

## 鎌倉大仏およびその周辺地盤の地震動特性調査

中村 豊<sup>1)</sup>、井上 修作<sup>2)</sup>、森井 順之<sup>3)</sup>、大町 達夫<sup>4)</sup>

1) (株)システムアンドデータリサーチ

東京工業大学 総合理工学研究科 人間環境システム専攻

2) 東京工業大学 総合理工学研究科 人間環境システム専攻

3) (独)国立文化財機構 東京文化財研究所 保存修復化学センター

4) 東京工業大学 総合理工学研究科 人間環境システム専攻

yutaka@sdr.co.jp

nakamura.y.aw@m.titech.ac.jp

shusaku@enveng.titech.ac.jp

morii@tobunken.go.jp

ohmachi@enveng.titech.ac.jp

### 1. はじめに

古都鎌倉を対象に都市地震防災情報ネットワークの構築を検討するにあたり、鎌倉を代表する大仏およびその周辺地盤の地震動特性を把握して、具体的な検討に資することとした。

昭和の修理報告書<sup>1)</sup>などによれば、鎌倉大仏は、約750年前に造られた後、暴雨や洪水、地震など幾多の災害に遭遇してきたが、今日まで仏像本体は大きく損傷することなく伝えられてきた。現在は露座であるが、当初は大仏殿があり、14世紀か15世紀の災害(風、地震・津波)の後、最終的に大仏殿はなくなったと考えられている。大きな地震にも何度か遭遇している。1703年の元禄地震(M7.9~8.2)と1923年の大正関東地震(M7.9)では基壇が損壊し、仏体が移動・沈下する被害が記録されているが、仏像本体が大きく破壊されることはなかった。大きな地震動に見舞われ、周りの建物などが倒壊するなどの被害を受けながら、なぜ大仏本体が大きな被害を受けることなく、ほぼ当初のままの姿で今日まで伝えられてきたかについては興味のあるところである。

地震被害を受けた後、その都度、大仏の基壇周辺は修復整備されている。大正年間に行われた関東地震の修復を補う形で1960年に行われた昭和の修理では、仏像の頸部周辺がFRP(ガラス繊維補強プラスチック)で補強されるとともに、基壇と仏像の間にステンレス板を敷き、大きな地震動の際には、大仏を基壇上で滑動させることにより、地震動を大仏本体に伝えにくくする工夫なども実施されている。この新しい工夫は、文化財に対する最初の免震対策として知られている。

昭和の修理後、今年でちょうど50年が経過する。大仏頸部の強化に使われているFRPの劣化も進み、改めて、鎌倉大仏を地震から護る諸方策について検討する機運が高まっている。こうした中、文化財の適切な管理体制を構築するためにも、文化財の立地環境条件を地震防災の観点から見直すことが求められている。そこで、古都鎌倉を代表する鎌倉大仏を

対象として、周辺地盤を含めた地震動特性を調査し、今後の合理的な地震対策策定に資することを目指す。

### 2. 調査概要

調査対象である鎌倉大仏は、三方を丘陵で囲まれ海に向かって開かれた鎌倉の西端に位置し、さらに三方を小さく丘陵で囲まれた標高14m程度のやや開けた場所にある。地形の関係から、狭い範囲で変化するやや複雑な堆積構造になっているものと推測される。修理報告書に掲載されたボーリング調査データによると、この付近の地下水位は0.7m~1.7m程度と高くなっている。

#### 2.1 測点配置

本調査では、狭い範囲で変化する地盤特性が予想される基礎地盤を含めた大仏の地震動特性を明らかにするため、図1~図3に示すような大仏を中心にした稠密な測点配置とした。

