

# 2007年新潟県中越沖地震における2鉛直強震アレイ地点の地盤の非線形性状の同定

時松 孝次<sup>1)</sup>, 茨木 嘉昭<sup>2)</sup>

- 1) 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 教授・工博, kohji@o.cc.titech.ac.jp
- 2) 東京工業大学工学部建築学科 学生, ibaraki.y.aa@m.titech.ac.jp

## 1. はじめに

2007年の新潟県中越沖地震とその余震の際、東京電力柏崎刈羽原子力発電所の3ヶ所の地盤系観測点(図1)において鉛直アレイ地震動記録<sup>1)</sup>が得られた。この地震動記録に関する既往の研究<sup>2)</sup>により、本震時にサービスホールにおいて表層から70m以浅の地盤が大きく非線形化したことが推定されているが、原子炉付近の地盤の非線形性状の検討は行われていない。これは本震1号機系、5号機系鉛直アレイのデジタル記録が消失し、熱ペンにより出力された波形(ペンレコード)しか残らなかったためだが、最近になってそのデジタル化が試みられた<sup>3)</sup>。そこで本研究では遺伝アルゴリズム(GA)を用いて、せん断剛性比と減衰定数のひずみ依存性(以下、G/G<sub>0</sub>- $\gamma$ 関係、h- $\gamma$ 関係)を推定することで原子炉建屋付近を含む複数の観測点地盤の非線形性状について比較、検討を行う。

## 2. 鉛直アレイ観測点及び対象記録概要

今回対象とする観測点は前述のサービスホール、及び5号機原子炉脇の観測点(以下、5号機系)の2箇所である。また、対象とする地震動は本震、最大余震(M5.8, 7/16 15:37発生、以下余震L)、及び余震(M4.2, 7/16 17:42発生、以下余震S)である。残ったペンレコードは地中4深度(G52-G55、図2)で、地表付近の記録は5号機系地盤観測小屋(KKZ-5G1、図1)の本震記録を代用する。また、対象地震動は

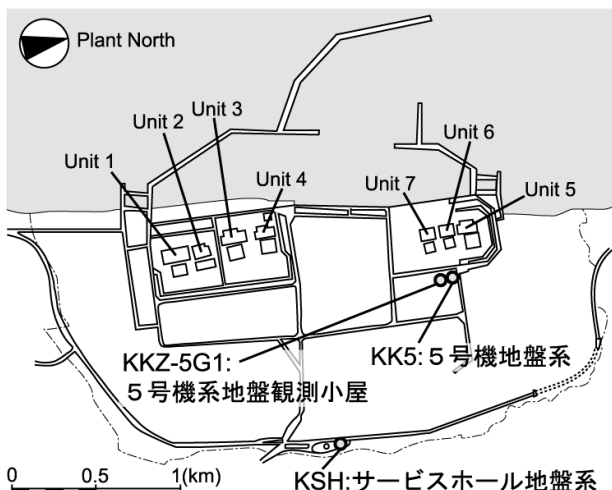


図1 各鉛直アレイ観測点配置

全てNS方向とし、それぞれの本震の加速度時刻歴を図3,4に示す。サービスホールにおいては、最大値がSG4(図3d),SG3(図3c)で4m/s<sup>2</sup>程度であるが、SG2(図3b),SG1(図3a)で、3.5m/s<sup>2</sup>程度と表層に向かうに従って小さくなる。またその波形から短周期成分の低下も確認できる。一方5号機系においては最大値がG55(図3e)-G52(図3b)で4m/s<sup>2</sup>程度だが、G51(図3a)で9.6m/s<sup>2</sup>と急激に増幅する。このことから、本震時において、サービスホールのSG1-SG2での非線形化が示唆されるが、5号機系での目立った非線形化は確認できない。

## 3. h- $\gamma$ 関係を考慮したGAによる逆解析

地震時の地盤構造を推定するため、地盤はN層の平行成層地盤、入力地震動は1次元の鉛直方向入力を仮定する。また、PS検層データから、各層の密度 $\rho$ 、層厚Hを既知とし、各層のS波速度 $V_s$ 、減衰定数hは未知とする。減衰定数は、杉戸ら<sup>4)</sup>の方法を参考にし、周波数fに依存し、フーリエひずみ振幅を介して次式で与えられるものとする。

$$h(\gamma_{eff}(f)) = h_{min} + (h_{max} - h_{min})(\gamma_{eff}(f)/\gamma_{ref}) / (1 + \gamma_{eff}(f)/\gamma_{ref}) \quad (1)$$

$$\gamma_{eff}(f) = 0.8\gamma_{max} \cdot \Gamma(f) \quad (2)$$

ここに、 $h_{min}, h_{max}$ は各層の最小・最大の減衰定数、 $\gamma_{ref}, \gamma_{max}, \gamma_{eff}(f), \Gamma(f)$ は、規準せん断ひずみ、最大

