〈一般研究課題〉　任意の地震による長周期地震動予測システムと
建物応答・室内被害の擬似体験環境の構築
助 成 研 究 者　名古屋大学　　平井　敬

任意の地震による長周期地震動予測システムと建物応答・室内被害の擬似体験環境の構築

平井　敬
(名古屋大学)

Development of long-period ground motion prediction system and virtual experience environment of building response

Takashi Hirai
(Nagoya University)

Abstract：

The long-period ground motion prediction system and virtual experience environment of building response is developed. The ground motion simulation is conducted using the Green's function database based on the reciprocity theorem. Using the reciprocity, Green's functions representing the ground motions at the site due to many source locations in complex soil structure can be calculated simultaneously by the finite difference method. Once the Green's function database has been constructed, the ground motion at the site due to an arbitrary seismic source is determined effectively by superposing Green's functions with appropriate weight factors. In this study, the web interface of the ground motion prediction system is developed. Furthermore, the computed ground motion data can be applied to the virtual experience system of building response.

1．はじめに

大都市に多く所在する超高層建物や免震建物は，長周期地震動による影響を受けやすく，特に大振幅で長時間揺れ続ける共振現象が問題となる．大都市が存在する堆積平野上での長周期地震動は，震源の方位や深さによってその卓越周期や継続時間などが変動することが分かっている．例えば，寺島・他[1] は大阪堆積平野上の地点において地震動の卓越周期が一定でないことを指摘し，平井・福和[2] は不整形な地下構造を考慮した理論計算によって卓越周期の変動の傾向について検討した．通

常, 長周期地震動の予測に用いられる有限差分法[3] は, 膨大な計算時間を必要とするため, 多くの地震を想定して揺れを予測することは困難であるという欠点がある. 著者は, 以前より, 弾性論に基づくグリーン関数の相反性を利用することで有限差分法の欠点を克服し, 震源の違いによる長周期地震動の変化を効率的に検討する手法を開発してきた[4].

建物の安全性向上を実現するには, 居住者が地震時の建物の揺れを擬似体験することが有益である. 本研究では, 著者が開発してきた方法を応用し, 任意の地震による長周期地震動を効率よく短時間で計算するシステムを構築することを考えた. すなわち, 大都市が位置する堆積盆地などの不整形な地下構造を考慮するには, 通常ならば有限差分法による大容量の計算を必要とするところ, あらかじめグリーン関数を計算しておくことで高速に地震動を予測することができるものである. 名古屋大学減災館には, 3次元画像・音声環境の下で内部に人や家具を配し, 水平2方向の揺れを再現することができる実験室がある. これと本研究で構築するシステムを連携させることで, 建物の揺れと室内の家具転倒などの危険を, 任意の地震について揺れ・映像・音声で擬似体験することができる環境を整備することを目的とした.

2. 地震動予測手法の定式化

地震によって生じる地動変位は以下のように表される.

$$u_i(\boldsymbol{x},t)=\sum_{p=1}^{3}\sum_{q=1}^{3}\int_{-\infty}^{t}\int_{V}\frac{\partial G_{ip}(\boldsymbol{x},t-\tau;\boldsymbol{\xi},0)}{\partial\xi_q}m_{pq}(\boldsymbol{\xi},\tau)dVd\tau \tag{1}$$

上記は, 震源域Vでの地震によって生じる観測点$\boldsymbol{x}$における時刻tでの変位のi成分を表している. $\boldsymbol{\xi}$は震源域内での座標, m_{pq}はモーメントテンソル密度の累積解放量である. $G_{ip}(\boldsymbol{x},t-\tau;\boldsymbol{\xi},0)$ は, 位置$\boldsymbol{\xi}$でのインパルス力によって位置$\boldsymbol{x}$に生じる変位を表す関数であり, グリーン関数と呼ばれる. モーメントテンソル密度は媒質内で生じる非線形性を線形弾性論の枠組みで取り扱う際に使用されるものであるが, 断層運動に対するモーメントテンソルは以下のように表される.

$$m_{pq}dV=(n_p\nu_q+n_q\nu_p)\mu DdS \tag{2}$$

ここでnとνはそれぞれ断層の単位法線ベクトルと単位すべりベクトルの成分を表す. μは震源域剛性率, Dはすべり量, dSは断層の微小要素の面積である. 式 (2) を式 (1) へ代入し, さらに断層を有限の大きさを持つ要素断層の集合として近似すると, 以下の式が得られる.

$$u_i(\boldsymbol{x},t)=\sum_{p=1}^{3}\sum_{q=1}^{3}\sum_{j=1}^{N_e}\int_{-\infty}^{t}\frac{\partial G_{ip}(\boldsymbol{x},t-\tau;\boldsymbol{\xi}_j,0)}{\partial\xi_q}M_{jpq}(\tau)d\tau \tag{3}$$

ここでN_eは要素断層の数, M_{jpq}は要素断層jのモーメントテンソルのpq成分の累積解放量である.

