



## 統計的グリーン関数の最大加速度・最大速度の距離減衰特性

佐藤智美<sup>1)</sup>

1) 正会員 清水建設技術研究所、主任研究員、博士(工学)  
e-mail: toshimi.satoh@shimz.co.jp

### 要約

複数の  $Q$  値モデルと経時特性モデルを用いて地震基盤における中規模地震相当の統計的グリーン関数を計算し、その最大加速度と最大速度の距離減衰特性と既往の距離減衰式(経験式)との比較を行ない、 $Q$  値・経時特性モデルの適用性について検討した。その結果、海溝型地震に対して、佐藤(2004、2006)の地域性を考慮した  $Q$  値モデルと散乱理論に基づく経時特性モデルを用いた統計的グリーン関数は距離減衰式と整合することがわかった。一方、海溝型地震に対して、Boore(1983)の経時特性モデルを用いた場合には震源距離が遠くなるほど過大評価、佐藤・他(1994)の経時特性モデルを用いた場合には 100km 以下で半分程度の過小評価となり、両者とも距離減衰式より距離減衰が小さい。

キーワード: 統計的グリーン関数、距離減衰、経時特性モデル、 $Q$  値

### 1. はじめに

統計的グリーン関数法<sup>1),2)</sup>は、予測対象サイトにおいて地震観測波形がない場合でも断層モデルを用いて強震動が予測できる手法であり、国<sup>3),4)</sup>や地方自治体<sup>5)</sup>が実施する強震動評価でも用いられている。例えば、文部科学省地震調査研究推進本部<sup>3)</sup>(以下、推本と略す)や内閣府中央防災会議<sup>4)</sup>(以下、中央防災会議と略す)では、統計的グリーン関数法、あるいは、ハイブリッド法<sup>6),7)</sup>の周期 1~3 秒程度以下の短周期地震動予測に統計的グリーン関数法を用いて、広域多点での強震動予測を実施している。また、名古屋市の建築構造物の設計用入力地震動策定のためのプロジェクト<sup>5)</sup>でも、短周期地震動予測に統計的グリーン関数法を用いたハイブリッド法が用いられている。また、2006年9月には、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」が改定され、従来の応答スペクトルに基づく評価手法に加え、断層モデルを用いた強震動予測手法により、地震動を評価するように明示された<sup>8)</sup>。対象サイトに適切な中小地震の観測波形がある場合には、経験的グリーン関数法により地震動評価が可能である。しかし、活断層による地殻内地震の地震動評価の場合など、対象サイトにおいて適切な観測波形が得られていない場合には、統計的グリーン関数法が用いられるものと考えられる。このように、現在、統計的グリーン関数法は、地震防災や耐震設計のための地震動評価手法として重要な手法となっている。

推本や中央防災会議で実施されている断層モデルに基づく強震動予測<sup>3),4)</sup>では、断層モデルのパラメータは、入倉・三宅<sup>9)</sup>により提案されている設定手法に基づき設定されている。断層モデルが決まれば、統計的グリーン関数法による強震動予測で重要となるのは、中小地震波形の代わりとなる統計的グリーン関数が、どれだけ中小地震波形を再現できるものになっているかということである。つまり、想定地震から対象サイトまでの伝播経路特性と地盤増幅特性が、統計的グリーン関数にいかに関数に適切に反映されているかと

いうことである。中小地震波形を精度よく再現できない統計的グリーン関数では、大地震の強震動波形を精度よく再現・予測できないことは言うまでもない。

統計的グリーン関数は、フーリエ振幅スペクトルモデルと経時特性モデル<sup>例えば 10),11),12),13)</sup>(あるいは、フーリエ位相スペクトル)から作成されるため、両者が適切にモデル化される必要がある。従来の応答スペクトル法による地震動評価手法(模擬地震波作成手法)でも、経時特性モデル(あるいは、フーリエ位相スペクトル)は必要であったが、応答スペクトルにフィッティングするように模擬地震波が作成されるため、経時特性モデルによらず最大加速度がほぼ同じ模擬地震波が得られる。一方、フーリエ振幅スペクトルが用いられる統計的グリーン関数法では、経時特性モデルの違いにより統計的グリーン関数の最大加速度や最大速度は異なってくるため、経時特性モデルの重要性がより大きい。波形合成法では、スケーリングを考慮して統計的グリーン関数を線形に足し合わせるため、統計的グリーン関数の最大加速度や最大速度の違いは想定地震の予測波形の最大加速度や最大速度に線形にその影響が及ぶ。

統計的グリーン関数法における経時特性モデルの重要性に着目して、筆者<sup>12),13)</sup>は、中規模海溝型地震(気象庁マグニチュード  $M_J=5\sim 6.5$ )の強震記録から、震源特性が Boore<sup>11)</sup>の経時特性モデル、伝播経路特性が散乱理論に基づく経時特性モデル<sup>14)</sup>からなるモデルを提案した。そして、提案経時特性モデルを用いて作成した統計的グリーン関数の方が、Boore<sup>11)</sup>や佐藤・他<sup>10)</sup>のモデルを用いた場合より、短周期(1秒以下)の観測加速度波形をより再現できることを示した。また、Saito et al.<sup>15)</sup>は、Saito et al.<sup>14)</sup>による散乱理論に基づく経時特性モデルにより、小規模海溝型地震 ( $M_J=3.6\sim 4.3$ )の短周期(0.5秒以下)の狭帯域フィルター波の観測最大加速度と継続時間が統一的に説明できることを示している。しかしながら、これまで、統計的グリーン関数法では、Boore<sup>11)</sup>や佐藤・他<sup>10)</sup>のモデル等の異なる経時特性モデルが適用されているが、異なる経時特性モデルで作成された統計的グリーン関数の最大加速度や最大速度の距離減衰特性が、経験式である距離減衰式の距離減衰を再現できるか否かという観点で経時特性モデルの適用性の検討が行われた例はない。また、統計的グリーン関数の距離減衰特性には、当然ながら、フーリエ振幅スペクトルモデルが寄与するため、 $Q$ 値モデルも含めて距離減衰特性を検討する必要がある。

そこで、本研究では、複数の  $Q$ 値モデルと経時特性モデルを用いて中規模地震相当の地震基盤における統計的グリーン関数を計算し、その最大加速度と最大速度の距離減衰特性と既往の最大加速度・最大速度の距離減衰式(経験式)との比較を行うことで、 $Q$ 値モデルと経時特性モデルの適用性について考察する。また、推本の想定宮城県沖地震の断層モデル(モーメントマグニチュード  $M_w 7.6$ )と地盤モデル<sup>3),16)</sup>を用いて、異なる経時特性モデルを適用した統計的グリーン関数法により3観測点での強震動予測を行ない、経時特性モデルの違いによる最大加速度・最大速度の違いを示す。なお、本研究では水平動を対象とする。

## 2. 手法及び解析条件

中規模地震相当の地震基盤における統計的グリーン関数の計算で用いる統計的グリーン関数法と解析条件について記述する。フーリエ振幅スペクトルモデルは Boore<sup>11)</sup>のモデルに基づく式とする。経時特性モデルは、中央防災会議<sup>4)</sup>などで用いられている Boore<sup>11)</sup>のモデル、推本<sup>3)</sup>などで用いられている佐藤・他<sup>10)</sup>のモデル、散乱理論に基づく佐藤<sup>12),13)</sup>のモデルの3種類を対象とする。いずれも、加速度波形に対する経時特性モデルである。フーリエ振幅スペクトルモデルと経時特性モデルを用いて地震基盤で統計的グリーン関数を作成する手順は、Boore<sup>11)</sup>と佐藤・他<sup>10)</sup>の経時特性モデルを用いた場合は佐藤・他<sup>2)</sup>、佐藤<sup>12),13)</sup>の経時特性モデルを用いた場合は佐藤<sup>12)</sup>と同じとする。また、波形合成法は、壇・佐藤<sup>17)</sup>の手法を用いる。

なお、想定宮城県沖地震の強震動予測の際の統計的グリーン関数法及び設定パラメータは、経時特性モデルを3種類とする以外は推本で用いられているものと同じである<sup>3),16)</sup>。

