

# 1. 東京の液状化予測での地震動強度評価

—1923 年関東地震から推定した基盤最大加速度—

## Earthquake Ground Motion for the Liquefaction Potential Map of Tokyo

— Estimation of Maximum Acceleration of Base during 1923 Kanto Earthquake —

技術支援課 小川 好、加藤 直継（現・江東治水事務所）

### 1. はじめに

この報告は平成 25 年 3 月に公表した「東京の液状化予測図」で、地震荷重の設定の際に使用する地表最大加速度の評価について述べたものである。液状化予測図の目的は、個人では調べるのがむずかしい地盤の液状化について、発生の可能性を相対的に表すことにある。そのため、特定の震源をもった地震を想定せずに、一律のゆれによって都内の地盤がゆすられたときに、どの地域が液状化しやすいかを評価している。具体的には、建物の基礎地盤となる地層（工学的基盤）に一律の強さのゆれを入力して計算された地表のゆれをもとに、液状化を予測している。このように、特定の地震を想定しない予測方法は「非シナリオ型の予測」と呼ばれており、東京都では地域危険度測定調査「あなたのまわりの地域危険度」でも使用されている。特定の震源をもとしたシナリオ型の被害予測では、想定する地震断層からの距離によって地表のゆれの強さは変化する。特に、最近の被害想定では断層上にアスペリティを設定しているため、断層の破壊過程が地表の地震動に与える影響はきわめて強い。このように、シナリオ型の被害予測は被害の全体像をリアルに予想するのに適しているのに対して、非シナリオ型の予測はどの場所が他の場所に比べて液状化しやすいかを比較するなど、地域の相対的な危険度を比較するのに適していると考えられている<sup>注1)</sup>。

ゆれの強さとしては、前回、昭和 62 年の液状化予測と同様に、大正 12 年（1923 年）関東大地震で東京の都心が襲われた程度のゆれを想定している。関東地震を想定対象とするメリットとしては、およそ次の 3 点をあげることができる。

- ① 過去に東京で発生した最大の被害地震であることから、一般によく知られている。
- ② 遠距離海洋型の大地震であることから、都内では震源からの距離によるゆれの違いがあまり強くないため、非シナリオ型としてイメージしやすい。
- ③ 実際に液状化も多く場所で発生したことがこの地震の体験者に対する面接調査でもわかっている。

今回の液状化予測では、想定する地表最大加速度についても再検討すべきであるという意見がアドバイザー委員会からあったことから、当時、本郷で観測された地震記録をもとに再現解析を行ったので報告する。

### 2. 関東地震の再現波形

地震計で観測された関東地震の記録のうち、東京で観測された本震の記録は、地震計自体の損傷のため完全な波形は残されていない。しかし、部分的に欠損した地震記録をもとに、波形を再現した成果が森岡<sup>2)</sup>と山原ら<sup>3)</sup>によって公表されている。このほか、数値記録ではないが、東京帝国大学地震学教室（本郷）でのゆれについての緻密な観察文が、当時の地震学科助教

注 1) 額田一起（文献 1）は「シナリオ地震の落とし穴」として、東京都防災会議が 2012 年に公表した「首都直下地震等による東京の被害想定」では将来、発生するゆれの予測として 5 つの震源モデルを採用しているが、いずれの地震でも練馬では最大でも震度 6 弱となっているのに対して、中央防災会議（2005 年）の 18 モデルには震度 6 強となる例もあることから、シナリオ地震の結果を防災計画に反映する上で注意が必要なることを指摘している。

授の今村明恒によって残されている<sup>4)</sup>。

森岡<sup>2)</sup>はユーイング円盤記録式強震計によって記録された波形のうち、起動から数回の短い中断のある2分間のSW-NE(南西-北東)成分の記録を再現している。この地震計は関東地震の40年以上前に、お雇い外国人であったユーイングによって作成されたもので、当時、すでに正規の観測からははずされていたが、常に整備されていたものである。強震観測用の地震計のため倍率は1倍、水平振子の固有周期6秒、ダンパは付属せず機械摩擦による減衰機構の変位計である。また、記録装置は直径約60cmの連続回転式円盤であり、装置はトリガーによって起動する。

