

## $\omega^{-2}$ -scaling 則に基づく経験的 Green 関数法による波形合成と $f_{\max}$

横井 俊明・入倉孝次郎

### MEANING OF SOURCE CONTROLLED $F_{\max}$ IN THE EMPIRICAL GREEN'S FUNCTION TECHNIQUE BASED ON $\omega^{-2}$ -SCALING LAW

By Toshiaki YOKOI and Kojiro IRIKURA

#### Synopsis

The source processes of a few earthquakes were checked by waveform simulation using the empirical Green's function technique based on the  $\omega^{-2}$ -spectral scaling law. Synthetic waveforms were successfully fit to the observed ones, and their sources were supposed to be a single rupture. The small event used as the empirical Green's function in the synthesis of large event, could be synthesized with the smaller event. In the method of synthesis used here, it is considered that barriers on the fault plane are broken in the process of growth and mutual connection of small cracks. These let us guess that the stronger barriers were distributed sparsely and the weaker ones densely. And, according to the slip weakening model, it is supposed that the  $f_{\max}$  depends on the barrier interval on the fault plane or small crack size. Supposing the distribution of barriers as given in the hierarchy model, some physical parameters will be able to be obtained from the observed  $f_0$ - $M_0$  relation and the  $f_{\max}$ - $M_0$  relation expected to be confirmed by observation. Thus, the  $f_{\max}$  can be a new informant about heterogeneity in seismic source.

#### 1. はじめに

高周波数帯域における震源スペクトルのスケーリングの問題を考える時、加速度スペクトルの平坦部の高周波数側での限界周波数 ( $f_{\max}$ ) が重要となる<sup>1)</sup>。特に地震工学・耐震設計分野では、建造物に加えてその内部の配管系・機器系の耐震性が問題となる事から、従来検討対象となっていた周波数帯域よりさらに高周波数帯域までが検討対象とされるようになり、 $f_{\max}$  も含めた高周波数帯域での加速度スペクトル形状の予測が試みられている<sup>2)</sup>。

一方、地震学的な検討対象としての  $f_{\max}$  は、高周波数成分の発生源である不均質な断層破壊過程・伝播経路中での高周波数帯域での減衰効果・観測点近傍の高周波数帯域での地盤応答特性、さらには観測機器自体の高周波数帯域での応答特性等定量的評価の難しい問題と直接関係している。Hanks (1982)<sup>1)</sup> による提唱以来の  $f_{\max}$  に関する研究は木下 (1988)<sup>3)</sup> に詳しく総括されている。また、最近では、基盤層に達する深井戸内での観測記録を使って、 $f_{\max}$  が震源の位置により顕著に変化する事が示され、震源分布のテクトニックな条件による分類が行われた他、深井戸上下の観測記録の比較検討により、堆積層の増幅特性のピーク及び地震波の入射角によっても  $f_{\max}$  がコントロールされる事が示された<sup>4)5)</sup>。

一方、大地震の震源域またはその近傍に発生する小地震からの震動が、大地震による強震動と同様の伝播経路の減衰効果・観測点近傍の地盤応答特性の影響を受けていると考えられる事を利用して、小地震の

観測波形の重ね合わせによって大地震時の強震動の合成を行う経験的 Green 関数法では<sup>6)</sup>、小地震と大地震の震源過程の違いが仮定される<sup>7)</sup>。従って現在までに幾つか報告のある  $f_{\max}$  の地震モーメント依存性が重要な意味を持つ<sup>2), 7)-12)</sup>。経験的 Green 関数法においては、線形応答の範囲において、すべての Path 及び Site effect は経験的 Green 関数である小地震波形に含まれ、波形の重ね合わせの効果は小地震と大地震の震源過程の違いのみを表すと考えられる為、Source Controlled  $f_{\max}$  と Path 及び Site Controlled  $f_{\max}$  とが合成波形に与える影響は異なったものとなる。これらのうち Source Controlled  $f_{\max}$  を波形合成に取り入れる方法が確立されていないため、合成波形に現れる高周波成分を  $f_{\max}$  と地震モーメントの経験的關係から決められた大地震に対するカットオフ周波数を持つハイカットフィルターで除去する必要がある<sup>2)</sup>。

ところで、 $f_{\max}$  と密接に関係する高周波数成分発生源について、動的クラックモデルにおいては、滑らかに破壊する単独クラックの場合、破壊が停止する際にクラック縁辺部から発生するとされる<sup>13), 14)</sup>。一方、不均質な破壊伝播の立場では、震源内部のバリエーから発生するとされる<sup>15), 16)</sup>。不均質性の近似的表現として提唱されたモデルのひとつに、震源断層が複数の小クラックにより構成されるとする Specific Barrier Model がある<sup>10), 11), 17)</sup>。この問題については、規模の大きい地震に対して、高周波数成分が震源内部から不均質に発生している事が、観測データの解析から報告されている<sup>18)</sup>。

多くの観測事実に基づく地震の  $\omega^{-2}$ -scaling 則に基づいて、小地震と大地震の震源過程の違いを仮定する経験的 Green 関数法<sup>19)</sup>は、不均質な破壊伝播による高周波数成分発生と単一の破壊としての変位分布生成による低周波数成分を合わせた立場を取るもので、小クラックの成長により小クラック間を区切るバリエーが最終的に破壊され、小クラックが結合して単独の破壊に成長するという意味付けを持つ<sup>18)</sup>。この時、高周波数成分はバリエーから発生するとされるので、加速度波形及びスペクトルには、震源内部でのバリエーの分布が強く反映されると考えられる。

震源域の不均質の分布は、震源の大きさの分布にも影響を与える。これに関する情報を提供するものひとつとしてコーナー周波数の地震モーメント依存性 ( $f_0$ - $M_0$  関係) があげられる。 $\omega^{-2}$ -model<sup>21)</sup>では、 $M_0 \propto f_0^{-3}$  とされている。Iio(1986)<sup>22)</sup>は、 $M_0 \sim 10^{25}$  dyne·cm 以下で  $f_0$ - $M_0$  関係が変化するとしている。Chouet *et al*(1978)<sup>22)</sup>は  $f_0$ - $M_0$  関係が  $M_0 \propto f_0^{-3}$  から  $f_0 = \text{const}$  に変化する事、及びその変わり方に地域性がある事を示した。一方、Yoshioka and Umeda(1991)<sup>24)</sup>は  $10^{17} \sim 10^{26}$  dyne·cm の広 Dynamic Range では、 $M_0 \propto f_0^{-4}$  となるとしている。