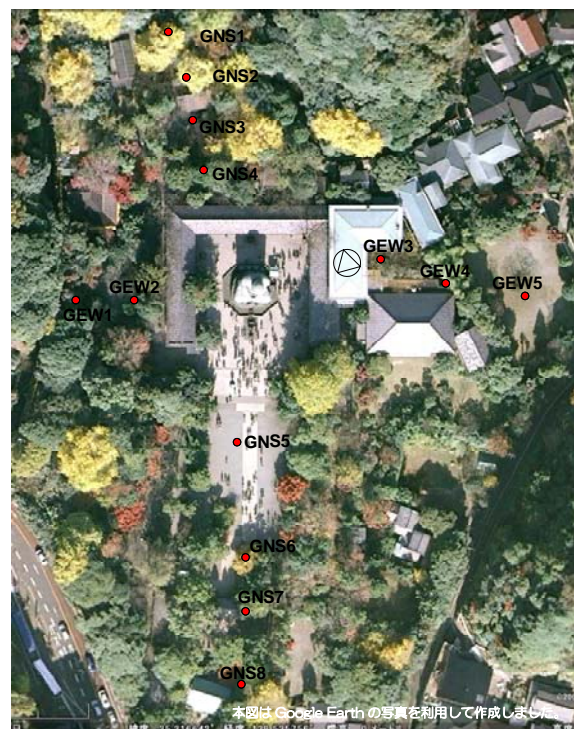


図1 高德院境内の常時微動測点配置

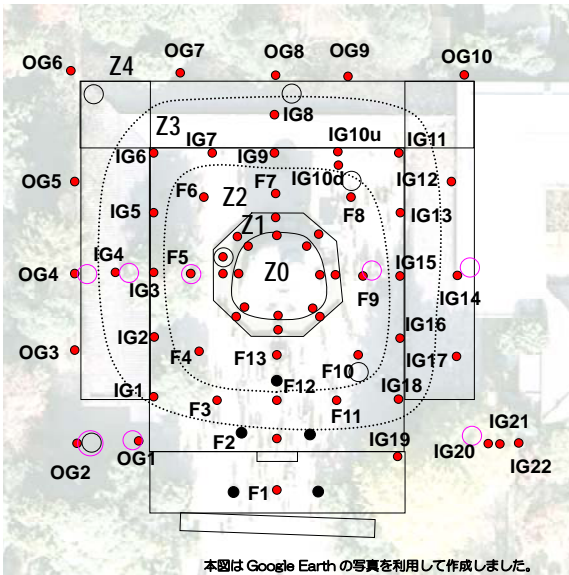


図2 大仏周辺の詳細測点配置

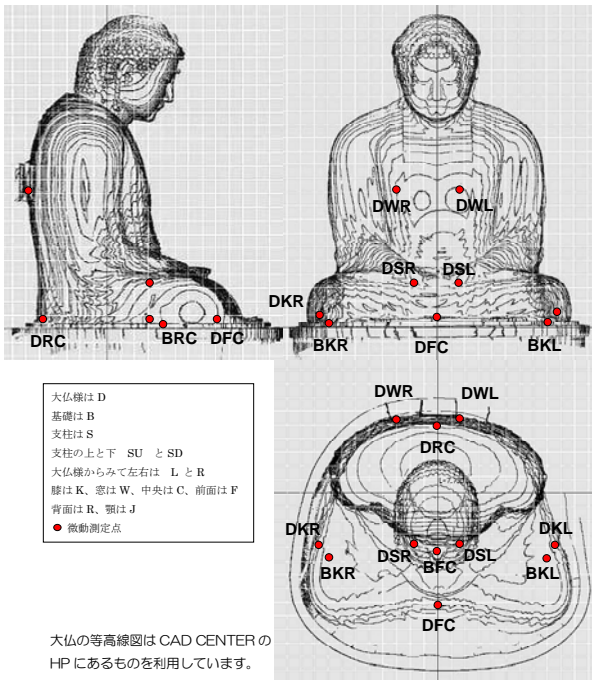


図3 大仏胎内の測点配置

まず、全体的な傾向を把握するため、高德院境内を大きく南北に 8 測点、東西に 5 測点を設けた。大仏が鎮座する回廊域内とその周辺については、大仏基壇 (Z0) を中心に、基壇周り地盤 (Z1)、石畳 (Z2)、回廊内側 (Z3) および回廊外側 (Z4) と、大仏を 5 重の測線で取り囲むように測点を設けた。基壇周り地盤 (Z1) では、昭和修理時に実施したボーリング調査位置の近傍でも測定している。およそ 50m 四方の地盤領域に合計 54 測点がある。

なお、旧大仏殿の柱礎石下の地盤は版築で固められていると考えられ、それ以外の地盤とは特性が

異なる可能性がある。今は柱礎石は数個を除いて当初の位置から移動しているが、柱礎石の跡と思われるところはできるだけ避けた。以下の測点: OG1、OG2、OG4、IG4、IG14、IG20、F5 および F9 では、礎石下の版築にかかっている可能性がある。関連する礎石跡は赤丸で囲んで示した。なお、近年の発掘調査<sup>2)</sup>によれば、大仏造営方法に関連していると考えられる、大仏を中心とした小山のような盛土が築かれた跡、が確認されている。

昭和の修理時点で実施されたボーリング調査地点が 6 箇所修理報告書に掲載されている。報告書に掲載された地図を参考に、近傍測点を黒丸で示したが、BFWB (ボーリング#2 に対応) 以外の確度は高くない。地盤での微動測定の様子を写真 1 に例示する。



写真1 地盤での常時微動測定状況

8 方位の基壇上の測点 (合計 8 測点) については、対応する大仏基壇周りの地盤測点と同時に測定し、周辺地盤に対する基壇上面の増幅スペクトルが算定できるようにしている。基壇での微動測定状況例を写真 2 に示す。



写真2 基壇上と基壇周辺地盤の測定状況

大仏本体については (図 3 参照)、昭和の修理

で付加された大仏下部の補強コンクリート架構に東西南北 4 測点を設けるとともに、胸腹部の荷重を一部負担するために内部に設置された鋼製門型支持架構に 2 測点、さらに背面の窓部（創建時よりある大仏本体背面に空けられた窓）に 2 測点を設けた。さらに基壇上面では、中心位置と両膝の内側の合計 3 測点を設けた。大仏および基壇上面の測点では、対応する左右測点とともに基壇上面中心の測点、合計 3 測点の同時測定を行っている。大仏本体に関する測点は合計 11 測点である。大仏内部での微動測定状況を写真 3 に例示する。



