

## 千島海溝沿い巨大地震による強震動予測と免震建物の動的応答解析

### Estimation of strong ground motions from mega earthquakes along the Kuril-Kamchatka Trench and their effects on seismically isolated buildings

小穴 温子<sup>1</sup>, 菊地 優<sup>2</sup>, 壇 一男<sup>3</sup>, 井ノ上 大門<sup>3</sup>, 射場 淳<sup>2</sup>

1, 株式会社大崎総合研究所

2, 北海道大学工学研究院

3, 熊本大学大学院先端科学研究部

Atsuko Oana<sup>1</sup>, Masaru Kikuchi<sup>2</sup>, Kazuo Dan<sup>3</sup>, Hiroto Inoue<sup>3</sup>

1, Ohsaki Research Institute, Inc.

2, Faculty of Engineering, Hokkaido University

3, Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University

#### Abstract

We developed fault models of the mega earthquakes along the Kuril-Kamchatka Trench and predicted strong ground motions at Kushiro, Urakawa, and Tomakomai based on empirical Green's function method using these models. Spectral inversion analysis was performed for elemental earthquakes used as empirical Green's functions to estimate their sources and paths parameters. To verify the validity of the predicted strong ground motions, we compared them with the observation records of the 2003 Tokachi-oki earthquake and with a previous ground motion prediction equation. Finally, we evaluated the impacts of the predicted strong ground motions on seismically-isolated buildings based on dynamic response analysis.

*Key Words: Kuril-Kamchatka Trench, Fault Model, Strong Motion Prediction, Isolated Building*

キーワード: 千島海溝, 断層モデル, 強震動予測, 免震建物

#### 1. はじめに

地震調査研究推進本部(2017)<sup>1)</sup>は、千島海溝沿いで発生する可能性のある巨大地震の長期評価を実施し、将来の地震の発生パターンを提示した。内閣府 (2020)<sup>2)</sup>は、それらの震源像に対して強震動生成域から成る断層モデルを設定し、統計的グリーン関数法による強震動予測結果に基づき震度分布を公表した。しかしながら、その予測地震動は公表されていない。これらの地震動が構造物の耐震性能に及ぼす影響を詳細に検討するためには、入力地震動の時刻歴が必要である。加えて、統計的グリーン関数法は周期 2~3 秒程度以下の短周期帯域を対象とした地震動評価手法であるため、免震建物のような長周期構造物に対しては、周期 4~6 秒程度までの長周期帯域も適切に評価できる手法を選択する必要がある。



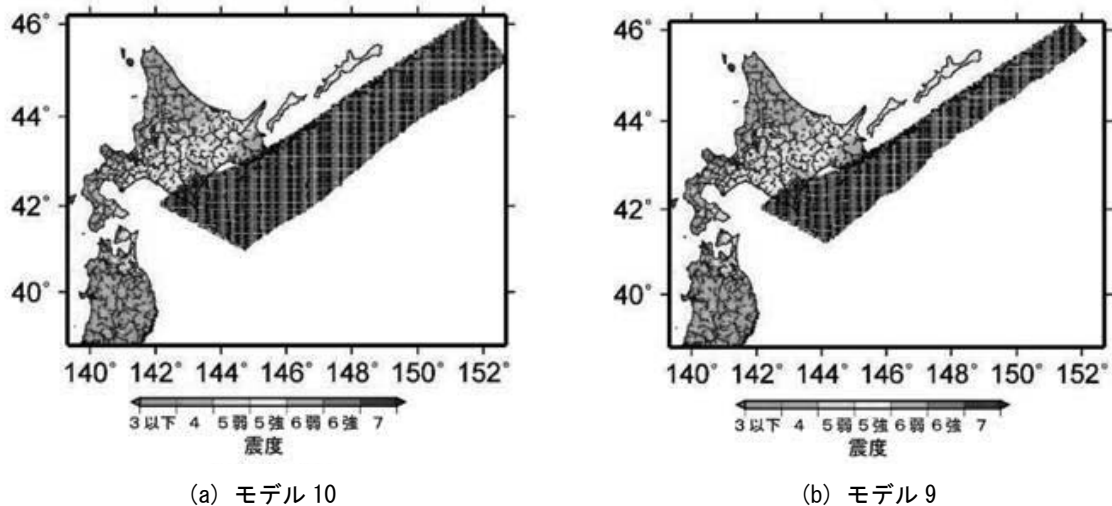


図2 千島海溝沿いの超巨大地震の予測震度（地震調査研究推進本部，2019）<sup>6)</sup>

## 2-2 断層パラメータと断層モデル

地震調査研究推進本部(2017)<sup>7)</sup>は、円形クラック式 (Eshelby, 1957)<sup>8)</sup>に基づく平均応力降下量の算定式を用いたプレート境界地震の強震動予測のためのレシピを公開している。しかしこれは、断層破壊が地表（海底）まで達しない小地震を対象とした断層パラメータ設定手順である。これに対し、ドルジャパラム・他(2015)<sup>9)</sup>は、断層破壊が海底まで達する大地震の場合に、海底で応力が解放され境界条件が変わることを考慮した平均動的応力降下量の近似式を動力学的断層破壊シミュレーションに基づき導出した。Dan et al.(2018)<sup>10)</sup>は、この近似式を用いた断層パラメータ設定方法を提案した。浅部断層に大すべり域や超大すべり域を設定する手順となっており、強震動だけではなく津波も考慮できることに特徴がある。Dan et al.(2018)<sup>10)</sup>の断層パラメータ設定手順を図3に示す。この方法では、深部断層と浅部断層の長さや幅が与条件となっている。

検討対象とする超巨大地震（モデル10）の断層面積  $S$  (147,000 km<sup>2</sup>) と震源域の地理的分布に基づき、断層長さ  $L$  を 849 km、断層幅  $W$  を 173 km とした。なお、深部断層の断層幅  $W_{deep}$  はモデル9の断層面積に基づき 109 km とした。これらの断層長さや断層幅を与条件として、図3に従い、その他の断層パラメータを設定した。断層パラメータを表1に示す。ここに、アスペリティの個数は、断層長さが 500 km の 2011 年東北地方太平洋沖地震で 4~5 個(川辺・釜江, 2013)<sup>11)</sup>だったことを参考に、100 km ごとに 1 個と仮定し、合計 8 個とした。断層モデルを図4に示す。図4(a)はアスペリティを深部断層の深さ方向中央に配置した場合の「基本モデル」、図4(b)はアスペリティを陸側すなわち深い側に配置した場合の「陸側モデル」、図4(c)はアスペリティを内閣府(2020)<sup>2)</sup>の強震動生成域の位置に合わせて配置した場合の「内閣府モデル」である。アスペリティの数を 8 個と仮定したため、内閣府モデルでは内閣府(2020)<sup>2)</sup>の最北の強震動生成域は無視した。要素断層の規模は、半経験的波形合成法における重ね合わせ数に配慮して Mw7.1 とした。アスペリティはいずれも同サイズとした。超大すべり域は深さ 4 km 以浅、大すべり域は深さ 14 km 以浅に設定した。各モデルとも、破壊開始点は断層西側アスペリティ下端とした case1、中央付近のアスペリティ下端とした case2、断層東側アスペリティ下端とした case3 を設定した。破壊伝播速度は Geller(1976)<sup>12)</sup>に基づき 2.74 km/s とした。