円盤記録からのデジタル化には、このために開発された読み取り装置が使用されている。また、欠落した記録の補修としては、波形を2秒以上の長周期成分と短周期成分にわけ、それぞれ補完を加えたのち合成するという方法が使用されている。加速度波形は変位波形を時間軸で2回微分することで求められている。

山原ら<sup>3)</sup>は今村式の2倍強震計の記録から再現波形を作成している。この記録は、関東地震の振り切れた地震記録としてよく紹介されているものである。NS成分と上下成分は主要動の初期に描針が逸脱して記録がとれていない。一方、EW成分は、初動から16.45秒後(主要動に入ってから4.05秒後)に描針が逸脱したものの、約10秒後に回復している。復元されたのは、このEW成分である。

今村式2倍強震計の水平振子の固有周期は10秒、油によるダンパがあり、振子の固有周期から考えて周期5秒程度までのゆれに対してはほぼ変位を記録している。

約10秒間の補完は、本震ときわめてよく似ていたとされる<sup>注2)</sup>9月1日午後2時22分49秒の余震記録のEW成分を比例拡大して空白部分をうめている。また、変位記録から加速度記録への変換は、高速フーリエ変換が使用されている。

注2) 今村明恒は震災予防調査会第百号 関東大地震調査報告(文献4)で次のように述べている(現代語訳は著者)「以上の部分的な観測(EW成分のみ記録されていること:著者注)から実際の地動を推測するため、余震の中で震源が最初の大地震に近い記録と比較してみる。このために自分が選定するのは、同日午後2時22分頃に起きた余震であるが、上下動の記録が比較的よく似ていて、推定される震源が大地震とあまり変わらないから、水平動の記録も互いに似ているはずであるが、東西成分を比較してみると時間経過につれて波動の周期の変化していく状態が特によく似ていて、また、最初の約2分間の波動の大きさの変化も相当似ている。これらの記録から、その相似性が成立すると仮定すると、主要部での振動は概して南北動の方が著しく、東西動と組み合わせたときの大きさは震動最強部(関東大地震の記録がある初動から16.45秒間の波形でもっとも大きな振幅の部分:著者注)の2倍半である約20cmに達する震動であったことであろうし、その震動の方向もほぼ最強部の震動方向に平行であるかそれに近いものであったと想像される。

