

# 東京層砂層の液状化の痕跡調査と一考察

森 伸一郎<sup>1</sup>・池田 悦夫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 飛鳥建設株式会社 技術研究所 主任研究員 (〒 270-02 千葉県関宿町木間が瀬 5472)

<sup>2</sup>東京都新宿区教育委員会 新宿歴史博物館 研究員 (〒 160 東京都新宿区三栄町 20 番地)

東京都新宿区四谷の江戸城四谷御門外の一連の遺跡調査において、江戸城外堀の盛土周辺で地震の痕跡が検出された。地震の痕跡には、地割れ、地滑りのほか、噴砂脈が認められた。現地調査、サンディング、粒度・比重・重鉱物・珪藻などの土質分析、および周辺の地質調査資料に基づき、噴砂脈の供給源が更新統（洪積層）である東京層にあることを確認した。考古学・地震学・地盤地震工学の観点から、地震の発生時期を特定した。液状化しにくいと考えられていた洪積砂層も強地震動の下では液状化しうることを示した。有史以来の歴史地震で洪積層が液状化したことを確認した初めての例である。

**Key Words :** *liquefaction, historical earthquake, Pleistocene(diluvial soil), Tokyo Formation, archaeology, embankment, sand dyke, grain size, heavy metal, diatom*

## 1. はじめに

本論文は、東京都新宿区四谷の遺跡調査の際に検出された地震の痕跡の調査結果を示し、地震の液状化による噴砂脈の供給源が更新統（洪積層）である東京層砂層にあることを立証し、液状化現象について地盤工学的な考察を述べたものである<sup>1)</sup>。

1964年新潟地震以降、地盤の液状化に関しては研究が進み、実際の液状化現象の事例について様々な取り組みがなされてきた。

栗林ら<sup>2)</sup>や若松<sup>3)</sup>によって過去の震害調査資料や歴史資料に基づき、有史以降の過去の我が国での液状化履歴が整理された。また、最近では地震が発生すれば液状化研究者により現地調査が行われ、液状化と関連被害の詳細な報告が行われている<sup>4)・5)</sup>。

過去の液状化履歴を基に、若松<sup>3)</sup>は微地形の観点から、台地地域における液状化事例を4地震28地点について見出し検討した。地形や地盤柱状図に基づき、これらの事例で液状化した土は、洪積層ではなく、洪積層の上に堆積する風化土、崩積土、風成土などの2次堆積物であると述べている。

一方、最近では遺跡調査の際に発見される液状化による噴砂脈や地盤変状を地震の痕跡と位置づけ、考古学と地震学の相互の時代特定能力を補完し利用し合う研究が寒川<sup>7)</sup>により始められ、地震学や考古

学分野で多くの成果<sup>8)・9)</sup>を上げている。さらに、それらを地盤工学に利用する研究の試み<sup>10)</sup>もなされている。

地質学の分野でも、古い地質時代の地層内に地震による液状化や外部からの水供給に起因する流動化による特殊な微小地質構造が、砂脈の他さまざまな形態で検出されている<sup>11)</sup>が、いずれも堆積後間もない時点における緩い状態の砂や火山灰質土の液状化現象として捉えられている。

以上のように、液状化に関して様々な研究がなされているが、どの事例についても、液状化は完新統である「沖積層」や埋立層において起こり、それを起源とする噴砂や噴砂脈が確認されているという理解がされる。すなわち、第四系更新統である「洪積層」において、完新世の地震によって液状化が確認された例はない。安田<sup>12)</sup>も「洪積層が液状化した例は見当たらないようである」と述べている。設計規準<sup>13)</sup>においても、洪積層での液状化事例がないことから、液状化の検討対象から除外されている。「洪積層の液状化例がない」ということは、「洪積層は液状化しない」ということの傍証となり得るが、完全な証左とはなり得ない。現実には「洪積層の液状化による被害事例がない」と捉えた方がよいと考えられる。

今回、東京都新宿区四谷一丁目先で行われた遺跡

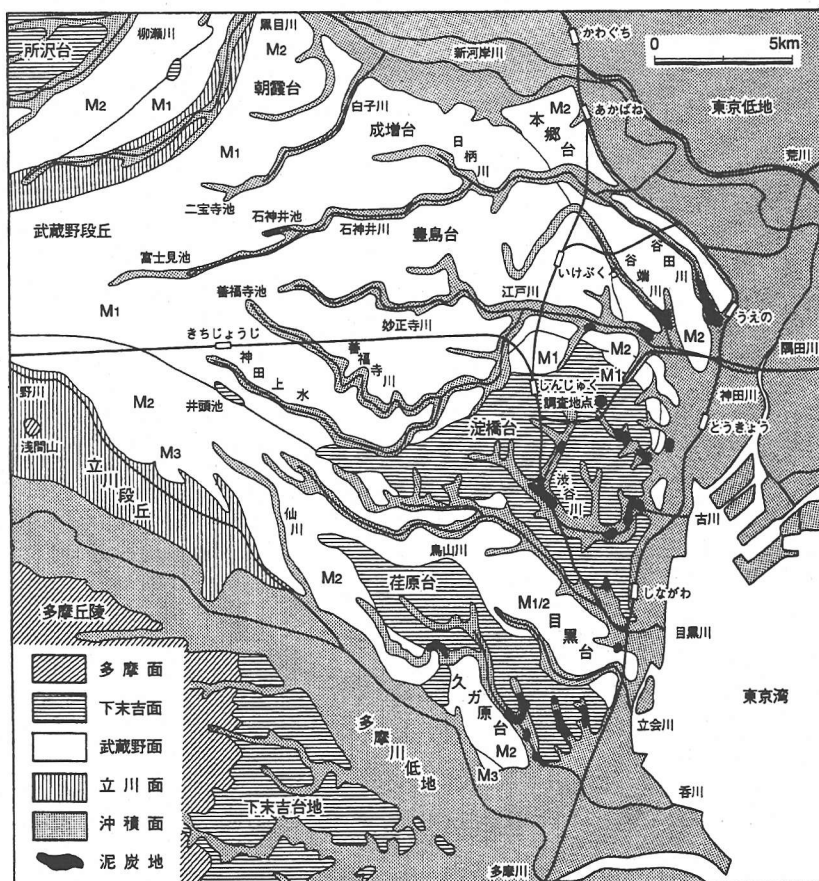


図-1 調査地付近の地形区分図 (貝塚<sup>17)</sup> 原図)

調査において、江戸城外堀（そとぼり）の盛土周辺で地震の痕跡が検出され、特に地震の液状化によると考えられる噴砂脈を主体として調査をする機会を得た。

本論文では、自然地形や歴史的環境を明らかにした上で、地質学と地盤工学の面から地震の痕跡であることを示しその概要を述べる。噴砂脈の供給源が洪積層である東京層砂層の最上部層にあることを現地調査・土質分析・周辺地質調査資料に基づいて述べる。さらに、液状化を発生させた地震を考古学と地震学の両面から推定することにより、東京層を液状化させた地震動の大きさについて考察を行う。

この事例は、有史以来の歴史地震で洪積砂層が液状化したことを確認した我が国での初めての例であり、液状化しにくいと考えられていた洪積砂層も液状化しうることを示した。今後の液状化研究に有用であると考えられる。

なお、今回の調査は、以下に記す遺跡調査に伴って実施された。東京の営団地下鉄7号線溜池・駒込

間建設工事に伴う埋蔵文化財調査のため、1989年遺跡調査会が結成され、新線の（仮称）四ツ谷駅の駅舎と駅出入口の建設に伴う事前発掘調査が、建設工事と並行して3工区に対して、1990年9月から1994年9月の間に実施された<sup>14)・15)</sup>。

また、地学分野では、完新統・更新統の語を使用する<sup>16)</sup> ことになっているが、土木・建築の分野では、沖積層・洪積層の語が未だに広く使用されていることから、本論文では沖積層・洪積層の語を使用する。

## 2. 調査地周辺の地形・地質と歴史環境

### (1) 調査地周辺の自然地形

調査地は、東京都新宿区四谷一丁目先に位置する。図-1に調査地付近の地形区分図（貝塚<sup>17)</sup> 原図）を示す。当該地は、荒川と多摩川の間で東京西部に広がる武蔵野台地の東端に位置しており、武蔵野台地のなかでも最も高い淀橋台と呼ばれる台地の東端に

位置する。淀橋台は、下末吉期（約13万年前から12万年前の間）に形成された。

当該地の位置する台地は、東西に長く、当該地周辺より、北は市ヶ谷、南は赤坂に向けて次第に標高は低くなる。当該地の標高はTP+28.3～+28.4mである。

淀橋台の平坦な面を形成しているのは、東京層と呼ばれる海成層である。岡<sup>19)</sup>によれば、約14.7万年前から13.2万年前までの間に起きた海水準上昇（下末吉海進）によって、現在の関東平野が広がる地域に古東京湾と呼ばれる広い内湾が形成され、そこに堆積した浅海・内湾性の堆積物が、東京層である。

これら台地の表層は厚い火山灰土層で覆われている。この火山灰土層は関東ローム層と呼ばれ、富士山および箱根火山の噴出物を母材の主体とし、上位より、立川ローム、武蔵野ローム、下末吉ロームと呼ばれている。淀橋台では、関東ローム層の下部には、下末吉ローム層に対比される渋谷粘土層とよばれる火山灰質の粘土層が東京層の上に堆積している。

図-1によれば調査地は台地に位置している。最新の新宿区および周辺の地形分類図<sup>19)</sup>によれば、調査地点である四ッ谷駅西側は、大局的には甲州街道を分水界とする尾根筋の延長に位置する。

また、四ッ谷駅周辺の外堀は、1635～1636年にかけて麴町台地北部にある平川の支流と反対側の赤坂溜池にそそぐ小流を利用して牛込～市ヶ谷～四谷～赤坂～溜池に堀を新開した<sup>20)</sup>と考えられている。絵図に基づく江戸城外町建設過程の図<sup>20)</sup>によっても、四ッ谷駅西側は、大局的には甲州街道を分水界とする尾根筋の延長に位置する。