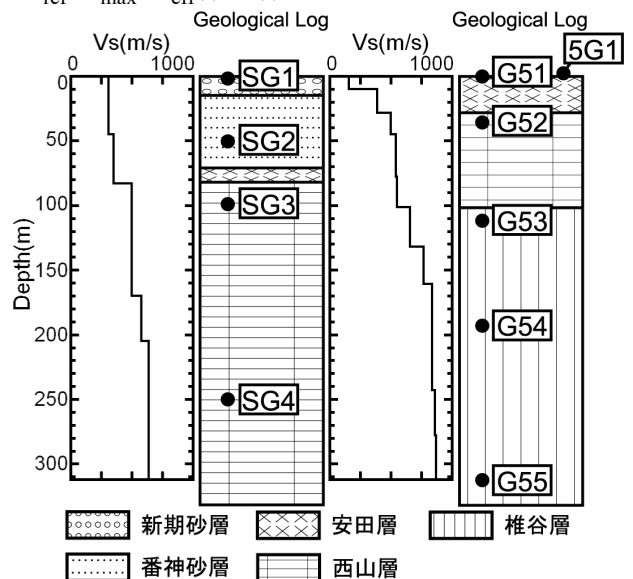


図2 5号機系及びサービスホールPS検層

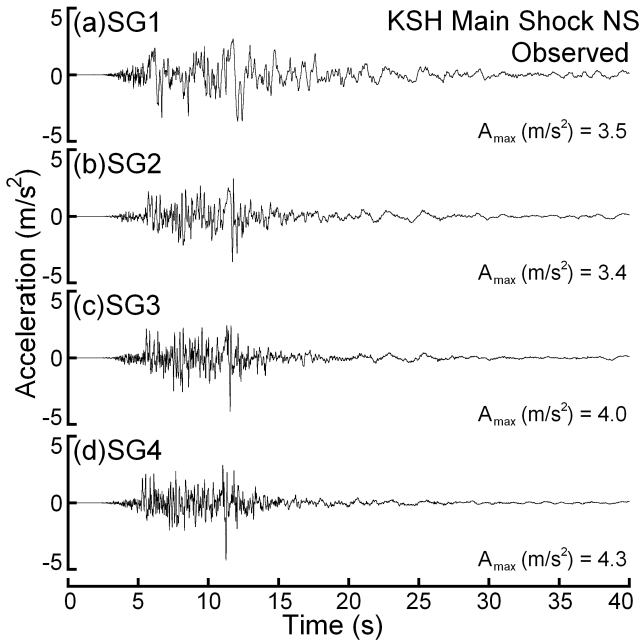


図3 サービスホール本震時刻歴

せん断ひずみ、各周波数に対する有効せん断ひずみ、せん断ひずみの規準化フーリエスペクトルである。これにより、等価線形とした際の大地震時に短周期領域で過減衰となることを避けることが可能となる。以上より、各層に対して未知数は  $V_s, h_{\min}, h_{\max}, \gamma_{\text{ref}}$  の4個、1地盤モデルは4N個の未知数を持つことになる。このモデルのイメージを図5に示す。未知変数に対して検索範囲を与えて、その範囲に対し8ビットのグレイコードに離散化、乱数を用いて初期個体を発生させる。発生させた各個体に対し以下に示す評価関数Sの逆数を適合度とする。

$$S = \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K \int_{f_1}^{f_2} \left\{ \log_{10}(A_{o_{ij}}(f)) - \log_{10}(A_{c_{ij}}(f)) \right\}^2 df + \alpha \times \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K \int_{f_1}^{f_2} \left\{ P_{o_{ij}}(f) - P_{c_{ij}}(f) \right\}^2 df \quad (3)$$

