

# グリーン関数の補間による効率的強震動評価法と地震体験環境の構築

名古屋大学大学院環境学研究科 都市環境学専攻  
福和研究室 博士課程前期課程 2年 福井優太

## 1. はじめに

現在、発生が危惧されている南海トラフ巨大地震は、想定されている震源域が駿河湾から日向灘までの広域にわたり、複数の震源過程の可能性が考えられる。また、大規模堆積盆地では長周期成分を多く含む地震動を生じる。平野部に位置する都市部には超高層建物等の長周期構造物が多数存在するため、様々な震源過程を考慮した強震動の適切な評価が必要となる。

不均質地盤での長周期地震動を理論的に計算する方法として、有限差分法がよく用いられる。しかし、多様な震源過程について地震動の面的評価と比較検討を行う際には、評価地点の数は膨大になり、震源域を構成する要素断層も多数であるため、この方法のみでは困難である。そこで本研究ではグリーン関数の補間を利用した強震動評価法を新たに提案し、地震動予測の効率化を図る。

また、一般社会の長周期地震動や地盤と建物の共振現象に関する理解を向上させることが重要である。その一助として、体験者が当事者意識を持てるようなリアルな揺れを容易に体験できる環境を整える。ここでのリアルな揺れとは任意地震に対する任意地点・任意建物の応答を再現することを目指す。

## 2. グリーン関数の補間を用いた強震動評価法

### 2.1 地震動評価の流れ

本研究では震度への影響が小さい背景領域は考慮せず、強震動生成域(以下、SMGA と表記する)のみの強震断層モデルで評価する。SMGA を構成するすべての要素断層について、全地表面に対するグリーン関数をあらかじめ計算しておき、震源過程に応じて適切に合成することで地震動を評価する。本研究では、一部の要素断層によるグリー

ン関数のみ有限差分法により計算し、残りは観測点からの距離に応じてグリーン関数の補間を行い、必要な精度を確保しつつ、効率的に地震動を予測する。図1に計算方法を示す。(a)は評価地点近傍のSMGAである。これは評価地点の地震動に大きな影響を与えるため、すべての要素断層についてグリーン関数を理論的に計算する。これを理論グリーン関数と呼ぶ。(b)は評価地点からある程度離れたSMGAである。この場合、各要素断層からの地震波の伝播経路は近接しており、要素断層ごとのグリーン関数の波形の差は小さいと考えられる。そのため、SMGAの四隅の要素断層によるグリーン関数を理論的に計算しておき、残りの要素断層によるグリーン関数はそれらの補間により求める。これを補間によるグリーン関数と呼ぶ。(c)は評価地点から非常に遠いSMGAである。この場合、要素断層ごとのグリーン関数の波形の差はほぼ無いものと考えられる。そのため、SMGAを代表する要素断層ひとつによるグリーン関数のみを理論的に計算しておき、他の要素断層に対してもこれを代用する。その際、地震動の評価地点と要素断層間の距離による補正、走時の補正等を行わず、破壊時刻の分だけ時間シフトさせ合成する。

### 2.2 グリーン関数の補間方法

ここでは図1の(b)の場合に着目する。図2に9つの要素断層からなるSMGAにおけるグリーン関数の補間の模式図を示す。SMGAの四隅の要素断層①～④によるグリーン関数が既知のとき、残りの要素断層によるグリーン関数を補間により求める。はじめに、グリーン関数  $G(t)$  のフーリエ変換  $F(\omega)$  を次のように表す。