一方、Fukao and Furumoto(1985)<sup>25)</sup>は、幾つもの特徴的なバリエーインターバルを持つ巨視的には自己相似的なバリエー分布からなり、平均的な "Barrier Height" がその階層の特徴的なバリエーインターバルに比例する様な階層性モデルを提唱し、観測されている Gutenberg-Richter 関係及び本震と最大余震との間に見られるマグニチュードギャップを説明した。

ところで、Source Controlled  $f_{\max}$  のはっきりした物理的イメージは、Slip Weakening Model により破壊先端の Cohesive Zone の存在と結び付けて与えられた<sup>10), 11), 17)</sup>。それによれば、 $f_{\max}$  は、Average Cohesive Force、クラックの直径 (バリエーインターバル)、クラック内の応力降下量、破壊伝播速度によって規定される。つまり、 $f_{\max}$  にはそれらの量に関する情報が含まれていると期待される。

また、Slip Weakening Model によれば、破壊され残ったバリエーがある場合に相当する Multiple Shock の場合  $f_{\max}$  は個々のサブイベントに関係する量となるので、観測データの整理の際には単独の破壊による地震と Multiple Shock による地震とを分別する必要がある<sup>26)</sup>。その確実な判定法は、想定した震源過程 (Single または Multiple) にあわせて  $\omega^{-2}$ -scaling 則に基づく経験的 Green 関数法による波形合成を行い、合成波形を観測波形と比較することにより想定した震源過程が現実的であるか否かを確認する事である<sup>27)</sup>。

本稿では、 $\omega^{-2}$ -scaling 則に基づく経験的 Green 関数法による波形合成により、単独の破壊である事が確認された地震にも  $f_{\max}$  の地震モーメント依存性が見られる例を示す。また、 $\omega^{-2}$ -scaling 則に基づく

経験的 Green 関数法の物理的意味付け<sup>20)</sup>と Slip Weakening Model による  $f_{\max}$  の説明<sup>10), 11), 17)</sup>を基に、不均質性の階層性分布を仮定したときの、 $f_{\max}$  の地震モーメント依存性の意味について考察する。

## 2. $\omega^{-2}$ -scaling 則と経験的 Green 関数法による波形合成

経験的 Green 関数法によって強震動予測を行う時、大地震と小地震の震源特性の違いの定量的評価が問題となる。これは、地震の Scaling 則の解明により解決されると期待される。

$\omega^{-2}$ -scaling 則<sup>21)</sup>は、(1) 観測事実とよく合う事<sup>28)-30)</sup>、(2) 動的断層モデルに基礎付けられる為<sup>31)</sup>、経験的 Green 関数法への応用にあたって、伝達関数のモデル化が可能な事、さらに、(3) それによる強震動合成が良好な結果を与える事<sup>19)</sup>から、その有効性が確認されている。

ところで、 $\omega^{-2}$ -scaling 則は応力降下量一定の単独の破壊系列を前提としているが<sup>21)</sup>、この前提は厳密には成立しない。

応力降下量は、ひとつの地震系列の中でも、ある幅 ( $\Delta\sigma = 10 \sim 400$  bar) でばらつく<sup>32)</sup>。この応力降下量の違いを考慮に入れた波形合成法は、Irikura(1986)<sup>19)</sup>により与えられている。

一方、M7 を超える大地震に対して多重震源の事例が数多く観測されている (1969 年十勝沖地震(M=7.9)、1978 年宮城県沖地震(M=7.4)、1983 年日本海中部地震(M=7.7)等)。このような多重震源の地震に対しては、 $\omega^{-2}$ -scaling 則に従う破壊単位の集合体とみなす合成法が提案されている<sup>19), 27)</sup>。しかし、破壊単位から破壊単位へと破壊がジャンプする際の変速<sup>33)</sup>や破壊単位間のバリエーションが破壊されないのか、または破壊されるが高周波数成分を発生しないだけなのかといった震源過程論の側の問題が残っており、合成法が確立しているとは言い難い。ここでは、波形合成法が確立していると考えられる  $\omega^{-2}$ -scaling 則に従う単独の破壊単位同志を使った波形合成に基づく例について検討する。

応力降下量の違いを考慮した  $\omega^{-2}$ -scaling 則に従う地震の系列に対する波形合成法は次式で与えられる<sup>19)</sup>。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (r/r_{ij}) \cdot F(t) * (c \cdot u(t))$$

$$F(t) = \delta(t-t_{ij}) + (1/n') \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \delta(t-t_{ij} - (k-1) \cdot \tau / ((N-1) \cdot n')) \dots\dots\dots (1)$$

$$t_{ij} = (r_{ij} - r_0) / \beta + \xi_{ij} / V_r$$

- ここに、 $U(t)$  : 大地震の観測波形
- $u(t)$  : 小地震の観測波形
- $N$  : 断層面の大きさの比
- $c$  : 応力降下量 ( $\Delta\sigma$ ) の比
- $r$  : 小地震の震源距離
- $r_0$  : 大地震の発震点と観測点の間の距離
- $r_{ij}$  : 大地震を構成する小断層 ( $i, j$ ) と観測点の間の距離
- $\xi_{ij}$  : 発震点と小断層 ( $i, j$ ) の間の距離
- $t_{ij}$  : 小断層 ( $i, j$ ) に対する破壊伝播と、観測点との距離の差による時間遅れ
- $\tau$  : 大地震のライズタイム
- $n'$  : 波形の重ね合わせの際に現れる見かけの周期性を除去するための任意の整数
- $*$  : コンボリューションを表す

式中の  $F(t)$  は小地震と大地震の震源過程の違いを表す伝達関数で一種のフィルターである。 $F(t)$  の

時間軸上での形を Fig. 1 にしめす<sup>34)</sup>。Fig. 1 中先頭の  $\delta$  関数は、伝播中の破壊がバリエーにぶつかり破壊伝播速度が変化する時破壊面先端部から発生する高周波数成分に、後続の箱型の部分は破壊面の背後で小クラック群の結合により発生する低周波数成分に対応すると考えられる<sup>20)</sup>。なお、(1)式は入倉・安芸(1990)<sup>20)</sup>のモデルにおいて震源内部での最終変位量・応力降下量の分布を一様として単純化した形である。

(1)式中の整数  $N$  と  $c$  は地震モーメント比を用いた次式によって震源の物理パラメーター及び観測スペクトル比から得られる諸量と関係付けられる。また、応力降下量 ( $\Delta\sigma$ ) の比は、動的応力降下量、静的応力降下量のいずれでもよい<sup>27)</sup>。

$$N = (M_0^T/c \cdot M_0^E)^{1/3} = (L^T/L^E) = (f_0^E/f_0^T)$$

$$c = \Delta\sigma^T/\Delta\sigma^E$$

$$= (R_0^T/R_0^E) \cdot (f_0^T/f_0^E) \cdot (a_0^T/a_0^E)$$

ここに、添え字  $T$  は大地震、 $E$  は小地震を表し、 $L$  は震源の長さ、 $f_0$  は観測スペクトルのコーナー周波数、 $R_0$  は震源距離、 $a_0$  は加速度スペクトルのフラットレベル、 $\Omega_0$  は変位スペクトルのフラットレベルである。