### 2.1 フーリエ振幅スペクトルモデル

地震基盤でのS波のフーリエスペクトルモデルは、 $\omega^2$ モデルに基づく震源スペクトル  $S(f)$ に、伝播経路スペクトル  $P(f)$ 式をコンボリューションしてモデル化される<sup>11)</sup>。

$$S(f) = \frac{R_{\theta\phi} F_s P_{RITIN}}{4\pi\rho\beta^2} \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_z\beta_z}} \frac{(2\pi f)^2 M_0}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \left[ 1 + \left(\frac{f}{f_{\max}}\right)^m \right]^{-1/2} \quad (1)$$

$$P(f) = \frac{1}{X} \exp\left(\frac{-\pi f X}{QV_s}\right) \quad (2)$$

中規模地震相当の地震基盤における統計的グリーン関数作成の際の(1)、(2)式の各パラメータは以下のよう  
に設定した。自由地表面の効果を表す定数  $F_s$  は 2、水平 2 成分へのエネルギー分配を表す係数  $P_{RITIN}$  は  
水平 1 方向対象とすることから  $1/2^{0.5}$  とする<sup>11)</sup>。また、 $R_{\theta\phi}$  はラディエーションパターン係数であり、Boore  
and Boatwright<sup>18)</sup> の S 波のラディエーションパターン係数の対数での平均値 0.55 とする。 $\beta$ 、 $\rho$  は、震源で  
の S 波速度、密度であり、海溝型地震に対しては 4.0km/s、3.0g/cm<sup>3</sup>、地殻内地震に対しては  $\beta=3.4$ km/s、  
 $\rho=2.7$ g/cm<sup>3</sup> とした<sup>19)</sup>。 $\beta_z$ 、 $\rho_z$  は、地震基盤での S 波速度、密度であり、3.0km/s、2.6g/cm<sup>3</sup> とした。 $V_s$  は  
伝播経路の平均 S 波速度であり  $\beta$  と同じとした。 $X$  は震源距離である。 $f_{\max}$  は、海溝型地震では主に福島  
県沖や宮城県沖の  $M_5 \sim 7$  程度の海溝型地震から推定されている 13.5Hz<sup>20)</sup>、地殻内地震では鳥取県西部地  
震<sup>21)</sup> や兵庫県南部地震<sup>22)</sup> に対して推定されている 6Hz とした。 $m$  は、佐藤・他<sup>20)</sup> に基づき 4.2 とした。 $f$   
は周波数、 $M_0$  は地震モーメント、 $f_0$  はコーナー周波数である。中規模地震の震源パラメータは、佐藤<sup>12)</sup>  
と同様に、2002 年 1 月 27 日の岩手県沖の地震( $M_w 5.2$ )の震源パラメータを用いた。すなわち、 $M_0$  は F-net  
の推定値である  $8.7 \times 10^{23}$  dyne-cm、応力降下量  $\Delta\sigma$  は佐藤<sup>19)</sup> の推定値である 197bar である。したがって、  
 $f_0$  は、海溝型地震で 1.2Hz、地殻内地震で 1.0Hz とする。

$Q$  値については、海溝型地震の計算の際には、深さ 60km 以下の海溝型地震の強震記録からスペクトル  
インバージョンに基づき推定されている 3 つの地域に対する式<sup>13),19)</sup>を用いる。

$$Q = 154f^{0.91} \quad (\geq 0.5\text{Hz}) \quad (\text{東日本太平洋岸の海溝型地震}) \quad (3)$$

$$Q = 392f^{0.37} \quad (\geq 1\text{Hz}) \quad (\text{東海・東南海沖の海溝型地震}) \quad (4)$$

$$Q = 114f^{0.67} \quad (\geq 1\text{Hz}) \quad (\text{日向灘周辺の海溝型地震}) \quad (5)$$

統計的グリーン関数の計算の際には、(3)式の 0.5Hz 以下では 0.5Hz での  $Q$  値、(4)式、(5)式の 1Hz 以下で  
は 1Hz での  $Q$  値で一定と仮定する。地殻内地震については、既往の研究で推定されている  $Q$  値を回帰分  
析して平均的  $Q$  値を求めた。表 1 には、地殻内地震の震源距離 100km 以内でかつ火山フロントをまたが  
ない強震記録のみからスペクトルインバージョンに基づき推定されている既往の  $Q$  値モデル<sup>23)~30)</sup>を示す。  
 $Q$  値モデルの傾きを共通とした層別因子を用いた方法で回帰分析した結果、以下の回帰式が得られた。

$$Q = 40f^{1.0} \quad (\text{日本全国の地殻内地震、震源距離 100km 以内}) \quad (6)$$

表 1 地殻内地震の震源距離 100km 以下の記録から推定された  $Q$  値モデル

地域	$Q$ 値モデル	周波数(Hz)	参考文献
大阪周辺	$Q = 37f^{0.84}$	0.5~10	古和田・他 <sup>23)</sup>
大阪周辺	$Q = 33f^{1.0}$	0.33~10	Moya et al. <sup>24)</sup>
九州南西部	$Q = 104f^{0.63}$	1~10	加藤 <sup>25)</sup>
小田原周辺	$Q = 20f$	1~20	植竹・工藤 <sup>26)</sup>
新潟県中越	$Q = 21f^{0.89}$	0.6~10	畑山・他 <sup>27)</sup>
新潟平野	$Q = 50f$	0.5~20	金谷・他 <sup>28)</sup>
九州北部	$Q = 56f^{1.5}$	1~10	佐藤・川瀬 <sup>29)</sup>
北海道留萌周辺	$Q = 43f^{0.89}$	1~10	佐藤 <sup>30)</sup>
若狭湾周辺	$Q = 30f^{1.40}$	1~10	佐藤 <sup>30)</sup>

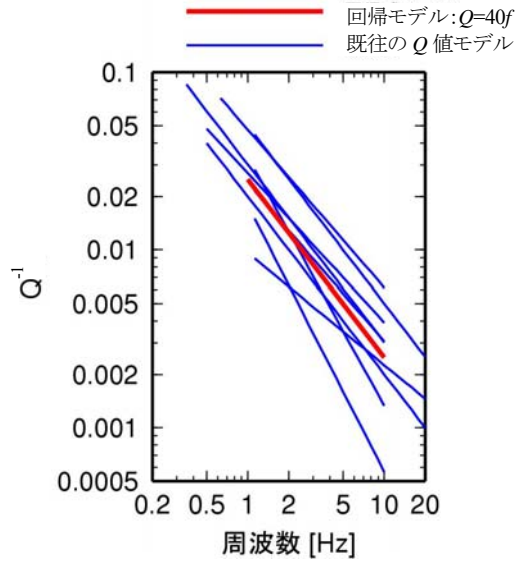


図1 地殻内地震に対する既往の  $Q$  値モデル<sup>23)~30)</sup> (青線)とこれらを回帰した平均的  $Q$  値モデル (赤線)

なお、震源距離を 100km 以内に限ったのは、防災や耐震設計のための強震動評価では震源近傍が重要であること、100km 以遠では後述するように距離減衰特性が変化することが指摘されていることである。図 1 には、既往の  $Q$  値モデルと回帰式を示す。回帰式を用いた統計的グリーン関数の計算では 1Hz 以下では、1Hz での  $Q$  値で一定と仮定した。回帰式は、平均的モデルであるが、実際には既往の  $Q$  値モデルが示すように地域性がある。そこで、 $Q$  値の違いによる統計的グリーン関数の最大加速度・最大速度の距離減衰特性の感度をみるため、 $Q=20f$ 、 $Q=80f$ 、 $Q=160f$  と、周波数依存の係数を変化させた  $Q=40f^{0.7}$ 、 $Q=40f^{1.3}$  のケースについても計算を行い、比較検討を行う。

## 2.2 経時特性モデル

Boore<sup>11)</sup>の経時特性モデル  $BENV(t)$ は次式で表される。

$$BENV(t) = Ct^b e^{-ct} H(t) \quad (7)$$

ここで、

$$b = -p \ln q / [1 + p(\ln p - 1)] \quad (8)$$

$$c = b / (pT_w) \quad (9)$$

$$C = [e / (pT_w)]^p \quad (10)$$

である。 $T_w$ はコーナー周期  $T_c$ の2倍であり、 $q$ は0.05である。Boore<sup>11)</sup>では、Saragoni and Hart<sup>31)</sup>が主にカルフォルニアの地殻内地震の観測波形にフィッティングするように推定した係数が説明できるとして、 $p=0.2$ としている。Boore<sup>11)</sup>の経時特性モデルは、釜江・他<sup>1)</sup>の地殻内地震の強震動予測や、中央防災会議<sup>4)</sup>による海溝型地震・地殻内地震の強震動予測で用いられている。Boore<sup>11)</sup>の経時特性モデルは  $T_c$ の関数であり、伝播経路の影響が含まれていない。

佐藤・他<sup>10)</sup>のモデルは、(11)~(13)式で定義される Jennings 型<sup>32)</sup>モデル  $ENV(t)$ に基づいている。

$$ENV(t) = ((t - t_a) / (t_b - t_a))^2 \quad (t_a \leq t \leq t_b) \quad (11)$$

$$ENV(t) = 1.0 \quad (t_b \leq t \leq t_c) \quad (12)$$

$$ENV(t) = \exp[-(\ln 10)(t - t_c) / (t_d - t_c)] \quad (t_c \leq t \leq t_d) \quad (13)$$

$t_a=0$  とし、立ち上がり部( $t_b - t_a$ )、主要動部( $t_c - t_b$ )、減衰部( $t_d - t_c$ )が(14)~(16)式で与えられる。

$$\log(t_b - t_a) = 0.229M_J - 1.112 \quad (14)$$

$$\log(t_c - t_b) = 0.433M_J - 1.936 \quad (15)$$

$$\log(t_d - t_c) = 0.778\log(X) - 0.340 \quad (16)$$

立ち上がり部と主要動部が  $M_J$  依存であり、減衰部が震源距離  $X$  依存となっている。この関係は、主に福島県沖や宮城県沖の海溝型地震の仙台の工学的基盤波での加速度波形記録から作成され、統計的グリーン関数法による1978年宮城県沖地震の強震動の再現・予測に適用された<sup>2)</sup>。その後、地震基盤での経時特性モデルとみなして、関東地震<sup>33)</sup>や想定東海地震<sup>5)</sup>、推本<sup>例えは<sup>3)</sup></sup>による地殻内地震と海溝型地震の強震動予測に適用されている。なお、計算の際には、 $M_J = M_w$ とみなした。