しかしながら、後述するように今回の遺跡調査により、調査地点は谷底低地の一部であることが判明しており、前述の平川支流の水源地である可能性もある。したがって、調査地点は谷底低地に江戸城外堀構築の際に盛土して形成された地形であり、江戸城外堀構築前は自然地形、構築後は人工改変地であると言える。

## (2) 歴史的環境

図-2に江戸復原図<sup>21)</sup>における当該調査地点の位置を示す。調査地は、四谷御門の西橋詰に位置し、当時の町屋部分に相当する。また、江戸城外郭工事は1636年（寛永13年）に竣工し、40年後には既に町屋が形成され、幕末まで町屋として土地利用がされていたことが史料によりわかっている<sup>22)、23)</sup>。さらに、玉川上水の配水管として、3種の主要な管路が四谷御門で外堀を横断していることがわかって

いる。これらの管路は、今回の遺跡調査で考古学的に明らかにされた<sup>14)</sup>。

## (3) 調査区域の位置

図-3に調査区域の位置図を示す。調査区域は①四谷御門外橋詰地点（橋詰と略す）、②四谷御門外堀端通・町屋跡地点（御堀端通と略す）、③四谷御門外町屋跡地点（町屋跡と略す）の3つに大別される。①区域は現在のJR四ッ谷駅入口北側斜路に沿っている。②区域は現在の外堀通りと新宿通りの交差点から北に外堀通りに沿っている。③区域は同交差点の北西付近である。

## (4) 調査地の標準層序

図-4に調査区域の標準層序を示す。これは図-3に示した▲地点で現地表面から9.20m下まで確認したものと8箇所土層観察溝による観察によっている。

現地表面から、約0.9mの深さまでは近・現代の盛土層が堆積し、これより下に江戸城外堀の盛土層が認められた。江戸城外堀の盛土層は、数面の遺構面（硬化面）を含み、最大で約8.3mの層厚を有する。

また、現地表面から約6.6mの深さで有機質のロームから成る自然堆積層が確認された。自然堆積層の堆積状況から、当該調査地では江戸城外堀の盛土は自然地形を掘削せずに構築されていたことがわかった。

75、76層は埋没した谷の基底を構成する谷底堆積物であり自然堆積層である。75層は暗褐色のシルトであり、スコリア粒はほとんど認められなかった。須恵器の破片が検出されたことから、古墳時代後期（6世紀前半）以降に堆積したものと考えられる。78層には植物根痕（黒色の高師小僧：たかしこぞう）が無数に認められたことから自然堆積層であると考えられ、地下水位が堆積後一度も下がっていないことがわかる。

76層（約TP+21.6m）から土は還元色となり、掘削調査で75～78層を掘削した際に初めて確認された自然水位がこのレベルにあることと調和する。また、この地下水位は図-3中のNo.67地点のボーリング調査結果（孔内水位）と一致する。

## 3. 遺跡調査における液状化痕跡の状況

### (1) 地震跡の検出とその状況の概要

池田<sup>24)</sup>は、この調査区域で地震跡を9箇所を確認したことを中間報告している。①橋詰で6箇所、

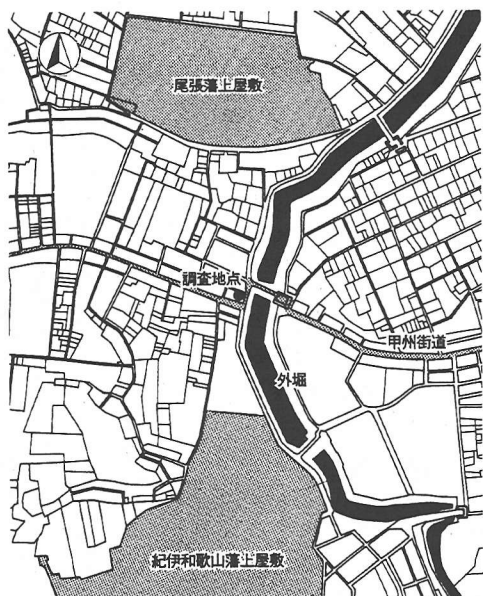


図-2 江戸復原図<sup>21)</sup>における当該調査地点の位置

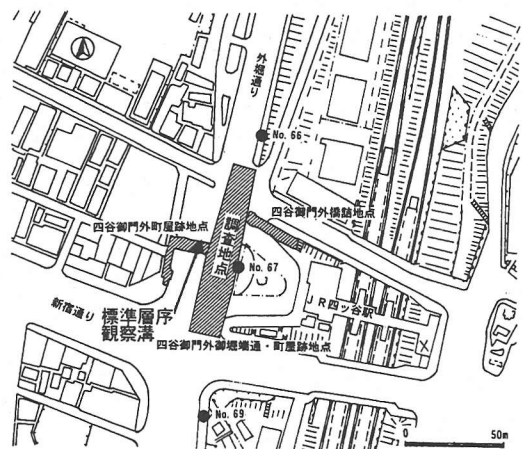
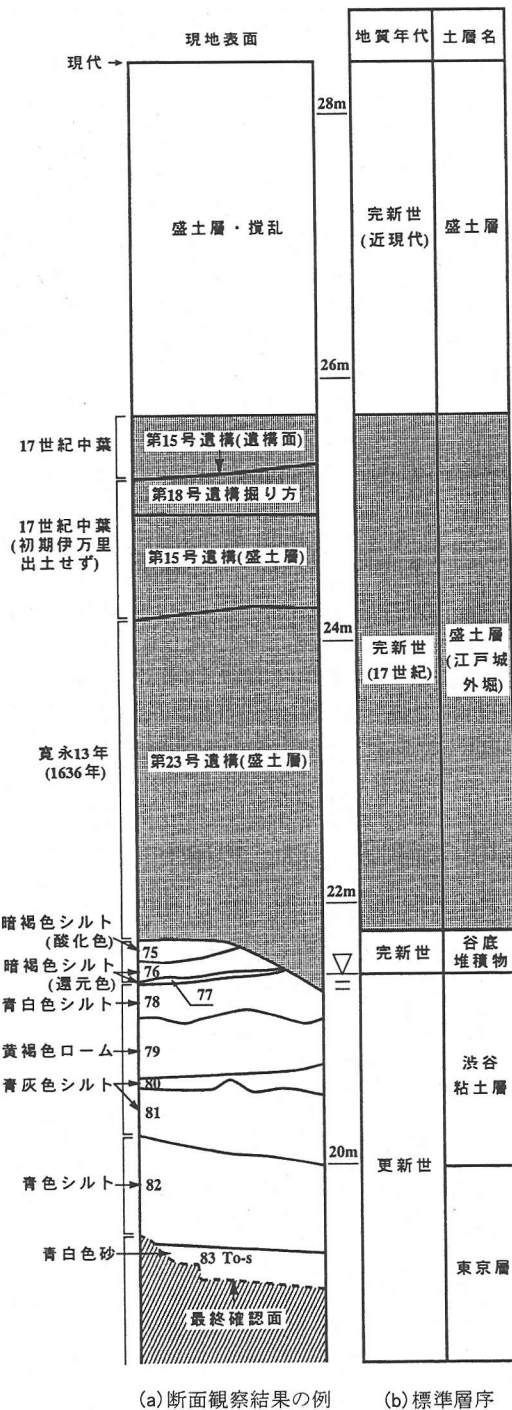


図-3 調査区域の位置図

③町屋跡で3箇所である。②御堀端通では検出されなかった。

池田<sup>24)</sup>の確認した9箇所の地震の痕跡について、完了した調査結果<sup>14)、15)</sup>を基に、再吟味の上、状況を整理した。表-1に確認された地震跡についてその概要を整理した。地震跡の現象としては、地滑り1箇所、地割れ3箇所、噴砂脈5箇所である。本論文の主題は液状化であるので、噴砂脈が主な議論の対象であるが、液状化を生じさせた地震を議論するために、比較の対象として地割れなどについても明らかにする必要がある。



(a)断面観察結果の例 (b)標準層序

図-4 調査区域の標準層序<sup>14)</sup>

表-1 江戸城四谷御門外の遺跡調査における観察で確認された地震の痕跡とその特徴

確認地震跡	調査 区 域	観察	確認現象	噴 砂 脈		地震跡の様子, 被害の特徴, 噴砂の状況
				最大幅	供 給 層	
地震跡-1	橋詰跡	西壁	噴砂脈	5mm 未満	東京層	東京層(TP+17.15m)より上昇し, 自然堆積層上面の硬化面を貫通し初期盛土層上面(TP+18.60m)で噴出。 (上記硬化面は第26号遺構面)
地震跡-2	橋詰跡	南壁	地滑り	----	-----	1636年構築盛土法中腹部2mが円弧状に滑っていた。 分割土塊の滑り様式が地震被害時の特徴を有する。
地震跡-3	橋詰跡	北壁	噴砂脈	12mm	東京層	東京層(TP+16.05m)より1636年構築外堀盛土層上面(TP+22.85m)まで上昇。噴砂脈の走向はNNW-SSE
地震跡-4	橋詰跡	南壁	地割れ	----	-----	1636～1655年施工の腹付け盛土部の法肩が地割れを伴う陥没とせり出し変形。地割れの走向はNE-SW。
地震跡-5	橋詰跡	南壁	地割れ	----	-----	地震跡-4の上に盛られた盛土法肩の硬化面に亀裂。 地割れの走向は, 地震跡-4と同方向。亀裂幅小
地震跡-6	橋詰跡	南壁	噴砂脈	7mm	東京層?	TP+22.75mより上で確認, 当時の地表に噴出か? 国鉄四谷駅構築時(明治27年)の盛土に覆われる。 玉川上水石組構が変形被害。 砂脈中の噴砂の粒度・色調が東京層に類似。 盛土層内の砂薄層を供給層とし, 当時の地表に噴出。 隣接する上記の砂脈は, この供給砂層を貫通。
			噴砂脈	2mm	盛土層	
地震跡-7	町屋跡	東端	噴砂脈	40mm	東京層?	1636年竣工した外堀盛土より前の盛土表面に噴出。 地震跡-8の地割れの延長線上に位置する。
地震跡-8	町屋跡	西側	地割れ	----	-----	地割れの走向はNNE-SSWからNEE-SWWに変化。
地震跡-9	町屋跡	西南	噴砂脈	5mm	不明	盛土層内の砂薄層で液状化