$$G(t) \leftrightarrow F(\omega) = \alpha(\omega)e^{id(\omega)} \quad (1)$$

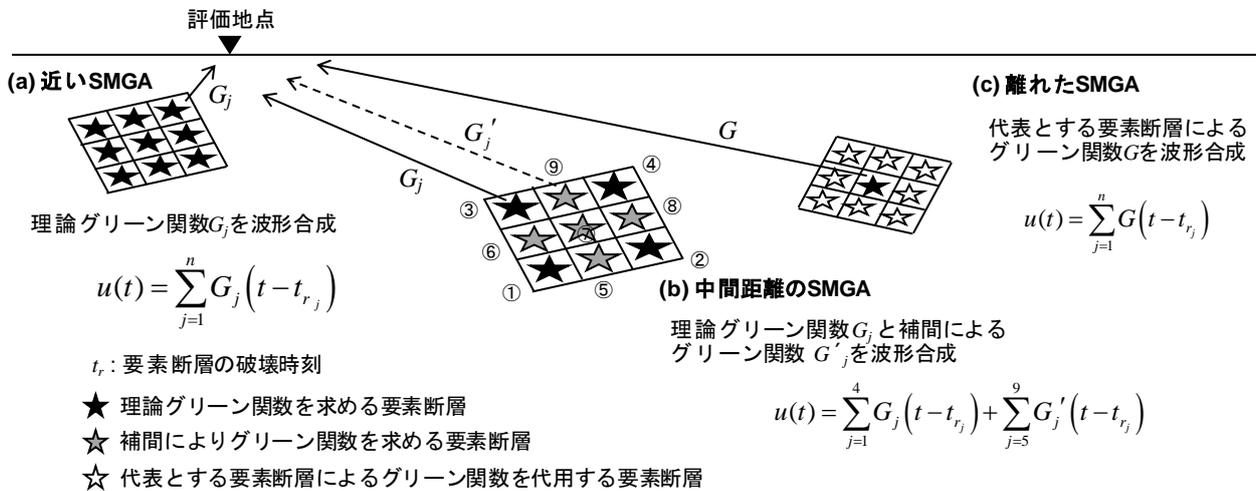


図1 提案する強震動評価法の概要

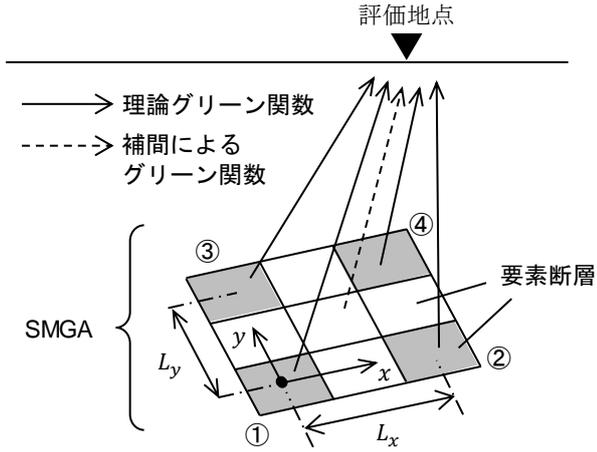


図2 SMGA内でのグリーン関数の補間の模式図

また、フーリエ位相 $\phi(\omega)$ の $\omega$ に対する変化率である群遅延時間を $t_{gr}(\omega)$ と表す。群遅延時間は波群の到達時刻を表す。ここでは波動伝播を考慮するため、位相情報の補間には群遅延時間 $t_{gr}(\omega)$ を、振幅情報の補間にはフーリエ振幅 $\alpha(\omega)$ を用いる。SMGAの四隅の要素断層①～④によるグリーン関数の $\alpha(\omega)$ と $t_{gr}(\omega)$ を使用して要素断層⑤～⑨のグリーン関数の $\alpha(\omega)$ と $t_{gr}(\omega)$ を以下のように表す。

$$\alpha(\omega) = Z_1 \cdot \alpha_1(\omega) + Z_2 \cdot \alpha_2(\omega) + Z_3 \cdot \alpha_3(\omega) + Z_4 \cdot \alpha_4(\omega) \quad (2)$$

$$t_{gr}(\omega) = Z_1 \cdot t_{gr_1}(\omega) + Z_2 \cdot t_{gr_2}(\omega) + Z_3 \cdot t_{gr_3}(\omega) + Z_4 \cdot t_{gr_4}(\omega) \quad (3)$$

