から震源パラメータを求め、これに各地震の本震のパラメータを加えて最大加速度値と震源パラメータの関係を調べた。最大加速度を応力降下量で正規化した値を、震源距離を断層の半径で正規化した値に対してプロットすると、両者の間には明瞭な相関関係が成立する。この関係は(震源距離/断層の半径)が 1.5~200 程度まで (M では 1~7.7) 広範囲にわたり成立するほか、確率モデルを用いて予測される最大加速度の理論値とも良く整合する(図-5)。これから、地震動の最大加速度を推定するうえで、震源域の規模と応力降下量は大きな影響を及ぼすといえる。

また、小地震の記録を用いて大地震の地震動を予測するいわゆる半経験的予測手法においては加速度スペクトルのスケール則が重要な課題である。このため、日本海中部地震、山梨県南東部の地震および千葉県東方沖地震で得られたデータから、M の異なる地震のフーリエスペクトル比を用いて、スケール則を検討した。その結果、M が 5 程度以下では  $\omega^{-2}$  モデル、M が 7 以上ではバリエーションモデルが適用できることが判った(図-6)。

さらに、地震波の加速度スペクトルの高周波限界 ( $f_{max}$ ) について、伊豆半島東方沖地震、山梨県南東部地震および日本海中部地震の本・余震の記録を用いて検討した。同時にコーナー周波数 ( $f_c$ ) も求めたが、 $f_c$  は地震モーメント ( $M_0$ ) に強く依存するのに対し、 $f_{max}$  は伝播経路の Q 値を補正した場合としない場合で若干分布が異なるものの、 $M_0$  にかかわらず概ね 6~20 Hz 程度に比較的安定に分布する。このことから、 $f_{max}$  が仮に震源特性に起因するとしても地震規模などにそれほど依存する量ではないと推測される(図-7)。

最後に、各地震の本震波形の継続時間と断層パラメータの関係を調べ、強地震動の継続時間は断層の破壊に要する時間と強く関係していることを確認した。

以上の各検討により、強地震動と震源特性の関係がかなりの程度明らかになったといえる。

## 第 5 章 議 論

強地震動の予測には、どこにどのような地震をいつ想定するか、すなわち、想定地震の問題と、想定地震による強地震動をいかに評価するか、いわゆる狭義の地震動予測手法の問題があ

る。

最初の問題については、まず、我々が観測した地震を例にとり上げ、それらの発生のテクトニクス上の背景を概観するとともに、地震発生の場が強くテクトニクスあるいは地質構造、速度構造に依拠していることなど、強地震動特性がテクトニクス背景をどの様に反映するかについて議論した。例えば、関東周辺で近年発生した主な地震（その多くを我々は観測した）は最新のテクトニクスモデルにより明瞭に説明することができる。また、地震発生の場は、プレートの力学場に支配される破壊様式で発生するものといえる。今後、テクトニクスに基づく地震区分と発生様式の詳細化、強地震観測などによる震源過程の研究の進展により、地震動予測の精度を格段に向上させることが期待される。

後者の問題については、従来用いられている簡便な経験的（統計的）手法により強地震動の平均的な評価は十分可能であるが、個々の地震の震源特性などが強地震動に及ぼす効果を評価するには必ずしも十分ではない。このような場合には比較的簡単な断層モデルでもそれらの効果をかなりの程度評価でき、断層の破壊の方向や速度が地震動予測において非常に重要であることを示した。また、最大加速度の応力降下量依存性、スケーリング則、 $f_{max}$  や継続時間などの検討結果は、確定論又は確率論的な予測手法を今後さらに発展させるうえで有用といえよう。

## 結 語

地表面の影響を受けない、かつ震源に近い観測データに基づく強地震動の性質を明らかにするため、岩盤の強地震観測網を全国に展開し、1977年以降、我が国に発生した主な被害地震の記録を得ることができた。

本論は、これらの観測データに基づき、既往の各種実験式の適用性を明らかにするとともに、強地震動に及ぼす震源特性の影響を破壊の伝播方向や速度、応力降下量などにより明らかにした。また、強地震動のスケーリング則や  $f_{max}$  などについて検討する一方、テクトニクスの背景の強地震動予測への反映を考察し、これらを合わせて今後の予測への提言としてまとめた。