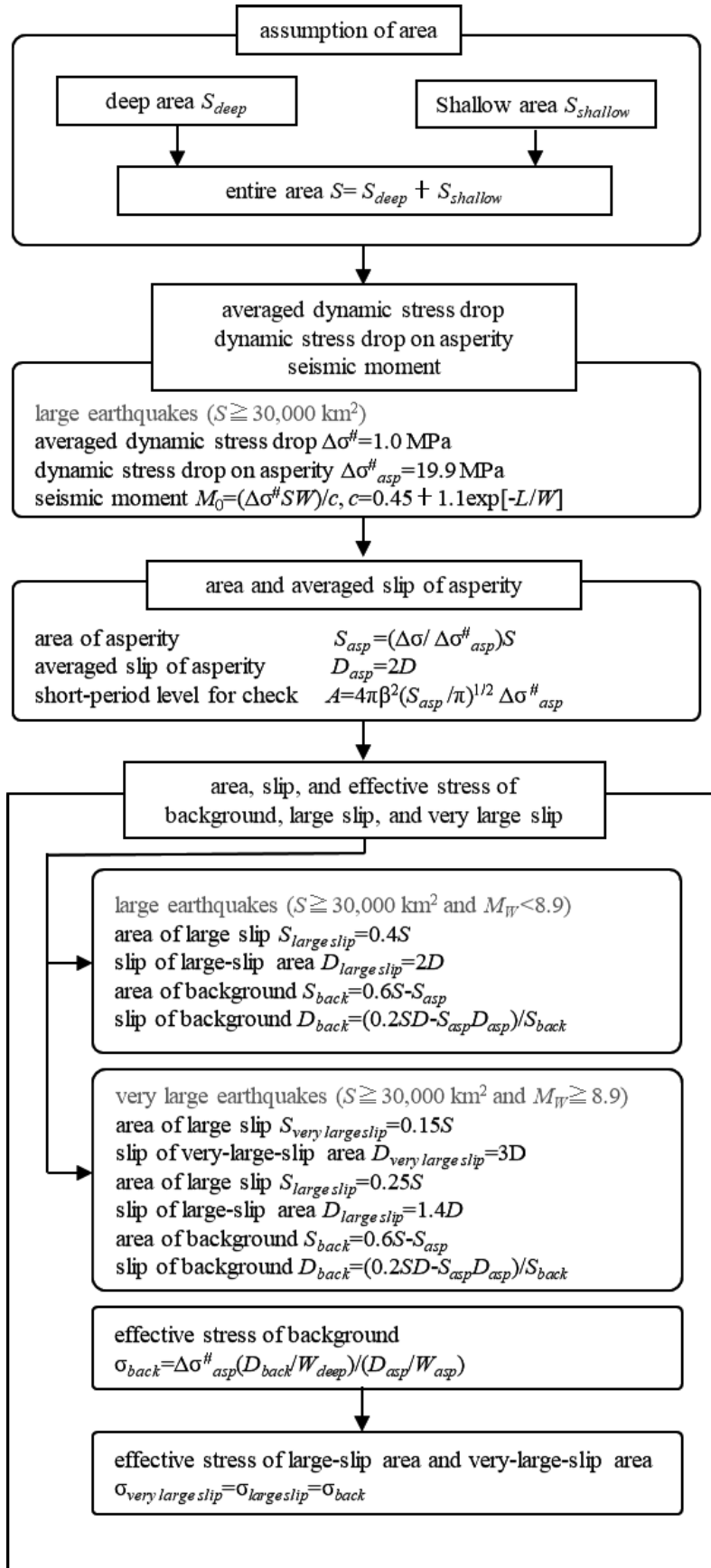
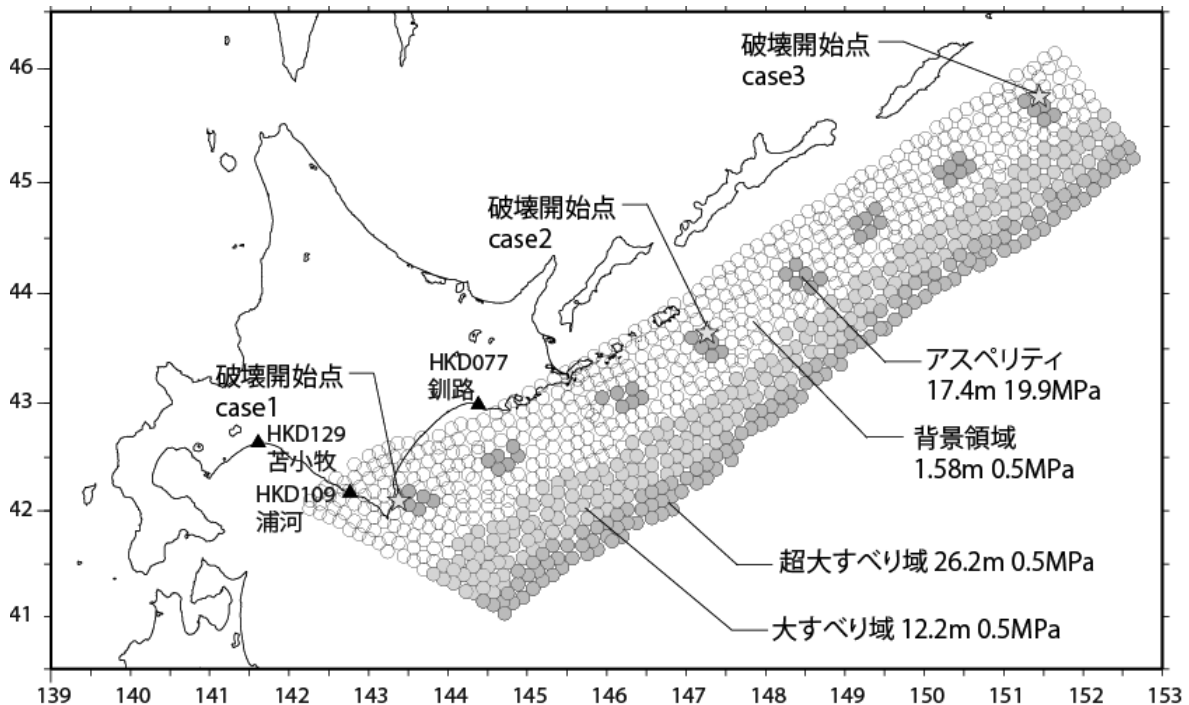


図3 断層破壊が地表（海底）まで達するプレート境界地震を対象とした Dan et al. (2018)<sup>10</sup>の断層パラメータ設定手順

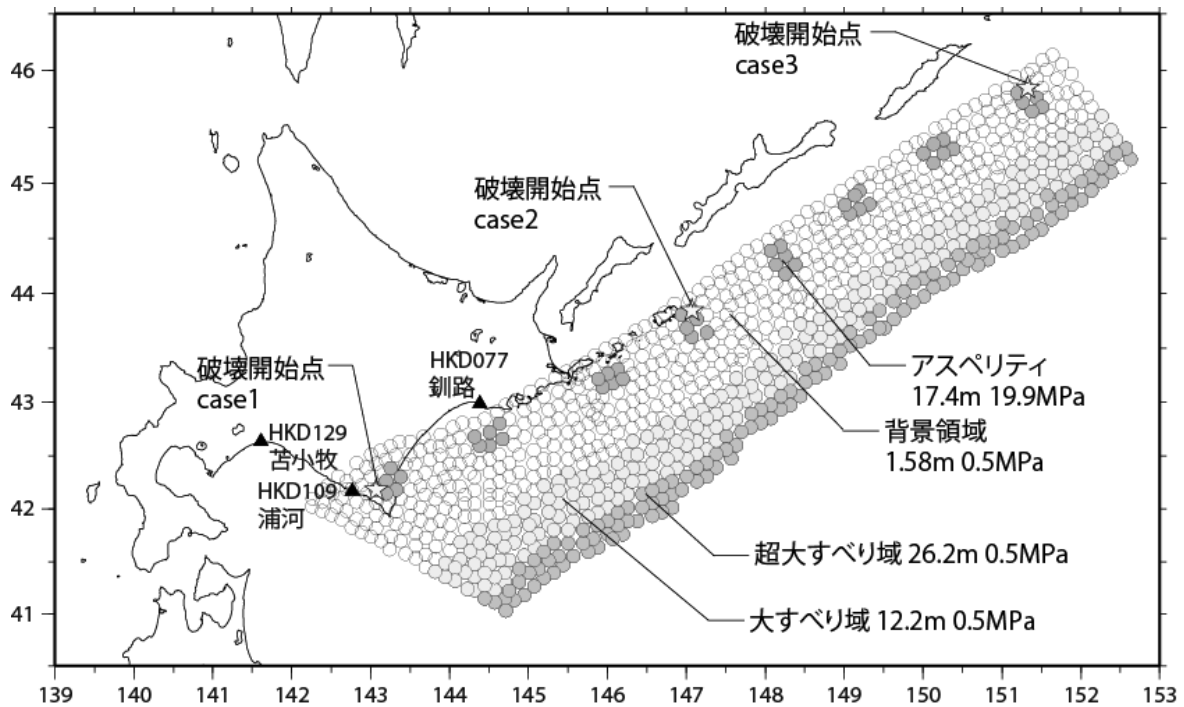
表1 千島海溝沿いの超巨大地震の断層パラメータ

断層パラメータ	数値	設定式	設定根拠
断層長さL (km)	849		地震本部 (2019) のモデル10
断層幅W (km)	173	$W=S/L$	地震本部 (2019) のモデル10
断層面積S (km <sup>2</sup> )	$1.47 \times 10^5$		地震本部 (2019) のモデル10
深部断層面積S <sub>deep</sub> (km <sup>2</sup> )	$9.29 \times 10^4$		地震本部 (2019) のモデル9
深部断層幅W <sub>deep</sub> (km)	109	$W_{deep}=S_{deep}/L$	地震本部 (2019) のモデル9
平均応力降下量 $\Delta\sigma$ (MPa)	1.00		Dan <i>et al.</i> (2018)
アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}$ (MPa)	19.9		Dan <i>et al.</i> (2018)
地震モーメントM <sub>0</sub> (N・m)	$5.55 \times 10^{22}$	$M_0=(\Delta\sigma \cdot S \cdot W)/c$	Dan <i>et al.</i> (2018)
モーメントマグニチュードM <sub>w</sub>	9.10	$M_w=(\log M_0[\text{dyne}\cdot\text{cm}]-16.1)/1.5$	
アスペリティの面積S <sub>asp</sub> (km <sup>2</sup> )	$7.39 \times 10^3$	$S_{asp}=(\Delta\sigma/\Delta\sigma_{asp})S$	Dan <i>et al.</i> (2018)
アスペリティのすべり量D <sub>asp</sub> (m)	17.4	$D_{asp}=2D$	Dan <i>et al.</i> (2018)
短周期レベルA (N・m/s <sup>2</sup> )	$1.75 \times 10^{20}$	$A=4\pi\beta^2(S_{asp}/\pi)^{1/2}\Delta\sigma_{asp}$	Dan <i>et al.</i> (2018)
S <sub>very large slip</sub> (km <sup>2</sup> )	$2.20 \times 10^4$	$S_{very\ large\ slip}=0.15S$	Dan <i>et al.</i> (2018)
S <sub>large slip</sub> (km <sup>2</sup> )	$3.67 \times 10^4$	$S_{large\ slip}=0.25S$	Dan <i>et al.</i> (2018)
S <sub>back</sub> (km <sup>2</sup> )	$8.08 \times 10^4$	$S_{back}=0.6S-S_{asp}$	Dan <i>et al.</i> (2018)
D <sub>very large slip</sub> (m)	26.2	$D_{very\ large\ slip}=3D$	Dan <i>et al.</i> (2018)
アスペリティの個数N <sub>asp</sub>	8		
アスペリティ1個の面積 (km <sup>2</sup> )	923	$S_{asp}/N_{asp}$	
アスペリティ1個の大きさW <sub>asp</sub> (km)	30.4	$(S_{asp}/N_{asp})^{1/2}$	正方形を仮定
D <sub>large slip</sub> (m)	12.1	$D_{large\ slip}=1.4D$	Dan <i>et al.</i> (2018)
D <sub>back</sub> (m)	1.58	$D_{back}=(0.2SD_{asp}-S_{asp}D_{asp})/S_{back}$	Dan <i>et al.</i> (2018)
$\sigma_{back}$ (MPa)	0.50	$\sigma_{back}=\Delta\sigma_{asp}(D_{back}/W_{deep})/(D_{asp}/W_{asp})$	Dan <i>et al.</i> (2018)
$\sigma_{very\ large\ slip}=\sigma_{large\ slip}$ (MPa)	0.50	$\sigma_{very\ large\ slip}=\sigma_{large\ slip}=\sigma_{back}$	Dan <i>et al.</i> (2018)
密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	3.00		
S波速度 $\beta$ (km/s)	3.80		