ところで, グリーン関数には以下のような相反性が成立する.

$$G_{ip}(\boldsymbol{x},t-\tau;\boldsymbol{\xi},0)=G_{pi}(\boldsymbol{\xi},t-\tau;\boldsymbol{x},0) \tag{4}$$

これを式 (3) へ代入すると, 次式のようになる.

$$u_i(\boldsymbol{x},t)=\sum_{p=1}^{3}\sum_{q=1}^{3}\sum_{j=1}^{N_e}\int_{-\infty}^{t}\frac{\partial G_{pi}(\boldsymbol{\xi}_j,t-\tau;\boldsymbol{x},0)}{\partial\xi_q}M_{jpq}(\tau)d\tau \tag{5}$$

これより, 観測点においてインパルス力を加えたときの震源位置での変位勾配テンソルが, 震源位

置でのモーメントテンソルの解放による観測点での変位に等しいことが分かる.

グリーン関数の計算には, 不整形な地下構造を考慮するため, 有限差分法を用いた. 有限差分法は, 媒質全体を格子の集合として近似し, 運動方程式を逐次解くことにより地震波の伝播を追跡するものである. そのため, 震源は1種類のものしか想定できないものの, それによる変位は媒質内のすべての点で計算することができる. この特徴は, ある想定地震についてのハザードマップを作成するときなどは有利に働くが, 重要建物の建設地点における多くの想定地震による地震動を計算する場合などは不利に働く. しかし, グリーン関数の相反性を利用すると, ひとつの観測点に対する媒質内のあらゆる位置の震源による地震動のグリーン関数を得ることができる. このことを利用して, いくつかの地点における媒質内の多数の位置の震源による地震動のグリーン関数をデータベース化し, 必要に応じて重ね合わせることで観測点における地震動を作成することとした. 式 (5) では震源位置での変位勾配テンソルを用いることになっているが, 有限差分法では変位勾配テンソルは得られず, 代わりに応力テンソルが得られる. 本研究では, 以下の式により応力テンソルから歪みテンソルを計算した.

$$\begin{pmatrix} \tau_{xx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda+2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda+2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda+2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix} \tag{6}$$

ここで τ は応力テンソル, ε は歪みテンソル, λ と μ はその位置におけるラメの定数である. 式 (5) に現れるモーメントテンソルは対称テンソルであり, 変位勾配テンソルは常に対角成分が組になって現れるため, その和のみが重要となる. そこで, 式 (5) を以下のように書き換える.

$$u_i(\boldsymbol{x},t) = \sum_{p=1}^{3}\sum_{q=1}^{3}\sum_{j=1}^{N_e}\int_{-\infty}^{t} H_{ipq}(\boldsymbol{x},t-\tau;\boldsymbol{\xi}_j,0)\,M_{jpq}(\tau)\,d\tau \tag{7}$$

ここで, 新たなグリーン関数 H_{ipq} の定義は次式の通りである.

$$H_{ipq}(\boldsymbol{x},t-\tau;\boldsymbol{\xi}_j,0) = \frac{1}{2}\left\{\frac{\partial G_{pi}(\boldsymbol{\xi}_j,t-\tau;\boldsymbol{x},0)}{\partial \xi_q} + \frac{\partial G_{qi}(\boldsymbol{\xi}_j,t-\tau;\boldsymbol{x},0)}{\partial \xi_p}\right\} = \varepsilon_{pq}(\boldsymbol{\xi}_j,t-\tau;\boldsymbol{x},0) \tag{8}$$

式 (8) の ε_{pq} は, 観測点においてインパルス力を加えたときの震源位置での歪みテンソルである.