佐藤<sup>12),13)</sup>の経時特性モデルは、震源特性がBoore<sup>11)</sup>の経時特性モデル、伝播経路特性が散乱理論<sup>14)</sup>に基づく経時特性モデルとなっている。(8)式の  $p$  の値は、東海・東南海沖周辺と日向灘周辺ではBoore<sup>11)</sup>と同じ0.2、東日本太平洋岸では0.34と推定されている。散乱理論に基づく伝播経路特性の経時特性モデル  $TENV(t)$  は次式で表される<sup>14)</sup>。

$$TENV(t) = \sqrt{I(X, t) \exp(-2\pi ft Q^{-1})} \quad (17)$$

ここで、 $I(X, t)$  は

$$I(X, t) = \frac{1}{4\pi X^2} H(t - X/V_s) \frac{\pi^2}{2t_M} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} n^2 \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2 (t - X/V_s)}{4t_M}\right] \quad (18)$$

である。 $H$  はステップ関数である。 $t$  は発震時からの時間である。 $t_M$  は、経時特性モデルの幅(継続時間)を表す特徴的時間であり、von Karman型で  $\kappa \neq 1$  ( $\kappa$  は波数) の場合には  $X$  の2乗に比例し、

$$t_M = \frac{D(\kappa) \varepsilon^2 a}{2V_s} \left(\frac{X}{a}\right) \quad (19)$$

で表される。ここで、 $\varepsilon$  は伝播経路のS波速度  $V_s$  の二乗平均値の平方根(RMS)であり速度構造の不均質の大きさを意味する。 $a$  は相関距離であり、 $D(\kappa) \approx 1.5$  である。なお、 $n$  は1000程度でよい<sup>12)</sup>。 $Q$  値は3つの地域に対して(3)~(5)で与えられている<sup>12),13)</sup>。佐藤<sup>12),13)</sup>は、 $V_s$  を4km/sと仮定し、深さ60km以下の中規模海溝型地震の強震記録から、3つの震源域に対する周波数1~16Hzの範囲の  $\varepsilon^2/a$  を以下のように求めている。

$$\varepsilon^2/a = 10^{-2.84} \text{ [km}^{-1}\text{]} \quad (\text{東日本太平洋岸}) \quad (20)$$

$$\varepsilon^2/a = 10^{-3.18 \sim -2.99} \text{ [km}^{-1}\text{]} \quad (\text{東海・東南海沖}) \quad (21)$$

$$\varepsilon^2/a = 10^{-2.76 \sim -2.72} \text{ [km}^{-1}\text{]} \quad (\text{九州日向灘周辺}) \quad (22)$$

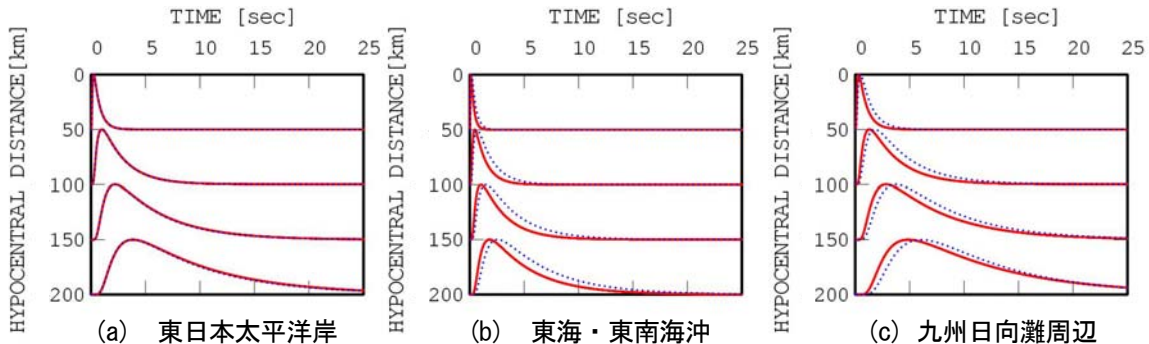


図2 3つの地域における散乱理論に基づく伝播経路の経時特性モデル(佐藤<sup>13)</sup>の図をカラー化)  
(赤が1Hzの場合、青が16Hzの場合であり、振幅はすべて同じとなるように基準化して表示)

(21)、(22)式のべき乗は周波数依存の係数として与えられている。図2には、周波数1Hzと16Hzの場合の伝播経路の経時特性モデルを示す。地域性がみられるが、周波数依存性は小さい。なお、佐藤<sup>12),13)</sup>の経時特性モデルの適用範囲は、震源距離50km程度以上、周波数1~16Hzである。しかし、震源近傍では、これまで統計的グリーン関数法に最も利用されているBoore<sup>11)</sup>の経時特性モデルとほぼ一致するという観点から、0.25Hz以下では0.25Hzでの値を用いて全周波数帯域に適用して計算を実施する。

### 3. 中規模地震に対する統計的グリーン関数の距離減衰特性

2002年1月27日の岩手県沖の地震( $M$ 5.5、深さ46.3km)のKiK-net地中観測点における加速度波形と、3つの経時特性モデルを用いて計算した地震基盤における統計的グリーン関数(加速度波形)の比較を示す。これは、佐藤<sup>12)</sup>の計算結果に、(d)のBoore<sup>11)</sup>の経時特性モデルによる計算結果を加えたものであり、いずれも1~20Hzのフィルター波形である。 $Q$ 値は(3)式で共通であるので、フーリエ振幅スペクトルも同じである。なお、KiK-net地中観測点の波形には、上昇波と下降波が含まれており、露頭基盤波とは異なるため、サイト特性の群遅延時間の平均値が0に近い地中観測点を選んで比較している。しかし、地中観測点では露頭基盤よりフーリエ振幅がやや小さくなるため、観測波形の最大加速度は小さめになる。(c)の佐藤・他<sup>10)</sup>の経時特性モデルは、観測波形にみられる距離が遠いほど継続時間が長くなる傾向は表現されて

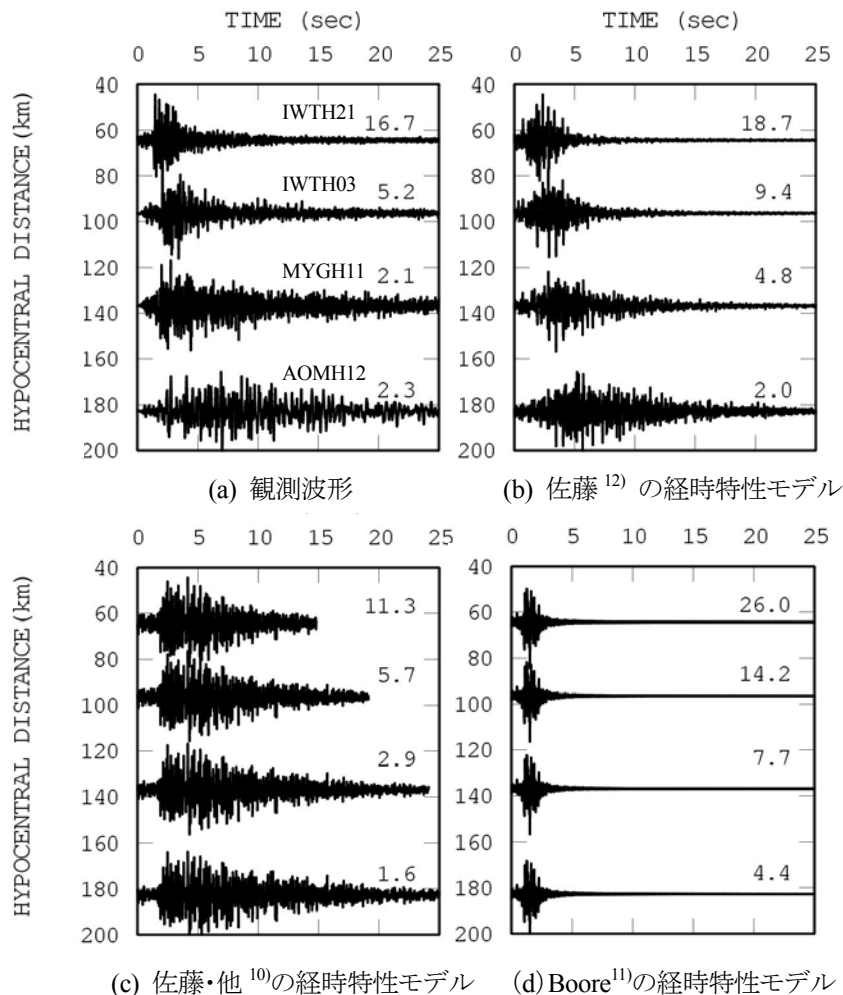


図3  $M$ 5.2の岩手県沖の地震のKiK-net地中観測点における加速度波形と、フーリエ振幅特性を共通とし、3種類の経時特性モデルを用いて計算した統計的グリーン関数の比較(数字は最大加速度。佐藤<sup>12)</sup>に(d)を追加)