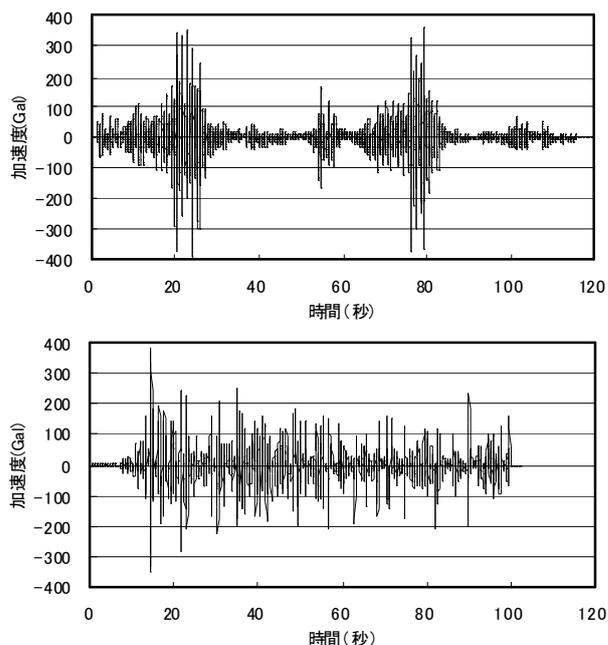


図-1 森岡<sup>2)</sup>(上)と山原ら<sup>3)</sup>(下)による再現波形

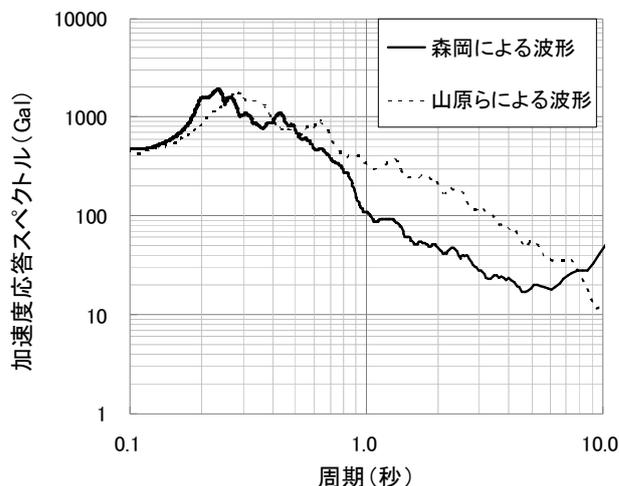


図-2 再現された地震波形の加速度応答スペクトル(減衰定数5%)

復元されたEW成分の最大加速度は238Gal、最大速度は22.5cm/秒であるが、注2にも引用したように、関東地震ではNS成分の方がEW成分より大きかった。山原らは、本震で描針が逸脱するまでの主要動初期部分のNS成分の最大振幅はEW成分の最大振幅の約1.6倍であることと、補間に使用した余震の最大振幅でもNS成分がEW成分の約1.6倍であったことから、NS成分の最大加速度も1.6倍程度と推定している。このた

め、今回の予測でも、EW 成分を 1.6 倍した波形を解析に使用した。

今村式 2 倍強震計の記録は、のちに横田ら<sup>5)</sup>によっても修復されている。しかし、やや長周期地震動を対象として周期が 2 秒以上の波形を再現しているため加速度の値はかなり小さいことから、今回の検討対象からは除外した。

図-1 に 2 つの再現波の加速度波形を示す。森岡の再現波の最大加速度は 392Gal、山原らの再現波の最大加速度は 381Gal である。図-2 には、2 つの再現波形の加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) を示した。

再現されている最大加速度を、距離減衰式から想定される最大加速度と比較する。断層モデルとして Kanamori によって提案されたモデル (北緯 34.86 度、東経 140.31 度を起点として走向 290 度、傾斜 34 度、断層の長さ 130km、断層の幅 70km、地震モーメント  $7.6 \times 10^{27} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$ )<sup>6)</sup> と震源パラメータ (気象庁マグニチュード 7.9、震源の深さ 23km)<sup>7)</sup> をもとに推定される最大加速度は、司・翠川の式<sup>8)</sup>で 370.0Gal、Molas・Yamazaki の式 (旧地盤種別 4 種に対する推定)<sup>9)</sup> では 2 種地盤で 243.8Gal、4 種地盤で 336.6Gal となる。

### 3. 本郷の地盤構造と入力地震動

対象とする 2 つの地震計は、当時の東京帝国大学地震学教室によって計測されていた。図-3 の明治 42 年の地形図からも読み取られるように、地震学教室のあ

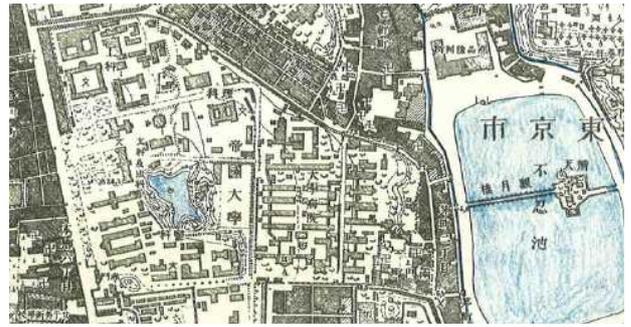


図-3 東京帝国大学 (本郷) 構内の配置 (明治 42 年の 1:10,000 地形図「上野」による)