橋詰: 四谷御門外橋詰を指す, 町屋跡: 四谷御門外町屋跡を指す。  
供給層の欄? は推定を意味する。

## (2) 地震跡としての地割れの検出とその状況

地震跡-2の地滑りは, 極めて局所的で小規模なものであるが, 分割土塊の滑り様式が地震被害時の特徴を有すること, 地震跡-3の噴砂脈に近接しており, 滑り面の走向と噴砂脈の走向が概ね同じであることなどの理由により地震跡と判断した。

地割れは, 全て盛土の法肩で発生している。図-5に地震跡-4,5の様子を示す。地震跡-4では, 腹付け盛土部が江戸時代初期以前に構築された盛土より40～50cm下がっていること, 法肩先端は崩落していること, 盛土法肩部全体としては沈下しているが陥没土塊を伴っていることなど, 地震時に特有の盛土被害形態を有している。このことから, この盛土法肩の地割れは, 地震によるものと考えられる。

また, 段差を伴わない法肩平行方向の亀裂だけの地震跡-5も地震による可能性が高いと判断した。

以上のことから, 地震跡-5は, 地震跡-4を形成した地震に比べて地震動の大きさは小さいこと, 地震跡-4の修復後間もない頃に形成されたことが推察される。

地震跡-8は, 盛土ではない自然地盤上での地割れである。後述する地震跡-7の噴砂がこの地割れの延長線上に位置することから, 東京層の液状化に関連するものと推察される。なお, 地割れの走向と自然地盤の緩斜面の走向はほぼ一致する。

## (3) 地震跡の検出と噴砂脈の状況

砂脈は5箇所検出されたが, 地震跡-1, -3, -6, -7の4箇所噴砂供給層が確認または推定できた。図-6に地震跡-1の噴砂脈の状況を, 図-7に地震跡-3の噴砂脈の状況を示す。これらの2つの噴砂脈は, 供給層が目視により確認できた。

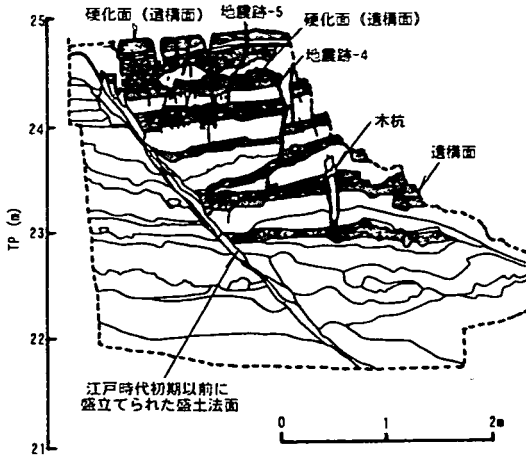


図-5 地震跡-4,-5 (地割れ) の観察断面図

地震跡-1の噴砂脈はTP+17.20mより上の渋谷粘土層とその上の谷底堆積層および初期盛土層(茶褐色)を貫通して、当時の地表面で切られている。供給層確認のための掘り下げを行っていないが、噴砂脈中の砂が、暗青灰色の色調と粒度が東京層の砂に類似していること、調査地の地盤にはそのような特徴の砂が東京層の砂以外にないことから、噴砂の供給層は東京層砂層である。

地震跡-3の噴砂脈は、TP+16.00mの東京層砂層より上昇し、17世紀中葉に整備された大下水(おおげすい)の基礎となる盛土層の上面(TP+22.85m)付近まで延びていることが確認され、その長さは約7mにも達する。ただし、砂脈幅は1cm前後であった。

すなわち、この2つの噴砂脈の供給層は東京層砂層である。

地震跡-6は、TP+22.6m～+25.5m間で確認した砂脈で最下部の供給層は確認できていない。図-8に、(a)地震跡-6の全体、(b)途中に供給層を有し主たる噴砂脈の横に平行な噴砂脈のあるB部詳細、(c)主たる砂脈のA部詳細を示す。図-8(c)に示したように、地山付近には微細粒砂が中央の細～中粒砂を挟むように砂粒子が配列され、これまでの掘削調査による砂脈の断面観察結果<sup>7)・9)・25)</sup>と同様の傾向がある。したがって、噴砂脈の代表的な特徴を有することから、この砂脈は、地震時の液状化による噴砂脈であると判断できる。TP+22.6mより上では、ロームの盛土中の砂脈の幅は4～7mmであった。また、この主たる噴砂脈中の砂は暗青灰色の細～中粒砂であり、東京層砂層の砂の特徴を有している。本調査地で、このような特徴を有する砂は東京層以外にないことから東京層砂層が供給層と推定できる。

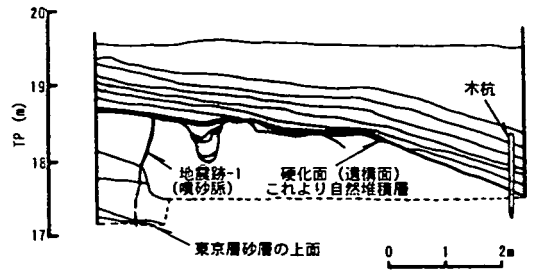


図-6 地震跡-1 (噴砂脈) の観察断面図

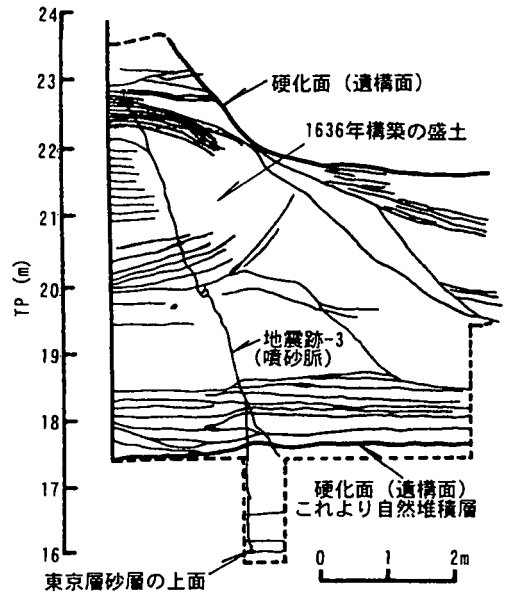


図-7 地震跡-3 (噴砂脈) の観察断面図

なお、図-8(a)、(b)で示したように、この砂脈が横切る途中の盛土層内の薄い砂層を供給源とする黄褐色の砂からなる幅1～2mmの噴砂脈が約15cm離れて平行に上昇していた。

目視観察や現地から抽出した砂の様子は、いずれの地震跡の噴砂脈においても、色調、粒度組成、コンシステンシーについて東京層砂層の特徴とよく類似していた。

また、噴砂発生箇所(地形的特徴として、盛土法肩部)の直下から噴砂脈が上昇していること、噴砂脈が平面的に延びる方向が法肩法線に概ね平行であることが挙げられる。この事実からは、盛土法肩部直

下の応力状態が液状化や砂脈の形成に強く反映しているものと考えられ、初期せん断の液状化に及ぼす影響が今後の検討課題であることを示唆している。さらに、噴砂脈を形成していることから、東京層が液状化し、その一部が液体状となり亀裂内を上昇したことは事実であるが、地震被害による盛土の変状としては極めて軽微なものである。

#### (4) 建設工事の影響により形成される砂脈の検討

一連の遺跡調査の内、本調査地点とは別の発掘調査地点<sup>29)</sup>(四谷食違見附)で、1993年3月に砂脈が数箇所で見出された。しかし、現地観察によると、その内の2箇所では砂脈状構造内の土が、灰色の色調、硬度、シルト主体の粒度特性などの特徴を持つことから噴砂ではないという疑問が抱かれた。

そこで、検出された砂脈について、周辺を丹念に調査した結果、2箇所の砂脈は、地下鉄建設工事に伴う仮設構台用に支持杭として使われているH型钢杭の打設の際に使用したと考えられるソイルセメントが混入している可能性が極めて強いことがわかった。鋼杭の打設の際に、周辺地盤に力が負荷され、その結果、地盤に細かい亀裂が生じ、杭の根固めのためのソイルセメントが流入し固化したものであると考えられる。

このように、都市での建設工事と並行して行われる遺跡調査では、地震跡に関する調査結果に対する建設工事の影響について入念な検討が必要であることがわかった。同様な観点から本調査地点を調査したが、本調査地点の地震跡については、工事の影響はないことを確認している。

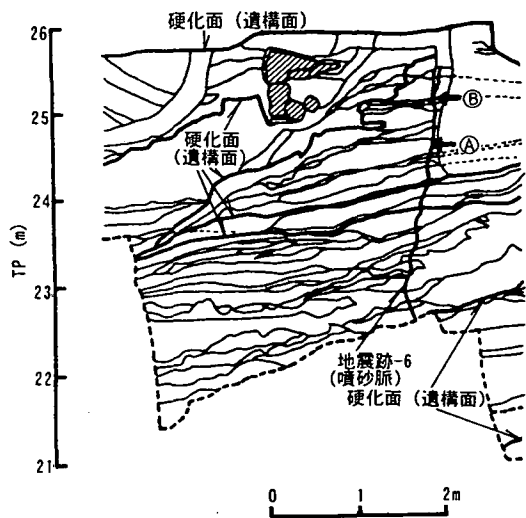
### 4. 噴砂供給部周辺での地盤工学的調査

#### (1) 地盤工学的調査の概要

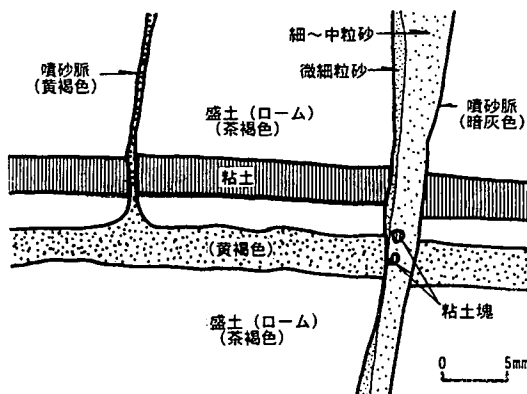
③町屋跡で検出された地震跡-7の噴砂脈の供給点周辺で地盤工学的調査を実施した。調査としては、スウェーデン式サウンディング試験(JIS A 1221)と砂脈および砂脈供給層までの土層断面観察と攪乱試料採取である。併せて供給層に対し、シンウォールサンプラーによる不攪乱試料採取も実施した。