また、合成の対象となる大地震が単独の破壊によるものか、多重震源によるものかは、次の二つの値を比較することにより判定できる<sup>27)</sup>。ここで、経験的 Green 関数として用いる小地震は、Single Crack と仮定する。この仮定は、M4~5 程度以下の地震を使えば満たされると考えられる<sup>32)</sup>。

- ・断層面の長さ(幅)の比

$$(L^T/L^E) = (f_0^E/f_0^T) \dots\dots\dots (2)$$

- ・大地震のサブイベントと小地震との半径の比

$$(\rho_p^T/\rho_p^E) = (a_0^E/a_0^T) \cdot (\Omega_0^T/\Omega_0^E) \cdot (f_0^T/f_0^E) \dots\dots\dots (3)$$

(2) 及び (3) の値がほぼ一致すれば大地震が単独の破壊によるものと判定され、(1)式による波形合成法が適用可能であると推定される。

(1)式により、単独の破壊と判断された地震の波形を合成した例を以下に示す。解析の対象としたのは、1983年日本海中部地震の第2最大余震(M=6.1)と、これらとほぼ同じ位置に起こった余震を京都大学理学部付属地震予知観測センターの黒磯・飯尾等が、青森県西津軽郡深浦町(震央距離約110km)において村松式速度型強震計<sup>35)</sup>によって観測した記録である<sup>36)</sup>。なお観測された速度波形に周波数領域で角周波数を乗ずることにより加速度波形を求めた。解析した地震の震源要素を Table 1 に示す。また、地震Aと地震B、及び地震Bと地震Cのスペクトル振幅比から求めた( $N, c$ )の値を Table 2 に示す。これらの地震は、ほぼ同じ伝播経路を伝わり、同様な Site 特性の影響を受けていると考えられるので、スペクトル形状の違いは震源特性の違いによるものである。

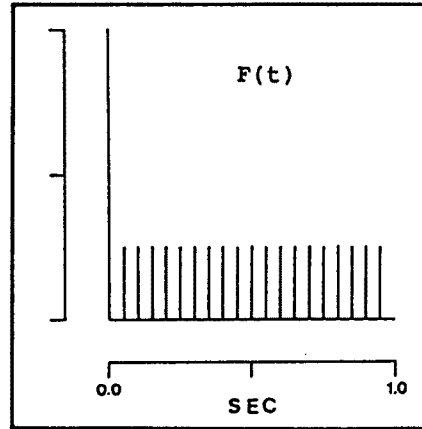


Fig. 1. An operation function for correcting the difference in slip velocity between the large event and the small event based on the  $\omega^{-2}$ -scaling model. [After Sumoto *et al.* (1987)<sup>34)</sup>]

Table 1. List of analysed earthquakes

|       | Data<br>(1983) | LAat. (N)<br>(d. m.) | Long. (E)<br>(d. m.) | Dep.<br>(km) | M<br>JMA |
|-------|----------------|----------------------|----------------------|--------------|----------|
| Eq. A | 6/9 21:49      | 40° 13.0'            | 138° 54.2'           | 23           | 6.1      |
| Eq. B | 6/10 16:20     | 40° 15.0'            | 138° 58.0'           | 57           | 5.0      |
| Eq. C | 6/12 14:02     | 40° 12.5'            | 139° 00.9'           | 42           | 3.9      |

Table 2. Ratio of source parameters of analysed earthquakes

|               | $\Omega_0$<br>(T/E) | $a_0$<br>(T/E) | $f_0$<br>(T/E) | $R_0$<br>(T/E) | $L$<br>(T/E) | $\Delta\sigma$<br>(T/E) |
|---------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|-------------------------|
| (Eq. A/Eq. B) | 110                 | 17             | 0.35           | 1.08           | 2.86         | 6.43                    |
| (Eq. B/Eq. C) | 10                  | 1.3            | 0.37           | 1.07           | 2.69         | 0.51                    |

Table 3. Source parameters used in synthesis

|          | N | c   | L (T) | L (E) | $n'$ | $V, \text{km/s}$ | $\beta \text{ km/s}$ |
|----------|---|-----|-------|-------|------|------------------|----------------------|
| B from C | 3 | 1.0 | 1.5km | 0.5km | 30   | 3.0              | 3.7                  |
| A from B | 3 | 4.0 | 3.3km | 1.1km | 30   | 3.0              | 3.7                  |

(1)式により、地震 C から地震 B を 地震 B から地震 A の波形合成を行った。合成に使用したパラメータの値を **Table 3** に示す<sup>27)</sup>。合成波形と観測波形の比較及びスペクトル振幅比を **Fig. 2 (a), (b)** に示す。また、地震 C の観測波形を **Fig. 2 (c)** に示す。 $f_{\max}$  の地震モーメント依存性が合成波形に影響するのを避けるために、両者共カットオフ周波数 8 Hz のハイカットフィルターで処理されている。速度波形・加速度波形共に、主要動・後続波群の位相・包絡線形状まで良い一致を示し、スペクトル振幅比（合成波形/観測波形）は、ほぼ 1.0 である。即ち、地震 A, B, C はそれぞれ  $\omega^{-2}$ -scaling 則に従う単独の破壊単位によるものであると推定される。

ハイカットフィルターで処理する前の加速度スペクトルに注目すると (**Fig. 3 (a)**)、これら 3 個の地震波形の間にも、わずかに  $f_{\max}$  の地震モーメント依存性が観察される (**Fig. 3 (b)**)。上述のように、これらの震源は単独の破壊であるので  $f_{\max}$  の原因として、Specific Barrier Model<sup>10),11)</sup> のように断層面内に破壊されずに残ったバリアーを考える事はできない。この問題については、4 章で考察する。

### 3. 合成波形に現れる Source Controlled $f_{\max}$ の影響について

$\omega^{-2}$ -scaling 則に従う波形合成では、**Fig. 4 (a), (b)** に示す様に、 $\omega^{-2}$ -model のスペクトル形状を持つ小地震波形から、同様に  $\omega^{-2}$ -model のスペクトル形状を持つ大地震の波形が合成される。合成によってスペクトルは、大地震のスペクトルのコーナー周波数よりも低周波数帯域で  $cN^3$  倍され、小地震のコーナー周波数よりも高周波数帯域では  $(cN^3)^{1/3}$  倍される (**Fig. 4 (c)**)。つまり、 $f_{\max}$  が現れる周波数帯域では、小地震波形の重ね合わせの効果によるスペクトル形状の変化は無く、合成波形の  $f_{\max}$  は小地震波形の  $f_{\max}$  そのものとなる。ところが、 $f_{\max}$  は地震モーメント依存性を持つ<sup>2),7)-12)</sup>。例えば、イタリアの地震に対しては<sup>8)</sup>、

$$f_{\max} = 7.31 \times 10^3 M_0^{-0.12}$$

釜江他(1990)<sup>2)</sup>は、南大阪地域で観測された強震記録の  $f_{\max}$ - $M_0$  関係がこの式とよく一致する事を示している (**Fig. 5**)。