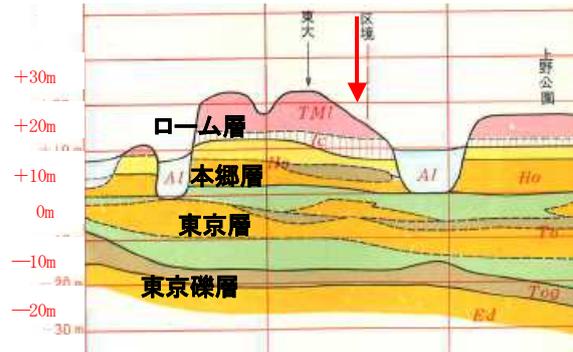


図-4 本郷周辺の地盤断面<sup>10)</sup>

	層厚 分割数	地層名 土質名	S 波速度 (m/s <sup>2</sup> )	単位体積重 量(kN/m <sup>3</sup> )	剛性率低下 曲線
T.P. 17m	2.0m 2	立川・武蔵 野ローム層	120	15	HD モデル $\gamma_{0.5}=0.0019, D_{max}=0.14$
	3.5m 3	立川・武蔵 野ローム層	140	15	HD モデル $\gamma_{0.5}=0.0019, D_{max}=0.14$
T.P. 10m	2.0m 2	ローム質 粘土層	190	15	HD モデル $\gamma_{0.5}=0.0019, D_{max}=0.14$
	4.5m 4	本郷層 砂層	280	19	曲線 30「洪積」砂層 拘束圧 98kPa 以下
T.P. 0m	3.0m 2	本郷層 砂礫層	420	21	曲線 31「洪積」砂層 拘束圧 196kPa 以下
	4.0m 2	東京層 砂質粘土層	420	18	曲線 39 「洪積」砂質シルト層 拘束圧 196kPa 以下
T.P. -10m	8.0m 4	東京層 砂層	420	19	曲線 31「洪積」砂層 拘束圧 196kPa 以下
	7.0m 3	東京層 砂質粘土層	420	18	曲線 39 「洪積」砂質シルト層 拘束圧 196kPa 以下
T.P. -17m		東京礫層 工学的基礎	450	21	

図-6 地盤モデル

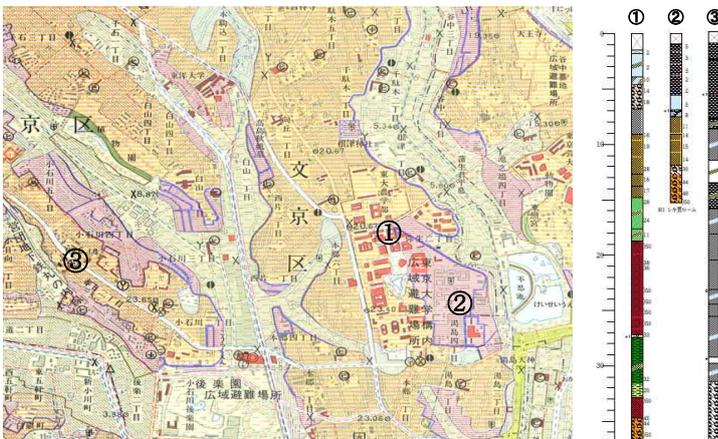


図-5 本郷周辺の地形とボーリングデータ  
地図は国土地理院発行の 1:25,000 土地条件図「東京東北部」を使用しました。

注 3) 当時、地震学教室には地震観測のための建物もあった。対象とする地震計が地震学教室の建物にあったか地震計室にあったかは、資料からは断定できなかった。地震計室の位置については、今村のエッセー集「地震の国」(文芸春秋新社, 1949 年)に北米の女性新聞記者を地震学教室に案内する話があり、その中に地震計室(等温室)は運動場の近くにあるという記述があることから、御殿下グラウンドの近くにあったと考えられる。この場合、理学部とは地形・地質的に大きく異なることはない。

った理科は、ほぼ現在の理学部の位置にあり、地形も大きく変わってはいない<sup>注3)</sup>。大学のある本郷台の地盤は、図-4 に示すようにローム層とローム質粘土層の下位に、本郷層とよばれる東京層よりも新しい地層が分布しているのが特徴である。

入力地震動を解析する地盤モデルとしては、図-4 の東京礫層を工学的基盤に選び、東京都地盤地質図(23 区内)<sup>10)</sup>の断面図をもとに、基本的な層構造を決定した。ローム層・ローム質粘土層と下位の本郷層の層厚は、図-5 の②のボーリングデータから決定した。本郷層の礫層以深の地層層厚は、PS 検層のある大深度調査ボーリング<sup>11)</sup>(図-5 の③)とよく対比できることから、①のボーリングデータから設定した。ただし、このボーリングデータは、土地条件図の「浅い谷」に位置していることから、ローム層は洗掘されていると考えられ、ローム層の層厚決定には使用できない。S 波速度は大深度ボーリングデータ③から設定したが、このデータは成増面に位置するため、本郷層の S 波速度は本郷面での大深度ボーリング<sup>11)</sup>(北区十条台 1 丁目)を参考に決定した。