これらの調査は、この工区の発掘調査が全て終了する1994年3月31日に実施した。この時点では、調査面はGL-6.5m ~ -6.7m(TP+21.9m ~ +21.7m)であり、6つの調査溝があり、そのうちの1つは噴砂供給層確認のためにGL-9.14m(TP+19.06m)まで掘削した。

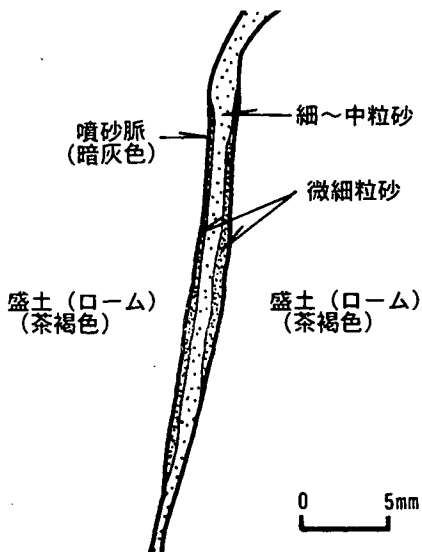
図-9に地震跡-7の検出された区域におけるサウンディング調査と試料採取の位置を示す。図-9中に



(a) 地震跡-6 (噴砂脈) の全体図



(b) B部詳細図



(c) A部詳細図

図-8 地震跡-6 (噴砂脈) の観察断面図

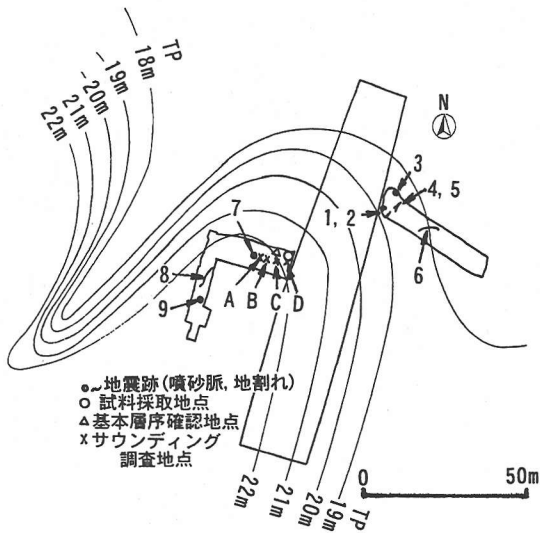


図-9 スウェーデン式サウンディング試験と試料採取位置

は、噴砂脈の検出された地点も記入してある。また、図-9中の等高線は盛土下の自然地形に対するものであり、当該遺跡に加えて他の発掘調査や周辺のボーリングのデータを基に推定したものである。自然地形の地表面の出現高度は調査地域内で4m以上の変化があるが、渋谷粘土層と東京層の上面の出現高度も変化する。渋谷粘土層は地点により層厚が変化するものの調査地域全域で確認された。高度が低くなるにつれ東京層が深く確認できないところもあった。渋谷粘土層は東京層に整合に堆積するという地質的な知見と調和し、かつ堆積前から微傾斜地形であったことが推測される。また、立川ロームと武蔵野ロームが認められず、渋谷粘土層の厚さが変化することから、侵食により谷地形が発達したことが推測できる。なお、観察によれば渋谷粘土層の堆積状況は概ね水平であり、大きく乱された様子が見られなかったことから、渋谷粘土層に覆われる東京層砂層は攪乱を受けず2次堆積でもないことが推察される。立川・武蔵ローム層については、堆積せずに掃流されたというより堆積後侵食されたと考えられるが、それらによる応力履歴については不明である。

写真-1に地震跡-7の噴砂脈の検出された状況を示す。また、図-10に噴砂脈の検出された様子のスケッチを示す。観察のため2側面と上面が見えるように掘り出したのでスケッチでは逆U字型に見える。図中で地山の下半分は、須恵器の検出された谷底堆積物の自然地盤であり、上半分は暗褐色土である。



写真-1 地震跡-7の噴砂脈の検出された状況

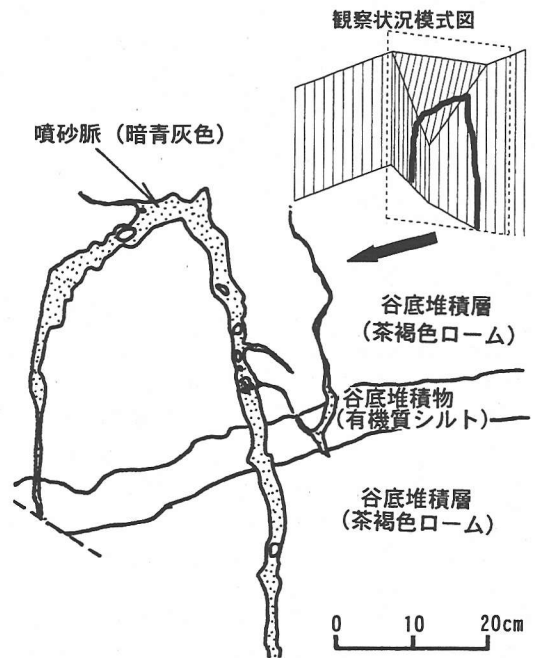


図-10 地震跡-7の噴砂脈のスケッチ



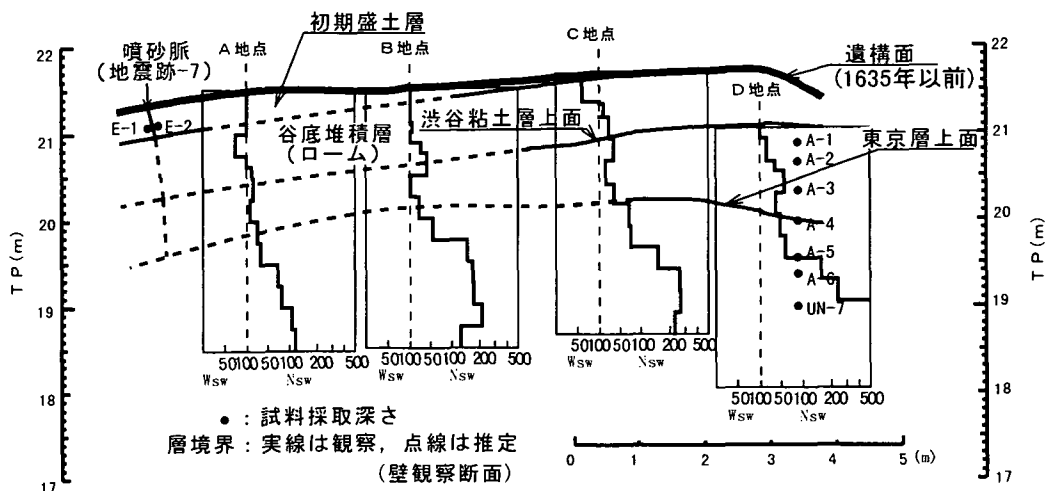


図-11 地震跡-7付近の地盤におけるスウェーデン式サウンディング試験の結果

なお、この砂脈は、TP+21.9m～+21.7mの自然地盤の遺構面（過去の人間活動の残された面：硬化面）より上には貫入していない。盛土部分の土は茶褐色のロームであり、暗青灰色の砂の存在は色調と粒度から容易に判別できるが、盛土部分からは暗青灰色の砂は全く検出されなかった。すなわち、地震などで滑って砂脈が切れた可能性は全くない。したがって、自然地形のときに液状化して、噴砂が生じ、噴砂脈が形成されたものと考えられる。

### (2) スウェーデン式サウンディングの結果

図-9に示したように、噴砂脈の検出地点から、1.5m、4.0m、6.9m、9.4m離れた4地点（各々A、B、C、D地点と呼ぶ）でスウェーデン式サウンディング（以下、SWSと略す。）を実施した。図-11にSWSの結果を示す。Nswは貫入量1mあたりの半回転数であり、土の締まり具合を表す。この図には、壁面観察による区域内の土層の等高線とSWSの結果を基に推定した土層境界を記入してある。

図-11によれば、渋谷粘土層のNsw値は、B,C,D地点では平均値として25-40の値を示すが、A地点では15であり、相対的に弱い。A地点は、噴砂脈から1.5m離れているため、噴砂現象の影響を受けたとは考えにくい。

また、東京層砂層のNsw値の深さ分布は、大局的には、下になるほど大きくなり、拘束圧に依存する砂層の特徴が現れている。しかし、詳細に検討すると、特徴として次の3点が指摘できる。

第1に、B,C,D地点では砂層上面より50-75cm以深でNsw値が120以上の値を示すのに対して、A地点では砂層上面より1.5m下までは深さによらず

120以下である。

第2に、B,C,D地点では砂層上面より50-75cm以浅でNsw値が60以下であり、それより下方のNsw値に比べて極端に小さい。

第3に、噴砂脈より最も遠いD地点では、東京層上面から1m以深でNswが200以上となる。

SWSとは別個に、ハンドコーンにより土層の目視確認できる壁面で貫入抵抗を測定した。その結果によれば、東京層砂層上面付近と渋谷粘土層の貫入抵抗値はほぼ同程度であったことから、SWSの結果に見られる渋谷粘土層と東京層砂層上部とのNswの相対的な関係は裏付けられる。