ここに、 $A_{o_{ij}}, P_{o_{ij}}$  は観測記録の振幅と位相の伝達関数（フーリエ振幅の増幅倍率）であり、 $A_{c_{ij}}, P_{c_{ij}}$  は重複反射理論を用いて算出した振幅と位相の伝達関数である。本研究では  $\alpha = 0.10$  としている。順位を決定した固体群の上位個体10%をエリート個体として次世代に保存、残存個体群からルーレット方式により上位個体を優先的に選択し、交叉、突然変異を行い次世代の個体群を作成する。この作成した次世代個体群に対して再び順位付けを行い、指定世代数まで同様の手順を繰り返す。検索に用いるパラメータは世代数300、個体数100、交叉率70%、突然変異率2%である。以上の最適解探索手順を図6に示す。また以上の手順を10回ずつ試行し、理論伝達関数はその平均値を示し、S波速度構造、せん断剛性比及びひずみ依存性は全10試行結果を示し、解と共にそのばらつきを見る。

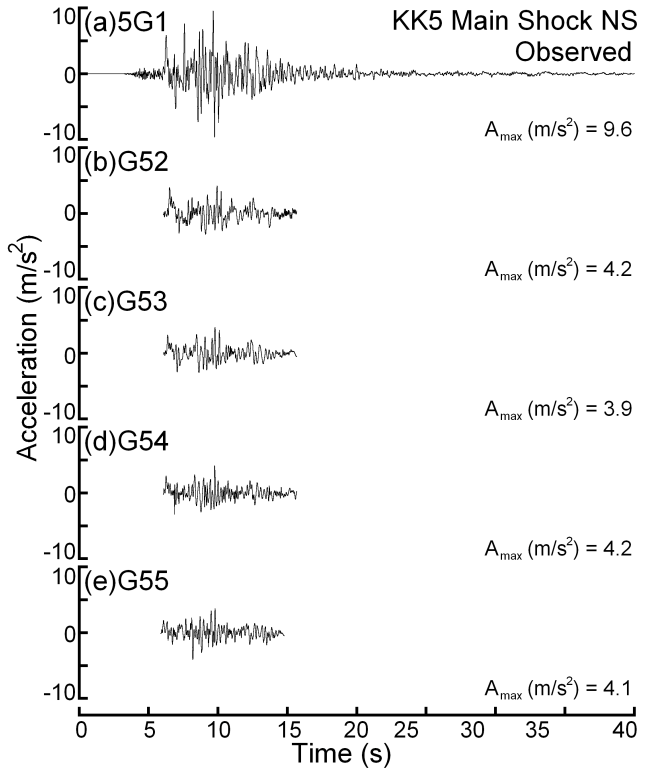


図4 5号機系本震時刻歴 (G52-G55はペンレコード)

層厚	密度	S波速度	最小減衰定数	最大減衰定数	基準せん断ひずみ	
1	$H_1$	$\rho_1$	$V_{S1}$	$h_{\min 1}$	$h_{\max 1}$	$\gamma_{\text{ref} 1}$
2	$H_2$	$\rho_2$	$V_{S2}$	$h_{\min 2}$	$h_{\max 2}$	$\gamma_{\text{ref} 2}$
...						
N-1	$H_{N-1}$	$\rho_{N-1}$	$V_{SN-1}$	$h_{\min N-1}$	$h_{\max N-1}$	$\gamma_{\text{ref} N-1}$
N	$H_N$	$\rho_N$	$V_{SN}$	$h_{\min N}$	$h_{\max N}$	$\gamma_{\text{ref} N}$