$Z_1 \sim Z_4$ はFig.3中の $x, y, L_x, L_y$ を使って次のように表す。

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{L_x - x}{L_x} \frac{L_y - y}{L_y} & Z_2 &= \frac{L_x - x}{L_x} \frac{y}{L_y} \\ Z_3 &= \frac{x}{L_x} \frac{L_y - y}{L_y} & Z_4 &= \frac{x}{L_x} \frac{y}{L_y} \end{aligned} \quad (4)$$

$\alpha(\omega), t_{gr}(\omega)$ の添字は図2中の要素断層の番号に対応している。補間によるグリーン関数の位相は次式で計算する。

$$\phi(\omega) = \int_0^\omega t_{gr}(\xi) d\xi \quad (5)$$

$\alpha(\omega)$ について、理論的には、実体波や表面波の幾何減衰を考慮して、震源と評価地点との距離 $R$ 、もしくはその平方根 $\sqrt{R}$ を用いた式とすべきである。また、 $t_{gr}(\omega)$ についても、理論的には地震波の走時の違い等を考慮した補間の方法をとるべきである。しかしながら、本論文では、SMGAの一辺の長さ比べて評価地点とSMGAとの距離が十分大きいことを前提に、以上の方法で補間を行う。

なお、理論グリーン関数の $\alpha(\omega)$ と $t_{gr}(\omega)$ を算出するにあたり、それぞれ注意すべき点がある。フーリエ振幅 $\alpha(\omega)$ は、本論文においては次式で定義した。

$$\alpha(\omega) = \begin{cases} \sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)} & (R(0) \geq 0) \\ -\sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)} & (R(0) < 0) \end{cases} \quad (6-a)$$

$$(6-b)$$

$R(\omega), I(\omega)$ は $F(\omega)$ の実部、虚部である。式(8-b)に示す

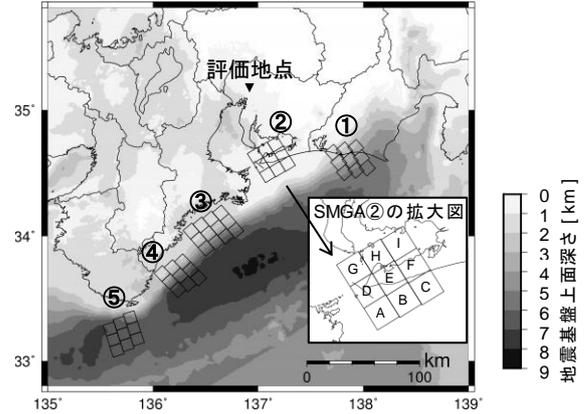


図3 理論計算の範囲とSMGAの位置

$R(0) < 0$ の場合は、通常の振幅・位相の定義では振動数0での位相が $\phi(0) = \pi$ となる。しかし、補間によるグリーン関数の位相を式(5)で算出するために、フーリエ位相スペクトル全体から $\pi$ を減じ、代わりにフーリエ振幅スペクトルに $e^{i\pi} = -1$ を乗ずることとした。また、群遅延時間 $t_{gr}$ は以下のように求める。

$$t_{gr}(\omega) = \begin{cases} \frac{R(\omega)I'(\omega) - R'(\omega)I(\omega)}{R^2(\omega) + I^2(\omega)} & (\alpha(\omega) \neq 0) \\ \frac{\phi(\omega + \Delta\omega) - \phi(\omega - \Delta\omega)}{2\Delta\omega} & (\alpha(\omega) = 0) \end{cases} \quad (7-a)$$

$$(7-b)$$

ここで、 $\Delta\omega$ は角振動数の刻みである。式(7-a)は佐藤・他<sup>1)</sup>による群遅延時間の計算式であるが、フーリエ振幅の値が0である振動数においては $t_{gr}$ を定義できない。しかし、本論文では、群遅延時間を積分することによりフーリエ位相を連続的に算出できるようにするため、式(7-b)を定義した。