写真 3 大仏内背面窓の測定状況

これらの測定を、地盤については 1 月 25 日（月）に、大仏本体については、1 月 26 日（火）に、それぞれ実施した。なお、測定時、観光客は通常どおり参拝しており、測点近傍の通行を避けていただいた他は特に制限するようなことはしていない。

## 2.2 測定方法

計測方位は、回廊より外側の境内 8 測点では、Y を北（磁北）に、X を東に、Z を上方に設定した。その他の地点では、すべて、回廊の方向にあわせている。すなわち、大仏様が向いている方向を南とし、その反対側を Y としている。しかし、両者の相違は 20 度程度であり、同じとみなしても大きな相違はない。

ひとつの測点で 40.96 秒間（1/100 秒サンプリング、4096 個のデータ）の微動波形を原則 3 回測定したが、非定常ノイズが混入したと思われる時には、追加して測定した。

1 回の測定毎に、全データを使って 3 方向のフーリエスペクトル X、Y および Z を算定し、これらから X/Z と Y/Z を算定する。これらのスペクトルおよびスペクトル比を 3 回分平均して、各測点の各方向成分のスペクトルと H/V スペクトル比を求めた。平均過程で、計測時には見逃されたが非定常ノイズが多いと見られる測定データを除外している。

このため、平均回数が 3 回に満たない測点がいくつかある。

同時測定したデータについては以下のように増幅スペクトルを算定した。すなわち、基壇上 BT と周辺地盤 BF については、地盤に対する基壇上の増幅を見るため、スペクトル比 BT/BF を方向成分毎に算定した。また、大仏本体測点群 D\* については、基壇中心 BRC に対する増幅特性スペクトル比 D\*/BRC を算定している。

いずれも、測定毎に算定したスペクトル比を、非定常ノイズが少ない測定について平均したものを各測点のスペクトルおよび増幅スペクトルとした。

## 2.3 解析方法

求められた各測点の H/V スペクトル比の最大ピークとその周波数を各方向毎に抽出し、i 方向の卓越振動数  $F_i$  および増幅倍率  $A_i$  とする。これらの値を用いて、以下に概説する表層地盤の  $K_{gi}$  値を各方向毎に算定するとともに、増幅倍率が大きい成分のデータを用いて表層平均 S 波速度  $AVS$  (m/s)、表層層厚  $h$  (m) を推定する。

### (1) $K_g$ 値

$K_g$  値は、地盤の壊れやすさに関する指標として提案されている<sup>4)</sup>もので、 $K_g$  値に地震時の基盤最大加速度  $\alpha_b$  を掛けると、次式で示されるように表層地盤に生じる地震時のせん断歪  $\gamma$  が大まかに推測できるというものである。

表層地盤の有効せん断歪  $\gamma$  は以下のように概算できる。

$$\begin{aligned}\gamma &= eA\delta/h \\ &= eA\alpha_b/(2\pi F)^2/(V_s/4/F) \\ &= eA\alpha_b/(2\pi F)^2/(V_b/4/F/A) \\ &= e(A^2/F)/(\pi^2V_b)\alpha_b\end{aligned}$$

ここに、 $\delta$  は基盤での変位、 $A$  は増幅倍率、 $F$  は卓越振動数 (Hz)、 $e$  は効率である。効率を 60%、 $V_b$  を 600m/s とすれば、加速度を  $cm/s^2$  単位で、S 波速度を m/s 単位で与える時の単位調整分を考慮して、以下ようになる。

$$e/(\pi^2V_b) \cong 10^{-6} \quad (\text{単位: } 1/m/s)$$

$\gamma$  の単位を  $10^{-6}$  (マイクロストレイン単位) とすれば、 $\gamma$  は次式で表すことができる。

$$\gamma = K_g \times \alpha_b \quad (1)$$

$$K_g = A^2/F \quad (2)$$

ここで、改めて  $K_g$  の単位を、マイクロストrein/Gal ( $10^{-6}/\text{cm}/\text{s}^2$ ) と定義しておく。数値上は増幅倍率  $A$  の自乗を卓越振動数  $F$  (Hz) で除したものとなる。なお、 $K_g$  値は地盤上の列車の転倒や木造 2 階建て住宅など小規模構造物の被災しやすさにも関係していると考えられている<sup>5)</sup>。

### (2) 表層平均 S 波速度 AVS と表層層厚 $h$ <sup>3)</sup>

インピーダンス比と増幅倍率の関係から表層の平均 S 波速度は次のように求められる。

$$AVS = V_b (\rho_b / \rho_s) / A \quad (3)$$

かつこ内は基盤と表層地盤の密度比であるが、不明の場合には、これを 1 と置いても大きな誤差はない。こうすると、既に前項でも (1) 式を導き出すのに用いた次式が得られる。

$$AVS = V_b / A \quad (4)$$

固有振動数  $F$  は次のようにおけるので、基盤 S 波伝播速度を仮定すれば、表層層厚  $h$  を推定することができる。

$$F = V_s / (4h) = V_b / (4Ah) \\ \therefore h = V_b / (4AF) \quad (5)$$

ここでは  $V_b = 600\text{m}/\text{s}$  と仮定している。

## 3. 調査結果

### 3.1 周辺地盤

図 4 に回廊より外側の境内で計測された H/V スペクトル比を示す。青線が X 方向成分を、赤線が Y 方向成分を、それぞれ示している。これを見てわかることは、大仏を中心にして、西側の地盤がもっとも堅硬であり、南に行くほど、また東に行くほど地盤は軟弱になると推察される。南北測線では南北方向の振動成分が卓越し、東西測線では東西方向の振動成分が卓越する傾向が認められる。