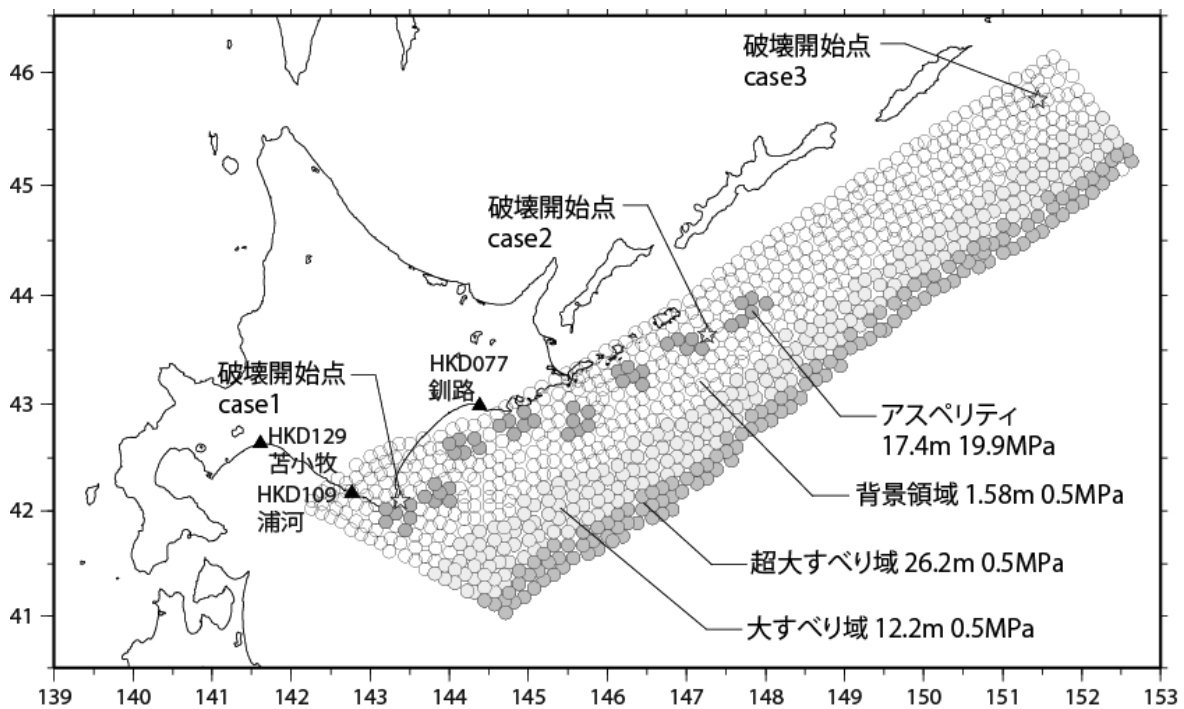


(a) 基本モデル

図4 千島海溝沿いの超巨大地震の断層モデル



(b) 陸側モデル



(c) 内閣府モデル

図4 千島海溝沿いの超巨大地震の断層モデル (つづき)

### 3. 要素地震のスペクトルインバージョン

経験的グリーン関数とする要素地震を選定するために、千島海溝沿いのプレート境界で発生した  $M_w5$  以上の地震を F-net<sup>13)</sup> で検索した結果、18 地震が抽出された。これらの地震について、防災科学技術研究所強震観測網 KiK-net<sup>14)</sup> 観測点で得られた記録を対象にスペクトルインバージョンを行い、伝播経路の  $Q$  値と各地震のコーナー振動数を推定した。スペクトルインバ

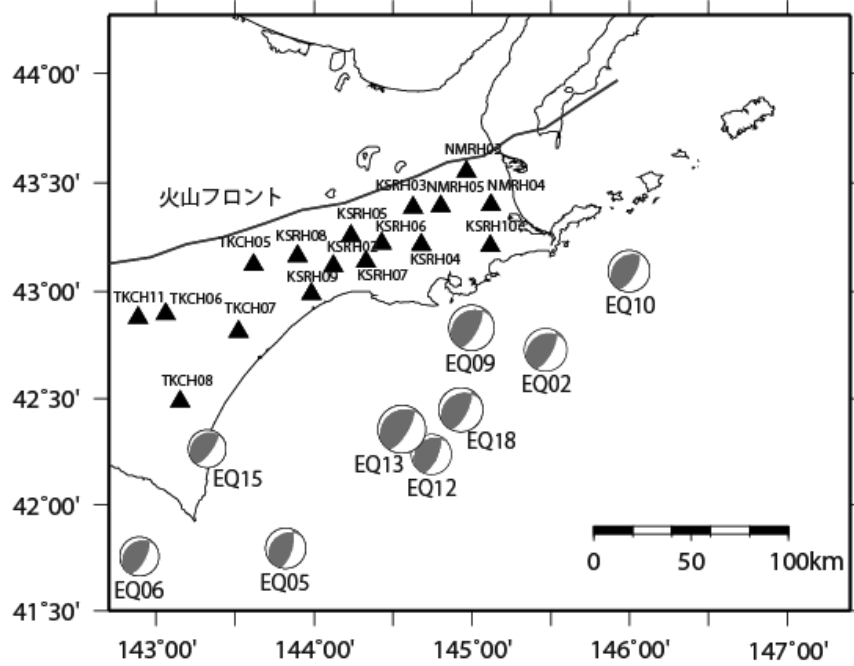


図5 スペクトルインバージョンの対象とした地震と KiK-net 観測点

ージョンの対象とした地震と KiK-net 観測点を図5に示す。

スペクトルインバージョンの概略を以下に記す。地震  $i$  およびサイト  $j$  において、地震動の加速度フーリエ振幅スペクトル  $A_{ij}(f)$  が得られているとする。 $f$  は振動数である。ここで、震源スペクトルを  $S_i(f)$ 、伝播特性（震源～地震基盤）を  $P_{ij}(f)$ 、サイト増幅特性（地震基盤～評価位置）を  $G_j(f)$  とすると、下式が成り立つ。

$$A_{ij}(f) = S_i(f) \times P_{ij}(f) \times G_j(f) \quad (1)$$

ここで、伝播特性  $P_{ij}(f)$  は Q 値  $Q(f)$  と震源距離  $R_{ij}$  により以下で表せる。 $\beta$  は伝播経路（震源）における地盤のせん断波速度である。

$$P_{ij}(f) = (1/R_{ij}) \times \exp(-\pi f R_{ij} / Q(f) / \beta) \quad (2)$$

(1)式は、各変数の自然対数を小文字で表記すると下式のように書き換えられる。

$$a_{ij}(f) = s_i(f) + p_{ij}(f) + g_j(f) = s_i(f) + \{-r_{ij} - \pi f R_{ij} / Q(f) / \beta\} + g_j(f) \quad (3)$$

ここで、Q 値に関する項を(4)式のようにおけば、(3)式は(5)式のように変数  $s_i(f)$ 、 $b(f)$ 、 $g_j(f)$  の線形関数となる。

$$b(f) = -\pi f / Q(f) / \beta \quad (4)$$

$$a_{ij}(f) = s_i(f) - r_{ij} + R_{ij} b(f) + g_j(f) \quad (5)$$

岩田・入倉(1986)<sup>15)</sup>の手法により、下式の誤差関数  $E$  を最小化する  $s_i(f) (i=1, 2, \dots, I)$ ,  $g_j(f) (j=1, 2, \dots, J)$ ,  $b(f)$  のセットを求める。

$$E = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \delta_{ij} [a_{ij}(f) - \{s_i(f) - r_{ij} + R_{ij}b(f) + g_j(f)\}]^2 \quad (6)$$