いるが、(b)の佐藤<sup>12)</sup>の経時特性モデルと比較すると特に近距離において観測波の再現性は悪い。(d)のBoore<sup>11)</sup>の経時特性モデル( $p=0.2$ )を用いた場合は、継続時間は震源距離によらずコーナー周期の2倍程度と短いため、距離が遠いほど継続時間が長くなる傾向は表現できず、最大加速度も他の経時特性モデルを用いた場合より大きくなっている。佐藤<sup>12)</sup>の経時特性モデルは、広い震源距離の範囲で、最もよく観測加速度波形の経時特性を表現している。

次に、同じ条件で、断層最短距離 10~200km の範囲を対数軸で 26 等分した距離で統計的グリーン関数を計算し、最大加速度と最大速度の距離減衰特性について検討した。同じ距離において、乱數位相を 10 通り変えて統計的グリーン関数を計算し、その最大加速度と最大速度の平均値を図 4(a)に示す。図 4(b)、図 6(a)、(b)に示した、他の条件により計算された統計的グリーン関数の距離減衰特性も、同様に 10 個の乱數位相で計算された波形の最大加速度と最大速度の幾何平均値である。

図 4、図 6 で比較対象として用いている距離減衰式は、(23)式でモデル化されている片岡・他<sup>34)</sup>と片岡・佐藤<sup>35)</sup>の距離減衰式である。

$$\log_{10} Y_{ij} = a_1 M_w + a_2 \log_{10} A - bR + c_0 - \log_{10} (R + d \cdot 10^{0.5M_w}) + \sum_k \delta_{kj} c_k \pm e \quad (23)$$

ここで、 $Y_{ij}$  は  $i$  番目の地震の  $j$  番目の観測点における最大加速度、最大速度、加速度応答スペクトル、SI 値、計測震度である。 $R$  は断層最短距離、 $A$  は短周期レベル<sup>36)</sup>、 $e$  は標準偏差である。 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b$ 、 $c_0$ 、 $c_k$ 、 $d$  は回帰係数である。 $c_k$  は  $k$  番目の観測点の地点補正值であり、 $c_0$  は  $c_k$  の平均が 0 となるよう求められる。地殻内地震に対しては、 $R$  が 80km 以遠では、 $R$  の代わりに  $(80R)^{0.5}$  となる。

本研究で、片岡・他<sup>34)</sup>と片岡・佐藤<sup>35)</sup>の距離減衰式を比較対象として選択した理由は、以下の通りである。まず、地殻内地震と海溝型地震で距離係数  $b$  が異なる距離減衰式が提案されていること、海溝型地震は東日本と西日本の2つの地域に分かれており、東日本については火山フロント前孤側の記録のみを用いているため、火山フロント直下付近の高減衰の領域の影響がないことである。また、データセットが日本の地震の記録のみであるため、日本とは異なる大陸性地殻を伝播する波の影響がある米国西海岸の記録等が含まれていない。さらに、統計的グリーン関数作成に用いる短周期レベルを(23)式に代入することにより、絶対値の議論も可能となる利点もある。実際に、上述の地震モーメントと応力降下量から算出される短周期レベル(海溝型地震で  $5.0 \times 10^{25}$  dyne-cm/s<sup>2</sup>、地殻内地震で  $3.6 \times 10^{25}$  dyne-cm/s<sup>2</sup>)を代入し、距離減衰を計算した。ただし、工学的基盤( $V_s=700$ m/s 程度)とI種地盤、II種地盤、III種地盤に対する地盤補正係数が用意されているが、地震基盤に対する補正係数はない。また、最大加速度、最大速度とも、水平2成分合成の最大値から作成されている。一方、統計的グリーン関数は、地震基盤における水平1成分のものである。そこで、工学的基盤の距離減衰式を以下のように補正して比較を行なった。水平2成分合成の最大値と水平1成分の最大値の違いは、水平1成分の応答スペクトルに対する水平2成分合成の応答スペクトルの比<sup>37)</sup>の短周期領域の平均的値である1.3倍を補正に用いた。また、高橋・他<sup>38)</sup>の応答スペクトルの地盤増幅率補正式(経験式)は、 $V_s=2200$ m/sの層からの増幅率で定義されているため、 $V_s=2200$ m/sの層から $V_s=700$ m/sの層までの増幅率を計算すると、周期範囲0.2~0.5秒で1.53倍となる。周期範囲0.2~0.5秒は、片岡・他<sup>34)</sup>と片岡・佐藤<sup>35)</sup>の地殻内地震と東日本の海溝型地震の加速度応答スペクトルの距離減衰式の $b$ 値が最大加速度・最大速度の距離減衰式の $b$ 値と同じとなる周期範囲に相当する。松岡・翠川<sup>39)</sup>による最大速度の増幅率の経験式は、地下30mから地表までの平均S波速度 $AVS_{30}$ の適用範囲が1500m/sまでであるため、 $AVS_{30}$ が1500m/sの層から700m/sの層までの増幅率を求めると1.65倍となる。 $V_s=3000$ m/sの地震基盤から $V_s=700$ m/sの工学的基盤までの増幅率は、これらより大きくなるものと考えられたため、1.7倍として補正を行った。したがって、図4、図6に示す距離減衰式は、工学的基盤での距離減衰式を(1.3×1.7)で除した値となっている。なお、統計的グリーン関数の最大加速度・最大速度は、片岡・他<sup>34)</sup>、片岡・佐藤<sup>35)</sup>の距離減衰式で用いられている周期0.1~5秒のバンドパスフィルターを通して求めた。

図4(a)において、佐藤<sup>12)</sup>の経時特性モデルを用いた統計的グリーン関数の最大加速度・最大速度の距離減衰特性は、片岡・佐藤<sup>35)</sup>の距離減衰式と整合している。佐藤<sup>12)</sup>の経時特性モデルは、片岡・佐藤<sup>35)</sup>の距離減衰式とは独立な手法で算出されているが、この経時特性モデルで最大加速度・最大速度の距離減衰特性も統一的に表現できることがわかる。一方、Boore<sup>11)</sup>、佐藤・他<sup>10)</sup>の経時特性モデルを用いた場合は、佐



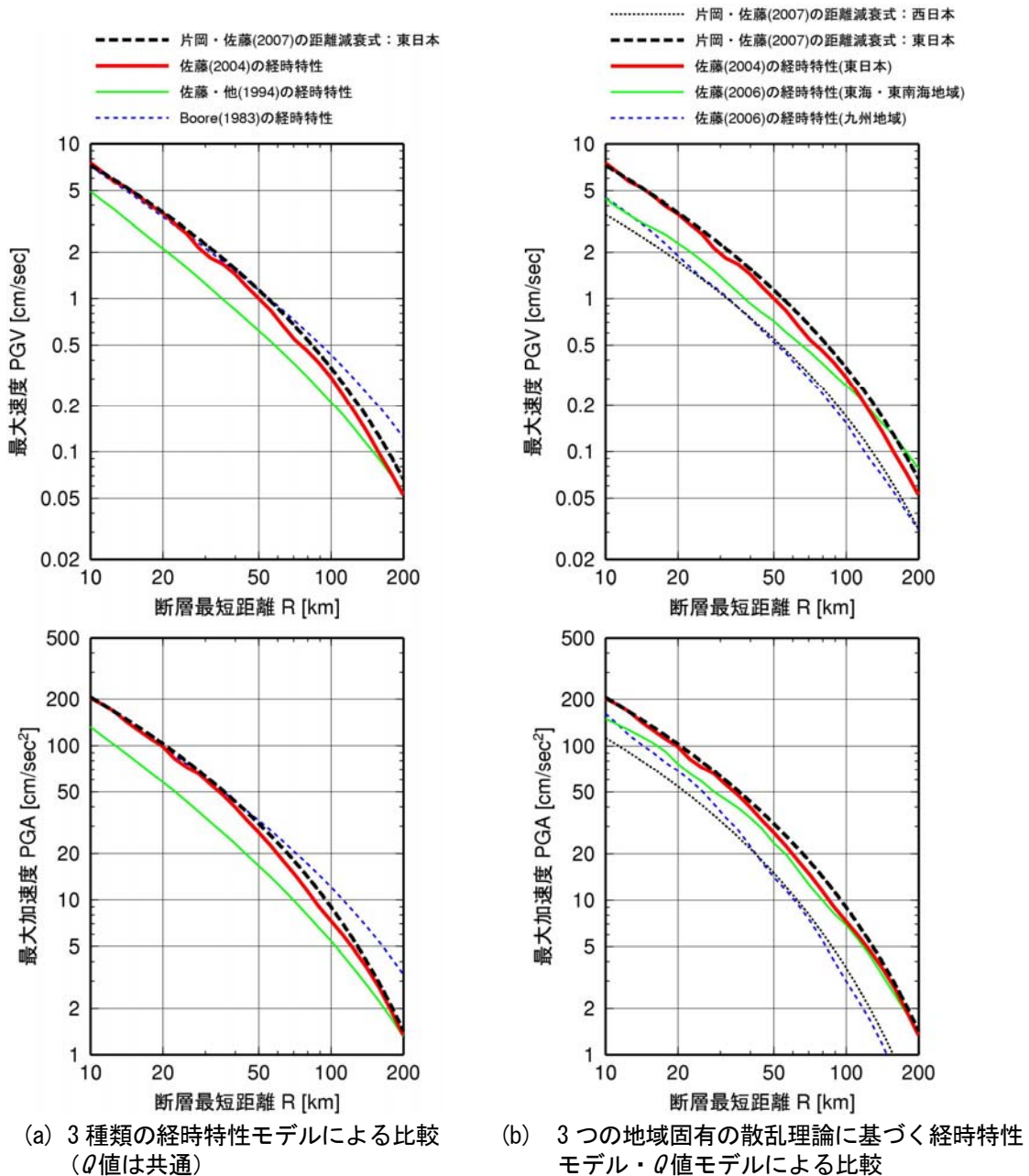


図4  $M_w$ 5.2の海溝型地震に対する片岡・佐藤<sup>35)</sup>の最大加速度と最大速度の距離減衰式(地震基盤相当に補正)と地震基盤での統計的グリーン関数の距離減衰特性の比較