図 5 は、回廊周辺から内側の測点の H/V スペクトル比を、大仏を取り囲む 5 つのゾーン (Z0: 基壇上、Z1: 基壇周辺地盤、Z2: 周辺石畳部分、Z3: 回廊内側部分、Z4: 回廊外側部分) に分けて示したものである。左側が X (ほぼ東西) 方向、右側が Y (ほぼ南北) 方向である。これを見ると、XY ともすべての測点で 2~3Hz の振動が卓越していることがわかる。Y 方向の方が増幅度が大きいので、地震動は南北方向が卓越するものと予想される。Y 方向の増幅度に注目すると、Z1 では、増幅度は 3 倍を中心に分布しているが Z0 や Z2 では、やや小さい 2.5 倍を中心に分布しており、Z1 の基壇周辺地盤の方が、

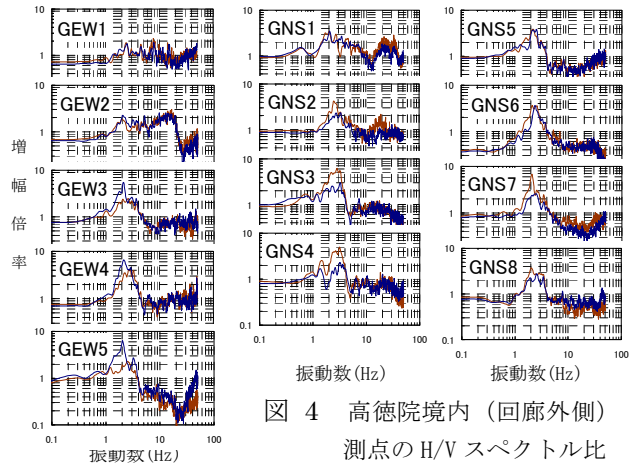


図 4 高德院境内 (回廊外側) 測点の H/V スペクトル比

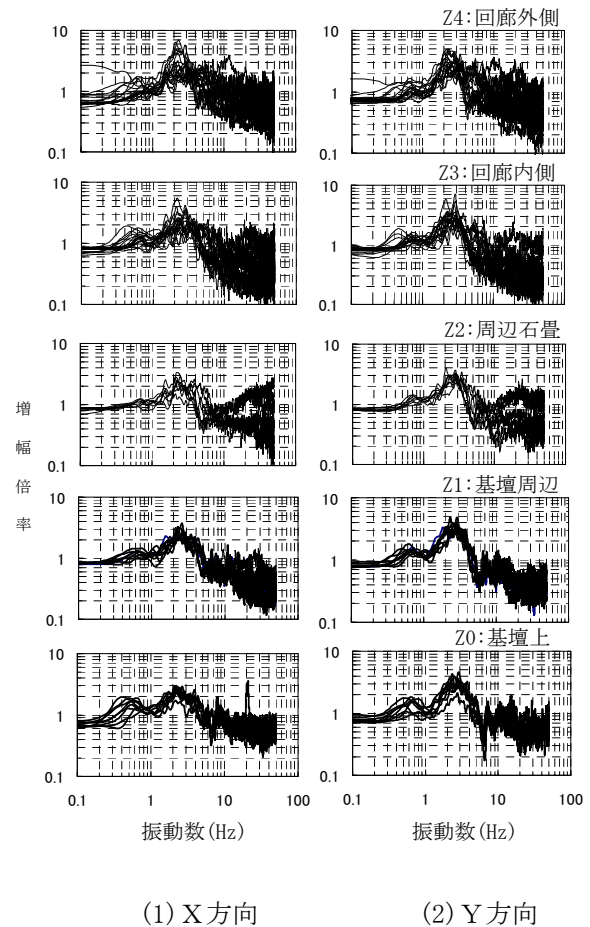


図 5 回廊周辺 Z0~Z4 での H/V スペクトル比

相対的にやや大きくなっている。

以下、これらのスペクトルから読み取られた卓越振動数と増幅倍率のデータを基に議論を進める。

### (1) 固有振動数 $F$ と増幅倍率 $A$

図 6 は、H/V スペクトル比から読み取った XY 二組の固有振動数  $F$  と増幅倍率  $A$  のペアのうち、増幅倍率の大きい方向成分のものを、測点に対応する位置にバブルの大きさに示したものである。青いバブルが  $F$ 、赤いバブルが  $A$  を示している。これらは分布状況を把握するためのもので、 $F$  ではバブルの面

積が  $F$  に比例し、 $A$  ではバブルの直径が  $A$  に比例するように描いている。これによると、 $F$  は西側で振動数が高くなるが概ね一様であり、 $A$  は場所により大きく変化することがわかる。