この関係によると大小地震のスペクトル比は、大地震の  $f_{\max}$  以上の周波数帯で減少する (**Fig. 4 (c)**)。故に、合成波形を観測波形に一致させるためには、前者に次式で表されるハイカットフィルターを施す必要がある<sup>2)</sup>。ここに、添え字  $T$  は大地震、 $E$  は小地震を示す。

$$H(\omega) = [1 + (\omega/2\pi f_{\max}^E)^2] / [1 + (\omega/2\pi f_{\max}^T)^2]$$

次にこのハイカットフィルターの意味について考察する。(1)式をフーリエ変換すると、次式を得る。

$$U(\omega) = \{c \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\tau/\tau_{ij}) \cdot F(\omega)\} \cdot u(\omega) = K(\omega) \cdot u(\omega) \dots \dots \dots (2)$$

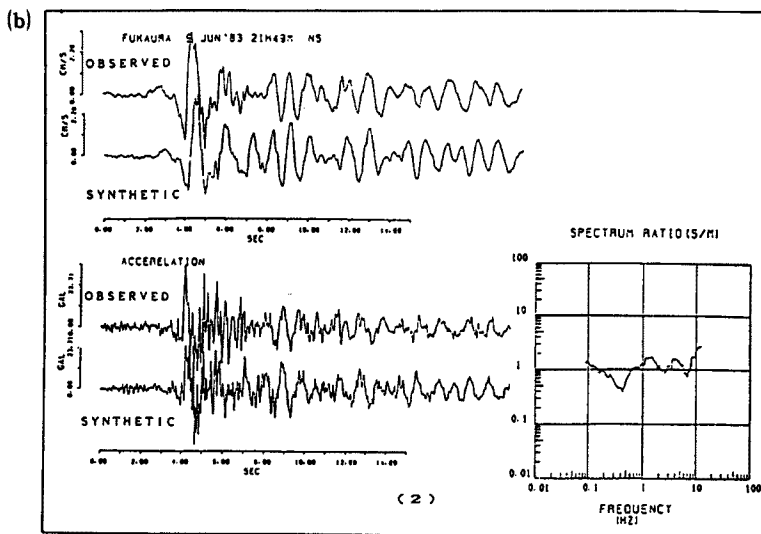
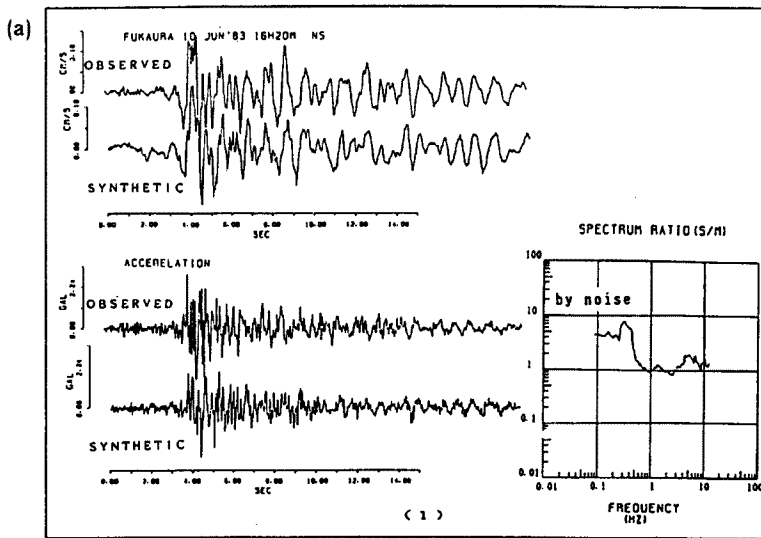


Fig. 2.(a) Synthetic result for event B. Observed seismogram for event C is used as the empirical Green's function. (Upper left) Comparison of observed and synthetic velocity seismograms of NS-component. (Lower left) Comparison of observed and synthetic accelerograms. (Right) Spectral ratio of synthetic to observed. Growth of the spectral ratio in the frequency lower than 0.5Hz is caused by the noise contained in the event C.

Fig. 2.(b) Synthetic result for event A. Observed seismogram for event B is used as the empirical Green's function. (Upper left) Comparison of observed and synthetic velocity seismograms of NS-component. (Lower left) Comparison of observed and synthetic accelerograms. (Right) Spectral ratio of synthetic to observed.

(c)

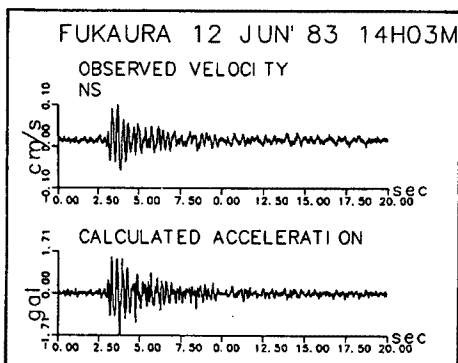


Fig. 2.(c) Observed velocity seismogram and accelerogram of event C.