藤<sup>12)</sup>の経時特性モデルを用いた場合より距離減衰の傾きが小さく、片岡・佐藤<sup>35)</sup>の距離減衰式との整合性はよくない。図4(a)の比較を、片岡・佐藤<sup>35)</sup>の距離減衰式に対する統計的グリーン関数の距離減衰特性の比として表示した結果を図5に示す。佐藤<sup>12)</sup>の経時特性モデルを用いた場合、この比はほぼ1である。しかし、Boore<sup>11)</sup>の経時特性モデルを用いた場合の比は、50km程度以下ではほぼ1であるが、距離が遠くなるほど大きくなり、200kmではほぼ2倍の過大評価となる。佐藤・他<sup>10)</sup>の経時特性を用いた場合の比は、Boore<sup>11)</sup>、佐藤<sup>12)</sup>の経時特性モデルを用いた場合より小さく、100km以内で約半分の過少評価となる。震源距離150~200km付近で比は1に近づくが、これは、佐藤・他<sup>10)</sup>の主なデータの震源距離の範囲と対応している。

図4(b)は、散乱理論に基づく3つの地域固有の経時特性モデル<sup>12),13)</sup>と $Q$ 値モデルを用いた場合の統計的グリーン関数の距離減衰特性と片岡・佐藤<sup>35)</sup>の東日本と西日本の海溝型地震の距離減衰式の比較である。



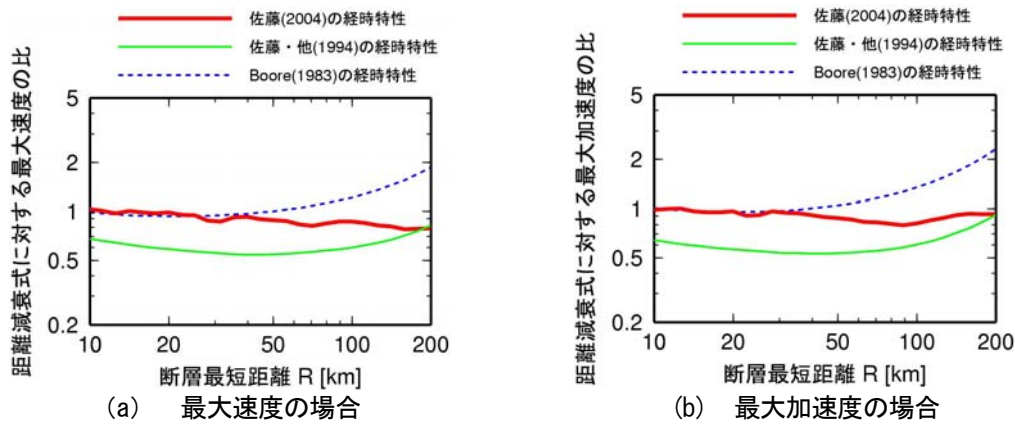


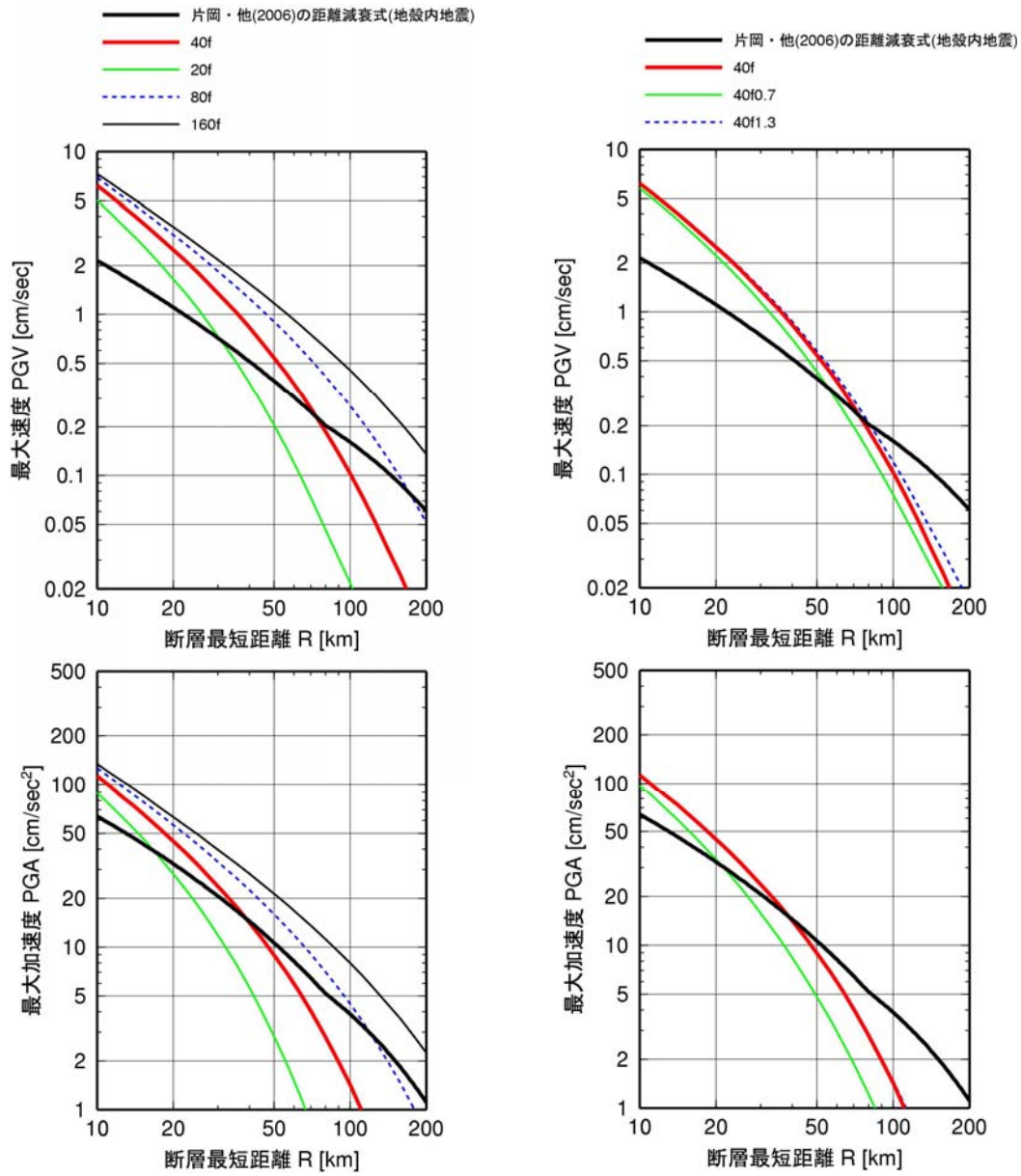
図5  $M_w$  5.2の地震に対する片岡・佐藤<sup>35)</sup>の東日本の海溝型地震の距離減衰式(地震基盤相当に補正)に対する3つの経時特性モデルを用いた地震基盤での統計的グリーン関数の距離減衰特性の比

$Q$  値モデルは、(20)~(22)式である。上述のように、震源特性の経時特性のパラメータ  $p$  は、東海・東南海沖と九州日向灘周辺では同じであるが、東日本太平洋側では異なっている。図4(b)の東日本の海溝型地震の距離減衰式と、東日本太平洋側の海溝型地震の経時特性モデルを用いた統計的グリーン関数の距離減衰特性は図4(a)と同じであり、両者はほぼ一致している。また、西日本の海溝型地震の距離減衰式は、式作成の際のデータセットの範囲である断層最短距離 20km 以上では、九州日向灘周辺地域の経時特性モデルを用いた場合の統計的グリーン関数の距離減衰特性と類似している。これは、西日本の海溝型地震の距離減衰式作成の際のデータセットの大半が九州日向灘周辺地域の海溝型地震の記録である<sup>35)</sup>ことと調和的である。以上のように、地域により異なる距離減衰式は、散乱減衰が考慮されている佐藤<sup>12),13)</sup>の経時特性モデルと  $Q$  値の地域性を考慮することでほぼ説明可能であることがわかった。