### 2.3 南海トラフ巨大地震への適用

3次元有限差分法により理論グリーン関数を計算する領域、評価地点、各SMGAの位置を図3に示す。震源モデルは、内閣府のもの<sup>2)</sup>を参考に設定した。はじめに、SMGA②の四隅にあたる要素断層A, C, G, Iによるグリーン関数を理論的に計算し、その他の要素断層B, D, E, F, Hによるグリーン関数を補間により求める。図4に各要素断層によるグリーン関数を示す。それぞれについて補間結果と理論計算結果を重ね描き、鈴木・他<sup>3)</sup>による波形と包絡形の適合度GOF, E-GOFも示した。これらの指標は、それぞれ0.003~10の値をとり、値が大きいほど波形もしくは包絡形の適合度が高いことを示す。要素断層B, D, F, H,さらにEにおいては、SMGAからの四隅の距離とともに適合度が低下する傾向が見られる。続いて、図5に各SMGAの破壊による評価地点での地震動を示す。破壊開始点は各SMGAの南端とした。いずれのSMGAについても、理論計算との適合度が高い。また、評価地点から離れたSMGAほど適合度が低くなる傾向がある。これは震源距離とともに地震波の分散が大きくなるためであると考え

えられる。本手法が適用可能な範囲においては、地震波の分散が小さいほど、つまり評価地点に近い SMGA ほど補間によるグリーン関数を用いた波形合成の精度は高い。しかし、SMGA が評価地点の至近に位置している場合は、地震波の伝播経路の違いが大きいため、グリーン関数の補間を行うことは適切ではない。一方、評価地点から遠い SMGA については地震動の振幅が小さく、多少の精度の低下は許容できる。

## 2.4 南海トラフ巨大地震の地震動予測

南海トラフ巨大地震では複数の SMGA が連動して破壊する。ここでは破壊開始点の位置による地震動の違いについて比較する。図 6 に、想定した震源過程を示す。震源域全体の破壊開始点を黒の星印★で、各 SMGA の破壊開始点を白の星印☆で示す。破壊伝播速度は 2.7 km/s とした。

図 7 に各ケースの評価地点での速度波形を、図 8 に速度応答スペクトル(減衰定数 5%)を示す。破壊伝播が評価地点に近づく方向へ進行するケース 1 では、ディレクティブ効果による指向性パルスが大きく、応答スペクトル

の値も大きい。一方、SMGA②以外は評価地点から遠ざかる方向へ破壊伝播が進行するケース 2 では、指向性パルスは小さく、地震動の継続時間が長い。いずれの場合も理論計算との適合度は高く、補間によるグリーン関数を使用することで種々の震源過程を適切に比較検討できる。

## 3. 地震体験環境の構築

地震動予測結果の新たな利活用方法となる地震体験環境を構築する。現在最も普及している地震体験装置である起震車は、加振機構の制約から長周期・大振幅の揺れの再現が難しい。通常、大振幅の揺れを再現するには大型の振動台が必要であり、人間が搭乗するには安全性等の問題が生じる。そこで本研究では視覚による揺れの擬似体験環境を構築する。視覚情報による揺れの体験には仮想現実(バーチャルリアリティ)のソフトウェア技術を応用する。表示媒体には、すでに幅広い世代に普及しているスマートフォンを用いる。スマートフォンのアプリケーションとして簡易な地震体験装置として開発することで各個人が手軽に体験でき、普及性も期待できる。