### (3) サウンディング結果に基づく考察

観察結果より、この調査地点の噴砂脈は、自然地形のときに液状化して、噴砂が生じた結果と考えられる。

三木<sup>27)</sup>は、Nsw値と標準貫入試験のN値との間には次の経験式が成立するとしている。

$$N = Nsw / 12 \quad (1)$$

ただし、砂、れきの場合

$$N = Nsw / 9 \quad (2)$$

ただし、赤土またはNsw < 90の場合

これによれば、上述のNsw=60, 120, 200は、それぞれおおよそN値で5～7, 10, 17に対応する。地震後の砂地盤の貫入値の解釈に当たっては、地震によって変化するのかもしれない様々な見方があるが、ここでは見方を固定しない。また、洪積層といえど

表-2 江戸城四谷御門付近の遺跡における自然堆積層と噴砂脈の物理試験結果

試料採取土層名		渋谷粘土層 (上部)		渋谷粘土層 (下部)		東京層砂層 (上部)		東京層 砂層	噴砂脈	
試料番号		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	UN-7	E-1	E-2
試料採取標高: TP+		20.86	20.66	20.31	19.96	19.56	19.36	19.06	21.5	21.6
試料採取土層: 層番号		79層	79層	81層	81層	82層	82層	83層	74層	74層
粒 度 特 性	礫分 Pg %	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	砂分 Ps %	47	39	55	65	89	87	76	58	62
	シルト分 Pm %	38	43	34	27	8	11	10	38	35
	粘土分 Pc %	15	18	11	8	3	2	13	4	3
	細粒分 Pf %	53	61	45	35	11	13	23	42	38
	最大粒径 mm	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	4.75	2.00	2.00
	均等係数 Uc	30	29	28	28	3.1	3.4	140	8.8	9.1
曲率係数 Uc'	4.3	1.2	3.6	2.4	2.5	2.3	48	0.86	0.99	
コン シ ス テ ン シー	液性限界 LL %	64.9	61.6	55.4	37.5	NP	NP	NP	NP	NP
	塑性限界 PL %	43.4	41.1	34.1	25.9	NP	NP	NP	NP	NP
	塑性指数 IP	21.5	20.5	21.3	11.6	NP	NP	NP	NP	NP
	活性度 Ac	1.43	1.14	1.94	1.45	NP	NP	NP	NP	NP
日本統一土質分類 記号	火山灰質粘性土 (VH1)		火山灰質砂 (SV)		シルト混じり砂 (S-M)		粘土質砂 (SC)	シルト質砂 (SM)		
土粒子密度 g/cm <sup>3</sup>	2.703	2.695	2.664	2.688	2.681	2.680	2.704	2.572	2.574	
自然含水比 w <sub>n</sub> %	81.8	79.7	70.6	55.2	38.6	31.5	33.5	71.2	69.2	

も液状化に対する強さはこれらの貫入値に反映されていると考えられることから、N<sub>sw</sub>が60以下の緩い層は液状化によって擾乱された層であり、N<sub>sw</sub>が120以下の層は液状化可能層であるとして考察する。

前述のように、渋谷粘土層では、噴砂脈に最も近いA地点が周囲に比べて相対的に強度が小さく、層厚も薄いため、噴出点の渋谷粘土層が弱点となり噴出したものと考えられる。

また、東京層では、指摘した第1点であるA地点のみが上面から1.5mにわたってN<sub>sw</sub>が小さい事実は、噴砂の供給源に近いため、液状化と噴砂供給による擾乱によって緩くなったものと考えられる。なぜなら、10m以内の範囲で1点だけが極端に弱くなる堆積条件が考えにくいからである。

指摘した第2点である東京層砂層上面より50-75cm以浅でN<sub>sw</sub>値が下方に比べて極端に小さい事実については、①地震前から小さかったのか、②地震後に小さくなったのか、2つの解釈が成立するが、どちらが真実なのかかわからない。いずれにせよ、噴砂を生じた地震当時のこの地点では、地表面より下に、層厚0.7-0.8mの2次的に堆積した立川・武蔵野ロームから成る谷底堆積物、層厚1.0-1.7m

の渋谷粘土層、そして東京砂層があったわけである。すなわち、地表面より1.7-2.5m下の東京層砂層が液状化して、噴砂現象が生じたと考えられる。

指摘した第3点より、場所により異なるであろうが、液状化層はせいぜい1~2mの厚さであったものと推察する。3.(3)で述べた液状化地点の盛土の変化が極めて軽微であるという理由の1つとして、液状化層厚が薄いことが考えられる。

さて、渋谷粘土層は難透水性と考えられるので東京層上部砂層の被圧状態について考察する。図-3のボーリングNo.67の東京層の最上部砂層に相当するGL-11.5m~-12.0mに設置された間隙水圧計による水位はGL-6.0mであり、同ボーリング孔により確認された地下水位はGL-7.45mであることから、現時点における当該地点の東京層の最上部砂層は水頭差で1.45m分被圧された状態にあると言える。しかしながら、噴砂地点では東京層上部砂層の上に厚さおよそ2mの自然堆積層が堆積しており、さらにその上に盛土層がある。したがって被圧のみによる噴砂・噴水現象は起こり得ない。

東京層は堆積から10数万年経っているもので、その間の地震活動度を仮に一定とすると、再現期間1000年の地震を100数十回、再現期間100年の地

震を1000数百回経験しているはずである。本調査地の液状化した東京層の最上部は、それらの地震の内、本調査地が侵食と谷底堆積による谷地形の発達の中で幾度かの地震で液状化し、今後も液状化するものと考えられる。一方、室内試験から小ひずみ繰り返しせん断履歴を受けると液状化抵抗が増加し、大ひずみ繰り返しせん断履歴を受けると液状化抵抗が低下するという知見が得られている<sup>28)</sup>。吉見<sup>29)</sup>は、液状化を起こした地震の後に続く中程度の地震の繰り返しによる小ひずみ繰り返しせん断履歴効果と堆積時間効果によって、液状化により劣化した地盤はより安定な状態に変化する傾向があると述べている。著者もその考えに同意するものである。東京層は下部では安定化しているが、相続く液状化と噴砂の影響で最上部ではまだ劣化した状態が継続しているものと考えたと上述の知見と矛盾しない。

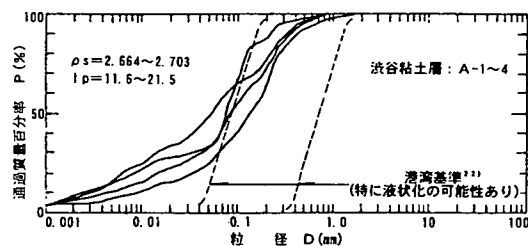
#### (4) 噴砂と供給層の土質の物理特性

図-9に示した地点の自然堆積層と噴砂脈から土質試料を採取した。自然堆積層の試料は調査溝壁面より深さ方向に順に採取した。採取した試料は、土質工学会基準<sup>29)</sup>に準拠し、含水量、粒度、比重、液性・塑性限界試験の物理試験を実施した。表-2に土質試料の採取深さと土層に対応させて物理試験結果を示す。また、図-12に(a)渋谷粘土層、(b)東京層砂層、(c)噴砂脈の各土層の粒径加積曲線を示す。(b)、(c)には、港湾基準<sup>30)</sup>に示される「特に液状化の可能性の高い」粒度の範囲を併せて示した。

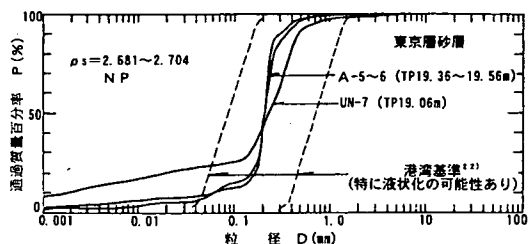
渋谷粘土層は火山灰質土に分類され、これまでの渋谷粘土の特徴を表している。粘土分はそれほど多くなく、日本統一分類上、上層は粘性土に分類されるが、下層は砂に分類される。活性度も小さめで火山灰に由来しているものと考えられる。図-12において上層ほど細粒分が多く、堆積状況を反映したものと考えられる。

図-12(b)に示す東京層砂層は、層位により粒度特性が若干異なる。上層部は細粒分が10%程度であり、均等係数も小さく、平均粒径も0.2mmであり、細粒分も少ない。少し下の部分では50%粒径はほぼ同様であるが、粗粒分が多くまた細粒分が20%を超える。粒度特性からは、東京層砂層の上層部は液状化しやすい砂と言える。

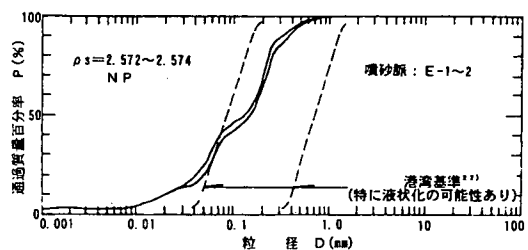
一方、噴砂脈内の土は、シルト質砂に分類されるが、細粒分が40%程度あること、比重が小さいこと、自然含水比が大きいことが特徴として挙げられ、東京層砂層とは性質を異にする。図-12(c)より、噴砂脈内の土の粒度特性は明らかに階段粒度の様相を呈しており、複数の土が混ざり合ったことが推測さ



(a) 渋谷粘土層



(b) 東京層砂層



(c) 噴砂脈

図-12 粒径加積曲線

れる。比重が小さいことと保水性能が大きいことから、有機質ロームを含む地表面近くの谷底堆積物が混入したものと推測される。しかし、粒度特性は東京層砂層の3つの粒度曲線の平均的なものと類似していると言える。

## 5. 噴砂供給層の検討

### (1) 検討の目的と内容

これまで、調査地の自然堆積地盤の粘土層を渋谷粘土層、最下層の砂層を東京層砂層と記述してきたが、この妥当性を検証する必要がある。ここでは、鉱物分析と珪藻分析および周辺の地盤構造資料に基づいて、噴砂の供給層である調査地最下層の砂層が東京層砂層である根拠を示す。