図5 逆解析の地盤モデル

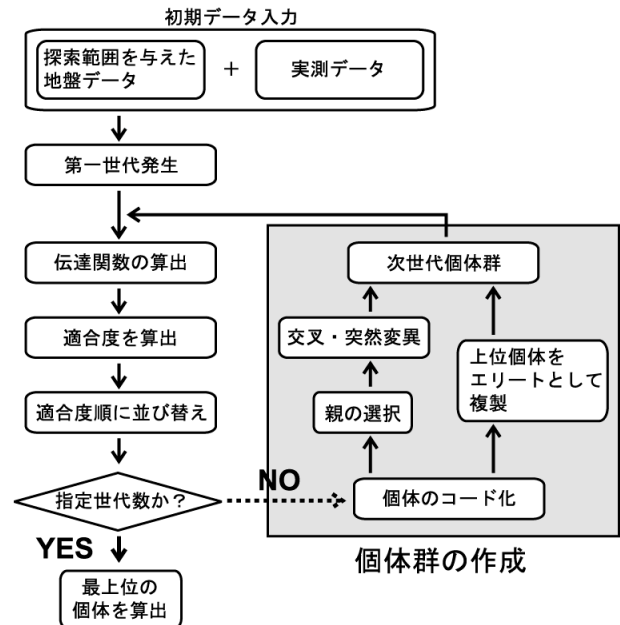


図6 解探索フローチャート

#### 4. 推定された各観測点の非線形性状の特徴

図7,8に観測伝達関数とGAにより得られた理論伝達関数を比較して示している。サービスホールでの観測伝達関数(図7)は本震と余震で形状が異なり、本震においては1s以下の短周期帯でスペクトルピークの消失が見られ、1s以上の周期帯においても余震に対してスペクトルピークが小さい。一方、5号機系での観測伝達関数(図8)は地表付近では、余震(図8a),(図8e)に比べ、本震時(図8i)のスペクトルピークが小さく、長周期化する非線形化の特徴が見られるが、深部では本震(図8l)と余震(図8d),(図8h)の伝達関数の間に大きな形状変化は見られず、比較的線形化の程度は小さいと推定される。これらの形状の特徴を理論値は良く再現している。図9に推定されたS波速度構造を示す。サービスホールのS波速度は本震時に余震時に比べ、深度100m程度以浅において大幅に低下しているが、5号機系においては本震時と余震時に明確な差は見られない。図10,11にサービスホール及び5号機系において推定された地盤各層のG/G<sub>0</sub>- $\gamma$ 、h- $\gamma$ 関係を示す。剛性比は、サービスホールでは余震L、本震に対して新期砂層で27%、7.9%程度まで大幅に低下し、番神砂層(図10b)でも本震で45%程度まで低下する。一方、西山層(図10c)のせん断剛性比は余震L、本震に対し明瞭な低下が見られない。このことから強震時に浅い砂層で非線形化が大きく、深い層で非線形化が小さいことが示唆される。一方、5号機系のせん断剛性比は安田層で余震L、本震に対し89%、62%まで低下するが、西山層、椎谷層では明瞭な低下が見られない。これは浅い層でやや非線形化するが、深い層で非線形化が小さかったことを示唆している。一方、減衰定数は、サービスホールでは、新期砂層(図10a)において余震L、本震で最大せん断ひずみが $6 \times 10^{-4}$ 、 $8 \times 10^{-3}$ 程度で、0.30、0.32程度となっており、減衰のひずみ依存性が認められる。この傾向は番神砂層(b)でも見られる。一方、西山層(c)においては発生したひずみレベルに関わらず減衰定数が0.1程度以下と小さい。このことから非線形化が浅い層で大きく、深い層で小さいといえる。一方、5号機系の減衰定数は余震L、本震に対して、安田層(a)でせん断ひずみが $1 \times 10^{-4}$ 、 $7 \times 10^{-4}$ 程度に対して、0.23、0.34程度、西山層(b)でせん断ひずみが $2 \times 10^{-4}$ 、 $7 \times 10^{-4}$ 程度に対して、0.20、0.29程度と、ひずみレベルに対してその値が比較的大きい。また、図の太破線は既往の砂資料の室内動的試験結果の範囲<sup>5)</sup>を示している。サービスホール、5号機系共に逆解析から得られたG/G<sub>0</sub>- $\gamma$ 関係は既往の室内試験結果と概ね調和的であるが、減衰定数は試験結果に比べ、やや大きめの値をとる傾向が見られる。