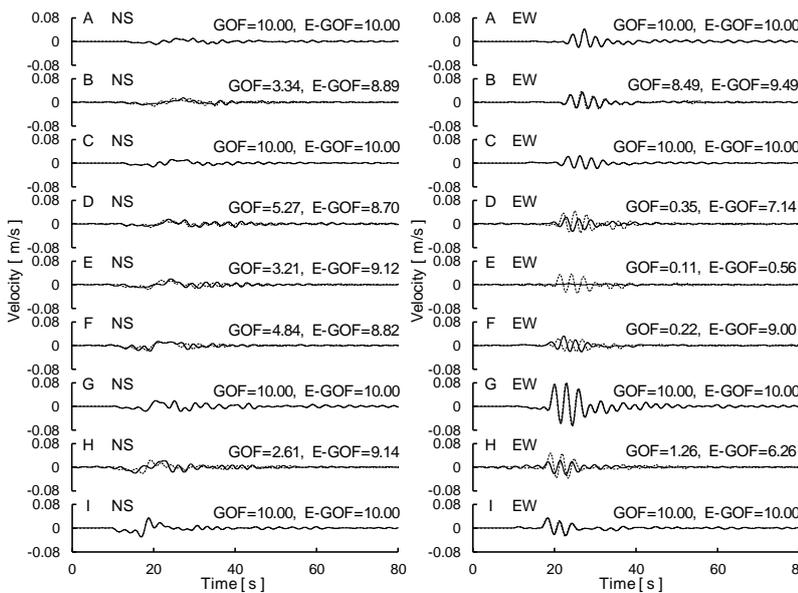


図4 SMGA②の各要素断層による評価地点でのグリーン関数

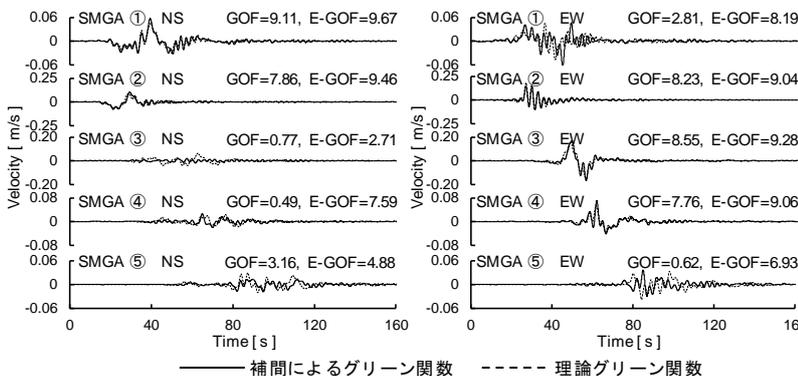


図5 各SMGAによる評価地点での地震動

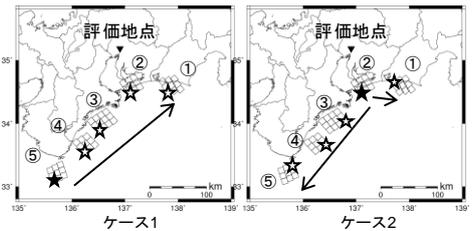


図6 想定した震源過程

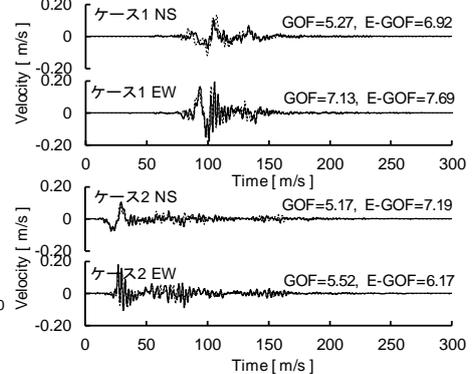


図7 各ケースの評価地点における地震動

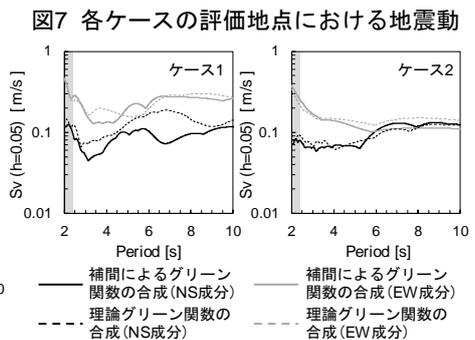


図8 速度応答スペクトル

### 3.1 入力地震動と建物応答計算

任意地震に対する任意地点・任意建物の揺れを表現可能なソフトウェアの概要を示す。入力地震動には、長周期成分と短周期成分をそれぞれ別々の方法により計算し、両者を組み合わせるハイブリッド合成法を用いる。長周期成分には内閣府の南海トラフ巨大地震の推計結果<sup>2)</sup>あるいは平井・福和による地震動作成システム<sup>4)</sup>で計算したものを使用している。また、短周期成分には統計的グリーン関数法<sup>5)</sup>により作成したものをを用いる。