また、砂脈中の土についても鉱物分析と珪藻分析を行い、砂脈中の砂が東京層砂層に起源を有すること、すなわち砂脈が液状化による噴砂現象により形成されたことを示す。

表-3 東京層および噴砂脈から検出された海水生種の珪藻とその個体数

珪藻種名	生態性	環境指標	東京層		噴砂脈	
			82層	83層	E-1	E-2
<i>Paralia sulcata</i> (Ehr.) Cleve	海水生種	内湾指標種	なし	2	なし	なし
<i>Cyclotella striata</i> C.stylorum	海水生種-汽水生種	内湾指標種	なし	1	1	2
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehr.) Simonsen	海水生種-汽水生種	湖沼浮遊性、広適応種	1	なし	なし	なし
<i>Triceratum</i> sp.	海水生種	-----	なし	なし	なし	1
<i>Cyclotella striata</i> (kuetz.) Grunow	海水生種-汽水生種	内湾指標種	なし	なし	2	1
<i>Diploneis smithii</i> (Breb.) Cleve	海水生種-汽水生種	汽水泥質干潟指標種	なし	なし	なし	1

(2) 鉱物分析と珪藻分析による堆積層の検討

鉱物分析は、次のように行った<sup>15)</sup>。試料約 40gf に水を加え超音波洗浄装置により分散し、250 メッシュの分析ふるいを用いて水洗し、粒径 1/16mm 以下の粒子を除去する。乾燥の後、ふるいで分別し、得られた 1/4 ~ 1/8mm の砂分をポリタングステン酸ナトリウムにより重液分離し、重鉱物と軽鉱物を偏光顕微鏡下で 250 粒に達するまで同定する。以下に組成を記述する際の百分率は 250 粒に対する該当する鉱物粒の数量百分率である。ここでは、噴砂脈の供給層の特定に関連することに絞って述べる。自然堆積層は、図-4 に示した標準層序における 71 層と 75 ~ 83 層である。噴砂脈の供給層は、82, 83 層である。

図-13 に鉱物分析の結果得られた重鉱物組成を示す。試料は町屋跡調査区の北壁より採取された試料である。78 ~ 80 層は、ほぼ同様の鉱物組成を示し、斜方輝石 (28-44%) と不透明鉱物 (22-37%) が多く、単斜輝石 (6-12%) と角閃石 (4-11%) が少量含まれる。この重鉱物組成は、稲子ら<sup>11)</sup> による淀橋台西部の世田谷における渋谷粘土層の重鉱物組成とよい整合を示すことから、78-80 層は渋谷粘土層に対比される。

82, 83 層はともに、斜方輝石が 52-55% と最も多く、単斜輝石 (7-8%)、角閃石 (12-17%)、不透明鉱物 (6-9%) が少量含まれる。これらの重鉱物組成が、これまでに得られている東京層のそれとほぼ同様である。

表-3 に珪藻分析結果のうち東京層で検出された内湾性指標種を示す。珪藻分析では、83 層の試料に海水生種 2、海水-汽水生種 1 という内湾指標種の珪藻 3 個体が認められ、海成の東京層であることを裏付けている。一方、盛土層には一部に多くの珪藻化石が認められたが、全て淡水生種であった。

以上の鉱物分析と珪藻分析により、82, 83 層は東

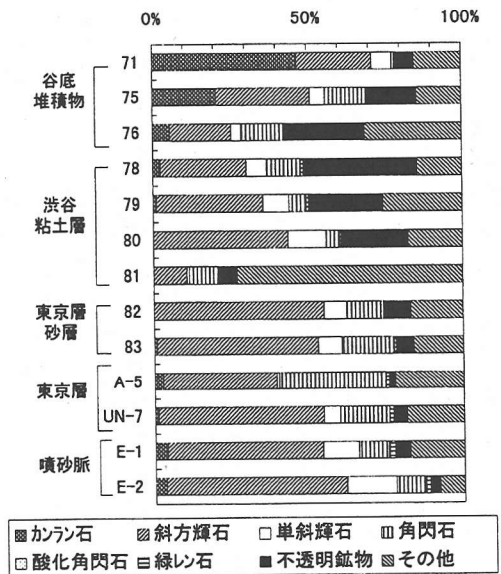


図-13 自然堆積層と噴砂脈の重鉱物組成

京層、78 ~ 81 層は渋谷粘土層に対比されることがわかった。

(3) 鉱物分析と珪藻分析による噴砂脈中の土の検討

町屋跡調査区で検出された地震跡-7 における噴砂脈中の土を同定するために、東京層上面より約 1.5m 上に位置する噴砂脈中の土 (E-1, E-2) と供給層の東京層砂層の土 (A-6, UN-7) について (2) と同様な鉱物分析と珪藻分析を実施した。東京層については、(2) で既に実施しているが、東京層の組成についてはばらつきがあることが考えられたので、噴砂脈近傍における東京層について改めて実施した。

図-13 に結果を併せて示した。東京層から採取した A-5, UN-7 の内、UN-7 は 82, 83 層の代表試料と

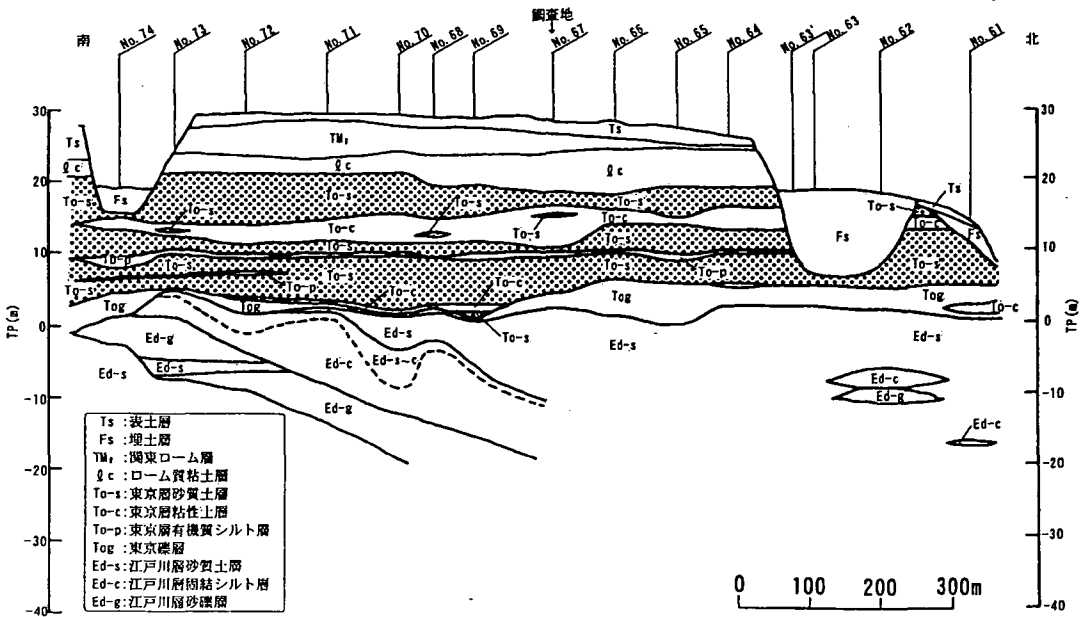


図-14 調査地周辺の地質断面図 (資料 34) に基づき作成

組成がほぼ同じであるが、A-5についてはカンラン石の量比が若干高い点、斜方輝石が少なく角閃石が多いという点で他の東京層と若干異なるが、既往の分析例では東京層の層位によって重鉱物組成が異なることも知られている。

噴砂脈中の土については、カンラン石の量比が若干高い点を除けば、東京層と類似するが、同様の重鉱物組成は谷底堆積物にも認められる可能性があり、重鉱物組成の観点のみから噴砂脈中の土を東京層の土と断定する根拠とはならない。

一方、珪藻分析によれば、表-3に示すように噴砂脈中の土であるE-1からは海水生種1個体、海水-汽水生種3個体、E-2からは海水-汽水生種4個体が認められた。本調査地付近には海成層は東京層以外になく、また標高と地理的位置からみて縄文海進時に海成層が形成されたとも考えられないので、上記の珪藻化石の由来は東京層に求めるしかない。

以上のことから、噴砂脈中の土は東京層から供給されたものと断定できる。

さて、珪藻分析の結果によれば、噴砂脈中の土には上記の海水生種や海水-汽水生種のほか、淡水生種も認められた (E-1で32個体、E-2で40個体)。一方、東京層には淡水生種は認められず、1636年の盛土層には3層の試料でそれぞれ200個体という多くの淡水生種のみが認められた。この事実は、噴砂脈中の土には、1636年の盛土層に由来する土や水によって淡水生種の珪藻が混入したことを意味し

ている。分析試料の採取位置は、1636年の盛土層から0.5~2.5m下にあることから、検出された噴砂脈は、液状化による噴出の勢いがおさまりに、砂脈中には供給層からの東京層砂に盛土層のロームが混入し、混然となった土が沈降や過剰間隙水圧の消散による水位低下に伴って形成されたことを示していると言える。カンラン石の量比の高さもこのような現象の理解で説明できる。

#### (4) 周辺の地盤構造資料との比較

以上の検討と考察で、調査地における噴砂脈の供給層が東京層であることが判明したが、さらに、周辺地質との整合性について検討する。

調査区域において、最も下位にある暗青灰色の砂層は、TP+17~+20mで確認されている。この砂層上面の標高は、東京都土木技術研究所<sup>32)</sup>による調査区周辺の東京層の上面高度に一致する。

また、地下鉄7号線建設に伴う地質調査<sup>34)</sup>の結果に基づく地質断面図 (概ね南北断面) を図-14に示す。図中No.67が本調査地点である。これによれば、東京層の砂層上面は、およそTP+18m~+21mに現れ、1.8~7.1mの層厚を有している。その下位には砂混じりシルト層、砂層、有機質シルト層と続き互層状態の東京層を成している。東京礫層は、およそTP+1m~+6mに現れ、0.2~5.7mの層厚を有している。