図-6 に地盤モデルを示す。図-7 は、この地盤モデルをもとに、等価線形解析プログラム DYNEQ<sup>12)</sup>によって計算した工学的基盤での入射波形(解放基盤での波形 2E)である。入射波の最大加速度は森岡の波形で 195Gal、山原らの波形では 200Gal となった。

#### 参考文献

- 1) 額瀨一起(2013)：揺れの予測の落とし穴，NHK そなえる防災，(<http://www.nhk.or.jp/sonae/column/20130402.html>)，(アクセス：2013 年 7 月 8 日)
- 2) 森岡敬樹(1980)：1923 年関東大地震の地動，日本建築学会論文報告集，第 289 号，79-91
- 3) 山原 浩，伊藤哲次，広瀬通孝(1974)：1923 年関東地震記録の検討，清水建設研究所報，第 22 号，47-55
- 4) 震災予防調査会(1925)：震災予防調査会報告，第 100 号(甲)，関東地震調査報文，岩波書店
- 5) 横田晴彦，片岡俊一，田中貞二，吉沢静代(1989)：1923 年関東地震のやや長周期地震動，日本建築学会構造系論文集，第 401 号，35-45
- 6) 佐藤良輔 編(1989)：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック，鹿島出版会，141
- 7) 宇佐美龍夫(2003)：最新版 日本被害地震総覧，東京大学出版会，272
- 8) 司 宏俊，翠川三郎(1999)：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第 523 号，63-70
- 9) Molas, G.L., Yamazaki, F. (1995): Attenuation of Earthquake Motion in Japan Including Deep Focus Events, Bulletin Seismological Society America, Vol. 85, No. 5, 1343-1358
- 10) 東京都土木技術研究所(1969)：東京都地盤地質図(23 区内)
- 11) 東京都土木技術研究所(1996)：東京都(区部)大深度地下地盤図
- 12) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. (2002): Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 3, 205-222

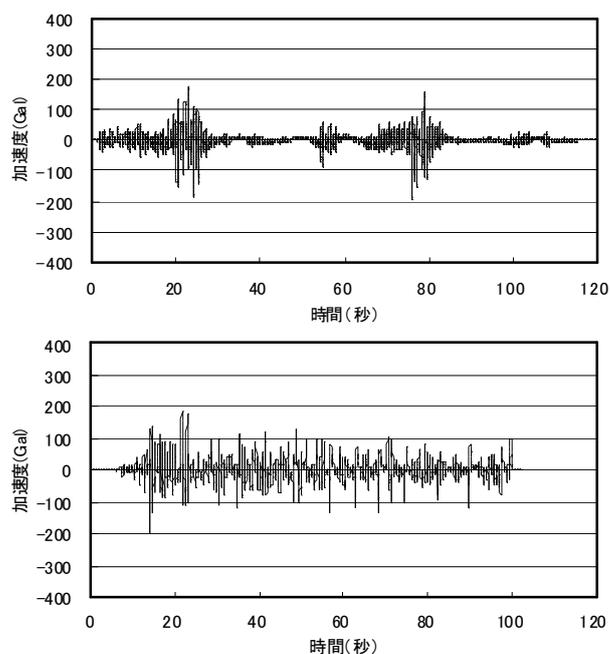


図-7 森岡<sup>2)</sup>(上)と山原ら<sup>3)</sup>(下)から求めた入射波形

#### 4. おわりに

この小論で述べた結果をもとに、今回の液状化予測では工学的基盤での最大加速度を 200Gal として想定を行った。予測では地表の最大加速度を沖積層の層厚の違いでグループ分けしているが、この値は 232Gal から 314Gal となっている。前回、1987 年の予測では、地表の最大加速度を 208Gal から 278Gal としていることから、今回はおよそ 10%程度、地震荷重を大きく想定していることになる。