しかし、ここで用いたデータは  $M$  の大きなものは少ないなど、必ずしも十分なデータとはいえない。近年、各機関において岩盤の強地震観測記録の重要性が認識されつつあるが、今後さらにこれらの観測施設と観測データの充実が、地震動予測の発展に不可欠であることを強く指摘したい。

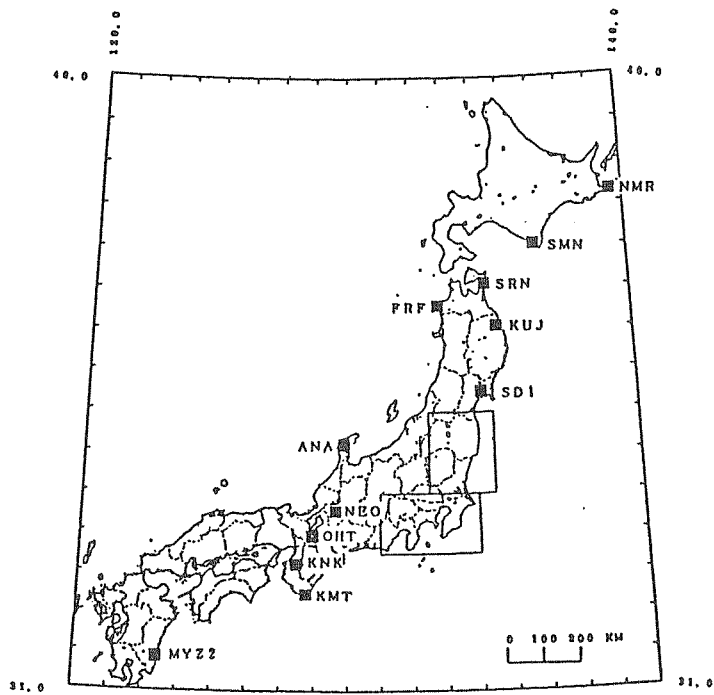


図 1(1) 岩盤の強地震観測点 (関東, 福島, 茨城を除く)

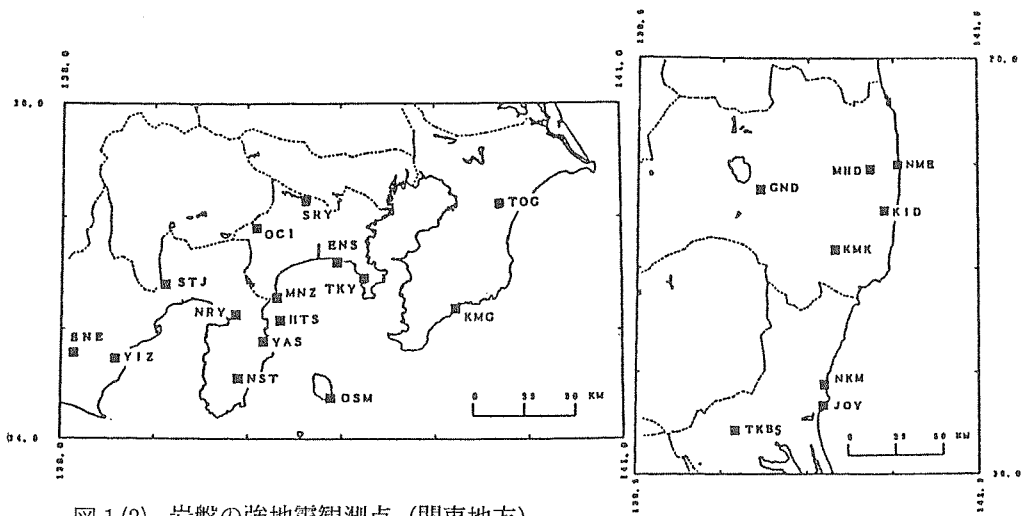


図 1(2) 岩盤の強地震観測点 (関東地方)

図 1(3) 岩盤の強地震観測点  
(福島, 茨城)