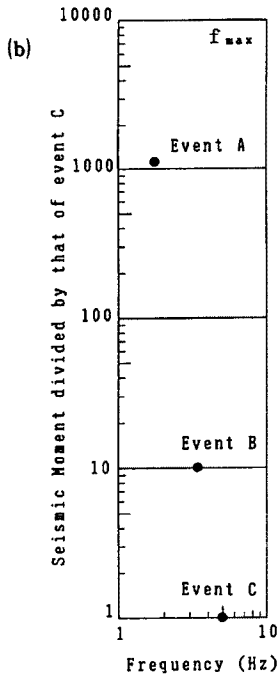
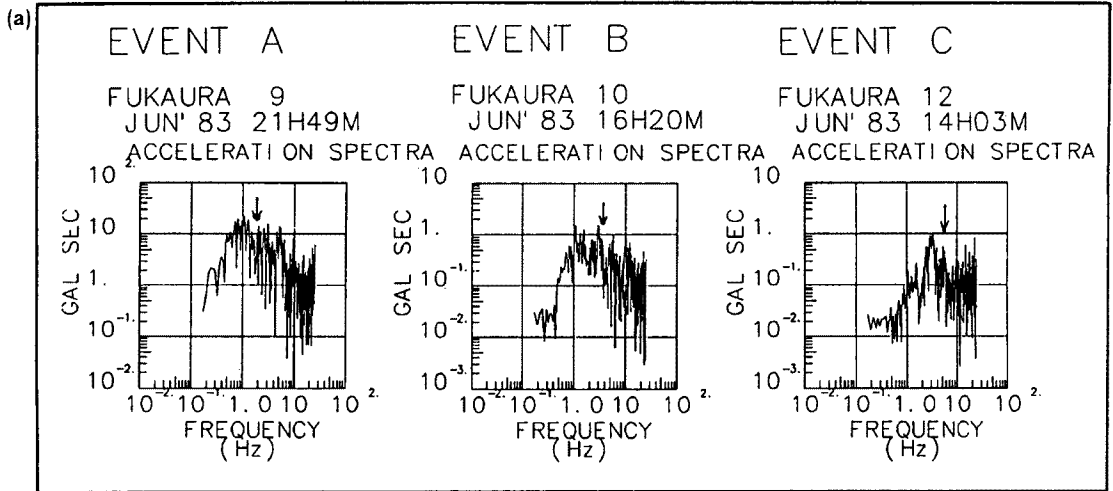


Fig. 3.(a) Observed acceleration spectra of three events. The change of spectral shape can be shown, both in low frequency side and in high-frequency side. The  $f_{max}$  of each event is indicated with vertical arrow. The values of  $f_{max}$  used in Fig. 3.(2) are read in this figure.  
 Fig. 3.(b) Relation of  $f_{max}$  to relative seismic-moment. The values of  $f_{max}$  are read in Fig. 3.(a). And the values in Table 2 are used for relative seismic moment.

ここに  $K(\omega)$  は波形の重ね合わせによる増幅特性である (Fig. 4 (c))。フィルタリング処理後のスペクトルは、次式で表される。

$$\{H(\omega) \cdot U(\omega)\} = \{H(\omega) \cdot K(\omega)\} \cdot u(\omega) \dots\dots\dots (3)$$

この処理により合成波形は観測波形に、より似てくるので、(3)式で表現される様な効果は実際に起こっていると考えられる。

(3)式の操作により、Fig. 1 の伝達関数  $F(t)$  は Fig. 6 に示す様に変形され、先頭の  $\delta$ -関数が幅を持った関数で置換される。この部分は震源断層面上のバリヤーから生じるものであるので<sup>20)</sup>、 $f_{max}$  もまたバリヤーの分布・性状などを反映した量であると考えられる。これは、Specific barrier model<sup>10), 11)</sup> による、Cohesive Zone の存在による  $f_{max}$  の説明とよく似ている。しかし、前者ではバリヤーは最終的に破壊されるが、後者では破壊されずに残る点で異なっている。

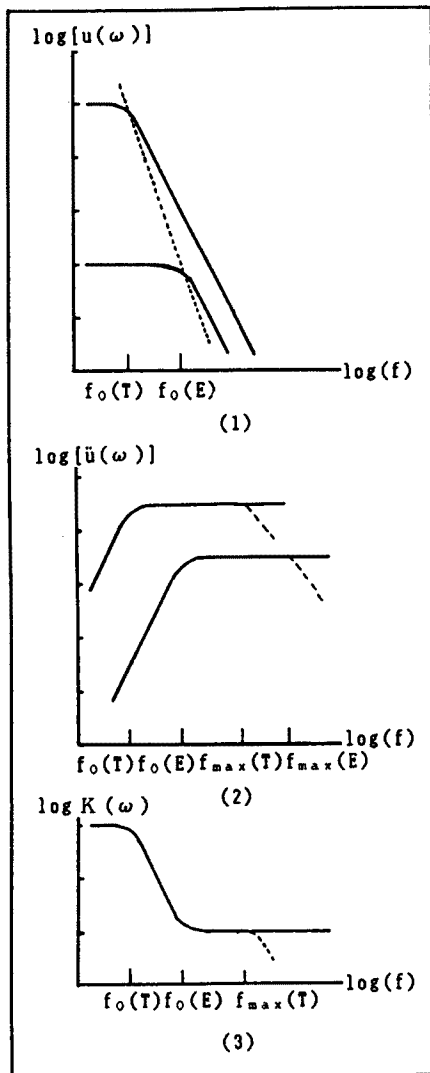


Fig. 4 Amplification effect of the synthesis by the empirical Green's function technique based on  $\omega^{-2}$ -scaling law. (1) Displacement spectra of target and element events. (2) Acceleration spectra of them. Spectral fall off at  $f_{max}$  (drawn with dashed lines) is not considered in present technique. (3) Amplification factor  $K(\omega)$ . Solid line shows expected behavior of  $K(\omega)$  by  $\omega^{-2}$ -scaling law. But seismic-moment dependency of  $f_{max}$  gives the decay of  $K(\omega)$  in the frequency range higher than  $f_{max}$  of the target event.

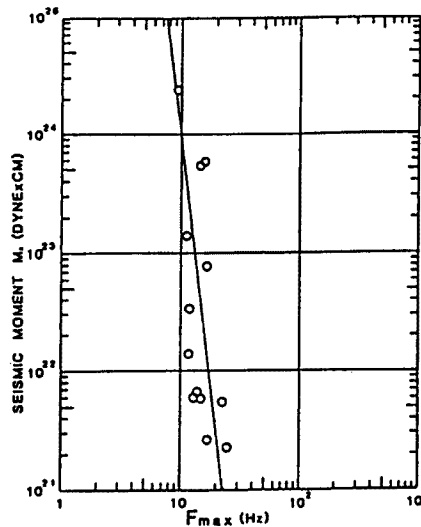


Fig. 5. Seismic moment dependency of  $f_{max}$  for events occurring in south-Osaka region. Solid line denotes the relation obtained by Faccioli (1986)<sup>8)</sup>. [After Kamae *et al.* (1990)<sup>2)</sup>

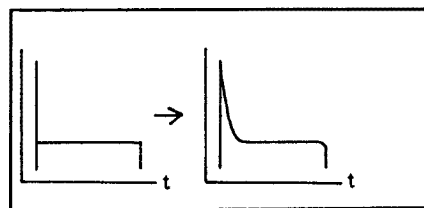


Fig. 6. Change of operation function  $F(t)$  by processing with high-cut filter  $H(\omega)$ . Main of the change occurs in the  $\delta$ -function part of  $F(t)$ .