図6には、片岡・他<sup>34)</sup>の地殻内地震に対する距離減衰式と、 $Q$  値を変化させた場合の地殻内地震に対する統計的グリーン関数の距離減衰特性の比較を示す。散乱理論に基づく経時特性モデルは実体波に対するものであるため、海溝型地震に比べ表面波やモホ反射波の影響の大きい地殻内地震に対しては適用が困難である<sup>40)</sup>。そこで、Boore<sup>11)</sup>の経時特性モデルを用いて統計的グリーン関数の計算を行った。

図6(a)は、 $Q$ を地殻内地震の震源距離 100km以内のデータに基づく平均的モデルである  $Q=40f$ の場合と  $Q=20f$ 、 $Q=80f$ 、 $Q=160f$ の場合の統計的グリーン関数の距離減衰特性の比較である。遠方ほど  $Q$  値の違いによる最大加速度・最大速度の差が大きくなることがわかる。最大加速度についてみると、統計的グリーン関数の距離減衰の傾きは、 $Q=160f$ の場合に片岡・他<sup>34)</sup>の距離減衰式と同程度である。これは、震源距離 150km以内の全国の地殻内地震<sup>41)</sup>や震源距離 200km以内の東日本の地殻内地震<sup>19),42)</sup>の記録から推定されている  $Q$  が  $Q=160f$ 程度であるという結果と調和的である。つまり、片岡・他<sup>34)</sup>の地殻内地震に対する距離減衰式は断層最短距離 250km以内という比較的遠方までのデータを用いて作成されているため、 $Q=160f$ 程度の場合と同程度になったものと考えられる。一方、 $Q=40f$ を用いた場合の最大加速度の距離減衰は距離減衰式より大きく、断層最短距離 40km以内では過大評価、40km以遠では過少評価となっている。なお、既往の距離減衰式の傾きを参考にして傾きの係数が決められている司・翠川<sup>43)</sup>の距離減衰式の傾き ( $b=0.003$ ) や浅い地震の記録から求められている福島・田中<sup>44)</sup>の距離減衰の傾き ( $b=0.0033$ ) は、片岡・他<sup>34)</sup>の地殻内地震の距離減衰の傾き ( $b=0.00395$ ) よりやや緩いため、これらと比較すると、 $Q=40f$ の場合の距離減衰特性との差がさらに大きい。仮に、Boore<sup>11)</sup>の経時特性モデルの代わりに佐藤・他<sup>10)</sup>の経時特性モデルを用いても、図4や図5から類推できるように距離減衰の傾きはBoore<sup>11)</sup>の経時特性モデルとほとんど変わらず、散乱理論に基づく佐藤<sup>12)</sup>の経時特性モデルを用いると距離減衰式との隔離がさらに大きくなる。

この原因として、上述のように、既往の距離減衰式は 200km 程度かそれ以上までのデータを用いて作成されているため、以下で説明するような波の影響を受けて、平均的に距離減衰が小さくなっていることが考えられる。火山フロントの前弧側では震源距離 80~100km 以遠で距離減衰が小さくなるという特徴が指摘されるなど<sup>45)</sup>、モホ反射波や地殻内でトラップされる波の影響により、100km 以遠で距離減衰が小さく



(a)  $Q$ 値モデルの1 Hzでの値を変化させた場合 (b)  $Q$ 値モデルの周波数依存性を変化させた場合

図6  $M_w 5.2$ の地殻内地震に対する片岡・他の最大加速度と最大速度の距離減衰式(地震基盤相当に補正)と、Boore<sup>11)</sup>の経時特性モデルを用い、 $Q$ 値を平均的モデル( $Q=40f$ )を中心に变化させた場合の地震基盤での統計的グリーン関数の距離減衰特性の比較

なる。また、米国のような大陸性地殻を伝播する波ほど顕著ではないものの、日本でも地殻内地震の波形の震央距離150km程度以上においてLg波がみられることが確認されており<sup>46),47)</sup>、この場合も距離減衰は小さくなる。さらに、浅い地震では深い地震と比較して表面波が励起されやすく、遠方で距離減衰が小さくなる傾向がある。最大速度の場合に、 $Q=160f$ でも片岡・他<sup>34)</sup>の距離減衰式より傾きが大きいのは、特に表面波の寄与が大きいものと考えられる。

一方、近距離では、減衰が大きい浅い地殻を伝播するため、震源距離100km以内のデータから得られる平均的 $Q$ 値モデルは $Q=40f$ となり、統計的グリーン関数の方が距離減衰が大きくなったと考えられる。なお、距離減衰式は、(23)式の $d \cdot 10^{0.5M_w}$ の項等により近距離で頭打ちするようにモデル化されていることも一因として考えられる。しかし、 $M_w 5.5$ 程度までであれば、福島・田中<sup>44)</sup>、司・翠川<sup>45)</sup>、片岡・他<sup>34)</sup>のい

ずれの距離減衰式でも頭打ちの距離は5km以内となるので影響は小さい。このように、地殻内地震に対する統計的グリーン関数は、距離減衰特性が距離減衰式とは異なるが、適当な $Q$ 値を設定すれば、実体波部については強震動予測に適用可能と考えられる。ただし、統計的グリーン関数法では表面波は考慮できないため、震源深さが浅い地殻内地震の強震動予測の際には、理論的手法等により表面波を別途評価することが望ましいと考えられる。

図6(b)は、 $Q=40f$ の場合と $Q=40f^{0.7}$ 、 $Q=40f^{1.3}$ の場合の統計的グリーン関数の距離減衰特性であり、 $Q=40f$ と $Q=40f^{1.3}$ ではほとんど差がないことがわかる。表1に示した若狭湾付近や九州北部の地殻内地震の他、日本海東縁の地震の震源距離100km以内の強震記録から推定されている $Q$ 値には、 $f$ のべき乗が1以上となる特徴があるが<sup>30)</sup>、 $f_{max}=6\text{Hz}$ の仮定の下では、 $f$ のべき乗が1以上では最大加速度・最大速度の距離減衰特性に与える感度は小さい。

#### 4. 想定宮城県沖地震の強震動予測

図7には、推本による想定宮城県沖地震の断層モデル(A1断層)と、推本により統計的グリーン関数法で予測波形が計算されている3つの観測点位置を示す<sup>3),16)</sup>。開北橋と樽水ダムは旧建設省土木研究所<sup>48)</sup>、東北大学は旧建設省建築研究所の観測点である<sup>3),16),49)</sup>。本研究では、経時特性モデルを推本と同じ佐藤・他<sup>10)</sup>とした場合と、Boore<sup>11)</sup>、佐藤<sup>12)</sup>とした場合について、3観測点において統計的グリーン関数法で強震動予測を行い、その違いについて考察する。3観測点は、1978年宮城県沖地震の観測波形が得られている観測点であるが、観測波形の再現性は、設定する断層モデルや地下構造モデルにも依存するため、観測波形との合致度についての議論は行わない。表2には、40通りの乱数位相を用いた予測波形の最大加速度・最大速度の平均値と対数標準偏差を示す。図8には、横軸に断層最短距離をとり、最大加速度・最大速度の平均値±標準偏差の範囲を示した。Boore<sup>11)</sup>のモデルを用いた場合の最大加速度・最大速度の平均値は、佐藤・他<sup>10)</sup>の経時特性モデルの場合の1.5~1.8倍大きい。乱数位相の違いによるばらつきを考慮しても、こ

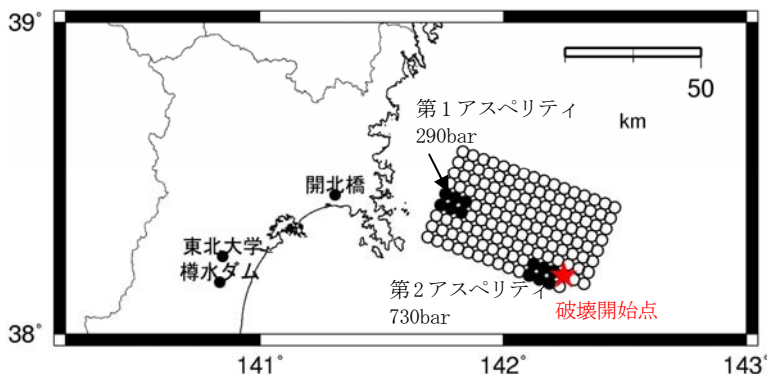


図7 推本による想定宮城県沖地震の断層モデルと統計的グリーン関数による強震動予測地点<sup>3),16),49)</sup>

表2 想定宮城県沖地震( $Mw7.6$ )に対して、3つの経時特性モデルを用いて統計的グリーン関数法により推定した乱数位相の異なる40波の予測波の最大速度・最大加速度の平均値と対数標準偏差

	経時特性	開北橋	樽水ダム	東北大学
		DKHB	DTMD	THUV
最大加速度[ $\text{cm/s}^2$ ]の平均値 (対数標準偏差)	佐藤・他 <sup>10)</sup>	302.6 (0.047)	125.5 (0.039)	328.7 (0.047)
	佐藤 <sup>12)</sup>	402.2 (0.047)	156.5 (0.046)	420.9 (0.045)
	Boore <sup>11)</sup>	440.0 (0.059)	204.1 (0.056)	512.6 (0.062)
最大速度[ $\text{cm/s}$ ]の平均値 (対数標準偏差)	佐藤・他 <sup>10)</sup>	22.9 (0.044)	14.1 (0.054)	26.7 (0.055)
	佐藤 <sup>12)</sup>	25.8 (0.056)	14.2 (0.064)	35.1 (0.057)
	Boore <sup>11)</sup>	35.7 (0.077)	23.2 (0.071)	46.7 (0.086)