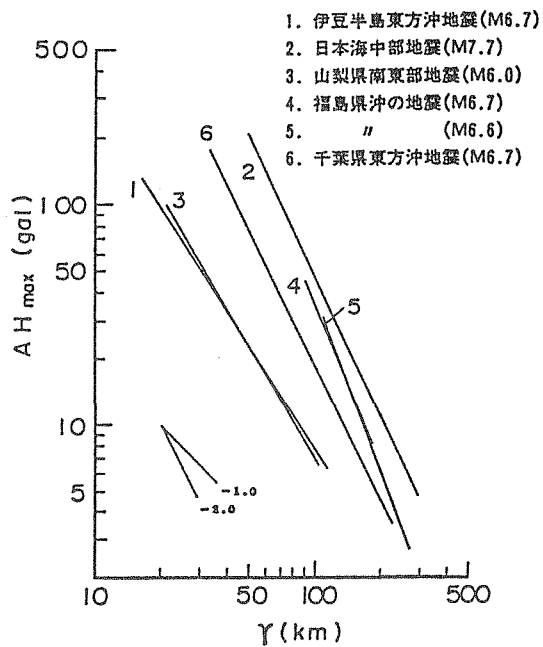


図2 各観測地震の水平成分の最大加速度 ( $A_{Hmax}$ ) と震源距離 ( $r$ ) の関係

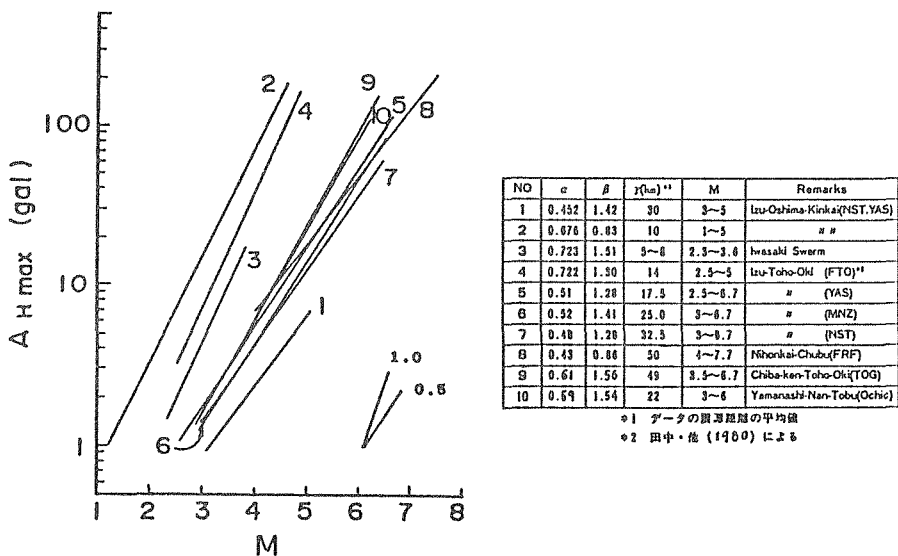
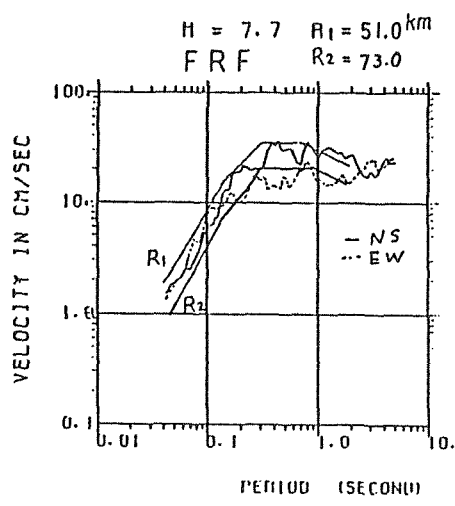
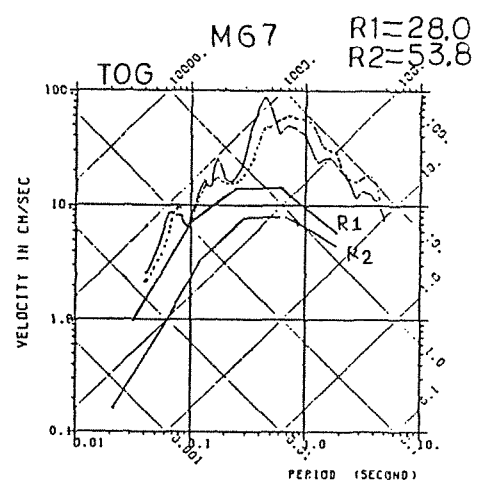