建物の地震時応答計算は、逆三角形の一次モードを持つ多自由度系のせん断質点系モデルを用いて、Newmarkの $\beta$ 法により計算する。

### 3.2 地震時建物応答可視化アプリの概要

アプリ側から見た揺れの表示までのフローは次の通りである。図9に動作条件の設定画面を示す。ここでは評価地点を指定し、計算に用いる地震シナリオの選択や建物パラメータを入力する。専門的な知識を要しない一般利用者向けの設定方法も用意した。ここで、地震動作成システムにより作成した任意地震の地震動を入力することも可能である。これらの情報から、サーバ側で対象地点の地震動波形の取得・作成、建物の応答計算を行い、アプリケーション側では室内の揺れを表示する。この様子を図10に示す。この際、家具の応答シミュレーションをリアルタイムで行い、転倒・破損の判定に基づく効果音を再生する。また、簡易ヘッドマウントディスプレイ(以下、HMDと表記する)を図11に示す。これを用いることで簡単に仮想現実空間内での揺れの体験ができる。

### 3.3 外部装置との連携

構築したアプリとサーバによるシステムを図12に示す。サーバでの地震動作成・建物応答計算と、アプリでの揺れの可視化のシステムとを分離させたことにより、多様な入力元、出力先に対応できるようになった。

その一例として振動台への出力がある。図13に、本研究で使用した自走式小型振動台を示す。HMDを装着した状態で振動台に搭乗することで、振動台の加振能力が不足する場合も、視覚情報により揺れを補うことで、大振幅の体験を安全に行えるようになった。

## 4. さいごに

本研究では、グリーン関数の補間を用いた強震動予測手法の効率化と、予測結果の新たな利活用方法として地震体験環境を構築した。

第2章で提案した手法を用いて、任意震源による任意地点における完全なグリーン関数のセットが作成できれば、緊急地震速報への応用やこれまでの強震動予測手法ではできなかった新たな地震動予測が可能になると期待できる。



図9 動作条件入力画面



図10 室内の揺れのシミュレーション映像



図11 簡易HMD



図13 自走式振動台

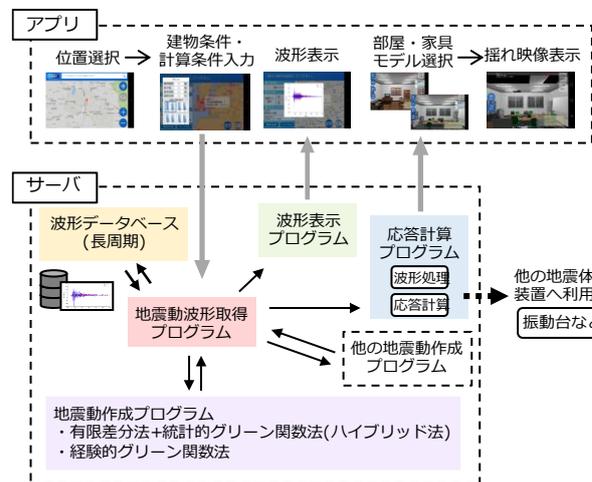


図12 アプリケーションとサーバでの計算フロー

### 参考文献

- 1) 佐藤忠信, 吉田郁政, 大島義信: 地震動位相のモデル化について, 土木学会論文集 A1(構造・地盤工学), Vol.70, No.4, pp.1-273-1-284, 2014
- 2) 内閣府, 南海トラフの巨大地震モデル検討会, 首都直下地震モデル検討会: 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告, 2015
- 3) 鈴木文乃, 加藤研一, 渡辺哲史: 地震観測波形とシミュレーション波形の適合度評価 Frequency domain error の改良と V&V での適用, 日本建築学科構造系論文集 第83巻 第752号, pp.1435-1444, 2018.10
- 4) 平井敬, 福和伸夫: グリーン関数の相反性を利用した長周期地震動作成システムの構築, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.405-406, 2017.7
- 5) 釜江克弘, 入倉孝次郎, 福知保長: 地震のスケール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, 1-9, 1991