#### 4. $f_{max}$ のマグニチュード (地震モーメント) 依存性の震源過程における意味

$\omega^{-2}$ -scaling 則に従う波形合成の意味付け<sup>20)</sup>によれば、観測事実に見られるように<sup>18)</sup>、大地震の震源断層面内で、高周波数成分は縁辺部からではなく、内部から発生する。したがって、 $f_{max}$  の成因を縁辺部の Cohesive Zone に求める事はできず、震源内部のバリエーで破壊速度が変化する時に生ずる Cohesive Zone を考える必要がある。

前章で、地震 A が地震 B から、また地震 B が地震 C か



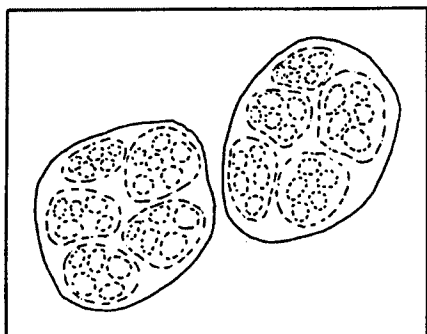


Fig. 7. Schematic illustration of the basic idea about the detailed structure of seismic source, according to Irikura and Aki (1990)<sup>20)</sup>. The large crack (solid line) is composed of the small cracks (dashed line) which have been mutually connected by the breakage of the barrier between them. The small cracks are composed of the smaller cracks (dotted line) in the same way. The high frequency components of seismic wave are emitted from those internal barriers. If some barriers rest unbroken, multiple shock event will appear. The perimeter of cracks denotes the barrier interval in this expression.

ら合成されることから、大クラックの破壊要素となる小クラックもまた、より小さいクラックの成長と結合により生成されると類推される (Fig. 7)。このような複数個のクラックの集合とは、断層面上にバリエーが分布している事の言葉を換えた表現で、クラックの直径とはバリエーインターバルの事である<sup>10),11)</sup>。Fig. 7 に示された模式図は、小地震の際に破壊される (弱い) バリエーが密に分布し、大地震時に破壊される (強い) バリエーは疎に分布する事を意味する。Fig. 7 のようなバリエーの分布は、Fukao and Furumoto (1985)<sup>25)</sup> の提唱した階層性モデルでも想定されている。そこでは、断層面の破壊は段階的なプロセスの繰り返しから成る。ある階層では特徴的な長さ (バリエーインターバル) を持った破壊単位が順次隣へと拡大する。この拡大過程で破壊単位数が臨界数に達すれば、破壊過程は次の階層へ移り、一回り大きなスケールを単位として破壊過程が進行する (Fig. 8)。このモデルで想定されている震源のブロック構造はランダム性と規則性を合わせ持つものである (Fig. 8)。なお、階層性モデル<sup>25)</sup> では、破壊の拡大の際の破壊単位の結合によるスリップ量の増加<sup>20)</sup> は、考慮されていない。しかし、基本的な考え方は Fig. 8 に示す不均質性の分布にあるので、ここでは、そのような分布を指して階層性分布と呼ぶ事にする。破壊単位の結合によるスリップ量の増加を考慮するか否かは、第 2 のコーナー周波数<sup>37)</sup> の出現の有無と、コーナー周波数以下での低周波数成分の発生に影響し、 $f_{\max}$  付近のスペクトル構造には影響しない。

不均質性の階層性分布は、Slip Weakening Model との関連付けが可能である。 $f_{\max}$  は Cohesive Zone Size :  $d$  と

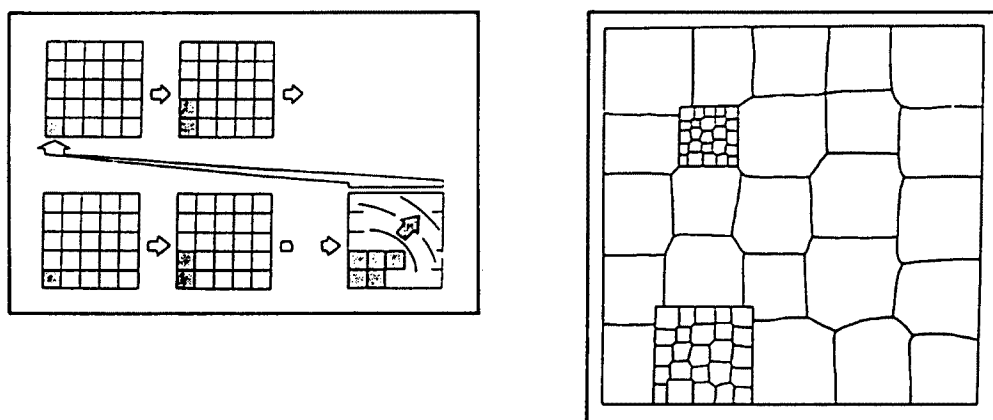


Fig. 8. (Left) A model of the rupture expansion in hierarchy model. Rupture grows by repeating the cycle shown in the figure. (Right) Self-similar fault block structure which is neither completely random nor regular. [After Fukao and Furumoto (1985)<sup>25)</sup> It's very similar concept of Fig. 7.

次式で関係付けられる<sup>10),38)</sup>。

$$f_{max} = v_r/d \dots\dots\dots (4.1)$$

また, Cohesive Zone Size :  $d$ , Average Cohesive Force  $\sigma_c$ . 注目している小クラックの半径  $\rho_p$  及びクラックの応力降下量  $\Delta\sigma$  は, Cohesive Zone 内の単位面積当たりの破壊エネルギー  $G$  と次の関係を持つ<sup>39)</sup> (Fig. 9)。

$$G = 2\sigma_c^2 d / \mu \pi c \quad G = (\Delta\sigma)^2 \rho_p / \mu \pi c \dots\dots\dots (4.2)$$

ここに  $c$  は定数,  $\mu$  は剛性率である。(4.1), (4.2) 式より,

$$f_{max} = 2 \cdot (v_r / \rho_p) \cdot (\sigma_c / \Delta\sigma)^2 \dots\dots (5.1)$$

を得る。ここで, 小クラックとは, バリヤーの破壊によって結合し単独の大クラックよりなる震源に成長するものなので,  $(v_r / \rho_p)$  は大クラックに対するコーナー周波数  $f_0$  を意味しない。しかし, 階層性分布を仮定すれば, 震源の長さ ( $2\rho_0$ ) は, ひとつ下の階層のバリヤーインターバル (小クラックの直径 ( $2\rho_p$ )) と比例関係を持つ, 2つの階層のバリヤーインターバルの比を  $r$  とすると,

$$\rho_0 = r \cdot \rho_p$$

これと,  $(v_r / \rho_0) \propto f_0$  を使って次式を得る。

$$f_{max} = 4rf_0 \cdot (\sigma_c / \Delta\sigma)^2 \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで,  $f_0 - M_0$  関係を考える。観測により,  $M_0 \propto f_0^3$  の部分と  $f_0 = \text{const.}$  の部分が混在するが, 広い Dynamic Range で見れば,  $M_0 \propto f_0^4$  となる<sup>23),24)</sup>。