ここで  $\delta_{ij}$  は、地震  $i$ 、サイト  $j$  の記録がある場合 1、無い場合 0 とする。また、サイト G (基準観測点) の補正係数を 1 (対数は 0) とするための  $\delta G=1$  ( $i=G$  のとき)、 $\delta G=0$  ( $i \neq G$  のとき) という拘束条件を与えると、最小二乗解が求められる。

本検討で、スペクトルインバージョンの対象とした観測記録は次の条件を満たすものとし、S 波初動から 10.24 秒を切り出して解析を行った。

- ・ 震源距離 250 km 以下
- ・ 火山フロント前弧側の観測点 (火山フロントを通過しない)
- ・ 地表最大加速度が 2 cm/s<sup>2</sup> 以上、200 cm/s<sup>2</sup> 以下

震源スペクトルおよびサイト増幅特性を求める際に拘束条件を与える必要があるため、地震基盤相当のサイトの記録が必要となる。そのため、地震基盤の層ではぎ取り波が求まるサイトとして、 $V_s=2.8$  km/s の TKCH08 大樹を基準観測点とした。TKCH08 における地表記録と地中記録を用いて、GA により地盤同定解析を行い、地震基盤上面におけるはぎ取り波を算出した。地盤同定の対象振動数帯域は 10 Hz 以下とした。地中観測記録に対する地表観測記録の伝達関数とはぎ取り解析による伝達関数の比較の例を図 6 に示す。

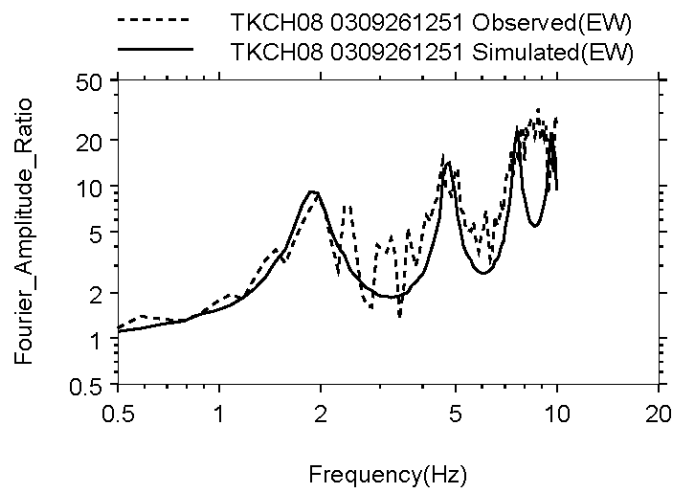


図 6 地中観測記録に対する地表観測記録の伝達関数とはぎ取り解析による伝達関数の比較例

スペクトルインバージョンにより求められた  $b(f)$  を(4)式に代入することにより、(7)のように  $Q$  値が振動数の関数として求まる。

$$Q(f) = -\pi f / b(f) / \beta \quad (7)$$

ここで求まる  $Q(f)$  を(8)式のような関数形にフィッティングさせる。推定された  $Q$  値を図 7



に示す。

$$Q(f) = Q_0 f^\alpha \quad (8)$$

本検討では  $Q(f) = 229f^{0.67}$  と推定された。5 Hz で約 700、10 Hz で約 1000 となり、これらは Morikawa and Sasatani(2000)<sup>16)</sup> と概ね調和的な値である。

Boore(1983)<sup>17)</sup> 等によれば、加速度震源スペクトル  $S(f)$  は下式のようにモデル化される。

$$S(f) = \frac{R_{\theta\phi} F_s P_{RTITN}}{4\pi\rho\beta^3} \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_z\beta_z} \frac{(2\pi f)^2 M_0}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (9)$$

ここに、 $R_{\theta\phi}$  : 放射係数 (幾何平均のため 0.55)

$F_s$  : 地表面増幅率 (基盤表面のため 2.0)

$P_{RTITN}$  : 水平 2 方向への地震波エネルギーの分配率 (=  $1/\sqrt{2}$ )

$\rho, \beta$  : 震源の密度とせん断波速度 ( $\rho = 3.0 \text{ g/cm}^3, \beta = 3.8 \text{ km/s}$ )

$\rho_z, \beta_z$  : 地震基盤の密度とせん断波速度 ( $\rho_z = 2.61 \text{ g/cm}^3, \beta_z = 2.8 \text{ km/s}$ )

$M_0$  : 地震モーメント

$f_0$  : コーナー振動数

スペクトルインバージョンで求めた  $S(f)$  をこの関数形にフィッティングする。 $M_0$  は F-net<sup>13)</sup> の値を採用し、1~5 Hz の  $S(f)$  を対象に  $f_0$  を同定した。なお、短周期レベル  $A$  は下式により求めた。

$$A = (2\pi f_0)^2 M_0 \quad (10)$$

加速度震源スペクトルのフィッティングの例を図 8 に示す。以上により求めた短周期レベルを含む、要素地震の諸元を表 2 に示す。

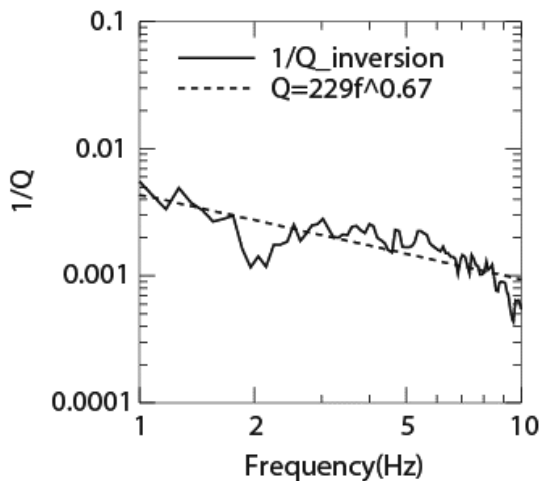


図 7 Q 値の推定結果

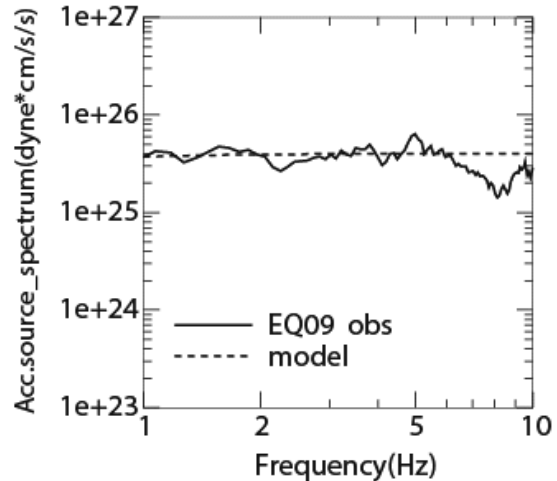


図 8 短周期レベルの推定結果の例

表 2 経験的グリーン関数として用いた要素地震の諸元

記号	発震時刻* <sup>1</sup>	緯度* <sup>1</sup>	経度* <sup>1</sup>	M <sub>0</sub> [Nm]* <sup>2</sup>	A[Nm/s <sup>2</sup> ]* <sup>3</sup>	Δσ [MPa]* <sup>3</sup>
EQ02	2018/05/18 03:42	42.7252	145.4705	5.15E+17	1.77E+18	2.03
EQ05	2009/03/07 23:33	41.7953	143.8225	1.45E+17	1.19E+18	2.11
EQ06	2006/04/13 13:27	41.7560	142.8938	1.10E+17	1.75E+18	4.30
EQ09	2004/04/12 03:06	42.8298	144.9982	1.45E+18	4.00E+18	4.11
EQ10	2004/02/17 16:46	43.0928	145.9978	2.40E+17	2.62E+18	5.35
EQ12	2003/10/07 04:26	42.2380	144.7452	1.65E+17	1.54E+18	2.92
EQ13	2003/09/29 11:37	42.3570	144.5570	4.96E+18	6.06E+18	4.14
EQ15	2003/09/28 09:23	42.2650	143.3243	3.95E+16	1.25E+18	4.35
EQ18	2000/11/14 00:57	42.4467	144.9312	7.79E+17	2.92E+18	3.49

\*1) 気象庁<sup>18)</sup>、\*2) F-net<sup>13)</sup>、\*3)本研究

#### 4. 経験的グリーン関数法による地震動評価

対象地点は、HKD077 釧路、HKD109 浦河、HKD129 苫小牧の 3 地点とした。千島海溝巨大地震の断層モデルの要素断層に対する要素地震の配置を図 9 に示す。地点によって観測記録が得られている地震が異なるため、要素地震の配置もそれぞれ異なる。北部では適切な要素地震がなかったため、半分以上の要素断層に同じ要素地震を割り当てたが、陸域から離れた領域であるため、予測地震動に対してそれらグリーン関数の精度が及ぼす影響は工学的に小さいと判断した。波形合成法には Dan *et al.*(1989)<sup>19)</sup>を用いた。対象地点における地震動はいずれも地表位置で評価した。表層地盤の非線形特性は考慮していない。伝播経路の Q 値はスペクトルインバージョンによる  $Q(f)=229f^{0.67}$  ( $f \geq 1$  Hz)とした。要素地震の放射特性係数や高周波遮断振動数  $f_{max}$  の補正は行っていない。各ケースで要素断層内における地震波放射位置を変えた 11 通りの地震動を計算した。それぞれ周期 0.03~10 秒のバンドパスフィルタをかけた。