さらに、調査区を通過する地下鉄丸ノ内線の建設

表-4 考古学的に推定される地震の時期と地震史料に基づく地震の推定

順序 *1	根拠地震跡	地震跡 の形態	考古学的推定による 地震跡の形成時期 *2	地震起因の根拠	地震工学的推定 *3		
					推定地震	震度	被害等級
I	地震跡-7 地震跡-1 地震跡-8	噴砂 噴砂 地割れ	6c末～1636年 17c前葉～1636年 17c前葉～1636年	噴砂脈の確認 噴砂脈の確認 地割れの延長上に噴砂	1615. 6.26	VI	3-
II	地震跡-2 地震跡-3	地滑り 噴砂	1636年～1655年頃 1636年～1655年頃	噴砂脈の近傍である 噴砂脈の確認	1647. 6.16	IV～V	2+
III	地震跡-4	地割れ	1636年～1655年頃	変状形態が地震起因	1649. 7.30	≤VI	2
IV	地震跡-5	地割れ	1636年～1655年頃	変状形態が地震起因	1649. 9. 1	--	--
V	地震跡-6 地震跡-9	噴砂 噴砂	19c中葉 17c末葉～19c中葉	噴砂脈の確認 噴砂脈の確認	1855.11.11 *4	VI	4

- \*1 地震順序：地震跡の検出された層や砂脈の切り合い関係（上下関係など）によって順序が推定できる。  
 \*2 時期の考古学的推定根拠（各検出地点での根拠に基づく。表中、cは世紀を意味する。）  
 6c末：須恵器のかけらを含む土層を噴砂脈が貫通している。  
 17c前葉：江戸城外堀より前の盛土を噴砂脈が貫通、もしくは地割れ。志野・唐津など17c前葉の様相の遺物検出。  
 1636年（寛永13年）：1635年から始まった江戸城外堀普請の完成が文献より知られる。  
 1655年頃：江戸城外堀の修築に伴い、1655年（明暦元年）に玉川上水が敷設された（「蔵有院殿御実」）。  
 外堀の修築に当たり1656年（明暦2年）に地下水が構築されたという説がある（「御府内備考」）。  
 19c中葉：19c中葉の遺物を含む覆土層を噴砂脈が貫通するが、明治26年工部省による旧国鉄四谷駅構築の際の盛土下面で噴砂は切れる。  
 \*3 地震の推定根拠：宇佐美(1983)、宇佐美(1996)を参照して作成した表-5に基づき、著者らが推定した。  
 \*4：地震跡-9については1855.11.11安政江戸地震と推定されるが、1703.12.31元禄地震の可能性も残されている。

表-5 江戸城開關から19世紀にわたる江戸被害地震と江戸城付近の被害の様子

地震発生日月日		地震の 場所	地震の 規模 M	江戸の 震度	江戸 被害 等級	江戸城または江戸の被害の様子	江戸等 液状化
西 暦	和 暦						
1615. 6.26	元和 1. 6. 1	江戸直下	6.4	VI	3-	家屋損壊多し、死傷多し*、地割れ	----
1628. 8.10	寛永 5. 7.11	江戸*	6.0*	V	1	江戸城石垣所々崩れる	----
1630. 8. 2	寛永 7. 6.24	江戸*	6-1/4*	V	1	江戸城石垣多少崩れる	----
1635.3.12*	寛永 12.1.23*	江戸*	6.0*			長屋の塀破損、増上寺石灯籠倒れる	----
1643. 7. 7*	寛永 20.10.26*	江戸*	6.2*			屋根落ち、壁崩れる	----
1647. 6.16	正保 4. 5.14	武蔵相模	6.5*	IV～V	2+	江戸城石垣破損多し、大名屋敷・御城破損*、死者少なからず*	----
1649. 7.30	慶安 2. 6.21	川越*	7.1	≤VI	2	江戸城石垣・石塀10ヶ所余破損	----
1649. 9. 1*	慶安 2. 7.25*	江戸川崎	6.4			江戸城平川口腰掛、御春屋破損	----
1683. 6.18	天和 3. 5.24	日光*	6.5-7.0	V-	1	江戸城内築屋少々倒れる	----
1697.11.25	元禄 10.10.12	相模武蔵	6.5*	≤V	1	江戸城平川口梅林坂多門石垣崩れる*	----
1703.12.31	元禄 16.11.23	房総南方	7.9-8.2	VI	3	32御門で被害。四谷御門で渡櫓ひずむ	2ヶ所
1706.10.21	宝永 3. 9.15	江戸*	5-3/4*	V	1	江戸城石垣多少破損*	----
1767.10.22*	明和 4. 4. 7*	江戸*	6.0*			江戸で瓦落ち14-15軒潰れ*	----
1782. 8.23	天明 2. 7.15	相・武甲斐	7.0*	V-	2	江戸で瓦落ち壁破損、地裂け・潰家*	小田原
1784.8.29*	天明 4. 7.14*	江戸*	6.1*			江戸で傾いた家、瓦落ちた家多し	----
1791. 1. 1*	寛政 2.11.27*	川越・蔵	6.0-6.5			江戸で土蔵に小損*	----
1794.11.25*	寛政 6.11.3*	江戸*				鳥取藩上屋敷土蔵崩れ、書物蔵破損*	----
1812.12. 7	文化 9.11. 4	川崎付近	6-1/4*	V	1+	江戸では僅かな被害、書物蔵破損	----
1854.12.23	安政 1.11. 4	東海	8.4	V	1+	江戸で家屋に小被害	静岡
1855.11.11	安政 2.10. 2	江戸直下	6.9	VI	4	死者1万余、江戸城内石垣・見附被害 四谷で玉川上水の樋が崩れて破損*	9ヶ所

宇佐美龍夫：東京地震地図、新潮選書、1983を参照して作成。ただし、地震の場所と被害概要は若干表現を修正。  
 \*の付いたものは、宇佐美龍夫：新編 日本地震被害総覧、1996に基づき修正した。ただし、「疑わしき」の地震は除く。  
 被害等級：1:破損、倒壊なし、2:小被害、倒壊まれ、3:中被害、倒壊かなり、死者あり、4:大被害、倒壊・死者多い  
 江戸の震度と江戸の被害等級は宇佐美による。江戸等液状化：江戸または周辺の低地での液状化の発生事例<sup>2)</sup>。

時に開削工事の際の観察に基づいて作成された路線に沿う地質図<sup>33)</sup>によると、四ツ谷駅中心から外堀に沿う紀の国坂方面に約400mの区間では、TP+20m付近に東京層の砂層の上面と思われる平坦面が現れており、弁慶塚から赤坂に向かってその砂層上面は下がり、TP+10mより下に下がる。途中この砂層は消失するが、赤坂見附駅中心から四谷方面に約300mの区間では、TP+4～+7m付近に砂層上面が現れ、TP-2m付近に東京礫層が現れることがわかる。この観察結果は前述の地下鉄7号線建設時の地質調査結果と整合している。

以上、3種の既往の地質調査に基づくと、調査区域周辺では、TP+18m～+21mに東京層の砂層の上面が現れることがわかる。すなわち、既に知られている周辺地盤構造資料に基づく東京層砂層上面の標高と本調査区域の自然地盤の砂層上面の標高は一致することからも、液状化層である砂脈供給層は東京層砂層であることが裏付けられた。

## 6. 地震跡に対応する地震と地震動の推定

### (1) 推定の目的

これまで述べてきたように、東京層砂層が液状化し噴砂脈を形成したことが事実であることを検証してきた。しかし、東京層砂層が液状化したとき、あるいは、しななかったときの地盤状態や地震動の大きさが工学的には重要である。一方、歴史地震であるので、十分な資料は望めない。しかし、洪積砂層の液状化という重要な問題であるので、考古学的な調査結果と既往の研究や歴史資料を参考に、地震跡を生じさせた地震を推定し、地盤地震工学的な知見を援用してそのときの地震動を推定する。

### (2) 地震跡を生じさせた地震の推定

遺跡における考古学的な調査では、前述の遺構面の検出と詳細な土層観察が行われ、出土した遺物によって出土層の年代がある幅を持って特定できる。また、考古学的調査においては、出土した全ての遺物や遺構について極めて綿密な調査と記録が行われる。したがって、遺物によっては、ごく狭い年代特定ができることもある。

また、観察する遺構面や土層断面は、ねじり鎌や刷毛などで丹念に露出させた上で観察するため、工学的な調査では検出が極めて困難であろう微細な亀裂や砂脈などが検出される。

前述したように、地震跡の形態は、地滑り、地割れ、噴砂脈である。地滑りでは、地滑りによって変形した部分の最上部の層の形成された時期とその上

を覆う土層の時期との間で起きた地震であると判断できる。地割れについても、同様である。噴砂脈については、観察断面上の途中で徐々に幅を狭めながら消失する場合には、貫通している土層の最上層の土層の形成時期より後の時期ということしかわからないが、土層断面に現れる遺構面を地震当時の噴砂の堆積面として検出される場合や遺構面で切られたように噴砂脈が途切れる場合には、その遺構面を形成する時期より後で、その上を覆っている土層の形成時期より前であることがわかる。

さらに、調査工区別に番号付けられた層番号は、工区ごとに同じ層に対する層番号の対応が検討されるので、離れている場所で検出された地震跡でも、地震発生時期の前後関係を順序付けることができる。

表-4に9つの地震跡を現地調査からわかった発生順序ごとに、地震跡の形態、考古学的に推定される発生時期、地震起因の根拠に関して整理したものを示す。この表の作成には表-1を参考にしている。

表-5には宇佐美<sup>35), 36)</sup>に基づいて、江戸城または江戸の被害の様子に関する記述がある地震の内、考古学的に推定される時期に相当する地震に関して整理した表を示す。この表で江戸城といっても、調査地の四谷付近は淀橋台地に接する部分であり、他の部分の外郭に比べて地盤条件もよく、安政江戸地震や関東地震の被害のように地域差がよく調べられているものについては、江戸城より西側では、他の地盤が悪い地域に比べて、明らかに相対的に被害は少ない。

また、江戸または周辺での液状化状況について、若松<sup>3)</sup>の整理を基に、参考のため併せて示した。元禄地震では神田小川町と大田区六郷渡りで、安政江戸地震では、現在の江戸川区、品川区、墨田区、葛飾区で9箇所液状化の記録があるのみである。歴史資料による液状化は、いずれも水や砂が大規模に噴出したものが多く、小規模な液状化は記録されていない可能性が大きいことに注意する必要がある。