3. グリーン関数データベースの作成

式 (8) の歪みテンソルの時系列データを複数の観測点と多くの震源位置について計算したものの集合をグリーン関数データベースと呼ぶこととする. 図1にモデル範囲とグリーン関数を定義した震源位置（以下, グリーン関数定義点）の分布を示す. グリーン関数定義点は密に配置することが望ましいが, データベースの容量が大きくなるという問題が生じる. ここでは, 水平方向10 km間隔, 上下方向5 km間隔でグリーン関数定義点を配置した. 上下方向の間隔を小さくしているのは, 地下構造は水平方向よりも上下方向に大きく変動するためである.

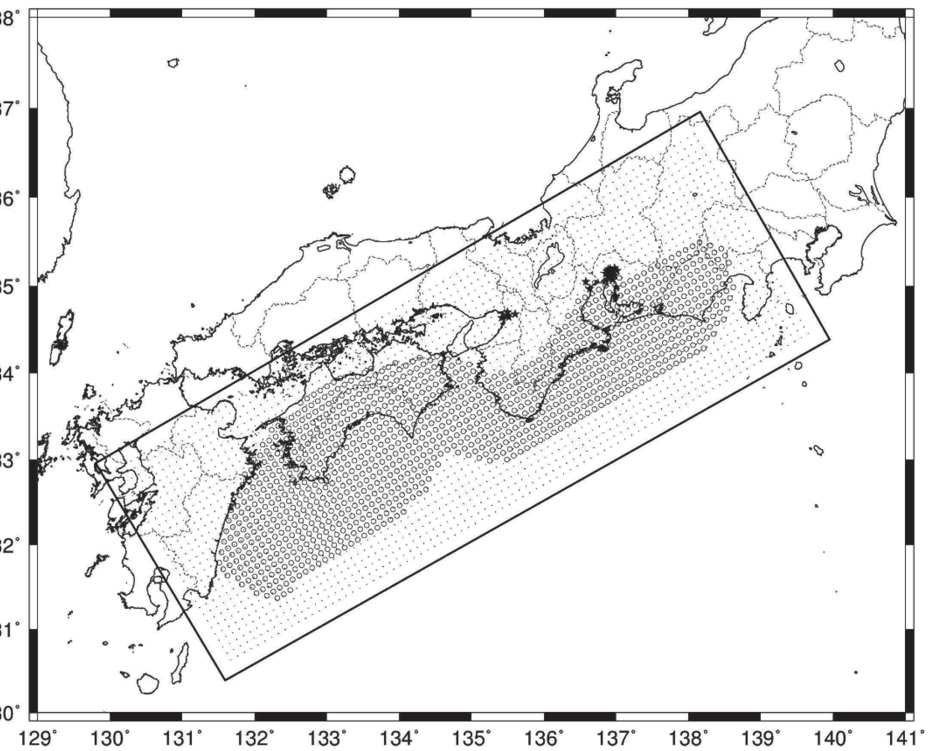

図1. グリーン関数データベースを作成した範囲

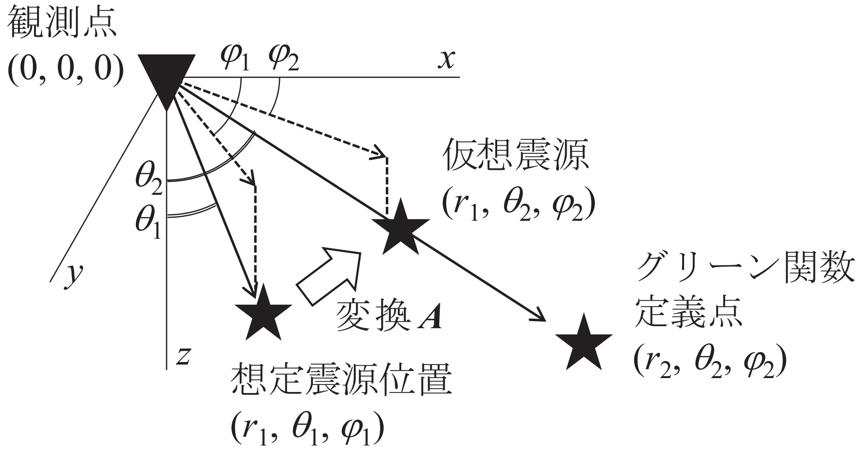

図2. 観測点・想定新芸位置・グリーン関数定義点の関係

式 (7) に従って地震動を計算する際, 想定する地震の震源位置とグリーン関数定義点は一般には一致しない. この場合, 以下のようにグリーン関数を補正した. まず, 図2のように, 観測点位置を原点としたときの想定震源位置とそれにもっとも近いグリーン関数定義点の極座標をそれぞれ $(r_1, \theta_1, \varphi_1)$, $(r_2, \theta_2, \varphi_2)$ とする. $(r_1, \theta_2, \varphi_2)$ に仮想的な震源を設定し, そのモーメントテンソル$\boldsymbol{M}'$を想定地震のモーメントテンソル$\boldsymbol{M}$をもとに以下のように与える.