評価した地震動の妥当性を検証するための目安として、2003 年十勝沖地震の観測記録と Morikawa and Fujiwara(2013)<sup>20)</sup>の地震動予測式(以後、MF 式)に基づく計算結果を用いた。MF 式にはマグニチュードによる振幅の頭打ちの効果が考慮された Model 1 (Mw8.3 で頭打ち)を用い、地盤特性の補正と異常震域の補正を施した。

HKD129 における本検討結果と 2003 年十勝沖地震 (Mw7.9) の観測記録の加速度波形を図 10 に示す。図中右上に最大加速度と実効継続時間  $et0$ <sup>21)</sup>を記した。図 10 より、本検討結果は、いずれのモデルも case2 と case3 に比べて case1 の実効継続時間が長く、破壊開始点の違いに伴う波群の重なるタイミングの違いの影響が確認できる。各モデルの case1 を比較すると、基本モデルと陸側モデルでは波群が複数に分かれている一方、内閣府モデルでは単一の波群に見え、アスペリティを集中的に配置した影響が現れている。また、本検討結果の各モデルの case1 は 2003 年十勝沖地震の観測記録に比べて実効継続時間が約 1.5 倍長く、震源規模の違いが現れている。減衰定数 5%の擬似速度応答スペクトルの比較を図 11 に示す。図 11 より、HKD077 の周期 1 秒程度以下と HKD109 の周期 0.3 秒程度以下で内閣府モデルが比較的大きいものの、

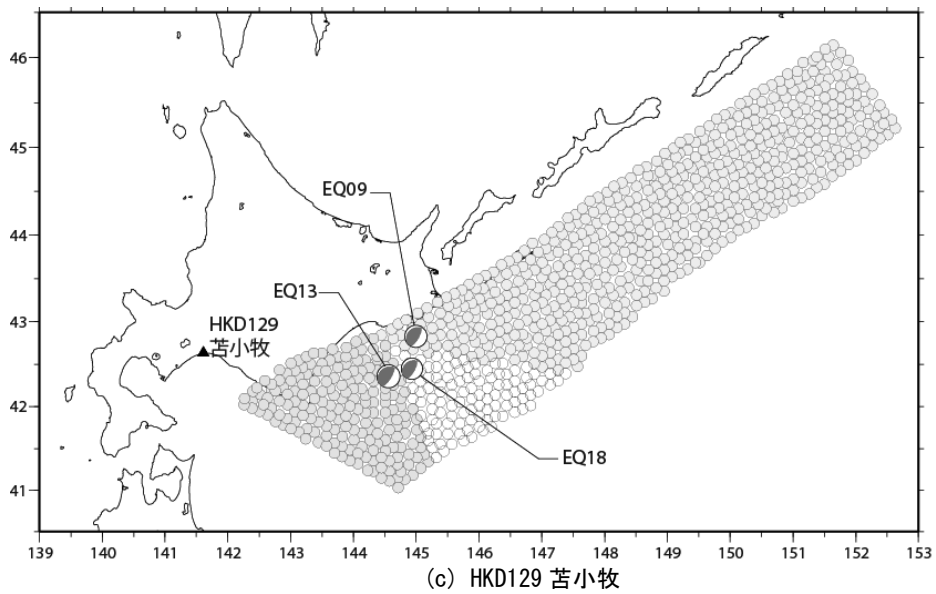
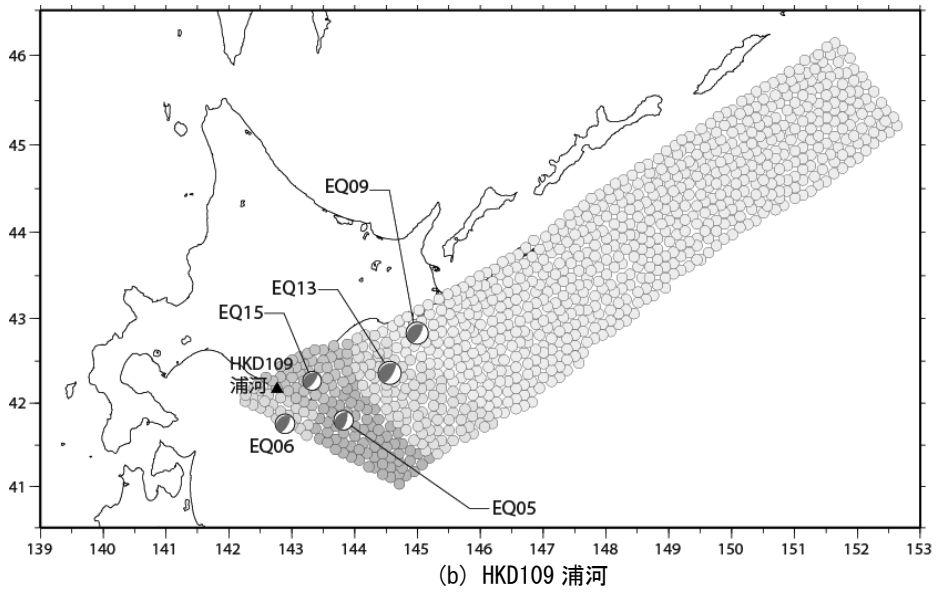
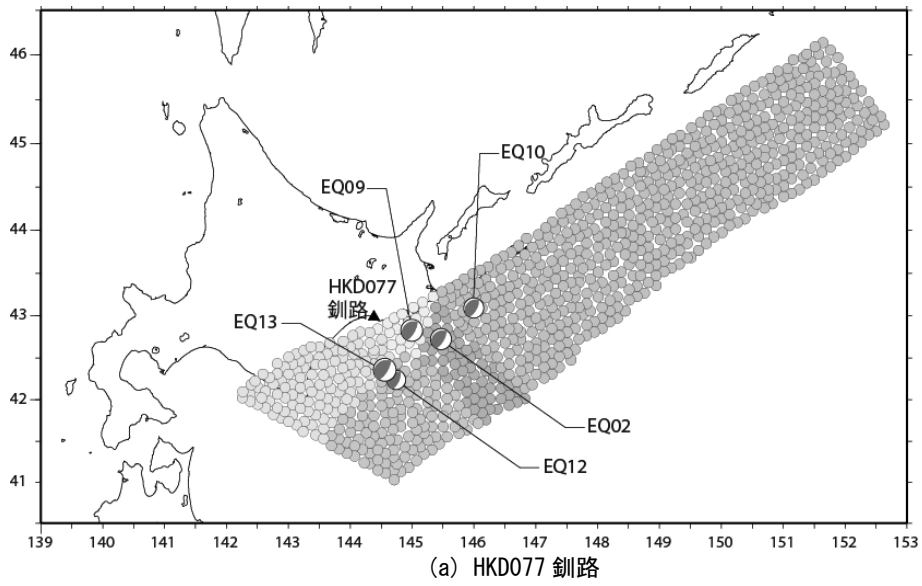


図9 要素地震の配置

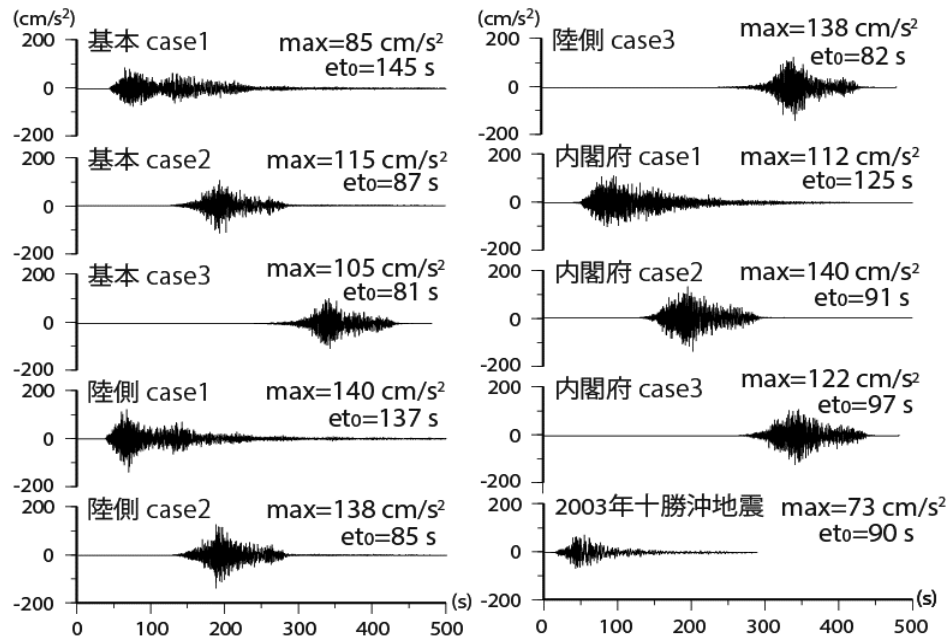


図10 HKD129 苦小牧における加速度波形 (EW方向)