図3 各観測地震の水平成分の最大加速度 ( $A_{Hmax}$ ) とマグニチュード ( $M$ ) の関係





日本海中部地震 (M 7.7)



千葉県東方沖地震 (M 6.7)

図4 各観測地震の震源に最も近い観測点での加速度波形の速度応答スペクトルと既往スペクトルの比較 ( $h=0.05$ )

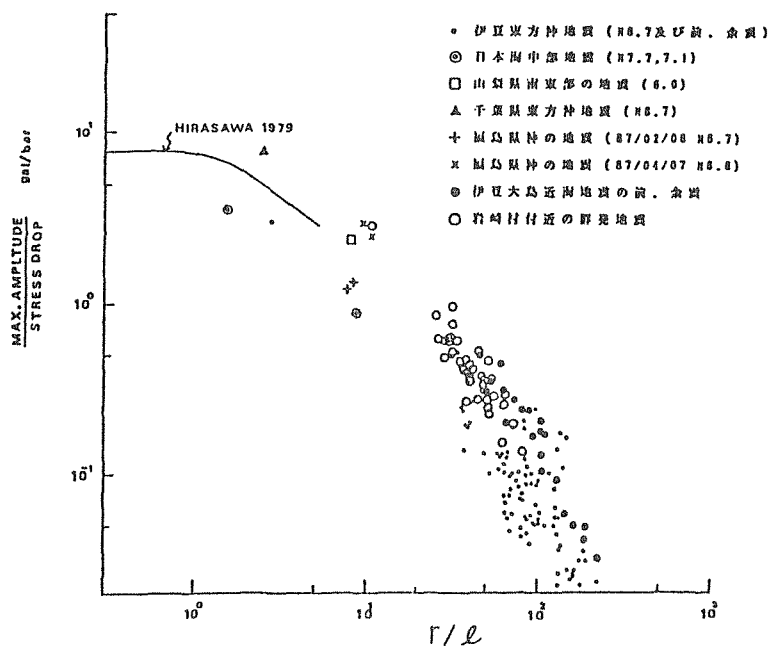


図5 水平成分の最大加速度 ( $A_{Hmax}$ ) / 応力降下量 ( $\Delta\sigma$ ) と震源距離 ( $r$ ) / 断層の半径 ( $l$ ) の関係

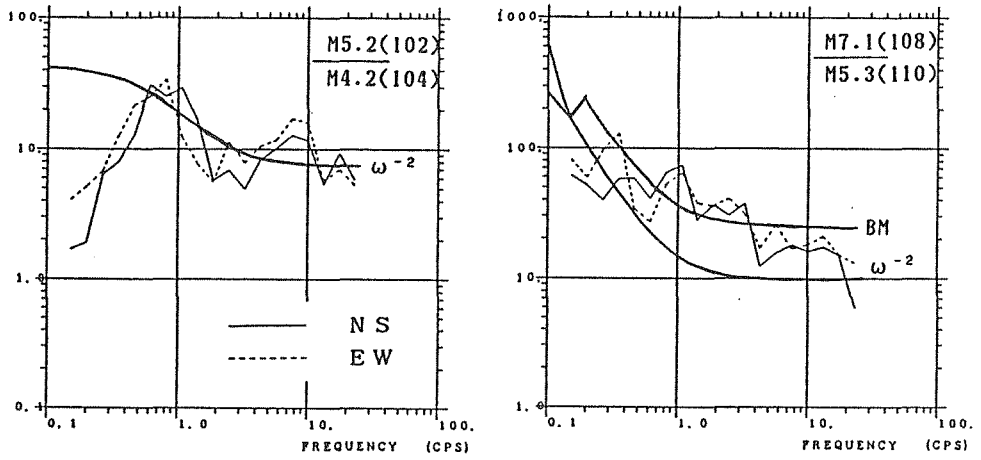


図6 FRFにおける観測波のフーリエスペクトル比と理論値の比較  
(日本海中部地震の余震)