$$\boldsymbol{M}' = \boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{M}\boldsymbol{A} \tag{9}$$

$\boldsymbol{A}$は単位球面上での (θ_1, φ_1) から (θ_2, φ_2) への線形変換を表す行列である. $\boldsymbol{M}'$を用いて計算した

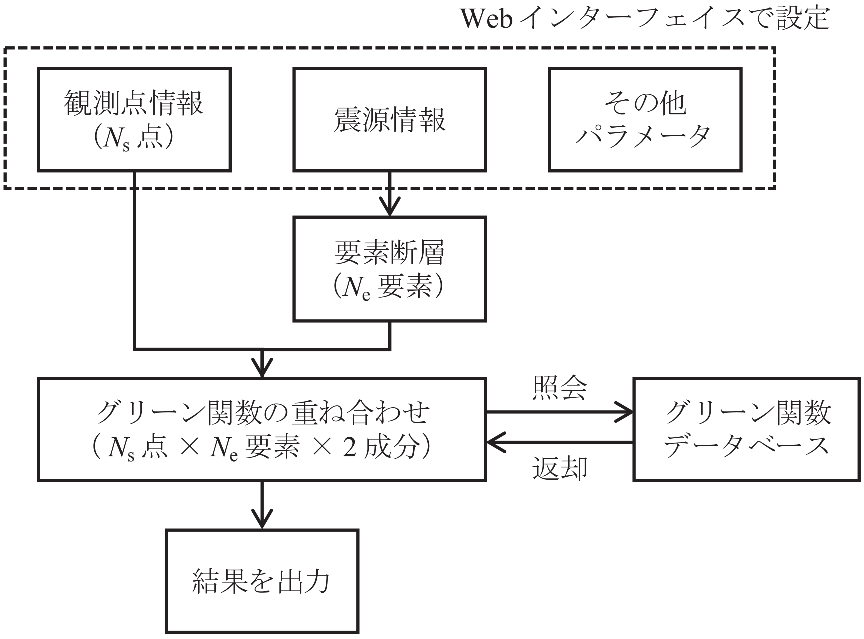

図3．　地震動予測システムの流れ図

変位波形を $\boldsymbol{u}'(t)$ とし，想定震源による変位波形を以下のように推定する．

$$\boldsymbol{u}(t)=\frac{r_2}{r_1}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{u}'\left(t-\frac{r_1-r_2}{V_S}\right) \tag{10}$$

ここで，V_Sは想定震源位置周辺のS波速度である．有限差分法によって計算されたグリーン関数はS波の寄与のみでなく，P波や表面波の寄与も含んでいる．そのため，式 (10) による振幅と走時の補正は万全のものではない．しかしながら，波動の種類ごとに振幅と走時を補正することは不可能であるため，通常もっとも振幅が大きくなるS波を基準に補正を行うこととした．

本研究では，有限差分法によるグリーン関数の計算に用いる地下構造モデルとして，地震調査研究推進本部による長周期地震動予測地図[5] の作成に用いられたモデルを採用した．最上層はV_S = 500 m/sの工学的基盤相当であり，格子分割は対象とする観測点によって異なる値とした．すなわち，濃尾平野上の観測点についてグリーン関数を計算する際には格子寸法を200 mとして解析有効周期2 s以上，大阪平野上の観測点については格子寸法を300 mとして解析有効周期3 s以上を確保した．

4．地震動作成システムの構築

地震動作成システムの処理の流れを図3に，インターフェイスの操作画面を図4に示す．このシステムはWeb上に公開されており，http://133.6.118.22/map/map/?cid=1&gid=0&mid=44より誰でも利用することが可能である．観測点情報・震源断層の情報・その他の情報（計算のパラメータなど）をユーザーが設定し，内部動作で震源断層を要素断層に分割する．その際，以下のように要素断層の長さ・幅を設定する．

$$\Delta L=\frac{L}{\lfloor L/\Delta L'+1/2\rfloor},\ \Delta W=\frac{W}{\lfloor W/\Delta W'+1/2\rfloor} \tag{11}$$