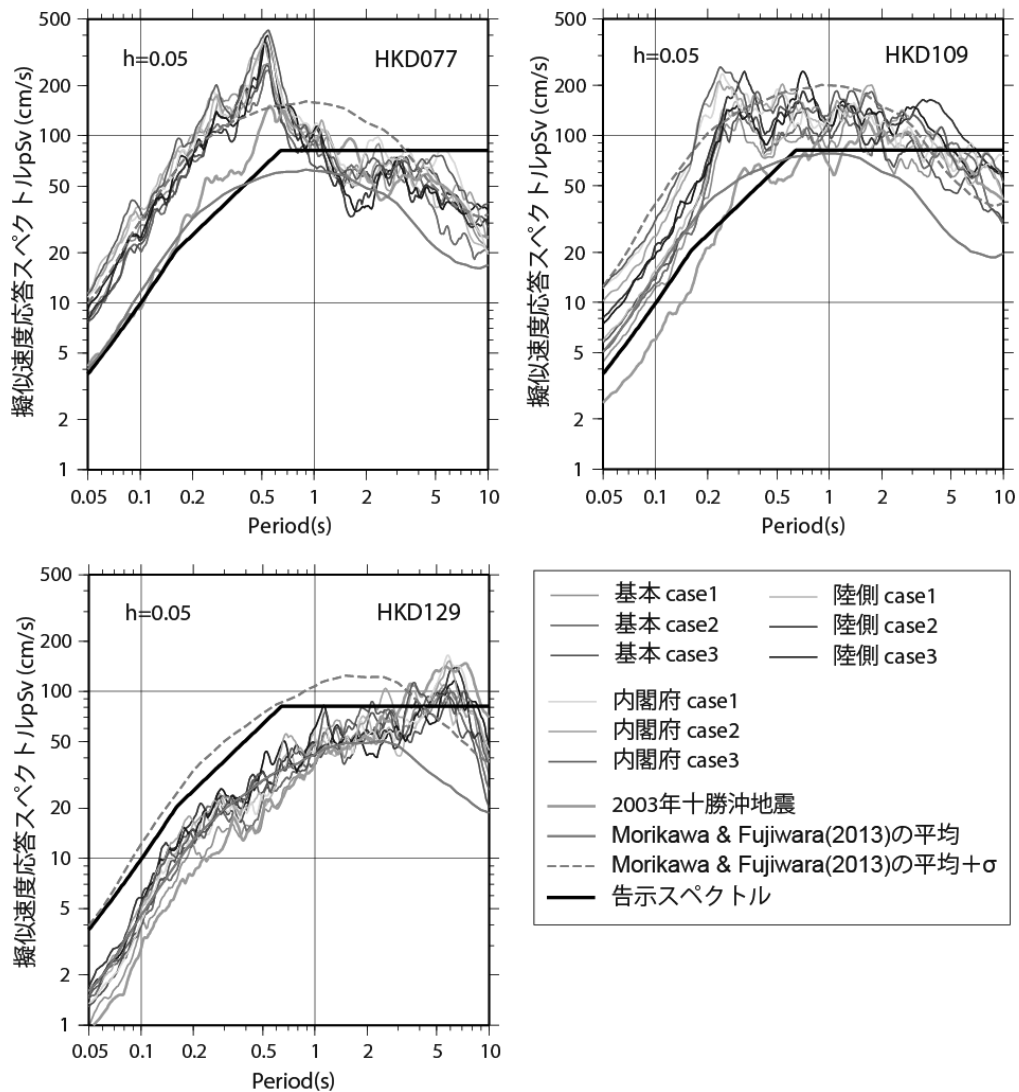


図11 減衰定数 5%の擬似速度応答スペクトル (水平二方向ベクトル合成値)

全般的にアスペリティ位置の違いによる差はさほど大きくないことが分かる。本検討結果と2003年十勝沖地震の記録を比べると、HKD077とHKD109の周期1秒程度以下で本検討結果のほうが2~3倍程度大きい。同地震の際、これらの地点の地震動は200 cm/s<sup>2</sup>を超えていたため、表層地盤の非線形挙動の影響により短周期帯域の地震動振幅が低減した可能性がある。周期1秒程度以上の長周期帯域では、いずれの地点でも本検討結果のばらつきの範囲内に十勝沖地震記録が概ね含まれている。海溝沿いに震源域が広がっても、最大応答値には陸域に近い十勝沖の震源域からの地震動の影響が支配的であることが理由と考えられる。本検討結果とMF式を比べると、本検討結果のHKD077とHKD109は概ねMF式の平均+標準偏差に、HKD129は周期3秒程度以上を除き概ねMF式の平均に対応している。HKD129は周期5秒程度以上では、MF式の平均+標準偏差よりも本検討結果のほうが大きい。これは、MF式の深部地盤特性の補正項を考慮しても尚残るHKD129における長周期帯域のサイト特性の固有性の影響と推察される。

以上より、千島海溝沿いの超巨大地震の地震動を評価した結果、周期1秒程度以下の短周期帯域の応答スペクトルは2003年十勝沖地震の観測記録よりも大きくなり、長周期帯域の応答スペクトルは概ね同程度になった。ただし、本検討では表層地盤の非線形特性の影響を考慮していないため、この点に関しては別途検討が必要である。継続時間は、本検討結果の各モデルのcase1の場合、2003年十勝沖地震の観測記録に比べて約1.5倍長くなり、破壊開始点の位置によっては震源規模の違いが反映され、継続時間が伸びることを確認した。また、HKD129の長周期帯域を除き、本検討結果はMw8.3での振幅の頭打ちを考慮したMF式の平均~平均+標準偏差に概ね対応することを確認した。

## 5. 免震建物の地震応答解析

### 5-1 検討方針

前章で評価した千島海溝の巨大地震による地震動を用いて免震建物の動的応答解析を行い、地震動が免震建物の地震応答に与える影響について検討した。

履歴減衰によって免震建物の応答を抑制する免震装置では、長周期地震動下で多数回繰り返し変形を強いられた場合に性能変化を生じるものがある<sup>22)</sup>。国土交通省は南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動の対策の一つとして、免震建物の設計では免震装置の性能変化を考慮した安全性の検証を要求している<sup>23)</sup>。本検討では、千島海溝の超巨大地震による予測地震動が、免震装置の性能に与える繰り返し変形の影響に着目した検討を行う。

### 5-2 解析手法

免震装置の繰り返し変形による特性変化を考慮するために、動的応答解析では免震装置の応答量に応じて特性を時々刻々変動させる方法(詳細法)を用いる<sup>22)</sup>。詳細法のフローを図12に示す。詳細法では、熱伝導解析と時刻歴応答解析の2つのプロセス間で履歴吸収エネルギーと温度の情報を相互に更新しながら、解析を並列に進める。

本検討では免震装置として図13に示す鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)を用いる<sup>24)</sup>。LRBの熱電動解析には図14のように挿入プラグを発熱箇所とした熱伝導解析モデルを用いる。図12のフローをLRBに適用する場合について解説する。まずは、ある時刻歴ステップで履歴吸収されたエネルギーを発熱部に与えた熱伝導解析から鉛プラグ温度を得る。続いて、その温度を用い

て免震材料の力学特性を評価しなおし、次ステップの時刻歴解析に備える。LRBでは、例えば図15のような温度とプラグ応力度の関係<sup>25)</sup>を参照して、鉛プラグの降伏耐力を変化させることになる。続いて、変化させた力学特性を用いて時刻歴解析を1ステップ進める。以上の手順を全時刻歴ステップで繰り返し、解析を終了させる。

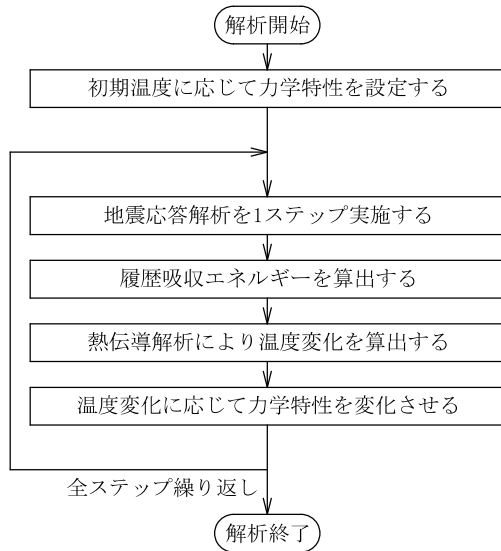
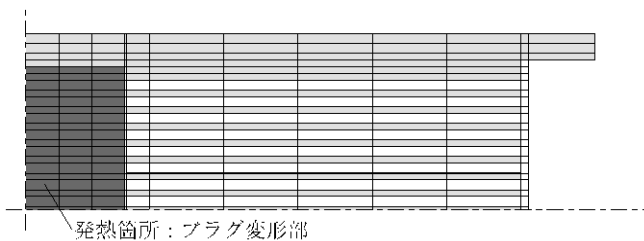


図12 詳細法フロー



(2次元軸対称、上半分モデル)

図14 LRBの熱伝導解析モデル

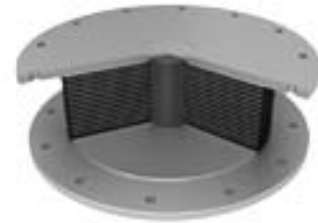


図13 鉛プラグ入り積層ゴム<sup>24)</sup> (LRB)