表-4には考古学的推定時期から地震工学的な考察に基づいて推定した地震を併せて示した。1703年の元禄地震や1923年関東地震に対応する地震跡は本調査地では残念ながら検出されていない。なお、1923年関東地震では、本調査地の僅か南側で外堀盛土法肩に相当する部分で堀に平行に地割れが生じている<sup>37)</sup>。一度形成された噴砂脈は弱線となり、その後の大きな地震で液状化すれば噴出する道筋になりやすいと考えられるが、盛土の修復や嵩上げのために盛土は耐震的となり、また、東京層にとっては上載圧が増加するため相対的に液状化は起こりにくくなる。前述のように、その後の大きな地震で液

状化跡が検出されていないのは、これらのことも一因であると考えられる。

地震跡-3と地震跡-4については、その変状の状況や四谷御門における渡櫓の被害の史料記述から、地盤地震工学的には1703年元禄地震によるものと捉えるのが妥当であると考えられるが、江戸城大下水が四谷で1660年代後半までに構築されているという考古学的推定根拠から明確に否定される。

表-4によれば、四谷御門付近の東京層砂層に液状化を発生させた3つの地震の内2つは、江戸直下の地震であること、その際の江戸の震度はいずれもVI程度であり、家屋の倒壊がかなりあるという程度の地震動であることがわかる。

## 7. 結 論

東京都新宿区四谷の遺跡調査において、液状化の痕跡調査を行い、併せて若干の考察を加えて、次の結論を得た。

- (1) 遺跡調査において検出された地震跡について調査し、地震跡として検出された砂脈は、液状化による噴砂に起因することが確認できた。
- (2) 噴砂脈に土を供給した液状化層は、目視観察のほか、鉙物分析、珪藻分析、粒度分析に基づいて、更新統（洪積層）である東京層砂層であることが立証できた。
- (3) スウェーデン式サウンディング調査により、東京層砂層の液状化層は、せいぜい上部の1～2m程度であると推測された。
- (4) 東京層砂層を液状化させた歴史地震が3つあり、推定された地震はいずれも江戸直下型の地震である。いずれも江戸で震度VI程度と見積もられているが、盛土の地震被害としては軽微である。

本研究の結論から、洪積層でも場合によっては液状化しうることが考えられる。したがって、洪積層においても、沖積層や埋立層と同様に、N値が小さい場合には液状化の検討を行う必要があり、緩い洪積層を杭などが貫く場合には、十分な検討が必要と考えられる。しかし、一般に洪積層の砂層はN値が大きく液状化抵抗も大きい場合が多いこと、液状化する場合でも変形は小さく被害と結びつくことは少ないものと考えられる。

謝辞： 今回の調査では、帝都高速度交通営団ならびに地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査会（調査団長：早稲田大学人間科学部 谷川 章雄 教授）を

はじめ関係機関の方々には多大な御協力を戴いた。また、本論文の学術的価値を認めて戴き、発表を快諾して戴いた。一方、本研究では現地における地震の痕跡の判断と論文をまとめるに当たり、通産省地質調査所の寒川 旭 主任研究員には、懇切なご教示を戴いた。鉙物分析と珪藻分析の実施は、パリノ・サーヴェイ（株）によるものである。日本大学文理学部の遠藤 邦彦 教授には、本論文の草稿を読んで戴き、地質学的なご意見・ご指導を戴いた。中央学院大学の久保 純子 先生には、同様に、地理学的な観点から真摯なご意見・ご議論を戴いた。千葉県水質保全研究所の風岡 修 博士、東京大学生産技術研究所の若松 加寿江 博士、東京大学地震研究所の飯田 昌弘 博士には、更新統の液状化事例に関連する文献の収集にご協力を戴いた。現地の試料採取とサウンディングおよび土質試験は、飛島建設（株）技術研究所の沼田 淳紀 研究員と染谷 昇氏によるところが大きく、特に、沼田研究員には結果の解釈に有益な議論をして戴いた。最後に記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 森 伸一郎, 池田 悦夫：第2節東京層砂層の液状化の痕跡調査と一考察, 第3章四谷御門外橋詰・御堀端通・町屋跡の遺跡から検出された地震跡, 江戸城外堀跡 四谷御門外橋詰・御堀端通・町屋跡（考察編）, 地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡発掘調査報告書4-3, pp.345-362, 1997.3.
- 2) 栗林 栄一, 龍岡 文夫, 吉田 精一：明治以降の本邦の地盤液状化履歴, 土木研究所彙報, 第30号, 181pp., 1974.12.
- 3) 若松 加寿江：日本の地盤液状化履歴図, 東海大学出版会, 1991.
- 4) 土木学会：1983年日本海中部地震震害調査報告書, 933pp., 1986.
- 5) 土木学会：1993年釧路沖地震震害調査報告, 407pp., 1994.12.
- 6) 若松 加寿江：わが国における地盤の液状化履歴と微地形に基づく液状化危険度に関する研究, 早稲田大学学位論文, 1993.12.
- 7) 寒川 旭：地震考古学, 中公新書, 1992.10.
- 8) 寒川 旭：遺跡の地震跡, 土と基礎, Vol.40, No.1, pp.13-18, 1992.1.
- 9) 金折 裕司, 矢入 憲二, 川上 紳一, 服部 俊之：中部日本内帯の主要構造線の活動サイクル：沖積平野と盆地内の遺跡発掘で確認された液状化イベント, 地震2, Vol.46, No.2, pp.119-133, 1993.9.
- 10) 関 眞一, 森 伸一郎, 立花 秀夫：鎌倉由比が浜の遺跡における液状化の痕跡の現地調査と液状化履歴砂の時間効果, 土木学会第47回学術講演会講演概要集Ⅲ, pp.292-293, 1992.9.
- 11) 辻 隆司, 宮田 雄一郎：地質学雑誌, No.93, pp.791-808, 1987.
- 12) 安田 進：5.5密な砂の予測方法, 液状化の調査から



- 対策工まで，鹿島出版会，pp.134-136, 1987.
- 13) 日本道路協会：3.7.2 液状化する砂質土層，道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計，丸善，pp.38-42, 1990.2.
  - 14) 帝都高速度交通営団 地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査会：江戸城外堀跡 四谷御門外橋詰・御堀端通・町屋跡，地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査報告書4-1，328pp., 1996.3.
  - 15) 帝都高速度交通営団 地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査会：江戸城外堀跡 四谷御門外町屋跡，地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査報告書4-2，280pp., 1996.3.
  - 16) 地学団体研究会：新版 地学事典，1996
  - 17) 貝塚 爽平：東京の自然史—増補第二版—，紀伊國屋出版，239pp., 1979
  - 18) 岡 重文：関東地方南西部における中上部更新統の地質，地質調査所月報，42, pp.553-653, 1991.
  - 19) 久保 純子：東京低地の水域・地形環境の変化，アトラス 日本列島の環境変化（西川 治監修），朝倉書店，pp.112-113, 1995，および私信，1997.1
  - 20) 内藤 昌：Ⅲ江戸の建設，江戸と江戸城，鹿島出版会，pp.41-60, 1966
  - 21) 東京都教育委員会：江戸復原図，1989
  - 22) 新宿区教育委員会：地図で見る新宿区の移り変わり—四谷編—，1982
  - 23) 御府内沿革図書
  - 24) 池田 悦夫：江戸城外堀跡四谷御門外西詰・四谷御門外町屋跡における地震跡について，江戸遺跡研究会第8回大会，pp.48-71, 1995.1.
  - 25) 関 眞一，森 伸一郎，立花 秀夫：千葉・関宿における1923年関東地震による液状化跡の掘削調査の方法，第28回土質工学研究発表会講演集，pp.101-102, 1993.6.
  - 26) 帝都高速度交通営団 地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査会：江戸城外堀跡 赤坂御門食違土橋，地下鉄7号線溜池・駒込間遺跡調査報告書3，1995.5.
  - 27) 三木 五三郎：赤土台地における各種サウンディング方法の比較実験とその実用性の検討，土と基礎，特集号，No.1, 1959.
  - 28) 吉見 吉昭：3.7 応力 - ひずみ履歴の影響，砂地盤の液状化，第2版，技報堂出版，pp.41-48, 1991.
  - 29) 土質工学会：土質試験の方法と解説，pp.186-200, 1990.3.
  - 30) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.203-209, 1988.6
  - 31) 稲子 誠，辻 誠一郎，遠藤 邦彦：淀橋台地西縁地域の関東ローム層と段丘地形，日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要，13, pp.31-42, 1978.
  - 32) 東京都土木技術研究所：東京都総合地盤図Ⅰ，東京都地質図集3，東京都の地盤(1), 1977.
  - 33) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄道丸の内線建設史（下巻），386pp., 1960.3.
  - 34) 帝都高速度交通営団：7号線目黒～駒込間第1次地質調査報告書，1987.
  - 35) 宇佐美 龍夫：東京地震地図，新潮選書，1983.
  - 36) 宇佐美 龍夫：新編 日本地震被害総覧，東京大学出版会 1996.8
  - 37) 佐藤 戈止：東京西部地震調査報文，関東地震調査報告第一，地質調査所，pp.111-139, 1924.8.

(1997. 2. 10 受付)

## TRACES OF LIQUEFACTION OF TOKYO FORMATION SAND LAYER AND ITS CONSIDERATION

Shin'ichiro MORI and Etsuo IKEDA

Some earthquake traces were discovered at around the embankment of outside moat of the Edo castle in a series of the remain investigation for the Yotsuya-Gomongai of the Edo castle at Yotsuya, Shinjuku, Tokyo. Sand dikes, fissures and a landslide were recognized as earthquake traces. According to site investigation, sounding and soil analysis for grain size, heavy metal and diatom, it was confirmed that source of supply of sand dykes was Tokyo Formation sand layer which is Pleistocene. The earthquakes induced the traces was specified from stand points of archaeology, seismology and geotechnical earthquake engineering. It was shown that Pleistocene, so called diluvial deposit, which had been thought hard to liquefy, could liquefy under severely strong motions.