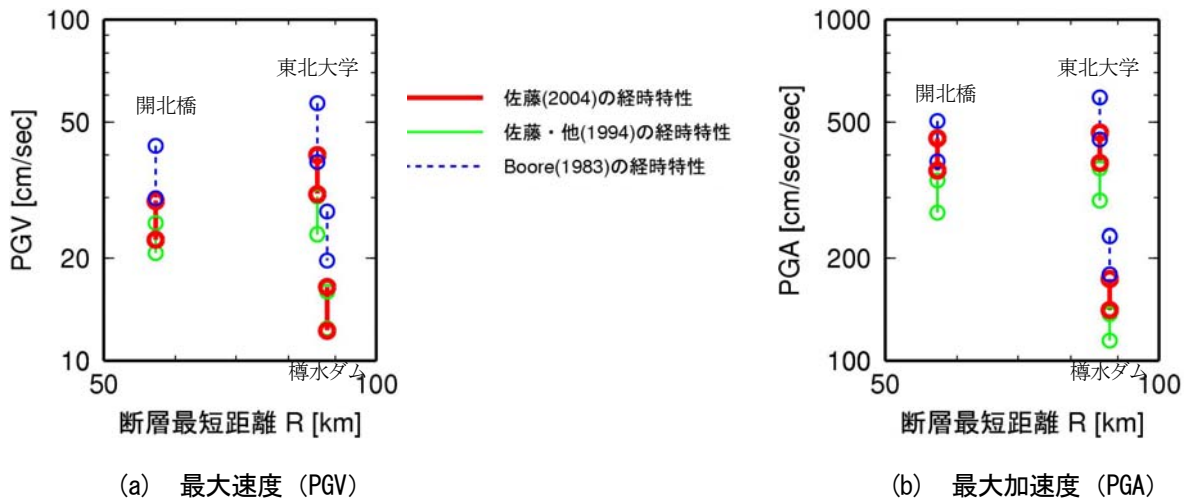


図8 想定宮城県沖地震 ( $M_w7.6$ ) に対して、3つの経時特性モデルを用いて統計的グリーン関数法により推定した乱数位相の異なる40波の予測波の最大速度・最大加速度の平均値±標準偏差の範囲の比較

の差は有為である。平均値で比較すると、例えば、東北大学では、Boore<sup>11)</sup>のモデルを用いた場合の最大加速度・最大速度は、それぞれ、 $512.6\text{cm/s}^2$ 、 $46.7\text{cm/s}$  であるのに対して、佐藤・他<sup>10)</sup>の経時特性モデルを用いた場合、 $327.8\text{cm/s}^2$ 、 $26.7\text{cm/s}$  である。対数指標である震度等の評価であれば大きな差とはいえないが、予測波形を構造物の耐震設計等に用いる場合、このような差は無視できるものではないと考えられる。上述の中規模地震 ( $M_w5.2$ ) の統計的グリーン関数の距離減衰特性からいうと、この地域については佐藤<sup>12)</sup>の経時特性モデルが最も適したモデルであり、この場合の最大加速度・最大速度は、Boore<sup>11)</sup>と佐藤・他<sup>10)</sup>の経時特性モデルを用いた場合の間の値となっている。

## 5. 結論

複数の  $Q$  値モデルと経時特性モデルを用いて地震基盤における中規模地震 ( $M_w5.2$ ) の統計的グリーン関数を計算し、その最大加速度と最大速度の距離減衰特性と既往の最大加速度・最大速度の距離減衰式 (経験式) との比較を行ない、 $Q$  値モデルと経時特性モデルの適用性について検討した。その結果、以下のことがわかった。

- 海溝型地震に対しては、佐藤<sup>12),13)</sup>の東日本太平洋岸、東海・東南海沖周辺、日向灘周辺の3つの地域に対して提案されている散乱理論に基づく経時特性モデルと  $Q$  値モデルを用いて計算される統計的グリーン関数の最大加速度・最大速度の距離減衰特性は、片岡・佐藤<sup>35)</sup>の地域性を考慮した海溝型地震の距離減衰式の距離減衰特性を震源距離 200km 程度までよく説明できる。
- 東日本太平洋岸の海溝型地震に対しては、震源距離 150~200km の遠方であれば、佐藤・他<sup>10)</sup>の経時特性モデルも適用可能であるが、100km 程度以下では最大加速度・最大速度が距離減衰式の半分ほどの過小評価となる。一方、Boore<sup>11)</sup>の経時特性モデルは、50km 程度以下では佐藤<sup>12),13)</sup>の経時特性を用いた場合及び距離減衰式とほぼ整合するが、遠方ほど継続時間が過小評価、最大加速度・最大速度が過大評価となり、200km 程度で最大加速度・最大速度が距離減衰式の倍程度の過大評価となる。
- 日本の地殻内地震の震源距離 100km 以内の記録から推定されている既往の  $Q$  値モデルから回帰分析により  $Q=40f$  という平均的関係を求めた。 $Q=40f$  と Boore<sup>11)</sup>の経時特性モデルを用いて計算される統計的グリーン関数の最大加速度・最大速度の距離減衰は、既往の地殻内地震あるいは浅い地震の距離減衰式の距離減衰より大きく、片岡・他<sup>34)</sup>の距離減衰式と比較して震源距離 50km 程度以下で過大評価、50~100km 程度で過小評価となることを示した。これは、既往の距離減衰式は震源距離 200km 程度かそれ以上の観測記録から作成されているため、この距離までの平均的な距離減衰が求められているの



に対して、震源距離 100km 以内の記録から推定されている  $Q=40f$  は地殻の浅い部分の減衰を反映しているためと考えられる。

さらに、Boore<sup>11)</sup>、佐藤・他<sup>10)</sup>、佐藤<sup>12)</sup>の3つの経時特性モデルを用いて、統計的グリーン関数法により、想定宮城県沖地震の3つの地点(震源距離 50~100km 程度)で強震動予測を行なった。そして、Boore<sup>11)</sup>の経時特性モデルの場合の最大加速度・最大速度は、佐藤・他<sup>10)</sup>の経時特性モデルの場合の1.5~1.8倍となること、この地域に対して最適である佐藤<sup>12)</sup>の経時特性モデルを用いた場合の最大加速度・最大速度は、Boore<sup>11)</sup>と佐藤・他<sup>10)</sup>の経時特性モデルを用いた場合のそれらの間にあることを示した。

以上のように、本研究では、水平動の統計的グリーン関数の  $Q$  値モデルと経時特性モデルに着目して、その適用性について検討を行った。しかし、統計的グリーン関数法では、他にも、ラディエーションパターンやサイト特性などのパラメータ・モデルが予測波形に影響する。また、震源近傍の統計的グリーン関数の適用性についても、観測波形に基づき十分に検証されているとはいえない。さらに、上下動の統計的グリーン関数については、その評価手法も確立しておらず、観測波形に基づく検証もほとんどなされていない。したがって、統計的グリーン関数法を、対数軸での精度で可能な震度等の評価のみならず、線形軸での精度が要求される耐震設計のための入力地震動としての時刻歴波形の評価に用いるためには、今後も、中小地震の観測波形を説明できるように、さらに高精度化していく積み重ねが必要となると考えられる。

## 謝辞

本研究では、気象庁による震源情報、(独)防災科学技術研究所の地震ハザードステーション J-SHIS で公開されている想定宮城県沖地震の断層パラメータを使用しました。また、一部の図の作成には、GMT<sup>50)</sup>を用いました。記して、感謝致します。なお、本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(C)課題番号 17560527)によりサポートを受けたものです。

## 参考文献

- 1) 釜江克宏、入倉孝次郎、福知保長：地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測、日本建築学会構造系論文報告集、第430号、1991、pp.1-9.
- 2) 佐藤智美、川瀬博、佐藤俊明：観測記録から同定した地震動の統計的特性と地盤の非線形性を考慮した強震動予測、日本建築学会構造系論文集、第463号、1994、pp.27-37.
- 3) 地震調査研究推進本部：宮城県沖地震を想定した強震動評価(一部修正版)について、[http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/05dec\\_miyagi/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/05dec_miyagi/index.htm)
- 4) 中央防災会議 東海地震に関する専門委員会：統計的グリーン関数法の概要、<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/tokai/2/1-2-3-02.html>
- 5) 藤川智、佐藤俊明、壇一男、石井透、佐藤智美、早川崇、宮腰淳一、松島信一、渡辺基史、福和伸夫、久保哲夫：名古屋市を対象とした想定新東海地震による強震動予測、土木学会地震工学論文集、2003、p-085.pdf.
- 6) 佐藤俊明、壇一男、Graves, R.W.、Somerville, P.G.：1923年関東大地震(Ms8.2)の断層の一樣すべり破壊を考慮した3次元有限差分法と半経験的方法のハイブリッドによる東京の広帯域強震動シミュレーション、第10回日本地震工学シンポジウム、Vol.1、1998、pp.679-684.
- 7) 入倉孝次郎、釜江克宏：1948年福井地震の強震動-ハイブリッド法による広帯域強震動の再現、地震、第2輯、第52巻、1999、pp.129-150.
- 8) 原子力安全委員会：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針、<http://www.nsc.go.jp/anzen/sonota/kettei/20060919-31.pdf>
- 9) 入倉孝次郎、三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測、地学雑誌、Vol.110、No.6、2001、pp.849-875.
- 10) 佐藤智美、川瀬博、佐藤俊明：ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性、日本建築学会構造系論文集、第461号、1994、pp.19-28.
- 11) Boore, D.M.：Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, 1983, pp.1865-1894.
- 12) 佐藤智美：群遅延時間のインバージョンと散乱理論に基づく地震動の経時特性モデルに関する研究、