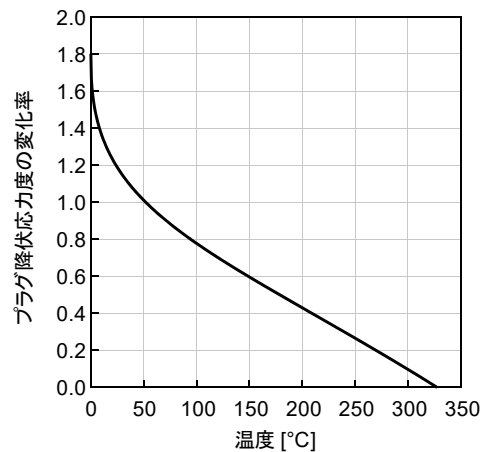


図15 LRBの力学特性の温度依存性<sup>25)</sup>

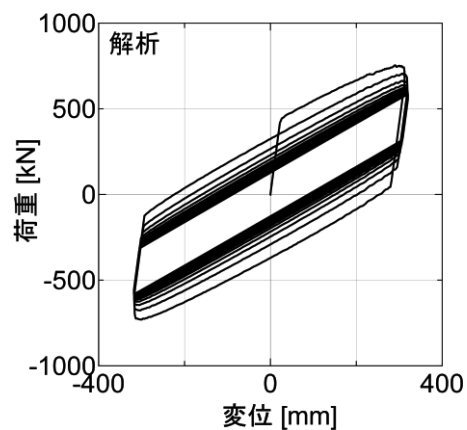
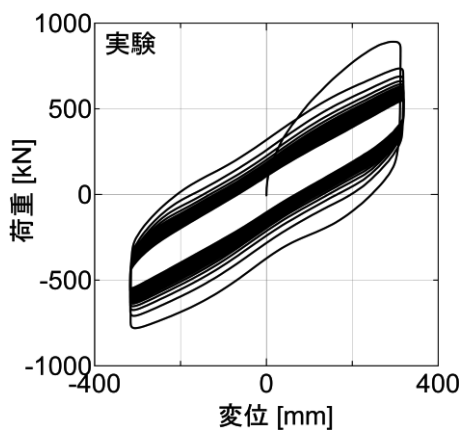


図16 実験結果と詳細法を用いた解析結果の比較

図 16 に LRB の動的繰り返し実験<sup>26)</sup>と詳細法を用いた熱伝導解析の水平力・水平変位関係を示す。同図より、詳細法を用いた解析から実験結果を良好に再現できていることが確認できる。

免震建物の動的応答解析には解析プログラム OpenSees<sup>27)</sup>を使用し、直接時間積分法に Newmark -  $\beta$ 法( $\beta=0.25$ )を適用する。鉛プラグ入り積層ゴムには Kikuchi-Aiken モデル<sup>28)</sup>を適用する。

### 5-3 地震応答解析

検討対象とする免震建物は RC 造 15 階建てとし、図 17 に示す 16 質点系振動モデルにモデル化する。免震層は表 3 に示す鉛プラグ入り積層ゴムのみの構成とする。

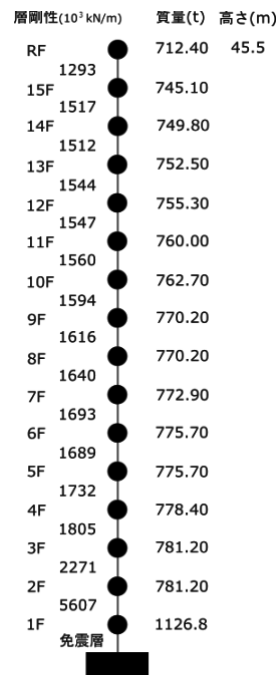


表 3 免震層の構成

鉛プラグ入り積層ゴム
ゴム種 : G0.4 タイプ
ゴム径 : 1100 mm
鉛プラグ径 : 220 mm
ゴム層厚 : 200 mm
台数 : 14

図 17 建物モデル

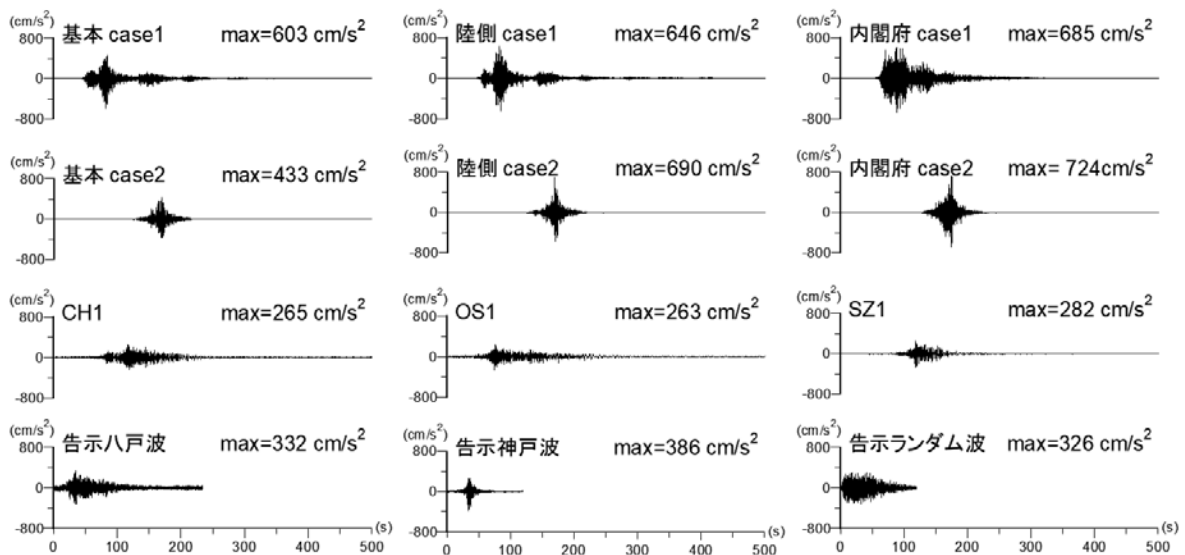


図 18 入力地震動

前章で作成した地震動 6 波(基本モデル・陸側モデル・内閣府モデルのそれぞれの HKD077 釧路の case1、HKD109 浦河の case2)に加え、告示波 3 波(八戸位相、神戸位相、ランダム位相)と基整促波 3 波<sup>23)</sup>(OS1、CH1、SZ1)の計 12 波を用いる。告示波は免震設計で一般的に用いられるレベル 2 地震動、基整促波は南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動という位置づけである。図 18 に入力地震動の加速度波形を示す。

#### 5-4 解析結果と考察

解析結果を図 19 に示す。同図(a), (b)は千島海溝沖予測地震動(基本モデル case1-釧路)、(陸側モデル case2-浦河)、告示波(八戸位相)、基整促波(OS1)入力時の最大応答加速度、最大応答変位を比較している。応答加速度は概ね 200 Gal 程度で大差ないが、地動加速度に対する低減では千島海溝沖が約 1/3 と最も大きく、短周期地震動に対する応答低減効果の傾向が強い。一方、最大応答変位では、基整促波が千島海溝沖釧路と告示波に比べて約 3 倍程度と圧倒的に大きく、次いで千島海溝沖浦河が 2 番目に大きい。同図(c)は全 12 波に対する鉛プラグの最高温度(初期温度 15°C)と免震層の最大応答変位を比較している。基整促波は 3 波とも鉛プラグの著