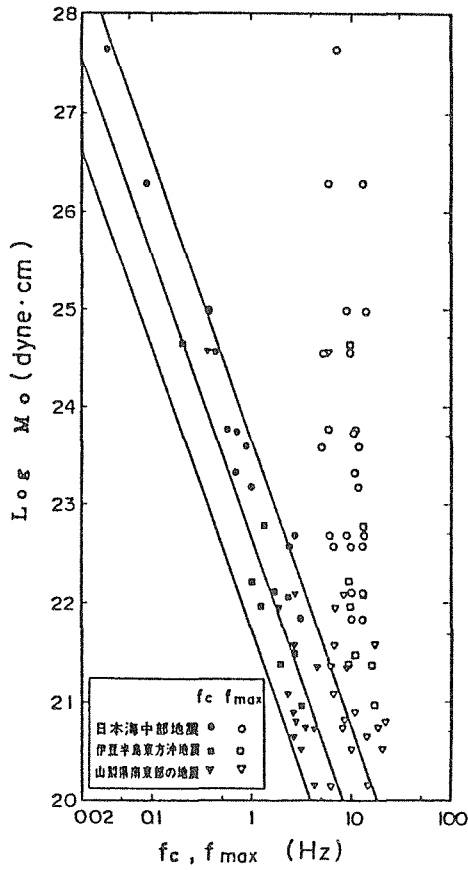


図7 コーナー周波数 ( $f_c$ ),  $f_{max}$  と地震モーメント ( $M_0$ ) の関係  
( $Q$  補正あり)

## 論文審査の結果の要旨

災害を生ずる恐れのある地震について、これによる地震動を的確に予測することは、地震に対する対策を講じ災害を軽減するうえでとりわけ重要な課題である。このためには、特殊な地形や地質の影響が少なく、かつ震源に近い観測点のデータに基づいて、強地震動の性質やこれと震源特性との関係を明らかにすることが必要である。こうした観点から澤田義博提出の論文は、強地震観測網を新たに全国の岩盤上に展開して得た観測データに基づき、強地震動と震源の特性を詳細に検討したものである。

1977年頃から同人は加速度計による岩盤上の強地震観測を開始し、1986年までには計35地点にのぼる観測網を展開した。その多くがS波速度1 km/sce以上の硬い岩盤であることが他の観測には見られない特徴である。これにより、1977年以降わが国に発生した被害地震のうち、1980年伊豆半島東方沖地震、1983年日本海中部地震、1987年千葉県東方沖地震など、主な地震の震源に近い岩盤上の貴重な観測データを得た。

これらのデータにより、最大加速度の距離減衰とマグニチュード依存性および強地震動のスペクトル特性について、実用的予測手法で用いられている既往式の適用性が検討された。その結果、大部分のデータは既往式にほぼ適合することが確認されたが、千葉県東方沖地震や福島県沖の地震など既往式に適合しない地震も見出された。

既往式を満足しない地震に関し、観測波形と断層モデルによる理論波形を比較してその震源過程を詳細に検討した。その結果、破壊の伝播に起因する波動振幅の方位依存性、平均くい違い量、応力降下量などが波形に大きく影響していることを示した。最大加速度はとくに応力降下量に強く依存するが、確率モデルに基づく予測値によく整合することが見出された。また、地震のスケイリング則に関しては、マグニチュード5程度以下の地震は「周波数2乗モデル」が、7以上の地震は「バリエーションモデル」が適合することを明らかにした。さらに、加速度スペクトルの高周波数限界 ( $f_{max}$ ) は地震モーメントの大きさに関わらずほぼ一定で6~20Hz程度であること、強地震動の継続時間は断層の破壊に要する時間と強く関係していることなども明らかにした。

以上述べた如く、澤田義博提出の論文は、自らの貴重な観測データに基づいて、強地震動が個々の地震の断層運動の詳細に強く支配されていることを実証するとともに、強地震動の予測には地震テクニクスとそれに基づく震源過程の特性を十分に考慮することが重要であることを指摘した。これは、同人が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、澤田義博提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。