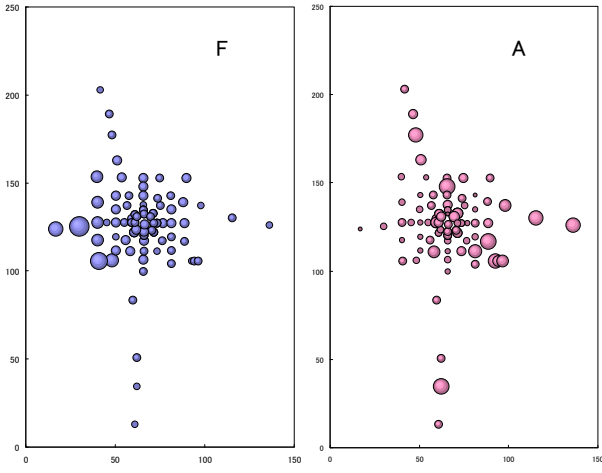
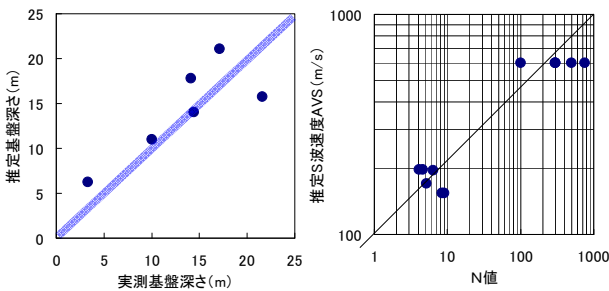


図6 固有振動数と増幅倍率の分布

(2) 表層平均 S 波速度 AVS と対応する表層層厚  $h$

ここでは、増幅倍率が大きい方向の固有振動数と増幅倍率を使って、表層の平均 S 波速度 AVS と基盤までの深さ(表層層厚)  $h$  を推定した。その際、基盤 S 波速度は  $600\text{m/s}$  と仮定した。

推定の精度を確認するため、ボーリング調査データがある地点付近の測点で  $h$  の推定値を測定値と比較した。結果を図 7(a) に示すが、両者は概ね一致している。また、図 7(b) は、AVS の推定結果を表層の平均  $N$  値と比較したもので、基盤での  $30\text{cm}$  沈下相当の  $N$  値も基盤速度  $600\text{m/s}$  に対応させて示している。これによると、AVS は  $N$  値のほぼ  $1/3$  乗に比例し、既往関係式群の係数と整合している。



(a) 基盤深さ (b) 表層 S 波速度

図7 ボーリング調査結果との比較(検証)

以上のことから、ここで採用した AVS と  $h$  の推定方法に大きな問題は無いと判断した。計測結果から AVS と  $h$  を推定した結果を、図 8 と図 9 に示す。

AVS についてみると、東西に沿った分布では、西から東に移るにつれて、AVS が小さくなる傾向が認められ、また、南北に沿った分布では、大仏に向かって AVS が小さくなる傾向が認められる。これに對

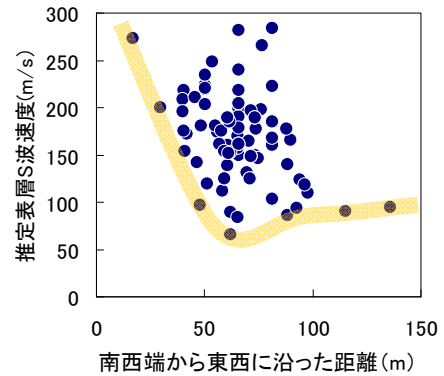
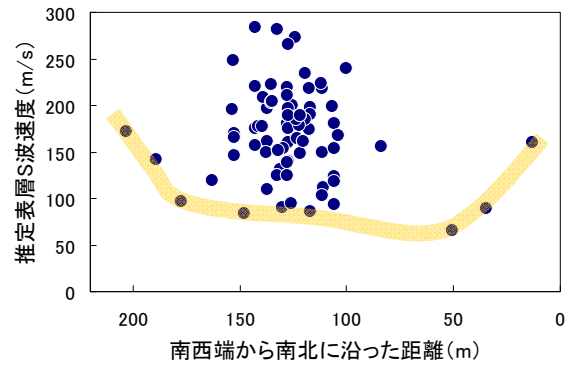


図8 表層 S 波速度の推定結果

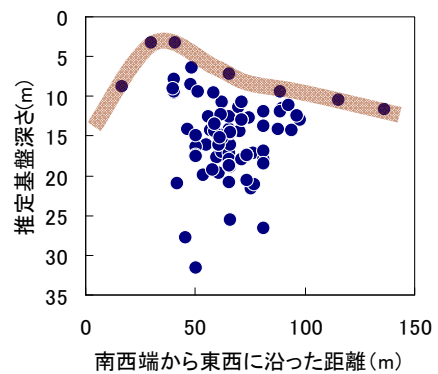
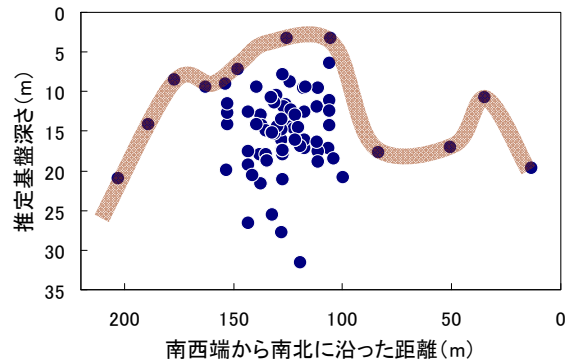