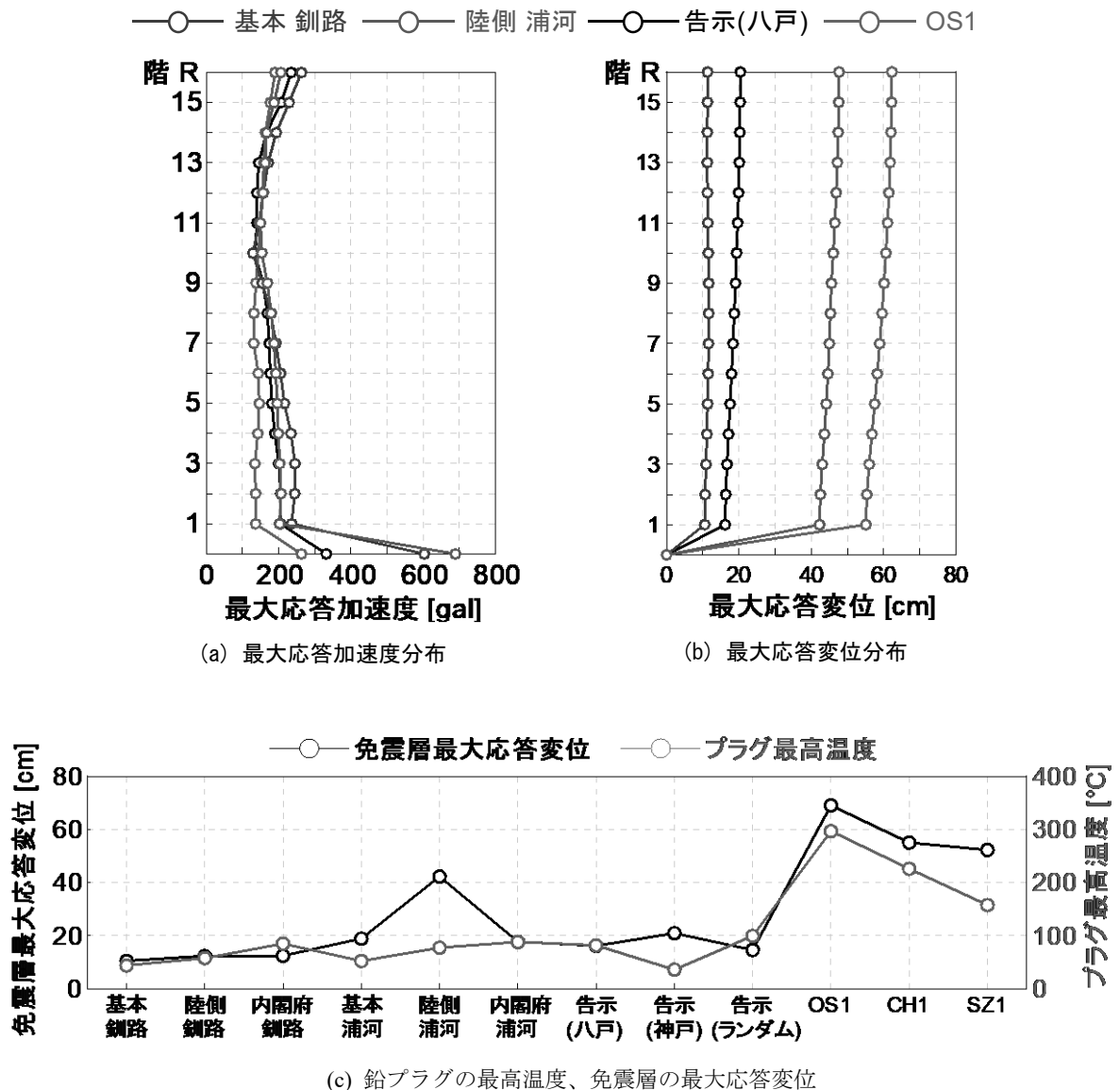


図 19 解析結果



しい温度上昇が見られ、それに呼応して応答変位も 50 cm を上回る。一方、千島海溝沿いの 6 波および告示波入力時は、温度上昇は 100°C に達せず応答変位も陸側モデル case2-浦河を除き 20 cm 以内である。

千島海溝沿いの超巨大地震の地震動による免震建物の地震応答への影響をまとめると、陸側モデル case2-浦河で免震層の最大応答変位が 40 cm ほど生じているが、総じて基整促波入力時に顕著であった繰り返しによる免震装置の特性変化は見られなかった。

## 6. まとめ

断層破壊が海底まで達する場合の応力境界条件を考慮した断層パラメータ設定手法<sup>10)</sup>に基づき、千島海溝沿い超巨大地震の断層モデルを設定し、経験的グリーン関数法を用いて釧路・浦河・苫小牧における広帯域地震動を予測した。周期 1 秒程度以下の短周期帯域の応答スペクトルは 2003 年十勝沖地震の観測記録よりも大きくなり、長周期帯域の応答スペクトルは概ね同程度になった。ただし、本検討では表層地盤の非線形特性の影響を考慮していないため、この点に関しては別途検討が必要である。継続時間は、2003 年十勝沖地震の観測記録に比べて約 1.5 倍長くなるケースがあることを示した。また、Mw8.3 での振幅の頭打ちを考慮した地震動予測式 (MF 式)<sup>20)</sup>に基づく評価結果と本検討結果を比較した結果、HKD129 苫小牧の長周期帯域を除き、本検討結果は MF 式の平均～平均+標準偏差に概ね対応することを確認した。上記の予測地震動を入力地震動として免震建物の動的応答解析を行い、建物に与える影響について検討した。その結果、最大応答変位が 40 cm ほど生じたケースがあったものの、総じて繰り返しによる免震装置の特性変化は見られなかった。

## 謝辞

本研究は、JSPS 研究費 (基盤研究(A) 19H00788, 研究代表者: 菊地 優) の成果の一部です。図の作成には GMT(The Generic Mapping Tools) を使用させて頂きました。本報告で示した免震材料の特性変化の評価手法に関して、OpenSees 構造解析プログラムの整備ならびに数値解析の実施にあたり、北海道大学大学院・助教の石井建氏に多大なご協力をいただきました。ここに心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- (1) 地震調査研究推進本部: 千島海溝沿いの地震活動の長期評価 (第三版), 2017.
- (2) 内閣府: 日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデルの検討について (概要報告), 2020.
- (3) 小穴温子, 壇一男, 菊地優: 千島海溝沿いの超巨大地震による強震動の予測と免震建物の動的応答解析 (その 2) 経験的グリーン関数法による強震動予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.139-140, 2022.
- (4) 高橋慶太, 射場淳, 石井建, 菊地優, 壇一男, 小穴温子: 千島海溝沿いの超巨大地震による強震動の予測と免震建物の動的応答解析 (その 3: 免震建物の地震応答解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.141-142, 2022.
- (5) 井ノ上大門, 壇一男, 小穴温子, 菊地優: 千島海溝沿いの超巨大地震による強震動の予測と免震建物の動的応答解析 (その 1) 断層モデルの設定, 日本建築学会九州支部研究発表会, 2023 (投

稿中).

- (6) 地震調査研究推進本部：全国地震動予測地図 2018 年版，地図編，震源断層を特定した地震動予測地図（シナリオ地震動予測地図）（2019 年 1 月修正版），2019.
- (7) 地震調査研究推進本部：震源を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」），2017.
- (8) J. D. Eshelby: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 241, pp. 376-396, 1957.
- (9) ドルジャパラムサロル，壇一男，具典淑，入江紀嘉：断層を考慮した動学的断層破壊シミュレーションによるプレート境界地震の平均動的応力降下量算定式における応力形状係数の検討（その 5）成層媒質を考慮したシミュレーション結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-II, pp.1135-1136, 2016.
- (10) K. Dan, D. Ju, S. Dorjpalam, H. Fujiwara, and N. Morikawa: Procedure of evaluating fault parameters of subduction plate-boundary earthquakes with surface fault breakings for strong motion prediction, *IAEA Second Workshop on Best Practices in Physics-based Fault Rupture Models for Seismic Hazard Assessment of Nuclear Installations: Issues and Challenges towards Full Seismic Risk Analysis*, Cadarache-Chateau, France, 2018.
- (11) 川辺秀憲，釜江克宏：2011 年東北地方太平洋沖地震の震源のモデル化，日本地震工学会論文集，第 13 号，第 2 号，pp.75-87, 2013.
- (12) R. J. Geller: Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.66, pp.1501-1523, 1976.
- (13) Y. Okada, K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, and A. Yamamoto: Recent progress of seismic observation networks in Japan Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net, *Earth, Planets and Space*, Vol.56, pp. xv-xxviii, 2004.
- (14) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019.
- (15) 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，第 39 卷，pp.579-593, 1986.
- (16) N. Morikawa, and T. Sasatani: The 1994 Hokkaido Toho-oki earthquake sequence: The complex activity of intra-slab and plate-boundary earthquakes, *Physics of the Earth Planetary Interiors*, Vol. 121, pp.39-58, 2000.
- (17) D. M. Boore: Stochastic Simulation of High-frequency Ground Motions Based on Seismological Models of The Radiated Spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, No.6, pp.1865-1894, 1983.
- (18) 気象庁：[http://www.jma.go.jp/jp/quake/quake\\_singendo\\_index.html](http://www.jma.go.jp/jp/quake/quake_singendo_index.html)
- (19) K. Dan, T. Watanabe, and T. Tanaka: A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear-wave displacement, *Journal of Structural Construction Engineering*, No.396, pp.27-36, 1989.
- (20) N. Morikawa, and H. Fujiwara: A new ground motion prediction equation for Japan applicable up to M9 mega-earthquake, *Journal of Disaster Research*, Vol.8, No.5, pp.878-888, 2013.

- (21) 秋山宏, 北村春幸: エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応, 日本建築学会構造系論文集, No.608, pp.37-43, 2006.
- (22) 北村春幸, 大宮幸: 長周期地震動対応を行う際の注意点, 特集・今知りたい長周期地震動の基本と対処法, 建築技術, 2017.12.
- (23) 国土交通省: 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について(技術的助言), 2016.6.
- (24) オイレス工業: [https://www.oiles.co.jp/menshin/building/menshin/products/lrb\\_s/](https://www.oiles.co.jp/menshin/building/menshin/products/lrb_s/), 2023.1.26 アクセス
- (25) 近藤明洋, 竹中康雄, 高岡栄治, 引田真規子, 兵頭陽, 北村春幸: 鉛入り積層ゴムの熱・力学的連成挙動を考慮した応答解析法, 日本建築学会構造系論文集 第 83 巻第 753 号, pp.1595-1605, 2018.11.
- (26) 和氣知貴, 石井建, 菊地優: 鉛プラグ入り積層ゴム支承の減衰材分散配置による熱力学特性の改善効果, 日本建築学会構造系論文集, No.763, pp.1187-1197, 2019.
- (27) PEER, OpenSees, <https://opensees.berkeley.edu/index.php>, 2023.1.26 アクセス
- (28) M. Kikuchi, and I. D. Aiken: An Analytical Hysteresis Model for Elastomeric Seismic Isolation Bearings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp.215-231, 1997.