- 日本建築学会構造系論文集、第 586 号、2004、pp.71-78.
- 13) 佐藤智美：フィリピン海プレートの海溝型地震による短周期地震動の散乱理論に基づく経時特性モデル、日本建築学会構造系論文集、第 601 号、2006、pp.75-82.
- 14) Saito, T., H. Sato, and M. Ohtake : Envelope broadening of spherically outgoing waves in three-dimensional random media having power law spectra, *J. Geophys. Res.*, Vol.107, 2089, 2002,doi101029/ 2001JB000264.
- 15) Saito, T., H. Sato, M. Ohtake, and K. Obara : Unified explanation of envelope broadening and maximum-amplitude decay of high-frequency seismograms based on the envelope simulation using the Markov approximation: Forearc side of the volcanic front in northeastern Honshu, Japan, *J. Geophys. Res.*, Vol.110, B01304, 2005, doi:10.1029/2004JB003225.
- 16) 藤原広行、河合伸一、青井真、功刀卓、石井透、早川譲、森川信之、小林京子、大井昌弘、神野達夫、奥村直子：宮城県沖地震を想定した地震動予測値図作成手法の検討、防災科学技術研究所研究資料、第 249 号、[http://www.j-map.bosai.go.jp/j-map/result/tn\\_249/index.html](http://www.j-map.bosai.go.jp/j-map/result/tn_249/index.html)
- 17) 壇一男、佐藤俊明：断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測、日本建築学会構造系論文集、第 509 号、1998、pp. 49-60.
- 18) Boore, D.M. and J. Boatwright : Average body-wave radiation coefficient, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.74, 1984, pp.1615-1621.
- 19) 佐藤智美：中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源深さ依存性及び地域性に関する研究、土木学会地震工学論文集、2003、p\_048.pdf.
- 20) 佐藤智美、川瀬博、佐藤俊明：表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性 仙台地域のボアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析、日本建築学会構造系論文集、第 462 号、1994、pp.79-89.
- 21) 佐藤智美：Kik-net 強震記録に基づく鳥取県西部地震とその余震のラディエーションパターン及び  $f_{max}$  の評価、日本建築学会構造系論文集、第 556 号、2002、pp.25-34.
- 22) 鶴来雅人、香川敬生、岡崎敦、羽田浩二、入倉孝次郎：強震動予測のための高域遮断フィルターに関する研究 -1995 年兵庫県南部地震の観測記録に基づく検討-、日本地震工学学会論文集、第 6 巻、第 4 号、pp.94-112、2006.
- 23) 古和田明、田居優、岩崎好規、入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価、日本建築学会構造系論文集、第 514 号、1998、pp.97-104.
- 24) Moya, A., J. Aguirre, and K. Irikura : Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using generic Algorithms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.90, 2000, pp.977-992.
- 25) 加藤研一：K - NET 強震記録に基づく 1997 年鹿児島県北西部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価、日本建築学会構造系論文集、第.543 号、2001、pp.61-68.
- 26) 植竹富一、工藤一嘉：スペクトルインバージョンを用いた神奈川西部地域の地盤増幅特性と  $Q_s$  値の評価、地震、第 2 輯、第 58 巻、2005、pp. 15-28.
- 27) 畑山健、工藤一嘉、松島信一、神原浩、早川崇、福喜多輝、坂上実：2004 年新潟県中越地震の震源域における余震・微動観測とその記録を用いた分析(その 3)余震記録を用いたサイト増幅特性の評価、地球惑星科学連合大会、2005、S079-P002.
- 28) 金谷淳二、池浦友則、土方勝一郎、植竹富一：新潟県中越地域の強震記録を用いたスペクトルインバージョン解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、2006、pp.303-304.
- 29) 佐藤智美、川瀬博：福岡県西方沖の地震と余震の強震記録のスペクトルインバージョン解析、福岡県西方沖の地震の強震動と構造物被害の関係に関する調査研究、平成 17 年度科学研究費補助金(特別研究促進費)研究成果、2006、pp.76-87.
- 30) 佐藤智美：伝播経路モデルの与え方、第 34 回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、2006、pp.23-34.
- 31) Saragoni, G.R. and G.C. Hart : Simulation of artificial earthquakes, *Earthquake Eng. Structural Dyn.*, Vol.2, 1974, pp.249-267.
- 32) Jennings, P.C., W.G. Housner and C.N. Tsai : Simulated earthquake motions, E. E. R. L., Pasadena, 1968.



- 33) 壇一男、渡辺基史、佐藤俊明、宮腰淳一、佐藤智美：統計的グリーン関数法による 1923 年関東地震 ( $M_{JMA}7.9$ ) の広帯域強震動評価、日本建築学会構造系論文集、第 530 号、2000、pp.53-62.
- 34) 片岡正次郎、佐藤智美、松本俊輔、日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式、土木学会論文集 A、Vol. 62、No.4、2006、pp.740-757.
- 35) 片岡正次郎、佐藤智美：海溝性地震を対象とした地震動強さの距離減衰特性の地域性に関する検討、第 10 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、(社)土木学会、2007、pp.269-274.
- 36) 壇一男、渡辺基史、佐藤俊明、石井透：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化、日本建築学会構造系論文集、第 545 号、2001、pp.51-62.
- 37) 佐藤智美、片岡正次郎、奥村俊彦：K-Net 強震記録に基づく工学的基盤における加速度応答スペクトルと経時特性の推定式の検討、第 11 回日本地震工学シンポジウム、2002、pp.615-620.
- 38) 高橋克也、武村雅之、藤堂正喜、渡辺孝英、野田静男：様々な岩盤上での強震動応答スペクトルの予測式、第 10 回日本地震工学シンポジウム、1998、pp.547-552.
- 39) 松岡昌志、翠川三郎：国土数値情報をサイスマックマイクロゾーニング、第 22 回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、1994、pp.23-34.
- 40) 斉藤竜彦、佐藤春夫、大竹政和、小原一成：東北地方前弧側における高周波数地震波の主要動継続時間と最大振幅の距離依存性 -マルコフ近似法に基づく理論エンベロープによる解釈-、月刊地球、Vol.25、2003、pp.616-621.
- 41) 川瀬博、松島信一、佐藤智美、伏見実、巽誉樹：JMA87 型強震計の観測記録に基づいた震源・伝播経路・サイトの各特性の分離(その 1)内陸浅発地震の場合、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、1999、pp.201-202.
- 42) 佐藤智美、巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性、日本建築学会構造系論文集、第 556 号、2002、pp.15-24.
- 43) 司宏俊、翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第 523 号、1999、pp.63-70.
- 44) 福島美光、田中貞二：新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂、日本地震学会 1992 年秋季大会講演予稿集、1992、pp.116.
- 45) 佐藤智美：スペクトルインバージョンに基づく震源スペクトル・伝播特性の断層タイプによる違いと地域性、日本地震工学会大会梗概集、2003、特 66-67.
- 46) 古村孝志：不均質な地殻・上部マントル構造における地震波の伝播と減衰異常、第 4 回都市直下地震災害総合シンポジウム、1999、pp.109-112.
- 47) Furumura, T. and B. Kennett : Variations in regional phase propagation in the area around Japan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.91, 2001, pp.667-682.
- 48) 建設省土木研究所：土木構造物における加速度強震記録(No.2)、土木研究所集報、第 33 号、1978.
- 49) 東北大学工学部地震災害科学資料室：東北地方で得られた強震記録に関する資料、1983、pp.1-51.
- 50) Wessel, P. and W. H. F. Smith : New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS, AGU, 1998.

(受理: H19 年 3 月 22 日)

(採用決定: H19 年 8 月 31 日)

## **Attenuation of Peak Ground Acceleration and Peak Ground Velocity of Statistical Green's Function**

# SATOH Toshimi<sup>1)</sup>

1) Member, Senior Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

## ABSTRACT

Attenuation of peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV) of statistical Green's functions with  $M_w=5.2$  calculated by different kinds of Q models and envelope models is compared with previous empirical attenuation relations. The attenuation of the statistical Green's function calculated by the region-specific Q model and envelope model based on scattering theory for subduction-zone earthquakes proposed by Satoh (2004, 2006) agrees with the region-specific empirical attenuation relation for subduction-zone earthquakes. On the other hand, Boore's (1983) envelope model tends to overestimate the empirical PGAs and PGVs as larger hypocentral distances are. Satoh et al's (1994) envelope model underestimates them by nearly 50 % in the hypocentral distances of less than 100 km.

*Key words: Statistical Green's function, Attenuation, Envelope model, Q value*