図9 基盤深さの推定結果

して、大仏周辺測点では、東西と南北の両測線から推測される値を下限として、それより大きな値に分布しているようにみえる。大仏造立時の版築盛土による圧密効果など人工的な地盤強化の結果とも考えられ、興味深い。なお、柱礎石の下で実施されたと考えられる版築の影響はわからなかった。

基壇周辺の基盤までの深さ  $h$  は図 10 に示すように概ね 15m 前後と推定される。これは#2 ボーリング調査結果と概ね一致している。

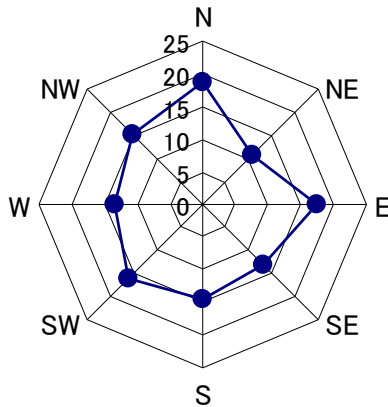


図 10 基壇周辺地盤の推定基盤深さ (m)

### (3) $K_g$ 値

図 11 と図 12 は、地盤の壊れやすさ指数  $K_g$  値の分布を計測位置と測線に対応して示したものである。図 11 のバブルの面積は  $K_g$  値の大きさに対応するが、大まかな傾向をみるもので、詳細な値については図 12 をみてほしい。青は X 方向、赤は Y 方向を示す。

$K_g$  値は場所によって値が大きく変化しており、東西方向の  $K_g$  値は、大仏の左前方(南東)と西方で大きいこと、基壇周辺は  $K_g$  値がやや大きくなっており、概ね南北方向 (Y) が卓越していること、などがわかる。なお、以下の議論では単位を省略している。

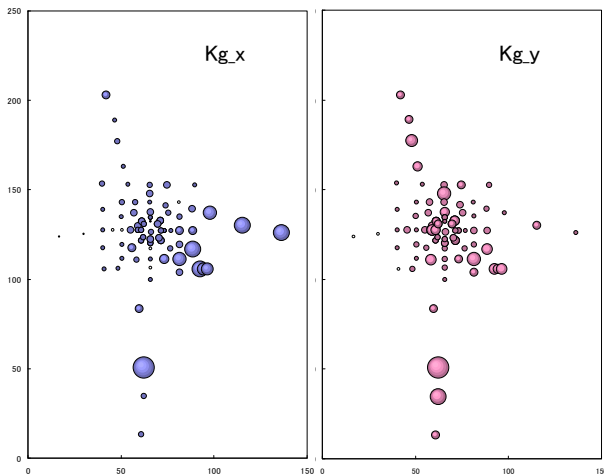


図 11 地盤の壊れやすさ指数  $K_g$  値 (地点対応)

回廊の外側の、旧大仏殿の東南端付近(大仏から見て左側)の柱礎石跡付近や東方では、X(東西)方向の  $K_g$  値が 20 前後とかなり大きくなっている。これは写真 5 の被災写真の状況と整合する。また、大仏基壇の北側 IG8 でも Y(南北)方向の  $K_g$  値が 18 近くの値となっている。これらの  $K_g$  値によれば、地盤変状が始まる基盤地震動加速度は、概ね

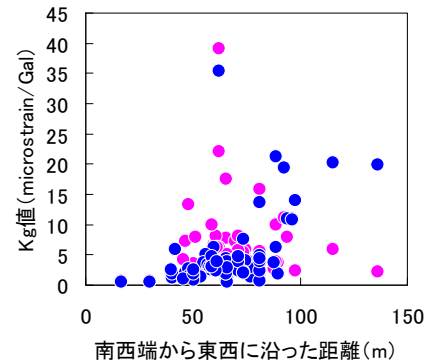
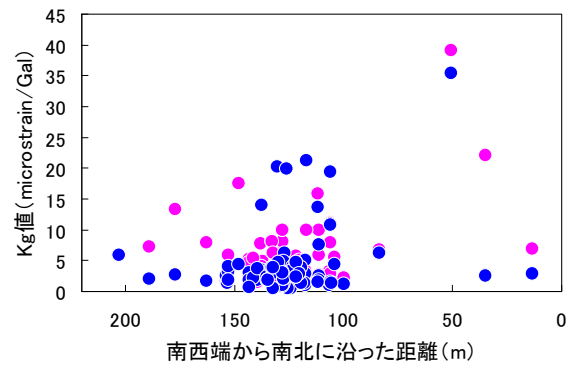


図 12 地盤の壊れやすさ指数  $K_g$  値 (測線対応)