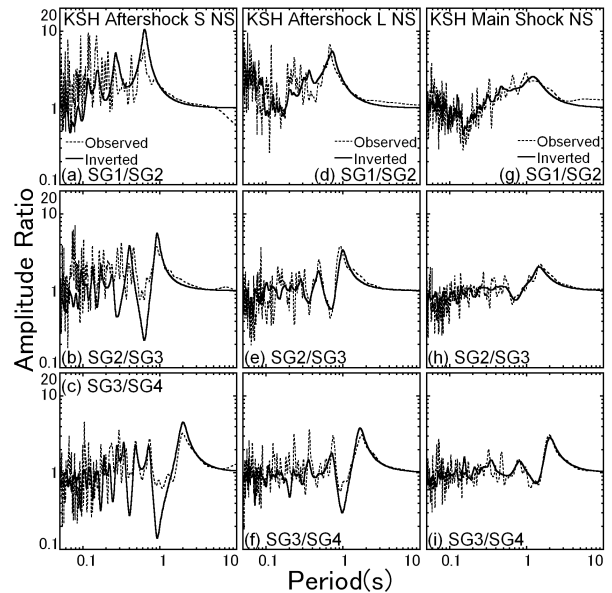


図7 サービスホール本震及び余震の時刻歴

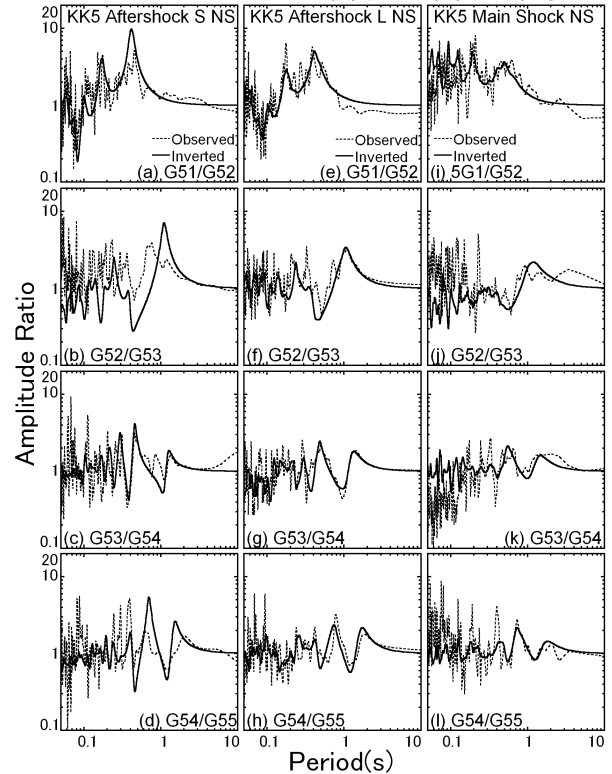


図8 5号機系本震及び余震の時刻歴

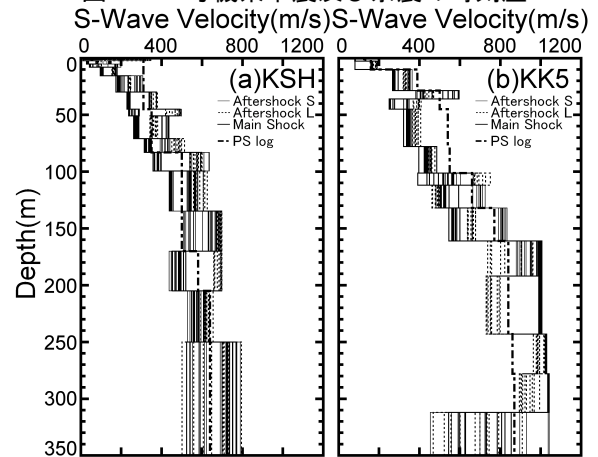


図9 推定されたサービスホール及び5号機系のS波速度構造

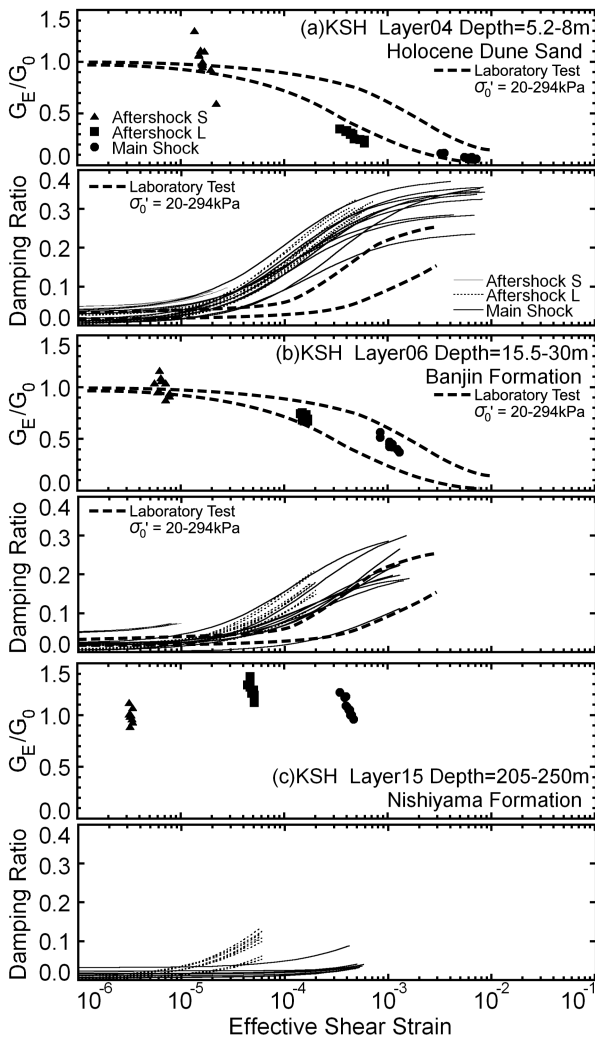


図10 推定されたサービスホール各層におけるせん断剛性比及びひずみ依存性

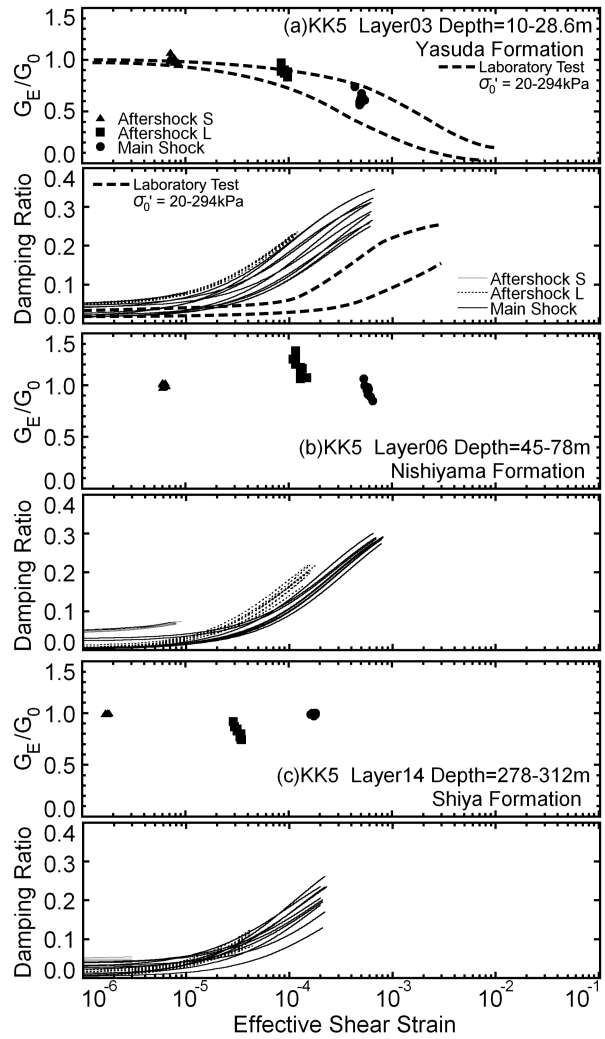


図11 推定された5号機系各層におけるせん断剛性比及びひずみ依存性

## 5. まとめ

新潟県中越沖地震で得られた鉛直強震アレイ地震動記録に対し GA を用いた逆解析からせん断剛性比及び減衰定数を推定し、以下のことを示した。(1) 5号機系の浅い層は、サービスホールの浅い層に比べ強震時の非線形化が小さい。(2) 5号機系の深い層では強震時のひずみレベルに対し、剛性低下率は非常に小さいが減衰はサービスホールの深い層と比べ大きい。

### 参考文献

- 1) 東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所における平成19年(2007年)新潟県中越沖地震の加速度時刻歴波形データ(本震,余震),(財)震災予防協会,2007.

- 2) 時松孝次、新井洋、蓑和健太郎:柏崎刈羽原子力発電所サービスホールの鉛直アレイ強震記録から推定した地盤の非線形性状と基盤露頭波,日本建築学会構造系論文集, No.630, pp1273-1280, 2008.8.
- 3) 田中信也ほか:柏崎刈羽原子力発電所で観測された新潟県中越沖地震動のペンレコードからの復元,日本地震工学会大会-2007 梗概集, 506-507, 2007.
- 4) 杉戸真太ほか:周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析に関する一考察,土木学会論文集, 493/II-27, 49-58, 1994.
- 5) Kokusho, T.: Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range, Soils and Foundations, 20(2), 45-60, 1980