例えば,  $\omega^{-2}$ -model で  $\Delta\sigma = \text{const.}$  を意味する  $M_0 \propto f_0^3$  の関係を持つ地震系列を考える。階層性分布を仮定した時の概念図を Fig. 10 に示す。この時 (5.2) 式から次式を得る。

$$f_{max} \propto f_0 \cdot \sigma_c^2 \propto M_0^{-1/3} \cdot \sigma_c^2 \dots\dots\dots (6.1)$$

一方,  $f_0 = \text{const.}$  の時は,

$$f_{max} = 4rf_0 \cdot (\sigma_c / \Delta\sigma)^2 \propto (\sigma_c / \Delta\sigma)^2 \dots\dots\dots (6.2)$$

破壊伝播速度  $v_r$  が  $\Delta\sigma$  に依存しないとして, 階層性分布を仮定した時の概念図を Fig. 10 に示す。

(6.1) 式の場合 ( $M_0 \propto f_0^3$ ), その範囲での  $f_{max}$  の地震モーメント依存性が観測データにより確立されれば,  $\sigma_c$  の地震モーメント依存性が求められると考えられる。

### 5. ま と め

加速度スペクトルの高周波数側の限界周波数  $f_{max}$  を Source Controlled Factor として,  $\omega^{-2}$ -scaling 則に基づき経験的 Green 関数法に与えるその影響を検討することにより, 震源過程特に震源内部の不均質性の分布に対する  $f_{max}$  の地震モーメント依存性の意味について考察した。

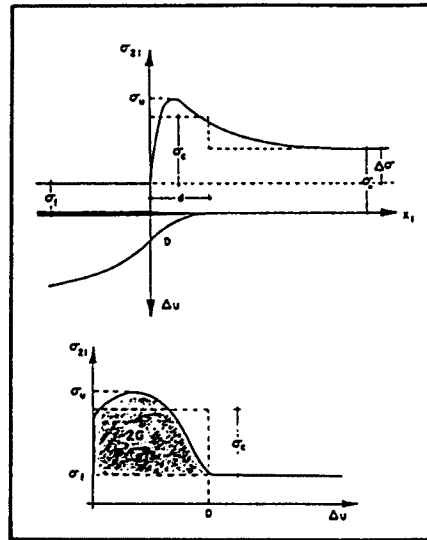


Fig. 9. (Top) Smoothing of the stress singularity at the rupture front, due to the presence of the cohesive zone of length:  $d$ , which assumed to exist just behind the crack tip. The slip necessary to break the bond of cohesive zone completely is denoted by  $D$ . The average value of the cohesive stress, assuming the latter to be uniformly distributed over the cohesive zone, is denoted by  $\sigma_c$ . (Bottom) A schematic representation of constitutive law (cohesive force diagram) of the "slip weakening" model. [After Papageorgiou and Aki (1983a)<sup>10)</sup>

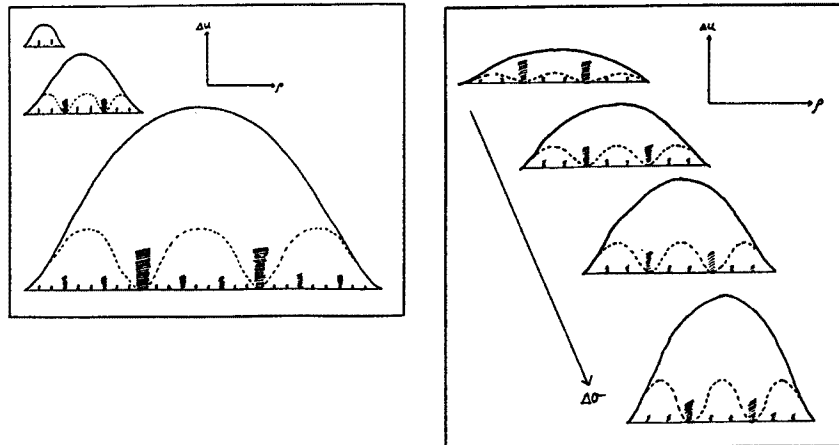


Fig. 10. (Left) Schematic illustration of the source model for  $M_0 \propto f_0^{-3}$  (constant stress drop) series. The shades denote barriers assumed to be distributed over the fault surface obeying to hierarchy model given by Fukao and Furumoto (1985)<sup>25)</sup>. The weakers are distributed densely and the strongers sparsely. The small cracks (dashed line) emit high-frequency components at its edge (the internal barriers), then grow up to the large crack (solid line) through the growth-connection process considered by Irikura and Aki (1990)<sup>20)</sup>. In this constant stress drop series, of which ratio of slip to radius is constant, the radius of large crack may be proportional to that of small crack, corresponding to typical barrier interval, because of the hierarchy. (Right) Schematic illustration of the source model for constant corner frequency (constant source size) series. The stress drop increase from top to bottom as indicated by a long arrow. Because of the assumed hierarchy, the radius of small cracks (dashed line) composing the source (solid line) may be constant.

(1)  $\omega^{-2}$ -scaling 則に基づく経験的 Green 関数法による波形合成で、単独の破壊であると推定された地震の間にも、わずかに  $f_{\max}$  の地震モーメント依存性が見られる。これは、Specific Barrier Model の様に、破壊され残ったバリアーにおける Slip Weakening Process では説明出来ない例である。

(2) 現在便宜的に行われている、経験的 Green 関数法による合成波形に  $f_{\max}$  のマグニチュード（地震モーメント）依存性を表すハイカットフィルターを施す処理は、小クラックの成長と結合による大クラックの生成という、 $\omega^{-2}$ -scaling 則に基づく経験的 Green 関数法の物理的解釈により、最終的には破壊されるが、破壊伝播の際伝播速度に揺らぎをあたえる、震源内部に分布するバリアーでの Slip Weakening Process による  $f_{\max}$  の説明に結び付けられる。

(3)  $f_0$ - $M_0$  関係から、不均質性自体に関する情報が得られる可能性がある。観測データによる  $f_{\max}$ - $M_0$  関係の確立が待たれる。

## 謝 辞

貴重な記録を使わせて頂きました気象庁地震観測所の黒磯章夫氏、京都大学防災研究所地震予知研究センターの飯尾能久氏、研究を進める上で御指導頂きました京都大学防災研究所地震動部門の岩田知孝氏、原稿を読んで頂きました秋田大学鉱山学部鉱山地質学科狐崎長琅教授に厚く御礼申し上げます。計算は、京都大学防災研究所防災科学資料センターの FACOM-M 384 及び秋田大学情報処理センターの MV-20000 II で行った。