50Gal 以上と推測される。表層地盤の倍率を考えれば、地表では概ね 150Gal 以上となる。これは震度 5 に相当し、この程度の地震動には、鎌倉大仏創建以後、幾度も遭遇していると考えられる。旧大仏殿が地震で損壊したとすれば、それは大仏後方と左前方から始まったと推測することもできる。なお、大仏の左肩にはやや後方からの落下物によると思われる凹みが残っている(写真 4)。



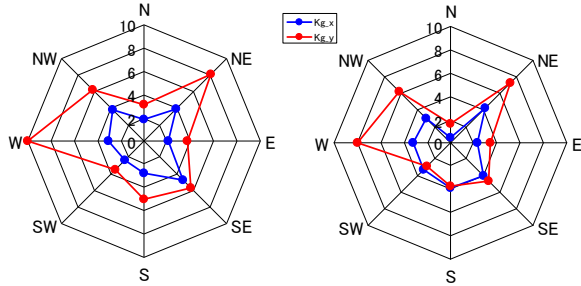
写真 4 大仏左肩に残る凹み

地震時の大仏基壇の被害と対比するため、大仏基壇上とその周辺地盤の方向成分毎の  $K_g$  値について検討する。

図 13 に基壇周辺地盤と基壇における H/V スペクトルから算定した  $K_g$  値を方向成分毎に示す。青が X 方向で、赤が Y 方向を示す。全般に Y(ほぼ南北)方向が卓越して大きく、西側が突出して大きい

(最大8:基壇~10:基壇周辺) ことがわかる。

南側基壇での  $K_g$  値は 3.7 で、北側基壇での 1.6 の2倍以上となっている。大正地震における大仏周辺の基壇最大加速度は 300Gal 程度と推測されるが、基壇の下の地盤で発生したせん断歪は北側で約  $500 \times 10^{-6}$ 、南側で約  $1100 \times 10^{-6}$ 、西側で約  $2400 \times 10^{-6}$  と推定される。すなわち、北側ではほとんど地盤は変状せず、南側で軽微な地盤変状が発生、西側の地盤は液状化した可能性がある。

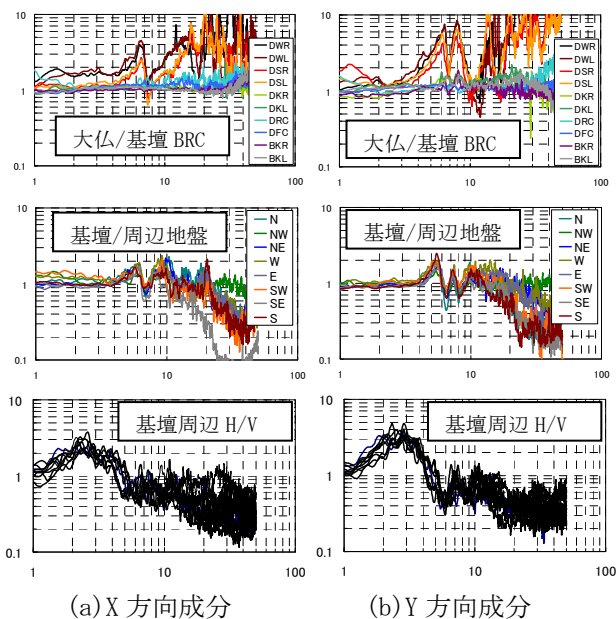


(a) 基壇周辺地盤 (b) 基壇  
図 13 基壇およびその周辺地盤の  $K_g$  値

写真 5 に示すように、大正地震では、大仏は、南 15 度東の方向に約 30cm 前進し、のめり込むように約 50cm 沈下したとされている。また、西側の基壇笠石が大きく変状している被災状況は、 $K_g$  値の分布と整合しているようにみえる。

### 3.2 基壇と大仏

図 14 には、大仏内部測点と基壇上面中心 BRC のスペクトル比を一番上に、その下に、基壇上測点と基壇周辺地盤のスペクトル比を、さらにその下には、基壇周辺地盤の H/V スペクトル比を示した。