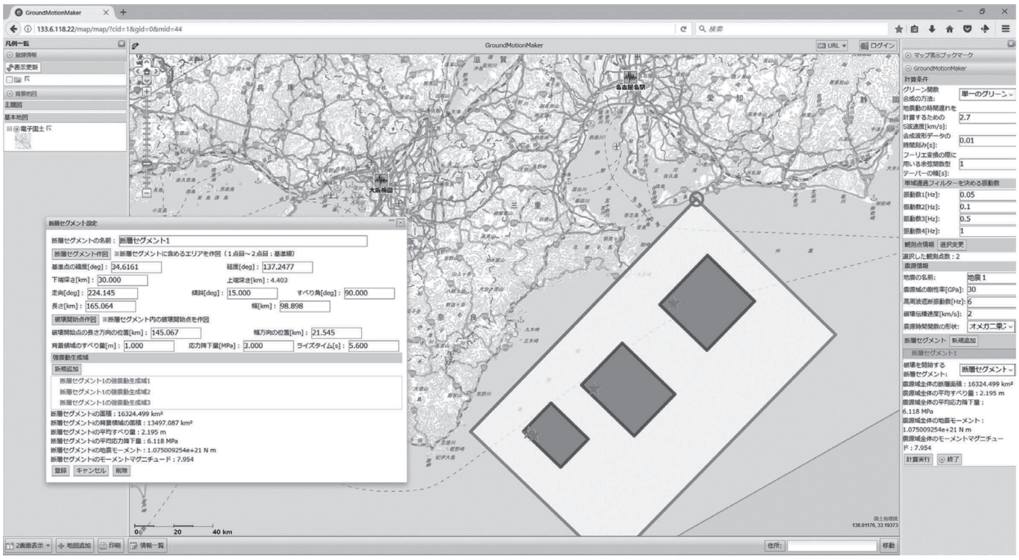

図4. 地震動予測システムの操作画面

ここでL, Wは断層セグメントの長さ・幅であり, $\Delta L = \Delta W = \sqrt{LW/100}$ である. このように生成された要素断層は, おおむね断層セグメントの1/100程度の面積で, 正方形に近い形状となる. 生成された要素断層を点震源に近似し, 適切なグリーン関数を検索しながら, 波形合成を行う.

震源時間関数については, 本システムでは, 要素断層の震源時間関数の形状をユーザーが選択できるようになっている. 選択肢としては, 一般に地震動予測で用いられることの多い代表的なものとして, ω^{-2}スペクトル型, 矩形波型, 三角波型, ベル型, 中村・宮武型[6] を用意した. なお, ここでω^{-2}スペクトル型とは

$$f(t) = \omega_c^2 t e^{-\omega_c t} \tag{12}$$

の式で表される震源時間関数であり, そのフーリエスペクトルは厳密にω^{-2}スペクトルの形状となる. 上式でω_cはコーナー振動数の2π倍である.

本システムは, インターフェイス・要素断層分割・波形合成がそれぞれ独立した構成となっている. そのため, 要素断層モデルとして既存の断層モデルを使用する, 要素断層モデルに統計的グリーン関数法を適用して地震動の短周期成分を付加するなどの操作が可能である. また, 別に作成した建物応答の可視化ツールへの入力として本手法で作成した地震動を用いることで, 長周期地震動に対する建物応答を擬似体験することが可能となっている.

参考文献

1) 寺島芳洋, 高橋広人, 福和伸夫, 護雅史：堆積盆地における地盤と超高層建物との共振現象に関する研究　その1　大阪平野の地盤周期の分析と強震動予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 151-152, 2012. 2) 平井敬, 福和伸夫：3次元有限差分法と相反定理を用いた堆積盆地の地盤震動性状の評価手法, 日本建築学会構造系論文集, 694, pp.2083-2091, 2013

2) 平井敬, 福和伸夫：3次元有限差分法と相反定理を用いた堆積盆地の地盤震動性状の評価手法, 日本建築学会構造系論文集, 694, pp.2083-2091, 2013

3) Graves, R. W.: Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences, Bull. Seism. Soc. Am., 86, pp.1091-1106, 1996

4) 平井敬, 福和伸夫：大阪堆積盆地上の長周期地震動の震源位置による変動, 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造Ⅱ), pp.1151-1152, 2016
5) 地震調査研究推進本部：「全国地震動予測地図」別冊　震源断層を特定した地震動予測地図, 2014
6) 中村洋光, 宮武隆：断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, 地震2, 53, pp.1-9, 2000