## 参考文献

- 1) Hanks, T. C.:  $f_{\max}$ , Bull. Seismol. Soc. Am., 72, 1982, pp. 1867-1879.
- 2) 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長: 地域的な震源スケーリング則を用いた大地震 (M7級) のための設計用地震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第416号, 1990, pp. 57-68.
- 3) 木下繁夫: 総合報告- $f_{\max}$  周辺の話, 地震第2輯, Vol. 41, 1988, pp. 629-639.
- 4) 木下繁夫: 震源からの  $f_{\max}$ , 平成3年度地震学会春季大会講演予稿集, 1991 a, p. 44.
- 5) 木下繁夫: サイトからの  $f_{\max}$ , 平成3年度地震学会春季大会講演予稿集, 1991 b, p. 45.
- 6) Hartzell, S. H.: Earthquake aftershocks as Green's functions, Geophys. Res. Lett., Vol. 5, 1978, pp. 1-4.
- 7) Irikura, K.: Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, Bull. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 33, 1983, pp. 63-104.
- 8) Faccioli, E.: A study of strong motions from Italy and Yugoslavia in terms of cross source properties, 'Earthquake Source Mechanics', Geophys. monograph, Maurice Ewing Vol. 6, Am. Geophys. Union, 1986, pp. 297-309.
- 9) Gusev, A. A.: Descriptive statistical model of earthquake source radiation and its application to an estimation of short-period strong motion, Geophys. J. Roy. astr. Soc., Vol. 74, 1983, pp. 787-808.
- 10) Papageorgiou, A. S. and K. Aki: A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. Description of the model, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 73, 1983 a, pp. 693-722.
- 11) Papageorgiou, A. S. and K. Aki: A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. Application of the model, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 73, 1983 b, pp. 953-978.
- 12) 横井俊明・入倉孝次郎: 加速度スペクトルの cut-off frequency について, 昭和59年度地震学会春季大会講演予稿集, 1984, p. 199.
- 13) Madariaga, R.: Dynamics of an expanding circular fault, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 78, 1988, pp. 1438-1449.
- 14) Sato, T. and T. Hirasawa: Body wave spectra from propagating shear cracks, J. Phys. Earth, Vol. 21, 1973, pp. 415-431.
- 15) Das, S. and K. Aki: A numerical study of two-dimensional spontaneous rupture propagation, Geophys. J. Roy. Astr. Soc., Vol. 50, 1977 a, pp. 643-668.
- 16) Das, S. and K. Aki: Fault plane with barriers: a versatile earthquake model, J. Geophys. Res., Vol. 82, 1977 b, pp. 5658-5670.
- 17) Papageorgiou, A. S. and K. Aki: A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. Description of the model, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 74, 1984, pp. 794-795.
- 18) 岩田知孝・入倉孝次郎: トモグラフィ法による断層面上の不均質破壊過程の推定, 地震第2輯, Vol. 42, 1989, pp. 49-58.
- 19) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., 1986, pp. 151-156.
- 20) 入倉孝次郎・安芸敬一: Construction of source process of large earthquake by superposition of sub-events, 平成2年度地震学会秋季大会講演予稿集, 1990, p. 32.

- 21) Aki, K.: Scaling relation of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, Vol. 72, 1967, pp. 1217-1231.
- 22) Iio, Y.: Scaling relation between earthquake size and duration of faulting for shallow earthquakes in seismic moment between  $10^{10}$  and  $10^{25}$  dyne-cm, *J. Phys. Earth*, Vol. 34, 1986, pp. 127-169.
- 23) Chouet, B., K. Aki and M. Tsujiura: Regional variation of the scaling law of earthquake source spectra, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 68, 1978, pp. 49-70.
- 24) Yoshioka, K. and Y. Umeda: Spectral scaling for the earthquake moment of  $10^{17}$ - $10^{26}$  dyne-cm, 1991, submitted to *J. Phys. Earth*.
- 25) Fukao, Y. and M. Furumoto: Hierarchy in earthquake size distribution, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 37, 1985, pp. 149-168.
- 26) 入倉孝次郎・横井俊明: 地震波の加速度スペクトルのスケーリング則, 昭和 59 年度地震学会春季大会講演予稿集, 1984, p. 200.
- 27) 横井俊明・入倉孝次郎: 震源スペクトルのスケーリング則と経験的 Green 関数法, 地震第 2 輯, Vol. 44, 1991, pp. 109-122.
- 28) Hanks, T.C.: b-values and  $\omega^{-\tau}$  seismic source models: Implication for tectonic stress variation along active crustal fault zone and the estimation of high frequency strong ground motion, *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, 1979, pp. 2235-2242.
- 29) Boore, D.M.: Stochastic simulation of high frequency ground motion based on seismological model of the radiated spectra, *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 73, 1983, pp. 1865-1894.
- 30) 岩田知孝・入倉孝次郎: 観測された地震波から, 震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震第 2 輯, Vol. 39, 1986, pp. 579-593.
- 31) Madariaga, R.: High-frequency from crack (stress drop) models of earthquake faulting, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, Vol. 51, 1977, pp. 625-652.
- 32) Iwata, T. and K. Irikura: Source parameters of the 1983 Japan sea earthquake sequence, *J. Phys. Earth*, Vol. 36, 1988, pp. 155-184.
- 33) Sato, T.: Rupture characteristics of the 1983 Nihonkai-chubu (Japan Sea) earthquake as inferred from strong motion accelerograms, *J. Phys. Earth.*, Vol. 33, 1985, pp. 525-557.
- 34) 須本満由美・入倉孝次郎・岩田知孝: 経験的グリーン関数法による高周波地震動の予測, 京都大学防災研究所年報, Vol. 30, B-1, 1987, pp. 107-131.
- 35) 村松郁栄: 速度型強震計の開発, 地震第 2 輯, Vol. 30, 1977, pp. 317-33.
- 36) 梅田康弘・飯尾能久・黒磯章夫・伊藤 潔・村上寛史: 地震波スペクトルのスケーリング, 地震第 2 輯, Vol. 37, 1984, pp. 559-567.
- 37) Papageorgiou, A., S.: Two characteristic frequencies of acceleration spectra: Patch corner frequency and  $f_{\max}$ , *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 78, 1988, pp. 509-529.
- 38) Aki, K.: Origin of  $f_{\max}$ , 'Earthquake Source Mechanics', *Geophys. monograph*, Maurice Ewing Vol. 6, Am. Geophys. Union, 1986.
- 37) Aki, K.: Characterization of barriers on an earthquake fault, *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, pp. 6140-6148.