(a) X 方向成分 (b) Y 方向成分  
図 14 基壇と大仏各部の応答スペクトルほか

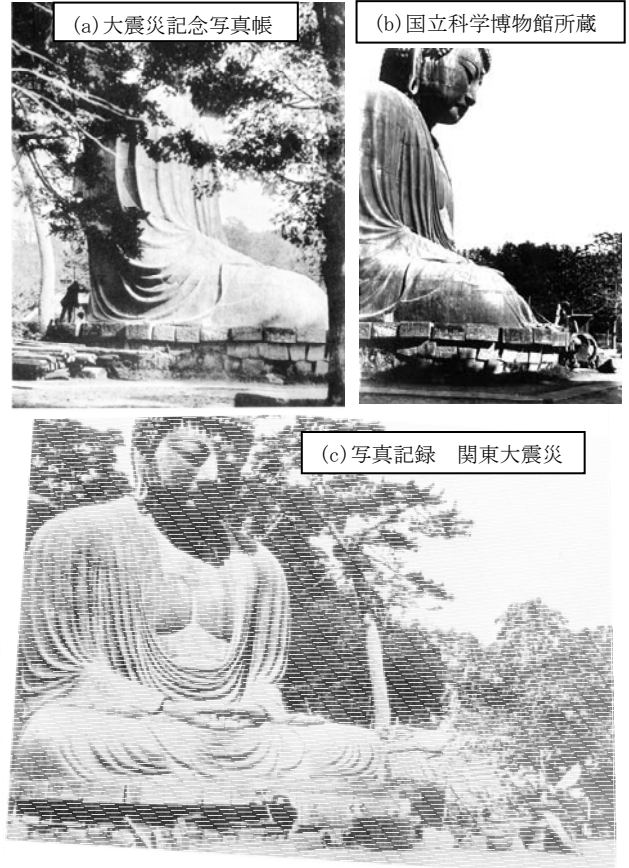


写真 5 大正関東地震による被災状況

これによると、基壇では、X 方向が 6.2Hz と 9Hz 前後、Y 方向が 5.5Hz、7.5Hz と 10Hz 前後、で卓越している。しかし、増幅倍率は、概ね 2 倍以下で小さい。また、基壇上面の測点 (BRC、BKL、BKR) と、大仏下部を強化しているコンクリート基部上の測点 (DKL、DKR、DRC、DFC) では、基壇中央の BRC に対して大きな増幅を示さず、ほぼ同一の動きを示している。以上のことは、基壇および大仏基礎コンクリートがともに健全であることを示している。

一方、基壇中央面上面 BRC に対する大仏内の支持架構測点 (DSL、DSR) や背面窓枠測点 (DWL、DWR) の応答倍率は、2 倍に満たない上下方向成分 (ここには示していない) を除き、かなり大きくなっている。特に Y 方向で顕著である。

10Hz 以下の振動についてみると、X 方向 (東西

動)が6.5Hz前後で約2.5倍(DS)~4.2倍(DW)、Y方向が6.3Hz前後と8Hz弱で、それぞれ、約5.3倍(DS)~8.6倍(DW)、約4.3倍(DS)~7.6倍(DW)、となっている。前後動は左右動の2倍以上の増幅倍率となっており、地震時には前後動が卓越するものと推測される。

特に背面窓部のDWRやDWLで計測される前後動は大仏本体部分のロッキング振動の可能性がある。その場合、胸腹部を支える鋼製門型架構には水平動とともに上下動が伝えられると推察される。支持架構は振動を抑えるような構造となっているので、ロッキング振動をかなりよく抑制しているものと推察される。

なお、支持架構の原型である支持石柱は、元禄地震の被害の後、設けられたが、関東地震の際、石柱頭角部がかなり損傷した。大正修理の際、コンクリート柱に置き換えられ、さらに昭和の修理で仏体とともに、ステンレス板上を動くことができる鋼製門型架構に変えられている。

#### 4. おわりに

本調査はいわば予備的な調査である。

地震による大仏基壇の二度(記録されているもの)の大きな沈下傾斜の要因が地盤変状にあるとすれば、対策が必要となる。また、頸部の補強対策も50年を経て、経年劣化が心配されている。境内の様子もまた、震災当時とも修理当時とも、大きく異なっている。まず現状を把握することが重要である。そこで、とりあえず計測できるものを計測して、現状把握を試みた。さまざまな知見が得られたが、今回は、大仏本体の計測に関しては、限られた部分しか行っていない。重要な頭部の振動なども計測できていないが、頸部の状況を把握するためにも、今回の知見を踏まえながら、今後、改めて詳細な調査を行いたい。

ステンレス板を用いた免震機能についてはある程度以上の強震動のもとでなければ、確認することはできない。台座の花崗岩(ビシャン仕上げ)とステンレス板の摩擦係数は0.4と実験的に求められており、400Gal以上の地震動で滑動することが想定されている。しかし、地震動には高い振動数成分の振動も含まれており、もっと小さい地震動でも滑動してしまうおそれがある。これを確認するには地震観測を行うほかはない。そこで、強震動を観測するシステムについても計画し、準備を整えつつある。関係者と緊密な連携をとりながら、実現にむけて努力していく所存である。

#### 謝辞

本調査は、高徳院住職 佐藤孝雄様(慶応大学教

授)のご理解とご支援の下に実施することができました。記して深甚の謝意を表します。実際の測定に際しては、(株)システムアンドデータリサーチの齋田淳氏と立花三裕氏を中心に東京工業大学大町研究室の田原徹也君と古川陽君に手伝っていただきました。東京文化財研究所の久せめぐみ様には大正関東地震の被害写真の情報を教えていただきました。これらの方々に謝意を表するとともに、本調査に関係された皆様のご協力に改めて感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 関野 克(編集): 高徳院国宝銅造阿弥陀如来座像修理工事報告書、1961.7.
- 2) 鎌倉市教育委員会: 鎌倉大仏周辺発掘報告調査書、2002.3.
- 3) 中村 豊、滝沢太朗: 常時微動による表層層厚と基盤および表層地盤のS波速度の推定、鉄道総研報告、Vol.4、No.9、pp.29-35、1990.9.
- 4) 中村 豊、滝沢太朗: 常時微動を用いた地盤の液状化予測、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、I-519、pp.1067-1069、1990.9.
- 5) 中村 豊: 兵庫県南部地震による留置列車の脱線・転覆と周辺地盤の常時微動特性の関係、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集、I-470、pp.940-941、1995.9